

도시대기 Aerosol의 입자직경 0.01~1.0 μm범위의 농도변화 특성

A Study on the Characteristics of Urban Aerosol
Concentration in the Size Range of 0.01~1.0 μm

김 필 수* 김 윤 장* 이 양 호* 조 숙 현* 안 승 태**

Pill-Soo Kim, Youn-Jang Kim, Yang-Ho Lee, Sook-Hyun Cho, Seung-Tae Ahn

Abstract

Urban aerosol concentrations in the size range of 0.01~1.0 μm have been measured by using an electrical aerosol analyzer from May through October, 1984. The total diurnal variation of the number concentration indicates that a minimum value is observed at 3 hr and a sharp increase is noticed early in the morning with a subsequent slow and continuous increase from around 7 hr until 20 hr. After that it is decreased to reach its minimum by dawn. However, both surface and volume concentrations have shown that their first maxima at 8 hr and their second at about 20 hr simultaneously. It is found that the aerosol number is mainly governed by the particles in the size range of 0.01~0.1 μm, while most volume is in 0.1~1.0 μm size range. It is known fact that particles of 0.1~1.0 μm size range affect the visibility reduction in the atmosphere. The monthly variation of aerosol concentration remarks its minimum in summer. The main factors influencing the aerosol concentration are emission of autoexhausts, various processes of production and removal, and meteorological parameters.

1. 서 론

Aerosol은 공기중에 부유하는 고체상 및 액체상의 粒子系를 의미하는데 그 어원은 제1차대전이 끝날무렵 F.G. Dannan 교수에 의해 처음으로 명명된 말로서 물을 분산매질로 하는 colloid인 hydrosol에 비유하여 나온 말이다.¹⁾ 물론 이러한 어원이 생기기 이전에 대기중의 부유입자상 물질의 성질에 관한 연구가 진행되었으며, 특히

금세기초 C.T.R. Wilson의 안개상자 (cloud chamber)와 R.A. Millikan의 유적 (oil drop) 실험 등은 aerosol을 이용한 것으로 현대물리학의 발전에 크게 기여한 것이다.

Aerosol에 대한 많은 연구는 두번의 세계대전을 통하여 독gas와 같은 군사적 이용을 목적으로 수행되었지만 최근에는 각국의 산업화 추세에 따라 공장의 증설, 차량의 증가 및 문화생활을 위한 에너지 소비로 대기오염이 증가되었

* 한양대학교 물리학과 Dept. of Physics, Hanyang University

** 한양대학교 수학과 Dept. of Mathematics, Hanyang University

고, 이에 따라 aerosol의 연구와 관련기술의 개발이 활발히 진행되고 있다. 대기 aerosol은 대기 오염의 한 성분으로서 인간과 동식물의 생활에 갖가지 영향을 미치며,^{2,4)} 첨단산업으로 각광을 받고 있는 반도체나 초정밀제품을 제조할 때 품질저하와 제품손상을 가져온다. 군사적으로는 독gas 이외에도 laser beam 및 특수 전자파의 산란과 투과에 영향을 미치므로 이에 대한 연구가 중요하게 다루어지고 있다.⁵⁻⁷⁾ 뿐만 아니라 우주과학의 발전과 더불어 지구대기 및 성간분진의 특성을 규명하려는 연구에서 aerosol은 더욱 중요하게 되었다. 한편 aerosol은 smog, 안개와 구름 및 강우 등 기상현상에 영향을 주며 광산란과 시계 감퇴(visibility reduction)에도 큰 영향을 미친다.⁸⁻⁹⁾

대기 aerosol 입자의 직경은 분자크기에 이르는 수천분의 일 μm 로부터 수백 μm 범위가 되며 크기에 따라 이화학적 성질을 달리한다. 크기에 따른 질량분포는 일반적으로 직경 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 를 기준으로 양분되므로 이보다 작은 입자와 큰 입자로 구분하여 각각 미세입자(fine particles)와 조대입자(coarse particles)라 하는데 성분과 성질이 서로 다르다.¹⁰⁾ 한편 크기에 따른 입자수분포는 미세입자가 다시 $0.1 \mu\text{m}$ 부근을 기준으로 이보다 작은 입자군(aitken nuclei)과 이보다 큰 입자군(accumulation particles)으로 나뉘어지므로 전체적으로는 세 봉우리의 입자수분포를 보이며 크기에 따라 그 물리적 성질은 크게 달라진다.¹¹⁾

이 대기 aerosol의 특성은 크기뿐만 아니라 지역과 시간, 생성요인, 대기의 성질 및 화학적 성질에 따라 크게 달라진다. Aerosol 특성 중에서 입자크기와 농도변화는 가장 중요한 성질로서 국내에서도 이에 관련된 연구에 관심이 높아지고 있다.^{11-20, 32)} 그러나 aerosol의 크기와 농도변화를 측정하기에는 여러가지 제한이 따른다. 관성충돌이나 여과지에 의한 포집 및 광학적 측정 방법은 보통 $0.3 \mu\text{m}$ 이상 크기의 입자만 측정할 수 있고 그 이하의 극미세입자는 전기적 이동도(electrical mobility)의 측정으로 가능하다.

