

# 수중 축소표적의 음향산란에 관한 연구 - 실험과 분석

신기철, 김재수

## A Study on the Acoustic Scattering of Submerged Scale Target - Experiment and Analysis

Kee-Cheol Shin, Jea-Soo Kim

**Key Words** : Acoustic Scattering(음향산란), Scale Target(축소표적), Specular Reflection(경면반사), Reradiation(재방사), Matched Filter(정합필터), Impulse Response(충격응답)

### Abstract

The target detection, classification and motion analysis by active sonar system requires the detailed characteristics of scattered echoes in the near field. Because of the inherently complex scattering mechanism, experimental methods are widely used to understand the process of scattered echo formation.

In this paper, the experimental approach and the data processing techniques are applied to the analysis of scattering mechanism. For this purpose, the scale target experiment in acoustic water tank is designed and the data obtained in the experiment are analyzed to characterize the echoes in time and frequency domain. Especially, the analysis is focused on the identification of location and directivity of each HL points for parameterization of HL. In the geometric optics region, acoustic scattering is dominated by the specular reflection due to the shapes of target, and re-radiation is also important in certain aspect angle of the target.

### 1. 서론

능동소나 시스템에서 표적의 음향산란 현상은 해석적으로 도출되는 이론적인 해와 실제 측정 결과와의 관계를 정의할 수 있는 매개변수가 있게 된다. 산란이론에서 보편적으로 사용되는 이러한 매개변수는 송신신호의 파장과 표적의 크기의 관계로 알려져 있다. 파장은 파수를 나타내는  $k$ , 표적의 크기를  $a$ 라 표시한다면 매개변수는  $ka$ 로 표현된다. 일반적으로  $ka$ 의 값에 따라 4개의 산란영역으로 분류

하며, 본 논문에서 다루고자하는 영역은 기하광학영역(geometric optics region)으로  $ka$ 가 대략 100 이상의 값을 가지며, 해는 음선이론(ray theory)에 의해 구해지는 영역으로 알려져 있다<sup>1)</sup>.

축소표적 실험은 수중음향뿐만 아니라 공기중의 소음진동 분야에서도 사용되는 일반적인 방법이다<sup>2)</sup>. 수중음향에서 표적에 의한 산란신호의 연구에 축소표적 실험이 이용되는 것은 해석적 또는 수치적인 방법과 같이 이론적인 방법으로는 현상을 다루기에 어렵다는

데에 주된 이유가 있으며, 나아가서 축소표적을 사용한 실험은 해상실험에서 제어할 수 없는 환경변수들을 분리 및 제어함으로써 보다 의미 있는 실험을 할 수 있기 때문이다. 즉, 해상실험에서는 표적 및 소나의 자세각을 정밀하게 측정 제어할 수 없으나 음향수조 실험에서는 가능하기 때문이다.

축소표적 실험은 실 표적을 일정한 비율로 축소하여 제한된 크기의 수조 또는 자연상태의 호수 등과 같은 곳에서 표적의 형상과 내부구조에 따라 표적신호가 어떻게 달라라지는지에 대한 실험적·이론적인 연구를 하기 위하여 수행한다. 본 논문에서는 능동소나에서 표적 산란체 또는 반사체에서의 산란현상을 실험 자료를 분석하여 표적신호를 특징지우고, 표적신호의 시간영역 신장(elongation)과 표적의 형상 및 내부 구조가 표적 산란신호에 어떠한 영향을 미치는지를 분석한다. 기하광학영역에서의 표적의 음향산란은 음선이론에 의한 경면반사(鏡面反射, specular reflection)가 주된 에너지로 작용하게 되며, 특정 자세각에서 표적의 내부 구조물에 의한 재방사(reradiation)가 경면반사와 비교할 때 상대적으로 적은 에너지로 발생한다.

## 2. 음향수조에서의 축소표적 반향실험

음향수조에서의 축소표적 반향실험은 해양 환경에서 발생할 수 있는 여러 환경변수 즉, 음속의 변화, 주변소음, 잔향음(reverberation) 등에 대한 영향과 표적과 소나의 위치와 방향에 대한 불확실성 및 계측장비의 운용시에 발생하는 오차를 최소화하므로써 표적 자체의 산란현상을 분석하는데 효과적이기 때문에 해석적인 해를 구할 수 없는 복잡한 현상의 해석에 이용된다.

