

## 회전 표적의 고주파수 후방산란단면적 해석

### High-frequency Back-scattering Cross Section Analysis of Rotating Targets

김국현\*

Kim, Kook-Hyun

조대승\*\*

Cho, Dae-Seung

김진형\*\*

Kim, Jin-Hyeong

#### ABSTRACT

The high-frequency analysis method of back-scattering cross section spectrum of rotating targets is established. The time history of the back-scattering cross section is calculated using a quasi-stationary approach, based on a physical optics and a physical theory of diffraction, combining an adaptive triangular beam method to consider the shadow effect. And the spectra of back-scattering cross section by the Doppler effect are analyzed applying a simple fast Fourier transform method to its time history. The numerical calculation for rotating targets, such as rotating metal plates and underwater propeller, are carried out. The time history appears to be periodic with respect to the number of wings. The back-scattering cross section spectrum level and its frequency shift are dependent on the rotating speed, direction, and the shape of the targets.

주요기술용어(주제어) : Rotating Target(회전 표적), Back-scattering Cross Section Spectrum(후방산란단면적 스펙트럼), Doppler Effect(도플러 효과), Physical Optics(물리광학법), Physical Theory of Diffraction(물리광학회절이론)

#### 1. 서론

이동 또는 회전하는 표적으로부터 산란되는 신호는 대상표적의 국부 산란점(scattering point)의 속도변화로 인해 도플러 효과(Doppler effect)가 나타난다. 특히, 헬기, 잠수함 등에 설치되는 프로펠러는 일정한 속도로 회전하는 특성으로 인해 레이더 또는 소나에

의한 표적 식별을 용이하게 할 수 있다. 이러한 신호 정보는 복잡한 탐지 환경 하에서도 대상표적을 보다 효과적으로 탐지해 낼 수 있는 수단이 될 수 있다. 따라서, 회전하는 표적의 후방산란 단면적에 대한 스펙트럼 분석기법에 대한 연구는 매우 중요한 분야라 할 수 있다<sup>[1,2]</sup>.

회전하는 표적의 후방산란해석에 대해서는 Tanaka<sup>[3]</sup>, Zutter<sup>[4]</sup> 등에 의해 매우 폭넓게 연구된바 있으나, 이는 대부분 수학적으로 정해(exact solution)를 갖는 표적에 대해서만 적용이 가능하다는 단점이 있다. 이에 Bladel<sup>[5]</sup>은 문제를 보다 간략화하기 위해 파의 전달속도가 표적의 회전속도보다 충분히 작아서 산란점은 순간적으로 정지해 있다고 가정하는 준 정적

† 2007년 3월 28일 접수~2007년 6월 15일 게재승인

\* (주)한진중공업

\*\* 부산대학교 조선해양공학과

\*\*\* (주)크리에이티브

주저자 이메일 : kimkh@hanjinsc.com

방법(quasi-stationary method)을 제안하였다. 또한, Lahaie와 Sengupta<sup>[6]</sup>는 물리광학법과 함께 준 정적 방법을 적용해 저속으로 회전하는 금속판의 레이더 단면적 해석을 수행하였다. 한편, Chuang<sup>[7]</sup>은 기하 회절이론을 이용해 물리광학법에서 고려할 수 없는 모서리에 의한 회절효과를 해석하였다.

한편, Yang 등<sup>[1]</sup>과 Tardy 등<sup>[2]</sup>은 물리광학법과 물리광학 회절이론에 근거한 준 정적(quasi-stationary) 기법을 이용해 회전 금속판에 대한 레이더 단면적 스펙트럼을 해석하고 그 결과를 측정결과와 비교한 바 있으나 형상이 복잡한 회전표적에서 나타날 수 있는 음영효과를 반영할 수 없는 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 물리광학법과 물리광학 회절이론에 근거한 준 정적 해석기법을 이용해 회전 표적에 대한 후방산란 단면적 스펙트럼 해석을 수행하였으며, 이때, 실제 회전표적에서 나타날 수 있는 음영효과(shadow effect)를 함께 고려할 수 있도록 하였다. 또한, 제시된 연구결과의 정확도 검증을 위해 단순형상의 회전 금속판의 레이더 단면적 스펙트럼을 계산하고 측정결과<sup>[1,2]</sup>와 비교하였으며, 본 해석방법의 수중 표적으로의 응용가능성을 함께 검토하기 위해 잠수함 등에 설치되는 수중프로펠러에 대한 소나 단면적 스펙트럼 계산하고 그 결과를 고찰하였다.

## 2. 해석이론

### 가. 후방산란 단면적

후방산란 단면적(back-scattering cross section)  $\sigma$ 는 레이더 공학과 소나공학 분야에서 레이더 단면적(radar cross section)과 소나 단면적(sonar cross section) 등의 용어로 구분되어 사용된다.

