

배리어 유전체 방전을 이용한 전기 집진부에서의 나노 입자 집진 효율

강석훈* · 지준호** · 변정훈* · 황정호†

(2003 년 1 월 14 일 접수, 2003 년 9 월 17 일 심사완료)

Collection Efficiency of Nano Particles by Electrostatic Precipitator using Dielectric Barrier Discharge

Suk-Hoon Kang, Jun-Ho Ji, Jeong-Hoon Byeon and Jung-Ho Hwang

Key Words : Dielectric Barrier Discharge(DBD), Nano Particle(나노 입자), Electrostatic Precipitator
(전기 집진기), Collection Efficiency(집진 효율)

Abstract

Although dielectric barrier discharge (DBD) in air has been applied to a wider range of aftertreatment processes for HAPs (Hazardous Air Pollutants), due to its high electron density and energy, its potential use as precharging dust particles is not well known. In this work, we measured size distributions of bimodal aerosol particles and estimated collection efficiency of the particles by an electrostatic precipitator (ESP) using DBD as particle charger. To examine the particle collection with DBD charger, nano size particles of NaCl (20 ~ 100 nm) and DOS (50 ~ 800 nm) were generated by a tube furnace and an atomizer, respectively. For experimental conditions of 60 Hz, 11 kV, and 60 lpm, the particle collection efficiency for the hybrid system was over 85 %, based on the number of particles captured.

1. 서 론

배리어 유전체 방전(dielectric barrier discharge)은 상압에서 사용되는 저온 플라즈마⁽¹⁾의 한 형태이다. 배리어 유전체 방전은 한 쌍의 전극 중 한쪽 혹은 양쪽의 전극을 유전체로 감싼 후 교류전기장을 가할 때 발생하며,⁽²⁾ 유전체의 전하축적(charge build-up)현상⁽³⁾을 이용한다. 유전체 전극에는 수 μm 의 지름을 가진 마이크로 방전(microdischarge)⁽⁴⁾이 발생하고, 한 쌍의 유전체 방전면 사이의 공간 전체에 분포된다. 이때, 방전면 사이는 마이크로 방전에 의해 발생하는 고농도의 이온들로 이루어

진 플라즈마 상태가 된다. 코로나 방전⁽⁵⁾과 비교할 때 배리어 유전체 방전은 전자밀도와 전자에너지가 높고, 발생하는 이온의 농도가 높다.⁽⁶⁾

이와 같은 특성을 이용하여 배리어 유전체 방전의 NOx 와 SOx 등의 유해가스 제거기술이 오래 전부터 연구되어 왔다. Breault⁽⁷⁾는 막대형 전극과 석영 튜브를 사용한 반응기에서 NO 를 NO₂ 로 산화시키는 연구를 수행하였으며, Fujii⁽⁸⁾는 실차 테스트를 통해 NOx, COx, SOx 등의 유해가스뿐만 아니라 Soot 등의 입자상 물질의 저감을 시도하였다. 또한 근래에는 VOCs 나 악취제거에 관한 연구도 활발하게 이루어지고 있는데, Yamamoto⁽⁹⁾와 Rosocha 등⁽¹⁰⁾은 배리어 유전체 방전을 이용하여 VOCs 및 Freon 가스 등의 가스상 오염물질을 제거하는 연구를 수행하였다. 최근에는 이러한 가스상 오염 물질 저감에 대한 연구와 별도로 배리어 유전체 방전의 높은 전자 밀도와 에너지를 활용한 입자상 물질 집진에 대한 연구도 시작되었다. 이러한 연구 중 하나로 배리어 유전체 방전을 2 단형 전기 집진기에서의 입자 하전부로서 사용하는

