

# 원통면 음향 홀로그래피를 이용한 수중음향 곡면배열센서의 빔 해석

## Beam Analysis of Underwater Conformal Array by Using Cylindrical Acoustic Holography

권 휴 상†·박 성 철\*·서 희 선\*\*·신 구 균\*\*·조 치 영\*\*

Hyu-Sang Kwon, Seong-Chol Park, Hee-Seon Seo, Gu-Kyun Shin and Ghee-Young Joh

(2009년 4월 2일 접수 ; 2009년 9월 4일 심사완료)

**Key Words** : Cylindrical Acoustic Holography(원통면 음향 홀로그래피), Underwater Array Sensor(수중 음향센서), Beam Pattern(빔 패턴), Stationary Phase(정상위상)

### ABSTRACT

As an experimental technique to analyze the far-field characteristics of underwater cylindrical array sensors, cylindrical acoustic holography is studied. Inside an laboratory water tank, far-field directivity patterns as well as near-field source images are reconstructed from the measured hologram by hydrophone array. Approximate equation for far-field directivity estimation is derived based on stationary phase method. The simulation and experiment show well usefulness of the proposed method in application of underwater array sensors.

### 1. 서 론

수중 음향센서는 방향성을 가지는 음파 송수신 특성을 만들기 위하여 여러 개의 센서 엘리먼트를 어레이로 배열하여 사용한다. 이와 같은 음향센서 배열은 개개의 센서 엘리먼트들의 방사 특성을 고려하여 각 입력신호의 크기와 위상을 조정함으로써 원하는 방향으로 특정한 방향성을 얻게 된다. 이와 같은 센서 배열 원리를 바탕으로 방향 특성을 향상시키기 위한 신호처리와 센서 구성에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다<sup>(1)</sup>. 이는 센서의 설계에 관련하여 센서 엘리먼트와 센서 배열의 음장 방사특성 등 주로 이론적 혹은 수치적인 방법을 사용한 해석적인 연구였다. 그런데 실제 제작된 센서 배열의 음향학적 특성을 확인하기 위해서는 측정을 통한 실험

적인 방법이 필요하다. 그리고 이러한 실험적인 방법으로 해석하기 위하여 수중 음향센서의 음향학적 방사특성을 측정하고 예측하는 방법론의 개발이 요구되며 결과의 신뢰성에 대해서도 검증이 필요하다.

수중 음향센서는 군사적인 목적으로 주로 원거리 탐지를 위하여 사용된다. 그러므로 수중 음향센서의 원거리 음장 특성이 요구된다. 일반적으로 배열센서의 음향특성으로 대표적인 원거리 방향특성을 측정하기 위해서는 원거리 측정환경을 만족하는 자유음장 조건에서 가능하나 이를 만족하는 시험시설은 구성하기 매우 어렵다. 이와 같은 원거리 특성을 직접 측정하기 위해서는 넓은 측정 공간이 필요할 뿐만 아니라 이에 따른 부가적인 장비, 시간, 그리고 비용 등 많은 복잡한 문제가 발생한다. 특히 대형 배열의 경우 대부분의 음향수조에서는 원거리 음장 조건을 충족하지 못하므로 해상시험으로 대체 수행하여야 한다. 그러나 시험 함정의 운용, 해상 환경에 따른 제한 및 실험실 장비의 해상 운용에 따른 장비 훼손 등의 문제점 등이 있다. 이를 극복하기 위한 방안으로 음향수조 내에서 근거리 음장을 측

† 교신저자; 정회원, 한국표준과학연구원  
E-mail : hyusang@kriss.re.kr  
Tel : (042)868-5057, Fax : (042)868-5643

\* 한국표준과학연구원

\*\* 정회원, 국방과학연구소

정하고 이를 이용하여 원거리의 음향특성을 정확히 예측하고 확인할 수 있는 실험적 해석방법의 개발이 필요하다.

크기가 제한된 공간에서의 실험에는 필연적으로 경계 벽면에 의한 반사파가 존재한다. 더욱이 수중에서 음파의 감쇠를 줄이기 위하여 낮은 주파수를 사용하는 추세에 따라 수중 음향센서의 사용 하한 주파수는 낮아지며 반사파의 영향은 더욱 중요하게 다뤄져야 한다. 이 연구에서는 수조의 벽면에 의한 반사파를 분리하고 해석하는 기술적 방법으로 시간 영역에서의 시간선택 기법에 기반한 신호처리 알고리즘을 개발하여 적용하였다<sup>(2)</sup>.

