

SDI 정책리포트

대기질 관리 패러다임의 변화 : 오염물질 통합관리

2011. 4. 4 제86호

최유진 / 서울시정개발연구원 부연구위원

〈 목 차 〉

요약

- I. 서울의 대기질 현황과 과제
- II. 대기질 관리 해외사례
- III. 효율적 대기질 관리를 위한 전략

요 약

서울의 대기질 문제는 이산화황(SO₂), 일산화탄소(CO) 등 1차 오염물질보다는 오존(O₃), 이산화질소(NO₂), 미세먼지(PM10) 등 2차 오염물질이 문제시되는 선진국형으로 변하고 있다.

개별오염물질 관리에 집중하는 대기질 관리 방식

2차 오염물질은 생성 및 소멸과정이 복잡하게 얽혀 있어 관리가 까다로울 뿐 아니라 상호 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 개별 오염물질 관리에 집중하는 기존의 대기관리 방식은 1차 오염물질 관리에는 효과적이지만 2차 오염물질 관리 방식으로는 부적합하다는 지적이 나오고 있다. 그 동안 서울시는 미세먼지(PM10)와 이산화질소(NO₂)을 중심으로 적극적인 저감 방안을 추진해 왔으며, 어느 정도 효과가 있는 것으로 조사되었다. 이제는 오존(O₃)까지 포함한 대기관리를 위해 통합적인 대기관리 방법을 모색할 필요가 있다.

선진국은 통합적 대기관리로 전환 중

대기질 관리는 대체로 4단계로 구분되는데, 1단계 오염물질 개별관리 (Level 1) 방식은 우리나라를 포함한 대부분의 도시나 국가에서 시행하고 있다. 최근 선진국을 중심으로 Level 1 방식이 2차 오염물질의 관리에는 비효과적이라는 인식이 확산되면서 위해성 최소화를 목적으로 하는 오염물질 통합관리(Level 2 이상)로 관리방식이 전환되고 있다. 미국 디트로이트 등 일부 지역에서는 Level 3의 대기관리 방식을 시도하고 있으며, 이와 더불어 기후변화와 연계한 대기질-온실가스의 통합관리로까지 연구를 확대하고 있다. 이는 단순히 온실가스 배출량과 연계하는 초보적인 대기질-온실가스 통합관리에서 벗어나 기후변화에 영향을 미칠 수 있는 오염물질들의 광화학적 작용까지 고려하는 통합적 접근 방법이다.

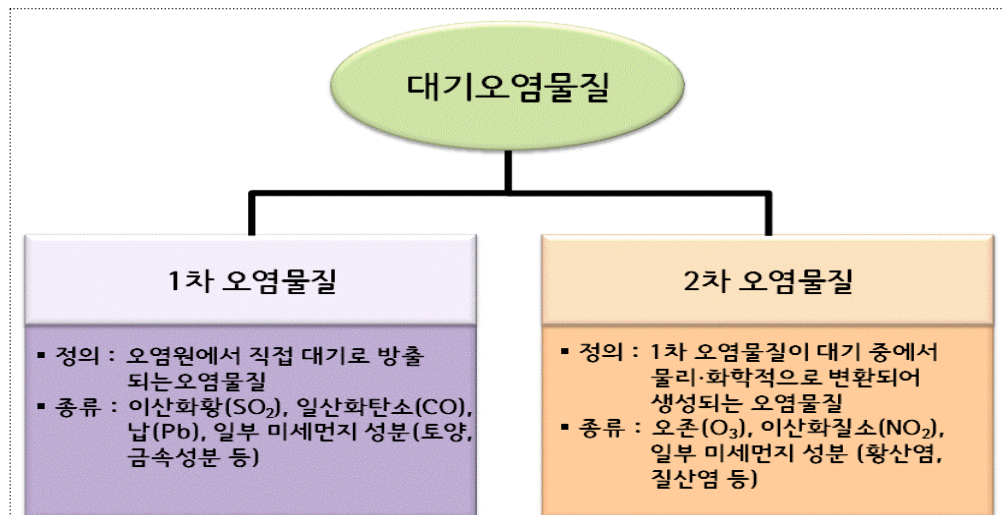
개별관리에서 통합관리로 오염물질 관리 방향의 점진적 전환

서울의 대기질 역시 오존(O₃), 이산화질소(NO₂), 미세먼지(PM10) 등 2차 오염물질이 문제시되고 있으므로 효과적인 관리를 위해서는 오염물질을 통합관리하는 Level 2 이상으로 관리방식의 전환이 필요하다. 이를 위해서는 첫째, 통합관리를 위한 인적·물적 기반을 구축한다. 우선, 복잡·다양해지는 대기관리를 위하여 전문 지식 및 기술수준을 갖춘 전문조직을 확보한다. 대기모델링 센터를 설립하여 대기질 모델링과 인체위해성 평가를 연계하는 건강영향평가 모델을 도입하고 정책의 우선순위를 결정한다. 또한 서울의 대기질은 서울시 자체만으로는 해결이 어려운 만큼 수도권 공조체계 구축이 중요하다. 둘째, 환경기준 달성인지 또는 위해성 최소화인지 정책목표에 따라 정책의 우선순위가 달라진다는 점에서 정책목표를 확실히 하고 대기질 관리 단계를 Level 2 이상으로 업그레이드할 필요가 있다.

