

## 플라즈마의 특성 분석을 위한 수정된 로렌츠 분산 모형 기반 FDTD 알고리즘

### FDTD Algorithm Based on the Modified Lorentz Dispersive Model for the Analysis of the Characteristics of Plasma

안옥현 · 김상인 · 조창석 · 오테주 · 이용식 · 오일영\* · 임진우\*\* · 하정제\*\* · 배지훈\*\* · 유흥철\*\* · 육종관

Wookhyun Ahn · Sangin Kim · Changseok Cho · Taejoo Oh · Yongshik Lee · Ilyoung Oh\*  
Jinwoo Yim\*\* · Jungje Ha\*\* · Gihun Bae\*\* · Heung Cheol You\*\* · Jong-Gwan Yook

#### 요 약

본 논문은 유한 차분 시간 영역법(FDTD: finite-difference time-domain)에 적용 가능한 플라즈마 분산 모형을 제안한다. 주파수에 따라 전기적 특성이 변하는 플라즈마의 분산 특성을 정확하고 효율적으로 모델링하기 위해 수정된 로렌츠 분산 모형을 이용하여 표현하였다. 가중최소제곱법 기반의 복소 곡선 접합법을 적용하여 플라즈마에 대한 수정된 로렌츠 분산 모형의 계수를 추출하였으며, 수정된 로렌츠 분산 모형을 FDTD에 적용하는 방법을 논의하였다. 본 논문에서 제안한 수정된 로렌츠 분산 모형 기반의 플라즈마 모형이 유전체 장벽 방전(DBD: dielectric barrier discharge) 플라즈마 발생기를 유전체 슬래브로 등가 모델링하여 추출한 유전율의 데이터와 일치하는 것을 확인하였다. 광대역 레이더 단면적(RCS: radar cross-section) 측정 실험의 결과와 비교를 통해 제안한 수정된 로렌츠 분산 모형 기반의 FDTD 알고리즘의 정확도를 검증하였다.

#### Abstract

In this paper, to analyze the dispersive characteristics of plasma, a dispersive model suitable for the finite-difference time-domain (FDTD) method is proposed. The dispersive characteristics of plasma with varying electrical properties according to frequency were accurately and efficiently expressed using the modified Lorentz dispersive model. The coefficient of the modified Lorentz dispersive model was extracted by applying complex curve fitting based on the weighted least squares method. The method of applying the modified Lorentz dispersion model to the FDTD is discussed. The plasma model based on the modified Lorentz dispersion model proposed in this paper was verified to match the data of the dielectric barrier discharge (DBD) plasma generator from dielectric slab equivalent modeling. The accuracy of the proposed FDTD algorithm based on the modified Lorentz dispersive model was verified by comparison with the results of the broadband radar cross-section (RCS) measurement experiment.

Key words: FDTD, Dispersion, Plasma, Complex-Curve Fitting

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 항공 피탐지 감소기술 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electric and Electronic Engineering, Yonsei University)

\*동양미래대학교 정보전자공학과 (Department of Information Electronic Engineering, Dongyang Mirae University)

\*\*국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

· Manuscript received October 29, 2020 ; Revised November 8, 2020 ; Accepted February 21, 2021. (ID No.20201029-092)

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

## I. 서 론

FDTD는 Finite Element Method나 Method of Moments와 달리 행렬 계산이 필요하지 않으며, 한 번의 모의실험을 통해 광대역 특성을 확인할 수 있는 장점이 있는 시간 영역 알고리즘이다. 또한, FDTD는 Maxwell 방정식을 이산화하여, 복잡하고 다양한 구조를 모델링하기에 매우 용이하므로 현재 다양한 분야에서 많이 사용되고 있다<sup>[1]~[4]</sup>. 그러나, 기본적인 FDTD 알고리즘은 주파수 영역 알고리즘과 달리 주파수에 따라 유전율이 변하는 분산 매질을 분석하는데 어려움이 있다.

플라즈마는 전자기파를 흡수, 산란시키는 매질로써 Monostatic RCS 측면에서 좋은 효과를 기대할 수 있기에, RCS 저감 연구와 이를 통한 스텔스 관련 연구에 적용되어왔다<sup>[5]~[9]</sup>.

