

선대 평판형 플라즈마장치의 코로나 방전 및 오존발생 특성에 미치는 바이어스된 3전극의 영향

論 文

57-4-17

Effect of the Biased Third Electrode of a Wire-Plate Type Plasma Reactor on Corona Discharge and Ozone Generation Characteristics

鄭在勝* · 文在德†

(Jae-Seung Jung · Jae-Duk Moon)

Abstract - Corona discharge and ozone generation characteristics of a wire-plate plasma reactor, with a biased third electrode, have been investigated with an emphasis on the role of the bias voltage and frequency applied on the third electrode. It was found that the wire-plate plasma reactor, with the biased third electrode, had a switching characteristic on its I-V characteristics for negative and positive discharges, which is very different from that of a conventional wire-plate plasma reactor without the third electrode. As a result, the corona discharge and ozone generation characteristics of the proposed plasma reactor could be controlled by adjusting the bias voltage and frequency of the third electrode. The corona onset and breakdown voltages, and ozone generation and yield, were increased compared with those of without the third electrode. These, however, reveal the effectiveness of the biased third electrode.

Key Words : Wire-plate type plasma reactor, Third electrode, Bias voltage and frequency, Corona discharge and ozone generation control, Ozone yield.

1. 서 론

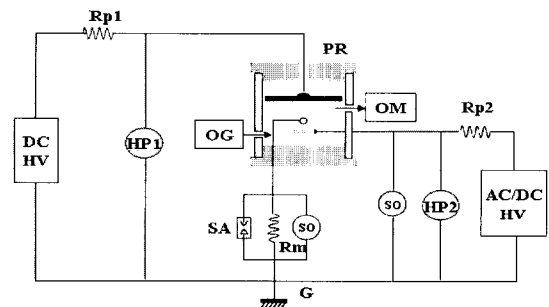
대기 공해는 인류의 삶에 심각한 영향을 주는 환경오염 문제이나, 충분한 해결책은 아직 실현되지 못한 실정이다. 비열 방전 플라즈마 기술은 대기 오염 가스를 효과적으로 제거할 수 있는 장점 때문에 많은 연구가 수행되어 왔다 [1-9]. 즉, 펄스 코로나 방전[2,3], 무성/장벽 방전[2,4], 표면 방전[5], 전자 빔[6] 등의 방법들이 연구되어 왔다. 유해가스의 효과적 제거를 위해서는 강력한 코로나 방전의 발생이 요구된다[3-5]. 왜냐하면 유해가스는 코로나 방전의 전기물리화학적 반응으로 제거되며[2], 전기물리적 반응은 활성전자에 의해 발생되고[7], 전기화학적 반응은 방전(활성전자)으로부터 생성된 활성종(radicals, O₃, 등)에 의해 일어나기 때문이다[2,3,8,9].

최근에 들어 소형 방전생장치가 비열 플라즈마장치 등의 이름으로 생활 환경내의 유해 매진과 유해 가스 제거용 또는 살균 소독용으로 많이 적용되고 있다[10]. 이 경우, 방전장치에서 발생하는 오존이 생활환경 기준치(우리나라 0.1ppm/8hrs)를 초과하지 않으면서, 적절한 살균력을 갖는 오존량을 갖게 해야 하기 때문에, 오존량을 적정량으로 제어 조절하여야 할 필요가 있다. 즉, 오존량이 너무 많은 경우, 인체에 유해하게 되는 문제점이 있게 된다. 따라서 효과적인 오존발생효율은 물론 출력 오존량의 적절한 제어는 매우 필요하나, 종래의 가전용 공기정화장치에 넓게 적용되고 있

는 선대 평판형 장치로는 효율적인 오존발생도 그리고 오존 제어성도 이루지 못하고 있는 실정이다.

본 논문은, 소형 방전발생원으로 폭넓게 적용되고 있는 선대 평판형 방전장치에 금속평판형 3전극을 방전선 주변에 설치하고, 이 3전극에 인가하는 바이어스 전압과 주파수가, 선대 평판형 방전장치의 코로나 방전과 오존발생 특성 향상과 효과적인 제어 가능성을 실험적으로 검토한 결과이다.

