

## 1A1) 도시 지역 시정장애 현상의 물리·화학적 특성 Physico-Chemical Characteristics of Visibility Impairment in an Urban Area

김경원·김영준<sup>1)</sup>

경주대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>광주과학기술원, 환경모니터링 신기술연구센터

### 1. 서론

시정장애 현상은 대기오염물질의 화학적 조성, 질량농도, 입경분포, 상대습도 및 대기조건의 변화와 밀접한 관계가 있다. 특히 수도권을 포함한 대도시 시정장애 현상은 주로 인위적으로 발생된 대기오염 물질의 영향이 큰 것으로 보고 되었으며, 입경이  $2.5 \mu\text{m}$  이하인  $\text{PM}_{2.5}$  입자의 물리·화학적 변화가 지배적인 원인 요소인 것으로 분석되었다. 이러한 시정장애 현상의 주요 대기오염 물질들은 인체의 호흡기에 의해 제거되기도 어려울 뿐만 아니라, 우리의 눈으로 쉽게 식별되지 않으며, 이들의 복합작용 및 장·단기 노출에 의한 인체 보건상의 피해도 적지 않은 것으로 보고 되었다. 최근 미세먼지 등 대기오염으로 서울·인천·경기 등 수도권에서 연간 1만1천여 명이 조기 사망하고, 최대 10조원이 넘는 경제적 손실이 발생하고 있다는 연구 결과가 나왔다.

본 연구의 목적은 광주시를 대상으로 4년여 기간동안 지속적인 시정 관측을 통해 이미 알려진 도시지역의 시정장애 현상의 원인 요소뿐만 아니라 자연발생적인 에어로졸 및 황사 폭풍에 의한 시정장애 현상의 물리적, 화학적 특성을 분석하고, 대기오염물질의 지역간 및 장거리 이동에 따른 화학적 조성의 변화와 이에 따른 시정장애의 기여도의 변화를 조사하는 데에 있었다.

### 2. 연구 방법

광주시 도시지역의 지속적인 시정모니터링을 위해 transmissometer, nephelometer, aethalometer의 세 광학계를 이용하여 1999년 5월 23일부터 빛소멸계수(light extinction coefficient), 빛산란계수(light scattering coefficient, 빛흡수계수(light absorption coefficient)를 실시간으로 측정하였다. 광주 도심의 두 개소의 시정관측소에서 실시되었다. 제 1 관측소 (Transmitter site)는 해발 84m 현대백화점 옥상 위에, 제 2관측소 (Receiver site)는 해발 78m 광주지방기상청 옥상 위에 설치되었으며, 두 관측소간의 거리는 약 1.91 km 이었다. 에어로졸 샘플링은 URG사 모델 VAPS-2000J와 R&P사 모델 Partisol -Plus-2025를 사용하여 오전 6시 및 오후 6시에 각각 시작하여 12시간 간격으로 포집되었으며, 포집된 미세먼지( $D_p < 2.5 \mu\text{m}$ ) 및 초대입자( $2.5 < D_p < 10 \mu\text{m}$ ) 샘플은 ICP/AES & MS, TMO, IC 분석방법을 이용하여 각각 원소분석, 탄소분석, 이온분석이 실시되었다. 가스상 물질에 의한 과대평가를 사전에 제거하기 위해서 annular denuder 시스템이 도입되었다. 공중화분 및 황사 현상에 대한 보다 면밀한 분석을 위해 전자현미경(SEM/EDX)을 사용한 개별입자분석을 시행하였으며, 기단의 역궤적 분석을 위해 Hysplit 4.5 모델이, 기단의 흐름 분석을 위해 GrADS(Grid Analysis and Display System)가 사용되었다.

### 3. 결과 및 고찰

도시지역과 농촌지역간의 시정장애현상은 뚜렷한 차이를 나타내었다. 그림 1에서와 같이 미세먼지의 화학적 조성에 대한 각 화합물질의 기여도 분석 결과 광주시에서는 황산암모늄이 가장 컸으며, 안면도에서는 유기탄소입자가 가장 컸다. 모든 입자에 의한 산란의 합을 분석한 결과, 광주시에서는 총 빛소멸계수의 52.8~81.3 % 범위 내로 분석되었으나, 안면도에서는 72.1~94.2%로 비교적 안면도에서 입자에 의한 산란이 컸음을 알 수 있었다. 원소탄소 입자 및  $\text{NO}_2$  가스에 의한 흡수현상의 경우 광주시에서는 총 빛소멸계수의 14.5~34.8%를 나타내었으며, 안면도에서는 1.1~6.8%를 나타내었다.

