Regular Paper
J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 31, No. 2, pp. 80-84 February 2018
DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.2.80
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

유전체 방전 살균 극대화를 위한 금속 나노 구조를 이용한 표면 플라즈몬 전극에 관한 연구

기현철[1,a], 오병윤[2,b]
[1] 한국광기술원 광에너지연구센터
[2] (주)제시테크

Study on Surface Plasmon Electrode Using Metal Nano-Structure for Maximizing Sterilization of Dielectric Discharge

Hyun-Chul Ki[1,a] and Byeong-Yun Oh[2,b]
[1] Photonics Energy Research Center, Korea Photonics Technology Institute, Gwangju 61007, Korea
[2] ZeSHTech Co., Ltd, Gwangju 61005, Korea

(Received December 25, 2017; Accepted January 12, 2018)

Abstract: In this study, we investigated plasmon effects to maximize the sterilization of dielectric discharge. We predicted the effect using the finite difference time domain (FDTD) method as a function of electrode shape, size, and period. The structure of the electrode was designed with a thickness of 100 nm of silver nanoparticles on a glass substrate, and was varied according to the shape, size, and period of the electrode hole. Based on the results, it was confirmed that the effect of plasmons was independent of the shape of the electrode hole. It was thus confirmed that the plasmon effect depended only on the size and period of the holes. Further, the plasmon effect was affected by the size rather than period of the holes. Because the absorption of light by the metal varied according to the size of the hole, the plasmon effect generated by the absorption of light also varied. The best results were obtained when the radius and period of the electrode holes were 0.1 μm and 0.4 μm, respectively.

Keywords: Dielectric discharge, Plasma, Plasmon, Nano structure, Hole

1. 서 론

현재 개인의 건강 및 위생에 관련한 살균 및 항균기능을 갖는 다양한 제품의 중요성이 인지되고 있는 가운데, 기존의 살균 및 항균 제품은 자외선램프나 오존, 스프레이 형태의 제품을 사용하고 있으나 이는 살균 및 항균력에 있어서 지속성이 떨어지거나 인체에 위해성이 오히려 대두되고 있는 실정이다.

유전체 장벽 방전은 저온 플라즈마 기술의 종류 중 하나로써 2개의 전극 사이에 유전체 물질이 위치하게 하여 플라즈마를 발생시키는 방법이다. 오염된 대기는 플라즈마에 의해 생성된 전자와의 직접 충돌에 의해 일어날 수도 있으나, 주로 플라즈마에 의해 발생되는 전자와 유입되는 기체의 반응에 의해 생성되는 자유라디칼 및 오존, 이온, 여기원자 등과의 반응에 의해 제거되는 원리이다.

이러한 플라즈마를 실생활에 접목하고자 하는 다양한 연구가 진행되어 오·폐수를 플라즈마로 정화시켜

a. Corresponding author; kihc@kopti.re.kr
b. Corresponding author; ohnleeu@nate.com

Copyright ©2018 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.

처리하거나 의료기기의 살균, 불화탄소 가스, 디젤 엔진매연, 화생독가스를 분해하는 등의 다양한 응용연구가 진행되었다 [1,2].

주로 플라즈마를 이용하여 대기의 오염물질을 청정해 주는 공기청정기에 사용되어 왔으나, 최근에 와서는 플라즈마 기술을 미생물의 살균, 상처의 지혈, 치아 미백, 암세포 사멸유도와 같은 의학 분야에 적용하여 탁월한 효과를 보임에 따라 이를 응용한 실용적 시도가 크게 늘어나고 있다 [3-5].

현재까지 공기 또는 수질 처리에 유전체 장벽 방전 기술이 많이 적용되고 있으나 대기, 식품 살균 기능에 대한 기술 개발이 미지한 상태이다. 특히 저온 대기압 플라즈마는 온도가 높지 않아 열에 의한 단백질의 변형을 일으키지 않고 환경에 해로운 물질이 발생하지 않는다는 점에서 종래의 살균 기술들이 안고 있는 문제점을 보완해 줄 수 있는 기술이 된다.

