

서울지역의 시정 장애 요인에 관한 연구 On the Origin of Visibility Degradation in Seoul

윤 순 창 · 이 강 웅¹⁾

서울대학교 대기과학과, ¹⁾한국외국어대학교 환경학과

(1998년 1월 21일 접수, 1998년 6월 15일 채택)

Soon-Chang Yoon, Gang-Woong Lee¹⁾

Department of Atmospheric Sciences, Seoul National University

¹⁾*Department of Environmental Sciences, Hankook University of Foreign Studies*

(Received 21 January 1998; accepted 15 June 1998)

Abstract

Visibility is a good indicator of comprehensive air quality. The prevailing visibility in Seoul is no better than the past although the average concentration of SO₂ and TSP (total suspended particulate) has decreased quite significantly in the past decade, owing to the government efforts to reduce the emission. Then, a question arises why visibility has not been improved. In order to answer this question we have investigated which components of air pollutants are most responsible for the visibility degradation in Seoul.

Analysis on the visibility vs the aerosol size distribution measured by an optical particle counter shows that the particles of the size interval between 0.5 μm and 2.5 μm are most responsible for the visibility degradation. Among the criteria air pollutants, NO₂ concentration is found to be most responsible, rather than PM₁₀. Ion analysis of the particulate collected by a high volume sampler shows that the nitrate component increases more significantly than other ions when visibility becomes very poor. Therefore, we conclude that the major causes of visibility degradation in Seoul are the increase of NO₂, nitrates and the particles of the size range between 0.5 μm and 2.5 μm.

Key words : visibility, air pollution, particulate, size distribution, nitrate

1. 서 론

스모그에 의한 시정 장애는 대기 오염도를 체감할 수 있는 대표적인 현상이다. 따라서 시정 (visibility)은 대기 오염도를 나타내는 종합적인 지표라고 할 수 있다. 우리 나라의 대기오염도 변화를 보면, 환경부의 대기 오염 저감 정책에 힘입어 SO₂와 총 부유분진의 농도가 1988년 이후에 현저히 줄어들었

다 (환경부, 1997). 그러나, 기상청에서 매일 측정하는 시정의 변화를 보면 수도권에서는 시정이 전혀 개선되지 않았고, 오히려 전국적으로는 감소 추세에 있는 것으로 나타난다 (오현선과 윤순창, 1996). 그러면 부유분진과 황산염 입자의 원인 물질인 SO₂가 줄었음에도 불구하고 "왜 스모그 현상이 개선되지 않는가? 또한, 대도시의 스모그 현상을 줄이기 위해서는 어떤 물질을 저감해야 하는가?"라는 의문이 생긴다.

시정이 감소하는 원인은 대기중의 입자와 가스가 햇빛을 흡수 또는 산란하기 때문인데, 최근에 국립환경연구원과 한국과학기술연구원 등에서 수행된 대도시 스모그에 관한 연구 결과(한진석 *et al.*, 1996; 이종훈 *et al.*, 1995)에 의하면 서울시내에서 시정장애의 성분별 기여도는 유기탄소, 원소탄소, 황산염, 질산염의 순서로 나타나며, 입자에 의한 흡수에 가장 크게 영향을 미치는 요인은 원소 탄소이고, 유기탄소와 원소탄소의 기여율이 50% 이상이라고 보고된 바 있다. 그러나, 시정 장애 현상은 주로 빛의 파장역에 가까운 0.1~2 μm 영역의 입자들에 의한 산란 효과에 의한 것으로 알려져 있으므로(김필수 *et al.*, 1991; Waggoner *et al.*, 1981), 시정 장애에 영향을 미치는 입경 영역 및 입경 영역별 성분을 밝히는 것이 매우 중요하다고 하겠다.

본 연구에서는 nephelometer (Belfort Instrument Inc. Integrating Nephelometer Series 1598) optical particle counter (HIAC/ROYCO Airborne Particle Counter 5230, 이하 OPC) 및 cascade impactor (Graseby Model GS2310)를 이용하여 빛의 산란계수, 입경별 입자의 수농도 분포 및 입경별 입자의 이온 분포를 분석하여, 시정 장애를 유발하는 물질이 무엇인지를 밝히고자 한다. 측정 결과의 종합적 분석을 위하여 가스상 대기 오염 물질인 SO_2 , CO, NO, NO_2 , O_3 농도와 풍속, 풍향, 기온, 습도 등의 기상 인자를 동시에 측정하였다. 측정 장소는 서울대학교 기초과학교육연구공동기연구원 (이하 공동기원) 옥상이고, 1995년과 1996년 가을에 각각 약 2달간씩 측정하였다.

