

국립공원 지역 시정장애 현상의 물리·화학적 특성

Physico-Chemical Characteristics of Visibility Impairment in a National Park Area

김 경 원*

경주대학교 환경에너지학과

(2009년 4월 8일 접수, 2009년 6월 15일 수정, 2009년 7월 23일 채택)

Kyung Won Kim*

Department of Environmental and Energy Science Gyeongju University

(Received 8 April 2009, revised 15 June 2009, accepted 23 July 2009)

Abstract

National parks provide recreation, health, and science to human being. The provision of beautiful landscape view of the national park improves an economic and social phase of a nation. However, visibility impairment frequently occurred in the national park area of Gyeongju. The purpose of this study is to investigate the physical and the chemical characteristics of visibility reduction observed at the national park area of Gyeongju. Optical, chemical, meteorological characteristics and scenic monitoring were performed at the visibility monitoring station of Gyeongju University located at the Seoak section of Gyeongju national park from April 28 to May 9, 2008. Light extinction, light scattering, and light absorption coefficients were continuously measured using a transmissometer, a nephelometer, and an aethalometer, respectively. In order to investigate the impact of aerosol chemistry on visibility impairment, size-resolved aerosols were collected at intervals of 2-hour (from 8 A.M. to 6 P.M.) and 14-hour (from 6 P.M. to 8 A.M.) interval each sampling day. The average light extinction coefficient and the average visual range were measured to be $270 \pm 135 \text{ Mm}^{-1}$ and $14.5 \pm 6.3 \text{ km}$ during the intensive monitoring period, respectively. It was revealed that sulfate particle was the largest contributor to the light extinction under hazy condition. Organic mass accounted for about 26% of the average light extinction. The mass extinction efficiencies for $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$, and PM_{10} were estimated to be 9.0, 4.7, and $2.7 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ under the consideration of water growth function of hygroscopic aerosols, respectively.

Key words : Visibility, Particulate matter, Light extinction, National park

1. 서 론

국립공원은 생태계, 자연 및 문화경관을 대표할 수 있는 지역 중의 하나이다. 세계의 각국은 국립공원에

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)54-770-5390, E-mail : kwkim@gnu.ac.kr

대한 지속가능한 이용을 도모하기 위하여 국가적 차원에서 해당 지역의 보호를 지정하여 운영 및 관리하고 있다. 국민들에게 보건, 학습, 휴양 등을 제공할 수 있는 국립공원은 각국의 뛰어난 명승지로서 훌륭한 사적 등 문화유산을 개발 및 보호해야 하는 대표적인 관광지로 운영되기도 한다. 우리나라에서는 1967년 최초로 국립공원관리공단이 지리산을 국립공원으로 지정한 이후 현재 20개 소의 국립공원을 지정하여 관리하고 있다. 국립공원의 가치 중의 하나인 아름다운 경관의 제공은 지역의 경제적 및 사회적 위상을 향상시키는 매개체로서 공공에게 긍정적으로 인식되어 왔다. 광활한 전경, 쾌적한 환경을 제공하는 미국의 그랜드 캐년(Grand Canyon), 캐나다의 재스퍼(Jasper), 스위스의 알프스(Alpine), 스웨덴의 아비스코(Abisko) 일본의 세토나이카이 등 각국의 국립공원들은 전 세계의 관광객들에게 방문하고 싶은 욕구를 불러일으키기에 충분히 훌륭한 경관을 지니고 있다.

그러나 인간의 산업활동으로 인한 대기오염의 영향은 도시로부터 수십~수천 km 떨어진 국립공원에서 시정장애(visibility impairment) 현상으로 관측된 바가 있다(Park *et al.*, 2006; Hand *et al.*, 2002; Mazurek *et al.*, 1997). 일반적으로 국립공원 지역의 대기오염 배출원은 도시지역과는 동일하지 않은 경향을 나타낸다(Chow *et al.*, 2004). 미국의 IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments)는 1987년 이후 국립공원 지역에서 시정감소를 유발시키는 대기오염물질에 대한 조사를 시작한 이래로 국립공원 지역에서의 시정장애 현상에 대한 연구가 활성화되었다. 우리나라에서도 국립공원 지역에서 관측된 에어로졸의 물리적 및 화학적 특성에 관한 연구가 수행된 바 있으며(Kim *et al.*, 2007), 도시지역에서 관측된 에어로졸과의 차이점에 대하여 분석된 바 있다(Kim *et al.*, 2008). 과거의 연구는 도시지역에서 관측되는 대기오염물질의 물리적 및 화학적 특성을 파악하기 위하여 비도시지역에서 관측된 대기오염물질의 특성에 대하여 조사하는 과정으로서, 그 목적이 대도시의 악화된 대기질을 개선시키기 위한 기반 자료의 구축에 집중되었다. 이러한 연구의 결과들로부터 대기오염물질의 지역 간 이동의 가능성이 암시되고, 이로 인하여 비도시지역의 대기질의 악화로 확대됨에 따라 국립공원과 같이 보호 받아야 하는 지역

에 대한 대기오염 현황의 파악이 대두되었다. 그럼에도 불구하고 국립공원 지역에서 발생된 시정장애 현상에 대한 국내 연구는 수행된 바가 매우 미흡하였다.

우리나라의 국립공원 중 경주 국립공원은 고도보존법에 의하여 개발이 규제되는 지역적 특성을 지니고 있으며, 대구광역시, 울산광역시와 포항시 등 광역시와 공단지역으로 둘러싸여 있고 국립공원으로 유입되는 기단의 주요 이동경로에 대도시가 위치하고 있어서 대기오염물질의 지역 간 이동이 조사될 수 있는 지역이라 할 수 있다. 한반도의 동남쪽에 위치한 경주 국립공원 지역의 대기질의 특성을 조사하기 위하여, 본 연구에서는 시정관측을 위한 물리적, 광학적, 화학적 및 영상학적 관측을 도입하였다. 과거에 수행되었던 시정변화에 대한 연구에서는 PM_{1.0} 입자에 대한 분석이 수행된 바 없었으나, 본 연구에서는 시정장애 유발 에어로졸의 입경분포별 특성을 보다 자세하게 분석하기 위하여 에어로졸을 입경이 1.0 μm 이하인 PM_{1.0}, 입경이 2.5 μm 이하인 PM_{2.5}, 입경이 2.5 μm 이상 10 μm 이하인 조대입자(coarse particles) 영역으로 분별하여 채집하였다. 본 연구의 목적은 에어로졸의 입경분포별 물리적 특성, 화학적 조성, 광학적 성질을 토대로 경주 국립공원 지역의 시정장애 현상에 대한 물리적 및 화학적 특성을 분석하는 데에 있다.

2. 측정 및 분석 방법

시정변화 관측에 사용되는 측정 장치는 광학적, 화학적, 기상학적 및 영상학적 시스템으로 구성될 수 있다. 가시광선 광원의 광소멸량(light extinction)을 정량함으로써 산출되는 광학적 시정(optical visibility) 관측과 인간의 눈에 의하여 인식되는 체감시정(perceived visibility) 관측은 시정변화를 유도하는 대기 중의 에어로졸의 공간적 분포가 균일한 조건에서 측정될 수 있도록 구성되는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 영상학적 체감시정 관측이 시행되는 경로에서 광학적 시정을 측정할 수 있도록 각 측정 장치를 설치하였으며, 광학적 측정이 운영되는 경로에 에어로졸 포집장치가 위치하도록 설치하였다. 경주시 시정관측소는 국립공원 서악지구 해발고도(above sea

