

유전체 장벽 방전 플라즈마의 전자파 산란 특성 분석

Analysis of Electromagnetic Wave Scattering Characteristics of Dielectric Barrier Discharge Plasma

이수민 · 오일영 · 홍용준* · 육종관

Soo-Min Lee · Il-Young Oh · Yong-Jun Hong* · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문은 대기압 환경에서 발생하는 유전체 장벽 방전(dielectric barrier discharge: DBD) 플라즈마의 전자파 산란 특성을 측정하였다. 본 논문에서는 기본적인 DBD 플라즈마 발생기 구조를 병렬로 연결하여 넓은 면적의 플라즈마 발생기를 제작하였고, 14 kV, 4 kHz의 고전압 발생장치를 이용해 플라즈마가 발생하는 것을 확인하였다. 두 개의 혼 안테나와 벡터 네트워크 분석기를 이용해 S-parameter의 비교를 통해 전자파 산란 특성을 측정하였다. 전방 산란의 경우 제작된 플라즈마 발생기의 구조적 특성으로 인해 안테나의 편파에 따라 다른 결과 값을 얻었다. 편파가 수평일 때 최대 2 dB의 산란파 감쇠 특성을 확인할 수 있었다. 또한, 편파가 수평일 경우, 플라즈마 발생기 뒤에 PEC를 설치한 후 후방 산란 특성을 측정하였다. 그 결과, 5 GHz에서 안테나 관찰 각도가 40°, 60°일 때 최대 2 dB 산란파 감쇠 특성을 얻었다.

Abstract

This paper presented measurement results of scattering characteristics of dielectric barrier discharge (DBD) plasma at atmospheric pressure. In this paper, plasma actuator is fabricated by parallel connecting of basic configuration of DBD plasma actuator, then plasma could be generated by applying 14 kV, 4 kHz of high voltage generator. In order to measure the scattering characteristics of DBD plasma, in this paper, two horn antennas and vector network analyzer are used to compare the S-parameter. Because of the structure of fabricated plasma generator, different result is obtained as antenna polarization changes. When antenna polarization is parallel to electrodes of plasma generator, the scattered field is reduced by 2 dB in maximum. In addition, for parallel polarization case, PEC is set up behind the plasma generator to measure backward scattered field. When the observation angles are 40° and 60°, the amount of reduced scattered field is 2 dB in maximum at 5 GHz.

Key words : DBD Plasma Generator, Scattered Field Measurement System, Scattered Field Reduction

I. 서 론

플라즈마의 산란 특성에 관한 연구는 수치 해석

적인 방법과 측정을 통해 분석하는 방법으로 진행되고 있다. 수치 해석적인 방법을 이용한 연구는 예측한 플라즈마 변수(전자밀도, 충돌주파수, 이온밀도

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.」
연세대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Yonsei University)

*국방과학연구소(Agency for Defence Development)

· Manuscript received November 30, 2012 ; Revised February 9, 2013 ; Accepted February 21, 2013. (ID No. 20121130-09S)

· Corresponding Author : Jong-Gwan Yook (e-mail : jgyook@yonsei.ac.kr)

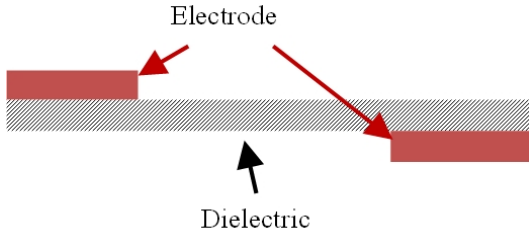


그림 1. 유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기의 구조
Fig. 1. Structure of DBD plasma generator.

