

# 군사 표적물의 RCS 예측과 측정 기술

김 효 태

포항공과대학교  
전자컴퓨터공학부

## 요 약

전자전에 투입되는 군장비들의 생존 가능성은 피탐지율과 밀접한 관련이 있다. 이러한 피탐지율을 줄이기 위해서는 레이더 단면적(RCS)의 주요 산란원에 관한 연구와 레이더 단면적 예측 기술에 대한 이해가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 레이더 단면적을 예측하는 기술과 레이더 단면적을 측정할 수 있는 단축거리 전계 측정 무반향실(Compact range)에 대해 소개한다.

## I. 서 론

고도로 발달된 탐지 시스템의 개발로 인해 전자전에 투입되는 최신 군장비들의 생존 가능 여부는 피탐지율과 직접적으로 관련된다. 따라서 군장비들의 피탐지율을 줄이기 위한 연구는 필수적이라 할 수 있고 이미 많은 연구가 진행중이다.

대표적 탐지 시스템인 레이더는 표적물에 전자파를 가한 후, 그 표적물로부터 되돌아오는 신호를 탐지하여 표적물에 관한 정보를 획득하는 시스템이다. 따라서 레이더에 대한 피탐지율을 줄이기 위해서는, 표적물의 레이더 단면적의 주요 산란원에 관한 연구와 레이더 단면적 예측 기술을 이용하여 표적물의 레이더 단면적을 감소시켜야 한다. 그러므로 군사 표적물의 피탐지율을 줄이는 작업에 앞서 군사 표적의 RCS(radar cross section) 예측과 주요 산란원에 대한 이해는 선행되어야 한다.

RCS를 예측하는 기법에는 변수분리법을 이용한

해석 기법, 저주파 산란 해석 기법, 고주파 산란 해석 기법 등이 있다. 변수분리법을 이용한 해석 기법은 산란체 표면에서의 경계 조건을 맥스웰(Maxwell) 방정식의 경계값으로 이용하여 해를 구하는 방법으로 정확한 해의 유도는 가능하지만 해석할 수 있는 구조가 매우 한정되어 있다. 저주파 산란 해석 기법은 FEM(Finite Element Method), MoM(Method of Moment) 등이 대표적이며 상당히 정확한 해를 구할 수 있는 반면, 산란체의 크기가 파장에 비해 커질 경우 해석 시간과 비용이 매우 커지는 단점이 있다. 고주파 해석 기법은 주파수가 높아질 경우 전자파의 특성이 빛의 특성과 유사해진다는 가정을 이용하여 전자파 산란문제를 해석하는 방법으로 GO(Geometric Optics), PO(Physical Optics), GTD / UTD / PTD (Geometric / Uniform / Physical Theory of Diffraction) 등이 있다. 군사표적의 경우 표적의 구조가 변수분리가 되지 않고, 표적의 크기가 파장에 비해 매우 커서 저주파 산란 해석 기법을 적용하기가 불가능하다. 그리고 레이더와 표적간의 거리가 파장에 비해 매우 멀어서 표적에 입사하는 전자파와 레이더로 돌아오는 산란파를 모두 평면파로 근사화 할 수 있다. 따라서 군사표적물의 RCS 계산에는 고주파 해석기법인 PO / PTD를 적용하는 것이 가장 적합하다.

이러한 PO / PTD 등의 전자기 산란 해석 기법을 표적물에 적용하기에 앞서 그래픽 전처리 과정(graphical pre-processing)이 선행되어야 한다. 이는 RCS를 구하기 위해 모델링된 표적물의 표면에 표면적분 혹은 선적분을 행해야 하는데, 표면적분과

선적분은 입사되는 전자파에 의해 직접 조사되는 영역에서만 적용되어야 하기 때문이다. 따라서 그래픽 전처리 과정이란 입사파에 의해 직접 조사되는 영역을 구분하는 과정을 의미하는 것으로 이를 은면 / 은선 처리(Visible Surface/Line Determination)라 한다. 이러한 은면 / 은선처리 기법에는 수치적인 계산을 통한 Object Precision 기법과 화소(pixel)를 이용하는 Image Precision 기법이 있다.

표적물의 RCS를 측정하는 과정은 예측된 RCS를 검증하는데 있어 신빙성있는 기준을 제시할 수 있다. 역으로 측정이 불가능한 주파수 대역의 RCS 예측결과에 신뢰성을 확보할 수 있다. 이러한 의미에서 RCS의 예측과 측정은 병행되어야 한다. RCS를 측정하기 위해서는 단축거리 전계 측정 무반향실(Compact range) 시설이 갖추어져 있어야 한다. Compact range란 실내의 좁은 공간에서 원거리 전자파(far-field)의 조건을 만족하는 균일한 평면파(Uniform plane wave)를 발생시키는 실험설비이다.

본 논문에서는 표적물의 레이다 단면적을 예측하기 위해 기존의 PO(physical optics), PTD(physical theory of diffraction), SBR(shooting and bouncing rays) 등의 기법을 은면처리과정(visible surface determination)에 따라 두 가지의 방식으로 적용하는 과정과 RCS측정에 필요한 Compact range에 관해 서술하고 간단한 형태의 복합 구조물을 제작하여 이에 관한 예측 결과와 실험 결과를 비교한다.

