

한반도 11개 도시의 1995~2000년 PM₁₀농도 변화 경향

Variations of the PM₁₀ Concentrations Observed in Eleven Cities in South Korea between 1995 and 2000

진윤하 · 구해정 · 김봉만¹⁾ · 김용표^{2)*} · 박순웅
서울대학교 지구환경과학부, ¹⁾미국 남캘리포니아 대기관리국, ²⁾이화여자대학교 환경학과
(2002년 11월 2일 접수, 2003년 2월 5일 채택)

Y.H. Jin, H.J. Koo, B.M. Kim¹⁾, Y.P. Kim²⁾ and S.U. Park
School of Earth and Environment Sciences, Seoul National University
¹⁾*South Coast Air Quality Management District, USA*
²⁾*Department of Environmental Science and Technology, Ewha Womans University*
(Received 2 November 2002, accepted 5 February 2003)

Abstract

Hourly PM₁₀ concentrations measured at 11 sites in Seoul and 10 sites in the large cities over South Korea for the period from March 1995 to February 2000 are analyzed to examine annual trend and monthly variations of the PM₁₀ concentrations. Further analysis has been carried out by using the one year data from March 1999 to February 2000 to see the seasonal variation, diurnal variation and weekly variation of the seasonally averaged PM₁₀ concentrations at each site. Weekly variations of the CO concentrations at the same sites for the same one year period are compared with that of the PM₁₀ concentration.

There is no significant annual trend in the variation of the PM₁₀ concentration at all the sites analyzed. The seasonal and monthly mean concentrations show a minimum concentration in summer and alternative maximum concentration in spring and winter for most sites. The diurnal variation of the seasonally averaged mean PM₁₀ concentrations is strongly affected by traffic loads and meteorological conditions. The weekly variation of seasonal averaged concentrations of CO and PM₁₀ shows a high concentration for weekdays in spring, autumn and winter, while high concentration for weekends in summer.

Key words : PM₁₀, Annual concentration, Monthly concentration, Weekly concentration

1. 서 론

도시지역의 집중적인 경제산업 활동으로 인한 에

너지소비와 교통량의 지속적인 증가는 환경개선을 위한 노력에도 불구하고 도시 대기질을 오염시키고 있다. 대기오염을 유발하는 물질은 매연, 먼지, 가스 및 악취 등으로 사람의 건강상이나 재산상에 해를 미치거나 동식물의 자연 생육 환경에 악영향을 미치는 물질을 말하며, 이들 물질은 기체상 물질과 입

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-3277-2832, E-mail : yong@ewha.ac.kr

자상 물질로 나눌 수 있다. 입자상 물질의 크기는 0.01 μm 에서 100 μm 보다 큰 것까지 다양한 크기로 대기 내에서 존재한다. 도시 지역에 존재하는 입자상 물질은 직경이 2.5 μm 보다 작은 미세입자 (fine particles)와 직경이 2.5 μm 이상의 크기를 가진 조대입자 (coarse particles)의 이산형 (bimodal)의 형태로 나눌 수 있다. 조대입자는 도로 부유입자, 농업활동, 황사 등의 기계적 과정에 의해 주로 기원하고, 미세입자들은 소형자동차와 트럭, 버스에 의한 연소가스나 대기 중에서 2차적인 반응에 의한 화학적 과정에 의해 주로 형성된다.

보존학적 연구에서 입자의 크기가 10 μm 보다 큰 입자는 입이나 코로 흡인이 되어, 호흡기를 통과할 때 대부분 제거되지만, 10 μm 보다 작은 입자 (PM_{10})는 입이나 코를 통과하여 내부의 호흡기관으로 이동되어 폐 기관속으로 유입되어 침적된다고 알려져 있다 (이혜문 등, 1996; 박성은과 정 용, 1992). 이러한 건강상의 이유로, 미국 환경 보호청에서는 NAAQS (National Ambient Air Quality Standards)에서 총부유분진 (TSP, Total Suspended Particle)에 대해 기준을 제정하였고, 1987년 PM_{10} 으로 기준을 변경하였다.

이처럼 직경 10 μm 이하의 미세 부유분진이 인체에 더욱 유해한 것으로 알려짐으로써 우리나라에서도 1995년 1월에 대기 환경 기준을 총부유분진에서 직경 10 μm 이하의 (미세먼지, 이하 PM_{10})로 바꾸었다. 이 당시의 환경기준은 일평균 농도 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연평균 기준은 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 그 후 2001년 1월 환경 법규를 개정하여 일평균 기준은 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 종전과 같으나 연평균 기준은 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 강화하여 PM_{10} 에 대해 보다 엄격한 규제를 하고 있다 (환경부, 2001).

대기질 개선은 철저한 정도관리에 입각하여 장기간 측정을 수행하고 연구 목적에 부합된 자료분석법과 통계분석법을 개발할 때, 즉 대기오염의 기초 연구를 강화할 때 이룩할 수 있다. 또한 대기 오염 물질의 관리 및 통제를 하기 위해서는 그 지역의 대기질에 관한 정확한 자료가 필요하므로 남한 11개 도시에서의 PM_{10} 농도의 시공간적인 특징을 살펴보고 있다. 본 연구자료는 지역 대기질 해석의 기초 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 자료 및 자료 분석 방법

본 연구에 이용된 자료는 환경부가 운영하는 대기오염 자동관측망 자료 중 PM_{10} 농도로 1995년 3월부터 2000년 2월까지 매시간 측정된 자료이다. 자료의 신뢰도를 높이기 위해서 하루 24시간 관측 자료 중에 3분의 2에 해당하는 16시간 이상의 관측치가 존재하는 날만 선택하여 분석하였다 (김영성, 1996). 자동 관측망에서 사용한 시료 포집 방법은 광학적 측정법에 의한 β 선 흡수법이다. 이 방법은 β 선이 어느 정도 흡수되는가에 따라 분진의 양을 추정하게 된다. 1999년 당시 서울 지역의 PM_{10} 관측소는 모두 19개이나 서울지역의 주풍이 서풍임을 고려해 볼 때 풍상지역, 풍하지역으로 그리고 강남 지역 등을 고려하여 총 11개 관측소를 선택하였다. 풍상지역으로는 화곡동, 문래동, 구로동을 선택하였고, 풍하지역으로는 번동, 상계동, 면목동, 천호동을, 그리고 북한산 쪽 불광동과 강남의 잠실동, 반포동을 선택하였다. 그 외 서울시내 중심가인 시청앞 관측소를 선택하였다 (그림 1). 서울을 제외한 전국 관측소 중에서는 전국 6대 도시 중에서 각각 한 관측소를 선택하였는데, 각 도시의 여러 관측지점 중 도시 중심에 위치한 관측소를 선택하였다. 다만 울산 지역의 경우 관측지점들이 시외 번두리에 자리잡고 있어서 이 관측지점을 선택하였다. 그리고 강릉, 제주, 전주에서 각 1개의 관측소와 안양의 공업단지인 호계동을 선택하였다. 서울 제외한 전국 관측지점은 부산-덕천동, 대구-대명동, 인천-송의동, 광주-두암동, 안양-호계동, 대전-대흥동, 울산-야음동, 강릉-옥천동, 전주-효자동, 제주-이도동이다 (그림 2). 자료를 분석한 각 도시의 대략적인 특징을 알아보기 위해 인구수와 자동차수, 대기오염물질 배출량을 표 1에 정리해 보았다.

