THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2020 Feb.; 31(2), 136～142.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.2.136
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

ELND-FDTD 기법을 이용한 콘크리트의 균열에 의한 전자기 차폐 효과 분석

Analysis of Shielding Effectiveness for Concrete Material with Crack Using ELND-FDTD Method

오 일 영

Ilyoung Oh

요 약

본 논문은 극저분산 유한차분 시간영역(Extremely Low Numerical-Dispersion Finite-Difference Time-Domain, ELND-FDTD) 기법을 이용하여 콘크리트의 전자기 특성을 해석하였다. 콘크리트의 정확한 전자기 특성을 해석하기 위해서 주파수와 콘크리트의 비유전율과 도전율 특성에 맞는 ELND-FDTD의 변수 값(가중값, 비례값)을 계산하였다. 균열이 있는 콘크리트와 균열이 있는 PEC가 겹친 구조에서 콘크리트의 균열(폭, PEC 균열과의 상대적 위치)이 차폐효과에 미치는 영향을 분석했다. 차폐효과는 균열의 폭과 입사각에 따라서 최대 20 dB 차이가 났다. 그리고 균열의 위치와 입사각에 따라서 차폐효과가 최대 22 dB의 차이가 남을 확인하였다.

Abstract

The electromagnetic characteristics of concrete using the extremely low numerical dispersion finite-difference time-domain (ELND-FDTD) method have been analyzed. To analyze the electromagnetic properties of concrete accurately, we calculated the weighting factor and scaling factor in the ELND-FDTD according to the frequency, relative permittivity, and conductivity of the concrete. The effects of cracking (width and relative position with perfect electric conductor (PEC) cracking) on shielding effectiveness were analyzed in the overlapping structure of the cracked concrete and cracked PEC. The shielding effectiveness had a variation of 20 dB depending on the width of the crack and the angle of incidence. Furthermore, the shielding effectiveness was found to differ by up to 22 dB depending on the location of the crack and the angle of incidence.

Key words: Concrete, Dispersive Material, Shielding Effectivness, Finite-Difference Time-Domain, FDTD

Ⅰ. 서 론

수분 함유량에 따라 비유전율과 도전율이 변화하는 콘크리트의 전자기적 특성 및 차폐 효과 연구가 활발하게 수행되고 있다[1]~[4]. 콘크리트 구조물의 경우 균열은 주기적으로 발생하고, 균열은 건물의 다양한 기능을 변화시킨다[5]. 하지만 콘크리트의 균열에 의한 차폐효과의 성능 변화에 대한 연구는 많지 않다. 균열이 차폐효과에 미치

「이 연구는 2018학년도 동양미래대학교 교내 연구지원사업의 지원으로 연구되었음.」
동양미래대학교 정보전자공학과(Department of Information Electronic Engineering, Dongyang Mirae University)
· Manuscript received January 8, 2020 ; Revised January 23, 2020 ; Accepted February 19, 2020. (ID No. 20200108-003)
· Corresponding Author: Ilyoung Oh (e-mail: pinokio13@dongyang.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

는 영향에 대한 연구가 필요하다.

차폐 분야의 특성상 정확도가 매우 중요하므로 측정을 통해서 콘크리트의 차폐 효과 특성을 분석한 연구들이 주를 이룬다. 하지만 건물과 같은 건축물 전체를 측정하기에는 많은 공간과 시간의 제약이 존재하므로 콘크리트 벽과 같은 건축물의 일부에 대해 차폐효과를 측정한 연구들이 대부분이다. 반면 수치해석 기법을 이용하여 같은 연구를 진행할 경우, 측정을 통한 연구보다 더욱 효율적으로 진행할 수 있다.

수치해석 기법을 이용한 연구가 측정을 통한 연구의 대안이 될 수 있다. 수치해석을 통한 결과가 측정 결과를 대체하기 위해서는 정확한 결과가 보장되어야 한다. 이를 위해 정확도가 높은 수치해석 기법 연구, 정확한 콘크리트의 전자기 특성 모형화 연구가 수행되어져야 한다.

