

FDTD를 이용한 매설 설비의 탐지 시뮬레이션

論 文
10-2-4

A Simulation of the Detection of Buried Facilities using FDTD

이 우 찬, 김 형 석*
 Woo-Chan Lee, Hyeong-Seok Kim

Abstract

In Ground Penetrating Radar (GPR) for buried object detection, it is important to identify a buried target because removal of an unwanted target requires as much time and effort as does a wanted target. For a simulation of the target identification, the FDTD (Finite Difference Time Domain) and PML (Perfectly Matched Layer) techniques are widely used. Simulation results vary depending on the type of the buried object and the position of the source. As a result, this paper illustrates the range (time) profile of the five types of facilities including PEC (Perfect Electric Conductor) rectangular box and pipes, and shows the comparison of the range profile of the buried facilities.

Keywords : GPR, FDTD, PML, buried facilities

I. 서 론

현재 지하에는 많은 통신, 전기, 가스 설비 등이 매장되어 있다. 각종 지하 공사 수행 시 모든 매설 설비에 대한 지하 지도를 작성하고 그에 대한 관리를 수행하는 것이 자명할 것이나, 과거의 자료가 유실되거나 또는 원 자료가 처음부터 부정확하게 기술되었을 경우 매설된 설비의 위치나 종류를 파악하기 힘들게 된다. 이런 경우에 있어 GPR (Ground Penetrating Radar)은 매장 물체의 탐지를 위한 유용한 도구이다. GPR을 통하여 매설된 설비의 종류를 알 수 있다면 유지보수를 위한 굴착에 따른 노력과 시간을 절약할 수 있다.

본 논문에서는 지하 매설 설비, 특히 배관의 종류 판단 가능성을 타진하기 위하여 FDTD (Finite Difference Time Domain) 및 PML (Perfectly Matched Layer)를 도입하여 매설 설비의 거리 또

는 시간 프로파일을 시뮬레이션 할 수 있도록 구성하였다.

구체적으로, 그림 1에서 묘사된 것과 같이 수평적으로 움직이는 모노스테틱 GPR 송수신기의 상황을 가정한 후, 타겟의 종류로 PEC (Perfect Electric Conductor) 박스 및 4 종의 매설 설비(배관)의 간략화된 모델의 도입하여 각 타겟 모델에 따른 거리 프로파일을 시뮬레이션 하였고, 이 시뮬레이션 결과에 따라 매설 설비의 종류 구별의 가능성을 판단하였다.

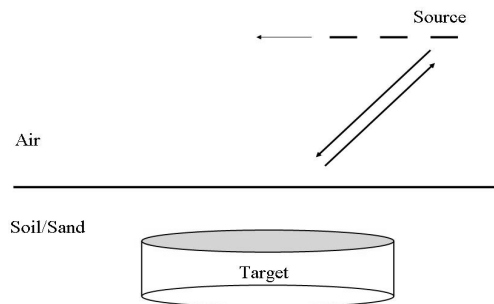


그림 1. 매장 물체와 송수신기 구성

접수일자 : 2011년 04월 10일
 심사일자 : 2011년 05월 24일
 수락일자 : 2011년 06월 27일
 *교신저자, E-mail : kimcaf2@cau.ac.kr

II. FDTD 방법론

FDTD는 맥스웰 방정식에 차분 (finite differencing)의 개념을 도입한 수치 해석 기법이다. 이러한 FDTD는 관찰자 위치, 즉 GPR 송수신기에서 시간에 따른 수신 신호의 변화, 즉 거리 프로파일 또는 시간 프로파일 그 자체를 알 수 있기 때문에 레이다 신호의 시뮬레이션에 이점을 가지고 있다.

FDTD는 개념적으로 간단한 편이며, 적분방정식이나 큰 행렬의 역변환이 필요하지 않은 장점을 가지고 있는 반면, 필드 값이 그리드 노드에서만 알려져 있고, 곡면 형성이 어렵다는 단점 역시 가지고 있다 [1-2].