반포동을 제외한 전국 20개 지점을 중심으로 1999년 3월부터 2000년 2월까지 1년 간 PM_{10} 농도의 월별 변화 경향, 계절별 변화 경향, 계절별 일변화 경향을 살펴보고 있다. 앞서 언급했듯이 일 관측치가 3분의 2가 되지 않는 날은 제외시켰는데, 반포동의 경우 일 관측치가 3분의 2가 되지 않는 날이 많아서 월평균 분석에서 제외시켰다. 그리고 반포동을 제외한 서울 10개 관측지점의 계절별 주간 변화 경

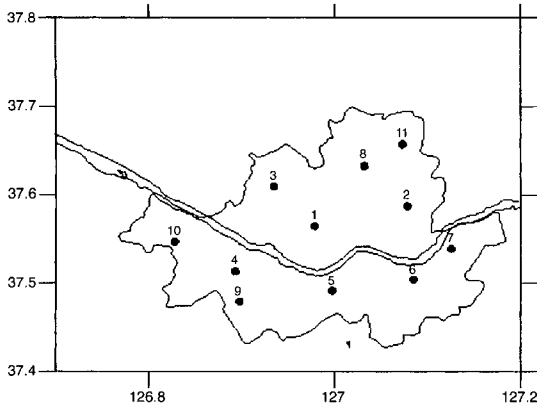


Fig. 1. Observation sites in Seoul.
 1:시청앞 2:면목동 3:불광동 4:문래동 5:반포동 6:잠실동
 7:천호동 8:번동 9:구로동 10:화곡동 11:상계동

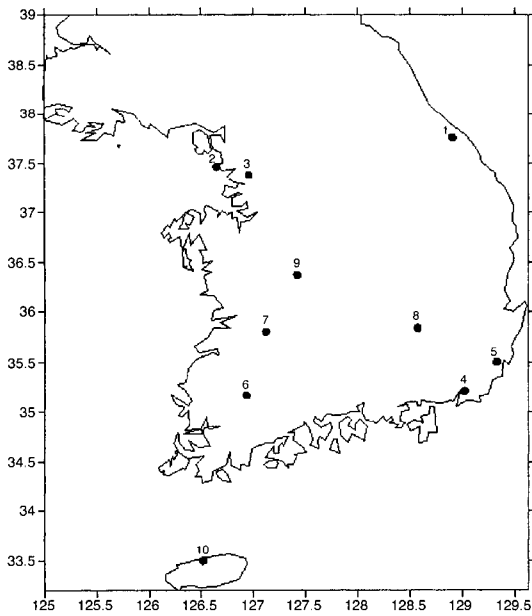


Fig. 2. Observation sites except Seoul.
 1:강릉 2:인천 3:안양 4:부산 5:울산 6:광주 7:전주
 8:대구 9:대전 10:제주

향을 살펴보았다. 또한 서울 10개 관측지점의 CO농도자료를 이용하여 PM₁₀과 같은 방법으로 분석하였다. 계절에 따른 변화에서 봄은 1999년 3월, 4월, 5월, 여름은 1999년 6월, 7월, 8월, 가을은 1999년 9

Table 1. The number of people and vehicle and the emission of SO₂, NO₂, CO and TSP in 1999.

	인구수	자동차수	SO ₂ 배출량	NO ₂ 배출량	CO 배출량	TSP 배출량
서울	10,320,000	2,666,660	11,340	89,656	188,987	9,936
부산	3,830,000	910,100	128,349	76,993	80,588	12,541
인천	2,520,000	741,700	46,494	49,607	56,960	7,287
대구	2,510,000	775,800	13,163	35,509	54,498	5,818
대전	1,360,000	447,400	6,049	16,270	29,888	2,179
광주	1,330,000	395,090	2,428	15,158	28,898	1,996
울산	1,020,000	336,900	151,329	53,019	27,847	13,843
전주	610,000	162,470	-	-	-	-
안양	580,000	169,230	-	-	-	-
제주	270,000	188,000	-	-	-	-
강릉	220,000	74,770	-	-	-	-

* 배출량단위: Ton
 * 전국 7대 대도시를 제외한 경우에는 오염물질의 배출량 자료가 도단 위로 추정되어 있어 표기하지 않았음.

월, 10월, 11월, 겨울은 1999년 12월, 2000년 1월, 2월로 구분하였다.

또한 서울을 포함한 전국의 총 21개 관측지점 중에서 5년 이상 계속해서 PM₁₀을 관측한 15개 관측지점을 선정하여 1995년부터 2000년까지 연평균 PM₁₀농도를 분석하였다. 인천-송의동과 전주-효자동은 1998년부터 PM₁₀을 관측하기 시작하였으므로 두 지역은 1998년부터의 자료만을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전국 15개 관측지점에서 PM₁₀농도의 연간 변화 경향

전국 15개 관측지점의 연평균 PM₁₀과 6년 평균값을 표 2에 나타내었다. 가장 오염이 심한 지역은 면목동으로 연평균 PM₁₀농도가 81 µg/m³으로 나타났고, 가장 청정한 지역은 강릉-옥천동으로 PM₁₀농도가 34 µg/m³으로 나타났다. 서울 지역 5개 측정소의 6년 간 연평균은 69 µg/m³로 환경부의 연평균 환경 기준치(70 µg/m³)와 거의 같게 나타나고 있으나 면목동의 경우 6년 간 PM₁₀농도의 최소값이 67 µg/m³이고, 6년 간 연평균 농도는 81 µg/m³로 상당히 높게 나타났다. 서울 지역의 연평균 최대값은 1997년 구로동의 98 µg/m³로 나타났고, 최소값은 2000년 반포동에서 45 µg/m³로 나타났다. 서울을 제

Table 2. Annual mean concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of PM_{10} in 15sites in South Korea between 1995 and 2000.

	면목동	구로동	불광동	반포동	시청앞	부 산 덕천동	대 구 대명동	대 전 송의동	인 천 야음동	울 산 야음동	광 주 두암동	안 양 호계동	제 주 이도동	전 주 효자동	강 룡 옥천동
1995	89	63	66	83	87	53	66	65	-	66	45	83	39	-	32
1996	84	64	58	77	78	59	70	64	-	75	53	78	39	-	35
1997	69	98	61	76	64	60	55	64	-	59	56	87	39	-	42
1998	67	55	63	56	60	63	82	71	70	37	62	75	42	53	25
1999	95	83	46	61	64	61	71	58	60	33	59	68	33	44	29
2000	83	68	47	45	59	64	72	56	51	48	56	63	35	33	38
Mean	81	71	57	66	70	60	69	63	60	53	55	76	38	43	34
Min	67	55	47	45	59	53	55	56	51	33	45	63	33	33	25
Max	96	98	66	83	87	64	82	71	70	75	62	87	42	53	42

* 인천-송의동과 전주-효자동은 1998~2000년 평균 농도

외한 전국 관측지점은 6년 간 연평균이 $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 서울보다는 낮게 나타났다. 그러나 각각 관측지점별로 살펴보면 때 공업지역인 안양-호계동의 경우 평균값이 $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 환경부 기준치를 초과하였다. 지방의 경우 연평균 최대값은 1998년 대구-대명동의 $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 최소값은 강릉-옥천동의 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

환경부 연평균 PM_{10} 농도기준 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교해 보면 서울의 관측지점은 1995년도에는 5개의 관측지점 중 3개 지점이 환경 기준을 초과하였고, 1996년에는 3지점, 1997년에는 2지점, 1998년에는 초과한 지역이 없으며, 1999년에는 3지점, 2000년에는 1지점이 기준을 초과했다. 불광동을 제외한 서울의 4개 측정소는 1995년에서 2000년 사이에 연평균 농도가 1회 이상 환경부 환경 기준치를 초과하였다. 지방에서는 10개의 관측지점 중 1995년도에는 4지점, 1996년에는 6지점, 1997년도에는 3지점, 1998년도에는 2지점, 1999년도 3지점, 2000년도 1지점이 기준을 초과했다. 그러나 단순히 기준치를 초과한 지점 개수나 서울지역 전체 연평균 값으로 서울 지역 PM_{10} 농도가 줄어들었는지 늘어났는지를 판단하기는 어렵다. 지난 6년 간 PM_{10} 농도 변화 경향으로 봤을 때 서울을 비롯한 전국의 PM_{10} 농도는 크게 달라지지 않은 것으로 보인다.

