

도체 구조물의 과도 산란 해석을 위한 결합 적분방정식의 안정된 MOT 기법

A Stable MOT Scheme with Combined Field Integral Equation for the Analysis of Transient Scattering from Conducting Structure

이창화 · 안옥규* · 권우현 · 정백호**

Chang Hwa Lee · Ok Kyu An* · Woo-Hyen Kwon · Baek Ho Jung**

요 약

본 논문에서는 3차원 임의의 형태 도체 구조의 과도 산란 해석을 위한 결합 적분방정식(CFIE)의 안정된 MOT (Marching-On in Time) 방법을 제안한다. 결합 적분방정식은 전장 및 자장 적분방정식의 선형적인 결합으로 구성된다. 공식의 전개 과정에서 전방 및 후방, 그리고 중앙 유한 차분을 포함시켜 일반화된 식을 구성하며, 파라미터에 의하여 유한 차분의 종류를 선택할 수 있다. 적분방정식에서 시간에 대한 미분 항을 중앙 유한 차분법으로 근사시키고, 그 외의 시간 의존 항을 평균치로 표현하였을 때, 도체로부터의 과도 산란해는 가장 안정되고 정확하였다. 중앙 유한 차분법을 적용한 MOT 기법에 의한 해를 기존의 방법과 주파수 영역 결합 적분방정식(FD-CFIE)으로부터 얻은 결과의 역 푸리에 변환과 비교한다.

Abstract

In this paper, a stable marching-on in time(MOT) method with a time domain combined field integral equation(CFIE) is presented to obtain the transient scattering response from arbitrarily shaped three-dimensional conducting bodies. This formulation is based on a linear combination of the time domain electric field integral equation(EFIE) with the magnetic field integral equation(MFIE). The time derivatives in the EFIE and MFIE are approximated using a central finite difference scheme and other terms are averaged over time. This time domain CFIE approach produces results that are accurate and stable when solving for transient scattering responses from conducting objects. Numerical results with the proposed MOT scheme are presented and compared with those obtained from the conventional method and the inverse discrete Fourier transform(IDFT) of the frequency domain CFIE solution.

Key words : MOT, CFIE, Integral Equation, Transient, Scattering

I. 서 론

삼차원 임의의 형태 구조의 전자파 과도 산란 문제를 해결하기 위하여 표면 적분방정식에 MOT 방법을 적용하며, 3차원 구조의 해석을 위하여 삼각형

표면 분할 모델을 이용한 다양한 해법이 제시되었다^{[1]~[4]}. 전장 적분방정식(Electric Field Integral Equation: EFIE)에는 자기 벡터 전위에 대한 시간 미분항이 있다. 이를 처리하기 위하여 EFIE 전체를 시간에 대하여 미분을 하였으며, 2차 중앙 차분을 적용하였

「이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-041-D00302).」

경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

*호서대학교 반도체디스플레이공학과(Dept. of Semiconductor and Display Engineering, Hoseo University)

**호서대학교 정보통신공학과(Dept. of Information and Communication Engineering, Hoseo University)

· 논문 번호 : 20071226-150

· 수정완료일자 : 2008년 1월 28일

다^[2]. 이 방법에 의한 해는 시간 단계의 증가에 따라 초기에 진동이 발생하였다. 그 후 계산된 전류의 평균을 취함으로써, 이 진동을 낮출 수 있었다^[3]. 그러나 이 방법은 입사파를 미분의 형태로 사용하므로 임펄스 또는 계단 함수와 같은 전원은 입사장으로 사용할 수 없는 단점이 있었다. 이를 처리하기 위하여 자기 벡터 전위에 대한 미분항을 후방 차분으로 처리하는 기법이 제시되었으며^[4], 그 후 이 방법을 이용한 많은 수치 결과들이 발표되었다^[5]. 또한, 해의 안정성을 개선하기 위하여 이차원 또는 삼차원 문제에서 시간 간격의 설정을 패치 중심 간의 최소 거리보다 크게 선택하는 방법(implicit method)이 적용되기도 하였다^{[6]~[10]}. 시간 간격을 패치 중심 간의 최소 거리보다 작게 선택하는 방법(explicit method)을 이용할 때, 시간 간격이 작아지므로 계산된 지연 응답은 불안정하였다. 이 불안정의 현상은 계산 단계마다 누적되는 수치 오차에 기인하며, 시간 간격이 짧게 설정되므로 충분한 응답을 얻기 위하여 많은 계산 시간이 소요되었다. 적분방정식에서 미분항에 대한 유한 차분의 근사로 인하여 발생하는 오차를 감소시키고, 더 정확하고 안정된 해를 얻을 수 있는 중앙 차분 근사를 적용하는 방법이^[11]에서 제안되었다. 이 방법은 유전체의 산란문제에도 적용되어 기존의 방법보다 더욱 정확한 해가 제시되었다^[12]. 시간 간격의 설정을 패치 중심 간의 최소 거리보다 크게 선택하는 경우, 임의의 형태 3차원 도체의 산란 문제를 풀기 위한 자장 적분방정식(Magnetic Field Integral Equation: MFIE)의 MOT 해법은 참고문헌 [13]에서 제안되었으며, EFIE의 경우보다 더 정확한 해를 얻을 수 있었다.

