

측정망 자료를 이용한 환경기준 대기오염물질의 권역별 단기 고농도 변화 추이

Regional Trends in Short-Term High Concentrations of Criteria Pollutants from National Air Monitoring Stations

김 영 성* · 김 찬 혁

한국외국어대학교 환경학과

(2013년 6월 17일 접수, 2013년 7월 16일 수정, 2013년 7월 16일 채택)

Young Sung Ghim* and Chan Hyuk Kim

Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies

(Received 17 June 2013, revised 16 July 2013, accepted 16 July 2013)

Abstract

While attainment rates for SO₂ and CO approached 100%, those for PM₁₀, NO₂, and O₃ have been low during the past decade. The attainment rates for 24-h PM₁₀ and 8-h O₃ have been only 1~3% and 5~12%, respectively, since the standards were strengthened in 2007. Variations in the 99th percentiles of 24-h PM₁₀, 8-h O₃, and 24-h NO₂, which are used as criteria for determining exceedance of standards, were examined by region. Because the analysis was based on short-term high-concentrations, the effects of Asian dust were observed for PM₁₀. Accordingly, it is necessary to specify whether exceptional events such as Asian dust will be included or not in determining the exceedances of standards. While variations in NO₂ were not large, there was an increasing trend in O₃. In the Yeongnam region, the increasing rate of O₃ concentrations was small although the decreasing rate of NO₂ was the greatest. In the Gangwon region, NO₂ concentrations were almost unchanged, but O₃ concentrations experienced a significant increase. Regional management strategies targeting short-term high concentrations of criteria pollutants analogous to the Special Act for the greater Seoul area will aid in improving attainment rates.

Key words : Criteria pollutants, Attainment rate, Short-term high concentration, Asian dust, Regional management

1. 서 론

우리나라는 1978년 SO₂를 시작으로 1983년 CO, NO₂, TSP (total suspended particles, 총먼지), 오존, 탄화수소 등에 대하여 환경기준을 설정하였다(KME,

2012a; NIER, 2012a). 1993년 오존으로 관리가 가능하다고 판단하여 탄화수소 기준을 폐지하였고, 1995년 PM₁₀ 기준을 시행하며 2001년 TSP 기준을 폐지하였다. 1991년부터 납, 2010년부터 벤젠 기준을 시행하고 있고 2015년부터 PM_{2.5} 기준이 시행될 예정이다. 여러 물질에 대하여 기준이 신설되고 일부는 폐지되었으나 최근 10~20년간 정책과 연구의 대상이 된 주요 환경기준물질은 SO₂, CO, NO₂, PM₁₀, 오존이다.

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-330-4993, E-mail : ysghim@hufs.ac.kr

Table 1. Attainment rates^a (%) of air quality standards between 2002 and 2011.

Pollutant	Averaging time	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
SO ₂	Annual	100	99.4 ^b	100 ^b	100	100	100	100	100	100	100
	24-hour	98.6	98.1	98.9	100	99.5	99.5	99.6	100	100	100
	1-hour	99.3	98.8	98.3	99.0	99.0	99.1	99.6	99.6	99.6	99.1
CO	8-hour	100	99.6	100	100	100	100	100	100	100	100
	1-hour	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
NO ₂	Annual ^c	100	100	100	100	100	67.3	67.3	70.4	70.2	71.5
	24-hour ^c	92.1	93.3	92.7	97.4	98.5	63.0	64.6	63.5	62.8	67.8
	1-hour ^c	100	98.2	100	99.5	99.5	62.2	70.4	70.4	74.9	79.1
O ₃	8-hour	54.3	42.4	15.4	14.8	14.0	12.3	8.2	4.6	4.6	7.9
	1-hour	79.2	71.4	57.2	70.6	81.5	60.0	57.4	48.7	48.1	59.8
PM ₁₀	Annual ^c	58.6	82.3	80.3	87.9	84.9	23.0	30.0	38.4	46.0	53.1
	24-hour ^c	0.8 ^d	55.4	53.2	61.5	32.5	1.4	1.4	2.6	3.0	1.3

^aNumber of stations that meet the standard divided by the total number of stations.

^bDifferent from the yearbook (NIER, 2012a). See the text for details.

^cThe standards were strengthened from 2007. See Table 2 for selected standards and NIER (2012a) for other standards.

^dParticularly low due to the effects of strong Asian dust events.

