

3전극이 부설된 틈새 장벽방전형 플라즈마장치의 코로나 방전 및 오존발생 특성

論 文

56-3-21

Corona Discharge and Ozone Generation Characteristics of a Slit Dielectric Barrier Discharge Type Plasma Reactor with a Third Electrode

文在德* · 鄭在勝*

(Jae-Duk Moon · Jae-Seung Jung)

Abstract - Corona discharge and ozone generation characteristics of a slit dielectric barrier discharge type wire-plate plasma reactor with a third electrode have been investigated. When a third electrode is installed on a slit of the slit barrier, where an intense corona discharge occurs, it is found that a significantly increased ozone output could be obtained. This, however, indicates that the third electrode can activate the corona discharges both of the discharge wire and the slit of the slit barrier in the plasma reactor. As a result, a thin stainless wire, used as the third electrode, has a strong effect to influence the corona discharge of the slit and corona wire, especially to the negative corona discharge. Higher amounts of the output ozone and ozone yield, about 1.27 and 1.29 times for the negative corona discharge, can be obtained with the third electrode, which reveals the effectiveness of the third electrode.

Key Words : Slit dielectric barrier, Wire-plate, Third electrode, Corona discharge, Ozone generation,

1. 서 론

유해가스에 의한 대기 오염은 우리가 직면하고 있는 가장 심각한 환경 문제 중의 하나이다[1-4]. 방전 플라즈마 기술은 유해가스 제거 문제의 가장 효율적인 해결책으로 각광 받고 있다[5]. 다양한 방전, 즉, 펄스코로나 방전[3,5,6], 무성 또는 장벽방전[7], 표면방전[8], 전자빔[5,9], 강유전체 충전층 방전[5,10] 등의 기술들이 질소산화물, 황산화물, 휘발성 유기물, 스프레이용 분사제 등의 오염 가스의 제거를 위해 연구되어 왔다[1-4]. 유해가스의 효과적 제거를 위해서는 강력한 코로나 방전의 발생이 요구된다[3-5]. 즉, 인가하는 전기 에너지가 모두 코로나 방전 발생에 사용되고, 이 코로나 방전이 고에너지 활성전자(energetic electron, 3~15eV)를 효과적으로 생성시켜야 한다. 왜냐하면, 유해가스들은 코로나 방전의 전기물리화학적(electrophysicochemical) 반응으로 제거되며[5], 전기물리적(electrophysical) 반응은 활성전자(9~15eV)에 의해 발생되고[9], 전기화학적(electrochemical) 반응은 활성전자(3~9eV)로부터 이차적으로 생성된 활성종(radicals, 주로 O₃)에 의해 발생되기 때문이다[5,6]. 따라서 효과적인 오존발생 기술은 유해가스 제거수단중의 중요기술(key technology) 중의 하나이다[5].

유전체 틈새장벽(slit dielectric barrier)을 이용한 코로나 방전은 많은 오존을 생성할 수 있다는 점에서 효과적인 비열 플라즈마장치로 보고되고 있다[11]. 즉, 평판전극상에 유전체가 설치된 선대 평판 전극구조의 선전극에 코로나 방전

이 형성되면, 유전체의 표면에는 방전전극에서 이동해 온 이온이 축적되고, 접지전극에는 역극성의 전하가 유도되게 된다. 이 유전체 표면전하와 접지전극의 유도전하 사이에는 강한 전장이 형성되고, 결국 이들 전하는 틈새를 통해 급속히 누설되어 틈새에는 연면방전(surface discharge)이 추가로 생성되고, 오존도 추가로 발생하게 되는 효과가 있다.

그러나 틈새장벽상의 연면방전은 방전선 쪽으로 역전류(back current)를 발생시키며[12], 이 역전류는 소비전력을 증가시키고, 결국 방전효율을 감소시킨다. 따라서 이 역전류를 줄이게 되면, 방전효율을 증가시키는 결과가 된다.

