

## 지하물체 탐지를 위한 수치해석법 연구

김승환, \*안창희  
영남대학교 전자정보공학부

### Numerical Analysis of EM scattering by Underground Object for GPR application

Kim Sung Hwan\*, Chang-Hoi Ahn  
School of EECS Yeungnam University, Gyongsan 712-749, Korea  
E-mail : chahn@yu.ac.kr

**Abstract** - For GPR applications, accurate analysis of the scattered field is necessary to identify the unknown target. Dyadic Green's Function of the multilayered medium is developed and applied to analyse of underground conducting object. We used method of moment(MOM) with dyadic Green's function, and Discrete Complex Image Method(DCIM).

#### 1. 서 론

지하에 매설된 3차원 물체에 대한 탐지는 지뢰 탐지등 군사적인 목적에 많이 이용될 수 있는데, 금속성 지뢰 뿐 아니라 최근에는 플라스틱과 같은 비금속성 지뢰에도 많이 사용되고 있다. 금속체에 비해 산란단면적이 작은 비금속물체에 대한 탐지를 위해서는 보다 정밀한 산란파 계산과 측정의 요구되어진다[1,2].

지하나 다층 매질 내에 매설된 물체에 대한 탐지 기술은 군사적인 목적 이외에도 여러 민간 분야에서도 요구가 발생하여 지하에 매설된 수도관 같은 파이프 매설 위치 파악, 지하의 공동 탐지, 건축물의 경우 크랙과 같은 결점 추적 등에 무선 탐지 기술이 연구되고 일부는 적용되어 사용되고 있다[3].

그러므로 다층 매질 하에 존재하는 물체에 대한 산란파의 정확한 계산은 지하의 물체 탐지를 위한 GPR(Ground Penetrating Radar)등의 응용에 있어서 필수적으로 선행되어야 하는 연구 분야라고 할 수 있다.

근래의 컴퓨터의 빠른 성능 향상과 더불어 전자기장의 수치해석법이 많이 연구됨에 힘입어 GPR에 관련된 산란전자장 연구도 선진국을 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 자유공간에서의 전파 산란의 계산을 위해서는 모멘트법(Method Of Moment)[4,5]을 비롯하여 FDTD(Finite-Difference Time-Domain)[6]등 여러 가지 적분방정식과 미분방정식에 기초한 수치해석법들이 사용되어 왔다. 특히 모멘트법은 계산의 정확성과 열린 경계 문제(open boundary problem)에 적합함으로 인하여 전파 산란의 계산에 주로 사용되어 오고 있다. 그러나 다층매질 하에서의 전파 산란 계산을 위해 모멘트법을 사용하기 위해서는 자유공간 그린 함수가 아닌 다층매질에 적합한 그린함수를 사용해야하는데, 이 경우 산란 메커니즘의 복잡성으로 인하여 공간영역에서의 그린함수가 closed-form으로 존재하지 않고 Sommerfeld 적분형태로 나타나게 된다[7-9]. 이 적분의 효율적인 계산을 위해서 DCIM(Discrete Complex Image Method)등을 이용한 연구가 이루어져 왔다.

본 논문에서는 지하에 있는 임의의 형태의 PEC 산란체를 해석하기 위해서 Dyadic half space Green's function을 적용한 MOM을 RWG[4] basis를 사용해서 전자기장 산란 문제를 해석했다. 이 때 계산 속도의 향상을 위해서 Sommerfeld-type integrals을 DCIM 방식을 사용해서 계산했다.

