

강설시 도심지역 에어러솔의 물리·화학적 특성

김민수·이동인·유철환
부경대학교 환경대기과학과
(2001년 4월 30일 접수)

The Physio-Chemical Characteristics of Aerosol in Urban Area During Snowfall

Min-Soo Kim, Dong-In Lee and Cheol-Hwan You

Dept. of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National Univ., Pusan, 608-737, Korea
(Manuscript received 30 April, 2001)

To investigate the physio-chemical components and properties of aerosol particles in urban area sampling of aerosol particles was carried out in the campus of Hokkaido University, Sapporo, Japan, during snowfall. Aerosol particles were collected on millipore filter papers using a low volume air sampler. Their shapes, sizes and chemical components were analyzed by a SEM (Scanning Electron Microscope) and an EDX (Energy Dispersive X-ray).

As a results, ice crystals of dendrite and column types were predominantly shown at mature and developing stage of snowfall intensity. The dendrite and sector plate types of ice crystals were mainly originated from the sea but column types were come from soil. Scavenging effect by snowfall was greatly also shown at dendrite type ice crystals that embryo was fully developed. Al, Si elements were shown at high frequencies as compared with others. Na, Cl components were especially shown at high frequencies under the sea-breeze wind during snowfall. Anthropogenic aerosol particles had shown with irregular shapes and sizes, relatively. Mainly 3-7 μ m aerosol particles were abundant and coarse particles also could be seen during snowfall. Ca, Zn, Fe components mainly caused by spike tires from vehicles in winter season were dominant before snowfall, however the element S mainly caused by human activity was rich after snowfall. The pH values of snow in Sapporo city were higher than those at coastal area. The concentration of chemical components in aerosol particles was also affected by surface winds.

Aerosol particles in urban area, Sapporo were mainly affected by human activities like vehicles and combustion with wind system. And their types were related with snowfall intensity.

Key words : aerosol particles, SEM, EDX, sea-breeze wind, human activity, ice crystal, snowfall intensity

1. 서론

동·식물의 호흡기 계통에 작용하여 해를 끼치거나 전파의 산란 및 가시거리 저하의 원인이 되기도 하며 광화학 스모그현상과 같은 대기오염현상을 일으키는 대기 중의 에어러솔은 대기의 복사 및 기상현상에 직·간접적으로 영향을 미치고 있어 최근 많은 관심이 집중되고 있다. 오늘날 우주과학의 발전과 더불어 지구대기 및 성간 분진의 특성을 규명하려는 연구에서도 에어러솔은 더욱 중요하게 대두되고 있다. 특히, 대기중의 중금속농도와 대기오염물질 농도증가에 따른 에어러솔에 관한 화학적 성분 및 발생원 규명에 관한 연구가 많이 행하여지고 있고, 산성눈과 산성비와 함께 에어러솔을 조사하여 강설,

강우의 특징을 밝히고자 한 연구도 많다. Endow and Magono¹⁾는 Sapporo 지역의 겨울철 에어러솔 분포에 관한 연구를 하였고, Kikuchi²⁾는 X-Ray Microanalyzer를 이용하여 빙정에 부착된 에어러솔을 측정하였고, Suzuki³⁾는 Sapporo 지역에서의 적설특징에 관하여 연구한 바가 있다. Magono et al.⁴⁾은 Sapporo 지역에서의 강설시 빙정에 부착된 에어러솔에 관한 특성을 연구한 결과 빙정에 의한 세정효과를 볼 수 있었으며 Lee⁵⁾는 Sapporo 지역에서의 에어러솔 총농도는 고도와 풍계에 따라 변화한다는 연구결과를 보고하고 있다.

도시에서 발생한 오염된 입자들은 구름 기저부인 도심하층 대기권에 분포되고, 강설시에는 강설입자에 의한

세정효과에 의해 대기가 깨끗해진다고 알려져 있으며 특히, Bell and Saunders⁶⁾는 세정효과실험을 통하여 빙정 낙하시 4~6 μ m범위의 에어러솔 입자의 세정효과가 보다 크다는 것을 보고하고 있다.

국내에서는 기상인자와 관련한 에어러솔의 수농도변화에 관한 연구⁷⁾와 입자상물질 중 금속성분의 밀도분포에 관한 연구,⁸⁾ 도시 대기중의 부유분진 중 입도별 분포,⁹⁾ 호흡성 분진중 중금속 오염도에 관하여 조사한 연구,¹⁰⁾ 도시 대기중에 함유된 중금속류의 오염분포에 관한 연구,¹¹⁾ 대기 부유분진 중의 미세, 거대 입자의 농도를 측정하여 각 미량 유해 성분에 관한 연구¹²⁾ 등이 있으나 강설시 기상현상과 관련한 에어러솔 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 도심지역에서의 강설시 기상학적인 변화에 따른 대기 에어러솔의 특성을 알아보고자 겨울철 집중적인 강설과 장기간의 강설지역으로 알려진 일본 북해도 Sapporo시에서 강설여부(강설전, 강설중, 강설후)에 따른 입경 1~30 μ m범위 대기 에어러솔 입자의 농도, 크기, 모양, 성분 등을 조사하였다.