본 논문에서는, 보조전극으로 접지된 3전극을 틈새장벽상에 부설한 3전극형 틈새장벽 방전 플라즈마장치를 제안하고, 이 3전극의 설치 유무시의 틈새장벽상의 코로나 방전특성, 전류-전압 특성, 오존 발생 특성을 종래형 틈새장벽 방전 플라즈마장치와 비교하여 3전극의 영향을 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

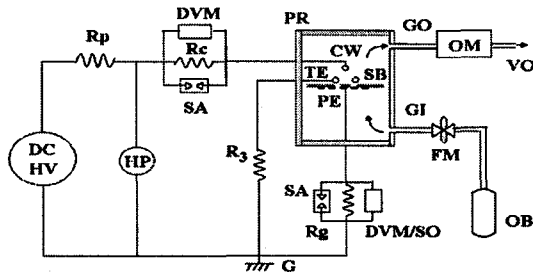
그림 1은 실험장치의 개략도이다. 본 실험장치는, 원통형 방전 플라즈마장치(PR), 고전압 직류전원(DCHV), 유속계(FM)와 산소 공급장치(OB), 오존모니터(OM), 전류 및 전압 측정장치(HP, DVM, SO)로 구성되어 있다. 방전 플라즈마 장치는 방전선 전극(CW), 틈새장벽(SB), 평판전극(PE), 그리고 3전극(TE)으로 구성되어 있다

그림 2는 틈새장벽(SB)과 3전극(TE)이 설치된 플라즈마 장치의 개략도이다. 방전선 전극은 스테인리스 선(SUS wire, 직경 0.18mm, 길이 8cm)으로, 접지전극(PE)은 그물전극(SUS meshed-plate, 직경 8cm)으로 만들었다. 유전체 장벽으로는 운모판(pressed mica sheet, 지름 9mm, 두께 0.5mm, $\epsilon_r=5.0$, $\rho=3.5T\Omega/\square$)을 사용하였다. 이 유전체 장벽 상에는 2개의 틈새(slit, 0.3mm wide)를 장벽의 상하부가 관

* 교신저자, 正會員 : 慶北大 電子電氣컴퓨터學部 教授 · 工博
E-mail : jdmoon@knu.ac.kr

* 學生會員 : 慶北大 大學院 電氣工學科 碩士課程
接受日字 : 2006年 11月 3日
最終完了 : 2006年 12月 5日

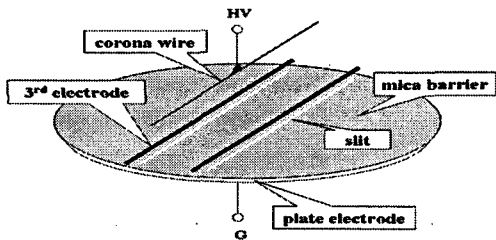
통하게 뚫었다. 3전극(TE)은 틈새의 수직상에 설치하였다. 3전극은 스테인리스 선(SUS wire, 외경 0.18mm, 길이 8cm)으로 하고, 접지 전극간에 고정저항($R_3=20M\Omega$)을 거쳐 접지하였다. 본 실험에서는 3전극선 하단부에서 틈새장벽 상측 표면까지의 높이(h)를 1.0mm로, 방전선과 틈새장벽과의 방전간격(airgap spacing)은 15.0mm로, 틈새간의 간격(L)은 15.0mm로, 각각 고정하였다.



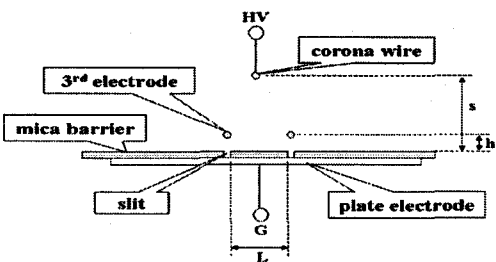
PR : plasma reactor	CW : corona wire	PE : plate electrode
TE : third electrode	SB : slit dielectric barrier	DCHV : DC HV supply
SA : surge arrester	Rc, Rg, R3 : resistors	Rp : protection resistor
G : ground	FM : flowmeter	SO : storage oscilloscope
HP : HV probe	DVM : digital voltmeter	VO : vent out
GI : gas inlet	GO : gas outlet	OB : oxygen bombe

그림 1 실험 장치 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.