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 나노과학기술사업단

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

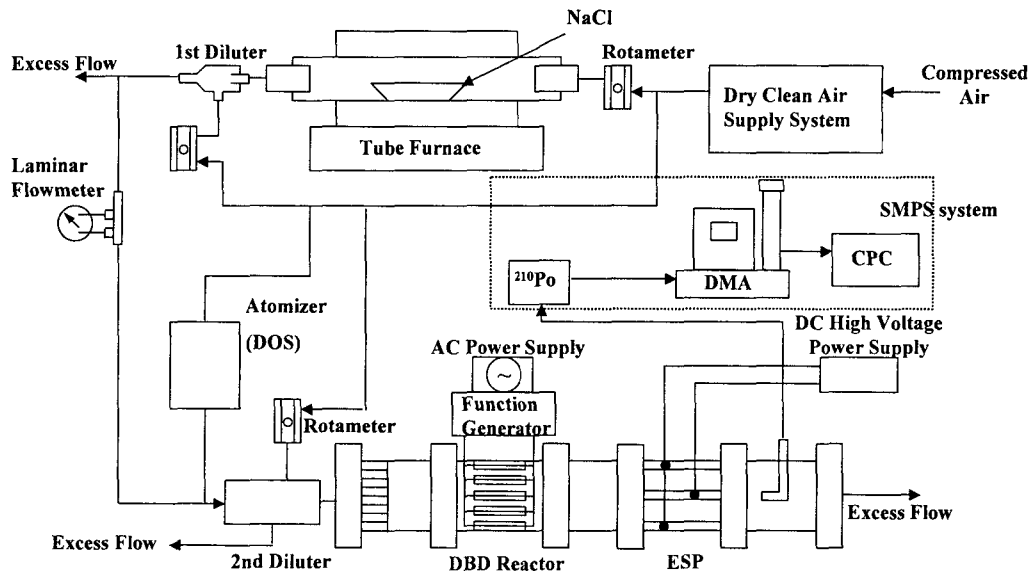


Fig. 1 Schematics of experimental set-up

기술에 대한 연구가 일본 무사시대학 (Musashi Institute of Technology) 에서 NOx 제거와 동시에 서브마이크론 및 마이크론 사이즈의 입자를 대상으로 수행되었다.⁽¹¹⁾ 그러나 1 μm 이하의 미세입자 및 0.3 μm 이하의 나노 크기 입자에 대한 연구는 미비하였다.

본 연구에서는 전기가열 튜브로와 분무형 입자 발생기를 사용하여 1 μm 이하의 미세 입자들을 발생 시켰다. 배리어 유전체 방전을 이용하여 입자를 하전시키고 DBD 부 후단의 전기집진부에서 하전입자를 집진하였다. 입자의 집진효율은 배리어 유전체 방전부와 전기집진부에서의 전압인가 유무에 따라 입경에 따른 수농도의 변화로서 측정하였다. 또한 배리어 유전체 방전부에 가해지는 교류전원의 인가전압 변화, 주파수, 단면유속에 따른 집진 효율을 측정하였다.

2. 실험

Fig. 1 과 같이 실험 장치를 구성하였다. 청정 건조공기 공급부(dry clean air supply)를 통과한 압축 공기 중 일부는 입자 발생을 위해 전기가열 튜브로(electrically heated tube furnace)와 분무형 입자 발생기(atomizer)에 공급되며 나머지는 발생 입자의 희석과 덕트 내의 유량 조절을 위해 사용된다. 전기가열 튜브로에서 기화-응축 현상을 이용하여 발생시킨 NaCl 입자의 농도는 층류 유량계(laminar