등)를 플라즈마 모델링에 적용한 후, 계산을 통해 전자과 흡수 효과의 가능성을 보여준다^{[1],[2]}. 하지만 발생 장치의 구조에 따라 플라즈마의 특성은 매우 다르게 나타난다^[3]. 이에 따라 많은 학자들은 다양한 플라즈마 발생기를 제작하여 플라즈마의 전자과 흡수 효과의 가능성을 연구하고 있다^{[4],[5]}. 그중 많은 연구가 진행되고 있는 플라즈마 발생기는 유전체 장벽 방전(dielectric barrier discharge, DBD) 플라즈마 발생기^[6], 플라즈마 켈(plasma jet)^{[7],[8]}, 플라즈마 토치(plasma torch)^[9]로 나누어진다. 또한, 플라즈마 발생기는 플라즈마가 발생하는 공간의 압력에 따라 대기압, 저기압 플라즈마로 나누어진다. 본 논문에서는 플라즈마 발생기중 대기압 환경에서 플라즈마가 발생하며, 설계가 쉽고 추가로 유입되는 가스가 필요 없는 유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기를 제작하였다. 그리고 발생된 플라즈마의 전자과 흡수 효과에 대하여 분석하였다.

본 논문에서는 본론 2-1에서 유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기 설계 시 고려할 점을 설명하고, 2-2에서 산란 특성을 측정하기 위해 구현된 시스템을 설명하였다. 2-3에서 전방 산란(forward scattering) 특성을 입사파가 수직일 경우에 대해 측정하였으며, 2-4에서 후방 산란(backward scattering) 특성을 관찰 각도를 변화시키며 측정하였다.

II. 본 론

2-1 유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기 설계

유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기는 그림 1과 같은 기본 구조를 가진다. 이 구조는 좁은 면적의 플라즈마가 발생되기 때문에 전자과 산란 특성을 알아보

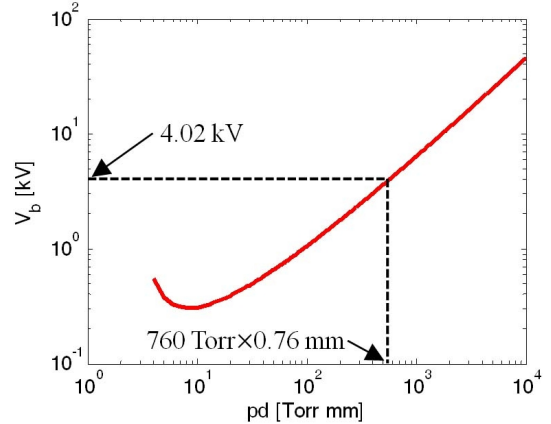


그림 2. Paschen의 곡선
Fig. 2. Paschen's curve.

기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같은 기본적인 구조를 병렬식으로 연결시켜 넓은 면적의 플라즈마가 발생하는 유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기를 제작하기로 하였다.

본 연구에서는 간단하게 제작할 수 있고, 넓은 면적의 유전체가 필요하기 때문에 printed circuit board (PCB)를 사용하여 플라즈마 발생기를 제작하였다. PCB는 비유전율=3.2, 유전체 두께=0.76 mm, 도체 높이는=0.035 mm의 TLC-32 기판을 사용하였다. 유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기의 설계를 위해서 고려되어야 할 사항은 유전체, 공기의 최소 방전 전압 그리고 전압 공급원이다. 본 연구에서 사용하는 가스는 공기이며, 방전 전압은 Paschen의 법칙^[10]에 의해 결정되며, 식 (1)과 같다.

$$V_b = \frac{B \cdot pd}{C + \ln(pd)} \quad (1)$$

공기의 경우 $B=365 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$, $C=1.18$ 이며 pd (Torr · cm)는 전극 사이의 간격과 기압의 곱이다. 그림 2는 pd 의 변화에 따른 방전 전압을 그래프로 나타낸 것이다.

