

빔 추적기법과 다층구조에서의 탄성과 전파이론을 적용한 소나돔 내부 음장 수치해석

Numerical analysis of acoustic field inside sonar dome by using a beam tracing method and the theory of elastic wave propagation

한 승 진*

Han, Seung-Jin

ABSTRACT

A sonar dome is basically designed and installed to protect sonar array from shocks, sea wave slaps and floating matters. The acoustic wave passing through sonar dome, however, can be distorted in magnitude and phase. This paper presents a numerical method for predicting the steady-state sound pressure on the surface of transducer array in the sonar dome and typical results of sonar beam pattern affected by sonar dome. A beam tracing model with phase information and a multi-layered elastic boundary model are involved. A full three-dimensional sonar dome is modeled as a GRP acoustic window, a rubber coated steel baffle and a rubber coated steel hull. A transducer array is modeled as thick steel cylinder. There are some assumptions such as incidence of plane wave, specular reflection on boundary and directionality of transducer element.

주요기술용어(주제어) : Sonar Dome(소나돔), Sonar Beam Pattern(소나 빔 패턴), Geometrical Acoustics(기하음향학), Beam-Tracing Method(빔 추적기법), Elastic Wave(탄성파)

1. 머리말

소나돔은 내부 음향센서배열을 외부 해양 환경으로부터 보호하기 위해 설치된다. 선체에 부착되기 때문에 유체역학적으로나 구조적으로 안정적이어야 함과 동시에 음향창부분은 음향 투과손실이 작은 재료로 만들어져야 한다. 특히 음향창의 음향투과 특성은 소

나의 송수신 성능에 직접적인 영향을 미친다. 소나돔에 의한 음파왜곡현상으로는 다음과 같은 사실들이 알려져 있다^[1]. 돔의 투과손실에 의해 송수신 음향에너지의 손실이 발생하고, 이는 소나 탐지성능의 저하를 초래할 수 있다. 돔 내부 음파의 다중 반사현상에 의해 소나 수신빔의 부엽준위가 증가하여 가상표적이 발생할 수 있다. 또한 수신빔 형성시 소나돔의 영향으로 인해 주엽의 빙폭과 지향방향이 왜곡되는 효과가 나타날 수 있다.

이와 같이 소나돔으로 인해 소나의 음향탐지 성능이 감소 될 수 있다. 소나돔 개념 설계시 이러한 소

† 2006년 3월 24일 접수~2006년 5월 4일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : sjhan@add.re.kr

나뭇잎에 의한 음파의 왜곡현상이 어떻게 발생하며 소나 배열센서의 송수신 성능에 어떠한 영향을 주는지 해석하고, 음향 성능 면에서 최적의 소나뭇잎을 설계하기 위해서는 소나뭇잎이 센서배열의 음향 송수신에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 소나뭇잎 내부 음장에 대한 수치해석기술을 개발하였다.

음파가 외부에서 돔을 투과하여 입사하는 경우 각 트랜스듀서 위치에서의 음압을 계산하기 위하여 기하음향학에 기초한 빔 추적기법을 적용하였다. 실내 공간의 음장을 예측하기 위해 건축음향 분야에서 빔 추적기법들에 대한 연구가 많이 수행되었고^[2,5,6] 본 연구에서도 닫힌 공간인 소나뭇잎 내부 음압을 계산한다는 점에서 건축음향학의 해석대상과 유사하고 해석 주파수가 수kHz의 고주파수 영역으로 회절에 의한 영향이 작기 때문에 건축음향 분야와 동등한 해석기법의 적용이 가능하다. 기존의 연구방법들과 다른 점은 음원신호를 평면파로 가정하고 있기 때문에 구가 아닌 음원평면을 정의하여 평면파 신호를 생성한다. 또한 건축음향 분야에서는 음원이 해석대상 공간 내부에 존재하는 반면 본 연구에서는 음원을 해석 공간 외부에 위치시킴으로써 투과 및 반사 현상을 모두 고려하여 해석하였다. 그리고 수중에서 음향 빔들 사이의 간섭현상까지 해석하기 위해 위상을 고려한 빔 추적기법을 이용하였다^[2].

돔 경계면에서의 투과 및 반사시 음압의 크기와 위상변화를 계산하기 위하여 무한다층 평판 구조물에서의 탄성과 전파현상 해석기법을 적용하였다.

빔 추적기법과 탄성파이론을 결합하여 경계면에서의 위상을 고려한 소나뭇잎 내부 음장을 해석하였으며 해석결과를 이용하여 소나뭇잎에 의한 소나의 송수신 신호의 왜곡현상을 시뮬레이션 하였다.

