

Beam Tracing 기법을 이용한 수동 소나 센서의 수신 음압해석 프로그램 개발

권현웅¹·홍석윤^{1,2,†}·송지훈³·전재진⁴·서영수⁴
서울대학교 해양시스템공학연구소¹
서울대학교 조선해양공학과²
전남대학교 해양기술학부 조선해양공학전공³
국방과학연구소 제6기술연구본부 국방해양기술센터⁴

Development of Received Acoustic Pressure Analysis Program of CHA using Beam Tracing Method

Hyun-Wung Kwon¹·Suk-Yoon Hong^{1,2,†}·Jee-Hun Song³·Jae Jin Jeon⁴·Young-Soo Seo⁴
Research Institute of Marine Systems Engineering(RIMSE) of Seoul National University¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University²
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chonnam National University³
Agency for Defense Development⁴

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In order to predict acoustic pressure distributions by exterior incident wave at Cylindrical Hydrophone Array (CHA) sensor's positions, acoustic pressure analysis is performed by using beam tracing method. Beam tracing method is well-known of reliable pressure analysis methods at high-frequency range. When an acoustic noise source is located at the center of rectangular room, acoustic pressure analysis is performed by using both beam tracing method and Power Flow Boundary Element Method (PFBEM). By comparing with results of beam tracing method and those of PFBEM, the accuracy of beam tracing method is verified. We develop the CHA pressure analysis program by verified beam tracing method. The developed software is composed of model input, sensor array creator, analysis option, solver and post-processor. We can choose a model option of 2D or 3D. The sensor array generator is connected to a sonar which is composed of center position, bottom, top and angle between sensors. We also can choose an analysis option such as analysis frequency, beam number, reflect number, etc. The solver module calculates the ray paths, acoustic pressure and result of generating beams. We apply the program to 2D and 3D CHA models, and their results are reliable.

Keywords : CHA(수동 소나), Beam tracing method(빔 추적법), Ray path(레이 경로), Beam forming(빔 형성)

1. 서론

현대 수중 무기체계에 있어 음파를 이용하여 상대방에 대한 정보 획득은 중요한 생존 능력 중의 하나이다. 이를 위해서 외부 입사파에 의한 소나돔 내부 음장 해석 및 송신 모드의 빔 형성이 필요하다.

일반적으로 저주파수 대역의 음향장 해석에 사용되는 방법으로 BEM과 FEM이 있고, 고주파수 대역에서는 통계적 에너지 해석법과 파워흐름해석법, 그리고 기하 음향학을 이용하는 방법이 있다. 그러나 BEM과 FEM의 경우 주파수가 증가할수록 해석하고자 하는 음향장 영역을 더 작은 요소로 모델링을 해야 하고 더 많

은 요소를 생성하게 된다. 이에 따라 해석시간이 증가하는 문제점이 발생한다. 그리고 주파수가 증가할수록 해석 오차를 또한 증가하기 때문에 중주파수 이상의 해석에서 신뢰도는 낮은 편이다. 그리고 통계적 에너지 해석법의 경우 하나의 영역에 대하여 하나의 대푯값만을 나타냄으로 공간에서의 변화를 제시할 수 없는 단점이 있고, 에너지를 변수로 하여 위상에 대한 정보가 없는 문제점이 있다. 그리고 파워흐름해석법의 경우 공간에서의 에너지 변화를 제시하지만 마찬가지로 위상에 대한 정보가 없는 문제가 있다. 이에 반해 위상을 고려한 레이 추적법은 효율적이고, 정확한 해를 제시한다고 알려져 있다 (Shin & Ih, 1998; De Geest & Garcea, 1995).

레이 추적 기법으로 음파를 이루는 각각의 레이 곡선을 추적하

는 방법과 콘(cone) 또는 삼각기둥 모양의 레이튜브를 추적하는 빔 추적법(beam tracing) (Krokstad, et al., 1968; Lewers, 1993; De Geest & Garcea, 1995)이 있고, 파동의 간섭 특성이 나타나는 중주파수 영역에서 적용하기 위해 위상을 고려한 레이 추적법 등이 있다 (Shin & lh, 1998). 레이추적법의 경우 레이 곡선 하나하나를 고려하여 계산하기 때문에 음장내부의 수신점을 놓치지 않도록 충분히 많은 레이 개수가 필요하다. 반면 빔 추적 기법의 경우 추적해야 할 레이의 개수를 줄임으로써 연산 횟수를 줄일 수 있다. 빔 추적법은 빔의 진행 경로를 결정하기 위하여 빔의 중심 레이를 추적하거나 빔의 가장자리 레이 면을 추적하는 방식이 있고, 매질에서의 전달 손실과 빔 단면적의 변화를 계산함으로써, 빔의 진행에 따른 에너지의 변화를 고려한다. 그리고 수신점(receiver)이 빔 쪽 안에 들어오면 그 지점에서의 에너지 기여도를 계산하는 방식이다. 일반적으로 해의 정확도는 거의 같지만 빔 추적법이 레이 추적법에 비해 계산시간이 절약되는 장점이 있다.

본 연구에서는 빔 추적법을 이용하여 수동 소나 센서에서의 음압 해석을 위한 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 모델 입력부, 센서배열 생성기, 해석기와 후처리로 구성되어 있다. 개발된 프로그램을 이용하여 2D와 3D 수동 소나에 대해 음장해석을 수행하였고, 해석된 음압을 이용하여 수신 모드인 빔 형성을 수행하였고, 가역성 원리를 이용하여 송신 모드에서의 신호의 입사각을 계산하였고, 해석시 입력한 각도와 동일한 각도에서 주요 로브(lobe)가 발생하는 것을 확인하였다.

2. 이론

2.1 음선 이론

음선 이론은 기하학적 이론을 바탕으로 음파의 전파현상을 해석하는 방법으로 주로 고주파수 대역에서 사용되며 다음과 같은 특성을 갖는다.

