

현안분석 2007-

입법평가 연구 07-08

미국 주간대기청정규칙의 제정에 대한 입법평가 사례분석

박수현

2007. 10. 5.



한국법제연구원
KOREA LEGISLATION RESEARCH INSTITUTE

미국 주간대기청정규칙의 제정에 대한 입법평가 사례분석

Legislation Impact Assessment of Making Clean
Air Interstate Rule in the United States

연구자 : 박수현(숙명여대 법과대학 교수)

Park, Soo-Hun



한국법제연구원
KOREA LEGISLATION RESEARCH INSTITUTE

국문 요약

이 연구는 미국 환경청(Environmental Protection Agency, EPA)의 입법 영향평가(기술적·경제적·환경적 분석)를 검토·고찰하여, 향후 우리 정부와 행정기관의 효율적 입법 및 입법영향평가 역량을 구축하고 제고시키기 위한 모델을 정립하는데 참고 자료로 사용될 수 있도록 하는데 그 목적이 있다. 이러한 연구목적을 달성하기 위하여 본 연구에서는 바람을 내보내는 주들(Upwind States)과 바람을 받아들이는 주들(Downwind States) 간의 오염물질의 이동에 따라 대기청정법(Clean Air Act, CAA)상 「전국 대기의 질 기준」(National Ambient Air Quality Standard, NAAQS)을 달성하지 못하게 하는 원인인 미세먼지의 이동을 감소시키기 위하여 주간대기청정규칙(Clean Air Interstate Rule, CAIR) 제정의 타당성 여부에 대한 EPA의 규제영향분석 보고서를 검토·분석하였다. EPA 보고서는 CAIR이 건강에 미치는 편익(건강편익), 복지에 미치는 편익(복지편익), 그리고 소요되는 비용에 대한 입법영향평가를 통하여 CAIR 제정의 타당성 여부를 결정하였다. EPA 보고서에 따르면, EPA는 CAIR의 편익과 비용을 1999년 달러가치로 예측하여 사회적 할인율 7%를 적용할 때 2010년에는 예상 연간 순편익 604억 달러, 2015년에는 832억 달러, 사회적 할인율 3%를 적용할 때 2010년에는 예상 연 순편익 714억 달러, 2015년에는 985억 달러가 될 것이라고 하였다. 그리고 2015년에는, 총 연간 계량화된 편익이 사회적 할인율 3%일 경우 1011억 달러, 7%일 경우 863억 달러이고 연간 총 사회적 비용은 26억 달러 또는 31억 달러가 되어 비용이 편익의 1/39 또는 1/28 수준이 될 것이라고 EPA는 예측하였다. 2015년 전력생산부문에서 편익과 비용을 예측한 결과 비용이 편익의 1/25 수준(편익 1010억 달러, 비용 36억 달러)이 될 것이라고 EPA는 예측하였다. 이러한 예측은 EPA가 금전화(또는 계량화)할 수 없는 편익과 비용 가치를 포함

하지는 않는다. 그러나 분석에 있어서의 불확실성과 한계를 고려하더라도, CAIR의 편익이 비용을 실질적으로 매우 많이 초과한다는 것은 명확한 사실이라고 EPA 보고서는 밝히고 있다. 본 보고서의 주요 내용들을 요약하면 다음과 같다.

I.에서는 EPA가 CAIR를 제정할 때 입법영향평가(기술적·경제적·환경적 분석)를 어떻게 실행하였는가를 기술한 EPA 보고서를 고찰하여, 향후 우리 정부와 행정기관의 효율적 입법 및 입법영향평가를 위한 모델을 정립하는데 참고 자료로 사용될 수 있도록 하는 것을 이 연구의 목적으로 함을 밝힌다.

II.에서는 EPA가 CAIR을 제정하는 배경, CAIR 제정을 위하여 행하는 입법영향평가의 목적, 이산화황(SO₂)과 산화질소(NO_x) 배출원인 화력발전소를 CAIR의 규제대상으로 하고 CAIR을 2010년과 2015년에 집행한다는 사실, 오염물질 배출상한과 거래프로그램(cap-and-trade program)이 전력산업에서 오염물질 감소를 위하여 사용될 것이라는 통제 시나리오, 배출을 통제함으로써 얻는 편익과 비용 등에 관한 개괄적 내용을 기술한다.

III.에서는 CAIR의 편익분석에 대한 투입(inputs)으로 작용하는 오염물질 배출원과 대기질 모델링을 간략히 고찰한다. 이 파트는 IV.에 대한 전제 파트로 작용한다. 여기서 오염물질 배출원은 전력산업에서의 발전 시설들(electric generating units, EGUs)이며, 대기질 모델링은 정교한 광화학적 대기질 모델링 기법을 사용하여 오존과 PM의 기준치와 사후 통제된 이후의 PM과 오존을 측정한다고 기술한다. PM은 Community Multi-Scale Air Quality Model(CMAQ), 오존은 Comprehensive Air Quality Model with Extensions(CAMx)라는 대기질 모델링을 사용한다. PM과 오존은 그 지역 인구에의 노출 및 영향 정도를 고려하여 건강에 영향을 주는 비용으로 측정된다. 이 모델링기법을 통해서 측정된 PM과 오존

데이터는 가시도(visibility)에서의 변화와 복지에 관한 영향을 평가하는데 필요한 그밖의 대기질 통계에서의 변화를 평가하기 위하여 사용된다는 것을 나타낸다.

IV.에서는 CAIR이 건강과 복지에 미치는 영향과 사회에 대한 금전화된 편익에 관한 EPA의 분석을 다룬다. 이 보고서의 핵심적 내용을 다루고 있다. EPA의 분석은 (1) NO_x와 SO₂를 포함하는 PM에 대한 전구물질의 감소로 인한 대기질 상태 변화의 건강과 복지효과는 무엇인가? (2) 최종 CAIR을 적용함으로써 인한 변화의 금전적 가치는 얼마인가? (3) 금전화된 편익은 비용과 어떻게 비교할 것인가?와 같은 물음에 응답한다. 편익분석은, EPA가 기존 규제영향분석에서 사용된 많은 모델링 요소들을 통합하여 개발한 Environmental Benefits Mapping and Analysis Program(BenMAP)이라는 모델링 기법에 의해 행해졌다. EGUs로부터의 NO_x와 SO₂의 배출과 그로 인한 오존과 PM의 대기질 농도에 미치는 영향은 인간의 건강과 복지에 광범위한 영향을 미친다. PM_{2.5}는 장기적 노출(만성)과 단기적 노출(급성)과 결부된 조기사망을에서 사망률에 이르기까지 인간 건강에 대한 잠재적 효과를 가진다(병원입원을 초래하는 호흡기 및 심장질환증상, 천식악화, 급만성 기관지염). 오존에의 노출은 학교 결석을 초래하는 병원입원과 질병을 포함하는 다양한 호흡기 질병에 결부되어 있다. PM과 잠재적으로 관련된 효과는 물질에 손상을 가하며 가시도를 저하시키는 것이고, 오존은 농산물 산출량과 산림을 감소시킴으로써 농업과 산림분야에 악영향을 미친다. CAIR을 적용한 이후의 건강편익은 1999년 달러가치로 예측하여 2015년에는 총 연간 계량화된 편익이 사회적 할인율 3%일 경우 1011억 달러, 7%일 경우 863억 달러에 해당한다. 이것은 약 17,000명의 조기사망, 22,000명의 비치명적 심장발작, 호흡기 및 심장혈관질환에 따른 12,300명의 입원, 1백 7십만 결근일(근로상실일)수, 5십만 결석일수, 일상적 활동제약이 있는 1천만 6백일 등을 회피할

수 있는 가치에 해당한다. 복지편익은 생태계 손상의 감소, 가시도의 향상, 레크리에이션과 상업적 낚시, 농산물 생산량, 산림 생산성 등의 향상을 의미한다. 이 모든 복지편익을 금전화할 수는 없지만, EPA는 CAIR이 남동부 Class I(국립공원) 지역에서 1999년 달러가치로 환산하여 2015년에 18억 달러 복지편익을 예측한다. 비록 이러한 인간의 건강과 복지 범주 가운데 많은 것들과 관련된 편익을 계량화하는 방법들이 존재하기는 하지만, 방법과/ 또는 데이터의 한계로 인하여 이 분석에서 모든 것을 평가할 수는 없다. EPA는 또한 편익분석의 한계인 불확실성에 대하여 다음과 같은 두 가지 통계적 접근법을 여기서 제시한다: 편익 모델링 틀에서 사용된 건강영향과 경제적 가치평가에서 표현된 고전적 통계상 오류에 기초한 편익의 분배를 산출하는 방법과 대기 PM2.5와 사망률 간의 관계에서 불확실성의 핵심 측면을 규정짓기 위하여 설계된 Pilot Expert Elicitation(PEE) Project로부터의 결과를 사용하는 방법.

V.에서는 IV.에서 논의된 대기의 PM과 오존 수준 감소로 인하여 결과하는 인간 건강과 복지편익에 더하여, CAIR가 결과할 금전화할 수 없는 편익에 대한 정성적(qualitative) 평가를 기술한다. 즉, CAIR의 집행으로 인하여 수생, 연안, 산림 생태계의 산성화와 수자원에서 있어서의 부영양화에 영향을 미치는 황과 질소 침적의 감소와 관련된 복지편익을 여기서 논의한다. 특히, 토양의 산성 침적이 지표수에 미치는 장기간의 영향을 분석하기 위해서 고안된 Model of Acidification of Groundwater in Catchments(MAGIC)이라는 모델링 기법을 설명한다. EPA는 농산물과 상업용 산림생산량의 증가, 가시도 향상, 질소와 산성 침적의 감소와 그에 따른 생태계 기능에서의 변화 등과 같이 계량화할 수 없는 편익이 실질적이라고 믿고 있다.

VI.에서는 CAIR에 영향을 받는 전력부문에 관련된 오염원들에 관해서 다루며, 전력부문과 EGUs에 관한 배경지식을 제공한다. 또한 EPA

규제정책의 역사적 배경과 전력부문에 관한 미래 전망에 대해서도 다룬다. 발전소의 SO₂ 배출량을 감소시키기 위한 오염통제기술(원료를 고유황탄에서 저유황탄으로 바꾸는 방법과 황정화장치를 설치하는 방법)의 사용, SO₂와 NO_x 배출량을 줄이기 위한 연방규제정책의 역사, 1990년 개정 대기청정법의 Title IV에 의해 설립된 산성비 프로그램 등을 여기서 검토한다. 또한 가장 비용효과적 방법으로 충족될 수 있는 환경목표를 위해 허용되는 고도로 효율적인 도구인 산성비 프로그램과 NO_x SIP Call에 주로 의존한 CAIR 하에서의 배출상한과 거래제도를 기술한다.

VII.에서는 미국 전역 전체 전력 시스템을 위한 SO₂와 NO_x 대기오염 통제정책을 검토하기 위하여 EPA가 사용한 역동적인 계수 프로그래밍 모델인 IPM을 분석하였다. 이를 토대로 EPA는 CAIR가 미치는 비용영향분석, 경제적 영향분석, 에너지영향분석을 실시하여 CAIR 제정에 관한 규제영향분석을 행하였다. 이 분석 결과, CAIR 적용으로 인한 민간 전력산업계의 예상 연간 증가 비용은 1999년 달러가치로 환산하여 2010년에는 240억 달러, 2015년에는 360억 달러이고, 이는 CAIR에 규정된 배출상한을 충족하기 위하여 SO₂와 NO_x 배출량을 감소하는 전력생산산업계의 총 비용을 나타낸다. 소매 전기 가격은 CAIR 시행으로 2010년과 2015년에는 2-3% 상승할 것으로 예상된다. 석탄 가격은 2010년에는 변화 없다가 2015년에는 약 -3% 내릴 것으로 예상되고, 천연가스 가격은 2010년에는 1.6% 2015년에는 1.5% 상승할 것으로 예상된다.

VIII.에서는 법률과 대통령령에서 규정하고 있는 규제영향분석요건을 CAIR 제정시 EPA가 어떻게 충족하고 있는가를 고찰한다. 법률로는 구체적으로 「소기업에 대한 공정한 규제집행법」(Small Business Regulatory Enforcement Fairness Act, SBREFA)에 의해 개정된 규제유연성법(Regulatory Flexibility Act, RFA)상의 소기관들(small entities)에 대한 CAIR

의 잠재적 영향, 「자금지원 없는 강제개혁법」(Unfunded Mandates Reform Act of 1995, UMRA)상의 주, 지방 그리고 부족 정부들과 사적 부문에 관한 CAIR의 영향, 서류작업간소화법(Paperwork Reduction Act, PRA)에 대한 CAIR의 영향 등을 평가한다. 대통령령(Executive Order, E.O.)으로는 E.O. 13045: 환경상 건강과 안전 위험으로부터 아동의 보호, E.O. 13175: 인디언 부족 정부와의 협의와 협동, E.O. 12898: 소수 인종과 저소득층에 있어서 환경상 정의를 다루기 위한 연방 조치들에 대한 CAIR의 영향 등을 분석한다.

IX.에서는 CAIR을 집행했을 때 편익과 비용을 결론적으로 나타낸다. 최종 CAIR 프로그램을 실행하기 위한 예상 사회적 비용은 2010년에는 19억 1천만 달러 또는 21억 4천만 달러이고 2015년에는 25억 6천만 달러 또는 30억 7천만 달러이다(1999년 달러가치로 환산, 3과 7 퍼센트 사회적 할인율을 각 각 적용). 그래서, 2010년에 동 프로그램의 순편익(사회적 편익-사회적 비용)은 대략 714억 달러+B 또는 604억+B 달러이고 2015년에는 985억+B 달러 또는 832억 + B 달러이다(B는 그 규제의 모든 계량화되지 않은 편익과 비편익의 총계를 나타냄). 그래서, CAIR의 집행은 비록 우리가 계량화할 수 있는 건강과 환경적 효과에 관한 제한된 설정이 주어진다고 하더라도 경제적 효율성 기준에만 기초하여 사회에 대하여 사회복지에서 증대한 순이익을 제공할 것으로 기대된다.

X.에서는 CAIR 제정의 타당성 여부를 검토하기 위하여 EPA가 사용한 다양한 평가기법을 표로 정리하였고, EPA의 입법영향평가제도가 우리에게 제공하는 시사점을 간략히 기술한다.

※ 키워드 : 주간대기청정규칙, 배출상한과 거래프로그램, 대기청정법, 비용-편익분석, 규제영향분석, 불확실성, 입법평가

Abstract

The purpose of this study is to provide helpful reference materials in establishing models that can enhance competences of our government and the agencies in performing the efficient legislation and legislation impact assessment through examining and analyzing US EPA's legislation impact assessment(technical • economic • environmental analyses). In order to achieve this purpose, I explored the reasonableness of making CAIR by studying EPA's report, Regulatory Impact Analysis for the Final Clean Air Interstate Rule. CAIR can result in the reduction of PM between upwind states and downwind states, which is the cause of nonattainment of NAAQS in the CAA. According to EPA's report, the reasonableness of making CAIR was decided by legislation impact assessment of health-benefit, welfare-benefit, and implementing costs. EPA has estimated the benefits and costs of CAIR and describes in the report that the rule results in estimated annual net benefit of \$71.4 or \$60.4 in 2010 and \$98.5 or \$83.2 billion 1999\$ in 2015(3 percent and 7 percent discount rates respectively). EPA also states in the report that in 2015, the total annual quantified benefits are \$101 or \$86.3 billion and the annual social costs are \$2.6 or \$3.1 billion-benefits outweigh social costs in 2015 by a ratio of 39 to 1 or 28 to 1(3 percent and 7 percent discount rates respectively). EPA said that an alternative comparison of the annual benefits of CAIR to the estimated private costs to the electric generating industry in 2015 resulted in benefits outweighing costs by a ratio of 25 to 1(benefits of \$101 billion compared to costs of \$3.6 billion). Theses estimates do not include the value of benefits or costs that EPA cannot monetize. Upon consideration of the uncertainties and limitations in the analysis, EPA

reveals in the report that the benefits of CAIR are substantial and far outweigh the costs.

This report consists of 10 chapters. I mentioned the purpose and method of this study as an introduction in chapter I. After that, I described EPA's modeling techniques and the various estimating methods to assess the legislation impact of CAIR on human health and welfare benefits by regulating the electric power sector from chapter II to chapter IX. In the end at chapter X, I evaluated the way of EPA to assess the legislation impact of CAIR and suggested some helpful comments for our government and the agencies to enhance abilities in implementing legislation and legislation impact assessment.

※ Key words : **CAIR**, cap-and-trade program, **CAA**, Cost-Benefit Analysis, Regulatory Impact Analysis, **Uncertainty**, Legislation Impact Assessment

목 차

국문 요약	3
Abstract	9
약어 표	19
I. 서론	23
II. EPA의 연구의 목적과 배경 등	25
1. 연구 목적	25
2. 연구 배경	26
3. 규제 대상	28
4. 기준값과 분석년도	28
5. 통제 시나리오	29
6. 배출통제의 편익	29
7. 배출통제의 비용	30
III. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향	31
1. 오염물질 배출원과 예상 오염물질배출 감소	31
2. 대기질에 미치는 영향	32
2.1. PM 대기질 평가	33
2.2. 오존 대기질 평가	43
2.3. 가시도 저하 측정	48

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과	51
1. 개 요	51
2. 편익분석 - 데이터와 방법들	63
2.1. 가치평가(Valuation) 개념	65
2.2. 국민소득의 성장에 따른 WTP의 증가	69
2.3. 불확실성을 기술하기 위한 방법들	72
2.4. 인구통계학적 예측	79
2.5. 건강에 대한 편익 평가방법	80
2.6. 인간복지에 미치는 영향에 대한 경제적 평가	122
3. 편익분석 - 결과	128
3.1. 뉴저지주와 델라웨어주의 잠재적 편익	134
3.2. 편익 예측을 하는 데 있어서의 불확실성에 대한 확률적 분석 ...	134
3.3. 논 의	138
V. 비금전화 편익의 질적 평가	141
1. 개 요	141
2. 황과 질소의 대기침적 - CAIR을 위한 영향의 수량화 (퍼센티지로 수량화하는 것을 보여줌)	141
3. 황과 질소의 대기침적 - 수생, 산림, 해양생태계에 대한 영향	142
3.1. 민물 산성화	143
3.2. 산림생태계	154
3.3. 연안 생태계	155
3.4. 그밖의 잠재적 영향	157

VI. 전력부문에 관한 연구	159
1. 전력부문 개론	159
1.1 전력생산	159
1.2 전력 전달	161
1.3 분 배	162
2. 규제완화와 전력사업 리스트럭처링	163
3. 오염과 EPA의 배출규제	164
4. 오염통제기술	165
5. 전력생산부문의 규제	167
6. 배출상한과 거래제도	169
7. CAIR	170
8. 전기의 가격탄력성	171
VII. 비용영향분석, 경제적 영향분석, 에너지영향분석 ...	173
1. 모델링 배경	173
1.1. 1단계 통제 전략	174
1.2. 2단계 통제 전략	174
1.3. CAIR에 대한 규제영향분석을 위한 방법	175
2. SO ₂ 와 NO _x 의 예상 배출 및 감소	176
2.1. 예상 배출	176
2.2. 예상 감소	177
3. 예상 비용	177

4. 예상 통제기술 개선	178
5. 예상 발전연료의 혼합	179
6. 예상 용량 추가	180
7. 전력부문을 위한 예상 석탄 생산	181
8. 예상 소매 전기 가격	181
9. 예상 연료 가격에 대한 영향	182
10. 최종 CAIR 모델링과 EPA의 기존 모델링에 있어서의 주요 차이점	182
11. 발전소들로부터의 예상 1차 PM 배출	183
12. 분석의 한계	184
13. 에너지에 미치는 중대한 영향	189
14. 산업부문에 미치는 영향	189
VIII. 법률과 대통령령에 규정된 영향분석	191
1. 소기관들에 대한 영향	191
1.1. CAIR의 예상 영향을 받는 소기관들	193
1.2. 분석과 결과 개요	194
1.3. 소기관들에 대한 영향의 개요	201
2. UMRA 분석	202
2.1. 정부소유 기관들의 확인	205
2.2. 분석과 결과 개요	206
2.3. 정부기관들에 대한 영향의 개요	213
3. 서류작업간소화법	214
4. 아동 건강	215

5. 부족에 대한 영향	216
6. 환경정의	218
IX. 편익과 비용의 비교	219
X. 결 론	221
참 고 문 헌	225

【표 및 그림 목차】

[표 3-1] CMAQ 2001년 시뮬레이션을 통한 선택적 수행 평가	40
[표 3-2] 기준 사례 PM 대기질과 CAIR로 인한 변화에 관한 개요 : 2010년과 2015년	43
[표 3-3] 동부지역의 시간당 오존량에 대한 CAMx 시뮬레이션 결과 : 1995년 기준사례	46
[표 3-4] CAIR 적용을 통한 건강편익 Endpoints를 위하여 인구가중치를 적용한 CAMx 모델링 결과 : 동부	47
[표 4-1] 최종 CAIR의 예상 금전편익	52
[표 4-2] 최종 CAIR에 의해 영향받는 오염물질들의 인간 건강과 복지에 대한 효과	53
[표 4-3] 예상 실질 소득 증가 계산을 위해 사용된 소득탄력도	70
[표 4-4] 예상 실질소득 증가 예측을 위해 사용된 조정계수들	71
[표 4-5] 편익분석에 있어서 불확실성의 주요 근원들	73
[표 4-6] 금전화된 총 건강 편익을 계산하기 위하여 사용된 Endpoints와 연구들	83
[표 4-7] 편익분석에서의 사용을 위하여 평가된 천식증상의 모집단에서의 건강영향을 검토하는 연구들	95

[표 4-8] 일반모집단에서 Impact 함수로 나타낸 기준선 발생율과 모집단 이환율	104
[표 4-9] Impact 함수에 있어서 천식 인구를 평가하기 위하여 사용된 천식 이환율	107
[표 4-10] 건강 endpoints의 경제적 가치를 계량화하기 위하여 사용된 단위 가치	111
[표 4-11] 응용 VSL과 이론 VSL을 개발하는데 있어서 사용된 요소들간의 차이에 관한 조기사망감소의 예상편익에 대한 예상영향 ...	113
[표 4-12] 비치명적 심장발작을 위한 대안적 직접치료비용	119
[표 4-13] 비치명적 심근경색치료를 위한 5년간의 비용예측값 (2000년 달러)	119
[표 4-14] 자녀가 있는 직장여성의 수와 비율 (단위 : 백만)	121
[표 4-15] CAIR : 건강에 대한 역효과 발생건수의 예상 감소	129
[표 4-16] 건강과 복지효과의 발생건수의 감소에 있어서 예상금전가치 (백만 1999년 달러)	130
[표 5-1] CAIR을 적용한 이후 수계(water bodies)의 산성도 변화	153
[표 6-1] 2002년 전력생산용량	159
[표 6-2] 2003년 총전력 생산 산업의 소매판매비용 (단위 : 10억 kWh)	160
[표 6-3] 2003년 원료별 순전력 생산량(단위: 10억 kWh)	161
[표 6-4] 2003년 SO ₂ 와 NO _x 의 배출량과 CAIR 적용지역에서의 배출량의 퍼센티지	170
[표 6-5] 현재 전력 순생산량과 2010년과 2015년 EPA 예상 전력생산량 (단위 : 10억 kWh)	171
[표 7-1] CAIR 적용시 연간배출총량 (단위 : 백만톤)	173
[표 7-2] 기준 사례 및 CAIR과 비교한 예상 SO ₂ 와 NO _x 배출 (백만 톤)	176
[표 7-3] CAIR의 연간 지역별 비용과 CAIR로 인한 SO ₂ 와 NO _x 감소의 한계비용(1999년 달러)	178

[표 7-4] 기준 사례 및 CAIR의 기술에 의한 오염 통제(GW)	179
[표 7-5] 기본 사례와 CAIR에 의한 발전연료의 혼합	180
[표 7-6] 2020년 총 석탄과 석유/천연가스를 연료로 하는 용량(GW) ...	180
[표 7-7] 기본 사례 및 CAIR과 관련한 지역 예상 소매 전기 가격 ...	181
[표 7-8] 기본 사례 및 CAIR과 관련한 헨리 허브 천연가스 가격과 배달된 평균 석탄 가격(1999년 달러)	182
[표 8-1] 잠재적으로 규제되는 범주와 대상	192
[표 8-2] 소기관들에 대한 CAIR의 영향예측(백만 1999년 달러)	194
[표 8-3] 소기관들에 대한 CAIR의 경제적 영향의 배분 개요	200
[표 8-4] 소유권 그룹과 비용 카테고리에 따라 요약된 CAIR에 따른 증가하는 연간 비용(백만 1999년 달러)	201
[표 8-5] CAIR에 따른 정부기관들에 대한 잠재적 영향의 개요	205
[표 8-6] 정부기관들에 대한 CAIR의 경제적 영향의 배분	211
[표 8-7] 소유권 그룹과 비용 카테고리에 따라 요약된 CAIR에 따른 증가하는 연간 비용(백만 1999년 달러)	212
[표 9-1] CAIR의 연간 편익, 비용, 순편익 개요(10억 1999년 달러) ...	219
[표 10-1] EPA의 평가기법 개관	221
[그림 4-1] 대기질 모델링에 기초한 편익분석에 있어서 핵심 단계들	62
[그림 4-2] PEE 인코딩 과정	137

약어 표

- ACS : American Cancer Society 미국 암협회
AIRS : Aerometric Information Retrival System
ALA : American Lung Association 미국폐협회
ANC : Acid Neutralizing Capacity 산성물중화능력
BEA : Bureau of Economic Analysis
Benefit TSD : Benefit Technical Support Document
CAA : Clean Air Act 대기청정법
CAIR : Clean Air Interstate Rule 주간대기청정규칙
CAMx : Comprehensive Air Quality Model With Extension
CASTNet : Clean Air Status and Trends Network
CB : Chronic Bromchitis 만성기관지염
CB-IV : Carbon-bond Mechanism IV
CDC : U.S Centers for Disease Control and Prevention
CEEPR : MIT's Center for Energy and Environmental Policy Research
CMAQ : Community Multi-Scale Air Quality Model
COI : Cost Of Illness
COPD : Chronic Obstructive Pulmonary Disease 만성 폐색성 폐질환
C-R Funtions : Concentration-Response Functions
CRF : Capital Recovery Factor 자본회원계수
CV : Contingent Valuation
EEAC : Environmental Economics Advisory Committee
EGUs : Electric Generating Units
EIA : Energy Information Administration
EMPAX-CGE : Economic Model for Environmental Policy Analysis
- Computable General Equilibrium

EPA : Environmental Protection Agency
ESPN : EPA Speciation Network
FGD : Flue Gas Desulfurization 황정화장치
GEOS-CHEM : Goddard Earth Observing System-Atmospheric Chemistry
Model
HEI : Health Effects Institute
ICD : International Classification of Disease 국제질병분류
IGCC : Integrated Gasfication Combined Cycle
IGEM : Intertemporal US Ggeneral Equilibrium Model
IMPROVE : Interagency Monitoring of PROtected Environment
IPM : Integrated Planning Model 통합모델기법
MAGIC : The Model of Acidification of Groundwater In Catchments
MM5 : Mesoscale Model version 5
MRADs : Minor Restricted-Activity Days
NAICS : North American Industry Classification System
NAPAP : National Acid Precipitation Assessment Program
NAS : National Academy of Sciences 국립과학원
NHAMCS : National Hospital Ambulatory Medical Care Survey
NHDS : National Hospital Discharge Survey
NRC : National Research Council
OCD : Ozone Criteria Document 오존기준문서
OMB : Office of Management and Budget
PEE : A Pilot Expert Elicitation
PEF : Daily Peak Expiratory Flow
PM : Particulate Matter
PRA : Paperwork Reduction Act 서류작업간소화법
REMSAD : Regional Modeling System for Aerosols and Deposition

RFA : Regulatory Flexibility Act 규제유연성법
RIAs : Regulatory Impact analyses
RRFs : Relative Reduction Factors
SAB-HES : Science Advisory Board Health Effect Subgroup
SBREFA : Small Business Regulatory Enforcement Fairness Act
SCR : Selective Catalytic Reductions 선택적 촉매감소기술
SIPs : State Implementation Plans 주집행계획
SMAT : Speciated Modeled Attainment Test
STN : Speciation Trends Network
TAR : Tribal Authority Rule 부족권한규칙
TRUM : Technology Retrofit and Updating Model
TSP : Total Suspended Particles 총부유입자
UMRA : Unfunded Mandates Reform Act 자금지원없는 강제개혁법
VSL : Value of Statistical Life
WTP : Willingness To Pay

I. 서론

이 연구는, 미국의 주간대기청정규칙(Clean Air Interstate Rule, CAIR)이 건강에 미치는 편익(건강편익)과 복지에 미치는 편익(복지편익)을 제시하고 향후 2010년과 2015년에 CAIR을 집행했을 때의 예상 비용과 예상 편익을 비교한 미국 환경청(Environmental Protection Agency, EPA)의 최종 CAIR에 대한 규제영향분석(Regulatory Impact Analysis for the Final Clean Air Interstate Rule, EPA-452/R-05-002(March 2005)(이하 EPA 보고서라 함))을 검토·분석한 것이다.¹⁾ 본 보고서는, EPA가 이러한 비교를 통하여 CAIR 제정의 타당성 여부를 결정한다는 사실, 즉, CAIR 제정과 그에 대한 영향평가(입법영향평가)가 규제영향분석을 통하여 이루어지게 된다는 것을 나타낸다. 따라서 이 연구는, EPA가 CAIR를 제정할 때 규제영향분석(기술적·경제적·환경적 분석)을 어떻게 실행하였는가를 기술한 위의 EPA 보고서를 고찰하여, 향후 우리 정부와 행정기관의 효율적 입법 및 입법영향평가를 위한 모델을 정립하는데 있어서 참고 자료로 사용될 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

1) 필요한 경우 연구자가 임의로 각주를 달아 독자들의 이해의 편의를 도모하였음을 밝히고, 본 보고서에 나오는 각종 연구들에 관한 references에 대해서는 위 EPA 보고서의 해당 파트에 있는 references 편을 참조하기 바란다. 이하의 내용은 EPA 보고서에 관한 것이다.

II. EPA의 연구의 목적과 배경 등

1. 연구 목적

EPA는 동부 28개 주(텍사스주 포함)와 컬럼비아 특별구를 포함하는 바람을 내보내는 주들(Upwind States)과 바람을 받아들이는 주들(Downwind States) 간의 오염물질의 이동에 따른 주민들의 건강과 관련하여 주간대기청정규칙(Clean Air Interstate Rule, CAIR)을 제정하였다. CAIR 제정을 위하여 EPA는 바람을 내보내는 주들에서 방출된 PM_{2.5}²⁾와 오존³⁾이 이동하여 바람을 받아들이는 주들의 주민들의 건강에 해로운 수준의 PM_{2.5}와 오존 형성에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 규제영향분석을 시행하였다. 이러한 EPA의 규제영향분석을 근거로 하여 CAIR은

-
- 2) PM_{2.5}는 입자 크기가 2.5 마이크론 이하인 미세입자로, 사람의 호흡기에 직접 침투하여 천식, 만성심장부정맥, 심장마비 그리고 조기 사망에 이르는 등 심각한 건강문제를 유발한다. EPA에서는 이를 입자의 크기에 따라 크게 두 가지로 나누어 규제하고 있는데, PM₁₀으로서 입자의 직경이 10 마이크론 이하의 입자의 질량과 PM_{2.5}로 입자의 직경이 2.5 마이크론 이하의 입자의 질량이다. 이렇게 나누어 구분한데는 여러 가지 이유가 있지만 가장 중요한 이유는 직경이 작을수록 체내에 보다 깊이 침투하여 더 위험할 수 있기 때문이다. 대기 중에 오염입자는 에너지를 산란하거나 흡수한다. 이로 인해 가시거리가 줄어들므로 가시거리의 확보가 필수적인 국립공원에서는 보다 강도 높은 기준을 적용하여 먼지 입자의 농도를 제한하고 있다. 미세입자는 지구의 복사에너지를 흡수하거나 구름을 만드는 핵으로 작용함으로써 정상적인 기상 패턴을 교란한다. 기후 변화에 관한 정부 간 패널에서는 지구 온난화에 먼지 입자가 미치는 영향에 대한 연구 보고서를 발표하였는데, 이에 따르면 입자 자체의 에너지 흡수(direct effect)에 의해 지구의 평균온도가 얼마나 올라가는 것에 대한 상당한 연구성과는 이미 나왔지만, 구름을 형성함으로써 태양빛을 반사하는 효과(indirect effect)는 아직까지도 확실한 연구가 나오지 못하고 있는 실정이다.
- 3) 오존이 세계보건기구 허용치(0.05ppm) 이상인 경우 문제가 발생할 수 있는데 1ppm에서 하루 8시간 동안 노출되면 기관지염, 폐조직의 섬유증 및 기관지초염이 발생된다. 1.25ppm에서 1시간 지나면 호흡기능이 감소되며, 농도가 더 높아지면 폐수종, 출혈 및 폐포막을 통한 가스교환 장애를 일으킨다. 작업장에서 하루 8시간 노동할 때 오존의 최대허용 농도는 0.1ppm이다. 지상의 오존은 대기 속으로 발산되는 게 아니라, 주로 태양열 속에서 산화질소와 휘발성의 유기화합 방출물이 반응을 보임으로써 만들어진다. 산업 시설, 전기 장치, 자동차의 매연, 휘발유 증기, 화학용제 등에서의 방출물 등이 원인이 된다.

II. EPA의 연구의 목적과 배경 등

바람을 내보내는 주들에 대하여 바람을 받아들이는 주들의 주민들의 건강을 위해 대기오염물질배출의 감소를 요구한다. 즉, CAIR은 대기 청정법(Clean Air Act, CAA)에 규정된 「전국 대기의 질 기준」(National Ambient Air Quality Standard, NAAQS)을 충족하지 못하는 데에 기여하는 것으로 밝혀진 미세 먼지의 이동을 감소시키기 위하여 비용-효과적 방법으로 미세먼지의 배출 감소를 달성하기 위한 것이다.

EPA는 또한 CAIR의 건강에 미치는 편익(건강편익)과 복지에 미치는 편익(복지편익)을 제시하고, 향후 2010년과 2015년에 CAIR을 집행했을 때의 예상 비용과 예상 편익을 비교하였다. 이러한 규제영향분석을 통하여 EPA는 CAIR 제정의 타당성 여부를 고찰하는 것을 그 연구 목적으로 하였다.

2. 연구 배경

바람을 내보내는 주들에서 배출하는 오염물질이 바람을 받아들이는 주들의 오염 수준에 영향을 주어 오염 정도를 높인다는 것을 의회가 이미 인식하고 있었다. 이에 따라, CAA § 110(a)(2)(D)는 NAAQS의 배출기준을 충족하지 못하고 있는 바람을 받아들이는 주들을 고려하여, 대기오염에 심각하게 기여하고 있는 오염물질배출을 하지 말 것을 바람을 내보내는 주들에 대하여 요구하고 있고, 각 주들은 개정 NAAQS의 제정일로부터 3년 이내에 이와 관련된 환경에 관한 계획을 EPA에 제출하여야 한다.

EPA도 이러한 사정을 인식하여 CAIR를 제정하면서, 텍사스를 포함한 동부 28개 주와 컬럼비아 특별구⁴⁾에서 배출하는 오염물질이 바람을 받아들이는 주들의 NAAQS에 적합한 PM_{2.5}와/또는 오존 기준을 높

4) CAIR이 완전 시행되면, 동부 28개 주와 컬럼비아 특별구의 이산화황 배출은 2003년 대비 70% 이상, 질소산화물배출은 60% 이상 감소될 것이며, 2015년까지 매년 천억 달러 이상의 편익을 제공하고 동부의 조기 사망을 실질적으로 감소시킬 것이다.

여 오염지역화 시키는데 크게 기여하고 있고, PM2.5와/또는 오존에 관한 NAAQS의 유지를 방해하고 있다는 것을 알게 되었다. 이에 따라 EPA는 이러한 바람을 내보내는 주들로 하여금 이산화황(SO2)와/또는 질소산화물(NOx)⁵⁾의 배출을 감소시키는 통제장치를 포함하도록 자신들의 주집행계획(State Implementation Plans, SIPs)⁶⁾을 개정할 것을 요구한다. SO2는 PM2.5의 전구물질(precursors)⁷⁾이며, NOx는 오존과 PM2.5의 전구물질이다.

EPA 보고서에 제시된 예상은 최종 CAIR 프로그램(최종 CAIR + CAIR의 적용을 받는 델라웨어주와 뉴저지주에 대한 SO2와 NOx에 대한 통제를 포함하는 CAIR안(proposal)을 포함)을 위한 편익과 비용을 나타낸다. 이러한 예상을 제공하기 위하여 사용된 모델링은 최종 CAIR의 적용 지역이 아닌 아칸소주의 일부가 포함되어 있어서, 편익비용분석에 있어서 약간의 과다 측정 가능성이 존재할 수 있다.

- 5) 질소산화물은 연소과정에서 공기 중의 질소가 산화되어 발생하며, 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO₂)가 대표적인 종류이다. 배출원은 자동차, 항공기, 선박, 보일러, 소각로 및 전기로 등에서 발생한다. 질소산화물은 산성비의 원인이 되며 눈과 호흡기에 영향을 미치며 식물들을 고사시키는 등 주요대기오염물질 중의 하나이다. 질소산화물은 태양광선과 반응하여 오존을 생성시킨다.
- 6) CAA는 오존, 일산화탄소, PM 등에 대한 오염배출조건을 각 장소와 오염배출조건의 미달성 정도에 따라 다르게 설정하였다. 이것의 시행은 SIPs의 개정을 통해 달성된다. 예컨대, 대기오존측정에 근거하여, 기준 미달성이 심각한 정도로 분류되면, 주는 9년 이내에 기준을 달성할 수 있도록 SIPs를 수정해야 한다.

오존 배출 미달 지역의 분류와 달성 기한

분류	오존 기준치	달성목표기간
한계(margnal)	0.121 ~ 0.138ppm	3년
보통(moderate)	0.138 ~ 0.160ppm	6년
심각(serious)	0.160 ~ 0.180ppm	9년
극심(severe)	0.180 ~ 0.280ppm	15년
극도(extreme)	0.280ppm 이상	20년

<한화진/조역수, 지역대기질 보전대책 수립 및 시행에 관한 연구(한국환경기술개발원, 1996,12), 21면>.

- 7) 오염원으로부터 직접 방출되는 물질은 1차 오염물질(primary pollutants)이라 하며, 그 물질들이 대기 중에서 화학반응에 의해서 만들어진 오염물질을 2차 오염물질(secondary pollutants)이라 한다. 1차 오염물질은 2차 오염물질의 전구물질이라고도 한다.

3. 규제 대상

CAIR은 오염물질원을 직접 규제하지는 않고, 각 주들로 하여금 NOx와 SO2 배출을 감소시키는 통제수단들을 포함하도록 자신들의 SIPs를 수정할 것을 요구한다. 각 주들이 행해야 할 배출감소는 화력 발전소들(Fossil-fuel Electric Generating Units, EGUs)를 위하여 매우 비용-효과적인 것으로 알려진 통제에 기초한다. EPA는 오염물질에 관한 배출상한과 거래(cap-and-trade) 프로그램을 만들었으며, SO2와 NOx 배출상한과 거래를 2010년까지 단계적으로 도입하고 그 이후부터 2015년까지는 SO2와 NOx 배출상한과 거래량을 단계적으로 줄여갈 계획이다. 각 주들이 NAAQS의 달성 정도에 따라서 배출상한량과 그것을 달성해야 할 시한은 정해져 있지만, 그 한도 내에서 각 주들은 자신들의 상황에 맞게 탄력적으로 규제정책을 시행할 수 있다. 또한 각 주들은 오염 규제 대상 선정 및 통제 방법을 자율적으로 결정할 수 있다.

4. 기준값과 분석년도

CAIR은 바람을 내보내는 주들로 하여금 대기오염물질을 제거하도록 하기 위한 요건들을 설정하고 있다. 이에 따라 EPA는 오염의 원인이 되는 특정 주들로 하여금 SO2와 NOx 배출을 감소할 것을 요구한다. EPA는 CAA의 요건들과 비용과 편익 평가를 개발하기 위하여 사용된 기준값에서의 각 주들의 조치들을 CAIR 제정을 위해 고려하였다. 2010년과 2015년이 이러한 분석에 사용되는데, 2010년은 CAIR의 1단계를 나타내고 NOx에 대한 2009년 단계와 근접해 있기 때문에 선택되었고, 2015년은 CAIR의 2단계가 집행될 것으로 예상되는 해이기 때문에 선택되었다. 이 보고서에서 제기된 예측값들은 2010년과 2015년의 CAIR의 편익과 비용에 관한 통계수치를 연간 환산한 값들을 나타낸다.

5. 통제 시나리오

EPA 보고서에서의 분석은, 오염물질 배출상한과 거래 프로그램이 전력부문으로부터 오염물질 감소요건을 달성하기 위하여 사용될 것이라는 것을 가정한다. CAIR 지역 내에 있는 25 MW 생산을 넘는 모든 화력발전소들이 적용 대상이다. EPA는 오염물질의 대기간 이동을 문제를 해결하기 위해서 SO₂와 NO_x를 위한 지역 오염물질 배출상한을 설정하고, 2010년까지 SO₂ 370 만톤과 NO_x 150 만톤으로 연간 배출상한선을 각각 설정한다. 배출상한은 2015년에 이르러 SO₂ 260 만톤과 NO_x 130 만톤으로 감소하게 된다. 오염물질 배출상한제는 EPA가 믿기에 매우 비용효과적 방법으로 화력발전소로부터 통제될 수 있는 SO₂와 NO_x 배출량을 결정함으로써 추론되었다. 이 프로그램이 완전히 집행되면, SO₂의 전국 배출량은 340 만톤으로 감소할 것이다. 이것은 개정 CAA의 Title IV 산성비 SO₂ 거래 프로그램⁸⁾하에서 허용된 895 만톤의 SO₂ 배출량에 비하면 획기적으로 낮은 것이다.

6. 배출통제의 편익

이 연구의 IV와 V에서 CAIR의 편익을 다룬다. 3% 할인율을 적용하여 편익에 관한 통계수치를 연간 환산할 경우, 2015년에는 이 프로그램으로 인해 얻게 되는 금전 편익이 1010억 달러로 기대되며, 7% 할인율을 적용할 경우에는 863억 달러가 기대된다. 이것은 「주간 대기질규칙안의 편익」(Benefits of the Proposed Interstate Air Quality Rule(OAR-2--3-0053-0175, January 2004))에서 보고된 예상치보다 더 크

8) 산성 침적물에 대한 통제(acid deposition control)를 의미하며(42 U.S.C. §§ 7651 & 7651a-o), 산성 침적물이란 이산화황과 질소산화물 등이 배출되어 대기에서 화학적으로 변환되어 비, 안개, 또는 눈의 형태로 지면에 떨어져 토양산성화를 일으키게 되는 주요 원인이다.

II. EPA의 연구의 목적과 배경 등

게 나타난다. 그 원인으로는 i) SO₂ 배출량 감소, ii) 인구밀집지역 근처에서 발생하는 오염물질들의 감소, iii) 오염물 배출 지역에서의 지리적 변화, iv) CAIR에 대한 추가적·직접적 PM_{2.5} 배출량 감소 등을 들 수 있다.

7. 배출통제의 비용

EPA는 통합기획모델기법(Integrated Planning Model, IPM)⁹⁾을 사용하여 CAIR의 비용을 분석하였다. EPA는 이 모델을 과거에 전력부문에 대한 규제영향을 분석하기 위하여 사용한 바 있다. EPA는 전력부문에 대한 CAIR의 비용(private industry costs)이 2010년에 236억 달러, 2015년에 357억 달러(1999년 달러 가치로 환산하여)가 될 것이라고 예상하였다. CAIR의 순편익을 예측하기 위하여 EPA는 할인율을 적용한 개념인 사회적 비용(social costs)¹⁰⁾을 사용한다. 사회적 비용은 2015년에 3% 할인율인 경우 256억 달러, 7% 할인율인 경우 307억 달러가 될 것이라고 예상한다. 전력부문에 대한 비용과 경제적 영향을 모델화하는데 사용된 방법론에 관한 내용은 V.에서 논의된다.

9) 미국 내의 전체 전력시스템을 위하여 SO₂와 NO_x에 대한 대기오염통제정책을 검토하기 위하여 EPA가 사용하는 역동적인 선형 프로그래밍이다. www.epa.gov/airmarkets/epa-ipm. 참조.

10) 규제의 순편익을 측정하는데 있어서 적절한 비용측정을 말하며, 그 규제의 사회에 대한 복지비용을 나타낸다. 부(wealth)를 단지 재분배하는 이전비용(예 : 조세)은 여기에 해당하지 않는다. EPA 보고서, 1-9.

Ⅲ. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향

Ⅳ.에서 상세히 논의되는 CAIR의 편익분석에 대한 투입(inputs)으로 작용하는 오염물질배출원과 대기질 모델링을 여기서 간단히 요약한다. EPA는 정교한 대기질 모델링 기법을 사용하여 오존과 PM의 기준치와 사후 통제된 이후의 오존, PM을 측정한다. 그리고 질산침적물과 황화침적물(deposition of nitrogen and sulfur)¹¹⁾의 대기 내의 농도를 매년 같은 방법으로 측정한다. 대기 중의 오염물질의 예측치는 그 지역 인구에의 노출 및 영향 정도를 고려하여 건강에 영향을 주는 비용으로 측정하게 된다. 모델링기법을 통해서 측정된 오염 물질의 데이터는 또한 가시도(visibility)에서의 변화를 평가하고, 복지에 관한 영향을 평가하는데 필요한 그 밖의 대기질 통계에서의 변화를 평가하기 위하여 사용된다.

1. 오염물질 배출원과 예상 오염물질배출 감소

오염물질 배출원에 관한 기술 지원 문서는 최종 CAIR의 편익분석을 위하여 2001, 2010, 2015년 기준 오염물질 배출원들의 발전을 논의한다. 오염물질 배출원과 현재와 미래의 배출원을 위한 기준은 [표 3-1]에 표시되어 있다.¹²⁾ 무엇보다도 전력산업에 있어서 Electric Generating Units(EGUs)가 CAIR의 규제 대상이며, 2001년 산성비 거래 프로그램 데이터가 2001 기준년이고 미래 기준 사례의 예상을 위하여 IPM이 분석기법으로 사용되었음을 알 수 있다. [표 3-2]에서는 EGUs로부터의

11) 1차 오염물질은 바람을 타고 이동하여 대기 중에서 황산염과 질산염 등을 형성하는 입자 등의 2차 오염물질을 형성하게 된다. 이런 화학물질은 습성침적(산성비, 눈, 안개, 구름)과 건성침적(산성입자)의 두가지 방식으로 지표에 떨어지게 되는데, 토양의 산성화를 일으키는 이러한 물질들을 산성침적물이라 한다.

12) EPA 보고서, Table 3-1, 3-2.

Ⅲ. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향

오염물질 배출이 2001년 기준치(NO_x 4,937,398톤 ; SO₂ 10,901,127톤), 2010년 기준 사례(NO_x 3,672,929톤 ; SO₂ 9,903,882톤), 2015년 기준 사례(NO_x 3,708,658톤 ; SO₂ 9,079,214톤)를 나타내고 있는바,¹³⁾ EPA가 오염물질 배출의 감소를 요구하고 있음을 알 수 있다. [표 2-3]에서는 CAIR을 2010년과 2015년에 적용했을 때 EGU_s로부터의 오염물질 배출(NO_x와 SO₂)의 감소를 나타낸다.¹⁴⁾ EGU_s로부터의 오염물질 배출의 변화는 대기질 변화를 모델링함에 있어서 사용된다.

2. 대기질에 미치는 영향

2010년과 2015년 기준 사례들을 위한 대기질을 평가하는 방법¹⁵⁾과 결과¹⁶⁾ 그리고 편익분석목적을 위한 통제 시나리오를 여기서 요약한다. EPA는 대기질의 변화에 관련된 건강, 복지, 생태적 영향에 관하여 중점을 두고 있으며, 대기질의 변화는 PM_{2.5},¹⁷⁾ 오존,¹⁸⁾ 가시도 저하(연무생성)¹⁹⁾를 포함한다.

13) EPA 보고서, Table 3-2, 3-3.

14) EPA 보고서, Table 3-3, 3-4

15) 대기질 평가방법은 앞에서 요약된 오염물질 배출변화에 기초한다.

16) 대기질 결과값은 인구수와 생태계라는 요소도 고려하여 건강과 복지에 미치는 영향을 측정한다.

17) Community Multi-Scale Air Quality(CMAQ) Model(EPA에서 개발한 광화학 3차원 모델링 기법으로 대기내의 오염물질을 측정하기 위한 모델링 기법)을 이용하여 미국 전역의 PM_{2.5} 값을 추정.

18) Comprehensive Air Quality Model with Extensions(CAMx)를 이용하여 미국전역의 오존값 추정. CAMx는 3차원 시뮬레이션 모델 기법으로 어떤 특정한 장소를 하나의 박스로 간주하고 시뮬레이션하는 박스모델과는 달리 3차원 모델에서는 오염입자뿐 만이 아니라 박스와 박스 간에 일어나는 공기의 흐름을 알아야 하고 그러한 것들을 투입요소로 하여 기상모델을 예측하며 각각의 결과와 연계한다.

19) 광소멸계수(light extinction coefficients)를 이용하여 실제측정값과 CMAQ을 통한 모델링 기법으로 나온 값을 함께 사용하여 값을 추정. 광소멸계수는 기체와 입자에 의한 흡수계수와 산란계수의 합을 나타내며 가시도를 측정하는데 사용되는 계수이다. 광원에서 나온 광도I₀는 대기를 통과하는 동안 기체와 입자에 의하여 흡수 또는 산란되어 그 세기가 약해지게 된다.

2.1. PM 대기질 평가

CMAQ 모델링 시스템을 사용하여 전국 PM 대기질을 평가한다. CMAQ는 전국 PM 농도 측정을 위한 모델링 기법으로 3차원 격자기본의 오일러 대기질 모델²⁰⁾이다. 이 기법을 사용하여 매년 전국 PM의 농도를 측정하며, 전국적으로 대기질의 오염정도를 측정할 수 있다. 각 지역에서 PM의 형성과정에 따라 오염원에 의해 직접적으로 배출된 1차적으로 형성된 PM과 대기 과정에 의해 형성된 2차적으로 형성된 PM을 분리해서 고려해야 한다. 이러한 분리과정은 PM, 오존, 그리고 지상으로 침적되는 오염물을 통제했을 때 그 효과를 분석하고 평가하는데 있어서 필수적이다.²¹⁾

CMAQ는 2차 오염물질의 전이로 인한 동시적이며 전체적인 변화 현상을 잘 설명해 주므로, PM 농도에 관한 규제의 영향력을 평가하는데 유용하다. 우리의 분석은 모델링 시스템을 5 가지 배출 시나리오(2001년 기준년, 2010년 기준선계획, 2010년 통제계획, 2015년 기준선계획, 2015년 통제계획)로 전국에 적용한다. CMAQ 버전 4.3이 CAIR 모델링 분석에 사용되었다(Byun and Schere, 2004). 이 버전은 모델링 실행 및 결과예측능력을 향상시키기 위하여 수많은 지역에서 최신 자료를 반영하고 이전 버전에서는 고려하지 않았던 다음 4가지 내용들

20) 오일러리안(Eulerian) 격자모델은 제반 공학분야, 플라즈마 물리, 해양물리 및 대기과학 등 광범위한 분야에서 확립된 이론을 기반으로 최신의 전산유체역학모델 기법을 적용하여 개발되었다. 이 모델의 적용대상은 대략 수십 km로부터 수 cm 공간 규모에서 발생하는 모든 종류의 유동현상과 열 및 물질 이동현상이며 컴퓨터 사양에 따라 훨씬 큰 규모의 기상모델링도 가능하다. CMAQ는 오일러 격자모델 기법을 분석방법으로 사용한다.

21) 오일러 격자모델 기법을 사용하는 CMAQ에서는 대기 중에서의 2차 오염물질의 생성과 전달과정이 중요하다. 예컨대, 이산화황과 같은 1차 오염물질은 대기 중에서 광화학반응을 통해서 입자크기가 1 μ m 이하의 황산염과 같은 2차 오염물질을 형성하여 지역 간으로 이동하며 오염을 확산하게 된다.

Ⅲ. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향

을 전문가 집단의 검토를 거쳐서 반영한다 ; (1) 기체-기체/기체-액체의 화학적 반응에 기초한 질산염의 형성과 무기질 질산염 형성 모듈, (2) 생명체에서 기원한 2차 유기적 에어로졸²²⁾ 형성 모듈, (3) 산성도에 영향을 미치는 황산염²³⁾의 비선형²⁴⁾ 민감도를 설명하는 구름 내에서의 황산염 형성작용, (4) 에어로졸 전구물질로서 옥시던트(oxidants)²⁵⁾

22) PM은 미국에서 주요 관심사로 다루어지고 있다. 미대륙 위를 덮는 미세 에어로졸의 가장 큰 화학적 조성은 동부에서는 황산염, 태평양 북서부에서는 탄소를 함유한 에어로졸, 남부 캘리포니아에서는 질산염이다. 탄소를 포함하는 에어로졸을 유기에어로졸(organic aerosol)이라고 하는데, PM의 상위 세 가지 구성 요소 중 하나이다. 따라서 미국의 대기오염 제어 전략은 탄소를 함유한 유기에어로졸의 대기 중 농도를 감소시키는 것이다. 유기에어로졸은 생명체에 의해 형성된 유기탄소(organic carbon, OC)와 원소탄소(elemental carbon, EC)로 구성된다. EC는 직접적으로 배출되는 반면 OC는 1차 유기탄소와 대기 중에서 형성되는 2차 유기탄소 형태로 존재한다. 생물에서 유래한 탄화수소(biogenic hydrocarbons)로부터의 2차 유기에어로졸의 형성은 지구상의 식물로부터 이루어진다.

23) SO_x로 표시되는 황산화물에는 아황산가스(SO₂), 3산화황(SO₃), 아황산(H₂SO₃), 황산(H₂SO₄), 그리고 황산동(CuSO₄), 황산칼슘(CaSO₄), 황산마그네슘(MgSO₄) 등의 황산염 등이 포함되나 배기가스 내에서는 주로 아황산가스, 삼산화황 형태가 주를 이루며 그중 아황산가스가 대부분이므로 배기가스 실측에 있어서는 아황산가스를 주로 하고 있다. 대기오염 측면에서는 광화학반응이나 촉매반응에 의하여 다른 오염물질과 반응하여 삼산화황, 황산, 기타 황산염 등의 2차 오염물질을 형성하며 대기의 습도가 높을 때는 물과 반응하여 아황산이나 황산방울 등의 에어로졸을 생성시킨다.

24) 뉴턴의 운동방정식과 같이 물체의 초기 조건(위치와 속도)을 알고 있으면 궤도를 구할 수 있는 경우를 선형계라고 하고, 초기 조건을 알아도 궤도를 구할 수 없는 경우를 비선형계라고 한다. 대표적인 비선형계로는 날씨가 있으며, 일기예보가 어려운 이유는 바로 비선형계이기 때문이다

25) 질소산화물과 탄화수소가 빛에너지에 의해 반응하여 생기는 강산성 물질. 자동차 배기가스로 인하여 대기 속에 함유된 탄화수소·질소산화물이 태양광선, 특히 자외선의 작용에 의해서 반응을 일으켜 생긴 원자상의 산소·오존, 또한 이들을 매개로 하여 생긴 과산화물 등과 같이 산화성이 강한 물질을 뜻한다. 옥시던트의 생성은 광흡수성이 강한 이산화질소가 420 nm 이하의 빛을 흡수하여 일산화질소와 원자상 산소(O)로 분해되고, 이어서 이 산소가 대기 속의 산소(O₂)와 반응하여 오존(O₃)이 되거나 탄화수소가 빛의 작용에 의해 공기 속의 산소와 반응하여 과산화물로 변화하고, 다시 분해하여 오존이 된다고 한다. 대기 속의 옥시던트는 대기 속의 아황산가스와 습기가 반응하여 생기는 아황산을 산화시켜 황산을 만들기 때문에 광화학 스모그·황산 미스트의 원인이 된다고 한다. 옥시던트에 관해서는 1940년경부터 미국 로스앤젤레스에서 연구가 이루어져, 생성과정이 밝혀졌다. 옥시던트에는 식물의 잎을 마르게 하거나 사람의 눈·목구멍 등을 자극하는 물질을 함유하여, 대기 속의 함유량 0.1 ppm이면 눈에 자극을 느끼고, 0.03 ppm으로 8시간 발생하면

의 분석을 통하여 오존농도를 측정하는 시뮬레이션 기법인 Carbon-bond Mechanism IV(CB-IV)²⁶⁾의 업데이트.

CMAQ는 매년 매일 매시의 상태를 시뮬레이션 하므로, 모델링 지역과 시뮬레이션 기간과 관련있는 정보를 포함하고 있는 다양한 입력 자료들을 필요로 한다. 미국 지역을 격자별로 구분해 놓은 각각의 셀 값에 입력해야 할 데이터들은 오염 농도의 값들을 포함해야 하는데, 그 값들은 모델링을 시작할 때의 값과 모델링 지역별로 구체적인 값들이 포함되어야 한다. 이 값들은 총체적인 화학적 모델링을 통해서 얻을 수 있다. 아래에서 논의하듯이, 우리는 2001 기준 년도와 매 미래 년도 시나리오간의 대기중²⁷⁾의 비율 예측을 최초로 결정함으로써, 상대적인 비율로써 모델링 예측을 사용한다. 대기중의 상대적 비율값들은 대기중 산정값과 결합하여 미래의 시나리오 분석에 사용된다. 이 값은 편익 분석을 위한 도구인 C-R 함수(Concentration-Response Functions)²⁸⁾의 투입 요소로 사용된다.

2.1.1. 모델링 지역과 시뮬레이션 기간

모델링 지역은 48개 주를 포함하는 전국(동경 126도에서 서경 66도까지 그리고 북위 24도에서 52도까지)이고, 격자칸(크기 36km, 총 14 × 16,576개)으로 알려진 정사각형 블록으로 나누어져 있다. CMAQ에 의한 시뮬레이션 기간은 1년을 완전히 적용하며, 5개년도의 배출 시나리오 각각에 모두 적용하였다.

어떤 종류의 식물도 말라 죽는다. 옥시던트는 요오드화칼륨을 산화시키는 방법에 의해 측정된다.

26) 오존전구물질 배출량을 통해서 오존농도의 민감도를 분석하는 기법.

27) 대기중이란 대기오염원의 종류로써, 대기오염 기여도가 높고 대부분의 공정에서 배출되는 대기오염물질 3종(먼지, SO₂, NO_x)을 종산정(배출량)기준 오염물질로 한다.

28) 대기질 오염원의 농도와 질병 발생 간의 역학적 연구를 통한 예측값을 산출하는 함수.

Ⅲ. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향

2.1.2. 모델링 투입요소

CMAQ는 모델링 지역과 시뮬레이션 기간에 따른 정보를 포함하고 있는 다양한 투입 파일들을 필요로 하는데, 격자별로 시간당 배출 예상치, 기상학적 자료, 최초 및 지역적 조건들이 투입파일에 포함된다. 전국의 2001년 조건들을 반영하는 기상학적 투입요소는 Mesoscale Model 버전 5(MM5)²⁹⁾로부터 추출되었다. 바람 요소(속도와 방향), 기온, 습도, 수직적 확산률(diffusion rates), 강우를 등이 여기에 해당한다. 격자칸 내의 측면 경계선과 시작 지점에서의 오염종의 농도값은 Goddard Earth Observing System-Atmospheric Chemistry Model(GEOS-CHEM)³⁰⁾에 의하고, 측면 경계선 오염종 농도는 높이와 시간(매 3시간)과 함께 변한다. 지형과 토지에 관한 정보는 10km 해상도를 지닌 지질학 검색 데이터베이스로부터 구하였고, CMAQ 적용을 위하여 대략 36km 수평적 해상도로 확대 적용하였다.