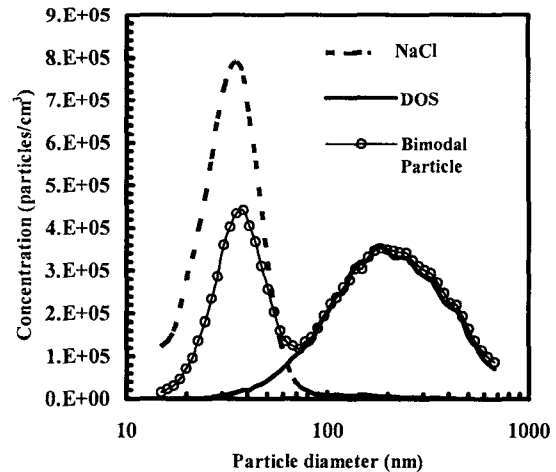


Fig. 2 Particle size distribution

flowmeter)로 조절된다. 분무형 입자 발생기에서는 DOS 액적이 생성되어 전기가열 튜브로에서 발생된 NaCl 입자와 혼합되고, 두 개의 희석관(diluter)에서 청정압축공기에 의해 덕트를 통과하는 유량에 따라 최소 200:1 이상의 비율로 희석된다. 본 연구에서는 Fig. 2 와 Table 1 과 같이 DOS 입자와 NaCl 입자로 이중 모드(bi-mode) 분포를 만들었다. DOS 입자는 약 50~800 nm의 입경 분포를 가지며, NaCl 입자는 20~100nm의 입경 분포를 갖는다.

Table 1 Characteristics of bimodal particles

Test Aerosol	NaCl	DOS
Geometric mean diameter(nm)	31	213
Geometric standard deviation	1.47	1.88
Concentration (#/cm ³)	8×10 ⁵	3.5×10 ⁵

발생된 이중 모드 입자는 배리어 유전체 방전부(DBD)와 집진부(ESP)로 구성된 덕트로 유입된다. 방전부와 집진부를 통과한 입자의 크기분포는 직경이 3/8"인 샘플링 프로브를 통해 0.3 L/min의 유량으로 측정된다. 입자의 크기분포는 에어로졸 증화기(²¹⁰Po), DMA(TSI model 3080) 및 CPC(TSI model 3022A)로 구성된 SMPS (scanning mobility particle sizer, TSI model 3936) 시스템으로 측정된다.

발생 입자의 수농도를 C_0 , 배리어 유전체 방전부만 전원이 인가되었을 때의 수농도를 C_D , 배리어 유전체 방전부와 집진부에 전원이 모두 인가되었을 때의 농도를 C_E 라 할 때, 방전부에서의 입자의 집진효율 η_{DBD} 는 식 (1)로, 방전부와 집진부 모두에서의 입자의 집진효율 η_{Total} 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{DBD} = 1 - \frac{C_D}{C_0} \quad (1)$$

$$\eta_{Total} = 1 - \frac{C_E}{C_0} \quad (2)$$

배리어 유전체 방전부 내의 전극은 두께 0.03 mm, 가로 30 mm, 세로 80 mm인 동박(copper foil)을 사용하였고, 감싸는 유전 물질로 운모(mica)를 사용하였다.

방전극 사이의 간격은 4 mm이고 방전면은 4단으로 구성하였다. 배리어 유전체 방전부로 인가되는 AC 전압은 8~12 kV로 조절하였으며, 주파수는 60~120 Hz로 변화시켰다. 각 주파수 대역에서의 인가전압에 따른 배리어 유전체 방전부의 전류량 변화를 Fig. 3에서 나타내었다. 인가전압이 8 kV 이상일 때 스트리머(streamer)가 발생하며 12 kV 이상의 전압이 인가되면 아크(arc) 방전으로 전이된다. 또한, 인가되는 주파수가 증가하면 방전시 전류량은 증가한다.

방전부를 통과하는 단면 유속은 일반적인 전기

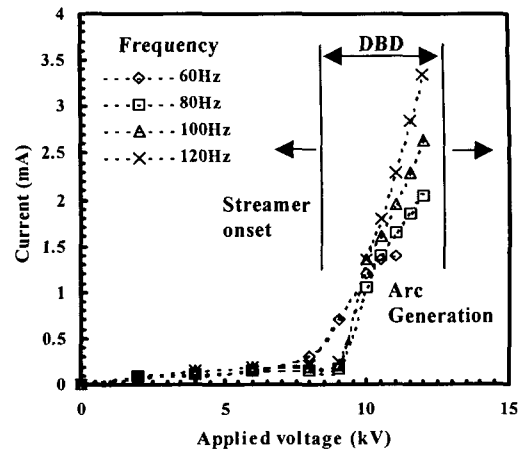


Fig. 3 I-V characteristics under DBD

집진부의 유속이 0.5~2 m/s 인 것⁽¹²⁾을 고려하여, 0.64~1.92 m/s (60~180 L/min)이 되도록 조절하였다. 집진부에서의 인가전압은 DC-8 kV 이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인가전압에 따른 집진효율