- 음속 변화에 의한 음파의 진행 경로는 스넬의 법칙(Snell's law)을 따른다.
- 경계면에서의 반사는 거울면 반사(Specular reflection)를 따른다.

음선 이론을 유도하기 위한 이차원 파동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \rho_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \rho_0 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서 c 는 음속, ρ_0 는 매질의 밀도이다.

2.2 빔 추적 알고리즘

빔의 진행 경로를 결정하기 위하여 빔의 중심 레이를 추적하였

다. 그리고 수신점(receiver)이 빔 쪽 안에 들어오면 그 지점에서의 에너지 기여도를 계산한다.

2.2.1 음원 모델

소나돔에 원거리에서 파가 입사하므로 평면파로 가정하였고, 입사파는 하나의 빔으로 가정하였다. 하나의 빔으로 시작할 경우 기하학적 모델에서 경계면에서 빔을 분할해야 하는 필요성이 발생한다. 이차원의 경우에는 공간상에 임의의 가상 직선(음원 면)을 만들고 이 직선을 균등 분할하여 각각을 하나의 레이 소스로 하고 그 쪽을 빔 쪽으로 정의한다. 초기 레이에는 이 음원 면에 수직인 방향으로 진행하며 모두 동일한 음압을 가지고 있다. 이때 경로 추적을 위한 빔의 중심은 빔 단면의 기하 중심으로 한다. 이차원 해석의 빔은 일정한 폭을 갖는 스트립(strip)으로 모델링 된다. 평면파는 진행하면서 빔의 단면적이 변하지 않고 평면 경계 요소에서의 반사 후에도 빔의 면적이 변하지 않기 때문에 빔 쪽은 항상 일정하다고 가정한다.

2.2.2 빔의 진행 및 반사

빔의 전파경로를 추적하기 위하여 빔의 중심레이를 추적하는 방법을 이용한다. 빔 내부의 모든 레이에는 축 레이가 부딪히는 면과 같은 면에서 모두 반사가 일어난다고 가정한다. 공간 내에서 레이는 장애물을 만날 때까지 직진하며 식(2)와 같은 간단한 직선 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$X = S + k\hat{i} \quad (k > 0) \quad (2)$$

여기서 X 는 현재 레이 좌표이고, S 는 소스의 좌표, \hat{i} 는 레이의 방향 벡터이고, k 은 레이의 진행 경로이다.

2.2.3 반사 경로 결정

레이는 경계면에서 거울면 반사(Specular reflection)를 하므로, 반사각은 입사각과 같으며, 반사된 레이는 반사점이 새로운 음향 소스가 되어 전파된다. 이때 반사된 레이의 진행 방향은 다음과 같다.

$$\hat{i}' = \hat{i} - 2(\hat{i} \cdot \hat{n})\hat{n} \quad (3)$$

여기서 \hat{n} 은 법선 벡터이다. 처음 단계를 통하여 입사하는 요소를 찾고 그 입사점이 X 일 경우 새롭게 그 점을 소스로 하여 \hat{i}' 방향으로 레이 입사를 하게 되고 그 방향에서 새로운 입사 요소를 찾는 과정을 거치게 된다. 새로운 레이식은 다음과 같다.

$$X' = X + k'\hat{i}' \quad (4)$$

2.2.4 수신점에서의 음압 계산

각각의 레이 곡선 하나씩을 추적하는 기법의 경우에는 공간상에서 수신점을 중심으로 2차원의 경우 직선 빔 폭을 갖고 3차원의 경우 사각형 빔 폭을 갖게 된다. 따라서 일정한 폭을 가진 레이가 소나로 입사하였을 경우 빔 폭이 모두 입사한다고 가정한다.

수신점에 기여하는 음압은 소스로부터 직접 도달하는 빔과 경계면에서 반사된 빔에 의해 입사하는 빔, 소나에 입사하였다가 반사 후 재입사하는 빔 등으로 구성된다.

빔이 진행하면서 위상의 변화는 빔의 이동거리와 반사면의 반사 특성에 따라 변하게 된다. 총 n 번 반사 후 소나에 입사한 레이의 음압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = P_0 \exp(-ikx_n) \prod_{i=1}^n R_i(\theta_i) \quad (5)$$

여기서 x_n 는 빔의 이동거리이고, $R_i(\theta_i)$ 는 i 번째 경계면의 반사계수이다. P_0 는 레이의 초기 음압이고, k 는 파수(wave number)이다.

2.3 송신 모드 빔 형성

송신 모드의 빔 형성을 통하여 신호가 어느 방향에서 발생했는지를 파악할 수 있다. 송신 모드에서의 빔 형성을 하기 위해서는 음원에 대한 정보들이 있어야 하기 때문에 직접적으로 송신 모드의 빔 형성을 하기가 쉽지 않다. 그러나 소나의 송신 모드와 수신 모드의 빔 패턴이 동일하다는 가역성 원리를 이용하면 간접적으로 송신 모드에서의 빔 형성을 할 수 있다. 총 N 개의 센서로 구성된 소나의 수신 모드 빔 형성은 다음과 같다.

$$BP(\theta) = \sum_{j=1}^n P_j e^{ik(x_j \cos \theta + y_j \sin \theta)} \quad (6)$$

여기서 BP 는 빔 형성, θ 는 입사각, P_j 는 j 번째 센서에서 계측된 압력 값이고, x_j 와 y_j 는 j 번째 센서의 x 와 y 좌표이다. 그리고 n 은 총 N 개의 센서 중 빔 형성에 사용된 센서의 개수이다. 2D의 경우 소나는 총 N 개의 센서들이 원의 형태를 이루고, 3D의 경우 실린더의 형태를 이루고 있다. 2D 빔 형성시 n 은 소나의 중심에서 j 번째 센서를 가리키는 벡터와 입사각 벡터와의 내각이 60° 이하인 센서들의 개수이고, 3D의 경우 실린더의 높이 방향에 수직인 면에 소나의 중심점과 j 번째 센서를 정사영 시켰을 때 정사영된 중심점과 j 번째 센서를 가리키는 벡터와 수평 입사벡터와의 내각이 60° 이하인 센서들의 개수이다.

