

# 국내 주요 대도시에서의 미세 먼지 노출 현황

연세대학교 환경공해연구소 및 보건대학원 양지연

## 1. 서론

세계보건기구(WHO)에서는 대기오염을 “대기 중에 인위적으로 배출된 오염물질이 한가지 또는 그 이상 존재하여 오염물질의 양, 농도 및 지속시간이 어떤 지역의 불특정 다수인에게 불편감을 일으키거나 해당 지역에 공중보건상 위해를 끼치고, 인간이나 동·식물의 활동에 해를 주어 생활과 재산을 향유할 정당한 권리를 방해받는 상태”로 정의하고 있다.

우리나라 대기환경규제물질 중 이산화황, 일산화탄소, 납 등 후진국형 오염물질의 농도는 1988년을 정점으로 하향 추세에 있다(김동술, 2001). 그럼에도 불구하고 국민들이 느끼는 일반인들이 느끼는 체감 대기오염도는 증가하고 있다. 특히, 1990년대 이후 대기 중 미세먼지에 대한 관심이 매우 증가되어 왔으며, 환경규제물질도 과거의 총먼지(Total suspended particles : TSP)로 규제하던 것을 1994년 PM10(Particle matter 10 $\mu$ m)에 대한 환경기준을 설정하여 관리해오고 있다.

미세먼지는 공기중의 고체상태의 입자와 액체상태의 입자의 혼합물을 말한다. 이러한 입자들은 자연 배출원 뿐만 아니라 여러 종류의 고정 배출원이나 이동 배출원으로부터 배출되므로 여러 형태의 모양과 크기를 가지고 있다. 미세먼지는 배출원으로부터 직접 배출되거나 아황산가스나 질소산화물과 같은 가스상물질에 의해 2차적으로 생성된다.

특히, 대도시에서는 자동차의 급격한 증가와 인구집중화로 교통관련 이동오염원과 화학공정과 같은 고정오염원에 의해 도시 대기 중 10 $\mu$ m이하의 미세먼지들이 인위적으로 방출되어 호흡기관을 통한 기관지나 폐의 허파꽂리까지 침투하여 인체에 유해한 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다(Hernandez 등, 1992). 미세먼지는 천식과 같은 호흡기계 질병을 악화시키고, 폐 기능의 저하를 초래한다. 또한 미세먼지는 시정을 악화시키고, 식물의 잎 표면에 침적되어 신진대사를 방해하며, 건축물에 퇴적되어 조각된 유적물이나 동상 등에 부식을 일으킨다. 또한, 분진의 크기가 작을수록 중금속과 이온류 등 무기물질류의 흡착이 용이하여 유해영향을 가중시키며(Simpson, 1992 ; John 등, 1990 ; Hindy, 1982), 더욱이, 대기 중 수용성 이온농도가 산성 강하물(acid precipitation)에 의한 산성우와 관계가 있는 것이 밝혀지면서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 원고에서는 국내 PM10의 환경기준에 대해 살펴보고, 국내 대기오염측정망 자료를 이용하여 대도시에서의 PM10 오염 현황을 알아보며, 황사시기의 미세먼지 오염 특성에 대해 기술하였다. 또한 연세대 환경공해연구소에서 지난 환경부 G7 과제 수행을 통해 측정된 우리나라의 6대 대도시(서울, 인천, 대전, 대구, 광주 및 부산)에서의 대기 중 호흡성 미세먼지인 PM10 중 수용성 이온류 및 유해 중금속의 무기물질류에 대한 오염도를 바탕으로 오염도에 영향을 미치는 주요 발생원을 주요인분석(Principal component analysis; PCA)을 통해 예측해보았다.

## 2. PM10 환경기준

분진은 크게 인위적으로 방출되는 분진과 자연적으로 방출되는 분진으로 나눌 수 있다. 인위적 분진은 인간의 생산 및 산업활동의 결과로 방출되는 분진을 의미하며, 분진의 크기에 따라 미세먼지(fine particle)과 거대먼지(coarse particle)으로 분류한다. 미세먼지와 거대먼지의 경계가 되는 크기가 2.5  $\mu\text{m}$ 이고, 일반적으로 인위적 분진의 대부분은 미세먼지이며, 자연적 분진의 대부분은 거대먼지로 알려져 있다.

우리나라에서는 1983년 총먼지(TSP)에 대한 대기환경기준을 적용하여 관리하다가 미국 등 외국에서 미세먼지가 인체에 미치는 영향이 밝혀지고 미세먼지에 대한 중점관리가 필요해짐에 따라 '93년에는 PM10에 대한 환경기준(연간 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하, 일일 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하)을 설정하였다. 1995년 이후 PM10과 TSP의 환경기준을 동시에 설정·운영함으로써, 동일 분진에 대해 6년간 2개 기준을 설정하여 분진오염 규제에 혼선이 빚어지기도 하였다. 이후 2001년부터는 TSP에 대한 환경기준을 삭제하고 PM10 환경기준을 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  일로 강화하여 운영하고 있다.

한편, 최근 지방자치단체에서는 국가환경기준 이외에 지역별로 대기오염현황과 대기오염물질 배출량 변화추이 등 지역특성을 고려하여 지역대기환경기준을 설정하고 있다. 현재 서울, 대전, 제주, 인천, 경기 등 5개 자치단체에서 지역환경기준을 설정·운영하고 있다(표1).

