

공기 분위기에서 작동하는 스파크 방전 나노입자 발생장치의 오존 및 질소산화물 생성 특성

지준호* · 오현철¹⁾ · 김상수¹⁾ · 배귀남²⁾
삼성전자 가전연구소, ¹⁾한국과학기술원 기계공학과,
²⁾한국과학기술연구원 유해물질연구센터

Ozone and NO_x formation from the spark discharge aerosol generator using air as a carrier gas

Jun Ho Ji*, Hyun Cheol Oh¹⁾, Sang Soo Kim¹⁾ and Gwi Nam Bae²⁾
Digital Appliance R&D Center, Samsung Electronics, Co., Ltd.,

¹⁾*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,*

²⁾*Hazardous Substances Research Center, Korea Institute of Science and Technology*

Abstract

An aerosol generator using spark discharge has applied to nanoparticle production. However, some by-products such as ozone, nitric oxide and nitrogen dioxide were simultaneously generated with particles in air. In this study, the generation characteristics of byproduct gases were investigated in terms of the air flow rates and the applied discharge power in spark discharge. The particle size distribution was measured using a SMPS system to observe the effect of gas absorption on silver nanoparticles. The results showed that NO_x concentration increased linearly with discharge energy. However, ozone concentration increases with discharge energy in a low energy region, but decreases adversely with discharge energy in a high-energy region, which NO_x concentration increases steeply in comparison of ozone concentration.

Key words : Spark discharge aerosol generator, Ozone, NO_x, Silver nano particles

1. 서 론

스파크 방전은 플라즈마의 일종으로 주로 대기에서 천둥을 동반한 번개현상으로 나타난다. 스파크 방

전현상으로 대기 중 질소산화물이 주로 생성되었기 때문에 스파크 방전은 대기과학과 기상학 분야에서 활발히 연구되었다 (Peyrou and Lapeyre, 1982; Cooray and Rahman, 2005).

스파크 방전 입자발생장치 (spark discharge aerosol generator)는 녹는점이 높은 금속이나 탄소와 같은 비금속 재료를 재현성 있고 안정적으로 발생시킬 수

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-218-5092, E-mail : junho.ji@samsung.com

있기 때문에 최근 나노입자 발생장치로 여러 분야에서 사용되고 있다. 주로 나노미터 크기의 금 (Schwyn *et al.*, 1988), 은 (Burtscher *et al.*, 1982; Lee *et al.*, 2000), 구리, 철, 아연 등 (Watters *et al.*, 1989), 다양한 순금속 입자의 발생 특성이 연구되었고, Helsper 등 (1990, 1993)이 연구한 디젤 PM (particulate matter) 모사용 스파크 방전 탄소 입자발생장치는 상용화 (Model GFG 1000, Palas, Karlsruhe, Germany)되어 PM의 인체 유해성 관련 연구에 사용되고 있다 (Roth *et al.*, 1998, 2004; Brown *et al.*, 2000; Kreyling *et al.*, 2002).

스파크 방전이 발생하면 높은 전기장에서 분자들이 전리되어 이온이나 라디칼이 생성되고 전자와 이온은 빠른 속도로 전기장을 이동하여 전극 표면에 충돌한다 (Aleksandrov and Bazelyan, 1999). 이 때, 국부적으로 전극 표면의 온도가 녹는점 이상으로 높아지면 재료가 기화되고, 기화된 분자들은 서로 충돌하여 핵생성, 응축, 응집 과정을 거쳐 나노입자가 생성된다 (Horvath and Gangl, 2003). 대부분의 연구가 연구실에서 진행되었기 때문에, 운반기체를 아르곤이나 질소 등 불활성 기체를 사용하여 필요한 나노입자를 발생시켰고, 실제 공간에서 작동을 나타낼 수 있는 공기를 운반기체로 사용한 연구는 거의 진행되지 않았다.

스파크 방전을 이용한 나노입자 생성장치는 실시간으로 나노입자를 공급할 필요가 있는 분야에 응용이 가능할 것으로 생각된다. 특히, 소형으로 가진 제품 등에 새로운 기능을 제공하는 장치로 사용될 수 있다. 예를 들어, 은 입자 등 살균 특성이 알려진 금속입자를 생성하여 곰팡이 등의 서식이 가능한 표면을 실시간으로 살균 혹은 항균 처리하는 장치를 구성할 수 있다. 또한 광촉매 시스템의 가장 큰 문제인 촉매 표면 피독에 의한 성능 저하에 대처할 수 있는 기술이 될 수 있다 (Byeon *et al.*, 2006). 그렇지만, 스파크 방전 입자발생장치를 공기분위기에서 사용할 경우 나노입자를 생성하는 과정에서 입자의 성분이 변화하고 (Kim and Chang, 2005), 예상치 않았던 기체가 부산물로 생성된다. 예를 들면, 질소와 산소가 분자상태에서 원자상태로 바뀐 후, 재반응하는 과정에서 인체에 나쁜 영향을 미치는 질소산화물과 오존이 생성된다 (Borra *et al.*, 1998).

