

서울 대기 에어로솔의 농도와 광소산에 관한 연구

A Study on the Concentration and Light Extinction of Atmospheric Aerosol in Seoul

김 필 수 · 오 미 석 · 김 의 훈

한양대학교 자연과학대학 물리학과
(원고접수: 1991. 10. 4)

Pill-Soo Kim, Mi-Seock Oh, Eui-Hoon Kim

Department of Physics, Hanyang University, Seoul
(Received 4, October 1991)

Abstract

This study deals with concentration and light extinction of atmospheric aerosol in Seoul. From the measured aerosol size distribution for particle diameter ranging from $0.01 \mu\text{m}$ ~ $1.0 \mu\text{m}$, extinction coefficient is calculated using the Mie theory. The results show that the diurnal variation of aerosol concentration, in general, reveals the lowest concentration in early morning and afternoon, while the highest at about 8 O'clock owing to the heavy traffic and accumulation of air pollution in the low atmosphere. However, aerosol concentration and extinction coefficient on April 7 give low values due to the advective wind. On the other hand, high aerosol concentration and extinction coefficient are recorded on April 10 although solar radiation is weak.

From the distribution of extinction coefficient we can find that aerosol particles of $0.1 \mu\text{m}$ ~ $1.0 \mu\text{m}$ in diameter are highly effective on light extinction.

1. 서 론

대기 에어로솔의 물리적 특성은 크기, 모양, 밀도 외에 역학적, 광학적, 전자기학적 및 열역학적 성질을 들 수 있다. 그중에서 광학적 성질은 19세기 후반 Tyndall(1869)에 의해 광산란에 관한 연구가 처음 실험적으로 실시된 이후 Rayleigh(1871)에 의해 이론적으로 분석되었으며 Mie(1908)에 의해 일반적인 산란이론이 확립되었다. 광산란은 입자의 크기에 따라 그 효율이 달라지는데 직경이 $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 미세입자는 Rayleigh 산란효과를 따르는 분자산란을 하며 $0.1 \mu\text{m}$ ~ $1.0 \mu\text{m}$ 범위의 입자는 크기가 가시광선의 파장과 일치하므로 Mie의 이론에 의하여

그 산란효과를 구할 수 있다(Van de Hulst, 1957; Kerker, 1969).

에어로솔의 광학적 성질은 주로 직경, 형태, 굴절율, 흡수율 등에 따라 크게 달라진다. 특히 에어로솔에 의한 빛의 소산정도는 입자광의 파장, 입자의 직경, 굴절율과 농도에 의존한다. 대기오염이 심한 지역에서 대기가 흐려지고 시정이 감퇴되는 것도 주로 에어로솔에 의한 빛의 소산 때문이다. 뿐만 아니라 에어로솔은 태양으로부터 지면에 도달하는 가시광선의 투과를 감소시킨다. 물론 전지구적으로 에어로솔의 농도가 증가하면 태양복사선을 차단하여 지구냉각화를 초래할 수 있으므로 기후와도 관련이 깊다.

본 연구에서는 서울에서 Electrical Aerosol

Analyzer로 에어로솔을 측정하여 농도, 크기에 따른 입자수 분포 및 광소산 특성을 다루었다.

2. 에어로솔의 크기 분포함수와 Mie 산란

2.1 에어로솔 입자크기 분포함수

입자의 크기는 에어로솔의 움직임과 성질을 특성화하는데 중요한 인자이다. 단분산(monodisperse) 에어로솔은 동일한 크기의 입자들로 구성되지만 다분산(polydisperse) 에어로솔은 다양한 크기의 입자들로 이루어지므로 크기별 특성을 고려해야 한다.

입자크기 분포함수는 분포된 양을 입자크기에 관해서 나타낸 함수이다. 입자들의 밀도가 균일하고 크기가 다른 입자들이 연속분포를 가질 때에 에어로솔들의 단위 직경당 입자수 농도, 즉 입자크기 분포함수는

$$f(D) = \frac{dN}{dD} \quad (1)$$

로 정의된다. 따라서 입자직경 D 와 $D+dD$ 사이의 입자수는

$$dN = f(D) dD \quad (2)$$

로 표현하며 전 입자직경 범위에 대한 입자의 수 N 는

$$N = \int_{D_1}^{D_2} f(D) dD \quad (3)$$

로 표시한다.

대기 에어로솔의 입자직경 $0.1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 범위에 대한 입자크기 분포는 Junge(1963)가 실험적으로 제시한 다음의 멱함수(power function)로 표시될 수 있다. 즉

$$\frac{dN}{dD} = CD^{-(k+1)} \quad (4)$$

으로 주어지며 단위 대수직경당 입자수는

$$\frac{dN}{d \log D} = CD^{-k} \quad (5)$$

와 같이 표현된다. 여기서 C 와 k 는 실험적으로 결정되는 상수이며 특히 k 는 분포곡선의 기울기를 나타낸다.