1. 서울의 대기질 현황과 과제

선진국형으로 변화하는 서울의 대기질 문제

- 대기오염물질은 생성과정에 따라 1차 오염물질과 2차 오염물질로 분류
 - 1차 오염물질은 오염원에서 직접 대기로 방출되는 물질로 방출 즉시 대기를 오염
 - 이산화황(SO₂), 일산화탄소(CO), 납(Pb), 도로비산먼지 등의 성분이 해당
 - 2차 오염물질은 1차 오염물질이 대기 중에서 물리·화학적 변환으로 생성되는 오염물질
 - 오존(O₃), 이산화질소(NO₂), 황산염, 질산염 등 일부 미세먼지 성분이 해당



주 : 미세먼지는 대기 중에 존재하는 다양한 입자상 성분(토양, 황산염, 질산염, 탄소, 금속 등)을 총칭하며, 입자 직경이 10 μ m 이하인 입자는 PM10으로, 2.5 μ m 이하인 입자는 PM2.5로 정의. PM10=PM2.5(미세입자)+ (PM10-PM2.5)(거대입자)

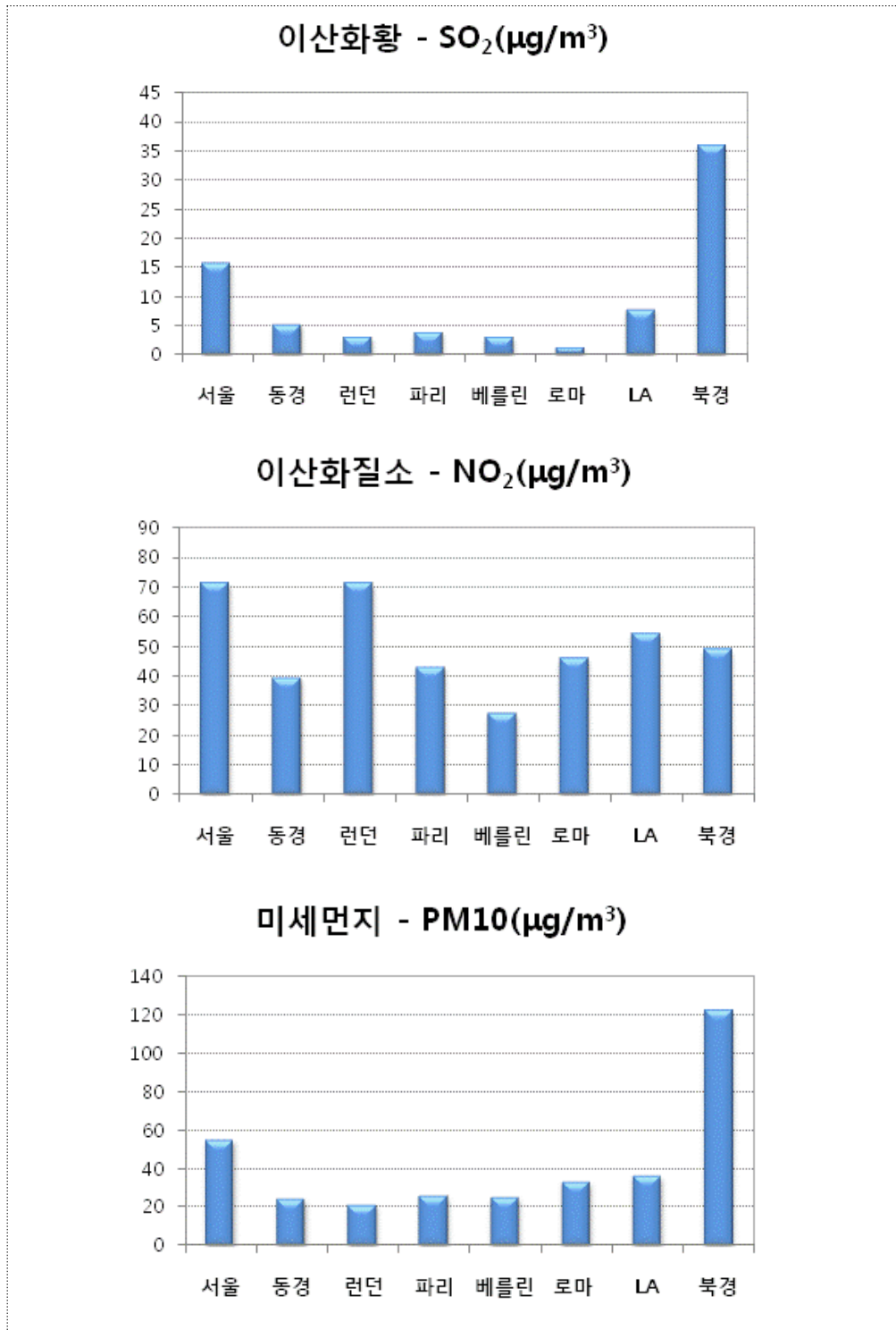
[그림 1] 대기오염물질의 생성과정에 따른 분류

- 서울의 대기문제는 1차 오염물질보다는 2차 오염물질이 문제시되는 선진국 형으로 변화
 - 이산화황(SO₂), 일산화탄소(CO) 등 1차 오염물질의 오염도는 선진국 수준에 도달하여 환경기준 이하로 유지
 - 오존(O₃), 이산화질소(NO₂), 미세먼지(PM10) 등 2차 오염물질은 장·단기 환경기준 초과 사례 꾸준히 발생
 - 이산화질소(NO₂), 미세먼지(PM10)는 환경기준 초과 사례가 발생하나 다양한 저감사업의 적극적 추진의 결과로 최근 감소 추세
 - 오존(O₃)은 광화학 반응이 활발한 5~8월에 단기환경기준을 초과하는 사례가 지속적으로 발생하고 있으며 단기기준 초과횟수가 증가하는 상황

<표 1> 서울시 대기오염물질의 연도별 농도 변화

구분		2007년	2008년	2009년
1차 대기오염물질	이산화황(SO ₂) (ppm)	0.006	0.006	0.005
	일산화탄소(CO) (ppm)	0.7	0.6	0.6
