

2003년 5월의 연무 관측시 에어로졸의 기상·물리·화학 특성 The Meteorological, Physical, and Chemical Characteristics of Aerosol during Haze Event in May 2003

임주연* · 전영신 · 조경미¹⁾ · 이상삼 · 신혜정²⁾
기상연구소 응용기상연구실, ¹⁾서울대학교 지구환경과학부, ²⁾대구지방환경청
(2004년 5월 13일 접수, 2004년 9월 23일 채택)

Ju-Yeon Lim, Youngsin Chun, Kyoung-Mi Cho¹⁾, Sang-Sam Lee and Hye-Jung Shin²⁾
Applied Meteorological Research Laboratory, Meteorological Research Institute,
¹⁾*School of Earth and Environment Sciences, Seoul National University,*
²⁾*Daegu Regional Environmental Office*

(Received 13 May 2004, accepted 23 September 2004)

Abstract

Severe haze, mist, and fog phenomena occurred in the central part of Korea during 15~25 May 2003 resulted in poor visibility and air quality. When these phenomena occurred, Korean peninsula was under the effects of anticyclone. The atmosphere was stable, and wind speed was so weak. Under this meteorological conditions, air quality was worse and worse. The characteristics of aerosol in Seoul, Incheon, and Gosan (Jeju) during this period are investigated from the PM₁₀, TSP concentrations and aerosol number concentrations. Concentrations of PM₁₀ and TSP measured at KMA increased upto 176 and 230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ on 22 May 2003, respectively. Aerosol number concentrations of size range from 0.82 to 6.06 μm increased in Seoul on 17, 19, and 21~24 May 2003, and the concentrations of NO₂ and SO₂ had maximum value of 0.165 ppm at Gwanak Mt. and 0.036 ppm at Guro-dong on 23 May 2003, respectively. Result from analysis on heavy metal elements showed high concentrations of Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, and Cd during 20~24 May 2003. This event is examined by comprehensive analyses of synoptic weather conditions, satellite images, concentrations of suspended particles and air pollutants, and heavy metal elements.

Key words : Haze, Mist, Fog, Smoke, PM₁₀ and TSP, Aerosol number concentration, Heavy metal elements

1. 서 론

대기 중의 수평 시야거리인 시정을 감소시키는 기

상현상에는 연무(haze), 박무(mist), 안개(fog), 황사(Asian dust), 스모그(smog) 등이 있다. 이 중에 '연무'는 습도가 75% 이하로 낮을 때 대기 중에 연기, 먼지 등 미세하고 건조한 고체입자가 떠 있어서 공기의 색이 우윳빛으로 흐려 보이는 현상을 말한다(기

* Corresponding author

Tel : +82-(0)2-846-2850, E-mail : rima@metri.re.kr

상청, 2002a; 김광식 등, 1992). 연무현상은 화산 분출 물이나 바람에 날린 먼지, 황사 등 천연의 먼지가 공기 중에 섞여 발생하지만, 도시나 공업 지대와 같은 오염 지역에서는 공장과 주택으로부터의 연기, 자동차 배기가스 등 인공적 오염물질에 의해 발생한다(기상청, 2002a). '박무'는 $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 미세한 물방울(droplet)이나 황산염, 질산염과 같은 흡습성 알갱이가 대기 중에 떠 있어서 먼 곳의 물체가 흐려 보이는 현상으로 시정이 1 km 이상, 상대습도가 80~90% 이상인 경우이고(전영신 등, 2003), '안개'는 매우 작은 물방울이 대기 중에 떠다니고 있는 현상을 말하며(기상청, 2002a), 수평시정이 1 km 미만이고 상대습도는 100%에 가깝다. 측정 빈도(%)로 살펴본 안개 알갱이의 크기는 복사안개가 $1\sim 2 \mu\text{m}$, 이류안개는 $2\sim 4 \mu\text{m}$ 정도이다(김광식 등, 1992). 이러한 현상들은 기상 관측자에 의해 맨눈으로 관측되며, 현상의 세기를 나타내는 강도는 시정거리로 구분하고 있다. 연무의 경우, 강도 0은 시정이 4~10 km이고, 강도 1은 2~4 km, 그리고 강도 2는 2 km 이하의 시정이 관측되는 경우이다. 박무는 연무현상과 강도를 구분하는 시정거리는 동일하지만, 80~90% 이상의 높은 상대습도와 회색을 띠는 특징으로 75% 이하의 상대습도를 가지며 부유계 흐린 우윳빛을 띠는 연무현상과 구분된다. 그리고 안개는 수평 시정거리가 1 km 미만인 경우로 연무와 박무현상보다 시정이 악화된다(기상청, 2002b).

초기의 에어로졸 연구는 군사적 목적으로 시작되었지만, 에어로졸이 대기오염과 대기질 악화의 원인 요소 및 기후변화의 한 요소로 작용함에 따라 인간과 자연 생태계 뿐만 아니라 연무, 박무, 안개, 스모그, 구름 등의 기상현상과 관련한 에어로졸 연구에도 관심이 높아지고 있으며(김필수 등, 1986), 시정과 관련한 연구에서는 1990년 이후 대도시를 중심으로 발생하는 시정 악화가 광화학 스모그와 같은 2차 오염물질에 의해 발생하는 박무, 연무, 안개현상 등에 의한 것으로 조사되었다(Moon *et al.*, 1997). 2003년 5월 15~25일 사이에 서울과 인천의 한반도 중부권에서 발생한 연무 사례는 도시의 대기오염현상이 연무, 박무, 안개 등의 기상현상을 동반하여 대기질을 저하시키고 악시정을 초래한 대표적 사례로 생각된다. 사례 기간동안 장기간 정체된 고기압의 영향으로, 대기 안정, 풍속 약화 등의 종관 특성이 이 사례

의 주된 원인으로 사료되며, 종관기상 특징 외에도 러시아 바이칼호 부근 및 극동 지역에서 발생한 대규모 산불의 영향도 고려해볼 수 있다. 이 산불은 5월 초부터 시작되어 NASA의 Rapid Response Team의 MODIS 영상 분석결과 5월 23일에 캐나다에서 발견될 정도로 심한 현상이었고(http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/natural_hazards_v2.php?img_id=10689), 5월 17~19일의 종관기상 분석에서 나타난 바이칼호 동남부에서 한반도 중북부까지의 복사기류는 산불에 의한 smoke가 한반도로 유입될 수 있는 조건을 형성함으로써 그 가능성을 고려해볼 수 있다. 이권호와 김영준(2004)은 TOMS와 MODIS 인공위성자료와 지상 복사관측 자료인 AERONET Sunphotometer 관측 자료를 이용하여 2003년 5월 러시아 산불시 발생한 에어로졸의 중장거리 모니터링에 대해 연구하였고, Gerhard and Trainer(2000)는 캐나다 산불이 미국의 대기오염 농도에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 황사현상과 관련해서는 1998년부터 2002년까지의 연무현상과 황사현상에 따른 대기 중 에어로졸의 특성이 분석된 바 있다(전영신 등, 2003).

대기 중 부유분진의 금속원소에 대한 연구에서, 납(Pb), 구리(Cu), 아연(Zn) 등의 인위적 오염원에 의한 중금속 원소는 $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 미세입자와 양의 상관성을 나타내고, 주로 겨울철에 높은 농도를 보이며 기온, 풍속, 상대습도와는 음의 상관성을 나타낸다. 반면, 철(Fe), 칼슘(Ca), 나트륨(Na) 등의 원소는 $2.5\sim 10 \mu\text{m}$ 의 거대입자군에 편중되며 주로 봄철에 고농도를 나타낸다(김병화 등, 2000; 신중훈 등, 1996). 대기 중 PM_{10} 의 오염원 추정을 위한 무기원소 통계 연구에서도, 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb), 칼륨(K)은 2월에 최고 농도를 보이며 미세입자군에 속함에 따라, 겨울철 화석연료의 연소나 쓰레기 소각 등 인위적 오염원에 의해 배출되는 것으로 추정하였고, 나트륨(Na), 철(Fe), 알루미늄(Al)은 거대입자군에 속하는 원소로서 5월에 고농도를 나타내므로, 황사를 포함한 토양성분의 비산에 의한 것으로 분석한 바 있다(손정화 등, 2000; 유정석 등, 1995). 이상의 선행연구 결과를 바탕으로, 이 연구에서 실시한 PM_{10} 필터의 중금속 성분 분석 결과를 비교, 분석하였다.