2. 실험 장치 및 방법



PR: plasma reactor	OG: oxygen gas bottle
OM: ozone monitor	AC/DC HV: AC/DC high volt
DCHV: DC high voltage	Rm: measurement resistor
Rp1,2: protection resistor	HP1,2: high voltage probe
SA: surge arrester	SO: storage oscilloscope

그림 1 실험 장치 개략도.

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

* 正 會 員 : 慶北大 大學院 電子電氣컴퓨터學部 博士課程

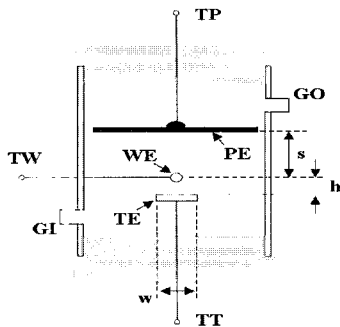
† 교신저자, 正會員 : 慶北大 電子電氣컴퓨터學部 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 1月 15日

最終完了 : 2008年 2月 4日

그림 1은 본 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로서, 3전극이 부설된 선대 평판형 방전 플라즈마장치(PR), 고전압 직류전원(DCHV), 고전압 교류전원(ACHV), 산소 공급장치(OG), 오존 측정장치(OM), 그리고, 코로나 전류 및 고전압 측정장치(R_M, SA, HP, SO)로 구성되어 있다.

그림 2는 평판형 3전극(TE)이 방전선(WE)의 하측에 설치된 선대 평판형 방전 플라즈마장치(PR)의 개략도이다. 방전선 전극(WE)은 스테인리스 단선(SUS wire, 직경 0.18mm, 길이 80mm)을 사용하였고, 평판전극(PE)은 스테인리스 그물 원판(SUS meshed plate, 직경 80mm, 두께 0.6mm)으로 제작되었다. 3전극(TE)은 알루미늄 테이프(Al tape, 길이 80mm, 폭은 2.5mm)를 절연판상에 부착하여, 그림 2와 같이, 방전선 전극(WE)의 수직 하부에 설치하였다. 이때, 3전극(TE)의 상단부에서 선전극(WE) 하단부까지의 높이(h, wire-third electrode height)는 3.0mm, 그리고, 선전극(WE)와 평판전극(PE)과의 간격(s, wire-plate gap spacing)은 10.0mm로, 각각 고정하여 실험하였다.



WE: wire electrode	PE: plate electrode	TE: third electrode
TP: plate terminal	TW: wire terminal	TT: 3rd terminal
w: third electrode width	GO: gas outlet	GI: gas inlet
s: wire-plate gap spacing	h: wire-third-electrode height	

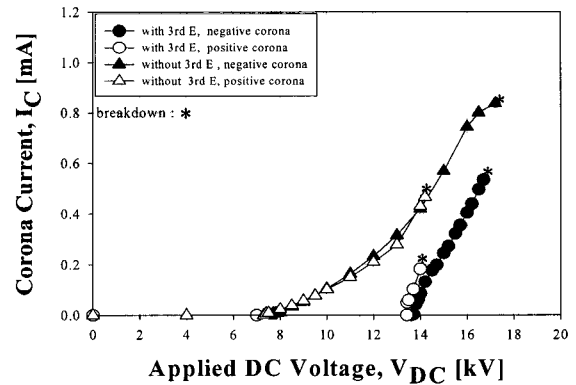
그림 2 제안한 3전극형 플라즈마장치의 구성도.
Fig. 2 Configuration of the plasma reactor with a third electrode.

본 실험에서는 직류 고전압 전원(0~30kV, 20mA)과 3전극 바이어스 전원으로 교류 고전압(V_p=0~5kV, i=1mA, f=0~3kHz)을 사용하였다. 전압은 전압계(DVM, Fluke 75 Digital Voltmeter), 고전압 프로브(HP, HV probe, Tektronix P6015A, 1000:1)로 측정하였고, 전류파형은 측정 저항(R_M=1.00kΩ)과 오실로스코프(SO, storage oscilloscope, Model TDS 3034B, Tektronix)로 측정하였다. 인입 기체로는 산소(99.9% pure)를 1.0ℓ/min(LPM)의 일정 유속으로 가스 인입구(GI)에 주입하였고, 오존농도(ppm)는 가스 출구(GO)에서 오존측정장치(OM, ozone monitor, Dasibi DY 1500)로 측정하였다. 모든 실험은 전자 차폐된 실험실내에서 수행하였다.