주파수 영역에서 EFIE와 MFIE의 해는 산란체의 내부 공진 문제 때문에 정확하지 않다는 사실은 이미 잘 알려져 있다. 따라서 시간 영역의 해석에서도 유사한 현상이 발생하리라 본다. 참고문헌 [14]에서는 시간 영역의 CFIE에 MOT를 적용한 해법이 제시되었다. 본 논문에서는 참고문헌 [14]의 결과보다 더욱 정확한 해를 얻기 위하여 CFIE에 대하여 안정된 MOT 기법으로 도체로부터의 산란 문제를 풀고자 한다. 이를 위하여 EFIE와 MFIE에서 미분항에 대한 근사로 인하여 발생하는 오차를 감소시키고, 안정된 해를 얻을 수 있는 중앙 차분 근사를 적용

하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제II장에서 시간 영역의 EFIE와 MFIE, 그리고 CFIE를 구성하고, 유한 차분법을 적용하여 행렬식을 얻는 과정을 기술한다. 제III장에서는 삼차원 도체 구조에 대하여 계산된 수치 예를 보인다. 수치 결과는 기존의 방법에 의한 과도해와 주파수 영역에서 CFIE를 이용하여 얻어진 해를 시간 영역으로 변환한 결과와도 비교한다. 마지막으로 제IV장에서 결론을 맺는다.

II. 시간 영역 적분방정식

2-1 전장 적분방정식

해석의 대상이 되는 구조는 자유공간에 놓인 임의 형태의 3차원 완전 도체이다. 그 표면을 S 라고 한다면, 외부로부터 입사되는 전자장에 의하여 도체 표면에는 전류 J 가 유기된다. 도체 표면에서 전체 전장의 접선 성분은 모든 시간 t 에 대하여 영이므로

$$[E^i(r, t) + E^s(r, t)]_{\tan} = 0, \quad r \in S \quad (1)$$

이 성립된다. 여기서 첨자 'tan'은 접선 성분을 나타낸다. 그리고 E^i 는 입사파의 전장이며, E^s 는 산란 전장이다. 유기 전류에 의하여 산란되는 전장은

$$E^s(r, t) = -\frac{\partial A(r, t)}{\partial t} - \nabla\phi(r, t) \quad (2)$$

이며, A 와 ϕ 는 각각 자기 벡터 및 전기 스칼라 전위로서 다음과 같다.

$$A(r, t) = \mu \int_S \frac{J(r', t)}{4\pi R} dS' \quad (3)$$

$$\phi(r, t) = \frac{1}{\epsilon} \int_S \frac{q(r', t)}{4\pi R} dS' \quad (4)$$

$$\tau = t - \frac{R}{c}, \quad R = |r - r'| \quad (5)$$

식 (3)~(5)에서 μ 와 ϵ 은 각각 산란체가 놓인 공간의 투자율과 유전율이며, c 는 자유공간의 전파속도, r 과 r' 은 각각 원점과 장점간, 그리고 원점과 전원점 간의 거리벡터이다. 식 (3)과 (4)에서 표면 전하 밀도 q 와 전류 밀도 J 의 관계는 다음의 연속방정식과 같다.

$$\nabla \cdot J(r, t) = -\frac{\partial q(r, t)}{\partial t} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 전하를 유기 전류 밀도로서 표현하면 다음과 같다.

$$q(r, t) = -\int_0^t \nabla \cdot J(r, t') dt' \quad (7)$$

식 (7)을 (4)에 대입하면 전기 스칼라 전위는 다음과 같이 전류 밀도로서 표현된다.

$$\phi(r, t) = -\frac{1}{\epsilon} \int_S \int_0^t \frac{\nabla' \cdot J(r', t')}{4\pi R} dt' dS' \quad (8)$$

식 (2)를 (1)에 대입하면

$$\left[\frac{\partial A(r, t)}{\partial t} + \nabla \phi(r, t) \right]_{\tan} = [E^i(r, t)]_{\tan}, \quad r \in S \quad (9)$$

와 같다. 식 (9)는 식 (3) 및 식 (8)과 함께 미지의 전류 J 를 구하기 위한 시간 영역의 전장 적분방정식이다.