(a) 3전극형 플라즈마장치의 구성도



(b) 3전극형 플라즈마장치의 축면도

그림 2 제안한 3전극형 플라즈마장치 구성도

Fig. 2 Configuration of proposed plasma reactor with a third electrode.

본 실험에서는 3종의 플라즈마장치, 즉, 종래형인 통상의 선대 평판형 플라즈마장치(WP), WP에 틈새장벽이 설치된 틈새장벽형 플라즈마장치(WB), WB에 3전극이 설치된 3전극형 플라즈마장치(WT)를 동일 규격으로 제작하고, 이 3종류의 플라즈마장치의 특성을 상호 비교하였다. 전원으로는

직류 고전압(0~40kV, 20mA)을 사용하였다. 전압은 전압계(DVM, Fluke 75 Digital Voltmeter), 고전압 프로브(HP, HV probe, Tektronix P6015A, 1000:1)로 측정하였고, 전류는 측정저항(Rc, Rg, film resistors)를 이용하였다. 인입기체는 산소(99.9% pure)를 1.0ℓ/min의 인입구(GI)로 일정하게 주입하였고, 오존농도(ppmV)는 출구(GO)에서 오존모니터(OM, ozone monitor, Dasibi DY 1500)로 측정하였다

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 틈새장벽형 플라즈마장치의 기본 특성

그림 3은, 통상의 선대 평판형(WP)과 WP의 접지 평판상에 틈새장벽(SB)을 형성한 틈새장벽형 플라즈마장치(WB, WP+SB)의 I-V 특성을 비교하여 나타낸 것이다. WP의 경우, 방전은 코로나선에서만 일어나고, 코로나 전류는 인가전압의 증가에 따라 매우 천천히 상승하며, 높은 코로나 개시전압과 절연과피전압을 나타내고, 최대 전류는 작은 값을 나타낸다. WB의 경우, 코로나 전류는 급격히 상승하여 큰 값에 이르나, 코로나 개시전압과 절연과피전압이 현저하게 낮게 나타났다. 이는 틈새장벽상의 전하의 영향으로 방전이 낮은 전압에서 발생하고 따라서 절연과피전압도 현저하게 낮게 나타남을 보여준다.

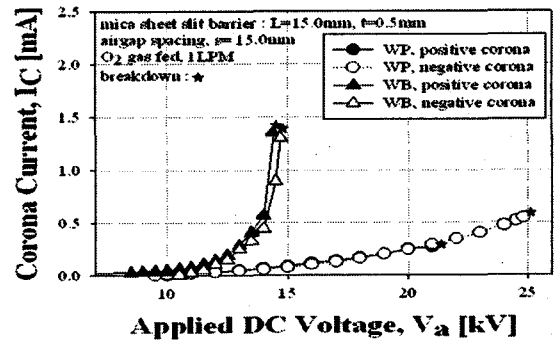
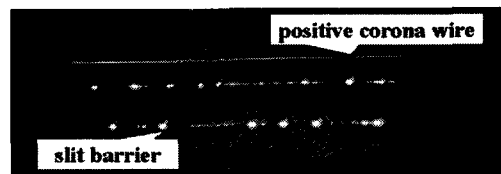
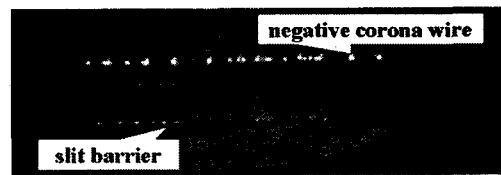


그림 3 실험한 2종의 플라즈마장치의 I-V 특성

Fig. 3 I-V characteristics of two types of plasma reactors.