2.2 Mie 산란과 소산계수

입자에 의한 가시광선의 산란효과는 입자크기에 따라 Rayleigh 산란과 Mie 산란 등으로 나누어 설명된다. 입자의 직경 D 가 입사광의 파장보다 작을

때에는 Rayleigh 산란이 적용되지만 입자직경이 입사광의 파장과 비슷하거나 클 때에는 Mie 산란 이론이 쓰여진다. 따라서 대기중 가시광선의 산란은 입사파장과 비슷하거나 큰 에어로솔 입자에 의해 일어나므로 Mie 산란 이론이 적용된다. Mie 산란 이론은 Maxwell의 전자기방정식의 해에 관한 문제로서 Van de Hulst(1957)와 Hodkinson(1965) 등에 의해 자세히 논의된 바 있다.

Mie 이론에 의하면 소산효율은

$$Q_e = \frac{2}{X^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (6)$$

와 같다. 여기에서 $X = \pi D / \lambda$ 로서 크기인자이고 D 는 입자직경이다. 그리고 a_n 과 b_n 은 입자의 굴절률과 직경 및 입사광의 파장에 관한 함수로서 각각 n 번째의 전기부분파 및 자기부분파의 진폭이며 Ricatti-Bessel 함수로 구해진다.

대기의 흡수효과를 고려치 않고 방사(emission) 효과를 배제한다면 세기가 I_0 인 평행광선이 위치에 따라 농도가 달라지는 비균질(inhomogeneous) 에어로솔층을 통과한 후 세기를 I 라 할 때, 이 두 빛의 세기의 비는 Bouger의 법칙(또는 Lambert-Beer의 법칙)에 의해

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-\int_0^L \sigma_e(X) dx\right) \quad (7)$$

과 같이 주어진다(Hinds, 1982). 이 식에서 σ_e 는 에어로솔의 소산계수(extinction coefficient)이고 L 은 빛이 에어로솔을 통과한 거리이다. 그러나 대기 부유입자들은 다양한 크기와 성질을 가진 다분산 에어로솔이므로 모든 크기범위의 입자들을 고려할 때 소산계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_e = \sum_{i=1}^n \frac{\pi D_i^2 \Delta N_i(Q_e)_i}{4} \quad (8)$$

윗 식에서 σ_e 를 계산하려면 입자크기 별로 입자수 농도와 소산효율을 알아야 한다. 대기 에어로솔의 크기별 입자수 농도 ΔN 는 실측으로 얻게되고 소산효율은 식 (6)에 의해서 계산되며 파장, 직경, 굴절률에 따라 달라지므로 $Q_e(\lambda, D, m)$ 로 표시한다. 만약 에어로솔 입자크기 분포가 연속 spectrum을 가진다면 가시광선 전 영역에 대해서 σ_e 는

$$\sigma_e = \frac{\pi}{4} \int_{D_1}^{D_2} Q_e(\lambda, D, m) D^2 f(D) dD \quad (9)$$

로 쓸 수 있다. 여기에서 $f(D) = dN/dD$ 는 입자수 분포함수이다. 한편 주어진 파장에 대한 단위 대수직

경당의 소산계수는

$$\frac{d\sigma_e}{d \log D} = \frac{\pi D^2}{4} Q_e(\lambda, D, m) \frac{dN}{d \log D} \quad (10)$$

가 되며 $dN/d \log D$ 는 단위 대수직경당 에어로솔 입자수 농도분포이다. 한편 소산계수로부터 시정 V 는

$$V = \frac{3.9}{\sigma_e} \quad (11)$$

에 의해 계산된다(Hinds, 1982).

3. 실험방법

본 연구에서 에어로솔의 측정은 미국 TSI (Thermo-Systems Inc.)사의 Electrical Aerosol Analyzer, Model 3030 (EAA 3030)를 사용하였다.

EAA 3030은 aerosol 입자의 크기와 전기적이동도 (electrical mobility)가 함수관계를 가지는데 바탕을 두고 있다. 이 장치는 Whitby 등(1970)에 의해 개발되었으며 Minnesota 대학교의 연구진과 TSI사의 기술진에 의해 장치의 원리, 작동법 및 응용 등에 관하여 계속 연구되고 개량되어 왔다(Liu and Pui, 1974; Liu *et al.*, 1974).

