서울시 미세먼지·오존 통합관리 전략

김운수 신상영 김정아

A Study for Developing an Integrated Air Quality(Ozone and PM2.5) Management Framework in Seoul

서울연구원
The Seoul Institute

서울시 미세먼지·오존 통합관리 전략

서울연구원 The Seoul Institute

연구책임

김운수 서울연구원 안전환경연구실 초빙선임연구위원
신상영 서울연구원 안전환경연구실 선임연구위원

연구진

김정아 서울연구원 안전환경연구실 연구원

서울연구원 The Seoul Institute

이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

요약

고농도 미세먼지·오존, 시민건강 위협요인 통합관리 전략 세워 '숨쉬는 서울' 만들기

대기환경정책 패러다임, 환경기준 달성에서 건강피해 예방으로 전환

최근 해외언론에서 공기(air)와 종말(apocalypse)의 합성어 '대기재앙(airpocalypse)'이라는 표현으로 심각한 대기오염에 경종을 울리고 있다. 세계보건기구(WHO)는 전 세계적으로 도시 지역 인구의 80% 이상이 한계치를 초과하는 대기오염에 노출된 것으로 평가하고 있다. 이처럼 대기오염의 인체건강 위해성이 핵심 이슈로 등장하고 있다.

주된 대기환경 정책 흐름은 대기오염물질의 환경기준 달성에서 대기오염의 건강피해 예방으로 전환되고 있다. '사전 진단과 처방 원칙'을 바탕으로 비용 효율적인 개선, 환경복지의 최대화를 모색하는 추세와 연동되어 있다. 이는 21세기 글로벌 경쟁사회에서 기후환경 가치의 중요성이 부각됨에 따라 국가 및 도시에서 환경경쟁력 브랜드 가치를 높이기 위한 대기환경의 최적화 전략 마련에 관심을 집중하는 배경이다.

특히 기후환경 변화에 따라 차별적으로 나타나는 미세먼지, 오존 대기질의 시민건강 영향에 유의하고, 적절한 해법을 찾는 과정은 도시의 환경복지 향상과 시민의 삶의 질 개선이라는 '숨쉬는 도시' 만들기 발상 전환으로 연계되고 있다.[1)]

서울시 고농도 미세먼지·오존 발생 증가로 시민건강 직간접 위협

서울시 초미세먼지(PM2.5)는 2011년부터 대기환경기준 25㎍/㎥ 이하로 유지되어 지속적으로 개선 경향을 보였다. 그러나 고농도 출현이 많았던 2016년에 26㎍/㎥, 2017년에 25㎍/㎥으로

1) 김운수(2016), "미세먼지 해외사례 분석", 「도시문제」, 제51권 제575호, 대한지방행정공제회, pp.20-23

나타나 시민의 기대에 다소 못 미치고 있다. WHO의 초미세먼지 권고기준(≤25㎍/㎥·일)을 충족시키는 일수가 2013년 223일, 2014년 233일, 2015년 242일로 증가하다 2016년 189일로 크게 감소하였으나, 2017년 218일로 증가하였다. 즉, 고농도 초미세먼지 발생 빈도의 증감 경향을 고려하면 고농도 초미세먼지는 시민 건강 영향 위협요인으로 지적되고 있다.

그리고 서울의 연간 평균 오존(O_3) 농도는 1990년 0.011ppm 이후 완만히 증가하다가 2000년 0.017ppm을 정점으로 2004년까지 감소추세를 보인 바 있다. 그러나 도시 기후환경 변화의 주요 특성인 기온 상승에 따라 2005년부터 다시 증가하여 2017년에는 0.022ppm으로 전반적인 상승 경향을 보여 시민 건강보호의 또 다른 위협요인으로 인식되고 있다.

워싱턴대 건강측정평가연구소(IMHE)에서 발표한 자료를 바탕으로 미세먼지와 오존에 의한 건강 영향을 다른 나라와 비교하면, 우리나라의 PM2.5 영향 사망자는 1990년 15,100명에서 2015년 18,200명으로 21% 증가한 반면 OECD 국가의 PM2.5로 인한 총사망자는 9% 감소한 것으로 추정되었다. 또한 우리나라의 오존 영향 사망자는 1990년 350명에서 2015년 810명으로 130% 증가한 반면, OECD 국가의 오존으로 인한 사망자는 48% 증가하였다.[2] 2017년 전국 PM2.5, O_3 평균 농도는 각각 25㎍/㎥·년, 0.029ppm/년으로, 서울시 25㎍/㎥·일, 0.025ppm/년과 비교하면 서울 시민의 건강영향을 간접적으로 추정할 수 있다.

미세먼지·오존 생성 메커니즘 이해하고 통합관리 전략 마련 필요

미세먼지와 오존은 대기 중의 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)이 햇빛과 반응하여 생성되는 2차 생성물질이다. 특히 환경부, 서울시, 한미 협력 국내 대기질 공동 조사(KORUS-AQ) 연구결과 등을 종합하면, 초미세먼지의 2차 생성은 직접배출 PM2.5 배출량 수준을 상회하는 것으로 추정되고 있다.

이처럼 국내외 연구 성과물에서 보듯이 시민 건강 보호와 목표농도 달성을 위해 미세먼지와 오존을 개별 관리하는 현행 관리 방식으로는 대기환경 개선에 있어 한계에 직면하게 된다. 향후 2차 오염물질을 생성하는 원인물질을 함께 관리하는 통합관리 전략 마련이 필요하다.

---

2) 송윤아, "대기오염의 건강위험과 보험", 「KiRi 리포트」, 보험연구원, 2017.6.12

미세먼지·오존 통합관리의 유의점은 서울시 실증 사례분석에서 확인되고 있다. 초미세먼지의 2차 생성 메커니즘에 따라 배출원의 NOx 배출량을 저감하면 PM2.5 농도는 저감될 수 있는 반면, O_3 농도는 VOCs와 NOx 간 광화학반응에 따라 감소될 수 있다. 하지만 VOCs/NOx 농도비에 따라 오히려 O_3 농도가 증가될 가능성도 있다. 이처럼 광화학 2차 생성과정에 중요한 역할을 하고 있는 NOx($NO+NO_2$), VOCs, O_3 간 복합영향 등을 실증 분석하게 되면 서울시 초미세먼지, 오존 통합관리 전략 방향을 수립할 수 있다.

세계 대도시, 미세먼지·오존 등 대기오염물질 통합관리정책 시행

해외 도시들에서는 대기오염으로 인한 시민의 건강 위해 가능성을 비용 효율적으로 개선하고, 지역 단위의 환경복지를 최대화하기 위해 대기오염물질 통합관리 정책을 추진하고 있다. 특히 미세먼지·오존의 개별 배출량/농도 저감 정책 추진을 지양하고, 대신 통합관리 전략을 새롭게 추진하고 있다. 또한 통합관리 추진과정에서 개념모델에 기반하여 단계별 적정화를 시도하고 있다.

실제 해외 도시들은 미세먼지와 오존 통합관리의 사전 단계로서 배출원/배출량 기초정보를 확인하고, 이를 바탕으로 관리전략을 수립하고 있다. 과학적 기반 구축은 제도나 정책과 달라 단기간에 이룰 수 없기 때문에 1차와 2차 오염물질 간 상호작용을 분석하고 예측하기 위한 신뢰성 있는 모델링 시스템을 우선적으로 고려하고 있다.

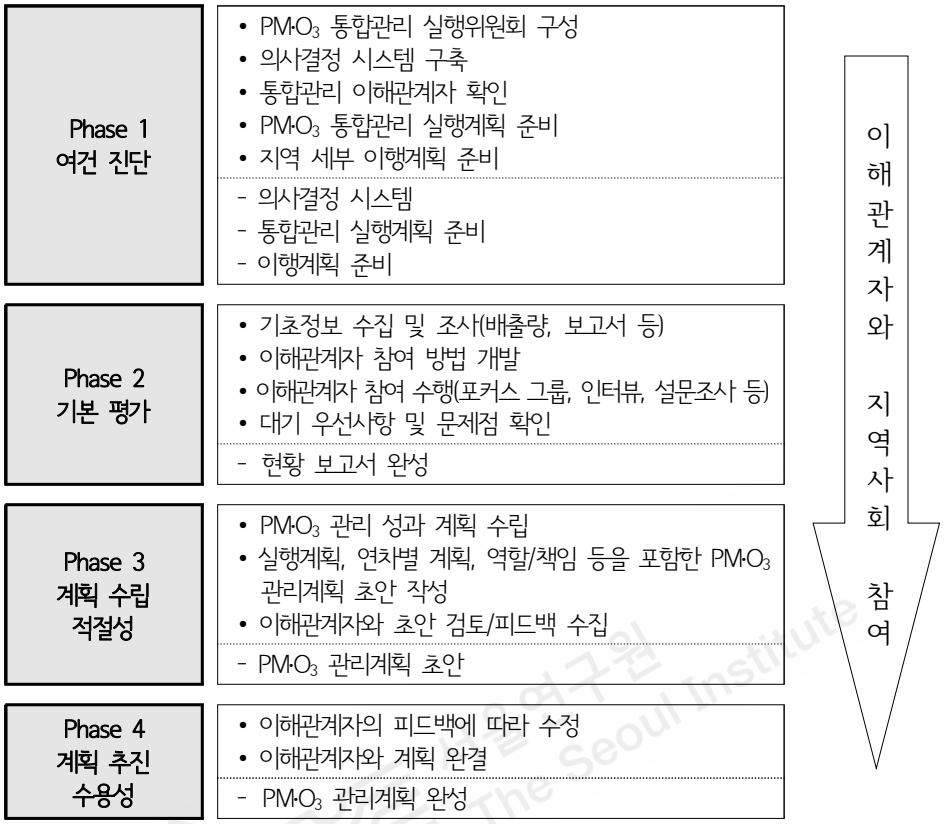
이와 함께 초미세먼지, 오존 통합관리를 위해 1차 PM2.5(filterable + condensible), 2차 생성의 주요 물질인 NOx, VOCs 관리방안을 함께 수립·시행하고 있다. 유의할 사항은 이동오염원이나 에너지연소(가정, 산업, 상업 시설 등) 등 1차 배출원에 대한 일부 관리정책은 저감 대책별 차이를 확인하고 추진하고 있다는 점이다. 즉, 저감 대책 추진과정에서 미세먼지뿐만 아니라 NOx, CO, VOCs, SOx 등 미세먼지·오존의 2차 생성 전구물질(前驅物質)인 기체상 물질의 저감을 동시에 고려하고 있다.

개념모델 기반 미세먼지·오존 간 맞춤 대응요소별 통합관리 필수

초미세먼지·오존의 효과적인 통합관리와 관련된 대기화학/수송 반응, 대기 중 농도 특성, 주요 배출원, 성분별/지역별 기여도 등 다양한 요소들의 복합 영향과 인과 관계를 파악하여 효율적·전략적인 정책적 시사점을 도출하기 위해서는 개념모델 적용이 바람직하다.

개념모델의 기본단계인 '여건진단→기본평가→계획수립의 적절성→계획추진 수용성'에 따라 미세먼지·오존 통합관리 정책방향을 설정할 수 있다. 서울시는 향후 초미세먼지·오존 통합관리 전략을 수립하기 위해 개념모델 기본조건인 배출원 확인 및 인벤토리 구축, 측정 모니터링, 확산모델링, 인체건강 위해성 조사, 저감 대책 수립 등 상호 연관관계를 보다 체계적으로 확인하여야 한다.

또한 미세먼지·오존 통합관리 계획/정책의 적절성과 수용성 확보를 위해 유기물질과 질소 성분이 미세먼지의 절반 정도를 차지한다는 것을 고려하여야 한다. 나아가 VOCs와 NOx 관리 전략을 통해 지역 내의 2차 생성 미세먼지 오염을 줄일 수 있는 가능성에 유의하여야 한다. 그리고 두 가지 전구물질은 오존 오염 관리에도 매우 중요하며, 이는 통합관리 전략 마련에 시사점을 제시하고 있다.



[그림 1] 개념모델(Conceptual Model) 적용 미세먼지·오존 통합관리 정책방향

시민의 삶의 질 개선정책 추진과정에서 숨 쉬는 도시 실현을 위한 개념모델 기반 미세먼지와 오존의 맞춤 대응요소별 통합관리 전략을 정리하면 다음과 같다.

[표 1] 서울시 초미세먼지·오존 통합관리 방안

미세먼지·오존 모니터링 및 배출량 자료 정확성 및 신뢰성 향상	• 미세먼지·오존 통합 측정망 설치·운영 • 서울형 배출원 인벤토리(Seoul_CAPSS) 구축
배출원 특성·기상학적 조건을 반영한 통합관리 전략	• 초미세먼지·오존 통합관리 기본계획 준비 • 초미세먼지·오존 통합관리 지역별 맞춤전략 수립 • 서울형 초미세먼지·오존 비상저감조치 통합관리제도 마련
거버넌스 체계 구축	• 대기환경 통합 개선 협치 협의회 구성·운영

우선 대기환경 통합관리의 실효성을 확보하기 위해서는 일차적으로 배출원의 분포, 대기오염의 확산 · 유입과정 및 오염수준 파악 등의 자료체계 확보가 선행되어야 한다. 구체적이며 실질적인 대기환경 관리 정책을 위해서는 정책 수립의 기초정보인 대기오염 모니터링, 배출량 자료 등이 필요하다. 이러한 기초정보가 '대기오염 오염수준 파악-저감 대책 처방'이라는 일련의 효율적인 선순환 과정의 출발점이 되기 때문이다.

그리고 공간특성 또는 지역 여건을 고려해 초미세먼지, 오존 통합관리 계획의 탄력성을 유지한다. 특히 2차 오염물질 관리방법의 차이를 확인하고 이에 대응할 수 있도록 지역 특성(오염물질 배출 특성, 기상학적 특성 등)을 반영한 통합관리 전략을 수립한다.

대기환경 통합관리 대책을 수립하는 주체는 중앙 또는 지방정부지만 대책이 실현되는 곳의 주체는 시민들이므로, 기존의 명령통제 방식의 규제만으로는 대기환경 문제를 해결하기 어렵다. 이에 대기환경 통합관리와 관련된 이해관계자를 적극적으로 포함시키는 협력적 민간 거버넌스 구축이 무엇보다 중요하다.

서울연구원 The Seoul Institute

목차

01 연구개요 2
1_연구배경 및 목적 2
2_연구설계 및 내용 7

02 미세먼지 및 오존 관리현황 12
1_미세먼지 및 오존 관리여건 12
2_미세먼지·오존 시공간 변화 28

03 서울시 미세먼지·오존 통합관리 실증분석 46
1_미세먼지·오존 시민 건강영향 46
2_서울시 미세먼지·오존 생성 메커니즘 분석 49
3_종합정리 71

04 해외도시의 대기환경 통합관리 사례분석 76
1_대기환경 통합관리 사례 76
2_시사점 101

05 서울시 미세먼지·오존 통합관리 전략 : 기본방향과 해결과제 106
1_개념모델 기반 미세먼지·오존 통합관리 방향 106
2_서울시 미세먼지·오존 통합관리 방안 109

서울연구원 The Seoul Institute

참고문헌 115
부록 118
Abstract 126

서울연구원
The Seoul Institute

표

[표 2-1] 중앙정부 대기환경관리 대책별 대기오염물질 달성 목표농도 13
[표 2-2] 오존 유발물질(NOx, VOCs) 저감 계획 14
[표 2-3] 서울시 민감·취약군 대상 고농도 오존 대응 세부 행동요령 20
[표 2-4] 서울시 대기오염물질 배출량 감축효과(2004년 대비 2014년 CAPSS 배출량 기준) 22
[표 2-5] 서울시 BAU 대비 배출량 감축효과(BAU 대비 CAPSS 배출량 기준) 23
[표 2-6] 수도권 대기환경관리 대책별 오염물질 저감실적 24
[표 2-7] 지역별 오염물질 저감실적 24
[표 2-8] 서울시 배출원별 PM10, PM2.5, NOx, VOCs 배출량 인벤토리(2015년 기준) 30
[표 2-9] 서울시 대기환경기준 초과횟수 40
[표 2-10] 초미세먼지 경보 발령 및 해제 기준 40
[표 2-11] 초미세먼지 주의보 발령 기준(시간평균 농도) 변경 현황 41
[표 3-1] 서울시 기상요소와 초미세먼지 농도의 상관관계 55
[표 3-2] 서울시 기상요소와 오존 농도의 상관관계 56
[표 3-3] 서울 오존 농도의 경년변화에 따른 회귀분석 결과(2000~2017년) 59
[표 3-4] 회귀분석 예측값의 경년 변화에 대한 회귀분석 결과(2000~2017년)(기상조건 한정) 60
[표 3-5] 수도권 초미세먼지 생성(1차, 2차 비율) 61
[표 3-6] 서울시 NMHC/NOx 비율 분포 66
[표 3-7] 서울시 NOx, NMHC 농도 범위별 고농도 오존(0.12ppm 이상) 출현율 69
[표 3-8] 서울시 전구물질 농도 저감에 따른 고농도 오존(0.12ppm 이상) 연간 출현일수 변화 70
[표 4-1] 도쿄도 대기환경 정책목표 : 광화학 스모그 및 초미세먼지(PM2.5) 80

서울연구원 The Seoul Institute

[표 4-2] 미국의 AQI 단계 85

[표 4-3] EU 대기질 지침에 명시된 건강 보호를 위한 대기질 기준 99

[표 4-4] 2005년 대비 EU 28개국의 오염물질별 저감비율 100

서울연구원
The Seoul Institute

그림

[그림 1-1] 미세먼지·오존 통합관리 연구체계 6
[그림 2-1] 서울형 미세먼지 비상저감조치 시민 주도 8대 대책 18
[그림 2-2] 수도권 3개 시·도 PM10과 NO_2 농도변화(2001~2014) 21
[그림 2-3] 서울시 연도별 O_3 농도와 8시간 기준 초과횟수 변화(2001~2014) 22
[그림 2-4] 대기환경관리 정책 변화 26
[그림 2-5] 서울시 대기오염물질 배출량 변화 추이(2005~2015년) 29
[그림 2-6] 서울시 PM10, PM2.5 배출원별 배출 기여도(2015년 CAPSS 기준) 30
[그림 2-7] 서울시 NOx, VOCs 배출원별 배출 기여도(2015년 CAPSS 기준) 31
[그림 2-8] 서울시 자치구별 미세먼지(PM10, PM2.5) 배출량(2015년 기준) 32
[그림 2-9] 서울시 자치구별 미세먼지(NOx, VOCs) 배출량(2015년 기준) 33
[그림 2-10] 서울시 연평균 미세먼지(PM10, PM2.5) 농도 및 PM2.5/PM10 비율 변화(2005~2017년) 34
[그림 2-11] 서울시 연도별 PM2.5 농도 변화 35
[그림 2-12] 서울시 월별·시간대별 PM2.5 농도 변화 35
[그림 2-13] 서울시 풍향별 미세먼지 오염분포(2017년) 36
[그림 2-14] 서울시 풍향 바람장미(2017년) 36
[그림 2-15] 서울시 연평균 O_3 농도 변화(1991~2017년) 37
[그림 2-16] 서울시 월별·시간대별 O_3 농도 변화 37
[그림 2-17] 전국 O_3 연평균 농도(2016년) 38
[그림 2-18] 서울시 연도별 O_3 농도 변화 38
[그림 2-19] 서울시 미세먼지 주의보 발령 현황 41
[그림 2-20] 서울시 초미세먼지 주의보 발령 추정일수(2013~2017) 42

[그림 2-21] 서울시 오존 주의보 발령 현황 42
[그림 2-22] 서울시 초미세먼지, 오존 동시 '나쁨' 시간수 변화 43
[그림 2-23] 초미세먼지·오존 관련 최근기사 44
[그림 3-1] 주요 국가별 PM2.5, O_3 영향 조기사망률 비교(1990년, 2015년) 47
[그림 3-2] 대기오염으로 인한 국가별 조기 사망자수 비교 통계 48
[그림 3-3] 초미세먼지·오존 발생 특성 50
[그림 3-4] 서울시 오존과 NO_2 백분위수 농도 변화 51
[그림 3-5] 서울시 NO_2, NOx 농도 및 NO_2/NOx 비율 변화 51
[그림 3-6] 서울시 NO, NO_2, O_3 시간대별 농도 변화(2013~2017년 평균) 53
[그림 3-7] 서울시 NOx, NMHC, O_3 연평균 농도 변화 54
[그림 3-8] 서울시 NOx, O_3, NMHC 시간 농도 변화(2013~2017년) 54
[그림 3-9] 서울시 연도별 일사량 변화(4~9월) 57
[그림 3-10] 서울시 일최고 기온 변화(4~9월) 57
[그림 3-11] 서울시 오전 풍속평균 변화(4~9월) 58
[그림 3-12] 회귀분석 예측농도 연 변화(좌 : 평균 기상조건, 우 : 최적 기상조건) 60
[그림 3-13] 수도권 초미세먼지 주요 배출원 61
[그림 3-14] 미세먼지 평균 성분(KORUS-AQ 연구결과) 62
[그림 3-15] 유기적 미세먼지와 광화학적 지표 간의 상관관계(좌 : 포름알데히드, 우 : NO_2+O_3) 62
[그림 3-16] 서울시 일사량·일 최고 기온과 고농도 오존의 상관관계 63
[그림 3-17] 서울시 일사량·주간 오전 풍속과 고농도 오존의 상관관계 64
[그림 3-18] 서울시 일정 범위 기상조건에서 전구물질과 오존 최고농도의 상관관계 64
[그림 3-19] 서울시 질소산화물과 오존 최고농도 출현비율의 관계 65
[그림 3-20] 서울시 비메탄 탄화수소와 오존 최고농도 출현비율의 관계 65
[그림 3-21] 서울시 NMHC/NOx 비율과 오존 최고농도 출현비율의 관계 65
[그림 3-22] NOx 대비 VOCs 비율에 따른 오존 등농도 곡선 67

서울연구원 The Seoul Institute

[그림 3-23] 서울시 2013~2017 연평균 전구물질 농도 연간 출현일수(a)와 O_3 농도 0.12ppm 이상인 날의 출현일수(b) 68

[그림 3-24] 서울시 2013~2017 연평균 NOx 30%, NMHC 30% 농도 저감 후 전구물질 농도의 연간 출현일수(a)와 O_3 농도 0.12ppm 이상 연간 출현일수(b) 70

[그림 4-1] 도쿄도의 대기오염물질 농도 변화와 주요 대책 77

[그림 4-2] 도쿄도 대기환경측정국의 환경기준 달성률 변화 78

[그림 4-3] 도쿄도 PM2.5 연평균 농도 변화 78

[그림 4-4] 도쿄도 오존 농도 0.12ppm 초과일수 변화 78

[그림 4-5] 도쿄도 PM2.5 일평균과 Ox 일 최고 8시간 농도의 관계 79

[그림 4-6] 도쿄도 대기환경 정책목표와 주요 대책 83

[그림 4-7] 미국 지역별 PM2.5 구성성분 농도 변화 84

[그림 4-8] 미국 35개 도시의 O_3, PM2.5 통합 AQI 100을 초과한 날의 총합계 변화 86

[그림 4-9] 미국 35개 도시의 O_3, PM2.5 통합 AQI 100을 초과한 날의 총합계 86

[그림 4-10] 2016 AQMP에 제시된 국가 대기질 기준 달성 기한 87

[그림 4-11] SCAQMD의 대기질 모델링 결과 88

[그림 4-12] 뉴욕의 PM2.5 농도 변화 90

[그림 4-13] 뉴욕의 PM2.5에 의한 조기사망과 사망률 91

[그림 4-14] Alberta PM2.5·O_3 연간 자료 분석 과정 94

[그림 4-15] Alberta주의 PM2.5, O_3 농도 현황 95

[그림 4-16] Alberta 대기권역 PM2.5·O_3 관리 체계(2010년 달성목표) 96

[그림 4-17] Alberta 대기권역 관리 체계(2015년 달성목표) 96

[그림 4-18] EU 국가의 PM2.5, O_3 농도 현황 97

[그림 4-19] EU-28개국 PM2.5, NOx, NMVOCs 주요 배출기여도 98

[그림 5-1] 개념모델(Conceptual Model) 적용 미세먼지·오존 통합관리 정책방향 108

[그림 5-2] 서울시 대기오염측정소 현황 110

01

연구개요

1_연구배경 및 목적
2_연구설계 및 내용

서울연구원
The Seoul Institute

01 | 연구개요

1_연구배경 및 목적

1) 연구배경

○'숨 쉬는 도시' 만들기와 대기환경 정책 패러다임의 변화

최근 해외언론에서 공기(air)와 종말(apocalypse)의 합성어 '대기재앙(airpocalypse)'이라는 표현으로 심각한 대기오염에 경종을 울리고 있다. 세계보건기구(WHO)는 세계적으로 도시지역 인구의 80% 이상이 한계치를 초과하는 대기오염에 노출된 것으로 평가하고 있다. 이는 대기오염을 측정하고 건강영향을 인식하고 있는 103개 국가 3,000여 도시를 대상으로 구축된 데이터 정보를 통하여 확인할 수 있다(WHO, 2016). 이처럼 대기오염의 인체건강 위해성에 대한 논의는 핵심 이슈로 등장하고 있다.

2013년 세계보건기구 산하의 국제암연구소(IARC; International Agency for Research on Cancer)에서 미세먼지를 사람에게 발암이 확인된 1군 발암물질(Group 1로 지정함에 따라, 시민 환경복지 개선을 위한 초미세먼지 관리수요가 더욱 증가하고 있다. 특히 초미세먼지(PM2.5)는 미세먼지(PM10)에 비해 심뇌혈관질환, 호흡기질환의 이환율 및 사망률과 관련성이 높을 뿐만 아니라, 인체건강의 가장 큰 환경적 리스크(risk) 요인 중 하나로 알려져 있다.

한편 경제협력개발기구(OECD)는 '대기오염의 경제적 결과 보고서'(2016.6)에서 한국의 심각한 미세먼지 문제를 경고하고 있다. 한국이 초미세먼지와 오존 관리대책을 수립·이행하지 않는다면 2060년 OECD 회원국 가운데 대기오염으로 인한 조기 사망률이 가장 높고, 경제 피해도 가장 클 것이라고 예상하고 있다. 더욱이 이산화질소(NO_2) 농도 개선의 정체현상, 오존 환경기준 초과횟수 증가 등이 나타나고 있어, 이는 향후 시민 건강보호에 맞춘 대기환경 목표관리의 위험요인으로 작용할 수 있다.[3)]

이와 관련하여 대기환경 정책의 주된 흐름은 대기오염물질의 환경기준 달성에서 대기오염

의 건강피해 예방으로 전환하고 있다. 즉 '사전 진단과 처방 원칙'을 바탕으로 비용 효율적 개선, 환경복지의 최대화를 모색하는 추세이다. 이는 21세기 글로벌 경쟁사회에서 기후환경 가치의 중요성이 부각됨에 따라 국가 및 도시에서 환경경쟁력 브랜드 가치를 높이기 위한 대기환경의 최적화 전략 마련에 관심을 집중하는 배경이다.

이처럼 기후환경 변화에 따라 차별적으로 나타나는 미세먼지, 오존 대기질의 시민건강 영향에 유의하고, 적절한 해법을 찾는 과정은 도시의 환경복지 향상과 시민의 삶의 질 개선이라는 '숨 쉬는 도시' 만들기 발상 전환으로 연계되고 있다.[4)]

○ 초미세먼지(PM2.5) 및 오존(O_3) 관리 이슈와 논점

최근 대기환경관리 정책 패러다임의 변화를 바탕으로 서울시를 비롯한 수도권 대기환경관리도 초미세먼지·오존 관련 이슈와 논점에 맞게 새롭게 전개될 필요가 있다.

수도권 대기환경 개선에 관한 특별법(2003년 제정, 2005년 시행)에 따라 2000년 초부터 저공해 자동차의 보급, 매연여과장치(Diesel Particle Filter; DPF) 부착, 운행자동차 배출가스 관리, 노후자동차의 조기 폐차 유도 등 '선택과 집중' 전략을 추진한 결과 대기환경 체감지표인 미세먼지(PM10)는 가시적인 성과를 보이고 있다. 다만 NO_2 농도는 정체현상을 보여 부분적인 한계상황에 직면하고 있다.

이후 2015년~2024년 기간을 대상으로 하는 2단계 수도권 대기환경개선 특별대책의 주된 관심과 정책방향이 목표농도 관리에 집중했던 것에서 인체 위해성에 중점을 둔 방향으로 전환됨에 따라 PM2.5, O_3이 관리대상물질에 추가되었다. 서울시의 대기환경기준 초과현황을 살펴보면 PM2.5, O_3이 환경기준을 부분적으로 초과하고 있고, 초과횟수도 모두 증가하는 추세여서 단기 고농도 발생빈도가 상대적으로 증가하고 있다.

PM2.5는 배출원에서 직접 배출되는 1차 입자, 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 암모니아(NH_3), 휘발성 유기화합물(VOCs) 등의 전구물질이 대기 중의 특정 조건에서 반응하여

---

3) 서울시 O_3 1시간, 8시간 기준 농도 초과횟수는 2010년 565회(1시간), 661회(8시간)에서 2017년 693회(1시간), 1,391회(8시간)로 증가하였으며, 2017년 기준 서울시 25개 측정지점에서 O_3 환경기준을 모두 초과함.

4) 김운수(2016), "미세먼지 해외사례 분석", 「도시문제」, 제51권 제575호, 대한지방행정공제회, pp.20-23

생성되는 2차 입자로 이루어져 있으며, 2차 생성 입자가 더 큰 비중을 차지하고 있다. 그리고 O_3은 NOx, 탄화수소(HC), 메탄(CH_4), 일산화탄소(CO) 등의 대기오염물질이 햇빛으로 인해 광화학 반응을 일으켜 만들어지는 2차 오염물질로, 대기 중으로 직접 배출되지 않는다. 특히, NOx와 VOCs이 오존의 가장 큰 원인이 된다.

이러한 2차 오염물질은 생성 및 소멸과정이 복잡하게 얽혀 있어 기존의 관리 방식으로는 대기환경을 개선하는 데 한계가 있다. 2차 오염물질을 생성하는 원인물질의 관리가 함께 요구된다. 특히 인체위해성 측면에서 PM2.5, O_3의 원인물질인 VOCs는 유해성이 크기 때문에 이러한 성분의 저감과 관리가 우선되어야 한다.

이에 시민의 건강 위해 요인 가운데 미세먼지, 오존은 '오염원 직접 배출과 2차 생성' 등을 고려하면 과거와 같이 개별적·독립적 관리대상으로 해서는 안 된다. 상호 복합적 작용으로 인하여 통합관리 정책으로 전환하여 시민 건강영향에 대응하는 방향으로 대기환경정책의 틀이 크게 바뀌어야 한다.

이를 반영하듯 최근 해외 선진도시들은 '대기환경의 복합작용과 시민건강 영향'을 기반으로 PM2.5, O_3의 통합관리 정책으로 전환하는 추세이다. 이는 인체 위해성을 최우선적으로 고려한 통합적·과학적인 관리로 대기환경의 정책 패러다임이 전환되고 있음을 의미한다.

PM2.5, O_3를 효과적으로 통합 관리하기 위한 접근방법에서 '개념모델'을 적용하고 있다. 즉, 초미세먼지 및 오존 환경기준 달성의 기본조건인 배출원 확인 및 인벤토리 구축, 측정 모니터링, 확산모델링, 인체건강 위해성 조사, 저감대책 수립 등이 보다 체계적으로 검증·보완되고 있다.

이러한 제반 여건을 고려하면, 일차적으로 서울시 PM2.5, O_3 관리의 실효성을 확보하기 위해서는 배출원 확인 및 관리대책, 실시간 모니터링 및 예·경보제 운영, 그리고 서울시 외부유입 영향을 고려한 협력방안 도출 등에 대한 사회적 공감대 형성이 필요하다. 이와 함께 시민 건강피해 영향 저감을 위한 환경 리스크(risk) 관리 차원에서, PM2.5, O_3의 생성 메커니즘을 고려한 저감 전략을 검토하는 통합관리의 실천적 솔루션 도출이 한층 요구되고 있다.

○ 지속가능한 환경복지 및 환경정책으로 전환 인식

환경부는 2014년 “국민의 지속가능한 환경복지를 구현”하고 “환경의 새로운 가치를 창출”하기 위한 업무추진 로드맵을 발표하면서, 최근 고농도 미세먼지 발생 증가로 국민의 우려가 높은 상황에서 국민건강을 보호하는 미세먼지 대책을 적극 추진하겠다고 밝혔다. 즉, 환경부는 인체에 더욱 위험한 것으로 알려진 PM2.5의 농도를 앞당겨 예보하고, 사업장 대상 수도권 대기오염총량관리의 확대, 경유자동차의 배출허용기준 강화 및 저공해자동차 보급 확대 등을 계획하였다.[5)]

그런데 유해물질을 포함하고 있는 중국 등 동북아 지역의 황사 및 고농도 대기오염물질의 유입은 국민의 건강 피해를 유발하여 국민 체감형 환경수준이 낮아지고 국민 공감형 대기환경 개선의 한계요인으로 작용하고 있다. 이에 서울시는 중국 베이징 등 주요도시와 대기질 개선 협력을 강화하고, 공해차량 운행제한지역(LEZ) 대상 단속 및 관리 강화 등 7개 분야 23개 사업을 포함한 ‘중국발 스모그 대응, 대기질 개선 종합대책’(2014.1.28)을 수립하기에 이르렀다.

유해물질을 포함한 황사, PM의 장거리이동 외부유입 영향으로 국내 지역의 PM 기여농도가 40% 수준으로 추정되고 있어, 이에 대응하기 위해 중앙정부와 지방정부 간 환경협력 네트워크 시스템의 설계·운영이 한층 요구되고 있다.

PM2.5와 O_3은 1차 오염물질의 이동, 확산, 반응으로 연결되는 2차 생성 및 소멸 과정 등 상호작용이 복잡하게 얽혀 있다. 따라서 2차 오염물질을 생성하는 NOx, SOx, NH_3, VOCs의 상호반응을 이해하고 물질 간의 균형(balance)에 기반한 미세먼지·오존 통합관리로의 전환이 필요하다.

---

5) 2008년~2012년 기간 연평균 PM2.5 농도는 전국적으로 감소하는 추세이나, 2013년 이후 초미세먼지 고농도 패턴 발생으로 새로운 환경기준(25㎍/㎥)을 적용하면 대부분 지역에서 기준초과 가능성이 있음, 환경부는 초미세먼지의 환경기준 달성 여부를 과학적으로 판정할 수 있는 측정망 추가 설치를 통해 기초자료의 생산을 계획하고 있음.

2) 연구목적

○ 미세먼지 및 오존 통합관리로 전환해 시민 환경복지 증진

시민이 행복한 미래 서울은 건강도시 실현과 직결된다. 특히 기후환경의 변화에 따른 시민 건강 피해영향을 고려하면 PM2.5, O_3 관리는 더욱 그러하다. 최근 시민 환경복지 개선의 최대 장애요인으로 확인된 PM2.5, O_3에 대응해 세계 도시들의 사례를 참고하여 '서울시 맞춤 통합관리 전략'의 방향 수립이 필요하다.

○ 미세먼지와 오존 통합관리 전략 제시

본 연구의 핵심은 2013년 이후 고농도 PM2.5 사례 증가 경향뿐만 아니라 O_3의 뚜렷한 증가현상에 대응하여 서울시 PM2.5, O_3의 오염도 변화과정과 복합영향을 검토하고, 통합관리 전략방향을 제시하는 데 있다. 또한 시민 환경복지 증진을 위해 PM2.5, O_3 통합관리 정책으로의 전환 및 대응방안 마련에 필요한 기초정보 구축과 활용에 이차적인 목적을 두고 있다.

[그림 1-1] 미세먼지·오존 통합관리 연구체계

2_연구설계 및 내용

1) 연구설계

○ 개념모델 기반 과학적 대응체계 구축

초미세먼지와 오존 통합관리의 실효성을 확보하기 위해서는 일차적으로 초미세먼지와 오존 농도 형성에 직·간접 관계를 가진 배출원의 분포, 공기 중 확산 · 유입과정 및 오염수준 파악 등의 자료체계 확보가 선행되어야 한다. 연후에 이를 바탕으로 구체적이며 실질적인 저감 대책이 적용되는 '초미세먼지·오존 오염수준 파악-저감대책 처방과 모니터링'이라는 일련의 효율적 선순환 관리체계의 확보가 필요하다.

이에 본 연구는 초미세먼지 농도와 관련된 대기화학/수송 반응, 대기 중 농도 특성, 주요 배출원, 성분별/지역별 기여도 등 다양한 요소들의 영향과 인과 관계 등 개념모델(Concept Model)에 바탕을 둔 서울시 초미세먼지·오존 관리 정보 시스템의 구축과 실제 활용에 일차적 목적을 두고 있다. 초미세먼지·오존 통합관리 설계의 일환으로, 향후 서울시 초미세먼지·오존 개념모델에 기반하는 과학적 대응체계를 구축하는 과정에서 구성 요소들을 평가하고 수정·보완·추가하고자 한다.

○ 초미세먼지·오존 통합관리의 역량 확보

국내 초미세먼지, 오존 관리는 그동안 추진하였던 대기환경 개선정책이라는 소극적 범주를 넘어 국민의 '환경복지' 증진 또는 '삶의 질' 제고를 위한 필요조건으로 인식하기에 이르렀다. 국내·외 연구결과에 의하면 초미세먼지, 오존 관리를 통해 '삶의 질'을 적극적으로 개선하려는 과정에서 도시의 추진역량 확보 여부가 주요한 이슈로 검토되고 있다.[6)]

생활밀착형 미세먼지, 오존 관리 및 개선을 위한 일차적인 역할은 지방정부의 몫이다. 이에 일차적으로 서울시는 초미세먼지, 오존농도 형성에 직·간접 영향을 주는 각종 배출원

---

6) 한국지역정보개발원 자료(2018.8)에 의하면 중앙선거관리위원회에서 운영하고 있는 정책·공약 알리미(http://policy.nec.go.kr)에 공개된 공약자료(17개 시·도지사 지방선거 선거공보, 선거공약서 및 5대 공약 등)를 분석한 결과, 지방자치단체 민선 7기 주요 공약/관심사항 가운데 '미세먼지 개선'을 '청년 고용 창출', '보육 지원'과 같은 우선순위를 두고 있는 것으로 나타남. 미세먼지 관리는 중앙정부의 최우선 국정과제인 동시에 지방정부의 풀뿌리 시정과제로서 인식되고 있음.

분포와 배출정보, 지역 간·지역 내 시·공간 대기 확산, 저감대책 수립, 고농도 출현과 비상저감조치 추진, 건강영향 모니터링 등 전방위적 대응 시스템을 구축하는 것이 필요하다.

다음으로 '환경자치' 도입 차원에서 서울시는 초미세먼지, 오존 농도 관리정책의 추진역량 확보가 필요하다. 초미세먼지, 오존 관리는 중앙정부가 추진해야 하는 전국적인 과제인 동시에 지방정부가 지역적으로 추진해야 하는 차별화된 과제가 함께 작용하는 복합적 요인을 포함하기 때문이다.

이에 일차적으로 초미세먼지, 오존 통합관리의 효율성 제고를 위한 서울시 추진역량 확보 여부를 가늠하기 위해 개념모델에 기반한 맞춤 대응요소를 발굴하여 전략대안을 개발하고자 한다.

2) 연구내용

○ 대기환경관리 정책여건 변화

최근 삶의 질 개선의 최대 난제인 초미세먼지, 오존의 인체건강 영향을 고려하여 시급성, 불확실성, 책임성의 상호 균형 접근 측면에서 대기환경 관리정책이 기본적으로 검토되는 추세이다. 즉, 대기환경 관리정책의 합목적성 확보를 위해 인체건강 위해도 실증분석과 초미세먼지, 오존 농도 측정 및 모니터링 시스템 구축으로 시급성에 대응하고 있다. 또한 배출원 확인과 배출량 정보체계를 마련하여 발생원 기여도 분석과정의 불확실성을 낮추고, 제도적용의 실효성 증대 및 이행규제와 지원을 통해 책임성을 유지하고 있다.

이와 관련하여 '초미세먼지·오존 관리 효율성 제고를 위한 중앙 및 지방정부의 협력방안' 수립에 필요한 기초 정책정보를 확인하기 위하여 정부 초미세먼지 관리정책에 대응하는 서울시 초미세먼지·오존 관리정책 현황을 분석한다. 이는 미세먼지 관리의 시급성, 불확실성, 책임성 등 3가지 원칙을 바탕으로 향후 서울시 초미세먼지·오존 통합관리 정책에 대한 시사점을 도출하는 첫 번째 단계이다. 즉, 중앙정부와 서울시의 대기환경관리 정책 변화를 확인·검토하여 서울시 맞춤형 선순환 기후환경 전략을 수립하고 환경복지 선도역량을 확보하기 위한 정책방향을 도출한다는 의미이다.

서울연구원 The Seoul Institute

○ 미세먼지·오존 시공간적 변화와 복합영향 검토

서울시 초미세먼지(PM2.5), 오존(O_3)의 시·공간적 변화와 복합영향 등을 분석하여, 향후 개념모델을 매개로 서울시 통합관리의 필요조건을 확인한다. 분석 자료는 서울시 대기오염자동측정망 측정 자료이며, 2013년 이후 서울시 초미세먼지와 오존 간 오염도 변화 과정과 복합적인 영향을 분석한다.

○ 선진도시의 대기환경 통합관리 사례분석

초미세먼지·오존 대응 통합관리 솔루션을 모색하는 과정에서 간과할 수 없는 단계는 해외 선진사례에서 원용 가능한 시사점을 살펴보는 것이다. 선진국이 이미 초미세먼지, 오존 농도의 건강 위해성에 대해 우리보다 한발 앞서 있음에 비추어, 해외 사례는 사회적 학습 과정으로서 시행착오라는 기회비용을 줄일 수 있는 유용한 참고사례가 될 수 있다.

세계도시들의 미세먼지와 오존을 포함한 대기환경 통합관리 전략 사례를 조사·정리하여, 서울시 통합관리 전략을 마련하는 데 기초정보로 활용한다.

○ 서울시 미세먼지·오존 통합관리 실증분석과 전략

'시민의 삶의 질' 개선과 관련하여 미세먼지, 오존의 통합관리 요인을 실증 분석하고, 향후 대기환경 통합관리 전략을 모색하는 과정에서 요인별 적정 맞춤관리 전략을 제시한다.

02

미세먼지 및 오존 관리현황

1_미세먼지 및 오존 관리여건

2_미세먼지·오존 시공간 변화

The Seoul Institute

02 | 미세먼지 및 오존 관리현황

1_미세먼지 및 오존 관리여건

1) 중앙정부 관리현황

(1) 미세먼지

수도권 대기환경관리는 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」(2005년)에 따라 시행되고 있다. 동법 제2조 및 동법 시행령 제2조의 규정에 따라 서울특별시, 인천광역시, 경기도 지역에서 대기오염이 심각하다고 인정되는 지역이나 해당 지역에서 배출되는 대기오염물질이 수도권 지역의 대기오염에 크게 영향을 미친다고 인정되는 지역을 '대기관리권역'으로 설정하여 10년 단위의 종합계획인 "제1차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015.11)"을 수립하였다. 목표연도 2014년까지 PM10), NO_2 농도를 선진국 수준으로 개선하는 것을 목표로 사업장, 자동차 등 주요 오염원에 대한 관리대책을 수립·추진하는 것이 핵심이다.

2014년에 제1차 수도권 대기환경관리 기본계획이 종료됨에 따라 2024년까지 인체 위해성 관리 강화를 주요 내용으로 하는 "제2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2013.12)"을 수립하였다. 또한 기본계획에 제시된 연차별 대기환경 개선목표를 달성하기 위한 5년 단위의 시행계획(2015~2019)을 수립하였다. PM2.5, O_3이 관리대상물질에 새롭게 추가되었으며, PM2.5는 2015년부터 적용되는 환경기준보다 더 강화된 20$\mu g/m^3$을 목표치로 설정하고 있다. 이러한 목표달성을 위해 자동차 및 사업장의 배출 관리를 강화하고, 현재 관리대상이 아닌 숯가마와 대형 직화구이 음식점도 관리대상에 포함시켜 배출 방지시설 설치를 지원하고 있다.

이후 2016년 고농도 미세먼지가 빈발하여 미세먼지 문제 해결을 위한 국가적 차원의 특단의 대책 수립의 필요성이 대두됨에 따라 국무조정실을 중심으로 관계부처 차관회의 등을 거쳐 "미세먼지 관리 특별대책(2016.6)"을 확정·발표하였다. 제2차 수도권 대기환경기본계획의 목표(20$\mu g/m^3$)를 2024년에서 2021년으로 3년 앞당겨 조기 달성한다는 계획이다. 또한 10년 내에 유럽 주요도시의 현재 수준으로 미세먼지를 개선한다는 목표(서울 기준,

2015년 23㎍/㎥ → 2026년 18㎍/㎥)를 설정하였다. 이와 함께 전국적으로 적용이 가능한 대책은 확대하고, 조기 시행이 가능한 대책은 앞당겨 시행할 뿐만 아니라 신규 대책을 추가하고 있다.

이는 결과적으로 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획의 변경 요인으로 인식되었다. 이에 2013년 대기오염물질 배출량을 기준으로 2024년 배출량 전망을 변경하고, 대기관리권역 및 지역별 오염물질별 목표배출량을 조정하여 "제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획(2017.5)"을 수립하였다. PM2.5의 개선 목표는 "미세먼지 관리 특별대책"에 제시된 목표농도의 3년 조기 달성으로 변경하고, 그 외 오염물질의 경우 당초 2024년 개선목표를 유지하고 있다.