배리어 유전체 방전에서 인가되는 교류 전원의 전압을 변화시키면서 방전부와 집진부에서의 집진효율을 측정하였다. 일반적으로 인가전압을 높이면, 전기장(V/m)의 세기가 증가하여 전기장 내의 입자하전 효율이 상승한다. 그러나 DBD와 같은 저온플라즈마에서는 방전에 일정 수준 이상의 전압이 가해졌을 경우 스트리머 영역에서 아크 방전 영역으로 전이되어 하전부가 손상될 수 있으므로 안정적인 방전을 얻을 수 있는 인가전압인 9~11 kV(Fig. 3 참조) 범위에서 실험을 수행하였다. 주파수를 60 Hz로 고정하고, 인가전압을 9~11 kV로 변화시키면서 방전부와 집진부의 집진효율을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

인가전압이 증가함에 따라 방전부와 집진부에서 입자의 집진효율이 높아지는데, 이것은 발생 이온의 농도가 높아지면 방전부를 지나는 입자의 하전효율이 증가하고, 하전입자가 전기장내 유동의 수직방향으로 이동하는 거리가 증가하기 때문이다. 그리고 Fig. 4와 Fig. 5의 결과에서 100nm 근방에서 입자의 집진효율이 저하되는 특징이 나타난다. 이는 Boelter 등⁽¹³⁾와 Yoo 등⁽¹⁴⁾이 언급한 대로 일반적인 전기집진기의 특성과 일치한다.

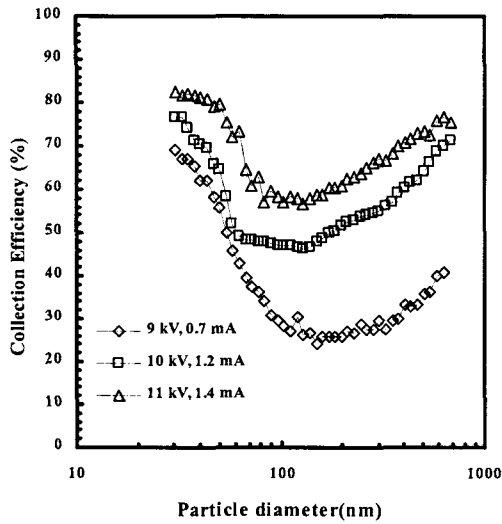


Fig. 4 Collection efficiency
(DBD on, ESP off : 60 Hz, 60 L/min)

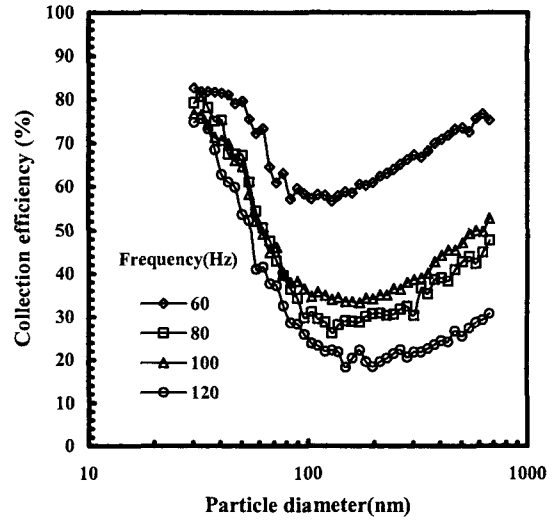


Fig. 6 Collection efficiency
(DBD on, ESP off : 15.4 W, 60 L/min)