축소표적 반향실험은 송·수신이 가능한 음향변환자와 외부 형태 및 내부구조가 다른 표적을 사용하여 mono-static 소나 시스템을 구성한다. 음향수조에서 축소표적 반향실험의 전체적인 구성과 장비의 구성은 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 도시하였다. 실험에 사용된 음향수조는 장방형으로 크기는 18×10×10 m이다.

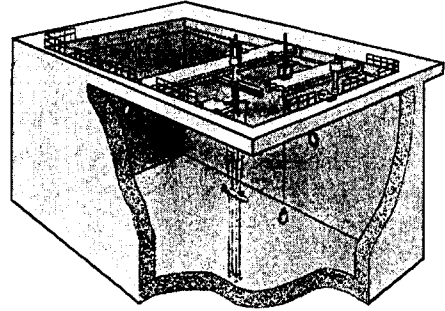


Fig. 1 Acoustic scattering experiment for the scale targets

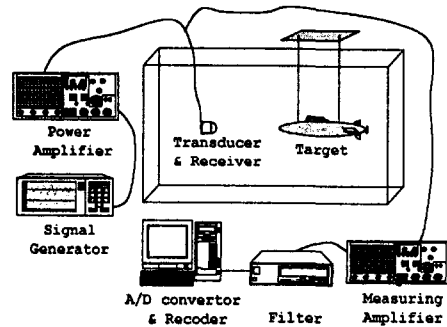


Fig. 2 Setup of experiment devices

음향변환자와 표적의 배치에 의해서 주어지는 RFT(Reflection Free Time)는 수조 경계면과 설치 구조물에 의한 잔향음과 구분되는 조건을 만족하며, 그러할 경우 약 6.6 msec이다. 표적은 음향변환자와 동일 수심에 위치시켰으며, 표적의 유효길이를 고려한 반향음은 잔향음에 대한 영향을 받지 않을 정도의 충분한 RFT를 가진다.

축소표적 반향실험에서 표적의 구성은 외부

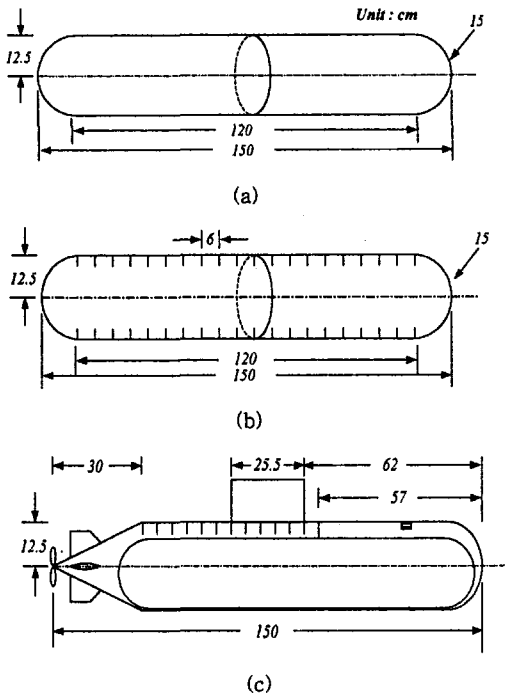
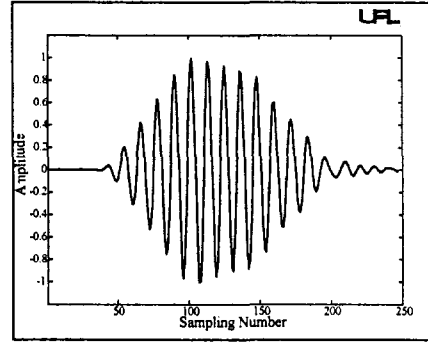
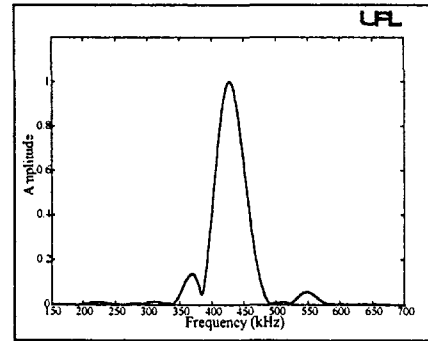


