

서울시 대기 측정소간 상관관계를 감안한 측정소의 운용 방향 개선을 위한 제언

A Proposal for the Upgrade of the Current Operating System of the Seoul's Atmospheric Monitoring Network Based on Statistical Analysis

배민석 · 정창훈^{1),*} · 김영성²⁾ · 김기현³⁾

국립목포대학교 환경공학과, ¹⁾경인여자대학교 보건의료관리과,
²⁾한국의국어대학교 환경학과, ³⁾세종대학교 환경에너지융합학과
(2013년 6월 17일 접수, 2013년 7월 25일 수정, 2013년 7월 25일 채택)

Min Suk Bae, Chang Hoon Jung^{1),*}, Young Sung Ghim²⁾ and Ki Hyun Kim³⁾

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University

¹⁾*Department of Health Management, Kyungin Women's University*

²⁾*Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies*

³⁾*Department of Environment & Energy, Sejong University*

(Received 17 June 2013, revised 25 July 2013, accepted 25 July 2013)

Abstract

The present operating system for the atmospheric monitoring network in the city of Seoul, Korea, has been established since the late 90s by the Korean Ministry of Environment (KMOE). In this research, it was evaluated by the multi-statistical approaches through combinations of time series analysis, correlation matrix, and multiple cluster analysis. Finally, road traffic including resuspended materials can be one of the main sources of particulate matter in the atmosphere. Based on its importance, it will be significant challenges in quantitative evaluation of its contribution to airborne concentrations. The future directions for their amendments such as a new management plan for the source of road dust (including car emissions) were devised and proposed based on the statistical judgements derived in this research.

Key words : Air quality monitoring network, Seoul, Multi-statistical approaches, Multiple cluster analysis

1. 서 론

도시의 대기 오염을 장기간 지속적으로 측정하는

것은 여러 측면에서 매우 중요한 의미가 있다. 특히, 뜻하지 않은 고농도 대기오염 누출에 의한 정보적 기능, 현 농도의 정확한 관측을 바탕으로 미래의 방지대책 수립과 평가를 위한 기초자료의 제공, 또한 환경기준 달성여부의 판단 및 대기 예측모델의 보정 자료 제공 등 여러 목적으로 활용되고 있다. 또한, 기

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-540-0166, E-mail : jch@kiwu.ac.kr

존의 대기오염측정망의 배치기준이 행정구역상 기초로 측정 장소의 관리 용이성 등에 근거를 두고 있어 지형 및 기상학적 특성 등을 고려하지 못하는 문제점 등이 지적되어 왔다. 대기환경연보와 대기오염측정망의 현황을 살펴보면, 환경부 및 지자체에서 운영하는 측정망은 전국적으로 총 450여 곳에 이르고 있다. 이러한 측정망의 운영은 그 양적 수준에 있어 선진국에 뒤지지 않는 수준에 도달하였다. 이와 더불어 최근 질적인 면에서 대기오염측정망의 구조와 운영체계에 대한 재평가 관측 자료와 함께 다각도로 이루어지고 있다 (Ministry of Environment, 2012; Jung et al., 2012; Ju and Hwang, 2011; Yoo and Park, 2007, 2006; Hong and Cho, 2005).

서울시 대기오염 측정소를 살펴보면, 행정적으로 (구를 중심으로) 크게 도시대기 측정소(Urban Sites)와 도로변 측정소(Road Sites)로 나누어 관리하고 있다. 이는 서울시 대기오염의 주원인으로 도로변의 기여도를 감안한 것이다. 2009년부터 2011년까지의 측정소의 갯수를 살펴보면 총 42개소가 대기오염 측정망을 운영 중이다. 그런데 이 중 2개소가 이전 또는 측정 중단을 하여, 2013년 6월 기준으로 총 40개(도시대기 25개와 도로변 15개)의 측정소를 운영하고 있다. 이로부터 측정할 결과는 행정적으로 해당 구의 대기오염을 대표한다고 할 수 있다. 그러나 행정적으로 다른 구에 위치함에도 불구하고 지리적으로 가까운 측정소가 존재한다는 점을 감안하면, 측정소 간의 유사한 대기환경 자료를 생산하고 있을 가능성을 무시할 수 없다. 또한 서울시 대기오염에 영향을 주는 주인자가 도로변 등으로 제한적인 것을 감안하면, 지리적 위치에 상관없이 측정소간의 상관성이 높을 가능성이 있다. 이에 서울시 도시대기 측정소와 도로변 측정소를 중심으로 현재의 전체 측정망이 이와 같은 상황에 얼마나 영향을 받는지, 또는 이러한 잠재적 문제를 어떻게 보완 또는 개선하여야 할지의 여부를 시계열 농도 변화와 군집분석 등의 통계적 기법을 동원하여 다각도로 살펴보았다. 이를 토대로 새롭게 운용 방향의 개선을 도모하기 위한 몇 가지 제언을 하고자 한다.

2. 서울시 측정망 농도 변화 분석

정량적인 서울지역의 대기오염농도의 시계열적 경

향을 파악하기 위하여, 서울지역 도시대기측정소의 연도별 오염농도의 분포를 살펴보면 다양한 경향을 확인할 수 있다. SO₂와 PM₁₀의 경우 지속적인 감소 경향을 보이고 있으나, NO₂와 O₃의 경우 2000년대 들어 오히려 증가하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다. 그림 1에 제시한 바와 같이, SO₂와 PM₁₀의 경우 연평균 경향이 시간에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 특히, 측정소별 농도의 편차가 시간이 갈수록 감소하는 경향을 뚜렷이 보여주고 있다. 이는 측정소간 농도의 변이가 이전에 비하여 크지 않음을 보여주고 있는 것이다. 이에 비하여 NO₂와 O₃의 경우(SO₂와 PM₁₀에 대비하여) 연도별로 뚜렷한 감소추세를 확인할 수 없다. 또한 측정소별 편차 역시 큰 감소의 경향을 보이지 않다는 것을 알 수 있다. 이는 측정소간 농도의 변이가 SO₂와 PM₁₀의 경우와 비교해 볼 때 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다.

