

수도권 대기질 관리의 쟁점과 과제

김영성*

Issues and Tasks for Air Quality Management in the Greater Seoul Metropolitan Area

Young Sung Ghim*

국문요약

금년 1월 1일부터 수도권 대기환경개선에 관한 특별법이 시행되었다. 특별법의 시행으로 정부는 현재 각각 $76\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 36ppb 수준인 PM_{10} 과 NO_2 의 연평균을 10년 내 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 20ppb까지 낮출 것을 목표로하고 있다. 특별법에서는 주로 PM_{10} 과 NO_2 와 같은 1차 오염물질만을 언급하고 있으나 정부는 이들의 농도가 낮아짐으로써 고농도 오존과 시정 장애도 개선될 것을 기대하고 있다. 그러나 중국으로부터 오염물질 유입과 광화학 반응에 의한 2차 생성으로 인하여 국지 배출 저감에 의한 PM_{10} 의 농도 감소 효과는 크지 않을 수 있다. 실제 고농도 오존이 빈번한 오존 시즌 동안 수도권 PM_{10} 의 대부분은 지역 규모의 2차 생성 비중이 높은 $\text{PM}_{2.5}$ 이다. 뿐만 아니라 많은 모델링 결과들이 수도권의 상당한 지역에서, NO_x 를 줄일 경우 오존 농도가 상승하는 소위 'NO_x 불이익' 현상이 나타날 수 있음을 지적하고 있다. 본 논문에서는 수도권의 오염 현황을 살펴보고, 장거리 이동 효과와 광화학 오염 특성 등 이슈와 함께, 특별법의 성공적 이행에 필요한 과제들에 대하여 논의하였다.

주제어 : 장거리 이동, 광화학적 특성, 2차 오염물질

* 한국과학기술연구원 대기자원연구센터(Air Resources Research Center, Korea Institute of Science and Technology),
주저자(ysghim@kist.re.kr)

** 본 연구는 스모그 생성 메커니즘 규명을 위한 과학기술부 국가지정연구실사업(과제번호 2000-N-NL-01-C-184)의 일환으로 수행되었습니다.

ABSTRACT

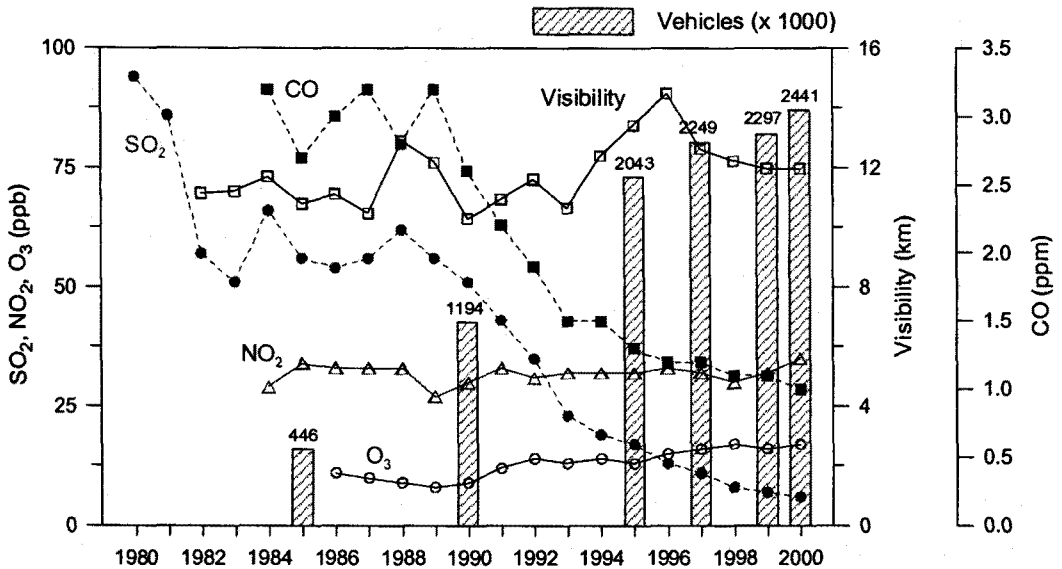
On January 1, 2005, the Special Act on Metropolitan Air Quality Improvement, known as the Blue Sky 21 Program, entered into force. This Special Act is aimed at reducing the annual average concentrations of PM_{10} and NO_2 to $40\mu g/m^3$ and 22ppb, respectively, from their current levels of $76\mu g/m^3$ and 36ppb, within the next 10 years. While the main focus of the Act is to reduce PM_{10} and NO_2 emissions, the government also anticipates that these reductions would lessen high ozone occurrences and improve visibility. However, reducing local PM emissions would not decrease PM_{10} concentrations as much as expected since other significant sources, such as continental inflow and/or secondary formation from photochemical reactions, exist. This is corroborated by the fact that PM_{10} in the greater Seoul Metropolitan area during the ozone season is mostly in the form of $PM_{2.5}$, which is secondarily formed on a regional scale. Furthermore, many modeling results indicate so-called 'NO_x disbenefits,' referring to the fostering of an increase in ozone concentrations from a decrease in NO_x emissions, over an extensive area. In this paper, the current status of air quality in the Seoul Metropolitan area is reviewed, and several other issues, including the effect of long-range transport, photochemical characteristics, and tasks for successful implementation of the Special Act are discussed.

Keywords : Long-range transport, Photochemical characteristics, Secondary pollutants

I. 서론

1992년 세계보건기구(WHO)와 유엔환경계획(UNEP)이 발간한 세계 20대 대도시의 대기질 비교에서 서울은 멕시코시티, 북경과 함께 아황산가스(SO₂)와 부유먼지(TSP) 농도가 높아 대기환경이 가장 열악한 도시로 분류되었다(WHO and UNEP, 1992). 그러나 1980년대 말의 자료를 토대로 한 이와 같은 내용이 국내에 알려진 1990년대 전반, 서울의 이들 오염물질 농도는 이미 선진국 수준에 버금가게 낮아진 후였다. <그림 1>은 지난 20년간 서울의 주요 오염물질 농도와 오염 지표의 변화이다. 1980년대 말부터 아황산가스의 농도가 급격하게 감소하였는데, 청정연료 보급 등 주로 연료 정책의 결과이다. 차량 등록대수가 지속적으로 증가하였음에도 불구하고 삼원촉매 장치의 부착으로 일산화탄소 역시 크게 감소하였다.

