

히터 일체형 하이브리드 단판형 플라즈마 방전소자

최우진, 최은혜, 성형석, 권진구, 이성의 

한국산업기술대학교 신소재공학과

One-Plate Type Hybrid Plasma Discharge Device with Heating Element

Woo Jin Choi, Eun Hye Choi, Hyeong Seok Sung, Jin Gu Kwon, and Seong Eui Lee
 Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung 15073, Korea

(Received April 9, 2019; Revised May 4, 2019; Accepted May 9, 2019)

Abstract: Recently, the application of atmospheric plasma technology in air filtration is increasing. Sterilization by an atmospheric plasma device is very effective. However, ozone gas, which is generated during atmospheric plasma formation, poses a hazard to human health. To reduce the ozone gas during plasma discharge, we fabricated a one-plate hybrid plasma discharge device with a heating element, which can decompose ozone gas effectively by a simple heating action. In this study, we evaluated the plasma discharge characteristics and ozone concentrations with various Ar flow rates and temperatures. With increasing Ar gas flow rate, the ozone concentration and spectrum intensity increased till an Ar gas flow rate of 60 sccm, and decreased thereafter. When discharged in high temperature, the ozone concentration and spectrum intensity decreased. Further, to evaluate the state of the treated surface under various plasma discharge and heating conditions, we measured the variation in the contact angles on the surface. Regardless of the temperature, the contact angle increased with increasing discharge voltage. However, the contact angle increased when discharged at high temperature.

Keywords: Ozone concentration, Heat element, Hybrid plasma discharge device

1. 서론

플라즈마 기술은 반도체, 디스플레이 등 여러 산업 분야에 응용되고 있다 [3,4]. 최근에는 바이오산업에서 활발히 연구가 진행되고 있으며, 특히 상압 플라즈마를 활용한 의료기 및 미용기기에 적용되고 있는 추세이다 [1-4]. 상압 플라즈마 방전 시 공기 중에 존재하는 산소 분자들의 반응에 의해 오존 기체가 발생하게 된다. 오존 기체는 살균력이 강한 물질 중 하나인데, 농도가 상승하게 되면 인체에 해로운 영향을 끼치게 된다 [2,3,7]. 이를 방지하기 위해 시중에 유통되고 있는 플

라즈마 피부 미용기기들은 플라즈마 방전구조, 유전체의 유전율 혹은 대기압 외의 혼합가스 등을 조절하여 대기압 플라즈마 방전 시의 오존 발생량을 조절하고 있다. 가스 공급형 플라즈마 방전소자의 경우에는 플라즈마 방전 시 혼합가스를 유입할 수 있는 가스통이 필요하여, 의료기기로서는 적합하지만 휴대용 피부 미용기기로서는 용도가 제한되고 있다 [1]. 이에 대한 해결방안으로 유전체를 이용한 플라즈마 방전소자는 방전구조와 유전체의 유전특성을 이용하여 플라즈마 방전 시 오존 발생량을 줄이는 방법을 사용하고 있다 [3,7]. 이 경우, 피부와 밀접한 거리에서 장비를 구동하게 되는데, 구동 환경의 변화에 의해 아크 방전이 발생할 수도 있고 오존 발생량이 급격히 변하는 위험성이 따를 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다 [4].

본 연구에서는 사파이어 기판 양면에 방전전극을 형성함으로써 기존에 존재하던 dielectric barrier discharge

✉ Seong Eui Lee; [cwjin9403@kpu.ac.kr](mailto:cwjjin9403@kpu.ac.kr)

Copyright ©2019 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(DBD) 형식이 아닌 단판형 및 오존 발생량의 제어를 위해 히터 일체형 방전소자의 구조를 제안하였다. 열선에 전압을 인가하여 열을 발생시킴으로써 열 발생 여부에 따른 플라즈마 방전 특성 및 오존 발생량을 측정하고 평가하였다. 또한, 방전소자에서 발생하는 플라즈마의 효과를 알아보기 위해 유리기판 상에 조건별로 플라즈마 처리 후, 접촉각의 변화를 관찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 단판형 플라즈마 방전소자 제작

그림 1은 방전소자의 공정을 도식화하여 나타낸 것으로서, 공정을 단순화 및 플라즈마 방전 시의 안정성을 부여하기 위해 각 공정마다 스크린 프린팅, 건조 및 소성 공정을 진행하였다.