(a) 정 코로나 방전



(b) 부 코로나 방전

그림 4 WB의 방전선 및 틈새장벽상의 코로나 방전사진

Fig. 4 Photographs of corona discharges on wire and slit barrier of plasma reactor without third electrode (WB).

그림 4는 WB의 방전선전극의 상측에서 촬영한 방전 사진으로, 방전선과 틈새에서 분명한 코로나 방전이 일어남을 보여준다. 즉, 정극성 고전압이 방전선에 인가된 경우, 방전선에는 약한 정극성 코로나 광을 보여주나, 틈새에서는 점광(点光)을 갖는 전형적인 부극성 방전을 보여준다. 부극성 고전압이 방전선에 인가된 경우는, 정극성과는 반대로, 방전선에서는 부극성의 강한 코로나 점광을 보여주고 틈새에서는 약한 정극성 코로나 광을 가짐을 보여준다[12,13].

그림 5는 WP와 WB의 정 및 부극성일 때의 O₃-V특성을 나타낸 것이다. WB가 WP보다 더 낮은 코로나 개시 전압에서 오존이 발생되기 시작하고, 인가전압의 증가와 함께 오존 발생은 증가하여, 최대 오존 값은 절연과피전압 직전에서 얻어졌다. WP의 최대 오존 발생량은 WB의 값보다 매우 많은 값을 가지며, 이는 그림 4에서 보는 바와 같이, 틈새장벽 방전이 추가됨에 의한 효과라고 사료된다.

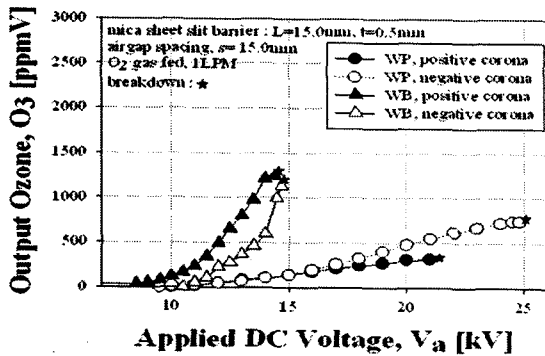


그림 5 2종의 방전 플라즈마장치의 오존발생 특성
Fig. 5 Ozone generation characteristics of two types of plasma reactors.

3.2 3전극이 부설된 틈새장벽형 플라즈마장치의 특성과 3전극의 유효성

그림 4의 WB의 틈새 및 장벽 방전의 발생 기구는 다음과 같이 설명할 수 있다. 방전선에 고전압이 인가되어 방전이 시작되면, 방전선 부근(0.1~2mm)[13]에는 정·부 이온이 혼재된 플라즈마(plasma)가 생성되고, 이들 중에서 방전선과는 반대극성의 이온(ion, ion current, i)들이 접지전극 방향으로 이동하고, 접지상의 유전체 장벽표면에 부착되며, 이 이온량은 시간(time, t)의 증가에 따라 증가하게 된다. 이렇게 부착된 전하(Q=f idt)는 유전체 장벽(mica sheet)상에서 접지 전극쪽으로 누설(relaxation, Q=Q₀exp(-t/τ))되게 되나 [11,12], 본 실험에서 사용한 유전체 장벽(운모판)의 경우, 누설시정수(τ=ρε₀ε_r=155s, ε_r=5.0, ρ=3.5TΩ/□)는 비교적 길다. 따라서 이들 전하들은 장벽 표면에 축적되게 된다. 만약 장벽상의 축적 전하량(Q=C_BV_B, C_B와 V_B는 각각 장벽 상하부간의 정전 용량과 유도전압)이 많아져서 장벽 상하간에 유도전압(V_B=Q/C_B)이 높아지고, 이때 장벽의 상하부가 관통하는 틈새가 뚫려지게 되면, 장벽상의 축적전하들이 이 틈새를 통하여 접지전극으로 빠르게 누설(방전)되게 된다. 결국 장벽상과 틈새에서는 그림 4에서 나타난 것처럼 연면방전(surface discharge)[8.13]이 나타나게 되고, 특히, 누설작용이 집중되는 틈새에서는 강한 방전이 발생하게 된다. 따라

