

# 물리 적분방정식을 이용한 삼차원 유전체의 전자기 산란 해석

## Analysis of Electromagnetic Scattering from 3-Dimensional Dielectric Objects applying Muller Integral Equation

박재권 · 김형진 · 안중출\* · 정백호\*\*

Jae-Kwon Park · Hyung-Jin Kim · Chong-Chul An\* · Baek-Ho Jung\*\*

### 요 약

본 논문에서는 임의의 형상을 가지는 삼차원 유전체의 전자파 산란을 해석하기 위하여 모멘트법을 이용한 물리 적분방정식의 새로운 해법을 제안한다. 매질이 균일한 유전체 표면을 평면 삼각형 패치로 모델링 하여, *RWG* (Rao, Wilton, Glisson) 함수를 등가 전기 및 자기 전류밀도의 전개함수로 사용한다. 그리고 *RWG* 함수와 그 직교 함수를 조합한 시험함수를 적용한다. 유전체구에 대하여 제안된 방법으로 계산된 수치 결과를 보이고 다른 공식에 의한 결과와도 비교한다.

### Abstract

In this paper, we present a set of numerical schemes to solve the Muller integral equation for the analysis of electromagnetic scattering from arbitrarily shaped three-dimensional dielectric bodies by applying the method of moments(MoM). The piecewise homogeneous dielectric structure is approximated by planar triangular patches. A set of the *RWG*(Rao, Wilton, Glisson) functions is used for expansion of the equivalent electric and magnetic current densities and a combination of the *RWG* function and its orthogonal component is used for testing. Numerical results for a dielectric sphere are presented and compared with solutions obtained using other formulations.

Key words : Electromagnetic Scattering, Dielectric, Muller Integral Equation, Method of Moments

### I. 서 론

유전체의 전자기 산란 해석시, 전장 적분방정식(Electric Field Integral Equation, EFIE) 및 자장 적분방정식(Magnetic Field Integral Equation, MFIE)을 적용하는 경우 해석 구조의 내부공진 주파수에 해당하는 주파수에서는 해가 발산한다. 이를 제거하는 한 방법은 EFIE와 MFIE를 조합하여 얻어지는 결합 적분방정식(Combined Field Integral Equation, CFIE)의 적용이며, 이로부터 모든 주파수에서 안정된 해를

얻을 수 있다. 공진 문제를 제거하기 위한 또 다른 방법으로는 CFIE처럼 전장 및 자장 적분방정식을 결합한 PMCHW(Poggio, Miller, Chang, Harrington, Wu)와 물리(Muller) 적분방정식의 적용이다<sup>[1][2]</sup>. CFIE 및 PMCHW 적분방정식을 적용한 해는 많은 문헌에서 볼 수 있으나, 초기의 연구는 주로 이차원 문제에 집중되었다.

표면 적분방정식을 사용하여 임의 형태의 삼차원 구조를 해석할 때는 해석 구조의 표면을 평면 삼각형 패치로 모델링한다. 이 삼각형 패치에 적합한 전

「이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-002-D00273).」

호서대학교 벤처전문대학원(Graduate School of Venture, Hoseo University)

\*엠에이전자(MA Electronics Company)

\*\*호서대학교 전기정보통신공학부(Dept. of Information and Communication Eng., Hoseo University)

· 논문 번호 : 20040716-091

· 수정완료일자 : 2004년 9월 6일

류밀도의 전개함수는 RWG 함수이다<sup>[3]</sup>. 삼차원 유전체의 전자기 산란에 관하여 삼각형 패치를 사용한 CFIE의 해법은 Sheng 등에 의하여 제안되었으며<sup>[4]</sup>, 이 문헌에서는 전기 및 자기 전류밀도의 전개함수로 RWG 함수를, 시험함수로는 RWG 및 그 직교함수의 조합을 사용하였다. 참고문헌 [5]에서는 Sheng의 해법에 근거하여 CFIE를 적용한 유전체의 산란 해석시 다양한 시험함수를 선택하는 방법이 고찰되었다. 삼차원 유전체의 해석에 관한 여러 가지 적분방정식의 해법이 제시되었으나<sup>[4]~[8]</sup>, 임의 구조의 유전체에 대하여 삼각형 패치로 유전체를 모델링한 경우의 물리 적분방정식의 적용은 지금까지 시도되지 않았다.