## II. RCS 예측 기술

### 2-1 1차 산란파의 계산

군사표적의 경우 표적의 구조가 변수 분리되지 않고, 표적의 크기는 파장에 비해 매우 커서 저주파 해석 기법을 적용하기가 불가능한 형태이며 레이다와 표적간의 거리가 매우 커서 입사파와 산란파 모

두를 평면파로 근사화 할 수 있다. 이러한 산란문제를 해석하는데 적합한 방법은 표적을 평판의 합으로 모델링하고 각각의 평판과 모서리에 의한 산란파를 더하여 전체 산란파를 구하는 것이다<sup>[1]</sup>. PO 근사기법을 이용해 평판에 유기되는 등가전류를 구하여 평판에 의한 산란파를 계산하며 모서리에 의한 산란은 PTD에 근거한 회절파를 계산함으로써 1차 산란파를 구한다. 즉 평판의 합으로 모델링된 표적의 산란파는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{전체 산란파} = (\text{평판 산란파}) + (\text{모서리 산란파}) + (\text{고차 산란파})$$

PO 기법을 이용한 평판 산란파는 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

$$\vec{E}_s(\vec{r}) = -\frac{j\omega\mu_0}{Z_0} \frac{e^{-jk_0r}}{2\pi r} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\sqrt{1-n_z^2}} \vec{W}_m I_m \quad (1)$$

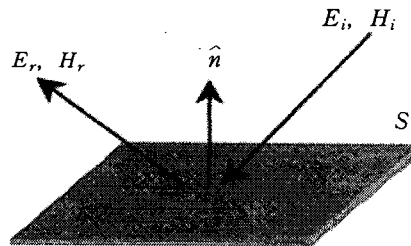
여기에서

$$I_m = \int \int_{S_m} ds' n_z e^{2jk_0z'}$$

$$\vec{W}_m = \hat{x}\{n_x R_H E_{i\parallel} + n_y R_E E_{i\perp}\} + \hat{y}\{n_y R_H E_{i\perp} + n_x R_E E_{i\parallel}\}$$

$R_H, R_E$  = H-pol, E-pol reflection coeff.

$E_{i\parallel}, E_{i\perp}$  = parallel and perpendicular E-comp.



[그림 1] 평판 구조

$M, n_x, n_y, n_z = \#patch, \hat{x} \cdot \hat{n}, \hat{y} \cdot \hat{n}, \hat{z} \cdot \hat{n}$

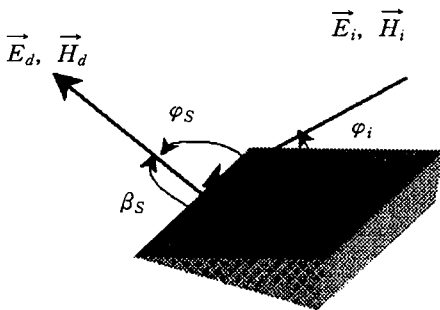
입사파의 진행방향은 임의의 방향이 될 수 있으나 입사파의 방향을 위와 같이 한 방향으로 고정시키고 (여기서는  $-\hat{z}$ ) 표적을 회전시키더라도 상대적으로 동일한 효과를 얻을 수 있다.

PO 기법은 모서리에 의한 불연속 전류는 고려하지 않고 평판의 전류만을 계산하여 산란파를 계산하므로 평판에 의한 산란파의 크기가 회절파의 크기와 비슷하거나 상대적으로 작을 경우 오차가 발생한다. 이러한 회절파를 고려하기 위하여 PTD 기법을 PO 기법과 함께 적용하여 보다 정확한 RCS를 예측할 수 있다.

[그림 2]와 같은 모서리 구조에 대한 회절파는 모서리상의 불연속 전류를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$\vec{E}_d = -\frac{jke^{-jkr}}{r} \int_C \{Z_0 I_e \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{t}) + I_m (\hat{s} \times \hat{t}) e^{-jkr} \hat{r} \cdot \hat{s}\} dl \quad (2)$$

여기에서  $\hat{t}$  는 모서리의 접선 벡터,  $\hat{s}$  는 산란파의 진행 방향을 나타내는 단위 벡터이다. 식 (2)에서의 불연속 전류  $I_e, I_m$  을 설명하는 방법에 관하여 많은 연구가 진행되었는데 그 중 Knott와 Senior



Wedge out angle  $\gamma = n\pi$

[그림 2] 모서리 구조

가 제시한 등가 전류는 다음과 같다<sup>[3]</sup>.

$$I_e = \frac{2j(X-Y)(\hat{t} \cdot \hat{e}_i)}{\sin^2 \beta k Z_0} \quad (3)$$

$$I_m = \frac{2j(X+Y)(\hat{t} \cdot \hat{h}_i)}{\sin^2 \beta k Y_0} \quad (4)$$

여기에서  $Z_0, Y_0$  는 자유공간에서의 임피던스와 어드미턴스를 의미하고  $X, Y$  는 Keller의 회절계수로 다음과 같이 주어진다.