그러나 EPA 연평균 기준 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교해볼 때 제주, 전주, 강릉 지역을 제외하고는 모든 곳이 분석기간 전기간에 걸쳐 기준을 초과했다. 이는 국민 보건 위생을 위해 전국 대도시 지역의 PM_{10} 농도 저감을 위한 적절한 대책이 필요함을 시사하고 있다.

3. 2 PM_{10} 의 월별, 계절별 농도 변화 경향

최근 1년 간 PM_{10} 농도 변화 양상을 살펴보기 위해 1999년 3월부터 2000년 2월까지의 자료를 선택하여 분석하였다. 표 3은 서울 10개 관측소의 월평균 PM_{10} 농도를 나타낸 것이다. 반포동의 경우 일 관측치가 3분의 2가 되지 않는 날이 많아서 월평균 분석에서 제외시켰다.

상계동, 면목동, 번동, 천호동에서 PM_{10} 의 농도가 높고, 불광동, 잠실동에서 농도가 낮음을 알 수 있다. 번동, 천호동, 상계동, 면목동에서 PM_{10} 농도가 높은 것은 서울 지역의 주풍이 서풍계열이고, 교통량이 많은 서울시내 중심지역을 지나 바람이 불어 나가는 풍하측에 위치하고 있기 때문인 것으로 보인다. 그리고 문래동과 구로동의 PM_{10} 농도도 비교적 높은 편인데, 이것은 이 지역에 공단이 위치하고 있기 때문인 것으로 생각된다. 서울 10개 관측소의 월평균한 값을 보면, 면목동이 $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났고, 그 다음으로 구로동 $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 문래동 $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순이었다. 불광동이 $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮게 나타났다. 서울 10개 관측지점 중에서 면목동, 문래동, 천호동, 번동, 화곡동, 상계동의 6개 지점이 환경부 기준치 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다.

지방 10개 관측소의 최근 1년 간 월평균 농도 변화 경향을 표 4에 보였다. 대구-대명동의 연평균이 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 안양-호계동 $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 부산-덕천동 $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순이었다. 전국 10개 관측지점이 모두 환경부 기준치인 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮았다. 울산-야음동, 강릉-옥천동, 제주-이도동은 연평균 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외로 농도가 낮게

Table 3. Monthly mean concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of PM₁₀ at 10 sites located in Seoul for the period from March 1999 to February 2000.

	면목동	불광동	문래동	천호동	번 동	구로동	잠실동	화곡동	시청앞	상계동
99년 3월	95	57	90	107	88	63	62	59	88	92
4	94	53	79	92	78	65	53	70	80	82
5	90	27	80	82	71	89	55	86	77	82
6	103	27	90	78	68	85	60	107	75	77
7	74	48	61	47	49	85	41	76	33	45
8	60	27	53	32	35	62	28	54	42	31
9	74	34	72	55	51	100	50	85	58	45
10	127	57	106	78	76	91	60	87	76	77
11	122	50	92	73	74	85	55	82	78	76
12	114	55	81	76	75	93	43	77	54	76
00년 1월	93	55	79	115	93	88	41	64	50	85
2	97	57	104	131	113	94	42	76	56	93
Mean	95	46	82	81	73	83	49	77	64	72
Min.	74	27	53	32	35	62	28	54	33	31
Max.	127	57	106	131	113	100	62	107	88	93
SD	19	12	15	27	20	12	10	13	16	19

Table 4. Monthly mean PM₁₀ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in other city sites except Seoul.

	부 산 덕천동	대 구 대명동	인 천 송의동	광 주 두암동	안 양 호계동	대 전 대흥동	울 산 야음동	강 릉 육천동	전 주 효자동	제 주 이도동
3	71	81	90	66	85	73	40	17	60	49
4	60	66	73	65	70	66	34	42	51	31
5	68	68	49	63	62	53	40	34	43	25
6	62	68	-	69	64	68	39	35	61	31
7	51	43	37	45	53	43	20	36	30	27
8	35	42	32	38	40	38	18	29	25	20
9	44	54	38	49	55	46	22	15	32	26
10	58	82	66	61	79	67	28	32	34	25
11	61	88	55	56	73	66	29	45	29	24
12	70	88	52	59	72	55	34	-	-	27
1	66	79	48	52	62	53	33	-	25	19
2	63	75	48	50	72	63	35	-	27	20
Mean	59	70	54	56	66	58	31	32	38	27
Min.	35	42	32	38	40	38	18	15	25	19
Max.	71	88	90	69	85	73	40	45	61	49
S.D	10	15	16	9	12	11	7	10	13	8

나타났다. 월평균 농도가 가장 높게 나타난 월을 보면 인천 송의동이 3월에 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났으며, 이는 봄철 서풍계열의 바람에 의해 장거리 수송된 먼지가 농도 증가에 일부 기여한 것으로 보인다. 다른 월에 대해서는 전반적으로 대구-대명동지점이 다른 관측지점에 비해 높게 나타났다. 이는 대구지역의 지형적 특징에 기인한 것으로 보인다. 대구지역은 대도시이므로 자동차에 의한 오염물질이 많이 배출될 뿐 아니라 지형적으로 분지

지역이기 때문에 공기의 확산이 적어 PM₁₀의 농도가 높게 나타난 것으로 보인다.

계절에 따른 PM₁₀농도 변화 경향을 표 5와 표 6에 보였다. 서울 10개 관측지점에서는 겨울철에 PM₁₀농도가 가장 높고, 가을, 봄, 여름 순이었다. 서울을 제외한 전국 관측지점에서는 봄철에 PM₁₀농도가 가장 높고, 겨울, 가을, 여름 순으로 높게 나타났다. 늦가을부터 겨울철에 걸쳐서는 대기가 건조하고 난방을 위한 연료 사용의 증가와 대기 안정도에

Table 5. Seasonal variation of mean PM₁₀ concentrations (µg/m³) at sites in Seoul.

	면목동	불광동	문래동	천호동	번 동	구로동	잠실동	화곡동	시청앞	상계동	평 균
봄	93	46	83	93	79	72	57	72	81	85	76
여름	79	34	68	52	51	77	43	79	50	51	58
가을	107	47	90	69	67	92	55	84	71	66	75
겨울	101	56	88	108	94	92	42	72	53	85	79

Table 6. Seasonal variation of mean PM₁₀ concentrations (µg/m³) at the specified city sites.

	부 산 덕천동	대 구 대명동	인 천 송의동	광 주 두암동	안 양 호계동	대 전 대흥동	울 산 야음동	강 원 옥천동	전 주 효자동	제 주 이도동	평 균
봄	66	72	71	65	72	64	38	31	51	35	57
여름	50	51	34	51	53	50	25	33	39	26	41
가을	55	75	53	55	69	60	27	30	31	25	48
겨울	67	81	49	54	69	57	34	-	26	22	51

Table 7. Monthly mean wind speed (m/s) at Seoul in autumn.

연 도	1997			1998			1999			2000		
	9월	10월	11월	9월	10월	11월	9월	10월	11월	9월	10월	11월
풍 속	2	2.4	2	1.8	1.9	2.2	1.3	1.1	1.3	1.7	1.5	1.8

의한 지표 역전층 형성, 혼합층 고도가 낮아지기 때문에 PM₁₀농도가 높아질 수 있을 가능성이 크다. 봄철에는 중국에서 발생한 황사의 장거리 수송으로 고농도가 나타날 가능성이 크다. 실제로 이 분석기간 중 1999년 4월 5일에 황사 현상이 관측되었다. 계절별 분석에서 특이할만한 점은 보통의 경우 봄철, 겨울철에 PM₁₀농도가 높고, 가을철에는 농도가 낮게 나타나는 경향이 있다(김병화와 김동술, 2000; 하진구, 1997). 그러나 1999년에는 가을철의 PM₁₀농도가 높게 나타났는데 이것은 1999년 가을의 평균 풍속이 평년의 평균풍속보다 약했던 것이 한 원인으로 작용한 것으로 생각된다(표 7). 여름철에 연중 최저치를 기록하였는데 이는 여름철에 대기의 불안정으로 혼합층 고도가 높아지고 잦은 강수에 의해 대기중의 PM₁₀이 상당량 wash out되었기 때문으로 사료된다(이태정과 김동술, 1997). 1999년 8월의 서울 지역의 강수량은 600 mm로 연간 최고치를 기록하였는데, 서울지역 PM₁₀농도 역시 이때가 가장 낮았다.