본 연구는 시정 악화와 오염물질의 확산 저하를

초래한 2003년 5월 15~25일에 서울과 인천을 중심으로 발생한 짙은 연무, 박무, 안개현상과 관련하여 이들 현상이 발생하였을 때의 종관기상 특징과 대기 중 에어로졸의 특성을 살펴보고, 이를 근거로 사례의 원인을 규명하고자 하였다. 이를 위해 기상청의 지상 및 고층일기도 및 위성영상 자료를 활용하였고, 환경부의 대기오염물질 농도, 기상청과 기상연구소에서 관측한 미세먼지와 총부유분진의 농도를 분석하였다. 또, 사례기간 동안 기상청 노장에서 채취한 PM₁₀ 필터에 대해서는 중금속 성분을 분석하였으며, 광학입자계수기로 측정된 에어로졸의 입경별 수농도를 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 사례 선정

서울과 인천을 중심으로 한 수도권 지역에서 짙은 연무, 박무, 안개현상이 발생한 2003년 5월 15일부터 25일 사이를 사례기간으로 선정하였다. 사례분석을 위하여 이들 현상이 심하게 나타난 서울과 인천, 그리고 청정지역인 제주 고산의 자료를 사용하였다. 사례기간 중, 5월 21일부터 24일까지는 서울과 인천을 중심으로 연무현상이 발생하였고, 5월 16일부터 25일까지는 서울과 인천, 그리고 제주에서 박무현상이 나타났다으며, 안개현상은 5월 17일부터 19일 사이에 인천에서만 관측되었다. 이들 현상으로 인하여, 서울과 인천을 비롯한 중부권에서는 시정이 3 km 이하로 짧아졌고, 기상청의 PM₁₀ 관측망에서 측정된 서울과 인천의 대기 중 미세먼지의 농도는 각각 267, 375 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최고농도를 기록하며 평상시의 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 농도에 비해 2~3배 이상 증가하였다.

2.2 자료 및 분석방법

연무, 박무, 안개현상이 관측된 사례기간의 종관기상 특징을 살펴보기 위하여, 기상청에서 매일 2회 제공하는 지상일기도와 고층일기도를 분석하였고, 850 hPa면의 유선도와 수분속 분포를 보조 자료로 사용하였다. 그리고, 5월 19일에 NASA의 AQUA 위성에 탑재된 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)와 NOAA-16 위성에 의해 관측된 RGB 합성 영상을 통해, 한반도 주변 지역에 넓게 분

포된 smoke의 모습을 가시적으로 확인하였다.

대기 중 에어로졸의 농도는 기상청에서 5분 간격으로 자동 측정되는 미세먼지 농도 자료와 기상연구소 응용기상연구실에서 기상청(서울시 동작구 신대방동) 노장에 설치된 고용량 시료 채취기(High Volume Air Sampler)를 가동하여 측정된 PM₁₀ 및 TSP 농도 자료를 이용하였다. 채취 매체는 셀룰로오스 필터(Watman, Cat no. 1441 866)이며, 필터는 시료 채취 전·후에 24시간 이상 테스케이터에서 항량시킨 후 칭량하였고, 매일 오전 10시부터 오후 6시까지 8시간 동안 주간에만 채취하였다. TSP와 PM₁₀ 시료의 포집 유량은 1.13 m^3/min 으로 하였다(Wedding *et al.*, 1985). TSP와 PM₁₀의 질량농도는 측정 개시 후 5분과 측정 종료 전 5분에 각각 전자식 마노미터를 이용하여 유량을 측정하고, 기상청 서울관측소(종로구 송월동)에서 관측된 기압과 기온을 이용하여 각각 표준상태로 채취유량을 보정하였다. 여기서 구한 보정된 유량을 이용하여 평균 유량을 산출하고 각각 농도를 구하였다.

그리고, 미국 Micro Air 社의 광산란식 입자계수기(Optical Particle Counter; Model HIAC/ROYCO 5230)를 이용하여 1시간 간격으로 측정된 에어로졸 수농도로부터 입자 크기별 에어로졸의 수농도 분포를 살펴보았다. 광학입자계수기는 내장된 펌프에 의해 흡인된 시료 공기가 광원의 조사 영역을 통과할 때 개개의 입자에 의해 산란된 산란광의 강도를 측정하여 그 강도와 미리 정해진 강도와의 관계에 의해 입자의 크기를 추정한다. 산란광은 광전자 증배관에 의해 산란광량에 대응하는 펄스 상의 전기신호로 변환되는데, 이 펄스의 크기는 입자의 크기와 일정한 관계가 있다. 이 관계에 따라 입경이 판별되며 대응하는 입경 영역범위에서 측정된다. 이때 광원은 Laser Diode와 H_c-N_c tube이다. 즉, 시료공기에 Laser beam을 쏘아 산란된 빛을 광전자 증배관에 집광시키는 방식이다(전영신 등, 1999).

OPC에 의해 측정된 입경별 에어로졸 수농도는 1시간마다 진공펌프에 의해 1분당 1 ft^3 의 공기를 자동 흡입하여 측정된 입자의 개수로서, 그 크기가 0.3~25 μm 인 에어로졸을 8개 구간(0.3~0.5 μm , 0.5~0.82 μm , 0.82~1.35 μm , 1.35~2.23 μm , 2.23~3.67 μm , 3.67~6.06 μm , 6.06~10 μm , and 10~25 μm)으로 구분하여 단위 부피당 개수로 정의되는 수농

도(number concentration)를 관측하였다.

대기 중 미세먼지의 농도와 대기오염물질간의 상관관계를 비교 분석하기 위하여, 환경부에서 관측한 대기오염물질(NO_2 , SO_2 , O_3) 농도 자료를 사용하였으며, 2003년 5월 15일부터 25일까지 기상청 노장에서 주간의 8시간동안 채취한 PM_{10} 필터를 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 13개 중금속 성분(Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Na, Zn, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Cd)의 농도를 분석하였다. 분석방법은 채취한 분진 필터를 산분해하여 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP/AES: SHIMAZ ICPS-IV Model) 및 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP/MS: VG PQII+Model)를 이용하였으며, 전자로는 Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Na를, 후자로는 Zn, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Cd를 분석하였다. 본 분석방법은 최만식 등(1995)과 최재천 등(1999)의 선행연구에서 상세하게 제시되어 있다.

3. 연구 결과

3.1 종관기상 특징

사례기간 동안의 종관기상 특징을 살펴본 결과, 한반도는 대체로 고기압의 영향 하에서 안정한 대기상태를 나타냈으며, 중국 북동부 및 바이칼호 동남쪽으로는 5월 초부터 시작된 화재로 인해 연무현상이 광범위하게 관측되었다.

서울과 인천에서 각각 박무현상과 안개현상이 심하게 나타난 2003년 5월 17~19일의 850 hPa면 일기도를 보면(그림 1(a~c)), 한반도는 동해상의 고기압과 몽골 서부의 고기압에 의해 형성된 동서 고압대의 영향을 받아 대체로 맑은 날씨를 보였으며, 기온과 날씨의 큰 변화는 나타나지 않았다. 17일에는 바이칼호 북쪽에서 형성된 강한 기압경도력에 의해 바이칼호 동부와 만주를 차례로 거쳐 한반도 중서부까지 이어지는 북서기류가 나타났으며, 점차 기압경도력은 약화되지만 북서기류는 19일까지 계속 이어졌다.

서울과 인천을 중심으로 심한 연무와 박무현상이 발생한 5월 21~24일의 850 hPa면 일기도를 살펴보면(그림 1(e~h)), 21일은 서해 남부해상에 중심을 둔 이동성 고기압의 영향을, 22일과 23일은 북위 30~40도 사이에 폭넓게 형성된 동서 고압대의 영

향을 받아 대체로 맑은 날씨를 나타내었으며 풍속이 약하고 안정한 대기 상태를 유지하였다. 그러나, 5월 24일에는 남서쪽에서 발달한 저기압의 영향으로 인해 점차 흐려져 저녁 9시경부터 강수가 시작되어 다음날까지 이어졌다. 이 기간(5월 21~24일)은 장기간 정체된 고기압의 영향이 크게 작용하여 대기가 안정하고 바람이 약하였으며, 외부 기류의 유입 가능성이 희박한 상태가 유지되거나 남서기류가 우세하게 나타났다.

NASA의 AQUA위성에 탑재된 MODIS가 관측한 RGB 합성영상과 NOAA-16위성의 RGB 합성영상은 에어로졸의 공간 분포와 시각적 정보를 제공해주는 데, 이들 자료로부터 한반도를 포함한 동북 아시아영역에서 5월 19일에 관측된 smoke의 분포를 확인할 수 있었다. 5월 19일 05:17UTC의 MODIS 영상을 살펴보면, 바이칼호 동쪽에서부터 한반도 중북부 지역까지 동남쪽으로 넓게 퍼져있는 잿빛의 smoke 분포를 볼 수 있으며, 05:26UTC에 관측된 NOAA의 RGB 합성영상에서도 이와 유사한 smoke 분포(노란색으로 채색된 부분)를 확인할 수 있다(그림 2). 이들 영상에서 나타난 smoke의 분포는 바이칼호 부근 지역 및 극동 지역에서 발생한 산불 화재에 의한 것으로 추정된다. 이와 유사한 결과는 이권호와 김영준(2004)의 연구에서 살펴볼 수 있는데, MODIS fire 분석자료와 TOMS 자료를 이용하여 바이칼호 인근 지역을 중심으로 넓게 퍼져있는 산불발생지역을 확인하였으며, 여기서 발생한 스모크 에어로졸이 기류를 따라 이동하는 것을 파악하였다. 특히, 2003년 5월 20일의 MODIS 영상으로부터, 산불로 인한 스모크 에어로졸 플룸의 형태가 한반도를 매우 질게 뒤덮고 있음을 확인한 바 있으며, 2003년 5월 23일에 캐나다에서 관측된 스모크 또한 러시아 산불에 의한 영향으로 알려졌다.

