

# 서울시 미세먼지 관리정책의 사회경제적 편익

황인창 김창훈 손원익

Benefits of Management Policy of Seoul on Airborne Particulate Matter



서울연구원  
The Seoul Institute

서울시  
미세먼지 관리정책의  
사회경제적 편익



The Seoul Institute

## 연구책임

황인창 서울연구원 안전환경연구실 부연구위원

## 연구진

김창훈 에너지경제연구원 부연구위원

손원익 서울대학교 박사과정

이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서  
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

## 요약

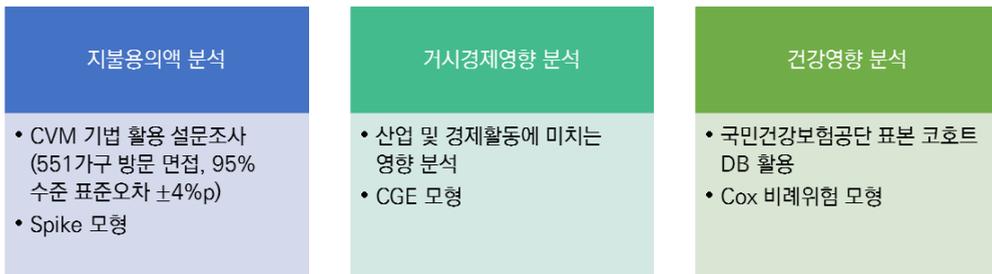
미세먼지 관리정책의 사회경제적 편익은  
연평균 5,400억원으로 투자예산의 3~4배

## 미세먼지 관리정책, 사회경제적 편익 산정으로 타당성 확보 필요

미세먼지 관리는 대규모 예산이 투입되는 공공 정책이다. 서울시의 경우 「서울시 미세먼지 10대 대책」을 위해 2020년까지 4개년간 총 6,417억 원을 투자할 계획이다(서울시, 2017). 이처럼 대규모 예산이 투입되는 정책은 사회경제적 편익 산정을 통해 타당성을 확보할 필요가 있다.

미세먼지에 대한 경제성 분석은 중국 등 주변 국가나 지자체와의 협력을 위해서도 필요하다. 현재 정부 차원에서 수행하고 있는 미세먼지 해결을 위한 동북아 국제협력의 경우 실효성 있는 대책을 마련하는 데 한계를 보이고 있는데, 구체적인 협력사업을 촉진할 수 있는 방안 중 하나는 미세먼지로 인한 피해를 정량화하고 미세먼지 감축을 위한 비용을 산정하는 것이다. OECD, 유럽연합, 미국 등에서는 과학적 분석 결과와 함께 경제성 분석 결과를 활용하여 미세먼지 관리 정책을 수립하고 대내외 협력방안을 마련하고 있다(OECD, 2016; Amann et al., 2011; EPA, 2011). 유럽연합에서 시행하고 있는 미세먼지 해결 협력을 위한 예테보리 의정서(Gothenburg Protocol)가 대표적인 사례이다.

이에 이 연구에서는 서울시 미세먼지 관리 정책의 사회경제적 편익을 다양한 방법을 활용해 산출하였다. 구체적으로 살펴보면, 서울시민의 미세먼지 개선 지불용의액을 조건부가치추정(CV) 기법을 활용해 산출했다. 또한 미세먼지의 거시경제영향(산업 측면), 심미적 영향, 건강영향 등을 연산가능일반균형(CGE) 모형, 가치평가 기법, 국민건강보험공단 표본코호트 DB 등을 활용해 분석했다.



[그림 1] 주요 연구 내용 및 방법

## 서울시 가구당 미세먼지 관리정책 지불용의액은 연평균 138,107원

경제학에서는 일반적으로 재화(상품)나 용역(서비스)이 제공하는 편익을 소비자가 해당 재화나 용역을 구매하기 위해 제시할 수 있는 최대 금액을 통해 산정한다. 이러한 이론적 배경하에 미세먼지 관리 정책의 편익은 일반적으로 시민들이 깨끗한 공기를 얻기 위해 지불할 수 있는 최대금액을 조사·분석하여 산출한다.

이번 연구에서는 서울시 미세먼지 관리 정책의 사회경제적 편익을 산출하기 위해 무작위로 추출된 서울시 551가구를 대상으로 대면면접방식의 설문조사를 실시하였다. 설문조사에서는 2025년까지 서울시 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 연평균 농도를 최근 평균보다  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  줄이는 데 소요되는 비용을 개별 가구에서 세금의 형태로 최대 얼마까지 지불할 용의가 있는지를 물어보았다. 농도가 이렇게 개선되면 2025년에 서울시 PM<sub>2.5</sub> 연평균 농도가  $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 되는데, 이는 세계보건기구(WHO)의 중간 권고기준3(WHO, 2006)을 달성하는 수준이다. 설문조사 분석 결과, 서울시 연평균 초미세먼지 농도를 현재보다  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  개선하기 위한 서울시의 가구당 연평균 지불용의액은 138,107원이었다. 지불용의액의 95% 신뢰구간은 125,376원~150,839원이었다. 서울시의 총 가구수를 감안하면, 서울시민의 미세먼지 관리 정책 총 지불용의액은 매년 5,407억 원(95% 신뢰구간, 4,908억 원~5,905억 원)이라고 추정할 수 있다.

**[표 1] 지불용의액 분석모형(스파이크 모형) 결과**

	계수 값	표준오차	p-value	95% 신뢰구간	
$\beta$	0.0000156	9.42e-7	<0.001	0.0000137	0.0000174
상수( $\alpha$ )	2.026832	0.1439092	<0.001	1.744775	2.308889

주: N=388, Log likelihood(LR)=-374.88, Wald chi-square(1)=273.20, p-value<0.001

이 연구에서 제시한 총 지불용의액은 1원이라도 지불할 용의가 있는 가구의 지불용의액과 지불 의사가 없는(또는 지불용의액 0원) 가구의 지불용의액을 모두 합산한 값이다. 예를 들어, A와 B 2가구로 구성된 사회에서 A 가구의 지불용의액은 100원이고 B 가구의 지불용의액은 0원이라면, 해당 사회의 총 지불용의액은 100원(100원+0원)이고 가구당 지불용의액은 50원이다. 서울시 개별 가구의 연평균 미세먼지 관리 정책 지불용의액은 이 연구에서 제시한 값보다 훨씬 높을 수도 있고 낮을 수도 있지만, 모든 가구를 평균할 경우 가구당 약 13만 8천 원이다.

## PM2.5 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 개선 시 서울 고령자 총사망위험도 13.9% 줄어

국민건강보험공단의 표본 코호트 DB를 활용해 미세먼지의 장기 건강영향을 추정한 결과, PM2.5 연평균 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  개선 시 서울 시민의 미세먼지로 인한 사망위험은 약 8.0% 감소하는 것으로 나타났다. 미세먼지 관련 질환 중에서는 허혈성심장질환으로 인한 사망위험이 PM2.5 연평균 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  감소 시 약 40.8% 줄어드는 것으로 나타났다.

또한 미세먼지가 고령자에게 미치는 영향을 확인하기 위해 이번 연구에서는 만 65세 이상 서울 시민을 대상으로 사망위험을 분석하였다. 분석 결과 고령자의 경우 연평균 PM2.5 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  감소 시 총 사망위험이 약 13.9% 줄어드는 것으로 나타났다. 질환별로는 연평균 PM2.5 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  감소 시 허혈성심장질환 사망위험은 약 59.6%, 뇌혈관질환 사망위험은 약 17.9% 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 고령자의 PM2.5 노출에 대한 취약성이 다른 연령대보다 더 높음을 보여주는 것이다.

**[표 2] 비례위험모형 추정 결과(고령자 전체)**

	계수 값	표준오차	P-value	상대 위험비	95% 신뢰구간		대조군
성	-0.810	0.062	<0.001	0.445	0.394	0.502	1.6
소득	-0.035	0.010	0.000	0.965	0.947	0.983	6.7
나이	0.119	0.005	<0.001	1.126	1.116	1.136	72.2
PM2.5	0.013	0.007	0.081	1.013	0.998	1.028	29.8

N=18,273명, 미세먼지 질환 사망자=1,108명, LR statistic=713.95(p-value<0,001)

## 건강영향 편익은 연평균 4,139억원...거시경제효과는 연평균 160억원

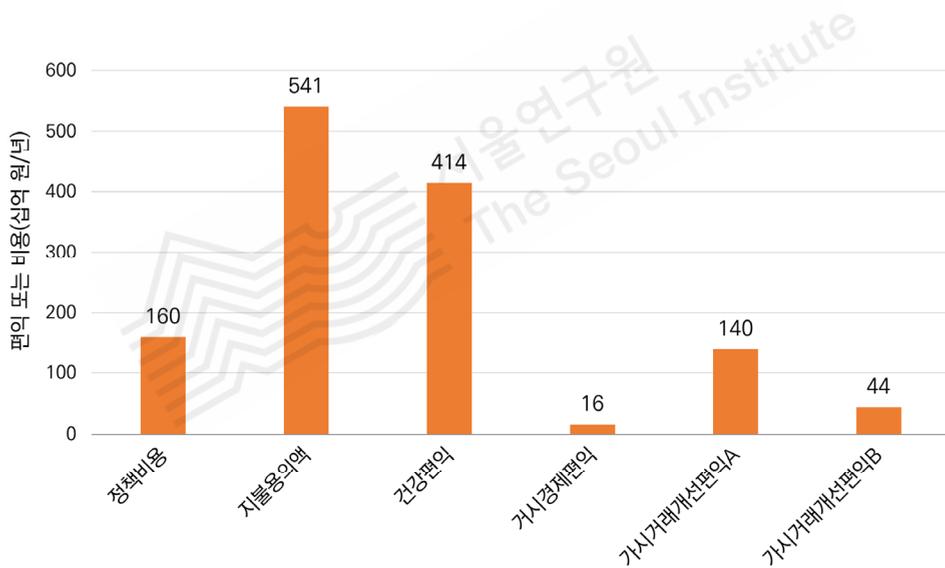
미세먼지 관리 정책으로 인해 줄어들 수 있는 조기사망자 수와 서울 시민의 통계적 생명가치(VSL)를 활용해 서울시 미세먼지 관리 정책의 건강영향 개선 편익을 분석한 결과, 서울시 연평균 초미세먼지 농도가 2025년에  $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 도달하면(현재보다  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  개선) 이로 인한 서울 시민의 미세먼지 건강영향 개선 편익은 연평균 4,139억 원일 것으로 추정된다. 이번 연구에서는 미세먼지로 인한 조기사망 영향만을 고려했는데, 사망 이외 미세먼지 질환으로 인한 피해 비용까지 고려한다면 서울시 미세먼지 관리 정책의 건강영향 개선 편익은 더 높아질 수 있다.

미세먼지 농도가 개선되면 의료비용 지출액이 줄고 노동생산성이 증가(노동가능일수 증가)할 수 있다. 또한 농작물 생산량이 늘어나고 여가활동이 증가할 수 있다. 이러한 효과는 개별 산업에만 영향을 미치는 것이 아니라 산업 생태계를 통해 산업 전반에 영향을 미칠 수 있다. 이번 연구에서는 이러한 효과를 일반균형모형(CGE)을 통해 산출했다. 분석 결과 서울시 연평균 미세먼지 농도가 2025년에  $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 도달하면(현재보다  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  개선), 서울시의 산업 총생산액(GRDP)은 연평균 160억 원 증가하는 것으로 산출되었다. 이번 연구에서는 자료의 한계로 의료비용 지출액과 노동생산성만을 고려했는데, 다른 영향도 고려하면 산업파급효과는 더 높아질 수 있다.

이밖에도 미세먼지 농도 개선은 심미적 영향 측면에서도 편익을 발생시킨다. 미세먼지 농도가 높으면 가시거리가 떨어지고 이로 인해 불쾌감 또는 우울감 등을 불러일으킬 수 있다. 설문조사를 통해 간접적으로 심미적 영향을 분석한 결과, 서울시 미세먼지 농도가 2025년에  $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 도달하면(현재보다  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  개선) 가시거리 개선에 따른 편익이 연평균 최소 438억 원에서 최대 1,400억 원이 될 것으로 추정된다.

## 미세먼지 관리정책 편익이 투자예산의 3~4배 ‘예산증액 필요성 입증’

서울시가 현재 미세먼지 관리를 위해 투자하고 있는 연평균 예산은 1,604억 원인 데 반해(서울시, 2017), 이번 연구에서 산출한 편익은 이를 3~4배 상회한다. 이는 서울시가 미세먼지 문제 개선을 위해 더 많은 예산을 투입할 필요성이 있음을 보여준다. 다만, 여기서 비용은 비용편익 분석에서 일반적으로 사용하는 경제적 비용(economic cost)이 아니라 「서울시 미세먼지 10대 대책」에서 제시한 연평균 정책 비용(financial cost)이기 때문에 엄밀한 의미에서의 비용편익 분석은 아니다. 또한 비용과 편익을 추정할 대상연도가 다르다는 한계도 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 비교는 미세먼지 관리 정책의 편익과 비용의 상대적인 규모를 가늠하는 데 유용하다. 추후 미세먼지 관리 정책의 경제적 비용을 산정하는 연구를 통해 엄밀한 의미에서의 비용편익 분석을 수행할 필요가 있다.



[그림 2] 서울시 미세먼지 관리 정책 연평균 편익

# 목차

01 연구 개요	2
1_연구 배경 및 목적	2
2_연구 내용 및 방법	4
02 기초이론 및 문헌 검토	8
1_미세먼지의 영향	8
2_미세먼지 경제성 분석	11
03 미세먼지 관리 정책에 대한 지불용의액 분석	24
1_분석 방법	24
2_분석 모형	27
3_분석 결과 및 시사점	29
04 미세먼지 관리 정책의 거시경제 영향 분석	38
1_분석 방법	38
2_주요 가정 및 시나리오	46
3_분석 결과 및 시사점	51
05 미세먼지의 건강영향 분석	56
1_사망위험도 분석	56
2_건강영향 개선 편익	63

06 결론	66
1_요약 및 결론	66
2_연구의 한계 및 제안	67
참고문헌	69
부록	72
Abstract	100



**표**

[표 2-1] 미세먼지의 사회경제적 영향	10
[표 2-2] 미국 대기오염 관리 정책 비용과 편익	14
[표 2-3] EU 대기오염 영향 가치평가 원단위	15
[표 2-4] 미국 대기오염 1톤의 사회적 비용	20
[표 2-5] 유럽 국가 대기오염 1톤의 사회적 비용	20
[표 2-6] 유럽연합 대기오염 1톤의 사회적 비용	21
[표 3-1] 설문조사 개요	24
[표 3-2] 대기관리 정책 시나리오	26
[표 3-3] 응답분포	29
[표 3-4] 지불의사에 관한 다항 로짓모형 결과(지불거부 확률)	30
[표 3-5] 지불용의액 분석모형(Kriström 스파이크 모형) 통계치	30
[표 3-6] 대안모형 결과	32
[표 3-7] 서울시 미세먼지 10대 대책 연차별 투자예산	33
[표 4-1] CGE 모형을 위한 경제부문 분류	41
[표 4-2] 지역 구분 거시 사회회계행렬 기본 거래표	42
[표 4-3] 대체탄력성(노동-자본, 내수-수출, 수입-내수)	44
[표 4-4] 배분계수 파라미터 추정 결과	45
[표 4-5] 의료비	47
[표 4-6] 간병비	47
[표 4-7] 교통비	47

[표 4-8] 손실비용 추정액	47
[표 4-9] 작물 수확 손실을 산정 방법과 파라미터	49
[표 4-10] 2017년 서울시 PM10, PM2.5, 오존 농도 측정치 통계 현황	50
[표 4-11] 모형 적용 시나리오	51
[표 4-12] PM10 정책 강도 시나리오별 변동량 추정 결과	52
[표 4-13] PM2.5 정책 강도 시나리오별 변동량 추정 결과	52
[표 4-14] 오존 정책 강도 시나리오별 변동량 추정 결과	52
[표 4-15] PM2.5 정책 강도 시나리오별 장기 효과 추정 결과 1	52
[표 4-16] PM2.5 정책 강도 시나리오별 장기 효과 추정 결과 2	53
[표 5-1] 국민건강보험공단 표본코호트 2.0 DB 주요 항목	57
[표 5-2] 서울시 사망원인별 사망자 수(2015년)	59
[표 5-3] 사망위험도 추정 결과(허혈성심장질환)	60
[표 5-4] 사망위험도 추정 결과(고령자 전체)	61
[표 5-5] 사망위험도 추정 결과(고령자 허혈성심장질환)	61
[표 5-6] 사망위험도 추정 결과(고령자 뇌혈관질환)	62

# 그림

[그림 1-1] 주요 연구 내용 및 방법	5
[그림 2-1] 대기오염과 가시거리	9
[그림 2-2] 미세먼지의 사회경제적 피해비용 산출과정	12
[그림 2-3] 예테보리 의정서 연평균 비용 및 편익	16
[그림 2-4] 대기오염 영향 요소별 비중	17
[그림 2-5] 영국의 미세먼지 한계감축비용곡선	18
[그림 2-6] 네덜란드 대기오염 한계감축비용곡선	19
[그림 3-1] 이중 양분선택형 방식 설계	26
[그림 3-2] 미세먼지 영향 중 1순위	35
[그림 3-3] 가시거리의 중요도 분포	35
[그림 5-1] 서울시 PM2.5 조기사망 전망	64
[그림 6-1] 서울시 미세먼지 관리 정책 연평균 편익	67

# 01

---

## 연구 개요

1\_연구 배경 및 목적

2\_연구 내용 및 방법

# 01 | 연구 개요

## 1\_연구배경 및 목적

대기오염은 전 세계 사망 및 질병 원인 중 가장 큰 환경보건 관련 위험 요소이다(WHO, 2015). 구체적으로 미세먼지는 허혈성심장질환(협심증, 심근경색), 뇌출혈, 만성폐쇄성폐질환, 천식, 암 등을 유발하며, 고혈압, 흡연, 고혈당, 콜레스테롤 다음으로 높은 사망원인이다. 또한 5세 이하 영유아에게 발생하는 급성 하기도 감염(기관지염, 폐렴 등)의 사망 원인 중 절반 정도는 대기오염이다(Cohen et al., 2017).

대기오염물질 중에서는 입자 직경이  $2.5\mu\text{m}$  이하인 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 건강영향이 가장 높다.<sup>1)</sup> 2015년에는 전 세계적으로 약 420만 명이 초미세먼지로 인해 사망했으며, 초미세먼지가 전체 사망원인에서 차지하는 비중은 7.6%였다. 또한 초미세먼지 노출로 인한 장애보정수명(disability-adjusted life-years) 손실은 2015년에 전 세계적으로 약 1억 년이었으며, 초미세먼지로 인한 손실이 전체 수명손실 원인에서 차지하는 비중은 4.2%였다(Cohen et al., 2017). 참고로 2015년에 전 세계적으로 오존(O<sub>3</sub>)으로 인한 사망은 25만 명, 장애보정수명 손실은 400만 년임을 고려하면(Cohen et al., 2017), 초미세먼지의 건강영향이 대기오염 물질 중에서도 대단히 높음을 알 수 있다.

이처럼 초미세먼지의 건강영향이 높은 주요 원인은 발암물질을 포함해 다양한 대기오염물질들이 초미세먼지를 구성하고 있으며(성상), 입자 크기가 작아 폐포(alveolar region)까지 침투할 수 있고(크기), 혈액에 용해되어 순환해 다양한 인체 조직에 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

서울시는 2000년대 중반 이후 미세먼지 문제 해결을 위해 다양한 노력을 기울여왔다(황인창, 2018). 그러나 2012년 이후 최근에는 미세먼지 농도가 정체하고 고농도 미세먼지 발

---

1) 미세먼지는 입자 직경에 따라 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)와 미세먼지(PM<sub>10</sub>)로 구분할 수 있다. 이 연구는 건강영향이 상대적으로 더 높은 초미세먼지에 대한 분석을 중심으로 한다. 다만 문맥상 혼동이 없으면, 초미세먼지와 미세먼지를 별도로 구분하여 명시하지는 않는다.

생일수가 증가하면서 미세먼지의 건강영향에 대한 시민들의 불안이 더욱 커지고 있다.

미세먼지 관리는 대규모 예산이 투입되는 공공 정책이다. 구체적으로 서울시는 「수도권 대기환경관리 기본계획 추진을 위한 서울특별시 시행계획」(서울시, 2015)에 따라 2019년 까지 5개년간 대기환경관리(모든 대기오염물질 포함)를 위해 총 1.5조 원을 투자하고, 「미세먼지 10대 대책」(서울시, 2017)을 위해 2020년까지 4개년간 총 6,417억 원을 투자할 계획이다. 이처럼 대규모 예산이 소요되는 공공 정책은 사회경제적 편익 산정을 통해 타당성을 확보할 필요가 있다.

미세먼지에 대한 경제성 분석은 또한 주변 국가나 지자체와의 공동 협력을 위해서도 필요하다. 공동 협력을 촉진할 수 있는 방안 중 하나는 미세먼지로 인한 피해를 정량화하고, 미세먼지 감축 비용을 관련 당사자들 사이에 배분하는 것이다. 관련하여 경제협력개발기구(OECD), 유럽연합(EU), 미국 등에서는 초미세먼지 경제성 분석 결과를 활용하여 미세먼지 대내외 협력 방안을 마련하고 있다(OECD, 2016; Amann et al., 2011; EPA, 2011). 경제성 분석 결과를 바탕으로 의무감축에 합의한 대표적인 사례로는 유럽연합의 예테보리 의정서(Göthenburg Protocol)가 있다. 그런데 국내에서는 미세먼지의 건강영향에 관해서 일부 연구가 수행되어 왔지만(김운수 외, 2013; 안소은 외, 2016, Han et al., 2018), 경제성을 평가한 연구는 부족한 편이다. 건강영향, 거시경제적 영향, 심미적 영향 등 미세먼지의 영향을 종합적으로 살펴본 연구 또한 부족하다.

이에 이 연구에서는 서울시를 대상으로 초미세먼지 관리 정책의 사회경제적 편익을 종합적으로 살펴보고자 한다. 서울시는 2002년부터 일부 자치구를 시작으로 초미세먼지 농도를 측정해오고 있기 때문에 초미세먼지의 사회경제적 영향을 살펴보는 데 유용하게 활용할 수 있다. 참고로, 전국에서 초미세먼지 농도를 관측하기 시작한 것은 2015년이기 때문에, 초미세먼지의 영향을 전국 단위로 연구하기에는 아직 자료가 부족한 상황이다.

## 2\_연구내용 및 방법

미세먼지의 사회경제적 편익을 살펴보는 방법에는 크게 2가지 접근법이 있다. 첫째는 미세먼지 관리 정책에 대한 시민들의 지불용의액(willingness to pay)을 분석하는 방법이다. 지불용의액은 대기 오염 등 특정 문제를 해결하기 위해 시민들이 자발적으로 지불할 의사가 있는 최대 금액으로 정의된다. 시장에서 거래되는 재화나 용역은 일반적으로 지불용의액이 상품의 가격과 동일하기 때문에 시민들의 지불용의액을 별도로 분석할 필요가 없다. 그러나 깨끗한 공기, 생명의 가치 등 시장에서 거래되지 않는 재화나 용역은 가격 정보가 없기 때문에 시민들의 지불용의액을 별도로 분석하고 이를 통해 해당 상품의 편익을 추정해야 한다.

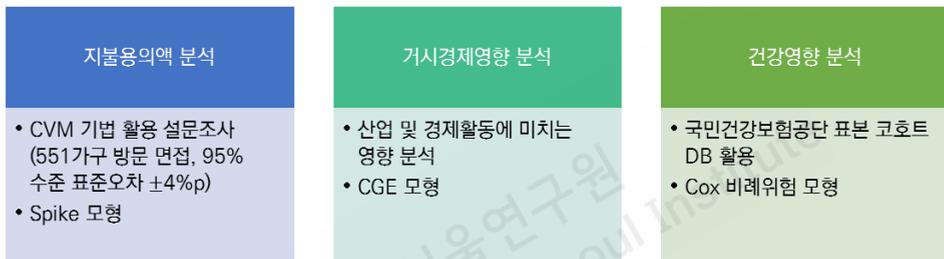
미세먼지의 사회경제적 편익을 산출하는 또 다른 방식은 상향식(bottom-up) 방법으로 다음과 같은 절차를 활용한다. 우선, 미세먼지로 인한 피해비용을 농업, 건강, 서비스업 등 분야별로 산정하고 모든 분야에 걸쳐 이를 합산한다. 다음으로 미세먼지 관리 정책을 시행함으로써 줄어들 것으로 예상되는 피해비용을 분야별로 산출하고 다시 모든 분야에 걸쳐 이를 합산한다. 결과적으로 미세먼지 관리 정책의 사회경제적 편익은 정책을 시행하지 않을 경우 발생하는 피해비용에서 정책을 시행한 후 남은 피해비용을 뺀 값으로 산출한다. 달리 표현하면, 미세먼지 관리 정책의 사회경제적 편익은 정책을 통해 줄어든 미세먼지의 피해비용으로 정의된다. 참고로 미세먼지로 인한 피해비용은 크게 시장비용(market cost)과 비시장비용(non-market cost)으로 구분할 수 있다(OECD, 2016). 시장비용은 시장에서 거래되는 재화나 용역에 대해 미세먼지가 미치는 영향을 의미하며, 비시장비용은 시장에서 거래되지 않는 재화나 용역에 대해 미세먼지가 미치는 영향을 의미한다.

이 연구에서는 [그림 1-1]에서 제시한 바와 같이 서울시 미세먼지 관리 정책의 사회경제적 편익을 크게 3가지 측면에서 살펴보았다. 우선, 미세먼지 관리 정책에 대한 시민 지불용의액은 가구 설문조사 결과를 바탕으로 조건부 가치추정(Contingent Valuation) 기법을 활용해 산출했다.

다음으로 시장비용은 연산가능일반균형(Computable General Equilibrium, CGE) 모형

을 구축해 산정하였다. CGE 모형은 경제 시스템에 특정한 충격이 발생했을 때 시스템이 새로운 균형에 도달하는 과정을 분석할 수 있도록 돕는 모형이다. CGE 모형에서 충격 전후 경제 시스템의 변화를 모니터링하여 충격이 산업 활동 등 거시경제에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 한다.

마지막으로 이 연구에서 비시장비용은 건강영향을 중심으로 분석하였다. 구체적으로 미세 먼지의 건강영향은 국민건강보험공단 표본 코호트 DB를 활용해 분석하였다. 외국 문헌에서 미세먼지의 건강영향은 장기영향이 단기영향에 비해 크게 높은 것으로 보고되고 있는데, 이를 반영해 이 연구에서는 장기영향을 중심으로 건강영향을 분석하였다.



[그림 1-1] 주요 연구 내용 및 방법

기존 연구들과 비교할 때 이 연구는 대기오염물질 가운데서도 초미세먼지에 초점을 맞추어 사회경제적 영향을 분석하고 있다는 점에서 차별화된다. 또한 이 연구는 초미세먼지의 사회경제적 영향에 관해 다양한 내용들을 종합적으로 살펴본다는 점에서도 기존 연구와 차별성이 있다.

# 02

---

## 기초이론 및 문헌 검토

- 1\_ 미세먼지의 영향
- 2\_ 미세먼지 경제성 분석

## 02 | 기초이론 및 문헌 검토

미세먼지의 사회경제적 영향을 부문별로 자세히 살펴보기에 앞서 이번 장에서는 미세먼지 영향 및 경제 분석에 관한 기초이론과 기존 연구를 살펴본다. 이는 3장부터 제시할 분석 방법론과 결과를 이해하는 데 있어 중요한 배경이 될 것이다. 또한 이 연구에서 산출한 결과 값들의 타당성을 기존 연구들의 결과 값에 비추어 간접적으로 가늠해 볼 수 있다.

