

## 기하광학영역에서의 능동소나 표적신호합성

### Target Scattering Echo Simulation for Active Sonar System in the Geometric Optics Region

신기철\*, 박재은\*, 김재수\*\*, 최상문\*\*\*, 김우식\*\*\*  
(Kee-Cheol Shin\*, Jae-Eun Park\*, Jea-Soo Kim\*\*, Moon-Sang Choi\*\*\*, Shik-Woo Kim\*\*\*)

\*한국해양대학교 대학원, \*\*한국해양대학교 해양시스템공학부, \*\*\*국방과학연구소  
(접수일자: 2000년 10월 27일; 수정일자: 2001년 1월 10일; 채택일자: 2001년 1월 26일)

능동소나 시스템에서 표적신호의 근거리 정보가 중요해짐에 따라, 표적 음향산란 신호의 고유한 특성을 분석하기 위해 실험적인 방법과 시뮬레이션 기법이 사용된다. 본 논문에서는 표적신호 합성을 위해 축소표적 반향실험을 수행하였고, 자료의 분석 결과 축소표적의 음향산란은 거울면 반사의 영향이 큰 것으로 분석되어, 표적신호 합성에서 기하광학이론을 응용하였다. 복잡한 형태의 표적을 여러 표본형상으로 분리하고, 각 표본형상의 기여도를 신호의 위상과 강도를 줌으로써 계산하였으며, 표적신호 합성모델의 검증을 위해 실제 축소표적 실험 결과와 비교하였다.

**핵심용어:** 기하광학이론, 음향산란, 거울면반사, 축소표적, 능동소나

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.2)

Since the near field information of target signal is important in the development and verification of active sonar system, experimental method and simulation technique are widely used in order to analyze the detail characteristics of target scattered echoes. Therefore, in this paper, the scale target experiment is performed to develop and improve the target signal simulation model. Since the experimental results show that the specular reflection is the major component among scattering mechanisms, the target signal simulation model based on the Geometric Optics Theory (GOT) is developed. Complex target is separated into simple shapes, known as canonical shape. The contribution from individual canonical shapes are summed with proper phase and amplitude to produce the target strength of the whole complex body. Simulated target signal is compared with the experimental results and discussed.

**Keywords:** GOT, Acoustic scattering, Specular reflection, Scale target, Active sonar

**Ask subject classification:** Underwater acoustics (5.2)

## I. 서론

최근의 표적탐지 알고리즘의 추세는 TMA (Target Motion Analysis)와 능동 표적분류 (active target classification) 및 ACM (Acoustic Counter Measure)의 식별을 위해 표적의 운동을 고려한 표적신호의 위상, 신호의

신장 (pulse elongation), 도플러 등의 특성파악이 원거리뿐만 아니라 근접거리에서도 요구되고 있다. 표적신호 합성모델은 소나체계 및 알고리즘 개발시에 가상 표적의 역할을 수행하게 되고, 개발된 소나의 성능평가 및 소나 운용자의 훈련에 필수적인 요소이므로 수중음향 측면에서 많은 연구가 이루어지고 있다[1-3].

표적신호 합성의 연구대상은 크게 음향변환자모델, 환경모델, 표적모델로 구성된다. 일반적으로 표적모델은 수 치계산이 용이한 HL (HighLight) 모델이 사용되고 있

책임저자: 신기철 (jskim1@hanara.kmaritime.ac.kr)  
606-791 부산광역시 영동구 동삼동  
한국해양대학교 대학원 해양개발공학부  
(전화: 051-410-4979; 팩스: 051-404-3538)

으나, 표적에 대한 HL의 분포와 강도에 대해서는 이론적인 정리가 미비한 상태이다.