방전 전극은 Ag paste (에이디엠티㈜)를 screen printing법을 이용하여 sapphire 기판 위에 형성하였다. Sapphire 기판 앞면에는 가로 및 세로의 길이가 3 cm인 메쉬 형태의 전극을 형성하였고, 이때, 전극 간 간격은 2 mm로 형성하였다. 뒷면에는 가로 및 세로의 길이가 2.4 cm인 사각형 모양의 단면형태인 전극을 형성하였다. 각각의 면에 screen printing 진행 후 수분 제거를 위해 건조로에서 120°C로 10분 동안 건조를 진행하였다. 그 후 소성조건은 승온 속도 5°C/min으로 설정하였고 450°C에서 30분, 550°C에서 60분 동안 온도를 유지하였다.

발열전극과 플라즈마 방전전극 간의 전기적 간섭에 의한 오방전 현상을 방지하기 위해 발열전극과 방전전

극 사이에 절연층을 형성하였다. 절연층은 전기와 반응성이 낮은 물질로 이루어진 paste를 이용하였다. 절연층은 전 단계와 동일하게 screen printing기법을 이용하여 패턴 형성 후 건조 및 소성 공정을 진행하였다. Screen printing 시 가로 4.5 cm, 세로 3.9 cm인 사각형 형태의 마스크를 이용하였으며 총 1회 프린팅을 진행하였다. 프린팅 후 박막의 균일성을 위해 1분간 leveling을 진행하였고 그 후 120°C에서 10분간 건조하였다. 건조 후 800°C 온도를 180분 동안 승온시키고 800°C에서 15분간 유지하는 조건에서 소성 공정을 진행하였다.

발열전극은 전압 인가 시 낮은 전압에서도 높은 열이 발생할 수 있도록 전기저항이 높은 paste를 이용하여 형성한다. 일정 면적에서 높은 저항 값을 갖기 위해 미로형태의 패턴이 형성된 마스크를 이용하여 전극을 형성하였다. 공정 과정은 상기 단계와 동일하게 screen printing, 건조, 소성 공정 순으로 진행하였다. 발열전극은 선폭 300 μm, 전극 간의 간격은 500 μm 크기로 형성하였으며, 총 가로 및 세로 길이는 3.4 cm × 3.6 cm의 면적으로 형성하였다. 프린팅 후 막의 균일성을 위해 1분 leveling을 진행한 후 120°C에서 10분간 건조하였다.

2.2 방전소자의 방전 및 오존 특성 평가

그림 2는 방전소자의 전극에 전압 인가 시 발생하는 플라즈마를 도식화하여 나타낸 것이다. 메쉬형 전극 사이에 존재하는 기체들의 절연 파괴 현상이 발생하면서 플라즈마가 발생하게 되고 플라즈마에 의해 산소 원자간 반응이 일어나서 오존 기체가 발생하게 된다. 그림 3은 방전소자의 특성 평가 과정을 도식화하여 나타낸 것

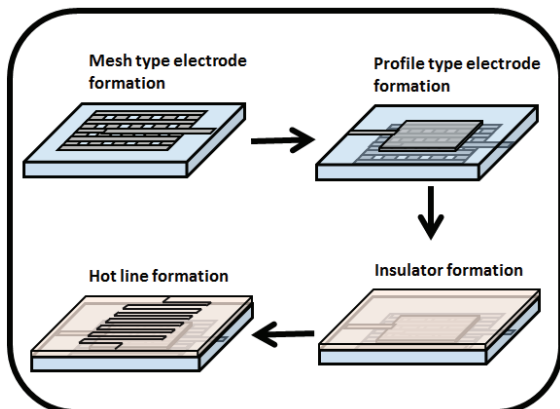


Fig. 1. Discharge device formation flow.

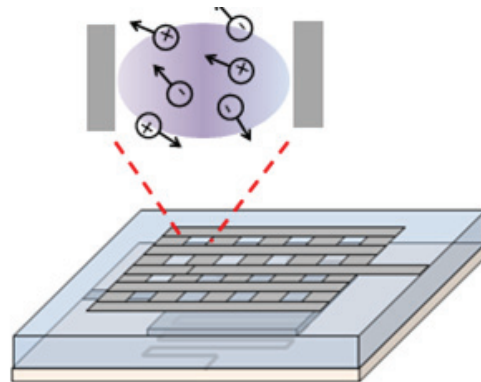


Fig. 2. Schematic structure of discharge device.

