

서울 대기 Aerosol의 물리적 특성 : 가시광선의 산란

Physical Characteristics of Atmospheric Aerosols in Seoul :
Scattering of Visible Light

김 필 수*
Pill-Soo Kim

ABSTRACT

Light scattering coefficient of visible light by atmospheric aerosol over the size range 0.01-10 μ m is determined from scattering efficiency and aerosol size distribution. Aerosol number distribution as a function of particle diameter $dN/d\log D$ decreases rapidly as increasing particle size. Distribution of scattering coefficient $d\sigma_s/d\log D$ is mostly accumulated in diameter 0.1-2.0 μ m showing its maximum in the vicinity of 0.6 μ m. This means that the visible light in the atmosphere is mainly scattered by these particles. Diurnal variation of scattering coefficient σ_s appears its maximum in the morning, while minimum in the afternoon and early morning which agrees with the aerosol number distribution in the size range 0.1-2.0 μ m.

I. 서 론

에어로솔의 물리적 특성중에서 오래전부터 알려지고 연구된 것은 광학적 성질이다. 역사적으로 광산란에 관한 연구가 19세기 후반 Tyndall¹⁾에 의해 실험적으로 처음 수행된 이래 Rayleigh²⁾에 의해 이론적으로 분석되었으며 Maxwell의 전자복사 이론을 바탕으로 Mie³⁾는 일반적인 산란 이론을 전개하였다. 그후 광산란 이론은 여러 연구자들에 의해 다각적으로 연구되어 왔다.

에어로솔은 대기중에서 빛과 같은 전자파가 전파될 때 여러가지 영향을 미친다. 즉, 각종 전자파를 산란하고 흡수함은 물론 가시광선과 상호작용을 하여 시계를 감퇴시키고, 저녁 노을, 해무리, 구름빛, 도시대기의 회부연 빛깔등을 나타나게 한다. 한편 에어로솔에 의한 대기의 여러 층내에서의 복사전달은 대기의 에너지 저장과 분배 및 지구의 기온에 중요한 역할을 하며 결과적으로 기후에도 영향을 미치게 된다.

* 한양대학교 물리학과 (Department of Physics, Hanyang University)

에어로솔의 광학적 성질은 에어로솔의 입자크기와 밀접한 관계를 가지고 있다. 직경이 수 μm 이상되는 큰 입자들은 표면에서의 반사, 가장자리에서의 회절 및 입자내부에서의 굴절등 기본적인 과정에 의해 산란이 일어나며, 입사광은 최초의 진행 방향으로 부터 크게 벗어나지 않고 거의 전방산란을 한다. 그러나 실제 대기중에는 이러한 입자들의 수가 매우 적기 때문에 광산란에 기여하는 정도가 무시된다.

입자의 크기가 빛의 파장과 비슷한 에어로솔, 즉 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 범위의 부유입자상 물질은 가시광선을 가장 잘 산란시키므로 시계를 흐리게 한다. 이때 산란광은 입사 방향으로 부터 대개 $1^\circ \sim 45^\circ$ 범위로 산란한다. 더구나 이 범위의 대기 부유 입자들의 수는 큰 입자들 보다 매우 많기 때문에 가시광의 산란은 이들 입자에 의해 지배된다. 이 크기 범위의 입자는 Mie 산란으로 다루어진다. 한편 입자의 크기가 빛의 파장보다 작은 $0.1 \mu\text{m}$ 미만의 에어로솔 입자들은 Rayleigh 산란을 하며, 전후방으로 거의 동일하게 빛을 산란시킨다. 이 극미세입자들은 장파장보다 단파장의 빛을 더 효과적으로 산란시킨다.

자연대기는 정상적으로 극히 희박한 부유입자를 포함하지만 대도시와 공업지대에서는 각종 오염물에 의한 미세 부유 입자의 과잉으로 혼탁한 대기와 나쁜 視程을 나타낸다. 따라서 미세 부유 입자에 의한 도시대기의 광산란 특성은 물리적인 면과 환경오염의 관점에서 매우 중요한 연구대상이 되고 있다.

이 연구는 서울의 미세 대기 에어로솔을 전기적 이동도(mobility) 분석으로 크기별로 입자수 농도를 측정하여 도시대기에서의 가시광선 산란 특성을 연구한 것이다. 이를 위하여 서울 대기 에어로솔의 농도로부터 입자크기에 따른 산란계수의 분포 spectrum과 총산란계수를 계산하여 이의 변화 특성을 다루었다.

II. 이론적 배경

1. 산란과 흡수(Mie 이론)

대기중의 분자나 부유입자상 물질등 입자에 의한 빛의 산란과 흡수는 입자의 크기, 모양, 산란각, 굴

절율, 성분 및 입사광의 파장등에 의해 영향을 받는다. 이들 입자가 빛과 상호작용할 때 이들이 받는 전자기적 에너지는 여러 방향으로 재복사 되는데 이러한 현상을 산란이라 한다. 한편 입사광이 입자에 의해 열이나 화학반응 에너지 등으로 변환되어 제거될 때 흡수라고 한다. 이처럼 분자나 입자들에 의해 빛이 산란되고 흡수되는 것을 소산(extinction)이라고 한다.