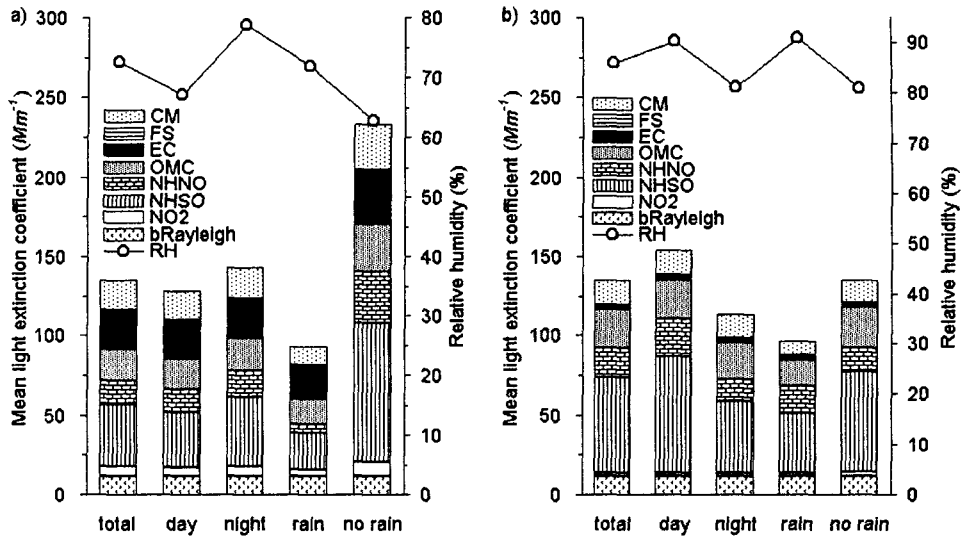


Fig. 1. Variation of total light extinction budgets for aerosol components proposed by the IMPROVE program during the intensive monitoring period. a): Kwangju, b): Anmyon

봄철 한국에서는 중국에서 발생한 황사폭풍에 의해 시정이 수 일간 심각하게 악화되는 현상이 발생하였다. 표 1에 관측기간 동안 기단의 유입경로에 따른 에어로졸의 물리·화학적 특성을 요약하였다. 황사 에어로졸은

Table 1. Chemical composition and optical properties of aerosol observed at Kwangju.

	Fine	Coarse	PM10	Fine particle				Coarse particle				PM10				$\omega$		
				EC	OC	nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	FS	nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sea-salt	MD	BCD	RH	$b_{ext}$	$b_{ext}$		$b_{abs}$	$\sigma_{ext,PM10}$
	$\mu\text{g m}^{-3}$										%	$\text{M m}^{-1}$		$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$				
CC <sup>a</sup>	11.9	35.6	47.6	1.4	3.0	4.9	1.5	8.0	1.9	1.2	26.3	N/A	34.0	112	89	17	2.4	0.84
NK <sup>b</sup>	23.6	30.3	53.9	3.1	8.7	4.4	2.4	4.8	2.0	0.3	26.1	N/A	36.4	217	168	31	4.0	0.85
SM <sup>c</sup>	22.0	15.0	37.0	3.1	9.1	4.8	2.2	3.1	2.3	0.6	10.6	N/A	66.5	388	263	42	11.6	0.86
SL <sup>d</sup>	26.0	9.0	35.0	3.2	9.8	9.3	3.3	3.1	3.3	0.3	7.2	N/A	51.8	305	235	37	9.5	0.86
1 <sup>st</sup> CD <sup>e</sup>	38.7	246.6	285.3	1.7	4.3	4.7	5.4	37.7	6.8	7.3	213.1	2.3	42.4	1082	952	71	4.1	0.93
2 <sup>nd</sup> CD <sup>e</sup>	37.4	93.0	130.4	2.3	7.3	11.2	5.6	15.4	4.3	2.3	72.3	1.5	57.1	648	571	62	5.0	0.90
NKD <sup>f</sup>	45.4	82.2	127.6	2.5	13.6	6.1	2.4	24.2	1.9	1.6	70.3	2.0	36.5	515	444	83	4.0	0.84

<sup>a</sup>: CC (Clean Continental): Clean condition perturbed by continental aerosol, two events (3/26-D, 3/26-N).