3. 해석 프로그램

음선 이론을 바탕으로 수동 소나 센서에서의 음압해석을 위한

프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 모델 입력부, 센서배열 생성기, 해석 옵션, 해석기와 후처리기로 구성되어 있다.

3.1 모델 입력부

모델을 입력하기 전에 2D 해석을 위한 모델인지 3D 해석을 위한 모델인지를 선택하고 모델을 입력한다. 사용자의 편의성을 위하여 해석 모델은 대표적인 FEM(Finite Element Method) 모델링 프로그램인 Patran의 Fe 모델 파일인 bdf파일을 입력한다. Fig. 1은 해석 모델이 2D 인지 3D 인지 판단하고 bdf파일을 선택하는 창이다. Fig. 2는 2D 모델을 입력했을 때이다. 프로그램의 오른쪽 윗부분에는 각각의 EP(element property)별로 색과 번호가 명시되어 있다. Fig. 3은 3D 모델을 입력했을 때의 결과이다.

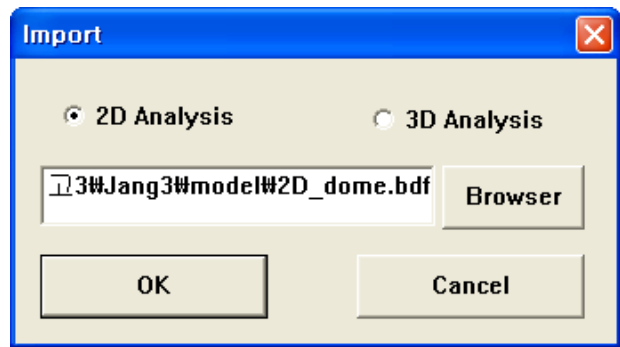


Fig. 1 Model input window

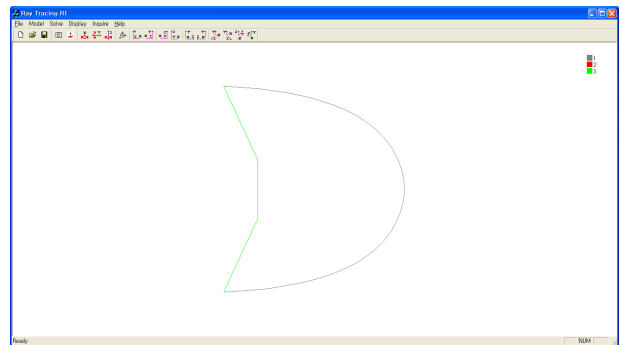


Fig. 2 2D model input

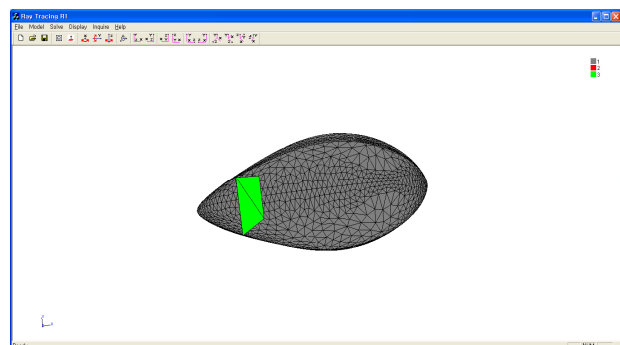


Fig. 3 3D model input

3.2 센서배열 생성기

센서배열 생성기는 Fig. 4와 같이 소나에 대한 정보를 입력받아서 자동으로 소나를 생성한다. 2D의 경우 센서의 중심점의 위치와 반경 그리고 센서들의 각도에 대한 정보를 입력하고, 3D 해석의 경우 축방향의 최저와 최고 위치 및 높이 간격을 입력한다.

