

평면형 대기압 유전장벽방전장치의 제작 및 동작특성분석

Fabrication of Atmospheric Coplanar Dielectric Barrier Discharge and Analysis of its Driving Characteristics

이 기 용* · 김 동 현* · 이 호 준†
(Ki-Yung Lee · Dong-Hyun Kim · Ho-Jun Lee)

Abstract - The discharge characteristics of Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD) reactor are investigated to find optimal driving condition with adjusting various parameter. When the high voltage with sine wave form is applied to SDBD source, successive pulsed current waveforms are observed owing to multiple ignitions through the long discharge channel and wall charge accumulation on the dielectric surface. The discharge voltage, total charge between dielectrics, mean energy and power are calculated from measured current and voltage according to electrode gap and dielectric thickness. Discharge mode transition from filamentary to diffusive glow is observed for narrow gap and high applied voltage case. However, when the diffusive discharge is occurred with high applied voltage, the actual firing voltage is always lower than that with low driving voltage. The Si_3N_4 , MgF_2 , Al_2O_3 and TiO_2 are considered for dielectric protection and high secondary electron emission coefficient. SDBD with MgF_2 shows the lowest breakdown voltage. MgF_2 thin film is proposed as a protection layer for low voltage atmospheric dielectric barrier discharge devices.

Key Words : Surface dielectric barrier discharge, Atmospheric pressure, Filamentary discharge, Glow discharge

1. 서 론

오늘날 대기압에서는 기체 압력이 높으므로 기체방전에 필요한 전압이 높다. 그리고 기체의 밀도가 높아 평균 자유행정이 진공의 경우보다 매우 짧아 진공의 경우처럼 플라즈마가 잘 확산되지 못하고 특정 부분에서만 방전이 일어나는 특성이 있어 대기압 대면적 플라즈마 생성에 어려움이 있다 [1]. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 평면형 대기압 유전장벽방전장치를 제작하여 방전특성을 분석하고, 이를 바탕으로 안정되고 균일한 플라즈마 소스 제작을 목표로 한다.

평면형 대기압 유전장벽방전장치는 쌍을 이루는 두 개의 전극에 유전체 장벽을 코팅하여 유전분극 현상을 이용하여 전하집적을 통한 역전위 형성으로 방전이 정지되는 펄스방전 때문에 아크방전으로 전환되는 것을 막는 방식이다. 이 방식은 균일한 플라즈마를 얻을 수 있고 장치를 구동하기 위한 회로 구성이 비교적 간단하다. 이러한 플라즈마 반응기의 장점은 현재 많이 이용되는 Jet 또는 Pencil 형태와는 다르게 대면적이 가능하고, 헬륨이나 아르곤가스를 사용하지 않아 플라즈마 발생 유지비용을 절감할 수 있다. 이러한 장점 때문에 표면처리, 표면개질, 박막증착 등 많은 분야에서 광범위하게 사용된다[2-4]. 또한 유리 기판 대신 유연한 재

료를 사용한다면 응용분야가 더욱 확대될 것이다.

일반적으로 평면형 대기압 유전장벽방전장치는 초기에 필라멘트 방전이 주로 일어난다. 이러한 방전은 유전체 표면 전체에서 방전이 일어나지 못하고 어느 특정부분에서만 발생한다. 보통 하나의 필라멘트는 10~100ns 동안 발생이 된다. 이 짧은 시간 내에 많은 전류가 흐르면서 유전체 표면에 손상을 줄 수 있다. 또한 표면처리에 응용 시에는 공간적으로 불균등하게 표면처리가 되는 문제가 발생한다. 따라서 대기압 글로우 방전을 하는 것이 플라즈마 응용에 있어서 중요하다. 이러한 응용 면에서의 중요함 때문에 어떠한 과정으로 필라멘트 방전과 글로우 방전이 일어나는지, 그리고 어떻게 이를 제어할 수 있는지에 대한 연구가 진행되어 왔다[5-7]. 본 실험에서는 평면형 대기압 유전장벽방전장치의 전극간격, 유전체두께 그리고 유전체 보호층의 조건들을 변경하여 방전특성을 분석하고 이를 바탕으로 균일한 플라즈마를 얻고자 하였다.