2. 실험 및 분석방법

2.1. 관측지점 및 관측기간

시료 채취지점은 일본 Sapporo시의 북해도 대학에서 행하였으며 이시카리만의 레이더 관측지점과 함께 Fig. 1에 나타내었다. Sapporo 시는 면적 1,118.01km², 인구 158만명으로 북해도에서 가장 큰 도시이다. 겨울철 주요 오염원은 난방과 자동차에서 발생하는 먼지이며, 이들이 겨울철 강설시 산성눈을 유발시키고 있다.¹³⁾ Sapporo시에서 주로 발생하는 에어러솔 성분은 토양입자, 해염입자, 알루미늄, 질산염, 황산염, 유기탄소와 탄소원자 등의 검출입자로 구성되어 있으며, 대부분이 인위적으로 유래된 오염물질의 영향을 많이 받고 있는 것으로 지적되고 있다.¹⁴⁾

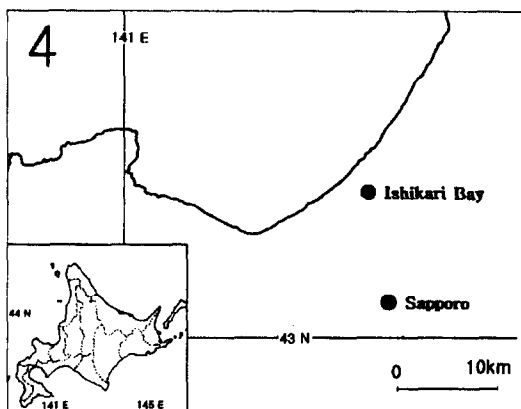


Fig. 1. The position of aerosol sampling(Sapporo) and radar observation(Ishikari) site.

관측기간은 1996년 1월 20일~27일, 1997년 1월 24

일~29일 이었으며, 특히 1996년 관측기간동안에는 일 강설량이 30cm 이상 되는 날도 있었다.

2.2. 분석방법

2.2.1. 에어러솔 Sampling

에어러솔 시료 채취방법은 Low Volume Air Sampler를 이용하여 20 l/min 유량으로 강설전, 강설중, 강설후로 나누어서 30분에서 1시간 흡입된 공기를 여과지에 통과시켰으며, 12시간 동안의 에어러솔 sample도 채취하였다. 여과지로는 기공이 일정하고 포집된 입자를 전자현미경으로 측정 가능한 Teflon Membrane Filter(pore size 0.45 μ m)를 사용하였다.

채취한 여과지는 가로, 세로 1cm×1cm 크기로 잘라 전기를 잘 통해주기 위해 금박을 한 후, SEM(Scanning Electron Microscope, HITACHI S-2700)을 사용하여 에어러솔 입자의 크기, 모양을 조사하고, EDX(Energy Dispersive X-ray, Kevex Delta+)를 사용하여 입자의 성분분석을 실시하였다.

2.2.2. 강설입자

강설중의 빙정에 의한 에어러솔의 세정효과와 강설입자의 모양과 크기를 알아보기 위하여 강설시작 10분 이내를 강설초기, 강설시작 10~30분 이내를 강설중기, 강설종료 10분전을 강설말기로 나누어서 강설입자를 slide glass에 10초간 포집하여 replica 용액 (dichroetane에 polyvinylformal 분말을 0.5~3% 넣어서 만듦)으로 코팅하여 고정시킨 후 하루동안 방치하여 현미경(Nikon SMZ-10)으로 사진 (FX-35)을 찍어 관측하였다.¹⁵⁾

2.2.3. 기상요소

Sapporo시에 설치된 AWS를 이용하여 풍향, 풍속, 기온, 강설량 등을 측정하였으며, 09시와 21시에 관측되는 라디오존데 자료를 이용하여 Sapporo시의 연직기온, 습도 및 바람장을 분석하였다. 북해도 대학에 설치된 반경 60km의 도플러 레이더를 이용하여 강설구름의 발달을 관측하고 대기의 운동학적 특성을 알아보기 위하여 단일 도플러 레이더를 이용한 VAD방법으로 연직 바람장을 구하였다.¹⁶⁾ 관측에 사용한 도플러 레이더의 제원 및 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Specifications of a Doppler radar in Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University.

Frequency	9,445 MHz
Peak power	40kW
Pulse length	0.5 μ s
Pulse repetition frequency	2,000Hz
Beam width	1.1°
Minimum detectable signal	-110dBm
Spatial resolution	62.5/250/500 m
Doppler signal processing	Pulse pair processing
Nyquist velocity	±16 m/s

3. 결 과

3.1. 에어러솔 분류 및 성분분석

대기에어러솔 입자직경은 분자크기에 이르는 수천분의 일 μm 로부터 수백 μm 범위가 되며 크기에 따라 물리·화학적 성질을 달리한다.⁷⁾ 본 연구에서는 1~30 μm 범위의 에어러솔 입자를 대상으로 분류하였다. 또한 에어러솔 입자성분의 기원추정은 Table 2에 나타난 Hidy et al.¹⁷⁾의 분류를 따랐다.

Table 2. The chemical constituents of aerosol particles and its possible origins by Hidy et al.¹⁷⁾

Element	Possible Origins
Carbon	Natural and anthropogenic
Nitrogen	Oxidation of NO _x , NH ₃ , fuel additives
Sodium(Na)	Mainly seasalt
Aluminum	Mainly soil
Silicon	Mainly soil
Sulfur(SO ₄ ²⁻ , SO ₃ ²⁻ , S....)	Oxidation of SO ₂
Chlorine	Mainly seasalt
Potassium	Mainly natural
Calcium	Soil and cement
Titanium	Anthropogenic and natural
Chromium	Anthropogenic
Manganese	Anthropogenic, soil
iron	Anthropogenic, natural
Nickel	Anthropogenic
Copper	Anthropogenic
Zinc	Tire dust, smelting, fuel additives
Cadmium	Metal production and processing
Pb	Auto exhaust, industrial processes

관측된 대기중의 에어러솔 입자를 크게 토양입자, 해염입자, 검댕입자의 3가지로 분류하였다. 토양입자는 지표면의 입자가 바람에 의해 대기중에 부유하고 있는 입자이다. 반경 40~50 μm 정도의 입자가 바람에 의해서 가장 움직이기 쉽다고 알려져 있고, 입자가 작은 것들은 지표면과의 van der waals' 힘에 의해 지표면의 물체에 부착하며, 입자가 큰 것들은 무겁기 때문에 바람에 의해 부유하기 힘들다. 바람에 의해 대기중에 부유하고 있는 입자들은 다른 입자들끼리 충돌하여 입자표면이 파쇄되어 1~10 μm 정도의 입자를 생성하고, 대기중에 부유하게 되는데, 이와 같은 효과를 Sand Blasting이라고 한다.¹⁸⁾ 토양입자의 화학조성은 Si, Al, Fe, Ca, K, Na, Mg 등으로 구성되어 있지만 발생원에 따라 차이를 나타내며, 본 연구에서 관측된 토양입자의 모양은 주로 둥글고 크기는 1~10 μm 범위의 입자가 많았다.