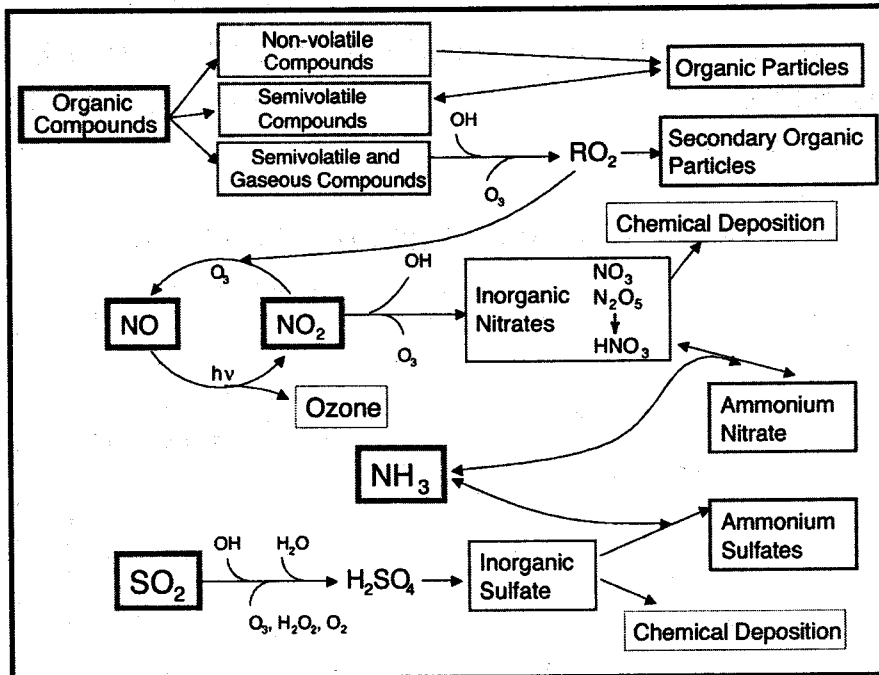
<그림 1> 서울의 주요 대기오염물질과 오염 지표의 변화



아황산가스와 일산화탄소 등은 오염원으로부터 직접 배출되기 때문에 1차 오염물질이라 부른다. 반면 오존과 상당 부분의 미세먼지는 광화학 반응 등 대기 중 화학반응에 의하여 형성되며 2차 오염물질이라 부른다. <그림 2>는 2차 오염물질이 형성되는 과정을 도식적으로 표시한 것이다. 핵심은 가운데의 $NO \rightleftharpoons NO_2$ 전환반응이다. NO₂가 NO로 환원되면서 오존이 생성되며 이와 같은 반응은 휘발성 유기화합물(VOC, volatile organic compounds)로부터 래디컬이 공급될 때 더욱 활성화된다. 이 과정에서 탄소수가 많은 유기화합물은 탄화되어 이차 유기입자로 변하며, 질소산화물로부터 생성되는 질산암모늄, 황산화물로부터 생성되는 황산

암모늄과 함께 미세먼지를 형성한다. 차량으로부터 직접 배출되는 원소탄소와, 먼지 비산, 해양 발생, 연료 연소, 산업 활동 등 다양한 경로로부터 발생하는 광물질도 미세먼지의 주요 성분이나 대도시에서는 보통 절반 이상 70-80%가 이차 이온과 유기성분이다(NARSTO, 2003).

<그림 2> 2차 오염물질의 생성 과정. 휘발성 유기화합물, 질소산화물, 황산화물로부터 복잡한 화학반응에 의하여 오존과 다양한 성분의 미세입자가 생성 (NARSTO, 2003).



<그림 1>은 서울의 오염의 중심이 아황산가스, 일산화탄소 등 1차 오염물질로부터 1990대 오존, NO₂ 등 2차 오염물질로 빠르게 전환되었음을 보여주고 있다. 1차 오염물질이 주로 대형 산업시설과 같은 점오염원으로부터 오염물질이 배출될 때 인근에서 농도가 높는데 비하여 2차 오염물질은 차량 이용과 용제 사용 등 비점오염원의 배출에 의해서 생성되고, 반응에 필요한 시간 때문에 광범위한 지역에서 며칠씩 영향을 미친다. 1차 오염물질은 오염원의 배출을 직접 관리함으로써 저감될 수 있으나 2차 오염물질은 대기 중 농도를 관찰하며 원인 물질을 찾아 간접적으로 관리하여야 하는 어려움이 있다.

1) 오염원으로부터 질소산화물이 배출될 때 10% 정도는 NO₂로 배출되므로 엄밀히 말하여 대기 중 NO₂에는 오염원으로부터 직접 배출된 1차 오염물질과 대기 중에서 NO로부터 산화된 2차 오염물질이 혼합되어 있다.

환경부는 2003년 12월 “수도권 대기환경개선에 관한 특별법”을 제정한데 이어 2004년 12월 동 법 시행령을 확정 발표하였다. 사실 특별법 자체에서는 사업장으로부터 배출되는 질소산화물, 미세먼지, 아황산가스와 차량 배출가스 등 오염원 배출 오염물질을 언급하고 있을 뿐 오존과 대기 중 미세먼지 등 2차 오염물질에 대하여 기술하고 있지는 않다. 그러나 광화학 오염이 심한 5월부터 9월까지 오존 시즌 동안 NO₂, 미세먼지의 상당 부분이 특별법에서 목표로 하고 있는 오염물질에 의하여 2차로 생성될 뿐 아니라 입법 취지에서도 고농도 오존과 시정 장애 등 2차 오염 현상의 개선을 천명하고 있어 특별법은 2차 오염물질과 무관할 수 없다.

특별법에는 권역 내 오염물질 배출 총량 관리와 저공해 자동차 보급 등 많은 선진 개념의 환경대책들이 포함되어 있다. 그러나 2차 오염 시대 대기질 관리에서는 법의 틀 못지 않게 대기현실에 적합한 법의 운용이 중요하다. 본 논문에서는 특별법의 시행이 수도권의 실질적 대기환경개선에 기여할 수 있도록 법의 집행과 더불어 고려하여야 할 사항들을 살펴보았다.

II. 수도권의 대기질 현황

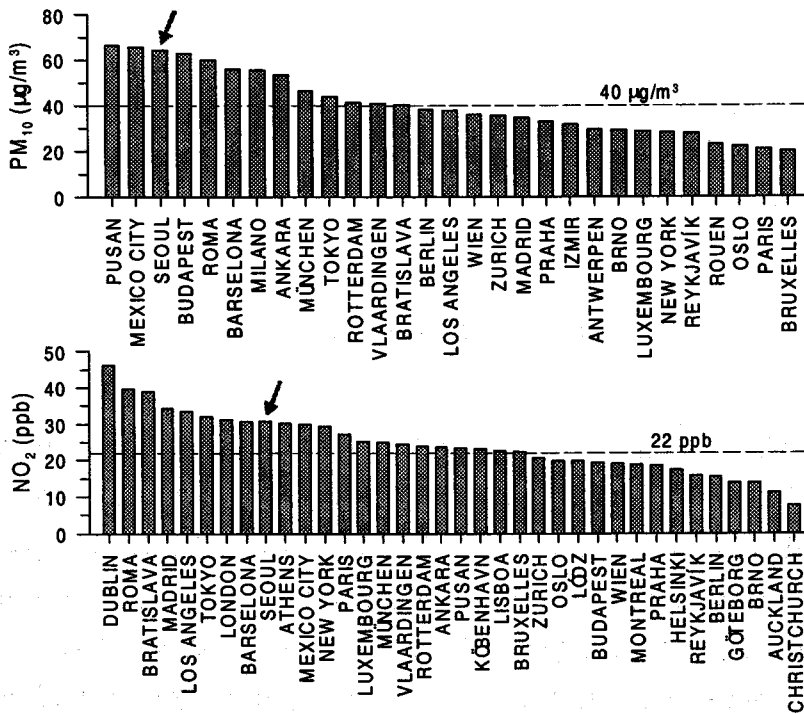
수도권 특별법은 수도권의 대기질이 매우 열악하기 때문에 이를 특별히 개선하기 위하여 제정되었다. 환경부는 서울의 대기오염이 OECD 30개 회원국 중 최하위 수준으로 2002년 기준 미세먼지(PM₁₀)는 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 선진국 주요 대도시의 1.7-3.5배, NO₂는 36ppb로 1.7배라고 밝히고 있다(환경부, 2004). 이에 따라 특별법의 제정을 통하여 2012년까지 미세먼지는 동경의 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂는 파리의 22ppb 수준으로 낮출 것을 목표로 하고 있다.