대기환경에 대한 관리기준은 시간에 따라 점차 강화하는 방향으로 변화하여 왔다. 1993~2010년까지의 주요 기준대기오염물질의 기준치 변화를 보면 SO₂의 경우 2001년 연평균 기준, 일평균, 시간평균 기준이 0.03 ppm/년, 0.14 ppm/일, 0.2 ppm/시간에서 0.02 ppm/년, 0.05 ppm/일, 0.15 ppm/시간으로 강화되었다. 이에 반해, CO와 오존은 대상 기간 중 환경기준의 강화가 더 이루어지지 않았다. 환경기준의 달성 여부는 도시대기측정소를 대상으로 한다. 이에 대기환경기준에 따른 서울시 도시대기측정소의 오염 물질별 환경기준 달성률을 표 1에 나타내었다. SO₂의 경우 연평균은 연평균 및 24시간, 1시간평균 공히 100%의 기준을 달성하였다. CO의 경우에도 역시 모든 측정소에서 기준치를 만족하고 있다. 반면 NO₂와 오존의 경우 환경기준 달성률을 만족하는 측정소가 많지 않으며, 1시간 및 24시간 환경기준 달성률 역시 매우 낮은 수준을 유지하고 있다. O₃의 경우 1시간 평균의 경우 등락을 거듭하는 경향을 보이는 반면, 8시간 평균의 환경 기준 달성률은 지속적으로 감소함을 알 수 있다. NO₂ 경우 2007년에 기준치를 강화한 이후, 기준치의 달성률이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

앞서 설명한 바와 같이 시간에 따른 기준치의 변화를 감안할 때, 이전의 자료에 대하여 기준치의 초과현황을 근거로 시간에 따른 오염물질의 변화를 파악하는 것은 여러 가지 변수를 고려할 필요가 있다.

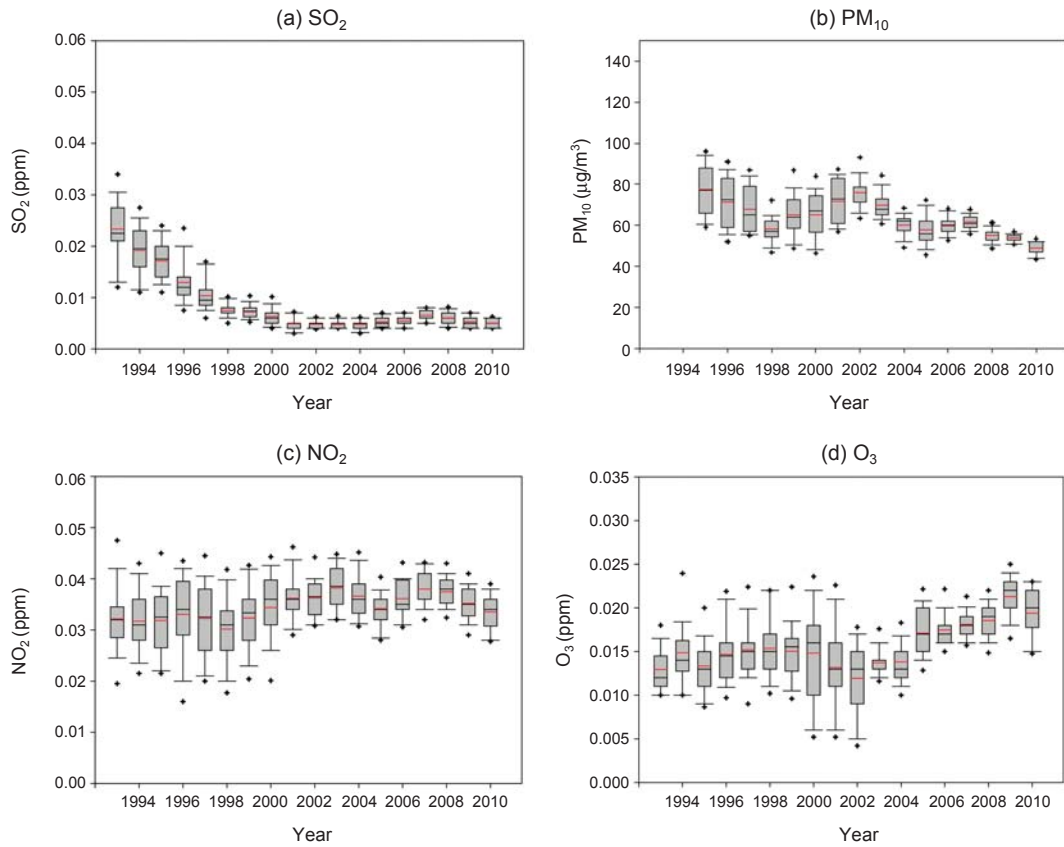


Fig. 1. Annual Variations of SO₂, PM₁₀, NO₂, and O₃ concentration at the Seoul's Atmospheric Monitoring Network placed between different urban sites from 1993 through 2010.

예컨대 서울지역 SO₂ 농도가 1993년 이후 기간의 기준초과 지점이 없었던 것은 이 당시의 24시간 및 1시간 기준이 기준강화 이전이기 때문인 것으로 사료된다. 즉, SO₂의 기준강화 시점인 2001년도를 중심으로 그 전후의 기준초과 현황의 차이를 살펴볼 필요가 있다. 그림 2는 서울시 도시대기측정소를 대상으로 오염물질별 측정소, 기준초과 측정소 및 강화된 기준 적용시의 기준초과 측정소의 추이변화를 살펴본 것이다. 연도별 해당연도의 SO₂ 농도 기준을 적용하였을 경우 기준치 초과 측정소는 발견되지 않았다. 1993년부터 측정자료가 있는 측정소에 한해 2001년 이후의 기준을 적용하면, SO₂의 기준치 초과 횟수 및 측정소 수는 꾸준히 감소하고 있는 경향을 뚜렷이 보여주는 것으로 조사되었다(MOE, 2001~2010).

그림 3은 서울지역의 가장 오랜 측정소중의 하나

인 중구측정소의 일평균 농도 값을 오염물질별로 살펴본 것이다. 그림 3에서 오존의 일농도 값은 1일 8시간 평균 농도치를 비교한 결과이다. 즉, 오존의 1일 8시간 평균치의 경우 하루를 기준으로 01~08시, 02~09시, 03~10시, 04~11시, ..., 17~24시 등 총 17개 경우의 평균치로 구분하였다. 이 때, 각 경우의 자료 개수가 6개 이상인 것을 8시간 평균치로 적용하고, 총 17개의 평균치중 최대치를 1일 8시간 평균치로 하여 경향을 살펴보았다. 나머지 NO₂, SO₂와 PM₁₀의 농도는 24시간 평균값을 적용하였다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 SO₂ 농도는 지속적으로 감소하여 90년대 후반부터 기준치를 초과하는 경우를 살펴보기 어려운데 비하여 NO₂와 오존농도의 경우는 기준치를 초과하는 고농도 사례가 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. PM₁₀의 경우 2005년부터 시행한 '수도

권 대기환경개선을 위한 특별법' 등의 영향으로 연평균 농도는 2000년대 중후반 이후 감소추세인 것을 확인할 수 있었다. 다만 일평균 자료의 경우 황사 및 연무 등의 영향으로 인한 고농도 사례가 여전히 존재하여 SO₂ 농도의 변화와 같은 뚜렷한 감소경향을 파악하기는 힘들었다.