표면 플라즈몬(surface plasmons, SPs)은 표면 플라즈몬 폴라리톤(surface plasmon polaritons, SPPs) 또는 플라즈몬 표면 폴라리톤(plasmon surface polaritons, PSPs)이라고도 불린다. 표면 플라즈몬은 일반적으로 음의 유전 함수(dielectric function, $\varepsilon'<0$)를 갖는 금속과 양($\varepsilon'>0$)의 그것을 갖는 매체의 계면을 따라 전파하는 전도대(conduction band) 전자들의 집단적인 진동(collective oscillation) 현상을 말하며, 빛(보다 구체적으로 전자기파)과의 상호작용의 결과 여기(excitation)되어 입사하는 빛보다 증강된 크기를 갖고 계면에서 수직 방향으로 멀어질수록 지수적으로 감소하는 소멸파(evanescent wave)의 성질과 형태를 갖게 된다 [6-10].

본 연구에서는 살균 기능이 있는 유전체 방전의 살균 극대화를 위하여, 표면 플라즈몬 폴라리톤(surface plasmon polariton) 적용을 위하여 유전체 방전에 필요한 전극과 이 전극과 동일한 모양의 플라즈몬이 형성할 수 있는 전극 구조 설계 및 그 설계에 대한 플라즈몬 효과를 예측하였다.

2. 실험 방법

2.1 유전체 방전 및 표면 플라즈몬 전극 설계

유전체 방전은 그림 1과 같이 전극 사이에 유전체를 삽입하는 구조로 금속전극에 전압을 인가하면 유전체에 의해 플라즈마가 발생하게 된다.

유전체 방전의 전극은 그림 2와 같은 형태로 제작된다. 금속 판 위에 유전체 물질인 티탄산바륨($BaTiO_3$)을 도포하여 플라즈마 방전을 발생하게 된다.

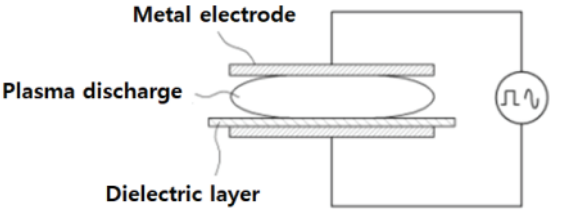

Fig. 1. Structure of dielectric discharge.

Fig. 2. Electrode of dielectric discharge.

Fig. 3. Electrode structure of surface plasmon using metal nanostructures.

유전체 방전의 살균 극대화를 방법을 위하여 금속 나노 구조를 이용한 표면 플라즈몬을 적용하였다. 그림 2의 유전체 전극과 동일한 크기 유리 기판 위에 다양한 모양의 홀(hole)과 홀의 크기, 홀의 주기에 따른 표면 플라즈몬의 효과를 예측하였다.

그림 3은 표면 플라즈몬 효과를 위한 전극의 구조를 나타내고 있다. 표면 플라즈몬 발생을 위한 금속 나노 물질은 은(Ag)을 선택하였고, 예비 기초실험 결과 금속의 두께는 표면 플라즈몬을 최적화할 수 있는 100 nm로 결정하였다.

2.2 표면 플라즈몬 전극 형태 선정

표면 플라즈몬의 전극은 그림 4와 같이 다양한 홀의 모양, 크기, 주기를 변형하여 설계하였다.

홀의 모양은 원형, 사각형, 헥사(hexa) 형태로 하였고, 홀의 크기와 주기는 제작할 수 있는 최소 및 최대

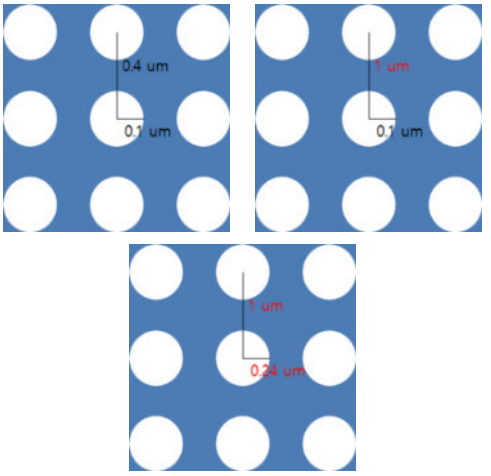

Fig. 4. Circular model electrode.

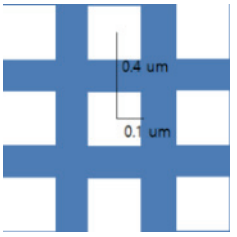

Fig. 5. Rectangular model electrode.

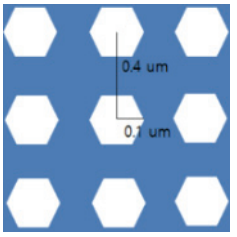

Fig. 6. Hexa model electrode.