서 WB의 코로나 전류와 오존 발생량은 그림 3과 5에서 나타난 것처럼 급격히 증가하게 된다. 틈새와 장벽상의 강한 코로나 방전은 틈새상에 많은 정·부의 이온들을 발생시키고, 이들 중 방전선 전압과 역극성의 이온들은 방전선 쪽으로 이동되어 큰 역전류(back current)[12]를 형성하게 되어, 방전전력을 증가시켜서 결국 방전효율을 감소시키게 된다.

코로나 방전이 발생하고 있는 틈새상에 접지된 3전극을 설치한다면, 이 3전극은 두 가지 작용을 할 것이다. 하나는 방전선전극상의 전계를 강화하는 작용과, 둘째는 틈새 및 장벽상의 역전류(이온)를 흡수 또는 억제하며, 또한, 방전선으로부터의 이동해 오는 이온들(정전류)을 집속하여 장벽상의 전하를 집속 증대시키는 작용이다. 즉, 틈새장벽이 설치된 선대 평판 전극계에 고전압이 인가되면, 선대 평판전극간의 공극(airgap)에는 공간전위(space potential)가 형성한다. 이 공간전위는 선전극에서 가장 높고, 접지쪽으로 갈수록 낮아져서, 틈새장벽을 거쳐 접지전극에서 영(zero)이 된다[12,13]. 이때에 장벽상에 전하가 축적되어 있게 되면, 이 전하들에 의해 선전극과 장벽사이의 공극(airgap)의 전위는 상대적으로 크게 감소(장벽효과)[3]하게 되고, 이 감소된 전위만큼 장벽과 접지전극간의 전위는 상대적으로 증가시키게 된다.

이때 틈새상에 접지된 3전극이 설치되면, 3전극과 접지전극간에는 등전위(等電位, 즉, 零電位)가 형성되어 유전체 장벽효과[3]가 없어진다(크게 약화).따라서 3전극과 방전선간의 감소된 전위는 환원(크게 증가)되게 되어, 결국 방전선의 방전을 강화시키게 할 것이다. 이때는, 3전극과 접지전극간에는 동일한 영전위이므로 장벽효과가 없어져서, 장벽과 접지전극간의 전계는 크게 감소(零電界)되게 된다. 또한, 3전극은 방전선전극에서 이동해 오는 이온들(정전류)을 3전극쪽으로 집속시켜 틈새장벽상의 전하를 집속 증대시키고, 방전선 전극을 향하는 이온들(역전류)을 억제 또는 흡수하는 작용을 하게 되므로, 이는 결국 틈새장벽방전을 활성화시키는 작용이 될 것이다.

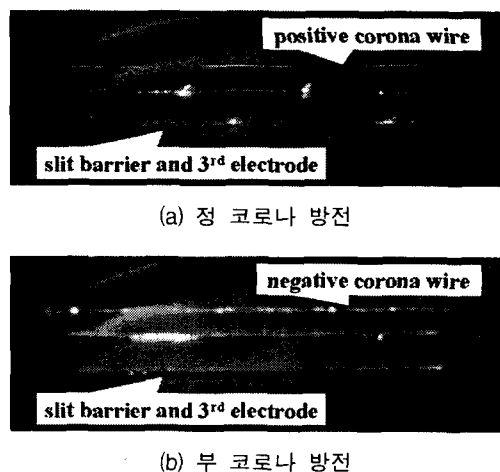


그림 6 WT의 방전선 및 틈새장벽상의 코로나 방전사진
Fig. 6 Photographs of corona discharges on wire and slit barrier of plasma reactor with third electrode (WT).

