

축소표적 음향산란 신호의 실험적 연구와 형상을 고려한 표적신호합성

신 기 철¹⁾, 김 재 수²⁾

Experimental Investigation of Scale Target Echoes and Target Signal Simulation

Kee-Cheol Shin

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 thesis, the experimental approach and the data processing techniques are applied to develop and improve the target signal simulation model. For this purpose, the scaled 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 highlight points.

Based on the experimental results, the improved target signal simulation model is developed. The developed model is capable of simulating the three dimensional distribution of highlights, the target strength and directivity of the individual highlights depending on the geometry of substructures for the arbitrary target and sonar platform kinematics in three dimensional ocean environment. The simulated results agree well the experimental data.

1) 한국해양대학교 해양공학과 석사과정 해양공학 전공
2) 한국해양대학교 해양공학과 부교수

1. 서 론

능동소나 시스템의 운용 목적은 표적의 탐지뿐만 아니라 필요한 경우에는 표적의 분류 및 상태분석 등을 하는 것인데, 이러한 목적을 달성하기 위해서는 신뢰성 있는 표적신호의 해석이 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 표적의 고속화, 음향 스텔스화 추세에 따라 요구되는 표적신호의 특성 분석을 위해 음향수조 축소모형표적 실험을 실시하였고, 그 결과를 능동표적신호 합성모델의 개발에 이용하였다.

축소모형표적 반향실험은 해석적으로 구하기 어려운 경우에 대해 실험적이면서 실신호에 근접한 신호를 얻을 수 있어 표적신호에 대한 구체적인 자료를 제공할 수 있다.

국내의 실정으로 볼 때, 축소모형을 대상으로 실시된 실험은 다수 있으나 대부분은 지상 또는 해상에서 행해진 실험들이었다. 미국의 경우에는 NRL¹⁾을 주축으로 여러 음향수조 실험이 행해지고 있으며, 실험의 대상은 단순한 원통형 구조물에서 실제 잠수함을 축소한 모델에 이르기까지 다양한 표적을 대상으로 하고 있다. Table 1.1은 미국에서 진행되고 있는 표적 반향실험의 장단점 비교와 실험의 주체를 정리한 것이다.

Table 1.1 표적 반향실험의 장단점 비교와 실험의 주체

음향수조 실 험	장 점	• 표적신호 획득 및 실험 실시 용이 • 환경적인 제약조건을 극소화
	단 점	• 환경의 개선을 위한 부수적인 장치 필요(방음처리 등) • 정밀 측정장치 필요
	목 적	• 기초연구 및 표적분류를 위한 사전정보 획득
	운 용 기 관	• 미 NRL의 Target Facility Section • 미 NUWC의 Acoustic Test Facility
호수실험	장 점	• 해상실험에 비해 경제적 • 상사법칙에 따른 far-field 개념 도입 가능
	단 점	• 음향수조에 비해 정밀측정 불리
	목 적	• 잠수함 스텔스 기술의 개발 • 대규모 축소모형표적 실험 • 소나돔 개발, 잠수함의 저소음화, 저 표적강도화를 위한 실험
	운 용 기 관	• 미 NSWC의 ARD : Lake Pend Oreille in northern Idaho • 미 Lake Gem Mary near Orlando, Florida • 미 Point Loma, San Diego, California
해상실험	장 점	• 실 표적신호 획득
	단 점	• 실험 제약 조건이 다수 존재 • 실험조건외 불확실성에 의한 해석의 어려움
	목 적	• 소나 및 실 장비의 테스트

1) Naval Research Lab.