이 장치의 원리는 장치내에 흡입된 공기가 고전압 전장을 지날때 공기속에 부유하고 있는 에어로솔이 corona 방전에 의해 대전되므로 그의 전기적 이동을 측정하여 에어로솔의 입자크기를 결정하는 것이다. 측정범위는 입자직경 $0.0032 \mu\text{m}$ 부터 $1.0 \mu\text{m}$ 이며 십진단위당 4개의 동일한 기하학적 간격으로 10개 구간으로 입자크기를 나누어 측정할 수 있다. 그러나 입자수의 농도가 희박한 극미세 입자의 측정은 신뢰도가 저하되므로 본 연구에서는 $0.01 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ 사이의 입자에 한하여 측정결과를 다루었다. 이 장치의 제원, 동작원리, 자료처리 방법들은 이미 상세히 다루어졌으므로(Kim and Rho, 1986; Kim, 1986) 여기에서는 생략한다.

이 연구에서의 에어로솔 측정은 1991년 4월 4일부터 11일 사이에 한양대학교 자연과학대학 4층에서 수행하였으며 기상자료는 기상청의 관측결과를 이용하였다.

4. 결과 및 논의

4.1 광소산효율

소산효율 Q_e 는 복소굴절률 m , 파장 λ 및 입자직경 D 등에 따라 복잡하게 변하게 된다. 식 (6)에 의해 전산으로 구한 소산효율 Q_e 의 입자크기에 따른

변화는 그림 1과 같으며, 가시광선의 중심파장 $0.55 \mu\text{m}$ 와 가시광선 영역의 경계라고 할 수 있는 $0.38 \mu\text{m}$ 와 $0.76 \mu\text{m}$ 에 대해 계산한 것이다. 여기에서 입자의 굴절률은 건조한 대기 에어로솔의 복소굴절률인 $m=1.50-0.02i$ 를 채택하였다(Willeke and Brockmann, 1977). m 의 실수부는 산란에, 허수부는 흡수에, 그리고 전체적으로는 소산에 기여하게 된다.

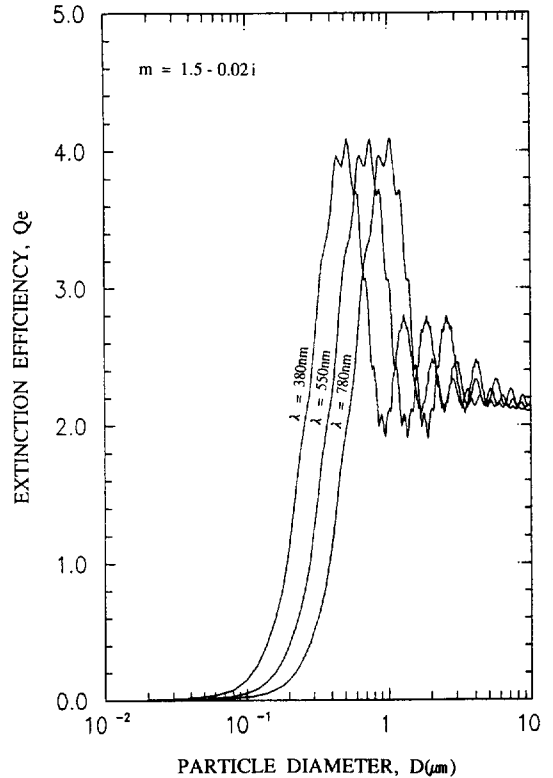


Fig. 1. Particle extinction efficiency versus particle diameter of sphere with refractive index $m = 1.5 - 0.02i$ for different wavelengths.

이 그림에서 알 수 있듯이 $0.55 \mu\text{m}$ 이하의 입자들에 의한 광소산은 거의 무시되고 직경 $0.2 \mu\text{m}$ 부근에서 부터 증가하기 시작하여 $0.5 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ 사이에서 최고값에 이른다. 파장이 길수록 큰 입자에서 최대 소산효율이 나타난다. 이처럼 소산효율은 광파장에 따라 달라지므로 가시광선 전 영역에 대해 계산하는 것이 정확하겠지만 편의상 가시광선 중심 파장인 $0.05 \mu\text{m}$ 를 택하여 본 연구에 이용하였다.

파장 $0.55 \mu\text{m}$ 에 대한 입자크기별 광소산효율 Q_e 는 입자직경 $0.7 \mu\text{m}$ 근처에서 최대값 4 정도에 이르는

후 진동적인 증감을 계속하여 직경이 $10 \mu\text{m}$ 이상 되면 Q_e 는 2에 접근해 산다. 여기에서 계산된 소산효율 Q_e 는 다음에 다루어질 에어로솔 입자수 분포와 더불어 소산계수 σ_e 의 계산에 이용된다.