<sup>b</sup>: NK (Northwestern China/Korea): Mixture of continental and regional aerosols, two events (4/4-D, 4/22-D).

<sup>c</sup>: SM (Southern Marine): Mixture of local and marine aerosols, four events (4/7-N, 4/8-D, 4/28-D, 5/4-N).

<sup>d</sup>: SL (Stagnant Local): Hazy condition impacted by local pollution, two events (4/8-N, 4/10-D).

<sup>e</sup>: CD (Continental with Asian Dust): Asian Dust particles originated from northwestern Chinese desert regions.

1<sup>st</sup> CD: two events (3/22-N, 3/23-D).

2<sup>nd</sup> CD: four events (4/10-N, 4/11-D, 4/12-N, 4/13-D).

<sup>f</sup>: NKD (Northeastern China/Korea with Asian Dust): Mixture of Asian Dust particles originated from northeastern Chinese sandy areas and regional aerosol, one event (4/25-D).

기단의 이동경로와 발원지에 따라 다르게 나타났다. 중국 북서부 사막 지역에서 발생한 황사폭풍의 경우 미세입자의 양이 급격하게 증가하는 일반적인 황사 에어로졸의 특성을 나타냈으나, 중국 북서부 사막 지역에서 발생한 황사 에어로졸은 황산염 및 유기탄소 입자의 농도가 증가에 기인한 장거리 이동되는 대기오염

물질들의 영향을 받았고, 중국 북동부 황토 모래 지역에서 발생하여 한반도를 거쳐 내려온 황사폭풍 사례에서는 원소탄소 및 유기탄소의 질량 농도가 증가하였다.

황사폭풍에 의한 심각한 시정장애 현상이 다량의 조대입자의 증가에 기인하는데, 특히 이 과정에서 미세입자(PM<sub>2.5</sub>) 영역의 황산염 및 원소탄소 입자가 물리적으로 응집 또는 흡착되어 조대입자영역으로 이동함을 밝혀내었다. 그림 2는 aethalometer로 측정된 BC<sub>a</sub>(black carbon)의 광학적 불확실성을 고려한 조대입자 및 미세입자 영역의 실제 BC의 농도 범위를 나타낸다. 1차 황사사례에서는 조대입자 영역의 BC의 농도가 불확실성의 범위 내에 있었으나, 2, 3차에서는 모두 불확실성의 영향이 적은 것으로 분석되어, 원소탄소 입자의 물리적 응집을 밝혀내었다.