플라즈마는 주파수에 따라 유전율이 변화하는 분산 특성을 가지고 있는 매질이다. 과거부터 분산 특성을 가지는 매질을 드바이 모델, 로렌츠 모델, 드루드 모델 등을 시간 영역 전자기 수치해석 기법인 FDTD에 적용하기 위한 연구는 지속되었다<sup>[10]~[15]</sup>. 대부분의 플라즈마의 전기적 특성을 드루드 모델 기반으로 데이터화하고자 하는 연구가 지속되어 왔으나, 실제 플라즈마를 측정된 데이터와는 큰 오차가 존재했다<sup>[16]~[18]</sup>.

보다 정확하고 효율적으로 매질의 분산 특성을 분석하기 위해 2차 복소 유리함수(QCRF: quadratic complex rational function)를 적용한 QCRF-FDTD 알고리즘이 개발되었다<sup>[19]~[21]</sup>. 이는 가중최소제곱법 기반의 복소 곡선 적합법을 적용하므로, 다른 기법들과 달리 초기값 없이 계수를 구할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 분산 매질과 고정된 도전율을 갖는 물체가 동시에 존재하는 문제에 대한 분석은 수행되지 않았다.

수정된 로렌츠 분산 모형은 앞서 언급한 드바이 모델, 로렌츠 모델, 드루드 모델보다 높은 자유도를 가진다는 장점이 있으며, 동시에 QCRF 모델보다 한 차수 낮은 미분 방정식을 고려하므로, 계산 효율을 증가시킬 수 있다<sup>[22],[23]</sup>.

본 논문에서는 9~11 GHz 대역에서 플라즈마의 유전율을 정확하게 표현하는 동시에 고정된 도전율을 가지는 대상이 포함된 문제에 적용 가능한 일반화된 FDTD 분산

특성 모델링을 제안한다. 본 연구에서는 수정된 로렌츠 분산 모형 기반의 FDTD 알고리즘을 통해 9~11 GHz에서의 플라즈마에 의한 전자기파 흡수, 산란 특성을 분석하고, 측정 데이터와 비교 검증하였다.

## II. 수치 해석 방법

### 2-1 플라즈마 분산 특성 모델링

9~11 GHz에서 고정된 도전율이 포함된 대상과 플라즈마가 동시에 존재하는 문제에 대한 분석을 위하여 일반화된 수정된 로렌츠 분산 모형 기반의 FDTD 알고리즘을 개발하였다. 기존 Yee FDTD 알고리즘의 경우, 광대역 분산 특성 분석이 불가능한 기법인 반면, 제안한 수정된 로렌츠 분산 모형 기반의 FDTD 알고리즘은 광대역으로 플라즈마의 분산 특성을 분석할 수 있다.

수정된 로렌츠 분산 모형 기반 FDTD 알고리즘은 QCRF 분산 모형 기반 알고리즘보다 한 차수 낮은 연산이 가능하므로 계산 효율이 증가한다. 고정된 도전율이 포함된 문제를 해석하기 위하여 QCRF에서 사용한 상대 유전율의 표현 방식인  $\tilde{D}$ 와  $\tilde{E}$ 의 관계를 사용하는 대신, 식 (1)과 같이  $\tilde{J}$ 와  $\tilde{E}$ 의 관계를 사용하였으며, 표 1에 각 관계에 따른 연산량을 비교하였다. JE 전개식과 DE 전개식 모두 하나의 필드 성분에 6개의 동일한 변수를 가지고 있으나, 연산량 측면에서 JE 전개식은 11번의 덧셈/뺄셈(A/S: addition/subtraction)과 13번의 곱셈/나눗셈(M/D: multiplication/division)이 연산에 사용되므로 계산 효율이 향상됨을 확인할 수 있다. 플라즈마의 분산 특성을 표현하기 위하여, 상대 유전율은 식 (2)와 같이 수정된 로렌츠 분산 모형으로 표현된다.

표 1. 플라즈마에 대한 FDTD 분산 모델의 연산량 비교  
Table 1. Comparison of computational quantities of dispersive FDTD modeling of plasma.

Formula	Variable	Operation count	
		A/S	M/D
DE	6	14	15
JE	6	11	13

$$\tilde{J}(\omega) = j\omega\epsilon_0 \frac{A_0 + A_1(j\omega)}{1 + B_1(j\omega) + B_2(j\omega)^2} \tilde{E}(\omega) \quad (1)$$

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \frac{A_0 + A_1(j\omega)}{1 + B_1(j\omega) + B_2(j\omega)^2} \quad (2)$$

수정된 로렌츠 분산 모형의 정확도는 2, 3차 복소 유리 함수 분산 모형의 정확도와 큰 차이가 없다. 또한, QCRF 분산 모형과 달리 분자의  $(j\omega)^2$  항이 제거되어 계산 효율이 증가하게 되므로 효율적이고 정확하게 플라즈마의 분산 특성을 광대역으로 분석하게 된다.

