

유체 모델을 이용한 유전체 장벽 방전 플라즈마와 전자기파 간의 시간 의존적 상호 작용 분석

Time Dependent Interaction between Electromagnetic Wave and Dielectric Barrier Discharge Plasma Using Fluid Model

김유나 · 오일영 · 정인균 · 홍용준* · 육종관

Yuna Kim · Il-Young Oh · Inkyun Jung · Yongjun Hong* · Jong-Gwan Yook

요 약

전자기파와 플라즈마의 상호 작용을 결정하는 주요 변수는 플라즈마 주파수와 충돌 주파수이며, 이 둘은 각각 전자 밀도와 전자 온도로부터 계산할 수 있다. 이 두 값은 플라즈마 발생기 종류에 따라 결정되는 시간 의존적인 변수이다. 기존의 전파 흡수 특성 연구에서는 수치 해석적 모형의 부재로 인하여 플라즈마의 시간적/공간적 변화를 간략화하거나, 상수로 가정하여 수행하였다. 본 연구에서는 플라즈마 유체 모델을 도입하여 얻어진 시간 의존적 변수 값을 전자기파 감쇠량 계산에 이용함으로써 해석의 정확도를 높이는 방식을 제안하였다. 해석 대상인 유전체 장벽 방전 플라즈마는 구조적인 단순함으로 인하여 1차원 분석만으로 플라즈마 분포의 시간적 변화를 반영할 수 있다. 본 논문은 한 주기 내에서 전자 밀도와 전자 온도를 추출하여 마이크로파 입사 시 시간적 흡수 특성 변화를 분석하였다. 또한, 전자 밀도와 전자 온도의 변화에 따라 감쇠량을 계산하여 감쇠 경향성을 분석하였다.

Abstract

In determining interaction between plasma and electromagnetic wave, plasma frequency and collision frequency are two key parameters. They are derived from electron density and temperature, which vary in an extremely wide range, depending on a plasma generator. Because the parameters are usually unknown, traditional researches have utilized simplified electron density model and constant electron temperature approximation. Introduction of plasma fluid model to electromagnetics is suggested to utilize relatively precise time dependent variables for given generator. Dielectric barrier discharge(DBD) generator is selected due to its simple geometry which allows us to use one dimensional analysis. Time dependent property is analyzed when microwave is launched toward parallel plate DBD plasma. Afterwards, attenuation tendency with the change of electron density and temperature is demonstrated.

Key words: Plasma Fluid Model, Dispersion Relation, DBD Plasma, Atmospheric Pressure Plasma, Microwave Attenuation

I. 서 론

기체의 외부에서 가해진 높은 에너지는 내부의 분자나 원자를 이온화 시키며, 그 결과로 물질의 상태가 플라즈

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

*국방과학연구소(Agency for Defence Development)

· Manuscript received April 28, 2014 ; Revised June 17, 2014 ; Accepted July 30, 2014. (ID No. 20140428-040)

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

마로 전환된다. 이 때 발생된 플라즈마는 다수의 대전된 입자들을 포함한다. 플라즈마와 전자기파와의 상호작용에는 이러한 입자들 중 주로 전자가 기여한다. 구체적으로는 플라즈마의 상태를 기술하는 다양한 변수 중 전자 밀도(electron density)와 전자 온도(electron temperature) 분포가 전자기파 변화량 계산에 이용된다^[1]. 이 두 변수는 플라즈마 발생기에 따라 그 분포가 큰 차이를 보이며, 그 공간적/ 시간적 변화 범위가 매우 넓다^[2]. 따라서 전파의 플라즈마와의 상호 작용을 분석하기 위하여 발생기 종류에 따른 주요 변수 추출이 선결 과제가 된다.