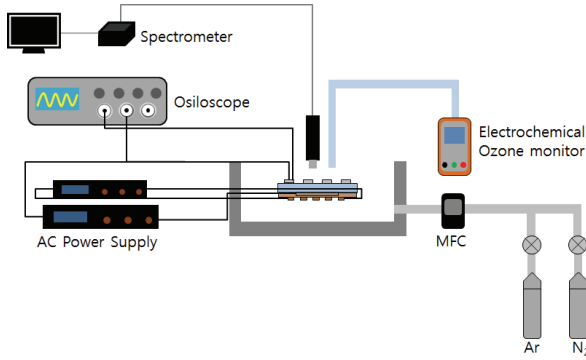


Fig. 3. Schematic structure of device plasma discharge characteristic and ozone concentration evaluation.

Table 1. Discharge condition of device.

Classification	Unit	Value
Voltage	V	1,500
Flow rate	sccm	20~100
Temperature	°C	0~100

이다. AC power supply (Ftlab사 HPI 1500)를 이용하여 방전소자의 인가전압을 조절하였고, MFC를 이용하여 방전 기체의 종류 및 유량을 조절하였다. 또한, 열선의 열을 발생시키기 위해 전압용량이 낮은 AC power supply (Ftlab사 PDS 2000)을 사용하였다. 오존 발생량 측정에는 electrochemical ozone monitor (Meggram사 cz-10)를 이용하였고, 흡입구는 방전소자로부터 0.5 cm 이격된 거리에 설치하여 오존 발생량을 측정하였다. Spectrometer (Hamamatsu사 minispectrometer)를 이용하여 플라즈마 방전 시의 스펙트럼을 측정함으로써 플라즈마 방전 특성을 고찰하였다. 방전소자의 플라즈마 특성 및 오존 발생량 특성을 확인하기 위해 표 1과 같이 조건을 설정하였다. 조건의 항목은 방전전극의 인가전압, 방전 기체의 종류 및 유량, 열선 전압 인가 여부로 분류하였다.

2.3 접촉각 측정

일반 slide glass 표면에 표와 같이 방전전극의 인가전압, 플라즈마 처리시간, glass와 방전소자와의 간격 그리고 방전 기체 종류 및 유량을 조건별로 플라즈마 처리를 한 후 접촉각측정기(Surfacetech사 GS-X 150)를 사용하여 3 cm 거리에서 D.I water를 떨어뜨리고 접촉각을 측정함으로써 표면의 친수화 정도를 확

Table 2. Condition of plasma treatment.

Classification	Unit	Value
Voltage	V	1,400~1,700
Time	min	5
Clearance	cm	0.5

인하였다. Slide glass는 실험 전에 에탄올 및 아세톤으로 기판 표면을 세척하여 표면에 잔여할 수도 있는 불순물 및 유기물을 제거하였고, 건조로에서 100°C에서 20분간 건조하여 기판표면에 존재하는 수분을 제거하였다. 방전조건에 따른 유리기판의 친수화 정도를 확인하기 위해 표 2와 같이 방전전압, 방전시간, 유리기판과 방전소자와의 간격, 방전 기체 종류 및 유량은 다음과 같이 조건을 세분화하여 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 방전 기체 및 유량에 따른

플라즈마 방전 특성 및 오존 발생량 변화 결과

본 연구에서는 아르곤 및 질소 기체의 유량 변화에 따른 플라즈마 방전 특성 및 오존 발생량 변화를 확인하기 위해 아르곤 및 질소 기체의 유량은 20~100 sccm 범위에서 20 sccm 단위로 조절하였고, 방전전압은 1,500 V로 고정하여 실험을 진행하였다. 스펙트럼 및 오존 발생량은 방전소자와의 0.5 cm 이격된 거리에서 측정하였다.

그림 4(a)는 아르곤 기체의 유량에 따라서 발생한 오존 발생량을 30초 간격으로 측정하여 나타낸 그래프이다. 아르곤 기체의 유량과 관계없이 오존 발생량은 시간에 따라서 크게 변하지 않는다는 것을 알 수 있다. 유량 60 sccm 기준으로 서로 상반된 경향이 나타났다. 20 sccm에서는 평균 0.249 ppm, 40 sccm에서는 0.284 ppm, 그리고 60 sccm에서는 최고 0.317 ppm으로 유량이 상승할수록 오존 발생량이 증가하는 경향을 나타냈지만, 80 sccm에서는 0.15 ppm, 그리고 100 sccm에서는 0.144 ppm으로 유량이 증가할수록 오존 발생량이 감소하는 경향이 나타났다. 아르곤 기체는 절연 파괴 전압이 산소 기체보다 낮기 때문에 상압에서 아르곤 기체의 분압이 증가하게 되면 방전전압이 낮아져서 오존 기체의 발생량이 증가하지만, 아르곤의 분압이 일정 수준을 넘어서게 되면 오존 기체의 형성에 기여하는 산소 기체의 분압이 낮아지게 되면서