2. 능동소나 시스템에서 표적신호의 특성

능동소나 시스템에서 표적 음향산란 현상은 해석적으로 도출되는 이론적인 해와 실제 측정 결과와의 관계를 정의할 수 있는 매개변수가 있게 되고, 이것은 산란이론에서 송신신호의 파장과 표적 크기와 관계로 알려져 있다. 파장은 파수를 나타내는 k , 표적의 크기를 a 라 표시한다면 매개변수는 ka 로 표현된다. 매개변수의 값에 따라 4개의 산란영역으로 분류하게 되고, ka 값이 증가하는 순서로 Rayleigh 영역, 공진 영역, 물리광학 영역 그리고 기하광학 영역으로 구성된다. Rayleigh 영역은 표적의 크기가 파장보다 상당히 작은 경우이고, 공진 영역은 표적의 크기가 파장에 근사하는 경우이다. 물리광학 영역은 ka 가 대략 10 이상의 값을 갖는 경우로 대부분의 현대적인 소나 시스템은 이 영역에 해당된다. 기하광학 영역은 ka 가 대략 100 이상의 값을 갖는 영역으로, 해는 음선이론(Ray theory)에 의해 구해진다. 축소모형표적 반향실험은 중심 주파수 420 kHz의 송신펄스를 사용하며, 이 경우에 있어서 표적의 크기와 주파수의 관계는 산란이론에서 기하광학 영역에 해당하는 $200 < ka < 1300$ 이 된다.

음파가 표적에 입사하였을 경우, 에너지의 일부는 음원의 방향으로 산란되는데, 이러한 에너지를 종종 음향 산란체, 음향 반사 또는 표적 반향음이라 한다. 입사 에너지의 일부는 표적을 투과하게 되고, 종파와 횡파의 형태로 표적 내부의 여러 경계면에서 보다 많은 산란을 일으키게 되어, 후방 산란된 에너지에 기여하게 된다.

두 종류의 중요한 산란 과정이 반향음의 구조에 영향을 주게 되는데, 표적 전면부에서의 거울면 반사와 표적 경계면에서의 복합적인 내부 반사를 일으키는 종파와 횡파이다. 표적으로부터 수신되는 반향음 성분들은 여러 과정의 반향음 형성 메커니즘에 의해서 구성되고, 각 반향음 성분의 표적강도에 대한 기여도는 산란체의 형태, 주파수 등에 따라 변화한다. 반향음 성분들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- | | |
|----------------------|----------------------|
| a) 거울면 반사 | b) 유체영역으로부터의 반사 |
| c) corner 반사체로부터의 반사 | d) 굽힘 모우드에 의한 반향음 성분 |
| e) 회절에 의한 반향음 성분 | f) 공진 모우드에 의한 반향음 성분 |

일반적으로 사용되는 search sonar, active sono-buoy, active homing weapon 등은 $10^2 \sim 10^3$ 의 ka 값을 갖고, 이 범위에서 (a)~(f)까지의 모든 메커니즘은 유효하며, 상대적인 중요성은 주파수에 의존하지만 표적강도의 대부분 에너지는 거울면 반사성분에 의해 지배된다.

3. 축소모형표적 반향실험

해상실험에서 획득하기 어려운 다양한 표적신호 특성을 분석하여 표적별 HL 특성 변수 도출 및 HL 자료기지를 구축하는데 이용되는 실험 장비는 신호발생부와 센서부 그리고 센서부를 구동하고 수신 신호를 처리하는 신호처리부로 구성된다.