4.2 에어로솔 농도의 일변화 경향

EAA 3030으로 에어로솔을 측정된 값을 전산처리하여 단위 체적당의 공기중에 포함되어 있는 에어로솔 입자수의 농도를 결정하였다. 그림 2는 1991년 4월 4일부터 11일까지 8일간에 대해 입자직경 $0.01 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ 범위의 에어로솔 입자수 농도의 일변화를 나타낸 것이다.

이 그림에서 8일간 측정된 에어로솔 농도는 7일과 8일을 제외하고는 유사한 일변화 양상을 보여준다. 일반적으로 에어로솔 농도는 새벽 4시에 최저값을

보인 후 교통량의 증가와 더불어 낮은 대기층내에 오염물질이 누적됨에 따라 점점 높아져 오전 8시경에 최고값을 기록한다. 더욱이 이 시간대는 새벽보다 교통량이 증가하고 대기의 확산과 희석이 아직 활발하지 못하기 때문에 농도가 증가한다. 그러나 8시가 지남에 따라 대기 혼합층이 점점 높아져 에어로솔 농도는 희석된다. 에어로솔 농도는 오후에 최저에 이르게 되는데 이때에는 기온이 상승하고 대기가 불안정해지며 혼합층은 최고에 이르러 연직순환이 활발해진다. 또 하루중 풍속이 가장 높아지며 이류성 기류에 의해 희석되기 때문이다. 야간이 되면 대기역전층이 지표근처에 생기며 계속 방출되는 오염물질로 에어로솔의 농도는 높아지게 된다. 자정이 지나면 교통량은 격감하고 낮은 대기층내의 에어로솔은 안정된 대기중에서 하강하며 제거양이 많아지므로 새벽까지 농도가 감소하게 된다. 에어로솔의 농도의 일변화는 대기 오염물질의 배출률, 대기층의 높이, 기온, 풍속에 따라 크게 달라지며 smog의 생성 등도 주요 변수가 될 수 있다.

그림 2에서 4월 7일과 8일은 예외적인 일변화를

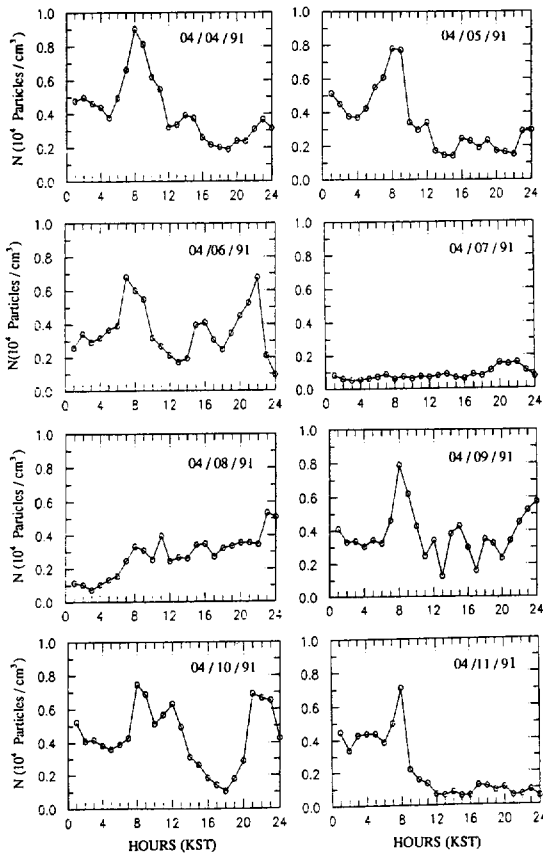


Fig. 2. Diurnal variation of aerosol number concentrations (N) for $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ in particle diameter at Hanyang University for April 4~11, 1991.

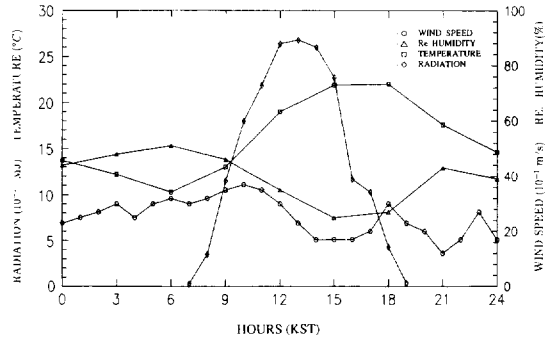


Fig. 3. Diurnal variation of the meteorological parameters on April 7, 1991.