본 논문에서는 매질이 균일하고 임의 형태의 삼차원 유전체로부터 전자기 산란을 해석하기 위하여 물리 적분방정식을 풀기 위한 새로운 해법을 제안한다. 이를 위하여 등가 전류밀도를 RWG 함수로 표현하고, 시험함수로는 RWG 함수 및 그 직교함수의 조합을 사용한다. 시험함수의 적용시 네 개의 파라미터를 도입하여 모든 가능한 경우의 시험 방법을 고찰한다. 다음 장에서 물리 적분방정식과 시험과정을 살펴보고, 제 III장에서는 엄밀해를 가지는 유전체 구에 대하여 평면파 입사시의 수치해를 보이고 다른 방법에 의한 해와 비교한다. 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

## II. 적분방정식

본 장에서는 유전체로부터의 전자기 산란을 해석하기 위한 적분방정식을 논의하고 물리 적분방정식에 관한 모멘트법의 적용 과정을 보인다. 그림 1과 같이 유전율이  $\epsilon_1$ 이고 투자율이  $\mu_1$ 인 무한 공간에

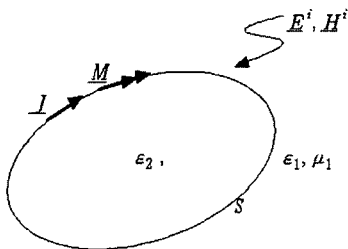


그림 1. 균일 유전체의 평면파 입사  
Fig. 1. Homogeneous dielectric body illuminated by a plane wave.

매질의 유전율과 투자율이 각각  $\epsilon_2$ 와  $\mu_2$ 인 유전체가 놓여져 있으며 외부로부터 전자파가 조사된다고 가정한다. 등가원리에 의하여 유전체 표면 S의 전기 및 자기 전류밀도  $J$ 와  $M$ 으로부터 산란장을 표현할 수 있으며, 전장 및 자장의 접선성분이 표면 S에서 연속인 경계조건을 적용하면 다음과 같은 적분방정식을 얻을 수 있다.

$$[-E_1^s(J, M)]_{\tan} = [E^i]_{\tan} \quad (1)$$

$$[-E_2^s(J, M)]_{\tan} = 0 \quad (2)$$

$$[-H_1^s(J, M)]_{\tan} = [H^i]_{\tan} \quad (3)$$

$$[-H_2^s(J, M)]_{\tan} = 0 \quad (4)$$

여기서  $E^i$ 와  $H^i$ 는 각각 입사파의 전장과 자장이다. 아래첨자 'tan'은 접선성분을 나타내며,  $E_\nu^s$ 와  $H_\nu^s$ 는 산란 전장과 자장으로서 다음과 같이 주어진다.

$$E_\nu^s(J) = -j\omega A_\nu - \nabla \Phi_\nu \quad (5)$$

$$E_\nu^s(M) = -\frac{1}{\epsilon_\nu} \nabla \times F_\nu \quad (6)$$

$$H_\nu^s(M) = -j\omega F_\nu - \nabla \Psi_\nu \quad (7)$$

$$H_\nu^s(J) = \frac{1}{\mu_\nu} \nabla \times A_\nu \quad (8)$$

여기서  $\nu$ 는 1 또는 2이다. 식 (5)~(8)에서  $A_\nu$ 와  $F_\nu$ 는 각각 자기 및 전기 벡터 전위이며,  $\Phi_\nu$ 와  $\Psi_\nu$ 는 각각 전기 및 자기 스칼라 전위이다.

식 (1)~(4)에서 미지량은 두 개의 전류밀도  $J$  및  $M$ 이며, 해를 얻기 위하여 네 개의 식을 다양하게 조합할 수 있다<sup>[1][2]</sup>. 즉 식 (1)과 (2)로부터 EFIE를 얻을 수 있으며, 이와는 쌍대로서 식 (3)과 (4)로부터 MFIE를 구성할 수 있다. 그러나 서론에서 언급하였듯이 EFIE와 MFIE만을 사용한다면 유전체의 표면 S가 도체로 대체되고, 그 내부가 외부와 동일한 매질로 채워진 구조의 내부공진 주파수에서는 안정된 해를 얻기 어렵다. 이를 극복하는 방법이 CFIE이며, 식 (1)~(4)로부터 다음과 같은 형태의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & (1-x)[-E_\nu^s(J, M)]_{\tan} + x\eta_\nu[-H_\nu^s(J, M)]_{\tan} \\ & = \begin{cases} (1-x)[E^i]_{\tan} + x\eta_1[H^i]_{\tan}, & \nu=1 \\ 0, & \nu=2 \end{cases} \quad (9) \end{aligned}$$

