한국환경과학회지 제13권(제1호), 27~36, 2004
J. of the Environmental Sciences

대구지역 PM10 오염 관리를 위한 시간적 및 공간적 오염 특성 평가

조 완 근 · 권 기 동
경북대학교 환경공학과
(*2003*년 *11*월 *3*일 접수; *2004*년 *1*월 *20*일 채택)

Evaluation of Temporal and Spatial PM10 Characteristics for Pollution Management in Daegu area

Wan-Kuen Jo and Gi-Dong Kwon
Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
(Manuscript received 3 November, 2003; accepted 20 January, 2004)

Present study analyzed the temporal and spatial characteristics of PM10 pollution in Metropolitan Daegu area based on air pollution monitoring station data and measurements of PM10 concentrations in background area in order to provide essential data for efficient PM10 pollution management. The significant variation of spatial and temporal PM10 concentrations in Daegu area was observed during the study years. The highest maximum PM10 concentration(332 ㎍/㎥), average concentration(88 ㎍/㎥) and frequency exceeding PM10 daily standard(150 ㎍/㎥) were all observed in Namsandong located near a major roadway. The hourly and weekly variations of PM10 concentrations had different pattern for the measurement sites. The monthly and seasonal concentrations exhibited a notable characteristic: the maximum concentration was obtained in spring season, most likely due to Yellow sand effects. Furthermore, this temporal variation of PM10 pollution varied with study site. Meanwhile, the PM10 values measured at the monitoring site, Manchondong, were comparable with those of a control site. The average PM10 concentration ranged from 23 ㎍/㎥ to 115 ㎍/㎥ with a mean value of 53 ㎍/㎥ in the former site and from 22 ㎍/㎥ to 91 ㎍/㎥ with a mean value of 45 ㎍/㎥ in the latter site.

Key words : Background area, Monitoring station, PM10 management, Spatial characteristic, Temporal characteristic

1. 서 론

도시 대기 중에 존재하는 분진은 다른 대기환경 기준물질과는 달리 오존과 더불어 오염도가 증가추세에 있고[1] 다양한 독성물질로 구성되기 때문에[2] 건강 위해성(health risk)과 관련하여 많은 관심을 받고 있다. 특히 공기역학적 직경(aerodynamic diameter)이 10 μm 이상인 입자까지 포함하는 총부유 분진(total suspended particulates : TSP)과는 달리 공기역학적 직경이 10 μm 이하 입자인 PM10의 경우 호흡기관을 통해 기관지나 폐포(alveoli)까지 침투할 수 있고 주로 연소 및 광화학적 과정에 의해서 생성되며 독성이 강한 물질을 많이 포함하기 때문에 인체에 더욱 유해한 것으로 알려져 있다.[3,4] 대기 중 PM10은 일차적 또는 이차적으로 생성된다. 일차적 분진은 대기 중으로 직접 방출되고 이차적 분진은 대기 중에서 아황산가스, 이산화질소, 암모니아 및 휘발성 유기물질과 같은 가스 오염물질의 광화학적 반응에 의해서 생성되며 이러한 이차적 분진은 주로 미세분진에 해당한다. 연소시 및 산업공정시 방출되는 분진들이 주요 인위적 분진오염원으로 알려져 있다.[5] 한편, 최근에 수행된 국내 · 외 여러 역학조사들에 따르면, 대기 중의 미세분진(PM10)과 공중보건은 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 인정된다.[6~9] 높은 농도의 PM10에 노출

Corresponding Author : Wan-Kuen Jo, Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
Phone : +82-53-950-6579,
E-mail : wkjo@knu.ac.kr

될 때 치사율과 같은 급성영향과 만성적인 호흡기 질병이 유발된다.[2,7~9] PM10의 이러한 환경보건적인 중요성 때문에 우리나라에서도 TSP와 더불어 PM10의 기준을 신설하여 1995년 1월 1일부터 시행하고 있으며, 연 평균 기준치는 70 ㎍/㎥이하이고 일평균 기준치는 150 ㎍/㎥이하로 설정되어 있다.

미국을 포함한 선진국가들은 PM10에 대한 관리방안을 수립하기 위해서 우선적으로 PM10 오염도의 공간적 및 시간적 특성을 분석·평가해 왔다. 또한, PM10을 효율적으로 통제하기 위한 우선과제로서, 미국은 전역의 오염원 별 PM10 배출량, 실내 및 실외 공기중의 PM10의 오염정도에 대한 자료를 체계적으로 전산화(data base)하여 왔고, 또한 이들 자료를 지속적으로 확장하고 있으며, 이 자료를 이용하여 PM10에 대한 오염원 별 PM10 배출 관리 방안과 함께 PM10에 대한 거동을 연구해 왔다.[10,11]

국내에도 최근 PM10에 대한 인식이 증대되고 있고 이러한 국민적 관심과 병행하여 대기 중 PM10 관리방안에 대한 연구도 증대되고 있는 실정이다. 그러나, 국내의 경우 PM10 관리는 각 도시의 PM10 특성은 무시된 채 모든 도시가 일률적으로 일반적인 PM10 관리방안을 활용하고 있는 실정이다. 나아가, 국내의 여러 도시지역에서 PM10 오염에 대한 다양한 거동 및 특성이 연구되었지만,[1,12~17] PM10 관리방안과 직접적으로 연관하여 실질적으로 활용될 수 있는 목적으로 수행된 연구는 아직까지는 보고되지 않고 있다. 한편, 대구지역의 경우 인위적 분진오염원인 자동차와 가정 및 산업체 에너지 사용, 열병합발전소, 소각로 그리고 여러 공단들로부터 방출되는 미세분진으로 인해 전국에서 PM10의 오염도가 가장 심한 도시들 중에 하나로 알려져 있다.[18] PM10 오염으로 인해 대구시민들의 건강을 보호하기 위해서는 이에 대한 저감대책이 수립되고 시행되어야 한다. 따라서, 본 연구의 궁극적인 목표는 선진외국의 효율적인 대기오염 관리기법 활용과 관련하여 대구지역의 PM10 오염도 특성을 시간적 및 공간적으로 진단하여 PM10 오염의 실질적인 관리방안에 활용될 수 있는 연구자료를 제공하는 것이다. 이러한 연구목표를 달성하기 위해서, 대기질 자동측정망 자료뿐만 아니라 대조지역 한 곳을 선정하여 PM10 시료를 실제 채취 및 측정하여 비교·분석하였다.