이상과 같이 서울지역 대기 오염물질의 시계열적 경향을 살펴본 결과 SO₂와 PM₁₀의 경우 오염농도의 감소와 측정소별 편차의 감소를 확인할 수 있었다. 그러나 NO₂와 O₃의 경우 뚜렷한 감소경향을 보이기보다 오히려 다소 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 시계열적 변화경향을 통하여 이들의 원인을 확인할 수는 없으나 이러한 경향의 원인은 서울지역의 배출오염원이 가지고 있는 특성 추이의 변화 등을 보다 면밀히 살펴보아야 할 것으로 사료된다. 이를 위해 도로변 측정소 자료를 포함하는 서울시 전체 측정망 자료를 이용하여 근집분석을 통해 원인을 분석하고자 하였다.

3. 근집분석을 이용한 서울시 측정망 상관관계

서울시 대기오염의 주원인을 좀 더 자세히 분석하고자, 측정소간의 절대 평균농도를 다각도로 분석하고자 하였다. 이를 위해 대기오염 측면에서 2009년부터 2011년까지의 운영한 도시대기와 도로변 서울시 측정소 42곳의 유기적 관계, 즉 같은 원인 물질에 대해 유사성의 강도를 통계적 방법을 이용하여 분석하였다. 먼저 2009년부터 2011년까지 서울시 측정소 42곳의 PM₁₀과 NO₂ 자료에 대한 검증 분석을 하였다. 간략히 데이터 값이 3시간 이상 연속적으로 동일한 자료(자료 값이 0인 경우 포함) 등 과학적으로 설명하기 어려운 이상치(outlier)를 나타낸 경우 분석에서 제외하였다. 그 결과 전체적인 PM₁₀과 NO₂의 자료 수집율(Data Capture)은 각각 86.51%과 86.42%로 나타났다.

본격적인 데이터 분석에 앞서 2009년부터 2011년까지 서울시 측정소 42곳 중 PM₁₀과 NO₂ 자료 수집율이 70% 이하인 '내부순환로', '공향로', '궁동', '동작대로', 그리고 '잠실동' 측정소는 본 연구에서 제외하였다(표 2). 그 결과 12곳의 도로변 측정소(서울

Table 1. Attainment ratio based on the national standard at the Seoul Atmospheric Monitoring Network from many urban sites (2001 to 2010).

Pollutants	Averaging time	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
		Standard attainment (%)	Standard attainment (%)	Standard attainment (%)	Standard attainment (%)	Standard attainment (%)	Standard attainment (%)	Standard attainment (%)	Standard attainment (%)	Standard attainment (%)	Standard attainment (%)
SO ₂	Year	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	24 hr	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	1 hr	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
NO ₂	Year	100	100	100	100	100	100	3.7 ⁽¹⁾	3.7	8.0	24.0
	1 hr	96.3	100	92.6	100	100	100	11.11 ⁽¹⁾	11.11	20	60
	24 hr	51.9	85.2	81.5	70.4	85.2	96.3	3.70 ⁽¹⁾	0	4	20
O ₃	1 hr	70.4	85.2	96.3	81.5	48.1	81.5	11.11	0	20	12
	8 hr	25.9	29.6	3.7	14.8	7.4	0	0	29.63	0	0
CO	1 hr	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	8 hr	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
PM ₁₀	Year	61.5	29.6	74.1	96.3	92.6	100	0 ⁽²⁾	7.4	4.0	68.0
	24 hr	7.7	0	0	25.9	55.6	40.7	0 ⁽²⁾	0	0	0

⁽¹⁾NO₂ standard (2007) : 0.05 ppm/yr, 0.08 ppm/day, 0.15 ppm/hr ⇒ 0.03 ppm/yr, 0.06 ppm/day, 0.1 ppm/hr

⁽²⁾PM₁₀ standard (2007) : 70 µg/m³/year, 150 µg/m³/day ⇒ 50 µg/m³/day, 100 µg/m³/day