Table 1. Hole size and period according to shape.

Hole shape	Hole size (r, um)	Hole period (um)
Circular	0.1	0.4
	0.1	1
	0.24	1
Rectangular	0.1	0.4
Hexa	0.1	0.4

로 하여 그림 4, 5 그리고 6과 같이 선정하였다. 특히, 유전체 전극의 모양인 동일한 원형의 경우 각 홀의 크기와 주기를 변형하여 크기와 주기에 따른 플라즈몬 효과를 분석하였다. 각 홀의 모양에 따른 반지름과 주기를 표 1에 나타내었다.

2.3 표면 플라즈몬 효과 분석

설계된 전극의 홀 모양, 크기, 주기에 따른 표면 플라즈몬의 효과를 분석하기 위하여 광학 프로그램인 FDTD (finite-difference time-domain method)을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

표면 플라즈몬은 주로 유리/금속/유전체 구조에서 빛의 특정 입사각에서 공명 현상이 유도되고 이는 반사율과 입사각 관계 곡선에서 매우 뚜렷한 흡수 피크로써 확인된다. 이러한 피크가 관측되는 위치를 표면 플라즈몬 공명 각도라고 한다 [11]. 본 논문에서는 FDTD를 이용하여 반사와 투과피크를 이용하여 플라즈몬 효과를 예측하였다.

그림 7은 원형 모양에 홀 크기가 반지름이 0.1 um, 홀의 주기가 0.4 um의 전극의 반사율과 흡수 피크를 나타내고 있다. 450 nm 영역에서 반사와 투과합의 피크(R + T 피크, 적색)가 크게 감소됨을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 즉 금속에 입사되는 빛을 흡수하게 되고 흡수된 빛에 의해서 플라즈몬 효과를 발생하게 된

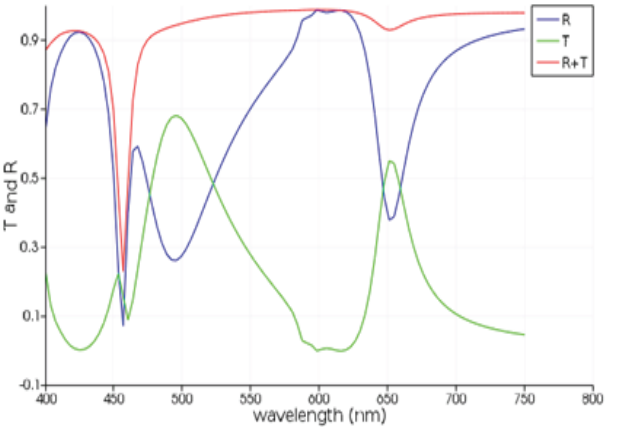

Fig. 7. FDTD result of circular model (R=0.1 um, period=0.4 um).

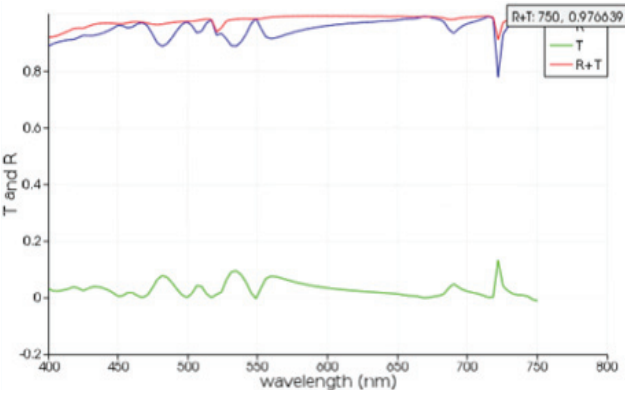

Fig. 8. FDTD result of circular model (R = 0.1 um, period = 1 um).

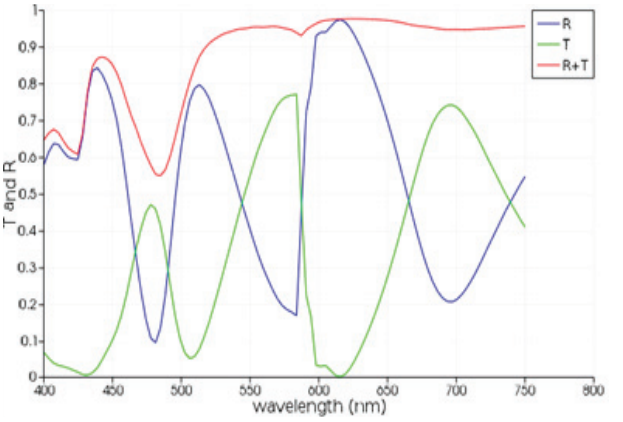

Fig. 10. FDTD result of rectangular model (R = 0.1 um, period = 0.4 um).