2. 해석방법

가. 해석모델

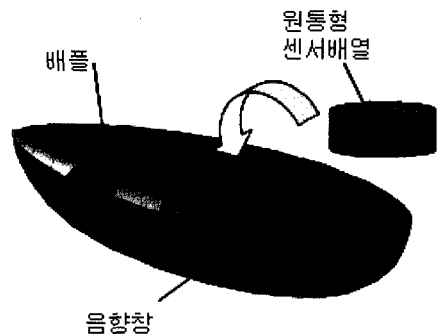
해석대상인 소나뭇잎 모델은 그림 1과 같다. 음향장 내부에 원통형 배열센서가 위치하고 뒷부분에 배플이 설치된다. 선저에 부착되는 돔의 윗부분은 평면으로 모

델링 하였다. 음향장은 GRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)로 모델링 하였고 배플과 소나뭇잎이 부착되는 선체바닥은 고무 코팅된 강철로 모델링 하였다. 모델의 크기는 길이 6m, 폭 2.3m 높이 1.3m이다. 배열센서는 내부가 빈 강철 원통으로 모델링 하였고, 각각의 트랜스듀서는 원통 표면의 점들로 모델링 하였으며 모두 동일한 지향성을 가지고 있다고 가정하였다. 이 트랜스듀서 위치가 빔 추적 모델에서 수신점이며 각 위치에서 음압을 계산한다.

나. 빔 추적 모델

입사음파를 평면파로 가정하고 돔 외부에 평면파 음원 평면을 정의한다. 음원평면은 여러 개의 사각형 요소로 구성되며, 이 요소들은 개별 빔추적을 위한 빔의 음원이 되며 각각의 빔은 소나뭇잎 음향장을 투과하여 돔 내부에서 반사를 일으키며 음장을 형성한다. 이때 경계면에서 반사후 빔의 진행방향과 다음번 부딪히게 되는 경계면이 결정되면 수신점이 돔 내부에 존재하는지를 판단하고 존재한다면 그 수신점에서의 현재 빔의 음압기여도를 계산한다. 각각의 빔에 대해서 위와 같은 과정을 반복하며 정해진 반사 횟수만큼 진행 후에 계산을 마친다. 모든 빔에 대해서 경로추적과 각 수신점에서의 음압기여도가 계산되면 수신점에 기여하는 음압성분을 모두 더하여 각 수신점에서의 정상상태 음압을 계산한다.

위 설명에서와 같이 빔 추적모델을 완성하기 위해서는 음원의 정의, 해석모델 경계면 결정, 수신점 정의, 빔 경로 추적 그리고 수신점에서 빔의 음압기여도 계산이 필요하다.



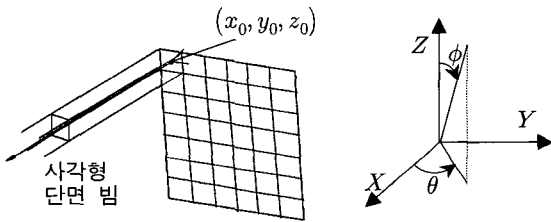
[그림 1] 소나뭇잎 모델

1) 음원 모델

소나돔 외부에 하나의 평면을 정의하고 여러 개의 사각형 평면 요소로 분할하여 평면파 음원으로 가정하며 음파의 진행방향은 정의된 평면에 수직인 방향이다. 각 빔 단면의 모양은 사각형이고 단면의 기하 중심 연결선인 음선벡터와 꼭지점 좌표로서 각각의 빔이 정의된다. 각 빔의 중심음선은 식 (1)과 같은 직선방정식으로 표현할 수 있다. (x_0, y_0, z_0) 는 음원 빔의 시작점이고 l 은 음원 빔이 진행한 거리이며 그림 2의 구 좌표계에서 α, β, γ 는 빔의 진행 방향 코사인이다. 빔 단면의 꼭지점을 시작점으로 하는 빔의 가장자리 벡터는 중심음선과 평행하므로 위 기하정보를 이용하여 사각기둥 모양의 빔 추적이 가능하다. 초기 음파의 위상은 모두 0으로 정하고 음파의 진행 거리에 따라서 위상변화가 고려되며 평면파를 가정하므로 음압의 크기는 일정하다. 따라서 음원의 초기 음압의 크기가 p_0 이면 거리 l 만큼 진행한 지점에서 빔의 음압은 식 (2)와 같이 표현된다. k 는 파수이다.