변경계획에서는 공해자동차 운행제한지역(LEZ) 제도를 정착시키고, 고농도 미세먼지 발생 시 비상저감조치를 시행하며, 고농도(Hot-Spot) 노출에 따른 인체 위해성 관리에 중점을 둔 신규 대책들이 추가·강화되었다.

이후 미세먼지 문제 해결에 대한 국민적 요구가 높아짐에 따라 미세먼지 관리의 패러다임을 전환하여 2022년까지 미세먼지 국내 배출량을 30% 감축하고, 2022년 PM2.5 달성 목표를 18㎍/㎥로 하는 "미세먼지 관리 종합대책(2017.9)"을 발표하였다.

[표 2-1] 중앙정부 대기환경관리 대책별 대기오염물질 달성 목표농도

구분	목표농도
제1차 수도권 대기환경관리 기본계획(2005.11)	2014년 PM10 40㎍/㎥, NO_2 22ppb
제2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2013.12)	2024년 PM10 30㎍/㎥, NO_2 21ppb PM2.5 20㎍/㎥, O_3 60ppb
미세먼지 관리 특별대책(2016.6)	2021년 PM2.5 20㎍/㎥ 2026년 PM2.5 18㎍/㎥
제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획(2017.5)	2021년 PM2.5 20㎍/㎥ 2024년 PM10 30㎍/㎥, NO_2 21ppb O_3 60ppb
미세먼지 관리 종합대책(2017.9)	2022년 PM2.5 18㎍/㎥

(2) 오존

환경부에서는 고농도 오존에 민감한 취약계층에 오존 농도를 알려 피해를 최소화하기 위한 오존 경보제를 1998년부터 시행하고 있으며, 2018년 현재 73개 권역에서 시행하고 있다. 그리고 2015년부터 전국 단위의 오존 예보제를 시행하고 있다. 2017년 기준 정확도는 81%(고농도 정확도 71%)로 PM2.5의 정확도와 비슷한 수준이다. 국가별로 오존의 측정방법이 달라 단순 비교하기는 어려우나 우리나라의 오존 농도는 다소 높은 상태이다. 최근 오존 주의보 발령횟수(일수)가 증가하고 있는 추세이며, 2017년은 경보제 도입 이후 주의보 발령일수(횟수)가 최대치를 기록하였다.[7)]

이에 고농도 오존 발생 억제와 피해 최소화를 위해 「미세먼지 관리 종합대책」에 오존 대응정책을 포함하여 추진 중에 있다. 오존 대응정책의 주요 목표는 2016년 대비 2022년 오존 유발물질 배출량을 24.4% 감축하고(NOx 36.9%, VOCs 11.9%), 오존주의보 발령 횟수는 5~15% 정도 감소시키는 것이다.

정부에서는 O_3 농도에 대응하기 위한 주요 관리대책으로 ① 오존 유발물질 발생 저감, ② 오존 유발물질 배출 지도·단속, ③ 예·경보 강화 및 발생원인 규명, ④ 민감·취약계층 보호 및 대(對)국민 홍보 등을 시행하고 있다.

[표 2-2] 오존 유발물질(NOx, VOCs) 저감 계획

(단위 : 톤/년)

구분	계	직접배출	간접배출		
			황산화물	질소산화물	휘발성 유기화합물
2016년 배출량(A)	324,109	91,460	118,418	90,416	23,814
2022년 배출전망(B)	225,369	77,090	70,282	57,022	20,975
2022년 삭감량(A-B) (비율)	98,740 (30.5%)	14,370 (15.7%)	48,136 (40.6%)	33,394 (36.9%)	2,840 (11.9%)

7) 오존 경보제를 시행하고 있는 73개 권역에서 2015년 133회(34일), 2016년 241회(55일), 2017년 276회(59일)가 발령되어 2017년에 발령일수가 가장 높은 수치를 기록함(자료: 환경부, 「여름철 오존 관리 및 피해 예방대책」, 2018.5).

① 오존 유발물질 발생 저감
【발 전】 질소산화물 배출허용 기준 강화(기존 2배, 신규 5배), 노후 석탄발전 폐지 일정 단축(1~3년)
【산 업】 질소산화물 총량관리 확대(수도권 → 수도권 + 충청권·동남권·광양만권(2019년 상반기)), 질소산화물 대기배출부과금 부과(2018년 하반기)
【도로수송】 노후경유차 조기폐차 지원 확대(2017년 6만 → 2018년 이후 16만 대), 친환경차(수소차·전기차) 보급 확대(2022년까지 200만 대)
【비 도 로】 건설기계 저감사업(2018~2022년 노후 건설기계 3.1만 대 저공해 조치), 선박 저감대책(육상전력공급시설 구축)
【생 활】 주유소 유증기 휘발성유기화합물 관리 강화(인구 50만 이상 10개 도시)
② 오존 유발물질 배출 지도·단속
○ 질소산화물 : 지자체 등과 협업, 자동차 배출가스 집중단속(2018년 5월~) - (시도) 집중단속 대상지역 240곳(차고지, 버스터미널, 주차장, 도로변, 고속도로진출입로)에서 노후경유차, 버스, 학원차량(4.4만 대) 단속 - (환경부) 배출가스 정밀검사 대상지역 중 6곳(수도권 5, 울산 1)에서 원격측정장비*(RSD; Remote Sensing Device)로 단속 * 원격측정장비는 차량이 측정지점을 통과할 때 적외선, 자외선을 발사하여 흡수된 배출가스 양을 자동으로 분석하는 장비임.
○ (휘발성유기화합물) 제조사업장, 제품(도료), 주유소 등 휘발성유기화합물 배출원에 대한 분야별 집중 점검(2018년 4~8월) - (환경부) 드론 등 신기술 활용, 소규모 배출사업장(약 600개소) 밀집지역에 대한 배출허용기준 준수 여부 등 특별점검(2018년 4월~) - 도료 제조·수입(약 100개소) 및 판매업체(약 100개소) 등의 도료 내 휘발성유기화합물 함유기준 준수 여부 점검(2018년 5월~8월) ※ 원유정제, 석유화학 등 비산배출사업장에 대해 굴뚝 외 누출지점 밀폐화 등 적정 시설관리를 위한 기술지원 병행(환경공단) - (지자체) 도장·세정시설 및 주유소 등 생활주변 휘발성유기화합물 배출원(약 5천 개)에 대해 유증기회수설비 등 방지시설 적정 운영 점검(2018년 5~8월)
③ 예·경보 강화 및 발생원인 규명
○ 예·경보 인프라 구축 확대 - (측정망 확대) 오존 측정망을 미세먼지 측정망과 동일한 수준(2022년 505개소)으로 확충 ※ (2017년) 328(+64) → (2018년) 355(+27) → (2022년) 505개소(+153) - (예보 강화) 오존 원인물질 배출량 세분화, 예보모델 고도화 등으로 예보정확도를 2020년 85% 이상으로 향상 ※ 예보정확도 : 2015년 83% → 2016년 82% → 2017년 81% → 2020년 85% ○ 오존 발생원인 과학적 규명 - (발생량 산정) 국가배출량 산정 시스템(CAPSS; Clean Air Policy Support System)에서 실제 집계되지 않은 소규모 배출시설 추가 및 배출계수 지속적 보완(2019~2020) - (국내 연구) 오존 유발물질 배출특성 및 농도 조사*, 대기질 영향 예측 시스템(K-MEMs)** 개발(2017~2020) * 산림지역 휘발성유기화합물 배출특성 조사, 도시지역 유해대기오염물질 모니터링 ** 지역별, 배출원별, 계절별 국내·외 기여도 산정 - (국제 연구) 한·미(KORUS-AQ), 한·EU(EMeRGe), 한·중(청천프로젝트) 등을 활용하여 오존 유발물질 이동특성 파악

서울연구원 The Seoul Institute

④ 민감·취약계층 보호 및 대국민 홍보
○ 어린이 등 오존 민감계층 보호 - 관계부처(교육부·복지부·환경부) 협업으로 일선기관(유치원·학교 20천 개소, 어린이집 42천 개소) 담당자를 대상으로 고농도 대응요령 교육(2018년 5월~10월) - 휴대폰 앱(우리동네 대기질)의 오존 예·경보 알림기능* 활용, 다수의 사용자에게 신속 전파 - "나쁨"(0.09ppm) 이상일 경우 자동알림이 가능하도록 개선(2018년 7월) * 시·도 : 홈페이지 게재, 관계기관 통보 및 주의보·경보 시 알림문자 발송 일선기관 : 오존 예보상황 실시간 확인(모바일 앱) 및 행동요령 조치 ○ 실외작업자 등 오존 취약계층 보호 - 건설·청소업 등 실외작업자 보호를 위해 옥외작업 단축, 실내 작업으로 전환, 건강관리 등 실외작업자 대응요령 마련(2018년 6월) ※(참고사례) 폭염 시 적절한 휴식 보장 등 규정(산업안전보건기준규칙, 고용부) - 관계기관(고용부·국토부·행안부·경찰청·우정사업본부·지자체 등)과 협업으로 대응요령 홍보 및 고농도 오존 발생 시 대응조치(2018년 6월~9월) ○ 대국민 오존 행동요령 홍보 강화 - 대국민 「오존 대응 6대 수칙」 캠페인 추진(홈페이지, 리플렛 등) - 국민 눈높이에 맞는 홍보책자·동영상 제작·배포 및 일선기관에 오존 교육 강화(교육부·복지부 협조)

2) 서울시 미세먼지·오존 통합관리

(1) 정책방향

2014년에 대기질 개선과 관련하여 2018년까지 연평균 농도 20㎍/㎥(2013년 기준 25㎍/㎥) 달성을 목표로 수립하였다. 이를 위해 교통분야, 산업·비산업 분야, 생활오염원 분야에 걸쳐 세부적인 전략을 마련하고, 동북아 대기질 개선 네트워크를 구축하는 등 "초미세먼지 20% 줄이기"를 위한 다양한 대기질 관리 대책을 추진하였다.

이후 "시민이 안심하고 숨쉴 수 있는 서울"의 실현을 위한 가시적인 농도 저감이라는 목표 달성을 위해 실효성과 현장성에 초점을 맞춘 "서울시 대기질 개선 특별대책(2016.7)"을 발표하였다. 서울 지역의 미세먼지 3대 발생원인 자동차(35%), 건설기계(17%), 비산먼지(12%)에 대한 강도 높은 대책으로 미세먼지를 획기적으로 저감하는 것이 핵심이다. 이 중 배출 영향이 가장 큰 교통 부문은 강력한 교통수요 관리를 통해 발생 원인을 원천 차단하는 투트랙(two-track) 전략을 채택하고 있다.

또한 미세먼지는 세계보건기구(WHO)가 지정한 1급 발암물질로 시민건강에 치명적인 위협을 가하고 있고, 서울 시민의 삶의 질 개선의 한계요인으로 인식되고 있기 때문에 가용할 수 있는 정책수단을 동원하여 시민건강을 지키기 위한 "서울시 대기질 개선 대책

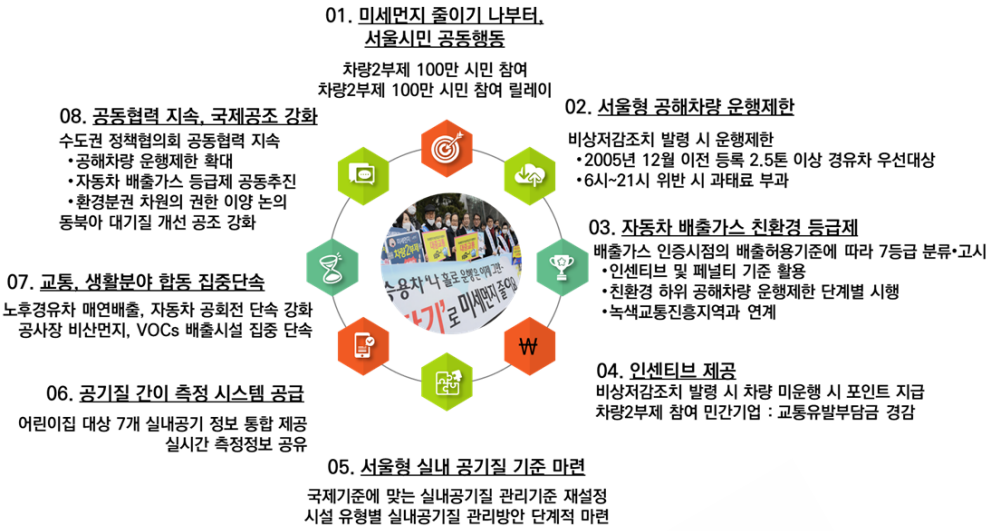
(2017.4)"을 발표하였다.

"서울시 대기질 개선 대책"의 주요 내용을 살펴보면, 대기질 개선효과가 입증된 노후경유차(건설기계) 저감사업을 지속적으로 시행하는 한편, 정책의 사각지대에 있었던 서울시 발주공사장에 친환경 건설기계 사용을 의무화하고, 수도권 이외 지역에서 서울시로 진입하는 전국 농수산물 유통 화물차량의 공공물류센터 진입제한 등 운행제한 조치를 확대해 나가기로 했다. 비산먼지 부문의 기여도와 시민건강 피해 최소화를 위하여 건설공사장 및 도로 등 생활주변 오염원에 대한 강력한 먼지 저감대책을 시행하기로 하였다. 또한 실주행 배출가스 관리제도 운영에 따른 자동차 등급 재산정, 신규 배출가스 인증제도의 국제적 통일기준 마련을 위해 정부와 협력하기로 하였다.

초미세먼지 대응의 근본적인 패러다임 전환을 위해 '서울시민 미세먼지 대토론회'를 2017년 5월 27일에 개최하였다. 이는 시민 체감형 서울형 대기질 정책 수립을 위해 시민이 직접 참여·제안함으로써 사회적 합의와 공감대를 형성하는 데 기여한 것으로 평가되고 있다. 시민 3천여 명의 의견을 바탕으로 후속 조치인 "미세먼지 10대 대책(2017.6)"을 발표하였다.

"미세먼지 10대 대책"은 ① 미세먼지를 재난으로 규정, 미세먼지 취약계층 공정 보호조치 강화, ② '서울형 초미세먼지 민감군 주의보' 신규 도입, ③ 서울형 비상저감 조치 시행, ④ 시민참여형 차량 2부제 실시 및 대중교통요금 무료, ⑤ 서울 도심 내(사대문 안) 공해차량 운행제한, ⑥ 노후 건설기계 저공해화 의무화 및 친환경 건설기계 사용 의무화, ⑦ 서울시 건축물 가정용 친환경보일러·산업용 저녹스버너 보급, ⑧ 미세먼지 대응 R&D 지원 및 연구 확대, ⑨ 동북아 4개국 주요도시와 환경외교 강화, ⑩ 정부·지자체 대기질 공동협력 확대 등이다.

그러나 공공부문 위주의 기존 수도권 비상저감조치는 PM2.5 배출량을 크게 감축할 수 없는 한계가 있어, 미세먼지 고농도 시 대기오염물질의 배출 저감 이외에 시민건강 피해를 줄이는 노출저감 정책의 강화가 필요했다. 이에 서울형 비상저감조치가 거둔 범시민 차원의 참여와 실천이라는 긍정적 시민여론과 공감을 기반으로, 시민주도 시민참여라는 보다 실효성 있고 의미 있는 '서울형 미세먼지 비상저감조치' 시민 주도 8대 대책(2018.2)을 마련하고 추진 중에 있다.



[그림 2-1] 서울형 미세먼지 비상저감조치 시민 주도 8대 대책

한편 1단계 수도권 대기환경 관리 기본계획과 시행계획의 목표관리에서 제외되었던 O_3, PM2.5 기준이 추가되었다. 또한 기후환경 변화의 건강영향을 최소화하기 위한 새로운 대기환경 정책방향 마련에 관심이 집중되고 있다. 오존에 의한 피해를 줄이기 위해 질소산화물과 휘발성유기화합물 관련 대책들을 마련하여 추진 중에 있다.

오존 배출원 관리 강화
○ 자동차 배출가스 무료 점검 및 집중단속 시행 - 배출가스 무료점검을 시행하여 자율적인 차량관리 유도 - 오존농도 상승 시 해당지역 배출가스 집중단속 ○ 승용차 운행 억제 - 오존경보가 발령되거나 오존 중대경보 발령이 예상되는 경우 교통량 감축이 필요할 때 자동차 운행제한 ○ 하절기 도장 및 도로포장으로 인한 오존발생 저감방안 추진 - 공공건물 하절기 외의 계절에 도장 시행, 대형사업장도 하절기에 도장 및 도로포장을 자제하도록 유도 - 자동차 도장작업 등 VOC 배출이 많은 작업은 야간에 시행하도록 유도 ○ 주유소 신설 및 연료 급유 시 VOC 저감대책 추진 - 신규 주유소 설치 시 VOC 배출억제시설 설치 - 급유 시 시동을 끄고 연료는 탱크에 가득 채우지 않도록 홍보 ○ 기타시설(세탁시설 등) 오존오염물질 배출 억제 - 오염도가 높은 시간대(12:00~15:00)에 VOC 배출이 많은 드라이클리닝 작업을 최소화하도록 협조 요청

중장기 오존저감 대책
○ 친환경차 보급 확대 - 전기택시, 전기화물차, 전기오토바이 등 보급 확대 - 충전인프라 구축 ○ 운행차 배출가스 관리 - 노후 경유차 저공해화 사업 - 이륜차 배출가스 관리 강화 - 자동차 배출가스 친환경 등급제 실시 - 공해차량 운행제한 강화 ○ 운행차 배출가스 관리 - 주요 배출원에 원격감시장치를 설치하여 감시 강화, 오존주의보 발령이 예상되는 경우 VOC 사업장에 사전통보하여 배출가스 저감 유도 - VOC 사업장 방지시설 설치기준을 강화하여 오염물질 발생 최소화

특히 서울시는 고농도 오존에 대한 민감·취약군의 건강피해를 최소화하고, 오존 관리의 중요성에 대한 인식 제고를 위해 2017년 9월에 '민감·취약군 대상 고농도 오존 대응 세부 행동요령'을 마련하였다.

「서울특별시 대기오염 예보 및 경보에 관한 조례」 별표 3의 '대기오염 경보에 따른 조치사항'을 기초로 오존 상태를 평시, 고농도예보, 주의보, 경보, 중대경보로 세분화해 단계별 대처방안을 제시하고 있다. 또한 적용대상도 기존 영·유아, 어린이, 임신부, 호흡기 및 심혈관계 질환자에서 환경미화원, 교통경찰 등 야외근로자 등의 '취약군'도 새롭게 추가하였다. 행동요령 대상과 야외 현장의 특성을 반영해 당사자뿐만 아니라 보호자, 시설관리자 및 현장관리 감독자도 고농도 오존에 대처할 수 있는 유용한 자료로 활용되고 있다. 개편된 오존경보 행동요령의 특이사항은 5단계별로 민감군, 취약군 대응요령으로 구성되며, 일반시민은 각 요령에 맞추어 대응하도록 유도한 것이다.

그리고 오존 발생기작 등 과학적 현상 분석에 기반한 고도의 중장기 관리 기반을 마련하기 위하여 초미세먼지 상세모니터링에 이어 오존 생성 메커니즘 규명과 관련한 연구를 추진 중에 있다.

단기적으로는 현행 대기환경보전법상 고농도 오존 오염의 명시적 대응 규정의 실제 적용과 시민참여 과정을 고려하여, 고농도 오존 발생 가능성에 대비한 민감계층·상습 고농도 지역·배출 부문별 고농도 오존 대응방안을 마련하기 위함이다. 중장기적으로는 서울시 오

존 오염의 발생·확산·영향 등의 특성을 고려한 과학적 정밀분석을 기반으로 효율적인 전구물질 저감을 진행하여 시민건강 및 사회·경제적 영향과 연계된 오존 대응 정책방안을 수립하기 위함이다.

[표 2-3] 서울시 민감·취약군 대상 고농도 오존 대응 세부 행동요령

구분		세부 행동요령
평상시	민감군	• 질환자 인원파악 및 보호자 비상연락망 구축 • 오존 상황 대비 사전 계획 마련, 오존 농도 수시 확인
	취약군	• 질환자 인원파악 및 보호자 비상연락망 구축, 오존 농도 수시 확인 • 작업장 주변에 그늘이 없을 경우 그늘막 설치
고농도 예보 (일 예보 나쁨 이상)	민감군	• 익월 예정된 실외 활동을 확인하여 상황에 따라 실내 활동으로 대처 • 보호자 비상연락망, 안내문 등을 통한 예보상황 및 행동요령 공지
	취약군	• 익월 예정된 실외근무 및 작업시간 등에 대한 점검
주의보 (0.12ppm/hr 이상)	민감군	• 일사량이 많은 시간대(14~16시)에 야외 활동 자제 • 고농도 오존 행동요령 교육 및 실천
	취약군	• 일사량이 많은 시간대(14~16시)에 격렬한 노동활동 자제 • 익월 예정된 실외근무 및 작업시간 등 조정 • 호흡기 및 심혈관계질환 등 오존 노출 민감군 및 고위험군 관리 대책 이행
경보 (0.30ppm/hr 이상)	민감군	• 일사량이 많은 시간대(14~16시)에 야외 수업 제한 또는 하교시간 조정 권고 • 외출 및 야외활동 제한
	취약군	• 각종 야외행사를 취소하고 활동 금지 요청 • 익월 예정된 실외근무 중지 권고 • 14~16시 사이에는 작업 중지 및 휴식 권고
중대경보 (0.50ppm/hr 이상)	민감군	• 야외수업 금지, 하교시간 조정 • 외출 및 야외활동 금지 • 호흡기 및 심혈관계 질환자 파악과 특별관리(조기 귀가, 진료)
	취약군	• 실외 근무 금지

자료 : 서울시, 예·경보 단계별 민감·취약군 오존 대응 세부 행동요령(2017)

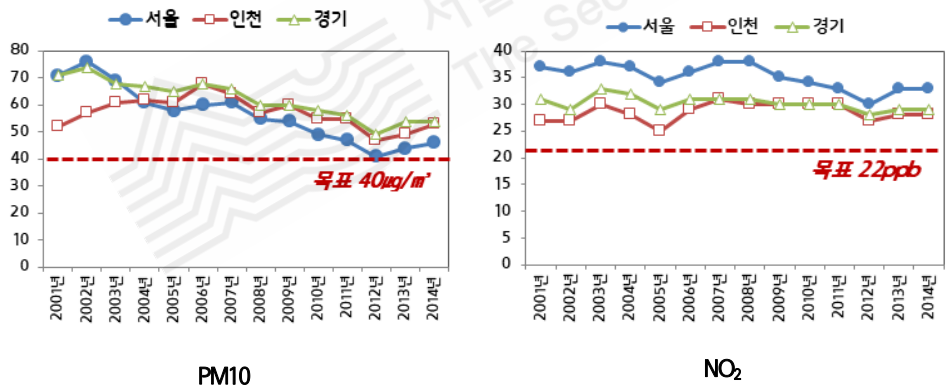
(2) 추진성과

서울시 대기질 개선 시행계획의 수립·추진(2005~2014)으로 '선택과 집중' 전략을 추진해 시정거리 악화요인일 뿐만 아니라 시민의 호흡기 질환을 유발하는 PM10을 저감하는 환경개선 성과가 가시화되고 있다. 서울시 PM10 농도는 2001년 71㎍/㎥ 수준에서 크게

감소하여 개선목표에 근접한 후, 2013년부터 44㎍/㎥ 수준을 유지하고 있어 약 21% 정도 개선된 것으로 분석되었다. 인천시의 경우는 PM10 농도가 2005년 59㎍/㎥에서 2014년 47㎍/㎥로, 경기도는 2005년 63㎍/㎥에서 2014년 53㎍/㎥로 각각 20%, 16% 정도 감소하였다.

국가대기환경기준(50㎍/㎥)과 비교하면 서울, 인천과 달리 경기도만 기준 농도를 초과한 것으로 나타났다. 다만 2014년 PM10 목표 농도(40㎍/㎥)는 서울, 경기, 인천 3개 시·도가 모두 달성하지 못하였다.

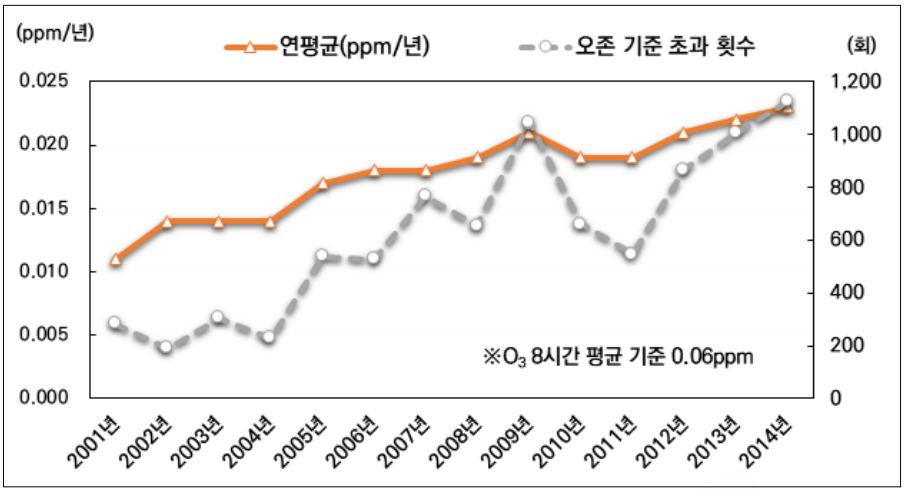
그러나 3개 시·도의 NO_2 농도는 2007년까지 증가하다가 2012년까지 감소 추세를 보였으며, 2013년부터는 2012년도에 비해 다소 증가하였다. 서울은 2005년 34ppb에서 2012년 30ppb로 감소되었으나, 2014년 목표농도(22ppb)는 달성하지 못했다. 다만 대기환경기준(30ppb)은 최초로 달성하였다. 인천과 경기는 서울보다 NO_2 수준이 낮으며, 대기환경기준을 만족하는 수준이나 목표농도는 서울과 마찬가지로 달성하지 못하였다.



PM10 NO_2

[그림 2-2] 수도권 3개 시·도 PM10과 NO_2 농도변화(2001~2014)

1차 기본계획은 PM10과 NO_2 목표농도만을 제시하고 있으며, VOCs, O_3에 대해서는 별도의 목표농도를 제시하고 있지 않다. 그러나 O_3 연평균 농도가 꾸준히 증가하고 있고, 국가 및 서울시의 8시간 기준(0.06ppm)을 초과하는 횟수 역시 계속 증가하고 있어 시민건강을 위협할 가능성이 커지고 있다.[8)]



[그림 2-3] 서울시 연도별 O_3 농도와 8시간 기준 초과횟수 변화(2001~2014)

한편 1차 수도권 대기환경관리 대책 시행 전(2004년)과 비교하여 목표연도(2014년)의 오염물질 배출량의 감축 성과를 살펴보면, PM10은 67.8%, NOx는 39.8%, VOCs는 14.7% 정도 감소한 것으로 나타났다.

[표 2-4] 서울시 대기오염물질 배출량 감축효과(2004년 대비 2014년 CAPSS 배출량 기준)

(단위 : 톤/년)

구분	PM10	SOx	NOx	VOCs
2004년 배출량	4,424	6,462	103,549	77,695
2014년 배출량	1,424	3,527	62,358	66,290
삭감률	-67.8%	-45.4%	-39.8%	-14.7%

주 : 2004년, 2014년 CAPSS 배출량 기준 삭감률을 비교함.
자료 : 국립환경과학원, 「2015 국가 대기오염물질 배출량」, 2018.

기존의 제1차 수도권 대기환경관리 기본계획이 비산먼지 대책과 NO_2, VOCs 등의 오염물질 관리가 상대적으로 미흡하다는 중간평가 결과를 반영하여, 기존의 기준연도 2001년을 2007년으로 변경하고 2014년 배출전망(BAU)을 수정한 바 있다(2010.12). 수정된 2014년

8) 국가, 서울시의 O_3 환경기준은 8시간 기준 0.06ppm, 1시간 기준 0.1ppm으로 동일함. 다만 세부적으로 국가는 1시간 평균치의 경우 999천분위수의 값, 8시간 및 24시간 평균치는 99백분위수의 값을 기준을 설정하고 그 값을 초과해서는 안되는 것으로 규정하고 있음. 서울시의 경우 1시간, 8시간의 평균치가 연간 3회 이상 그 기준을 초과하여서는 안되는 것으로 규정하고 있음.

BAU 기준 감축효과는 PM10 66.1% 수준으로 가장 크게 저감하였으나, VOCs는 BAU 대비 38.0% 정도의 감축효과를 보였다.

[표 2-5] 서울시 BAU 대비 배출량 감축효과(BAU 대비 CAPSS 배출량 기준)

구분		2011년	2012년	2013년	2014년
PM10	BAU	4,076	4,109	4,156	4,204
	CAPSS	1,742	1,728	1,735	1,424
	감축량	2,334	2,381	2,421	2,780
	(삭감률)	(-57.3%)	(-57.9%)	(-58.3%)	(-66.1%)
NOx	BAU	115,873	116,922	117,757	119,234
	CAPSS	62,080	61,784	64,034	62,358
	감축량	53,793	55,138	53,723	56,876
	(삭감률)	(-46.4%)	(-47.2%)	(-45.6%)	(-47.7%)
VOCs	BAU	99,689	101,848	104,284	106,892
	CAPSS	72,054	72,693	69,763	66,290
	감축량	27,635	29,155	34,521	40,602
	(삭감률)	(-27.7%)	(-28.6%)	(-33.1%)	(-38.0%)

주 : 2011년~2014년은 제1차 기본계획 변경계획에서 무대책 시 BAU 배출량임
자료 : 서울시정개발연구원, 「서울시 대기환경 개선목표 달성을 위한 오염물질 저감대책 수립 연구」, 2011. 국립환경과학원(2018)

그리고 2014년 수도권 대기오염물질 삭감 계획량 대비 삭감실적은 PM10 76%, NOx 62%, SOx 129%, VOCs 41% 수준으로, SOx 항목에 국한해서 목표를 달성하였다. 대책별로 살펴보면 PM10, NOx는 도로이동오염원에서 각각 93,705톤, 320,560톤으로 가장 많이 삭감되었으며, SOx는 사업장에서 130,131톤, VOCs는 면오염원에서 400,119톤 수준을 삭감한 것으로 나타났다([표 2-6] 참조).

서울시와 경기도의 SOx 삭감실적은 각각 202%, 182% 정도로 삭감 목표를 달성하였으나, PM10, NOx, VOCs 오염물질은 삭감 목표를 달성하지 못한 것으로 분석되었다. 인천시는 SOx를 포함해 모든 오염물질의 삭감 목표를 달성하지 못한 것으로 나타났다([표 2-7] 참조).

수도권 3개 시·도는 전반적으로 VOCs 삭감 달성률이 31~54% 수준으로, 다른 오염물질과 비교해 달성률이 낮은 수준이다. 이는 VOCs 배출량의 70%를 차지하는 면오염원(유기

용제 사용 등)의 특성상 효과적인 저감대책 추진에 한계가 있고, 삭감계획 목표량이 다소 과다하여 다른 오염물질에 비해 계획 대비 삭감실적이 다소 낮은 것으로 판단된다.

[표 2-6] 수도권 대기환경관리 대책별 오염물질 저감실적

(단위 : 톤, %)

구분		PM10	NOx	SOx	VOCs
계	**계획**	**69,585**	**1,106,385**	**187,703**	**1,242,874**
	실적	**52,728**	**685,401**	**241,729**	**512,120**
	달성률	**76**	**62**	**129**	**41**
도로이동 오염원	계획	48,361	590,074	17,819	150,125
	실적	39,705	320,560	25,991	107,034
	달성률	82	54	146	71
비도로 이동오염원	계획	5,269	150,378	40,638	15,566
	실적	10	11,396	12,153	1,048
	달성률	0	8	30	7
사업장	계획	12,318	189,204	89,057	89,468
	실적	625	194,097	130,131	1840
	달성률	5	103	146	2
면오염원	계획	1,012	80,608	31,924	985,941
	실적	1,984	1,091	66,099	400,119
	달성률	196	1	207	41
친환경에너지 및 도시관리	계획	2,625	96,121	8,265	1,774
	실적	10,404	158,257	7,354	2,079
	달성률	396	165	89	117

자료 : 수도권대기환경청, 「'14년도 수도권 대기환경관리 시행계획 추진실적 평가('07~'14 종합평가 포함) 결과, 2016.5

[표 2-7] 지역별 오염물질 저감실적

(단위 : 톤, %)

구분		PM10	NOx	SOx	VOCs
서울	**계획**	**23,289**	**352,929**	**11,050**	**343,490**
	실적	**18,966**	**254,750**	**22,316**	**187,157**
	달성률	**81**	**72**	**202**	**54**
인천	계획	15,417	231,743	110,203	267,576
	실적	8,162	128,554	98,409	131,002
	달성률	53	55	89	49
경기	계획	30,879	521,713	66,450	631808
	실적	25,600	302,097	121,004	193,961
	달성률	83	58	182	31

자료 : 수도권대기환경청(2016.5)

(3) 한계요인

중국 등 국외 영향의 증가, 대기정체 일수 증가 등 국내외 기상여건 악화가 복합적으로 작용하고, 계획 수립 당시 비산배출, 생물성 연소, 2차 생성량 등 국내 배출량을 과소 산정하여 PM10 농도가 증가하였다.[9] 그리고 운행 경유차의 저공해화 등 PM10 저감 중심 대책 추진, 전망을 상회하는 경유자동차 증가로 NOx 배출량의 증가, 계획 수립 당시 실도로 주행조건의 미반영으로 NOx 배출량의 과소산정으로 인해 서울시 NO_2 농도 저감이 미흡하였다. 결과적으로 2014년 서울 기준 PM10 40㎍/㎥, NO_2 22ppb 대기 개선 목표를 달성하지 못하였다.

또한 관리대상 물질에 인체위해성이 큰 PM2.5, O_3 항목이 포함되지 않아 인체 위해성 관리에 한계가 있고, 고농도 오염지역(Hot Spot)에 대한 정확한 위치 및 노출 인구수 파악, 오염농도와 인체 위해도의 상관관계 분석 등의 관리기반이 미흡한 것으로 나타났다. 이에 2015년부터 시작되는 2단계 수도권 대기환경 기본계획의 대상 오염물질에는 PM10, PM2.5, NO_2, O_3 등이 포함되었다. 그러나 각 오염물질에 대한 목표농도만이 제시되어 대기오염물질 통합관리의 한계가 내재되어 있다.[10]

현재 PM2.5는 자동차 등 오염원에서 직접 배출되는 1차 오염물질로 자동차, 난방 연소, 도로 비산먼지 등 배출원 관리에 중점을 두고 있다. 그러나 외부변수로서 인접국의 영향 증가와 함께 2차 생성 먼지의 원인인 전구물질(질소산화물, 황산화물 등)에 대한 종합적인 관리가 부족하고, 경유차의 급증과 함께 실험실 인증기준과 도로에서 실제 배출 간 격차에 의한 증가분을 고려하지 않아 PM2.5 배출원의 과학적 관리가 미흡하였다.

그리고 사업장 배출량 총량제 도입 초기에 과다할당, 운영 미흡 등으로 인해 제도의 실효성이 부족해 배출원 거래 실적이 총 배출량의 51% 수준으로 한계점을 내포하였다. 그리고 당초 총량관리 대상 물질에 포함되었으나, 사업장의 먼지 배출량 등 기존자료 부족으

---

9) 중국 PM10 농도는 2012년 83㎍/㎥, 2013년 118㎍/㎥, 2014년 45㎍/㎥ 수준이었음. 국내 기상여건은 평균 풍속 2012년 2.79㎧, 2014년 2.64㎧로 감소하였고, 강수량 역시 2012년 1,646㎜에서 2014년 809㎜로 감소하여 대기정체일수가 75.6일에서 98.9일로 증가함(대기정체일수는 강수일 제외, 지표 풍속이 4㎧ 이하의 조건이 4일 이상 지속되는 경우)

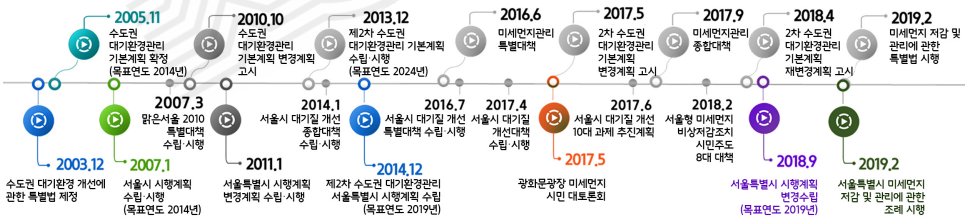
10) 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획에서 2024년 제시하고 있는 목표농도는 PM10 30㎍/㎥, PM2.5 20㎍/㎥, NO_2 21ppb, O_3 60ppb 수준임.

로 먼지총량제 시행을 유보하는 등 사업장 배출량 총량제에 한계가 있었다. 뿐만 아니라 인쇄소, 도장시설, 생물성 연소 등 생활주변에 산재하는 배출원에 대한 기초자료 수집 및 관리 수단 부재로 생활오염원 관리가 소홀하여 VOCs 삭감 성과가 기대 수준에 미치지 못한 것으로 분석되었다.

3) 서울시 미세먼지·오존관리 정책방향

서울시는 도시화와 산업화로 인해 인구와 자동차가 급격히 증가하였다. 또한 밀집된 가구의 난방, 취사 등으로 인해 발생되는 분진 및 유해가스, 공장에서 발생되는 유해화학물질, 노후 경유차 등의 배출가스에서 발생하는 미세먼지, 질소산화물 등의 대기오염물질 등은 서울시 대기환경관리의 취약요인이 되었다.

이에 향후 시민의 피해를 최소화하기 위한 다양하고, 지속적인 환경정책의 필요성이 제기되고 있다. 기본적으로 서울시를 포함한 수도권 3개 광역자치단체의 대기환경관리 정책은 고농도 (초)미세먼지, 오존 농도가 시민 건강에 미치는 영향과 미세먼지·오존의 2차 생성 메커니즘 등을 고려할 때 세계 대도시와 같이 미세먼지·오존 통합관리 정책으로 전환하는 것이 바람직하다.



[그림 2-4] 대기환경관리 정책 변화

더욱이 수도권은 환경여건과 광역적인 대기오염 특성상 지역적인 대기오염 관리만으로는 효율적인 효과를 거둘 수 없다. 이에 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」(2003년)에 따라 환경부와 수도권 3개 시·도가 공동으로 수도권 대기환경 개선 특화전략을 검토하고, 선택과 집중 전략을 협력적으로 추진하는 것이 필요하다.

시민이 안심하고 숨쉴 수 있는 환경도시 서울을 만들기 위하여 서울시 맞춤형 선순환 기후환경 전략을 수립하고 환경복지, 환경자치 선도 역량을 확보하기 위한 정책방향은 다음과 같다.

첫째, 선진도시의 대기환경 정책은 대기오염물질의 환경기준 달성에서 대기오염의 시민 건강피해 예방으로 전환하고 있다. 즉 '사전 진단과 처방 원칙'을 바탕으로 비용 효율적 개선, 지역 단위의 환경복지(Environmental Welfare)의 최대화를 모색하는 추세이다.

2015~2024년 기간을 대상으로 하는 2단계 수도권 대기환경개선 특별대책의 주된 관심은 그간 목표농도 관리에 집중했던 정책방향을 인체 위해성에 중점을 둔 방향으로 전환하는 데 있다. 이에 따라 서울을 포함한 수도권의 대기환경 관리에서 기후환경 변화의 건강영향을 최소화하기 위한 새로운 정책방향 마련에 관심이 집중되고 있다. 즉, 국내·외 환경정책 대기환경 관리방향은 '안전과 건강' 중심으로 변화하고 있다.

둘째, PM2.5와 O_3 농도의 생성 메커니즘, 원인물질, 건강 위해도, 예·경보 제도 및 비상저감조치 시행, 모니터링 등이 상호 연관관계를 맺고 있어 통합관리가 새롭게 조명 받고 있다. 즉, PM2.5와 O_3 등의 발생원 기여도 및 성분 분석을 바탕으로 맞춤형 관리대책이 검토되어야 한다. 이는 정책수단 선택의 효율성을 확보하고, 환경기술의 변화를 수용하는 접근법이다. 그리고 환경기준 충족과 별도로 위해성 예방 차원에서 장기간의 노출영향조사 및 농도수준에 따라 사전 대응지침이 적용되고 있다.

셋째, 대기오염물질은 지역별로 생성과정 및 성상이 상이하게 나타나기 때문에 효과적인 저감대책을 수립하기 위해서는 명확한 분석이 선행되어야 한다. 그러나 대기환경 관리대책은 지역적 특성을 고려하지 않고 건설기계 배출기준 강화 등 자동차 부문 관리와 같은 특정 배출원 관리에 집중되고 있다. 대기환경 관리의 실효성 확보를 위해서는 지역 배출원에 기반한 관리가 요구되고 있다. 현재 서울시가 추진하고 있는 대기환경 개선대책의 효율성 제고를 위해 당면과제를 종합적으로 비교 검토하여, 대기오염물질 목표관리의 한계요인을 극복하는 것이 필요하다.

1차 오염물질들의 이동, 확산, 반응에 따라서 2차 오염물질인 O_3 오염도가 달라지므로 지역적 특성에 따라 배출원 대책의 효과에 차이가 있다. 그러므로 대기오염물질 오염농도

의 목표관리를 위하여 지역별 배출 오염원별 기여도를 고려한 관리대책의 추진 가능범위를 확인하고, 이를 바탕으로 지역별 맞춤형 관리 방안의 적용 가능성을 검토하여야 한다.

넷째, 최근 국내 대기오염 물질의 상당 부분이 인근 국가로부터 유입된 것으로 알려지면서 인접한 국가들과의 공동 대응이 필요한 시점이다. 특히 동북아시아 지역은 인구밀도가 높고 산업시설이 많이 늘어나고 있어 오염물질 배출량이 많고 앞으로도 증가할 여지가 크며, 황사의 영향도 많이 받는 지역이다. 오염물질은 이동하며 확산, 반응, 소멸 등이 이루어지기 때문에 장거리 이동성향이 강하다. 국경 없이 이동하는 대기오염물질의 특성상 국내의 지역 대기오염 저감대책 추진만으로는 대기오염 저감에는 한계가 있다. 이에 대응하기 위해 중앙정부와 지방정부 간 환경협력 네트워크 시스템의 설계·운영이 한층 요구되고 있다. 또한 PM2.5 농도 생성원리와 유사한 O_3 생성원리를 고려하면, 향후 초미세먼지와 오존의 통합관리 전략 마련이 필요하다.

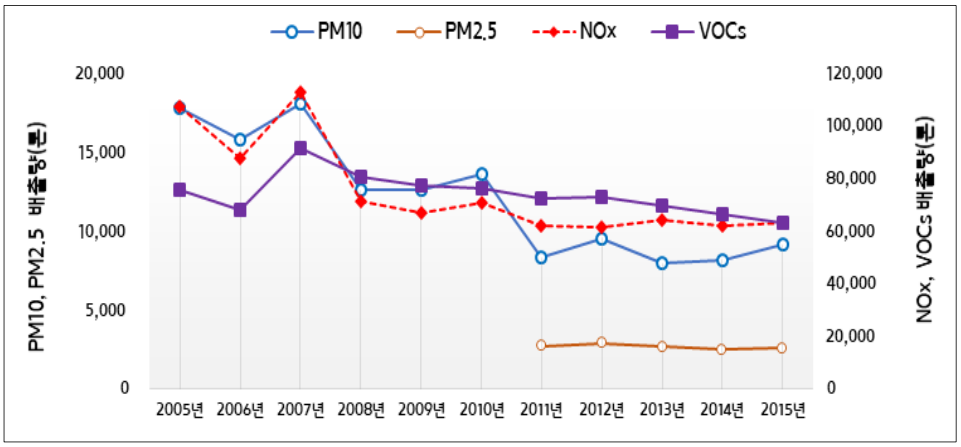
2_ 미세먼지·오존 시공간 변화

1980년대 중반 이후 수도권에서 청정연료와 저황유 공급 확대, 저공해 자동차 보급, 대기환경 규제 강화 등으로, 아황산가스와 총먼지(TSP) 대기오염은 대기환경 개선 핵심 대상으로 더 이상 유효하지 않다는 진단이다.

그러나 서울을 둘러싸고 있는 수도권의 인구와 자동차가 급격히 증가하고, 이의 반작용으로 미세먼지, 질소산화물, 휘발성 유기화합물질 등의 배출이 크게 증가하였다. 시민의 삶의 질을 떨어뜨리고, 뚜렷한 개선대책 이행이 어려운 2차 대기오염물질에 의한 스모그와 시정장애, 오존오염 증가 등 대기오염 형태가 점차 또 다른 패턴으로 전환되고 있다.

1) 대기오염물질 배출량 변화

대기환경의 복합작용과 시민건강 위해성과 밀접하게 관련되어 있는 대기오염물질은 미세먼지(PM10, PM2.5)와 O_3 발생 원인물질인 NOx, VOCs 배출량 등이다. 환경부 대기환경정책지원시스템(CAPSS)의 대기오염물질 인벤토리 자료를 활용하면, 연도별 배출량 변화 추이를 알 수 있다.