나노기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있지

만 실제 제품에 적용된 예는 많지 않다. 본 연구는 나노기술을 실조건에 응용할 수 있는 가능성을 타진하기 위해 수행되었다. 실조건을 모사하기 위해 운반기체가 공기인 경우를 대상으로 하였고, 연구용으로만 사용되는 나노입자 발생장치를 실제 제품의 부가장치로 적용할 수 있는 가능성을 고찰하였다. 이전 연구 (Oh *et al.*, 2006)에서는 스파크 방전 입자발생장치를 공기분위기에서 사용하여 은 나노입자를 생성하였고, 입자의 발생 특성 및 물리 화학적 성분을 분석하였다. 본 연구의 목적은 이와 같이 스파크 방전 입자발생장치를 공기 분위기에서 사용할 때 생성될 수 있는 질소산화물과 오존의 생성 특성을 실험적으로 밝히는 것이다. 또한 장치를 사용하는 과정에서 질소산화물과 오존의 생성농도를 제어할 수 있는 인자를 찾으려 한다.

2. 실험

스파크 방전 입자발생장치의 평가 시스템을 그림 1 (a)와 (b)에 나타냈다. 주기적인 스파크 방전을 발생시키기 위해 정전류의 공급이 가능한 고전압 전원 (high voltage power supply, Korea Switching, Seoul, Korea)에 콘덴서 (condenser)와 전극 (electrode)을 병렬로 연결하였으며, 방전을 안정화시키기 위해 저항 (5,000 k Ω , 2W)를 고전압 전원에 직렬로 연결하였다.

전극은 2중 원통형 구조로서, 몸통 지름이 5 mm이며, 실제 스파크 방전이 발생하는 전극봉의 지름은 3 mm이며, 두 전극 사이의 간격을 미세하게 조절하기 위하여 마이크로미터를 장착하였다. 두 전극 사이로 누설 전류가 통하지 않도록 몸체의 재질을 절연체인 엔지니어링 플라스틱으로 하였으며, 관측창을 설치하여 방전 형상을 PMT (photo-multiplier tube) 및 카메라로 관찰하였다. 유량은 2~10 Lpm, 방전 주파수 $f=50\sim 200$ Hz, 전극 간의 간격 $d=0.3, 0.5, 0.7$ mm, 축전기의 용량 $C=2.5\sim 10$ nF, 저항 $R=5,000$ k Ω 의 조건으로 실험을 수행하였다. 운반기체로 공기를 사용하였다. 본 연구에 사용된 스파크 방전 입자발생장치는 Oh *et al.* (2006)에서 자세히 설명하였다.

에어로졸 생성장치에서 발생된 입자의 크기분포와 질소산화물, 오존을 측정하기 위해 실험 장치를 그림 1 (a)와 같이 구성하였다. 스파크 방전 입자 발생 장

