

## 단일입자분석법을 이용한 지하상가에서 채취한 실내입자의 특성분석

### Single-particle Characterization of Aerosol Samples Collected at an Underground Shopping Area

강선이 · 황희진 · 박유명 · 강수진 · 김혜경 · 노철언\*  
인하대학교 화학과

(2008년 7월 3일 접수, 2008년 10월 14일 채택)

SunEi Kang, HeeJin Hwang, Yu-Myung Park, SuJin Kang,  
HyeKyung Kim and Chul-Un Ro\*

*Department of Chemistry, Inha University*

(Received 3 July 2008, accepted 14 October 2008)

#### Abstract

A single particle analytical technique, named low-Z particle electron probe X-ray microanalysis, was applied to characterize four samples collected at an underground shopping area connected to Dongdeamun subway station, in January and May 2006. Based on the analysis of their chemical compositions of the samples, many distinctive particle types are identified and the major chemical species are observed to be soil-derived particles, iron-containing particles, sulfates, nitrates, and carbonaceous particles, which are encountered both in coarse and fine fractions. Carbonaceous particles exist in carbon-rich and organic. Soil derived particles such as aluminosilicates, AlSi/C, CaCO<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> are more frequently encountered in spring samples than winter samples. Nitrate- and sulfate-containing particles are more frequently encountered in winter samples, and those nitrate- and sulfate-containing particles mostly exist in the chemical forms of Ca(CO<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>), Ca(NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>), (Na, Mg)NO<sub>3</sub>, and (Mg, Na)(NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>). Fe-containing particles which came from nearby subway platform are in the range of about 10% relative abundances for all the samples. It is observed that nitrate- and sulfate-containing particles and carbonaceous particles are much more frequently encountered in indoor aerosol samples than in outdoor aerosols, implying that NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, and VOCs at the underground shopping area were more partitioned into aerosol phase.

**Key words :** Low-Z particle EPMA, Single particle analysis, Indoor aerosols

#### 1. 서 론

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)32-860-7676, E-mail : curo@inha.ac.kr

많은 사람들이 하루 중 대부분의 시간을 실내에서 보내게 됨에 따라 실내 환경에 대한 관심이 고조되

고 있으며, 도시로 인구가 밀집되고 한정된 공간에 대한 활용도를 높이기 위해 실내 공간은 고층빌딩과 지하 공간 등으로 이용되고 있다. 그 중 지하 공간은 지하철 역사와 상가, 식당 등으로 다양하게 활용되고 있으며, 지하철이 대표적인 교통수단으로 이용됨에 따라 지하철 역사 주변 공간이 활용되어 상가들이 밀집된 지하상가가 형성된 곳이 많다. 이러한 실내 공간의 공기는 한정된 공간에 있으므로 실외에 비해 공기의 순환이 덜 일어날 것으로 예상되며, 실외 공기가 유입될 수 있는 환기구 설비가 미흡하다면 한정된 공간 안에서 공기가 정체될 가능성이 있다. Johanson *et al.* (2003)에 의하면  $PM_{10}$  농도는 실외에 비해 지하에서 5배 더 높게 나타난다고 하였으며, 그뿐 아니라 실내 대기에서 나타나는 오염원으로써 잘 알려진 것으로는 이산화질소, 아황산가스, 휘발성 유기화합물질, 석면 등이 있다. 이채언 등(1989)에 의하면 부산지역 지하상가 세 곳의 아황산가스 농도는 0.012~0.036 ppm으로 우리나라 환경 기준치를 대부분 초과한다고 보고한 바 있다. 또한 김민영 등(1998)은 서울시 지하상가에서 측정된 이산화질소 및 아황산가스 농도는 겨울철 실내 난방으로 인해 겨울철에 더 높게 나타난다고 하였다.

지하상가에서 발견되는 에어로졸은 다양한 기원에서 올 것으로 예상되는데 먼저 외부로 통하는 계단이나 환기구 등에 의해 실외 에어로졸이 유입될 수 있다. 김신도(1996)에 의하면 환기구의 공기 인입구가 대부분 지면에 있으므로 유입되는 외부공기는 자동차의 배기ガ스나 보행자들의 흙먼지를 그대로 내부에 끌고 들어와 오염된 공기가 유입되어 순환될 가능성이 있다고 하였다. 또한 근처 지하철 역사나 지하상가 내 액세서리, 가방, 옷 등의 판매 상점과 사람들의 유동에 의한 실내 자체에서 발생하는 에어로졸의 영향도 클 것으로 보인다. 일반적으로 에어로졸의 화학적 특성 파악을 위해서 전량 분석 방법이 사용되고 있으나 이는 입자의 평균적인 정보만을 제공하기 때문에 대기 중으로 독립적으로 방출되어 이동 및 반응하는 미세입자의 특성을 명확히 파악하기 힘들다. 따라서 개개 입자의 물리적 및 화학적 특성을 구체적으로 파악할 수 있는 단일입자분석이 유용하게 사용되고 있다.