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \alpha l & \alpha &= \sin\phi \cos\theta \\ y &= y_0 + \beta l & \beta &= \sin\phi \sin\theta \\ z &= z_0 + \gamma l & \gamma &= \cos\phi \end{aligned} \quad (1)$$

$$p(l) = p_0 \exp(ikl) \quad (2)$$



[그림 2] 음원 평면과 구 좌표계

2) 해석모델 경계면 정의

소나돔 표면은 모두 삼각형 요소로 분할하였고 각각의 평면요소에 대한 수직벡터와 평면 방정식을 정한다. 삼각형 평면 요소 n 번 째의 평면방정식은 $A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0$ 이고 계수 A_n, B_n, C_n 은 평면에 수직인 벡터 성분이다.

3) 빔 진행 경로 추적

중심음선의 진행 방향을 빔의 진행방향으로 보며 중심음선이 부딪히는 경계면에서 빔의 반사가 발생한다고 가정한다. 빔은 직선방정식으로 표현되고 경계면은 평면방정식으로 표현되므로 두 방정식을 연립하여 풀면 빔이 부딪히는 경계면을 알 수 있다. 이때 중심음선과 교점이 발생하는 평면요소가 한 개 이상 발생할 수 있는데 거리가 가장 가까운 평면이 반사평면 요소가 된다. 거울면 반사를 가정하고 있으므로 평면의 수직벡터와 빔의 중심음선 벡터의 관계로부터 반사방향이 계산되고, 반사음압의 값은 입사음압에 경계면에서의 복소음압 반사계수를 곱하여 계산한다.

4) 수신점에서의 음압계산

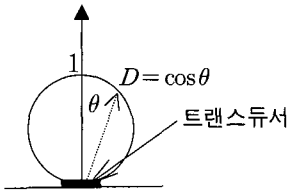
수신점은 트랜스듀서 위치로서 점 하나로 표현되고 이 점이 사각형 빔 내부에 존재하면 그 수신점에서의 음압 기여도를 계산한다. 수신점이 빔 내부에 존재하는지 확인 하기위해 다음과 같이 점과 평면사이의 관계를 조사한다. 단면이 사각형인 빔은 네 개의 경계평면으로 이루어져있고 경계평면의 수직벡터를 빔 내부를 향하는 벡터로 정의한다. 이 때 수신점이 네 평면의 수직벡터방향에 모두 존재하면 빔 내부에 수신점이 위치하게 되고 하나라도 반대방향에 위치하면 빔 외부에 존재한다고 판단할 수 있다.

수신점에서의 음압은 복소수로 표현되고 그 수신점을 통과하는 각각의 빔에 의한 음압 기여성분의 합으로 표현된다. 수신점까지의 거리는 수신점을 포함하는 빔 단면까지 중심음선이 진행한 거리와 같다고 가정한다. 수신점까지의 총 진행거리가 x_n 이고 n 번 반사가 일어났다면 그 수신점에서의 음압 기여성분은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$p = p_0 D(\theta) \exp(ikx_n) \prod_{i=1}^n R_i(\theta_i) \quad (3)$$

여기서, p_0 는 초기 음원의 음압, $D(\theta)$ 는 트랜스듀서의 지향성으로 음파입사 방향별 수신감도를 나타내며 본 연구에서는 $\cos\theta$ 로 가정하였다. R_i 는 i 번째 반사시 반사평면의 복소음압 반사계수이다. 돔 내부에서

의 다중 반사에 의해 이러한 음압기여 성분이 여러 개 존재 하게 되고 각각의 음압기여 성분의 합이 수신점에서의 정상상태 음압이다.



[그림 3] 트랜스듀서 지향성

다. 경계면에서의 음압 반사계수

소나돔 경계면에서의 음압반사계수를 계산하기 위하여 무한 다층평판에서의 탄성과 전파를 해석하였다. 수중의 입사음파 및 투과 음파는 식 (4)의 헬름홀츠 방정식을 만족하며, 경계면 고체구조물 내에서 음파는 식 (5)의 탄성과 파동방정식을 만족한다. 각 층 사이에서의 응력과 매질 입자속도 경계조건으로부터 해가 결정된다. 본 연구에서는 Brekhovskikh^[3]에 의해 연구된 방법을 적용하여 그림 4와 같은 모델에 대하여 반사 및 투과계수를 계산하였다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi = \frac{1}{c} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \quad (4)$$

$$(\lambda_m + 2\mu_m) \nabla(\nabla \cdot \overline{u}_m) - \mu_m \nabla \times (\nabla \times \overline{u}_m) = \rho_m \frac{\partial^2 \overline{u}_m}{\partial t^2} \quad (5)$$

