

# 유체역학에 바탕한 플라즈마 모델링을 통한 유전체 장벽 방전 플라즈마의 전파 특성 해석

## Electromagnetic Characteristics of Dielectric Barrier Discharge Plasma Based on Fluid Dynamical Modeling

김유나 · 오일영 · 홍용준\* · 육종관

Yu-na Kim · Il-Young Oh · Yong-Jun Hong\* · Jong-Gwan Yook

### 요 약

본 논문은 유체 역학적 관점에서 플라즈마 모델링을 통하여 전자 밀도를 계산하는 방식을 제안하였다. 그럼으로써 기존 논문들에서 사용된 단순화된 플라즈마 모델링의 한계를 극복하였다. 계산된 전자 밀도를 finite-difference time-domain(FDTD) 기법에 기반한 맥스웰-볼츠만 시스템에 연계하여 다양한 각도에서 입사하는 전자기파에 대한 산란파 계산을 수행하였다. 전반부에서는 유전체 장벽 방전(dielectric barrier discharge: DBD) 구조에서 발생하는 플라즈마를 모델링하였다. 다수의 모델링 방식 중, 시간 독립적인 변수를 도입하여 정지계의 전위 분포와 전자 밀도 분포를 계산하는 Suzen-Huang 모델을 이용하였다. 후반부에서는 변조된 가우시안 펄스를 플라즈마에 입사시켜 발생하는 산란파를 FDTD 기법을 이용하여 계산하였으며, 이를 바탕으로 레이더 단면적(radar cross section: RCS)을 관찰하였다. 모의실험 결과, DBD 플라즈마에 의해 1~2 dB 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 기존의 논문에서 알려진 RCS 측정 결과와 유사한 양상을 보이며, 본 논문에서 제안한 모델링의 유효성을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, plasma modeling is achieved using fluid dynamics, thereby electron density is derived. The way proposes the key to overcoming the limitations of conventional researches which adopt simplified plasma model. The result is coupled with Maxwell-Boltzmann system in order to calculate scattering waves in various incident angle. The first part is dedicated to perform plasma modeling in dielectric barrier discharge(DBD) structure. Suzen-Huang model is adopted among various models due to the fact that it uses time independent variables to calculated potential and electron distribution in static system. The second part deals with finite difference time domain(FDTD) scheme which computes the scattered waves when the modulated Gaussian pulse is incident. Founded on it, radar cross section(RCS) is observed. Consequently, RCS is decreased by 1~2 dB with DBD plasma. The result is analogous to the RCS measurement in other researches.

Key words : FDTD, RCS, Fluid Dynamics, DBD Plasma

### I. 서 론

Finite-difference time-domain(FDTD)를 이용하여 플

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

\*국방과학연구소(Agency for Defence Development)

· Manuscript received November 30, 2012 ; Revised January 21, 2013 ; Accepted February 4, 2013. (ID No. 20121130-10S)

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

라즈마의 전자파 흡수 특성을 분석한 연구들이 수십년간 활발히 진행되어 왔다. 이와 같은 연구의 기반이 되는 플라즈마 해석을 위해서는 플라즈마 발생 환경과 상황에 맞는 적절한 플라즈마 변수들의 결정이 중요하다. 본 논문은 플라즈마 전자 밀도 분포 해석에서 새로운 방식을 제안하였다. 기존의 연구는 플라즈마의 전자 밀도 분포를 극도로 단순화한 가정값을 사용하였다<sup>[1],[2]</sup>. 이는 실제 플라즈마의 분포와 큰 차이를 나타내기 때문에 산란과 해석의 정확도를 낮추는 요인이 된다. 따라서 유체 역학적 관점에서 검증된 플라즈마 모델링에서 얻어진 분포를 FDTD에 기반한 맥스웰-볼츠만 시스템에 대입하여 계산함으로써<sup>[2],[3]</sup> 상대적으로 높은 정확도를 가지는 플라즈마의 전자파 산란 특성이 분석 가능하다. 특히 본 논문에서 사용된 dielectric barrier discharge(DBD, 유전체 장벽 방전 구조)에서 발생된 플라즈마의 경우 현재까지 RCS 해석을 수행한 모의실험이 전무하다. DBD를 비행체에 부착하여 주변부의 유동을 변화시키는 기술 개발이 활발하게 진행되고 있기 때문에, 그 전자기적 특성 분석에 대한 요구가 증대되고 있다. 해당 구조를 분석한 모델로는 집중 상수 회로 모델(lumped element circuit model)<sup>[4]</sup>, 강제 선형 모델(forced linearization model)<sup>[5]</sup> 등이 있다. 그러나 이러한 모델들은 선형적 전위 분포를 가정하고 있으므로 본 연구에는 부적합하다. 그러므로 이와 달리 기존의 유체 역학에 가우스 법칙을 도입한 Suzen-Huang 모델을 채택하였다. 이와 같은 방식으로 얻어진 전자 밀도 분포를 바탕으로 FDTD 기법을 이용하여 산란과 계산을 수행하였다.