시간 영역에서 전장 적분방정식의 수치 해를 구하기 위하여, 시간을 간격 Δt 로 등분하고, 시간 단계(time step)를 $t_i = i\Delta t$ 로 정의한다. 시간에 대한 미분 항을 유한 차분으로 근사하면 식 (9)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left[\frac{A(r, t_i) - A(r, t_{i-1})}{\Delta t} + (1-\nu)\nabla \phi(r, t_i) + \nu\nabla \phi(r, t_{i-1}) \right]_{\tan} = [E^i(r, t_{i-\nu})]_{\tan} \quad (10)$$

여기서 전방 및 후방 차분에 대하여 각각 $\nu=1$ 과 $\nu=0$ 이며, 중앙 차분에 대하여는 $\nu=1/2$ 이다.

임의 형태의 3차원 구조물의 표면을 다수의 삼각형 조각으로 근사화할 수 있다. 두 개의 삼각형이 변을 공유하여 접하는 경우를 위한 전개함수는 다음과 같이 정의된다^[15].

$$f_n(r) = f_n^+(r) + f_n^-(r) \quad (11-1)$$

$$f_n^{\pm}(r) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^{\pm}} \rho_n^{\pm}, & r \in T_n^{\pm} \\ 0, & r \notin T_n^{\pm} \end{cases} \quad (11-2)$$

여기서 l_n 은 두 삼각형이 접하는 공유변의 길이이며, A_n^{\pm} 은 삼각형 T_n^{\pm} 의 면적이다. 그리고 ρ_n^{\pm} 는

공유변에 포함되지 않은 삼각형의 꼭지점으로부터 정의되는 위치 벡터이다.

산란체의 표면 전류 밀도 J 는 식 (11)의 전개함수를 이용하여 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$J(r, t) = \sum_{n=1}^N I_n(t) f_n(r) \quad (12)$$

여기서 N 은 도체 표면을 삼각형으로 근사하였을 때, 각 삼각형이 접하는 공유변의 개수이며, I_n 은 시간 영역의 미정계수이다. 식 (10)을 풀기 위하여 모멘트법을 적용하며, 이때 시험 함수를 전개함수와 동일하게 선택하는 갤러킨 방법을 사용한다. 그리고 두 벡터간의 내적을

$$\langle f, g \rangle = \int_S f \cdot g dS \quad (13)$$

로 정의하여, 이를 식 (10)에 적용하면 그 결과는 다음과 같다.

$$A_m(t_i) + (1-\nu)B_m(t_i) = V_m(t_{i-\nu}) + A_m(t_{i-1}) - \nu B_m(t_{i-1}) \quad (14)$$

여기서

$$A_m(t_i) = \langle f_m(r), \frac{1}{\Delta t} A(r, t_i) \rangle \quad (15)$$

$$B_m(t_i) = \langle f_m(r), \nabla \phi(r, t_i) \rangle \quad (16)$$

$$V_m(t_i) = \langle f_m(r), E^i(r, t_i) \rangle \quad (17)$$

이다. 식 (15)~(17)에서 발생하는 시험 적분(testing integral)과 전위 적분(potential integral)의 계산시 참고문헌 [16]과 [17]의 방법을 따른다. 식 (14)로부터 참고문헌 [11]의 방법으로 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$[\alpha_{mn}^E][I_n(t_i)] = [\beta_{m,i}^E] \quad (18)$$

행렬 $[\alpha_{mn}^E]$ 은 시간의 함수가 아니며, 따라서 계산 초기에 한 번의 역행렬 연산만 필요하다.

2-2 자장 적분방정식

도체 표면에서 자장에 경계 조건을 부여하여 자장 적분방정식을 구성하고자 한다. 표면이 닫힌 구조인 3차원 완전 도체의 표면을 S 라고 나타내며,

외부로부터 평면파가 입사한다고 가정한다. 그러면 도체 표면에서 자장에 관한 경계 조건은 다음과 같다.

$$n \times [H^i(r, t) + H^s(r, t)] = J(r, t) \quad (19)$$

여기서 n 은 표면의 장점 위치에서 외향 법선 벡터이며, H^i 는 입사 자장, H^s 는 유기 전류 J 에 의하여 산란되는 자장이다. 이 산란 자장은 다음과 같이 표현된다.

$$H^s(r, t) = \frac{1}{\mu} \nabla \times A(r, t) \quad (20)$$

여기서 A 는 식 (3)과 같이 주어진다.