레이더 단면적  $\sigma_{uv}$ 와 소나 단면적  $\sigma_s$ 은 각각 식 (1)과 식 (2)로 정의된다<sup>[8,9]</sup>.

$$\sigma_{uv} = 4\pi |S_{uv}|^2 = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[ 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_{s,u}|^2}{|\vec{E}_{i,v}|^2} \right], \quad (u \text{ or } v = x \text{ or } y) \quad (1)$$

$$\sigma_s = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[ 4\pi R^2 \frac{|p_s|^2}{|p_i|^2} \right] \quad (2)$$

여기서,  $R$ 은 레이더 또는 소나 등의 탐지센서와 표적간의 이격거리를,  $\vec{E}_{i,u}$ 와  $\vec{E}_{s,v}$ 는 입사 및 산란 전기장 벡터의  $u$ -편파성분 또는  $v$ -편파성분을,  $p_i$ 와  $p_s$ 는 입사 음장과 산란 음장을 각각 나타내는 음압(acoustic pressure)을 각각 의미한다.

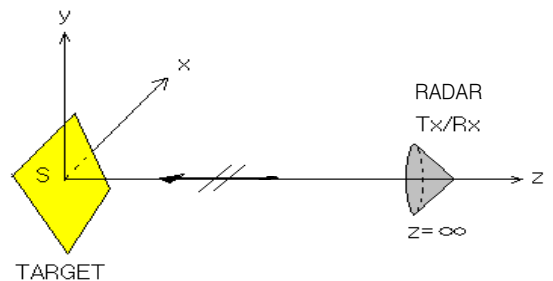
한편, 레이더 단면적과 소나 단면적은 물리적 개념의 유사성으로 인해 동일한 해석기법이 적용될 수 있다<sup>[10]</sup>. 따라서 본 논문에서는 레이더 단면적 해석이론만을 다루기로 한다.

### 나. 물리광학법

전자기파가 임의의 표적면에 평면파로 입사할 때, 그 면에 유기되는 전기장(electric field)과 자기장(magnetic field)을 알 수 있다면, 식 (3)에 나타난 간략화된 Stratton-Chu 적분식을 이용해 임의 위치에서의 산란 전기장 벡터  $\vec{E}_s$ 를 구할 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$\vec{E}_s = \frac{-jke^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}}}{4\pi R} \int_S [\hat{\zeta}_s \times \{\hat{n} \times \vec{E} - \eta(\hat{\zeta}_s \times (\hat{n} \times \vec{H}))\}] e^{j\vec{k}\cdot(\vec{r}-\vec{\zeta})} dS \quad (3)$$

여기서,  $j$ 는 단위 허수( $=\sqrt{-1}$ )를,  $k$ 는 전자기파의 파수(wave number,  $k = \omega_o/c$ ,  $\omega_o = 2\pi f$  : 전자기파 각주파수,  $f$  : 전자기파 주파수,  $c$  : 광속)를 각각 나타내며,  $\hat{n}$ 는 표적면  $S$ 에 대한 단위 법선벡터를,  $\vec{E}$ 와  $\vec{H}$ 는 표적면 근방에 유기된 전기장과 자기장 벡터를,  $\hat{\zeta}_i$ 와  $\hat{\zeta}_s$ 는 전자기파의 입사 및 산란방향을 나타내는 단위 벡터를,  $\vec{r}$ 은 표적면상 임의 점의 위치벡터이다. 또한,  $\eta$ 는 매질 임피던스이며, 나머지 기호는 앞서 정의한 바와 같다.



[그림 1] Coordinate system

그림 1에 보인 바와 같이 완전 반사면을 갖는 평면 표적이  $xyz$  직교좌표계 상에 놓여 있고 이로부터 매우 먼 거리에 레이더가 위치하고 있다면, 입사파를 평면파로 간주할 수 있다. 또한, 표적의 크기가 전자기파의 파장보다 충분히 클 경우, 식 (3)에 Kirrchhoff 근사이론을 적용할 수 있으며, 이를 식 (1)에 대입하여 레이더 단면적을 구하면 식 (4)와 같은 간략한 적분식을 얻을 수 있다<sup>[11]</sup>.

$$\sigma_{uv} = \begin{cases} \frac{k^2}{\pi} \left| \int_S e^{jkz'} dx' dy' \right|^2, & uv = xx, yy \\ 0, & uv = xy, yx \end{cases} \quad (4)$$

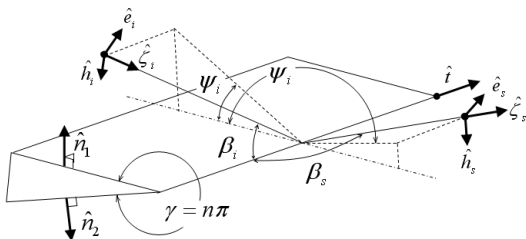
여기서,  $(x', y', z')$ 는 표적면상 임의의 점에 대한 좌표값을 나타낸다.