또한, 본 논문에서는 Yee 알고리즘이 사용되었는데, 이 알고리즘은 전자기 필드 해석에 기초를 제공하며, 식 (1)의 예와 같이 전기장과 자기장을 건너뛰기 식(leap-frog manner)으로 순차적으로 구할 수 있게 한다 [3].

$$E_z^{i,j,t+1} = \frac{1}{\frac{\epsilon_{i,j}}{\Delta t} + \frac{\sigma_{ex,t}}{2}} \left[\Delta E_z^{i,j,t} + \frac{1}{\Delta x} \left(H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{t+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{t+\frac{1}{2}} \right) \right] - \frac{1}{\Delta y} \left(H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - H_x \Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} \right) - J_z \quad (1)$$

Scattering 문제에서 FDTD를 사용하기 위해서는 무한대의 domain의 시뮬레이션이 불가능하므로 computational domain의 절단이 있어야 한다. 그러나 이 경우 절단된 경계면에서의 반사가 불가피하다. 따라서 이러한 반사를 흡수하기 위한 흡수경계조건 (Absorbing Boundary Condition, ABC)이 제안되었는데, 이 ABC는 computational domain으로부터 나오는 방사 필드를 이론적으로 흡수하여 반사를 제거하는 역할을 하게 된다. 이러한 ABC의 종류 중 하나로 Perfectly Matched Layer (PML)가 제안되었고, 그림 2에 제시된 예와 같이 이 PML이 computational domain을 감싸는 형태로 시뮬레이션이 진행되게 된다.

알려진 여러 PML 중 처음 제안된 것은 Berenger's PML 이다 [4, 5]. Berenger's PML은

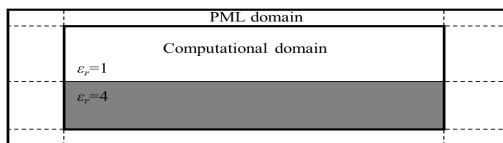


그림 2. Computational domain과 PML의 예

split field strategy에 기초되었는데, 예를 들어 2D 의 경우 식 (2)와 같은 방식으로 PML 안의 필드가 분리되게 된다.

$$E_x = E_{xy} + E_{xz} \quad (2)$$

그러나, 3D의 경우 E_{xy} , E_{xz} , E_{yz} , E_{yx} 등 12개의 분리된 필드 방정식이 필요하고, PML이 26개의 부분 PML로 분리되어야 한다. 따라서 3D에서 Berenger's PML의 구현에는 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 PML 구현을 위하여 Uniaxial PML (UPML)을 채용하였다 [2, 6, 10]. UPML 은 All-UPML strategy에 기반을 두고 있는데, 즉 아래 식 (5)에서의 위치에 따른 파라미터 s_x , s_y , s_z 를 변화시켜서 식 (3), (4)에 나타난 computational domain 및 PML의 필드를 전부 표현할 수 있으므로 Berenger's PML에 비하여 상대적으로 구현이 간단할 수 있다. 단, 계산과정중에 \mathbf{D} , \mathbf{B} vector를 저장하여야 하는 오버헤드가 있다.

$$\nabla \times \hat{\mathbf{E}} = -j\omega \hat{\mathbf{s}} \hat{\mathbf{H}} \quad (3)$$

$$\nabla \times \hat{\mathbf{H}} = j\omega \hat{\mathbf{s}} \hat{\mathbf{E}} \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} s_y s_z s_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & s_x s_z s_y^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & s_x s_y s_z^{-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$s_x = \kappa_x + \frac{\sigma_x}{j\omega \epsilon} \quad s_y = \kappa_y + \frac{\sigma_y}{j\omega \epsilon} \quad s_z = \kappa_z + \frac{\sigma_z}{j\omega \epsilon} \quad (6)$$

요약하면, 거리 프로파일 혹은 시간 프로파일을 구하기 위한 FDTD 적용 절차는 다음과 같다.