다양한 수치해석 기법들 중에서 유한차분 시간영역법(finite-difference time-domain: FDTD)은 Yee에 의해서 개발된 이후 다양한 전자기 현상을 해석하는데 많이 이용되고 있다[6]~[8]. FDTD 기법은 정확도가 낮다는 단점이 있어 정확도를 높이기 위한 많은 연구가 수행되었다[9]~[12].

본 연구에서는 콘크리트의 균열이 차폐효과에 미치는 영향을 알아보기 위해서 내부에 균열이 있는 콘크리트와 균열이 있는 도체 벽이 겹쳐진 구조의 차폐효과에 대해 분석을 했다. 차폐효과의 정확한 해석을 위해서 극저분산 유한차분 시간영역 (Extremely Low Numerical Dispersion Finite-Difference Time-Domain, ELND-FDTD) 기법을 이용하였다[10].

II장에서는 콘크리트를 ELND-FDTD에 적용하기 위한 가중값과 비례값을 계산한 뒤, ELND-FDTD의 정확도를 확인하였다. III장에서는 콘크리트와 균열이 있는 PEC가 겹쳐진 구조에서 균열(폭, 위치)과 입사각이 차폐효과에 미치는 영향에 대해 분석을 했다.

Ⅱ. ELND-FDTD 개요

2-1 변수 계산 및 안정성

그림 1은 2차원 TMz mode에서 ELND-FDTD 기법과 H(2,4), Yee 기법이 사용하는 계산점을 나타낸다. ELND-FDTD와 H(2,4)기법이 사용하는 계산점들은 같고, Yee의 계산점을 포함한다. 그러므로 H(2,4) 기법과 Yee 기법의 가중합을 이용하는 ELND-FDTD 기법의 계산량은 H(2,4) 기법과 같다. ELND-FDTD 기법에 사용되는 변수는 세 개로 한 개의 가중값(α)과 두 개의 비례값(s_1, s_2)이다. α는 각도에 따라 다른 값을 갖는 수치 파수를 일정하게 만들고, s_1과 s_2는 각각 비유전율과 도전율에 적용되어 이론값과 같은 수치 파수를 갖도록 한다. 그림 2는 ELND-FDTD 기법으로 계산하기 위한 과정을 보여준다. $D_{H(2,4)}$, D_{Yee} 는 각각 H(2,4) 기법과 Yee 기법의 각도에 따른 수치 파수의 최대값과 최소값의 차이를 의미한다. FDTD 기법의 수치 파수는 뉴튼 방법(Newton's method)을 이용하여 계산할 수 있다[13].

TMz mode에서의 ELND-FDTD 기법의 맥스웰 방정식은 식 (1), 식 (2)로 나타낼 수 있고, 가중값과 비유전율 및 도전율 비례값은 식 (3)~(5)를 이용하여 계산할 수 있다. 단, ϵ_{ra}, σ_a는 각각 비유전율과 도전율의 이론값을 의미하고, real( ), imag( )는 괄호안의 값의 실수부분과 허수부분을 의미한다.

$$\alpha(\nabla\times\overline{E})_{H(2,4)}+(1-\alpha)(\nabla\times\overline{E})_{Yee}=-\mu\frac{\partial}{\partial t}\overline{H} \tag{1}$$

$$\alpha(\nabla\times\overline{H})_{H(2,4)}+(1-\alpha)(\nabla\times\overline{H})_{Yee}=s_1\epsilon_0\epsilon_{ra}\frac{\partial}{\partial t}\overline{E}+s_2\sigma_a\overline{E} \tag{2}$$

$$\alpha=\frac{-D_{Yee}}{D_{H(2,4)}-D_{Yee}} \tag{3}$$

$$s_1=\frac{\omega^2\epsilon_0\mu\epsilon_{ra}}{real(k_n^2)} \tag{4}$$

$$s_2=\frac{-\omega\mu\sigma_a}{imag(k_n^2)} \tag{5}$$

$$\Delta t\le\frac{\frac{6}{6+\alpha}\sqrt{s_1}}{c\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2+\left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2}} \tag{6}$$