2.1.3. CMAQ 모델 평가

CMAQ 모델링 시스템의 능력을 평가하기 위하여, 암모늄, 질산염, 황산염으로의 침적현상과 PM_{2.5}를 형성하는 데 관련된 대기 중의 요소들에 대한 작업수행평가를 실시하였다. 이 평가는 원칙적으로 모델에 관한 통계적 평가값과 실제 측정된 데이터값에 의한다. 측정값들은 실측된 표본 기간에 따라 일 또는 주 단위로 시간값과 공간값을

29) MM5는 기상학적 자료입력을 통해서 기상 변화에 대한 민감도 분석을 위해 사용하는 모델이다. 예컨대, 태풍의 예측도는 모형의 격자간격, 물리 과정에 따라 강도는 물론 진로도 민감하게 반응하며, 태풍의 진로 및 강도는 모형의 물리과정에 상당히 민감하게 나타난다.

30) NASA에 의한 기상학 관찰자료를 바탕으로 전지구적인 기후와 대기 연구에 관한 3차원 입체 모델링 기법이다. 미래의 기후와 대기 순환에 관한 모델링기법으로 하버드 대학의 대기화학모델링 그룹에 의해서 운영되고 있다.

각각 반영한다. 계절별 평균과 연 평균 예측치와 측정값이 지역별로 함께 제시되어 모델링 수행능력에 대한 평가를 할 수 있게 된다. 황산염과 질산염에 관하여 공간적 분석이 수행되어, 이 모델링 기법을 통한 예측이 얼마나 실측값과 차이를 가지는가에 대해 분석하게 된다.

PM_{2.5}를 구성하는 오염종을 위하여, CMAQ 모델 평가는 Clean Air Status and Trends Network(CASTNet)³¹⁾에서 측정한 값과 Speciation Trend Network(STN)으로부터 측정한 값과 모델링한 값과의 비교를 통해서 평가하게 된다. CASTNet은 2001년에 총 79개 장소(동부 56, 서부 23)에서 황산염과 총 질산염 데이터를 측정하였다. CASTNet 데이터는 주간 평균 데이터로 수집·보고되며, 일주일 동안 대기를 표본 추출하여 데이터가 수집된다. 황산염 데이터는 안정적인 혼합물 상태이므로 휘발성이다. 그러나 CASTNet에 의해 수집된 질산염 미립자 농도 데이터는 휘발성을 가지고 있으므로, 측정 기간에 따라 값이 달라지는 문제점을 가지고 있다. 그러므로 CASTNet은 총 질산염을 측정하여 보고한다. 그것은 질산염 미립자와 질산의 총량을 측정하게 되면 질산미립자의 휘발성으로 인한 데이터로의 결함을 막을 수 있게 되어 측정값에 신뢰성을 줄 수 있게 된다. 즉, 총 질산염 측정방법이 이 표본채집의 문제점에 의해 영향을 받지 않기 때문에, 그것은 훨씬 더 신뢰할만한 측정방법으로 고려되고 있다. 그러므로, 우리는 이 평가에서 질산염 미립자 데이터를 사용하는 것이 아니라 총 질산염 데이터를 사용할 것을 선택한다.

EPA Speciation Network(ESPN)은 1999년에 도시 지역에서 대표 장소들의 경향 평가를 위하여 전국적으로 일치하는(동일한) 분화된 PM_{2.5} 데이터를 제공하기 위하여 작동하기 시작하였다. STN은 황산염, 질산염, 암모니아, 카본을 포함하는 PM_{2.5} 구성물질과 질량(mass) 농도를

31) 산성화를 유도하는 화학물질을 측정하는 기관으로, 이 기관에서는 건성 침적물(dry deposition)을 측정한다.

III. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향

보고한다. 대부분의 STN 장소들은 데이터를 3일 마다 1번씩 수집한다. 2001년 분석에서 CMAQ 예측은 133 STN 장소(동부 105, 서부 28)에서 측정된 값들과 다른 것으로 평가되었다.

Interagency Monitoring of PROtected Visual Environment(IMPROVE)는 EPA, 연방 국토관리청들, 주 대기 행정청들 간의 협력적 가시도 모니터링 운동이다. 데이터는 주로 국립공원들, 국립야생지역들, 기타 보호받는 원시지역들과 같이 전국에 있는 Class I 지역³²⁾에서 수집된다. 대략 134곳(서부 86, 동부 48)의 청정지역들에서 2001년에 PM_{2.5}에 관련된 완벽한 연간 데이터를 측정했다. IMPROVE 데이터는 3일마다 한번씩 수집된다.

CMAQ 수행을 평가하기 위하여 IMPROVE, CASTNet, STN, ESPN 등을 통하여 확보된 수치들을 Fractional Bias와 Fractional Error라는 통계기법을 사용하였다.

$$FBIAS = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(Pred_{x,t}^i - Obs_{x,t}^i)}{(Pred_{x,t}^i + Obs_{x,t}^i)} \times 100$$

FBIAS는 유용한 모델 수행 표시기이다. 이것은 예측값과 실제값의 평균을 기준으로, 예측값과 실제값의 차이를 나타내는 것으로 그 값은 이론적으로 극단의 과소평가와 극단의 과대평가의 값인 -200에서 200의 값을 가질수 있으며, 0의 값에 가까울수록 모델링이 정확하다고 평가할 수 있다. 0의 값을 기준으로 음의 값과 양의 값이 편향(Bias)을 나타내는 것이 된다.

32) 연방정부는 전국을 다음과 같이 구분해서 오염물질의 배출 정도를 각각 다르게 적용하고 있다.

- Class I : 국립공원, 국립해안, 자연야생지역 등 청정지역으로 구분된 곳(156개의 국립공원과 야생서식지)
- Class II : 어느 정도의 환경 악화가 용납되는 곳으로 별도의 지정이 없는 한 대부분의 지역은 Class II에 속함
- Class III : 중공업지대로 특별히 지정된 곳

$$FERROR = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Pred_{x,t}^i - Obs_{x,t}^i|}{(Pred_{x,t}^i + Obs_{x,t}^i)} \times 100$$

Fractional Error는 0의 값에 가까울수록 모델링이 정확하다고 평가할 수 있다.

현재 PM2.5 모델 수행의 정확성을 판단하기 위해 공통적으로 허용되는 수행 기준은 존재하지 않는다. 그러나, 모델링 수행 정도는 대기질 모델링에 있어서 예측값과 실제값과의 비교에 의해 판단될 수 있다. 이러한 측면에서, 우리는 우리의 CMAQ 2001 모델 수행 결과를 다른 그룹들에 의한 최근의 다른 지역적 PM2.5 모델 적용에서 발견된 수행의 범위와 비교하였다. 이러한 모델링 연구는 다양한 모델들, 모델 구성(configuration), 지역, 장기간(몇년) 및 /또는 일시적, 화학적 메카니즘, 그리고 에어로졸 모듈 등을 커버하는 광범위한 모델링 분석 범위를 나타낸다. Fractional Bias와 Fractional Error는 2001년 연중 그리고 계절별 예측값과 실제값들을 사용하여 계산되었다. 질산염과 황산염은 CAIR와 가장 관련있는 두 오염종이다. 오염 농도가 동부에서 최고로 높을 때(즉, 여름에는 황산염, 겨울에는 질산염), 여름에 황산염의 Fractional Bias는 3%에서 14%의 값을 가지며, Fractional Error는 22%에서 44%의 값을 나타낸다. 겨울의 질산염의 Fractional Bias는 15%에서 21%의 값을 가지며, Fractional Error는 73%에서 92%의 값을 나타낸다. 아래 [표 3-1]은 이를 요약하고 있다.³³⁾ 이 결과 CMAQ는 미래 년도의 PM2.5 농도에서 변화를 계획하는데 있어서 그리고 배출 감소로 인한 결과인 건강/경제적 편익을 계획하는데 있어서 사용하기에 적절하다고 고려된다.

33) EPA 보고서, Table 3-5, 3-12.

Ⅲ. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향

[표 3-1] CMAQ 2001년 시뮬레이션을 통한 선택적 수행 평가

동 부		CMAQ 2001	
		Fractional Bias(%)	Fractional Error(%)
황산염(여름)	STN	14	44
	IMPROVE	10	42
	CASTnet	3	22
질산염(겨울)	STN	15	73
	IMPROVE	21	92

2.1.4. CMAQ 산출을 편익투입으로 전환하기

CMAQ는 모든 격자칸에서 시간당 PM 종류들 농도에 관한 예측을 산출한다. 오염원들은 크기에 따라서 1차적으로 대략적 분류(2.5에서 10 마이크론 크기 범위 내에 있는 PM)와 세밀한 분류(지름 2.5 마이크론 이하의 PM)를 하며, 그리고 2차적으로 종류에 따라 황산염, 질산염, 유기질들로 분류한다. PM_{2.5}는 1차적 정밀 분류의 총량과 모든 2차적으로 형성된 미립자들로 계산된다. PM_{2.5}의 미래년도 예측값은 2002년 대기 PM_{2.5}와 PM_{2.5} 오염원 농도에 적용된 상대적 감소 요소들(Relative Reduction Factors, RRFs)을 사용하여 계산되었다. 대기 PM_{2.5} 농도의 격자화된 값은 Federal Reference Monitor 대기 데이터와 IMPROVE 대기 데이터의 추정값을 산출하였다. PM_{2.5} 오염원 농도에 대한 격자화된 값은 ESPN의 대기 데이터와 IMPROVE의 대기 데이터의 추정값을 통해서 산출되었으며, CMAQ 36km 격자에 맞게 수정되었다.

RRFs를 결정하기 위한 절차들은 EPA의 PM_{2.5} 기준(EPA, 2000)을 모델화하기 위한 지침초안에 있는 것들과 유사하다. 이 지침은 광범위한 전문가 심사를 거쳤고 올해(2005년) 최종적으로 결정될 것이라 예상된다. 모델 예측에 있어서 각 주요 PM_{2.5} 오염원들 내에서 발생할

것으로 여겨지는 변화를 평가하는데 사용할 것을 이 지침은 권고한다. 미래 년도 PM_{2.5} 값을 계산하기 위한 절차는 Speciated Modeled Attainment Test(SMAT)³⁴⁾라고 불리어 진다. EPA는 CAIR의 배출 통계의 대기에 관한 영향을 평가하기 위하여 이 절차를 사용하였다. SMAT 방법론은 다음의 PM_{2.5} 오염원 구성 요소들을 사용한다: 황산염, 질산염, 암모늄, 유기탄소, 원소탄소, 지각(crustal), 물, 그리고 0.5 ug/m³의 고정값을 가지는 blank 질량³⁵⁾. 각각의 격자칸에 PM_{2.5}를 구성하는 오염원들 질량은 예측값들로 계산한다.

편익 계산에 투입하기 위한 값으로 미래의 PM_{2.5} 농도값을 알아내기 위하여, 우리는 기준년도인 2001년 모델링 시나리오와 미래 년도 시나리오를 이용하는 SMAT 절차를 적용하였다. SMAT 절차를 적용하여, CMAQ의 산출값들은 SAS 통계기법을 사용하여, 대기질에 따른 건강 편익분석을 위한 모델링 기법인 Environmental Benefits Mapping and Analysis Program(BenMAP)³⁶⁾ 투입값으로 변환된다.

SMAT 절차는 미래의 오염기준 미달성 지역들과 바람을 받아들이는 지역들에 대하여 오염원의 대기이동에 관한 분석에 적용가능하다. SMAT 절차들은 다음의 예외 조항이 적용된다 : 1) 편익분석은 모델링 지역에 있는 모든 격자칸들을 커버하는(전 국토를 커버하는) 중간값들의 PM_{2.5} 데이터를 사용한다. 반면에 미달성지역 분석은 측정된 PM_{2.5} 데이터(오염원들 데이터만이 중간값을 사용함)를 사용하여 동부에 있는 각 각의 대기 모니터링 지역에서 수행된다. 2) 편익분석은 2002년 단

34) EPA는 PM_{2.5}의 미래치 농도를 측정하기 위해서 시뮬레이션 결과로 인한 산출값과 모니터링을 통한 측정값을 결합하는 일련의 지침을 설정하고 있다. 그러한 지침에 따른 일련의 절차들을 SMAT라고 하며, 2001년에 최초로 규정되었고, 2004년에 다시 최종 CAIR을 적용하도록 업데이트 되었다.

35) 화학에서 질소의 농도를 구할 때 사용하는 방법으로 흡광도에서 바탕실험 Blank 값을 빼주어서 구한다.

36) EPA에서 개발한 대기질 변화에 따른 건강편익분석을 위한 모델링 기법으로 대기오염에 미치는 영향을 경제적 가치로 평가할 때 사용한다.

Ⅲ. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향

일 년도로부터의 보정된 PM_{2.5} 데이터에 의해 고정된다. 반면에 미달 성지역 분석은 각 모니터링 지역의 5년간(1999-2003년) 평균 PM_{2.5} 설계가치(Design Value)³⁷⁾를 사용한다.

2.1.5. PM 측정을 위한 CMAQ 모델링 결과

2010년과 2015년 기준 사례들을 위한 예상 PM_{2.5} 농도와 CAIR을 적용했을 때의 변화된 값을 [표 3-2]에서 나타내고 있다.³⁸⁾ 이 표는 기준 농도와 통제 농도 간의 평균 변화값을 나타내고 있으며, 동부(경도 100도의 동쪽)와 서부(경도 100도의 서쪽)에 있는 모든 모델 격자칸들의 평균 연간 평균(mean) 농도를 나타내고 있다. 우리는 또한 기준선 수준과 더 많은 인구 밀집 지역을 위하여 예견된 변화를 더 잘 반영하기 위해 인구에 가중치를 둔 평균값을 사용한다. 인구밀집 지역인 동부 격자칸들의 PM_{2.5} 평균 연간 평균 농도는 2010년에는 7.1%와 2015년에는 8.7% 감소한다. 인구 가중치를 둔 평균 농도는 2010년에는 8.1% 그리고 2015년에는 9.8% 감소하고, 이 변화는 더 가중치를 두지 않은 값에 비해 더 크게 나타나고 있다. 이것은 CAIR의 적용으로 인해서 인구가 더 밀집된 도시 지역들에서 훨씬 더 절대적 대기질 향상을 창출한다는 것을 나타낸다. 즉, [표 3-2]는 향상된 PM 대기질을 경험하게 될 2010년과 2015년 인구에 관한 정보를 제공하며, CAIR의 적용으로부터 연간 PM_{2.5} 농도 평균의 감소는 인구밀집지역에서 훨씬 더 효과가 크다는 것을 나타낸다. 2015년에는, 동부 37개 주 모델링 지역에 위치한 인구의 약 63%가 0.5 ug/m³ 이상의 감소를 경험할 것으로 예상된다. 이것은 2010년의 54%보다 증가한 것이다. 더욱이, 이 인구 가운데 40% 이상이 1 ug/m³ 이상의 연간 평균 PM_{2.5} 농

37) Design Value란 EPA에서 사용하는 것으로, 대기상태가 얼마나 좋은지 나쁜지의 수준을 결정하기 위해 특정지역을 모니터링한 값이다.

38) EPA 보고서, Table 3-6, 3-15.

도에서 감소로부터 편익을 얻게 될 것이다. 그리고 약 23%가 1.5 ug/m3이상 감소된 지역에서 살게 될 것이다. [표 2-2]에서 변화값은 CAIR을 적용 했을 때의 통제값 - 기준값으로 정의된다. 변화값이 음의 값으로 산출되었으므로, CAIR를 적용 했을 때의 PM2.5 값이 더 작다는 의미를 가지므로, 대기질 향상 결과를 나타내게 된다.

[표 3-2] 기준 사례 PM 대기질과 CAIR로 인한 변화에 관한 개요:
2010년과 2015년

		2010			2015		
지역	PM _{2.5} (ug/m ³)	기준값	변화값	변화율	기준값	변화값	변화율
동부	연평균	10.36	-0.73	-7.1	10.28	-0.89	-8.7
	인구 가중치 연평균	11.91	-0.96	-8.1	11.79	-1.15	-9.8
서부	연평균	6.04	-0.02	-0.3	6.07	-0.03	-0.5
	인구 가중치 연평균	12.38	-0.01	-0.1	12.50	-0.01	-0.1

* 연평균값은 전국의 격자셀을 평균한 값이다.

2.2. 오존 대기질 평가

CAMx는 오일러 3차 입체 광화학적 대기질 모델링 기법으로, 오존 형성에 영향을 미치는 대기에서의 광화학적 반응을 시뮬레이션 하여, 3차원 모델에서는 오염입자뿐 아니라 박스와 박스간에 일어나는 공기의 흐름을 알아야 하고 그러한 것들을 투입요소로 하여 기상모델을 예측하며 각각의 결과와 연계한다. CAMx 3.1버전은 시간과 공간적인 변수를 동시에 고려하면서 오염 배출에 있어서의 반응정도의 차이를 고려하기 때문에, 오존 농도 규제에 관한 영향을 분석하는 데 있어서 유용하다. 5개의 시나리오를 동부에 적용하는 모델링 기법을 사용한다: 2001년 기준값, 2010년과 2015년의 예측값들과 규제를 적용했을

Ⅲ. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향

때의 예측값들로 구성된다. 이 모델링을 통한 결과값은 전적으로 편익분석에만 사용된다.

CAMx 모델링 기법은 모델링 지역과 시뮬레이션 기간별 정보를 포함하고 있는 다양한 투입파일을 필요로 한다. 이 파일들은 공간 및 시간에 관한 구체적인 배출 예측치와 기상학적 데이터, 시작 및 경계 조건 그리고 대지의 용도에 관한 정보에 관한 것들을 포함한다. 동부 지역에 적용해 볼 때, 이 모델링 기법은 각각의 지역을 여러 개의 칸으로 분리하고, 대기의 조건에 따라 몇 개의 계층으로 다시 분리한다. 관찰하여 측정된 오존 농도값을 CAMx에 정규화시켜서 예측치로 전환시킴으로써 2010년과 2015년의 결과값을 산출한다. 오존을 측정하지 않은 지역에 대해서는 그 주변 지역에서 측정한 값들의 중간값을 사용하여 추정한다. 이러한 과정을 마친 후에, 오존농도에 따른 건강과 복지에 관한 함수에 관한 변수값으로 작성하여 편익분석을 할 수 있게 한다.

2.2.1. 모델링 지역과 시뮬레이션 기간

동부 해안으로부터 텍사스 중부까지의 동부 대부분이 모델링 지역이다(서경 99도부터 67도까지 그리고 북위 26도부터 47도까지). 편익분석을 위하여, CAMx 모델링 기간은 대기중 오존농도의 최고치에 도달한 시기를 포함한다. 시뮬레이션 기간에 포함되는 것은 대기질 모델링의 투입요소로 사용된 날들의 기상학적 자료가 해당된다. 1995년 여름에 6월 12일에서 24일, 7월 5일에서 15일, 8월 7일에서 21일의 자료를 사용하여 1995년 기준값, 2001년 기준값, 2010년 기준값 및 통제값, 2015년 기준값 및 통제값을 산출하였다.

2.2.2. 비배출 모델링 투입요소

기상학적 데이터(바람, 온도, 대기의 수직적 혼합)가 CAMx에의 필수투입요소이다. 이 모델링은 오염수준이 최상일 때의 값을 전제로 하며, 모델링 주변지역을 분석 대상으로 한다. 초기 조건들은 상대적으로 깨끗한 상태임을 가정하며, 위 세 기간의 모델링과 광범위한 지역을 전제조건으로 하였다.

2.2.3. 오존 측정을 위한 모델 수행

CAMx 모델에 대한 수행능력 평가는 CAIR 이전인 1995년에 행해졌다. 이 분석에서는 모델링의 통계값은 4개로 분리된 동부지역을 기반으로 해서 계산되며, 여러 곳의 추가 지역들도 고려대상이 된다. 기준연도 모델링 시뮬레이션의 전체적인 정확도를 측정하기 위해서 다음의 세 가지 통계측정기법이 사용되었다: i) Mean Normalized Bias는 매시간당 모델링 예측값과 정규화시킨 관찰값들의 차이에 대한 평균값을 나타낸다. ii) Mean Normalized Gross Error는 매시간당 모델링 예측값과 정규화시킨 관찰값들의 차이에 대한 평균값의 절대값을 나타낸다. iii) Average Accuracy of the Peak는 일일 모델링의 최고 예측값과 정규화시킨 최대 관찰값들의 차이에 대한 평균값을 나타낸다.

일반적으로 이 모델링 기법은 관찰된 오존값을 약간 과소측정하는 경향이 있다. Mean Normalized Bias는 -1.1%이며, Mean Normalized Gross Error는 20.5%이다. [표 3-3] 에서 보듯이, 모델링값은 관찰값보다 예측값이 적게 산출되어서, 6월과 7월에는 음의 값이 나왔지만, 8월에는 예측값이 관찰값보다 더 크게 나타났다.³⁹⁾

39) EPA 보고서, Table 3-8, 3-19.

Ⅲ. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향

[표 3-3] 동부지역의 시간당 오존량에 대한 CAMx 시뮬레이션 결과 : 1995년 기준사례

Episode	Average Accuracy of the Peak	Mean Normalized Bias	Mean Normalized Gross Error
1995년 6월	-7.3	-8.8	19.6
1995년 7월	-3.3	-5.0	19.1
1995년 8월	9.6	8.6	23.3

이 모델링기법은 상대적으로 완전한 것이어서, 그 이전에 EPA에 의해 실시된 다른 여타의 모델링 기법보다 bias와 error가 적어서 유용하다. 그러므로 이 모델링 기법은 미래의 오존 농도에 관한 변화를 예측하는데 있어서 적절한 기법이며 오염배출량 감소로 인한 건강 및 경제적 편익분석에 있어서도 적당하다.

2.2.4. CAMx 산출을 편익분석을 위한 연(年) profile로 전환하기

이 연구는 매시간별 평균 오존 농도값을 보유하고 있는 CAMx 파일에서 자료를 가지고 와서, 격자셀의 지상층 오존농도를 분석한다. 이 값들과 Aerometric Information Retrieval System, AIRS)⁴⁰⁾에서 관찰한 오존 농도값과 함께 오존기간⁴¹⁾동안의 오존농도를 측정한다. 미래 기준 사례로부터 미래 통제 시나리오까지 발생하는 오존 농도에 있어서 예상 변화는 BenMAP에 투입으로 된다.

전국의 오존과 관련한 건강과 복지 영향을 측정하기 위해서는, BenMAP에 투입될 연간 오존 데이터가 필요하다. 이용가능한 오존 측

40) 대기 오염에 관계있는 모든 자료를 저장하는 데이터베이스 시스템.

41) 이번 연구의 오존기간은 일반적으로 5월에서 9월(5개월)까지 961곳에서 아침 8시부터 저녁 8시 사이에 최소한 9시간 이상 관찰한 오존값을 반영한다. 그러나 특정 농작물 생산에 관한 편익을 측정하는 데에는 그 기간을 5개월로 한정하지 않고 확장하였다.

정값을 가지고, 2 단계로 48개 주의 각 지역에 관한 연간 오존에 관련된 프로필을 산출한다. 1 단계는, 가로 세로 8Km의 인구 격자셀들⁴²⁾ 가운데 하나의 격자에 시간당 오존 농도를 산입하기 위하여 오존 관측치와 모델화된 오존 예상치를 결합. 2 단계는, 이러한 1년간 시간당 오존 프로필을 하루 평균 오존값으로 전환.

2.2.5. 오존 측정을 위한 CAMx 모델링 결과

CAMx모델로부터 도출된 예상 대기오존 농도의 개요를 아래 [표 3-4]을 통하여 알 수 있다.⁴³⁾ [표 3-4]는 동부지역을 격자화해서 그 격자셀 내의 오존값을 건강편익에 관한 함수값으로 산출한다. 인구가중치 평균은 인구 집중이 훨씬 더 심한 지역들을 위한 기준값과 예상변화를 반영하는데, 이 방법은 예상 변화의 잠재적 편익을 이 인구에의 노출 변화를 통하여 더 잘 반영할 것이다. 표에서 나타난 바와 같이, 2015년으로 갈수록 건강편익 Endpoints가 증가하는 것을 알 수 있다.

[표 3-4] CAIR 적용을 통한 건강편익 Endpoints를 위하여 인구가중치를 적용한 CAMx 모델링 결과 : 동부

인구가중치 적용한 평균(Daily)	2010			2015		
	기준값	변화값	변화율	기준값	변화값	변화율
1시간 최대농도	51.82	-0.50	-1.0%	50.77	-1.36	-2.7%
8시간 최대농도	42.59	-0.39	-1.0%	41.84	-1.05	-2.5%
12시간 최대농도	40.09	-0.37	-1.0%	39.41	-0.97	-2.5%
24시간 최대농도	30.15	-0.27	-1.0%	29.73	-0.67	-2.3%

42) 8 km 정사각형 격자는 건강편익분석모델인 BenMAP에서 사용된 인구 데이터를 가지고 있다. EPA 보고서, 3-21 n. 5.

43) EPA 보고서, Table 3-9, 3-22.

III. 오염물질배출과 대기질에 미치는 영향

- * 이러한 오존 측정은 공간과 시간적 Voronoi Neighbor Averaging의 결과에 기초한 건강 영향평가에서 사용하기 위하여 CAMx 격자셀 수준에서 계산된다. 24시간 평균을 제외하고, 이러한 오존 측정은 오존 시즌의 낮시간 동안 계산된다. 8시간 평균은 오전 9시부터 오후 5시까지, 12시간 평균은 오전 8시부터 오후 8시까지 측정.
- * 변화는 통제값 - 기준값이다. 퍼센트 변화는 기준값으로 변화를 나눈 후 퍼센트로 전환하기 위하여 100을 곱한 것이다.
- * 예상 CAMx 격자셀 인구와 예상 CAMx 격자셀 시즌 오존 농도를 합한 후 총인구수로 나누어 계산.

2.3. 가시도 저하 측정

가시도 저하는 대기 중에서 빛의 전달률이 감소하는 것을 의미한다. 기체와 미세입자에 의해 빛의 산란과 흡수가 발생하여 빛의 전달이 감소하는 것이다. 가시도 변화를 측정하기 위해서는 1996년 시슬러의 연구(Sisler, 1996)에 기반을 둔 거리에 따라서 감소하는 빛의 총감소량을 의미하는 광소멸계수를 사용한다. 광소멸계수는 미세입자와 기체에 의한 빛의 산란과 흡수를 나타내며, 큰입자에 비해 미세입자가 가시도 저하에 더 위력적이라는 사실을 설명한다. 이러한 미세입자의 종류에는 황산염, 질산염, 유기탄소, 원소탄소가 있으며 토양에서 나오는 미세입자도 포함한다. 광소멸계수를 바탕으로 하여, deciview라고 하는 가시도 측정지수를 계산하였다. deciview의 초기값은 0이며, deciview의 값이 올라갈수록 시정은 떨어진다. 일반인들은 1 deciview의 증감 정도를 시각적으로 인지한다.

EPA 보고서 Table 3-10은 CAIR를 적용한 Class I 지역에서의 가시도가 높아지는 것을 보여주고 있다.⁴⁴⁾ 표에서 나타나듯이, Great Smokey

44) EPA 보고서, Table 3-10, 3-23~24.

Mountain과 Shenandoah 국립공원을 포함한 동부지역의 대부분의 공원들은 CAIR을 적용했을 때, 가시도가 개선될 것이다. 2015년에 가시도가 최악인 날들(전체 측정 일수 가운데 20%)에 대하여 Great Smokey Mountain은 2.5 deciview(9%), Shenandoah 국립공원은 3.3 deciview(12%)의 개선이 이루어지게 된다. 일반적인 태양광의 조건에서 가시도의 개선을 거리로 환산한다면 Great Smokey Mountain은 7마일, Shenandoah 국립공원은 10 마일 이상 시정거리가 좋아지는 것이다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

1. 개요

CAIR이 건강과 복지에 미치는 영향과 사회에 대한 금전화된 편익에 관한 EPA의 분석을 여기서 다룬다. 이를 위해 EPA는 새로운 오염물질에 관한 주요 통제 규율들의 편익과 비용을 평가하기 위하여 대통령령(E.O.) 12,866을 준수하여야 한다. 그 결과, EPA의 분석은 (1) NO_x와 SO₂를 포함하는 PM에 대한 전구물질의 감소로 인한 대기질 상태 변화의 건강과 복지효과는 무엇인가? (2) 최종 CAIR에 따라 이러한 효과에 있어서의 변화의 금전적 가치는 얼마인가? (3) 금전화된 편익은 비용과 어떻게 비교할 것인가?와 같은 물음에 응답하려고 한다.

EPA는 Nonroad Diesel Engines Tier 4 Standards⁴⁵⁾와 청정하늘법안(proposed Clear Skies Act of 2003)에 의해 수행된 편익분석과 전반적으로 일치하는 방법을 사용하여 분석한다. 편익분석은 다음과 같은 세 가지 주요 모델링 요소들에 의존한다 : 1) PM에 대한 전구물질, 특히 NO_x와 SO₂의 전국적 목록에 기초한 배출상한과 거래 프로그램의 적용을 추정하는 EGU_s에 대한 CAIR 영향의 계산. 2) 배출기준치와 통제후의 배출목록을 반영하여 오존과 PM의 대기농도변화를 결정하기 위하여 2010년과 2015년에서의 대기질 모델링. 3) 모델화된 기준들을 위한 다양한 오염물질들의 예상 대기농도 변화로부터 결과하는 물리적 영향과 금전적 가치 모두에 있어서 인간 건강과 복지에서의 변화를 결정하기 위한 편익분석.

EGU_s로부터 발생하는 NO_x와 SO₂의 배출과 그로 인한 오존과 PM의 농도에의 영향은 인간의 건강과 복지에 광범위한 영향을 미친다. PM_{2.5}는 장기적 노출(만성)과 단기적 노출(급성)과 결부된 조기사망을

45) 선박, 철도, 항공기, 농기계, 건설장비와 같은 비도로 디젤엔진에서 발생하는 NO_x와 PM_{2.5} 오염물질은 EPA에 의해서 1차적으로 규제되고 있는 대상이다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

에서 사망률에 이르기까지 인간의 건강에 대한 잠재적 효과를 가진다 (예: 병원입원을 초래하는 호흡기 및 심장질환증상, 천식악화, 급만성 기관지염). 오존에의 노출은 학교 결석을 초래하는 병원입원과 질병을 포함하는 다양한 호흡기 질병에 결부되어 있다. 최근의 95개 도시지역 분석 등(Bell, 2004) 몇몇 연구는 단기 오존 노출이 조기사망률과 관련되었다고 한다.⁴⁶⁾ PM과 잠재적으로 관련된 복지효과는 물질에 손상을 가하며 가시도를 저하시키는 것이고, 오존은 농산물 산출량과 산림을 감소시킴으로써 농업과 산림부문에 악영향을 미친다. 비록 이러한 인간의 건강과 복지 범주 가운데 많은 것들과 관련된 편익을 계량화하는 방법들이 존재하기는 하지만, 방법과/ 또는 데이터의 한계로 인하여 이 분석에서 모든 것을 평가할 수는 없다. 아래 [표 4-1]에서는 2010년과 2015년 2년간 CAIR을 적용했을 때의 연간 금전화된 건강과 복지편익을 개괄적으로 나타내고 있다.⁴⁷⁾

[표 4-1] 최종 CAIR의 예상 금전편익

	총편익(10억 1999\$)	
	2010	2015
3% 할인을 적용	\$73.3 + B	\$101 + B
7% 할인을 적용	\$62.6 + B	\$86.3 + B

* B는 계량화되지 않은 편익을 나타냄.

46) 오존에 대한 단기노출의 경우 또한 조기사망률과 관련있다. EPA는 최근 오존과 조기사망률간의 관계를 조사한 관련 자료 및 연구들을 평가하였는데, 평가방법으로는 메타분석(meta analysis)을 사용하였다. EPA는 1차적으로 편익분석하는 데 있어서, 오존치사율을 고려할 것이다. 참고로 메타분석이란 양적 문헌연구의 대표적인 방법으로, 비슷한 주제(가설)에 대한 여러 연구들(주로 실험연구들)을 종합하고 비교하여 그 주제(가설)에 대한 종합적 결론을 내기 위해 사용하는 통계적 방법이다. 일반적으로 비슷한 주제를 연구한다고 해도 각 개별 연구들이 완전히 동일한 조건(독립변수나 트리트먼트의 스케일, 또는 샘플의 수 등 등)에서 수행될 수 없기 때문에 단순히 각 개별 연구들의 결과를 종합·비교해서 결론을 내린다면 편향(bias)이 발생할 수 있다. 그래서, 각 개별 연구들에서 나온 결과들을 표준화시킨 후, 종합·비교할 필요가 있으며 이러한 통계적 분석을 말한다.

47) EPA 보고서, Table 4-1, 4-2.

[표 4-2]는 오존 및 PM과 관련된 건강과 복지효과의 모든 요소들을 거론하고 1차적 평가를 위하여 계량화되는 건강과 복지효과와 계량화할 수 없는 건강과 복지효과를 나타낸다.⁴⁸⁾

[표 4-2] 최종 CAIR에 의해 영향받는 오염물질들의 인간 건강과 복지에 대한 효과

오염 물질 /효과	기준평가에 있어서 계량화·금전화 효과	민감도 분석에 있어서 계량화와/또는 금전화 효과	비계량화 효과 - 다음 경우들에 있어서의 변화
오존/ 건강	병원입원 : 천식으로인한 응급실 입원 활동일수 제한 학교 결석 일수	조기사망율 : 오존에 단기간 노출 천식 발병 심장 응급실 방문 급성 호흡질환 증상	만성 호흡기 손상 폐의 조기 노화 천식 이외의 호흡기 응급실 방문 자외선에의 노출 증가
오존/ 복지	실외노동자 생산성저하		상업적 산림, 과일과 채소, 그 밖의 상업 및 비상업적 곡물의 생산성 도시 장식용 식물에 대한 손상 손상된 산림미(美)로 인한 레크리에이션 수요 생태계 기능 자외선에의 노출 증가
PM/ 건강	동시출생 집단연구에 기초한 조기사망율 만성 및 급성 기관지염 호흡기 및 심장질환으로 인한 병원 입원	단기노출에 의한 조기사망율 중기(Subchronic) 기관지염 사례들	낮은 출생아 몸무게 폐기능 만성기관지염 이외의 만성 호흡기 질환들 천식 이외의 호흡기 응급실

48) EPA 보고서, Table 4-2, 4-3~6.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

오염 물질 /효과	기준평가에 있어서 계량화 · 금전화 효과	민감도 분석에 있어서 계량화와/또는 금전화 효과	비계량화 효과 - 다음 경우들에 있어서의 변화
PM/ 건강	천식으로 인한 응급실 방문 비치명적 심장 발작 호흡기관련 질병 활동일수제한 근무 일수 손실 천식악화(천식인구) 호흡기질병증상(천식인구) 유아사망		방문 자외선 노출
오존/ 복지	남동부지역 국립공원의 가시도	북동부 및 중서부 지역 국립공원의 가시도 가정(家庭)의 오염화	서부지역 국립공원의 가시도 거주지역과 국립공원 이외 지역의 가시도 자외선노출
질산염, 황산염, 침적물 /복지			산화 황산염과 질산염 침적물로 인한 상업용 산림 산화침적물로 인한 상업용 민물낚시 산화침적물로 인한 토양생태 계에서의 레크리에이션 질산염침적으로 인한 상업용 낚시, 농업, 산림 생태계 기능 비활성 수정(passive fertilization)
SO2/ 건강			호흡기 및 심장질환으로 인한 병원입원 천식에 포함되는 호흡기 증상

오염 물질 /효과	기준평가에 있어서 계량화·금전화 효과	민감도 분석에 있어서 계량화와/또는 금전화 효과	비계량화 효과 - 다음 경우들에 있어서의 변화
NOx/ 건강			폐염증 호흡기 감염에 대한 저항의 현저한 감소 호흡기 및 심장질환으로 인한 병원입원
수은/ 건강			신경장애 발생을 학습장애 발생을 발달지연 발생을 잠재적인 심장효과 잠재적인 생식효과
수은 침적 /복지			새와 포유류에 대한 영향 (예, 생식효과) 상업, 생계, 여가용 낚시에 대한 영향

여기서 논의된 편익은 최종 CAIR 프로그램을 위해 예상된 배출변화에 기초한 평가를 한 개의 예외를 가지고서 나타낸다. 이 보고서에서 예측된 편익은 아칸소주를 위하여 SO₂와 연간 NO_x 통제에 다른 배출감소를 포함하기 때문에 약간 과잉기술되고 있다.

2002년 9월 26일, 전국연구협의회(National Research Council, NRC)는 대기오염을 감소하기 위한 조치를 취함으로써 인해 얻을 수 있는 건강상의 편익에 관하여 분석하는 방법론에 대한 검토 보고서를 발표하였다. 이 보고서는 대기 PM의 농도를 줄이기 위한 규제장치로 인한 건강상의 편익을 예측하는 EPA의 접근방법에 포커스를 맞추고 있다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

NRC는 이 보고서에서 EPA가 PM 통제방법들의 건강상 편익을 분석하기 위하여 합리적인 틀을 일반적으로 사용해 오고 있음을 밝히고 있다. 그러나 NRC는 EPA가 자신의 편익분석을 향상시키기 위하여 몇 단계 조치들을 취할 것을 권고하였다. 여기서 사용된 현재의 분석방법은 NRC에서 권고한 i) 1년이 아니라 매 5년과 같이 간격을 두고서 편익을 평가할 것, ii) 공기배출, 대기질, 그리고 건강상의 결과를 위한 예상 기준선 통계를 포함하여, 건강편익을 평가하는 데 있어서 사용된 예상 기준선 통계를 명확히 기술할 것, iii) 적절하다면, 현재 평가가 적용되는 연령대를 확장하고 더 많은 유형의 관련 건강 결과들을 포함하기 위하여 미국 외의 데이터를 사용할 것 등을 반영한다.

이외에 NRC는, EPA가 불확실한 것들에 관한 평가를 예측적 방법과 복합적 원인으로 인한 불확실성 분석을 수행함으로써 자신의 보조분석으로부터 기본분석으로 이동할 것을 권고하였다. 그러나, CAIR을 위하여, 그러한 복합적 불확실성 평가를 위해 이용가능한 한정된 데이터로 인하여, EPA는 기본분석에서의 통계적 오차를 반영하는 불확실성의 원천들을 위한 내용을 제공하는 보조적·예측적 불확실성 분석의 결과만을 요약할 것을 결정하였다. EPA는 예측적 평가는 이용가능한 데이터와 전문가 판단에 기초되어야 한다는 NRC 권고를 따랐다.

NRC는 EPA의 접근방법을 개선하기 위해서 많은 권고를 하였고 EPA에서 편익분석에 사용한 여러 가지 연구들이 일반적으로 합리적 선택이었음을 알게 되었다. 특히, 조기사망편익을 평가하기 위하여 코호트 연구(cohort studies)⁴⁹⁾를 사용하는 EPA 결정에 동의하였다.

49) 코호트법은 예컨대, 병의 원인으로 추측되는 사항을 가지고 있는 집단과 그렇지 않은 집단을 관찰하여, 그것을 가지고 있는 집단에서 그 질병이 많이 발생하는지의 여부를 조사하는 방법이다. 코호트 예측은 대기오염에 장기 노출했을 때의 영향을 조사하기 위해서 고안되었다. 분석역학의 한 예로서 폐암과 그 병인의 가설로서의 흡연과의 관계를 증명하려는 경우를 들 수 있으며, 그 결과 양자 사이의 밀접한 관계가 증명되었다.

또한 NRC는 PM 관련 조기사망률의 평가를 위한 미국암협회(American Cancer Society, ACS) 연구를 EPA가 선택한 것은 합리적이었다고 결론내렸다. NRC가 보고서를 발표한 이후, EPA는 ACS 연구데이터를 다시 분석하는 것을 포함하여 새로운 코호트 연구를 검토해 왔으며, 이 새로운 연구 데이터를 CAIR을 위한 분석적 접근방법을 개발하기 위해서 검토해왔다.

NRC 보고서 이외에, EPA는 개정 CAA § 812의 blueprint⁵⁰⁾를 검토한 EPA Science Advisory Board(SAB)⁵¹⁾ 소속 Health Effect Subgroup(SAB-HES, 2004)으로부터 그리고 규제영향분석을 할 때 사용된 방법들에 관한 계속되는 논의들을 통하여 OMB로부터 PM과 오존 관련 편익분석을 수행하기 위한 방법론에 관한 기술적 지침과 투입을 받아들였고, 최근의 Nonroad Diesel 규칙제정에 관한 협동작업 동안의 발전을 받아들였다. EPA는 최근의 Nonroad Diesel Rule에 대한 규제영향분석을 위한 분석적 접근방법을 개발할 때 NRC, SAB-HES, 그리고 OMB로부터 접수한 많은 코멘트들을 다루었다. 이러한 향상은 또한 최종 CAIR을 위한 여기서의 분석에서도 반영되고 있다.

규제영향분석의 방법들에 관한 OMB의 권고는 규제영향분석을 위해 발생된 편익예측에서의 불확실성을 성격지우기 위하여 사용된 접근방법과 사망률예측을 평가하기 위하여 사용된 접근방법에 초점을 맞추고 있다. EPA는 최근 발생된 건강에 대한 영향과 금전화된 편익예측에 관한 편익 모델링 과정(예 : 배출 모델링, 대기질 모델링, 건강에 대한 영향 사례 평가, 가치평가)에서의 주요요소에 있어서 불확실성의 영향을 규정하는 종합적인 통합전략을 개발하고 있다. 장단기 노출로부터 결과하는 PM 관련 사망률에 관한 평가에서의 불확실성을 성격

50) EPA로 하여금 비용편익분석을 하는데 있어서 따라야 할 일련의 지침.

51) EPA는 경제학, 건강 및 환경과학 등에 있어서의 전문가에게 컨설팅을 의뢰해야 하고, 이에 따라 EPA는 외부전문가들로 이뤄진 조직을 구성하였는바, 이를 SAB라고 하고, 1991년에 조직되었다. 그 후 SAB council로 불렸다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

지우기 위해 고안된 시범적 전문가 도출(Pilot Expert Elicitation, PEE)⁵²⁾프로그램이 바로 최근에 완성되었고, 이것은 동료 전문가 심사를 거친 노력의 결과였다. PEE에 대한 동료전문가 심사는 전반적으로 호의적이었다.

우리는 대기질 모델링에 있어서의 데이터와 방법론의 진전을 반영하였고, 이 분석을 개발함에 있어서 역학적 방법론⁵³⁾과 경제학적 방법론을 반영하였다. CAIR안을 위한 분석 이후 PM_{2.5}와 오존 관련 편익을 측정하는 데 사용된 가정과 방법들에 대한 최신 내용은 아래 각 항목들과 관련하여 다음과 같다.

대기질

- * 대기 PM_{2.5}와 PM_{2.5} 구성종들(component species)을 위하여 CMAQ에 기초한 예측을 사용하였다.
- * 대기 PM_{2.5} 모델링 결과를 개발하기 위하여 업데이트된 SMAT 접근법을 사용. CAIR안 분석을 위하여, 2001년-2002년까지 일시적으로 측정된 PM_{2.5} 모니터 데이터를 사용하였고, 2000년-2002년 설계가치에 기초한 총 PM_{2.5} 질량⁵⁴⁾으로 전환되고, 12km 격자셀 내의 값으로 포획되었다. 시분할방법은 2001 Regional Modeling System for Aerosols and Deposition(REMSAD)⁵⁵⁾ 데이터에 대한 미래

52) PEE는 여러 분야의 전문가들에 의해서 결정되는 기법으로, PM에 대한 노출로 인하여 발생하는 사망을 예측하는 데 있어서 불확실성을 규정하여 경제적 편익분석에 일조하는 기법이다. PEE 프로젝트에 관한 자세한 내용은, EPA 보고서, Appendix B(Supplemental Analyses Addressing Uncertainties in the Benefit Analysis)를 참조할 것.

53) 역학은 인간집단에서 발생·분포하는 질병을 관찰하여 그 질병의 원인을 구명하는 학문으로, 여기서 언급하는 역학적 방법은 분석역학으로서 가설로 설정된 병인으로 추측되는 사항과 질병의 관계를 증명하는 것으로 코호트법을 사용한다.

54) PM_{2.5}내에서는 NH₄, NO₃, SO₄ 등이 포함되어 있으며, 이와 같이 PM_{2.5} 내에 있는 모든 것을 통칭해서 PM_{2.5} 질량이라 한다.

55) 각각의 지역 내의 연무(haze), 미세먼자, 대기중 오염물 및 독성물을 제거하기 위

의 REMSAD의 비율에 기초하고 있으며, REMSAD 모델링은 36km 격자셀 방법을 사용하고 있다. 최종 CAIR에 관한 분석을 위해서, 2001년 CMAQ 산출과 공간적으로 삽입된 모니터 데이터에 대한 미래값에 기초하는 변형된 방법을 사용하였다.

- * CAIR안 분석은 동부 지역에만 국한되었다. 최종규칙 분석을 위하여, PM 편익은 CAIR이 적용되는 동부지역에서 서부지역으로 PM 전구물질이 이동하는 것을 설명하기 위하여 전국을 평가한다. 오존 편익에 대한 평가는 서부지역에서는 오존 형성에 관한 모델을 적용하지 않기 때문에 여전히 동부지역에만 제한적으로 적용된다.

가치평가

- * 1차적 분석과정에서 조기사망률의 감소에 대한 금전화된 편익을 산출함에 있어서, 대기 중 PM2.5에 대한 노출이 변하는 시간과 조기사망률의 감소가 발생할 것으로 예상되는 시간 간의 관계를 분석하기 위해서 20년 단위로 분할하는 방법이 사용될 것이다.

불확실성

- * 감소된 조기사망률의 편익에 관한 1차적 예측에 더하여, 역학적 연구에서 나타나는 표준 오차(standard error)와 같은 통계적 불확실성처럼 예측값의 불확실성을 확률 범위를 사용하여 성격지운다. 최종 CAIR를 위해 산출된 편익예측은 수많은 가정과 불확실성에 의존한다. 예를 들어, 사망률 범주를 위한 1차적 예측에 기초가 되는 핵심 가정들은 다음을 포함한다 :

- 1) 미세입자의 흡입은 조기사망과 인과 관계가 있다. 비록 미세입자가 미치는 효과에 관한 생물학적 메커니즘이 완벽하게 증명되지는 않

한 목적으로 개발된 지역 대기 모델링 시스템.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

았지만, 역학적이고 경험적 증거는 이러한 가정을 뒷받침한다.

- 2) 모든 미세입자는 그 화학적 구성과는 상관없이, 조기사망률을 유발하는데 있어서 동등하게 잠재력을 가진다. 이것은 중요한 가정이다. 왜냐하면, EGUs로부터 배출되어 운반된 전구물질을 통하여 2차적으로 생성된 PM은 자동차 엔진이나 그밖의 산업 오염원에 의해 직접 배출된 PM과는 다르기 때문이다. 그러나, 이렇게 구별되는 미세입자 유형에 의해서 서로 다른 효과를 발생시킨다는 것을 증명하는 과학적 연구방법은 아직 명확하게 정립되어 있지는 않다.
- 3) 미세입자에 대한 C-R 함수관계는 대기질에 존재하는 농도에 의해 선형적인 특징을 갖는다. 그러므로, 그와 관련된 편익에 대한 예측은 PM의 농도를 감소시켜서 얻게 되는 편익으로서, 이것은 미세입자 배출기준을 충족한 지역과 미달성 지역 모두에 영향을 미친다. 즉, 선형적으로 연관되어 있으므로 한 지역의 배출량 감소는 인근지역의 대기질 환경개선에 영향을 주게 된다.
- 4) 미래의 배출과 관련된 대기질에 관한 예측은 효력이 있다. 비록 이러한 것들을 예측하는 것은 매우 어렵지만, 미래 예측을 위한 분석은 동료 전문가 집단에 의한 검토, 최신의 계량평가기법 등에 기초하고 있으므로, 이러한 분석기반에 기초한 결과들은 CAIR을 평가하는데 매우 유용하다.

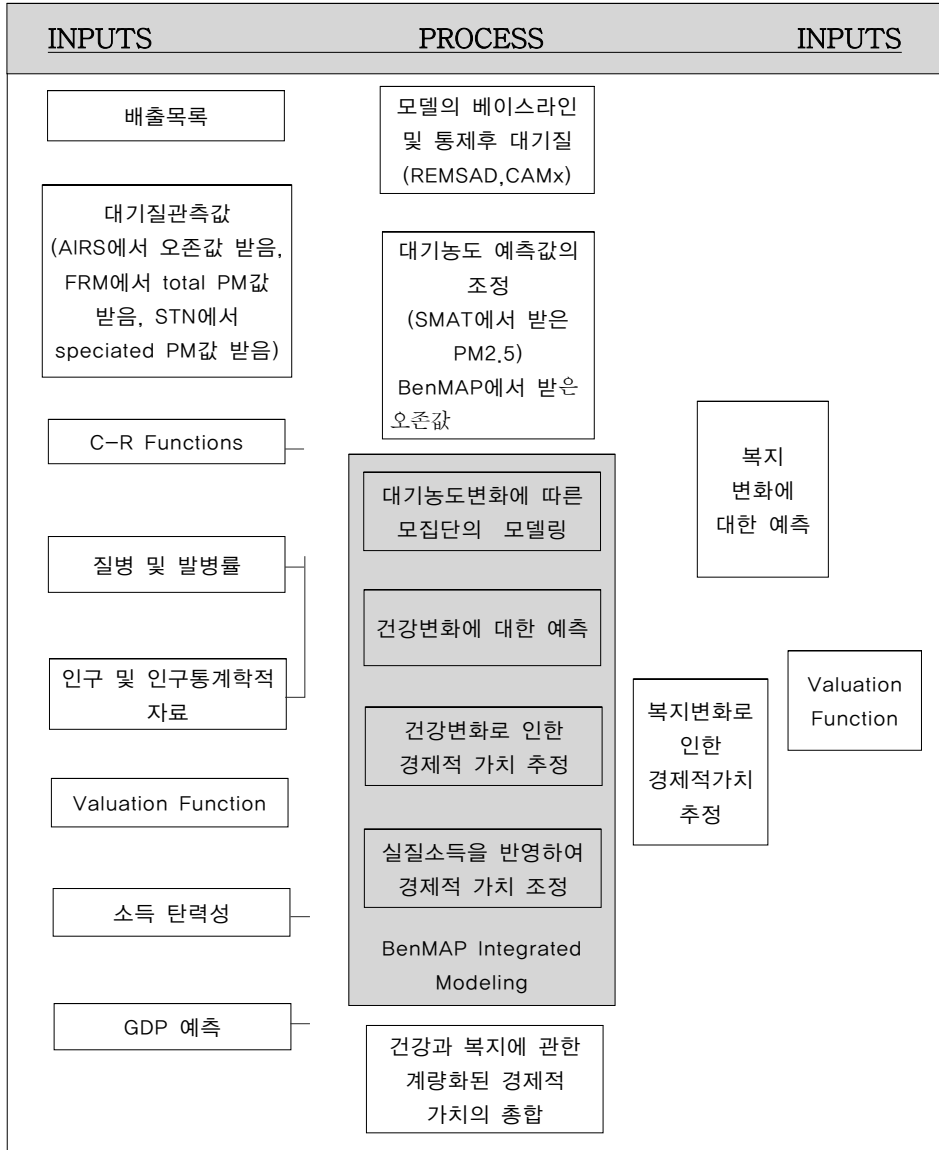
위에서 요약된 계량화되고 금전화된 편익 이외에 수많은 추가적 범주들이 현재 계량화 또는 가치평가될 수 없다. 감소된 산성침적물의 문화유산 등에 대한 손상, 산림생태계에 대한 감소된 오존영향, 호수와 냇물에서의 영향력 감소로 인한 환경상 편익, 연안지역의 부영양화 등이 이러한 범주에 속한다. 이에 더하여, 오존과 PM이 건강에 미치는 영향에 대해서 기존에 알려지거나 의심스러운 많은 것들에 대해

서도 적절한 건강 영향 함수가 이용가능하지 않거나 쉽게 해석될 수 있는 결과를 제공하지 않기 때문에 계량화 할 수 없는 것들이 있다. 그 결과, 1차적 예측을 위해 산출된 금전화된 편익은 최종 규제 옵션으로 인하여 총편익을 과소예측할 수도 있다.

최종 CAIR을 위한 편익예측은 BenMAP 모델링 기법을 사용해서 도출되었다. BenMAP은 EPA에 의해서 개발된 컴퓨터 모델링 기법으로 모델화된 대기농도예측을 건강효과예측과 금전화된 편익예측으로 전환시키기 위하여 이전의 규제영향분석에서 사용된 수많은 모델링 요소들(예 : 삽입함수, 인구예상, 건강영향함수, 가치평가함수, 분석과 풀링(pooling) 방법들)을 통합한다. BenMAP은 오염원이 주는 영향의 중간값과 분산에 대한 예측을 제공한다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

BenMAP의 단계별 내용을 도표화하면 다음과 같다:⁵⁶⁾



[그림 4-1] 대기질 모델링에 기초한 편익분석에 있어서 핵심 단계들

56) EPA 보고서, Figure 4-1, 4-7.

아래 2.에서는 건강과 복지를 계량화하고 가치평가를 위하여 사용된 데이터와 방법들의 개요를 다루고 불확실성을 분석에 어떻게 체화할 것인가를 논의한다. 3.에서는 인간의 건강과 복지에 대한 영향분석결과를 보고한다.

2. 편익분석 - 데이터와 방법들

환경질(대기질, 가시도, 질산염, 황화침적물)에서의 변화를 전제로 하고, 다음 단계는 그러한 변화의 경제적 가치를 결정하는 것이다. 환경질에서의 모델화된 변화의 총편익을 계산하기 위하여 damage-function 접근법⁵⁷⁾을 사용한다. 이 접근법은 개인의 건강과 복지의 endpoints(대기질에서의 변화와 관련될 수 있는 구체적 효과)에서의 변화를 예측하고 개별 가치들을 독립적인 것으로 가정하는 그러한 변화에 대하여 가치를 부여한다. 총편익은 중복되지않는 모든 건강과 복지 endpoints의 가치총합만을 계산한 것이다. 이것은 어떠한 전체적인 우선적 구조를 부과하지도 않고 잠재적 소득 또는 대체 효과(즉, 새로운 endpoint를 추가하는 것은 그밖의 endpoints에서의 변화의 가치를 감소시키지 않을 것이다)를 반영하지도 않는다. Damage function 접근법은 환경에 관련된 대부분의 비용편익분석에 있어 표준적인 접근방법이고, 이 방법을 사용하여 여러 가지 분석결과가 도출되었다(Banzhaf et al., 2002; Levy et al., 2001 ; Levy et al., 1999; Ostro and Chestnut, 1998).

57) 대기배출허용기준 강화로 인한 사회적 편익을 추정할 때, 시장재화의 가치측정 방법과 비시장재화의 가치측정 방법으로 나눌 수 있는데, Damage Function Approach는 비시장재화의 가치측정 방법 중의 하나이다. 시장재화는 실제 시장에서 거래되는 가격정보를 이용할 수 있기 때문에 경제적 가치를 결정하는 데는 상대적으로 용이한 반면 해수욕장 이용이나 해양공원의 이용 등과 같은 비시장재화는 시장에서 거래되는 재화나 서비스가 아니기 때문에 이들 재화에 대한 경제적 가치평가는 비시장재화의 가치평가 방법들을 이용하여야 한다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

Damage-function 틀에서 경제적 가치를 평가하기 위하여, 환경질에서의 변화는 사람 또는 사람이 가치있다고 평가하는 사물들에 관한 효과로 전환되어야 한다. 가시도의 변화에 있어서처럼 몇몇의 경우에는 환경질에서의 변화가 직접적으로 가치평가 되어질 수 있다. 오존과 PM에서의 변화와 같은 그 밖의 경우에는, 대기질 변화를 달리 가치로 환산될 수 있는 효과로 전화하기 위하여 먼저 건강과 복지 영향 분석이 수행되어야 한다.

이 규제영향분석을 위하여, 건강영향분석은 오존과 PM에 관련된 대기수준의 공기오염에 직접적으로 관련되는 그러한 건강효과에 국한된다. 광부의 직업상 건강에 미치는 영향과 같이 배출통제를 집행하는 것과 관련된 간접적 건강영향도 존재할 수 있다. 복지영향분석은 인간복지에 직접적으로 영향을 미치는 환경에서의 변화에 국한된다. 이 분석을 위하여, 가시도에서의 변화의 영향을 검토하기 위한 가능한 데이터에 의해 제한받는다. 그 밖의 환경 및 생태적 효과에서의 변화, 예컨대, 질산염과 황의 토양과 수상 생태계에의 침적에서의 변화의 영향에 관한 질적인 논의를 또한 제공한다. 그러나 이러한 변화들에 대하여 경제적 가치를 환산할 수는 없다.

EPA는 건강에 관련된 데이터와 관련한 결과값이나 이러한 분석을 위한 그 가치를 측정하기 위한 광범위한 새로운 연구를 수행하기에는 시간이나 자원이 부족하다고 처음에 지적하였다. 그래서, 2000년에 Kunzli et al.과 최근 행해진 건강에 대한 영향분석과 유사하게 우리의 예측도 편익이전(benefit transfer)⁵⁸⁾이라고 하는 가능한 최상의 방법론에 기초를 둔다. 편익이전은 측정하기가 쉽지 않으므로, 과학기술적인 방법에 근거하여 측정하고자 하는 목적과 관련이 있는 유사한 자료들

58) 편익에는 어떠한 규제로 인한 직접적 편익이 발생하는 것과 2차적으로 발생하는 편익이전으로 나눌 수 있다. 정책집행의 결과에 대한 가치 추정을 위하여 이미 유사한 상황 하에서 추정된 편익의 평가결과를 활용하는 과정을 편익이전이라 한다.

을 이용하여 편익이전을 측정하여야 한다. 편익의 측정에 있어서의 정확도와 타당성을 고양하기 위하여 환경질 변화수준, 영향을 받은 모집단에 대한 사회통계 및 경제적 특징, 그리고 그밖의 요소들에 대한 조정이 행해진다.

2.1. 가치평가(Valuation) 개념⁵⁹⁾

건강에 미치는 영향을 가치평가하는 데 있어서, 대기오염농도의 감소는 적은 양으로도 많은 사람들의 미래 건강을 해치는 위험을 일반적으로 낮추는 것을 우리는 지적하였다. 규제를 하기에 앞서 위험에서의 변화를 위하여 기꺼이 지불하려는 의사(Willingness to Pay, WTP)⁶⁰⁾가 적절한 경제적 측정방법이다. 가치의 측정수단으로 WTP를 채택하는 것은 환경질 개선의 가치는 영향을 받는 사람들 중에서 개인의 선호도에 달려있고 소득(지불할 수 있는 능력)의 현재 분배가 적절하다는 것을 암시한다. 병원에 입원하는 경우와 같은 몇몇 건강영향에는, WTP 평가는 일반적으로 이용가능하지 않다. 이러한 경우에는 치료 또는 증상 경감 비용을 편익의 측정수단으로 사용한다. 이러한 질병비용(Cost of Illness, COI)⁶¹⁾에측은 건강영향의 위험에 있어서 감

59) 환경재의 총가치는 문제의 재화를 현재의 상태로 유지하거나 보존하는데 있어서 개인들이 지불할 의사가 있는 총액을 의미한다. 즉, 환경재의 총가치 = 사용가치 + 비사용가치 이다.

60) 여러 상품들에 있어서, 지불의사는 실제 시장에서의 거래를 조사함으로써 얻을 수 있다. 예컨대, 1갤론의 물이 1달러에 시장에서 거래된다고 할 때, 최소한 사람들이 1갤론의 물을 구입할 때 지불하는 최소비용은 1달러가 될 것이다. 그런데, 시장에서 거래되지 않는 상품, 예컨대 대부분의 환경의 상품 가치에 대해서는 지불의사를 측정하기가 곤란한 것이 사실이다. 그러나, 사람들의 선호 및 행동을 조사하여 그것의 가치를 유추할 수 있다. 예컨대, 친환경 세제 혹은 오토바이 헬멧 등과 같이 환경적 영향에 비슷한 효과 및 위험감소 효과를 주는 상품에 소비자들이 기꺼이 지불하는 가격을 조사해서 2차적으로 알아낼 수 있다. 이러한 조사방법을 통하여 환경 개선에 대한 지불의사액을 알아낼 수 있게 된다. WTP는 편익을 측정하는 수단으로 많이 사용된다.