- 1) 간략화한 모델에 3D mesh의 적용 및 computational domain 절단
- 2) Yee 알고리즘의 적용
- 3) 흡수경계조건을 적용 - Uniaxial PML [6]
- 4) Source excitation을 적용 - Differentiated Gaussian modulated pulse

III. 시뮬레이션 결과

1. 시뮬레이션 조건

시뮬레이션을 위해서 computational domain을 111(x축)×111(y축)×71(z축)로, PML depth를 10으

로 설정하였다. 여타의 파라미터 값들은 다음의 식 (7), (8)과 같이 설정하였다.

$$\Delta = dx = dy = dz = 0.02 \quad (7)$$

$$dt = \Delta \times \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} / (2 \times c) \quad (8)$$

토양-공기 경계면은 computational domain의 z=36 지점에 위치하게 되며, 토양의 도전율(σ)은 0.01으로, 상대유전율 ϵ_r 은 3으로 설정하였다 [11].

x방향으로 excitation 되는 소스는 하나의 포인트 소스로 computational domain 상에서 (56, 56, 41)에 위치하게 되고, 이는 토양-공기 경계면에서 5 delta(=10cm) 위에 위치한 것이다. 소스의 위치는 소스 위치 변화 경우를 제외하고는 본 논문 전역에 걸쳐 일정하다. 소스의 표현식과 관련 파라미터는 다음의 식(9)와 같이 설정하였다.

$$J_s = J_0 \cdot e^{-(n-n_{delay})^2 / \tau^2} \cos(2\pi f) \quad (9)$$

$$r_\tau = 50.0 \times 10^{-12} \quad \tau = r_\tau / dt \quad n_{delay} = 3 \cdot \tau$$

$$J_0 = -1.0 \cdot \epsilon_0 \quad f = 150.0 \times 10^6$$

또한, 반사 신호를 명확히 하는 동시에 hard source effect를 제거하기 위하여 특정 시간의 관찰자 위치(소스의 위치와 같음)에서 전체 수신한 신호에서 자유공간에서 소스만 존재하는 경우의 신호를 빼는 보정과정을 수행하였다.

2. 경계면만 존재하는 경우

레퍼런스로 활용하기 위해서, 먼저 경계면만 존재하는 경우 즉, 토양에 물체가 매설되어 있지 않은 경우를 상정하여 시뮬레이션 하였다. 그림 3은 경계면에서의 반사를 보여준다.(여기서 컬러 그래프는 $50 \times dt = 1.668ns$ 시점의 스냅샷을 나타낸다.) 또한, 경계면에서 반사된 신호가 들어오는 최초 수신 시점은 0.667ns이다.

3. PEC 박스 모델링

소스의 위치와 물체의 깊이에 따른 반사 신호의 양상을 알아보기 위하여 이상적인 PEC 박스를 매장하고 시뮬레이션을 수행하였다.

PEC 박스는 (x=41~71(60cm), y=41~71(60cm), z=26~31(10cm))의 위치/크기이며, 이 물체는 5 delta(=10cm)의 깊이에 매장되어 있다.