본 연구는 입자직경 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 범위의 도시대기 aerosol을 1984년 5월부터 10월까지

6개월간 Electrical Aerosol Analyzer로 측정된 결과로부터 단위체적의 공기속에 들어있는 aerosol의 입자수, 표면적 및 체적 농도의 일변화 양상을 크기별로 조사하고, 이를 대기오염물의 방출, 대기의 성질 및 생멸과정과 비교분석하였다. 또 aerosol 농도와 시정 및 기상요인 등과의 상관관계도 다루었다.

2. 실험

2.1 장소 및 기간

실험은 1984년 5월부터 10월까지 한양대학교 자연과학관 4층에서 실시되었다. 표1은 각 달마다 측정된 날수를 보여 준다. 실험은 맑은날 또는 비교적 맑은날을 택하여 하루종일 연속적으로 측정하여 매시간 평균을 취하였다.

Table 1. Number of days of measurement for each month between May and October, 1984.

Month	May	Jun.	July	Aug.	Sep.	Oct.	Tot.
Days	9	15	8	13	11	12	68

2.2 측정장치와 방법

실험에 사용된 장치는 그림 1에 보인 바와 같이 미국의 Thermo-Systems Inc. (TSI)社의

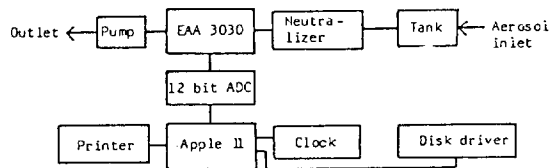


Fig.1 Block diagram of the EAA 3030 and peripheral devices.

Electrical Aerosol Analyzer Model 3030 (EAA 3030)과 주변기기들로 구성되어 있다. Aerosol을 측정할 공기는 진공펌프에 의해 흡입되는데, 먼저 20ℓ 들이 플라스틱 용기에 들어가 머무는 동안 균일하게 혼합된다. 혼합된 aerosol은 Kr-85 이온중화기(TSI 20)를 통과하면서 대기중에서 자연적으로 전리된 입자들이 중화된다. 중화된 aerosol은 주장치인 EAA

3030에 유입되어 크기별로 입자수 농도가 분류 측정되고 전류치로 나타나게 된다. 측정의 자동화와 자료처리의 전산화를 위하여 EAA 3030의 analog 출력을 12bit A/D 변환기를 사용하여 digital 신호로 바꾼 후 Apple II microcomputer에 입력시켜 측정된 자료와 계산된 결과를 diskette에 저장하거나 print-out 할 수 있게 하였다. 또 원하는 날짜와 시각에 작동하도록 computer clock을 부착하였다.

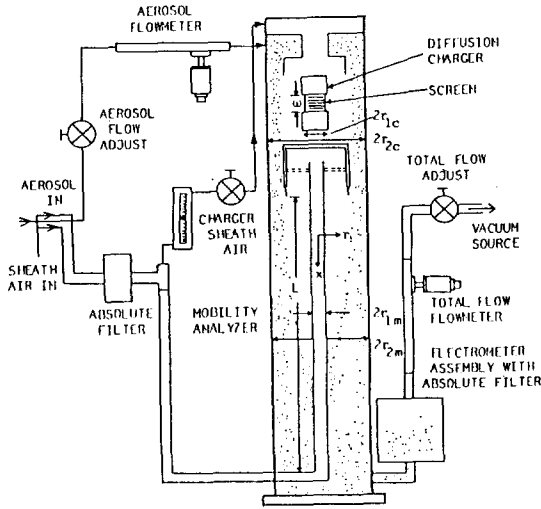


Fig.2 Schematic diagram of the EAA 3030.

그림 2는 EAA 3030의 구조도로서 확산대전기(diffusion charger), 전기적 이동도 분석기(electrical mobility analyzer), 그리고 전위계(electrometer) 등 크게 세 부분으로 나뉘어져 있다.

이 장치는 Whitby 등에 의해 개발되었으며^{24,22)} Minnesota 대학교의 연구진과 TSI의 기술진에 의해 연구 및 개량되어 왔다.²³⁻²⁶⁾ EAA 3030의 측정원리는 장치내에 흡입된 공기가 확산대전기의 고전압전장을 지날 때 공기속에 부유하고 있는 aerosol 입자들이 corona 방전에 의해 대전되므로 입자크기에 따른 전기적 移動도를 측정하여 입자의 크기를 결정하는 것이다. 만약 이동도 분석기내 정전기적 침전봉(electrostatic precipitation)의 인가전압을 단계적으로 변화시키면 침전봉에 포집되는 입자의 직경이 변하게

된다. 포집되지 않은 대전입자들은 마지막으로 aluminum 통속의 절대여과지에 포집될 때 보유한 전하량을 전위계에 지시하게 된다. 요컨대 이동도 분석기의 인가전압은 입자크기를, 그리고 전위계의 지시값은 입자수농도를 나타낸다. 측정 범위는 입자직경 $0.0032 \mu\text{m}$ 로부터 $1.0 \mu\text{m}$ 이며 10개 구간으로 입자크기를 나누어 측정할 수 있으나 농도가 희박한 대기 aerosol의 경우 극미세입자의 측정은 신뢰도가 저하되므로 본 연구에서는 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 사이의 입자에 한하여 측정 결과를 다루었다. 이 장치의 제원, 작동원리, 자료처리와 계산방법 등은 이미 상세히 설명된 바 있으므로^{13, 27)} 여기서는 생략하기로 한다.