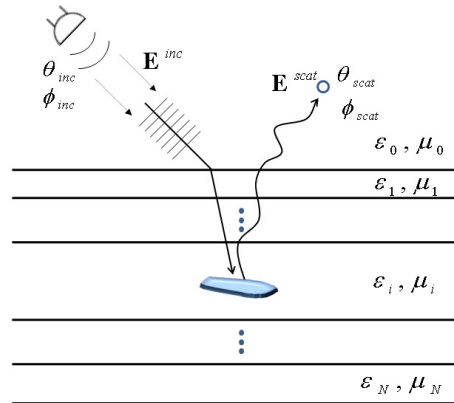
#### 2. 본 론

##### 2.1 다층매질 그린함수

그림1과 같이 다층매질내의 물체에 대한 전파산란을 계산하기 위해서는 자유공간이 아닌 Dyadic 그린함수가 필요하게 된다. 다층매질 Dyadic 그린함수는 스펙트럼 도메인으로 변환하여 전송선로 문제로 모델링을 하여 구해줄 수 있는데, 그렇게 구해진 그린함수는 각각 매질의 유전율, 투자율, 두께에 의해서 결정되어진다.[7,8] 매질 내에 있는 등가 전류에 의해서 생성되는 전계를 Mixed-Potential 형태로 표현하면 식(1)과 같다.

$$E = -j\omega\mu_0 \langle \overline{G^A}, J \rangle + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \langle G^\phi, \nabla' \cdot J \rangle \quad (1)$$

여기서 J는 등가 전류이고  $\overline{G^A}$ 와  $G^\phi$ 는 각각 공간 도메인의 Dyadic 그린함수와 스칼라 포텐셜 그린함수이다. 여기서  $\overline{G^A}$ 는 한 가지 형태로 정해져 있지 않다. 여기서는 많이 사용되는 식2의  $\overline{G^A}$ 을 사용한다.



<그림 1> 다층매질 안에 있는 산란체

$$\overline{G^A} = \begin{bmatrix} G^A & 0 & G_{xz}^A \\ 0 & G_{xx}^A & G_{yz}^A \\ G_{zx}^A & G_{zy}^A & G_{zz}^A \end{bmatrix} \quad (2)$$

공간 도메인의 Dyadic 그린함수의 각각 요소들은 다음과 같은 Sommerfeld 적분으로 표현되어진다.

$$G(\rho, z | z') = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \tilde{G}(K_\rho, z | z') J_0(K_\rho \rho) K_\rho dK_\rho \quad (3)$$

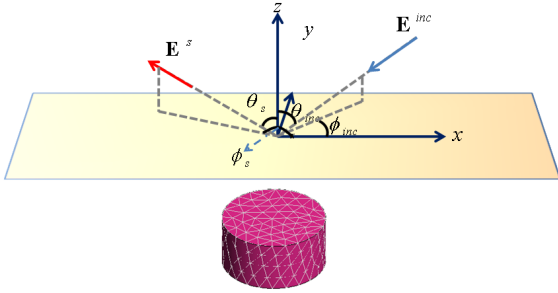
여기서  $\tilde{G}$ 는 스펙트럼 도메인 그린함수이다. 스펙트럼 도메인 그린함수는 전성선로 문제로 모델링해서 구해진다.

##### 2.2 DCIM(Discrete Complex Image Method)

Sommerfeld 적분은 피적분 항이 매우 급격히 변하고 천천히 크기가 감소하기 때문에 계산시간이 많이 걸린다. 그동안 이 적분을 빠르게 하기 위해서 많은 기술들이[10] 개발되어 졌지만 여전히 다른 부분의 계산에 비해서 현저히 느려 다층매질 MOM의 실용화를 막고 있었다. 최근에 DCIM은 이 문제를 해결함으로써 빠른 다층매질 MOM을 구현할 수 있게 되었다.

