

정전식 집진기에서 오존, NO_x 발생특성에 관한 연구

노광철[†]·이영호*·오명도**

A Study on the Characteristic of Ozone and NO_x Generation in the Electrostatic Precipitators

Kwang-Chul Noh, Young-Ho Lee and Myung-Do Oh

Key Words: Ozone(오존), NO_x(질소산화물), Corona(코로나), Electrostatic precipitator(정전식 집진기)

Abstract

We investigated the amount of the toxic gases emitted from the Electrostatic Precipitators(ESPs), which were currently used by indoor air cleaners. We used the wire-to-plate(WTP) type and the needle-to-plate(NTP) type corona discharger in our study. Using the voltage, the polarity of wire, the number of needles of NTP as the input variables, we studied the characteristic of Ozone and NO_x generation in the ESPs. As the results, we found out that the concentration of Ozone, NO₂ and NO_x is increased, but the amount of NO is decreased with increasing the voltage and the number of needles. And we knew that the generation rate of ozone and NO_x is very related with the corona region.

1. 서 론

건물의 에너지 절약을 위하여 건물의 밀폐도가 증가하고 이에 따른 환기횟수의 감소, 건축자재나 공조설비 등에서 발생하는 오염물질의 증대, 자동차의 매연이나 공장굴뚝에서 나오는 배기가스 등으로 인해 실내 공기질(indoor air quality)은 상당히 악화되고 있다. 더욱이 현대인들은 생활의 90%를 실내에서 사용하는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁾ 이로 인하여 실내에서의 공기청정에 대한 관심이 증대되고 있으며 실내 공기질의 개선을 위한 공기청정기의 사용이 늘어나고 있다.

실내 공기청정기는 입자의 제거방식에 따라 기계식, 전기식, 그리고 혼합식 등으로 나눌 수 있다. 이러한 여러 방식 중 전기식으로는 고유량에

서도 압력손실이 작은 정전식집진기(electrostatic precipitator, ESP)의 사용이 최근 들어 많이 증대되고 있다. 따라서 이러한 수요의 증대에 따라 전기집진기의 입자제거에 대한 성능 향상을 위하여 여러 방법들이 이론적, 실험적인 방법으로 계속 연구되어 왔다.^(1,2)

코로나방전을 이용한 공기청정기는 코로나영역 내에 유입된 공기분자들을 분해하기 때문에 오존(ozone) 등이 발생하게 된다. 오존(O₃)은 3개의 산소원자로 구성된 하나의 분자이다. 이중 2개의 산소는 인간이 호흡하는데 필수적인 기본적인 산소분자를 형성한다. 나머지 세 번째 산소원자는 오존으로부터 분리되어 다른 물질의 분자에 재부착되고 이에 따라 그 물질의 화학적인 구성을 변경시키게 된다. 이러한 오존의 반응성에 때문에 유해한 가스를 제거하는데 많이 이용되고 있다. 그러나 인체의 외부에서 유기물과 반응하는 오존의 화학적인 특성은 인체의 내부를 구성하는 유기물과 동일하게 반응하기 때문에, 이를 들여 마시면 폐에 손상을 일으킬 수 있고 결과적으로 건강상 문제를 발생시킬 수 있는 요인이 된다.^(7,8) Table 1은 오존의 양에 따른 효과를 보여주고 있

[†] 서울시립대학교 대학원 기계정보공학과

E-mail : mdoh@uos.ac.kr

TEL : (02)2210-2547 FAX : (02)2248-5110

* 서울시립대학교 대학원 기계정보공학과

** 서울시립대학교 기계정보공학과

다.⁽⁶⁾ 여기에서 보듯이 공기 중에 존재하는 오존은 인간뿐만 아니라 식물 등에도 매우 유해하다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 미국의 FDA (Food and Drug Administration)에서는 실내 의료기에서의 오존발생량을 0.05ppm이하로 요구하고 있고 EPA (Environmental Pollution Agency)에서는 대기에 대하여 8시간 평균이 0.08ppm이하로 유지되어야 한다고 규정하고 있다.⁽⁷⁾