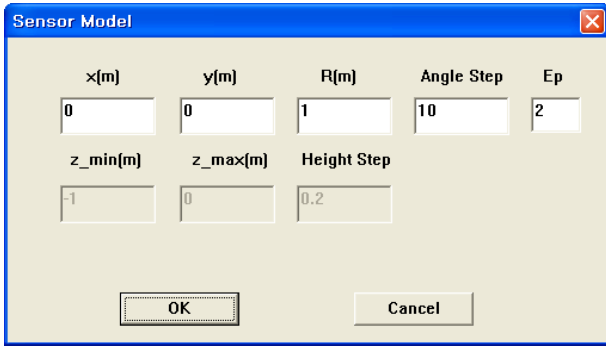


Fig. 4 Sonar information input window

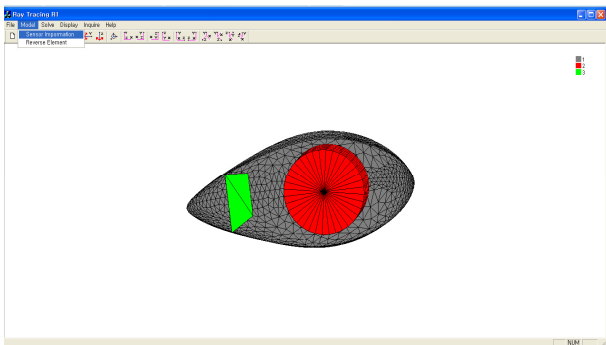


Fig. 5 Sonar model

3.3 해석 옵션

해석에 필요한 옵션을 선택한다. 해석하고자하는 주파수를 Frequency 창에 입력하고 2D 해석의 경우 수직 빔의 개수를 입력하는 창은 비활성화 되어 있고, 수평 빔 개수만 Beam Number 창에 입력한다. 3D 해석의 경우에는 Beam Number의 두 번째 창이 활성화 되고 그 창에 수직 빔의 개수도 같이 입력한다. Reflect Number 창에는 몇 번의 진행 과정을 거칠지를 선택한다. 다음으로 Window와 Sonar 창에는 각각의 Window와 Sonar에 대한 Ep(Element Property) Number들을 입력한다. Ep는 각 요소별 특성을 나타내는 것으로 사전에 Window와 Sonar에 대한 재질과 두께를 입력한다. 다음으로 파가 어느 위치에서 입사하는 지 결정한다. 2D 모델의 경우 수평각의 시작과 끝 그리고, 수평각 증가 각도를 입력한다. 3D 모델의 경우 추가적으로 수직각의 시작과 끝 그리고, 수직각 증가 각도를 입력한다. 그리고 각각의 요소의 투과 및 반사 계수 파일을 입력할 수 있다. 파일 입력이 없을 경우에는 투과 및 반사 계수 값을 1로 가정한다.

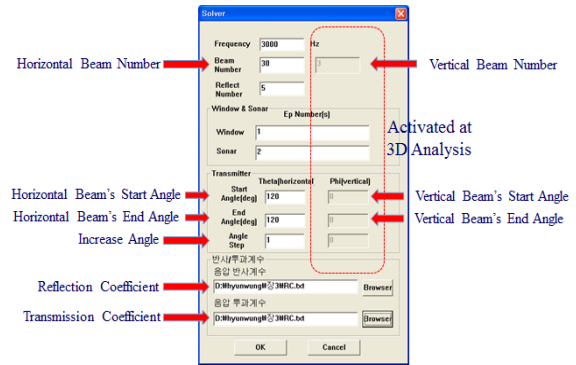


Fig. 6 Analysis option window

3.4 후처리기

해석을 수행한 뒤 Display의 Figure창을 클릭하면 왼쪽은 레이 경로에 대한 결과가 출력되고, 오른쪽 위에는 음압 결과가 출력되고, 오른쪽 아래에는 Beam forming에 대한 결과가 출력된다.

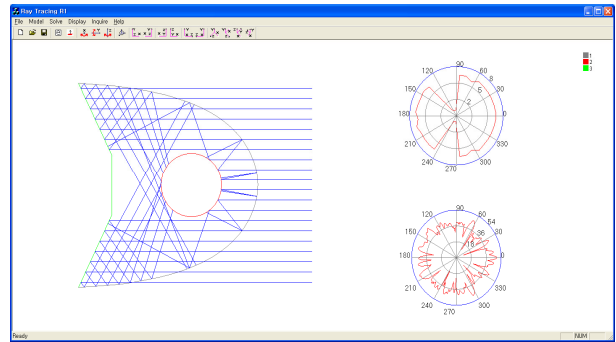


Fig. 7 Analysis result

4. 적용

개발 프로그램의 신뢰성을 확보하기 위하여 실내 공간에서 소음 에너지 분포를 파워흐름해석법과 비교하였다. 파워흐름해석법

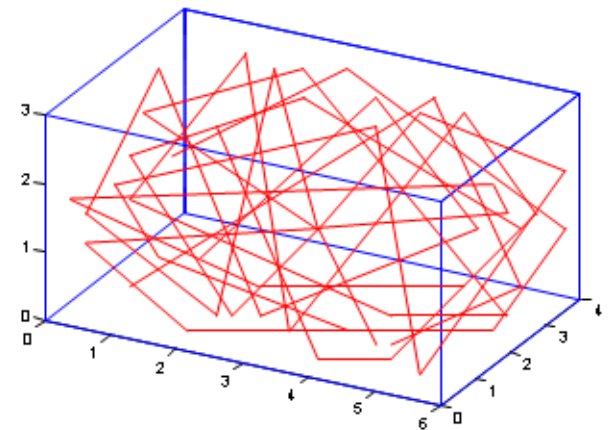
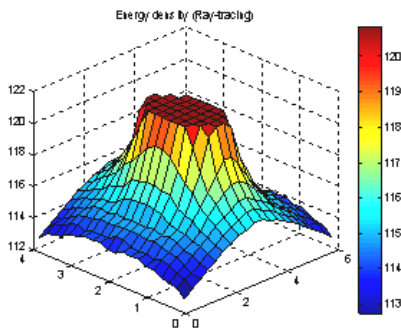
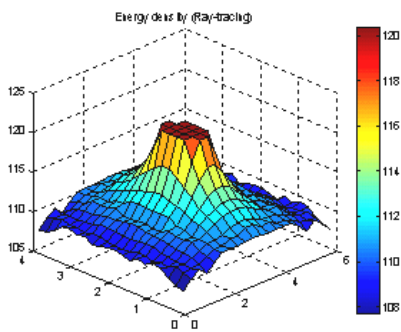


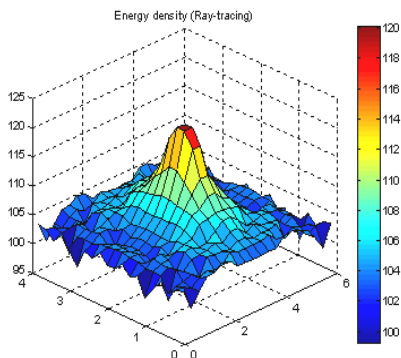
Fig. 8 The path of rays



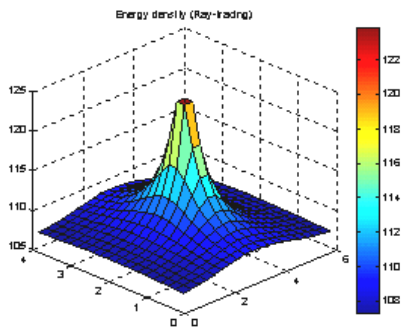
(a) Receiver radius : 1m



(b) Receiver radius : 0.6m



(c) Receiver radius : 0.3m



(d) Power Flow Analysis result

Fig. 9 Comparison energy distribution of ray tracing and PFA, (a) receiver radius : 1m, (b) receiver radius : 0.6m, (c) receiver radius : 0.3m, (d) Power Flow Analysis result

은 중고주파수 대역에서 신뢰성이 검증된 해석 기법이다. Fig. 8은 가로 6m, 세로 4m, 높이 3m인 직육면체 공간에 가운데 소음원이 존재할 때 레이의 진행 및 반사에 대해 나타내고 있다.