$$X = \frac{\left(\frac{1}{n}\right) \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos(\psi_s - \psi_i)} \quad (5)$$

$$Y = \frac{\left(\frac{1}{n}\right) \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos(\psi_s - \psi_i)} \quad (6)$$

그러나 Keller의 회절계수는 PTD 회절파 뿐만 아니라 PO 반사파도 포함한 전체 산란파를 구하기 위한 계수이므로 PTD 회절파를 구하기 위해서는 Keller 회절계수를 사용하는 대신 Uffimtsev 회절계수를 사용하여야 한다. Uffimtsev 회절계수는 다음과 같다.

$$f = \begin{cases} X - Y - X_1 & , 0 \leq \psi_i \leq \gamma - \pi \\ X - Y - X_1 - Y_1 & , \gamma - \pi \leq \psi_i \leq \pi \\ X - Y - Y_1 & , \pi \leq \psi_i \leq \gamma \end{cases} \quad (7)$$

$$g = \begin{cases} X + Y + X_1 & , 0 \leq \psi_i \leq \gamma - \pi \\ X + Y + X_1 + Y_1 & , \gamma - \pi \leq \psi_i \leq \pi \\ X + Y + Y_1 & , \pi \leq \psi_i \leq \gamma \end{cases} \quad (8)$$

## 2-2 고차 산란파의 계산

PO 기법과 PTD 기법을 이용하여 RCS를 예측할 경우 1차 산란파는 비교적 정확하게 계산할 수 있는 반면 표적의 특정한 부분에서 산란된 전자파가 표적의 또 다른 부분으로 입사하여 산란되는 고차 산

란파를 계산할 수 없다. 고차 산란파는 반사-회절, 회절-반사, 반사-반사, 반사-회절-반사 등 무한한 형태로 존재하게 된다. 그러나 복합구조물의 RCS 계산에서는 반사-반사(반사-...-반사 포함), 즉 고차 반사파만을 고려하여도 비교적 정확한 RCS를 얻을 수 있다<sup>[1]</sup>.

고차 반사파를 계산하는 방법에는 크게 GO-PO, PO-PO, SBR 기법 등이 있다. 본 논문에서는 복합구조물의 RCS 예측에 적합한 SBR 기법을 이용한다<sup>[4]</sup>. SBR 기법에 대해 설명을 하면 다음과 같다. 원거리로부터 표적에 입사되는 평면파는 전공간에 걸쳐 진행하지만 표적의 RCS를 예측하기 위한 관점에서는 표적에 직접 투영되는 입사파가 관심거리이다. 따라서 표적의 상공에 가상의 평면을 두어 그 평면으로부터 평면파가 표적을 향하여 입사한다고 가정한다. 가상의 평면에서 출발하는 평면파는 [그림 3]과 같은 많은 수의 ray의 합으로 이루어져 있다고 가정하여 각각의 ray의 반사, 투과, 굴절 경로를 GO 관점에서 추적하여 최종적으로 표적을 빠져 나오는 반사점에서 PO 등가전류를 형성하게 된다. 각각의 ray가 만드는 등가전류를 이용하여 산란파를 구하면 고차 반사에 의한 RCS를 계산할 수 있다. 이러한 방식으로 계산한 고차 반사파를 PO, PTD

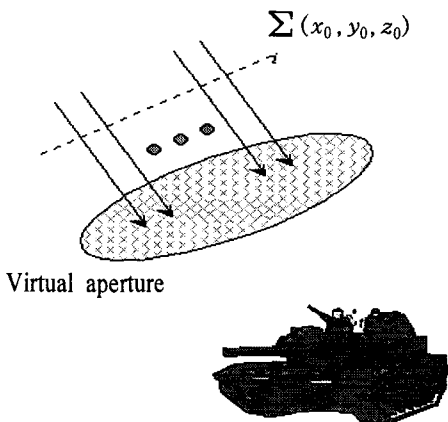
기법으로 구한 일차 산란파에 더하여 전체 산란파를 구할 수 있으며 전체 산란파를 이용하여 표적의 RCS를 계산하게 된다.

### 2-3 은면 처리

은면 처리란 공간상의 3차원 objects의 집합을 주어진 시점과 시선을 통해 2차원 평면으로 mapping시켰을 때 보이는 면과 보이지 않는 면을 구분하는 과정을 말한다. 이러한 은면 처리 기법에는 크게 Object Precision기법과 Image Precision기법이 있다<sup>[5]</sup>.

Object Precision기법이란 3차원상 objects 사이의 수치적인 비교를 통해 보이는 부분과 보이지 않는 부분을 구분하는 기법으로 objects가 설명되어지는 실제 좌표계에서 실행된다. 만일 3차원 공간상에  $n$ 개의 objects가 있다면 하나의 object당  $(n-1)$ 개의 나머지 objects와의 가려지는 효과를 계산해야 하므로 은면 처리에 요구되는 계산량은  $O(n^2)$ 이 된다. 반면 Image Precision기법이란 2차원 화면의 화소(pixel)에서 3차원 objects 중 어떠한 object가 보이는가에 대한 판단을 통해 은면을 제거(Hidden Surface Removal)하는 기법을 말한다. 이 경우 3차원 공간상에 objects의 수가  $n$ 개, 화면상의 화소의 수가  $p$ 개 라면 화소당  $n$ 개의 objects 사이의 은면 처리 작업이 이루어지므로 은면 처리에 요구되는 계산량은  $O(np)$ 가 된다.