다. 물리광학 회절이론

물리광학법은 스펙큘러 반사(specular reflection)방향과 수신 레이더 방향이 이루는 각이 커질수록 그 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 모서리 회절에 대한 대표적 고주파수 해석이론인 물리광학 회절이론(physical theory of diffraction)을 도입하였다.

그림 2는 두 개의 면으로 형성되는 전자기파의 입사와 3차원 모서리에 의한 회절현상을 도식적으로 나타낸 것이다. 이때, 모서리 회절에 의해 형성되는 전기장 벡터  $\vec{E}_d$ 는 식 (5)로부터 계산할 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$\vec{E}_d = \frac{jke^{-jkR}}{4\pi R} \int_i [\eta L_e \{ \hat{\zeta}_s \times (\hat{\zeta}_s \times \hat{t}) \} + L_m (\hat{\zeta}_s \times \hat{t})] e^{jk\vec{r} \cdot \hat{\zeta}_i} dt \quad (5)$$



[그림 2] Three-dimensional edge diffraction

여기서,  $t$ 와  $\hat{t}$ 는 모서리 길이와 모서리의 단위 방향 벡터를,  $\vec{r}$ 은 모서리상 임의의 점의 위치벡터를 나타내며, 나머지 기호는 앞서 정의한 바와 같다. 또한,  $I_e$ 와  $I_m$ 은 모서리에 유기되는 등가 전류(equivalent current)를 의미하며, 식 (6)과 같다.

$$I_e = \frac{2j(\hat{t} \cdot \hat{e}_i) \mathbf{f}}{\eta k \sin \beta_i \sin \beta_s} E_0 e^{-jk\vec{r} \cdot \hat{\zeta}_i} \quad (6)$$

$$I_m = \frac{2j(\hat{t} \cdot \hat{h}_i) \mathbf{g}}{k \sin \beta_i \sin \beta_s} E_0 e^{-jk\vec{r} \cdot \hat{\zeta}_i}$$

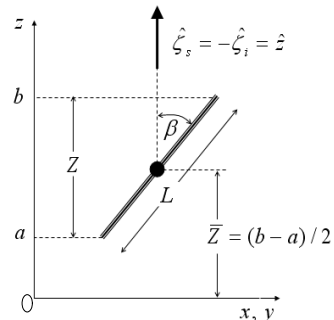
여기서,  $E_0$ 는 입사 전기장 크기를,  $\hat{\zeta}_i$ 는 전자기파의 입사 단위 방향벡터를,  $\hat{e}_i$ 와  $\hat{h}_i$ 는 입사 전자기파의 전기장 및 자기장 단위 방향벡터( $\hat{e}_i = \hat{h}_i \times \hat{\zeta}_i$ )를,  $\beta_i$ ,  $\beta_s$ 는 모서리와 전자기파 입사방향 및 산란방향이 이루는 각도를,  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{g}$ 는 Ufimtsev 회절계수를 각각 나타내며, 나머지 기호는 앞서 정의한 바와 같다.

표적의 모서리가 유한 직선인 경우, 식 (5)를 그림 1에서 정의한 좌표계에 대해 정리하고, 식 (1)에 대입하면, 모서리 회절에 대한 레이더 단면적은 식 (7)과 같이 구할 수 있다<sup>[10]</sup>.

$$\sigma_{uv} = -\frac{k}{2\pi} \{ \hat{u} \cdot \vec{W}(\hat{v}) \} e^{2jk\bar{Z}} L \text{sinc}(kL \cos \beta) \quad (7)$$

$$\vec{W}_d(\hat{v}) = -\frac{j}{k \sin^2 \beta} [(\hat{t} \cdot \hat{v}) \{ \hat{z} \times (\hat{z} \times \hat{t}) \} \mathbf{f} + \{ \hat{t} \cdot (\hat{z} \times \hat{v}) \} (\hat{z} \times \hat{t}) \mathbf{g}]$$