Fig. 3 Geometry of the targets (a) target 1 (b) target 2 (c) target 3

형상 및 내부구조물의 효과를 파악하기 위해 사용되는 표적은 3종류이며, 각각은 Fig. 3에 도시하였다. 표적 1은 순수 원통형 표적으로 내부는 비어 있고, 표적 2는 표적 1과 같은 외부형태를 가지나 주기적으로 배치된 내부 보강재에 의한 효과를 관찰할 수 있도록 제작되었다. 표적 3은 임의의 수중 자함체



(a)



(b)

Fig. 4 Tone burst Source signal (a) time series (b) spectrum

축소모델로 복잡한 외부 형태뿐만 아니라 내부에 보강재와 이중선각으로 구성된 표적이다.

실험에 사용된 음원신호는 Fig. 4에서 도시된 톤 버스트 파(tone burst)이며, Fig. 5에서

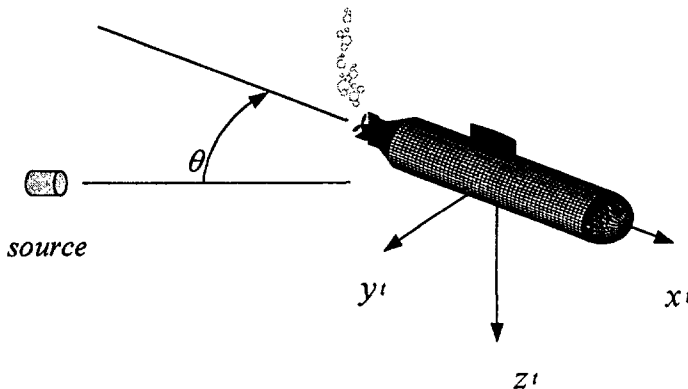


Fig. 5 Definition of target aspect angle

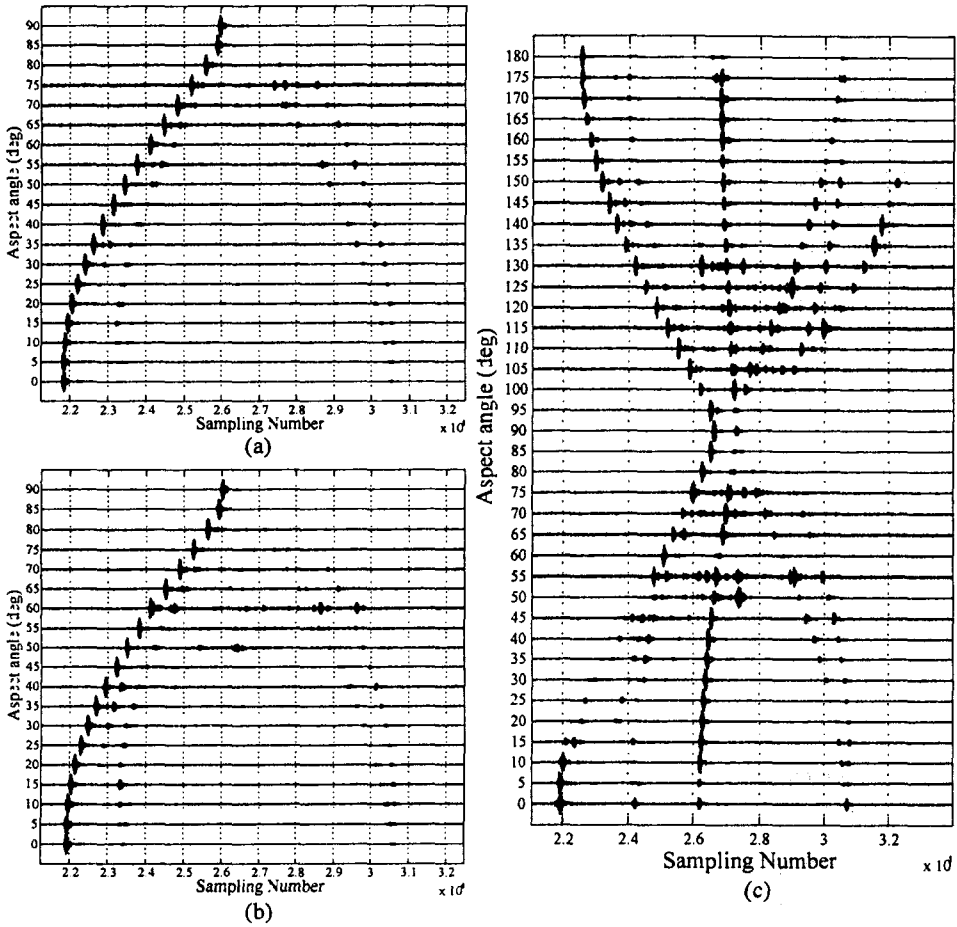


Fig. 6 Echoes for tone burst source signal (a) target 1 (b) target 2 (c) target 3

와 같이 표적의 중심점을 기준으로 5도 간격으로 회전시키면서 여러 자세각에 대해 음향산란 실험을 실시하였다.

표적의 길이는 150 cm이고, 음향변환자와 표적 중심까지의 거리를 400 cm 하였기 때문에, 음향변환자는 표적에 대한 음향학적으로 근거리 효과에 지배받게 된다. 그러므로 표적 강도는 의미가 없으나, 시간영역의 신호의 경우 근접거리에서의 대규모 표적에 대한 근거리 효과를 반영하게 된다. Fig. 6은 실제 측정에 의한 결과를 시간대 자세각으로 도시한 것으로 각각의 신호는 정규화(normalization)하였다. 표적 1과 2는 앞뒤가 대칭이기 때문에