현재 실내에 사용되고 있는 정전식 공기청정기에서도 코로나에 의해 형성된 인체에 위해를 줄 수 있는 오존이 발생하게 된다.⁽¹⁾ 이러한 이유로 인하여 전기식 공기청정기에서 발생하는 오존량에 대한 조사가 필요하다고 볼 수 있다. 또한 코로나방전(corona discharge)은 가스를 전자와 이온으로 분해하기 때문에 공기 중에 존재하는 다량의 질소(N₂)도 코로나 방전에 의하여 원자로 분해가 되고 이것이 산소의 원자와 반응하여 질소산화물(NO_x)을 생성할 수도 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기존의 wire-to-plate(이하 WTP) 형태의 하전부를 갖는 공기청정기에 대하여 전압 및 코로나 와이어의 극성변화에 따라 오존과 NO_x 발생량을 측정하여 그 특성을 분석하였다. 그리고 하전부의 형상이 needle-to-plate(이하 NTP)인 것에 대해서도 전압, 코로나 와이어의 극성, 침(needle)의 수에 따른 오존 및 NO_x 발생량 등을 조사하였고 이를 WTP형태의 결과와 비교, 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

전기집진기에서 발생하는 오존과 NO_x를 측정

Table 1 Health effects of Ozone

Concentration (ppm)	Exposure time	Effects
0.02	1 hr	Cracked, stretched rubber
0.03	8 hr	Vegetation damage
0.10	1 hr	Increased airway resistance
0.30	continuous working hours	Nose and throat irritation, chest constriction
2.00	2 hr	Severe cough

하기 위하여 Fig. 1과 같이 시스템을 구성하였다. 이는 공기청정기의 입자의 집진효율을 측정하기 위한 실험장치와 그 구성면에서 동일하다. 실내의 공기는 HEPA필터를 통과하면서 여과되어 풍동으로 유입된다. 여과된 공기들은 honeycomb과 2개의 스크린을 통과하면서 난류가 깨어져 유동이 plug flow형상을 유지할 수 있도록 되어 지고 풍동의 수축부를 통과하면서 경계층이 최대한 억제된 형태로 흐르게 된다. 이렇게 균일성이 확보된 유동은 시험장치부(test section)와 플레넘챔버(plenum chamber)를 지난 후 제트팬(jet fan)에 의해 외부로 빠져나간다. 이때 플레넘챔버는 제트팬에 형성되는 유동의 교란현상을 방지하기 위하여 설치되었다.

본 연구에서 사용된 전기집진기의 또한 코로나 방전에 의해 발생된 오존(O₃)과 NO_x의 농도를 조사하기 위하여 오존분석기(ozone analyzer, model 400A, API)와 NO_x분석기(NO_x analyzer, model 200A, API)를 사용하였고 전기집진기의 on/off시에 시험장치부의 50cm 후방에서 각각의 농도를 측정하였다.

Fig. 2는 전기집진기에 사용된 WTP타입과 NTP타입의 하전부와 집진부의 형상을 보여주고 있다. WTP타입의 하전부의 크기는 26(L)×280(H)×18(W)mm 이고 5개의 레인(lane)으로 구성되어 있으며 와이어와 판사이의 간격은 13mm이다. NTP타입의 하전부는 길이와 높이가 20(L)×280(H)mm 이고 6레인(lane)으로 구성되었으며 그 폭은 침의 수에 따라 달라진다. 침은 15mm의 일정한 간격으로 배열되어 있으며 침의 개수(38, 95, 133)에 따라 판의 폭이 달라진다. 침끝과 판사이의 간격은 13mm로 WTP타입과 동일하다. 집진부의 크기는 16(L)×280(H)×100(W)mm 이고 총 8레인으로 구성되어 있으며 판과 판사이의 간격은 8mm이다. 고전압발생기(high voltage power supply)는 전압0~30kV, 전류 0~6mA까지 발생이 가능한 장치로 하전부 및 집진부에 연결하여 사용하였다. 이때 발생된 전압, 전류는 고전압 프루브(high voltage probe, model P6015A, Tektronix)를 이용하여 측정하였다.