61) COI는 보건경제학에 자주 사용되는 방법의 하나로 질병치료를 위해 포기한 소득과 치료비용(의사진료비, 병원비, 투약 및 다른 처치료 포함)을 합계하여 산출한다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

소의 진정한 가치를 일반적으로 저평가한다. 왜냐하면 회피된 통증과 건강효과로부터 겪는 것의 가치를 포함하지 않기 때문이다(Harrington and Portney, 1987 ; Berger et al, 1987).

환경 편익 추정에 있어서 하나 특이한 점은 사용가치⁶²⁾와 비사용가치⁶³⁾의 구별이다. 사용가치는 환경이 개인의 편익에 직접적으로 영향을 미치는 환경의 질에 관한 측면이다. 생산물가격, 질, 이용도에서의 변화; 야외 레크리에이션과 환경미의 질에서의 변화 ; 건강 또는 기대수명에 있어서의 변화 ; 환경의 질 변화의 부정적 영향을 회피하기 위하여 취해진 조치의 비용 등이 개인의 편익에 직접적으로 영향을 미치는 것이다. 비사용가치는 환경 편익을 직접적으로 향유하는 것과 관련되지는 않지만 현존 및 유물 가치와 관련될 수 있는 것에 개인이 기꺼이 지불하려고 하는 것들이다. 비사용가치는 시장에서 직접 또는 간접적으로 거래되지 않는다. 이러한 이유로, 비시장가치를 측정하는 것은 사용가치를 측정하는 것보다 훨씬 어렵다. CAIR에 의해 야기된 대기질 변화는 사용가치와 비사용가치 모두에 변화를 일으키지만, 금전적 편익예측은 거의 사용가치에만 국한된다.

환경질 변화로 인한 경제적 편익은 시장에서 거래되지 않는다. 따라서 직접적인 가치측정 방법은 사용될 수 없다. 이 분석에 고려된 endpoints 를 위한 가치를 개발하기 위하여 사용된 세 가지 주요 비시장 가치평가방법이 존재한다 : 선호도 기술법((stated preference) 또는

COI는 전문가에 의해 감정된 비용이 아니라 사람들이 실제 지출한 액수를 관찰하여 측정한다. 만일 개인들이 치료에 소요되는 전비용을 부담하고 있다면 이는 완전한 건강을 회복하기 위해 적어도 이러한 치료비용(포기한 소득을 포함하여)을 지불할 의사가 있다는 것을 입증한다. 따라서 COI는 최소한 지불의사액의 하한치(lower bound)를 측정할 수 있다.

62) 사용가치는 환경의 실제적인 사용으로부터 얻어지는 가치이다. 예컨대, 국립공원의 이용에 따른 사용가치는 종종 여행비용법에 의해 측정되는데 이는 국립공원과 보완관계에 있는 공원까지의 여행서비스의 구매 또는 여행회수로 측정한다.

63) 비사용가치는 사람들이 환경(또는 자연자원)의 현재의 사용과 독립적으로 이루지는 자원의 가치로서 사용가치 이상으로 더 지불할 의사가 있는 액수를 말한다.

contingent valuation, CV))⁶⁴, 간접적 시장법(예, 헤도닉 임금 hedonic wage)⁶⁵, 회피된 비용법(avoided cost method).

선호도 기술법 또는 CV법은 직접적인 접근방법이다. 이 방법은 샘플 집단에게 환경질에서의 변화에 상응하게 얼마만큼 보상되어야 하는가를 묻는 매우 정교한 조사를 사용하여 환경재화에 부여된 가치를 추정한다. CV법에 의한 기존의 과학적 연구 및 자료들은 많이 존재하며, CV법은 대기질 규제의 편익을 추정하는데 있어서 유용한 방법이다. CV법은 사망위험감소, 사소한 질병위험의 감소, 가시도의 증가 등에 대해서 가치측정을 할 수 있다.

간접적 시장접근법은 관련된 시장에서 개인들이 행한 실제적인 선택의 자료들을 사용하여 환경재에 부여한 가치들을 추론하는 방법이

64) 조건부 가치평가법(CV)은 직접 응답자에게 환경재의 가치를 진술하도록 하는 것으로 1970년 중반 본격적으로 이용되기 시작한 이후 환경재의 가치평가에 가장 널리 이용되는 방법이다. CV의 절차는 다음과 같다 :

① 설문 시나리오 작성: 문제의 환경재에 대한 가상적인 시장을 세우고 설문 시나리오를 작성함.

→ 예를 들어 도시의 대기질을 개선하는 정책을 수립하여 응답자들에게 이러한 정책이 구체적으로 어떠한 효과를 줄 것인지를 설명함(호흡기 관련 질병, 사망, 암 위험의 감소, 가시거리확보 등).

→ 대기질 개선을 위해서는 추가적인 기금의 필요성을 설명하고 어떤 수단(재산세, 소득세, 환경세 등)을 사용하여 대기질 개선의 비용을 마련할 것인지를 기술함. 설문에 지불의사액을 질문하는 내용을 포함함.

② 설문 실시 : 직접 면담방식

③ 평균WTP(지불의사금액) 산출

④ 평균WTP를 해당 인구수에 곱하여 환경질 개선의 총편익(총WTP)를 산출함(미래가치는 적절한 할인율적용).

65) 헤도닉기법이란 어느 재화의 가치를 유용한 특성들의 집합으로서 설명하고자 하는 방법으로, 어떤 재화의 개별특성의 가치는 그 특성이 변화할 때 사람들의 지불의사액이 어떻게 변화하는지를 관찰함으로써 평가하는 기법이다. 헤도닉 임금기법은 월임금수준의 결정을 분석하는 방법으로, 헤도닉가격함수의 변수를 직종의 위험특성(치사율, 발병율 등) 및 직업적 특성(주 근로시간 및 직종)등을 설정하여 임금결정에 있어서 위험 및 환경에 대한 영향을 반영한다. 헤도닉 임금이론에 따르면 근로자는 보다 좋은 조건의 일자리를 선택하는 경우 그에 따른 보상비용으로 일정한 임금손실을 감내하는 것으로 가정되며, 이에 따라 보상적 임금격차가 발생하는 것으로 설명한다(Borjas, G., Labor Economics, (1996, McGraw-Hill)).

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

다. 이러한 방법으로 오염의 감소로 인한 편익을 추정할 수 있다. 간접적 시장접근법을 통해서 Value of Statistical Life(VSL)⁶⁶⁾을 알아내는 것이 중요하다.

간접적 시장법도 오염감소의 편익을 추정하기 위하여 사용될 수 있다. 우리 분석에서 이 기법의 가장 중요한 적용은 사망률위험의 감소로부터의 편익을 예측하는데 사용되는 VSL에 관한 계산이다. 죽음의 확률에서의 변화가 직접적으로 교환되는 어떠한 시장도 존재하지 않는다. 그러나, 사람들은 죽음의 위험에서의 변화와 관련된 직업, 사전 예방적 행동, 그 밖의 활동들에 관한 결정을 한다. 이러한 위험변화와 사람들의 선택에 관한 그 밖의 특성들을 검토함으로써, 사망률 위험에서의 변화와 관련된 금전적 가치에 관한 정보를 추정할 수 있다.

회피된 비용법은 오염에 따른 손상을 복구하기 위하여 필요한 지출을 함으로써 발생하는 오염에 따른 비용을 예측하는 것으로 환경질 개선에 따른 비용/편익을 측정하는 기법이다. 예컨대, 만약 PM이 증가함에 따라서 건물을 깨끗하게 청소하거나 자주 페인트칠을 하는 경우를 생각해 보자. PM이 증가하면 건물청소 및 페인트칠을 더욱 자주 해서 비용이 증가하게 되고, PM이 감소하게 되면 건물청소 및 페인트칠 횟수는 줄어들어 비용이 줄어들게 된다. 이런 방식으로 위험회피지출액의 증가(또는 감소)로 후생 손실(증가)을 측정하는 방법이다.

66) 오염규제정책의 결과물로 발생한 조기사망의 위험도의 감소는 구체적으로 사망 인원의 감소로 이어지며 그 때의 인원수를 통계적 생명이라 하며, 이때의 편익을 계량화시키는 수단으로 사용하는 것이 VSL이다. 따라서 VSL이란, 개인의 관점에서 사망확률이 100%인 경우의 지불의사액(WTP)을 말한다. 일반적으로 VSL은 사망확률을 감소시키는 특정 재화를 상정하여 그에 대한 지불의사액을 조사한 후 통계적 기법을 통해 도출해 낸다. VSL은 개개인의 생명가치를 직접 평가하는 것이 아니라 사망확률의 작은 변화에 대한 지불의사액으로부터 도출된 값이다. 예컨대, 만일 10,000명의 사람들이 1/10,000의 사망 리스크를 줄이기 위해 각각 500달러씩 지불할 의사가 있다면, 이때 VSL은 500달러에 10,000을 곱한 5백만 달러가 된다. 노화준, 환경부문 규제영향분석의 방법과 사례연구(2005. 12), 48면.

2.2. 국민소득의 성장에 따른 WTP의 증가

여기서의 분석은 시간에 따른 실질소득증가의 예상치에 관한 것이다. 실질소득이 증가함에 따라서, 환경보호와 같은 대부분의 재화를 위한 WTP가 증가할 것이라고 한다. 정확한 가치를 측정하는 데 있어서 불확실성은 존재하지만, 소득의 증가에 따라서 건강위험감소를 위한 WTP가 증가한다는 실증적 증거가 있다. 그러므로 실질소득이 증가함에 따라서 환경개선에 대한 WTP는 증가한다. 여러 가지 분석에서는 WTP에 대한 소득 탄력도에 대해서 단위탄력적⁶⁷⁾이라고 전제한 후 편익분석을 하지만, 실측자료에 의하면 소득탄력도는 1보다 작아서 비탄력적이다. 그러므로 실질소득의 증가에 따라서 WTP도 증가하지만, WTP는 실질소득의 증가액수보다 적게 증가한다.

EPA는 아래 방법들을 사용하여 소득증가를 반영하는 가치평가예측을 조정하고 있다. 소득탄력성에 기초하여 건강 편익의 가치평가를 국내 예상 실질소득 증가에 따라 상향 조정하였다. 시계열연구로부터 도출된 소득탄력도의 측정값의 감소분에 직면하여, 횡단분석(cross sectional analysis)으로부터 도출된 측정값을 적용하였다.⁶⁸⁾ 1990년과 2010년과

67) 탄력도가 1보다 작으면 비탄력적, 탄력도가 1보다 큰 것을 탄력적이라 하며, 탄력도가 1인 것을 단위탄력적이라고 한다. 즉, 실질소득이 10% 증가하면 환경에 따른 지불의사비용도 10% 증가하는 것을 단위탄력적이라고 한다.

68) 시계열분석이란 시간의 경과에 따른 어떤 변수의 변화 경향을 분석하여 그것을 토대로 미래의 상태를 예측하려는 방법이다. 즉, 시간을 독립변수로 하여 과거로부터 현재에 이르는 변화를 분석함으로써 미래를 예측하려는 동태적인 분석방식이다. 따라서 시계열분석은 동일시점에서 여러 사례를 비교분석하는 정태적 방법인 횡단분석과는 반대되는 분석방법이다. 시계열분석은 과거의 변화경향에 관한 계량적인 분석을 토대로 미래를 추정하는 방식이므로 예측의 객관적인 준거를 제시한다. 시계열분석은 변화경향이 명료하고 비교적 안정적이며 이에 관한 자료들이 축적되어 있을 때 활용할 수 있는 예측방법이다. 그러므로 미래를 예측하는데 있어서, 실질소득의 증가분의 반영값은 변화하며 시계열분석방법을 통한 예측값의 분석은 실질소득증가분을 충분히 반영하지 못하므로, 이를 보완하기 위해서 정태적 방법인 횡단분석방법을 사용한다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

2015년 사이의 실질 소득 증가를 위한 WTP를 설명하기 위한 절차에 대한 개요는 아래와 같다.

보고된 소득탄력도는 건강에 미치는 효과의 심각성이 실질소득과 WTP의 변화 간 관계 강도를 결정하는 주요 원인이라고 한다. 그래서, 건강에 미치는 경미한 효과, 건강에 미치는 심각하고 만성적인 효과, 그리고 조기 사망률에 WTP를 맞추기 위하여 서로 다른 탄력도 예측을 사용한다. 건강에 대한 효과의 중대성의 정도가 실질소득에 따른 WTP의 변화 정도에 주요한 영향을 미친다. 즉, 중대하게 건강에 영향을 미치는 경우에는 소득탄력도를 더 큰 값으로 적용하고, 사소한 질병같은 경우에는 소득탄력도를 작은 값으로 적용한다. 가시도의 경우에도 높은 소득탄력도를 적용한다. 아래 [표 4-3]은 2010년과 2015년의 편익측정을 위해 사용된 소득탄력도를 나타내고 있다.⁶⁹⁾

[표 4-3] 예상 실질 소득 증가 계산을 위해 사용된 소득탄력도

편익의 유형	탄력도 측정
사소한 건강상의 효과	0.14
심각하고 만성적인 건강상의 효과	0.45
조기사망률	0.40
가시도	0.90

탄력도 평가에 더하여, 1990년부터 2010년과 2015년까지의 실질 GDP와 인구변화를 예측하여 1인당 실질소득의 증가를 편익에 반영해야 한다. 배출과 편익 모델링의 일관성을 위하여, 통계청 평가에 기초하여 1990년부터 1999년까지의 전국인구평가를 사용하였다. 이 때의 인구예측방법은 1990년 인구통계에서 적용된 코호트 기법을 적용하였

69) EPA 보고서, Table 4-3, 4-18.

다. 2010년과 2015년의 인구예측은 2000년 통계청 인구예측치를 적용하여 예측하였다. 1990년에서 2010의 실질 GDP의 예측은 Kleckner and Neumann(1999)의 방법을 이용하였고, 2010년에서 2015년의 실질 GDP의 예측은 Standard and Poor's(2000)의 방법을 이용하였다.

위의 Kleckner and Neumann과 인구와 소득에서의 방법을 사용하여, 각각의 탄력도에 따른 WTP 조정계수(adjustment factors)를 계산하였고, 조기사망률의 경우는 소득조정계수를 사용하였다. 그러나, COI와 소득과의 관계를 나타내는 데이터의 부족과 평균임금의 예상증가치의 데이터 부족으로 인해서, COI 접근법에 기초한 편익 또는 근로상실일⁷⁰⁾과 근로자 생산성에 대한 조정은 행해지지 않았다. 실질소득의 증가는 질병비용의 상승(의료에 종사하는 사람들의 임금이 상승하기 때문), 근로상실일의 비용증가, 상실된 근로자 생산성(만약 근로자 임금이 높아지면, 감소된 근로자 생산성으로부터의 손실 또한 높아지게 될 것이라는 것을 반영하는)을 초래하게 될 것이기 때문에 이 추정은 미래에 편익을 과소예측하게 한다. 조정계수의 예측치는 다음 [표 4-4]에서 나타내고 있다.⁷¹⁾

[표 4-4] 예상 실질소득 증가 예측을 위해 사용된 조정계수들

편익범주	2010	2015
경미한 건강상의 효과	1.034	1.073
심각하고 만성적인 건강상의 효과	1.113	1.254
조기사망률	1.100	1.222
가시도	1.239	1.581

70) 임금이 올라가면, 여가는 임금의 기회비용이므로 일을 하지 않고 쉬는 날의 가치 또한 상승한다.

71) EPA 보고서, Table 4-4, 4-19.

2.3. 불확실성을 기술하기 위한 방법들⁷²⁾

매개변수와 여러 가지 모델에서 도출하는 투입요소를 사용하는 복잡한 분석에서는 많은 불확실성 근원들이 존재할 수 있다. BenMAP 모델링을 위한 많은 투입요소들⁷³⁾이 최종 편익의 예측치를 도출하기 위하여 사용되었다. 이들 투입요소는 편익분석에 있어서 각각의 역할에 따라 불확실성을 가지고 있을 수 있으므로, 최종적으로 도출된 편익분석 예측치에 큰 영향을 미칠 수 있다. 예컨대, 배출예측은 분석의 첫 단계에서 사용된다. 그래서 배출예측에 있어서의 모든 불확실성은 전체 분석 단계에 영향을 미치게 된다. 나중 단계에서 불확실성과 결합할 때, 배출 수준에서의 적은 불확실성이 총편익에 커다란 영향을 초래할 수 있다.

편익분석의 각 단계에서의 불확실성의 핵심 근원들은 다음과 같다:

- * 과학적 데이터와 조사에 있어서의 간격
- * 연구계획과 통계학적 모델링에 있어서의 차이를 통해 도입된 역학적 효과예측과 같은 예측된 관계에서의 가변성
- * 인구증가율과 변수들의 특징과 예상에 있어서의 오류
- * PM_{2.5}가 이용가능하지 않아 PM₁₀을 사용하는 것과 같은 대리변수의 사용, 배제된 변수, 복합함수의 단순화를 포함하여 모델 구조의 구체화 실패로 인한 오류
- * 누락 또는 그 밖의 연구제한으로 인한 편향

72) 불확실성 분석에 있어서의 초점은 이것을 어떻게 계량화할 수 있는가의 문제이며, 이것을 계산하여 정책결정자들이 올바른 결론을 내릴 수 있도록 정보를 제공하는데 있다.

73) 배출목록, 대기질모델에서의 매개변수 및 투입요소,역학적 방법에 의한 건강효과 예측값, WTP예측값 및 COI 예측값, 인구 예측값, 소득예측값 등.

다음 [표 4-5]에 편익분석에서의 핵심 불확실성에 관한 개요가 기술되어 있다.⁷⁴⁾

[표 4-5] 편익분석에 있어서 불확실성의 주요 근원들

<p>1. Impact 함수⁷⁵⁾와 관련된 불확실성</p> <ul style="list-style-type: none"> - Impact 함수에서 오존이나 PM의 예측값에 대한 가치 - 오염물질의 변화 및 모든 지역에서 많은 오염물질에 대한 단일 Impact 함수 적용 - 현재 Impact 함수와 미래 Impact 함수의 유사성 - 각각의 Impact 함수의 함수형태 수정 - 역학적 조사방법에서 관찰된 오존과 PM 농도의 범위를 넘어서는 효과 예측값의 추정 - Impact 함수를 적용할 때 부분모집단(Subpopulation)에만 적용
<p>2. 오존과 PM 농도와 관련된 불확실성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 통제정책으로 인한 전구물질방출에 있어서의 변화들에 대한 모델의 반응성 - 미래 전구물질방출에 대한 예측 - 대기 질산염 농도의 형성에 대한 화학반응 모델의 정확성 - 시골에서 오존값 관찰측정의 결여로 도시에서 관찰한 오존값을 가지고 추정 - 오존과 PM에 대해서 각각 다른 대기모델 사용으로 인한 한계 - 제한된 날의 오존 측정의 데이터값을 전체적으로 확산 적용함으로써 인한 불확실성 - 모델링을 통한 미세입자 형태의 질산염 예측값과 시골에서 측정된 질산염 관찰값의 비교
<p>3. PM 사망률 위험과 관련된 불확실성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 관찰된 역학적 근거를 기반으로 한 직접적인 생물학적 메커니즘을 지지하는 과학적 연구자료의 부족 - PM 복합체 내부에서 일어나는 화학적 메커니즘이 아직 규명되지 않음 - 연간 다수 노출로 인한 위험과 순간적으로 많이 노출되었을 때의 건강 효과에 대한 범위 - 실제와 비교하여 대기질 PM_{2.5}를 모니터링한 값의 신뢰성 정도

74) EPA 보고서, Table 4-5, 4-21.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

<p>4. 가능한 지연효과(Lagged Effect)와 관련된 불확실성</p> <ul style="list-style-type: none"> - PM과 관련된 장기사망효과는 1년 혹은 그 이상의 시간이 지나서 나타날 수 있음
<p>5. 기준선 발생율과 관련된 불확실성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 몇몇 기준선 발생율은 구체적인 장소를 반영한 것이 아님 - 현재 기준선 발생율은 2015년의 기준선 발생율을 잘 반영하지 못함 - 인구예측이 틀릴 가능성 존재
<p>6. 경제적 가치평가에 관련된 불확실성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 건강과 복지 관련 endpoints의 경제적 가치는 단지 WTP의 추정 중간값임 - WTP 중간값은 소득과 다른 요소들의 차이 등으로 인해서 가치 반영에 있어 오류가 존재할 수 있음
<p>7. 금전화된 편익의 총합에 관련된 불확실성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 건강과 복지 편익에 관한 예측은 Impact 함수만 사용하기 때문에 계량화되지 않고 경제적 가치로 측정되지 않은 편익은 포함되지 않음

EPA의 편익조사방법론에 대한 NRC의 보고서는 EPA가 편익을 측정하는데 있어서 불확실성에 대한 엄격한 계량적 분석을 할 필요성을 강조하였다. 이에 따라, EPA는 건강 및 편익분석을 위한 모델링을 하는데 필요한 주요 요소들에 있어서, 불확실성의 종합적 영향을 특징짓기 위한 포괄적인 방법론에 대한 개발을 시작하였다. 최종 CAIR의 이러한 분석을 위하여, EPA는 모델링 틀을 통하여 한정된 일련의 불확실성의 근원들의 영향을 전하는 Monte Carlo 방법⁷⁵⁾에 기초한 제한

75) 몬테카를로 방법은 컴퓨터를 사용하여 확률적인 문제를 풀기 위해 시뮬레이션에 의하여 문제를 푸는 방법을 말한다. 몬테카를로 시뮬레이션이란 불확실한 상황 하에서의 의사결정을 목적으로 확률적 시스템의 모의실험에 이용되는 절차를 말한다. 몬테카를로 시뮬레이션의 핵심은 모형의 확률요소들에 대한 실험인데 이는 확률적 또는 우연적 결과를 발생시켜 주는 도구를 이용하여 수행된다. 이 도구는 모형에서 가정한 확률분포에 따라 무작위표본추출에 의해서 우연적 결과를 발생시켜 주는데 이용된다. 따라서 몬테카를로 시뮬레이션을 모의적 표본 추출법(simulated sampling technique)이라고도 한다. 우연적 결과 또는 확률적 결과를 발생시켜 주는데 이용되는 도구로는 주사위나 룰렛바퀴(roulett wheel), 복권추첨에 이용되는 숫자공 등이 있으며, 가장 일반적으로 쓰이는 것은 난수(random number)이며 컴퓨터에 의해 발생되는 의사난수(pseudo-random number) 등이 있다. 몬테카를로 시뮬레이션의 시행을 위

된 확률적 시뮬레이션 접근법을 개발하였다. 최종 CAIR을 위하여, EPA는 C-R 함수와 경제적 가치평가 함수에서의 불확실성에 관한 몬테카를로 기법과 민감도 분석(sensitivity analysis)⁷⁶⁾을 통하여 불확실성의 핵심 근원들을 다루었다. 몬테카를로에 의해 산출된 편익의 분배는 투입 파라미터에서의 몇몇 불확실성만을 반영한다는 것이 지적되어야 한다. 배출, 대기질 모델링, 인구, 기준선 영향 효과 발생율과 관련된 불확실성은 CAIR을 위한 편익분배에 제시되지 않는다.

CAIR 분석에서 부분적으로 반영되고 있는 EPA의 불확실성 분석방법의 일 요소는 PM에 대한 장단기 노출로 인한 조기사망률을 예측하기 위하여 사용된 영향예측에 있어서의 불확실성을 성격지우는 전문가가 도출 결과를 사용하는 것이다. 이 전문가 도출은 사망률 영향 함수의 형태(예, 역치와 선형모델들)와 데이터에 대한 구체적 모델의 적합성(예, 사망률 효과 예측에 관한 구체적 퍼센티지를 향한 확신) 모두에서의 불확실성을 평가하는 데에 목표가 두어졌다. 단기간 집중적인 PM 노출로부터 결과하는 조기 사망률을 포획하는 장기 코호트 연구의 가능성과 같은 추가적 쟁점들이 또한 전문가 도출에서 다루어졌다. OMB와 협력하여 EPA는 CAIR를 위한 보조적 불확실성 분석에서 사용되는 하나의 PEE를 완성하였다. 이 실험에서의 경험에 기초하여, EPA는 조기사망률 함수에서의 불확실성에 관한 더욱 확고한 특성을 제공할 완전한 전문가 도출을 2005년에 수행할 계획이다.

금전화된 편익예측을 고려하는데 있어서 유의해야 할 점은 규제영향 분석과정에서 언급된 분석을 실행하는 데에는 많은 한계가 존재한다는

한 절차로는 단계 1, 확률변수의 확률분포를 얻는다. 단계 2, 누적확률분포를 설정한다. 단계 3, 확률변수의 값이나 값의 범위를 나타내기 위해서 적절한 난수의 집합 - 난수의 구간 - 을 할당한다. 단계 4, 무작위표본추출을 이용하여 시뮬레이션실험을 실시한다. 단계 5. 행동방안을 설계·시행하고 통제한다.

76) 미래에 발생할 수 있는 다양한 변동상황이 사업에 어떤 영향을 미치는가를 분석하는 것. 이에 대한 자세한 내용은 김동진, 비용·편익분석(2004, 박영사), 183-201면 참조.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

것이다. 건강과 복지편익분석에 관한 하나의 중요한 한계는 [표 4-1]에 기록된 많은 효과들을 계량화할 수 없다는 것이다. 생태계 기능과 PM과 관련된 물질 손상과 같은 많은 건강과 복지효과를 위하여, 신뢰할 수 있는 Impact 함수와/또는 가치측정 함수는 아직까지 유용하지 않다는 것이다. 일반적으로, 만약 이러한 편익범주들을 금전화할 수 있다면, 비록 그러한 증가의 정도가 매우 불확실하기는 하더라도, 이 분석에서 제시된 편익예측도 증가할 것이다. EPA는 민감도 분석을 통하여 오존과 조기사망율과의 잠재적 관계에 대한 암시를 하고 있다. 계량화되지 못한 편익에 더하여, 계량화할 수 없는 환경적 비용들(비편익)도 존재할 수 있다. 총편익에 관한 예측으로부터 편익과 비편익을 배제하는 것의 순수한 효과는 그 효과의 상대적 중요도에 달려있다.

비록 계량화할 수 없고 금전화할 수 없는 편익들의 중요도를 현재로서는 예측할 수 없다고 하더라도, 그러한 것들의 범주를 구체적으로 설정해 두는 것은 더 발전적인 분석을 위한 논의에 있어서 도움을 줄 것이다. EPA는 금전화될 수 없는 편익범주를 설정하는 것은 공중에게 상당한 가치가 있는 것이라고 믿지만, 그 범주는 계량화되고 금전화될 수 있는 편익범주에 비하여 적을 것이라고 믿는다.

그러나, 추가적 경제적 편익의 가능성을 새로운 연구들이 제시하는 곳에서 하나의 범주가 존재한다. 지난 몇 년간 EPA의 SAB는 오존이 사망율에 영향을 미치는 독립변수라는 충분한 증거가 존재하지 않았으며, 오존과 PM이 함께 영향을 미칠 수 있다는 견해를 피력하였다. 그러나, 가장 최근의 자문에서 SAB는 EPA로 하여금 오존과 사망률 간의 통계적으로 중요한 관련성에 대한 여러 가지 최근 발표에 기초한 오존과 관련한 사망률에 대한 증거를 재고려할 것을 권고하였다. 이러한 SAB의 연구와 권고에 따라서 EPA는 오존과 사망율에 관한 역학적 연구에 대해서 세 개의 독립메타분석을 의뢰하여 완성하였다.

이러한 메타분석들의 발표가 조기사망을 감소의 편익을 포함하는 오존에 대한 편익측정에 관한 과학적 타당성을 매우 고양할 것이라고 EPA는 믿는다. 게다가, 2004년 11월 Journal of the American Medical Association(JAMA)에 게재된 논문도 오존 사망률 영향은 PM 사망률 영향으로부터 독립적으로 계산될 수 있다고 확신하였다. 이러한 새로운 연구에서 발견된 것들과 유사한 영향예측을 사용하여, EPA는 오존으로 인한 조기사망을 편익의 금전적 가치가 실질적일 수 있다고 예측한다. 오존 사망률 편익은 대략 연간 500명의 조기사망자를 감소시키며 CAIR의 편익을 매년 약 30억 달러 증가할 것이라고 EPA는 예측한다.

계량화되지 않고 금전화되지 않은 건강편익범주들에 더하여, [표 4-2]는 CAIR을 위한 금전화된 편익예측으로부터 누락된 수많은 복지 편익범주들을 보여준다. 남동부 지방의 Class I 지역에서 가시도로 인한 편익의 예측값은 이 규칙을 적용하여 경제적 가치로 계량화하고 있다. 가시도와 같이, 건강과 직접 관련이 없는 편익범주를 고려하는 것은 중요하다. 가시도와 관련해서 편익을 측정할 수 있는 것도 있지만, 가시도의 편익을 측정할 수 없는 범주도 존재한다. 예컨대, 북동부와 중서부에 있는 Class I 지역의 가시도의 개선은 측정가능하지만, 가시도의 개선에 금전적 가치를 계량화하는 것은 현재로는 불가능하다. 또한 CAIR이 적용되는 주거지의 가시도 개선을 고대하고 있지만, 경제적 가치로 환산하는 것은 어렵다. 남동부 Class I 지역의 경우, 2015년부터 시작하여 가시도 개선으로 인한 편익은 연간 17억 8천만 달러로 추정된다. 편익을 금전화할 수 없는 이 지역에서의 가시도 편익의 가치도 또한 실질적일 수 있었다. 가시도와 가옥보수비용과 관련된 보충적 분석을 수행하였고, 이러한 편익범주들의 확장된 커버리지 가 오천만 달러 이상의 총편익을 증가시킬 수 있었다.⁷⁷⁾

77) 이에 대한 자세한 내용은, EPA 보고서, Appendix C(Sensitivity Analysis of the Key Parameters in the Benefits Analysis) 참조.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

최근 연구에서 Resources for the Future(RFF)⁷⁸⁾은 Adiriondacks 산에 있는 호수의 40%에서 산성화를 감소시키는 프로그램을 적용하여 자연자원의 개선에 대한 총편익(즉, 사용과 비사용가치의 합)을 예측하였다. 이 연구는 더 많은 평가를 요구하고 있는 반면, CAIR를 위한 산성침적물 감소의 편익은 생태학적 endpoints⁷⁹⁾를 위하여 총금전화된 가치에서 보아 실질적일 수 있었다는 것을 이 연구는 제시한다.

금전화되지 않은 잠재적 편익에 관한 또 다른 영역은 CAIR 지역 내에 있는 습지와 해안의 물을 위하여 CAIR로부터 질산염침적에서의 잠재적 감소와 관련된다. 질산염침적은 습지와 해안의 물에서 부영양화와 수질저하에 기여한다. 그러한 감소의 편익을 금전화할 수는 없지만, Chesapeake Bay Program⁸⁰⁾은 CAIR로부터 발생할 것 같은 감소된 질산염 부하농도를 예측하였다. 대기에서의 질산염침적의 28%가 비를 통해서 Chesapeake Bay에 유입된다. 2004년 1월에 발간된 CAIR안의 질산염침적축소에 기초하여, Chesapeake Bay Program은 Bay에 대한 질산염 부하를 2010년까지 연간 1000만 파운드를 감소시킬 것이라고

78) RFF는 환경, 에너지, 천연자원에 관련하여 경제학과 사회과학에 기반을 두고 연구하는 비영리 조직이며, 세계 최초의 Think Tank이다. 특히 천연자원의 보존과 사용에 관해서 특별히 관심을 가지고 연구하고 있다. RFF는 1955년 설립되었으며, 현재 워싱턴 D.C에 본부를 두고 40 여명의 연구원들이 연구를 수행하고 있다. 이들 대부분은 경제학 박사이지만, 전기공학, 법학, 생태학, 도시공학, 행정학, 공공정책학 전공의 연구원들이 포진하고 있다.

79) 생태학적 편익을 추정함에 있어서는 전체적인 생태시스템의 구조와 기능변화에 대한 가격들을 추정하기는 매우 힘들기 때문에, 개별적인 생태학적 서비스 흐름을 각각 분리하여 그 가치를 평가하고 이 추정치를 합산하는 방법을 사용하고 있다.

80) 미국에서 가장 큰 강의 하구인 Chesapeake Bay는 다양한 생물 및 서식지, 먹이사슬 등을 포함해서 매우 복잡한 생태학적 시스템을 가지고 있다. Chesapeake Bay의 강물은 델라웨어, 메일랜드, 뉴욕, 펜실베이니아, 버지니아, 웨스트버지니아주와 연결되어 있다. 그러므로, Chesapeake Bay가 환경적으로 미국에서 차지하는 영향은 매우 크다. Chesapeake Bay Program은 이곳에 미치는 모든 환경적인 영향을 분석하는 프로그램으로, 오염물질, 수질, 근처토양의 용도, 물속 미생물, 물고기, 가재 등의 모든 업데이트된 정보데이터베이스를 가지고 있으며 오염물질이 미치는 환경영향분석을 위한 모델링을 수행한다.

한다(Sweeney, 2004). 이러한 실질적 질산염 부하 감소는 Chesapeake Bay에 전달된 대기침적물을 연간 8백만 파운드 감소시키려는 EPA의 약속을 충족시키고도 남는 것이다.

2.4. 인구통계학적 예측

계량화되고 금전화된 건강영향은 나이, 지역, 소득을 포함하는 인구의 인구통계학적 성격에 의존한다. 우리는 Woods & Poole Economics, Inc.(WP)⁸¹⁾에서 개발한 경제학적 예측 모델들에 기초한 예측을 사용한다. WP의 데이터베이스는 나이, 성별, 인종에 따라 카운티 차원의 인구예측을 포함한다. 각각의 카운티에서의 인구예측은 경제성장과 이동의 유형들을 고려하기 위하여 동시에 다른 카운티와 함께 결정된다. 카운티 차원의 인구 성장 총합은 통계청의 사전에 결정된 전국 인구 증가에 일치하도록 결정된다. 카운티 차원의 성장 예측의 총합과 전국 차원의 총 성장에 따른 제한은 각각의 카운티를 독립적으로 예측함으로써 도입된 잠재적 오류를 회피한다. 카운티 인구 예측은 다음 4단계로 행해진다 : 첫째, 소득, 고용, 인구와 같은 전국 차원의 변수들이 예측된다. 둘째, 고용에 관한 예측은 경제분석청(Bureau of Economic Analysis, BEA)에 의해서 구분된 172개의 경제지역단위에서 전국적 경제인 광산, 농업, 제조업으로부터의 상품과 같은 비지방적으로 소비된 생산품목들 가운데 산업부문별 생산을 연결하는 것에 의존하는 수출을 기본으로 하는 접근법을 사용하여 행해진다. 셋째, 각각의 경제적 지역 단위를 위하여 인구는 고용기회로부터 추론된 순이동율과 각각의 지역에서 출산율과 사망률에 기초한 코호트 방법을 따라 예측된다. 넷째, 고용과 인구예측은 경제적 지역 총합을 한계로 사용

81) 장기 경제 및 인구통계학적 예측을 전문으로 하는 회사이며, 900개가 넘는 경제학 및 인구통계학 변수를 가지고, 1970년에서 2030년까지의 경제학 및 인구통계학적 시뮬레이션을 한다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

하여 카운티들을 위하여 반복된다. 각 지역 또는 카운티를 위한 나이, 성과 인종분배는 사망률, 출산율, 이동의 역사적 비율에 기초하여 2015년까지 매년 성과 인종에 따른 단일 년도의 노령인구에 의해 결정된다.

위에서 지적하였듯이, 환경질 개선에 대한 가치는 1인당 실질소득의 증가에 따라서 함께 증가할 것으로 예상된다. 오랜 기간의 실질 소득 증가를 설명하기 위해서는 실질 GDP와 총인구에 대한 예측을 요구한다. 배출과 편익 모델링의 일관성을 위해서, 인구통계청의 예측에 기초한 전국 인구 예측을 사용하였다.

2.5. 건강에 대한 편익 평가방법

PM과 오존 농도의 대기질에서 감소로 인한 가장 큰 금전화된 편익은 대기오염과 관련된 건강위험의 감소에 기여할 수 있다는 것이다. 오존과 PM을 위한 EPA의 기준 문서는 대기오염물질 농도에 관련된 것으로 알려진 수많은 건강에 미치는 영향을 나열하고 있다. 건강에 미치는 영향의 계량화는 역학적 효과 예측(C-R 함수), 기준선 발생과 보급률, 잠재적으로 영향을 받는 인구, 대기오염농도에서의 변화 예측을 포함하여 몇 가지 투입을 요구한다.

2.5.1. 건강 endpoints와 역학적 효과를 선택하기

CAIR의 어떤 계량화된 건강편익은 오존에만 관련이 있을 수도 있고, PM에만 관련될 수도 있고, 양자 모두 관련될 수도 있다. 이용가능한 역학적 데이터에 기초해서, PM이 아니라 오존과 관련된 감소된 노동자 생산성, 2세 미만 유아들의 호흡기 병원 입원 그리고 학교 결석 등을 계량화 하였다. 우리가 계량화한 PM만이 건강에 미치는 영향은 조기사망율, 비치명적 심장병, 급·만성 기관지염, 호흡기 관련 증

상, 천식악화, 근로상실일 등을 포함한다. 그리고 오존과 PM 모두와 관련되어 계량화된 건강에 미치는 영향은 병원 입원, 천식으로 인한 응급실 방문, 경미한 활동일수 제한(Minor Restricted Activity Days, MRADs) 등을 포함한다. 비록 최근의 역학적 증거가 오존에의 단기노출과 조기 사망을 간의 결합을 지적하고 있다 하더라도, EPA는 CAIR을 위한 주된 분석에서 SAB-HES에 의해 그 쟁점에 관한 추가적 심사를 위한 필요성으로 인하여 이 영향을 계량화할 준비가 되어 있지는 않다.

우리는 PM과 오존노출과 인간의 건강에 미치는 영향 간의 관계를 확정하기 위하여 발표된 과학 문헌에 의존하고 있으며, 선택기준을 사용하는 연구들을 평가하였다. 이러한 기준들은 연구가 동료 전문가 심사를 받았는지 여부의 고려, 연구된 오염물질과 관심의 대상인 오염물질 간의 일치성, 연구 모집단의 특징, 연구대상의 위치 등을 포함한다.⁸²⁾ 연구의 포괄성과 과학적 타당성 간에 있어서의 균형을 달성하려는 목표에 의해 편익분석을 위하여 C-R 함수가 선택되었다.

다음과 같은 세 가지 이유로 인하여 이 분석으로부터 몇몇 건강에 미치는 효과가 배제된다 : 이중 계산의 가능성(특정 호흡기 질병으로 인한 병원입원과 같은), 임상연구에 기초한 영향 관계를 영향을 받은 모집단에 적용함에 있어서 불확실성, 또는 발표된 역학적 문헌에서 건강에 미치는 효과와 오염물질 간의 정립된 관계의 부족. 대기에서의 PM과 오존의 개선은 미국 인구가 경험할 각각 계량화되지 않은 영향 범주 내에서 발생의 수를 감소할 수 있다. 비록 이러한 건강에 대한 효과가 PM이나 오존에 의해 유발된 것으로 믿어진다고 하더라도, 효과 예측은 이러한 효과를 감소하는 것과 관련된 편익을 계량화하기 위하여 이용가능하지는 않다.⁸³⁾ 이러한 효과를 계량화할 수 없

82) 이러한 기준들에 관한 자세한 내용은 EPA, 4-27, Table 4-6. C-R 함수를 선택함에 있어서 사용된 고려사항들의 개요를 참조할 것.

83) 비록 조기사망과 관련있는 대부분은 대기질의 PM이지만, 조기사망과 관련해서는 오존 또한 상당한 효과를 미친다는 최근 연구결과들이 많이 존재하고 있다. 즉, 계

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

는 것은 이 분석에서 나타난 금전화된 편익에 감소편향(downward bias)을 제공한다.

일반적으로, 복수의 연구결과를 사용하는 것은 오염물질과 건강 효과 간의 관계에 관해서 보다 확고한 예측을 제공할 수 있다. 그러나, 일관성있는 방법으로 결과를 공동으로 묶는 것을 곤란하게 하면서 동일한 endpoint를 검토하는 연구들 간에 종종 차이가 존재한다. 예컨대, 연구들은 상이한 오염물질들 또는 상이한 나이그룹들을 검사할 수도 있다. 이런 이유로, 우리는 각각의 endpoint를 검사할 수 있는 연구들을 매우 신중하게 고려하고 인구 커버리지와 관심의 대상이 되는 오염물질의 일치에 대한 훌륭한 균형을 제공하는 하나의 일관된 부분 집합을 선택한다. 복합 연구의 결여, 일관성 문제, 또는 질에서의 명확한 우월성 또는 다른 것들에 대한 어떤 연구의 종합성 가운데 하나로 인하여, 많은 경우에 발표된 하나의 단일 연구가 효과예측의 기초로서 선택된다.

오염물질과 주어진 건강 endpoint를 위한 몇몇 효과예측이 선택되어질 때, 그 관계에 관한 더욱 확고한 예측을 추출하기 위하여 양적으로 결합되거나 공동으로 묶여지게 된다. Nonroad diesel 규칙제정을 위해 완성된 Benefits TSD는 multiple impact functions를 결합하기 위하여 사용된 절차들에 관한 상세한 내용을 제공한다(Abt. Associates, 2003).⁸⁴⁾ 동일한 endpoint에 대한 상이한 연구들로부터의 예측을 통합하기 위하여 우리는 고정된 또는 무작위적 효과 모델들을 사용하였다.⁸⁵⁾ Pooled impact functions는 PM으로 인한 병원입원, 심각하지 않은

속적으로 반복되는 오존에의 노출은 조기사망을 유발한다.

84) Abt Associates는 사회, 경제, 건강정책 등에 관한 기술적 조언을 하는 정책 컨설팅 회사로 주고객은 미연방정부, 지방정부, 비영리기관, 일반기업 등이 있다. 주로 환경 및 복지에 관련된 일을 취급하며, 1000명 이상의 대규모 영리 think tank 회사이다.

85) 이 분석에서 Fixed Effects Model은 전체 모델링 지역을 하나의 오염계수만을 사용하는 것을 전제로 하며, Random Effects Model에서는 서로 다른 지역에서 행해

호흡기 증상, 천식악화와 오존으로 인한 학교 결석 일수 및 천식 관련으로 인한 응급실 방문 횟수 등을 예측한다.

오염물질과 주어진 건강 endpoint를 위한 효과예측은 전국적으로 일관성있게 적용되었다. 이것은 하나의 단일 효과 예측에 의해 정의된 impact 함수와 복합 효과 예측의 통합에 의해 정의된 impact 함수 모두에 적용된다. 1차 분석을 위한 효과 예측이 도출되는 구체적 연구들은 아래 [표 4-6]에 나타난다.⁸⁶⁾

[표 4-6] 금전화된 총 건강 편익을 계산하기 위하여 사용된 Endpoints와 연구들

Endpoint	오염물질	연구	모집단연령
조기사망 조기사망 -코호트 연구법 조기사망	연평균 PM2.5 연평균 PM2.5	Pope et al. (2002) Woodruff et al. (1997)	29세 이상 유아(1세미만)
만성질병 만성기관지염 비치명적 심장발작	PM2.5 PM2.5	Abbey et al(1995) Peters et al(2001)	26세이상 성인
병원입원 호흡기	오존	Pooled estimates: Schwarz(1995) Schwarz(1994) Moolgavkar et al(1997) Schwarz(1994b)	64세이상

진 연구는 각각 서로 다른 매개변수를 측정하는 것을 가정하고 있다.
86) EPA 보고서, Table 4-7, 4-30~31.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

Endpoint	오염물질	연구	모집단연령
심장혈관질환	오존 PM2.5	Burnett et al(2001) Pooled estimates: Moolgavkar(2003) Ito(2003)	2세미만 64세이상
	PM2.5	Moolgavkar(2000)	20-64세
	PM2.5	Ito(2003)	64세이상
	PM2.5	Sheppard(2003)	65세이하
천식관련응급실방문 횟수	PM2.5	Pooled estimates: Moolgavkar(2003) Ito(2003)	64세이상
	PM2.5 오존	Moolgavkar(2000) Pooled estimates: Weisel et al(1995) Cody et al(1992) Stieb et al(1996)	20-64세 모든 연령
경미한기관지염 호흡기질환(upper) 호흡기질환(lower) 천식악화	PM2.5	Norris et al(1999)	0-18세
	PM2.5	Dockery et al(1996)	8-12세
	PM10	Pope et al(1991)	9-11세(천식성 질환)
	PM2.5	Schwarz and Neas(2000) Pooled estimates: Ostro et al(2001) Vedal et al(1998)	7-14세
결근일(근로상실일) 결석일	PM2.5	Ostro(1987)	
	오존	Pooled estimates: Gillaliand et al(2001) Chen et al(2000)	18-65세 9-10세
노동생산성	오존	Crocker and Horst(1981)	6-11세 실외노동자 (18-65세)
MRADS	PM2.5,오존	Ostro and Rothschild(1989)	18-65세

조기사망

대기오염물질에의 장단기 노출은 조기사망율의 증가와 관련이 있다. 역학적 연구, 영향 그 자체의 심각한 성질, 그리고 생명을 연장할 때의 높은 금전적 가치로부터 도출하는 사망 위험 예측의 크기는 사망 위험 감소를 이 분석에서 계량화된 가장 중요한 건강 endpoint로 만든다.

비록 많은 불확실성이 존재하고 있지만, PM농도 증가에 따른 사망의 증가에 관한 많은 과학적 연구 조사는 발표되어 왔다. 시계열적 방법은 PM농도의 단기변화와 일일 사망율의 변화와 관련이 있다. 코호트 방법은 다년간(즉, 장기노출) 카운티 차원의 PM 노출과 카운티 차원의 연간 사망률 간의 잠재적 관계를 검토한다. 이 두 연구를 사용하여 연구자들은 PM과 조기사망 간에 있어서 통계적으로 중대한 관련성이 있다는 것을 규명하였다. 일반적으로, 코호트 연구법에 의한 위험 예측치가 시계열접근방법으로 얻은 값보다는 크게 나타난다.

많은 연구들은 PM에의 장기노출과 그로 인한 연간사망율의 증가에 대한 다양한 측정 방법들 간에 중요한 관련성을 규명하고 있다. 발표된 대부분의 연구는 총부유입자(total suspended particles, TSP)와 같은 이용가능한 PM지수는 연간사망율과 관계가 있다는 것을 발견하였다. 그러나, 이것은 수많은 방법론상 한계, 특히 부(wealth), 흡연, 다이어트와 같은 사망을 초래하는데 있어서 잠재적으로 중요한 개인적 차원의 변수들에 대한 불충분한 통제로 인하여 비판받았다. 더 최근에는, 개선된 접근법과 이전의 문헌들과 일치하는 것으로 보이는 몇몇 연구들이 발표되고 있다. 이 새로운 예측적 코호트(prospective cohort) 연구들은 건강상태와 거주와 관련한 개인적 차원의 정보를 포함하고 있기 때문에 이전의 작업에 대해 중대한 개선을 반영한다. Harvard “Six-Cities Study”와 “American Cancer Society or ACS Study”⁸⁷⁾로 종종 알려진 두 개의

87) 하버드 대학교의 “Six Cities” 연구는 북동부와 중서부 6개 도시를 대상으로, 코호

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

예측적 코호트 그룹들로부터의 데이터에 기초하여 가장 광범위한 분석이 행해지고 있다. 이 연구들은 미세입자지수와 조기사망 간에 일관성있는 관계가 있다는 것을 발견하였다.

세 번째 주요 연구는 장기 PM 노출과 남성 사망률 간의 관련성을 보고한 캘리포니아에 근거를 둔 제7 재림예수교 연구이다. 이 연구는, 그러나, PM에의 장기노출과 그로 인한 연간사망율간의 관계에서 불일치하는 결과를 발견하였으며, 대기질 결과 또한 전국을 커버하지 못하였다. 더 최근에, 고혈압으로 진단된 성인 남성 제대군인들에 관한 코호트가 검토되었다. 이 그룹의 특성은 소득, 인종, 건강 상태 그리고 흡연 상태와 관련하여 위 3 개 연구들과는 다르다. 이전의 장기 분석들과는 달리, 이 연구는 사망과 오존 간에 다소 관련성을 발견하였지만 PM지표와 사망 간의 관계에서는 불일치하는 결과를 발견하였다. 제대 군인의 코호트에서의 모집단의 선별적 성질로 인하여, 우리의 편익분석에서 이 연구는 배제한다.

일치하는 결과와 광범위한 지역적 커버리지로 인하여, Six-Cities and ACS 데이터가 편익분석에 있어서 특히 중요하게 되고 있다. 이 두 연구의 신뢰성은 Health Effects Institute(HEI)⁸⁸에 의해 소집된 독립된 과학 전문가들에 의해 광범위한 재검토 및 재분석되었다는 사실에 의해 훨씬 더 고양되고 있다. 재분석의 최종 결과는 그 다음에 HEI의 Health Review Committee의 전문가 패널에 의해서 독립적으로 평가되어 원래 연구를 확정하고 확장하였다.

트 연구방법으로 대기의 미세입자에 대한 장기노출과 사망과의 관련성에 대해서 실시한 연구이다. ACS는 자발적으로 조성된 기금으로 운영되는 비영리목적의 암연구 재단이다. 2005년에 암연구에 투자된 비용이 거의 1억 3천 백만 달러에 달하며, 미국 전역에 3400 여개의 사무실을 가지고 있는 대규모 조직이다. ACS 연구도 대기의 미세입자에 대한 장기노출과 사망과의 관련성에 관한 연구이다.

88) 대기질이 건강에 미치는 영향을 과학적으로 분석하기 위해 1980년에 설립된 비영리 법인으로, EPA는 HEI운영 자금의 절반 이상을 지원하고 있다.

HEI의 재검토가 원래 연구들에게 신뢰성을 부여하지만, 동시에 HEI는 다양한 오염물질들의 관련 영향, 오염과 사망간의 관련성을 전달함에 있어서 교육의 잠재적 역할, 그리고 공간적 상호 관련성 모델링의 영향을 고려하는 민감성을 강조한다. ACS 코호트를 위하여 더 최근의 대기질과 더 장기의 기간을 사용하여 위의 모든 내용들을 더욱 더 확정하고 확장하는 것이 최근에 발표되었다(Pope et al., 2002).

사망위험의 잠재적 감소를 예측하고 가치평가하기 위한 방법들을 개발하고 개선함에 있어서, EPA는 SAB-HES와 협의하였다. SAB-HES는 사망 위험 감소를 측정하는 데 있어서 장기 예측적 코호트 연구를 사용할 것을 권고하였는바, 이 권고는 “대기오염노출로 인한 모든 중요한 영향을 인지하기 위해서는 편익분석에 있어서 코호트 연구는 필수적이다.”고 한 NRC의 최근 보고서에 의해 확정되었다(NRC, 2002, p. 108). 더욱 구체적으로, SAB는 훨씬 더 큰 샘플크기와 장기 노출에의 영향 및 더 많은 지역(예 : Six-Cities 연구의 50개 도시들과 비교하여)을 연구대상으로 한 ACS 연구를 권고하였다. 이에 EPA의 편익분석은 HEI의 재분석에 의해서 한층 개선된 ACS의 코호트 데이터에 의존하였다(Krewski et al., 2002).

가장 최근의 ACS 코호트 데이터에 대한 재분석(Pope et al., 2002)은 a) 사망률 데이터 기간을 3배로 하는 16년으로 ASC 연구 검체들을 위한 규명기간을 확장함 ; b) 1999년 PM2.5 기준의 집행에 따라 PM2.5에의 코호트 노출을 위한 고려를 포함하여 노출 데이터를 실질적으로 증가시킴 ; c) 직업상 노출과 다이어트를 포함하는 개인적 위험 요소들의 다양성을 통제함 ; d) 서로 가까이에 위치한 지역사회들에서 생존의 공간적 자동 관련성의 가능성을 포함하는 위험 예측에 악영향을 끼칠 수 있는 구체적 쟁점들을 평가하기 위한 선진 통계적 방법들을 사용함으로써 PM 관련 사망률 분석에 추가적 개선을 제공한다. 이러

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

한 개선으로 인해, SAB-HES는 성인에 대한 1차 사망률 예측을 위한 근거로서 Pope et al. (2002) 연구를 사용할 것을 권고하고 그 밖의 코호트 연구와 시계열 연구를 사용하여 산출된 대체적 사망률 예측이 민감도 분석의 일부에 포함될 수 있도록 제안한다(SAB-HES, 2004).

SAB-HES는 1979-1983년과 1999-2000년 동안의 PM_{2.5} 평균을 측정하여 PM_{2.5}에의 평균 노출에 기초한 Pope et al. (2002) 연구로부터 예측된 상대적 위험을 사용할 것을 또한 권고하였다. 사망의 모든 원인을 위한 상대적 위험에 더하여, Pope et al. (2002) 연구는 심폐 및 폐암 등 사망에 관여하는 다른 원인들에 대한 상대적 위험에 관해서도 제시하고 있다. 사망에 관여하는 모든 그 밖의 원인에 대한 상대적 위험에 관한 통계적 신뢰도에 관한 관심으로 인하여, 우리는 사망의 모든 원인을 위한 상대적 위험에 기초한 1차 분석을 위하여 사망을 영향을 계산하였다. 그러나, 우리는 PM_{2.5}의 감소에 의해 심폐 및 폐암이 어떻게 영향을 받는가를 보여주기 위하여 심폐 및 폐암으로 인한 죽음에 관한 독립된 예측치를 제공한다.

최근에 발표된 연구들은 PM 노출과 5세 미만 아동의 조기사망을 초래하는 호흡기질환의 악화와 감염의 관련성에 대한 사례를 강화하고 있다. 특히, SAB-HES는 대기질에 초점을 두는 WHO Global Burden of Disease Study⁸⁹⁾의 발표에 주목하였다. 이 연구는 최근에 발표된 일일 PM 노출량이 아동 사망에 미치는 영향에 관한 시계열적 연구들을 인용하고 있다(SAB-HES, 2003). SAB-HES는 또한 PM노출이 아동들에게 있어서는 호흡기질환의 악화와 감염을 유발하는 것과 상관관계가 존재한다는 Belanger et al. (2003)의 연구도 인용한다. 최근에, Chay and Greenstone (2003)의 연구는 1981-1982년의 감소에 의해 야기된 공기 중의 총 미세먼지(total suspended particle, TSP)에서의 감소가 카운티

89) 2000-2002년간 전세계, 각 지역, WHO 회원국 등을 조사 범주로 해서 질병과 사망에 관해 광범위하게 조사하여 통계적 예측치를 산출하였다.

차원에서의 유아사망을 감소와 관련되었다고 하였다. Woodruff et al. (1997)의 코호트 연구에 대해서 SAB-HES는 수많은 대도시 지역들로부터 추출한 더 넓은 코호트의 이용과 유아들에 있어서 개인적 위험 요소들의 다양성(예 : 모(母)의 교육수준과 인종, 부모의 결혼 상태, 모(母)의 흡연 상태)을 통제하려는 노력을 포함하여 이 연구의 장점에 주목한다. 이러한 연구조사들에 기초하여, SAB-HES는 EPA가 유아사망을 1차 편익예측에 체화하고 유아사망은 Woodruff et al. (1997) 연구로부터 개발된 impact 함수를 사용하여 평가되도록 권고한다.

만성기관지염(Chronic Bronchitis)

미국인의 5% 정도가 CB에 영향을 받고 있다고 American Lung Association (ALA)에서 1999년 발표하였다. 대기질이 새로운 CB 발병에 미치는 영향에 대한 한정된 수의 연구들이 있다. Schwarz (1993)와 Abbey et al. (1995)는 장기간 PM노출은 CB 발병에 영향을 준다는 증거를 제공한다. CAIR는 우선적으로 PM2.5를 감소할 것으로 예상되기 때문에, 이 분석은 Abbey et al. (1995)의 연구를 사용한다. 이 연구는 PM2.5와 새로운 CB 발병 간의 관계에 초점을 맞추고 있는 유일한 연구이다.

비치명적 심장발작(Nonfatal heart attack)

비치명적 심장발작은 PM2.5에의 단기노출과 관련되어 있다(Peters et al. (2001)). 우리는 PM2.5와 비치명적 심장발작과의 관계를 예측하는 impact 함수를 위한 기초로서 Peters et al. (2001)의 연구를 사용하였다. Peters et al. (2001)의 연구는 심장발작을 위한 구체적 예측을 제공하는 유일한 이용가능한 미국의 연구이다. CAIR 분석에 사용된 예측은 단일의 이용가능한 미국의 효과예측에 기초한다. 심장발작에 대한 구체적 영향을 발견하는 것은 병원 입원과 관련이 있다. 몇몇 역학적 연구들은 심장병과 심장질환에 있어서 심장박동회수는 중요한 요

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

소이지만, PM 수준에는 중요하지 않다고 한다(Liao et al. (1999); Gold et al. (2000) ; Magari et al. (1996)). 심장박동회수변화는 심장발작과 그밖의 관상동맥성 심장질환의 하나의 위험 요소이다. 따라서, 심장박동회수변화에 대하여 PM이 미치는 중대한 영향이라고 하는 것은 심장발작의 위험의 증가와 관련될 뿐이다.

병원 및 응급실 입원

상세한 병원입원 및 퇴원기록이 존재하므로, 병원입원과 대기오염과의 관계에 대해서 나타내 주는 광범위한 자료들이 존재한다. 이에 따라 병원입원 endpoint 측정은 통합 impact 함수를 사용하여 측정한다. 게다가, 몇몇 연구들은 대기오염과 응급실 방문회수와의 관련성을 검토하였다. 대부분의 응급실방문이 병원입원을 초래하는 것은 아니기 때문에, 우리는 병원입원과 응급실 방문을 분리해서 다룬다.

이번 분석에서는 오존 또는 PM과 관련한 병원 입원 유형 중 호흡기로 입원한 경우와 심장혈관으로 입원한 경우로 나누어 분석한다. PM_{2.5}와 관련된 심장혈관 병원 입원에 대한 회피된 발생을 예측하기 위하여 우리는 Moolgavkar (2003)와 Ito (2003)의 연구를 사용하였다. 그밖의 발표된 연구들은 PM₁₀과 심장혈관 병원 입원 간에 통계적으로 중대한 관계를 보여준다. 그러나, 우리가 분석하고 있는 통제 옵션들이 주로 PM_{2.5}를 감소시킬 것으로 예상되기 때문에, 우리는 PM_{2.5}를 검토하는 두 개의 연구들에 초점을 둔다. 이 두 연구는 모두 65세 이상의 모집단에 대한 효과예측을 제공하지만, Moolgavkar (2000)는 20-64세의 모집단에 대해서도 독자적인 효과예측을 제공하였다. 심혈관 병원 입원은 따라서 65세 이상과 20-64세 인구의 총합에 대한 예측이다. 심혈관 병원 입원은 심장발작 입원도 포함한다. 심혈관 병원 입원에 대한 impact 함수를 적용할 때 심장발작에서의 감소로부터의 편익을 이중으로 계산하는 것을 회피하기 위하여, 우리는 심장발작으로 인한 입원을

배제하기 위하여 우선 기준선 심혈관 병원 입원을 조정하였다.

호흡기 병원 입원의 총 회피된 발생율을 예측하기 위하여, 우리는 만성 폐색성 폐질환(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)⁹⁰, 폐렴과 천식을 포함하는 몇 가지 호흡기 원인들에 대한 impact 함수를 사용하였다. 그 밖의 발표된 연구들은 PM10과 호흡기 병원 입원 간에 통계적으로 중대한 관계를 보여준다. 그러나, 우리가 분석하고 있는 통제 옵션들이 주로 PM2.5를 감소시킬 것으로 예상되기 때문에, 우리는 PM2.5를 검토하는 Moolgavkar (2003)와 Ito (2003)의 연구에 초점을 둔다. 이 두 연구는 모두 65세 이상의 모집단에 대한 효과예측을 제공하지만, Moolgavkar (2000)는 20-64세의 모집단에 대해서도 독자적인 효과예측을 제공하였다. 만성 폐색성 폐질환 병원 입원은 따라서 65세 이상과 20-64세 인구의 총합에 대한 예측이다. Ito (2003)만이 폐렴을 예측하였고 65세 이상에 대해서만 예측하였다. 이에 더하여, Sheppard (2003)는 65세 이하의 천식 병원 입원에 대한 효과예측을 제공하였다. PM 관련 호흡기 관련 병원 입원 가운데 총 회피된 발생율은 만성 폐색성 폐질환, 폐렴과 천식으로 인한 병원 입원의 총합이다.

