



2차 수도권 대기환경관리
서울특별시 시행계획 수립 연구



SEOUL

VII

7

대기환경 개선 목표



제7장 대기환경 개선 목표

제1절 연도별 달성목표

세계도시 서울의 환경복지 수준을 향상시키고, 건강한 삶의 조건을 확보하기 위해서는 서울의 대기환경 조건 변화에 따른 시민건강 영향에 유의하고, 기후환경 변화 요인에 대한 대응방안 마련이 바람직하다. 특히 PM과 같은 입자상물질은 흡입성 기도 자극, 기침, 호흡곤란과 같은 호흡기계 질환 증가, 폐 기능 감소, 천식 악화, 만성 기관지염 발생, 불규칙한 심장박동, 경미한 심장마비, 심장질환 또는 폐질환자의 조기사망 등 건강영향을 유발하기 때문이다. 이러한 사실은 초미세먼지 및 스모그 대응을 위한 ‘서울시 대기질 개선 종합대책 수립’ 및 ‘제2차 서울시 대기질 개선 시행계획’(2015~2024) 수립 등으로 맞춤형 대기환경 개선의 승격(upgrade)이 요구되는 연유이다.

이산화질소(NO₂)는 시정거리 감소에 영향을 미치며, 또한 2차 반응에 의해 오존과 미세먼지를 증가시키는 점을 고려하였다. 그리고 미세먼지(PM10)는 시정거리 감소의 직접적인 원인을 제공하며 환경기준 설정 항목 가운데 인체유해성이 가장 큰 점을 고려하여 개선목표를 1차 시행계획에서와 마찬가지로 설정하였다. 특히 인체위해성 중심의 대기관리로의 전환에 부응하기 위해 초미세먼지(PM2.5), 오존(O₃)의 개선목표를 함께 설정하였다.

1. 대책지역 및 관리대상 오염물질

대기환경의 광역관리를 위해 설정되는 대기관리 권역은 시·도간의 행정구역 경계를 넘어 상호 영향을 미치는 대기오염물질의 확산·이동 특성상 수도권 전역을 둘러싼 지정이 바람직하다. 특히 PM10 및 오존의 환경기준 초과횟수가 기존 대기관리권역에서 나타나는 초과횟수 빈도를 상회하고, 오염도가 관리권역과 유사하여 대기오염물질에 의한 인체위해성을 관리하기 위해서는 1차 수도권 대기환경 관리 기본계획에서 제외되었던 7개 시·군(포천시, 광주시, 안성시,



그림 7-1 수도권 대기관리권역의 범위



여주시, 연천군, 양평군, 가평군)을 수도권 대기관리권역에 포함하는 것이 고려되고 있다.¹⁾

그리고 관리대상 오염물질은 1차 계획의 대상물질인 PM10, NOx, VOC, SOx 등 4개 항목에 PM2.5, O₃를 추가하여 6개 오염물질이다. 미세먼지, 초미세먼지 등의 저감을 위해서는 2차 반응에 의하여 (초)미세먼지 오염을 유발하는 황산화물 및 휘발성유기화합물 등 오염물질의 동시 저감에 유의할 필요가 있다.

표 7-1 관리대상 오염물질

1차 기본계획	2차 기본계획
PM10, SOx, NOx, VOCs	PM10, PM2.5 , SOx, NOx, VOCs, O₃

2. 대기질 개선목표

2차 수도권 대기환경 관리 기본계획에서 고려하고 있는 대기환경 개선목표는 인체위해성이 큰 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5), 이산화질소(NO₂), 오존(O₃)의 오염농도를 WHO 권고기준, 선진국 수준으로 개선하여, ‘국민 행복, 건강 복지’ 실현에 기여함에 있다. 대기환경 개선목표 설정 단계에서 검토된 환경기준, 대기질 수준, WHO의 권고기준은 <표 7-2>와 같다.