Fig. 9는 레이 빔의 개수를 1016개로 하고 반사를 6회 시켰을 때 수음점의 반경을 1m, 0.6m, 0.3m로 하였을 때의 소음 에너지의 분포 결과이다. 각 레이 빔의 개수에 따라 빔 폭이 정해지는데 빔의 개수가 적을수록 빔 폭은 증가하게 된다. 그리고 각 위치에서 신호를 계산하는 수음점의 반경 또한 클수록 계산에 사용되는 빔의 개수가 늘어나기 때문에 적절한 수음점의 반경이 필요하다. Fig. 9에서 보듯이 수음점의 반경이 1m일 경우 수음점에서 계산되는 빔의 개수가 늘어나기 때문에 높은 에너지 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 수음점의 반경을 줄일수록 에너지의 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있고, 점차적으로 파워 흐름해석법과 유사한 결과를 가지는 것을 확인할 수 있다.

파워흐름해석법과의 비교를 통해 레이 추적법의 신뢰성을 확보하였기 때문에 2차원 모델에 대해 음장분포를 해석하였다. Fig. 10은 2차원 해석 모델이다. 해석 모델은 여러 개의 센서들로 구성된 소나, 그리고 소나를 둘러싼 음향창, 소나를 통과한 신호들에 의한 반사를 위해 설치된 배플로 구성되어 있다.

Fig. 11은 주파수가 8kHz이고, 신호가 0도로 입사할 때 빔의 개수를 50개로 하였을 때의 센서 주위의 음장 분포와 빔 형성 결과를 나타낸다. 센서는 반경이 1m이고 1도 간격으로 총 360개로 구성되어 있다. Fig. 12-14는 빔의 개수를 150, 250, 350개로 하였을 때의 해석 결과를 나타낸다. 빔의 개수가 증가함에 따라 결과가 점점 수렴하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11-14는 배플에서의 반사계수의 값을 1로 하였을 때의 해석 결과로서, 음향창과 배플에서의 반사로 인하여 신호가 뒤쪽면에 더 많이 입사하게 되어 뒤쪽에서의 입력값이 앞쪽보다 더 높게 나타나고 있다. 이에 따라 빔 형성 결과 신호가 앞쪽 뿐만 아니라 뒤쪽에서도 입사하는 것처럼 결과가 나타나고 있다.

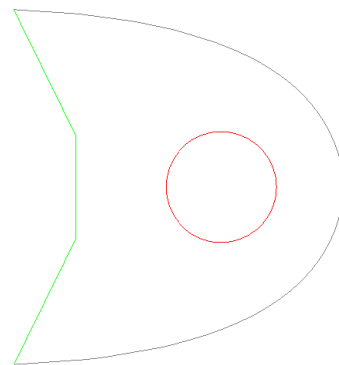
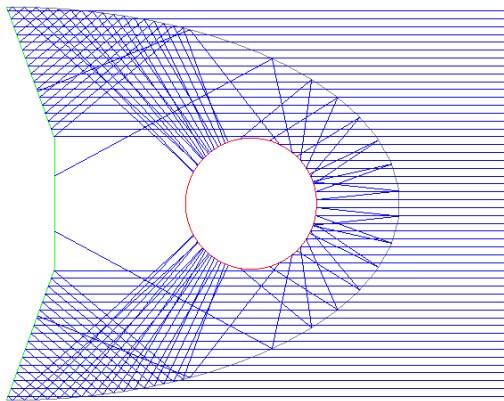
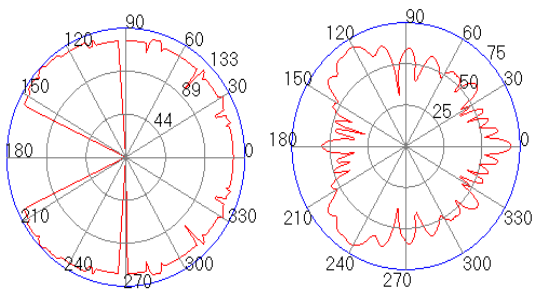


Fig. 10 Analysis model 2D

Fig. 11-14의 결과는 음향창에서 반사되고 배플에서 반사되어 들어오는 신호에 의한 값으로 배플에서의 흡음률을 조정함으로써 실제 입사한 각도 이외에서 발생하는 로브를 줄일 수 있다. Fig. 15-16은 주파수가 8kHz일 때, 배플에서의 반사계수 변화에 따른 입력과 빔 형성 결과를 나타낸다. 반사계수가 줄어들수록 110도와