2차 대기오염물질	이산화질소(NO ₂) (ppm)	0.038	0.038	0.035
	미세먼지(PM10) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	61	55	54
	오존(O ₃) (ppm)	0.018	0.019	0.021

주: 서울시 연평균 대기환경기준은 SO₂ 0.01ppm, NO₂ 0.03ppm, PM10 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



주: 동경의 미세먼지는 PM10이 아니라 SPM으로 다른 도시의 미세먼지 정의와 다름.
단위는 25℃, 1기압기준으로 환산함.

자료: 서울시, 2010, 「서울의 대기질 평가보고서」; <http://www.epa.gov>; <http://www.airqualitynow.eu>

[그림 2] 서울과 해외도시의 대기현황 비교(2008년)



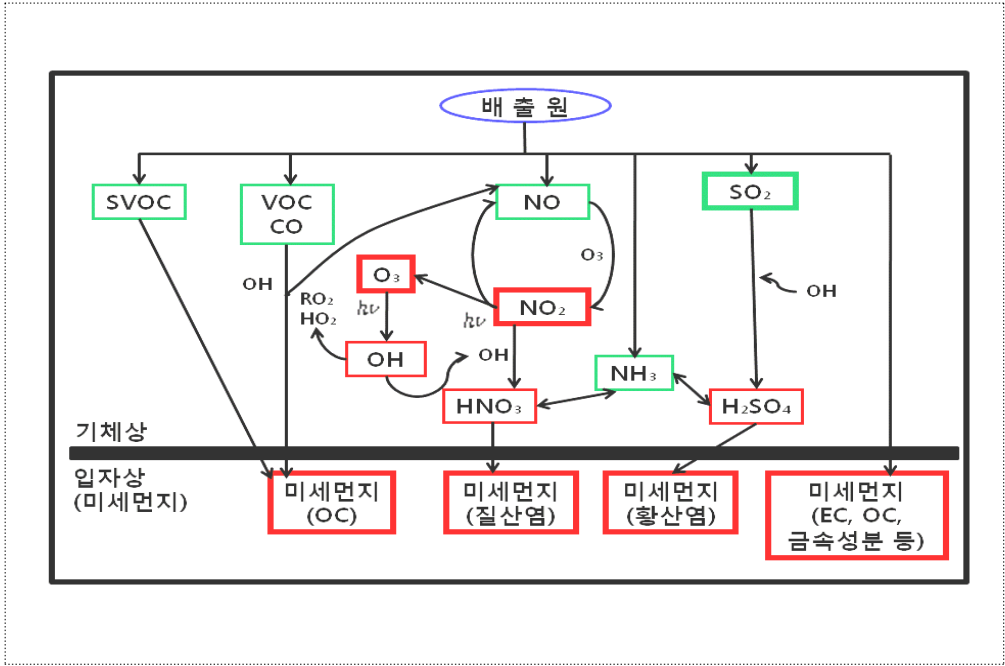
주: 서울시 대기환경기준은 NO₂ 24시간평균 0.06ppm, PM10 24시간평균 100 μ g/m³, O₃ 8시간평균 0.06ppm

[그림 3] 서울시 대기오염물질별 단기 대기환경기준 초과횟수

개별오염물질 관리 방식의 한계

- 2차 오염물질은 생성 및 소멸과정이 복잡하게 얽혀 관리가 까다로울 뿐 아니라 상호 연관되어 발생
 - 미세먼지(PM10)는 비산먼지처럼 배출원에서 직접 배출되는 1차형과 휘발성 유기화합물(VOC), 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx) 등이 대기 중에서 반응하여 생성되는 2차형 오염물질로 구성
 - 이산화질소(NO₂)는 일산화질소(NO)의 산화반응으로, 오존(O₃)은 질소산화물(NOx)과 휘발성 유기화합물(VOC)의 광화학 반응으로 생성
 - 질소산화물(NOx)과 휘발성 유기화합물(VOC)은 오존(O₃), 이산화질소(NO₂), 미세먼지(PM10) 생성에 공통으로 참여하여 서로간의 농도에 영향