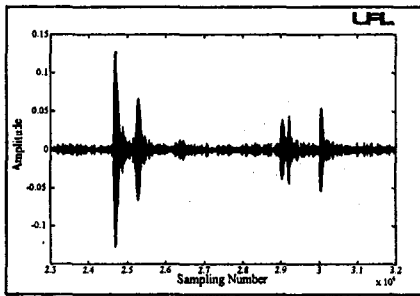
자세각 0 ~ 90° 까지 측정결과를 도시하였다.

### 3. 축소표적의 음향 산란체 분석

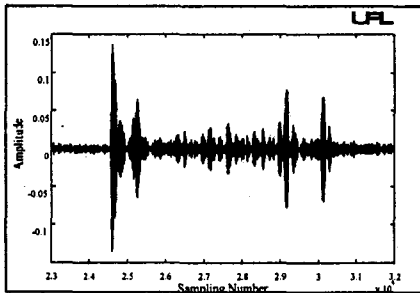
#### 3.1 배경이론

측정 주파수 대역에서 관측되는 파 성분은 세 가지 형태로 분류할 수 있다. 여기에서는 각 성분에 대해 음향물리적인 관점에서 요약한다. 지배적인 파 성분 중 첫 번째 형태는 표적 형상에 의한 경면반사이다. 이와 같은 에너지는 음향변환자와 근접한 곡률반경이 상대적으로 큰 표적의 소부분에서 발생하고, 표적은 입사신호의 음향 임피던스를 변화시키게 되어

일부분의 에너지가 반향된다. 두 번째의 파 성분은 표적 셀 내부의 주기적인 보강재에 의한 Bragg 회절성분이다. 표적의 길이 방향으로 입사한 파는 비교적 강한 음향 반사체인 보강재에 연속적으로 입사하게 되고, 이중 일부는 음향변환자에 직접 반향된다. 세 번째 성분은 음향학적으로 여기된 굽힘 Block 파로부터의 방사이다



(a)



(b)

Fig. 7 Target signal with aspect angle  $60^\circ$   
(a) target 1 (b) target 2

보강재들은 셀을 여러 소부분으로 분할하고, 각각은 역학적으로 인접된 소부분들에 연결된다. 파면이 셀을 스침에 따라 축 방향 파수의 위상은 굽힘 Bloch 파와 조화된다. 소부분 내부에서 진동 에너지는 그것과 이웃된 소부분에 전달되고, 같은 형식으로 또 다른 소부분에 전달된다. 누적된 진동은 음향 방사를 일으키고, 일부는 음향변환자에 수신된다. 셀을 따라 흐르는 에너지의 전파는 입사하는 파면의

속도보다 작은 속도에서 발생하고, 이것은 표적의 유효길이에 관련된 시간보다 긴 시간에서 퍼져나가는 형식으로 음향 방사를 일으키게 된다.