식 (3)을 이용하여 (19)와 (20)을 결합하면 그 결과는 다음과 같다.

$$J(r, t) = n \times H^i(r, t) + n \times \nabla \times \int_S \frac{I(r', \tau)}{4\pi R} dS' \quad (21)$$

식 (21)의 적분항에서 특이점을 분리하여 다시 쓰면

$$\begin{aligned} n \times \nabla \times \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{I(r', \tau)}{R} dS' \\ = -\frac{I(r, t)}{2} + n \times \nabla \times \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \frac{I(r', \tau)}{R} dS' \end{aligned} \quad (22)$$

와 같으며, S_0 는 S 에서 특이점 ($R=0$)이 제외된 표면이다. 식 (22)를 식 (21)에 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{I(r, t)}{2} - n \times \int_{S_0} \nabla \times \frac{I(r', \tau)}{4\pi R} dS' \\ = n \times H^i(r, t) \end{aligned} \quad (23)$$

을 얻을 수 있다^[18]. 식 (23)의 적분 항에서 $R \neq 0$ 이므로 ‘ $\nabla \times$ ’을 적분 기호 안에 두었다. 식 (23)에서 벡터 항등식을 이용하면 적분내의 항을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \frac{I(r', \tau)}{R} = \frac{1}{c} \frac{\partial I(r', \tau)}{\partial \tau} \times \frac{\widehat{R}}{R} \\ + J(r', \tau) \times \frac{\widehat{R}}{R^2} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 \widehat{R} 은 $r - r'$ 의 방향을 따른 단위 벡터이다. 그러므로 식 (24)를 이용하면, 식 (23)은

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} J(r, t) - n \times D(r, t) - n \times \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} F(r, t) \\ = n \times H^i(r, t) \end{aligned} \quad (25)$$

이며, 여기서

$$D(r, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} J(r', \tau) \times \frac{\widehat{R}}{R^2} dS' \quad (26)$$

$$F(r, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} J(r', \tau) \times \frac{\widehat{R}}{R} dS' \quad (27)$$

으로 정의된다.

모멘트법을 적용하여 식 (25)를 행렬식으로 변환하기 위한 시험 과정에 대하여 전개하고자 한다. 단, MFIE는 표면이 닫힌 구조의 산란체에만 적용된다. 식 (25)에서 미분항에 대하여 유한 차분법을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (1-\nu) \frac{1}{2} J(t_i) + \nu \frac{1}{2} J(t_{i-1}) \\ - n \times [(1-\nu) D(t_i) + \nu D(t_{i-1})] \\ - n \times \frac{1}{c} \frac{F(t_i) - F(t_{i-1})}{\Delta t} \\ = n \times H^i(r, t_{i-\nu}) \end{aligned} \quad (28)$$

여기서 전방 및 후방 차분에 대하여는 각각 $\nu=1$ 과 $\nu=0$ 이며, 중앙 차분에 대하여는 $\nu=1/2$ 이다.

식 (28)에 시험 함수 f_m 으로 식 (13)에서 정의된 내적을 취하면 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (1-\nu) C_m(t_i) - (1-\nu) D_m(t_i) - F_m(t_i) \\ = V_m(t_{i-\nu}) - \nu C_m(t_{i-1}) + \nu D_m(t_{i-1}) - F_m(t_{i-1}) \end{aligned} \quad (29)$$

여기서

$$C_m(t) = \left\langle f_m(r), \frac{I(r, t)}{2} \right\rangle \quad (30)$$

$$D_m(t) = \langle f_m(r), n \times D(r, t) \rangle \quad (31)$$

$$F_m(t) = \left\langle f_m(r), n \times \frac{F(r, t)}{c \Delta t} \right\rangle \quad (32)$$

$$V_m(t) = \langle f_m(r), n \times H^i(r, t) \rangle \quad (33)$$

으로 정의된다. 식 (30)~(33)에서 발생하는 시험 적분(testing integral)과 전위 적분(potential integral)의 계산시 참고문헌 [16]과 [17]의 방법을 따른다.

식 (29)로부터 참고문헌 [13]의 방법으로 행렬식을 표현하면 다음과 같다.

$$[\alpha_{mn}^H][I_n(t_i)] = [\beta_{mi}^H] \quad (34)$$

행렬 $[a_{mn}^H]$ 은 시간의 함수가 아니며, 따라서 계산 초기에 한 번의 역행렬 연산만 필요하다.

2-3 결합 적분방정식

전장과 자장에 경계 조건을 부여하여 얻어진 적분방정식의 결과는 각각 (1)과 (19)로 주어진다. EFIE와 MFIE, 이 두 방정식은 입사파의 주파수 스펙트럼이 산란체의 내부 공진 주파수를 포함하면 정확한 해를 얻기에는 어렵다. 이 문제를 해결하기 위하여 CFIE가 사용된다. 시간 영역 CFIE는 다음과 같이 EFIE와 MFIE의 선형 결합으로 이루어진다. 즉 식 (1)과 식 (19)를 결합하면

$$(1-x)[-E^s(r, t)]_{\tan} + x\eta[J(r, t) - n \times H^s(r, t)] = (1-x)[E^i(r, t)]_{\tan} + x\eta[n \times H^i(r, t)] \quad (35)$$

을 얻을 수 있으며^[14], 여기서 x 는 선형 결합계수로서, 0(EFIE)과 1(MFIE) 사이의 임의의 실수이며, η 는 파동 임피던스이다.