2. 연구 방법

2.1. 대구지역 PM10 오염도의 특성 분석 및 평가

대구지역의 PM10 오염 특성을 공간적 및 시간적 분포에 근거하여 분석 및 평가하였다. 본 연구에 이용된 PM10 농도 자료는 1999년부터 2001년까지 대구환경관리청 대기질 자동측정망에서 관측된 대구지역 7개 지점의(만촌동, 산격동, 대명동, 삼덕동, 중리동, 노원동 및 남산동) 시간별 오염물질 농도자료를 이용하였다. 각 지점별로는 자료이용기간 동안 장기간의 특별한 자료누락이 없는 최대한 이용 가능한 관측 자료를 모두 선택하였다.

자료에 통계적 의미를 부여하기 위하여 자료의 선택은 각 지점별로 24시간 관측자료 중 20시간 이상이 관측된 날과 한달 동안의 관측자료 중 20일 이상이 관측된 달을 선별하였다. Larsen[11]에 의하면 실측자료의 수가 2/3 이상일 때 통계적인 의미를 가지며, 일본의 경우에는 일 평균시간이 20시간 이상되는 자료만 이용하도록 통계분석 자료의 조건을 엄격히 관리하고 있다.[18] 따라서 엄격한 자료 관리를 위해서 본 연구에서는 20시간 이상의 자료만을 선정하였으며 16시간 이상 관측횟수와 20시간 이상 관측횟수의 비가 10:9 정도로 크게 차이가 없어서 정상적으로 관측이 시작된 날은 대부분 결측이 없었음을 알 수 있었다. 위와 같이 자료를 선정한 후 이 자료를 이용하여 각 관측지점별 한 시간 최대농도를 컴퓨터 프로그램을 만들어 계산하였으며 계산치의 정확성을 재확인하기 위하여 임의로 날짜를 선택하여 재검토하였다. 이상의 전처리과정과 그 결과를 이용한 자료의 분석을 위해서 통계소프트웨어인 SAS(version 6.0)를 활용하였다.

2.2. 대조지역 PM10 시료 채취 및 측정

대구지역 내에서도 상대적으로 PM10 오염이 약할 것으로 기대되는 녹지 대조지역 한 군데에서 PM10 시료를 채취하고 측정하였다. 2002년 7월부터 12월까지 매달 7일 동안 평균 농도를 6 개월 동안 지속하여 전체 42일간의 평균 오염도를 평가하였다. PM10 시료를 채취하기 위해서 본 연구에 사용되는 시료 채취기는 Air-Metrics의 전지 사용이 가능한 MINIVOL Portable Sampler(Model 4.2) 이다. MINIVOL Sampler의 경우 소형이라 휴대가 용이하며, 작동을 자동으로 조절할 수 있는 프로그램이 장착되어 있고 채취 유량을 적정으로 유지시키는 기능을 갖고 있어서 적정유량을 10%이상 벗어나면 자동으로 작동이 멈추는 기능을 갖고 있다.

이 연구에 시용된 여과재는 셀루로오스 여과재(Cellulose filter, Pallflex, Putnam)이다. 모든 여과재는 사용 전후 온도(25±2℃)와 습도(50±2%)가 일정하게 유지된 항온·항습장치에서 24시간 이상 조절화시킨 후 무게를 단다. 항온·항습장치에서 24시간동안 조절화된 여과재를 0.001 mg까지 칭량할 수 있는 전자미세저울(Electronic Microbalance ;

Sartorius M2P, Goettingen, Germany)을 이용하여 여과재를 칭량한 다음 여과재 지지장치(filter holder)에 넣고 이중 지퍼가 달린 밀폐 가능 백(bag)에 세운 상태로 넣어 임시 보관하였다. 다음 단계에서는 시료채취기의 정상작동여부(적정유량 및 경과시간 등)를 확인하였다. 보관 백에 보관된 여과재 지지장치를 시료채취기에 부착하고 여과재 지지장치를 시료채취기 본체에 장착한 후에 한번 더 적정유량(5 lpm)을 확인한 다음 시료채취를 시작하였다. 전체 채취 시간에서 기기의 정상작동여부를 점검한 시간을 제외한 순수 채취 시간만을 실제 채취시간으로 하고 이러한 과정을 통해서 사용한 여과재를 여과재 지지장치내에 넣은 상태로 항온항습된 데시케이트에서 다음 채취시간까지 보관하였다. 여과재 지지장치에서 여과재를 분리하여 항온·항습 장치에서 24시간동안 조절화한 후에 미리 검정(calibration)된 미세저울로 여과재의 무게를 칭량하는데, 한 개 시료에 대해서 5회 이상 반복 칭량을 하여서 그 평균값을 대표치로 계산하였다.