이들 오염물질들은 일반대기오염측정망에서 측정한다(KME, 2010). 반면, 유해대기오염물질과 광화학오염물질, 산성강하물 등은 특수대기오염측정망에서 측정한다. 일반대기오염측정망은 도시대기, 교외대기, 국가배경농도, 도로변대기측정망 등으로 구분되는데 이 중 환경기준 달성여부를 판정하기 위한 것은 도시대기측정망이다. 다른 일반대기오염측정망은 도시대기측정망의 환경기준 달성에 필요한 정보를 얻기 위한 것이다. 남은 1991년부터 환경기준을 시행하고 있음에도 일반대기오염측정망이 아닌 특수대기오염측정망에서 측정하며 근래에는 기준초과도 거의 없다(NIER, 2012a). KME(2012b)에서는 우리나라뿐 아니라 중국에서도 유연휘발유 사용이 금지되었기 때문에 앞으로 일반 도시대기에서 남이 문제될 가능성이 거의 없으므로 환경기준물질보다 유해대기오염물질로서 관리를 제안하였다.

표 1은 지난 10년간 남을 제외한 환경기준물질의 환경기준 달성률이다. 여기서 환경기준 달성률은 전체 측정소 중 환경기준을 달성한 측정소의 비율이다. CO는 장단기 기준을 모두 거의 100% 달성하였다. SO₂는 단기기준을 일부 초과하였는데 주로 산업단지 주변이다(KME, 2012b). SO₂ 연평균 기준은 2003년 울산 원산리 1곳에서 초과하였으나 대기환경연보(NIER, 2012a; 이하 연보)에서는 동일 측정소에서

2004년에 환경기준을 초과한 것으로 나타나 표 1과 다르다. 2004년의 경우, 연보에서는 2008년까지 유효측정비율이 50% 이상일 때 연평균을 계산한 데 비하여 표 1에서는(2001년부터 적용하고 있는 연보의 통계처리 방법에 따라) 유효측정비율이 75% 이상일 때 연평균을 계산하였는데 울산 원산리는 유효측정비율이 75%보다 낮아 환경기준 미달로 집계되지 않았다. 2003년 울산 원산리는 유효측정비율이 75% 이상이고 환경기준을 초과하였음에도 연보에서 집계되지 않은 이유는 명확하지 않다.

SO₂ 1시간 평균(이하 1시간 SO₂)이 일부 산업단지 주변에서만 환경기준을 초과하고 있는 데 비하여 8시간 오존과 24시간 PM₁₀은 최근 5년 환경기준 달성률이 각각 4.6~12%와 1.3~3.0%에 불과하다(표 1). NO₂ 중에서는 24시간 평균이 60% 대로 낮다. 지난 10년간 국가측정망 측정소 수가 지속적으로 증가함에 따라 환경부에서는 측정소 수 감소를 적극 검토하고 있다(KME, 2012b). SO₂와 CO와 같이 기준 달성률이 100%에 이르거나 근접할 경우 기준 준수 여부 감시를 위한 측정은 유지하기 어렵다. 이에 따라 KME(2012b)에서는 연소 배출에 대한 중요한 정보를 제공하는 등 측정이 필요한 SO₂와 CO에 대하여 환경기준 달성과 무관하게 일부 측정소에서 고성능 기기를 이용하여 한 단계 낮은 농도까지 측정하

Table 2. Selected air quality standards^a (NIER 2012a).

Pollutant	1993~2006	2007-Present
24-h PM ₁₀ (µg/m ³)	150 ^b	100
24-h NO ₂ (ppb)	80	60
8-h O ₃ (ppb)	60	60

^a99th percentile should not exceed the standard since 2001; before 2001, the standard should not be exceeded three or more times.

^bEnforced since 1995.

는 방안을 제시하였다.

연구를 위한 측정이 특정의 목적을 위하여 제한된 기간 진행되는 데 비하여 측정망 측정은 측정소에 따라서는 10년 이상 장기간 지속된다는 점에서 다르다. 그동안 측정망 자료를 이용한 연구는 주로 오존과 PM₁₀을 대상으로 하였다(Han *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2004; Jin *et al.*, 2003; Oh and Kim, 2002; Ghim, 2000, 1996). 일정 지역을 대상으로 한 연구도 수도권(Oh *et al.*, 2005; Ghim and Oh, 1999; Ghim, 1997), 서울과 부산(Kim *et al.*, 2003), 광양(Ha *et al.*, 2006), 대구(Ju and Hwang, 2011; Hwang *et al.*, 2009), 부산(Son and Kim, 2009), 서해연안 도시(Kim and Ma, 2009), 포항(Lim and Lee, 2011) 등 다양하다. 최소 1년 이상의 장기간 자료를 이용하므로 주로 평균 변화를 조사하였지만 고농도 발생 등 특정 사례를 분석한 연구도 적지 않다(Kim *et al.*, 2004; Ghim and Oh, 1999).