플라즈마 발생기의 종류에는 플라즈마 제트(jet), 토치(torch), 레이저 발생원 플라즈마 등 다양한 방식이 존재한다. 전자 빔이나 이온 빔 혹은 X-ray 방사 등의 에너지를 통하여 얻어지는 방울(blob) 모양의 플라즈마의 전자 밀도는 가우시안(Gaussian)과 엡스테인(Epstein) 분포의 조합으로 근사시킬 수 있다^[3]. 이를 바탕으로 평판 위에 방울 모양의 플라즈마를 2차원으로 배열하여 전파 감쇠 특성을 분석한 연구가 최근 몇 년간 활발히 수행되어 왔다^[4-6]. 그러나 소수의 경우를 제외하고는 대부분 발생기의 전자 밀도와 전자 온도 분포가 일반적으로 알려져 있지 않다. 따라서 기존의 연구는 플라즈마 내 전자 밀도 분포를 균일(uniform)^[7] 혹은 엡스테인(Epstein) 분포와 같은 단순화된 모형으로 가정하여 계산을 수행하였다^{[8],[9]}. 더불어 시간에 따라 변화하는 변수 값들로 인한 특성 분석은 거의 발표되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 플라즈마 유체 모델을 도입하여 얻어진 시간에 따른 플라즈마 분포 변화를 전파 감쇠량 계산에 반영하는 방식을 제안하였다. 이를 통해 전파 흡수 특성 해석의 정확도를 향상시킬 수 있다.

본 모의실험은 평판 유전체 장벽 방전 구조(dielectric barrier discharge: DBD) 발생기를 대상으로 진행하였으며, 전자기파가 해당 구조로 입사하였을 때 플라즈마로 인한 전파 감쇠량 변화를 계산하였다. 본 발생기는 그림 1과 같이 두 개의 평행한 금속판 표면에 유전체가 위치한 구조를 가진다. 강한 전압을 전극에 가하면 두 유전체 사이의 전자가 가속되어 기존에 있는 이온, 중성입자와 같은 다른 입자들과 충돌한다. 전자를 잃어 발생된 양이온들은 음극을 걸어준 유전체 표면을 향하여 가속되어 충돌하게

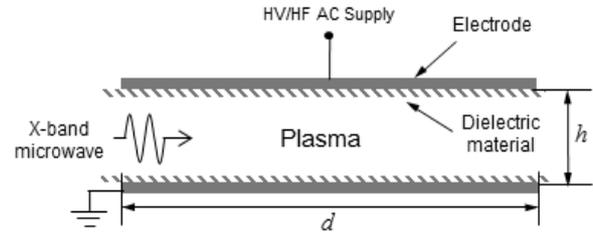


그림 1. 평판 DBD 구조
Fig. 1. The structure of DBD.

되는데, 이때 다수의 전자가 추가적으로 표면으로부터 방출되는 방전(discharge) 현상이 일어나 플라즈마를 발생시킨다.

II. 플라즈마 유체 모델

본 논문에서 사용한 플라즈마 유체 모델은 플라즈마 내의 입자들을 전자와 그 외의 입자로 분류한다^{[10],[11]}. 전자와 비전자 각각에 대하여 표동-확산 방정식(drift-diffusion equation)의 해를 구하여 전자와 이온, 중성 입자들의 출입을 기술한다. 반응이 일어나는 동안 전자가 가지는 에너지는 매우 넓은 범위에서 변화하기 때문에, 이를 반영하기 위하여 에너지 균형 방정식(energy balance equation)이 추가로 필요하다. 따라서 전자에 대하여 전자 밀도 n_e 와 전자 에너지 밀도 n_ϵ 에 관한 두 개의 식 (1)과 (3)을, 그 외의 입자에 대하여 질량 분율(mass fraction) w_k 에 관한 하나의 식 (5)를 풀게 된다^[12].

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)n_e + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e \tag{1}$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e \vec{E})n_e - D_e \nabla n_e \tag{2}$$

$$\frac{\partial n_\epsilon}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)n_\epsilon + \nabla \cdot \Gamma_\epsilon + \vec{E} \cdot \Gamma_\epsilon = R_\epsilon \tag{3}$$

$$\Gamma_\epsilon = -(\mu_\epsilon \vec{E})n_\epsilon - D_\epsilon \nabla n_\epsilon \tag{4}$$

$$\rho \frac{\partial w_k}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla)w_k = \nabla \cdot \vec{j}_k + R_k \tag{5}$$