관련 논문<sup>34)</sup>에 의하면 표적에 의한 충격 응답(impulse response)에서 Bragg와 Bloch에 의한 반향음은 특정한 주파수 범위에 제한되는 반면 시간영역에서 넓은 범위에 걸쳐 있게 되고, 경면반사는 상대적으로 광대역이고, 시간영역에서 잘 집중되는 양상을 가지게 된다.

Fig. 7에는 자세각  $\theta = 60^\circ$  일 때, 표적 1과 2의 반향신호를 도시하였다. 내부 보강재가 없는 표적 1과 비교할 때 표적 2의 경우에는 주기적인 보강재에 의한 Bragg 회절에 의한 재방사가 발생한다. 기하광학영역에서의 표적신호는 그림에서 보듯이 재방사에 의한 에너지 보다는 형상에 의한 경면반사가 강하게 발생한다. 그리고, 내부 보강재에 의한 재방사 효과는 특정 자세각에서 관찰되며, 그 외의 자세각에서는 약화되는 경향을 보인다.

### 3.2 충격응답과 정합필터응답

입사신호에 의한 표적의 시스템 응답은 충격응답으로 표현된다. 충격응답은 디콘볼루션에 의해 얻어지나 시간영역에서는 특이해 문제를 풀어야하며 또한 계산량이 많다는 단점이 있고, 주파수 영역에서는 대역 제한된 신호에 대해 여러 영점으로 근접하는 에너지에서 발산한다는 단점이 있으므로 최적화 과정이 필수적이다<sup>5)</sup>.

기하광학영역에서의 축소표적의 충격응답은 경면반사 성분으로 대부분의 에너지가 구성되며, 이것은 음원신호의 replica로 이루어지기 때문에 표적신호와 음원신호는 상관관계가 높다. 그 외에 존재할 수 있는 파는 특정 자세각에서의 재방사 현상에 의해 발생하는 파인데 상관함수(correlation) 처리에 의해 재방사에 의한 파 성분이 파가 여전히 존재한다면 그

또한 음원신호와 상관관계가 높다고 할 수 있다.

**표적신호의 충격응답**

선형시스템에서 입력신호  $x(t)$  와 시스템의 충격응답을  $h(t)$  라 했을 때, 출력신호  $y(t)$  는 수학적으로 콘볼루션 적분으로 표현된다.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

$$Y(w) = X(w) \cdot H(w) \quad (2)$$

주어진 입력신호와 출력신호를 알려져 있을 때, 디콘볼루션은 시스템의 충격응답을 계산한다. 콘볼루션 이론으로부터 식(1)은 주파수 영역에서 식(2)과 같이 간단히 표시된다. 그러므로 시스템의 충격응답은 수신신호와 음원신호 스펙트럼을 나누어 역 푸리에 변환을 하는 과정이다.

$$H(w) = \frac{Y(w)}{X(w)} \quad (3)$$

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1} \left[ \frac{Y(w)}{X(w)} \right]$$

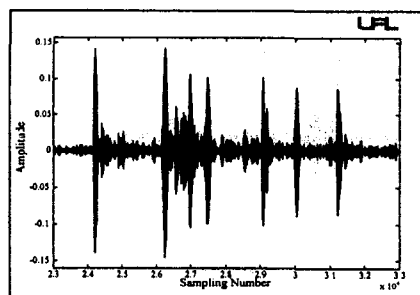
**표적신호의 정합필터 응답**

잡음성분을 포함한 표적 반향음은 송신신호와 매치되는 응답특성을 가지는 필터를 사용하여 선 처리과정을 거친 후 분석한다. 시간영역 표적 반향음의 파형 구조에서 개별적으로 분간할 수 있는 어떠한 성분을 HL라고 하는데, 이러한 표적에 의한 HL는 송신신호와 닮은 경향을 보이 때문에 정합필터로 표적의 입사신호를 사용하였을 때 음향수조 내의 주변 소음을 감소시킬 수 있다. 푸리에 해석의 상관함수 이론에 의해서 출력의 푸리에 변환은 식(4)와 같이 표현된다<sup>6)</sup>.