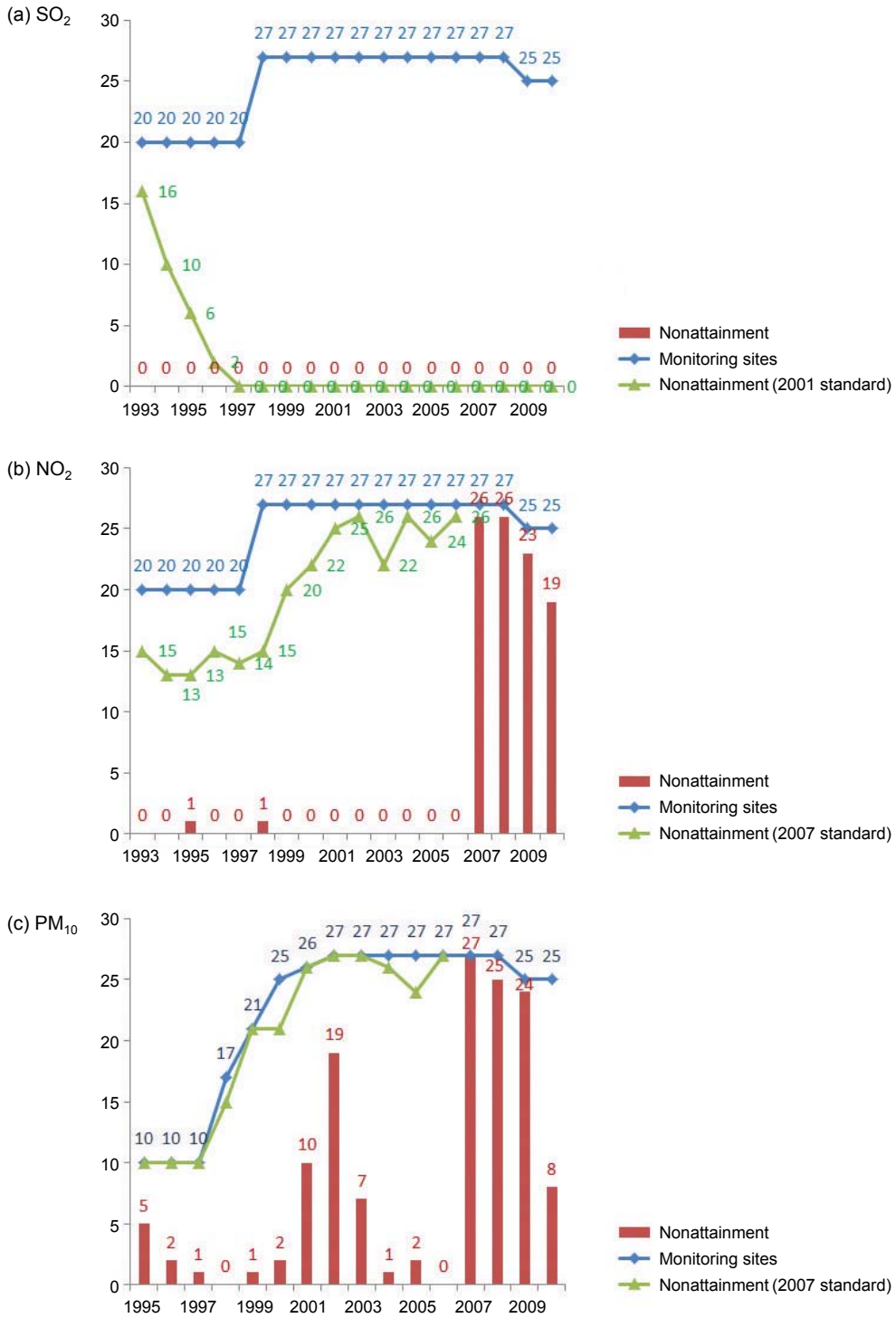


Fig. 2. Annual Variations of the national air quality standards non-attainment sites for SO₂, NO₂, and PM₁₀ at the Seoul's Atmospheric Monitoring Network placed between different urban sites from 1995 through 2010.

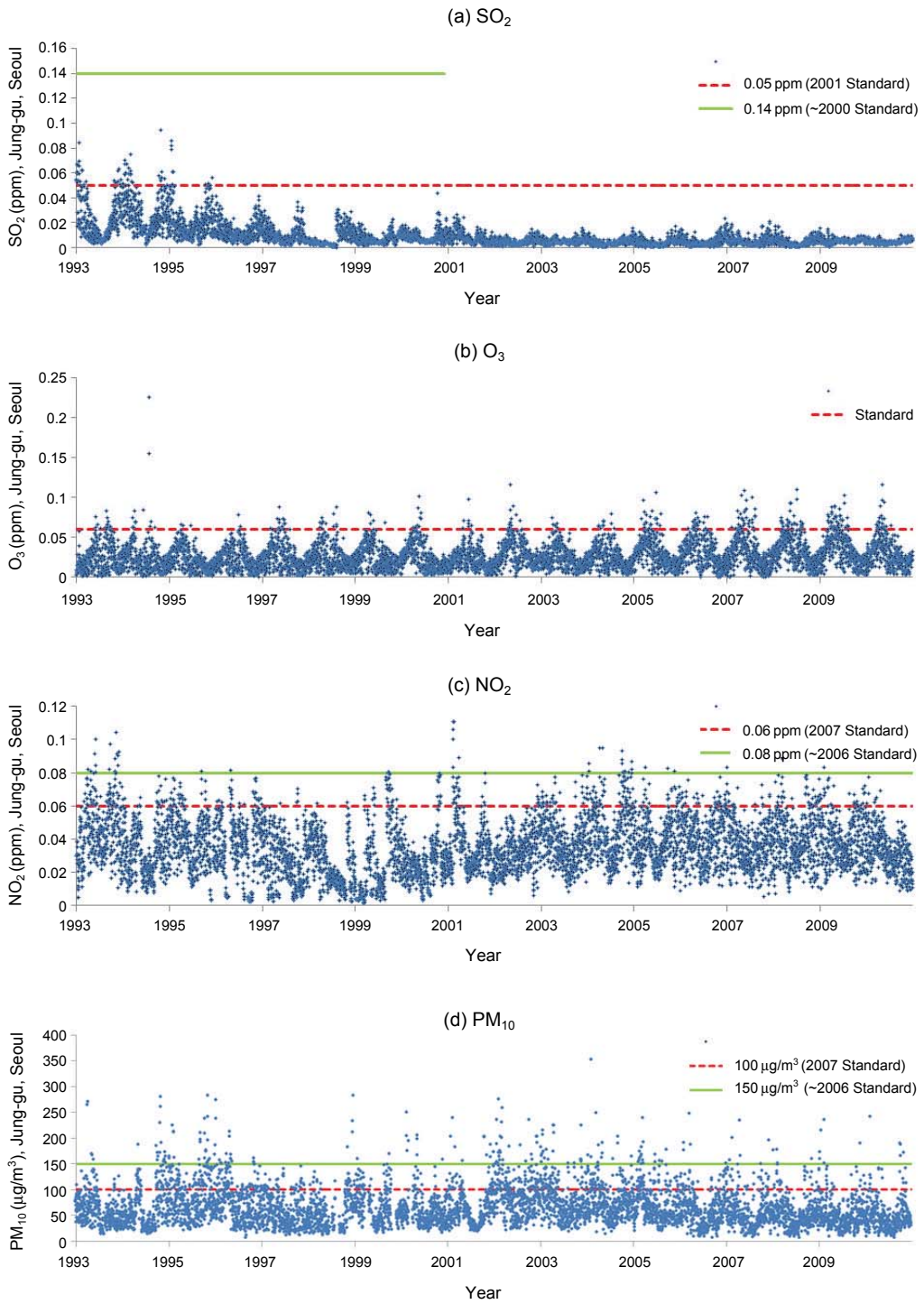


Fig. 3. Daily variations of SO₂, O₃, NO₂ and PM₁₀ concentration at the Seoul (Jung-gu) Atmospheric Monitoring Sites from 1993 through 2010.

Table 2. Basic information of individual site for the Seoul's Atmospheric Monitoring Network operated from 2009 to 2011.

Site number	Site name	Land-use type	Mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Standard error	Data capture (%)
1	Seo So Mun dong	Urban	48	0.81	99.54
2	Seo Ul yeok	Road	53	0.84	87.03
3	Hyo Jae Dong	Urban	48	0.79	96.44
4	Cheong Gye Cheon	Road	49	0.78	99.73
5	Jong Ro	Road	56	0.85	99.45
6	Han Nam Dong	Urban	50	0.82	99.91
7	Gu Ui Dong	Urban	47	0.80	100.00
8	Seong Su Dong	Urban	49	0.82	99.54
9	Gang Byeon Buk Ro	Road	58	1.07	71.60
10	Myeon Mok Dong	Urban	48	0.82	97.63
11	Yong Du Dong	Urban	49	0.87	96.07
12	Dong Dae Mun	Road	50	0.85	95.53
13	Chung Ryang Ri	Road	56	0.92	89.50
14	Gil Eum Dong	Urban	44	0.76	99.00
R ⁽¹⁾	Nae Bu Sun Hwan Ro	Road	47	1.51	22.37
15	Ssang Mun Dong	Urban	45	0.81	98.26
16	Bul Gwang Dong	Urban	47	0.80	98.08
17	Nam Ga Jwa Dong	Urban	50	0.87	97.44
18	Dae Heung Dong	Urban	51	0.90	98.54
19	Sin Chon	Road	54	0.85	99.91
20	Hwa Gok Dong	Urban	50	0.84	95.07
R	Gong Hang Ro	Road	52	1.70	25.11
21	Gu Ro Dong	Urban	50	0.83	100.00
R	Gung Dong	Road	70	3.23	10.96
22	Dang San Dong	Urban	50	0.84	98.72
23	Yeong Deung Po	Road	60	0.96	95.71
24	Sa Dang Dong	Urban	48	0.79	98.90
R	Dong Jak Dae Ro	Road	54	1.53	25.11
25	Sin Rim Dong	Urban	51	0.85	99.45
26	Dae Chi Dong	Urban	51	0.82	98.81
27	Ban Po Dong	Urban	50	0.84	100.00
28	Sin Sa Dong	Road	52	0.84	95.25
29	Yang Jae Ro	Road	64	1.05	70.23
R	Jam Sil Dong	Road	61	3.16	8.13
30	Bang Yi Dong	Urban	47	0.80	100.00
31	Cheon Ho Dong	Urban	47	0.80	95.62
32	Gil Dong	Road	50	0.77	100.00
33	Si Heung Dong	Urban	47	0.76	99.91
34	Bun Dong	Urban	45	0.75	99.73
35	Sin Jeong Dong	Urban	48	0.79	99.18
36	Sang Gye Dong	Urban	45	0.78	99.91
37	Tae Reung	Road	59	1.04	71.96