level) 78 m에 위치한 경주대학교 공학관 옥상 위에 위치하고 있다. 서악지구는 경주시 시내로부터 약 5 km 떨어진 서쪽에 위치하고 있으며, 시정관측소의 주변은 소나무, 잣나무 등 침엽수 군락으로 둘러싸여 있고, 인근의 토지 이용은 대부분 농지로서 대기오염 물질을 배출시킬 수 있는 인위적 배출원이 극히 적다. 시정관측소는 광감쇄계수(light attenuation coefficient)를 측정하는 광학적 측정지와 에어로졸을 포집하는 시정관측소로 구성되어 있다. 시정관측소에는 OPTEC사 LPV-3 transmissometer의 수광부(receiver unit)를 설치하였고, 투광부(transmitter unit)는 국립공원 서악지구를 가로지르는 개광경로(optical open path)를 거쳐 수광부로부터 약 920 m 떨어진 북서쪽에 설치하였다. 본문에서 광감쇄는 광소멸, 광산란 및 광흡수에 대한 총칭의 의미로 표기하였다. 집중관측 기간 동안 기상변화 및 외부 환경으로부터 광학적 신호의 영향을 차단하기 위하여 측정 장치들을 냉·난방 시설이 도입된 시정관측소의 컨테이너 내부에 설치하였다. 체감시정 영상은 Canon사 EOS-40D 디지털 카메라와 TC-80N3 셔터릴리즈(shutter release)를 이용하여 집중관측 기간 동안 10분 간격으로 체감시정을 촬영하였다. 체감시정측정소에 설치된 디지털 카메라시스템은 태양광에 의한 영상의 직접산란(direct scattering)을 최소화하며 원거리의 피사체를 확보할 수 있는 방향으로 설정하였으며, 디지털 영상은 국립공원 서악지구 해발고도 321 m 옥너봉을 중심으로 transmissometer의 광경로를 가로지르도록 남서 방향의 단석산을 포함하는 전경으로 촬영하였다. 광소멸계수(light extinction coefficient: b_{ext})는 transmissometer에 의하여 1분 간격으로 측정하였으며, 광산란계수(light scattering coefficient: b_{scat})는 NGN-2 nephelometer에 의하여 2분 간격으로 개광경로에서 측정하였다. 광흡수계수(light absorption coefficient: b_{abs})는 Magee Scientific사 AE-31 aethalometer에 의하여 1분 간격으로 측정하였다. Transmissometer의 검정은 MODTRAN 모델을 활용하여 개선된 ND-filter 방법으로 수행하였으며(Kim and Kim, 2005a), nephelometer는 purge gas와 span gas를 사용하여 압검정(zero calibration) 및 범위검정(span calibration)을 실시하였고, aethalometer는 총 7개의 파장 영역(370, 470, 520, 590, 660, 880, and 950 nm)에서 일정 간격으로 자동시스템 검정을 수행하였다. 본 연구에

서 b_{abs} 는 흑탄소(black carbon) 이외의 다른 입자에 의한 광흡수 영향이 상대적으로 적은 880 nm의 파장 영역에서 얻어진 흑탄소의 측정값을 사용하였으며, 550 nm 파장 영역에서의 광흡수계수를 산출하기 위하여 알려진 단위질량당 흡수효율 계수인 $10 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 을 적용하였다(Watson, 2002; Malm *et al.*, 1996; Parungo *et al.*, 1994).

시정 집중관측 기간 동안 URG사 모델 VAPS 2000I 에어로졸 샘플러와 모델 URG-2000-30EHB $\text{PM}_{1.0}$ 사이클론 및 모델 URG-2000-30EH $\text{PM}_{2.5}$ 사이클론 샘플러를 이용하여 초미세입자($D_p < 1.0 \mu\text{m}$), 미세입자($D_p < 2.5 \mu\text{m}$) 및 조대입자($2.5 < D_p < 10 \mu\text{m}$)를 각각 채집하였다. 집중관측 기간 동안 대기 중 에어로졸을 2시간(오전 8시~오후 6시) 및 14시간(오후 6시~오전 8시) 간격의 준실시간(semi-continuous) 간격으로 필터에 채집하였다. 채집된 에어로졸은 PIXE(proton induced X-ray emission) 분석법, 이온크로마토그래피법(ion chromatography) 및 열·광학적 투과(thermal optical transmittance: TOT) 분석법을 이용하여 원소 분석, 이온분석 및 탄소분석을 각각 수행하였다. 원소 분석에서는 PIXE 분석에서의 장애유발 요소를 줄이기 위하여 Whatman사 47 mm-0.4 μm -pore polycarbonate 필터를 사용하였다. PIXE 분석은 서울대학교 기초과학공동기기원의 정전가속기연구소에서 운영 중인 Tandem Van de Graaff 정전형 양성자가속기로부터 이온원(ion beam)을 획득하여 Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Se, Cd, Pb의 15개 항목을 정량하였다. 이온분석은 경주대학교 대기환경연구실에서 GAT(Gamma Analysen technik GmbH)사 model DKK-TOA IA-300 이온크로마토그래피를 사용하여 수행하였으며, Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 이온을 정량하였다. 또한 242 mm 및 150 mm annular denuder를 사용하여 가스상 물질이 필터에 포집되기 전에 제거하였다. 산성가스(SO_2 , HCl)의 제거를 위해서는 1% Na_2CO_3 +1% glycerin+($\text{H}_2\text{O}+\text{CH}_3\text{OH}$)의 함침액을 사용하였으며, 염기성가스(NH_3)의 제거를 위해서는 1% citric acid+1% glycerin+($\text{H}_2\text{O}+\text{CH}_3\text{OH}$)의 함침액을 사용하였다. 유기탄소와 원소탄소(organic carbon & elemental carbon: OC & EC)는 NIOSH-5040(National Institute of Occupational Safety and Health) 프로토콜을 기초로 한 TOT법으로 분석하였다. 기상요소는 기상청에 의하여 측정된 기온, 풍향,

Table 1. Measurement condition for visibility monitoring during the intensive monitoring period.

Monitoring type	Instrument	Particle size	Measurement parameter	Measurement and analytical method
Optical	LPV-3 transmissometer	$D_p > 0 \mu\text{m}$	b_{ext}	Light extinction
	NGN-2 nephelometer		b_{scat}	Light scattering
	AE-31 aethalometer	$D_p < 2.5 \mu\text{m}$ or $D_p > 0 \mu\text{m}$	b_{abs}	Light absorption
Chemical	URG-2000-30EHB PM _{1.0}	$D_p < 1.0 \mu\text{m}$	PM _{1.0}	Gravimetric analysis (mass), PIXE analysis (Al~Pb) IC analysis (NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , etc), TOT analysis (OC/EC)
	URG VAPS 2000J/ URG-2000-30EH PM _{2.5}	$D_p < 2.5 \mu\text{m}$	PM _{2.5}	
	URG VAPS 2000J	$2.5 < D_p < 10 \mu\text{m}$	CM	
Scenic	Canon EOS-40D		ΔD	Color difference

풍속, 상대습도의 자료를 사용하였으며, Onset사 H21 측정기를 이용하여 현장에서 상대습도와 기온을 비교 측정하였다. 본 연구에서 도입된 측정 장비 및 측정 항목에 관한 사항을 표 1에 요약하였다.

3. 결과 및 고찰

시정의 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 광학적 측정을 수행하였다. 2008년 4월 28일부터 5월 9일까지 시정 집중관측 기간 관측된 광소멸계수의 시계열 변화를 그림 1에 나타내었다. 국립공원 지역의 시정거리가 약 10km 미만으로 감소되었던 4월 28일부터 광학적, 화학적, 기상학적 및 영상학적 관측을 동시에 수행하였다. 광소멸계수는 4월 28일 오전 약 600 Mm^{-1} 로 측정되었고 뚜렷한 일변화 경향을 나타내며 5월 1일까지 약 400 Mm^{-1} 로 점진적으로 감소하였다. 그러나 5월 2일 오전부터 광소멸계수가 급격하게 상승하여 5월 4일에는 $1,066 \text{ Mm}^{-1}$ 까지 증가되었다. 5월 4일 오전의 시정거리는 5km 이하로 낮아져 저시정(low visibility) 상태를 나타내었으나 오후부터 강우가 시작되었다. 5월 4일 오후부터 5월 5일 오전 사이에 소량의 강우로 인하여 광소멸계수가 일시적으로 $400 \sim 700 \text{ Mm}^{-1}$ 까지 증가되었고, 강우 후 광소멸계수는 최저 62 Mm^{-1} 까지 개선되었으며 5월 6일까지 쾌적한 시정이 유지되었다. 그러나 5월 7일부터 점진적으로 광소멸계수가 증가되는 추이를 나타내었다. 시정 집중관측 기간 동안 측정된 평균 광소멸계수, 광산란계수, 광흡수계수는 각각 $270 \pm 135 \text{ Mm}^{-1}$, $226 \pm 111 \text{ Mm}^{-1}$, $13 \pm 5 \text{ Mm}^{-1}$ 이었으며 평