식 (2)와 (4)는 각각 전자 밀도와 전자 에너지 밀도의 플럭스(flux)를 나타내는 Γ_e 와 Γ_ϵ 를 구하는 식이다. 전

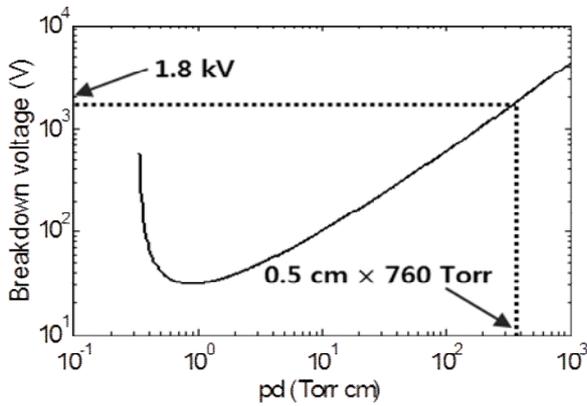


그림 2. 헬륨의 파슨스 커브(Paschen's curve)
Fig. 2. Paschen's curve of helium gas.

자와 전자 에너지의 이동도(mobility) μ_e 와 μ_e 는 표동(drift)을 기술하기 위하여 사용되며, 확산상수(diffusion coefficient) D_e 와 D_e 는 밀도 차로 발생하는 확산의 정도를 나타낸다. 플라즈마 내 화학반응으로부터 새로 생성되거나 소멸되는 전자, 또는 k 번째 비전자 입자의 단위 시간당 밀도 변화량은 R_e 와 R_k 를 통해 계산되며, R_e 는 비탄성 충돌로 인하여 소실되는 단위 시간당 에너지량을 반영하기 위해 사용된다. 방전 현상으로 인한 전자 급증 현상이 R_e , R_k 과 R_e 를 통하여 식 (1)과 (3), (5)에 반영된다. 식 (5)의 \vec{j}_k 는 확산성 플럭스 벡터(diffusive flux vector)로 k 번째 입자가 얼마나 빨리 확산되는 지를 나타내는 변수이다. 식 (1)~(5)는 유한요소법을 이용한 상용툴 COMSOL을 이용하여 계산하였다.

방전 현상이 시작되기 위해 필요한 최소전압을 파괴전압(break down voltage)라 부르며, 이는 기체의 종류에 따라 다르다. DBD 구조에서는 두 금속 평판의 간격 h 와 압력이 주어지면 파슨스 법칙(Paschen's law)에 따라 식 (6)과 같이 파괴전압이 결정된다^[13].

$$V_b = \frac{B \times pd}{A + \ln(pd)} \quad (6)$$

본 유체 모델에서는 헬륨 기체를 가정하였으며, 이때 $A \approx 1.1$, $B=34 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ 이다. 대기압 환경에서, 간격 h 는 5 mm로 설정하였다. 그림 2에서 주어진 헬륨의 파슨스 커브에 따라서 브레이크 다운 전압은 1.8 kV로 얻

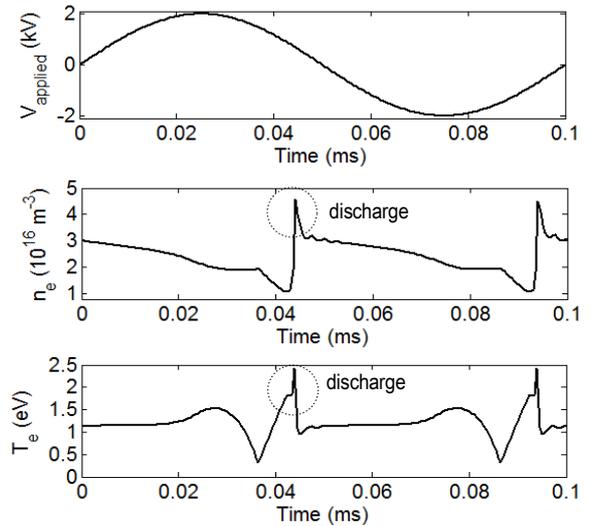


그림 3. 입력전압에 따른 전자밀도와 전자온도의 변화
Fig. 3. Electron density and temperature as the change of applied voltage.

어지며, 이보다 큰 전압이 가해져야 하므로 주파수 10 kHz에서 최고점 간 전압(peak-to-peak) 값을 4 kV으로 결정하여 계산하였다.