여기서,  $L$ 은 모서리 길이를,  $\bar{Z} = (b-a)/2$ 는 모서리

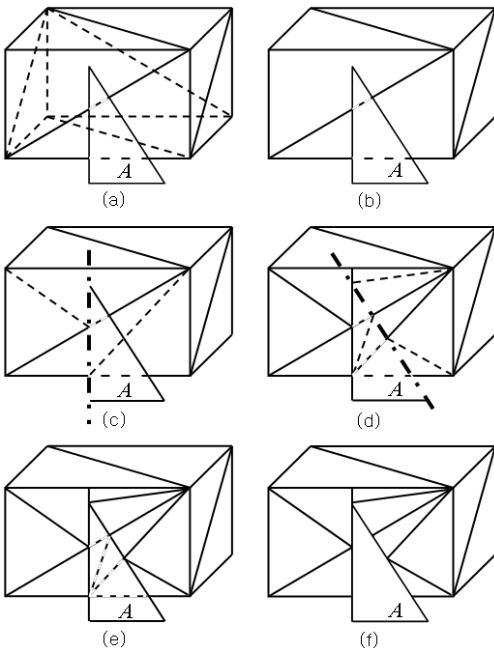


[그림 3] Variable exchange

리 중심의  $z$ -축 성분은,  $\beta$ 는  $z$ -축과 모서리 사이각을 나타내며(그림 3), 나머지 기호는 앞서 정의한 바와 같다.

라. 음영효과(shadow effect) 산정

본 연구에서는 Kirrchoff 근사이론에 근거한 물리 광학법을 적용하므로, 회전표적을 구성하는 평면들은 분할 평면들 중에서 파에 대한 가시면(visual surface)만이 후방산란 단면적에 기여한다고 할 수 있다. 따라서, 볼록 면(convex surface)과 오목 면(concave surface) 등이 혼재하는 복잡한 표적면에 대해 후방산란 단면적을 산정하기 위해서는 가시면과 은면(hidden surface)에 대한 효율적 판별이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 표적면을 구성하는 평면 요소들의 크기에 상관없이 삼각형 빔에 해당하는 파와 여기에 조사되는 표적면과의 교점을 이용하여 가시면을 삼각형 면으로 자동 재분할하는 적응 삼각형 빔 방법<sup>[12]</sup>을 적용하였다. 그림 4는 직육면체에 삼각형 빔에 해당하는 파가 조사될 경우 가시면과 은면을 구분하는 절차를 예시한 것이다.



[그림 4] Hidden surface removal procedure

마. 회전 표적의 후방산란 단면적 스펙트럼  
회전하는 표적에 대한 후방산란장(back-scattered field)  $E_s$ 는 시간에 대한 함수가 되며, 식 (8)과 같이 푸리에 급수(Fourier series)로 표현할 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$E_s = E_s(\vec{R}, \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n(\vec{R}, \tau) \exp(2\pi j n \tau / T) \quad (8)$$

여기서,  $X_n(\vec{R})$ 는 후방산란장 스펙트럼 밀도,  $\vec{R}$ 은 후방산란 신호 수신 위치,  $\tau$ 은 시간,  $T$ 는 신호의 envelope 주기를 각각 나타내며,  $j$ 는 단위허수( $=\sqrt{-1}$ )를,  $n$ 은 Fourier 급수의 차수를 각각 나타낸다.

해석 또는 측정을 통해 구해진 후방산란장 시간이력에 FFT(fast Fourier transform)를 취하면 후방산란장 스펙트럼 밀도를 구할 수 있다. 따라서, 회전하는 표적에 대한 후방산란 단면적  $\sigma$ 는 식 (9)와 같이 산정할 수 있다.

$$\sigma = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma_n \quad (9)$$

여기서,  $\sigma_n$ 은 후방산란 단면적 스펙트럼을 나타내며, 후방산란장 스펙트럼 밀도  $X_n(\vec{R})$ 과는 식 (10)과 같은 관계가 있다<sup>[1]</sup>.

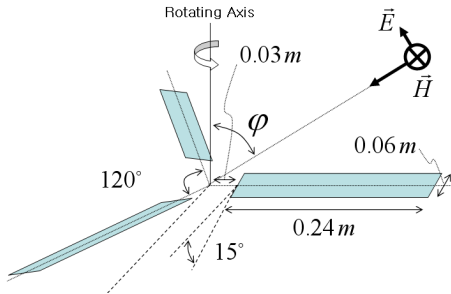
$$|\sigma_n| = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 (|X_n(\vec{R})|^2) / |E_o|^2 \quad (10)$$

여기서,  $R(=|\vec{R}|)$ 은 레이더 또는 소나와 표적간의 이격거리를,  $E_o$ 는 입사장의 크기를 나타낸다.

3. 수치해석 및 고찰

가. 회전금속판

본 해석방법에 대한 타당성을 평가하기 위해 회전 금속판에 대한 후방산란 단면적 시간이력과 레이더 단면적 스펙트럼 해석을 수행하고, 그 결과를 실험결과<sup>[1,2]</sup>와 비교하였다.