2. 실험방법

그림 1은 실험에 사용된 평면형 대기압 유전장벽방전장치의 구조이다. 표 1은 방전장치의 상세한 수치를 보여주고 있다. 공정순서는 70×90 mm²의 유리 기판 윗면에 RF 마그네트론 스퍼터를 사용하여 두께 1 μm 로 알루미늄 전극을 형성하였고, 그 윗면에 유전체 두께에 따른 특성을 보기 위하여 프린트 방식으로 도포 높이를 달리하여 유전체를 도포하였다. 여기서 유전체의 목적은 방전 시 정해진 전하의 양을 제한하여 아크 방전으로의 전이를 막고 방전이 전극 전체로 퍼지도록 하는 것이다. 이 유전체 위에 RF 마그네트론 스퍼터를 사용하여 Al_2O_3 , MgF_2 , Si_3N_4 , TiO_2 를 각각 코팅하였

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea
E-mail : hedo@pusan.ac.kr

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea

Received : August 23, 2013; Accepted : November 27, 2013

다. 이들은 2차전자방출계수가 높은 물질로 방전개시전압을 낮추고 플라즈마 형성에 도움을 줄 뿐만 아니라 유전체 보호막 역할을 한다.

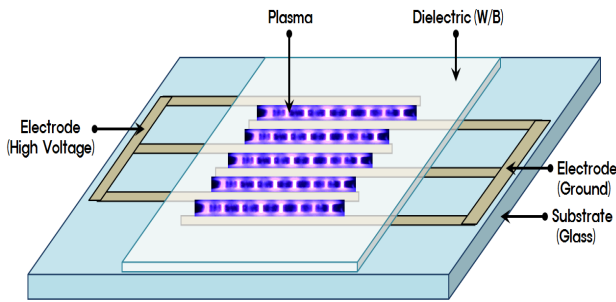


그림 1 평면형 대기압 유전장벽방전장치의 구조
 Fig. 1 Structure of atmospheric coplanar dielectric barrier discharge reactor

대기압 플라즈마 장치의 특성을 평가하기 위해서 그림 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 장치구동을 위해서 로이어 인버터회로(입력전압 6~15VDC, 출력전압 7~20kVpp, 주파수 12~13kHz)를 사용하였다. 모든 실험은 대기압에서 이뤄졌다. 전기적 특성 중에 중요한 파라미터인 전압, 전류 및 주파수를 측정하기 위해서 오실로스코프(LeCroy434, 350MHz)를 사용하였다. 실험과정은 먼저 장치의 기본구조를 표 1과 같이 설계하고 이를 바탕으로 장치를 제작하여 방전특성을 측정하고 분석하였다.

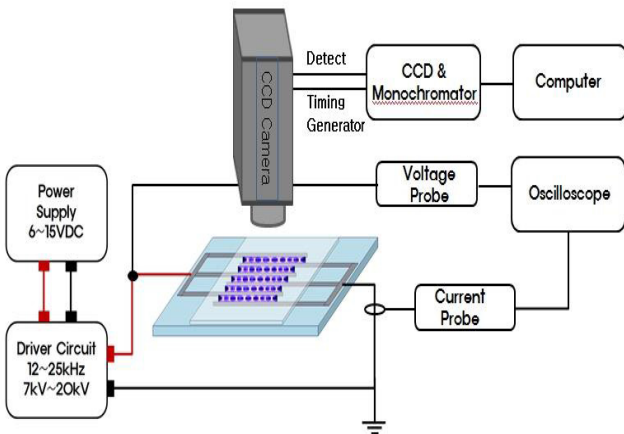


그림 2 실험장치 구성도
 Fig. 2 Experimental setup

3. 결과 및 고찰

3.1 전극 간격에 따른 방전특성

플라즈마 반응기의 전극 간격에 따른 전기적인 특성을 관찰하기 위해서 전극 간격을 1, 2, 3mm로 달리하여 실험을 하였다. 그림 3은 전극 간격에 따른 실험 결과이다. 전극간격 1mm 에서 전압 3.4kV를 인가했을 때 반응기의 상승하는