이 연구에서 aerosol 입자의 모양이 구형체라고 가정하였다. 실제의 대기 aerosol 입자의 모양은 매우 다양한 것이므로 구형체로 계산한 크기, 표면적 및 체적은 실제와 차이를 가질 것이다. 그러나 미세한 이들 입자의 생김새를 모두 고려하기란 불가능하다. 더구나 전기적 이동도(electrical mobility)를 측정할 때의 입자직경의 개념은 전기적으로 동가동역학적 입자직경(electro-equivalent aerodynamic particle diameter)에 근거한 것이다. 이것은 전장내에서 공기의 흐름을 따라 움직이는 대전된 입자와 동일한 동역학적 성질을 가지는 단위밀도의 구형물방울의 직경으로 정의되고 있다. 따라서 이 개념을 바탕으로 입자의 크기에 관련된 성질을 다루기로 한다.

4. 결과 및 고찰

EAA 3030으로 측정된 자료를 Twomey²⁸⁾의 비선형 반복법으로 전산처리하여 직경 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 범위의 aerosol 입자에 대해 크기에 따라 단위체적의 공기속에 들어있는 aerosol 입자수, 표면적 및 체적 농도를 구하고 이들의 시간에 따른 평균일변화 양상을 비교하였다. 또 aerosol 농도가 특이한 날에 대한 경우도 다루었다. 특히 aerosol 농도의 변화요인을 알아보기 위하여 중앙기상대의 기상자료와 비교 분석하였다.

1984년 5월에서 10월까지 측정된 결과에

서 $0.01 \mu\text{m}$ 에서 $1.0 \mu\text{m}$ 까지 전 직경 구간에 관한 aerosol의 단위체적당 입자수, 표면적 및 체적농도의 전 평균 일변화가 그림3에 나타나 있다.

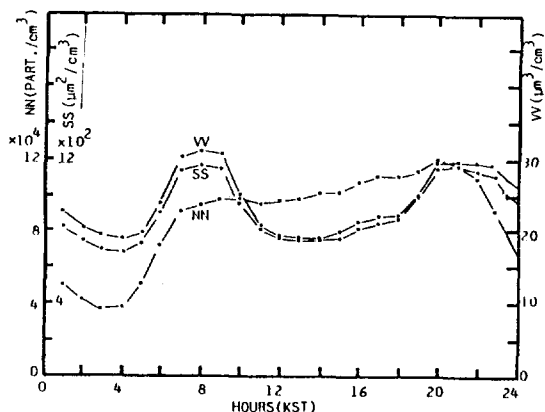


Fig.3 Diurnal variation of average number (NN), surface(SS) and volume(VV) concentrations ranging from 0.01 to $1.0 \mu\text{m}$ in diameter for 6 months for May through October, 1984.

이 그림에서 NN로 표시된 입자수농도의 일변화는 새벽 3시에 최소의 값을 보이고 새벽 4시부터 그 농도가 급격하게 증가하다가 8시 이후부터 완만히 증가하고 다시 21시 이후에 크게 감소함을 보이고 있다. 자정이 지나면서 교통량이 크게 감소하고 미세한 aerosol 입자들이 응집되어 큰 입자로 변하게 되고, 이들은 낮은 역전층내에서 지표에 닿아 쉽게 제거되기 때문에 새벽 3시까지 입자수농도가 계속 감소하게 된다.

한편 교통소통이 시작되는 4시부터 아침의 교통혼잡시간(rush hour)인 8시경까지는 오염방출률이 높고 이 시간대의 대기혼합층(mixing layer)이 비교적 낮기 때문에 시간에 따른 aerosol의 농도 증가율이 높아지게 된다.²⁹⁾ 그러나 낮 동안에는 기온이 상승하고 혼합층이 계속 높아지며 교통량도 다소 감소하므로 입자수농도가 낮아질 것으로 예상되나 오히려 증가경향을 보이고 있다. 이것은 대기중에 존재하는 기체상의 각종 오염물질이 태양광의 작용으로 광화학적으로 gas-to-particle 변환을 일으켜 미세 aerosol 입자가 많이 생성되기 때문인 것으로 해

석된다.³²⁾

저녁이 되면 태양광의 영향은 감소하므로 광화학적 aerosol의 생성은 무시되나 지표고도에 낮은 역전층(inversion layer)이 형성될 뿐만 아니라, 저녁의 교통혼잡시간이 겹치게 되므로 20시경까지 농도가 계속 증가하게 된다.

Los Angeles 지방의 Pasadena에서 1969년 8월과 9월에 Whitby²⁵⁾ 등이 측정된 smog aerosol의 전 평균 입자수농도의 일변화는 새벽 4시에 최저에 이른 후 급격히 증가하여 낮은 역전층과 교통혼잡이 겹치는 아침 교통혼잡시간에 교통첨예치(traffic peak)를 보이고 오전 동안 점점 증가하여 태양광의 강도가 가장 강한 12시에 최고농도를 보였다. 그들의 결과와 본 연구의 결과를 비교해 볼 때 새벽 4시의 최저에서는 유사하나, 서울의 경우 Los Angeles 처럼 교통첨예치나 낮동안의 많은 smog aerosol의 생성은 나타나지 않아 분명한 차이를 보이고 있다. 이는 Los Angeles가 세계적으로 가장 smog가 심한 곳임을 생각할 때 당연한 것이라 할 수 있다.