사례기간동안 서울, 인천, 서산, 그리고 제주 고산의 시정을 조사하였다(그림 3). 연무와 박무현상의 강도를 구분하는 시정거리인 4km와 2km를 기준으로 살펴보면, 서울은 5월 17일 새벽과 19일 오전, 21일 오전과 야간, 22~24일 새벽부터 저녁까지, 그리고 25일 오전에 2~4km의 시정이 관측되었으며, 특히 22일과 23일 오전에는 2km 이하의 시정이 관측되기도 하였다. 이 때의 기상현상은 주로 강도 1, 2의 심한 박무현상이었으며, 상대습도가 낮아지는 오후시

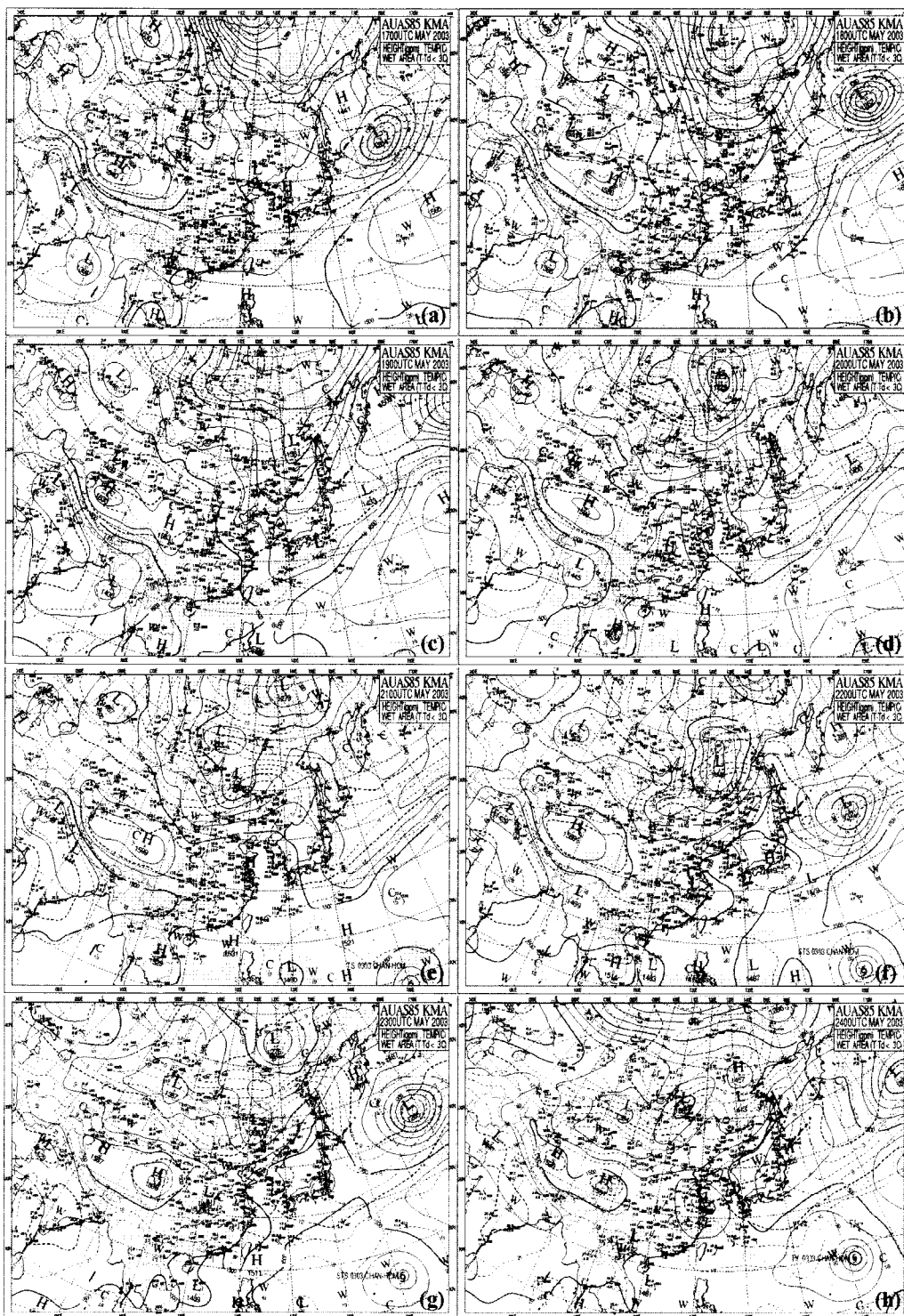


Fig. 1. Synoptic weather charts on 850 hPa at 00UTC during 17 (a) ~ 24 (h) May 2003.

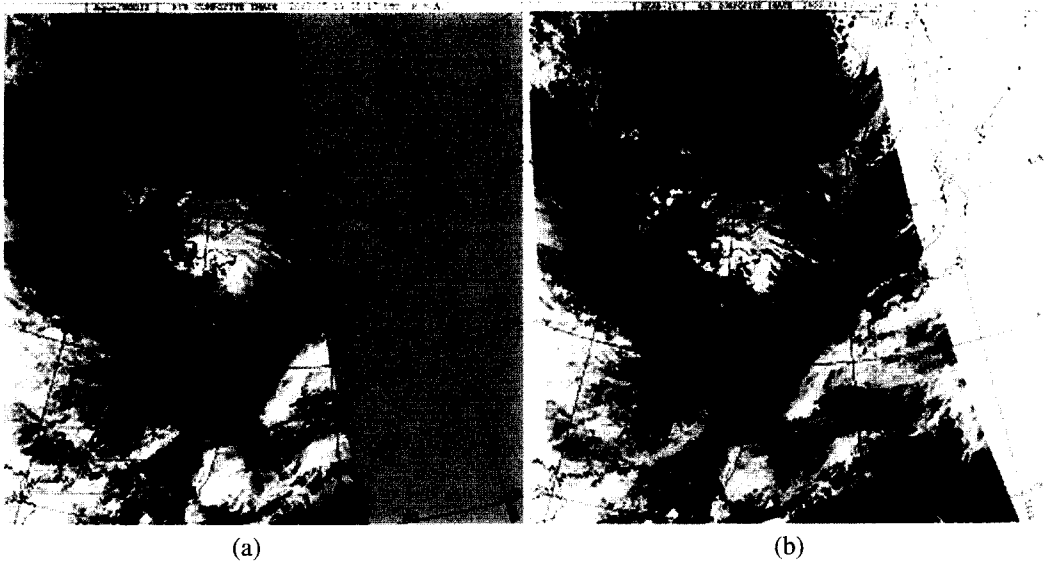


Fig. 2. MODIS images at 05 : 17UTC and NOAA RGB images at 05 : 26UTC 19 May 2003.

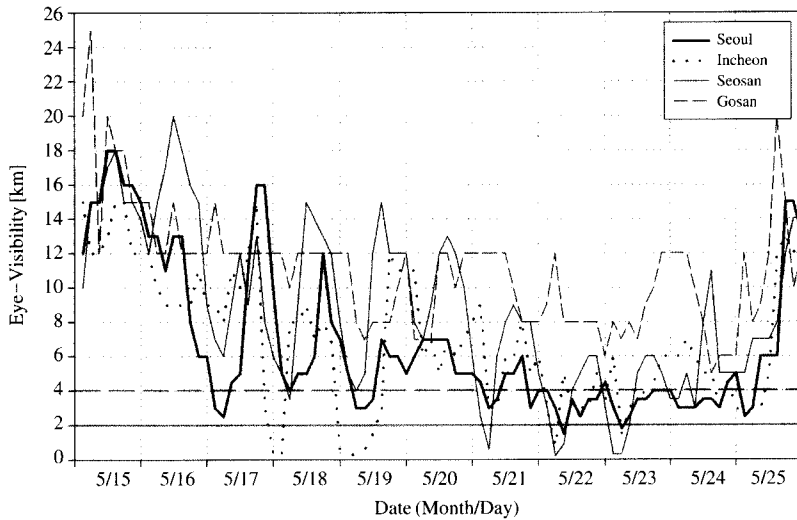


Fig. 3. Eye-Visibility observed in Seoul (Songwol-dong), Incheon (Jeon-dong), Seosan (Suseok-dong), and Jeju (Gosan) during 15~25 May 2003.