2. 측정 방법

시정(가시거리)은 측정 기간동안 매일 9시, 12시, 15시 및 18시에 목측(目測)을 통하여 실제 가시거리를 관측하였고 특별히 시정이 매우 나쁘거나 아주 좋은 날에는 매 시간 관측하였다. 측정 자료의 연속성을 위하여 nephelometer 측정을 병행하였는데 nephelometer(파장 550 nm)는 입자에 의한 산란계수를 연속적으로 측정하므로, 소멸계수(extinction coefficient)가 입자에 의한 산란계수와 거의 같다고 가정하면 Koschmeider 공식(시정 = 3.9/소멸계수)에

의하여 시정의 시간적 변화를 연속적으로 계산할 수 있다. 입경별 입자수의 분포는 매 시간 OPC로 3회씩 측정하여 그 평균값을 취하였고, 입경 구간은 표 1과 같다. 또한, 입경 구간별 입자의 화학적 성분 분석을 위하여 cascade impactor를 이용하여 포집한 필터(glass fiber)로부터 입경 구간별 입자의 이온 성분비와 중금속 성분비를 분석하였다. Impactor는 원래 5단으로 구성되어 있으나 적정유속(40 lpm)을 유지하기 위하여서는 2단만 사용할 수 있었다. 따라서 1단계 필터에는 0.95 μm 이상, 2단계에는 0.49 μm ~0.95 μm , 그 아래에는 0.49 μm 미만의 입자가 포집되도록 하였고, 일 1회 포집하여 분석하였다.

포집된 필터들 중 시정이 아주 좋은 날과 나쁜 날의 표본들에 대하여 음이온 분석(Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-)과 양이온 분석(NH_4^+) 및 중금속 분석(Ca, Mg, Fe, Pb, Zn, Cu)을 실시하였다. 한편, PM_{10} 은 β -gauge sampler(Wedding & Associates 제품)로 연속

Table 1. Size intervals of the optical particle counter.

Channel No.	Size Interval(mm)
1	0.32~0.56
2	0.56~1.0
3	1.0~2.5
4	2.5~5.0
5	5.0~10.0
6	10.0~15.0
7	15.0~25.0
8	25.0~

측정하였다.

시정에 영향을 주는 입자들의 크기와 농도는 기상장의 영향을 많이 받으므로 측정 지점에 자동기상측정기(automatic weather station)를 설치하여 풍향, 풍속, 기온, 습도 등의 기상인자를 연속적으로 측정하였다. 또한 대기오염도의 변화를 알아보기 위하여 SO_2 , CO, NO, NO_2 , O_3 농도를 자동측정기기(Thermo Environment Instruments Inc. Model 42, Model 43, Model 48, Model 49)를 이용하여 연속적으로 측정하였다. 이상의 측정 기기들의 조작 방법과 보정 방법 등은 정길란(1996)과 김현주(1997)의 논문에 자세히 설명되어 있다.