<그림 3>은 환경부와 같이 OECD(2002)의 자료를 이용하여 서울의 대기질을 비교한 것이다. 그러나 몇 가지 차이점이 있는데, 가장 중요한 것은, 1997-1999년까지는 대부분의 도시에서 자료가 주어지는데 반해 2000년까지 제공된 도시는 드물어 모두 동일하게 가장 최근의 자료로서 1997-1999년까지 3년을 평균하였다는 점이다. 또한 우리 나라는 PM₁₀이 아닌 TSP 농도가 제시되어 있어 별도로 대기환경연보로부터 PM₁₀ 평균을 산출하여 비교하였다. PM₁₀에서는 우리 나라 외에도 런던이 매연(black smoke) 농도를 제시하는 등 상당수의 도시에서 다른 종류의 자료들이 주어져 있어 이를 배제함에 따라 <그림 3>에서 PM₁₀의 경우 NO₂에 비하여 도시 수가 적다.

<그림 3>을 보면 다른 주요 도시에 비하여 서울의 미세먼지와 NO₂ 농도가 높은 것이 틀림없다. 그러나 1997-1999년 평균 서울의 미세먼지 농도는 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 동경의 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 1.5배이며, NO₂는 31ppb로 파리의 27ppb와 크게 다르지 않다. 2012년 서울의 미세먼지와 NO₂ 목

표값 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 20ppb는 1997-1999년 평균으로는 각각 동경과 파리보다는 슬로바키아의 브라티슬라바와 벨기에의 브뤼셀에 가깝다. 대기 중 오염물질 농도는 배출량뿐 아니라 기상 조건의 함수이다. 이들은 매년 다르기 때문에 의미 있는 비교를 위하여서는 최소한 3년의 변화를 살펴야 하며 특별한 목적이 아니라면 시기가 다른 자료를 함께 비교하는 것은 위험하다.

<그림 3> OECD 주요 대도시와 비교한 1997-1999년 평균 서울의 미세먼지와 NO_2 농도. 화살표는 서울의 위치를, 가로 선은 2012년 서울의 목표 값을 표시.

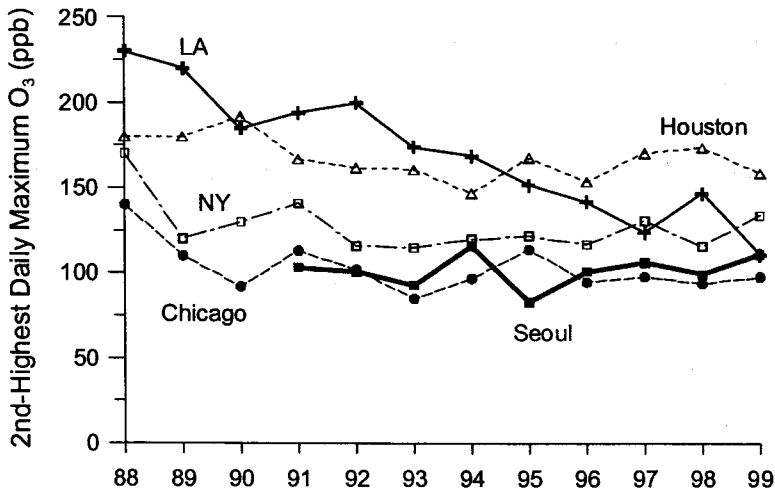


<그림 1>에서 서울의 오존 농도는 1990년대 조금씩 상승하고 있으나 20ppb 정도로 낮다. 이는 연평균 농도 변화를 조사하였기 때문이다. 장기적이거나 광범위한 지역의 변화를 살필 때에는 연평균을 조사하기도 하나 위해성 관점에서 단기 변화를 알아보고자 할 때에는 고농도를 중심으로 조사하는 것이 보통이다. <그림 4>는 오존 오염으로 유명한 미국 주요 도시 (USEPA, 1998, 2002)와 서울의 오존 고농도를 비교한 것이다. 가장 높은 농도는 주변의 작은 변화에 민감하기 때문에 추이를 살펴보기 위하여 각 측정소별로 연중 2번째로 높은 농도를 선택하여 지역별로 평균하였다(NRC, 1991).

해에 따라 차이가 있으나 서울의 오존농도는 시카고와 유사하거나 조금 높고 뉴욕보다 낮은 반면 최근의 LA에 근접한 수준이다. 무엇보다 LA의 농도 감소가 두드러지는데, 이와 같

은 농도 변화는, 꿈으로만 상상하던 현실이 실현되고 있다고 스스로 표현할 만큼 극적이다 (Lloyd, 2001). 반면 뉴욕은 중서부 공업지역으로부터 배출되는 NO_x의 영향이(OTAG AQAW, 1997), 휴스턴은 미국 남동부에 광범위한 생물학적 VOC 배출에, 인근 석유화학공장의 영향이 겹쳐 어려움을 겪고 있다(Thomas and Price, 2002).