본 논문에서는 표적모델의 개발을 위해 2차에 걸쳐 음향수조에서 축소표적 음향산란실험을 수행하였고[4,5], 분석 결과 표적 형상에 의한 거울면 반사 (specular reflection)의 영향이 큰 것으로 분석되어, 이러한 결과를 표적 신호 합성에 적용하기 위해 표적 형상의존 HL모델을 사용하였다. 형상의존 HL 모델은 기하광학이론 (Geometric Optics Theory: GOT)을 토대로 하고 있으며, 기하확산계수 (Geometric Spreading Factor: GSF)에 의해서 HL의 산란강도를 결정한다. 본 논문에서는 기본적인 여러 구성 모델과 표적 형상의존 HL모델에 의한 합성모델을 개발하고, 합성된 표적신호를 음향수조에서의 축소표적 실험의 결과와 비교 및 검증하였다.

## II. 기하광학영역에서의 표적신호 합성 이론

능동소나 시스템의 표적의 음향산란 현상에서 이론적인 해와 실제 측정 결과와의 관계는 송신신호의 파수  $k$ 와 표적의 특징적인 길이 (characteristic length)  $a$ 로 표시되는  $ka$ 로 표현된다.  $ka$  값의 범위에 따라 그림 1과 같이 4개의 음향산란영역으로 분류하며, 기하광학영역은 대략  $ka$ 가 100이상의 값을 갖는 영역이며 그 해는 음선이론 (ray theory)에 의해 구해진다[6].

축소표적 음향산란실험은 중심 주파수 420 kHz를 사용하였으며, 표적모델의 크기에 따라 결정되는 음향산란 영역은  $200 < ka < 1300$ 으로 기하광학영역 실험에 해당한다. 축소표적 실험 결과[4,5] 및 기존문헌[6,7]에 의하면, 기하광학영역에서 표적신호 형성과정과 산란강도에 있어 가장 강인한 파성분은 거울면 반사이다. 그림 2와 같이 음원에 의해서 방사된 음향에너지가 표적의 표면에 입사하였을 때, 표적의 국부적인 표면에서 반사된 음향에

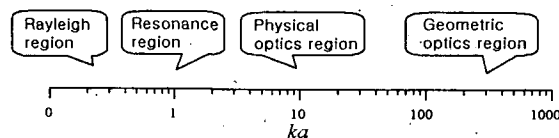


그림 1. 표적의 음향산란현상  
Fig. 1. Acoustic scattering of a target.

너지는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$p(R) = p_i(Q) A(r_1, r_2) V \exp(-ikr_2) \quad (1)$$

여기에서,  $p(R)$ 은 수신된 음압의 크기,  $p_i(Q)$ 는 점  $Q$ 에 입사된 음압의 크기,  $A(r_1, r_2)$ 는 기하확산계수의 크기이고,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 각각 점  $S$ 와 점  $Q$ 사이의 거리와 점  $Q$ 와 점  $R$ 사이의 거리를 나타낸다.  $V$ 는 표면의 반사계수이고,  $k$ 는 파수이다. 지수항은 점  $Q$ 와 수신기 사이의 위상차를 나타낸다.

본 연구에서는 송수신 위치가 동일한 단상 (monostatic)을 다루므로, 식 (1)에서 기하확산계수  $A(r_1, r_2)$ 는 점  $P$ 에서 반사된 신호만이 수신되므로 ( $r_1 = r_2 = r$ ), 다음과 같이 표현된다[부록 참조].

$$A(r_1, r_2) = \frac{1}{2} \left[ \left( 1 + \frac{r}{a_h} \right) \left( 1 + \frac{r}{a_v} \right) \right]^{-1/2} \quad (2)$$

여기에서,  $a_h$ 와  $a_v$ 는 각각 3차원 표적의 수평과 수직 주 곡률반경을 나타낸다.

표적의 반사계수  $V$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$V = \frac{Z - \rho c / \cos \theta}{Z + \rho c / \cos \theta} \quad (3)$$

여기에서,  $Z$ 는 표적 표면의 임피던스 (impedance)이고,  $\rho$ 와  $c$ 는 각각 매질의 밀도와 음속이며,  $\theta$ 는 입사각이다.