해염입자는 파도가 부서지는 과정에서 파도 속에 휘말려 공기에 의해 생성된 기포가 해면에서 파멸하는 힘에 끌여 올려져서 생성된다. 이렇게 생성된 해염입자는 대개 2~40 μm 범위의 거대입자 영역에 속한다. 이들 입자의 90%가 큰 입자 영역이고, 미소입자영역의 해염입자는 10%이하에 속한다.¹⁹⁾ 본 연구의 관측결과 해염입자의 모양은 주로 각지고 크기도 1~30 μm 범위의 입자가 많았다.

검댕입자는 대부분 화석연료의 연소에 의해 발생된다. 연료의 조성 및 연소방법에 따라서 성분함량이 다르지만 굵속을 비롯한 다종다양한 환경오염물질들이 함유되어 있으며 입자의 모양, 색조, 표면상태, 조성 등 입자 자체의 물리·화학적 성상이 서로 다른 매우 복잡한 화합물로 되어있다. 최근에는 대기중의 굵속과 방향족 탄화수소와 함께 발암물질로 조사되어 더욱 주의를 요하고 있다. 본 연구의 관측결과 검댕입자의 모양은 각진 형태에서 둥근 형태에 이르기까지 여러 종류였으며 크기도 일정하지가 않았다.

3.1.1. 12시간 에어러솔 특성

Sapporo지역에서의 에어러솔 성분을 강설전, 중, 후와 비교하기 위하여 12시간별 에어러솔 관측을 행하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다. Sapporo지역에서의 에어러솔 특성은 토양성분인 Si, 해염입자인 Cl 및 Ca 성분이 많았고, 특히 겨울철 아스팔트 분진으로 인한 영향과 해풍의 영향도 많이 받고 있음을 알 수 있었다. 에어러솔 입경분포는 Fig. 3에 나타내었다. 강설여부에 상관없이 전체적으로 입경이 작은 것들이 많이 분포되었으며 입경이 클수록 적은 분포를 보였다. 특히 7 μm 를 전후로 출현빈도의 차가 크게 나타났으며, 대부분 3 μm 이하의 에어러솔이 40%이상으로 나타났다.

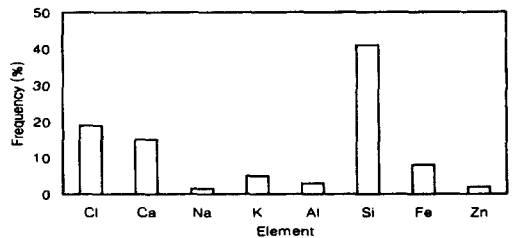


Fig. 2. The frequency distribution of elements contained in the aerosol particle for 12hours during Jan. 20~27, 1996 and Jan. 24~29, 1997 in Sapporo city.

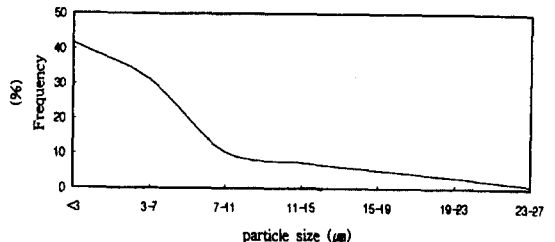


Fig. 3. The size distribution of elements contained in the aerosol particle for 12hours during Jan. 20~27, 1996 and Jan. 24~29, 1997 in Sapporo city.

3.1.2. 강설전 에어러솔 성분

전 관측기간 중 강설전 30분간의 에어러솔에 함유된 성분의 빈도는 Si, Ca, Cl, Zn, Fe, Al, K, Na 등의 순으로 나타났으며, 각 성분별 빈도분포를 Fig. 4에 나타내었다.

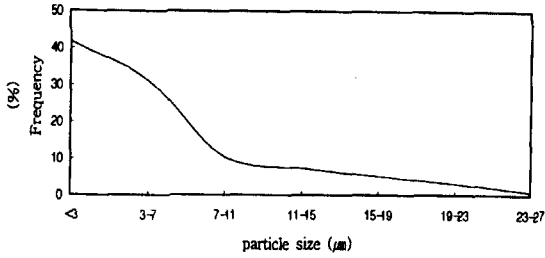


Fig. 4. The frequency distribution of elements contained in the aerosol particle for 30min. before snowfall during Jan. 20~27, 1996 and Jan. 27~29, 1997 in Sapporo city.

관측결과, 토양입자의 일반적인 화학조성인 Si : 26%, Al : 8%, Fe : 4%, Ca : 1.4%, K : 1.4%, Na : 0.6 %, Mg : 0.5%에 비해 Si, Al의 비율이 상대적으로 높게 나타났다. 대기 에어러솔중의 Si, Al 성분을 측정해서 얻어진 Si, Al의 농도에서 Si, Al의 함유량 (Si=26%, Al=8%)을 기초로 한 계산한 결과,¹⁴⁾ 강설전의 에어러솔은 토양입자에서 기원되었음을 알 수 있었다. 이는 겨울철 석탄류 연료의 연소와 같은 인위적인 발생원에 의한 것으로 사료되며, Sapporo 지역의 겨울철은 눈으로 지면이 덮혀 있기 때문에 토양입자 중 Si성분은 아시아 대륙에서 날아온 것으로 추정된다.²⁰⁾

그밖에 Zn, Ti, Cr, Fe 등의 금속성분들이 검출되었으며 이들은 대체적으로 인간활동에서 그 기원을 찾을 수 있는 성분들인데, 주로 차량 운행시 spike tire에 의한 아스팔트 분진으로 인해 생기는 street dust인 Fe, Ca, Zn 성분이 높았으며, 이는 Mohri et al.²¹⁾의 연구결과와 유사하였다. 이들 성분들은 다른 성분들과 비교해볼 때 상대적으로 높게 검출되었으며, 해풍의 영향으로 Cl성분도 함께 검출되었다.