PM10 측정자료의 정도관리(quality assurance and quality control, QA/QC)를 위해서 여과재는 채취 전·후에 항온·항습장치에 넣어서 24시간 보관 후 0.001 mg까지 칭량할 수 있는 전자미세저울로 무게를 칭량하였다. 이때 모든 칭량은 이틀간 하루에 한번씩 모두 두 번을 칭량하여 두 여과재 무게의 평균을 대표값으로 사용하였다. 만약 두 번의 칭량 시 무게 차이가 0.01 mg 이상일때는 세 번째까지 칭량하고 이때의 값이 앞의 두 번 칭량한 평균의 0.01 mg 이내이면 이 세 번째 값을 사용하고, 이전 두개 값 차이의 범위안에 들게되면 세 번의 무게 값을 모두 평균하여 대표 값으로 한다. 무게 측정 한계가 0.001 mg인 전자미세저울은 측정한계의 10배인 0.01 mg까지는 정확하게 측정할 수 이를 고려하여 시료채취량을 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지역별 PM10 일 평균 농도의 특성

대구지역 7개 지점의(만촌동, 산격동, 대명동, 삼덕동, 중리동, 노원동 및 남산동) 일 평균 농도의 특성을 Table 1에 요약하여 나타내었다. 최대농도(332 $\mu g/m^3$), 평균농도(88 $\mu g/m^3$) 그리고 PM10 대기환경 기준치인 150 $\mu g/m^3$를 초과하는 빈도수 모두에 대해서 도로변 지역인 남산동에서 가장 높게 나타났다. 최대농도는 남산동 다음으로 공업지역인 중리동(321 $\mu g/m^3$)과 노원동(289 $\mu g/m^3$) 순으로 나타났고 일반 주거지역인 만촌동에서(226 $\mu g/m^3$) 가장 낮게 나타났다. PM10 대기환경 기준치를 초과하는 빈도수에서도 남산동 다음으로 공업지역인 노원동(4.3%)과 중리동에서(3.0%) 높게 나타났고, 일반 주거지역인 만촌동에서(0.7%) 가장 낮게 나타났다. 그러나, 평균농도의 경우에는 공업지역인 노원동과 중리동 보다 오히려 상업/주거지역인 삼덕동(75 $\mu g/m^3$)과 대명동에서(71 $\mu g/m^3$) 높게 나타났다. 삼덕동과 대명동의 경우에 주요도로 인근에 위치해 있기 때문에 자동차 배출 PM10의 영향이 크기 때문에 평균농도가 공업지역보다 높게 나왔고, 노원동과 중리동의 경우는 작업 중에 공단에서 집중적으로 배출되는 PM10의 영향이 크기 때문에 최대농도가 상업/주거지역 보다 높게 나타난 것으로 사료된다.[18] 본 연구 결과는 대구지역의 PM10 관리는 다른 지역보다는 도로변 또는 도로변 인근지

Table 1. Characteristics of daily mean PM10 concentrations ($\mu g/m^3$) for seven selected sites from 1999 to 2001

Site	Type	No of obs.	Maxa	Mean	SDb	Exceedancec	
						No	%
Manchondong	Residential	1021	226	54	25	7	0.7
Sankeodong	Residential	990	233	63	28	11	1.1
Daemyungdong	Commercial/Residential	1026	279	71	32	21	2.1
Samdeokdong	Commercial/Residential	1010	260	75	31	21	2.1
Jungridong	Industrial	1032	321	60	37	31	3.0
Nowondong	Industrial	781	287	66	37	33	4.3
Namsandong	Roadside/residential	924	332	88	41	73	7.9

a "No of obs" represents the number of observations
b "SD" represents standard deviation values
c "Exceedance" represents the number and percent of exceedance of daily PM10 standard ($150 \mu g/m^3$)

역, 그리고 공업지역에서 우선적으로 이루어져야 하고 지역적으로 PM10 관리 전략을 달리하여야 함을 제시한다. 남산동, 삼덕동 및 대명동을 포함하여 도로변 또는 도로변 인근의 주택에 거주하는 주민의 PM10으로부터 건강 위해성을 줄이기 위해서는 자동차 교통 관리가 가장 우선적으로 수행되어야 한다. 한편, 노원동과 중리동을 포함한 공업지역 또는 인근에 거주하는 주민의 PM10으로부터 건강 위해성을 줄이기 위해서는 자동차 교통 관리보다는 공단 배출 PM10 관리가 가장 우선적으로 수행되어야 한다. 나아가, 본 연구결과에 기초할 때, 비록 만성영향(chronic effect)와 밀접한 관련이 있는 평균농도는 모든 지역에서 PM10 대기환경 기준치 이하로 나타났지만, 급성영향(acute effect)과 관련이 있는 높은 최대농도와 결코 낮지 않은 PM10 대기환경 기준치를 초과하는 빈도수를 고려할 때, 대구지역의 PM10 관리는 지속적으로 수행되어야 함이 강조된다.

한편, 본 연구 결과를 국내 타 지역의 결과와 비교할 때, 대구지역의 PM10 평균 농도는 국내 여러 도시에서 보고된 PM10 평균 농도 범위 내에 포함되는 것으로 나타났다. 서울특별시 성동구 행당동에서 측정된 평균 농도는 89 $\mu g/m^3$으로 나타났고[13], 울산지역에서는 58 $\mu g/m^3$으로 나타났다[17]. 또한, 수원지역에서 측정된 평균 농도는 70 $\mu g/m^3$으로 나타났다.[1]

3.2. 시간대별 PM10 농도 변화

대구지역 7개 대기오염 측정 지점에 대한 시간대별 PM10 농도 변화를 Table 2에 요약하여 나타내었다. 일반 주거지역인 만촌동의 경우, 오전 10시에서 오후 1시 사이에 대체적으로 높은 PM10 농도를 (63 ~ 68 $\mu g/m^3$) 나타내었다. 역시 일반 주거지역에 해당하는 산격동의 경우에는, 만촌동과 비교할 때 PM10 농도는 높으나 (66 ~ 89 $\mu g/m^3$), 상대적으로 높은 농도를 나타내는 시간대는 유사하게 오전 10시에서 오후 3시 사이이었다. 따라서, 대구의 일반 주거지역의 PM10 관리는 오전 10시에서 오후 1 ~ 3시에 집중되어야 효율적인 PM10 관리가 될 수 있음을 의미한다. 공업지역인 중리동과 노원동의 경우, 일반 주거지역 보다는 다소 이른 오전 7시부터 오후 1 ~ 2시 사이에 높은 농도를(중리동: 61 ~ 81 $\mu g/m^3$, 노원동: 61 ~ 93 $\mu g/m^3$) 나타내고 있으므로 공업지역의 PM10 관리는 이 시간대에 집중되어

Table 2. Variation of hourly mean PM10 concentration ($\mu g/m^3$) for seven selected sites from 1999 to 2001