원거리 음장을 예측하기 위한 실험적 방법으로 잘 알려진 음향 홀로그래피 기법을 사용하였다<sup>(3-5)</sup>. 이는 경계면의 음압분포로부터 공간상의 음장을 표현할 수 있다는 Kirchhoff-Helmholtz 식을 기반으로 원통형 배열센서에서 근거리의 측정면에 위치한 하이드로폰 배열을 이용하여 방사음장을 측정하고 이로부터 원거리의 방사음장을 예측하게 된다. 원통형 배열센서의 형상에 맞춰 원통면 음향 홀로그래피 기법을 기반으로 하는 원거리 음장 예측기법을 전개하였으며 이를 바탕으로 측정하고 분석하는 실험적 해석 방법과 함께 알고리즘 및 처리 프로그램을 개발하였다. 음원의 빔 패턴을 계산하기 위해서 기존의 음향 홀로그래피 기법에서 원거리 음장 예측을 가정하여 예측 거리가 아주 먼 원거리 음장의 적용을 위한 근사식을 이론적으로 유도하였고 이로부터 빔 패턴을 산출하였다.

음향 홀로그래피 기법은 공간상의 모든 음장을 예측할 수 있기 때문에 원거리 음장예측과 더불어 근거리의 음원면에서의 방사음장의 거동을 예측하여 가시화할 수 있다. 근거리 음장의 거동해석으로부터 음원의 위치와 형상뿐만 아니라 음장의 방사 경로를 세밀하게 고찰하고 해석할 수 있다. 실험적인 방법으로 음향 홀로그래피 방법에 대해서는 1980년대 처음 소개된 이후로 많은 연구가 이루어졌으며 근거리 및 원거리 음장을 정확히 예측하기 위한 많은 이론적 해석과 신호처리 기법들이 소개되었다. 그러나 대부분의 연구가 공기 전파 음파를 대상으로 하고 있으며 특히 국내에서는 수중에서의 음향 홀로그래피 기법 연구가 거의 이루어지지 않았다<sup>(6,7)</sup>. 더욱이 반사파가 존재하는 환경에서의 기

법의 적용에 대해서는 연구가 이루어지지 않았다. 이 논문에서는 벽면 반사를 무시할 수 없는 수중음향 측정에서 원통면 음향 홀로그래피를 적용하여 원거리 빔 패턴을 정확히 예측하기 위한 실험적 기법에 대하여 실제적 적용과 이를 구현하는 구체적 방법을 소개하고자 하였다.

이와 같은 구체적인 방법론 해석과 함께 제안하는 원통면 음향 홀로그래피 예측기법의 효율성과 신뢰성을 확인하기 위하여 이론적인 해석이 가능한 점음원으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 실제 실험을 통하여 제작된 시제품의 원거리 빔 패턴을 예측하고 확인하였다.

## 2. 음장에측의 기본 이론

### 2.1 Helmholtz 적분 방정식

임의의 음원으로부터 방사하는 음장의 시, 공간적 거동에 대한 해석은 음파의 거동을 표현하는 선형 음향학적 이론으로 잘 알려져 있다. 균일한 매질에서 음파의 거동은 선형 파동 방정식으로 표현되는데, 변수분리를 이용하여 시간적인 조화거동, 즉 주파수 해석을 바탕으로 다음과 같은 선형 homogeneous Helmholtz 식으로 정리된다.

$$\nabla^2 p(\vec{r}) + k^2 p(\vec{r}) = 0 \quad (1)$$

이 관계식으로부터 임의의 균일한 공간상에 놓인 음장의 분포는 Green의 정리를 이용하여 이를 둘러싸는 임의의 경계면에서의 적분 방정식으로 표현할 수 있다. 이는 선형 음향학 이론에서 Kirchhoff-Helmholtz 적분 방정식으로 잘 알려져 있으며, 임의의 음원으로부터 방사하는 음장을 해석하는 음향학적 기본 방정식이다. 즉 공간적인 음장분포를 예측하고 해석하기 위한 기본적인 지배 방정식이다.

$$p(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1} \left[ p(\vec{r}_0) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_0)}{\partial n} - G(\vec{r}, \vec{r}_0) \frac{\partial p(\vec{r}_0)}{\partial n} \right] ds \quad (2)$$

여기서 위치벡터  $\vec{r}$ 과  $\vec{r}_0$ 는 각각 관심 있는 공간영역 내의 해석 위치와 경계면의 임의의 위치를 나타낸다. 또한  $\vec{n}$ 은 단위벡터로 경계면의 각 위치에서

경계면에 수직한 방향을 지시하는 벡터이다. 그리고  $S$ 는 경계면을 나타내는데, 음원과 같은 특이 (singularity)가 존재하지 않는 균일한 영역을 에워싸고 있는 닫힌 경계면이어야 한다.  $G(\vec{r}, \vec{r}_0)$ 는 Green 함수로써 식 (1)의 Helmholtz 식을 만족하는 수학적 해이다. 이 식에서 관심 영역에서의 음장은 경계면의 음압과 입자속도 분포로부터 예측이 가능하다는 사실을 알 수 있다.