한편 단위체적의 공기속에 들어있는 aerosol 입자의 표면적(SS)과 체적(VV)은 모두 8시와 21시에 최고치를 보이는 이중극대의 일변화 특징을 보여준다. 이것은 이 시간대에 큰 표면적과 체적을 가진 입자들이 공기중에 많이 생성되고 있는데 그 근원은 차량배기물에서 방출된 일차 aerosol에 기인한 것으로 생각할 수 있다.

낮 동안은 입자수가 증가함에도 불구하고 표면적과 체적이 감소함을 보여주는데 이는 광화학적으로 생성된 $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 다량의 극미세 입자들이 표면적과 체적에는 별로 기여하지 않기 때문이다. 또 기온의 상승 및 풍속의 증가에 따라 불안정한 대기속에서 혼합높이가 증가하고 난류적 혼합과 확산이 이루어지므로 이미 생성되었던 큰 입자들의 농도는 감소하게 된다.

21시 이후부터는 입자수농도에서와 마찬가지로 차량통행이 점점 감소하고 낮은 역전층내에서 입자들이 지표에서 제거되므로 표면적 및 체적농도도 감소하기 시작한다. 만약 대기오염의 정도를 aerosol 입자의 체적 또는 질량으로 평가할 때 대기오염 역시 8시에 제일극대, 21시에 제

이극대를 보인다고 할 수 있다. 본 연구에서는 aerosol 입자의 크기범위를 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 로 한정하였으나, 모든 크기범위에 걸친 전체 질량 농도 결정에는 $1.0 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자의 기여를 반드시 고려해야 할 것이다.

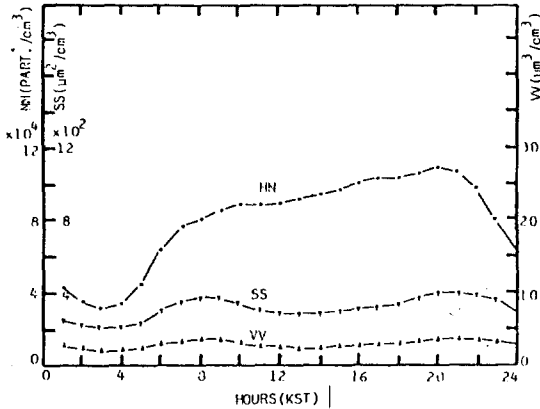


Fig.4 Same graph as Fig.3 but for $0.01 \mu\text{m}$ to $0.1 \mu\text{m}$.

그림 4는 직경 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 범위의 작은 입자들에 대한 입자수, 표면적 및 체적 농도의 시간에 따른 일변화를 보여준다. 이 그림을 그림 3과 비교할 때 평균 입자수 농도는 $\frac{1}{10}$ 정도 감소한 것을 제외하고는 일변화 양상에 큰 차이가 없지만 체적 및 표면적 농도는 각각 $\frac{1}{3}$ 및 $\frac{1}{8}$ 정도로 크게 감소되었음을 볼 수 있다. 이는 $0.01 \sim 0.1$

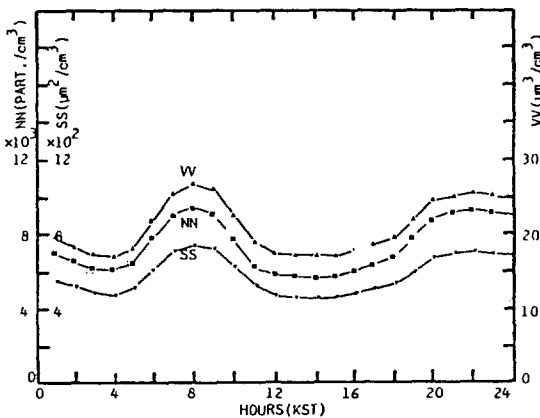


Fig.5 Same graph as Fig.3 but for 0.1 to $1.0 \mu\text{m}$. Note that the scale of NN is enlarged by 10 times in comparison with that in Fig.5.

μm 의 작은 입자들이 그 수에 있어서 aerosol 입자수농도의 대부분을 차지하지만 표면적 및 체적효과에는 별로 기여하지 않음을 의미한다.

입자직경이 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 인 큰 입자들에 대한 입자수, 표면적 및 체적농도의 시간에 따른 농도의 일변화는 그림 5와 같다. 이 그림에서 입자수농도의 척도는 그림 3에 비하여 10배로 확대하였다. 이 그림에서 입자수농도, 표면적 및 체적농도는 모두 오전의 교통혼잡시간인 8시경에 제일극대를, 그리고 야간의 교통혼잡시간이 조금 지난 22시경에 제이극대를 나타내는 이중극대의 특이한 현상을 보이며 이들의 일변화 양상이 서로 비슷함을 나타내고 있다. 이와 같은 크기의 입자들은 그 수에 있어서 그림 3에서 보인 전체 입자수의 $\frac{1}{10}$ 에 불과하나 전 표면적의 $\frac{2}{3}$ 를, 그리고 전체적의 $\frac{7}{8}$ 을 차지하고 있음을 미루어 볼 때 대부분의 표면적과 체적은 소수의 큰 입자들에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다.