## III. 표적신호 합성모델

### 3.1. 음향 변환자 모델

음향변환자 모델은 음원준위, 핑의 지속시간, PRI (Ping Repetition Interval)와 음향변환자와 표적 HL의 기하학

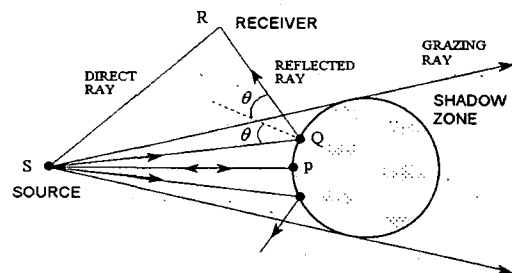


그림 2. 표적의 거울면 반사  
Fig. 2. Specular reflection by the target.

적 위치에 따른 빔패턴의 가중치를 계산한다. 능동소나 시스템에서 송·수신시 빔패턴은 사각평면배열에 의해서 주어지는 식 (4)를 사용한다.

$$B(\theta, \phi) = \text{sinc}\left(\frac{L_x}{\lambda} \sin \theta\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{L_y}{\lambda} \sin \phi\right) \quad (4)$$

여기에서,  $L_x$  와  $L_y$  는 사각평면배열의 각 변의 길이이고,  $\lambda$  는 파장이다. 축소표적 실험의 결과와 비교하기 위한 빔패턴은  $L_x/\lambda$  와  $L_y/\lambda$  를 송신시 3.5와 수신시 2로 하여 실제 빔패턴에 근사시킬 수 있으며, 송·수신 빔패턴의 3 dB 유효 빔폭은 각각 15°와 25°이다.

### 3.2. 환경 모델

해양에서의 음향환경은 해양 환경변수에 따라 변화성이 크다. 해양의 환경변수로는 수온과 염분에 따라 수층의 음속분포, 해저의 구성물질에 따른 저질상태, 바람에 의한 해수면의 변화와 이로 인한 공기방울의 형성 및 산란체로 작용하는 부유생물의 분포 등이 있다. 표적신호 합성에서 중요한 환경요소는 기하학적 확산과 흡수에 의한 전달손실이며, 이를 정확히 예측하는 것이 합성된 표적신호의 신뢰성과 관계가 있다. 기하학적 확산손실은 음원에서 방사된 음파의 전달경로에 의존하기 때문에 음속분포에 따른 고유음선을 예측하는 것이 필수적이다. 축소표적신호 합성에 적용된 음향환경은 청수와 제한된 크기의 음향수

조이기 때문에 깊이에 따른 음속분포는 일정하며 또한 흡수손실에 의한 영향도 적다고 가정할 수 있으므로 고유음선은 직선경로에 의한 단일 음선으로 제한한다.

### 3.3. 표적 모델

#### (1) 표적 형상의존 HL 모델

표적모델에서 표적은 표본형상으로 구성되며 각 부분에 대한 형상은 수학적으로 표현되고, 수치적으로 이산화된다. 표 1은 축소표적을 표본형상으로 분리하여 형상함수로 표현한 것이다. 그림 3(a)의 표적은 표본형상에 의한 조합 표적이고, (b)는 표본형상들로 분리하여 도시한 것이다. 표적 표면의 격자점들은 가상의 HL 점을 구성한다.

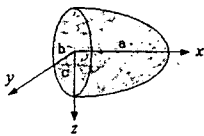
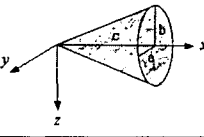
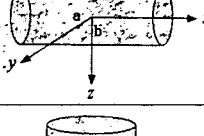
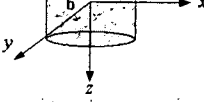
#### (2) 표적 HL의 운동학적 모델

표적의 형상에 의한 거울면 반사점은 음원과 표적의 배치와 자세각에 따라 그 위치가 가변적이다. 주어진 음원과 표적의 배치에서 형상함수는 각 격자점에서 정의되는 법선 벡터장을 구성한다. 임의의 격자점에서의 법선벡터는 그 점에서 음원을 바라보는 벡터와 일치될 수 있으며, 일치된 점이 존재한다면 결국 이 점이 형상함수에 의해서 주어지는 거울면 반사점이 된다. 그림 4에서와 같이 곡면의 법선벡터는 식 (5)로부터 얻어진다.