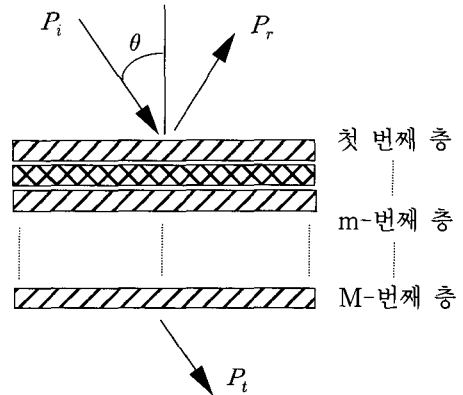
$$\lambda_m = \frac{E_m \nu_m}{(1 + \nu_m)(1 - 2\nu_m)} \quad (6)$$

$$\mu_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}$$

ϕ 는 음장의 속도 포텐셜, \overline{u}_m 은 m번째 매질의 변위, E_m 은 m번째 매질의 탄성계수이고 ν_m 은 m번째 매질의 포아송비이다.

경계면에서의 복소음압 반사계수는 입사음압과 반사음압의 비, $R = P_r/P_i$ 로 표현되고, 복소음압 투과계수는 $T = P_t/P_i$ 로 나타내어진다. 각 계수는 음파의

입사방향에 따라 계산되며 입사각에 따른 경계면에서의 흡음정도와 위상변화를 포함하게 된다.



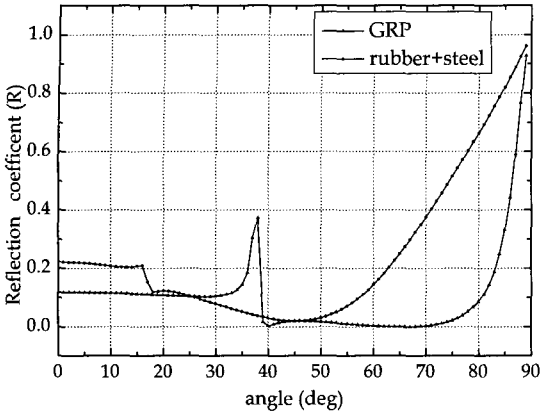
[그림 4] 다층구조

라. 소나돔 재료의 물성치

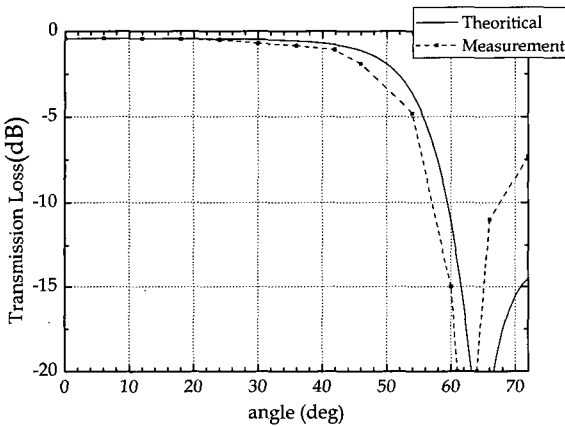
소나돔 재료의 물성치는 표 1에 나타내었다. 표의 물성치는 실제 재료에 대한 측정결과가 아니며, 각 재료의 특성을 나타내는 대표값이다. 음향창 부분은 구조강도 성능을 만족시키면서 음향투과 성능이 좋은 GRP로 주로 만들어진다. 일반적으로 선미 추진기 소음이 소나돔 내부로 들어오는 것을 차단하기 위해 소나돔 내부 배열 뒤쪽에 배플을 설치한다. 이때 배플의 안쪽면에서 불필요한 반사를 일으켜 소나 배열센서의 수신에 영향을 줄 수 있기 때문에 흡음코팅을 하며 같은 이유로 소나돔이 부착되는 선체에도 흡음코팅을 한다. 흡음재료로는 폴리우레탄이나 고무 등의 재료가 사용된다.