가장 일반적인 Green 함수로써 경계면이 무한대인 자유 공간상의 해를 생각할 수 있다. 이 해는 앞의 homogeneous Helmholtz 식을 만족하는 해로써 대표적으로 자유공간 점음원 해로 정의할 수 있다.

$$G(\vec{r}, \vec{r}_0) = \frac{e^{jkr}}{r} \quad (3)$$

여기서  $r = |\vec{r} - \vec{r}_0|$ 로 거리를 의미한다.

이 자유음장 Green 함수를 사용하면 식 (2)의 Helmholtz 적분식으로부터 다음과 같은 음장 관계식을 얻는다.

$$p(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left[ p(\vec{r}_0) \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) - \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) \frac{\partial p(\vec{r}_0)}{\partial n} \right] ds \quad (4)$$

이는 음원을 둘러싸는 경계면을 연속된 단극 및 쌍극 점음원의 조합으로 모델링하여 음장을 중첩하는 방법이라 할 수 있다. 여기에서 음파의 거동을 가정하여 측정면에서 음파의 변화량이 크지 않고 음압의 변화가 급격하지 않다면 음압의 법선방향 구배를 다음과 같이 가정할 수 있고,

$$\frac{\partial p(\vec{r}_0)}{\partial n} \cong jkp(\vec{r}_0) \quad (5)$$

원거리인 경우에 측정점과 예측점 사이의 거리  $r$ 이 매우 크기 때문에 다음과 같이 근사하여 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) \cong \frac{jk}{r} e^{jkr} \frac{\partial r}{\partial n} = -jk \frac{e^{jkr}}{r} \cos\beta \quad (6)$$

여기서  $\beta$ 는 측정점에서의 법선방향에 대한 예측점의 방향각이다. 그러므로 결국 원거리 음장은 다음과 같이 얻어진다.

$$p(\vec{r}) = \frac{-jk}{4\pi} \int_S (1 + \cos\beta) \frac{e^{jkr}}{r} p(\vec{r}_0) ds \quad (7)$$

이 식으로부터 근거리에서 음압분포를 측정하여 원거리 음압을 예측할 수 있다. 그런데 이 식은 앞서 유도한 바와 같이 음장의 조건이나 원거리 예측 등의 가정이 필요하기 때문에 근사식이라는 한계가 있다<sup>(8,9)</sup>.

## 2.2 음장예측 방법의 비교

앞서 설명한 Helmholtz 적분 방정식에 기반하여 음장을 예측하는 실제 방법들을 정리하면 다음과 같이 세 가지가 있다. 먼저 Helmholtz 적분 방정식을 직접 수치 해석적으로 적분하는 방법으로 적분하는 방법에 따라 다양한 해석기법이 존재한다. 이는 일반적으로 경계요소법(BEM: boundary element method)으로 널리 알려져 있는데, 이와 같은 수치 해석적인 적분에서는 경계면의 형상이 좌표계에 제한되지 않지만 계산이 복잡하고 시간이 많이 걸리는 문제가 있다. 그러므로 계산 시간을 줄이고 효율적인 해석을 하기 위하여 Fourier 해석에 기반을 둔 방법이 소개되었다. 이는 변수분리가 가능한 직교 좌표계로부터 음장을 독립적인 모드의 중첩으로 해석하는 방법으로 Fourier 변환과 같은 계산 알고리즘을 이용하여 빠르게 계산 결과를 얻을 수 있다. 이는 근접 음향 홀로그래피(NAH: nearfield acoustical holography)란 방법으로 소개되어 왔다.

다른 방법으로 NFCA(near-field calibration array)로 알려진 방법이 있다. 이는 격자형으로 구성된 구역 하이드로폰 배열을 이용하여 주어진 공간 영역에 평면파를 생성하거나 평면파를 측정하는 방법이다. 각 엘레먼트에 가중치를 적용한 하이드로폰 배열을 구동하여 근접한 임의 영역에 평면파를 생성하고 여기에서 평면파 응답특성을 측정하는 방법이다. 또한 역으로 측정하고자 하는 배열센서에서 방사한 음장을 NFCA로 측정하고 각 엘레먼트 신호에 가중치를 곱함으로써 평면파 방사특성을 근사화하여 산출할 수 있기 때문에 각 방향별로 측정을 반복하여 빔 패턴을 추정할 수 있다<sup>(10,11)</sup>.