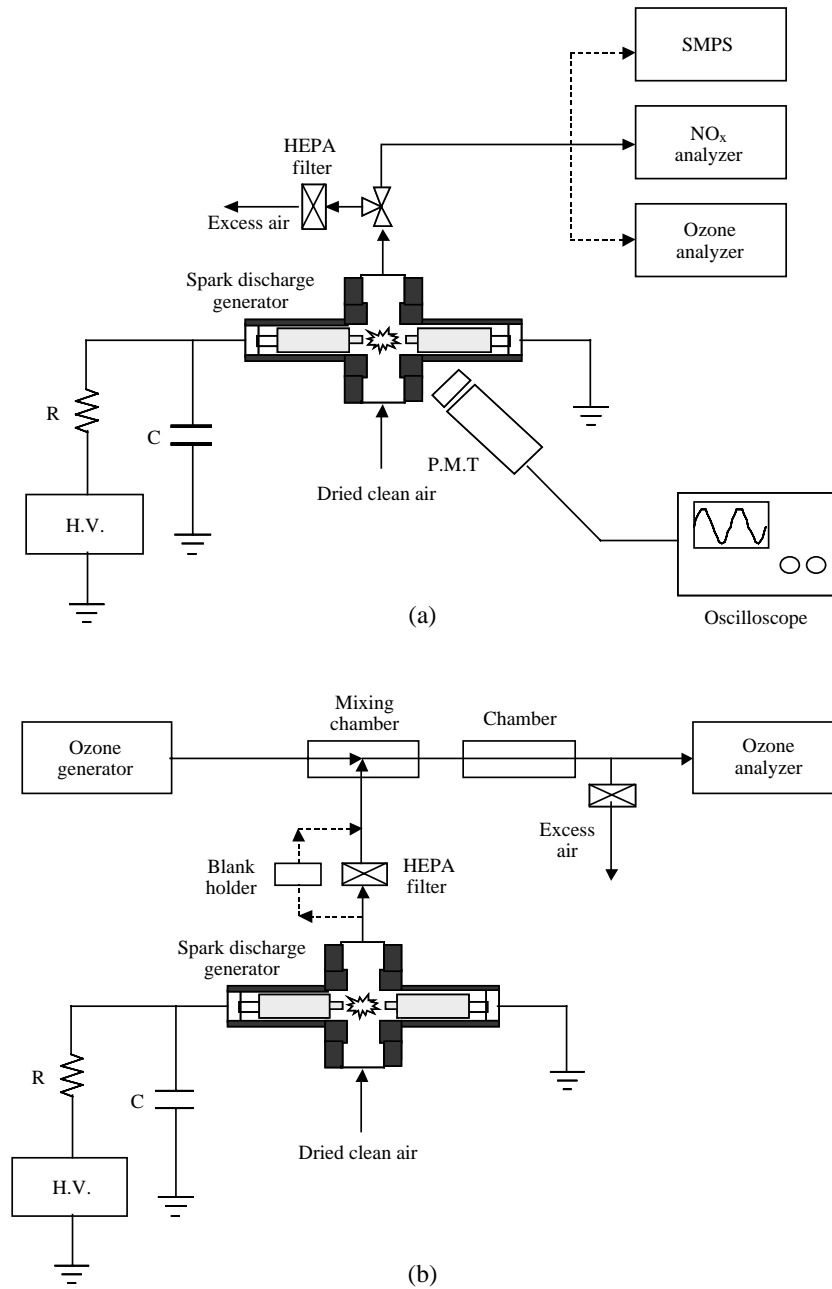


Figure 1. Experimental setup for the evaluation of byproducts of spark discharge aerosol generator.

치의 출구에서 nano-DMA (differential mobility analyzer; TSI model 3085)와 UCPC (ultrafine condensation particle counter; TSI model 3025)로 구성된

SMPS 시스템을 이용하여 나노입자의 크기 분포를 측정하였다. 또한 NO_x 분석기 (NO_x analyzer; Thermo Environmental Instruments model 42C, USA)와 오존

분석기 (ozone analyzer; Thermo Environmental Instruments model 49, USA)를 사용하여 질소산화물과 오존을 측정하였다.

스파크 플라즈마에 의해 생성된 오존은 함께 생성된 은 나노입자의 표면에 흡착 및 반응하여 제거될 수 있고, 일산화질소(NO)와 반응하여 소멸될 수 있다. 그림 1 (b)는 은 나노입자가 오존의 생성에 미치는 영향을 확인하기 위한 장치 구성도이다. 입자 생성장치의 출구에 HEPA 필터를 설치하여 은 나노입자의 효과를 분리하여 확인하였다. HEPA 필터를 통과한 공기는 질소산화물을 포함하고 은 나노입자를 포함하지 않지만, HEPA 필터를 통과하지 않은 공기는 은 나노입자와 질소산화물을 모두 포함한다. 두 가지 조건에 대해 150 ppb의 오존을 오존발생기를 이용하여 발생시킨 후, 나노입자 생성장치에서 생성된 공기와 혼합하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 나노입자 생성특성

Oh *et al.* (2006)은 은 나노입자의 크기분포는 인가 전원의 주파수(인가전류에 비례)와 정전용량의 크기, 전극 사이의 간격, 공기의 유량에 따라 변하는 것을 보였다. 생성된 입자의 무게농도나 크기분포는 주로 전극 표면에서 기화된 재료의 양에 따라 변화하였다. 전극 증발량은 방전 주파수에 선형적으로 증가하는 비례 관계임을 알 수 있으며 이는 기존의 문헌 (Helsper *et al.*, 1993)과도 일치하는 경향임을 보였다. 전극 간격에 따른 스파크 방전전압 V 는 방전주파수 f 와 정전용량 C , 전류 I 를 측정할 후 식 (1)을 사용하여 간접적으로 구하였다.

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

이 때, 전극간격이 0.3, 0.5, 0.7 mm 인 경우 각각 스파크 방전전압은 식 (1)에 의해 각각 1.9, 2.86, 3.54 kV 이었다. Paschen의 법칙은 평행 평판전극 사이의 스파크 방전전압 V 을 전극간격 d 와 압력 P 의 곱으로 표현한 것으로, 식 (2)에 나타내었다.