균 시정거리는 $14.5 \pm 6.3 \text{ km}$ 를 나타내었다. 시정거리는 대조한계를 0.02로 가정하고 Koschmieder 이론식(Koschmieder, 1924)에 의하여 산출되었다. 강우에 의한 시정개선 효과를 제외한 평균 광소멸계수와 평균 시정거리는 각각 $299 \pm 129 \text{ Mm}^{-1}$ 과 $13.1 \pm 5.7 \text{ km}$ 로 강우 이후 이틀간의 평균 광소멸계수와 시정거리인 $128 \pm 45 \text{ Mm}^{-1}$ 과 $30.5 \pm 11.2 \text{ km}$ 에 비하여 상대적으로 낮은 시정수준을 나타내었다. 경주시 국립공원 지역에서 관측된 평균 광소멸계수는 Kim *et al.* (2008)에 의하여 2007년 5월 18일에서 30일까지 서울시에서 측정되었던 평균 광소멸계수인 $343 \pm 186 \text{ Mm}^{-1}$ 의 약 79% 수준을 나타내었으며, 김경원(2006)에 의하여 2005년 4월 21일에서 5월 2일까지 서울시에서 측정되었던 광소멸계수인 $392 \pm 243 \text{ Mm}^{-1}$ 의 약 69% 수준으로 평가될 수 있다. 이를 시정거리로 환산하면 2005년 및 2007년 서울시의 평균 시정거리는 각각 약 11.4km와 약 10.0km이었다. 또한 2003년 6월 16일부터 8월 28일까지 광주광역시에서 측정된 시정거리는 낮 동안 $15.3 \pm 7.2 \text{ km}$ 와 밤 동안 $13.8 \pm 7.4 \text{ km}$ 로 보고된 바 있어서(김경원과 김영준, 2003) 적어도 본 연구에서 측정된 경주시 국립공원 지역의 시정수준은 청정지역의 수준으로 판단되지 못하였다.

광소멸계수의 변화는 에어로졸의 질량농도와 상대습도의 변화에 직접적으로 영향을 받는다(Tang, 1996). 그림 1의 상대습도의 변화는 광소멸계수의 변화와 유사한 경향을 나타내었다. 상대습도의 증감이 광소멸계수의 증감에 영향을 미치는 정도는 건조입자에 대한 습윤입자의 광산란 효과로 판단되며 이는 상대습도의 함수로 정의되어 있다(Pitchford *et al.*, 2007). 시정장애 현상이 발생되었던 4월 28일부터 5

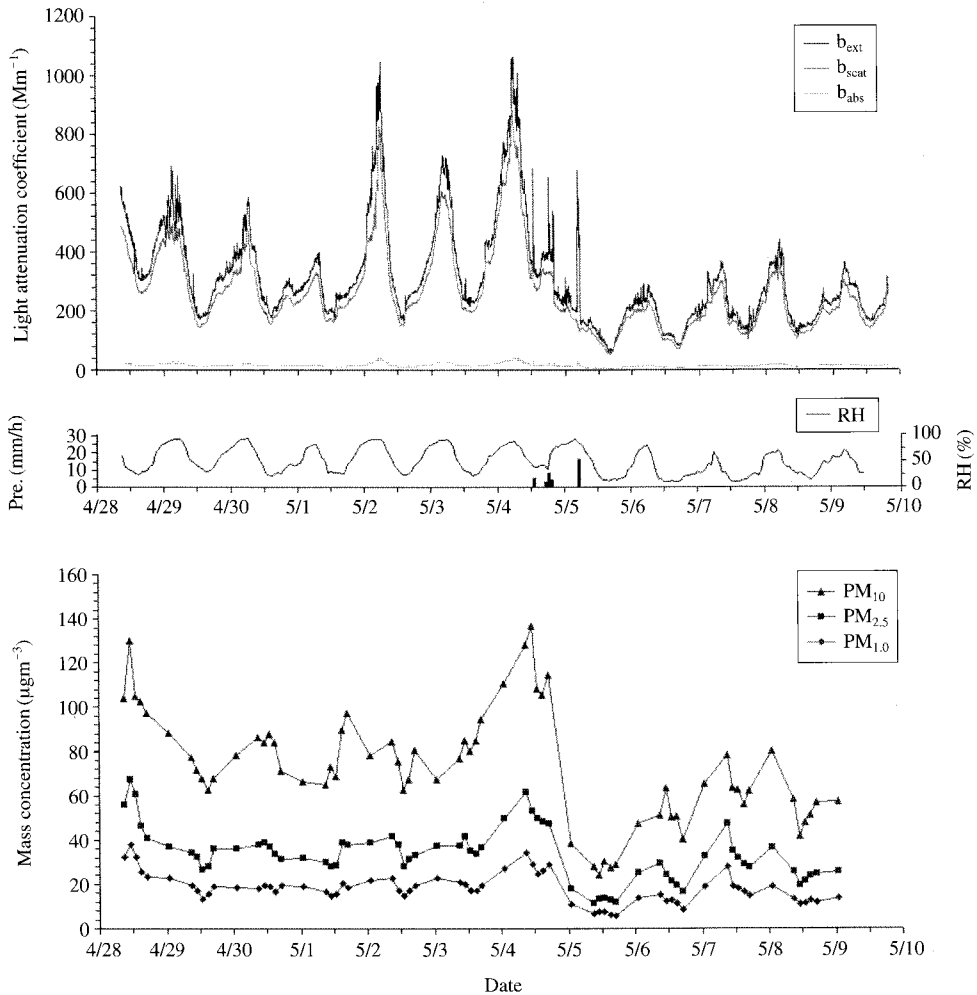


Fig. 1. Temporal variations of measured light attenuation coefficients, precipitation (Pre.), relative humidity (RH), and mass concentrations of size resolved particulate matters during the intensive monitoring period.

월 4일까지의 상대습도는 22~94%로 큰 변화 폭을 나타내었으며, 평균 상대습도는 약 58%로서 Pitchford *et al.* (2007)의 연구에서 제시된 값에 의하면 해당 기간의 흡습성 에어로졸인 황산염(sulfates)과 질산염(nitrates)의 상대습도에 의한 평균 광산란 효과는 건조 조건의 1.65~1.83배인 것으로 파악되었다. 그러나 에어로졸이 모두 황산염과 질산염으로 구성되어 있지 않으므로 상대습도에 의한 영향을 정확하게 파악하기 위해서는 비흡습성 에어로졸의 구성 비율을 고려하여야 하며 적어도 상기의 값보다는 다소 낮아질 것으로 예상된다. 준실시간으로 채집된 입경

분포별 에어로졸의 질량농도 역시 광소멸계수의 추이와 유사한 경향을 나타내었다. 집중관측 기간 동안 측정된 에어로졸의 입경분포별 PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0}의 평균 질량농도는 각각 73.2±25.0, 33.6±12.1, 18.2±6.8 µg m⁻³이었으며 시정악화 시 각각 최대 136.8, 67.5, 38.2 µg m⁻³까지 증가되었다. 강우 이후 이틀간의 평균 질량농도는 각각 40.3±13.2, 18.1±6.2, 9.8±3.4 µg m⁻³으로 측정되었으며, 강우 효과를 제외한 기간 동안의 평균 질량농도는 각각 79.8±21.4, 36.7±10.5, 19.9±6.0 µg m⁻³으로 측정되었다. 특히 강우 전의 PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0}의 질량농도는 각각 136.8,

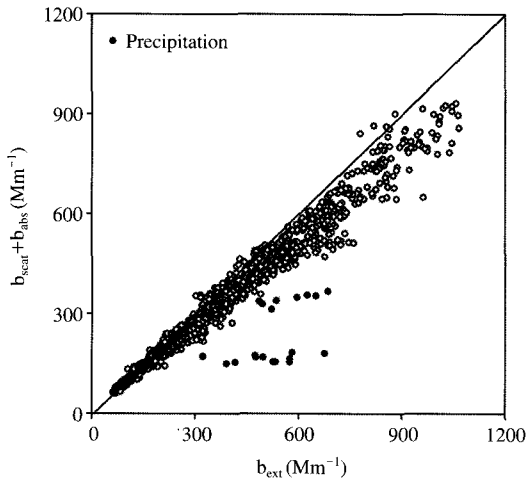


Fig. 2. Scatter plot between the light extinction coefficient (b_{ext}) and the sum of the light scattering coefficient (b_{scat}) and the light absorption coefficient (b_{abs}).

61.8, 34.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이었으며 강우 후의 질량농도는 각각 28.2, 11.6, 6.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 강우 전·후의 기단의 변화에 대한 영향을 배제할 수는 없으나 강우에 의한 에어로졸의 질량농도에 대한 세정효과가 뚜렷하게 나타났다. 따라서 강우 시 상대습도는 96%까지 증가하여 광산란 효과는 증가되었으나 입자상 물질의 질량농도의 감소가 시정을 개선시키는 주요한 요소로 작용된 것으로 파악된다.