<그림 4> 미국의 주요 도시와 비교한 서울의 오존 농도

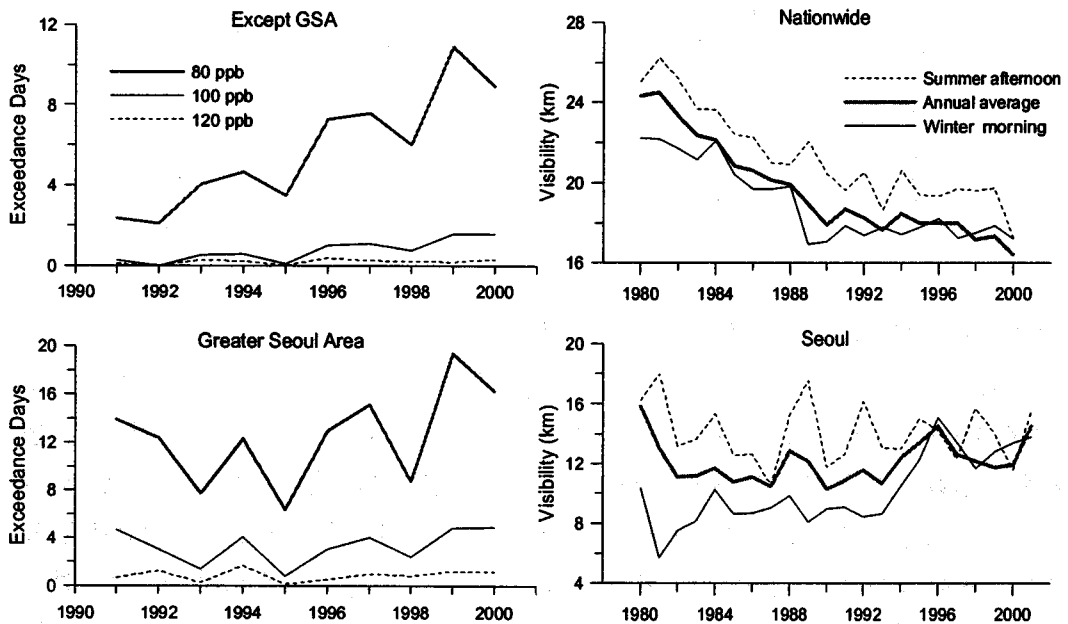


그러나 <그림 3, 4>가 서울의 대기질이 상대적으로 열악한 수준임을 나타내고 있음에도 불구하고 <그림 4>의 고농도 오존은 지난 10년간 뚜렷한 증가나 감소를 보이지 않고 있으며, <그림 1>의 시정은 약하지만 오히려 개선되는 모습이다. 이와 같은 경향은 <그림 5>와 같이 서울의 변화를 서울 외 다른 지역과 비교할 때 더욱 명확하다. 오존은 각각 80, 100, 120 ppb를 넘는 날수를 조사하였는데 수도권에서는 <그림 4>와 비슷하게 해에 따른 변화가 두드러진데 비하여 수도권 외 지역에서는 증가 추세가 뚜렷하다. 시정은 겨울 아침, 여름 낮, 연평균을 각각 조사하였는데 서울에서는 특히 1990년대 중반 겨울 아침 시정이 크게 개선되어 최근에는 겨울 아침과 여름 낮의 시정이 크게 다르지 않은데 비하여 전국적으로는(1980년대보다 속도가 줄었으나) 1990년대에도 대체로 악화 추세이다.

물론 수도권의 오존 고농도 초과 일수는 여타 지역의 2배 수준이고 서울의 시정 역시 전국의 1/2을 약간 넘을 정도로 수도권 혹은 서울의 대기질은 다른 지역에 비하여 월등하게 나쁘다. 그럼에도 여타 지역의 2차 오염이 계속 심화되고 있는데 비하여 서울은 정체 상태이거나 약간씩 개선되고 있어 양상이 다르다. 이에 따라 서울의 연도별 변화에서는 증가나 감소보다 오존의 경우 기온의 영향이, 시정에서는 상대습도의 영향이 두드러지고 있다(김영성, 2000; Ghim et al., 2005).

그림 설명에도 나타나 있지만 <그림 5>에서 오존은 1990년대 10년간의 변화가 주어진데 비하여 시정은 1980년대부터 20년간의 변화가 표시되어 있다. 앞에서 서울의 시정이 상대습도에 따라 변한다 하였으나 보다 정확하게 말하면, 시정이 이와 같은 모습을 보인 것은 1990년대이다. <그림 1>에서 볼 수 있는 것과 같이 1980년대에는 1차 오염물질의 농도가 높았다. 도시화의 영향으로 지난 20년간 서울의 기온은 점차적으로 상승하였고 이에 따라 상대습도는 감소하였다. 상대습도가 낮으면 안개가 감소하는 등 시정이 좋아지는 것이 보통이나 1980년대에는 상대습도가 감소함에도 불구하고 시정이 악화되어 1990년대와는 다른 모습이었다 (Ghim et al., 2005).

<그림 5> 서울과 전국의 오존과 시정 변화. 오존은 1990년대 10년간, 시정은 1980년대부터 20년간의 변화를 나타냄.



오존은 1980년대 말부터 측정이 시작되어 1980년대의 변화를 말할 수 없다. 그러나 서울의 오존 농도도 오염이 심하지 않았을 때에는 다른 지역과 크게 다르지 않았을 것임을 감안하면 1980년대 시정이 그러하였듯 서울의 오존도 <그림 5>의 여타 지역과 같은 변화 과정을 거쳐 기온의 영향이 지배적인 1990년대의 모습에 이르렀을 것을 짐작할 수 있다.

Ⅲ. 장거리 이동 오염물질의 영향

한 지역의 오염물질 농도는 그 지역에서 배출된 부분과 외부로부터 유입된 부분으로 나누어 볼 수 있다. 외부의 영향이 인근으로부터 비롯된 것이라면 비교적 추적이 쉬우나 거리가 멀수록 입증에 어렵고 협조도 쉽지 않다. <그림 4>에서 뉴욕의 고농도 오존은 상당 부분이 중서부 공업지역의 NO_x 배출 때문임을 지적하였다. 워싱턴/볼티모어 지역에서는 오존 농도가 180ppb까지 상승하였다면 60ppb는 지역 전체 배경 농도의 변화에 의한 것이고, 60ppb는 중서부 공업지역 배출의 영향이며, 60ppb 정도가 지역의 노력에 의하여 저감이 가능한 것으로 판단하고 있다²⁾(Aburn, 1999).

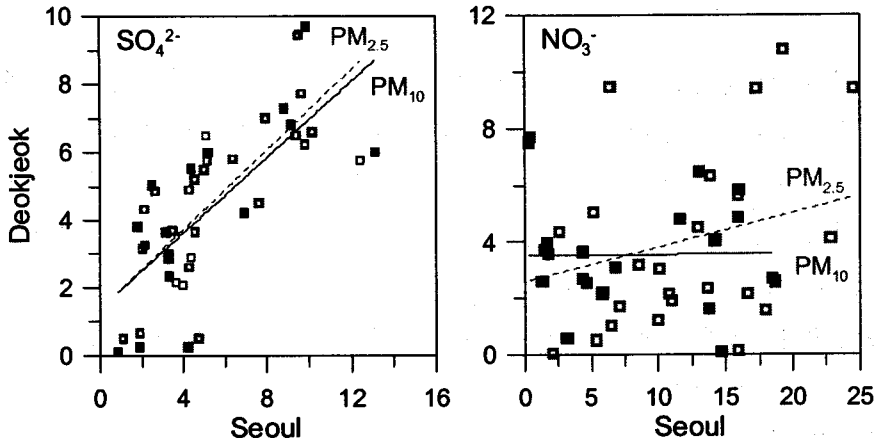
미국 동부의 NO_x 배출이 많은 것은 사실이나 동북아 지역의 오염물질 배출도 적지 않다. 미국 동부에서 NO_x 배출이 밀집된 오하이오강 유역으로부터 워싱턴과 뉴욕까지의 거리는 대략 900-1,000km로, 중국 북경과 상해로부터 서울까지의 거리와 크게 다르지 않다. 그러나 중국의 오염물질은 황해를 건너 우리 나라에 도달하게 되는데, 바다 위에서는 대기가 안정되어 확산이 적을 뿐 아니라 육지와 같이 침적도 활발하지 않아 이동하는 동안 오염물질의 농도가 크게 줄지 않는다(Sillman et al., 1993).

우리 나라에 침적되는 황산화물의 20-40%는 중국으로부터 유입되는 오염물질에 의한 것으로 알려져 있다(박일수와 김중춘, 2004; Shim and Park, 2004). 그러나 장거리 이동 오염물질의 영향은 물질의 종류, 지역, 시기에 따라 달라 일률적으로 이야기하기 어렵다. 기체상 물질보다는 대기 중 체류시간이 긴 미세입자가 장거리 이동의 영향이 크고, 수도권과 같이 배출이 많은 지역은 상대적으로 영향이 적다(김영성 등, 2004). 북서풍이 강한 겨울에 대체로 영향이 크나 같은 계절이라도 정체가 심할 때에는 자체 배출의 기여도가 높다.