그림 6은 3전극형 플라즈마 장치인 WT의 코로나 방전 사진으로, 3전극이 부설되지 않은 동일 장치인 WB와는 크

게 차이가 남을 보여준다. 즉, WT의 경우, 방전선과 3전극 사이, 3전극과 틈새사이에도 강한 코로나 방전이 발생되고 진전됨을 보여주며, 특히 부극성 코로나방전은 더욱 강력해짐을 보여준다(다만, 흑백의 사진상에서는 연보라색의 식별이 불분명하나, 칼라 사진으로는 분명히 구분된다). 이는 3전극이 틈새방전상의 이온들은 억제 또는 흡수하고, 방전선의 전계를 강화시키기 때문이며, 결과적으로 틈새상의 부극성 방전을 크게 강화되었기 때문인 것으로 사료된다.

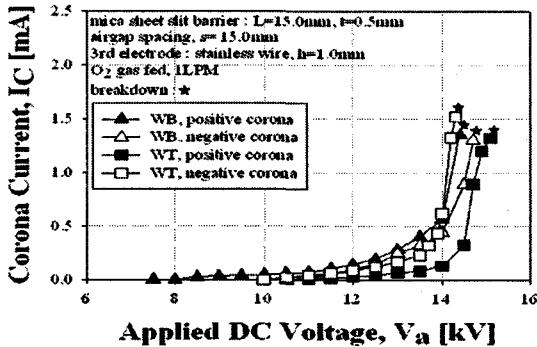


그림 7 제안한 3전극형 플라즈마장치의 I-V 특성
Fig. 7 I-V characteristics of proposed plasma reactor.

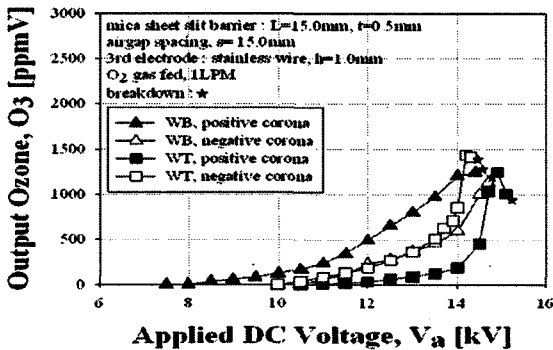


그림 8 제안한 3전극형 플라즈마장치의 O₃-V 특성
Fig. 8 O₃-V characteristics of proposed plasma reactor.

그림 7과 8은 WT와 WB의 I-V 및 오존발생 특성을 비교하여 나타낸 것으로, 최대 코로나 전류(I_{cm})와 발생된 최대 오존량(O_{3m})이 WB쪽보다 WT쪽이 많은 것을 보여준다. 이는 전술했듯이, 3전극의 이온 억제 및 흡수 효과와 방전선상의 전계 강화 효과에 의한 것으로 사료된다. 결국 3전극의 이와 같은 효과가 그림 7과 8에 나타나서, 코로나 전류와 오존발생을 증가시키게 된 원인이라고 생각된다.

한편, 3전극의 이온 억제, 흡수 및 집중 작용은, 3전극과 장벽간의 거리(h), 장벽의 두께, 그리고, 3전극의 크기(선의 직경)와 재질(도체 및 절연 피복), 3전극에의 전압 인가(정부 극성) 등에 의해서 영향을 받을 것이나, 이들의 영향에 대해서는 추가연구를 통해 별도로 발표할 예정이다. 다만, 3전극과 방전선과의 간격은 3전극과 방전선과의 절연과피 전압과 직접 관련됨으로, 본 실험에서는 3전극과 방전선간의 간격(s=15mm), 장벽의 두께(T=0.5mm), 그리고, 3전극과 틈새간의 거리(h=1.0mm)는 s>>h>T로 설정하고, 또 3전극을

저항(R₃=20MΩ)을 통해 접지함으로, 3전극과 방전선간의 절연과피를 방지하고, 틈새에 미치는 3전극의 작용은 크게 하고자 하였다.