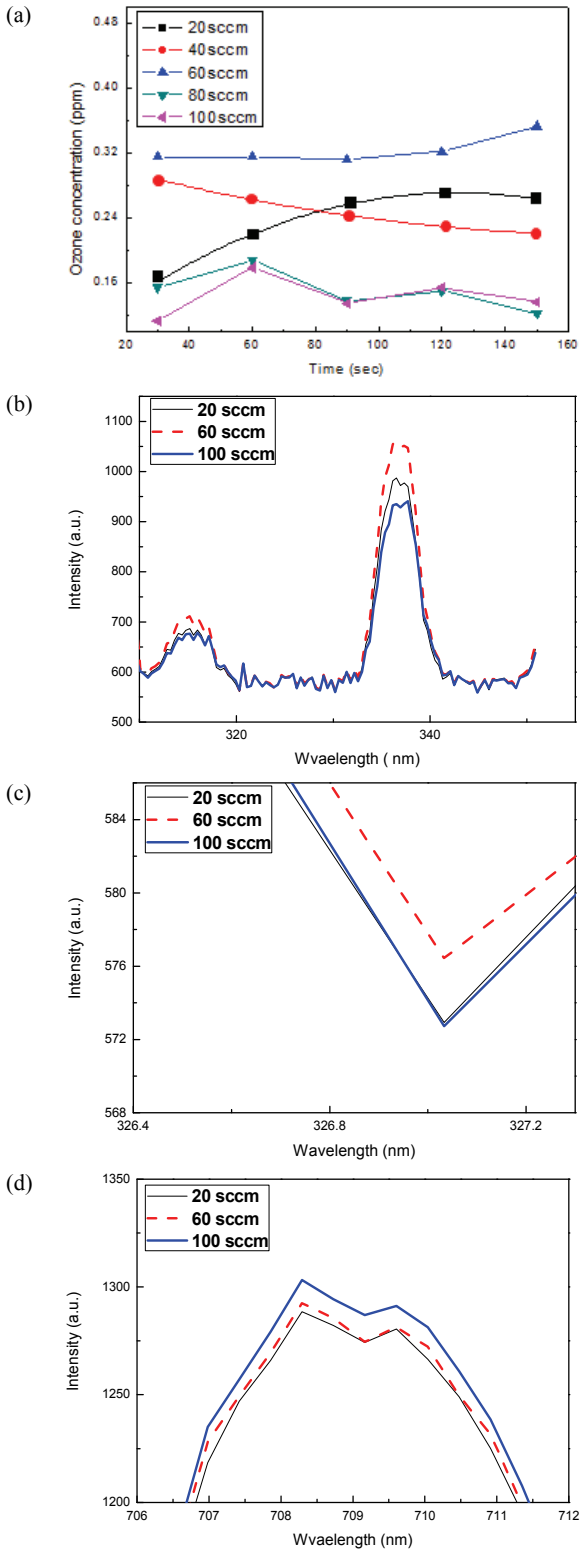


Fig. 4. (a) Ozone concentration with time and flow rate of Ar gas, (b) UV spectrum with flow rate of Ar gas, (c) ozone spectrum with flow rate of Ar flow, and (d) Ar spectrum with flow rate of Ar gas.

오존 발생량은 낮아지는 것으로 사료된다.

그림 4(b)는 아르곤 기체의 유량에 따른 자외선 영역의 플라즈마 방전 스펙트럼을 측정된 결과이다. 그림 4(a)와 동일하게 60 sccm 기준으로 서로 상반되는 경향을 나타내었다. 336.539 nm 파장 기준으로 20 sccm 유량에서는 987.1 값을 나타내었고, 유량을 증가시켜 60 sccm에서는 최고 1061.47 값을 나타내었다. 유량을 100 sccm까지 증가시킨 후 방전 스펙트럼을 측정하였을 때, 935.13 값이 측정되었다. 그림 4(a)와 비교하였을 때, 유량 60 sccm 기준으로 아르곤 기체의 유량 증가에 따른 스펙트럼의 강도가 서로 상반된 결과를 나타내었다. 유량 20 sccm에서 60 sccm까지 증가시켰을 경우, 스펙트럼의 강도는 증가하였지만, 100 sccm까지 증가시켰을 경우 스펙트럼의 강도는 감소하였다. 이를 통해, 아르곤 기체의 분압이 플라즈마의 자외선 영역 스펙트럼의 강도에 영향을 끼친다는 것과, 스펙트럼의 강도가 오존 발생량과 연관 있다는 것을 알 수 있다 [1,3-5].