대기 중 입자상 물질의 분석을 위해 low-Z particle electron probe X-ray microanalysis (이하 low-Z parti-

cle EPMA) 단일입자 분석법을 이용하였다. low-Z particle EPMA는 ultra-thin window를 장착한 EDX검출기를 사용하여 window에 의한 낮은 원자 번호 (low-Z) 원소의 X-ray 흡수를 크게 감소시키고, 이 흡수 효과를 Monte Carlo 계산을 기반으로 계산하여 C, N, O 등의 원자 번호가 낮은 원소를 정량적으로 분석할 수 있는 기술이다(Osan *et al.*, 2000; Szaloki *et al.*, 2000; Ro *et al.*, 1999). 이 방법을 이용하면 C, N, O 등의 low-Z 원소의 정량분석이 가능하므로 개개입자의 특성을 구체적으로 파악할 수 있는데 이는 대기 입자의 주요 구성 성분인 질산염( $NO_3^-$ ), 황산염( $SO_4^{2-}$ ) 및 암모늄( $NH_4^+$ ) 등이 이들 low-Z 원소들로 구성되어 있기 때문이다. low-Z particle EPMA 분석과정을 통해 입자 하나하나의 화학종 판별이 가능하고 크기에 따라 화학종을 분류함으로써 여러 가지 기원의 입자들, 즉 토양 기원의 입자, 해염기원의 입자 및 연소 등의 인간 활동에 의한 유기입자, 황산염, 질산염 입자 등이 대기 중에 어떠한 상대적 분율로 존재하는지 파악할 수 있고, 이러한 분석 결과는 대기 입자의 물리적, 화학적 특성에 대한 명확한 정보를 제공한다(Hwang and Ro, 2006, 2005; Ro *et al.*, 2005). 본 연구에서는 지하상가 에어로졸의 화학적 특성 규명을 위해 단일입자 분석을 이용하여 개개 에어로졸의 화학 조성의 특성을 입자 크기에 따라 분석하고, 입자들의 기원을 파악하고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2. 1 시료 채취 장소 및 방법

시료는 지하철 2, 4, 5호선의 환승역인 동대문운동장역의 지하역사 부근 지하상가에서 채취하였으며, 2006년 겨울과 봄에 각각 2회에 걸쳐 1월 11일, 15일과 5월 25일, 31일에 채취하였다. 시료 채취 위치는 그림 1에서 보이는 바와 같이 외부로의 통로가 인접한 곳이며 을지로 지하상가가 시작되는 부근이다. 지하역사 개찰구에서 시료채취 장소 및 을지로 지하상가에는 음식점 및 액세서리, 가방, 화장품, 신발, 옷 등이 판매되는 상점들이 있다.

시료 채취는 3단의 임팩터( $PM_{10}$  sampler, Dekati)를 사용하였다. 임팩터 각 단의 채취 cut-off 입경은 유속 10 L/min에서 3단은 1  $\mu\text{m}$ , 2단은 2.5  $\mu\text{m}$ , 1단은

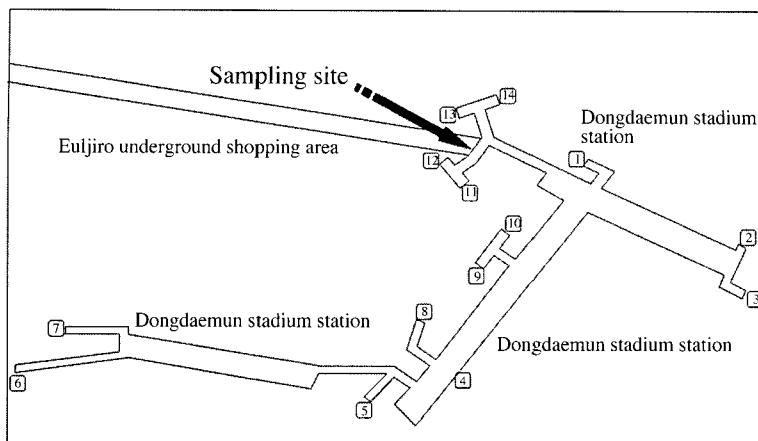


Fig. 1. Sampling site at Dongdaemun underground shopping area.

10  $\mu\text{m}$ 이다. 본 연구에서 2단을 조대입자영역 (coarse fraction), 3단을 미세입자영역 (fine fraction)이라 명하고 2단과 3단만을 분석하였으며, 시료는 silver foil (0.025 mm thickness, 99.95%, Aldrich) 위에 포집하였다. 지하상가의 대기 입자 채취 시간은 2006년 1월 11일에는 오전 10시 30분부터 오후 1시 30분, 1월 15일과 5월 25일, 31일에는 오후 3시부터 6시까지 모두 3시간씩 채취하였다. 더불어 실내의 에어로졸의 입자 크기에 따른 분포 측정을 위하여 단일입자분석용 시료 채취 시에 광산란입자계수기 (Optical Particle Counter, 이하 OPC)를 이용하여 30분마다 입자 개수 농도를 측정하였다. OPC로 농도 측정이 가능한 입경범위는 0.3~25.0  $\mu\text{m}$ 이다.