### 1\_미세먼지의 영향

#### 1) 건강영향

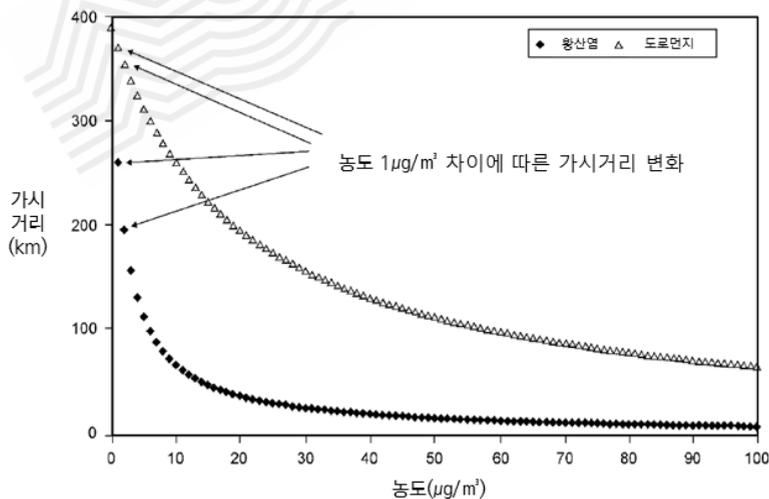
미국 워싱턴대학교(University of Washington) 보건통계평가연구원(Institute for Health Metrics and Evaluation, IHME)에서는 전 세계의 보건 관련 통계를 구축하고 건강영향을 평가하고 있다. 대표적으로 IHME는 전 세계 수백 명의 전문가로 구성된 컨소시엄을 구성해 질병부담(Global Burden of Disease, GBD) 순위를 산정하고 있는데, 대기 중 미세먼지는 GBD 순위에서 고혈압(high systolic blood pressure), 흡연, 고혈당(high fasting plasma glucose), 콜레스테롤(high total cholesterol) 다음으로 5번째로 높은 사망원인이다(Cohen et al., 2017).

초미세먼지(PM2.5)는 입자 직경이  $2.5\mu\text{m}$  이하인 미세먼지로, 토양 및 해염 등 자연성분, 에너지 연소 및 경제활동 과정에서의 직접 배출, 대기 중 오염물질(황산화물, 질소산화물, 암모늄, 유기물질, 중금속 등)의 화학반응을 통해 생성된 2차 배출 등으로 구성된다. 초미세먼지는 대기 중에서 최대 수 주 동안 머무를 수 있으며, 기상조건(풍향, 풍속, 상대습도, 기온 등)에 따라 최대 수천km까지 이동할 수 있다(NOAA, 2002). 입자가 큰 미세먼지(PM10)는 인체 내에서 기관지(tracheobronchial region)까지 침투할 수 있고, 초미세먼지는 더 나아가 폐포(alveolar region)까지 침투할 수 있어 건강영향이 상대적으로 높다. 또한 2차적으로 생성된 초미세먼지는 발암물질을 포함할 수 있어 건강에 미치는 영향이 더 크다.

대기 중 미세먼지 농도와 인체 노출 간의 상관관계는 높은 편이다. 미국의 사례연구에 따르면(NOAA, 2002), 대기 중 미세먼지 농도가 1단위 증가할 때마다 인체에 노출되는 정도는 0.625단위 증가한다. 대기 미세먼지 농도와 실내에서의 미세먼지 노출 간 상관관계는 높지 않은 편인데, 실내에서는 건물 내부의 오염원이 인체 노출 정도에 더 큰 영향을 미친다. 다만, 입자가 작은 PM2.5의 경우에는 대기 미세먼지 농도와 실내 노출 간 상관관계가 PM10에 비해 좀 더 높을 수 있는데, 외기 유입과 환기시스템 등 건물의 특성에 따라 노출의 정도는 달라질 수 있다.

## 2) 가시거리 영향

대기오염물질은 빛을 산란하고 흡수하며, 구름입자를 생성하는 역할을 한다. 특히 입자가 작은 대기오염물질은 이러한 역할을 더 잘 수행하기 때문에 가시거리에 미치는 영향이 더 크다. 단위 미세먼지 농도가 가시거리에 미치는 영향은 미세먼지 농도가 작을 때 더 크다. 특히 다음 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 미세먼지 농도가  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하일 때 가시거리에 미치는 미세먼지의 영향이 큰 폭으로 상승한다. 현재 서울시의 미세먼지 농도 수준(연평균  $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에서는 미세먼지 농도를 개선할수록 가시거리가 개선되는 정도가 큰 폭으로 높아질 수 있다.



주: 황산염은 입자 크기가 작고 초미세먼지(PM2.5)를 이루는 주요 물질임. 도로먼지는 대체로 입자 크기가 큰 미세먼지(PM10)로 구성되어 있음

자료: NOAA(2002)

[그림 2-1] 대기오염과 가시거리

### 3) 사회경제적 영향

미세먼지가 사회경제적으로 미치는 영향은 건강, 농업, 관광, 생태계 등 다음 표에서 나타난 것처럼 다양하다. 건강과 관련하여서는 조기사망과 질병뿐 아니라 최근에는 미세먼지가 출산에도 영향을 미치는 것으로 밝혀지고 있다. 이로 인해 의료비 지출액이 증가하고 노동생산성(결근 등)이 낮아지며, 심리적인 불쾌감이 증가할 수 있다. 일례로 OECD(2016)는 2060년에 대기오염으로 인한 노동생산성 손실이 한국의 GDP를 약 0.3~0.4% 감소시킬 것이라고 전망했다.

[표 2-1] 미세먼지의 사회경제적 영향

분류	영향	시장영향	비시장영향
건강	고농도 미세먼지 및 오존으로 인한 폐암, 호흡기 및 순환기 질환 사망		조기사망
	고농도 미세먼지 및 오존으로 인한 폐암, 호흡기 및 순환기 질환	건강 관련 지출 증가	질환으로 인한 불편함(통증 등)
	임신 및 출산 관련 영향	질병으로 인한 결근 등 노동생산성 손실	
	이산화질소 건강영향		
농업	고농도 오존으로 인한 작물 생산성 피해	작물 수확량 변화	
관광, 레저	가시거리 악화, 문화유산 피해, 건강위험 우려 등으로 인한 관광 및 레저 변화		
생태계, 생물다양성, 산림	대기 및 수질 악화, 생태계 파괴		

자료: OECD(2016)

산업부문 중에서는 농업과 관광, 외식업 등에서 미세먼지의 영향을 크게 받을 수 있다. 미세먼지가 작물에 침투하거나 가축의 생육에 영향을 미쳐 농업 생산량이 감소할 수 있으며, 미세먼지와 그로 인한 가시거리 악화 등으로 인해 야외활동이나 여가활동이 제약을 받게 되어 외식업이나 관광 산업이 영향을 받을 수 있다. 일례로, OECD(2016)는 2060년에 대기오염으로 인해 한국에서는 작물생산량이 17~18% 정도 감소할 수 있을 것으로 전망했다. 또한 호수나 산림 등에 미세먼지가 축적되면서 생태계서비스 기능이 저하될 수 있다.

## 2\_미세먼지 경제성 분석

### 1) 개념

미세먼지 관리 정책의 사회경제적 편익은 다음 식과 같이 미세먼지 관리 정책을 시행함으로써 줄어든 피해비용이라고 정의할 수 있다.

$$SB = SC_{w/o\ policy} - SC_{policy} \quad \text{[식 2-1]}$$

여기서 SB와 SC는 각각 사회경제적 편익과 사회경제적 비용을 의미하며, policy는 정책 시행, w/o policy는 정책 미시행을 의미한다.

사회경제적 편익을 측정하는 방식으로는 개별 시나리오에서 미세먼지로 인한 사회경제적 피해비용을 산출하여 그 차이를 계산하는 방식과 정책에 대한 시민들의 지불의액(willingness to pay)을 산출하는 방식이 있다. 지불의액은 시장에서 거래되지 않는 재화나 용역의 가치를 평가하는 데 있어 중요하게 사용되고 있는 개념으로, 대기관리 정책의 편익 역시 이러한 방법을 활용해 산정할 수 있다(Kolstad, 2011). 이론적으로는 2가지 방식의 산출 결과가 같아야 하지만, 지불의액 조사방식에서 발생하는 편익(bias)과 부문별 피해비용을 산출하는 방식에서 발생하는 오차 등으로 인해 2가지 방식이 산출한 결과가 달라질 수 있다. 아래에서는 각각의 방식을 적용한 연구 사례를 좀 더 자세히 살펴본다.

### 2) 미세먼지의 사회경제적 피해비용

미세먼지의 사회경제적 피해비용은 일반적으로 시장비용(market cost)과 비시장비용(non-market cost)으로 구분할 수 있다(OECD, 2016). 시장비용은 미세먼지가 시장에서 거래되는 재화나 용역에 미치는 영향으로 건강보험 지출, 노동일수의 감소 등으로 인한 노동생산성 감소, 농작물 피해, 도소매업 등 산업생산 감소 등이 있을 수 있다. 비시장비용은 미세먼지가 시장에서 거래되지 않는 재화나 용역에 미치는 영향으로 사망 등 건강 영향, 가시거리 악화 등 심미적 영향, 생태계 교란 등이 있을 수 있다.

경제활동 과정에서 배출되는 미세먼지는 대기 중에서 축적되고 생태계와 인간 사회에 물리적 영향을 미치게 된다. 이러한 물리적 영향을 화폐화하여 다른 경제적 선택과 비교할 수 있도록 돕는 것이 미세먼지에 대한 경제 분석의 주요한 역할이다. 따라서 미세먼지의 사회경제적 피해비용을 산출하기 위해서는 다음 그림에서와 같이 시간과 공간 등 분석 범위를 설정하고, 분석범위 내에서의 미세먼지 배출량, 농도, 물리적 영향 등을 전망한 후 물리적 영향을 화폐화하는 과정을 거쳐야 한다. 미세먼지 배출량, 농도, 물리적 영향은 사회경제적인 요소들과 기상조건, 월경성(transboundary) 유입 등의 영향을 받기 때문에 일반적으로 통합평가모형(integrated assessment model)을 통해 산출한다. 대표적으로, 유럽연합과 OECD 등에서는 국제 응용시스템 분석연구소(IIASA)에서 개발한 GAINS 모형(IIASA, 2009)을 활용하고 있다(Amann et al., 2011; OECD, 2016). 물리적 영향을 화폐화하는 과정에서 비시장비용은 대체로 사회후생(social welfare) 손실을 살펴볼 수 있는 가치평가 기법을 활용한다. 국제기구나 정부 보고서에서는 대부분 직접 생명가치 등을 추정하기보다는 기존 문헌들에서 산출한 값을 활용하는 방식(benefit transfer)을 사용한다. 반면, 시장비용은 대체로 거시경제 영향을 살펴볼 수 있는 연산가능일반균형(CGE) 모형을 활용하여 산출한다.



자료: OECD(2016)

[그림 2-2] 미세먼지의 사회경제적 피해비용 산출과정

### 3) 피해비용 분석사례

#### (1) OECD

미세먼지의 사회경제적 비용을 산출한 예로서, OECD(2016)는 회원국의 대기오염 피해비용을 2060년까지 전망하였다. OECD는 대기오염물질 배출량, 농도, 물리적 영향을 GAINS 모형을 활용해 전망하였다. 시장비용은 OECD가 개발한 CGE 모형인 ENV-

Linkages 모형(Chateau et al., 2014)을 사용해 평가하고, 비시장비용은 가치평가 문헌에서 도출된 결과를 활용하였다. 구체적으로 살펴보면, 통계적 생명가치(Value of statistical life)는 1인당 3백만 달러를 기준으로 개별 국가의 소득수준에 따라 다음의 식을 이용해 환산하여 사용하였다. 여기서 통계적 생명가치는 공공정책의 가치를 평가하기 위해 사용하는 것으로, 윤리적 의미에서의 생명가치와는 다른 개념이다. 한정된 재화를 효율적으로 사용해야 하는 공공정책의 특성상 건강에 영향을 미치는 정책들의 경우 비교 평가가 필요한데, 통계적 생명가치는 이를 위해 고안된 숫자라고 할 수 있다.

$$VSL_r^t = VSL_{OECD}^{2010} \left( \frac{Y_r^r}{Y_{OECD}^t} \right)^\beta \quad \text{[식 2-2]}$$

여기서 VSL은 통계적 생명가치, Y는 일인당 평균소득(또는 일인당 GDP), r은 개별 국가, t는 시간,  $\beta$ 는 통계적 생명가치의 소득탄력성을 의미한다.

산출 결과, 2060년 OECD 회원국의 대기오염으로 인한 시장비용은 평균적으로 소득 대비 0.5%이며, 비시장비용은 소득 대비 5%일 것으로 전망되었다. OECD 보고서에서 한국의 대기오염 피해비용도 산출하였는데, 한국의 2060년 비시장 피해비용은 일인당 5~6백 달러, 시장 피해비용은 GDP 대비 0.5~1.0%일 것으로 전망되었다.

OECD(2014)는 위와 유사한 방식으로 OECD 회원국과 중국, 인도의 도로교통부문 대기오염 건강영향 피해비용을 산출했다. 사망이 아닌 질병으로 인한 피해비용은 조기사망 피해비용의 10%라고 가정했으며, 수송부문으로 인한 피해비용은 전체 피해비용의 50% 정도 기여한다고 가정했다. 분석 결과 건강영향의 대부분은 미세먼지로 인한 것이었으며, 한국의 도로교통부문 대기오염의 사회적 비용은 약 700억 달러인 것으로 추정되었다. 한국의 통계적 생명가치는 1인당 302만 7천 달러로 가정했다.

WHO Europe and OECD(2015) 역시 OECD(2014)와 유사한 방법으로 유럽연합 회원국을 대상으로 대기오염의 경제적 피해비용을 산정했다.

## (2) 미국

미국 환경청은 청정대기법(Clean Air Act) 개정에 따른 대기 관리 정책의 비용과 편익을 산출하였다(EPA, 2011). 청정대기법이 시행되지 않을 때와 청정대기법이 시행될 때의 대기오염물질 배출, 농도, 물리적 영향 등을 각각 전망하고, 그 차이를 계산한 뒤 가치평가 문헌 등을 활용해 청정대기법의 편익을 산출하였다. 또한 편익을 소요되는 비용과 비교하였다. 미국에서는 통계적 생명가치로 2020년 기준 1인당 890만 달러를 사용하였다.

산출 결과 2020년까지 청정대기법을 위해 소요되는 비용은 650억 달러인 데 반해, 대기질 개선에 따른 편익은 2조 달러로 산정되었다. 다음 표에서도 확인할 수 있듯이 대기오염 관리 정책의 편익 대부분은 미세먼지 농도 개선에 따른 조기사망자 수의 감소에서 발생하며, 조기사망 이외 건강영향 개선 편익은 총 편익의 10%, 가시거리 개선 편익은 3.4% 정도를 차지하였다.

[표 2-2] 미국 대기오염 관리 정책 비용과 편익

분류		2020년 연간 편익 (백만 달러)	비고	
건강영향 개선	미세먼지	사망	1,700,000	
		질환	68,000	
	오존	사망	55,000	
		질환	2,100	
	총 건강영향 개선 편익		1,900,000	
가시거리 개선	여가활동		19,000	여가활동 개선 편익은 캘리포니아, 남서부, 남동부 주 등 일부 지역만 고려한 결과임
	주거		48,000	
	총 가시거리 개선 편익		67,000	
농업 및 산림 생산성 개선		11,000		
건축물 손실 등 개선		110		
생태적 영향 개선		8.2	호수산성화 개선으로 인한 낚시 등 여가 활동 편익	
총 편익		2,000,000		

주: 2006년 기준 미국 달러

자료: EPA(2011)

## (3) 유럽연합

Holland(2014)는 유럽연합의 대기오염 정책패키지(EU clean air package) 시나리오에 따라 2030년까지 유럽연합 회원국들의 비용과 편익을 분석하였다. Holland는 총 7개 시나리오를 구성하고 GAINS 모형을 활용해 배출량, 농도, 물리적 영향을 전망하였다. 비시장비용 산정을 위해서는 가치평가 문헌에서 보고된 원단위를 사용하였다. Holland는 통계적 생명가치로 1인당 109~222만 유로를 사용하였다.

[표 2-3] EU 대기오염 영향 가치평가 원단위

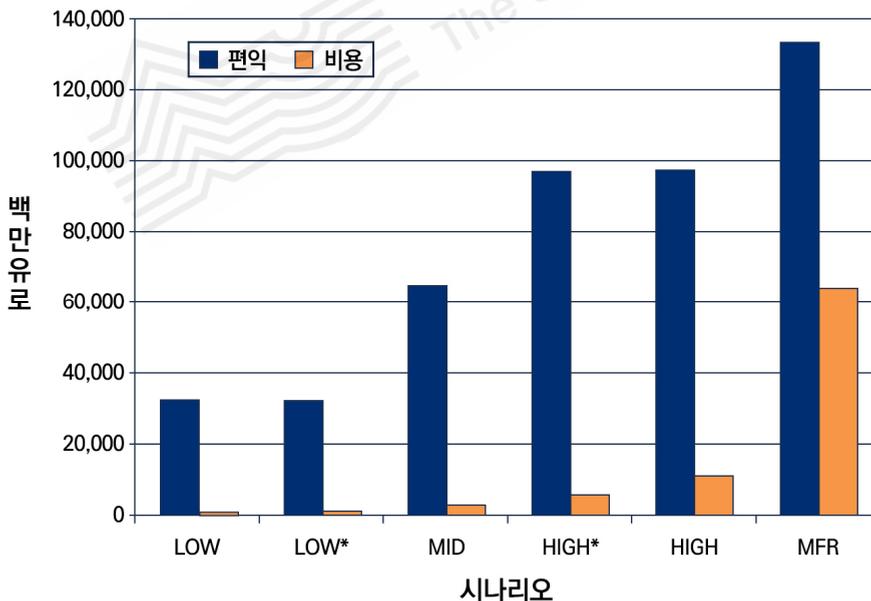
분류		단위비용	단위	
오존	만성질환 사망	수명단축	57.7~133	천 유로/년
		조기사망	1,090~2,220	천 유로/사망
	급성질환 사망		57.7~138.7	천 유로/년
	호흡기 질환 입원		2.22	천 유로/입원
	심혈관계 질환 입원		2.22	천 유로/입원
	활동제약일수		0.042	천 유로/일
초미세 먼지	만성질환 사망	수명단축	57.7~133	천 유로/년
		조기사망	1,090~2,220	천 유로/사망
	급성질환 사망		57.7~138.7	천 유로/년
	유아사망		1,600~3,300	천 유로/사망
	신규 성인 만성 기관지염		53.6	천 유로/건수
	아동 기관지염		0.588	천 유로/건수
	호흡기 질환 입원		2.22	천 유로/입원
	심혈관계 질환 입원		2.22	천 유로/입원
	활동제약일수		0.042	천 유로/일
결근일수		0.13	천 유로/일	
천식		0.042	천 유로/일	
이산화 질소	만성질환 사망	수명단축	57.7~133	천 유로/년
		조기사망	1,090~2,220	천 유로/사망
	급성질환 사망		57.7~138.7	천 유로/년
	아동 기관지염		0.588	천 유로/건수
	호흡기 질환 입원		2.22	천 유로/입원

자료: Holland(2014)

분석 결과, 원단위에 따라 대기오염 정책의 편익은 비용보다 21~41배 정도 높았다. Holland(2014)는 통계적 생명가치와 별개로 건강한 1년의 가치(Value of Life Years) 원단위(1년에 57.7~133천 유로)를 활용하여 대기오염 관리 정책의 편익을 산출하기도 했는데, 이때 편익은 비용보다 11~22배 더 높았다.

AEA(2011)는 예테보리 의정서(Gothenburg Protocol) 개정안에 따른 유럽연합 회원국의 비용과 편익을 산정하였다. 구체적으로 살펴보면, AEA는 7개 시나리오를 구축하고, 미세먼지와 오존의 건강영향을 중심으로 가치평가 기법 문헌을 활용해 피해비용을 분석했다. 기타 영향으로 농작물, 건물, 생태계 피해비용도 고려하였다. AEA의 연구 결과는 예테보리 의정서 개정을 위한 기본 자료로 사용되었다. AEA의 시나리오는 현재 시나리오(CLE)와 최대 기술 시나리오(MFR), 중간 시나리오(목표치 대비 50% 도달 등) 등으로 구성된다.

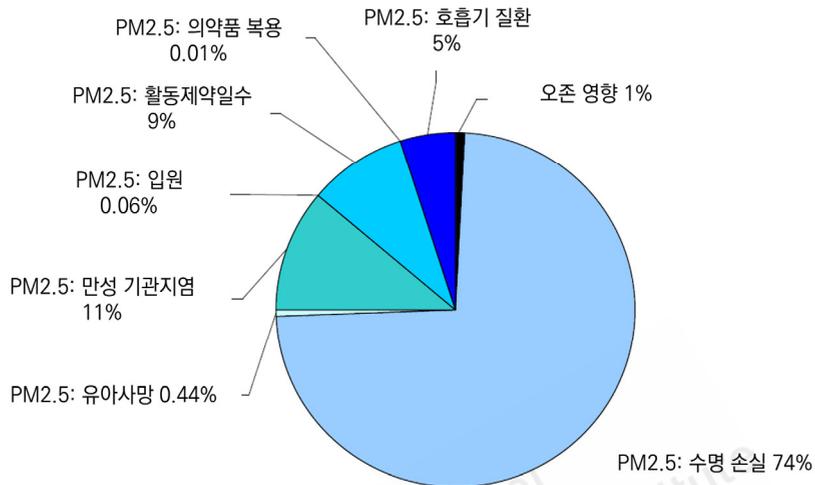
AEA의 분석 결과 모든 시나리오에서 예테보리 의정서의 편익은 비용보다 높았으며, MFR 시나리오로 갈수록 대기오염 정책의 비용이 상승하기 때문에 비용편익 비율은 낮아졌다.



자료: AEA(2011)

[그림 2-3] 예테보리 의정서 연평균 비용 및 편익

AEA(2011)의 연구에서도 대기오염 피해비용의 대부분은 다음 그림에서 나타난 바와 같이 미세먼지로 인한 조기사망이었다.



[그림 2-4] 대기오염 영향 요소별 비중

#### (4) 기타

World Bank and IHME(2016)는 전 세계 질병부담(GBD) DB와 가치평가 문헌에서 보고된 단위비용 등을 활용해 지역별, 국가별로 미세먼지 및 오존의 피해비용을 산출했다. 한국의 2013년 비시장 피해비용은 소득 대비 4.32%, 시장 피해비용은 GDP 대비 0.15%로 산정되었다. World Bank and IHME(2016) 연구의 특징은 대기오염과 실내오염을 구분하여 피해비용을 산정했다는 점이며, 후생손실의 경우 생명비용만 고려했다.

#### 4) 지불용의액 분석사례

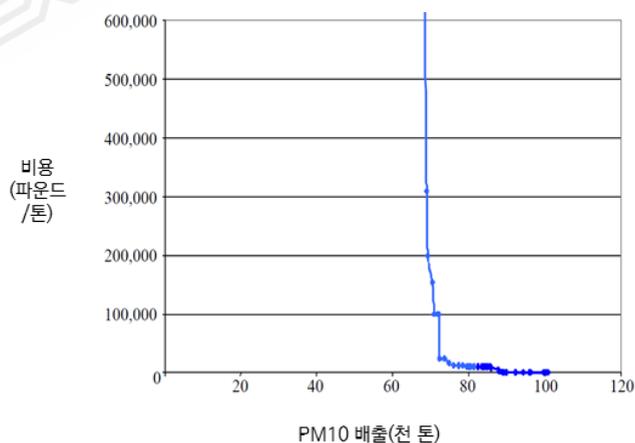
대기오염 개선을 위한 지불용의액 분석은 국내에서도 많이 이루어져 왔으며, 지불용의액은 지역적 특성에 따라 상당히 다른 값을 가질 수 있기 때문에 이 연구에서는 국내 분석 사례를 중심으로 살펴본다. 유승훈 외(2003)는 컨조인트(conjoint) 방식을 이용하여 서울시 대기오염 관리 정책 지불용의액을 가구당 월평균 55,139원으로 추정하였다. 이해춘

외(2004)는 수도권 대기질 개선의 편익을 사망위험, 질병위험, 지구온난화 등 6가지 속성으로 나누고, 이에 대한 지불의사를 추정하였다. 3중 양분선택형 가치추정방식을 이용해 추정된 수도권 가구당 월평균 지불용의액은 16,402원이었다. 조승국 외(2006)는 수도권 대기오염 개선으로 인해 발생하는 건강효과를 시민 지불용의액 분석을 통해 추정하였다. 컨조인트 방식을 이용해 추정한 가구당 연평균 지불용의액은 38,856원이었다. 홍중호·오형내(2006)는 서울시 지하철 실내공기 개선에 대한 시민 지불용의액을 추정하였다. 지불의사 추정을 위해 연립방정식 모형을 활용하였으며, 추정 결과 서울시 가구당 연평균 지불용의액은 5,314원이었다. 권기현·서인(2010)은 서울시 대기환경 개선을 위한 지불용의액을 조건부가치추정 방식으로 추정하였는데, 분석 결과 지불용의액은 월평균 1,392원이었다.

## 5) 한계감축비용 분석

AEA(2001)는 영국의 미세먼지(PM10) 한계 감축비용곡선(marginal abatement cost curve)을 도출하였다. 한계감축비용곡선은 경제적 의미에서 최적(optimal)의 대기오염물질 감축량을 산정하는 데 유용하게 활용할 수 있는 정보이다. 분석에서는 상향식(Bottom-up) 방법으로 기술별 감축비용을 산정한 후 이를 합산하는 방식을 사용한다.

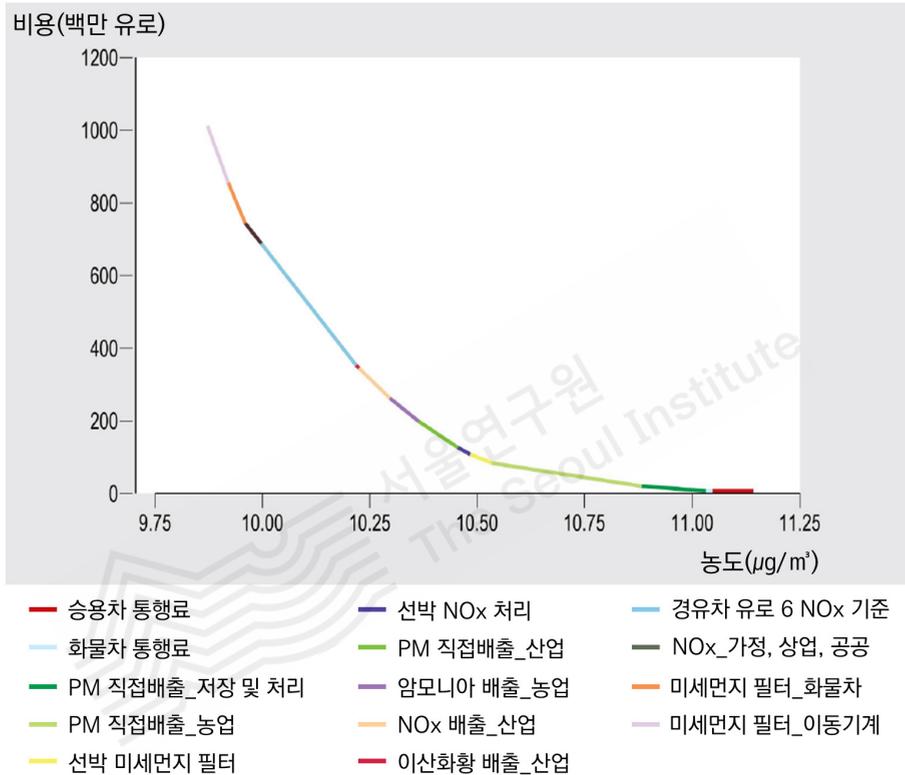
AEA의 분석 결과, 다음 그림과 같이 일정 수준 이상으로 미세먼지를 감축할 경우 감축비용이 지수함수 형태로 큰 폭으로 상승하는 것으로 분석되었다.