표 1은 그림 3, 5, 7, 8에서 구한 WP, WB, 그리고 WT의 특성을 상호 비교한 것이다. WP의 경우, 최대오존 발생량(O_{3m})은 정 및 부극성일 때 각각 최대 인가전압(V_{am})인 21.0kV 및 24.8kV에서 각각 318ppm 및 741ppm이지만, WB의 경우 각각 14.4kV 및 14.7kV에서 각각 1,244ppm 및 1,130ppm으로 크게 증가하였다. 그러나 WB에 3전극을 부설한 WT의 경우, 정 및 부극성의 방전의 경우, 14.9kV와 14.2kV에서 각각 1,251ppm과 1,437ppm으로 나타났다. 특히, 3전극은 정극성일 때보다 부극성일 때에 매우 큰 영향을 주며, WT는 WB에 비하여 1.27배의 많은 오존을 얻을 수 있음을 보여준다. 한편, WB와 WT의 경우, 틈새장벽상의 방전에 의해 방전전류(I_{cm})가 큰 값을 가지나, 3전극의 이온 억제 및 흡수 효과로 소비전류가 작아지기 때문에 단위 전력당의 오존발생량(O_{3m}/W, W=I_{cm}*V_{am})이 WB에 비해 WT가 각각 1.12배 및 1.29배로 증가함을 보여 주었다.

표 1 제안한 3전극형과 기존형 플라즈마장치와의 특성비교
Table 1 Characteristics comparisons of proposed and conventional plasma reactors.

Discharge & Plasma Reactor Type	V _{am} [kV]	I _{cm} [mA]	O _{3m} [ppm]	O _{3m} /W [ppm/W]	Comparison WT with WB		
					O _{3m}	O _{3m} /W	
Positive corona	WP	21.0	0.27	318	56.08	0.26	0.90
	WB	14.4	1.38	1,244	62.60	1.00	1.00
	WT	14.9	1.20	1,251	69.97	1.01	1.12
Negative corona	WP	24.8	0.52	741	57.46	0.66	0.97
	WB	14.7	1.30	1,130	59.13	1.00	1.00
	WT	14.2	1.33	1,437	76.09	1.27	1.29

3전극의 부설과 방전극성에 따라 발생오존량에 차이를 보이는 이유는 그림 4의 정 및 부의 코로나 방전 사진을 보면 설명될 수 있다. 즉, 정극성일 경우 방전선상의 방전은 매우 약하나, 틈새장벽에서의 방전은 활발하게 발생함을 보여준다. 반면에 부극성일 경우, 방전선에서 강한 코로나 방전이 주로 발생하고 틈새장벽에는 방전이 상대적으로 미약하다. 3전극은 정 및 부극성의 방전과 틈새와 장벽상의 방전에 모두 영향을 주나, 특히 틈새장벽상의 방전이 미약한 부극성의 경우, 틈새장벽상의 방전을 크게 활성화시켜서 많은 오존을 발생시키게 되고, 틈새장벽상의 코로나 방전이 이미 매우 활발하게 발생하고 있는 정극성의 경우는, 3전극으로 더욱 활성화되기는 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

결과적으로 3전극을 틈새장벽형 방전 플라즈마장치의 틈새상에 설치함으로 역전류는 억제 및 흡수하고, 정전류는 장벽상에 집중시킴으로 틈새장벽상의 방전을 더욱 활성화시키고, 더욱 증가된 오존발생량과 오존발생 효율을 얻을 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

이 논문에서는 유전체 틸새장벽과 3전극이 설치된 새로운 플라즈마 플라즈마장치를 제안하고, 3전극이 방전과 오존 발생에 미치는 영향을 실험을 통하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

틸새장벽이 설치된 선대 평판형 플라즈마장치의 틸새 수직상에 적정 높이로 부설된 3전극선은 틸새장벽상의 코로나 방전에 크게 영향을 미치며, 특히 부극성의 방전을 매우 활성화시키는 것이 방전사진으로 확인되었다.