표 1은 PM₁₀, NO₂, 오존 등 환경기준물질의 단기 평균에 보다 적극적 관심이 필요함을 보여주고 있다. 2005년부터 시행 중인 “수도권 대기환경개선에 관한 특별법”(이하 특별법)이 기본계획에서 연평균을 목표로 설정함에 따라 근래 연평균에 관심이 높으나 환경기준은 특별법 이전에 대기환경정책이 추구하여야 할 기본 목표이다. 이번 연구에서는 PM₁₀, NO₂, 오존의 단기평균 중에서도 특히 기준 달성률이 낮은 24시간 평균과 8시간 평균에 대하여 기준초과 여부 판단기준인 99백분위수(오름차순으로 배열하였을 때 99%에 해당되는 값)를 계산하여(표 2) 지역별 변화 추이를 조사하였다.

2. 자료 이용 및 처리

1993년부터 2011년까지 전국 도시대기측정망의 1시간 평균 자료를 이용하였다. 자료는 충분히 검증된

것으로 판단하여 별도의 검증절차를 거치지 않았다. 이론적으로 0이 가능한 오존 외에도 일부 오염물질에서 0이 발견되었으나 그대로 이용하였다. 단지, 1996년 충청권의 일평균 NO₂의 99백분위수가 특별히 높아 점검한 결과 대전 읍내동 4월 4일 2시부터 7일 9시까지와 청주 송정동 8월 1일 1시부터 2일 11시까지 자료는 이상치로 판단되어 제외하였다.

연보에서는 2001년부터 대상기간 중 75% 이상 측정자료가 확보되었을 때 통계값을 산출하고 있으나 이번 연구에서는 2001년 이전 자료에 대해서도 동일한 원칙을 적용하였다. 지역 평균의 경우 연보에서는 지역 내 모든 측정소의 측정자료를 모아 자료수가 75% 이상일 때 평균을 산출한다. 동일한 방식을 따른다면 지역의 백분위수도 모든 측정자료를 모아 산출하여야 한다. 그러나 이번 연구에서는 측정소별로 99백분위수를 산출한 후 지역 내 측정소들의 99백분위수를 평균하여 지역의 99백분위수를 결정하였다. 이와 같은 방식의 계산에서는 자료수가 75% 이상인 모든 측정소 통계값이 동등하게 취급되며 자료수가 75% 미만인 측정소의 통계값은 무시된다. 반면, 연보의 지역통계에서는 자료수가 100%인 측정소는 75%인 측정소에 비하여 1.3배 비중이 크고 자료수가 10%인 측정소도 자료수만큼 기여한다. 우리나라는 많은 측정소의 자료수가 75% 이상이기 때문에 두 값이 거의 같은 것이 보통이다. 하지만 측정소 수가 작은 지역에서 측정소의 신설이나 폐지 등 변화가 있을 때에는 두 값이 차이를 보일 수 있다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 지난 20년간 서울과 전국의 24시간 PM₁₀과 NO₂, 그리고 8시간 오존의 99백분위수 변화이다. PM₁₀은 서울과 전국 모두 2002년에 가장 높았는데 3월과 4월 초대형 황사 때문이다(Choi *et al.*, 2013). 2002년이 특히 높지만 이와 무관하게 전국에 비하여 서울이 평균 11% 높다. 서울의 경우 특별법의 시행과 더불어 2002년 이후 연평균이 감소 추세이나 그림 1의 24시간 PM₁₀은 2004, 2005년 이후 증가추세이다. 서울과 전국의 차이는 NO₂가 가장 커서 서울이 26% 높으며, 오존도 서울이 약간 높다. 표 1에서 24시간 PM₁₀과 8시간 오존의 기준달성률이

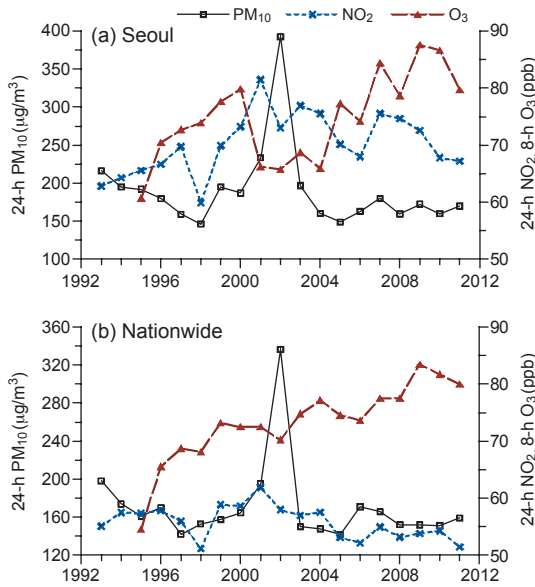


Fig. 1. Trends in the 99th percentiles of 24-h PM₁₀, 24-h NO₂, and 8-h O₃ in Seoul and nationwide.