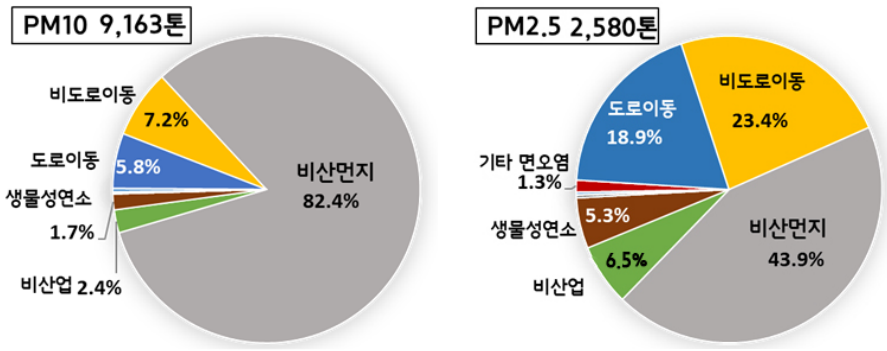
주 : 비산먼지, 생물성 연소 포함
자료 : CAPSS 각 연도(생물성연소와 비산먼지 자료는 국립환경과학원 제공)

[그림 2-5] 서울시 대기오염물질 배출량 변화 추이(2005~2015년)

(1) 배출원별 기여도

PM10은 비산먼지, 생물성연소를 포함하여 2005년 17,782톤에서 2015년 9,163톤으로 48.5% 정도 감소하였다. PM2.5는 2011년 2,732톤에서 2015년 2,580톤으로 약 5.6% 감소하였으나, 2014년 대비 다소 증가한 것으로 나타났다. NOx 역시 배출량이 계속 감소하였으나, 2015년에는 전년보다 다소 증가하였다. VOCs 대기항목은 2005년 75,971톤에서 2015년 62,916톤으로, 17.2% 감소한 것으로 나타났다.

비산먼지를 제외한 PM10 배출총량 변화를 살펴보면, 2005년 4,310톤이 배출되었으나, 2015년에는 1,617톤으로 감소하였다. 특히 도로이동오염원의 경우 자동차 주행거리 감축 및 경유자동차 저공해화 등의 정책이 시행됨에 따라 꾸준한 감소 추이를 보이고 있다. 비산먼지를 제외한 배출비중은 2014년까지 도로이동오염원이 38.3%로 가장 높았으나 2015년에는 32.8%로 낮아져, 비도로이동오염원 다음으로 배출 기여도 순위가 변동되었다. 비도로이동오염원의 배출비중은 비산먼지를 제외하면 40.7%로 가장 높게 나타났다. 특히, 건설기계는 39.0%로 가장 높았다. 이는 주거환경정비, 도시재생정비, 도시개발 계획 등 대규모 재개발, 재건축 등으로 인한 건설기계 장비의 사용 증가에 의한 것으로 판단된다.



[그림 2-6] 서울시 PM10, PM2.5 배출원별 배출 기여도(2015년 CAPSS 기준)

2015년 기준 PM2.5의 총배출량은 2,580톤이며, 비산먼지를 제외하면 1,447톤이다. 총배출량 가운데 비산먼지가 43.9%로 가장 높은 비중이며, 다음으로는 비도로이동오염원(23.4%), 도로이동오염원(18.9%), 비산업 연소(6.5%), 고기구이, 숯가마 등 생물성연소(5.3%) 순이다.

[표 2-8] 서울시 배출원별 PM10, PM2.5, NOx, VOCs 배출량 인벤토리(2015년 기준)

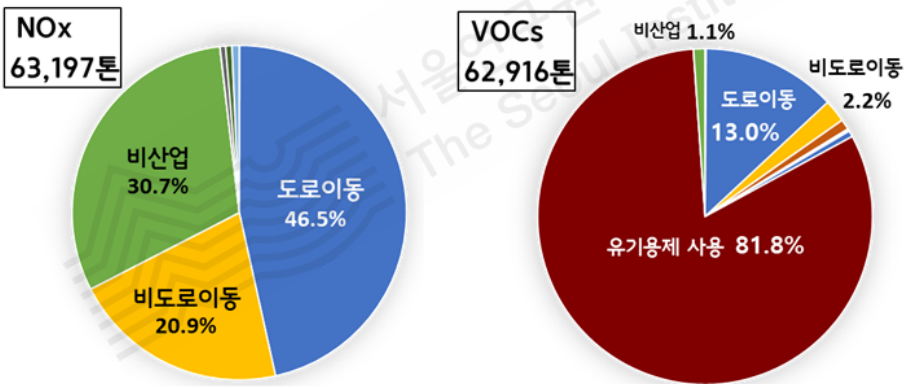
(단위 : 톤, (%))

구분		PM10	PM2.5	NOx	VOCs
에너지산업 연소		7 (0.5/0.1)	7 (0.5/0.3)	341 (0.5)	50 (0.1)
비산업 연소		222 (13.7/2.4)	167 (11.6/6.5)	19,396 (30.7)	651 (1.0)
제조업 연소		2 (0.1	1 (0.1/0.0)	384 (0.6)	16 (0.0)
생산공정		- (-/-)	- (-/-)	- (-/-)	0 (0.0)
에너지수송 및 저장		- (-/-)	- (-/-)	- (-/-)	408 (0.6)
유기용제 사용		- (-/-)	- (-/-)	- (-/-)	51,499 (81.9)
도로이동오염원		531 (32.8/5.8)	489 (33.8/18.9)	29,375 (46.5)	7,775 (12.4)
비도로이동오염원		657 (40.7/7.2)	605 (41.8/23.4)	13,227 (20.9)	1,675 (2.7)
폐기물처리		9 (0.6/0.1)	7 (0.5/0.3)	444 (0.7)	652 (1.0)
기타 면오염원		36 (2.2/0.4)	33 (2.3/1.3)	21 (0.0)	73 (0.1)
비산먼지		7,545 (-/82.4)	1,133 (-/43.8)	- (-/-)	- (-/-)
생물성 연소		152 (9.4/1.7)	138 (9.5/5.3)	9 (0.0)	116 (0.0)
전체	비산 제외	1,617	1,453	63,197	62,916
	비산 포함	9,163	2,580		

주 : 배출 비율(A/B)에서 A는 비산먼지 배출량을 제외한 전체(비산 제외) 대비 부문별 배출량 비율이며, B는 비산먼지를 포함한 전체(비산 포함) 대비 배출량 비율임.

그리고 NOx은 2005년 107,258톤이 배출되었으며, 2015년에는 63,197톤 배출된 것으로 나타나, 2005년 기준 41.9% 감소하였다. 2003년까지 꾸준히 증가하는 추세에서 이후 2007년까지 부분적 증감 패턴을 보였으나, 2009년부터 도로·비도로이동오염원의 배출량 감소와 더불어 NOx 배출총량이 감소하였다.

NOx 배출원별 기여도를 살펴보면, 도로이동오염원에서 29,375톤이 배출되어 전체 배출량에서 46.5%의 비중을 차지하고 있다. 다음으로는 비산업 연소 부문 19,396톤, 비도로이동오염원 13,227톤으로 전체 배출량의 30.7%, 20.9%를 각각 차지하고 있다. 도로이동오염원의 배출량은 감소하였으나 비산업 연소, 비도로 이동오염원의 배출량이 증가하여 전체적으로 2014년보다 1.4% 증가하였다. 도로 및 비도로 이동오염원의 배출량이 전체 배출량의 67.4%를 차지하였으며, 다음으로 난방과 관련된 비산업 연소가 주요 배출원임을 알 수 있다.



[그림 2-7] 서울시 NOx, VOCs 배출원별 배출 기여도(2015년 CAPSS 기준)

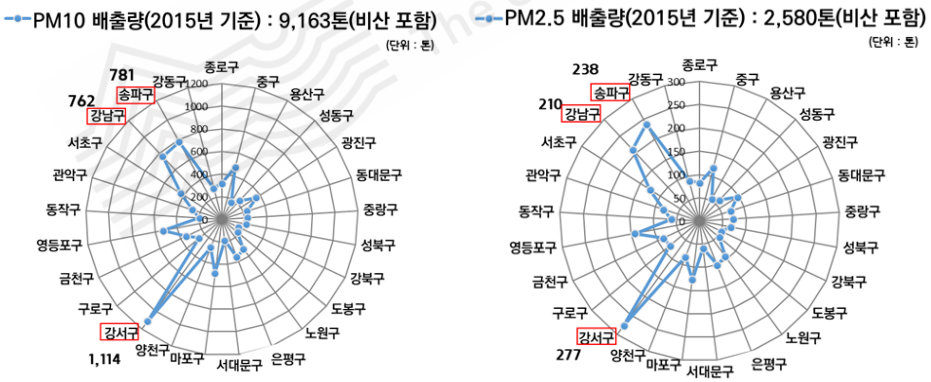
VOCs 배출총량은 2007년 이후 배출목록 추가 및 배출계수 개선에 따라 크게 증가한 이후 감소하는 추세이다. 하지만 유기용제 사용에 따른 VOCs 배출수준을 고려할 경우 총량 비중과 배출증가 비율 관점에서 향후 주된 관리대상으로 확인되고 있는 것이 특이사항이다.

서울시 2015년 VOCs 배출량을 부문별로 구분하여 살펴보면, 유기용제 사용 부문에서 54,297톤이 배출되어 전체 VOCs 배출량 가운데 약 81.8%를 차지하는 것으로 나타났다.

다음으로는 도로이동오염원에서 8,616톤이 배출되어 전체 배출량에서 13.0%의 비중을 보이고 있다. VOCs가 유기용제 사용에서 많이 배출되는 것은 유기용제 사용부문에 도장시설, 세정시설, 세탁시설 등 VOCs 배출이 많은 업종이 포함되어 있기 때문이다.

(2) 지역별 기여도

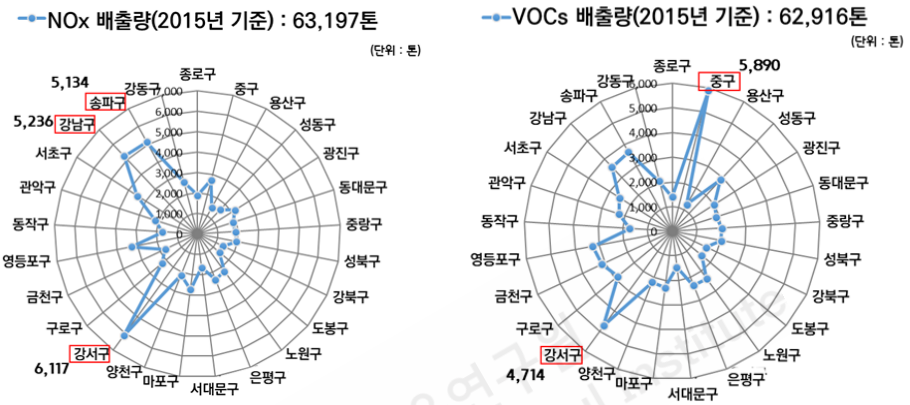
2015년 자치구별 PM10 배출기여도를 살펴보면, 강서구의 배출비중이 전체의 12.2%(1,114톤)로 가장 높았으며, 송파구, 강남구 배출비중이 각각 8.5%, 8.3%로 다른 자치구와 비교해 상대적으로 높은 수준이었다. 세부 배출원별로는 강서구는 건설공사 비산먼지 배출비중이 63.3%로 가장 높았으며, 도로재비산(12.8%), 건설기계 비도로이동오염원(9.6%) 배출 기여도가 높게 나타나고 있다. 송파구도 건설공사 비산먼지, 도로재비산 배출기여도가 각각 45.1%, 20.6%로 높게 나타났으며, 다음으로 배출기여가 높은 부문은 비산업연소가 약 11.7%를 차지하고 있다. 자치구의 지역 특성에 따라 부문별 배출기여 정도가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.



[그림 2-8] 서울시 자치구별 미세먼지(PM10, PM2.5) 배출량(2015년 기준)

지역별 PM2.5 배출량 기여도를 살펴보면, 강서구의 총배출량이 277톤(10.7%)으로 높은 비중을 보인다. 25개 자치구별 평균 배출량 103톤과 비교하여 송파구(238톤), 강남구(210톤), 영등포구(141톤), 마포구(126톤)에서 기여도가 비교적 높게 나타나고 있다. 강서구는 비산먼지 배출량이 118톤, 건설장비, 항공 등 비도로 이동오염원 배출량이 108톤

으로 높은 배출 비중을 차지하고 있다. 송파구의 총 배출량은 238톤(비산먼지 포함)으로 2015년 서울시 총배출량(2,580톤)에서 9.2% 비중을 차지하고 있다. 이 가운데 비산먼지가 86톤, 비산업연소가 62톤을 배출하고 있다. 강남구는 서울시 배출량의 약 8.1%인 210톤을 배출하며, 비산먼지가 94톤, 비도로이동오염원, 도로이동오염원이 각각 49톤, 36톤을 배출하여 기여도가 높게 나타났다.



[그림 2-9] 서울시 자치구별 미세먼지(NOx, VOCs) 배출량(2015년 기준)

서울시 25개 자치구별 NOx 배출량(2015년 기준)을 살펴보면, 서울시 전체 배출량 가운데 강서구의 배출 기여도가 9.7%로 가장 큰 기여도를 보이고 있다. 다음으로는 강남구, 송파구가 각각 8.3%, 8.1%로 상당 부분 기여하고 있다.

VOCs의 경우 중구에서 가장 많이 배출되었으며, 다음으로 강서구의 기여도가 높게 나타나고 있다. 특히 중구의 유기용제 사용부문의 배출비중이 서울시 전체의 8.8%(5,549톤)를 차지하고, 그 중에서 인쇄업에서 사용하는 유기용제의 배출비중이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 중구 전체 배출량 5,890톤 가운데 인쇄업의 배출 비중이 75.6%를 차지하고 있어, 휘발성 유기화합물 배출원의 특화 관리가 필요한 지역임을 시사하고 있다.

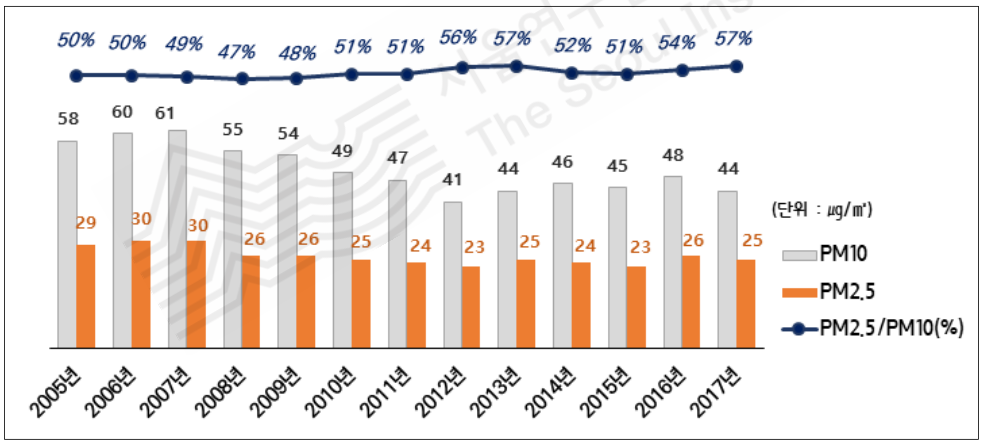
오존 발생 원인물질인 NOx, VOCs와 PM10, PM2.5의 배출원별, 지역별 배출기여 정도는 다소 차이가 있으며, 기여 순위가 동일하더라도 배출 비중에는 상당한 차이가 있다. 향후 PM2.5·O_3의 통합관리 전략을 마련함에 있어 배출특성을 고려한 맞춤형 관리가 필요함을 알 수 있다.

2) 미세먼지·오존 대기오염도 변화

(1) 초미세먼지(PM2.5)

PM2.5는 오염도 체감요소 중 하나인 시정(視程)에 더 직접적인 영향을 미친다. 또한 입자 크기가 작을수록 인체 깊숙이 침투해 심혈관계 질환 등 각종 질환을 일으킬 가능성이 있어, 유해성이 가장 심각한 것으로 보고되고 있다.

PM2.5는 2011년부터 대기환경기준 25㎍/㎥ 이하로 유지되어 지속적으로 개선 경향을 보였으나, 고농도 출현이 많았던 2016년에는 26㎍/㎥, 2017년에는 25㎍/㎥으로 시민의 기대에 다소 못 미치고 있다. 세계보건기구의 PM2.5 권고기준(≤25㎍/㎥·일)을 충족시키는 일수가 2013년 223일, 2014년 233일, 2015년 242일로 증가하다 2016년 189일로 크게 감소하고, 2017년 218일로 증가하였다. 즉 고농도 초미세먼지 발생 빈도 증감 경향을 고려하면 시민의 건강영향 위협요인으로 지목되고 있다.

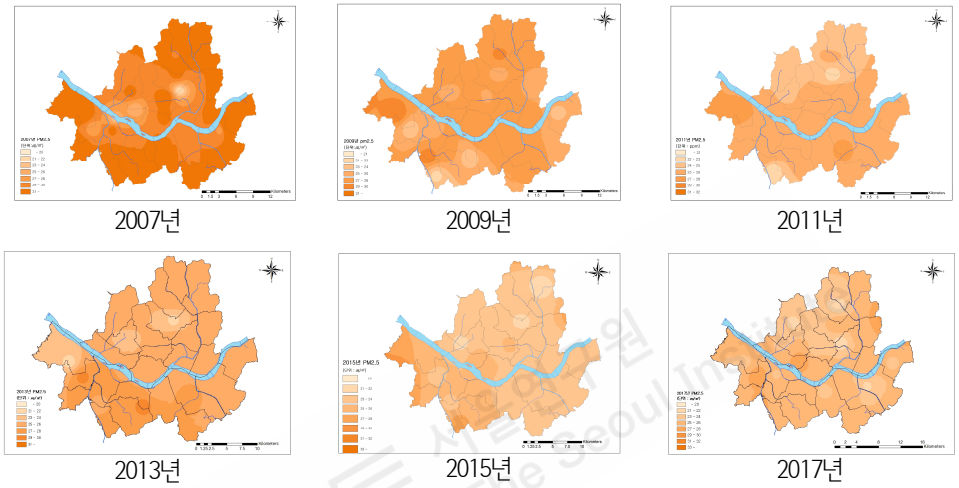


[그림 2-10] 서울시 연평균 미세먼지(PM10, PM2.5) 농도 및 PM2.5/PM10 비율 변화(2005~2017년)

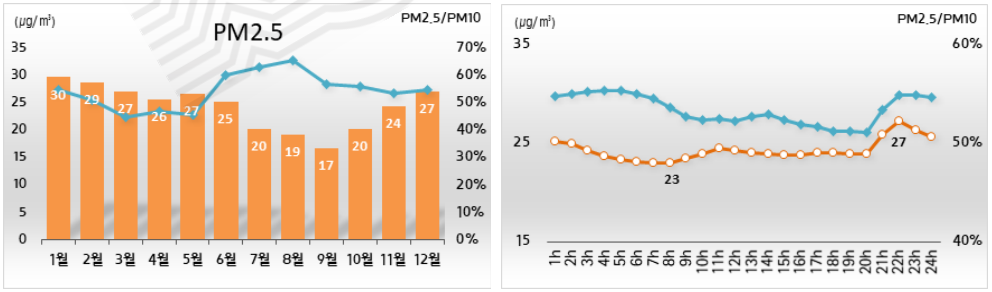
계절별 PM2.5 오염도는 난방을 위한 에너지 소모량이 많고 중국의 오염물질 유입 영향이 큰 봄철·겨울철에 PM2.5 농도가 높은 반면, 여름철에는 다른 계절에 비해 다소 낮은 농도 분포를 보이고 있다. PM2.5와 PM10의 농도 비율은 황사 유입이 많은 3월에 비율이 낮고, 강수일이 많은 여름철인 7~8월은 높은 수준이다.

그리고 출근 시간부터 PM2.5/PM10 비율이 감소하기 시작하여 낮 12시까지 감소한 이후

점차 상승하여 오후 2시에 최대값을 보인다. 이후 다시 감소하여 퇴근 시간대에 최소값을 나타낸 후 상승하는 경향을 확인할 수 있다. 그러나 출퇴근 시간대에 PM2.5, PM10의 농도가 증가 추세에 있음을 고려하면 자동차 운행으로 도로 재비산 먼지 발생이 PM10 농도의 증가 원인으로 판단된다. 이러한 사항은 도로 재비산 먼지의 억제가 PM2.5보다 PM10 농도 개선에 큰 효과가 있음을 의미한다.



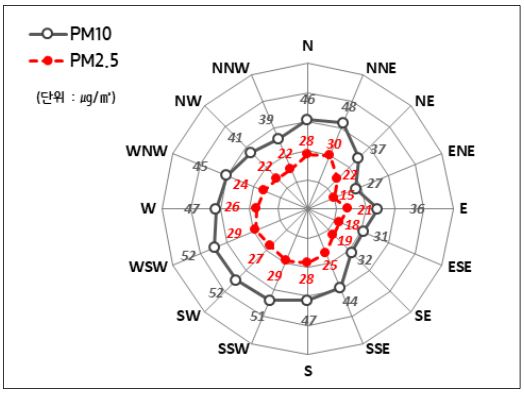
[그림 2-11] 서울시 연도별 PM2.5 농도 변화



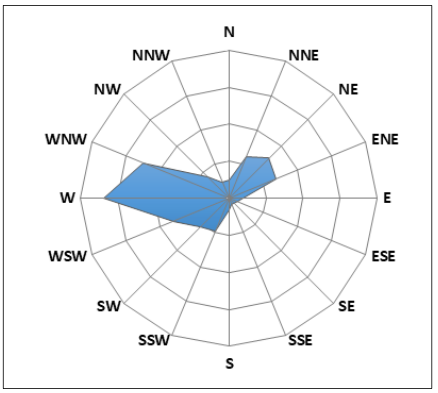
주 : 2010~2017년 월별·시간대별 농도의 평균값

[그림 2-12] 서울시 월별시간대별 PM2.5 농도 변화

한편 대기오염물질의 이동과 확산, 침착 과정에서 중요한 역할을 하는 기상요인 가운데 풍향을 살펴보면, 서풍계열이 우세한 것으로 분석되고 있다. 2017년의 경우 서풍(19.4%), 서북서풍(14.4%), 서남서풍(9.3%)의 순서로 나타났다.



[그림 2-13] 서울시 풍향별 미세먼지 오염분포(2017년)



[그림 2-14] 서울시 풍향 바람장미(2017년)

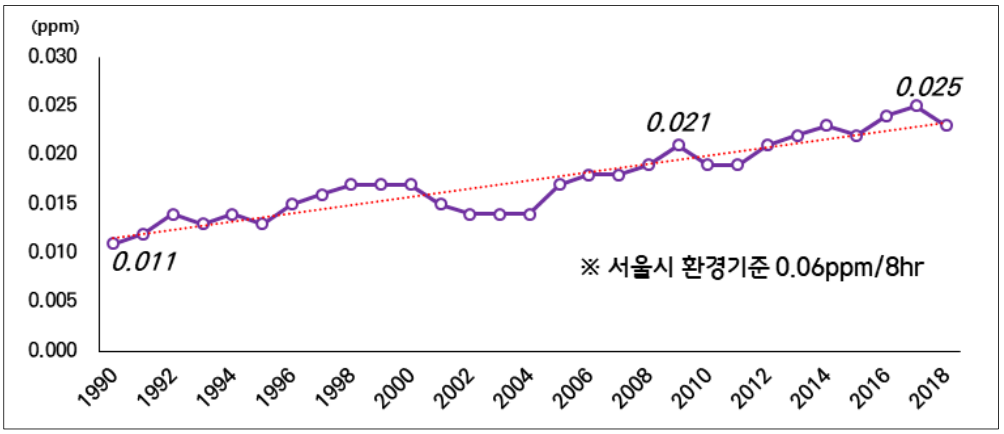
2017년 풍향별 초미세먼지는 남남서·서남서일 때 29㎍/㎥로, 동풍계열의 풍향일 때보다 PM2.5 농도가 높게 나타났다. 서울의 대기질은 서남쪽에 위치한 경기, 인천 등의 산업단지와 중국 동쪽 해안에 몰려 있는 산업시설 등의 발생원으로부터 영향을 받는다. 서울에 부는 지상 풍향과 발생원의 위치, 미세먼지 농도의 관계가 정확하게 비례하지는 않지만, 서울의 미세먼지 농도에 서풍계열의 풍향이 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

(2) 오존(O_3)

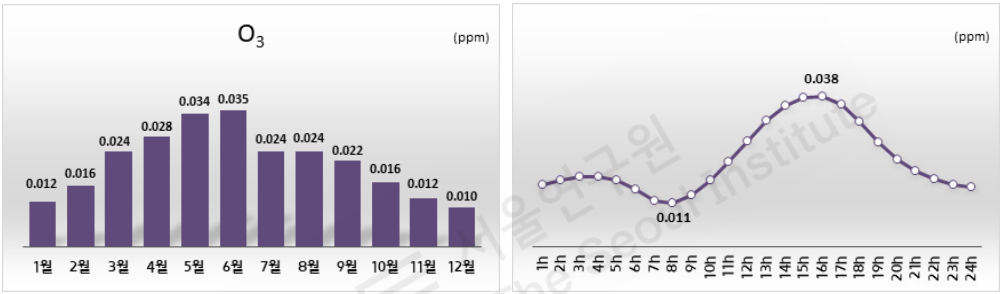
O_3은 대기 중의 NOx와 VOCs 등이 자외선에 의하여 광화학 반응을 일으켜 생성된 2차 오염물질이다. 일사량, 풍속 등의 기상과 가장 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되고 있다.

서울의 연간 평균 O_3 농도는 1990년 0.011ppm 이후 완만히 증가하다가 2000년 0.017ppm을 정점으로 2004년까지 감소추세를 보인 바 있다. 그러나 도시 기후환경 변화의 주요 특성인 기온 상승에 따라 2005년부터 다시 증가하여 2017년에는 0.022ppm으로 전반적인 상승 경향을 보여, 시민 건강보호의 또 다른 위협요인으로 인식되고 있다.

강한 일사에 의해 생성이 활발해지는 O_3은 기온이 높아지는 5~6월에 비교적 높은 농도를 보이며, 장마가 시작되기 직전인 6월에 가장 높은 농도를 나타낸다. 7월에는 장마의 영향으로 감소하다가 8~9월에 다시 상승하는 경향이며, 겨울철인 12~1월에는 가장 낮은 농도를 나타내 기상여건과 높은 상관도를 보이고 있다.



[그림 2-15] 서울시 연평균 O_3 농도 변화(1991~2017년)



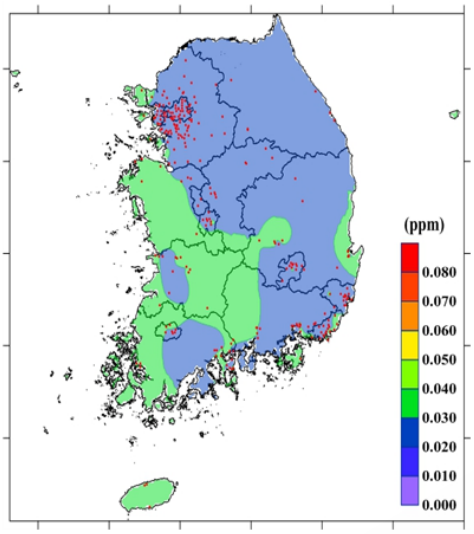
주 : 2010~2017년 월별·시간대별 농도의 평균값

[그림 2-16] 서울시 월별시간대별 O_3 농도 변화

광역적 규모의 O_3 농도 변화는 NOx 배출에 민감하고, 국지적 고농도 O_3 발생은 VOCs 배출에 민감한 것으로 보고되고 있다(서울시, 2017). O_3의 소모현상(NOx titration)으로 다른 지역과 비교하여 NOx이 많이 배출되는 서울, 경기 등 수도권의 연평균 O_3 농도가 다른 지역에 비해 낮게 나타나기도 한다.

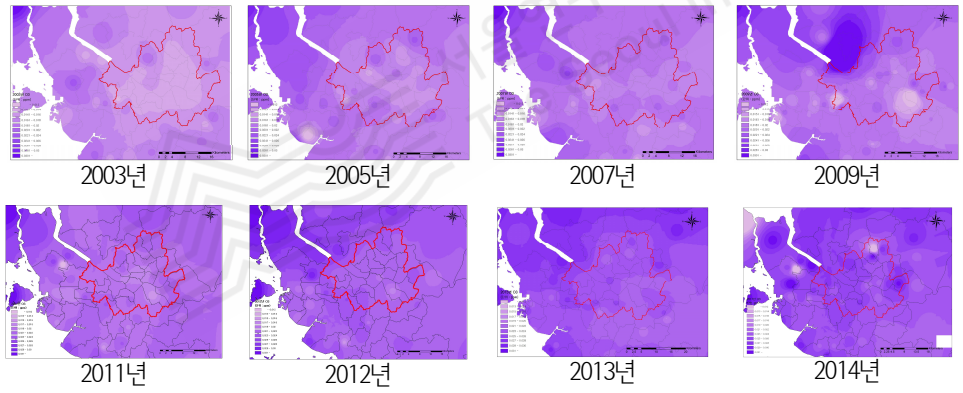
2017년 기준 지역별 오존 농도를 살펴보면, 수도권에 비해 기온이 높은 남부지방에서 비교적 높게 나타나고 있다. 제주도가 0.042ppm으로 가장 높았으며, 그다음으로는 경남 0.034ppm, 경북, 전북 0.033ppm, 전남 0.032ppm의 순서로 나타났으며, 서울이 0.025ppm으로 가장 낮았다.[11]

11) 에어코리아에서 2017년 대기오염 최종확정 자료를 바탕으로 전라남도, 제주도, 경상남도 오존 연평균을 추정함 (http://www.airkorea.or.kr)



자료 : 국립환경과학원, 「대기환경연보 2016」, 2017

[그림 2-17] 전국 O_3 연평균 농도(2016년)



[그림 2-18] 서울시 연도별 O_3 농도 변화

서울의 지형적 여건과 대기오염물질 이동경로를 고려하여 권역별 O_3 농도의 분포를 분석한 결과, 북동부 권역이 다른 권역과 비교해 다소 높은 수준을 보이고 있다. 이는 남서쪽으로부터 이동해 온 오염물질이 단기적으로 북동부 권역에서 정체·축적되는 지형적 여건의 영향으로 판단된다.

한편 서울, 인천, 경기를 포함한 수도권의 O_3 농도 역시 지속적으로 증가하는 추세이다.

수도권에서는 서울의 농도가 가장 낮고, 인천의 농도가 가장 높게 나타나고 있다. 서울을 포함한 수도권 지역의 오존농도 상승 경향은 주로 고온 연소 시 발생하는 NOx 및 VOCs의 배출량 증가와 기상여건에 기인하는 것으로 추정된다.

(3) 고농도 발생현황

2007년 환경정책기본법 개정으로 국가 환경기준 가운데 PM10, NO_2 환경기준은 서울시 기준에 맞추어 강화되어 서울시 대기환경기준과 국가 대기환경기준이 동일한 수준이다. 다만 SO_2는 서울시 대기환경기준이 국가 대기환경기준보다 다소 엄격한 수준을 유지하고 있다. 이러한 관점에서 서울시의 대기환경기준 초과현황을 살펴보면, 대부분의 오염항목은 환경기준을 만족하고 있다. 다만 PM10, PM2.5, NO_2, O_3는 환경기준을 부분적으로 초과하고 있다([표 2-9] 참조).

그리고 대기 중 O_3, PM10, PM2.5가 일정기준을 초과할 때 신속히 경보를 발령함으로써 노약자, 어린이 등 시민피해를 최소화하고, O_3, PM10, PM2.5 농도 저감을 위한 시민의 자발적 참여를 유도하기 위해 대기오염 경보제를 시행하고 있다.[12]

PM2.5 경보는 당일 측정농도에 따라 주의보, 경보가 서울시 단일권역으로 발령되며, 2018년 3월부터 강화된 발령기준이 적용되고 있다.[13] 그리고 오존은 5개 권역(도심, 서북, 동북, 서남, 동남)으로 구분하여 오존 농도에 따라 주의보, 경보, 중대경보로 구분하여 발령하고 있다.

---

12) 오존 경보제는 대기환경보전법 제8조에 의거해 1995년 7월부터 시행하고 있으며, 2005년 2월부터 서울특별시 대기오염 예보 및 경보에 관한 조례를 근거로 미세먼지 경보제를 실시함. 이후 건강 위해성이 더 크다고 알려진 초미세먼지 경보제는 국내 최초로 서울시가 2013년 10월부터 시행함.

13) 초미세먼지 대기환경기준은 2015년 1월부터 연평균 25㎍/㎥, 일평균 50㎍/㎥으로 적용되었으며, 2018년 3월부터는 연평균 15㎍/㎥, 일평균 35㎍/㎥으로 강화됨.

[표 2-9] 서울시 대기환경기준 초과횟수

(단위 : 회)

구분	서울시·국가 환경기준	2010년	2011년	2012년	2013년	2014년	2015년	2016년	2017년
PM10	100㎍/㎥/24시간	467	408	126	383	474	289	192	256
	50㎍/㎥/년	8	1	0	0	1	1	6	0
PM2.5	50㎍/㎥/24시간	-	-	-	-	-	309	359	512
	25㎍/㎥/년	-	-	-	-	-	3	17	5
NO_2	0.1ppm/1h	206	290	181	377	279	209	95	35
	0.06ppm/24시간	354	342	200	403	371	241	121	154
	0.03ppm/년	19	16	12	22	20	17	16	10
O_3	0.1ppm/1시간	565	255	259	458	484	123	652	693
	0.06ppm/8시간	661	546	867	1,005	1,125	896	1,344	1,391

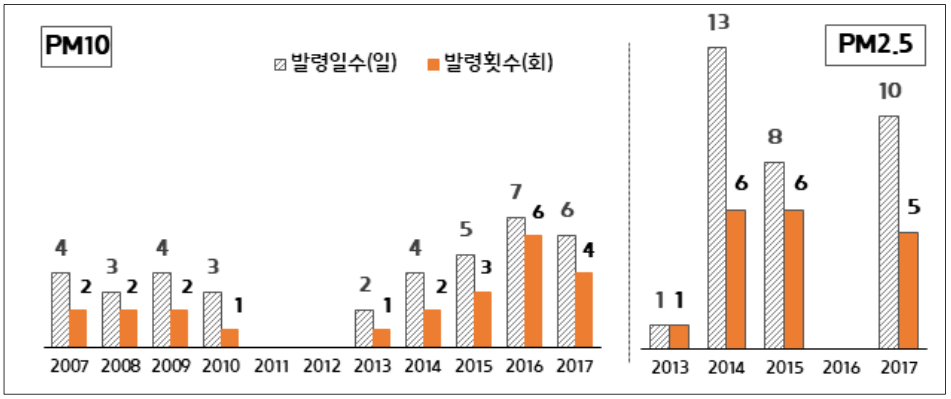
주 : 서울시 기준은 1시간, 8시간, 24시간 평균치는 연간 3회 이상 그 기준을 초과하여서는 안 되며, 국가 기준 1시간 평균치는 999천분위수의 값, 8시간 및 24시간 평균치는 99백분위수의 값이 기준을 초과해서는 안 됨.
자료 : 환경부, 대기환경연보, 각 연도.

[표 2-10] 초미세먼지 경보 발령 및 해제 기준

구분		발령 기준	해제 기준
초미세먼지 (PM2.5)	주의보	시간당 평균 75㎍/㎥ 이상이 2시간 지속되는 때	시간당 평균 35㎍/㎥ 이하인 때
	경보	시간당 평균 150㎍/㎥ 이상이 2시간 지속되는 때	시간당 평균 75㎍/㎥ 미만인 때는 주의보로 전환
오존 (O_3)	주의보	0.12ppm 이상인 때	0.12ppm 미만인 때
	경보	0.3ppm 이상인 때	0.12ppm 이상 0.3ppm 미만인 때는 주의보로 전환
	중대경보	0.5ppm 이상인 때	0.3ppm 이상 0.5ppm 미만인 때는 경보로 전환

주 : 대기환경 보전법 시행규칙 [별표7] 대기오염경보단계별 대기오염물질의 농도기준(제14조 관련)

초미세먼지 주의보는 2013년 1회, 2014년과 2015년 각각 6회, 2017년 5회(10일)가 발령되었으나, 주의보 발령기준이 수차례 변경되어 연도별 발령현황을 직접 비교하는 데 어려움이 있다([그림 2-19], [표 2-11] 참조). 이에 2013~2017년 도시대기측정망의 시간별 자료를 바탕으로 현재의 발령 기준을 적용하여 주의보 발령일수를 추정하였다.



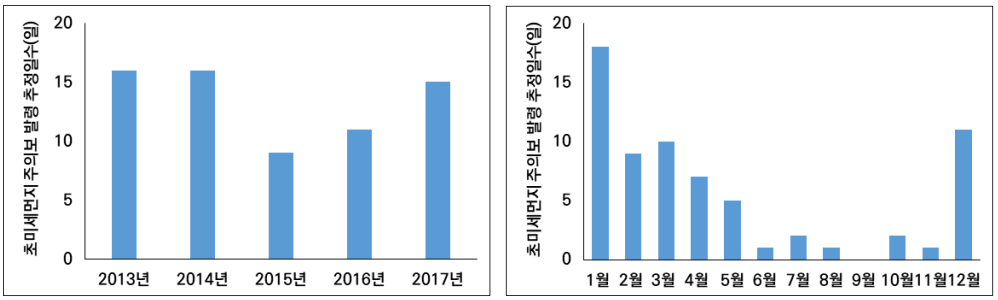
[그림 2-19] 서울시 미세먼지 주의보 발령 현황

[표 2-11] 초미세먼지 주의보 발령 기준(시간평균 농도) 변경 현황

구분	농도 기준	권역기준
2005년~2013년 9월	기준 없음	25개 측정소 **전체 평균**이 기준 초과 시 서울시 전역 발령
2013년 10월~2014년	85㎍/㎥ 2시간 이상	25개 측정소 **전체 평균**이 기준 초과 시 서울시 전역 발령
2015년	120㎍/㎥ 2시간 이상 또는 24시간 이동평균 35㎍/㎥ 이상	25개 중 **1개 측정소**가 기준 초과 시 서울시 전역 발령
2016년	90㎍/㎥ 2시간 이상	25개 측정소 **전체 평균**이 기준 초과 시 서울시 전역 발령
2018년 7월	75㎍/㎥ 2시간 이상	25개 측정소 **전체 평균**이 기준 초과 시 서울시 전역 발령

자료 : 서울시, 2017년 서울대기질 평가보고서(2018)

2013~2017년 동안 추정된 고농도 PM2.5 발생일(PM2.5 주의보 발령 기준)은 총 77일이다. 2015년(6일)을 제외하고 매년 16~18일 정도로 단기 고농도 초미세먼지 발생 빈도가 증가하고 있다. 전체 고농도 발생일 가운데 겨울철(1월, 2월, 12월)의 비중이 53.2% 정도로 높게 나타나고 있다. 이는 난방을 위한 연료 사용량 증가, 계절풍인 북서풍으로 인한 중국발 미세먼지의 유입, 계절적인 낮은 강수량의 영향으로 판단된다.

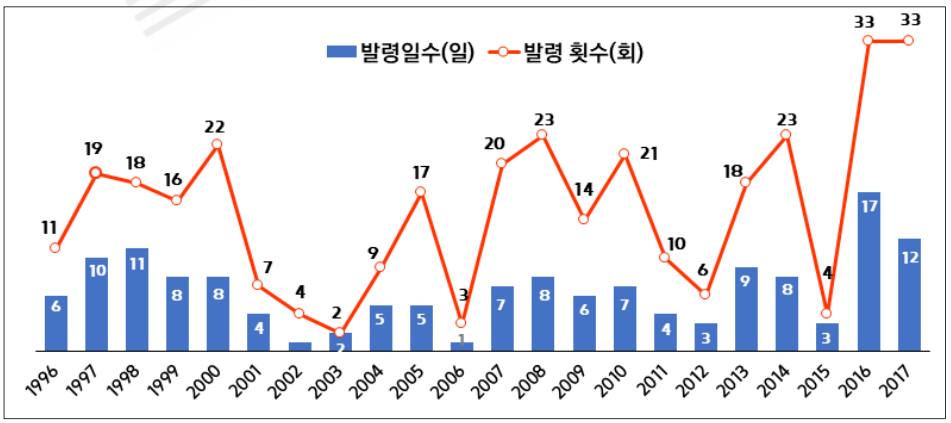


주 : 도시대기측정망 시간별 자료를 바탕으로 75㎍/㎥/hr 2시간 이상 지속된 날을 추정함.

[그림 2-20] 서울시 초미세먼지 주의보 발령 추정일수(2013~2017)

오존의 경우 경보, 중대경보 발령사례는 없으며, 오존주의보 일수, 횟수는 전체적으로 증가하는 추세이다([그림 2-21] 참조). 오존주의보는 5개 권역으로 발령되므로 발령횟수가 전체적으로 초미세먼지 발령사례보다 다소 높은 편이다.

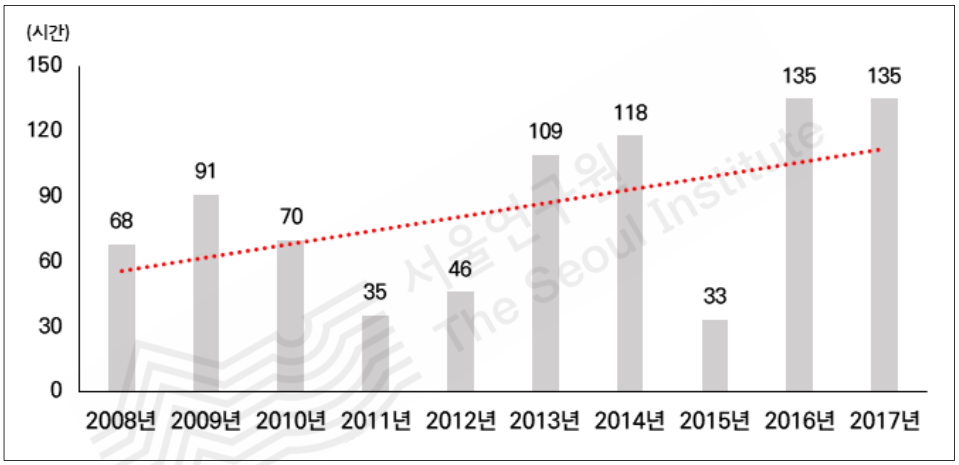
2013~2017년 동안 권역별 발생특성을 살펴보면 도심이 17회(10.4%), 북서가 17회(10.4%), 북동이 55회(33.7%), 남서가 53회(32.5%), 남동이 21회(12.9%) 발령되어, 북동권역에서 상대적으로 발령빈도가 높게 나타났다. 1개 측정소의 매시간 O_3 측정농도가 경보 발령기준에 해당되면, 당해 측정소가 포함된 권역에 오존주의보가 발령된다. 자치구별로는 노원구가 15회로 오존주의보 발령 횟수가 가장 많았으며, 그 다음은 강북구, 강서구, 금천구가 각각 11회로 많이 발령되었다.



[그림 2-21] 서울시 오존 주의보 발령 현황

그리고 통합환경지수(Comprehensive Air quality Index)는 대기오염도에 따른 인체 위해성과 대기환경기준을 고려하여 대기오염도를 표현하는 방식이다. PM2.5, PM10, O_3, NO_2, CO, SO_2 오염물질에 대한 대기질의 상태지수를 알려준다.

환자군 및 민감군에게 유해한 영향을 유발하고, 일반인도 건강상 불쾌감을 경험할 수 있는 수준인 "나쁨" 구간을 기준으로, PM2.5, O_3 농도가 동시에 "나쁨"에 해당되는 시간을 연차별로 산정하였다. 다만 O_3 농도는 25개 측정값 중 최대농도, PM2.5는 평균농도를 사용하였다. 최근 10년간 동시 "나쁨" 시간 수는 점차 증가하는 추세로, 2008년 68시간에서 2017년 135시간으로 약 2배 이상 증가하였다.



주 : 초미세먼지 36㎍/㎥ 이상, 오존 0.091ppm 이상이 동시에 나타난 시간수

[그림 2-22] 서울시 초미세먼지, 오존 동시 '나쁨' 시간수 변화

최근 미세먼지·오존 관련 기사들을 살펴보면, 초열대야, 폭염 속 고농도 미세먼지와 오존이 더해지며, '3중고' 또는 '4중고', '헬서울'이란 표현이 등장하기도 하였다. 고농도 오염 증가 경향, 기후환경 변화에 따른 2차 생성 가능성 증대, 초미세먼지와 오존 형성의 복합적인 메커니즘 등은 시민 건강의 위협요인으로 부각되고 있다.

시민이 행복한 미래도시는 건강도시 실현과 직결된다. 시민 건강영향을 고려하면 초미세먼지와 오존 관리는 더욱 그러하다. 대기환경 패러다임 변화에 따라 PM2.5·O_3의 통합관리로의 전환이 바람직하다.

오존이 초미세먼지 만드는 숨은 주범이었네

초열대야-미세먼지-오존 '숨막히는 3중고'

서울 연이틀 아침 최저 30도 넘겨

초열대야+폭염+미세먼지+오존… '헬서울' 4중고

주말엔 영남 지역 최고 40도 예보

태풍 '산산' 한국 영향 못 미칠 듯

자료 : 동아일보, "오존이 초미세먼지 만드는 숨은 주범이었네"(2018.05.28.)
동아일보, "초열대야-미세먼지-오존 '숨막히는 3중고'"(2018.08.04.)
한국일보, "초열대야+폭염+미세먼지+오존…'헬서울' 4중고"(2018.08.04.)