DCIM은 스펙트럼 도메인의 그린함수에서 준정전장부분과 표면파의 부분을 제거한 후에 prony method와 같은 parametric 알고리즘을 사용해서 복소수 지수함수들의 합인 형태로 근사함으로써 Sommerfeld 적분을 closed-form으로 바꾼다. 이 방법은 일정한 형태의 지수함수의 Sommerfeld 적분이 자유공간 그린함수로 나온다는 것을 알고 있으므로,

피적분항을 일정한 형태의 지수함수만의 항의 합으로 표현함으로써 실제 적분을 하지 않고 Closed-form을 구하는 것이다. 이 방법은 Sommerfeld 적분을 수행하지 않아 비약적인 계산속도의 향상을 가져온다. 이때, 준정전장과 표면파의 기여 부분을 제거한 부분을 Complex Image라고 한다. 이 Complex Image 부분은 복소수 값을 가지는 가상의 위치에 소스가 있을 때의 자유공간 그린함수들의 합으로 표현되어진다.



<그림 2> 반공간에 있는 실린더

### 2.3 반공간 안에 있는 실린더 해석

그림 2에서처럼 반공간 그린함수는 다층매질 그린함수에서 N=2인 경우의 그린함수로써 유전율과 투자율에 대한 함수이다. Mixed-Potential 형태의 CFIE에 이 그린함수와 잘 알려진 RWG 기저함수와 시험함수를 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Z_{mn} &= \alpha j \omega \mu_i \iint_{x \in S_m} \iint_{x' \in S_n} w_m(x) \cdot \bar{K}_{Aii}(x, x') \cdot b_n(x') dS' dS \\
 &+ \frac{\alpha}{j \omega \epsilon_i} \iint_{x \in S_m} \iint_{x' \in S_n} [\nabla \cdot w_m(x)] K_{\phi e}^{ii}(x, x') [\nabla_s \cdot b_n(x')] dS' dS \\
 &+ \eta(1-\alpha) \iint_{x \in S_m} w_m(x) \left[ b_n(x) - \hat{n} \times \iint_{x' \in S_n} \nabla \times \bar{G}_{Aii}(x, x') \cdot b_n(x') dS' \right]_{x \in S_m^+} dS \\
 V_m &= \alpha \iint_{x \in S_m} w_m(x) \cdot E^{inc}(x) dS \\
 &+ \eta(1-\alpha) \iint_{x' \in S_n} w_m(x) \cdot \hat{n} \times H^{inc}(x) dS
 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\alpha$ 는 EFIE와 MFIE에 대한 기여도 상수,  $\bar{G}_{Aii}$ 는 A 포텐셜에 대한 dyadic 그린함수,  $\bar{K}_{Aii}$ 는 E 필드에 대한 dyadic 그린함수,  $K_{\phi e}^{ii}$ 는 스칼라 포텐셜 그린함수이다.

본 논문에서는 그림 1에 있는 구조로서, 위부분의 매질은 자유공간이고 아래 매질은 손실이 있는 유전체인 반공간 안에 있는 PEC 실린더에 대해서 수치해석을 했다. 실린더는 지름  $2a=33$  cm, 높이  $h=16$  cm이고 경계면으로부터 12 cm 아래에 위치해 있다. 유전체의  $\epsilon_r = 4$ ,  $\sigma = 0.005 S/M$ 이다. 이 때 전계 E가  $\theta = 50^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ 로 입사할 때  $\theta_s = 60^\circ$ ,  $\phi_s = 120^\circ$  방향으로 산란되어지는 원거리전계를 수치해석 했다. 이 때 중심 주파수  $f_c = 500 MHz$ 인 Blackman-Harris pulse을 사용하였다.

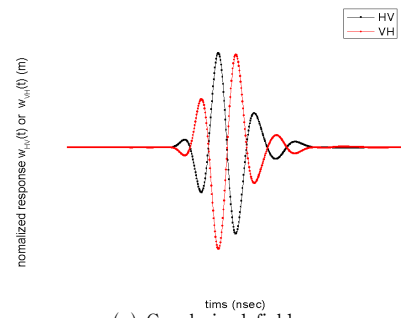
$$P(\omega) = 0.42 - 0.5 \cos\left(\pi \frac{|\omega|}{\omega_c}\right) + 0.08 \cos\left(2\pi \frac{\omega}{\omega_c}\right) \quad (6)$$

이 때,  $|\omega| \leq \omega_c$ , 나머지 영역은 0 이다.