전 기간 중 강설전의 aerosol 입경별 분포는 Fig. 5에서와 같이 3~7 μ m 범위에서 높은 분포를 보였으며, 이는 겨울철 Sapporo 지역의 토양입자의 특성상 1~10 μ m 범위의 실트 입자가 많았으므로 사료된다. 따라서 Sapporo 지역의 강설전 에어러솔 특성은 주로 토양입자와 함께 인위적인 오염물질의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있었다.

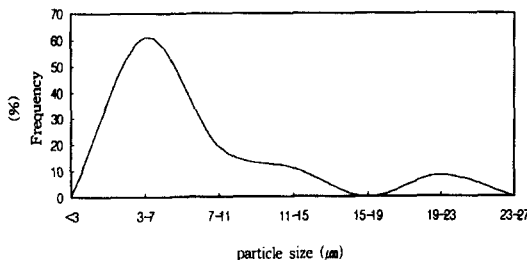


Fig. 5. The size distribution of elements contained in the aerosol particle for 30min. before snowfall during Jan. 20~27, 1996 and Jan. 24~29, 1997 in Sapporo city.

3.1.3. 강설중 에어러솔 성분

Fig. 6에는 전 관측기간 중 강설중 30분간의 에어러솔의 각 성분별 빈도분포를 Si, Cl, Al, Ca, K, Na, Fe, Mn, Cr, Sb, Ti 등의 순으로 나타내었다.

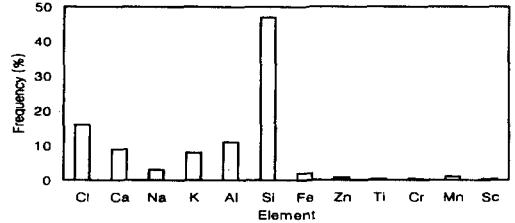


Fig. 6. Same as Fig. 2 but for 30min. during snowfall.

강설전과 비교하여 볼 때, Si 성분의 값은 큰 변동은 없었으나 Fe, Zn, Ti, Cr, Mn의 값은 보다 감소하였다. Na, Cl성분은 강설전과 비교하여 증가된 것으로 보아 해풍의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있었다. 따라서 강설중에는 인간활동에 의한 인위적인 영향을 많이 받지 않는 것으로 사료된다. 에어러솔의 형태에 있어서도 해염입자의 특성인 각진 형태의 에어러솔입자가 많이 있음을 알 수 있었다. 강설중 전기간동안 강설입자의 입경별 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 강설전과 비교하여 볼 때 3~7 μ m크기가 많았으며, 11 μ m범위 이상과 15 μ m이하의 범위에서도 많은 빈도를 볼 수 있었다. 특히 거대입자로 구성되어 있는 해염입자들의 증대가 두드러지게 많이 나타났다.

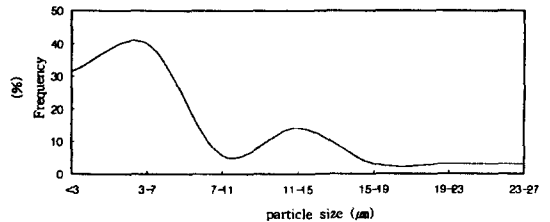


Fig. 7. Same as Fig. 3 but for 30 min. during snowfall.

또한, 강설초기(강설시작 후 10분이내), 강설중기(10~30분), 강설말기(강설종료 10분전)의 3가지로 구분하여 눈 결정체를 조사하였다. 관측결과, Sapporo 지역의 눈입자구조는 column, dendrite, sector plate형이었고, 입경은 0.8~6mm 범위로 평균 1.2mm 정도크기였다. 강설입자들은 대부분 단결정형태로 포집하기가 어려웠고, 이 물질이 많이 함유된 것으로 보아 눈 결정체의 낙하시 에어러솔 입자들이 많이 부착되어 내려온 것으로 사료된다.

전자현미경 SEM을 이용하여 눈 결정체모양을 관측한 결과, snow crystal의 형태에 따라 응결핵 역할을 하는 에어러솔의 성분 및 기원은 지역에 따라 다르게 나타나며 특히 해염입자와 인간활동으로 기인된 입자들이 많이 나타났다. 일반적으로 snow crystal들 중에서 plate, dendrite 등은 주로 해양기원 성분이 stellar 형은 인간활동으로 기인된 것들이 많았으며, column 형은 토양기원

의 에어러솔이 많았다. 이는 Kikuchi(1982)에 의한 조사와 유사한 결과를 보였다.

Kikuchi²⁾에 의하면 Sapporo시에서 10km 정도 떨어진 Mt. Teine에서 에어러솔입자들을 관측한 결과 giant particles($d \geq 2\mu\text{m}$), large particles($0.2\mu\text{m} < d < 2\mu\text{m}$), Aitken particles($d \leq 0.2\mu\text{m}$) 등의 3가지로 분류한 성분조사에서 입자가 작을수록 S성분이 높았다고 하였다. 또한 강설입자 속의 응결핵과 대기중의 에어러솔 입자들의 성분을 비교해 본 결과 주로 giant particles의 성분이 비슷한 유형으로 나타나고 있다고 보고한 바 있다.

