

# 3차원 경계요소법을 이용한 무경계 산란장의 효율적 해석

An Efficient Analysis of Unbounded Scattering Field Using  
Three Dimensional Boundary Element Method

박 동 희\* · 김 정 기\*\*

## 요 약

본 논문에서는 임의의 형태와 매질성분을 갖는 3차원 물체의 RCS(Radar Cross Section)를 구하기 위한 수치적 방법을 제시한다. RSC는 3차원 경계요소법(3-DBEM)을 사용하여 다층산란체에 관한 표면적분방정식을 해석함으로서 구한다.

본 논문에서는 3차원적 경계요소법의 타당성과 유용성을 보이기 위하여 산란체의 형태를 비스듬한 입사전계로 부터 다층 정6면체 및 직6면체를 선택하였으며, 손실을 갖는 유전체 및 자성체의 경우에도 충분히 적용될 수 있도록 고찰하였다.

## Abstract

In this paper, a numerical method to obtain the radar cross section(RCS) of three-dimensional bodies with arbitrary geometry and material compositions on the electromagnetic field with arbitrary incident angle is described. The RCS is obtained by solving the individual surface integral equation about multi-layers scatterer using the three-dimensional boundary element method(BEM).

To show propriety and usefulness as to the three-dimensional BEM in this paper, the choice of a geometry is a multi-regular hexahedron and multi-right-angled hexahedron out of oblique incident electric field, and is considered to apply to every condition with loss sufficiently.

## I. 序 論

임의의 체적체에 대한 전자장 산란연구는 70년대 초반부터 많은 관심이 집중되어왔다. 이는 유전체주 및 구형의 단면과 체적에 대한 모양, 크기 및 내부 구성성분의 특성에 따라 지정된 경계면상으로 유도된 체적

및 표면 전자장으로부터 무한영역에서 관측된 산란전자계 및 Radar Cross Section(RCS)를 보다 효율적이고 유용하게 분석하기 위한 것이다.[1,2,3]

본 논문은 이전에 제시된 2차원 전자장산란 해석방법을 확장한 3차원 6면체 각주의 형태를 갖는 다층구조 산란체에 대하여 표면적분방정식을 유도하고, 3차원 경계

\* 충주산업대학교, 전자통신공학과

\*\* 중앙대학교, 전자공학과

요소법을 적용했다.[3] 요소화 방법에 있어 6면체인 3차원 산란체의 표면은 4절점을 갖는 사각형요소로 세분하고, 각각의 요소가 갖는 절점좌표와 그 절점의 위치함수값에 대해서 산란 전자장이 표현되는 선형 형상함수를 사용한다.[4,5]

본 논문의 연구방법으로서 자유공간상에 놓인 임의의 3차원 산란체는 도체, 유전체 그리고 자성체로 이루어진 두영역 이상의 구조를 갖는 다층산란체이다. 또한 다층구조의 내부매질은 연구목적에 따라 다양하게 혼용하여 사용할 수 있다.[6,7]