간대에는 연무현상이 지속적으로 나타났다. 인천의 경우, 5월 17일 야간부터 18일 새벽까지와 19일 새벽부터 낮 시간까지 강도 1의 안개현상이 나타나 2 km 이하의 악시정을 초래하였다. 5월 22일 새벽에 관측된 1~4 km의 저시정 또한 안개현상에 의해 기인한

것이며, 23일과 25일 오전에는 각각 강도 2, 강도 1의 심한 박무현상에 의해 저시정이 관측되었다. 서산에서는 강도 1의 안개현상으로 인하여 5월 21일 새벽과 22, 23일 새벽부터 오전까지 2 km 이하의 악시정이 관측되었다. 반면, 제주 고산은 5월 19, 20, 23, 24일

의 일부 시간대를 제외하고는 대체로 8 km 이상의 높은 시정이 관측되었다.

3. 2 에어로졸 수농도

서울에서 OPC에 의해 관측된 8개 구간의 에어로

졸의 수농도 중, 사례 기간동안 수농도의 증가가 뚜렷하게 나타난 3~6 채널, 즉 0.82~6.06 μm 범위의 입자에 대한 입경별 에어로졸 수농도를 그림 4(a)에 나타내었다. 세로축은 상용로그 척도로 나타낸 입자 개수이며 단위는 개수/ m^3 이다. 사례기간동안 관측된

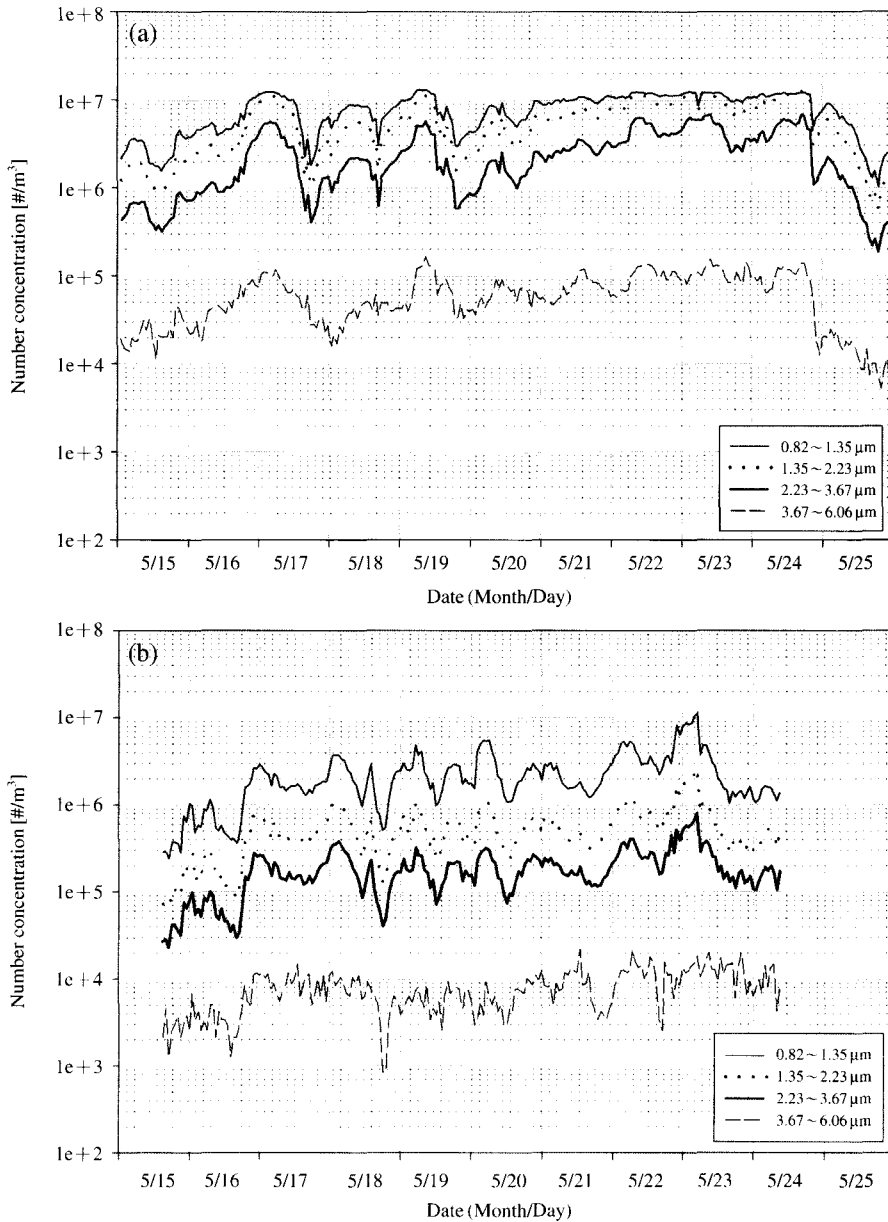


Fig. 4. Aerosol number concentrations observed in Seoul (Sindaebang-dong) (a) and Gosan, Jeju (b) during 15~25 May 2003.

에어로졸 수농도는 0.82 ~ 6.06 μm 의 4개 채널에서 매우 유사한 변화 패턴을 나타내었다. 사례기간의 전반부에는 5월 17~19일에 증가된 농도를 나타내었는데, 전날 야간부터 증가하기 시작하여 당일 새벽에 최고치를 기록하였다가 오후까지 점차 감소하는 패턴을 보였다. 사례기간의 후반부에는 5월 21일부터 24일 야간까지 특정한 일변화 없이 높은 농도가 꾸준히 지속되었다. 그러나, 5월 24일 야간부터 시작되어 25일까지 지속된 강수에 의해 수농도는 급격히 감소하였다.

제주 고산에서 관측된 입경별 에어로졸의 수농도(그림 4(b))는 서울의 수농도 분포와는 다소 다른 패턴을 나타내었다. 5월 17일부터 20일까지, 그리고 22일과 23일의 야간 또는 오전시간대에 다소 증가된 값이 관측되었으나, 수농도의 뚜렷한 증가현상이나 증가된 농도의 지속현상은 나타나지 않았다. 또한, 서울의 수농도에 비해 매우 낮은 농도값이 관측되었다.

서울에서 연무, 박무, 안개현상이 심했던 5월 17일, 19일, 그리고 21~24일에는 에어로졸 수농도 또한 증가하여 높은 값이 지속적으로 나타난 반면, 사례기간 내내 약한 박무현상만 관측되었던 제주 고산에서의 수농도는 5월 18~20, 22~23일 오전 시간대에 다소 증가하는 패턴을 보이나, 서울의 수농도에 비해 대체로 낮은 농도가 지속되어 청정지역의 특성을 나타내었다.

3.3 미세먼지 농도

기상청에서 베타레이 방식에 의해 5분 간격으로 자동 측정되는 미세먼지 농도 자료를 분석하였다. 서울에서는(그림 5(a)), 5월 15일부터 18일까지 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 농도가 관측되다가 19일 주간에 급증하여 약 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 농도를 나타내었다. 20일에는 미세먼지 농도가 감소하였다가 21일 오후부터 다시 증가하기 시작하여 24일까지 150~200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 값이 유지되었으며 24일 야간부터 시작된 강수현상으로 인해 급격히 감소하였다. 인천의 경우에는, 5월 16일 야간부터 17일 새벽 사이에 약 220~230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 농도가 관측되었고, 이후 서서히 감소하였다가 19일에 다시 급증하여 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 값을 기록하였다. 이보다 높은 농도는 22일부터 24일 사이에 관측되었는데 농도의 변동 폭이 다소 크게 나타나기도 하였으나 최고 농도가 370~380 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

이상으로 약한 황사의 경우에 해당되는 고농도를 나타내었다. 인천에서도 24일 야간부터 시작된 강수의 영향으로 미세먼지의 농도는 급격히 감소하여 25일까지 낮은 농도가 관측되었다(그림 5(b)). 제주 고산에서는 서울, 인천과는 다른 양상을 나타냈는데, 5월 19일 야간과 24일 야간에 약 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 달하는 높은 농도가 관측된 것을 제외하고는 사례기간 내내 대체로 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 부근 또는 그 이하의 낮은 농도가 관측되었다(그림 5(c)).