2.2 실험방법

본 연구는 실내 공기청정용 전기집진기에 대한 오존 및 NO_x발생량을 조사하기 위한 것이다. 따

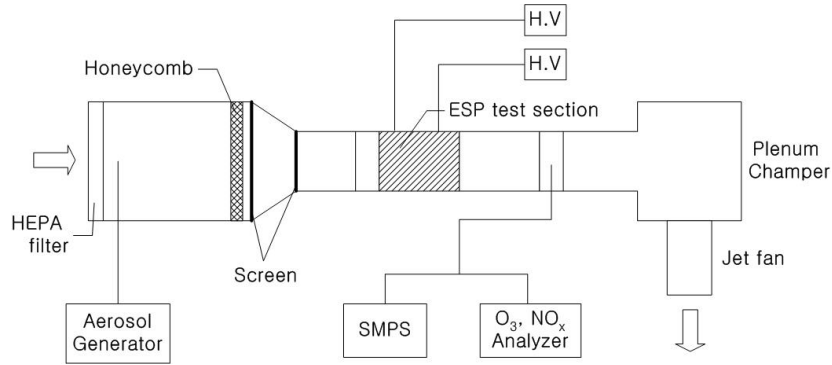


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

라서 모든 조건은 실내용 공기청정기의 가동조건을 기준으로 실험하였다. 전기집진기의 코로나방전부는 그 타입에 관계없이 전류-전압곡선에 의하여 안정성이 유지되는 최고의 전압을 인가전압의 한계로 그 값보다 낮은 전압에서 실험을 수행하였다. 집진부의 전압은 코로나방전부 전압의 1/2이 인가되도록 하였다.

WTP타입의 경우, 오존 및 NO_x의 발생량에 대한 조사는 전압-전류 특성곡선에 맞추어 값을 측정하였고 NTP타입의 경우에는 침의 수에 따라 코로나방전부의 전류-전압 특성이 달라지기 때문에 침(needle)의 수에 따라 전압을 기준으로 5~12kV에서 오존 및 NO_x의 발생량을 측정하였다. 또한 코로나 와이어에 인가된 방전극성에 따른 오존 및 NO_x에 관한 발생특성의 변화를 관찰하기 위하여 양코로나(positive corona)와 음코로나(negative corona)에 대한 실험을 모두 수행하였다. 유속은 모든 실험에 대해 1m/s로 동일하게 유지하였다.