## 2. 2 Low-Z particle EPMA 단일입자분석 방법

지하상가 입자의 단일입자분석은 한국기초과학지원연구원 춘천센터의 Hitachi사 SEM S-3500N과 Oxford사 ultra-thin window EDX 검출기를 사용하여 개개 입자의 X-ray 스펙트럼을 얻었다. 검출기의 분해능은 Mn-K $\alpha$  X-ray에 대해서 133 eV이다. 각 입자의 X-ray 스펙트럼은 EMAX software로 기록하였고 각각의 입자들은 point analysis mode로 분석하였다. 시료 분석 시에 전자빔의 가속 전압은 10 keV, 1 nA의 beam current, 10초의 X-ray data acquisition time을 사용하였다. 각각의 실내 에어로졸 시료에 대하여 400개씩의 입자를 분석하여, 총 1,600개 입자에 대한 데이터를 얻었다. 분석 대상 입자의 선정은 EMAX

(Hitachi) software를 사용하여 자동으로 image field를 선정하고 무작위로 입자를 선택하도록 하여 분석하였다. SEM/EDX를 이용하여 개개 입자들을 분석하여 X-ray 스펙트럼을 얻은 후 X-ray 스펙트럼을 분석하여 개개 입자의 화학종을 파악하는 과정은 여러 단계를 거치는데, 자세한 데이터 처리 과정은 김혜경과 노철언(2003)에 의해 기술된 바 있으며 요약하면 다음과 같다. 먼저 SEM/EDX를 이용하여 얻은 개개 입자의 X-ray 스펙트럼으로부터 AXIL program을 사용하여 입자를 구성하고 있는 각 원소에 의한 X-ray 세기를 구한다. 각 원소의 X-ray 세기와 SEM으로 측정한 입자의 크기 및 형상으로부터 입자를 구성하는 원소들을 정량 분석하여 입자 내에 포함된 각 원소의 몰 조성 %를 계산한다. 특히 C, N, O 등의 낮은 원자 번호 원소의 정량분석을 위해 연속접근법 (successive approximations)을 이용한 Monte Carlo 계산을 사용하여 (Ro *et al.*, 2003, 1999), 낮은 원자 번호 원소의 matrix effect를 계산할 수 있으므로 기존의 화학 원소들과 함께 C, N, O 등의 낮은 원자 번호 원소들의 정량 분석이 가능하다. 이로써 개개 입자를 구성하고 있는 각 원소들의 몰 조성 %를 구할 수 있다. 개개 입자를 구성하는 원소들의 몰 조성 비율로부터 입자의 화학종을 판별할 수 있는데, 예를 들어 정량 분석 결과 Ca, C, O 원소의 몰 조성 %가 각각 20, 20, 60%이면 이들 원소의 몰 비는 1:1:3이므로 이 입자는  $\text{CaCO}_3$  화학종임을 알 수 있다. 또한 개개입자를 구성하는 각 원소의 몰 조성 % data로부터

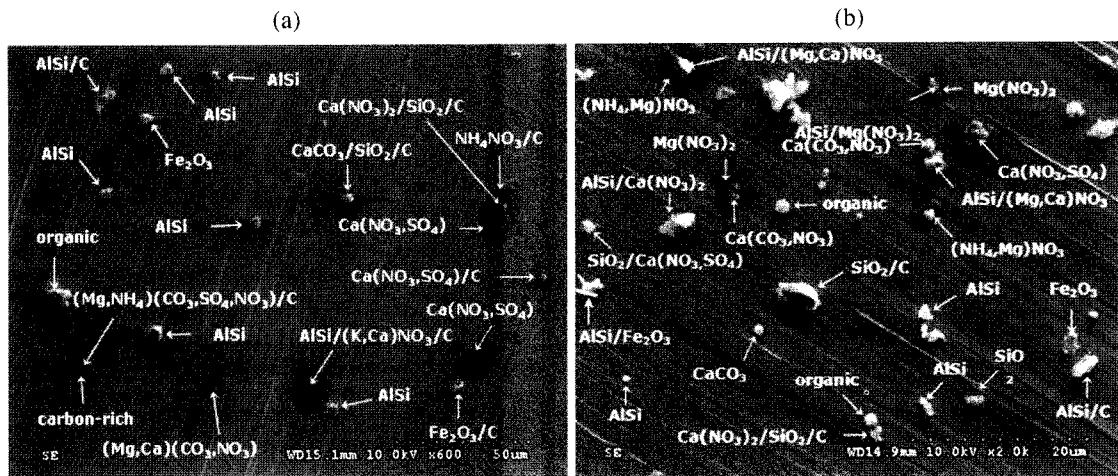


Fig. 2. Exemplar SEM images for underground shopping area aerosols: (a) coarse stage (2.5~10  $\mu\text{m}$ ), (b) fine stage (1.0~2.5  $\mu\text{m}$ ).

터 1,600여 개의 실내외 입자의 화학종을 빠르고 개연성 있게 분류할 수 있는 expert system program (Ro et al., 2004)이 개발되어 지하상가 에어로졸의 화학종을 빠르고 개연성 있게 분류할 수 있다. 한 입자에서 여러 화학종이 발견될 때, 분포 비율이 50% 이상을 차지하는 것을 주 화학종으로 입자를 분류하였고, 발견 빈도가 분석한 전체 입자의 1% 이내인 소량 존재하는 화학종은 others로 분류하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3. 1 지하상가 입자의 SEM image에서 채취한 시료 및 X-ray spectrum

그림 2는 지하상가에서 채취한 시료의 대표적인 secondary electron image이며, 각 입자의 화학종도 함께 표시하였다. 이미지에서 보이는 바와 같이 주로 발견되는 화학종으로는 organic, carbon-rich와 같은 유기입자와 AISI (aluminosilicate), SiO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>와 같은 토양입자, 그리고 (Na, Mg)(NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>), Ca(NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>), NH<sub>4</sub>(NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>)와 같은 질산염/황산염 입자 등이다.

