

유전체 배리어 방전형 2 단 전기집진기의 인가전압 파형별 나노 및 서브마이크론 입자 집진 특성

박재홍* · 변정훈* · 황정호†

Nano and Submicron Sized Particle Collection with Various Voltage Waveforms for Dielectric Barrier Discharge Type 2-Stage ESP

Jae-Hong Park, Jeong-Hoon Byeon, Jung-ho Hwang

Key Words : Particle Collection (입자 집진), Voltage Waveform (전압파형), Dielectric Barrier Discharge (유전체 배리어 방전), 2-Stage ESP (2 단형 전기집진기)

Abstract

Dielectric Barrier Discharge (DBD) in air, which has been established for the production of large quantities of ozone, is more recently being applied to a wider range of aftertreatment processes for HAPs (Hazardous Air Pollutants). Although DBD has high electron density and energy, its potential use as precharging nano and submicron particles are not well known. In this work, we measured I-V characteristics of DBD and estimated collection efficiency of the particles by DBD type 2-stage ESP. To examine the particle collection with various applied voltage waveforms of DBD for nano and submicron sized, bimodal particles were generated by a electrical tube furnace and an atomizer.

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 이루어진 플라즈마 상태가 된다. 코로나 방전⁽⁵⁾과 비교할 때 배리어 유전체 방전은 전자밀도와 전자

에너지가 높고, 발생하는 이온의 농도가 높다.⁽⁶⁾ 이와 같은 특성을 이용하여 배리어 유전체 방전의 NO_x 와 SO_x 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 NO_x, CO_x, SO_x 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 기술에 대한 연구가 일본 무사시대학 (Musashi Institute of Technology) 에서 NO_x 제거와 동시에

* 연세대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

서브마이크론 및 마이크론 사이즈의 입자를 대상으로 수행되었다.⁽¹¹⁾ 1 μm 이하의 미세입자 및 0.3 μm 이하의 나노 크기 입자에 대한 연구는 Kang⁽¹²⁾ 등에 의해 실시되었다. 그러나 이러한 연구들이 진행됨에 따라 유전체 배리어 방전을 비롯한 저온 플라즈마를 이용한 유해가스 제거기술에서 해결해야 할 문제들이 생겨났다. 특히 전기적 방법에 따른 전력소모와 플라즈마 내에서의 무수한 반응에서 원하는 반응의 제어의 어려움에 의한 부산물 생성 및 잔류에 대한 문제가 대표적이다. 유해가스의 제거효율, 전력소모 및 부산물 발생에 대한 대안 연구 중 하나로 최근에는 인가전압의 파형을 다양한 형상으로 변화시켰을 경우 유해가스의 제거 특성, 전력소모 특성 및 부산물 발생에 대한 연구들이 진행되었다. 유해가스 제거와 부산물 생성특성에 관한 연구의 경우는 Ogata⁽¹³⁾ 등에 의해 가스상 물질에 정현, 사각, 삼각 및 톱니파형에 실시되었다. 또한 전력소모의 경우는 유전체 배리어 방전에서의 효율적 측정에 관한 내용은 Feng⁽¹⁴⁾ 등에 의해, 파형 조절에 의한 전력소모 개선에 관한 내용은 Scholfield⁽¹⁵⁾ 등이 수행되었다.

본 연구에서는 유전체 배리어 방전기술을 유해가스 및 미세입자를 동시에 제거하는 기술을 최종 목표로 할 때 그에 대한 기초 연구 중 입자집진에 대한 내용이다. 2 단형 전기집진기에서 유전체 배리어 방전 장치를 입자의 하전장치로 사용하였을 때의 집진효율을 인가전압 파형에 따라 측정하고 입자의 집진효율에 지배적인 영향을 주는 인자를 확인하였다. 입자의 집진효율은 유전체 배리어 방전부에 가해지는 교류전원의 인가전압, 주파수, 단면유속의 변화에 따라 측정하였다.