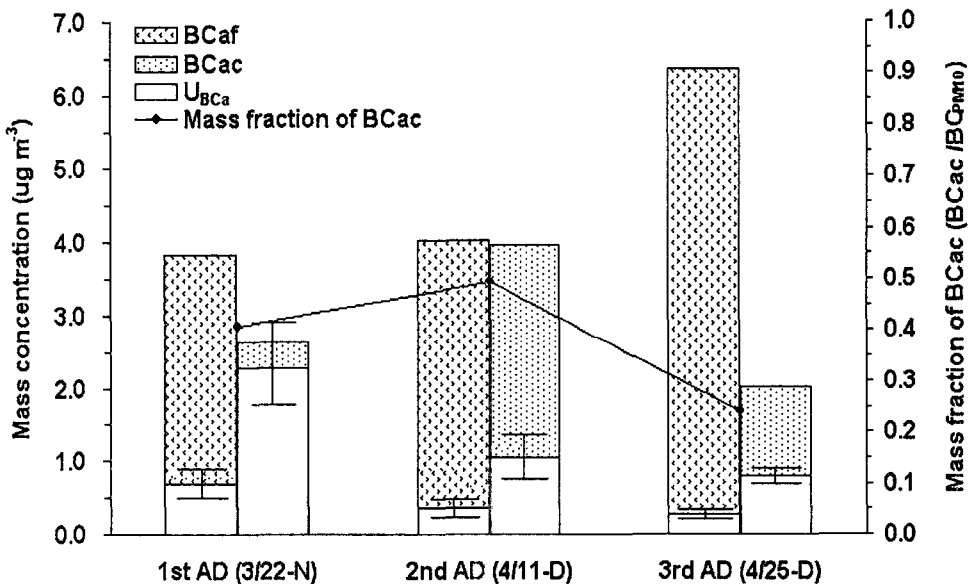


Fig. 2. Variation of Aethalometer-based BC<sub>a</sub> and mass fraction for BC<sub>c</sub> during the three Asian Dust storm event periods. Each bar represents uncertainty bound(U<sub>BCa</sub>) of possible error in BC due to dust particles.

또한 IMPROVE에서 개발한 빛소멸관계식은 측정된 빛소멸계수와 좋지 않은 상관성을 나타내었고, 이를 보완하기 위하여, 조대입자 중의 황산암모늄, 미네랄, 해염 입자의 질량에 대한 산란효율이 각각 1.0, 0.77, 0.4 m<sup>2</sup>/g로 결정되었다. 개선된 빛소멸관계식을 식 1)에 나타내었다.

$$b_{ext}(Mm^{-1}) = 3f(RH)\{[NH_4SO_4] + [NH_4NO_3]\} + 4[OMC] + 10[EC] + [FS] + b_{scat,coarse} + b_{NO_2} + b_{dust} + b_{Ray}$$

$$b_{scat,coarse}(Mm^{-1}) = 0.4[SS] + 1.0[NH_4SO_4] + 0.77[MD] \quad (RH \leq 40\%) \quad 1)$$

집중관측 기간 중 공중화분은 2001년 5월에 관측되었다. 조대입자 영역에서 발견된 평균 화분개수 농도는 218.5±160.2 m<sup>-3</sup>로 미세입자 영역의 평균값인 0.9±0.8 m<sup>-3</sup>보다 높았다. 공중화분의 비산이 가장 심했던 16일 및 19일의 평균 화분개수 농도는 각각 321.6 및 376.7 m<sup>-3</sup>이었으며, 그 결과 PM<sub>10</sub> 입자에 대한 미세입자의 질량농도 비율이 0.31±0.26 으로 낮아졌다. 그림 3에서와 같이 관측기간 동안의 공중화분의 빛산란계수에 대한 기여도를 분석한 결과를 토대로 공중화분의 개수 산란효율이 0.12±0.03(×10<sup>-6</sup>) m<sup>2</sup>으로 계산되었다. 공중화분이 관측된 사례에 대하여 PM<sub>10</sub>영역에서의 공중화분에 의한 시정장애의 기여도는 총 빛소