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 ELND-FDTD의 안정성(stability) 조건을 계산하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[13]. c, Δx, Δy Δt는 각각 빛의 속도, x-방향 격자 길이, y-방향 격자 길이, 시간 간격을 의미한다. α와 s_1의 값이 모두 1일 경우 H(2,4) 기법과 같은 안정성을 갖게 된다.

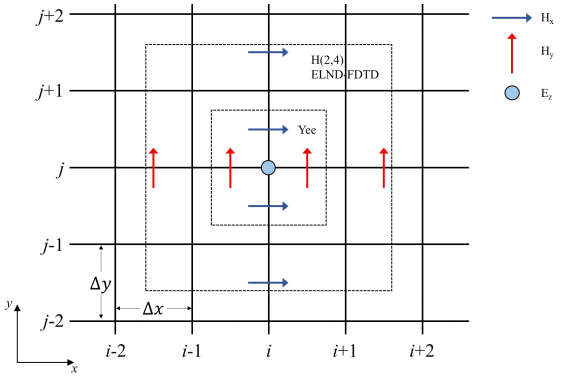


그림 1. Yee, H(2,4), ELND-FDTD 기법의 계산점들
Fig. 1. Calculation points of Yee, H(2,4) and ELND-FDTD.

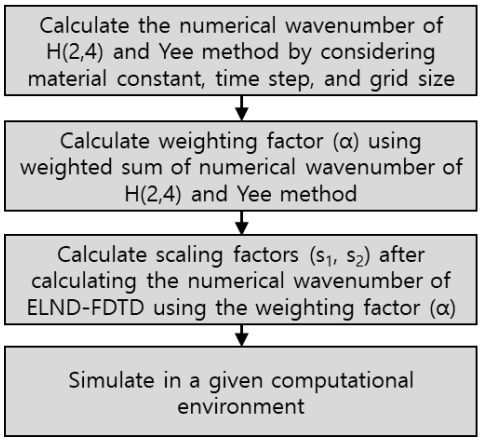


그림 2. ELND-FDTD의 계산 과정
Fig. 2. Calculation process of ELND-FDTD.

2-2 정확도

본 장에서는 ELND-FDTD, H(2,4), Yee 기법의 정확도 비교를 위해서 콘크리트의 수치 파수를 각각 계산하였다. 수치 파수를 이용하여 비유전율과 도전율을 추출하여 이론값과 비교를 한 뒤 콘크리트 실린더의 산란파를 계산하여 이론값과 비교 분석을 하였다. 콘크리트의 비유전율, 도전율은 각각 13과 0.021 S/m로 설정했다[1]. 계산을 위한 조건은 표 1과 같다.

식 (3)~(5)가 주파수에 따라 변화하므로 정확도는 특정 주파수에서 가장 높고, 특정 주파수에서 멀어질수록 정확도는 변화하게 된다. 주파수 변화에 따른 정확도를 확인하기

표 1. 정확도 비교를 위한 계산 조건
Table 1. Calculation condition for comparison of accuracy.