2. 실험

Fig. 1 과 같이 실험 장치를 구성하였다. 청정 건조 공기 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 회석과 덕트 내의 유량 조절을 위해 사용된다. 전기가열 튜브로에서 기화-응축 현상을 이용하여 발생시킨 NaCl 입자의 농도는 층류 유량계(laminar flowmeter)로 조절된다. 분무형 입자 발생기에서는 (diluter)에서 청정압축공기에 의해 덕트를 발생된 NaCl 입자와 혼합되고, 두 개의 회석관 본 연구에서는 Fig. 2 와 Table 1 과 같이 DOS 입자와 NaCl 입자로 이중 모드(bi-mode) 분포를 만들었다. DOS

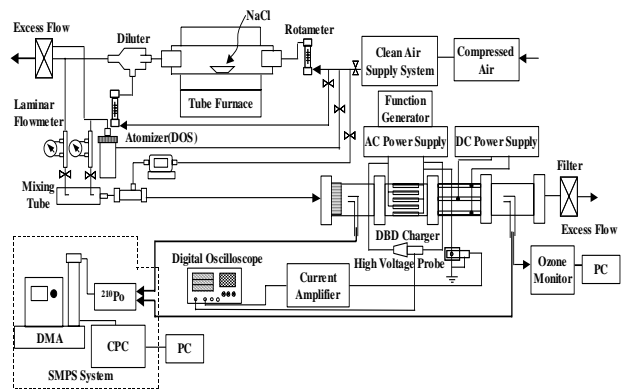


Fig. 1 Experimental Set-up

입자는 약 50~800 nm 의 입경 분포를 가지며, NaCl 입자는 20~100nm 의 입경 분포를 나타내었다.

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 중화기 (²¹⁰Po), DMA(TSI model 3080) 및 CPC(TSI model 3022A)로 구성된 SMPS(scanning mobility particle sizer, TSI model 3936) 시스템으로 측정된다. 발생 입자의 농도를 C_i, 배리어 유전체 방전부와 집진부를 통과한 입자의 농도를 C_o라 할 때에서의 입자의 집진효율 η 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

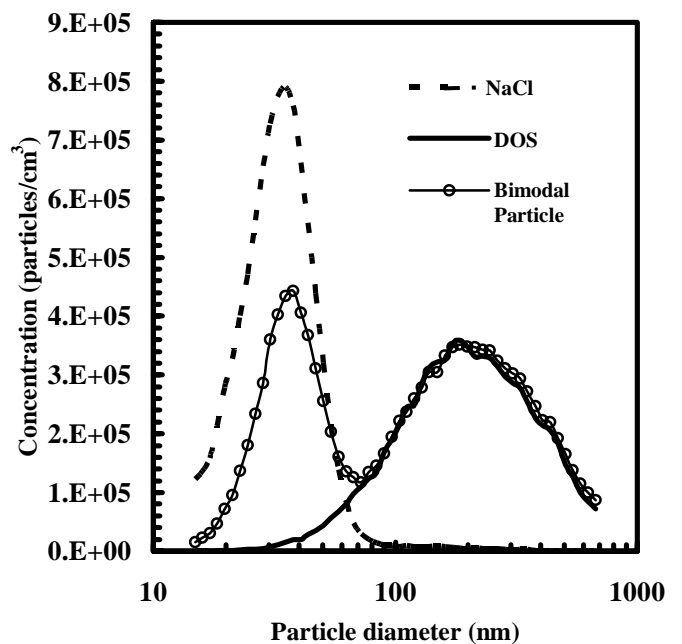


Fig. 2 Particle size distribution

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

$$\eta = 1 - \frac{C_o}{C_i} \quad (1)$$

DBD 발생 전압은 AC 고전압발생기를 통해 7.5 - 8.5 kV(rms) 범위로 인가되었으며, 주파수는 합수발생기에 의해 60-120 Hz 범위로 정현파, 사각파, 삼각파를 발생시켰다. 집진부의 인가 전압은 DC - 5.0 kV 로 고정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 DBD 에 인가되는 전압의 파형을 정현, 사각, 삼각형의 세 가지의 경우에 대해서 집진효율을 확인하였다.