일반적인 경우  $p > n$ 이므로 단순 계산량만으로 보자면 Object Precision기법이 Image Precision기법에 비해 속도가 빠른 것처럼 보이나 실제 개별 계산 과정에 있어 Object Precision기법은 Image Precision기법에 비해 복잡하고 많은 시간을 필요로 하여 전체적인 속도면에서 느리고 구현에 있어서도 많은 난점을 지닌다. 또한 Image Precision기법은 동일한 해상도 하에서 objects의 복잡도와는 무관하게 일정



[그림 3] SBR과 가상평면

한 계산량을 필요로 하나 Object Precision기법은 환경에 대해 계산량이 상당히 민감하게 변화한다. 그러나 Object Precision기법은 수치적인 계산을 통해 정확한 은면의 좌표를 추출할 수 있는 반면 Image Precision기법은 Raster Display가 안고 있는 근본적 문제인 Aliasing으로 인해 해상도가 낮을수록 은면 좌표 추출에 오차를 갖는 단점을 지닌다.

앞서 설명한 바와 같이 Object Precision기법은 objects 사이의 수치적인 계산을 통해 은면 처리작업이 이루어지므로 개별적인 계산마다 수치 기하학(Computational Geometry)의 수식을 적용하여 계산 자체가 복잡하고 계산 시간도 지연되는 문제점이 있다. 이에 반해 Image Precision기법은 한 화소와 동일한 시선상에 위치하는 objects의 부분들 가운데 시점으로부터의 거리가 가장 작은 것을 화소로 mapping시켜 은면처리작업을 수행한다. 따라서 Image Precision기법은 복잡한 계산을 필요로 하지 않고 단순히 시점으로부터의 거리값만을 비교하여 은면처리작업을 수행할 수 있어 계산 시간의 단축 효과를 가져올 수 있는 것이다.

#### 2-4 은면 처리 작업에 따른 산란파 계산

2-3에서 서술된 은면 처리 기법 중 Object Precision기법을 사용하여 은면 처리 작업을 하였다면 2-1과 2-2에서 기술한 고주파 산란 해석 기법을 이용해 RCS를 계산할 수 있다. 그러나 Image Precision기법을 통해 은면 처리 작업을 수행했다면 은면 처리 결과는 화면상에 뿌려진 상태가 된다. 따라서 산란파의 수식 계산을 가능케 하기 위해 화면으로부터 object를 구성하는 면의 꼭지점과 면의 정보를 추출하는 부가적인 작업이 요구된다. 이와 같은 작업을 배제하기 위해서 화면상의 각각의 화소를 하나의 면으로 가정한다. 면으로 가정한 각 화소에 산란파 수식을 적용하여 모든 화소에 대한 값을 더

하면 표적물에 대한 RCS를 계산할 수 있다. 여기서는 산란파의 수식 중 PO기법만을 적용해보기로 하고 Image Precision기법의 은면처리를 통한 PO의 적용과정을 Image Based PO라 정의하겠다.

각 화소에 적용한 PO의 수식은 다음과 같다<sup>[6]</sup>.

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{PIXELS} \sin c \left( K \frac{l}{\cos \theta} \sin \theta \right) e^{2iKz} \right| \quad (9)$$

### III. RCS측정 기술

Compact range는 실내의 좁은 공간에서 원계 근사 조건을 만족하는 균일한 평면파를 발생시키는 실험설비이다<sup>[7]</sup>. 균일 평면파란 전파원에서 전파한 전파가 무한한 거리에서 진행방향에 수직인 평면상에서 위치에 상관없이 전파의 세기와 위상이 동일한 전파를 의미한다. 일반적으로 측정하는 산란체의 크기를 고려하고 전파원에서 전파된 전파가 산란체에 부딪히는 파면의 세기와 위상이 어느 정도의 허용범위 내에 들면 국부적으로 평면파라 할 수 있다. 알려진 원계조건(Far-Field Condition :  $r \geq 2D^2/\lambda$ )은 위상허용범위가 22.5° 미만을 만족하는 거리 조건이다. 저주파일 경우 만족하는 원계거리는 상당히 멀게 되고 외부에서 측정하기 위해서는 외부전파환경이 상당히 양호해야 한다. 외부전파환경에 상관없이 측정하기 위해서는 실내환경, 즉 무반향 실험실에서 측정을 해야 한다. 그러나 원계조건에 의한 원계거리가 멀어지더라도 제한된 공간의 실내에서 평면파를 만들어 내야 한다. 이런 단축거리에서 평면파를 만들어 내는 변환기로는 유전체 렌즈안테나, 반사판 안테나가 있다. 평면파를 만들어 내기 위해 반사판 안테나와 급전 안테나를 무반향실에 설치한 시스템을 단축거리 전계 측정 무반향실(Compact Range)이라고 한다<sup>[7]~[9]</sup>.