한 입자에 의한 빛의 산란효율 Q_s 는 다음과 같이 정의된다. 즉

$$Q_s = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

와 같다. 여기서 I_0 는 고려하는 입자에 기하학적으로 입사한 에너지 flux, 즉 이 입자의 단면적에 입사하는 단위 시간당의 에너지량이며, I 는 같은 입자에 의해 산란된 에너지 flux이다.

광산란은 입자크기에 따라 Rayleigh 산란과 Mie 산란등 몇가지로 나누어 설명된다. 입자의 크기가 입사광의 파장보다 훨씬 작을 때, 즉 입사직경 $D < 0.05 \mu\text{m}$ 인 입자들에 대해서는 Rayleigh 산란 이론을 적용할 수 있다.²⁾ 분자에 의한 산란은 이러한 산란을 한다. 그러나 공기 중의 에어로솔은 입자가 크므로 이 이론을 쓸 수는 없다. 입자의 크기가 입사광의 파장과 비슷하거나 또는 그 보다 큰 경우, 즉 입자직경이 약 $0.05 \mu\text{m}$ 이상되는 입자에 대한 가시광선의 산란은 Mie 이론으로 취급된다.³⁾ 이론은 구형입자의 광산란 문제에 대해 일반적인 해를 주지만 산란광의 각 분포를 결정해야 하므로 파장, 크기, 굴절율을 계수로 하는 球調和 함수항의 급수로 표시된다.

Mie 이론은 분자크기 정도로부터 기하광학으로 처리될 수 있는 상당히 큰 입자에 이르기까지 잘 맞으며 흡수성 및 비흡수성 입자에 대해 다같이 적용된다. 그러므로 Rayleigh 영역에 있는 극미세 입자도 Mie 이론으로 취급될 수 있다. 결국 Rayleigh 이론은 Mie 이론의 특수한 경우에 속한다. Mie 이론은 Maxwell의 전자기 방정식의 해에 관한 문제로서 입자표면의 경계조건을 고려해야 한다. 이 이론의 유도와 설명은 van de Hulst⁴⁾와 Kerker⁵⁾에 의해 자세히 논의되었다.

구형입자에 세기가 I_0 인 편광되지 않은 빛이 입사하여 θ 방향으로 산란될 때 입자로부터 거리 R

인 곳에서의 산란광의 세기는

$$I(\theta) = \frac{\lambda^2(i_1 + i_2)}{8\pi^2 R^2} I_0, \quad (2)$$

또는 파수 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 를 도입하여

$$I(\theta) = \frac{(i_1 + i_2)}{2k^2 R^2} I_0 \quad (3)$$

와 같이 표현된다. 이때 수직으로 편광된 입사광의 세기를 I_{01} , 그리고 평행으로 편광된 입사광의 세기를 I_{02} 라면 이들의 산란광의 세기는 각각

$$I_1(\theta) = \frac{I_{01}\lambda^2 i_1}{4\pi^2 R^2} \quad (4)$$

및

$$I_2(\theta) = \frac{I_{02}\lambda^2 i_1}{4\pi^2 R^2} \quad (5)$$

가 된다. 식(2)~(5)의 i_1 과 i_2 는 각각 수직 및 평행으로 편광된 산란광의 Mie 세기인자로서

$$i_1 = S_1 S_1^* = |S_1(\theta)|^2 \quad (6)$$

및

$$i_2 = S_2 S_2^* = |S_2(\theta)|^2 \quad (7)$$

으로 주어진다. $S_1(\theta)$ 와 $S_2(\theta)$ 는 산란파의 복소진폭 (complex amplitude) 으로

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{ a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta) \} \quad (8)$$

및

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+2}{n(n+1)} \{ b_n \pi_n(\cos \theta) + a_n \tau_n(\cos \theta) \} \quad (9)$$

이 된다. 윗 식에서

$$\pi_n(\cos \theta) = P'_n(\cos \theta) = \frac{d}{d \cos \theta} P_n(\cos \theta) \quad (10)$$

및

$$\tau_n(\cos \theta) = \cos \theta \pi_n(\cos \theta)$$

$$- \sin^2 \theta \frac{d}{d \cos \theta} \pi_n(\cos \theta) \quad (11)$$

로 주어지는 n 차 Legendre 다항식의 1 차와 2 차 도함수를 의미한다. 그리고 a_n 과 b_n 은 굴절율 m , 크기인자 x 의 함수로서 각각 n 번째의 전기부분파와 자기부분파의 진폭이며 Ricatti - Bessel 함수에 의해 구해진다. 여기서 $x = \frac{\pi D}{\lambda}$

이고 D 는 입자직경이다.

Mie 이론에서 산란효율은

$$Q_s = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{ |a_n|^2 + |b_n|^2 \} \quad (12)$$

로 쓸 수 있다.

이처럼 Mie 이론에 의한 산란효율의 계산은 매우 복잡하고 힘들어서 computer 를 사용해야 한다. Computer 에 의한 계산결과와 이에 대한 논의 및 응용은 뒤에서 다루기로 한다.

2. 산란계수

세기가 I_0 인 평행광선이 에어로솔을 통과한 후의 세기를 I 라 할 때 이 두 빛의 세기의 비는 Bouger 의 법칙 (또는 Lambert-Beer 의 법칙이라고도 함)에 의해

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sigma_s L} \quad (13)$$

과 같이 주어진다.⁶⁾ 이 식에서 σ_s 는 에어로솔의 산란계수 (scattering coefficient) 이고, L 은 빛이 에어로솔을 통과한 거리이다. 산란계수는 빛이 에어로솔을 단위거리 통과할 때 감쇠하는 비율을 뜻한다. 따라서 σ_s 의 단위는 길이의 역이 된다.