[그림 5] Rotating metal plates

해석 모델은 그림 5에 보인 바와 같이 길이와 폭이 0.24m, 0.06m인 금속판 3개가 120도 등각도로 배치되어 있는 표적이며, 회전축에 대해 반시계 방향으로 180rpm의 속도로 회전하고 있다. 이때, 관찰각  $\varphi$  (viewing angle)는 회전축과 전자기파 입사방향이 이루는 각도로 정의된다. 수치해석은 0도에서 90도까지 6도 간격으로 주파수 10GHz에 대해 수행하였다.

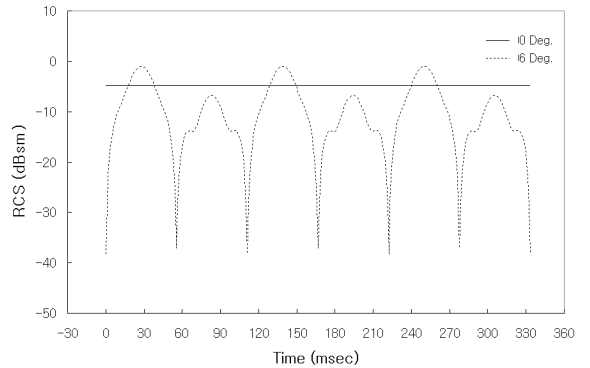
그림 6은 해석모델이 1회전할 동안 관찰각별 레이더 단면적 시간이력을 0.926msec(= 1/1080sec)의 시간간격으로 관찰각 0, 6, 24, 30, 84, 90에 대해서만 나타낸 것이다. 관찰각 0도에서는 레이더 단면적이 일정하게 나타나며, 관찰각이 커질수록 시간에 대한 변화가 커지고 있다. 또한, 날개 수가 3개이므로 1회전 동안에 3주기 함수로 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

또한, 관찰각별 후방산란 전기장 신호의 시간이력을 이용해 FFT분석을 수행하고, 대상표적의 레이더 단면적 스펙트럼으로 환산한 결과를 Yang 등의 실험 결과<sup>[1]</sup>와 함께 그림 7에 나타내었다.

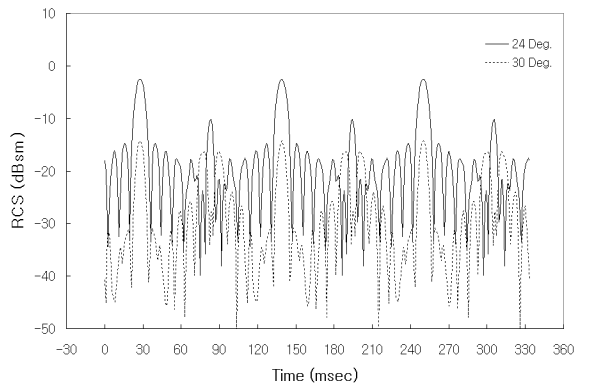
또한, 그림 8에는 Tardy 등<sup>[2]</sup>이 동일한 모델에 대해 수행한 관찰각 24도의 레이더 단면적 스펙트럼 해석 및 실험결과를 나타내었다. 이때, 가로축은 실험결과와 동일한 조건으로 비교하기 위해 식 (11)과 같은 무차원 주파수  $K$ 를 사용하였다.

$$K = \frac{f_m - f_c}{N_B f_r} \quad (11)$$

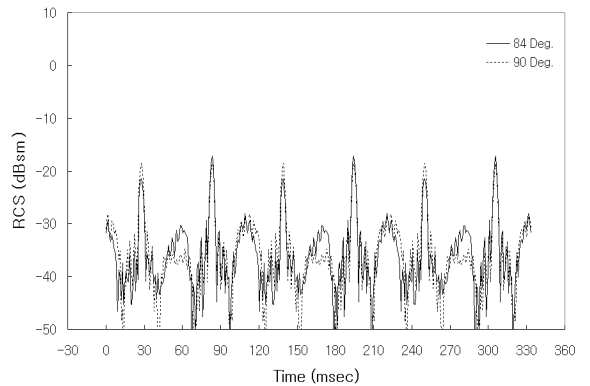
여기서,  $f_m$ ,  $f_c$ ,  $f_r$ 은 표적 회전에 의해 변이된 주파수, 전자기파 중심주파수, 표적의 회전 주파수를 각각