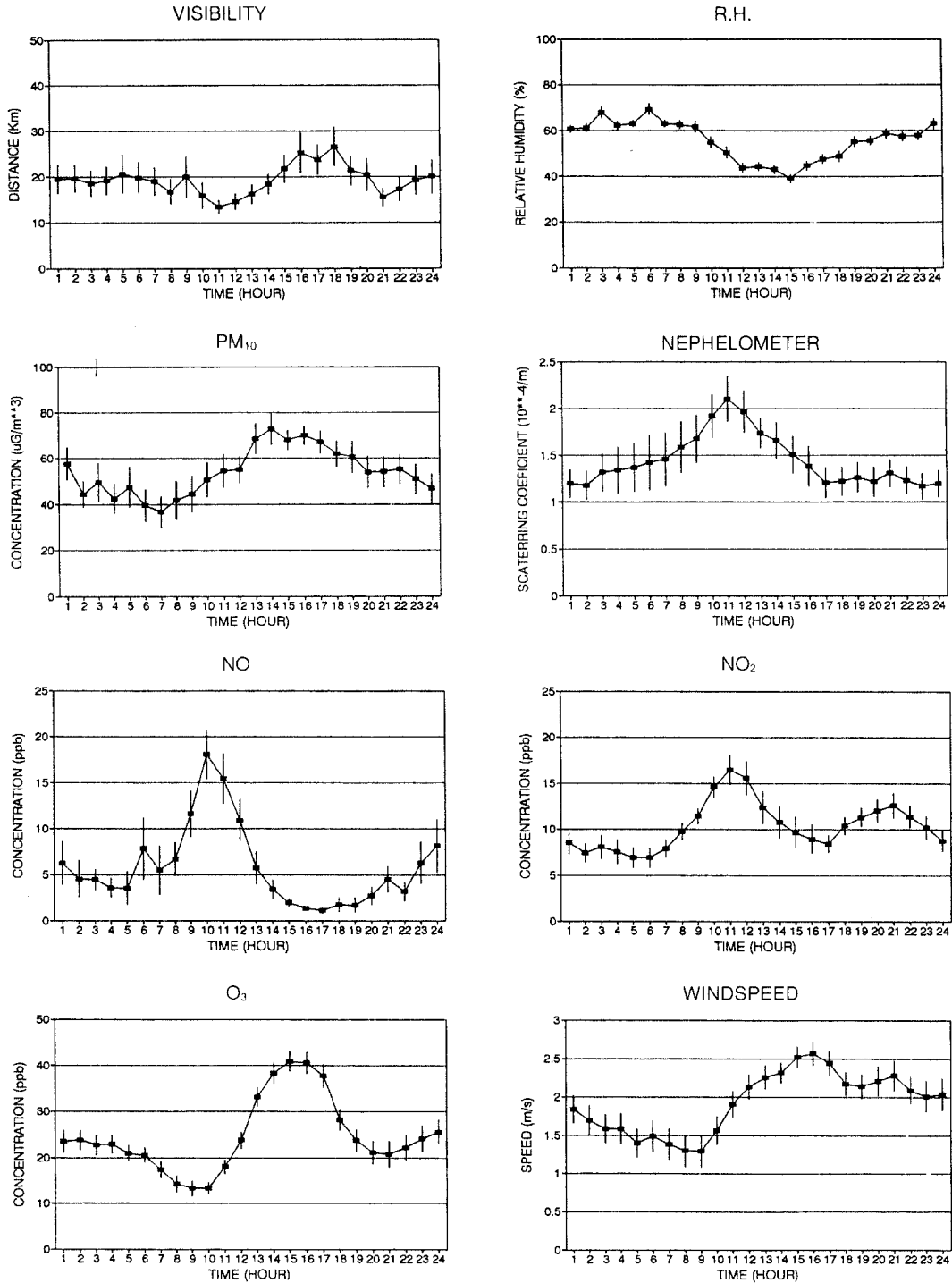


Fig. 1. Diurnal variation of visibility, PM₁₀, NO, O₃ (left panel), relative humidity, scattering coefficient, NO₂ and wind speed (right panel) averaged during September 28 to November 16 in 1995.

3. 결과 분석

3.1 일변화 경향

그림 1은 1995년 9월 28일부터 11월 16일까지 약 50일간의 nephelometer 의한 시정, 대기 오염도 및 기상장의 평균 일변화를 나타낸다. Nephelometer로 측정된 산란계수는 오전 11시에 최대값에 도달하고, 따라서 시정은 오전 11시에 최소값이 되는데, 빛 산란의 원인물질인 입자 즉, PM₁₀의 농도는 이와는 달리 오후 2시에 최대값에 도달한다. 한편, NO₂는 시정이 최소가 되는 오전 11시에 최대값에 도달하여, 시정과의 관계는 PM₁₀보다 NO₂가 더 밀접하다는 점을 암시한다. NO, NO₂ 및 O₃의 일변화는 대도시에서의 NOx cycle을 잘 나타내고 있다. 측정 지점이 관악산 기슭인 점을 감안하면, 이 지점

근방에는 공장이 없으므로 주 오염원은 대학캠퍼스에 진입하는 자동차 배출가스로 간주할 수 있다. 기상장과의 관계는 일반적으로 습도가 높을 때 시정이 나빠지는 경향을 보이고, 풍속이 약하고 오염원이 많은 시내쪽에서 바람이 불어올 때 대기 오염도가 높아지고 시정도 나빠지는 일반론적 경향을 보인다.