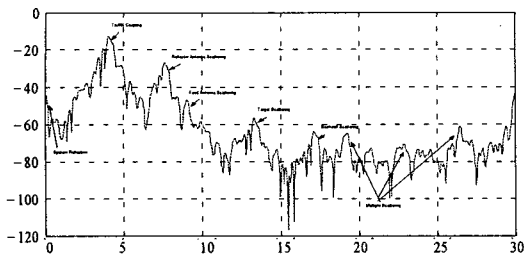
정확한 산란 및 안테나 실험을 위해서는 균일한

평면파가 필요하며 Compact Range에서 가장 중요한 것은 국부적으로 생성된 평면파의 균일 정도와 내부 영역의 크기가 허용 범위를 만족할 수 있어야 한다. 허용범위를 만족하는 영역을 평면파영역(Quiet Zone)이라고 한다<sup>[10]</sup>.

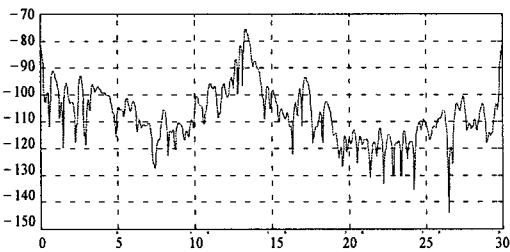
국부적인 평면파 파면의 세기 허용오차는 1 dB 미만, 위상 허용오차는 10° 미만이 일반적인 사양이다. 평면파영역의 모양은 원기둥 또는 사각기둥 형태이며 평면파영역의 크기는 측정할 수 있는 산란체의 최대크기를 제한하며 반사판 안테나의 크기와 밀접한 관련이 있다. 60년대 중반 Johnson이 Compact Range를 처음 발명하였고 70년대 중반에는 학술적인 용도로 사용되었으며 이후 3개 업체(Scientific Atlanta, Harris Corporation, March Microwave)에서 상업용으로 생산하게 되었다. Compact Range 기술은 80년대 중반 이후 상당한 발전을 이루었으며 주요 사용분야는 RCS 분야와 Antenna분야이다.

RCS는 일반적으로 송수신 편파, 입사각, 산란각, 송신주파수, 산란체의 전기적 특성들에 대한 함수이며 정확한 산란 및 안테나 측정을 위해서는 균일 평면파가 필요하다. 그러나 Compact range에서 생성되는 평면파는 여러 요인들에 의해 발생한 회절파, 반사파에 의해 왜곡된다. 생성된 평면파의 파두(Wavefront)에서의 세기와 위상은 일반적으로 리플(Ripple)과 테이프(Tapering) 특성이 나타난다<sup>[7]</sup>. 다시 언급하면 세기와 위상이 리플과 테이프 허용범위에 들어가는 국부적인 공간을 평면파영역(Quiet Zone)이라 한다. 포항공대에 설치된 Compact range의 평면파영역 허용범위는 세기 허용오차 1 dB 미만, 위상 허용오차 10° 미만이고 크기는 1.2 m×1.2 m×1.8 m이다. Compact range의 성능을 평가할 수 있는 기준에는 감도(Sensitivity)와 정밀도(Accuracy)가 있다. 감도는 RCS 측정 시스템이 측정할 수 있는 최소의 RCS 값을 의미하며 정밀도는 측정 시스

템이 동작하는 각도, 주파수, I-Q, 편파의 정밀도이다<sup>[11,12]</sup>. 포항공대 Compact range는 국방과학연구소의 지원으로 건설되었다. 측정 주파수 대역은 2 GHz에서 20 GHz까지이다. 외부 전자파환경과 기후 조건에 상관없이 측정할 수 있도록 동판으로 외부 환경으로부터 차폐를 하고 내부 동판에 전자파가 반사되어 생기는 반사파와 여러 구조물에서 발생하는 다중 반사파와 회절파를 억제하기 위해 전자파 흡수체를 내부 동판면에 붙인 방식이 전자파 무반향실이다. 전자파 흡수체의 최적의 성능을 위해 실내 온도는 18° 내외, 실내 습도는 50% 미만을 유지해야 하며 온도와 습도를 유지하기 위해 공조시설이 갖추어져 있다. 흡수체는 원하지 않는 전자파의 입사각에 따라 피라미드 형태와 썰기 형태의 조합으로 배치되어 있으며 반사판 안테나의 모서리 회절파를 최소화하기 위해 안테나 모서리를 톱니모양으로 설계하여 회절파의 경로를 평면파 영역이 아닌 무반향실의 양쪽 벽과 위쪽 벽 방향으로 향하도록 하였다. 급전 안테나는 Quasi-Monostatic 방식을 사용하여 파라볼라 곡면 반사판 안테나의 초점위치에서 고각이 25°가 되도록 설치되었다. 측정 성능 향상을 위해 하드웨어 게이팅, 소프트웨어 게이팅, 배경 제거 기법 등을 이용하였으며, 정확한 RCS 값을 도출하기 위하여 표준 구조물의 RCS를 측정하여 보정된 측정 결과를 도출하였다. 보정 기법은 측정된 주파수영역 데이터를 RCS 단위(dBsm)로 환산하는 과정이다. 송수신 편파가 같은 Co-Pol(VV, HH)일 때는 보정용 표적물로 도체구를 사용하고 송수신 편파가 다른 X-Pol(VH, HV)일 때는 45° 기울인 직각 코너 반사경을 사용한다. 측정된 표준 구조물은 도체구와 직각 코너 반사경이며 지면관계상 편파는 모두 VV-Pol로 두었다. [그림 4]는 반지름 13.84 cm의 도체구에 대한 하드웨어 게이팅을 하지 않았을 때의 거리정보(range profile)이고 [그림 5]는 하드웨어 게이팅을 했을 때의 거리정보이다. 표적물