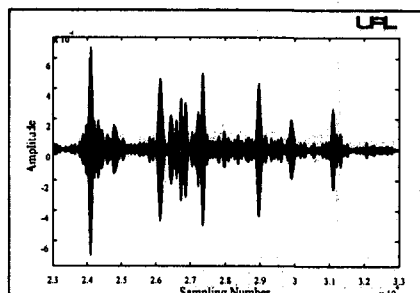
$$\mathcal{F}[h'(t)] = H'(w) = Y(w) X^*(w) \quad (4)$$

여기에서  $X^*(w)$ 는  $X(w)$ 의 공액 복소수이다. 결국 시간영역에서 정합필터의 출력은 식(5)의 역 푸리에 변환이 된다.

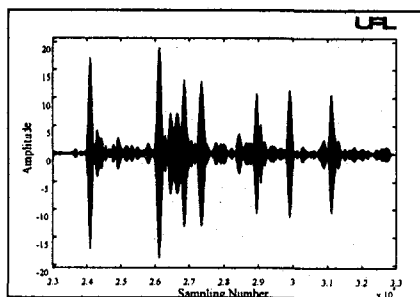
$$h'(t) = \mathcal{F}^{-1} [Y(w) X^*(w)] \quad (5)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Target 4 with aspect angle 130°

(a) target signal (b) impulse response  
(c) matched filter response

시스템의 충격응답을 계산함에 있어 일반적으로 사용되는 방법은 디콘볼루션을 수행하는 것이나, 대역이 제한된 경우에는  $X(w)$ 의 역 필터가 발산하기 때문에 최적화과정을 수반하게 된다. 그러나 이러한 문제는 입력신호와 출력신호가 상관성이 높은 경우에는 정합필터응답으로 그 과정을 대신할 수 있다. 입력신호의 스펙트럼 성분을 식(6)과 같이 표현한다면,

$$X(w) = R_x(w) + jI_x(w) \quad (6)$$

입력신호의 역 필터는 식(7)과 같이 간단히 정리된다.

$$\frac{1}{X(w)} = \frac{X^*(w)}{R_x^2(w) + I_x^2(w)} \quad (7)$$

식(7)에 의해서 디콘볼루션과 정합필터 응답은 식(8)로 표현되는 관계를 가지게 되고, 이것은 시스템의 충격응답은 가중치를 곱하므로써 정합필터 응답과 같게 된다는 것을 보여준다.

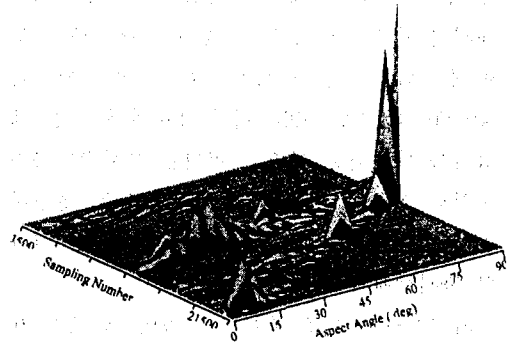
$$\frac{Y(w) X^*(w)}{R_x^2(w) + I_x^2(w)} \Leftrightarrow Y(w) X^*(w) \quad (8)$$

Fig. 8은 표적4의 자세각 130°에서의 충격응답과 정합필터응답을 도시한 것이다. 충격응답 스펙트럼의 발산을 피하기 위해 표적신호의 스펙트럼에 대역이 제한된 truncation function을 곱해야 하며, 그 과정에서 많은 오차를 동반하게 된다. 결국 대역이 제한되고, 표적 신호의 모든 산란성분이 음원신호와 상관관계가 높을 때는 디콘볼루션을 수행하는 것보다 상관이론에 의한 정합필터 응답을 구하는 것이 타당하다는 것을 보여준다. Fig. 8 (c)의 정합필터응답에