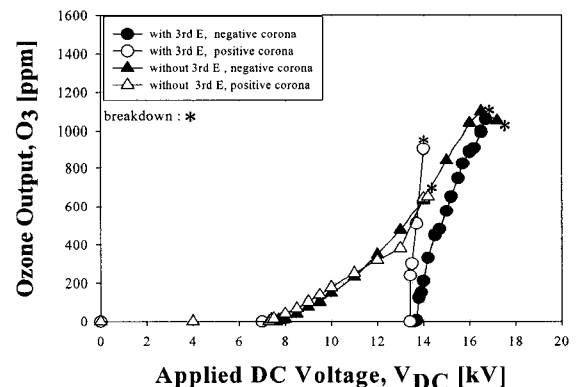
3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 전형적인 선대 평판형 방전장치에 3전극 설치 유무에 따른 코로나 방전과 오존발생 특성을 서로 비교하여

나타낸 것이다. 3전극이 설치되어 있지 않은 경우, 정부 방전이 약 7kV 부근에서 방전이 개시하여, 방전전류는 인가전압의 증가에 따라 서서히 증가함을 보여준다. 3전극이 설치된 경우, 정부 방전은 약 13.5kV의 매우 높은 전압에서 개시하여, 방전전류는 인가전압의 증가에 따라 급격히 증가하는, 큰 특성의 차이를 보여주었다. 절연과피 전압과 최대 코로나 전류는 정 및 부극성 코로나 모두 감소하는 현상을 보여 주었다. 오존 발생량은 3전극이 설치된 경우가 설치되어 있지 않은 경우보다, 정극성 코로나의 경우는 크게 증가하였고, 부극성 코로나의 경우에는 변화가 없었다.



(a) I-V characteristics



(b) ozone generation characteristics

그림 3 3전극 유무에 따른 전류-전압 및 오존 발생 특성.
Fig. 3 I-V and ozone generation characteristics of the plasma reactor with and without the third electrode.

이와 같은 방전전류의 급상승과 절연과피 및 방전 개시전압의 증가는, 방전선 전극 후면에 평판형 3전극이 근접해(w=2.5mm, h=3.0mm, s=10.0mm) 있음으로, 동일 전위인 3전극의 영향에 의해, 코로나 방전선상의 전계가 3전극 반대쪽으로 밀려지고, 또 전체 전속밀도는 감소되었기 때문인 것으로 사료된다. 이는, 전이(lateral transference) 특성이 있는 정방전의 경우[11] 3전극 반대쪽으로 전속이 밀려져서 상대적으로 정 코로나 방전이 고밀도(활성)화되고 따라서 오존 발생량도 증가되나, 방전 전이성이 적고 점광성(点光性)을 갖는 부방전의 경우[11] 전속밀도가 상대적으로 밀집되지 못하기 때문에 오존발생량의 증가가 없는 것으로 사료된다.

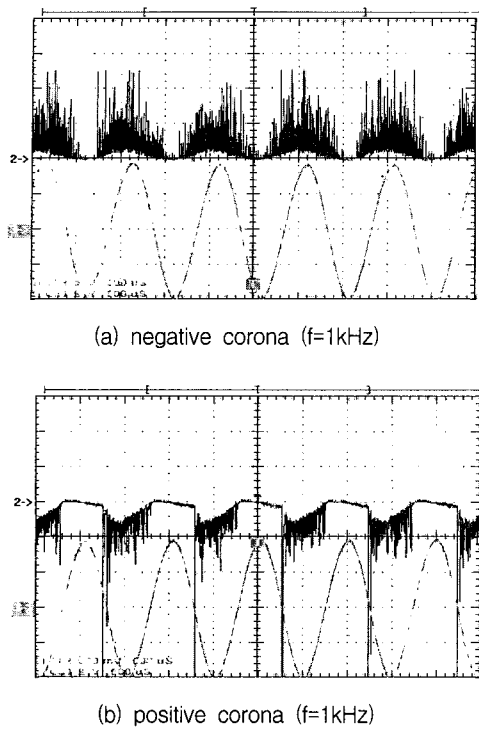


그림 4 3전극의 바이어스 주파수 변화에 따른 코로나 방전 파형.