정상적인 스파크 방전이 발생했음을 확인하기 위해 식 (2)와 비교하였다.

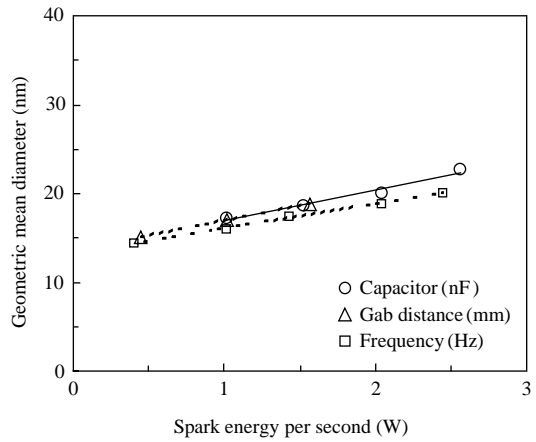


Figure 2. Variation of geometric mean diameter with spark energy.

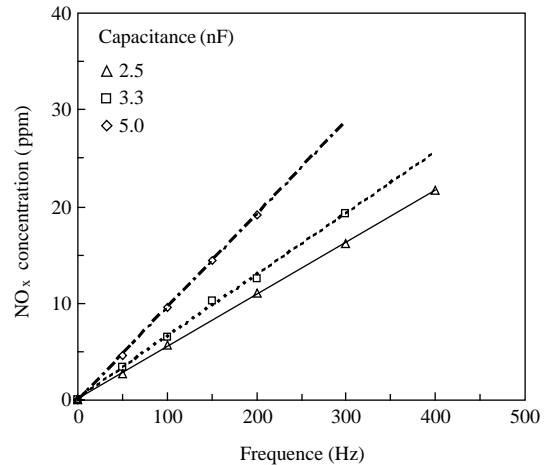


Figure 3. Variation of NO_x concentration with frequency.

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

여기서, 상수 B 는 $365 \text{ Vcm}^{-1} \text{ Torr}^{-1}$ 이고 공기 중에서 C 는 1.18이다 (Bazelyan and Raizer, 1997). 스파크 방전전압은 전극 간격에 선형적으로 비례하고, 실험에서 구한 값을 이용하여 식 (1)을 계산하고 식 (2)와 비교했을 때 Paschen의 법칙과 잘 일치했다 (Oh *et al.*, 2006).

그림 2는 식 (3)을 이용하여 인가전류, 정전용량,

전극간격의 차이를 스파크 방전에너지로 변환하여, 인가에너지에 따른 생성 입자의 기하평균 입경을 나타낸 것이다. 응집의 영향을 제외하기 위해 입자의 크기분포를 측정하는 경우 출구에서 10배 희석하여 측정하였다. 스파크 방전에너지 (E)는 다음과 같다.

$$E=1/2CV^2f \quad (3)$$

스파크 방전에너지는 식 (1)을 이용하여 얻은 스파크 방전전압을 식 (3)에 적용하여 계산하였다. 초당 스파크 에너지가 0.5~2.5 W일 때, 기하평균 크기는 에너지에 비례하여 선형적으로 증가하였다. 이것은 스파크 방전에너지가 재료의 기화량을 결정하기 때문이다(Helsper *et al.*, 1993).

3.2 질소산화물 생성 특성

그림 3은 전극 간격이 0.5 mm인 조건에서 인가 전원의 주파수를 변화시킬 때 생성되는 질소산화물 농도 변화를 나타낸다. 주파수가 증가함에 따라 질소산화물의 농도는 선형적으로 증가하였다. 한 번의 스파크에서 생성되는 질소산화물의 농도가 일정하기 때문에, 스파크 회수에 비례하여 농도가 증가하게 된다. 즉, n 번째 스파크 방전에 의한 전극 증발이나 질소산화물 생성반응이 $(n-1)$ 번째 스파크 방전에 영향 받지 않았음을 의미한다.

입자발생 실험의 결과(그림 2참조)와 마찬가지로, 스파크 방전에너지는 질소산화물의 생성 특성에 지배적인 영향을 미칠 것으로 추정할 수 있다. 그림 4

는 전극간격이 0.5 mm로 일정한 조건에서 질소산화물 농도를 스파크 방전에너지를 기준으로 나타낸 것이다. 이 때, 정전용량과 주파수 변화를 식 (3)을 이용하여 스파크 방전에너지로 환산하여 나타냈다. 입자의 생성과 마찬가지로 질소산화물의 농도는 정전용량이나 주파수의 변화와 관계없이 스파크 방전에너지의 크기에 비례하여 증가하는 경향을 나타냈다. 그럼에서 같은 주파수 조건에서 방전에너지가 달라지는 이유는 각각 데이터 포인트의 정전용량이 다르기 때문이다. 정전용량이 증가할수록 질소산화물 농도가 높아진다.