본 연구에서 사용된 기판의 유전체 두께는 전극 사이의 간격이고, 그림 2에 의하면 최소 4.02 kV 이상의 전압이 있어야 플라즈마가 발생하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 제안된 플라즈마 발생기는 발생기 측면에 위치한 전극에서 여러 개의 전극으로 나누어져 파워가 전달되는 구조이기 때문에 4.02 kV

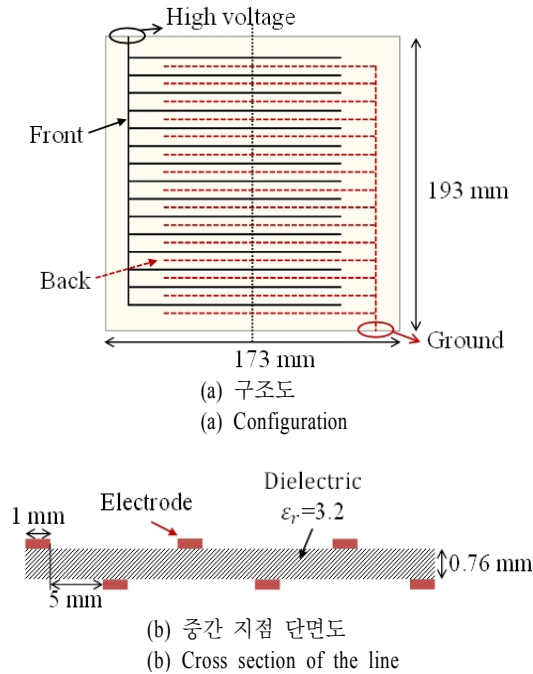


그림 3. 제작한 플라즈마 발생장치의 구조
Fig. 3. Structure of fabricated plasma generator.

의 전압을 가해 주면 플라즈마 발생기의 측면에서만 플라즈마가 발생하게 된다. 따라서 넓은 면적의 플라즈마를 생성하기 위한 최소 전압은 4.02 kV보다 훨씬 높다. 이에 따라 유전체의 방전 전압이 매우 높아 유전체의 손상 없이 안정적으로 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 본 연구에서 사용된 TLC-32의 경우 60 kV의 매우 큰 방전 전압을 가진다.

그림 3은 제작된 유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기의 구조도이다. (a)는 플라즈마 발생기의 구조도이고, (b)는 그림 (a)의 중간 지점을 잘랐을 때 옆에서 보는 단면도이다. 전극이 유전체 양면에 위치하며, 동일한 전극 간격을 가지도록 설계하였다. 설계된 플라즈마 발생기는 고전압 발생장치를 이용하여 최소 방전 전압보다 높은 14 kV, 4 kHz의 전압원을 전극의 양 끝단에 가해 주면 플라즈마가 고르게 넓은 면적에 걸쳐 양면에 발생하는 것을 확인할 수 있다.

2-2 산란 특성 측정 환경 구성

본 논문에서는 전방 산란 특성을 측정하기 위해서 3.9~5.8 GHz 대역의 두 개의 혼 안테나(horn an

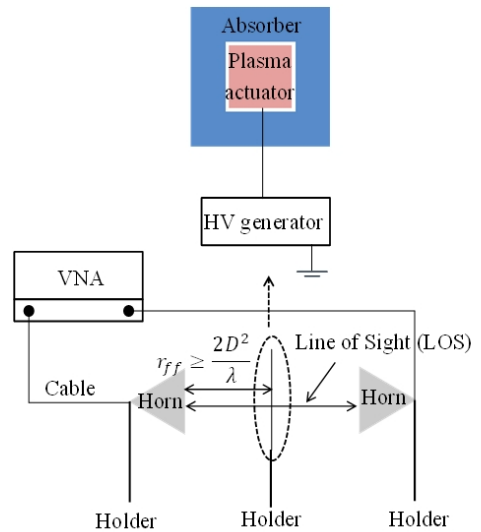


그림 4. 측정 시스템
Fig. 4. Measurement system.

tenna)의 Line of sight (LOS)상에 플라즈마 발생기를 위치시키고, 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer, VNA)를 이용해 전자파 흡수 특성을 알아보았다^[11]. 본 논문에서 측정 환경 구성을 위해 고려한 것은 다음과 같다. 안테나와 플라즈마 발생기 사이의 거리는 원거리장(far-field) 조건을 만족시키도록 하였다. 그리고 다중 반사(multipath reflection)를 감소시키기 위해 플라즈마 발생기 주변에 흡수체(absorber)를 두었다. 그림 4는 플라즈마의 산란 특성을 측정하기 위해 구성한 측정 시스템의 개념도이다.