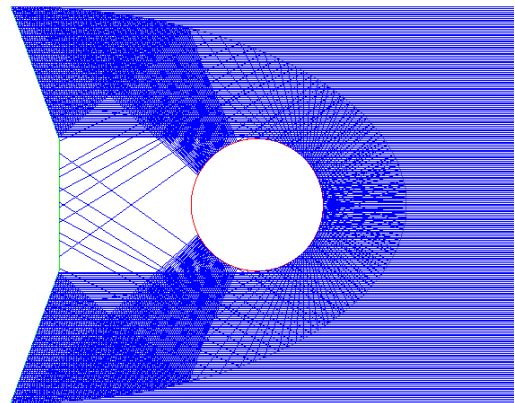


(a) Ray path

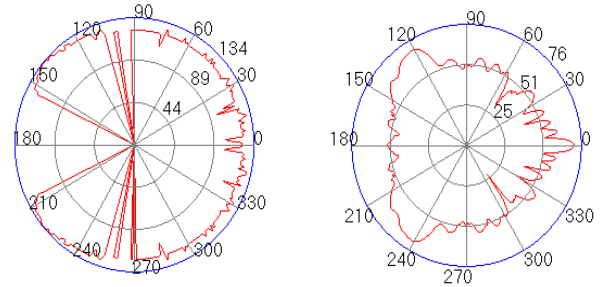


(b) Sensor pressure (c) Beam forming

Fig. 11 Result of beam tracing method after selecting 50 beams with 0 degree incident angle

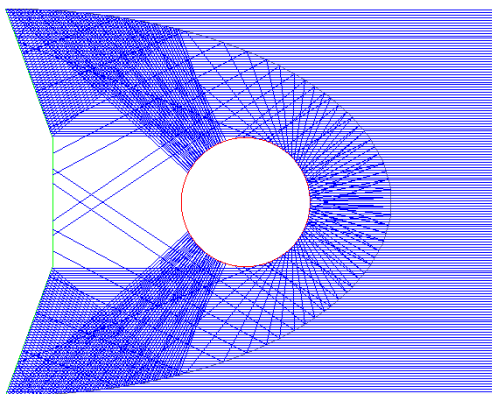


(a) Ray path

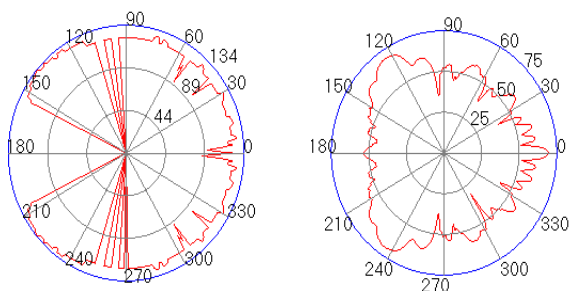


(b) Sensor pressure (c) Beam forming

Fig. 13 Result of beam tracing method after selecting 250 beams with 0 degree incident angle

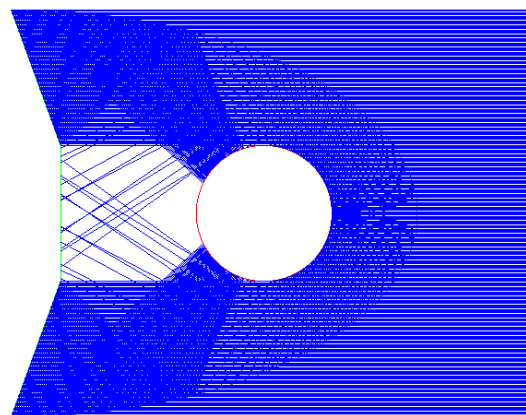


(a) Ray path

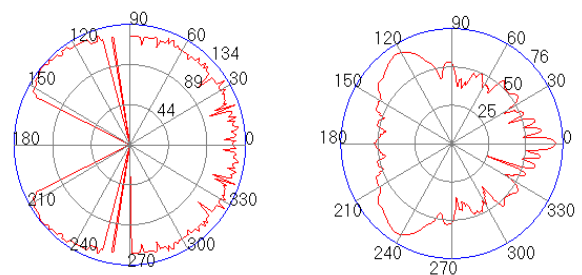


(b) Sensor pressure (c) Beam forming

Fig. 12 Result of beam tracing method after selecting 150 beams with 0 degree incident angle



(a) Ray path



(b) Sensor pressure (c) Beam forming

Fig. 14 Result of beam tracing method after selecting 350 beams with 0 degree incident angle

150도, 그리고 210도와 250도사이의 압력값이 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 이에 따라 빔 형성 결과도 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Table 1에서 살펴보면 반사계수가 1에서 0.5로 줄어들 경우 110도에서 150도에서는 5dB에서 13dB 가량 감소하는 것을 확인할 수 있고, 반사계수가 0.2로 줄어들 경우 반사계수가 1일 때에 비해 10dB에서 21dB 가량 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Table 2에서 살펴보면 120도에서 240도 사이에서 반사계수의 감소에 따라 빔 형성 값이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Acoustic pressure corresponding to reflecting coefficients for acoustic waves with 0 degree incident angle

Angle	R=1	R=0.5	R=0.2
110	125	118	113
120	126	121	116
130	126	114	106
140	132	119	111
150	126	115	107

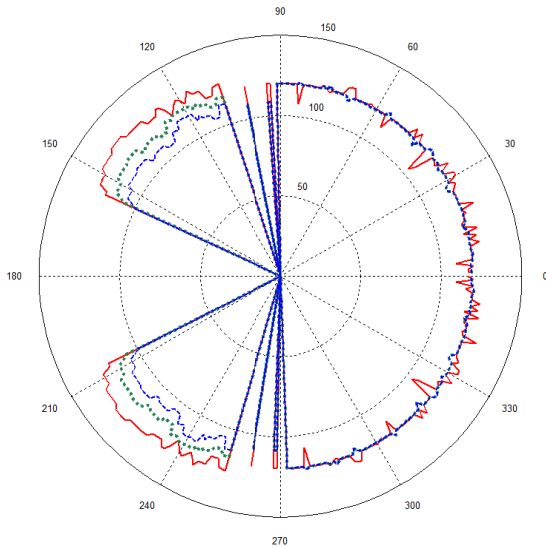


Table 2 Beam forming corresponding to reflecting coefficients for acoustic waves with 0 degree incident angle