여러 실험적 방법 중에서 해석결과의 정확성과 신뢰성을 고려하고 빠르고 쉬운 측정을 위해서는 대표적인 실험적 음장예측 및 해석방법인 음향 홀

로그래피를 적용할 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 원거리에서의 음압은 근거리 측정면에서 측정하는 음압분포를 적분하여 계산된다. 이때 Green 함수가 수학적으로 잘 정의될 수 있도록 경계면을 정하는 것이 일차적으로 매우 중요하다. 잘 알려진 분리 직교 좌표계로써 직각 좌표계, 원통 좌표계, 그리고 구 좌표계가 있는데 이 좌표계의 선정에 따라 각각 평면 음향 홀로그래피, 원통면 음향 홀로그래피, 구면 음향 홀로그래피로 나뉜다.

측정대상인 수중 음향센서가 원통형 배열센서이므로 이 연구에서는 원통 좌표계를 사용하는 원통면 음향 홀로그래피를 적용하였다. 음향 홀로그래피에서는 공간상의 음장을 Fourier 해석을 기반으로 모드의 중첩으로 해석하는데, 이와 같은 원통형 좌표계에서는 Fourier-Bessel 변환을 이용한다. 이와 같은 파수 영역에서의 해석은 해의 안정성과 수렴성이 좋기 때문에 음원의 해석에 유리하며 음원 부근에서의 음장 해석과 가시화를 목적으로 하는 음향 홀로그래피에 적합하다. 그러나 원거리 음장을 예측하는 경우에는 측정구경의 제한에 의하여 근거리 해석방법으로는 적용이 어렵고 이를 다시 정리하여 원거리에서 적용이 가능한 근사식을 구해야 한다.

### 2.3. 원통면 음향 홀로그래피 이론

원통면 좌표계에서 음파의 거동을 표현하기 위하여 다음과 같은 변수분리를 적용하여

$$p(r, \phi, z, t) = R(r)\Phi(\phi)Z(z)T(t) \quad (8)$$

음파의 거동을 정리할 수 있다. 파동 방정식에 대입하여 정리하면 다음과 같이 반경방향의 변수로 표현되는 상미분 방정식으로 정리되며

$$\frac{d^2R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + (k_r^2 - \frac{n^2}{r^2})R = 0 \quad (9)$$

상수들 사이에는 다음과 같은 관계가 얻어진다.

$$k_r = \sqrt{k^2 - k_z^2}, \quad n = \text{정수} \quad (10)$$

$$p(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y P(k_x, k_y, z_0) e^{i(k_x x + k_y y)} e^{ik_z(z-z_0)} \quad (12)$$

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$$

이와 같은 Bessel 방정식의 해는 Bessel 함수로 표현되며 이는 각각 직교하는 기저함수로 알려져 있다. 결국 주기적인 지수함수와 이 Bessel 함수의 조합으로 음장이 표현되며 이는 각 방정식의 독립적인 해들의 중첩이 전체의 해가 되어 다음과 같이 정리된다.

$$p(r, \phi, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\phi} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P_n(a, k_z) e^{ik_z z} \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} dk_z \quad (11)$$

이를 평면 음향 홀로그래피와 비교할 때 각 변수에 대한 기저 함수의 표현만 달라졌음을 확인할 수 있다. 즉 평면 음향 홀로그래피의 음장 예측식은 식 (12)와 같으며, 식 (11)과 식 (12)를 비교하면 각 좌표축에 대한 변수와 좌표축은 다음과 같은 상사성을 가지고 있다.

$$\begin{aligned} P(k_x, k_y, z_0) &\leftrightarrow P_n(r, k_z) \\ e^{ik_z(z-z_0)} &\leftrightarrow \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} \\ k_x &\leftrightarrow k_z \\ k_y &\leftrightarrow n/r \\ k_z &\leftrightarrow k_r \end{aligned} \quad (13)$$

이로부터 임의의 반경을 가지는 원통면에서의 음장은 측정면, 즉 반경이  $a$  인 원통면에서의 음장과 다음과 같은 변환관계를 가지게 되며

$$P_n(r, k_z) = \frac{H_n^{(1)}(k_r r)}{H_n^{(1)}(k_r a)} P_n(a, k_r) \quad (14)$$

이러한 각 모드별 전과관계를 이용하여 임의의 예측면으로의 음장을 각각 전파시키고 이를 모두 중첩함으로써 원하는 음장을 얻을 수 있다.