## II. 유체역학에 기반한 플라즈마 모형화

### 2-1 나비에 스톡스 방정식과 맥스웰 방정식의 결합

유체 역학은 식 (1)과 같은 나비에-스톡스(Navier Stokes) 방정식을 사용한다<sup>[6]</sup>. 플라즈마 모델링은 나비에-스톡스 방정식과 맥스웰 방정식을 결합하여 수행하며, 식 (1)~(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = \bar{F} - \nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \bar{u} \quad (1)$$

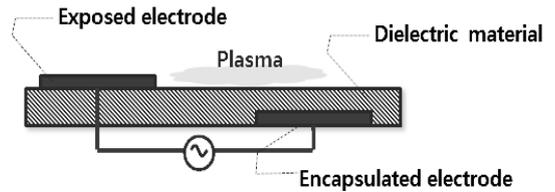


그림 1. DBD 구조

Fig. 1. The structure of DBD.

$$\bar{J} = -e\rho_s \bar{v} \quad (2)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial}{\partial t} \bar{D} + \bar{J} \quad (3)$$

유체 역학은 단위 부피(control volume)의 위치와 속도, 밀도를 직접적으로 기술한다. 식 (1)에서  $\bar{u}$ 는 단위 부피의 속도를 나타낸다. 우변에서  $\bar{F}$ 는 외부의 힘,  $p$ 는 압력,  $Re$ 는 레이놀즈 수(Reynolds number)를 나타낸다. 식 (2)에서  $e$ 는 전자의 전하량,  $n$ 은 전자밀도이며  $\bar{v}$ 는 속도 분포 함수이다. 식 (1)에서 언급된  $Re$ 의 정의는 식 (4)와 같으며, 플라즈마 전자 밀도  $\rho_s$ 와 플라즈마 흐름의 평균 속도  $v_s$ , 기하학적 구조에 의해서 정의되는 특성 길이(characteristic length)  $L$ 와 점성 계수  $\mu$ 의 비, 다시 말하면 관성력과 점성력의 비율을 나타낸다.

$$Re = \frac{\rho_s v_s L}{\mu} \quad (4)$$

플라즈마는 도전성 유체(electrically conductive)이기 때문에 외부 전자기장에 따라 그 분포가 크게 달라진다. 따라서 전자기장에 따른 플라즈마의 분포 변화를 반영할 기법이 추가로 필요하다. 이에 본 논문에서는 가우스의 법칙(Gauss's law)을 이용한 Suzen-Huang 모델을 사용하였다. 계산된 전자 밀도는 식 (2)에서 전류 밀도  $\bar{J}$  계산에 이용되며, 그 결과값을 맥스웰 방정식에 대입하여 플라즈마에 입사한 전자기파의 산란파를 계산할 수 있다<sup>[2],[3]</sup>.

### 2-2 DBD에서 발생된 플라즈마 계산

DBD는 그림 1과 같이 두 개의 전극 사이에 유전체가 위치한 형태로, 이 때 플라즈마는 유전체에 감싸인 전극(encapsulated electrode)의 위쪽에 쌓이게 된다. 도전성(electrically conductive) 유체인 플라즈마를

분석하기 위해서는 식 (1)의 나비에-스톡스 방정식에 추가로 전자 밀도 분포가 전위에 따라 어떻게 변화하는 지 반영해 주어야 한다. 본 논문에서 사용된 Suzen-Huang 모델<sup>[7],[8]</sup>은 발생된 플라즈마의 두께가 충분히 얇은 것을 가정하고 있다. 이를 바탕으로 식 (5)와 같이 전위  $\Phi$ 를  $\phi$ 와  $\varphi$ 로 나누어 분석하는 것이 가능하다.

$$\Phi = \phi + \varphi \quad (5)$$

$$\rho_c = -\frac{\epsilon_0}{\lambda_d^2} \varphi \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \rho_c) = -\frac{\rho_c}{\lambda_d^2} \quad (8)$$

여기서  $\phi$ 는 외부 전기장에 의한 전위이며,  $\varphi$ 는 전자 밀도  $\rho_c$  분포에 의한 전위이다. 각 변수는 가우스의 법칙(Gauss's law)를 이용하여 식 (7)의 프아송 방정식(Poisson equation)과 식 (8)의 헬름홀츠 방정식(Helmholtz equation)으로 각각 계산 가능하다. 특히 식 (8)은 식 (6)을 이용하여 전위  $\varphi$ 를  $\rho_c$ 로 바꾸어 정리한 것이다. 식 (6)과 식 (8)의  $\lambda_d$ 는 드바이 길이(Debye length)로 플라즈마가 전극 주변의 전기적 인력을 넘어 흘러갈 수 있는 최소 거리를 의미한다.

