

< 논문 >

## 공기 분위기에서 스파크 방전을 이용한 은 나노입자 생성

오현철\* · 정재희\* · 박형호\* · 지준호\*\* · 김상수†

(2005년 10월 5일 접수, 2006년 1월 11일 심사완료)

### Generation of Silver Nanoparticles by Spark Discharge Aerosol Generator Using Air as a Carrier Gas

Hyuncheol Oh, Jaehae Jung, Hyungho Park, Junho Ji and Sangsoo Kim

**Key Words :** Spark Discharge(스파크 방전), Silver Nanoparticle(은 나노입자)

#### Abstract

A spark discharge aerosol generator using air as a carrier gas has successfully been applied to silver nanoparticle production. The spark discharge between two silver electrodes, which was periodically obtained by discharging the capacitor, produced sufficient high temperatures to evaporate a small fraction of the silver electrodes. The silver vapor was subsequently supersaturated by rapid cooling and condensed to silver nanoparticles by nucleation and condensation. The morphology of the generated particles observed by transmission electron microscope was spherical. The element composition of the nanoparticles was silver, which was determined by energy dispersive X-ray spectroscopy. The crystal phase of the particles spark-generated under air atmosphere was composed of silver and silver oxides phase, which was determined by X-ray diffraction analysis. While the nanoparticles generated under nitrogen atmosphere had only silver phase. This XRD data indicates that some fraction of the evaporated silver vapor could be oxidized in air atmosphere by the reaction with oxygen. A stable operation of the spark discharge generator has been achieved. The size and concentration of the particles can be easily controlled by altering the repetition frequency, capacitance, gap distance and flow rate of the spark discharge system.

#### 1. 서론

랩 스케일의 에어로졸 연구에 사용되는 에어로졸 입자 발생장치는 원하는 성분 및 크기를 안정적으로 발생시킬 수 있어야 하며, 이를 위해 다양한 방법 및 형태의 입자 발생 장치가 사용되어왔다.<sup>(1)</sup> 이 중 스파크 방전 에어로졸 발생장치(spark discharge aerosol generator)는 녹는점이 높은 물질 및 순금속과 산화물 등 다양한 성분의 입자를 안

정적으로 발생시킬 수 있으며, 발생 입자의 농도 및 크기 제어가 용이할 뿐 아니라 장치의 구조가 간단하고 소형화가 가능하다는 많은 장점을 갖고 있어 에어로졸 관련 실험에 많이 사용되고 있다. 스파크 방전 에어로졸 발생장치를 이용한 수십 nm의 금,<sup>(2)</sup> 은,<sup>(3,4)</sup> 다분산 구리, 철, 아연 등<sup>(5)</sup> 다양한 순금속 입자의 발생 특성이 연구되었으며, Helsper<sup>(6,7)</sup>에 의해 연구된 스파크 방전 에어로졸 발생장치는 디젤엔진에서 발생하는 PM(particulate matter)을 모사하는 탄소 입자 발생기(model GFG 1000, Palas, Karlsruhe, Germany)로 상용화되어 PM의 인체 유해성 관련 연구<sup>(8,9)</sup> 등을 위한 입자 발생 장치로써 사용되고 있다.<sup>(10,11)</sup> 그리고 Saunders와 그의 동료 연구자들<sup>(12)</sup>은 스파크 방전을 통해 발생시킨 실리콘 나노입자가 발광(luminescence)

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : sskim@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3021 FAX : (042)869-3210

\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 회원, 삼성전자 가전연구소

Table 1 Experimental conditions for spark discharge aerosol generator

	Flow rate (lpm)	Spark frequency (Hz)	Capacitance (nF)	Gap distance (mm)	Resistance (kΩ)
Case 1	2, 4, 6, 8, 10	100	5	0.5	5000
Case 2	2	20, 50, 70, 100, 120	5	0.5	5000
Case 3	2	50	5, 7.5, 10, 12.5	0.5	5000
Case 4	2	50	5	0.3, 0.5, 0.7	5000

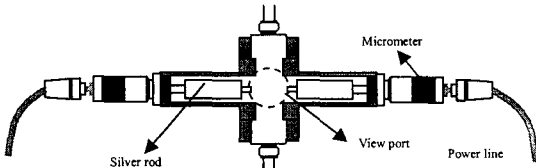


Fig. 1 Schematic of spark discharge aerosol generator

특성이 있음을 밝혔으며 이는 스파크 에어로졸 발생장치가 기능성 나노입자의 제조 방법으로서의 가능성이 있음을 보여주고 있다.