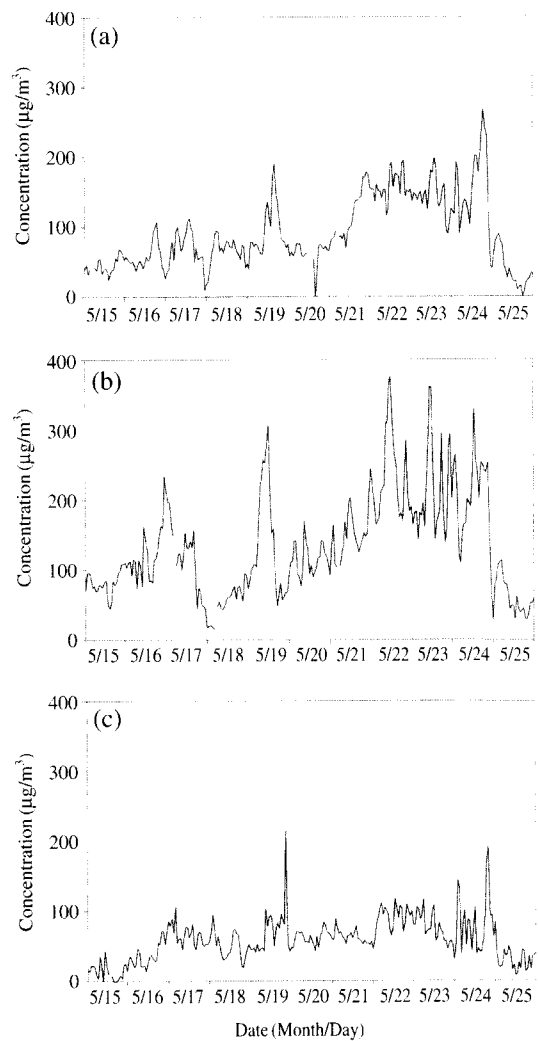


Fig. 5. PM_{10} concentrations measured in Seoul (Mt. Gwanak) (a), Incheon (b), and Jeju (c) during 15 ~ 25 May 2003.

서울과 인천에서 미세먼지의 고농도가 관측된 5월 17일, 19일, 21~24일은 연무와 박무, 안개현상이 심하게 발생한 날들인 반면, 사례기간동안 대체로 낮은 농도가 관측된 제주 고산의 경우는 5월 16일부터 25일 사이에 약한 박무현상만 발생하였다. 즉, 서울과

인천의 경우에는 도시의 대기 중에 존재하는 오염물질에 의해 연무, 박무, 안개와 같은 기상현상이 더욱 심화될 수 있으며, 청정지역인 제주 고산은 대기오염이 기상현상에 미치는 영향이 매우 미미함을 알 수 있다.

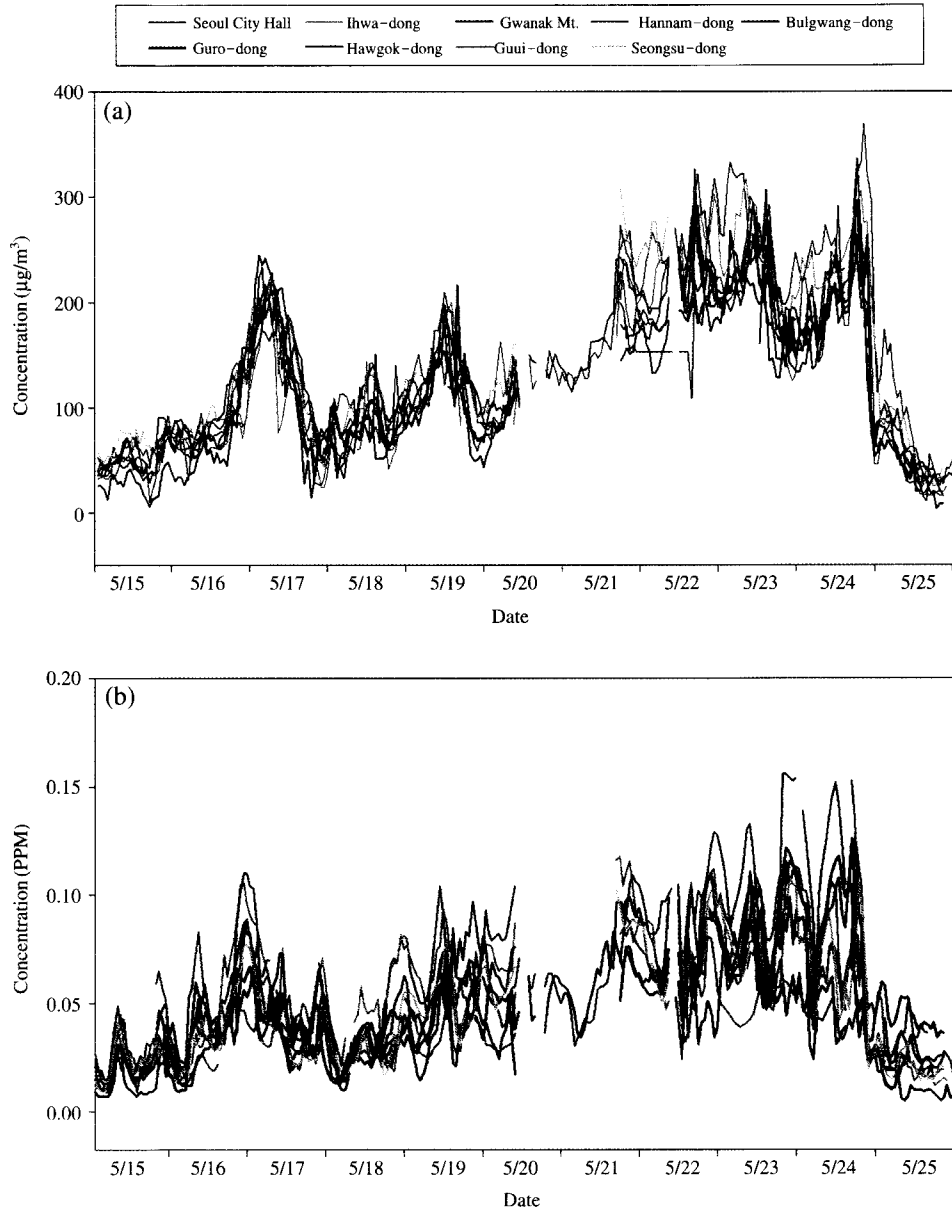


Fig. 6. Concentrations of PM₁₀ (a), NO₂ (b), SO₂ (c), and O₃ (d) observed by the Ministry of Environment in Seoul (9 sites) during 15~25 May 2003.

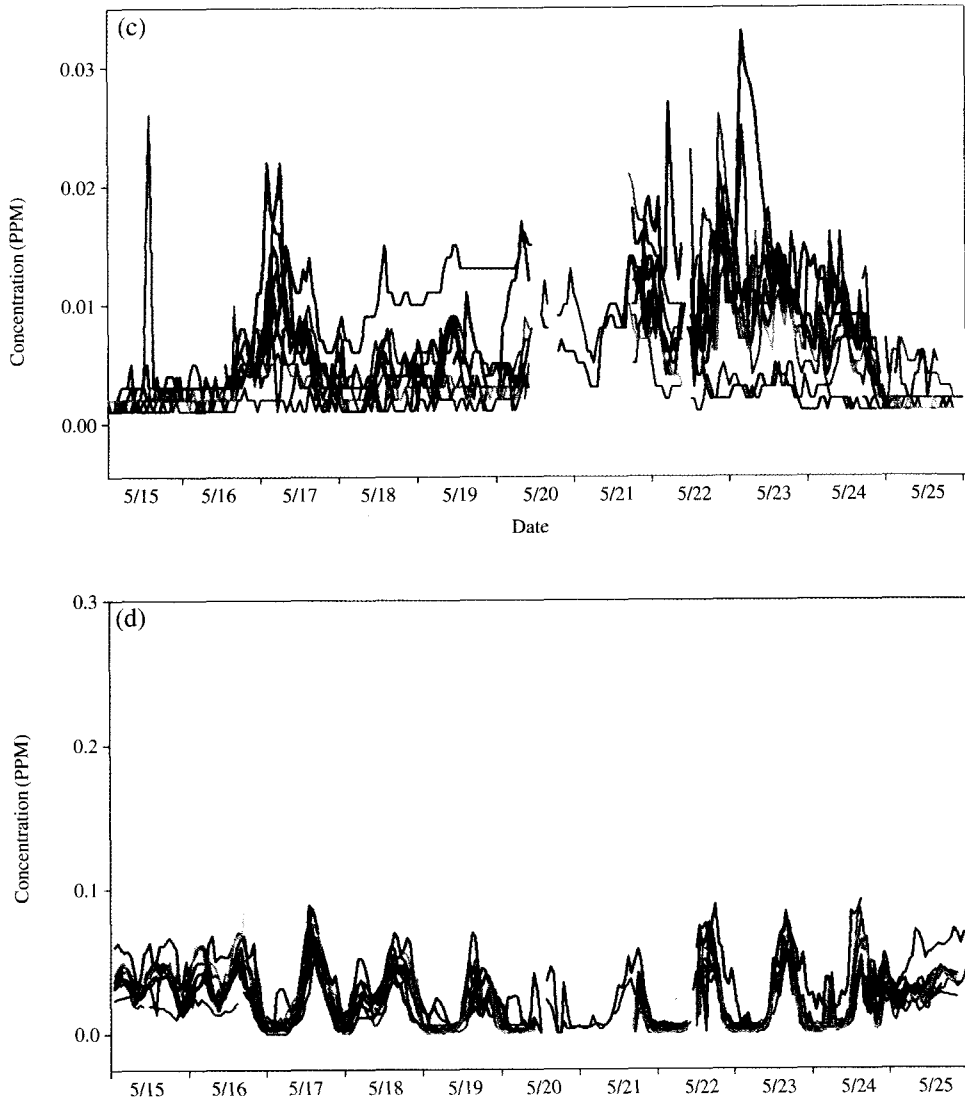


Fig. 6. Continued.