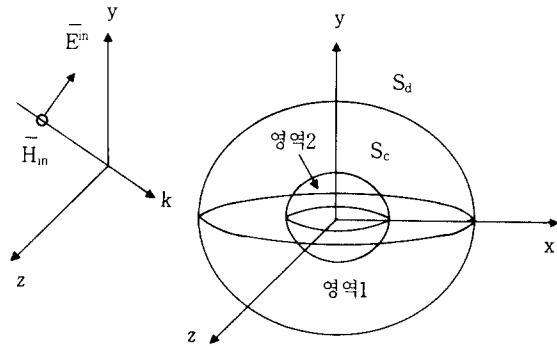
이전에 제시된 2차원 해석 논문에서는 유도된 표면경계적분방정식에 관해 관측점과 이웃하는 요소들에서 Green함수 자체에 특이점이 발생되므로 이를 제거하기 위하여 미소반경을 갖는 경계적분방정식을 급수전개식으로 나타내었다. 따라서 급수전개식에 대한 오차를 최소로 하기 위하여 무한급수항의 수를 선택하도록 되어 있다.[3,7] 이 방법의 단점으로서는 급수전개식으로의 변환과정이 표적체의 구조적 특성에 따라서 대단히 복잡하며, 수학적 해결방법을 어렵게 하고 있다. 또한 무한급수의 항수 선택이 전체 계산시간에 큰 영향을 미치므로 수치적 방법의 개선이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 2차원 문제를 3차원으로 확장하여 극한을 갖는 Cauchy주치적분 자체를 급수항으로 표현하지 않고 임의의 내분점을 최대 20점을 갖는 2차원 Gaussian구적법을 직접사용함으로 3차원 구조의 해석적 및 수치계산적인 효율을 향상시킬 수 있었다. 이와 같은 방법으로 각각의 관측점에서 계산된 행렬관계식을 전자장 표면경계조건에 의하여 단일 행렬관계식으로 조합하게 된다. 또한 단일 행렬관계식은 LU분해법을 통하여 표면경계에서 미지의 전자장을 해석하게 된다.

최종수식에 대한 타당성과 유용성을 보이기 위하여 수치계산된 결과는 비스듬한 입사전자계로 부터 손실유전체 및 손실자성체 매질에 대한 3차원 각주형 정6면체 및 직6면체 구조물에 대한 산란폭을 수치계산하였으며, 각각의 독립된 매질 변화에 대하여도 충분히 적용될 수 있도록 결과를 고찰하였다.

## II. 本 論

임의의 체적체로 이루어진 3차원적 산란체는 [그림

1]에서 나타낸 것과 같이 균일 입사전자계가 입사된 YZ평면에 유한 크기를 갖고 놓여있다고 가정한다. 따라서 3차원 체적체를 갖는 산란체의 외부 표면경계를  $S_d$ 로 그리고 내부 표면경계를  $S_c$ 로 놓을 수 있으며, 외부로부터 영역1과 영역2로 분리된 각기 다른 특성을 갖는 매질로 이루어진 폐영역을 고려한다.



[그림 1] 임의의 형태를 갖는 3차원적 산란체

TE파인 임의의 위치함수  $U$ 에 대해서  $U=E_y$ , 그리고 TM파인 경우  $U=H_x$ 로 놓을 수 있으므로 3차원의 Helmholtz방정식과 경계조건이 다음과 같이 주워진다. [3,5]

$$\nabla^2 U_0 + k^2 U_0 = 0 \quad (1)$$

경계조건:  $U_0 = \bar{U}_0$  : 경계 S1

$$Q_0 = \frac{\partial U_0}{\partial n} = \bar{Q} \quad : \text{경계 S2}$$

식(1)에서  $U_0$ 와  $Q_0$ 는 3차원 표면경계  $S_d$ 를 두 영역으로 분리한 S1과 S2상에서 정확한 위치값을 나타낸다. 또한 식(1)의 지배방정식에서  $U_0 \rightarrow U$ 와  $Q_0 \rightarrow Q$ 로 근사식을 대입하면  $e(\text{오차}) \rightarrow 0$ 을 얻게 된다. 식(1)에서  $-$ 는 경계상에서 알고 있는 값을 의미한다.

$$U^2 + k^2 U = e \quad (2)$$

경계조건:  $U - \bar{U} = e_1$ : 경계 S1

경계조건:  $Q - \bar{Q} = e_2$ : 경계 S2

위식에서  $e_1$ 과  $e_2$ 는 경계  $S_1$ 과  $S_2$ 에서의 오차를 말한다. 또한 위식에서 2차 미분가능함수인 가중함수  $W$ 를 양변에 곱하여 채적적분을 취하면 오른쪽은 직교관계에 따라서 0(zero)이 된다. 보통가중함수는 Dirac Delta 함수를 사용하여 점정합법으로 이용하거나 또는 내적의 원리를 이용한 Moment법을 사용할 수 있다.