VOC : 대기 중에 휘발되어 약취나 오존을 발생시키는 휘발성 유기화합물의 총칭
 SOx : SO₂와 SO₃와 같은 황산화물의 총칭. 주로 황 함유 화석연료의 연소시 발생
 NOx : 질소와 산소의 화합물로, 연소과정에서 공기 중의 질소가 고온에서 산화되어 발생하며, 일산화질소(NO), 이산화질소(NO₂)를 포함



[그림 4] 대기오염물질들의 상호 관련성

- 오염물질 개별관리 방식은 1차 오염물질에는 효과적이거나 2차 오염물질 관리에는 부적합
 - 기존의 오염물질 개별관리는 각 오염물질을 독립적 물질로 보고, 각 오염물질의 저감방안이 다른 오염물질의 농도에 미치는 영향은 간과
 - 단지, 대기오염물질 저감정책이 삭감할 수 있는 1차 오염물질들의 배출량 정도만을 산출하는 수준
 - 오염물질 간의 상호연관성이 고려되지 않은 오염물질 개별관리 형식으로 2차 오염물질 관리에는 한계

- 특히 질소산화물(NOx)과 휘발성 유기화합물(VOC)의 광화학반응으로 생성되는 오존(O₃)은 단순히 두 전구(前驅)물질의 배출량을 감소시키는 것만으로는 역효과 초래 가능
 - 질소산화물(NOx)과 휘발성 유기화합물(VOC) 배출 저감량의 절대량뿐 아니라 두 물질의 저감비율에 따라 대기 중 나타나는 오존(O₃) 농도가 개선 또는 악화
- 일부 대기관리 정책들은 여러가지 1차 오염물질을 동시에 저감하는 효과
 - 가장 중점적으로 추진하고 있는 자동차 정책들의 경우, 미세먼지(PM10) 뿐 아니라 오존(O₃)과 이산화질소(NO₂)를 생성하는 질소산화물(NOx)과 휘발성 유기화합물(VOC)의 배출에도 영향

<표 2> 저감정책과 관련 오염물질(예시)

분야	저감정책		대기오염물질			
			PM10	NOx	SOx	VOC
면배출원 관리	유기용제 관리	친환경 도료 사용 확대				✓
		도장 세정시설 비산배출허용기준 설정				✓
		소비재유기용제 함량 제한				✓
		아스팔트 포장방법 개선				✓
		주유소 Stage II 관리				✓
		가정용 저NOx보일러 보급		✓		
비산먼지 관리		도로비산먼지 관리	✓			
		기타 비산먼지 관리	✓			
에너지 관리	지역 냉난방 공급 확대		✓	✓	✓	✓
	신재생에너지 보급 확대		✓	✓	✓	✓
제작자동차 관리	제작차 배출허용기준 강화		✓	✓		✓
	저공해차 보급	전기이륜차 보급	✓	✓	✓	✓
		하이브리드승용차 보급	✓	✓		✓
		CNG 차량 보급	✓	✓		
운행자동차 관리	특정경유	DPF 보급	✓	✓		✓
		DOC 보급	✓			✓
		LPG엔진 개조	✓	✓		✓
		노후차 조기폐차	✓	✓		✓
	자동차 연료품질 개선		✓	✓	✓	✓

대기질 관리의 패러다임 전환 필요

- 미세먼지(PM10)와 이산화질소(NO₂) 중심의 대기오염물질 관리에서 탈피하여 미세먼지(PM10), 이산화질소(NO₂), 오존(O₃)을 모두 관리할 수 있는 통합적 대기관리 방법 모색 필요
- 서울시를 포함한 수도권 대기질 관리의 목표는 미세먼지(PM10)와 이산화질소(NO₂) 농도 개선
 - 서울시의 대기관리 방향은 '수도권 대기환경개선에 관한 특별법(2003년 12월 제정)'에 근거하여 수립된 '수도권 대기환경관리 기본계획'에 기초
 - 2014년까지 미세먼지(PM10)와 이산화질소(NO₂) 농도를 선진국 수준으로 개선하는 것을 목표로 설정
- 그러나 오존에 대한 목표 미설정으로 적극적 대기질 관리의 공백 우려
 - 1차 대기오염물질 관리에는 효과적이거나 2차 대기오염물질 관리에 한계를 보이는 기존의 오염물질 개별관리 방식 탈피 필요
 - 2차 오염물질 <미세먼지(PM10), 이산화질소(NO₂), 오존(O₃)> 생성의 전구(前驅)물질인 질소산화물(NO_x), 휘발성 유기화합물(VOC), 황산화물(SO_x) 등의 관리 정책들에 대해서는 상호간에 미치는 복합적 효과를 평가하여 정책의 우선순위를 조정하는 과학적 분석과정이 필요