3.1 DBD 의 전기적 특성 (전압-전류)

DBD 하전장치에 인가전압을 0.5 kV 간격으로 증가시키면서 전류를 측정 한 결과를 Fig. 3 에 나

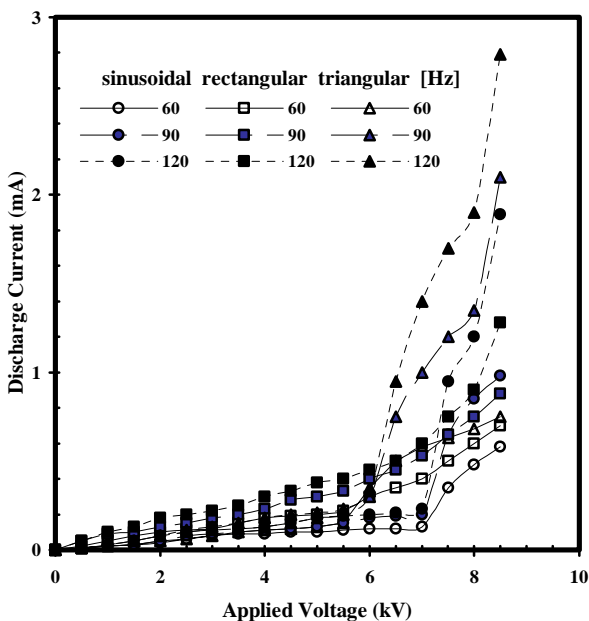


Fig. 3 Electrical characteristics (I-V curve)

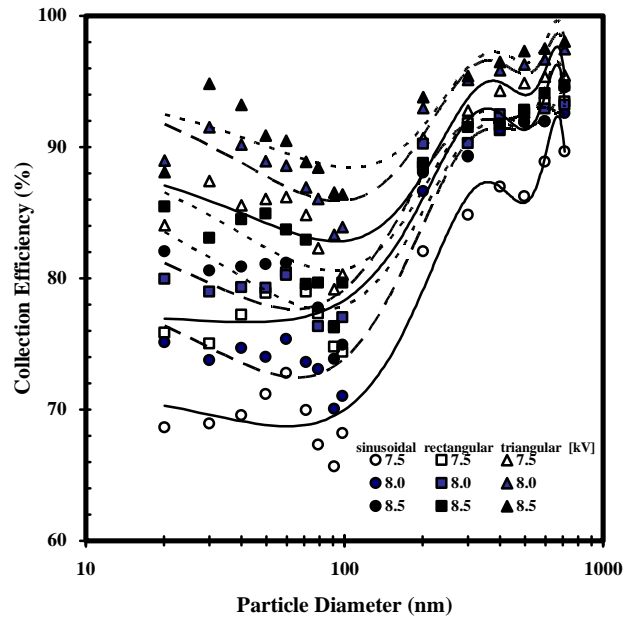


Fig. 4 Collection Efficiency (at 60 Hz, 0.5 m/s)

타내었다. 인가전압에 따른 전류는 주파수를 60-120 Hz 로 고정하여 측정하였다. 주어진 주파수 범위에서 각 파형 조건에 대해 전압을 인가하였을 경우 공통적으로 방전이 이루어지는 전압은 7.5 kV 이상이고 방전이 안정적으로 유지되는 최대 전압은 8.5 kV 이었다. 60 Hz 조건에서는 방전영역 범위에서 정현, 사각, 삼각 파형 각각의 전류는 0.35-0.5 mA, 0.60-0.70 mA, 0.63-0.75 mA 로 정현파가 가장 낮고 삼각파가 가장 높게 형성되었다. 반면, 90 과 120 Hz 조건에서는 정현파가 각각 0.65-0.98 mA, 0.95-1.89 mA, 사각파가 0.75-1.28 mA, 삼각파가 1.70-2.70 mA 로 사각파가 가장 낮고 삼각파가 가장 높게 형성되었다. 주어진 인가전압 범위에서 주파수를 60-120 Hz 로 변경하였을 때 방전전류가 파형별로 다르게 나타남으로 소모되는 전력이 다름을 확인하였다.