동일한 입자들로부터 이루어진 단분산 (monodisperse) 에어로솔이 단위체적당 N 개의 입자를 포함하고 각 입자는 단면적 A 와 산란효율 Q_s 를 가질 때, 산란계수는

$$\sigma_s = NAQ_s \quad (14)$$

와 같이 정의되며 구형입자인 경우 $A = \frac{\pi D^2}{4}$ 이므로

$$\sigma_s = \frac{\pi ND^2 Q_s}{4} \quad (15)$$

로 쓸 수 있다. 그러나 대기 부유입자들은 다양한 크기와 성질을 가지는 다분산(polydisperse) 에어로솔이므로 전체 산란계수는 모든 크기 범위 입자들의 산란계수의 합으로 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$\sigma_s = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^n \Delta N_i D_i^2 (Q_s)_i \quad (16)$$

와 같다.

식 (16)의 σ_s 를 계산하려면 입자크기별로 입자수농도와 산란효율을 알아야 한다. 대기 에어로솔의 크기별 입자수농도 ΔN_i 는 실측으로 얻게 되고 산란효율 $(Q_s)_i$ 는 식 (12)에 의하여 계산된다. 만약 에어로솔 입자크기분포가 연속 spectrum을 가진다면 가시광선 전영역에 대해 σ_s 는

$$\sigma_s = \frac{\pi}{4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{D_1}^{D_2} g(\lambda) Q_s(\lambda, D, m) D^2 f(D) dD d\lambda \quad (17)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(\lambda) d\lambda = 1$ 로서 가

시광의 spectrum 분포이며, $f(D) = dN/dD$ 으로 입자수 분포 함수이다.

한편 주어진 파장에 대한 단위 대수직경당의 산란계수는

$$d\sigma_s/d\log D = \frac{\pi D^2}{4} Q_s(\lambda, D, m) dN/d\log D \quad (18)$$

가 된다. 여기서 $dN/d\log D$ 는 단위 대수 직경당 에어로솔 입자수농도 분포이다.

III. 실험방법

앞에서 언급한 바와 같이 에어로솔의 산란계수를 구하려면 먼저 에어로솔의 크기별 입자수 또는 입자크기분포를 알아야 한다. 이 연구에서는 대기 에어로솔 입자의 전기적 이동도(electrical mobility)를 측정함으로써 이를 결정하였다. 실험에 사용된 측정장치는 미국의 Thermo-Systems Inc. (TSI) 사의 Electrical Aerosol Ana-

lyzer Model 3030 (EAA 3030)과 주변기들로 구성되어 있다. EAA 3030는 Whitby 등에 의해 개발되었으며,^{7),8)} Minnesota 대학교의 연구진과 TSI의 기술진의 의해 연구 및 개량되어 왔다.⁹⁻¹²⁾ 이 장치에 대한 재원, 작동원리, 자료처리와 계산방법 등은 이미 상세히 설명한 수 있으므로^{13),14)} 여기서는 생략하기로 한다.

에어로솔의 측정은 한양대학교 자연과학관 4층에서 1987년 10월부터 1988년 6월 사이에 맑은 날을 택하여 매일 수 일간씩 실시하였다. 표 1은 이 기간 동안의 월별 일수를 보여주고 있다.

Table I. Number of days measurement for each month between October 1987 through to June 1988.

Month	1987			1988	
	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.
Days	7	4	7	6	6
1988					
Month	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Total
Days	7	6	5	7	55

IV. 결과 및 논의

1. 산란계수 계산

앞에서 다룬 바와 같이 산란계수는 입자의 크기와 굴절율, 그리고 입사광의 파장에 따라 복잡하게 변하게 된다. 실제 대기 에어로솔의 경우 각 입자의 굴절율을 알기는 불가능하다. 본 연구에서는 건조한 대기 에어로솔의 굴절율인 $m=1.50$ 를 채택하였다.¹⁸⁾ 입자직경 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 범위에 대해 가시광선의 중심파장 $\lambda = 0.550 \mu\text{m}$ 에 관한 산란계수 Q_s 를 computer로 계산하여 입자직경의 함수로 그린 결과는 그림 1과 같다. 이 그림에서 입자직경은 $0.01 \mu\text{m}$ 씩 나누어 1000개의 구분으로 세분하여 계산하였다.

Q_s 는 직경 $0.05 \mu\text{m}$ 이하에서 무시될 정도로 매우 작으나 $0.2 \mu\text{m}$ 로부터 급격히 증가하여 $0.7 \mu\text{m}$ 근처에서 4 이상까지 이른 후 진동적인 증감을 계속한다. 입자가 커짐에 따라 2.1에 접근해간다. 특히 Q_s 의 곡선은 심한 요철을 보이고 있다.