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{k} \quad (5)$$

표 1. 축소표적의 표본형상과 형상함수

Table 1. Canonical shapes and form functions of scale target.

| Sub-structure | Sketch  | Form Function   |
|---------------|---|---|
| Bow part      |  | $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ |
| Stern part    |  | $\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = \frac{x^2}{c^2}$     |
| Hull part     |  | $\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$                   |
| Conning tower |  | $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$                   |

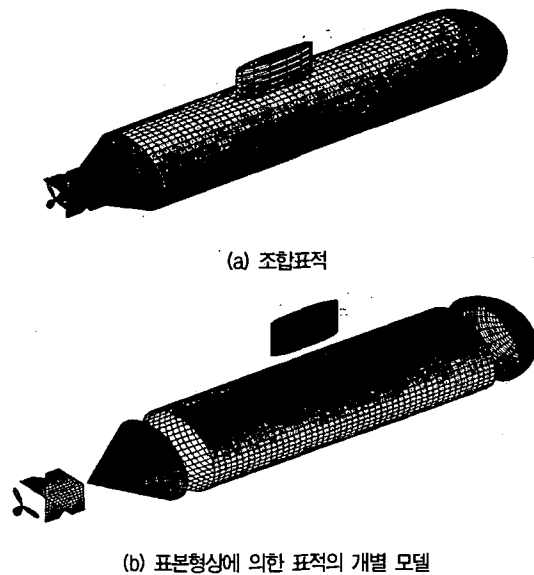


그림 3. 표적 모델 (a) 조합표적 (b) 표본형상에 의한 표적의 개별 모델

Fig. 3. Target model, (a) simulated model, (b) model separated by canonical shapes.

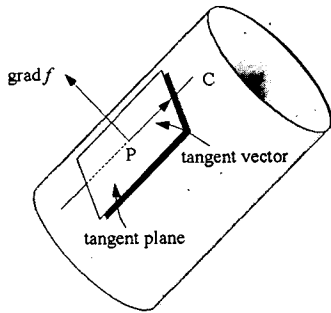


그림 4. 원통형상의 법선과 접선벡터  
Fig. 4. Normal and tangential vector on cylindrical shape.

표본형상의 표면은 이산화된 유한개의 점으로 구성되고, 각 점은 형상함수에 의해서 유일하게 정의되는 고유의 정규화된 법선벡터  $\vec{n}_i(x_i, y_i, z_i)$ 를 가진다. 여기에서  $x_i, y_i, z_i$ 는 표적 고정 좌표계에서 가상 HL의 위치를 나타낸다. 거울면 반사점을 계산하기 위해 정의되는 또 다른 벡터는 그 위치에서 음원을 향하는 정규화된 벡터  $\vec{n}_s(x_i, y_i, z_i)$ 이다. 운동학적 모델은 주어진 조건에서 식 (6)에서와 같이 두 벡터의 내적(dot product)이 1이 되는 거울면 반사점을 찾는 과정이다.

$$\vec{n}_i(x_i, y_i, z_i) \cdot \vec{n}_s(x_i, y_i, z_i) = 1 \quad (6)$$

### 3.4. 표적신호 합성 과정

복잡한 형상을 가진 표적에 대한 표적신호 합성 과정은 위에서 설명한 여러 모델의 조합으로 구성된다. 예를 들어, 잠수함의 경우에는 선체 구조물의 형상과 일치하거나 유사한 일련의 원통형 구조물, 썩기 구조물, 평판 등에 의해 외형 표적모델을 구성하여 자세각별 거울면 반사를 정의할 수 있다. 전체적인 표적신호 합성 과정은 그림 5와 같다. 표적신호는 각 HL의 시간지연(time delay) 위치에 반사강도와 송신신호를 중첩하게 되며, 그 과정은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{j=1}^N R_j \delta(t - t_j) \otimes s(t) \quad (7)$$