낮다고 하였는데 그림 1의 24시간 PM₁₀을 보면 환경기준이 150 µg/m³에서 100 µg/m³로 강화된 2007년 이후 서울은 물론 전국의 평균도 환경기준보다 50 µg/m³ 이상 높다(표 2).

오존도 PM₁₀, NO₂와 유사하지만 전국적으로 상승이 가파르다는 점에서 상황이 더욱 좋지 않다. 이와 같은 변화는 2000년대 이후 중국의 NO_x 배출 증가와 연관될 수 있다는 점에서 더욱 그러하다(Zhang *et al.*, 2009; Ohara *et al.*, 2007). 광역 규모 오존 농도 변화에는 NO_x 배출이, 국지 고농도 발생에는 VOC 배출이 중요한 것으로 알려져 있다(Fusco and Logan, 2003; OTAG, 1997). 영향 반경이 평균화 시간에 비례하기 때문에 Ghim(2012) 등 여러 연구에서 지적한 서울의 오존 연평균 상승은 중국의 NO_x 배출과 연관될 수 있다. 그러나 Ghim(2012)에서는 연평균뿐 아니라 1시간 오존의 99.9백분위수가 증가하였고 그림 1에서는 8시간 평균의 99백분위수도 증가하였다. VOC 배출 변화를 우선적으로 점검할 필요가 있다. 아울러 최근에는 EU(European Union)의 차량 배출기준이 강화되는 과정에서 경유차 배출 NO_x 중 NO₂ 비율이 높아진다는 주장이 제기되고 있다(Choi *et al.*, 2011). 도심에서 NO는 오존 농도를 낮추지만 NO_x 배출량이

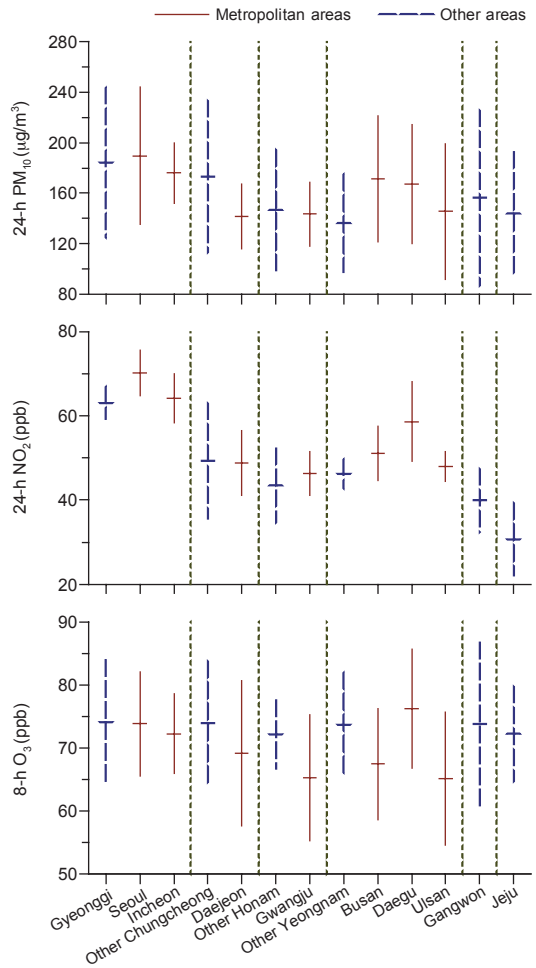


Fig. 2. Means and standard deviations of the 99th percentiles of 24-h PM₁₀, 24-h NO₂, and 8-h O₃ by region for the period shown in Fig. 1. Vertically dotted lines divide regions. Horizontal lines in the middle denote means and vertical lines denote mean ± standard deviation. Other areas represent the region excluding metropolitan areas.

같아도 NO₂ 비율이 높으면 오존 생성에 유리하므로 점검이 필요하다.