시간 영역 CFIE인 식 (35)에 대한 행렬식을 직접식 (18)과 식 (34)로부터 얻을 수도 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$[a_{mn}] [I_n(t_i)] = [\beta_{m,i}] \quad (36)$$

$$a_{mn} = (1-x)\alpha_{mn}^E + x\eta\alpha_{mn}^H \quad (37)$$

$$\beta_{m,i} = (1-x)\beta_{m,i}^E + x\eta\beta_{m,i}^H \quad (38)$$

식 (36)에서 시간 단계 i 를 증가시키면서 미지의 전류계수를 얻을 수 있다. 행렬 $[a_{mn}]$ 은 시간의 함수가 아니며, 따라서 계산 초기에 한 번의 역행렬 연산만 필요하다.

III. 수치 결과

수치 결과를 보이고자 선택된 구조는 자유공간에 놓인 도체이다. 산란체에 입사되는 가우시안 펄스의 평면파는 다음과 같다^[1].

$$E^i(r, t) = E_0 \frac{4}{\sqrt{\pi T}} e^{-r^2} \quad (39)$$

$$H^i(r, t) = \frac{1}{\eta} \hat{k} \times E^i(r, t) \quad (40)$$

$$\gamma = \frac{4}{T}(ct - ct_0 - r \cdot \hat{k}) \quad (41)$$

여기서 \hat{k} 는 입사파의 진행 방향을 나타내는 단위 파수 벡터, T 는 가우시안 펄스의 폭, 그리고 t_0 는 펄스의 지연을 나타내며, 이 시간에서 입사 펄스는 최대치를 가진다. 계산시 사용된 펄스는 $-z$ 방향으로 입사하며, $E_0 = \hat{x}$ 이다. 그리고 $ct_0 = 3 \text{ lm}$, $T = 2 \text{ lm}$ 으로 두었다. 단위 'lm (light meter)'은 전자파가 자유공간에서 1 m 동안 진행하는 시간으로서 정의된다. 본 논문에서 제안하는 시간 영역 CFIE의 해는 식 (10)과 식 (28)에서 $\nu = 0.5$ 로 두어 중앙차분으로 근사한 결과이며(Proposed), 기존 결과와 비교하기 위하여 참고문헌 [14]의 방법으로 계산시에 EFIE의 경우 $\nu = 0.5$, MFIE에 대하여 $\nu = 0$ 으로 두었다(conventional). 그 외의 유한 차분 근사를 선택한 경우, 해의 정확성과 안정성이 열악하였다. 특히 미분항에 대하여 전방 유한 차분으로 근사하는 경우에는 해가 초기에 발산하였으며, 비교 대상에서 제외한다. 또한, 시간 영역 적분식으로부터 계산된 결과는 주파수 영역에서 계산된 해의 역 푸리에 변환(Inverse Discrete Fourier Transform: IDFT)과 비교되며, 구도체의 경우 산란전장에 대한 해석해(mie solution)와도 비교한다. IDFT는 $0 \leq f < 500 \text{ MHz}$ 범위에서 128개의 표본을 얻어 만들었다. CFIE의 계산시 식 (37)과 (38)의 결합계수는 $x = 0.5$ 로 선택하였다. 계산시 시간 간격은 $c\Delta t = 2 R_{av}$ 로 두었다.

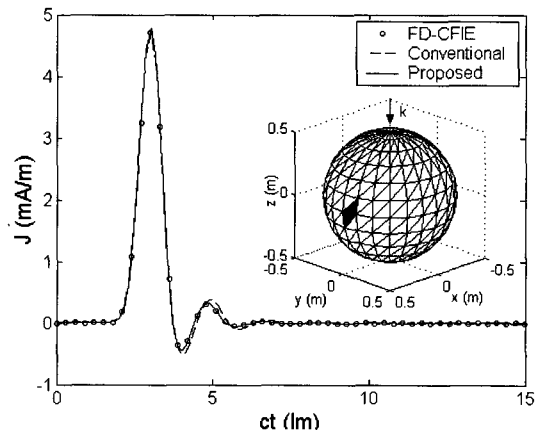


그림 1. 도체구 표면의 θ -방향 유기 전류의 과도 응답
Fig. 1. Transient response of θ -directed current on a conducting sphere.

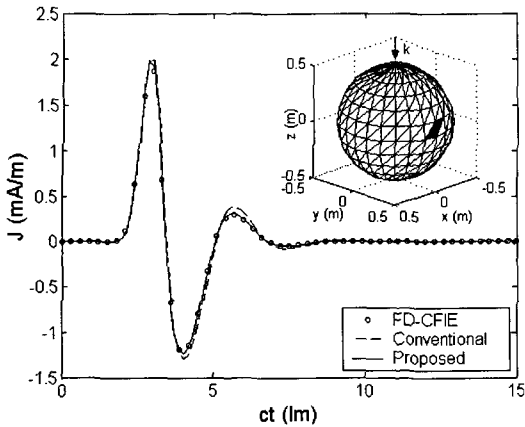


그림 2. 도체구 표면의 ϕ -방향 유기 전류의 과도 응답
Fig. 2. Transient response of ϕ -directed current on a conducting sphere.