여기에서  $R_j$ 는  $j$ 번째 HL에서의 반사강도로 기하학적 확산 손실과 기하확산계수, 반사계수 및 송수신 빔 가중치를 포함한다.  $s(t)$ 는 송신신호를 나타내며,  $t_j$ 는  $j$ 번째 HL의

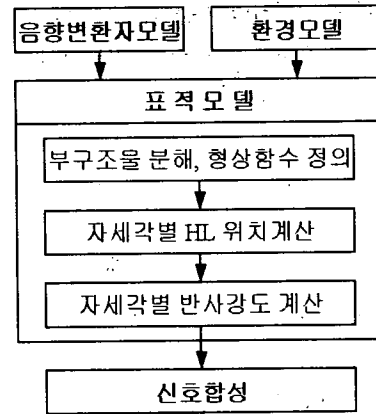


그림 5. 표적신호 합성 과정  
Fig. 5. The procedure of target scattering echo simulation.

수신기까지의 시간지연이고,  $\otimes$ 는 convolution 관계를 나타낸다.

### 3.5. 축소표적신호 합성 결과

기하광학영역에서 거울면 반사가 중요하다라는 사실은 해양환경에서 소나와 표적의 자세각 및 표적의 표본형상에 의해 음선의 경로와 산란강도가 가변적임을 보여준다. 표본형상으로 구성되는 표적모델은 표적의 소부분을 독립된 단일 객체로 고려함으로써 3차원 표적에 대해 각 표본형상에 따라 효율적인 가변 HL 배치와 HL 수를 정의할 수 있다. 또한 운동학적 모델에서 음원과 표적의 운동 및 자세각과 표본형상에 의해서 변화하는 HL 위치를 계산할 수 있다. 그림 6은 실제 신호와 합성신호를 비교하기 위해 표적의 자세각을 정의한 것이다.

표적신호 합성에 사용된 송신신호는 중심주파수 420 kHz의 톤 버스트(tone burst)파로 펄스의 길이는 36  $\mu$ sec 이다[4]. 그림 7(a)는 표적의  $z_i$  축을 회전축으로 하여 5도 간격으로 회전시켜 획득한 실제 축소표적 신호로 시간영역에서 HL가 가시적으로 분리되며, 각 HL는 하나의 궤적을

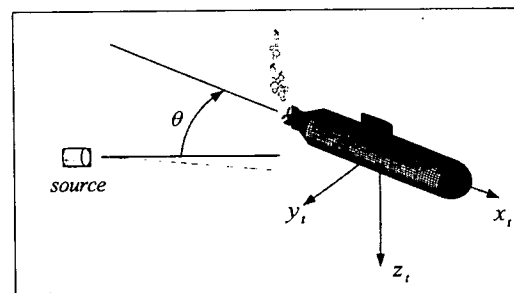


그림 6. 표적 자세각의 정의  
Fig. 6. Definition of target aspect angle.