표 7-2 대기환경 개선목표 설정시 고려사항

PM10	<ul style="list-style-type: none"> ◦ WHO 권고기준 : 20$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 잠정목표 1 70$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 잠정목표 2 50$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 잠정목표 3 30$\mu\text{g}/\text{m}^3$ ◦ 세계 주요도시 : 파리 27$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 동경 21$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 런던 31$\mu\text{g}/\text{m}^3$ ◦ 환경기준 : 한국 50$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 영국 40$\mu\text{g}/\text{m}^3$, EU 40$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM2.5	<ul style="list-style-type: none"> ◦ WHO 권고기준 : 10$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 잠정목표 1 35$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 잠정목표 2 25$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 잠정목표 3 15$\mu\text{g}/\text{m}^3$ ◦ 세계 주요도시 : 파리 17$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 동경 16$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 뉴욕 14$\mu\text{g}/\text{m}^3$ ◦ 환경기준 : 한국 25$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 미국 15$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일본 15$\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO ₂	<ul style="list-style-type: none"> ◦ WHO 권고기준 : 21ppb ◦ 세계 주요도시 : 파리 16ppb, 동경 19ppb ◦ 환경기준 : 한국 30ppb, 영국 21ppb, 중국 21ppb
O ₃	<ul style="list-style-type: none"> ◦ WHO 권고기준 : 50ppb ◦ 환경기준 : 한국 60ppb, 영국 50ppb, EU 60ppb

자료 : 환경부 수도권대기환경청, 「2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015~2024)」, 2013.

1) 경기도 연천군·양평군·가평군 3개군이 최종적으로 제외되고, 인천시 용진군은 영흥면만 포함

이와 관련하여 수도권 대기환경 개선 2차 기본계획에서 제시하고 있는 2024년 최종 목표연도의 서울시 대기환경 개선목표 농도 수준은 미세먼지(PM10) $30\mu\text{g}/\text{m}^3$, 초미세먼지(PM2.5) $20\mu\text{g}/\text{m}^3$, 이산화질소(NO_2) 21ppb, 그리고 오존(O_3) 60ppb 수준이다. 다만, 10년 단위의 기본계획에서 중간단계인 2019년의 목표농도 수준 및 오염물질별 지역배출허용총량이 제시되지 않아, 수도권 목표배출량을 서울시·인천시·경기도 3개 시도간 삭감대책 이행에 따른 기대농도를 추정하고 있다. <표 7-3>은 수도권 대기환경관리 기본계획의 2024년 목표농도를 바탕으로 서울시 단계별 대기환경 개선목표를 제시하고 있다.

표 7-3 서울시 단계별 대기환경 개선목표

구분	2010년	2013년	2019년	2024년
PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	47	44	36	30
PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	25	25	23	20
NO_2 (ppb)	34	33	26	21
O_3 (ppb)	75	79	70	60

주 1: 10년 단위의 기본계획에서 중간단계인 2019년의 목표농도 수준 및 오염물질별 지역배출허용총량이 제시되지 않아, 수도권 목표배출량을 서울시·인천시·경기도 3개 시도간 삭감대책 이행에 따른 기대농도를 추정하고 있음. <표 7-1>은 수도권 대기환경관리 기본계획의 2024년 목표농도를 바탕으로 서울시 단계별 대기환경 개선목표를 제시함.

2: 2010년, 2013년은 대기오염도 측정 자료에 의한 농도 수준이며, PM10은 황사관측일 제외시 농도임. O_3 는 99%ile의 농도 수준임.

한편 이러한 서울시 대기환경 개선 시행계획과 더불어 서울시는 민선6기 기간 동안 ‘숨쉬는 도시 서울 - 미세먼지여 안녕’의 정책목표를 설정하고, 특화·집중관리 대책을 마련하고 있다. 특히 초미세먼지를 20% 감축하여 2018년 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준(베타선흘수법)을 달성하는 목표를 검토하고 있다.