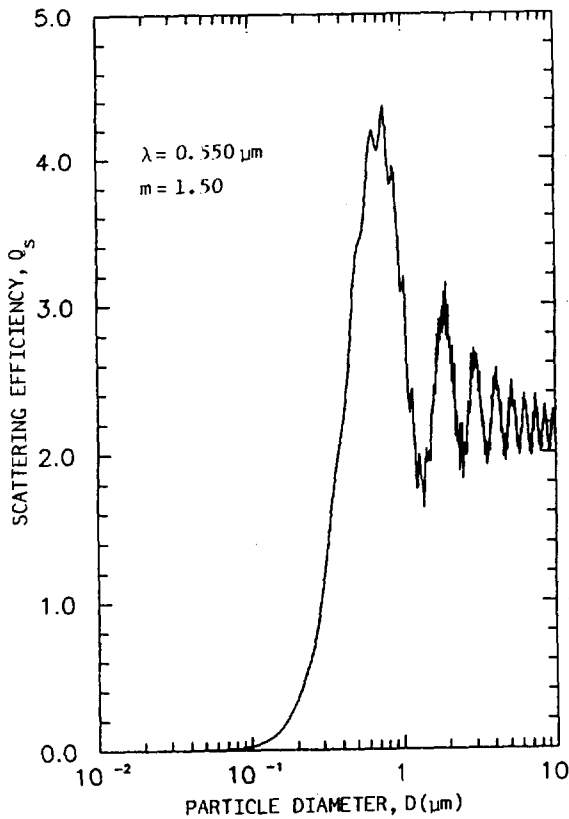


Fig.1 Particle scattering efficiency versus particle diameter for sphere.

2. 입자크기 분포와 산란계수 분포

EAA 3030으로 대기중의 에어로솔을 측정하여 전산처리한 결과로부터 단위체적의 공기속에 들어 있는 에어로솔 입자수를 크기별로 계산하고 입자크기분포를 결정하였다. EAA 3030의 에어로솔 측정범위는 직경 0.01 ~ 1.0 μm 이며 8개 구간으로 나누어 측정되었다.

그림 2는 1987년 10월부터 1988년 6월까지 9개월동안 에어로솔 입자수 분포의 월평균 자료로부터 이 기간의 전평균을 계산하여 나타낸 것이다. 그림에서 $dN/d \log D$ 는 1 cm^3 공기속에 포함된 단위 대수 직경당의 에어로솔 입자수 분포를 의미한다. 이 그림에서 Δ 로 표시된 것은 측정된 값이며, 실선은 cubic spline 내삽에 의해 구한 값이다. 점선으로 그려진 부분은 의심된 예상값이다. Junge¹⁶⁾

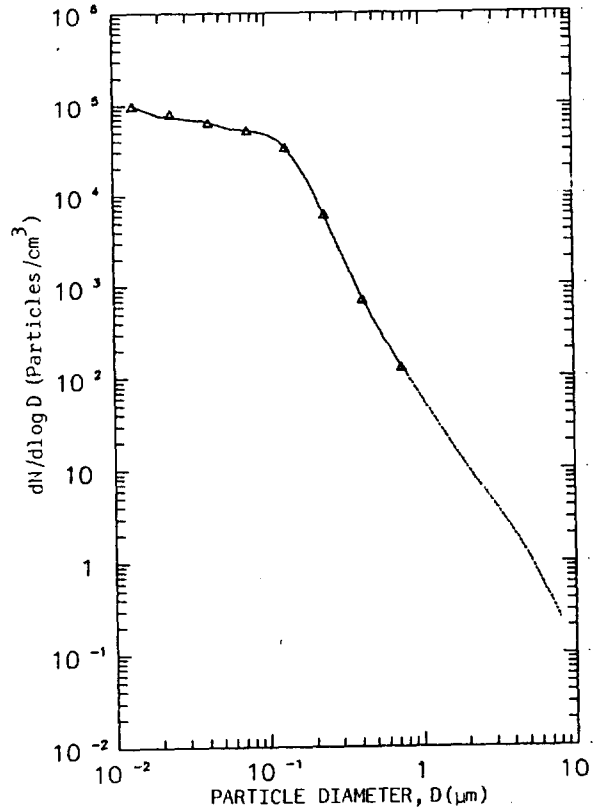


Fig.2 Average distribution of aerosol number($dN/d \log D$) as a function of particle size(D) at the Hanyang University of 9 months for October 1987-June 1988.

는 대기 에어로솔의 크기범위 0.1 ~ 5 μm 사이의 입자수 분포가 $dN/d \log D = CD^{-k}$ 와 같은 역함수 분포를 나타낸다고 하였다. 여기서 C와 k는 상수값이 되며 특히 -k는 직선의 기울기가 된다. 이러한 경향은 서울 대기 에어로솔의 크기 분포에서도 k는 3 정도임을 알 수 있었다.^{16),17)} 따라서 EAA 3030 측정범위 이상의 입자에 대해서는 의심된 분포값을 취하였다.

그림 2의 $dN/d \log D$ 분포에서 미세입자의 수는 매우 크며 0.1 μm 이상에서 급락하고 있다. 직경 0.05 μm 미만의 입자는 매우 많으나 그림 1에서 보는 바와 같이 이들 미세입자의 산란효율 Q_s 가 매우 작으므로 실질적으로 산란에 기여하는 정도는 무시된다. 그러나 0.1 μm 이상의 입자는 산란효율 Q_s 가 크므로 수 μm 범위까지 계산에 포함시켜야 한다. 이러한 까닭으로 EAA 3030의 측

정가능 범위밖의 입자는 $10 \mu\text{m}$ 까지의 외삽값을 취하여 산란계수 σ_s 의 계산에 사용하였다.