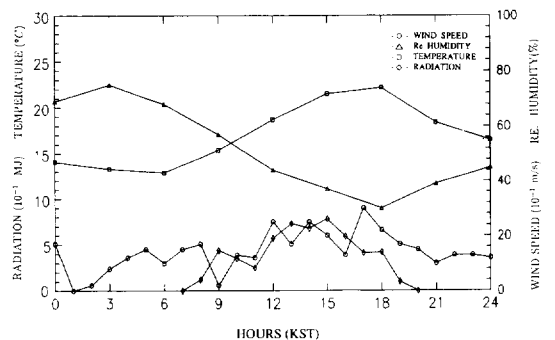


Fig. 4. Same graph as Fig. 3 but for April 10, 1991.

보이고 있다. 4월 7일은 그림 3에서 보는 바와 같이 일사량이 1.45 MJ로 꽤 강한 휴일이었다. 일평균 풍속은 2.3 ms^{-1} 이었고 5시부터 12시까지는 3 ms^{-1} 이상의 바람이 불어 서울지역에 정체해 있던 대기 오염물질을 확산시켰던 것이다. 다음날인 4월 8일은 전일의 영향으로 오전까지 낮은 농도를 보이다가 오후부터 평일의 양상으로 회복됨을 보이고 있다.

한편 대기가 혼탁했던 4월 10일은 그림 4에 보인 바와 같이 일사량이 0.39 MJ로 흐렸고 평균 풍속이 1.4 ms^{-1} 이었으며 비교적 높은 에어로솔 농도를 나타내었다. 당일의 낮은 일사량을 고려할 때 에어로솔은 광화학 반응에 의해 생성된 것이 아니고 주로 일차대기오염물질에 의한 누적이거나 화학적으로 생성된 이차 에어로솔 때문인 것으로 해석된다. 이처럼 서울의 고농도 에어로솔은 반드시 건조하고 맑은 날에만 나타나는 것이 아니고 흐리고 습도가 높거나 일사량이 낮은 때에도 나타나고 있어 그 발생 과정, 화학적 및 광화학적 반응이 어떠한 것인지 밝혀져야 할 과제이다.

4.3 크기별 에어로솔 입자수 분포

EAA 3030으로 전산 처리하면 매 시간별 단위 대수직경당 에어로솔 입자수 농도를 구하게 되고 이를 그래프로 그리면 입자수 분포곡선을 구하게 된다. 그림 5는 4월 7일의 에어로솔 입자수 분포곡선을 격시간 간격으로 그린 것이다. 그림에서 새벽 2시보다 새벽 4시에 가장 낮은 입자수 분포를 보이는데 낮은 대기층내에 유입되는 입자수 보다 제거되는 입자수가 계속 많아지기 때문이다. 새벽 4시부터 사람들의 활동이 시작됨에 따라 차량통행도 많아지므로 오염물질과 더불어 점점 에어로솔의 농도가 증가한다. 오전 6시에는 $0.2 \mu\text{m}$ 미만의 미세입자의 수가 현저히 증가하는데 낮은 대기층 내에 차량에서 배출된 일차 오염물질의 기여때문인 것으로 생각되며 $0.5 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자의 농도도 약간 증가함을 보여 준다. 8시부터 10시까지는 $0.1 \mu\text{m}$ 미만의 미세입자가 오히려 줄어든 대신 $0.13 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자가 증가하고 있다. 이것은 운동이 활발한 미세 입자들이 부단한 충돌과 병합과정을 거쳐 큰 입자로 변환되기