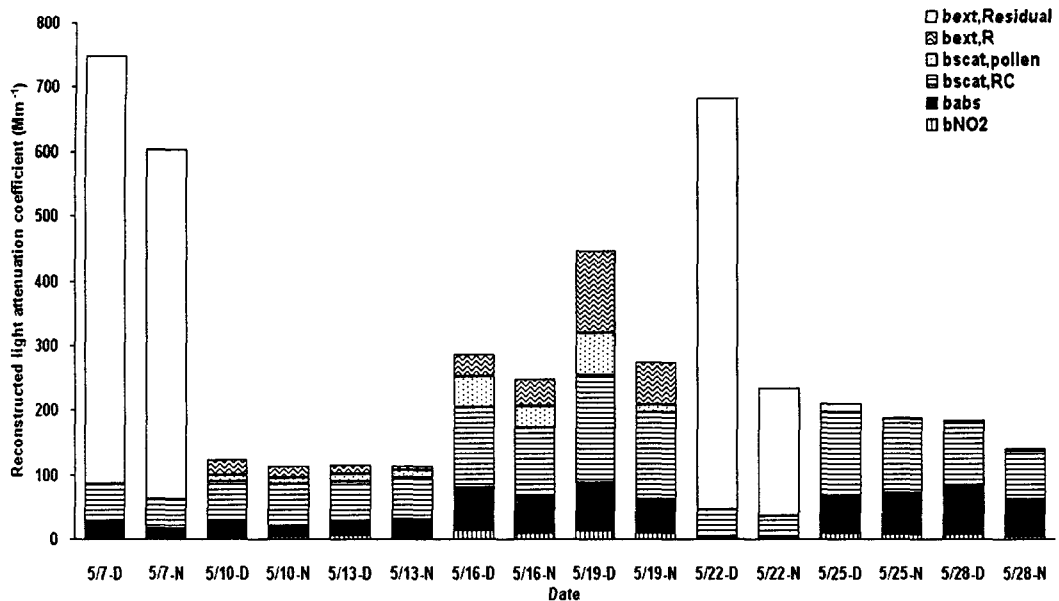


Fig. 3. Temporal variation of light scattering coefficient for pollen( $b_{scat,pollen}$ ) and reconstructed aerosol ( $b_{scat,RC}$ ) in the PM10 mode including residue of light extinction coefficient( $b_{ext,R}$ ) as well as light absorption coefficient for elemental carbon and NO<sub>2</sub> gas.

멸계수의 약 10%를 나타내었으며, TSP영역에 존재하는 공중화분을 고려할 경우 기여도는 약 25%까지 상승할 것으로 추정되었다.

2001년 3월 22일부터 2002년 2월 25일까지 매 6일 마다 정서관측을 실시하였다. 광주시의 대기 조건은 발원지 및 이동경로 별로 특정사례를 포함하여 총 13개로 세분화되었다. 정서관측 기간동안 총 사례에 대한 대륙, 해양, 국내로부터 발원한 기단의 빈도분율은 각각 64.0, 28.7, 7.3%로 분석되었다. 광주시의 심각한 시정장애는 기단이 아시아 대륙에서 발원했었던 황사폭풍 및 생체소각(biomass burning) 사례에서 주로 발생하였다. 미세먼자, 조대입자, 황산염, 질산염, 유기탄소, 원소탄소 입자에 대한 연평균 질량농도는 각각  $22.8 \pm 13.4$ ,  $29.8 \pm 37.3$ ,  $4.4 \pm 3.3$ ,  $2.2 \pm 1.6$ ,  $6.7 \pm 4.5$ ,  $2.5 \pm 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었으며, 연평균미세입자의 질량농도는 미국의 대기환경기준인  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높았다. 황산암모늄 입자가 시정장애의 가장 큰 영향을 미쳤으며, 미세탄소입자의 기여도는 약 39.4%를 차지하였다. 관측기간 동안의 대기조건에 따른 에어로졸의 물리·화학적 특성을 표 2에 요약하였다.

Table 2. Measurement parameters for chemical composition by atmospheric condition type and haze level at Kwangju during the 2001 to 2002 RMP.