FDTD Variables	grid length ($\Delta x = \Delta y$) [m]		0.0015
	time step (Δt) [ps]		1
	frequency (f) [GHz]		10
ELND-FDTD Variables	Concrete	α	1.19329394108659
		s_1	1.00489036223125
		s_2	0.99952599495495
	Free-space	α	1.01655624891844
		s_1	1.00037336046509
Concrete	relative permittivity		13
	conductivity [S/m]		0.021

$$e_\epsilon(f) = 20\log_{10}\left(\left|1 - \frac{\epsilon_{rn}(f)}{\epsilon_{ra}}\right|\right) \quad (7)$$

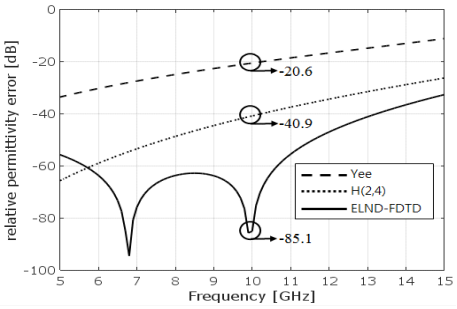
$$e_\sigma(f) = 20\log_{10}\left(\left|1 - \frac{\sigma_n(f)}{\sigma_a}\right|\right) \quad (8)$$

위해서 비유전율과 도전율 오차를 각각 식 (7), (8)로 정의했다. ELND-FDTD, H(2,4), Yee 기법의 비유전율과 도전율의 주파수에 따른 오차는 그림 3과 같다.

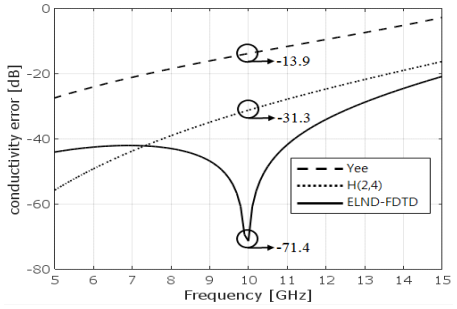
그림 3을 통해서 ELND-FDTD 기법의 오차가 다른 두 기법보다 매우 작은 오차를 갖는 것을 확인할 수 있다. 10 GHz에서는 H(2,4) 기법보다 비유전율과 도전율 오차가 40 dB 이상 정확성을 갖는다. 또한 광대역 범위에서도 다른 두 기법보다 높은 정확도를 갖는 것을 알 수 있다. 주파수에 따라 콘크리트의 유전율과 도전율이 급격하게 변하지 않으므로 ELND-FDTD 기법은 콘크리트의 광대역 해석에도 적합함을 알 수 있다. ϵ_{rn}과 σ_n은 각 수치해석 기법의 수치파수로부터 추출하였다[13].

Ⅲ. 콘크리트 균열에 의한 차폐효과

콘크리트의 균열(crack)에 의한 차폐효과(shielding effectiveness: SE)를 확인하기 위해서 그림 4(a)와 그림 5(a) 구조의 차폐효과를 ELND-FDTD 기법을 이용하여 계산하였다. ELND-FDTD 기법의 정확도를 확인하기 위해서 두 구조에서의 차폐효과 결과를 상용 모의실험 소프트웨어(commercial simulation software)인 COMSOL의 결과와



(a) Yee, H(2,4), ELND-FDTD의 비유전율 오차
(a) Relative permittivity errors of Yee, H(2,4) and ELND-FDTD



(b) Yee, H(2,4), ELND-FDTD의 도전율 오차
(b) Conductivity errors of Yee, H(2,4) and ELND-FDTD

그림 3. 콘크리트 물성에 대한 각 수치해석 기법 오차 비교
Fig. 3. Comparison of the error of each numerical analysis method on concrete material properties.

H(2,4) 및 Yee 기법의 결과와 비교를 하였다. 그림 4(a)의 구조에서는 균열이 없을 때부터 균열의 폭을 6 cm까지 단계적으로 변화시켰다. 또한 입사각을 0°부터 75°까지 15° 간격으로 변화시켜가며 차폐효과를 관찰하였다. PEC의 균열 폭은 1.5 cm로 고정되어 있고, 콘크리트의 균열과 PEC의 균열 폭의 중심을 일치하게 하였다. 그림 5(a)의 구조에서는 PEC의 균열 폭과 콘크리트 균열 폭을 1.5 cm로 같게 설정하였고, 균열의 상대 위치(M)에 따른 차폐효과 변화를 분석하였다. 차폐효과는 식 (9)로 계산하였다. E_1과 E_2는 각각 자유공간 에서의 전계(electric field intensity)와 PEC와 콘크리트를 통과한 전계를 의미한다.