자료: AEA(2001)

[그림 2-5] 영국의 미세먼지 한계감축비용곡선

네덜란드(Smeets et al., 2007), 핀란드(Karvosenoia et al., 2007), 이탈리아(Ciucci et al., 2016), 일본 도쿄(Kunugi et al., 2017) 등에서도 대기오염 한계감축비용곡선을 산출하였는데, 다음 그림은 네덜란드의 한계감축비용곡선 사례이다. 네덜란드에서도 한계감축비용은 대기오염 농도 수준을 낮게 할수록 큰 폭으로 상승하는 것을 확인할 수 있다.



자료: Smeets et al.(2007)

[그림 2-6] 네덜란드 대기오염 한계감축비용곡선

## 6) 미세먼지 1톤의 사회적 비용

미국에서 공식적으로 활용하고 있는 대기오염물질 1톤의 사회적 비용(Marginal Social Cost)은 다음 표와 같다. 미세먼지의 사회적 비용이 다른 대기오염물질에 비해 상대적으로 높음을 알 수 있다.

**[표 2-4] 미국 대기오염 1톤의 사회적 비용**

(단위: 달러/톤)

	Heo et al.(2016)	Fann et al.(2009)	Fann et al.(2012)
PM2.5	88,000~130,000	210,000~330,000	93,000~270,000
SO <sub>2</sub>	14,000~24,000	19,000~38,000	20,000~42,000
NO <sub>x</sub>	3,800~14,000	4,500~6,900	1,300~4,800
NH <sub>3</sub>	23,000~66,000	17,000~45,000	

유럽에서는 다음 표와 같이 국가별로 대기오염물질 1톤당 사회적 비용을 다양하게 산정하고 있다. 미국과 마찬가지로 미세먼지의 사회적 비용이 다른 오염물질에 비해 상대적으로 높았다.

**[표 2-5] 유럽 국가 대기오염 1톤의 사회적 비용**

(단위: 유로/톤)

	영국	독일	프랑스	이탈리아	스페인	네덜란드
PM2.5	110,000	140,000	130,000	97,000	54,000	180,000
SO <sub>2</sub>	19,000	32,000	23,000	18,000	12,000	39,000
NO <sub>x</sub>	10,000	26,000	21,000	16,000	7,200	18,000
NH <sub>3</sub>	50,000	51,000	34,000	32,000	13,000	64,000
VOC	3,200	5,100	4,200	3,500	1,100	5,400

자료: Holland et al.(2005)

유럽연합의 연구(EC, 2002)는 「제2차 수도권 대기환경관리 기본계획」 등 국내에서도 많이 활용되고 있는데, 오염물질별 1톤의 사회적 비용은 다음 표와 같다. 인구 규모에 따라 노출인구가 달라지기 때문에 인구가 많은 대도시일수록 단위비용은 높아지는 것을 확인할 수 있다.

**[표 2-6] 유럽연합 대기오염 1톤의 사회적 비용**

(단위: 유로/톤)

	시골	인구 10만	인구 50만	인구 100만	인구 100만 이상
PM2.5	14,000	33,000	33,000×5	33,000×7.5	33,000×15
SO <sub>2</sub>	5,200	6,000	6,000×5	6,000×7.5	6,000×15
NO <sub>x</sub>	4,200				
VOCs	2,100				

자료: EC(2002)

국내에서는 최종일·이영수(2015)가 국내 미세먼지 1톤의 사회적 비용을 2.1억 원으로 산정한 바 있지만, 입원질환 비용만 고려한 것이라는 점에서 한계가 있다.

국내에서는 아직 생명비용을 포함한 미세먼지 1톤의 사회적 비용을 활발히 산정하지 않고 있기 때문에 해외에서 산정한 값을 적용하는 경우가 많다. 이때 해외 국가들과 국내는 대기오염물질 배출량, 인구, 기상조건, 통계적 생명가치 등이 다르기 때문에 해외 연구결과를 국내에 바로 적용하기에는 한계가 있을 수 있음을 명확히 인식해야 한다.

# 03

---

## 미세먼지 관리 정책에 대한 지불용의액 분석

- 1\_분석 방법
- 2\_분석 모형
- 3\_분석 결과 및 시사점

## 03 | 미세먼지 관리 정책에 대한 지불용의액 분석

### 1\_분석 방법

#### 1) 설문조사 개요

서울시 미세먼지 관리 정책의 사회경제적 편익을 산정하기 위해 이 장에서는 가상의 시장을 설정하고 새롭게 생성된 재화에 대한 지불용의액을 질문하는 조건부가치추정(contingent valuation) 기법을 사용하였다. 이 연구에서 사용한 지불용의액 분석절차 및 개요는 다음 표와 같다. 우선 분석모형과 설문지를 작성한 후 전문가 검토를 통해 설문지를 보완하였다. 이후 무작위 비례 할당으로 서울시 51가구를 선정하고, 오픈 형식(범위를 미리 제시하지 않고, 자유롭게 지불용의액을 답하도록 하는 방식)으로 가구당 지불용의액을 묻는 사전조사를 수행하였다. 사전조사 결과를 바탕으로 본 조사에서 사용할 설문문항을 확정하였으며, 설문에서 사용할 초기 제시액도 선정하였다. 본 조사는 무작위 비례 할당으로 선정된 51가구를 대상으로 수행하였다.

**[표 3-1] 설문조사 개요**

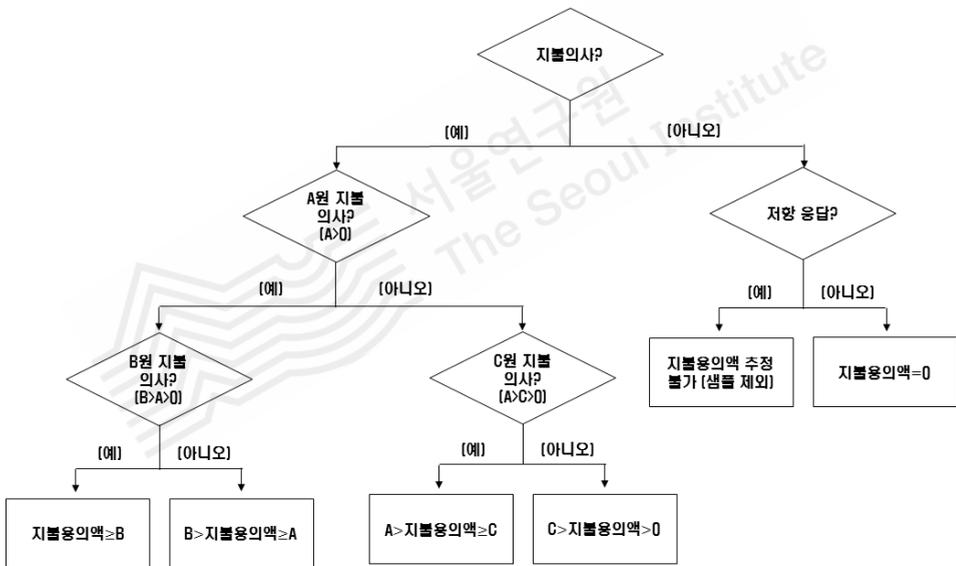
구분	내용
모집단	서울시 가구(면접대상: 만 19세 이상 가구원)
표본 크기	551명(95% 신뢰수준에서 표준오차 4.0%p)
표본 추출	2018년 4월 행정안전부 주민등록인구현황 기준, 권역별, 성별, 연령별 비례 할당
조사 방법	대면면접조사: PI(Personal Interview) 면접원이 응답자를 직접 찾아가 질의 응답한 내용을 설문지에 기록
조사 도구	구조화된 설문지
조사 기간	2018년 6월 15일 ~ 6월 29일
조사 기관	(주)한국리서치

## 2) 질문방식

지불의액 질문방식으로는 Arrow et al.(1993), 한국개발연구원(2012), Carson and Hanemann(2005) 등 지불의액 조사 가이드라인에 따라 이중 양분선택형(dichotomous choice) 방식을 사용하였다. 양분선택형 질문 방식에는 물음의 횟수에 따라 단일, 이중, 삼중 양분선택형 등이 존재한다(이해춘 외, 2004). 단일 양분선택형의 경우 제시금액에 대한 단 한 번의 응답을 통해 응답자의 지불의사를 추정하는 방식이다. 이는 시장에서 소비자들이 실제로 재화를 구매할 시 맞닥뜨리는 선택상황과 유사하다는 장점이 있다. 그러나 통계적으로 유의한 추정치를 얻기 위해 복잡한 계량모형이 활용되어야 하며, 큰 표본을 요한다는 단점이 있다(한국개발연구원, 2012). 또한 삼중 이상의 양분선택형 질문 방식은 복수의 질문으로 인해 초기 제시금액에 따라 지불의액이 영향을 받는 참조 효과(reference effect)가 있을 수 있다는 문제가 있다(권기현·서인, 2010). 한편 이중 양분선택형의 경우 두 번의 양분형 질문을 통해 지불의액에 대한 보다 많은 정보를 얻을 수 있어 단일 양분선택형에 비해 통계적으로 효율적인 방법으로 알려져 있다. 여기서는 추정치의 통계적 효율성을 개선하고 추가적 질문에 따른 참조효과를 방지하고자 이중 양분선택형 질문을 통해 지불의액을 추정하였다.

이중 양분선택형 설계 방식은 다음 그림과 같다. 먼저 응답자에게 2가지 대기관리 정책 시나리오를 제시하였다. 첫 번째는 현재의 상황이 유지되는 시나리오(BAU 시나리오)이고, 두 번째는 적극적인 대기관리 정책으로 미세먼지 나쁨/보통/좋은 일수가 다음 표에 제시한 바와 같이 개선되는 시나리오(정책 시나리오)이다. 정책 시나리오는 서울시 연평균 초미세먼지 농도가 2025년에  $15\mu\text{g}/\text{m}^3$  정도 도달할 때의 농도 분포를 가정한 것이다. 이후 해당 시나리오에 대해 소액이라도 지방세를 지불할 의사가 있는지를 물었다. 소액이라도 지불할 의사가 있다고 응답한 경우, 다음 문항에서 일정 금액을 제시하고 해당 금액에 대해 향후 5년간 매년 지방세 형태로 지불할 의사가 있는지를 물었다. 초기 제시액은 사전조사 결과에 따라 가구당 최저 연 5만 원에서 최대 연 25만 원까지 5만 원 단위로 5단계로 나누었다. 5단계의 금액 중 개별 응답자가 제시받는 금액은 임의로 선정하였다. 초기 제시액에 대한 지불의사가 있다고 응답한 경우에는 초기 제시액보다 더 큰 액수(2배 금액)를 다시 한 번 제시하였고, 초기 제시액에 대해 지불의사가 없다고 응답한 경우에는

초기 제시액보다 낮은 액수(1/2배 금액)를 다시 한 번 제시하였다. 애초에 소액이라도 지불할 의향이 없다고 응답한 가구에 대해서는 해당 답변이 저항응답인지를 판별하기 위해 추가적인 질문을 제시하였다. 구체적으로 문헌에서 사용하는 방식을 따라 지불거부 이유 문항에서 ‘이미 충분한 세금을 내고 있음’ 혹은 ‘정보부족’을 선택한 응답자는 저항응답자로 판단했으며, ‘지불 능력 없음’ 혹은 ‘관심 없음’을 선택한 응답자는 지불용의액 0원인 응답자로 판단했다(한국개발연구원, 2012). 응답내용에 따라 저항응답이 아닌 경우에는 해당 가구의 지불용의액은 0원이라고 판단하였으며, 저항응답인 경우에는 기본모형에서는 분석 샘플에서 제외하였다. 관련하여 저항응답의 지불용의액도 0원이라고 가정하고 분석한 결과 역시 3절에서 제시하였다. 구체적인 설문 문항은 부록 1절에서 참고할 수 있다.



[그림 3-1] 이중 양분선택형 방식 설계

[표 3-2] 대기관리 정책 시나리오

미세먼지(PM2.5) 농도 등급	좋음(0~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	보통(16~35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	나쁨(36~75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
A. 현재	1년 중 57일(16%)	1년 중 237일(65%)	1년 중 71일(19%)
B. 개선사업 시행 시	1년 중 183일(50%)	1년 중 164일(45%)	1년 중 18일(5%)

## 2\_분석 모형

### 1) 기본모형

일반적으로 지불용의액 분석에서는 로지스틱(logistic) 모형이나 프로빗(probit) 모형을 사용한다. 그러나 미세먼지 관리와 같이 공공의 선(public good)을 제공하는 정책에 대해서는 음수의 지불용의액이 적절하지 않기 때문에 일반적인 모형을 사용하면 지불용의액이 과소 추정될 가능성이 있다(한국개발연구원, 2012). 이에 이 연구에서는 지불용의액 분석을 위해 Krström(1997)의 스파이크(spike) 모형을 기본모형으로 사용하였다. 스파이크 모형은 0원 이하의 지불용의액을 반영하기에 적절한 모형으로, 안소은 외(2016)의 연구 등에서도 활용된 바 있다.

Krström 스파이크 모형에서는 지불용의액 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$F_{wtp}(A) = \begin{cases} 0 & \text{if } A < 0 \\ p & \text{if } A = 0 \\ G_{wtp}(A) & \text{if } A > 0 \end{cases} \quad \text{[식 3-1]}$$

여기서  $F_{wtp}$ 는 지불용의액 함수,  $G_{wtp}$ 는 누적밀도 함수(cumulative density function),  $A$ 는 지불용의액,  $p$ 는 지불용의액이 0원인 응답자 비율( $0 \leq p \leq 1$ )을 의미한다.  $G_{wtp}(0) = p$ ,  $\lim_{A \rightarrow \infty} G_{wtp}(A) = 1$ 이다.

누적밀도 함수는 로지스틱 함수를 적용하면 다음과 같이 정의된다.

$$G_{wtp}(A) = 1 / \{1 + \exp(\alpha - \beta A)\} \quad \text{[식 3-2]}$$

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 모수(parameter)로서 로그-우도(log-likelihood) 함수를 최대화하는 값으로 추정된다.

Krström 스파이크 모형에서 로그-우도함수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\ln(L_i) = S_i Y_i \ln\{1 - F_{wtp}(A)\} + S_i (1 - Y_i) \ln\{F_{wtp}(A) - F_{wtp}(0)\} + (1 - S_i) \ln\{F_{wtp}(0)\} \quad \text{[식 3-3]}$$

여기서  $S$ 는 지불의사가 조금이라도 있는 경우 1의 값을 갖고, 지불의사가 없는 경우 0의 값을 갖는 변수이다.  $Y$ 는 제시금액을 지불할 용의가 있는 경우 1의 값을 갖고, 제시금액을 지불할 용의가 없는 경우 0의 값을 갖는 변수이다.  $i$ 는 개별 응답가구를 의미한다.

## 2) 대안모형

이 연구에서는 비교를 위해 로짓 모형, 프로빗 모형, 비모수(non-parametric) 모형 등 다양한 모형들에 대한 결과 값도 함께 제시하였다.

우선, 프로빗 모형은 다음과 같이 추정한다.

$$\Pr(Y_i = 1|A_i) = \Phi(\alpha + \beta A_i) \quad \text{[식 3-4]}$$

여기서  $Y$ 는 제시금액  $A$ 를 지불할 용의가 있는 경우 1의 값을 갖고, 제시금액을 지불할 용의가 없는 경우 0의 값을 갖는 변수를 의미한다.  $\Phi$ 는 표준정규분포의 누적밀도함수,  $i$ 는 개별 응답가구,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 모수로서 로그-우도(log-likelihood) 함수를 최대화하는 값으로 추정된다.

로짓 모형은 위 식에서 표준정규분포 누적함수 대신 로지스틱 함수를 사용한다. Haab and McConnell(2002)은 저항응답자뿐 아니라 지불거부자도 분석 샘플에서 제외하고 추정하는 방식을 제안했는데, 이 연구에서는 로짓 모형에 Haab and McConnell의 방식을 적용한 결과도 산출했다. 또한 이 연구에서는 저항응답자도 분석 샘플에 포함한 채 기본모형인 Krström(1997) 모형을 적용한 결과도 제시하였다. 비모수 모형은 사전에 지불용의액 함수 분포에 대한 가정을 하지 않고, 조사된 자료가 나타내는 누적분포 함수를 도출해 지불용의액을 추정하는 방식이다. 이 연구에서는 조사된 자료를 통해 누적분포

합수를 추정하되, 설문조사의 결과가 이산적인 점을 감안해 하한값과 상한값을 별도로 산정하였다. 개별모형에 대한 보다 자세한 설명은 Carson and Hanemann(2005), 한국 개발연구원(2012) 등을 참고할 수 있다.

### 3\_분석 결과 및 시사점

#### 1) 지불의사 분포 및 특징

설문조사 결과 저항응답자는 29.6%를 차지했으며, 지불의액이 0원인 응답자는 5.1%, 지불의액이 0원보다 큰 응답자는 65.3%였다. 지불의사가 있는 응답자들의 초기 제시액별 응답분포는 다음 표와 같다.

**[표 3-3] 응답분포**

초기 제시액	예-예	예-아니오	아니오-예	아니오-아니오	합계
5만 원	10	30	14	17	71
10만 원	9	33	12	22	76
15만 원	12	19	13	22	66
20만 원	4	21	20	31	76
25만 원	7	15	8	41	71
합계	42	118	67	133	360

주: 처음 제시액에서 '예'라고 응답한 경우 두 번째에서는 2배의 금액을 제시. 처음 제시액에서 '아니오'라고 응답한 경우 두 번째에서는 1/2배의 금액을 제시

소득, 성별, 환경인식 등 응답자의 특성에 따른 지불거부 여부는 다음 표에 나타난 바와 같다. 대체로 남성, 저소득, 고연령의 응답자일수록 지불거부 확률이 높았으며, 미세먼지 대응을 위해 마스크를 구매할 의사가 없거나 미세먼지 감축노력 필요성에 대해 동의하지 않는 경우 지불거부 확률이 높았다.

**[표 3-4] 지불의사에 관한 다항 로짓모형 결과(지불거부 확률)**

속성	상대위험비(rrr)*	표준오차	p-value
응답자 성별(여성=0, 남성=1)	1.52	0.29	0.028
응답자 나이**	1.09	0.08	0.233
가구소득***	0.89	0.05	0.022
마스크 구매의사(없음=0, 있음=1)	0.76	0.15	0.156
감축노력 필요성(불필요=0, 필요=1)	0.61	0.09	0.001
가구원_아동(없음=0, 있음=1)	0.91	0.23	0.708
가구원_노인(없음=0, 있음=1)	1.12	0.27	0.627
가구원_호흡기질환(없음=0, 있음=1)	1.46	0.65	0.394
가구원_심혈관질환(없음=0, 있음=1)	0.67	0.35	0.441
상수	5.41	4.21	0.030

주: N=551, Log likelihood(LR)=-337.23, LR chi-square(9)=36.70, p-value<0.001, Pseudo R-square=0.0516

\* 상대 위험비(relative risk ratio)는 속성별로 반대인 경우와 비교할 때(혹은 속성이 한 단위 증가할 때 상대적인 지불거부 확률을 의미함)

\*\* 응답자 나이는, 20대 1, 30대 2, 40대 3, 50대 4, 60대 이상 5

\*\*\* 가구소득은, 200만 원 이하 1, 200~300만 원 2, 300~400만 원 3, 400~500만 원 4, 500~600만 원 5, 600만 원 이상 6

## 2) 지불용의액

기본모형 추정 결과는 다음 표와 같다. 누적밀도 함수로는 로지스틱 함수를 사용하였다. 저항응답자를 제외하고 추정한 결과이기 때문에 분석 샘플 수는 388명이다. 계수 값들을 통해 추정한 서울시 미세먼지 관리 정책 지불용의액은 가구당 연평균 138,107원이며, 95% 신뢰구간은 125,376원~150,839원이다. 서울시 총 가구수(2016년 통계청 인구총조사, 3,915,023가구)를 감안하면, 서울시민의 미세먼지 관리 정책 지불용의액은 매년 5,407억 원이고, 95% 신뢰구간은 4,908억 원~5,905억 원이다.

**[표 3-5] 지불용의액 분석모형(Krström 스파이크 모형) 통계치**

	계수 값	표준오차	p-value	95% 신뢰구간	
$\beta$	0.0000156	9.42e-7	<0.001	0.0000137	0.0000174
상수( $\alpha$ )	2.026832	0.1439092	<0.001	1.744775	2.308889

주: N=388, Log likelihood(LR)=-374.88, Wald chi-square(1)=273.20, p-value<0.001

### 3) 대안 모형 결과

대안 모형 산출 결과는 다음 표와 같다. 개별 모형에 대한 통계 검증 결과는 부록 2절을 참고할 수 있다.

프로빗 모형과 로짓 모형에서는 정의상 지불용의액이 0원보다 작은 경우가 포함되기 때문에, 이들 모형을 통해 추정된 지불용의액은 기본모형에서 추정된 값보다 낮게 추정되었다. 95% 신뢰구간도 상대적으로 넓었다.

지불용의액이 0원보다 작은 경우를 제외하고 분석하는 방식의 하나로 절단된(truncated) 로짓 모형을 사용할 수 있는데, 그 결과 지불용의액은 기본 로짓 모형 결과보다 2배 이상 높아졌다.

지불용의액이 0원보다 작은 경우를 제외하는 또 다른 방식으로 Haab and McConnell (2002)이 제안한 방식을 적용하면, 가구당 연평균 지불용의액은 11만 원 정도로 기본모형보다 다소 낮게 산출되었다.

기본모형에서처럼 Kriström(1997)의 스파이크 모형을 적용하되 저항응답자도 포함하여 분석할 경우(저항응답자의 지불용의액은 0원으로 가정) 지불용의액은 10만 원 정도로 산출된다.

마지막으로, 비모수 모형에서는 지불용의액 분포를 미리 가정하지 않고 오직 설문조사 응답 결과에만 근거해 지불용의액 누적함수를 도출하여 사용했다. 다만 지불용의액 설문조사에서 응답자에게 제시하는 값이 연속적이지 않기 때문에 부록 그림에서 제시한 바와 같이 누적분포는 상한 기준과 하한 기준으로 구분하여 도출했다. 하한 기준은 낮은 쪽을 기준으로 누적분포함수를 추정하는 방식이며, 상한 기준은 높은 쪽을 기준으로 누적분포함수를 추정하는 방식이다. 분석 결과, 하한 기준으로 서울시 가구당 연평균 지불용의액은 10만 원이고, 상한 기준으로 서울시 가구당 연평균 지불용의액은 28만 원이었다. Carson(2002)을 비롯하여 많은 연구에서는 보수적인 값인 하한 기준을 적용하고 있다.

**[표 3-6] 대안모형 결과**

모형		가구당 연간 지불용의액	95% 신뢰구간 (하한, 상한)	비고
프로빗 모형		82,737원	(32,652원, 132,822원)	저항응답자 제외
로짓 모형		82,818원	(33,046원, 132,591원)	저항응답자 제외
절단된 로짓 모형		172,006원	(122,174원, 221,839원)	저항응답자 제외, 지불용의액 분포에서 0 이하 제외
Haab and McConnell(2002) 스파이크 모형		111,841원	(72,988원, 150,694원)	저항응답자 및 지불거부자 제외
Kriström 스파이크 모형(저항응답 포함)		102,036원	(89,262원, 114,810원)	저항응답자 포함
비모수 모형 (tumbull 방식)	하한 기준	100,087원	-	저항응답자 제외
	상한 기준	280,172원		저항응답자 제외

주: 모든 모형에서 통계적 유의성 확보(부록 2절 참고), 비모수 모형의 경우 표준편차는 7,269원임.

#### 4) 시사점

이 장에서는 조건부 가치추정 기법을 활용해 서울시 미세먼지 관리 정책에 대한 시민들의 지불용의액을 추정하였다. 추정 결과 서울시민의 가구당 지불용의액은 매년 138,107원이고, 95% 신뢰구간은 125,376원~150,839원이었다. 대안 모형들로 추정한 결과 서울시민의 미세먼지 관리 정책 지불용의액은 적게는 가구당 연평균 8.2만 원에서 많게는 28만 원으로 추정되었다. 한국개발연구원 등 문헌(예비타당성 조사 방법론)에서 추천하는 방식인 기본모형(스파이크 모형)의 결과를 토대로 서울시 미세먼지 관리 정책의 편익을 추정하면 연간 5,407억 원이며, 95% 신뢰구간은 4,908억 원~5,905억 원이다.

서울시에서 현재 미세먼지 관리를 위해 투자하고 있는 비용은 연평균 1,604억 원 정도이다. 미세먼지 정책 비용은 「서울시 미세먼지 10대 대책」(서울시, 2017)에서 제시된 연차별 투자예산을 참고하였다. 그런데 「서울시 미세먼지 10대 대책」에서는 뚜렷한 농도 목표가 제시되어 있지 않다. 기존에 서울시에서 발표한 농도 목표(2018년 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2030년 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 감안할 때, 미세먼지 10대 대책의 (암묵적) 목표 농도는 지불용의액 분석에서 가정한

15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다는 높다고 할 수 있다. 참고로, 2015년에 발표된 「제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 수립을 위한 서울시 시행계획」(서울시, 2015)에서 서울시의 대기관리 투자비용은 연평균 약 3천억 원이었다. 그런데 이 계획에는 미세먼지뿐 아니라 다른 대기오염물질에 대한 관리비용도 포함되어 있기 때문에 직접적인 비교는 어렵다.

**[표 3-7] 서울시 미세먼지 10대 대책 연차별 투자예산**

(단위: 백만 원)

구 분	사업내용	계	2017년	2018년	2019년	2020년	
합 계		641,789	104,867	250,642	214,524	71,756	
건강취약 계층 미세먼지 대응	건강취약계층별 맞춤형 행동 매뉴얼 제작	220	40	60	60	60	
	건강취약계층 안전구호물품	22,003	2,221	6,594	6,594	6,594	
	마스크	소 계	13,133	2,213	3,640	3,640	3,640
		유 치 원	197	197			0
		초등학교	924	924			0
		어린이집	6,237	567	1,890	1,890	1,890
		노인복지시설	4,620	420	1,400	1,400	1,400
		장애인복지시설	1,155	105	350	350	350
	공기 청정기	소 계	8,870	8	2,954	2,954	2,954
		어린이집	7,800	-	2,600	2,600	2,600
아동복지시설		1,070	8	354	354	354	
서울형 대기오염 예경보제	미세먼지 예경보제 운영	650	50	150	200	250	
	미세먼지 원인규명을 위한 연구 기능 강화	1,500	0	500	500	500	
교통	시민참여형 차량 2부제에 따른 대중교통요금 지원	85,440	10,680	24,920	24,920	24,920	
	시민참여형 차량 2부제에 따른 기업참여 촉진	80	20	20	20	20	
	자동차 환경등급제/ 표시제 도입	2,940	0	98	980	1,862	
	한양도성 내 친환경 하위등급 자동차 운행제한	30,200	200	30,000	0	0	
	노후경유차 저공해사업 확대	361,500	64,400	153,400	143,700	0	
	노후건설기계 저공해화	93,000	21,000	24,000	24,000	24,000	
난방발전	친환경보일러 확대 보급	3,560	560	1,000	1,000	1,000	
	저녹스버너 확대 보급	23,696	3,696	4,900	7,550	7,550	
4차산업 R&D	대기질 개선 유망기업 R&D	17,000	2,000	5,000	5,000	5,000	

단순 비교를 해보면 미세먼지 관리를 위해 현재 서울시가 투자하고 있는 비용보다는 미세먼지 개선을 통해 얻을 수 있는 시민들의 편익이 약 3.4배 높다. 다만, 설문조사에서는 미세먼지 관리 정책을 통해 PM2.5 농도가 5년 후  $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 달성하는 것을 가정하고 농도별 일수를 제시한 것인 데 반해, 서울시가 현재 투자하는 비용으로 설문조사 시나리오에서 제시한 효과를 달성할 수 있을지는 미지수라는 점에서 직접적인 비용편익분석이 가능하지는 않다. 또한 여기서 비용은 재정적 비용(financial cost, 정부부처의 비용)으로 일반적인 비용편익분석에서 살펴보는 경제적 비용(economic cost, 사회 전반의 비용)이 아니다.