⁽¹⁾R: Removed from the statistical analysis.

역, 청계천, 종로, 강변북로, 동대문, 청량리, 신촌, 영등포, 신사동, 양재로, 길동, 태릉) 및 25곳의 도시대기 측정소, 총 37 측정소에 대해서 통계분석을 실시하였다. 표 2에 제시한 바와 같이 37곳 측정소 중 2009년부터 2011년 사이 가장 높은 PM₁₀ 농도를 나타낸 곳은 도로변 측정소 중 한곳인 양재로 측정소로 평

균값이 64 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 그 다음으로 영등포 측정소, 태릉, 강변북로, 종로 순으로 나타났다. 평균 농도만을 고려했을 때 상위 24% (총 37 측정소 중 9 곳)가 모두 도로변 측정소에서 측정된 값이다. 이에 서울시 전체 측정망에 대한 상관관계를 분석하여, 도로변 측정소와 도시대기 측정소의 차별성을 다시 한

번 점검하고 이들 측정소간의 상관관계를 통한 원인을 분석하고자 하였다.

먼저 전체 측정망의 농도 해석에 대한 가장 일반적인 방법으로 측정소와 측정소간의 관측 값이 시간적 변화를 기준으로 얼마만큼 상관성이 있는지를 분석하였다. 이는 서울측정소를 중심으로 통계적인 분석 방법을 통해 공간적 특이성과 공통성을 추적하여 측정망 자료의 시간적 분석과 함께 측정소간 상관관계를 다각도로 해석하고자 함에 목적이 있다. 측정망의 통계적 해석을 위해 측정소와 측정소간의 관측 값이 시간적 변화를 가지고 서로 상관성이 있는지를 분석하였다. 이를 위해서 1차적으로 상관행렬 (correlation matrix) 방법을 적용하였다. 이를 통해서 전체적인 측정망에 대한 상관관계를 1차적으로 판단할 수 있다. 상관행렬방법은 두 측정소간의 상관성을 판단하는 간단한 통계방법으로, 세 측정소 이상에 적용하기에는 제한이 따른다. 그러나 이를 통해 전체 집단, 즉 측정소간의 상관성 정도를 판단할 수 있다. 총 666개 ($\sum n, n=1$ to 36)의 서울시 전체 측정망 사이 상관관계를 분석하였다. 전체적으로 살펴보면 상관관계 수(r)가 0.98 이상인 경우가 총 666 상관관계 중 52개, 0.96 이상인 경우가 221개, 0.94 이상인 경우가 426개로 나타났다. 즉, 세 측정소 이상 측정소 간의 높은 상관관계를 가진 군집집단이 존재할 가능성이 높은 것을 알 수 있다.

위의 상관행렬 분석을 좀 더 구체화하기 위해서 군집분석을 시행하였다. 군집분석은 측정소들이 갖고 있는 유사성을 기반으로 동질적인 집단으로 묶어주는 방법으로, 측정망간의 상관성뿐만 아니라 대기오염의 이동 경로 추적 등 다양한 분야에서 적용되고 있다 (Jin *et al.*, 2011; Baker 2009; Han *et al.*, 2008; Coury *et al.*, 2007; Gramsch *et al.*, 2006). 군집분석에는 여러 종류가 있으나 본 분석에서는 ‘계층적 군집 방법’을 이용하였다. 계층적 군집분석은 군집분석 중 가장 널리 사용하는 방법으로 개개의 군집들로부터 전체가 하나의 군집을 형성할 때까지 모아가는 병합적 방법이다. 계층적 방법은 실제 자료의 구조가 계층적인 구조가 아니더라도 매 단계마다 무조건적으로 가장 가까운 두 군집을 하나의 군집으로 묶는다. 또한 두 개체가 한번 같은 군집에 소속되면 다시 분리되지 않는다. 이는 서울시 측정소간의 상관관계 분석 목적에 부합되는 방법으로 서로 상관성이 높은

측정소를 집단으로 분류하는 데 매우 유용한 계산법이다. 일반적으로 동일 원인에 의한 농도 측정값들이 한 군집에 수렴하는 양상을 보여준다. 이를 분석하기 위해 측정소의 시간별 농도와 측정소별 상관관계를 매트랩 (MATLAB) 프로그램을 통해 다각도로 분석하였다. 그 결과 그림 4에 서울시 37개 측정소 별 시간평균 농도와 함께 다차원 군집분석을 나타내었다. 좀 더 자세히 y축은 37개의 측정소를 나타낸다. 각각의 번호는 표 2에 나타난 측정소 번호와 같다. 이들 측정소를 다시 도로변 측정소와 도시대기측정소를 나누어 각각 갈색과 흑색으로 나누어 표시하였다. y축은 1~24시간까지의 하루 중 시간을 나타낸 것이다. 이에 그래프는 각 측정소별 2009~2011년 사이의 하루 동안의 시간평균농도를 색으로 나타낸 것이다. 홍색계열로 진행할수록 고농도를 청색계열로 진행할수록 저농도를 의미한다. 색에 대한 농도값은 그래프 좌측에 농도-색계열 막대그래프에 제시하였다. PM_{10} 의 경우 평균값이 $60 \mu g/m^3$ 이상인 경우는 모두 홍색으로 나타내었다. 예를 들어 그림 4의 좌측 상단은 PM_{10} 을 분석한 그래프이며, 그래프 가장 하단의 색은 29번 측정소, 즉 도로변 측정소 중 한곳인 양재로 측정소를 나타낸 것이다. 다시 설명하면, 2009~2011년 사이의 양재로 측정소의 하루 24시간에 대한 시간별 평균농도를 색으로 표현한 결과에서 낮시간과 저녁시간의 홍색은 이 시간대에서 고농도가 나타났음을 알 수 있다. 반면에 그래프 상단의 색은 34번 측정소, 도시대기 측정소 중 한곳인 번동 측정소를 나타낸 것이다. 농도-색계열 막대그래프와 비교해 볼 때, 오전 9~11시 사이를 제외하고 청색계열의 저농도 상태를 알 수 있다. 이와 같이 그래프를 통해 전체 서울시 37곳의 측정소에 대한 시간대별 평균 농도를 알 수 있다.