Atmospheric condition type	Haze level (#)	Fine	Coarse	PM10	Fines particle			M <sub>r</sub>	C <sub>r</sub>			
					SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	OC			EC	BC	
					μg m <sup>-3</sup>			(Fine/PM <sub>10</sub> )	(OC/EC)			
S	C(2)	5.8 ± 6.6	7.6 ± 10.5	13.5 ± 3.9	1.1 ± 1.4	0.6 ± 0.7	1.9 ± 2.0	0.8 ± 0.8	0.9 ± 1.1	0.5 ± 0.6	2.2 ± 0.4	
	M(5)	22.3 ± 5.9	10.9 ± 10.9	33.2 ± 33.2	6.2 ± 6.2	2.5 ± 2.5	7.7 ± 7.7	2.9 ± 2.9	3.6 ± 3.6	0.7 ± 0.7	2.6 ± 2.6	
	H(1)	27.6	22.3	49.9	4.0	1.9	13.1	3.8	4.7	0.6	3.4	
	avg.	18.9 ± 4.5	11.5 ± 10.7	30.4 ± 18.5	4.7 ± 3.8	1.9 ± 1.6	6.9 ± 4.9	2.5 ± 1.8	3.1 ± 2.4	0.6 ± 0.7	2.8 ± 1.5	
CD	C(4)	7.3 ± 2.4	30.6 ± 15.9	37.9 ± 13.5	1.3 ± 0.6	0.7 ± 0.1	2.3 ± 0.9	1.0 ± 0.7	1.9 ± 0.9	0.2 ± 0.2	2.5 ± 0.5	
	M(9)	21.3 ± 5.3	26.4 ± 13.5	47.6 ± 16.9	4.4 ± 1.3	2.1 ± 0.5	6.9 ± 2.4	2.8 ± 0.7	3.7 ± 1.1	0.5 ± 0.1	2.5 ± 0.5	
	H(4)	40.2 ± 17.9	38.6 ± 18.9	78.8 ± 28.2	7.1 ± 5.5	4.0 ± 1.8	13.6 ± 5.5	4.9 ± 1.6	5.8 ± 1.5	0.5 ± 0.2	2.7 ± 0.4	
	avg.	23.0 ± 8.6	35.1 ± 16.1	58.2 ± 19.5	4.6 ± 2.5	2.2 ± 0.8	7.5 ± 2.9	2.8 ± 1.0	3.8 ± 1.2	0.4 ± 0.2	2.7 ± 0.5	
MD	C(18)	6.0 ± 2.7	20.7 ± 17.4	26.7 ± 17.5	1.0 ± 0.4	0.4 ± 0.3	2.0 ± 1.1	1.0 ± 0.6	1.1 ± 0.7	0.3 ± 0.2	2.1 ± 0.5	
	M(14)	15.8 ± 5.9	17.1 ± 12.3	32.9 ± 15.3	2.8 ± 1.6	1.5 ± 0.9	5.5 ± 2.7	2.7 ± 1.3	2.9 ± 1.6	0.5 ± 0.2	2.1 ± 0.7	
	H(4)	28.7 ± 12.1	21.1 ± 27.1	49.8 ± 38.9	8.0 ± 2.4	3.4 ± 1.6	9.3 ± 3.2	3.2 ± 0.5	3.4 ± 1.1	0.7 ± 0.2	2.9 ± 0.6	
	avg.	12.3 ± 6.9	19.3 ± 19.0	31.7 ± 23.9	2.4 ± 1.5	1.2 ± 0.9	4.2 ± 2.3	1.9 ± 0.8	2.1 ± 1.1	0.4 ± 0.2	2.2 ± 0.6	
CMD	C(13)	9.1 ± 3.2	27.4 ± 14.5	36.5 ± 15.1	1.9 ± 1.6	1.0 ± 0.4	2.8 ± 1.1	1.3 ± 0.5	2.0 ± 0.8	0.3 ± 0.1	2.2 ± 0.5	
	M(3)	18.8 ± 5.7	25.8 ± 22.4	44.6 ± 23.8	4.1 ± 2.1	2.0 ± 0.8	6.0 ± 2.1	2.7 ± 1.5	4.0 ± 1.4	0.5 ± 0.2	2.6 ± 0.8	
	H(17)	33.5 ± 6.8	29.5 ± 17.0	63.0 ± 19.3	7.6 ± 1.5	3.6 ± 1.2	13.3 ± 2.4	3.7 ± 1.3	5.7 ± 1.1	0.6 ± 0.2	2.9 ± 0.6	
	avg.	20.7 ± 5.2	27.1 ± 18.0	47.9 ± 19.4	4.6 ± 1.7	2.3 ± 0.8	7.3 ± 1.9	2.7 ± 1.1	4.0 ± 1.1	0.4 ± 0.1	2.5 ± 0.6	
JMD	C(2)	5.8 ± 0.6	24.8 ± 8.6	30.5 ± 9.2	1.1 ± 0.2	0.5 ± 0.1	1.9 ± 0.4	0.7 ± 0.2	0.6 ± 0.0	0.2 ± 0.0	2.7 ± 0.2	
	M(3)	16.4 ± 5.1	15.7 ± 12.8	32.2 ± 17.0	4.7 ± 3.9	1.7 ± 0.1	4.9 ± 1.7	1.6 ± 0.6	2.2 ± 1.6	0.6 ± 0.3	3.0 ± 0.1	
	avg.	12.2 ± 2.9	19.3 ± 10.7	31.5 ± 13.1	3.3 ± 2.1	1.2 ± 0.1	3.7 ± 1.0	1.3 ± 0.4	1.5 ± 0.8	0.4 ± 0.1	2.9 ± 0.2	
	AD	H(1)	45.4	122.2	167.6	5.1	2.4	13.1	2.5	6.3	0.3	5.3
AMD	H(6)	37.8 ± 7.2	144.2 ± 107.9	182.1 ± 112.3	10.4 ± 4.1	5.5 ± 1.5	6.3 ± 1.8	2.1 ± 0.6	4.7 ± 1.3	0.2 ± 0.1	3.1 ± 0.7	
	avg.	38.9 ± 8.1	141.1 ± 106.2	180.0 ± 110.1	9.6 ± 5.2	5.1 ± 1.8	7.3 ± 2.3	2.1 ± 0.8	5.0 ± 1.5	0.2 ± 0.1	3.5 ± 0.8	
	BS	H(1)	63.3	5.3	68.6	10.1	5.4	25.1	5.9	6.1	0.9	4.3
BCMD	H(6)	44.1 ± 13.1	23.7 ± 18.3	67.8 ± 20.6	8.3 ± 2.0	4.7 ± 1.8	13.9 ± 6.6	4.1 ± 0.8	5.6 ± 1.2	0.7 ± 0.2	3.3 ± 1.1	
	BJMD	H(1)	54.2	2.4	56.6	9.1	4.8	20.6	4.1	7.2	1.0	5.0
PS	avg.	47.8 ± 15.2	18.7 ± 17.1	66.5 ± 21.9	8.7 ± 2.1	4.8 ± 1.9	16.1 ± 6.9	4.3 ± 0.9	5.8 ± 1.4	0.7 ± 0.2	3.7 ± 1.1	
	FMD	M(2)	30.2 ± 3.4	97.4 ± 60.0	127.7 ± 63.4	4.2 ± 0.7	3.8 ± 0.8	9.1 ± 2.5	4.2 ± 0.5	6.3 ± 0.6	0.3 ± 0.1	1.4 ± 0.2
	PCMD	C(1)	15.7	15.0	30.7	3.8	2.1	3.7	2.4	2.7	0.5	1.4
PCMD	C(3)	14.3 ± 0.6	12.6 ± 5.8	26.9 ± 6.1	3.1 ± 0.5	1.7 ± 0.7	4.5 ± 0.6	1.5 ± 0.4	2.0 ± 0.5	0.6 ± 0.1	2.4 ± 0.6	
	avg.	19.8 ± 2.0	41.3 ± 32.9	61.1 ± 34.7	3.6 ± 0.6	2.5 ± 0.7	5.9 ± 1.5	2.5 ± 0.4	3.5 ± 0.6	0.3 ± 0.1	1.9 ± 0.4	
total avg.		22.8 ± 13.4	29.8 ± 37.3	50.6 ± 43.2	4.4 ± 3.3	2.2 ± 1.6	6.7 ± 4.5	2.5 ± 1.5	3.5 ± 1.9	0.5 ± 0.2	2.6 ± 0.8	