스파크 방전 에어로졸 발생장치에 관련된 대부분의 연구에서는 스파크 방전 시 발생하는 고온 분위기에 의한 화학 반응을 피하기 위하여 이송기체(carrier gas)로 질소(N<sub>2</sub>)나 아르곤(Ar) 등의 불활성 기체를 사용하였으며 따라서 순금속 및 탄소입자 등의 발생 특성에 대해 보고하였다. 2005년 Kim 과 Chang<sup>(13)</sup>은 공기를 이송기체로 사용하여 산화 구리(copper oxide) 입자를 발생시킨 연구결과를 보고하였으며, 위 문헌 이외에 공기나 산소와 질소의 혼합기체 분위기에서 스파크 방전을 통한 입자의 발생에 대한 연구는 거의 시도되지 않았다.

본 연구에서는 이송 가스로서 공기를 사용하여 스파크 에어로졸 발생장치의 나노입자의 발생 특성 및 생성 나노입자의 물리적, 화학적 분석을 수행하였으며, 발생 입자로는 항균 특성 및 화학적 안정성이 뛰어나 에어로졸 연구에서 유용하게 사용될 수 있는 은(silver)를 선택하였다.

## 2. 실험

### 2.1 스파크 방전 에어로졸 발생기

스파크 방전 에어로졸 생성장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 전극은 2중 원통형 구조로서, 몸통 지름이 5 mm이며, 스파크 방전이 실제 발생하는 끝 부분의 지름은 3 mm인 구조로 되어 있으며, 두 전극 사이의 간격을 미세하게 조절하기 위하여 마이크로미터를 장착하였다. 두 전극 사이로 누설 전류가 통하지 않도록 하기 위해 스파크 방전 에어로졸 생성장치 몸체의 재질을 절연체인 MC Nylon 재질의 엔지니어링 플라스틱으로 하였으며, 투명 아크릴 재질의 관측창(View port)을 설치하여

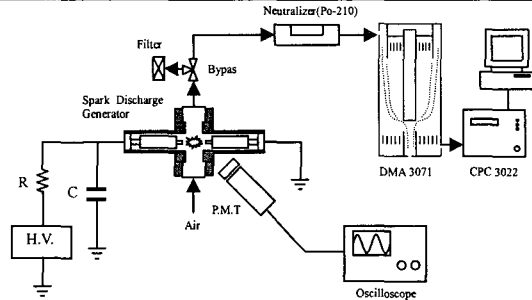


Fig. 2 Experimental set-up for characterizing of spark discharge aerosol generator

스파크 방전 현상을 디지털 카메라로 관측하였다. 그리고 광섬유(optical fiber)를 이용하여 관측창의 스파크 광신호를 PMT(photomultiplier tube; Dongwoo optron, Korea)에 전달하도록 하였으며, PMT에서 증폭된 광신호는 디지털 오실로스코프(digital oscilloscope; model 9400, LeCroy, USA)를 통해 방전 주파수 등의 분석에 이용되었다.

### 2.2 은 나노입자 발생 특성

전체적인 실험 장치를 Fig. 2에 나타내었다. 스파크 방전 회로는 테슬라 변압기(Tesla transformer) 등을 사용하여 구성될 수 있으나<sup>(14)</sup> 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 고전압 전원과 RC 회로를 이용하였다. 정전류 전원을 통해 일정한 전류가 공급됨에 따라 고전압용 축전기(high-voltage capacitor)에 전기적 에너지가 축적되며, 전극 양단 사이의 전압이 상승하게 된다. 전극 사이의 전압이 스파크 방전 개시 전압이 되면, 전극 사이의 공기 절연 파괴로 인해 순간적으로 축전기에 축적된 전기적 에너지가 전극 사이로 방전되어 스파크가 발생하게 된다.