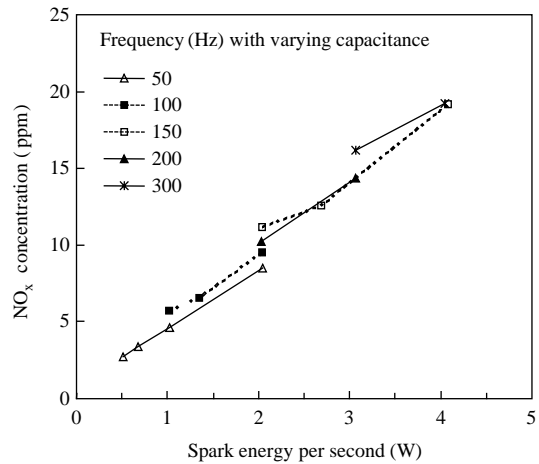


Figure 4. Variation of NO_x concentration with spark power.

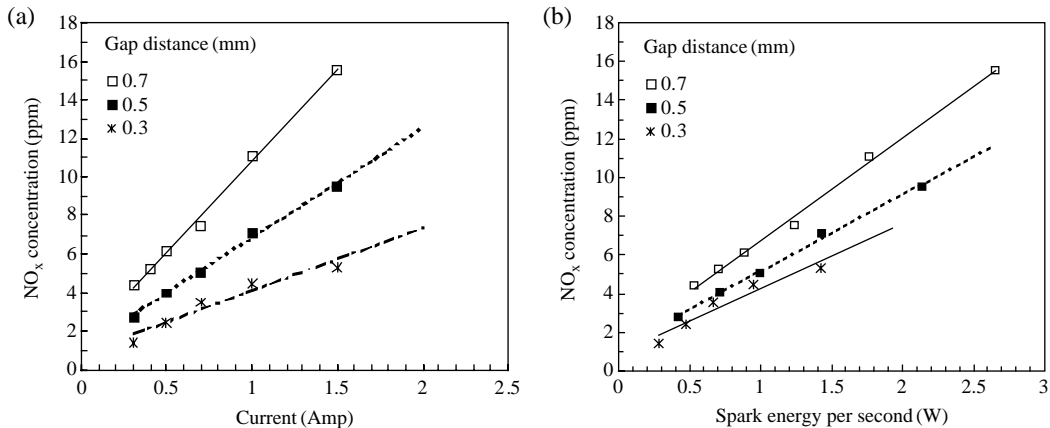


Figure 5. Variation of NO_x concentration for gap distances (a) as a function of current and (b) spark energy.

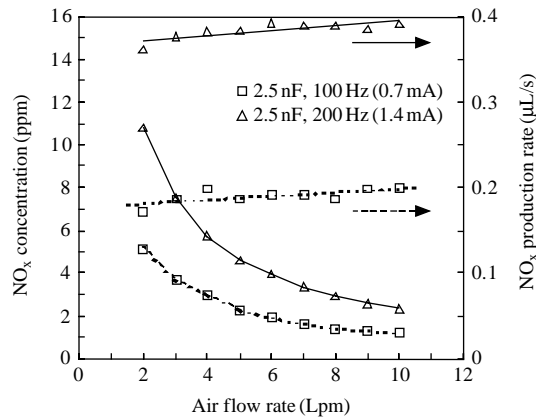


Figure 6. NO_x concentrations and NO_x production rates with air flow rates.

그림 5 (a)와 (b)는 질소산화물의 생성농도를 전극 간격에 따라 인가전류와 스파크 방전에너지의 향으로 나타낸 것이다. 그림 5 (a)와 같이 인가 전류로 나타낸 경우 전극 간격에 따라 스파크 방전전압이 달라지기 때문에, 같은 기준의 비교라고 할 수 없다. 예를 들어, 전극간격이 0.3 mm인 경우 1.9 kV에서 방전이 일어나지만, 전극간격이 0.7 mm로 넓어지면 3.54 kV가 인가되어야 방전이 일어난다. 그림 5 (b)는 식 (3)를 이용하여 스파크 방전에너지로 환산하여 다시 작성한 그래프이다. 전극간격에 따라 생성된 질소산화물의 농도 차이는 그림 5 (a)에 비해 상대적으로 낮다. 이 결과는 플라즈마 화학반응으로 생성되는 질소산화물의 농도가 스파크의 길이, 즉 전극 사이의 간격에 따라 달라지기 때문이다. 결국 스파크 전극 사이의 간격을 줄이면, 공기 중 플라즈마 영역인 스파크 플라즈마 영역의 길이가 줄어들고, 이에 따라 질소산화물이 생성될 수 있는 영역이 좁아진다.