오염물질의 지역별 차이를 좀 더 상세히 알아보기 위하여 그림 2에서는 전국을 권역별로 나누어 광역시와 기타 지역의 농도 변화를 살펴보았다. 여기서 농도 변화는 지역별 연평균의 변화이다. 그림 1에서 서울과 전국의 변화가 컸던 NO₂는 그림 2에서도 지역별 차이가 크다. 흥미로운 것은 수도권과 충청권,

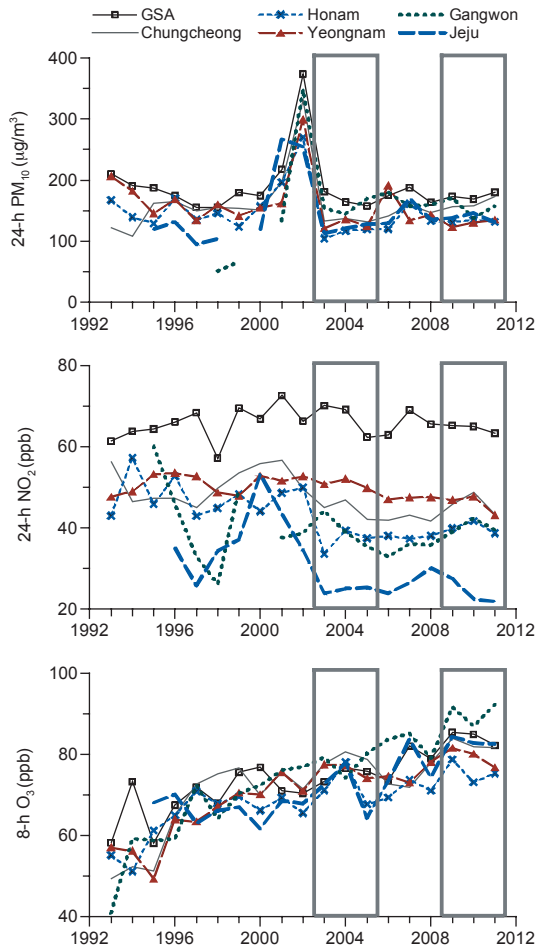


Fig. 3. Trends in the 99th percentiles of 24-h PM_{10} , 24-h NO_2 , and 8-h O_3 by region. Discontinuities of the plot are caused by the lack of valid data. Boxes shows the first and the last 3 years during the past 9 years for which means of the 99th percentiles are presented in Table 2.

호남권에서 광역시와 기타 지역의 차이보다 권역별 차이가 크다는 점이다. 영남권은 권역이 넓어 권역 내에서도 변화 폭이 크지만 수도권과 충청·호남권과 구별이 어려울 정도는 아니다. 반면, 순수한 2차 생성물인 오존은 권역별 차이를 알아보기 어렵고 광역시와 기타 지역의 차이도 일률적이지 않다. 광역시가 없는 강원, 제주권과 다른 권역 기타 지역의 평균 농도가 대체로 유사한데(해에 따라 광화학 환경이 달라 변화가 있으나), 인위적 배출에 의한 NO의 영향

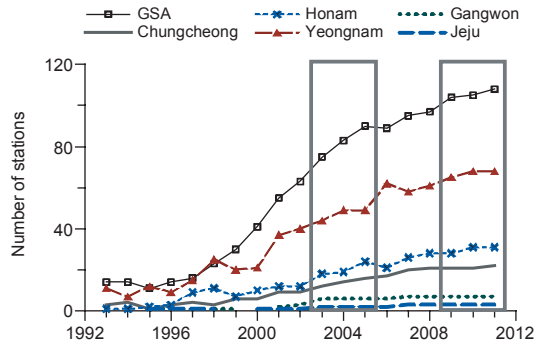


Fig. 4. Trends in the number of stations with valid 99th percentiles of 24-h PM_{10} . Description for boxes is the same as that in Fig. 3.

이 직접적이지 않아 농도 수준이 지역규모(regional scale) 평균에 수렴하면서 나타난 현상으로 보여진다(Ghim and Chang, 2000).

그림 3에서는 권역별로 각각 24시간 PM_{10} 과 NO_2 그리고 8시간 오존의 99백분위수 변화를 조사하였다. 그림 4는 24시간 PM_{10} 99백분위수의 유효 측정소수 변화이다. PM_{10} 기준 설정이 늦어 2000년대 초까지는 NO_2 와 오존에 비하여 측정소수가 작으나 전체적 모습은 거의 유사하다. 표 3은 지난 9년 중 초반 3년과 후반 3년, 그리고 연도별 변화의 기율기로 알아본 9년간 평균 변화율이다. 표 3에서 최근 9년의 변화를 조사한 것은 (1) 측정소수가 계속 증가함에 어느 정도 틀이 갖추어진 것으로 판단하였고, (2) PM_{10} 의 경우 2002년 강한 황사의 영향으로 농도가 높아 이후의 변화를 알아보고자 하였기 때문이다.