그림 4(c)는 아르곤 기체의 유량에 따른 오존의 방전 스펙트럼을 측정된 그래프이다. 오존은 327 nm 파장의 스펙트럼을 방출하는데 [11], 그림 4(a), 4(b)와 동일하게 60 sccm 유량을 기준으로 상반된 결과를 나타내었다. 파장 327 nm 기준, 20 sccm 유량에서는 572.93 값이 측정되었고, 60 sccm에서는 최대 576.44 값을 나타내었다. 반대로 유량이 점차 증가하여 100 sccm 유량에서의 스펙트럼의 강도는 감소하여 572.73 값을 나타내었다. 이를 통해 아르곤 기체의 유량 증가에 따른 오존 발생량은 유량 60 sccm을 기준으로 서로 상반된 결과를 나타내었으며, 오존 스펙트럼은 오존 발생량과 플라즈마의 자외선 영역에 해당하는 스펙트럼의 강도와 비례한다는 것을 알 수 있다 [3,4,9].

그림 4(d)는 아르곤 기체의 방출 스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 708 nm 파장 기준으로 유량 20, 60, 100 sccm에서 각각 1,288.52, 1,292.51, 1,303.38 값을 나타내었다. 아르곤 기체 유량의 증가에 따라서 적외선 스펙트럼의 강도가 증가하였는데, 이는 아르곤 기체의 분압이 증가함에 따라 이온화되는 아르곤 기체 분자 수가 증가하여 방출되는 스펙트럼의 강도가 증가하는 것으로 사료된다 [3,10].