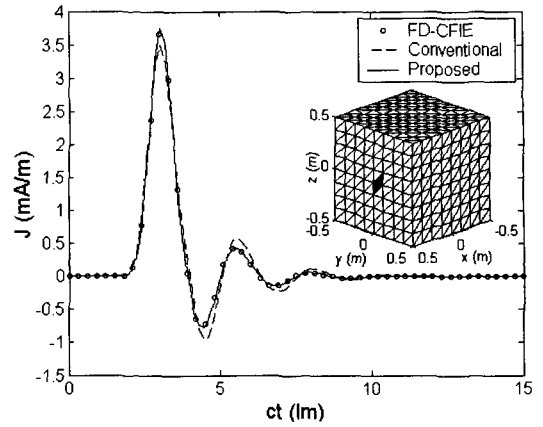


그림 4. 정육면 도체 표면의 z -방향 유기 전류의 과도 응답
Fig. 4. Transient response of z -directed current on a conducting cube.

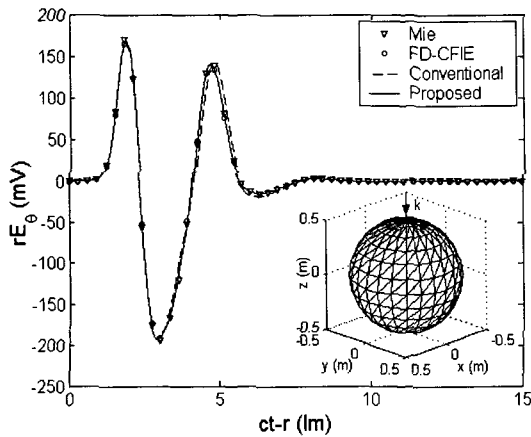


그림 3. 도체구의 후방 원거리 산란 전장 응답
Fig. 3. Backward far scattered electric field response from a conducting sphere.

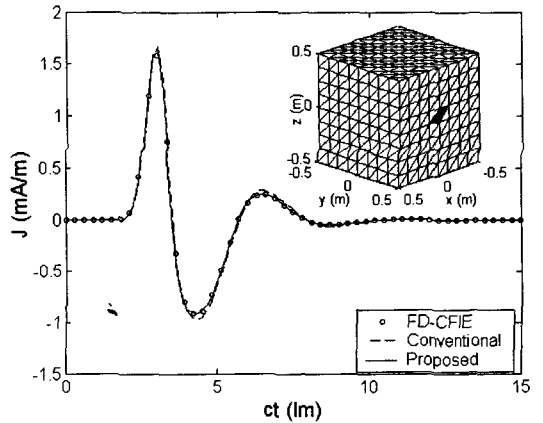


그림 5. 정육면 도체 표면의 x -방향 유기전류의 과도 응답
Fig. 5. Transient response of x -directed current on a conducting cube.

여기서 R_{av} 는 삼각형 조각 중심 간의 평균거리이다.

첫 산란체의 예는 반지름이 0.5 m이고, 중심이 좌표계의 원점에 있는 도체구이다. 구표면을 분할하여 삼각형을 구성하였으며, 그 결과 528개의 삼각형 조각과 792개의 공유변을 얻었다. 그림 1과 2는 가우시안 평면파가 도체구에 입사할 때 유기되는 표면 전류이며, 제안된 방법으로 계산된 과도 응답의 해는 기존의 방법에 의한 해보다 주파수 영역의 IDFT 결과와 더욱 잘 일치하고 있다. 그림 3은 원거리 산란장의 과도 응답이다. 제안된 방법에 의한 과도 산란장의 해는 엄밀해(Mie) 및 주파수 영역의

IDFT 결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

다음 예는 변의 길이가 1 m이고, 중심이 좌표계의 원점에 있는 정육면 도체이다. 표면을 분할하여 삼각형을 구성하였으며, 그 결과 768개의 삼각형 조각과 1,152개의 공유변을 얻었다. 그림 4와 5는 가우시안 평면파가 정육면 도체에 입사할 때 유기되는 표면 전류이며, 그림 6은 원거리 산란장의 과도 응답이다. 제안된 방법으로 계산된 과도해는 기존의 방법에 의한 해보다 주파수 영역의 IDFT 결과와 더욱 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

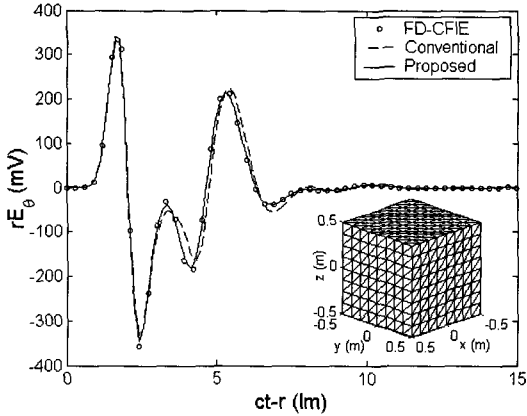


그림 6. 정육면 도체의 후방 원거리 산란 전장 응답
Fig. 6. Backward far scattered electric field response from a conducting cube.