[표 1] 4가지 소나돔 재료의 물성치 대표값

재료	탄성계수 (N/m ²)	감쇠계수	포아송비	밀도 (kg/m ³)
GRP	8.75×10 ⁹	0.01	0.33	1650
강철	2.1×10 ¹¹	0.001	0.3	7800
고무	1.1×10 ⁹	0.3	0.4	1100
Absonic-A	2.33×10 ⁹	0.0264	0.39	1080



[그림 5] 반사계수 20mm GRP, 고무(60mm)+강철(10mm)



[그림 6] 100kHz에서 Absonic-A에 대한 투과손실. 실선 : 이론 계산값, 점선 : 참고문헌상 측정값^[8]

본 연구에서는 표 1과 같은 물성치를 가지는 고무 재료를 흡음재료로 사용하였다. 그림 5에 해석에 이용한 재료의 입사각에 따른 반사계수를 나타내었다.

그림 6은 주파수 100kHz에서 Absonic-A에 대한 투과손실계수 계산결과를 참고문헌^[8]의 측정결과와 비교하여 나타내었으며 그림에서 보는 바와 같이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

마. 배열센서의 빔 패턴

N개의 트랜스듀서로 이루어진 배열 센서의 빔 패턴은 식 (7)로 표현된다. $D(\theta)$ 는 트랜스듀서의 지향

성, k 는 파수이고 A_j 는 각 트랜스듀서에 가해지는 크기 및 위상 가중치로서 신호처리과정에서 정해진다.

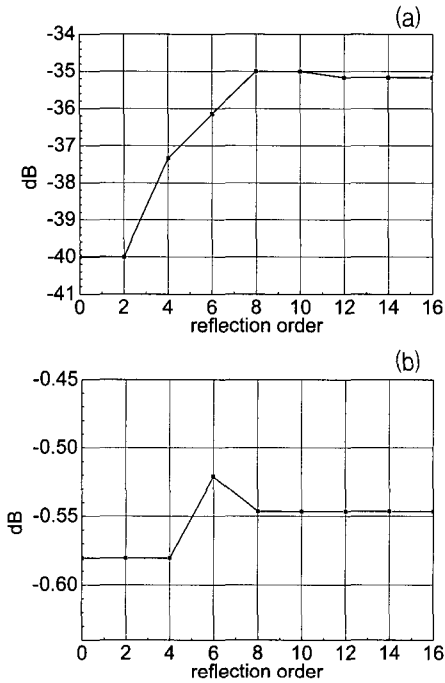
$$BP(\theta, \phi) = \sum_{j=1}^N A_j D_j(\theta) \exp\{ik(x_j \cos \theta + y_j \sin \theta + z_j \cos \phi)\} \tag{7}$$

본 해석에서 트랜스듀서 지향성은 $\cos \theta$ 로 가정하였으나 실제 시스템 해석을 위해서는 실선에 설치되는 배열센서 트랜스듀서의 지향성을 측정하거나 해석적인 방법을 통해 미리 계산해야 한다.

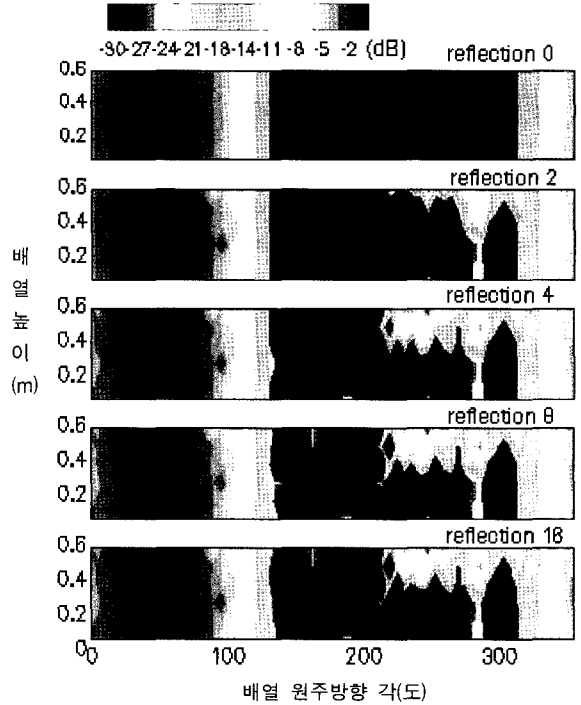
소나의 송수신시 일종의 공간필터 개념인 빔을 형성하는데, 빔을 형성하고자 하는 방향에 수직인 평면을 기준으로 하이드로폰까지의 경로차 만큼 배열센서의 각 하이드로폰에 인위적인 위상변화를 준다^[4]. 빔 추적기법으로 계산된 배열센서에서의 음압에 이와 같은 빔 형성 방법을 적용하여 실제 소나가 표적을 탐지하는 경우를 모사함으로써 음파 수신시 소나돔이 미치는 영향을 해석하였다.