그림 1에 나타난 산란효율 Q_s 와 그림 2의 입자수분포 $dN/d\log D$ 의 값을 식 (18)에 대입하여 계산하여 단위대수직경당의 산란계수 $d\sigma_s/d\log D$ 를 구하게 된다. 앞에서 주어진 굴절율 $m=1.50$ 와 가시광선의 중심파장 $\lambda=0.550 \mu\text{m}$ 에 대한 $d\sigma_s/d\log D$ 분포곡선이 그림.3에 나와 있다. $d\sigma_s/d\log D$ 의 분포곡선을 보면 $0.1 \mu\text{m}$ 로부터 급상승하여 $0.62 \mu\text{m}$ 에서 최고치 $2.86 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$ 에 이른 후 다시 하강하여 $2 \mu\text{m}$ 이상에서는 낮은 값으로 감소해 간다. 이것은 서울의 대기 에어로솔이 입자 크기에 따라 가시광선을 어느 정도로 산란하는가를 보여주는 중요한 특성 곡선이다.

여기서 무엇보다도 특기할 것은 서울 대기 에어로솔에 의한 가시광선의 산란이 주로 $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 범위의 입자들에 의해 지배된다는 것이다. 이러한

산란계수의 분포 양상은 서울 대기 에어로솔의 매우 중요한 광학적 특성의 하나이다. 요컨대 $0.1 \mu\text{m}$ 미만의 입자들은 극소한 산란효율 때문에 거의 광산란을 일으키지 못하고, $2 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자들은 큰 산란효율에도 불구하고 입자수가 극소하여 광산란에 기여하지 못한다. 그러나 광학적 부영역이라고 할 수 있는 $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 의 입자들은 광산란 유효입자들임을 알 수 있다.

1987년 10월부터 1988년 6월까지 9개월간의 전평균에 대한 단위대수 직경당 산란계수, 즉 $d\sigma_s/d\log D$ 의 시간별 변화를 그림 4(a)와 (b)에 나타냈다. 편의상 3시, 6시, 9시, 12시, 15시, 18시, 21시 및 24시에 관하여 비교하였다. 이 그림에서 하루 중 $d\sigma_s/d\log D$ 는 3시와 15시에 낮은 값을 보이고 9시와 21시에 높은 값을 보이고 있다. 이에 관한 설명은 그림. 5에서 다시 다루기로 한다.

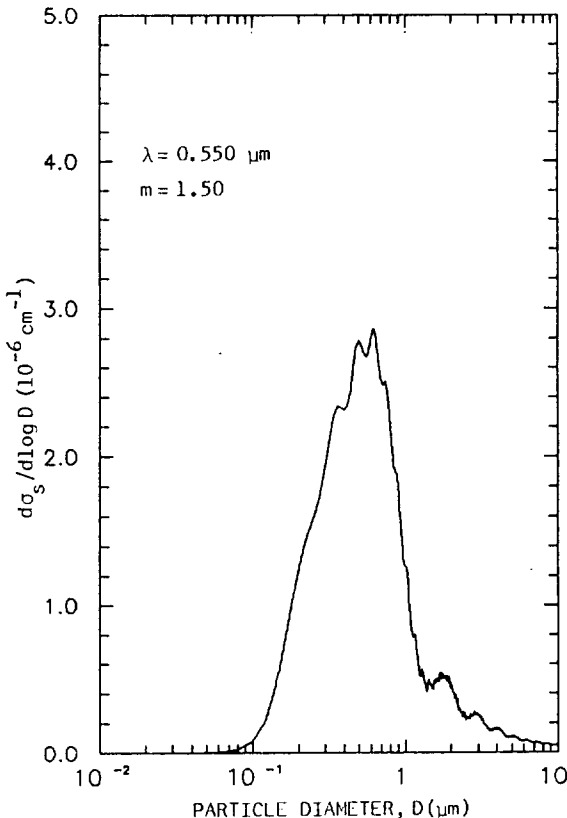


Fig.3 Scattering coefficient($d\sigma_s/d\log D$) versus particle diameter(D) for 9-month average from October 1987 to June 1988.

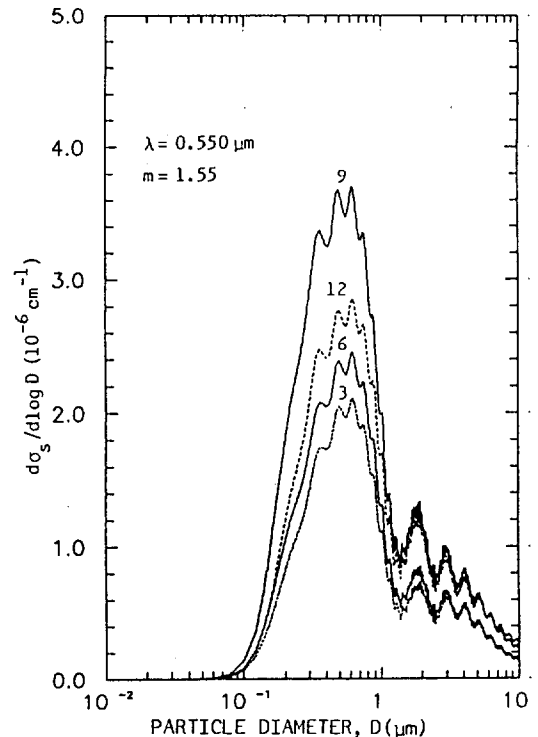


Fig.4(a) Time development of scattering coefficient distribution as a function of particle diameter at 3,6,9 and 12hr for 9 months from October 1987 to June 1988. Number denotes time of a day.