3.3 PM₁₀농도의 일변화 경향

서울 10개 관측지점을 포함한 전국 20개 관측지

점의 계절별 일변화 경향을 그림 3과 4에 나타냈다. 그림을 보면 일변화 경향이 계절에 따라 큰 차이를 보이지는 않는다. 계절에 따라서 PM₁₀의 총량만 차이가 있을 뿐 일변화 양상은 거의 유사하다. 대부분의 경우 새벽 4~6시에 PM₁₀농도가 최저이고 7시부터 서서히 증가해서 9시에서 11시 사이에 극값에 도달하고, 다시 감소하다 18시 이후에서 자정까지 점차 증가하는 경향을 보이는 극값이 2개인 형태를 보이고 있다. 이는 아침 출근시간 전후로 PM₁₀농도가 높았다가 저녁 퇴근시간 무렵에 다시 높아지는 것으로 해석할 수 있다. 아침 출근시간은 일정한 반면, 저녁 퇴근시간은 일정하지 않으므로 농도가 18시 이후에 지속적으로 높은 값이 나타나는 것으로 보인다(김유규 등, 1995). 야간에 PM₁₀농도가 높은 상태가 지속되는 또 다른 이유는 야간에 지표 냉각으로 인해 낮 동안에 형성되었던 혼합층의 고도가 낮아지고 접지 역전층이 형성되기 때문으로 생각된다.

계절에 따른 PM₁₀농도의 일변화에서 특이 할만한 점은 여름철 일변화이다. 여름철의 경우에는 다른 계절과는 달리 극값이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 특히 천호동, 번동, 구로동, 화곡동, 상계동, 광주-

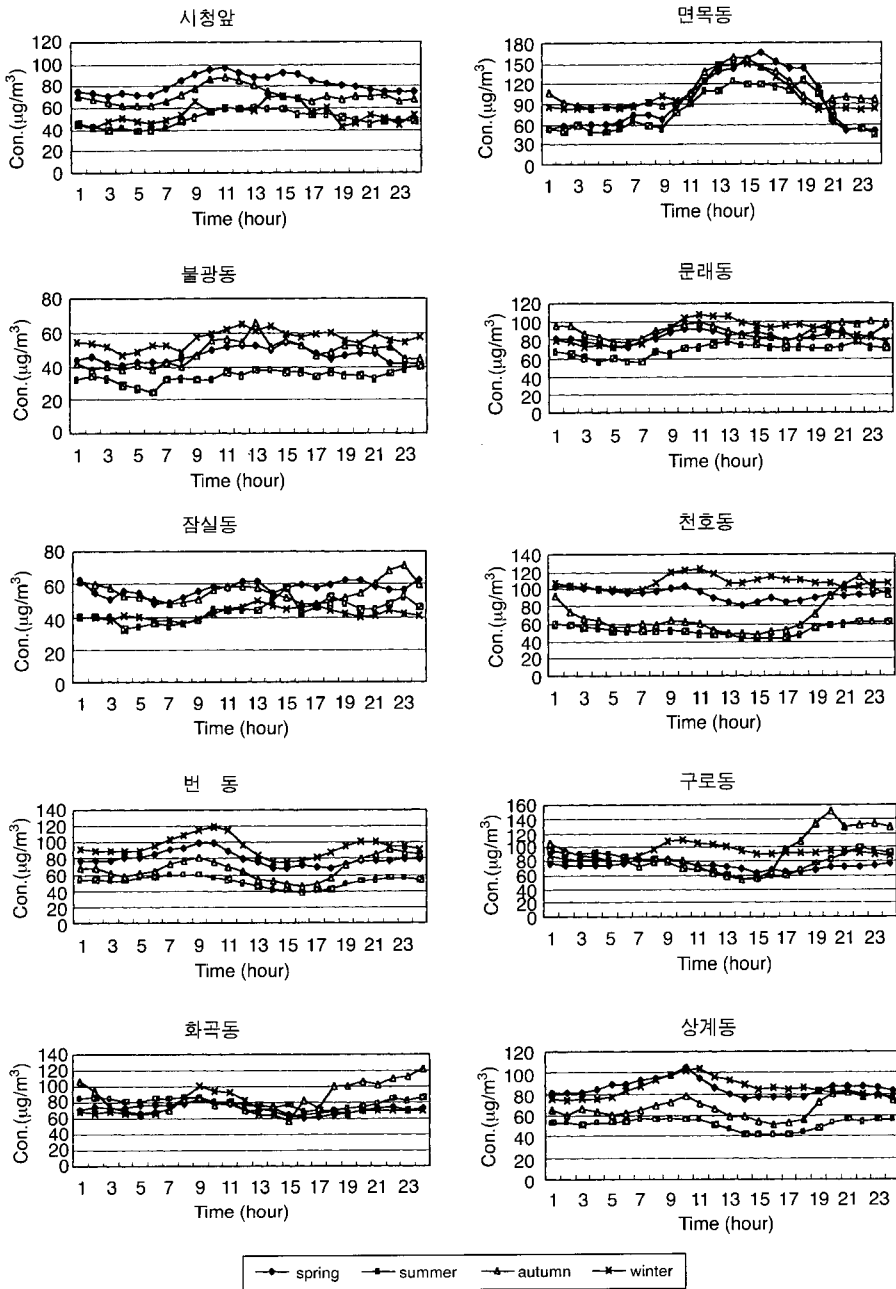


Fig. 3. Diurnal variations of seasonal mean PM₁₀ concentration at 10 sites in Seoul.

두암동에서 이러한 경향이 잘 나타나는데, 새벽 무렵의 PM₁₀농도가 높고, 정오를 지나 15~17시까지 점차 감소하는 경향을 보인다. 이처럼 여름철 오후

에 PM₁₀농도가 감소하는 것은 지표가열로 인한 혼합층 고도가 다른 계절에 비해 높아지므로 상하혼합이 활발해지기 때문인 것으로 보인다.