3. 해석결과

소나돔 음향장 부분은 반사계수가 작고 투과손실도 매우 작으므로 음향장에 입사하는 음향 에너지의 대부분은 소나돔 외부로 빠져나가게 된다. 음향장에 두 번 이상 부딪힌 빔의 음압은 매우 낮아지게 되고 배열센서의 각 트랜스듀서 위치에서 계산되는 음압 기여도가 매우 작다. 그림 7의 (b)에 나타낸바와 같이 입사방향의 트랜스듀서 위치에서 빔의 내부 반사횟수가 0번인 계산 결과와 8번인 계산결과가 0.034dB의 차이 밖에 나지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 음파가 직접 입사하지 않는 위치에서는 반사횟수에 따라 음압이 증가하다가 8번 이상에서 계산 결과가 수렴되는 경향을 보인다(그림 7 (a) 참고). 즉 내부 반사가 많이 진행되기 전의 음압이 크기 때문에 이에 따라 배열센서 위의 음압이 결정되지만, 그림 8에서도 알 수 있듯이 음파가 직접입사하지 않는 배열센서 위치에서는 내부 반사 횟수가 8번 이상인 경우에 음파가 수신되고 배열센서 위의 음압분포가 일정하게 된다.

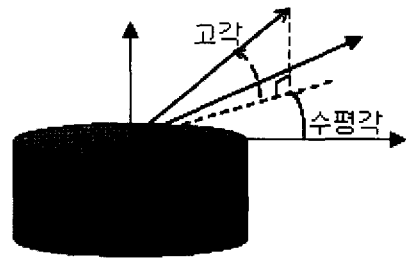


[그림 7] 반사 횟수 변화에 따른 배열 센서 표면 수신점에서의 음압변화 (a)배열 높이 0.3664m 원주방향 135도, (b)배열 높이 0.3663m 원주방향 45도

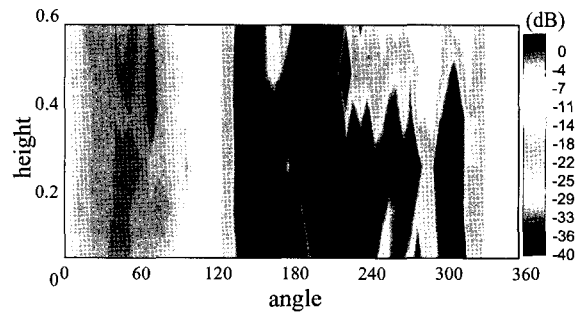


[그림 8] 빔 반사 횟수에 따른 배열 표면 음압 분포

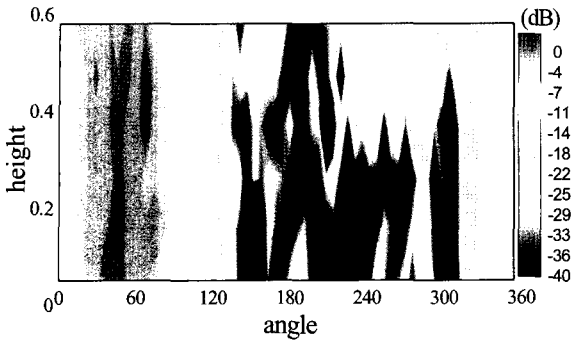
배플이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우, 흡음 코팅이 부착된 경우와 그렇지 않은 경우 등 몇 가지 해석 조건을 달리 하여 계산을 수행 하였으며, 해석 주파수는 일반적인 함정 소나의 운용주파수 대역에 속하는 6kHz이다. 음파 입사는 그림 9와 같은 배열 센서 좌표계에서 1도 간격의 수평각과 5도 간격의 고각 방향으로 입사하는 것으로 가정하였다. 그림 10, 11은 수평각 45도, 고각 -10도에서 음파가 입사할 경우 배열센서 표면의 음압분포이다. 트랜스듀서의 개수는 원주방향으로 64개 높이 방향으로 6개씩 총 384개이며, 표시된 음압은 입사음압의 크기로 무차원화된 값이다. 45도 부근의 트랜스듀서 위치에서 음압이 크게 나타나고 있고, 내부 반사에 의해 음파가 직접 입사하지 않는 방향의 트랜스듀서 위치에서도 음압이 계산되는 것을 알 수 있으며 흡음처리를 하지 않은 소나돔(그림 11)의 경우 이러한 현상이 더 크게 나타난다.