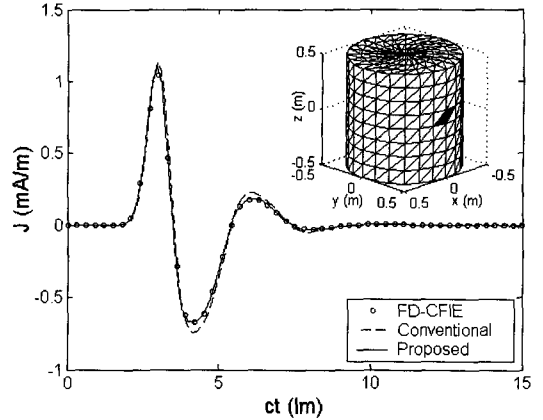


그림 8. 원통 도체 표면의 phi-방향 유기 전류의 과도 응답
Fig. 8. Transient response of phi-directed current on a conducting cylinder.

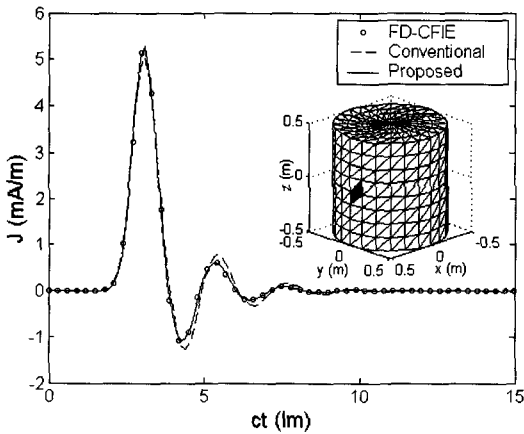


그림 7. 원통 도체 표면의 z-방향 유기 전류의 과도 응답
Fig. 7. Transient response of z-directed current on a conducting cylinder.

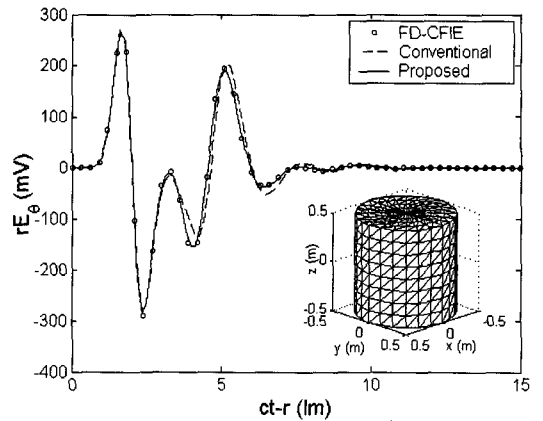


그림 9. 원통 도체의 후방 원거리 산란 전장 응답
Fig. 9. Backward far scattered electric field response from a conducting cylinder.

마지막 예는 원통 도체이며, 그 중심은 좌표계의 원점에 있으며, 반지름은 0.5 m, 높이는 1 m이다. 표면을 720개의 삼각형으로 분할하였으며, 1,080개의 공유변을 얻었다. 그림 7과 8은 가우시안 평면파가 원통 도체에 입사할 때 유기되는 표면 전류이며, 그림 9는 원거리 산란장의 과도 응답이다. 기존 방법의 결과보다 제안된 방법의 해는 주파수 영역의 IDFT 결과와 더욱 잘 일치하고 있다. 지금까지 보인 모든 계산 결과에서 EFIE 및 MFIE의 미분항에 대하여 동시에 중앙 차분을 적용한 경우가 기존의

참고문헌 [14]의 기법보다도 더욱 정확함을 볼 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 표면이 단축된 삼차원 임의 도체 구조의 과도 산란 해석을 위하여 시간 영역 결합 적분방정식의 안정된 MOT 해법을 제안하였으며, 계산된 수치 결과를 주파수 영역에서 얻어진 IDFT와 비교하였다. 공식화 과정에서 전장 및 자장 적분 방정식의 모든 미분 항을 중앙 차분으로 근사시켰

으며, CFIE의 행렬식을 구성하였다. 제안된 방법으로 계산된 시간 영역 CFIE의 해는 주파수 영역 CFIE로부터 얻은 해의 IDFT와 서로 잘 일치하였다. 본 논문의 동기 및 제안하는 내용은 비교적 간단하지만, 계산된 결과를 보면 기존의 방법보다 그 정확성이 획기적으로 개선되었다.