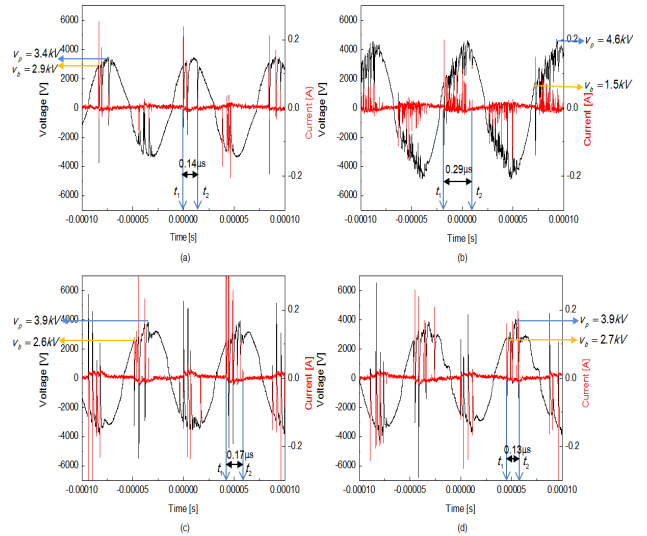


그림 3 전극 간격에 따른 측정된 전압 전류 신호 (a)전극 간격 1mm, 인가전압 3.4kV (b)전극 간격 1mm, 인가전압 4.6kV (c)전극 간격 2mm, 인가전압 3.9kV (d)전극 간격 3mm, 인가전압 3.9kV

Fig. 3 Measured voltage and current waveforms ; (a) 3.4 kV electrode gap 1mm, (b) 4.6 kV electrode gap 1mm (c) 3.9kV electrode gap 2mm (d) 3.9kV electrode gap 3mm

구간에서 전류펄스들이 형성되었다. 전류펄스는 전하의 이동에 의한 전류신호를 나타내는 것으로 한번 생성되었던 필라멘트들은 계속 일정한 시점에서 발생되고 있다. 인가되는 전압이 증가함에 따라 전류펄스의 개수는 증가하지만 세기는 감소하였다. 이는 전기장이 강해짐에 따라서 초기에 방전이 발생하지 않은 곳에서도 방전이 일어날 확률이 증가함에 따른 현상으로 해석할 수 있다. 기존에 펄스의 인접한 영역에서 새로운 펄스들이 생성되면서 단위면적당 이동하는 전하량이 감소되어 펄스들의 세기가 약해진다.

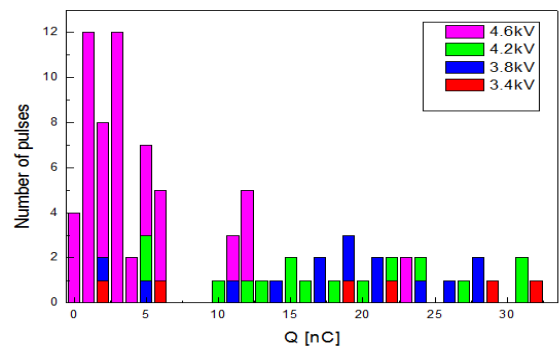


그림 4 인가전압에 따른 전류펄스의 변화
 Fig. 4 Variation of the current pulses of the according to the bias voltage

그림 4에서 인가되는 전압에 따른 한 주기 동안 발생된 전류펄스들을 각각 적분하여 전하 이동량을 계산하였다. 3.4kV에서는 펄스들의 개수는 적지만 단일 펄스의 전하 이