식(2)에 대한 3차원의 주요해는 다음과 같이 표현된다.[5]

$$U^* = \frac{1}{4\pi R} e^{-ikR} \quad (3)$$

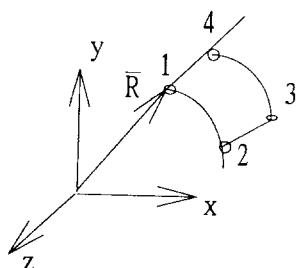
식(3)에서  $j$ 는 복소수를 의미하고  $k$ 는 식(2)에서 만족되는 영역내의 파수이며  $R$ 은 임의의 거리함수를 나타낸다.

또한 식(3)의  $U^*$ 에 대하여 단위 수직벡터로서 1차 도함수를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U^*}{\partial n} = \frac{1}{4\pi R} \left( \frac{1}{R} + jk \right) \frac{\partial R}{\partial n} e^{ikR} \quad (4)$$

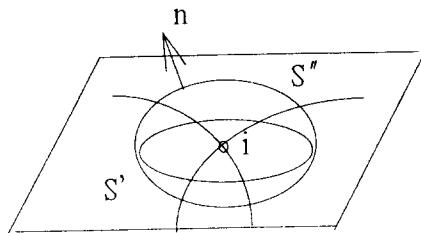
식(4)에서  $n$ 은 경계면으로 부터 밖으로 향하고 있는 단위 수직 벡터이고, 거리함수  $R$ 과 단위 수직벡터는 항상 cosine함수로 표현될 수 있다. 또한 3차원 산란체에 대한 전체좌표계와 표면국소좌표계를 나타내면 [그림 2]와 같다.

따라서 영역내부에서 만족되는 경계적분 방정식을 순수 표면경계상에서만 만족되도록 하기 위하여 관측점을 영역 내부 임의 지점에서 경계선상으로 이동시킴으로써 합당한 경계적분 방정식을 유도할 수 있다.[5,6,7]



[그림 2] 표면경계상에서 3차원 산란체에 대한 전체 및 국소좌표

그러나 이와 같이 원천점과 관측점이 하나의 경계상에 모두 존재하게되면 Green함수는 특이점을 갖게된다.



[그림 3] 관측점  $i$ 가 임의의 경계요소면  $S$ 상에 위치한 경우( $s=s''+s'$ )

이와 같은 경우에 [그림 3]에서와 같이 특이점을 갖는 경계상의 관측점을 근사적으로 피하기 위하여 미소의 반경함수를 갖는 극한을 취하여 경계적분을 하게된다. 그러므로 경계선상의 관측점과 적분방정식에 의한 원천점 사이에서 일어날 수 있고 특이점을 완전히 제거하게 된다.

따라서 순수 경계적분방정식은 다음과 같다.[4,5,6]

$$(1 - \frac{\omega}{4\pi}) U_i + \oint_{S'} U \frac{\partial U^*}{\partial n} ds = \oint_{S'} U^* \frac{\partial U}{\partial n} ds \quad (5)$$

식(5)로부터  $(1 - \omega/4\pi)$ 은 임의의 실수변수  $C_i$ 로 대치될 수 있고, 관측점  $i$ 에 대한 경계적분 방정식은 Cauchy주치적분을 의미한다. 또한 식(5)의  $\omega$ 는 관측점  $i$ 에서 영역 외부를 본 입체각이지만,  $C_i = (4\pi - \omega) / 4\pi = \omega' / 4\pi$ 와 같이 변화하면 영역이 내부를 본 입체각이 된다.

식(5)은 관측점이 경계면상에 존재할때 특이점이 제거된 경계적분방정식으로써 미지수와 기지수를 모두 포함하고 있다. 따라서 식(5)은 구조적인 해석방법인 유한요소법에서와 같이 경계를 구조적으로 요소화함으로써 순수경계요소법에 의해 해석된다.