입경분포별 에어로졸의 질량농도에 대한 광학적 특성을 조사하기 위하여 광감쇄계수에 대한 광학적 수치(optical closure)가 검토되었다. 본 연구에서 측정된 광소멸량이 광산란량과 광흡수량의 합과 어느 정도 일치하는지를 조사하기 위하여 그림 2에서와 같이 transmissometer에 의하여 측정된 광소멸계수와 nephelometer에 의하여 측정된 광산란계수 및 aethalometer에 의하여 측정된 광흡수계수의 합 간의 산포도가 도식되었다. 강우 시를 제외한 두 집단 간의 평균 상대오차 $(|b_{ext} - (b_{scat} + b_{abs})|/b_{ext})$ 는 $10.3 \pm 5.9\%$ 로 산출되었다. Nephelometer와 aethalometer는 가스상 물질의 광산란과 광흡수량을 모두 반영하지 못하므로 측정된 광산란계수와 광흡수계수의 합은 광소멸계수보다 작아야 한다(Watson, 2002). 그림 2에서와 같이 본 연구의 광학적 수치는 광소멸계수가 소폭 큰 것으로 조사되었으며, 이는 Rayleigh 산란(Ray-

leigh scattering)과 이산화질소(NO_2)에 의한 광흡수로 보정될 수 있으므로 상기의 상대오차보다 낮은 불확실도가 예상된다.

입경분포별 $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 에 대한 단위질량당 광소멸효율(mass extinction efficiency)은 시정감소를 유발시키는 입자상물질의 광학적 성질을 제시하는 요소로서 입자상물질의 질량농도의 변화를 이용하여 개괄적인 광소멸량을 추정하여 시정을 진단할 수 있는 자료로 활용된다. 국립공원 지역에서 측정된 광소멸계수와 $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 의 질량농도 간의 상관관계를 그림 3의 a), b), c)에 도식하였다. $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 에 대한 광소멸효율은 입경크기가 작아질수록 컸으며, 상관계수인 R^2 역시 $\text{PM}_{1.0}$ 이 0.6326으로 PM_{10} 의 0.503보다 상대적으로 높은 상관성을 나타내었다. 본 연구에서 산출된 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 의 광소멸효율은 2001년 광주지역에서 각각 측정된 $5.3 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 과 $8.3 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 의 약 83~89% 수준으로 소폭 작았다(Kim *et al.*, 2001). IMPROVE가 제시한 황산염과 질산염의 흡습성장(hygroscopic growth)에 관한 함수인 $f(\text{RH})$ 를 각각 $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 의 흡습성장의 함수로 가정하여 고려한 결과(Malm *et al.*, 1994)에서는 그림 3의 d), e), f)에서와 같이 $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 과 광소멸계수 간의 상관성이 각각 0.9358, 0.9255, 0.8844로 증가되었고, 광소멸효율은 각각 약 9.0, 4.7, $2.7 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 으로 산출되었다. 또한 상대습도 함수가 고려되지 않은 입경분포별 평균 광산란효율(mass scattering efficiency)은 $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 에 대하여 각각 12.4 ± 3.5 , 6.7 ± 2.1 , $3.1 \pm 0.8 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 이었다. 미국의 IMPROVE에서 조사된 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 광산란효율은 약 $3 \sim 8 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 인 것으로 보고된 바 있다. 입자상물질의 광산란에 대한 상대습도 함수를 대략적으로 고려하여 산출된 상기의 광산란 효율의 범위는 흡습성 화합물질의 구성비율에 좌우되는 것으로 알려져 있다(Malm and Pitchford, 1997; Anderson *et al.*, 1994; Sloane, 1986). 본 연구에서 산출된 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 광산란효율은 $\text{PM}_{2.5}$ 중 흡습성 화합물의 조성이 비교적 높음을 암시하는 것으로 판단된다.

시정의 정량적 측정은 광학적으로 수행되지만, 일반적인 표현은 광소멸계수보다 시정거리가 주로 사용된다. 따라서 입자상물질의 질량농도의 변화에 따른 시정거리의 변화에 대한 조사가 수행되었다. $\text{PM}_{1.0}$,

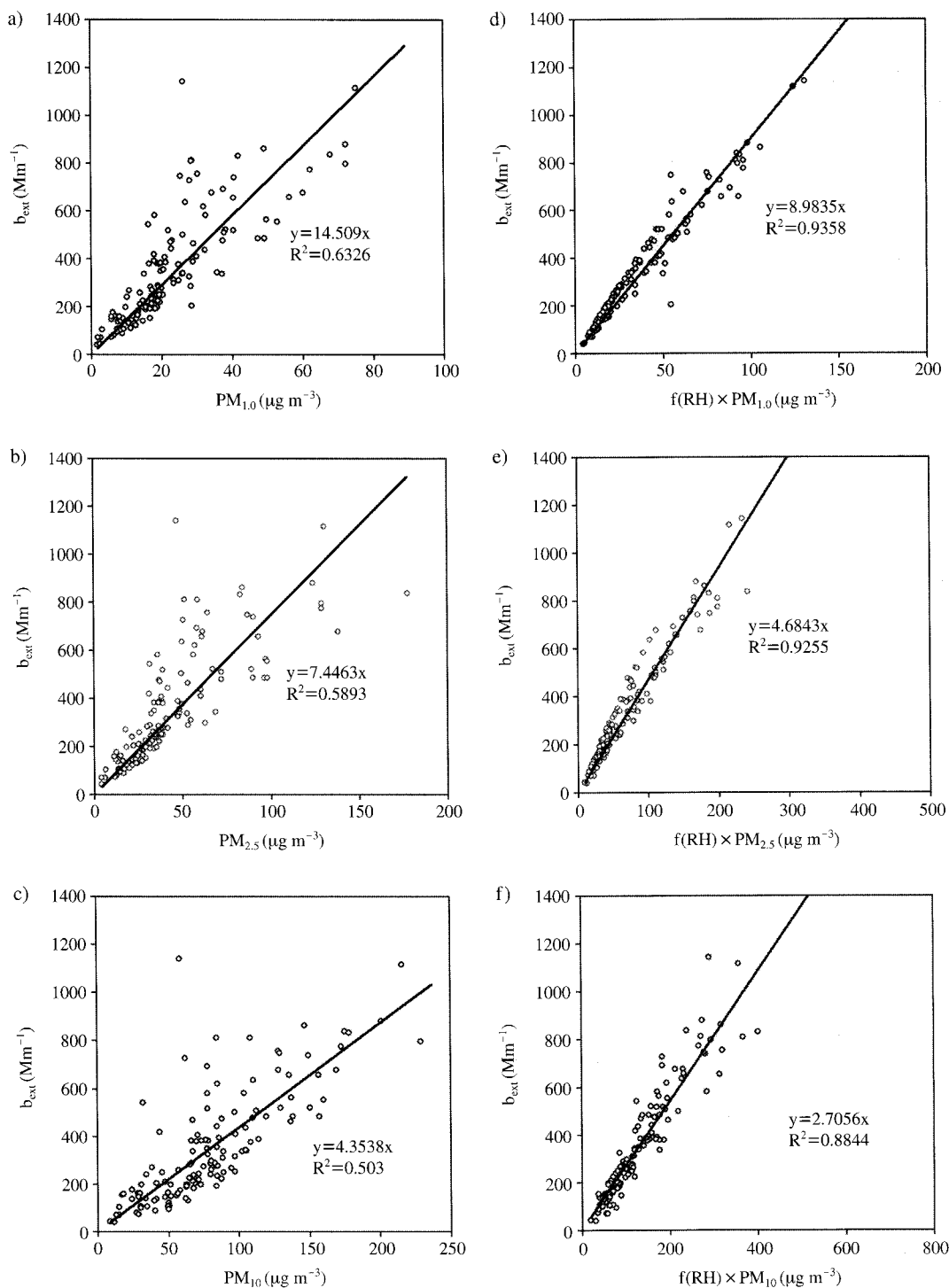


Fig. 3. Scatter plots between the light extinction coefficients and the mass concentrations of the size resolved PMs. $f(RH)$ is water growth function of sulfates and nitrates.