오염물질 장거리 이동을 이야기할 때 황산화물을 주로 언급하는 것은, 연료 연소과정에서 배출되는 대표적 인위적 오염물질로써 대체로 1 μ m 이하의 미세입자에 존재하며 장거리 이동에 용이하기 때문이다. 동북아시아에서 황산화물의 주요 배출원은 석탄 연소이며 중국이 석탄을 많이 사용하기 때문에 황산화물 농도는 중국으로부터 오염물질 유입의 지표로 이용되는 경우가 많다(Akimoto et al., 1994; Arimoto et al., 1996). <그림 6>은 2003년 3, 4월 인천에서 서남쪽으로 약 50km 떨어진 덕적도와 서울 동북쪽 KIST에서 측정된 미세먼지 중 SO₄²⁻와 NO₃⁻의 농도를 비교한 것이다. 덕적도 측정소는 인근에 대형 오염원이 없을 뿐 아니라 해발 160m 산 위에 있어 오염원의 영향이 직접적이지 않다.

2) 60ppb 중에서도 20ppb는 차량 사용 억제 등 시민의 참여가 필요한 부분으로 분류하고 있으므로 지역 정책에 의하여 실질적으로 저감이 가능한 부분은 40ppb 정도이다.

<그림 6> 서해안 덕적도와 서울의 미세먼자 중 황산염과 질산염 비교³⁾



두 지점의 특성이 다르고 거리가 상당함에도 불구하고 두 지점의 SO_4^{2-} 의 농도변화는 상관성이 상당하다. 국지 배출보다 장거리 이동의 영향이 크기 때문에 나타난 현상이다. 반면 NO_3^- 는 두 지점이 다른 만큼 농도 변화가 달라 국지 배출 비중이 큼을 보여주고 있다. PM_{10} 보다 $PM_{2.5}$ 에서 장거리 이동의 영향이 큰 것이 보통이나(NARSTO, 2003) 측정 당시 서울과 덕적도 모두에서 PM_{10} 중 $PM_{2.5}$ 비율이 90%를 넘을 정도로 높아 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 모두 먼지 입경에 따른 차이는 뚜렷하지 않다. 그럼에도 NO_3^- 에서는 $PM_{2.5}$ 의 상관성이 PM_{10} 보다 커서 제한적이지만 장거리 이동의 영향을 볼 수 있다.

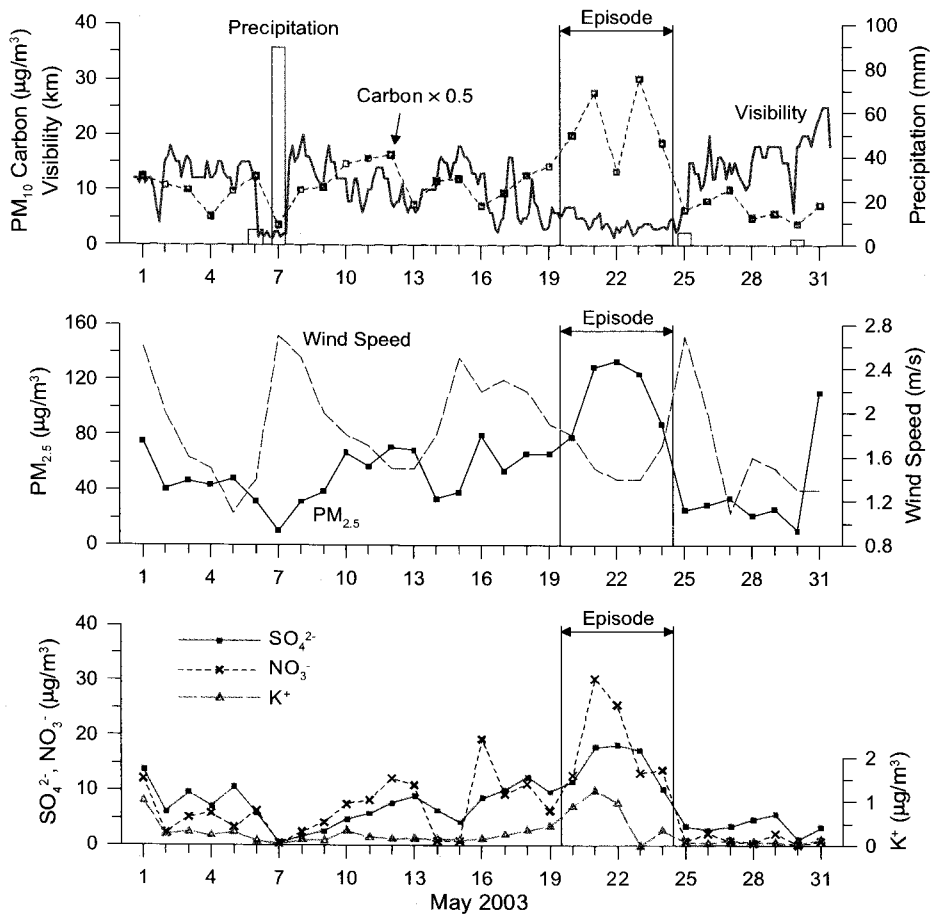
2003년 5월 20-24일은 우리 나라에서 드물게 러시아 산불의 배출물이 유입되면서 시정이 악화된 사례로 기록되고 있다(Lee et al., 2005). <그림 7a>는 2003년 5월 서울의 기상 요소와 미세먼지의 변화이다. 5월 20-24일 기간 유기탄소와 원소탄소의 농도가 평소의 $10\mu g/m^3$ 과 $3-4\mu g/m^3$ 에서 $40\mu g/m^3$ 과 $10\mu g/m^3$ 로 각각 4배와 3배 가까이 상승하였고 $PM_{2.5}$ 농도가 높아지면서 시정도 평소의 10km에서 1-3km로 크게 저하되었다.

러시아에서는 최근 20여 년간 산불의 발생 건수와 피해 지역이 계속 증가하는 것으로 보고되고 있다(Davidenko, 2000). 2003년 5월은 2001년과 2002년 같은 시기에 비하여 월등하게 산불 발생이 많았고 한반도 북쪽 시베리아에서 특히 그러하였다. <그림 7b>는 2003년 5월 서울에 도착한 기류의 모습이다. 미세먼지 농도가 가장 높았던 21일과 22일에는 기류가 만주 북쪽의 산불 발생 지역 바로 위를 지나 우리 나라로 유입되었다. 식물체가 연소될 때에는

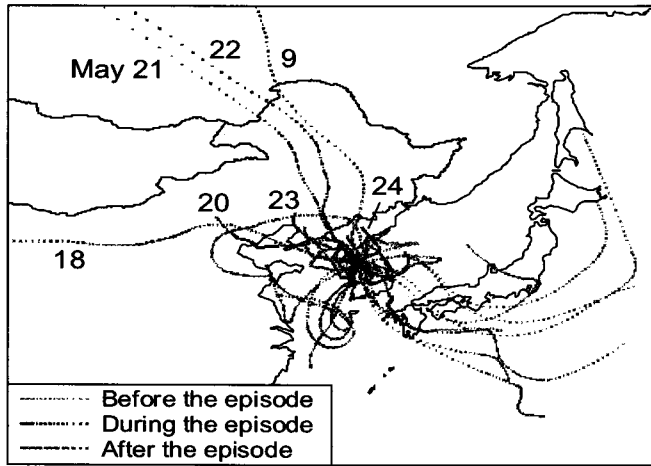
3) PM_{10} 은 공기역학적 직경 $10\mu m$ 이하, $PM_{2.5}$ 는 공기역학적 직경 $2.5\mu m$ 이하인 먼지. PM_{10} 이 토양이나 해염 등 자연에서 비롯된 성분이 많은데 비하여 $PM_{2.5}$ 는 인위적 오염 성분의 비중이 크다. 질량을 기준으로 할 때 $PM_{2.5}$ 는 대부분 $0.1-1\mu m$ 범위에 있으며 PM_{10} 에 비하여 대기 중에 머무르는 시간이 길고 인체에 위해하다. 미국은 1997년 먼지 환경기준을 PM_{10} 에서 $PM_{2.5}$ 로 개정하였다.