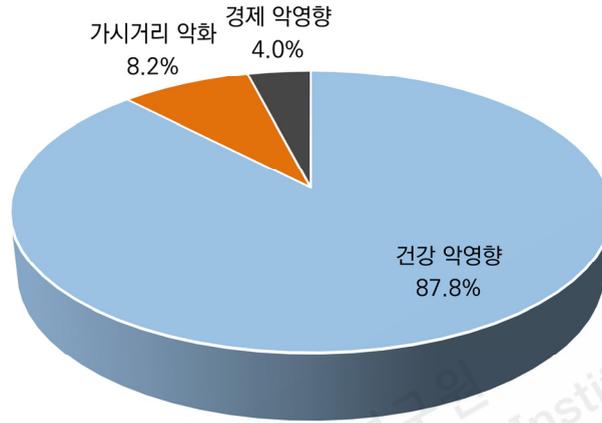
이 장의 결과는 미세먼지 건강영향 평가, 거시경제영향 평가 등과 함께 서울시가 미세먼지 관리 정책을 수립하고 시행해나가는 데 있어 중요한 기초자료로 활용될 수 있다. 미세먼지 관리 정책을 보다 효율적으로 추진하기 위해서는 이밖에도 미세먼지로 인한 조기사망의 통계적 생명가치, 미세먼지 1톤의 사회적 비용, 미세먼지 관리 정책의 경제적 비용, 미세먼지 한계감축비용 등에 관한 경제성 분석이 추가적으로 시행되어야 할 것이다.

## 5) 심미적 영향

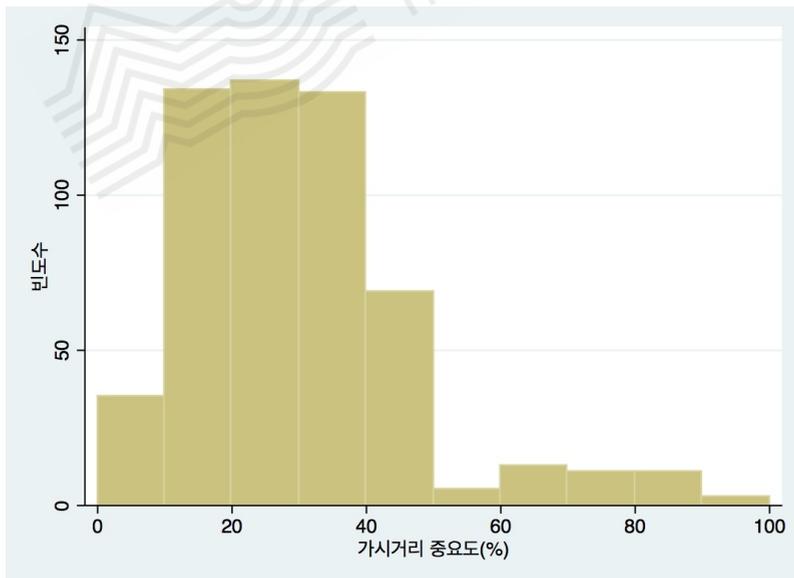
이번 연구에서는 3장에서 살펴본 지불용의액 설문조사 시 추가적으로 가시거리 개선에 관한 문항을 제시하였으며, 이를 통해 가시거리 문제에 대한 시민들의 인식을 살펴볼 수 있었다. 구체적으로 살펴보면, 미세먼지로 인한 악영향 중 가장 중요하다고 생각하는 것을 선택하도록 한 문항에 대해 건강영향이 가장 중요하다고 응답한 비율은 87.8%, 가시거리로 인한 심미적 영향이 가장 중요하다고 응답한 비율은 8.2%, 경제에 대한 악영향이 가장 중요하다고 응답한 비율은 4.0%였다. 또한 미세먼지 악영향 중 가시거리 악화가 차지하는 중요도(100점 만점)를 묻는 문항에 대해 시민들의 평균 점수는 25.9점(95% 신뢰구간: 24.5~27.3점)이었다.

이러한 설문조사 결과를 활용해 가시거리 개선에 따른 경제적 편익을 간접적으로 추정할 수 있다. 여기에서는 3장에서 살펴본 서울시민의 미세먼지 관리 정책 지불용의액을 서울시민이 생각하는 가시거리 중요도 비율로 곱해 산출했다. 미세먼지 악영향 중 가시거리 악

화가 차지하는 중요도에 대한 서울시민 설문조사 결과(100점 만점 척도 중 25.9점)를 적용하면, 가시거리 개선에 따른 경제적인 편익은 연평균 1,400억 원이다. 반면, 미세먼지 영향 중 1순위로 가시거리 악화를 응답한 비율(8.1%)을 적용하면, 가시거리 개선에 따른 경제적인 편익은 연평균 438억 원이다.



[그림 3-2] 미세먼지 영향 중 1순위



[그림 3-3] 가시거리의 중요도 분포

# 04

---

## 미세먼지 관리 정책의 거시경제 영향 분석

- 1\_분석 방법
- 2\_주요 가정 및 시나리오
- 3\_분석 결과 및 시사점

## 04 | 미세먼지 관리 정책의 거시경제 영향 분석

### 1\_분석 방법

#### 1) 연구범위 설정

이 장은 연산가능 일반균형(CGE) 모형을 이용해 서울시 미세먼지 저감 정책의 거시경제적 파급효과를 분석함을 목적으로 한다. CGE 모형은 경제주체의 최적화 행위와 재화 및 생산요소의 흐름을 방정식 체계로 나타내어 모든 시장의 균형을 계량적으로 도출하는 방법이다.

OECD(2016)는 연산가능 일반균형(CGE) 모형인 ENV-Linkages 모형과 TM5-FASST 모형, GAINS 모형 등을 활용해 OECD 회원국을 대상으로 대기오염의 경제적 영향을 분석하였다. OECD에서는 대기오염의 사회적 비용을 시장비용과 비시장비용으로 구분하였다. 시장비용은 시장에서 정량화할 수 있는 비용들로서 건강 관련 지출, 노동 생산성, 농작물 수확률 등이 있다. 이러한 개별 영향도 오염물질이 직접적인 경로로 영향을 미치는 것과 간접적인 경로로 영향을 미치는 것 2가지를 생각할 수 있다. 비시장비용은 사망, 질환으로 인한 불편(disutility)을 비롯하여 여가활동 제약, 생태계 영향 등을 포함한다.

Van Dingenen et al.(2009)은 오존 농도와 수확률 간의 상관관계에 대해 지역별 측정치와 모형 결과를 바탕으로 대기오염 물질 중 오존의 농작물에 대한 영향을 분석하였다.

이 장에서는 시장비용 중 일부에 대해서만 정량분석 대상으로 삼기로 한다. 구체적으로 건강 관련 의료비 지출에 대해서는 안소은 외(2015)의 분류를 따라 의료비용, 교통비용, 간병비용, 생산성 손실 등으로 구분하여 분석한다. 농작물 피해는 Van Dingenen et al.(2009)의 모형을 적용하여 분석한다. 이들 시장비용은 다른 산업에도 영향을 미치게 되는데(노동력 손실, 농작물을 원료로 하는 산업에 미치는 영향 등), 이 장에서는 CGE 모형을 통해 이러한 파급효과도 반영하여 서울시에 미치는 미세먼지의 거시경제적 영향을 분석한다.

## 2) CGE 모형 설계

일반적으로 활용되는 CGE 모형에서의 연산 원리는 다음과 같다. 우선, 각 경제 내의 생산 부문에서는 생산요소(자본, 노동 등)와 중간재를 사용하여 최종재화를 생산한다. 생산부문의 소득은 생산비용(생산요소와 중간재 구매)과 세금을 납부하는 데 사용되어 영(0)의 이윤을 달성한다. 가계는 생산부문으로부터의 소득을 소비와 저축의 형태로 지출하고, 정부는 세금을 통하여 수입을 얻고 이를 정부지출과 가계이전에 사용한다.

서울시 미세먼지 관리 정책 효과를 분석하기 위해서는 다지역(multi-region)을 구성하고 국민계정과의 정합성을 극대화한 형태로 모형을 구축해야 한다. 이번 연구에서는 서울 지역과 비서울 지역으로 구분한 ‘지역 구분’ 모형을 구축하였다. 모형의 단순화를 위해 서울시의 미세먼지 정책이 노동시장과 농작물 수확에 미치는 효과가 서울시에만 국한되도록 시나리오를 구성했다. 연산의 단순화를 위해 기타 지역은 비서울로 묶어 한 지역으로 취급하였으므로, 보다 상세한 지역 간 상호작용 반영에는 한계가 있다.

이번 연구에서는 일반적으로 가계와 정부 부문으로만 구성되어 있는 ‘제도 부문’을 기업도 포함하는 방향으로 변형하여 적용했다. 이를 통해 일반적인 CGE 모형과는 달리 기업 지출이나 기업을 경유하는 이전 거래들이 모형에 반영될 수 있어서 현실 설명력을 향상시켰다.

이번 연구에서는 특정 시기에 대한 비교정태(comparative statics) 분석만을 실시하였다. 따라서 이번에 구축한 CGE 모형은 기준연도 서울시 경제에 가상(counterfactual)의 정책 충격(shock)이 가해졌을 때 거시 경제에 어느 정도 영향을 미치는지를 알아보는 것을 목적으로 한다.

## 3) 사회회계행렬

CGE 모형을 위한 자료집합은 사회회계행렬(Social Accounting Matrix) 형태로 정리된다. 사회회계행렬은 기준연도의 모든 경제 부문 간 거래의 흐름을 총괄하여 보여주는 단면도라고 할 수 있다. 사회회계행렬은 기준연도의 부가가치 생산과 산업 간 거래내역을 포괄하는 산업연관표와 국민계정에서 확인할 수 있는 거시 경제변수 등을 기초로 하여 작성된다. 이번 모형에서는 경제 부문을 총 30개로 구분하고 지역은 2개로 분리하였다.

산업부문은 한국은행에서 제공하는 최신 자료인 2013년 기준 투입산출표(대분류, 기초가격)의 체계를 따랐다. 다지역 구분에 따른 모형의 불필요한 복잡성을 회피하고 대체탄력성 등의 파라미터 소요를 최소화시키기 위함이다. 2개 지역에 대해 30개 산업분류 체계를 취하여 결과적으로는 총 60개 산업부문에 분류하였다.

서울과 비서울 지역으로 구분된 경제부문 분류 체계는 다음과 같다. 서울 지역 산업분류 코드는 s1~s30으로 표기하였으며, 비서울 지역은 n1~n30으로 표기하였다. 같은 업종인 경우 지역은 달라도 대체탄력성 등 파라미터는 공유한다.

산업연관표에 국민계정 자료를 더하여 사회회계행렬 기본 거래표를 다음과 같이 구성한다. 기본체계는 노용환·남상호(2006)를 따르되 연구의 목적에 맞게 일부 수정하였다. 노용환·남상호(2006)에서는 해외(E) 부문의 가로 행 중 가계, 기업, 정부 부문에 해당하는 칸이 '해외 이전지출'로만 표기되어 있는데, 이번 연구에서는 산업연관표에서 나타난 '최종재 수입' 액수가 같이 포함된 것으로 해석하였다. 이와 관련하여 '중간재 수입'은 산업활동 과정에 들어가는 중간재로서 반영되도록 하여 수입재를 2가지 경로로 분리했다. 노용환·남상호(2006)에서는 정부가 자본 형성에 과세하는 내용이 없으나, 산업연관표에는 민간 및 정부의 고정자본형성에 대한 '순생산물세'가 포함되어 있으므로 이를 '자산취득과세'라는 명목으로 반영했다. 이번 연구에서 사용한 2013년 기준 사회회계행렬의 구체적인 수치는 부록의 3절에 수록한다.

[표 4-1] CGE 모형을 위한 경제부문 분류

지역	코드	산업분류	지역	코드	산업분류
서울	s1	농림수산물	비서울	n1	농림수산물
	s2	광산품		n2	광산품
	s3	음식료품		n3	음식료품
	s4	섬유 및 가죽제품		n4	섬유 및 가죽제품
	s5	목재 및 종이, 인쇄		n5	목재 및 종이, 인쇄
	s6	석탄 및 석유제품		n6	석탄 및 석유제품
	s7	화학제품		n7	화학제품
	s8	비금속광물제품		n8	비금속광물제품
	s9	1차 금속제품		n9	1차 금속제품
	s10	금속제품		n10	금속제품
	s11	기계 및 장비		n11	기계 및 장비
	s12	전기 및 전자기기		n12	전기 및 전자기기
	s13	정밀기기		n13	정밀기기
	s14	운송장비		n14	운송장비
	s15	기타 제조업 제품 및 임가공		n15	기타 제조업 제품 및 임가공
	s16	전력, 가스 및 증기		n16	전력, 가스 및 증기
	s17	수도, 폐기물 및 재활용서비스		n17	수도, 폐기물 및 재활용서비스
	s18	건설		n18	건설
	s19	도소매서비스		n19	도소매서비스
	s20	운송서비스		n20	운송서비스
	s21	음식점 및 숙박서비스		n21	음식점 및 숙박서비스
	s22	정보통신 및 방송 서비스		n22	정보통신 및 방송 서비스
	s23	금융 및 보험 서비스		n23	금융 및 보험 서비스
	s24	부동산 및 임대		n24	부동산 및 임대
	s25	전문, 과학 및 기술 서비스		n25	전문, 과학 및 기술 서비스
	s26	사업지원서비스		n26	사업지원서비스
	s27	공공행정 및 국방		n27	공공행정 및 국방
	s28	교육서비스		n28	교육서비스
	s29	보건 및 사회복지서비스		n29	보건 및 사회복지서비스
	s30	문화 및 기타 서비스		n30	문화 및 기타 서비스

[표 4-2] 지역 구분 거시 사회회계행렬 기본 거래표

	산업 서울 (S1~S30)	산업 비서울 (n1~n30)	노동요소 (L)	자본요소 (K)	가계 (H)	기업 (F)	정부 (G)	자본 (CS)	해외 (E)	합계 (TOT)
상품 서울 (S1~S30)	중간재 수요 (서울→서울)	중간재 수요 (서울→비서울)			민간소비 지출		정부소비지출	자본형성	수출	총수요
상품 비서울 (n1~n30)	중간재 수요 (비서울→서울)	중간재 수요 (비서울→비서울)			민간소비 지출		정부소비비지출	자본형성	수출	총수요
노동 요소 (L)	피고용인 보수 (서울)	피고용인 보수 (비서울)							국외수취 피고용인 보수	노동소득
자본 요소 (K)	영업 잉여 (서울)	영업 잉여 (비서울)							국외수취 기업 및 재산소득	자본소득
가계 (H)			노동소득	분배이윤		이전거래	이전거래		국내로의 경상이전	가계수입
기업 (F)				비분배 이윤	이전거래		이전거래		국내로의 경상이전	기업수입
정부 (G)	순간접세 관세 수입상품세(비서울)	순간접세 관세 수입상품세(비서울)			직접세 간접세 지방세	직접세 간접세 지방세		자산취득 과세	국내로의 경상이전	정부수입
자본 (CS)	고장자본 소모 (서울)	고장자본 소모 (비서울)			가계지출	기업지출	정부지출		해외 순자본 이전	총저축
해외 (E)	중간재 수입 (서울)	중간재 수입 (비서울)	국외지급 피고용인 보수	국외지급 기업 및 재산소득	해외 이전지출+ 최종재 수입	해외 이전지출+ 최종재 수입	해외 이전지출+ 최종재 수입	해외지출 투자지역		외환지불
합계 (TOT)	총투입 (서울)	총투입 (비서울)	노동소득	자본소득	가계지출	기업지출	정부지출	총투자	외환수취	

#### 4) 모형 구조

이번 연구에서 사용한 모형의 구조 및 세부 연산식은 부록의 3절을 참고할 수 있다.

#### 5) 파라미터

이번 모형에서 탄력성 계수는 외생적으로 결정한다. 복합 생산요소에서 노동과 자본 간 대체탄력성은 김성태 외(2011)의 28개 산업분류하에서의 추정 결과를 활용하되, 이번 연구의 30개 산업분류에 맞도록 일부 항목을 조정한다. 내수재와 수출재 간의 전환탄력성, 수입재와 내수재 간의 대체탄력성은 강상인·김재준(2007)의 수치를 적용한다. 산업분류 체계가 상이하므로 추후 세분화된 탄력성 수치 추정이 필요하다. 이상의 대체탄력성 수치를 정리한 결과는 다음 표와 같다. 그 밖의 파라미터들은 데이터에 맞게 조정(calibration)하여 추정하였다.

대체탄력치를 제외하고 간접세율, 수입세율, 직접세율, 저축률, 이천지출률, 소비지출 비중 등은 기준연도 사회회계행렬 자료를 통하여 계산된다. 그 중 생산함수의 배분계수 파라미터 추정 결과는 다음과 같다. 일부 조정된 파라미터들은 정책 시나리오 부여에 따라 다시 산정된다.

이번 연구에서는 일부 항목의 소비지출량에 변동이 있을 경우 이를 반영하여 소비지출 비중계수가 새로 산정된다.

[표 4-3] 대체탄력성(노동-자본, 내수-수출, 수입-내수)

코드		노동-자본 대체탄력성	내수-수출 전환탄력성	수입-내수 대체탄력성	비고
s1	n1	0.554	3.9	1.5	농림수산물
s2	n2	0.416	3.9	1.5	광산품
s3	n3	0.386	2.9	2.5	음식료품
s4	n4	0.504	2.9	2.5	섬유 및 가죽제품
s5	n5	0.45	2.9	2.5	목재 및 종이, 인쇄
s6	n6	0.324	2.9	2.5	석탄 및 석유제품
s7	n7	0.413	2.9	2.5	화학제품
s8	n8	0.418	2.9	2.5	비금속광물제품
s9	n9	0.521	2.9	2.5	1차 금속제품
s10	n10	0.454	2.9	2.5	금속제품
s11	n11	0.377	2.9	2.5	기계 및 장비
s12	n12	0.499	2.9	2.5	전기 및 전자기기
s13	n13	0.274	2.9	2.5	정밀기기
s14	n14	0.472	2.9	2.5	운송장비
s15	n15	0.442	2.9	2.5	기타 제조업 제품 및 임가공
s16	n16	0.394	2.9	2	전력, 가스 및 증기
s17	n17	0.417	2.9	2	수도, 폐기물 및 재활용서비스
s18	n18	0.677	0.7	2	건설
s19	n19	0.486	0.7	2	도소매서비스
s20	n20	0.3	0.7	2	운송서비스
s21	n21	0.605	0.7	2	음식점 및 숙박서비스
s22	n22	0.372	0.7	2	정보통신 및 방송 서비스
s23	n23	0.402	0.7	2	금융 및 보험 서비스
s24	n24	0.602	0.7	2	부동산 및 임대
s25	n25	0.602	0.7	2	전문, 과학 및 기술 서비스
s26	n26	0.602	0.7	2	사업지원서비스
s27	n27	0.432	0.7	2	공공행정 및 국방
s28	n28	0.617	0.7	2	교육서비스
s29	n29	0.432	0.7	2	보건 및 사회복지서비스
s30	n30	0.547	0.7	2	문화 및 기타 서비스

[표 4-4] 배분계수 파라미터 추정 결과

코드	altd	alsd	alp_l	코드	altd	alsd	alp_l
s1	0.7	0.5	0.9	n1	0.75	0.91	0.06
s2	0.63	0.89	0.27	n2	0.68	0.69	0.27
s3	0.62	0.53	0.87	n3	0.7	0.74	0.85
s4	0.51	0.65	0.49	n4	0.56	0.61	0.67
s5	0.71	0.82	0.63	n5	0.67	0.89	0.7
s6	0.99	0.4	0.21	n6	0.53	0.82	0.03
s7	0.62	0.57	0.79	n7	0.56	0.84	0.54
s8	0.77	0.71	0.2	n8	0.7	0.86	0.62
s9	0.54	0.84	0.72	n9	0.62	0.92	0.44
s10	0.64	0.63	0.66	n10	0.64	0.84	0.68
s11	0.55	0.46	0.94	n11	0.54	0.62	0.89
s12	0.48	0.54	0.6	n12	0.47	0.73	0.63
s13	0.56	0.54	0.83	n13	0.52	0.55	0.85
s14	0.55	0.3	1	n14	0.49	0.71	0.86
s15	0.55	0.62	0.91	n15	0.7	0.76	0.87
s16	0.69	0.83	0.99	n16	0.93	0.97	0.7
s17	0.77	0.95	0.94	n17	0.94	0.97	0.89
s18	1	1	0.98	n18	1	1	0.95
s19	0.98	1	0.39	n19	0.92	1	0.26
s20	0.61	0.84	1	n20	0.86	0.84	1
s21	0.9	0.77	0.67	n21	0.99	0.76	0.66
s22	0.99	0.9	0.98	n22	0.99	0.83	0.98
s23	0.99	0.95	0.39	n23	1	0.91	0.42
s24	0.99	0.95	0.05	n24	1	0.9	0.06
s25	0.93	0.87	0.87	n25	0.98	0.8	0.91
s26	0.76	0.86	0.86	n26	0.97	0.81	0.86
s27	1	1	1	n27	1	1	1
s28	1	0.85	0.98	n28	1	0.84	0.99
s29	1	0.96	0.99	n29	1	0.95	0.98
s30	0.99	0.9	0.81	n30	1	0.88	0.8

## 6) 연산 프로그램

이번 연구에서 사용한 연산 프로그램은 GAMS(버전 23.9.1)이며, Solver는 NLPEC (Nonlinear Programs with Equilibrium Constraints; 버전 1.6)을 사용했다. NLPEC 는 이번 연구에서 구성한 MCP(mixed complementarity problem) 문제를 일반적인 비 선형문제로 변환하여 CONOPT Solver로 풀 수 있도록 한다. 일반적으로 MCP Solver로 많이 쓰이는 PATH Solver도 비슷한 결과를 보였으나, 시나리오 변화에 따라 나타나는

결과의 신뢰도 측면에서 NLPEC가 상대적으로 우수한 것으로 판단되어 이를 주로 사용한다. NLPEC 연산 결과 오류 및 불가능(Infeasible)해 없이 오차(tolerance) 수준을 1E-20 수준에서 결과를 얻을 수 있었다.

## 2\_주요 가정 및 시나리오

### 1) 주요 가정

이번 연구에서는 미세먼지가 건강과 작물 생산에만 영향을 미치는 것으로 가정하였다. 이는 OECD(2016)의 시장비용으로 정량적 추정이 가능한 건강 관련 지출, 노동 생산성 변화, 농작물 수확률 변화의 범주에 해당하는 것이다. 비시장비용은 이 연구의 피해 범주에 넣지 않았다. 건강은 미세먼지(PM10)나 초미세먼지(PM2.5)의 형태로만 영향을 미치고, 작물 수확에는 오존 농도만 영향을 미치는 것으로 연구범위를 제한하였다. 미세먼지가 되기 전의 형체인 전구체(precursor)가 건강에 직접 영향을 미칠 수도 있지만, 이 연구에서는 이들이 PM2.5 또는 PM10으로 변화되어 일으키는 영향만을 고려하기로 한다.

작물 수확에 영향을 미치는 것은 오존 농도, 산성화(acidification), 부영양화(eutrophication) 등의 경로가 있으나, 이번 연구에서는 오존 농도의 직접적 영향만을 고려하기로 한다. Van Dingenen et al.(2018), IIASA 등에서 보고된 값으로, 오존 농도와 수확률 간의 상관성을 나타내는 산식 추정 결과를 활용하였다.

PM2.5 또는 PM10의 건강 관련 단위 비용은 기존 연구의 결과를 활용한다. 안소은 외(2015)는 질병비용을 크게 의료비용, 교통비용, 생산성 손실비용으로 구분했다. 의료비용은 다시 입원비용, 외래비용, 약제비용으로 구분한다. 안소은 외(2015)에서는 간병비용을 별도로 취급하고 있으나, 이번 연구에서는 의료비용에 통합하여 취급하기로 한다.

이번 연구의 기준연도인 2013년 기준으로 안소은 외(2015)에서 추정된 질병비용은 다음과 같다.

우선 의료비용 관련 결과는 다음과 같다.

**[표 4-5] 의료비**

구분	건수/비용
호흡기계 총 입원 에피소드	26,705건
호흡기계 총 의료비	42,144,084,130원
에피소드당 평균 비용(급여)	1,578,135원
에피소드당 비급여 본인부담금	346,420원

자료: 안소은 외(2015)

**[표 4-6] 간병비**

구분	비용
에피소드당 간병비	388,969원
총 간병비용	10,387,427,891원

자료: 안소은 외(2015)

**[표 4-7] 교통비**

구분	비용/비율
에피소드당 교통비	183,049원
총 교통비	4,888,329,211원
대중교통 대비 자가용의 비용 비율	1:3.42

자료: 안소은 외(2015)

생산성 손실비용 추정 결과는 다음과 같다.

**[표 4-8] 손실비용 추정액**

구분	비용
에피소드당 생산성 손실액(노동투입량 감소액)	1,270,376원
총 생산성 손실액(노동투입량 감소액)	33,925,402,950원

자료: 안소은 외(2015)

앞의 각 비용이 사회회계행렬에 반영되는 경로는 다음과 같다. 의료비용 중 ‘급여’는 정부 지출에 해당하며, 이번 연구에서는 서울지역에서만 해당사항이 있다. 따라서 미세먼지 정

책의 효과로 의료비 지출이 감소할 경우 정부지출 중 s29, 즉 서울 지역의 '보건 및 사회복지서비스' 지출액이 감소해야 한다. 의료비용 중 '비급여' 및 간병비는 가계지출에 해당한다. 따라서 미세먼지 정책의 효과로 의료비 지출이 감소할 경우 이번 연구에서는 서울지역의 '보건 및 사회복지서비스', 즉 s29에 대한 가계지출이 감소해야 한다. 교통비용의 변화가 발생할 경우 변화분의  $1/(1+3.42)$ 의 비중만큼은 대중교통에 해당하므로, 이만큼의 비중이 가계지출 중 서울지역의 '운송서비스'인 s20에 변화를 주게 된다. 한편 자가용은 가계지출 중 자동차 연료에 해당하는 s6, 즉 서울 지역의 '석탄 및 석유제품'에 시나리오를 적용하면 된다. 생산성 손실비용 변화는 서울지역 각 생산부문(s1~s30)에 고르게 반영되는 것으로 가정한다.

미세먼지 정책 효과로 노동 투입량 증가가 일어날 경우 서울 지역 각 생산부문의 노동 투입량이 같은 비율만큼 증가하는 것으로 적용한다. 이번 연구에서는 각 생산부문 및 지역 간의 노동 이동은 없다고 가정하였으며, 특히 비서울 지역에서의 노동투입량 변화는 없다고 가정한다. 안소은 외(2015)에서 추정된 결과는 전국에 해당하는 것이므로, 서울 지역의 비중만을 고려하여 적용하여야 한다.

미세먼지 농도 변화와 입원 간의 상관관계는 공성용 외(2012, 2013)와 안소은 외(2015)의 결과를 참조하였다. 안소은 외(2015)에서는 PM10의 농도가  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가할 경우 장기노출로 인한 서울 지역 신규 입원증가율이 6.85% 증가한다고 분석하였다. 공성용 외(2012, 2013)에서는 PM10과 PM2.5의 농도가  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가할 경우 서울 지역 호흡기계 입원 증가율이 각각 0.66%, 1.06% 증가한다고 분석하였다. 두 효과가 각기 독립적이라고 가정할 경우 농도가  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  감소할 경우 1.72%의 입원 감소효과가 있는 것으로 적용할 수 있다.