Hour	Manchon dong	Sankeok dong	Daemyungdong	Samdeok dong	Jungri dong	Nowon dong	Namsan dong
1	53	56	72	75	60	64	82
2	50	53	71	75	59	59	78
3	49	51	70	74	59	56	76
4	48	52	68	72	57	55	76
5	47	52	67	72	58	55	76
6	46	51	67	74	58	57	77
7	48	54	69	75	61	61	81
8	51	59	72	82	67	69	91
9	58	71	81	87	76	82	105
10	67	82	86	92	81	93	115
11	68	89	85	92	78	89	117
12	66	86	81	88	69	79	110
13	63	81	75	80	61	72	102
14	59	70	70	76	54	63	91
15	57	66	66	71	50	58	86
16	55	62	64	67	48	58	85
17	52	59	63	64	48	56	83
18	50	60	62	64	49	56	84
19	49	59	63	68	51	61	85
20	50	59	66	72	54	65	84
21	52	59	69	75	57	67	84
22	53	59	70	75	57	66	86
23	53	57	71	75	58	66	85
24	52	57	72	75	60	65	87

야 효율적인 PM10 관리가 될 수 있을 것이다. 반면에 상업/주거 지역인 삼덕동(64 ~ 92 $\mu g/m^3$)과 대명동(62 ~ 86 $\mu g/m^3$) 그리고 도로변 지역인 남산동의(76 ~ 117 $\mu g/m^3$) 경우, 특정 시간대가 아닌 거의 전 시간대에 높은 농도를 나타내므로 이 지역들의 PM10 관리를 위해서는 자동차 배출 PM10 관리대책 수립이 시급함을 알 수 있다.

3.3. 요일별 PM10 농도 변화

대구지역 7개 대기오염 측정 지점에 대한 요일별 PM10 농도 변화가 Table 3에 요약되었다. 모든 지역에 대하여 일요일과 월요일의 PM10 농도가 낮게 나타났으므로, 화요일에서 토요일까지 PM10관리가 집중되어야 PM10오염도를 효율적으로 저감시킬 수 있음을 의미한다. 만촌동의 경우는 가장 낮은 PM10 농도가 일요일에 50 $\mu g/m^3$, 가장 높은 농도가 수요일, 목요일 및 금요일에 56 $\mu g/m^3$으로 나타났다. 산격동의 경우는 가장 낮은 PM10 농도가 일요일에 59 $\mu g/m^3$, 가장 높은 농도가 금요일에 65 $\mu g/m^3$으로 나타났다. 대명동의 경우는 가장 낮은 PM10 농도가 일요일에 67 $\mu g/m^3$, 가장 높은 농도가 수요일에 74 $\mu g/m^3$으로 나타났다. 삼덕동의 경우는 가장 낮은 PM10 농도가 일요일에 70 $\mu g/m^3$, 가장 높은 농도가 금요일에 79 $\mu g/m^3$으로 나타났다. 중리동의 경우는 가장 낮은 PM10 농도가 일요일에 52 $\mu g/m^3$, 가장 높은 농도가 수요일에 65 $\mu g/m^3$으로 나타났다. 노원동의 경우는 가장 낮은 PM10 농도가 일요일에 54 $\mu g/m^3$, 가장 높은 농도가 수요일에 72 $\mu g/m^3$으로 나타났다. 마지막으로 남산동의 경우는 가장 낮은 PM10 농도가 일요일에 81 $\mu g/m^3$, 가장 높은 농도가 수요일, 목요일 및 금요일에 90 $\mu g/m^3$으로 나타났다.

3.4. 월별 PM10 농도 변화

대구지역 7개 대기오염 측정 지점에 대한 월별 PM10 농도 변화가 Table 4에 요약되었다. 모든 지역에서 하절기인 7월, 8월 및 9월에 낮은 농도를 나타내었고, 동절기인 11월 ~ 2월 보다는 오히려 이른 봄인 3월에 최대 농도를 나타내고 있으므로 모든 지역에서 3월에는 특별한 PM10 관리가 이루어져야 하고, 특히 근본적인 문제점인 중국의 황사현상을 저감하기 위한 중국과의 외교적인 노력이 요구된다. 만촌동의 경우, 하절기인 7월(38 $\mu g/m^3$), 8월(34 $\mu g/m^3$) 및 9월(36 $\mu g/m^3$)에 낮은 농도를 나타내었고, 동절기인 11월 ~ 2월(53 ~ 61 $\mu g/m^3$) 보다 이른 봄인 3월에(73 $\mu g/m^3$) 최대 농도를 나타내었다. 산격동의 경우, 하절기인 7월(49 $\mu g/m^3$), 8월(40 $\mu g/m^3$) 및 9월(41 $\mu g/m^3$)에 낮은 농도를 나타내었고, 동절기인 11월 ~ 2월(64 ~ 73 $\mu g/m^3$) 보다 이른 봄인 3월에

Table 3. Variation of weekly mean PM10 concentration ($\mu g/m^3$) for seven selected sites from 1999 to 2001

Site	Sun	Mon	Tues	Wed	Thrs	Fri	Sat
Manchondong	50	52	53	56	56	56	54
Sankeokdong	59	60	62	64	64	65	64
Daemyungdong	67	69	70	74	72	70	71
Samdeokdong	70	72	76	78	78	79	75
Jungridong	52	56	59	65	63	61	61
Nowondong	54	66	68	72	68	66	65
Namsandong	81	85	88	90	90	90	88

Table 4. Variation of monthly mean PM10 concentration ($\mu g/m^3$) for seven selected sites from 1999 to 2001

	Month											
Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Manchondong	53	59	73	62	61	59	38	34	36	53	61	57
Sankeokdong	69	64	81	70	66	66	49	40	41	61	73	71
Daemyungdong	83	81	94	82	73	73	47	41	43	70	83	78
Samdeokdong	86	85	97	83	80	74	51	46	51	76	92	89
Jungridong	58	55	86	75	65	60	40	33	36	59	77	68
Nowondong	77	65	86	71	64	70	45	34	44	66	77	73
Namsandong	101	93	115	91	84	80	58	53	51	83	115	105