표 1. TSP 및 PM10 관련 국가·지역환경기준 (단위 :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

항 목		국가환경기준			지역 환경기준							
		'83	'93	'01	서울 ('97.12)	대전 ('97.12)	제주 ('99.1)	인천 ('00.11)	경기('01.5)			
									제1권역		제2권역	
									'02 까지	'07 까지	'02 까지	'07 까지
총먼지 (TSP)	연간	150	150	-	-	90	-	-	-	-	-	-
	24시간	300	300	-	-	230	-	-	-	-	-	-
PM <sub>10</sub>	연간	-	80	70	60	50	60	60	70	65	40	30
	24시간	-	150	150	120	100	120	120	140	130	70	50

\* 경기도 지역환경기준은 제1권역 22 시·군(수원·성남·고양·부천 등)에, 제2권역 9 시·군(광주·안성 등)으로 구분하여 설정

\*자료출처 : 환경부 대기정책과(2001)

외국의 경우에도 TSP로 관리하던 것을 단계적으로 PM10, PM2.5로 전환하는 추세에 있다. 우리나라를 비롯하여 미국, 일본, 홍콩, 싱가포르, EC(European Commission)국가에서 PM10에 대한 환경기준을 설정하고 있으며, 미국과 EC에서는 PM2.5에 대한 기준도 별도로 정하고 있다. 미국과 EC에서는 인위적 분진의 제어에 더 중요성을 두고 있어, PM10이외에 PM2.5를 추가로 설정하고 있으며, PM2.5 기준은 국민 특히 노약자의 건강 및 시정(visibility) 보호차원에서 PM10 기준보다 합리적이며 규제력이 강한 기준이라 할 수 있다. 현재 우리나라의 PM10 국가환경기준은 미국, 일본, 홍콩, 싱가포르 등 외국과 유사한 수준이나 EC 권고기준보다는 다소 높게 설정되어 있다. 표 2에는 국가별 미세먼지의 대기환경

기준들을 비교하였다.

표 2. 미세먼지에 대한 국가별 대기환경기준 비교

(단위 :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

항목	국가	한국	미국	일본	캐나다	홍콩	싱가포르	EC 권고기준	
								'05목표	'10목표
총먼지 (TSP)	연간	-	-	-	70	80	75	-	-
	24시간	-	-	-	120	260	260	-	-
PM <sub>10</sub>	연간	70	50	-	-	55	50	30	20
	24시간	150	150	100	-	180	150	50	50
	1시간	-	-	200	-	-	-	-	-
PM <sub>2.5</sub>	연간	-	15	-	-	-	-	20	20
	24시간	-	65	-	-	-	-	40	40

\* 환경기준 초과여부의 판단기준

1. 한국 : PM<sub>10</sub> 24시간 기준은 99 percentile 값이 1년 동안 기준을 초과하여서는 안됨
2. 미국 : PM<sub>10</sub>(PM<sub>2.5</sub>) 24시간 기준치는 연간 24시간 측정값들의 .98 percentile 값이 3년 동안 그 기준을 초과하여서는 안됨.
3. 일본 : 공업전용지역, 차도, 기타 일반인이 통상 생활하지 않는 지역이나 장소에 대해서는 환경기준치를 적용하지 않음.
4. EC : '05 목표 중 PM<sub>10</sub> 24시간 환경기준(50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )은 연간 25회 이상, PM<sub>2.5</sub> 24시간 환경기준(40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )은 연간 14회 이상 초과해서는 안됨. '10 목표 중 PM<sub>10</sub> 24시간 환경기준(50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )은 연간 7회 이상 초과해서는 안됨.

\* 자료 : 국내·외 대기환경관련 기준 및 동향(국립환경연구원, 2000)

### 3. 국내 주요 대도시의 대기 중 PM10 농도 분포

우리나라에서는 대기오염실태를 파악하고 대기질 개선대책 수립에 필요한 기초자료를 확보하기 위해 환경부 및 지방자치단체에서 총 8 종류(지역대기질 조사, 도로변 대기질 조사, 산성강하물 조사, 국가배경농도 조사, 지역배경농도 조사, 중금속 조사, 시정거리 조사, 지구 대기 측정망)을 설치·운영하고 있으며, 현재 66개 시·군에 총 328개의 측정소가 설치되어 있다(환경부, 2001).

PM10은 1995년부터 측정되기 시작하였으며, 지역 대기질 조사 측정망 자료에 의한 연평균 PM10 농도 변화를 살펴보면, 1995년부터 1998년까지 조금씩 감소하다가 최근에는 다소 증가하는 추세를 보이고 있다(그림 1). 대기 중 PM10은 기상요인과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되고 있으며, 1998년 국내 대기 중 PM10 농도가 급격히 감소한 것도 당시 연평균 강수량이 예년의 두배에 가까운 약 2,500mm이었기 때문인 것으로 보고된 바 있다(김동술, 2001).

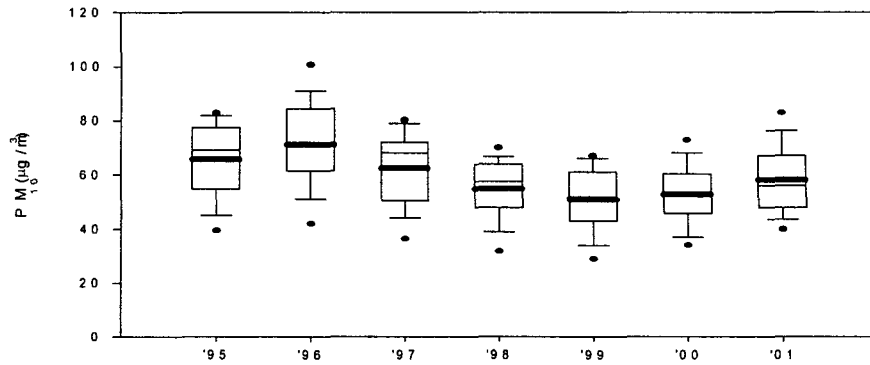


그림 1. 연도별 PM10 연평균 농도 분포 (환경부, 2001)

2001년 대기 중 PM10 연평균 농도는 총 52개 시·군 중 4개 시·군(7.7%)에서  $40\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하의 오염도를 보였으며, 27개 시·군(51.9%)은  $41\sim 60\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 9개 시·군(17.3%)은  $61\sim 70\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 11개 시·군(21.2%)이  $70\mu\text{g}/\text{m}^3$  농도를 초과한 것으로 조사되었다. 국내 PM10 연평균 기준을 초과하는 도시는 21.2%이었으나, 미국 연평균 기준인  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 도시는 전체 도시의 61.3%(35개 시·군)으로 조사되어 국내 대기 중 PM10 농도는 안심할만한 수준은 아닌 것으로 평가되었다.

2001년의 측정소별 연평균 PM10 오염도를 보면 유효측정소 총 147개 중 9개소(6.1%)는  $40\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하, 68개소(46.3%)는  $41\sim 60\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 31개소(21.1%)는  $61\sim 70\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 19개소(12.9%)는  $71\sim 80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 나타내었으며,  $81\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상의 농도를 나타낸 측정소도 20곳(13.6%)이 있었다. 2000년도의 109개 측정소 중  $40\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하 측정소수는 14개소(12.8%),  $41\sim 60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 58개소(53.2%),  $61\sim 70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 20개소(18.4%),  $71\sim 80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 14개소(12.8%),  $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 곳은 3개소(2.8%)로 나타나, 2001년에 다소 고농도로 측정된 측정소수가 증가하였다.