QCRF 분산 모형에서 적용한 방법과 동일한 가중최소 제곱법 기반의 복소 곡선 접합법을 적용하여, 계수  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ 를 추출했다. 그러나, 기존의 QCRF 분산 모형과 달리  $\tilde{J}$ 와  $\tilde{E}$ 의 관계를 통한 모델링이므로, 기존의 행렬식은 수정된  $4 \times 4$  행렬인 식 (7)이 된다. 또한, 드루드 모델과 로렌츠 모델에 가중최소제곱법 기반의 복소 곡선 접합법을 사용하여 계수를 추출할 경우, 해당 모델의 주요 파라미터인 전자밀도와 충돌주파수의 값이 허수 혹은 음수로 추출되는 경우가 발생하여 물리적인 오류를 포함할 수 있어, 본 알고리즘의 사용에 유의해야 한다.

$$\lambda_h = \sum_{k=0}^m (\omega_k)^h \quad (3)$$

$$S_h = \sum_{k=0}^m (\omega_k)^h R_k \quad (4)$$

$$T_h = \sum_{k=0}^m (-\omega_k)^h I_k \quad (5)$$

$$U_h = \sum_{k=0}^m (\omega_k)^h [(R_k)^2 + (I_k)^2] \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_2 & 0 & -S_2 & T_3 \\ 0 & -\lambda_4 & T_3 & S_4 \\ -S_2 & -T_3 & U_2 & 0 \\ T_3 & -S_4 & 0 & U_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_1 \\ S_2 \\ 0 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서  $k$ 는 샘플링 지수,  $\omega_k$ 는 샘플링 각주파수,  $R_k$ 는 샘플링 주파수에서의  $\epsilon'_r(\omega_k) - 1$  측정 데이터,  $I_k$ 는 샘플링 주파수에서의  $\epsilon''_r(\omega_k)$  측정 데이터이다( $\epsilon_r(\omega_k) = \epsilon'_r(\omega_k) - j\epsilon''_r(\omega_k)$ ). 표 2는 복소 곡선 접합법을 이용하여 추출한

표 2. 플라즈마에 대한 수정된 로렌츠 분산 모형의 계수  
Table 2. Coefficient of modified Lorentz dispersion model for plasma.

$A_0$	$A_1$	$B_1$	$B_2$
$3.3393 \times 10^{-11}$	$1.7919 \times 10^{-21}$	$9.7694 \times 10^{-13}$	$4.9293 \times 10^{-22}$

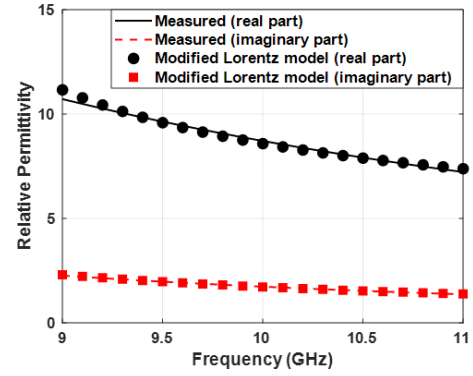


그림 1. 플라즈마의 상대 유전율의 실수부와 허수부  
Fig. 1. The real part and imaginary part of the relative permittivity of plasma.

플라즈마에 대한 수정된 로렌츠 분산 모형의 계수이다.

플라즈마의 주파수에 따른 상대 유전율은 유전체 장벽 방전(DBD: dielectric barrier discharge) 플라즈마 발생기를 유전체 슬래브로 등가 모델링하여 추출한 데이터를 사용했다<sup>[24]</sup>. 그림 1에 그 결과를 도시했으며, DBD 플라즈마 발생기의 측정 데이터와 본 논문에서 제안한 분산 모델링이 일치함을 확인할 수 있다.

## 2.2 플라즈마 FDTD 분산 알고리즘

플라즈마의 분산 특성 분석을 위한 수정된 로렌츠 분산 모형을 FDTD 알고리즘에 적용하는 방법은 다음과 같다.