본 모의실험에서는 평판의 길이가 충분하여 가장자리로 인한 영향이 무시할 만큼 미미하다고 가정한다. 고전압 발생기에 연결된 평판 전극 사이의 플라즈마의 변화는 가해진 전압의 시간적 변화에 지배적인 영향을 받게 된다. 이때, 평판에 수직 방향으로의 변화가 주된 현상이며, 평판의 수평 방향으로의 변화는 미미하다. 따라서 평판 수평 방향인 전자기파 진행 방향으로의 플라즈마 분포는 일정함을 가정할 수 있다. 결과적으로 평판의 수직 방향에서 플라즈마가 시간에 따라 어떻게 변화하는 지를 계산하는 것으로, 발생기에서 발생된 플라즈마와 전자기파와의 상호 작용 분석을 수행할 수 있다.

방전 현상은 정현파(sinusoidal signal)의 매 주기마다 반복되므로, 한 주기에 대한 분석으로 전체적인 경향성을 파악할 수 있다. 전위의 변화량이 클수록 가해지는 전기적 힘이 증가하게 되어 전자는 더 빠르게 가속되며, 전위 변화량이 일정 수준 이상이 되면 그림 3의 0.08 ms 부근에서처럼 방전 현상이 일어난다. 가해진 정현파의 매 주기마다 위쪽과 아래쪽 유전체 표면에서 교대로 플라즈마

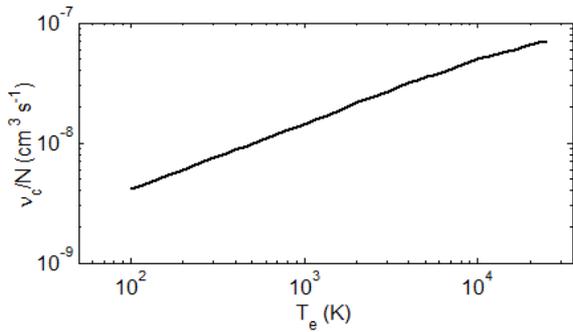


그림 4. 전자온도와 충돌주파수의 관계
Fig. 4. Relation between electron temperature and collision frequency per atom.

가 발생하여 총 두 번 급격한 플라즈마 전자 증가가 발생한다. 이 때 전자 에너지는 충돌로 인하여 소실된다. 그림 3에서 방전 시 전자가 가지고 있는 에너지를 나타내는 척도인 전자 온도 T_e 는 급격하게 감소하고, 전자 밀도 n_e 가 급증하는 것이 관찰 가능하다. 전자 밀도와 전자 온도의 최댓값은 각각 $4.7 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 과 2.48 eV 이다. 이는 참고 문헌 [14]의 동일한 실험 조건에서 측정된 방전 저항 (discharge resistivity)로부터 계산된 전자 밀도인 $4.86 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 과 일치한다. 전자 온도 또한 분광기를 이용하여 측정된 온도값 5.48 eV 와 큰 차이가 나지 않음을 확인할 수 있다.

III. 전자기파 감쇠량 계산

평판 DBD 발생기는 평행 평판 도파관으로 TEM, TE, TM 모드의 전자기파가 동시에 진행하게 된다. 본 논문에서 사용된 구조는 평판 사이 간격이 5 mm 로 TE와 TM 모드의 차단 주파수가 입사한 전자기파의 주파수보다 매우 높다. 그러므로 TEM 모드만이 도파관 내로 진행할 수 있으므로 감쇠량 계산에는 해당 모드만이 고려되었다. TEM 모드일 때, 도파관 내의 전자기파는 식 (7)과 같으므로, 플라즈마 매질 내에서 전자기파가 진행할 때 감쇠량(A)은 식 (8)과 같이 정의된다^[15].