작물 수확률 변화와 관련하여서는 오존 농도만이 영향을 미치는 것으로 가정하였다. 오존 농도와 작물 수확 손실률 간의 관계는 Van Dingenen et al.(2009)에 소개된 방법 중 M7을 이용한 수식을 적용한다. 국내 실정을 고려할 때 쌀에 해당하는 파라미터를 활용하여야 하는데, 이에 해당하는 것은 M7과 AOT40밖에 없다. Van Dingenen et al.(2009)의 평가에 따르면, 실측치와의 오차를 고려하였을 때 AOT40의 신뢰성이 상대적으로 떨어지는 것으로 나타난다. M7, M12, AOT40 간의 상세내용과 파라미터는 다음 표와 같다.

[표 4-9] 작물 수확 손실률 산정 방법과 파라미터

종류	단위	정의 및 수식	파라미터							
			밀		쌀		콩		옥수수	
			a	b	a	b	a	b	a	b
M7	ppbV	작물생장 3개월간 낮 7시간 동안 오존농도 평균이 M7일 때 수확 손실률 $1 - \frac{\exp[-(M7/a)^b]}{\exp[-(25/a)^b]}$	137	2.34	202	2.47				
M12	ppbV	작물생장 3개월간 낮 12시간 동안 오존농도 평균이 M12일 때 수확 손실률 $1 - \frac{\exp[-(M12/a)^b]}{\exp[-(20/a)^b]}$					107	1.58	124	2.83
AOT40	ppmh	낮 시간 동안 40ppbV 이상 시간별 오존농도 누적 합산이 AOT40일 때 수확 손실률 $a \cdot AOT40$	$a = 0.0163$		$a = 0.00415$		$a = 0.0113$		$a = 0.00356$	

자료: Van Dingenen et al.(2009)

위 표의 수식에 적용할 오존 농도는 2017년 서울시 측정치를 활용한다. M7의 기준으로 작물 생장기간인 여름(6, 7, 8월)의 서울지역 오존 농도는 다음 표에서 평균 32ppbV로 나타난다. 이는 M7 수식의 정의와 같이 낮 시간에만 측정된 결과는 아니므로 오차가 있을 수 있으나, 분석 편의를 위해 근사치로 적용한다.

**[표 4-10] 2017년 서울시 PM10, PM2.5, 오존 농도 측정치 통계 현황**

	평균	최대	계절별			
			봄 (3, 4, 5월)	여름 (6, 7, 8월)	가을 (9, 10, 11월)	겨울 (12, 1, 2월)
PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	44	63(6월)	60	32	34	49
PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	25	40(3월)	30	19	18	30
오존 (ppbV)	25	41(6월)	33	32	21	14

자료: 서울시 대기환경정보 홈페이지

작물 수확률 영향이 모형에 반영되는 경로는 다음과 같다. 우선 서울 지역의 ‘농림수산물’, 즉  $s_1$ 의 총산출량이 변화된다. 앞의 총 산출량 수식에서 외생적인 생산성을 나타내는  $z_i$  변수를 변화시킨다. 서울시 전체 농림수산물 산출량에서 산업연관표 중분류에서 나타난 ‘작물’의 비중만 적용한다.  $s_1$ 의 생산성 변화가  $s_1$ 의 노동가격에도 영향을 미칠 것이므로 모형에서는  $s_1$ 의 노동가격 변수를 별도로 둔다.

## 2) 시나리오 구성

이상의 건강영향과 작물 수확률 영향을 종합하여 다음과 같은 2개의 시나리오를 구성하였다. 시나리오별로 미세먼지와 오존 농도에 대한 정책 강도를 달리하여 세분화하였으며, 미세먼지 농도에 따른 입원 건수는 선형적으로 변화한다고 가정하였다. 오존농도 감소에 따른 수확률 변화량은 앞의 M7 수식 계산 결과이다. 기준 오존농도가 32ppbV일 경우 오존농도를 22.2% 감소하면 수확률 개선의 여지가 더 이상 없으므로, 오존농도는 2가지 경우만 상정한다.

**[표 4-11] 모형 적용 시나리오**

구분	내용	오존농도 10% 감소로 수확률 0.24% 상승	오존농도 20% 감소로 수확률 0.45% 상승
시나리오 A - 안소은 외 (2015)	PM10 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소로 호흡기계 입원 6.85% 감소		
	PM10 농도 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소로 호흡기계 입원 6.85% $\times$ 2 감소		
시나리오 B - 공성용 외 (2012, 2013)	PM10과 PM2.5 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소로 호흡기계 입원 1.72% 감소		
	PM10과 PM2.5 농도 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소로 호흡기계 입원 1.72% $\times$ 2 감소		

주: 2개의 요소가 동시에 고려될 경우의 총 효과는 CGE 모형의 연산 작용에 의해 개별 효과의 합과 달라질 수 있음

### 3\_분석 결과 및 시사점

#### 1) 단기 영향 고려

단기 건강영향을 고려할 경우 거시경제에 미치는 대기오염 개선정책의 효과는 다음 표와 같다. 오존의 파급효과 정도가 가장 큰 것으로 나타났으며, PM2.5의 건강영향도 큰 것으로 나타난다. 서울 지역에서는 작물 생산 비중이 작으므로, 오존 농도 변화에 따른 작물 생산 변화가 크지 않았다. 관련하여 PM10, PM2.5, 오존의 복합적인 효과 추정에는 심화된 연구가 필요하다. 각각이 주는 효과의 상관성에 대한 규명이 여전히 어려우므로, 이들이 복합적으로 미치는 영향에 대해서는 현재로서는 추정이 불가하다.

이번 연구 결과는 직접적인 시장가치 중 일부 질화와 작물에만 국한하여 추정한 것으로서, 전체 시장가치를 다 포괄하지는 못하였다. OECD(2016)에 따르면 OECD 평균 미세먼지로 인한 시장비용은 소득 대비 0.5%, 비시장비용은 소득 대비 5%로 추정되어, 본 연구 결과와 비교할 때 큰 차이를 나타낸다. 해외 연구 결과가 직접비용 외의 간접적 효과도 포함시키고, 장기간 누적 효과를 합산한 결과이기 때문이다. 따라서 장기간의 누적된 영향을 포함하는 형태의 보다 광범위한 연구가 필요하다.

**[표 4-12] PM10 정책 강도 시나리오별 변동량 추정 결과**

(단위: 백만 원)

구분		질병비용 변화	노동투입량 변화	GRDP 변화
PM2.5 정책 강도	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감	-1,892.25	542.56	1,673.81
	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감	-3,772.35	1081.75	3,336.29

주: 2개의 요소가 동시에 고려될 경우의 총 효과는 CGE 모형의 연산 작용에 의해 개별 효과의 합과 달라질 수 있음

**[표 4-13] PM2.5 정책 강도 시나리오별 변동량 추정 결과**

(단위: 백만 원)

구분		질병비용 변화	노동투입량 변화	GRDP 변화
PM2.5 정책 강도	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감	-3,054.09	885.20	2,730.09
	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감	-6,077.74	1,761.89	5,433.96

주: 2개의 요소가 동시에 고려될 경우의 총 효과는 CGE 모형의 연산 작용에 의해 개별 효과의 합과 달라질 수 있음

**[표 4-14] 오존 정책 강도 시나리오별 변동량 추정 결과**

(단위: 백만 원)

구분		질병비용 변화	노동투입량 변화	작물 생산량 변화	GRDP 변화
오존 정책 강도	10ppb 저감	-3,035.99	1,210.71	126.51	3,856.83
	20ppb 저감	-5,985.32	2,386.87	130.10	7,484.30

주: 3개의 요소가 동시에 고려될 경우의 총 효과는 CGE 모형의 연산 작용에 의해 개별 효과의 합과 달라질 수 있음

## 2) PM2.5 장기영향 고려

WHO(2013)에서는 PM2.5 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  변할 경우 장기 사망 위험이 6.2% 변하는 것으로 추정하였다. 이를 반영하면 연간 경제적 파급효과는 다음 표와 같다. 구체적으로 미세먼지 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  개선 시 서울시의 GRDP는 약 207억 원 상승한다.

**[표 4-15] PM2.5 정책 강도 시나리오별 장기 효과 추정 결과 1**

(단위: 백만 원)

구분		질병비용 변화	노동투입량 변화	GRDP 변화
PM2.5 정책 강도	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감	-21,508.37	6,692.18	20,639.79
	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감	-43,016.73	13,384.36	41,279.60

주: 2개의 요소가 동시에 고려될 경우의 총 효과는 CGE 모형의 연산 작용에 의해 개별 효과의 합과 달라질 수 있음

다음 장에서 살펴보겠지만, 국민건강보험공단 DB를 활용한 분석에서 PM2.5 농도가 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  변할 경우 장기 사망 위험이 약 8.0% 변할 수 있다. 이를 반영하면 연간 경제적 파급효과는 다음 표와 같다. 구체적으로 미세먼지 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  개선 시 서울시의 GRDP는 약 266억 원 상승한다.

**[표 4-16] PM2.5 정책 강도 시나리오별 장기 효과 추정 결과 2**

(단위: 백만 원)

구분		질병비용 변화	노동투입량 변화	GRDP 변화
PM2.5 정책 강도	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감	-27,752.73	8,635.07	26,632.00
	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감	-55,505.46	17,270.14	53,264.00

주: 2개의 요소가 동시에 고려될 경우의 총 효과는 CGE 모형의 연산 작용에 의해 개별 효과의 합과 달라질 수 있음

### 3) 시사점

이번 장에서는 서울시 미세먼지 관리 정책의 거시 경제학적 파급효과를 일반균형모형을 이용하여 분석하였다. 서울 지역 PM10 또는 PM2.5 농도 감소로 인한 건강 관련 의료비용의 감소, 노동생산성 변화, 오존 농도 감소로 인한 농작물 수확률 개선이 서울 지역에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 서울 지역 GRDP에 일정 수준의 정(+)의 효과를 주는 것으로 나타났으나, 전체 GRDP 수치에 비하면 낮은 수준이었다. 향후에는 이번 연구에서 포함하지 못한 보다 다양한 유형의 시장비용을 포함한 분석이 필요하다.

# 05

---

## 미세먼지의 건강영향 분석

- 1\_사망위험도 분석
- 2\_건강영향 개선 편익

## 05 | 미세먼지의 건강영향 분석

### 1\_사망위험도 분석

#### 1) 분석방법

미세먼지의 건강영향은 연구목적과 자료의 종류에 따라 다양한 방법론을 활용해 분석할 수 있다. 최근의 문헌에서는 대체로 장기영향을 분석하는 연구에서는 비례위험모형(proportional hazard model)을 활용하며, 단기영향을 분석하는 연구에서는 일반화선형 모형(generalized linear model) 또는 일반화가법 모형(generalized additive model)을 활용하고 있다(Abbey et al., 1991; Pope III et al., 1995; 이종태·김호, 2001; Dominici et al., 2003; Pope III and Dockery, 2006; Puett et al., 2009; Kim et al., 2015).

미세먼지의 건강영향에 관한 최근 국내 주요 연구를 소개하면 다음과 같다. 안소는 외(2015)는 미시 데이터를 활용하여 대기오염에 의한 건강영향을 분석하였다. 분석 범위는 2002~2013년 동안의 전국 호흡기계 관련 질환 신규입원과 재입원 통계자료이며, 분석 방법은 표본 코호트 DB를 이용한 생존 분석과 시계열 패널 자료의 반복측정분석을 실시하여 신규입원 및 재입원 영향을 평가하는 것이었다. 대기오염 장기노출로 인한 호흡기계 영향을 PM10, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>에 대해서 분석하였으나, PM2.5는 포함되지 않았다.

공성용 외(2012, 2013)는 서울시의 PM10과 PM2.5 자료를 바탕으로 건강영향의 정량적 평가를 실시하였다. 분석 범위는 2006~2010년의 서울지역 심혈관계 입원과 호흡기계 입원 통계자료이며, 분석 방법은 시계열 대기오염 자료와 상병 자료를 활용하여 계량분석으로 둘 간의 상관성을 분석하는 것이다.

이번 연구는 기존 연구와 달리 PM2.5의 서울시 장기 건강영향을 분석한다는 점에서 기존 연구와 차별성을 갖는다. 구체적으로 살펴보면, 미세먼지의 장기 건강영향 분석을 위해 비례위험모형을 사용한다. 자료는 국민건강보험공단에서 구축하고 있는 표본코호트

(cohort) 2.0 DB(국민건강보험공단, 2017)를 활용한다. 표본코호트 DB에는 2006년 기준으로 확률추출(random sampling)된 전국 1백만 명(비식별화)에 대해 전-후방(2002년~2015년)으로 건강 관련 자료가 축적되어 있다. 구체적으로 다음 표와 같이 인구사회적 특성, 질병이력 및 건강행태(비정기), 진료 및 사망자료(사망연월 제공) 등이 구축되어 있다. 연구자는 필요에 따라 표본코호트 DB를 SQL 언어 등을 활용해 조정된 후 분석을 수행한다.<sup>2)</sup>

**[표 5-1] 국민건강보험공단 표본코호트 2.0 DB 주요 항목**

항목		자격 및 보험료	사망	진료	일반 건강검진	요양기관
인구사회적 특성	성별	●				
	연령	●				
	거주지역	●				
	소득(보험료분위)	●				
	의료보장 유형	●				
	장애	●				
질병이력 및 건강행태	과거력/가족력				●	
	흡연/음주/신체활동				●	
신체계측 및 검사결과	키/몸무게/BMI				●	
	흉부X선 촬영				●	
	혈압/혈당				●	
	기타 검사결과				●	
의료이용	상병			●		
	입원/외래/응급실			●		
	처치 및 투약			●		
	의료비용			●		
사망	사망연월		●			
	사망원인		●			
요양기관	기본특성					●
	인력/시설					●

출처: 국민건강보험공단(2017)

2) 단기영향분석의 경우 국민건강보험공단에서 제공하는 맞춤형 DB를 활용할 수 있는데, 맞춤형 DB는 국민건강보험에 가입되어 있는 서울 시민을 대상으로 일별로 사망자 현황과 주요 질환 정보 등을 제공하고 있어 대기오염이 일별 사망자 수 변화에 미치는 영향을 분석하기에 적합하다.

PM2.5 농도 데이터의 경우 전국적인 관측이 시작된 것은 2015년이지만, 서울시에서는 2002년 이후 일부 자치구에서 PM2.5 관측값이 존재한다는 점에서 여러 연도에 걸친 PM2.5의 건강영향 연구가 가능하다. 다만, 25개 서울시 자치구 전체에서 관측되기 시작한 것은 2007년이기 때문에 이번 연구에서는 2007년을 기준으로 서울시에 거주하는 시민을 관찰 대상으로 선정하였다. 분석 목적은 2007년 한 해 동안 PM2.5에 노출된 서울 시민들이 향후 2015년까지 사망할 확률이 노출된 PM2.5 농도에 따라 얼마나 달라지는지 살펴보는 것이다. PM2.5로 인한 추가 사망자는 기존 문헌들에서 인과관계가 밝혀진 것으로 허혈성심장질환(IHD), 만성폐쇄성폐질환(COPD), 폐암(lung cancer), 뇌혈관질환(stroke)을 포함하였다(Han et al., 2018). 구체적으로 표본 코호트 DB에서 사망 코드가 I20~I25, J40~J44, C33~C34, I60~I69에 해당하는 시민들을 미세먼지 관련 사망 분석 대상으로 추출하였다. 장기영향 분석의 주요 가설은 'PM2.5 고농도에 장기간 노출된 시민들의 조기사망 확률은 낮은 농도에 노출된 시민들보다 더 높다'이다. 이러한 가설을 검증하기 위해 모형을 구축하고 국민건강보험공단 DB와 서울시 자치구별 대기오염 관측 값을 설명 변수로 하여 결과를 분석하였다.

서울시의 허혈성심장질환, 만성폐쇄성폐질환, 폐암, 뇌혈관질환 사망자 수 현황은 다음 표와 같다. 전체 연령에서 서울시 연간 사망자 수는 2015년에 약 43천 명이었으며, 그 중에서 허혈성심장질환, 만성폐쇄성폐질환, 폐암, 뇌혈관질환으로 사망한 사람들은 각각 4.9%, 1.7%, 6.5%, 8.6%를 차지하고 있다. 이 중에서 질환별로 미세먼지에 기인하여 조기사망한 사람들의 비율(질환별 미세먼지 기인 조기 사망자 수 ÷ 질환별 총 사망자 수)은 허혈성심장질환, 만성폐쇄성폐질환, 폐암, 뇌혈관질환이 각각 23.1%, 8.2%, 13.1%, 23.0%이다. 여기서 질환별 미세먼지 기인 조기 사망자 수는 Han et al.(2018)에서 제시한 값을 사용했다.

**[표 5-2] 서울시 사망원인별 사망자 수(2015년)**

	전체 연령						만 65세 이상		
	모든 사망원인			PM2.5 기인			모든 사망원인		
	사망자 수 (명)	사망률 (명/10만 명)	총사망 대비 비율	사망자 수 (명)	사망률 (명/10만 명)	PM2.5 기인 사망률	사망자 수 (명)	사망률 (명/10만 명)	총사망 대비 비율
총사망	43,053	435	100%				31,286	2,604	100%
IHD	2,112	21	4.9%	488	4.9	23.1%	1,606	134	5.1%
COPD	743	8	1.7%	61	0.6	8.2%	687	57	2.2%
LC	2,807	28	6.5%	367	3.7	13.1%	2,152	179	6.9%
Stroke	3,683	37	8.6%	847	8.6	23.0%	2,977	248	9.5%
합계	9,345	94	21.7%	1,763	17.8	18.9%	7,422	618	17.2%

주: 사망률은 10만 명당 사망자 수(명)를 의미함. 허혈성심장질환(IHD), 만성폐쇄성폐질환(COPD), 폐암(lung cancer), 뇌혈관질환(stroke)

자료: 통계청 국가통계포털, Han et al.(2018)

이번 연구에서 사용한 모형의 기본적인 구조는 다음과 같다. 장기영향 분석을 위한 비례 위험모형은 다음과 같이 대조군( $\lambda_0$ )과 실험군( $\lambda_i$ )의 위험함수(hazard function) 관계를 기본 식으로 한다. 다음 식은 비례위험모형 중에서도 여러 사례 연구에서 가장 많이 사용되고 있는 콕스(Cox) 비례위험모형(Cox, 1972)을 나타낸 것이다.

$$\lambda_i(t|X_i) = \lambda_0(t) \exp\{X_i\beta\} \quad \text{[식 5-1]}$$

여기서  $\lambda$ 는 위험함수,  $X$ 는 건강에 영향을 미치는 설명 변수(대기오염, 성별, 연령, 소득, 흡연 등),  $t$ 는 시간,  $\beta$ 는 파라미터(parameter),  $i$ 는 개인을 나타낸다.

위험함수는 다음 식과 같이  $t$  시기까지 살아남은 사람이  $t$  시기 이후  $dt$ 만큼 시간이 흐를 동안 새로이 사망하게 될 확률의 증가율로 정의한다.

$$\lambda(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\Pr\{t \leq T < t + dt | T \geq t\}}{dt} \quad \text{[식 5-2]}$$

여기서  $\Pr$ 은 확률,  $T$ 는 사망시점까지의 시간,  $dt$ 는 순간적인 시간 변화량,  $\lim$ 은 극한 연

산자(여기서는 시간변화  $dt$ 가 아주 작음)를 의미한다.

이와 같이 모형을 구축한 이후에는 통계 패키지 등을 활용해 모형의 파라미터  $\beta$  값을 추정할 수 있다. 여기서  $\beta$ 는 대기오염이 한 단위 증가할 때마다 사망률 또는 사망자 수가 변화하는 정도라고 해석할 수 있다. 최소자승법(OLS)을 활용하는 일반적인 선형모형과 달리 비례위험모형에서는 우도함수(likelihood function)를 최대화하는 파라미터 값을 찾는다. 이번 연구에서는 SAS 패키지를 활용해 장기건강영향을 분석했다.

## 2) 분석 결과 및 시사점

### (1) 전체 샘플 분석

Cox 비례위험모형의 추정 결과 허혈성심장질환, 만성폐쇄성폐질환, 폐암, 뇌혈관질환 사망자를 모두 합할 경우 PM2.5의 연평균 농도가  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가 시 총 사망위험은 약 8.0% 증가하는 것으로 나타났다. 다만 이 경우 추정된 PM2.5 계수 값의 P-value는 0.223으로 통계적 유의성이 높지는 않았다.

질환 중에서 허혈성심장질환의 경우 PM2.5의 연평균 농도가  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가 시 사망위험이 약 40.8% 증가한다. 구체적인 통계 값은 다음 표에 제시한 바와 같다. 다른 질환 사망의 경우 통계적으로 유의미한 상관관계가 나타나지 않아 결과를 제시하지 않는다.

**[표 5-3] 사망위험도 추정 결과(허혈성심장질환)**

	계수 값	표준오차	P-value	상대 위험비	95% 신뢰구간		대조군
성	-0.865	0.111	<0.001	0.421	0.339	0.523	1.5
소득	-0.029	0.017	0.096	0.972	0.940	1.005	6.4
나이	0.126	0.004	<0.001	1.134	1.124	1.144	36.0
PM2.5	0.034	0.014	0.013	1.035	1.007	1.063	29.9

주: N=207,832명, 허혈성심장질환 사망자=352명, LR statistic=1,308.55(p-value<0.001)

## (2) 고령자 분석

미세먼지가 고령자에게 미치는 영향은 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다(WHO, 2005). 이를 확인하기 위해 이번 연구에서는 만 65세 이상 서울 시민을 대상으로 비례위험모형을 분석하였다. 분석 결과, 고령자의 경우 연평균 PM2.5 농도가  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가 시 총 사망위험이 다음 표에서 나타난 바와 같이 약 13.9% 증가하는 것으로 나타났다. 전체 연령과 달리 통계 값의 신뢰도는 크게 증가하였다.

**[표 5-4] 사망위험도 추정 결과(고령자 전체)**

	계수 값	표준오차	P-value	상대 위험비	95% 신뢰구간		대조군
성	-0.810	0.062	<0.001	0.445	0.394	0.502	1.6
소득	-0.035	0.010	0.000	0.965	0.947	0.983	6.7
나이	0.119	0.005	<0.001	1.126	1.116	1.136	72.2
PM2.5	0.013	0.007	0.081	1.013	0.998	1.028	29.8

주: N=18,273명, 미세먼지 질환 사망자=1,108명, LR statistic=713.95(p-value<0.001)

질환별로는 PM2.5의 연평균 농도가  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가 시 허혈성심장질환으로 인한 고령자의 사망위험은 약 59.6% 증가하며, PM2.5의 연평균 농도가  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가 시 뇌혈관질환으로 인한 사망위험은 약 17.9% 증가하는 것으로 나타났다.

**[표 5-5] 사망위험도 추정 결과(고령자 허혈성심장질환)**

	계수 값	표준오차	P-value	상대 위험비	95% 신뢰구간		대조군
성	-0.624	0.128	<0.001	0.536	0.339	0.523	1.6
소득	-0.021	0.021	0.308	0.980	0.940	1.005	6.7
나이	0.126	0.010	<0.001	1.135	1.124	1.144	72.2
PM2.5	0.047	0.016	0.005	1.048	1.007	1.063	29.8

주: N=18,273명, 허혈성심장질환 사망자=254명, LR statistic=181.47(p-value<0.001)

**[표 5-6] 사망위험도 추정 결과(고령자 뇌혈관질환)**

	계수 값	표준오차	P-value	상대 위험비	95% 신뢰구간		대조군
성	-0.373	0.092	<0.001	0.689	0.575	0.824	1.6
소득	-0.038	0.014	0.007	0.963	0.936	0.990	6.7
나이	0.131	0.007	<0.001	1.140	1.125	1.156	72.2
PM2.5	0.016	0.011	0.141	1.017	0.995	1.039	29.8

주: N=18,273명, 뇌혈관질환 사망자=500명, LR statistic=361.26(p-value<0.001)

위의 결과를 통해 확인할 수 있는 것은 일반 시민보다 만 65세 이상 고령자가 미세먼지로 인한 장기 건강영향에 더 취약하다는 점이다. 또한 미세먼지 관련 질환 중에서는 허혈성심장질환이 PM2.5의 연평균 농도와 상관관계가 높다는 점도 확인할 수 있다.

PM2.5 노출이 조기사망에 미치는 영향은, 장기 노출이 단기 노출에 비해 더 크다. 일례로 PM2.5 농도가 조기사망에 미치는 단기 영향을 분석한 김운수 외(2013)의 연구에서는 PM2.5 단기 노출로 인해 서울시민의 사망률이 연령과 질환에 따라 최소 1.1%에서 최대 2.1% 정도 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 이번 연구에서 분석한 장기 노출 영향에 비해 크게 낮은 값이다. 미세먼지 건강영향 평가 문헌을 리뷰한 후 권고 값을 제공하고 있는 WHO-Europe(2013) 연구에서도 PM2.5 장기 노출로 인한 영향( $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가 시 사망률은 6.2% 증가)이 단기 노출로 인한 영향( $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가 시 사망률은 1.2% 증가)보다 훨씬 높은 것으로 제시하고 있다.

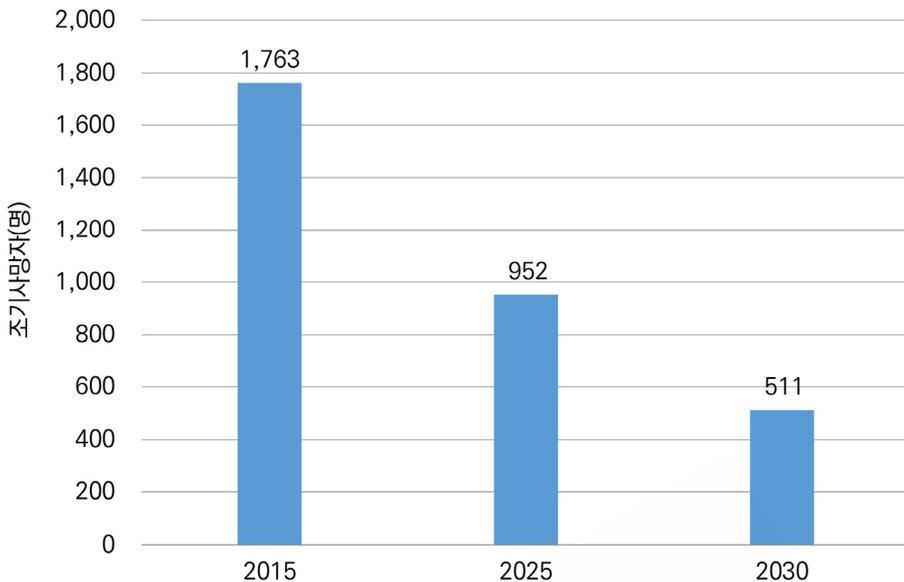
### (3) 한계

이번 연구에서는 흡연 여부나 체질량 지수 등 개인의 기초건강 자료를 활용한 분석도 수행했는데, 이 경우 PM2.5 농도와 사망률 사이에 통계적으로 유의미한 관계를 확인할 수 없었다. 국민건강보험공단 표본 코호트 DB에서 흡연 여부나 기초건강 정보는 건강검진 문진 결과를 통해서만 확인할 수 있는데, 해마다 건강검진을 받는 대상자가 달라지기 때문에 흡연 여부를 포함해 분석하고자 할 경우 분석 대상에 포함되는 샘플 수가 크게 줄어 든다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 방법을 사용해보았지만(예를 들어, 2007~2009년 동안 건강검진 자료에서 흡연여부 추출 후 분석), 이 경우에도 PM2.5 농도와 사망률 사이 상관관계에 대한 설명력이 증가하지는 않았다.