24시간 평균 PM10 오염도의 경우 99percentile값이 환경기준치를 초과한 측정소는 112개소이며, 이중 오염도가 가장 높은 측정소는 군산시 개정동으로  $369\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 그 다음으로 서울시 이화동( $313\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 군산시 소룡동( $311\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 부천시 상 1동( $307\mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 순이었다.

국내 주요 대도시의 대기 중 PM10 오염도를 비교해 보면, 2001년 연평균 PM10은 서울시가  $71\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높고 대구( $67\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 부산( $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ )순으로 나타났으며, 대전이  $48\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮았다(그림 2).

국내 주요 대도시의 대기 중 PM10 농도별 누적분포에서는 99.5 percentile 이상에서 기상인자 등의 영향으로 특이치의 변화가 매우 큰 것으로 분석되었으며, 이러한 값들은 단순 산술평균값에 상당한 영향을 줄 수 있다. 24시간 단기환경기준의 적용 대상값을 많은 나라에서 99 percentile으로 설정하고 있으며 우리나라의 경우에도 2001년 1월 1일 환경기준 개정과 함께 99 percentile을 기준 대상으로 삼고 있고, 이러한 percentile 개념의 도입으로 노출빈도(발생 확률)에 대한 농도수준의 파악이 용이해지고 특이치의 영향을 일부 배제할 수 있다. 그림 3을 보면, 서울과 부산 모두 전체적인 연평균은 감소하고 있으나, 1996년보다

2000년에서  $400\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상의 고농도 측정횟수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 서울과 부산의 2000년 99 percentile 값은 각각  $210\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과  $205\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 두 지역 모두 단기환경기준 ( $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 초과하고 있었다.

국내 주요 대도시에서의 PM10 월평균 농도 변화 경향은 건조하고 황사의 영향을 많이 받은 봄철에 가장 높은 농도를 보이며 강수가 집중되는 하계에 가장 낮은 농도 분포를 보이고 있다(그림 4).

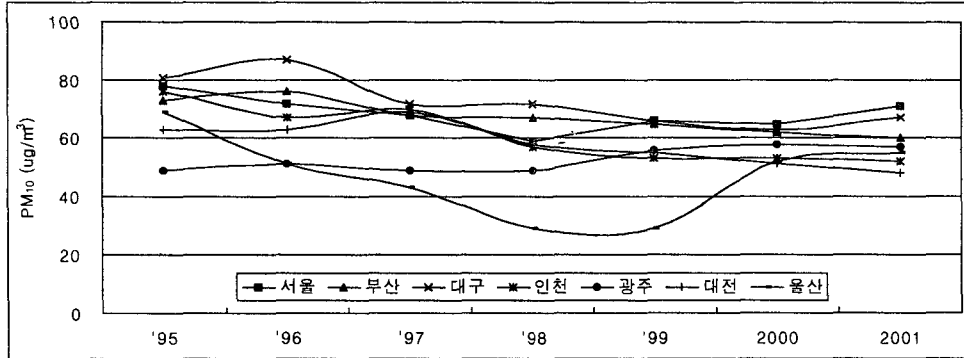


그림 2. 국내 대도시의 대기 중 PM10 연평균 농도 비교 (환경부, 2001)

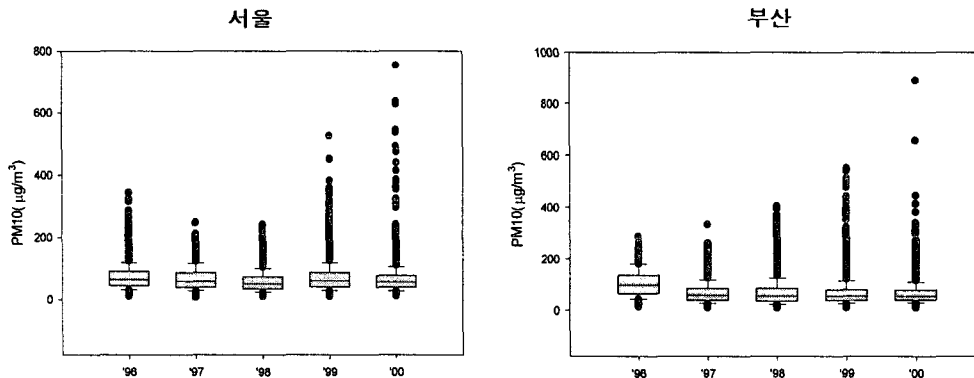


그림 3. 서울 및 부산의 대기 중 PM10 농도 분포 (환경부, 2001)

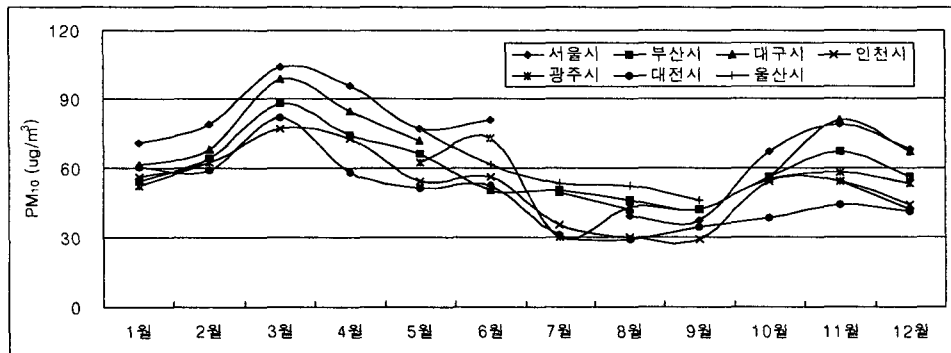
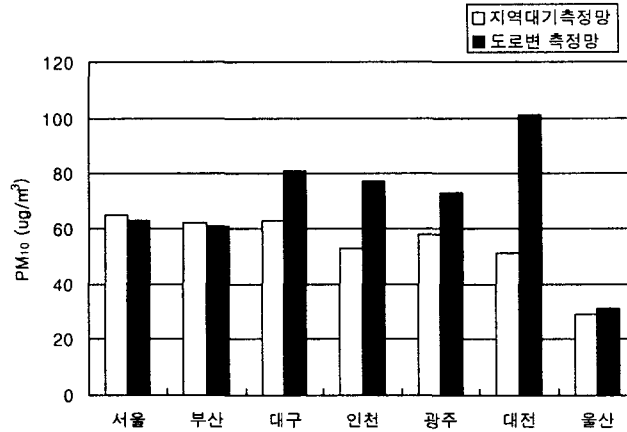