그런데 예측하고자 하는 음장이 원거리일 경우에는 이러한 예측관계를 직접적으로 적용하기가 쉽지 않다. 실제 측정에 있어서 측정면의 크기가 유한하게 제한되므로 예측면이 멀어지게 될수록 측정하지 못한 부분이 창문함수를 적용한 것으로 작용하여

누설에 의한 오차가 발생한다. 이는 예측하는 거리가 멀어질수록 더욱 커지게 된다. 그러므로 이러한 오차요인을 제거하기 위하여 음장 예측식을 근사하여 다시 정리하였다. 아주 먼 거리라는 가정에 의하여 정상위상(stationary phase)기법으로 적분을 수행하면 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있다<sup>(5)</sup>.

$$p(R, \theta, \phi) \approx \frac{\rho_0 c}{\pi R} \sum_{n=-N}^N (-i)^n e^{in\phi} \frac{W_n(a, k \cos\theta)}{\sin\theta H'_n(ka \sin\theta)} \quad (15)$$

여기서  $N$ 은 실제 계산에 영향을 주는 모드의 개수를 나타내는데, 이는 기존의 평면 음향 홀로그래피와 비교할 때, 진행과 성분과 감쇠와 성분을 구분하는 방사원(radiation circle)과 같다고 할 수 있다.

$$N \approx ka \sin\theta \quad (16)$$

결국 음압으로 다시 표현하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$p(R, \theta, \phi) \approx \frac{e^{ikR}}{\pi R} \sum_{n=-N}^N (-i)^{n+1} e^{in\phi} \frac{P_n(a, k \cos\theta)}{H_n(ka \sin\theta)} \quad (17)$$

이 식에서 원거리의 음장은 중첩으로 표현되는 진행과 성분의 모드들의 합과 점음원 방사식으로 나타난다. 이때 모드의 중첩은 점음원의 방향성을 표현한다고 볼 수 있으며 이는 즉 음원의 빔 패턴임을 알 수 있다. 그러므로 이 식과 같은 방법으로 모드를 중첩함으로써 음원의 빔 패턴을 얻을 수 있게 된다.

### 3. 프로그램 개발 및 시뮬레이션

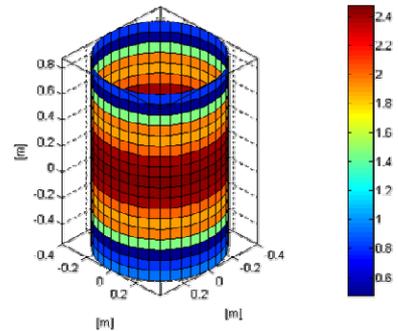
앞서 설명한 수중에서 원통면 음향 홀로그래피 기법을 실제 적용하기 위하여 측정 시스템과 절차 및 방법, 그리고 계산 프로그램을 개발하였다. 먼저 원통형 측정면에서 측정한 홀로그램 데이터로부터 근거리 음장 거동과 원거리 빔 패턴을 계산하는 MATLAB 프로그램을 개발하였다<sup>(12-14)</sup>.

이 프로그램은 앞서 설명한 음향 홀로그래피의 음장예측 이론을 구현하고 있으며 원거리 빔 패턴을 계산하기 위하여 유도한 식(17)의 근사식을 알고리즘으로 구현하였다. 그리고 이산화된 유한한 개

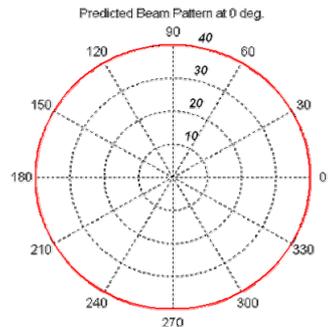
수의 측정점의 측정 조건, 즉 측정점 사이의 간격과 측정 구경 등에 의한 오차를 개선하기 위한 MEW (minimum error window), 공간 필터(spatial filter), 제로 패딩(zero padding) 등의 개발한 신호처리 기법을 적용하였다. 측정조건에 따른 측정오차의 해석 결과를 이용하여 최적의 측정조건을 설정하였다.