[그림 4] 하드웨어 게이팅 전의 거리정보



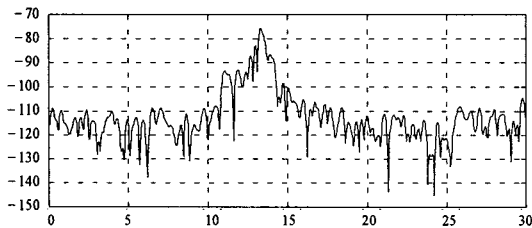
[그림 5] 하드웨어 게이팅 후의 거리정보

이 아닌 것으로부터의 산란 현상이 일부 제거되었다.

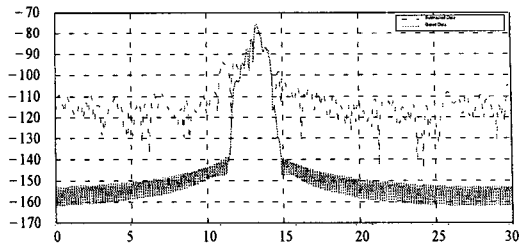
[그림 6]은 배경 제거 기법 후의 거리정보이다.

[그림 7]은 소프트웨어 게이팅 후의 거리정보이다.

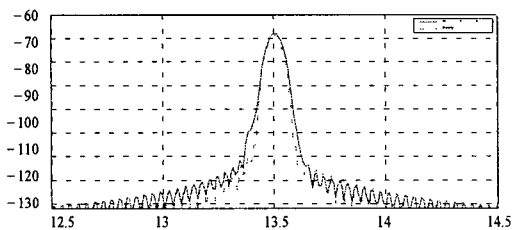
성능 향상을 위한 모든 기법들이 적용된 상태의 측정 시스템 감도를 도출하기 위해 반지름이 3.5 mm인 도체구를 사용하여 [그림 8]과 같은 거리정보를 획득하였다. 이 경우, 예측된 RCS와 측정된 RCS가  $-44$  dBsm으로 일치하였고 [그림 8]의 거리정보 결과로부터 도체구 주위의 산란 현상과 충분히 구분이 되기 때문에 포항공대 Compact range의 측정



[그림 6] 배경 제거 기법 후의 거리정보



[그림 7] 소프트웨어 게이팅 후의 거리정보

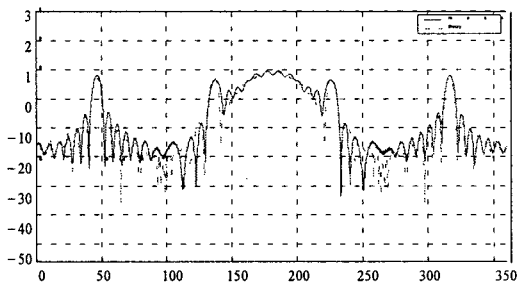


[그림 8] 반지름 3.5mm 도체구에 대한 거리정보

감도는  $-50$  dBsm 정도로 판단된다.

[그림 9]는 모서리의 길이가 13.8 cm인 직각 코너 반사경에 대한 정면에서의 VV-Pol RCS 패턴이다. 이론치는 PO/PTD/SBR 기법<sup>[13]</sup>을 이용하여 예측하였다.

포항공대에 설치된 Compact range의 측정 주파수 대역은 2 GHz에서 20 GHz까지이며 측정 감도는  $-50$  dBsm이다. 기본적인 표준 구조물을 측정한 결과는 이론치와 일치하고 있다.



[그림 9] 직각코너반사경에 대한 RCS 패턴

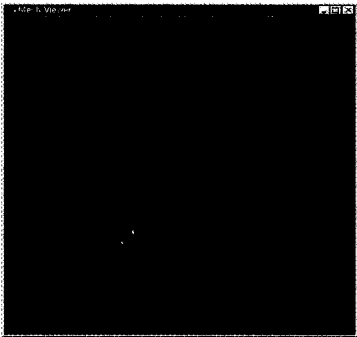
#### IV. 수치결과 및 해석

Image Based PO를 이용하여 [그림 10]과 같은 형태의 반지름 1m인 구의 RCS를 주파수 10 GHz에서 예측하였다.

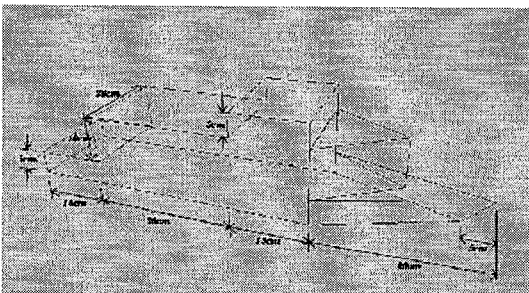
그 결과 예측치의 값은 4.872 dBsm으로 실제 RCS인 4.971 dBsm과 큰 오차가 발생하지 않았다.