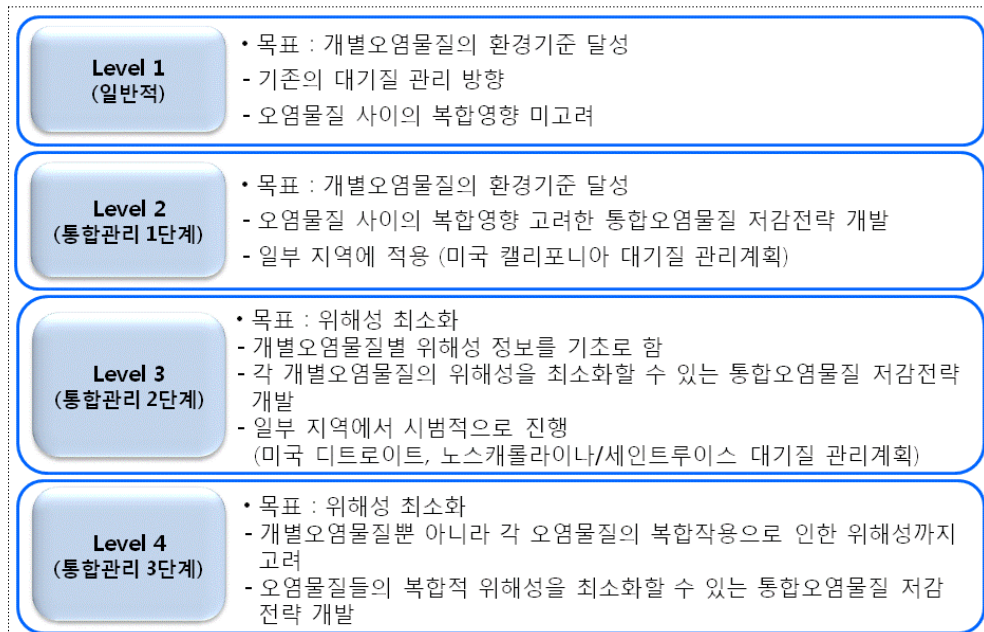
II. 대기질 관리 해외사례

국제적으로 대기질 관리의 이슈는 통합관리

- 선진국을 중심으로 서서히 논의되고 있는 오염물질 통합관리
 - 기존의 오염물질 개별관리에서 여러 오염물질을 동시에 고려하는 통합관리로 대기관리의 방향 전환 추진 중
 - 미국 등 일부 지역을 중심으로 오염물질 통합관리가 시범적으로 진행
 - 기후변화와 연계한 대기질-온실가스의 통합관리로까지 확대 연구 진행 중
 - 미국과 유럽 선진국에서는 기후변화에 따른 대기환경의 악영향을 최소화하기 위한 대기질 연구가 활발히 진행
 - 단순히 온실가스 배출량과 연계하는 초보적인 대기질-온실가스 통합관리에서 벗어나, 기후변화에 영향을 미칠 수 있는 오염물질들의 광화학적 작용까지 고려하는 통합적 접근

- 궁극적인 대기질 관리 방향은 위해성에 기초한 오염물질 통합관리
 - NARSTO(North American Research Strategy for Tropospheric Ozone)는 최근 대기질 통합관리에 대한 보고서를 통해 궁극적인 대기관리의 방향을 위해성에 기초한 통합관리로 설정하고 대기관리의 단계를 4단계로 구분
 - 우리나라를 포함한 대부분의 도시나 국가들의 대기관리 단계는 Level 1 수준이며, 일부 선진도시들에서 Level 2, 3의 대기관리를 위한 시범적인 시도를 진행
 - Level 3과 4 수준의 경우, 위해성과 관련된 불확실성이 상당히 존재하여 아직까지는 초보적인 수준에 머무르고 있는 상황