동량은 많다. 3.8kV와 4.2kV에서도 마찬가지로 필라멘트 형태의 필스들이 생성되었고 인가전압이 증가함에 따라 필스들의 개수도 증가하였다. 4.6kV에서 필스들의 개수가 급증하고 단일 필스의 전하 이동량은 줄어들었다. 이 때 필라멘트 방전에서 글로우 방전으로 방전모드의 변화가 발생하였다. 필라멘트 방전과 글로우 방전에 상관없이 총 전하량은 인가전압이 증가할수록 증가하였다. 전류신호에서 필스의 수가 많아지더라도 기존에 있던 필스들의 시간적 위치는 고정된다. 대기압에서 플라즈마의 확산이 어렵고 유전체 위에 쌓이는 전하 또한 공간적으로 차이가 나게 되고, 그 전하 차이는 다음의 방전에서 방전이 일어나는 공간의 위치 차이로 나타나게 된다. 즉 한번 플라즈마가 시작하던 위치에서만 계속 플라즈마가 발생하는 것이다. 전압을 상승시켜서 4.6kV를 인가했을 때, 전체 방전영역에서 균일한 플라즈마가 형성되었다. 이때 방전유지시간은 인가전압 3.4kV(0.14 μs)와 비교했을 때, 0.29μs로 대략 2배로 증가하였다. 그리고 방전 전압도 2.9kV에서 1.5kV로 반으로 감소하였다. 전극 간격 2mm와 3mm에서는 인가전압을 증가시켜도 필라멘트 방전만 확인되었다. 실험에서 최대전압까지 인가하였지만 전극 간격이 멀어지면서 전기장의 감소로 플라즈마가 확산되지 못하고 필라멘트 방전이 유지되었다.

한 주기 동안 플라즈마에서 소비된 에너지와 파워를 전압, 전류 신호로부터 구할 수 있다. 다음의 식으로 에너지와 파워를 계산하였다.

$$\text{방전소비 에너지} = \int_0^T I \cdot V dt \quad (1)$$

$$\text{방전소비 파워} = \frac{1}{T} \int_0^T V \cdot I dt \quad (2)$$

전극 간격에 따른 한 주기 동안 플라즈마에서 소비된 에너지와 파워를 구하면 그림 5(a)와 같다. 전극 간격 1mm에서 플라즈마에서 소비되는 에너지가 가장 높게 나타났다. 그리고 플라즈마 밝기도 가장 높게 나타났다. 전극간격 감소에 따른 전기장도의 증가에 따라 중성기체의 여기와 이온화가 증가하고 이에 따라 전하량도 증가하며 플라즈마의 밝기 또한 밝아지게 되는 것이다. 전극 간격에 따른 실험을

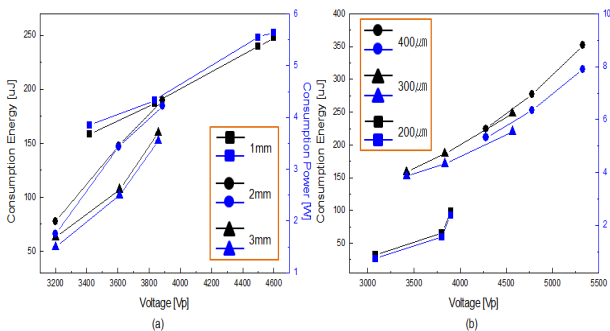


그림 5 플라즈마에서 소비되는 에너지와 파워 (a)전극 간격 (b)유전체 두께

Fig. 5 Variation of the consumption power and consumption energy with the voltage amplitude; (a) Electrode gap, (b) Dielectric thickness

통해서 균일한 플라즈마를 얻는데 전극 간격 조절이 중요한 변수가 된다는 것을 알 수 있다.

전극 간격에 따른 한 주기 동안 플라즈마에서 소비된 에너지와 파워를 구하면 그림 5(a)와 같다. 전극 간격 1mm에서 플라즈마에서 소비되는 에너지가 가장 높게 나타났다. 그리고 플라즈마 밝기도 가장 높게 나타났다. 전극간격 감소에 따른 전기장도의 증가에 따라 중성기체의 여기와 이온화가 증가하고 이에 따라 전하량도 증가하며 플라즈마의 밝기 또한 밝아지게 되는 것이다. 전극 간격에 따른 실험을 통해서 균일한 플라즈마를 얻는데 전극 간격 조절이 중요한 변수가 된다는 것을 알 수 있다.