천식 관련 응급실 방문에 대한 PM 대기오염 감소의 효과를 측정하기 위해서 우리는 18세 이하에 대한 Norris et al. (1999) 연구로부터의 효과예측을 사용한다. 아이들은 65세 이하의 성인에 비하여 천식으로 병원에 입원할 확률이 훨씬 더 높기 때문에, 우리는 65세 이하에서 천식 응급실 방문에 대한 PM2.5의 영향을 조사할 것이다.

오존과 관련된 호흡기 병원 입원의 회피된 발생율을 예측하기 위하여, 우리는 폐렴과 만성 폐색성 폐질환을 포함하여 광범위한 호흡기 질병들에 대한 병원 입원을 검토하는 수많은 연구들(실증자료들)을 사용하였다. 65세 이상의 성인과 2세 이하의 유아 집단이 검토되었다.

90) 폐손상으로 인해서 호흡곤란을 유발하는 질병으로, 오존과의 직접 관련성이 존재하지는 않는다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

65세 이상의 성인들에 대해서는 Schwartz (1995)가 모든 호흡기 원인들에 대한 오존과 병원 입원과 관련있는 두 도시들에 대한 효과예측을 제공한다. 이러한 연구들에 기초한 impact 함수는 그밖의 연구들에 의해 통합되기 이전에 먼저 통합되었다. Moolgavkar et al. (1997)와 Schwarz (1994a)는 미네아폴리스에서의 오존과 폐렴으로 인한 병원 입원을 조사하였다. Schwarz (1994b)는 디트로이트에서의 오존과 폐렴으로 인한 병원 입원을 조사하였다. 이것은 한 도시로부터 발생하는 정보에 너무 많은 무게를 부여하는 것을 회피하게 된다. 만성 폐색성 폐질환으로 인한 병원 입원을 위해서는 미네아폴리스에서 수행된 Moolgavkar et al. (1997)와 디트로이트에서 수행된 Schwarz (1994b)가 사용되고, 이 두 연구는 서로 통합되었다. 65세 이상 성인들의 호흡기 관련 총 병원 입원을 측정하기 위하여, 만성 폐색성 폐질환으로 인한 병원 입원이 폐렴으로 인한 병원 입원에 더해졌고, 그 결과는 호흡기 관련 총 입원에 대한 Schwartz (1995)에 통합되었다. Burnet et al. (2001)은 2세 이하 유아의 호흡기 관련 병원 입원에 대한 효과예측을 제공하는 유일한 연구이다.

급성 건강 영향과 결석일/결근일수

[표 4-2]가 나타내는 바와 같이, 사망, 만성 질병, 그리고 병원 입원에 더하여, 병원 입원을 요하지 않는 수많은 급성 건강 영향이 PM과 오존에의 노출과 관련된다. 5-17세 아동의 급성 기관지염 발생은 Dockery et al. (1996)으로부터 개발된 효과예측을 사용하여 측정되었다. 7-14세 아동의 PM_{2.5}로 인한 호흡기 증세(lower respiratory symptoms. 예, 거친 숨소리와 심한 기침)의 발병은 Schwartz and Neas (2000)의 효과예측을 사용하여 측정되었다.

천식은 자극(대기오염을 포함하는)에 매우 민감하기 때문에, 천식을 지닌 아이들은 PM₁₀으로 인한 호흡기 증세(upper respiratory symptoms.⁹¹)

예: 콧물, 코막힘, 기침, 발열, 진통 및 충열된 눈)에도 쉽게 영향을 받는다. upper respiratory symptoms에 미치는 대기오염의 영향에 대한 연구는 천식에 주목하고 있다. 9-11세의 천식 아동들에게 나타나는 upper respiratory symptoms의 발병 회수에 대한 측정은 Pope et al. (1991)의 연구를 사용한다.

대기오염이 미치는 건강에 대한 영향은 결근일을 초래할 수도 있다. PM_{2.5}로 인한 결근일수는 Ostro (1987)의 효과예측으로 측정한다. 아동들은 대기오염에의 노출로 인해 야기된 호흡기 또는 그 밖의 질병으로 인해 결석할 수도 있다. 학교 결석율을 조사하는 대부분의 연구들은 PM_{2.5}와는 거의 또는 전혀 관련성이 없다고 한다. 오존 수준의 변화로 인해 결석일의 변화를 예측하기 위하여 우리는 Gilliland et al. (2001)과 Chen et al. (2000)를 사용하였다. Gilliland et al. (2001)은 결석 기간의 발생율을 측정하였고, Chen et al. (2000)은 주어진 특정 일자의 결석을 조사하였다. 우리는 평균 1번 결석일이 1.6일이라고 측정하였다.

Minor Restricted Activity Days(MRADs)는 결근 또는 결석까지 이르는 않지만, 일상적인 하루 업무를 줄이거나 강도가 약한 업무로 대체할 때 나타난다. 예컨대, 하루의 대부분을 육체적 노동에 종사하는 수선공이 호흡곤란 또는 가슴통증으로 인해 사무일을 보는 경우이다. MRADs에 대한 오존과 PM_{2.5}의 영향은 Ostro and Rothschild (1989)로부터 추론된 효과예측을 사용하여 측정되었다.

CAIR를 위하여, 우리는 1차 측정을 위하여 천식악화에 관한 SAB-HES의 권고를 따랐다. 이중계산을 방지하기 위하여, 어른들은 배제하고 아동들에게서 발생하는 천식악화에 대한 예측에 초점을 두었다. 어른에게서

91) PM₁₀이 인간의 호흡기에 침투하여 영향을 미치는 기관으로 코에서 인두까지이다. 이에 반하여, lower respiratory symptoms은 PM₁₀은 투과하지 못하고, PM_{2.5}가 투과할 수 있는 내부호흡기관인 폐가 해당된다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

발생하는 천식악화는 결근일과 MRADs와 같은 일반 인구 endpoints 속에 포획되는 것으로 추정된다. 따라서, 만약 우리가 어른에 구체화된 천식 악화 측정을 포함한다면, 우리는 이 endpoint를 위한 발생율을 이중 계산하게 된다. 그러나, 일반 인구 endpoints는 아동들을 포함하지 않기 때문에, 아동들(6-18세)에 대한 천식 악화에 구체적으로 초점을 둔 분석은 이중 계산의 염려없이 수행될 수 있다.

아동들의 천식악화를 성격지우기 위하여, 우리는 Ostro et al. (2001)과 Vedal et al. (1998)을 선택하였다. Ostro et al. (2001)은 로스엔젤레스에서 13주 동안 138명의 흑인 아동들을 추적하여 천식악화(예: 숨가쁨, 거친 숨소리, 기침)와 관련한 매일의 호흡기 증상의 발생을 기록하였다. 이 연구는 PM_{2.5}와 호흡의 빠름과 거친 숨소리 간에 통계적으로 중대한 관련성이 있다고 밝혔다. 비록 관련성이 기침에 대해서는 통계적으로 중대하지는 않다고 하더라도, 이것 역시 중대한 것으로 간주하여 기침도 포함시켰다. Vedal et al. (1998)은 밴쿠버섬에 위치한 초등학교 아동을 18개월 동안 하루 중 내쉬는 숨의 최고 흐름(Daily Peak Expiratory Flow, PEF)의 측정과 호흡기 증상(예: 기침, 담, 거친 숨소리, 가슴의 답답함)을 추적하였다. PM₁₀과 호흡기 증상 간의 관련성은 기침과 PEF에 대해서만 보고되었다. PEF 측정을 금전화될 수 있는 명확하게 개념정의된 건강 endpoints로 전환하는 것이 어렵기 때문에, 우리는 천식악화를 계량화함에 있어서 이 연구로부터 기침관련 효과예측만을 포함하였다. 단일 천식 악화 발생을 예측을 산출하기 위하여 두 연구로부터의 효과예측을 사용하여 산출된 예측을 결합함에 있어서 아래의 통합접근법을 우리는 사용하였다. 첫째, 숨가쁨, 거친 숨소리, 그리고 기침에 대한 각각의 발생을 예측을 통합하였다. 둘째, 통합된 예측이 그 다음에 Vedal 연구를 사용하여 산출된 기침관련 예측과 통합되었다. 두 번째 단계를 위한 논거는 첫 번째와 동일하다. 두 개의 연구는 동일한 전체 건강 endpoints인 천식악

화를 계량화하려고 시도한다.

천식관련 건강 endpoints을 성격지우기 위하여 추가적인 역학적 연구가 이용가능하다. 아래 [표 4-7]은 천식과 관련한 모델링에 대한 역학적 연구방법 리스트들을 나열하였다.⁹²⁾ 그러나 SAB-HES의 권고에 기초하여, 우리는 1차 예측을 산출함에 있어서 이 추가적 연구를 사용하지 않기로 결정하였다. 특히, Yu et al. (2000)은 다른 연구들에 비하여 훨씬 더 높은 기준선 발생율을 나타낸다. 이것은 총 천식 인구에서의 예상 영향에 관한 과잉진술을 초래할 수 있다. Whittermore and Korn (1980)의 연구는 잘 정의된 endpoint를 사용하지 않고 그 대신 증상을 나타내는 천식발병(asthma attack)에 초점을 두었다.

[표 4-7] 편익분석에서의 사용을 위하여 평가된 천식증상의 모집단에서의 건강영향을 검토하는 연구들

Endpoint	오염원	연구	연구모집단
천식발병증상			
호흡곤란	PM2.5	Ostro et al (2001)	흑인 8-13세
기침	PM2.5	Ostro et al (2001)	흑인 8-13세
Wheeze	PM2.5	Ostro et al (2001)	흑인 8-13세
천식악화	PM2.5, PM1.0	Yu et al (2000)	5-13세
기침	PM10	Vedal et al (1998)	6-13세
기타 증상이나 질병			
Upper respiratory symptom	PM10	Pope et al (1991)	9-11세

92) EPA 보고서, Table 4-8, 4-41.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

Endpoint	오염원	연구	연구모집단
중간 증세 이상의 천식	PM2.5	Ostro et al (1991)	전 연령
경미한 기관지염	PM2.5	McConnell et al (1999)	9-15세
가래	PM2.5	McConnell et al (1999)	9-15세
천식발병	PM2.5, 오존	Whittemore and Korn (1999)	전 연령

2.5.2. 건강영향함수(Health Impact Functions)와 관련된 불확실성

Within-Study Variation

Within-study Variation은 주어진 연구가 대기질 변화와 그로 인한 건강에 관한 효과 간의 관계를 예측하는 정확도를 말한다. 건강효과에 관한 연구는 이러한 관계의 최상의 예측과 이 관계의 통계적 불확실성에 관한 측정 모두를 제공하고 있다. 이 불확실성의 크기는 연구된 검체의 수와 측정된 효과의 크기와 같은 요소들에 달려있다. 따라서 아무리 잘 설계된 역학적 연구에 근거한 결과라고 하더라도 불확실성은 언제나 존재한다. 건강 endpoints를 선정함에 있어서, 비록 우리가 선정 편견을 회피하기 위하여 통계적으로 중요한 예측과 중요하지 않은 예측을 지닌 연구로부터의 결과를 함께 통합한다고 하더라도, 우리는 일반적으로 통계적으로 중대한 관계가 최소한 몇몇 연구에서 관찰되고 있는 endpoints에 초점을 두었다.

Across-Study Variation

Across-Study Variation은 동일한 오염물질/건강효과 관계에 관한 서로 다른 연구들이 동일한 결과를 나타내지 않는다는 사실을 말한다.

Across-Study Variation은 두 가지의 원인으로 발생할 수 있다: 첫째, 연구들은 연구설계, 우연성, 또는 그밖의 요소들로 인한 주어진 오염물질과 건강효과 간의 단일의 진정한 관계에 관한 상이한 예측을 나타낸다. 예컨대, 뉴욕과 시애틀에서 수행된 연구는 모집단의 차이점(예: 평균 연령, 소득, 교육 수준 등을 분석한 실태적인 인구 통계, 활동 패턴)으로 인하여 PM과 사망 간의 관계에 대한 상이한 C-R 함수를 나타낼 수 있다. 둘째, 두 연구가 서로 공통적인 원인을 가지고 측정하더라도 서로 상이한 지역을 조사함으로써 인해서 결과가 달라질 수 있다는 것이다. 예컨대, 뉴욕과 시애틀에서 PM이 동일하게 감소했다고 가정하자. 그렇지만, 조기사망에 있어서의 감소는 PM농도에 대한 두 모집단 간의 민감도의 차이, PM을 구성하고 있는 종류 및 농도의 차이 등으로 인해서 서로 다른 값으로 나타날 것이다. 그렇다 하더라도, 우리는 각 연구들로부터의 결과에 관한 예측을 통합하였다.

모집단을 통한 Impact 함수의 추정

역학적 연구는 데이터 활용의 제한(예컨대, 대부분의 병원 입원 데이터는 메디케어 기록으로부터 나오는데, 그것은 65세 이상 인구에 국한됨) 또는 데이터 수집의 단순화(예컨대, 천식 증상 연구는 여름 캠프의 아동들에 초점을 맞추는데, 그것은 일반적으로 제한된 나이 범위를 가짐)로 인하여 종종 특정 연령대에 초점을 둔다. 대부분의 Impact 함수는 근거가 되는 역학적 연구에서 엄격하게 모집단에 일치하는 나이대의 인구들에게만 적용되어야 한다는 1차 분석을 우리는 가정한다. 그러나, 많은 경우에, 왜 관찰된 건강효과가 연구된 모집단의 합리적 범위 내에 있는 그 밖의 인구에서는 발생하지 않는가에 대한 생물학적 이유는 존재하지 않는다. 예컨대, Dockery et al. (1996)은 8-12세의 아동을 모집단으로 해서 급성 기관지염을 조사하였지만, 6 또는 14세의 아동에서 매우 상이한 결과를 기대하기 위한 어떠한 생

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

물학적 근거도 존재하지 않는다. 연구 대상을 한정함으로써, 전체 인구에 있어서의 건강영향을 과소측정할 수도 있다. SAB-HES의 권고에 따라, 전체 나이집단(예컨대 7-11세의 모집단으로부터 6-18세 전체 아동 집단으로 확장)를 커버하기 위하여 연구의 모집단을 넘어서 구체적 효과예측과 관련된 나이집단을 확장하기 위한 합리적 생리학적 근거가 존재하는 것으로 보이는 경우, 우리는 그렇게 하였고 1차 분석에서 확장된 발생을 예측을 사용하였다.

PM으로 인한 사망과의 상관관계에 있어서의 불확실성

발표된 과학 문헌들 가운데 주류는 상승된 PM농도와 증가된 조기 사망을 간의 상관관계를 증명하고 있다. 그러나 이 관계에 대한 많은 것들이 여전히 불확실하다. 이러한 불확실성은 다음 사항을 포함한다:

인과관계 : 역학적 연구는 원인을 명확히 입증하도록 설계되지 않는다. CAIR 분석을 위하여, 우리는 발표된 과학 문헌들 가운데 주류에서 보고된 PM과 조기 사망률 간의 일관성있는 상관관계의 증거에 기초하여 상승된 PM에의 노출과 조기사망율과의 인과관계를 가정하였다.

그밖의 오염물질들 : PM의 농도는 오존과 CO와 같은 그 밖의 범주에 속하는 오염물질들의 농도와 상호 연관되어 있다. 상관관계가 존재하는 범위 내에서, 이 분석은 사망효과를 실제로는 그밖의 오염물질들에의 노출결과인 PM노출에 탓으로 돌릴 수도 있다. 최근 Thurston and Ito (2001)와 Bell et al. (2004)의 연구는 PM과 무관하게 오존이 사망률효과를 가질 수 있는지 여부를 조사하였다. EPA는 현재 오존과 사망률 간의 관계에 대한 역학적 문헌을 평가하고 있다.

C-R 함수의 모양 : 진정한 PM 사망률 C-R 함수의 모양은 불확실하지만, 이 분석은 C-R 함수가 선형로그함수의 형태로 가정한다. 만약

이것이 C-R 함수의 정확한 모양이 아니라면, 또는 만약 특정 시나리오가 C-R 함수가 예측한 값보다 더 알맞는 농도를 예측한다면, 회피된 사망률 예측은 잘못 측정될 수도 있다. 비록 1차 분석에 포함되지는 않았지만, PM 관련 조기 사망률의 회피된 발생율에 대한 건강효과 역치의 잠재적 영향은 핵심 민감도 분석으로서 검토된다.

효과역치의 가능한 존재는 이 분석과 같은 정책분석을 위하여 매우 중요한 과학적 의문점이고 쟁점이다. 1999년에 EPA 소속 SAB 청정대 기준수를 위한 자문회의회는 전형적 편익분석에서 고려된 PM 관련 건강효과를 위한 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이라는 역치의 선택 또는 그밖의 어떠한 구체적 역치의 선택을 위한 어떠한 과학적 근거도 현재 존재하지 않는다고 EPA에게 조언하였다(EPA-SAB-Council-ADV-99-012, 1999). 2000년에, 편익방법들에 관한 자신의 심사의 일부로서, NRC는 PM₁₀ 또는 PM_{2.5}에의 관찰된 노출범위에서 선형성으로부터 어떠한 결별에 대한 증거도 존재하지 않고, 역치에 관한 어떠한 표지에 대한 증거도 존재하지 않는다고 결론내렸다. NRC는 장단기 노출 모델들로부터의 이용 가능한 증거의 중요도와 낮고 높은 PM 대기농도를 지닌 도시들에서 발견된 유사한 효과를 인용한다. 가장 최근에, EPA의 업데이트된 기준문서는, “PM이 사망에 미치는 영향에 대한 역치에 대해서 그것을 뒷받침할 과학적 근거가 존재하지도, 그것을 부정할 근거도 존재하지 않는다”고 기술하였다(EPA’s Criteria Document, 2004). PM 기준문서는 전체 PM 역학 데이터베이스를 해석함에 있어서 중요한 쟁점과 불확실성으로서, PM과/또는 그밖의 오염물질들과 관찰된 건강효과(예, 역치에 관한 잠재적 표지들) 간의 노출-반응관계(exposure-response relationships)에 관한 일반적 형태를 밝히고 있다.

지역적 차이 : 상이한 PM/사망율 연구들의 결과에는 중요한 변수가 존재한다. 이 변수는 PM의 물리적 및 화학적 구성과 같은 요소들에

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

있어서 지역적 차이점으로부터 결과하는 지역적으로 구체화된 C-R 함수를 반영할 수도 있다. 만약 진정한 지역적 차이가 존재한다면, 연구 대상 지역 이외의 지역들에 PM/사망을 C-R 함수를 적용하는 것은 이 지역들에 있어서 효과를 잘못 예측하는 결과를 초래할 수 있다.

노출과 사망간의 시간 간격 : PM 노출의 변화와 그로 인한 연간 사망률에 있어서의 변화는 시간적 간격이 존재한다. 만성 PM/사망을 관계에 있어서는, 간격의 길이가 알려져 있지 않고 노출의 종류에 의존할 수도 있다. 그러한 간격의 존재는 조기 사망 발생율을 평가하는데 중요하다. 왜냐하면 미래에 발생하는 편익은 할인되어야 한다는 것을 경제학 이론이 제시하기 때문이다. PM 효과 간격의 존재 또는 구조에 관한 어떠한 구체적 과학적 증거는 존재하지 않는다. 그러나, PM과 관련된 그러한 것들(예, 흡연 관련 질병들)과 유사한 건강역효과와 만성 노출 연구들과 일간 사망률 연구 간의 효과 크기에서의 차이점에 대한 현재의 과학적 문헌은 PM 노출에서 주어진 증가된 변화와 관련된 조기사망감소의 모든 발생율은 노출감소처럼 동일한 년도에서 발생하지는 않을 것이라고 제시한다. 흡연 관련 문헌도 몇 년 또는 더 장기간의 간격이 바람직하다고 암시한다. SAB-HES는 적절한 간격 구조는 모든 원인 예측 내에서 죽음의 특정 원인의 분배에 기초하여 개발될 수도 있다고 제시한다. 매우 장기의 진전을 보이는 질병들은 장기 간격 구조에 의해 성격지워져야 하고, 반면 현재 질병이 있는 인구에서 발생하는 영향은 단기 간격에 의해 성격지워질 수 있다.

핵심 물음은 사용된 코호트 연구에서 분석된 비교적 광범위한 범주들 내에서 죽음의 원인의 분배이다. 우리가 폐암 사망에 대한 적절한 길이의 정지 간격에 관해 훨씬 더 확실하다고 하더라도, 상이한 유형의 심폐 사망에 대해 적절한 간격 구조가 무엇이 되어야 하는가는 명확하지 않다. 어떤 호흡기 질병들은 장기간의 진전을 가지며, 반면에

폐렴과 같은 호흡기 질환은 대단히 짧은 지속기간을 가진다. 비교적 장기의 간격 정지를 암시하는 심혈관 질환인 경우에, 대기오염이 질병을 유발하고 있는지 여부가 매우 중요한 물음이다. 또는 대기오염이 매우 짧은 간격 정지를 암시하는 이전에 존재하는 심장질환이 있는 개인들에게 조기사망을 유발하는지 여부가 매우 중요한 물음이다.

SAB-HES는 구체적 질병에 따른 간격모델, 죽음의 원인들에 대한 상이한 간격들을 결합하기 위하여 분절된 간격 배분을 구축하는 것을 포함하여 간격구조의 개발을 지지할 수 있는 미래 연구를 위한 몇 가지 권고를 제공한다. SAB-HES는 추가 연구가 완성될 때까지, EPA는 첫해에 발생하는 사망률 감소의 30%, PM2.5의 감소 이후에 평균 2-5년 이후에 발생하는 50%, PM2.5의 감소 이후에 평균 6-20년 이후에 발생하는 20%에 따라 분절된 간격구조를 가정하여야 한다고 권고하였다. 잠복기간 이후에 죽음의 분배는 첫해 단기 노출의 기여를 반영하도록, 2-5년간 심폐 죽음을, 6-20년간 장기 폐질환과 폐암을 반영할 것으로 의도되고 있다. 예컨대, 2000년 오염물질에 대한 규제를 하여 2020년에 발생하는 편익을 측정한다고 가정하자. 2000년에 사망자수가 2200명이고 2020년에는 1200명으로 줄어든다고 가정하자. 그러면 이 정책으로 인한 20년 뒤의 총편익은 사망자수가 1000명 줄어들게 된다. SAB-HES의 권고에 따르면, 이 정책으로 인한 1년 이내의 단기 노출 감소로 인한 편익은 사망자수 300명의 감소가 되며, 2-5년 후의 편익은 사망자수 50% 감소인 500명이 되고, 6-20년 후의 편익은 사망자수 20% 감소인 200명이 된다. 미래 분석을 위하여, 시간 경과에 따른 죽음의 구체적 분배는 대기오염과 관련된 죽음의 원인과 질병의 진전에 관한 연구를 통하여 결정되어야 할 필요가 있을 것이다. 간격 추정에서의 변화가 예측된 죽음의 총 수를 변화시키지는 않지만 그러한 죽음들의 시기를 변화시킨다는 것을 명심하는 것이 중요하다.

2.5.3. 기준선 건강효과 발생율

오염수준과 건강역효과 간의 관련성에 관한 역학적 연구들은 회피된 사건들의 절대적 수를 측정하기 보다는 오히려 건강효과의 상대적 위험에 대한 대기질 변화의 관련성의 직접적 측정을 제공한다. 예컨대, 전형적 결과는 일간 PM_{2.5} 수준에서 10ug/*m*³ 감소가 3%의 병원입원을 감소시킬 것이다. 건강효과의 기준선 발생율은 이 상대적 변화를 사건들의 수로 전환하는데 필요하다. 기준선 발생율은 평가 지역에서의 기준선 오염물질 수준에 대응하는 평가 지역에서의 발생율(보통 10,000 또는 100,000명의 일반인구 당 매년 건강효과의 사건 수)에 대한 예측을 제공한다. 1년 당 총 기준선 발생율을 추론하기 위하여, 이 비율은 대응 인구 수에 의해 곱해 져야 한다(예컨대, 만약 기준선 발생율이 1년에 100,000명 당 사건수라면, 총 기준선 발생율은 100,000/전체 인구에서 나온 값을 곱하여야 한다).

몇몇 역학적 연구들은 오염 수준과 천식 또는 당뇨병과 같은 특정 하위모집단에서의 건강역효과 간의 관련성을 검토한다. 이 경우에, 기준선 발생율뿐만 아니라 정의되는 조건(예, 천식)을 위하여 이환율(prevalence rate)⁹³⁾도 개발하여야 한다. 기준선 발생과 이환 데이터 모두를 위하여, 우리는 가능한 경우에 특정 나이 비율을 사용한다. Impact 함수는 개별 나이 그룹에 적용되고 그리고 나서 총 인구 편익의 예측을 제공하기 위하여 관련 나이 범위를 넘어 총합되어진다.

대부분의 경우, 데이터나 방법의 결여로 인하여, 우리는 미래 년도들에 대한 발생율을 예상하려고 시도하지 않고 있다. 그 대신 발생율

93) 어떤 기간(일반적으로 1년) 내에 발생한 환자수를 그에 대응하는 인구로 나눈 비율을 말한다. 질병별 또는 성별·나이·지역 등 인구 집단별로 계산할 수도 있다. 이환율은 어떤 인구 집단에서 어떤 질병의 발생률이 높고 낮은가를 논하여 구하는 것이므로, 계산상 분모가 되는 인구는 그 질병에 걸릴 가능성이 있는 인구이다. 예컨대, 자궁암에 대한 이환율에서는 여성 인구를 분모로 하여 계산한다.

에 관한 가장 최근 데이터를 가정하는 것이 미래 발생율의 최상의 예측이다. 최근에, 천식과 같은 몇몇 endpoints를 위한 발생과 이환율에서의 경향에 관한 더 나은 데이터가 이용가능하게 되고 있다. 우리는 미래 발생율을 예상하기 위하여 이러한 데이터를 사용하는 방법들을 개발하고 있다. 그러나, 최종 CAIR에 대한 우리의 1차 편익분석을 위하여, 우리는 현재의 발생율을 계속하여 사용한다. 예컨대, 홍역과 같은 급성 전염병의 경우나 유문 협착증과 같은 출생 후에만 일어나는 질병 등의 경우에는 발병의 위험에 노출되어 있는 인구가 한정되어 있기 때문에, 발생 환자 수를 그 인구로 나누어서 발병률을 구할 수 있다.

[표 4-8]은 편익분석에 사용된 기준선 발생 데이터와 자료들을 요약하고 있다.⁹⁴⁾ 우리는 최대한 지리적으로 분리된 이용가능한 데이터를 사용한다. 조기사망율의 경우는 카운티 차원의 데이터가 이용가능하고, 병원입원의 경우는 지역별 비율이 이용가능하다. 그러나 모든 다른 endpoints의 경우는 공간적으로 분리된 데이터가 없기 때문에 단일 전국 발생율이 사용된다. 다만, 기관지염 악화와 만성 기관지염의 경우에는 데이터 자체의 특성으로 인하여, 즉 모집단의 연령별 구분(만성 기관지염)과 기관지염이 걸린 아동들(기관지염악화)의 경우는 특정 대상으로 한정시키기 때문에 이환율도 함께 나타내고 있다.

나이, 질병의 원인, 카운티별 사망율에 관한 데이터는 1996년에서 1998년의 질병통제 및 예방센터 자료를 참조하였다. 사망율은 사망기록자료들과 통계청의 자료를 참고하였다. 사망률은 훨씬 더 안정적인 예측을 제공하기 위하여 3년치(1996-1998년) 평균이다. 질병통제 및 예방센터 분류와 다른 나이 집단들을 위한 예측율이 다른 경우에는, 우리는 그 비율이 보고된 나이 집단에 있는 모든 나이에 공통이라고 가정하였다. 예컨대, 30세 이상의 개인들을 위한 사망률을 예측하기

94) EPA 보고서, Table 4-9, 4-48~49.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

위하여, 우리는 25-34세의 사망 수와 인구에 1/2을 곱하여 측정하였고 그리고 나서 더 나이가 많은 집단들을 위한 데이터를 사용하는 인구 가중치 사망율을 산출하였다. 우리는 우리의 인구예상에 사용된 총 및 특정 나이 사망률에 관한 인구통계예상이 오랜 기간 동안 젊은 인구에 대한 사망률의 감소와 나이든 인구에 대한 사망률의 증가예상에 기초한다는 것을 알고 있다. 이러한 예상을 우리의 카운티 차원의 특정 원인에 의한 사망률 데이터베이스 속으로 체화하기 위한 가장 적절한 방법을 평가하고 있다. 그러는 사이에, 우리는 미래 사망률을 조정하려고 시도하지는 않고 있다. 이것은 편익이 미래 속으로 예상될 때 증가하는 편향을 과잉측정하는 것과 마찬가지로, 미래에 사망률 편익의 과잉측정을 초래할 것이다. 우리는 이번에는 CAIR을 위하여 분석된 년도들(2010년과 2015년)에서 잠재적 편향의 크기에 관한 계량화된 예측을 하지는 않는다.

[표 4-9]는 천식증상을 위한 적용가능한 인구를 결정하기 위하여 사용된 이환율을 나열하고 있다.⁹⁵⁾ 이것은 현재의 천식 이환율을 반영하며 미래에 이환율의 어떠한 변화도 가정하지는 않는다.

[표 4-8] 일반모집단에서 Impact 함수로 나타낸 기준선 발생율과 모집단 이환율

Endpoint	매개변수	Value	출 처
사망	일일 혹은 연간사망율	나이, 병의 원인 및 카운티별 비율	CDC Wonder (1996-1998)
병원입원	일일 입원 비율	나이, 지역, 및 구체적인 입원 원인에 따른 비율	1999 NHDS 공용데이터파일

95) EPA 보고서, Table 4-10, 4-50.

Endpoint	매개변수	Value	출 처			
천식관련 응급실 방문회수	일일응급실방문비율	나이, 그리고 구체적인 지역별 방문비율	2000 NHAMCS 및 1999 NHDS 공용데이터파일			
만성기관지염	연간 이환율		Abbey et al. (1993)			
	18-44세	0.0367				
	45-64세	0.0505				
	65세이상	0.0587				
비치명적 심장병	연간 발생율		Rosamond et al. (1999)			
	(18세 이상)					
	북동부	0.0000159				
	중서부	0.0000135				
천식악화	일일 발생율 (18세 이상)	남부	0.0000111	Ostro et al. (2001)		
		서부	0.0000100			
		흑인 천식 아동들 가운데 발생 및 이환율				
	거친 숨소리	기침	0.076(0.173)		Vedal et al. (1998)	
		호흡 곤란	0.067(0.145)			
		천식 아동들 가운데 이환율	0.037(0.074)			
	거친 숨소리	기침	0.038			
		호흡 곤란	0.086			
호흡 곤란		0.045				
경미한 기관지염	연간 기관지염 발생율, 아동	0.043	미국폐협회(2002)			
Lower Respiratory	아동들 가운데 daily lower respiratory	0.0012	Schwarz et al. (1994)			

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

Endpoint	매개변수	Value	출 처
Symptoms	symptoms incidence		
Upper Respiratory Symptoms	아동들 가운데 daily upper respiratory symptoms	0.3419	Pope et al. (1991)
결근일 (근로상실일)	개인당 (18-65) 결근 일 발생율		Adams et al. (1999)
	18세-24세	0.00540	
	25세-44세	0.00678	통계청(2000)
	45세-64세	0.00492	
MRADs	개인당 MRAD 발생율	0.02137	Ostro and Rothschild(1989)
결석일	개인당 결석율	0.055	국립교육통계센터 (1996)
	개인당 질병 관련 결석율		Adams et al. (1999)
	북동부	0.0136	
	중서부	0.0146	
	남부	0.0142	
	남서부	0.0206	
	개인당 호흡기 관련 결석율		Adams et al. (1999)
	북동부	0.0073	
	중서부	0.0092	
	남부	0.0061	
남서부	0.0124		

[표 4-9] Impact 함수에 있어서 천식 인구를 평가하기 위하여 사용된 천식 이환율

	Asthma Prevalence	Rates
모집단	Value	출 처
모든 나이	0.0386	미국폐협회(2002a,Table7)
18세 미만	0.0527	미국폐협회(2002a,Table7)
5세-17세	0.0567	미국폐협회(2002a,Table7)
18세-44세	0.0371	미국폐협회(2002a,Table7)
45세-64세	0.0333	미국폐협회(2002a,Table7)
65세 이상	0.0221	미국폐협회(2002a,Table7)
남자, 27세 이상	0.0210	2000 HIS 공용데이터파일
흑인, 5세-17세	0.0726	미국폐협회(2002a,Table7)
흑인, 18세미만	0.0735	미국폐협회(2002a,Table7)

2.5.4. 건강 endpoints를 금전화하기 위한 단위 가치를 선정하기

건강효과를 적절한 경제적 가치로 측정하는 데 있어서 그 효과가 발생하기 이전인 사전적 측정(ex ante)과 그 효과가 발생한 이후인 사후적 측정(ex post) 방법이 있다. 대기오염은 일반적으로 조금만 감소하여도 건강효과에 영향을 미친다. 그러므로 대기오염의 감소가 건강에 미치는 영향을 계량화하는 데에는 사전적 방법으로 측정한 WTP를 사용하는 것이 적절하다. 그러나, 역학적 연구방법은 질병의 원인 및 발생에 관계되는 요인, 숙주 및 환경의 세 요소간의 모든 관계를 연구하는 방법이므로, 대기오염의 감소가 구체적인 건강에 미치는 영향

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

을 조사하는데 있어서, 이와 관련한 다른 영향요소까지 함께 조사한다. 그러므로 역학적 연구방법으로 인한 결과값을 사용하기 위해서는 적절한 조정이 필요하다. 즉 모집단 전체 중에서 질병이 발생한 인원을 조사해서 확률값을 찾고, 각 개인 WTP를 구함으로써 경제적 계량화를 하는 것이다. 예컨대, 대기오염의 감소로 인해서 조기사망 위험이 기존 10,000명 중 2명에서 1명으로 줄었다고 가정하자. 만약 1/10,000로 줄어든 확률에 대해서 개개인의 WTP가 100 달러라고 한다면, 위험률감소 0.0001에 대해서 각 개인의 WTP가 100 달러이므로, 총 WTP는 1,000,000 달러가 되는 것이고 이것이 경제적 가치로 환산한 값이 되는 것이다. 이 방법을 사용하면, 역학적 연구방법으로 조사한 집단의 크기가 자동적으로 경제적 가치에 환산된다. 조기사망뿐만 아니라 다른 건강 endpoints를 환산하는 데에도 이 방법을 사용한다.

병원입원과 같은 몇몇 건강효과에 대하여는 위의 WTP 방법이 일반적으로 유용하지 않다. 이러한 경우에는, 병원 입원을 하지 않기 위해 직접적으로 사용된 치료비용을 우선적으로 고려해야 한다. 치료효과로 인한 고통의 감소와 같은 요소들은 경제적 가치를 산출하는 데 포함되지 않는다. [표 4-10]은 각각의 건강 endpoints와 그에 대한 WTP의 값을 나타내고 있다.⁹⁶⁾ 1990년도의 소득을 기준값으로 정하고, 2010년과 2015년은 향후 경제성장에 대한 요소를 고려해서 소득을 결정하였다. 병원입원과 관련된 질병은 국제질병분류 (International Classification of Disease, ICD)⁹⁷⁾에 따른다. 아래에서 조기사망, 만성기관지염, 비치명적 심장병, 학교결석에 대한 경제적 계량화의 방법에 대해서 다른

96) EPA 보고서, Table 4-11, 4-52~55.

97) WHO가 국제적으로 통일한 질병·상해 및 죽음의 원인 등을 통계 분류하여 각국이 행정상 목적으로 여러 통계에 사용할 것을 권고한 것으로 각각의 질병에 대해서 분류하여 숫자 및 문자로 나타낸다. 예컨대, 편도선 비대증의 코드는 J35.1이다. ICD 9 code법이 업데이트 되어서 현재는 ICD 10 code법을 사용하고 있다. 우리나라에서는 ICD를 번역한 KCD를 제정한 이래 현재까지 WHO 제10차 개정 국제질병분류(ICD 10 code법)의 수정·권고안을 반영한 KCD 4차 개정판(2002. 7)을 현재 사용하고 있다.

다. 그리고 기존 분석과의 일관성 유지를 위해서 1990년도를 기준값으로 하며, [표 4-10]에서 제시된 값으로 미래에 대한 가치를 산출한다. 질병비용 예측값은 1999년 달러가치로 환산하여 사용하고, 소비자물가지수항목 중 의료항목(medical CPI)⁹⁸⁾을 사용한다.

2.5.4.1. 조기사망위험의 감소로 인한 경제적 편익 측정

조기사망위험의 감소로 인한 경제적 편익을 측정하는 데 있어서 대규모 인구가 경험하는 사망위험에서의 작은 변화의 가치를 위한 측정 방법인 VSL을 사용한다. VSL의 예측값은 각개인의 사망리스크에 대해서 소량의 변화값을 총계하여 도출한다. 이 분석에서는 한 사람의 죽음에 대한 가치를 1999년 달러가치로 550만 달러로 가정한다. 이 값은 메타분석기법을 사용하여, 직업 종류로 발생하는 위험과 그에 따른 임금과의 상관관계를 조사한 VSL 기술자료에서 도출한 평균값을 나타낸다. VSL의 분포는 1달러에서 1000만 달러값의 신뢰 구간을 가지며, 이 값은 직업 종류로 발생하는 위험과 그에 따른 임금과의 상관관계를 조사한 두 가지 방법의 메타분석으로 도출된다. Mrozek and Taylor(2002)의 메타분석방법에 의하면 전체의 신뢰구간을 4구간으로 나누었을 때, 1달러에서 100만 달러가 첫 구간이 된다. Viscusi and Aldy의 메타분석방법에 의하면, 1000만 달러가 4구간의 최종값이 된다. 이 두방법을 고려하여 VSL값이 신뢰구간을 결정하였다. 대부분의 메타분석 연구방법은 1990대 혹은 그 이전의 데이터값에 기초하여 조사되었으므로, 여기서의 VSL 예측값도 1990년 당시의 임금과 소득을 기준값으로 하여 예측한다. 향후 연구방법들이 더욱 발전하여, 메타분석을 이용해서 각 개인의 소득까지 고려된 VSL이 산출될 수도 있다. 그로 인하여 더욱 신뢰성있는 기준값이 측정될 수 있을 것이다.

98) 미국 CPI의 항목은 식음료, 주거, 교통, 교육 및 통신, 레저, medical care 등으로 구성되어 있다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

앞에서 언급했듯이, PM노출로 인해서 발생하는 건강상의 위험발생에 대해서 20년이라는 시간을 고려하여 조기사망의 감소로 인한 편익을 계량화하였다. 이러한 시간을 고려하여 미래가치를 측정하는데 있어서 연간 3%의 할인율⁹⁹⁾을 적용하여 경제적 가치를 계량화하였다.

조기사망감소를 경제적 가치로 계량화하기 위한 적절한 방법에 관한 경제학 문헌은 여전히 개발 중에 있다. 조기사망에서의 예상감소의 예측값을 채택하는 것은 경제학과 공공정책분석 분야 내에서의 지속적 논의의 주제이다. EPA는 나이, 건강상태, 사회경제적 지위, 성별 또는 성인모집단의 그밖의 특성 등이 상이하다 하더라도 구조된 생명(lives saved)에 할당된 금전적 가치에 있어서는 구별을 하지 않는다.

SAB 소속 Environmental Economics Advisory Committee(EEAC)¹⁰⁰⁾의 권고에 따라, EPA는 사망위험에서의 감소를 경제적 가치로 측정하는 방법으로 VSL 접근법을 사용한다. 노동시장에 대한 연구들 간에 서로 차이가 있지만, 영향을 받은 모집단과 위험의 성질에 있어서의 그러한 차이가 상향 및 하향 조정 모두를 암시한다. [표 4-11]은 VSL 예측값의 편향에 대한 가능성과 그 원인을 나타낸다.¹⁰¹⁾ VSL값을 예측하기 위한 통합적이고 균형적인 분석도구가 현재로서는 존재하지 않기 때문에, EPA는 한사람의 생명에 대한 VSL값을 550만 달러로 가정하는 것이 타당하다고 전제하고 있다.

EEAC에서는 VSL값의 정확한 접근방법에 대해서 많은 검토를 해왔다. SAB의 EEAC에서는 노동시장연구를 통한 VSL 예측값에 대한 사

99) EPA에서는 PM과 관련한 건강에 대한 경제적 편익을 계량화하는데 있어서는 3%의 사회적 할인율을 채택하였다. [표 3-10]에서는 7%의 할인율을 적용한 값도 제시하고 있다. 7%의 할인율은 일반적으로 민간부문에서 많이 적용하는 값이다. 7% 할인율을 적용한 값을 구하는 것은 이 정책과 관련된 자금을 기타 다른 부문 및 민간부문에 활용하는 경우의 기회비용을 측정하기 위한 것이다.

100) 사망위험에 대한 감소를 경제적 가치로 계량화하는 것과 관련한 이슈들에 대해서 EPA에게 권고하는 위원회.

101) EPA 보고서, Table 4-12, 4-57.

용을 EPA에 권고 했으며, 또한 거기에서 발생하는 VSL 예측값의 불확실성에 대한 조정을 권고하였다. 민감도 분석을 통해서, VSL의 불확실성에 큰 영향을 주는 것은 위험감소를 측정하는 시기에 따라 달라진다는 것이다. 즉, PM노출과 그로 인한 조기사망간의 효과를 측정할 때, 잠복기간을 충분히 고려하여 측정해야 한다.

[표 4-10] 건강 endpoints의 경제적 가치를 계량화하기 위하여 사용된 단위가치

연도별 소득을 고려하여 경제적 가치로 계량화된 값				
Health Endpoint	1990년	2010년	2015년	예측값의 추론
조기사망(VSL)	\$5,500,000	\$6,000,000	\$6,400,000	Mrozek and Taylor (2002) Viscusi and Aldy (2003)
만성기관지염	\$340,000	\$380,000	\$400,000	Viscusi et al(1991)
비치명적 심장병(심근경색) 3% 할인율				Cropper and Krunpnick (1990) - 질병으로 인한 소득손실에 대해서 5년 기간으로 하여 각각의 나이별로 3%와 7%의 할인율을 적용.
00 - 24세	\$66,902	\$66,902	\$66,902	
25 - 44세	\$74,676	\$74,676	\$74,676	
45 - 54세	\$78,834	\$78,834	\$78,834	
55 - 65세	\$140,649	\$140,649	\$140,649	
66세 이상	\$66,902	\$66,902	\$66,902	
7% 할인율				Wittels et al(1990) and Russel et al(1998) - 직접적 치료비용 자료
00 - 24세	\$65,293	\$65,293	\$65,293	
25 - 44세	\$73,149	\$73,149	\$73,149	
45 - 54세	\$76,871	\$76,871	\$76,871	
55 - 65세	\$132,214	\$132,214	\$132,214	
66세 이상	\$65,293	\$65,293	\$65,293	
병원입원				질병치료비용에 대한

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

연도별 소득을 고려하여 경제적 가치로 계량화된 값				
Health Endpoint	1990년	2010년	2015년	예측값의 추론
만성폐질환(COPD) - ICD code 490-492,494-496	\$12,378	\$12,378	\$12,378	예측값은 ICD-9 code 자료에 근거함(이하 폐렴, 천식관련입원, 모든 심장혈관질환도 마찬가지로 포함). Smith et al(1997) - \$311.55 Stanford et al(1999) - \$260.67을 평균한 값
폐렴 - ICD code 480-487	\$14,693	\$14,693	\$14,693	
천식관련 입원 모든 심장혈관질환	\$6,634	\$6,634	\$6,634	
- ICD code 390-429	\$18,387	\$18,387	\$18,387	
천식으로 응급실입원	\$286	\$286	\$286	
호흡기 질환(입원불요)				Pope et al Pope et al Rowe and Chestnut (1986) Neumann et al(1994)
Upper respiratory symptoms	\$25	\$26	\$26	
Upper respiratory symptoms	\$16	\$17	\$17	
천식악화	\$42	\$43	\$44	
급성 기관지염	\$360	\$370	\$380	
활동제약, 결석및 결근일수 결근일(근로상실일) 결석일 노동자 생산성	\$75	\$75	\$75	US year 2000 Census US Census Bureau 2001 US Bureau of Labor Statistics
MRADs	일일 오존치 10% 변함에 따라 \$0.95/1인 \$51	일일오존치 10% 변함에 따라 \$0.95/1인 \$53	일일 오존치 10% 변함에 따라 \$0.95/1인 \$54	

[표 4-11] 응용 VSL과 이론 VSL을 개발하는데 있어서 사용된 요소들간의 차이에 관한 조기사망감소의 예상편익에 대한 예상영향

요 소	편향의 예상방향
나이	불확실하지만, 과대평가 가능성 있음
기대수명/건강상태	불확실하지만, 과대평가 가능성 있음
위험에 대한 태도	과소평가
소득	불확실함
자발적 / 비자발적	불확실하지만, 과소평가 가능성 있음
갑작스런 재난으로 인한 / 오랜시간 소요된 사망	불확실하지만, 과소평가 가능성 있음

조기사망에 대한 경제적 평가의 불확실성¹⁰²⁾

조기사망과 관련된 경제적 편익은 최종 CAIR을 적용한 후에 나타나는 경제적 편익을 측정하는 데 있어서 가장 큰 부분을 차지한다. EPA는 사망의 감소로 인한 편익에 대한 가치측정을 하는 데 있어서 불확실성이 가장 크게 나타난다고 여겨왔다. 가치 측정을 하는 데 있어서 이러한 불확실성의 존재로 인하여, 사망에 대한 가치평가를 하는데 있어서 여러 가지 경제적 접근 방법을 적절하게 규정하고 이해하는 것이 중요하다. 또한 경제적 가치평가를 하는데 있어서 각 개인의 특성 및 위험의 특성에 따른 차이점을 반영할 수 있는 새로운 접근방법이 필요하고, 그러한 방법적 고려는 대기오염 감소가 사망에 미치는 영향을 더욱 더 잘 반영할 수 있을 것이다.

102) 편익의 추정이 불확실한 경우에는 기존의 연구방법으로 도출된 가능한 결과들을 고려해서 완전한 확률분포를 사용한다. 그리고 중앙경향치를 나타내는 값에 대한 보완적 측정을 위하여 상한과 하한값의 측정치를 고려해서 측정한다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

대기오염에 관한 건강과학문헌은 질병으로 인한 사망에의 위험이 각 개인에게 미치는 영향의 정도는 각 개인의 특성과 관련있다고 한다. 예컨대, 몇몇 연령별 집단은 다른 연령별 집단(예: 노인과 아동)보다 대기오염에 훨씬 더 민감한 것처럼 보인다. 건강 상태 또한 민감성에 영향을 미친다. 사망위험감소에 대한 이상적 편익측정은 자신의 생존기회를 증가시키기 위한 각 개인의 WTP + 자신 이외의 다른 사람의 생존율을 증가시키기 위한 WTP + 인간의 위의 특성을 반영한 것이다. 이상적 측정방법은 위험이 감소되는 내용뿐만 아니라 각 개인에게 제공되는 위험감소상품의 구체적 성질 또한 고려할 것이다. 이러한 것들을 고려하여 가치를 측정하기 위해서 중요한 것은 대기오염의 감소로 인해 사망의 위험이 줄어드는 데 있어서 시간적 요소를 고려하고 개인에 따른 차이점을 고려해야 한다. 각 개인의 특성을 고려한 생존곡선이나 연령별 생존확률 등을 고려하여 편익분석을 해야 한다. 예컨대, 각 개인의 현재 생존확률을 변경하는 것은 그들의 미래의 생존확률 또한 이동시킨다. 이러한 확률의 이동은 생존곡선이 나이, 건강상태, 개인이 생존할 것 같은 현재 나이와 같은 특성에 달려 있기 때문에 개인들 간에 다를 것이다.

비록 생존곡선 접근법이 대기오염을 감소시키는 것과 관련된 조기사망의 감소된 위험의 편익을 가치평가하기 위한 이론상 선호되는 방법을 제공하기는 하지만, 집행하기 위해서는 엄청난 양의 데이터를 요구한다. 경제적 가치평가 문헌은 아직까지 이러한 자세하고 방대한 데이터를 가지고 있지 못하다. 결과적으로 이러한 연구방법은 현재의 수준으로서는 이상적인 접근방법일 수밖에 없기 때문에, 여기서의 분석방법은 VSL 접근법을 사용하여 회피된 조기사망위험을 가치평가한다. 조기사망의 가치평가에 대한 그밖의 구체적 불확실성은 다음과 같다:

- * 연구결과 간 차이 : VSL 문헌이 대기오염감소로 인한 조기사망에 대한 충분한 예측을 제공하는지 여부에 대한 상당한 불확실성이

존재한다. 그럼에도 불구하고 VSL 연구의 대부분은 중년의 근로자 집단의 위험에 대한 가치를 포함하고 있다. 대부분의 연구는 헤도닉 접근방법을 사용하여 직업의 위험정도에 따른 임금에 있어서의 차이를 연구하고 있다. 직업의 위험정도에 따른 집단과 사망위험 간에 나타나는 특징은 WTP에 있어서도 각각 다르게 나타난다. 기존 연구방법으로 도출한 WTP를 적절하게 조정하는 것이 필요하다. 각각의 연구가 모집단이나 연구목적 등이 다르므로, 그 특성을 고려하여 WTP값이 본 연구에 맞도록 조정하는 것이 필요하다.

- * 위험감소의 정도 : 위험에 따른 임금과의 상관관계를 조사한 연구에서부터 도출된 VSL 예측값은 CAIR 적용 후에 대한 비용편익분석을 하는 본 연구에 적용하기 위해서는 편익의 이전(transferability)¹⁰³⁾이 필요하다. 예컨대, 한 조사연구에서의 사망위험율이 1/100,000로 줄어드는데 대한 WTP가 50 달러라는 연구결과가 나왔다고 하자. 그러나, 이 연구 데이터를 활용하여 사용할 실제 연구에 있어서의 사망확률의 감소는 1/10,000이라고 하자. 이런 경우에 WTP에 대한 함수가 선형적이라는 가정 하에서 총지불의사액수는 1/10로 줄어드는 500,000 달러가 되는 것이다(Rowlatt et al,1998).
- * 평가된 위험에 대한 자발성 : 대기오염은 사람들이 가지고 있는 직업에 따라서 미치는 사망위험의 정도는 다르게 나타난다. 그렇지만, 여기서 가장 중요하게 생각해야 할 것은 대기오염에 관련된 위험에 대한 감수가 자발적인지 아니면 비자발적인지 파악하는 것이 중요하다. 몇몇 연구에 따르면, 사람들은 예측할 수 있는 위험보다는 예측할 수 없는 위험에 대한 WTP를 더 크게 생각하

103) 정책의 결과에 대한 가치를 추정하기 위해서는 기존 연구결과에서 도출된 편익을 이용하여 현재의 연구결과에 부합되도록 편익을 활용하게 되는 데 이러한 과정을 편익의 이전이라고 한다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

고 있을 거라고 가정한다. 만약 그렇다면, 위험에 따른 임금과의 상관관계를 조사한 연구에서 도출된 예측값은 아마도 예측할 수 없는 위험에 대한 WTP를 과소평가할 가능성이 있게 된다.

- * 갑작스런 사망과 오랜시간 소요된 사망 : 위험의 속성에 따라서 두 가지로 사망을 나눌 수 있다. 하나는 작업장에서 발생하는 재난으로 인한 갑작스런 사망과 또 하나는 대기오염으로 인하여 장기간의 질병과 고통을 통해서 사망하는 것이다. 몇 가지 실증조사에 의하면, 장기간의 질병과 고통을 통해서 사망에 이르는 위험을 감소시키는데 있어서의 WTP가 갑작스런 사망을 감소시키는데 있어서의 WTP보다 더 크다고 하였다. 그러므로 현재의 분석방법에 의한 WTP는 과소평가될 가능성이 존재하게 된다.
- * 헤도닉 임금이론의 특성으로 인한 불확실성 : Shogren and Stamland의 연구에 의하면, 헤도닉 임금이론에 기반한 VSL 예측값이 과다평가될 가능성이 존재한다. 헤도닉 모형은 환경재에 대한 시장이 명시적으로 존재하기 않기 때문에 간접적으로 환경재에 대한 가치를 측정하는 방법이며 현시선호법을 사용하고 있다. 헤도닉 임금이론에 따르면, 노동자가 보다 좋은 조건의 일자리를 선택하는 경우 그에 따른 보상비용으로 일정한 임금 손실을 감내하는 것으로 가정한다. 반면 비희망 직장을 선택한 노동자의 경우는 사회적으로 불리한 조건 등을 감내하면서 그에 대한 보상으로 임금이득을 보고 있다고 가정한다. 그러므로, 비희망직장을 선택한 한계 노동자와 같이 상대적으로 높은 위험성을 지니고 있는 노동자의 선호가 반영되고 있고 임금의 차이와 위험성의 측정과의 관계를 정확하게 측정할 수 없는 한계로 인하여 VSL 예측값이 과다평가될 가능성이 존재한다.

2.5.4.2. 만성기관지염 위험감소의 가치측정

만성기관지염 위험감소에 대한 WTP는 Viscusi et al. (1991)의 연구에서 도출되었다. 이 연구에서는 만성기관지염이 심각한 경우만을 응답자 설문방식으로 조사하였다. 심각한 경우의 기관지염을 회피하기 위한 WTP의 값을 1차적으로 구한 후, 2차적으로는 Krupnick and Cropper (1992)의 연구 방법(병의 심각성에 따른 지불의사액의 탄력도)을 사용하여 덜 심각한 만성기관지염의 WTP를 예측한다.

이 분석에서 사용하는 WTP값은 분포된 통계값들의 평균을 사용한다. Viscusi et al. (1991)의 연구에서 도출된 WTP와 Krupnick and Cropper (1992)의 연구 방법을 사용한 WTP로 인한 불확실성이 존재할 수 있다. 이들의 불확실성을 감안하여 통계적 불확실성 분석기법을 적용하여 WTP의 분포값을 도출하고 평균을 산출한다. PM으로 인한 만성기관지염을 회피하기 위한 WTP 예측값은 2000년 달러가치로 약 331,000 달러이다.

2.5.4.3. 비치명적 심장병(심근경색) 위험감소의 가치측정

비치명적 심장병의 위험감소에 대한 WTP를 산출하기 어려우므로, 질병치료비용을 사용한다. 즉, 심근경색의 감소를 위한 치료비용과 기회비용(그 병으로 인한 소득의 감소)을 구하는 것이다. 질병으로 인한 소득손실에 대해서 5년을 조사기간으로 하여 각각의 나이별로 3%와 7%할인율을 적용한 Cropper and Krupnick (1990)의 연구방법을 사용하였다. 25-40세의 3%와 7%를 적용한 기회비용은 8,774 달러/7,885 달러, 45-54세는 12,932 달러/11,578 달러, 55-65세는 74,746 달러/66,920 달러이다. 이 연구에서는 25세 이하와 65세 이상은 연구대상에서 제외하였으므로, 본 분석대상에서도 제외한다. 다음의 세 문헌이 심근경색에 대한 직접적 치료비용을 측정하는 자료이다 :

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

- * Wittels et al. (1990)에 의하면 심근경색으로 인한 5년 이상의 입원 및 치료비용은 51,211 달러(1986년 달러기준)로 예측되었다. 여기서는 할인율을 적용하지 않았다. 이 연구방법은 CAA § 812 Retrospective Study에 명시되어 있는 관상동맥성 심장질환비용에 대한 예측에 사용되었다. 소비자 물가지수를 사용하여 예측된 치료비용은 109,474 달러(2000년 달러기준)이고 이 값의 산출은 치료비용 모델링 기법을 이용한다. 급성 심근경색으로 인한 입원기간은 1980년에는 평균 12.9일이고 1983년에는 11일이었다. Wittels et al. (1990)은 이 조사에서 평균입원기간을 10일로 하였다. 1983년부터 현재까지 급성심근경색으로 인한 입원기간이 얼마나 줄어들었는지는 확실하지 않다. 미국 의료보험연구 및 질을 위한 행정청(Agency for Healthcare Research & Quality)의 2000년 기준 데이터베이스에 의하면 평균입원기간이 5.5일로 나타났다. 그러나, 이 기간은 병원입원기간 중 사망한 수까지 포함하고 있어 비치명적 심근경색환자수는 제외되어 있으므로 실제 입원기간은 더 짧아질 가능성이 있다.
- * Eisenstein et al. (2001) 연구 조사결과에 의하면 심근경색으로 입원한 환자 치료를 위한 10년간 예측비용은 44,643 달러(1997년 달러기준), 49,651 달러(2000년 달러기준)으로 추산했으며 입원환자에 대한 치료비용은 내과진료와 입원비가 포함되었다.
- * Russell et al. (1998) 연구 조사 결과에 의하면 비치명적 심근경색 치료를 위해서 발병 첫째 소요되는 치료비용은 15,540 달러(1995년 달러기준)이며 그 이후로는 매년 1,051 달러의 추가비용이 발생한다고 조사되었다. 이 값은 2000년 달러기준으로 환산하면 5년간 23,353 달러, 10년간 29,568 달러의 비용이 소요된다(할인율 적

용하지 않음). 아래 [표 4-12]는 위 세 가지 연구의 주요한 차이점을 나타낸다.¹⁰⁴⁾

[표 4-12] 비치명적 심장발작을 위한 대안적 직접치료비용

연구	직접 치료 비용(2000\$)	할인율	소요기간
Wittels et al. (1990)	\$109,474	적용없음	5
Russell et al. (1998)	\$22,331	3%	5
Eisenstein et al. (2001)	\$49,651	3%	10
Russell et al. (1998)	\$27,242	3%	10

위에서 지적했듯이, 세 연구로 인한 예측값은 차이가 존재하고 그 원인에 대해서는 충분히 밝혀지지 않았다. 임금과 관련된 기회비용을 예측한 Cropper and Krupnick (1990)이 연구한 조사기간은 5년으로 Wittels et al. (1990)과 Russell et al. (1998)의 그것과 일치한다. 그러므로, Wittels et al. (1990)과 Russell et al. (1998)의 직접치료비용을 평균한 값과 Cropper and Krupnick(1990)의 할인율을 3% 적용한 기회비용을 합산하여 예측비용을 구한다. 아래 [표 4-13]은 5년간 예측값의 단순 평균인 \$65,902를 사용하고, 그것을 5년간 기회비용예측에 더한 것을 나타낸다.¹⁰⁵⁾

[표 4-13] 비치명적 심근경색치료를 위한 5년간의 비용예측값 (2000년 달러)

연령대	기회비용	치료비용	총비용
0-24세	\$0	\$65,902	\$65,902
25-44세	\$8,774	\$65,902	\$74,676

104) EPA 보고서, Table 4-13, 4-62.

105) EPA 보고서, Table 4-14, 4-62.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

연령대	기회비용	치료비용	총비용
45-54세	\$12,253	\$65,902	\$78,834
55-65세	\$70,619	\$65,902	\$140,649
66세 이상	\$0	\$65,902	\$65,902

2.5.4.4. 결석일수 감소에 대한 가치측정

오존으로 인한 호흡기관련 질병과 증상으로 인해서 학생들의 결석일수가 증가한다. 그런데, 호흡기 관련 질병으로 인한 증상은 오존을 원인으로 하지만, 오히려 PM과 관련성이 더욱 크고, 이로 인해서 이중계산의 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 호흡기 관련 질병으로 인한 증상의 원인을 통합해서 계산함으로써 이중계산의 문제를 제거할 수 있다.