3. 결과 및 논의

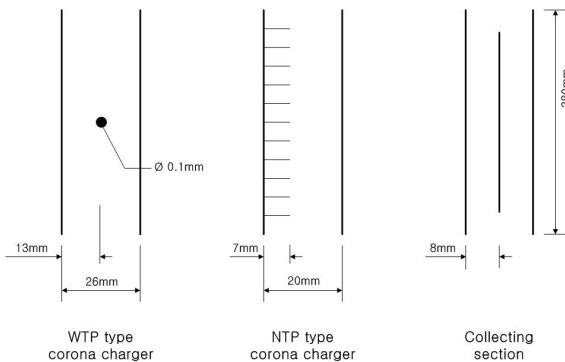


Fig. 2 Schematic diagram of the ESP's parts

3.1 전압-전류 특성

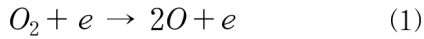
본 연구에서 사용된 전기집진기의 전기적인 특성을 분석하기 위하여 인가전압과 코로나 전류와의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 이 특성곡선들은 WTP의 경우 5라인, NTP타입의 경우 6라인이 모두 설치되었을 때에 측정한 값들이다. (a)는 양코로나에 의한 전류-전압 특성을 보여주고 있고 (b)는 음코로나인 경우의 특성을 나타낸다. 여기서 NTP-1,2,3은 NTP타입의 침(needle)의 수에 따른 분류로서 각각 38개, 95개, 133개일 때를 의미한다. WTP타입과 NTP타입 모두 인가전압의 증가와 함께 코로나 전류도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 동일한 전압에서의 코로나전류는 음코로나가 양코로나보다 큰 것으로 측정되었다.

본 연구에서 사용된 WTP타입의 코로나 개시전압은 양코로나인 경우 4.6kV, 음코로나인 경우 5.0kV로 측정되었다. 그리고 NTP타입의 코로나 개시전압은 NTP-1,2,3 모두 양코로나인 경우 7kV, 음코로나인 경우 6kV로 거의 같게 측정되었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 침의 수가 증가함에 따라 코로나 전류가 증가하고 있는데 이는 침의 수가 증가하면서 코로나방전이 발생하는 부분도 증가하기 때문이다. 이러한 결과들은 장치의 크기 및 실험조건 등으로 인하여 정량적인 결과비교는 어렵지만 이전의 Huang and Chen⁽¹⁾ 등의 결과들과 정성적으로는 잘 일치한다.

3.2 오존 및 NO_x 발생특성

인가전압의 증가에 따라 WTP와 NTP-1,2,3에 대한 오존 및 NO_x발생량을 측정하였다. Fig. 4는 오존의 발생량을 나타낸다. 초기상태에서의, 즉 코로나방전 이전의 오존량은 약 4~7ppb정도로 모든 경우에 대해서 비슷한 값으로 측정되었다.

Fig. 4에서 보인 것처럼 코로나의 종류에 관계없이 인가전압의 증가와 함께 오존량은 증가하는 것을 볼 수 있다. 오존의 발생은 다음과 같은 화학반응에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다.^(5,6)

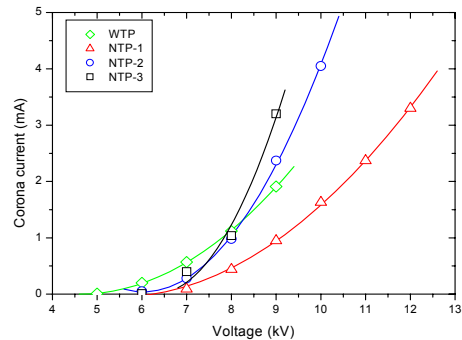
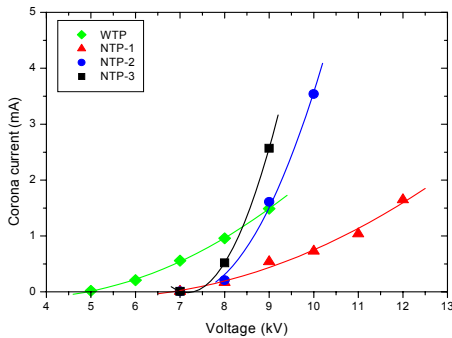


WTP타입에서는 전체적으로 음코로나인 경우에 양코로나에 비해 많은 양이 오존이 발생하는 것을 볼 수 있다. 양코로나인 경우, 인가전압이 9kV에서 초기농도보다 약 50ppb정도 증가하였고 음코로나인 경우에는 약 650ppb정도 증가하였다. 이 결과는 Huang and Chen⁽¹⁾의 결과와 정성적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