3. 4 대기오염물질 농도

사례기간동안 환경부에서 측정한 서울 9개 지점에서의 PM₁₀과 대기오염물질(NO₂, SO₂, O₃) 농도를 분석하였다. PM₁₀의 농도는 5월 16일 야간부터 서서히 증가하기 시작하여 17일 오전까지 약 200µg/m³ 또는 그 이상의 높은 농도가 측정되었다. 17일 이후 농도는 감소하다가 19일 주간에 다시 증가하여 200µg/m³ 부근의 농도값을 나타내었고, 21일부터 23일까지는 9개

지점 모두에서 200~300µg/m³의 높은 농도를 나타내었다. 농도는 24일 야간과 25일에 급격히 감소하였는데, 이는 24일 야간부터 시작된 강수의 영향으로 볼 수 있다(그림 6(a)). 같은 기간 동안의 NO₂ 농도는 PM₁₀ 농도와 매우 유사한 특징을 나타내었는데(그림 6(b)), 5월 16일 오후부터 17일 오전까지 한 차례 증가된 농도가 나타났다가 19일 주간에 또 높은 농도가 관측되었다. 그리고 21일부터 24일 사이에 사례기간

중 0.165 ppm의 최대 농도(5월 23일, 관악산)를 기록하는 등 고농도를 유지하다가 24일 야간에 급격히 감소하였다. SO₂ 농도의 경우에는 불광동과 구의동 등 일부 지점에서 다른 지점들에 비해 다소 높거나 낮은 농도가 관측된 경우도 있었으나, 나머지 지점들은 대체로 유사한 농도 특징을 보였다. SO₂의 고농도는 5월 16일 야간부터 17일 사이와 21일 저녁부터 23일 주간까지 관측되었고 23일 야간 이후 급격히 감소하는 특징을 나타내어, 5월 19일을 제외하면 PM₁₀과 NO₂ 농도특징과 비슷한 양상을 나타내었다(그림 6(c)). 그러나, O₃의 경우는 앞서 살펴본 3개 오염물질

과 다소 상이한 농도특징이 나타났는데, 태양 복사가 강한 정오이후 시간에 농도가 증가하였다가 야간에 감소하는 전형적인 오존 농도의 일주기가 관측되었다. 일별 최고 농도값은 큰 차이가 없지만, 5월 17일과 22~24일에 다른 날보다 다소 높은 값이 관측되어 PM₁₀, NO₂, SO₂ 농도 패턴에서 나타난 고농도일과 일치하는 모습도 보였다.

환경부에서 관측한 서울의 미세먼지와 NO₂, SO₂의 농도변화는 앞서 살펴본 기상청에서 관측한 서울과 인천의 미세먼지 농도와 매우 유사한 패턴을 나타내었다. 4개 대기오염물질 모두 사례기간 중 5월 17일과 19일, 그리고 21일부터 24일 사이에 고농도가 관측되었는데, 이와 같이 기간 중 일부 특정일에만 대기오염물질의 고농도 현상이 관측된 원인에 대해 살펴보았다. 3.1절에서 이미 분석한 바와 같이, 5월 17일과 19일, 그리고 21~24일은 연무, 박무 및 안개현상이 모두 발생하였거나, 강도 1 이상의 심한 연무와 박무 또는 안개와 박무현상이 동시에 발생한 날들이다. 도시 대기의 1차, 2차 오염물질이 연무, 박무, 안개 등의 기상현상과 결합하여 대기오염을 가중시키고 오염물질의 고농도를 초래한 것으로 보인다. 종관기상 특성을 고려해보면, 5월 17일과 19일은 바이칼호 남동부로부터 만주를 거쳐 한반도 중북부까지 북서기류가 존재하였다. 이 북서기류는 당시 바이칼호 부근 및 극동지역에서 광범위하게 발생한 산불의 smoke가 한반도까지 유입되었을 가능성을 나타

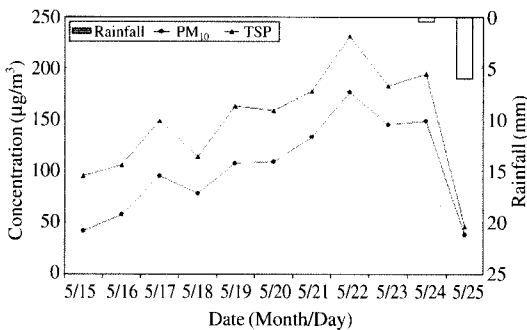


Fig. 7. TSP and PM₁₀ concentrations measured by METRI in Seoul (Sindaebang-dong), and rainfall measured by KMA in Seoul (Songwol-dong) during 15~25 May 2003.

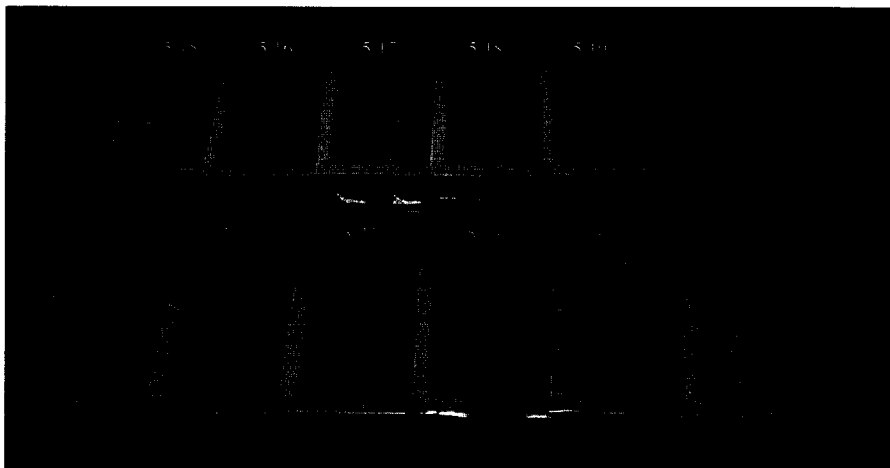


Fig. 8. PM₁₀ filters observed by METRI in Seoul during 15~25 May 2003.

내며, 이로 인해 대기오염물질의 고농도 현상이 초래되었을 가능성도 배제할 수 없다.

5월 21~24일은 장기간 정체된 고기압의 영향으로 인하여 대기가 안정하고 바람이 약하여 도시 내 대기오염물질의 확산이 불가능한 상태가 지속됨으로

써 오염물질의 고농도 현상이 나타났다. 이 기간동안 한반도에는 남서기류가 우세하여 시베리아 산불의 직접적인 영향을 고려하는 것은 불가능하지만, 이전에 이미 유입된 산불의 smoke가 정체된 대기 내에 잔류하여 간접적으로 약한 영향을 주었을 가능성은