Fig. 4 Corona oscillograms of the plasma reactor for different biased frequency of the third electrode.

그림 4는, 그림 3의 전류-오존-전압특성의 중간지점(코로나 전류 및 오존발생량의 50%지점, 즉 정극성의 경우 $V_{DC}=13.9kV$, 부극성의 경우 $V_{DC}=15.3kV$)의 전압이 인가되어 있을 때에, 3전극에 바이어스전압($V_p=4kV$, 3전극과 방전 선간의 코로나 개시전압은 $5.3kV$)과 주파수($f=60Hz, 500Hz$, 및 $1kHz$)를 가변하였을 경우의 코로나 방전전류의 파형을 나타낸 것이다. 바이어스전압의 극성이 교번(交番)함에 따라 방전도 발생·소멸되는 스위칭(switching) 특성이 반복됨을 보여주고 있다. 즉, 직류 부극성 코로나인 경우에는 바이어스 전압의 정극성 반주기 때만 코로나 방전이 발생하고, 부극성 바이어스전압의 반주기 때에는 코로나 방전이 발생하지 않는 특성을 보이며, 직류 정극성 코로나인 경우에는 반대의 현상을 나타내었다. 통상의 선대 평판형 방전장치에서는 인가전압의 가감에 의해서만 코로나 방전의 조절이 가능하지만, 본 실험의 결과는 3전극의 인가전압과 주파수로 코로나 방전 개시를 제어할 수 있음과, 또한 3전극 주파수변화로 코로나 발생을 제어함으로써 발생 오존량도 조절할 수 있음을 보여준다.

그림 5, 6은, 그림 3의 오존발생 특성에서 얻는 최대 오존 발생량의 중간지점(최대 오존발생량의 50%지점, 즉 정극성의 경우 $V_{DC}=13.9kV$, 부극성의 경우 $V_{DC}=15.3kV$)을 기준으로 고정하고, 일정 바이어스전압($V_p=4.0kV$)에서 주파수만을 변화시켰을 때, 코로나 방전전류와 오존 발생 특성을 각각 나타낸 것이다. 여기서 $f=0Hz$ 는 바이어스 전극이 접지($V_p=0, f=0Hz$)된 경우를 나타낸다. 그림 5, 6에서, 저주파수

인가의 경우에는 코로나 전류와 오존 발생량이 3전극을 접지하였을 경우보다 크게 감소하였다. 이는 코로나 방전이 지속적으로 발생하는 직류전압 인가의 경우에 비해, 바이어스 전압의 반주기에서만 코로나 방전이 발생하기 때문에, 오존 발생량도 감소하게 된다. 그러나 주파수를 증가시키면, 코로나 전류의 발생 주기가 증가하여 결과적으로 코로나 전류가 증가하고 따라서 오존 발생량도 증가하여, 정극성의 경우에는 $f=1kHz$ 이상, 부극성의 경우에는 $f=3kHz$ 이상이 될 때, 3전극이 접지된 경우보다 오히려 더 오존 발생량이 증가함을 보여준다. 이는 인가 주파수를 제어하여 코로나 방전과 오존발생 특성을 매우 용이하게 조절할 수 있음을 보여줄 뿐만 아니라, 오존발생량도 증가시킬 수 있음을 보여준다. 특히 정극성의 경우 코로나 방전전류와 오존 발생량이 매우 크게 증가시킬 수 있음을 보여준다.