(81 $\mu g/m^3$) 최대 농도를 나타내었다. 대명동의 경우, 하절기인 7월(47 $\mu g/m^3$), 8월(41 $\mu g/m^3$) 및 9월(43 $\mu g/m^3$)에 낮은 농도를 나타내었고, 동절기인 11월 ~ 2월(78 ~ 81 $\mu g/m^3$) 보다 이른 봄인 3월에(94 $\mu g/m^3$) 최대 농도를 나타내었다. 삼덕동의 경우, 하절기인 7월(51 $\mu g/m^3$), 8월(46 $\mu g/m^3$) 및 9월(51 $\mu g/m^3$)에 낮은 농도를 나타내었고, 동절기인 11월 ~ 2월(85 ~ 92 $\mu g/m^3$) 보다 이른 봄인 3월에(73 $\mu g/m^3$) 최대 농도를 나타내었다. 중리동의 경우, 하절기인 7월(40 $\mu g/m^3$), 8월(33 $\mu g/m^3$) 및 9월(36 $\mu g/m^3$)에 낮은 농도를 나타내었고, 동절기인 11월 ~ 2월(55 ~ 77 $\mu g/m^3$) 보다 이른 봄인 3월에(86 $\mu g/m^3$) 최대 농도를 나타내었다. 노원동의 경우, 하절기인 7월(45 $\mu g/m^3$), 8월(34 $\mu g/m^3$) 및 9월(44 $\mu g/m^3$)에 낮은 농도를 나타내었고, 동절기인 11월 ~ 2월(65 ~ 77 $\mu g/m^3$) 보다 이른 봄인 3월에(86 $\mu g/m^3$) 최대 농도를 나타내었다. 마지막으로 남산동의 경우, 하절기인 7월(58 $\mu g/m^3$), 8월(53 $\mu g/m^3$) 및 9월(51 $\mu g/m^3$)에 낮은 농도를 나타내었고, 동절기인 12월 ~ 2월(93 ~ 105 $\mu g/m^3$) 보다 이른 동절기인 11월(115 $\mu g/m^3$)과 이른 봄인 3월에(115 $\mu g/m^3$) 최대 농도를 나타내었다.

3.5. 계절별 PM10 농도 변화

대구지역 7개 대기오염 측정 지점에 대한 계절별 PM10 농도 변화가 Table 5에 요약되었다. 계절적으로는 모든 지역에서 봄철에 가장 PM10 농도, 그 다음이 겨울, 가을 그리고 여름의 순으로 나타났다. 봄철의 가장 높은 PM10 농도와 여름철의 가장 낮은 PM10 농도는 앞의 월별 PM10 농도 변화에서도 설명된 바와 같이 각각 황사와 장마의 영향 때문인 것으로 사료된다. 여름과 가을 보다 높은 PM10 농도를 나타내는 겨울철의 경우, 난방 연료 사용의 증가로 인한 영향을 받는 것으로 사료된다. 만촌동의 경우, 계절적으로 최대 농도를 나타내는 봄철에는 PM10 농도가 66 $\mu g/m^3$이었고, 최저 농도를 나타내는 여름철에는 44 $\mu g/m^3$이었다. 산격동의 경우, 계절적으로 최대 농도를 나타내는 봄철에는 PM10 농도가 73 $\mu g/m^3$이었고, 최저 농도를 나타내는 여름철에는 51 $\mu g/m^3$이었다. 대명동의 경우, 계절적으로 최대 농도를 나타내는 봄철에는 PM10 농도가 83 $\mu g/m^3$이었고, 최저 농도를 나타내는 여름철에는 52 $\mu g/m^3$이었다. 삼덕동의 경우, 계절적으로 최대 농도를 나타내는 봄철에는 PM10 농도가 87 $\mu g/m^3$이었고, 최저 농도를 나타내는 여름철에는 56 $\mu g/m^3$이었다. 중리동의 경우, 계절적으로 최대 농도를 나타내는 봄철에는 PM10 농도가 75 $\mu g/m^3$이었고, 최저 농도를 나타내는 여름철에는 44 $\mu g/m^3$이었다. 노원동의 경우, 계절적으로 최대 농도를 나타내는 봄철에는 PM10 농도가 74 $\mu g/m^3$이었고, 최저 농도를 나타내는 여름철에는 44 $\mu g/m^3$이었다. 마지막으로 남산동의 경우, 계절적으로 최대 농도를 나타내는 봄철에는 PM10 농도가 96 $\mu g/m^3$이었고, 최저 농도를 나타내는 여름철에는 65 $\mu g/m^3$이었다.

3.6. 연도별 PM10 농도 변화

대구지역 7개 대기오염 측정 지점에 대한 연도별 PM10 농도 변화가 Table 6에 요약되었다. 한정된 연구범위에 따른 연구 연도의 한계성은 있지만 연도별 PM10 평균농도는 지역에 따라 다른 추세를 나타내 보였다. 만촌동의 경우, 1999년과 2000년에는 55 $\mu g/m^3$으로 동일하다가 2001년에는 52 $\mu g/m^3$으로 다소 낮아졌다. 산격동의 경우, 1999연도에 58 $\mu g/m^3$에서 2000연도에 66 $\mu g/m^3$으로 증가하였다가 다시 2001연도에 63 $\mu g/m^3$으로 다소 낮아졌다. 대명동의 경우, 1999년(71 $\mu g/m^3$), 2000년(71 $\mu g/m^3$) 및 2001년의(70 $\mu g/m^3$) 3년동안 거의 변화가 없었다. 삼덕동의 경우, 산격동과 유사하게 1999연도에 74 $\mu g/m^3$에서 2000연도에 77 $\mu g/m^3$으로 증가하였다가 다시 2001연도에 74 $\mu g/m^3$으로 다소 낮아졌다. 중리동의 경우, 1999년(59 $\mu g/m^3$)에 비해 2000연도에는 48 $\mu g/$