3.2 열 인가 여부에 따른 플라즈마 방전 특성 및 오존 발생량 변화 결과

본 연구에서는 상압 플라즈마 방전 시 발생하는 오

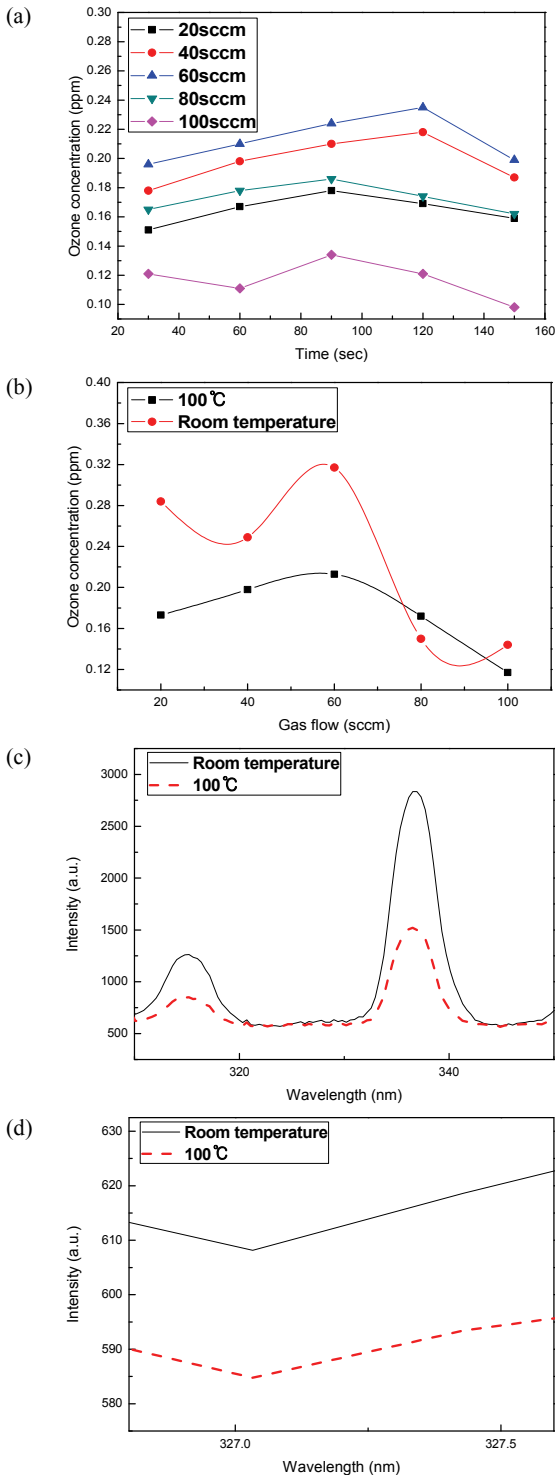


Fig. 5. (a) Ozone concentration with time and flow rate of Ar gas at 100°C, (b) ozone concentration with flow rate of Ar gas and temperature, (c) UV spectrum with temperature at 100 sccm of Ar gas flow rate, and (d) ozone spectrum with temperature at 100 sccm of Ar gas flow rate.

존 기체가 열 인가 여부에 따라서 제거되는 정도를 확인해 보기 위해 방전소자에 형성된 열선에 전압을 인가하여 열 생성 후, 아르곤 기체의 유량을 조절하면서 1,500 V 전압을 인가하여 플라즈마 방전을 하면서 오존 발생량을 측정하였다. 아르곤 기체의 유량은 20~100 sccm 범위 내에서 20 sccm 단위로 유량을 조절하였고, 오존 발생량은 방전소자와 0.5 cm 이격된 거리에서 측정 기기의 흡입구를 설치하여 측정하였다.

그림 5(a)는 방전소자의 열선에 전압을 인가하여 온도를 100°C까지 상승시킨 후 아르곤 기체의 유량을 조절하면서 유량에 따른 오존 발생량을 측정한 것이다. 그림 4(a)와 유사한 경향이 나타났는데, 유량 60 sccm에서 오존 발생량이 평균 0.213 ppm으로 다른 유량에 비해 가장 높게 나타났다. 60 sccm 미만의 유량에서는 유량의 상승에 따라서 오존 발생량이 평균 0.173 ppm, 0.198 ppm으로 증가하였지만, 60 sccm의 유량에서는 유량이 증가할수록 오존 발생량이 감소하여 100 sccm에서는 평균 0.117 ppm의 값을 나타내었다.

그림 5(b)는 열선에서 발생하는 열이 오존 분해에 기여하는 정도를 확인해 보기 위해 상온 및 고온일 때의 방전소자에서 발생하는 오존의 양을 비교한 그래프이다. 아르곤 유량을 20~100 sccm 범위 내에서 20 sccm 단위로 증가시키며 오존 발생량을 측정하였다. 방전소자의 온도와 관계없이 오존 발생량은 유량 60 sccm에서 가장 높게 나타났다. 80 sccm에서 상온 방전소자의 오존 발생량이 고온 방전소자의 오존 발생량보다 적게 나타났지만, 그 외의 유량에서는 상온 방전소자의 오존 발생량이 더 높게 나타났다. 고온 방전소자의 평균 오존 발생량은 0.175 ppm, 최대 0.213 ppm으로 나타났지만, 상온 방전소자의 평균 오존 발생량은 0.229 ppm, 최대 오존 발생량은 0.317 ppm으로써 고온 방전소자의 오존 발생량보다 높게 나타났다. 이에 따라서 열선에 의해 발생하는 열이 오존 기체를 분해하는 데 기여하는 것을 알 수 있다 [1,6,8,9].

그림 5(c)는 아르곤 기체 100 sccm 유량에서 소자의 온도에 따른 자외선 영역의 스펙트럼을 측정한 그래프이다. 소자 온도는 100°C까지 상승시킨 후 플라즈마를 방전하여 스펙트럼을 측정하였다. 337 nm 파장을 기준으로 상온 방전소자의 스펙트럼은 2,833.83 값을 나타내었고, 고온소자의 스펙트럼은 1,257.16의 값을 나타내었다. 그림 5(b)와 비교하였을 때, 상온에서보다 고온에서 오존 발생량이 낮게 나타났고 동일하게 그림 5(c)에서는 고온에서 스펙트럼의 강도가 낮게 나타났다. 이를 통해, 고온의 열이 오존 발생량뿐만 아니라 스펙트

럼의 강도에도 관여할 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 5(d)는 아르곤 유량 100 sccm 환경에서 열선의 열 발생 여부에 따른 오존 스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 327 nm 파장을 기준으로, 열을 가하지 않은 방전소자의 오존 스펙트럼은 618.58의 값을 나타내었고, 열을 가한 소자의 오존 스펙트럼은 593.42의 값이 나타났다. 그림 5(b)에서의 아르곤 유량 100 sccm에서 열을 가했을 때의 오존 발생량이 상온에서보다 약 20% 낮게 나타났다. 100 sccm에서의 오존스펙트럼은 열을 가했을 경우가 상온에서보다 5% 강도가 감소하였다. 이를 통해 오존 스펙트럼을 통해서 오존 발생량의 경향성을 대략적으로 유추할 수 있음을 알 수 있다.