3.2 분진 성분과 시정 변화

1995년 10월 12일부터 10월 25일 기간 중 시정 상태에 따라 10개의 경우에 대하여 이온 성분과 중금속 성분을 서울대학교 환경안전연구소에 의뢰하여 분석한 결과, 유기탄소 입자가 무기탄소 입자보다 월등히 많았고, 황산염 입자가 질산염 입자보다 많았으나 시정이 가장 나쁜 날과 좋은 날을 비교하면 그림 2에서 보듯이 질산염 입자(nitrate)의 증가율이 가장 크게 나타난다. 이는 위에서 언급한 시정 감소와 NO₂의 증가가 깊은 관계가 있음을 뜻한다. 즉, NO₂가 증가하면 가스-입자 변환에 의해 질산염 입자가 증가한 것으로 해석된다. 한편, 중금속 분석 결과는 시정 변화에 따른 뚜렷한 성분비의 변화가 없는 것으로 판단된다.

3.3 입경 분포와 시정 변화

위의 결과를 토대로 시정 악화를 유발하는 입자의 크기와 시정 악화를 유발하는 입경 구간에서의 주요 분진 성분 변화를 알아보기 위해 OPC와 cascade impactor를 이용하여 1996년 9월 5일부터 11월 29일까지 동일 지점에서 같은 측정을 실시하였다. 일변화 경향과 이온 성분비의 변화는 위의 전년도 결과와 거의 일치하였다(김현주, 1997). 목측한 시정을 Koschmeider식에 대입하여 역산출한 소멸계수(extinction coefficient)와 입경 구간별 수능도와 의 상관 관계(그림 3)를 보면 channel 2(0.56 μm ~ 1.0 μm)와 channel 3(1.0 μm ~ 2.5 μm) 구간에서 가장 높은 상관 관계를 나타내고, 그 외의 구간에서는 상관관계수가 급격히 낮아진다. 즉, 0.56 μm ~ 2.5 μm 구간의 입자수의 증가가 시정 감소에 가장 크게 기여함을 알 수 있다. 이 결과는 소멸계수 대신 nephelometer로 측정된 산란계수(scattering coefficient)를 사용한 경우에도 유사하게 나타난다.

습도가 매우 낮을 때(30% 미만)는 channel 2(0.56

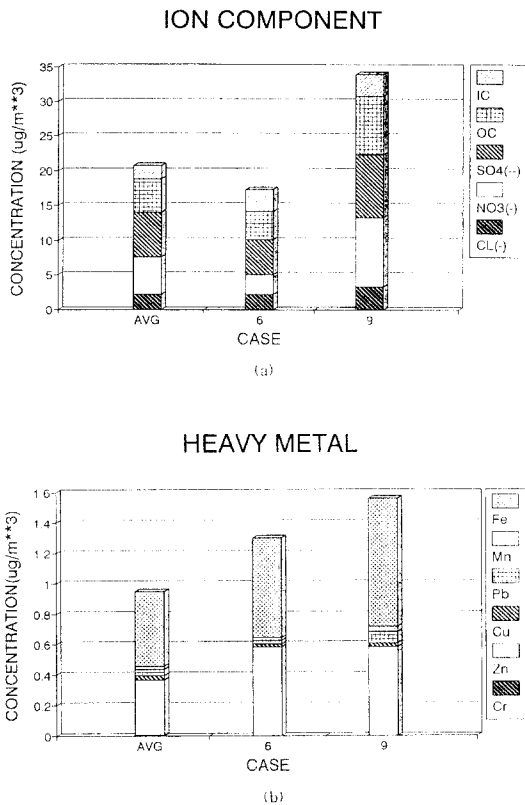


Fig. 2. Comparison of the ion components (a), and of heavy metals (b), between a clear day (case 6) and a smoggy day (case 9).