Table 5. Variation of seasonal mean PM10 concentration ($\mu g/m^3$) for seven selected sites from 1999 to 2001

Site	Season			
	Spring	Summer	Fall	Winter
Manchondong	66	44	50	56
Sankeokdong	73	51	59	68
Daemyungdong	83	52	66	81
Samdeokdong	87	56	73	87
Jungridong	75	44	58	60
Nowondong	74	44	64	72
Namsandong	96	65	85	100

Table 6. Variation of yearly mean PM10 concentration ($\mu g/m^3$) for seven selected sites from 1999 to 2001

Site	Year		
	1999	2000	2001
Manchondong	55	55	52
Sankeokdong	58	66	63
Daemyungdong	71	71	70
Samdeokdong	74	77	74
Jungridong	59	48	72
Nowondong	73	57	68
Namsandong	86	90	88

m^3으로 대폭 감소하였다가 2000년에 72 $\mu g/m^3$으로 다시 큰 폭으로 증가함으로서 연도별 변화가 심했던 것으로 나타났으므로 이에 대한 원인 파악의 필요성이 제기된다. 노원동의 경우도 중리동과 유사하게 1999년(73 $\mu g/m^3$)에 비해 2000연도에는 57 $\mu g/m^3$으로 대폭 감소하였다가 2000년에 68 $\mu g/m^3$으로 다시 큰 폭으로 증가함으로서 연도별 변화가 심했던 것으로 나타났다. 남산동의 경우는 산격동과 삼덕동의 경우와 유사하게 1999연도에 86 $\mu g/m^3$에서 2000연도에 90 $\mu g/m^3$으로 증가하였다가 다시 2001연도에 88 $\mu g/m^3$으로 다소 낮아졌다.

3.7. 대조지역 PM10 오염도

Table 7에 상대적으로 PM10 오염이 약할 것으로 기대되는 녹지 대조지역인 경북대학교 공과대학 6호관 건물 옥상에서 측정된 PM10 농도와 대구의 여섯 개 대기오염측정 지점에서 동일 시간대에 측정된 PM10 농도가 정리되어 있다. 대부분의 경우, 대조지역에서 측정된 PM10 농도가 대구의 여섯 개 대기오염측정 지점에서 측정된 PM10 농도 보다 낮게 나타났고, 일부는 일반주거지역인 만촌동과 유사하게 나타났다. 따라서, 경북대학교 공과대학 6호관 건물이 대기오염 자동 측정의 대조지역으로 적합한 것으로 나타났다. 또한, 본 연구 결과는 만촌동의 대기오염측정값이 대조지역의 측정값으로 활용될 수 있음을 의미한다. 7월과 9월의 경우, 대조지역의 PM10 농도가 대구의 여섯 개 대기오염측정 지점 모두에서 측정된 PM10 농도 보다 낮게 나타났다. 8월의 경우, 8월2일에 측정된 대조지역의 PM10 농도가(33 $\mu g/m^3$) 만촌동(27 $\mu g/m^3$) 및 대명동(27 $\mu g/m^3$) 보다 다소 높으나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 10월의 경우, 10월 8일(41 $\mu g/m^3$), 10월15일(53 $\mu g/m^3$) 및 10월16일(53 $\mu g/m^3$)의 대조지역 PM10 농도가 만촌동의 10월 8일(39 $\mu g/m^3$), 10월15일(523 $\mu g/m^3$) 및 10월16일(51 $\mu g/m^3$)의 PM10 농도와 유사하게 나타났고, 그 이외의 10월 측정일들에 대해서는 대조지역 PM10 농도가 대구의 여섯 개 대기오염측정 지점에서 측정된 PM10 농도 보다 모두 낮게 나타났다. 11월의 경우, 11월 5일(38 $\mu g/m^3$)의 대조지역 PM10 농도가 만촌동의 11월 5일(35 $\mu g/m^3$)의 PM10 농도보다 약간 높게 나타났고, 11월8일(36 $\mu g/m^3$) 대조지역의 PM10 농도가 복현동의 11월 8일(35 $\mu g/m^3$) PM10 농도와 유사하게 나타났으며, 이외의 11월 측정일들에 대해서는 대조지역 PM10 농도가 대구의 여섯 개 대기오염측정 지점에서 측정된 PM10 농도 보다 모두 낮게 나타났다. 마지막으로 12월의 경우, 12월 5일(61 $\mu g/m^3$)의 대조지역 PM10 농도가 만촌동의 12월 5일(60 $\mu g/m^3$)의 PM10 농도와 유사하게 나타났고, 이외의 12월 측정일들에 대해서는 대조지역 PM10 농도가 대구의 여섯 개 대기오염측정 지점에서 측정된 PM10 농도 보다 모두 낮게 나타났다.

3.8. PM10 관리를 위한 접근 가능한 방안

연구지역의 PM10 관리를 위한 접근 가능한 방안을 위해서 EPA[12]에 의해서 개발된 PM10의 관리 방안을 활용할 수 있다. PM10의 최대농도(332 $\mu g/m^3$), 평균농도(88 $\mu g/m^3$) 그리고 PM10 대기환경 기준치인 150 $\mu g/m^3$를 초과하는 빈도수 모두에 대해서 도로변 지역인 남산동에서 가장 높게 나타났으므로 도로변지역의 PM10 관리가 요구된다. 도로변 PM10 오염의 효율적 관리를 위해서 도로상 PM10의 진공청소의 경우 PM10 제어효율은 0-50%, 물 청소가 0-96%의 PM10 제어효율을 가지며, 도로포장 개선, 도로를 운행하는 트럭의 덮개를 효율화 및 교통량과 차량속도를 감소시키는 방법이 있다. 이들 제어방법에 소용되는 경비는 어떤 제어방법을 활용하느냐, 횟수 및 주기 그리고 교통량에 따라서 결정된다. 디젤엔진차량으로부터 배출되는 PM10을 관리하기 위하여 디젤엔진의 향상, 디젤유의 개량 및 분진 필