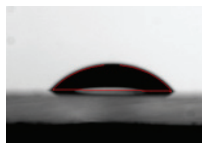
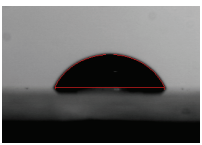
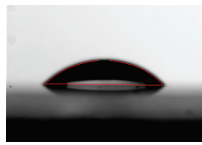
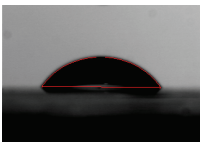
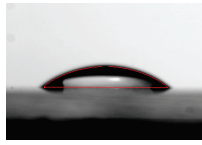
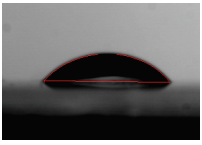
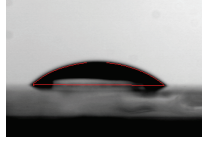
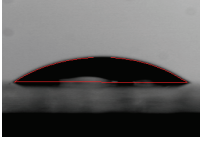
3.3 열 인가 여부에 따른 플라즈마 처리효과 비교

본 연구에서는 상압 플라즈마 표면 처리 시 열선에서 발생하는 열이 표면의 친수화에 어떤 영향을 끼치는지 알아보기 위해 1,400~1,700 V 범위 내에서 100 V씩 증가시키며 D.I water를 3 cm 거리에서 떨어트린 후 접촉각을 측정하였다. 플라즈마 처리는 5분간 진행하였고, 방전소자와 유리기판의 거리는 0.5 cm로 고정하였다.

표 3은 인가전압 및 열선의 열 발생 여부에 따른 D.I water의 형태를 촬영한 사진이다. 방전소자의 열 발생 여부와 관계없이 인가전압이 상승할수록 물방울 모양은 납작해지며 접촉각이 낮아지는 경향을 나타내었다. 동일한 전압에서 열 인가 여부에 따른 물방울 형태 비교 결과, 고온 방전소자에서 표면 처리한 유리기판의 물방울 모양이 상온 방전소자의 경우보다 볼록하며 높은 접촉각을 보이고 있다.

그림 6은 방전전압과 열 인가 여부에 따른 접촉각 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 표 3과 동일하게 열 발생 여부와 관계없이 인가전압이 상승할수록 접촉각은 감소하는 경향을 나타내었다. 1,700 V의 전압을 인가하였을 때 유리기판의 접촉각이 감소하는 것으로 보아 유리기판 표면에 친수성기가 1,400 V의 전압에서보다 더 많이 형성되었다는 것을 알 수 있다. 고온 방전소자로 표면 처리한 유리기판의 접촉각은 표 3과 동일하게 상온 방전소자의 경우보다 높게 측정되었다. 고온 방전소자의 경우 1,400 V에서는 최대 58.35°, 1,700 V에서는 최소 39.87°로 측정되었고 상온 방전소자의 경우 1,400 V에서는 최대 48.27°, 1,700 V에서는 최소 36.24°로 측정되었다. 산소원자는 상압 플라즈마로 인해 주위 다른 기체들과 반응하여 친수성을 나타내는 산소종(OH⁻, O₂⁻)

Table 3. Photo of droplet shape with discharge voltage and heat.

Voltage (V)	Temperature (°C)	
	Room temperature	100°C
1,400		
1,500		
1,600		
1,700		

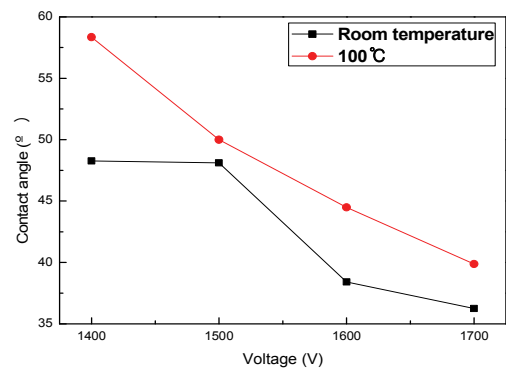


Fig. 6. Variation of contact angle with voltage and temperature.