$$SE = 20\log_{10}\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \tag{9}$$

그림 4(b)는 PEC와 콘크리트의 균열의 폭이 1.5 cm이고, 입사각이 0°일 때의 차폐효과를 나타낸다. ELND-FDTD의 결과가 H(2,4), Yee 기법과 비교해서 상용 모의실험 소프트웨어의 결과와 정합성이 큰 것을 확인하였다.

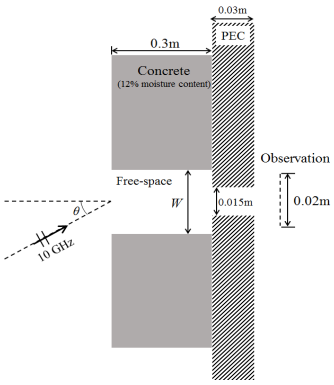
그림 4(c)는 입사각과 콘크리트의 균열폭 변화에 따른 차폐효과의 최소 값을 나타낸다. 콘크리트의 균열이 없을 때와 비교해서 차폐효과의 변화가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 콘크리트의 균열이 0.01 m의 경우 차폐효과의 변화가 최대 약 12 dB 변화하고, 0.02 m의 경우 약 20 dB 가량 변화하며, 균열이 없는 경우와 비교하면 최대 12 dB의 차이가 발생한다. 전반적으로 콘크리트의 균열에 의해서 차폐효과 성능이 하락한다. 전반적으로 콘크리트의 균열 폭이 넓어질수록 차폐효과 성능이 하락하는 것을 볼 수 있다. W=0.01 m, W=0.02 m의 경우 입사각이 0°와 15°인 상황에서는 차폐효과 성능이 향상된 결과를 나타낸다.

그림 5(a)와 같이 PEC와 콘크리트의 균열 폭을 1.5 cm로 고정시킨 뒤, 콘크리트의 균열 위치를 변화시켜가며 차폐효과를 관찰하였다. 콘크리트와 PEC의 균열의 상대적 위치를 M으로 표시하였고, PEC 균열을 기준으로 콘크리트 균열의 위치가 위에 있으면 +로 아래에 있으면 −로 표시하였다. 그림 5(b)는 M=−0.006 [m], 입사각은 0°일 때의 상용 모의실험 소프트웨어와 각 수치해석 기법의 차폐효과 결과를 나타내고 있다. 다른 수치해석 기법과 비교했을 때 ELND-FDTD의 결과가 상용 모의실험 소프트웨어의 결과와 높은 정합성을 나타낸다.

그림 5(c)는 입사각과 균열의 상대 위치(M)에 따른 차폐효과의 최대값을 나타낸다. M의 변화에 따라 차폐효과 값이 크게 변함을 알 수 있다. 균열 위치 M=−0.015 m일 경우 차폐효과가 최대 22 dB까지 차이가 발생한다. M=−0.009 m와 M =−0.015 m의 경우 균열이 없는 경우보다 차폐효과 성능이 향상된 결과를 나타낸다. 콘크리트의 균열이 PEC의 균열 위치보다 아래에 있어 입사되는 전자기파가 콘크리트와 자유공간(free-space)의 경계에서 반사되어 PEC 균열로 입사되는 양이 적어지기 때문이다.