지하상가 시료에서는 다양한 형태의 유기입자를 발견하였는데, 그림 3에 유기입자에 대한 SEM image를 나타내었다. (a)와 같이 얇은 껌질이 벗겨진 형태와 (b)에서 보이는 실타래 같은 형태, 동그란 모양

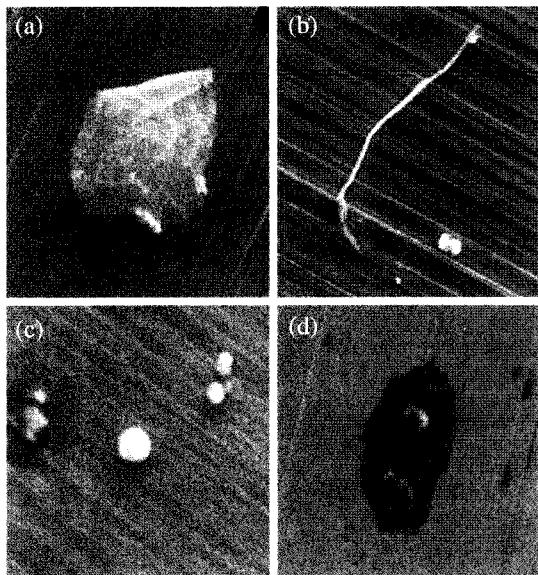


Fig. 3. SEM images of organic particles.

(c), secondary organic aerosol에 해당하는 액적상태의 (d)와 같이 다양한 모습을 나타내었으며, (a)와 (b)에서 보이는 입자는 실내대기에서 볼 수 있는 특징적인 입자로 생각된다. 그 중 (a)입자의 X-ray 스펙트럼을 그림 4에 나타내었다. 지하상가에서 채취한 시료의 또 다른 특징으로 질산염·황산염 입자가 많았

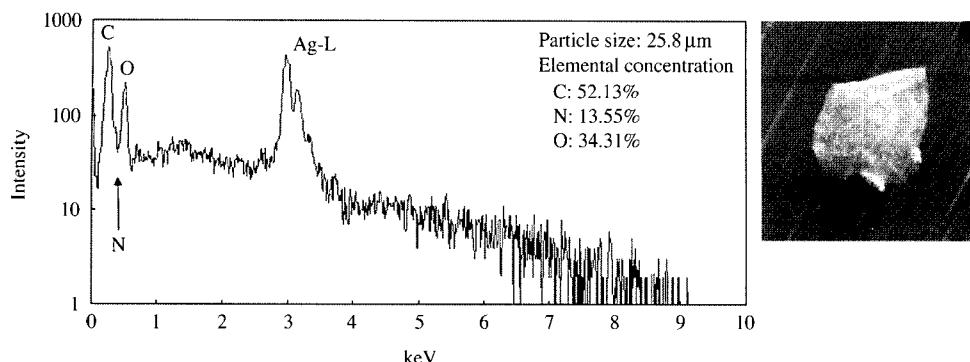


Fig. 4. X-ray spectrum of organic particle (Fig. 3(a)).

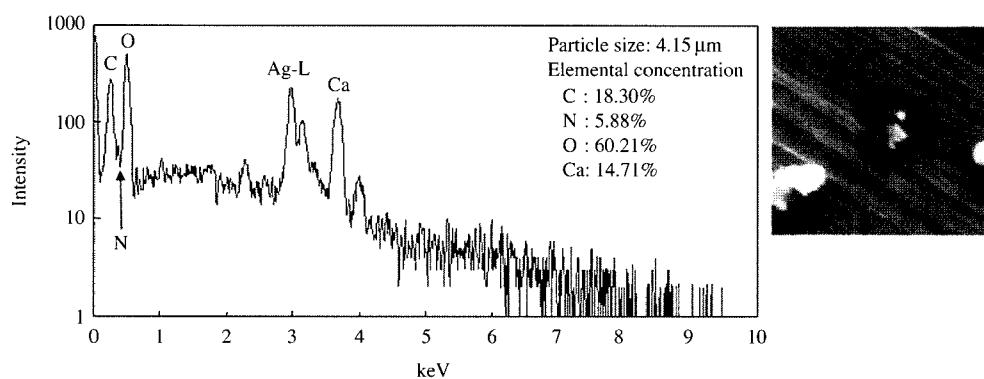


Fig. 5. X-ray spectrum of  $\text{Ca}(\text{CO}_3, \text{NO}_3)$  particle.

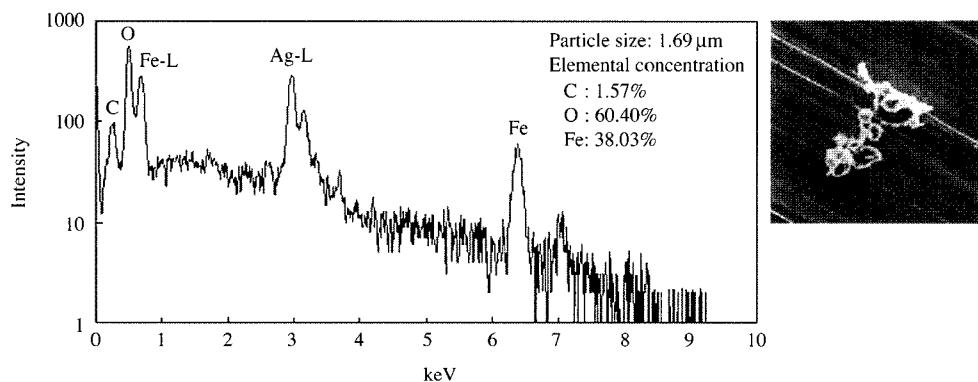


Fig. 6. X-ray spectrum of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  particle.