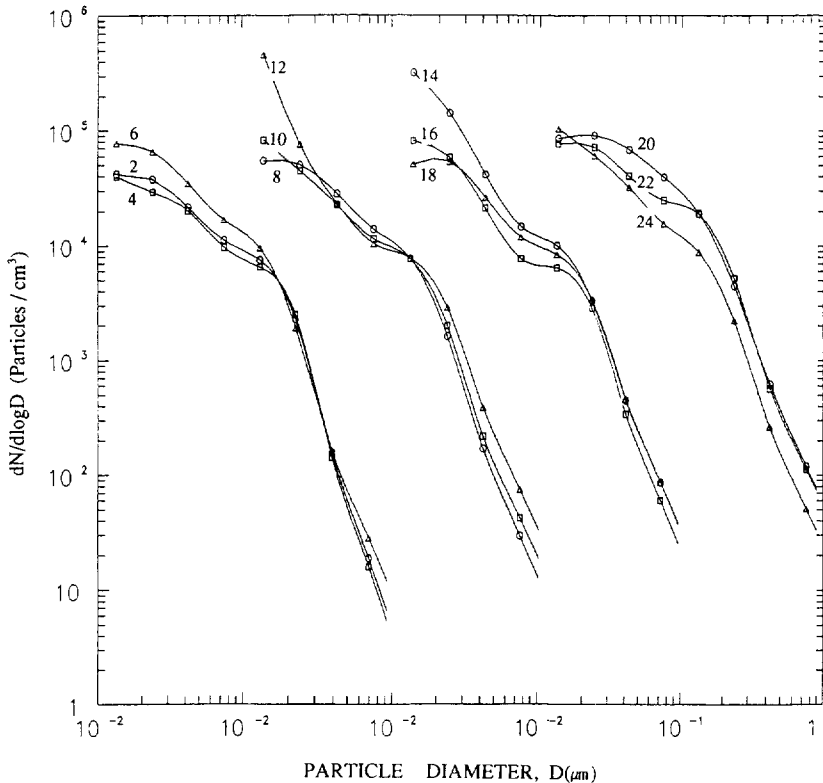


Fig. 5. Aerosol number distribution ($dN/d \log D$) as a function of particle diameter (D) on April 7, 1991. Number denotes time of a day.

때문인 것으로 풀이된다. 그러나 10시부터 0.023 μm 미만의 극미세 입자들은 오후 14시까지 큰 증가를 보여준다. 여기에서 생긴 에어로졸은 강한 태양광의 영향하에서 광화학적으로 기체-입자 변환으로 생성된 것으로 생각된다. 그후 16시~18시에는 농도 분포가 감소하지만 20시~21시에는 안정된 대기층 내에 대기오염물질의 누적함에 따라 입자수 분포는 증가한다. 그러나 자정이 지나면서 농도분포는 감소하게 된다.

그림 6은 농도가 비교적 높으나 일사량이 적었던 날에 대한 크기별 입자수 농도 분포곡선을 나타낸 것이다. 이들 분포곡선은 습도가 비교적 높은 야간과 일출직전까지는 0.023 μm 미만의 미세입자의 농도가 낮게 관측된다. 미세입자들은 습도가 높은 때에는 응결핵으로 작용하여 큰 입자로 성장되지만 곧 지면에서 제거되기가 쉽다. 그러므로 습도가 입자수 분포에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 오전 8시경에는 가장 높은 값을 나타내며 오후에는 점점 농도 분포가 낮아진다. 야간에는 낮은 대기층 내에 0.023

μm ~0.23 μm 사이의 입자수가 증가하지만 미세입자는 줄어든다. 자정부터 새벽 4시까지 안정된 대기층에서 층돌, 병합에 의해 입자가 성장되지만 지표에서 제거되므로 농도는 줄어들게 된다.

요약하면 크기별 입자수 분포로 에어로졸 배출원, 습도, 풍속, 태양광, 입자 생성과 소멸관계에 따라 시시각각으로 그 양상이 달라지게 된다.

4.4 소산계수의 시간변화

식 (6)에 의해 계산된 소산효율의 곡선인 그림 1 및 입자수 농도분포인 그림 5와 6을 식 (10)에 넣어 시간별로 단위 대수직경당 소산계수의 분포곡선 $d\sigma_e/d \log D$ 를 계산하였다.

그림 7은 4월 7일에 대해 3시간 간격으로 $d\sigma_e/d \log D$ 를 나타낸 것이다. 이 그림에서 일사량이 많은 12시경에는 입자수 농도가 높아짐에 따라 소산계수도 높게 나타나고 오후에는 낮아진다. 야간에는 낮은 대기층 내에 대기오염물질이 누적되므로 다시 증가하지만 자정부터 감소하고 있다.