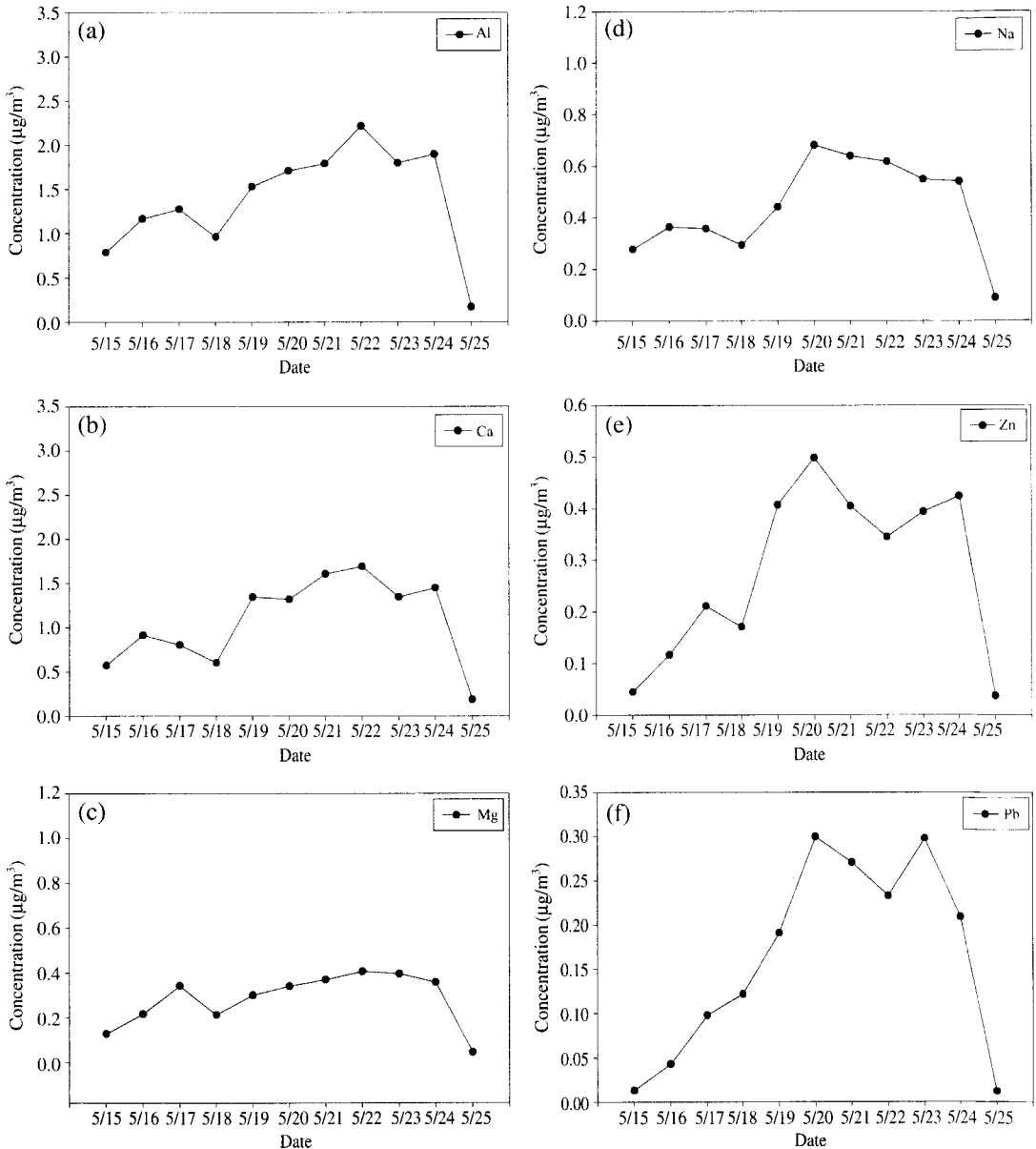


Fig. 9. Concentrations of heavy metal elements during 15 ~ 25 May 2003: (a) Al, (b) Ca, (c) Mg, (d) Na, (e) Zn, (f) Pb, (g) Cr, (h) Ni, (i) Cu, (j) Cd.

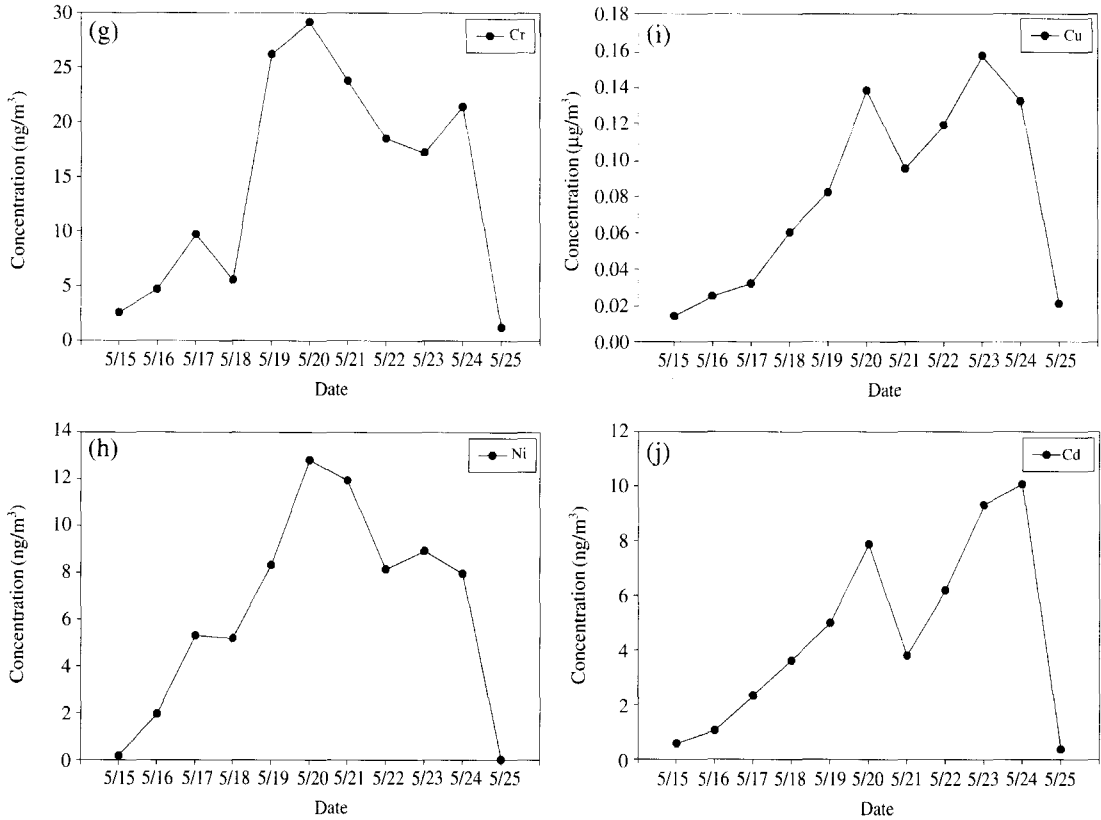


Fig. 9. Continued.

고려해 볼 수 있다.

3.5 총 부유분진(TSP) 및 미세먼지(PM₁₀) 농도

총 부유분진과 미세먼지의 농도는 5월 17일과 19일에 다소 증가하여 각각 150 μg/m³와 100 μg/m³의 값이 관측되었다. 20일에는 농도가 감소하였다가 21일부터 다시 증가하기 시작하였는데, 사례기간의 후반부(5월 22~24일)로 갈수록 점차 농도가 증가하여 22~24일의 TSP 농도는 약 180~230 μg/m³, 그리고 PM₁₀ 농도는 약 144~176 μg/m³로 높은 값이 관측되었다. 이처럼 증가된 농도는 5월 24일 야간부터 시작되어 25일까지 지속된 강수현상(6.5 mm)에 의해 급격히 감소하였다(그림 7). 이와 같은 농도 변화는 앞서 살펴본 광합입자계수기로 관측한 에어로졸 수농도 변화와 기상청, 환경부에서 관측한 미세먼지 농도 변화와 매우 유사하다. 그러나, 이 결과는 주간

의 8시간 동안에만 관측된 농도값이기 때문에, 기상청과 환경부의 미세먼지 농도와 비교하면 미세먼지 농도뿐 만 아니라 총 부유분진 농도 또한 낮게 측정되었음을 알 수 있다.

3.6 중금속 성분

그림 8은 분석한 PM₁₀ 필터를 날짜순으로 나열한 것이다. 심한 연무, 박무, 안개현상이 발생하였으며 대기오염물질과 미세먼지의 농도가 높게 관측되었던 5월 19일과 22~24일의 필터는 맨눈으로도 쉽게 구별할 수 있을 정도의 매우 짙은 회색을 나타냈다. 14개 중금속 성분 중 알루미늄(Al), 칼슘(Ca), 철(Fe), 마그네슘(Mg), 망간(Mn), 나트륨(Na)은 봄철 황사를 포함한 토양성분의 비산에 의해 발생하는 성분이며, 아연(Zn), 납(Pb), 크롬(Cr), 코발트(Co), 니켈(Ni), 구리(Cu), 카드뮴(Cd), 우라늄(U)은 겨울철 화석연료 연소, 쓰레기 소각 등 인위적 오염원으로부터

터 배출되는 중금속 성분이다.