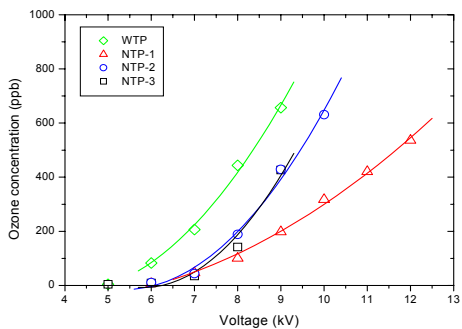
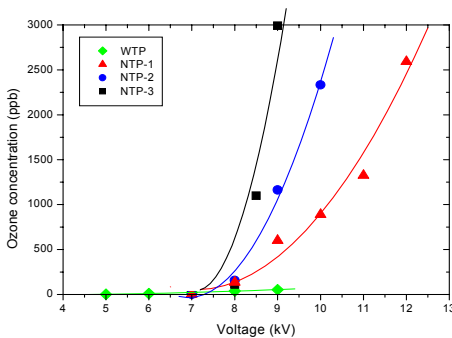
그러나 NTP타입의 경우에는 양코로나가 음코로나에 비해 더 많은 오존을 발생시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 코로나영역(corona region)과 매우 관련이 깊다. WTP타입은 양코로

나에 비해 음코로나인 경우에 더 큰 코로나영역을 갖는다. 그러나 NTP타입의 코로나방전에서는 음코로나인 경우에 비해 양코로나인 경우에 전기장의 영향으로 인하여 이온화영역이 증가⁽⁴⁾하기 때문에 이와 같은 현상이 발생하는 것으로 판단이 된다. 그리고 양코로나의 경우 침(needle)의 수가 증가함에 따라 오존발생량은 계속해서 증가하는 것으로 나타났으나 음코로나의 경우 NTP-2,3의 타입에서는 거의 동일한 증가량을 보이는 것으로 나타났다.

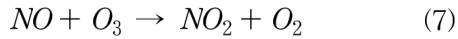
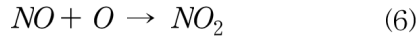
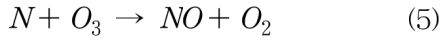
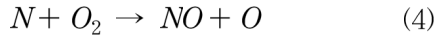
Fig. 5~7은 코로나방전부에서의 인가전압에 따른 NO_x의 변화량을 보여준다. NO_x는 대기에서의 일변화량이 크기 때문에 초기값에 대한 증감량으로 변화량을 나타냈다. 공기 중의 질소분자(N₂)는 코로나방전에 의하여 분해되어 산소원자들과 반응하거나 또는 분해된 산소원자들, 오존과 직접 반응하여 NO를 생성하게 된다. 이러한 NO는 코로나에 의해 발생된 산소원자, 오존 등과 다시 반응하여 NO₂로 변하게 된다.⁽³⁻⁶⁾



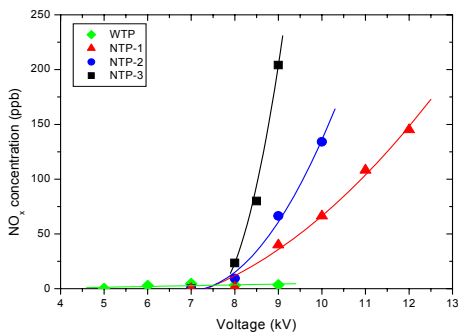
(a) positive corona (b) negative corona
Fig. 3 Experimental voltage-current characteristic curves for several corona dischargers



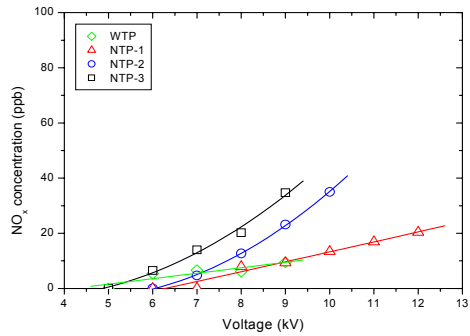
(a) positive corona (b) negative corona
Fig. 4 Ozone generation characteristic curves for several corona dischargers



식 (3)~(5)와 같은 반응으로 생성된 NO는 식 (6), (7)의 반응에 의하여 Fig. 6에서 보는 바와 같이 그 양이 전압의 증가와 함께 계속해서 감소하게 되는데 어느 전압이상이 되면 초기의 존재량이 거의 모두 소멸되는 것으로 나타났다. 그러나 이 반응에 의해서 NO₂의 양은 전압의 증가와 함께 계속해서 증가하게 되는데 이는 Fig. 7에서 볼 수 있다.