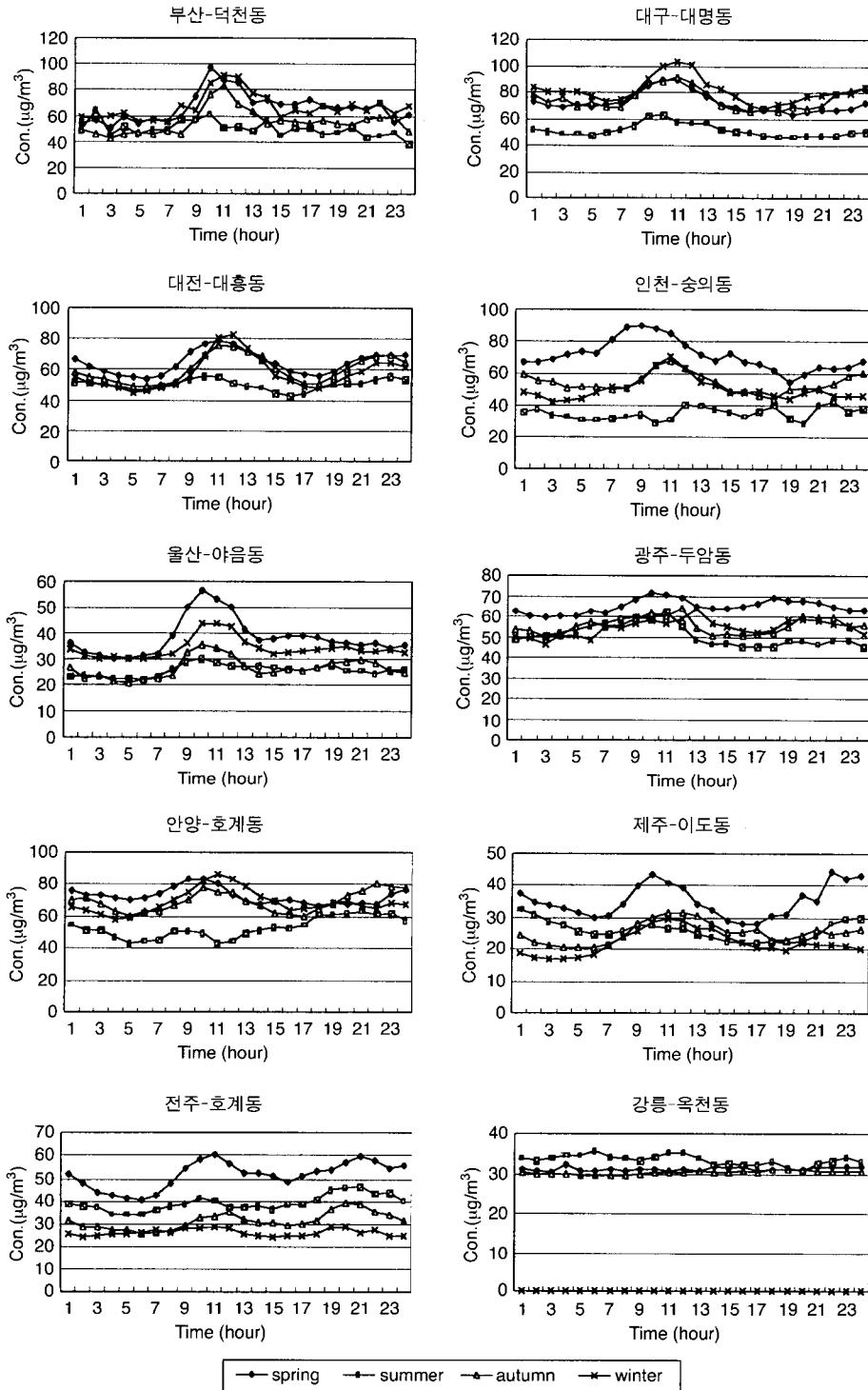


Fig. 4. Diurnal variations of seasonal mean PM₁₀ concentration at specified city sites.

Table 8. Monthly mean wind speed (m/s) at Seoul in 1999.

월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월
평균	2.5	2.6	2.2	1.8	2.1	1.2	1.3	1.1	1.3	1.2	2.6	2.7

잠실동, 화곡동, 번동, 구로동, 천호동, 문래동, 상계동, 반포동의 서울 관측지점에서 가을철 일변화 경향을 보면 21시 이후에 PM₁₀농도가 급격히 증가하고 있다. 가을철이 아닌 다른 계절에도 저녁 퇴근 시간 무렵에 PM₁₀농도가 증가하기는 하지만 가을철이 다른 계절보다 더욱 두드러진 것은 여러 가지 원인이 있긴 하지만, 그 중 하나로 1999년 가을이 다른 계절에 비해 풍속이 약했기 때문일 것으로 생각된다(표 8).

불광동은 서울 외곽지역에서 서울 시내 중심가를 연결하는 지역으로 아침, 저녁 출퇴근 시간 뿐 아니라 낮시간 동안에도 교통량이 꾸준하므로 PM₁₀의 농도가 시간에 따른 큰 차이를 보이지는 않았다. 시청앞 역시 낮 동안에도 교통량이 꾸준한 지역이므로 낮에도 PM₁₀농도가 감소하지 않고 비교적 높은 채로 지속되는 것으로 나타났다. 대부분 관측지점들이 출근 시간에 PM₁₀농도가 높았다가 낮 시간에 감소하는 경향을 보이는데 반해, 주거지역인 면목동의 경우에는 아침 7~9시 사이에 PM₁₀농도가 약간 높아졌다가 오후에 급격히 PM₁₀의 농도가 증가하는 모습을 보인다. 이는 오전 출근 시간대에 배출된 먼지 입자가 서풍에 의해 동쪽으로 이루어져 동쪽에 위치한 산에 의해 이곳에 수렴되기 때문일 것으로 생각된다. 공업지역인 문래동과 구로동의 경우에 출퇴근 시간에 농도가 높아지는 경향이 뚜렷하게 나타나고 다른 지역에 비해 농도가 높다. 서울 관측지점 중에서 관측지점의 위도 값이 유사한 구로동, 잠실동의 PM₁₀농도가 극값에 이르는 시간을 보면, 구로동의 경우(여름철은 극값이 명료하지 않으므로 제외시키기로 한다) 봄철에는 8~9시 사이, 가을철에는 9시, 겨울에는 10시에 극값이 나타나고, 잠실동에서는 봄철 12시, 가을철 11시, 겨울철 13시 무렵에 극값에 이른다. 이는 오염물질이 서풍에 의해 동쪽으로 이루어지고 있음을 보여주고 있다.

지방의 관측지점에서도 서울과 비슷한 경향을 보인다(그림 4). 부산-덕천동, 대구-대명동, 대전-대흥동, 인천-송의동, 울산-야음동, 광주-두암동은 출

퇴근 시간에 PM₁₀농도가 높게 나타났다. 울산에 화학공단이 있기 때문에 PM₁₀농도가 높을 것으로 생각되었으나 관측지점으로 백한 야음동이 울산시 공단과 도심 사이에 자리잡고 있어서 울산지역의 대표값으로 보기에 어려운 점이 있다. 안양-호계동은 공장이 많이 들어선 공업지역이므로 다른 지역보다 PM₁₀농도가 높게 나타났고, PM₁₀농도의 일변화 경향은 다른 관측지점들과 마찬가지로 출퇴근 시간에 극값이 나타났다. 강릉-옥천동에서는 다른 지역과는 달리 일변화 경향이 거의 변화가 없었다. 이 지역은 강릉 외곽에 자리잡은 개발이 덜 된 지역이고, 여름철이 다른 계절보다 PM₁₀농도가 높은 점이 다른 지역과는 대조적이다.

24시간 농도 변화는 계절에 따른 뚜렷한 특징보다는 각 관측지점의 교통량이나 인구 밀도, 활동 시간 등 주변환경에 의한 영향을 더 많이 받는 것으로 보이며 이런 주변 자료에 대한 고찰이 필요하다.

3. 4 PM₁₀농도와 CO농도의 주간 변화 경향

대도시 지역은 대체로 주중에 각종 인위적 활동에 의해 교통량이 주말보다 많고, 주중에 오염물질의 배출량도 주말보다 많다. 주말에 줄어든 오염원이 PM₁₀농도에 미치는 영향을 분석해 보았다. 또한 교통량의 지표로 활용할 수 있는 CO(일산화탄소) 배출량의 계절별 주간 농도 변화를 같이 살펴봄으로써 PM₁₀의 농도와 상관관계를 살펴보았다.