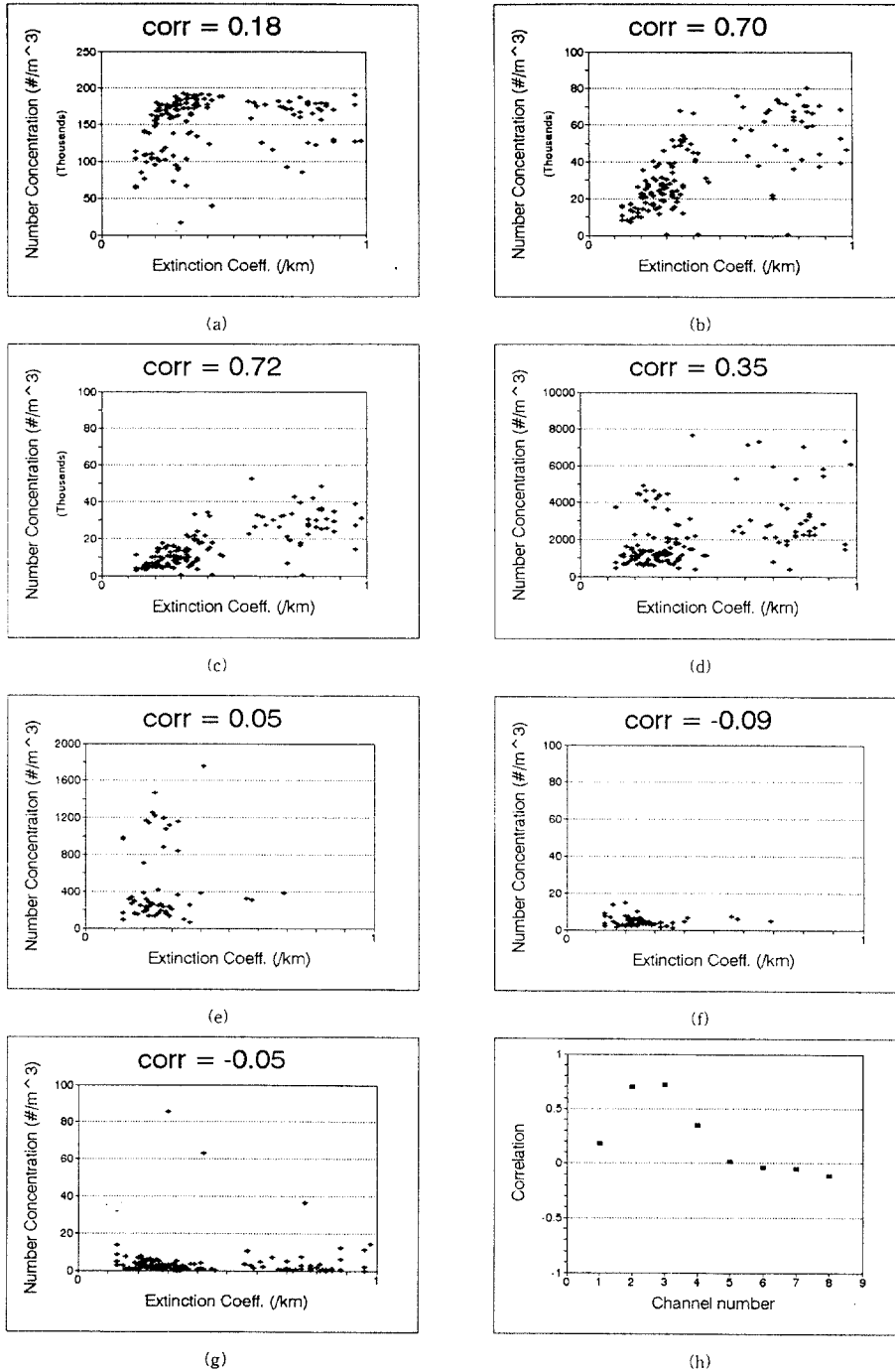
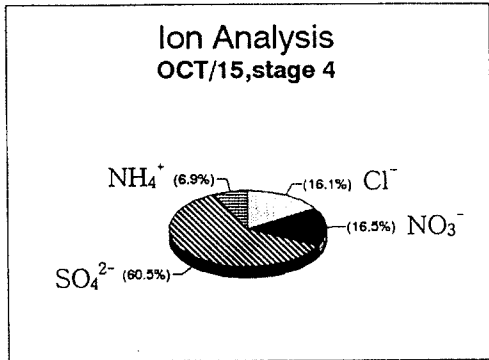
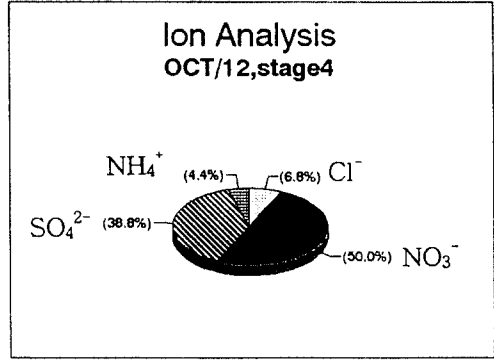