그림 6은 공기 유량에 따라 질소산화물 생성 특성을 질소산화물 농도와 질소산화물의 시간당 발생 부피로 환산하여 나타낸 것이다. 전극 사이를 통과하는 공기 유량이 증가하면 생성되는 질소산화물 농도는 감소한다. 장치를 통과하는 공기는 스파크 방전으로 인해 생성된 질소산화물을 희석시키는 역할을 한다. 단위에너지 당 생성되는 질소산화물의 부피는 거의 일정하고 유량이 증가하면 다소 양이 많아진다.

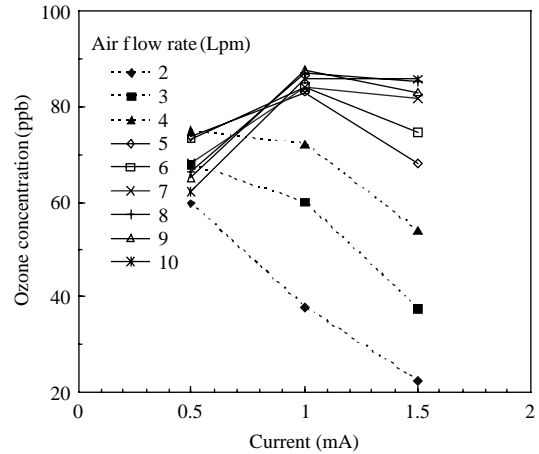


Figure 7. Effect of air flow rate and current on the ozone concentration.

3.3 오존 생성 특성

그림 7은 스파크 방전 장치에 인가된 전류에 따른 오존의 생성특성을 나타낸다. 발생된 오존 농도는 방전장치를 통과하는 공기 유량에 따라 복잡한 특성을 나타냈다. 만약 오존 생성량이 질소산화물의 경우와 같이 인가되는 에너지에 비례한다면, 전극에 인가된 전류가 증가하면 오존량은 선형적으로 증가해야 한다. 그렇지만, 그림 7에 나타난 것과 같이 인가 전류가 증가하더라도 4 Lpm 이하의 낮은 유량에서는 오존의 농도가 오히려 감소하는 경향이 나타났다. 플라즈마는 스파크 방전에너지가 증가함에 따라 오존 생성량이 많은 조건에서 질소산화물이 높게 생성되는 조건으로 이동한다고 알려져 있다 (Borra *et al.*, 1998). 즉 상대적으로 에너지가 낮은 코로나 방전의 경우 오존 생성이 지배적인 반면, 상대적으로 에너지가 높은 스파크 방전의 경우 질소산화물이 주로 나타난다고 알려져 있다 (Peyrou and Lapeyre, 1982).

그림 8은 전극간격과 공기유량이 변화하는 조건에 대해 질소산화물의 농도에 대한 오존농도로 결과를 나타냈다. 앞에서 살펴보았던 것처럼 질소산화물은 스파크 방전에너지에 비례하여 농도가 증가한다. 반면, 오존은 초기 에너지가 낮은 조건에서 질소산화물과 함께 증가하지만, 에너지가 높아지는 경우 오존의 농도는 감소하는 경향을 보인다. 이 경향은 유량이나 전극 간격이 달라지더라도 비슷한 경향을 나타냈다.

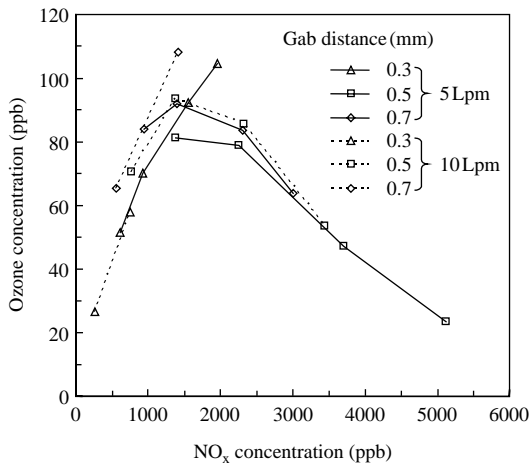


Figure 8. Relation between ozone concentration and NO_x concentration.

Table 1. Ozone concentrations after the small chamber (ppb).

	Applied current (Amp)			
	0*	0.5	1.0	2.0
w/HEPA	0	0	0	0
w/o HEPA	0	24	14	6
w/HEPA	150	70	44	16
w/o HEPA	150	90	58	26

*Ozone generator off (0 ppb) or on (150 ppb).