으며, 그 중  $\text{Ca}(\text{CO}_3, \text{NO}_3)$  입자에 대한 SEM 이미지와 X-ray 스펙트럼을 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 가운데는 하얀 입자가 있고 그 주

변은 까만 액적 상태로 존재하는 입자이며, X-ray 스펙트럼을 통해  $\text{CaCO}_3$ 과  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 가 혼재된 형태의 입자임을 알 수 있다. 철 함유 입자를 통해 인근 지

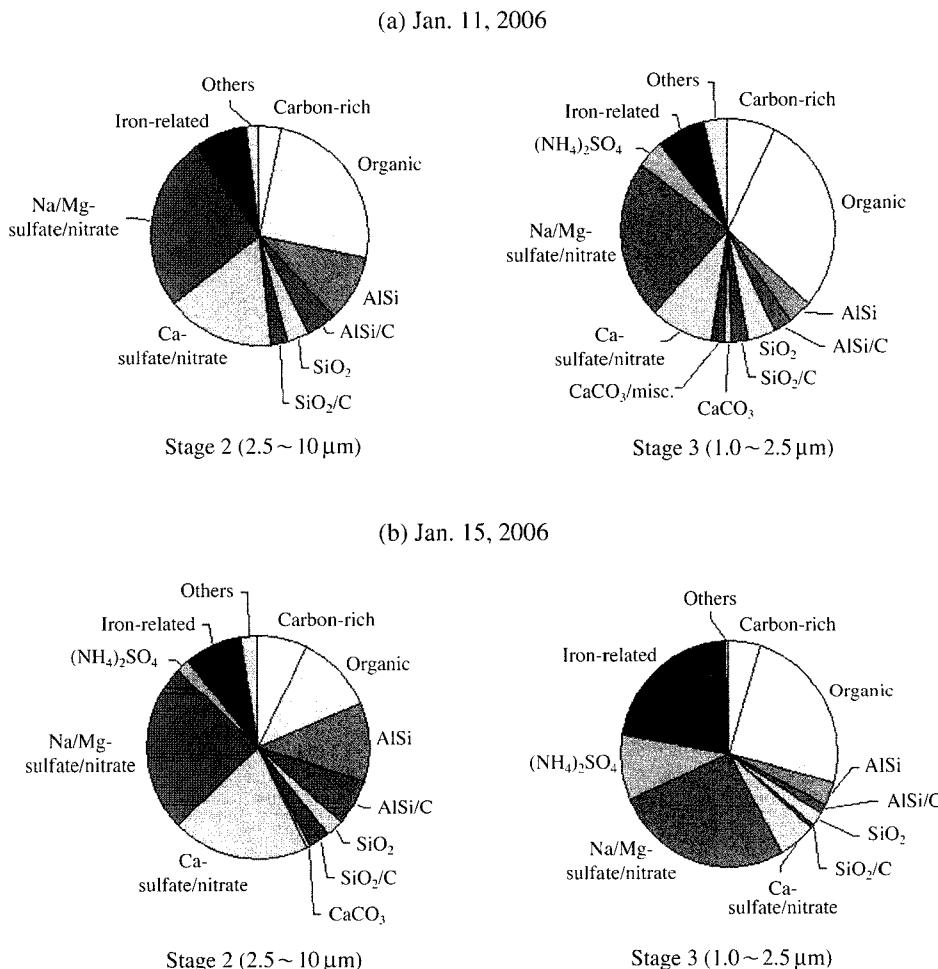


Fig. 7. Overall relative abundances of significantly encountered particles types in winter season.

하철역인 동대문운동장역으로부터 영향을 받은 것을 알 수 있었으며, 그림 6의 철 입자는 SEM 이미지를 통해 지하철 승강장에서 지하철 선로와 지하철 브레이크 또는 바퀴와의 마찰로 인해 생성된 입자임을 확인할 수 있었으며, 입자의 화학 조성은 X-ray 스펙트럼에서 보이는 바와 같이 Fe와 O가 2:3의 비율로 있으므로 완전히 산화된  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 임을 알 수 있다.

### 3. 2 지하상가에서의 단일입자 분석 결과

동대문운동장역 지하역사에서 겨울에 채취한 2개의 시료와 봄에 채취한 2개의 시료는 그림 7과 그림 8에서 보는 바와 같이 미세입자영역과 조대입자영역

모두에서 탄소함유입자, 토양기원입자, 질산염·황산염 입자, 철 함유 입자 등이 주로 발견되었다.

Organic, carbon-rich와 같은 탄소함유입자는 조대입자영역과 미세입자영역 모두에서 많은 부분 차지하였는데, 개수 분율로 조대입자영역에서는 18.7~28.4%, 미세입자영역에서는 24.2~37.6%로 존재하였다. 이는 실내공기에 많은 것으로 알려져 있는 VOCs의 영향으로 보이며, 이는 지하상가에서 판매되고 있는 의류, 신발, 액세서리 등으로부터 상당량이 배출될 것으로 예상된다. 또한 한정된 공간에서 공기의 순환이 잘 이루어지지 않는다면 정체되어 머무를 가능성이 있다.