Table 7. PM10 concentrations (㎍/㎥) measured at a control site and at six Daegu Air Minitoring stations through July to December, 2002

Mon	Day	Control	Suchang	Daemyung	Bokhyun	Manchon	Ihyun	Namsan
7	23	33	41	35	46	-	-	-
	24	32	47	37	36	37	-	-
	25	41	61	49	56	51	-	-
	26	31	55	34	34	33	-	57
	27	26	38	28	34	28	-	-
	29	28	53	47	49	47	-	-
	30	44	73	62	66	56	-	-
8	1	33	45	33	38	36	-	-
	2	33	36	27	33	27	-	-
	23	42	56	48	59	53	-	-
	24	46	55	55	52	48	-	-
	26	36	58	45	49	-	-	-
	27	41	54	47	51	-	-	-
	28	39	55	48	62	-	-	-
9	2	49	72	-	64	67	-	-
	3	79	100	-	102	105	-	-
	4	51	65	64	67	62	-	-
	5	31	56	45	46	46	-	-
	6	24	35	28	33	24	-	-
	7	22	39	27	32	23	-	-
	9	44	54	65	54	52	-	-
10	4	90	98	104	91	115	-	-
	8	41	65	56	50	39	65	-
	9	51	86	77	59	66	108	-
	10	59	69	78	61	56	105	-
	11	55	76	77	60	64	-	-
	15	53	70	69	57	52	80	81
	16	53	80	73	60	51	-	102
11	5	38	51	47	48	35	57	50
	6	79	95	95	80	88	154	133
	7	91	112	106	110	95	155	160
	8	36	58	51	35	39	62	65
	25	41	64	58	44	39	61	69
	26	38	65	56	49	42	89	88
	27	37	51	39	42	35	36	50
12	2	91	123	112	110	106	194	181
	3	49	158	188	124	115	276	243
	5	61	86	87	79	60	130	129
	6	23	50	35	36	24	50	36
	9	32	45	36	38	-	32	54
	10	24	54	40	50	27	40	61
	11	30	56	48	45	30	46	75

터를 장착시키는 정책을 수립·시행할 수 있다. 다른 관리방법으로서 자동차 엔진의 연소효율 증대 및 청정 연료를 사용하는 방법이 있다. 자동차 공해를 저감시키는 대표적인 공학 방법으로서 자동차 엔진개선과 공기와 연료의 비율 (공연비) 조절을 들 수 있다. 자동차 엔진을 개선하여 연료의 연소효율을 증가시키는 방법이 있고, 최적의 공연비를 유지하기 위해서 공기 흡입부에 산소 감지기 (O_2

sensor)를 부착하여 산소농도를 측정하고 그 신호를 전자조절장치 (ECU; electronic control unit)에 보내어 공연비를 조절하는 방법이 이용될 수 있다. 대구시와 같은 지방자치시에서는 대구지역에 판매되는 차량의 배출가스 허용기준을 엄격히 설정 규제함으로서 자동차 제작사들이 자동차 공해 배출량을 줄이기 위한 위의 방안들을 실행하도록 유도할 수 있다. 또한, 차량 정기검사와 유지관리 (Inspection /maintenance, I/M)를 통하거나 개인운전 습관을 개선함으로서 통하여 PM10 배출을 효율적으로 관리할 수 있다.

PM10 대기환경 기준치를 초과하는 빈도수에서도 남산동 다음으로 공업지역인 노원동(4.3%)과 중리동에서(3.0%) 높게 나타났다. 공업지역의 경우에는 주로 보일러 연소와 다양한 산업공정으로 인해 PM10이 대기로 배출되므로 이러한 공업지역의 PM10 대기질을 개선하기 위해서는 이러한 오염원을 집중관리할 필요가 있다. 분쇄공정의 경우, 공정시설을 밀폐화하거나 습식화시키는 방법이 있다. 분말석탄연소와 중유연소 보일러로부터 발생되는 PM10의 효율적 관리를 위해서는 전기집진장치 또는 여과집진장치를 설치·작동시키는 방법이 있다.

4. 요약 및 결론

체계적으로 분석된 대구지역의 PM10 오염도의 시간적 및 공간적 특성과 대조지역에서 측정된 PM10 오염도에 근거하여 대구지역의 PM10 오염에 대한 저감 방안이 다음과 같이 제시된다. 대구시의 지역특성에 따른 PM10 관리의 관점에서 볼 때 대구지역의 PM10 관리는 다른 지역보다는 도로변 또는 도로변 인근지역, 그리고 공업지역에서 우선적으로 이루어져야 하고 지역적으로 PM10 관리 전략을 달리하여야 함을 제시하고 있다. 남산동, 삼덕동 및 대명동을 포함하여 도로변 또는 도로변 인근의 주택에 거주하는 주민의 PM10으로부터 건강 위해성을 줄이기 위해서는 자동차 교통 관리가 가장 우선적으로 수행되어야 한다. 한편, 노원동과 중리동을 포함한 공업지역 또는 인근에 거주하는 주민의 PM10으로부터 건강 위해성을 줄이기 위해서는 자동차 교통 관리 보다는 공단 배출 PM10 관리가 가장 우선적으로 수행되어야 한다. 나아가, 본 연구결과에 기초할 때, 비록 만성영향과 밀접한 관련이 있는 평균농도는 모든 지역에서 PM10 대기환경 기준치 이하로 나타났지만, 급성영향과 밀접한 관련이 있는 최대 농도와 결코 낮지 않은 PM10 대기환경 기준치를 초과하는 빈도수를 고려할 때, 대구지역의 PM10 관리는 지속적으로 수행되어야 함이 강조된다.