이 경우, 전체의 반사 수신신호는 매질 경계면

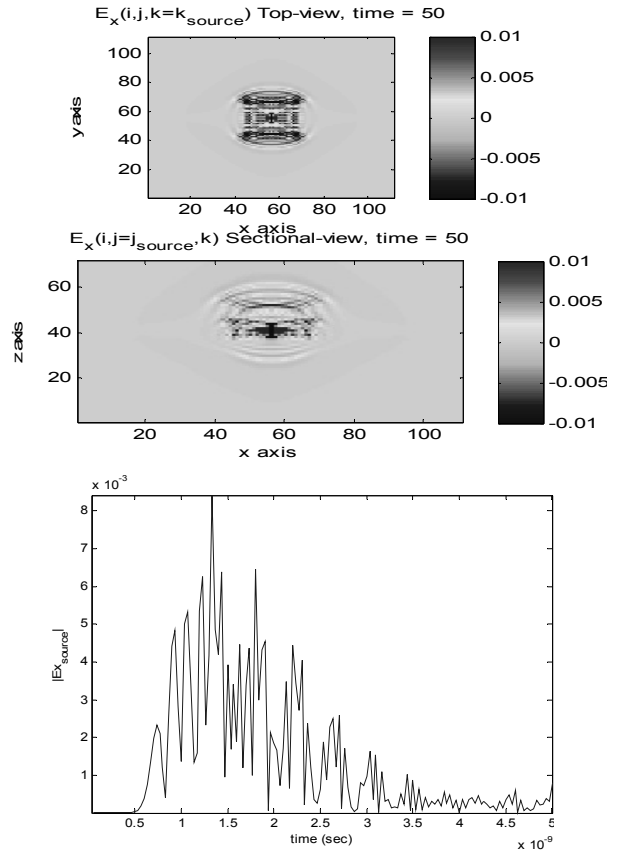


그림 3. 토양-공기 경계면으로부터의 반사

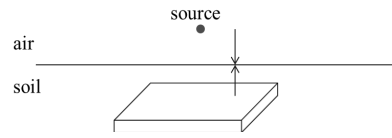


그림 4. 매장된 PEC 박스

의 반사와 물체로부터의 반사의 합이 되나, 그림 5는 물체로부터의 반사를 보다 명확히 하기 위해서 전체 수신신호에서 경계면으로부터의 반사를 제거한 상태이다. 이 때, 소스는 물체 바로 위에 위치하였으며, 매장된 물체로부터의 반사 신호의 최초 수신 시점은 1.821ns이다.

i) 소스 이동

GPR 탐사에 있어서 소스 즉, 송수신기의 이동은 매장 물체 탐사를 위한 통상적인 절차이다. x 방향으로 excitation 되는 소스는 computational domain 상에서 (76, 56, 41)에 위치한 경우로, 이전 경우와 달리 물체 바로 위가 아닌 경우를 나타낸다. 그림 6은 소스 이동의 경우 물체로부터의 수신 신호를 나타내는데, 소스가 물체 바로 위인 경우에 비하여 수신 신호의 레벨이 매우 약해짐

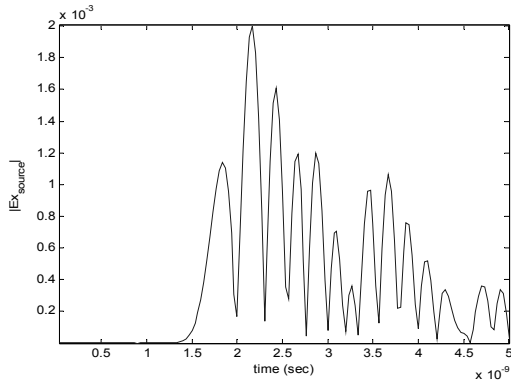
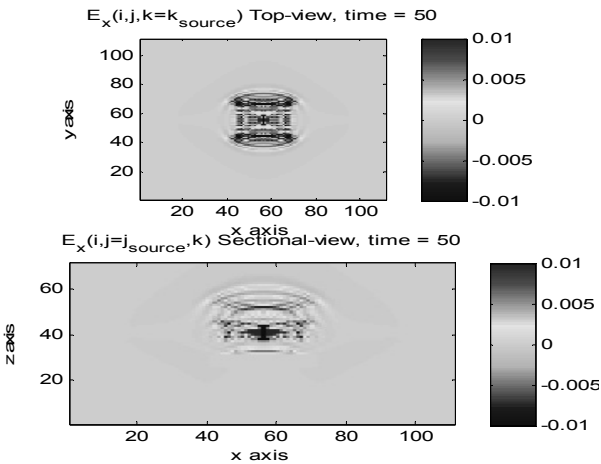


그림 5. PEC 박스로부터의 반사

을 알 수 있다. 즉, 이상적인 PEC로 구성된 매장 물체의 경우라도 소스가 바로 매장 물체 위에 위치하지 않는다면 물체의 탐지는 쉽지 않다.