위 메커니즘의 반복을 통해 스파크가 주기적으로 일어나게 되며, 스파크 방전 주기는 충전 전류의 크기를 바꿈으로써 조절이 가능하다. 주기적인 스파크 방전을 발생시키기 위해 양극 정전류 전원(Korea Switching, Seoul, Korea)에 콘덴서와 전극을 병렬로 연결하였으며, 방전을 안정화시키기 위해 저항(5000 kΩ, 2W)를 정전류 전원에 직렬로 연결하였다. 공기 유량은 2-10 lpm, 방전 주파수 f=20-120 Hz, 전극 간의 간격은 d=0.3, 0.5, 0.7 mm, 축전기의

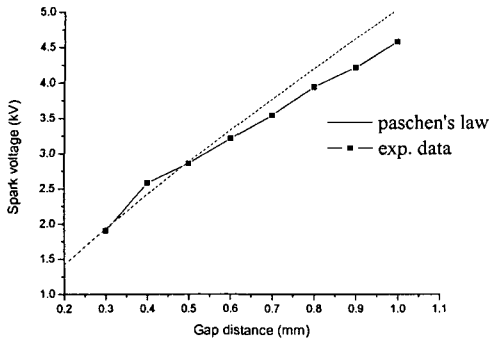


Fig. 3 Dependence of spark discharge voltage on gap distance

용량은 C=5-12.5 nF, 저항 R=5000 kΩ의 조건으로 실험을 수행하였으며, 실험 조건을 정리하여 Table 1에 나타내었다. 전극 사이의 스파크 방전에 의해, 전극 근처에 순간적인 플라즈마 상태가 발생하여 국부적으로 고온을 유발시킴으로써 전극 물질이 증발하게 되며, 증발된 증기(vapor)는 핵생성 및 응축과 응집을 통해 입자로 성장하게 된다.

발생된 나노입자의 크기 분포 및 수농도는 DMA(differential mobility analyzer; model 3071, TSI Inc., St. Paul, MN, USA)와 CPC(condensation particle counter; model 3022A, TSI Inc., St. Paul, MN, USA)를 이용한 SMPS 시스템을 사용하여 측정하였다. 이때, 측정 구간은 10nm 이하에서 100nm까지로 하였으며, 수농도 및 부피 농도는 입자 크기 분포를 적분하여 구하였다. SMPS 시스템으로 샘플링되지 않은 에어로졸은 HEPA(high efficiency particulate air) 필터를 통해 배출시켰다. 입자 크기 분포 측정은 한 조건당 3회 반복 실험하여 그 평균값을 사용하였다. 또한 확산 포집(diffusional precipitation) 방법을 사용하여 TEM grid(carbon coated copper grid, 200 mesh)에 입자를 포집한 후 크기 및 형상을 TEM(transmission electron microscope; Tecnai F20, FEI, USA)으로 확인하였으며 EDS(energy-dispersive X-ray spectroscopy) 분석을 같이 수행하여 입자의 원소 구성 성분(elemental composition)을 분석하였다. 그리고 입자의 산화 정도 및 결정 구조에 대한 정보를 얻기 위해, 유리섬유필터(glass microfiber filter; GF/F, Whatman)를 이용하여 입자를 포집한 후, 2θ scan 방법으로 XRD(X-ray diffractometer; D/max-RC, Rigaku) 분석을 하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 입자 크기 분포 특성

전극 간격에 따른 스파크 방전 전압을 Paschen

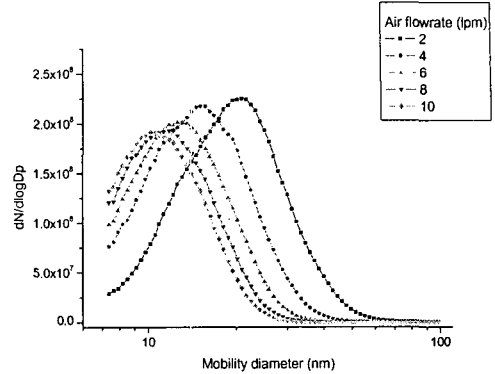


Fig. 4 Particle size distributions of spark discharge aerosol generator for different air flow rate. Gap distance : 0.5 mm, frequency : 100 Hz(1.5 mA), capacitance : 0.005 μF, resistance : 500 kΩ

의 법칙<sup>(15)</sup>과 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 이 때, 스파크 방전 전압 V는 방전 주파수 f와 정전 용량 C, 전류 I를 측정된 후 식 (1)을 사용하여 간접적으로 구하였다.