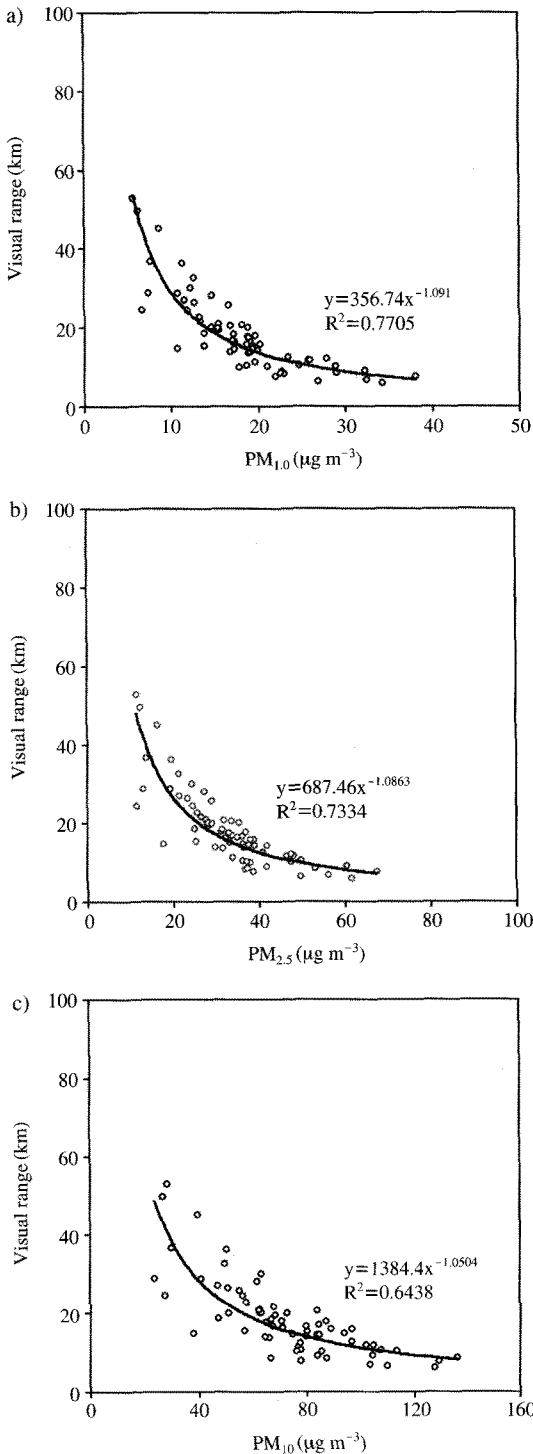


Fig. 4. Relationship between the visual range and the mass concentration of the size resolved PMs.

PM_{2.5} 및 PM₁₀과 시정거리 간의 산포도를 나타낸 그림 4에서와 같이 입자상물질의 질량농도와 시정거리 간의 상관함수는 비선형인 것으로 조사되었다. PM_{1.0}은 약 10 µg m⁻³ 이하에서 시정거리가 약 30 km 이상 급격하게 증가하였고 약 20 µg m⁻³ 이상에서 완만하게 감소하였다. PM_{2.5}와 PM₁₀은 각각 약 20 µg m⁻³과 약 40 µg m⁻³ 이하에서 시정거리의 증가가 급상승하였으며 약 40 µg m⁻³과 약 80 µg m⁻³ 이상에서 시정거리의 감소가 둔화되었다. 이러한 결과는 Kim *et al.* (2001)이 광주지역에서 측정된 결과와 유사한 경향을 나타낸 것으로서, 국립공원 지역에서 측정된 에어로졸의 광학적 특성이 도시지역에서 측정된 결과와 유사한 것으로 판단된다.

시정장애를 유발시키는 에어로졸 화합물에 대한 분석을 위하여 입경분포별 원소성분, 이온성분 및 탄소성분이 정성 및 정량되었다. 지난 십여 년간 여러 연구자들은 광감쇄를 유발시키는 에어로졸의 화학적 성분을 세분화하였다. 1993년 IMPROVE가 제시한 황산암모늄 ((NH₄)₂SO₄: NHSO), 질산암모늄 (NH₄NO₃: NHNO), 유기물 (organics: OMC), 원소탄소 (elemental carbon: EC), 미세토양 (fine soil: FS), 비해염 조대입자 (non-sea-salt coarse mass: nss-CM)의 구성 요소에 Kim *et al.* (2001)에 의하여 해염 (sea salt: SS) 입자의 광산란이 보완되었으며, 최근의 연구에서는 입경 분포별 Mie 이론을 이용하여 계산된 단위질량 광산란효율을 식 (1)에서와 같이 적용하였다 (Pitchford *et al.*, 2007).

$$b_{ext} \approx 2.2 \times f_s(RH) \times [NHSO_{-s}] + 4.8 \times f_L(RH) \times [NHSO_{-L}] + 2.4 \times f_s(RH) \times [NHNO_{-s}] + 5.1 \times f_L(RH) \times [NHNO_{-L}] + 2.8 \times [OMC_{-s}] + 6.1 \times [OMC_{-L}] + 10 \times [EC] + 1 \times [FS] + 1.7 \times f_{SS}(RH) \times [SS] + 0.6 \times [nss-CM] + b_{NO_2} + b_{Ray} \quad (1)$$

보완된 광소멸 산정식 (light extinction budget equation)에서는 흡습성 입자상 물질의 상대습도 함수인 $f(RH)$ 의 함수가 입경분포에 따라 $f_s(RH)$ 와 $f_L(RH)$ 으로 세분화되었다. Pitchford *et al.* (2007)은 미세입자의 주요 오염물질인 황산암모늄, 질산암모늄, 유기물 입자의 기하입경분포의 최빈수 (mode) 입경을 0.2 µm와 0.5 µm로 제시하여 PM_{2.5} 중 소입자 (small particle in PM_{2.5} regime)와 PM_{2.5} 중 대입자 (large particle in PM_{2.5} regime) 영역으로 분류하였으며, 이를 각각

Table 2. Composite variables for visibility impairing aerosol composition in this study.

Particle size range	Component	Specifications	Composite equation
$D_p < 1.0 \mu\text{m}$	NHSO _s	(NH ₄) ₂ SO ₄	4.125[S]
	NHNO _s	NH ₄ NO ₃	1.29[NO ₃ ⁻]
	OMC _s	Organic mass by carbon	1.8[OC]
$1.0 < D_p < 2.5 \mu\text{m}$	NHSO _L	(NH ₄) ₂ SO ₄	4.125[S]
	NHNO _L	NH ₄ NO ₃	1.29[NO ₃ ⁻]
	OMC _L	Organic mass by carbon	1.8[OC]
$D_p < 2.5 \mu\text{m}$	EC	Elemental carbon	[EC]
	FS	Fine soil	2.20[Al]+2.49[Si]+1.63[Ca]+2.42[Fe]+1.94[Ti]
	SS	Sea-salt	2.5[Na]
$2.5 < D_p < 10 \mu\text{m}$	SS	Sea-salt	2.5[Na]
	nss-CM	Non-sea-salt coarse mass	[CM]-2.5[Na]
Gas phase	b _{NO₂}	Absorption coefficient by NO ₂	0.33[NO ₂] _{ppb}
	b _{Ray}	Rayleigh scattering coefficient	Altitude dependent

하침자 _s와 _L로 표현하였다. PM_{2.5} 중 대입자는 생성된 후 대기 중에 체류된 지 오래된 입자(aged particle) 또는 구름생성에 관계된 입자(cloud processed particle)를 나타내며, PM_{2.5} 중 소입자는 생성된 지 오래되지 않은 입자(freshly formed particle)를 나타내는 것으로 보고하였다. Pitchford *et al.* (2007)은 기존의 광소멸 산정식으로부터 계산된 광소멸계수가 저시정 조건에서 과소평가되며 쾌적시정 조건에서 과대평가되는 문제를 보정하기 위하여 Mie 이론을 사용하여 PM_{2.5} 중 소입자와 대입자 영역에서 황산암모늄, 질산암모늄 및 유기물 입자의 광산란효율을 계산하여 보고하였다. 광소멸 산정식은 흡습성을 나타내는 황산암모늄, 질산암모늄 및 유기물 입자에 의한 단위질량당 광산란효율과 $f_s(\text{RH})$ 와 $f_L(\text{RH})$ 의 곱으로 구성되었다(Pitchford *et al.*, 2007). 그러나 식(1)에서 제시된 입경분포는 모델을 통하여 계산된 결과이다. 본 연구에서는 개선된 광소멸 산정식을 도입하기 위하여 입경분포별로 PM_{1.0} 및 PM_{2.5}에 대한 측정이 수행되었으며 각각 화학적 분석이 수행되었다. 또한 PM_{1.0}을 PM_{2.5} 중 소입자로 PM_{2.5}와 PM_{1.0} 간의 차를 PM_{2.5} 중 대입자로 가정하여 식(1)에 적용하였다. $f_{SS}(\text{RH})$ 함수는 해염 입자의 흡습도의 증가에 따른 건조상태의 광산란계수에 대한 습윤상태의 광산란계수의 효율을 나타낸다. 표 2에 제시된 구성 관계식에 의하여 시정장애 유발 에어로졸 화합물의 질량농도를 산출하였으며, 황(S) 성분과 질산이온(NO₃⁻) 성분의 질량농도에 몰상수를 고려하여 황산암모늄과