표 3의 PM_{10} 을 보면 수도권이 대체로 높고 최근에는 의외로 영남권이 낮다. 그러나 영남권은 초반 3년에도 호남 다음으로 농도가 낮았다. 초반 3년보다 후반 3년 평균 농도가 상승하였음에도 불구하고 평균 변화율이 음(-)인 것은 2006년 농도가 높았기 때문이다(그림 3). 그러나 절대 값이 작아 큰 의미를 부여하기 어렵고 강원권도 유사하다. 오히려 충청부터 제주까지 서쪽 지방의 PM_{10} 상승을 주목할 만하다. 충청, 호남, 제주 순으로 상승하였기 때문에 이와 같이 본다면 수도권이 가장 크게 상승하여야 하나 서쪽 지방 중에서는 상승률이 가장 작다. 서울의 연평균이 낮아지고 있는 것과 같이 수도권 특별법의 효과일 개연성이 있어 조사가 필요하다.

Table 3. Means of the 99th percentiles of 24-h PM₁₀, 24-h NO₂, and 8-h O₃ for 2003~2005 and 2009~2011 and the slope of the best-fit line for their annual variations between 2003 and 2011.

Region	24-h PM ₁₀			24-h NO ₂			8-h O ₃		
	Mean (µg/m ³)		Slope	Mean (ppb)		Slope	Mean (ppb)		Slope
	2003~2005	2009~2011		2003~2005	2009~2011		2003~2005	2009~2011	
GSA	168	174	0.5	67	65	-0.5	75	84	1.4
Chungcheong	134	162	4.6	45	46	0.1	79	82	0.6
Honam	113	132	3.3	37	40	0.5	72	76	0.4
Yeongnam	127	129	-0.1	51	46	-0.8	76	79	0.4
Gangwon	156	155	-0.4	40	40	0.0	78	90	1.8
Jeju	120	138	2.9	25	24	-0.1	72	83	1.6

수도권이 높고 영남권이 낮은 표 3의 PM₁₀에서는 황사의 영향을 짐작할 만하다. 무엇보다 표 1과 그림 1, 3에서 2002년 황사의 영향을 확인하였고, 황사가 주로 북서쪽에서 유입되기 때문에 북서쪽부터 남동쪽으로 영향이 감소하기 때문이다(Choi *et al.*, 2013). 수도권 특별법의 기본계획에서는 PM₁₀ 연평균을 산출할 때 황사일을 제외하였으나 현재 환경기준에는 이에 대한 언급이 없다. 하지만 단기 고농도는 황사에 훨씬 민감하므로 단기 환경기준을 위하여서도 황사에 대한 규정이 필요하다.

영남권의 최근 3년 PM₁₀이 낮은 것은 황사의 영향으로 해석하였지만 영남권은 PM₁₀ 외에도 NO₂ 감소율이 가장 높고 그림에도 불구하고 오존의 증가율이 가장 낮다. 영남권 다음으로는 특별법이 시행되는 수도권의 NO₂ 감소율이 높는데 수도권은 오존의 증가율이 높다. 영남권과 더불어 오존의 증가율이 낮은 호남권은 NO₂ 증가율이 가장 높다. 영남권은 지역이 넓고 광역시도 많아 지역 내에서도 편차가 크지만 그림에도 표 3에 나타난 영남권의 변화는 충분히 주목할 만하다. 변화의 실제와 원인에 대한 조사가 필요하다.

충청과 호남의 변화는 영남권과 대비된다. PM₁₀의 변화는 황사의 영향을 의심하였지만 NO₂가 증가하였다. 오존의 낮은 증가율은 NO₂가 증가한 까닭에 상쇄되는 모습이다. 강원은 오존이 크게 증가하였다. 그림 3을 보면 현재에 비하여 측정망 체계가 아직 불완전하였던 1990년대를 제외하면 2000년대 이후 계속 높은 수준을 유지하였고 증가추세가 더해지며 최근 3년 평균은 권역 중 가장 높다. NO₂는 거의 변화가 없는 상황에서 오존만이 증가하였는데 수도권의 풍하지역이라는 측면에서 수도권의 영향일 가능성이

있다. 강원만큼은 아니어도 수도권에 인접한 충청도 오존 농도가 높다. 강원 다음으로는 제주의 오존 증가율이 높는데 제주에는 NO₂가 낮다.