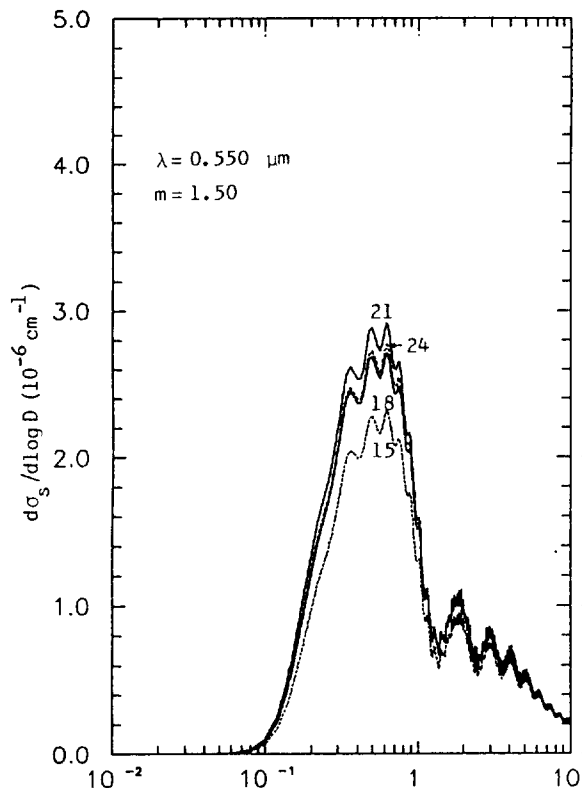


Fig.4(b). Same graph as Fig.4(a) but for 15, 18, 21 and 24 hr.

3. 입자수와 산란계수의 일변화

$dN/d\log D$ 와 $d\sigma_s/d\log D$ 의 일변화를 분명히 나타낸 것이 그림 5이다. 이 그림에서 전입자농도 N 은 공기 1 cm^3 당 에어로솔 입자수로서

$$N = \int_{D_1}^{D_2} (dN/d\log D) d\log D \quad (19)$$

이고, 전산란계수 σ_s 는

$$\sigma_s = \int_{D_1}^{D_2} (d\sigma_s/d\log D) d\log D \quad (20)$$

와 같다. N 과 σ_s 는 $dN/d\log D$ 와 $d\sigma_s/d\log D$ 를 $D_1 = 0.01 \mu m$ 와 $D_2 = 10.0 \mu m$ 범위내에서 적분한 것으로 이들 미분곡선의 하부 면적에 해당한다. 그림 5, 에서 입자수의 농도는 새벽 3시에 최소값을, 그리고 9시에 최고값을 나타내고 그 다음 감소한 후 증가하여 20시에 비교적 높은 값을 보이는 일변화를 보여준다. 한편 산란계수 σ_s 의 일변화는 3시에 최소, 10시에 최고, 15시에 최저 및 21시경에 약간 상승하는 경향을 보이는 일변화를 나타낸다. 이와같은 일변화는 대기 오염농도와 기상조건의 영향을 받기 때문인 것으로 해석된다.

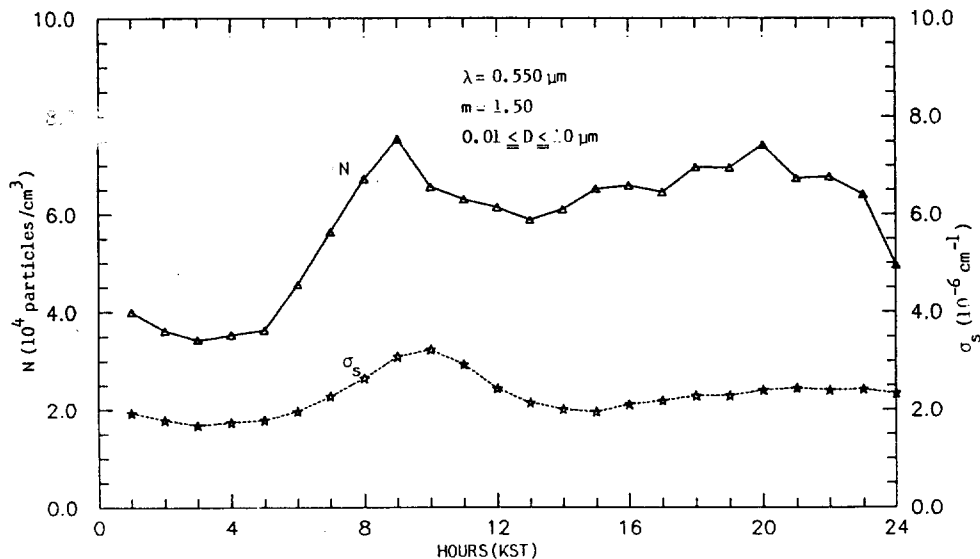


Fig.5 Nine-month average of diurnal variations of aerosol number concentration (N) and extinction coefficient (σ_s) for $0.01-10 \mu m$ in diameter at the Hanyang University from October 1987 through to June 1988.