3.2 유전체 두께에 따른 방전특성

그림 6은 유전체두께에 따른 초기 방전개시전압을 나타낸다. 유전체 200μm에서 가장 낮은 방전개시전압을 보였다. 200μm 이하의 두께에서는 유전체 절연파괴 현상이 나타났다. 유전체 두께가 증가함에 따라 초기 방전개시전압도 증가하였다.

그림 7은 유전체 두께에 따른 전압, 전류 신호를 나타내고 있다. 유전체 두께 200μm에서 인가전압이 증가함에 따라 전류 필스의 개수가 약간 증가하였으나 균일한 방전은 형성되지 못하였다. 유전체 두께 400μm에서 초기 방전은 필라멘트 방전의 형태를 보이다가 인가전압이 상승하면서 전류필

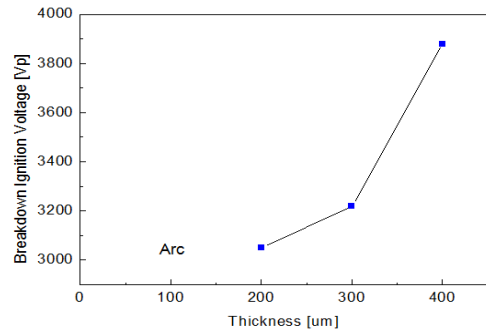


그림 6 유전체 두께에 따른 초기 방전개시전압

Fig. 6 Initial breakdown voltage according to the thickness of dielectric

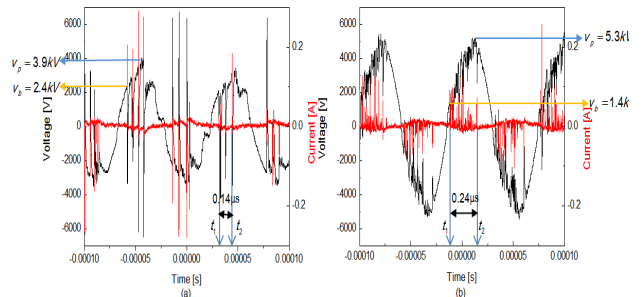


그림 7 유전체 두께에 따른 전압 전류 신호 (a)유전체 두께 200μm (b)유전체 두께 400μm

Fig. 7 Measured voltage and current waveforms ; (a) Dielectric thickness 200μm, (b) Dielectric thickness 400μm

스의 개수가 증가하고 강도는 감소되면서 균일한 글로우 방전형태를 나타냈다. 유전체 두께 200 μm 에서는 낮은 두께로 인해서 플라즈마 확산이 일어나지 않기 때문에 균일한 방전이 되지 못하였다. 초기 방전개시전압은 유전체 두께 200 μm 에서 3.1kV, 400 μm 에서 3.9kV로 나타났다. 하지만 초기방전이 시작되고 나서 유전체 두께 200 μm 에서 2.4kV, 400 μm 에서 1.4kV로 400 μm 에서 방전전압이 더 낮게 나타났다. 유전체 두께 200 μm 에서는 700V가 낮아졌고, 400 μm 에서는 2.5kV가 낮아졌다. 이는 전자들이 유전체 표면에 축적됨으로 이 상태에서 방전전압을 유도하였기 때문이다. 한 주기 동안 플라즈마에서 소비되는 에너지와 파워를 구하면 그림 5(b)와 같다. 결과에서 유전체 두께가 증가하면 커패시턴스의 증가로 소비되는 에너지와 파워가 증가하였다.

3.2 유전체 보호막에 따른 방전특성

유전체를 이온 포격으로부터 보호하고 방전전압을 낮추기 위해서 2차전자방출계수가 높은 Al_2O_3 , MgF_2 , Si_3N_4 , TiO_2 를 유전체 표면에 증착하여 실험을 하였다. 이는 플라즈마 디스플레이 패널(PDP)에서 사용되는 MgO 처럼 균일하고 안정적인 방전에 도움을 준다.