$$E = E_0 (e^{j(\omega t - kx)}) \quad (7)$$

$$A = 10 \log_{10}(P_{out}/P_{in}) = 10 \log_{10}(e^{-2\alpha d}) \quad (8)$$

이 때, 이 값은 감쇠상수 α 와 플라즈마 내에서 전자기

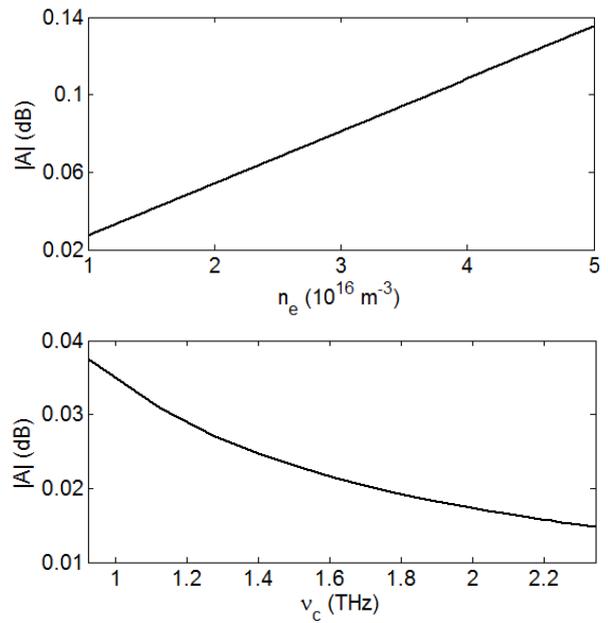


그림 5. 전자 밀도와 충돌 주파수에 따른 감쇠
Fig. 5. Attenuation with the change of electron density and collision frequency.

파가 전파한 거리 d 에 값에 의해서 결정된다. d 는 DBD 발생기의 총 길이로, 7.5 cm 로 설정하였다. 감쇠상수는 식 (9)에서 구할 수 있으며, 이는 분산방정식(dispersion equation)으로 전파 상수 β 와 감쇠상수 α 를 포함하고 있다^[16]. 식 (9)은 플라즈마 주파수 ω_p 와 충돌주파수 ν_c 를 필요로 하며, 전자 밀도가 주어졌을 때 식 (10)으로부터 플라즈마 주파수 ω_p 를 얻을 수 있다. 그림 4와 같이 전자 온도를 이용하여 충돌주파수를 계산하는 것은 참고문헌 [17]에서 수행되었다.

$$k = \beta - j\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\omega_p^2}{c^2 \left(1 - j \frac{\nu_c}{\omega}\right)}} \quad (9)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m \epsilon_0}} \quad (10)$$

그림 5에서 전자밀도는 최댓값을 가질 때 최대 감쇠가 나타난다. 이는 전자기파 감쇠 과정이 대부분 플라즈마 내 전자에 의해서 이루어지기 때문이며, 참여하는 전자의 수가 증가할수록 더 많은 감쇠를 일으키게 된다. 이와 반

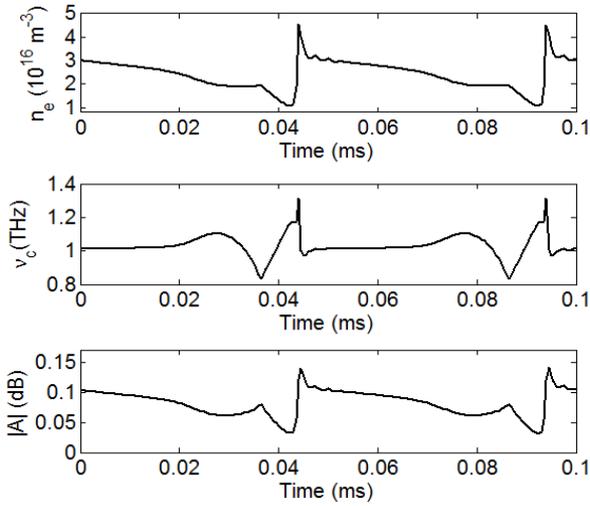


그림 6. 한 주기 내 전자 밀도와 충돌 주파수, 감쇠량 변화
Fig. 6. Electron density, collision frequency and attenuation change in a period.

대로 충돌 주파수가 높을수록 감쇠 정도는 약화되게 된다. 이는 충돌 주파수로 나타나는 전자의 에너지가 높을수록 외부에서 입사한 전자기파에 영향을 적게 받게 되어 감쇠 과정에 기여하는 정도가 감소하기 때문이다. 한 주기 내 전자 밀도와 충돌 주파수 변화 양상은 그림 6과 같으며, 이로부터 시간에 따른 전자기파 감쇠량이 계산 가능하다. 방전으로 인하여 전자 밀도가 급증함에 따라 감쇠량이 증가하며, 전자밀도가 서서히 감소함에 따라서 마찬가지로 감쇠 정도가 약화된다. 반면, 충돌 주파수가 최대인 지점에서는 전자기파 감쇠 정도가 최소로 나타나게 된다.