CD(Continental domestic): Atmospheric condition affected by continental and domestic aerosol  
 MD(Marine domestic): Atmospheric condition affected by marine and domestic aerosol  
 CMD(Continental marine domestic): Atmospheric condition affected by continental, marine and domestic aerosol  
 JMD(Japanese marine domestic): Atmospheric condition affected by Japanese, marine and domestic aerosol  
 A(Asian Dust storm): Atmospheric condition affected during the Asian Dust event  
 B(Biomass burning): Atmospheric condition affected during the biomass burning event  
 P(Airborne pollen): Atmospheric condition affected during the airborne pollen event

## 사 사

본 연구는 광주과학기술원 환경모니터링신기술연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금, 두뇌한국 BK21사업 지원금에 의한 것입니다.

## 참 고 문 헌

- Kim K.W., Y.J. Kim, and S.J. Oh (2001) Visibility impairment during Yellow Sand periods in the urban atmosphere of Kwangju, Korea, *Atmos. Env.*, 35, 5157-5167.
- Kim K.W., Z. He, and Y.J. Kim, Physico-chemical characteristics and radiative properties of Asian Dust particles observed at Kwangju, Korea during the 2001 ACE-Asia IOP, *J. Geophys. Res.*, in press (March 15, 2004).
- Kim K.W. (2004) Physico-chemical characteristics of visibility impairment in an urban area & Development of a remote digital vision visibility monitor, Ph.D. dissertation, K-JIST.