K^+ 이온이 많이 배출되는데 <그림 7a>의 마지막 그림을 보면 21일과 22일에 K^+ 이온의 농도가 높다. 흥미로운 것은 사례 이전에는 기류가 대체로 중국 쪽으로부터 유입되었으나 사례 후에는 오염물질 농도가 낮은 태평양 방향의 남동쪽으로부터 기류가 유입되었다는 점이다. 이에 따라 <그림 7a>의 마지막 그림을 보면 사례 후에 대표적 인위적 오염물질인 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 농도가 모두 낮다.

<그림 7a> 2003년 5월 서울의 기상요소와 미세먼지 농도 및 조성(Ghim et al., 2004). 탄소 성분은 PM_{10} , 그 밖의 입자 농도와 조성은 $PM_{2.5}$.



<그림 7b> 2003년 5월 서울에 도달하는 기류의 모습. 1시간 간격으로 4일간의 궤적을 표시



<그림 7a>의 마지막 그림에서 5월 중순 이후 SO_4^{2-} 농도가 꾸준히 상승한 것은 중국의 영향이 지속된 때문으로 볼 수 있다. 오염물질이 장거리를 이동하여 유입되면서 농도가 상승함에 따라 변화 속도가 늦다. 반면 NO_3^- 는 국지 배출의 비중이 커서 상대적으로 변화가 심하다. 2003년 5월 20-24일의 오염 사례는 종합하면, (1) 중국으로부터 오염물질 이동이 배경을 이룬 가운데, (2) 산불에 의하여 발생한 오염물질이 러시아로부터 유입되었고, (3) 풍속이 낮아 국지 배출 오염물질이 함께 적체되면서 발생하였다(Ghim et al., 2004).

IV. 수도권의 광화학 특성

<그림 7>은 서울의 미세입자 농도가 자체 배출뿐 아니라 동북아 지역의 기류 이동과 밀접하게 연관되어 있음을 보여 주고 있다. 그러나 이에 못지 않게 중요한 사실은 미세먼지의 상당 부분이 SO_4^{2-} , NO_3^- 등 2차 생성물이라는 점이다. 미세먼지 농도가 가장 높았던 5월 20-24일 기간 미세먼지 중 NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- 등 2차 오염물질의 비율은 39%이며 5월 평균도 32%이다. 5월 평균 32%는 그동안 서울에서 측정된 화학조성의 평균값인 31%와 거의 같은 반면, LA의 약 60%나 토론토, 애틀란타의 50%보다 작다(이시혜와 김영성, 2003). 대신 서울의 미세먼지는 상대적으로 광물질의 비중이 크고 원소탄소 농도도 높다.

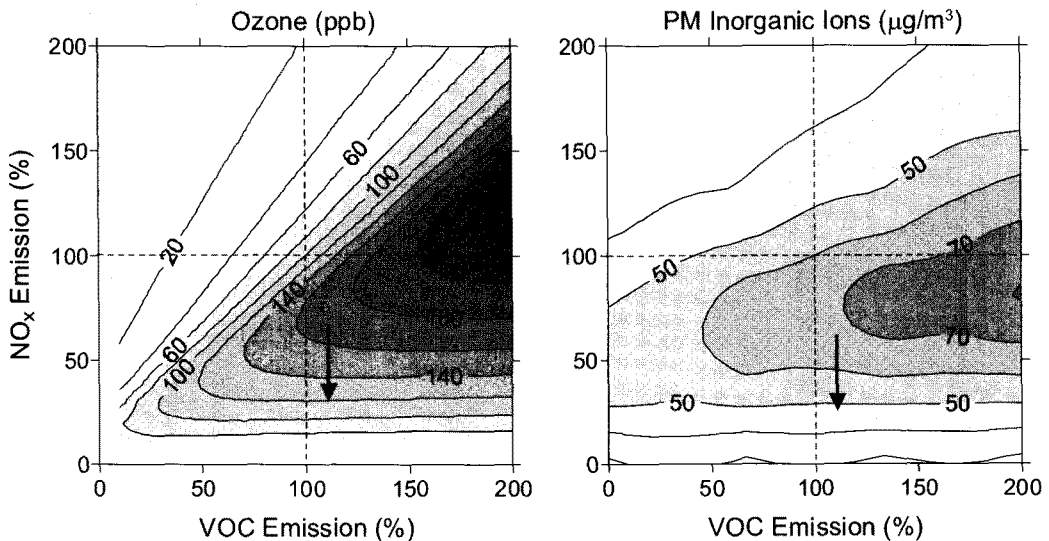
특별법에서 2차 오염물질을 직접적으로 언급하지 않았으나 2차 오염물질과 무관할 수 없음을 이미 지적한 바와 같다. 특별법의 시행에 따른 2차 오염물질의 농도 변화는 특히 신중하게 살펴볼 필요가 있는데, 특별법의 목표인 NO_2 와 미세먼지의 상당 부분이 2차 오염물질일

뿐만 아니라 특별법에서 다루고 있는 NO_x, VOC 등이 2차 오염물질의 원인 물질이기 때문이다.

잘 알려진 것과 같이 오존은 NO_x와 VOC의 반응에 의하여 생성되며, 미세먼지의 생성에는 이들 외에 NH₃, SO₂들이 중요하다. 그러나 수도권을 비롯한 많은 도시에서 NH₃의 농도는 충분히 높고 SO₂는 낮으므로 미세먼지의 농도에서 실질적으로 중요한 것은 NO_x와 VOC의 반응에 의한 NO₃⁻의 생성이다. <그림 8>은 여름철 NO_x와 VOC 배출에 따른 오존과 미세먼지 농도 변화이다. 이 때 미세먼지는 수분을 포함한 무기이온의 합이며 따라서 광물질과 탄소 성분이 제외된 양이다. 오존은 OZIPR(Ozone Isopleth Plotting Package for Research; Gery and Crouse, 1990)을 이용하였고 미세먼지는 광화학 상자모델과 기체/입자 평형 모델에 의하여 계산하였다(이시혜 등, 2004).