이를 다시, 서로 상관성이 높은 측정소와 상관성이 높은 시간대를 분석하고자 각각의 측정소와 시간대별로 군집분석을 수행하였다. 이에 상관성이 높은 집단으로 분류한 군집분석 수행 결과를 각각 왼쪽과 상단에 나타내었다. 군집분석 결과 측정소별로 PM_{10} 및 NO_2 모두에서 농도에 따른 군집을 형성함을 확인할 수 있었다. 분석한 군집은 크게 최고농도군집 (Highest), 고농도군집 (High), 중농도군집 (Medium)으로 분류할 수 있다. PM_{10} 의 최고농도군집 (Highest)의 경우 측정소 29, 23, 37, 13, 9, 5, 2, 19의 군집을 나타

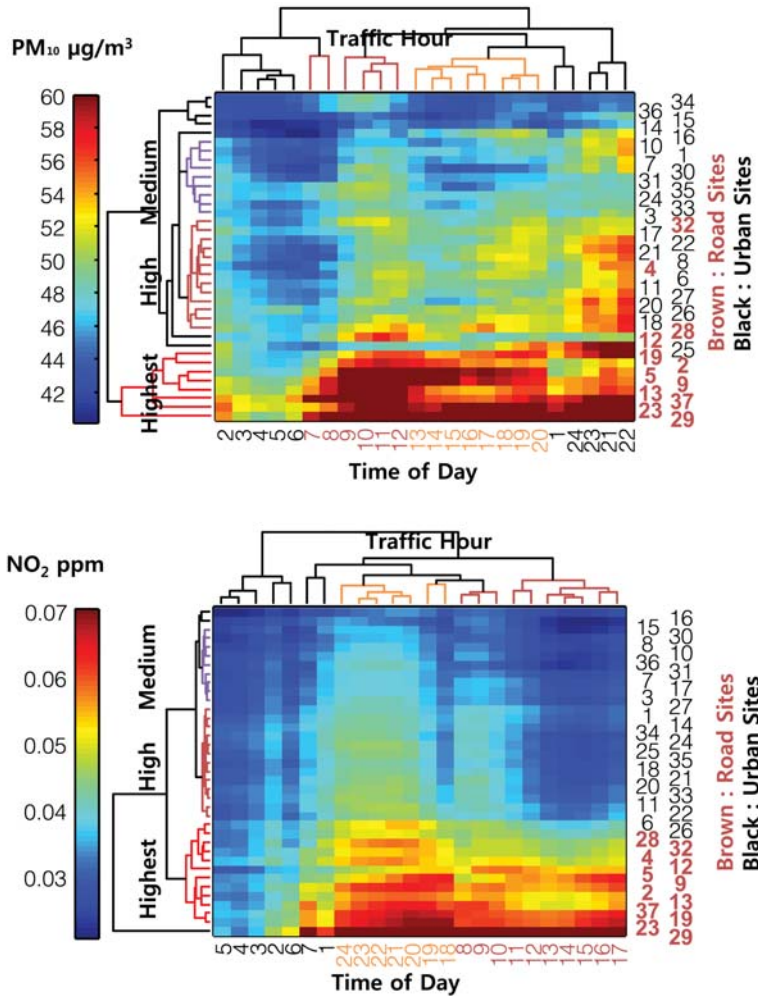


Fig. 4. Results of Multiple Cluster Analysis in Time-of-day at the Seoul Atmospheric Monitoring Network from 2009 to 2011.

났다. 이들 측정소는 모두 도로변 측정소에 속한다. 이들 측정소의 2009~2011년 사이 전체 평균값을 보면, $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 중농도군집 (Medium)으로 분류한 10, 1, 7, 30, 31, 35, 24, 33, 3 측정소의 평균값 $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높은 것을 알 수 있다. 이를 시간대 평균값과 비교하여 다각도로 분석해 보면, 최고농도군집 (Highest)은 낮 시간대부터 저녁시간대 걸쳐 고농도를 나타낸 것을 볼 수 있다. 고농도군집 (High)의 경우에는 저녁시간대 (21~23)에 최고 농도를 나타내고 오전, 오후의 출퇴근 시간대에 상대적으로 높은 농도를 나타냄을 알 수 있다. 마지막으로 중

농도군집 (Medium)에서는 오후의 출퇴근 시간대의 농도 기여율은 상대적으로 적게 나타나며, 저녁시간에 높은 농도를 나타내는 것을 알 수 있다. 시간대별로 군집분석 결과를 살펴보면 크게 세 개의 군집으로 분류할 수 있다. 첫째는 새벽시간대 (3~6시)와 교통시간대 (7~20시), 저녁시간대 (21~1시) 군집으로 분류할 수 있다. 먼저 새벽시간대는 오염물질의 발생량이 상대적으로 적은 것에 따른 저농도 시간대 군집으로 분류할 수 있다. 차량에 의한 교통시간대 (7~20시)에서는 오전 7시에서 낮 12시 사이에 거의 대부분 측정소에서 농도증가를 볼 수 있다. 특히 저