개발한 음향 홀로그래피 프로그램의 성능을 검증하기 위하여 이론적인 해석 해가 잘 알려져 있는 점음원을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 해석결과를 확인, 검토하였다. 단극 점음원(monopole)과 쌍극 점음원(dipole)을 좌표계의 원점에 두고 잘 알려진 이론적인 음압 해로써 측정면에서의 홀로그램을 계산하였으며, 이로부터 다시 개발한 음향 홀로그래피 프로그램을 이용하여 음원면의 음장과 원거리 빔 패턴을 예측하여 결과를 검증하였다.

Fig. 1은 단극 점음원 시뮬레이션으로부터 얻은 결과를 보여주고 있다. (a)는 역방향 변환을 통하여 얻은 음원면의 예측음압분포로써 음원의 위치와 형상을 파악할 수 있다. 음원이 단극이기 때문에 모든 방향으로 동일한 음압 크기를 가지고 있음을 확인

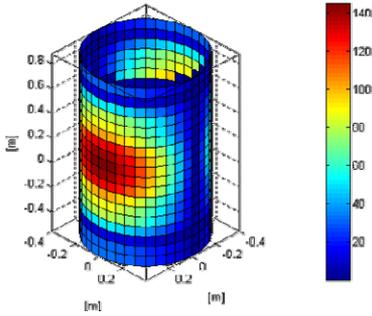


(a) Pressure distribution on source surface

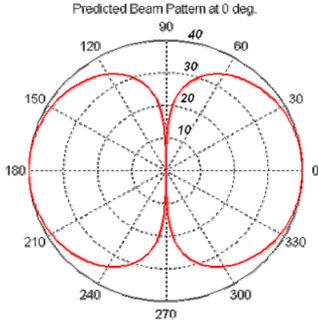


(b) Far-field beam pattern (0°)

Fig. 1 Predicted sound fields in a monopole simulation



(a) Pressure distribution on source surface



(b) Far-field beam pattern (0°)

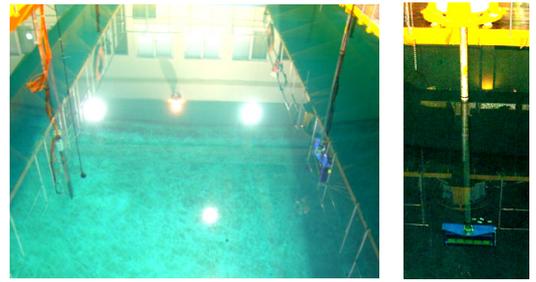
**Fig. 2** Predicted sound fields in a dipole simulation

할 수 있다. 원거리 음장을 예측하는 방법으로 (b) 처럼 정방향 변환을 수행하여 빔 패턴을 얻을 수 있다. 원거리 극한으로부터 얻을 수 있는 빔 패턴으로 음원의 특성을 표현할 수 있으며 그림에서처럼 무지향성을 가지는 단극 음원의 특성을 확인할 수 있다. 이와 같은 시뮬레이션 결과에서 제한하여 정리한 해석 알고리즘이 실제로 정확한 예측을 가능하게 하여 유용함을 확인하였고 또한 이를 바탕으로 개발한 프로그램을 검증할 수 있었다.

마찬가지로 쌍극 음원에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 2에서 보여준다. 두 방향으로 지향성을 가지는 쌍극 음원의 특성이 음원면의 음압과 원거리 빔 패턴에서 잘 나타남을 확인할 수 있었고 또한 이론적인 해석결과와 정확히 잘 일치함을 검증하였다. 이러한 시뮬레이션 결과에서 제한한 음향 홀로그래피 기법의 실험적 해석 적용이 가능함을 확인하고 적용하기로 하였다.

#### 4. 실험 및 결과

앞서 검증한 프로그램을 이용하여 실제 수중음향



**Fig. 3** Experimental setup for near-field acoustical holography in a water tank

센서를 실험하고 결과를 고찰하였다. 측정을 위한 신호수집 시스템은 NI-PXI 플랫폼에 NI-PXI 4496 DSA 보드를 이용하여 구성하였으며 LabVIEW를 이용하여 신호수집과 주파수 응답 분석 프로그램을 개발하였다. 다채널 입력신호를 동시에 수집하고 이를 주어진 주파수 신호로 피팅하여 크기와 위상을 계산하도록 프로그램하였다.