질산암모늄 입자의 질량농도를 산출하였다(Malm and Hand, 2007). 유기탄소로부터 유기물질의 질량을 산출하기 위한 환산 계수 1.8을 사용하여 유기물질의 질량농도를 결정하였다(Pitchford *et al.*, 2007). 수용성 나트륨 이온(Na⁺)의 질량농도에 환산계수 2.5를 곱하여 해염 입자의 질량농도를 산출하였으며, IMPROVE에 의하여 제시된 Al₂O₃, SiO₂, CaO, K₂O, FeO, Fe₂O₃, TiO₂ 성분에 대한 보정계수의 곱으로 미세토양 입자의 질량농도를 산출하였다(김경원, 2006; Pettijohn, 1949).

광소멸 현상을 유발시키는 화합물의 질량농도와 광소멸효율의 곱, 이산화질소의 광흡수 및 Rayleigh 산란의 합으로 재구성된 광소멸계수(reconstructed b_{ext})와 측정된 광소멸계수 간의 비교를 통하여 개선된 광소멸 산정식의 적용에 대한 불확실도를 파악할 수 있다. 측정된 b_{ext} 와 재구성된 b_{ext} 간의 산포도를 그림 5에 도식하였다. 측정된 b_{ext} 값들과 재구성된 b_{ext} 값들 간의 기울기는 1.0에 근접하였으며, 상관계수는 0.7596로 계산되었다. 재구성된 b_{ext} 값이 측정값을 기준으로 과대 및 과소평가가 아닌 중립적인 경향을 나타낸 것으로 분석되었다. 측정된 b_{ext} 에 대한 재구성된 b_{ext} 의 평균 상대오차는 19.6%로 산출되어 약 20% 정도의 불확실도가 예상되었다.

시정 집중관측 기간 중 강우 전후의 광소멸계수, 입자상물질의 농도 및 상대습도와와의 관계로부터 경주시 국립공원 지역에서 관측된 시정장애 현상의 원인이 입자상물질의 증가와 밀접한 관계가 있는 것으로 제

시되었다. 대기 중의 입자상 물질은 시정장애를 유발시키는 화학물의 직접적 배출뿐만 아니라 외부 또는 내부 혼합에 의한 간접적 전환으로부터 생성되므로 이들의 화학적 조성에 관한 구체적인 조사를 통하여 국립공원 지역의 시정장애 현상을 유발시키는 주요한 원인물질의 화학적 성분을 확인할 수 있으며, 이를 통하여 그 원인에 대한 해석이 가능하다. 집중관측 기간 총 54회의 측정 사례를 강우에 의한 영향을 고려하여 세 단계의 시정수준으로 분류하였다. 시정거리

가 10 km 미만인 저시정 (low visibility), 10 km 이상 25 km 미만인 일반시정 (moderate visibility), 25 km 이상인 쾌적시정 (clear visibility)의 조건에서 광소멸을 유발시키는 화학물의 광소멸계수에 대한 기여도를 그림 6에 도식하였다. 시정장애를 유발시키는 에어로졸 성분을 $D_p < 1.0 \mu\text{m}$ 영역의 황산암모늄 (NH_4SO_4), 질산암모늄 (NH_4NO_3) 및 유기물 (OMC_s) 입자, $1.0 \mu\text{m} \leq D_p < 2.5 \mu\text{m}$ 영역의 황산암모늄 (NH_4SO_4), 질산암모늄 (NH_4NO_3) 및 유기물 (OMC_L) 입자, $D_p < 2.5 \mu\text{m}$ 영역의 원소탄소 (EC) 및 미세토양 (FS) 입자, $2.5 \mu\text{m} \leq D_p < 10 \mu\text{m}$ 영역의 비해염 조대입자 (nss-CM) 및 $D_p < 10 \mu\text{m}$ 영역의 해염 (SS) 입자로 분류하였다.

쾌적시정 조건의 평균 광소멸계수와 시정거리는 각각 $111 \pm 33 \text{ Mm}^{-1}$ 과 $35.2 \pm 11.4 \text{ km}$ 이었으며, 시정장애 유발 에어로졸인 NH_4SO_4 , NH_4NO_3 , OMC_s , NH_4SO_4 , NH_4NO_3 , OMC_L , EC, FS, nss-CM, SS의 광소멸계수에 대한 기여도는 그림 6의 a)에서와 같이 각각 2.7, 2.5, 6.4, 9.9, 11.4, 19.5, 7.5, 8.4, 8.8, 7.7%로 산출되었다. 유기물의 총 기여도가 25.9%로 가장 높았고, 질산암모늄과 황산암모늄의 총 기여도가 각각 13.9%와 12.6%로 뒤를 이었다. 기타 시정장애 유발 화학물은 Rayleigh 산란의 기여도보다 낮은 수준이었다. 강우에 의하여 개선된 쾌적시정 조건에서 국립공원 지역의 광소멸을 유발시키는 주요한 화학물은 유기물 입자인 것으로 분석되었다. 2000년 서해안에 근접한 충청남도 태안군 안면읍에서 관측

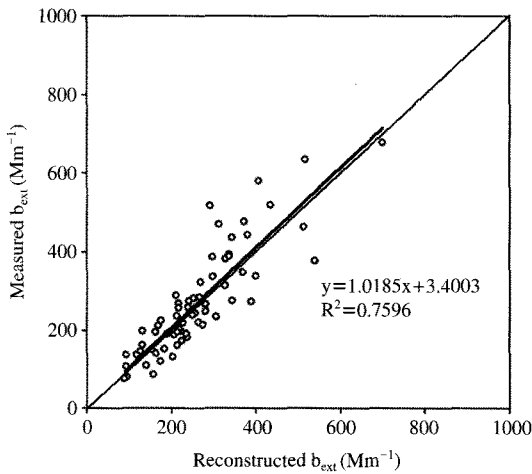


Fig. 5. Scatter plot between the measured light extinction coefficient and the reconstructed light extinction coefficient.

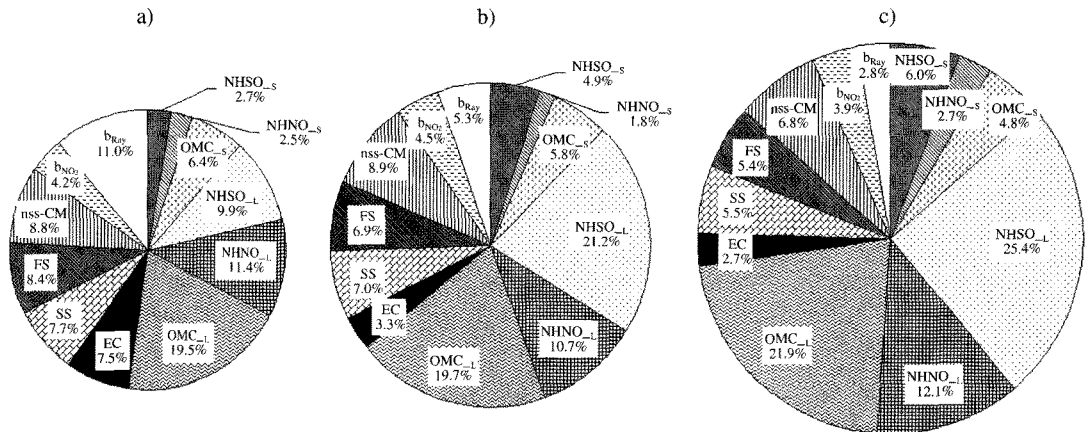


Fig. 6. Variation of light extinction budgets for visibility impairing aerosol components with haze level; a) hazy, b) moderate, c) clear.