강설단계별 snow crystal의 특징과 형태는 Table 3과 Fig. 8에 각각 나타내었다. 강설초기에는 column, sector plate, dendrite형 등 여러 가지 형태의 snow crystal들이 관측되었으며 크기는 작고 embryo들이 완전히 성장하지 못한 입자가 많았다. 강설중기에는 dendrite 형태의 빙정들이 많았으며 여러 개의 입자가 겹쳐진 형태가 많았다. 크기도 1mm 이상에서 5mm 범위의 큰 입자들로 구성되었다. 강설말기에는 주로 column형의 입자가 많고 크기는 1mm 이하의 결정들이 대부분으로 Kikuchi²⁾가 관측한 결과와 비교해보면 강설중일 때 해풍의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다. 이는 Sapporo지역의 강설시 에어러솔 입자들이 빙정 등에 부착되어 내려옴으로써 산성눈과 같은 오염을 유발하는 것으로 사료되며 오히려 해풍은 Sapporo지역의 에어러솔을 감소시키는 역할을 하는 것으로 사료된다.

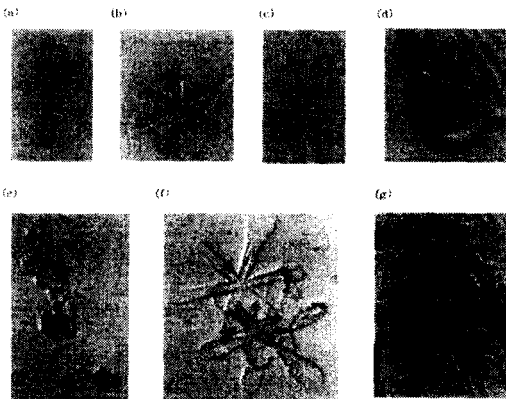


Fig. 8. Various type of ice crystals at Jan. 20~27, 1996 and Jan. 24~29, 1997 in Sapporo city. (a), (c) : column, (b), (f), (g) : dendrite, (d), (e), sector plate.

Table 3. Variation of snow crystal types with respect to snowfall stage during Jan. 20~27, 1996 and Jan. 24~29, 1997 in Sapporo city.

Snowfall stage	Type of snow crystal	Temp(°C)	Size
Developing stage	dendrite, sector plate, column	-2~-7	0.8-1.3mm
Mature stage	dendrite	-2~-8	1.0-6.0mm
Dissipating stage	column	-2~-4	0.8-1.0mm

3.1.4 강설후 에어러솔 성분과 세정효과

강설후 30분간 에어러솔 관측결과를 전기간 빈도분포로 Fig. 9에 나타내었다. Si, Ca, Al, Cl, S, Ti, Fe, K, Na, Mg등의 순으로 나타났으며, 강설전과 비교해볼 때 Si와 Ca를 제외하고는 모든 성분에서 감소하였고 대부분 입자가 작거나 없어서 관측이 불가능한 경우가 많았다. 에어러솔 수량에 있어서도 급격한 감소를 볼 수 있었는데, 이는 강설시의 세정효과(scavenging effect)와 빙정에 의한 포집효과(collection efficiency)에 기인된 것이라고 추정된다. 특히 인간활동으로 인해 기인되는 금속성분들은 감소하였으며 아스팔트 분진으로 생성된 성분들 중 Fe와 Zn이 거의 없었거나 감소하였으며 Ca성분은 증가하였다. 이는 Ca성분이 주로 토양에서 기인된 것으로 사료된다. Fig. 10에 에어러솔 입경분포를 나타내었으며, 작은 입자들이 큰 입자들에 비해 많이 분포하여 강설전과 유사한 입경분포를 보였다.

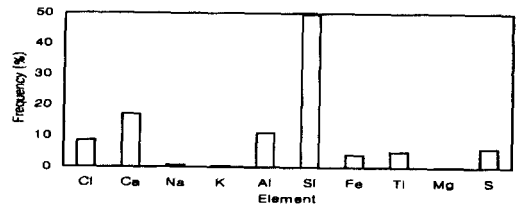


Fig. 9. The frequency distribution of elements contained in the aerosol particle for 30min. after snowfall during Jan. 20~27, 1996 and Jan. 24~29, 1997 in Sapporo city.

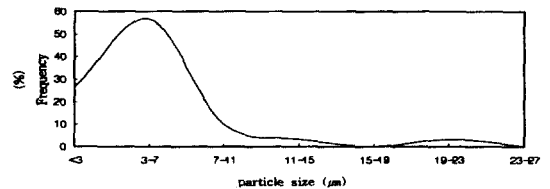


Fig. 10. The size distribution of elements contained in the aerosol particle for 30min. after snowfall during Jan. 20~27, 1996 and Jan. 24~29, 1997 in Sapporo city.

Rain drop, snow crystal, snow flake, graupel 등으로 이들 입자들은 강한 전기장에서 상당한 양의 전하를 가지고 있어서 에어러솔 입자들을 포집하는 것으로 알려져 있는데,²²⁾ 본 연구에서도 강설전과 강설후의 에어러솔을 비교해 본 결과 에어러솔의 감소현상을 볼 수 있었다. 따라서, 비나 눈이 오고 난 후에는 강수세정에 의한 대기 에어러솔의 감소현상을 볼 수 있었다.