정확한 실험을 위해서는 자유공간의 조건이 만족되어야 하므로 벽면이 흡음처리가 된 무향수조가 요구되지만 Fig. 3과 같은 일반 수조에서 실험을 수행하였다. 그러므로 경계 벽면에서의 반사파가 나타나고 측정신호에 포함되므로 이를 분리하여 해석할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 이 연구에서는 수중 음향센서 방사음파의 전달경로를 해석하여 직접 전달파와 반사파를 시간적으로 분리할 수 있도록 정현파와 버스트(tone burst)신호를 사용하였다. 음원신호에 동기를 맞춰 측정시간 게이트를 설정하였으며 음원으로부터 직접 전달되는 음파 신호를 분리하였다. 그리고 이 동기신호를 이용한 각 신호의 시간지연을 계산하여 위상을 산출하였다. 그리고 각각의 단일 주파수에 대해서 실험을 반복하면서 순차적 정현파 측정(sine sweep)으로 신호를 해석하였다.

실험에서 20개의 하이드로폰을 선형으로 배열하여 측정 어레이로 사용하였다. 이를 측정하는 수중 음향센서 중심에서 0.5 m 떨어진 곳에 위치시키고 원점에 위치한 음원을 9도 간격으로 회전시키면서 순차적으로 40회 측정을 수행하였다. 그러므로 반경이 0.5 m인 원통면에서 측정된 음압 데이터로 홀로그램을 구성하였고 이로부터 근거리 및 원거리의 음장을 예측하였다. 실험에 사용한 음원으로는 해석이 가능한 점음원으로써 무지향성 구형 음원과 5개의 엘레먼트를 선형으로 배열한 수중음향센서이다.

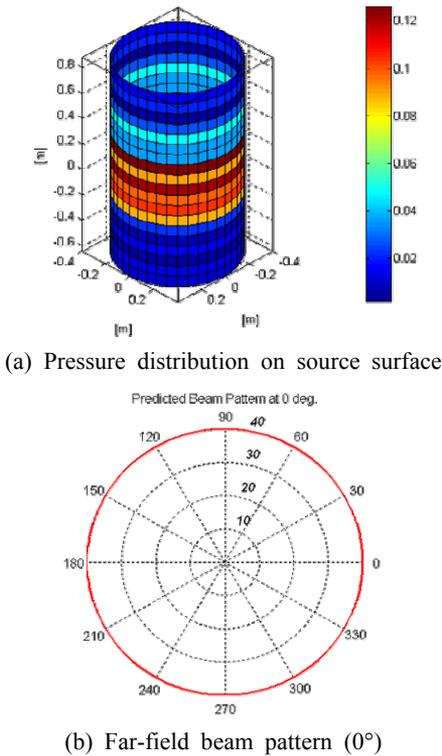


Fig. 4 Predicted sound fields in a omnidirectional sound source experiment

실험에서는 임의의 단일 주파수로 구동시키면서 측정을 수행하였다.

먼저 무지향성 구형 수중 음원에 대해서는 Fig. 4와 같은 음장예측 결과를 얻었다.

점음원의 방사특성에서 예상하는 것과 같이 모든 방향에 대해서 동일한 특성을 보여준다. 이 실험 결과로부터 측정 시스템과 프로그램의 정확성과 성능을 재확인하였다.

실험에 사용한 수중음향센서는 5개의 음향센서 엘리먼트를 배열한 선형배열로 원통형 선체고정소나(Hull-Mounted SONAR)의 개발단계에서 제작한 시제품 모델이다(Fig. 5(a)). 이 수중음향센서배열은 선형배열로 구성되었기 때문에 그 형상이 원통형 음향 홀로그래피에 적합하지 않으며 이를 해석하는데 고차모드 성분들이 많이 포함되어야 하기 때문에 측정점이 그 만큼 많아야 하는 단점이 있다. 또한 마찬가지로 이유로 예측오차가 증가하게 된다. 그러나 궁극적으로 적용할 대상이 원통형이기 때문에 이 실험을 통하여 원통형 음향 홀로그래피 기법의

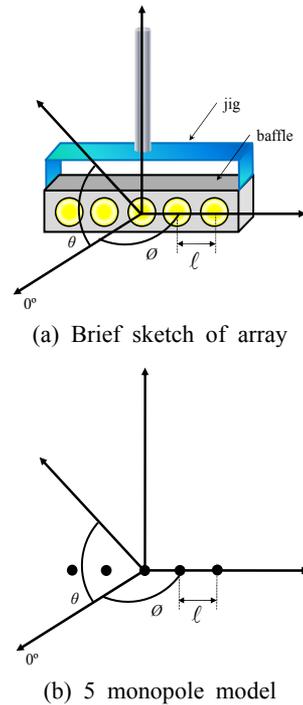


Fig. 5 5 element underwater linear array

적용성과 오차 등을 확인하고 검증할 수 있다.