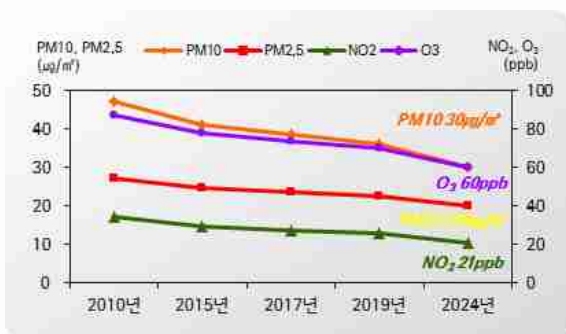


그림 7-2 서울시 단계별 대기환경 개선목표

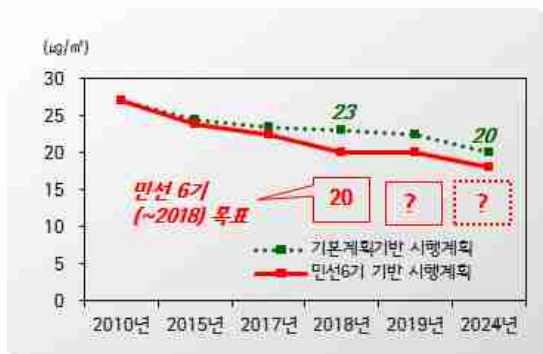


그림 7-3 서울시 장래 PM2.5 조기달성 목표



제2절 목표배출량

1. 목표배출량 정의

목표연도의 대기질 수준을 달성하기 목표배출량은 일정 수준 이상의 건강영향 피해를 유발하지 않고 해당 지역의 장래 대기환경 수준을 수용할 수 있는 필요조건인 배출량이라 정의할 수 있다. 목표기준 달성을 위한 목표배출량을 파악하는 것은 현재의 환경질 수준을 기능하고 개선해야 할 농도 수준 및 배출량 등에 대한 구체적인 정보를 제공하게 되는 체계적인 접근방법이라 할 수 있다.

일반적으로 기상조건을 일정하다고 가정하면 대기오염도는 배출량에 비례할 것이라 추정된다. 다만, 오염물질의 다양한 화학반응, 배출원의 특성(배출고도, 배출온도 등), 배경농도 등에 의하여 대기오염도와 배출량은 다소간의 비선형적인 관계를 내포하고 있다.

2. 지역별 목표배출량

수도권 대기관리권역 공간범위에서 서울시는 2019년 목표 대기질 수준을 달성하기 위해 배출허용총량의 범위 이내에서 배출량 삭감이 필요하여, 2019년 전망 배출량의 42~50%의 삭감이 전제되어야 하는 것으로 분석되고 있다. 이를 오염물질별로 살펴보면, 비산먼지를 제외한 PM10 50.5%, PM2.5 49.3%, NO_x 43.2%, SO_x 50.8%, VOCs 42.6% 정도를 각각 삭감해야 하는 것으로 파악되고 있다(<그림 7-4> 참조).

그리고 2024년의 목표농도 수준을 달성하기 위해서는 2024년 전망 배출량 대비 PM10 77%, PM2.5 73%, NO_x 55%, SO_x 48%, VOCs 50% 정도를 각각 삭감해야 하는 것으로 나타났다(<표 7-4> 참조).