식 (1)의  $\tilde{J}$ 와  $\tilde{E}$ 의 관계에 역푸리에 변환과 차분법을 적용하여 플라즈마의 분산 특성을 고려하고자 하며,  $J_x$ 에 대한 업데이트 수식은 식 (8)이 된다.

$$\begin{aligned} J_{x,i+1/2,j,k}^{n+1} = & \alpha_0 J_{x,i+1/2,j,k}^n \\ & + \alpha_1 J_{x,i+1/2,j,k}^{n-1} + \alpha_2 E_{x,i+1/2,j,k}^{n+1} \\ & + \alpha_3 E_{x,i+1/2,j,k}^n + \alpha_4 E_{x,i+1/2,j,k}^{n-1} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에 사용되는 계수  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$ 는 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned}
\alpha_0 &= \frac{4B_2 + 2B_1\Delta t - \Delta t^2}{2B_2 + 2B_1\Delta t + \Delta t^2} \\
\alpha_1 &= -\frac{2B_2}{2B_2 + 2B_1\Delta t + \Delta t^2} \\
\alpha_2 &= \frac{2\epsilon_0 A_1 + 2\epsilon_0 A_0 \Delta t}{2B_2 + 2B_1\Delta t + \Delta t^2} \\
\alpha_3 &= -\frac{4\epsilon_0 A_1 + 2\epsilon_0 A_0 \Delta t}{2B_2 + 2B_1\Delta t + \Delta t^2} \\
\alpha_4 &= \frac{2\epsilon_0 A_1}{2B_2 + 2B_1\Delta t + \Delta t^2}
\end{aligned} \quad (9)$$

고정된 도전율을 포함한 플라즈마의 분산특성을 고려하기 위해서  $\bar{E}$ 와  $\bar{H}$ 의 관계는 식 (10)과 같이 표현되며,  $E_x$ 에 관한 업데이트 수식은 식 (11)로 표현된다.

$$\nabla \times \bar{H} = \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \sigma \bar{E} + \bar{J} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
E_{x,i+1/2,j,k}^{n+1} &= \beta_0 E_{x,i+1/2,j,k}^n + \beta_1 E_{x,i+1/2,j,k}^{n-1} \\
&+ \beta_2 J_{x,i+1/2,j,k}^n + \beta_3 J_{x,i+1/2,j,k}^{n-1} \\
&+ \beta_4 \left[ \frac{1}{\Delta y} (H_{z,i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_{z,i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}) \right] \\
&- \beta_4 \left[ \frac{1}{\Delta z} (H_{y,i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_{y,i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}) \right]
\end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에 사용되는 계수  $\xi_1, \xi_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 는 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}
\xi_1 &= 2\epsilon - \sigma \Delta t & \xi_2 &= 2\epsilon + \sigma \Delta t \\
\beta_0 &= \frac{2B_2\xi_1 + 2B_1\Delta t\xi_1 + \Delta t^2\xi_1 + 4\epsilon_0 A_1\Delta t + 2\epsilon_0 A_0\Delta t^2}{2B_2\xi_2 + 2B_1\Delta t\xi_2 + \Delta t^2\xi_2 + 2\epsilon_0 A_1\Delta t + 2\epsilon_0 A_0\Delta t^2} \\
\beta_1 &= -\frac{2\epsilon_0 A_1\Delta t}{2B_2\xi_2 + 2B_1\Delta t\xi_2 + \Delta t^2\xi_2 + 2\epsilon_0 A_1\Delta t + 2\epsilon_0 A_0\Delta t^2} \\
\beta_2 &= -\frac{6B_2\Delta t + 4B_1\Delta t^2}{2B_2\xi_2 + 2B_1\Delta t\xi_2 + \Delta t^2\xi_2 + 2\epsilon_0 A_1\Delta t + 2\epsilon_0 A_0\Delta t^2} \\
\beta_3 &= \frac{2B_2\Delta t}{2B_2\xi_2 + 2B_1\Delta t\xi_2 + \Delta t^2\xi_2 + 2\epsilon_0 A_1\Delta t + 2\epsilon_0 A_0\Delta t^2} \\
\beta_4 &= -\frac{4B_2\Delta t + 4B_1\Delta t^2 + 2\Delta t^3}{2B_2\xi_2 + 2B_1\Delta t\xi_2 + \Delta t^2\xi_2 + 2\epsilon_0 A_1\Delta t + 2\epsilon_0 A_0\Delta t^2}
\end{aligned} \quad (12)$$