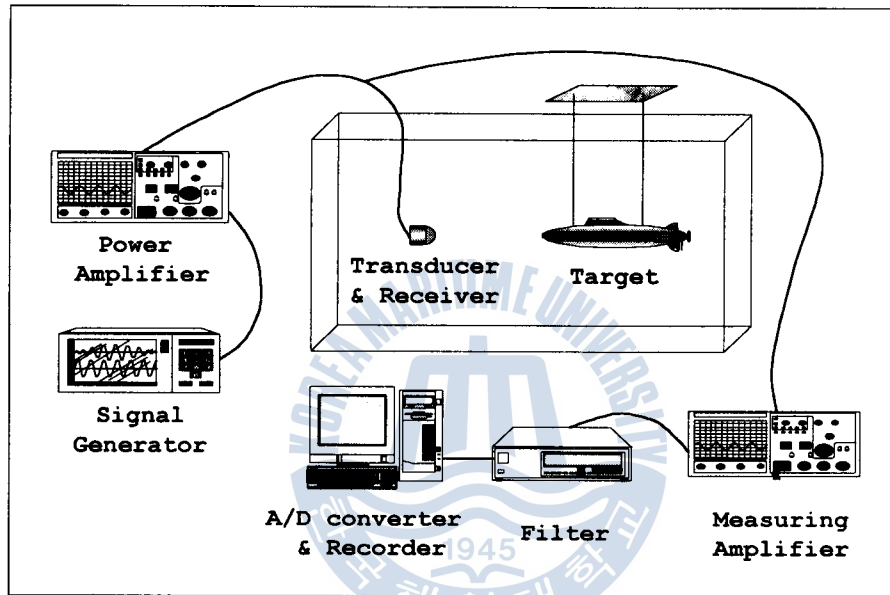


Fig. 3.1 축소모형표적 반향실험을 위한 실험 장비의 구성

반향실험에 사용된 표적은 외부 형태 및 내부구조가 서로 다른 4 종류로 구성된다. 본 논문에서는 각각의 표적을 표적 1, 2, 3, 4로 분류한다.

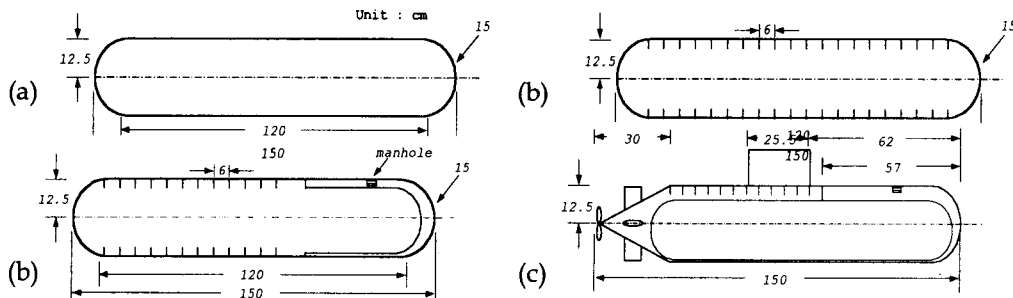


Fig. 3.2 축소모형표적의 측면도

(a) 표적 1 (b) 표적 2 (c) 표적 3 (d) 표적 4

4. 표적 반향신호의 특성 분석

능동소나 시스템에서 반향음의 산란강도는 수중 표적에 의해서 반향된 신호와 밀접한 관계가 있다. Fig. 4.1은 각각의 표적에 대해서 자세각에 따른 반향음 준위의 상대적인 변화를 나타낸 것이다. 표적의 반향음을 $r(t)$ 라고 할 때, 정의되는 반향음 준위는 식(4.1)과 같다.

$$EL = 10 \log \left[\int_{t_1}^{t_2} r^2(t) dt \right] \tag{4.1}$$

Fig. 4.1에서 각 표적에 대한 반향음 준위의 변화폭은 대략 20 dB이다. 반향음 준위의 최대치는 대부분 선폭 자세각(beam aspect)인 90도 근처에서 가장 큰 값들을 가지고, 이것은 선체로부터의 강한 거울면 반사에 의한 것이다. 실험에서 사용된 특정 주파수 대역에서는 재 방사에 의한 효과가 적고, 대부분의 반향음이 거울면 반사에 의해서 형성된다.