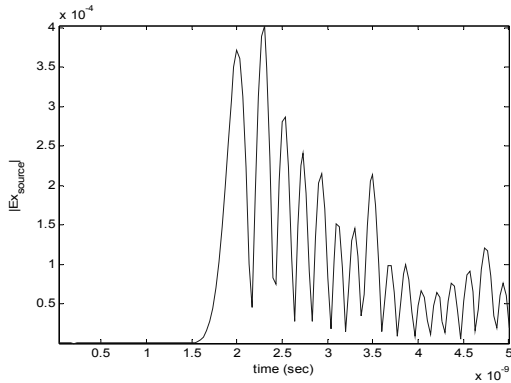


그림 6. PEC 박스로부터의 반사 (소스 이동)

ii) 깊이 변화

깊이 변화의 경우 PEC 박스는 (x=41~71 (60cm), y=41~71(60cm), z=21~26(10cm))에 위치하여 있고, 이는 10 delta(=20cm)의 깊이에 매장되어 있는 상태이다. 그림 7은 깊이 변화 시 PEC 박스로부터의 반사를 나타낸 것으로, 이를 소스

이동의 경우와 비교해보면, 수신 신호의 레벨의 약해졌을지라도 소스 이동의 경우만큼 수신신호가 급격히 약해지지는 않는다.

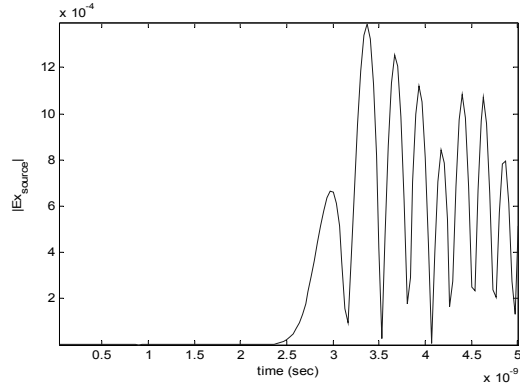


그림 7. PEC 박스로부터 반사 (매장깊이=20cm)

4. 금속 배관 모델링

금속 배관은 철 재질을 가정하고 $\sigma=1.03 \times 10^5$ 를 적용하였다. 소스는 매장 물체의 중심에서 바로 위에 있는 것으로 상정하였고, 시뮬레이션을 위한 매장 깊이는 10 delta(=20cm)로 가정하였다. 아울러 배관의 간략화된 모델은 다음의 그림 8과 같은 형태이며, x방향으로 놓여져 있는 물체의 길이는 1m로 설정하였다.

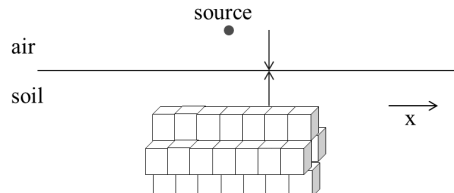


그림 8. 배관의 모델링

i) 직경 100mm 금속 배관

그림 9의 결과를 통하여 볼 때, 이 경우 PEC 박스의 경우에 비하여 반사 신호의 크기가 다소 작아짐을 관찰할 수 있다.