이들 입자의 일변화가 이중극대를 보이는 것은 전술한 바와 같이 하루의 교통량 및 기상요인과 밀접한 관계를 가지고 있음이 분명하며 그 생성원의 대부분이 차량 배기물임을 알 수 있다. 다만 야간의 제이극대가 교통혼잡시간이 지난 뒤에 나타난 것은 이미 생성된 미세 입자들이 응집되어 큰 입자로 변환된 것에 기인한 것으로 추측

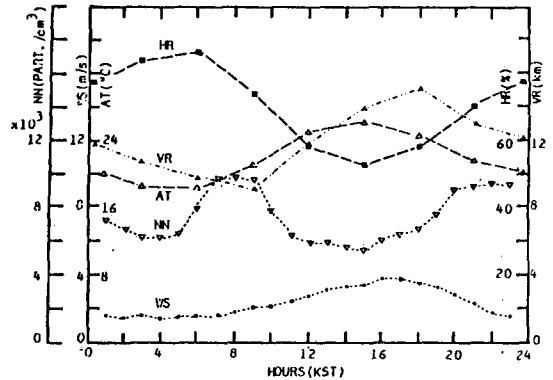


Fig.6 Diurnal variation of the meteorological factors and aerosol number concentration ($0.1 \leq D \leq 1.0 \mu\text{m}$) from May through October, 1984 (HR: relative humidity; VR: visual range; AT: air temperature; NN: number concentration; VS: wind speed). Meteorological data were supplied by Korea Meteorological Service.

된다. 특히 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 범위의 큰 입자들은 가시광선의 파장과 비슷한 크기이므로 가시광선의 산란에 유효한 Mie 산란을 일으킨다.^{9, 30)} 그러므로 서울에서는 일반적으로 아침 교통혼잡시간에 대기가 가장 혼탁하고 낮 동안은 오히려 맑아지며 저녁 교통혼잡시간대에 다시 혼탁해지지만 햇빛이 없는 야간에는 대기의 투명도를 가늠하기란 어렵다.

그림 6은 광산란 유효크기를 가진 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 범위의 aerosol 입자수농도와 기상요인 및 視程(visual range)의 6개월간 평균 일변화를 비교한 것이다. 이 그림에서 aerosol 입자수는 한양대학교에서 측정된 것이고 기상자료와 目測에 의한 시정은 서울시내 중심부근에 위치한 중앙기상대에서 관측한 자료이다. 이 그림에서 평균 입자수와 평균 시정과의 관계를 비교하면 다음과 같다. 오전 교통혼잡시간대에 최고의 입자수농도를 보일 때 최저의 시정 9 km 를 기록한 후 낮 동안에는 입자수 농도가 감소함에 따라 시정은 증가하여 오후 18 시경에는 최고의 시정 15 km 를 기록하여 시계가 맑아짐을 알 수 있다. 저녁 교통혼잡시간이 가까와짐에 따라 입자수농도는 증가하고 이에 따라서 시정은 점점 감소하게 된다.

그러나 시정의 일변화는 입자수농도와 같이 이중극대의 양상을 나타내지 않는다. 그 원인은 첫째로 주간 시정관측의 기준이 다르기 때문이다. 주간에는 눈으로 보이는 어떤 목표물까지의 가시거리를 시정으로 정하지만, 야간에는 불빛이 보이는 곳까지의 거리를 시정으로 정한다. 둘째로 한양대학교와 중앙기상대가 거리적으로 9 km 정도 떨어져 있으므로 관측환경이 다를 수 있다는 점을 들 수 있다. 셋째로 目測에 의한 시정은 같은 관측자라 하더라도 다분히 관측당시의 심리적 및 주변의 환경적 요인에 의해 그 결과가 달라질 수 있기 때문이다. 또한 북측에 의한 시정은 明度對比(brightness contrast)와 明暗에 따라 주간간에 다르게 관측될 수 있다. 그러므로 본 연구에서 야간의 경우 aerosol 농도와 시정을 비교하는 데는 무리가 따르며 불일치하게 됨을 짐작할 수 있다. 그러나 그림 6에서 주간시정과 aerosol 농도는 음의 상관관계가 있음을 알 수

있다. 이것은 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 범위 입자들이 가시광선을 산란시킴으로써 시정에 직접적으로 영향을 미치기 때문이다.

광산란 유효 입자수농도와 상대습도 사이에도 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다.³¹⁾ 새벽부터 방출되는 차량 배기물중 미세입자들은 응결핵(condensation nuclei)으로 작용하여 아침의 높은 습도속에서 성장하여 안개와 같은 광산란 유효크기로 된다. 낮 동안에는 기온상승으로 습도가 감소하고 이미 성장한 입자들이 다시 건조되어 입자직경이 감소하거나 난류적 연직혼합과 수평바람에 의해 입자들이 확산되어 농도가 감소하므로 시정이 증가한다. 그러나 야간 교통혼잡시간대에는 큰 입자의 수가 증가하여 시정이 감소한다.