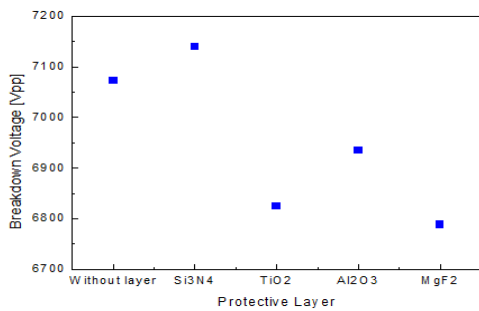


그림 8 보호막에 따른 초기 방전개시전압
Fig. 8 Initial breakdown voltage according to the protective layer

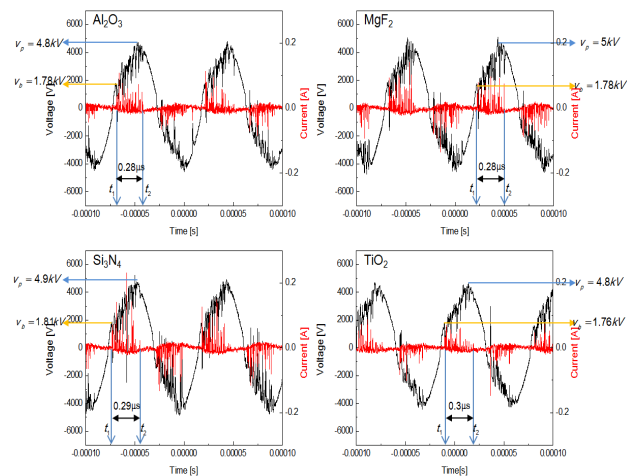


그림 9 보호막에 따른 측정된 전압 전류 신호
Fig. 9 Measured voltage and current waveforms according to the protective layer

그림 8, 9는 실험결과를 보여준다. 유전체 위에 대략 5000 A 두께로 코팅하였고 전극 간격은 1mm, 유전체 두께는 300 μm 이다. 실험결과 초기 방전개시전압은 MgF_2 가 가장 낮았다. 4종류의 보호막 재료 중에서 MgF_2 가 가장 많은 2차전자를 방출함으로서 가장 낮은 전압에서 방전이 발생되었다. 그림 9는 Al_2O_3 , MgF_2 , Si_3N_4 , TiO_2 의 전기적인 특성을 나타낸다. 4종류 모두 인가전압을 증가할수록 전류 펄스의 개수가 증가하는 것을 볼 수 있다. TiO_2 가 방전지속시간은 가장 길면서 방전전압은 가장 낮게 측정되었다. 그리고 전류 펄스도 낮고 안정되게 발생하였다. TiO_2 가 플라즈마를 형성하고 유지하는데 도움이 된다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 2차전자방출계수가 큰 값을 가지는 보호막을 선정하였다. 2차전자방출계수가 큰 경우, 방전전압이 낮아진다. 이 때 2차전자방출계수는 전자 표류 속도의 함수이므로 E/P의 함수가 된다.

$$\gamma_{eff} = \gamma \frac{v_d}{v_d + 0.25 \langle v \rangle} \quad (3)$$

여기서 $\langle v \rangle$ 는 음극으로부터 나와서 중성기체 또는 이온에 도달하기까지 전자의 평균운도를 의미하고, v_d 는 전자 표류 속도를 의미한다. 따라서 E가 전기장의 세기이고 P가 기체 압력일 때, γ_{eff} 는 E/P의 함수로 나타나게 된다. 따라서 대기압에서는 높은 압력에 의해서 2차전자방출계수가 감소하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 12kHz의 고전압 정현파를 이용하여 평면형 대기압 유전장벽 방전장치의 형태, 전극간격, 유전체 두께 그리고 4종류의 유전체 보호막 재료에 따른 전기적 특성을 비교 연구함으로써 평면형 대기압 유전장벽 방전장치를 이용한 대기압 플라즈마에 대한 이해를 높이고 응용을 할 수 있는 발판을 마련했다.