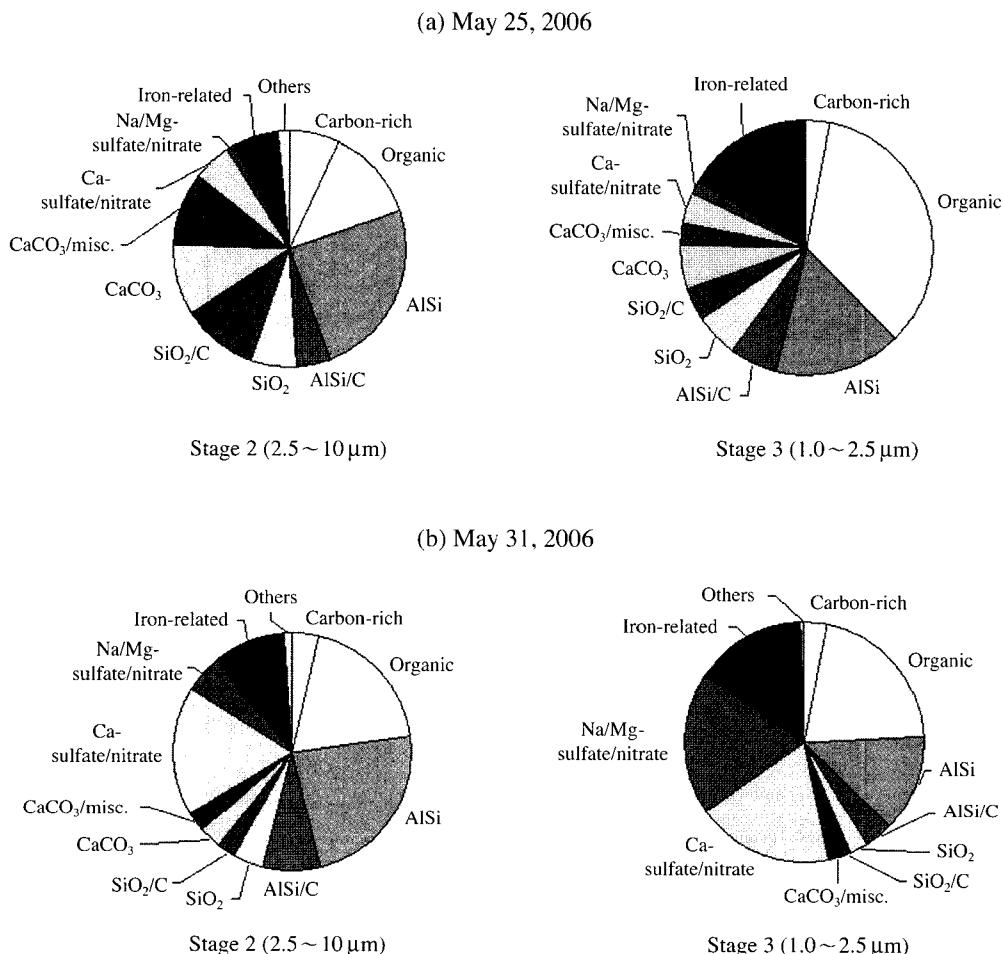


Fig. 8. Overall relative abundances of significantly encountered particles types in spring season.

토양기원입자로는 aluminosilicates (AlSi), AlSi/C,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2/\text{C}$ ,  $\text{CaCO}_3$  등이 발견되었으며, AlSi의 경우 겨울 시료보다는 봄 시료에서 더 많이 발견되는 것을 확인하였다. 조대입자영역에서 AlSi이 차지하는 정도를 살펴보면 겨울 시료에서는 9.7~11.4%의 개수 분포를 보인 반면, 봄 시료에서는 23.4~24.5%이다.  $\text{CaCO}_3$ 의 경우 대부분 적은 양 발견되었는데 4개의 시료 중 5월 25일 시료에서만 많이 발견되어 조대입자영역과 미세입자영역에서 각각 19.7%, 8.5% 차지하였고, 다른 날 시료는  $\text{Ca}^{+2}$ 의 황산염·질산염 입자로 존재하여 조대입자영역에서는 16.7~19.9%, 미세입자영역에서는 5.4~18.6%를 나타내었다.

$\text{Ca}^{+2}$ 의 황산염·질산염 입자 외에도  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,

$\text{NH}_4^+$ 의 질산염·황산염 입자가 발견되었는데 겨울 시료에서는 조대입자영역과 미세입자영역 모두에서 25% 내외로 존재하였고, 5월 31일 시료에서는 조대입자영역과 미세입자영역에서 각각 5.4%, 19.3% 차지하였지만, 5월 25일 시료에서는 2% 미만의 개수 분율로 발견되었다. 이를 입자는 실내에 존재하는 많은 양의  $\text{NO}_x$  또는  $\text{SO}_x$ 와 반응한 입자로 예상되는 것으로써, 다양한 화학종으로 발견되었다.  $\text{Ca}^{+2}$ 의 황산염·질산염 입자로는  $\text{CaCO}_3$ 가  $\text{NO}_x$ 와 일부 반응한  $\text{Ca}(\text{CO}_3, \text{NO}_3)$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ 와 완전히 반응한  $\text{Ca}(\text{NO}_3, \text{SO}_4)$  등이 발견되었고,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ 의 질산염·황산염 입자로는  $\text{NaNO}_3$ 와  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3, \text{SO}_4)$ ,  $(\text{Na}, \text{Mg})\text{NO}_3$  등이 발견되었으며, 이들 중 일부는 서