Murakami²²⁾등은 빙정에 의한 직경 0.1~6 μm 범위의 에어러솔 세정효과 실험에서 0.2 μm 범위에서 세정효과가 최저였으며 에어러솔 크기가 증가할수록 강설에 의한 세정효과가 크다고 하였다. 본 연구에서도 강설전과 강설후의 에어러솔 갯수를 비교해 본 결과 3 μm 범위이하와 3~7 μm 에서 에어러솔 감소를 볼 수 있었다. 이는 주로 자연

에서 발생된 에어러솔 입자들 중 토양 입자들이 많이 세정되는 것으로 사료되며 인간활동에서 발생된 에어러솔들은 크기가 작은 것을 감안할 때 3 μ m이하의 입자에서 크게 감소를 보인 것으로 사료된다. 에어러솔 성분들을 비교해 볼 때 주로 인간활동에서 기인된 금속성분들은 강설후에는 거의 없었거나 감소하였음을 볼 수 있었다. 이는 Kikuch et al.²⁾의 관측에서도 알 수 있듯이 강설에 의해서 주로 large particles과 Aitken particles들이 많이 세정되어 인간활동으로 기인된 성분들이 많이 감소하는 것으로 사료된다.

이상에서 강설에 의한 세정효과는 3 μ m 범위 이하에서는 주로 인간활동 성분들이, 3 μ m 이상에서는 주로 토양입자들이 많이 세정됨을 추측할 수 있었다. 그러나 빙정에 의한 세정효과 뿐만 아니라 도심지에서 발생된 오염된 공기가 교외의 신선한 공기로 대체되는 것에 의해서도 세정효과를 예측할 수 있으므로 기상조건, 특히 풍계에 따른 에어러솔의 감소 현상도 매우 중요하리라 사료된다.

3.2 풍계 변화에 따른 에어러솔 특성

에어러솔이 기상조건 특히 강설시 풍계에 따라 에어러솔이 어떠한 특성을 가지는가를 알아보기 위하여 관측 기간 중 강설과 함께, 풍계가 바뀌는 1996년 1월 20일 1830LST~2230LST의 경우를 선택하여 그 특성을 분석하였다.

Fig. 11은 1996년 1월 20일 2100LST의 지상일기도이다. 관측지역인 북해도 서쪽 연안에 저기압중심이 위치하고 있으며 1400LST부터 Sapporo의 남쪽내륙지역에서 강설예보가 발생하여 시간이 지남에 따라 북상하면서 점차 세력이 강해져 1630LST부터 2000LST까지 Sapporo 지역에 정체하여 눈을 내렸으며 2000LST 이후부터는 풍계가 급격히 바뀌면서 Ishikari만에서 평균 지상풍속이 15m/s 이상의 강한 북서풍이 불기 시작하였다.



Fig. 11. The surface weather chart for 2100LST Jan. 20, 1996.

Fig. 12의 지상 기온 및 풍속 관측자료에서 볼 수 있

듯이 1996년 1월 20일부터 기온이 하강하기 시작하여 21일에는 최저 -10 $^{\circ}$ C, 23일에는 -12 $^{\circ}$ C에 이르고 있고 풍속은 4m/sec 전후로 그다지 강하지 않았다. Fig. 13에 VAD방법을 이용한 고도별 바람장 추정에서 내륙으로부터의 북동 및 동풍 계열바람이 2030LST에 북서계절풍으로 점차 강하게 변화되고 있으며, 이는 고도 2km이하에서 그 경향이 뚜렷하게 나타나는 특성을 보였다.

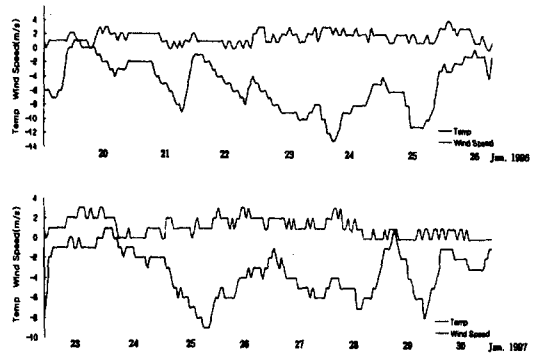


Fig. 12. The surface wind speed(m/s) and temperature ($^{\circ}$ C) in Sapporo during observation period.

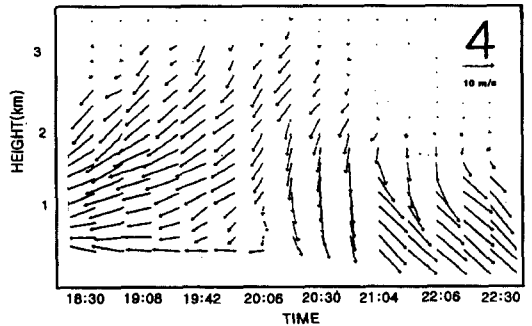


Fig. 13. Horizontal wind vectors calculated by VAD method from 1830LST to 2230LST, 20 Jan. 1996.

풍계변화 전후의 강설시 에어러솔 성분은 Table 4와 같으며 해염기원 성분은 증가한 반면 인간활동에서 기인된 Fe, Zn성분들과 토양기원 성분들은 감소하였음을 볼 수 있었다. 이는 강설과 동시에 풍계가 동풍에서 북서풍계로 변화하여 해양성 공기의 유입으로 인해 인간활동에 의한 기원되는 성분들이 감소한 것으로 사료된다.

Table 4. The chemical components frequency(%) of aerosol in Sapporo. A and B is at 18:30~20:30 and 20:30~22:30, Jan. 20, 1996, respectively.