[그림 2-23] 초미세먼지·오존 관련 최근기사

03

서울시 미세먼지·오존 통합관리 실증분석

1_미세먼지·오존 시민 건강영향

2_서울시 미세먼지·오존 생성 메커니즘 분석

3_종합정리

03 | 서울시 미세먼지·오존 통합관리 실증분석

1_미세먼지·오존 시민 건강영향

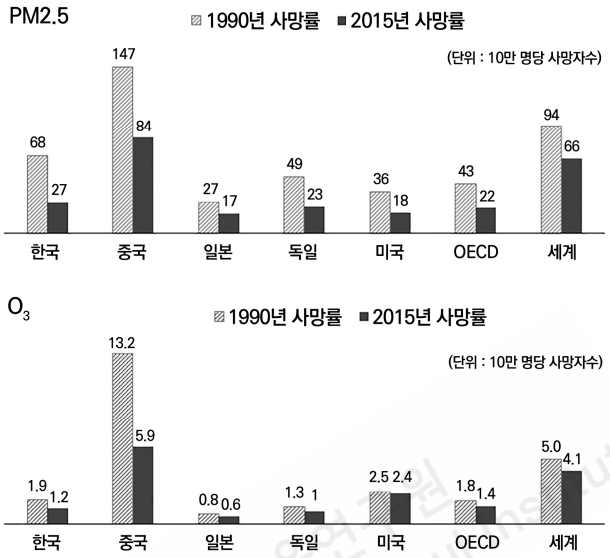
세계보건기구는 대기오염을 1급 발암물질로 지정하였으며, 건강측정평가연구소(IHME; The Institute for Health Metrics and Evaluation)는 보고서에서 2015년 기준 대기오염이 대사위험, 식이위험, 흡연 다음으로 세계 사망 위험요인 중 4번째로 높은 비중을 차지하고 있는 것으로 발표한 바 있다. 특히 PM2.5는 중금속과 같은 오염물질을 보다 많이 흡착할 수 있으며, 인간의 폐 속 깊이 들어가 축적되고 혈관을 통해 전파되어 인간의 호흡기계나 신경계 질환의 원인이 된다.

워싱턴대 건강측정평가연구소(IHME)에서 발표한 자료를 바탕으로 PM2.5와 O_3에 의한 건강 영향을 다른 나라와 비교하여 살펴보았다. 우리나라의 PM2.5 영향 사망자는 1990년 15,100명에서 2015년 18,200명으로 21% 증가한 반면, OECD 국가의 PM2.5로 인한 총사망자는 9% 감소한 것으로 추정되었다. 10만 명을 기준으로 할 경우에는 1990년 68명에서 2015년 27명으로 감소하였으나 미국, 일본, 독일과 비교해 여전히 높은 수치이다. 또한 O_3 영향 사망자는 1990년 350명에서 2015년 810명으로 130% 증가한 반면, OECD 국가의 오존으로 인한 사망자는 48% 증가한 수치를 나타내고 있다([그림 3-1] 참조).[14] 2017년 우리나라 연평균 PM2.5, O_3 농도는 각각 25㎍/㎥, 0.029ppm으로, 서울시 25㎍/㎥, 0.025ppm과 비교하면 서울 시민의 건강영향을 간접적으로 추정할 수 있다.

그리고 2015년 우리나라 지역별 PM2.5 농도와 연령 및 특정사망률 등을 토대로 조사한 연구결과에 따르면, PM2.5 연평균 24.4㎍/㎥에 노출되어 11,924명이 조기 사망한 것으로 추정하고 있다. 세종시를 포함한 8개 대도시 가운데 조기 사망자가 가장 많은 곳은 서울로 2015년 1,763명이었다. 다음으로 부산 947명, 대구 672명, 광주 657명의 순서로 인구밀집도가 높은 도시일수록 높게 나타났다. 만약 연평균 PM2.5 농도를 WHO 권고

14) 송윤아, "대기오염의 건강위험과 보험", 「KiRi 리포트」, 보험연구원, 2017.6.12

수준(10㎍/㎥)으로 낮출 경우, 조기 사망자 10명 중 7명(8,539명)이 생명을 연장할 수 있는 것으로 보고하고 있다.[15)]



자료 : Institute for Health Metrics and Evaluation(http://www.stateofglobalair.org/data)

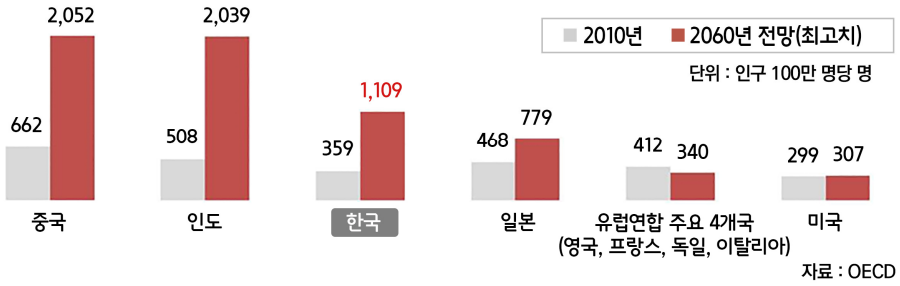
[그림 3-1] 주요 국가별 PM2.5, O_3 영향 조기사망률 비교(1990년, 2015년)

한편 OECD는 '대기오염의 경제적 결과 보고서'(2016.6)를 통해 한국의 심각한 미세먼지 문제를 경고하고 있다. 한국이 PM2.5와 O_3 관리대책을 세우지 않는다면 2060년 OECD 회원국 가운데 대기오염으로 인한 조기 사망률이 가장 높고, 경제 피해도 가장 클 것이라고 예상하고 있다.

OECD 보고서(2016)는 한국의 대기환경 수준을 악화시키는 주요 요인으로 높은 PM2.5 및 O3 농도를 지목하고 있다. 특히 지름 2.5㎛ 이하의 초미세먼지 농도 수치는 한국에서 두드러지게 높아 노동 생산성에 악영향을 미칠 수 있다고 경고했다. OECD는 앞서 2016년 5월 '2016년 더 나은 삶의 질 지수(BLI)' 보고서를 통해 한국의 평균 PM2.5 농도(29.1㎍/㎥)가 세계보건기구(WHO) 가이드라인(10㎍/㎥)의 3배에 달한다고 지적한 바 있다.

---

15) Han C, Kim S, Lim YH, Bae HJ, Hong YC, "Spatial and Temporal Trends of Number of Deaths Attributable to Ambient PM2.5 in the Korea", J Korean Med Sci. 2018 Jun 4; 33(30).



자료 : OECD(2016), 대기오염의 경제적 결과 보고서

[그림 3-2] 대기오염으로 인한 국가별 조기 사망자수 비교 통계

1999~2016년 기간 서울의 기후·환경 조건의 변화에 따른 건강영향을 평가하기 위해 시계열 통계분석 모형을 적용하였다. 최종 도출된 회귀모형의 계수(β)를 이용하여 일별 대기오염물질의 단위 변화에 따른 일별 사망위험의 상대위험비(Relative Risk : RR)를 exp(β)으로 계산하고, 일별 사망자수의 퍼센트 변화는 (RR-1)×100으로 계산하였다.[16]

PM2.5 농도 10㎍/㎥ 증가당 상대위험도는 호흡계통 질환이 2.2%, 순환계통 질환은 1.0%로 나타나, 호흡계통 질환이 순환계통보다 상대위험도가 더 큰 것을 알 수 있다. 그리고 순환계통과 호흡계통 질환 전체 사망위험은 PM2.5가 0.9~2.4%, PM10은 0.7~1.0% 증가하는 것으로 나타나, PM10보다 PM2.5의 건강 위해도가 더 높은 것을 알 수 있다. 오존의 경우 10ppb 농도 증가할 때 호흡계통 질환의 상대위험도는 약 3.1%

16) 1999년~2016년 기간 서울의 일별 PM2.5 평균 농도, O_3 최대 농도, 전체 연령 집단의 순환계통 환경성 질환 일별 사망자수, 호흡계통 환경성 질환 일별 사망자수의 시계별 분석모형의 적용과정은 비선형 포아송회귀모형임(de boor, 1978; Kim et al., 2006 등).

$$\ln(E(M_t)) = \alpha DOW_t + ns(t, df_t) + ns(Temp_t, df_{Temp}) + ns(Humi_t, df_{Humi}) + pollution$$

단, M_t는 t날의 일별 사망자수, DOW_t는 t날의 요일, $Temp_t$는 t날의 일별 평균기온, $Humi_t$는 t날의 일별 평균상대습도

그리고 대기오염이 사망자수에 미치는 영향을 일반화가법 모형(Generalized Additive Model : GAM)을 이용하여 분석함.

- $E(M|X_1, X_2, \cdots, X_p) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \cdots + \beta_p X_p$, 단, $X_1, X_2, \cdots, X_p$는 일별 사망자수 발생의 예측(설명) 변수군, β의 95% 신뢰구간 = $\exp(\hat{\beta} \pm 1.96 \times Std.error)$

여기에서 기후·환경 조건에 대한 사망자료의 비정규성으로 인해 다중 포아송 회귀모형(Multiple Poisson Regression Model)을 대기오염물질 단위별로 다음과 같이 적용하여 단기노출의 건강영향 기대 수준을 평가함.

- $\ln[E(M)] = \alpha + \beta_i X_i + \gamma \bullet Q + \epsilon$ 단, Q는 Temp, Humi 등의 자연조건 변수

대기오염물질 노출에 의한 일별 환경성 질환 사망자수 노출반응은 김운수(2013), 「서울시 기후환경변화의 건강영향 분석연구」에 제시된 방법을 따라 추정하였음.

증가하고 있다. 그리고 O_3로 인한 호흡계통 질환의 사망위험이 약 3.3% 증가하는 것으로 나타나, PM보다 건강 위해도가 다소 큰 것을 알 수 있다.

결과적으로 (초)미세먼지와 오존 오염으로 서울 시민의 건강영향을 고려할 경우, 기존 개별 목표농도 설정과 배출원 관리정책 추진을 지양하고 향후 PM2.5·O_3 통합관리 정책으로 전환하는 것이 필요하다.

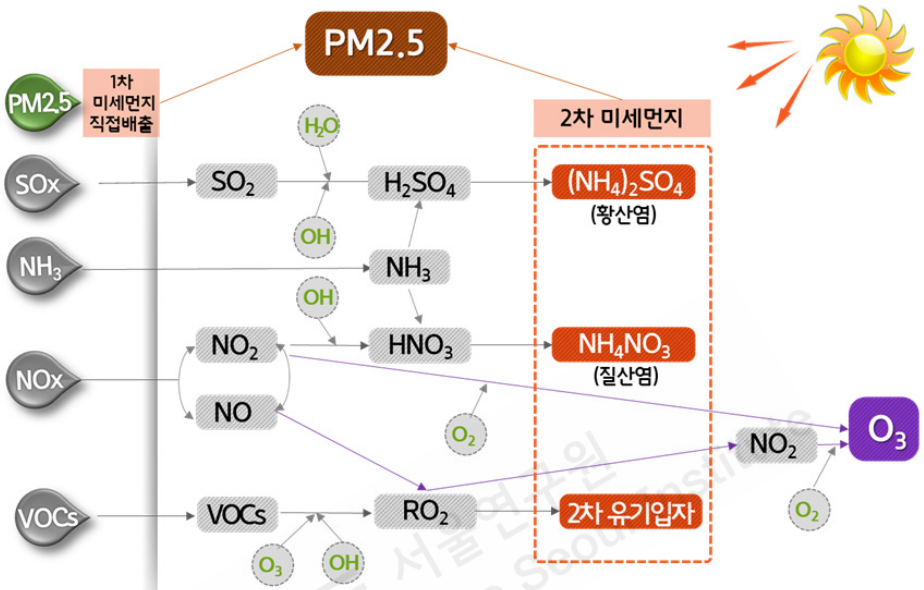
2_서울시 미세먼지·오존 생성 메커니즘 분석

대기 중 미세먼지는 배출원에서 직접 배출되는 1차(Primary) 미세먼지와 대기 중에서 화학반응에 의해 생성된 2차(Secondary) 미세먼지로 구분된다. 1차 미세먼지는 굴뚝 등 발생원에서부터 고체 상태의 미세먼지로 OC(organic Carbon), EC(Elemental Carbon), 토양(중금속 포함) 등으로 구성되어 있다. 그리고 2차 생성 미세먼지는 유기성 미세먼지(Secondary Organic Aerosol)와 무기성 미세먼지(Secondary Inorganic Aerosol)로 구분된다.

2차 생성 유기성 미세먼지는 자동차 배기가스, 주유소 유증기 등에 포함된 VOCs와 OH, O_3에 의한 산화반응에 의해 고분자성 유기물로 변환되면서 생성된다. 그리고 2차 생성 무기성 미세먼지는 각종 연소과정에서 발생한 NOx와 대기 중 O_3 등이 반응해 산성물질인 질산(HNO_3)을 생성하고, 이는 NH_3와 반응하여 2차 생성 입자상 물질인 질산암모늄(NH_4NO_3)이 된다. SO_2는 수증기와 반응하여 황산(H_2SO_4)이 되고, 이는 다시 암모니아 등과 반응하여 황산암모늄($(NH_4)_2SO_4$) 등의 입자를 생성하게 된다.

한편 오존의 생성 과정을 살펴보면, 자동차 등에서 대부분 NO의 형태로 배출되는 NOx가 먼저 NO_2로 산화되고, NO_2가 햇빛에 의해 O+NO로 광분해된다. 산소 원자가 대기 중 산소 분자와 반응하여 오존을 만들며, 이 오존은 다시 NO를 NO_2로 산화시키는 데 소비된다. VOCs가 존재하는 대기 중에서는 산소원자와 휘발성 유기화합물의 반응에 의해 과산화기(RO_2)가 생성된다. 이 과산화기에 의해 NO는 NO_2로 빨리 산화되는데, 이 과정에서 오존이 덜 소모되어 대기 중 오존 농도가 증가하게 된다.

미세먼지와 오존은 대기 중에서 다른 오염물질과 화학반응에 의해 생성되고 풍속, 기온, 습도 등 대기조건과 이온성분들의 비율 등에 영향을 받는 등 복잡한 메커니즘에 따라 생성된다.



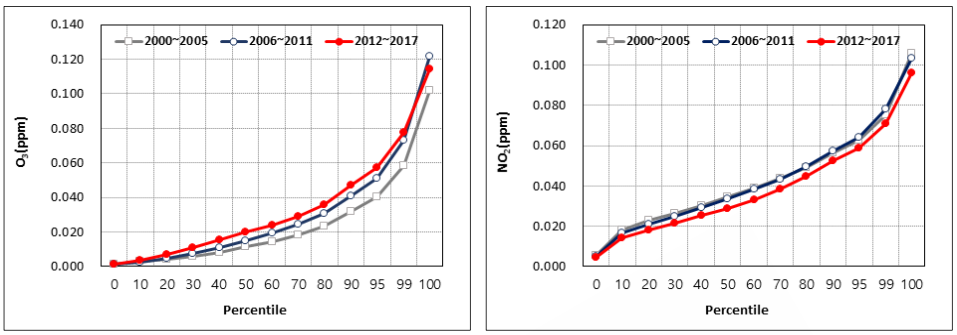
[그림 3-3] 초미세먼지·오존 발생 특성

이와 같이 PM2.5와 O_3은 대기 중의 NOx, 햇빛 그리고 VOCs이 광화학 산화 과정을 통해 생성되는 2차 생성물질이다. 도시에서 오존 생성의 특징은 NOx와 VOCs의 농도 비율에 따라 비선형적으로 달라질 수 있다는 점이다.[17] 이에 광화학 2차 생성과정에서 중요한 역할을 하고 있는 NOx($NO+NO_2$), VOCs, O_3의 복합영향 등을 분석하여 서울시 통합관리에 필요한 조건을 확인한다. 분석 자료는 서울시 대기오염자동측정망 측정 자료이며, 2013년 이후 서울시 PM2.5와 O_3 오존 간 오염도 변화 과정과 복합적인 영향을 분석한다.

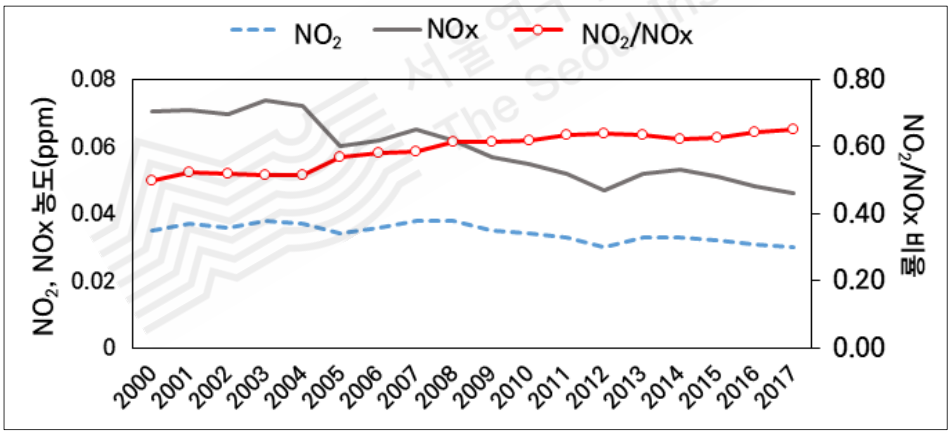
17) Finlayson-Pitts and Pitts, "Atmospheric Chemistry : Fundamentals and Experimental Techniques, John Wiley & Sons, New York, 1986.

1) NO, NO_2, NO_X, NHHC(VOCs), O_3 농도 변화 특성

2000~2017년 O_3 백분위수 농도를 세 개의 기간으로 나누어 살펴보면, 2012~2017년 기간이 가장 높은 수준이다. 오존 농도가 전체적으로 증가하고 있으며, 고농도의 증가 경향이 더 명확하게 보인다.



[그림 3-4] 서울시 오존과 NO_2 백분위수 농도 변화



자료 : 서울시보건환경연구원, 서울시 25개 도시대기 측정망의 NOx 농도 자료 협조

[그림 3-5] 서울시 NO_2, NOx 농도 및 NO_2/NOx 비율 변화

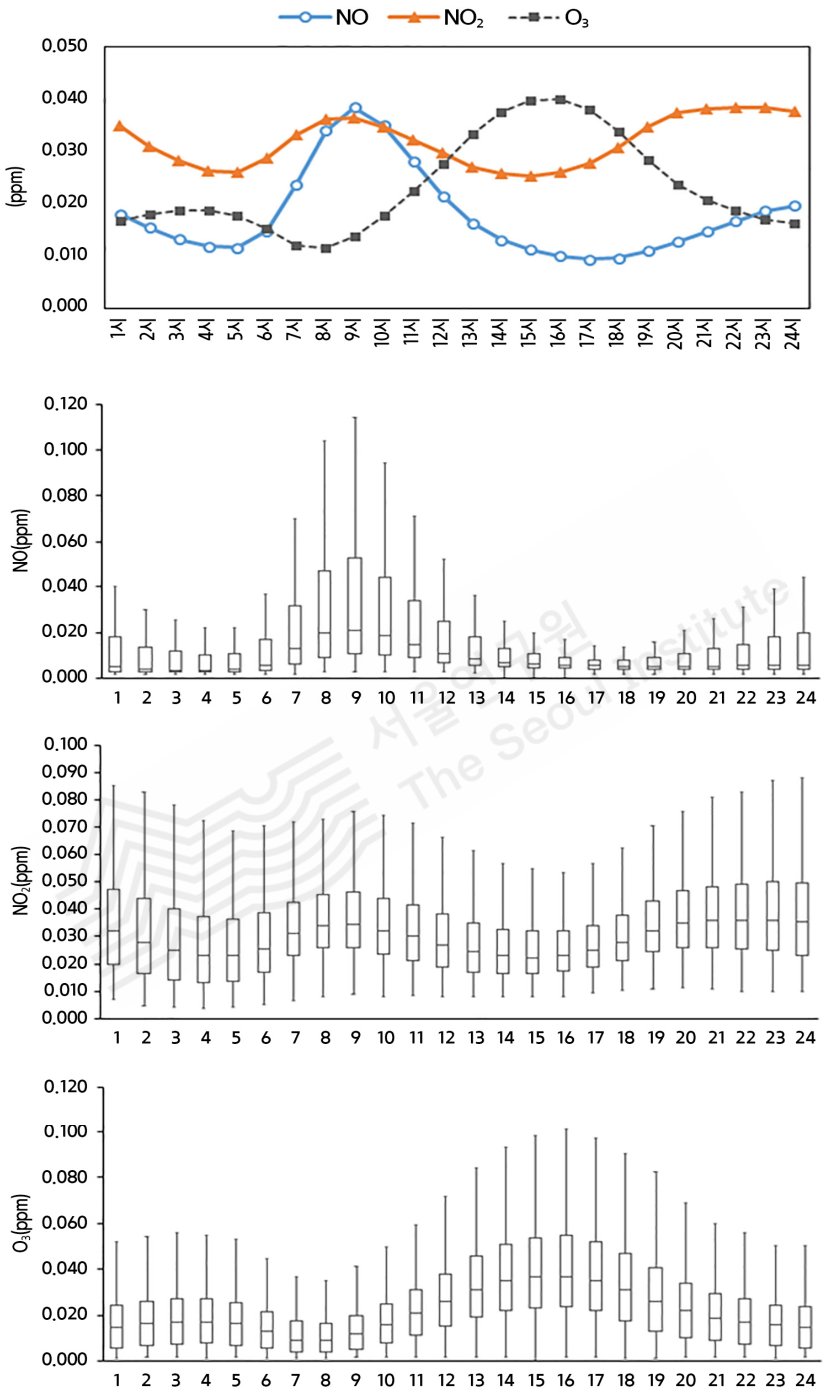
O_3 생성과 관련된 NO_2의 백분위수 농도는 반대로 감소 추세를 보이고 있으며, 최근 6년(2012~2017년)이 가장 낮다. 이러한 추세는 NOx 배출량 감소로 NOx 농도가 감소된 것으로 판단할 수 있다. 그러나 NO_2/NOx 비율은 오히려 증가하고 있어, 실제 감소한 NO_2는 NOx 배출 감소에 미치지 못하고 있는 것으로 판단할 수 있다.

NO, NO_2, O_3의 시간대별 농도 변화를 살펴보면, NO는 밤에는 매우 낮았으며 아침 6시부터 출근 시간대까지 꾸준히 상승하여 오전 9시에 최고 농도를 보인 후 감소하는 경향을 보이고 있다. NO_2는 오전 6시부터 NO 농도 증가와 함께 오전 9시까지 상승하고, 이후 감소하여 낮은 농도를 보이다, 퇴근 차량의 NOx 배출영향으로 퇴근 시간 이후 다시 증가하는 패턴을 보이고 있다.

한편 O_3의 농도는 오전 8시부터 급격히 상승하기 시작하여 오후 3~4시에 최고 농도에 이르며, 늦은 오후, 밤으로 가면서 감소하고 있다. 오후 시간대 O_3 농도는 차량 배출에 따른 NOx 증가와 함께 광화학 과정이 활성화되어 증가한다. 이후 태양광이 감소하면서 광화학 과정이 약화되어 오존 생성과정보다 소멸과정이 우세하여 O_3 농도가 감소하는 것으로 판단된다.

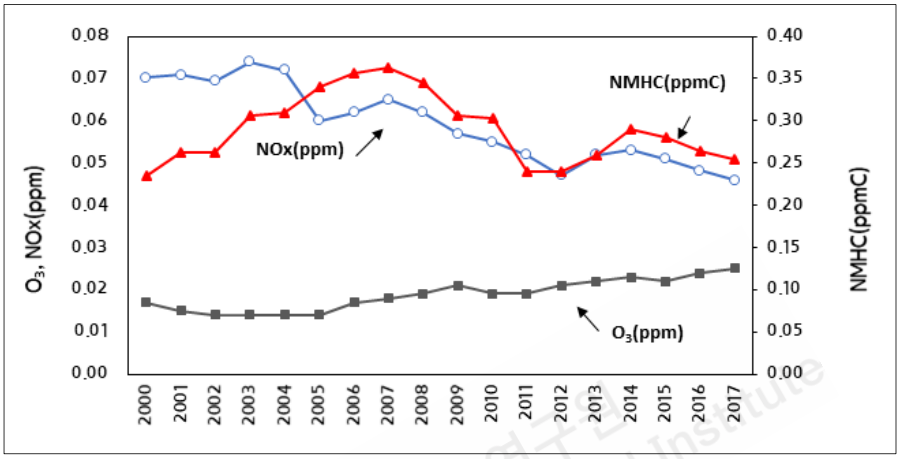
일반적으로 O_3 농도는 일사량과 기온에 비례하여 증가하고, 상대습도 및 풍속에 반비례하여 감소하는 것으로 보고되고 있다. 이에 햇빛이 없고 기온도 내려가는 저녁, 밤 시간에는 광화학 반응에 의한 오존 생성은 멈추게 되고, 낮 시간대에 생성된 고농도 오존은 NO를 NO_2 등으로 산화시키는 데 소모된다. 이러한 오존의 소모현상(NOx titration)으로 밤이나 이른 아침에는 오존 농도가 하루 중에서 가장 낮은 수준으로 떨어지는 변화를 보이고 있다.[18]

18) 밤이나 질소산화물(NOx)의 배출량이 많은 지역에서 NO와의 화학반응으로 인해 오존이 분해되어 제거되는 현상(환경부, 2016)



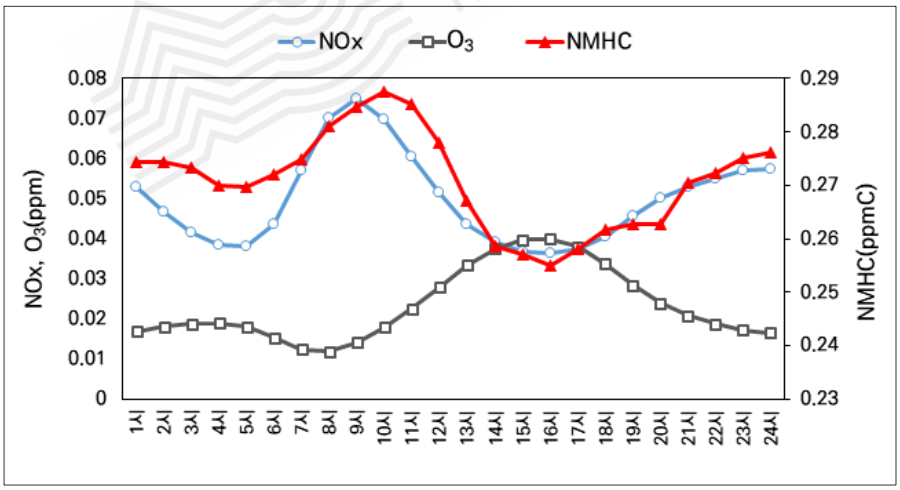
[그림 3-6] 서울시 NO, NO_2, O_3 시간대별 농도 변화(2013~2017년 평균)

대기 중의 탄화수소 가운데 메탄은 광화학 반응성이 적지만, 비메탄 탄화수소(NHMC, 특히 불포화탄화수소)는 오존의 생성 원인이 된다. 수도권 대기환경관리 기본계획 및 시행계획을 시행한 이후 2007년부터 오존의 원인물질인 NOx과 NMHC의 농도는 낮아지고 있으나, 오존은 연평균 값이 상승 추세에 있다.[19]



주 : 광화학 반응을 고려하여 O_3 농도의 경우 5~20시 평균임.

[그림 3-7] 서울시 NOx, NMHC, O_3 연평균 농도 변화



[그림 3-8] 서울시 NOx, O_3, NMHC 시간 농도 변화(2013~2017년)

19) 서울보건환경연구원에서 25개 도시대기 측정망의 시간대별 질소산화물(NOx), 오존(O3), 비메탄탄화수소(NHMC) 농도 자료를 협조받아 분석정리함.

시간대별 NMHC, NOx, O_3 농도를 살펴보면, 출근시간의 차량 배출 등으로 인해 NOx, NMHC 농도가 오전에 증가하다, 태양 자외선이 강해지는 오후에 광화학적 반응으로 원인물질인 NOx, NMHC 농도는 감소하고 O_3 농도는 증가하고 있다. 반대로 저녁, 밤에는 광화학 반응이 없어지므로 NOx, NMHC 농도는 증가하고 O_3 농도는 감소하고 있다.

2) 기상영향 분석[20]

(1) 초미세먼지

2013~2017년 기간 기상요소(상대습도, 일강수량, 일교차, 일사량, 기온, 풍속)와 PM2.5 농도와의 상관관계를 분석하였다. PM2.5 농도는 25개 도시대기측정소의 1시간 값을 평균한 '평균', 25개 측정소 가운데 최고 1시간 농도를 '최고', 25개 측정소의 시간 최고농도를 평균한 '최고 평균' 등 3개로 구분하였다.

분석 결과, PM2.5 농도와 기상요소의 상관관계는 상관이 다소 낮은 것으로 나타났다. 다만 기온, 풍속, 일강수량과 PM2.5 농도와는 (-) 관계, 일교차와는 (+)의 관계가 나타남을 알 수 있다.

[표 3-1] 서울시 기상요소와 초미세먼지 농도의 상관관계

구분	일사 (MJ/m^2)	기온(℃)			풍속(m/s)			일 강수량 (mm)	상대습도 (%)	일교차 (℃)
		일 최고	주간 평균	일 평균	주간 평균	주간 오전	일 평균			
평균	-0.023	**-0.109**	**-0.125**	**-0.129**	-0.072	**-0.147**	**-0.079**	**-0.178**	-0.017	**0.113**
최고	-0.039	-0.105	-0.114	-0.116	0.010	-0.055	-0.002	-0.104	-0.007	0.069
최고 평균	-0.025	**-0.111**	**-0.126**	**-0.129**	-0.062	-0.135	-0.071	**-0.171**	-0.026	**0.105**

주 : 2013년부터 2017년까지 1~12월 일자료 데이터를 분석함. 기상요소 가운데 일은 0시부터 24시까지 24시간, 주간은 5시부터 20시까지 15시간, 주간 오전은 5시부터 12시까지 7시간임.

20) 108번 서울지점의 기상요소(상대습도, 일강수량, 일교차, 일사량, 기온, 풍속)를 바탕으로 분석함.

(2) 오존

오존은 시간경과에 따라 오염물질이 광역적으로 이동하면서 반응하여 생성한다. 따라서 일사량·기온·풍속 등 기상요소의 영향을 받으면서 원인물질인 NOx이나 NMHC의 농도와도 복잡하게 관련되어 있어 O_3 농도의 상승 요인을 통계적으로 분석하였다. 우선 기상요소(일사량, 기온, 풍속 등)와 O_3 농도의 상관관계, 원인물질의 농도와 고농도 오존 출현빈도의 관계에 대해 분석했다.

분석에 사용한 O_3 농도는 일 대표 값으로 3종류의 일 통계량을 선정하였다. 25개 전체 측정소 주간(5~20시)의 1시간 값을 평균한 '평균', 25개 측정소 가운데 주간에 가장 높은 1개 측정소의 최고 1시간 농도를 '최고값', 25개 측정소의 시간 최고농도를 평균한 '최고 평균'으로 선정하고, 2013~2017년 동안 4~9월 183일 평균값으로 한정하여 분석하였다.

[표 3-2] 서울시 기상요소와 오존 농도의 상관관계

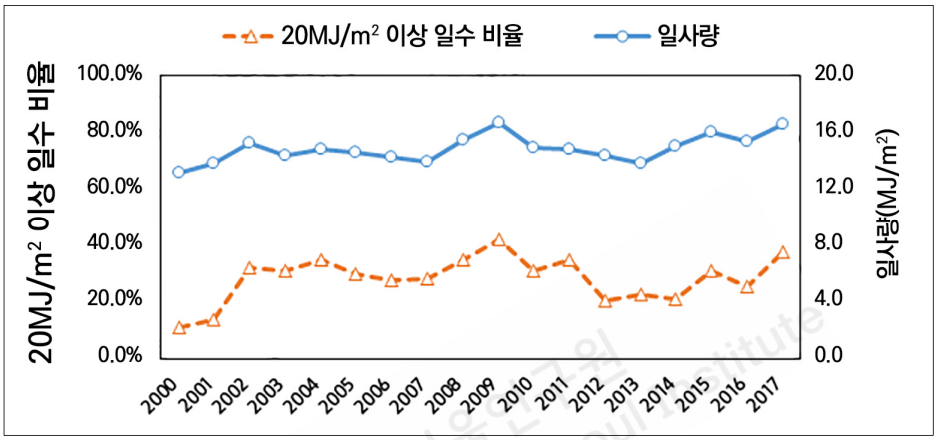
구분		오존 농도					
		평균		최고값		최고 평균	
		연평균	전체기간	연평균	전체기간	연평균	전체기간
일사(MJ/m^2)		**0.593**	**0.600**	**0.526**	**0.528**	**0.546**	**0.552**
기온(℃)	일최고 기온	**0.238**	**0.238**	**0.437**	**0.436**	**0.273**	**0.272**
	주간평균 기온	0.110	0.107	0.294	0.295	0.147	0.143
	일평균 기온	0.085	0.083	0.271	0.272	0.123	0.120
풍속(㎧)	주간평균 풍속	0.092	0.054	-0.213	-0.232	0.010	-0.026
	주간오전 풍속	**-0.083**	**-0.106**	**-0.365**	**-0.375**	**-0.160**	**-0.182**
	일평균 풍속	0.072	0.035	-0.247	-0.262	-0.013	-0.046

주 : 연평균은 2013년~2017년 각 연도별 상관계수의 평균값이며, 전체기간은 2013년부터 2017년까지 모든 데이터를 일괄 산출한 상관계수임.

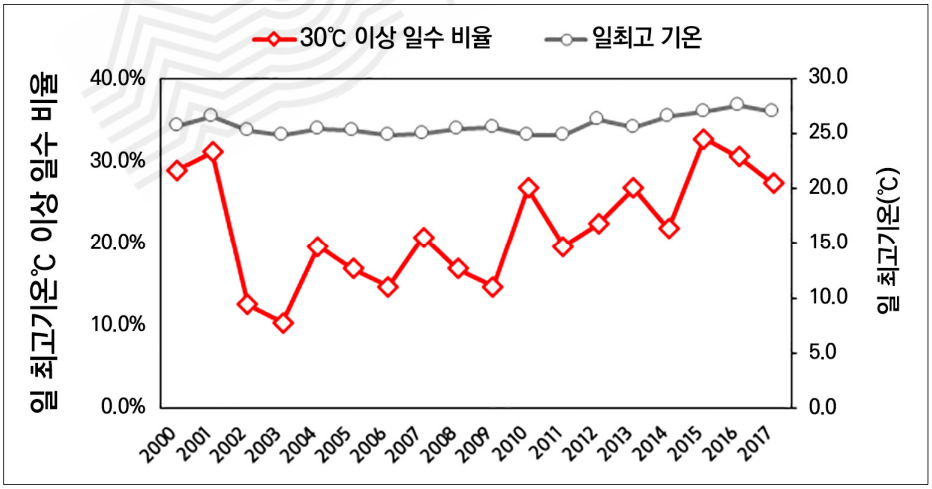
기상요소 가운데 일은 0시부터 24시까지 24시간, 주간은 5시부터 20시까지 15시간, 주간 오전은 5시부터 12시까지 7시간임.

상관분석 결과, O_3 농도는 기상요소 중에서 일사량과 가장 상관이 있으며, 다음으로 최고 O_3 농도는 풍속 특히 주간시간 동안 풍속의 상관이 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 일사량, 기온, 풍속에 대해 O_3이 생성되기 쉬운 4~9월 동안 서울 기상의 연간 변화를 살펴보았다.

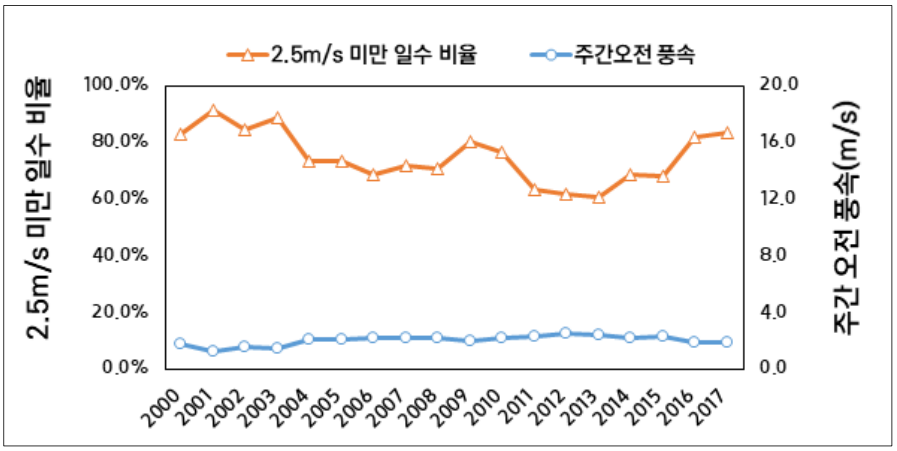
2000~2017년 동안 일사량은 다소 증감을 반복하고 있으나 전체적으로는 증가추세에 있으며, 일사량 20MJ/m^2 이상 일수의 비율이 높아지고 있다. 상관도가 높게 나타난 일최고기온과 일최고 기온 30℃ 이상인 날의 출현빈도 역시 증가하는 경향이다. 오전시간의 풍속의 경우 큰 변화 추세는 나타나지 않으나, 2.5㎧ 미만의 약풍의 출현빈도가 증가하고 있는 것으로 나타났다.



[그림 3-9] 서울시 연도별 일사량 변화(4~9월)



[그림 3-10] 서울시 일최고 기온 변화(4~9월)



[그림 3-11] 서울시 오전 풍속평균 변화(4~9월)

이와 같이 기상요소와 오존 생성의 상관분석, 기상요소의 변화를 종합하여 살펴보면, 생성의 영향에 (+)의 관계가 있는 일사량과 일 최고기온 30℃ 이상 일수의 출현빈도가 증가 경향을 보이고 있다. 그리고 (-)의 영향을 미치는 오전시간 풍속은 약풍의 출현 빈도가 증가하고 있다. 즉, 서울의 기상변화에 따라 고농도 오존의 발생 가능성이 점차 증대하고 있음을 알 수 있다.

3) 오존 농도 상승경향 분석

O_3, PM2.5 농도 변화와 기상요소의 상관 분석결과를 살펴보면, PM2.5보다 O_3 농도가 기상요소의 변화에 따른 영향이 크게 나타났다. 그래서 특정한 기상요소에 의한 O_3 농도 상승 영향의 가능성을 명확하게 정리하기 위해 일정조건의 기상조건에 대응하는 O_3 농도의 연차별 농도 변화를 분석하고, 기상요소의 변화를 제외한 오존 농도의 장기적인 상승 경향이 통계적으로 유의함을 분석하였다.

앞서 O_3 농도와 비교적 상관이 있는 것으로 분석된 기상요소들을 독립변수로 하여 회귀분석을 실시하였다. 즉, O_3 '평균농도'와 '최고농도 평균'에 관련된 기상요소는 일사량, 일최고 온도의 2개 변수, '최고농도'는 일사량, 일최고 온도, 주간오전 풍속의 3개 독립변수로 분석하였다.

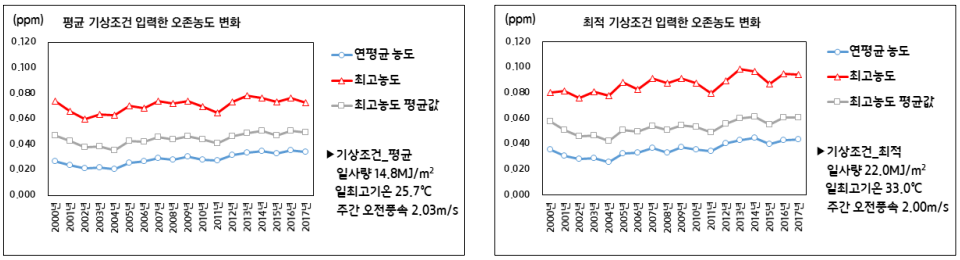
[표 3-3] 서울 오존 농도의 경년변화에 따른 회귀분석 결과(2000~2017년)

구분	오존 농도		
	연평균	최고	최고평균
상관계수	0.915	0.715	0.789
R^2	0.837	0.511	0.623
기울기(ppb/년)	0.89	0.83	0.72
기울기의 표준오차(ppb/년)	±0.10	±0.20	±0.14
기울기의 t값	9.07	4.09	5.14
기울기의 95% 하한(ppb/년)	0.68	0.40	0.42
기울기의 95% 상한(ppb/년)	1.10	1.26	1.01

2000~2017년(4~9월)의 O_3 농도는 유의성 있게 상승 경향을 보이고 있음을 알 수 있다([표 3-3] 참조). 각 연도별 O_3 농도와 상관도가 높은 기상요소의 회귀분석을 실시하여 수식을 산출하였다. 그리고 각 기상요소의 평균값(일사량 14.8MJ/㎡, 주간 오전 풍속 2.03㎧, 일 최고기온 25.7℃)과 일반적으로 비교적 고농도 오존농도가 출현하기 쉬운 기상 요소값(일사량 22MJ/㎡, 주간 오전 풍속 2.00㎧, 일 최고기온 30℃)을 입력하여 해당 연도의 오존농도를 예측하였다([그림 3-12]).

2000년	연평균 농도	$O_{3_2000} = 0.001007 \times S_{2000} + 0.000239 \times T_{2000} + 0.005933$
	최고 농도	$O_{3_2000} = 0.001885 \times S_{2000} + 0.001551 \times T_{2000} - 0.00262 \times WS_{2000} + 0.011398$
	최고농도 평균	$O_{3_2000} = 0.001235 \times S_{2000} + 0.000388 \times T_{2000} + 0.018763$
⋮		
2008년	연평균 농도	$O_{3_2008} = 0.000948 \times S_{2008} - 0.0003 \times T_{2008} + 0.021413$
	최고 농도	$O_{3_2008} = 0.001611 \times S_{2008} + 0.000921 \times T_{2008} - 0.00727 \times WS_{2008} + 0.039368$
	최고농도 평균	$O_{3_2008} = 0.001026 \times S_{2008} + 0.000039 \times T_{2008} + 0.029425$
⋮		
2017년	연평균 농도	$O_{3_2017} = 0.001105 \times S_{2017} + 0.000419 \times T_{2017} + 0.006858$
	최고 농도	$O_{3_2017} = 0.001688 \times S_{2017} + 0.002066 \times T_{2017} - 0.00838 \times WS_{2017} + 0.011798$
	최고농도 평균	$O_{3_2017} = 0.001197 \times S_{2017} + 0.000648 \times T_{2017} + 0.014974$

S_t = 각 연도 일사량, T_t = 각 연도 일최고 기온, WS_t = 각 연도 주간 오전 풍속



[그림 3-12] 회귀분석 예측농도 연 변화(좌 : 평균 기상조건, 우 : 최적 기상조건)

[그림 3-12]에 제시된 바와 같이 예측된 오존 농도의 연차별 변화에 대해 회귀분석을 한 결과는 [표 3-4]와 같다. 비교적 상관이 높은 기상요소를 일정조건으로 한정시켜 기상요소의 연도별 변화에 대한 영향은 제외하였다. 이러한 경우에도 오존 농도(연평균, 최고농도, 최고농도 평균)의 상승경향이 나타나고 있어, 한정시킨 기상요소 이외에도 오존 농도 상승 요인이 존재하는 것으로 판단된다.

[표 3-4] 회귀분석 예측값의 경년 변화에 대한 회귀분석 결과(2000~2017년)(기상조건 한정)

구분		오존 농도					
		연평균		최고		최고평균	
상관계수		0.876	0.846	0.615	0.763	0.679	0.671
R^2		0.768	0.716	0.378	0.582	0.461	0.450
예측 조건	일사량(MJ/㎡)	14.8	22.0	14.8	22.0	14.8	22.0
	일최고 기온(℃)	25.7	30.0	25.7	30.0	25.7	30.0
	주간 오전 풍속(m/s)	-	-	2.03	2.00	-	-
기울기(ppb/년)		0.76	0.89	0.60	0.97	0.57	0.70
기울기의 표준오차(ppb/년)		±0.11	±0.14	±0.19	±0.20	±0.15	±0.19
기울기의 t값		7.28	6.35	3.12	4.73	3.70	3.62
기울기의 95% 하한(ppb/년)		0.54	0.60	0.19	0.53	0.24	0.29
기울기의 95% 상한(ppb/년)		0.99	1.19	1.01	1.40	0.89	1.11

서울연구원 Seoul Institute

4) 미세먼지의 2차 생성 배출기여

미세먼지의 생성원인은 발생원으로부터 고체 상태의 미세먼지로 나오는 1차 생성, 발생원에서 가스 상태로 나온 물질이 공기 중의 다른 물질과 화학반응을 일으켜 미세먼지가 되는 2차 생성으로 나누어진다.

1차 생성은 경유자동차, 공장 등에서 주로 PM2.5 형태로 직접 배출되는 것을 말한다. 2차 생성은 자동차, 발전소에서 배출된 아황산가스, 질소산화물이 대기 중에서 수증기, 암모니아 등과 결합하는 화학반응을 거쳐 PM2.5가 생성되는 것을 말한다. 대기오염물질 배출량 통계와 수도권 대기오염집중측정소에서 측정하고 있는 PM2.5 구성 성분을 토대로 추정한 결과, 수도권에서 2차 생성 비중이 전체 PM2.5 발생량의 73%를 차지한다.