자기장에 대한 수식은 기본 Yee FDTD 알고리즘과 동일하며,  $H_x$ 에 관한 업데이트 수식은 식 (13)으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
H_{x,i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} &= H_{x,i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} \\
&+ \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} (E_{y,i,j+1/2,k+1}^n - E_{y,i,j+1/2,k}^n) \\
&- \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} (E_{z,i,j+1,k+1/2}^n - E_{z,i,j,k+1/2}^n)
\end{aligned} \quad (13)$$

### III. 수치 해석 결과

플라즈마 해석을 위한 수정된 로렌츠 분산 모형 기반의 FDTD 알고리즘의 정확성을 입증하기 위해 그림 2와 같은 실험 환경을 조성하였다. 측정 대상은 DBD 플라즈마 발생기로, 플라즈마 발생 전후에 대한 RCS 변화를 측정한다. 또한, 수정된 로렌츠 분산 모형 기반의 FDTD 알고리즘의 정확도를 확인하기 위하여, 앞서 추출된 계수를 적용하여 그림 3의 모의실험을 진행했다. PML층의 두께는 8개의 셀을 사용하였고, 공간 간격은  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$  mm로 하였으며, 시간 간격은  $\Delta t = 1.73$  ps로 설정하였다. 가우시안 펄스 평면파의 중심 주파수는 10 GHz이며, 펄스폭은 4 GHz이고, +z 방향으로 진행된다. 이때, 편파는 전극의 영향을 최소화하기 위하여 수직으로 입사된다. 평면파의 진행 방향에는 18 cm×18 cm×5 mm의 분산 매질과 도전율( $\sigma = 5.8 \times 10^{-7}$  S/m)을 갖는 18 cm×18 cm×1 mm

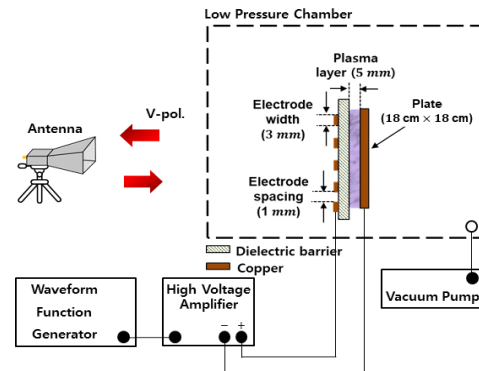


그림 2. 플라즈마의 분산 특성 검증을 위한 RCS 측정 시스템.

Fig. 2. RCS measurement system for verification of dispersive characteristics of plasma.

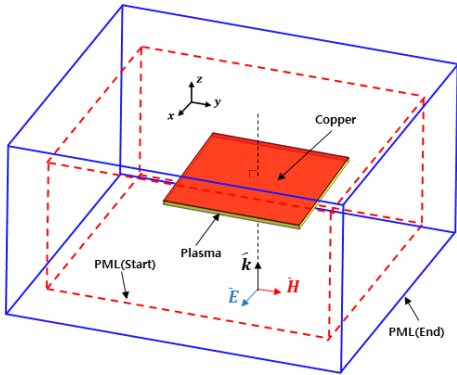


그림 3. 플라즈마의 분산 특성 분석을 위한 모의실험 환경.

Fig. 3. Simulated environment for analysis of dispersive characteristics of plasma.

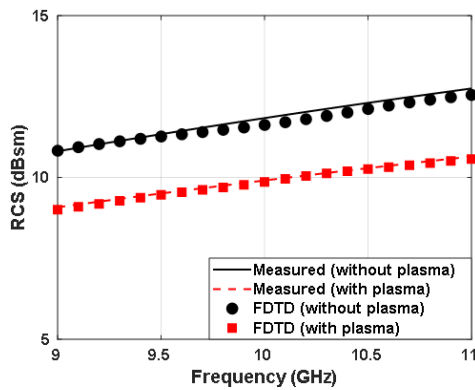


그림 4. RCS 측정 데이터와 모의실험 데이터의 비교.

Fig. 4. Comparison of RCS measurement data with simulation data.