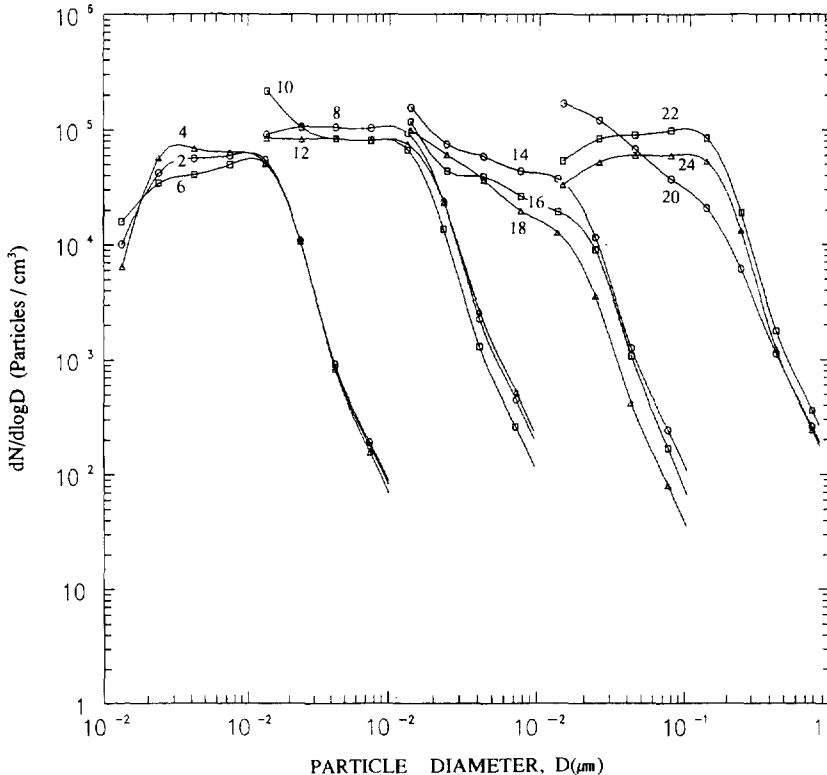


Fig. 6. Aerosol number distribution ($dN/d \log D$) as a function of particle diameter (D) on April 10, 1991. Number denotes time of a day.

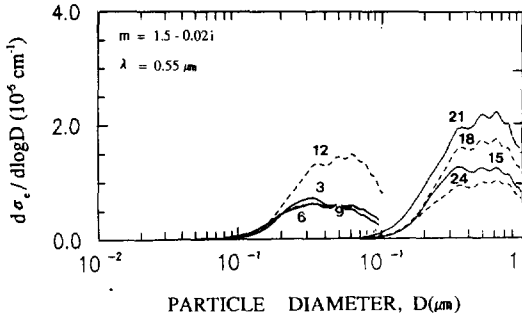


Fig. 7. Time development of extinction coefficient distribution as a function of particle diameter on April 7, 1991. Number denotes time of a day.

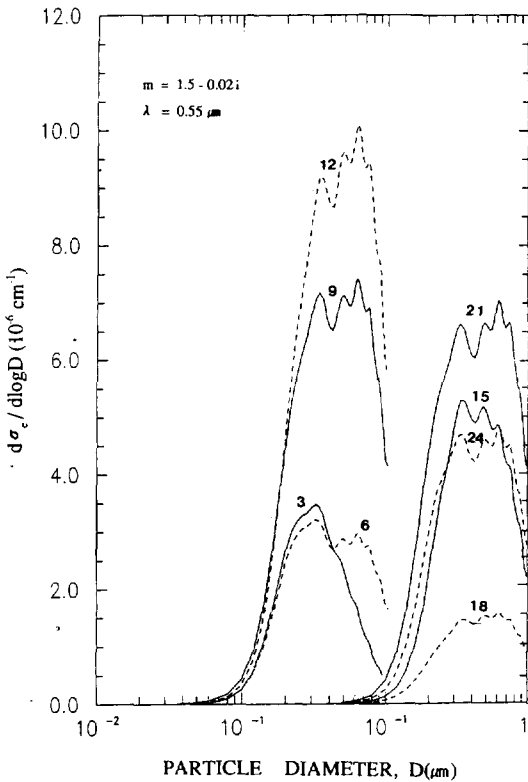


Fig. 8. Time development of extinction coefficient distribution as a function of particle diameter on April 10, 1991. Number denotes time of a day.

그림 8은 에어로솔 농도가 높았던 4월 10일의 소산계수 분포의 시간별 변화곡선이다. 새벽에는 입자수 농도의 감소로 소산계수가 낮으나 9시와 12시에

높은 소산계수를 보여준다. 오후의 감소에 이어 야간에는 증가하고, 자정부터 낮아진다. 그림 7과 8을 비교할 때 4월 10일은 4월 7일에 비하여 소산계수가 훨씬 높음을 알 수 있으며 따라서 시정이 훨씬 낮았던 것을 알 수 있다. 이들 분포곡선을 보면 광소산은 직경 $0.1\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$ 범위의 입자들에 의해 주로 일어나며 특히 $0.3\mu\text{m} \sim 0.7\mu\text{m}$ 의 입자들이 광소산에 유효한 입자들임을 알 수 있다.

한편 시간별 전소산계수는 식 (9)에 의하여 계산되며 $0.1 \sim 1.0\mu\text{m}$ 범위의 입자수 농도와 깊은 상관관계를 가진다. 에어로솔 입자직경 $0.1 \sim 1.0\mu\text{m}$ 범위에 국한하여 계산한 결과에서 4월 7일과 10일의 일평균 σ_e 는 각각 $0.78 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$ 와 $3.23 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$ 이었으며 식 (10)로 구한 일평균시정은 각각 66.3 km와 14.3 km로서 큰 차이를 보였다. 입자의 모든 크기를 고려하고 NO_2 등 기체성분의 광흡수를 생각한다면 이보다 더 낮은 시정이 계산될 것이다. 물론 극심한 smog 출현에서는 시정이 더 악화되며 서울의 도심에서는 더욱 심해질 것이다.