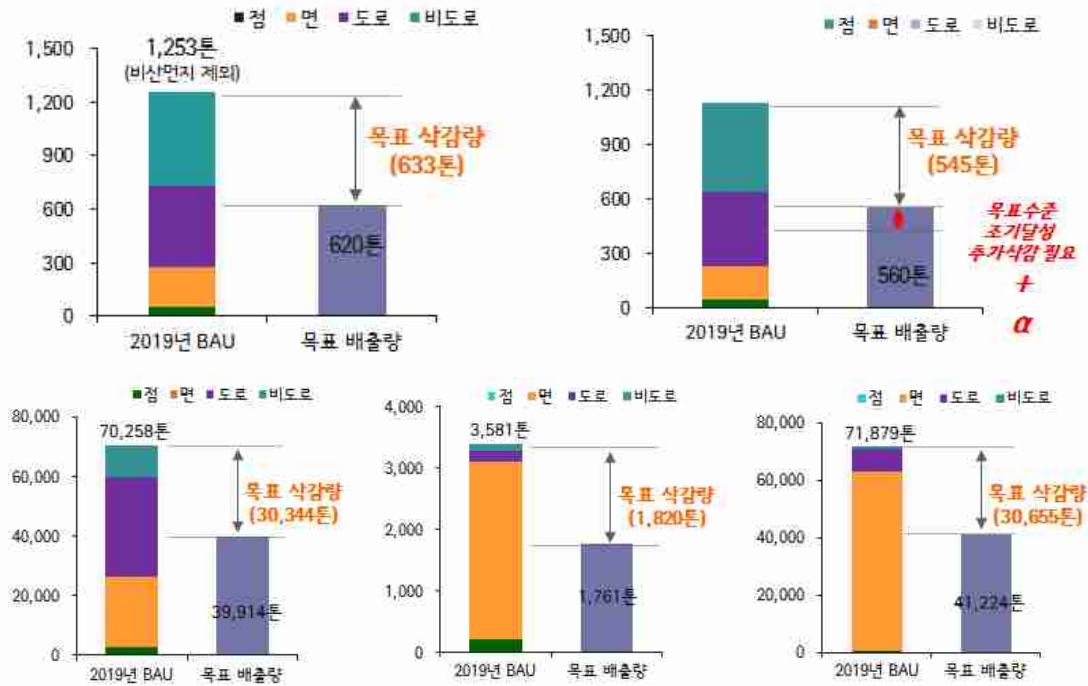


그림 7-4 2019년 목표 대기질 달성을 위한 서울시 목표 배출량 및 목표 삭감량

표 7-4 2024년 목표 대기질 수준 달성을 위한 전망 배출량 및 목표배출량

구 분	PM10		PM2.5		NOx	SOx	VOCs	
	비산포함	비산제외	비산포함	비산제외				
수도권	68,306 (34%)	8,659 (59%)	14,024 (45%)	6,265 (53%)	300,157 (55%)	50,401 (44%)	303,620 (56%)	
2024년 전망 배출량 (삭감률)	서울시	14,871 (34%)	1,066 (77%)	2,830 (47%)	954 (73%)	69,836 (55%)	3,635 (48%)	72,751 (50%)
	인천시	11,722 (36%)	3,361 (46%)	3,199 (43%)	2,095 (35%)	59,113 (43%)	27,033 (35%)	58,658 (59%)
	경기도	41,713 (34%)	4,232 (65%)	7,995 (45%)	3,216 (56%)	171,208 (60%)	19,733 (55%)	172,211 (58%)
	수도권	45,053	3,534	7,781	3,029	134,041	28,159	133,195
목표 배출량	서울시	9,890	243	1,515	260	31,646	1,877	36,428
	인천시	7,543	1,810	1,830	1,364	33,607	17,448	24,241
	경기도	27,619	1,480	4,436	1,405	68,788	8,834	72,526

자료 : 환경부·수도권대기환경청, 「2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015~2024)」, 2013.

제3절 기대효과

1. 대기오염도 개선

장래 오염물질별 삭감계획 정보를 적용하여 대기오염 모델링 과정에서 분석된 2019년의 예측 농도를 검토하였다. <그림 7-5>는 2019년 삭감 배출량을 이용한 모델링 결과와 2019년 전망 배출량을 이용한 모사결과의 차이를 비교한 공간분포로서, NO₂의 경우 삭감 배출량을 이용한 모사 결과에서 상대적으로 NO₂ 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 서울과 경기 중부 일부지역에서 8ppb로 가장 많은 감소를 보이며, 이 지역을 중심으로 점차적으로 주변지역의 감소 경향이 낮아지고 있다.

PM_{2.5}와 PM₁₀의 경우, 수도권 전체에서 일반적으로 PM_{2.5} 1~3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 1~4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 농도가 감소하는 것으로 분석되었다. SO₂도 삭감 배출량을 이용한 모사결과에서 SO₂ 농도가 감소하는 것으로 나타나고 있으며, 특히 인천 해안지역에서 상대적으로 높은 4ppb 정도의 감소를 보이고 있다. 다만, 오존은 서울과 경기 중부 및 남부 지역을 중심으로 99% Percentile 농도 기준의 오존 농도 변화율은 서울 ▲8.9%, 수도권 ▲5.1%을 보이는 것으로 예측되고 있다.

오염물질별 모사 농도에 RRF를 적용하여 산정한 예상관측농도를 바탕으로 전망 및 삭감 배출량을 적용한 2019년 예측농도를 비교하면 <표 7-6>과 같다.