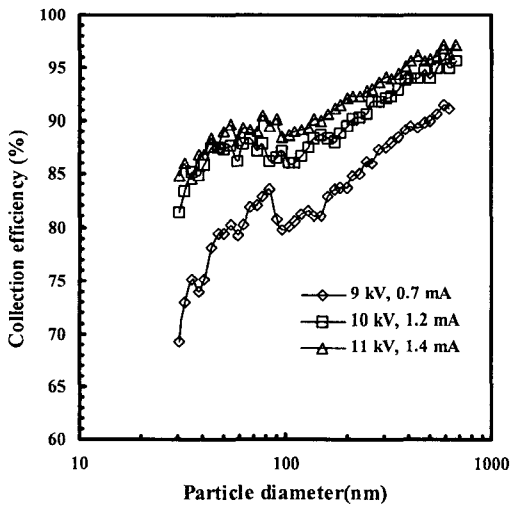


Fig. 5 Collection efficiency
(DBD on, ESP on : 60 Hz, 60 L/min)

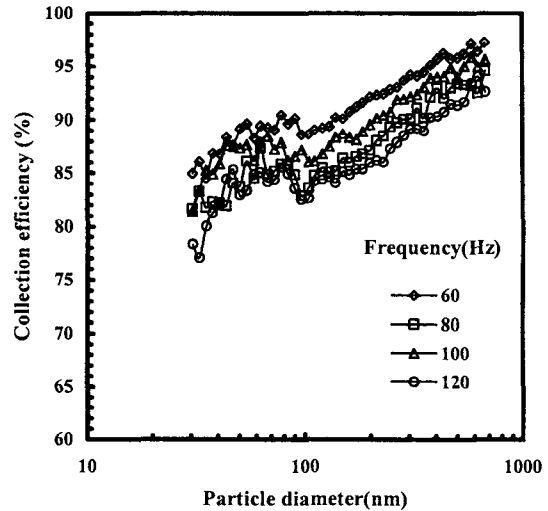


Fig. 7 Collection efficiency
(DBD on, ESP on : 15.4 W, 60 L/min)

3.2 주파수 변화에 따른 집진효율

Fig. 6 과 Fig. 7 는 각각 주파수 변화에 따른 배리어 유전체 방전부와 집진부에서의 집진효율을 보여준다. 하전부를 통과하는 공기의 단면유속은 0.64 m/s (60 L/min)이고, 약 15 W 의 전력량을 유지한 상태에서 실험하였다. 이 때 주파수에 따라

인가전압과 전류는 달라진다. 교류전기장의 주파수를 60 Hz 에서 120 Hz 까지 변화시키면서 하전부와 집진부의 집진효율을 측정하였다. Fig. 6 의 경우 하전부에 인가되는 주파수가 증가할수록 집진효율이 Fig. 7 의 집진기에서의 그것보다 더 급속히 감소하는 것을 볼 수 있는데, 특히 80 Hz 에서 120 Hz 의 경우 60 Hz 에 비해 하전부에서의 집진

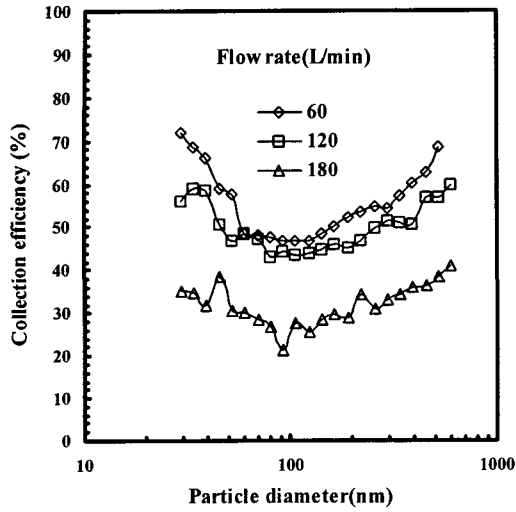


Fig. 8 Collection efficiency (DBD on, ESP off : 60 Hz, 10 kV)