그림 4. 국내 대도시의 대기 중 PM10 월평균 농도 비교 (환경부, 2001)

서울 및 부산을 제외한 주요 대도시의 주요 도로변에 위치한 측정소에서의 연평균 PM10 농도는 지역대기 측정망의 연평균 농도에 비하여 다소 높은 농도를 나타내고 있으며, 이러한 현상 역시 자동차에서 배출된 PM10 영향에 의한 것으로 보인다(그림 5). 서울과 부산의 경우에는 도시 전체에 주요 도로가 산재해 있고, 자동차 통행도 매우 많음으로 인해 지역대기 측정망과 도로변 측정망의 차이가 관찰되지 않았다.



\*울산은 1999년, 그 외 지역은 2000년 측정 자료 이용

그림 5. 국내 대도시의 도로변 대기 중 PM10 연평균 농도 비교 (환경부, 2001)

#### 4. 황사 발생시 PM10 농도 분포

황사 현상은 몽고 및 중국내륙의 사막지대와 황하강 유역의 황토지대에서 미세한 모래먼지가 발생되어 인근 국가로 장거리 이동하는 것을 일컬으며 주로 건조기인 봄철에 발생한다. 이러한 황사 현상은 우리 나라 및 일본에서 주로 나타나며 심할 경우 태평양의 하와이에서까지 관측되기도 한다. 최근에는 중국의 사막지역이 확대되면서 봄철뿐만 아니라 겨울에도 발생되고, 서울 등 대도시뿐만 아니라 전국적인 황사현상이 빈번히 관찰됨에 따라 황사의 발생 기작, 발생 추세 및 사례 분석을 통해 황사의 전반적인 동향 및 실태를 파악하는 연구가 관심을 끌고 있다.

황사는 발원지에서 우리나라까지 이동하기 위해서는 황사가 부유할 수 있는 강한 바람과 부유된 입자가 장거리 수송될 수 있는 적합한 기상조건이 필요하다. 일반적으로 발원지에서 배출되는 황사의 양을 100%라고 할 때, 보통 30%는 발원지에서 재침적되고, 20%는 주변 지역으로 수송되며, 50%는 장거리 이동되어 한국, 일본, 태평양 등에 침적된다. 발원지에서 부유하여 우리나라까지 이동되는 황사의 양은 발원지의 지표상태, 기상 조건에 따라 매우 다르게 나타난다.

우리나라와 일본에서 관측되는 황사의 크기는 대략 1~10 $\mu$ m 정도인 것으로 알려져 있으며, 3 $\mu$ m 내외의 입자가 많다. 황사시에는 입자수농도가 비황사시에 비해 모든 입경에서 2배 이상 높게 관측된다. 그림 6에는 2001년 4월 Ace-Asia 집중 관측 기간동안 국립환경연구원

에서 분석한 입경별 에어로졸 농도 분포를 나타내었다. 이 기간동안 우리나라에서 관측되는 먼지 입자는 약  $0.7\sim 0.8\mu\text{m}$  및  $4\sim 5\mu\text{m}$ 를 중심으로 이산형(bimodel) 분포를 보이며, 황사시에는 비황사시에 비해 미세입자가 최고 약 2배, 조대입자는 최고 4배 이상의 농도를 보이는 것이 특징으로 관찰되었다.

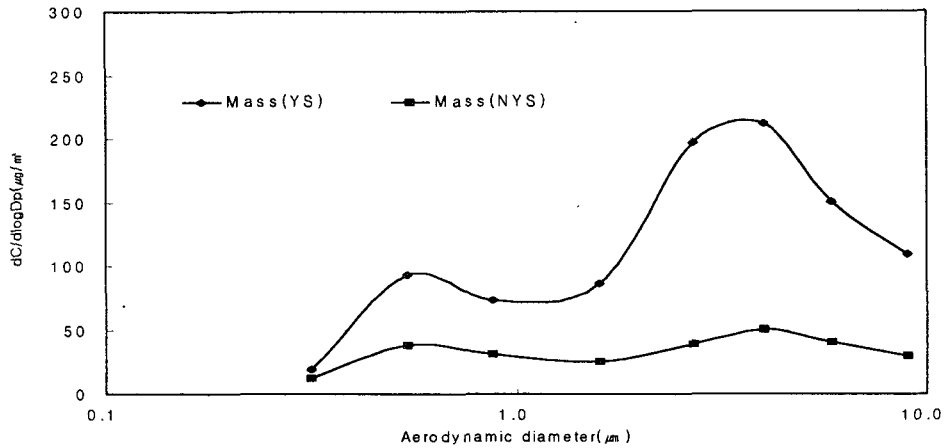


그림 6. 2001년 황사 및 평상시의 입자별 무게 농도 (국립환경연구원, 2001)

우리 나라의 연간 황사 발생일수는 1996, 1997년에는 다소 주춤하거나 감소하다가 1998년부터 다시 증가하기 시작하였으며, 2001년에는 급격한 증가하는 추세를 보였다(그림 7). 황사 발생 횟수가 많은 해인 1993, 1995, 1998년에는 봄철의 발생 빈도가 많아 4월의 발생 빈도가 50%를 훨씬 상회하였으나(평균 74%) 2000년에는 평균 약 50%로 감소하였고, 2001년도에는 절반을 훨씬 밑도는 평균 약 30%로서 예전의 봄철에 국한된 황사 현상이 점차 계절에 무관해 지고 있는 것으로 분석되었다.