3전극은 오존발생에도 크게 영향을 미쳐서 정 및 부극성의 경우 모두 오존발생량이 증가하는 경향을 보여 주었다. 특히 3전극이 설치되어 틸새장벽상의 코로나 방전이 강화된 부극성 방전의 경우, 최대 오존발생량과 단위전력당 오존발생량은 각각 1.27배 및 1.29배의 높은 값을 얻을 수 있어서, 3전극 설치의 유효성이 실험적으로 확인할 수 있었다.

감사의 글

“이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임”
(KRF-2006-521-D00189)

참 고 문 헌

[1] H. H. Kim, et al, Performance evaluation of discharge plasma process for gaseous pollutant removal, Journal of Electrostatics, 55 (2002) 25-41
 [2] M. L. Balmer, et al, Non-thermal plasma for exhaust emission control: NOx, HC, and particulates, ISBN 0-7680-0490-X, USA (1999).
 [3] K. Yan, Corona Plasma Generation, Eindhoven (2001).
 [4] U. Kogelschatz, Ozone generation and dust collection, in electrical discharge for environmental purposes: Fundamentals and Applications, edited by E. M. van Veldhuizen, Nova Science Publishers, Inc., New York 11743 (2000).
 [5] NATO Advanced Research Workshop on Non-thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Cambridge Univ, England U.K. (Sept 21-25, 1992) 1-8.
 [6] G. Sathiamoorthy, et al, Chemical reaction kinetics and reactor modeling of NOx removal in a pulsed streamer corona discharge reactor, Ind. Eng. Chem. Res. 38 (5) (1999) 1944-1855.
 [7] W. Niessen, et al, The influence of ethane on the conversion of NOx in a dielectric barrier discharge,

J. Phys, D: Appl. Phys, 31 (1998) 542-550.
 [8] T. Oda, et al, Decomposition of gaseous organic contaminants by surface discharge induced plasma chemical processing-SPCP, IEEE Trans. on IA, 32, 1 (1996) 118-123.
 [9] M. G. Nickelsen, et al, Removal of benzene and selected alkylsubstituted benzene from aqueous solution utilizing continuous electron radiation, Environmental Science Technology, 26 (1992) 144-152.
 [10] T. Yamamoto, Decomposition of Toluene, o-Xylene, Trichloroethylene, and Their Mixture Using a BaTiO₃ Packed-Bed Plasma Reactor, Journal of Advanced Technology, 1, 1 (1996) 67-78.
 [11] Jae-Seung Jung, et al, Effective Ozone Generation of a Wire-Plate Discharge System with a Slit Barrier, Proceeding of 2005 Annual Meeting of The Institute of Electrostatics Japan (2005) 245-250.
 [12] 日本靜電氣學會編, 靜電氣ハンドブック (1981) 507-519.
 [13] 大木正路, 高電壓工學 (1980) 74-75

저 자 소 개



문재덕 (文在德)

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대 사대 과학교육과(물리전공) 졸업. 1975년 동대학원 전자공학과 졸업(공학). 1982년 일본 동경대학 대학원 전기공학과(공학). 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수.
 Tel : 053-950-5601
 Fax : 053-950-5508
 E-mail : jdmooon@knu.ac.kr



정재승 (鄭在勝)

1978년 4월 14일생. 2004년 경북대 공대 전자전기공학부 졸업. 현재 경북대학교 대학원 전기공학과 석사과정
 Tel : 053-940-8601
 Fax : 053-950-5508
 E-mail : bucstual@empal.com