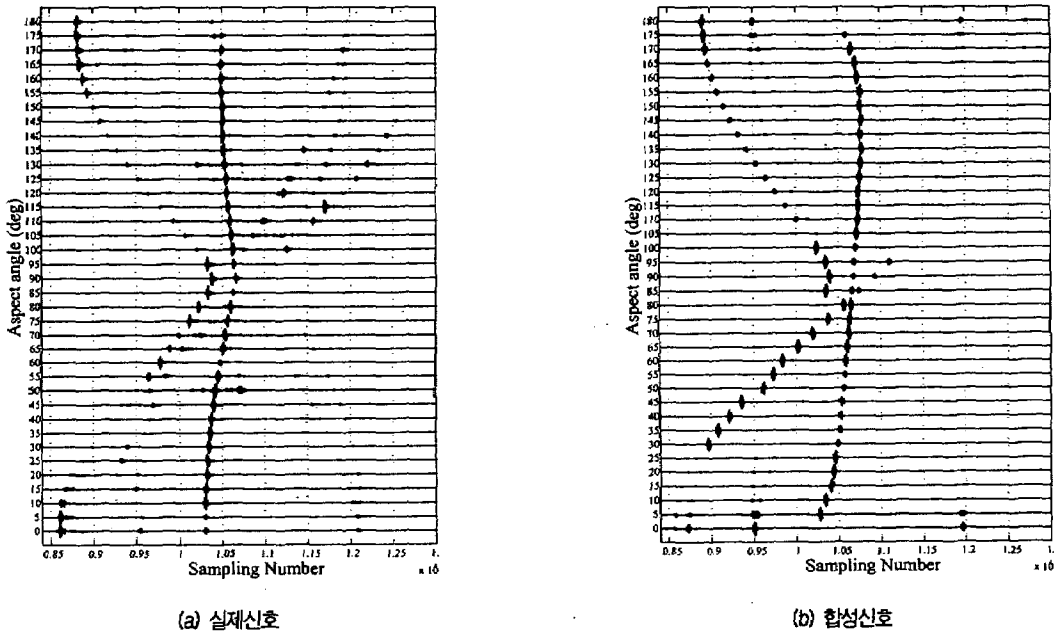


그림 7. 축소표적신호 (a) 실제신호 (b) 합성신호

Fig. 7. Echo simulation of scale target, (a) measured data, (b) simulated data.

구성하고 있다. 축소표적의 HL는 프로펠러, 선측, 선미, 방향타, 전망탑, 선수로 구성되는 것으로 분석되며, 소나의 LOS (line of sight)가 표적의 임의의 자세각에서 표적의 형상에 의해 가려지는 음영 (shadowed)HL의 특성을 보이고 있다. 그림 7(b)는 표적 형상의존 HL모델과 GOT에 의해서 계산된 축소표적신호 합성결과로서 실제 신호에서 나타나는 HL의 시간지연과 신호신장 현상이 발생하며, 자세각과 표적 형상에 의한 HL의 이동현상과 음영 HL 등의 효과가 반영됨을 보인다. 송신펄스의 길이가 변할 경우 수신신호는 각 HL의 시간지연 위치에 중첩되어 구성되며, 시간영역 측면에서 부정확한 시간지연으로 인해 시간 파형의 변형이 발생할 수 있으나, 전체적인 표적신호 에너지는 보존된다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 표적신호 합성에 있어 기하광학이론과 표적 형상의존 HL모델을 적용하여 3차원 표적에 의한 거울면 반사현상을 시뮬레이션하였다. 기존의 표적신호 합성모델들은 공간상을 점유한 표적에 대해 단순히 HL를 랜덤하게 분포시키고, 위치와 세기를 통계적으로 처리하거나 고정시키는 방법을 사용하였다. 그러나 개발된 표적신호 합성모델은 HL의 위치를 운동학적 특성과 표적 형상

을 고려하여 계산하고, 표적의 곡률반경에 의해 산란 강도를 결정하므로 HL의 위치 가변적인 특성과 음영 특성을 반영하여 최근 중요시되는 근거리에서의 표적신호의 특성을 충실히 반영한다.

#### 부록. 표적형상에 의한 기하확산계수 (GSF)

음원에서 방사된 음향에너지가 물체에 도달하게 되면, 표적의 형상에 따라 여러 방향으로 산란되고 이중 일부만이 수신기 방향으로 전파된다. 그림 A1은 표적의 형상에 의해서 발생하는 기하확산계수를 유도하기 위해 간단한 형태의 물체에 대해 변수를 정의한 것이다.