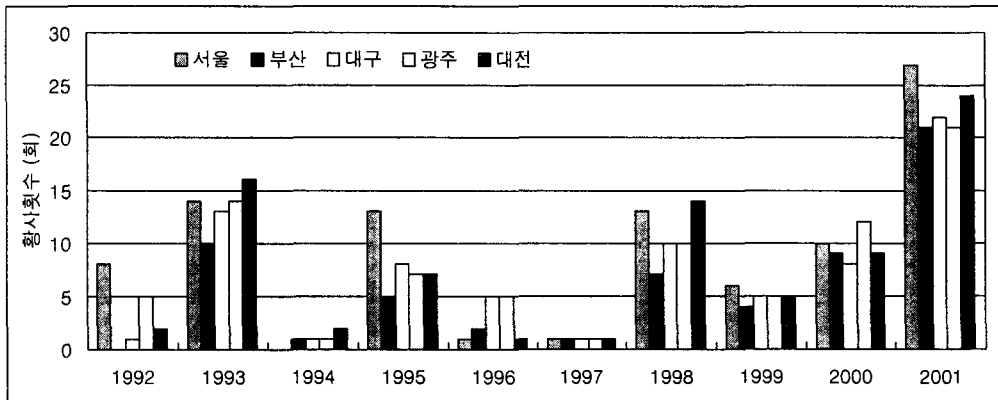


그림 7. 지난 10년간 국내 주요 도시의 연간 황사 발생일수 비교(환경부, 2001)

2001년 황사시에 주요 도시별 일평균 PM10 농도를 살펴보면 평균  $300\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상의 오염도를 기록하고 있으며, 발생 횟수도 서울을 비롯한 주요 5개 도시에서 평균 7 차례로서 황사 발생 기록이래 최다 횟수이며 그 발생일수 또한 모두 20일을 상회하고 있었다. 특히 2001년 1월 및 12월에 발생한 황사현상은 예전의 봄철 황사현상과는 달리 이례적으로 일찍 황사가 발생하였으며 그 영향권 또한 겨울 황사로서 전국적인 규모로 진행되었다는 점이 큰 특징이다(그림 7).

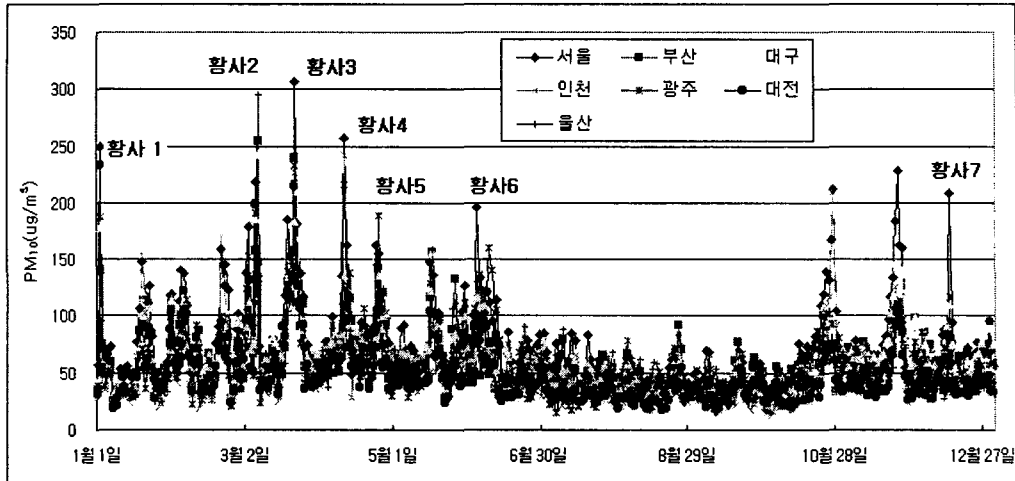


그림 7. 2001년 주요 도시별 일 평균 PM10의 시계열 (환경부, 2001)

특히, 2001년 황사의 특징으로서 겨울철인 1월 및 2월을 비롯하여 특히 3월에 이례적으로 황사의 발생일수가 많았다는 것이다. 또 과거의 황사현상은 보통 2~3일간 지속되다가 사라지는 경향을 나타내는 것이 보통이었으나, 2001년 특히 3월의 황사현상은 시간 평균 약  $300\mu\text{g}/\text{m}^3$  정도의 약한 황사로 시작되다가 후반부에는 최고  $900\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 강한 강도로 우리나라에 전국적으로 영향을 주었다(그림 8). 2001년 12월 13일 발생한 황사는 겨울철 특히 초겨울 12월에 발생한 것으로는 1991년 이후 10년만으로 61년이래 다섯 번째이지만 우리나라 동해안을 제외한 전국 대부분 지방에서 때 이른 황사현상이 관측된 것은 이번이 처음 있는 아주 이례적인 현상이었다. 겨울 황사시의 최고 PM10 농도는 일평균  $291\mu\text{g}/\text{m}^3$ (부천시 심곡동)으로 관측되었으며, 서울에서 시간 평균 최고  $400\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상이 관측되었다(그림 9). 이렇게 2001년에 황사의 발생이 평년에 비하여 빈번하며 봄철에만 국한되지 않고 겨울철에도 황사의 영향권이 점점 광역화되고 있는 이유는 겨울 내내 중국 화북지역이 예년에 비해  $3^{\circ}\text{C}$  이상 높은 고온을 유지했으며 강수량 또한 예년에 비해 적었던 것이 주요 원인으로 분석되고 있으며 장기적으로는 중국의 급속히 진행되는 사막화(전 국토의 17.6%가 사막)에 기인하고 있다.