각 계절에 따른 PM₁₀농도의 주간 변화 경향을 그림 5, 그림 6, 그림 7 그리고 그림 8에 나타냈다. 봄철에(그림 5) PM₁₀농도는 두 번의 극값을 갖은 형태를 보였다. 월요일이 낮은 편이고, 화, 수요일에 점차 증가하여 목요일에 극값을 나타내고, 금요일에 감소했다가 토요일에 다시 증가하는 패턴을 보이는 지점이 많았다. CO의 농도는 각 요일별로 큰 차이는 없지만 주중이 주말보다 약간 높게 나타났다. 차이는 미약하지만 금요일 무렵에 최대값을 보였다. 이처럼 PM₁₀이 1차 오염물질인 CO와는 다른 추이를 보이는 이유는 광화학 반응에 의한 2차 오염물

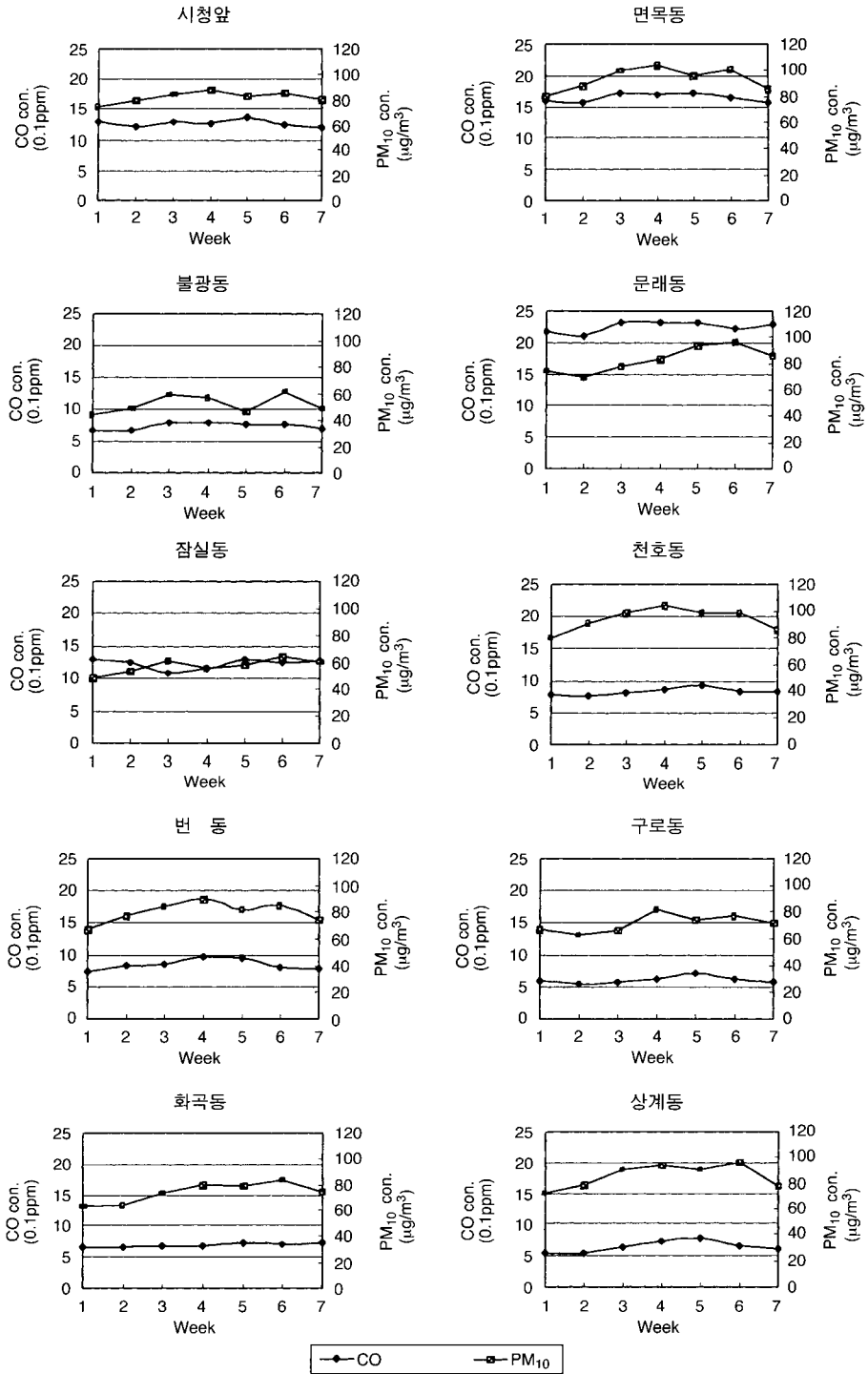


Fig. 5. Weekly variation of seasonally averaged concentrations of CO (◆) and PM₁₀ (■) at sites in Seoul in spring.
1: MON 2: TUE 3: WED 4: THU 5: FRI 6: SAT 7: SUN

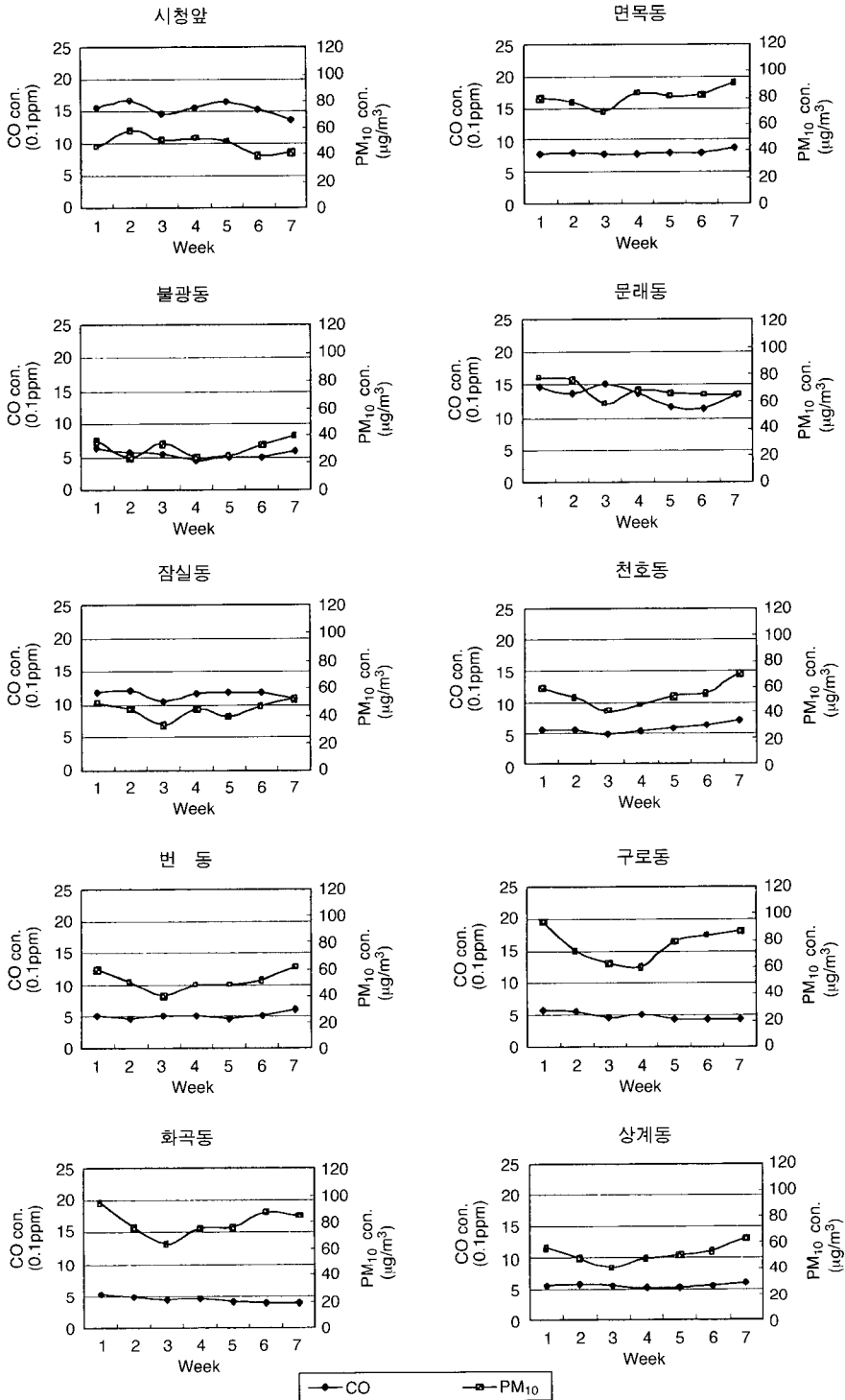


Fig. 6. The same as in Fig. 5 except in summer.