Compo-nents	Cl	Ca	Na	K	Al	Si	Fe	Zn	Mn
Case A	16.652	6.599	5.046	7.455	7.327	41.841	8.771	3.309	ND
Case B	30.271	1.317	9.091	11.603	5.187	36.29	ND	ND	6.237

한편 내륙에서 성장 발달한 에어러솔의 특성을 알아보기 위하여 1997년 1월 24일 1900LST~2400LST의 경우를 살펴보았다. 이 때의 풍향은 Fig. 14에서와 같이 북동풍이 불었으며 1997년 1월 25일 0200LST부터는 풍향이 북서풍으로 바뀌었고 기온은 -8℃, 풍속은 1m/s로 그다지 강한 편은 아니었다. 이는 내륙에서 발달한 강설구름이 오랫동안 Sapporo시에 정체한 후 풍계가 바뀌었음을 잘 보여 주고 있다. 이 때의 에어러솔 성분은 Table 5에서와 같이 주성분은 Si, Ca, Zn, Al이었으며 그 밖에 Fe, K, Na 성분의 에어러솔들도 관측되었음을 볼 때, 이는 주로 토양 및 인간활동으로 기인된 성분들로 사료된다. 이들 인간활동에서 기인된 에어러솔 성분들은 겨울철 연료의 연소나 차량 운행으로 생성되며, 강설시 강설입자에 침착함으로써 산성눈과 같은 오염을 유발시킨다고 알려져 있다.

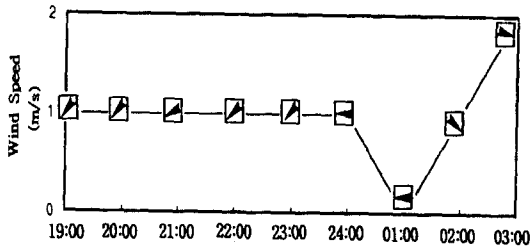


Fig. 14. Wind speed and wind direction from 1900LST Jan. 24 to 0300LST Jan. 25, 1997.

Table 5. The chemical components of aerosol during 19:00~24:00, Jan. 24, 1997 in Sapporo.

Components	Cl	Ca	Na	K	Al	Si	Fe	Zn
%	0.636	32.597	1.305	1.784	3.178	49.384	2.441	8.695

이상에서 Sapporo 지역의 강설시에는 강설과 함께 풍계가 변하는 경우가 많이 있었으며 강설전, 후의 에어러솔을 비교해 본 결과 에어러솔의 감소 현상을 볼 수 있었다. 이는 강설에 의한 세정효과와 풍계 변화에 의한 새로운 공기의 유입 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

강설시 도심지역의 대기 에어러솔 성분과 그 특성을 알아보기 위하여 년중 장기간의 강설지역으로 알려진 일본 Sapporo지역에서 겨울철인 1996년 1월 20일~26일, 1997년 1월 24일~29일 동안 12시간, 강설전, 강설중, 강설후로 나누어서 대기 에어러솔을 각각 채취하였다. 에어러솔의 화학성분과 입자의 생성기원은 SEM/EDX을 이용하여 관찰하였으며, 강설시의 세정효과와 snow crystal의 변화과정을 알아보기 위하여는 replica용액을 이용하여 강설단계별로 눈 결정체를 관찰 조사하였다. Sapporo지역에서 강설시 에어러솔 특성과 생성기원, 강

설중의 snow crystal입자를 분석한 결과(Table 6)를 요약하면 다음과 같다.

Table 6. The characteristic of aerosol and ice crystal during Jan. 20~27, 1996 and Jan. 24~29, 1997 in Sapporo city.

Wind direction	↙	↘	→		
Aerosol origin	Soil /anthropogenic	Marine/Soil	Marine	Soil	Soil
Metal components	High (Fe, Zn, Ti, Cr)	Low(Fe)			
Ice crystal		Dendrite Sector plate Column	Dendrite	Column	
Aerosol components	Si, Ca, Al > Na, Cl, K, Zn, Fe	Si, Cl, Al, Ca > K, Na			Si, Ca, Al > Cl, S
Aerosol shape	Circular	Angular			Circular
	Before snowfall	Developing stage	Mature stage	Dissipating stage	After snowfall
		During snowfall			

1. Sapporo지역의 에어러솔 성분은 전반적으로 토양성 입자가 가장 많았으며, 해풍의 영향과 인간 오염물질의 영향도 받고 있었다. 특히 토양입자성분 중 Al, Si 성분은 토양입자의 일반적인 성분비에 비해 모두 높았으며, 금속성분으로는 Fe, Zn, Ti, Mn, Cr 등이 검출되었으며, 주로 인간활동에서 기원을 찾을 수 있는 성분들이 많이 검출되었다. 특히 겨울철 자동차 운행시 spike tire에 의한 아스팔트분진으로 Ca, Fe, Zn 성분들이 강설중과 강설후에 비해 강설전에 많이 검출되었다.

2. Sapporo지역은 강설과 동시에 풍계가 변하는 경우가 많았으며 이 때 강설전과 강설후의 에어러솔 입자의 감소현상을 뚜렷하게 볼 수 있었다. 주로 3~7μm와 3μm 이하 크기에서 에어러솔 감소를 볼 수 있었으며, 인간활동에서 기인된 성분들은 주로 3μm이하에서 강설에 의한 세정효과가 큰 것으로 관측되었다.

3. 강설시 snow crystal에 의한 세정효과는 snow crystal의 embryo가 완전히 성장한 강설 중기 때 많이 포집되었고, 세정효과는 강설 중기 때 가장 큰 것으로 나타났다. 입자모양은 강설초기에는 dendrite, sector plate, column형 등 여러 가지 종류의 입자를 볼 수 있었으며, 강설 중기 때는 dendrite, 강설 말기에는 column형이 많이 나타남을 알 수 있었다. 강설입자는 강설초기와 강설말기에는 0.8~1.2mm 크기의 범위로 불완전한 모양을 띤 것이 많았으며 강설 중기에는 1~6mm 크기 범위의 완전히 성장한 입자들이 주로 묻혀져서 많이 나타났다.

4. 일반적으로 풍계 변화시 강설 초기에는 해양 및 토양의 영향을 받았으며 강설 중기 때는 해양의 영향을, 강설 말기 때는 토양의 영향을 많이 받는 것으로 관측되었다. 강설 후의 대기 에어러솔이 감소하였음을 볼 때 풍계 변화에 의해서도 에어러솔의 세정효과가 크다고 사료된다.