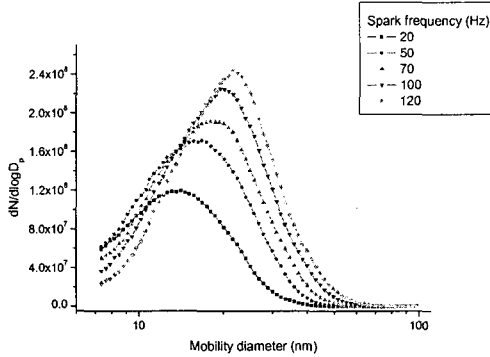
$$V = \frac{I}{fC} \tag{1}$$

Paschen의 법칙은 평행 평판 전극 사이의 스파크 개시 전압  $V_s$ 을 전극 간격 d와 압력 P의 곱으로 표현한 것으로, 식 (2)에 나타내었다.

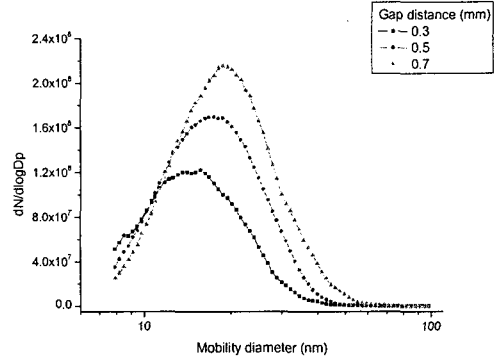
$$V = \frac{BPd}{(C + \ln Pd)} \tag{2}$$

공기(air)에 대해, B는  $365 \text{ Vcm}^{-1}\text{Torr}^{-1}$  이고 C는 1.18이다.

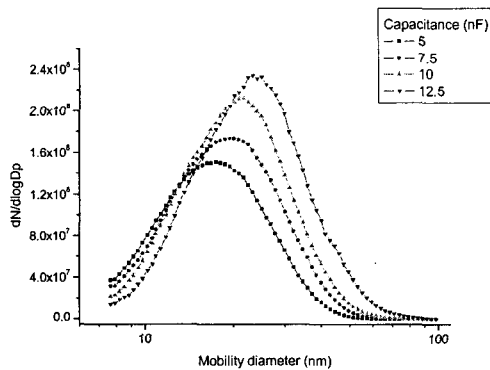
Fig. 3에서 스파크 방전 전압은 전극 간격에 선형적으로 비례하고 있으며, Paschen의 법칙과 잘 일치함을 볼 수 있다. 전극 간격이 0.5 mm 이상의 조건에서, Paschen의 법칙으로 구한 이론값보다 실험값이 작은 이유는 전극 간격에 비해 전극 지름이 충분히 크지 않아 불균일 전기장(inhomogeneous electric field)이 형성되었기 때문으로 판단된다. Paschen의 법칙은 균일 전기장(homogeneous electric field)을 가정하고 있으며, 불균일 전기장이 형성된 경우 스파크 방전 전압은 Paschen의 법칙으로 구한 값보다 작게 된다.<sup>(16,17)</sup> 스파크 방전 전압은 공기 유량, 방전 주거나 정전 용량 등 다른 변수의 영향을 받지 않았으며, Fig. 3의 결과로부터 정상적인 스파크 방전이 발생했음을 알 수 있다.