해석에 적용된 표면경계를  $N$ 개의 사각형요소로 이산화하고, 각 요소에 있어서 미지수인 위치함수  $U$ 와  $\partial U / \partial n$ 가 선형변환을 한다고 가정한다. 이때 식(5)은 표면경계에 대하여 이산화 된다.

식(5)의 경계 적분방정식을 선형 형상함수인 4절점을 갖는 4각형요소에 대해 총 요소수 N으로 이산화한다면, 다음과 같은 행렬관계식으로 나타낼 수 있다.[5,7]

$$C_e U_e = \sum_{e=1}^N [h_1, h_2, h_3, h_4]_e \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}_e = \sum_{e=1}^N [g_1, g_2, g_3, g_4]_e \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix}_e \quad (6)$$

대표요소로부터 전체요소와 절점에 대한 경계적분방정식을 행렬관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[H_e] \begin{bmatrix} \bar{U} \\ U \end{bmatrix} = [G_e] \begin{bmatrix} Q \\ \bar{Q} \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(7)에서 만약 요소와 이웃한 절점, 즉  $i=j$ 일 때는  $H_{ij}=C_i$ 이 되고, 그리고  $G_{ij}=g_{ij}$ 가 된다. 또한  $i \neq j$  일 때는 다음과 같이 이산화된 행렬들로 부터 서로 이웃한 요소의 합으로 나타낼 수 있다.

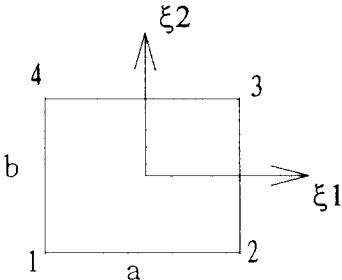
관측점 i가 요소 e상에 없는 경우로서  $h_1, h_2, h_3, h_4$  및  $g_1, g_2, g_3, g_4$ 의 계산은 다음과 같은 행렬관계식으로 부터 수치적분에 의해서 계산된다.

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} = \oint_s \frac{\partial U^*}{\partial n} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \end{bmatrix} ds \quad (8)$$

$$\begin{aligned} g_1 &= L_1 \\ g_2 &= \oint_s \frac{\partial U^*}{\partial n} L_2 ds \\ g_3 &= L_3 \\ g_4 &= L_4 \end{aligned} \quad (8)$$

또한 4절점을 갖는 사각형 대표요소를 나타내면 [그림 3]과 같다.

식 (8)과 (9)에서 4절점을 갖는 사각형요소의 형상함수(L)은 다음과 같다.



[그림 4] 4절점을 갖는 4각형 대표요소 e

$$L1(\xi_1, \xi_2) = (1 - \xi_1/a)(1 - \xi_2/b)$$

$$L2(\xi_1, \xi_2) = (\xi_1/a)(1 - \xi_2/b) \quad (10)$$

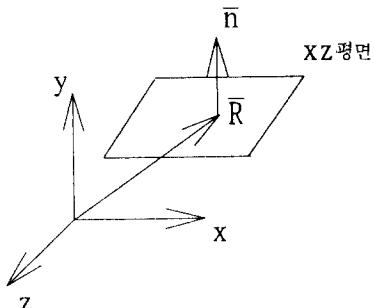
$$L3(\xi_1, \xi_2) = (\xi_1/a)(\xi_2/b)$$

$$L4(\xi_1, \xi_2) = (1 - \xi_1/a)(\xi_2/b)$$

식(10)에서  $\xi_1$ 와  $\xi_2$ 는 대표요소의 2차원 국소좌표를 나타내며, a와 b는 대표요소의 폭을 의미한다. 또한 관측점 i가 대표요소 e의 절점중에 있는 경우로서  $h_1, h_2, h_3$  및  $h_4$ 의 계산은 거리벡터 R이 요소내에 있으므로 그 외향법선단위벡터 n은 R과 직교관계에 있게된다. 따라서  $\cos(R:n)$ 는 영이되므로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

또한 요소의 평면상에서 외향단위법선벡터와의 관계는 [그림 5]와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 5] 임의의 요소평면상에서 외향 단위법선벡터와 거리함수와의 관계