(a) Viewing angle = 0 and 6 degrees

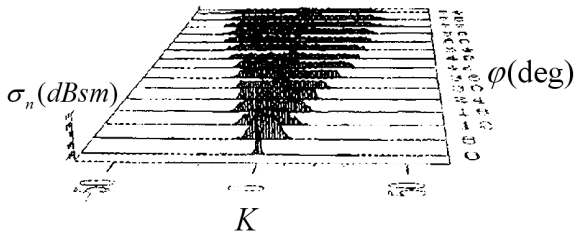


(b) Viewing angle = 24 and 30 degrees

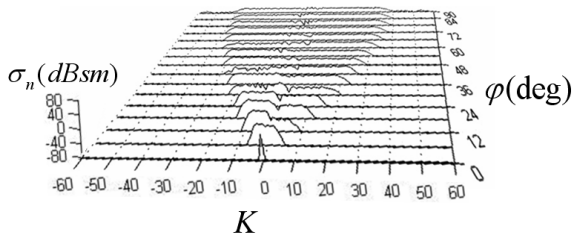


(c) Viewing angle = 84 and 90 degrees

[그림 6] Time histories of the radar cross section of the metal plates rotating in 180rpm at the various viewing angles(yy-polarization)

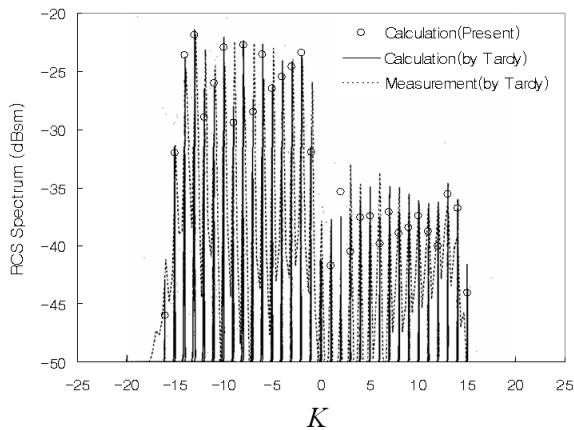


(a) Measured result



(b) Calculated result

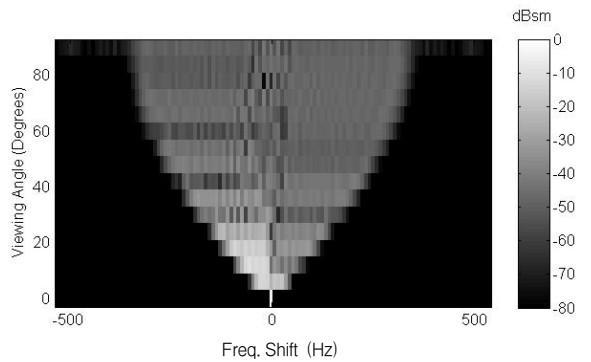
[그림 7] Comparison of the measured and the calculated results of radar cross section spectra for the rotating metal plates



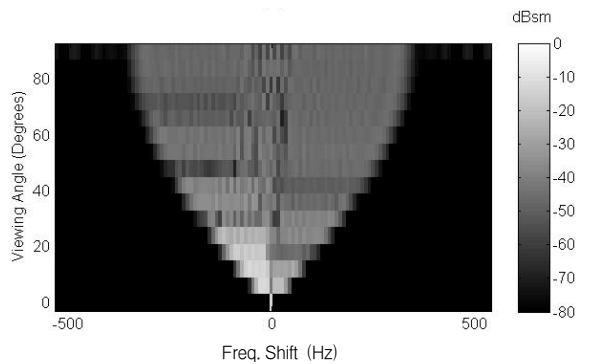
[그림 8] Comparison of the measured, calculated by Tardy<sup>[2]</sup>, and present calculated result of radar cross section spectra for the rotating metal plates, at 24 degrees of the viewing angle

나타내며,  $N_B$ 는 날개 수(=3)를 나타낸다.

상기의 결과로부터 본 연구에서 수행한 수치해석결과는 타 연구자의 해석 또는 실험결과와 유사한 주파



(a) yy-polarization



(b) xx-polarization

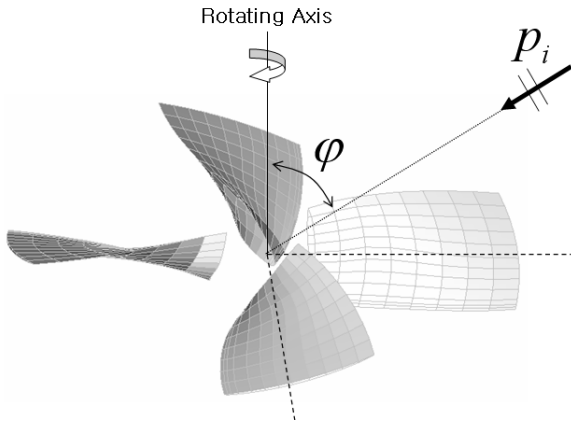
[그림 9] Contour plots of the radar cross section spectra of the rotating metal plates for yy-polarization and xx-polarization

수 변이특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

한편, 그림 9는 주파수 변이(frequency shift,  $f_m - f_c$ )와 관찰각에 대한 레이더 단면적 스펙트럼을 yy-편파 성분과 xx-편파 성분으로 구분하여 contour plot으로 나타낸 것이다. 이로부터, 음(-)의 주파수 변이 성분이 양(+)의 주파수 변이 성분에 비해 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이는 대상표적의 회전방향과 판의 각도(15도)의 영향에 의한 것으로 판단된다.