된 광소멸계수에 대한 유기물의 평균 기여도는 약 17.7%로 보고된 바 있다(Kim *et al.*, 2007). Kavouras and Stephanou (2002)의 연구결과에 의하면 다환방향족탄화수소(PAHs) 중 n-alkanes는 주로 도시지역과 삼림지역과 연관되어 있으며 평균 공기역학적 직경이 각각 0.45 및 0.63 μm 이었고, 생물기원의 유기탄소인 n-alkanols의 평균 공기역학적 직경은 도시지역, 도서지역 및 삼림지역에서 각각 2.45, 2.69 및 1.67 μm 으로 관측되었으며, n-alkanoic 산들의 평균 공기역학적 직경은 각각 0.71, 0.62 및 0.91 μm 으로 관측된 것으로 보고되었다. 또한 배경지역인 도서지역에서 관측된 n-alkanes의 유기물 입자는 평균 공기역학적 직경이 약 2.0 μm 로 장거리이동에 의한 입자의 물리적 성장의 영향으로 파악된 바 있다. 본 연구에서 관측된 유기물 입자는 PM_{1.0} 영역과 PM_{2.5} 영역에서 모두 관측됨으로서 도시지역과 삼림지역의 특성이 동시에 반영된 것으로 파악된다. 그림 7에서와 같이 경주시 국립공원 서악지구는 산악으로 둘러싸여 있으며 쾌적시정 조건에서는 경주시의 남서쪽 약 35.4 km에 위치한 백운산의 전경을 볼 수 있다. 본 연구에서 유기물 입자의 기여도는 그림 6의 b) 일반시정 및 c) 저시정 조건에서와 같이 각각 25.5% 및 26.7%로 산출되어 안면읍에서 측정된 사례보다 상대적으로 높은 것으로 평가되었다. 특히 시정이 악화될수록 OMC_S의 기여도는 감소하는 반면 OMC_L의 기여도가 증가된 것은 이동 또는 전환되어 생성된 2차 유기탄소의 증가 및 삼림지역의 생물기원으로부터 생성된 1차 유기탄소의 영향으로 추정된다. 그러나 OMC_S와 OMC_L의 기여도의 증감은 소폭이었다. 숲으로부터 주로 발생되는 테르펜(terpene)과 이소프렌(isoprene)은 산화반응을 통해 상대적으로 큰 에어로졸의 표면에 응집될 수 있는 것으로 보고된 바 있으며(Cahill *et al.*, 2006; Yanhong *et al.*, 1996), 2001년 ACE-Asia 관측기간 제주도 고산에서 관측된 PM_{1.0} 영역의 고분자 지방산(higher-molecular-weight fatty acids)은 생체소각(biomass-burning)의 영향으로 추정된 바 있다(Mochida *et al.*, 2007). 따라서 경주시 국립공원 지역에서 측정된 유기물 입자는 1차 유기탄소, 2차 유기물질, 생물기원 유기물의 산화반응 및 생체소각의 영향을 포함한다고 할 수 있다. 탄소성 입자인 원소탄소의 기여도는 상대적으로 작았다. 쾌적시정, 일반시정 및 저시정 조건에서 광소

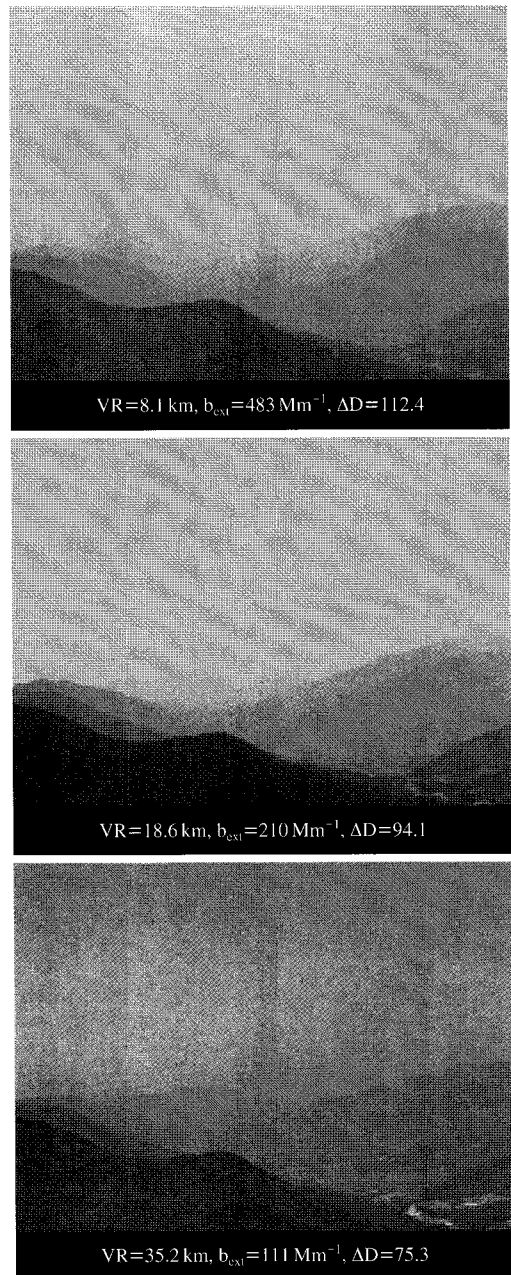


Fig. 7. Perceived visibility variation with haze level in the Gyeongju National Park area. VR and ΔD are the visual range and the color difference using the HSI color difference method.

멸계수에 대한 원소탄소의 기여도는 각각 7.5%, 3.3% 및 2.7%로 유기물의 기여도의 약 10~29% 수

준이었다. 반면, 안면읍에서 관측된 원소탄소의 기여도는 약 1~4%로(Kim *et al.*, 2007) 경주시 국립공원 지역의 원소탄소에 의한 기여도가 안면읍보다 상대적으로 높은 것으로 파악되었다.

일반시정 조건의 평균 광소멸계수와 시정거리는 그림 7에서와 같이 각각 $210 \pm 52 \text{ Mm}^{-1}$ 과 $18.6 \pm 5.6 \text{ km}$ 이었으며, 저시정 조건의 평균 광소멸계수와 시정거리는 각각 $483 \pm 95 \text{ Mm}^{-1}$ 과 $8.1 \pm 2.3 \text{ km}$ 이었다. HSI 색차법을 이용한 색차(color difference: ΔD) 값(Kim and Kim, 2005b)은 쾌적시정 시 75.3에서 저시정 시 112.4로 증가하였다. 국립공원 지역의 시정악화를 유발시킨 가장 주요한 원인물질은 황산암모늄 입자인 것으로 분석되었다. 저시정 사례에서 광소멸계수에 대한 질산암모늄과 유기물 입자의 기여도는 각각 14.8%와 26.7%로 쾌적시정 사례에 대하여 소폭의 증가를 나타낸 반면, 광소멸계수에 대한 황산암모늄 입자의 총 기여도는 쾌적시정 시 12.6%에서 저시정 시 31.4%로 급격하게 증가하였으며 저시정 사례에서도 가장 큰 기여도를 나타내었다. 황산염 입자는 그 배출과 생성에 있어서 숲과 산으로 둘러싸인 국립공원 지역과는 상관성이 적은 편이다. 최근 황산염 입자의 지역 간 이동에 의한 시정장애 현상에 대한 연구가 도시 또는 공단 지역으로부터 수백 km 떨어진 미국의 국립공원 지역에서 수행된 바 있으며, 그 영향이 보고되었다(Knippling *et al.*, 2006). 또한 저시정 사례에서 광소멸계수에 대한 NHSO_L , NHNO_L 및 OMC_L 입자의 기여도의 합이 NHSO_S , NHNO_S 및 OMC_S 입자의 기여도의 합보다 크게 증가한 결과에서도 시간의 경과에 따른 에어로졸의 균질적(homogeneous) 및 비균질적(heterogeneous) 물리적 성장 및 각 입경영역에 상응하는 화학종의 직접배출의 영향이 암시된다 할 것이다. 경주시 국립공원은 미국의 국립공원들과 같이 도시로부터 멀리 떨어지지 않았으며 오히려 주변에 광역시와 공단지역이 위치하고 있다. 따라서 저시정 사례에서 광소멸계수에 대한 황산염 입자의 기여도의 증가는 외부로부터의 영향으로 파악될 수 있으나 국지적 발생을 배제할 수는 없다.