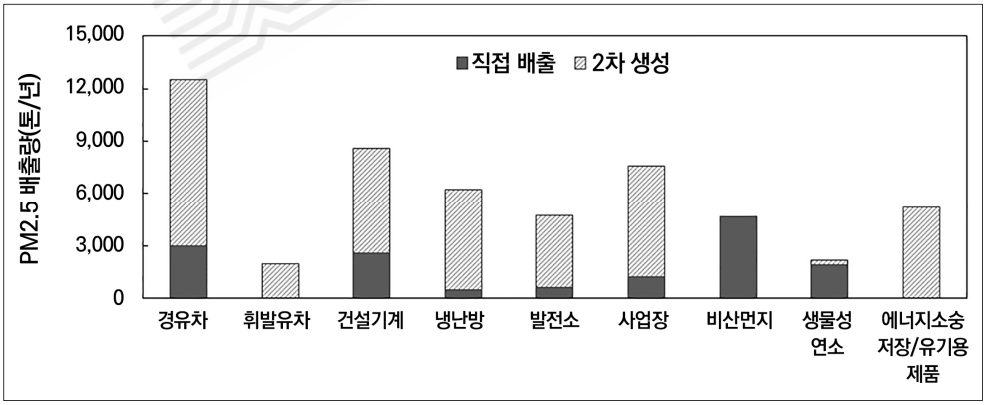
국내 배출원별 기여율을 살펴보면, PM2.5는 직접배출(1차)과 간접배출(2차)이 약 1:2로 구성되며, 국내 배출원이 미세먼지 발생원의 약 50%를 차지하고 있다. 수도권의 배출부문별로 기여율을 살펴보면, 경유차(23%), 건설기계(16%), 사업장(14%)의 순서로 배출 비중이 높은 것으로 분석되고 있다.

[표 3-5] 수도권 초미세먼지 생성(1차, 2차 비율)

(단위 : 톤/년)

구분	합계	경유차	건설기계	냉난방	발전소	비산먼지	사업장	생물성연소	휘발유차	에너지수송저장/유기용제품
1차	14,427 (27%)	2,979 (24%)	2,555 (30%)	458 (7%)	613 (13%)	4,660 (100%)	1,236 (16%)	1,914 (88%)	12 (1%)	-
2차	39,209 (73%)	9,515 (76%)	6,032 (70%)	5,746 (93%)	4,114 (87%)	-	6,373 (84%)	261 (12%)	1,964 (99%)	5,204 (100%)
총계	53,636	12,494	8,587	6,204	4,727	4,660	7,609	2,175	1,976	5,204

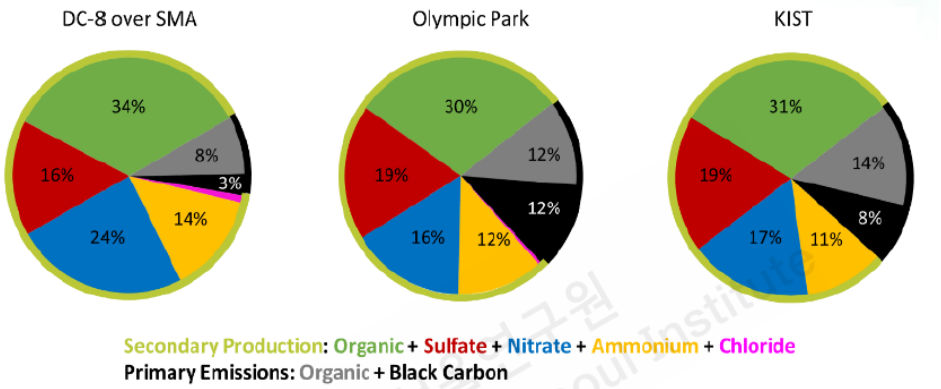
자료 : 환경부, 환경백서 2017



자료 : 환경부(2017)

[그림 3-13] 수도권 초미세먼지 주요 배출원

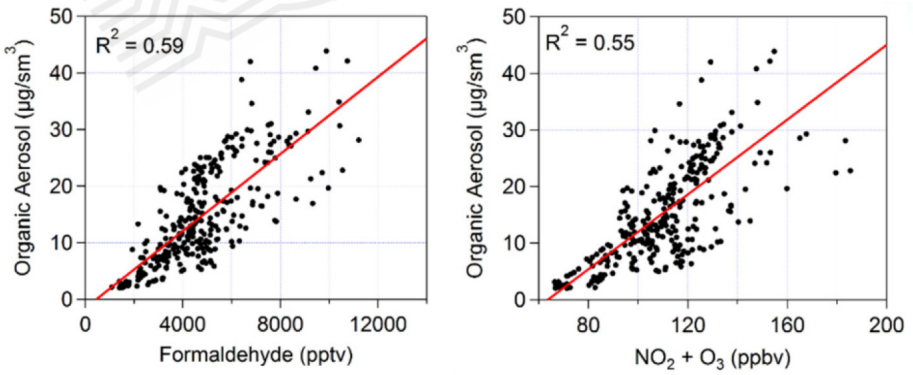
그리고 미국 항공우주국(NASA)과 국립환경과학원(NIER)이 공동으로 2016년 5~6월에 수행한 국내 대기질 공동 조사 결과(KORUS-AQ 보고서)에 따르면, 조사 기간 서울에서 측정된 PM2.5의 국내 기여율은 52%, 중국 내륙 34%를 포함한 국외 기여율은 48%에 이르는 것으로 확인되고 있다. 또한 관측된 미세먼지의 75% 이상은 배출원에서 직접 배출되지 않고, 대기 중에서 미세먼지를 유발하는 오염물질로 인한 2차 생성이 원인인 것으로 파악되었다.



주 : KORUS -AQ 기간(2016년 5~6월) 동안 항공기 DC-8과 서울에 설치된 지상 관측소 두 곳의 관측자료

자료 : KORUS-AQ 예비종합보고서(2017)

[그림 3-14] 미세먼지 평균 성분(KORUS-AQ 연구결과)



주 : 서울 상공에서 항공기 DC-8이 오후에 관찰한 자료 분석

자료 : KORUS-AQ 예비종합보고서(2017)

[그림 3-15] 유기적 미세먼지와 광화학적 지표 간의 상관관계(좌 : 포름알데히드, 우 : NO_2+O_3)

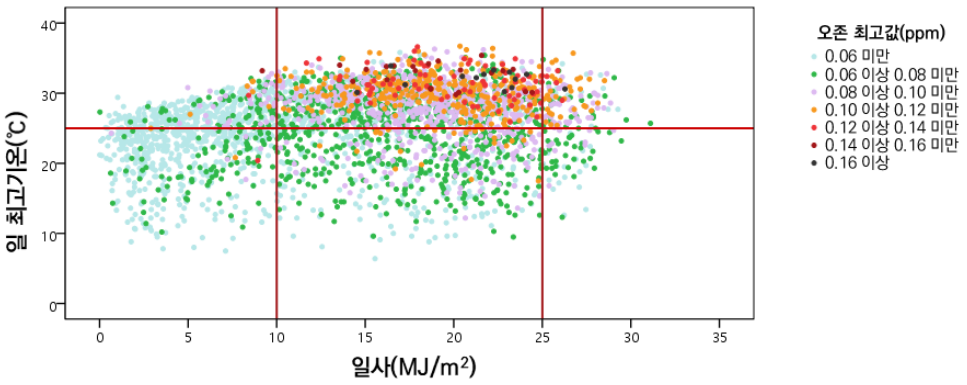
한미 대기질 합동연구(KORUS-AQ) 결과에 따르면, 톨루엔 등의 방향족 화합물이 OH, O_3, NO_3에 의한 산화반응을 통해 고분자성 유기물로 변환되면서 유기성 미세먼지(Secondary Organic Areosol)가 생성된다. 방향족 화합물은 O_3 발생에 영향을 미치며 수도권 지역의 기타 VOCs 관련 화학반응에도 영향을 미친다. 또한 NO_2+O_3의 상관관계를 보면 전반적으로 PM2.5 유기성분은 대기의 산화력 증가와 비례한다. 즉, PM2.5 발생량은 지역 내 화학생성 반응의 강도와 밀접한 관계가 있다고 보고되고 있다.

5) 오존과 전구물질(前驅物質) 상관관계

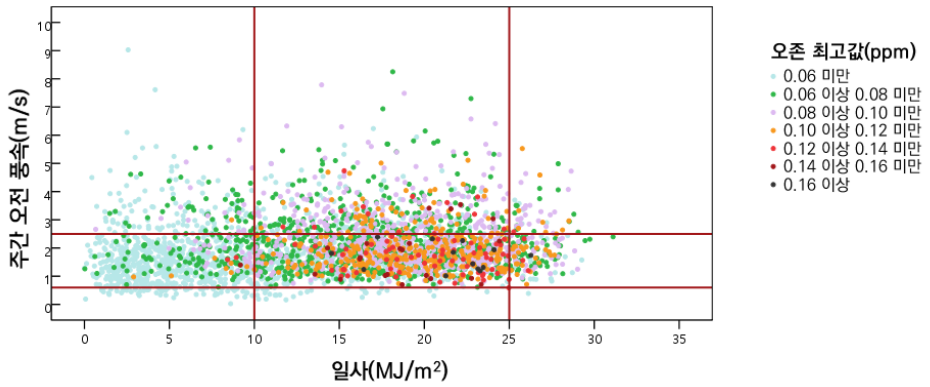
고농도 오존이 출현하는 요인에 대해, 기상요소 이외의 원인으로 전구물질인 NOx와 NMHC 농도의 상관관계를 분석하였다.

기상요소의 영향을 가능한 한 제외하기 위해 O_3 최고 농도와 비교적 상관이 높았던 일사량, 일최고 기온 및 주간 오전 풍속을 비교적 고농도 O_3이 발생했던 범위로 한정하였다. 그리고 O_3 형성에 미치는 시간대를 고려하여 오전 6~9시의 NOx, NMHC 농도를 분석하였다. 4~9월 동안 일사량일 최고 기온, 최고 농도와의 관계 그리고 일사량주간 오전 풍속과의 관계는 [그림 3-16], [그림 3-17]과 같다.

- 일사량 : 10 ~ 25MJ/m^2
- 일 최고 기온 25℃ 이상
- 주간 오전 평균풍속 1.5 ~ 2.5m/s

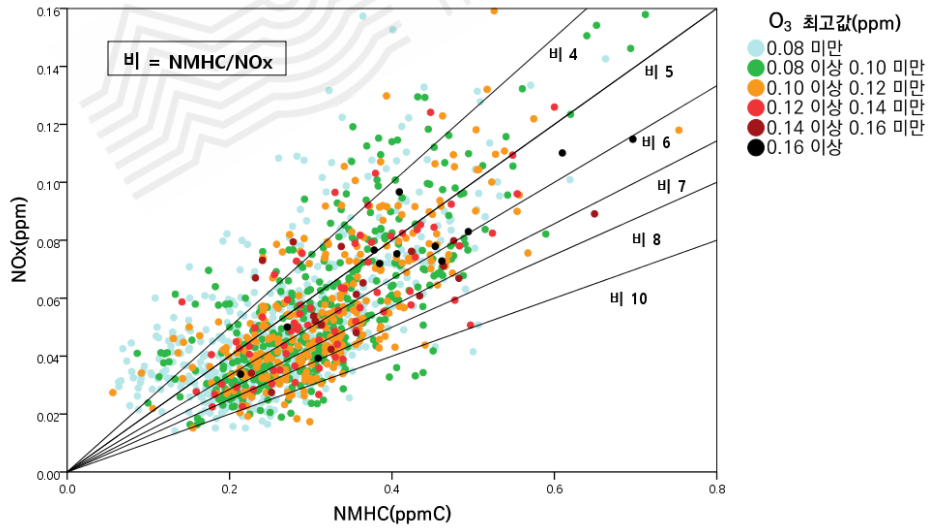


[그림 3-16] 서울시 일사량일 최고 기온과 고농도 오존의 상관관계

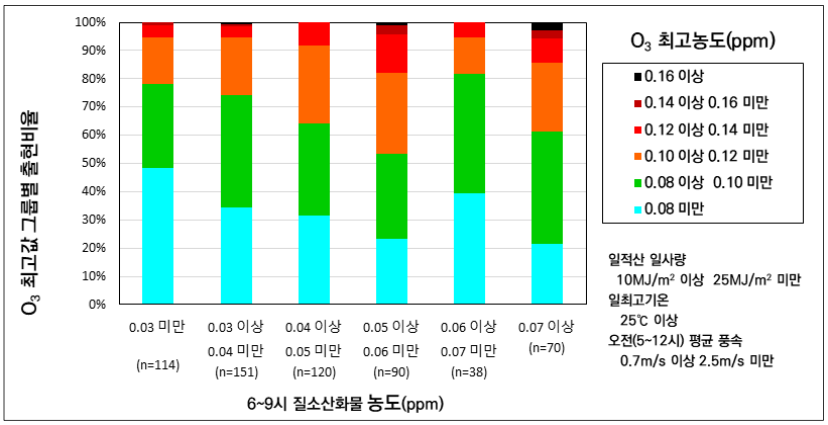


[그림 3-17] 서울시 일사량주간 오전 풍속과 고농도 오존의 상관관계

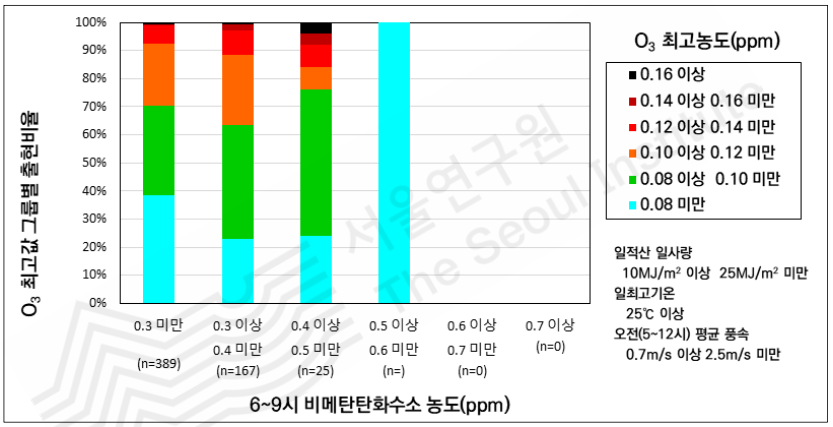
일정 기상조건에서의 전구물질과 O_3 농도의 상관관계는 [그림 3-18]과 같다. 전구물질의 농도에 따른 최고 오존 농도 출현비율을 보다 상세하게 살펴보기 위해 전구물질의 농도별 O_3 농도 출현빈도를 산정하였다. 전체적으로 NOx 농도가 높을수록 고농도 O_3 출현 비율이 다소 높게 나타났다([그림 3-19]). 그리고 NMHC 농도는 0.6~0.7ppmC 범위에서 고농도 O_3의 출현이 많이 나타났다([그림 3-20]).



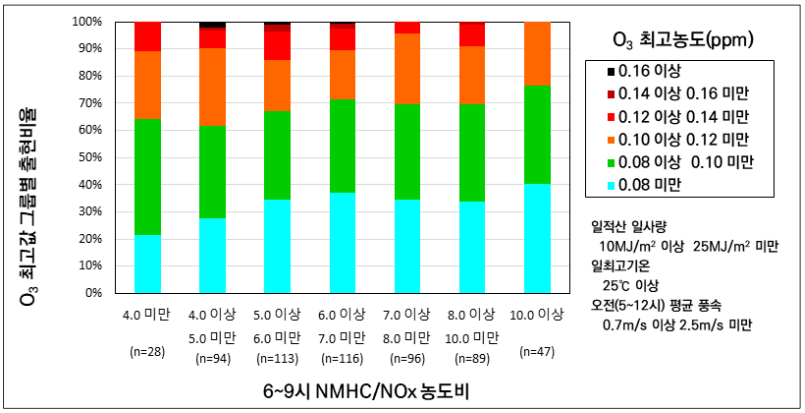
[그림 3-18] 서울시 일정 범위 기상조건에서 전구물질과 오존 최고농도의 상관관계



[그림 3-19] 서울시 질소산화물과 오존 최고농도 출현비율의 관계



[그림 3-20] 서울시 비메탄 탄화수소와 오존 최고농도 출현비율의 관계



[그림 3-21] 서울시 NMHC/NOx 비율과 오존 최고농도 출현비율의 관계

다음으로 NMHC/NOx 농도비에 따른 고농도 O_3 출현비율을 분석하였다. NMHC/NOx 농도 비율은 7개 범위로 구분하였으며, 분석 결과는 [그림 3-21]과 같다. 대체로 NMHC/NOx 농도 비율이 4.0~8.0 범위에서 고농도 O_3이 발생하고 있음을 알 수 있다.

고농도 O_3이 출현하기 쉬운 기상조건에서, 6~9시 사이에 NOx 농도가 0.5ppm, NMHC 농도는 0.4~0.7ppmC, NMHC/NOx 농도비는 4.0~8.0 범위일 때 오존 농도가 주의보 발령 수준(0.12ppm 이상)의 고농도 비율이 다소 높게 나타나고 있다.

2013~2017년 4~9월 기간 NMHC/NOx 비율을 조사한 결과, 평균비는 7.0이었다. NMHC/NOx비가 4 미만이 8.6%, 4~8 구간이 60.5%, 8~10 구간이 19.2% 수준으로, 서울의 NMHC/NOx 비율은 2 이상에서 10 이하가 대부분인 것으로 나타났다. 그리고 고농도 O_3이 발생한 날(오존주의보 발령일)의 NMHC/NOx 비율의 평균은 6.1이었다. 4 미만은 8%, 4 이상 8 미만은 74%, 8 이상 10 미만은 18%, 비율이 10 이상일 때 고농도 O_3이 출현한 날은 없는 것으로 분석되었다.

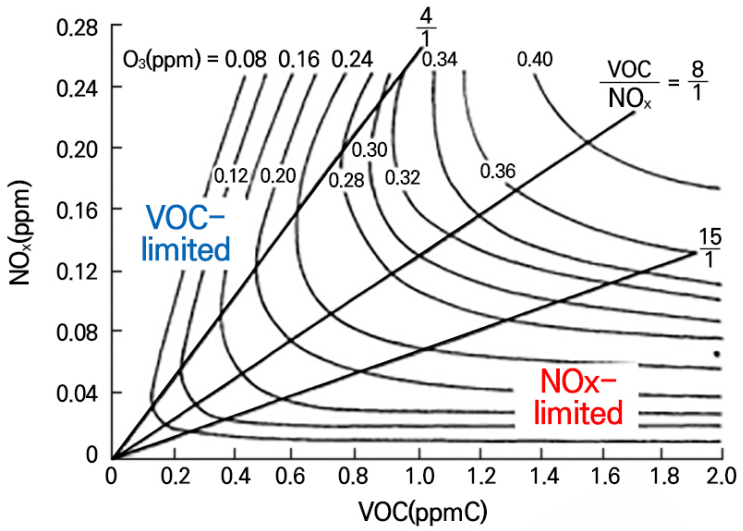
[표 3-6] 서울시 NMHC/NOx 비율 분포

(단위 : %)

구분	4 미만	4 이상 8 미만	8 이상 10 미만	10 이상
2013~2017년 4~9월 전체일 (n=945)	8.6	60.5	19.2	11.7`
2013~2017년 오존주의보 발령일 (n=39)	7.7	74.4	17.9	-

대기 중의 VOCs와 NOx에 의해 O_3 농도가 변화한다는 사실은 O_3 등농도 곡선 생성원리를 분석하면 알 수 있다. VOCs 농도가 낮고 NOx 농도가 높은 환경에서는 VOCs의 농도를 저감하면 O_3의 농도가 감소하는 경향을 보이는데, 이런 환경을 VOCs-limited 환경이라 한다. 반대로 VOCs 농도가 높고 NOx 농도가 낮은 환경에서는 NOx의 농도가 감소할수록 O_3의 농도가 감소하는데, 이런 환경을 NOx-limited 환경이라고 한다. VOCs/NOx 비율이 4 이하이면 VOCs 농도를, 15 이상이면 NOx를 저감하는 것이 O_3 저감에 효과적인 접근법으로 평가되고 있다(정일록, 2001).

서울연구원 The Seoul Institute



자료 : 곽진, "부산지역 휘발성유기화합물(VOCs)의 농도분포 특성연구 : 당감동, 덕천동, 광화학 평가측정소를 대상으로", 부산광역시 보건환경연구원보, 제14권

[그림 3-22] NOx 대비 VOCs 비율에 따른 오존 등농도 곡선

서울시는 전체 기간의 NMHC/NOx 비율, 고농도 일의 NMHC/NOx 비율을 살펴보면 VOCs-limited 환경에 해당함을 알 수 있다. 다만 권역별, 자치구별 비율 차이가 나타나고 있어, 향후 NMHC/NOx 농도 비율을 고려한 세부 지역별 맞춤형 대응대책 검토가 요구되고 있다.

6) 전구물질 농도 저하와 고농도 오존 출현일 변화

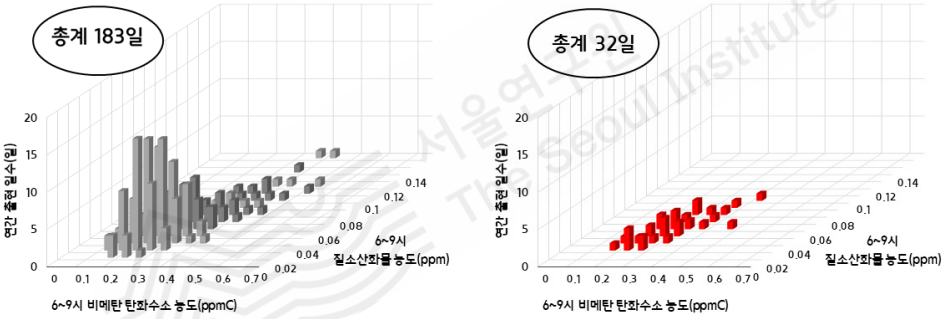
고농도 O_3 발생 빈도는 전구물질 농도에 따라 달라지므로, O_3 농도 형성의 전구물질인 NMHC, NOx 농도 간 상관관계식을 살펴보고, 전구물질의 연간 출현일수와 고농도 O_3의 출현일수와의 관계를 분석하였다.[21] 고농도 O_3 출현율은 각 전구물질의 농도 그룹별 출현일수와 O_3 농도가 0.12ppm 이상 발생한 일수의 비율로 산정하였다. 2013~2017년 가운데 O_3 농도가 상승하는 4~9월을 대상으로 각 연도별 출현일수를 산정한 후 전체 기간의 평균 비율을 적용하였다. 다만, 전구물질 농도에 대응하는 고농도 O_3 출현율은 현재와

21) 전구물질 출현일수는 질소산화물(NOx) 농도와 비메탄탄화수소(NMHC) 농도 간 일 상관 분포 값을 의미

동일하다고 가정하였으며, 전구물질의 농도는 O_3 형성 시간을 고려하여 오전 6~9시 농도로 한정하였고, 농도와 배출량의 관계는 고려하지 않았다.

2013~2017년 동안 각 4~9월의 183일 분석 기간에 나타난 O_3 형성 전구물질인 NOx, NMHC의 농도 구간별(NOx 0.01ppm, NMHC 0.05ppmC) 출현일수 빈도를 바탕으로 '고농도 오존(≥0.12ppm) 출현율'을 추정하였다.

183일에 대한 NOx, NMHC 농도 구간별 출현일수 분포는 [그림 3-23] (a)와 같다. 2013~2017년 동안 O_3 농도 0.12ppm 이상 출현일수는 평균 32일/년으로, 전구물질 NOx, NMHC 농도 구간별 출현분포는 [그림 3-23] (b)와 같다. (b)와 (a)의 일수 비율을 산정한 '고농도 오존 출현율'은 [표 3-7]과 같다.



(a) 전구물질의 연간 출현일수 (b) 오존 농도 0.12ppm 이상 연간 출현일수

[그림 3-23] 서울시 2013~2017 연평균 전구물질 농도 연간 출현일수(a)와 O_3 농도 0.12ppm 이상인 날의 출현일수(b)

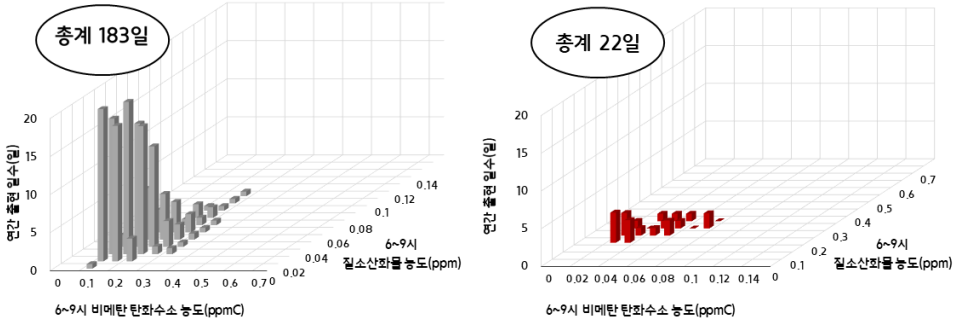
[표 3-7] 서울시 NOx, NMHC 농도 범위별 고농도 오존(0.12ppm 이상) 출현율

NMHC / NOx	0.00 ~ 0.05	0.05 ~ 0.10	0.10 ~ 0.15	0.15 ~ 0.20	0.20 ~ 0.25	0.25 ~ 0.30	0.30 ~ 0.35	0.35 ~ 0.40	0.40 ~ 0.45	0.45 ~ 0.50	0.50 ~ 0.55	0.55 ~ 0.60	0.60 ~ 0.65	0.65 ~ 0.70	0.70~
0.00 ~ 0.01															
0.01 ~ 0.02				0.000	0.000	0.000									
0.02 ~ 0.03			0.000	0.125	0.200	0.222	0.000								
0.03 ~ 0.04			0.000	0.167	0.071	0.071	0.167	0.000	0.000						
0.04 ~ 0.05				0.000	0.125	0.250	0.286	0.000							
0.05 ~ 0.06				0.000	0.400	0.417	0.313	0.333							
0.06 ~ 0.07					0.000	0.167	0.000	0.500	0.000						
0.07 ~ 0.08						1.000	0.333	1.000	0.000	0.000					
0.08 ~ 0.09						0.000	0.000	0.000	0.000						
0.09 ~ 0.10							0.000	0.000	1.000	0.000					
0.10 ~ 0.11						0.000	0.000	0.000			0.000				
0.11 ~ 0.12								0.000	0.000		0.000				
0.12 ~ 0.13															
0.13 ~ 0.14								0.000							
0.14 ~ 0.15															
0.15 ~ 0.16								0.000	0.000						
(ppm) / (ppmC)	0.00 ~ 0.05	0.05 ~ 0.10	0.10 ~ 0.15	0.15 ~ 0.20	0.20 ~ 0.25	0.25 ~ 0.30	0.30 ~ 0.35	0.35 ~ 0.40	0.40 ~ 0.45	0.45 ~ 0.50	0.50 ~ 0.55	0.55 ~ 0.60	0.60 ~ 0.65	0.65 ~ 0.70	0.70 ~

주 : NMHC, NOx 농도는 '(농도) 미만 ~ (농도) 이상' 범위에 해당됨.

NOx, NMHC 농도에 따라 고농도 O_3이 발생할 수 있는 여건이 변화되므로, 전구물질 농도 저감 정도에 따른 고농도 O_3 출현일의 변화를 분석하였다. 우선 전구물질의 농도가 낮아져도 고농도 O_3 출현율은 달라지지 않는다고 가정하였다. 농도 저감 후 조정된 '전구물질 연간 출현일수'에 '고농도 오존 출현율'을 적용하여 출현일수를 산정하였다.

NOx, NMHC 농도를 각각 30% 저감한 경우, 농도 구간별 출현일수 분포는 [그림 3-24] (a)와 같이 변화되고, 여기에 '고농도 오존 출현율'을 적용하면 고농도 출현일수가 22일로 감소하였다([그림 3-24] (b)). 이와 같이 NOx, NMHC 농도를 각각 30% 저감하면 고농도 O_3 출현일 32일이 22일로, 약 31.3% 정도 감소하게 된다.



(a) 전구물질의 연간 출현일수 (b) 오존 0.12ppm 이상 연간 출현일수

[그림 3-24] 서울시 2013~2017 연평균 NOx 30%, NMHC 30% 농도 저감 후 전구물질 농도의 연간 출현일수(a)와 O_3 농도 0.12ppm 이상 연간 출현일수(b)

전구물질 농도 저감에 따라 고농도 오존(0.12ppm 이상) 출현일수 변화를 정리하면 [표 3-8]과 같다.

[표 3-8] 서울시 전구물질 농도 저감에 따른 고농도 오존(0.12ppm 이상) 연간 출현일수 변화

NMHC 농도 저감비율 \ NOx 농도 저감비율	0%	10%	20%	30%	40%	50%
0%	**32일**	28일	33일	29일	21일	14일
10%	33일	**26일**	29일	28일	21일	16일
20%	28일	30일	**27일**	27일	22일	15일
30%	19일	18일	22일	**22일**	18일	22일
40%	14일	12일	13일	14일	**12일**	12일
50%	3일	4일	6일	5일	6일	**5일**

주 : 2013~2017년 고농도 오존 연간 출현일수는 32일임.

NOx, NMHC 농도 비율에 따라 O3 농도가 변화되며, 서울시는 전반적으로 VOCs-limited 환경에 해당한다. 고농도 O3(0.12ppm) 출현율 분석 자료에 따라 전구물질 NMHC 농도의 저감 없이 NOx의 농도를 저감하면 PM2.5 농도 수치가 감소하게 되나, 고농도 O3 출현빈도는 증가할 가능성이 있다. NMHC 농도를 동시에 저감할 경우, 고농도 O3 출현일수 저감률이 더 커진다는 것을 알 수 있다.

실증분석에서 NOx 농도만 20% 저감할 경우, 고농도 O_3 출현일수는 32일에서 33일로 3.1% 증가하고, NMHC 농도를 동시에 10%, 20%, 30% 저감하게 되면 출현일수는 29일, 27일, 22일로 각각 9.4%, 15.6%, 31.3% 정도 감소하는 것으로 분석되었다. NOx 및 NMHC 농도를 동시 저감하면 출현일수가 5일로 크게 감소한다. 즉 VOCs-limited 환경에 해당되는 서울시는 NMHC 농도 저감률이 클수록 고농도 오존 출현일수가 전반적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

3_종합정리

시민이 행복한 미래 서울은 건강도시 실현과 직결되므로, 기후환경의 변화에 따른 시민건강 피해영향을 고려하면 PM2.5, O_3에 대한 적극적인 관리가 우선되어야 한다.

최근 서울시는 '안전도시 서울플랜'에서 새로운 재난 유형으로 떠오른 PM2.5 농도 감축을 목표로 다양한 대책을 마련했다고 밝혔다. 2022년까지 18$\mu g/m^3$ 감축목표로 시민의 삶과 도시의 기본 전제인 안전을 확보하기 위해 재난 대응책을 체계적으로 마련하고 있다.

서울시 PM2.5 화학 성분비를 분석한 연구결과에서는 2차상 무기물질인 SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+이 약 59%, 1차/2차상 유기물질인 OM이 약 11%, 1차상 물질인 EC 및 Soil을 포함한 기타 성분이 약 30%인 것으로 보고하고 있다.[22] 한미 협력 국내 대기질 공동 조사(KORUS-AQ) 연구와 환경부 발표 등을 종합하면, 서울시 PM2.5의 2차 생성 비율은 직접배출 PM2.5 배출량 수준을 상회하는 것으로 추정할 수 있다.

2015년 CAPSS 배출량 기준 서울시 PM2.5 직접 배출량은 2,579톤이며, 2차 생성비율을 70%로 추정하면 6,018톤으로 전체 PM2.5 배출량은 8,597톤 정도이다. 2차 생성과 관련된 NOx는 63,197톤, VOCs는 62,916톤으로, PM2.5 농도를 감축하기 위해서는 직접배출뿐만 아니라 2차 생성과 관련한 배출량을 관리해야 한다.[23]

---

22) 서울특별시, 초미세먼지 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구, 2016.

23) 기여농도 전환율에는 외부 영향, 기상여건 등 복잡한 영향이 포함되어 있어, 연간 배출량 자료(CAPSS 배출량)에 기여농도

$$PM\ 농도 = f(PM_{직접배출},\ PM_{2차생성})$$

2차 생성과 관련된 대기오염물질 배출량 저감에 따른 대기질 개선효과는 SOx, NOx 배출량에 따라 산정된 기여농도 전환율을 활용하여 추정할 수 있다.[24] 다만, 기여농도 전환율에는 외부영향이나 기상여건 등 복합적 영향이 포함되어 불확실성이 내재되어 있다. 따라서 지속적으로 보완이 필요하다.

O_3는 NOx와 VOCs 간의 광화학 반응으로 생성된다. VOCs와 O_3의 관계, NOx와 O_3의 관계에서 오존 생성에 영향을 많이 주는 요인에 따라 VOCs-limited 환경, NOx-limited 환경으로 구분할 수 있다.

$$O_3\ 농도 = f(NOx,\ VOCs)$$

서울시는 2013~2017년 4~9월 기간 동안 평균 VOCs/NOx 비율, 0.12ppm 이상 출현한 일의 VOCs/NOx 비율 등을 살펴보면 VOCs-limited 환경에 해당한다. 따라서 고농도 O_3 대응을 위해서는 VOCs/NOx 농도 비율을 고려한 배출원 관리가 필요하다.

2차 수도권 대기환경관리 기본계획에서 제시하고 있는 최종 목표연도인 2024년 서울시 PM2.5 20$\mu g/m^3$ 목표를 변경계획에서는 중앙정부의 미세먼지(PM2.5) 관리 특별대책에 따라 2021년 조기달성을 목표로 하고 있다. 목표관리 수준을 달성하기 위해 서울시는 비산먼지를 포함한 PM2.5는 1,009톤, NOx는 32,496톤, VOCs는 48,363톤을 저감해야 한다. 최근에 발표한 서울시의 2022년 PM2.5 목표농도는 18$\mu g/m^3$이다.

시민 건강 보호와 목표농도 달성을 위해서는 PM2.5와 O_3을 개별 관리하는 현행 관리방식으로는 대기환경 개선에 한계가 있으므로, 2차 오염물질을 생성하는 원인물질의 관리가 함께 요구된다. NOx 배출량을 저감하면 PM2.5 농도는 저감될 수 있다. 그런데 O_3 농도는 VOCs와 NOx 간 광화학반응에 따라 생성되기 때문에 감소될 수 있으나 VOCs/NOx

---

전환율을 적용하여 1차 생성과 2차 생성 배출량을 직접적으로 추정하는 데 한계가 있음. 다만 서울시, 환경부, KORUS-AQ의 2차 생성 비율을 종합적으로 판단하여 2015년 서울시 PM2.5 CAPSS 배출량을 바탕으로 2차 생성비율 70%를 적용하여 전체 배출량을 추정함.

24) SO_2 배출량에 따른 $(NH_4)_2SO_4$ 변환율 54.986(($\mu g/m^3$)/(톤/년)×10^4), NO_X 배출량에 따른 NH_4NO_3 변환율 2.853(($\mu g/m^3$)/(톤/년)×10_4)

농도비에 따라 오히려 증가될 가능성도 있음에 유의하여야 한다. 따라서 PM2.5, O_3는 '오염원 직접 배출과 2차 생성' 등을 고려해 통합관리 전략이 필요하다.

서울연구원 The Seoul Institute

04

해외도시의 대기환경 통합관리 사례분석

1_대기환경 통합관리 사례

2_시사점

04| 해외도시의 대기환경 통합관리 사례분석

1950년대를 전후해 인류 역사상 가장 심각한 대기오염 사건이 영국의 런던, 미국 로스앤젤레스(LA) 지역에서 발생하였다. 이후 런던과 LA는 수십 년간의 노력을 통해 '스모그 도시'라는 이미지에서 벗어났다. 런던은 연평균 PM2.5 농도를 20㎍/㎥, LA는 15㎍/㎥ 이하로 낮추었다. 선진 도시들은 (초)미세먼지와 스모그(smog)의 시민건강 위해성을 줄이고자 모든 노력을 집중함으로써 대기환경 고민을 해결하기에 이르렀다.

시행착오와 기회비용을 줄일 수 있는 선진사례에 대한 학습효과(Social learning effect)가 우리에게 소중한 의미를 준다. PM2.5와 O_3에 대한 시민의 우려에 대응하는 차원에서 환경기준, 모니터링, 배출원 기여도 및 생성 메커니즘 그리고 관리대책 등을 중심으로 학습효과의 정리가 필요하다.

서울연구원 The Seoul Institute

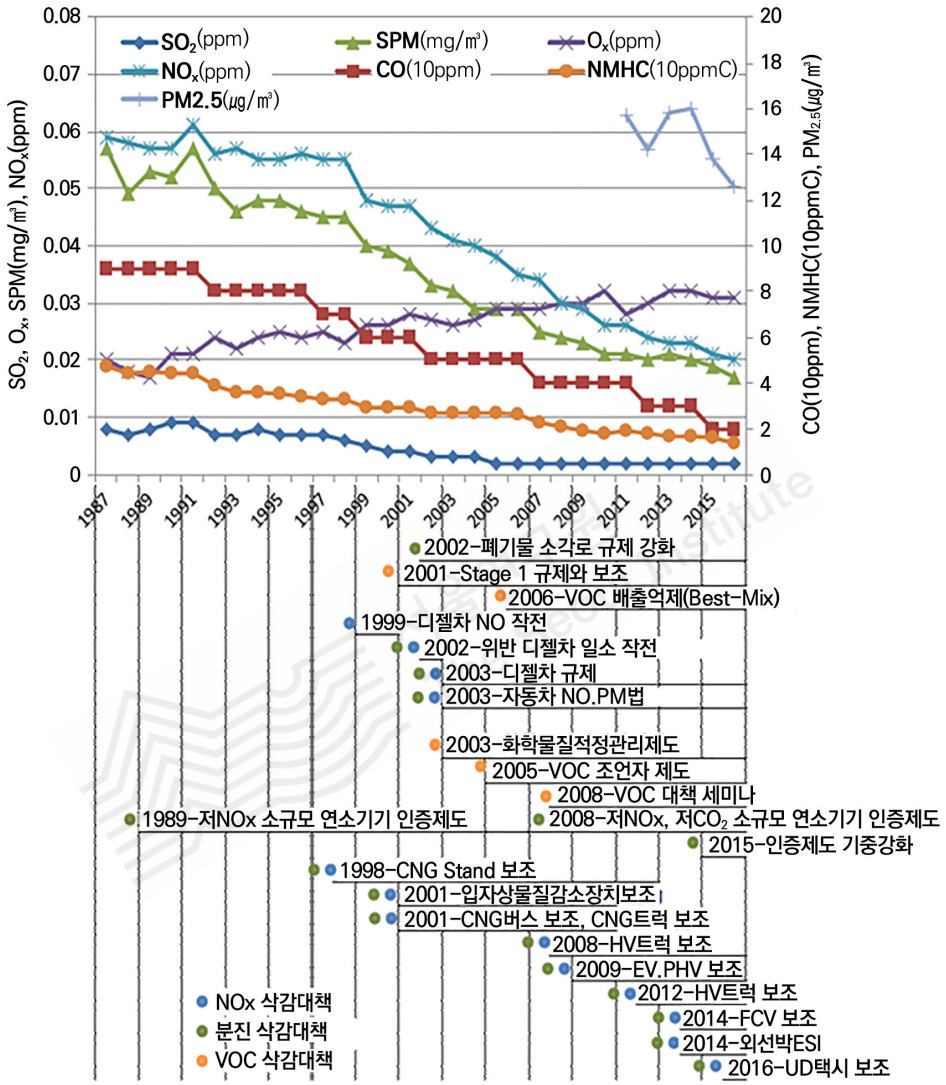
1_대기환경 통합관리 사례

1) 일본(도쿄도)

도쿄도는 공장, 사업장의 보일러에 대한 철저한 관리와 각종 고정발생원 대책으로 대기오염이 크게 개선되었다. 그러나 자동차 교통량의 증대와 이로 인한 경유차의 배출가스로 인해 NO_2와 PM의 환경기준 달성률은 낮은 상황이었다. 2003년 10월부터 경유차 주행규제를 실시한 이후 자동차 배출가스 측정국의 PM 농도가 대책 시행 전보다 크게 개선되었다. 2016년 기준으로 NO_2, SPM, SO_2, CO는 모든 측정국에서 기준을 달성하고 있다. 하지만 PM2.5는 47개 측정소 가운데 1개소가 기준을 달성하지 못했으며, Ox는 모든 측정소에서 기준을 초과하였다.

도쿄도는 PM2.5의 환경기준이 제정된 2009년 이전인 2001년부터 PM2.5를 측정해 왔다. 도쿄도의 PM2.5 농도는 보일러, 폐기물 소각 등 고정발생원 대책이나 경유차 대책 등의 효과로 2001년부터 10년 동안 약 55% 저감한 것으로 나타났다. 2016년 PM2.5의 환경

기준 달성률은 98% 수준으로, 환경기준을 설정한 이후 최고의 달성률을 기록했다. 하지만 PM2.5의 환경기준 달성률의 변동이 급격하여, 이후로도 추이에 주목하고 있다.

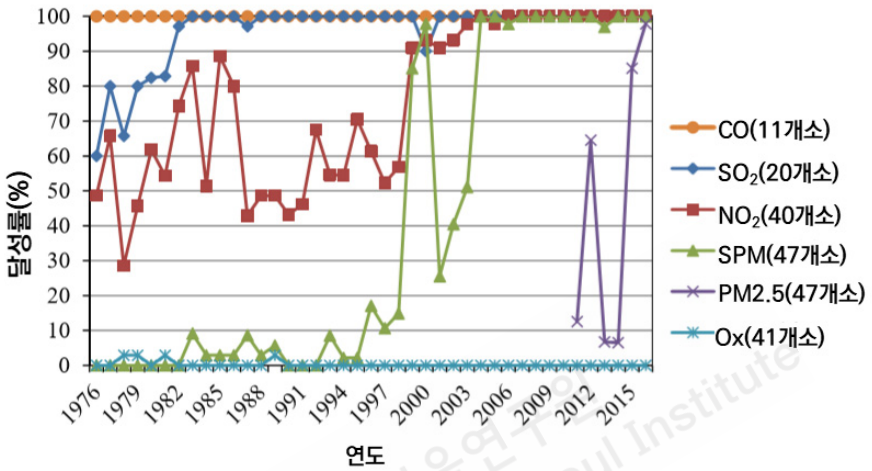


자료 : 대기중미소입자물질검토회, 대기중 미소입자물질 검토회 중간정리(2017.7)

[그림 4-1] 도쿄도의 대기오염물질 농도 변화와 주요 대책

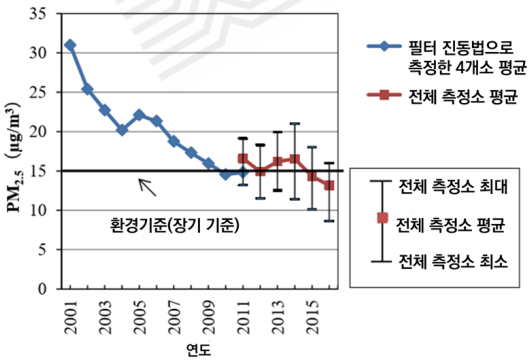
그리고 광화학 스모그 주의보 발령 기준(0.12ppm/hr) 초과일은 2013~2016년의 3년 평균값이 2001~2003년과 비교해 약 47% 감소했으나 환경기준 달성률은 0%이다. 이와 같이 최종 목표인 환경기준 달성이 어려운 상황에 있어 '2030년까지 모든 측정국에서 Ox

농도를 0.07ppm 이하로 한다(연간 4번째로 높은 일최고 8시간 값의 3년 평균치)'라는 중간목표를 수립하였다. 2014~2016년 중간목표를 달성한 일반환경 대기측정국은 없었다. 이와 같이 PM2.5와 Ox는 개선되고 있지만, PM2.5는 환경기준, Ox는 환경기준 및 중간 정책목표를 달성하지 못하고 있어 문제가 되고 있다.



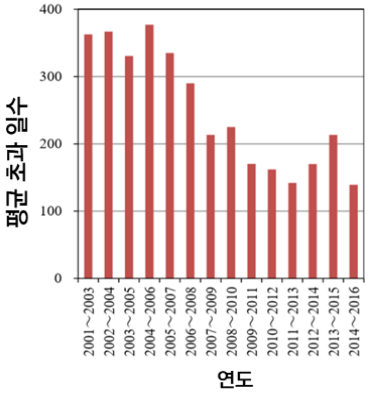
주 : ( )는 2016년 기준 측정소 개수임.
자료 : 대기중미소입자물질검토회(2017.7)

[그림 4-2] 도쿄도 대기환경측정국의 환경기준 달성률 변화



자료 : 대기중미소입자물질검토회(2017.7)

[그림 4-3] 도쿄도 PM2.5 연평균 농도 변화

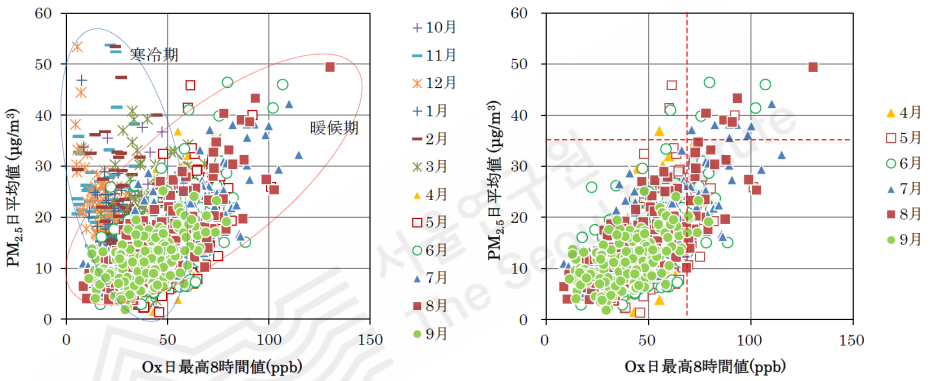


자료 : 대기중미소입자물질검토회(2017.7)

[그림 4-4] 도쿄도 오존 농도 0.12ppm 초과일수 변화

2011~2016년 일반환경 대기측정소의 PM2.5 평균과 Ox 일 최고 8시간 값의 관계를 살펴보면, 온난기(4~9월)와 한랭기(10~3월)에 다른 변화를 보인다. 따뜻한 시기의 PM2.5 일평균과 Ox 일 최고 8시간 농도는 (+)의 상관관계가 보이고 있어, Ox 농도가 높은 날에는 PM2.5 농도도 높아지기 쉽다는 것을 알 수 있다. 또 9월에는 PM2.5, Ox 모두 농도가 낮은 경향을 보인다.