여기서  $x$ 는 일반적인 선형 결합계수이며, 0부터 1

까지 임의의 실수이다. 그리고  $\eta_\nu$ 는 영역  $\nu$ 의 파동 임피던스이다. 네 개의 적분식을 결합하는 또 다른 방법으로는 식 (1)과 (2), 그리고 (3)과 (4)를 각각 더하여 다음과 같이 두 개의 방정식을 얻을 수 있다.

$$[-E_1^s(\mathbf{J}, \mathbf{M}) - \alpha E_2^s(\mathbf{J}, \mathbf{M})]_{\tan} = [E^i]_{\tan} \quad (10)$$

$$[-H_1^s(\mathbf{J}, \mathbf{M}) - \beta H_2^s(\mathbf{J}, \mathbf{M})]_{\tan} = [H^i]_{\tan} \quad (11)$$

여기서  $\alpha = \epsilon_2/\epsilon_1$ , 그리고  $\beta = \mu_2/\mu_1$ 이다. 이 형태의 식을 물리 적분방정식이라고 한다<sup>[2]</sup>. 만약에  $\alpha = \beta = 1$ 이라면, 식 (10)과 (11)은 PMCHW 적분방정식이 된다.

삼차원 임의 형태의 유전체를 해석하기 위하여 구조의 표면을 평면 삼각형 패치로 근사하고자 한다. 이때 적합한 전개함수는 참고문헌 [3]에서 제안된 RWG 함수  $f_n$ 이다. 이 함수는 서로 인접하는 두 개의 삼각형에서 정의되며,  $n$ 은 공유변의 번호이다. 이 전개함수를 사용하여 일반적으로 유전체 표면의 등가 전류밀도  $\mathbf{J}$ 와  $\mathbf{M}$ 은 다음과 같이 근사된다.

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N J_n f_n(\mathbf{x}) \quad (12)$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N M_n f_n(\mathbf{x}) \quad (13)$$

여기서  $J_n$ 과  $M_n$ 은 미정 계수이며,  $N$ 은 삼각형으로 모델링된 유전체 표면의 공유변 개수이다. 본 논문에서도 등가 전류밀도  $\mathbf{J}$ 와  $\mathbf{M}$ 을 식 (12) 및 (13)과 같이 전개한다. 모멘트법을 적용하여 적분방정식으로부터 행렬식을 얻기 위한 그 다음 단계는 시험 내적이다. 식 (9)의 CFIE에 대하여 내적을 취할 때 시험함수로서 RWG 함수 및 그 직교함수의 다양한 조합을 사용할 수 있다<sup>[4][5]</sup>. 이 직교함수는 공유변  $n$ 에 대하여  $g_n = \hat{n} \times f_n$ 으로 정의된다. 여기서  $\hat{n}$ 은 표면  $S$ 의 외향 법선 단위벡터이다.

지금부터는 물리 적분 방정식을 풀기 위한 시험 내적을 고려하고자 한다. 식 (5)~(8)을 식 (10)과 (11)에 대입하면 그 결과는 다음과 같다.

$$\left[ j\omega(\mathbf{A}_1 + \alpha\mathbf{A}_2) + \nabla(\Phi_1 + \alpha\Phi_2) + (1-\alpha)\frac{1}{2}\hat{n} \times \mathbf{M} + PV\left(\frac{1}{\epsilon_1}\nabla \times \mathbf{E}_1 + \alpha\frac{1}{\epsilon_2}\nabla \times \mathbf{E}_2\right) \right]_{\tan} = [E^i]_{\tan} \quad (14)$$

$$\left[ j\omega(\mathbf{E}_1 + \beta\mathbf{E}_2) + \nabla(\Psi_1 + \beta\Psi_2) - (1-\beta)\frac{1}{2}\hat{n} \times \mathbf{J} \right. \\ \left. - PV\left(\frac{1}{\mu_1}\nabla \times \mathbf{A}_1 + \beta\frac{1}{\mu_2}\nabla \times \mathbf{A}_2\right) \right]_{\tan} = [H^i]_{\tan} \quad (15)$$