참 고 문 헌

- [1] S. M. Rao, *Time Domain Electromagnetics*, Academic Press, pp. 49-149, 1999.
- [2] S. M. Rao, D. R. Wilton, "Transient scattering by conducting surfaces of arbitrary shape", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, no. 1, pp. 56-61, Jan. 1991.
- [3] D. A. Vechinski, S. M. Rao, "A stable procedure to calculate the transient scattering by conducting surfaces of arbitrary shape", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 40, no. 6, pp. 661-665, Jun. 1992.
- [4] S. M. Rao, T. K. Sarkar, "An alternative version of the time-domain electric field integral equation for arbitrarily shaped conductors", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 41, no. 6, pp. 831-834, Jun. 1993.
- [5] P. J. Davies, "On the stability of time-marching schemes for the general surface electric-field integral equation", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, no. 11, pp. 1467-1473, Nov. 1996.
- [6] S. M. Rao, T. K. Sarkar, "Time-domain modeling of two-dimensional conducting cylinders utilizing an implicit scheme-TM incidence", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 6, pp. 342-347, Aug. 1997.
- [7] S. M. Rao, T. K. Sarkar, "An efficient method to evaluate the time-domain scattering from arbitrarily shaped conducting bodies", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 5, pp. 321-325, Apr. 1998.
- [8] S. M. Rao, T. K. Sarkar, "Transient analysis of electromagnetic scattering from wire structures utilizing an implicit time-domain integral-equation technique", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 66-69, Jan. 1998.
- [9] S. M. Rao, D. A. Vechinski, and T. K. Sarkar, "Transient scattering by conducting cylinders-implicit solution for the transverse electric case", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 2, pp. 129-134, Apr. 1999.
- [10] T. K. Sarkar, W. Lee, and S. M. Rao, "Analysis of transient scattering from composite arbitrarily shaped complex structures", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 48, no. 10, pp. 1625-1634, Oct. 2000.
- [11] B. H. Jung, T. K. Sarkar, "Time-domain electric field integral equation with central finite difference", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 31, no. 6, pp. 429-435, Dec. 2001.
- [12] W. Lee, T. K. Sarkar, "Direct time domain solution for dielectric structure with time derivatives of the potential functions by central difference", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 48, no. 9, pp. 1795-1801, Sep. 2006.
- [13] B. H. Jung, T. K. Sarkar, "Transient scattering from three-dimensional conducting bodies by using magnetic field integral equation", *J. of Electromag. Waves and Appl.*, vol. 16, no. 1, pp. 111-128, Jan. 2002.
- [14] B. H. Jung, T. K. Sarkar, "Time-domain CFIE for the analysis of transient scattering from arbitrarily shaped 3D conducting objects", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 34, no. 4, pp. 289-296, Aug. 2002.
- [15] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, no. 3, pp. 409-418, May 1982.
- [16] D. R. Wilton, S. M. Rao, A. W. Glisson, D. H. Schaubert, O. M. Al-Bundak, and C. M. Butler, "Potential integrals for uniform and linear source distributions on polygonal and polyhedral domains", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 32, no. 3, pp. 276-281, Mar. 1984.
- [17] P. Yla-Oijala, M. Taskinen, "Calculation of CFIE

impedance matrix elements with RWG and $n \times n$ RWG functions", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 8, pp. 1837-1846, Aug. 2003.

[18] S. M. Rao, "Electromagnetic scattering and radiation of arbitrarily-shaped surfaces by triangular patch modeling", Ph.D. Dissertation, Univ. Mississippi, Aug. 1980.

tion of arbitrarily-shaped surfaces by triangular patch modeling", Ph.D. Dissertation, Univ. Mississippi, Aug. 1980.

이 창 화



1987년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년~현재: 경북대학교 전자공학과 박사과정
 1989년~2000년: 한국전자통신연구원 선임연구원

2000년~현재: (주)에드모텍 연구소장
 [주 관심분야] 초고주파 소자, 안테나, 이동통신기술

권 우 현



1977년: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1979년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1993년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1979년~현재: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수

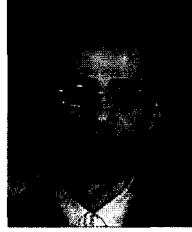
[주 관심분야] 컴퓨터응용제어 및 전력전자, 제어계측

안 옥 규



2007년 2월: 호서대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2007년 2월~현재: 호서대학교 혁신기술경영융합대학원 반도체디스플레이공학과 석사과정
 [주 관심분야] 전자파 수치해석

정 백 호



1985년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년 8월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
 1989년 2월~1994년 3월: 국방과학연구소 연구원

1997년 9월~현재: 호서대학교 정보통신공학과 부교수
 2001년 1월~2002년 2월: 미국 Syracuse 대학교 연구교수
 [주 관심분야] 전자파 수치해석, 모멘트법, 시간 영역 유한차분법