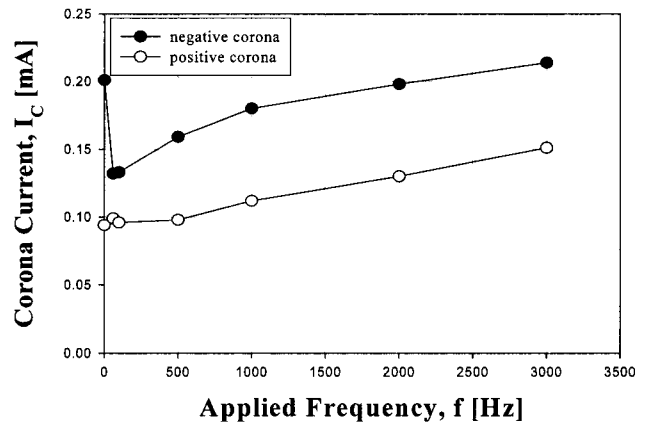


그림 5 3전극의 바이어스 주파수 변화에 따른 코로나 방전 특성.

Fig. 5 Corona discharge characteristics of the plasma reactor for different biased frequency of the third electrode.

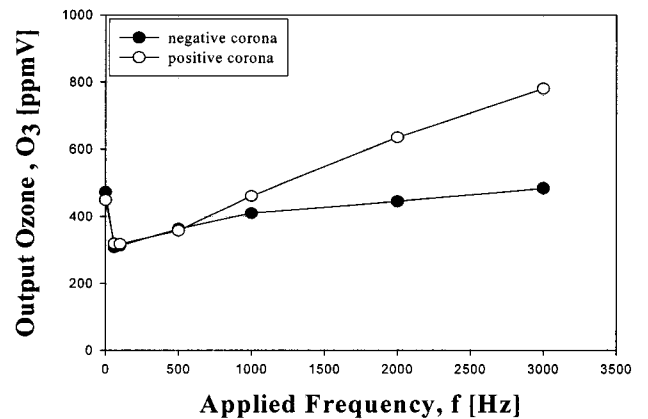


그림 6 3전극의 바이어스 주파수 변화에 따른 오존발생 특성.

Fig. 6 Ozone generation characteristics of the plasma reactor as a function of the biased frequency of the third electrode.

정극성 방전의 경우, 중간 기준점(최대 오존발생량의 50% 지점)에서 바이어스 주파수를 가변시킴으로, 발생 오존량은 약 250ppm에서 400ppm까지 용이하게 조절할 수 있게 된다. 한편, 더 많은 량(최대량까지)의 오존을 제어하려면, 상부 기준점(최대 오존발생량의 80~90%지점)에서, 또는 더 작은 오존량까지 제어하고자 하면, 하부 기준점(최대 오존발생량의 10~20%지점 또는 방전개시 전압보다 낮은 기준점)을 기준해서 제어할 수 있다. 이와 같은 특성은 3전극의 인가 주파수 제어만으로 정 및 부극성 방전의 오존 발생량을 매우 용이하게 또한 매우 넓은 범위(오존발생량을 최소량에서 최대량까지)로 제어할 수 있는 매우 유효한 장점임을 보여준다.

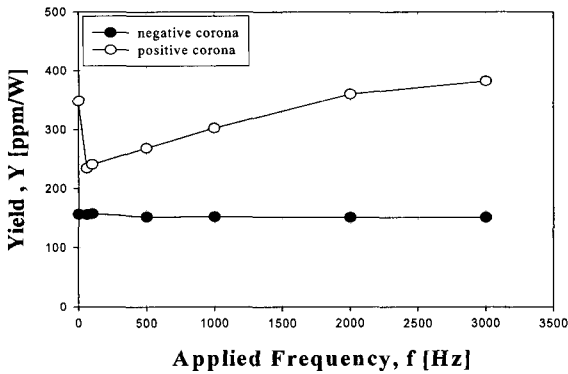


그림 7 3전극의 바이어스 주파수 변화에 따른 오존수율.
Fig. 7 Ozone yield of the plasma reactor as a function of the biased frequency of the third electrode.

그림 7과 표 1은 바이어스전압의 주파수에 따른 오존수율 (Yield, $Y=O_3/P$, $P=IV$)을 각각 나타낸 것이다. 부극성의 경우, 인가되는 바이어스전압의 주파수의 증가로 인하여 코로나 전류의 증가하여도 이에 따른 오존의 증가량이 크지 않기 때문에, 오존수율은 156.5ppm/W에서 151ppm/W 정도로 변화가 거의 없음을 보여준다. 그러나 정극성의 경우, 인가되는 바이어스전압의 주파수가 $f=2kHz$ 이상부터 오존수율이 3전극이 접지되어 있는 경우인 348.1ppm/W보다 증가하기 시작하여 주파수가 $f=3kHz$ 인 경우에는 381.7ppm/W로 점점 증가함을 보여준다.