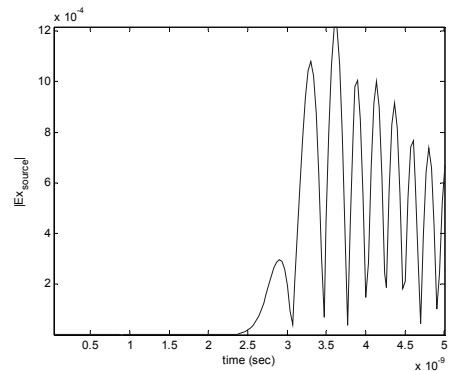


그림 9. 직경 100mm 금속 배관 반사 신호

ii) 직경 200mm 금속 배관

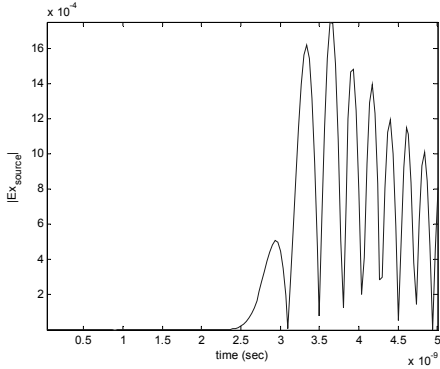


그림 10. 직경 200mm 금속 배관 반사 신호

그림 10의 경우는 상대적으로 직경이 작은 그림 9의 경우에 비하여 반사신호의 크기가 커진다.

5. PVC 배관 모델링

소스의 위치와 매장 깊이, 물체의 방향과 길이는 앞서의 금속 배관의 경우와 같다. 다만 PVC는 상대유전율 ϵ_r 은 3으로 알려져 있는데, 본 논문의 토양 조건과 유전율이 같아 시뮬레이션의 편의를 위하여 배관 자체를 빈 공간으로 대체하여 시뮬레이션 하였다.

i) 직경 100mm PVC 배관

예측되는 바와 같이, PVC 배관의 경우, 배관 내부에도 필드값이 존재할 수 있으며, 금속 재질의 배관과 신호의 반사 세기 및 패턴이 상이하다.

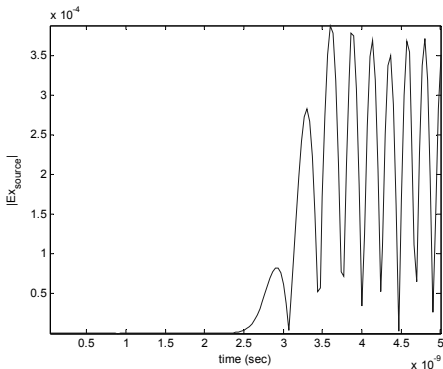


그림 11. 직경 100mm PVC 배관 반사 신호

ii) 직경 200mm PVC 배관

금속 배관의 경우와 같이 그림 12의 경우는 그림 11의 경우에 비하여 반사신호의 크기가 커진다.

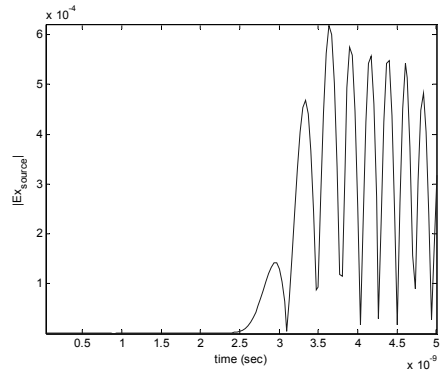


그림 12. 직경 200mm PVC 배관 반사 신호

VI. 결 론

본 논문에서는 FDTD와 UPML을 이용하여 토양 속 매장된 설비(배관)의 거리 또는 시간 프로파일을 시뮬레이션 하였다. 이러한 프로파일을 파악하게 되면, GPR은 매장 물체의 존재여부나 그 종류를 알 수 있다.

그러나 토양 속 물체의 프로파일 패턴은 물체의 놓여진 방향 및 전파의 입사각에 따라 변화하므로 비슷한 크기를 가진 세부적인 물체의 종류 구별은 용이하지 않지만, 시뮬레이션 결과를 토대로 보면 반사 신호의 세기 분석을 통하여 매장 물체 간 상대적인 금속 재질의 크기 파악이 가능할 것이며, 또한 금속과 비금속 재질의 물체의 구분이 가능할 것이다.