여기서  $PV$  (principal value)는 특이점을 제외한 값이다. PMCHW 적분방정식의 경우에는  $\alpha = \beta = 1$ 이며, 따라서 식 (14)와 (15)는

$$\sum_{\nu=1}^2 \left[ j\omega\mathbf{A}_\nu + \nabla\Phi_\nu + PV\left(\frac{1}{\epsilon_\nu}\nabla \times \mathbf{E}_\nu\right) \right]_{\tan} = [E^i]_{\tan} \quad (16)$$

$$\sum_{\nu=1}^2 \left[ j\omega\mathbf{E}_\nu + \nabla\Psi_\nu - PV\left(\frac{1}{\mu_\nu}\nabla \times \mathbf{A}_\nu\right) \right]_{\tan} = [H^i]_{\tan} \quad (17)$$

와 같다. 이 PMCHW 적분방정식에서 RWG 함수만을 시험함수로 사용하여도 정확하고 안정한 해를 얻을 수 있다<sup>[4]~[6]</sup>. 그러나 식 (14)와 (15)의 물리 적분방정식에 대하여 내적을 취한다면 좌변의 셋째 항인  $\hat{n} \times \mathbf{M}$ 과  $\hat{n} \times \mathbf{J}$ 로 인하여 시험함수로서 RWG 함수뿐만 아니라 그 직교 함수인  $g_m$ 도 필요하다. 따라서 시험함수로서  $f_m$ 과  $g_m$ 을 조합하여 물리 적분방정식에 내적을 취하는 일반적인 표현을 다음과 같이 네 개의 계수를 도입하여 나타내고자 한다.

$$\langle f_E f_m + g_E g_m, -E_1^s(\mathbf{J}, \mathbf{M}) - \alpha E_2^s(\mathbf{J}, \mathbf{M}) \rangle \\ = \langle f_E f_m + g_E g_m, E^i \rangle \quad (18)$$

$$\langle f_H f_m + g_H g_m, -H_1^s(\mathbf{J}, \mathbf{M}) - \beta H_2^s(\mathbf{J}, \mathbf{M}) \rangle \\ = \langle f_H f_m + g_H g_m, H^i \rangle \quad (19)$$

여기서  $f_E, g_E, f_H,$  그리고  $g_H$ 는 시험 계수이고, +1 또는 -1의 값을 가진다. CFIE에 관하여 이 형태의 시험 방법을 참고문헌 [5]에서 TENE-THNH로 부른 바가 있다. 식 (18)과 (19)에서 시험 계수를 각각 달리 선택하면 물리 적분방정식에서는 네가지 경우의 시험 방법이 발생한다. 본 논문에서도 이 방법을 TENE-THNH라 하고, 전장 및 자장에 관한 시험 함수와 함께 표 1에 요약하였다. 또한 CFIE의 내적 과정에서 시험 항의 하나를 생략하는 방법이 제안되었으며<sup>[5]</sup>, 이와 유사하게 물리 방정식의 경우도 하나의 시험내적 항을 무시하면 TENE-TH( $g_H = 0$ ), TENE-NH( $f_H = 0$ ), TE-THNH( $g_E = 0$ ), NE-THNH( $f_E = 0$ )와 같이 네 개의 경우를 얻을 수 있다. 따라서 시험 계수의 부호를 다르게 선택하여 전부 8 가지 경우의

표 1. 적분방정식의 시험함수와 유전체구의 RCS 평균 오차

Table 1. Testing functions for integral equations and the average difference of RCS for the dielectric sphere.

Formulation		Testing function		$\Delta\text{RCS}$ (dBm <sup>2</sup> )	
		$E$ -field	$H$ -field	Monostatic	Bistatic
CFIE		$f_m + g_m$	$-f_m + g_m$	0.98	0.44
PMCHW		$f_m$	$f_m$	0.82	0.19
Muller	TETH	$f_m$	$f_m$	0.85	0.24
	NENH	$g_m$	$g_m$	5.00	2.09
	TENE-THNH	$f_m + g_m$	$f_m + g_m$	0.87	0.11
			$f_m - g_m$	0.95	0.14
		$f_m - g_m$	$f_m + g_m$	0.81	0.10
			$f_m - g_m$	0.94	0.15
	TENE-TH	$f_m + g_m$	$f_m$	1.00	0.30
				$f_m - g_m$	1.01
	TENE-NH	$f_m + g_m$	$g_m$	5.22	2.37
				$f_m - g_m$	5.23
	TE-THNH	$f_m$	$f_m + g_m$	0.93	0.14
			$f_m - g_m$	0.98	0.18
NE-THNH	$g_m$	$f_m + g_m$	5.63	1.62	
		$f_m + g_m$	5.87	2.06	

시험 내적이 가능하며, 이를 표 1에 요약하였다. CFIE(TENE-THNH)의 경우 안정된 해를 얻기 위하여 전장에 대하여  $f_m + g_m$ 을, 그리고 자장에 대하여  $-f_m + g_m$ 을 시험함수로 선택할 수 있으며, 또 다른 방법으로는 전장에 대하여  $f_m - g_m$ 을, 그리고 자장에 대하여  $f_m + g_m$ 을 시험함수로도 선택할 수 있다<sup>5)</sup>.