대구지역의 시간대 별 PM10 관리 관점에서 볼 때, 대구의 일반 주거지역의 PM10 관리는 오전 10시에서 오후 1 ~ 3시에 집중되어야 효율적인 PM10 관리가 될 수 있음을 의미한다. 공업지역인 중리동과 노원동의 경우, 다소 이른 오전 7시부터 오후 1 ~ 2시 사이에 PM10 관리가 집중되어야 효율적인 PM10 관리가 될 수 있을 것이다. 반면에 상업/주거 지역인 삼덕동과 대명동 그리고 도로변 지역인 남산동의 경우, 특정 시간대가 아닌 거의 전 시간대에 걸쳐 PM10 관리해야 하고 특히 자동차 배출 PM10 관리대책 수립이 시급하다.

대구지역의 요일 별 PM10 관리 관점에서 볼 때, 모든 지역에 대하여 일요일과 월요일의 PM10 농도가 낮게 나타났으므로 화요일에서 토요일까지 집중되는 것이 PM10관리가 효율적으로 수행될 수 있음을 의미한다.

대구지역의 월 별 PM10 관리 관점에서 볼 때, 모든 지역에서 하절기인 7월, 8월 및 9월에 낮은 농도를 나타내었고, 동절기인 11월 ~ 2월 보다는 오히려 이른 봄인 3월에 최대 농도를 나타내고 있으므로 모든 지역에서 3월에는 특별한 PM10 관리가 이루어져야 하고, 특히 근본적인 문제점인 중국의 황사현상을 저감하기 위한 중국과의 외교적인 노력이 요구된다.

대구지역의 계절 별 PM10 관리 관점에서 볼 때, 계절적으로는 모든 지역에서 봄철에 가장 PM10 농도, 그 다음이 겨울, 가을 그리고 여름의 순으로 나타났다. 봄철의 가장 높은 PM10 농도와 여름철의 가장 낮은 PM10 농도는 앞의 월별 PM10 농도 변화에서도 설명된 바와 같이 각각 황사와 장마의 영향 때문인 것으로 사료된다. 여름과 가을 보다 높은 PM10 농도를 나타내는 겨울철의 경우, 난방 연료 사용의 증가로 인한 영향을 받는 것으로 사료되므로 청정연료 사용의 확대가 권장된다.

대부분의 경우, 대조지역에서 측정된 PM10 농도가 대구의 여섯 개 대기오염측정 지점에서 측정된 PM10 농도 보다 낮게 나타났고, 일부는 일반주거지역인 만촌동과 유사하게 나타났다. 따라서, 대구의 PM10 측정망 중에서 만촌동이 주위 PM10 오염원의 영향을 가장 적게 받는 주거지역임을 함께 고려할 때 대구시의 PM10 관리목표는 만촌동의 PM10 수준으로 유지함이 바람직한 것으로 제안된다.

감사의 글

본 연구는 2002연도 대구지역환경개발센터에서 시행한 환경기술연구개발사업의 지원(02-1-40-41)에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

1) 김병화, 김동술, 2000, 수원지역 대기중 PM2.5와 PM10의 환경거동에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16, 89-101.
2) Dockery, D. W., C. A. Pope, X. Xu, J. D. Spengler, J. H. Ware, M. E. Fay, B. G. Ferris and F. E. Speizer, 1993, An association between air pollution and mortality in six U.S. cities, New England J. Med., 329, 1753-1759.
3) John, W., S. M. Wall, J. L. Ondo and W. Winklmay, 1990, Modes in the size distribution of atmospheric inorganic aerosol, Atmos. Environ., 24, 2349-2359.
4) Simpson, R. W., 1992, A statistical analysis of particulate data sets in Brisbane, Australia Atmos. Environ., 26, 99-105.
5) Baltensperger, U. and S. Nyeki, 1998, Atmospheric aerosols. In: Colbeck, I. (Ed.), Physical and Chemical Properties of Aerosols. Blackie Academic & Professional, London, 280-329pp.
6) 신동천, 정 용, 김종만, 임영옥, 1994, 서울시 대기 부유분진 중 중금속에 대한 발암 위해성 평가, 한국대기보전학회지, 10, 105-115.
7) 이혜문, 김동술, 이진홍, 1996, PM10 내 중금속의 장기간 평균농도 및 위해도 평가, 한국대기보전학회지, 12, 555-566.
8) Schwartz, J., 1994, Air pollution and daily mortality: a review and meta-analysis, Environ. Res., 64, 36-52.
9) Schwartz, J., D. W. Dockery and L. M. Neas, 1996, Is daily mortality associated specifically with fine particles?, J. Air and Waste Manage. Assoc., 46, 2-14.
10) Ackermann-Liebrich, U., P. H. Leuenberger, J. Schwartz, C. H. Schindler, C. H. Monn and SAPALDIA Team, 1997, Lung function and long term exposure to air pollutants in Switzerland, Am. J. Resp. Crit. Care Med., 155, 122-129.
11) Larsen, R., 1973, An air quality data analysis system for interrelating effects, standards, and needed source reduction, JAPCA, 23, 933-939.
12) Tucker, W. G., 2000, An overview of PM2.5 sources and control strategies, Fuel Processing Technol., 65-66, 379-392.
13) 유정석, 김동술, 김윤신, 1995, 서울시 PM-10 오염원의 정량적 기여도 추정, 한국대기환경학회지, 11, 279-290.
14) 백성옥, 송희봉, 신동찬, 홍성희, 장혁상, 1998, 대구지역 공중위생법 규제대상시설의 실내공기중 입자상 오염물질의 계절별 및 지점별 농도분포 특성, 한국대기환경학회지, 14, 163-175.
15) 서영화, 이병규, 정용삼, 정영주, 문종화, 이길용, 심상권, 홍완, 최한우, 김기현, 1999, PM10 채취와 PM10 조성물질의 실험실간 동시측정 비교연구, 한국대기환경학회지, 15, 485-493.
16) 최성우, 송형도, 2000, 대구지역 부유분진 중 미량금속성분의 발생원 특성연구, 한국대기환경학회지, 16, 469-476.
17) 나덕재, 이병규, 2000, 산업도시 대기 중 PM10의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구, 한국대기환경학회지, 16, 23-35.
18) 조완근, 1996, 대구시 대기오염 거동평가에 관한 연구, 대구광역시 시정연구, 16, 557-573.