결석일에 대한 가치를 측정하는 한가지 가능한 방법이 부모의 기회비용 접근법을 사용하는 것이다. 즉, 취학연령아동들이 질병으로 인해서 결석하게 되면 집에 머무르게 되고, 부모들은 자녀들을 돌보기 위해서 일을 할 수 없게 됨으로 인해 기회비용이 발생하게 된다. 그런데, 이와 같은 기회비용의 개념으로 결석일에 대한 가치를 측정하게 되면 두 가지 문제점이 나타나게 된다. 첫째, 결석을 유발하는 호흡기 관련 질병을 회피하기 위한 WTP가 생략된다. 둘째, 이러한 방법의 가치측정은 결과적으로 결석일의 가치를 부모의 노동기회비용으로 대체하기 때문에 결석일에 대한 가치는 결과적으로 고려되지 않는 것과 같은 효과가 발생하게 된다. 그러므로 우리는 결석을 유발하는 호흡기관련질병과 증상을 회피하기 위한 WTP를 측정할 수 있는 접근방법을 조사한다. 그 과정에서 부모의 기회비용에 대해서도 조사한다.

기회비용 접근법을 위해서 다음 가정을 하자. 즉, 부모가 모두 존재하며 모(母)가 아픈 아이를 보살피기 위해서 집에 머무른다는 전제를 한다. 2001년 통계청자료는 여성 노동인구를 미혼, 기혼, 기타(이혼,

별거, 미망인)로 분류해서 조사했으며, 우리는 이 자료를 이용하여 계산하여 아래 [표 4-14]에 나타낸다.¹⁰⁶⁾

[표 4-14] 자녀가 있는 직장여성의 수와 비율 (단위 : 백만)

	노동인구(A)	참여율 (B)	총인원 (A ÷ B)	총인원 구성비(C)	인구가중치를 적용한 참여율 (B×C)의 합
미 혼	3.1	73.9%	4.19	11.84%	
기 혼	18.2	70.6%	25.78	72.79%	
기 타	4.5	82.7%	5.44	15.36%	
총 계			35.2		72.85%

자녀들의 하루 결석으로 인한 모(母)의 임금 손실액수(만약 모(母)가 아픈 아이와 함께 집에 있어야 한다면, 예상 일주일 상실 임금의 평균은 551달러이고, 하루 평균은 주 5일로 계산하여 103달러 임)는 103달러의 72.85%인 75달러로 추산한다.¹⁰⁷⁾ 물론 전업주부의 기회비용도 고려되어야 한다. 경제학적인 개념으로 전업주부의 임금은 남편의 임금과 최소한 같거나 그 이상이라고 간주한다. 물론 불완전 노동시장에서는 다르게 계산될 수 있겠지만, 완전고용시장을 전제한 경우에 그러하다. 전업주부가 아이를 돌보는 데 희생한 시간의 양을 결정하는 데 있어서 불확실성이 존재하게 된다. 전업주부의 일상적 활동 중 하나로 병든 아이를 돌보는 것이 포함될 수 있기 때문이다. 이러한 불확실성을 전제로 해서, 여기 분석에서는 전업주부가 병든 아이를 돌보는 일에 있어서 추가로 발생하는 기회비용은 없다고 가정한다.

106) EPA 보고서, Table 4-15, 4-64,

107) Hall et al. (2003)의 최근 연구에서는 위와 유사한 방법을 사용하여 캘리포니아 주 내 3개 카운티를 대상으로 한 조사결과, 하루 결석으로 인한 모(母)의 기회비용을 70~81달러로 추산하였다. 이 값을 평균하면 대략 75달러가 나오는데, 이 연구 예측값과 일치한다.

2.6. 인간복지에 미치는 영향에 대한 경제적 평가

PM과 오존은 인간복지에 영향을 미치는 환경질에 관한 수많은 문서화된 효과를 가지고 있다. 이러한 복지효과는 토양에 미치는 영향, 작물과 수목의 생산성 저하에 미치는 영향 등을 포함하여 재산에 직접적 손실을 끼치는 경우와 자연 생태계 기능의 변화를 통해서 레크리에이션 경험에서의 상실이나 중요한 자원들의 존재에 영향을 미치는 간접적 손실의 경우로 나눌 수 있다. 여기서는 PM과 오존이 미치는 각각의 영향과 경제적 가치로 계량화하는 것을 다룬다.

2.6.1. 가시도 편익

CAIR 적용으로 인한 대기 PM농도의 감소는 동부의 가시도를 개선시킬 것이다. 가시도는 사람들의 다양한 일상 활동에 직접적으로 영향을 미친다. 주거공간, 작업장 등에서 느끼는 개인적 편익증대 뿐만 아니라 스모키 국립공원과 같은 공공 편익증대효과가 존재한다. 여기에서는 가시도의 개선으로 인한 경제적 편익을 측정하는 방법을 다룬다.

가치측정을 위해서, 가시도의 endpoints를 규정하는 것이 쉽지는 않다. PM농도의 증가로 인한 광소멸현상으로 가시도가 악화되고, 가시도 측정에 대한 기준이 필요하게 된다. Sisler (1996)는 가시도의 측정 기준으로 deciview라는 개념을 규정하였다. 1 deciview의 증가는 사람이 인지할 수 있을 정도의 시각적 변화로 대략 10% 정도의 밝기가 개선된 것으로 Sisler는 정의했다. 가시도 변화를 예측하기 위하여 사용된 대기질 모델들은 측정단위로 deciview를 사용하였다.

EPA는 가시도 변화의 두 범주인 거주 지역의 가시도(residential visibility)와 레크리에이션 가시도(recreational visibility)로부터의 편익을 고려한다. 양자 모두에 있어서 경제적 편익은 사용가치와 비사용가치로 구성된

다고 믿는다. 사용가치란 특정자원에 대한 소비로 인해서 얻게 되는 가치를 의미한다. 예컨대, 맑은 공기를 느끼고 신선한 물을 마시고, 아름다운 자연을 만끽하고 야생동물을 사냥하고 아름다운 새를 찍고 구경하는 등의 행위로 인해 얻게 되는 만족감 같은 것이 사용가치의 대표적 예라고 할 수 있다. 비사용가치(존재가치)란 비록 그 자연환경 속에서 소비행태는 일어나지 않고 있지만, 자연환경을 잘 보존하는 것 그 존재자체에 가치를 부여하는 것을 비사용가치라 정의할 수 있다. 비사용가치는 특히 국립공원과 역사적 유적지와 같은 레크리에이션 지역에서 중요한 의미가 있다.

거주지역의 가시도의 개선으로 인한 편익대상지역은 도시, 준도시 지역, 전원지역, Class I 지역으로 분류되지 않은 레크리에이션지역도 포함한다. 거주지역의 가시도 편익은 가시도 개선으로 인한 거주지역 주민들의 반사적 이익이며 레크리에이션지역의 가시도 편익은 Class I 지역의 가시도 개선으로 인한 국민 전체의 편익으로 전제한다. Class I 지역 근처에 거주하는 사람들의 경우는 가시도의 개선으로 인한 편익은 더 높게 나타날 것이다. 가시도 개선으로 인한 경제적 편익 측정에 관하여 현재 충분히 타당성이 있는 연구는 두 개뿐이다. 하나는 McClelland et al. (1993)의 거주지역에 관한 연구이며, 다른 하나는 Chestnut and Rowe (1990a; 1990b)의 레크리에이션지역에 관한 연구이다. 비록 이에 관한 많은 연구자료들이 존재하고 있지만 대다수의 자료들은 1980년대에 행해진 연구들이며 현재의 기준에 맞지 않는 것들이 대부분이다. McClelland et al. (1993)와 Chestnut and Rowe(1990a; 1990b)의 연구는 조건부가치측정방법(Contingent Valuation Method, CVM)을 사용하고 있다. 많은 토론과 논쟁을 통하여, CVM에 대한 많은 개선이 이루어져 왔다. EPA의 결정에 의해서 Chestnut and Rowe의 연구방법이 타당하다고 여겨졌고, 특히 레크리에이션지역의 가시도 개선으로 인한 편익을 측정하는 데 있어서 매우 효과적이라고 간주되었다. EPA는 McClelland

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

et al.의 연구방법에 문제점이 있다는 지적에 따라 여기서는 거주지역 가시도 개선으로 인한 편익을 산출하지는 않는다.

Chestnut and Rowe는 국립공원관리청에 의해서 운영되는 캘리포니아, 남서부, 남동부 지역에 있는 Class I 지역에 대한 가시도를 측정하였다. 5개주에 거주하는 주민들을 대상으로 Class I 지역을 보호하기 위한 WTP에 대한 설문조사를 실시하였다. 설문조사방법으로는 가시도가 다른 여러 개의 사진을 제시하는 방식으로 진행되었다. 각각의 가시도에 차이가 나는 사진들은 이 후 구체적인 deciview값으로 전환해서 분석하였다. 설문조사결과로 인한 모든 데이터를 수집해서 가시도 개선에 따른 WTP를 산출하기 위한 함수를 생성하였고 가계소득을 포함시켰다.

Chestnut and Rowe의 연구는 위의 세 지역을 제외한 다른 지역에 존재하는 Class I 지역의 가시도에 대해서는 조사하지 않았다. 그들의 연구는 총 156개의 Class I 지역 중 86개를 조사하였다. 그러므로 우리는 Chestnut and Rowe가 조사한 이 값을 기반으로 다른 지역을 추론할 수가 있다(기존 조사지역을 기반으로 다른 지역의 편익을 추정하는 편익이전). Chestnut and Rowe의 연구는 최상의 이용가능한 예측을 나타내고는 있지만, 다음과 같은 한계를 가지고 있다:

- * 조사시기가 1980년대 후반이므로, 시간적 차이로 인한 불확실성이 존재한다.
- * 설문조사는 단지 5개 주에만 실시했기 때문에, 조사하지 않은 다른 지역으로 확장적용하는 데 있어서 불확실성이 존재한다.
- * 가시도 개선으로 인한 편익에 대한 가치와 대기질 개선으로 인한 편익에 대한 가치를 분리하는데 있어서 근원적인 어려움이 존재한다. 즉, 설문응답자의 대부분은 국립공원의 가시도 개선으로 인한 편익과 대기질 개선으로 인한 거주지역의 가시도 증가 및 건강효과를 완전히 분리해서 응답하는 데 한계가 있었다.

- * 설문 응답 결과로 나온 가치측정값 자체에 있어서 불확실성이 존재한다. 편익분석을 위해서 EPA는 응답결과로 나온 가치측정값을 연평균 가시도의 변화에 대한 측정값으로 전제했다. 그런데, 응답자는 가장 가시도가 나쁜 날에 영향을 많이 받으므로 연평균값을 전제로 했을 때, 편향(Bias)의 가능성이 존재하게 된다.
- * WTP 설문조사방식에 문제점이 있다. 설문응답자에게 보여준 사진들은 가시도가 일반적으로 최악의 상황인 여름 사진만을 보여주었기 때문에, WTP의 과다측정 가능성이 존재하게 된다.
- * 이 설문조사에는 예산제약에 관한 사항은 포함되어 있지 않으며, 다른 국립공원들의 가시도 사진에 대해서도 포함하고 있지 않다.
- * 이 연구는 남서부 Class I 지역의 가시도 개선에 포커스를 맞추었다. 조사 지역외의 Class I 지역은 각각의 고유한 특성을 지니고 있으므로, 남서부 Class I 지역의 가치측정값을 조사지역 이외로 확장하는 편익이전에 있어서 불확실성이 존재하게 된다.

일반적으로 설문조사를 설계하고 실행하는 데 있어서 결과값은 조사기간에 영향을 받는다. 이후, 위의 선호방법론에 대한 많은 개선이 이루어졌으며, EPA는 향상된 설문조사방법을 반영하는 가시도 향상을 위한 가치측정을 체화할 것이다.

Chestnut an Rowe의 연구조사결과는 설문응답자의 모집단에만 적용할 수 있으므로, 편익의 이전이 필요하다. EPA는 설문조사의 결과를 보완하여 최종 CAIR을 적용했을 때 영향받는 모집단에 대해 적용하였다. 가시도 개선을 변수로 하는 일반적인 WTP 함수는 변수가 추가되어서 가시도의 기준값, 가시도 개선의 최대값, 그리고 가계소득을 고려한 함수로 개선되었다. 설문조사로 산출된 WTP를 CAIR이 적용된 이후의 WTP로 조정하기 위해서 Chestnut an Rowe의 자료를 근거로 만들어진 행위모수(behavioral parameter)를 이용하여 조정한다. WTP값

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

을 조정하기 위한 방법은 Smith et al. (2002) 연구방법을 원용한다. Chestnut(1997)의 자료에 의하면, 가계소득이 증가함에 따라서 가시도 개선을 위한 WTP는 증가하는데, 즉 소득이 1%증가함에 따라서, 가시도 개선을 위한 WTP는 0.9% 증가한다. 여기서는 이 방법을 적용한다. 이 방법을 사용하여, EPA는 CAIR을 적용한 이후의 남동부 Class I 지역의 가시도 개선에 대한 WTP를 2010년에는 11.4조 달러, 2015년에는 17.8조 달러로 추산하였다. 이 금액은 Class I 지역을 포함하고 있는 주에 거주하는 사람들뿐만 아니라 전국의 WTP에 대한 추정치이며, 이 액수에는 실질소득증가분을 반영하고 있다.¹⁰⁸⁾

가시도 개선으로 인한 편익을 측정하는 데 있어서 편익의 이전과정에서 불확실성이 존재하게 된다. 편익함수의 형태를 선택하고, WTP에 대한 주요 변수를 설정해야 하므로 그로 인한 불확실성이 존재하게 된다. 또한 설문대상자들의 수가 적고, 그것을 확장하여 적용하는 과정에서 불확실성이 발생하게 된다.

2.6.2. 농업, 산림, 기타 작물관련 편익

오존기준문서(Ozone Criteria Document)는 오존이 다른 대기오염물질보다 곡물, 토종작물, 생태계에 해를 끼쳐 전국적으로 작물에 영향을 미친다고 지적하고 있다. 지표에서 대류권 10Km 이내에 존재하고 있는 오존은 영향을 받는 지역의 작물과 산림생산에 영향을 미치는 것으로 예상된다.

오존의 감소로 인한 편익을 예측하기 위해서는 오존으로 인한 생산량의 변화, 농작물의 수요와 공급, 상업작물의 종류 등을 고려해야 한다. 오존으로 인한 상업작물의 시장가격과 생산비용의 변화 및 오존

108) 최종 CAIR 적용에 따른 남동부 Class I 지역에서의 가시도 향상에 따른 편익에 대해서는 EPA, Figure 4-2. 4-70을 참조할 것. 이 그림은 개개의 Class I 지역을 위해 모델화된 총편익과 48개 인근 주들 가운데 각 주의 인구에 의해 현실화된 편익 모두를 나타낸다.

이 산림에 미치는 영향 또한 고려되어야 한다. 그러나 이것을 경제적 가치로 계량화하는 데 있어서는 한계가 존재하며, 여기서는 CAIR을 적용했을 때 농작물에 대한 편익을 측정하지는 않는다.

EGUs 프로그램을 적용한 결과 NOx의 감소로 인해서 농작물에 대한 질산염 침적이 감소될 것이다. 질산염 침적으로 인한 효과는 두 가지가 존재한다. 적절한 양의 질산염 침적은 토양의 비옥화를 유발하여 농작물 생산력을 높이는 데 기여한다. 그러나 질산염 침적이 포화상태에 이르면 토양 산성화를 유발하여 농작물 성장에 저해가 된다. 그리고 토양 산성화는 강과 호수를 오염하여 수중생태계에 영향을 미치게 된다. 그런데, 질산염 침적으로 인한 농작물 생산성 증대의 효과가 상대적으로 인간의 건강에 미치는 영향에 비하여 미미하다. 또한 질산의 과포화로 인한 효과 또한 농장에서 자체적으로 원인이 되는 퇴비나 비료 등에 의해서도 유발된다. 그리고 산림 생태계에 미치는 영향의 원인은 질산염 침적뿐만 아니라 오존 등의 다른 오염물질이 복합적으로 작용한다. 그러므로 NOx의 감소로 인한 편익측정을 하기는 쉽지 않다.

2.6.3. 물질손상의 감소로 인한 편익

우리가 모델화한 통제옵션들은 감소된 물질손상의 형태로 경제적 편익을 산출할 것으로 기대된다. 두 개의 중요한 편익 범주가 존재한다. 하나는 노출된 지표면 위에 오물, 먼지, 재 등의 축적을 의미하는 household soiling이고, 다른 하나는 상업용/산업용 건물과 문화 및 역사적 중요성을 지닌 구조물에 대해 부식효과를 가지는 기준오염물질들(criteria pollutants)이다. 특히 역사적인 건물이나 야외 예술품의 경우는 유일성과 비대체성으로 인해 매우 중요한 관심사항이 된다. 이전의 EPA 편익분석은 household soiling 손상에 대한 계량화 측정을 제공할 수 있지만, 그 조사자료는 1970년대 초반 자료이므로, 현재의 분

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

석에 적용하기 힘들기 때문에 household soiling 손상에 대한 계량화는 여기서는 하지 않는다. 또한 EPA는 상업용/산업용 건물과 문화 및 역사적 중요성을 지닌 구조물에 대한 PM 관련 손상의 편익을 측정할 수 없기 때문에 이 또한 여기서는 다루지 않는다.

2.6.4. 감소된 생태계 손상으로 인한 편익

대기오염이 생태계의 보존에 매우 크게 영향을 미치지만, 현재수준으로는 이것을 계량화하는 기술이 부족하다. CAIR 적용으로 NOx의 감소는 적조현상을 감소시키고, 수중식물에 영향을 미치는 등 하천 및 호수 생태계에 큰 영향을 미친다. NOx 감소로 인한 하천 생태계의 편익을 직접적으로 측정하는 함수는 존재하지 않는다. 단지 WTP를 이용해서 간접적으로 예측값을 추정할 수 있을 정도이다. 직접적으로 편익을 측정할 함수도 존재하지 않고, NOx 변화에 의한 한계가치를 측정하는 것이 가능하지 않으므로, 단순히 WTP에 의해서 하천 생태계의 편익을 측정하는 방법도 불가능하다. 생태계에 미치는 영향에 대한 계량모델이 앞으로 더욱 발전하게 되면 이것에 관련된 편익을 측정하는 것은 매우 중요하게 될 것이다. 만약 질산염과 황산염이 어류집단과 같은 수중생태계의 다양성에 미치는 영향에 대해서 측정가능하고 규정할 수 있다면, CVM을 사용하여 개인의 WTP를 측정함으로써 편익분석이 가능하게 될 수 있다. 이것은 앞으로 학자들이 연구해야 할 중요한 분야가 될 것이다.

3. 편익분석 - 결과

앞에서 기술된 Impact 함수와 가치측정함수를 적용하여 오존과 PM의 변화로 인해 발생하는 물리적 변화(예 : 조기사망, 병원입원, 광소멸의 변화 등)를 예측하고 그 값을 다시 경제적 가치로 전환하였다. [표 4-15]는

물리적 건강효과에 관한 예측값을 나타내며,¹⁰⁹⁾ [표 4-16]은 경제적 가치로 계량화한 총편익을 1999년 달러 가치를 기준으로 하여 나타낸다.¹¹⁰⁾

[표 4-15] CAIR: 건강에 대한 역효과 발생건수의 예상 감소

건강 효과	2010 _____ 2015	
	발생건수의 감소	
PM 관련 Endpoints		
조기사망		
성인 30세 이상	13,000	17,000
유아 1세 미만	29	36
만성기관지염(26세 이상)	6,900	8,700
비치명적 심근경색(18세 이상)	17,000	22,000
호흡기질환관련 병원입원(전연령)	4,300	5,500
심장혈관질환관련 병원입원(18세 초과)	3,800	5,000
천식관련 응급실 입원(18세 이하)	10,000	13,000
급성기관지염(8~12세)	16,000	19,000
Lower respiratory symptoms(7~14세)	190,000	230,000
Upper respiratory symptoms (천식증상을 갖고 있는 9~18세)	150,000	180,000
천식악화(천식증상을 갖고 있는 6~18세)	240,000	290,000
결근일수(18~65세)	1,400,000	1,700,000
활동제한일수(18-65세)	8,100,000	9,900,000
오존 관련 Endpoints		
호흡기질환관련 병원입원(65세 이상)	610	1,700
호흡기질환관련 병원입원(2세 이하)	380	1,100
천식관련 응급실 입원(전연령)	100	280
활동제한일수(18-65세)	280,000	690,000
결석일수	180,000	510,000

109) EPA 보고서, Table 4-16, 4-74.

110) EPA 보고서, Table 4-17, 4-75.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

- * 발생건수는 두자리 수로 올림하여 계산하였다.
- * 최종 CAIR 프로그램을 위하여 뉴저지주와 델라웨어주를 위한 SO2와 NOx 통제를 포함하는 CAIR안을 나타낸다.
- * SO2와 NOx에 대한 규제를 적용하는 데 있어서 알칸사스주도 포함되었으므로, 약간 과다측정 가능성이 존재한다.
- * 오존으로 인한 조기사망에 대한 예측값은 산출하지 않았다.
- * 성인의 PM으로 인한 조기사망에 대한 자료는 Pope et al. (2002)에 근거한다.
- * 아동의 PM으로 인한 조기사망에 대한 자료는 Woodruff et al. (1997)에 근거한다.
- * PM으로 인한 호흡기질환관련 병원입원증상에는 만성폐질환, 폐렴, 천식을 포함한다.
- * PM으로 인한 심장혈관질환관련 병원입원증상에는 허혈성심장질환, 심장박동불규칙, 심장질환을 포함한다.
- * 오존으로 인한 호흡기질환관련 병원입원증상에는 만성폐질환과 폐렴을 포함한다.

[표 4-16] 건강과 복지효과의 발생건수의 감소에 있어서 예상금전가치 (백만 1999년 달러)

건강 효과	오염물질	2010	2015
		감소의 예상가치	
PM 관련 Endpoints			
조기사망	PM2.5		
성인 30세 이상			
- 3% 할인율		67,300	92,800
- 7% 할인율	56,600	78,100	
유아 1세 미만	168	222	
만성기관지염(26세 이상)	PM2.5	2,520	3,340

3. 편익분석 - 결과

		2010	2015
건강 효과	오염물질	감소의 예상가치	
비치명적 심근경색(18세 이상) - 3% 할인율 - 7% 할인율	PM2.5	1,420	1,850
		1,370	1,790
호흡기질환관련 병원입원	PM2.5,오존	45.2	78.9
심장혈관질환관련 병원입원	PM2.5	80.7	105
천식관련 응급실 입원	PM2.5,오존	2.84	3.56
급성기관지염(8~12세)	PM2.5	5.63	7.06
Lower respiratory symptoms(7~14세)	PM2.5	2.98	3.74
Upper respiratory symptoms(천식증상을 갖고 있는 9~11세)	PM2.5	3.80	4.77
천식악화	PM2.5	10.3	12.7
결근일수(근로상실일수)	PM2.5	180	219
활동제한일수	PM2.5,오존	422	543
결석일수	오존	12.9	36.4
노동자 생산성(외부근무노동자 18-65세)	오존	7.66	19.9
청정지역 가시도,81 Class I 지역	PM2.5	1,140	1,780
총 액 수			
할인율	PM _{2.5} ,오존		
3% 적용		73,300 + B	101,000 + B
7% 적용		62,600 + B	86,300 + B

* 경제적 편익값은 세자리 수로 올림하여 계산하였다. 이 표에서 나타난 값은 EGU 프로그램으로 인한 NOx 와 SO2의 감소로 인한 전국에 대한 편익의 예측값이며, 오존과 가시도로 인한 영향은 배제하였다. 오존에 대한 편익은 동부지역과 연관이 있으며, 가시도

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

의 편익은 남동부지역의 Class I 지역과 연관이 있기 때문이다. 최종 CAIR 프로그램을 위하여 뉴저지주와 델라웨어주를 위한 SO₂와 NO_x 통제를 포함하는 CAIR안을 나타낸다. SO₂와 NO_x에 대한 규제를 적용하는 데 있어서 알칸사스주도 포함되었으므로, 약간 과다측정 가능성이 존재한다.

- * 경제적 편익에 대한 예측값은 1990에서 2010년과 2015년에 이르는 실질 GDP 성장을 고려하여 적용하였다.
- * PM으로 인한 경제적 편익측정에 있어서는 20년 간의 잠복기간을 고려하였으며, 3%와 7%의 할인율을 적용한 것은 각각 EPA와 PMB의 지침을 따랐다.
- * 성인의 PM으로 인한 조기사망에 대한 자료는 Pope et al. (2002)에 근거한다.
- * 아동의 PM으로 인한 조기사망에 대한 자료는 Woodruff et al. (1997)에 근거한다.
- * B는 계량화하지 못한 건강과 복지에 있어서의 편익과 비편익을 포함한 값을 나타낸다.

PM과 오존이 인간의 건강과 복지에 미치는 영향을 모두 계량화하고 경제적 가치로 환산할 수는 없다. 그러므로, 계량화되지 못한 편익과 비편익을 합하여 B라고 표현하였다. 그러므로 경제적 가치로 환산된 총가치는 불확실한 B의 값을 고려해야 한다.

경제적 가치로 환산된 총 편익에 있어서 가장 크게 차지하는 부분은 사망위험에 대한 감소이다. CAIR 적용으로 조기사망의 예상되는 연간 감소수는 2010년에는 13000명, 2015년에는 17000명으로 추산된다. 2010년에서 2015년으로 갈수록 조기사망의 수가 감소하는 것은 해가 거듭될수록 오염물질의 배출감소를 반영하며, 또한 인구의 증가와 평균연령의 증가를 반영한다. 여기 분석에서 고려되지 않은 위험

요소들이 있으므로, 예측된 조기사망의 감소인원수는 과소평가가능성이 존재한다.

경제적 가치로 환산된 편익 예측값은 각각 3%와 7%의 할인율을 적용했을 때, 2010년에는 733억 달러(626억 달러)이며 2015년에는 1010억 달러(863억 달러)이다. 건강과 관련되지 않은 편익의 대부분을 계량화할 수 없는 한계로 인하여, 실제 건강에 관한 편익은 총편익에 있어서 98%를 나타낸다고 할 수 있다. 불확실성이 크게 존재함으로 인해서, 계량화되지 않은 편익은 정확하게 예측할 수는 없다. 조기사망의 감소로 경제적 가치로 환산된 편익은 총 건강편익의 90% 이상을 차지한다. 그 다음으로 크게 차지하는 것은 만성기관지염과 비치명적 심근경색과 같은 장기적인 증상으로 인한 질병이다. 호흡기 및 심장질환관련 병원입원, 가시도, 활동제약일수, 결근일, 결석일, 노동생산성이 총편익의 나머지를 차지한다. 이러한 편익들을 경제적 가치로 환산한 값은 상대적으로 작지만, 국민 대다수에게 미치는 영향이므로 공공성이라는 정책효과를 고려할 때 매우 중요하게 여겨져야 한다. 정책 효과로 인한 감소건수가 많다고 해서 그것의 경제적 가치가 높다는 것을 반영하지는 않는다. 예컨대, 조기사망감소건수보다 결근일의 감소건수가 100배 이상 크지만, 조기사망감소로 인한 경제적 편익이 훨씬 더 크게 나타난다. 이것은 건강에 치명적인 것과 비치명적인 것에 대한 가치가 다르게 측정되기 때문이다. 또한 병원입원과 같은 몇몇의 효과를 측정하는 데에는 WTP를 사용하였으므로, [표 4-16]에서 제시된 값은 과소측정의 가능성이 존재한다.

오존감소로 인한 편익은 국민전체에 영향을 미친다. 그러나, 오존의 농도는 도시지역의 특정 낮시간에 집중적으로 높게 나타나므로 오존과 PM이 동시에 미치는 영향으로 인한 건강 효과는 직접적으로 PM의 영향이 더욱 크다. 또한 오존의 이런 특성으로 인해서 2010년과 2015년의 오존에 대한 경제적 편익은 과소측정의 가능성이 존재한다.

3.1. 뉴저지주와 델라웨어주의 잠재적 편익

제시된 편익예측결과는 뉴저지주와 델라웨어주 안을 포함하는 최종 CAIR 프로그램을 위한 편익을 반영한다. 그러나 델라웨어주와 뉴저지주의 대기질 모델링에 관한 조사는 시행되지 않았다. 이러한 이유로 인해서 델라웨어주와 뉴저지주에 대한 편익분석은 완전하지 못하다. 그러므로 CAIR을 적용했을 때의 SO₂와 Nox의 감소로 인한 델라웨어주와 뉴저지주의 편익을 개략적으로 예측할 수 밖에 없다. 이 분석에서는 2010년에는 6억 3천만 달러로 추정되고, 2015년에는 11억 달러의 연간 편익을 예상한다.

3.2. 편익 예측을 하는 데 있어서의 불확실성에 대한 확률적 분석

대기오염규제로 인한 국민건강의 편익을 예측하는 데 관련한 NRC 보고서에 의하면, EPA는 불확실성을 측정하는 데 있어서 확률적 방법과 불확실성을 유발하는 다양한 원천에 관한 분석을 할 것을 권고하였다(NRC, 2002). 이러한 분석을 위해서는 확률분포에 관한 접근이 필요하며 이것은 불확실성에 관련된 이용가능한 데이터와 전문가의 판단이 필수적이다. NRC는 불확실성에 관련된 제반 요소를 판단하고 결정하는 데 있어서 내·외부 전문가들을 충분히 활용할 것을 EPA에게 권고하고 있다.

건강편익분석과 관련한 불확실성에 관한 프로그램을 개선하기 위하여 EPA가 노력을 해왔으며, 여기서는 PM으로 인한 사망과 관련된 불확실성을 감소시키기 위한 방법으로 PM 농도 - 반응관계(concentration response relationship)와 가치측정에 관한 것을 다룬다. 이와 관련된 첫 번째 접근방법으로는 표본오차¹¹¹⁾와 가변성에 기초한 편익의 분포값

111) 모집단을 대표할 수 있는 전형적인 구성요소를 선택하지 못함으로써 발생하는

을 산출한다. 두 번째 접근방법으로는 대기질의 PM_{2.5}와 사망간의 관계를 분석할 때 발생하는 불확실성을 규정하기 위해서 고안된 PEE에서 나온 결과를 이용하는 것이다.

우리는 총편익의 예측값과 조기사망발생건수를 입력데이터로 하여 개연성분포(likelihood distribution)¹¹²⁾를 산출하는 방법을 사용함으로써 불확실성을 낮춘다. 농도-반응관계와 가치측정이라는 두 개의 요소로 인한 불확실성에 관해서는 몬테카를로 기법을 통하여 예측한다. 개연성분포를 이용하여 예측된 총편익의 값은 기존 예측방법에서 고려하지 않았던 불확실성을 유발하는 요소들을 고려하여 측정되어야 한다.

현재까지 행해진 대기오염규율들에 관한 편익분석에서, 조기사망의 감소효과는 총편익의 85~95%를 차지한다. 그러므로 총편익의 불확실성을 규정하는 데 있어서는 조기사망과 관련된 불확실성에 대한 측정이 필수적이다. 여기서 우리는 두 개의 서로 다른 몬테카를로 기법을 사용한다. 하나는 Pope et al. (2002) 연구로부터 평균효과와 표본오차를 이용하여 조기사망감소의 분포값들을 사용하는 방법이고, 다른 하나는 PEE 프로젝트(IEc, 2004)에서 나온 결과를 이용하는 것이다.

EPA는 OMB와 함께 PEE를 실행하여 대기 PM_{2.5}와 사망과 관련한 불확실성을 규정하였다. PEE 프로젝트가 고안된 목적은 EPA가 경제적 편익분석을 하는 데 있어서 이 프로젝트를 적용함으로써 더욱 더

오차를 말한다. 이러한 표본오차는 편향과 우연에 의해 발생한다. 우연에 의한 표본오차는 표본의 크기를 증가시킴으로써 감소시킬 수 있으며 이것은 주로 몬테카를로 기법을 많이 사용하며, 편향에 의한 오차는 표본선택방법을 엄격히 함으로써 줄일 수 있다.

112) 개연성이라는 개념은 여러 가지 통계적 기법에 있어서 관심의 대상이 되는 모수(parameter)를 추정하는 데 일반적으로 많이 사용되는 접근방법이다. 예컨대, 어떤 질병에 걸릴 위험에 노출이 된 사람 10명 중에서 그 질환에 대한 특이검사를 시행했을 때 3명이 양성반응을 보였다면 표본의 비율은 0.3이 된다. 이 값을 갖고 위험에 노출되었을 때 검사에서 양성을 보일 확률은 0.3이라고 단정지을 수 있을까? 이때의 확률은 0.3이라고 단정짓기에는 불확실하다. 이 때 0.3이라는 값에 대한 불확실성을 낮게 하기 위해서, 개연성 함수를 이용해서 최대 개연성을 구하여 확률값을 다시 조정하는 것이다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

종합적인 편익분석을 하는 데 있어서의 기반을 마련하기 위한 것이고, Nonroad Diesel 규칙제정에 대한 규제영향평가와 같은 맥락에서 PM2.5와 조기사망에 관련된 불확실성에 관한 더욱 더 많은 정보를 제공하기 위함이다. 이 프로젝트는 다섯 명의 건강과학 관련 전문가와 미세입자와 관련된 국립과학원(National Academy of Sciences) 소속의 두 개의 과학위원회(Scientific Committees)가운데 최소한 하나에 소속된 위원들이 전문가 그룹이 된다. PEE 접근법의 타당성에 대해서 4명의 전문가들이 검토하여 다음과 같은 좋은 반응을 받았다.

- * Pilot 프로젝트는 불확실성 평가에 관련되어 그간 시행되어 왔던 최고의 방법을 따랐고, 그 과정들이 잘 문서화 되어 있었다.
- * Elicitation은 매우 잘 시행되었고, 불확실성을 규정하는 데 있어서 적절한 기법이다.
- * 위촉된 전문가들은 각 분야에 있어서 매우 명성있는 분들로 구성되었다.
- * 전문가 선발 과정/프로토콜은 매우 훌륭하였다.

PEE 프로젝트에 필수적인 전문가집단 심사 보고서에서는 PM과 사망의 C-R 관계에 관하여 전문가집단의 좀 더 종합적인 검토과정이 필요하다고 제안하였고, 구체적인 권고는 다음과 같다 :

- * 인터뷰를 하기 전에 미리 전문가 집단들이 모여서 워크숍을 시행하여 각각의 전문가들이 이 프로젝트에 관련된 제반사항을 서로 공유하고 이해해야 한다.
- * 각각의 전문가들이 의사소통할 수 있도록 함으로써, 각각의 전문가들의 의견에 대해서 상호 검토를 행하며 그러한 과정에서 예측값들에 대한 조정이 자연스럽게 이뤄지도록 해야 한다.
- * 전문가들이 중앙경향을 띠는 값(Central tendency)을 결정하기 이전에, 인코딩 과정의 조정을 통해서 최저값과 최고값을 반영하여 예

측값을 조정하도록 해야 한다. 이러한 과정은 불확실성을 측정함에 있어서 편향(bias)와 관련있는 휴리스틱 방법¹¹³⁾의 오류가능성을 조정하기 위해서 필요하다.

- * 비록 명시적으로 권고하지는 않았지만, 몇몇의 전문가는 이 프로젝트에 참가한 전문가의 수가 적으며, 앞으로는 더욱 더 많은 전문가들을 참여시켜야 한다고 조언하였다.

PEE 인코딩 과정은 다음과 같다.



[그림 4-2] PEE 인코딩 과정

전문가집단 심사자들은 PEE 프로젝트 결과로 인한 값을 결합하는 방법에 관해서도 다양한 코멘트를 제공하였다. 전문가집단 심사자들 가운데 2명은 결합하는 데 찬성하고, 2명은 반대의사를 표시하였다. 반대의사를 표시한 심사자들은 전문가들의 의견으로 나온 각각의 값들이 조합되어서는 안된다고 하면서 각각의 전문가들의 의견은 독자적으로 허용해야 한다고 하였다. 한명은 결합되어 버린 분포값들은 개개인의 전문가의 의견을 나타낼 수 없으며 단지 평균값을 산출하는

113) 의사결정모델의 하나로서, 인간의 의사결정에 이용되는 방법으로 과거의 경험적 측면을 도입한 모델이다. 즉, 의사결정과 관련있는 경험적 지식이나 과거의 데이터를 통해서 의사결정하는 방법이다.

IV. CAIR에 대한 편익분석과 그 결과

것에 다름이 아니라고 하였고, 또 다른 한명은 PEE 연구방법 자체의 특성으로 인하여, 각각의 전문가들의 결정으로 인한 값들을 결합해서 안되는 것이며 전문가 각자의 의견은 독자적으로 유지되어야 한다고 하였다.

사망과 관련없는 건강 endpoints의 분포값들은 역학적 연구 자료들을 원용하여 평균과 표준편차를 사용하여 나타낸다. 여기서 Class I 지역의 가시도 개선으로 인한 편익의 측정을 할 수는 없다. 이와 관련하여 우리는 가시도의 편익은 고정된 값으로 규정하여 건강편익을 측정할 값에 가산한다. 각각의 endpoint의 값에 차별성을 고려해 본다면, 이러한 일괄적인 방법은 불확실성을 야기하며 예측값의 과소측정 가능성이 존재하게 된다. 그러므로 여기서는 PEE와 통계적 오차에 기반을 둔 확률분포값을 사용하여 1차적으로 불확실성을 보정한다.¹¹⁴⁾

3.3. 논 의

이 분석은 CAIR의 영향을 받은 EGU로부터 NO_x와 SO₂의 배출량 감소가 대기 중의 미세입자와 오존농도를 감소시킴으로 인해서 발생하는 건강과 복지의 편익을 측정하고 있다. 그 결과는 EGU로부터 배

114) PEE를 적용한 결과 CAIR과 관련된 2015년에 있어서 조기사망의 연간 감소에 대해서는 EPA 보고서, Figure 4-3, 4-81을 참조. 이를 달러가치로 환산한 것에 대해서는 EPA, Figure 4-4, 4-83을 참조. Figure 4-3에서는 PM_{2.5}의 감소로 인한 조기사망의 분포값을 박스 플롯 형태로 제시하고 있으며 이 값들은 각각의 전문가들의 검토과정을 거친 C-R 분포값들이다. 1차 예측값은 Pope et al. (2002)의 자료이다. 그림에서 나타내는 ◆ 표시는 평균을 나타내고 - 는 중위수를 표현한다. 박스의 범위는 전체구간 값에서 하위 25%와 상위 25%는 생략하고 그 사이값들만 나타내며 신뢰구간은 90%이다. 그림에서 나타나듯, 1차 예측값(Pope et al. 2002)의 평균은 2015년에 16,700이다. 이것은 A,B,C,D 전문가 보다는 높은 값이며, E 전문가보다는 낮은 값이다. 그리고 평균값은 2,800(C)에서 22,800(E)으로 평균의 차이값이 20000에 달한다. Figure 4-4에서는 PM_{2.5}의 감소로 인한 조기사망의 분포값을 경제적 가치로 측정하여 박스 플롯 형태로 제시하고 있으며 이 값들은 Pope et al. (2002)의 분포값과 전문가들의 분포값들을 나타내고 있다. 1차 예측값(Pope et al,2002)의 평균은 930억 달러이며, 160억 달러(C)에서 1300억 달러(E)까지 나타나고 있다.

출을 규제함으로써 발생하는 중대한 건강과 복지편익이 존재할 것이라는 것을 나타낸다. 규제로 인하여 배출감소가 완전히 현실화될 때 17,000명의 조기사망자의 감소 효과를 나타내며 이것은 EGU's 부문으로부터의 오염으로 인한 대기오염이 공중건강에 미치는 영향에서 중요한 역할을 한다고 하는 증거이기도 하다.

우리가 계량화할 수 없었던 그밖의 불확실성은 대기질을 모델링하는데 있어서 계량화되지 않은 효과와 불확실성의 중요성을 포함하기 때문에 간과해서는 안된다. 기상변화, 인구증가, 소득변화, 기술변화 및 기타요소들의 변화가능성으로 인해 미래를 예측하는 데 있어서의 불확실성은 필연적일 수밖에 없다. 그러므로 이러한 요소들을 반영하는 데 필요한 가정들은 현존하는 자료들에 기반하여 합리적으로 행해져야 한다. 그렇지만, 현존하는 데이터들의 한계로 인하여 총편익과 관련된 불확실성을 계량화하는 데는 현실적인 어려움이 존재한다.

EPA는 대기오염감소로 인한 건강편익을 측정하기 위하여 새로운 방법과 모델들을 찾아내기 위해서 계속 연구할 것이다. 기존의 자료에 대한 편익이전에 관련된 개선된 방법과 새로운 방법들에 관해서 연구하는 것이 매우 중요하다. 고혈압, 출산감소와 같은 건강 endpoints를 추가한 새로운 모델링 기법에 대한 발전이 향후 편익분석의 정확성과 신뢰성을 높이는 데 있어서 필수적이라 여겨진다. 대기질 모델링 학자, 역학 연구학자, 독물학자, 경제학자 등의 한층 개선된 공동연구는 대기정책을 통한 건강편익을 측정하는 방법을 발전시키는 데 있어서 원동력이 될 것이다.

V. 비금전화 편익의 질적 평가

1. 개요

대기의 PM과 오존 수준 감소로 인하여 결과하는 인간 건강과 복지 편익에 더하여, CAIR은 금전화할 수 없는 편익을 결과할 것이다. 이 파트는 생태계의 산성화와 수자원에서 있어서 부영양화에 영향을 미치는 감소된 황과 질소침적과 관련한 복지편익을 논의한다.

2. 황과 질소의 대기침적 - CAIR을 위한 영향의 수량화(퍼센티지로 수량화하는 것을 보여줌)

수생, 산림, 해안생태계에서 감소된 황과 질소침적으로 인한 편익에 대해서 정성적(qualitatively)인 방법으로 여기서 논의된다. 또한 북동부에 있는 국립호수들과 남동부 개천들의 산성침적의 감소를 수량화한다. 구체적으로 지도 5-1과 5-2는 최종 CAIR에 따라 예상된 배출감소의 결과로 동부지역에서 2010년과 2015년에 발생할 것으로 예상되는 황과 질소 감소를 나타내고, 이에 따르면, 2015년에 CAIR 지역 내의 특정 지역들에서는 약 1%에서 59%까지 황 침적량의 감소가 예상되고, 질소 침적량의 변화는 1.5%를 초과하지 않는 범위 내에서 약간의 증가가 있는 지역부터 19% 감소가 있는 지역(평균 4.6% 감소)이 있는 것으로 예상된다.¹¹⁵⁾ 지도 5-3은 기준 조건과 비교하여 2015년에 황과 질소침적은 호수(Adirondacks)에서 30%와 8%, 해안(New England)에서 24%와 6%, 내륙 산악(Blue Ridge) 지역에서 34%와 8% 감소가 예상된다는 것을 나타낸다.¹¹⁶⁾

115) EPA 보고서, Figure 5-1 & 5-2, 5-2.

116) EPA 보고서, Figure 5-3, 5-3.

3. 황과 질소의 대기침적 - 수생, 산림, 해양생태계에 대한 영향

일반적으로 산성비로 더 잘 알려진 황과 질소의 대기침적은 SO₂와 NO_x의 배출이 대기에서(물, 산소, 산화물을 지닌) 다양한 산성 복합물을 형성하기 위하여 반응할 때 발생한다. 이러한 산성 복합물은 지구에 수분형태(비, 눈, 안개)로 또는 고체형태(가스와 입자)로 떨어진다. 강한 바람이 (황산염과 질산염과 같은 소립자를 포함하는) 산성복합물을 수백 마일 이동시키며, 환경에 많은 부정적 영향을 야기한다. 이러한 오염물질들은 호수와 강물을 산성화시키고, 민감한 산림과 해양생태계에 해를 끼친다.

민물과 산림생태계에 대한 대기 산성물의 퇴적의 효과는 그 산성을 중화할 수 있는 해당 생태계의 능력에 크게 달려있다(Driscoll et al., 2001). 이것은 생태계의 산성물 중화 능력(Ecosystem's Acid Neutralizing Capacity, ANC)으로 지칭되고 있다. 산성물 중화는 기본 양이온으로 알려진 칼슘, 칼륨, 나트륨, 마그네슘과 같은 적극적으로 충전된 철성분이 방출될 때 발생한다. 유역을 통하여 물이 이동할 때, 두 가지 중요한 화학과정이 산을 중화하기 위하여 행동한다. 첫 번째 과정은 이러한 양이온을 토양과 지표수에 방출하면서 산성물 퇴적으로부터 수소이온이 토양입자의 표면으로부터 그밖의 이온을 교체하는 과정인 토양에서 양이온을 교환하는 것을 포함한다. 두 번째 과정은 광물의 풍화작용이다. 이것은 바위의 광물 구조인 기본 이온이 오랜기간 동안 광물이 조금씩 바위를 침식할 때 방출되는 것이다. 풍화작용에 의해 기본 이온이 방출됨에 따라, 기본 이온은 산성을 중화시키고 토양수(soil water)와 지표수(surface water)의 pH 수준을 증가시킨다. 산성물 침적은, 산성음이온(예 : 황산염, 질산염)으로 구성되어 있기 때문에, 토양으로부터 하수속으로 축적된 기본 이온을 걸러낸다. 이러한 기본

이온을 걸러내는 비율이 풍화작용을 통한 재공급을 매우 초과하는 곳까지 가속화 될 것이다(Driscoll et al., 2001). CAIR은 대기의 질소와 황의 퇴적을 감소시키고 동부 지역에서 총 질소와 황 부담을 감소할 것으로 예상된다.

토양, 산림, 지표수와 수행종(어류, 조류, 기타), 그리고 해안생태계는 물, 영양분, 그리고 기타 필수 생태계 요소들을 공유하고 위에서 기술된 화학작용에 의해 불가분하게 연결되어 있다. 예컨대, 호수와 강물에서 산성물을 중화하는데 도움을 주는 동일한 염기성 이온은 산림 토양에서도 마찬가지로 필수 영양분이다. 즉, 염기성 이온의 고갈은 깨끗한 물의 산성화를 증가시키는 동시에 숲의 생산성을 감소시키는 두 가지의 역할을 동시에 하게 된다는 것이다. 마찬가지로, 시냇물(stream)의 산성화에 기여하는 동일한 질소 원자가 하류를 지나 큰 강에 도달하면서 해안 부영양화에 궁극적으로 기여할 수 있다. 따라서, 대기침적의 완전한 효과를 이해하기 위하여, 이러한 모든 시스템 간의 상호작용을 인식하는 것이 필요하다.

3.1. 민물 산성화

산성 침적은 지표수의 산성화를 유발한다. 1980년대의 조사결과에 따르면, 산성화된 호수의 75%와 산성화된 시냇물의 50%는 주요 원인이 산성비로 인한 것이었다. 이와 같은 산성화에 미국 북동부지역(특히, Adirondack and Catskill Mountains, 뉴잉글랜드¹¹⁷⁾ 일부지역, 아팔래

117) 메인·뉴햄프셔·버몬트·매사추세츠·코네티컷·로드아일랜드의 6주에 걸친 지역으로, 지리적·역사적·통계적인 단위로 사용한다. 1620년 메이플라워호를 타고 온 102명의 청교도가 현재의 보스턴 남쪽에 상륙하여 그곳에 플리머스 식민지를 형성한 곳으로 지형상 개석(開析)이 진전된 지형으로 산지와 구릉이 많고 곳곳에 잔구(殘丘)가 산재한다. 이들 산지와 구릉은 지질적으로는 애팔래치아산맥의 연속이나 허드슨강의 골짜기에 의해서 지형적으로는 분리되어 있다. 또 코네티컷강을 비롯해서 여러 개의 강이 대서양으로 흘러들고 있다. 빙하에 의한 빙식지형과 특수 지형 및 U자곡·빙하호 등의 산재해 있다. 케이프코드 남쪽에서는 해안평야의 발

V. 비금전화 편익의 질적 평가

치아 고산지대의 시냇물)과 남동부지역의 시냇물에 크게 영향을 미쳤다. 특히 로키산맥에 있는 일부 고산지대의 호수들은 눈이 녹음으로 인해서 산성화가 되었다. 서부 지역의 호수의 시냇물도 산성화에 영향을 많이 받지만, 동부지역에 비하여 산성 침적이 계속적으로 높은 수준으로 유지되지 않으므로 만성적인 산성화 문제는 상대적으로 동부지역에서 심각하게 나타나고 있다(NAPAP, 1990).¹¹⁸⁾

산(성물) 중화능력은 담수와 하천 유역 토양이 산성화 되었을 때 그것을 중화시킬 수 있는 정도에 관련된 주요 측정단위로서, 이것은 하천 유역의 지형적 물리적 특징에 따라 다르게 나타난다. 물은 알카라인 광물이 거의 없고 표토를 가지고 있는 조그만 크기의 하천 유역에 위치하여 산성화의 매개체로 활동한다. 즉, 알카라인 광물을 보유하고 있는 하천 유역에 존재하고 있는 물은 높은 수치의 ANC 값을 가진다.

산성화가 증가함에 따라서, 토양에서 스며나온 알루미늄은 호수와 시냇물에 흘러들어가서 수중 생태계에 치명적인 영향을 미친다. 산성화로 인한 낮은 pH(강산성)와 고농도의 알루미늄은 수중 생명체의 생존에 영향을 미쳐, 생태계 균형을 파괴하는 데 심각한 원인이 된다. 산성화는 또한 물고기의 개체수 뿐만 아니라 물고기의 크기에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

북동부지역 하천 토양에서의 최근의 물질수지 조사연구¹¹⁹⁾에 의하면, 하천토양에서 스며나온 황산염은 점차적으로 물로 유입되었고, 이

달과 함께 많은 사주(砂洲)와 석호가 전개되어 있다. 기후는 1년을 통하여 비교적 습윤하며, 연강수량은 1,000~1,200mm 내외이며 근교농업과 낙농업 및 수산업, 섬유공업 등이 발달하였다.

118) 전국산성비평가프로그램(National Acid Precipitation Assessment Program, NAPAP). 1980년 6월에 미국에서 산성강하물법이 정해져, 이 법률에 의거하여 강수 모니터링, 생태영향조사 등을 내용으로 하는 전국 산성강하물 조사프로그램이 10개년 계획으로 개시되었다. NAPAP 종료후인 1990년에는 미국은 CAA를 개정하여, 산성비 대책을 위한 유황산화물이나 질소산화물의 배출상한제 등을 규정하였다.

119) 물질수지(mass balance or material balance)는 특정 환경이나 시스템에 물질을 투입하고 내보내는 것을 계산하는 과정을 통해서 알려지지 않거나 측정하기 힘든 물질의 흐름을 찾아내는 방법으로 환경공학적인 분석방법에서 많이 사용된다.

로 인하여 생태계가 요구하는 이상으로 황이 초과 공급되었다. 이번 연구 조사 결과에 따른 과학자들의 견해에 의하면 SO₂의 최근 배출 규제에 의한 효과는 기존에 하천 토양에 계속적으로 축적된 황산염으로 인하여 그 효과가 빨리 나타나지는 않을 것으로 예측하고 있다 (Driscoll et al. 2001)

산성화가 생태계에 미치는 반응 기작에 관한 주요 연구가 메인주의 베어브룩 하천유역을 대상으로 실시되었다. 1986년 EPA의 하천유역 조정 프로젝트의 일환으로 계획된 이 연구에서 다음과 같은 사실을 발견하였다. 즉, 하천유역토양에 질소와 황을 증가시키면, 서부 베어브룩 하천의 질산염과 황산염 농도도 또한 함께 증가하였다. 시냇물에 있는 알루미늄, ANC 등을 포함하는 기타 다른 이온들의 농도는 Norton et al. (1999)의 연구결과와 유사하나 약간의 변화를 나타내었다. 실험 첫 해, 베어브룩 하천 유역 토양에 실험을 위하여 추가된 질소는 94%만 존재했고, 나머지 6%는 인근 유역의 시냇물로 질산염의 형태로 흘러들었다. 다음 해에는 추가된 질소의 82%만 베어브룩 하천유역 토양에 존재하게 되었다(Kahl et al. 1993 ; 1999). 비록 산림 생태계가 질소를 계속적으로 축적하였지만, 그것은 다시 질산염의 형태로 시냇물로 흘러 보내 하천 생태계에 영향을 미친다. 위 두 가지 하천으로의 질산염 유입방법은 각각 독자적으로 만성적인 하천 산성화에 영향을 미친다. 하천 산성화와 복구의 관계에 관한 메커니즘을 계량화하는 것에 대한 여러 다른 연구 방법들이 1990년보다 훨씬 더 자세하게 되도록 계속 연구하고 있다.

애팔래치아산맥 지역은 산성 침적도가 매우 높은 곳 중의 하나이다 (Herlihy et al. 1993). 산림지대 근처의 하천 인근유역은 1990년대 초반에 산성화에 관한 조사가 광범위하게 실시되었다. 웨스트버지니아주에서 앨라바마주에 달하는 남부 애팔래치아 지역에 대한 최근의 연구 조사를 통하여 이 지역의 하천 유역 토양은 산성침적화에 대해서 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 연구 조사방법은 이 지역

V. 비금전화 편익의 질적 평가

에 존재하는 암반의 물리적 특성과 토양 산성화를 중화시킬 수 있는 자정능력에 관한 이 지역 토양의 특성 등을 고려하여 연구하였다.

이 지역 시냇물의 59% 정도가 산성화에 매우 취약한 것으로 나타났다으며, 27%는 중간정도로 나타났다(SAMAB, 1996). 또 다른 연구에 의하면, 중부 애팔래치아 산맥의 시냇물의 18%는 산성화의 정도가 심해서 송어의 생존율에 치명적인 영향을 미친다(Herlihy et al. 1996). 이와 관련한 연구 중에서 가장 중요한 연구는 버지니아 지역의 송어 이동 민감성연구(Virginia Trout Stream Sensitivity Study)이다(Web et al. 2004). 이들 개천들에 대한 경향분석은 산성화를 장기간 시행한 곳의 대부분의 지역에서는 산성화가 계속적으로 유지되었고 그것은 송어 개체 집단의 생존에 큰 영향을 준다고 나타낸다.

3.1.1. 물/하천 인근 지역의 모델링

모델링을 사용한 연구기법은 20년 간의 시간흐름에 따라서 산성침적이 대기, 환경, 그리고 인간 건강에 미치는 영향에 대해서 알아낼 수 있도록 도움을 준다. 1990년 이후로 하천 인근 지역의 모델링 기법은 끊임없이 발전하여 왔다. 대기질의 반응기작과는 달리, 호수와 시냇물에서의 산성침적으로 인한 반응을 정확하게 측정하기 위해서는 수 십년의 세월이 걸린다. 이 시간 동안에는 토양내 화학반응이 변하고 새로운 이온이 발생하거나 유출될 수도 있다. 그러므로 호수와 강에 관련하여 편익의 예측 연도를 2030년으로 제시한다. 물론 여러 가지 불확실성의 존재로 인하여 CAIR이 적용된 이후에 발생하는 효과를 완전히 측정할 수 없을 가능성은 존재한다.

3.1.2. MAGIC 모델과 방법의 묘사

대기침적으로 인한 토양과 지표수의 산성화에 관련된 많은 수의 수학적 모델링 기법들이 1980년 초반에 개발되었다. 이 때 개발된 모델들

은 산성화되는 과정에 초점을 두었고, 각각의 측정 목적에 따라서 여러 가지 개발되었다. 이 모델들 중에서 주목해야 할 것이 MAGIC(Model of Acidification of Groundwater In Catchments ; Cosby et al. 1985)이다. 토양의 산성 침적이 지표수에 미치는 장기간의 영향을 분석하기 위해서 고안된 MAGIC은 20년 이상 지난 지금까지도 사용되고 있는 모델이다. MAGIC은 북미와 유럽뿐만이 아니라 아시아, 아프리카, 남미까지 광범위하게 적용되었다. 여러 가지 종류의 물과 그로 인한 토양산성화에 관해서 시뮬레이션을 행하는 MAGIC의 유용성에 대해서는 장기간 측정된 데이터값과 시뮬레이션 실험을 통한 값을 비교함으로써 오랜동안 검증을 실시해왔다. MAGIC은 미국뿐만 아니라 유럽 여러 국가들에 의해서 많이 활용되었다.

3.1.3. 모델 구조

MAGIC은 토양의 산성 침적이 지표수의 화학반응(surface water chemistry)에 미치는 장기간의 영향을 분석하기 위해서 고안된 모델로써, 상호영향을 미치는 변수들 간의 복합적 상호작용에 관하여 여러 개의 모수(parameter)를 사용하여 분석하는 모델이다. 토양의 화학반응(soil solution chemistry)과 지표수의 화학반응을 시뮬레이션함으로써 이들 내부에 존재하는 주요 이온성분들의 월/연평균 농도를 예측한다. MAGIC은 다음의 과정들로 이뤄진다 :

- (1) 황산염 흡수, 이온 교환, 비로 인한 알루미늄의 유출, 무기탄소 유출 등의 동시적 반응과정에 의하여 주요 이온 농도의 변화가 결정된다.
- (2) 토양에서 발생하거나 토양으로 유입되는 주요 이온의 흐름은 대기 투입 요소, 기상의 화학적 반응, 순흡수 및 유출 등에 의한다. MAGIC은 토양에서의 염기성 이온의 교환과정을 반영하고 있어서, 대기 침적량의 변화로 인해 토양에서의 이온의 변화과정과

V. 비금전화 편익의 질적 평가

지표수의 변화과정을 시뮬레이션한다. 이 때 지표수 산성화의 변화 정도는 이온의 유출입 요소들과 토양자체의 고유한 속성에 영향을 받는다.

이온의 교환은 염기성 이온과 알루미늄 이온을 계수로 포함하고 있는 Gaines-Thomas의 평형방정식을 사용하여 모델링한다. 황산염 흡착은 Langmur 등온식¹²⁰⁾에 의해서 구한다. 알루미늄 용해¹²¹⁾와 강우량은 수산화알루미늄으로 인한 평형상태를 통해서 조절된다고 가정한다. 알루미늄 형성은 황산염,¹²²⁾ 플루오르화물, 용해된 유기 화합물의 복합작용과 가수분해 반응을 고려하여 계산된다. pH와 무기 탄소의 형성에 영향을 미치는 이산화탄소의 효과는 평형방정식으로 계산한다. 유기산은 이전에는 데이터의 부족으로 인해서 MAGIC에서는 제외되는데(Jenkins and Cosby, 1989), 1994년 Driscoll et al.의 유기산 연속 모델 연구를 통하여 포함되었다. 날씨 비율은 상수(constant)로 가정된다. MAGIC은 산성화의 시간적 흐름에 대하여 연구함으로써, 현재의 산성화 상태를 개선하고 향후 시냇물 산성화의 예측을 목적으로 한다.

3.1.4. 모델 실행

대기 침적과 염기성/강한 산성 이온의 흡수와 방출은 모델링 과정에 있어서 투입요소가 된다. 이들 투입요소들은 빗물 집수시스템(catchment

120) 등온흡착식(adsorption isotherm)의 한 종류로서 일정한 온도에서 흡착제에 의하여 제거되는 피흡착제의 양을 농도의 함수로 나타낸 것이다. 대표적인 두 종류가 Freundlich 등온식과 Langmur 등온식이 있다.

121) 기체·액체·고체 물질이 다른 액체나 고체와 혼합되어 균일한 상의 혼합물, 즉 용액(solution)을 생성하는 현상. 액체의 용체는 용액이라 하지만 고체의 경우는 고용체라 한다. 일반적으로 기체끼리의 혼합은 용해라고 하지 않는다. 고체를 가열하여 액체로 하는 <용해>와는 다른 개념이다

122) 플루오르(F)는 헬륨, 네온, 아르곤을 제외한 거의 모든 원소와 결합하여 플루오르화물을 형성한다. 이성분계 플루오르화물로는 HF, BeF₂, BF₃, CF₄, NF₃, OF₂, ClF, XeF₂ 등을 비롯하여 여러 금속과 다양한 조성의 중성 및 이온성 플루오르화물을 형성한다.

system)에 있어서 모두 균일하다고 전제한다. 대기 흐름은 강수량과 빗물의 양에 존재하는 이온의 농도가 집수시스템에 흘러들어가서 계산된다. 이온의 대기 이동량은 구름과 안개 속에 존재하는 가스, 미세 입자, 에어로졸 등을 고려하여 수정된다. 집수 시스템에 집계된 양은 모델링 과정에 제공된다. 일반적으로 이 모델은 연평균 혹은 월평균 침적량을 시뮬레이션을 통해서 측정하는데, 수문학과 측량학에 관련된 제반 사항들을 이용한다. 강수량으로 인한 이온의 호수방출량을 측정하는데 이 모델을 사용한다. 토양과 지표수 온도, 이산화탄소의 부분적 압력, 유기산 농도는 이 모델링을 하는데 있어서 필수 요소이다.