4. 결 론

WHO/UNEP (1992)에서는 서울을 멕시코시티, 베이징 등과 함께 대기오염이 가장 심한 도시의 하나로 분류하였다. 그러나 당시 보고서에서도 도시대기 측정망 측정은 LA, 도쿄 등과 함께 가장 우수하였다. 배출자료는 미흡하였지만 2000년대 대기정책지원시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System; NIER, 2012b)이 구축되며 체계를 갖추었고 수도권 특별법의 기초가 되었다. 수도권 특별법은 목표를 설정하고 이를 위하여 기본계획과 실행계획을 작성하여 시행하는 선진 대기환경관리의 전형을 보여주었다는 점에서 의미가 크다. 그동안 노력의 결과로 많은 성과를 거두었지만 성과가 큰 만큼 변화의 필요성도 커졌다.

이번 논문에서는 다음의 사항들을 주목하였다. (1) SO₂, CO의 기준달성률은 거의 100%에 도달한 데 비하여 NO₂, O₃, PM₁₀은 기준달성률이 낮고 특히 24시간 PM₁₀, NO₂와 8시간 O₃의 기준달성률이 낮다. (2) 특별법은 선진 대기환경관리의 효율을 경험하는 좋은 계기가 되었지만 1차 기본계획이 연평균을 목표로 하면서 장기 기준에 관심이 집중되었다. (3) 보편적 목표인 환경기준 달성을 위하여 보다 노력할 필요가 있으며 이 경우 환경기준 달성률이 특히 낮은 24시간 PM₁₀, NO₂와 8시간 O₃가 1차 대상이 될 수 있다.

기준초과 여부 판단 기준인 99백분위수 24시간 PM₁₀, NO₂와 8시간 O₃의 권역별 변화를 조사하였다.

PM₁₀과 오존은 최근 모든 권역에서 환경기준을 초과하고 있으며(표 3) 단기 고농도를 대상으로 한 까닭에 PM₁₀에서는 황사의 영향이 관찰되었다. 특별법 기본계획에서는 PM₁₀ 연평균을 산출할 때 황사일을 제외하고 있는데 환경기준에서도 황사에 대한 규정이 필요하다. 황사의 영향이 지배적인 2002년을 제외한 2003년 이후 9년의 변화를 요약하면 PM₁₀은 대체로 증가하였고 NO₂는 변화가 크지 않으며 오존은 증가하였다.

영남권은 수도권보다 NO₂ 감소율이 높음에도 오존 증가율이 낮았다. 강원은 NO₂가 거의 변화하지 않은 가운데 오존이 큰 폭으로 상승하여 수도권의 영향이 의심되었으며 충청도 유사하였다. 수도권을 대상으로 특별법이 시행되고 있지만 1차 오염물질의 특성을 보이는 NO₂는 권역별 차이가 뚜렷하고 PM₁₀ 변화도 권역별로 달라 환경기준물질도 권역별 관리를 검토할 만하다.

감사의 글

이 연구는 한국외국어대학교 교내학술연구의 일환으로 진행되었습니다. 도시대기측정망 자료를 제공한 국립환경과학원에 감사드립니다.

References

Choi, S.-H., Y. Choi, and Y.S. Ghim (2013) Analysis of Asian dust events in Korea between 1997 and 2006, *Asian J. Atmos. Environ.*, 7, 114-119.

Choi, Y.-J., W. Kim, and K.-J. Ko (2011) Analysis of the Reason for the Slow Reduction of Nitrogen Dioxide (NO₂) Concentration and Countermeasures in Seoul, Seoul Development Institute.

Fusco, A.C. and J.A. Logan (2003) Analysis of 1970~1995 trends in tropospheric ozone at Northern Hemisphere midlatitudes with the GEOS-CHEM model, *J. Geophys. Res.*, 108(D15), 4449, doi:10.1029/2002JD002742.