본 모델은 시간 독립적인 변수를 도입하여 정지계(static)에서의 플라즈마를 계산하며, 이 과정은 다음과 같다. 식 (5), (6)에서의 전위  $\phi$ 와 전자 밀도  $\rho_c$ 는 시간 의존적 변수이다. 따라서 식 (9) 및 식 (10)과 같이 시간 변수를 제거하고 정규화(normalized)시킨 변수  $\phi^*$ 와  $\rho_c^*$ 를 이용하여 방정식을 계산한다.  $\rho_{c,w}$ 은 유전체로 감싸인 전극의 상단 표면(wall)의 전자 밀도를 나타낸다.

$$\phi^* = \frac{\phi}{\phi_{\max} f(t)} \quad (9)$$

$$\rho_c^* = \frac{\rho_c}{\rho_{c,\max} f(t)} \quad (10)$$

Enloe의 연구 결과에 따라 유전체로 감싸인 전극의 상단 표면에서의 전자 밀도 경계 조건(boundary

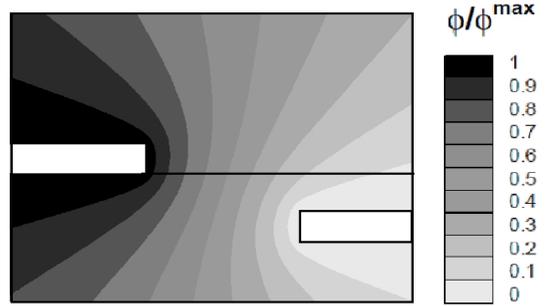


그림 2. 전위 분포  
Fig. 2. Electric potential distribution.

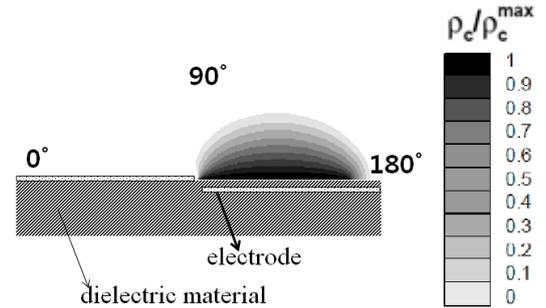


그림 3. 전자 밀도 분포  
Fig. 3. Electron density distribution.

condition)을 가우시안 분포로 설정하였다<sup>[9],[10]</sup>. 또한, M. Forte의 논문에서 유전체로 감싸인 전극의 폭을 0~50 mm까지 증가시킬수록 발생하는 플라즈마의 부피가 증가하는 것을 실험적으로 보였으므로<sup>[11]</sup>, 본 모의실험에서는 큰 부피의 플라즈마를 얻기 위하여 전극 크기를 50 mm로 결정하였다.

### 2-3 플라즈마 모의실험 결과

그림 2는 프아송 방정식을 계산하여 얻은 전위 분포이며, 헬름홀츠 방정식으로부터 얻은 플라즈마의 전자 밀도 분포는 그림 3과 같다. 전자 밀도의 최대치는 유전체에 감싸인 전극 윗면에서 나타난다. 모의실험 시 입사하는 전자기파의 동작 주파수 영역이 8~10 GHz이기 때문에 플라즈마에 입사하는 전자기파 감쇠 효과를 보기 위해서는 플라즈마 주파수가 8 GHz 이하의 값으로 설정되어야 한다. 따라서 식 (11)에서 플라즈마 주파수( $f_p$ )가 7.5 GHz가 되도록 최대 전자 밀도가  $7 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 으로 할당하여 계산하였다.

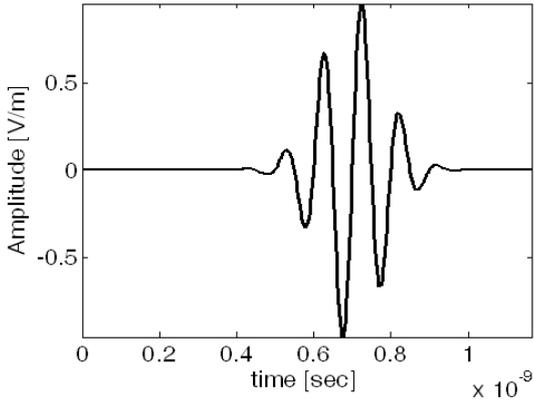


그림 4. 변조된 가우시안 펄스  
Fig. 4. Modulated Gaussian pulse.