상대습도와 시정사이에도 깊은 관계가 있는 것으로 알려졌다. 미국 California의 여러 장소에서 aerosol 입자의 광산란계수 b_{SP} 와 상대습도와의 관계를 연구한 바에 따르면 상대습도가 65% 이상일 경우에는 입자의 상대습도에서의 광산란계수 b_{SPRH} 와 상대습도 30%일때의 광산란계수 $b_{SPRH 30}$ 와의 비 즉, $B = b_{SPRH} / b_{SPRH 30}$ 값이 급증하지만 상대습도가 65% 이하의 경우에는 상대습도가 b_{SP} 에 영향을 미치지 않는다는 것을 관측하였다.⁹⁾

이러한 연구결과를 그림 6에 적용해 보면 상대습도가 낮을 경우에는 시정에 별로 영향을 미치지 않아 모두 높은 시정 값을 나타내고 있다. 이 그림에서 직관적으로 알 수 있듯이 상대습도와 시정사이에도 음의 상관관계가 있음을 보여주는데 상대습도가 높은 아침에는 안개와 같은 큰 입자들로 인해서 시계가 불량해 진다는 것을 나타낸다.

또한 기온이 상승하면 대기의 혼합층이 상승하고 수평바람의 속도가 증가하여 확산과 희석이 잘되어 대기중에 부유하는 입자수농도는 감소한다. 이러한 현상은 그림 6에서 보는 바와 같이 기온과 풍속은 양의 상관관계를 명확히 보이고 있음에 비추어 낮 동안에는 큰 입자의 입자수농도가 감소함에 따라 시계가 양호해짐을 알 수 있다.

그림 7은 1984년 5월부터 10월까지 6개월

간에 걸쳐 입자직경 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 범위의 aerosol 입자수농도, 기온 및 일조시간의 월별변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 봄에는 입자수농도가 높은 값을 나타내지만 여름에는 감소경향을 보이며 가을에 다시 증가함을 보여 준다.

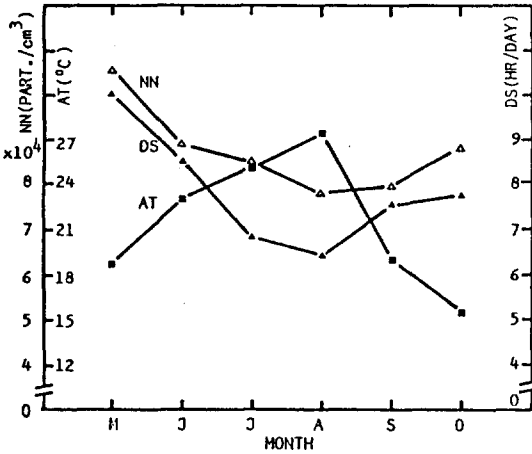


Fig.7 Monthly variation of air temperature (AT), duration of sunshine(DS) and number concentration(NN) of $0.01 \leq 1.0 \mu\text{m}$ particles from May through October, 1984.

5월과 6월의 경우 입자수농도는 태양광이 강하기 때문에 광화학적으로 생성된 smog aerosol의 기여가 크고 특히 5월은 각종 식물체에서 방출되는 분비물과 꽃가루 등의 영향으로 가장 높은 농도값을 나타내는 것으로 보인다. 여름인 7월과 8월은 기온이 높아 대기가 불안정해지고 태풍 및 장마의 영향으로 aerosol 입자들이 쉽게 제거되거나 확산되어 오히려 그 농도가 낮아지는 경향을 보이며, 다시 9월과 10월로 접어들면서 대기가 안정되고 기상변화가 적으므로 입자수농도가 증가하는 것으로 해석된다.

5월에서 10월까지 6개월간의 측정에서 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 범위 aerosol에 대해 단위체적의 공기속에 포함된 aerosol 입자의 수, 표면적 및 체적의 전 평균은 각각 $87,000 \text{ 입자}/\text{cm}^3$, $890 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 및 $24 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ 정도였다. 청결한 대기의 aerosol 입자수농도가 1 cm^3 당 수백 내지 수 천인데 비하면 서울대기는 많은 부유입자로 오염되어 있음을 알 수 있다.

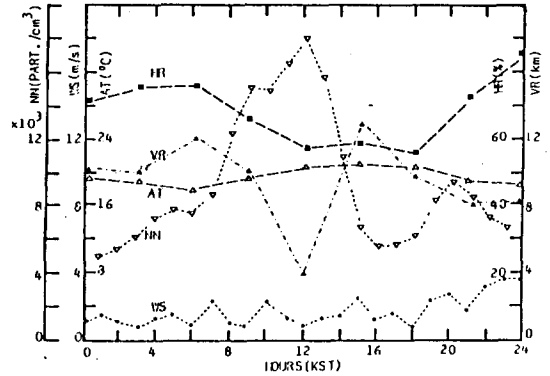


Fig.8 Same graph as Fig.6 but for June 9, 1984.