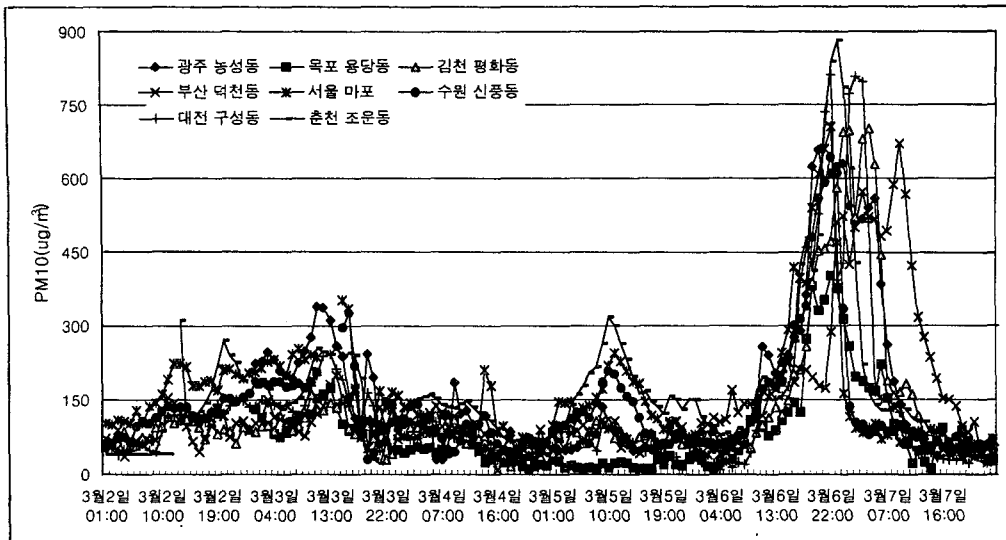


그림 8. 2001년 3월 지역별 시간 평균 PM10 농도분포(환경부, 2001)

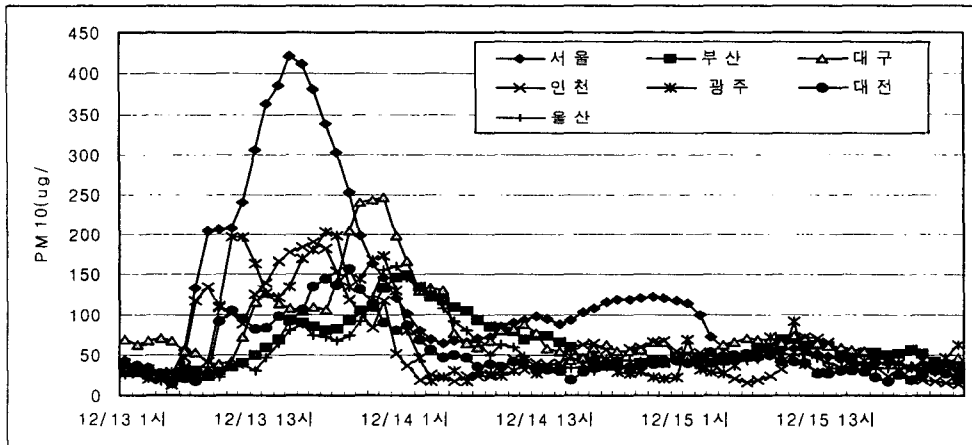


그림 9. 2001년 12월 지역별 시간 평균 PM10 농도분포(환경부, 2001)

### 5. 주성분 분석을 이용한 우리나라 6개 대도시 지역의 PM10 중 무기물질의 발생원 평가

미세먼지는 화석연료의 연소나 노천소각 등 인위적 활동에 의해 직접·간접으로 발생되는 한편, 안개나 황사 등 자연적인 요인에 의해서도 많은 영향을 받는다. 가스상 물질과 같은 대기오염물질의 경우 대부분 화석연료의 연소과정에서 발생하는 반면, 미세먼지는 안개, 화재, 황사, 바람에 의한 비산 등 자연요인에 의해 많은 영향을 받으며, 또한 직접적인 발생 이외에도 아황산가스, 이산화질소와 같은 가스상 오염물질이 황산염이나 질산염과 같은 입

자상물질로 전환되어 2차적으로 생성되기도 한다. 이와 같이 미세먼지는 인위적인 직접 배출량 이외에도 자연발생원과 2차 반응에 의해서도 오염도가 증가하기 때문에 정확한 발생원을 규명하고 기여도를 평가하는 것이 매우 어렵다.

미세먼지의 발생원 평가 방법으로는 대기확산 모델링 등의 발생원 중심 평가와 시료채취 지점에서의 역추정해서 발생원을 추정하는 수용 모델링이 있다. 수용모델에는 Enrichment factor, Time series analysis, Spatial series analysis, CMB(chemical mass balance), 다변량 Receptor 모델 등이 있다. 그리고, 다변량적 Receptor 모델에는 주성분분석(PCA), 목표전환 인자분석(TTFA), 선형중회귀분석(MLR), 절대주성분분석(APCA)이 적용되고 있다. 기기 분석법의 발달과 함께 입자상 물질의 화학적 성분의 분석자료가 수용 모델에 널리 이용되고 있으며, 화학적 성분중에서도 금속성분들이 각종 발생원의 지표원소(trace element)로 사용되고 있다. 그러나 발생원에서 발생된 입자의 화학적인 구성이 대기중에서 변화하지 않는다는 수용 모델 적용의 가정과 대기중 미세입자의 대부분이 반응생성된 2차 입자상 물질이므로 미세먼지에 대한 수용 모델의 적용은 제한을 받아 왔다. 발생원에서 발생하는 미세 입자상물질의 화학적 성분에 대한 조사와 함께 수용 모델의 무기성분의 발생원 분류표(source file) 구성을 통해 대기중 미세먼지의 발생원을 예측하고자 하였다.

6대 대도시(서울, 인천, 대전, 대구, 광주, 부산)에서의 PM10 중 무기물질류의 오염도를 자료는 환경부 G7 과제를 통해 측정된 1996년에서 1998년동안 계절별·일별 오염도 측정 자료를 이용하였다(환경공해연구소, 1998). 시료의 채취는 PM10 mini-volume air sampler(5 l/min)를 이용하여 membrane filter(Whatman, England)에 포집하였다. 포집된 PM10에서의 이온류(F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>)는 전기전도도 검출기가 부착된 IC(Water 431 system, Waters Co, USA)로, 중금속(Zn, Fe, Pb, Cd, Cr, Mn, Ba, As, Cu)은 GF/Flame-AAS(Shimadzu 6701F, Shimadzu Co, Japan)로 분석하였다.

본 연구에서는 수용 모델의 한 방법인 주성분 분석(principal component analysis ; PCA)을 적용하여 각 지역별 주요 오염원을 예측하고자 하였으며, 주성분 분석을 통한 주성분의 해석을 용이하게 하기 위해 VARIMAX 회전기법을 적용하였다.

6대 대도시 지역의 대기 중 무기물의 오염농도는 표 3과 그림 10에서 제시한 바와 같다.