3.2 인가전압에 변화에 따른 집진효율

Fig. 4 에는 공기의 유속을 0.5 m/s, 주파수를 60 Hz 로 고정하고 인가전압을 7.5 kV 에서 8.5 kV 로 조절하였을 때의 집진효율을 나타내었다. 인가 전압의 파형 및 전압 인가량을 변화시켰을 때 집진특성은 모두 100 nm 를 기준으로 입경이 더 큰 서브마이크론 영역과 입경이 더 작은 나노 영역 모두에서 집진효율이 증가함을 확인하였다. 하전부와 집진부를 분리하여 입자를 집진하는 2 단형 집진장치의 경우 하전부와 집진부가 함께 설치된 1 단형 집진기와는 다르게 30 nm 이하의 부분하전

영역에서 집진효율이 급격히 감소하나 본 연구에서의 DBD 형 2 단 집진장치에서는 1 단형 집진장치와 유사하게 100 nm 영역에서 집진효율이 급격히 감소하나, 30 nm 이하의 입자에 대해서는 인가전압을 증가시킬 경우 효율이 증가하는 경향을 보였다. 또한 파형을 변화시킴에 따른 집진특성의 변화는 뚜렷하지 않았다. Fig. 3 의 DBD 의 전기적 특성 중 60 Hz 조건에서 인가전압을 7.5 kV 에서 8.5 kV 로 증가하였을 경우 전류량이 정현파에서 가장 낮고 삼각파에서 가장 높는데, 전압에 전류를 곱한 값은 전력으로 이의 양도 전류특성과 동일함을 알 수 있다. Fig. 4 의 결과는 이러한 전력특성과 상응하여 인가전압을 조절하였을 경우 집진효율이 정현파에서 가장 낮고 삼각파가 가장 높았다.

3.3 주파수 변화에 따른 집진효율

Fig. 5 에는 공기의 유속을 0.5 m/s, 인가전압을 8.0 kV 로 고정하고 주파수를 60 Hz 에서 120 Hz 로 조절하였을 때의 집진효율을 나타내었다. 전체적인 집진효율은 인가전압에 변화에 따른 집진효율에서 기술한 것과 같이 인가전압의 파형에 관계없이 100 nm 를 기준으로 이보다 입경이 작은 나노 영역과 입경이 큰 서브마이크론 영역에서는 집진효율이 증가함을 보여준다. 주파수를 60 Hz 로 하였을 경우에는 집진효율이 정현파에서 가장 낮고 삼각파에서 가장 높음을 확인하였으나, 주파수가 90 Hz 와 120 Hz 에서는 집진효율이 사각파에서 가