이번 연구에서는 자료의 한계로 PM2.5 농도에 대한 노출을 자치구 수준으로 한정할 수 밖에 없었다. 자치구 내에서도 거주 동이나 주요 도로로부터 거주지까지의 거리 등에 따라서 PM2.5 농도에 노출되는 정도가 달라질 수 있다는 점에서 이번 연구에서 사용한 자료에는 한계가 있다. 또한 분석 대상자들의 2008년 이후 PM2.5 노출 정도를 추적하기 위해서는 전국적인 PM2.5 관측 자료가 필요하지만, PM2.5 농도 관측이 전국적으로 시작된 것이 2015년 이후이기 때문에 서울이 아닌 지역으로 이사를 한 경우에는 추적 조사가 불가능했다. 향후 건강보험공단 표본 코호트 DB에 2016년 이후 값이 많이 추가되고, PM2.5 농도 관측 정보가 전국 기초자치체 수준까지 확대될 수 있다면, 보다 정밀한 분석이 가능할 것으로 예상된다.

## 2\_건강영향 개선 편익

앞서 살펴보았듯이 이번 연구에서 서울시 미세먼지 장기 노출에 따른 건강영향이 모든 질환에 대해서 통계적으로 유의미하게 도출되지 않았다. 따라서 위의 연구결과를 이용해 서울시 미세먼지 사망자 수를 직접 도출하기는 어렵다. 대신 이하에서는 Han et al.(2018)의 연구결과를 활용해 서울시 미세먼지 관리 정책의 건강영향 편익을 산출하였다. Han et al.(2018)은 국민건강보험공단 DB와 건강영향농도-반응 함수 외국 사례 값을 이용해 서울시 미세먼지 조기사망자 수를 산정하였다. 구체적으로 Han et al.(2018)의 연구에서는 PM2.5 장기 노출로 인해 서울시에서는 2015년에 1,763명이 조기 사망하고, 사망원인 중에서는 뇌졸중과 허혈성심장질환이 가장 많은 것으로 분석되었다. 이러한 결과에 외국 문헌에서 제시한 농도-반응 함수를 적용하면, 서울시 미세먼지 관리 정책으로 인한 조기 사망자 수 감소를 계산할 수 있다. 구체적으로 살펴보면, 서울시 PM2.5 연평균 농도를 2025년과 2030년에 각각  $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮출 경우 PM2.5로 인한 서울시 연간 조기사망자 수는 각각 952명과 511명으로 감소할 수 있다.



자료: Han et al.(2018)

**[그림 5-1] 서울시 PM2.5 조기사망 전망**

서울시 미세먼지 관리 정책의 편익을 계산하기 위해서는 줄어드는 조기사망자 수 외에 서울시민의 통계적 생명가치(VSL)를 산출해야 한다. 이번 연구에서는 3장에서 제시한 지불용의액 분석 결과를 활용해 간접적으로 통계적 생명가치를 1인당 10.2억 원으로 추정하였다. 여기서 서울시민의 통계적 생명가치는 향후 5년간 서울시민의 총 지불용의액을 향후 5년간 총 조기사망자 수 감소로 나눈 값으로 산출하였다. 이는 기존 문헌에서 제시된 신뢰도 범위 안에 있는 값으로 적용하기에 큰 무리가 없다(한국환경정책·평가연구원, 2016).

결과적으로 서울시 미세먼지 관리 정책 목표 달성 시(2025년과 2030년에 각각  $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2025년까지 미세먼지 개선으로 인한 서울시의 건강영향 편익은 연평균 4,139억 원에 달한다. 연도별로는 2025년에 8,277억 원, 2030년에 1조 2776억 원의 편익이 발생한다.

# 06

---

## 결론

1\_요약 및 결론

2\_연구의 한계 및 제안

## 06 | 결론

### 1\_요약 및 결론

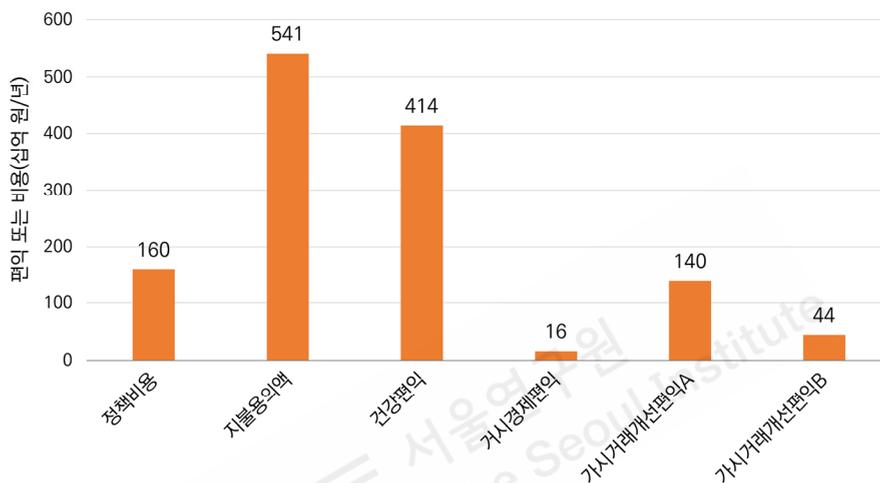
미세먼지 농도 개선은 대규모의 예산이 투입되는 정책으로 사회경제적 편익 산정을 통해 타당성을 확보할 필요가 있다. 이 연구에서는 지불용의액 기법과 사회경제적 피해비용 분석 기법 등을 활용해 서울시 미세먼지 관리 정책의 사회경제적 편익을 분석하였다.

구체적으로 살펴보면 이번 연구에서는 우선, 계량경제 모형을 구축하고 미세먼지 농도 개선을 위한 서울 시민의 지불용의액을 추정하였다. 분석 결과 서울시 가구당 연평균 미세먼지 관리 정책에 대한 지불용의액은 138,107원이었으며, 95% 신뢰구간은 125,376원~150,839원이었다. 서울시 총 가구 수를 감안하면 서울시민의 미세먼지 관리 정책 총 지불용의액은 매년 5,407억 원, 95% 신뢰구간은 4,908억 원~5,905억 원으로 추정된다.

다음으로 이번 연구에서는 부문별로 미세먼지로 인한 사회경제적 피해비용을 산정하였다. 미세먼지 관리 정책의 편익은 미세먼지 정책으로 인해 줄어든 사회경제적 피해비용이라고 정의할 수 있다. 미세먼지로 인한 시장 피해비용은 연산가능일반균형 모형을 통해 산출했으며, 비시장비용은 국민건강보험공단 DB와 가치평가 기법을 활용해 산출했다. 산출 결과 미세먼지 PM<sub>2.5</sub> 농도를 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  개선할 때 장기 건강영향 고려 시 연간 최대 266억 원의 경제적 효과가 발생하는 것으로 추정되었다. 건강영향의 경우 2025년까지 PM<sub>2.5</sub> 농도를 현재보다 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  개선할 때 연평균 약 4,139억 원의 건강영향 개선 편익이 발생한다.

이상의 결과를 종합하면 다음 그림과 같다. 다음 그림에서는 서울시가 현재 미세먼지 관리를 위해 투자하고 있는 연평균 지출 예산도 함께 제시하였다. 건강영향과 거시경제영향, 심미적 영향을 모두 포함할 경우 이번 연구에서 산출한 편익은 지출예산에 비해 3~4배 상회하는 것으로 나타났다. 시민들의 지불용의액 역시 지출예산에 비해 3~4배 높았다. 물론 다음 그림에서 비용은 비용편익분석에서 일반적으로 사용하는 경제적 비용(economic cost)이 아니라 「서울시 미세먼지 10대 대책」에서 제시한 연평균 정책(재정)

비용(financial cost)이라는 점에서, 엄밀한 의미에서 비용편익분석이라고 할 수 없다. 또한 비용과 편익을 추정할 대상연도가 다르다는 한계도 있다. 구체적으로 살펴보면, 여기서 제시한 정책비용은 2020년까지 서울시가 계획하고 있는 연평균 예산인 반면, 지불용의액은 2025년까지 연평균 미세먼지 농도를 현재보다  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  낮추는 시나리오에 대한 지불용의액을 나타낸다.



[그림 6-1] 서울시 미세먼지 관리 정책 연평균 편익

## 2\_연구의 한계 및 제언

이번 연구의 결과들은 서울시 미세먼지 관리 정책의 경제성 분석을 위한 기초 자료로 활용할 수 있다. 향후에는 서울시가 추진하고 있는 미세먼지 관련 규제로 인해 민간 부문의 경제활동이 변하는 것까지 함께 고려한 경제적 비용(economic cost)을 산출하는 연구를 수행할 필요가 있다. 이러한 경제적 비용이 산출되면 이번 연구에서 산출한 편익과 함께 비용편익분석을 위한 자료로 사용할 수 있다. 또한 향후에는 개별 사업 단위에서의 비용 편익분석을 수행할 필요가 있다. 개별 수단에 대한 비용편익분석은 미세먼지 정책 수단의 우선순위를 정하는 데 도움이 될 것이다. 미세먼지 관리 정책을 보다 효율적으로 추진해 가기 위해서는 이밖에도 미세먼지 1톤의 사회적 비용, 미세먼지 한계감축비용 등에 관한

경제성 분석이 추가적으로 시행되어야 할 것이다. 이는 추후 연구과제로 남긴다.

서울시의 미세먼지 문제는 서울시민의 노력으로 해결할 수는 없다. 서울시 외부에서 유입되는 오염물질의 양이 자체적으로 발생하는 오염물질의 양보다 많기 때문이다(서울시, 2016). 따라서 서울 시민이 겪는 불편함과 건강위험을 해소하기 위해서는 오염원을 발생시키는 해외 국가 혹은 주변 지자체와의 협상이 무엇보다 중요하다. 이를 위해서는 오염 기여도 분석과 같은 자연과학적 연구결과뿐 아니라 최적(optimal)의 감축량과 감축방식을 선정하기 위한 경제학적 분석도 선행되어야 한다. 이번 연구는 이를 위한 중요한 시작점이 될 수 있다. A라는 국가 혹은 지자체와 B라는 국가 혹은 지자체 사이에 미세먼지 감축 협력을 수행할 때의 핵심은 공동으로 감축해야 할 목표량을 산정하고 상호간 미세먼지 감축의 책임을 어떻게 분배할 것인가에 있다. 이번 연구에서 산출한 미세먼지 관리정책의 편익은 공동의 감축량 목표 선정을 위한 기초자료로 활용할 수 있다.

이번 연구는 서울시 미세먼지 관리 정책의 편익을 종합적으로 분석했다는 점에서 의의가 있다. 그러나 개별 분석 방법은 나름의 한계를 갖고 있기 때문에 이번 연구에서 산출한 결과를 절대적인 수치로 받아들이기 필요는 없다. 보다 견고한 정책을 수립하기 위해서는 다양한 방법론을 활용한 연구 결과들이 축적되어야 할 것이다. 특히 지불용의액 분석은 설문조사 시점에 따라 다양한 편익(bias)이 발생할 수 있기 때문에 이번 연구와 다른 시기에 설문조사를 수행하고 결과를 비교할 필요가 있다. 이번 연구의 설문조사는 미세먼지 농도가 비교적 양호한 6월에 수행되었는데, 미세먼지 문제의 계절적 특성을 반영해 미세먼지가 심한 겨울이나 봄에 수행한 조사도 필요할 수 있다. 또한 건강영향 분석과 심미적 영향 분석, 거시경제 영향 분석의 경우 이번 연구에서는 자료의 한계로 분석 내용을 일부로 한정하였는데, 자료가 축적되어 추가적인 영향을 분석할 수 있다면 서울시 미세먼지 관리 정책의 편익은 더욱 커질 수 있다. 특히 미세먼지로 인한 질환 치료비용 영향(우울증 등 포함), 여가 산업 및 서비스업 매출 변화, 생태계 영향 등은 이번 연구에서 고려하지 못하였는데, 추후 연구에서는 이러한 내용도 포함할 필요가 있다.

## 참고문헌

- 김봉수(2013), “국내 미술시장 현황 연구: 미술시장실태조사를 중심으로”, 『경영관리연구』, 제6권 제1호, pp.27~49.
- 강상인·김재준(2007), 「축사 동태형 환경경제 통합모형 연구」, 한국환경정책평가연구원.
- 공성용 외(2012, 2013), 「초미세먼지(PM2.5)의 건강영향 평가 및 관리 정책 연구(I, II)」, 한국환경정책평가연구원.
- 김성태 외(2011), “한국의 산업별 생산의 대체탄력성 추정”, 『응용경제』, 제13권 제3호, 99-122.
- 노용환·남상호(2006), “한국경제의 소득재분배 효과 분석”, 『금융경제연구』, 제242호, 한국은행.
- 서울시(2015), 「제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 수립을 위한 서울특별시 시행계획 수립」, 서울특별시.
- 서울시(2016), 「초미세먼지(PM-2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구」, 서울특별시.
- 서울시(2017), “서울시, 소중한 시민의견 담아 만든 미세먼지 10대 대책 발표”, 서울시 보도자료(2017.6.2.).
- 서울시(2018), 「초미세먼지(PM-2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구」, 서울특별시.
- 안소은, 배현주,곽소연, 임연희, 김명희, 오서연(2016), 「빅데이터를 이용한 대기오염의 건강영향 평가 및 피해비용 추정(2)」, 한국환경정책·평가연구원.
- 최종일·이영수(2015), “초미세먼지(PM2.5) 배출량이 호흡기계 질환에 미치는 영향 연구”, 『환경정책』, 23(4): 155-172.
- 통계청(2017), 한국표준산업분류 제10차 개정 해설서.
- 한국개발연구원(2012), 「예비타당성 조사를 위한 CVM 분석지침 개선 연구」, 한국개발연구원.
- 한국은행(2015), 우리나라의 국민계정체계.
- 황인창(2018), “서울시 미세먼지 관리 정책의 성과와 한계”, 『한국정책학회보』, 27(2): 27-50.
- AEA(2001), The cost of reducing PM10 and NO2 emissions and concentrations in the UK.
- AEA(2011), Cost benefit analysis for the revision of the national emission ceilings directive, Report to European Commission.
- Amann, H.M.(2014), The final policy scenarios of the EU clean air policy package, IIASA, Laxenburg.
- Amann, H.M. et al.(2011), Cost-effective emission reductions to improve air quality in Europe in 2020, IIASA, Laxenburg.

Arrow, K., Solow, R., Portney, P.R., Leamer, E.E., Radner, R., Schuman, H.(1993), Report for the NOAA Panel on Contingent Valuation, NOAA.

Carson, R.T., Hanemann, W.M.(2005), Contingent valuation, in Mäler, K.G. and Vincent J.R.(eds), Handbook of Environmental Economics Vol.2., Elsevier.

Carson, R.T., Mitchell, R.C., Hanemann, W.M., Kopp, R.J., Presser, S., Ruud, P.A.(2003), Contingent valuation and lost passive use: damages from the Exxon Valdez oil spill, Environmental and Resource Economics, 25: 257-286.

Ciucci, A. et al.(2016), Cost-effective reductions of PM<sub>2.5</sub> concentrations and exposure in Italy, Atmospheric Environment(forthcoming).

Cohen, A. et al.(2017), Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015, Lancet, 389: 1907-18.

EPA(2011), The benefits and costs of the clean air act from 1990 to 2020: Summary report.

Fann, N., Fulcher, C. M., Hubbell, B. J.(2009), The influence of location, source, and emission type in estimates of the human health benefits of reducing a ton of air pollution. Air Qual., Atmos. Health, 2(3): 169-176.

Fann, N., Baker, K. R., Fulcher, C. M.(2012), Characterizing the PM<sub>2.5</sub>-related health benefits of emission reductions for 17 industrial, area and mobile emission sectors across the U.S. Environ. Int., 49: 141-151.

Haab, T.C., McConnell, K.E.(2002), Valuing Environmental and Natural Resources, Edward Elgar, Northampton.

Heo, J., Adams, P. J., Gao, H. O.(2016), Public health costs of primary PM<sub>2.5</sub> and inorganic PM<sub>2.5</sub> precursor emissions in the United States. Environmental science & technology, 50(11): 6061-6070.

Holland, M., Watkiss, P.(2002), Estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe. European Commission DG Environment.

Holland, M.(2014), Cost-benefit analysis of final policy scenarios for the EU clean air package, EMRC.

Holland, M., Pye, S., Watkiss, P., Droste-Franke, B., Bickel, P.(2005), Damages per tonne emission of PM<sub>2.5</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and VOCs from each EU25 member states(excluding Cyprus) and surrounding areas, European Commission DG Environment.

IASA(2009), GAINS online: Tutorial for advanced users, IASA, Laxenburg.

Karvosenoja, N. et al.(2007), Cost-effective reduction of fine primary particulate matter emissions

in Finland, Environmental Research Letter, 2: 1-8.

Kolstad, C.(2011), Intermediate Environmental Economics, Oxford University Press, New York.

Krström, B.(1997), Spike models in contingent valuation, American Journal of Agricultural Economics, 79(3): 1013-1023.

Kunugi et al.(2017), Cost-effective strategy for reducing particulate matter 2.5 in the Tokyo Metropolitan area: An integrated approach with aerosol and economic models, WINPEC Working Paper Series No.E1709.

NOAA(2002), Strategic research plan for particulate matter, Air quality research subcommittee of the committee on environment and natural resources.

OECD(2014), The cost of air pollution: Health impacts of road transport, OECD Publishing.

OECD(2016), The economic consequences of outdoor air pollution, OECD Publishing.

Smeets, W. et al.(2007), Cost-effective abatement options for improving air quality in the Netherlands.

Van Dingenen et al.(2009), The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation. Atmospheric Environment, 43: 604-618.

Van Dingenen et al.(2018), TM5-FASST: a global atmospheric source-receptor model for rapid impact analysis of emission changes on air quality and short-lived climate pollutants, Atmos. Chem. Phys. Discuss,(<https://doi.org/10.5194/acp-2018-112>).

WHO(2015), Health and the environment: addressing the health impact of air pollution, Sixty-eighth world health assembly agenda item 14.6, WHA68.8.

WHO(2016), Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease, WHO Press, Geneva.

WHO Europe and OECD(2015), Economic cost of the health impact of air pollution in Europe.

World Bank and IHME(2016), The cost of air pollution: Strengthening the economic case for action, The World Bank and Institute for Health Metrics and Evaluation.

서울시 대기환경정보 홈페이지(<http://cleanair.seoul.go.kr/>)

한국은행 ECOS(<http://ecos.bok.or.kr/>)

GAINS(<http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/air/GAINS.html>)

## 부록

### 1\_지불용의액 설문문항

서울시는 미세먼지 농도를 줄이기 위해 보다 강력한 정책을 시행하려고 합니다. 이를 통해 미세먼지가 건강에 미치는 악영향을 완화하고 가시거리를 개선하는 등의 효과를 거둘 수 있습니다. 미세먼지 개선사업을 시행할 경우 아래의 표와 같이 미세먼지 농도가 좋은 날이 늘고 나쁜 날이 줄어들게 됩니다. 다만 미세먼지 개선사업을 위해서는 많은 예산이 소요되므로 이 비용은 지방세의 형태로 시민이 부담해야 합니다. 미세먼지 개선사업은 향후 5년간 추진될 예정이며, 이에 따라 귀댁에서는 5년간 동일한 액수의 지방세를 매년 납부하셔야 합니다.

#### [대기관리 정책 사나리오]

미세먼지(PM2.5) 농도 등급	좋음(0~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	보통(16~35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	나쁨(36~75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
A. 현재	1년 중 57일(16%)	1년 중 237일(65%)	1년 중 71일(19%)
B. 개선사업 시행 시	1년 중 183일(50%)	1년 중 164일(45%)	1년 중 18일(5%)

#### 문1

서울시의 적극적인 미세먼지 개선사업 수행으로 A 상태에서 B 상태로 미세먼지 농도가 개선된다면, 이를 위해 귀댁에서는 소액이라도 지방세를 납부하실 의향이 있습니까? 납부한 세금은 전액 자동차·사업장 미세먼지 감축, 대외협력 사업 등의 미세먼지 개선사업에 사용될 예정이며, A에서 B로 100% 전환 가능합니다.

※ 미세먼지 농도 등급에 따른 가시거리 및 건강에 미치는 영향은 [보기카드 1]과 같음

1. 있다 → 문1-1로 이동

2. 없다 → 문1-4로 이동



**[보기카드 1] 미세먼지 농도별 차이**

미세먼지(PM2.5) 농도 등급	중음(0~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	보통(16~35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	나쁨(36~75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
가시거리	 <p>(가시거리 19km)</p>	 <p>(가시거리 13km)</p>	 <p>(가시거리 4km)</p>
건강영향*	<p>호흡기질환 사망률 1.8% 감소, 심혈관계 질환 사망률 1.3% 감소</p>	<p>호흡기질환 사망률 1.8% 증가, 심혈관계 질환 사망률 1.3% 증가</p>	<p>호흡기질환 사망률 9.0% 증가, 심혈관계 질환 사망률 6.5% 증가</p>

\* 최근 37년 평균농도(25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 대비 농도 등급별(중음, 보통, 나쁨) 최다치에서의 사망률 산정

**[보가카드 2] 2018년 표준생계비 중 공과금 및 차량 유지비 항목(연간 비용)**

(단위: 원/년)

구분	1인 가구	2인 가구	3인 가구	4인 가구
취사·난방비	226,728	397,008	387,576	381,600
상·하수도요금	295,668	534,876	729,792	784,584
전기요금	506,148	782,688	923,532	991,944
수도·광열비	1,028,544	1,714,572	2,040,900	2,158,128
차량 유지비	-	4,536,000	4,546,800	4,871,400

자료: 2018년 민주노총 표준생계비 산출 결과 보고서

**2\_지불용의액 분석 대안모형 결과****[부록 표 1] 프로빗 모형 통계치**

	계수 값	표준오차	p-value	95% 신뢰구간	
$\beta$	-3.42e-06	9.15e-07	<0.001	-5.21e-06	-1.62e-06
상수( $\alpha$ )	0.2826392	0.1489808	0.058	-.0093578	0.5746363

주: N=388, Log likelihood(LR)=-255.89, LR chi-square(1)=14.12, p-value &lt; 0.001

**[부록 표 2] 로짓 모형 통계치**

	계수 값	표준오차	p-value	95% 신뢰구간	
$\beta$	-5.50e-06	1.49e-06	<0.001	-8.43e-06	-2.58e-06
상수( $\alpha$ )	0.4558958	0.2398741	0.057	-0.0142489	0.9260405

주: N=388, Log likelihood(LR)=-255.90, LR chi-square(1)=14.09, p-value &lt; 0.001

**[부록 표 3] Haab and McConell(2002) 모형 통계치**

	계수 값	표준오차	p-value	95% 신뢰구간	
$\beta$	-6.12e-06	1.56e-06	<0.001	-9.18e-06	-3.06e-06
상수( $\alpha$ )	0.684321	0.2531051	<0.001	0.188244	1.180398

주: N=360, Log likelihood(LR)=-239.30, LR chi-square(1)=16.00, p-value &lt; 0.001

**[부록 표 4] Krström(1997) 스파이크 모형(저항응답 포함) 통계치**

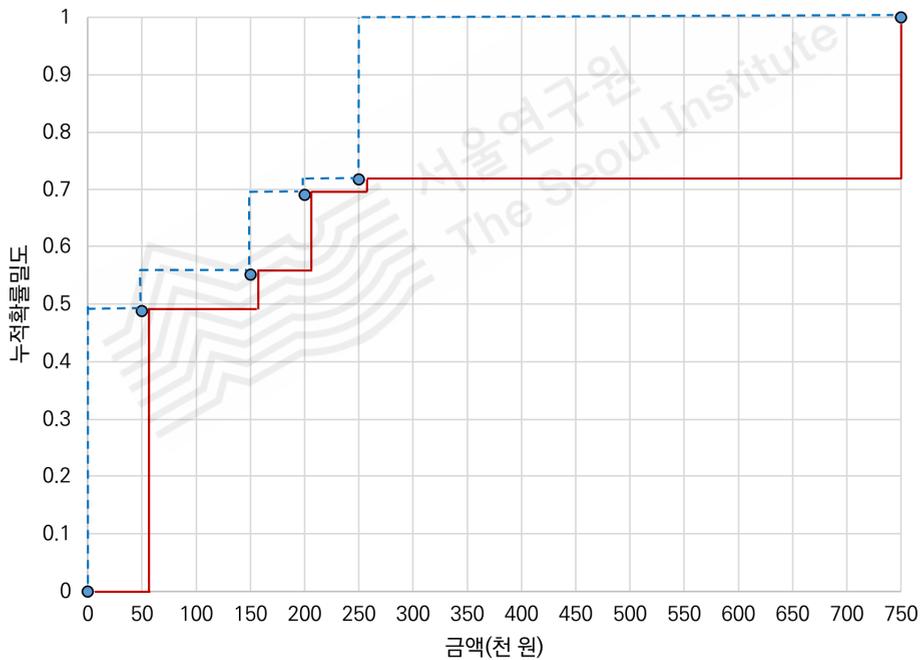
	계수 값	표준오차	p-value	95% 신뢰구간	
$\beta$	0.00001	6.29e-07	<0.001	8.81e-06	0.0000113
상수( $\alpha$ )	0.5798771	0.0870074	<0.001	0.4093458	0.7504084

주: N=551, Log likelihood(LR)=-609.08, Wald chi-square(1)=255.11, p-value &lt; 0.001

[부록 표 5] 비모수 모형(turnbull 방식) 통계치

구간	확률밀도	누적밀도	하한평균(원)	상한평균(원)
0원		0.000	0	24,375
5만 원	0.488	0.488	3,161	9,484
15만 원	0.063	0.551	21,095	28,127
20만 원	0.141	0.691	5,318	6,648
25만 원	0.027	0.718	70,513	211,538
75만 원*	0.282	1.000		
합계			100,087	280,172

주: N=388, 지불용의액의 표준편차=7,269원, p-value < 0.001, \* 75만 원은 임의로 선정



주: 그림에서 점선은 상한 기준, 실선은 하한 기준으로 도출된 누적분포함수임

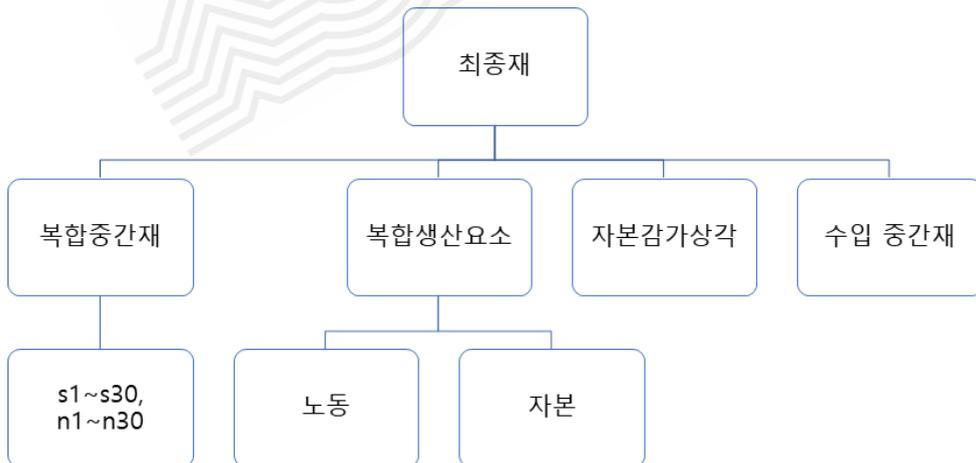
[부록 그림 1] 지불용의액 누적분포함수

### 3\_연산가능 일반균형 모형 구조

이번 연구에서 사용한 모형의 세부 연산식은 생산 부문, 최종수요 부문, 대외 부문, 시장 청산 조건으로 구분하여 살펴볼 수 있다.