특히, PEC 박스의 시뮬레이션 결과로 볼 때, 송수신기가 매장 물체의 바로 위에 위치하지 않는 경우에는 매장 물체의 존재여부도 파악하기 쉽지 않다. GPR이 매장 물체의 바로 위에 있을 때 전파가 가장 짧은 loss path를 지나가고 또한 전파를 반사시키는 면적이 가장 크기 때문에 이 경우에만 탐지가 쉬울 뿐, 송수신기가 매장 물체 바로 위를 벗어난 다른 경우에는 탐지가 힘든 것으로 보인다. 또한, 주요한 반사는 물체가 아닌 매질의 경계면에서 일어나기 때문에 실제 상황에서는 이 반사로 인해 물체로부터의 반사가 가려질 가능성이 크다.

다만, 본 논문에서는 x방향의 포인트 소스를 가정하였으나, 어레이 소스 등 보다 정교한 리시버를 사용하고, SAR (Synthetic Aperture Radar) 기술 등을 사용한다면 물체 구별을 방해하는 여

러 노이즈를 극복하고 매장 물체의 구별 가능성이 커질 수 있을 것으로 본다.

[참고 문헌]

[1] *Numerical Techniques in Electromagnetics with Matlab 3rd edition*, Matthew Sadiku, CRC, 2009.

[2] *Computational Electrodynamics 3rd edition*, Allen Taflove et al., Artech House, 2005.

[3] Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems involving Maxwell's Equations, Kane Yee, *Transaction of Antennas and Propagation*, IEEE, Volume 14, 1966.

[4] A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves, Jean-Pierre Berenger, *Journal of Computational Physics*, Volume 114, 1994.

[5] Three-Dimensional Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves, Jean-Pierre Berenger, *Journal of Computational Physics*, Volume 127, 1996.

[6] An Anisotropic Perfectly Matched Layer-Absorbing Medium for the Truncation of FDTD Lattices, Stephen Gedney, *Transaction of Antennas and Propagation*, IEEE, Volume 44, 1996.

[7] Frequency Dependence of the Soil Electromagnetic Properties Derived from Ground-Penetrating Radar Signal Inversion, Sébastien Lambot et al., *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, Volume 6, Number 1, 2005.

[8] A Detection of Buried Objects Using FDTD, Woochan Lee, Hyuk-Jae Lee, *ITC-CSCC 2011*, 2011.

[9] 지하 탐사용 레이더를 이용한 매설된 구조물의 탐사, 김동호, 조평동, *전자통신동향분석* 15권 5호, 2000.

[10] <http://www.artechhouse.com/Computational-Electrodynamics-The-Finite-Difference-Time-Domain-Method-Third-Edition/b/Default.aspx?eAppType=1&strFrame=Misc/taflove.html>

[11] <http://www.gprmax.org/GMAXV2/GprMaxV2.0.zip>

Biography



이우찬

2002년 서울대학교 전기공학 (공학사)
 2005년 서울대학교 전기컴퓨터공학 (공학석사)
 2004년~현재 특허청 사무관
 2005년~2008년 육군사관학교 전자공학 교수사관
 2010년~현재 텍사스 오스틴 대학교 전자공학

박사과정

<관심분야> Computational Electromagnetics, Radar

<e-mail> logic4u@gmail.com



김형석

1985년 서울대학교 전기공학 (공학사)
 1987년 서울대학교 전기공학 (공학석사)
 1990년 서울대학교 전기공학 (공학박사)
 1990~2002년 순천향대학교 정보기술공학부 교수
 2002년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수

<관심분야> 전자파 수치해석 및 최적 설계 기법 연구, 무선 부품 설계 및 응용, RFID 시스템 연구, SoC 응용회로, 전력 IT

<e-mail> kimcaf2@cau.ac.kr