PM2.5, Ox는 광화학 반응에 의해 생성되기 때문에 일조 시간, 일사량의 영향을 받는다. 9월의 일조시간, 일사량은 온난기(4~9월)의 다른 달보다도 적다. 이러한 영향으로 9월에는 광화학 반응이 촉진되기 어려워 PM2.5, Ox 농도가 모두 낮은 것으로 판단된다.



(2011~2016년 평균) (2011~2016년 온난기(4~9월) 추출)

자료 : 대기중미소입자물질검토회(2017.7)

[그림 4-5] 도쿄도 PM2.5 일평균과 Ox 일 최고 8시간 농도의 관계

2002년 1월에 도쿄도 환경기본계획에서 '2010년까지 SPM 환경기준, 2005년까지 NO_2 환경기준을 모든 측정소에서 달성'한다는 목표를 수립하였다. 이 목표를 세운 2001년에 SPM 환경기준 달성률은 일반환경 대기측정소 26%, 자동차 배출가스 측정소 0%였다. 그래서 공장 등의 분진규제와 함께 2003년부터 경유차 배출가스 규제를 실시한 결과, SPM, NO_2 농도는 감소하였다. 그러나 2005년 자동차 배출가스 측정소의 NO_2 환경기준 달성률은 56%에 그치고 있었다.

그래서 2008년 3월 환경기본계획을 개정하여 2010년까지 SPM, NO_2 환경기준을 모든 측

정국에서 달성한다는 목표를 수립하였다. 이후 2010년 SPM 환경기준 달성률은 일반환경 대기측정소, 자동차 배출가스 측정소 모두 100%가 되어 목표를 달성하였다. 한편 NO_2 환경기준 달성률은 일반환경 측정소 100%, 자동차 배출가스 측정소 91%였다. 2014년 이후 기준을 달성하지 못한 자동차 배출가스 측정소는 1개소로, 목표는 이미 달성한 것으로 보고 있다.

PM2.5와 함께 Ox는 2008년 3월 환경기본계획에서 2016년까지 Ox 주의보 발령일수를 0일로 한다는 목표를 수립하였다. 이제까지의 NOx, VOCs 대책 효과를 통해 Ox 주의보 발령일수는 감소하고 있지만, 2016년 발령일수는 5일로 목표를 달성하지 못하였다. 그래서 2016년 3월에 달성연도를 2020년으로 수정하고, 2024년까지 PM2.5 환경기준을 모든 측정소에서 달성하며, 2030년까지 Ox 농도를 모든 측정소에서 0.07ppm 이하(연간 4번째로 높은 일최고 8시간 값의 3년 평균)로 하는 새로운 정책목표를 설정하였다. 또 이러한 목표는 2016년 12월에 수립한 「도민 1등으로 만들기 '새로운 도쿄' - 2020년을 향한 실행계획」에도 포함시켰다.

[표 4-1] 도쿄도 대기환경 정책목표 : 광화학 스모그 및 초미세먼지(PM2.5)

정책목표	달성연도	목표값
광화학 스모그 주의보[1] 발령일수	2020년	0
광화학 스모그 농도	2030년	모든 측정국에서 0.07ppm 이하(8시간 값)[2]
PM2.5 환경기준	2020년	장기기준 달성
	2024년	달성

주 1) 대기오염방지법에 근거해 Ox 농도 1시간 값이 0.12ppm 이상일 때, 기상조건 상황으로 판단할 경우 현재 상황이 지속될 것으로 예측될 경우 지사가 발령함.
2) 연간 4번째 높은 일 최고 8시간 값의 3년 평균
3) 1년 평균값이 15㎍/㎥ 이하(장기기준)이며, 1일 평균값은 35㎍/㎥(단기 기준)

자료 : 대기중미소입자물질검토회(2017.7)

고정발생원 대책으로는 대기오염방지법 및 도민의 건강과 안전을 확보하는 환경에 관한 조례에 기초해 공장, 사업장에 대한 분진 배출 규제를 실시하고 있다. 도쿄도는 1989년부터 「저NOx 소규모 연소기기 인증제도」를 운영하여, 대기오염방지법의 규제대상보다 규모가 작은 업무용 소규모 연소기기(주로 보일러)를 대상으로 인증기기의 보급을 추진해 왔다. 2008년부터 평가 기준에 고효율 기기를 추가한 「저NOx·저CO_2 소규모 연소기기 인증

제도」로 변경하여 NOx 배출농도와 에너지 효율을 함께 관리하고 있다.

Ox 원인물질의 하나인 탄화수소물질의 배출량 저감을 위해 환경확보조례에 근거하여 탄화수소물질을 저장하는 휘발유 탱크 저장시설에 대한 배출방지설비(Stage Ⅰ) 설치를 의무화하고 있다. Stage Ⅰ은 도쿄도뿐만 아니라 인근 자치단체도 함께 의무화하고 있다.

VOC 대책으로 법적 규제와 자주적인 대처를 조합한 시책(Best Mix)을 실시하고 있다. 자주적 대처로, 효과적인 VOC 배출을 억제하기 위한 「VOC 대책 가이드」 작성, 사업소별 상황에 따라 관련 대책을 조언하는 「조언자 파견제도」 등 중소사업자에 대한 기술지원을 실시하고 있다. 2017년부터 업계 단체, 사업자의 자주적 대처를 지원하는 「민간과 제휴한 VOC 배출삭감 대책 추진사업」을 시행하고, 업계의 배출특성에 따라 효과적인 VOC 대책 보급·확대를 추진하고 있다. 또 「특정 화학물질의 배출량 파악 및 관리 개선 촉진에 관한 법률」에 기초해 PRTR 제도를, 환경확보조례에 기초해 화학물질 적정 관리제도를 시행한다. 이를 통해 사업자가 화학물질의 배출량을 파악하여 적정 관리하고, 화학물질의 배출량 저감, 건강피해의 사전 예방을 도모하고 있다.

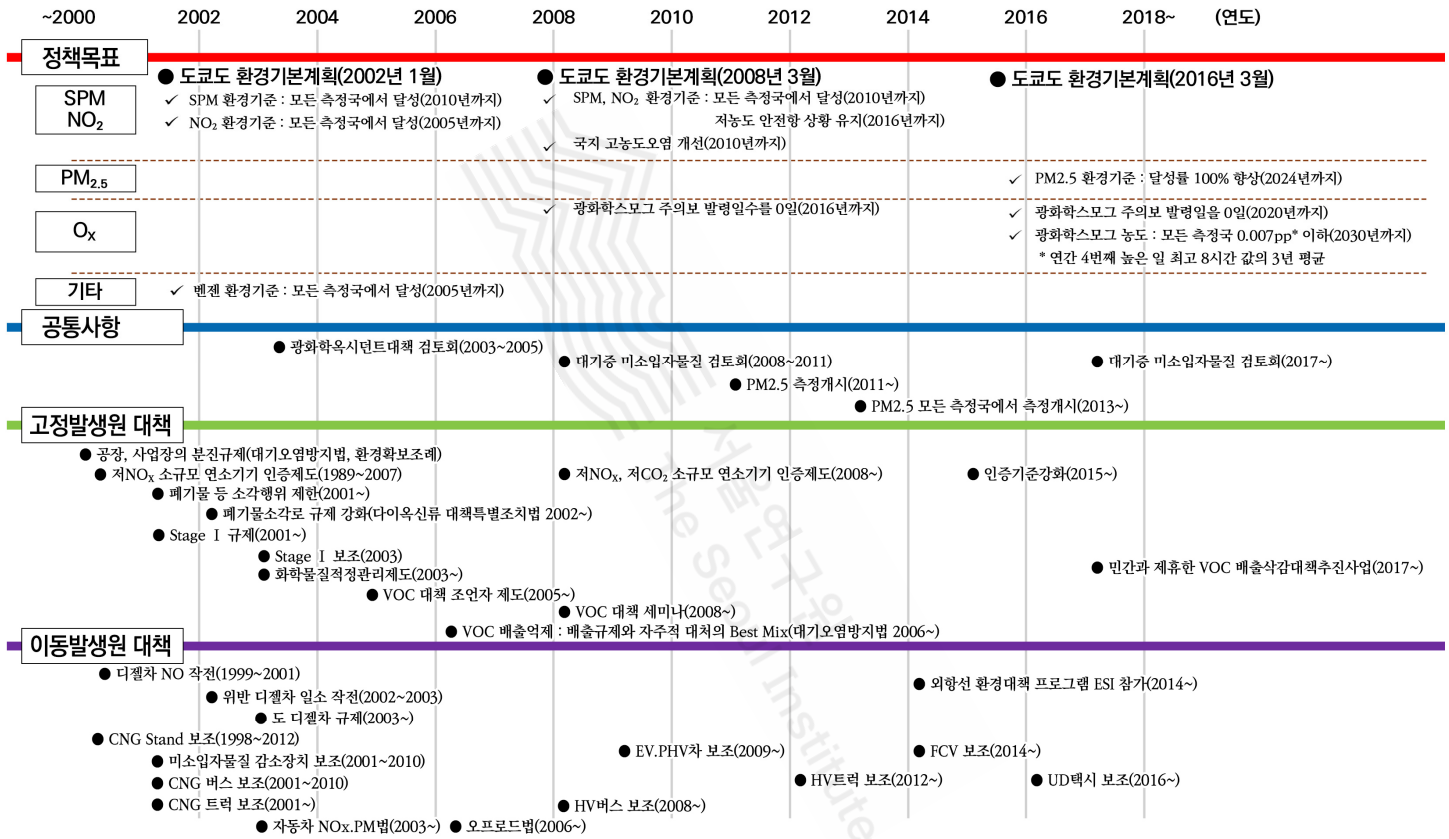
이동발생원 대책으로는 환경확보조례에 기초해 1도 3현과 제휴해 이용 중인 모든 차량을 포함하여 경유차 규제를 추진하고 있다. 또 자동차의 환경부하를 저감하기 위해 저공해·저연비차의 보급을 추진해 왔고, 대기환경 개선과 자동차의 CO_2 배출량 저감을 동시에 추진하기 위해 연료전지 자동차나 전기자동차 등 차세대 자동차 보급 지원책으로 중소기업자에 융자보조를 실시하여 왔다.

PM2.5 평균농도는 최근 장기기준 15㎍/㎥까지 도달하여, 2016년 일반환경 대기측정소의 연평균은 12.2㎍/㎥였다. 환경기준 달성률은 매년 변동이 있어, 도쿄도는 안정적인 환경기준 달성을 위해 연평균 농도를 보다 저감할 필요가 있다고 판단하고 있다. 그리고 Ox의 일반환경 대기측정소의 환경기준 달성률은 1990년 이후 0% 상황이 지속되고 있다. 정책목표(0.07ppm)도 달성하지 못했기 때문에 환경기준이나 정책목표 달성을 위해서는 대기환경 정책의 개선이 요구되고 있다.

2001년 이후 도쿄도는 PM2.5와 Ox의 2차 생성 원인물질인 NOx, SOx, VOC, 암모니아 저감을 위해 통합관리에 대한 논의를 진행하고 있다.

또 광역적 대책으로 2012년부터 인근 자치단체와 제휴하여 여름철 VOC 배출저감이나 겨울철 NOx 저감대책을 추진해 나간다. PM2.5, Ox에 대한 정보공유의 장으로 2008년부터 「관동지방 대기환경 대책 추진 연락회 미소입자물질 조사회의」를, 2014년부터 「2차 생성 대기오염물질에 관한 연락회」를 설치·운영하고 있다. 보다 효과적인 PM2.5, Ox 대책을 추진하기 위해 시뮬레이션을 통해 발생원 기여율, 대책 영향 평가 등을 지속적으로 검토하고 있다.

서울연구원 The Seoul Institute



자료 : 대기중미소입자물질검토회(2017.7)

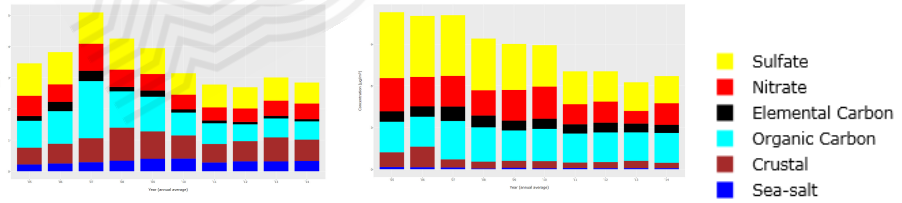
[그림 4-6] 도쿄도 대기환경 정책목표와 주요 대책

2) 미국

미국은 1970년 개정된 청정대기법에 따라 EPA에서 연방 대기질기준(National Ambient Air Quality Standards)을 제정하였으며, 대기질 기준을 달성하고 유지하기 위한 수단으로 대기질 관리 계획(Air Quality Management Plan; AQMP)을 도입하게 되었다. 이에 따라 각 주는 연방 대기질기준을 초과하는 경우 배출량 인벤토리, 대기질 모델링, 배출량 저감 계획을 담은 주 이행계획(State Implementation Plan)을 제출하여 EPA의 승인을 받아야 한다.

오존을 포함한 일산화탄소, 입자상물질, 이산화질소, 이산화황, 납 등 6개 기준오염물질의 배출 제한에 초점을 두고, 각 지역에 대해 기준오염물질마다 기준 달성여부를 판단하여 '달성', '미달성' 지역으로 구분하고 있다. 특히 미달성 지역의 경우, 오존은 5단계(marginal, moderate, serious, severe, extreme), 입자상 물질은 2단계(Reasonably Available Control Measure, Best Available Control Measure)로 나누어 각각 다른 수준의 대책을 시행하도록 하고 있다.

그리고 대기오염관리의 효과와 건강상의 영향 및 생태계와 기후에 미치는 영향을 정량화하는 데 기초정보가 될 수 있기 때문에 지역별 PM2.5 구성성분 변화를 평가하고 있다.



Sanata Barbara, California　　New Castlem, Delaware

자료 : https://gispub.epa.gov/air/trendsreport/2016/

[그림 4-7] 미국 지역별 PM2.5 구성성분 농도 변화

2004년 National Research Council에서는 미국의 대기오염 관리 정책방향을 개별 오염물질별 관리에서 위해성에 기반한 오염물질 통합관리로 전환할 것을 EPA에 권장하였다.[25]

---

25) National Research Council, 2004, Air Quality Management in the United States, National Academies Press, Washington DC.

위해성 기반 통합관리의 타당성을 평가하기 위해 EPA는 대기질 모델링을 이용하여 미국 디트로이트시에 기존 개별 오염물질별 관리정책과 위해성 기반 통합관리를 2020년에 적용했을 경우 예상되는 대기질 결과를 비교 분석하는 사례연구를 수행하였다. 제시된 통합관리 전략에서는 PM2.5, O_3, HAPs를 통합관리 대상으로 선정하고, 위해성을 최소화하기 위해 인구밀도가 높은 지역의 오염물질 농도 관리에 초점을 맞추어 배출 저감 방안을 마련하였다. 기존의 개별 오염물질 관리방식보다 위해성에 기반을 둔 통합관리 전략을 시행했을 경우 디트로이트 지역의 PM2.5 및 O_3 농도 개선에 더 효과적이고, 이를 통한 총 위해성 저감 효과는 두 배 정도이며, 경제성도 더 높은 것으로 분석되었다.[26)]

대기질 지수(Air Quality Index ; AQI)는 건강 민감계층과 일반계층에 대하여 SO_2, NO_2, CO, O_3, PM10, PM2.5 등 6개 대상물질의 일평균 농도와 관련된 대기오염정도를 지수화하여 6단계로 구분하고 있다.

[표 4-2] 미국의 AQI 단계

Good	Moderate	Unhealthy for Sensitive Groups	Unhealthy	Very Unhealthy	Hazardous
0~50	51~100	101~150	151~200	201~300	301~

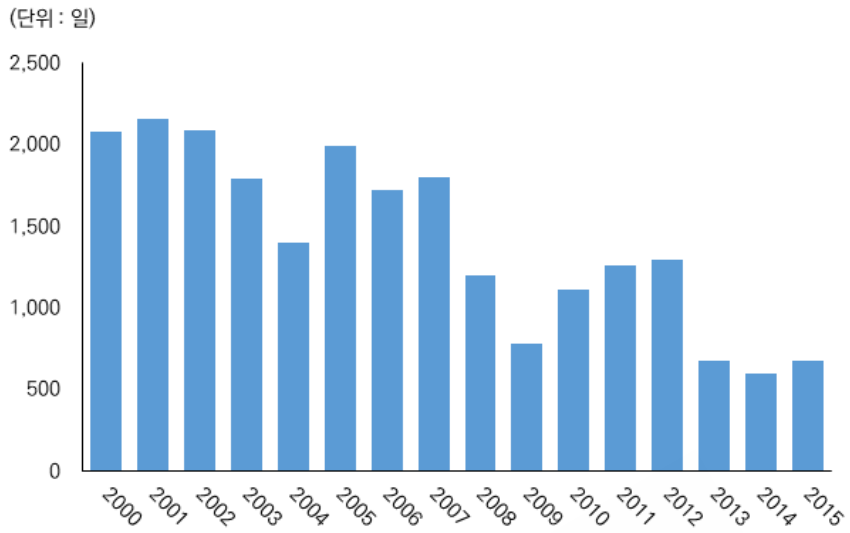
100을 초과하는 경우 건강에 영향을 미치는 기준이 되고 있으며, 노약자 및 심폐질환자의 경우 장시간 야외활동을 자제할 것을 권고하고 있다. 미국의 주요 35개 도시에서 O_3와 PM2.5에 대한 AQI 지수를 통합하여 100을 초과한 Unhealthy for Sensitivities Groups 일수는 대기질 개선과 함께 감소하고 있다([그림 4-8] 참조).

35개 도시별로 살펴보면, O_3, PM2.5 통합 AQI 100 초과일수는 전체적으로 감소하고 있으며, 최근 민감계층 및 심폐질환자에게 심각한 영향을 미치는 단계(Very Unhealty)가 발생한 일수는 거의 없는 것으로 나타나고 있다.[27)]

---

26) Wesson, K., Fann, N., Morris, M., Fox, T. and Hubbill, B., 2010, A Muliti-pollutant, risk-based approach to air quality management : Case study of Detroit, Atmospheric Pollution Research 1.

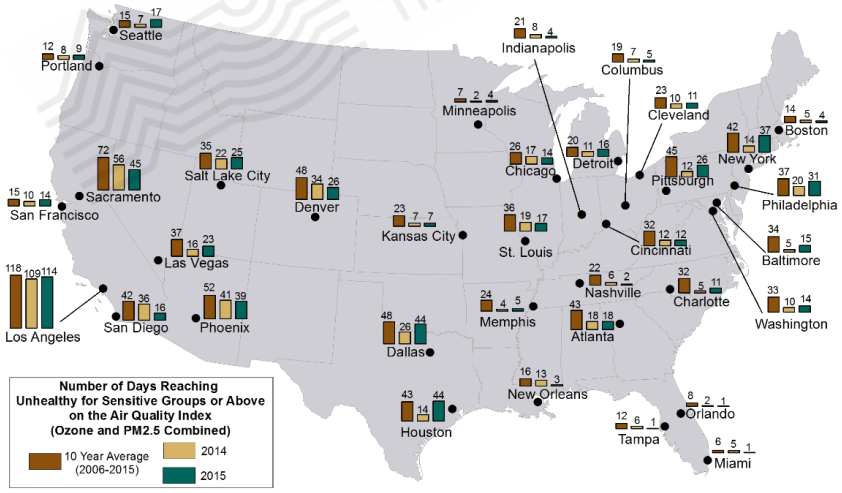
27) EPA 홈페이지에서 35개 도시의 단계별 초과일수에 대한 자료를 상세히 검색할 수 있음. (https://gispub.epa.gov/OAR_OAQPS/SeasonReview2015/index.html?appid=456e646cd77f427fbce17c12fb2fa16b)



주 : O_3, PM2.5 AQI를 통합하여 35개 도시들이 Unhealthy for Sensitive Group 단계에 도달한 날의 총합계

자료 : https://gispub.epa.gov/air/trendsreport/2016/

[그림 4-8] 미국 35개 도시의 O_3, PM2.5 통합 AQI 100을 초과한 날의 총합계 변화



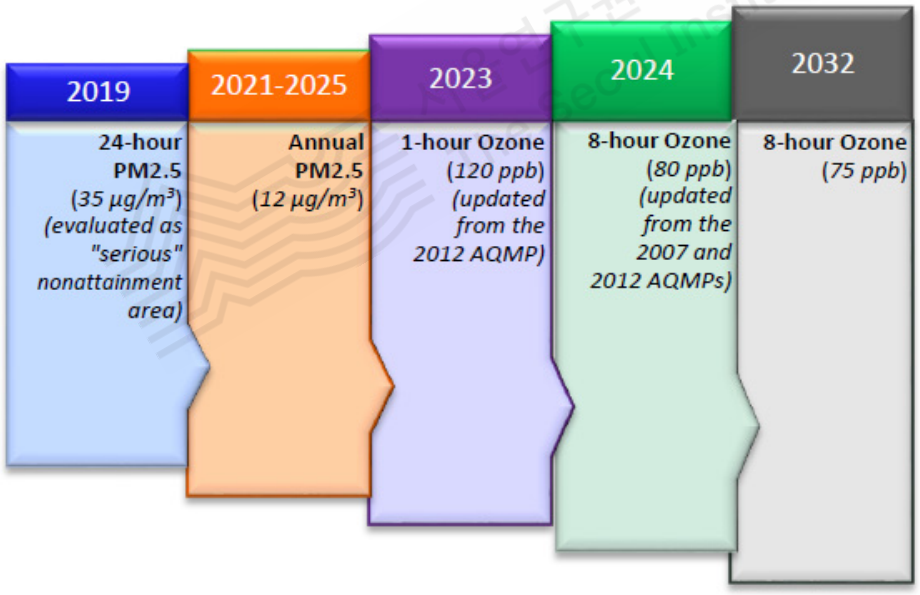
자료 : https://gispub.epa.gov/air/trendsreport/2016/

[그림 4-9] 미국 35개 도시의 O_3, PM2.5 통합 AQI 100을 초과한 날의 총합계

(1) SCAQMD(South Coast Air Quality Management District)[28]

SCAQMD의 대기질 수준은 미국 내 가장 열악한 지역 가운데 하나이다. PM2.5와 O_3이 국가 대기환경기준을 충족시키지 못해 미달성 지역으로 구분되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 오존 생성에 대한 광화학 과정을 파악하고, 제어 전략의 효과성, 배출 인벤토리의 정확성 등을 검토하는 등 광범위한 분석을 실시하고 있다.

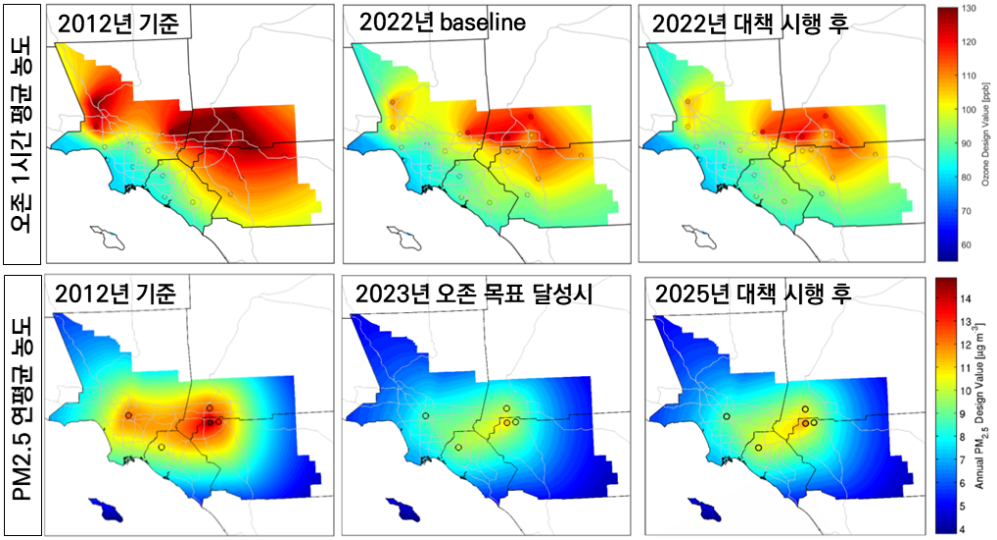
2016년 AQMP에서는 2019년까지 24시간 PM2.5 기준 35㎍/㎥, 2021~2025년까지 연평균 PM2.5 기준 12㎍/㎥, 오존에 대해서는 1시간 기준으로 2023년까지 120ppb, 8시간 기준으로 2024년까지 80ppb, 2032년까지 75ppb 이하의 달성 목표를 설정하였다. 또한 각종 제어 전략과 연방, 주, 지방정부, 공공기관, 기업, 대중과의 협력의 중요성에 주목하고, 향후 대기질에 영향을 미치는 에너지, 수송, 기반시설, 기타 계획과의 통합계획을 수립하고 있다.



자료 : South Coast AQMD, Final 2016 Air Quality Management Plan, 2017.4

[그림 4-10] 2016 AQMP에 제시된 국가 대기질 기준 달성 기한

28) 서울시, 초미세먼지(PM-2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구(2016)의 해외 초미세먼지 관리 및 정책사례에서 요약 정리함.



자료 : South Coast AQMD, Final 2016 Air Quality Management Plan, 2017.4

[그림 4-11] SCAQMD의 대기질 모델링 결과

그동안 AQMP로 상당한 배출량 감소를 달성하였지만, 시민의 건강을 최대한 보호하고 국가 대기질 기준(National Ambient Air Quality Standards; NAAQS)을 달성하지 못할 경우 직면할 수 있는 경제적 제재를 피하기 위해 2016년 AQMP는 달성기한을 최대한 앞당겼다. AQMP의 목표 배출량은 NAAQS를 달성할 수 있는 수준으로, 오존 목표를 달성하기 위해서는 2012년 NOx 배출량 580톤/일, 2023년 300톤/일, 2031년 250톤/일로 저감해야 한다. PM2.5, O_3의 목표달성을 위해 NOx 배출량을 저감해야 하는데, 이를 위해 전체 NOx 배출의 88% 비중을 차지하고 있는 이동오염원에 대한 집중 관리대책을 수립하고 있다.

① 오존관리 전략

2024년, 2032년까지 연방 8시간 오존 기준 달성을 위해 고정·이동 오염원의 NOx 관리전략, VOCs 배출량 저감방안 등을 제시하고 있다.

VOCs 관리	• PM 전구 가스물질인 VOCs와 암모니아 발생 제어를 위해 녹색폐기물, 음식폐기물의 혐기성 소화 기술 적용 • 원격 센서 기술을 적용하여 실시간 VOCs 누출탐지 및 보수 시스템 적용 • 코팅, 솔벤트, 접착제, 밀폐제 등의 VOCs 허용기준 강화 • 고정오염원에서 청정, 저VOCs 배출 기술 이용을 위한 인센티브 프로그램 운영
NOx 관리	• 보일러, 엔진, 터빈, 마이크로 터빈, 분산발전, 설비전원, 난방과 스팀 생산을 위한 전기 생산 보일러를 포함한 노후된 고정오염원을 저NOx 배출, 전력화, 배터리 형식 저장, CHP 연료전지 등 제로배출 기술이 적용된 설비로 교체 • 상업·가정에서 노후된 기존의 보일러, 온수기, 난방기, 기타 가스 또는 LPG 제품을 제로 NOx 배출 제품으로 교체하기 위한 규제와 인센티브 • 현행 규제 제외 대상인 유기액체 저장소, 탱크팜, 오일 및 가스 생산, 매립지와 폐기처리 시설 등의 비정제 배출원(non-refienry source)에 대해 NOx 배출, VOCs 열산화 BACT (최적방지기술) 기준 적용 • 식당과 요리 오븐을 이용하는 배달 서비스 시설에 저NOx 버너 이용과 설치 권장 및 지원 • RECLAIM 평가를 통한 NOx 배출 저감 • 공동이익(co-benefit) 활용 : GHG 프로그램, 기존의 가정·상업 건물 에너지 효율 방안, 쿨루프(cool roof) • 노후 설비를 고효율 기술로의 업그레이드, 재생가능 에너지 이용 등 가정에 에너지 사용 저감기술 적용을 장려하기 위한 인센티브 강화 • 소비자, 기업체의 인식 전환을 위한 교육, 강연 전개 • 영업용 항만, 철도 조차장, 영업용 공항, 물류창고센터에서의 배출량 저감 • 0 또는 0에 가까운 차량 전환 가속 • 노후 경량, 중량 자동차 조기 폐차 • 건설/공장 등에 대한 SOON 규정 확대

② PM2.5 관리전략

캘리포니아에서는 자동차, 트럭, 비도로 장비들이 O_3, PM2.5, 온실가스 배출 형성에 가장 큰 기여를 하고 있다. 이동오염원 배출량은 질소산화물 배출량의 80%, 경유 미세먼지의 90%, 온실가스의 약 50% 정도를 기여하고 있는 것으로 나타났다. 이에 2023년, 2031년까지 오존 목표 달성, 1990년 기준 대비 40% 온실가스 감축, 독성 대기오염물질 노출에 의한 건강영향 최소화, 2030년까지 석유 사용량 50% 감소, 에너지 효율 증가, 2030년까지 재생가능 에너지원에서 전체 전기의 50% 생산 등의 목표 달성을 위해 다양한 이동오염원 전략을 수립하여 추진하고 있다.

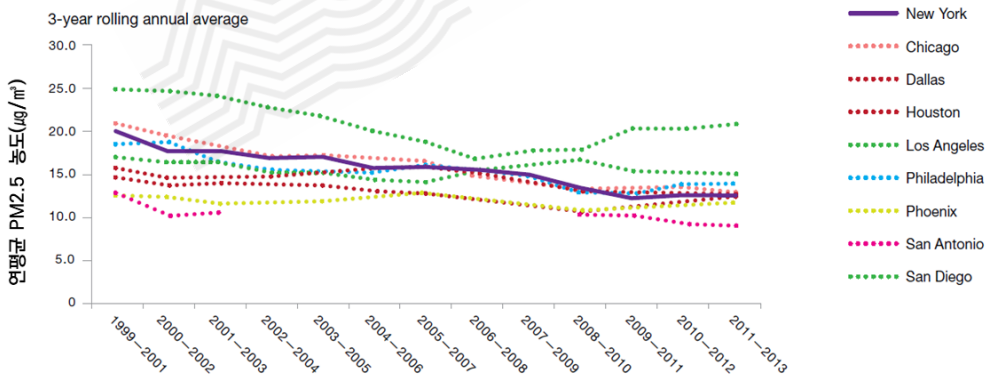
특히 제로 배출에 대한 규제 사항들, 제로 배출 교통수단의 투입, 청정연료 사용, 노후 교통수단의 조기 폐차, 향후 이동오염원에 대한 발전된 제어기술의 조사·개발을 포함하고 있다.

이 외에도 직접 PM2.5로 배출되는 상업 조리, 숯불 그릴에 다양한 방지시설을 설치하고, 최신의 편류제거장치 기술을 적용한 산업 냉각 타워를 도입하는 한편, 포장도로의 비산먼지를 저감하기 위해 지속적인 도로 청소, 휠세척 시스템 등을 적용하였다.

그리고 PM 전구물질인 암모니아 저감을 위해 거름 관리시스템을 도입하는 한편 선택적 촉매환원(SCR), 비선택적 촉매 환원(NSCR) 기술 등을 적용하여 NOx를 관리함으로써 암모니아 배출량의 감소를 도모하였다. 또한 연마가공의 허용기준을 강화하여 연마 사업체, 농업의 노천소각, 가정 목재 벽난로 및 스토브의 관리 강화 등 다양한 대책들을 추진하고 있다.

(2) 뉴욕

뉴욕의 대기질은 꾸준히 향상되어 왔다. 2008~2013년 사이 PM2.5 농도가 25% 감소한 대부분의 미국 대도시보다 더 빠르게 감소하여 2008~2010년에는 대기질 순위 7위에서 2011~2013년에는 4위로 향상되었다. 이러한 개선에도 불구하고 PM2.5는 매년 2,000명의 조기사망과 6,000명의 응급실 방문과 입원에 기여하고 있는 것으로 분석되었다. 오존은 400명의 조기사망, 5,900명의 호흡기 관련 환자들에게 영향을 미치고 있다.



자료 : NYC, One New York The Plan for a Strong and Just City, 2015

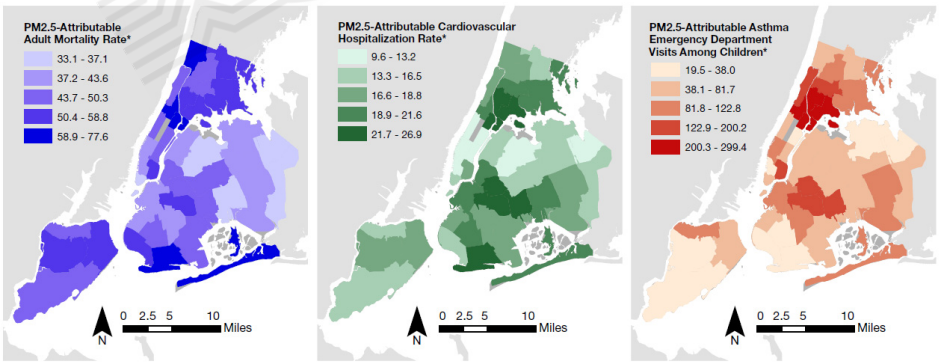
[그림 4-12] 뉴욕의 PM2.5 농도 변화

2030년까지 뉴욕시를 미국에서 가장 깨끗한 도시로 만들기 위해 2013년 기준 PM2.5는 20%, SO_2는 50% 감축 목표를 수립하고, 배출량 감축을 위해 다양한 정책을 시행하고 있다.

PM2.5 배출원별 기여도를 살펴보면, 건물 난방 49%, 도로이동 24%, 비도로 이동 19%, 전력 발전 7% 정도이다. SO_2는 건물 난방 61%, 자동차 5%, 비도로 이동 14%, 전력 발전 17%, 기타 3% 수준이다.

상업용 숯불구이, 나무 보일러, 냉동 트럭, 이동 푸드트럭 같이 현재 규제받지 않는 배출원의 PM2.5 기여율은 약 14%로, 이러한 배출원 관리를 위해 DEP 대기오염 관리 조례를 최근에 개정하였다. 상업용 숯불구이 관리는 현재 미규제 대상 배출원의 비용 효율이 높은 관리방안으로 85% 배출량 저감을 가능하게 하여 300명의 조기사망, 500명의 응급실 방문과 입원을 피할 수 있게 한다. 그리고 조례는 이동 푸드트럭과 냉동트럭의 보조 동력 장치(APUs)에 대해 등록비를 면제해주고, APUs가 없는 차량에 대한 엄격한 공회전 관리를 통해 청정 기술을 사용하도록 규정하고 있다.

뉴욕시 보건정신위생국(DOHMH)은 2008년 12월부터 거리 지상레벨에서 대기관측을 통해 대기오염물질 수준을 모니터링하고 있다. 이러한 모니터링은 정책을 구상하는 데 기초적인 자료를 제공하고 있다. 그리고 환경 건강 데이터 포털을 구축하여 지역의 지속가능성 지표와 통합함으로써, 공립학교와 지역 시민단체에서 지속가능성과 건강에 대한 교육 자료로 활용하도록 할 계획이다. 이러한 데이터들은 향후 대기오염 Hot-spot과 지역 배출원에 대한 관리방안을 마련하는 데 유용한 자료를 제공할 수 있다.



자료 : NYC, One New York The Plan for a Strong and Just City, 2015

[그림 4-13] 뉴욕의 PM2.5에 의한 조기사망과 사망률

뉴욕시는 건물 난방 기여율이 PM2.5의 49%를 차지하고 있어, 가정의 기름 보일러 교체를 강화하고 있다. 2012년 초 대기오염물질을 가장 많이 배출하는 중유를 사용하는 #6 보일러가 5,300대 정도 사용되고 있었다. 이에 뉴욕시는 2015년 7월까지 #6 보일러 사용을 더 이상 허가하지 않고 가스, #2 또는 #4 보일러로 교체하도록 하였다. 이러한 노력의 결과로 #6 보일러의 90% 정도가 교체되었다. 그럼에도 수천 대의 #4 보일러가 사용되고 있어, 2030년까지 #2 또는 가스 보일러로 교체할 계획이다. 이를 통해 매년 80명의 조기 사망, 200명의 응급실 방문과 입원 환자수를 줄일 수 있을 것으로 분석되고 있다. GHG 배출량과 대기오염물질을 동시에 감소시키고, 시민의 건강을 보호하기 위한 '80×50' 목표 아래 기술 및 재정 지원, 인센티브를 제공하는 교체 지원프로그램을 운영하여 #4 보일러 교체를 가속시켜 나갈 계획이다.

또 다른 정책방안은 도로이동오염원의 배출량 감소이다. 2017년까지 노후 경유차의 90%를 2007년 배출 기준 또는 이상의 기준을 만족시키는 자동차로 교체하였으며, 나머지 10%도 교체할 예정이다. 2017년까지 현재 운영 중인 800대의 전기차는 1,000대, 203개소의 전기충전소는 250개소로 확충할 계획이다. 2016년에는 고속 충전소와 최소 1개 이상은 태양광으로 충전이 가능한 충전소를 도입할 계획이다.

Hunts Point Clean Trucks Program(HPCTP)은 경유차 대체 프로그램으로, CNG 또는 하이브리드 같은 차량으로 자발적으로 업그레이드하는 트럭에 할인을 제공하고 있다. 2015년 4월까지 450대의 디젤 트럭을 대체하여 배출량의 97%까지 미세먼지를 감소시켰다. 뉴욕시는 HPCTP를 다른 지역으로 확대해 나갈 계획이다.

3) 캐나다 Alberta

앨버타(Alberta)주는 6개의 관리 권역으로 구분하여 대기권역 관리 지침서(CCME)에 근거한 캐나다 대기환경기준(CAAQS)을 달성하기 위해 대기질을 관리하고 있다. 우선 6개 권역 내에서 측정된 각각의 오염물질 농도를 모니터링한 후 월경성 오염과 예외적 에피소드(자연 발생 사건)를 제외하고, 연후에 산정된 PM2.5, O_3 농도에 따라 관리 등급이 결정된다. PM2.5와 O_3의 농도는 풍향, 계절적 기상상황, 지형, 토지이용 등 다양한 요인에

따라 영향을 받기 때문에 지역에 따라 큰 차이가 있다.

1995년 기준 PM2.5와 O_3에 대한 Alberta의 주요 배출원을 살펴보면, 전기 발전을 포함한 산업부문의 기여수준은 NOx, SO_2에서 62%, 99%이고, 면오염원(도로 먼지, 건설, 농업, 연소, 솔벤트 사용, 기타)이 Primary PM과 암모니아에서 각각 64%, 91% 정도를 기여하고 있다. 그리고 VOC 배출량의 63%는 자연 배출원에서 발생되는 것으로 분석되었다. 2020년까지 Primary PM, PM, 오존의 전구물질 배출량을 전망한 결과, SO_2와 암모니아를 제외하고 교통 부문은 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

앨버타주는 매년 CAAQS 기준과 비교한 대기질 모니터링 결과, 대기관리 단계, 관리계획의 요약, 관련 정보들이 담긴 보고서를 매년 캐나다 환경 장관 위원회(CCME)에 제출하고 있다. 대기관리 계획은 토지이용 체계에 맞추어 광역 지역계획 과정에 통합하여 진행하며 경제, 환경, 사회적 결과 등을 고려하여 수립하고 있다.

대기권역 관리체계는 CAAQS를 기준으로 청정 지역 유지와 지속적인 향상이 주요 목적이며, 4단계별로 관리 실행과 계획의 강도가 다르다.

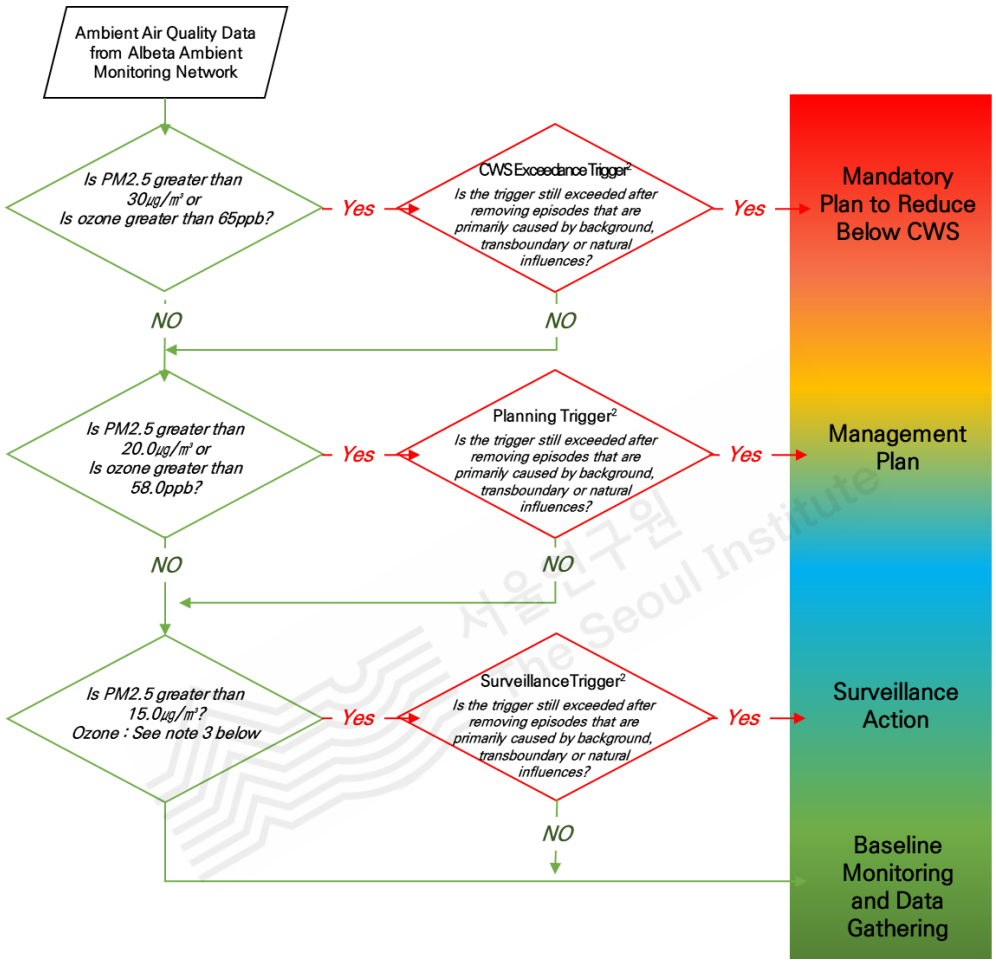
녹색 단계(기준 단계)는 가장 좋은 대기질 단계로, 사전 대응을 통해 이러한 대기질을 유지하는 것을 목표로 한다. 추가적인 대기질 관리 방안들이 요구되지는 않지만, 지속적인 모니터링, 교육성, 데이터 평가 활동을 시행하도록 하고 있다.

노란색 단계(감시 단계)는 대기질 악화 예방을 목표로 대기질 모니터링과 지역 대기질 정보를 구축해 나가는 단계로 배출량 수준, 대기질 현황 및 예측 등을 포함하고 있다.

오렌지 단계(관리 단계)는 CAAQS의 초과를 예방하는 단계로, 가능한 대기질 개선을 위해 2년 이내에 대기질 관리 계획을 수립해야 한다. 대기질 관리 계획에는 배출과 수용과 관련해 지역사회를 포함한 주요 이해관계자의 확인, 농도 상승을 이끄는 전구물질을 포함하여 모든 잠재적 배출원 확인, 대기오염도 현황 분석, 기존 대기질 모니터링의 적절성 평가, 관리계획 개발 및 실행 등이 포함되어야 한다.

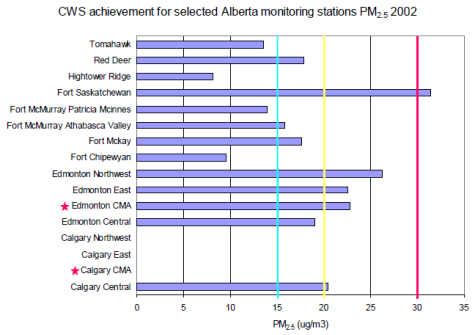
레드 단계(CWS 초과 단계)의 목표는 강화된 대기권역 관리 실행을 통한 CAAQS의 달성이다. CAAQS를 초과할 경우, 대기질 농도를 CAAQS 이하로 감소시키기 위한 대안들을

포함한 계획을 2년 안에 수립해야 한다. 오렌지 단계의 내용들을 포함한 관련 대안들을 앨버타주 정부가 법적 의무로 시행한다.