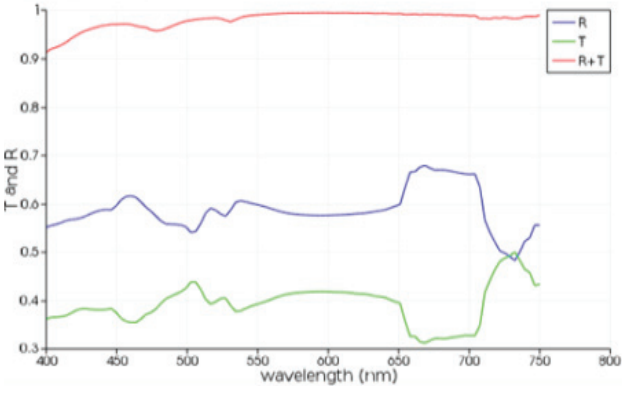

Fig. 9. FDTD result of circular model (R = 0.24 um, period = 1 um).

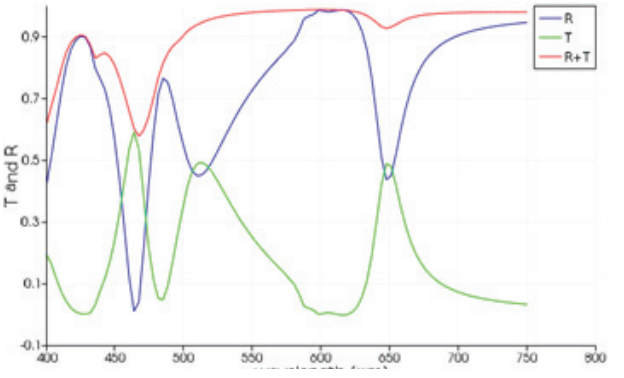

Fig. 11. FDTD result of hexa model (R = 0.1 um, period = 0.4 um).

다. 650 nm 영역에서도 투과와 반사가 변화됨을 확인할 수 있으나. 450 nm 영역과 비교하였을 경우 낮게 변화됨을 확인할 수 있다.

그림 8은 홀의 크기를 0.1 um로 유지하고 주기는 1 um로 하였을 경우 결과 값을 나타내고 있다. 투과와 반사합의 피크가 725 nm 영역에서 변화됨을 확인할 수 있었으나, 주기가 0.4 um의 전극구조와 비교했을 때 투과와 반사 피크 합의 변화 폭이 적으나 플라즈몬 효과는 발생한다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 9는 홀의 크기를 0.24 um로 줄이고 주기는 1 um로 유지하였을 경우 그림 7과 그림 8과 비교하였을 경우 전 파장 영역에서 투과와 반사의 합의 피크가 변화 폭이 없으며, 반사 값이 흡수 값보다 높은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 입사되는 빛이 금속에 의해 반사되는 양이 흡수되는 양보다 큼으로써 입사되는 빛을 흡수하지 못하여 플라즈몬 효과를 볼 수 없는 것이다.

따라서 원형의 경우 홀의 주기보다는 크기(즉 반지름)에 따라 플라즈몬의 효과가 달라진다고 판단할 수 있으며, 이러한 결과는 플라즈몬 발생을 위해서는 홀의 크기는 파장의 1/4 수준이 되어야 한다.

그림 10은 홀의 모양은 사각형으로 크기는 0.1 um로 유지하고 주기를 0.4 um로 하였을 경우 결과 값을 나타내고 있다. 사각형의 경우 원형과 동일하게 470 nm 영역에서 투과와 반사피크합의 변화가 큰 것을 확인할 수 있었고, 그림 11은 홀의 모양을 헥사 모양으로 크기와 주기는 원형과 사각형과 동일하게 각각 0.1 um, 0.4 um로 하였고, 결과는 원형과 사각과 동일하게 470 nm 영역과 650 nm 영역에서 투과와 반사 피크의 합이 변화를 확인할 수 있었다.