측정된 전류 및 전압 신호로부터 방전전압, 유전체 사이를 이동하는 전하량, 한 주기 동안 소모되는 에너지와 파워를 계산하였다. 초기 방전에서는 필라멘트 방전이 발생되다가 인가되는 전압이 증가하면서 글로우 방전으로 방전이 균일하게 일어났다. 이는 인가전압의 증가로 방전 공간내의 필라멘트의 개수가 증가하고 이온 확산의 영향으로 방전모드가 전이됨을 알 수 있다. 그리고 방전모드와는 상관없이 인가되는 전압이 증가할수록 소모되는 에너지와 파워는 증가하였다.

제작된 플라즈마 장치를 전극 간격 및 유전체 두께를 조절하여 특성을 관찰하였다. 전극 간격이 좁고, 유전체 두께가 낮아질수록 전기장의 세기가 강해 방전전류의 형성이 빠르고 강한 펄스들이 발생하였다. 하지만 얇은 유전체로 인해서 아크로 방전이 전이되거나 방전 확산이 잘 일어나지 않아서 필라멘트 방전에서 글로우 방전으로 방전모드 전이가 되지 않을 수도 있다.

유전체 보호 및 2차전자방출계수를 고려하여 유전체 보호막으로, Al_2O_3 , MgF_2 , Si_3N_4 , TiO_2 를 증착해서 방전특성을 관찰하였다. MgF_2 가 가장 낮은 방전전압을 보였다. 하지만

전체적으로 높은 압력과 높은 전압으로 인해서 효과가 미미하게 나타났다. 연구결과들은 향후 평면형 대기압 유전장벽 방전장치를 응용한 여러 분야들에 적용되고 활용될 것으로 기대된다.

표 1 평면형 대기압 유전장벽방전장치의 제원

Table 1 Parameters of the CDBD arrangement under investigation

Electrodes	Thickness	1 μ m
	Width	2mm
	Gap	1~3mm
Dielectric (White-Back)	Thickness	100~400 μ m
	Relative Permittivity	10

감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구결과임 (No. 2013H1B8A2032267).

References

[1] Valentin I Giblov, Gerhard J Piestch, J. Phys. D: Appl. Phys. 37, 2082 (2004)
 [2] Salge J, Surface and Coatings Technol. 80, 1 (1996)
 [3] Kogelschatz U, Plasma Chem. Plasma Proc. 23, 1 (2003)
 [4] Borcia G, Anderson C A and Brown N M D, Plasma Sources of Sci. Technol. 12, 335 (2003)
 [5] N. Gherardi, G. Gouda, E. Gat, A. Ricard, and F. Massines, Plasma Source of Sci. Technol. 9, 340 (2000)
 [6] N. Gherardi, F. Massines, IEEE Transactions On Plasma Science. 29, 536 (2001)
 [7] I. Bruer, C. Punset, H-G. Purwins, and J. P. Boeuf, Journal of Applied Physics. 85, 7569 (1999)

저 자 소 개



이 기 응 (李 基 隆)

1983년 3월 26일생. 2010년 부경대 공대 전기공학과 졸업. 2013년 부산대학원 공대 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사).

Tel : 051-510-2746

Fax : 051-510-1498

E-mail : legna7248@pusan.ac.kr



김 등 현 (金 東 鉉)

1961년 1월 9일생. 1984년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 부산대 PDP 연구소 연구원

Tel : 051-510-1544

Fax : 051-510-1498

E-mail : dhkim11@pusan.ac.kr



이 호 준 (李 晸 駿)

1966년 10월 14일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학부과 졸업(공학박). 현재 부산대 공대 전자전기컴퓨터공학과 정교수

Tel : 051-510-2301

Fax : 051-513-0212

E-mail : hedo@pusan.ac.kr