MAGIC에 투입되는 침적 요소들의 예측값은 산성침적 전구물질과 산성침적도와와의 관계를 고려하여 측정된 배출시나리오의 과정을 거쳐서 예측된다. 이 모델은 두 가지의 집수시스템을 가지고 있다. 대기침적에서 토양으로 흘러들어가는 과정과 그것을 계산하기 위한 평형방정식이 있다. 그런 후, 토양에서부터 다시 시냇물로 흘러 들어가는 과정이 있으며, 이때에도 적절하게 측정하기 위한 평형방정식이 존재한다.

모델링을 위한 초기 조건들이 결정되면, 평형방정식은 토양수(soil water)와 지표수 내의 여러 가지 이온 농도를 계산한다. 이렇게 측정된 농도는 다시 이온들의 호수로 배출되는 값을 계산하는데 사용된다. 이러한 과정에서 염기성 이온과 산성 이온의 총계에 대한 값을 제공하기 위해서, 평형방정식이 전체적으로 통합된다. 그러므로, MAGIC의 산출값은 시간의 흐름을 고려하여 이온의 경로를 추적하는 것이 고려되어서 산출된다.

3.1.5. 조정(calibration)절차

모델링의 조정절차는 관찰값과 시뮬레이션한 결과값이 다를 때, 이들을 최적화하여 값을 조정하게 된다. 관찰값과 시뮬레이션값의 차이가 존재할 경우, 시뮬레이션의 반복수행을 통하여 관찰값과 시뮬레이

V. 비금전화 편익의 질적 평가

선값의 차이를 0으로 만들어서 편향(bias)을 제거하게 된다. 만약 이 모델링에 필요한 새로운 요소들이 필요하다고 판단되면, 다시 그 투입요소를 투입해서 다시 시뮬레이션을 하게 된다.

조정절차는 강수량에 가중치를 적용한 연평균과 계절에 따른 강수량에 대한 가중치를 적용하여 이온의 양을 산출한다. 조정절차를 위한 관찰 기간은 탄력적이다. 적어도 1년 이상인 수년의 기간을 관찰 기간으로 해야 모델링의 결과값을 더욱 더 신뢰할 수 있을 것이다.

수년의 기간을 관찰하여 그것에 대한 평균값을 산출하게 되면, 매우 건조한 연도의 경우는 모델 예측 가능성이 떨어지게 된다. 또한 지나치게 장기간을 관찰하여 그것에 관한 평균값을 산출하는 경우에는 해당 연도의 모델링이 측정한 고유의 중요한 값들을 간과할 경우도 존재하게 된다.

조정절차에서는 시냇물의 수질, 토양화학 및 물리적 특성, 대기 침적데이터값들이 필요하다. 조정에 필요한 수질 관련 데이터는 염기성 이온(K, Mg, Na, K)의 농도와 산성 이온(Cl, SO₄, NO₃) 그리고 pH가 필요하다. 이 모델링에 사용되는 토양관련 데이터는 토양의 깊이, 겉보기 밀도(bulk density)¹²³, 토양산성도, 토양이온교환능력 등이 필요하다. 대기 침적 투입요소들은 습성침적과 건성침적을 모두 포함한 값을 사용한다. 어떤 지역에서는 데이터값을 직접 측정하는 것이 가능하지 않은 곳이 있을 수 있다. 이런 경우에는 그 지역 특성과 유사한 점을 고려한 분류방법을 통하여 토양 특성을 지정하여 토양관련 데이터를 유추하며, 침적특성을 지정하여 다른 지역이나 혹은 전국의 대기 침적값을 고려하고 조정하여 모델링 기법을 사용하여 침적관련 데이터를 유추한다.

123) 겉보기 비중이라고도 하며, 물질과 물질 사이의 부피까지 포함하여 중량으로 측정할 때 사용하는 용어이다. 여기서 물질과 물질사이의 부피란 예를 들어 자갈과 자갈사이에는 빈공간이 있는 데 그 공간(부피)을 말한다.

i. 토양의 물리 화학적 특성

모델링 결과 데이터값들의 조정을 위한 토양관련 데이터들은 집수 시수템 내부의 토양모수의 평균값을 통해서 얻는다. 만약 토양 특성이 수직으로 성층배열되어 있으면, 그 지역 토양 데이터는 수평적 특성, 깊이, 겉보기밀도 등을 고려한 값으로 통일하거나, 각각의 성층배열된 값을 직접적으로 사용하여 모델링 목적에 맞도록 탄력적으로 적용한다.

ii. 대기침적총량

대기침적총량은 건성침적, 습성침적, 구름과 안개로 인한 침적으로 구분한다. 구름/안개로 인한 침적은 육지의 산이 있는 곳, 고산지대, 또는 바다나 강이 인근에 존재하는 지역에서 특히 중요하다. 강수량과 이온 농도의 측정에는 습성 침적이 중요하다. 건성침적이거나 구름/안개로 인한 침적은 빈번하게 나타나지 않는다. 그러므로, 1차적으로 이들 요소들을 계량화하는데 사용하는 접근법은 중요 이온의 총침적량에 대한 습성침적량의 비율을 사용하게 된다. 그 후 이 값을 바탕으로 해서, 총침적량에 대한 건성침적에 관한 비율을 구할 수 있게 된다.

iii. 시간적 흐름에 따른 유출

샘플링 지역의 시간 흐름에 따라 변화된 특성을 반영하기 위한 조정과정이 필요하다. 산성 침적에 대한 현재의 생태학적 반응을 이해하는 것은 미래의 생태학적 반응을 추론하는데 있어서 필수적이다. 이와 관련해서 샘플링 지역에 대한 산성도에 관한 장기간의 시간적 요소가 반영되어야 한다. 그러나, 그러한 지역에 관련하여 장기간에 걸친 산성도에 관한 자료는 존재하지 않는 것이 현실이다. 일반적인

V. 비금전화 편익의 질적 평가

접근은 매년 측정된 자료들을 이용하여 과거의 자료로 역진하는 방법을 사용한다.

3.1.6. MAGIC 모델링 결과

CAIR의 제안에 의해서 하천 인근 유역의 모델링이 시작되었다. 이 모델링의 예측에 따르면, CAIR 적용 후에 북동부 호수지역의 1%는 2030년에 만성적인 산성도를 나타낼 것이라고 하고, 이와 달리 현재 존재하는 규제 정책 하에서 북동부 호수지역의 6%는 2030년에 만성적인 산성도를 나타낼 것이라고 하였다. 그리고 CAIR 적용 후에 북동부의 호수지역의 28%는 2030년에 비정기적으로 산성도를 나타낼 것이라고 하였고, 이와 달리 현재 존재하는 규제 정책 하에서 북동부 호수지역의 25%는 2030년에 비정기적으로 산성도를 나타낼 것이라고 하였다. 북동부지역에 있는 Adirondack 호수의 경우, 오염에 대한 지표수의 복구능력이 훨씬 더 양호하다. CAIR 적용 하에서 Adirondack 호수는 만성적인 산성도는 존재하지 않으며 호수지역의 64%는 2030년에 비정기적으로 산성도를 나타낼 것이라고 하였고, 이와 달리 현재 존재하는 규제 정책 하에서 각각 12%의 만성적인 산성도를, 52%는 2030년에 비정기적으로 산성도를 나타낼 것이라고 하였다.

남동부 고산지대의 토양의 물리화학적 특성으로 인하여 그 지역의 시냇물들은 침적으로 변화가 늦게 나타난다. 이 지역에 대한 생태학적 모델링 결과, 시냇물의 17%는 만성적인 산성도를 타나내고 있으며, CAIR을 적용 후 2030년에도 역시 변함없게 된다. 비정기적인 산성도의 비율은 현재 19%에서 CAIR을 적용한 이후 2030년에는 23%로 높아진다. 그리고 현재 64%에 해당하는 산성도가 없는 시냇물은 CAIR을 적용한 후 2030년에는 60%로 낮아진다. 그리고 현재 존재하는 규제 정책을 적용했을 때 산성도가 없는 시냇물은 58%로 나타나고 있다. 현재의 규제정책 하에서의 데이터와 CAIR을 적용한 이후의 데이터를

3. 황과 질소의 대기침적 - 수생, 산림, 해양생태계에 대한 영향

비교해 보면, CAIR은 비정기적으로 산성도를 나타내는 시냇물의 상태 악화를 늦춰주고 있으며, 만성적인 산성도를 감소시키고 있다. 아래 [표 5-1]에서 CAIR을 적용한 이후 수(water bodies)의 산성도 변화를 나타낸다.¹²⁴⁾

[표 5-1] CAIR을 적용한 이후 수계(water bodies)의 산성도 변화

지 역	현 재	현재 규제 정책 적용 (2030년)	CAIR 적용 (2030년)
북동부지역 호수			
만성적인 산성도	10%	6%	1%
비정기적인 산성도	21%	25%	28%
산성도 없음	69%	69%	71%
Adirondack 호수			
만성적인 산성도	21%	12%	0%
비정기적인 산성도	43%	52%	64%
산성도 없음	36%	36%	36%
남동부 시냇물			
만성적인 산성도	17%	17%	17%
비정기적인 산성도	19%	25%	23%
산성도 없음	64%	58%	60%

3.1.7. Adirondack 호수에서 천연자원 개선에 대한 편익 연구

EPA는 CAIR의 결과로 발생하는 북동부 지역의 호수, Adirondack 호수, 남동부 시냇물에서 발생하는 산성도의 개선을 MAGIC 모델링을 실행하여 계량화하였다. 그러나, 그러한 개선을 경제적 가치로 측정할 수

124) EPA 보고서, Table 5-1, 5-12.

V. 비금전화 편익의 질적 평가

는 없다. RFF의 연구는 Adirondack 호수의 산성도 개선으로 인한 경제적 편익을 예측하였다(Banzhaf, 2004). CAIR 적용으로 인하여 Adirondack 호수의 산성도 개선이 발생한 것에 대하여 경제적 가치로 전환하는 것에 대해서 RFF 연구가 적절할 수 있다. RFF 연구는 Adirondack 호수의 40%에 대해서 산성화를 감소한 프로그램으로 인한 천연자원의 개선에 대한 총편익을 예측하였다. RFF는 호수의 산성도 개선으로 인하여 인근 뉴욕주 주민들에 대한 중요한 편익이 있다고 예측한다. 이 연구는 동료 전문가 집단 검토방법을 사용한다. 이것에 기초하여, EPA는 산성도 감소로 인한 편익을 측정여부를 결정하거나 혹은 구체적으로 측정하는 방법에 대해서 결정할 것이다. CAIR의 적용은 Adirondack 호수의 산성도에 대한 개선이 이뤄질 거라고 MAGIC 모델링은 예측했고 이에 관한 경제적 측정이 필요하다. RFF 방법을 사용한 호수 산성도 개선으로 인한 경제적 편익을 측정하기 위해서는 산성 침적도 감소량의 정확한 최대값, 개선된 호수의 개수, 산성화 개선의 최대값 등이 필요하다. RFF 연구는 CAIR 적용 후 산성침적도 감소로 인한 총편익의 측정값은 생태학적 특성에 대한 가치를 고려할 때 매우 큰 가치를 나타낼 수 있다.

3.2. 산림생태계

CAIR 적용 후에 황산염과 질산염 침적의 감소는 산림생태계에 있어서 산성도 침적을 감소시킨다. 산림생태계에 관한 산성도 침적 효과에 관하여, 산림생태계 내부에서 발생하는 식물흡수, 보유, 영양분 피드백 등의 생물지구화학적 과정에 초점을 두고 연구 중에 있다. 1990년대의 여러 연구들에 의하면, 북동부와 남동부 토양에서의 염기성 이온의 감소는 산성 침적도에 영향을 미친다고 하였다(Lawrence et al. 1997 ; Huntington et al. 2000). 염기성 이온은 산성화된 토양이나 시냇물을 중성화시키는 데 중요한 역할을 한다. 특히, 칼슘, 마그네슘, 포타슘과 같은 이온들은 식물 생장에 있어서 필수적인 영양요소이다. 토양 염기이온이 없어짐으로 인

해서 식물 뿌리가 칼슘을 흡수하지 못하게 된다(Shortle and Smith, 1988). 최근 연구에 의하면 이러한 염기성 이온의 고갈 현상은 알루미늄 이온의 유출에 영향을 미쳐서, 수중 생태계에 알루미늄이 유출되도록 하여 어류 집단의 생존에 영향을 미치게 된다(Dept. of Interior, 2003).

칼슘 감소는 식물 생리학적 과정에 영향을 끼치게 되고, 그 결과 식물 세포막 구조와 성장, 탄소 대사(metabolism)작용, 기공억제, 병원균에 대한 저항능력, 저온내성 등에 영향을 미친다(Dehayes et al. 1999). 토양구조, 개체군 서식지, 분해율(decomposition), 질소 대사 등 또한 칼슘에 영향을 받는다. 산림 생태계에서 칼슘의 손실과 토양에서 산성침적에 관한 반응에 관한 여러 자료들이 존재하고 있다. 산성침적과 염기성 이온의 배출에 관한 강한 상관관계가 존재한다는 과학적 실증자료들이 많이 존재한다(Lawrence et al. 1999 ; Huntington et al. 1999; Likens et al. 1996; Mitchell et al. 1994 ; 1996 ; Norton et al. 1992 ; Macdonald et al. 1992).

비록 황산염이 염기성 이온 방출의 주요한 원인이지만, 질산염 역시 하천 인근 구역에서 질소 포화상태를 일으키는 주요한 원인이다(Adams et al. 1997). 최근 북동부의 단풍나무의 감소에 대한 연구에 따르면 토양에서 고농도의 알루미늄과 마그네슘이온이 검출되었고, 단풍잎을 시들게 하는 해충들이 또한 발견되었다. 이들의 작용이 결정적으로 단풍나무의 감소에 기여를 하였다(Horsley et al. 2000). 산성 침적으로 인하여 나무의 잎과 가지들이 변형되고, 결과적으로 식물체 내의 유기물질과 영양분 순환에 있어서 변화가 생기게 된다.

3.3. 연안 생태계

1990년 이후로 연안지역 수질에 관하여 질소침적이 미치는 영향에 대한 많은 연구가 행해져 왔다. 질소침적은 연안가의 하구에 많은 영향을 미친다(Valigura et al. 2001 ; Howarth 1998). 대기침적으로 인해서 연안가의 하구로 유입되는 질소의 양은 지역마다 다양하게 나타난

V. 비금전화 편익의 질적 평가

다. 일부 하구에서는 질소 대기침적은 총 질소 침적량의 40% 이상을 차지할 정도로 많은 영향을 미친다. 그러나, 대부분의 하구는 15~30% 정도 나타내고 있다. 30%로 나타나는 지역은 메사추세츠지역에서 체서피크만과 멕시코만의 중부지역으로 쪽 뻗어서 분포하고 있다.

질소의 증가는 연안 생태계에 중요한 변화를 유발한다. 미국 내 하구의 약 60%는 질소과다로 인한 부영양화로 고통받고 있다. 부영양화의 증상은 서식하고 있는 플랑크톤의 종류에 영향을 미치고, 바닷속 조류에 영향을 미쳐서 수중 산소량의 감소로 이어진다. 또한 어류의 생존에 영향을 미치고, 먹이사슬에 영향을 미친다. 부영양화된 연안 하구의 대부분은 중앙 태평양 지역의 연안과 만에 나타나고 있으며, 다른 연안 지역에서도 나타나고 있다.

지도 5-4는 CAIR 지역 내에서 CAIR을 적용했을 때 예측되는 연안 지역의 질소 침적의 감소에 대하여 나타내고 있다. 이로부터 알 수 있듯이, CAIR 지역 내의 연안지역의 모든 유형의 질소침적의 변화는 1.5% 정도의 가벼운 증가에서부터 최대 19%의 감소를 보이고 있으며, 2015년의 동부 지역에 있어서는 평균 4.6%의 감소를 보이고 있다.¹²⁵⁾

체서피크만 프로그램¹²⁶⁾은 Sweeny(2004)의 연구에서 발표한 예측값을 기반으로 하여, CAIR을 적용한 후에 감소된 질소의 양을 예측하였다. 질소 대기침적은 체서피크만으로 유입되어 체서피크만의 질소의 28%에 해당한다. 2004년 1월에 질소침적에 관한 CAIR안을 기반으로 하여, 2010년까지 연간 천만 파운드에 달하는 질소량이 체서피크만에서 감소할 것이라는 사실을 체서피크만 프로그램 관련자들은 인

125) EPA 보고서, Figure 5-4, 5-16.

126) 1970년대 후반에 의회에서 체서피크만의 복원을 위한 과학적 연구를 위한 기금 조성을 의결하였고, 1983년에 메릴랜드와 펜실베니아 주지사와 컬럼비아 특별구 시장과 EPA는 체서피크만의 복원에 관한 협약에 서명했다. 체서피크만 프로그램은 체서피크만의 복원을 위한 지역적 파트너십으로 체서피크만과 관련된 주, 연방정부, 학자들, 지역기관들이 공동으로 체서피크만의 복원을 위한 정책을 채택하고 협력하는 통합적인 프로그램이다.

지하게 된다. 최종 CAIR 적용을 통한 질소 침적량의 감소는 연간 8백만 파운드에 달하는 질소량을 감소시킬 것이라는 EPA의 약속보다 훨씬 더 많은 양이다. 이러한 감소를 통한 경제적 편익은 매우 클 것이라고 예상할 수는 있지만, 구체적인 수치로 계량화할 수는 없다.

3.4. 그밖의 잠재적 영향

현재로서는 우리가 계량화하거나 경제적 측정을 정확히 할 수 없는 것에 대한 수많은 범주들이 존재하고 있다. CAIR 적용으로 인한 질소 침적량의 감소는 비옥화 측면 만을 본다면, 질소영양분이 감소로 인해 산림 비옥화에 약간의 역효과를 줄 수 있을지도 모른다. 또한 경작용 농산물이 생산량의 감소에 약간의 영향을 미칠 가능성이 존재한다. 그러나 이런 것들에 대한 계량화는 현재로서는 불가능하다.

대기에서 오존과 미세입자의 효과는 자외선을 차단하며 기후 변화에도 영향을 미친다. 지표면이 오존은 성층권을 포함한 대기내의 총오존량에 비하면 매우 적은 양이다. EPA는 오존과 미세입자에 관련하여 이들이 미치는 잠재적인 불편익은 가변적이며 매우 적고, 많은 불확실성이 존재한다고 평가하였다(EPA, 2005a). EPA의 가장 최근의 제안은 잠재적이고 계량화할 수 없는 편익 중에서 오존이 자외선을 차단하는 효과에 관련된 것이었다(EPA, 2005b). 또한 질산염과 황산염이 자외선을 차단하는 효과도 존재한다. 즉, 태양광선이 질산염과 황산염 입자들과 만나는 표면이 수평이 되면 이것을 반사하여 자외선이 차단되는 효과가 있지만, 수직으로 되면 오히려 자외선 노출을 크게 한다. 그러므로, 황산염과 질산염이 자외선에 미치는 영향을 계량화하기는 현실적으로 힘들다(EPA, 2004). 오존은 온실효과를 발생시키며, 질산염과 황산염 또한 태양빛의 양을 어느 정도 차단하는 효과를 가지고 있다. 그러나 이것 역시 현재로서는 계량화하기는 힘들다고 EPA는 규정하고 있다.

VI. 전력부문에 관한 연구

이 파트에서는 CAIR에 영향을 받는 전력부문에 관련된 오염원들에 관해서 다루며, 전력부문과 EGUs에 관한 배경지식을 제공한다. 또한 EPA 규제정책의 역사적 배경과 전력부문에 관한 미래 전망에 대해서 다룬다.

1. 전력부문 개론

전력부문의 기능은 전력생산, 전달, 배분과 같은 활동으로 구분될 수 있다.

1.1 전력생산

전력생산은 소비자에 대한 전력서비스의 1차적 생산단계이다. 전력을 생산하는 과정은 대부분 발열과정을 수반하게 된다. 전력을 생산하기 위하여 16,000여개의 화석연료, 핵연료, 수력, 재생가능한 에너지 관련 제너레이터가 있다. [표 6-1]은 에너지 원료와, 이를 사용하는 제너레이터 수와 전력생산량을 나타낸다.¹²⁷⁾

[표 6-1] 2002년 전력생산용량

에너지 원료	제너레이터 개수	제너레이터 가용능력(메가와트)
석 탄	1,566	338,199
석 유	3,076	43,206
천연가스	2,890	194,968

127) EPA 보고서, Table 6-1, 6-1.

VI. 전력부문에 관한 연구

에너지 원료	제너레이터 개수	제너레이터 가용능력(메가와트)
이중 연료	2,974	180,174
기타의 가스	104	2,210
핵	104	104,933
수 력	4,157	96,343
기타 재생연료	1,501	18,797
기 타	41	756
총 계	16,413	979,585

아래 [표 6-2]는 총생산 전력을 용도별로 구분하여 나타내고 있다.¹²⁸⁾

[표 6-2] 2003년 총전력 생산 산업의 소매판매비율(단위 : 10억 kWh)

용 도	소 비 량	구 성 비(%)
주거용	1,280	37%
상업용	1,119	32%
산업용	991	28%
기 타	109	3%
모든 용도의 총합	3500	100%

2003년에 전력 생산은 수요를 맞추기 위하여 총 3848 kWh를 생산하였다. 전력생산량의 약 70%는 화석연료, 특히 석탄과 천연가스를 사용한 것이었다. 아래 [표 6-3]은 원료별 생산량과 그 구성비를 나타낸다.¹²⁹⁾

128) EPA 보고서, Table 6-2, 6-2.

129) EPA 보고서, Table 6-3, 6-2.

[표 6-3] 2003년 원료별 순전력 생산량(단위: 10억 kWh)

원 료	생 산 량	구 성 비
석 탄	1970	51%
석 유	118	3%
천연가스	629	516
기타 가스	11	0.3%
핵	764	20%
수 력	275	7%
기 타	81	2%
총 계	3848	100%

석탄연료를 사용하여 전력을 생산하는 제너레이터는 하루종일 가동된다. 핵발전과 더불어 석탄연료를 사용한 전력 생산은 일상적인 소비자의 수요를 충족시킨다. 그러나 가스를 사용한 전력 생산은 소비자의 수요가 초과하여 일상적인 상태를 넘었을 때, 보조적으로 가동하여 에너지 수요에 맞게 공급한다.

1.2 전력 전달

전력 전달은 제너레이터로 생산된 전기가 고압전선을 통하여 이동하는 과정에 관한 것이다. 전달 시스템은 전기의 대량 전달을 위해 연결된 네트워크를 통하여 각각의 제너레이터로부터 독자적으로 생산된 전기를 모으는 시스템이다. 잘 설계된 전력전달 서비스영역에서는 전력을 생산, 유지, 전달에 관하여 통합적으로 제어할 수 있도록 설계되어 있다. 전력의 생산에서부터 계획하고, 안정적으로 유지하고, 제어하는 모든 과정을 통합적으로 포함한다.

1.3 분 배

전력의 분배는 고압전선을 통하여 전달된 전력을 수많은 작은 전선 네트워크로 이동하여 소비자에게 전달하는 과정인바, 전력전달과 분배시스템은 발전소로부터 주민들에게 전기공급을 위하여 한 세트의 전선만을 사용하기 때문에 자연독점(natural monopoly)¹³⁰⁾의 대표적인 예에 해당한다.

전력의 전달은 생산된 전력을 운영하고 분배하는 네트워크를 수직적으로 통합하는 과정¹³¹⁾을 통하여 발달되어 왔다. 이와 달리 전력의 분배는 전력을 판매하는 수많은 회사들로 이뤄지고 있다. 전력사업 리스트럭처링(또는 전력사업 재구축)¹³²⁾은 전기 전달과정과 분배과정보다는 전기 생산에 관한 제반사항을 완전 경쟁시장으로 조정하기 위한 것이다. 즉, 생산과정에 다수의 공급자를 참가시켜 완전 경쟁을 통한 시장 효율적인 방법을 통하여 전기를 생산한다는 것이다. 전력사업 리스트럭처링은 우선 전력생산관련 자산을 전달과 분배과정에 필요한 자산과 구별한다. 그런데 전기는 공공재의 성격을 띠므로 생산

130) 자연독점이란 전력·상수도·전화·철도산업 등과 같이 자연적·기술적 특성으로 인해 높은 규모의 경제 효과를 지니고 있는 산업부문에 종국적으로 하나의 독점 기업이 출현하게 되는 현상을 말한다.

131) 수직적 통합이란 경제학적 용어로, 일련의 생산 공정에 있는 기업 간의 통합으로 원료기업이 말단제품 분야까지 생산영역을 넓히는 것을 말한다. 이와 반대로 말단제품 분야기업이 원료기업에까지 참여하는 것을 역수직통합이라고 한다. 최근에는 이와 같이 구별을 명확히 하지 않고 원료, 제품을 일관제조할 경우 그 방향이나 순서를 따지지 않고 모두 수직통합이라고 한다.

132) 리스트럭처링은 M&A 외에도 LBO(인수할 회사 자체를 담보로 두어 금융기관에서 대출받은 자금으로 기업인수)나 제후전략까지 포괄하는 개념으로 M&A를 적극적으로 활용한 사업단위의 재구축이다. ‘사업재 구축’이라는 말로 표현되는 리스트럭처링은 비전, 즉 미래의 모습을 설정하고 그 계획을 시행하는 것이다. 소득 수준이 변화할 때 미래에 살아남기 위해 무엇을 생산할 것인가라는 문제의식이 리스트럭처링으로 연결된다. 리스트럭처링의 시행절차는 ①비전 및 미래목표의 잠정적 설정 ②전략사업단위의 설정 ③리스트럭처링 방향설정 작업 ④리스트럭처링 확정 ⑤비전 및 미래목표의 수정 ⑥비전 및 미래목표의 확정 등 6단계로 구성된다.

과정과는 달리, 전기의 전달과 분배과정에서는 가격에 대한 규제가 적용한다.

2. 규제완화와 전력사업 리스트럭처링

전기의 판매에 관한 규제완화 과정은 전기생산 산업의 구조를 변경하고 있다. 공장들 간의 자산 운영에 대한 조정과 함께 규제완화의 대상은 전력생산의 과정, 전달, 분배에 따라서 각각의 기능별로 가격을 책정하는 것에 초점을 맞추고 있다.

1970년 대에 시작한 정부정책은 과거 전통적인 규제정책에서 탈피하여 지금은 중요한 산업들, 예컨대 운송, 통신, 에너지와 같이 과거에는 독점이었던 기간산업에 대한 규제완화로 방향을 선회하고 있다. 효율적인 투자선택 등을 포함하여 전력 생산 산업과 관련된 규제완화는 전기를 파는 더 많은 회사들을 위하여 진입 장벽을 낮추기 위해서 연소터빈기술의 비용을 절감하는 것과 전기서비스의 비용 복잡성을 제거하는 것과 전기 사용량이 각각 다른 다양한 고객들의 기호에 따른 비용을 차별화시키는 것 등과 관련되어 있다. 전력 산업의 리스트럭처링은 시장 변동과 재정 악화에 따라서 천천히 진행되었으며, 이것은 특히 캘리포니아에서 발생한 전력사태¹³³⁾와 관련이 있다. 2001년

133) 2001년 1월 캘리포니아에서 2차 대전 후 처음으로 대규모 정전사태가 발생했다. 캘리포니아에서는 정전발생이전에 각 지역에서 전력 생산과 판매를 거의 독점하다시피 하던 민간 전력업체들이 서로 경쟁을 하도록 규제를 완화하고 시장을 개방하였다. 시장은 1996년부터 개방되었고, 1998년에 본격적으로 경쟁이 시작되었다. 주 정부에서 처음에 시장개방 조치를 통해서 얻으리라고 기대한 것은 바로 경쟁을 통한 전기가격의 인하였다. 그러나 2001년까지 5년 동안 기대했던 가격인하는 일어나지 않았다. 오히려 거대 민간전력회사의 전기가격은 기대와는 정반대로 아주 조금씩이기는 하지만 해마다 상승하였다. 전력판매회사들은 도매시장에서 전기를 값싸게 사들여 주정부에서 정해진 범위 안에서 소매가격을 조금씩 올리면서 상당한 이익을 얻었다. 그러나 2000년 중반부터 사정은 급격히 변하여 도매가격이 가파르게 올라가기 시작하였다. 2000년 6월 도매가격은 300%나 상승했고, 소매가격 범위제한이 풀리지 않은 지역의 전력회사들은 엄청난 손해를 보기 시작하였다. 도매가격은 계속해서 상승했고, 2000년 12월에는 1999년 가격의 30배로 올랐다. 캘리포니아

VI. 전력부문에 관한 연구

말, 기존에 이미 전력 산업의 리스טר럭처링의 실시단계에 있던 8개 주에서 리스טר럭처링 과정이 연기되거나 정지되었다. 2000년 당시 규제완화에 대한 가능성을 심각하게 검토했던 또 다른 18개 주는 리스טר럭처링에 대해서 어떠한 입법적 조치도 취하지 않았다(DOE, EIA, 2003a). 현재 17개 주에서 리스טר럭처링이 실시되고 있다. 이들 중 15개 주는 CAIR이 적용되는 지역이다. 규제완화와 리스טר럭처링에 대한 노력이 현재는 다소 소강상태에 있으나, 연방정부 수준에서는 입법적으로 뿐만 아니라 연방 에너지 규제위원회(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)의 활동을 통하여 많은 노력을 행하고 있다. 아직까지 리스טר럭처링과 규제 완화에 관한 노력을 기울이지 않은 주들은 언제/어떻게 시행할 지에 대해서는 미정이다. 지도 6-1은 2003년 2월 현재 리스טר럭처링 활동을 하고 있는 주 전력산업의 분포를 나타낸다.¹³⁴⁾

3. 오염과 EPA의 배출규제

전력생산의 약 70%를 차지하는 화석연료로 인한 전력생산과정에서 미세입자와 오존 형성에 있어서 전구물질로 작용하는 SO₂와 NO_x가 대기 중으로 방출된다. 전력생산은 SO₂와 NO_x 대기배출에 주요한 원인이 되고 있으며, 이들 SO₂와 NO_x의 배출량 감소를 위한 EPA의 노

의 최대 전력회사인 PG&E와 SCE는 파산지경에 몰렸고, 상황이 점점 더 나빠지자 이들은 캘리포니아 정부에 대해 소매가격 범위제한을 풀어줄 것을 요구하였다. 그러나 캘리포니아 정부는 그 요구를 거절했고, 2001년 1월 16일 두 회사는 채무불이행을 선언하였다. 전기판매대금을 받지 못하게 된 발전회사들은 이들 회사에 대한 전력공급을 중단했고, 1월 17일과 18일 캘리포니아 북부에서 2차 대전 후 최초로 전기가 끊어지는 사태가 일어났다. 정전사태는 며칠 후 진정되었지만 전력시장은 여전히 불안한 상태였고, 이 상태는 상당히 오래 지속되었다. 2001년 3월 19일에는 캘리포니아 남부가 정전으로 타격을 입었고, 2001년 5월 7일과 8일에 또다시 정전이 일어났다. 캘리포니아 정전사태는 2001년 여름을 고비로 진정되기 시작했다. 그러나 그 여파는 엄청났다. 캘리포니아의 최대 전력회사 PG&E와 SCE가 파산했고, 두 차례의 가격인상이 단행되었고, 100억 달러의 공적 자금이 정전을 막기 위한 전기구입을 위해 추가로 지출되었다.

134) EPA 보고서, Figure 6-1, 6-5.

력은 결국 미세입자와 오존의 감소로 이어진다. 2003년에 전력부문은 전국 SO₂ 총방출량의 67%를 차지하며, 전국 NO_x 총방출량의 22%를 차지한다.¹³⁵⁾

기름과 가스를 원료로 하는 전력발전의 경우는 NO_x 방출에 영향을 미치는데, 공장형태와 통제장치의 설치 여부에 따라서 방출량은 차이가 있다. 촉매환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)¹³⁶⁾을 사용하여 질소산화물 배출을 억제하는 공장에서는 0.01 lbs/mmBtu 이하를 방출하며, 질소산화물 배출 억제장치를 사용하지 않는 공장에서는 0.5 lbs/mmBtu 이상을 방출한다. 가스를 원료로 하는 전력발전의 경우 SO₂ 방출은 거의 없다. 기름을 원료로 하는 전력발전의 경우 연소제어장치를 설치하지 않으면, NO_x의 방출비율은 0.1 lbs/mmBtu에서 0.6 lbs/mmBtu에 달한다. SO₂ 방출은 기름 내에 황의 보유정도에 따라서 다르며 0.1 lbs/mmBtu에서 2 lbs/mmBtu에 달한다.

4. 오염통제기술

석탄을 원료로 하는 전력발전으로 배출되는 SO₂량을 감소하는 것에 관하여 원료를 고유황탄에서 저유황탄으로 변경하는 방법과 황정화장치(Flue Gas Desulfurization, FGD. 보통 집진기(Scrubbers)라 함)를 설치하는 방법이 있다. 산성비 프로그램(Title IV Acid Rain Program)과 관련하여 EPA가 입수한 자료에 따르면, 석탄을 원료로 하는 발전소에서 배출하는 SO₂양의 비율은 석탄의 연소방식에 따라 0.4 lbs/mmBtu에서

135) EPA 보고서, Figure 6-2, 6-6.

136) 질소산화물 처리방법에는 촉매환원법과 무촉매환원법(Selective Non Catalytic Reduction, SNCR)을 이용한다. 촉매환원법은 환원제로 NH₃, CO, H₂S 등을 사용하여 300~400도 조건 하에서 NH₃ 가스를 분사하여 TiO₂ 또는 V₂O₅ 촉매층을 통과하는 과정에서 질소산화물이 처리된다. 무촉매환원법은 촉매없이 870~1,200℃ 온도범위의 고온 배출가스에 NH₃ 또는 암모니아수를 분사하여 질소산화물을 처리한다. 이 방법은 촉매환원법에 비해 건설비, 유지관리비가 저렴하다.

VI. 전력부문에 관한 연구

5 lbs/mmBtu를 나타내고 있다. SO₂의 양을 줄이기 위해서 석탄연료를 바꾸는 것이 일반적으로 쉬운 방법이다. 역청탄이나 아역청탄¹³⁷⁾을 사용하는 것인데, 이 둘은 발열량은 비슷하지만, 특성상 차이가 있다. 역청탄 대신 황함유량이 적은 아역청탄을 사용하게 되면 황배출감소에 기여하게 된다. 역청탄과 아역청탄을 혼합하여 사용하는 것도 하나의 방법이 될 수 있다.

황을 정화하는 데에는 일반적으로 습식집진장치(wet scrubber)¹³⁸⁾와 분무건조장치가 사용된다. 습식집진장치는 SO₂를 걸러내기 위하여 다양한 종류의 흡착제를 사용한다. 흡착제의 종류를 선택하는 데에는 정화장치의 특성에 따른 역할, 크기 및 비용을 고려하여 선택한다. 새로운 종류의 습식집진장치는 매우 성능이 좋아서 SO₂의 95% 이상을 제거하는 효과가 있다. 분무건조장치 역시 SO₂의 90% 이상을 제거하는 효과가 있다.

NO_x 배출량을 감소시키는 방법 중의 하나는 (저NO_x 버너와 과잉연소된 공기와 같은) 연소통제장치를 사용하는 것이다. 연소통제장치는 NO_x발생이 적게 되는 조건 하에서 석탄을 연소하여 NO_x 배출량을 감소시키는 방법이다. 연소 후 통제장치(Post-combustion control)는 연소과정에서 NO_x가 형성된 이후 그것을 제거함으로써 NO_x를 감소시키는 방법이다. 가장 많이 사용하는 연소 후 통제장치는 선택적 촉매

137) 역청탄은 비교적 석탄화도(石炭化度)가 높은 것이다. 무수무회(無水無灰) 기준의 탄소함유량은 78~90%이며, 탄소함유량이 적은 것을 아역청탄(亞瀝靑炭)이라 한다. 아역청탄은 무수무회 기준의 발열량은 3만~3만 4000kJ/kg이다. 역청탄은 석탄화도가 높아짐에 따라서 약점결성, 점결성, 강점결성으로 성질이 변하며, 발열량은 3만 4000~3만 6000kJ/kg이다. 일반 연료용, 가스발생용으로 쓰이는데, 점결탄은 코크스로의 용도가 크다.

138) 습식집진장치는 유해가스 및 화학물질을 처리하기 위하여 액적, 액막, 기포 등을 이용하여 가스로부터 입자를 분리시키는 장치이다. 주로 가용성 포집에 사용되고 있으며 온도 조건에 따른 재질의 선정에 유의해야 하며 포집효율에 따른 세밀한 설계가 요구된다. 가스 흡수뿐만 아니라 증유, 증습, 액적, 먼지 등의 제거에도 사용된다.

감소기술(Selective Catalytic Reductions, SCR)이다. SCR 시스템은 암모니아를 주입하여 NOx와 결합시켜서 질소와 물로 분리시킨다. 이 반응을 촉진시키기 위해서 촉매를 사용한다. SCR 시스템을 사용하게 되면 NOx 배출량의 90% 정도를 감소시킨다. 촉매를 사용하지 않고 암모니아를 주입해서 사용하는 방법도 있는데, 이것은 NOx 배출량의 40% 정도를 감소시킨다.

5. 전력생산부문의 규제

연방정부차원에서 SO2와 NOx의 배출량을 줄이기 위한 노력은 1970년대 이후부터 시작되었다. 정책결정권자들은 이러한 유해한 배출을 다룰 필요성을 인식하기 시작하였고, 오염원 배출 규제에 대한 필요성을 인식하였고, 대기질기준을 충족하도록 하는 점진적 조치들을 취하기 시작하였다. CAIR은 그러한 대기질기준에의 달성을 실현하기 위한 그 다음 조치인 것이다. 발전소의 SO2와 NOx 배출량에 연방규제 정책은 1970년 CAA로 시작되었다. 동법은 석탄을 원료로 사용하는 발전소를 포함하여 여러 가지 발전소들이 준수해야할 기준을 EPA가 개발하도록 요구하였다. 발전소를 위한 New Source Performance Standards, NSPS는 정화장치의 사용과 황함유량이 낮은 연료를 사용하도록 했으며, NOx에 대한 배출량에 대해서도 규제를 실시하였다. 그 후 1978년 개정된 NSPS에서는 모든 신규 발전소들에 대해서 집진기 설치를 요구하여 SO2 기준을 강화하였다.

1990년 개정 CAA는 발전소에 대한 많은 새로운 요건들을 부과하였다. 1990년 개정 CAA의 Title IV에 의해 설립된 산성비 프로그램¹³⁹⁾은

139) 산성비 프로그램의 성과에 대해 정부에서는 항목별로 평가하고 있다.

- 비용절감 : 지시·통제 프로그램에 의한 오염물질 저감과 비교했을 때 같은 기간 동안 같은 양을 줄이는 데 2/3의 비용만이 소요되었다.
- 경제적 인센티브 : 배출권거래제는 발전소가 배출량을 효과적으로 저감하는 새롭고 비용이 덜 드는 방법을 찾게 하는 경제적 인센티브를 제공한다.

VI. 전력부문에 관한 연구

SO₂와 NO_x 배출에 대한 대폭적인 감소를 요구한다. SO₂ 프로그램은 발전소에 의해 배출될 수 있는 총 SO₂ 배출에 대한 영구적 상한선을 설정한다. 시장에 기초한 배출상한과 거래메카니즘은 개별 연소장치들로 하여금 자신들의 준수방법을 선택할 수 있는 유연성을 허용한다. 이 프로그램은 석탄을 연료로 하는 특정 발전소들에 대한 NO_x 배출한계에 대하여 Title IV의 집행없이 2001년에 배출되었을 예상 NO_x 배출량으로부터 200만톤 감소를 달성할 목적으로 훨씬 더 전통적 접근법을 사용한다.

산성비 프로그램의 목적은 산성비의 주원인인 아황산가스의 배출량을 줄임으로써 대기질 개선을 추구하는 것이고, 활발한 배출권 거래제도를 통해 경제적 효율성을 최대한 높이며 성장을 가능하게 해줄 여러 경제적·기술적 대안의 활용을 허용하는 데 있다. 이 프로그램은 모든 배출시설이 지켜야 할 특정한 배출허용기준을 설정한 기존의 직접규제 방식으로부터 시장의 인센티브를 활용한 배출권 거래제도로의 전환을 의미한다. 주로 화석 연료를 사용하는 발전소나 산업시설을 대상으로 배출권을 할당하고 하나의 배출권은 특정기간 동안 1톤의 아황산가스를 배출할 권리를 부여하고 있다. 산성비 프로그램은 1995년부터 실시되었는데 첫 해부터 이 프로그램에 참가한 발전소의 아황산가스 배출량이 상당히 감소하였으며, 현재까지 잘 운영되고 있

■ 책임성과 투명성 : 산성비 프로그램을 적용했을 때, 발전소가 실제 오염물질 배출량에 따르는 충분한 배출권을 가지고 있는지를 입증하기 위해 철저한 모니터링을 하도록 유도함으로써 책임성과 투명성을 높일 수 있다.

■ 지역적 효과 : 지역 내 총량규제를 만족시키는 결과를 얻었다. 예를 들어 1990년과 1999년을 비교했을 때, 263개의 규제된 발전소를 대상으로 North Central, Southeast, Mid-Atlantic 지역에서 각각 49%, 48%, 43%의 SO₂ 저감효과를 보였다.

■ 검증된 결과 : 사업장은 100% 산성비 프로그램을 준수하였으며 프로그램 운영을 위해 EPA직원 75명만이 활용되었다. 이는 기존의 지시·통제 프로그램이 달성할 수 없었던 수치이다. 시행 초기에, 배출 총량은 평균 25% 수준의 감소를 보였고 산성비는 크게 줄었다. 한화진, 미국의 최근 대기질 입법발의안 특성(한국환경정책평가연구원), http://www.kei.re.kr/02_pub/r_forum_con.asp?page_num=3&SEQ=89&tc_num=5&tc_seq=3.

는 것으로 평가되고 있다. 동 프로그램은 발전소에 대한 규제를 2단계 절차에 걸쳐 강화할 것을 규정하고 있는데, 제 1단계는 1995년부터 시작되어 1999년 말까지 적용되며, 2000년부터 시작된 제 2단계는 좀 더 강화된 기준으로 시행되고 있다.

개정 CAA는 오존기준의 미달성을 감소시키기 위하여 NOx 배출통제에 대하여 훨씬 더 강조하였다. 그럼으로써, 이는 텍사스 지역에서의 NOx 배출거래제도뿐만 아니라, 다른 여러 지역 간의 NOx 배출거래제도의 정착을 촉진시켰다. 북동부에 위치한 주들을 구성원으로 하는 오존운반 위원회(Ozone Transport Commission)는 1999년에 발효되는 각 주들 간에 있어서 NOx 배출량을 거래할 수 있는 규정에 합의하였다. 1998년 EPA는 동부 21개 주와 컬럼비아 특별구의 NOx 배출량 감소를 위하여 규제정책(NOx SIP Call)을 공표하였다. 이 정책은 배출상한과 거래제도(Cap and Trade)를 도입하여, 바람을 받는 지역에서의 오존 한도량에 대한 미달성을 극복할 수 있도록 하였다. 이 프로그램은 2004년 여름에 시작되었고, 이를 위하여 선택적 촉매감소기법이 많이 사용되었다.

6. 배출상한과 거래제도

산성비 프로그램과 NOx SIP Call에 주로 의존한 CAIR 하에서의 배출상한과 거래제도는 전력부문에서 배출감소요건을 충족함에 있어서 상당한 유연성을 부여한다. 배출상한과 거래제도는 가장 비용효과적 방법으로 충족될 수 있는 환경목표를 위해 허용되는 고도로 효율적인 도구이다. 왜냐하면 기업들은 가장 최소한의 비용으로 배출감소를 달성하기 위한 경제적 유인책을 가지고 있기 때문이다. 이 제도는 어떠한 옵션이 연료비용 또는 오염통제비용과 같은 주어진 비용에서 최상으로 작용하는가를 결정하도록 개개 기업에게 다양한 준수 옵션들을 허용하고 있다.

위의 오염통제옵션들에 더하여, 기업들은, 통상 신속한 조치 변화(dispatch change)라 일컬어지는, 덜 배출하고 훨씬 더 효율적으로 운영되

VI. 전력부문에 관한 연구

는 발전소들을 훨씬 더 효율적으로 이용함으로써 배출상한과 거래프로그램을 준수할 수 있다. 전력 생산을 이러한 훨씬 더 효율적인 시설들에서 하도록 함으로써, 전력부문은 준수비용을 줄이고 있다. 왜냐하면, 배출상한제 하에서는 오염에 따른 비용이 존재하기 때문이다. 또 다른 옵션은 배출을 커버하기 위하여 추가적 허용치를 구입하는 것이다.

7. CAIR

대기질 문제로 인한 공공의 건강과 환경에 대한 개선을 위하여, EPA는 CAIR을 최종적인 것으로 하고 있다. 최종 CAIR은 23개 주와 콜롬비아 특별구에서 연간 SO₂와 NO_x의 배출량 감소를 요구한다. CAIR이 적용되는 많은 주들에서는 연간 SO₂와 NO_x의 배출량 감소에 영향을 받고, 오존이 빈번하게 발생하는 시기에는 NO_x의 배출량 감소 요구에 영향을 받는다. CAIR은 2003년 수준을 기준으로 SO₂의 73% 감소와 NO_x의 61% 감소를 요구하였고, 이것을 각 주별로 탄력적으로 해결해 나가기 위한 방법으로 배출상한과 거래제도를 허용하였다. CAIR은 25 MW 이상의 용량을 지닌 약 3,000 개의 화석연료를 사용하는 발전소들에 영향을 미친다. 이것은 2003년 전국 SO₂ 배출량의 89%와 NO_x 배출량의 79%의 원인이 된다. [표 6-4]는 이를 나타낸다.¹⁴⁰⁾

[표 6-4] 2003년 SO₂와 NO_x의 배출량과 CAIR 적용지역에서의 배출량의 퍼센티지

	SO ₂	NO _x
CAIR 지역	9,407,406	3,222,636
전 국	10,595,069	4,156,026
전체 방출량에서 CAIR 지역 방출량의 구성비	89%	79%

140) EPA 보고서, Table 6-4, 6-10.

* 배출상한과 거래제도가 적용되는 지역은 알라바마, 콜롬비아 특별구, 플로리다, 조지아, 일리노이, 인디애나, 아이오아, 켄터키, 루이지애나, 메릴랜드, 미시간, 미네소타, 미시시피, 미주리, 뉴욕, 남북캐롤리나, 테네시, 텍사스, 버지니아, 서버지니아, 위스콘신주이다.

EPA에서 실시한 모델링 결과 석탄과 기름/가스를 사용한 전력 생산은 국내 전력생산에 있어서 큰 비중을 차지한다.¹⁴¹⁾ 전력수요는 연간 1.6%씩 성장하고, 총전력에 대한 수요는 2010년에는 41,980억 킬로와트시(kWh)로 예측된다. [표 6-5]는 EPA의 모델링 결과, 현재의 전기생산과 2010년과 2015년에 예측되는 전력생산량을 나타낸다.¹⁴²⁾

[표 6-5] 현재 전력 순생산량과 2010년과 2015년 EPA 예상 전력생산량
(단위: 10억 kWh)

전력 생산 원료	2003년	2010년	2015년
석 탄	1,970	2,198	2,242
기름/가스	758	777	1,026
기 타	1,119	1,223	1,235
총 계	3,848	4,198	4,503

8. 전기의 가격탄력성

전기는 인간의 삶에 없어서는 안 될 매우 중요하고 핵심적인 역할을 수행한다. 결론적으로 전기는 필수재화이므로, 전기가격의 변화로 인해서 소비자의 수요량이 크게 바뀌지 않으므로, 가격에 대한 수요

141) EPA는 IPM 분석을 사용하여 발전소에서 발생하는 배출량, 비용, 그리고 그밖의 다른 요소들을 예측하였다. 여기서 제시된 예측은 EPA에서 작성한 기준 시나리오에 의한다.

142) EPA 보고서, Table 6-5, 6-10.

VI. 전력부문에 관한 연구

탄력성은 비탄력적이다. 이는 특히 단기적인 경우에 있어서는 더욱 그러하다. EPA 모델링에서는 전기의 가격변화에 대한 수요량을 일정하다고 가정함으로써, 즉 완전 비탄력적임을 전제로 해서 모델링을 수행하였다. 이러한 가정으로 인해서 모델링의 결과값은 어느 정도 과다측정의 가능성이 존재하게 된다.

Ⅶ. 비용영향분석, 경제적 영향분석, 에너지영향분석

EPA는 미국 전체 전력 시스템을 위한 SO₂와 NO_x 대기오염 통제정책을 검토하기 위하여 역동적인 계수 프로그래밍 모델인 IPM을 사용하였다. 이를 토대로 EPA는 CAIR가 미치는 비용영향분석, 경제적 영향분석, 에너지영향분석을 실시하여 CAIR 제정에 관한 규제영향분석을 행하였다.

1. 모델링 배경

IPM 분석은 SO₂와 NO_x의 주요 배출원인 동시에 각 주들이 배출상한과 거래프로그램을 통하여 배출감소 요건 실현을 위하여 통제할 수 있는 전력부문¹⁴³⁾을 대상으로 한다. EPA는 CAIR에서 SO₂와 NO_x의 연간 배출 상한을 [표 7-1]에서와 같이 정해놓고 최종 CAIR과 CAIR안(proposal)에서 대상이 될 수 있는 CAIR 지역에 해당하는 주들의 수를 조정하여 2단계 IPM 통제 전략을 모델화 하였다.¹⁴⁴⁾

[표 7-1] CAIR 적용시 연간배출총량 (단위 : 백만톤)

	2010-2014('09-'14 for NO _x)	2015-그 이후
SO ₂	3.6	2.5
NO _x	1.5	1.3

143) 배출감소 목표를 달성하기 위한 가장 효율적인 방법은 주들이 선택할 옵션을 가지고 있는 전력부문에 관한 배출상한과 거래프로그램을 통한 것이라고 EPA 분석은 밝히고 있다. 전력부문은 2002년 전국 SO₂ 배출의 67%와 NO_x 배출의 22%에 기여하였다. 실제로 주들은 선택적인 배출상한과 거래프로그램에 참여하지 않을 것을 선택할 수도 있고 다른 부문으로부터 그에 상응하는 배출감소를 획득할 것을 취득할 것을 선택할 수도 있다. 그러나, 전력부문을 위한 지역 전체의 배출상한과 거래프로그램이 배출을 감소하기 위한 최상의 접근법이라고 EPA는 믿는다.

144) EPA 보고서, Table 7-1, 7-2.

1.1. 1단계 통제 전략

EPA의 1단계 통제 전략은 3개 주(아칸소, 델라웨어, 뉴저지)를 CAIR 지역에 추가로 편입하여, 이들로 하여금 연간 SO₂와 NO_x 감소를 할 것을 요구하는 것이었다. 그러나, 이 3개 주들은 최종 CAIR 하에서는 연간 감소를 할 것이 요구되지 않는다. 아칸소, 델라웨어, 뉴저지주의 추가로 인하여 최초의 모델 운영을 위한 연간 SO₂와 NO_x에 영향을 받는 주들의 총 수는 26개주와 컬럼비아 특별구로 늘어나게 되었다. 아칸소주는 최종 CAIR 또는 CAIR 안의 어디에도 연간 SO₂와 NO_x 요건에 포함되지 않지만, 최종 CAIR의 일부인 오존 시즌에 관련된 CAIR 요건에는 포함된다. 이러한 모델 운영을 통한 1단계 통제 전략은 코네티컷과 메사추세츠주를 위하여 개별 주 오존 시즌 NO_x 상한선을 포함하게 된다.

참고로 최종 CAIR은 동부 23개 주와 컬럼비아 특별구에서 연간 SO₂와 NO_x 감소를 요구하고 있으며, 오존 시즌(5월-9월)에 25개 주와 컬럼비아 특별구에서 NO_x 감소를 요구하고 있다. CAIR 안은 델라웨어와 뉴저지주를 연간 SO₂와 NO_x 감소를 위하여 CAIR 지역에 포함하는 방안을 게재하고 있다. 이러한 1단계 통제 전략은 최종 CAIR과 CAIR안 모두에 관한 EPA의 분석적 평가로 사용된다.

1.2. 2단계 통제 전략

최종 CAIR 통제 전략을 반영하는 최종 IPM 모델링은 연간 감소를 할 것으로 요구된 23개 주와 컬럼비아 특별구에 대하여 연간 SO₂와 NO_x 상한선을 포함하고, 오존 시즌 감소를 할 것을 요구받은 25개 주와 컬럼비아 특별구에 대하여 오존 시즌 NO_x 상한선을 포함한다.

1.3. CAIR에 대한 규제영향분석을 위한 방법

CAIR 집행에 따른 예상 비용과 배출은 아칸소, 델라웨어, 뉴저지주를 포함하는 최초의 IPM 운용으로부터 추론된다. CAIR 집행에 따른 대기질과 편익분석은 최초의 IPM 운용에 따른 예상 배출에 근거한다. EPA는 예상 통제 비용, 배출, 그리고 그밖의 영향에 대해 최초의 IPM 운용과 최종 IPM 운용 간에 거의 차이가 없는 것으로 본다.

IPM은 10년 이상 환경 정책의 경제적 및 배출 영향을 평가하기 위하여 사용되어 오고 있다. 이 모델의 기본 사례는 개정 CAA Title IV (산성비 프로그램), NOx SIP Call, 다양한 New Source Review(NSR) 합의¹⁴⁵⁾, 2004년 4월 이전에 최종적으로 된 SO₂와 NO_x의 배출에 영향을 미치는 몇몇 주 규칙들을 체화하고 있다. IPM은 또한 다양한 현재 및 미래의 주 프로그램들, 주의회 및/ 또는 환경청에 의해 승인된 최종 주 규칙들을 포함한다. 이러한 기본 사례는 환경 정책들을 비교하고 그 정책들의 영향력을 평가하기 위한 참고 사항으로 제공되고 있으며, EPA의 예측이 발생할 것이라는 미래 시나리오를 반영하지는 않는다.

여기서 제시된 경제적 모델링은 전력부문에 관한 구체적 분석을 위하여 개발되어, 그 산업을 가능한 한 정확하게 반영하도록 디자인 되어 있다. 그 결과, EPA는 IPM에서 다양한 형태의 투자와 전력 분야가 야기하는 기타 비용을 위해 적합한 할인율을 사용한다. IPM에서 사용된 할인율은 CAIR을 위하여 행해진 EPA의 다른 분석에서 사용된 할인율, 특히 사회적 할인율일 것이라고 가정되고 있는 편익분석에서 사용된 할인률과는 다를 수도 있다. EPA는 전력 분야 모델링을 위하여

145) EPA와 Southern Indiana GAs and Electric Company(Vectren), Public Service Enterprise Group, Tampa Electric Company, We Energies(WEPCO), Virginia Electric & Power Company (Dominion), Santee Cooper 간의 합의를 포함한다. EPA 보고서, 7-3.

사용된 할인율을 위한 기초(근거)로서 사회기본시설기관들, 재정 기관들, 채무평가 행정청들, 그리고 정부 통계로부터 최상의 유용한 정보를 이용한다. 이 할인율은 전력부문과 에너지정보청(Energy Information Administration, EIA)에 의한 심사를 받지만, 법원에서 다투어지지 않는다. 결론적으로 EPA의 모델링은 불확실한, 특히 미래 연료 가격과 전력 수요 성장을 위한 가정과 같이 다양한 투입 가정을 위한 자신의 최선의 판단에 근거하고 있다. 이를 위하여 최종 CAIR과 CAIR안에 관한 규제영향분석을 비교·검토하는 모델링을 하였다.

2. SO₂와 NO_x의 예상 배출 및 감소

2.1. 예상 배출

자원들이 CAIR 요건에 근거하여 사용되도록 허용될 Title IV 산성비 프로그램에 근거한 오염배출한도량의 허용한도(bank of allowances)의 존재로 인하여, 2010년과 2015년의 SO₂ 배출은 CAIR를 위하여 요구되고 있는 상한선보다 더 높게 될 것이다. 아래 [표 7-2]는 예상 배출 정도를 나타낸다.¹⁴⁶⁾

[표 7-2] 기준 사례 및 CAIR과 비교한 예상 SO₂와 NO_x 배출(백만 톤)

지 역		2010년			2015년			2020년		
		Base Case	CAIR	배출 감소	Base Case	CAIR	배출 감소	Base Case	CAIR	배출 감소
SO ₂ (연간)	전국	9.7	6.1	3.6	8.9	4.9	4.0	8.6	4.2	4.5
	CAIR	8.8	5.2	3.6	8.0	4.1	4.0	7.9	3.4	4.5
NO _x (연간)	전국	3.6	2.4	1.2	3.7	2.1	1.5	3.7	2.1	1.6
	CAIR	2.8	1.5	1.3	2.8	1.3	1.5	2.9	1.3	1.6

146) EPA 보고서, Table 7-2, 7-5.

지 역		2010년			2015년			2020년		
		Base Case	CAIR	배출 감소	Base Case	CAIR	배출 감소	Base Case	CAIR	배출 감소
NOx (여름)	전국	1.2	1.0	0.2	1.2	0.9	0.3	1.2	1.0	0.3
	CAIR	0.8	0.7	0.2	0.8	0.6	0.3	0.8	0.6	0.3

- * 배출 데이터는 EPA 모델링 결과이고 CAIR 지역은 연 SO₂와 NO_x 요건을 위하여 모델링된 주들을 포함한다. 여름은 오존 시즌인 5월 1일부터 9월 30일까지이다.
- * 기준 사례는 Title IV 산성비 프로그램, Nox SIP Call, 2004년 3월 이전에 최종적인 것으로 된 주 규칙들을 포함한다.

2.2 예상 감소

CAIR을 적용했을 때를 모델링한 결과, 실질적 SO₂ 배출 감소는 중서부와 중부 애틀란타 지역에서 발생하였다. NO_x 배출 감소는 CAIR 지역 전반에서 발생하였고, 이 때 오존 시즌동안의 NO_x 배출량의 감소는 NO_x SIP Call을 적용했을 때보다 적다. NO_x 배출량에 대하여 SIP Call을 적용했을 때의 여름 동안 감소량보다 CAIR을 적용했을 때의 오존 시즌기간에 NO_x의 더 많은 배출 감소를 달성한다.¹⁴⁷⁾

3. 예상 비용

CAIR의 연간 증가 비용은 2010년에는 240억 달러, 2015년에는 360억 달러, 2020년에는 440억 달러이다. 전기 생산 비용은 이전 및 분배 비용을 포함하는 총 전기 비용의 1/3 또는 1/2이다. 아래 [표 7-3]은

147) EPA 보고서, Figure 7-2, 7-3 & 7-4, 7-6~8.

SO2와 NOx 감소를 위한 CAIR의 한계비용을 나타낸다.¹⁴⁸⁾

[표 7-3] CAIR의 연간 지역별 비용과 CAIR로 인한 SO2와 NOx 감소의 한계비용(1999년 달러)

연간 비용 (10억 달러)		2010년	2015년	2020년
			2.4 달러	3.6 달러
한계 비용(달러/톤)	SO2	700 달러	1,000 달러	1,400 달러
	NOx	1,300 달러	1,600 달러	1,600 달러

4. 예상 통제기술 개선

CAIR을 적용한 이후, 2015년까지 SO2 배출통제를 위하여 현재의 화력발전 용량에 추가로 황정화장치 64 GW 설치를 초래할 것으로 예상되고, NOx 배출통제를 위하여 현재의 화력발전 용량에 추가로 SCR 34 GW시스템을 설치할 것으로 예상된다. CAIR 1 단계는 2010년까지 추가로 황정화장치 37 GW시스템을 설치하고, SCR 14 GW 설치를 예상한다. CAIR 1 단계에서 달성된 많은 NOx 감소는 지금까지 NOx SIP call 지역하에서 오존 시즌동안 사용해왔던 많은 SCR장치로 인한 것이었고, 이로 인해 SCR 시스템을 1년 내내 가동할 수 있게 되었다. 몇몇의 화력 발전소들 또한 CAIR에 근거하여 NOx 통제를 위하여 SCR장치를 설치한다. 배출 감소는 추가적 오염 통제 설치, 더욱 효율적인 전기 생산 시설에로의 이동 그리고 연료와 석탄의 전환과 같은 국가정책에 대한 선택적 순응을 통하여 달성된다. 아래 [표 7-4]는 CAIR을 적용한 이후, 2015년까지 SO2 배출통제를 위하여 현재의 화력발전 용량에 추가로 황정화장치 64 GW 설치를 초래할 것으로 예상되고, NOx 배출통제를 위하여 현재의 화력발전 용량에 추가로 SCR

148) EPA 보고서, Table 7-3, 7-9.