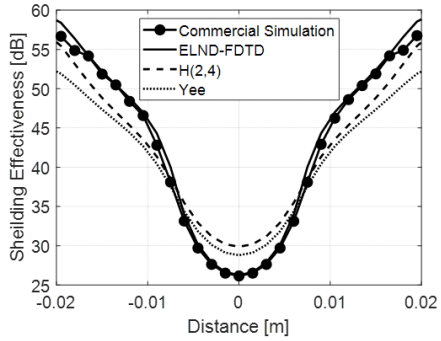
Ⅳ. 결 론

본 논문은 기존의 FDTD 기법보다 정확도가 높은 ELND-FDTD 기법을 이용하여 콘크리트 균열 폭에 따른 차폐효과 변화와 PEC의 균열 폭과 콘크리트의 균열 폭의



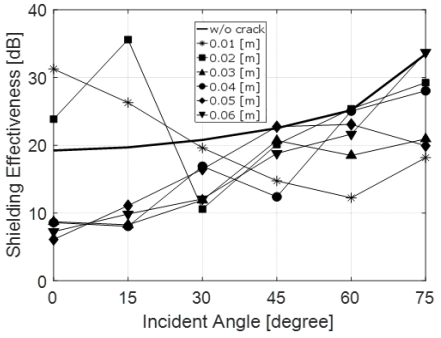
(a) 계산 구조 및 관찰 지점

(a) Calculation structure and observation line



(b) 콘크리트와 PEC 크랙 폭이 0.015 m, 입사각 0°일 때 차폐효과 비교

(b) Comparison of SE at concrete and PEC crack width 0.015 m and incident angle 0°

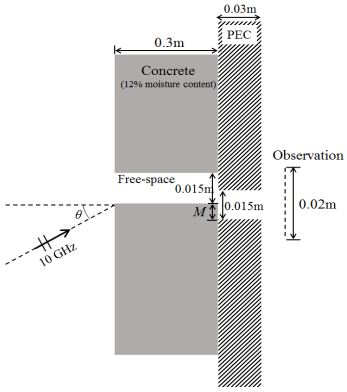


(c) 콘크리트 크랙 폭과 입사각의 변화에 따른 차폐효과의 최소값

(c) Minimum SE according to the change of concrete crack width and incident angle

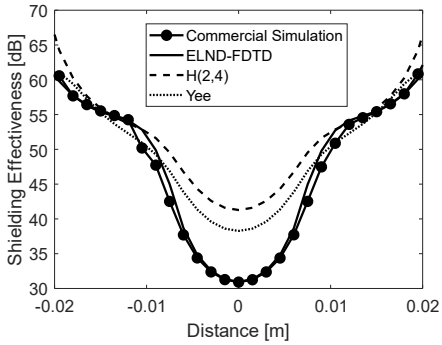
그림 4. 계산 구조 및 콘크리트 균열 폭 변화에 따른 차폐효과

Fig. 4. Calculation structure and shielding effectiveness of concrete crack width variation.



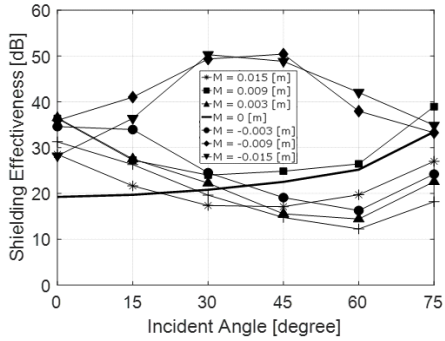
(a) 계산 구조 및 관찰 지점

(a) Calculation structure and observation line



(b) 크랙 상대 위치(*M*)가 −0.006 m, 입사각 0°일 때 차폐효과 비교

(b) Comparison of SE when crack relative position(*M*) −0.006 m and incident angle 0°



(c) 크랙 상대 위치(*M*)와 입사각에 따른 최소차폐효과

(c) Minimum SE according to crack relative position(*M*) and incident angle

그림 5.계산 구조 및 균열 위치 변화에 따른 차폐효과

Fig. 5. Calculation structure and shielding effectiveness of crack relative position variation.