새벽 3시에 N 과 σ_s 가 낮은 것은 하루중 교통량이 가장 적으므로 에어로솔의 방출량이 낮고, 태양광이 없으므로 대기오염물로부터 광화학적 2차 에어로솔이 생성되지 않을 뿐더러 안정된 야간 대기층내에서 부유입자들이 지표에서 쉽게 제거되기 때문이다.^{19), 20)}

오전 9시에는 교통 혼잡 시간대인데다 비교적 낮은 대기층내에 누적된 차량 배기물과 적당한 습도 및 태양광의 영향으로 생성된 2차 에어로솔로 인해 입자수와 산란계수가 크게 증가하는 것으로 생각된다.¹⁸⁾ 산란계수의 최고치가 입자수의 그것보다 1시간뒤인 10시경에 나타나는 것은 이 시간대에 광산란 유효크기의 입자들이 많이 생성되기 때문이다. 그것은 교통혼잡 시간인 9시에 배출된 1차 에어로솔인 미세입자가 충돌과정을 거쳐 응집되면서 더 큰 입자로 변환되어 광산란유효입자로 되기 때문인 것으로 풀이된다. 따라서 하루중에서 오전 10시경이 가장 나쁜 視程을 나타낼 수

있다. 그러나 10시가 지나면서 대기 경계층이 상승하고 불안정한 대기속의 오염물이 쉽게 확산 및 희석되어 오후에는 낮은 에어로솔 농도와 산란계수를 보여 오히려 대기가 맑아지게 된다. 야간인 20~22시경에는 안정된 낮은 대기층내에 차량배기물이 누적되어 다시 N 와 σ_s 가 증가하게 된다.

산란계수가 높다는 것은 그만큼 가시광의 투과가 감소하므로 시정이 낮아짐을 의미한다. 물론 야간의 산란계수와 시정은 별로 큰 의미를 가지지는 않는다.

그림 3에서 보여준 바와 같이 광산란에 유효한 입자의 크기는 $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 범위내에 있는데 이들 입자의 수와 산란계수를 비교하면 그림 6과 같다. 이 그림에서 N 과 σ_s 는 명확한 양의 상관관계를 보여주며 최소, 최고의 변화 양상이 거의 일치하고 있음을 보여준다. 특히 오전 9~10시 사이에 최고치가 나타나는 것은 광산란 유효 크기입자의 수가 이 시간대에 가장 많다는 것을 뜻한다.

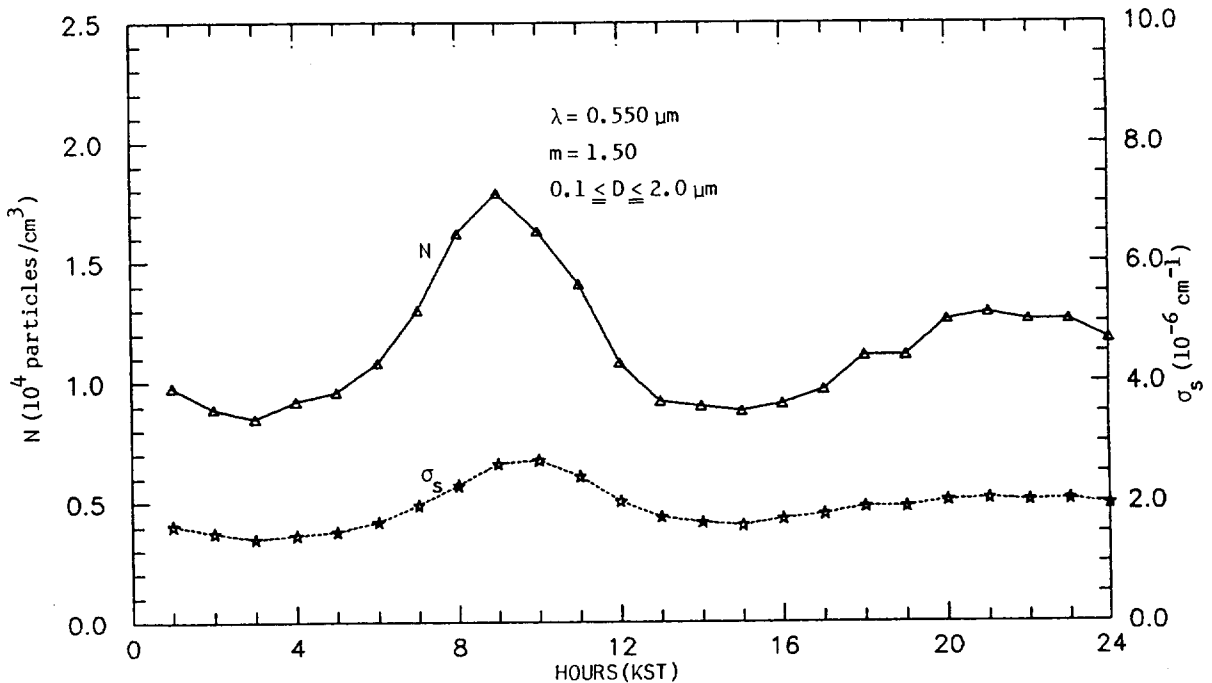


Fig.6 Same graph as Fig.5 but $0.1-2.0 \mu\text{m}$ in diameter.