표 1 3전극의 바이어스 주파수의 변화에 따른 특성 비교.
Table 1 Characteristics comparisons of the plasma reactor for the different biased frequency of the third electrode.

Polarity	f[Hz]	Output O ₃ [ppm]	Output O ₃ Comparison	Yield [ppm/W]	Yield Comparison
Negative corona	0	474	1.00	156.5	1.00
	60	308	0.65	156.1	1.00
	500	363	0.77	152.1	0.97
	1k	410	0.86	152.3	0.97
	3k	485	1.02	151.3	0.97
Positive corona	0	450	1.00	348.1	1.00
	60	319	0.71	234.2	0.67
	500	358	0.80	268.3	0.77
	1k	462	1.03	302.2	0.87
	3k	780	1.73	381.7	1.10

그림 8은, 그림 3의 오존발생 특성에서 얻는 최대 오존 발생량의 중간 지점(즉, 정극성의 경우 $V_{DC}=13.9kV$, 부극성의 경우 $V_{DC}=15.3kV$)을 기준으로 고정하고, 직류 바이어스 전압의 변화에 따른 오존 발생 특성을 나타낸 것이다. 바이어스 주파수를 변화시킨 그림 7의 결과와는 상이함을 보여 준다. 부극성 코로나의 경우, 3전극에 부극성의 전압을 인가하면, 오존 발생량은 감소하여 영(zero)이 되고, 정극성의 바이어스 전압에서는 증가하다가 절연과파 전압에 이르게 된다. 그러나 정극성 코로나의 경우, 정극성의 바이어스 전압을 인가하면 오존 발생량이 감소하여 영(zero)이 되지만, 부극성의 바이어스 전압에서는 오존 발생량이 증가하다가 다시 감소하게 된다. 바이어스전압을 증가시키면, 오존 발생량은 영점을 기준으로 어느 쪽도 감소하는 경향을 보여준다. 이는 바이어스전압을 제어하여 오존발생 특성과 발생량을 용이하게 조절하기에는 부족함을 보여줄 뿐만 아니라, 오존 발생량도 감소되고, 오존수율도 상승하지 않음을 보여준다.

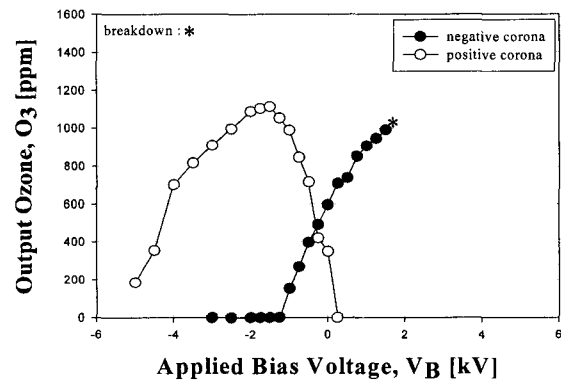


그림 8 3전극의 바이어스 전압 변화에 따른 오존 발생 특성.
Fig. 8 Ozone output of the plasma reactor as a function of the biased voltage of the third electrode.

4. 결 론

선대 평판형 비열 방전 플라즈마 장치의 코로나 선전극 부근에 3전극을 부설하고, 3전극에 바이어스 전압과 주파수 변화에 따른 코로나 방전 및 오존 발생 특성의 효율 향상과 오존의 제어 가능성을 실험적으로 연구 검토한 결과는 다음과 같다.