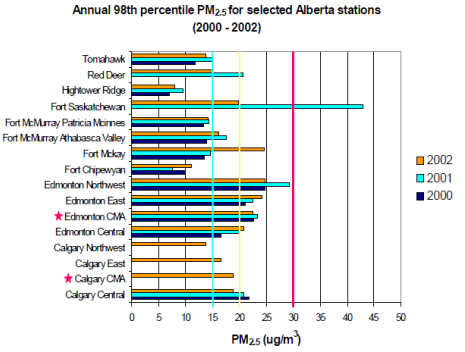


자료 : CASA, Particulate matter and Ozone Management Framework, 2003.

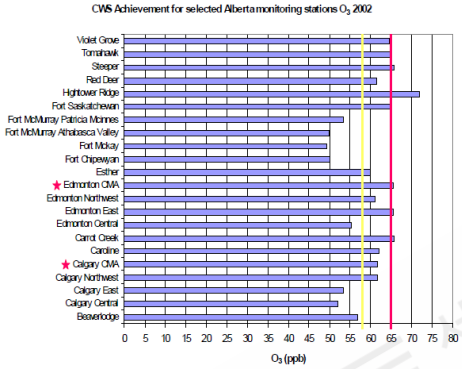
[그림 4-14] Alberta $PM_{2.5}$·O_3 연간 자료 분석 과정



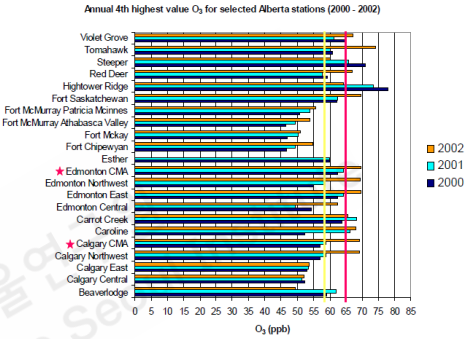
PM2.5 농도 현황(2002)



PM2.5 98퍼센타일 수준(2000~2002)



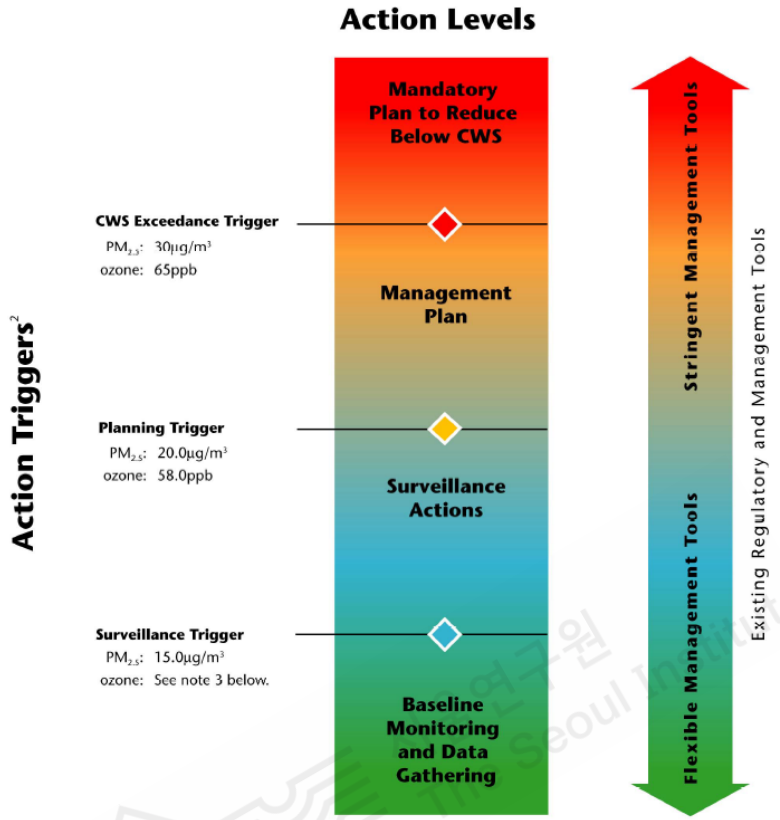
O_3 농도 현황(2000~2002)



O_3 98퍼센타일 수준(2000~2002)

자료 : CASA(2003)

[그림 4-15] Alberta주의 PM2.5, O_3 농도 현황



[그림 4-16] Alberta 대기권역 PM2.5·O_3 관리 체계(2010년 달성목표)

Management Level	Ozone (ppb)	$PM_{2.5}$ 24 hour ($\mu g\ m^{-3}$)	$PM_{2.5}$ Annual ($\mu g\ m^{-3}$)
Effective	**2015**	**2015**	**2015**
Red	**Actions for Achieving CAAQS**		
Threshold	63	28	10.0
Orange	**Actions for Preventing CAAQS Exceedances**		
Threshold	56	19	6.4
Yellow	Actions for Preventing Air Quality Deterioration		
Threshold	50	10	4.0
Green	**Actions for Keeping Clean Areas Clean**		

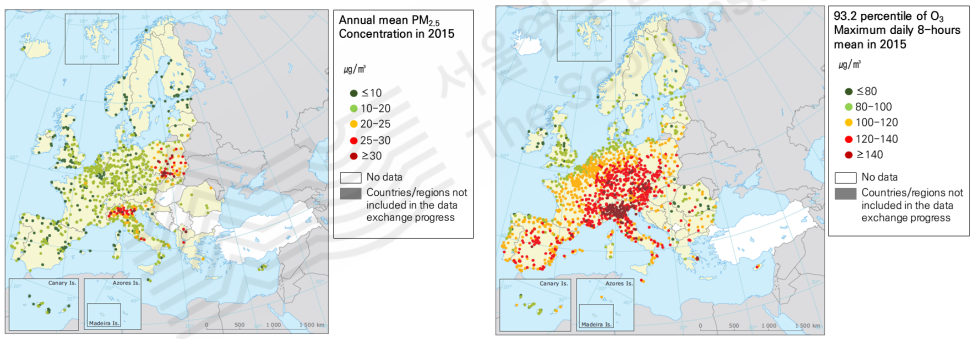
자료 : Albera Government, "Albeta Implementation of the Air Zone Management Framework for Fine Particulate Mater and Ozone", 2015.

[그림 4-17] Alberta 대기권역 관리 체계(2015년 달성목표)

4) 유럽연합

2015년 유럽의 많은 지역에서 PM 농도에 관한 EU 기준을 초과하였다. PM2.5의 경우 EU 28개 회원국 중 체코, 이탈리아, 폴란드 3개국 그리고 3개의 부속 보고국(알바니아, 도미니카 공화국, 코소보)이 1일 기준을 초과하였다.[29] O_3는 8개 회원국, 4개 보고국이 기준을 25배 이상 초과하였다.

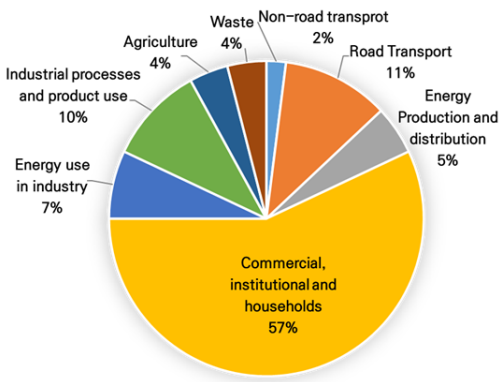
유럽 대기오염물질의 주요 배출원은 비도로이동오염, 도로교통, 상업·가정 분야, 에너지 생산 분배, 산업공정의 에너지 사용, 생산공정, 농업과 폐기물이다. 도로교통은 NOx 배출에서 첫 번째로, BC(블랙 카본)에는 두 번째로 기여하고 있다. 2015년 배출량 가운데 상업·가정 연료 연소 부문은 전체 Primary PM2.5, BC 배출량에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 산업공정 부문은 NMVOCs 배출에서 47% 정도의 비중으로 가장 큰 배출 기여도를 보이고 있다.



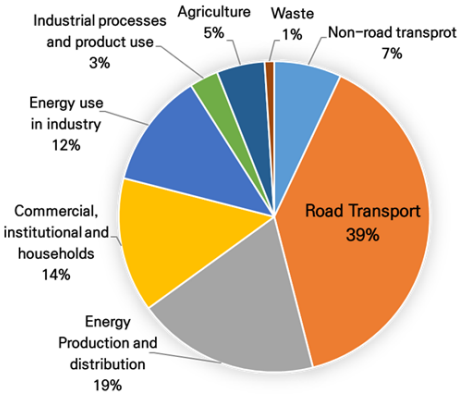
자료 : European Environment Agency, Air quality in Europe 2017 report, 2017.

[그림 4-18] EU 국가의 PM2.5, O_3 농도 현황

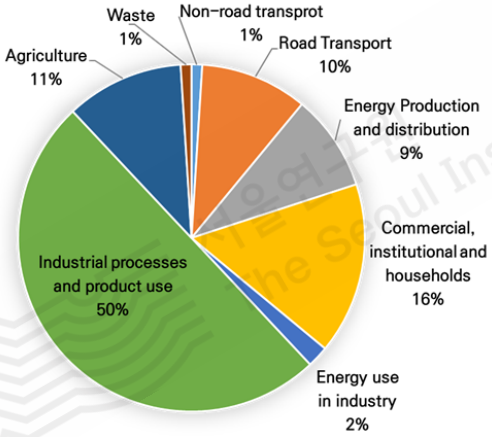
29) EU 28개 회원국과 8개의 부속 보고 국가(알바니아, 안도라, 보스니아, 헤르체고비나, 도미니카 공화국, 몬테네그로, 노르웨이, 세르비아, 스위스)의 측정자료를 기반으로 분석함.



(a) PM2.5



(b) NOx



(C) NMVOCs

자료 : European Environment Agency(2017)

[그림 4-19] EU-28개국 PM2.5, NOx, NMVOCs 주요 배출기여도

2001년 EU는 유럽의 대기질 개선과 대기환경 관리를 위해 '국가별 배출량 상한(National Emission Ceilings ; NEC)' 지침을 처음 채택했다. 이 지침은 회원국의 대기오염물질 배출량을 제한하여 유럽 전반의 대기질 악화를 방지하고자 마련한 EU의 법적 수단이다. 2001년에 채택된 NEC 지침은 2010년까지 매년 SO_2, NOx, NMVOCs, NH_3의 배출 감축량을 설정하고 있다.

[표 4-3] EU 대기질 지침에 명시된 건강 보호를 위한 대기질 기준

구분	평균 기간	기준	한도	비고
PM10	24시간	Limit Value	50㎍/㎥	1년에 35일 이상 초과 불가
	1년	Limit Value	10㎍/㎥	
PM2.5	1년	Limit Value	25㎍/㎥	
		노출 의무 농도	20㎍/㎥	2015년 평균노출지수(AEI)[1] (2013~2015년 평균)
		국가 노출 감소 목표	노출 0~20% 감소	2020년 AEI[2]의 감소율은 초기 AEI에 좌우
O3	8시간	Target Value	120㎍/㎥	평균 3년 이상 기준초과일 25일 이상 불가
		장기 목표	120㎍/㎥	
	1시간	정보값	180㎍/㎥	
		경고값	240㎍/㎥	
NO2	1시간	Limit Value	200㎍/㎥	1년에 기준초과 시간 18시간 이상 불가
		경고값	400㎍/㎥	100㎢ 또는 전체 구역에서 3시간 연속 측정
	1년	Limit Value	40㎍/㎥	
Bap	1년	Target Value	1ng/㎥	PM10의 함량으로 측정
SO2	1시간	Limit Value	350㎍/㎥	
		경고값	500㎍/㎥	
	1년	Limit Value	12㎍/㎥	
CO	최대 1일 8시간	Limit Value	10㎍/㎥	
C6H6	1년	Limit Value	5㎍/㎥	
Pb	1년	Limit Value	0.5㎍/㎥	PM10의 함량으로 측정
As	1년	Target Value	6ng/㎥	PM10의 함량으로 측정
Cd	1년	Target Value	5ng/㎥	PM10의 함량으로 측정
Ni	1년	Target Value	20ng/㎥	PM10의 함량으로 측정

주 : 1) AEI : 도시 배경농도 측정 자료를 활용하여 3년 연속 연평균으로 평가
2) 2015년 최대 1일 8시간 평균(mean)만 고려되므로 2013-2015년 평균은 제시되지 않음.

자료 : EEA, Air quality in Europe 2017 report, 2017

2007년에는 새로운 대기질 지침을 제정하여 2008년부터 시행하였다. 이후 기존의 대기질 평가 및 관리에 관한 지침(Directive 96/62/EC), 이산화황, 이산화질소, 질소산화물, 입자상물질, 납의 허용기준에 관한 지침(Directive 1999/30/EC), 벤젠 및 일산화탄소의 허용기준에 관한 지침(Directive 2000/69/EC), 오존에 관한 지침(Directive 2002/3/EC), 대기오염 측정망 정보 교류에 관한 결정(Decision 97/101/EC)을 폐지하였다. PM2.5에 대한 기준(25㎍/㎥)이 새롭게 추가되어 2015년부터 시행하고, 2020년부터는 강화된 기준 20㎍/㎥이 적용될 예정이다.

현재 EU의 대기질 기준(Limit Value)은 위반할 경우 법적 조치가 취해지는 강제 조항인 반면, 정책목표 기준(Target Value)은 위해성을 낮추기 위해 가능한 한 지키도록 설정된 권고 조항이다.

어떤 구역에서 오염물질 농도가 대기질 기준(Limit Value) 또는 정책목표 기준(Target Value)을 초과할 경우, 회원국은 해당 구역에 대한 대기질 관리 계획이 수립되어 있는지 확인하고 가능한 한 빨리 달성할 수 있도록 적절한 대책을 수립해야 한다. 오존을 제외한 다른 오염물질의 농도가 경고값(Alert Threshold)을 초과할 위험이 있는 경우에는 그 위험을 줄이고 초과 기간을 최소화하기 위한 단기대책을 마련해야 한다. 오존은 지리학적, 기상학적, 경제적 조건을 고려하여 충분한 가능성이 있다고 판단되는 경우에만 단기대책 마련 의무가 부과된다.

대기오염물질 및 전구물질의 월경성 이동성을 고려하여 해당 기준들을 초과할 경우에는 관련 회원국들이 협력하여 공동 대책을 마련해야 한다. 회원국들은 자국에 인접하는 다른 나라의 구역들이 단기대책을 수립할 때 필요한 정보를 제공해야 하며, 필요한 경우 공동 단기대책을 마련해야 한다.

[표 4-4] 2005년 대비 EU 28개국의 오염물질별 저감비율

구분	2005	2012	2020 NEC	2030 CLE	2030 NEC	2030 MTFR
	전체 발생량	달성 저감률	NEC 지침에서 요구하는 저감량	기존 법규 이행에 따른 기대 저감량	NEC 지침에서 요구하는 저감량	가용 기술적용에 따른 기대 저감량
SO_2	7,710	-48%	-59%	-74%	-79%	-84%
NO_2	11,531	-27%	-42%	-63%	-63%	-73%
PM2.5	1,414	-12%	-22%	-32%	-49%	-62%
NH_3	3,878	-5%	-6%	-8%	-19%	-35%
NMVOC	8,775	-24%	-28%	-40%	-40%	-61%

주 : 2030 CLE(기존의 EU 법규를 적용한 2030 시나리오= Baseline), 2030 MTRF(가용기술을 적용한 시나리오)
자료 : 최유진, 2030년을 준비하는 유럽 대기오염 관리의 새 지침, 세계와 도시, 19호, 2017.

이후 2016년에 NEC 지침을 개정하여 2020년과 2030년을 목표로 대기오염물질 배출 감축량을 새롭게 설정하였다. 개정된 NEC 지침의 핵심은 PM2.5 추가와 2030년을 목표로

하는 국가배출감축 약속(National Emission Reduction Commitments; NERCs)이다. NERC는 회원국이 특정 대기오염물질에 대해 특정일까지 달성해야 하는 배출 감축량을 정한 것으로, EU 전역의 대기오염 개선을 목표로 산출된 값이다.

유럽에서 배출되는 암모니아의 95% 이상이 화학비료와 가축분뇨 등 농업분야에서 배출되므로, 적용 가능한 다양한 방안을 제시하고 있다.

유럽의 2010년 PM2.5 배출량 가운데 43%는 난방에서 배출되었다. 경유 자동차에 대한 강력한 규제로 도로교통 부문의 초미세먼지 배출이 크게 감소될 것으로 예상되므로, 향후 난방분야가 PM2.5 배출 및 농도의 주된 원인이 될 것으로 보고 있다. 이에 석탄이나 고체 바이오매스를 난방 연료로 사용하는 것을 가장 큰 문제로 지적하고, 노후 난방방식을 친환경적인 재생에너지나 지역난방 등으로 교체하도록 경제 인센티브의 제공, 주거지역 내 고체연료 사용 금지나 대체기술 및 배기가스 정화기술 사용의 장려, 가장 깨끗한 설비와 효율적 운영방법 제공, 친환경적 난방기기를 소비자에게 알리는 라벨링 제도 도입 등 다양한 조치들을 제시하고 있다.

그리고 2013년 석탄발전소는 EU 산업 분야의 SO_2 배출량의 52%, 질소산화물 배출량의 40%, PM 배출량의 37%를 차지하는 것으로 조사되었다. NEC 지침에서는 가장 엄격한 BAT를 적용하면서 석탄발전의 단계적 폐쇄를 제안하고 있다.

2_시사점

해외 도시들은 대기오염으로 인한 시민의 건강 위해 가능성을 비용 효율적으로 개선하고, 지역 단위의 환경복지를 최대화하기 위해 대기오염물질의 통합관리 정책을 추진하고 있다. 특히 PM2.5, O_3의 개별 배출량/농도 저감 정책 추진을 지양하고, 대신 통합관리 전략을 새롭게 추진하고 있다. 또한 통합관리를 추진하는 과정에서 개념모델에 기반한 단계별 적정화를 시도하고 있다. 특히, PM2.5의 2차 생성 메커니즘 및 VOCs/NOx 농도 비율에 따른 오존 등농도 곡선 형성 조건을 측정·분석하고, 연후에 미세먼지·오존 통합관리에 의한 배출원 적정 관리대책을 수립하고 있다.

① 대기환경 모니터링과 대기오염물질의 기여도 및 생성메커니즘 분석 : 축적된 자료를 바탕으로 관리정책·대안별 경제적 분석을 통해 수행의 우선순위를 정하여 관리대책의 실효성을 높이고 있다.

② 최악상태(episode)의 대기질 관리 : 대기질이 수용할 수 없을 정도로 악화될 수도 있는 특성조건을 파악하여 이에 대한 저감 대책을 수립하고 있다. 초미세먼지와 오존의 통합관리 사례에도 적용되고 있다.

③ 통합 계획 : 미래 성장전략에 수반되어 증가되는 미세먼지·오존 등 대기오염을 효율적으로 해결하기 위해 토지이용과 교통계획은 대기질 계획과 상호 통합되어 수립되어야 함을 강조하고 있다.

④ 지역의 협조방안 및 중앙과 지방정부의 역할 구분 : PM2.5, O_3의 발생·피해 공간범위를 고려하여 같은 영향권 범위 내 지역 환경관리는 공동으로 수립·이행하며 최소한의 비용으로 효과를 증대하고 있다.

⑤ 지역 대기질과 지구 기후변화 대책의 연계 : 지역적인 대기오염에 대한 대응은 지구적 환경대책으로 이어지고, 에너지 보존대책은 생산효율 증가뿐만 아니라 환경대책으로도 이어질 수 있는 win-win approach를 강조하고 있다. 이에 따라 PM2.5, O_3 등 지역 대기질 개선을 위해 에너지 감소와 에너지 효율 개선정책 및 프로그램을 추진하고 있다.

실제 해외 도시들은 미세먼지와 오존 통합관리의 사전 단계로서 배출원/배출량 기초정보를 확인하고, 이후 관리전략을 수립하고 있다. 먼저 PM2.5의 주요 배출원은 도로/비도로 이동오염원인 것으로 나타나고 있다. 이러한 배출 기여도에 따라 배출기준을 강화하고 청정연료 사용을 확대하는 등 차량 자체의 배출량 저감을 유도하는 것 외에도 저배출지역 지정, 혼잡통행료 부과, 대중교통 이용 확대 등 교통수요 관리에도 집중하고 있다. 최근에는 비도로이동오염원 관리를 통한 배출 저감 노력을 펼치고 있다.

또한 NOx의 경우 저녹스버너 사용 및 청정난방에너지 이용, VOCs는 도료, 코팅, 세정제 등에 대한 관리, 암모니아는 축산부분에 대한 친환경적 처리기술의 도입이 주요한 관리방안으로 제시되고 있다.

이와 함께 1차 PM2.5(filterable + condensible)와 2차 PM2.5의 관리를 위해 NOx, VOCs 관리방안을 함께 수립·시행하고 있다. 유의할 사항은 이동오염원이나 에너지연소(가정, 산업, 상업 시설 등) 등 1차 배출원에 대한 일부 관리 정책들은 저감 대책별 차이를 확인하고 추진되고 있다는 점이다. 즉, 저감대책 추진과정에서 미세먼지뿐만 아니라 미세먼지와 오존의 2차 생성 전구물질인 NOx, CO, VOCs, SOx 등 기체상 물질 저감을 동시에 고려하고 있다.

시민의 건강영향을 고려한 대기환경 문제 해결을 위해 과학적인 오염물질 간 상호 연계성을 바탕으로 정책이 수립되고 있다. 그러나 과학적 기반은 제도나 정책과 달라 단기간에 만들어지지 않기 때문에, 1차와 2차 오염물질 간 상호작용을 분석하고 예측하기 위한 신뢰성 있는 모델링 시스템을 우선적으로 구축하고 있다.

서울연구원 The Seoul Institute

05

서울시 미세먼지·오존 통합관리 전략 : 기본방향과 해결과제

1_개념모델 기반 미세먼지·오존 통합관리 방향

2_서울시 미세먼지·오존 통합관리 방안

05| 서울시 미세먼지·오존 통합관리 전략 : 기본방향과 해결과제

1_개념모델 기반 미세먼지·오존 통합관리 방향

오늘날 시민건강 결정요인을 설명하는 데 있어 환경적 요인의 중요성이 강조된다. 특히 대기오염은 환경성 질환의 발생과 악화 모두에 영향을 준다. 초미세먼지와 오존 등 대기환경 오염인자는 호흡기질환뿐만 아니라 시민들의 삶의 질, 생활패턴의 변화를 불러오는 요인으로 작용한다.

이러한 변화를 반영하듯 선진도시의 대기환경 정책은 대기오염물질의 환경기준 달성에서 대기오염의 시민 건강피해 예방으로 전환하고 있다. 즉 기후환경 변화에 따른 시민건강 영향에 유의하고, 적절한 해법을 찾는 과정이야말로 도시의 환경복지 향상과 시민의 건강한 삶의 질을 확보할 수 있다는 발상의 전환으로 연계되고 있다.

초미세먼지·오존의 효과적인 통합관리를 위해서는 대기화학/수송 반응, 농도 특성, 주요 배출원, 성분별/지역별 기여도 등 다양한 요소들의 복합 영향과 인과 관계를 분석하고, 이를 바탕으로 효율적·전략적인 정책적 시사점을 도출하는 일련의 개념모델을 적용하는 것이 바람직하다.

개념모델의 기본단계인 '여건진단 → 기본평가 → 계획수립 적절성 → 계획추진 수용성'에 따라 미세먼지·오존 통합관리 정책방향을 설정할 수 있다. 서울시는 향후 초미세먼지·오존 통합관리 전략을 수립하기 위해 개념모델의 기본조건인 배출원 확인 및 인벤토리 구축, 측정 모니터링, 확산모델링, 인체건강 위해성 조사, 저감대책 수립 등의 상호 연관관계를 보다 체계적으로 확인하여야 한다.

대기환경 관리계획은 단순히 목표농도의 달성을 넘어 위해성 최소화, 환경기준 달성 등에 유의하는 접근이 필요하다. 우리나라도 그간 목표농도 관리에 집중했던 정책방향을 2단계 수도권 대기환경개선 특별대책에서 인체 위해성에 중점을 둔 방향으로 전환하였다. 이

에 따라 서울을 포함한 수도권 대기환경 관리에서 기후환경 변화의 건강영향을 최소화하기 위한 새로운 정책방향 마련에 관심이 집중되고 있다. 즉, 국내·외 대기환경 관리는 '안전과 건강' 중심으로 진행되고 있으며, 초미세먼지와 오존 문제는 이런 흐름 속에서 더욱 중요해질 것으로 전망되고 있다.

제1차, 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 및 3개 시·도의 시행계획에 산업체의 VOCs 배출원 점검, 생활부문에서의 관리 강화 대책이 포함되어 있으나, 미세먼지 생성 전구물질인 NOx 대책에 보다 선택과 집중이 이루어졌다. 즉, NOx 배출 저감 대책을 매우 강력하게 추진하여 어느 정도의 배출량 감축을 달성하였으나, VOCs 배출저감 대책은 상대적으로 효과가 다소 미흡한 것으로 나타났다.

또한 미세먼지·오존 통합관리 계획/정책의 적절성 및 수용성 확보를 위해서는 유기물질과 질소 성분이 미세먼지의 절반 정도를 차지한다는 것을 고려하여야 한다. 나아가 VOCs와 NOx 관리 전략을 통해 지역 내의 2차 생성 미세먼지 오염을 줄일 수 있는 가능성에도 유의하여야 한다. VOCs, NOx 전구물질들은 오존오염 관리에도 매우 중요하다.

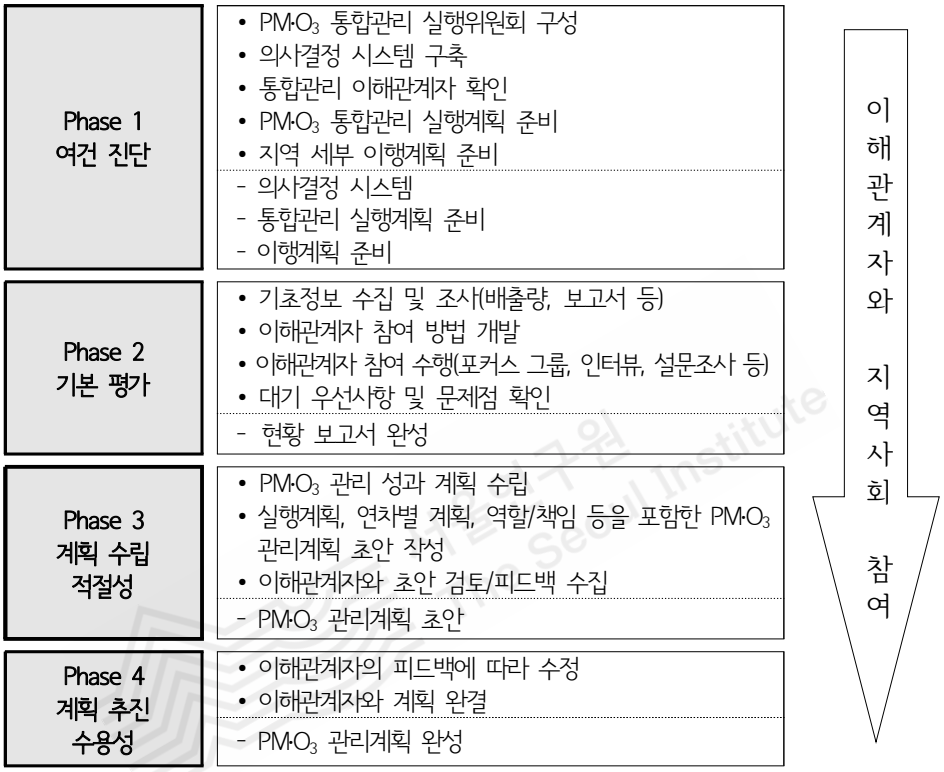
2013~2017년 사이 서울의 VOCs/NOx 비율이 8 이하에 해당되어, VOCs 농도가 증가하거나 NOx 농도가 감소할 경우 최대 오존 농도가 증가하는 VOC-limited 환경에 해당되는 것은 앞서 정리한 바 있다. 그리고 VOC/NOx 발생량 비율이 7 정도이기 때문에 VOC와 NOx의 어떤 하나를 저감해도 지역 전체적으로 오존의 일 최고농도 값은 낮아지지만, VOC와 NOx 두 물질을 비슷한 정도로 저감하는 경우가 오존의 저감효과를 높인다는 연구 결과가 있다.[30]

현재와 같이 VOCs보다 NOx 배출 저감에 중점을 둔다면 대기 산화상태에 따라 PM2.5 생성 속도가 어느 정도 증가할 가능성이 있다(Ji et al., 2012; Lee et al., 2006). 이는 동시에 고농도 오존 관리의 한계요인으로 작용할 수 있다. KORUS-AQ를 포함한 기존 국내·외 연구에서는 NOx 배출 감축효과가 즉시 나타나는 PM2.5와 달리 O_3는 NOx와 비선형적 효율성을 가지고 있어, NOx 농도가 높은 지역의 경우 오히려 NOx 저감이 O_3을

30) 수도권대기환경청, 2012, 수도권대기환경관리 중장기 정책방향 설정

단기적으로 악화시킬 수도 있는 것으로 보고하고 있다.

시민의 삶의 질 개선정책 추진과정에서 개념모델에 기반한 미세먼지와 오존의 통합관리 정책방향은 [그림 5-1]과 같다.



[그림 5-1] 개념모델(Conceptual Model) 적용 미세먼지·오존 통합관리 정책방향

대기환경 통합관리의 실효성을 확보하기 위해서는 일차적으로 배출원의 분포, 대기오염의 확산 · 유입과정 및 오염수준 파악 등의 자료체계 확보가 선행되어야 한다. 구체적이며 실질적인 대기환경 관리 정책을 위해서는 정책 수립의 기초정보인 대기오염 모니터링, 배출량 자료 등이 필요하다. 이러한 기초정보가 '대기오염 오염수준 파악-저감 대책의 처방'이라는 일련의 효율적인 선순환 과정의 출발점이 되기 때문이다.

또한 대기환경 개선을 위한 정책 수립 및 정책 시행효과의 분석·평가를 위한 대기질 모델링 과정에서도 모니터링 측정자료, 배출량 기본정보 이용이 필수적이다. 이러한 모델링

결과의 정책 활용도 제고를 위해서는 신뢰성 있고 정확도 높은 결과를 산출하는 것이 중요하며, 충실한 자료를 생산하여 모델에 입력하는 것이 좋은 결과를 산출하기 위한 선행조건이다. 대기질 모델링의 기초 입력 자료인 대기오염 모니터링 자료와 배출량 자료의 정확성 확보와 신뢰성 향상은 대기환경 통합관리의 첫걸음이라고 할 수 있다.

그리고 공간특성 또는 지역 여건을 고려한 초미세먼지, 오존 통합관리 계획의 탄력성을 유지한다. 특히 2차 오염물질 관리방법의 차이를 확인하고 대응할 수 있도록 지역 특성(오염물질 배출특성, 기상학적 특성 등)을 반영한 통합관리 전략을 수립한다.

대기환경 통합관리의 불확실성과 복잡성은 대기오염의 발생을 인지하고, 원인을 파악하며, 해결방안을 도출하기 위한 고도의 전문적인 지식과 정보를 필요로 한다. 따라서 비정부 조직들의 대기오염 감시 활동과 전문가 그룹의 연구 및 조사를 통한 과학적 지식의 축적과 전파는 대기오염에 대한 시민들의 인식을 증진시키고, 정부에 직접적인 정책을 제공하는 등 대기오염 문제 해결을 위해 중요한 역할을 수행한다.

이와 같이 대기환경 통합관리 대책을 수립하는 주체는 중앙 또는 지방정부지만, 대책이 실현되는 곳의 주체는 시민들이므로, 기존의 명령통제 방식의 규제만으로는 대기환경 문제를 해결하기 어렵다. 이에 대기환경 통합관리와 관련된 이해관계자를 적극적으로 포함시키는 협력적 민간 거버넌스 구축이 무엇보다 중요하다.

2_서울시 미세먼지·오존 통합관리 방안

1) 미세먼지·오존 통합 측정망 설치·운영

초미세먼지·오존 통합관리를 위해서는 과학적인 데이터에 기반한 정책 수립을 위해 미세먼지와 오존 발생 메커니즘과 배출원별 기여도의 정밀한 산정이 우선되어야 한다. 초미세먼지와 오존의 발생원·구성성분에 대한 분석이 보다 명확화·세분화되어야 하며, 이에 따른 근본적·과학적 대응을 위한 상세모니터링이 지속적으로 이루어져야 한다. 그리고 초미세먼지와 오존의 외부 영향, 고농도 발생 등을 고려하여 상세모니터링 측정소 확대를 검토

하여야 한다.

현재의 단순 초미세먼지의 질량농도 측정만으로는 초미세먼지 전구물질(SOx, NOx, VOCs, NH_3 등)에 의한 2차 생성 PM2.5의 발생원인 분석이 어렵다. 최근 들어 O_3 농도는 증가하고 있으며, NO_2의 농도 변화는 적지만 NOx의 농도는 감소하고 있다. 이는 대기 중 NOx 배출형태의 변화 또는 광화학 산화력의 증가와 관련이 있다. 이에 대한 원인 규명을 위해서는 오존 순환 반응에 관여하는 광화학 지표물질의 집중 측정 또한 필요하다.

서울시는 현재 8개소에서 매시간 56개 항목 또는 34개 항목의 휘발성 유기화합물을 측정하는 광화학오염물질 측정소 8개소를 운영하고 있다. 일반대기 오염물질과 기상요소들을 측정하는 도시대기 측정망은 25개이다. 미세먼지와 오존의 오염실태 연구와 효과적인 대기질 개선 대책 마련을 위한 기초자료로 활용하기 위해서는 지역별 오존형성 메커니즘 확인 목적의 광화학오염물질 측정소 확대가 바람직하다.

[그림 5-2] 서울시 대기오염측정소 현황

향후 수도권 PM2.5·O_3 통합관리 기초정보를 수집하고 활용하기 위해, 수도권·비수도권의 협력으로 광역 측정망을 구축하여야 한다. 경기·인천에는 상세 모니터링 측정소를 신설하고, 환경부에서 운영 중인 집중측정소의 측정자료 공유를 통해 보다 정확한 초미세먼지와 오존의 생성 메커니즘을 분석해야 한다.

2) 서울형 배출원 인벤토리(Seoul_CAPSS) 구축

대기관리정책 수립의 기초자료가 되는 배출자료의 신뢰도를 향상시키고 불확실도를 줄이기 위해 대기오염과 유해물질 배출 실태조사를 정기적으로 실시하여 정확한 배출 실태를 파악하는 것이 시급하다. 이를 위해 과학기술을 기반으로 한 기초연구가 반드시 필요하고, 관련 연구에 대한 집중적인 투자 역시 필요하다.

서울시 특성에 맞는 정책 추진을 위해 누락된 CAPSS 배출원 및 배출량을 조사하고, 장거리영향 등 기여도를 분석하며, 대기질 모델링을 통해 오염물질 상세 모니터링을 실시한다. 그리고 대기오염의 인체 위해성 평가방법 등의 연구를 지속적으로 추진해야 한다.

이에 이동오염원 부문의 실주행 조건을 반영한 배출량을 산정하고, Condensible PM을 고려한 Primary PM 배출량을 산정하며, 과소평가된 대기오염물질 배출량을 보완한다. 현재 CAPSS의 배출원 분류체계에 포함되어 있지 않은 2행정 소형엔진(two-stroke engine) 배출원은 비도로이동오염원의 하위분류로 하여 배출량 산정이 필요하다. 그리고 학교 급식과 같은 대형 급식, 공공주택(아파트)의 조리에 따른 배출자료 등 과소평가된 CAPSS 배출자료의 보완 등이 이루어져야 할 것이다.

현재 NOx와 VOCs는 미세먼지와 오존 분석에 중요한 전구물질이나, 도로이동오염원과 자연에서 기인한 대기오염원에 대한 배출정보가 부족한 실정이다. VOCs 배출에서 많은 비율을 차지하고 있는 유기용제의 특성을 구체화할 필요가 있다. 특히 광화학 오존 생성에 크게 기여하는 BVOCs(Biogenic Volatile Organic Carbons)의 배출정보를 개선하여 정량화를 위한 다양한 관측 및 검증이 수행되어야 한다.[31]

그리고 대기배출원 구분에서 소규모 배출원(4종, 5종)은 자치단체에서 관리하고 있으나 배출원에 대한 공간정보 확인과 배출량 산정관리가 미흡하여 생활밀착형 대기환경관리에 한계를 보이고 있다. 이에 서울시 내부 소규모, 신규, 미확인 배출원의 공간 및 배출특성을 파악하고, 환경부 배출정보시스템을 보완할 수 있는 "서울시 대기배출원 공간정보

31) 국립환경과학원, 「오존 종합대책 수립마련 기획연구」, 2014.

(Seoul Air Emission Inventory)"를 구축하여 대기정책 효과 제고를 위한 활용이 필요하다. 특히, 미세먼지와 오존 통합관리 전략을 마련하기 위해서는 2차 생성 원인물질 SOx, NOx, VOCs 등 지역 내 배출목록 정비가 고려되어야 한다.

3) 초미세먼지·오존 통합관리 기본계획 준비

제2차 수도권 대기환경 기본계획에 PM2.5와 O_3이 추가되어, 각 오염물질에 대한 대기환경 목표농도와 이를 달성하기 위한 목표 삭감량이 제시되어 있다. 그러나 오염물질 간 상호 복합영향을 고려하지 않아, PM2.5, NOx 목표 삭감량을 달성하였을 경우 NOx와 VOC 조건에 따라 O_3의 농도가 변화될 수 있다는 한계가 있다. 이에 PM2.5와 오존의 상호반응을 이해하고, VOC와 NOx의 균형(balance) 조건을 반영한 대책 마련이 필요하다.

현재 서울시 초미세먼지와 오존의 생성 메커니즘 및 기여도 분석 관련 연구가 각각 진행중에 있다. PM2.5의 2차 생성, O_3의 전구물질의 상호 복합영향을 고려한 통합 연구를 진행해야 한다. 오염기여도 추정이 어려운 2차 생성 PM2.5에 대한 배출원별 영향, 정량적 O_3 생성 메커니즘과 배출원별 기여도 등의 통합분석을 통한 과학적 관리기반을 마련해야 한다.

그리고 PM2.5, O_3의 과학적 정밀분석을 기반으로 제시된 직접 배출 및 2차 생성, 전구물질 통합관리 방안을 서울시 2030 대기환경개선 로드맵에 포함하여야 한다. 이는 안전하게 숨쉴 수 있는 대기환경을 조성하고 시민 환경복지 개선을 위한 통합관리 수요 증대에 합목적적으로 대응하는 기본절차이다.

4) 초미세먼지·오존 통합관리 지역별 맞춤전략 수립

국내외에서 발생하는 미세먼지·오존의 정확한 발생 원인을 찾아 다각도로 오염원을 차단하기 위한 노력이 필요하다. 국가는 원천적으로 대기오염의 원인을 차단하고 감소시키기 위해서는 오염물질을 적게 발생시키는 대체 연료나 장치(저공해 버스나 저공해 또는 무공해 자동차 등)를 적극 개발, 장려해야 한다. 정책의 효과적 운영 측면에서는 지역마다 상이한 주요 발생원인을 밝혀내어 이를 중점적으로 저감하려는 지역맞춤형 관리가 필요하

다. 또한 장기 저감목표를 설정하고 이를 달성하기 위해 추진 사업 발굴, 예산 배정, 모니터링 등 최적의 저감계획을 수립해야 한다.

또한 미세먼지와 오존은 지역별로 생성과정 및 성상이 상이하게 나타나기 때문에 효과적인 저감대책을 수립하기 위해서는 명확한 분석이 선행되어야 한다. 그러나 미세먼지와 오존의 관리대책은 지역적 특성을 고려하지 않고 주로 자동차 부문 관리, 사업장 관리와 같은 1차 배출원 중심 관리에 집중되고 있다.

서울시는 그동안 대기질 개선 정책의 추진으로 NOx 배출량을 저감했지만, NMHC 농도 감소는 다소 미흡하여 NMHC/NOx 농도 비율이 상승하고 있다. 이는 최근의 고농도 오존 출현이 증가하는 주요 원인 가운데 하나로 작용할 수 있다.

미세먼지·오존 통합관리 전략에서 미세먼지 2차 생성, 고농도 오존을 효과적으로 관리하기 위해서는 NOx 배출 감소 이외에 NMHC를 포함한 VOCs의 배출 저감을 함께 추진할 필요가 있다. 서울시는 VOCs/NOx 농도 비율을 조정하여 고농도 오존에 대응하여야 한다. 앞서 서울의 오존 생성 환경은 VOC-limited 환경에 해당하는 것을 확인하였다. 이에 VOCs 저감을 위한 유기용제 사용 관리가 필요하다. 이에 권역별 오존 생성 기여도를 파악하고, 맞춤형 관리 대책을 마련하여야 한다.

5) 서울형 초미세먼지·오존 비상저감조치 관련 통합관리제도 마련

2017년 7월부터 당일(0~16시) 초미세먼지 평균농도가 50㎍/㎥를 초과하고 다음날도 '나쁨(50㎍/㎥ 초과)' 이상으로 예상되는 경우, 서울시 단독으로 발령할 수 있는 "서울형 미세먼지 비상저감조치"를 시행하고 있다.

이러한 비상저감조치는 고농도 미세먼지 지속 시 시민 건강보호를 위해 단기간에 강력한 대기오염물질을 감축하기 위한 대응 조치이다. 대기통합지수에서 "나쁨 수준"은 PM2.5 36~75㎍/㎥, O_3는 0.091~0.150ppm 수준으로, PM2.5 농도가 나쁨이 예상되는 수준에서는 비상조치가 발령되지만 오존은 주의보만 발령되고 있다. 오존주의보의 대응조치로는 실외활동 자제 요청, 자동차 운행제한 요청, 대중교통 시설 이용 권고만이 이루어지고

있어, 단기간 고농도 오존에 대한 대응은 미세먼지 비상저감조치(공공기관 주차장 폐쇄, 공공차량 운행 제한 등)에는 다소 미흡하다.

이제 서울시는 초미세먼지만이 아니라 '초열대야+폭염+미세먼지+오존…'헬서울'[32]이라는 표현처럼 기후와 대기환경 문제가 복합적으로 발생되고 있다. 이에 시민건강 위해성, 환경변화 등을 고려하여 미세먼지·오존의 복합영향을 반영한 비상저감조치 통합관리 제도 마련을 검토해야 한다.

6) 미세먼지·오존 통합관리 협치의 거버넌스 구축

거버넌스 협력체계는 시민사회와 지속적으로 상호작용하여 대기오염 문제에 대한 인식을 공유하고 정책대안에 대한 합의를 도출할 수 있다. 나아가 이해관계자들이 대기오염을 예방적 차원에서 관리하고, 대기환경 목표 달성에 능동적으로 참여시켜 시민이 안심하고 숨 쉴 수 있는 행복한 서울 실현에 적극적으로 임할 수 있게 한다.

또한 이해관계자들과 파트너십을 맺고 협약을 도출하는 등의 정책을 활용하면 보다 유연하게 대기환경 통합관리에 대응할 수 있다. 대기환경 통합관리를 위한 거버넌스는 정책결정과정에의 참여, 명령 규제의 대안으로서 정책수단에 대한 합의 도출, 환경 관련 갈등해결 프로세스, 자원 및 공유재 관리, 지속가능한 발전의 실현 수단 등 다양한 방식으로 실현될 수 있다.

이에 미세먼지·오존 통합 개선 사업에 대한 시민참여 및 홍보방안 등의 수립에서부터 평가에 이르기까지 시민 참여 확대를 위한 대기환경 통합 개선 협치 협의회를 구성·운영한다. 협의회의 주요 역할은 대기환경 통합 개선을 위한 정책과정에서 시민참여 확대 제안, 관련 정책 자문, 심의·조정, 대기질 개선사업 추진의 기본방향 및 계획 수립 등이다. 이에 더하여 대기질 통합 개선사업의 추진에 대한 부서 간 협력·조정 및 지원, 대기질 개선사업의 추진상황에 대한 점검 및 평가 등을 수행한다.