[그림 5]에서 식(9)에 대한 표현은 관측점  $i$ 를 주위로 하는 미소반경을 갖는 그린함수의 특이점을 포함하는 적분이 된다. 따라서 다음과 같은 적분식으로 표현된다.

$$\oint_s f ds = \lim_{\rho \rightarrow 0} \int_0^{1-\rho} \left[ \int_0^{1-\xi_1} f d\xi_1 \right] d\xi_2 2V_e \quad (12)$$

특이점을 제외한 나머지 영역에서의 영역적분은 다음과 같이 표현된다.

$$\oint_s f ds = \int_0^{1-p} \left[ \int_0^{1-\xi_1} f d\xi_1 \right] d\xi_2 2V_e \quad (13)$$

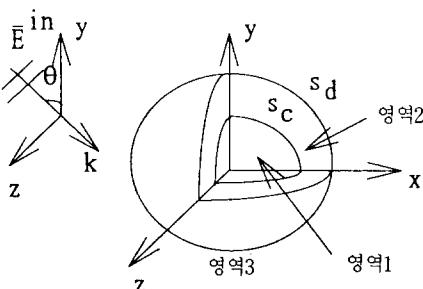
식(12) 및 식(13)에서  $\nabla_e$ 는 대표요소의 면적을 나타낸다. 위와 같은 방법에 의하여 [그림 6]에 나타낸 임의의 다층 체적체에 대한 무손실 또는 손실 유전체주 및 자성체주를 고려할 수 있으며, 그 이상의 다층인  $N+1$  층의 무경계 전장산란문제들도 임의적으로 구성할 수 있다.

따라서 다층 손실 및 무손실 유전체에 대한 영역1과 영역2에서 만족되는 전자장 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 \bar{E} + k_0^2 \mu_m (\epsilon_m - j \frac{\sigma_n}{\omega \epsilon_0}) \bar{E} = 0 \quad (14)$$

$$\nabla^2 \bar{H} + k_0^2 \mu_m (\epsilon_m - j \frac{\sigma_n}{\omega \epsilon_0}) \bar{H} = 0 \quad (15)$$

식(14)와 식(15)에 있어서  $\mu_m$ ,  $\epsilon_m$ 과  $\sigma_n$ 는 각각의 해당된 영역에서 비투자율, 비유전율 및 전도도를 나타내며, 유전체 및 자성체를 임의로 선택할 수 있다. 또한  $k_0$ 는 자유공간 파수를 나타낸다.



[그림 6] 임의의 형태를 갖는 다층구조의 3차원적 산란체

3차원 유전체 및 자성체주의 영역으로써 영역1과 영역2는 독립적으로 내부 표면경계 SC를 공유하고, 영역3에서 만족되는 자유공간의 전자장방정식은 영역2의 표면경계 SD를 공유하여 표면적분방정식을 유도하게 된다.

따라서 각각의 영역1과 영역2에서 만족되는 표면경계 적분방정식은 다음과 같다.

$$(1 - \frac{\omega}{4\pi}) E_{zi} + \oint_{sc} E_z \frac{\partial E_z^*}{\partial n} ds_c = \oint_{sc} E_z \frac{\partial E_z^*}{\partial n} ds_c \quad (16)$$

영역2에서 원천점이 SC에 있을 경우의 표면 경계 적분방정식은 다음과 같다.

$$(1 + \frac{\omega}{4\pi}) E_{zi} + \oint_{sc} E_z \frac{\partial E_z^*}{\partial n} ds_c = \oint_{sc} E_z \frac{\partial E_z^*}{\partial n} ds_c \quad (17)$$

또한 원천점이 SD에 있을 경우의 표면경계 적분방정식은 다음과 같다.

$$(1 - \frac{\omega}{4\pi}) E_{zi} + \oint_{sd} E_z \frac{\partial E_z^*}{\partial n} ds_d = \oint_{sd} E_z \frac{\partial E_z^*}{\partial n} ds_d \quad (18)$$

영역2에서의 표면경계 적분방정식은 영역1에서 밖으로 향하는 단위 벡터를 기준 벡터로 정의하므로  $n_d$ 는 같은 방향이 되나  $n_c$ 은 반대방향이 된다. 따라서 경계적분식에서 부호가 반대가 된다. 또한 경계상의 미소반경의 극한값에 의한 상수항도 반대의 부호를 갖게된다.