- 대기오염물질 통합관리를 위해서는 신뢰성 있는 모델링 시스템과 오염물질 위해성 평가 체계 도입 필요

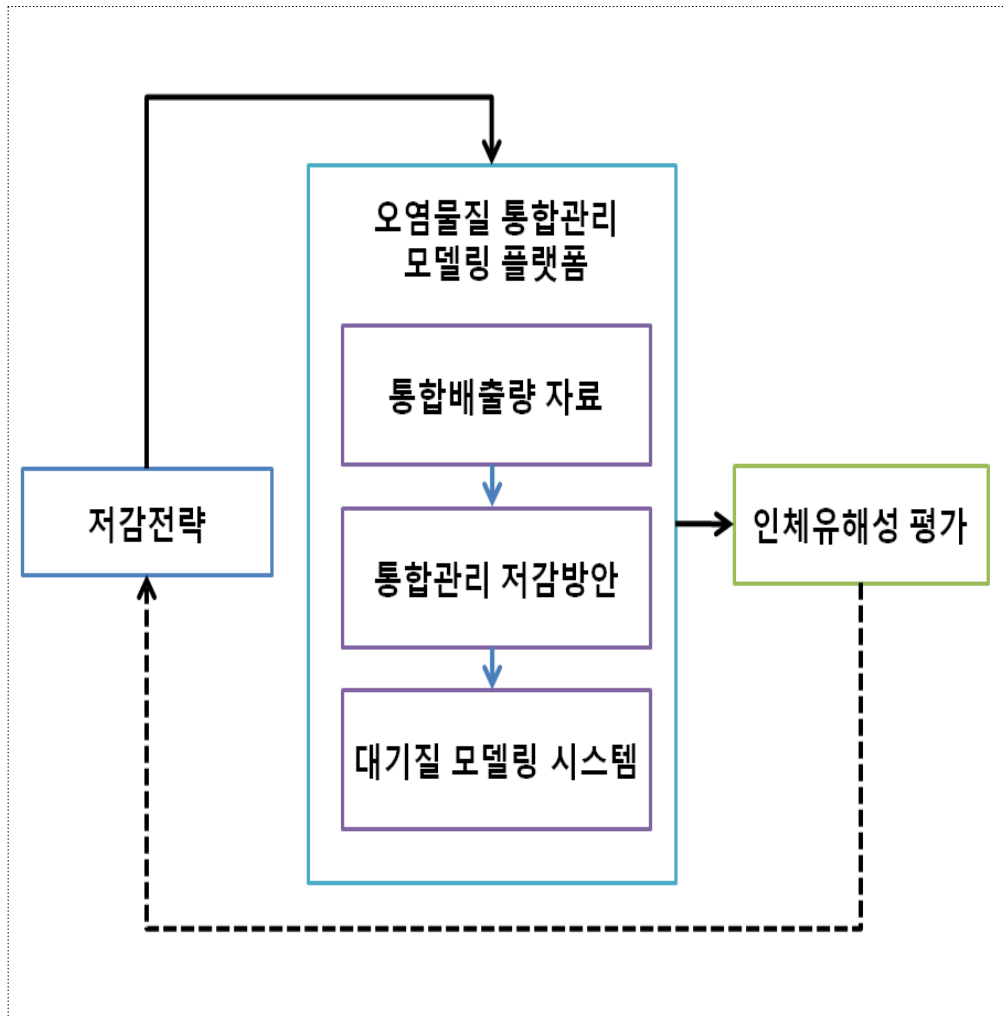


자료 : NARSTO, 2010, *Technical challenges of risk-and result-based multipollutant air quality management: A summary for policymakers.*

[그림 5] 단계별 대기관리 특성

미국 디트로이트시 : Level 3 통합관리 사례

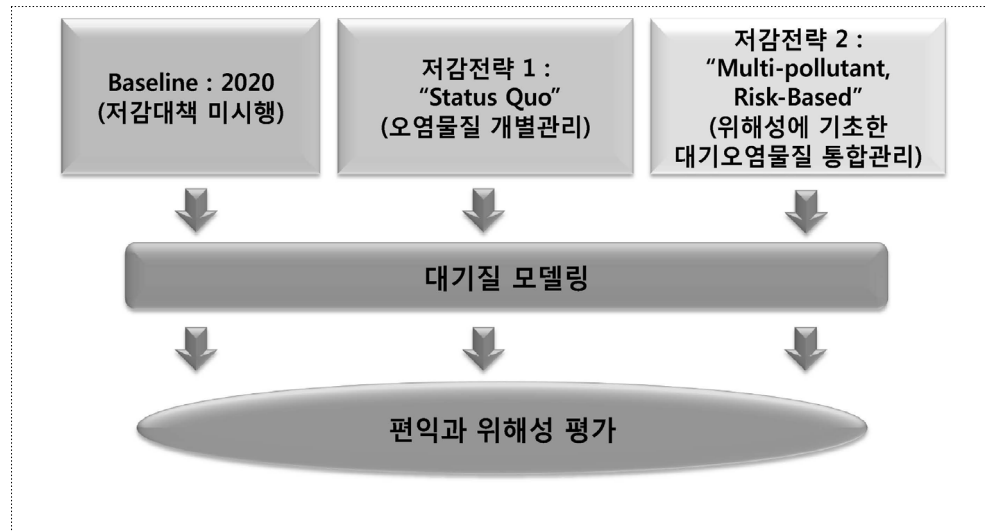
- 위해성 최소화를 목표로 이 지역에서 문제되고 있는 미세먼지(PM2.5), 오존(O₃), 일부 유해물질(air toxic)을 통합관리의 대상으로 선정하고, 최적의 저감전략 개발
- 기존의 다양한 정보와 모델링 도구들을 사용한 통합대기관리가 현실적으로 가능성이 있는지를 타진
- 통합관리를 위한 전략개발 평가는 대기질 모델링과 인체유해성 평가방법을 접목하여 시행



자료 : Wesson, K., Fann, N., Morris, M., Fos, T., Hubbell, B., 2010, "A multi-pollutant, risk-based approach to air quality management: Case study for Detroit", *Atmospheric Pollution Research*, 1.