이것은 질소산화물의 일산화질소의 농도가 증가하여 오존과 반응하기 때문인 것으로 생각된다.

오존은 보통 일산화질소와 반응하여 이산화질소를 생성하는 것으로 알려져 있기 때문에, 스파크 방전의 경우 일산화질소의 농도가 높은 분위기에서는 오존의 농도가 감소할 수 있다. 또한, 오존은 은과 반응하여 산화은을 형성한다고 알려져 있기 때문에 (Waterhouse *et al.*, 2002) 스파크 방전으로 은 나노입자를 생성하는 과정에서 오존의 농도가 감소할 수도 있다. 그림 1 (b)와 같이 HEPA 필터 홀더에 필터를 장착한 경우와 장착하지 않은 경우 오존농도를 비교하였다. 오존 생성기에서 발생한 오존과 스파크 방전장치를 통과한 공기를 섞어서 일산화질소와 나노입자가 충분히 반응할 수 있도록 소형 챔버를 통과시켰다.

Table 1은 HEPA 필터를 통과하여 입자가 모두 제거된 경우와 HEPA 필터를 제거하여 공기가 빈 홀더 공간을 통과한 경우 측정된 오존농도를 나타낸 것이

다. 먼저 오존발생기를 사용하지 않고, 스파크 방전 입자발생장치에서 발생한 입자에 대해서 약 500 mL 챔버를 통과하여 약 6초의 체류시간이 경과한 후 오존을 측정하였다. 이 때 스파크 방전장치를 통과하는 공기 유량은 5 Lpm이었다. 스파크 방전장치를 통과한 공기가 HEPA 필터를 지나면 입자가 제거된 질소산화물과 오존이 반응하는 상태를 모사할 수 있다. 이와 같이 나노입자가 없는 조건에서 측정된 오존의 농도는 0이었다. 반면, HEPA 필터를 제외한 필터를 지지하는 케이스를 통과하여 비슷하게 체류시간을 유지한 경우는 나노입자가 포함된 공기의 경우 오존이 6~24 ppb 측정되었다. 오존의 농도 변화를 명확히 확인하기 위해 오존 발생기에서 오존을 생성하여 스파크 방전장치를 통과한 공기와 혼합하였다. 오존발생기에서 약 500 ppb농도의 공기를 공급할 때, 스파크 방전장치의 전원을 인가하지 않고 공기를 통과시킨 경우 측정된 오존의 농도는 150 ppb였다. 스파크 방전주파수를 높일수록 오존의 농도는 감소했는데, 이것은 주파수를 증가시키면 질소산화물의 농도가 높아져서 일정한 농도의 오존과 반응하는 일산화질소의 농도가 증가한 결과이다. HEPA 필터를 통과한 공기는 필터를 장착하지 않는 경우와 비교할 때 필터가 차지하는 부피로 인해 일산화질소와 반응할 수 있는 시간이 짧다. 그렇지만 주파수가 같은 조건에서 오존의 농도가 감소했는데, 이것은 스파크 방전 입자발생장치에서 생성된 오존의 일부가 HEPA 필터에서 제거되기 때문인 것으로 생각된다 (Hyttinen *et al.*, 2006).

4. 결 론

본 연구에서는 공기 중 스파크 방전 입자 생성 장치를 사용하는 경우 나노입자를 생성하는 과정에서 나타날 수 있는 질소산화물과 오존의 생성 특성을 고찰하였다. 입자를 생성할 수 있는 운전조건에서 질소산화물은 수 ppm에서 수십 ppm이 생성되었고, 주파수, 정전용량이 증가함에 따라 질소산화물의 농도가 증가하였는데, 인가한 스파크 방전에너지가 같은 경우 생성되는 질소산화물의 양은 비슷하게 나타났다. 전극 사이의 간격을 감소시키면 스파크가 형성되는 간격이 감소하므로, 질소산화물의 농도는 상대

적으로 낮았다. 질소산화물의 생성을 억제하는 방법은 스파크 방전에 필요한 전력을 최소화하기 위해 인가전압이나 주파수를 낮추는 방법, 스파크 플라즈마가 생성되는 공기 영역을 감소시키기 위해 전극간격을 줄이는 방법, 주변 공기를 증가시켜 희석하는 방법 등이 있다. 그렇지만 이와 같은 방법들은 입자의 생성특성에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 입자 특성과 함께 고려하여 운전조건을 결정해야 한다.