또한 완벽하게 구형화된 자유공간이 아니므로 플라즈마 발생기 및 생성된 플라즈마의 투과 특성을 살펴보기 위해 세 가지 경우에 대해 측정을 하였다. 두 개의 혼 안테나 사이에 흡수체가 있을 경우, 플라즈마 발생기가 있을 경우 그리고 플라즈마 발생기에 14 kV, 4 kHz의 전압을 인가하여 플라즈마가 발생했을 경우에 대해 측정 후, 첫 번째 경우와 비교해 두 번째, 세 번째의 값의 변화량을 측정하였다^[12].

그림 5는 측정 환경의 정확성을 판단하기 위해 플라즈마 발생기의 레이더 단면적(RCS) 모의 실험과 측정값을 비교한 그래프이다. 산란과 RCS는 그 절대값이 분명 다르겠지만 안테나의 이득을 생각한다면 충분히 합리적인 값이라고 생각할 수 있으며, 경향성 또한 일치하는 것을 살펴볼 수 있다.

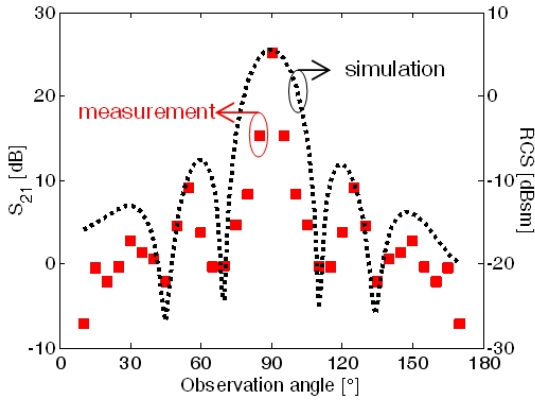
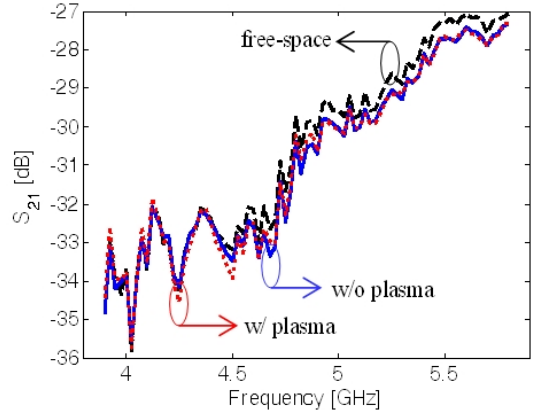
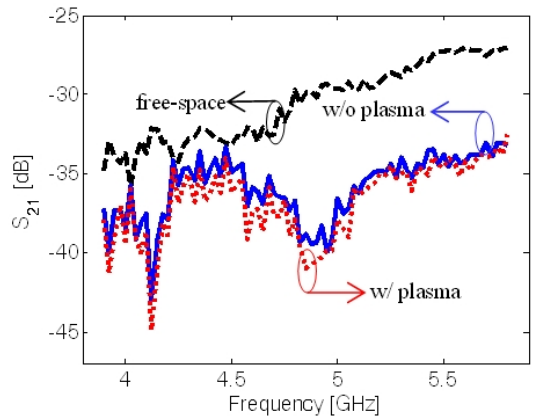


그림 5. RCS 모의 실험과 측정결과 비교
Fig. 5. RCS simulation vs. measurement.