34 GW시스템을 설치할 것으로 예상된다¹⁴⁹⁾는 것을 나타낸다.

[표 7-4] 기준 사례 및 CAIR의 기술에 의한 오염 통제(GW)

기술	기준값 총계			CAIR후 증가값			CAIR후 총계		
	2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
정화장치 (Scrubber)	110	116	117	37	64	82	147	180	199
선택적 촉매감소기법 (SCR)	111	119	121	14	34	33	126	152	154

* 기준 사례 개선은 Title IV 산성비 프로그램, NOx SIP Call, NSR 합의, 그리고 다양한 주 규칙들을 위한 추가적 개선뿐만 아니라 현존하는 집진기와 SCR을 포함한다.

5. 예상 발전연료의 혼합

산업계로 하여금 필요한 오염통제를 설치할 적절한 시간을 허용하고 있는 CAIR의 단계별 특성으로 인하여 석탄을 연료로 하는 발전과 천연가스를 연료로 하는 발전은 거의 변화하지 않는 것으로 예상된다. 기본 사례와 관련하여, 5.3 GW 석탄 연료 용량은 유지하기에는 비경제적인 것으로 예상되고(모든 석탄 연료 용량의 약 1.7%와 모든 발전 용량의 0.5%), 그리고 1 GW 석탄 연료 용량은 천연 가스 또는 통합 가스화 조합 사이클(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)로 전환될 것으로 예상된다. 대부분의 경우, 비경제적 시설들은 CAIR 지역 전역에 산재해 있는 소규모이고 자주 사용되지 않는 발전 시설들이다. 실제로, 유지하기에 비경제적인 것으로 예상된 시설들은 격자의 특정 부분에서 전송 신뢰도(transmission reliability)를 보장할 목적으

149) EPA 보고서, Table 7-4, 7-9.

Ⅶ. 비용영향분석, 경제적 영향분석, 에너지영향분석

로 보존될 수도 있다. 특정 발전 시설들이 연료, 운영 및 수리비용, 수요와 신뢰도 보존 요건 모두를 충족시킬 필요성이 있는지 여부에 근거하여 판단할 때, IPM은 이 시설들은 유지하기에 비경제적이라는 것을 예측할 수 있다. [표 7-5]는 CAIR에 의한 발전연료의 혼합을 나타낸다.¹⁵⁰⁾

[표 7-5] 기본 사례와 CAIR에 의한 발전연료의 혼합

연 료	2003	2010년			2015년			2020년		
		기준값	CAIR	변화율	기준값	CAIR	변화율	기준값	CAIR	변화율
석 탄	1970	2198	2163	-1.6%	2242	2195	-2.1%	2410	2381	-1.2%
석유/ 천연가스	758	777	809	4.1%	1026	1072	4.5%	1221	1250	2.3%
기 타	1102	1223	1218	-0.4%	1235	1233	-0.2%	1218	1217	-0.1%
총	3848	4198	4198	-0.2%	4503	4499	-0.1%	4850	4847	-0.1%

6. 예상 용량 추가

EPA는 미래의 전력 수요 증가는 새로운 천연 가스와 석탄 연료 용량의 결합으로 충족될 것이라고 예상한다([표 7-6]).¹⁵¹⁾

[표 7-6] 2020년 총 석탄과 석유/천연가스를 연료로 하는 용량(GW)

	현 재	기본 사례	2020년
분쇄된 석탄	305	318	314
IGCC	0.6	8	9
석유/가스	395	467	469

150) EPA 보고서, Table 7-5, 7-10.

151) EPA 보고서, Table 7-6, 7-11.

7. 전력부문을 위한 예상 석탄 생산

전기 생산을 위한 석탄 생산은 CAIR 여부와는 상관없이 현재 수준보다 약간 증가할 것으로 예상된다. 기본 사례(2010년부터 2020년까지)와 관련해서는 전국적으로 8%(1188-1089) 증가하지만 동부지역에서는 8%(301-325) 감소하고, CAIR(2010년부터 2020년까지)과 관련해서는 전국적으로(1156-1077), 동부지역(331-306)으로 증가한다.¹⁵²⁾ 전력부문으로부터의 배출 감소는 SO₂와 NO_x 제거를 위한 오염 통제 장치를 통하여 충족될 것이다. 오염 통제는 95 퍼센트의 SO₂ 제거율을 기록할 수 있고, 이것은 산업계로 하여금 더 많은 황 물질을 포함하고 서부보다는 운송비용이 싼 동부와 중부 지역의 지방 역청탄에 훨씬 더 많이 의존하도록 허용한다.

8. 예상 소매 전기 가격

CAIR 지역을 위한 소매 전기 가격은 CAIR 시행으로 약간 증가할 것으로 예상된다. 배출상한과 거래프로그램은 산업계로 하여금 가장 비용효과적 방법으로 CAIR 요건들을 충족하도록 한다. 그럼으로써 소비자들에게 전가되는 비용을 최소화한다. 지역 소매 전기 가격은 CAIR 시행으로 2-3% 상승할 것으로 예상된다. 2020년에 CAIR 지역 소매 전기 가격은 CAIR 시행으로 1.8% 상승할 것으로 예상된다. [표 7-7]은 CAIR 지역의 소매 전기 가격이 약간 증가할 것임을 나타낸다.¹⁵³⁾

[표 7-7] 기본 사례 및 CAIR과 관련한 지역 예상 소매 전기 가격

년 도	기본 사례	CAIR	퍼센트 변화
2010	58	59	2.0

152) EPA 보고서, Table 7-7 & Figure 7-6, 7-12.

153) EPA 보고서, Table 7-8, 7-13.

Ⅶ. 비용영향분석, 경제적 영향분석, 에너지영향분석

년 도	기본 사례	CAIR	퍼센트 변화
2015	61	62	2.7
2020	61	62	1.8

9. 예상 연료 가격에 대한 영향

선적 이전의 석탄 가격과 천연가스 가격에 대한 CAIR의 영향은 아래 [표 7-8]와 같다.¹⁵⁴⁾ 석탄 가격은 2010년에는 변화 없다가 2015년과 2020년에는 약 -3% 내릴 것으로 예상된다. 이것은 사용된 석탄 유형의 혼합에서의 변화 때문이다. 배달된 석탄 가격은 상당히 변화하지만, 개개 석탄 유형의 비용에서의 큰 변화는 예상되지 않는다.

[표 7-8] 기본 사례 및 CAIR과 관련한 헨리 허브 천연가스 가격과 배달된 평균 석탄 가격(1999년 달러)

연료	2000	기준값			CAIR			변화율		
		2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
천연가스	4.15	3.20	3.25	3.16	3.25	3.30	3.20	1.6%	1.5%	1.3%
석탄	1.25	1.05	1.01	0.96	0.05	0.98	0.93	0.0%	-3.0%	-3.1%

10. 최종 CAIR 모델링과 EPA의 기존 모델링에 있어서의 주요 차이점

최종 CAIR을 위하여 행해진 배출분석, 비용분석, 대기질분석, 그리고 편익분석은 26개 주와 컬럼비아 특별구에서 연간 SO₂와 NO_x 감

¹⁵⁴⁾ EPA 보고서, Table 7-10, 7-15.

소와 코네티컷과 메사추세츠에서 오존 시즌 NO_x 요건을 요구하는 모델링 시나리오로부터 나온 것이다. 이 모델링은 아칸소, 델라웨어, 뉴저지주가 연간 SO₂와 NO_x 요건에 포함되지 않고 그리고 다양한 주들이 오존 시즌 NO_x 요건을 충족할 것을 요구받고 있다는 점에서 최종 CAIR과는 다르다. 그리고 이 모델링은 최종 CAIR 지역에 근거하여 행해졌는데, 그 결과는 범위 또는 정도에서 EPA의 모델링과 크게 다르지 않았다.

구체적으로 석탄생산, 생산지 석탄 가격과 생산지 천연가스 가격, 생산과 생산능력, 그리고 전기가격은 EPA 모델들 간에 큰 차이가 없다(모두 1% 이하의 차이가 남). SO₂와 NO_x의 전국적 배출은 아칸소, 델라웨어, 뉴저지가 연간 프로그램에 포함되지 않을 때 약 1-3% 더 높은 것으로 나타났다. 모델링 결과에서 주목할 만한 차이는 retrofits (장비개선)에서 나타났는데, SCR와 FGD의 장비개선은 위 세 주가 없으면 약 2-4% 낮다.

더욱이, EPA는 연간 SO₂와 NO_x의 배출량 규제에 관련하여 델라웨어와 뉴저지주를 포함했을 때에 미치는 영향을 결정하기 위한 분석을 하였다.(이 때, NO_x 배출량은 오존 시즌만을 대상으로 함) 그 결과, 위 두 주들을 포함하는 것은 2015년에 추가로 약 5만톤의 SO₂ 감소와 1만톤의 NO_x 감소를 결과한다. 위 두 주를 포함하는 것에 대한 점증하는 비용은 2015년에 약 4천만 달러로 예상된다.¹⁵⁵⁾

11. 발전소들로부터의 예상 1차 PM 배출

발전소들로부터의 1차 PM 배출은 IPM 산출과 배출 요소들 간의 결합을 통하여 예상할 수 있다. 1차 PM 배출은 여과가능한 PM 배출과

155) CAIR을 지지하기 위하여 사용된 모든 IPM 운영과 최종 CAIR 패키지 가운데 일부로 사용된 모든 IPM 운영은 최종 CAIR docket에 있고 EPA 웹사이트 <http://www.epa.gov/airmarkets/epa-ipm/iaqr.html>에서 찾을 수 있다.

응축가능한 PM 배출로 구분되고, 양자를 합한 것이 총 1차 PM 배출량이 된다. 여과가능한 PM 배출을 위하여, 배출 요소들은 설치된 배출 통제와 연료 유형에 관한 역사적 정보에 기초하여 개발되었다. 이 방법론은 기본 사례와 통제 사례 간의 여과가능한 PM 배출에 있어서 감소를 낮게 전망하는 경향이 있다. 왜냐하면 FGD를 설치함으로써 인하여 PM 배출이 감소될 지라도, 이와 관련된 어떠한 변화도 배출 요소들에 있어서 가정(전제)되지 않기 때문이다. CAIR을 적용했을 때 SCR장비로 인해서 PM이 응축되므로 통제가 적용되었을 때의 PM배출량과 기존 배출량간에는 변화가 생기게 된다. 비록 EPA가 분석을 위하여 모델링을 사용할 때 최선의 이용 가능한 배출 요소들을 사용하였다 하더라도, 이러한 배출 요소들은 SCR의 설치로 인하여 응축가능한 PM 배출에 있어서 잠재적 변화를 설명할 수 없고 그 관련 요소들을 모두 포함시킬 수 없다. SCRs가 있는 시설들에서 SO₂과 H₂SO₄ 형태로 생성된 PM은 SCR에서 사용된 석탄 황 내용물, 연소 조건과 촉매제의 특성과 같은 수많은 요소들에 따르며, 또한 각각의 시설마다 달라질 수 있다. SCR은 응축가능한 PM의 증가를 최소화하기 위하여 일반적으로 설계되고 작동된다. 이러한 한계로 인하여 SCR을 가진 시설에 대해서는 PM 배출량의 감소량 예측에 대한 과다측정 가능성이 존재하게 된다.

12. 분석의 한계

EPA의 모델링은 불확실한 다양한 투입을 가정하고, 그에 대한 자신의 최상의 판단에 기초하고 있다. 특히, 미래 연료 가격에 대한 가정과 전력 수요 증가에 대한 가정은 전력부문에 대한 EPA 모델링의 핵심적 투입가정이기 때문에 특별한 주의를 요한다. EPA는 민감도분석을 통하여 이 두 투입가정을 둘러싸고 있는 불확실성을 해소하고 있

으며, 대기오염통제에 관한 이용가능한 엔지니어링 연구로부터 최상의 이용가능한 정보를 선택하고 규제통제의 비용, 규제통제에 따른 배출변화, 그밖의 규제통제의 영향을 분석하기 위하여 가장 합리적인 모델링 틀을 설정하여 오고 있다.

EPA의 모델링을 위한 분석에서 제공되고 있는 민간기업의 정책 준수에 따른 연간 예상 비용에 대한 내용은 여기서는 전력부문에 대한 CAIR의 생산(엔지니어링) 비용에 있어서 증가를 의미한다. 즉, 제시된 민간기업의 정책준수에 따른 비용은 환경이라는 공공재의 희생을 대가로 치루는 이익이며, 이 비용은 곧 CAIR이 실행되기 전 뿐만 아니라 CAIR이 실행된 이후에도 산업계가 잘 유지되기 위한 이익과 연결된다고 할 수 있다. 연간 비용을 평가하기 위하여, EPA는 자본회원계수(capital recovery factor, CRF)¹⁵⁶⁾의 승수를 자본 투자에 적용하고 그것을 연간 증가 운영비용에 더하였다. CRF는 자본비용(사적 할인율), 필수 보험비, 지방 재산세, 자본의 수명에 관한 평가로부터 추론된다.

통계수치를 연간 단위로 계산하는 연간화된 비용에서 순수 사회적 비용을 계산하기 위하여 사용된 연간화 요소에는 자본의 수명과 사회적 할인율을 포함한다. CAIR의 편익-비용분석의 목적을 위하여, EPA는 CAIR를 위한 편익분석으로부터 할인율을 사용하는 연간화된 사회적 비용을 계산하고 있다(3%, 7%, 30년 자본 수명. CAIR이 계산에 포함됨으로 인해 필요한 추가 보험비용, 그러나 지방세는 이전 비용으로 간주되고 사회적 비용이 아니기 때문에 포함되지 않았음). 이러한 할인율을 사용하여, CAIR의 사회적 비용은 2010년에는 3% 할인율 적용시 10억 9천 1백만 달러, 2015년에는 20억 5천 6백만 달러, 7% 할인율 적용시 2010년에는 20억 1천 4백만 달러, 2015년에는 30억 7백만 달러이다.

156) 자본회원계수는 사업계획을 세우고 거기에 타당한 총투자액을 산정할 때 사용하는 계수이다.

EPA가 CAIR을 실행하는 데 있어서 드는 비용을 예측하는 방법에 있어서(오염물의 배출상한과 거래프로그램이 적용되는 것을 전제로), 지역적 연간 비용의 측정은 최선의 방법이다. 이러한 비용들은 CAIR로 인하여 발생하게 되는 전력부문에서의 급격한 경제적 변화들에 관한 모델링으로부터 산출된다. IPM을 사용하는 이러한 유형의 분석은 전문가 심사를 거치고 있으며 연방 법원들은 IPM의 비용분석에 의존하고 있는 전력부문에 적용되는 규제를 지지하고 있다.

민간기업의 정책준수에 따른 직접적인 비용은 오염통제에서의 자본투자, 오염통제의 운영비용, 신 오염원들에의 투자, 그리고 추가적 연료비용을 포함한다. EPA는 CAIR를 위하여 사용된 비용 추정은 가능한 근접하게 오늘날 EPA에게 최상으로 이용가능한 정보를 반영한다고 믿는다. 배출을 모니터링하고, 보고하고 영향을 받는 원천들을 위한 기록 유지와 관련한 비교적 적은 비용은 이러한 연간 비용 평가에 포함되지 않는다. 그리고 EPA는 계량화할 수 없는 비용의 존재를 이 분석의 한계로 인식한다. 이러한 비용은 연방과 주의 프로그램 집행비용,¹⁵⁷⁾ CAIR로 전환되는 비용,¹⁵⁸⁾ 새로운 프로그램 참가자(일일 1,000명 이하)가 직면하는 Title IV와 관련한 비교적 적은 승인비용 등을 포함한다.

위에서 언급된 비용 평가는 EPA가 IPM 모델을 운영한 결과에 기초한다. 이 모델은 전력수요부담과 그밖의 제한요소들을 충족하면서 (감소비용을 포함하는) 전력생산비용을 최소화하고, 전력설비산업계가 최저비용으로 환경배출상한을 충족할 수 있을 것이라고 가정한다(Montgomery, 1972). 그러나, 이 모델은 다음과 같은 3 가지 단점을 가진다. 첫째, i) 기관 장벽과 결합한 이전 및 /또는 탐색 비용이 배출거래로

157) 산성비 프로그램, NOx Budget Trading Program, EPA의 승인을 보장하는 각 주들의 SIPs 개발, CAIR이 다루는 대기오염이동문제를 다루는 연방/주의 강제집행 등이 여기에 포함된다. EPA 보고서, 7-18.

158) 훨씬 규모가 작고 덜 효율적인 전력 생산 설비의 퇴출, 그리고 근로자들이 동일한 회사에서 재교육 받을 때 또는 어딘가 다른 곳에서 재고용 될 때 고용 이동과 관련한 비용과 같은 것들이 여기에 포함된다. EPA, 보고서, 7-18.

시설들이 얻는 총 이득보다 많은 경우와 ii) 시설들이 오염 통제의 경제에 영향을 미치는 미래의 조건들을 잘못 판단하는 경우에 이 모델은 비용을 과소평가할 수 있다. 둘째, 이 모델은 장기간 오염 통제 기술들의 비용에 있어서의 감소와 SO₂와 NO_x 제거를 위한 오염 통제 기술들의 능력에 있어서의 진보를 위한 잠재력을 고려하지 않는다.¹⁵⁹⁾ 셋째, EPA 모델링 적용에서 사용된 집진기를 위한 자본금 비용에 대한 가정이 매우 보수적인데, 이는 이 비용이 정책준수비용 중에서 상당부분을 차지하기 때문이다. 최근 발간된 데이터는 최근 설치로부터 보고된 FGD 비용이 IPM에 의해 계획된 수준 이하라는 것을 보여준다.¹⁶⁰⁾ 또한 EPA는 최근의 FGD 설치에 관한 조사를 행하였는바, IPM 모델에서는 전기가격에 대한 수요탄력성이 완전 비탄력적이라고 가정하고 있다(즉, 전리가격에 대한 소비자 반응을 고려하지 않는다). [표 7-8]과 [표 7-9]에서 보여준 증가한 소비자 전력 가격은 최종 사용자들로 하여금 자신들의 전력 사용을 어느 정도 줄이도록 촉구할 것이고 그들로 하여금 대체재들을 사용할 것을 장려할 것이다.¹⁶¹⁾ 이러한 결과 전기에 대한 수요는 감소할 것이고, 결과적으로 IPM이 예측한 것보

159) 시장에 기초한 배출상한과 거래규제는 새롭고 값싼 기술들의 개발과 혁신을 조장하는데 기여한다. 예로서, RFF와 MIT's Center for Energy and Environmental Policy Research(CEEPR)에 의한 산성비 SO₂ 거래 프로그램에 관한 최근 비용평가는 EPA에 의해 처음에 계획되었던 것보다 83% 낮은 것으로 되었다(Carlson et al., 2000; Elerman, 2003). EPA에 의해 행해진 산성비 프로그램들 위한 원래 분석은 IPM과 같은 최적화 모델에 의존하였다는 것을 지적하는 것이 중요하다. 오염 통제의 기술적 향상과 연료 교체와 같은 그 밖의 준수 옵션들을 예측하는 경제적 모델링의 한계로 인하여 1989년에 대략 27억 달러에서 62억 달러일 거라는 EPA의 사전적 비용평가(예상)는 그 프로그램에 관한 비용의 과잉예상이었다. 산성비 SO₂ 거래 프로그램에 관한 사후적 연간 예상비용은 10억 달러에서 14억 달러이다. Harrington et al.은 EPA 프로그램들의 비용분석을 검토하여 예상 비용이 시장에 기초한 프로그램들에 있어서 실제 실행 비용을 과잉기술하는 경향이 있다는 것을 발견하였다(Harrington, Morgenstern, and Nelson, 2000, 7-19면 참조).

160) 집진기 비용은 더 많은 집진기들이 설치됨에 따라 행함으로써 얻는 학습현상에 따라 미래에 감소할 것이라는 증거가 또 있다(Manson, Nelson, and Neumann, 2002).

161) 대체/축소 정도는 전력 수요의 가격 탄력성에 의존한다.

다는 더 낮게 약간의 가격 상승이 초래되며, 이것은 또한 전력 생산의 전기생산의 감소와 배출량의 감소로 이어질 수 있다. 수요량의 감소로 인해서 전기생산의 감소로 이어지고 이로 인한 생산 비용의 절감은 계량화할 수 없는 비용효과 - 수요감소 및 생산비의 감소로 인해서 남은 재화를 저축할 수 있다 - 를 유발할 수 있다. 어느 정도, 이러한 절약된 자원 비용은 우리가 CAIR과 함께 예상할 수 있는 오염 통제에 추가 비용과 연료 교체를 상계할 것이다. 비록 전력 사용에서의 감소가 적을 것 같을 지라도, 그러한 대규모 산업(2003년 수입 2천 5백만 달러)으로부터의 비용 절감은 실질적일 것이다. 2003년에 의회에 상정된 복수 오염물질 입법을 검토하는 EIA 분석은 CAIR의 연간비용이 비용 증가의 크기와 적용범위에 의존하면서, 수요 응답을 고려하지 않음으로써 실질적으로 과장될 수 있다는 것을 나타낸다.¹⁶²⁾

그밖에 최근의 연구에서, 새로운 규제의 총 사회적 비용은 새로운 규제와 세금과 같이 경제에 있어서 이전부터 존재하고 있는 왜곡 간의 상호작용에 의해 영향받을 수 있다는 것을 또한 나타내고 있다. 특히, 만약 규제로 인하여 비용증가가 가격의 증가로 이어진다면, 총 노동량 공급의 감소를 초래하면서 근로자의 실질 임금도 감소할 것이다. 세금 상호작용효과(tax interaction effect)는 노동시장에서 자중(deadweight) 손실의 증가와 총 사회적 비용의 증가를 결과할 수도 있다.

결과적으로, 다양한 비계량화 비용들(그리고 가능한 절약)을 고려한 이후에 EPA는 연간 민간기업의 정책준수에 따른 연간 비용은 산업계가 초래할 미래 연간 준수비용을 과소기술하기보다는 오히려 과잉기술하는 것처럼 보인다고 믿는다.

162) "Analysis of S. 485, the Clear Skie Act of 2003, and S. 843, the Clean Air Planning Act of 2003." 참조. Energy Information Administration, Sept. 2003. EIA 모델링은 Clear Skies Act of 2003 (SO₂, NO_x and mercury를 위한 전국적 총량거래프로그램)의 수요 응답이 CAIR에 유사한 배출 억제없이 현재 가치 가격을 47%까지 낮출 수 있다고 나타냈다.

13. 에너지에 미치는 중대한 영향

CAIR은, E.O. 13211 : Actions that Significantly Affect Energy Supply, Distribution, or Use에 따르면, 천연가스와 전력 생산 비용에 대하여 1% 이상 영향력을 가지며 석탄 연료 발전의 500 MW 이상의 퇴출을 초래하기 때문에 중요하다고 한다. 그러나 CAIR의 몇 가지 측면들은 에너지 생산에 관한 영향력을 최소화 하도록 설계되어 있다. 첫째, EPA는 명령 - 통제 규제를 사용하기 보다는 거래 프로그램을 추천한다. 둘째, 준수 시한이 전력 생산에 대하여 가지는 영향력을 인식하여 설정된다. 따라서 CAIR의 이러한 측면들이 전력부문에 관한 CAIR 안의 영향력을 감소시킨다.

14. 산업부문에 미치는 영향

CAIR 집행의 직접 비용을 EPA는 2015년 CAIR 지역에서 36억 달러로 예상한다. 발전소들에 관한 이 규칙의 영향력을 차치하더라도, 우리는 이 규칙이 다른 산업부문에 미칠 수 있는 영향의 범위를 측정하는 것도 중요하다고 믿는다. EPA는 전기가격에서 예상된 변화들이 어떻게 대규모 전력 사용자들인 산업부문에 영향을 미칠 것인가를 학습하는데 특히 관심을 가졌다. 우리가 사용한 모델들은 향상된 근로자 건강 및 생산성과 같은 CAIR 관련 공기질 향상으로 인한 경제적 편익효과를 제외하더라도, 그러한 영향은 적을 것이라고 나타내었다. 오히려, 계량화 할 수 있는 CAIR 편익의 한정된 부분 가치가 CAIR 실행 비용을 실질적으로 초과하고 있다는 것을 나타낸다.

EPA는 CAIR 실행 비용의 경제 전반적 효과의 잠재적 규모를 측정하기 위하여 두 개의 계산가능한 일반적 균형 모델들을 사용하였다. IGEM으로 알려진 첫 번째 모델은 오랜 추적 기록을 가지고 있으며

Ⅶ. 비용영향분석, 경제적 영향분석, 에너지영향분석

EPA에 의해 두 개의 CAA § 812 연구들 가운데 첫 번째 연구를 위해 사용되었다. EMPAX-CGE라고 불리워진 다른 모델은 현재 동료 전문가가 심사 중이며 전국을 복수 지역군으로 분리하지 않는 장점을 가지고 있다. 이 모델들도 장·단점을 가지고 있으며, 데이터에 있어서 차이점과 기능 형식의 선택은 그 모델들이 약간 다른 결과를 보여줄 것 같다는 것을 암시한다. 모델들 간의 차이에도 불구하고, 각 분석들의 결과는 에너지 집약 산업들에 대한 CAIR의 영향이 작다는 것을 보여준다. 예를 들면, 화학제조사업을 위한 생산 변화는 2010년에 -0.01%에서 -0.04%로 예상된다. 더욱이, 만약 노동 생산성 향상과 향상된 공기질의 그밖의 편익이 포함된다면, 양 모델들에 의해 계획된 소량 생산 감소는 부분적으로 또는 전체적으로 상계될 수 있다.

VIII. 법률과 대통령령에 규정된 영향분석

법률과 대통령령에서 규정하고 있는 규제영향분석요건을 CAIR 제정 시 EPA가 어떻게 충족하고 있는가를 여기서 고찰한다. 법률로는 구체적으로 「소기업에 대한 공정한 규제집행법」(Small Business Regulatory Enforcement Fairness Act, SBREFA)에 의해 개정된 규제유연성법(Regulatory Flexibility Act, RFA)상의 소기관들(small entities)에 대한 CAIR의 잠재적 영향, 「자금지원 없는 강제개혁법」(Unfunded Mandates Reform Act of 1995, UMRA)상의 주, 지방 그리고 부족 정부들과 사적 부문에 관한 CAIR의 영향, 서류작업간소화법(Paperwork Reduction Act, PRA)에 대한 CAIR의 영향 등을 평가한다. 대통령령으로는 E.O. 13045: 환경상 건강과 안전 위협으로부터 아동의 보호, E.O. 13175: 인디언 부족 정부와의 협의와 협동, E.O.12898: 소수 인종과 저소득층에 있어서 환경상 정의를 다루기 위한 연방 조치들에 대한 CAIR의 영향 등을 분석한다.

1. 소기관들에 대한 영향

RFA(5 U.S.C. § 601 et seq.)는, 행정청의 규칙안이 공표된다면 “상당한 수의 소기관들에게 중대한 경제적 영향”을 미치지 않을 것으로 확인되지 않는 한, 1차 규제유연성분석을 하여야 한다고 규정하고 있다(§ 605(b)). 소기관은 소기업(small businesses)(North American Industry Classification System, NAICS가 설정한 소기업청의 규모 기준에 따라 전력시설의 경우 연 40억 KWh 또는 그 이하), 소조직(small organizations)(독립적으로 소유 및 운영되며 독점적 지위를 갖지 않는 비영리 기업), 소정부(small government jurisdiction)(인구 50,000명 이하의 도시 등)을 포함한다. RFA의 규칙안은 화석연료를 사용하는 전력시설을 대상으로 하

VIII. 법률과 대통령령에 규정된 영향분석

며, 각 주들로 하여금 이러한 규제대상을 결정할 재량을 부여하고 있다. 잠재적으로 규제되는 범주와 대상은 아래 [표 8-1]과 같다.¹⁶³⁾

[표 8-1] 잠재적으로 규제되는 범주와 대상

규제범주	잠재적인 규제 대상
산업계	화석 연료를 사용하는 전기 발전 시설들
연방정부	연방정부 소유의 화석 연료를 사용하는 전기 발전 시설들
주/지방/부족 정부	지방정부들 소유의 화석 연료를 사용하는 전기 발전 시설들 인디언 지역에 있는 화석 연료를 사용하는 전기 발전 시설들

법원은 소기관들이 행정청의 규칙의 대상이 될 경우에만 규제유연성분석을 요구하는 것으로 RFA를 해석하고 있지만,¹⁶⁴⁾ 어떤 경우에 소기관들이 이 규칙의 적용대상이 되는가에 대한 구체적 요건을 규칙에서 규정하고 있지는 않다. 그 대신, 어떻게 그리고 어느 기관들에 의해 오염물질 배출의 감소가 달성될 것인가에 대한 결정권을 각 주들에게 위임하면서, 주들로 하여금 필요한 SO₂와 NO_x 감소를 달성할 SIP 개정을 개발, 채택 그리고 제출할 것을 요구한다. 영향을 받는 주들은 통제해야 할 오염배출원의 종류와 선정된 각 오염 배출원이 달성해야 할 배출 감소의 범위를 결정하기 때문에, EPA는 소기관들에 대한 규칙안의 효과를 명확하게 예상할 수는 없다.

영향을 받는 각 주들이 NO_x와 SO₂ 배출상한을 충족하는 통제 조치들을 어떻게 집행할 것인가에 관한 추정에 기초하여 EPA는 이 규칙 제정으로 소기관들에 대한 잠재적인 경제적 영향을 검토하였다. EPA의 분석은, 영향을 받는 주들이 EGU만을 통제함으로써 NO_x와 SO₂

163) EPA 보고서, Table 8-1, 8-2.

164) Michigan v. EPA, 213 F.3d 663, 668-69 (D.C. Cir. 2000), cert. den. 121 S.Ct. 225, 149 L.Ed. 2d 135 (2001). 행정청의 확인 필요성은 그 규칙에 복종하는 기관들에 대해서만 그 규칙의 영향을 고려한다.

배출상한을 충족할 수 있는 통제조치를 선택하는 것으로 추정한다. 이 분석은 연료와 오염물질 통제 설비를 제공하는 산업계 내에서 고용 효과 또는 산업계와 가정에 대한 전기 가격 상승의 잠재적 효과와 같은 CAIR로 인한 잠재적 간접적 경제적 영향을 검토하지는 않는다.

VI.에서 논의한 바와 같이, EPA는 최종 CAIR 요건들과 유사하지만 동일하지는 않은 현재의 최종 조치를 위하여 우선 IPM 모델링을 수행하였다. EPA가 최초로 모델화한 통제 전략은 추가로 3개 주(아칸소, 델라웨어, 뉴저지주)를 CAIR 지역에 포함시켰고 이 주들로 하여금 연 SO₂와 NO_x 감소를 행하도록 요구하였다. 이 3개 주들이 이 분석에는 포함되지만, 최종 CAIR에 따라 연간 감소를 하도록 이 주들에게 요구하지는 않는다. 따라서 이것의 함의는 소기관들에 대한 총영향은 이 분석에서 다소 과대평가 가능성이 존재할 수 있다는 것이다.

1.1. CAIR의 예상 영향을 받는 소기관들

EPA는 Emissions & Generation Resource Integrated Database(EGRID)¹⁶⁵⁾의 데이터를 기초로 CAIR에 의해 잠재적으로 영향을 받는 소기관들의 목록을 작성하였다. 시간당 연 40억 KW 이상 생산하는 기관과 인구 50,000 이상의 지방정부 소유의 기관은 목록에서 제외되었다. 그리고 25 MW 이상 생산용량을 가진 발전설비를 1개 이상 가지고 있지 않은 소기관들도 목록에서 제외되었다. 왜냐하면, CAIR은 25 MW 이하의 생산용량을 가진 발전설비에는 영향을 미치지 않기 때문이다. 결과적으로, 약 185개의 소기관들이 목록에서 배제되었다. 그리고 IPM이 기본 사례로 설정하는 2010년 또는 2015년에 생산을 예상하지 않는 소기관들도 제외되었다. 최종적으로, EPA는 264 개 가운데 총 75개의 잠재적으로 영향받는 소기관들을 선정하였다. [표 8-2]에서 소

165) 미국에서 전력을 생산하는 모든 발전소와 기업을 위한 배출과 자원 혼합 자료를 가지고 있다. <http://www.epa.gov/cleanenergy/egrid/download.htm> 참조.

VIII. 법률과 대통령령에 규정된 영향분석

유권 별로 목록이 작성되어 있다.¹⁶⁶⁾

[표 8-2] 소기관들에 대한 CAIR의 영향예측(백만 1999년 달러)

EGU 소유구조	잠재적으로 영향받는 기관의 수	총준수비용 (1999\$)		세금지출액의 1%보다 준수비용이 큰 소기관들의 수		세금지출액의 3%보다 준수비용이 큰 소기관들의 수	
		2010	2015	2010	2015	2010	2015
협동조합	17	13.2	22.3	8	11	5	9
투자자소유	2	3.1	2.8	1	2	0	0
지방자치단체	49	-28.2	-9.1	15	29	15	19
하부기관 (Subdivision)	5	-15.2	-1.7	3	3	0	1
기 타	2	0.1	0.1	1	1	0	1
총 계	75	-27.0	14.4	28	46	20	30

* CAIR에 의해 영향을 받지 않을 것이기 때문에 189개 기관들이 이 목록에서 제외되었다. 수입 가운데 준수비용이 1%와 3% 이상이 되는 기관들의 총수는 플러스 비용을 경험하는 기관만을 포함한다. 마이너스 비용 가치는 소기관들이 CAIR 하에서 순수한 절약을 경험한다는 것을 암시한다.

1.2. 분석과 결과 개요

소기관들에 대한 CAIR의 연간 경제적 영향과 전기 발전 수입에 대한 소기관 영향의 비율에 기초하여 2010년과 2015년에 소기관들에 대한 CAIR의 영향을 평가하기 위한 방법론과 결과를 고찰한다.

166) EPA 보고서, Table 8-2, 8-4.

1.2.1. 소기관들에 대한 CAIR의 영향을 평가하기 위한 방법론

i) 개선 기술 설치, ii) 배출가능량 구입, iii) 더 깨끗한 연료로 전환, iv) 발전량의 감소를 통한 배출 감소 등의 방법을 결합하여 소기관은 CAIR을 준수할 수 있다. 요구량보다 더 많은 배출가능량을 가지고 있는 시설들은 이를 시장에서 판매할 수 있다. 선택된 준수 전략은 그 시설의 한계 통제 비용과 다른 시설들의 한계 통제 비용에 비례하는 그 시설의 입장에 관한 함수가 될 것이다. 각 잠재적 통제 전략을 설명하려고, EPA는 $C = \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3 + \Delta C_4 - \Delta R$ (준수=운영 및 개선+연료+배출가능량 +이전-이전의 전기생산 소매가치)로 준수비용을 예상한다. C는 비용 가운데 한 개 요소를 나타내고, ΔR 은 이전의 전기 생산의 소매가치를 나타낸다.¹⁶⁷⁾

실제로, 준수 선택과 시장 조건은 결합할 수 있어서 기관은 비용의 개별 요소들 가운데 어느 것에서도 절약을 경험할 것이다. CAIR에서, 예컨대, 많은 시설들이 집진기를 설치하고 저황 석탄을 더 값싼 역청탄으로 전환함에 따라 저황 석탄 가격이 하락할 것이라고 EPA는 예상한다. 그리고 수요 이동에 따른 더 낮은 가격의 결과로 연료 가격에서의 감소를 많은 기관들이 실제로 경험한다. 비록 몇몇 시설들이 준수하기 위한 일정 수준의 전기 생산을 포기할 것이라 하더라도, 연료 가격의 감소뿐만 아니라 CAIR에 따라 전기 가격의 예상된 증가에 의해 이러한 기관들에 대하여 이 영향은 줄어들게 될 것이고, 생산 수준을 감소하지 않는 기관들은 전기 수입의 증가를 보게 될 것이다. 고(高) 또는 중(中)황 석탄을 태우는 시설들은 자신들의 모든 또는 다소의 준수비용을 없애려는 희망을 가지고 CAIR에 근거하여 저(低)황 석탄을 위해 비교적 더 많이 지불할 것을 결정할 수도 있고 시장에 배출가능량을 팔 수도 있다. 왜냐하면, 이 분석은 각 기관을 위해 제

167) EPA 보고서, (8.1), 8-5.

VIII. 법률과 대통령령에 규정된 영향분석

시된 4가지 준수 전략들 가운데 각 각에 따라 총 비용을 평가하기 때문에, 그것은 필연적으로 절약 또는 이득을 가져온다. 결론적으로, 우리가 비용으로 기술하는 것은 실제로 소기관들에 대한 그 규칙의 순수 경제적 영향값보다 많다.

이 분석을 위하여, EPA는 시설(unit) 차원에서 위 수식에 기초하여 비용을 예상하기 위하여 IPM을 분석한 결과를 사용하였다. 순 영향 평가는 i) 운영 및 시설 개선비용, ii) 배출가능량의 판매 또는 구입, iii) 기준 사례와 관련한 CAIR에 따른 연료비용의 변화 또는 전기 생산 수입(收入)에 기초하였다.

(1) 운영 및 시설 개선비용 : 기준 사례와 CAIR을 위하여 IPM을 분석한 결과를 이용하여, EPA는 CAIR에 근거하여 통제 기술을 설치하는 시설들과 설치된 기술을 확인하였다. 시설 개선비용을 계산하기 위한 방정식은 EPA의 Technology Retrofit and Updating Model(TRUM)로부터 채택되었다. 자본비용(in \$/MW); 고정 운영 및 유지비(in \$/MW-year) ; 가변 운영 및 유지비(in \$/Mh) ; FGD, SCR, 또는 SnCR을 설치하기 위하여 예정된 시설들을 위한 총 연간 시설 개선비용을 이 모델은 계산한다.

(2) 배출가능량의 판매 또는 구입 : EPA는 최초 SO₂와 NO_x 배출가능량의 보유 가치를 평가하였다. SO₂의 경우, 시설들은 EPA의 1998년 산성비 배출가능량의 재할당에 따라 정해진 대로, CAIR에 근거하여 2010년에 50% 감소와 2015년에 65% 감소를 반영하도록 정해진 대로 자신들의 Phase II 배출가능량 할당을 유지할 것으로 추정되었다. NO_x의 경우, 주의 배출상한이 열량-투입(heat-input basis)에 따라 주 내에 있는 각 시설들에게 할당된다고 추정하였다. 각 주들은 NO_x 배출가능량을 어떻게 할당할 것인가를 궁극적으로 결정할 수 있다. 배출가능량의 보유 가

치를 평가하기 위하여, 할당된 배출가능량은 예상 배출로부터 추론되었고, 차이가 2010년과 2015년을 위해 IPM에 의해 예상된 배출가능량 가격으로 곱해졌다. 각 시설들은 CAIR에 근거한 자신들의 예상 배출을 정확히 커버하기 위하여 배출가능량을 사거나 팔 것으로 추정되었다.

- (3) **연료비용** : 연료비용은 연료투입(MMBtu) × (지역 + TRUM으로부터 연료 유형별 연료가격(\$/MMBtu))으로 예상되었다. CAIR에 근거한 연료비 지출의 변화는 CAIR과 기준 사례 간 연료비용의 차이를 고려하여 예측하였다.
- (4) **생산된 전기의 가치** : 단위용량요소(unit capacity factor)와 최대 연료용량을 우선 평가함으로써 EPA는 전기생산을 예상하였다. 단위용량요소는 연료투입을 최대연료용량으로 나누어 평가된다. 최대연료용량은 용량×8,760 운영시간×heat rate(MMBtu/MWh)로 평가되었다. 생산된 전기가치는 용량×시설용량요소×8,760×지역에 적합한 소매 전기 가격(\$/MWh)이다. CAIR에 의해 영향을 받을 것으로 예상되는 소기관들은 경쟁적 시장 환경 속에서 운영할 필요가 없기 때문에 소비자들에게 준수비용을 전가할 수 있어야 한다. 이 때문에, CAIR에 근거하여 계산된 지역에 적합한 소매전기 가격을 CAIR에 근거한 예상생산수입과 통합하였다.
- (5) **행정비용** : 대부분의 영향을 받는 시설들은 그밖의 규제요건들에 관한 결과로서 이미 모니터 되고 있기 때문에, EPA는 배출가능량을 사거나 파는 것에 비례하는 이전비용을 행정비용으로 고려하였다. EPA는 이전비용이 단일 시설의 배출가능량의 총 가치 가운데 1.5%라고 추정하였다.

1.2.2. 결 과

앞의 [표 8-2]에 소기관들에 관한 CAIR의 잠재적 영향이 요약되어 있다. 모든 비용은 1999년 달러를 기준으로 하며, EPA는 연간 순준수 비용이 2010년에는 약 -2천 7백만 달러이고 2015년에는 1천 4백 4십만 달러가 될 것으로 예상하였다.¹⁶⁸⁾ 이런 마이너스 순준수비용은 더 높은 전기가격으로 인한 것이고(그래서 더 높은 생산수입) CAIR에 따라 저항 석탄가격을 감소시켰다. EPA 분석에 따르면, 수입의 일부를 비용으로 환산하여 CAIR에 따라 최대한의 영향을 경험하는 소기관들은 산출과 배출가능량의 구입 모두를 감소할 것으로 예상된 소기관들이다.

나아가, 약 180 MW 소기업 발전설비(이 분석에서 61개 가운데 5개 시설들)는 IPM에 의해 기본사례인 265 MW 소지방 소유 발전설비(이 분석에서 101개 가운데 6개 시설들)에 비례하여 CAIR 하에서 유지하기에는 비경제적인 것으로 예상된다. 한 개 기업에 의해 소유된 한 개 공장은 한 개 지방자치단체가 소유한 한 개 공장과 마찬가지로 비경제적인 것으로 예상된다. 더욱이, 약 445 MW 총 소기관 발전설비, 또는 CAIR 지역에 있는 총 소기관 발전설비의 1.0%는 이 기본사례에 비례하여 유지하기에는 비경제적인 것으로 예상된다. 이러한 수들을 내용상 고찰해 보면, CAIR을 적용했을 때 영향을 받는 모든 발전설비들 가운데, 약 5.3 GW(1.7%)의 석탄을 연료로 하는 발전설비가 기본사례와 관련하여 유지하기에는 비경제적인 것으로 예상된다. 실제로 있어서, 유지하기에 비경제적인 것으로 예상된 시설들은 격자의 특정 부분에서 이전 신뢰성을 보장하기 위하여 남게 되거나, 퇴출되거나,

168) CAIR에 근거하여 퇴출하는 시설들의 비용도 소득도 영향 평가에서 제외된다. 왜냐하면 이 시설들은 계속하여 운영하는 것보다 CAIR에 근거하여 퇴출하는 것이 훨씬 낫기 때문에, 이 시설들에 대한 CAIR의 진정한 비용은 우리 모델링에 의해 나타내어지지 않는다. 이 시설들에 관한 CAIR의 진정한 비용은 기준 사례에서의 비용과 CAIR에 따라 소비자들의 요구를 충족하는 비용 간의 차이이다.

또는 계속 사용될 수도 있다. 영향을 받는 시설들 가운데 어느 것도 경쟁적 시장 환경에 있는 것 같지 않고 그래서 준수비용을 소비자들에게 전가할 수 있다.

EPA는, 전기생산의 수입에 대한 준수비용의 비율이 1% 이상인 기관들에 특히 초점을 두면서, 전기생산의 수입에 대한 준수비용의 비율을 사용하는 규칙의 경제적·재정적 영향을 평가하였다.¹⁶⁹⁾ 비록 이 측정방법이 EPA 영향분석들에서는 보편적으로 사용된다고 하더라도, 분석이라고 하는 것은 경쟁적 환경 속에서 운영되고 있는 소기업들을 관찰할 때 가장 합리적이다. 그러나, 전력산업계에 있는 소기업들은 경쟁적 환경이 아니라 요율증가를 통하여 비용을 회복할 수 있는 가격 규제를 받는 환경에서 작용한다.

이 분석에서 사용된 75개 소기관들 가운데 28개 기관들이 2010년에 생산 수입의 1% 이상 준수비용을 경험할 것이고, 2015년에는 46개 기관이 될 것이다. CAIR에 근거하여 준수비용 감소를 경험하는 기관들은 이러한 총계에서 배제된다. 이 결과는 이러한 기관들 가운데 어느 것도 경쟁적 시장에서 작동하지 않고 그래서 CAIR을 준수하는 자신들의 모든 비용을 회복할 수 있는 실상을 완전하게 설명하지는 않는다. CAIR에 근거하여, 각 주들은 자신들이 선택한 NO_x 배출가능량 할당 방법론을 통하여 소기관들에 관한 CAIR의 침해를 잠재적으로 완화할 수 있다는 것이 또한 강조되어야 한다. 생산 수입의 3%를 초과하는 준수비용을 가진 기관들의 수는 [표 8-2]에 마찬가지로 포함되어 있다.

기본사례의 수입의 일부로서 기관들 간의 경제적 영향의 분배는 아래 [표 8-3]에 요약되어 있다.¹⁷⁰⁾ 비록 각 소유 형태에 대한 경제적 영향의 분배가 공정하다고 하더라도, 용량 가중치 평균과 관계없이 존재하는 몇몇 시설들이 존재한다. 기관들이 수입의 높은 퍼센티지인

169) 1%는 소기관들이 요율위원회에 요청하거나 공기업에 대해 할 수 있는 가격 인상의 기본값이라고 EPA는 고려한다. EPA 보고서, 8-8.

170) EPA 보고서, Table 8-3, 8-9.

VIII. 법률과 대통령령에 규정된 영향분석

순영향 감소를 경험할 것으로 예상되는 사례들에 있어서, 이 기관들은 CAIR을 준수하기 위하여 더 값싸고, 저황 석탄으로 전환할 수 있는 시설들을 가지고 있으며 생산 단계를 증가하거나 유지시켜 수입을 증가할 수 있는 시설들을 가진다. 반면에, 전기가격을 큰 폭으로 증가하려는 지역에 있는 소규모 발전시설들은 시설 개선을 하는 것이 경제적이라고 인식하지는 않으며 더 낮은 황 석탄으로 전환할 수도 없다. 그래서, 이러한 기관들은 배출가능량을 구입하거나 생산을 감소함으로써 CAIR을 준수한다.

[표 8-3] 소기관들에 대한 CAIR의 경제적 영향의 배분 개요

EGU 소유구조	처리능력 가중치를 적용한 경제적 영향 (전체세금에서 차지하는 비율)					
	2010	2015	2010	2015	2010	2015
협동조합	1.0%	1.8%	-20.9%	-13.1%	11.5%	8.4%
투자자소유	1.6%	1.5%	0.4%	1.5%	2.0%	1.5%
광역지방자치 단체	-3.8%	-1.3%	-13.8%	-20.4%	17.2%	43.4%
기초지방자치 단체	-0.1%	0.0%	-80.0%	-27.6%	1.9%	3.1%
기 타	-0.3%	-0.2%	-0.7%	-0.8%	1.9%	3.1%
총 계	-0.2%	0.0%	-80.0%	-27.6%	17.2%	43.4%

CAIR 하에서 소기관들에 대한 연간 비용의 개별 구성요소들은 아래 [표 8-4]에 요약되어 있다.¹⁷¹⁾ CAIR 하에서 이러한 기관들에 대한 비용증가의 가장 중요한 요소들은 시설개선과 운영비용과 배출가능량 구입이다. 연료비용은 역청탄, 감소된 총 연료 사용, 그리고 저황 석

171) EPA 보고서, Table 8-4, 8-10.

탄을 위한 저가격으로 전환하는 것의 결합으로 인하여 모든 소유 집단에서 감소한다. 추가적으로, 전기생산수입의 증가는 2010년과 2015년에 모든 소유 형태가 경험한다.

[표 8-4] 소유권 그룹과 비용 카테고리에 따라 요약된 CAIR에 따른 증가하는 연간 비용(백만 1999년 달러)

EGU 소유구조	설비개선 + 운영비용		순구매		연료비		세금 손실		행정비	
	2010	2015	2010	2015	2010	2015	2010	2015	2010	2015
협동조합	4.1	15.7	35.2	54.0	-34.0	-34.8	7.5	-13.1	0.3	0.5
투자자 소유	-0.1	0.0	6.5	11.1	-6.0	-6.9	2.6	-1.5	0.0	0.1
지방자치 단체	2.2	5.6	17.7	30.7	-18.7	-27.7	-29.6	-18.0	0.2	0.3
하부기관 (Subdivision)	10.4	9.4	-1.6	1.7	-3.2	-8.4	-20.9	-4.5	0.05	0.06
기 타	0.374	0.375	-0.146	-0.106	-0.138	-0.117	-0.007	-0.018	0.001	0.001

1.3. 소기관들에 대한 영향의 개요

영향을 받는 주들이 어떻게 자신들의 배출을 충족하기 위하여 통제 장치들을 집행할 것인가에 대한 추정에 기초하여, CAIR 제정으로 소기관들에 대한 잠재적·경제적 영향을 EPA는 검토하였다. EPA는 SBREFA에 의해 개정된 RFA가 CAIR에는 적용되지 않는다고 결론내렸다. 전체적으로, 총 소기관 용량 가운데 약 445 MW, 또는 CAIR 지역에 있는 총 소기관 용량 가운데 1%가 기본사례와 관련하여 CAIR에 따라 유지하기에 비경제적인 것으로 예상된다. 실제로 있어서, 유지하기에 비경제적인 것으로 예상된 시설들은 격자의 특정 부분에서 이전

신뢰성을 보장하기 위하여 남게 되거나, 퇴출되거나, 또는 계속 사용될 수도 있다. IPM 모델링은 이러한 잠재적 결과들을 서로 구분하지는 못한다. 나아가, 잠재적으로 영향을 받는 75개 소기관들 가운데, 그리고 EPA의 모델링에 포함된 CAIR 지역에 있는 총 264개 소기관들 가운데, 영향을 받은 주들이 CAIR 제정에 의해 설정된 자신들의 배출량 예산을 충족하기 위하여 어떻게 통제 장치를 집행할 것인가에 관한 EPA의 추정에 기초하여, 28개 기관들이 2010년에 생산수입의 1% 이상 준수비용을 경험할 것이고, 2015년에는 46개 기관이 될 것이다. 수입 가운데 1%를 초과하는 준수비용을 경험하는 잠재적으로 영향을 받는 소기관들은 CAIR 집행으로부터 결과하는 중대한 영향을 위한 다소의 잠재성을 가진다. 그러나, 위에서 지적한 바와 같이, 영향을 받는 기관들 가운데 어느 것도 현재 경쟁적 시장 환경에서 작동하지 않고 있기 때문에, 그들은 비용 지급자들에게 CAIR 준수비용을 전가할 수 있다. 나아가, 크기에서 25 MW 이상의 시설들만을 포함하는 결정은 CAIR에 의해 잠재적으로 달리 영향을 받을 185개 소기관들을 제외한다.

소기관들에 대한 CAIR의 영향을 평가할 때, 그밖의 두 가지 다른 점들, 구체적으로, 그리고 일반적으로 배출상한과 거래프로그램이 고려되어야 한다. CAIR 하에서, 일반적으로 배출상한과 거래프로그램은 주들이 시설들 간에 어떻게 NO_x 배출가능량을 할당할 수 있는가를 결정하도록 디자인 되어 있다. 구체적으로 배출상한과 거래프로그램은 소기관들에 대한 CAIR의 영향을 완화하기를 원하는 주들로 하여금 소기관들에게 유리한 방법으로 NO_x 배출거래량을 할당할 것을 선택할 수 있도록 하고 있다.

2. UMRA 분석

1995년 UMRA Title II는 연방 행정청들로 하여금 주, 지방, 그리고 부족 정부들과 사적 부문에 대한 자신들의 규제 조치들의 효과를 평

가하기 위한 요건들을 규정하였다. UMRA § 202, 2 U.S.C. § 1532에 근거하여, EPA는 “주, 지방, 부족 정부들 전체에게 1년 동안 1억 달러 또는 그 이상의 비용을 초래할 수 있는, 또는 사적 부문에 1년 동안 1억 달러 또는 그 이상의 비용을 초래할 수 있는 모든 연방 강제를 포함하는” 모든 규칙안 또는 최종 규칙에 대하여 비용-편익분석을 포함하는 진술서를 준비하여야 한다. “연방 강제(Federal mandate)”는 § 421(6), 2 U.S.C. § 658(6)에 따라 “연방 정부간 강제”와 “연방 사적 부문 강제”를 포함하는 것으로 정의된다. “연방 정부간 강제”는 연방지원을 조건으로 하는 의무를 제외하고 “주, 지방, 또는 부족 정부들에 대하여 강제집행할 수 있는 의무를 부과하는”(§ 421(5)(A)(i), 2 U.S.C. § 658(5)(A)(i)) 규칙을 포함하는 것으로 정의된다. “연방 사적 부문 강제”는 특정 예외를 가지고 사적 부문에 대한 강제집행할 수 있는 의무를 부과하는 규칙을 포함한다(§ 421(7)(A), 2 USC § 658(7)(A)).

EPA가 규칙을 공표하기 이전에 UMRA는 EPA로 하여금 합리적 수의 규제 대안들을 확인하고 고려하여 규칙의 목적을 달성하는데 가장 비용이 적게 들고, 가장 비용-효과적이거나 가장 부담이 적은 대안을 선택할 것을 요구한다. EPA는 § 202의 요건들에 부합하는 규칙안 보충 고지를 위한 진술서를 준비하였다. 나아가, EPA가 안에서 진술하였듯이, EPA는 부족 정부들을 포함하여 소정부들에 중대하게 또는 소정부들에게만 영향을 미칠 수 있는 어떠한 규제 요건들도 직접적으로 설정하지는 않는다. 그래서, CAIR에 따라, EPA는 UMRA § 203에 근거하여 소정부 행정청 계획을 개발할 의무는 없다. 나아가, UMRA § 204 정부간 협의 조항들에 부합하는 방법으로 EPA는 CAIR에 의해 영향을 받는 정부 기관들과 협의를 수행하였다.

몇 가지 이유로 인하여, EPA는 UMRA 요건들이 CAIR에 적용하지 않는 것으로 결론내린다. 첫째, 개정 SIP를 제출하라는 요건이 어쨌든 연방 강제를 구성하는지 여부가 의문스럽다. CAA § 110(a)로부터 나

VIII. 법률과 대통령령에 규정된 영향분석

오는 주가 자신의 SIP를 개정하도록 하는 의무는 법원에 의해 법적으로 강제집행될 수 없고 잘해야 고속도로 자금의 지속적 수령을 위한 조건일 뿐이다. 그래서, 그러한 제출을 요구하는 조치를 UMRA § 421(5)(9a)(I)(2 U.S.C. § 658(a)(I))의 의미 내에서 어떠한 강제집행할 수 있는 의무를 창설하지 않는 것으로 보는 것은 가능하다. 비록 그렇다 하더라도, 그 의무는 UMRA § 421(5)(a)(i)(I)(2 U.S.C. § 658(5)(a)(i)(I))에 근거한 연방지원의 조건을 위한 예외에 해당하는 것으로 간주될 수 있다.

앞서 지적한 바와 같이, 그러나, 이러한 이슈들에도 불구하고, EPA는 만약 UMRA 조항들이 적용된다면 UMRA에 의해 요구되는 진술서를 규칙안 보충고지를 위해 준비하였고, EPA는 UMRA에 의해 요구된 대로 정부 기관들과 협의를 하였다. CAIR을 위하여 요구되지는 않고 있다 하더라도, EPA는 정보 목적으로 정부 기관들에 대한 CAIR의 경제적 영향을 분석하였다. 이 분석은 연료와 오염물질 통제 설비를 제공하는 산업계 내에서 고용 효과 또는 산업계와 가정에 대한 전기가격 상승의 잠재적 효과와 같은 CAIR로 인한 잠재적 간접적 경제적 영향을 검토하지는 않는다.

VI.에서 논의한 바와 같이, EPA는 최종 CAIR 요건들과 유사하지만 동일하지는 않은 현재의 최종 조치를 위하여 우선 IPM 모델링을 수행하였다. EPA가 최초로 모델화한 통제 전략은 추가로 3개 주(아칸소, 델라웨어, 뉴저지주)를 CAIR 지역에 포함시켰고 이 주들로 하여금 연 SO₂와 NO_x 감소를 행하도록 요구하였다. 이 3개 주들이 이 분석에는 포함되지만, 최종 CAIR에 따라 연간 감소를 하도록 이 주에게 요구하지는 않는다. 이것의 함의는 정부소유의 기관들에 대한 총 영향은 이 분석에서 다소 과장된다는 것이다.

2.1. 정부소유 기관들의 확인

EPA는 EGRID 데이터를 사용하여 CAIR 지역 내에 있는 주소유 기관들과 자치단체소유 기관들과 그 하부기관소유 기관들을 확인하였다. EPA는 그리고 나서 이러한 공장들을 개별 발전 시설들에 결합시키기 위하여 IPM으로 분류된 산출을 사용하였다. 25 MW 이상 생산용량을 가진 발전설비를 1개 이상 가지고 있지 않은 소기관들도 목록에서 제외되었다. 왜냐하면, CAIR은 25 MW 이하의 생산용량을 가진 발전설비에는 영향을 미치지 않기 때문이다. 이것은 주와 지방정부들 소유의 179개 기관들을 제외한다. 추가로, 기본사례 또는 CAIR 하에서 IPM이 2010년 또는 2015년에 생산을 예상하지 않는 정부소유 기관들도 제외되었다. 왜냐하면 그 기관들은 운영되지 않는 것으로 예상되고 그래서 CAIR 준수비용에 직면하지 않을 것이기 때문이다. 이러한 이유로 5개의 자치단체 기관들이 제외되었다. 그래서, EPA는 가능한 265 개 가운데 CAIR에 의해 잠재적으로 영향을 받는 81개 주와 자치단체 소유의 기관들을 확인하였고, [표 8-5]에 요약되어 있다.¹⁷²⁾

[표 8-5] CAIR에 따른 정부기관들에 대한 잠재적 영향의 개요

EGU 소유구조	잠재적으로 영향받는 개체단위	연간 예상 비용 (백만 달러)		정책에 순응하며, 세금 1%이상을 내는 개체수		정책에 순응하며, 세금 3%이상을 내는 개체수	
		2010	2015	2010	2015	2010	2015
하부기관 (Subdivision)	5	-\$15.2	-\$1.7	3	3	0	1
주	7	-\$134.2	-\$110.5	0	2	0	0

172) EPA 보고서, Table 8-5, 8-13.

VIII. 법률과 대통령령에 규정된 영향분석

EGU 소유구조	잠재적으로 영향받는 개체단위	연간 예상 비용 (백만 달러)		정책에 순응하며, 세금 1%이상을 내는 개체수		정책에 순응하며, 세금 3%이상을 내는 개체수	
		2010	2015	2010	2015	2010	2015
지방 자치단체	69	-\$162.5	-\$97.9	17	34	17	22
총 계	81	-\$311.9	-\$210.2	20	39	17	23

* CAIR에 의해 영향을 받지 않을 것이기 때문에 184개 기관들이 이 목록에서 제외되었다. 수입 가운데 준수비용이 1%와 3% 이상 이 되는 기관들의 총 수는 플러스 비용을 경험하는 기관만을 포함한다. 마이너스 비용 가치는 기관들이 CAIR 하에서 순수한 절약을 경험한다는 것을 암시한다.

2.2. 분석과 결과 개요

EPA는 잠재적으로 영향을 받는 정부기관들을 확인한 후, 정부기관들에 대한 CAIR 준수의 총영향과 전기발전수입에 대한 소기관 영향의 비율에 기초하여 2010년과 2015년에 CAIR의 영향을 평가하였다. CAIR 하에서 EGUs 소유자들에 대한 재정적 부담은 준수비용과 행정비용으로 구성된다. 여기서 CAIR 지역에 있는 81개 잠재적으로 영향을 받는 정부소유 기관들을 위하여 준수비용과 행정비용을 요약한다.