V. 결 론

대기중의 에어로솔에 의한 가시광선의 소산을 연구하기 위하여 Mie 이론을 적용하여 굴절률 $m = 1.50$, 가시광선 파장 $\lambda = 0.550 \mu\text{m}$ 에 대한 구형 입자의 산란효율 Q_s 를 입자직경의 함수로 구하고, EAA 3030으로 측정된 대기 에어로솔로부터 산란계수를 계산하여 몇가지 특징을 알게 되었다.

EAA 3030으로 측정된 에어로솔 입자수농도 분포는 극미세 입자의 농도가 높고 입자가 커질수록 점점 감소하며 $0.1 \mu\text{m}$ 이상에서는 거의 멱함수의 분포, $dN/d \log D = CD^{-k}$ 를 나타냈다.

Q_s 와 $dN/d \log D$ 로부터 구한 서울 대기 에어로솔의 산란계수분포 $d\sigma_s/d \log D$ 는 $0.6 \mu\text{m}$ 근방에서 최대값을 가지며 $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 범위내에 대부분 분포되어 있어 에어로솔에 의한 가시광선의 산란은 주로 이들 입자에 의해 일어남을 알 수 있었다. 따라서 서울 대기의 흐림도 이러한 크기의 입자들 때문이라고 할 수 있다. 또한 $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 범위의 입자수 N 과 산란계수 σ_s 의 일변화 양상이 서로 비슷한 것도 이 설명을 뒷받침하였다. 요컨대 대기 에어로솔에 의한 가시광선의 산란은 $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 크기의 입자수농도와 밀접한 관계를 가졌다.

이 연구는 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행되었음. (原稿接受 '88. 9.28)

참 고 문 헌

- 1) Tyndall J. (1869), On the blue colour of sky, the polarization of skylight, and on the polarization of light by cloudy matter generally, *Phil. Mag.*, 37, 384-394.
- 2) Rayleigh Lord (1871), On the light from the sky, its polarization and colour, *Phil. Mag.*, 41, 107-120, 274-279.
- 3) Mie, G. (1908), Beitrage zur optik truber medien speziell kolloidaler metallosungen, *Ann. Phys.*, 25, 377-445.
- 4) Van de Hulst, H.C. (1957), *Light scattering by small particles*, John Wiley and Sons, New York.

- 5) Kerker M. (1969), *The scattering of light and other electromagnetic radiation*, Academic Press, New York.
- 6) Hinds W.C. (1982), *Aerosol technology*, John Wiley and Sons, New York, 318 pp.
- 7) Whitby K.T. and Clark W.E. (1966), Electrical aerosol Particle counting and size distribution measuring systems for 0.015 to 1 μm size range, *Tellus*, 18, 573-586.
- 8) Whitby K.T. and Huser R.B. (1970), The Minnesota aerosol analyzing system, *Rep. Int'l Cloud & Ice Nuclei Workshop*, 19-29.
- 9) Liu B.Y., and Pui D.Y.H. (1975), On the performance of the electrical aerosol analyzer, *J. Aerosol Sci.*, 6, 249-264.
- 10) Liu B.Y.H., whitby K.T. and Pui D.Y.H. (1974), A portable electrical analyzer for size distribution measurement of submicron aerosols, *J. Air Poll. Cont. Assoc.*, 24, 1067-1972.
- 11) Pui D.Y.H. and Liu B.Y.H. (1979), Electrical aerosol analyzer: Calibration and performance, *Aerosol measurement.*, D.A. Lundgren (Ed.), Univ. Press of Florida, Gainesville, 384-399.
- 12) Liu B.Y.H. and Pui D.Y.H. (1974), Electrical neutralization of aerosols, *J. Aerosol Sci.*, 5, 465-472.
- 13) 김필수 (1983), 입자직경 $0.0075 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$ 범위 대기 aerosol 크기의 전기적 분석, 한양대학교 기초과학논문집, 제 3집, 77-84.
- 14) 김필수 외 4인 (1986), 도시대기 aerosol의 입자직경 $0.01-1.0 \mu\text{m}$ 범위의 농도변화 특성, 대기보전학회지, 2, 2, 41-50.
- 15) Junge C.E. (1963), *Air chemistry and radioactivity*, Academic Press, New York, 382 pp.
- 16) 김필수 (1986), $0.4-9.0 \mu\text{m}$ 범위 도시대기 aerosol의 크기분포 결정, 한양대학교 환경과학논문집, 제 7집, 37-46.
- 17) Kim P-S. and Rho C-S. (1986), Size distribution of atmospheric aerosols in Seoul, *Atmos. Env.*, 20, 1837-1845.

- 18) Willeke K. and Brochmann J.E. (1977), Extinction coefficients for multimodal atmospheric particle size distributions, *Atmo. Env.*, 11, 995-999.
- 19) Husar R. B. et al. (1972), Physical mechanisms governing the dynamics of Los Angeles smog aerosol, in *Aerosol and atmospheric chemistry* by G.M. Hidy (Ed) Academic Press, New York, 271-284.
- 20) Kim P.-S. and Rho C. -S. (1983). Calculations of time-dependent equivalent mixing heights (EMHs), using ^{222}Rn in the atmosphere, *J. Korean Met. Soc.*, 19, 110-117.