(a) 수직 편파
(a) Perpendicular



(b) 수평 편파
(b) Parallel

그림 7. 측정 결과
Fig. 7. Measurement results.

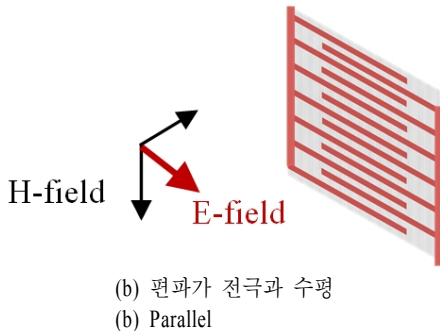
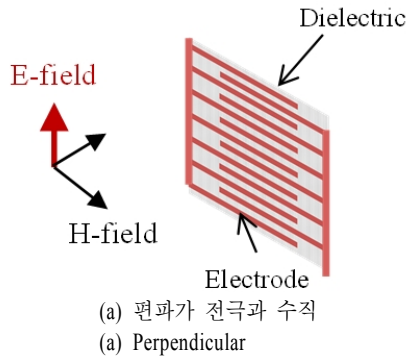


그림 6. 안테나의 편파와 플라즈마 발생기의 상관 관계
Fig. 6. Antenna polarization vs. plasma generator.

2-3 전방 산란 특성 측정 결과

본 논문에서 제작된 플라즈마 발생기는 주기적인 도체의 연결로 이루어져있기 때문에 안테나의 편파 특성에 따라 차이가 발생할 것을 쉽게 예측할 수 있다. 그림 6(a)는 전극과 안테나의 편파가 수직일 경우, (b)는 전극과 안테나의 편파가 수평일 경우의 안

테나의 편파와 플라즈마 발생기의 상관 관계를 나타낸 것이다. 그림 7은 안테나의 편파가 전극과 수직일 경우와 수평일 경우, 플라즈마 발생기만 존재할 경우와 플라즈마 발생기에 14 kV, 4 kHz의 고전압을 인가시켜 플라즈마가 생겼을 경우에 대해 측정한 결과다. 플라즈마 발생기의 구조상 생성된 플라즈마를 고려해 본다면 안테나의 편파가 전극의 편파와 수직일 경우에는 입사되는 전자파와 플라즈마 발생기 사이에 커플링(coupling)이 거의 발생하지 않을 것으로 예측할 수 있다. 반면, 편파가 전극의 편파와 일치하는 경우에는 4~6 GHz 대역에서 최대 2 dB의 전자파 감쇠 효과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 플라즈마 발생기 자체만의 감쇠 효과가 자유공

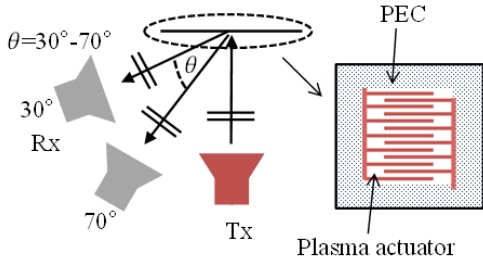


그림 8. 관찰 각도에 따른 측정 구성도
 Fig. 8. Measurement system.

간에서의 결과 값과 비교해 봤을 때 특정 주파수에서 큰 것을 알 수 있다. 이 역시도 플라즈마 발생기의 구조적 특성으로 인한 것으로 안테나의 편파에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