이러한 결과 금속 나노 구조를 통한 표면 플라즈몬은 홀의 모양은 무관하며 원형에서 결과와 같이 홀의

크기에 따라 달라지며 홀의 주기는 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

또한, 표면 플라즈몬이 발생되려면 홀의 반경이 입사되는 광원 파장의 1/4 수준이 되어야 하고, 홀의 주기의 간격 역시 파장의 길이보다 짧아야 한다. 이러한 것을 고려하여 표면 플라즈몬을 형성할 수 있는 전극을 설계해야 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 플라즈마를 이용하여 대기의 오염물질을 청정해 주는 공기청정기에 사용이 가능하고 미생물의 살균, 상처의 지혈, 치아미백, 암세포 사멸 유도와 같은 적용 범위가 높은 유전체 방전의 살균 극대화를 위하여 금속 나노 구조가 결합되는 플라즈몬을 적용하기 위한 전극 구조를 설계하고 예측하였다. 전극의 구조는 유전체 방전의 사용되는 전극과 동일한 크기와 모양을 고려하여 설계하였다. 전극의 구조는 유리 기판 위에 금속 나노 물질은 은을 형성하는 구조이며 전극의 모양은 원형, 사각형, 헥사형으로 설계하였다.

설계한 전극의 플라즈몬 효과는 FDTD 프로그램으로 분석하였고 원형의 경우 반지름이 0.1 um, 주기는 0.4 um의 전극에서 플라즈몬 효과를 확인할 수 있었고 반지름과 주기에 따른 플라즈몬 효과의 영향을 분석한 결과에서 반지름, 즉 홀의 크기가 플라즈몬 효과에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

전극의 모형에 따른 플라즈몬 효과를 분석한 결과 전극의 모형에 따라서는 플라즈몬 효과의 변화가 없음을 확인할 수 있었다.

플라즈몬은 입사되는 빛이 금속에 흡수되어 발생하게 되는데 전극의 모양, 크기 및 주기에 따라 금속이 도포된다. 이러한 세 가지 조건 중에 전극의 크기에 따라 흡수되는 빛의 양이 달라짐으로써 효과가 변화하게 된다.

최종적으로 표면 플라즈몬이 발생되려면 홀의 반경이 파장의 1/4 수준이 되어야 하고, 홀 주기의 간격 역시 파장의 길이보다 짧아야 한다. 이러한 것을 고려하여 유전체 방전의 전극과 표면 플라즈몬을 형성할 수 있는 전극을 설계해야 된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017R1D1A1B03028200).

REFERENCES

[1] D. S. Kim and Y. S. Park, *Korean Journal of Environmental Health Sciences*, **37**, 218 (2011). [DOI: https://doi.org/10.5668/jehs.2011.37.3.218]

[2] H. S. Uhm, *Appl. Sci. Convergence Technol.*, **15**, 117 (2006).

[3] R. Brandenburg, J. Ehlbeck, M. Stieber, T. v. Woedtke, J. Zeymer, O. Schlüter, and K. D. Weltmann, *Contrib. Plasma Phys.*, **47**, 72 (2007). [DOI: https://doi.org/10.1002/ctpp.200710011]

[4] K. D. Weltmann, R. Brandenburg, T. von Woedtke, J. Ehlbeck, R. Foest, M. Stieber, and E. Kindel, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 194008 (2008). [DOI: https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/19/194008]

[5] G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol, A. B. Shekhter, V. N. Vasilets, and A. Fridman, *Plasma Processes Polym.*, **5**, 503 (2008). [DOI: https://doi.org/10.1002/ppap.200700154]

[6] M. Piliarik, J. Homola, Z. Maníková, and J. Čtyroký, *Sens. Actuators, B*, **90**, 236 (2003). [DOI: https://doi.org/10.1016/S0925-4005(03)00034-0]

[7] L. K. Chau, Y. F. Lin, S. F. Cheng, and T. J. Lin, *Sens. Actuators, B*, **113**, 100 (2006). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.02.034]

[8] J. Homola, *Chem. Rev.*, **108**, 462 (2008). [DOI: https://doi.org/10.1021/cr068107d]

[9] M. E. Stewart, C. R. Anderton, L. B. Thompson, J. Maria, S. K. Gray, J. A. Rogers, and R. G. Nuzzo, *Chem. Rev.*, **108**, 494 (2008). [DOI: https://doi.org/10.1021/cr068126n]

[10] E. Hutter and J. H. Fendler, *Adv. Mater.*, **16**, 1685 (2004). [DOI: https://doi.org/10.1002/adma.200400271]

[11] W. Knoll, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, **49**, 569 (1998). [DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.49.1.569]