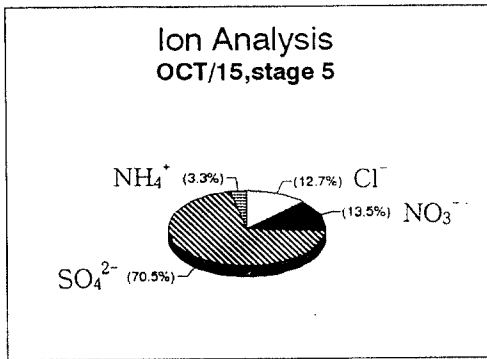
Fig. 3. Scatter diagram of light extinction coefficient vs number concentration of particles of the range (a) 0.32 μm ~ 0.56 μm , (b) 0.56 μm ~ 1.0 μm , (c) 1.0 μm ~ 2.5 μm , (d) 5.0 μm ~ 10.0 μm , (e) 10.0 μm ~ 15.0 μm , (f) 15.0 μm ~ 25.0 μm , (g) greater than 25.0 μm . And, correlation coefficient of each channel is plotted in (f).



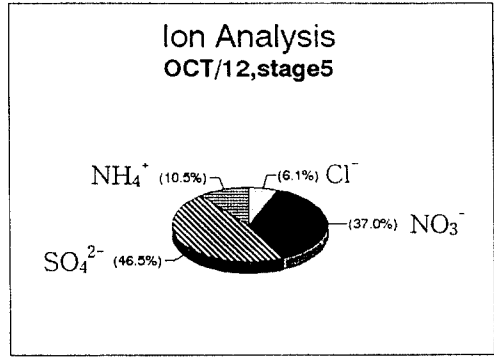
(a)



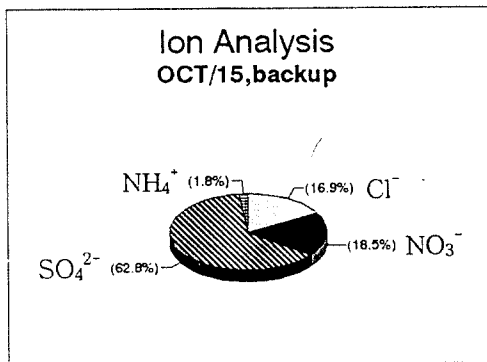
(d)



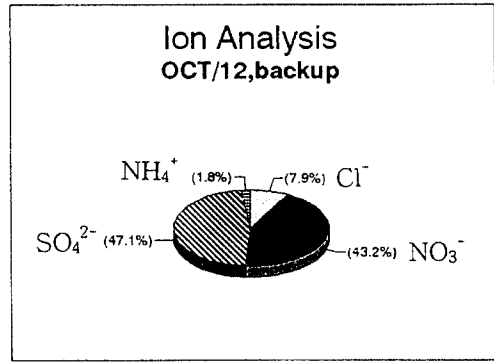
(b)



(e)



(c)



(f)

Fig. 4. Pie graphs of ion concentration ratios for a clear day; (a), (b), (c), and for a smoggy day; (d), (e), (f), in which (a) and (d) are ion ratios of the particles greater than $0.95 \mu\text{m}$, (b) and (e) are ion ratios of the particles in the range $0.49 \mu\text{m} \sim 0.95 \mu\text{m}$, and (c) and (f) are ion ratios of the particles less than $0.49 \mu\text{m}$.

$\mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$)에서만 높은 상관 계수를 보이고 channel 3 ($1.0 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$)에서는 상관 계수가 현저히 낮아지는 경향을 보여, 건조할 때는 $1.0 \mu\text{m}$ 미만 입자가 시정 장애의 주 원인임을 알 수 있었다.