5. Sapporo시의 대기 중의 에어러솔은 강설시 snow crystal의 형태에 따라 plate, dendrite형은 해양에서 기인된 성분이, column형은 토양에서 기인된 성분이 많이 나타났다.

이상에서와 같이 일본 Sapporo지역의 강설 시 에어러솔의 특성은 토양기원성분이 많았으나 인간활동으로 인한 인위적인 오염물질과 기상조건, 특히 풍계 변화에 따라 그 특징이 다름을 알 수 있었다. 강설전후의 에어러솔의 감소는 강설에 의한 세정효과와 풍계 변화에 의한 새로운 공기의 유입 때문인 것으로 사료되며 주로 인간활동으로 기인된 성분들은 3 μ m크기 이하의 입자에서 많이 세정됨을 알 수 있었다.

특히, 강설전의 에어러솔 성분들 중 자동차 배출가스 등과 같은 인간 활동으로 기인된 성분들이 강설 시 입자에 침착하여 산성눈과 같은 대기오염을 유발할 수도 있으므로 이들 강설전의 에어러솔의 성분 조사는 강설시의 산성도 예측에 크게 기여할 수 있으리라 생각된다. 아울러 snow crystal의 결정 형태에 따라서도 대기상공의 구름내부의 온·습도 등과 대기중의 에어러솔의 크기와 성분 등을 개략적으로 추정할 수 있어 우리나라 겨울철 동해안과 남서해안에서의 강설시 에어러솔 연구에 매우 유용한 자료가 될 것으로 사료된다.

참고 문헌

1) Endow, T. and C. Magono, 1971, Distribution of aerosols in Sapporo in winter season, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 49, No. 1, 48-55.
 2) Kikuchi, K., M. Murakami and Yoko Sanuki, 1982, Preliminary measurements of the center nucleus of snow crystal using an energy dispersive X-Ray microanalyzer, *Nat. Inst. Polar Res.*, Special Issue No.24, 157-174.
 3) Suzuki, K., 1983, Transfer mechanisms of chemical substances with the hydrologic cycle under snowy cold environment, Ph. D. Thesis of Hokkaido Univ., 123.
 4) Magono, C., T. Endih, F. Ueno, S. Kubota and M. Itasaka, 1979, Direct observations of aerosols attached to falling snow crystals, *Tellus*, 31, 102-114.
 5) Lee, D.I. 1991, On the atmospheric aerosol particles in relation to wind systems, *J. of Korean Meteor. Soc.*, Vol. 27, No.4, 333-352.
 6) Bell, D. A. and Saunders, C. P. R. 1995, An experimental study of aerosol scavenging by hexagonal plate ice crystals, *Atmospheric Research* 38, 9-19.
 7) 김필수, 김윤장, 이양호, 조현숙, 안승태, 1986, 도시대기 Aerosol의 입자직경 0.01~1.0 μ m범위의 농도 변화 특성, 한국대기보존학회지, 2(2), 41~50.

8) 허문영, 김형춘, 손동현, 1990, 입자상 물질중 금속성분의 밀도 분포, 한국대기보존학회지, 2(2), 9~18.
 9) 이용근, 김만구, 원정호, 1985, Andersen 시료 채취기를 이용한 도시대기 중 부유입자상 물질의 입도 분포 측정, 대기보존학회지, 1(1), 93~98.
 10) 임영욱, 정용, 1989, 호흡성분진중의 중금속 오염도에 관한 조사연구, 대기보존학회지, 5(1), 68~78.
 11) 정용, 장제연, 주의조, 1987, 도시대기중 중금속에 관한 연구, 대기보존학회지, 3(2), 18~26.
 12) 허문영, 유기선, 김경호, 손동현, 1990, 대기 부유분진 미량 유해물질들의 통계적 오염해석, 한국대기보존학회지, 6(2), 155~160.
 13) Kikuchi, K., 1984, *Meteorological Cyclopeda*, Chapter 3. Sapporo library, No.28, 146-167.
 14) Ohta, S., and T. Okita, 1990, A chemical characterization of atmospheric aerosol in Sapporo, *Atmos Environ* Vol. 24A, No. 4, 815-822.
 15) Odencrantz, F.K. and P. H. Hildebrand, 1971, Ice whiskers and dendrites in a cloud chamber replicated with methyl 2-cyanoacrylate, *J. Cryst. Growth*, 8, 141-148.
 16) Tsuboki, K. and G. Wakahama, 1992, Mesoscale cyclogenesis in winter monsoon air streams : Quasi-geostrophic baroclinic instability as a mechanism of the cyclogenesis of the west coat of Hokkaido Island Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 77-93.
 17) Hidy, G. M., Mueller, P. K., Grosjean, D., Appel, B. R. and Wesolowski, J. J., 1980, *The Character and Origins of Smog Aerosols*, A Wiley-Interscience Publication, pp. 776.
 18) 太田辛雄, 1991, 大気エアロソルの増加に伴う気候の變化, エアロソル研究 第6巻 第2号, 98~105.
 19) Junge, C., 1955, The size distribution of aging of natural aerosols as determined from the atmosphere, *J. Met.* 14, 115~125.
 20) Murakami, M., and K. Kikuchi, 1982, Some considerations of the center nuclei of snow crystals, *Nat. Inst. Polar Res.*, Special Issue No. 24, 175-183.
 21) Mohri, M, S. Kato, T. Obta, M. Hashiba, T. Yamashima, M. Kobayashi and S. Amemiya, 1982, Microanalysis of dust particles from road surface scraped off by spiked tires of outomobiles, *Bull. Fac. Eng.*, Hokkaido Univ., 108, 71-80.
 22) Murakami, M., and k. Kikuchi, 1985, Experiments on aerosol scavenging by natural crystals, Part III. The effect of snow crystal charge on collection efficiency, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 63, No. 6, 1127-1138.