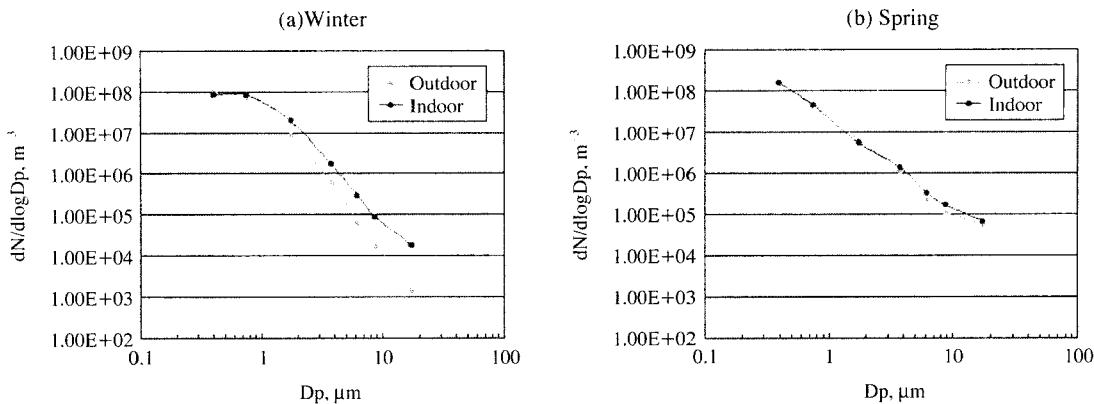


Fig. 9. Particle number concentrations of indoor and outdoor aerosols: (a) winter samples (Jan. 11<sup>th</sup> and 15<sup>th</sup>), (b) spring samples (May 25<sup>th</sup> and 31<sup>st</sup>).

로 혼재되어  $(\text{Mg}, \text{Ca})\text{NO}_3$ ,  $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{NO}_3, \text{SO}_4)$  등과 같은 화학종으로 발견되었다. 또한 탄소와 함께 혼재되어  $\text{Ca}(\text{NO}_3, \text{SO}_4)/\text{C}$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{C}$ ,  $(\text{Na}, \text{Mg})\text{NO}_3/\text{C}$  등도 볼 수 있었다. 이러한 입자들은 특히 겨울철 시료에서 더 많은 양 발견되었는데 이는 난방으로 인해 더 밀폐된 환경에서 환기가 덜 이루어진 결과로 보인다. 또한  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 는 겨울 시료의 미세입자영역에서 1월 11일과 15일에 각각 4.2%, 9.5%의 개수 분포로 존재함으로써 겨울 시료의 특징을 보여주었다.

근처 지하철 역사에서 영향을 받은 것으로 여겨지는 철이 함유된 입자는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{C}$ ,  $(\text{Si}, \text{Fe})\text{O}_x$ ,  $(\text{Si}, \text{Fe})\text{O}_x/\text{C}$  등의 화학종으로 발견되었으며, 지하철 운행 시 브레이크 및 레일, 열차 바퀴, 전선의 마모 등의 요인에 의해 배출된 것으로 추정할 수 있다. 철 함유 입자는 4개의 시료에서 모두 고르게 나타났으며, 그 중에도 일요일 오후에 채취한 시료(2006/01/15)의 미세입자영역에서 21.6%의 개수 농도로 가장 많이 나타났는데 이는 지하철 승강장으로부터의 많은 유동인구로 인해 지하상가의 대기에 가장 많은 영향을 미친 것으로 생각된다.

이와 같은 화학종의 분포를 통해 지하상가에서 주로 특징적으로 발견되는 것으로 유기입자와 질산염·황산염 입자를 대표적으로 들 수 있으며, 이들 입자가 주로 발견되는 것은 실내 공기에 많은 것으로 알려져 있는  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , VOCs의 영향인 것으로 판단된다.

### 3.3 실외로부터의 영향

지하상가에서 발견되는 화학종들 중 일부는 시료 채취 장소에 인접해 있는 실외로의 통로로부터 유입된 에어로졸로 예상되며, 철 함유 입자가 상당량 존재하는 것으로 보아 인접해 있는 지하철 승강장으로부터의 영향도 있음을 알 수 있었다. 그럼 9에서 보는 바와 같이 광산란입자계수기(OPC)를 통한 입자 개수농도의 입경별 농도의 분포가 실내·외에서 같은 경향을 나타내는 것으로 보아 실외의 영향도 상당량 미치는 것으로 보인다. 또한, 네 가지 시료 중에 1월 11일, 15일과 5월 31일에 채취한 시료의 결과는 각 성분의 상대분포가 비슷한 반면, 5월 25일에 채취한 시료는 다른 경향을 보였다. 시료 채취 시간대의 평균  $\text{PM}_{10}$  농도를 살펴보면 다른 날의 농도는 87.5 ~ 102.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분포하는 반면, 5월 25일의 농도는 42.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타난 것으로 보아 외부 환경이 다른 날과는 다르며 이에 의해 영향을 받아 다른 화학분포를 나타내는 것으로 생각된다.

실외에 비해 날씨의 영향을 덜 받는 실내 시료에서는 겨울과 늦은 봄에 채취한 시료 사이에 화학 조성에서 계절적 요인에 의한 차이는 거의 보이지 않았고, 동대문운동장역 지하역사에서 채취한 에어로졸 시료는 외부의 영향뿐 아니라 지하 내 자체적인 기원에도 많은 영향을 받은 것으로 보이므로 지하상가에서 기원한 에어로졸의 생성 및 반응에 대한 더 자세한 연구가 필요하다.