### III. 수치 결과

본 장에서는 지금까지 논의된 물리 적분방정식의 다양한 시험 방법을 사용하여 계산된 수치결과를 보이고 비교한다. 해석 구조는 그림 2에서 보는 바와 같이 엄밀해(Mie series solution)를 가지는 유전체구

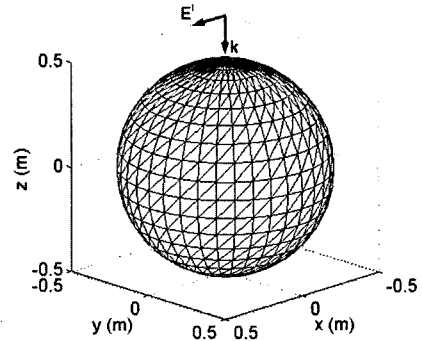


그림 2. 반경이 0.5 m인 유전체구 표면의 삼각형 분할  
Fig. 2. Triangular surface patching of a dielectric sphere with 0.5 m of a radius.

를 선택하였다. 그 반경은 0.5 m이고, 상대 유전율을  $\epsilon_r = 4$ 로 두었다. 그림 2와 같이 구의 표면을 1,224개의 삼각형 패치로 나누었으며, 공유변은  $N = 1,836$ 이 된다. 수치 계산시 입사파로서  $x$  방향의 전장을 가지고  $-z$  방향으로 입사하는 평면파를 가정하였다( $\hat{k} = -\hat{z}$ ). 계산되는 수치 결과는 4 MHz 간격으로 0~400 MHz의 주파수 대역에서 유전체구로부터  $+z$  방향으로 산란되는 monostatic 레이더 단면적 (radar cross section, RCS)이다. 표 1에 각 적분방정식과 다양한 시험방법에 의하여 계산된 RCS의 엄밀해(Mie)에 대한 상대 평균 오차를 정리하였으며, 이 오차는 다음과 같이 계산하였다.

$$\Delta\text{RCS} = \frac{\sum_{M=1}^M |\text{RCS}(\text{Mie}) - \text{RCS}(\text{Numerical})|}{M} \quad (20)$$

여기서  $M$ 은 계산된 표본의 개수이다. 계산 결과를 보이는 모든 그림에서 괄호 안의 네 개의 수는 식 (18)과 (19)에서 도입된 시험계수( $f_E, g_E, f_H, g_H$ )를 나타낸다.

첫째 예로서 그림 3은 물리 방정식을  $f_m$  또는  $g_m$ 으로만 시험하여(TETH 또는 NENH) 계산한 RCS이며, 엄밀해와 CFIE 및 PMCHW 적분식을 적용하여 계산된 결과와 비교하고 있다. CFIE의 해를 얻을 때 식 (9)의 결합계수  $x = 0.5$ 로 두었으며, 시험함수로는 전장에 대하여  $f_m + g_m$ 을, 그리고 자장에 대하여  $-f_m + g_m$ 을 사용하였다. 그림 3을 자세히 보면 물리 적분방정식의 TETH 경우와 PMCHW 적분방정식의 해가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이

현상은 식 (14)와 (15)에 있는  $\hat{n} \times M$ 과  $\hat{n} \times I$  항을  $f_m$ 만으로는 시험할 수 없어서, 결과적으로  $f_m$ 으로