#### (1) 생산 부문

생산부문의 연산구조는 다음과 같다. 최상위 단계인 최종재는 서울 및 비서울 지역의 각 산업부문에서 생산된 최종재들의 조합인 복합중간재, 노동과 자본으로 구성된 복합생산요소, 자본 감가상각, 수입된 최종재들의 조합인 수입 중간재로 이루어진다. 일반적으로는 최종재 생산이 복합중간재와 복합생산요소로만 구성되나(일부 에너지 모형에서는 에너지도 별도로 취급), 이번 연구에서는 자본감가상각과 수입 중간재도 별도의 투입요소로 간주했다. 최종재 생산의 함수는 복합중간재, 복합생산요소, 자본감가상각, 수입 중간재를 투입요소로 하는 레온티에프(Leontief) 함수 구조를 가진다. 즉, 개별 투입요소들의 비중은 상대가격과 무관하게 고정적인 것으로 간주된다. 또한 복합중간재의 함수 형태도 레온티에프 함수 구조를 가진다. 반면 복합생산요소는 노동과 자본을 투입요소로 하는 고정대체탄력성(Constant Elasticity of Substitution: CES) 기술로 생산된다.



[부록 그림 2] 생산부문 연산 구조

산업부문을  $i = s1, \dots, s30, n1, \dots, n30$  이라고 하고, 최종재 산출량을  $xt_i$ , 복합중간재를  $xm_i$ , 복합생산요소를  $xb_i$ , 간접세를  $idt_i$ , 자본감가상각을  $dep_i$ , 중간재 수입량을  $imp_i$  라고 하면, 레온티에프 생산기술로 이루어진 최종재 생산함수는 다음과 같이 표기된다.<sup>3)</sup>

$$xt_i = \min \left[ \frac{xm_i}{1 - axb_i - idtr_i - depr_i - impr_i}, \frac{xb_i}{axb_i}, \frac{idt_i}{idtr_i}, \frac{dep_i}{depr_i}, \frac{imp_i}{impr_i} \right]$$

**[부록 식 1]**

최종재 시장의 수급 균형에 따라 각 재화의 균형공급량이 결정되면, 각 재화의 양과 가격은 다음과 같이 생산함수 비용 최소화 문제의 해로 도출된다.

$$xm_i = (1 - axb_i - idtr_i - depr_i - impr_i) \cdot xt_i \quad \text{[부록 식 2]}$$

$$xb_i = axb_i \cdot xt_i \quad \text{[부록 식 3]}$$

$$idt_i = idtr_i \cdot xt_i \quad \text{[부록 식 4]}$$

$$dep_i = depr_i \cdot xt_i \quad \text{[부록 식 5]}$$

$$imp_i = impr_i \cdot xt_i \quad \text{[부록 식 6]}$$

$$\begin{aligned} & (1 - idtr_i - depr_i - impr_i) \cdot pt_i \\ & = (1 - axb_i - idtr_i - depr_i - impr_i) \cdot pm_i + axb_i \cdot pb_i \end{aligned} \quad \text{[부록 식 7]}$$

여기서  $axb_i$ 는 복합생산요소 투입계수,  $idtr_i$ 는 간접세율,  $depr_i$ 는 감가상각률,  $impr_i$ 는 중간재 수입 비중,  $pt_i$ 는 최종재 가격,  $pm_i$ 는 복합중간재 가격,  $pb_i$ 는 복합 생산요소 가격을 나타낸다.

3) 이하 연산식의 표기와 기본체계는 강상인·김재준(2007)을 따랐는데, 이번 연구의 목적에 맞게 일부 수정하였다.

복합생산요소  $xb_i$ 는 노동  $l_i$ 와 자본  $k_i$ 를 투입요소( $f$ 로 표기)로 하는 다음과 같은 CES 함수로 나타난다.

$$xb_i(l_i, k_i) = ab_i \left[ \sum_{f \in \{l_i, k_i\}} alp_{f,i} \cdot f^{\rho_i} \right]^{-1/\rho_i} \quad \text{[부록 식 8]}$$

여기서 배분계수  $alp_i$ 는  $\sum_{f \in \{l_i, k_i\}} alp_{f,i} = 1$ 을 만족하며,  $ab_i$ 는 스케일 파라미터를 나타낸다. 노동과 자본 간의 대체탄력성을 나타내는  $\sigma_i$ 는 수식의  $\rho_i$ 와  $\sigma_i = 1/(1 + \rho_i)$ 의 관계를 가진다.

복합생산요소 생산함수에 대한 비용 최소화 문제의 해는 노동의 가격을  $pl_i$ , 자본의 가격을  $pk$ 라고 할 때 다음과 같이 나타난다.

$$l_i = ab_i^{\sigma_i - 1} [alp_{l,i} \cdot pb_i / pl_i]^{\sigma_i} xb_i \quad \text{[부록 식 9]}$$

$$k_i = ab_i^{\sigma_i - 1} [alp_{k,i} \cdot pb_i / pk]^{\sigma_i} xb_i \quad \text{[부록 식 10]}$$

각 부문의 노동요소는 특정 시점에서의 정태적 관점에서 이동이 불가능한 것으로 간주하기 때문에 각 부문마다 노동가격을 차별화한다. 반면 자본은 부문 간 자유로운 이동이 가능하다고 가정하여 단일 가격인  $pk$ 로만 표기된다. 다만 이번 연구에서는 노동요소의 가격을 모든 산업부문에 대해 세분화하지 않고 농작물 생산변화의 직접적 영향이 있는 서울지역의 s1부문과 서울 지역의 나머지 부문인 s2~s30, 비서울 지역의 모든 생산부문인 n1~n30 등 크게 3가지 가격으로 나누어 연산한다.

복합생산요소의 가격  $pb_i$ 는 위의 최적 수요량을 비용함수에 대입하여 다음과 같이 나타난다(노동과 자본 요소가격을  $p_{f,i}$ 라고 표기).

$$pb_i = 1/ab_i \left[ \sum_{f \in \{l_i, k_i\}} alp_{f,i}^{\sigma_i} \cdot p_{f,i}^{1-\sigma_i} \right]^{1/(1-\sigma_i)} \quad \text{[부록 식 11]}$$

복합중간재  $xm_i$  함수는 생산부문  $j$ 로부터  $i$ 부분 생산에 활용된 중간투입량을  $mm_{j,i}$ 라고 표기하고,  $j$ 부문으로부터의 중간 투입계수를  $am_{j,i}$ 라고 표기할 경우 다음과 같은 레온티에프 함수로 나타난다. 이때 중간 투입계수의 합은  $\sum_j am_{j,i} = 1$ 을 만족시킨다.

$$xm_i = \min [mm_{j,i}/am_{j,i}] \quad \text{[부록 식 12]}$$

중간투입의 수요량과 복합중간재의 가격은 다음과 같이 결정된다. 이때  $ps_j$ 는  $j$ 부문으로부터의 공급 가격이다.

$$mm_{j,i} = am_{j,i} \cdot xm_i \quad \text{[부록 식 13]}$$

$$pm_i = \sum_j am_{j,i} \cdot ps_j \quad \text{[부록 식 14]}$$

## (2) 최종수요 부문

최종수요 부문은 국민계정 제도부문의 분류체계를 준용하여 가계, 기업, 정부로 구분한다. 가계부문의 최종수요는 다음과 같다. 우선 수입은 노동소득  $hl$ , 분배가 이루어진 자본수익  $hk$ , 정부로부터의 이전소득  $TPh$ , 민간사회보험부담금 등 연금이나 보험금과 같이 금융기업으로부터 가계로 이전된 이전거래  $TPhf$ , 해외로부터의 경상이전  $he$ 로 구성된다. 세금 및 공제는 노동소득과 자본수익에 대한 직접세(세율  $hdtr$ ), 기업을 경유한 피고용인 사회부담금이나 금융기업에 이전 지출되는 연금 및 보험금  $TPfh$ 로 구성된다.

이상의 내용을 반영하여 가계의 가처분소득  $DHI$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$DHI = (1 - hdtr) \cdot (hl + hk) - TPfh + TPh + TPhf + he \quad \text{[부록 식 15]}$$

가계에서는 가처분소득의 일정비율을 저축( $HS$ )하거나 해외 이전지출( $hce$ )하는데, 각 비례계수(저축률  $hsr$ , 해외 이전지출 비중  $her$ )에 따라 다음과 같이 계산한다.

$$HS = hsr \cdot DHI \quad \text{[부록 식 16]}$$

$$hce = her \cdot DHI \quad \text{[부록 식 17]}$$

저축 및 해외 이전지출 후 남은 소득으로 각 상품의 소비를 위해 지출한다고 가정한다. 가계의  $i$ 재화에 대한 지출이  $hc_i$ 라고 할 경우, 효용함수  $U(hc_i)$ 는 각 부문에 대한 지출의 콥-더글러스(Cob-Douglas) 함수 형태로 나타난다.

$$U(hc_i) = \prod_i hc_i^{\delta_i} \quad \text{[부록 식 18]}$$

여기서  $\delta_i$ 는  $i$ 부문 재화 소비비중을 의미한다.

각 부문 소비 수요는 다음과 같이 나타난다.

$$hc_i = \delta_i \cdot (1 - hsr - her) \cdot DHI / ps_i \quad \text{[부록 식 19]}$$

가계 부문의 수입-지출 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & hl + hk + TPfh + TPhe + hce \\ &= \sum_i ps_i \cdot hc_i + TPfh + hctr \cdot (hl + hk) + HS + hce \quad \text{[부록 식 20]} \end{aligned}$$

기업부문의 최종수요는 다음과 같다. 우선 기업의 수익은 분배가 이루어지지 않은 자본수익  $fk$ , 보조금 등 정부로부터의 이전소득  $TPf$ , 피고용인 사회부담금이나 금융기업에 이전 지출되는 연금 및 보험금 명목으로 기업에 이전된 거래액  $TPfh$ , 해외로부터의 경상 이전  $fe$ 로 구성된다.

세금 및 이전 지출액은 자본수익에 대한 직접세(세율  $fctr$ )와 민간사회보험부담금 등 연금이나 보험금과 같이 금융기업으로부터 가계로 이전되는 이전거래  $TPfh$ 로 구성된다.

이상을 반영하여 기업의 ‘가처분소득’  $DFI$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$DFI = (1 - fdtr) \cdot fk - TPhf + TPf + TPfh + fe \quad \text{[부록 식 21]}$$

기업은 별도의 재화 소비를 위한 지출이 가정되지 않으며, 대신 기업 저축( $FS$ )과 기업의 해외 이전지출( $fce$ )이 다음과 같이 각 비례상수  $f_{sr}$ ,  $f_{er}$ 에 의해 결정된다.

$$FS = f_{sr} \cdot DFI \quad \text{[부록 식 22]}$$

$$fce = f_{er} \cdot DFI \quad \text{[부록 식 23]}$$

기업 부문의 수입-지출 관계식은 다음과 같다.

$$fk + TPfh + TPf + fe = TPhf + fdtr \cdot fk + FS + fce \quad \text{[부록 식 24]}$$

정부부문의 최종수요는 다음과 같다. 우선 정부의 수입구조는 가계 노동 및 자본소득에 대한 직접세 부과, 기업 자본소득에 대한 직접세 부과, 생산과정에서의 간접세 부과( $i$ 생산부문에서의 간접세율  $idtr_i$ ), 자본취득에 대한 과세  $gcs$ , 정부의 해외로부터의 경상이전  $ge$ 로 구성된다.

이상을 정리하여 정부의 총수입  $TR$ 을 나타내면 다음과 같다.

$$TR = hdtr \cdot (hl + hk) + fdtr \cdot fk + \sum_i idtr_i \cdot pt_i \cdot xt_i + gcs + ge \quad \text{[부록 식 25]}$$

총수입에서 가계 및 기업부문으로의 이전거래를 제외한 액수에 저축률  $gsr$ 을 적용하여 정부저축  $GS$ 를 계산하고, 해외 이전지출 비율  $ger$ 을 적용하여 정부의 해외 이전지출액  $gce$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$GS = gsr \cdot (TR - TPh - TPf) \quad \text{[부록 식 26]}$$

$$gce = ger \cdot (TR - TPh - TPf) \quad \text{[부록 식 27]}$$

총수입에서 이전거래와 저축, 해외 이전지출 등을 제외한 나머지로 각 생산부문에 대한 지출을 결정하게 된다. 지출함수는 가계부문과 같이 콥-더글러스 함수 형태이며,  $i$ 재에 대한 지출이  $gc_i$ 이고 그 비중이  $\gamma_i$ 라고 할 경우  $gc_i$ 는 다음과 같다.

$$gc_i = \gamma_i \cdot (TR - TPh - TPf - GS - gce) / ps_i \quad \text{[부록 식 28]}$$

정부 부문의 수입·지출 관계식은 다음과 같다.

$$TR = \sum_i ps_i \cdot gc_i + TPh + TPf + GS + gce \quad \text{[부록 식 29]}$$

투자 부문의 구조는 다음과 같다. 총투자  $TIV$ 의 재원은 가계저축, 기업저축, 정부저축 및 해외저축(또는 해외 순자본 이전,  $FSAV$ 로 표기)과 함께 생산과정에서 소요된 감가상각( $dep_i$ )으로 구성되며, 수식은 다음과 같다.

$$TIV = \sum_i dep_i + HS + FS + GS + FSAV \quad \text{[부록 식 30]}$$

각 생산부문별 투자액은 각 부문의 총산출에서 중간재 투입, 가계 및 정부 지출, 수출 등을 제외한 나머지로 간주하여 다음과 같이 나타낸다.

$$inv_i = (pt_i \cdot z_i \cdot xt_i) / ps_i - \sum_j mm_{ij} - hc_i - gc_i - pex_i \cdot xex_i / ps_i$$

[부록 식 31]

여기서  $z_i$ 는  $xt_i$  외에 최종재 생산량에 영향을 미치는 외생변수를 나타내는 계수,  $xex_i$ 는 수출량,  $pex_i$ 는 수출재의 수출가격을 나타낸다.

투자 부문의 수입·지출 관계식은 다음과 같다.

$$TIV = \sum_i ps_i \cdot inv_i + gcs + FINV \quad \text{[부록 식 32]}$$

여기서  $FINV$ 는 해외저축 투자차액을 나타낸다.

### (3) 대외 거래 부문

수출 부문의 구조는 다음과 같다. 국내에서 생산된 최종재는 국내 시장에 공급되거나 수출되는데, 이를 결정짓는 것은 불변전환탄력성(CET: Constant Elasticity of Transformation)을 갖는 전환함수라고 가정하며, 이를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_i \cdot xt_i = at_i \cdot \left[ altd_i \cdot xd_i^{-\rho t_i} + altx_i \cdot xex_i^{-\rho t_i} \right]^{-1/\rho t_i} \quad \text{[부록 식 33]}$$

여기서  $xd_i$ 는 내수재,  $xex_i$ 는 수출재,  $at_i$ 는 스케일 파라미터,  $altd$ 는 내수재 배분계수,  $altx$ 는 수출재 배분계수(합이 1),  $\sigma t_i$ 는 전환탄력치를 의미하며, 다음의 관계식을 만족한다.

$$\rho t_i = (\sigma t_i - 1) / \sigma t_i$$

생산자의 총 판매수입은 완전경쟁시장의 영(0)이윤 조건에 따라 내수재와 수출재 판매수입의 합으로 결정되므로, 내수재 가격을  $pd_i$ 라고 할 경우 다음과 같은 관계를 가진다.

$$pt_i \cdot z_i \cdot xt_i = pd_i \cdot xd_i + pex_i \cdot xex_i \quad \text{[부록 식 34]}$$

수출재의 가격  $pex_i$ 는 국제시장 가격  $pexw_i$ 에 환율  $exr$ 을 곱한 것이다.

$$pex_i = exr \cdot pexw_i \quad \text{[부록 식 35]}$$

이번 연구에서 국제시장 가격은 국내 정책변화와 상관없이 불변이라고 가정한다. 이상의 영이윤 조건과 전환탄력성 함수의 비용최소화 조건으로부터 수출재와 내수재의 공급비율은 다음과 같이 결정된다.

$$xex_i/xd_i = [pd_i/pe x_i \cdot altx_i/altd_i]^{\sigma t_i} \quad \text{[부록 식 36]}$$

수입 부문의 구조는 다음과 같다. 개방경제에서 국내시장에 공급되는 최종재  $x_{s_i}$ 는 국내에서 생산되어 국내시장에 배분된 내수재  $xd_i$ 와 해외에서 생산된 수입최종재  $xim_i$ 로 구성된다. 이들 사이의 대체관계는 CES함수 관계에 의한 아밍턴 가정(Armington assumption)에 따르는 것으로 다음과 같다.

$$x_{s_i} = as_i \cdot [alsd_i \cdot xd_i^{-\rho s_i} + alsm_i \cdot xim_i^{-\rho s_i}]^{-1/\rho s_i} \quad \text{[부록 식 37]}$$

여기서  $alsd_i$ 는 내수재 배분계수,  $alsm_i$ 는 수입재 배분계수이며,  $alsd_i + alsm_i = 1$ ,  $as_i$ 는 스케일 파라미터이며 대체탄력성  $\sigma s_i$ 에 대해  $\rho s_i = (1 - \sigma s_i)/\sigma s_i$ 이다.

수입재의 가격을  $pim_i$ 라고 할 때 국내 공급 최종재, 내수재, 수입재 간에 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$ps_i \cdot x_{s_i} = pd_i \cdot xd_i + pim_i \cdot xim_i \quad \text{[부록 식 38]}$$

아밍턴 복합재 공급비용 최소화 문제를 풀면, 내수재와 수입재의 수요함수는 다음과 같이 나타난다.

$$xd_i = as_i^{-1} \left\{ [alsd_i^{\sigma s_i} \cdot pd_i^{1-\sigma s_i} + alsm_i^{\sigma s_i} pim_i^{1-\sigma s_i}]^{1/(1-\sigma s_i)} \cdot \frac{alsd_i}{pd_i} \right\}^{\sigma s_i} x_{s_i} \quad \text{[부록 식 39]}$$

$$xim_i = as_i^{-1} \left\{ [alsd_i^{\sigma s_i} \cdot pd_i^{1-\sigma s_i} + alsm_i^{\sigma s_i} pim_i^{1-\sigma s_i}]^{1/(1-\sigma s_i)} \cdot \frac{alsm_i}{pim_i} \right\}^{\sigma s_i} x_{s_i} \quad \text{[부록 식 40]}$$

또한 위의 수요식을 총공급비용식에 대입하여 구한 아밍턴재 공급가격은 다음과 같다.

$$ps_i = as_i^{-1} \left[ alsd_i^{\sigma_{s_i}} \cdot pd_i^{1-\sigma_{s_i}} + alsm_i^{\sigma_{s_i}} \cdot pim_i^{1-\sigma_{s_i}} \right]^{1/(1-\sigma_{s_i})} \quad \text{[부록 식 41]}$$

수입재의 가격  $pim_i$ 는 국제시장 가격  $pimw_i$ 에 환율  $exr$ 을 곱한 것이다.

$$pim_i = exr \cdot pimw_i \quad \text{[부록 식 42]}$$

수출재와 마찬가지로 이번 연구에서는 국제시장 가격이 국내 정책 변화와 상관없이 불변이라고 가정했다.

#### (4) 시장청산 조건

각 시장의 청산조건은 다음과 같다. 우선 노동요소시장의 청산 조건은 다음과 같다.

$$hl + el = \sum_i pl_i \cdot l_i + le \quad \text{[부록 식 43]}$$

여기서  $el$ 은 국외지급 피고용인 보수를 의미하며,  $le$ 는 반대로 국외에서 수취한 피고용인 보수를 나타낸다.

자본요소시장의 청산조건은 다음과 같다.

$$hk + fk + ek = \sum_i pk \cdot k_i + ke \quad \text{[부록 식 44]}$$

여기서  $ek$ 는 국외에 지급된 기업 및 재산소득이며,  $ke$ 는 반대로 국외에서 수취된 기업 및 재산소득이다.

각 재화시장의 청산조건은 다음과 같다.

$$xs_i = \sum_j mm_{ij} + hc_i + gc_i + inv_i + xim_i \quad \text{[부록 식 45]}$$

대외 부문의 청산조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum_i impr_i \cdot pt_i \cdot xt_i + el + ek + hce + fce + gce + FINV \\ & = \sum_i pex_i \cdot xex_i + le + ke + he + fe + ge + FSAV \end{aligned} \quad \text{[부록 식 46]}$$

상대가격 비교 방법은 다음과 같다. 소비재 상품의 소비비율을 가중치로 한 소비자 물가지수  $CPI$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CPI = \sum_i \delta_i \cdot ps_i \quad \text{[부록 식 47]}$$

이를 고정하여 상대가격체계의 변화를 나타낼 수 있다.

CGE 모형에서 사용한 사회계정행렬(2013년 기준)은 다음과 같다.

(단위: 백만 원)	s11	s12	s13	s14	s15	s16	s17	s18	s19	s20
s1	2	4	2	1	782	0	4	2020	653	56
s2	4	2	0	0	39	1	0	1171	0	0
s3	182	315	138	43	503	23	214	743	65025	6512
s4	1846	2669	5224	1270	22215	263	9328	15363	612392	107874
s5	1368	3635	577	153	8482	112	2827	15458	234923	43815
s6	15	27	9	10	59	15	45	360	2547	7040
s7	1804	6642	2892	1776	9991	50	2083	52866	61744	12881
s8	190	1528	604	79	1192	1	325	284033	1917	193
s9	11366	2754	793	846	4000	8	1978	5919	7	49
s10	12176	8017	6423	1699	7581	74	395	65267	24044	4012
s11	17639	5615	1417	1102	2707	392	4841	27040	14998	2346
s12	5070	63505	9983	1134	5177	191	786	79985	28215	11483
s13	370	880	5042	12	193	11	35	914	7068	918
s14	302	116	42	13366	355	11	1656	1554	33556	50165
s15	6025	10278	4937	2994	42691	5	887	25425	40366	3922
s16	590	1575	310	141	2623	59744	3417	3198	102194	10264
s17	434	830	444	202	2497	434	51305	7568	174738	19426
s18	699	2378	845	256	744	379	1549	4124	33819	14935
s19	81394	233688	112054	26622	167131	4224	29194	779512	1136842	525601
s20	21948	40370	16880	5571	48744	423	24287	115360	4010013	600455
s21	4657	7907	3545	1089	12434	546	7917	18607	1606564	145243
s22	4160	30133	5474	856	17158	780	13934	46636	6952877	324225
s23	25077	49134	25926	9838	72696	3517	24270	526644	4499697	616979
s24	4486	13275	7035	1010	40576	698	9750	99705	6641249	477722
s25	20240	43549	17031	7270	61886	3040	21527	1131021	2419764	203130
s26	967	4436	1255	248	19758	1444	16472	35467	2368128	468582
s27	1101	2023	1245	170	2678	142	2714	9723	156359	24879
s28	160	325	220	59	1834	55	352	1695	112718	3159
s29	1351	2600	2597	345	1581	62	10177	97716	747528	41534
s30	2614	4225	2029	716	10678	503	12264	52319	1243423	412067
n1	111	185	84	26	4989	12	259	105819	33496	2865
n2	273	142	0	33	2646	54	0	85887	0	0
n3	1084	1870	820	255	6856	137	1348	4407	399537	38017
n4	1110	4435	6396	3664	73035	145	4322	36869	417152	71982
n5	6237	23880	5056	1644	74908	869	4711	370967	1740137	117326
n6	13871	25168	8074	9023	53069	14085	41229	294619	2341194	4252955
n7	72306	291715	146859	64654	311496	2894	65078	1244673	1992879	417439
n8	3623	24768	9080	1587	18883	68	9710	2352225	32742	3147
n9	245574	197061	69921	58602	324633	401	45970	1930594	6111	8780
n10	146331	101879	100509	38695	100955	1513	5764	2499169	383342	91829
n11	199492	48436	12151	11006	31098	7005	62619	615640	389813	47939
n12	129343	1122676	287115	16683	84949	2152	14476	994512	723162	233544
n13	17166	26920	86157	1950	7473	966	14015	58566	212327	27665
n14	4462	1932	594	190720	4898	465	23109	22094	502427	1157766
n15	54010	92141	44159	26441	380065	42	7880	207759	348589	32908
n16	20766	45709	13270	5546	41408	420537	110181	77461	2073558	479378
n17	2536	4149	1445	1401	10936	1075	105223	19278	223443	41920
n18	1270	4321	1535	464	1351	689	2815	7494	61455	27139
n19	28271	81169	38921	9247	58051	1467	10140	270755	394870	182562

(단위: 백만 원)	s11	s12	s13	s14	s15	s16	s17	s18	s19	s20
n20	15267	36942	14655	3200	23450	866	13554	63026	6073821	1081557
n21	7794	13254	5919	1831	20824	918	13195	30629	2637714	247961
n22	1042	6754	1299	204	4529	192	3718	13883	1570034	85870
n23	3410	5928	3343	1152	10779	349	3194	69185	610051	77226
n24	500	1653	536	289	4512	250	2244	19146	432543	162615
n25	2982	5305	2213	1143	3644	376	1820	422083	96113	8946
n26	280	1586	348	70	9807	500	7485	20782	948646	190235
n27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n28	29	60	40	11	337	10	65	311	20700	580
n29	202	389	388	52	236	9	1521	14600	111692	6206
n30	425	639	382	144	2379	109	3528	13838	238173	118568
L	372426	745757	388958	93010	1162802	60040	343665	6371345	19619911	7404620
K	134055	604725	250446	7637	422617	9592	106455	486076	24362577	1361209
H										
F										
G	10748	31257	18673	3647	32680	10052	73384	543134	1566248	1878291
CS	93934	486934	106047	29674	160383	146561	430626	605304	3102060	3552655
E	202562	1742605	509209	71264	290963	61111	28374	1242921	2983395	12298431
TOT	2021732	6324777	2369572	733848	4310626	822657	1816207	24622464	109983282	39849599

(단위: 백만 원)	s21	s22	s23	s24	s25	s26	s27	s28	s29	s30
s1	177400	306	253	57	2386	87	96	133	15177	2745
s2	25	0	0	2	13	0	5	0	21	3
s3	502331	26106	19250	5687	23592	11602	6160	5980	32237	62298
s4	58766	97822	253261	47239	50205	100879	92178	25959	199018	233689
s5	13353	312211	387755	18895	175918	26049	61976	124182	111295	121343
s6	22321	473	258	669	628	209	427	436	10049	495
s7	12257	21537	3419	755	11721	27349	1387	4193	44388	42219
s8	540	676	604	118	1545	158	553	715	359	1180
s9	99	0	0	22	1213	0	1	3	1128	512
s10	6951	5905	11569	1468	7225	2270	9454	1834	1755	7611
s11	1016	5010	5454	4321	9231	2138	1937	1700	1050	14348
s12	3272	120353	29210	6413	22013	9945	3264	5981	3680	30155
s13	700	8500	3878	802	15359	3106	4587	2013	1956	3936
s14	335	8102	5181	4551	3763	1627	1622	813	5053	55776
s15	17380	13875	18390	9386	11080	4547	1890	33865	9344	19805
s16	13416	25379	31790	74899	20043	5767	5615	34247	22500	22958
s17	35772	30021	119121	88077	34538	14122	64197	48310	157382	22867
s18	5417	63626	18528	778549	22582	2981	95389	27139	28871	13392
s19	1378498	2291684	384380	98046	854077	194171	112619	219578	1284650	547565
s20	33856	277868	731435	115201	442942	206031	137358	73039	101798	104771
s21	43646	382840	614506	101632	444119	261009	114775	287341	159812	412148
s22	138163	6084871	3520561	330644	5917887	471038	381781	420366	248015	612764
s23	306877	776283	8012820	7874127	1055065	484114	266584	201872	758547	541088
s24	1060365	1604619	1866144	1175907	1274330	310488	212838	400467	968217	466950
s25	158640	2724405	2179797	238248	983672	198794	127727	175133	167186	174094
s26	49217	2001250	2111222	206492	316715	280135	206782	98806	114033	274725
s27	30196	323521	244322	96409	46498	20931	0	12852	49462	38190
s28	3407	17692	48242	3500	14591	3688	12751	5926	3488	9220
s29	20588	104114	215245	45757	101850	75192	77605	66410	109996	45648
s30	32235	1515873	961057	140623	441685	151225	291790	250059	399544	505948
n1	1164145	15694	12988	2939	19124	4463	3049	7385	261001	41792
n2	1800	0	0	182	886	0	384	0	1544	253
n3	4868553	155585	108972	33653	137233	72636	42460	39410	338579	665635
n4	89502	55673	81412	20592	38302	69454	16601	16629	99715	114323
n5	181677	1178550	304122	44886	255958	71809	31821	135401	99725	150604
n6	334564	434953	237207	615274	577576	192039	338092	400534	345021	405978
n7	295673	375322	110356	17044	372164	504508	39770	99240	3427006	948251
n8	25312	9613	8596	1678	34817	2241	9146	11737	7036	17965
n9	1957	346	0	1866	96605	129	59	788	78470	47545
n10	129883	73679	123620	27737	97566	33860	105821	25419	37384	157274
n11	26185	137990	167881	131562	155470	64334	82567	38014	23142	217668
n12	130561	2291702	528549	107907	443852	184012	76273	197690	121561	618265
n13	20861	196260	89785	21312	510643	45026	85624	117358	436283	70588
n14	7323	119423	68848	69552	206260	25521	135657	16667	78573	762110
n15	152144	121483	156026	77530	96162	39325	16798	280938	81302	172044
n16	817696	845288	660858	2474271	693814	184313	200493	890408	870344	732216
n17	126571	63624	180364	266380	55434	23795	114514	107727	316473	64801
n18	9844	115619	33668	1414756	41035	5417	173338	49317	52464	24336
n19	478807	795992	133510	34055	296655	67443	39117	76268	446209	190191