Angle	R=1	R=0.5	R=0.2
120	69	60	55
130	68	56	49
140	64	47	35
150	57	46	40
160	49	41	30
170	46	27	19
180	53	46	38

Fig. 15 Acoustic pressure corresponding to reflecting coefficients for acoustic waves with 0 degree incident angle, — : R=1, - - - : R=0.5, - - - : R=0.2

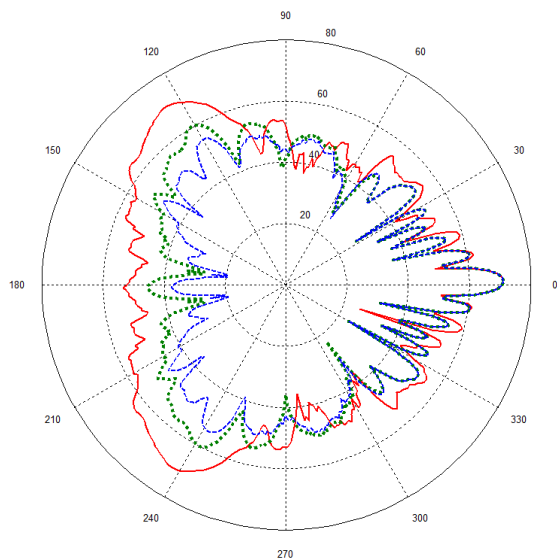
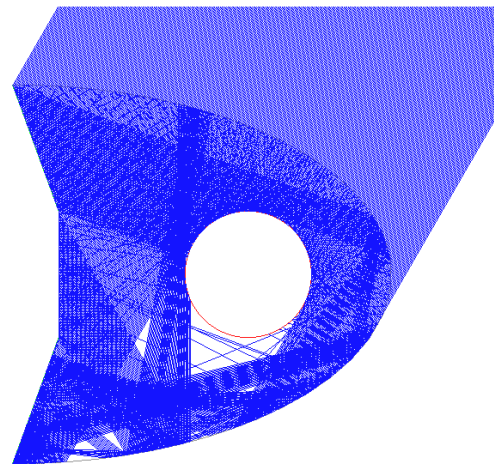
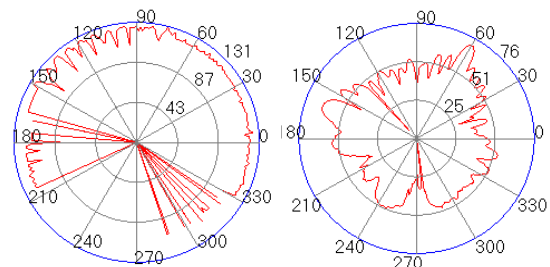


Fig. 16 Beamforming outer corresponding to reflecting coefficients for acoustic waves with 0 degree incident angle, — : R=1, - - - : R=0.5, - - - : R=0.2



(a) Ray path



(b) Sensor pressure (c) Beam forming

Fig. 17 Result of beam tracing method after selecting 350 beams with 60 degree incident angle

Fig. 17은 신호가 60도로 입사할 때의 센서 주위의 음장 분포와 빔 형성 결과를 나타낸다. Fig. 17은 주파수가 8kHz일 때, 배플에서의 반사계수의 값을 1로 하였을 때의 해석 결과이다.

Fig. 18-19는 배플에서의 반사계수 변화에 따른 압력과 빔 형성 결과를 나타낸다. 반사계수가 줄어들수록 150도에서 200도 사이의 압력값이 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 이에 따라 빔 형성 결과도 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Table 3-4에서 살펴보면 반사계수가 줄어들수록 입사각 이외의 압력값과 빔 형성 결과값이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

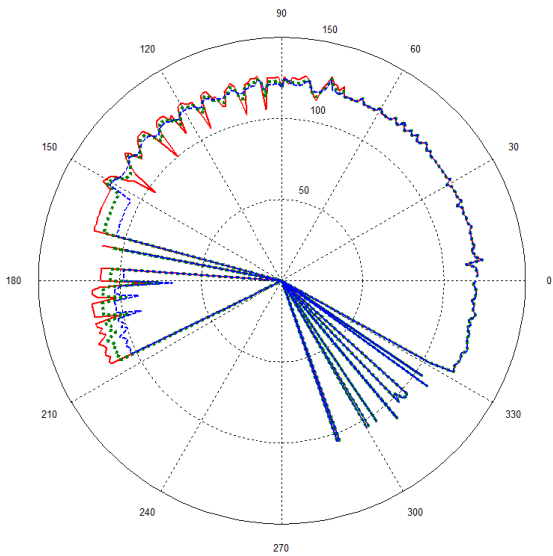


Fig. 18 Acoustic pressure corresponding to reflecting coefficients for acoustic waves with 60 degree incident angle, — : R=1, - - - : R=0.5, — — : R=0.2

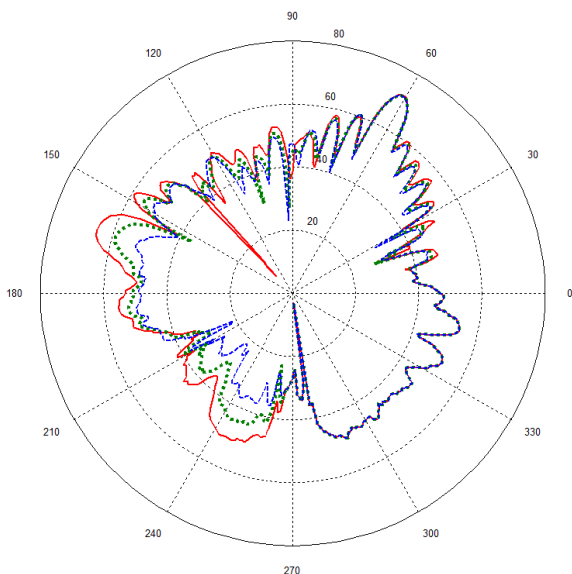


Fig. 19 Beam forming corresponding to reflecting coefficients for acoustic waves with 60 degree incident angle, — : R=1, - - - : R=0.5, — — : R=0.2

다음은 3D 모델에 대해 해석을 해보았다. Fig. 20은 주파수가 8kHz일 때, 평각 30도, 고각 0도로 입사할 때의 레이 경로와 센서 주위의 음압, 그리고 빔 형성 결과를 나타낸다. 빔 형성 결과에서 가로축은 평각을 나타내고, 세로축은 고각을 나타낸다. 입사각과 동일한 각도에서 빔 형성이 되는 것을 확인할 수 있다.