2.2.1. 정부기관들에 대한 CAIR의 영향을 평가하기 위한 방법론

CAIR에 따라 시설들을 운영하는 주와 자치단체들에 대한 주된 부담은 SO₂와 NO_x 배출 한계를 충족하기 위하여 시설들에 대한 통제 기술을 설치하는 비용 또는 배출가능량을 구입하는 비용이다. 그러나,

i) 개선 기술 설치, ii) 배출가능량 구입, iii) 더 깨끗한 연료로 전환, iv) 발전량의 감소를 통한 배출 감소 등의 방법을 결합하여 기관은 CAIR을 준수할 수 있다. 추가적으로, 요구량보다 더 많은 배출가능량을 가지고 있는 시설들은 이를 시장에서 판매할 수 있다. 선택된 준수 전략은 그 시설의 한계 통제 비용과 다른 시설들의 한계 통제 비용에 비례하는 그 시설의 입장에 관한 함수가 될 것이다. 각 잠재적 통제 전략을 설명하려고, EPA는 $C = \Delta C + \Delta C + \Delta C + \Delta C - \Delta R$ (준수=운영 및 개선+연료+배출가능량 +이전-이전의 전기생산 소매가치)로 준수비용을 예상한다. C는 비용 가운데 한 개 요소를 나타내고, ΔR 은 이전의 전기 생산의 소매가치를 나타낸다.¹⁷³⁾

실제로, 준수 선택과 시장 조건은 결합할 수 있어서 기관은 비용의 개별 요소들 가운데 어느 것에서도 절약을 경험할 것이다. CAIR에서, 예컨대, 많은 시설들이 집진기를 설치하고 저(低)황 석탄을 더 값싼 역청탄으로 전환함에 따라 저(低)황 석탄 가격이 하락할 것이라고 EPA는 예상한다. 그리고 수요 이동에 따른 더 낮은 가격의 결과로 연료 가격에서의 감소를 많은 기관들이 실제로 경험한다. 비록 몇몇 시설들이 준수하기 위한 일정 수준의 전기 생산을 포기할 것이라 하더라도, 연료 가격의 감소뿐만 아니라 CAIR에 따라 전기 가격의 예상된 증가에 의해 이러한 기관들에 대하여 이 영향은 줄어들게 될 것이고, 생산 수준을 감소하지 않는 기관들은 수입의 증가를 보게 될 것이다. 고(高) 또는 중(中)황 석탄을 태우는 시설들은 자신들의 모든 또는 다소의 준수비용을 없애려는 희망을 가지고 CAIR에 근거하여 저(低)황 석탄을 위해 비교적 더 많이 지불할 것을 결정할 수도 있고 시장에 배출가능량을 팔 수도 있다. 왜냐하면, 이 분석은 각 기관을 위해 제시된 4가지 준수 전략들 가운데 각 각에 따라 총 비용을 평가하

173) EPA 보고서, (8.2), 8-14.

VIII. 법률과 대통령령에 규정된 영향분석

기 때문에, 그것은 필연적으로 절약 또는 이득을 가져온다. 결론적으로, 우리가 비용으로 기술하는 것은 실제로 소기관들에 대한 그 규칙의 순수 경제적 영향값보다 많다.

이 분석을 위하여, EPA는 시설(unit) 차원에서 위 수식에 기초하여 비용을 예상하기 위하여 IPM을 분석한 결과를 사용하였다. 순 영향 평가는 i) 운영 및 시설 개선비용, ii) 배출가능량의 판매 또는 구입, iii) 기준사례와 관련하여 CAIR에 따른 연료비용의 변화 또는 전기 생산수입(收入)에 기초하였다.

(1) 운영 및 시설 개선비용 : 기준 사례와 CAIR을 위하여 IPM을 분석한 결과를 이용하여, EPA는 CAIR에 근거하여 통제 기술을 설치하는 시설들과 설치된 기술을 확인하였다. 시설 개선비용을 계산하기 위한 방정식은 EPA의 Technology Retrofit and Updating Model(TRUM)으로부터 채택되었다. 자본비용(in \$/MW) ; 고정 운영 및 유지비(in \$/MW-year) ; 가변 운영 및 유지비(in \$/Mh); FGD, SCR, 또는 SnCR을 설치하기 위하여 예정된 시설들을 위한 총 연간 시설 개선비용을 이 모델은 계산한다.

(2) 배출가능량의 판매 또는 구입 : EPA는 최초 SO₂와 NO_x 배출가능량의 보유 가치를 평가하였다. SO₂의 경우, 시설들은 EPA의 1998년 산성비 배출가능량의 재할당에 따라 정해진 대로, CAIR에 근거하여 2010년에 50% 감소와 2015년에 65% 감소를 반영하도록 정해진 대로 자신들의 Phase II 배출가능량 할당을 유지할 것으로 추정되었다. NO_x의 경우, 주의 배출상한이 열량-투입(heat-input basis)에 따라 주 내에 있는 각 시설들에게 할당된다고 추정하였다. 각 주들은 NO_x 배출가능량을 어떻게 할당할 것인가를 궁극적으로 결정할 수 있다. 배출가능량의 보유 가

치를 평가하기 위하여, 할당된 배출가능량은 예상 배출로부터 추론되었고, 차이가 2010년과 2015년을 위해 IPM에 의해 예상된 배출가능량 가격으로 곱해졌다. 각 시설들은 CAIR에 근거한 자신들의 예상 배출을 정확히 커버하기 위하여 배출가능량을 사거나 팔 것으로 추정되었다.

- (3) **연료비용** : 연료비용은 연료투입(MMBtu) × (지역 + TRUM으로부터 연료 유형별 연료가격(\$/MMBtu))으로 예상되었다. CAIR에 근거한 연료비 지출의 변화는 CAIR과 기준 사례 간 연료비용의 차이를 인정함으로써 예상되었다.
- (4) **생산된 전기의 가치** : 단위용량요소(unit capacity factor)와 최대 연료용량을 우선 평가함으로써 EPA는 전기생산을 예상하였다. 단위용량요소는 연료투입을 최대 연료용량으로 나누어 평가된다. 최대연료용량은 용량×8,760 운영시간×heat rate(MMBtu/MWh)로 평가되었다. 생산된 전기가치는 용량×시설용량요소×8,760×지역에 적합한 소매 전기 가격(\$/MWh)이다. CAIR에 의해 영향을 받을 것으로 예상되는 소기관들은 경쟁적 시장 환경 속에서 운영할 필요가 없기 때문에 소비자들에게 준수비용을 전가할 수 있어야 한다. 이 때문에, CAIR에 근거하여 계산된 지역에 적합한 소매전기 가격을 CAIR에 근거한 예상생산수입에 체화하였다.
- (5) **행정비용** : 대부분의 영향을 받는 시설들은 그밖의 규제요건들에 관한 결과로서 이미 모니터 되고 있기 때문에, EPA는 배출가능량을 사거나 파는 것에 비례하는 이전비용을 행정비용으로 고려하였다. EPA는 이전비용이 단일 시설의 배출가능량의 총 가치 가운데 1.5%라고 추정하였다.

2.2.2. 결 과

앞의 [표 8-5]에 정부기관들에 관한 CAIR의 경제적 영향이 요약되어 있다. EPA 분석에 따르면, 정부소유 기관에 관한 각 범주에 대한 총 순경제적 영향은 2010년과 2015년 모두에서 마이너스로 될 것으로 예상된다. 모든 비용은 1999년 달러를 기준으로 한다. CAIR에 대한 IPM 모델링은 자치단체소유용량 가운데 약 340 MW(이 분석에서 219개 가운데 8개 시설들)는 기준사례에서 예상하고 있는 것을 넘어서 CAIR 하에서 유지되기에는 비경제적인 것으로 예상된다. 이것은 CAIR 지역에 있는 모든 하위기관, 주, 자치단체 용량 가운데 약 0.4%를 나타낸다. 비교를 위하여, CAIR 하에서 모든 영향을 받는 용량 가운데, 석탄연료용량 가운데 약 5.3 GW 또는 1.7%가 기본사례와 관련하여 유지하기에는 비경제적인 것으로 예상된다. 이 비교는 정부기관들이 CAIR 하에서 불합리한 부담에 직면하여서는 안된다는 것을 나타낸다. 실제에 있어서, 유지하기에 비경제적인 것으로 예상된 시설들은 격자의 특정 부분에서 이전(transmission) 신뢰성을 보장하기 위하여 남게 되거나, 퇴출되거나, 또는 계속 사용될 수도 있다. IPM 모델링은 이러한 잠재적 결과들을 서로 구분할 수 없다.

소기관들 분석을 위해 행해졌듯이, EPA는, 전기생산의 수입에 대한 준수비용의 비율이 1% 이상인 기관들에 특히 초점을 두면서, 전기생산의 수입에 대한 준수비용의 비율을 사용하는 규칙의 경제적·재정적 영향을 평가하였다.¹⁷⁴⁾ EPA는 20개 정부기관들이 2010년에 전기생산수입의 1% 이상의 준수비용을 경험할 것이고, 2015년에는 39개

174) CAIR에 근거하여 퇴출하는 시설들의 비용도 수입도 영향 평가에서 제외된다. 왜냐하면 이 시설들은 계속하여 운영하는 것보다 CAIR에 근거하여 퇴출하는 것이 훨씬 낫기 때문에, 이 시설들에 대한 CAIR의 진정한 비용은 우리 모델링에 의해 나타내어지지 않는다. 이 시설들에 관한 CAIR의 진정한 비용은 기준 사례에서의 비용과 CAIR에 따라 소비자들의 요구를 충족하는 비용 간의 차이이다.

기관이 될 것이다. CAIR 하에서 마이너스 순 비용을 경험할 것으로 예상되는 기관들은 이러한 총계에서 배제된다. 이 방법은 어떤 분석이 경쟁적 시장 환경에서 작동하는 기관들을 고찰할 때 훨씬 더 중대한 영향을 표시하는 것이다. 정부소유 기관들은 경쟁적 시장 환경에서 제공하지 않기 때문에 요율 인상을 통하여 CAIR에 따른 비용을 회복할 수 있을 것이다.

기본사례의 수입의 일부로서 기관들 간의 경제적 영향의 분배는 아래 [표 8-6]에 요약되어 있다.¹⁷⁵⁾ 주소유 기관들과 하부기관들의 경우, 기본사례 수입 가운데 몫으로서 경제적 영향의 최대한은 약 3%이다. 몇몇 자치단체소유 기관들은 이 그룹을 위한 용량 가중치 평균보다 훨씬 더 높은 경제적 영향을 경험한다. 기관들이 수입의 높은 퍼센티지에 해당하는 플러스 순 비용을 경험할 것으로 예상되는 사례들에 있어서, 이러한 기관들은 시설개선을 하는 것이 경제적이라고 인식하지는 않으며 더 낮은 황 석탄으로 전환할 수도 없다. 그래서, 이러한 기관들은 배출가능량을 구입하거나 생산을 감소함으로써 CAIR을 준수한다.

[표 8-6] 정부기관들에 대한 CAIR의 경제적 영향의 배분

EGU 소유구조	처리능력 가중치 적용한 경제영향에 대한 평균 (세금 내는 비율)		최소값		최대값	
	2010	2015	2010	2015	2010	2015
하부기관 (Subdivision)	-3.6%	-2.0%	-80.0%	-27.6%	1.9%	3.1%
주	-5.2%	-3.9%	-11.4%	-10.2%	0.2%	2.8%
지방 자치단체	-5.9%	-0.3%	-13.8%	-20.4%	17.2%	43.5%
ALL	-4.2%	-2.3%	-80.0%	-27.6%	17.2%	43.5%

175) EPA 보고서, Table 8-7, 8-19.

VIII. 법률과 대통령령에 규정된 영향분석

더욱이, 기준사례 수입 가운데 높은 퍼센티지를 차지하는 마이너스 순비용을 경험할 것으로 예상되는 몇몇 기관들이 있다. 이러한 기관들은 CAIR을 준수하기 위하여 더 싸고, 더 낮은 황 석탄으로 전환할 수 있는 시설들을 가지고 생산 수준을 유지하거나 증가시킬 수 있으므로 수입을 증가시킬 수 있다. 반면에, 전기가격을 큰 폭으로 증가하려는 지역에 있는 소규모 발전시설들은 시설 개선을 하는 것이 경제적이라고 인식하지는 않으며 더 낮은 황 석탄으로 전환할 수도 없다. 그래서, 이러한 기관들은 배출가능량을 구입하거나 생산을 감소함으로써 CAIR을 준수한다.관들은 배분의 더 낮은 끝부분에 있는 것들 가운데 하나가 될 경향이 크다. CAIR 하에서 정부기관들에 대한 연간 비용의 개별 구성요소들은 [표 8-7]에 요약되어 있다.¹⁷⁶⁾ 무엇보다도, 2010년 하위기관들을 제외하고, 각 그룹은 배출가능량의 순구매자이다. 게다가, 각 그룹은 연료비지출에서 감소와 CAIR에 따라 전기수입에서 증가를 경험한다. 증가하는 연료비용은 CAIR 하에서 총 석탄 사용의 감소, 역청탄으로의 전환, 감소된 저항 석탄 가격의 결합으로 인하여 마이너스가 된다. 게다가, 비록 정부기관들에 의한 총 전기생산이 CAIR에 따라 약간 감소하다고 하더라도, 수입에서의 총손실은 CAIR에 따라 상승하는 소매전기가격의 결과로서 예상된 수입 이득에 의해 초과된 것보다 훨씬 더 많다.

[표 8-7] 소유권 그룹과 비용 카테고리에 따라 요약된 CAIR에 따른 증가하는 연간 비용(백만 1999년 달러)

EGU 소유구조	설비개선 + 운영비용		순구매비		연료비용		세금 손실		행정비	
	2010	2015	2010	2015	2010	2015	2010	2015	2010	2015
하부기관 (Subdivision)	10.4	9.4	-1.6	1.7	-3.2	-8.4	-20.9	-4.5	0.0	0.1

176) EPA 보고서, Table 8-7, 8-19.

EGU 소유구조	설비개선 + 운영비용		순구매비		연료비용		세금 손실		행정비	
	2010	2015	2010	2015	2010	2015	2010	2015	2010	2015
주	20.1	25.9	29.2	52.5	-116.8	-143.1	-67.0	-46.3	0.3	0.5
지방 자치단체	21.3	26.7	39.3	94.8	-120.0	-156.8	-103.7	-63.7	0.7	1.0

2.3. 정부기관들에 대한 영향의 개요

영향을 받는 주들이 어떻게 자신들의 배출을 충족하기 위하여 통제 장치들을 집행할 것인가에 대한 추정에 기초하여, CAIR 제정으로 주와 자치단체 소유기관들에 대한 잠재적·경제적 영향을 EPA는 검토하였다. 비록 EPA가 UMRA의 요건들이 CAIR에 적용된다고 결론내리지는 않을지라도, 이러한 영향은 CAIR 제정에 의해 설정된 배출상한을 충족하기 위하여 각 주들이 SIPs를 개정할 때 주들에게 잠재적 영향과 추가적 정보에 관한 추가적 이해를 제공하기 위하여 계산되어 왔다. EPA의 분석에 따르면, 정부소유 기관들에 대한 순 경제적 영향의 총계는 2010년과 2015년에 마이너스가 될 것으로 예상된다. 그러나, 자치단체소유 시설 가운데 약 340 MW(CAIR 지역 내에 있는 모든 하부기관, 주, 자치단체 시설의 약 0.4 %)가 기본사례에서 예상된 것을 넘어서 CAIR 하에서 유지되기에는 비경제적인 것으로 예상된다. 실제에 있어서, 유지하기에 비경제적인 것으로 예상된 시설들은 격자의 특정 부분에서 이전 신뢰성을 보장하기 위하여 남게 되거나, 퇴출되거나, 또는 계속 사용될 수도 있다.

이 분석에서 고려된 81개 정부기관들 가운데 그리고 EPA 모델링에 포함되는 CAIR 지역에 있는 265개 정부기관들 가운데, 영향을 받은 주들이 CAIR 제정에 의해 설정된 자신들의 배출상한을 충족하기 위

하여 어떻게 통제 장치를 집행할 것인가에 관한 EPA의 추정에 기초하여, 20개 기관들이 2010년에 생산수입의 1% 이상의 준수비용을 경험할 것이고, 2015년에는 39개 기관들이 그러할 것이다. 수입 가운데 1%를 초과하는 준수비용을 경험하는 것으로 예상된 정부기관들은 CAIR 집행으로부터 결과하는 중대한 영향에 대해 다소의 잠재성을 가진다. 그러나, 위에서 지적한 바와 같이, 이러한 정부기관들이 자신들의 준수비용을 요금부담자들에게 전가할 수 있기 때문에, 정부기관들은 심각하게 영향을 받지 않을 것이라는 것이 EPA의 입장이다. 나아가, 크기에서 25 MW 이상의 시설들만을 포함하는 결정은 CAIR에 의해 잠재적으로 달리 영향을 받을 179개 정부기관들을 제외한다.

위의 내용들을 차치하더라도, 주와 자치단체 소유 발전시설들에 대한 CAIR의 잠재적 역효과는 배출상한과 거래프로그램에 의해 방지될 수 있다. 주와 자치단체 소유기관들에 대한 CAIR의 영향을 완화하기를 원하는 주는 이러한 기관들에게 유리한 방법으로 NO_x 배출거래량을 할당할 것을 선택할 수 있도록 하고 있다. 일반적으로 배출상한과 거래프로그램의 사용은 시장지향적 규제정책으로서 엄격한 명령과 통제 프로그램과는 달리 소정부 소유 발전시설들에 대한 CAIR의 영향력을 제한할 것이다.

3. 서류작업간소화법

PRA(44 U.S.C. § 3501 et seq.)에 따라, EPA는 정보수집요청안(proposed Information Collection Request, ICR)을 2004년 7월 19일 예산관리국에 심사와 승인을 위해 제출하였다. IRC은 정보수집의 본질과 최종 규칙과 결합된 그 예상 부담과 비용을 기술하고 있다. 정보가 이미 관련 프로그램에 의해 수집된 경우에는, IRC은 추가적 부담만을 고려한다. 이러한 상황은 통합배출보고규칙(Consolidated Emission Reporting Rule)

의 요건들에 따르는주들에서 발생하거나 산성비 프로그램 또는 NOx SIP Call 요건들에 따르는 배출원들을 위하여 발생한다.

EPA는 정보수집의 구체적 측면에 관한 코멘트를 구하였다. IRC의 목적은 예상 모니터링, 보고, 기록보관부담의 예상, 주들, 지방정부들, CAIR로부터 결과하는 것이 예상되는 오염원들을 평가하는 것이다.

지역 배출상한과 거래프로그램에 참여할 것을 선택하는 주들로부터 결과하는 오염원들에 대한 기록보관 및 보고부담은 연간 약 4천 2백만 달러이다. 이 예상은 영향을 받은 EUGs(25 MW 이상의 발전기)로부터 이러한 오염물질들의 총 배출을 측정하고 보고하기 위한 적절한 SO2와 NOx 배출 모니터링 장비를 설치하고 운영하는 연간 비용을 포함한다. 주와 지방 대기청들에 대한 부담은 모든 필요한 SIP 개정, 모니터링 승인의 수행, 감독 책임의 완수를 포함한다.

2004년 7월 19일 PRA에 따라, ICR은 코멘트를 위하여 공중에게 이 용가능하도록 되었다. 60일 코멘트 기간은 2004년 9월 19일에 종료되었고, ICR에 공중의 구체적인 코멘트는 없었다.

4. 아동 건강

E.O. 13045, “환경상 건강 위험과 안전 위험으로부터의 아동보호”는 (1) E.O. 12866에 따라 정의된 “경제적으로 중대한” 것으로 결정되고 (2) EPA가 믿기에 아동들에 대하여 불균형적인 효과를 가질 수 있는 환경상 건강 또는 안전 위험을 고려하는 모든 규칙에 적용된다. 만약 규제조치가 위의 요건을 모두 충족한다면, § 5-501은 EPA로 하여금 아동들에 대한 계획된 규칙의 환경상 건강 또는 안전 효과를 평가하도록 지시하고 왜 계획된 규제가 EPA에 의해 고려된 그밖의 잠재적으로 효과있고 합리적으로 가능한 대안들보다 우선될 수 있는지를 설명하여야 한다.

최종 CAIR은 이 E.O.에 종속되지는 않는다. 왜냐하면 그것은 아동들에게 불균형적으로 영향을 줄 수 있는 환경상 건강 또는 안전 위험에 대한 결정을 포함하고 있지 않기 때문이다. CAIR에 있는 전략들로부터 배출량을 감소하는 것은 대기질을 매우 향상시킬 것이고 아동들의 건강을 더 증진시킬 것이라고 EPA는 믿는다.

5. 부족에 대한 영향

E.O. 13175, '인디언 부족 정부들과의 협의와 조정'은 EPA로 하여금 “부족이 관련되는 규제 정책들의 개발에 있어서 부족 관리들에 의한 의미있고 적절한 투입”을 보장하기 위한 책임있는 절차를 개발할 것을 요구하고 있다. CAIR은 위 E.O.에 구체화된 “부족이 관련되는 것”을 가지고 있지 않다.

CAIR은 오존과 PM2.5의 전구물질인 오염물질들의 이동을 다루고 있다. CAA는 주들과 부족들이 자신들의 관할구역 내에서 대기 오염물질들의 배출을 규제하는 계획을 개발하도록 규정하고 있다. CAA는 CAIR을 집행할 계획을 개발하는 주들과 부족들의 법률상 의무를 명백히 규정하고 있다. 부족권한규칙(Tribal Authority Rule, TAR)은 부족들에게 CAA 프로그램들을 개발하고 집행할 기회를 제공하지만, 이러한 프로그램들을 개발하고 부족이 선택할 어떤 프로그램들, 또는 적절한 프로그램의 요소들에 관해 부족에게 재량을 부여하고 있다.

CAIR은 E.O. 13175에 정의된 것과 같은 부족이 관련되는 것을 가지고 있지 않다. 그것은 하나 또는 그 이상의 인디언 부족들에 대하여 실질적 직접적 효과를 가지고 있지 않다. 왜냐하면 어떠한 부족도 대기질 관리 프로그램을 이 시기에 집행하고 있지 않기 때문이다. 나아가, CAIR은 연방 정부와 인디언 부족들 간의 관계 또는 권력분배 및 책임에 영향을 미치지도 않는다. CAA와 TAR은 NAAQS를 달성하기

위한 계획을 개발하는데 있어서 연방정부와 부족들간의 관계를 정립하고 있고, CAIR은 그 관계를 변경시킬 어떠한 것도 가지고 있지 않다. 왜냐하면 CAIR은 부족이 관련되는 것을 가지고 있지 않기 때문에, E.O. 13175는 적용되지 않는다.

만약 누군가 어떤 부족이 부족집행계획을 실행하고 있다면, 이 최종 CAIR은 그 부족에 대한 관련성을 가지게 될 것이다. 그러나, 그것이 결코 실질적 직접적 비용을 부족에게 부과하지도 않고 부족법에 우선하지도 않는다. 위에서 제시된 바와 같이, EPA는 주, 지방, 부족 정부들에 의해 집행될 때 CAIR 지역에 대한 CAIR의 총 년 사적 비용은 약 2010년에는 24억 달러, 2015년에는 36억 달러(1999년 달러)로 예상하고 있다. CAIR에 의해 영향받을 수 있는 인디언 지역에서의 배출원들은 현재 거의 없고 인디언 부족 지역도 매우 적다. 인디언 지역에서 오염원들을 규제할 것을 선택하는 부족들에게, 비용은 규제받는 시설들을 검사하고 채택된 규제를 집행하는데 소모될 것이다.

비록 E.O. 13175가 CAIR에 적용되지는 않더라도, EPA는 CAIR을 개발하는데 있어서 부족 관리들과 협의하였다. EPA는 초기 단계에서 부족 투입(Tribal input)을 장려하고 있다. 또한, EPA는 CAIR의 기술적 발전 동안 주들과 부족들과 주기적 만남을 가졌다. 석탄 광산 운영에 대한 CAIR의 잠재적 영향에 관해 관심을 표현한 Crow Tribe와 세 번의 미팅을 가졌다. 게다가, EPA는 특정 부족들에 대한 사안들을 다루기 위하여 부족 환경 전문가들과 세 번의 통화를 하였다. 이러한 논의들이 EPA에게 CAIR의 개발에 관한 부족의 관심에 관한 귀중한 정보를 제공하고 있다. EPA는 부족 대표들, 최근 형성된 전국부족대기협회(National Tribal Air Association, NTAA), 그밖의 전국부족포럼들에게 브리핑을 하였다. 부족 대표들로부터의 투입은 CAIR을 개발하는데 있어서 고려사항으로 되었다.

6. 환경정의

E.O. 12898, “소수층과 저소득층에 있어서 환경정의를 다루기 위한 연방조치들”은 연방 행정청들로 하여금 소수층과 저소득층들에 대한 프로그램들, 정책들, 그리고 활동들의 영향을 고려하도록 요구한다. EPA 지침에 따르면, 행정청들은 소수층 또는 저소득층이 중대하고 일반 계층 또는 적절한 대조군에 대한 위험 또는 위험에의 노출율을 상당히 초과하거나 상당히 초과할 것 같은 위험 또는 위험에의 노출율에 직면하는지 여부를 평가하여야 한다.

E.O. 12898에 따라, EPA는 CAIR이 소수 또는 저소득층에 대한 불균형적 부정적 영향을 가질 수 있는지 여부를 고려하여 오고 있다. EPA는 CAIR이 대기 오염과 노출을 일반적으로 감소할 것이라고 기대한다. 이러한 이유로 인하여, 소수 및 저소득층에 대한 부정적 영향이 기대되지는 않는다.

IX. 편익과 비용의 비교

최종 CAIR 프로그램을 실행하기 위한 예상 사회적 비용은 2010년에는 연 19억 1천만 달러 또는 21억 4천만 달러이고 2015년에는 연 25억 6천만 달러 또는 30억 7천만 달러이다(1999년 달러, 3과 7% 할인을 각각 적용). 그래서 2010년에 동 프로그램의 순편익(사회적 편익-사회적 비용)은 대략 714억 달러+B 또는 604억+B 달러이고 2015년에는 985억+B 달러 또는 832억 + B 달러이다(B는 그 규제의 모든 계량화되지 않은 편익과 비편익의 총계를 나타낸다). 그래서, 이 규칙의 집행은 비록 우리가 계량화할 수 있는 건강과 환경적 효과에 관한 제한된 설정이 주어진다 하더라도 경제적 효율성 기준에만 기초하여 사회에 대하여 사회복지에서 중대한 순 이득을 제공할 것으로 기대된다. 오존-, 직접적으로 배출된 PM2.5-, 수은-, 산성화-, 그리고 부영양화- 관련 영향의 추가는 이 규칙의 순 편익을 증가할 것이다. 보고된 편익과 비용은 최종 CAIR과 CAIR안(뉴저지와 델라웨어주를 위한 연 SO2와 NOx 통제안)을 포함하는 완전한 CAIR 프로그램을 위한 예상을 나타낸다. 아칸소주를 위한 연 SO2와 NOx 통제는 완전한 CAIR 프로그램을 위하여 보고된 편익과 비용의 최소한의 과잉기술을 결과하는 이러한 예상을 개발하기 위하여 사용된 모델링에 포함된다. 아래 [표 9-1]은 CAIR의 편익, 비용, 순편익의 개요를 나타낸다.¹⁷⁷⁾

[표 9-1] CAIR의 연간 편익, 비용, 순편익 개요(10억 1999년 달러)

구 분	2010	2015
사회적 비용		
3% 할인율	\$1.91	\$2.56
7% 할인율	\$2.14	\$3.07

177) EPA 보고서, Table 9-1, 9-2.

Ⅸ. 편익과 비용의 비교

구 분	2010	2015
사회적 편익		
3% 할인율	73.3 + B	101 + B
7% 할인율	62.6 + B	86.3 + B
건강관련 편익		
3% 할인율	72.1	99.3
7% 할인율	61.4	84.5
가시도 편익	1.14	1.78
순 편익 (편익 - 비용)		
3% 할인율	\$71.4 + B	\$98.5 + B
7% 할인율	\$60.4 + B	\$83.2 + B

X. 결론

위에서 EPA가, CAIR이 건강에 미치는 편익, 복지에 미치는 편익, 그리고 NAAQS 달성을 위해 소요되는 비용 등을 산정하기 위한 제 평가기법을 자세히 고찰하였다. EPA가 사용한 평가기법을 간략히 표로 나타내면 다음과 같다.

[표 10-1] EPA의 평가기법 개관

모델명	내용	사용 기법 및 투입요소	비고
CMAQ	대기 내의 오염물질을 측정하기 위한 3차원 모델링 기법으로, 이 방법을 이용하여 미국 전역의 PM2.5 값을 추정	MM5 : 기상학적 투입요소	CMAQ 모델링의 평가: IMPROVE, CASTNET, STN, ESPN
		GEOS-CHEM : 오염종의 농도값	
		CB-IV : 오존농도측정	
CAMx	오존 측정을 위한 시공간적 변수를 반영하는 3차 입체 대기질 모델	기상학적 자료	
REMSAD	36Km 격자셀 방법을 사용하여 대기질 내의 PM2.5와 PM2.5 구성종 예측을 위한 모델	PM2.5, PM2.5 구성종	
BenMAP	오존, PM 등이 미치는 영향을 금전화된 편익값으로 산출하기 위한 통합 모델	REMSAD PM2.5구성종	
		CAMx : 오존	
		SMAT : PM2.5	
		AIRS : 오존관측값	
		FRM : PM관측값	
		C-R 함수	

X. 결 론

모델명	내 용	사용 기법 및 투입요소	비 고
		Valuation 함수 소득탄력성 질병 및 발생률 인구통계학적 자료	
MAGIC	토양의 산성침적이 지표수에 미치는 영향을 분석하기 위한 모델	Gaines-Thomas의 평형방정식 : 이온교환 Langmur 등온식 : 황산염흡착 토양수와 지표수 온도, 이산화탄소의 압력, 유기산 농도 등	
IPM	전력부문에 관한 정부의 규제정책으로 인해서 발생하는 경제적 영향분석에 관한 통합 모델	EMPAX-CGE : 환경규제정책이 미국 경제에 미치는 거시경제적 효과에 대한 영향을 예측하기 위한 모델 IGEM : 자본의 축적, 기술진보, 인구의 변화가 경제에 미치는 영향을 분석하기 위한 모델 가용능력, 전력생산량, 가격, SO ₂ , NO _x , CO ₂	

표에서도 알 수 있는 바와 같이 EPA는 CAIR제정의 타당성 여부를 평가하기 위하여 과거 행해졌던 평가기법뿐만 아니라 가능한 검증된 최신 평가기법을 사용하였고 필요한 경우에는 NRC와 OMB 등의 권고도 수용하였다. 또한 위에서 고찰한 바에 따르면 EPA는 입법평가를 위한 관련 분야의 충분한 전문가를 확보하고 있으며, 자료수집 및 분

석을 위한 훌륭한 시스템을 구축하고 있고, 그리고 축적된 기왕의 기초연구들을 적극적으로 활용한다는 것을 알 수 있었다.¹⁷⁸⁾ 또한, EPA는 타 기관으로부터 의견을 구하고 받아들이는데 있어서 open 마인드를 갖추고 있었고, 규제영향평가를 규정하고 있는 법령을 최대한 준수하기 위한 노력을 하였음을 알 수 있었다.

우리의 경우 행정규제기본법 제7조에서 중앙행정기관의 장이 규제를 신설 또는 강화하고자 할 때에는 규제영향분석을 하여 규제영향분석서를 작성하도록 의무화 하고 있다. 특히, 규제의 시행에 따라 규제를 받는 집단 및 국민이 부담하여야 할 비용과 편익의 비교분석을 규제영향분석의 내용으로 규정함으로써 법률 차원에서 규제의 비용-편익분석을 요구하고 있다는 점에서 미국의 경우와 별반 차이가 없다고 할 수 있다. 다만, 미국의 RFA, UMRA, PRA의 경우와는 달리 규제대상분야의 구체화 결여, 규제에 의한 경제파급효과 액수에 따른 규제영향평가 대상에의 포함 여부의 불확실, 규제를 위한 기록의 보관 등에 따른 비용을 감축하기 규정의 결여 등이 우리 행정규제기본법의 문제점으로 지적될 수 있을 것이다. 또한, 규제영향분석의 방법·절차와 규제영향분석서의 작성지침 및 공표방법 등에 관하여 필요한 사항은 대통령령으로 정하도록 규정하고 있지만, 실제로 행정규제기본법 시행령에서 구체적으로 위의 사항을 규정하고 있지는 않다. 행정규제기본법시행규칙도 존재하지 않는다. 이는 입법적 불비라 여겨진다.

규제영향분석을 요건으로 하는 입법영향평가는 법학자만으로는 제대로 행해질 수 없다. 왜냐하면, 본 보고서에도 나타나듯이, EPA가 행한 분석은 법학뿐만 아니라 기상학, 토양학, 경제학, 통계학 등 다양한 분야의 학문에 기초하고 있기 때문이다. 따라서 제대로 된 입법영

178) 노화준, 환경부문 규제영향분석의 방법과 사례연구(한국행정연구원, 2005. 12), 332-338면.

X. 결 론

향평가를 위해서는 법학을 포함한 다양한 분야의 전문가로 구성된 학제간 연구가 이루어져야 할 것이다. 그밖에 입법영향평가를 위한 기초연구의 활성화, 관계 기관들과의 긴밀한 협의와 협조, 규제권자의 확고한 리더십 등이 제대로 된 입법영향평가를 위한 필요 요소라 여겨진다.

참 고 문 헌

- 김동건, 비용·편익분석(박영사, 2004)
- 노화준, 환경부문 규제영향분석의 방법과 사례연구(한국행정연구원, 2005. 12)
- 한화진/조억수, 지역대기질 보건대책 수립 및 시행에 관한 연구(한국 환경기술개발원, 1996. 12)
- 한화진, 미국의 최근 대기질 입법발의안 특성, 한국환경정책평가연구원 (http://www.kei.re.kr/02_pub/r_forum_con.asp?page_num=3&SEQ=89&tc_num=5&tc_seq=3)
- Abbey, D.E., S.D. Colome, P.K. Mills, R. Burchette, W.L. Beeson, and Y. Tian. 1993b. "Chronic Diseases Associated With Long-Term Concentrations of Nitrogen Dioxide." *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 3(2) : 181-202
- Abbey, D.E., B.L. Hwang, R.J. Burchette, T. Vancuren, and P.K. Mills. 1995. "Estimated Long-Term Ambient Concentration of PM10 and Development of Respiratory Symptoms in a Nonsmoking Population" *Archives of Environmental Health* 50(2) : 139-152
- Adams, M.B., T.R. Angradi, and J.N. Kochenderfer. 1997. "Stream Water and Soil Solution Responses to 5 years of Nitrogen and Sulfur Additions at the Fernow Experimental Forest, West Virginia." *Forest Ecology and Management* 95 : 79-91

참 고 문 헌

- Adams, P.F., G.E. Hendershot, and M.A. Marano. 1999. "Current Estimates from the National Health Interview Survey, 1996." *Vital Health Statistics* 10(200) : 1-212
- American Lung Association. 2002a. Trends in Asthma Morbidity and Mortality. American Lung Association, Best Practices and Program Services, Epidemiology and Statistics Unit
- American Lung Association. 2002b. Trends in Chronic Bronchitis and Emphysema : Morbidity and Mortality. American Lung Association, Best Practices and Program Services, Epidemiology and Statistics Unit
- Banzhaf, S., D. Burtraw, and K. Palmer. October 2002. "Efficient Emission Fees in the U.S Electricity Sector." Resources for the Future Discussion Paper 02-45
- Banzhaf, Spencer, Dallas Butraw, David Evans, and Alan Krupnick, September 2004. "Valuation of Natural Resources Improvements in the Adirondacks." Resources for the Future(RFF)
- Belanger. K., W. Beckett, E. Triche, M.B. Bracken, T. Holford, P. Ren, J.E. McSharry, D.R. Gold, T.A. Platts-Mills, and B.P. Leaderer. 2003. "Symptoms of Wheeze and Persistent Cough in the First Year of Life: Associations with Indoor Allergens, Air Contaminants, and Maternal History of Asthma." *American Journal of Epidemiology* 158 : 195-202
- Bell, M.L., A. McDermott, S.L. Zeger, J.M. Samet, and F. Dominici. 2004. "Ozone and Short-term Mortality in 95 U.S Urban Com-

- munities, 1987-2000.” *Journal of the American Medical Association* 292 : 2372-2378
- Berger, M.C., G.C. Blomquist, D. Kenkel, and G.S Tolley. 1987. “Valuing Changes in Health Risks: A Comparison of Alternative Measures.” *The Southern Economic Journal* 53 : 977-984
- Borjas, G. *Labor Economics*(1996, Mcgraw-Hill)
- Burnett, R.T., M. Smith-Dorison. D. Stieb, M.E. Raizenne, J.R. Brook, R.E Dales, J.A. Leech, S. Cakmak, D. Krewski. 2001. “Association between Ozone and Hospitalization for Acute Respiratory Diseases in Children less than 2 Years of Ages.” *American Journal of Epidemiology* 153 : 444-52
- Byun, D., and K.L, Schere. March, 2004. “Review of the governing equations, computational algorithms and other component of the models-3 Community Multiscale Air Quality(CMAQ) Modeling systems” submitted to the *Journal of Applied Mechanics* review
- CDC Wonder, Wide-ranging Online Data for Epidemiologic Research(Wonder)(data from years 1996-1998), Centers for Disease Control and Prevention(CDC), U.S. Department of Health and Human Services, <http://wonder.cdc.gov>
- Chay, K.Y., and M. Greenstone. 2003. “The Impact of Air Pollution on Infant Mortality : Evidence from Geographic Variation in Pollution Shocks Induced by a Recession” *Quarterly Journal of Economics* 118(3)

참 고 문 헌

- Chen, L., B.L. Jennison, W. Yang, and S.T. Omaye. 2000. "Elementary School Absenteeism and Air Pollution." *Inhalation Toxicology* 12(11) : 997-1016
- Chestnut, L.G. April 15, 1997. Draft Memorandum : Methodology for Estimating Values for Changes in Visibility at National Park
- Chestnut, L.G. and R.L. Dennis. 1997. "Economic Benefits of Improvements in Visibility : Acid Rain Provisions of the 1990 Clean Air Act Amendments." *Journal of the Air and Waste Management Association* 47 : 395-402
- Chestnut, L.G., and R.D. Rowe. 1990a. "A new National Park Visibility Value Estimates." In *visibility and Fine Particles, Transactions of an AWMA/EPA International Specialty Conference*, C.V. Mathai, ed. Air and Waste Management Association, Pittsburgh
- Cody, R.P., C.P. Weisel, G. Birnbaum, and P.J. Liroy.1992. "The Effect of Ozone Associated with Summertime Photochemical Smog on the frequency of Asthma Visits to Hospital Emergency Departments" *Environmental Research* 58(2) : 184-94.
- Cosby, B.J., R.F. Wright, G.M. Hornberger, and J.N. Galloway. 1985a, *Modelling the Effects of Acid Deposition : Assessment of a Lumped Parameter Model of Soil Water and Streamwater Chemistry.* *Water Resources Research* 21 : 51-63
- Crocker, T.D., and R.L. Horst, Jr. 1981. "Hours of Work,Labor Productivity and Environmental Conditions : A case Study" *The review of economics and statistics* 63 : 361-368

- Cropper, M.L., and A.J. Krupnick. 1990 “The Social Costs of Chronic Heart and Lung Disease.” Resources for the future. Washington, DC. Discussing Paper QE 89-16-REV
- Dockery, D.W., J.Cunningham, A.I. Damokosh, L.M. Neas, J.D. Spengler, P. Koutrakis, J.H. Ware, M.Raizenne, and F.E Speizer. 1996. “Health Effects of Acid Aerosols On North American Children-Respiratory Symptoms.”Environmental Health Perspectives 104(5) : 500-505
- Driscoll, C.T., G. Lawrence, A. Bulger, T. Butler, T. Butler, C. Cronan, C. Eagar, K.F. Lambert, G.E. Likens, J. Stoddard, and K. Weathers. 2001. “Acid Deposition in the Northeastern U.S. : Sources and Inputs, Ecosystem Effects, and Management Strategies.”
- Eisenstein, E.L., L.K. Shaw, K.J. Anstrom, C.L. Nelson, Z. Hakim, V. Hasselblad and D.B.Mark. 2001. “Assessing the Clinical and Economic Burden of Coronary Artery Disease : 1986-1998.” Medical Care 39(8) : 824-35
- EPA. 2000. Draft Guidance for demonstrating attainment of the Air Quality Goals for PM2.5 and regional haze : Draft 1.1, Office of Air Quality Planning and standards, research Triangle Park, NC
- EPA. 2004. Air Quality Criteria for Particulate Matter (October 2004) <<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=87903>>
- EPA. January 2004a. Air Quality Data Analysis Technical Support Document for the Proposed Interstate Air Quality Rule.

참 고 문 헌

- EPA. 2005a. Air Quality for Ozone and Related Photochemical Oxidants (First External Review Draft)
<<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=114523>>
- EPA. 2005b. Draft Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants E-Docket No. ORD-2004-0015. [Federal Register : January 31, 2005 (Volume 70, Number 19)]
<<http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/2005/January/Day-31/a1720.htm>>
- EPA, Regulatory Impact Analysis for the Final Clean Air Interstate Rule, EPA-452/R-05-002(March 2005)(이하 EPA 보고서라 함)
- Gilliand, F.D., K. Berhane, E.B. Rappaport, D.C. Thomas, E. Avol, W.J. Gauderman, S.J. London, H.G. Margolis, R. McConnell, K.T. Islam, and J.M. Peters, 2001. "The Effects of Ambient Air Pollution on School Absenteeism due to Respiratory Illnesses." *Epidemiology* 12(1):43-54
- Gold, D.R., A. Litonjua, J. Schwartz, E. Lovett, A. Larson, B. Nearing, G. Allen, M. Verrier, R. Cherry., and R. Verrier. 2000. "Ambient Pollution and Heart rate Variability." *Circulation* 101(11) : 1267-73
- Hall, J.V., V. Brajer, and F.W. Lurmann. 2003. "Economic Valuation of Ozone-related School Absences in the South Coast Air Basin Of California," *Contemporary Economic Policy* 21(4):407-417
- Harrington, W., and P.R. Portney, 1987. "Valuing the Benefits of Health and Safety Regulation" *Journal of Urban Economics* 22:101-112
- Herlihy, A.T., P.R. Kaufmann, M.R. Church, P.J. Wigington, Jr., J.R. Webb, and M.J. Sale. 1993. "The Effects of Acid Deposition on

- Streams in the Appalachian Mountains and Piedmont Region of the Mid-Atlantic United States.” *Water Resources Research* 29:2687-2703
- Horsley, S.B., R.P. Long, S.W. Bailey, R.A. Hallett, and T.J. Hall. 2000. “Factors Associated with the Decline Disease of Sugar Maple on the Allegheny Plateau.” *Canadian Journal of Forest Research* 30 : 1365-1378
- Howarth, Robert. 1998. “An Assessment of Human Influences on Fluxes of Nitrogen from the Terrestrial Landscape to the Estuaries and Continental Shelves of the North Atlantic Ocean.” *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52(2/3) : 213-223
- Huntington, T.G., R.P. Hooper, C.E. Johnson, B.T. Aulenbach, R. Cappellato, and A.E. Blum. 2000. “Calcium Depletion in a Southeastern U.S. Forest Ecosystem.” *Soil Science Society of America Journal* 64 : 1845-1858
- Ito, K. 2003. “Association of Particulate Matter Components with Daily Mortality and Morbidity in Detroit, Michigan.” I Revised Analyses of time-series Studies of Air Pollution and Health. Special Report. Health Effects Institute, Boston, MA
- Jenkins, A., P.G. Whitehead, B.J. Cosby, and H.J.B. Birks. 1990. “Modelling Long-Term Acidification : A Comparison with Diatom Reconstructions and the Implications for Reversibility.” *Phil. Trans. R. Soc. London B* 327 : 435-440

참 고 문 헌

- Kleckner, N., and J. Neumann, June 3, 1999. "Recommended Approach to Adjusting WTP Estimates to Reflect Changes in Real Income" Memorandum to Jim Democker, US EPA/OPAR
- Krewski D., R.T. Burnett, M.S. Goldberg, K. Hoover, J. Siemiatycki, M. Jerrett, M. Abrahamowicz, and W.H. White. July 2000. Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. Special Report to the Health Effects Institute, Cambridge MA
- Krupnick, A.J., and M.L. Cropper. 1992. "The Effects of Information on Health Risk Valuations." *Journal of Risk and Uncertainty* 5(2) : 29-48
- Kunzli. N., S. Medina, R. Kaiser, P. Quenel, F. Horak Jr, and M. Studnicka. 2001 "Assessment of Deaths Attributable to Air Pollution: Should We Risk Estimates Based on Time Series or on Cohort Studies?" *American Journal of Epidemiology* 153(11) : 1050-55
- Lawrence, G.W., M.B. David, S.W. Bailey, and W.C. Shortle. 1997. "Assessment of Calcium Status in Soils of Red Spruce Forests in the Northeastern U.S." *Biogeochemistry* 38 : 19-39
- Lawrence, G.B., M.B. David, G.M. Lovett, P.S. Murdoch, D.A. Burns, J.L. Stoddard, B.P. Bal야해, J.H. Porter, and A.W. Thompson. 1999. "Soil Calcium Status and the Response of Stream Chemistry to Changing Acidic Deposition Rates in the Catskill Mountains of New York." *Ecological Applications* 9 : 1059-1072

- Levy, J.I., T.J. Carrothers, J.T. Tuomisto, J.K. Hammitt, and J.S. Evans. 2001. "Assessing the Public Health Benefits of Reduced Ozone Concentrations" *Environmental Health Perspectives* 10 : 1215-1226
- Levy, J.I., J.K. Hanmmitt, Y. Yanagisawa, and J.D. Spengler. 1999. "Development of a New Damage Function Model for Power Plants : Methodology and Application." *Environmental Science and technology* 33 ; 4363-4372
- Liao, D.,J. Creason, C. Shy, R. Williams, R. Watts, and R. Zweidinger. 1999. "Daily Variation of Particulate Air Pollution and Poor Cardiac Autonomic Control in the Elderly." *Environ Health Perspect* 107 : 521-5
- Likens, G.E., C.T. Driscoll, and D.C. Buso. 1996. "Long-Term Effects of Acid Rain : Responses and Recovery of a Forest Ecosystem." *Science* 272 : 244-246
- MacDonald, N.W., A.J. Burton, H.O. Liechty, J.A. Whitter, K.S. Pregitzer, G.D. Mroz, and D.D.Richter, 1992. "Ion Leaching in Forest Ecosystems along a Great Lakes Air Pollution Gradient." *Journal of Environmental Quality* 21 : 614-623
- Magari, S.R., R. Hauser, J. Schwartz, P.L Williams, T.J Smith, and D.C. Christiani. 2001. "Association of Heart rate Variability with Occupational and Environmental Exposure to Particulate Air Pollution." *Circulation* 104(9) : 986-91
- McClelland, G., W. Schulze, D. Waldman, J.Irwin, D. Schenk, T. Stewart, L. Deck, and M. Thayer. September 1993. Valuing

참 고 문 헌

- Eastern Visibility : A Field Test of the Contingent Valuation Method. Prepared for Office of Policy, Planning and Evaluation, U.S. EPA.
- McConnell, R., K. Berhane, F. Gilliland, S.J. London, H. Vora, E. Avol, W.J. Gauderman, H.G. Margolis, F. Lurmann, D.C. Thomas, and J.M. Peters. 1999. "Air Pollution and Bronchitic Symptoms in Southern California Children with Asthma." *Environmental Health Perspectives* 107(9) : 757-760
- Mitchell, M.J., M.B. David, I.J. Fernandez, R.D. Fuller, K. Nadelhoffer, L.E. Rustad, and A.C. Stam. 1994. "Response of Buried Mineral Soil Bags to Experimental Acidification of Forest Ecosystem." *Soil Science Society of America Journal* 58 : 556-563
- Mitchell, M.J., C.T. Driscoll, J.S. Kahl, G.E. Likens, P.S. Murdoch, and L.H. Pardo. 1996. "Climate Control on Nitrate Loss from Forested Watersheds in the Northeast United States." *Environmental Science and Technology* 30 : 2609-2612
- Montgomery, W. David. 1972. "Markets in Licenses and Efficient Pollution Control Program." *Journal of Economic Theory* 5(3) : 395-418
- Moolgavkar, S.H., E.G. Luebeck, and E.L. Anderson. 1997. "Air Pollution and Hospital Admission for Respiratory Causes in Minneapolis-St.Paul and Birmingham." *Epidemiology* 8 : 364-370
- Moolgavkar, S.H. 2000. "Air Pollution and Hospital Admissions for Diseases of the Circulatory System in Three US Metropolitan

- Areas.” Journal of the air waste management association 50 : 1199-1206
- Moolgavkar, S.H. 2003. “Air Pollution and Daily Deaths nad Hospital Admissions in Los Angeles and Cook Counties.” In Revised Analyses of Time-Series Studies of Air Pollution and Health. Special Report. Boston, MA : Health Effects Institute
- Mrorzek, J.R., and L.O. Taylor. 2002. “What Determines the Value of Life? A Meta-Analysis.” Journal of Policy Analysis and Management. 21(2) : 253-270
- National Acid Precipitaiton Assessment Program(NAPAP). 1991. 1990 Integrated Assessment Report. Washington, DC : National Acid Precipitation Assessment Program Office of the Director
- National Center for Education Statistics. 1996. “The Condition of Education 1996, Indicator 42 : Student Absenteeism and Tardiness.” Washington, DC : U.S. Department of Education National Center for Education Statistics
- National Hospital Ambulatory Medical Care Survey (NHAMCS). 2000. National Center for Health Statistics, Centers for Disease Control and Prevention (CDC), U.S. Department of Health and Human Services. Available at : <<http://www.cdc.gov/nchs/about/major/ahcd/ahcd1.htm>>
- National Research Council(NRC). 2002. Estimating the Public Health Benefits of Proposed Air Pollution Regulations. Washington, DC : The National Academies Press
- Neumann, J.E., M.T. Dickie, and R.E. Unsworth. March 31, 1994. “Linkage Between Health Effects Estimation and Morbidity

참 고 문 헌

- Valuation in the Section 812 Analysis-Draft Valuation Document.” Industrial Economics Incorporated(IEc) Memorandum to Jim DeMocker, U.S. EPA, Office of Air and Radiation
- NHDS Public Use Data Files. 1999. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), U.S. Department of Health and Human Services. Available at : ftp://ftp.cdc.gov/pub/Health_Statistics/NCHS/datasets/NHDS
- Norris, G., S.N. Youngpong, J.Q. Koenig, T.V. Larson, L. Sheppard, and J.W. Stout. 1999 “An Association between Fine Particles and Asthma Emergency Department Visits for Children in Seatles.” *Environmental Health Perspectives* 107(6) : 489-493
- Norton, S.A., J.S. Kahl, I.J. Fernandez, T.A. Haines, L.E. Rustad, S. Nodvin, J.P. Scofield, T. Watershed, Maine, (BBWP). *Environmental Monitoring and Assessment* 55 : 7-51
- Norton, S.A. R.F. Wright, J.S. Kahl, and J.P. Scofield. 1992. “The MAGIC Simulatuion of Surface Water Acidification at, and Preliminary Results from, the Bear Brook Watershed Manipulation, Maine.” *Environmental Pollution* 77 : 279-286
- NRC, 2002. *Estimating the Public Health Benefits of Proposed Air Pollution Regulations*. Washington D.C p. 108
- Ostro, B.D. 1987. “Air Pollution and Morbidity Revisited : A Specification Test.” *Journal of Environmental Economics Management* 14 : 87-98
- Ostro, B.D., and S. Rothschild. 1989. “Air Pollution and Acute Respiratory Morbidity : An Observational Study of Multiple Pollutans.” *Environmental Research* 50 : 238-247

- Ostro, B.D., M.J. Lipsett, M.B. Wiener, and J.C. Selner. 1991. "Asthmatic Responses to Airborne Acid Aerosols." *American Journal of Public Health* 81(6) : 694-702
- Ostro, B. and L. Chestnut, 1998 "Assessing the Health Benefits of Reducing Particulate Matter Air Pollution in the US" *Environmental Research, Section A* 76 : 94-106
- Ostro, B., M. Lipsett, J. Mann. H. Braxton-Owens, and M. White.2001. "Air Pollution and Exacerbation of Asthma in African-American Children in Los Angels" *Epidemiology* 12(2) : 200-208
- Peters, A., D.W. Atkison., A.P. de Leon, and H.R. Anderson. 1997. "Daily Time series for Cardiovascular Hospital admissions and Previous Day's Air Pollution in London, UK." *Occupational and Environmental Medicine* 54(8) : 535-540
- Peters, A., D.W.Dockery, J.E. Muller, and M.A. Mittleman. 2001. "Increased Particulate Air Pollution and the Triggering of Myocardial Infarction." *Circulation* 103 : 2810-2815
- Pope, C.A., III, D.W. Dockery, J.D. Spengler, and M.E Raizenne. 1991 "Respiratory Health and PM10 Pollution. : A daily Time Series Analysis." *American Review of Respiratory Diseases* 144 : 668-674
- Pope, C.A., III, R.T. Burnett, M.J. Thun, E.E. Calle, D. Krewski, K. Ito, and G.D. thurston. 2002. "Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long term Exposure to Fine Particulate Air Pollution " *Journal of the American Medical Association* 287 : 1132-1141

참 고 문 헌

- Rosamond, W., G. Broda, E.Kawalec, S. Rywik, A. Pajak, L. Cooper, and L. Chambless. 1999. "Comparison of Medical Care and Survival of Hospitalized Patients with Acute Myocardial Infarction in Poland and the United States." *American Journal of Cardiology* 83 : 1180-1185
- Rowe, R.D., and L.G.Chesnut. 1986. "Oxidants and Asthmatics in Los Angeles : A Benefits Analysis-Executive Summary." Prepared by Energy and Resource Consultants, Inc. Report to the U.S.EPA, Office of Policy Analysis. EPA-230-09-86-018. Washington, DC
- Rowlatt, et al. 1998. "Valuation of Deaths from Air Pollution." NERA and CASPAR for DETR
- Russell, M.W., D.M. Huse, S. Drowns, E.C. Hamel, and S.C. Hartz. 1998. "Direct Medical Costs of Coronary Artery Disease in the United States." *American Journal of Cardiology* 81(9) : 1110-1115
- Schwarz, J., and L.M. Neas. 2000. "Fine Particles are More Strongly Associated than Coarse Particles with Acute Respiratory Health Effects in Schoolchildren" *Epidemiology* 11 : 6-10
- Schwarz, J. 1995. "Short Term Fluctuations in Air Pollution and Hospital Admissions of the Elderly for Respiratory Disease." *Thorax* 50(5) : 531-538
- Schwarz, J. 1994a. "PM10 Ozone,and Hospital Admissions for the Elderly in Minneapolis-St Paul, Minnesota." *Archives of Environmental Health* 49(5)366-374
- Schwarz, J. 1993. "Particulate Air Pollution and Chronic Respiratory Disease." *Environmental Research* 62 : 7-13

- Schwarz, J. 1994b. "Air Pollution and Hospital Admissions for the Elderly in Detroit, Michigan." *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 150(3) : 648-655
- Sheppard, L 2003. "Ambient Air Pollution and Nonelderly Asthma Hospital Admissions in Seattle, Washington, 1987-1994." In revised analyses of time-series studies of air pollution and health. Special Report. Boston, MA : Health Effects Institute
- Shogren, J., and T. Stamland. 2002. "Skill and Value of Life." *Journal of Political Economy* 110 : 1168-1197
- Shortle, W.C. and K.T. Smith. 1988. "Aluminum-Induced Calcium Deficiency Syndrome in Declining Red Spruce Trees." *Science* 240 : 1017-1018
- Sisler J.F, July 1996, Spatial and Seasonal Patterns and Long term Variability of the composition of Haze in the United States : An analysis of the IMPROVE Network. Fort Collins, CO : Co-operative Institute for Research In the Atmosphere, Colorado State University
- Smith, D.H., D.C. Malone, K.A. Lawson, L.J. Okamoto, C. Battista, and W.B. Saunders. 1997. "A National Estimate of the Economic Costs of Asthma." *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 156(3 Pt 1) : 787-793
- Southern Appalachian Man and Biosphere(SAMAB). 1996. The Southern Appalachian Assessment : Summary Report. Atlanta, GA : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Region

참 고 문 헌

- Standard and Poor's. 2000. "The US Economy : The 25 Year Focus"
Winter
- Stanford, R., T. McLaughlin, and L.J. Okamoto. 1999. "The Cost of
Asthma in the Emergency Department and Hospital." American
Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 160(1) :
211-215
- Stieb, D.M., R.T. Burnett, R.C. Beveridge, and J.R. Brook. 1996.
"Association between Ozone and Asthma Emergency Department
Visits in Saint John, New Brunswick, Canada." Environmental
Health Perspectives 104(12) : 1354-1360
- Sweeney, Jeff. "EPA's Chesapeake Bay Program Air Strategy." October
26, 2004
- Thurston, G.D., and K. Ito. 2001. "Epidemiological Studies of Acute
Ozone Exposures and Mortality." Journal of Exposure Analysis
and Environmental Epidemiology 11(4) : 286-294
- Tolley, G.S. et al. January 1986. Valuation of Reductions in Human
Health Symptoms and Risks. University of Chicago. Final Report
for the U.S. EPA
- Valigura, R.A., R.B. Alexander, M.S. Castro, T.P. Meyers, H.W. Paerl,
P.E. Stacy, and R.E. Turner. 2001. Nitrogen Loading in Coastal
Water Bodies : An Atmospheric Perspective. Washington, DC :
American Geophysical Union
- Vedal, S., J. Petkau, R. White, and J. Blair. 1998. "Acute Effects of
Ambient Inhalable Particles in Asthmatic and Nonasthmatic

- Children.” American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 157(4) : 1034-1043
- Viscusi, W.K., W.A. Magat, and J. Huber. 1991. “Pricing Environmental Health Risks : Survey Assessments of Risk-Risk and Risk-Dollar Trade-Offs for Chronic Bronchitis.” Journal of Environmental Economics and Management 21 : 32-51
- Viscusi, V.K., and J.E. Aldy. 2003. “The Value of a Statistical Life : A Critical Review of Market Estimates Throughout the World.” Journal of Risk and Uncertainty 27(1) : 5-26
- Webb, J.R., F.A. Deviney, J.N. Galloway, C.A. Rinehart, P.A. Thompson, and S. Wilson. 1994. The Acid-Base Status of Native Brook Trout Streams in the Mountains of Virginia. A regional Assessment Based on the Virginia Trout Stream Sensivity Study. Charlottesville, VA : Univ. of Virginia. http://www.nps.gov/shen/air_quality.htm
- Weisel, C.P., R.P. Cody, and P.J. Liroy. 1995. “Relationship between Summertime Ambient Ozone Levels and Emergency Department Visits for Asthma in Central New Jersey” Environmental Health Perspectives 103 Suppl 2 : 97-102
- Wittels, E.H., J.W. Hay, and A.M. Gotto, Jr. 1990. “Medical Costs of Coronary Artery Disease in the U.S.” American Journal of Public Health 70 : 687-696
- Whittemore, A.S., and E.L. Korn. 1980. “Asthma and Air Pollution in the Los Angeles Area.” American Journal of Public Health 70 : 687-696

참 고 문 헌

- Woodruf, T.J., J.Grillo, and K.C. Schoendorf. 1997. "The relationship between selected causes of Postneonatal Infant Mortality and Particulate Air Pollution in the United States." *Environmental Health Perspectives* 105(6) : 608-612
- Wood and Poole Economics, Inc. 2001. "Population by Single Year of Age CD." Woods and Poole Economics, Inc.
- Yu, O., L. Sheppard, T. Lumley, J.Q. Koenig, and G.G. Shapiro. 2000. "Effects of Ambient Air Pollution on Symptoms of Asthma in Seattle-Area Children Enrolled in the CAMP study." *Environmental Health Perspectives* 108(12)1209-1214