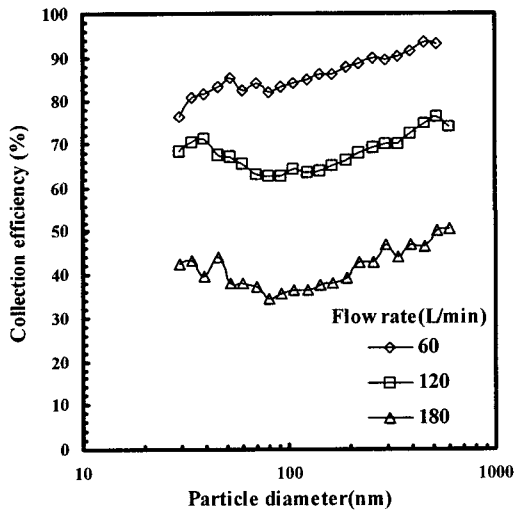


Fig. 9 Collection efficiency (DBD on, ESP on : 60 Hz, 10 kV)

기 효율이 현저하게 감소하는 것을 확인하였다. 60 Hz의 경우 전압이 약 11 kV(rms, 1.4 mA)인 반면, 80, 100, 120 Hz인 경우 약 10 kV(rms)이기 때문에 입자의 하전부 집진효율은 주파수의 함수라기보다는 인가전압에 의해 영향을 크게 받을 것으로 예측할 수 있다. 또한 주파수가 증가하면 하전부의 방전 공간 내에서 입자의 이동거리가 작아지기 때문에 입자가 방전부에 부착될 확률도 감소한

다. Fig. 7의 집진효율의 결과 또한 주파수가 80 Hz 이상이면 상대적으로 효율이 감소한다. 입자의 유동 수직 방향의 이동거리는 전기장의 세기와 입자 하전량에 따라 달라지므로 주파수보다는 인가전압의 세기가 하전부의 입자집진에 영향이 크다.

3.3 처리 유량에 따른 집진 효율

배리어 유전체 방전부를 통과하는 유량을 60, 120, 180 L/min으로 변환하면서 집진효율을 측정하였다. 각각의 유량을 단면유속(face velocity)으로 표시하면 0.64, 1.28, 1.92 m/s가 된다. 인가전압이 10 kV이고 주파수가 60 Hz인 경우 방전부와 집진부에서의 집진 효율 변화를 Fig. 8와 Fig. 9에 각각 나타내었다.

Fig. 8는 유량이 증가할수록 방전부에 집진되는 입자가 감소하는 경향을 보여준다. Fig. 9의 방전부를 통과한 입자의 집진효율도 유량의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 180 L/min의 경우 하전부에서 제거되지 않은 입자의 대부분이 집진부에서도 제거되지 않고 통과했다. 유량이 증가할수록 집진부를 지나는 입자의 체류시간이 줄어들기 때문에 입자가 정전기력에 의해 방전부나 집진부에 집진되기 전에 통과할 확률이 높아지기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 배리어 유전체 방전을 이용하는 전기집진기의 집진특성을 실험을 통해 고찰하였다. 입경 30 nm~1 μm 범위의 입자의 집진효율을 배리어 유전체 방전에 인가하는 전압(9~11 kV), 주파수(60~120 Hz) 및 처리유량(60~180 lpm)에 대해 측정하였다. 모든 경우에서 집진부에 인가되는 전압은 DC - 8 kV로 하였다.

(1) 배리어 유전체 방전을 이용하여 전기 집진기를 구성할 경우 입자의 집진효율은 단면유속 범위가 0.64~1.92 m/s일 때, 약 80~45%로 단면유속 증가에 집진효율이 감소하였다. 단면유속 증가에 따라 입자의 집진효율이 감소하는 것은 하전부와 집진부에서의 입자의 체류시간 감소에 따른 것으로 예측할 수 있다.