영역3에서의 표면경계 적분방정식 유도는 영역1에서의 밖으로 향하는 단위벡터가 기준벡터이므로  $n_d$ 는 부호가 반대이고,  $n_3$ 는 동일방향이 된다. 따라서  $s_d$ 상에서의 적분만이 남게된다. 그러므로 원천점이 경계  $s_d$ 상에 있을 경우의 표면경계 적분식은 다음과 같다.

$$(1 + \frac{\omega}{4\pi}) E_{zi} + \oint_{sd} E_z \frac{\partial E_z^*}{\partial n} ds_d = \oint_{sd} E_z \frac{\partial E_z^*}{\partial n} ds_d \quad (19)$$

결과적으로 식(16), (17), (18) 그리고 식(19)의 적분방정식은 각각의 영역에서 만족되는 행렬관계식으로 구성하게 된다.

3차원 경계요소법을 이용한 무경계 산란장의 효율적 해석

영역 1:

$$[H_{i1}] \{U_{i1}\} = [G_{i1}] \{Q_{i1}\} \quad (20)$$

영역 2:

$$[H_{i2}] \{U_{i2}\} = [G_{i2}] \{Q_{i2}\} \quad (21)$$

영역 3:

$$[H_{i3}] \{U_{i3}\} = [G_{i3}] \{Q_{i3}\} \quad (22)$$

또한, 각각의 영역에서 만족되는 경계조건은 다음과 같다.

영역1에서의 경계조건:

$$\begin{aligned} U_{i1}^{\text{int}} &= U_{i2}^{\text{int}} = U_i^{\text{int}} \\ Q_i^{\text{int}} &= Q_{i2}^{\text{int}} = Q_i^{\text{int}} \end{aligned} \quad (23)$$

식(23)은 내부영역의 경계  $s_c$ 에서 위치값과 그 위치의 도함수값을 나타낸다.

영역2에서  $s_c$ 에 대한 경계조건은 영역1에서의 경계조건과 동일하고 영역2의 경계  $s_d$ 상에서의 경계조건은 다음과 같다.

영역2에서의 경계조건:

$$\begin{aligned} U_{i2}^{\text{tot}} &= U_{i2}^{\text{sc}} = U_{i2}^{\text{in}} \\ Q_{i2}^{\text{tot}} &= Q_{i2}^{\text{sc}} = Q_{i2}^{\text{in}} \end{aligned} \quad (24)$$

식(24)에서 tot는 경계  $s_d$ 에서의 총전자계를 의미하고, sc와 in는 경계  $s_d$ 에서의 입사장과 산란장을 각각 나타낸다. 또한 영역3에서의 경계조건은 산란파에 관한 경계조건으로서 다음과 같다.

영역3에서의 경계조건:

$$\begin{aligned} U_{i2}^{\text{sc}} &= U_{i3}^{\text{sc}} = U_i^{\text{sc}} \\ Q_{i2}^{\text{tot}} &= Q_{i3}^{\text{sc}} = Q_{i2}^{\text{in}} \end{aligned} \quad (25)$$

입사전자는 경계  $s_d$ 상에서 YZ평면으로 향하며, 임의의 각도로 진행하고, 또한 XY평면에 평행한 평면파를 나타낸다.

$$U_{i2}^{\text{in}} = E_{\infty} (a_x \cos \theta_i + a_y \sin \theta_i) e^{-jk(x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)} \quad (26)$$

$$Q_{i2}^{\text{in}} = \frac{\partial U_{i2}^{\text{in}}}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial n} \quad (27)$$

식(26)과 식(27)에서  $\theta_i$ 는 YZ평면과 입사평면이 이루는 각도이고, x와 y는 좌표의 원점으로부터 표면의 입사장을 나타내는 점까지의 거리로 나타낸다.