[그림 9] 배열센서 좌표계



[그림 10] 배열센서 표면 압력분포(선체와 배플에 흡음재 부착)

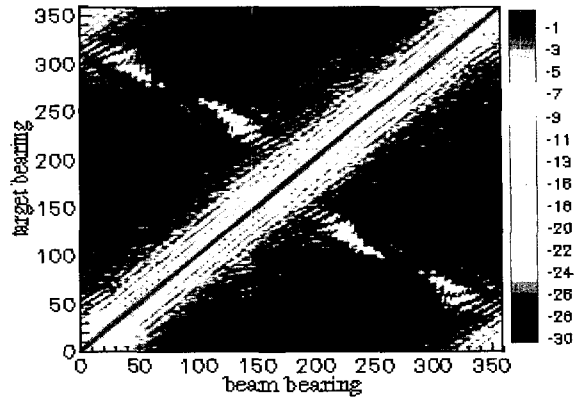


[그림 11] 배열센서 표면 압력분포(선체와 배플에 흡음재 미부착)

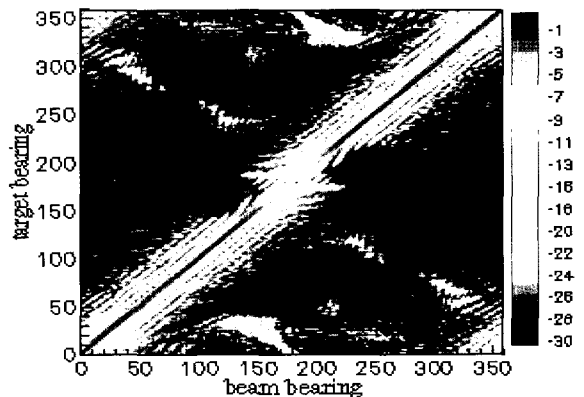
그림 12, 13, 14는 가상의 표적 방향인 입사 음파 방향과 소나의 빔 방향을 변화시켜가면서 계산한 결과이다. 소나가 360도 전 방위에 대해서 빔 형성시 음압이 가장 큰 방향이 표적의 방향으로서 그림에서 보는 바와 같이 표적 방향을 잘 찾아가고 있는 것을 알 수 있다. 배플이 설치된 경우에는 표적의 방향으로 빔을 형성하였을 경우 150도에서 210도 사이에는 표적의 신호가 매우 약해져서 표적을 잘 찾지 못하는 것을 볼 수 있으며 이것은 후방 배플에 의해 음파가 배열센서로 입사하지 못하기 때문이다.

그림 13을 살펴보면 표적 방향 0도에서 50도 사이인 경우 빔 방향이 표적의 방향이 아닌 150도 근처에 음압이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 배플에 의한 내부 반사의 영향으로 발생하는 것으로서 그림 14의 흡음재가 부착된 계산결과와 비교해 보면 흡음재의 영향으로 이러한 내부반사에 의한 영향이 사라지는 것을 볼 수 있다.

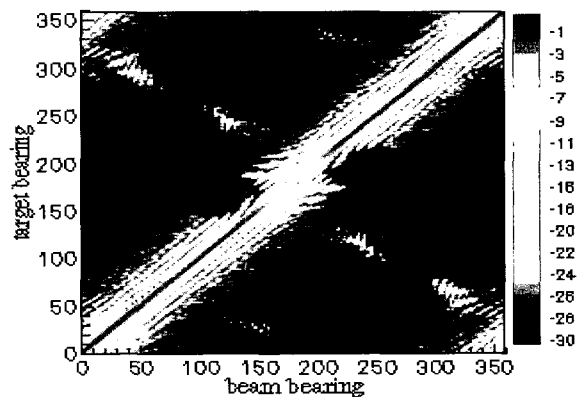
그림 15, 16에 배플이 설치되고 흡음재가 부착되어 있는 소나돔의 경우에 대해 고각 -10도에서 배열센서의 응답을 나타내었다. 수평각 45도 방향으로 빔형성을 하였을 경우 소나돔이 없는 경우와 비교하여 주빔의 모양은 거의 비슷하고 중심 음압 크기가 0.17dB 감소하였다. 반면 150도 방향으로 빔형성을 하였을 경우에는 배플의 영향으로 훨씬 큰 2.284dB 감소하였다. 또한 주빔의 크기 뿐 아니라 빔의 모양까지 변형되는 것을 보여준다. 즉 배플에 의해 외부 추진기 등에 의한 소음은 차단할 수 있지만 소나의 운용 범위각이 제한됨을 의미한다.