VOC 배출을 줄이면 오존과 미세먼지 농도가 감소하나 NO_x는 배출이 약 30% 줄 때까지 오존과 미세먼지 농도가 증가한다. 이와 같은 현상은 수도권의 NO_x 농도가 충분히 높아 광화학 반응을 억제하고 있기 때문이다. 따라서 NO_x 농도가 낮아지면 광화학 반응이 활발해져 오존 농도가 높아지고 NO₃⁻ 생성이 많아진다. VOC 배출이 줄더라도 NO_x 배출이 함께 줄 경우 효과가 현저하게 작거나 NO_x 배출 감소에 의한 불이익을 줄이는 정도의 역할에 그치고 있다. 'NO_x 불이익 (disbenefits)'이라고 부르는 이와 같은 현상은 NO_x 배출이 많은 도심에서는 보편적이다. NO_x와 VOC 중 어느 물질을 줄여야 하느냐를 선택하여야 한다면 VOC를 줄여야 한다(VOC control). 그러나 <그림 8>은 VOC 제어에 따른 긍정적 효과보다 NO_x 배출 감소에 의한 불이익이 강조되는 양상이다.

<그림 8> 수도권의 여름철 VOC와 NO_x 배출에 따른 오존과 미세먼지 농도 변화



도시 외곽으로 가서 <그림 8>의 화살표 방향과 같이 NO_x 배출이 줄게 되면 오존과 미세먼지 농도는 NO_x 배출이 감소함에 따라 급격히 낮아진다. 반면 이 때 VOC 배출 저감은 효과가 거의 없다. 대륙이나 지구 전체로 볼 때에는 도시의 면적 비율이 크지 않으므로 오염을 궁극적으로 저감시키기 위하여서는 NO_x를 제어하여야 한다. 광화학 오염을 도시규모 현상으로 이해하였던 1980년대에는 VOC 제어가 우세하였으나 오염물질 장거리 이동의 영향이 중요한 지역규모(regional scale) 현상으로 파악하게 된 1990년대 이후 NO_x 제어로 중심이 이동한 것도 이와 같은 이유 때문이다(NRC, 1991). 결국 상황에 따라 문제를 판단할 수밖에 없는데 인구밀집 지역의 광화학 오염 노출을 방지할 수 없는 행정 당국의 입장에서는 NO_x 불이익을 무시하기 어렵다. 이에 따라 많은 반발에도 불구하고⁴⁾ 미국의 청정대기법에서도 (Section 182(f)) EPA(Environmental Protection Agency)가 인정할 때에는 NO_x를 제어하지 않을 수 있다.

NO_x 불이익을 현실적으로 입증할 수 있느냐도 중요한 쟁점의 하나이다. 가장 흔하게 이용되는 방법은 주중과 주말의 오염물질 농도를 비교하는 것이다. 주말에는 차량 통행이 적어 NO_x 배출이 적기 때문에 주중에 비하여 주말에 오존 농도가 높으면 NO_x 불이익을 예상하는 것이다. 미국 캘리포니아의 경우, 1980년대 초에는 LA와 샌프란시스코 등 측정소의 20%에서만 주말 효과가 나타났으나 1990년대 후반에는 76%의 측정소에서 관찰되었다(Marr and Harley, 2004). 또한 지난 20년간 오존 농도가 많이 감소하였으나 주로 주중에 감소하였을 뿐 주말에는 감소 폭이 작았다. 배출권 거래가 지역 단위로 실시됨에 따라 NO_x 제어가 유효한 지역의 배출권이 NO_x 제어가 불리한 지역으로 판매되는 문제점도 지적되고 있다(Mauzerall et al., 2004).

우리 나라에서도 주말 효과를 확인하기 위한 시도가 수차례 있었으나 아직 의미있는 결과를 얻지 못하고 있다. 기상 변화와 장거리 이동 오염물질의 영향 등 자체 배출에 의한 변화를 구분하기 쉽지 않은 것도 원인이 될 수 있으나 같은 지역의 광화학 특성도 시기에 따라 다른 만큼 분석이 면밀하지 못한 때문일 수 있다. 반면 최근 화학 지시종 (indicator species)을 측정하여 분석한 결과에 의하면 서울, 인천과 같은 도시지역뿐 아니라 외곽에 위치하여 전원지역에 가까운 양평에서도 일시적으로 NO_x 제어가 유효할 뿐 대체로 VOC 제어가 우세하였다(김경렬 등, 2004). 김동영(2004)의 모델 계산에서도 서울을 중심으로 인천부터 양평, 여주까지 VOC 제어가 유효하여 지금까지의 연구와 일치하였다.

4) 예를 들면, "... the solution to pollution is not more pollution," "... the benefits of deep NO_x reduction far outweigh any potential 'disbenefits'" (Colburn, 2004).

V. 과 제

최근 지역을 막론하고 광화학 오염이 심하여지면서 오늘날 광화학 오염은 일부 선진국의 문제가 아니라 지구환경 문제로 인식되고 있다(Rowland, 2001). 이러한 상황에서 대표적 오염지역이었던 LA에서 광화학 오염이 해결되고 있음이 확인된 것은 작은 일이 아니다. LA는 차량 이용이 많고 역전층이 빈번하여 오염물질 적체가 용이한 가운데 햇빛이 강하고 기온도 높아 광화학 반응에 이상적이다. 반면 서쪽은 태평양, 동쪽은 높은 산지와 사막으로 고립되어 있어 외부의 영향이 거의 없다. 즉, LA의 광화학 오염이 어려운 문제였음에는 틀림이 없으나 자체 배출을 제어함으로써 해결이 가능한 문제였다. 이에 비하여 수도권은 7, 8월 일부를 제외하고는 11월 말부터 6월 장마 전까지 편서풍의 영향으로 중국의 영향이 직접적이다. 외부의 영향이 클 뿐 아니라 국제적이라는 점에서 수도권의 문제는 기본적으로 성격이 다르다.

LA의 성과는 30여 년이라는 긴 시간 연구와 정책이 효과적으로 결합되어 함께 노력한 결과이다. 광화학 오염 정책을 위하여서는 무엇보다도 대상 지역의 대기화학과 물리에 대한 정확한 이해가 중요하다. 이를 위한 가장 효과적 방법의 하나가 집중 현장 조사(intensive field study)이다. 최초의 집중 현장 조사는 1987년 LA 지역에서 실시된 SCAQS(South Coast Air Quality Study)이다. 기획부터 자료 해석까지 거의 10년 동안 수많은 전문 인력이 동원된 SCAQS의 결과는 LA 지역 광화학 오염 정책의 근간이 되었으며 미국 국내뿐 아니라 국외에서도 집중 현장 조사의 모범이 되었다. 그러나 SCAQS에서도 초기에는 원인과 대책에 대하여 이견과 다툼이 빈번하였으며 수년씩 결과를 지켜보고 확인한 후에야 의견이 모아질 수 있었다(Solomon, 1995). 전문가들 사이에서도 광화학 오염 현상에 대한 이해가 쉽지 않음을 말하여 주는 대목이다.

1990년대 이후 수도권의 오존과 스모그가 대체로 비슷한 수준을 유지하고 있는데 비하여 다른 지역은 지속적으로 악화되고 있다는 점에 대하여 보다 관심을 가질 필요가 있다. 오존과 스모그와 같은 2차 오염은 기본적으로 지역 규모이기 때문에(NARSTO, 2000) 상황에 따라서는 동일 영향권 내 다른 지역의 변화로부터 오히려 긴요한 정보를 얻을 수 있다. 무엇보다 지역 내 배출의 기여율과 배출 저감에 따른 효과를 충분히 점검하여야 한다. 미세먼지에서도 특히 5월부터 9월까지 오존 시즌에는 광화학 반응에 의한 2차 생성의 비중이 상당하며 장거리 이동에 의한 유입까지를 감안하면 자체 배출의 비율은 더욱 낮아질 수 있다. NO_x 불이익도 현실로 인정하여 언제 얼마만한 지역에서 불이익이 있을 수 있는지, 오염 저감이라는 명백한 긍정적 효과와 더불어 검토되어야 한다.