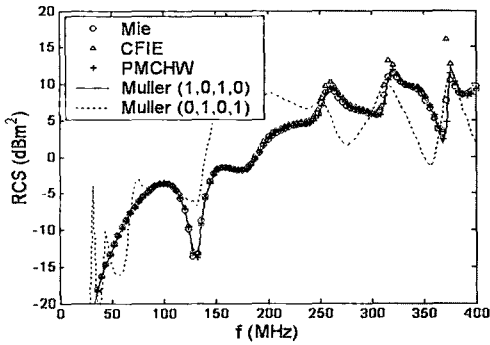
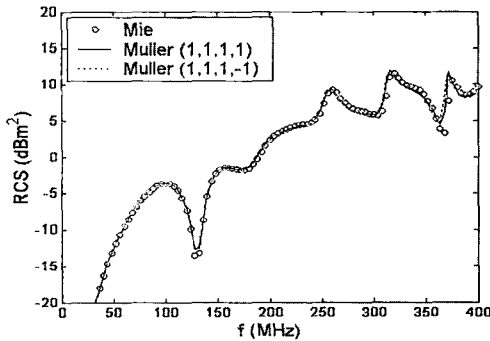
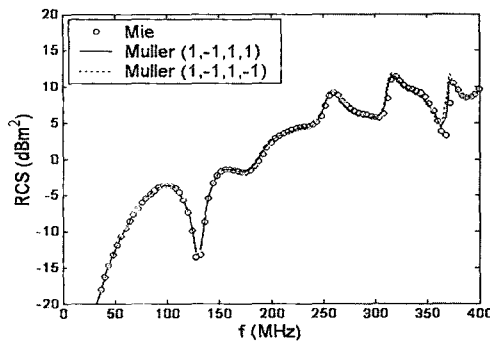


그림 3. CFIE 및 PMCHW와 물리 적분식(TETH와 NENH)으로 계산한 유전체구의 RCS  
Fig. 3. RCS of the dielectric sphere computed by CFIE, PMCHW, and Muller(TETH and NENH) formulations.



(a)  $\langle f_m + g_m, E \rangle$ 와  $\langle f_m \pm g_m, H \rangle$



(b)  $\langle f_m - g_m, E \rangle$ 와  $\langle f_m \pm g_m, H \rangle$

그림 4. 물리 적분식(TENE-THNH)으로 계산한 유전체구의 RCS  
Fig. 4. RCS of the dielectric sphere computed by Muller formulations(TENE-THNH).

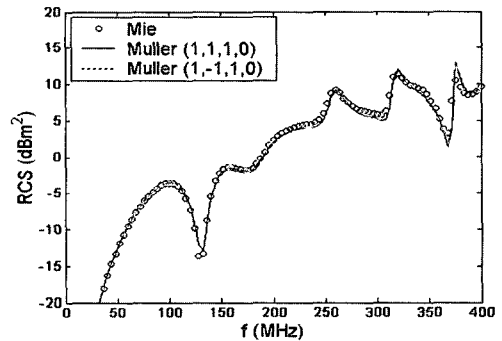
시험하는 PMCHW 적분식의 효과와 동일하기 때문이다. 그림 3에서 물리 적분방정식의 NENH를 제외한 모든 RCS는 공진 문제를 겪지 않고 해석해와 잘 일치함을 볼 수 있다.

둘째 예로서 그림 4는 물리 적분방정식에 대하여 TENE-THNH의 네 경우로부터 계산된 RCS를 보이고 있다. TENE-THNH의 모든 해는 엄밀해와 잘 일치함을 볼 수 있으며, 상대오차를 표 1에 정리하였다. 그러나 다음과 같은 시험 내적을 취하면, 즉

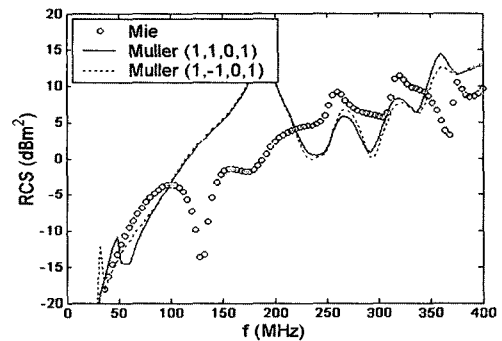
- (i)  $\langle f_m + g_m, E \rangle$ 와  $\langle f_m - g_m, H \rangle$
- (ii)  $\langle f_m - g_m, E \rangle$ 와  $\langle f_m + g_m, H \rangle$ ,

이 두 경우의 TENE-THNH로 계산된 등가전류의 해는 (본 논문에서는 보이지 않지만) 저주파수 대역 (0~100 MHz)에서 불안정하였다.