음원에서 단위거리 1m에서의 파의 입사강도 (incident intensity)를  $I_0$ , 물체에 의해서 반사된 강도 (reflected intensity)를  $I_1$  그리고 수신기에서의 강도 (received intensity)를  $I_2$  이라 한다면, 거리에 따라 파워는 보존되어야 하므로 다음의 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$I_0 \cdot 2\pi(1)\theta_1 = I_1 \cdot 2\pi R_2 \theta_1$$

$$I_0 / I_1 = R_2 \tag{A1}$$

$$I_1 \cdot 2\pi R_2 \theta_1 = I_2 \cdot 2\pi(R_3 - R_1)\theta_2$$

$$I_1 / I_2 = [(R_3 - R_1)\theta_2] / (R_2 \theta_1) \tag{A2}$$

위의 두 식을 이용하여 물체를 포함한 음원으로부터 수신기까지의 전 영역은 다음의 관계를 가지게 된다.

$$\begin{aligned} 10 \log (I_0 / I_2) &= 10 \log [(I_0 / I_1)(I_1 / I_2)] \\ &= 10 \log (I_0 / I_1) + 10 \log (I_1 / I_2) \\ &= 10 \log R_2 + 10 \log [(R_3 - R_1) \theta_2] / (R_2 \theta_1). \end{aligned} \quad (A3)$$

식 (A3)의 두 번째 항의  $\theta_2 / \theta_1$  를 물체의 곡률반경의 함수로 표현할 수 있으며, 이를 위해 그림 A1 (a)을 사용하면, 다음의 관계를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_2 &= 2(\theta_1 + \theta_3) - \theta_1 = \theta_1 + 2\theta_3 \\ \theta_2 / \theta_1 &= 1 + 2(\theta_3 / \theta_1) \end{aligned} \quad (A4)$$

여기에서  $R_2 \theta_1 = a \theta_3$  의 관계를 이용하면, 식 (A4)의  $\theta_2 / \theta_1$  를 거리와 곡률반경으로 표현된다.

$$\theta_2 / \theta_1 = 1 + 2(R_2 / a) \quad (A5)$$

식 (A3)의 두 번째 항의 로그항은 위 식을 사용하면 다음과 같다.

$$\frac{(R_3 - R_1) \theta_2}{R_2 \theta_1} = \frac{R_2 + e}{R_2} \left( 1 + 2 \frac{R_2}{a} \right) \quad (A6)$$

여기에서,  $e$ 는  $R_2 \theta_1 = a \theta_3$ 과 식 (A5)를 사용하고,  $\theta_2, \theta_3 \rightarrow 0$ 의 조건에서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e &= a(\sin \theta_3 / \tan \theta_2) \approx a(\theta_3 / \theta_2) \\ &= a / (2 + a/R_2) \end{aligned} \quad (A7)$$

식 (A6)에 식 (A7)을 대입하여 정리하면, 거리와 표적의 곡률반경으로 표현되는 항을 얻을 수 있다.

$$R' = 2 \left( 1 + \frac{R_2}{a} \right) \quad (A8)$$

위 결과를 식 (A3)에 대입하여 정리하면, 2차원 원통형 확산일 경우 다음과 같다.

$$10 \log R_2 + 10 \log 2(1 + R_2/a) \quad (A9)$$

$$10 \log 2 R_2 + 10 \log (1 + R_2/a) \quad (A10)$$

3차원 구형 확산일 경우에는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$20 \log 2 R_2 + 10 \log (1 + R_2/a_h)(1 + R_2/a_v) \quad (A11)$$

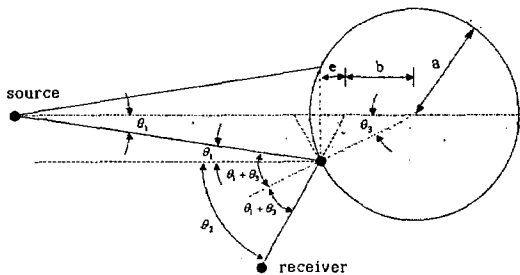
여기에서  $a_h$ 와  $a_v$ 는 3차원 물체의 수평과 수직 주 곡률반경이다.