#### 나. 수중프로펠러

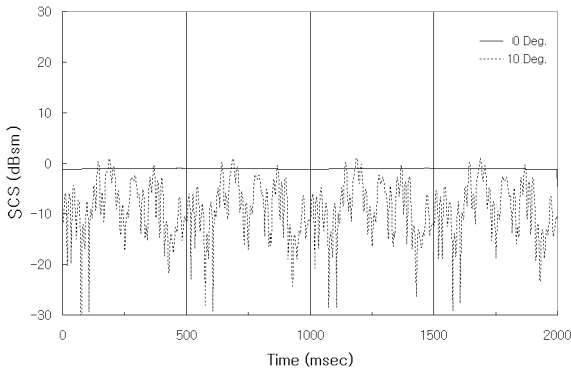
회전하는 수중 표적에 대한 본 해석기법의 응용 가능성을 살펴보기 위해 그림 10에 나타낸 수중 프로펠러의 소나 단면적 스펙트럼 해석을 주파수 50kHz에



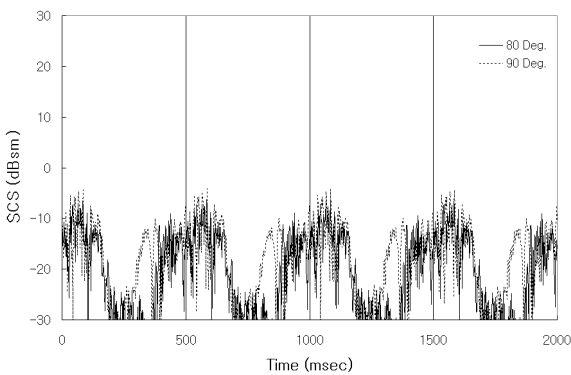
[그림 10] Underwater propeller

대해 관찰각 0도에서 90도까지 10도 간격으로 수행하였다. 이때, 수중 프로펠러 직경은 2.4m, 날개수는 4개, 스쿠와 레이크는 0, 피치비는 1이며, 회전방향은 그림 4에 나타난 회전 금속판과는 반대로 회전축에 대해 시계방향이다.

그림 11은 해석모델이 30rpm으로 회전할 경우, 1회전 동안의 관찰각별 소나 단면적 시간이력을 1.667 msec의 시간 간격으로 관찰각 0, 10, 80, 90도에 대해서 나타낸 것이다. 이로부터, 관찰각 0도에서는 레이더 단면적이 일정하게 나타나고, 관찰각이 클때 시간에 대한 변화가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 변화는 수중프로펠러의 복잡한 형상으로 인해 회전 금속판보다 상대적으로 더 크게 나타난다.

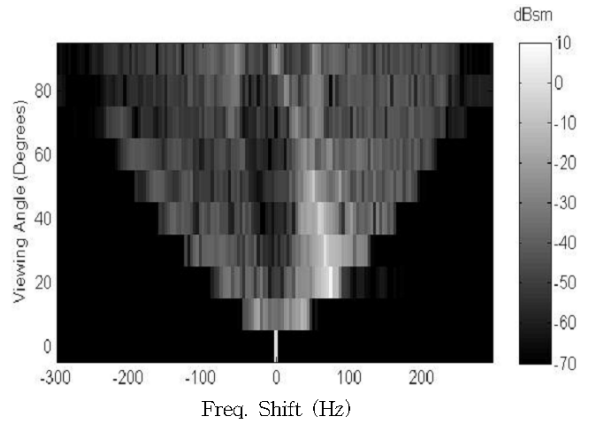


(a) Viewing angle = 0 and 10 degrees

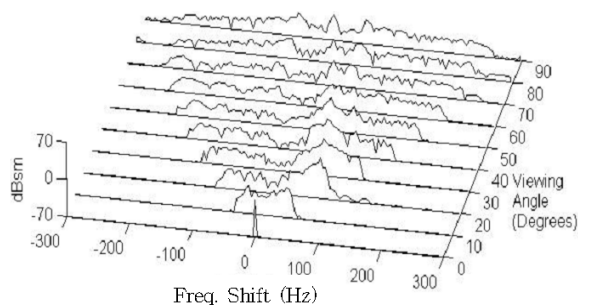


(b) Viewing angle = 80 and 90 degrees

[그림 11] Time histories of the sonar cross section of the underwater propeller rotating in 30 rpm at the various viewing angles