2-4 관찰 각도에 따른 측정

전방 산란 측정을 통해 편파가 수평일 경우, 플라즈마에 의한 전자파 감쇠 효과가 큰 것을 확인할 수 있었다. 그림 8은 관찰 각도에 따른 산란과 측정을 위한 측정 시스템 구성도이다. 본 논문에서는 30~70°까지 관찰 각도를 변화시켜가면서 측정을 하였다. 그림 8과 같이 편파가 수평일 경우, 관찰 각도에 따른 산란 특성을 알아보기 위해 플라즈마 발생기 뒤에 perfect electric conductor(PEC)를 놓고 측정하였다. 그림 9은 5 GHz에서 관찰 각도별 산란 특성을 비교한 결과 값이다. 관찰 각도에 따라서 전자파 감쇠 효과가 차이를 보였으며, 40°, 60°에서 최대 2 dB의 전자파 감쇠 효과를 보였다. 이 각도에서는 4.8~5.0 GHz 대역에서 가장 큰 전자파 감쇠 효과를 보였으며, 최대 2 dB 전자파 감쇠 효과를 보였다.

III. 결 론

본 논문에서는 유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기의 기본적인 구조를 병렬 연결해서 PCB에 제작하였다. 제작된 발생기는 기존의 발생기보다 넓은 면적의 플라즈마를 발생시킨다. 발생된 플라즈마의 전자파 감쇠 효과를 측정하기 위해 전방 산란 측정 시스템을 구성하였다. 측정은 자유 공간에서의 측정값과 플라즈마 발생기, 그리고 플라즈마 발생기에 플라즈마가 발생했을 경우의 측정값들의 비교를 통해

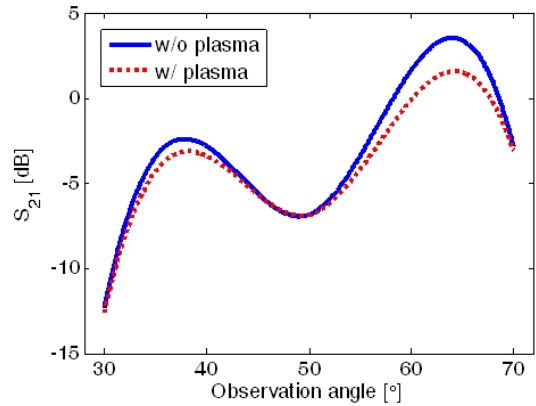


그림 9. 5 GHz 측정 결과
 Fig. 9. Result of S_{21} at 5 GHz.

이루어졌으며, 플라즈마 발생기의 RCS simulation을 통해 결과 값을 비교하였다.

제작된 플라즈마 발생기는 구조적 특성으로 인해 안테나 편파 특성에 따라 산란 특성에 차이를 보였다. 안테나의 편파가 전극과 수직일 경우, 안테나의 편파와 발생기의 커플링 효과가 적어 전파 감쇠 효과가 적었으나, 안테나의 편파가 전극과 수평일 때는 4~6 GHz 대역에서 최대 2 dB 감소하는 결과를 얻었다.

또한 입사파가 수직일 경우, 관찰 각도에 따른 산란 특성을 측정하기 위해 PEC 위에 플라즈마 발생기를 부착하고, 30~70°까지 관찰 각도를 변화시키며 측정하였다. 4.8~5 GHz 대역에서 관찰 각도에 따라 전자파 감쇠 효과는 차이를 보였다. 관찰 각도가 40°, 60°일 경우 가장 큰 전자파 감쇠 효과를 얻을 수 있었으며, 최대 2 dB 전자파 감쇠 효과를 보였다. 정리하면, 본 논문에서 제작된 플라즈마 발생기는 기존의 발생기에 비해 큰 면적의 플라즈마를 생성하고, 특정 조건(안테나의 편파 특성, 관찰각도)에서 최대 2 dB 전자파 감쇠 효과를 가진다.