반면 오존의 경우에는 상대적으로 낮은 농도인 100 ppb 이하로 형성되었다. 질소산화물과는 달리 인가한 스파크 방전에너지가 증가함에 따라 오존 생성량도 증가하다가 다시 감소하는 포물선 형태의 특성을 보였다. 이와 같은 특성은 오존이 일산화질소와 반응하여 이산화질소로 변환되는 반응이 지배적으로 나타나기 때문인 것으로 생각된다. 스파크 방전장치에 의해 생성된 은 나노입자의 오존 제거 특성과 일산화질소와 반응하는 특성을 비교한 결과 오존은 주로 일산화질소와의 반응에 의해 소멸되는 것을 실험적으로 확인하였다.

오존의 경우 대부분 장치에서 생성되는 농도가 100 ppb 이하이므로 적절한 희석과 운전시간을 조절하게 되면 실내공간에서 적용하는데 문제가 없을 것으로 생각된다. 반면 질소산화물의 경우 운전 조건에 대한 세밀한 검토가 요구된다.

참 고 문 헌

- Aleksandrov, N.L., and Bazelyan, E.M. (1999). Ionization processes in spark discharge plasma, *Plasma Sources Science and Technology*, 8, 285-294.
- Bazelyan, E.M., and Raizer, Y.P. (1997). *Spark discharge*, Boca Raton, CRC Press.
- Borra, J.P., Goldman, A., Goldman, M., and Bouloudà, D. (1998). Electrical discharge regimes and aerosol production in point-to-plane DC high-pressure cold plasmas: aerosol production by electrical discharges, *Journal of Aerosol Science*, 29, 661-674.
- 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 Science and Technology*, 32, 325-337.
- Burtscher, H., and Schmidt-Ott, A. (1984). Enormous enhancement of van der waals forces between small silver particles, *Physical Review Letters*, 48, 1734-1737.
- Byeon, J.H., Park, J.H., Yoon, K.Y., Ko, B.J., Ji, J.H., and Hwang, J.H. (2006). Removal of volatile organic compounds by spark generated carbon aerosol particles, *Carbon*, 44, 2106-2108.
- Cooray, V., and Rahman, M. (2005). Efficiencies for production of NO_x and O₃ by streamer discharges in air at atmospheric pressure, *Journal of Electrostatics*, 63, 977-983.
- Helsper, C., Mölter, L., Munzinger, F., and Sturn, W., US patent No. 4,967,958, issued Nov. 6, 1990.
- 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, *Atmospheric Environment*, 27A, 1271-1275.
- Horvath, H., and Gangl, M. (2003). A low-voltage spark generator for production of carbon particles, *Journal of Aerosol Science*, 34, 1581-1588.
- Hyttinen, M., Pasanen, P., and Kalliokoski, P. (2006). Removal of ozone on clean, dusty and sooty supply air filters, *Atmospheric Environment*, 40, 315-325.
- Kim, J.T., and Chang, J.S. (2005). Generation of metal oxide aerosol particles by a pulsed spark discharge technique, *Journal of Electrostatics*, 63, 911-916.
- 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. Toxicology and Environmental Health*, A65, 1513-1529.
- Lee, C.S., Kim, Y.J., and Kim, S.S. (2000). An experimental study on the characteristics of direct photoelectric charging, *Transactions of the KSME B*, 24, 753-759.
- Oh, H.C., Jeong, J.H., Park, H.H., Ji, J.H., and Kim, S.S. (2006). Generation of silver nanoparticle by spark discharge aerosol generator using air as a carrier gas, *Transactions of the KSME B*, 30, 170-176.
- Peyrou, R., and Lapeyre, R.M. (1982). Gaseous products created by electrical discharges in the atmosphere and condensation nuclei resulting from gaseous phase reactions, *Atmospheric Environment*, 16(5), 959-968.
- Rehbein, N., and Cooray, V. (2001). NO_x production in spark and corona discharges, *Journal of Electrostatics*,

- 51-52, 333-339.
- Roth, C., Karg, E., and Heyder, J. (1998). Do inhaled ultrafine particles cause acute health effects in rats? : particle production, *Journal of Aerosol Science*, 29, S769-S680.
- 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 Science and Technology*, 38, 228-235.
- Schwyn, S., Garwin, E., and Schmidt-Ott, A. (1988). Aerosol generation by spark discharge, *Journal of Aerosol Science*, 19, 639-642.
- Waterhouse, G.I.N., Bowmaker, G.A., and Metson, J.B. (2002). Interaction of a polycrystalline silver powder with ozone, *Surface and Interface Analysis*, 33, 401-409.
- Watters Jr., R.L., deVoe, J.R., Shen, F.H., Small, J.A., and Marinenko, R.B. (1989). Characteristics of aerosol produced by spark discharge, *Analytical Chemistry*, 61, 1826-1833.