다음은 Image Based PO를 이용하여 [그림 11]과 같은 형태의 표적의 RCS를 예측하여 이를 Compact range에서 측정된 결과와 비교하였다[그림 12].

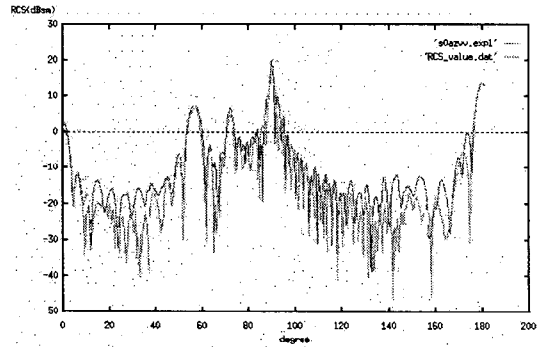
결과를 보면 대체적인 패턴은 측정치와 Image Based PO기법을 이용한 형태가 유사하나 방위각  $10^{\circ} \sim 50^{\circ}$  그리고  $130^{\circ} \sim 170^{\circ}$ 의 구간에서 상대적으로 큰 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 edge에



[그림 10] 반지름 1m인 구



[그림 11] 간단한 형태의 선박 구조물

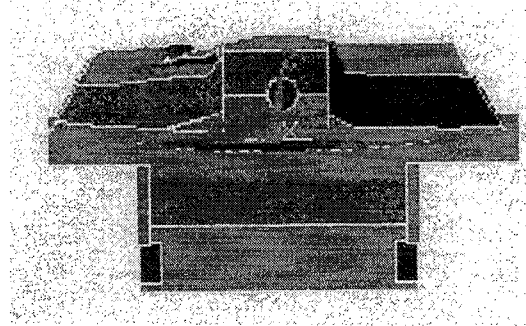


[그림 12] 방위각에 따른 선박 구조물의 RCS

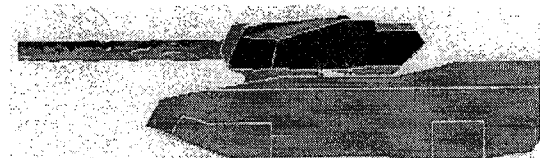
의한 diffraction효과가 계산되지 않았기 때문이다. PTD를 적용하면 이 문제를 어느 정도 해결할 수 있다.

마지막으로 Object Precision기법을 이용하여 면처리한 후 PO / PTD기법을 이용하여 [그림 13, 14]와 같은 형태의 전차 형상 모델의 RCS를 예측하고 이를 실제 측정된 전차 형상 모델의 RCS와 비교하였다[그림 15, 16].

[그림 15, 16]에서 점으로 나타난 값이 측정치이

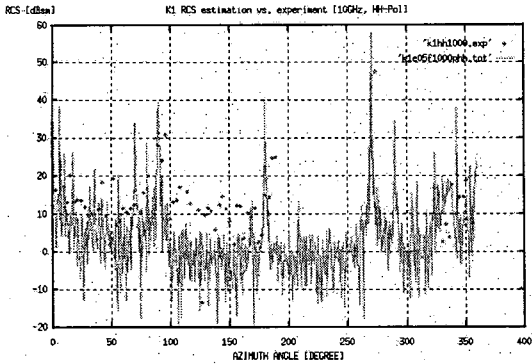


[그림 13] 전차 형상 모델의 정면도

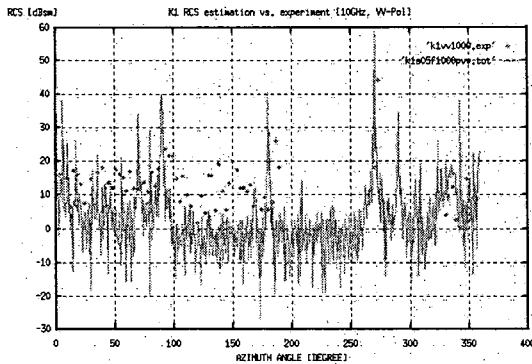


[그림 14] 전차 형상 모델의 측면도





[그림 15] 전차 모델의 RCS (10 GHz, HH pol.)



[그림 16] 전차 모델의 RCS (10 GHz, VV pol.)

고 선으로 나타난 값이 예측치이다.

여기서 예측치는 무한궤도와 차량 위에 장착되는 각종 부품들을 제외한 모델을 이용하여 예측하였으나, 측정치는 실물 전차 모델을 이용하여 측정하였기 때문에 다소 오차가 존재하며 실의 측정 방법의 문제점 또한 오차를 일으키는 원인이 된다. 측정과 예측 모두 지면과 평행한 평면 위에서 예측을 하였으며 전차의 전면부가 0°, 측면이 90°, 후면이 180°이다. [그림 15, 16]에서 알 수 있듯이 우선 측정각은 실의 측정 방법의 특수성 때문에 3° 간격으로 매우 넓게 정해졌다. 이는 측정장치에 대한 측정각을 전차를 움직여서 설정하였기 때문에 세밀한 각도 조절이 불가능하기 때문이다. 또한 각도의 절대치

또한 정확한 값은 아니다. 예를 들어 90°에서 측정 한 전차의 RCS는 정확히 90°에서의 RCS가 아닌  $90 \pm \delta$ °의 RCS 값이 된다.