4. 결 론

우리나라에서 대기오염의 영향에 관한 연구는 주

로 그 배출원이 밀집되어 있는 도시지역 또는 공단지역에 집중되어 수행되었다. 선진국에서는 학술적 또는 경제적 관점에서 국립공원 지역 또는 황야 지역(wilderness area)과 같은 비도시 지역의 대기오염의 영향에 관한 연구가 적잖게 수행되어 왔다. 자연환경의 보호와 관광산업의 진흥을 동시에 도모할 수 있는 시정의 개선은 아름다운 경관으로 인간에게 긍정적인 미래를 제시하는 매개체의 역할을 할 수 있다. 본 연구에서는 국토의 약 60% 이상이 산악 지역이며, 약 4천 개가 넘는 산이 존재하는 우리나라의 지리적 특성에도 도시와 도시 간의 거리가 수십 km에 불과하여, 대기오염의 영향이 도시로부터 비도시 지역으로 쉽게 확산될 수 있는 가능성을 지닌 경우 국립공원을 대상으로 시정장애 현상에 대한 물리적 및 화학적 특성이 조사되었다. 시정 집중관측 기간 동안 발생한 시정장애 현상의 주된 원인은 흡습성에어로졸인 황산암모늄 입자의 증가인 것으로 조사되었으며, 유기물 입자의 평균 기여도는 약 26%로 2000년 안면읍에서 측정된 값보다 상대적으로 높았다. 질산암모늄 역시 시정 감소에 기여하였다. 본 연구에서 산출된 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 의 평균 광소멸효율은 2001년 광주에서 측정된 값보다 소폭 낮았고, $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 광산란효율은 원소탄소의 기여도가 상대적으로 적었음에도 불구하고 $6.7 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 로 IMPROVE에 의하여 제시된 값과 비교하여 높은 수준이었다. 시정이 악화될수록 $\text{PM}_{2.5}$ 영역에서 소입자보다는 대입자에 의한 기여도가 증가되었다. 결과적으로 집중관측 기간 동안 경주 국립공원 지역에서 발생한 시정장애 현상은 국립공원 외부의 지역으로부터 이동된 대기오염물질에 영향을 받았을 것으로 판단되었으나 국지적 발생을 배제할 수는 없었다. 국립공원 지역의 시정장애 현상에 대한 보다 정확한 원인을 규명하기 위하여 중·장기적인 시정관측의 수행은 효과적인 방안이 될 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(KRF-2007-313-D00419), 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김경원 (2006) 공중화분에 의한 시정장에 현상의 물리적 및 화학적 특성 규명, 한국대기환경학회지, 22(6), 863-875.
- 김경원, 김영준 (2003) 에어로졸의 준실시간 관측에 의한 여름철 도시지역 시정 감쇄 현상의 광·화학적인 특성 분석, 한국대기환경학회지, 19(6), 647-661.
- Anderson, T.L., R.J. Charlson, W.H. White, and P.H. McMurry (1994) Comment on: Light scattering and cloud condensation nucleus activity of sulfate aerosol measured over the northeast Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 99, 25947-25949.
- Cahill, T.M., V.Y. Seaman, M.J. Charles, R. Holzinger, and A.H. Goldstein (2006) Secondary organic aerosols formed from oxidation of biogenic volatile organic compounds in the Sierra Nevada Mountains of California, *J. Geophys. Res.*, 111, D16312, doi:10.1029/2006JD007178.
- Chow, J., J. Watson, H. Kuhns, V. Etyemezian, D.H. Lowenthal, D. Crow, S. Kohl, J. Engelbracht, and M. Green (2004) Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend regional aerosol visibility observational study, *Chemosphere*, 54, 185-208.
- Hand, J.L., S.M. Kreidenweis, D. Eli Sherman, J.L. Collett, Jr., S.V. Hering, D.E. Day, and W.C. Malm (2002) Aerosol size distributions and visibility estimates during the Big Bend regional aerosol and visibility observational (BRAVO) study, *Atmos. Environ.*, 36(32), 5043-5055.
- Kavouras, I.G. and E.G. Stephanou (2002) Particle size distribution of organic primary and secondary aerosol constituents in urban, background marine, and forest atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 107(D8), 4069, doi: 10.1029/2000JD000278.
- Kim, K.W. and Y.J. Kim (2005a) Improvement of field calibration of a transmissometer for visibility measurement, *J. KOSAE*, 21(E2), 49-56.
- Kim, K.W. and Y.J. Kim (2005b) Perceived visibility measurement using the HSI color difference method, *J. Korean Physic. Soc.*, 46(5), 1243-1250.
- Kim, K.W., Y.J. Kim, and M. Youn (2008) Semi-continuous aerosol measurement for visibility variation using PIXE method, *J. Korean Physic. Soc.*, 52(4), 1143-1150.
- 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. Environ.*, 35(30), 5157-5167.
- Kim, K.W., Y.J. Kim, and S.Y. Bang (2007) Summer time haze characteristics of the urban atmosphere of Gwangju and the rural atmosphere of Anmyon, Korea, *Environ. Monit. & Assess.*, DOI 10.1007/s10661-007-9887-8.
- Kim, Y.J., K.W. Kim, and S.J. Oh (2001) Seasonal characteristics of haze observed by continuous visibility monitoring in the urban atmosphere of Kwangju, Korea, *Environ. Monit. & Assess.*, 70, 35-46.
- Knipping, E.M., N. Kumar, B.K. Pun, C. Seigneur, S.-Y. Wu, and B.A. Schichtel (2006) Modeling regional haze during the BRAVO study using CMAQ-MADRID: 2. Source region attribution of particulate sulfate compounds, *J. Geophys. Res.*, 111, D06303, doi: 10.1029/2004JD005609.
- Koschmieder, V.H. (1924) Theorie der horizontalen sichtweite II. Kontrast und sichtweite, *Beitr. z. Phys. d. fr. Atmosph.*, 12, 171-181.
- Malm, W.C. and J.L. Hand (2007) An examination of the physical and optical properties of aerosols collected in the IMPROVE program, *Atmos. Environ.*, 41(28), 3407-3427.
- Malm, W.C. and M. Pitchford (1997) Comparison of calculated sulfate scattering efficiencies as estimated from size-resolved particle measurements at three national locations, *Atmos. Environ.*, 31(9), 1315-1325.
- Malm, W.C., J.F. Sisler, D. Huffman, R.A. Eldred, and T.A. Cahill (1994) Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States, *J. Geophys. Res.*, 99(D1), 1347-1370.
- Malm, W.C., J.V. Molenaar, R.A. Eldred, and J.F. Sisler (1996) Examining the relationship among atmospheric aerosols and light scattering and extinction in the Grand Canyon area, *J. Geophys. Res.*, 101, 19251-19265.
- Mazurek, M., M.C. Masonjones, H.D. Masonjones, L.G. Salmon, G.R., Cass, K.A. Hallock, and M. Leach (1997) Visibility-reducing organic aerosols in the vicinity of Grand Canyon National Park: Properties observed by high resolution gas chromatography, *J. Geophys. Res.*, 102, 3779-3793.
- Mochida, M., N. Umemoto, K. Kawamura, H.-J. Lim, and B.J. Turpin (2007) Bimodal size distributions of various organic acids and fatty acids in the marine atmosphere: Influence of anthropogenic aerosols, *Asian*

- dusts, and sea spray off the coast of East Asia, *J. Geophys. Res.*, 112, D15209, doi:10.1029/2006-JD007773.
- Park, R.J., D.J. Jacob, N. Kumar, and R.M. Yantosca (2006) Regional visibility statistics in the United States: Natural and transboundary pollution influences, and implications for the Regional Haze Rule, *Atmos. Environ.*, 40(28), 5405-5423.
- Parungo, F., C. Nagamoto, M.Y. Zhou, A.D.A. Hansen, and J. Harris (1994) Aeolian transport of aerosol black carbon from China to the ocean, *Atmos. Environ.*, 28, 3251-3260.
- Pettijohn, F.J. (1949) *Sedimentary Rocks*, Harper & Brothers, New York.
- Pitchford, M., W.C. Malm, B. Schichtel, N. Kumar, D. Lowenthal, and J.L. Hand (2007) Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 57(11), 1326-36.
- Sloane, C.S. (1986) Effect of composition on aerosol light scattering efficiencies, *Atmos. Environ.*, 20(5), 1025-1037.
- Tang, I.N. (1996) Chemical and size effects of hygroscopic aerosols on light-scattering coefficients, *J. Geophys. Res.*, 101(D14), 19245-19250.
- Watson, J.G. (2002) Visibility: Science and regulation, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 52, 628-713.
- Yanhong, T., K. Naoki, F. Akio, and M. Awang (1996) Light reduction by regional haze and its effect on simulated leaf photosynthesis in a tropical forest of Malaysia, *Forest Ecology and Management*, 89, 205-211.