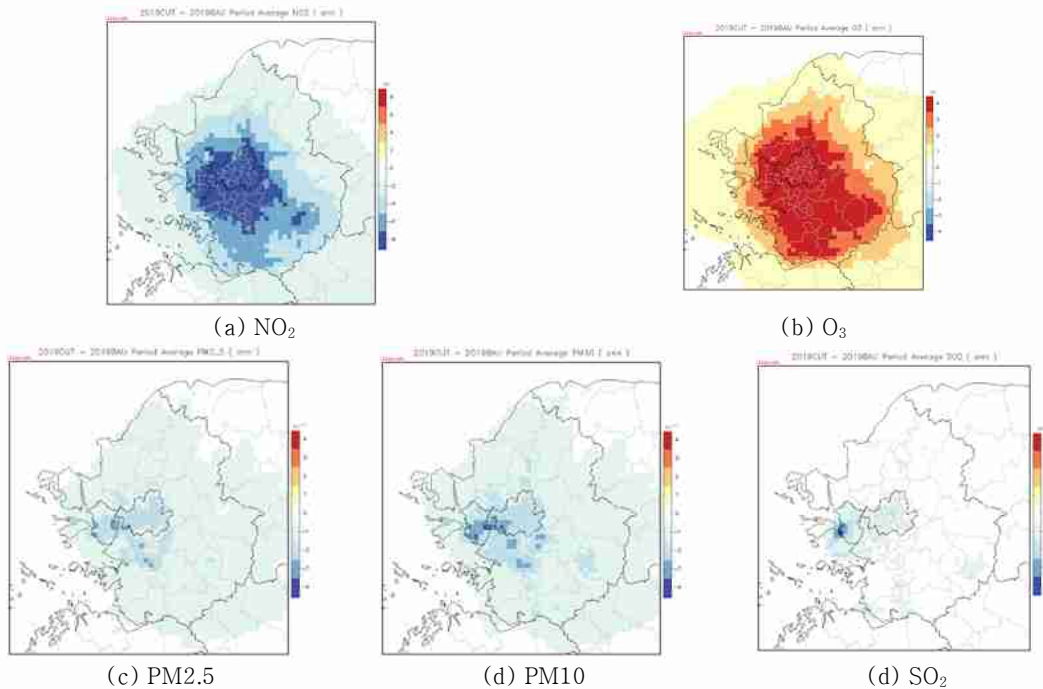


그림 7-5 2019년 삭감배출량을 이용한 물질별 연평균 모사농도의 공간분포 변화

표 7-5 2019년 전망배출량 및 삭감배출량 이용에 따른 예측 농도 비교

2019년 3-km	서울			수도권 평균			
	전망배출량 이용 (A) ¹⁾	삭감 배출량 이용(B) ²⁾	농도 차 ³⁾ (변화율(%)) ⁴⁾	전망배출량 이용 (A)	삭감 배출량 이용(B)	농도 차 (변화율(%))	
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	연평균	44.5	41.7	2.9 (6.4)	50.9	47.6	3.3 (6.4)
NO ₂ (ppm)	연평균	0.032	0.023	0.009 (27.4)	0.030	0.021	0.009 (29.9)
SO ₂ (ppm)	연평균	0.004	0.003	0.001 (30.0)	0.005	0.004	0.001 (22.8)
O ₃ (ppb)	99%	72.0	78.5	-6.4 (-8.9)	72.0	75.7	-3.7 (-5.1)

- 주: 1) 2019 전망배출량을 이용한 모사 결과를 바탕으로 RRF를 적용 : (A)
 2) 2019 삭감배출량을 이용한 모사 결과를 바탕으로 RRF를 적용 : (B)
 3) 2019 전망배출량 이용 모사결과와 삭감배출량 이용 모사결과의 예측 농도차 : (A) - (B)
 4) 2019 전망배출량 이용 모사결과와 삭감배출량 이용 모사결과의 예측 농도 변화율(%)

표 7-6 2019년 전망배출량 및 삭감배출량 이용에 따른 PM2.5 예측 농도

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

2019년 3-km	전망배출량 이용 (A) ¹⁾	삭감 배출량 이용(B) ²⁾	농도 차 ³⁾ (변화율(%)) ⁴⁾
봄	34.9	32.8	2.1 (5.9)
여름	29.1	26.6	2.5 (8.7)
가을	28.7	26.2	2.5 (8.8)
겨울	38.8	37.2	1.6 (4.0)
연평균	32.9	30.7	2.1 (6.5)

- 주 : 1) 2019 전망배출량을 이용한 모사 결과를 바탕으로 RRF를 적용 : (A)
 2) 2019 삭감배출량을 이용한 모사 결과를 바탕으로 RRF를 적용 : (B)
 3) 2019 전망배출량 이용 모사결과와 삭감배출량 이용 모사결과의 예측 농도차 : (A) - (B)
 4) 2019 전망배출량 이용 모사결과와 삭감배출량 이용 모사결과의 예측 농도 변화율(%)
 5) 모델링 입력에 사용된 PM2.5 입력 기준 농도는 중량법으로 측정된 불광동 측정지점의 자료로 34.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 베타레이 측정법으로 측정된 2010년 서울의 PM2.5 평균농도는 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이므로, 모델링 입력자료의 차이에 예측농도 편차의 유의성이 있음.