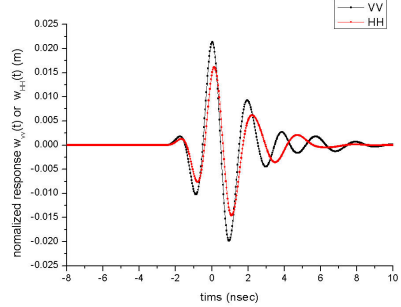
그림3은 시간영역에서의 입사한 펄스로 정규화한 산란 전계를 수치 해석한 결과이고 그림4는 주파수상에서의 RCS 값을 상용 수치해석 프로그램인 FEKO의 결과와 비교한 그래프이다.

### 3. 결 론

지하에 매설된 지뢰등과 같은 구조물들을 탐지하기 위해서 전자파 산란 수치해석을 수행하였다. 이 다층매질에 대한 Dyadic 그린함수를 효율적이고 빠르게 구하기 위해서 DCIM 방식을 적용하여 지하에 매설된 원통형 물체에 대한 산란단면적을 주파수 영역에서 구하고, GPR에서 주로 사용되는 입력신호인 가우시안펄스에 대한 산란파를 시간영역에서 계산하였다.

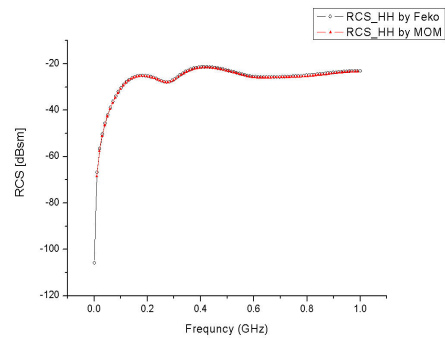


(a) Copolarized fields



(b) Cross-polarized fields

<그림 3> 시간영역에 대한 가우시안 펄스의 응답특성



<그림 4> 반공간하의 도체실린더에 대한 산란단면적(RCS)

### [참 고 문 헌]

- [1] J. He, N. Geng, L. Nguyen, and L. Carin, "Rigorous Modeling of Ultra-Wide-band VHF Scattering from tree Trunks Over Flat and Sloped Terrain," submitted to the IEEE Trans. Geo. and Rem. Sens.
- [2] J. He, T. Yu, N. Geng, L. Carin, "Method of moments analysis of electromagnetic scattering from a general three-dimensional dielectric target embedded in a multi-layered medium," to be published in Radio Science
- [3] 김동호, 이승학, 김채영, "지하 탐사 레이더를 이용한 누수탐지 가능성 연구," 대한전자과학회, pp565-574, November, 2000
- [4] S.M. Rao, D.R. Wilton, A.W. Glisson, "Electromagnetic scattering from surfaces of arbitrary shape," IEEE Trans. Ant. and Prop., vol 30, pp. 409-418, May 1982
- [5] A.F. Peterson, S.L. Ray, R. Mittra, Computational Methods for Electromagnetics, IEEE Press, 1998
- [6] A. Taflove (ed.), Advances in Computational Electromagnetics - The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, Boston, London, 1998
- [7] K.A. Michalski and D.Zheng, "Electromagnetic scattering and radiation by surfaces of arbitrary shape in layered media, Parts I and II," IEEE Trans. Ant. and Prop., vol.38, pp. 3350352, March 1990
- [8] W.C. Chew, Waves and Fields in Inhomogeneous Media, IEEE Press, 1995
- [9] L.B. Felsen, N. Marcuvitz, Radiation and Scattering of Waves, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1973
- [10] J.R. Mosig, "Integral equation techniques," in Numerical Techniques for microwave and Millimeter-Wave Passive Structures, T. Itoh, Ed. New York: Wiley, 1988