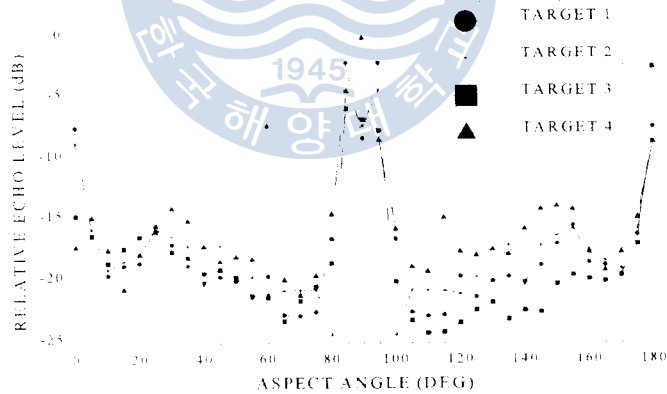


Fig. 4.1 축소모형표적의 상대적인 반향음 준위 분포

Hilbert 변환은 시간영역에서 신호의 순간 특성을 계산하기에 유용한 방법이다. 실시간영역 신호를 Hilbert 변환을 사용해서 해석신호를 구성하게 되고, 해석신호의 크기가 원 신호의 포락선이 된다. 잡음 성분을 포함한 반향음은 송신신호와 매치되는 응답특성을 가지는 필터를 사용하여 선 처리과정을 거친 후 분석하게 된다. 정합필터는 백색 가우스 소음의 효과를 감소시키는 좋은 방법이다. $R(f)$ 와 $S(f)$ 가 각각 반향음 $r(t)$ 와 송신신호 $s(t)$ 의 푸리에 변환이라면, 시간영역에서 정합필터의 출력은

식(4.2)의 역 푸리에 변환이 된다.

$$y(t) = \mathcal{F}^{-1}[R(f)S^*(f)] \quad (4.2)$$

축소모형표적 반향신호에 있어 $y(t)$ 의 포락선은 반향음 HL들의 간격과 상대적인 크기를 결정하기 위해 사용된다.

표적의 음향 산란체 분석을 위한 송신신호는 짧은 펄스를 사용하게 되며, 표적의 HL은 시간영역에서 가시적으로 분리된다. 수신된 표적신호는 입사신호 파형과 유사한 복제파가 시지연되고 감쇄되어 합쳐진 형태를 가지게 되는데, 이산적인 HL 분포를 가지는 표적 반향음은 주파수 스펙트럼에서 독특한 특성을 가지게 된다.

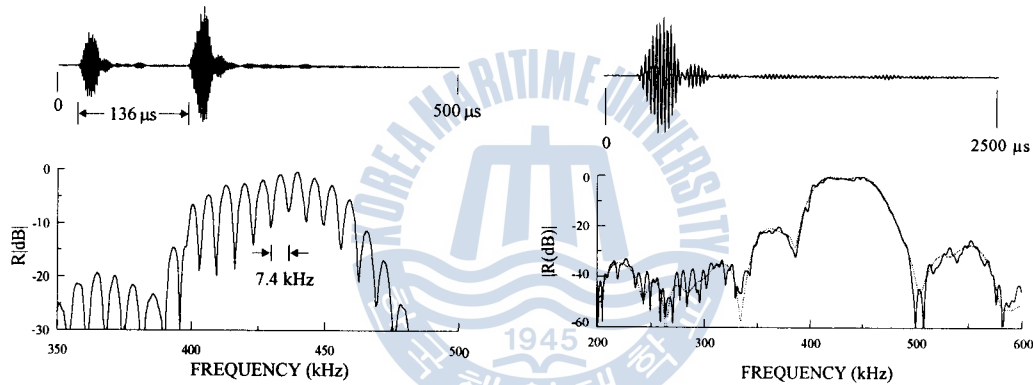


Fig. 4.2 실 신호의 스펙트럼 특성

Fig. 4.3 스펙트럼에서 주요 HL의 효과

Fig. 4.2는 표적4의 자세각 90도에서의 표적 반향음과 스펙트럼으로 나타난 것이다. 시간영역에서 표적 반향음은 상대적으로 강한 두 개의 HL로 구성되어 있다. 첫 번째 HL은 표적의 선체에 입사한 신호이고, 두 번째 HL은 표적의 돌출부인 전망탑에 의한 효과이다. 두 HL 간의 시지연은 대략 $136\mu s$ 이고, 이러한 HL 시지연에 의한 스펙트럼 리플간의 간격은 대략 7.4 kHz 로 시지연의 역수로 계산된다.

Fig. 4.3에서는 표적 2의 자세각 85도에 대해서 첫 번째와 두 번째 반향 성분의 주파수 스펙트럼을 전체 반향음 스펙트럼 상에 겹쳐서 나타낸 것이다. 결과로 볼 때, 반향음의 전체 스펙트럼은 주요 HL 즉, 최초의 두 개의 반향성분 스펙트럼에 대해 리플을 가진 형태가 된다.