---

32) 한국일보, "초열대야+폭염+미세먼지+오존… '헬서울' 4중고", 2018.08.03

참고문헌

김득수, 정진상, 안준영, 2016, “서울 도심대기의 NO, NO_2와 O_3 사이의 대기화학적 특성 연구”, 한국대기환경학회지, Vol.33, No.3

김용표, 2017, “초미세먼지 문제 해결을 위한 연구 및 정책방향”, 한국대기환경학회지, Vol.32, No.4

김운수, 2011,「서울시 고농도 미세먼지 오염현상의 원인분석 및 지역별 맞춤형 관리대책」

김운수, 2011,「서울시 대기환경 개선목표 달성을 위한 오염물질 저감대책 수립 연구」

김운수, 2013,「서울시 고농도 오존(O_3) 대응 매뉴얼 연구」

김용표, 2017, “초미세먼지 문제 해결을 위한 연구 및 정책방향”, 한국대기환경학회지, VOl.33, No.3

정장표, 유숙진, 2010, “휘발성유기화합물과 질소산화물의 오존생성 기여도 평가에 관한 연구”, 대기환경공학회지, 209~218

최유진, 2017, “2030년을 준비하는 유럽 대기오염 관리의 새지침”, 세계와 도시, 19호

최현정, 2016, “한국에서 맑은 공기 마시기 : 쉽지 않은 미션”, EAF PD, 제54호

국립환경과학원, 2014,「오존 종합대책 수립마련 기획연구」

국립환경과학원, 2015,「광화학물질 특성분석을 통한 국내 오존 발생원인 분석」

국립환경과학원, 2017,「KORUS-AQ 예비종합보고서」

국립환경과학원, 2018,「2015 국가 대기오염물질 배출량」

서울특별시, 2015,「2차 수도권 대기환경관리 서울특별시 시행계획 수립연구(2015~2019)」

서울특별시, 2016,「초미세먼지(PM2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구」

서울특별시, 2017,「예·경보 단계별 민감·취약군 오존 대응 세부 행동요령」

서울특별시, 2017,「환경분야 협치 의제포럼 서울시 환경협치 어디까지 왔나」

서울특별시, 2018,「2차 수도권대기환경관리 기본계획 변경에 따른 서울시 시행계획 변경 수립」

서울특별시, 2018,「2017년 서울대기질 평가보고서」

서울특별시, 2018,「굿모닝 맑은 서울」

수도권대기환경청, 2012,「수도권 대기환경관리 중장기 정책방향 설정」

서울연구원 The Seoul Institute

수도권대기환경청, 2016,「'14년도 수도권 대기환경관리 시행계획 추진실적 평가('07~'14 종합평가 포함) 결과」

한국공학한림원·한국과학기술한림원·대한민국의학한림원, 2018, "미세먼지 문제의 본질과 해결방안 ② 미세먼지, 어떻게 해결할 것인가?",「석학 정책제안 이슈페이퍼」, 2017-08

환경부, 2016,「오존, 제대로 알고 대비해요」

환경부, 2018,「여름철 오존관리 및 피해 예방대책」

환경부, 2018,「환경백서 2017」

광화학옥시던트대책검토회, 2005,「광화학옥시던트 대책검토 보고서」

도쿄도, 2016,「도쿄도 환경기본계획(개정판)」

도쿄도, 2017,「환경 선진도시 도쿄를 향해」

도쿄도, 2018,「동경도환경백서 2017」

도쿄도환경국, 2017,「2017년 광화학스모그 발생현황」

EEA, 2017, Air quality in Europe 2017 report

Eirc C. Apel, Jack G. Calvert, Michael O. Rodgers, Viney P. Aneja, James F. Meagher, and William A. Lonneman, 1995, "Hydrocarbon Measurements During the 1992 Southern Oxidants Study Atlanta Intensive : Protocal and Quality Assurance", J. Air Waste Manage. ASSOC., 45

Kim Hk, Woo JH, Park Rs, Song CH, Kim JH, Ban Sj, Park JH, 2014, "Impacts of different plant functional types on ambient ozone predictions in the Seoul Metropolitan Area(SMAs), Korea", Atmospheric Chemistry and Physics, 14(14), 7461-7484

Liu XH, Zhang Y, Xing J, Zhnag Q, Wag K, Streets DG, Jang C, Wang WX, Hao JM., 2010, Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part Ⅱ. Process analysis and sensitivity of ozone and particulate matter to precursor emissions, Atmospheric Envionment, 44(30), 3719-3727

National Research Council, 2004, Air Quality Management in the United States, National Academies Press, Washington DC.

Sanford, S., Dongyand, H., Carlos C. and Robert E. Imhoff, "The Use of Photochemical Indicators to Evaluate Ozone-NOx Hydrocarbon Sensitivity", Case Studies from Atlanta, New York, and Los Angeles, J. Air Waste Manage. Assoc.

Wesson, K., Fann, N., Morris, M., Fox, T. and Hubbill, B., 2010, "A Multi-pollutant, risk-based approac h to air quality management : Case study of Detroit", Atmospheric Pollution Research 1.

서울연구원 The Seoul Institute

http://cleanair.seoul.go.kr/(서울특별시 대기환경정보)

http://airemission.neir.go.kr/(국립환경과학원 국가대기오염물질 배출량 서비스)

http://www.airkorea.or.kr/(에어코리아)

http://www.lwq.go.kr/(국가법령정보센터)

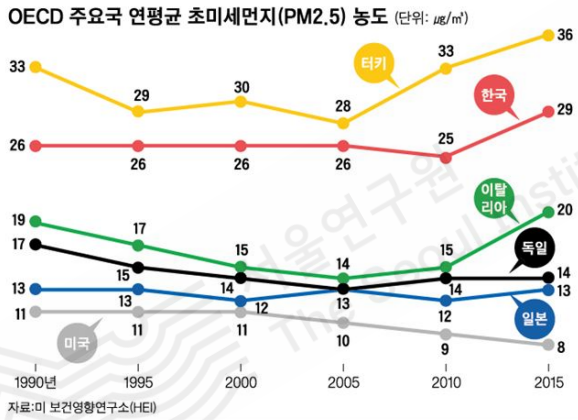
서울연구원
The Seoul Institute

부록

1_초미세먼지·오존 관련 국내 언론 동향

2017-02-16	한국, OECD 중 미세먼지 2위 · 오존 농도 4위… 관련 사망자 크게 늘어

고려대기환경연구소 "서울 등 큰 도시에서 특히 치명적"



우리나라의 미세먼지 농도와 대기오염으로 인한 사망자 수가 경제협력개발기구(OECD) 회원국 가운데 가장 높은 수준이라는 조사 결과가 나왔다. 사람의 호흡기를 바로 통과하는 특성 때문에 1군 발암물질로 지정된 미세먼지의 폐해가 날로 심각해지는 상황이다.

16일 미국 민간 환경보건단체 '보건영향연구소(HEI)'가 발표한 '제1차 세계 대기 연간 보고서'를 보면 인구가중치를 반영한 한국의 연평균 초미세먼지(PM2.5) 농도는 1990년 26㎍/㎥(공기 1㎥당 마이크로그램)에서 2015년 29㎍/㎥으로 증가했다. 1990년 폴란드, 헝가리, 체코 등 동유럽 국가들에 이어 7번째로 나쁜 수준이었던 한국은 25년 뒤 터키(36 ㎍/㎥)를 제외하고 OECD 회원국 중 두 번째로 미세먼지 농도가 최악인 국가로 나타났다. 인근 아시아 국가들과 비교해도 중국(58㎍/㎥), 북한(34㎍/㎥), 라오스(33㎍/㎥)보다는 낮지만 일본(13㎍/㎥)이나 싱가포르(19㎍/㎥)보다는 심각한 수준이었다.

역시 호흡기 질환을 일으키는 대기오염 물질 중 하나인 오존(Ozone) 농도도 OECD 회원국 중 네 번째로 높았다. 오존은 자동차 · 공장 등에서 발생한다. 전체 회원국 오존 농도 평균치가 1999년 61㎍/㎥에서 2015년 60㎍/㎥으로 소폭 낮아진 반면 한국은 66㎍/㎥에서 69㎍/㎥로 증가했다. 2015년 중국(65㎍/㎥)과 일본(61㎍/㎥)보다 못한 수준이다.

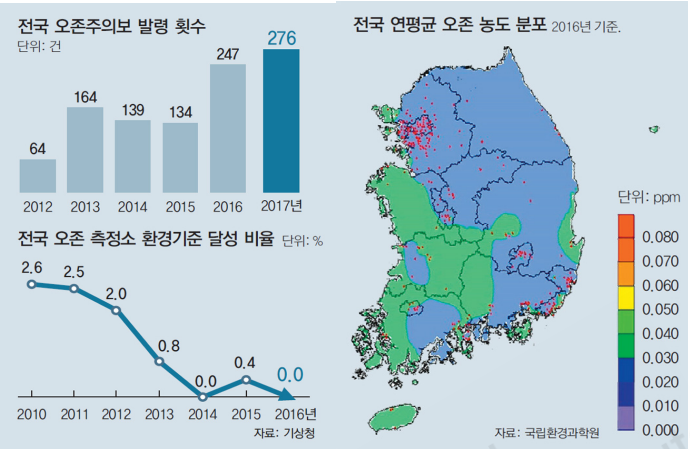
미세먼지로 인한 연간 사망자 수는 1990년 연 1만5,100명에서 2015년 1만8,200명으로 늘었다. 오존으로 인한 사망자 역시 1990년 350명에서 2015년 810명으로 증가했다. HEI는 이들 사망자 추정 근거를 공개하지는 않았다.

이날 HEI는 세계 각국의 미세먼지와 오존 등 대기오염 실태와 사망자 추이를 홈페이지(www.stateofglobalair.org)에 공개했다.

(출처 : http://www.hankookilbo.com/News/Read/201702161658026423)

2018-05-28	오존이 초미세먼지 만드는 숨은 주범이었네

車 배기가스·석유 공장서 배출… 눈에 보이지 않아 심각성 몰라
국내 오존주의보 5년새 4배 급증… 최근엔 봄부터 가을까지 발생
"미세먼지와 오존 함께 관리해야"



최근 국내 오존주의보 발령 횟수가 계속 늘고 있다. 그만큼 사람들이 더 자주, 더 많이 오존에 노출되는 셈이다. 눈에 보이지 않는 오존에 의한 인체 건강 위협을 더 이상 간과할 수 없다는 지적이 나온다.

27일 환경부의 대기 질 측정 데이터베이스(DB) '에어코리아'에 따르면 전국 오존주의보 발령 횟수는 2012년 64건에 불과했지만 지난해 276건으로 5년 만에 4.3배 이상으로 늘었다. 같은 기간 오존 측정소는 2012년 전국 247곳에서 2017년 261곳으로 14곳밖에 늘지 않았다. 권역별 오존주의보 발령 횟수가 실질적으로 늘었다는 뜻이다. 국내에서 오존주의보는 대기 중 오존 농도가 1시간 평균 0.12ppm 이상일 때, 오존 경보는 1시간 평균 0.3ppm 이상일 때 각각 발령된다.

우리가 숨쉬며 생활하는 지표면 인근의 오존은 자동차 배기가스의 질소산화물(NOx)과 석유화학 공장 등에서 배출되는 벤젠, 톨루엔 같은 휘발성유기화합물(VOCs) 등이 광(光)화학 반응을 일으키면서 생성된다. 다른 물질과 쉽게 반응하는 특성 때문에 하수 살균, 악취 제거 등에 쓰이지만 호흡을 통해 인체에 유입될 경우에는 천식, 폐기종 등 호흡기 질환과 각종 심장 질환을 일으키거나 악화시킬 수 있다. 특히 어린이, 노약자, 호흡기 질환자 등 취약 계층에게는 치명적인 대기오염물질로 꼽힌다.

그러나 환경 기준 달성률은 매우 낮은 실정이다. 1993년 환경부는 오존 농도에 대한 환경 기준을 8시간 평균 0.06ppm 이하로 강화했지만, 최근 5년간 이 기준치를 달성한 오존 측정소는 전체의 1% 미만에 그친다. 특히 2014년과 2016년에는 전국 오존 측정소 261곳 중 단 한 곳도 환경 기준을 만족시키지 못했다. 1시간 평균 기준치(0.1ppm 이하)를 만족시킨 곳도 2014년과 2016년 각각 37.5%, 26.8%에 불과했다.

고농도 오존은 기온이 높고 일사량이 많은 여름에 주로 나타나는데, 최근 들어서는 봄부터 가을까지 오존주의보가 이어지는 추세다. 지구온난화 여파로 지표면의 평균 기온은 계속 높아지는 반면 오염물질 배출량은 오히려 늘고 있기 때문이라고 전문가들은 지적한다. 수도권 기준 2012년 첫 오존주의보는 6월 3일 발령됐지만 2015년 5월 27일, 2016년 5월 17일, 지난해 5월 1일로 점점 앞당겨지면서 올해는 4월 19일부터 오존주의보가 발령됐다. 관측 사상 가장 뜨거운 해 1, 2위였던 2016년, 2017년 오존주의보는 9월 말까지 이어졌다. 그만큼 연평균 오존 농도는 더 높아졌다.

국립환경과학원이 지난해 발표한 보고서 '대기환경연보 2016'에 따르면 오존 생성 기여율이 가장 높은 VOCs는 용매로 쓰이는 톨루엔과 자일렌, 석유화학 제품의 원료로 활용되는 에틸렌 등으로 나타났다. 국립환경과학원 관계자는 "기온이 전반적으로 높아지고 있기 때문에 일정 수준의 대기 질 개선 효과를 보려면 과거보다 배출량을 더 많이 줄여야 하는 상황이 됐다"고 설명했다.

게다가 오존은 대기오염물질인 동시에 온실가스이기 때문에 지구온난화를 더 가속시키는 역할을 한다. 이는 지표에 더 많은 오존을 생성하는 악순환으로 이어진다. 또 산화력이 강해 초미세먼지(PM2.5)를 생성하는 데도 관여한다. 김세웅 미국 어바인 캘리포니아대 지구시스템과학과 교수는 "한국에선 미세먼지에 집중하고 있지만 결국 오존과 미세먼지는 통합적으로 관리돼야 한다. 중국도 미세먼지에서 오존으로 눈을 옮기고 있다"고 말했다. 이어 그는 "목표치(환경 기준)를 실현 불가능한 수준으로 너무 높게 잡은 것은 아닌지 검토할 필요가 있다"고 덧붙였다.

(출처 : http://news.donga.com/3/all/20180527/90275390/1)

2018-08-03	찜통 더위 한반도 초열대야+폭염+미세먼지+오존… '헬서울' 4중고

주말엔 영남 지역 최고 40도 예보, 태풍 '산산' 한국 영향 못 미칠 듯

'초열대야(아침 최저기온 30.4도)→폭염(낮 최고기온 37.9도)→미세먼지(나쁨)+오존(나쁨).'
3일 아침 초열대야 현상으로 시작한 서울은 한낮 폭염 속 고농도 미세먼지와 오존이 더해지며 그야말로 '4중고'를 겪었다. 이날 기상청과 에어코리아에 따르면 서울의 낮 최고기온은 37.9도. 어제와 같은 기온을 기록하며 여전히 불볕더위가 맹위를 떨쳤다. 전날(30.3도)에 이어 이날 아침 최저기온은 30.4도로 0.1도 더 높아지면서 이틀 연속 역대 기록을 갈아치웠다. 초열대야와 폭염에 더해 오후 2시를 기해서는 오존 농도가 높아지면서 서울 대부분의 지역에 오존주의보가 발령됐다. 서울시는 1시간 평균 오존 농도가 0.12ppm 이상이면 주의보를 발령하는데 이날이 사흘째 발령이었다. 초미세먼지(PM2.5)도 가세해 오후 3시 기준 대부분의 지역이 '나쁨'(36~75㎍/㎥) 수준을 기록하는 등 대기환경마저 악화됐다.
주말에는 그동안 서쪽 지역에 비해 상대적으로 기온이 낮았던 영남 지역이 다시 뜨거워지면서 '대프리카'(대구와 아프리카의 합성어)가 다시 기승을 부릴 전망이다. 서울, 대전, 광주의 낮 최고기온이 4일 37도, 5일 36~37도를 기록하는 등 중서부지역 기온은 조금은 내려갈 것으로 보인다. 반면 경북 영천, 군위, 의성의 낮 최고기온은 40도, 대구, 경남 합천·밀양 등은 39도까지 오르며 영남 지역은 주말 내내 무더울 것으로 예보됐다. 윤기한 기상청 통보관은 "북태평양 고기압 중심이 제주도와 일본 남쪽에 위치하면서 남서풍이 불겠다"며 "지면에 의해 데워진 공기가 소백산맥을 넘으면서 공기를 가두는 분지형태가 많은 영남지역의 기온을 끌어올릴 것"으로 분석했다.
기상청은 또 주말에도 낮 동안에 오른 기온이 밤사이에도 내려가지 못해 열대야가 나타나는 곳이 많을 것으로 보고 온열질환 관리와 농·수·축산물 관리에 각별히 유의할 것을 당부했다. 한편 이날 오전 9시 괌 북동쪽 870㎞ 부근 해상에서 발생한 제13호 태풍 '산산'은 일본 동쪽으로 이동하면서 우리나라에는 영향을 미치지 않을 전망이다.
(출처 : http://www.hankookilbo.com/News/Read/201808031670060167)

2018-08-04	초열대야-미세먼지-오존 '숨막히는 3중고'

서울 연이틀 아침 최저 30도 넘겨

서울의 잠 못 이루는 밤이 이틀 연속 이어졌다. 3일 서울의 아침 최저기온이 30.4도를 기록한 것. 서울의 밤사이(오후 9시~오전 6시) 기온이 이틀 연속 30도를 넘겨 '초열대야'를 나타낸 것은 1907년 근대 기상관측 이래 처음이다. 2일 낮 기온(최고 37.9도)이 전날(최고 39.6도)보다 떨어진 것을 감안하면 이례적이다.
기상청은 "구름이 복사냉각(밤새 열이 반사되며 지면의 기온이 떨어지는 현상)을 막았고 대기 중 습도가 높았던 것이 원인"이라고 설명했다. 이날 인천과 강원 홍천, 충북 청주 등도 역대 최고 최저기온보다 높은 아침 기온을 나타냈다. 서울과 인천에서는 한때 고농도 미세먼지가 나타났다. 이날 낮 12시 초미세먼지(PM2.5) 일평균 농도는 서울이 ㎥당 35㎍, 인천은 40㎍을 기록해 나쁨 수준(36㎍ 이상)에 근접하거나 초과했다. 전국 대부분 지역에서는 오존주의보도 이어졌다.
주말인 4, 5일에는 전국 대부분의 지역에서 낮 최고기온이 35도 이상 오르면서 무더위가 이어지겠다. 특히 4일은 경북 내륙을 중심으로 38도 이상 오를 것으로 전망된다.
(출처 : http://news.donga.com/3/all/20180804/91371082/1)

2018-11-26	서울 초미세먼지 기준 초과 '139일'…오존농도 증가 추세

마포구·양천구 초미세먼지 연평균 농도 각각 28㎍/㎥로 25개 자치구 중 가장 높아

지난해 서울의 초미세먼지 수치가 세계보건기구(WHO)의 권고기준을 만족하지 못한 날이 총 139일로 집계됐다.
26일 서울시가 발표한 '2017년 서울대기질 평가보고서 분석'에 따르면 WHO의 일평균 초미세먼지 권고기준인 25㎍/㎥ 이상에 해당하는 일수는 139일이었다. 미세먼지 권고기준 50㎍/㎥를 넘은 날은 106일로 나타났다. 서울 전체로 봤을 때 초미세먼지 농도는 2016년에 비해 1㎍/㎥ 감소한 25㎍/㎥였고, 미세먼지는 4㎍/㎥ 줄어든 44㎍/㎥였다.
지난해 '미세먼지 주의보'는 3회, '초미세먼지 주의보'는 5회 발령됐다. 미세먼지 주의보는 미세먼지 농도가 시간당 평균 150㎍/㎥ 이상으로 2시간 지속될 때, 초미세먼지 주의보는 시간당 90㎍/㎥ 이상으로 2시간 이어질 때 발령된다. 초미세먼지 주의보는 지난 7월부터 기준이 개정돼 시간당 평균이 90㎍/㎥가 아닌 75㎍/㎥로 바뀌었다.
자치구별로 보면 마포구·양천구의 초미세먼지 연평균 농도가 각각 28㎍/㎥로 가장 높았다. 미세먼지 평균농도가 가장 높은 곳은 영등포구 49㎍/㎥였고, 가장 낮은 곳은 강북구 37㎍/㎥로 편차가 최고 12㎍/㎥였다.
오존(O_3)의 연평균 농도 분포는 증가하는 경향을 보였다. 지난해 측정소별 연평균 오존 오염도는 25개 측정소 가운데 0.011~0.020ppm 2개소, 0.021~0.030ppm 22개소, 0.031ppm 1개소였다. 2009년 각각 9개소, 16개소, 0개소였던 것과 비교된다.
서울시 관계자는 "서울은 지리적으로 북한산·도봉산·관악산 등으로 둘러싸인 분지형태의 대도시로 대기 확산이 어렵고, 인구·교통 집중 현상과 중국 공업화·사막화 등 영향으로 대기질 악화에 영향을 미칠 요인들이 산재돼 있다"고 설명했다.
(출처 : http://view.asiae.co.kr/news/view.htm?idxno=2018112611190292214)

2_초미세먼지·오존 고농도 발생 사례(2013~2017)

1) 초미세먼지 주의보 발령 사례

[초미세먼지 주의보 발령 및 해제 기준]

구분	주의보 발령	주의보 해제
2013년~2014년	시간당 평균 85㎍/㎥ 2시간 이상 지속 (25개 측정소 전체 평균)	시간당 평균 50㎍/㎥ 이하 (2개 측정소 전체 평균)
2015년	24시간 이동평균 65㎍/㎥ 초과 또는 시간당 평균 120㎍/㎥ 이상 2시간 지속 (25개 중 **1개 측정소**가 기준 초과 시 전역 발령)	24시간 이동평균 50㎍/㎥ 미만 또는 시간당 평균 100㎍/㎥ 이하
2016년~2018년 6월	시간당 평균 90㎍/㎥ 2시간 이상 지속 (25개 측정소 전체 평균)	시간당 평균 50㎍/㎥ 이하 (2개 측정소 전체 평균)
2018년 7월	시간당 평균 75㎍/㎥ 2시간 이상 지속 (25개 측정소 전체 평균)	시간당 평균 35㎍/㎥ 이하 (2개 측정소 전체 평균)

[초미세먼지 주의보 세부 발령내역]

구분	발령일자	시각	농도(㎍/㎥)	해제일자	시각	농도(㎍/㎥)
2013년 (1회)	2013-12-05	16:00	94	2013-12-06	00:00	47
2014년 (6회)	2014-01-17	11:00	95	2014-01-17	16:00	48
	2014-01-21	22:00	89	2014-01-22	15:00	34
	2014-02-24	12:00	92	2014-02-27	15:00	50
	2014-04-16	17:00	91	2014-04-17	01:00	47
	2014-04-23	22:00	87	2014-04-24	13:00	49
	2014-12-29	17:00	93	2014-12-30	14:00	43
2015년 (6회)	2015-02-23	01:00	131(강서)	2015-02-23	20:00	50
	2015-03-17	12:00	100(중랑)	2015-03-17	15:00	31
	2015-03-21	17:00	125(마포)	2015-03-22	14:00	79
	2015-08-16	10:00	이동평균 70(강서) 이동평균 68(종로)	2015-08-16	20:00	18
	2015-10-21	15:00	101(종로)	2015-10-22	03:00	100
	2015-11-05	10:00	103(양천)	2015-11-05	13:00	50
2016년 (0회)	-			-		
2017년 (5회)	2017-01-02	17:00	107	2017-01-03	16:00	40
	2017-01-18	16:00	96	2017-01-19	19:00	46
	2017-03-20	21:00	114	2017-03-21	11:00	45
	2017-12-23	14:00	103	2017-12-24	12:00	30
	2017-12-30	11:00	100	2017-12-31	8:00	49

서울연구원 The Seoul Institute

2) 오존 주의보 발령

[오존 주의보 세부 발령내역]

일자	발령시각	해제시각	지속시간	권역	측정소	O_3(ppm)	NO_x(ppm)	기온(℃)	습도(%)	풍속(m/s)	풍향
2013-05-23	15:00	21:00	6:00	북동	노원	0.131	0.020	28.7	28	1.3	S
2013-05-23	16:00	20:00	4:00	남서	양천	0.120	0.082	26.9	45	1.6	SW
2013-05-23	19:00	20:00	1:00	남동	강남	0.128	0.068	23.1	35	1.4	WSW
2013-06-07	16:00	17:00	1:00	북동	노원	0.127	0.025	30.5	29	1.5	E
2013-06-08	19:00	20:00	1:00	북동	노원	0.128	0.042	28.8	45	1.7	NW
2013-06-08	19:00	20:00	1:00	북동	도봉	0.012	0.042	28.8	53	1.5	E
2013-06-14	14:00	15:00	1:00	남서	강서	0.123	0.027	28.4	37	1.4	W
2013-06-14	15:00	18:00	3:00	남동	강동	0.121	0.022	29.2	39	1.0	SSW
2013-06-14	16:00	18:00	2:00	북동	노원	0.131	0.032	28.3	40	1.8	W
2013-06-21	16:00	18:00	2:00	남서	양천	0.123	0.027	29.8	41	1.4	SW
2013-06-30	15:00	19:00	4:00	남서	강서	0.124	0.023	30.5	41	1.3	WNW
2013-06-30	16:00	19:00	3:00	북동	성동	0.132	0.023	30.9	41	2.3	S
2013-06-30	16:00	19:00	3:00	북동	동대문	0.125	0.018	31.7	50	2.1	NW
2013-06-30	16:00	20:00	4:00	남동	강남	0.136	0.027	31.0	48	2.3	W
2013-06-30	16:00	20:00	4:00	남동	강동	0.124	0.024	31.4	41	0.7	W
2013-06-30	17:00	19:00	2:00	도심	중구	0.126	0.029	30.6	52	2.1	W
2013-07-01	16:00	17:00	1:00	남서	동작	0.129	0.026	30.8	43	1.2	W
2013-07-01	16:00	17:00	1:00	남동	강남	0.123	0.033	30.1	48	1.8	NW
2013-07-01	18:00	19:00	1:00	남동	강남	0.126	0.023	30.3	47	1.0	SW
2013-07-01	18:00	19:00	1:00	남동	강동	0.120	0.030	30.6	43	0.7	SW
2013-08-11	16:00	19:00	3:00	북동	도봉	0.123	0.027	34.9	49	1.1	ENE
2013-08-21	16:00	19:00	3:00	남서	영등포	0.126	0.033	33.0	42	1.2	WNW
2013-08-21	16:00	19:00	3:00	남서	강서	0.120	0.025	32.7	37	1.5	SW
2014-05-14	14:00	16:00	2:00	남동	강남	0.123	0.030	21.3		1.8	WNW
2014-05-28	15:00	16:00	1:00	남서	강서	0.123	0.028	27.5	41	1.4	NW
2014-05-28	16:00	18:00	2:00	도심	종로	0.130	0.038	28.6	45	1.6	ENE
2014-05-28	16:00	18:00	2:00	북서	서대문	0.129	0.034	27.2	50	3.0	W
2014-05-28	16:00	19:00	3:00	북동	광진	0.125	0.032	27.8	45	2.9	WSW
2014-05-28	16:00	19:00	3:00	북동	동대문	0.130	0.035	29.1	46	2.7	W
2014-05-28	16:00	19:00	3:00	북동	중랑	0.137	0.036	29.8	43	1.5	WNW
2014-05-28	16:00	19:00	3:00	북동	강북	0.122	0.033	29.8	63	1.8	SE
2014-05-28	16:00	19:00	3:00	북동	노원	0.126	0.029	28.5	37	2.3	WNW
2014-05-28	17:00	18:00	1:00	남동	송파	0.121	0.034	29.3	53	2.2	SW
2014-05-28	17:00	18:00	1:00	남동	강동	0.125	0.052	28.9	39	0.9	WSW
2014-05-30	16:00	17:00	1:00	북동	광진	0.123	0.026	29.8	24	2.6	NW
2014-05-30	16:00	17:00	1:00	북동	중랑	0.132	0.034	332.4	25	1.0	WNW
2014-05-31	13:00	17:00	4:00	남서	구로	0.125	0.025	33.2	28	1.8	NNW
2014-05-31	14:00	18:00	4:00	도심	용산	0.127	0.049	31.7	26	3.5	WSW
2014-05-31	14:00	19:00	5:00	북동	동대문	0.130	0.033	32.9	32	1.8	SW
2014-05-31	14:00	19:00	5:00	북동	중랑	0.123	0.047	33.6	32	1.3	NW
2014-05-31	14:00	18:00	4:00	남동	강남	0.128	0.033	30.3	31	1.9	N
2014-05-31	15:00	18:00	3:00	북서	서대문	0.130	0.043	30.8	34	2.8	W

일자	발령시각	해제시각	지속시간	권역	측정소	O_3(ppm)	NO_x(ppm)	기온(℃)	습도(%)	풍속(m/s)	풍향
2014-06-17	16:00	18:00	2:00	북동	중랑	0.129	0.036	30.4	43	0.8	NW
2014-06-17	16:00	18:00	2:00	북동	광진	0.127	0.023	27.8	49	1.8	SSW
2014-06-17	16:00	18:00	2:00	북동	동대문	0.123	0.028	30.1	44	1.5	SSW
2014-06-17	16:00	18:00	2:00	북동	노원	0.121	0.029	29.0	35	1.9	SSE
2014-06-17	16:00	17:00	1:00	남동	송파	0.121	0.026	30.0	51	2.2	SSE
2014-06-17	16:00	17:00	1:00	남동	강동	0.127	0.022	29.2	39	0.9	SSW
2014-06-18	15:00	18:00	3:00	북동	광진	0.123	0.023	27.8	45	3.2	WSW
2014-06-18	15:00	18:00	3:00	북동	중랑	0.126	0.030	28.1	51	1.9	WNW
2014-06-18	15:00	16:00	1:00	남동	강동	0.121	0.024	28.5	38	1.2	SW
2014-06-18	16:00	17:00	1:00	북서	서대문	0.120	0.030	27.1	51	3.2	WNW
2014-06-18	16:00	18:00	2:00	남서	강서	0.120	0.034	28.2	40	1.4	NW
2014-06-18	17:00	18:00	1:00	남동	강동	0.125	0.025	28.6	38	1.0	SW
2014-06-26	17:00	18:00	1:00	북동	노원	0.127	0.017	27.9	42	1.9	WNW
2014-07-01	17:00	18:00	1:00	도심	중	0.124	0.044	29.8	41	1.5	WNW
2014-07-01	17:00	20:00	3:00	북동	중랑	0.122	0.036	31.6	46	1.4	NW
2014-07-01	17:00	18:00	1:00	북서	서대문	0.122	0.031	29.3	53	2.2	WSW
2015-06-10	17:00	18:00	1:00	남서	구로	0.125	0.033	33.5		2.6	NE
2015-06-10	17:00	18:00	1:00	남서	관악	0.123	0.032	33.5	32	2.6	NE
2015-06-10	17:00	18:00	1:00	북서	마포	0.126	0.030	31.8	36	1.8	W
2015-06-24	14:00	17:00	3:00	남서	구로	0.124	0.017	31.5		2.4	NE
2015-06-24	14:00	17:00	3:00	남서	동작	0.130	0.021	31.5	38	2.4	NE
2015-06-24	14:00	17:00	3:00	남서	관악	0.132	0.026	31.5	47	2.4	NE
2015-08-07	15:00	16:00	1:00	남서	동작	0.121	0.022	34.1	46	1.4	WNN
2016-05-17	15:00	16:00	1:00	남서	금천	0.120	0.035	25.6	31	2.3	WSW
2016-05-20	17:00	20:00	3:00	남서	양천	0.138	0.048	26.7	34	1.5	E
2016-05-20	17:00	19:00	2:00	남서	관악	0.126	0.047	31.2	30	1.3	S
2016-05-20	18:00	20:00	2:00	남서	금천	0.127	0.060	28.1	36	2.3	SSW
2016-05-20	18:00	19:00	1:00	도심	중구	0.121	0.049	27.5	41	2.0	WSW
2016-05-20	18:00	19:00	1:00	북서	서대문	0.125	0.025	27.4	38	2.5	SW
2016-05-20	18:00	19:00	1:00	북서	마포	0.128	0.051	28.0	39	1.6	W
2016-05-22	17:00	19:00	2:00	남서	양천	0.128	0.026	30.5	26	2.2	E
2016-06-10	14:00	15:00	1:00	남서	관악	0.121	0.026	26.5	42	1.6	SSE
2016-06-20	16:00	18:00	2:00	남서	금천	0.132	0.032	29.7	48	1.5	SSW
2016-06-21	14:00	17:00	3:00	남서	양천	0.121	0.035	30.1	52	2.2	E
2016-06-21	15:00	16:00	1:00	북서	서대문	0.124	0.031	29.3	50	2.3	SSW
2016-06-21	15:00	16:00	1:00	북서	마포	0.120	0.043	26.7	56	2.3	WSW
2016-06-21	15:00	17:00	2:00	북동	성동	0.120	0.051	30.5	51	0.7	NE
2016-06-21	15:00	17:00	2:00	남동	서초	0.128	0.032	30.8	54	1.3	SW
2016-06-21	15:00	16:00	1:00	남서	금천	0.126	0.034	28.7	57	3.0	SW
2016-06-21	15:00	17:00	2:00	남서	관악	0.136	0.028	30.3	52	1.7	SE
2016-06-21	18:00	20:00	2:00	북동	강북	0.129	0.036	28.5	55	1.9	SSW
2016-06-21	18:00	20:00	2:00	북동	도봉	0.121	0.030	27.2	59	1.7	E
2016-07-08	13:00	14:00	1:00	북동	강북	0.120	0.024	31.4	49	1.8	N
2016-07-11	15:00	16:00	1:00	도심	용산	0.122	0.020	33.2	35	3.2	ESE
2016-07-11	16:00	19:00	3:00	북동	강북	0.121	0.032	34.1	40	1.9	NE
2016-07-11	16:00	17:00	1:00	남서	양천	0.147	0.034	33.9	47	2.1	E
2016-07-11	16:00	17:00	1:00	남서	금천	0.133	0.032	33.8	47	2.3	SSW
2016-07-11	17:00	19:00	2:00	북동	도봉	0.140	0.031	31.3	57	1.9	ENE
2016-07-11	17:00	19:00	2:00	북동	노원	0.125	0.028	30.4	46	2.6	WNW
2016-07-11	17:00	18:00	1:00	도심	중구	0.127	0.045	31.0	73	2.0	W

일자	발령시각	해제시각	지속시간	권역	측정소	O_3(ppm)	NO_x(ppm)	기온(℃)	습도(%)	풍속(m/s)	풍향
2016-07-19	16:00	19:00	3:00	남서	양천	0.120	0.027	32.8	43	1.9	ENE
2016-07-19	16:00	20:00	4:00	남서	구로	0.124	0.023	33.2		1.9	WSW
2016-07-19	19:00	20:00	1:00	남서	금천	0.128	0.056	30.4	56	1.5	SSW
2016-08-05	15:00	17:00	2:00	남서	양천	0.133	0.024	35.0	46	2.3	S
2016-08-05	15:00	18:00	3:00	남서	금천	0.126	0.028	35.8	44	1.6	SW
2016-08-05	16:00	18:00	2:00	남서	관악	0.130	0.034	36.4	44	1.0	SSW
2016-08-05	16:00	17:00	1:00	도심	용산	0.137	0.017	35.0	41	1.9	E
2016-08-06	13:00	17:00	4:00	도심	용산	0.125	0.025	33.5	47	3.2	SSE
2016-08-06	13:00	17:00	4:00	북동	강북	0.128	0.031	34.1	52	1.6	N
2016-08-06	13:00	16:00	3:00	북동	노원	0.124	0.023	32.0	45	1.6	SSW
2017-05-01	18:00	20:00	2:00	남서	강서	0.131	0.026	26.0	41	3.0	W
2017-05-01	18:00	19:00	1:00	남서	금천	0.122	0.036	26.0	39	1.0	S
2017-05-01	18:00	19:00	1:00	남서	동작	0.121	0.037	27.0	38	1.0	SE
2017-05-01	19:00	19:00	0:00	북동	강북	0.122	0.023	22.0	37	2.0	W
2017-05-03	15:00	18:00	3:00	남서	강서	0.130	0.030	28.8	24	2.7	WNW
2017-05-03	16:00	18:00	2:00	남서	관악	0.130	0.025	27.9	23	1.3	SW
2017-05-03	16:00	18:00	2:00	남서	동작	0.122	0.020	29.1	19	1.8	WSW
2017-05-03	16:00	17:00	1:00	남서	금천	0.128	0.029	29.1	23	2.2	SW
2017-05-03	15:00	19:00	4:00	북동	광진	0.127	0.024	28.8	27	1.2	SSW
2017-05-03	16:00	19:00	3:00	북동	노원	0.126	0.032	28.7	17	2.0	WSW
2017-05-03	17:00	19:00	2:00	북동	강북	0.143	0.034	27.9	27	3.9	W
2017-05-03	17:00	19:00	2:00	북동	도봉	0.125	0.036	27.3	26	1.7	WNW
2017-05-03	16:00	18:00	2:00	북서	은평	0.131	0.040	27.6	30	2.9	NW
2017-05-03	17:00	18:00	1:00	북서	마포	0.125	0.031	27.5	29	3.5	WNW
2017-05-03	17:00	19:00	2:00	도심	종로	0.132	0.038	28.1	25	4.4	W
2017-05-03	17:00	18:00	1:00	도심	중	0.138	0.036	27.5	27	1.3	WSW
2017-05-03	17:00	18:00	1:00	남동	서초	0.132	0.033	28.6	29	2.5	NW
2017-05-03	18:00	19:00	1:00	남동	송파	0.012	0.039	27.5	25	1.9	NW
2017-05-03	18:00	19:00	1:00	남동	강동	0.122	0.033	26.6	25	1.3	WNW
2017-05-29	13:00	17:00	4:00	남서	강서	0.129	0.025	25.9	51	2.6	WSW
2017-05-29	14:00	16:00	2:00	북동	강북	0.120	0.031	28.5	47	1.9	WSW
2017-05-29	15:00	17:00	2:00	북동	노원	0.128	0.030	28.9	37	2.0	WNW
2017-06-16	14:00	17:00	3:00	남서	강서	0.130	0.021	30.5	40	1.9	W
2017-06-16	14:00	17:00	3:00	남서	영등포	0.127	0.031	31.8	38	2.1	SSW
2017-06-16	14:00	17:00	3:00	남서	동작	0.122	0.020	31.9	41	2.2	SSW
2017-06-16	14:00	16:00	2:00	남서	금천	0.124	0.024	30.2	36	2.1	S
2017-06-16	15:00	16:00	1:00	남서	양천	0.131	0.026	32.5	37	1.3	WSW
2017-06-16	15:00	16:00	1:00	남서	구로	0.124	0.017	31.0		3.9	SW
2017-06-16	15:00	17:00	2:00	남서	관악	0.126	0.022	34.6	37	1.9	SSW
2017-06-16	14:00	18:00	4:00	북동	성동	0.127	0.019	31.2	39	2.0	SSW
2017-06-16	14:00	18:00	4:00	북동	강북	0.134	0.032	29.9	37	1.5	S
2017-06-16	14:00	19:00	5:00	북동	노원	0.134	0.022	31.0	33	1.2	NNW
2017-06-16	15:00	17:00	2:00	북동	중랑	0.124	0.023	32.0	36	1.4	NE
2017-06-16	15:00	18:00	3:00	북동	광진	0.125	0.025	31.8	40	1.4	NW
2017-06-16	15:00	18:00	3:00	북동	도봉	0.133		31.1	36	1.9	NE
2017-06-16	14:00	18:00	4:00	도심	종로	0.124	0.029	32.1	40	1.9	WSW
2017-06-16	14:00	17:00	3:00	도심	용산	0.121	0.020	30.9	34	1.3	SE
2017-06-16	15:00	18:00	3:00	도심	중	0.137	0.036	32.7	40	1.1	WSW
2017-06-16	14:00	17:00	3:00	북서	은평	0.124	0.034	30.6	42	2.5	WSW
2017-06-16	15:00	16:00	1:00	북서	서대문	0.120	0.033	32.3	38	1.3	W
2017-06-16	15:00	17:00	2:00	북서	마포	0.138	0.021	32.0	39	3.7	WNW

일자	발령시각	해제시각	지속시간	권역	측정소	O_3(ppm)	NO_x(ppm)	기온(℃)	습도(%)	풍속(m/s)	풍향
2017-07-05	17:00	18:00	1:00	북동	동대문	0.123	0.027	31.8	50	2.3	NNW
2017-07-05	17:00	19:00	2:00	북동	강북	0.120	0.023	32.5	50	3.4	W
2017-07-05	18:00	19:00	1:00	북동	노원	0.125	0.019	30.9	43	1.4	WSW
2017-07-05	17:00	18:00	1:00	북서	은평	0.126	0.027	30.4	55	1.9	WNW
2017-07-05	17:00	18:00	1:00	남서	금천	0.124	0.021	32.7	47	1.2	WSW
2017-07-05	17:00	19:00	2:00	도심	중	0.127	0.034	32.6	50	0.7	WSW
2017-07-06	15:00	18:00	3:00	도심	중	0.120	0.040	33.7	49	0.5	W
2017-07-06	17:00	18:00	1:00	도심	종로	0.127		32.5	55	3.8	W
2017-07-06	15:00	18:00	3:00	북동	강북	0.130	0.026	33.6	48	1.6	ENE
2017-07-06	15:00	18:00	3:00	북동	동대문	0.121	0.022	32.5	47	1.7	S
2017-07-06	17:00	18:00	1:00	북동	노원	0.121	0.022	30.9	41	1.6	N
2017-07-06	15:00	18:00	3:00	북서	은평	0.136	0.027	32.8	52	1.3	W
2017-07-06	15:00	16:00	1:00	북서	마포	0.120	0.019	32.5	49	1.8	S
2017-07-06	15:00	16:00	1:00	남서	영등포	0.131	0.029	33.3	49	0.9	N
2017-07-06	15:00	16:00	1:00	남서	강서	0.129	0.017	32.6	47	1.5	WNW
2017-07-13	16:00	17:00	1:00	남동	강동	0.124	0.030	31.3	46	1.1	WNW
2017-07-13	16:00	17:00	1:00	남동	송파	0.120	0.030	32.0	53	1.4	NW
2017-07-13	15:00	16:00	1:00	북동	동대문	0.122	0.020	32.0	53	2.4	NNW
2017-07-20	15:00	17:00	2:00	북동	노원	0.131	0.025	33.1	46	1.5	SE
2017-08-03	15:00	16:00	1:00	남서	강서	0.123	0.023	34.4	60	1.7	W

서울연구원 The Seoul Institute

Abstract

A Study for Developing an Integrated Air Quality(Ozone and PM2.5) Management Framework in Seoul

WoonSoo Kim · Sangyoung Shin · Jeong-Ah Kim

Based on air quality monitoring statistics from the air quality network in Seoul until 2017, one of the dominant air pollutant episodes affecting citizens' health condition is closely related to both ozone (O_3) at ground level and fine particulate matter (PM2.5) concentration. In Seoul, O_3 and PM2.5 pollution, as major air pollutants that exert significant effects on human health, would not be easily reduced, despite great implementation of policy options for emission reduction. Analysis shows that the city of Seoul now encounters quadruple difficulty in dealing with increasing pattern of average O_3 concentrations, occurrence of spatially hot spot episodes, high relative risk of human health, and additive impacts of urban climate change. In addition, as the concentrations of fine PM increase, visibility deceases, making the control of fine PM a crucial component of haze reduction programs in Seoul.

The objective of this study was to provide Seoul's overall process for developing an integrated air quality (Ozone and PM2.5) management framework. Developing strategies of air quality management in Seoul however would be a difficult task because formation of air pollutants is interdependent and air quality at different locations may have different responses to emissions from common sources. Hence, to prepare an integrated strategy for air quality management, empirical analysis is conducted to determine the formation of O_3 and PM2.5 mechanism in Seoul thorough air quality monitoring data. Moreover,

to suggest policy options, integrated management system is proposed based on conceptual model.

To address the issue of integrated air quality management, empirical analysis is implemented to test a strategy of integrated management of O_3 and PM2.5 pollution simultaneously. Reduction of VOCs and NOx pollutants from various emission sources separately is also examined, which mean there may be a decrease in average concentration of ozone level. Considering the interaction of PM2.5 and O_3 air compound pollution over air shed, it is important to consider quantification of the enhanced effectiveness of NOx control from simultaneous reduction of VOCs pollutants from the air in Seoul.

Finally, with a view to alleviating harmful health impact from O_3 and PM2.5 pollution, the following multi-pollutant planning directions to O_3 and PM2.5 episodes would be required. 1) Preparation of a document guiding Seoul on developing an integrated air quality (O_3 and PM2.5) management. 2) Modification of integrated system for air quality management: Installment & operation of O_3 and PM2.5 monitoring stations to observe the formation of pollution concentration and survey & establishment of micro-level emission inventory. 3) Provision for O_3 and PM2.5 episodes alert/warning system, following multi-pollutant planning strategies. 4) Establishment of governance system to promoting actual status related to Ozone and PM2.5 implementation. Consideration should be given to how to consult key stakeholders so that their input and interests are included in the current state assessment, thereby engaging stakeholders in creating a solution to a problem and the process of developing O_3 and PM2.5 management plan.

Contents

01 Introduction

1_Background and Purpose

2_Research Framework

02 Overview Of the Air Quality Management Framework

1_Issues and Management Conditions for Ozone and PM2.5

2_Air Quality Assessment of Ozone and PM2.5

03 Empirical Analysis on Integrated Management of Ozone and PM2.5

1_Health Impacts of Ozone and PM2.5 Pollution

2_Empirical Analysis of Ozone and PM2.5 Developing Mechanism

3_Findings of Empirical Analysis

04 Case Studies of Foreign Cities' Integrated Ozone and PM2.5 Management

1_Cases of Integrated Management of Ozone and PM2.5

2_Implications

05 Policy Directions to Integrated Management of Ozone and PM2.5 in Seoul

1_Conceptual Model based Integrated Management System

2_Integrated Management of Ozone and PM2.5

서울연구원 The Seoul Institute

서울연 2018-PR-49

서울시 미세먼지·오존 통합관리 전략

발행인 _ 서왕진

발행일 _ 2018년 12월 31일

발행처 _ 서울연구원

ISBN 979-11-5700-379-2 93330 8,000원

06756 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57

본 출판물의 판권은 서울연구원에 속합니다.