중금속 성분에 대한 분석 결과, 주로 자연적으로 발생하는 토양 구성성분 (Al, Ca, Mg, Na)은 사례기간동안 큰 농도변화를 나타내지 않았다. 알루미늄 (Al), 칼슘 (Ca), 마그네슘 (Mg), 나트륨 (Na)의 농도는 5월 19일부터 점차 증가하여 24일까지 높은 농도를 유지하다가 25일에 급격히 감소하는 패턴이 동일하게 나타났으며, 5월 17일의 농도증가는 Mg의 경우에만 다소 뚜렷하게 나타났다 (그림 9(a~d)). 인위적 오염원에 의해 발생하는 중금속 성분 (Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Cd)은 연무, 박무현상이 심하게 나타났던 사례기간의 후반부에 높은 농도를 보였는데, 5월 18일과 19일 사이에 농도가 급증한 이후 대체로 높은 농도를 보이다가 25일에 급격히 하강하는 패턴을 나타냈다 (그림 9(e~j)). 이러한 결과를 황사현상시 분석한 중금속 성분의 농도와 비교하면, 황사시에는 Al, Ca, Mg, Mn, Na의 토양 성분 농도의 급증이 뚜렷하게 나타나는 반면, Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Cd의 인위적 오염원에 의한 성분은 연무현상시 더 높은 농도를 나타내었다. 즉, 연무현상은 인위적 오염원에 기인한 대기 오염물질이 주요 성분으로 함유되어 연무 입자를 구성하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

대기가 장기간 정체된 경우에는 도시 내부에서 방출되는 대기오염물질이 확산되지 못하여 미세먼지가 누적되고 점차 증가하여 심각한 대기오염 현상을 일으킬 수 있다. 2003년 5월 15일부터 25일까지 서울과 인천을 중심으로 한 한반도 중부지역에서는 짙은 연무와 박무, 안개현상이 발생하였다. 강도 1 이상의 심한 연무현상은 5월 21일부터 24일까지 서울과 인천을 중심으로 발생하였고, 박무현상은 5월 16~25일에 서울과 인천, 제주에 발생하였으며, 안개현상은 5월 17~19일에 인천에서만 발생하였다. 이들 현상은 5월 24일 야간부터 시작되어 25일까지 지속된 6.5 mm의 강수현상에 의해 농도가 급격히 감소될 때까지, 대기 중 에어로졸의 농도를 꾸준히 증가시켰다. 5월 15일부터 25일까지 발생한 심한 연무, 박무, 안개현상 사례의 특성을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 서울과 수도권에 심한 연무와 박무, 안개현상

이 발생하였던 기간동안의 중관기상 조건은 한반도가 고기압의 가장자리에 있거나 동서고압대의 영향을 받아 대기가 안정하고 바람이 약하였으며 대기가 장기간 정체하였다.

둘째, 서울과 인천, 제주에서 에어로졸의 농도를 관측한 결과, 2003년 5월 17일, 19일, 21~24일에 서울과 인천에서 관측된 대기 중 미세먼지가 고농도를 보였으며, 같은 기간의 에어로졸 수농도 또한 높은 값을 나타내었다. 그러나, 제주의 대기 중 미세먼지 농도와 에어로졸 수농도는 서울과 인천에 비해 매우 낮게 측정되어 청정지역의 특성을 잘 나타내었다.

셋째, 서울의 9개 지점에서의 PM₁₀, NO₂, SO₂ 농도는 5월 17일과 19일, 21~24일 사이에 높은 값이 관측되어 에어로졸 수농도 및 미세먼지 농도와 유사한 변화 패턴을 나타내었다. 반면, O₃는 태양 복사가 강한 오후에 최고 농도를 보였다가 야간에 감소하는 뚜렷한 일변화를 나타내었다.

네째, 사례기간동안 채취한 미세입자 필터에 대한 중금속 성분을 분석한 결과, 연무와 박무현상이 심하게 나타났던 5월 19~23일에 Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Cd 성분의 농도가 크게 증가하였으며, 이로써 연무 입자를 구성하는 성분이 주로 인위적 오염원에 의해 기인됨을 알 수 있었다.

2003년 5월에 발생한 연무, 박무, 안개 사례의 주된 원인은 사례기간동안 장기간 정체한 고기압의 영향이다. 5월 17일부터 19일까지 한반도는 고기압의 가장자리에 들면서 고기압의 영향 하에 있었으며, 21~24일에는 동서고압대의 영향이 우세해지면서 정체된 고기압의 영향은 지속되었다. 정체된 고기압으로 인해 대기는 안정하고 바람이 약하였으며, 5월 21일 이후에는 외부로부터 기류가 유입되기 어려운 중관패턴이 형성되었다.

따라서, 사례기간의 후반부(5월 21~24일)에 심하게 나타난 서울과 인천의 에어로졸의 고농도 현상은 도시 자체의 대기오염현상과 광화학 스모그 등이 장기간 정체된 고기압의 영향과 안정한 대기 상태로 인해 확산되지 못하고 대기 내 에어로졸 농도의 누적을 초래한 것으로 사료된다. 여기에는 한반도 중부권으로 유입된 러시아 산불의 smoke가 확산되지 못하고 잔류해 있었을 가능성도 배제할 수 없을 것이다. 또한, 서울과 인천에서는 에어로졸의 고농도 현상이 나타났는데 비해, 제주 고산에서는 에어로졸의 농도

가 매우 낮았으므로 도시에서 발생하는 대기오염현상이 이번 사례에 중요한 영향을 미쳤음을 확인하였다.

이와 같이, 연무, 박무, 안개와 같은 기상현상을 동반한 스모그 사례는 대기질을 악화시키며 인체와 동·식물, 그리고 사회 전반에 걸쳐 악영향을 미치기 쉽다. 그러므로, 종관 기상특징과 위성영상의 분석, 대기 중 에어로졸을 포함한 대기오염물질에 대한 농도분석 및 화학성분 조사, 대기오염 감시 등의 활발한 연구 활동이 요구되며, 이에 대한 방지 대책 또한 마련되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 하나인 “황사 감시 및 예측기술개발(I)” 과제에서 수행되었습니다. 꼼꼼하고 세심하게 심사해주신 두 분 심사위원님께 감사드립니다.

참고 문헌

기상청 (2002a) 기상용어해설, 204pp.
 기상청 (2002b) 지상기상관측지침, 245pp.
 기상청 (2003) 기상위성자료분석 (<http://mis.kma.go.kr/>).
 김광식 등 (1992) 기상학사전, 735pp.
 김병화, 김동술 (2000) 수원지역 대기 중 PM_{2.5}와 PM₁₀의 환경거동에 관한 연구. 한국대기환경학회지, 16(2), 89-101.
 김필수, 김윤장, 이양호, 조숙현, 안승태 (1986) 도시 대기 Aerosol의 입자 직경 0.01~1.0 μm 범위의 농도 변화 특성. 한국대기보전학회지, 8(2), 52-57.
 손정화, 황인조, 김동술 (2000) 대기 중 PM-10의 오염원 추정을 위한 다환방향족 탄화수소와 무기원소자료의 예비통계분석-1996년 2월~6월까지 대규모 영통건설지역 주변을 중심으로. 한국대기환경학

회지, 16(1), 11-22.
 신훈중, 이태정, 김동술 (1996) 대기부유분진 중 미량 금속원소의 입경별 농도분포에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 12(1), 67-77.
 유정석, 김동술, 김윤신 (1995) 서울시 PM-10 오염원의 정량적 기여도 추정. 한국대기보전학회지, 11(3), 279-290.
 윤마병, 정용승 (1995) 청주-청원 지역에서 관측한 안개와 박무의 특성 연구. 한국대기보전학회지, 12(1), 15-21.
 이권호, 김영준 (2004) 인공위성 자료와 AERONET 관측자료를 이용한 러시아산불 시 발생한 에어로졸의 중장거리 모니터링. 한국대기환경학회지, 20(4), 437-450.
 전영신, 김지영, 최재천, 신도식 (1999) 황사시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 수농도 특성. 한국대기환경학회지, 15(5), 575-586.
 전영신, 임주연, 최병철 (2003) 황사현상과 연무현상에 따른 서울의 봄철 에어러솔 특성. 한국기상학회지, 39, 459-474.
 최만식, 이선기, 최재천, 이민영 (1995) 소백산 대기 중 입상 물질의 화학적 특성에 관한 연구 (II). 한국대기보전학회지, 11(2), 191-198.
 최재천, 조하만, 전영신, 박기준 (1999b) 1998년 봄철 서울에서 관측된 에어러솔의 금속 성분에 관한 연구. 한국기상학회지, 35, 263-271.
 황인조, 김동술 (1998) Submicron 부유분진의 화학적 조성 및 분포에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 14(1), 11-23.
 Gerhard W. and M. Trainer (2000) The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States. Science, 288, 324-328.
 Moon, K.C., S.G. Shim, Y.S. Ghim, Y.P. Kim, and S.D. Kim (1997) Air quality changes of the seoul metropolitan area from year 1985 to 1995. Environmental Research Forum, 7, 45-50.
 Wedding J.B., M.A. Wedding, and Y.J. Kim (1985) Evaluation the Sierra-Andersen 10 micron inlet for the high volume sampler. Atmospheric Environment, 19, 539-545.