식(27)를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[Q_{i2}^{\text{in}}] = [B] \{U_{i2}^{\text{in}}\} \quad (28)$$

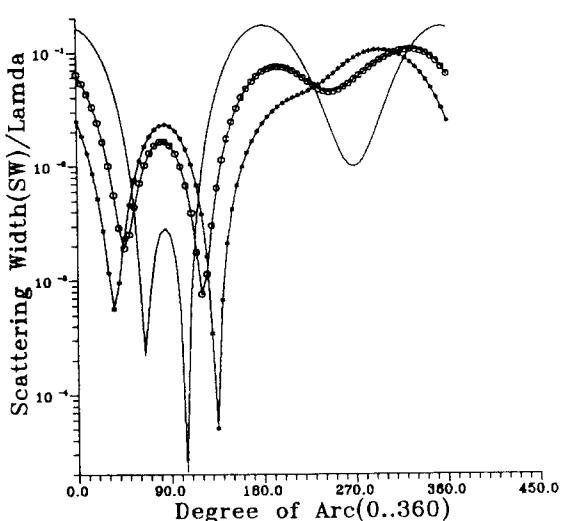
따라서 각각의 영역에서 만족된 식(20), (21) 그리고 식(22)에 대하여 경계조건식인 식(23), (24) 그리고 식(25)를 적용하여 해석에 유용한 전체 행렬관계식으로 조합하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [H] - [g_{i1}]_{sc} & [0] & [0] \\ [H_{i2}]_{sc} [G_{i2}]_{sc} [H_{i2}]_{sd} - [G_{i2}]_{sd} & \begin{bmatrix} U_i^{\text{in}} \\ Q_i^{\text{in}} \\ U_{i2}^{\text{sc}} \\ Q_{i2}^{\text{sc}} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix} \\ [0] & [0] & [H_{i3}]_{sd} [G_{i3}]_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (B[G_{i1}]_{sd} - [H_{i2}]_{sd}) [U_{i2}^{\text{in}}] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (29)$$

식(29)에서 위첨자 it영역내부에서의 위치함수값을 나타내므로 식(29)는 행렬연산법에 의해서 미지수를 구하게 된다.

### III. 數置解析 結果

3차원 다층 무손실 및 유전체를 갖는 정6면체 및 직6면체 임의의 각도로 입사하는 입사평면파로부터 전자파 산란 특성의 해석적 타당성을 입증하기 위하여 선택하였으며, 본 논문의 연산법에 의한 해석적 결과를 제시하였다. 정6면체 다층 무손실 및 손실 산란체의 영역  $n=1$ 에 대한 3차원 좌표축의 길이는  $0.25\lambda$ , 영역  $n=2$ 의 3차원 좌표축의 길이는  $0.5\lambda$ 로 선택하였다. 또한 동일한 매질 특성에서 직6면체의 경우는 XZ평면을 정6면체와 같은 평면에 위치하도록 하고, 단지 Y축으로의 길이 변화를  $0.5\lambda$  및  $1.0\lambda$ 로 하였다. 또한 각각의 영역에 대한 매질특성은 내부 및 외부영역을 완전도체와 손실이 있는 유전체를 임의적으로 선택할 수 있도록 구성하였으며, 해석적 결과는 3차원적 TEy bistatic SW(3-D /  $\lambda$ )을 나타낸다.