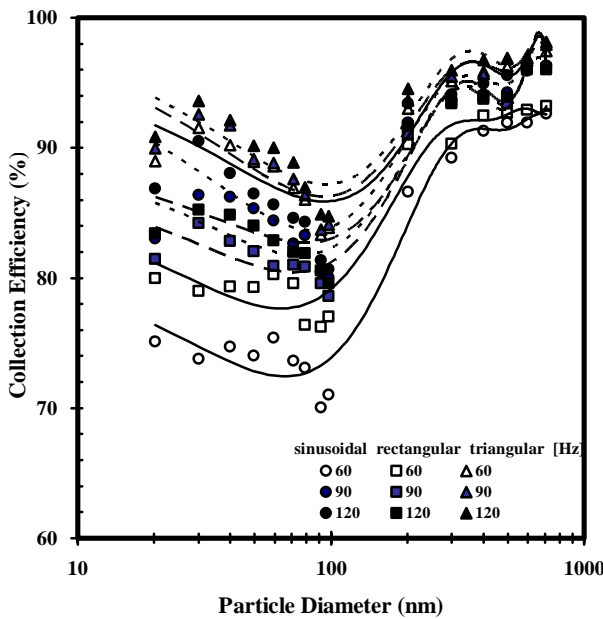


Fig. 5 Collection Efficiency (at 8.0 kV, 0.5 m/s)

장 낮고 삼각파에서 가장 높음을 확인하였다. 이는 Fig. 3 의 결과를 통해 확인할 수 있는데, 주파수 고유특성에 따라 90 Hz 이상에서는 정현파가 사각파 보다 전류량이 크므로 방전전력이 증가하기 때문에 집진효율이 증가하였을 것으로 예측된다.

3.4 유속 변화에 따른 집진효율

Fig. 6 에는 공기의 인가전압을 8.0 kV, 주파수를 60 Hz 로 고정하고 유속을 0.5 m/s 에서 2.5 m/s 로 조절하였을 때의 집진효율을 나타내었다. 유속증가에 따른 집진효율은 파형에 관계없이 모두 감소하는 경향을 보였고 주파수가 60 Hz 조건이기 때문에 집진효율은 정현파에서 가장 낮고 삼각파에서 가장 높음을 알 수 있다. 그러나 유속증가에 집진특성이 다소 변화함을 확인할 수 있다. 유속이 0.5 m/s 에서는 100 nm 를 기준으로 이보다 입경이 작은 나노 영역과 입경이 큰 서브마이크론 영역에서 집진효율이 증가하는 특성을 보였다. 반면, 유속이 1.5 m/s 일 때에는 100 nm 를 기준으로 집진효율이 서브마이크론 영역의 증가기울기는 0.5 m/s 의 경우와 거의 동일하나 나노 영역은 증가하기 않고 오히려 급격히 감소하는 경향을 나타내어 전 입경 영역에 있어서는 기울기가 급격한 선형곡선 특성을 보였다. 또한 유속이 2.5 m/s 일 때에는 100 nm 를 기준으로 집진효율이 서브마이크론 영역에서는 증가 기울기가 1.5 m/s 의 기울기보다 완만해지고 나노 영역에서는 1.5 m/s

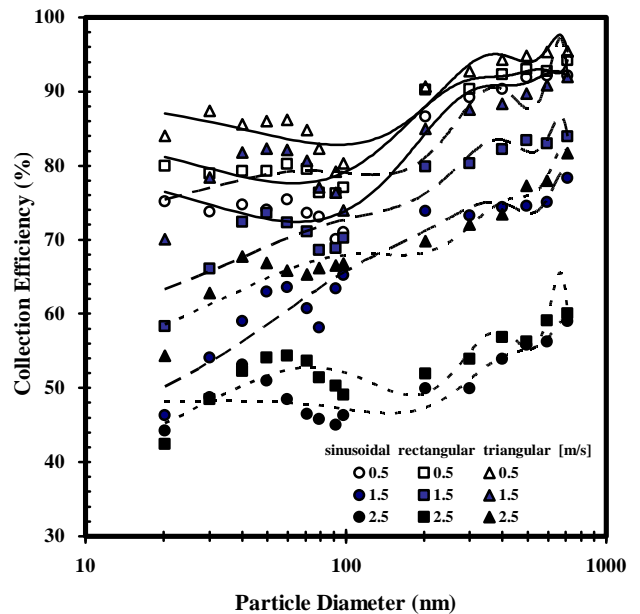


Fig. 6 Collection Efficiency (at 8.0 kV, 60 Hz)

의 감소기울기와 거의 동일하여 전 입경 영역에 있어서는 기울기가 완만한 선형곡선 특성을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 2 단형 전기집진기에서 유전체 배리어 방전 장치를 입자의 하전장치로 사용하였을 때의 전압-전류특성과 집진효율을 인가전압 파형에 따라 측정하고 입자의 집진효율에 지배적인 영향을 주는 인자를 확인하였다. 입자의 집진효율은 유전체 배리어 방전부에 가해지는 교류전원의 인가전압 (7.5-8.5 kV), 주파수 (60-120 Hz), 단면유속 (0.5-2.5 m/s)의 변화에 따라 측정하였다.