상대적 위치에 따른 차폐효과 변화를 분석했다. 콘크리트의 균열 폭과 입사각에 따라서 차폐효과가 최대 20 dB 변화하는 것을 확인했다. 그리고 콘크리트의 균열과 PEC 균열의 위치와 입사각의 변화에 따라서는 차폐효과가 최대 22 dB 변화하는 것을 확인했다. 그러므로 콘크리트의 균열에 의해서 구조물의 차폐효과 성능이 변화하는 것을 방지해야 한다. 이를 위해서 새롭게 구축되는 구조물은 설계를 할 때, 기존에 구축된 구조물은 콘크리트의 균열을 발견했을 때 콘크리트 이외의 차폐 기법을 적용해야 한다.

향후 ELND-FDTD를 3D로 확장하면 3차원 구조물에서의 콘크리트의 균열의 크기, 위치, 수분함유량, 주파수 등에 따른 차폐효과 연구에 활용할 수 있을 것이다. 또한 ELND-FDTD 기법은 레이다 단면(radar cross section) 연구, 지상침투레이다(ground penetration radar) 연구 등에도 활용될 수 있을 것이다.

References

[1] L. Sandrolini, U. Reggiani, and A. Ogunsola, "Modelling the electrical properties of concrete for shielding effectiveness prediction," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, no. 17, pp. 5366-5372, Aug. 2007.

[2] T. Bourdi, J. E. Rhazi, F. Boone, and G. Ballivy, "Modelling dielectric-constant values of concrete: An aid to shielding effectiveness prediction and ground-penetrating radar wave technique interpretation," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 45, no. 40, pp. 405401, Sep. 2012.

[3] H. J. Choi, H. C. Kim, S. W. Lim, and H. S. Lee, "An experimental study on the development of electromagnetic shielding concrete wall for shielding high-altitude electromagnetic pulse(HEMP)," *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 29, no. 2, pp. 169-177, Apr. 2017.

[4] S. S. Cho, J. S. Yu, J. M. Kim, and I. P. Hong, "Electromagnetic transmission characteristics of eco-friendly foamed concrete wall," *Journal of Korean Insitute of Information Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 123-130, Feb. 2017.

[5] E. A. Jiya, N. S. N. Anwar, and M. Z. Abdullah, "Detection of cracks in concrete structure using microwave imaging technique," *International Journal of Microwave Science and Technology*, vol. 2016, p. 3195716, Feb. 2016.

[6] 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.

[7] J. Cho, S. G. Ha, S. Park, K. Chu, S. Ju, and H. Kim, et al., "Study on wideband shielding effects of simple building structures using FDTD method," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 7, pp. 748-751, Jul. 2013.

[8] J. X. Liu, L. Ju, L. H. Meng, Y. J. Liu, Z. G. Xu, and H. W. Yang, "FDTD method for the scattered-field equation to calculate the radar cross-section of a three-dimensional target," *Journal of Computational Electronics*, vol. 17, no. 3, pp. 1013-1018, Sep. 2018.

[9] I. Y. Oh, Y. Hong, and J. G. Yook, "Extremely low dispersion higher order(2,4) 2-D-FDTD scheme for Maxwell-Boltzmann system," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 12, pp. 6100-6106, Dec. 2013.

[10] I. Oh, "Optimization of extremely low numerical-dispersion FDTD method based on H(2,4) scheme for wideband analysis of lossy dielectric," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 3, pp. 225-232, Mar. 2018.

[11] S. G. Ha, J. Cho, H. Kim, J. 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.

[12] H. Chung, J. Cho, S. G. Ha, S. Ju, and K. Y. Jung, "Accurate FDTD dispersive modeling for concrete materials," *ETRI Journal*, vol. 35, no. 5, pp. 915-918, Oct. 2013.

[13] A. Taflove, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain*, Boston, MA, Artech House, 2005.

오 일 영 [동양미래대학교/조교수]

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 정보전자공학과 조교수

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