(2) 단면유속이 0.64 m/s로 유지되는 배리어 유전체 방전부에 인가되는 전압을 9~11 kV 범위로 변화시켰을 때, 입자의 집진효율은 최저 약 70~85%이었다. 인가전압 증가에 따라 집진효율이 증가하는 것은 인가전압 증가에 따라 하전부

내의 전기장 세기의 증가로 입자와 이온과의 충돌 확률이 증가하기 때문이다.

(3) 단면유속이 0.64 m/s 로 유지되는 배리어 유전체 방전부에 인가되는 주파수를 60~120 Hz 로 변화시켰을 경우, 입자의 집진효율은 최저 약 85~75 % 이었다. 주파수의 증가에 따라 집진효율이 감소하는 것은 같은 전력량 조건에서 주파수 증가에 따라 인가전압이 감소되는 전기적 커플링 현상에 의해서이다. 결국, 집진효율은 주파수의 함수라기보다는 인가전압에 크게 영향을 받는 것으로 예측할 수 있다.

참고문헌

- (1) Penetrante, B. M. and Schultheis, E. S., 1993, "Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control," *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany*, pp. 1~2.
- (2) Falkenstein, Z., 1998, "Application of Dielectric Barrier Discharge," *12th Int. Conf on High-Energy Particle Beams, Beams'98, Haifa, Israel*, June 7~12.
- (3) Penetrante, B. M. and Shultheis, E. S., 1993, "Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control," *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany*, pp. 274~286.
- (4) Pashaie, B., Sankaranarayanan, R. and Dhali, S. K., 1999, "Experimental Investigation of Microdischarges in a Dielectric-Barrier Discharge," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 27, No. 1, pp. 22~23.
- (5) Mizuno, A., 2000, "Electrostatic Precipitation," *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 7, No. 5, pp. 615~624.
- (6) Kang, W. S., Kim, Y. H. and Hong, S. H., 2002, "Spatio-Temporal Image of Single Streamer Propagation in Dielectric Barrier Discharge," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 30, pp. 166~167.
- (7) Breault, R. W. and McLarnon, M., 1992, "Reaction Kinetics for Flue Gas Treatment of NOx," *Proceedings of NATO Advanced Research Workshop on Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control*, Cambridge, pp. 239~256.
- (8) Higashi, M., Uchida, S., Suzuki, N. and Fujii, K., 1992, "Use of Silent Electrical Discharges For Environmental Remediation," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 20, No. 1, p. 1.
- (9) Yamamoto, T., Okubo, M., Nagaoka, T. and Hayakawa, K., 2000, "Simultaneous Removal of NOx and SOx in Flue Gas Emission using Plasma-chemical Hybrid Process," *Industry Applications Conf., Conference Record of the 2000 IEEE*, Vol. 1, pp. 641~647.
- (10) Rosocha, L. A., Coogan, J. J. and Kang, M., 1994, "Use of Silent Electrical Discharges for Environmental Remediation," *IEEE Int. Conf.*, p. 88.
- (11) Kawada, Y., Kubo, T., Ehara, Y., Ito, T., Zukeran, A., Takahashi, T., Kawakami, H. and Takamatsu, T., 1999, "Development of High Collection Efficiency ESP by Barrier Discharge System," *Industry Applications Conference IEEE.*, Vol. 2, pp. 1130~1135.
- (12) Parker, K. R., 1997, "Applied Electrostatic Precipitation," *Brackie Academy & Professional*, pp. 113~115.
- (13) Boelter, K. J. and Davidson, J. H., 1997, "Ozone Generation by Indoor, Electrostatic Air Cleaner," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 27, No. 6, pp. 689~708.
- (14) Yoo, K. H., Lee, J. S. and Oh, M. D., 1997, "Charging and Collection of Submicron Particles in Two-Stage Parallel Electrostatic Precipitators," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 27, No. 3, pp. 308~323.