2. 인체위해성 저감

서울시 기후·환경 조건의 변화에 따라 단기노출의 건강영향을 분석한 연구 결과(김운수, 2013)에 의하면, 시계열 통계분석 모형에서 도출된 연도별 조기 사망자수 예상 수치와 PM10, PM2.5를 대상으로 회귀분석을 한 결과, PM10, PM2.5 농도가 증가(감소)할수록 조기 사망자수와 조기 사망부담이 증가(감소)하는 것을 알 수 있다.²⁾ PM10 농도가 2000년 $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준에서 2011년 $47\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 개선되어 조기 사망자수는 2000년 대비 35.5% 정도 감소하였으며, PM2.5 농도는 2009년 $29\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2011년 $24\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 개선되어 조기 사망자수는 2009년 대비 26.9% 정도 감소함을 추정할 수 있다. 이러한 농도별 조기 사망자수 분석 결과와 2019년 시행계획 이행 전·후 농도변화 비교(<표 7-5>, <표 7-6> 참조)를 통해 조기 사망자수 변화를 살펴보면, 2019년 대책 시행으로 PM2.5에 의한 서울지역의 조기 사망자수는 약 12.3%, PM10은 8.8% 정도 감소하는 것으로 추정된다.³⁾

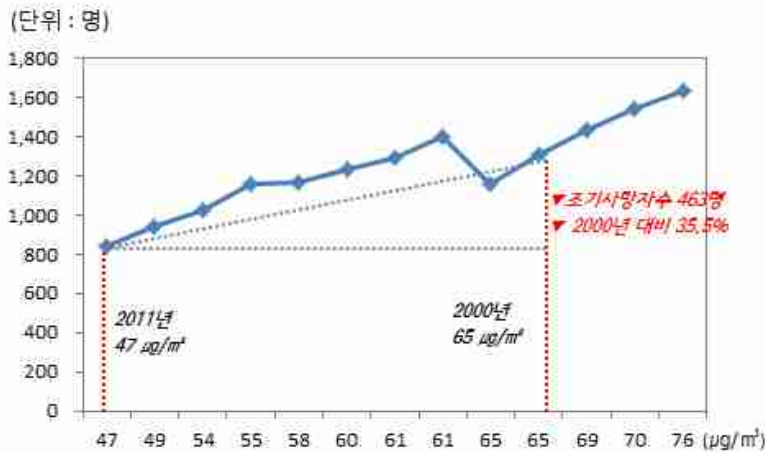


그림 7-6 PM10 농도별 조기 사망자수 비교
 자료 : 김운수, 2013, 서울시 기후·환경 변화의 건강영향 분석연구

한편 WHO 기준 대비 서울시 2010년 연평균 농도에 따른 호흡기질환 입원 초과건수를 추정할 경우 1,526~3,705건이었고, 대책 시행으로 PM10 농도가 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준에 도달하면 808~1,963건으로 감소하여 2010년 기준 대비 약 47.0% 정도 감소하는 것으로 분석하고 있다(임중환, 2012). 그리고 서울지역의 2010년 만성기관지염 진단 초과건수는 2,177건, 대책 시행으로 약 47.5% 감소하여 약 1,143건으로 추정되었다. 급성기관

2) PM10 농도와 조기 사망자수의 회귀분석 결과, $Y=25.76X-324.69$ $R^2=0.868$ 이며, PM2.5의 경우 $Y=63.3X-713.11$ $R^2=0.854$ 의 회귀식이 도출됨.

3) PM2.5 대기질 모델링의 기초 입력 자료인 불광동 측정지점의 2010년 농도는 $34.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2019년 대책 미시행시 모델링에 의한 예측 농도가 $33.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 모사되었음. 이를 바탕으로 2010년 서울의 PM2.5 농도 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 적용하여 2019년 대책 미시행시의 농도를 추정하고, 수도권의 전망 배출량과 삭감 배출량을 이용한 농도변화율을 통해 개선 정도를 산출함. 대책 미시행시의 농도, 대책 시행시의 농도를 추정하여 조기 사망자수 회귀분석식에 적용하여 효과를 산정함.