5. 축소모형 표적 HL의 자료기지화

축소모형 표적 HL 특성변수 도출을 위한 과정은 3 단계로 구성된다. 1단계와 2단계는 각각 가상 HL 점들의 궤적을 계산하기 위한 시뮬레이션과 특성변수 도출을 위한 정합필터 응답을 계산하는 단계이다. 3단계에서는 1단계에서 구해진 각 자세각별 가상 HL 점들의 시지인 정보와 2 단계에서 구해진 정합필터 응답을 시간영역에서 정렬하여 HL에 매치되는 정합필터의 세기와 위치를 추출한다.

자세각의 함수로 주어지는 가변적인 HL 세기의 패턴을 방향성이라 하고, HL의 공간적인 특성을 나타내게 된다. Fig. 5.1은 주요 HL에 대한 자세각에 따른 방향성 분포이다. 상대적으로 곡률반경이 큰 선수부나 전망탑의 경우는 일정한 방향성을 가지게 되고, 이러한 부분에서 거울면 반사 성분이 형성된다. 반면, 곡률반경이 작고 입사각에 따라 법선벡터의 변화폭이 많은 방향타나 프로펠러에서는 일정한 방향성 패턴을 보이지 않는다.

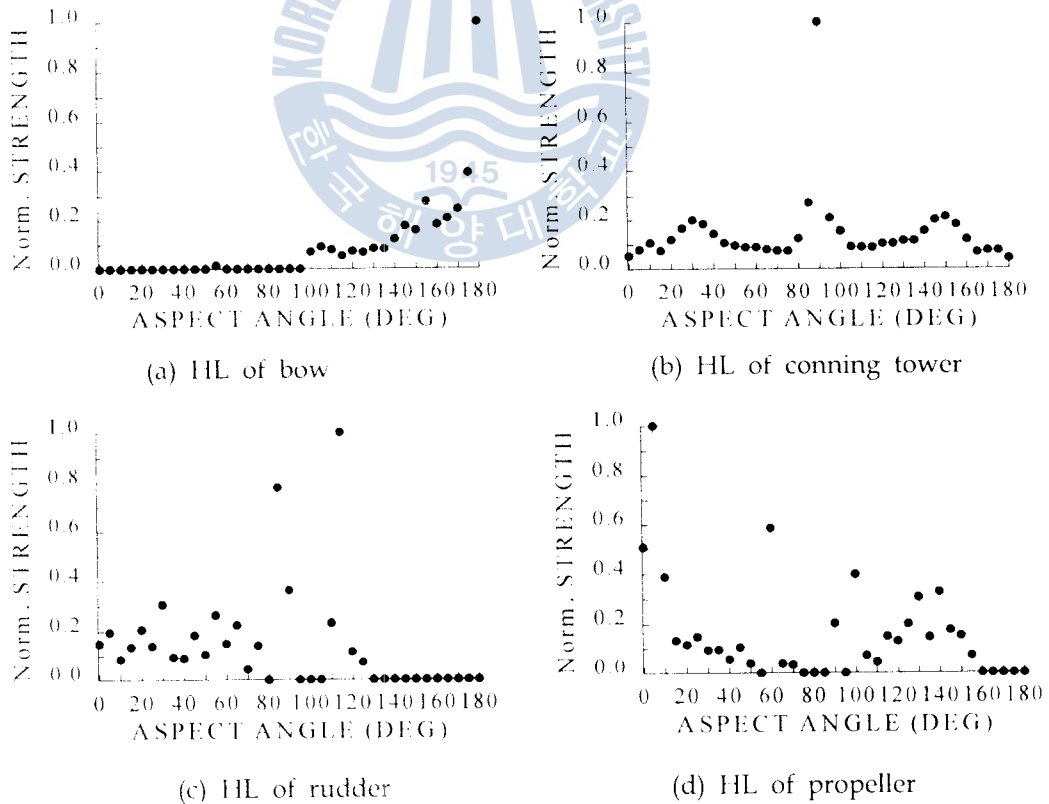


Fig. 5.1 주요 HL의 방향성 분포

자료기지의 신뢰성은 일반적으로 실 신호에 대한 정보를 자료기지가 어느 정도까지 유사하게 묘사할 수 있는가에 있다. 실 신호의 경우 정상적(stationary)이라기 보다는 랜덤성이 강하기 때문에 통계적인 신뢰성이 중요하다. 즉, 두 신호 자체의 유사성보다는 신호의 포락선을 비교하는 것이 타당하다.