(1) 방전 시 전압-전류 특성은 60 Hz 조건에서는 방전영역 범위에서 정현, 사각, 삼각 파형 각각의 전류는 0.35-0.5 mA, 0.60-0.70 mA, 0.63-0.75 mA로 정현파가 가장 낮고 삼각파가 가장 높게 형성되었다. 반면, 90 과 120 Hz 조건에서는 정현파가 각각 0.65-0.98 mA, 0.95-1.89 mA, 사각파가 0.75-1.28 mA, 삼각파가 1.70-2.70 mA로 사각파가 가장 낮고 삼각파가 가장 높게 형성되었다.

(2) 인가전압에 따른 집진특성은 DBD의 전기적 특성 중 60 Hz 조건에서 인가전압을 7.5 kV에서 8.5 kV로 증가하였을 경우 전류량이 정현파에서 가장 낮고 삼각파에서 가장 높은 경향에 상응하였다.

(3) 주파수에 따른 집진특성은 주파수를 60 Hz로 하였을 경우에는 집진효율이 정현파에서 가장 낮고 삼각파에서 가장 높음을 확인하였으나, 주파수가 90 Hz와 120 Hz에서는 집진효율이 사각파에서 가장 낮고 삼각파에서 가장 높음을 확인하였다. 이는 주파수 고유특성에 따라 90 Hz 이상에서는 정현파가 사각파보다 전류량이 크므로 방전전력이 증가하기 때문에 집진효율이 증가하였을 것으로 예측된다.

(4) 유속에 따른 집진특성은 유속이 0.5 m/s에 서는 100 nm를 기준으로 이보다 입경이 작은 나노 영역과 입경이 큰 서브마이크론 영역에서 집진효율이 증가하는 특성을 보였다. 반면, 유속이 1.5 m/s일 때에는 100 nm를 기준으로 집진효율이 서브마이크론 영역은 증가하나 나노 영역은 증가하기 않고 오히려 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 유속이 2.5 m/s일 때에는 100 nm를 기준으로 집진효율이 서브마이크론 영역에서는 증가 기울기가 완만해지고 나노 영역 또한 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

후 기

이 논문은 환경부에서 지원하는 차세대핵심환경 기술 과제 (과제번호: 2003-2-0633)와 산업자원부에서 지원하는 공통핵심기술개발 과제(과제번호: 2003-2-0881)에 의하여 지원되어 이에 감사 드린다.

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) Kang, S.H., Ji, J.H., Byeon, J.H. and Hwang, J., 2003, "Collection Efficiency of Nano Particles by Electrostatic Precipitator using Dielectric Barrier Discharge," *Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 27, No. 11, pp.1542~1547.
- (13) Ogata, A., Miyamae, K., Mizuno, K., Kushiya, S. and Tezuka, M., 2001, "Decomposition of Benzene in Air by Plasma Reactor –Effect of Reactor Type and Operating Conditions-." *Industry Applications Conference*, Vol. 1, pp. 686~692.
- (14) Feng, R., Castle, G.S.P. and Jayaram, S., 1998, "Automated System for Power Measurement in the Silent Discharge," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 34, No. 3, pp. 563~570.
- (15) Scholfield, D.W., Gahl, J.M. and Shimomura, N., 1998, "Effective Field for Arbitrary Waveforms," *25th Anniversary of IEEE Plasma Science Conference*, pp. 309.