모의실험 결과에 따르면 시간에 따라 전자 밀도와 충돌 주파수가 큰 범위에서 변화하고, 이에 따라 전자기파 감쇠량이 영향을 받게 된다. 따라서 전파 감쇠량을 측정하여 플라즈마의 전자 밀도를 역추산하는 진단법(diagnostic method)과 같은 경우에 상수 혹은 간략화한 플라즈마 모델을 차용한다면 큰 오류를 야기하게 될 것이다. 그림 6에서 플라즈마 주파수를 상수로 가정한다면 0.07 ns과 0.18 ns에서 전자 온도의 하강으로 인하여 발생하는 급격한 감쇠량 증가가 반영되지 못한다. 이러한 오차는 정확도 감소의 원인이 되므로 주요 변수의 시간적 변화에 따라 전자기파 감쇠량이 얼마나 영향을 받게 되는가를 고

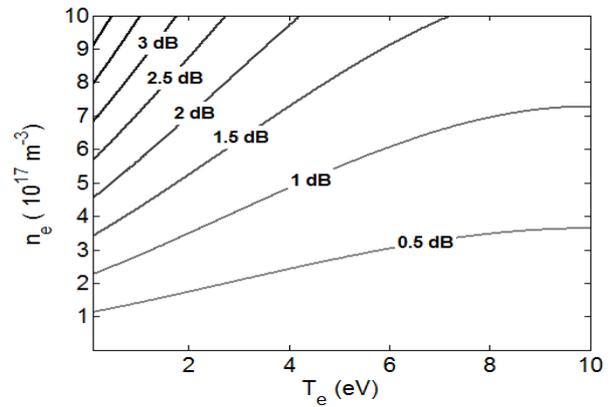


그림 7. 전자 밀도와 충돌 주파수에 따른 감쇠량 변화
Fig. 7. Attenuation with the change of electron density and collision frequency.

려하여야 한다.

그림 7은 본 논문에서 사용한 DBD 플라즈마 발생기의 전자 온도와 전자 밀도의 변화에 따른 전자기파 감쇠 경향을 나타내고 있다. 전자 온도가 낮을수록, 전자 밀도가 높을수록 감쇠량이 급격하게 변화하므로, 이 구간에서는 적은 변수 값의 변동일지라도 감쇠량에 큰 변화를 야기한다. 전자 온도가 0 eV에 근접할 때 전자 밀도가 $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3} \sim 10 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 까지 변함에 따라 감쇠량의 변화폭이 5 dB에 이르지만, 10 eV인 경우에는 1.5 dB에 그친다. 또한, 전자 온도가 1 eV에서 10 eV까지 증가할 때, $10 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 에서는 4 dB 가까이 변하나, $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 의 전자밀도에서는 감쇠량의 변화가 거의 관찰되지 않는다. 그러므로 상대적으로 높은 전자 온도와 낮은 전자 밀도 조건에서 상수 플라즈마 변수 가정을 이용할 수 있다. 나아가 계산을 통하여 원하는 정도의 신뢰도에서 시간 비의존적 변수 값을 적용 가능한 범위를 찾아내는 것이 가능할 것이다.

IV. 결 론

플라즈마와 전자기파의 상호작용을 분석하는 데 있어 주요 변수들을 추출하기 위하여 플라즈마 유체 모델을 도입하였다. DBD 구조에서 발생된 플라즈마의 전자 밀도와 전자 온도의 시간적 변화를 계산하고, 이를 통하여 전자기파의 감쇠량 변화를 분석할 수 있었다. 계산 결과, 한 주기 내에서 방전이 시작되어 전자 밀도가 급증하는

순간에 감쇠량이 가장 높았으며, 전자 온도가 높은 경우에는 감쇠 효과가 약화됨을 확인하였다. 또한, 각 변수의 변화에 따른 전자기파 감쇠 경향을 계산하고, 그 결과를 분석하였다. 이를 토대로 향후 연구에서 시간 비의존적 변수를 가정하였을 때 야기될 수 있는 오차 범위와 신뢰도를 구할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 임의로 주어진 플라즈마 발생기에 대하여 주요 변수 추출을 가능케 함으로써, 발생기의 구조적 특징과 에너지원에 따라 고유하게 나타나는 전자기파와의 상호작용 분석이 가능함을 시사한다.