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (11)$$

모의 실험 결과, 플라즈마의 두께는 전자밀도 최대치의 35 %에 해당하는 지점이 5 mm, 최대치의 1 %로 잔존하는 지점이 11.5 mm로 나타난다. 유전체의 상대유전율은 실제 DBD 제작에 사용되는 아크릴 유리의 2.7로 설정하였다.

### III. DBD 플라즈마의 전자기적 특성

#### 3-1 DBD 플라즈마의 전자기적 특성 분석

이와 같은 DBD 플라즈마에 그림 4와 같은 변조된 가우시안 펄스를 입사시켰다. 이 때, 펄스는 중심 주파수 10 GHz에서 대역폭 4 GHz를 가진다. 다음으로 FDTD를 이용하여 산란파를 계산하였다. 본 논문에서는 가우시안 펄스가 유전체에 90°, 105°로 입사하는 경우에 RCS를 계산하였다<sup>[12]</sup>. 그림 5은 전자기파가 90°로 유전체를 향하여 입사하였을 경우에 RCS를 계산한 결과이다. 플라즈마가 발생 시 최대 3.5 dB까지 감소하며, 이 값은 RCS 최저점에서 높게 나타난다. 반사의 법칙에 따라 같은 지점, 관찰각도 역시 90°일 때 산란파 최고치가 나타나며, 플라즈마가 존재할 경우 해당 각도에서 약 0.5 dB가 감소한다. 그림 6은 전자기파가 105°로 입사하였을 경우를 나타낸 결과이다. 플라즈마가 최대 2 dB 감소하며, 정반사 지점(specular reflection)인 75°에서 가장 높은 값의 RCS가 나타난다. 해당 각도에서는 약 1 dB의

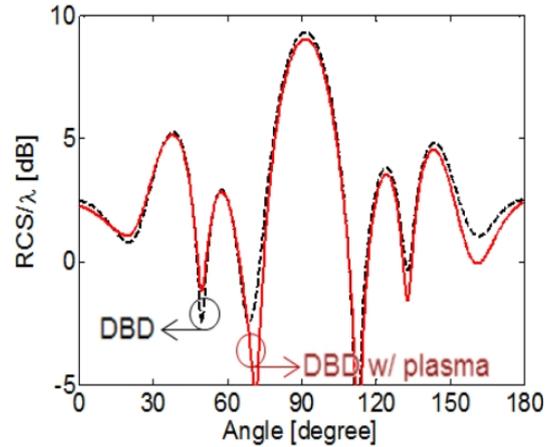


그림 5. 가우시안 펄스 90° 입사 시 RCS 변화  
Fig. 5. RCS when pulse is incident in 90°.

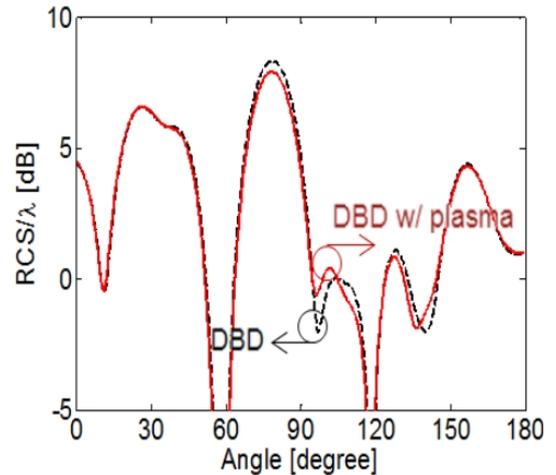


그림 6. 가우시안 펄스 105° 입사 시 RCS 변화  
Fig. 6. RCS when pulse is incident in 105°.

감소를 관찰이 가능하다. 이와는 대조적으로 90°에서 100° 부근에서 RCS가 증가하는 양상을 나타내는데, 이것은 플라즈마가 발생했을 때, 플라즈마와 공기의 경계면에서 산란파가 추가적으로 발생하기 때문이다.