[그림 6] 디트로이트 사례 : 통합대기관리 평가체계

- 위해성 최소화 목적을 둔 오염물질 통합관리 방식이 오염물질 개별관리보다 미세먼지(PM2.5)와 오존(O₃) 농도 저감 및 인체유해성분석에서 효과적인 것으로 분석
- 오염물질의 통합관리 저감전략은 특별히 인구밀도가 높은 지역에서 미세먼지(PM2.5), 오존(O₃), 유해물질의 농도 관리에 초점을 맞추어 위해성을 최소화하는 것이 목적



[그림 7] 디트로이트 사례 : 저감전략의 비교를 위한 체계

미국 필라델피아 : Level 3 통합관리 사례

- 위해성 최소화를 목표로 미세먼지(PM2.5), 오존(O₃), 일부 유해물질 농도 변화를 모델링으로 분석하여 위해성 최소화를 위한 최적 통합관리 전략을 개발
 - 미세먼지(PM2.5), 오존(O₃), 일부 유해물질(air toxic)을 통합관리의 대상으로 선정하고, 위해성 최소화 관점에서 최적 저감전략을 개발
 - 휘발성 유기화합물(VOC)과 질소산화물(NO_x)의 배출량 저감에 대한 세 가지 시나리오(50% NO_x 저감, 20% VOC 저감, 50% NO_x + 20% VOC 저감) 적용
 - 세 가지 시나리오의 경우, 각 저감전략 적용에 따른 미세먼지(PM2.5), 오존(O₃), 유해물질 농도변화 정도는 유사
 - 미세먼지(PM2.5), 오존(O₃), 유해물질의 농도변화에 따른 인체위해성에 대한 정량적 평가에서는 휘발성 유기화합물(VOC)과 질소산화물(NO_x)

배출량의 동시 저감전략이 건강유해의 측면에서 보다 효과적인 것으로 추정

□ 대기질 관리의 궁극적 목표에 대한 명확한 설정 필요

- 대기질 관리 목표가 환경기준 달성인지 위해성 최소화인지에 따라 대기질의 효과적 관리 방법이 상이할 수 있으므로 궁극적 대기질 관리의 목표를 명확히 설정

Ⅲ. 효율적 대기질 관리를 위한 전략

오염물질 통합관리로 대기질 관리 방향 전환

- 오염물질 개별관리(Level 1)로는 대기질 관리에 한계
 - 오존(O₃), 미세먼지(PM10) 등 2차 오염물질은 각각의 환경기준 달성에 목표를 둔 '오염물질 개별관리'(Level 1 단계의 대기질 관리 방식)로는 관리에 한계
 - 관리 대상 오염물질 상호간의 영향까지도 고려하는 '오염물질 통합관리(Level 2 이상)'로 대기질 관리 접근방법의 전환이 필요
 - 특히 2차적으로 생성되는 미세먼지의 대부분이 미세입자인 PM2.5영역에 해당되며 미세입자의 유해성이 거대입자보다 큰 것으로 추정
 - PM2.5는 2015년부터 대기오염물질에 포함되어 본격적인 관리가 시행될 예정이므로 통합관리로의 접근이 효과적
 - 더불어 대기질 관리의 목표를 환경기준 달성에서 위해성 최소화로 전환하고 단계적으로 대기질 관리 Level을 업그레이드
- 대기오염물질 통합관리로의 전환을 위한 전략

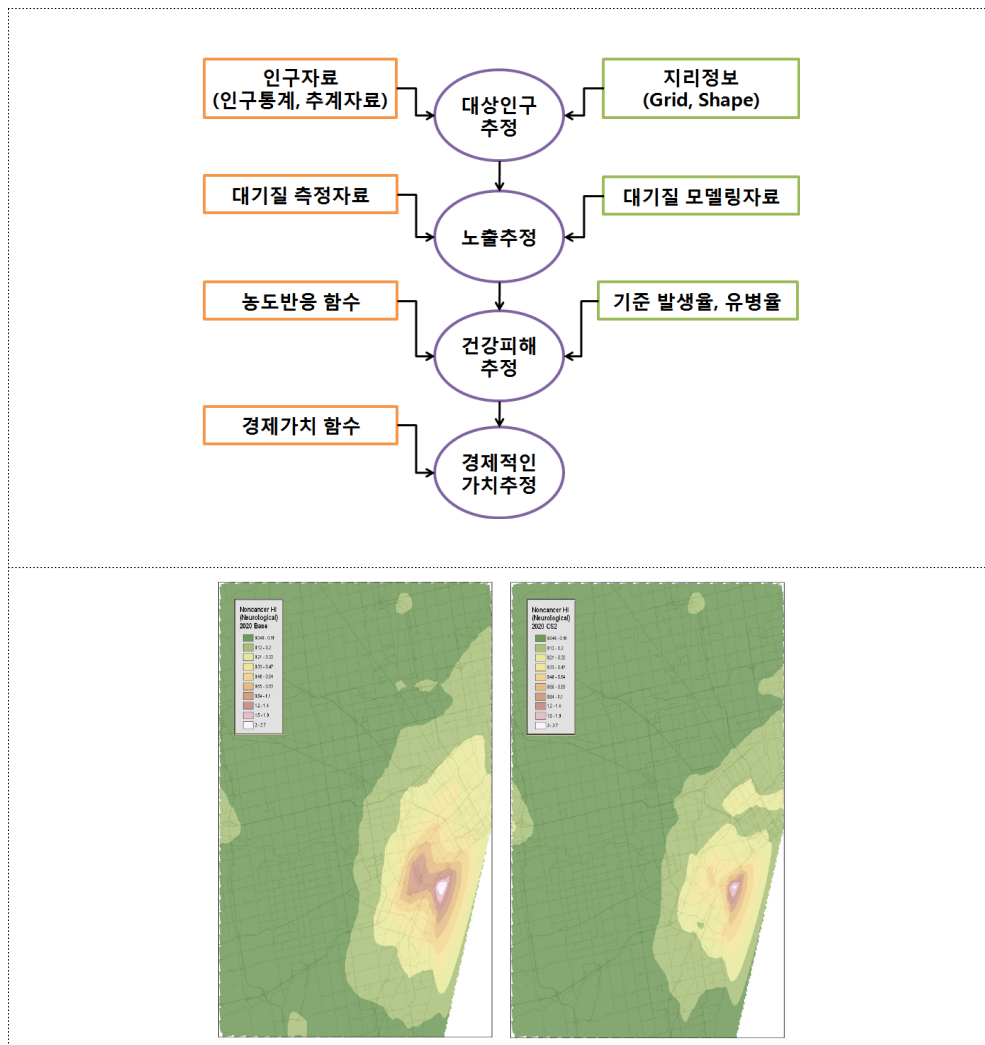
주요 전략	내 용
통합관리를 위한 기반구축	<ul style="list-style-type: none"> - 전문성을 갖춘 전담조직 확보 및 수도권 공조체계 구축 - 대기모델링 센터 설립 추진
대기관리 Level의 단계적 향상	<ul style="list-style-type: none"> - 대기질 관리의 궁극적 목표 확립 - 기존 대기관리 정책의 통합적 평가 - 대기관리 Level 2, Level 3로의 점진적 전환