References

- [1] A. P. Zilinskij, I. E. Sacharov, and V. E. Golant, *Fundamentals Plasma Physics*, Moscow: MIR, 1983.
- [2] 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", *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 6, pp. 1685-1694, 1998.
- [3] B. Chaudhury, S. Chaturvedi, "Study and optimization of plasma-based radar cross section reduction using three-dimensional computations", *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 11, pp. 2116-2127, 2009.
- [4] B. Chaudhury, S. Chaturvedi, "Three-dimensional computation of reduction in radar cross section using plasma shielding", *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 6, pp. 2027-2034, 2005.
- [5] B. Chaudhury, S. Chaturvedi, "Comparison of wave propagation studies in plasmas using three-dimensional finite-difference time-domain and ray-tracing methods", *Physics of Plasmas*, vol. 13, no. 12, pp. 123302, 2006.
- [6] B. Chaudhury, S. Chaturvedi, "Study and optimization of plasma-based radar cross section reduction using three-dimensional computations", *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 11, pp. 2116-2127, 2009.
- [7] O. Il-Young, H. Yongjun, and Y. Jong-Gwan, "Extremely low dispersion higher order (2,4) 2-D-FDTD scheme for maxwell-boltzmann system", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 12, pp. 6100-6106, 2013.
- [8] G. Cerri, F. Moglie, R. Montesi, P. Russo, and E. Vecchioni, "FDTD solution of the maxwell-boltzmann system for electromagnetic wave propagation in a plasma", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 2584-2588, 2008.
- [9] H. W. Yang, "A FDTD analysis on magnetized plasma of Epstein distribution and reflection calculation", *Computer Physics Communications*, vol. 180, no. 1, pp. 55-60, 2009.
- [10] J. Boeuf, L. Pitchford, "Electrohydrodynamic force and aerodynamic flow acceleration in surface dielectric barrier discharge", *Journal of Applied Physics*, vol. 97, no. 10, pp. 103307-103307-10, 2005.
- [11] COMSOL, *Comsol multiphysics modeling guide 4.3b* (COMSOL AB, Stockholm, 2013).
- [12] D. B. Graves, K. F. Jensen, "A continuum model of DC and RF discharges", *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 2, pp. 78-91, 1986.
- [13] A. A. Fridman, L. A. Kennedy, *Plasma Physics and Engineering*, CRC, 2004.
- [14] A. K. Srivastava, M. K. Garg, K. G. Prasad et al., "Characterization of atmospheric pressure glow discharge in helium using Langmuir probe, emission spectroscopy, and discharge resistivity", *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 35, no. 4, pp. 1135-1142, 2007.
- [15] A. Srivastava, G. Prasad, P. Atrey, and V. Kumar, "Attenuation of microwaves propagating through parallel-plate helium glow discharge at atmospheric pressure", *Journal of Applied Physics*, vol. 103, no. 3, pp. 033302-033302-7, 2008.
- [16] G. Cerri, F. Moglie, R. Montesi et al., "FDTD solution of the Maxwell-Boltzmann system for electromagnetic wave propagation in a plasma", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 8, pp. 2584-2588, 2008.

[17] P. Baille, J. -S. Chang, A. Claude, R. Hobson, G. Ogram, and A. Yau, "Effective collision frequency of electrons in noble gases", *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, vol. 14, no. 9, p. 1485, 1981.

[18] Y. Kim, I. Y. Oh, Y. Hong, and J. G. Yook, "Numerical investigation of interaction between argon glow discharge and electromagnetic waves", *Isromac-15*, Feb. 2014.

김 유 나



2012년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2012년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
 [주 관심분야] 수치해석, FDTD, 열유체 해석, 플라즈마, CFD, 안테나

홍 용 준



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

오 일 영



2007년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 2007년 3월~2013년 8월: 연세대학교 전자공학과 석박사 통합과정
 [주 관심분야] 수치 해석, 플라즈마 해석, HEMP, EMI/EMC, 안테나

육 중 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년 1월~1988년 10월: University 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 등

정 인 균



2011년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2011년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
 [주 관심분야] FDTD, 플라즈마 해석