셋째 예로서 그림 5와 6은 시험 내적 항의 하나를 생략하여 계산한 RCS를 엄밀해와 함께 보이고 있

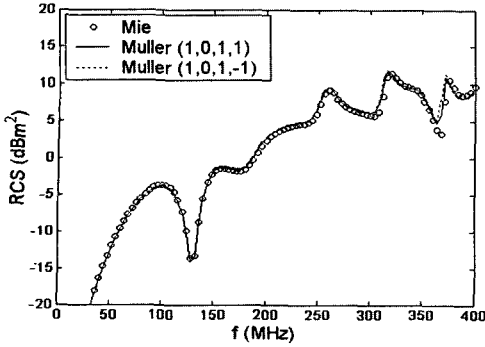


(a) TENE-TH

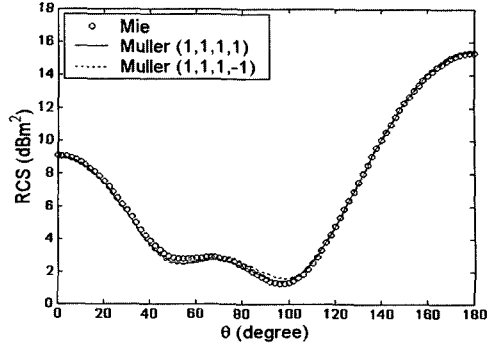


(b) TENE-NH

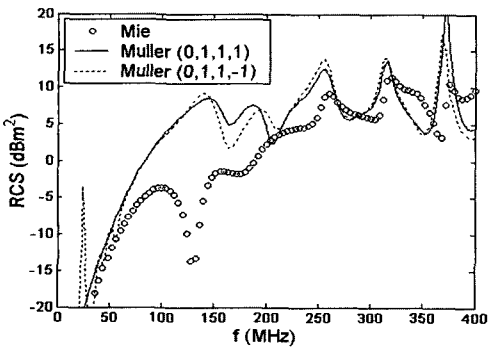
그림 5. 물리 적분식으로 계산한 유전체구의 RCS  
Fig. 5. RCS of the dielectric sphere computed by Muller formulations.



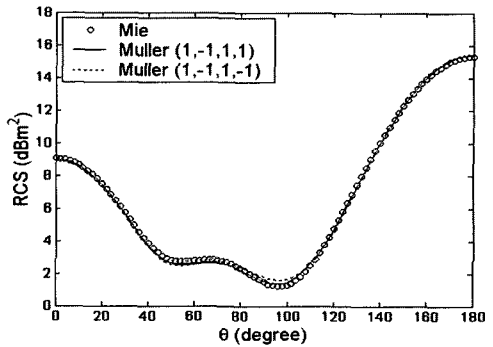
(a) TE-THNH



(a)  $\langle f_m + g_m, E \rangle$ 와  $\langle f_m \pm g_m, H \rangle$



(b) NE-THNH



(b)  $\langle f_m - g_m, E \rangle$ 와  $\langle f_m \pm g_m, H \rangle$

그림 6. 물러 적분식으로 계산한 유전체구의 RCS  
Fig. 6. RCS of the dielectric sphere computed by Muller formulations.

그림 7. 물러 적분식(TENE-THNH)으로 계산한 유전체구의 bistatic RCS

Fig. 7. Bistatic RCS of the dielectric sphere computed by Muller formulations(TENE-THNH).

다. 그림 5(a)와 그림 6(a)에서 보듯이 TENE-TH와 TE-THNH로부터 계산된 RCS는 해석해와 잘 일치하고 있다. 그러나 공진주파수에서 bistatic RCS를 조사하여 보면 TENE-TH와 TE-THNH의 해는 TENE-THNH의 해보다 정확성이 결여되었다. 그림 5(b)와 그림 6(b)는 TENE-NH와 NE-THNH로부터 계산된 RCS를 보이고 있으며, 해가 엄밀해로부터 벗어나 있음을 볼 수 있다. 따라서 그림 5와 그림 6으로부터 식 (14) 또는 (15)를  $g_m$ 만으로 시험하면 해를 얻을 수 없음을 알 수 있다.

마지막 예로서 그림 7은 물러 방정식의 TENE-THNH 방법으로 계산한 유전체구의 bistatic RCS를 보이고 있으며, 엄밀해와 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. 여러 시험 방법에 의한 bistatic RCS의 상대오차를 표 1에 나타내었으며, 그림 7에 보여진 TENE-THNH의 상대오차는 물러 적분방정식에 RWG 함수만을 사용하여 시험한 경우보다 절반으로 감소함을

알 수 있다.