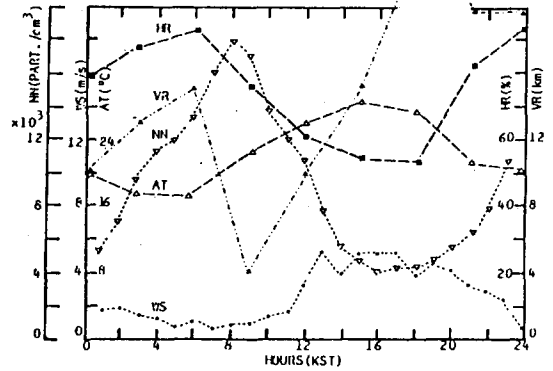


Fig.9 Same graph as Fig.6 but for June 29, 1984.

그림 8과 9는 특수일에 대한 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 크기 입자수농도와 기상자료의 일변화를 비교한 것이다. 그림 8에 나타난 1984년 6월 9일은 단위체적당 aerosol의 입자수농도가 새벽부터 증가하기 시작하여 교통혼잡시간대에 급증하고 뒤이어 12시경에 극대를 나타내고 있는데 당일의 12시경에 시계가 극히 악화되었던 날이다. 이날은 일출직후에는 투명한 대기였으나 아침부터 광화학적 smog가 생성되면서 aerosol 입자수농도가 급격히 증가하여 12시경에 최고치를 기록하였고 동시에 시정은 불과 4km로서 매우 악화되었다. 즉 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 크기의 aerosol

입자가 시정에 커다란 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

그림 9의 1984년 6월 29일은 자정부터 증가하기 시작하던 입자수농도는 이날 아침 9시경에 최고치를 기록한 후 낮 동안 감소하는 특징을 보이며 당일 9시경의 시정은 4 km로서 시계가 아주 불량하였는데 특히 11시경부터 초속 약 4 m의 비교적 센 바람이 불어 aerosol 입자들이 확산 및 희석되어 입자수농도가 감소함과 동시에 시정이 상당히 좋아져 18시경에는 25 km를 기록하는 현상을 보이고 있다. 이것은 그림 6의 평균값에서 논의한 바와 마찬가지로 하루의 측정에서도 입자수농도와 시정은 음의 상관관계가 있음을 알 수 있으며 풍속의 증가는 aerosol 입자의 확산과 희석을 가져오므로 시정을 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

도시지역인 서울에서 1984년 5월부터 10월 까지 6개월간에 걸쳐 EAA 3030으로 aerosol의 농도를 측정된 결과 몇 가지 특성을 찾아 볼 수 있었다.

1. 전 평균 aerosol 농도의 일변화중 입자직경 $0.01 \leq D \leq 1.0 \mu\text{m}$ 의 경우 입자수농도는 새벽 3시에 최저의 값을 나타냈고 교통량이 많은 아침에 급격히 증가한 후 계속 완만한 증가추세를 보이다가 저녁의 교통혼잡시간이 지난 후 감소하였다.

2. 표면적 및 체적농도 역시 이른 새벽에 최저를 그리고 아침과 저녁의 교통혼잡시간인 8시와 20시에 각각 최대를 보이는 이른바 이중극대 현상을 나타냈다. 입자직경 $0.01 \leq D \leq 0.1 \mu\text{m}$ 크기범위의 aerosol 입자수농도는 $0.01 \leq D \leq 1.0 \mu\text{m}$ 범위의 경우와 큰 차이는 없었으나 표면적과 체적농도는 현저히 감소하였다. 이에 반하여 $0.1 \leq D \leq 1.0 \mu\text{m}$ 크기범위의 입자는 그 수가 매우 적음에도 불구하고 표면적과 체적농도의 대부분을 차지하는 것으로 보아 aerosol 입자수농도를 지배하는 것은 극미세입자이고, 표면적과 체적농도에 기여하는 것은 큰 입자들임을 알

게 되었다.

3. 계절별 입자수농도의 변화는 봄에 높은 값을 나타냈지만 여름에는 감소경향을 보였으며 가을로 접어들면서 서서히 그 농도가 증가하는 경향을 보였다.

4. Aerosol 입자수농도와 기상자료와의 관계에서 풍속은 aerosol 입자들의 확산과 희석에 영향을 주었다. 특히 aerosol 농도와 시정은 낮 동안에 음의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 또 상대습도는 $0.1 \leq D \leq 1.0 \mu\text{m}$ 의 큰 입자의 생성에 관계가 깊으며 기온은 습도 및 풍속과 관계가 깊어 대기혼합층의 높이에 큰 영향을 주므로 결과적으로 aerosol 농도에 영향을 미치는 인자가 되었다.

5. 요컨대 aerosol은 차량배기물의 방출, 광화학적인 기체-입자변환, 응고와 응집, 지표에서의 제거 및 기상요인 등에 의해 그 농도가 변하였다.