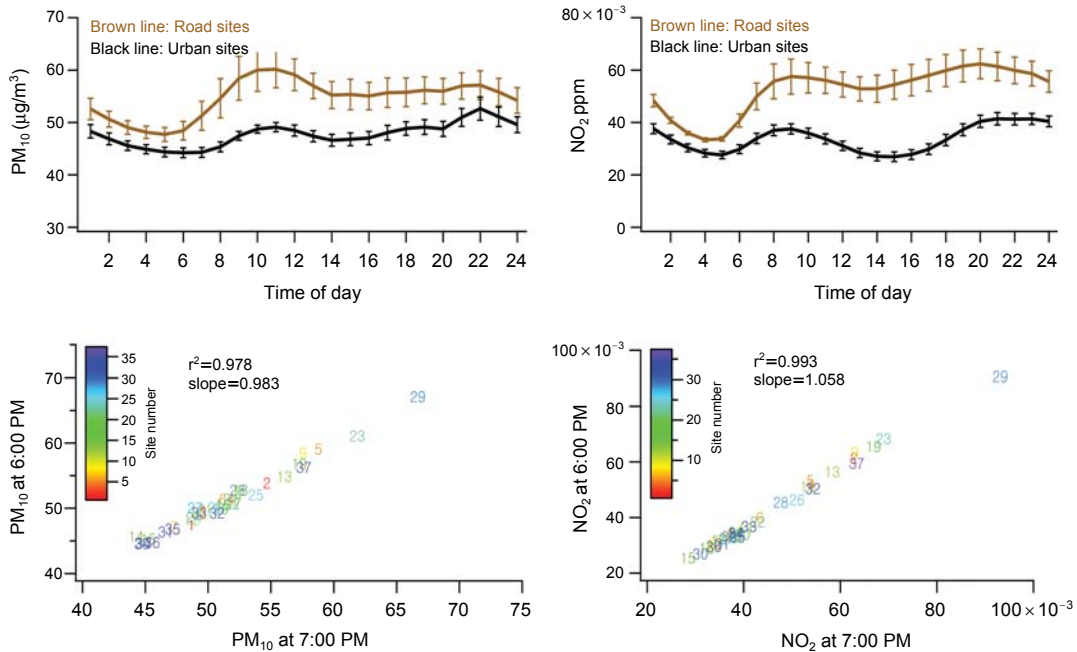


Fig. 5. PM₁₀ & NO₂ diurnal variation and relationships between averaged PM₁₀ & NO₂ at 6:00 PM and 7:00 PM at the Seoul Atmospheric Monitoring Network from 2009 to 2011.

녁시간대 (21~1시) 군집을 살펴보면, 최고농도군집 (Highest), 고농도군집 (High), 중농도군집 (Medium) 전반에 걸쳐 농도증가 현상을 볼 수 있다.

그림 5는 도로변 측정소와 도시대기 측정소를 나누어 1~24시간까지의 하루 중 PM₁₀ 시간 평균을 나타낸 그래프이다. 전체적인 평균값을 보면 도로변 측정소 평균값은 55 µg/m³으로 도시대기 측정소 평균값은 48 µg/m³보다 7 µg/m³ 높은 것을 알 수 있다. 도로변 측정소의 경우 오전 10시에 60.18 µg/m³으로 최고 농도(mode)를 나타내고, 점차 줄어들다가 저녁 21시에 다시 54.10 µg/m³로 농도의 증가 경향(mode)을 볼 수 있다. 또한 도시대기 측정소에서는 같은 시간대인 저녁 21시에 52.65 µg/m³으로 최고 농도를 나타냈고, 낮 시간에는 도로변 측정소와 같은 시간대인 오전 10시에 49.14 µg/m³으로 높은 농도(mode)를 나타냈다. 앞서 설명한 바와 같이 농도 절대 값에서 7 µg/m³의 차이를 보이지만 일중 농도 변화가 비슷한 양상을 유지하였다. 또한 절대 농도에서 차이가 나타나지만 도로변 측정소와 도시대기 측정소 모두 같은 원인에 의해 하루 중 농도가 변이한 것으로 사

료된다.

Kim (2010)가 최근에 발표한 ‘서울시 대기 중 미세먼지의 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성조사 연구’에 제시한 수용모델의 결과를 보면, 지역마다 차이는 있지만 서울시 측정소에서 측정된 PM₁₀ 질량의 약 25~50%가 자동차 및 도로변 비산먼지에 의한 것으로 나타났다. 이는 광화학적 반응에 의한 2차 물질을 제외하면, 서울시 분진 농도에 영향을 주는 일반적인 원인물질, 즉 장거리이동물질, 생체소각물질, 해염입자, 산업체 배출 등에 의한 원인보다 매우 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 또한 2차 물질의 상당 부분이 자동차 배출가스에 기인한다고 가정하면 보다 많은 양이 도로변에서 발생한다고 할 수 있다. 이에 위의 다차원 군집분석 및 일 중 시간평균농도를 볼 때, 차량에 의한 원인이 서울시 대기 분진의 발생에 가장 높은 기여율을 보이는 것으로 사료된다. 이에 차량에 의한 원인을 좀 더 자세히 분석하고자 NO₂ 군집분석을 수행하였다.

NO₂ 군집분석 결과를 살펴보면 PM₁₀과 같이 크게 최고농도군집 (Highest), 고농도군집 (High), 중농도군

집 (Medium)으로 분류할 수 있었다. NO₂의 최고농도 군집 (Highest)의 경우 측정소 23, 19, 37, 13, 2, 9, 5, 12, 4, 32, 28, 26 으로 나타났다. 도로변 측정소 29(양재로 측정소)를 제외한 모든 도로변 측정소와 도시대기 측정소 26(대치동 측정소)이 최고농도군집(Highest)에 속한다. 측정소 29(양재로 측정소)인 경우는 다른 도로변 측정소에 비해 보다 높은 고농도의 NO₂를 기록하여, 이 측정소와 높은 상관성을 나타내는 군집은 없는 것으로 나타났다. 이 지역의 배기가스에 대한 오염물질의 별도 관리가 요구된다고 할 수 있다. 또한 측정소 26(대치동 측정소) 또한 도시대기에 속하지만 최고농도군집(Highest)에 포함되어 차량의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

이들 측정소의 2009~2011년 사이 전체 평균값을 보면 최고농도군집(Highest)의 평균값이 0.050 ppm으로, 중농도군집(Medium)으로 분류한 8, 30, 10, 36, 31, 7, 17, 3, 27 측정소의 평균값 0.031 ppm보다 0.019 ppm 높은 것을 알 수 있다. 이를 시간대 평균값과 비교하여 각각도로 분석해 보면, 오전 6시경부터 농도가 증가하기 시작하여, 오전 8시경에 오전 중 최고농도를 나타내고 점차 줄어들다가 다시 증가하여 오후 7시경에 최고 농도를 나타냄을 알 수 있다. NO₂ 주 원인이 차량에 의한 배기가스임을 감안해 볼 때, 자동차에 의한 직접적 영향에 따른 농도 변화 및 기여로 해석할 수 있다.

같은 도로변 측정소가 최고농도군집(Highest)에 속했음에도 불구하고 앞서 분석한 PM₁₀과 다른 시간대에서 최고 농도를 나타내는 이유는 도로변 오염물질의 다양성이란 관점을 기준으로 해석할 수 있다. NO₂와 같이 차량의 배기가스에서 직접 배출되는 물질은 출퇴근 시간대에서 최고농도를 기록한다. 반면, PM₁₀은 자동차의 타이어, 브레이크 등의 차량의 직접배출과 교통량에 따른 도로변 비산먼지의 간접배출, 2차 분진에 의한 생성 등 다양한 원인이 혼재하여 영향을 주기 때문으로 볼 수 있다.