(단위: 백만 원)	s21	s22	s23	s24	s25	s26	s27	s28	s29	s30
n20	35648	551008	664852	81772	650629	163037	90139	66702	72776	112377
n21	77880	673210	1022921	171476	742928	441373	215469	482843	266912	699729
n22	30348	1573287	1087527	70909	600142	106303	90872	105755	58058	105621
n23	44189	91646	830226	1086531	137431	60673	39910	24737	99678	73617
n24	41513	165909	144506	193485	115985	16765	95439	24799	96181	50827
n25	6176	192245	88452	11000	148134	18265	8198	14580	14313	7605
n26	11740	1011037	847046	44807	112540	93030	62334	40252	25380	105684
n27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n28	626	3249	8860	643	2680	677	2342	1088	641	1693
n29	3076	15556	32161	6837	15218	11235	11595	9923	16435	6821
n30	2712	137975	211036	36176	60263	30247	86838	25045	108782	50727
L	5199988	15268976	14014833	5457059	17062087	8448976	11845174	13107119	11364050	6112412
K	3412401	3267336	16824251	34069117	5393645	2808089	0	1085459	1839995	2776141
H										
F										
G	838781	986282	2767346	2927680	1012686	264721	331804	584021	1048308	739763
CS	751458	9908508	2697895	16613009	2894319	493977	6902272	1991932	1567324	1991356
E	1281074	5356280	2213743	463346	1790113	449739	455195	326160	1270981	817569
TOT	24727706	65034225	68260069	78065520	47174846	17867086	24042513	22930697	29981658	23442227



(단위: 백만 원)	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8	n9	n10
s1	15265	1	3875	1	82	1	63	0	2	1
s2	7	0	183	114	131	39	1885	20300	274	382
s3	7230	7	152554	176	140	26	23317	62	74	106
s4	32008	1261	58599	895748	139598	60047	202192	45208	137799	136634
s5	6777	328	73034	15047	320432	51315	121982	11255	11506	21665
s6	2876	223	605	180	320	3037	12634	2706	3974	1005
s7	2859	440	30420	32290	25426	7560	351622	20286	14280	65286
s8	144	4	18229	115	876	1130	6041	8032	19289	2800
s9	91	13	50	59	215	986	16638	4299	776771	81416
s10	431	484	25209	4218	2449	46255	41200	7092	17721	121714
s11	1705	1286	5859	1372	2438	25166	103351	12274	19605	54001
s12	1179	325	770	821	1474	6919	6132	3491	7841	12363
s13	3126	108	2340	564	1790	18562	21638	3429	10939	17770
s14	70	153	173	73	246	251	855	754	208	540
s15	413	3088	100900	138435	54163	2760	170687	33625	117035	118123
s16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s17	721	54	10921	3116	22345	1380	49848	15164	64735	19913
s18	7344	883	7282	2737	3323	11398	26973	4453	10128	7867
s19	585901	29555	4824887	958941	1019581	1357164	5532806	800698	1606734	2077913
s20	44694	100203	559478	165549	195657	323414	1429166	532649	762169	445938
s21	14570	7204	47997	37845	46984	7718	126355	35098	58022	65022
s22	37294	3670	101732	24311	40954	272304	257282	38736	156920	78060
s23	138121	50590	368736	160809	207806	217002	793253	183331	418815	421504
s24	9870	12410	147102	69340	46810	69921	238287	37009	53940	34480
s25	34500	5934	417011	124022	148928	350544	856645	186877	512789	399941
s26	2544	518	21338	18657	14951	24795	46003	10480	86150	34005
s27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s28	54	3	804	288	549	2456	2505	389	1531	992
s29	5669	541	8337	2855	3352	948	13916	2766	4059	10803
s30	4973	1370	13642	8072	7734	37552	67040	15192	40989	22274
n1	2896511	2858	28214233	11154	322347	2567	278759	2051	7974	3980
n2	1188	0	20357	4116	9986	113342	267729	1976728	401824	28314
n3	10195649	4769	11675598	74171	63974	33104	1026615	25599	84188	45460
n4	335869	4830	65285	5335099	256740	36842	1507384	81688	114304	140544
n5	449225	10840	1706202	221348	6826285	158714	1440664	352570	363143	586915
n6	1957455	235587	681822	265676	385000	4762495	18307166	1902228	8107432	941365
n7	3521643	105580	2718209	4720154	2130675	2368880	75475050	1155357	1614789	4766092
n8	11133	556	522612	11302	124841	127489	600204	4060075	1311508	232313
n9	43319	17256	8546	27928	49994	298964	2292225	1471382	94851445	19038658
n10	30792	52560	1342451	262110	124313	1725666	2086131	513184	1533432	11977211
n11	213420	85913	255127	63058	101985	1569426	2921197	463960	1081332	2339576
n12	84704	15453	49765	42572	59978	356837	327386	174310	456551	669051
n13	23422	266	17810	4298	10003	287831	229291	19242	121834	192875
n14	273514	144523	57417	19061	64379	130907	222887	265884	87900	180818
n15	4967	48098	1595617	2464885	790077	51560	2939377	546634	2091110	2202504
n16	264121	105270	863406	1180707	1166558	3055946	5406730	1019724	6451786	1842438

(단위: 백만 원)	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8	n9	n10
n17	71838	4176	451755	91917	735201	115610	1838912	428862	2550391	586453
n18	71244	8086	55511	18150	22013	93562	200354	32994	84281	53576
n19	771587	36787	5896118	1194081	1194737	2101635	7051369	985144	2197663	2766016
n20	301388	348385	2763563	660082	1188704	3065219	5332589	2330219	3226932	1850163
n21	140617	38321	286813	177061	175113	301766	1521397	190778	623064	377318
n22	63975	6265	153961	68324	83974	386184	437880	137919	290317	144544
n23	510154	109802	739984	350150	372175	481125	1759843	379917	952574	924114
n24	27448	70880	371686	225083	146416	219532	656789	114452	222630	124617
n25	58336	10563	417927	144539	138428	891189	1560661	219712	946696	483598
n26	24999	4027	203675	85481	79347	396177	537968	69792	925037	230257
n27	726	1300	41643	16753	22291	5183	61487	14983	11443	56447
n28	736	60	8713	3181	5190	59891	38926	4566	24117	10909
n29	65734	5532	81919	26289	29951	17790	134864	26897	53691	119691
n30	78196	13812	154647	58507	65871	142466	456328	135652	299354	189496
L	4203035	752309	7603091	5091355	4381792	1906940	19551438	3394261	10162654	14947743
K	19391027	1127273	3895032	3549114	2997762	5757666	18315555	2771961	11423264	10514597
H										
F										
G	1745611	104492	1867938	350682	199701	2224811	1623792	393241	475340	467981
CS	5339353	513587	3707755	1394225	1233392	2530797	11233156	3563032	5299234	1268454
E	1847276	31938	15060374	8710715	6245243	117063696	65922174	4848251	47325643	8394960
TOT	55980649	4242608	100558629	39589083	34113186	155742459	264084593	36108902	210689174	92951566



(단위: 백만 원)	n11	n12	n13	n14	n15	n16	n17	n18	n19	n20
s1	2	2	0	2	15	0	1	152	8	2
s2	151	699	0	44	272	5	0	9211	0	0
s3	155	349	40	148	1065	14	50	78	1125	314
s4	89923	175924	27303	259824	292543	45848	137951	88823	400994	443351
s5	12129	64720	2273	13536	29379	3947	11153	8970	79553	40400
s6	939	812	70	3150	866	1764	387	2396	1259	9628
s7	44362	198256	38377	113802	41789	9986	13390	70039	26649	12260
s8	2053	18103	1858	3570	2365	930	4313	89373	471	335
s9	86191	98357	2771	28757	9997	206	11367	19608	8	137
s10	119151	72866	13768	94554	22714	2836	1032	79689	4610	4194
s11	266515	68573	4376	81729	14551	6670	15898	85459	4447	7311
s12	88255	663849	36361	97362	13415	16759	4037	207426	11219	19573
s13	150266	193859	201166	32568	16809	16970	19465	70311	22918	20706
s14	1688	436	25	178497	309	103	925	490	1524	25980
s15	168742	287853	31866	335651	260080	476	5678	26987	13996	5692
s16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s17	3869	9110	774	11441	9219	6361	85700	7166	527	8159
s18	13325	87732	3562	24370	2777	15867	4577	9226	10886	16514
s19	2709790	6601780	791433	4479896	1196981	303880	193018	2789499	569840	865558
s20	419977	807308	65950	385861	203158	20618	120602	162304	1030265	296759
s21	97042	196181	25049	98219	80407	12428	36968	53522	688276	171846
s22	139485	1456209	35299	183627	159827	79995	100844	124849	1220829	432943
s23	550290	1111865	111355	935596	257473	204210	106289	1318109	1224714	560288
s24	63675	146923	17529	56304	63742	28763	32281	211519	1622754	282490
s25	402879	1186603	73835	907059	587910	191524	214614	4438981	1195022	271801
s26	8760	44711	2454	9959	64587	62647	70156	54440	437846	335252
s27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s28	1220	3523	308	1827	3582	366	480	1075	11979	1094
s29	9702	21295	3480	8363	2868	555	9747	58672	66345	9137
s30	20562	30734	2189	26824	17581	9081	9666	27400	98751	70205
n1	6000	9908	850	7439	45149	1195	2478	582527	27596	7884
n2	9315	32126	0	4040	20130	132422	0	806139	0	0
n3	66832	114163	9484	83139	125893	18705	18278	38126	357820	120853
n4	79140	513704	74467	733759	2037246	67079	90138	296283	422211	512424
n5	331191	1329785	56607	541238	1212533	195645	112816	1997430	1521115	563987
n6	785541	1070987	81510	1769927	868044	3066186	441463	2479579	1671485	12512316
n7	3945260	14249109	2224844	13444760	3198135	1156358	750909	6643967	1531837	1348075
n8	175734	6272511	149644	670471	242373	31292	168264	16572431	30624	20529
n9	12361016	12150195	677053	12496070	3780336	61431	846066	13263691	7410	55609
n10	8786873	5524105	1018258	12448303	1595121	499731	79333	17259579	370219	383415
n11	17111329	3726051	138499	7757264	618235	342082	685507	4468165	271440	408318
n12	6262444	75671189	3062854	5987510	804183	1056129	188789	8214416	617969	981950
n13	1125551	1145268	1158250	801708	122689	240402	105304	402624	153361	129268
n14	757525	110651	4994	61797362	90879	52884	277649	161966	460481	2548895
n15	2978777	4500503	511395	10192439	5373279	8783	96896	1100199	282217	133094

(단위: 백만 원)	n11	n12	n13	n14	n15	n16	n17	n18	n19	n20
n16	900102	3653786	146979	1387075	665930	20243438	983890	498965	2360998	1945150
n17	136550	274889	35679	437897	231138	270792	1497499	184395	325043	228889
n18	89379	502591	20412	183331	17223	128078	32316	65971	68530	106487
n19	3525614	7975691	893985	6293379	1444315	408625	233201	3444904	679181	1078703
n20	1969789	3464193	258410	2246151	777616	162740	508018	1083253	6353770	3784330
n21	560347	912796	69010	716491	419599	150665	182592	310263	2577585	781751
n22	165673	1054400	28371	325297	198817	135379	158313	284363	5978214	615818
n23	1169139	1780964	186949	1811704	483114	313424	250919	2592649	2552538	1157117
n24	231449	488157	44746	324441	260684	115365	145657	709499	4958500	1020817
n25	842580	1804644	109202	1966770	359348	277155	183180	5646248	826028	265927
n26	74791	245683	10497	169018	435261	616006	391353	387326	2118485	1670266
n27	54629	77660	12504	40849	26208	17936	30275	82405	161746	92594
n28	12444	29345	2340	21539	37458	7065	4650	12773	104089	10184
n29	102128	159044	24888	122359	26532	7347	96832	583901	591786	99363
n30	190104	225859	22193	324138	195919	141014	207649	497694	1018813	1438382
L	18089730	31607478	3367676	28453867	13625974	5101735	3963035	43946745	24752954	17836565
K	8286071	24285517	2076386	12310374	5845432	3678459	1691794	6233035	41605996	2539921
H										
F										
G	793509	1693215	163714	992568	363842	3113453	874967	3443118	1419824	4105701
CS	5865988	40621757	1381342	12842035	2996164	11680828	3504774	4253148	4593549	12250568
E	13727826	104398149	4295231	33602100	2617074	45557311	503470	7412561	2957611	18131762
TOT	117041472	365224703	23812691	241679353	54518155	100099946	20518863	165976110	122477843	92798839

(단위: 백만 원)	n11	n12	n13	n14	n15	n16	n17	n18	n19	n20
s1	2091	3	4	1	60	2	70	7	246	21
s2	85	0	0	2	155	0	7	0	48	11
s3	128233	449	321	97	2924	253	311	354	7741	1381
s4	112957	57698	226068	38100	87160	109255	304329	63543	415063	351132
s5	10953	69724	138956	7714	101125	13335	115698	161379	103863	84156
s6	4708	262	167	556	431	200	872	1293	1792	788
s7	16409	2323	1000	328	11028	12847	1285	3259	49259	56019
s8	2093	70	90	17	1735	35	75	601	304	777
s9	46	0	0	2	2234	0	4	6	2312	474
s10	5019	1108	1563	395	6032	606	5576	989	869	5069
s11	1192	1794	2707	2237	10199	1384	2748	1626	949	11618
s12	6937	45335	11409	2794	35223	6411	5001	12373	6864	32591
s13	8379	26097	9609	4130	138463	6594	32091	52786	132059	15525
s14	37	277	208	416	3035	106	588	80	507	10325
s15	27048	3876	7056	3426	6782	2617	4696	30597	11798	24924
s16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s17	3134	308	1065	5161	450	256	11985	9493	20083	6998
s18	4056	21231	5030	373176	23564	1359	238611	38495	19718	11122
s19	2524904	2371486	207609	67980	677274	154668	258616	418957	1831625	770525
s20	24153	59223	178239	32884	186654	89208	132174	54953	57990	48113
s21	61898	160219	237472	47058	767707	139225	179937	430957	149252	292629
s22	185287	2008904	1392345	176058	1047689	157094	682994	624205	168183	560310
s23	258740	246576	2997808	4099458	381169	191711	420952	272797	573695	498309
s24	905444	262066	442448	267711	252594	104919	131971	195188	607847	253967
s25	267049	897244	1286890	143875	629100	113497	283963	204485	170202	187425
s26	26315	460529	408700	47432	89951	67112	124804	50221	41144	116251
s27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s28	1116	1727	4687	367	2804	525	4883	1633	703	1672
s29	5963	8814	18318	5070	15497	9851	28953	23505	28109	8891
s30	13268	35163	94755	11369	59329	17448	39627	115817	54558	46359
n1	4142417	8620	13256	2370	69592	5776	21652	29997	666736	71241
n2	5605	0	0	122	5066	0	3227	0	3583	602
n3	16554380	101664	132702	30698	494734	102442	140917	148912	978905	1467996
n4	211564	45468	108774	27370	127179	109764	107198	69585	323811	287942
n5	464296	554565	484750	50653	545732	112142	281791	636672	388558	367116
n6	1025119	343191	207431	734151	547491	250382	1080490	1561210	894993	950337
n7	703316	164570	110713	23621	955671	715034	169760	277381	8120798	2679928
n8	80931	8614	7354	1698	93178	3128	8784	34752	18514	54969
n9	6335	161	0	1441	462803	166	517	2483	182703	119809
n10	411219	62461	94717	31036	335397	46104	341894	73417	98627	477191
n11	81083	92414	162338	165152	686364	84129	253515	115377	61080	545255
n12	381228	2108190	410572	110673	1388155	242023	218136	644864	322851	1526078
n13	58104	144259	78517	26222	836338	54592	246099	359881	935204	107665
n14	21090	86304	67956	118846	869424	37256	417691	36058	198301	2996140
n15	478097	72558	164889	103926	139848	53897	72642	964894	219517	408397
n16	2240656	738017	805187	2098050	1515072	243813	893587	2717432	2238066	2014110
n17	454337	81786	329448	261912	171589	49561	501905	338181	1132405	231090
n18	30425	122881	36182	2264009	145299	9529	1488184	308119	160672	82939
n19	3094933	2809540	257901	80852	751476	190702	317219	520448	2261411	926455

(단위: 백만 원)	n11	n12	n13	n14	n15	n16	n17	n18	n19	n20
n20	182193	506781	1096560	200819	1021249	385756	770154	314554	368350	325371
n21	299993	465576	1254349	182018	2127212	745731	1215218	2696013	868089	1455357
n22	297337	4462909	2398253	293851	1475751	582030	1028729	840229	508741	575758
n23	645411	286404	4195504	5885284	727237	516618	892652	498847	1427649	949943
n24	2455982	822864	1455245	1370426	947766	314749	889849	591358	1859083	801881
n25	165834	760227	1000961	115821	1326952	164546	230713	227742	253584	147826
n26	159878	1795995	2593422	246576	415245	412514	843568	362241	279610	594747
n27	78866	912089	249476	107326	52965	27002	0	28890	120787	92406
n28	11167	14009	49384	3144	21163	5327	53529	18047	8276	17390
n29	59215	68185	196317	45077	131312	102087	338267	256930	298212	84185
n30	90434	554802	1258224	247003	692424	212192	1196765	633538	1183499	556398
L	14459190	9146382	15402488	6239481	28270313	11622374	41903787	46988825	28808490	14561675
K	9690272	2024162	17532043	31333989	7259875	3915833	0	2860831	5755827	6757712
H										
F										
G	2614950	793508	2697094	2923076	2082221	349429	1228415	1784475	2509435	1880561
CS	1640052	9797987	2892731	16711131	6424710	729494	25867192	7095750	4163155	4093095
E	3776346	3689581	2452288	654786	4178001	601859	1519552	856486	3154519	1908359
TOT	71679770	50389233	67871548	78030425	71835168	24198498	87556419	77664017	75230825	53515311



(단위: 백만 원)	L	K	H	F	G	CS	E	TOT
s1			194589		0	1773	15995	455655
s2			50		0	-111	4490	40299
s3			1181287		0	-35764	520166	2798532
s4			10697235		0	-1954448	17870384	37881196
s5			16961		0	-154430	253433	3781968
s6			26150		0	-67970	0	65650
s7			108130		0	-218327	372259	1925086
s8			3918		0	-73581	12504	427793
s9			154		0	-975526	128049	336381
s10			12031		0	48101	187746	1175683
s11			24395		0	313257	726450	2021732
s12			514915		0	492211	3510719	6324777
s13			73126		0	204069	780663	2369572
s14			6961		0	53862	254032	733848
s15			102750		0	117262	1498438	4310626
s16			289737		0	0	69674	822657
s17			435498		56388	0	51434	1816207
s18			0		0	22211027	280631	24622464
s19			33865603		0	7485955	6718787	109983282
s20			6103440		0	80435	16703898	39849599
s21			10741954		451571	0	4430884	24727706
s22			10476627		0	13694116	3283204	65034225
s23			20239198		0	0	2174397	68260069
s24			48652806		0	3604176	2031054	78065520
s25			1065160		0	11469838	6528107	47174846
s26			783218		0	0	5568771	17867086
s27			204181		22639939	0	118948	24042513
s28			13542882		8899205	0	186191	22930697
s29			9488621		18219259	0	82371	29981658
s30			13631547		782548	362760	1133566	23442227
n1			14322886		0	1185651	779444	55980649
n2			3414		0	17280	226137	4242608
n3			42393138		0	-1215287	7638359	100558629
n4			4530628		0	-421155	13359633	39589083
n5			697584		0	-436156	4011628	34113186
n6			11473550		0	-1128598	64194215	155742459
n7			4405388		0	-2239301	88214906	264084593
n8			175144		0	-1172272	2758283	36108902
n9			19923		0	-10456992	43015538	210689174
n10			476242		0	4011332	14205504	92951566
n11			1336612		0	21019782	45220150	117041472
n12			16592495		0	9713273	218128804	365224703
n13			611155		0	1720901	10285114	23812691
n14			16822928		0	17935904	130916242	241679353
n15			2056776		0	2167004	4482711	54518155
n16			18263966		0	0	60520	100099946
n17			4152903		520572	0	7715	20518863
n18			0		0	157418831	13870	165976110
n19			32934024		0	5401495	18127422	122477843

(단위: 백만 원)	L	K	H	F	G	CS	E	TOT
n20			15420087		0	289142	20013676	92798839
n21			36897147		1428086	0	3589079	71679770
n22			15475125		0	4799997	1385950	50389233
n23			29447077		0	0	189476	67871548
n24			50384435		0	3444046	617610	78030425
n25			1048459		0	43030417	5124730	71835168
n26			2288084		0	0	1915262	24198498
n27			842808		84209434	0	5310	87556419
n28			41185306		35729510	0	104179	77664017
n29			31306593		39653911	0	45790	75230825
n30			37306179		1876828	138471	569914	53515311
L	0	0	0	0	0	0	853500	630253932
K	0	0	0	0	0	0	33390100	412462411
H	628336832	118125800	0	41820600	67384600	0	6965000	862632832
F	0	272209111	20772500	0	55300	0	2042400	295079311
G	0	0	107930100	44163100	0	133489216	272600	347168051
CS	0	0	41736134	107310400	63277100	0	38717149	522172166
E	1917100	22127500	76840918	101785211	1983800	76800500	0	856945165
TOT	630253932	412462411	862632832	295079311	347168051	522172166	856945165	



## Abstract

---

### Benefits of Management Policy of Seoul on Airborne Particulate Matter

In Chang Hwang

Air pollution is one of the major environmental health hazards responsible for illness and deaths worldwide. Among the sources of air pollution, particulate matter whose diameter is less than 2.5 micron(PM<sub>2.5</sub>) has the highest effect on health condition. The municipality of Seoul has made various efforts to mitigate the effects of particulate matter. In particular, Ten Measures for Fine Particles were established after an open forum held in June 2017.

Since the management of fine particles would command a huge budget, a legitimate validation through the assessment of socioeconomic benefits is required.

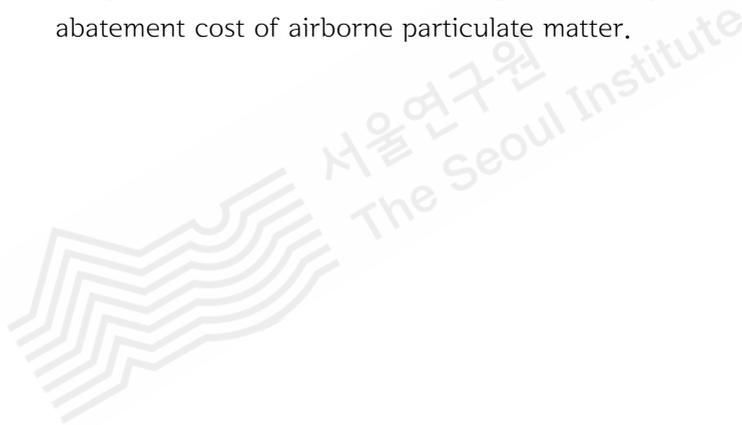
Moreover, there's a need for an economic analysis on matters related to fine particles in order to cooperate with other municipalities and neighboring countries such as China. This study aims to evaluate the socioeconomic benefit of the management policy of Seoul in regard to airborne particulate matter.

This study estimates the willingness to pay of the management policy of Seoul on airborne particulate matter using the contingent valuation method. The annual willingness to pay was estimated to be 138,107 Korean won per household in Seoul(95% confidence interval of 125,376 to 150,839 won). The total benefit of the management policy of Seoul was estimated to be 540.7 billion Korean won(95% confidence interval of 490.8 billion to 590.5 billion Korean won).

Applying a computable general equilibrium model, the maximum

annual benefit of the management policy of particulate matter in Seoul is estimated to be about 26.6 billion Korean won. Annual health benefit of the management policy of particulate matter in Seoul is estimated to be about 413.9 billion Korean won for the next 5 years. The budget used for airborne particulate matter management in Seoul averaged 160 billion Korean won annually. A simple comparison shows that the benefit of the management of airborne particulate matter in Seoul on Seoul's citizens would yield 3~4 times more than the incurred expense.

The results of this study are an important basis for the establishment and administration of the management policies on airborne particulate matter in Seoul. For an effective administration of the management policies, additional economic analyses are necessary to study the economic cost of the management policy and the marginal abatement cost of airborne particulate matter.



# Contents

---

## 01 Introduction

- 1\_Background and Objective
- 2\_Framework of Analysis

## 02 Literature Review

- 1\_Impacts of Particulate Matter
- 2\_Economics of Particulate Matter

## 03 Contingent Valuation

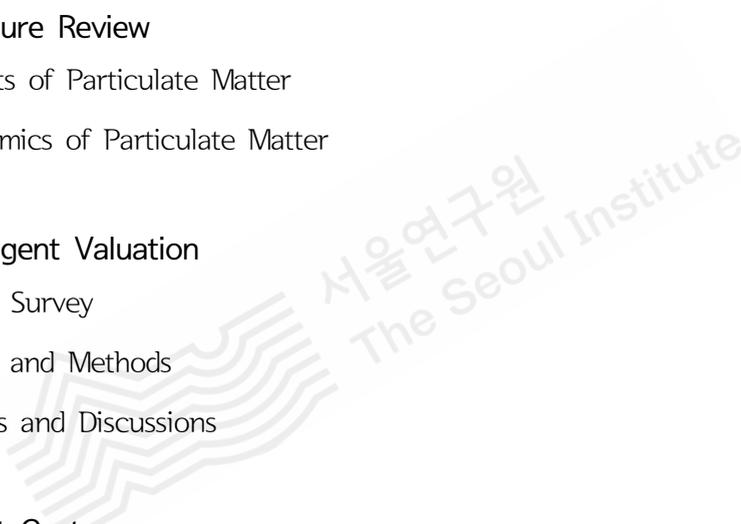
- 1\_Public Survey
- 2\_Model and Methods
- 3\_Results and Discussions

## 04 Market Cost

- 1\_Model and Methods
- 2\_Scenarios
- 3\_Results and Discussions

## 05 Non-market Cost

- 1\_Mortality Risk
- 2\_Health Benefits



## 06 Conclusions

1\_Summary

2\_Limitation

References

Appendix



---

서울연 2018-BR-12

서울시  
미세먼지 관리정책의  
사회경제적 편익

**발행인** \_ 서왕진

**발행일** \_ 2018년 12월 31일

**발행처** \_ 서울연구원

**ISBN** 979-11-5700-389-1 93350 8,000원

06756 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57

---

본 출판물의 판권은 서울연구원에 속합니다.