Table 3 Acoustic pressure corresponding to reflecting coefficients for acoustic waves with 60 degree incident angle

Angle	R=1	R=0.5	R=0.2
150	126	123	122
160	120	114	106
170	0	0	0
180	81	75	67
190	118	112	104
200	116	110	102

Table 4 Beam forming corresponding to reflecting coefficients for acoustic waves with 60 degree incident angle

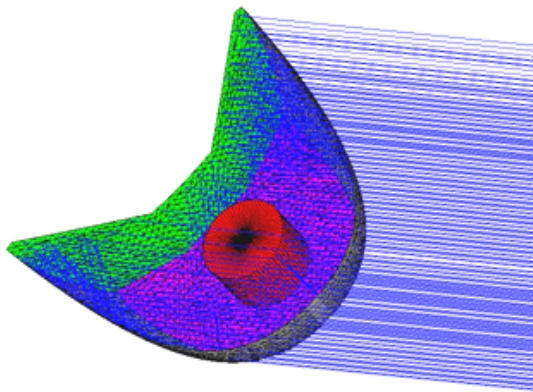
Angle	R=1	R=0.5	R=0.2
160	65	59	51
170	55	51	49
180	54	51	48
190	52	49	48
200	33	38	42
210	39	35	31
220	44	38	30
230	40	33	25
240	50	44	35

5. 결론

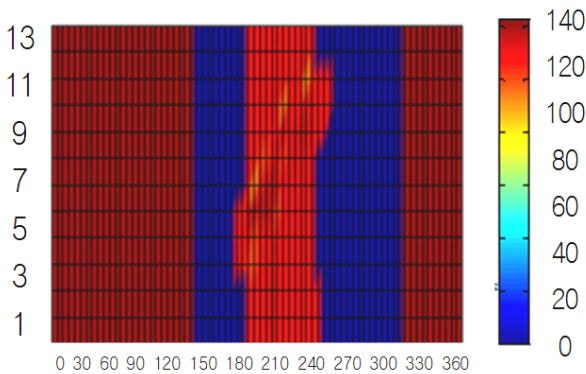
빔 추적법을 이용하여 수동 소나 센서에서의 음압해석 및 빔 형성 해석을 위한 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 신뢰성을 확보하기 위하여 실내음장에 대하여 고주파수 대역의 대표적인 해석기법인 파워흐름경계요소법과 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 신뢰성이 확보된 프로그램을 이용하여 2D 수동 소나에 대해 음장해석을 수행하였고, 해석된 음압을 이용하여 빔 형성을 하였다. 해석에 사용된 모델의 경우 배플에서의 반사계수 값이 1일 경우 높은 반사에 의해 입사각과 다른 각도에서도 비교적 높은 빔 형성이 되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 송신모드에

서의 빔 형성 각을 계산하는데 있어 문제가 될 수 있다. 따라서 입사각과 동일한 각도에서의 빔 형성을 하기 위하여 배플에서의 반사계수를 조정하면서 해석을 하였다. 반사계수가 줄어들에 따라 입사각과 동일한 방향의 빔 형성이 되는 것을 확인하였다. 이를 통해 추후 수동 소나의 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

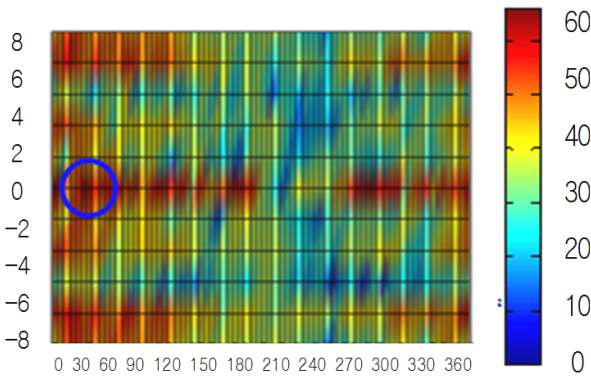
그리고 3D 모델에 대해서도 빔 경로 해석과 음압 분포, 그리고 빔 형성 해석을 하였고, 입사각과 동일한 방향으로 빔 형성이 되는 것을 확인하였다.



(a) Ray path



(b) Sensor pressure



(c) Beam forming

Fig. 20 Result of beam tracing method for acoustic waves with (30,0) degree incident angle

후기

이 연구는 국방과학연구소(장보고-III 선측배열/수동 소나의 음향성능 및 소음 차단구조 성능 해석연구) 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- De Geest, E. & Garcea, R., 1995. Simulation of room transmission functions using a triangular beam tracing computer model. *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 15-18 October 1995.
- Krokstad, A., Storm, S. & Sorsdal, S., 1968. Calculating the Acoustical Room Response by the Use of a Ray Tracing Technique. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1), pp.118-125.
- Lewers, T., 1993. A Combined Beam Tracing and Radiant Exchange Computer Model of Room Acoustics. *Applied Acoustics*, 38(2-4), pp.161-178.
- Shin, H.-C. & Ih, J.-G., 1998. Acoustic Analysis of Interior Spaces by using the Phased Geometric Acoustic Model. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 17(6), pp.54-61.



권현웅 홍석윤 송지훈 전재진



서영수