Cascade impactor로 포집한 입경 구간별 이온 성분비와 시정과의 관계(그림 4)를 보면 시정 악화시 질산염 입자(nitrate)의 구성비는 세 구간($0.95 \mu\text{m}$ 이상, $0.49 \mu\text{m} \sim 0.95 \mu\text{m}$, $0.49 \mu\text{m}$ 미만)에서 모두 3배 정도 증가하여 nitrate의 증가가 시정 악화에 가장 크게 기여한 점은 재확인되었으나, 구간별 nitrate 입자의 분포에 대해서는 뚜렷한 결론을 내리기 어렵다고 판단된다.

4. 결 론

1995년 9월 28일부터 11월 16일까지와 1996년 9월 5일부터 11월 30일까지 서울대학교 캠퍼스내의 측정지점에서 시정 및 대기 중 부유분진의 입경별 수농도, 질량농도 및 NO, NO₂, O₃ 농도 등을 측정 분석한 결과, 목측 시정을 Koschmeider식에 대입하여 역산출한 빛 소멸계수(extinction coefficient)는 $0.56 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$ 입경구간의 입자 수농도와 가장 높은 상관 계수(0.7)을 나타낸다. 또한, nephelometer로 측정한 산란계수(scattering coefficient)와 입경별 입자 수농도와의 상관관계도 유사한 결과를 보인다. 따라서, 시정 장애를 유발하는 원인 물질은 입경이 $2.5 \mu\text{m}$ 미만의 입자라고 결론지을 수 있고, 이 결과 우리 나라 대도시의 스모그 현상을 개선하기 위해서는 현행 대기환경기준의 PM₁₀만이 아니라 PM_{2.5}의 규제가 시행되어야 한다고 판단된다.

또한, 부유분진의 이온 구성비를 분석한 결과에 의하면 시정 악화시에는 질산염 입자(nitrate)의 증가가 가장 두드러지게 나타난다. 따라서 nitrate의 원인 물질인 NOx의 저감이 시정의 개선에 크게 기여할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 서울대학교내 측정점에서의 측정 결과이므로 국내 타지역에서의 측정 분석 연구가 병행되면 더 종합적인 결론을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

결론적으로 현재까지의 타 연구 결과들과 종합하

면 서울지역의 스모그 또는 시정 장애 현상의 개선을 위해서는 PM_{2.5}, NOx 및 무기탄소(inorganic carbon)의 저감이 가장 중요하며, 이를 위해서는 자동차 배출가스에 대한 더욱 강력한 규제가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

연구 수행에 필요한 nephelometer를 빌려 주신 한국과학기술연구원 문길주박사, 이온 분석을 해주신 서울대학교 환경안전연구소의 엄종수, 이현숙, 측정에 참여한 정길란, 김현주, 원재광 제씨 및 대기오염 측정기기를 임대해 준 서울대학교 기초과학교육연구공동기기에 감사드린다. 본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(BSRI-96-5412 및 96-7405)에 의하여 수행되었다.

참 고 문 헌

- 김필수, 오미석, 김의훈(1991) 서울 대기 에어로솔의 농도와 광소산에 관한 연구, 7(3), 227-234.
- 김현주(1997) 시정악화를 유발하는 원인 물질의 측정 및 분석, 서울대학교 석사학위논문, 50pp.
- 오현선, 윤순창(1996) 서울지역의 시정악화에 영향을 미치는 대기오염 및 기상상의 특성, 한국기상학회지, 32(1), 131-138.
- 이종훈, 백남준, 김용표, 문길주(1995) 1993년 8월의 서울 지역 시정 연구, 한국대기보전학회지, 11(3), 291-298.
- 정길란(1996) 관악산에서의 시정과 대기오염농도 및 기상요소의 측정과 분석, 서울대학교 석사학위 논문, 58pp.
- 과학기술처(1994) 서울 지방의 스모그 현상 연구, 한국과학기술연구원, 환경연구센터.
- 한진석, 김병곤, 김신도(1996) 1994년 수도권 지역에서의 시정과 미세 입자상물질 화학조성과의 관계해석, 한국대기보전학회지, 12(4), 377-388.
- 환경부(1991~1997) 환경백서, 환경부.
- Waggner, A.P., R.E. Weiss, N.C. Ahlquist, D.S. Coaert, S. Will and R.J. Charlson(1981) Optical characteristic of atmospheric aerosol, Atmos. Environ., 15(10), 1891-1009.