Ghim, Y.S. (1996) Variations of ground-level ozone concentration in Korea during 1991 to 1993, *J. Korea Air Poll. Res. Assoc.*, 12, 55-66. (in Korean with English Abstract)

Ghim, Y.S. (1997) Indication of photochemical air pollution in the greater Seoul area, 1990 to 1995, *J. Korea Air Poll. Res. Assoc.*, 13, 41-49. (in Korean with English Abstract)

Ghim, Y.S. (2000) Trends and factors of ozone concentration variations in Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 16, 607-623. (in Korean with English Abstract)

Ghim, Y.S. (2012) Proposal for air quality improvement and green growth in the Seoul metropolitan area of the 21st century, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28, 109-118. (in Korean with English Abstract)

Ghim, Y.S. and H.S. Oh (1999) Studies of high-ozone episodes in the greater Seoul area between 1990 and 1997, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 15, 267-280. (in Korean with English Abstract)

Ghim, Y.S. and Y.-S. Chang (2000) Characteristics of ground-level ozone distributions in Korea for the period of 1990~1995, *J. Geophys. Res.*, 105, 8877-8890.

Ha, H., S.-D. Lee, J.-K. Lee, C.-O. Park, and T.-R. Mun (2006) On characteristics of surface ozone concentration and temporal-spatial distribution in Kwangyang-bay, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22, 642-652. (in Korean with English Abstract)

Han, J., M. Lee, and Y.S. Ghim (2008) Cluster analysis of PM₁₀ concentrations from urban air monitoring network in Korea during 2000 to 2005, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24, 300-309. (in Korean with English Abstract)

Hwang, Y.-J., S.-J. Lee, H.-S. Do, Y.-K. Lee, T.-J. Son, T.-G. Kwon, J.-W. Han, D.-H. Kang, and J.-W. Kim (2009) The analysis of PM₁₀ concentration the evaluation of influences by meteorological factors in ambient air of Daegu area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25, 459-471. (in Korean with English Abstract)

Jin, Y.H., H.J. Koo, B.M. Kim, Y.P. Kim, and S.U. Park (2003) Variations of the PM₁₀ concentrations observed in eleven cities in South Korea between 1995 and 2000, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 19, 231-245. (in Korean with English Abstract)

Ju, J.-H. and I.J. Hwang (2011) A study for spatial distribution of paricipal pollutants in Daegu area using air pollution monitoring network data, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27, 545-557. (in Korean with English Abstract)

Kim, C.-H., I.-S. Park, S.-J. Lee, J.-S. Kim, H.-A. Jin, and H.-G. Sung (2004) On the recent air pollution levels observed in the regional air monitoring network - High air pollution concentration episodes and their

- meteorological characteristics in 2002, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20, 215-224. (in Korean with English Abstract)
- Kim, D.-S. and H. Ma (2009) Characteristics of air quality in the west-coastal urban atmosphere, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25, 550-561. (in Korean with English Abstract)
- Kim, Y.-K., I.-B. Oh, and M.-K. Hwang (2003) Meteorologically adjusted ozone trends in the Seoul and Busan metropolitan areas, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 19, 561-568. (in Korean with English Abstract)
- KME (Korea Ministry of Environment) (2010) Operation Plan of Air Pollution Monitoring Network (2011 ~ 2015), Climate and Air Quality Management Division.
- KME (2012a) 2012 White Paper of Environment.
- KME (2012b) Development of Upgrade Strategy of Air Pollution Monitoring Network for Enhancing the Reliability of Air Pollution Assessment, Report of the Hankuk University of Foreign Studies.
- Lim, H.-J. and Y.-J. Lee (2011) Characterization of ozone distributions in Pohang: Measurement data during 2002 ~ 2006, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27, 50-62. (in Korean with English Abstract)
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2012a) Annual Report of Air Quality in Korea 2011.
- NIER (2012b) National Air Pollutants Emission 2010.
- Oh, I.-B. and Y.-K. Kim (2002) Surface ozone in the major cities of Korea: trends, diurnal and seasonal variations, and horizontal distributions, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 18, 253-264. (in Korean with English Abstract)
- Oh, I.-B., Y.-K. Kim, and M.-K. Hwang (2005) Ozone pollution patterns and the relation to meteorological conditions in the greater Seoul area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 21, 357-365. (in Korean with English Abstract)
- Ohara, T., H. Akimoto, J. Kurokawa, N. Horii, K. Yamaji, X. Yan, and T. Hayasaka (2007) An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4419-4444.
- OTAG (Ozone Transport Assessment Group) (1997) Executive Report 1997, Washington, DC, ECOS/OTAG.
- Son, H.-Y. and C.-H. Kim (2009) Interpreting the spectral characteristics of measured particle concentrations in Busan, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25, 133-140. (in Korean with English Abstract)
- WHO/WHO (1992) Urban Air Pollution in Megacities of the World, Blackwell, Oxford, UK.
- Zhang, Q., D.G. Streets, G.R. Carmichael, K.B. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I.S. Park, S. Reddy, J.S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L.T. Wang, and Z.L. Yao (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5131-5153.