을 형성한다 [9,10,12]. 인가전압이 증가하게 되면 유리 표면에 형성되는 하이드록시기의 양이 증가하여 접촉각은 감소하는 경향을 나타낸다 [9,10,12]. 그러나 열을 인가하게 되면 상압 플라즈마에 의해 생성되는 하이드록시기의 양이 감소하게 되어 유리 표면은 열을 가하지 않은 경우보다 소수성을 나타낸다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 단판형 플라즈마 방전소자의 제작 및 방전 특성에 대해 연구하였다. 열에 의한 방전소자의 방전 특성 및 오존 발생량을 평가하기 위해 아르곤 기체의 유량, 그리고 열의 발생 여부를 조건으로 지정하여 해당 조건에 따른 오존 발생량 및 방전 스펙트럼을 측정하였다.

아르곤 기체의 유량을 20~100 sccm 범위 내에서 조절하면서 방전하였을 경우, 60 sccm의 유량에서 오존 발생량 및 스펙트럼의 강도는 가장 높게 나타났다. 60 sccm 미만의 유량에서는 유량이 증가하면 오존 발생량 및 스펙트럼의 강도가 증가하는 경향을 나타내었지만, 100 sccm 상반되는 경향이 나타났다. 오존 기체의 스펙트럼은 60 sccm에서 가장 높게 측정되었다.

열에 의한 오존 기체의 분해 특성을 알아보기 위해 열선에 전압을 인가한 후 플라즈마를 방전시켜 오존 발생량을 측정하였다. 고온 방전소자에서의 평균 오존 발생량이 상온 방전소자에서의 평균 오존 발생량보다 낮게 나타났으며, 이는 오존의 스펙트럼 결과와 동일한 경향을 나타내었다.

열의 인가 여부에 따른 상압 플라즈마의 표면 처리 효과를 확인한 결과, 온도와 관계없이 인가전압이 상승할수록 유리기판 표면의 접촉각은 줄어드는 경향을 나타내었다. 전체적으로 고온에서 표면 처리를 한 유리기판의 접촉각이 상온에서보다 높게 나타났다.

ORCID

Seong Eui Lee

<https://orcid.org/0000-0002-1396-8534>

감사의 글

This work was supported by Priority Research Centers Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the ministry of Education (NRF-2017R1A6A1A03015562).

REFERENCES

- [1] I. H. Won, S. K. Kang, J. Y. Sim, and J. K. Lee, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **42**, 2788 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tps.2014.2320266>]
- [2] K. H. Song, Y. S. Ko, and W. C. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **9**, 1427 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.13067/jkiecs.2014.9.12.1427>]
- [3] H. H. Son and W. G. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 261 (2011).
- [4] W. Y. Lee, D. J. Jin, Y. J. Kim, G. H. Han, H. K. Yu, H. C. Kim, S. W. Jin, J. H. Koo, D. Y. Kim, and G. Cho, *J. Korean Vac. Soc.*, **22**, 111 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.5757/JKVS.2013.22.3.111>]
- [5] J. S. Kim, H. Jee, and H. W. Seo, *New Phys.: Sae Mulli*, **67**, 1399 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.3938/NPSM.67.1399>]
- [6] S. B. Han, S. S. Park, J. H. Kim, and J. Y. Park, *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, **27**, 45 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2013.27.7.045>]
- [7] S. J. Lee and J. T. Lee, *Inst. Electron. Info. Eng.*, **2016**, 920 (2016).
- [8] B. J. Chun, S. K. Lee, M. F. Rahman, D. H. Lee, W. Z. Park, and K. S. Lee, *J. Elec. Eng. Technol.*, **1999**, 2004 (1999).
- [9] S. W. Hwang, H. J. Lee, and H. J. Lee, *J. Korean Vac. Soc.*, **20**, 258 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.5757/JKVS.2011.20.4.258>]
- [10] C. J. Lee, S. K. Lee, G. H. Park, and B. M. Kim, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **32**, 354 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2008.32.4.354>]
- [11] P. G. Reyes, E. F. Mendez, D. Osorio-Gonzalez, F. Castillo, and H. Martínez, *Phys. Status Solidi C*, **5**, 907 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssc.200778306>]
- [12] S. J. Cho, C. K. Jung, S. S. Kim, and J. H. Boo, *Appl. Sci. Conver. Technol.*, **19**, 22 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.5757/JKVS.2010.19.1.022>]