본 논문에서 제안된 플라즈마 발생기의 경우, 플라즈마의 발생 유무에 따라 전자기적 산란 특성이 달라지며, 전자파 흡수 특성을 보인다. 구조에 의한 전자파 흡수체는 그 흡수성이 영구적이거나, 플라즈마에 의한 전자파 흡수체는 전압의 인가 유무에 따라 그 흡수성이 유연하며, 이는 향후 특정 상황에서의 전자파 흡수체로서의 가능성을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

- [1] B. Chaudhury, S. Chaturvedi, "Comparison of wave propagation studies in plasmas using three-dimensional finite-difference time-domain and ray-tracing methods", *Phys. Plasmas*, vol. 13, pp. 123302-1-8, Dec. 2006.
- [2] L. Chaojui, H. Xiwei, and J. Zhonghe, "Interaction of electromagnetic waves with two-dimensional metal covered with radar absorbing material and plasma," *Plasma Sci. Technol.*, vol. 10, no. 6, pp. 717-723, Dec. 2008.
- [3] A. Schutze, J. Y. Jeong, S. E. Babayan, J. Park, G. S. Selwyn, and R. F. Hicks, "The atmospheric-pressure plasma jet: A review and comparison to other plasma sources", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 26, no. 6, pp. 1685-1694, Dec. 1998.
- [4] D. K. Stalder, R. Vidmar, and D. Eckstrom, "Observations of strong microwave absorption in collisional plasmas with gradual density gradients", *J. Appl. Phys.*, vol. 72, no. 11, pp. 5089-5094, Dec. 1992.
- [5] A. Srivastava, G. Prasad, P. Atrey, and V. Kumar, "Attenuation of microwaves propagating through parallel-plate helium glow discharge at atmospheric pressure", *J. Appl. Phys.*, vol. 103, pp. 033302-1-7, Feb. 2008.
- [6] S. Wolf, M. Arjomandi, "Investigation of the effect of dielectric barrier discharge plasma actuators on the radar cross section of an object", *J. Appl. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 44, p. 315202-1-10, Jun. 2011.
- [7] X. Lu, M. Laroussi, and V. Puech, "On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets", *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 1-17, Apr. 2012.
- [8] N. Jiang, A. Ji, and Z. Cao, "Atmospheric pressure plasma jet: Effect of electrode configuration, discharge behavior, and its formation mechanism", *J. Appl. Phys.*, vol. 106, pp. 013308-1-7, Mar. 2009.
- [9] E. Koretzky, S. Kuo, "Characterization of an atmospheric pressure plasma generated by a plasma torch array", *Phys. of Plasmas*, vol. 5, pp. 3774-3780, Oct. 1998.
- [10] A. A. Fridman, L. A. Kennedy, *Plasma Physics and Engineering*: CRC, 2004.
- [11] M. K. Howlader, Y. Yang, and J. R. Roth, "Time-resolved measurements of electron number density and collision frequency for a fluorescent lamp plasma using microwave diagnostics", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 33, no. 3, pp. 1093-1099, Jun. 2005.
- [12] C. Larsson, M. Gustafsson, and G. Kristensson, "Wideband microwave measurements of the extinction cross section-Experimental techniques", *Technical Report LUTEDX/(TEAT-7182)/1-2220 09*.

이 수 민



2012년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 2012년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 플라즈마 해석, 마이크로파 해석

오 일 영



2007년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 2007년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 석박사통합과정
 [주 관심분야] 수치 해석, 플라즈마 해석, HEMP, EMI/EMC, 안테나

홍 용 준



2005년 2월: 포항공과대학교 물리학
학과 (이학사)
2011년 2월: 포항공과대학교 물리학
학과 (이학박사)
2011년 1월~현재: 국방과학연구소
선임연구원
[주 관심분야] 플라즈마 해석, High
Power Microwave, 안테나 등

육 중 관



1987년: 연세대학교 전자공학과 (공학
학사)
1989년: 연세대학교 전자공학과 (공학
학석사)
1998년: University of Michigan 전기
공학과 (공학박사)
1997년 1월~1998년 10월: Univer-
sity of Michigan Research Fellow
1998년 11월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer
1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
[주 관심분야] 수치 해석, 바이오 센서, 마이크로파 구조
해석 및 설계, RF MEMS, 박막 공진 구조, EMI/EMC,
HEMP, 플라즈마 해석