통합관리를 위한 기반구축

- 전문성을 갖춘 전담조직 확보 및 수도권 공조체계 구축
 - 복잡·다양화되고 있는 대기관리를 위해서는 전문적 지식 및 기술수준이 필요하므로 자체적으로 연구역량을 갖춘 전문조직을 확보하여 미래 대기질 문제에 체계적으로 대응
 - 서울의 대기질은 서울시 자체의 노력만으로 해결할 수 없는 부분이 상당하므로 수도권의 대기질에 영향을 미치는 경기도, 인천시와 실질적인 공조체계 구축
- 대기모델링 센터 설립 추진
 - 신뢰성 있는 대기질 모델링 체계 구축
 - 다양한 2차 오염물질의 반응, 생성, 소멸, 이동을 시뮬레이션하여 오염물질의 통합적 평가가 가능한 모델링 시스템 도입
 - 상시적인 모델링 체계를 구축하여 지속적으로 운영하고, 서울 및 수도권 지역 특성에 맞도록 정비
 - 대기질 모델링의 중요 입력자료이며 정책입안의 핵심자료로 이용되는 배출량 자료에 대한 정확성을 평가하고 지속적으로 개선
 - 국내·외 대기오염도 변화에 대한 지속적인 모니터링 및 정보수집이 필요하며, 최신 정보의 반영으로 모델 예측 결과의 정확성 향상
 - 대기질 모델링과 인체위해성 평가를 연계할 수 있는 건강영향평가모델 도입
 - 대기질 관리 정책에 따른 건강영향을 예측하고, 그에 따른 경제적인 가

치를 추정할 수 있는 건강영향 평가 모델을 도입

- 대기질 관리 정책별 건강편익 분석에 적용하여 정책의 우선순위 결정
- 대상지역의 인구집단별 · 지역단위별 대기오염물질의 노출지도 작성을 통하여 집중 관리대상 및 지역 확인



주: BenMAP 모델은 미국 EPA에서 대기질 변화에 따른 건강영향의 편익분석을 수행하기 위하여 개발한 프로그램, 위 그림은 BenMAP Flow Diagram, 아래 그림은 미국 디트로이트시 대상으로 대기질 관리 전략별 인체위해성 감소의 공간적 분포를 비교

[그림 8] 대기관리 정책 평가에 인체위해성 모델(BenMAP)을 접목한 사례

대기관리 Level의 단계적 향상

- 개별 환경기준 달성에서 위해성 최소화로 대기질 관리의 궁극적 목표 전환
 - 개별 오염물질의 환경기준 달성인지 대기오염물질로 인한 통합적 위해성 최소화인지에 따라 정책의 우선순위가 달라지므로 궁극적 목표 재확립 필요
 - 통합관리의 관점에서 기존 대기관리 정책의 재평가
 - 미세먼지(PM10), 이산화질소(NO₂) 개선을 주목적으로 진행되고 있는 기존 대기관리 정책에 대한 재평가 필요
 - 미세먼지(PM10), 이산화질소(NO₂)뿐 아니라 오존(O₃)도 환경기준 초과 사례가 지속적으로 발생하고 있다는 점에서 세가지 오염물질을 통합적 관점에서 재평가
 - 미세먼지(PM10), 이산화질소(NO₂), 오존(O₃) 모두를 효과적, 효율적으로 관리할 수 있는 방향으로 기존 정책의 우선순위를 재조정
- 대기관리 Level 2, Level 3로의 점진적 전환
 - Level 1 단계에 있는 기존 대기관리 방법을 Level 2, Level 3으로 단계적으로 업그레이드
 - 기후변화와 연계하여 온실가스 저감 효과까지 고려

최유진 | 서울시정개발연구원 부연구위원

02-2149-1182

yjchoi@sdi.re.kr