### IV. 유체역학적 모델링의 타당성

S. Wolf와 M. Arjomandi가 수행한 실험<sup>[13]</sup>에서는 각각 1.2 cm의 너비를 가지는 두 개의 전극을 포함하는 DBD 구조 네 개를 일렬로 배치하였다. 이 구조에서 플라즈마는 유전체에 감싸인 총 네 개의 전극

위쪽에서만 발생한다. 본 모의실험은 5 cm의 전극을 사용하였으므로, 실험과 유사한 범위에서 플라즈마가 발생하게 된다. 언급한 논문에 따르면 실제 측정에서 DBD 구조 상단으로 약 5 mm의 높이를 가지는 플라즈마가 육안으로 관찰되었다. 이 때 측정된 monostatic RCS는 최대 2 dB 가량 감소한다. 전자기파가 DBD 구조에 수직으로 입사하는 90°에서 약 1~2 dB 가량의 RCS가 감소하는 현상이 나타나며 이 수치는 본 논문의 모의실험 결과와 유사하다. 이를 근거로 본 논문에서 수행한 유체 역학을 통한 DBD 플라즈마 모델링의 유효성을 확인하였다.

## V. 결 론

본 논문에서는 유체 역학적 플라즈마 모델링을 이용하여 전자밀도를 계산하는 방식을 제안하였다. DBD 구조에서 발생된 플라즈마 모델링은 Suzen-Huang model을 도입하여 수행되었다. 이를 통해 계산된 전자 밀도를 FDTD를 기반으로 한 맥스웰-볼츠만 시스템에 대입하여 전자기파가 DBD 구조로 입사하였을 때의 산란파를 계산하였다. 모의실험 결과, DBD에서 발생된 플라즈마에 의해 RCS가 1~2 dB 흡수되는 특성을 관찰할 수 있었다. 이는 기존의 논문에서 알려진 실험 결과와 유사하며, 본 논문에서 제안한 플라즈마 모델링이 높은 정확도를 가지는 것을 확인하였다. 또한, 본 모의실험은 2차원 FDTD를 이용하여 수행되었으나, 향후 3차원으로 확장시킨다면 추가적으로 발생하는 효과까지 고려하여 해석의 정확도를 증가시킬 수 있을 것이다. 본 논문은 나아가 복잡한 기하학적 구조 혹은 난류 특성을 포함한 상황에서도 유체 역학과의 커플링을 통하여 산란파 해석에 보다 현실적인 접근이 가능함을 시사한다.

## 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", *Physics of Plasmas*, vol. 13, p. 123302, Dec. 2006.

[2] G. Cerri, F. Moglie, R. Montesi, P. Russo, and E. Vecchioni, "FDTD solution of the Maxwell-Boltz-

mann system for electromagnetic wave propagation in a plasma", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 56, no. 8, pp. 2584-2588, Aug. 2008.

[3] U. S. Inan, R. A. Marshall, *Numerical Electromagnetics: The FDTD Method*, Cambridge University Press, 2011.

[4] D. M. Orlov, T. C. Corke, and M. Patel, "Electric circuit model for aerodynamic plasma actuator", *AIAA Paper*, vol. 126, 2006.

[5] B. Jayaraman, W. Shyy, "Modeling of dielectric barrier discharge-induced fluid dynamics and heat transfer", *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 44, pp. 139-191, Apr. 2008.

[6] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, and W. Shao, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, vol. 3, Wiley York, NY, USA, 1998.

[7] Y. B. Suzen, P. G. Huang, "Simulations of flow separation control using plasma actuators", *AIAA Paper*, vol. 877, Jan. 2006.

[8] A. Bouchmal, "Modeling of dielectric-barrier discharge actuator", *Unpublished Thesis(M.A.)*, Delft University of Technology, Mar. 2011.

[9] C. L. Enloe, Thomas E. McLaughlin, Robert D. VanDyken, and John C. Fischer, "Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: Geometric effects", *AIAA Journal*, vol. 42, pp. 595-604, Mar. 2004.

[10] C. L. Enloe, T. E. McLaughlin, R. D. VanDyken, and K. D. Kachner, "Plasma structure in the aerodynamic plasma actuator", *AIAA Journal*, vol. 844, Jan. 2004.

[11] M. Forte, J. Jolibois, J. Pons, E. Moreau, G. Touchard, and M. Cazalens, "Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control", *Exp. in Fluids*, vol. 43, pp. 917-928, 2007.

[12] K. Umashankar, A. Taflove, "A novel method to analyze electromagnetic scattering of complex objects", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, pp. 397-405, Nov. 1982.

[13] S. Wolf, M. Arjomandi, "Investigation of the effect of dielectric barrier discharge plasma actuators on the radar cross section of an object", *Journal of*

*Physics D: Applied Physics*, vol. 44, p. 315202, Jul. 2011.

김 유 나



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