(a) Contour plot



(b) Waterfall plot

[그림 12] Contour and waterfall plots of the sonar cross section spectra for the underwater propeller

아울러, 4개의 날개로 인해 1회전하는 동안의 시간이력이 4주기 함수로 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

그림 12는 주파수 변이(frequency shift,  $f_m - f_c$ )와 관찰각에 대한 소나단면적 스펙트럼을 contour plot과 waterfall plot으로 나타낸 것이다. 관찰각 0도에서는 회전 금속판과 같이 도플러 영향이 전혀 나타나지 않으나, 관찰각이 커짐에 따라 도플러 영향이 점차 커지고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 회전 금속판과는 달리 양(+)의 주파수 변이 성분이 음(-)의 주파수 변이 성분에 비해 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 물리광학법과 물리광학 회절이론에 근거한 준 정적 해석방법을 이용해 회전 표적에 대한 시간변화에 따른 후방산란 단면적 해석을 수행하고 FFT를 이용해 후방산란 단면적 스펙트럼 해석을 수행하였다. 이 때, 회전 표적의 회전각도에 따라 발생하는 음영효과를 고려하기 위해 삼각형 적용 빔 방법을 적용하였다.

회전 금속판에 대한 수치해석결과와 기존 실험결과의 비교를 통해 본 연구결과의 타당성을 검증하였으며, 레이더 단면적과 소나단면적의 물리적 유사성을 이용해 수중프로펠러의 소나 단면적 스펙트럼을 계산하고 그 특성을 살펴보았다.

회전 표적의 후방산란 단면적 시간이력 자료를 이용해 표적의 날개 수를 추론할 수 있으며, 회전 방향, 날개 형상 등에 따라 후방산란 단면적 스펙트럼 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

향후 본 연구결과를 바탕으로 실제 프로펠러와 같은 회전 표적의 직경, 스윙, 피치 등의 특성인자 변화에 따른 후방산란 단면적 이간이력과 후방산란 단면적 스펙트럼 분석에 대한 추가적인 연구가 이루어질 예정이다. 또한, 본 연구에서는 동일한 위치에서 일정한 속도로 회전하는 표적에 대한 내용만을 다루었으나, 헬기, 잠수함 등에 부착된 프로펠러는 플랫폼의 기동 특성으로 인해 후방산란 특성이 계속해서 변화하게 된다. 따라서 이에 대한 추가적인 연구가 필요

할 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었으며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T. Yang and S. Bor, "Comparison of Monostatic Doppler and Radar Cross-section Spectra by Rotating Multiple Skew-plated Metal Fan Blades", International Journal of Electronics, Vol. 72, No. 4, pp. 659~668, 1992.
- [2] I. Tardy, G. Piau, P. Chabrat and J. Rouch, "Computational and Experimental Analysis of the Scattering by Rotating Fans", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 44, No. 10, pp. 1414~1421, 1996.
- [3] K. Tanaka, "Scattering of Electromagnetic Waves by a Rotating Perfectly Conducting Cylinder with Arbitrary Cross Section: Point Matching Method", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 28, pp. 796~803, 1980.
- [4] D. D. Zutter, "Scattering by a Rotating Dielectric Sphere", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 28, pp. 643~651, 1980.
- [5] J. V. Blandel, "Electromagnetic Fields in the Presence of Rotating Bodies", Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 64, pp. 301~318, 1976.
- [6] I. J. Lahaie and D. I. Sengupta, "Scattering of Electromagnetic Waves by a Slowly Rotating Rectangular Metal Plate", IEEE



- Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 27, pp. 40~46, 1979.
- [7] C. W. Chuang, "Backscatter of a Large Rotating Conducting Cylinder of Arbitrary Cross Section", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 27, pp. 92~95, 1979.
- [8] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, M. Y. Tuley, Radar Cross Section, 2nd Ed. Artech House, 1993.
- [9] 김국현, 조대승, 김종철, "수중표적에 대한 고주파수 음향산란 해석", 대한조선학회 논문집, 제42권, 5호, pp. 528~533, 2005.
- [10] 김국현, "해양표적의 고주파수 후방산란 해석과 응용", 부산대학교, 박사학위논문, 2007.
- [11] 김국현, 김진형, 조대승, "Object Precision 방법을 이용한 복합구조물의 RCS 해석", 대한조선학회 논문집, 제42권, 2호, pp. 159~164, 2005.
- [12] 조대승, 성상경, 김진형, 최재호, 박일권, "적용 삼각형 빔 방법에 의한 실내음장 해석", 한국소음진동공학회 논문집, 제13권, 제3호, pp. 217~224, 2003.