의 구리판이 존재한다. 그 결과, 그림 4에서와 같이 수정된 로렌츠 분산 모형 기반의 FDTD 알고리즘의 데이터가 측정 데이터와 일치함을 확인했다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 복소 곡선 접합법을 수정된 로렌츠 분산 모형에 적용하여 관심 주파수 대역인 9~11 GHz 대역에서 플라즈마의 분산 특성을 정확하게 도출할 수 있는 수정된 로렌츠 분산 모형 기반의 FDTD 알고리즘을 제안하였다. 제안한 기법이 유전체 슬래브 등가 모델링을 통

해 추출한 상대 유전율 데이터와 일치하는 것을 확인하였으며, 측정 데이터와 모의실험 데이터를 비교함으로써 플라즈마 발생 전후에 따른 RCS 변화가 동일함을 확인하였다. 본 알고리즘은 다양한 발생 조건에 따른 플라즈마의 분산 특성의 변화를 적용하기 용이한 장점이 있으며, 다양한 플라즈마 발생기에 대해서도 유용하게 적용될 수 있다.

#### References

- [1] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, May 1966.
- [2] A. Taflov, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed. Boston, MA, Artech House, 2005.
- [3] S. Wanjun, Z. Hou, "RCS prediction of objects coated by magnetized plasma via scale model with FDTD," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 6, pp. 1939-1945, Jun. 2017.
- [4] K. Masumnia-Bisheh, M. Ghaffari-Miab, and B. Zakeri, "Evaluation of different approximations for correlation coefficients in stochastic FDTD to estimate SAR variance in a human head model," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 2, pp. 509-517, Apr. 2017.
- [5] 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, no. 31, p. 315202, Jul. 2011.
- [6] L. W. Cross, M. J. Almalkawi, and V. K. Devabhaktuni, "Development of large-area switchable plasma device for X-band applications," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 41, no. 4, pp. 948-954, Apr. 2013.
- [7] J. H. Lee, J. Kim, Y. Kim, S. Kim, D. S. Kim, and Y. Lee, et al., "Attenuation effects of plasma on Ka-band wave propagation in various gas and pressure environments," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 1, pp. 63-69, Jan. 2018.

- [8] Y. Kim, S. Kim, Y. Lee, and J. G. Yook, "Effect of plasma volume on monostatic radar cross section control," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 32, no. 15, pp. 1939-1949, May 2018.
- [9] Y. Kim, I. Jung, I. Y. Oh, D. S. Kim, and J. G. Yook, "Time-variant microwave absorption by dielectric barrier discharge plasma in atmospheric pressure helium," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 46, no. 1, pp. 57-63, Jan. 2018.
- [10] R. M. Joseph, S. C. Hagness, and A. Taflove, "Direct time integration of Maxwell's equations in linear dispersive media with absorption for scattering and propagation of femtosecond electromagnetic pulses," *Optics Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 180-182, Feb. 1992.
- [11] O. P. Gandhi, B. Gao, and J. Chen, "A frequency-dependent finite-difference time-domain formulation for general dispersive media," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, no. 4, pp. 658-665, Apr. 1993.
- [12] M. Okoniewski, M. Mrozowski, and M. A. Stuchly, "Simple treatment of multi-term dispersion in FDTD," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 7, no. 5, pp. 121-123, May 1997.
- [13] Y. Takayama, W. Klaus, "Reinterpretation of the auxiliary differential equation method for FDTD," *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, vol. 12, no. 3, pp. 102-104, Mar. 2002.
- [14] M. Okoniewski, E. Okoniewska, "Drude dispersion in ADE FDTD revisited," *Electronics Letters*, vol. 42, no. 9, pp. 503-504 Apr. 2006.
- [15] F. L. Teixeira, "Time-domain finite-difference and finite-element methods for maxwell equations in complex media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2150-2166, Aug. 2008.
- [16] 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," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2584-2588, Aug. 2008.
- [17] B. Chaudhury, S. Chaturvedi, "Study and optimization of plasma-based radar cross section reduction using computations, three-dimensional," *IEEE Transaction on Plasma Science*, vol. 37, no. 11, pp. 2116-2127, Nov. 2009.
- [18] C. X. Yuan, Z. X. Zhou, and H. G. Sun, "Reflection properties of electromagnetic wave in a bounded plasma slab," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 38, no. 12, pp. 3348-3355, Dec. 2010.
- [19] S. G. Ha, J. H. Cho, H. D. Kim, J. H. Choi, and K. Y. Jung, "Dispersive FDTD modeling of human body with high accuracy and efficiency," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 1, pp. 108-114, Jan. 2012.
- [20] S. G. Ha, J. Cho, J. Choi, H. Kim, and K. Y. Jung, "FDTD dispersive modeling of human tissues based on quadratic complex rational function," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 2, pp. 996-999, Feb. 2013.
- [21] S. G. Ha, K. Y. Jung, "Dispersive FDTD modeling of human body," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 3, pp. 205-215, Mar. 2020.
- [22] A. Deinega, S. John, "Effective optical response of silicon to sunlight in the finite-difference time-domain method," *Optics Letters*, vol. 37, no. 1, pp. 112-114, Jan. 2012.
- [23] H. Choi, J. Cho, Y. B. Park, and K. Y. Jung, "Newmark-FDTD formulation for modified Lorentz dispersive medium and its equivalence to auxiliary differential equation-FDTD with bilinear transformation," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2019, p. 4173017, Jun. 2019.
- [24] W. Ahn, J. G. Yook, "Analysis of RCS characteristics of dielectric barrier discharge plasma actuator," in *Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, Montreal, QC, Jul. 2020, pp. 1215-1216.