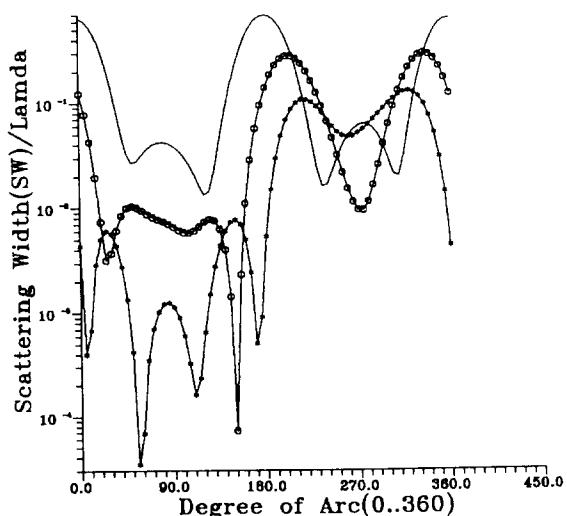


[그림 7] 정면체 디중 손실 유전체주의의 3차원적 TEy  
bistatic SW(3-D /  $\lambda$ )

영역  $n=1$ : 3차원 좌표축의 길이( $x,y,z=0.25\lambda$ ),  $K1=2$   
 $0-j20$

영역 n=2: 3차원 좌표축의 길이( $x,y,z=0.5\lambda$ ), K2=4.  
0-i4.0

입사파의 각도:  $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$



[그림 8] 직6면체 다층 손실 유전체주의 3차원적 TEy  
bistatic SW(3-D/  $\lambda$ )

영역 n=1: 3차원 좌표축의 길이(x,y,z=0.25λ, z=0.5λ), K1=2.0-j2.0  
 영역 n=2: 3차원 좌표축의 길이(x,y,z=0.5λ, z=1.0λ), K2=4.0-j4.0  
 임사파의 각도:  $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

#### IV 結 果

본 논문은 이전에 제시된 2차원 전자상산란 해석방법을 확장한 3차원 6면체의 형태를 갖는 다층구조 산란체에 대하여 표면적분방정식을 유도하고, 3차원 경계요소법을 적용했다. 연구방법으로서 자유공간상에 놓인 임의의 3차원 산란체는 도체 또는 유전체로 이루어진 두 영역 이상의 구조를 갖는 다층산란체이다. 또한 다층구조의 내부매질은 연구목적에 따라 다양하게 혼용하여 사용할 수 있다. 또한 극한을 갖는 Cauchy주치적분 자체를 급수항으로 표현하지 않고 임의의 내분점을 최대 20 점을 갖는 2차원 Gaussian구적법을 직접사용함으로 해석적 및 수치계산적인 효율을 향상시킬 수 있었다. 이와 같은 방법으로 각각의 관측점에서 계산된 행렬관계식을 전자장 표면경계조건에 의하여 단일 행렬관계식으로 조합하게 되다.

결과적으로 3차원 형태를 갖는 산란체 빛 그에 준하는 모든 형태를 해석할 수 있으며, 특히 마이크로스트립 패치 안테나 및 산란체에 적용하여 이동통신용 단말기의 체계적 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대 된다.

참 고 문 헌

- [1] M. H. Cohen, "Application of the Reaction Concept to Scattering Problems", T-AP, Vol.3, pp. 193~199, Oct 1955.
  - [2] T. K. Wu and L. L. Tasi, "Scattering by Arbitrarily Cross Sectioned Layered Dielectric Cylinders", IEEE Trans. Antenna Propagat., Vol. AP-25, pp.518~524, 1977.

- [3] S. Kagami and I. Fukai, "Application of Boundary-Element Method to Electromagnetic Field Problems", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.32, April 1984.
- [4] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, *Finite Elements for Electrical Engineers*, Cambridge University, 1983.
- [5] C. A. Brebbia and S. Walker, *Boundary Element Techniques in Engineering*, Newnes Butterworths, 1980.
- [6] Ichhiko Toyoda, Masanori Matsuhara, ad Nobuaki Kumagai, "Extended Integral Equation Formulation for Scattering Problems from a Cylindrical Scatterer", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.36, pp.1580~1586, Nov. 1988.
- [7] 박동희와 "다층타원 유전체주의 전자파 산란 해석", 한국전자파기술학회지, Vol.2, pp.26~31, Sep. 1991