Fig. 5.2는 표적 4의 자세각 100도에서, 실 신호 (a)와 자료기지를 사용해서 합성된 신호 (b)를 도시한 것이다. (c)에 표시된 상호상관함수는 두 신호의 포락선의 유사도를 계산한 것이다. 두 신호의 최대 상관도는 Lag T=0에서 대략 0.9의 값을 갖게 된다.

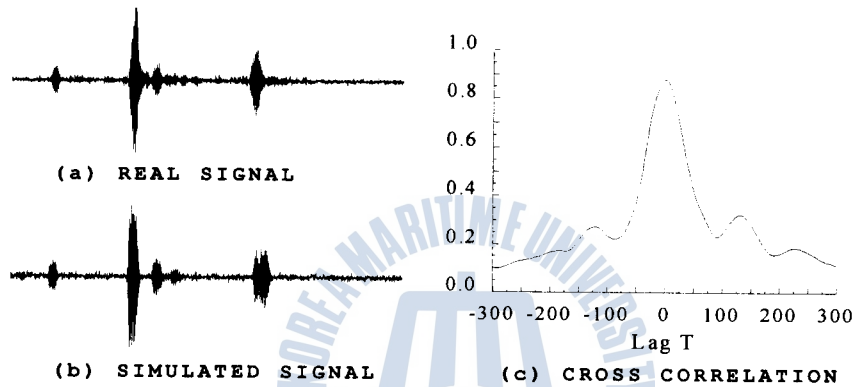


Fig. 5.2 자료기지를 이용한 표적신호 합성

자세각 0도에서 180도 까지 5도 간격으로 총 37개의 자세각에 대해, 실 신호와 자료기지에 의해서 합성된 신호의 상호상관함수 Lag T=0에서 상관도는 0.8~1.0의 값을 가지게 되고, 대체적으로 신호 대 잡음비(SNR)가 좋은 자세각에서는 큰 값을, 나쁜 자세각에서는 작은 값을 주고 있다. 거울면 반사를 가정한 HL 특성변수의 자료기지는 포락선 모사에 있어 대체적으로 양호한 값을 주고 있다. 이러한 결과로 볼 때, 축소모형표적 반향실험은 거울면 반사를 위주로는 표적신호 합성이 가능하다.

6. 표적 형상을 고려한 표적신호 합성모델의 개발

축소모형표적 반향신호 합성모델에 있어 거울면 반사가 중요하다는 것은 결국, 3차원 기하학적 형태를 지닌 표적 소부분(substructure)의 형태에 따라 음향 에너지의 경로가 변화한다는 것을 의미한다. 개발된 합성모델은 표적모델에서 표적 형상을 적용하여 효율적인 가변 HL 배치와 HL 수를 정의할 수 있고, 또한 운동학적 모델에서

는 자세각과 형상함수에 의해 정의되는 HL 위치를 계산하게 된다. HL의 표적강도는 형상함수로 주어지는 보편적인 표적강도의 식을 적용하였다. 표적의 소부분은 표적과 독립된 단일 객체로 고려할 수 있으며, 제한된 범위에서 형상함수의 개념을 도입하게 된다. 축소모형표적을 여러 소부분으로 분리하여 각 부분에 대한 형상을 수학적으로 모델링할 수 있다. Table 6.1은 축소모형표적의 소부분에 대한 형상함수를 나타낸 것이다.