안 옥 현 [연세대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-8728-9713>



2018년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공  
전자공학과 (공학사)  
2018년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공  
학과 석·박사 통합과정  
[주 관심분야] 수치해석, 플라즈마, FDTD,  
RCS 해석

오 태 주 [연세대학교/석사과정]

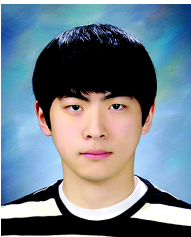
<https://orcid.org/0000-0003-3847-5557>



2020년 2월: 광운대학교 전자융합공학과  
(공학사)  
2020년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공  
학과 석사 과정  
[주 관심분야] RCS 해석, RF System

김 상 인 [연세대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0009-5022>



2015년 2월: 연세대학교 전기전자공학과  
(공학사)  
2015년 3월~현재: 연세대학교 전기전자  
공학과 석·박사 통합과정  
[주 관심분야] 드론 탐지, 전자파 차폐, 생  
체신호 측정 센서, HEMP, RCS 해석,  
RF System

이 용 식 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2623-3569>



1998년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학  
사)  
2004년 4월: 미국 University of Michigan  
(공학박사)  
2004년 10월: Purdue University, Post-doctoral  
Research Associate  
2005년 7월: EMAG Technologies, Inc.,  
Senior Research Engineering

2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 정교수

[주 관심분야] 초고주파 회로, Antenna, WPT

조 창 석 [연세대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-9616-8072>



2020년 2월: 연세대학교 전기전자공학과  
(공학사)  
2020년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공  
학과 석·박사 통합과정  
[주 관심분야] 플라즈마, RCS 해석

오 일 영 [동양미래대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6840-2899>



2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과  
(공학사)  
2013년 8월: 연세대학교 전기전자공학과  
(공학박사)  
2014년 1월~2016년 8월: 삼성전자 연구원  
2016년 9월~현재: 동양미래대학교 정보전  
자공학과 조교수

[주 관심분야] 전자기 현상 수치해석, 플라즈마 전자기 특성 해  
석, 소형 안테나 설계, EMC



임 진 우 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0356-8502>



2004년 2월 : 홍익대학교 기계공학과(공학사)  
2012년 2월 : 서울대학교 항공공학과(공학박사)  
2012년 4월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 저피탐 비행체, 공기역학,

스텔스(RCS, IR)

유 흥 철 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3327-9944>



1988년 2월 : 한국항공대학교 항공기계공학과(공학사)  
1990년 2월 : 한국항공대학교 항공공학과(공학석사)  
1990년 3월~현재 : 국방과학연구소 수석연구원  
[주 관심분야] 저피탐 비행체, 공기역학,

스텔스

하 정 제 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8831-0633>



2009년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부(공학사)  
2011년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과(공학석사)  
2017년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과(공학박사)  
2017년 8월~현재 : 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 저피탐 비행체, 스텔스(RCS)

육 중 관 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>



1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수(공학박사)  
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수  
2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)  
[주 관심분야] 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, EMI/EMC, HEMP, RF, 바이오/가스센서 등

배 지 훈 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1093-2656>



2010년 1월: Purdue University Aeronautical and Astronautical Engineering(공학사)  
2012년 5월: Purdue University Aeronautical and Astronautical Engineering(공학석사)  
2012년 10월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 저피탐 비행체, 스텔스

(RCS)