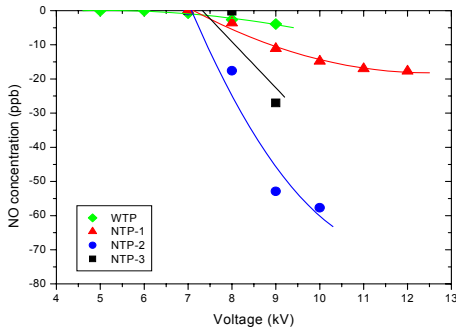


(a) positive corona

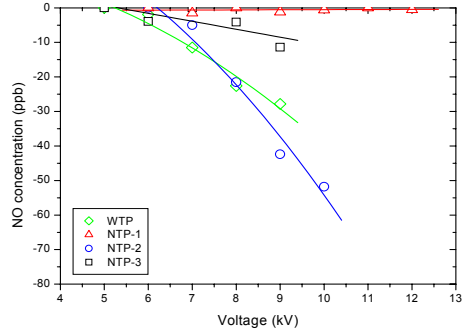


(b) negative corona

Fig. 5 NO_x generation characteristic curves for several corona discharges

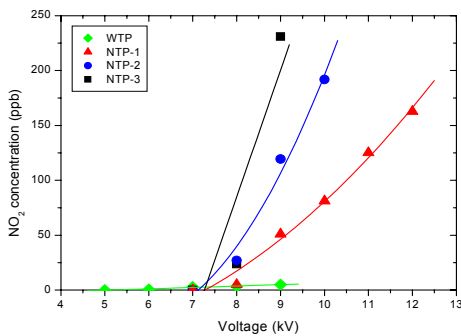


(b) positive corona

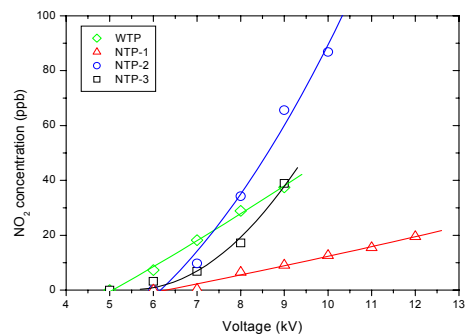


(a) negative corona

Fig. 6 NO generation characteristic curves for several corona discharges



(a) positive corona



(b) negative corona

Fig. 7 NO₂ generation characteristic curves for several corona discharges

Fig. 4~7에서 볼 수 있듯이 NO_x 와 NO_2 는 오존의 증가와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. NO_x 와 NO_2 의 양도 오존발생량처럼 인가전압의 증가와 함께 음코로나에 비해 양코로나에서 많은 증가를 보이고 있다. 이는 앞서 논의한 코로나 영역과 관련이 깊다. 코로나 영역이 클수록 질소의 반응영역은 증가하게 되고 또한 오존의 발생도 증가하게 되는데 이로 인하여 더 많은 반응이 일어나서 NO_x 와 NO_2 의 발생량도 증가하는 것이다. 그리고 그림에서 보는 바와 같이 인가전압이 증가함에 따라 NO의 양은 감소하지만 NO의 산화반응에 의하여 NO_2 의 양은 증가하게 된다. 이때 NO_2 의 증가량이 NO의 감소량보다 크기 때문이고 결국 NO_x 의 양은 증가하게 된다. 이러한 결과는 NO를 코로나방전부에 직접 주입하여 NO_x 의 제거실험을 수행하였던 이전의 결과들과 잘 일치한다.^(3,4)