5. 결 론

서울 대기 에어로솔의 농도와 광소산에 대해서 알아보기 위하여 1991년 4월 4일부터 11일까지 서울 대기 에어로솔의 농도를 Electrical Aerosol Analyzer로 직경 $0.01\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$ 범위의 입자분포를 측정하여 에어로솔의 단위 대수직경당 입자수 농도 분포를 구하고 Mie 산란 이론을 바탕으로 소산효율 Q_e 와 소산계수 σ_e 를 계산한 결과 다음과 같은 특징을 알 수 있었다.

에어로솔 농도의 일변화경향은 에어로솔 농도가 새벽 4시에 최저값을 보였고 교통량의 증가와 더불어 낮은 대기층내에 오염물질이 증가함에 따라 오전 8시경에는 최고값을 보였다. 오후가 되면서 지표고도의 온도상승으로 대기가 불안정하여짐에 따라 대기의 연직순환이 활발하여 농도가 최저에 이르다가 야간이 되면서 지표근처의 대기역전층 생성으로 22시경에 농도가 높아진다. 그러나 4월 7일은 이류성 기류로 에어로솔의 농도가 낮게 나타나는 예외적인 일변화를 보였다. 한편 4월 10일은 일사량이 낮았음에도 불구하고 에어로솔 농도가 높게 나타났다. 이것은 광화학반응에 의해서 에어로솔 농도가 증가한 것으로 보기 보다는 일차적인 차량배기물질 및 화학적 반응에 의해 이차적으로 생긴 것으로 해석된다.

단위 대수직경당 소산계수 $d\sigma_e/d \log D$ 는 직경 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 입자가 광소산에 거의 영향을 미치지

지 않았고 $0.1\ \mu\text{m} \sim 1.0\ \mu\text{m}$ 입자들이 광소산에 유효 입자임을 알 수 있었다. 시정의 일변화는 $0.1\ \mu\text{m} \sim 1.0\ \mu\text{m}$ 입자의 농도와 깊은 상관관계를 가졌다. 저농도를 보였던 4월 7일과 비교적 고농도인 4월 10일의 일평균 시정은 각각 66.3 km와 14.3 km로 계산되어 거의 5배에 가까운 큰 차이를 보였다. 광소산에 관한 정확한 분석은 모든 입자 크기를 포함한 에어로솔과 NO_2 등 가시광선을 흡수하는 기체성분 및 오존에 의한 광화학반응을 고려함으로써 가능하게 될 것이다.

參 考 文 獻

- 김필수(1986) 도시대기 aerosol의 입자직경 $0.01 \sim 1.0\ \mu\text{m}$ 범위의 농도변화 특성. 한국대기보전학회지, 2, 41 - 50.
- Hinds W.C. (1982) Aerosol technology. John Wiley & Sons, New York.
- Hodkinson J.R. (1965) The optical measurement of aerosol, in Aerosol Science, C.N. Davies (Ed.), Academic Press, New York.
- Junge C.E. (1963) Air chemistry and radioactivity, Academic Press, New York, 382 pp.
- Kerker M. (1969) The scattering of light and other electromagnetic radiation, Academic Press, New York.
- Kim P.S. and Rho C.S. (1986) Size distribution of atmospheric aerosols in Seoul, *Atm. Env.*, 20, 1837 - 1845.
- Liu B.Y.H. and Pui D.Y.H. (1974) Electrical neutralization of aerosols, *J. Aerosol Sci.*, 5, 465 - 472.
- Liu B.Y.H., Whitby K.T. and Pui D.Y.H. (1974) A portable electrical analyzer for size distribution measurement of submicron aerosol, *J. Air Poll. Cont. Assoc.*, 24, 1067 - 1072.
- Mie G. (1908) Beitrage Zur optiks tuber median speziell kolloidaler matallosungen, *Ann. Phys.*, 25, 377 - 445.
- Rayleigh Lord (1871) On the light from the sky, its polarization and colour, *Phil. Mag.*, 41, 107 - 120, 274 - 279.
- Tyndall J. (1869) On the blue colour of sky, the polarization of light by cloudy matter generally, *Phil. Mag.*, 37, 384 - 394.
- Van de Hulst H.C. (1957) Light scattering by small particle, John Wiley & Sons, New York.
- Whitby K.T. and Husar R.B. (1970) The Minesota aerosol analyzing system, Rep. Int'l Cloudy and Ice Nuclei workshop, 19 - 29.
- Willeke K. and Brochmann J.E. (1977) Extinction coefficients for multimodal atmospheric particle size distribution, *Atmo. Env.* 11, 995 - 999.