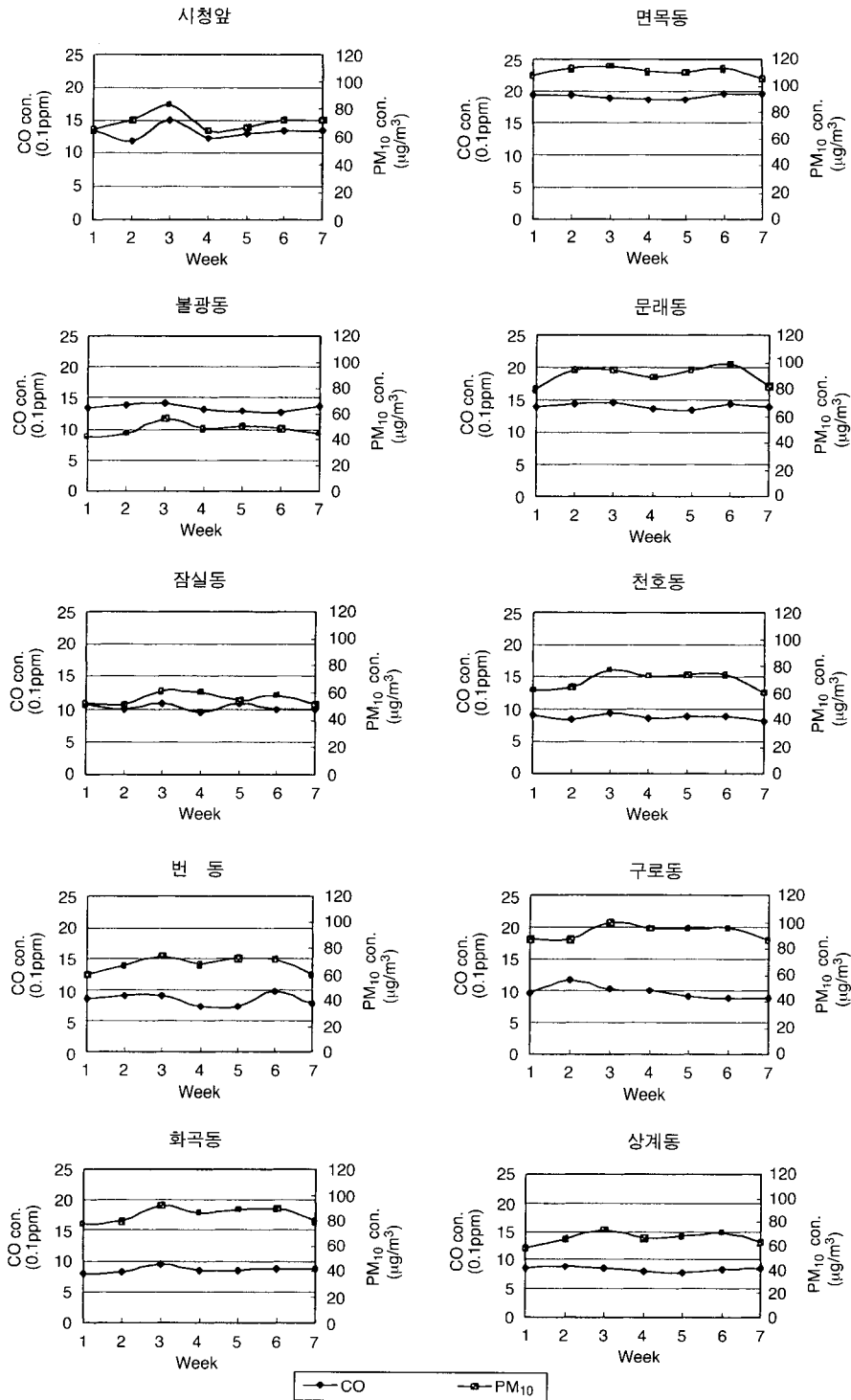


Fig. 7. The same as in Fig. 5 except in autumn.

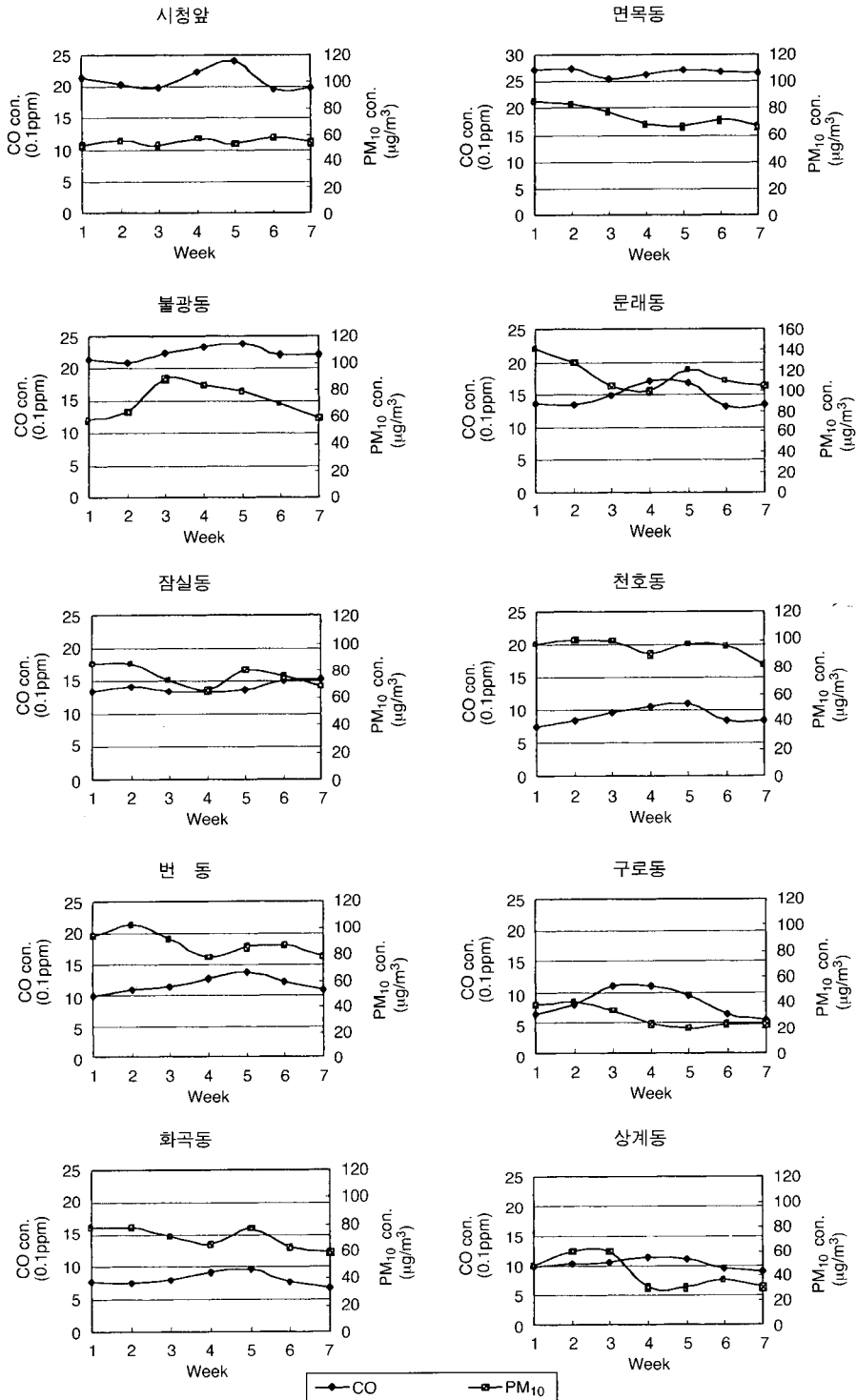


Fig. 8. The same as in Fig. 5 except in winter.

질의 생성에 의한 것으로 보인다.