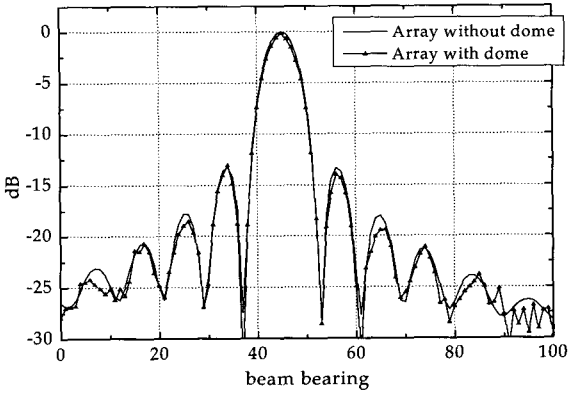
[그림 12] 배플이 설치되지 않은 경우 센서배열 수신 응답(선체 흡음재 미부착)



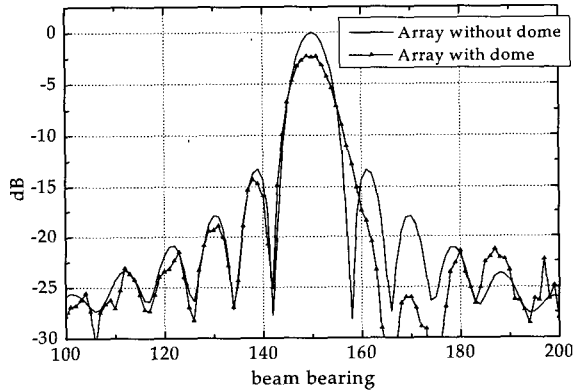
[그림 13] 배플이 설치된 경우 센서배열의 수신 응답 (선체와 배플에 흡음재 미부착)



[그림 14] 배플이 설치된 경우 센서배열의 수신 응답 (선체와 배플에 흡음재 부착)



[그림 16] 수평각 45도 빔 패턴



[그림 15] 수평각 150도 빔 패턴

4. 맺음말

소나돔 개념 설계를 위해 소나돔이 배열센서의 송수신에 미치는 영향 분석이 필요하고 이를 위해 빔추적기법과 다층구조에서의 탄성과 전파 이론을 적용한 소나돔 내부의 음장 해석기술을 개발하였다. 경계면에서의 복소 반사계수를 계산하기 위해 다층구조에서의 탄성과 전파이론을 적용하였으며 배열센서 표면의 음압분포를 계산하기 위해 빔추적 기법을 사용하였다. 소나돔 형상, 재료의 물성치, 트랜스듀서의 방향성을 입력인자로 받아들여 해석을 수행하였으며, 배열센서 각 트랜스듀서에서의 음압을 계산하여 소나의 빔 패턴을 예측하였다. 본 해석 프로그램을 이용하여 소나돔 재료의 특성, 주파수, 형상, 배열의 유무

및 감쇠재료에 따른 배열센서의 응답 변화를 시뮬레이션할 수 있음을 확인하였다. 소나시스템의 초기 설계단계에서 이와 같이 소나돔이 소나의 송수신 성능에 미치는 영향을 예측함으로써 소나성능에 악영향을 주는 요소들을 미리 인지하고 피해갈 수 있게 하는 도구로서 유용하리라 판단된다.

향후 실물 소나시스템에 대한 시험결과와의 비교분석을 통해 해석프로그램을 검증하고 보완하는 연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Shyam Kishore Srivastava : "Ocean engineering aspects of submarine sonar dome", UDT, June 1998.
- [2] Emmanuel De Geest, Ralph Garcea : "Simulation of Room Transmission Functions using a Triangular Beam Tracing Computer Model", 1995 workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, Oct. 1995.
- [3] L. M. Brekhovskikh : "Waves in Layered Media 2nd ed", Academic Press, 1980.
- [4] Cox, Albert W. : "Sonar and underwater sound"; Lexington Books, 1982.
- [5] A. Farina : "Pyramid Tracing vs. Ray Tracing for the simulation of sound propagation in large rooms", Computational acoustics and its environmental applications, 1995.
- [6] Nicola Campo, Paolo Rissone, Marco Toderi : Adaptive pyramid tracing : a new technique for room acoustics, Applied Acoustics, 2000, pp.199~221.
- [7] 전재진, 한승진 : "소나돔 음향 특성 해석 이론 연구", NSDC-520-041102, 국방과학연구소 기술 보고서, 11. 2004.
- [8] D. L. Folds and C. D. Loggins : "Transmission and Reflection of ultrasonic waves in layered media", Acoustical Society of America, Vol. 62, No. 5 1977.