1차 오염물질의 문제가 해결된 후 10여 년이 지났고 대기오염에 대한 사회의 관심이 크게

높아진 지금 어떠한 형태로든 대책이 필요함은 당연하다. 그러나 지금의 첫 발로서 앞날의 결과까지를 말하기에는 지나야 할 여정이 너무 복잡하고 험난하다. 이와 같은 이유로 특별법에도 진행 상황을 점검하며 필요하면 계획을 수정하도록 절차가 마련되어 있다. 국민의 여망과 함께 출발한 특별법이 목적하는바 성과를 거둠으로써 수도권이 광화학 오염 해결의 또 다른 모범 사례가 될 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- 김경렬 외. 2004.10.24. “서울 도심 지역의 오존 생성 조절 기작에 관하여.” 「대도시 대기질 관리방안 조사 연구 3차년도 최종보고회」 국립환경연구원.
- 김동영. 2004. “질소산화물 일정량 줄이면 오존 증가.” 연합뉴스, 경기개발연구원 보도자료.
- 김영성. 2000. “우리 나라의 오존농도 변화 추이와 주요 인자.” 「한국대기환경학회지」, 16: 607 - 623.
- 김영성 외. 2004. 「미량독성 유해물질의 장거리 이동 특성분석과 영향평가」 한국과학기술연구원 보고서 UCM1346-7602-9. 환경부.
- 박일수·김종춘. 2004. “우리 나라에 침적되는 황산화물의 20%는 중국으로부터 도래.” 국립환경연구원 보도자료.
- 이시혜·김영성. 2003.7.3-5. “서울지역 입자상 질산염의 계절 변화에 대한 고찰.” 「4th Korean Conference on Aerosol and Particle Technology」 용평. 논문번호 2C3.
- 이시혜 외. 2004. “광화학 상자모델과 기체/입자 평형모델을 이용한 서울·수도권의 계절별 질산염 농도 변화.” 「한국대기환경학회지」, 20: 729-738.
- 환경부. 2004. 「환경백서」
- Aburn, T. 1999.12.5-7. “SIP Credit for Voluntary Episodic Measures.” *National Conference for Ozone Action Programs*, Air & Waste Management Association. Phoenix, AZ.
- Akimoto, H. and H. Narita. 1994. “Distribution of SO₂, NO_x and CO₂ Emissions from Fuel Combustion and Industrial Activities in Asia with 1° x 1° Resolution.” *Atmospheric Environment* 28: 213-225.
- Arimoto, R. et al. 1996. “Relationships among Aerosol Constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West A.” *J. Geophys. Res.* 101: 2011-2023.
- Colburn, K.A. 2004. “Letter to the Administrator of USEPA.” <http://bronze.nescaum.org/committees/attainment/comments041001nox.pdf>. [accessed November 2004]
- Davidenko, E.P. 2000. “Forest Fire Problems in 1999 in the Russian Federation.” *International Forest Fire News* 22(April): 63-66.
- Gery, M.W. and R.R. Crouse. 1990. “User’s Guide for Executing OZIPR. Order No. 9D2196NASA.” Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/scram001/userg/other/ozipr.pdf>. [accessed August 2001]
- Ghim, Y.S. et al. 2004.10.4-8. “Analysis of Smog Episode in Korea in May 2003.” *AAAR 2004 Annual Conference*. Atlanta, Georgia.

- Ghim, Y.S. et al. 2005. "Visibility Trends in Korea during the Past Two Decades." *J. Air Waste Manage. Assoc.* 55: 73-82.
- Lee, K.H. et al. 2005. "Impact of the Smoke Aerosol from Russia Forest Fires on the Atmospheric Environment over Korea during May 2003." *Atmospheric Environment* 39: 85-99.
- Lloyd, A.C. 2001.2.13-15. "Welcome and Opening Remarks." *SCOS97-NARSTO Data Analysis Conference*. Diamond Bar, CA.
- Marr, L.C. and R.A. Harley. 2004.12.13-17. "Weekly and Decadal Changes in NO_x Emissions and Tropospheric Ozone." *Eos Trans. AGU 85(47). Fall Meet. Suppl.* San Francisco, CA., Abstract A22A-03.
- Mauzerall, D.L. et al. 2004.12.13-17. "NO_x Emissions from Large Point Sources: Variability in Ozone Production, Resulting Health Damages and Economic Costs." *Eos Trans. AGU, 85(47), Fall Meet. Suppl.* San Francisco, CA., Abstract A22A-04.
- NARSTO(North American Research Strategy for Tropospheric Ozone). 2000. "An Assessment of Tropospheric Ozone Pollution - A North American Perspective -." Synthesis Team. <ftp://ftp.cgenv.com/pub/downloads/assessment/>. [accessed January 2001]
- _____. 2003. "Particulate Matter Science for Policy Makers. A NARSTO Assessment." EPRI 1007735. <http://www.cgenv.com/Narsto/>. [accessed May 2003]
- NRC(National Research Council). 1991. *Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- OECD(Organisation for Economic Co-operation and Development). 2002. "Environmental Data Compendium 2002." http://www.oecd.org/document/21/0,2340,en_2649_34303_2516565_1_1_1_1,00.html. [accessed November 2004]
- OTAG AQA(W(Ozone Transport Assessment Group Air Quality Analysis Workgroup). 1997. "Final Report, Volume I: Executive Summary." http://capita.wustl.edu/otag/reports/aqafinvol_I/animations/v1_exsumanimb.html. [accessed September 1997]
- Roland, F.S. 2000.10.31-11.2. "Global Smog." Keynote speech, *7th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality and Exhibition*. Taipei, Taiwan.
- Shim, J.-M. and S.-U. Park. 2004. "Acidic Loadings in South Korean Ecosystems by Long-range Transport and Local Emissions." *Atmospheric Environment* 38: 5623-5636.
- Sillman, S., P.J. Samson and J.M. Masters. 1993. "Ozone Production in Urban Plumes Transported over Water: Photochemical Model and Case Studies in the Northeastern

- and Midwestern United States.” *J. Geophys. Res.* 98: 12,687-12,699.
- Solomon, P.A. 1995. “Regional Photochemical Measurement and Modeling Studies: A Summary of the Air & Waste Management Association International Specialty Conference.” *J. Air Waste Manage. Assoc.* 45: 253-286.
- Thomas, J.W. and J.H. Price. 2002.12.6-10. “The Impact of TexAQs 2000 on Air Quality Planning in Houston.” *Eos. Trans. AGU, 83(47), Fall Meet. Suppl.* San Francisco, CA., Abstract A21F-01.
- USEPA(United States Environmental Protection Agency). 1998. *National Air Quality and Emissions Trends Report, 1997*. EPA 454/R-98-016, Research Triangle Park, NC.
- _____. 2002. “National Air Quality and Emissions Trends Report, 2000.” <http://www.epa.gov/airtrends/metro.html>. [accessed October 2002]
- WHO and UNEP(World Health Organization and United Nations Environment Programme). 1992. *Urban Air Pollution in Megacities of the World*. Oxford, UK: Blackwell.