**Fig. 5** Particle size distributions of spark discharge aerosol generator for different repetitive frequency. Gap distance : 0.5 mm, air flow rate : 2 lpm, capacitance : 0.05  $\mu\text{F}$ , resistance : 500 k $\Omega$



**Fig. 7** Particle size distributions of spark discharge aerosol generator for different gap distance. Air flow rate : 2 lpm, frequency : 50 Hz, capacitance : 0.005  $\mu\text{F}$ , resistance : 500 k $\Omega$



**Fig. 6** Particle size distributions of spark discharge aerosol generator for different capacitance. Gap distance : 0.5 mm, air flow rate : 2 lpm, frequency : 50 Hz, resistance : 500 k $\Omega$

단 공기 유량이 0.5 lpm 이하로 매우 작을 경우, 스파크 방전 전압이 낮아지는 현상이 있었으며, 이는 스파크에 의해 생성된 이온 등이 다음 스파크에 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

Fig. 4 는 스파크 방전 주파수, 정전용량, 전극 간격 등의 실험 변수를 고정한 후 공기 유량을 변화시키에 따른 입자 크기 분포를 보여주고 있다. 스파크 방전 에너지를 생성장치를 통과하는 공기 유량이 커짐에 따라 발생 입자의 평균 크기가 작아졌으며, 수농도 또한 낮아졌음을 확인할 수 있었다. 유량의 증가에 따른 평균 입경 및 수농도의 감소는 초기 핵 생성 단계에서 단위 공기 부피당 은 증기 분율의 감소와 체류시간 감소에 의한 응

집지연 때문으로 판단된다. 방전 전극의 증발량은 유량에 영향 받지 않으므로, 유량이 증가함에 따라 단위 공기 부피당 은 증기량이 감소하게 된다.

Fig. 5 는 방전 주파수가 증가함에 따라 평균 입자 크기가 커졌으며 수농도가 높아졌음을 보여주고 있다. 방전주파수는 전류와 선형적으로 비례하므로 스파크 방전 에너지와 방전 주파수도 비례하게 된다. 따라서 방전주파수가 커질수록 전극의 증발량 또한 증가하게 되므로, 생성된 나노입자의 평균 크기 및 수농도가 증가하게 된다.

Fig. 6 은 정전용량이 증가함에 따라 평균 입자 크기가 커졌으며, 수농도 또한 높아졌음을 보여주고 있다. 정전용량이 5 nF에서 12.5 nF으로 증가함에 따라, mode 입경은 약 33%, 수농도는 약 55% 증가했음을 알 수 있다. 정전용량의 증가에 따른 평균 입경 및 수농도의 증가는 단일 스파크 에너지의 증가 때문으로 해석할 수 있다. 정전용량은 단일 스파크 에너지에 비례하며, 스파크 방전 에너지는 또한 전극의 증발량에 비례하므로 정전용량이 증가할수록 입자 평균 크기 및 수농도가 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 전극 간격이 증가함에 따라 입자의 수농도 및 평균 입자 크기가 증가했음을 보여주고 있다. 전극 간격이 0.3 mm 에서 0.7 mm로 증가함에 따라 mode 입경은 약 20%, 수농도는 약 80% 증가하였다. 이는 전극 간격이 증가함에 따라 스파크 방전 개시 전압이 증가하여 단일 스파크 방전 에너지가 커진 때문이라고 판단된다. Figs. 5-7 의 입경 분포를 토대로 단위 시간당 스파크 방전 에

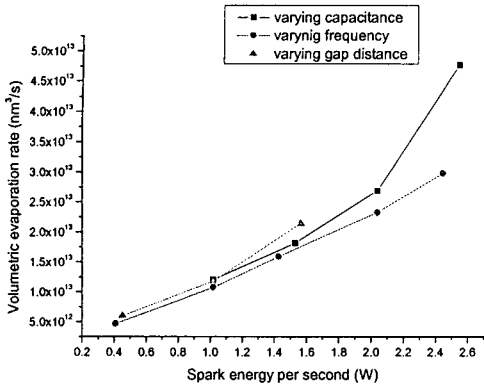


Fig. 8 Dependence of evaporation rate on spark energy

너지 E 와 단위 시간당 전극 부피 증발량과의 관계를 Fig. 8 에 나타내었다. 이 때, 스파크 방전 에너지는 식 (3)의 관계를 이용하였다.

$$E = 1/2CV^2 f \tag{3}$$

스파크 방전 에너지를 계산할 때, 전극 간격에 따른 스파크 방전 전압은 Fig. 3 의 실험 데이터를 이용하였다. 그리고 단위 시간당 전극 부피 증발량은 입자 크기 분포를 이용해 부피 농도를 구한 후 공기 유량을 곱해 간접적으로 구하였으며, 벽면 부착에 의한 입자 손실에 대한 효과는 무시하였다.