Substructure	Sketch	Form Function
1 Bow part Half Ellipsoid with semi-axes a,b,c		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$
2 Stern part Elliptic cone with axis as x axis		$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = \frac{x^2}{c^2}$
3 Hull part Elliptic cylinder with axis as x axis		$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$
4 Conning tower Elliptic cylinder with axis as z axis		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$

Table 6.1 축소모형표적의 형상함수

표적의 형상에 의한 거울면 반사점은 음원과 표적의 자세각에 따라 그 위치가 변화하게 된다. 형상함수의 표면을 구성하는 한 점에서 법선벡터는 그 점에서 음원을 바라보는 벡터와 일치될 수 있으며, 만약 일치된 점이 존재한다면 결국 이 점이 형상함수에 의해서 주어지는 거울면 반사점이 된다. 공간에서 미분 가능한 형상함수를 표현

하는 스칼라함수를 $f(x, y, z)$ 라 할 때, 상수 c 에 대해 식(6.1)은 공간에 있는 곡면 S 를 표시한다.

$$f(x, y, z) = c = \text{constant} \quad (6.1)$$

공간에 있는 임의의 곡선 C 는 식(6.2)로 표시할 수 있다.

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k} \quad (6.2)$$

그리고, 곡선 C 의 접선벡터(tangent vector)는 식(6.3)가 된다.

$$\vec{r}'(t) = x'(t)\vec{i} + y'(t)\vec{j} + z'(t)\vec{k} \quad (6.3)$$

곡면 S 위의 일정한 점 P 를 지나는 모든 곡선의 접선벡터들은 하나의 평면을 형성하여, 곡면 S 의 접평면(tangent plane)을 구성하게 된다. 평면의 법선을 점 P 에서 곡면 S 의 곡면법선(surface normal)이라고 하고, 식(6.4)에 의해 곡면의 법선벡터가 얻어지게 된다.

$$\text{grad } f = \nabla f = \frac{\partial f}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial f}{\partial z}\vec{k} \quad (6.4)$$

식(6.2.3)을 t 에 관하여 미분한후, 연쇄법칙(chain rule)을 적용하면 식(6.5)을 얻는다.

$$\frac{\partial f}{\partial x} x' + \frac{\partial f}{\partial y} y' + \frac{\partial f}{\partial z} z' = (\text{grad } f) \cdot \vec{r}' = 0 \quad (6.5)$$

식(6.5)는 $\text{grad } f$ 와 접평면에서 모든 벡터 \vec{r}' 가 직교함을 뜻한다. 결국 표적 소부분에서 형상함수에 의한 법선벡터는 접평면과 수직한 벡터가 된다. 형상함수에 의한 표적 소부분의 표면은 이산화된 유한개의 점으로 구성되고, 각 점은 고유의 정규화된 법선벡터 \vec{n}_i 을 가지게 된다. 거울면 반사점을 구하기 위해 정의해야 하는 또

다른 벡터는 그 값에서 음원을 향하는 정규화된 벡터 \vec{n}_s 이다. 결과적으로 HL의 운동학적 모델은 주어진 조건에서 식(6.6)에서와 같이 두 벡터의 내적(dot product)이 1이 되는 거울면 반사점을 찾는 것이다.

$$\vec{n}_l(x_l, y_l, z_l) \cdot \vec{n}_s(x_s, y_s, z_s) = 1 \quad (6.6)$$

7. 결론

축소모형표적 반향실험은 해상 실험의 결과에 포함된 불확실성을 제어함으로써 반향음 형성 매커니즘이나 산란성분 해석에서 여러 장점을 가진다. 본 논문에서는 음향수조에서 외부형태 및 내부구조가 다른 네 종류의 표적에 대해 음향산란 실험을 하였고, 실험자료를 분석하여 그 결과를 표적 형상을 고려한 표적신호 합성모델 개발에 적용하였다.

1) 축소모형표적 반향실험

축소모형표적의 음향산란 신호는 자세각, 음원의 제원, 표적의 재질 그리고 내부의 구조 및 상태 등에 의해서 변화한다. 축소모형표적 반향실험은 CW 펄스형태의 중심 주파수 420 kHz, 펄 지속시간 36 μ sec 인 산란이론에서 ka 값을 물리광학 영역 또는 기하광학 영역으로 조정하여 실 표적의 음향환경과 유사한 실험 조건을 음향수조에서 재현한다.