#### IV. 결 론

임의 형태의 삼차원 유전체에 관한 전자기 산란을 해석하기 위하여 유전체의 표면을 삼각형 패치로 모델링한 경우 물러 적분방정식을 풀기 위한 해법을 제안하였다. 모멘트법을 적용할 때 RWG 함수로서 등가 전기 및 자기 전류를 근사하였으며, 시험 함수로는 RWG 및 그 직교함수의 조합을 사용하였다. 시험 내적을 취할 때 시험 계수를 도입하여 물러 적분방정식을 구성하는 전장 및 자장에 대하여 다양한 시험함수의 선택으로 해를 산출하였으며 이를 엄밀해와 비교하였다. 물러 방정식으로부터 시험 내적을 구성하는 네 개의 항 중에서 하나를 무시하는 경우, NE-THNH와 TENE-NH로부터 계산된 해는 발산하였

으며, TENE-TH와 TE-THNH를 사용하여 계산된 RCS의 해는 네 개의 모든 항을 고려한 TENE-THNH로부터 계산된 해보다 정확성이 결여되었다. 결론적으로 정확한 물리 방정식의 해를 얻기 위해서는 TENE-THNH를 적용하여야 하며, 전장 및 자장에 관하여 내적을 취할 때  $RWG + \hat{n} \times RWG$  또는  $RWG - \hat{n} \times RWG$ 를 동시에 시험함수로 사용하여야 한다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. R. Mautz, R. F. Harrington, "Electromagnetic scattering from a homogeneous material body of revolution", *Arch. Elektron. Übertragungstechn.*, vol. 33, pp. 71-80, 1979.
- [2] R. F. Harrington, "Boundary integral formulations for homogeneous material bodies", *J. Electromagn. Waves Applicat.*, vol. 3, no. 1, pp. 1-15, 1989.
- [3] S. M. Rao, D. R. Wilton and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, no. 5, pp. 409-418, May 1982.
- [4] X. Q. Sheng, J. M. Jin, J. M. Song, W. C. Chew, and C. C. Lu, "Solution of combined-field integral equation using multilevel fast multipole algorithm for scattering by homogeneous bodies", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, no. 11, pp. 1718-1726, Nov. 1998.
- [5] B. H. Jung, T. K. Sarkar and Y.-S. Chung, "A survey of various frequency domain integral equations for the analysis of scattering from three-dimensional dielectric objects", *J. of Electromagn. Waves and Applicat.*, vol. 16, no. 10, pp. 1419-1421, Oct. 2002.
- [6] K. Umashankar, A. Taflove and S. M. Rao, "Electromagnetic scattering by arbitrary shaped three-dimensional homogeneous lossy dielectric bodies", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 34, no. 6, pp. 758-766, Jun. 1986.
- [7] S. M. Rao, D. R. Wilton, "E-field, H-field, and combined field solution for arbitrarily shaped three-dimensional dielectric bodies", *Electromagn.*, vol. 10, pp. 407-421, 1990.
- [8] M. S. Yeung, "Single integral equation for electromagnetic scattering by three-dimensional homogeneous dielectric objects", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, no. 10, pp. 1615-1622, Oct. 1999.

### 박 재 권



2003년 2월: 호서대학교 전파공학과 (공학사)  
 2003년 3월~현재: 호서대학교 벤처전문대학원 정보통신응용기술학과 석사과정  
 [주 관심분야] 전자파 수치해석

### 김 형 진



2003년 2월: 호서대학교 전파공학과 (공학사)  
 2003년 3월~현재: 호서대학교 벤처전문대학원 정보통신응용기술학과 석사과정  
 [주 관심분야] 전자파 수치해석

안 종 출



1989년 2월: 전남대학교 정밀화학  
과 (공학사)

1989년 12월~1992년 6월: 코니전  
자(주) 연구원

1992년 12월~현재: 엠에이전자 대  
표

[주 관심분야] 전자파 흡수체, RCS,  
RFID

정 백 호



1985년 2월: 경북대학교 전자공학  
과 (공학사)

1989년 2월: 경북대학교 전자공학  
과 (공학석사)

1997년 8월: 경북대학교 전자공학  
과 (공학박사)

1989년 2월~1994년 3월: 국방과학  
연구소 연구원

2001년 1월~2002년 2월: 미국 Syracuse 대학교 연구교수

1997년 9월~현재: 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수

[주 관심분야] 전자파 수치해석(CEM), 전파 전파모델