여름철에(그림 6) PM₁₀농도는 시정앞을 제외하고는 모든 관측지점이 일요일에 최대값을 보였고, 월요일에도 비교적 높은 값을 나타냈다. CO의 경우 주간 변화 경향이 뚜렷하지 않았으나 주말이 주중보다 약간 높게 나타나는 지역이 많았다. 면목동, 천호동, 번동, 상계동, 불광동 등 서울에서 외곽지역에 위치한 관측지점에서 주말에 CO농도가 높게 나타났고, PM₁₀농도도 주말에 높게 나타났다.

가을철에(그림 7) PM₁₀농도 분포는 봄철처럼 2개의 극값을 가지는 형태를 보였는데, 수요일과 금요일에 높은 농도를 나타냈다. 가을철에 CO농도의 요일별 변화 경향은 뚜렷이 나타나지 않았으나, 주말보다는 주중이 약간 높게 나타났다. 천호동, 화곡동, 번동에서는 CO농도의 주간 변화 경향이 PM₁₀농도의 주간 변화 경향의 위상과 유사하게 나타났다.

겨울철에는(그림 8) 화, 수요일에 PM₁₀의 농도가 높게 나타나는 경우가 많았다. PM₁₀농도가 화, 수요일에는 높게 나타났다가 목요일에 감소하고, 주말로 가면서 증가하는 경우가 많았는데, 번동, 천호동, 화곡동에서 이런 경향이 잘 나타났다. CO농도의 경우 주중이 주말보다 높게 나타났고, 목, 금요일에 최대값을 나타내는 빈도수가 많았다.

각 계절별로 PM₁₀농도의 주간별 변화 경향은 뚜렷하게 나타나지는 않았지만, 여름철에는 주중보다 주말에 PM₁₀의 농도가 높고, 나머지 계절에는 주중이 주말보다 PM₁₀농도가 높은 경우가 많았다. PM₁₀의 농도 변화에 영향을 미치는 인자로 교통량을 생각하고, CO농도와 비교해 보았는데, CO농도도 여름철에는 주말이 높은 경우가 많았고, 나머지 계절에는 주중이 주말보다 농도가 높은 경우가 많았다. 관측지점별로 CO농도의 주간별 변화 경향의 위상이 다르게 나타났는데, 이는 관측지점이 위치한 곳이 도로와 얼마나 인접해 있는지에 영향을 받을 것으로 사료된다. 주간 변화 경향을 분석할 때 기상조건을 배제하고 교통량 자료로 활용된 CO와 PM₁₀의 상관관계를 정확히 표현하기는 어려울 것으로 보인다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 1995년 3월부터 2000년 2월까지

서울 11개 관측소와 지방 10개 관측소의 대기 오염 자동 관측소에서 관측한 PM₁₀의 농도 자료를 이용하여 연간 변화 경향을 살펴 보았으며, 최근 1년 간 자료(1999년 3월부터 2000년 2월)를 이용하여 PM₁₀농도의 월별 변화 경향, 계절별 변화 경향, 계절 평균 일변화 경향과 주간변화 경향을 분석하였다. 또한 CO농도의 주간변화 경향도 살펴보았다. 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 6년 간 서울에서 PM₁₀ 평균농도는 69 µg/m³으로 환경부 기준치 70 µg/m³와 거의 같게 나타났다. 서울을 제외한 전국 관측지점의 6년 간 평균은 56 µg/m³으로 서울보다 농도가 낮게 나타났다. 전국 15개 관측지점 중 6년 간 평균농도의 최대값을 나타낸 지점은 면목동으로 PM₁₀농도가 81 µg/m³으로 나타났고, 환경부 기준치를 초과하였다. 최소값을 나타낸 지점은 강릉-옥천동으로 PM₁₀농도가 34 µg/m³로 나타났다. 불광동을 제외한 서울의 4개 측정소는 1995년에서 2000년 사이에 연평균 농도가 1회 이상 환경부 기준치를 초과하였다. 지방은 대구-대명동, 대전-대흥동, 인천-송의동, 안양-호계동에서 1995년에서 2000년 사이에 연평균 농도가 1회 이상 환경부 기준치를 초과하였다.

2. 1999년에서 3월에서 2000년 2월까지 월평균한 PM₁₀농도(표 3, 표 4)를 보면 서울의 10개 관측지점 중에서 상계동, 면목동, 번동, 천호동, 문래동, 구로동에서 PM₁₀의 농도가 높고, 불광동, 잠실동에서 PM₁₀농도가 낮게 나타났다. 지방의 경우 대구-대명동, 안양-호계동, 부산-덕천동이 높게 나타났고, 울산-야음동, 강릉-옥천동, 제주-이도동은 낮게 나타났다. 계절에 따른 변화는 서울에서는 겨울철에 PM₁₀농도가 가장 높고, 가을, 봄, 여름 순이었고, 지방에서는 봄, 겨울, 가을, 여름의 순으로 농도가 높게 나타났다. 특히 계절별 PM₁₀농도는 강수량, 온도, 풍속 등 기상인자에 의해서 많은 영향을 받을 것으로 생각된다.

3. 서울을 포함한 전국 관측지점의 계절별 일변화 경향은 계절별로 PM₁₀총량의 차이가 있을 뿐 일변화 경향은 유사하게 나타났다. 출퇴근 시간 전후로 PM₁₀농도가 높게 나타나는 경향을 보였다. 일변화는 계절에 따른 뚜렷한 특징보다는 관측지점의 교통량이나 인구 밀도, 활동시간 등 주변환경에 의한 영향이 큰 것으로 보이며 이러한 주변자료에 대한

고찰이 필요하다.

4. PM₁₀의 계절에 따른 주간 변화 경향은 각 계절마다 최대값, 최소값이 나타나는 요일이 다르게 나타났지만 여름철에는 주말이 주중보다 높은 값을 나타냈고, 봄철, 가을철, 겨울철에는 주중이 주말보다 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 같은 계절이라도 최대값과 최소값을 나타내는 요일이 각 관측지점별로 다양하게 나타났다. PM₁₀농도 변화가 교통량과 관련이 있다는 가정 하에 CO농도 자료를 이용해 CO의 주간 변화 경향을 분석하였다.

CO농도의 경우 여름철에는 주말이 주중보다 높은 값을 나타내는 경우가 많았고, 나머지 계절에는 주말이 높은 경우가 많았다. 관측지점별로 CO농도의 주간별 변화 경향의 위상이 다양하게 나타났는데, 이는 관측지점이 위치한 곳이 도로와 얼마나 인접해 있는지에 영향을 받는 것으로 사료된다. 주간 변화 경향을 분석할 때 기상조건을 배제하고 교통량 자료로 활용된 CO와 PM₁₀의 상관관계를 정확히 표현하기는 어려울 것으로 보인다.

참 고 문 헌

김병화, 김동술 (2000) 수원지역 대기 중 PM_{2.5}와 PM₁₀의

환경 거동에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16 (2), 89-101.

김영성 (1996) 1991~1993년 사이 우리나라의 오존 농도 변화, 한국대기보전학회지, 12(1), 55-66.

김우규, 전영신, 이원환, 김현미 (1995) 서울 부유분진 농도와 황사 특성에 관한 사례연구, 한국대기보전학회지, 11(2), 199-209.

박성은, 정 용 (1992) 서울시 대기부유분진의 농도와 다환방향족 유기물에 의한 발암 위해성, 한국대기보전학회지, 8(4), 247-256.

이태정, 김동술 (1997) 수원지역 입자상 오염물질의 오염원 기여도의 추정, 한국대기보전학회지, 13(4), 285-296.

이혜문, 김동술, 이진홍 (1996) PM₁₀내 중금속의 장기간 평균농도 및 위해도 평가, 한국대기보전학회지, 12 (5), 555-566.

하진구 (1997) 수도권에서의 미세먼지 (PM₁₀)농도의 영향 인자에 관한 연구, 건국대학교 환경공학과 석사학위논문.

환경부 (2001) 대기환경보전법.

환경통계연감 1999 (제12호).