끝으로 이 연구에 관하여 기상자료를 제공하여 주신 중앙기상대의 손형진 대장님과 최희승 과장님께 감사드리며, 이 연구가 한양대학교의 연구비지원을 받아 수행되었음을 밝히는 바이다. (原稿接受 '86. 5. 8)

참 고 문 헌

1. Green H.L., Lane W.R., (1964), Particulate Clouds, 4-5, Spon's General & Industrial Chemistry Series, London.
2. Haagen-Smit A.J., (1952), Chemistry and physiology of Los Angeles Amog, J. Ind. Eng. Chem., 44, 1342-1346.
3. Hatch T.F., (1959), Respiratory dust retention and elimination, Proc. of the Pneumocosis Conf., Johannesburg, 113-132, J. & A. Churchill Ltd., London.
4. Perera F.P., Ahmed A.K., (1979), Respirable particles, Ballinger Pub. Co.
5. Hinkley E.D. (Editor), (1976), Laser Monitoring of the atmosphere, Springer-Verlag, Berlin.
6. Strohhahn J.W. (Editor), (1978), Laser beam

- propagation in the atmosphere, Springer-Verlag, Berlin.
7. Zuev V.E., (1982), Laser beam in the atmosphere, Consultant Bureau, New York.
 8. Pruppacher H.R., Klett J.D., (1980) Microphysics of cloud and precipitation, Chs. 8 & 9, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland.
 9. Lodge J.P., Jr., (1981), Non-health effects of airborne particulate matter, Atmospheric Env., 15, 431-482.
 10. Lundgren D.A., et al., (1973), Mass distribution of large atmospheric particles, Ph.D. Thesis, Univ. Minnesota, Minneapolis, MN, U.S.A.
 11. Kim P.-S., (1984), A study on the atmospheric aerosol size distribution ranging from 0.4 to 9.0 μm in Western coastal area of Korea, Ann. Rev. of the Korean Nat'l Committee for IUGG, 12, 1-11.
 12. Kim P.-S., Lee C.-H., et al., (1983), Measurement of airborne particle size distributions at ground level, Bull. Environ. Sci., 5, 5-12, Hanyang University, Seoul.
 13. 김필수, (1983), 입자직경 0.0075 μm ~ 1.0 μm 범위 대기 aerosol 크기의 전기적 분석, 한양대학교 기초과학논문집, 제 3 집, 77-84.
 14. 김필수, (1986), 0.4 ~ 9.0 μm 범위 도시 대기 aerosol 의 크기분포결정, 한양대학교 환경과학논문집, 제 7 집, 37-46.
 15. 조희구, (1980), 서울의 대기 aerosol 입자 크기분포에 관한 연구, 한국기상학회지, 제 16권, 1-9.
 16. 조희구, (1983), 파장별 광전측정에 의한 에어로졸입자 크기분포, 83 국내외 과학기술자 학술회의 논문집, 하계 심포지움편, 한국과총, 329-348.
 17. 이윤재, 김희강, (1985), 초대입자가 대기부유분진에 주는 부하, 대기보전학회지, 제 1권, 1, 71-82.
 18. 이용근, 김만구, 원정호, (1985), Andersen 시료채취기를 이용한 도시대기중 부유입자상 물질의 입도분포측정, 대기보전학회지, 제 1권, 1, 93-98.
 19. 이민희, 심응기의 3인, (1984), 대기중 부유분진성분에 관한 조사연구, 국립환경연구소 연구보고서, 1-97.
 20. 이민희, 한의정의 4인, (1984), 대기중 부유입자상 물질의 농도분포와 입경분포별 특성에 관한 연구(III), 국립환경연구소 연구보고서, 1-90.
 21. Whitby K.T., 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.
 22. Whitby K.T., Husar R.B., (1970), The Minnesota aerosol analyzing system, Rep. Int'l Cloud & Ice Nuclei Workshop, 19-29.
 23. Liu B.Y.H., Pui D.Y.H., (1975), on the performance of the electrical aerosol analyzer, J. Aerosol Sci., 6, 249-264.
 24. Liu B.Y.H. Whitby K.T., Pui D.Y.H., (1974), A portable electrical analyzer for size distribution measurement of submicron aerosols, J. Air Poll. Cont. Assoc., 24, 1067-1072.
 25. Whitby K.T., Husar R.B., et al., (1972), The aerosol size distribution of Los Angeles smog, J. Colloid and Interface Sci, 39, 177-204.
 26. Pui D.Y.H., Liu B.Y.H., (1979), Electrical aerosol analyzer: Calibration and performance, Aerosol Measurement, ed. by D.A. Lundgren et al., 384-399, Univ. Press of Florida, Gainesville, U.S.A.
 27. 김윤장, (1985), 전기적 이동도분석에 의한 대기 aerosol 의 크기분포결정에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교.
 28. Twomey S., (1975), Comparison of constrained linear inversion and an iterative nonlinear algorithm applied to the indirect estimation of particle size distribution, J. Computational Physics, 18, 188-200.
 29. Kim P.-S., Rho C.-S., (1983), Calculations of time-dependent equivalent mixing heights (EMHs), using ^{222}Rn in the atmosphere, J. Korean Meteor. Soc., 19, 110-117.
 30. Van de Hulst H.C., (1957), Light scattering by small particles, Ch. 9, John Wiley & Sons, London.
 31. Whitby K.T., Sverdrup G.M., (1980), California aerosol: Their physical and chemical

characteristics, In the Character and origin of smog aerosols, ed. by G.M. Hidy et al., 447-558, John Wiley, New York.

32. Kim P.-S., Rho C.-S., (1986), Size distribution of atmospheric aerosols in Seoul, Atmospheric Environ., 20 (to be published).