측정치와 예측치의 비교에서 RCS 패턴의 경향은 상당히 유사함을 알 수 있다. 그러나 세밀한 RCS 값의 크기는 상당한 오차를 포함한다. 우선 RCS가 주변에 비해 큰 90°, 180°, 270°에서의 값을 비교해 보자. 전차의 측면인 90°와 270°에서는 측정치에 비해 예측치가 5~10 dB 정도 큰 값을 보인다. 이 각도에서는 전차의 옆면에 있는 무한궤도와 무한궤도가 장착되는 옆면의 큰 평판에 의한 RCS가 중요하게 되는데 측정시 측정장비에 대해 정확히 90°가 되지 않으면 보다 낮은 준위의 RCS를 나타내게 된다. 또한 예측에 적용된 모델에는 존재하지 않는 무한궤도에 의한 난반사 또한 측정 RCS 값이 낮은 중요한 원인이 된다. 무한궤도는 완전한 평면이 아닌, 평면에 주기적인 홈이 있는 구조이기 때문에 입사된 전자파를 여러 방향으로 산란시키는 효과가 있다. 따라서 완전한 평면으로 모델링된 예측 결과보다 낮은 값을 나타내게 된다. 또한 전차의 후면인 180°에서는 측정 결과가 예측 결과에 비해 10 dB 이상으로 낮은 값을 나타내는데 이 역시 측면에서 분석한 이유와 유사한 것으로 보인다.

입사각 100°~160°에서는 측정 결과가 예측 결과보다 전반적으로 높게 나온다. 이러한 입사각에서는 레이더와 수직인 평판이 존재하지 않기 때문에 수직 평판에 의한 정반사보다는 다중반사, 회절 등에 의한 효과가 크게 나타나게 된다. 그러나 예측 결과는 다중반사 효과를 고려하지 않았기 때문에 상대적으로 측정 결과보다 낮은 준위의 RCS를 나타낸 것으로 보인다.

## V. 결 론

본 논문에서는 은면 처리 방식에 따른 두 가지의

RCS 예측 과정과 RCS 측정 설비인 단축 거리 전계 측정 무반향실(Compact range)에 대해 서술하였다. 예측 기술 중 Object Precision기법의 은면 처리를 통한 RCS예측 기술은 PO/PTD/SBR을 적용하는 방식이 거의 완성되었고 Image Precision기법의 은면 처리를 통한 RCS예측은 현재 Image Based PTD/SBR이 연구중이다. 향후 두 가지 방식의 RCS예측에 대한 비교 분석 작업이 이루어질 예정이다.

### 참고문헌

- [1] Dieter Klement, et. al., "Special Problems in Applying the Physical Optic Method for Backscatter Computations of Complicated Object," *IEEE Trans. on AP.*, vol. 36, no. 2, Feb., 1988.
- [2] 석성하 외, "RCS 관련 기술 (I) : RCS 예측 및 측정," 98 춘계 마이크로파 학술대회, 제 21 권 제 1호, 1998년 5월.
- [3] E. F. Knott, et. al., "Equivalent Currents for a Ring Discontinuity," *IEEE Trans. on AP.*, vol. 21, Sep., 1973.
- [4] Hao Ling, et. al., "Shooting and Bouncing Rays," *IEEE Trans. on AP.*, vol. 37, no. 2, Feb., 1989.
- [5] James D. Foley, et.al., *Introduction to Computer Graphics*, Addison-Wesley Publishing Company, May, 1996
- [6] Juan M. Rius, et. al., "GRECO : Graphical Electromagnetic Computing for RCS Prediction in Real Time," *IEEE AP. Magazine*, vol. 35, no. 2, April, 1993
- [7] Nicholas C. Currie, *Radar Reflectivity Measurement : Techniques and Applications*, Artech House, 1989.
- [8] W.-M. Boerner and H. berall, *Radar Target Imaging*, Springer-Verlag, 1994.
- [9] Robert B. Dybdal, "Radar Cross Section Measurements," *Proceedings of The IEEE*, vol. 75, no. 4, pp. 498-516, Apr., 1987.
- [10] Teh-Hong Lee and Walter D. Burnside, "Compact Range Reflector Edge Treatment Impact on Antenna and Scattering Measurements", *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, no. l. AP-45, no. 1, pp. 57-65, Jan., 1997.
- [11] Dean L. Mensa, *High Resolution Radar Cross-Section Imaging*, Artech House, 1991.
- [12] Robert B. Dybdal, "Radar Cross Section Measurements," *Proceedings of The IEEE*, vol. 75, no. 4, pp. 498-516, Apr., 1987.
- [13] 김효태 외, '2단계 중간보고서', 전자파특화센터, 1999년 6월.

≡ 필자소개 ≡

김 효 태

포항공과대학교

전자컴퓨터공학부 교수