그림 5 하단의 그림은 차량에 의해 대기오염이 증가하는 서울시 전체 측정소에서 2009년에서 2011년도 사이에 오후 6:00와 오후 7:00에 측정된 PM₁₀과 NO₂의 평균농도의 상관관계를 측정소 별로 나타낸 그림이다. 측정소를 자세히 구별하고자 측정소번호-색계열 막대그래프를 좌측에 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이 결정계수(r²)가 PM₁₀과 NO₂의 경

우 각각 0.98, 0.99로 매우 높은 것을 볼 수 있다. 이는 두 시간대, 즉 오후 6:00와 오후 7:00에서 나타나는 농도의 비가 측정소에 상관없이 매우 일정함을 알 수 있다. 즉, 농도의 절대 값은 다를지라도 같은 오염원인, 도로변에 의한 것임을 알 수 있다. 결론적으로 다차원 군집분석, 일중 농도 변화, 상관관계 분석을 통해 서울시 대기오염의 주원인은 차량 배출가스를 포함한 도로변 오염물질일 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

4. 결론 - 서울시 측정망 시계열 및 군집분석결과에 의한 측정망 운영 제언

대기오염 측정소 설치 및 운영의 가장 큰 목적은 대기오염의 경중을 정확히 분석하고 대기오염으로부터 국민 건강을 지키는 예방적 목적이 가장 우선적이라 할 수 있다. 앞에서 살펴 본 바와 같이 서울시의 경우 도시대기 측정소에서 측정된 SO₂, CO의 경우 모든 측정소에서 기준치를 만족한다. 반면, NO₂와 오존의 경우 환경기준 달성률을 만족하는 측정소가 많지 않음을 알 수 있다. NO₂와 오존이 차량에 의한 배기가스의 영향을 직접적으로 받는다는 측면에서 볼 때 서울시 대기오염의 주원인은 도로변에서 기인한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 또한 이들 측정소 간에 특정 시간, 특히 출퇴근 시간대에서 높은 상관성을 나타내는 군집이 존재함을 알 수 있었다. 이를 종합적으로 고려해 볼 때, 서울시의 대기오염은 자동차 배기가스를 포함한 도로변 오염물질의 기여도가 가장 큰 것으로 예상할 수 있다. 따라서 이에 대한 정확한 기여도를 분석하기 위해 현 행정구역상으로 분류 운영 중인 측정소 관리의 개선을 위해 다음의 안을 제언하고자 한다.

첫째, 서울시 측정소의 추가 확대 운영 방안에 대해서 신중히 고려해야 한다. 앞서 설명한 바와 같이 서울 측정소간 대기오염의 주원인의 유사성 등을 고려해 볼 때, 막대한 예산이 들어가는 측정소의 추가 확대보다는 오히려 기존 측정소의 선택과 집중이 필요하다고 할 수 있다. 이를 위해서는, 둘째 상관관계, 군집 분석 등 과거에 축적한 데이터 분석을 통해 차량 배출 및 이에 따른 오염원을 효과적으로 감시할 수 있는 측정소를 선정하여, 선정한 대표 측정소에서

도로변에서 배출되는 대표 오염물질, 예를 들어 유기탄소, 원소탄소, 중금속과 더불어, 자동차 연소 유기유해 물질인 호페인 (Hopanes; 17A(H)-22,29,30-Trisnorhopane, 17B(H)-21A(H)-30-Norhopane, 17A (H)-21B(H)-Hopane)과 같은 특정 유기물질에 대한 장기간 측정 및 분석계획 등을 수립해야 한다. 이미 미국 등 선진국에서는 이들 물질에 대해 대도시를 중심으로 측정 분석을 실시하고 있다 (Bae and Schauer, 2009; Bae *et al.*, 2004). 이러한 도로변 배출 특정대기물질에 대한 측정 및 분석은 서울시 대기오염물질의 도로변으로 부더의 영향을 좀 더 정확히 분석 할 수 있다. 그뿐만 아니라 이를 통한 유해성평가 연구를 통해 국민건강과의 연관성을 규명하는 데 일조할 수 있을 것이다. 마지막으로 분석을 실시한 화학물질의 분석결과를 수용모델 등에 적용하여 서울시 대기의 도로변 물질의 기여도를 주기적으로 연구하는 데 활용한다. 그리고 궁극적으로 그 결과를 공식적인 경로를 통해 발표할 필요가 있다. 특히 자동차 등의 배출에 따른 오염 기여도 실태 파악과 함께 이를 통한 대기오염 기여율을 줄이기 위한 대책 마련 등의 정책수단을 보다 적극적으로 강구하여야 한다.

References

- Bae, M.S. and J.J. Schauer (2009) Analysis of Organic Molecular Markers in Atmospheric Fine Particulate Matter: Understanding the Impact of "Unknown" Point Sources on Chemical Mass Balance Models, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(3), 219-236.
- Bae, M.S., J.J. Schauer, J.T. DeMinter, and J.R. Turner (2004) Hourly and Daily Patterns of Particle-Phase Organic and Elemental Carbon Concentrations in the Urban Atmosphere, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 54, 823-833.
- Baker, J. (2009) A cluster analysis of long range air transport pathways and associated pollutant concentrations within the UK, *Atmos. Environ.*, 44(4), 563-571.
- Coury, C. and A.M. Dillner (2007) Trends and sources of particulate matter in the Superstition Wilderness using air trajectory and aerosol cluster analysis, *Atmos. Environ.*, 41(40), 9309-9323.
- Gramsch, E., F. Cereceda-Balic, P. Oyola, and D. von Baer (2006) Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM₁₀ and Ozone data, *Atmos. Environ.*, 40(28), 5464-5475.
- Han, J.H., M.H. 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(3), 300-309.
- Hong, M.O. and S.Y. Cho (2005) Assessment on Air Monitoring Station Siting in Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 2005 Fall meeting conference.
- Jin, L., R.A. Harley, and N.J. Brown (2011) Ozone pollution regimes modeled for a summer season in California's San Joaquin Valley: A cluster analysis, *Atmos. Environ.*, 45(27), 4707-4718.
- Ju, J.-H. and I.J. Hwang (2011) A Study for Spatial Distribution of Principal Pollutants in Daegu Area Using Air Pollution Monitoring Network Data, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27(5), 545-557.
- Jung, W.S., T.J. Lee, and D.S. Kim (2012) Determination of Optimal Number and Location of Air Monitoring Site in Seoul using Spatial Distribution Analysis, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 2012 Fall meeting conference.
- Kim, W.-S. (2010) Characteristics of Particulate Matter by Chemical-Monitoring in Seoul, Korea, Seoul Development Institute Report.
- Ministry of Environment (2012) 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.
- Ministry of Environment (MOE) (2001 ~ 2011) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, Annual Report.
- Yoo, E.-C. and O.-H. Park (2006) The Assessment of Air Quality Monitoring Network Considering the Change of Various Environmental Factors in Busan, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22(4), 405-420.
- Yoo, E.-C. and O.-H. Park (2007) Optimization of Air Quality Monitoring Networks in Busan Using a GIS-based Decision Support System, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(5), 526-538.