식 (A11)에서 1항은 자유공간 (free space)에서의 기하학적 확산에 의한 손실을 나타내며, 2항은 물체 형상에 의해서 발생하는 에너지의 확산에 의한 손실이다.

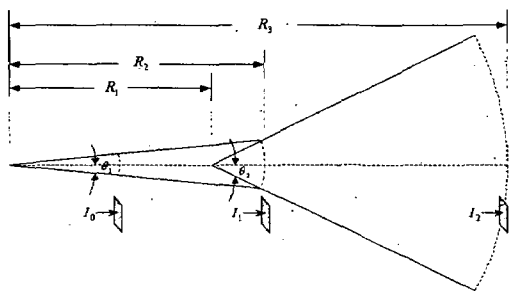
기하확산계수는 물체의 형상에 의한 효과와 물체에서 반사된 신호가 수신기에 수신될 때까지의 효과를 포함한 계수로 정의하며, 단상태인 경우  $R = R_2$ 로 놓으면 기하확산계수 GSF는 식 (A12)와 같이 표현된다.

$$A(R_1, R_2) = \frac{1}{2} \left[ \left( 1 + \frac{R}{a_h} \right) \left( 1 + \frac{R}{a_v} \right) \right]^{-1/2} \quad (A12)$$

해석적으로 계산된 GSF  $A$ 는 표적의 형상의 곡률반경이 유한한 값을 가지는 경우에 사용 가능한 식이다. 그러나 평판의 경우 주 곡률반경은 무한대이기 때문에 평면 반사가 되어 전달손실은  $20 \log 2 R$ 로 거리에 의한 효과만이 남게된다. 일반적으로 위 식을 적용하기 위해서는 기하광학영역 즉, 파장과 곡률반경의 관계를 나타내는  $ka$ 가 100 이상이어야 한다. 이 값 이하의 영역에서의 표



(a) 변수의 정의



(b) 물체에 의한 음장

그림 A1. 2차원 곡면에서의 거울면 반사  
(a) 변수의 정의 (b) 물체에 의한 음장  
Fig. A1. Specular reflection on the 2-dimensional curved surface, (a) definition of variables, (b) acoustic field by an object.

적에 의한 음향산란 현상은 반사뿐만 아니라 회절현상이 중요한 반향음 형성과정으로 작용하므로 완전한 음향산란 현상을 설명할 수 없다.

### 참고 문헌

1. S. G. Chamberlin and A.M. Berlinsky, "Coherent Target and Environmental Modelling for Torpedo Terminal Homing Simulation," *Electronic Progress*, Vol. XXIV, No. 1, Spring, pp. 19-22, Raytheon Company, 1982.
2. S. G. Chamberlin and A.M. Berlinsky, "Coherent Target and Environmental Modelling for Torpedo Terminal Homing Simulation," *Electronic Progress*, Vol. XXIV, No. 1, Spring, pp. 19-22, Raytheon Company, 1982.
3. J. C. Bol, "Some Developments in Simulating SONAR Targets," UDT Conference Proceedings, pp. 637-642, London, England, Oct, 1988.
4. 신기철, 김재수, 김우식, 김원호, 김용연, "수중 축소표적의 음향산란에 관한 연구 - 실험과 분석", 한국해양공학회지 12 권 4호, pp. 92-100, 1998.
5. 주재훈, 신기철, 김재수, "표적신호 음향산란 특징파라미터를 이용한 패턴인식에 관한 연구", 한국음향학회지 19권 4호, pp. 93-100, 2000.
6. 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.
7. S. I. Hayek, "Prediction of Echo Formation in Underwater Application," *In Proc. Int. Symp. on Underwater Acoustics*, 1981.
8. 표적 및 환경신호 변수 역추정 알고리즘 연구 Part II. 표적신호에 관한 연구, 국방과학연구소 연구보고서, 1998.
9. F. B. Jensen et al. *Computational Ocean Acoustics*, AIP Press, New York, 1994.