## 4. 결 론

Low-Z particle EPMA 단일입자 분석법을 통해 지하상가 대기 중 개개 입자의 화학적 특성을 파악할 수 있었으며, 화학종의 분포를 통해 지하상가에서 주로 특징적으로 발견되는 것으로 유기입자와 질산염/황산염입자를 대표적으로 들 수 있다. Carbon-rich, organic과 같은 탄소 함유 입자는 조대 입자 영역 및 미세 입자 영역 모두에서 개수 분율 18.7~37.6%로 존재하였으며 SEM image를 통해 다양한 형상으로 존재하는 것을 확인하였다. 토양기원입자는 aluminosilicates(AlSi), AlSi/C, CaCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> 등의 화학종으로 발견되었으며 봄 시료에는 23.4~24.5%, 겨울 시료에서는 9.7~11.4%의 개수 분포로 봄철에 더 많은 양 채취되었다. 황산염·질산염 입자 또한 지하상가 에어로졸에서 주로 발견되는 화학종으로써 Ca<sup>2+</sup> 및 Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 황산염·질산염 입자로 발견되었다. 1월 11일과 15일 시료에서는 조대입자영역과 미세입자영역 모두에서 개수 분율 25% 내외로 존재하였고, 5월 31일 시료에서는 조대입자영역과 미세입자영역에서 각각 5.4%, 19.3% 차지하였지만, 5월 25일 시료에서는 2% 미만으로 발견되었다. 또한 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>는 1월 11일과 15일 시료의 미세입자영역에서 각각 4.2%, 9.5%로 존재하였다. 근처 지하철 역사에서 영향을 받은 것으로 여겨지는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C, (Si, Fe)O<sub>x</sub>, (Si, Fe)O<sub>x</sub>/C 등과 같은 철 함유 입자는 지하철 운행 시 브레이크 및 레일, 열차 바퀴, 전선의 마모 등의 요인에 의해 배출된 것으로 추정할 수 있다. 이러한 입자들 중 일부는 실외로의 통로로부터 유입된 에어로졸로 예상할 수 있으며, 그 연관성은 실내·외에서 측정한 입자개수농도의 입경별 농도 분포를 통해 확인하였다. 또한 날씨의 영향을 덜 받는 실내 시료에서는 계절적인 요인에 의한 차이는 거의 없었으며, 발견되는 화학종을 통해 외부로부터의 영향뿐 아니라 지하 내 자체적인 기원의 영향 또한 큰 것을 확인하였다.

## 감사의 글

이 논문은 차세대 핵심환경기술개발 사업(과제 번

호: 2005-09001-0032-0)의 지원에 의하여 연구되었기에 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김민영, 전재식, 라승훈, 최윤섭, 이연수, 황 신(1998) 서울시 지하상가내 공기질 분포 특성에 관한 연구, 한국 대기환경학회 1998년 학술대회 논문집, 1, 233-236.
- 김신도(1996) 지하상가 공기질의 현황 및 문제점, 공기청정 기술 제9권, 4, 19-28.
- 김혜경, 노철언(2003) Low-Z electron probe X-ray micro-analysis 분석법을 이용한 해안인근 지역의 대기 입자 분석, 한국대기환경학회지, 19(5), 503-514.
- 이채언, 문덕환, 조병만, 김준연, 배기철(1989) 부산지역 지하상가의 대기오염도에 관한 조사 연구, 한국대기 보전학회지, 5(1), 22-32.
- Hwang, H. and C.-U. Ro (2005) Single-particle characterization of four aerosol samples collected in ChunCheon, Korea, during Asian Dust Storm events in 2002, Journal of Geophysical Research, 110, D23201.
- Hwang, H. and C.-U. Ro (2006) Single-particle characterization of "Asian Dust" certified reference materials using low-Z particle electron probe X-ray micro-analysis, Spectrochimica Acta B, 61, 400-406.
- Johansson, C. and P. Johansson (2003) Particulate matter in the underground of Stockholm, Atmospheric Environment, 37, 3-9.
- Osan, J., I. Szaloki, C.-U. Ro, and R. Van Grieken (2000) Light element analysis of individual microparticles using thin-window EPMA, Mikrochim. Acta, 132, 349-355.
- Ro, C.-U., H. Hwang, H. Kim, Y. Chun, and R. Van Grieken (2005) Single-particle characterization of four "Asian Dust" samples collected in Korea, using low-Z particle electron probe X-ray microanalysis, Environmental Science & Technology, 39, 1409-1419.
- Ro, C.-U., H. Kim, and R. Van Grieken (2004) An expert system for chemical speciation of individual particles using low-Z particle electron probe X-ray microanalysis data, Analytical Chemistry, 76, 1322-1327.
- Ro, C.-U., J. Osan, and R. Van Grieken (1999) Determination of low-Z elements in individual environmental particles using windowless EPMA, Analytical Chemistry, 71, 1521-1528.
- Ro, C.-U., J. Osan, I. Szaloki, J. de Hoog, A. Worobiec, and

R. Van Grieken (2003) A Monte Carlo program for quantitative electron-induced X-ray analysis of individual particles, *Analytical Chemistry*, 75, 851-859.

Szaloki, I., J. Osan, C.-U. Ro, and R. Van Grieken (2000)

Quantitative characterization of individual aerosol particles by thin-window EPMA combined with iterative simulation, *Spectrochimica Acta B*, 55, 1017-1030.