표 3. 국내 6대 대도시에서의 PM10 중 무기물질류의 오염도 (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

		서울	인천	대전	대구	광주	부산
Metals	Zn	1.05 ± 2.21	0.91 ± 1.37	2.53 ± 10.59	0.77 ± 1.44	0.88 ± 1.69	1.46 ± 2.15
	Fe	7.73 ± 8.74	5.63 ± 5.32	15.16 ± 53.91	4.01 ± 4.35	7.55 ± 9.28	7.25 ± 9.88
	Pb	0.19 ± 0.29	0.20 ± 0.17	0.20 ± 0.38	0.16 ± 0.30	0.14 ± 0.41	0.32 ± 0.46
	Cd	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
	Cr	0.09 ± 0.12	0.05 ± 0.06	0.13 ± 0.22	0.07 ± 0.12	0.10 ± 0.16	0.09 ± 0.25
	Mn	0.08 ± 0.22	0.07 ± 0.10	0.07 ± 0.15	0.08 ± 0.23	0.04 ± 0.07	0.14 ± 0.26
	As*	6.27 ± 13.13	4.90 ± 6.82	2.89 ± 3.65	4.00 ± 4.45	3.25 ± 5.34	6.61 ± 7.92
Ions	Cl <sup>-</sup>	5.98 ± 5.33	8.90 ± 7.53	5.74 ± 6.28	8.64 ± 12.98	4.46 ± 4.35	14.90 ± 19.01
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	16.90 ± 17.36	19.95 ± 22.07	17.18 ± 14.35	17.09 ± 15.74	11.32 ± 12.80	12.36 ± 11.77
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	20.41 ± 24.55	32.72 ± 34.82	27.62 ± 29.76	28.05 ± 31.93	17.73 ± 14.12	25.43 ± 27.60
	K <sup>+</sup>	0.33 ± 0.41	1.31 ± 6.49	0.23 ± 0.40	0.19 ± 0.31	0.27 ± 0.57	0.34 ± 1.23
	Mg <sup>2+</sup>	0.19 ± 0.16	0.31 ± 0.26	0.15 ± 0.13	0.64 ± 2.61	0.17 ± 0.16	0.28 ± 0.23
	Ca <sup>2+</sup>	1.26 ± 0.88	2.01 ± 1.69	1.10 ± 0.92	1.10 ± 0.90	1.09 ± 1.11	1.55 ± 1.24

\* As unit : ng/m<sup>3</sup>

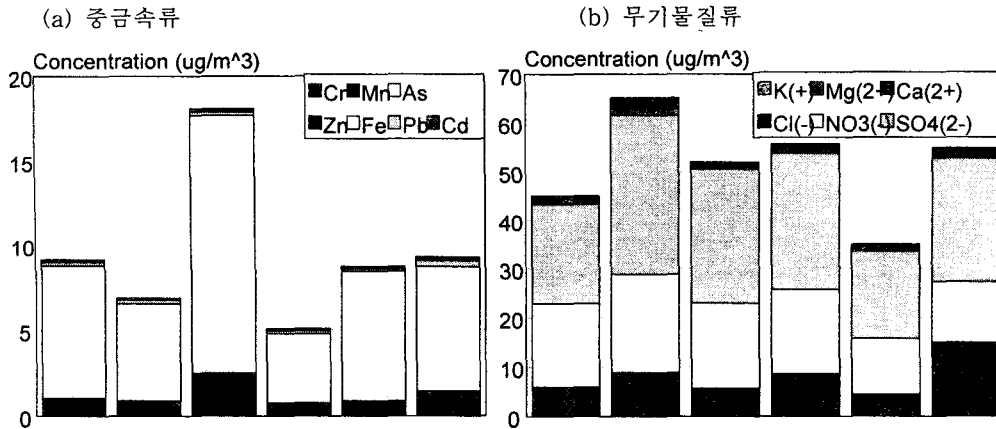
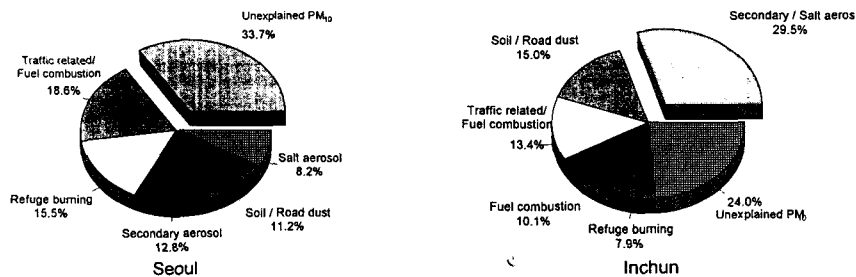


그림 10. 6대 대도시에서 PM10 중 중금속류 및 무기물질류의 오염도 비교

표 3에서 측정된 오염자료를 이용하여 PCA 분석을 한 결과, 서울, 인천, 대전, 광주에서는 5가지 주성분(soil/road dust resuspension, fuel combustion, secondary aerosol, traffic related aerosol and refuse burning)으로, 대구와 부산지역에서는 4개의 주성분(secondary aerosol, traffic related/ fuel combustion aerosol, refuse burning, soil/road dust aerosol)으로 분석되었다. 또한, 서울, 인천, 대전, 대구, 광주, 부산의 각 지역에서 최종적으로 선택된 주성분들에 의해 서울지역은 전체분산의 66.3%, 인천지역은 76%, 대전지역은 82%, 대구지역은 69.2%, 광주지역은 83.8%, 부산지역은 71.8%의 설명력을 갖는 것으로 나타났다. PM10 중 무기물질류의 주 배출원으로서, 서울과 광주는 traffic related aerosol가, 인천 대구 및 부산은 secondary aerosol가, 대전지역은 soil/road dust aerosol이 선택되었다(그림 11).

이상의 연구결과를 바탕으로 우리나라 6대 대도시에서 PM10 중 무기물질류의 주 오염원으로는 교통관련 및 연료 연소 분진 배출원으로 나타났다. 이러한 교통 관련 및 연료 연소 분진 배출원은 인체 발암성 물질로 간주되고 있는 As, Pb, Cd 및 Cr과, 산성우의 주 원인물질로 밝혀진 질산 이온과 황산 이온의 주요 오염원으로 보고되고 있어(Hopke, 1985 ; Thurston과 Spengler, 1985), 대도시 지역에서의 교통 관련 및 연료 연소 분진 배출원의 적극적인 관리를 통한 대기 중 무기물질 오염 저감 정책은 큰 효과를 가져올 것으로 사료된다.