3전극에 교류 바이어스 주파수를 가변 하였을 경우, 저주파수인 경우에는 3전극을 접지시켰을 경우보다 코로나 전류와 오존발생량이 크게 감소하였으나, 주파수가 증가함에 따라 코로나 전류와 오존발생량이 증가하여 일정 주파수 이상(부방전의 경우 3kHz, 정방전의 경우 1kHz 이상)이 되면 3전극이 접지된 경우의 오존량보다 증가(부방전의 경우는 1.02배, 정극성의 경우는 최대 1.73배)하는 것을 보여 주었다. 부극성인 경우 오존 발생량, 소비전력, 오존 수율도 변화가 거의 없지만, 정극성의 경우에는 오존 발생량뿐 아니라 오존 수율도 크게 증가하는 특성을 나타내었다. 특히 정극성 방전의 경우, 바이어스 주파수를 가변시킴으로, 발생 오존량은 용이하게 조절할 수 있음도 보여주었다.

이상의 결과는, 3전극의 바이어스전압 및 주파수가 코로나 방전 및 오존 발생량 특성에 크게 영향을 주며, 바이어스 전압 및 주파수를 적절히 제어함으로써 발생오존량을 용이하게 또 매우 넓은 범위로 제어할 수 있으며, 오존 수효율도 개선할 수 있음을 보여주었다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다” (KRF-2006-521-D00189).

참 고 문 헌

[1] J. Chang, Recent development of plasma pollution control technology: a critical review, *Sci and Tech of Advanced Materials*, 2, pp. 571-576, 2001.

[2] NATO Advanced Research Workshop on Non-thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Cambridge Univ, England U.K. (Sept, 1992) pp. 1-8.

[3] G. Sathiamoorthy, S. Kalyana, W. C. Finney, R. J. Clark and B. R. Locke, Chemical reaction kinetics and reactor modeling of NOx removal in a pulsed streamer corona discharge reactor, *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 38, No. 5, pp. 1944-1855, 1999.

[4] S. Park, J. Moon, S. Lee and S. Shin, Effective ozone generation utilizing a meshed-plate electrode in a dielectric-barrier discharge type ozone generator, *Journal of Electrostatics*, Vol. 64, No. 5, pp. 255-262, 2006.

[5] T. Oda, R. Yamashita, I. Haga, T. Takahashi and S. Masuda, Decomposition of gaseous organic contaminants by surface discharge induced plasma chemical processing-SPCP, *IEEE Trans on IA*, Vol. 32, No. 1, pp. 118-123, 1996.

[6] T. Hakoda, S. Hashimoto and T. Kojima, Effect of water and oxygen contents on the decomposition of gaseous trichloroethylene in air under electron beam radiation, *Bull. Chem. Soc. Japan*, Vol. 75, pp. 2177-2183, 2002.

[7] M. G. Nickelsen, W. J. Cooper, C. N. Kurucz and T. D. Waite, Removal of Benzene and Selected Alkyl-Substituted Benzene from Aqueous Solution Utilizing Continuous High-Energy Electron Irradiation, *Environ. Sci Tech*, 26, pp. 144-152, 1992.

[8] J. Moon, S. Geum, and G. Lee, Corona Discharge and Ozone Generation Characteristics of a Point-Plate Type Non-thermal Plasma Reactor with Ferroelectric Pellet Barrier, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 38, No. 6, pp. 680-685, 2001.

[9] J. Moon, S. Chung and K. Lee, Control of Corona Characteristics with Third Electrode and Bias

Voltage, *IEEE Trans on IA*, Vol. 1, No. 4, pp. 569-577, 1994.

[10] 신수연, 문재덕, 광촉매와 조합된 코로나 방전 플라즈마 필터의 유해 가스 및 입자 제거 특성, *전기학회논문지*, Vol. 56, No. 1, pp. 151-155, 2007.

[11] E. E. Kunhardt and L. Luessen, *Electrical Breakdown and Discharge in Gases*, NATO ASI Series B: Vol 89b, pp. 24-55, 1982

저 자 소 개



정재승 (鄭在勝)

1978년 4월 14일생. 2004년 경북대학교 공대 전자전기공학부 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석). 현재 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학과 박사과정.

Tel : 053-940-8601
Fax : 053-950-5508
E-mail : bucstual@empal.com



문재덕 (文在德)

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대학교 사범대학 과학교육과(물리전공) 졸업. 1975년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석). 1982년 日本東京大學 대학원 전기공학전문과정졸업(공학박). 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수.

Tel : 053-950-5601
Fax : 053-950-5508
E-mail : jdmoon@knu.ac.kr