Fig. 8 에서 전극 증발량은 방전 주파수에 선형적으로 증가하는 비례관계임을 알 수 있으며 이는 기존의 문헌과도 일치하는 경향이다.<sup>(6)</sup> 이는 n 번째 스파크 방전에 의한 전극 증발 현상이 (n-1) 번째 스파크 방전에 영향 받지 않음을 의미하며, 따라서 n 회 반복된 스파크 방전의 전극 증발량은 단일 스파크 방전 시 전극 증발량에 n 을 곱한 것과 같게 된다. 반면 전극 간격이나 정전용량은 에너지가 증가함에 따라 비례 기울기가 커지는 경향을 보인다.<sup>(14)</sup> 이것은 단일 스파크 방전의 에너지와 전극 증발량이 비선형적 비례관계임을 보여주는 것이라고 생각된다.

3.2 나노입자 특성 분석

Fig. 9 는 스파크 방전 에어로졸 생성장치에서 생성된 은 나노입자의 TEM 사진을 보여주고 있다. 은 나노입자는 약 10-20 nm 크기를 갖는 구형의 기본 입자(primary particle)가 응집되지 않았거나 수 개가 응집된 형태로 발생하였음을 TEM 사진 분석을 통해 확인할 수 있었다. 응집된 입자들의 일부는 Fig. 9 에서 보이듯이 접촉목(neck) 성장하여 강하게 결합되어 있는 형태를 보였으며 이

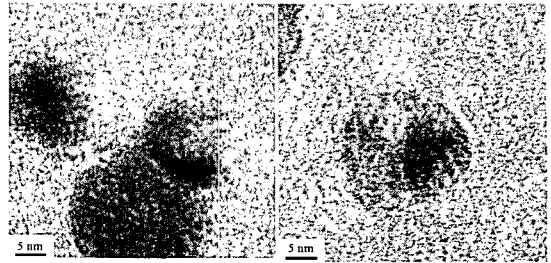


Fig. 9 Transmission electron microscopic image of collected silver nanoparticles. Air flow rate : 2 lpm, frequency : 100 Hz, gap distance : 0.5 mm, capacitance : 0.005 μF , resistance : 500 kΩ, sampling time : 2h

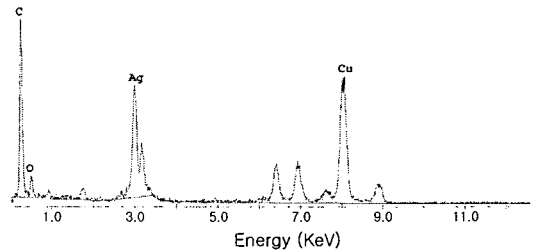
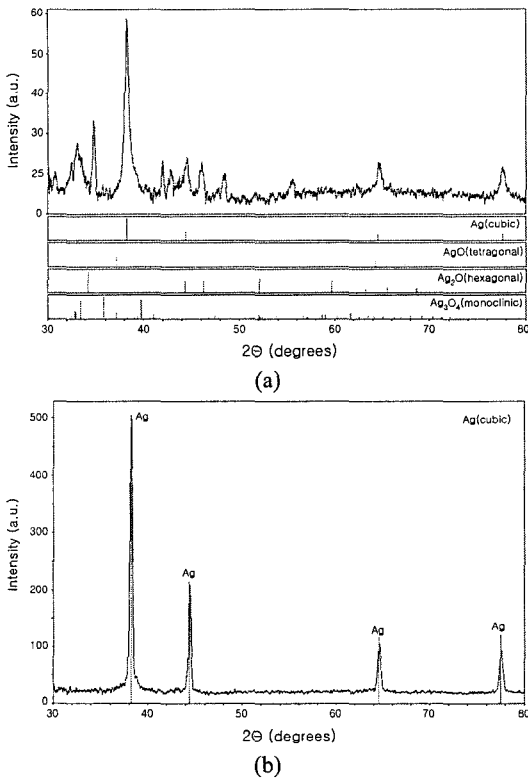