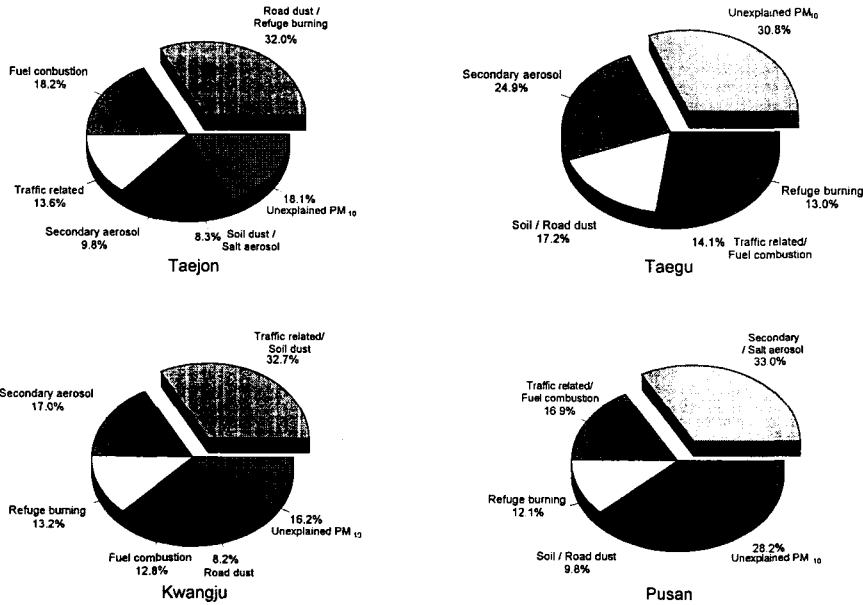


그림 11. PCA에 의한 국내 주요 대도시의 PM10 중 무기물질의 발생원 기여율 비교

## 6. 맺음말

최근 대기오염 문제를 해결하기 위해 정부는 수차에 걸쳐 환경관련법규를 개정하고, 동시에 기술적, 경제적, 행정적 지원과 투자를 크게 확대시키고 있다. 하지만, 이와 같은 노력에도 불구하고 국민들이 느끼는 체감오염은 가중되고 있다. 이러한 원인으로는 대기환경에 대한 기초연구의 부족으로 합리적 규제정책을 수립하지 못하였기 때문이다. 최근 많은 국가들은 대기오염 피해로 인한 생태 및 건강 영향을 최소화하기 위하여, 각종 합리적인 대기오염 관리기술을 도입하고 개발시키고 있다. 따라서, 국내에서도 미세먼지를 저감하기 위해서는 발생원을 규명하고 발생원별 기여도를 추정하고, 한편으로는 발생원별 PM10 성분분석을 통하여 중점 관리해 나가는 대책이 필요하다.

국내 주요 대도시의 경우 자동차의 배기가스가 주요한 미세먼지 발생원으로 추정되지만 황사와 같은 외부환경 요인에 따라 미세먼지의 조성성분은 다양하게 변화될 것으로 예측하고 있다. 따라서 향후 연구에서는 10 $\mu$ m 이하의 미세먼지의 입경별 농도, 화학적 성분, 및 입경에 따른 건강상 영향을 연구해야 할 것이다. 미세먼지에 의한 건강 영향은 먼지의 입경에 따른 물리적 특성에 의한 것 외에도 먼지의 화학적 특성도 중요하다. 미세먼지는 그 입경에 따라 인체 내에 침착되는 정도가 달라지며, 인체 내에 침착된 미세먼지가 인체에 미치는 영향은 미세먼지의 화학적 성분에 따라 달라질 가능성이 내포되어 있다. 따라서 향후에는 미세먼지의 입경별 화학적 성분 분석에 관한 연구가 매우 중요하다. 또한 미세먼지에 의한 인체 유해 영향을 평가하는 데 있어서, 미세먼지로 인한 인체 위해성 평가가 이루어져 다른 오염물질과 위해도 비교가 가능한 실증적인 자료가 제시되어 환경정책 수립에 적용·가능해

야 할 것이다. 또한 미세먼지의 저감을 위한 관리 방안 및 규제 제도의 비용-편익 분석을 통해 보다 효과적인 정책 대안들을 수립해야 할 것이다. 수용방법론에 입각한 대기오염관리 기술은 국민건강과 재산 손실을 최소화시키는 공공복지적인 실용성, 산업체의 경영 손실을 최소화시키는 경제적인 실용성, 대기오염학의 기초연구를 활성화시키는 학문적인 실용성 등을 동시에 충족시킬 수 있는 연구분야이다.

## 참고문헌

- 국립환경연구원. 국내·외 대기환경관련 기준 및 동향. 2000
- 김동술, 미세먼지 주요 배출원의 정량적 추정. 전문가토론회 자료집. 서울대 보건대학원, 2001
- 김동술, 이태정. 입경분류에 입각하여 목표변환 인자분석법을 이용한 수원지역 분진 오염원의 정량적 기여도 추정. 한국대기환경학회지. 1993; 9(1)
- 백성욱, 황승만. 주성분/중회귀 분석을 이용한 대구지역의 대기 중 부유분진의 발생원별 특성평가. 대기보전학회지 1992; 8(3): 179-190
- 이민희, 한의정, 한진석 등. 대기 중 aerosol 동태에 관한 연구. 국립환경연구원보. 1987
- 환경공해연구소, 대기오염물질의 위해성 평가 및 관리기술 개발, 환경부, 1998
- 환경부. 대기환경연보 2001. 환경부 및 국립환경연구원. 2001
- Hernandez, EF martin, and Valero F. statistical forecast models for daily air particulate iron and lead concentration for madrid. atmospheric environment 1992; 26b: 107-116
- Hindy, WC. aerosol technology: properties, behavior and measurement of air-borne particles. inc, USA 1982; 424
- Hopke, P.K. receptor modeling in environmental chmistry. newyork 1985
- John w, SM wall, J ondo, and W. winklmay. models in the size distribution of atmospheric inorganic aerosol . atmospheric environment 1990; 24a(9): 2349-59