지염 진단은 2010년 302,596건에서 PM10 농도 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 때 156,581건으로 48.3% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

표 7-7 서울 지역 대기오염 연평균 농도 변화에 따른 인체피해 저감

구분	호흡기질환 입원건 ¹⁾ (입원건/년)	만성기관지염 진단 ¹⁾ (건/년)	급성기관지염 진단 ²⁾ (건/년)
2010년 기준	1,526~3705	2,177	302,596
PM10 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$	808~1963	1,143	156,581

주 : 1) 전체 연령 인구 대상이며, 2)은 18세 이하 인구 대상임.

자료 : 임종한, 「국민 건강 위해성을 고려한 대기질 개선효과 분석 방안 도출」, 2012.

3. 사회적 피해 비용 저감

수도권 대기환경 개선 기본계획과 시행계획 수립의 기준 연도인 2010년 CAPSS 배출량 자료를 바탕으로 서울의 대기오염으로 인한 사회적 피해 비용은 연간 2조 5천억원으로 추정되었다.

Holland&Watkiss(2002)의 산정 방식에 근거하여 오염물질이 인체 건강에 미치는 단기적 영향과 장기적 영향을 함께 고려하고, 대기오염의 단위당 평균 사회적 비용을 근거로 인구 백만 이상 도시의 가중치를 적용하여 평가한서울지역의 대기오염으로 인한 사회적 피해 비용 변화를 검토하였다(<표 7-10> 참조).⁴⁾

표 7-8 대기오염의 단위당 평균 사회적 비용(시골지역)

(단위 : €/톤)

구분	SO ₂	NO _x	PM2.5	VOCs
EU 15개국 평균 (15개국, 1998 배출량 기준)	5,200	4,200	14,000	2,100

자료 : <http://www.gg.go.kr/gg/58025/ggnet/c1/total/cmsB0055.jsp>

4) Holland&Watkiss(2002)에서 사용된 가정은 다음과 같음. ① PM10과 PM2.5의 영향차이는 고려하지 않고, PM10과 PM2.5의 사회적 피해 비용을 동일하다고 가정, ② NO_x의 사회적 비용은 NO₂ 및 오존에 의한 영향을 모두 고려, ③ SO_x는 SO₂와 SO₄에 의한 영향을 포함, ④ 먼지와 SO₂는 도시지역 자체에서 배출된 값과 이차 오염물질에 의한 영향을 동시에 고려하기 위해 시골지역의 값을 더해 도시지역 피해를 산출한 반면 VOC와 NO_x는 배출 후 오존 및 질산염을 형성하기까지 시간이 필요하다고 보고 시골지역과 동일한 값을 사용(환경부 수도권대기환경청, 2012)

표 7-9 도시 규모별 가중 값

구분	PM2.5	SO ₂
인구 10만 도시	33,000€/톤	6,000€/톤
인구 백만 이상 도시 가중치	15	15

자료 : <http://www.gg.go.kr/gg/58025/ggnet/c1/total/cmsB0055.jsp>

표 7-10 서울의 대기오염으로 인한 사회적 피해비용

(단위 : 백만원)

구분	합계	SO ₂	NO _x	PM10	VOCs
2010년	2,505,873	552,013	411,325	1,321,929	220,606
2019년	991,608	218,399	231,006	422,908	119,294
증감(%)	-1,514,265 (60.4%)	-333,614 (60.4%)	-180,3118 (43.8%)	-899,021 (68.0%)	-101,312 (45.9%)

주 : 2019년 사회적 비용은 시행계획 대책 추진으로 목표 배출량을 달성한 경우의 사회적 피해비용이며, 오존, PM2.5의 사회적 비용은 미포함임. 2014년 11월 환율 기준 1€=1,378원 적용하여 산정

결과적으로 수도권 대기환경 관리 기본계획을 바탕으로 서울시 시행계획 추진으로 2019년 목표 배출량을 삭감하는 경우, 약 1조 5천원의 사회적 비용 저감효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되고 있다.