Fig. 10 EDS analysis for sampled TEM grid

로써 입자 간의 일부 응집 과정이 스파크 플라즈마 주위의 고온 상황에서 일어났다고 추측된다. 발생한 입자의 원소가 은으로 구성되어 있음을 확인하기 위해 EDS 원소 성분 분석을 수행하여 Fig. 10 에 나타내었다. Fig. 10 에서 은 원소에 해당하는 피크를 관찰할 수 있으며 이로써 발생입자의 원소 성분이 은임을 알 수 있었다. EDS 분석에서 탄소 및 구리 원소 성분에 해당하는 피크가 관찰되는 것은 샘플링에 사용한 TEM grid 의 구성 성분이 탄소와 구리로 되어있기 때문이다.

이송 가스로 질소나 아르곤과 같은 불활성 가스를 사용한 기존 연구에서는 은 금속 입자가 발생한다고 보고되었으나,<sup>(3,4)</sup> 본 연구에서는 공기 분위기에서 스파크 방전이 운전되므로, 공기 중의 산소 성분에 의한 산화음이 발생할 수가 있다. Fig. 10 의 EDS 분석에서 산소 원소 성분에 해당하는 피크가 관찰되나 이 산소 성분은 구리 및 탄소 등과 결합하였을 가능성이 있으므로, EDS 결과만으로는 은의 산화 여부를 알 수가 없었다. 따라서 은의 산화 여부를 확인하기 위해 XRD 분석을 수행하여 Fig. 11(a)에 나타내었다. 그리고 비교를 위해 질소 분위기에서 발생한 은 입자의 XRD 분석 결과를 Fig. 11(b)에 나타내었다. XRD 분석 결과, 질소 분위기에서 발생한 입자는 산화되지 않은 은 나노입자로 발생하였다. 이는 질소나 아르곤의 불



**Fig. 11** XRD analysis for using (a) air (b) nitrogen as carrier gas. Flow rate : 2lpm, frequency : 100 Hz, gap distance : 0.5 mm, capacitance : 0.005  $\mu$ F, resistance : 500 k $\Omega$ , sampling time : 5h

활성 가스 분위기에서 스파크 방전을 이용하여 순수 금속 나노 입자를 발생시킨 기존 연구와 일치한다.<sup>(2-4)</sup> 산소 분위기에서 발생한 은 나노입자의 성분은 금속 은에 해당하는 피크가 가장 크게 나타나 AgO, Ag<sub>2</sub>O, Ag<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등의 다양한 산화은 성분이 포함되어 있음을 확인하였다. 스파크 방전에 의한 증발한 은 증기와 스파크 방전 플라즈마에 의해 활성화된 공기 중의 산소 성분이 결합하여 산화은이 형성되었다고 판단된다.

이 결과는 공기 분위기에서 운전되는 스파크 방전 에어로졸 발생기는 순수 금속과 금속 산화물의 복합입자(composite) 및 세라믹 나노입자를 발생시킬 수 있는 가능성을 갖고 있음을 보여준다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 스파크 방전 에어로졸 발생장치의 특성 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유량이 증가함에 따라 입자의 평균 크기가

작아졌으며, 수농도 또한 감소하였다.

(2) 방전 주파수 및 정전용량, 전극 간격이 증가함에 따라 입자의 평균 크기 및 수농도가 증가하였다.

(3) 전극 증발량은 방전 주파수에 선형적으로 비례하였으며, 전극 간격과 정전 용량에는 비선형적으로 비례하였다.

(4) 스파크 방전 전압은 전극 간격에 선형적으로 비례하였으며, Paschen의 법칙으로 구한 이론값과 근사함을 알 수 있었다.

(5) TEM 사진 분석을 통해 10~20nm 크기의 구형 기본입자로 구성된 나노입자가 생성되었음을 확인하였으며, EDS 분석 결과 발생한 입자가 은임을 확인하였다.

(6) XRD 분석을 통해 공기 분위기에서 발생한 나노입자의 성분이 일부 산화은이 포함된 금속 은으로 이루어져 있음을 알 수 있었다.