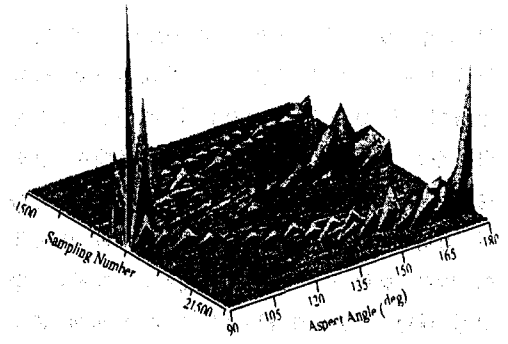
서 재방사에 의한 효과가 그대로 유지되는 것은 재방사에 의한 에너지 역시 입사신호와 상관관계가 크며, 분산(dispersion)에 의한 주파수 천이는 주어진 대역폭 내에서 결정됨을 나타낸다.

### 3.3 자료의 분석결과

표적의 음향 산란체 분석을 위한 송신신호로 짧은 펄스를 사용할 경우, 표적의 HL는 시간영역에서 가시적으로 분리되며, 수신된 표적신호는 입사신호 파형과 유사한 복제파가 지연되고 감쇠되어 합쳐진 형태를 가지게 된다.



(a)



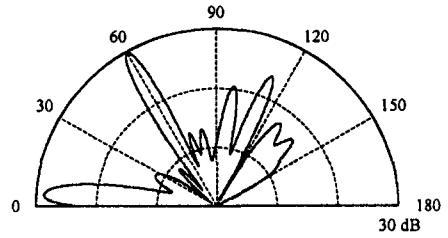
(b)

Fig. 9 Matched filter response vs. aspect angle of target 4  
(a) 0~90° (b) 90~180°

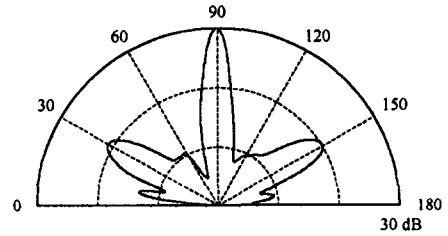
기하광학영역에서의 축소표적 실험에 의한 표적 형상에 의한 경면반사가 주된 에너지로 작용하고, 내부파인 재방사는 일부의 특정 자세각에서 발생하는 것으로 분석되었다. 특히 표적 3의 축소모델의 경우는 형상에 의한 자세각별 HL 추이현상이 나타나며, 그러한 HL로는 선수부, 전망탑, 방향타, 프로펠러 등으로 구분할 수 있다.

Fig. 9의 (a)와 (b)는 표적 3의 자세각별 표적신호의 정합필터응답 도시한 것이다. 각 HL별 자세각에 의한 궤적을 그릴 수 있으며, 또한 음영(shadowed) HL를 확인할 수 있다. 표적 자세각과 형상에 의존하는 HL와 음영 HL는 경면반사의 중요한 특성으로 기하광학영역에서의 축소표적 실험의 경우 경면반사 성분이 중요하다는 것을 보여준다. 그 외의 자세각 30~50° 와 120~135° 에서 내부파에 의한 재방사가 나타나고 있으며 이것은 음향변환자와 표적의 자세각이 coincidence angle을 형성하기 때문이다. 그러나 재방사의 에너지는 여타의 자세각에서 약화되고 있다.

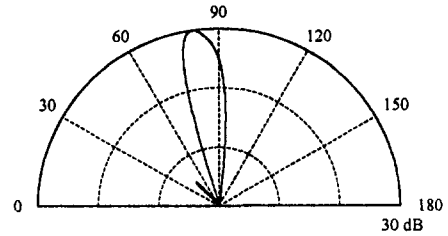
자세각의 함수로 주어지는 가변적인 HL 세기의 패턴을 HL의 방향성이라 하는데, 이러한 방향성은 HL의 공간적인 특성을 나타내게 된다. Fig. 10은 표적 3의 주요 HL에 대한 자세각에 따른 방향성 분포이다. 상대적으로 곡률반경이 큰 선수부나 전망탑의 경우는 일정한 방향성을 가지게 되고, 이러한 부분에서 강한 경면반사가 생성된다. 반면, 곡률반경의 변화가 심하고 입사각에 따라 법선벡터의 변화폭이 많은 방향타나 프로펠러에서는 일정한 방향성 패턴을 보이지 않는다. 또한 음원과 표적의 자세각에 의한 각 부분의 HL는 경우에 따라 표적 자체에 의해서 가려지게 되는데, 이러한 HL를 음영 HL로 정의할 수 있다. 특히 음영 HL는 프로펠러와 선수부에 주로 발생하게 된다.