2) 축소모형표적 반향실험 자료의 분석

실험에 있어서 매개변수 ka와 반향음 성분의 관계는 ka가 200에서 1300의 범위를 가지는 기하광학 영역으로 거울면 반사가 대부분의 반향음 성분으로 작용하고 있다. 시간영역에서 자세각별 반향준위의 분포에 있어 일정한 패턴을 가지는 것은 내부 구조물에 의한 제방사 효과가 적다는 것을 의미한다. 일반적으로 굽힘과 공진에 의한 Bloch 파는 반향신호에서 자세각별 표적신호 신호신장이 잘 정의되는 것으로 보아 실험 주파수 대역에서는 나타나지 않는 것으로 해석할 수 있다.

표적 HL 분석을 위한 송신펄스 형태는 광대역의 상대적으로 짧은 펄스여야 한다. 이로 인한 표적 반향음은 이산적으로 분포하는 표적 HL를 형성하게 된다. 또한 이산적으로 분포한 HL의 스펙트럼의 특성은 HL의 시지연에 의해 유발되는 맥동 형태의 스펙트럼을 가지게 된다.

시간영역에서 표적 HL을 분리하기 위해 표적신호의 충격응답을 계산하지 않고 표

적 반향음의 정합필터 응답을 사용하였는데, 그 이유는 실험에 사용된 신호가 상대적으로 협대역이었기 때문에 충격응답에서 원하는 만큼의 시간 해상도를 얻을 수 없었기 때문이다. 정합필터 응답의 경우 입사신호를 정합필터로 사용하여 표적 반향음에 포함된 잡음을 제거할 수 있어 계산 결과로서 뚜렷한 형태의 거울면 반사 성분을 얻을 수 있었다.

3) HL의 특성변수 도출과 자료기지화

표적 HL의 특성변수는 표적의 운동학적 정보와 신호처리 정보의 상호관계를 이용해서 획득된다. 특성변수 도출 방법은 주어진 음향수조에서 음원과 표적의 배치와 표적의 크기를 입력정보로 하여 각 표적 소부분에서의 시지연을 계산하고, 계산결과를 정합필터 응답과 매칭시키는 방법을 사용하였다. HL은 고정 HL과 가변 HL로 나누어 특성변수를 도출하였기 때문에 주어진 축소모형표적에 대해 충실한 산란체 해석이 가능하다.

표적의 각 자세각에 따라 정리된 자료기지를 사용하여 HL의 방향성 평가한다. 곡률 반경의 변화가 적은 선수부나 전망탑의 경우 일정한 방향성을 가지고 있었으나, 곡률 반경의 변화가 심하고 입사각에 따라 법선벡터의 변화폭이 많은 방향타나 프로펠러에서는 불규칙한 방향성을 보였다.

특성변수 도출과 정량화 과정을 통해 얻어진 자료기지는 표적신호 합성의 기초 자료가 된다. 거울면 반사를 가정한 자료기지의 타당성을 증명하기 위해 자료기지를 사용하여 합성된 표적신호 자료와 실제 표적신호와의 상관성을 계산하였으며, 그 결과 자세각별 상관계수가 0.8에서 1 미만의 충실한 값을 얻을 수 있었다.

4) 표적 형상을 고려한 표적신호 합성

실험자료의 분석 결과에 의해 거울면 반사가 반향음 에너지의 대부분을 구성한다는 것을 알 수 있다. 거울면 반사는 표적의 형상에 기인하는 반향음 성분이기 때문에 표적신호 합성모델 개발에 있어 형상에 대한 고려는 필수적이다. 표적 형상을 이용한 합성된 표적신호는 실 표적신호에서 발생하는 가변 HL 및 점멸 HL 효과를 시뮬레이션에 반영하게 되고, 표적 HL의 추이와 자세각에 의한 가변적인 거울면 반사점의 위치를 주어진 음향환경에 따라 on-line으로 표적신호를 합성한다.