(7) 스파크 방전 에어로졸 발생장치의 공정변수 제어를 통해 수농도  $10^7$  #/cm<sup>3</sup> 이상, 평균 크기 100 nm 이하의 나노입자를 안정적으로 발생시킬 수 있었다.

#### 후기

본 연구는 삼성전자의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Friedlander, S. K., 2000, *Smoke, Dust, and Haze-Fundamentals of Aerosol Dynamics*, Oxford Press, New York, pp. 331~338.
- (2) Schwyn, S., Garwin, E. and Schmidt-Ott, A., 1988, "Aerosol Generation by Spark Discharge," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 19, pp. 639~642.
- (3) Burtscher, H. and Schmidt-Ott, A., 1982, "Enormous Enhancement of van der Waals Forces Between Small Silver Particles," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 48, pp. 1734~1737.
- (4) Lee, C. S., Kim, Y. J. and Kim, S. S., 2000, "An Experimental Study on the Characteristics of Direct Photoelectric Charging," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 24, pp. 753~759.
- (5) Watters Jr., R. L., DeVoe, J. R., Shen, F. H., Small, J. A. and Marinenko, R. B., 1989, "Characteristics of Aerosols Produced by the Spark Discharge," *Anal. Chem.*, Vol. 61, pp. 1826~1833.
- (6) Helsper, C., Mölter, W., Löffler, F., Wadenpohl, C., Kaufmann, S. and Wenninger, G., 1993, "Investigation of a New Aerosol Generator for the Production of Carbon Aggregate Particles," *Atmos. Environ.*, Vol. 27A, pp. 1271~1275.

- (7) Helsper, C., Mölter, L., Munzinger, F. and Sturn, W., US patent No. 4,967,958, issued Nov. 6, 1990.
- (8) Brown, J. S., Kim, C. S., Reist, P. C., Zeman, K. L. and Bennett, W. D., 2000, "Generation of Radiolabeled 'Soot-Like' Ultrafine Aerosols Suitable for Use in Human Inhalation Studies," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 32, pp. 325~337.
- (9) Roth, C., Karg, E. and Heyder, J., 1998, "Do Inhaled Ultrafine Particles Cause Acute Health Effects in Rats? I: Particle Production," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 29, pp. S679~S680.
- (10) Kreyling, W. G., Semmler, M., Erbe, F., Mayer, P., Takenaka, S., Schulz, H., Oberdörster, G. and Ziesenis, A., 2002, "Translocation of Ultrafine Insoluble Iridium Particles from Lung Epithelium to Extrapulmonary Organs Is Size Dependent but Very Low," *J. Toxicol. Env. Health*, Vol. A65, pp. 1513~1530.
- (11) Roth, C., Ferron, G. A., Karg, E., Lentner, B., Schumann, G., Takenaka, S. and Heyder, J., 2004, "Generation of Ultrafine Particles by Spark Discharging," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 38, pp. 228~235.
- (12) Saunders, W. A., Sercel, P. C., Lee, R. B., Atwater, H. A., Vahala, K. J., Flagan, R. C. and Escorcia-Aparicio, E. J., 1993, "Synthesis of Luminescent Silicon Clusters by Spark Ablation," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 63, pp. 1549~1551.
- (13) Kim, J. T. and Chang, J. S., 2005, "Generation of Metal Oxide Aerosol Particles by a Pulsed Spark Discharge Technique," *J. Electrostat.*, Vol. 63, pp. 911~916.
- (14) Horvath, H. and Gangl, M., 2003, "A Low-Voltage Spark Generator for Production of Carbon Particles," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 34, pp. 1581~1588.
- (15) Bazelyan, E. M. and Raizer, Y. P., 1997, *Spark Discharge*, CRC Press, Boca Raton.
- (16) Held, B., Soulem, N., Peyrou, R. and Spyrou N., 1997, "Self-Sustained Conditions in Inhomogeneous Fields," *J. Phys. III France*, Vol. 7, pp. 2059~2077.
- (17) Spyrou, N., Peyrou, R., Soulem, N. and Held, B., 1995, "Why Paschen's Law Does not Apply in Low-Pressure Gas Discharges with Inhomogeneous Fields," *J. Phys. D, Appl. Phys.*, Vol. 28, pp. 701~710.