오존에 관한 기준들⁽⁷⁾을 근거로, 본 연구에서 실험한 정전식 집진기들을 평가한다면 9kV이상에서 모든 장치들이 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 특히 양코로나의 WTP타입의 경우를 제외하고는 모든 방식들에서 오존발생량이 위의 기준들을 훨씬 초과되는 것으로 나타났다. 또한 NO_x 의 총량(존재량+발생량)도 미국 EPA의 연평균 기준인 0.05ppm를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 실내의 공기질이 점차 강화되고 있는 시점에서 기존의 입자 및 가스제거용 정전식 공기청정기에 대하여 오존 및 NO_x 발생에 관한 실험적인 연구가 더 필요하다고 판단된다.

4. 결론

기존의 WTP타입 및 NTP타입의 전기집진기에서 발생하는 오존 및 NO_x 량에 대한 조사를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 코로나 전류는 코로나방전부의 형상에 관계없이 인가전압의 증가와 함께 증가하고, 동일한 전압에서 양코로나에 비해 음코로나에서 전류값이 더 크며 NTP타입의 경우, 침의 수가 증가함에 따라 코로나 전류도 증가한다.

(2) 오존의 발생량은 코로나영역과 매우 밀접한 관련이 있으며 동일한 인가전압에서 WTP타입의 경우, 양코로나에 비해 음코로나에서, NTP타입의 경우, 오존은 음코로나에 비해 양코로나에서 훨씬

많은 오존이 발생한다.

(3) NO_x 의 증가량은 오존발생량과 밀접한 관련이 있으며 오존발생량이 클수록 NO_x 의 증가량도 크게 나타난다.

(4) 인가전압의 증가함에 따라 NO의 양은 감소하나 NO_2 의 양은 증가하게 되는데 이는 NO가 NO_2 로의 산화반응 때문이며 결국 NO_x 의 양은 증가하게 된다.

참고문헌

- (1) Huang, S. H and Chen, C. C, 2001, Filtration Characteristics of a Miniature Electrostatic Precipitator, *Aerosol Sci. and Technol.*, 35:792-804.
- (2) Yoo, K.H., Lee, J.S. and Oh, M.D., 1997, Charging and Collection of Submicron Particles in Two-Stage Parallel-Plate Electrostatic Precipitators, *Aerosol Sci. Technol.*, 27:308-323.
- (3) Kuroki, T., Takahashi, M., Okubo, M. and Yamamoto, T., 2001, Single-Stage Plasma Chemical Process for Particulates, NO_x and SO_x Simultaneous removal, *IEEE Transactions*, Vol. 38, No. 5, pp. 1204 -1209.
- (4) Dong, L., Chen, C., Sheng S., Chi, X., Yang, J., 2002, The influence of interface phenomenon on removal of NO and SO_2 in corona discharge reactor with water film, *Industry Applications Conference 2002 37th IAS Annual Meeting*, Vol. 3, pp. 2194-2197.
- (5) Lowke, J.J, Morrow, R., 1995, Theoretical analysis of removal of oxides of sulphur and nitrogen in pulsed operation of electrostatic precipitators, *Plasma Science, IEEE Transactions*, Vol. 23, No. 4, pp. 661-671.
- (6) Mason, N.J. and Skalny, J.D., 2002, Experimental investigations and modeling studies of ozone producing corona discharges, *Czechoslovak J. of Physics*, Vol. 52, pp. 85-94.
- (7) US EPA, 1995, Ozone Generators that are sold as Air cleaners: An Assessment of Effectiveness and Health Consequences, Indoor Air-Publications.
- (8) Wark, K. and Warner, C. F., 1981, Air Pollution: Its Origin and Control, Harper & Row.