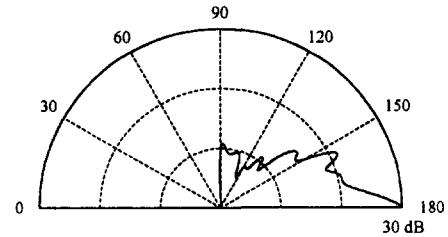
(a) Propeller



(b) Conning tower



(c) Beam or Hull



(d) Bow

Fig. 10 Directivity pattern of principal HL

#### 4. 결 론

본 논문에서는 특정 주파수와 표적의 상관관계를 나타내는  $ka$ 를 기하광학영역으로 조절하여 음향수조에서 축소표적 반향실험을 실시하였다. 음원신호로는 중심 주파수 420



kHz, 펄스 지속시간 36  $\mu\text{sec}$  인 톤 버스트 파를 사용하여 실 표적과 유사한 음향환경을 음향 수조에서 재현하였다.

시간영역에서 표적 HL를 분리하기 위해 표적신호의 충격응답을 계산하지 않고 표적 반향음의 정합필터 응답을 사용하였으며, 그 이유는 실험에 사용된 신호가 상대적으로 협대역이었기 때문에 충격응답에서 충분한 시간 해상도를 얻을 수 없었기 때문이다. 정합필터 응답의 경우, 표적 입사신호를 필터로 사용하여 반향음에 포함된 잡음을 제거할 수 있어 뚜렷한 형태의 경면반사 성분뿐만 아니라 재방사에 의한 HL를 확인할 수 있었다.

기존의 문헌에 의하면  $ka$  값이 Rayleigh 영역 또는 공진 영역의 실험 결과의 경우, 경면 반사뿐만 아니라 재방사 효과 및 공진현상에 의한 파들이 지배적이다. 그러나 본 실험 영역에서의 음향산란 메커니즘은 음선이론에 의한 경면반사가 중요한 성분으로 작용하며, 이러한 파 성분은 표적의 외부 형태에 기인하고 특히, 곡률반경이 파장에 비해 큰 표적의 소부분에서는 상대적으로 큰 에너지의 형태로 반향된다. 일반적으로 굽힘과 공진에 의한 Bragg와 Bloch 파는 실험 주파수 대역에서는 작은 에너지로 발생하는 것으로 분석되며, 그 기여도는 작으나 특정 자세각 즉, coincidence angle에서 확인되었다.

## 참 고 문 헌

- 1) D. E. Nelson, *A Statistical Scattering Model for Time-Spread SONAR Targets*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Electrical Eng., Univ. of Rochester, New York, U.S.A, 1975
- 2) R. Pompoli, *Sound Radiation Prediction by Scale Models*, Ph.D. Thesis Univ. of Southampton
- 3) D. M. Drumheller et al. "Identification and synthesis of acoustic scattering components via the wavelet transform," *J. Acoust. Soc. Am.* 97 (6), pp. 3649-3656, June 1995
- 4) David H. Hughes et al. "Synthesized wave packet basis for monostatic scattering from a randomly ribbed, finite cylindrical shell," *J. Acoust. Soc. Am.* 97 (3), pp. 1399-1408, March 1995
- 5) J. S. Kim et al. "Characteristics of Acoustic Impulse Response of Submerged Cylinder Objects as Elements of Target-Scattered Echo," *J. Acoust. Soc. Kr.*, Vol. 13, No. 2, pp. 5-13, 1994
- 6) E. O. Brigham, *The Fast Fourier Transform and Its Application*, Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1988