Fig. 5(a)와 같은 수중음향센서의 실험적 해석결과를 비교, 검증하기 위하여 대상으로 하는 수중음향센서의 각 음향센서 엘리먼트를 단일 점음원으로 모델링하였고 또한 여기에서 배플(baffle)을 없다고 가정함으로써 반사 경계면이 없는 점음원의 선형배열로 가정하여 해를 계산하였다(Fig. 5(b)). 이 경우의 원거리의 빔 패턴은 다음과 같이 얻어진다.

$$p(r, \theta, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \left( \frac{\sin[(N/2)k\Delta r]}{\sin[(1/2)k\Delta r]} \right) \quad (18)$$

여기서  $\Delta r = d \sin \theta$

잘 알려진 바와 같이 일정한 간격으로 놓인 점음원의 빔 패턴은 일정한 크기의 주엽과 부엽을 가지게 되며 배플이 없기 때문에 전후로 대칭인 음장을 가지게 된다. 반면 실험에 사용한 실제 수중음향센서는 뒤쪽에 배플과 고정지그가 존재한다.

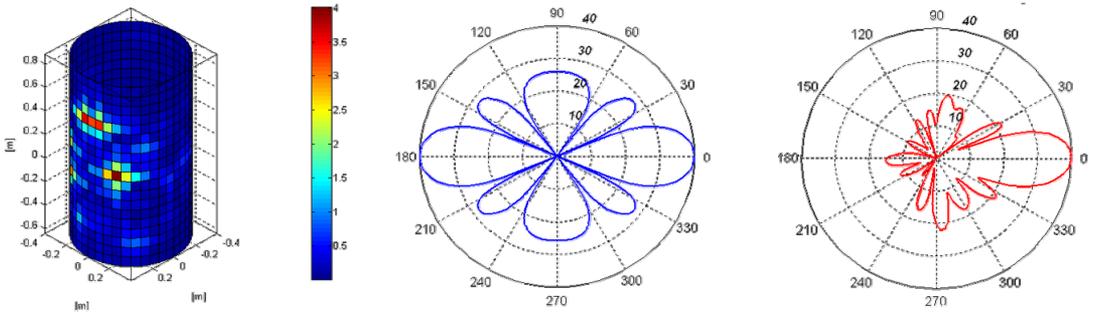
이 단일 점음원 모델로부터 계산한 빔 패턴과 실제 수중음향센서의 해석결과를 비교하여 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. 먼저 음원면으로 후방예측하여 Fig. 6(a)와 같이 구한 음압분포는 선형배열의 양 끝

단과 위 지그부분에서 상대적으로 높은 음압레벨을 가지는 것으로 나타났다. 이는 기하학적인 형상구조상 수중음향센서의 양 끝 부분이 음원면에 가깝기 때문에 음압이 크게 나타나는 것이며 윗 부분에서는 센서 고정지그에 의하여 산란이 크게 나타남을 보여준다. 결과적으로 이 결과는 원통면의 형상과 수중음향센서의 형상이 달라서 음원면에 근접한 돌출부위에서 음압이 크게 나타남을 보여 준다. 그런데 이러한 형상에 따른 음장의 변화는 원거리 음장에도 영향을 미치기 때문에 정확한 실험을 위해서는 측정조건과 배열구성에 세심한 주의가 필요하다.

Fig. 6(b)는 점음원 모델링과 실제실험 결과를 비

교한 것이다. 왼쪽 빔 패턴에도 나타나듯 점음원 모델링은 배플이 없다고 가정하였기 때문에 전후로 대칭적인 음장을 가진다. 반면 실제 선형배열의 실험 결과 원거리 음장의 예측에서는 빔 패턴의 비교에서 확인하는 바와 같이 주엽의 빔 폭은 잘 일치하고 있지만 부엽들은 뒤쪽의 배플과 지그 등에 의하여 줄어들고 복잡한 형상을 가진다는 사실을 알 수 있다. 그리고 이는 다음과 같이 수직축에 대한 각 경사각도별 빔 패턴에서도 잘 확인할 수 있다.

Fig. 7에서 나타나듯이 배플의 영향으로 인하여 수직방향의 각도의 변화에 따라 빔 패턴이 다르게 나타남을 잘 확인할 수 있다.



(a) Pressure distribution on source surface

(b) Far-field beam pattern (0°); 5 monopole simulation(left) and experiment(right)

Fig. 6 Predicted sound fields in the 5 element linear array experiment

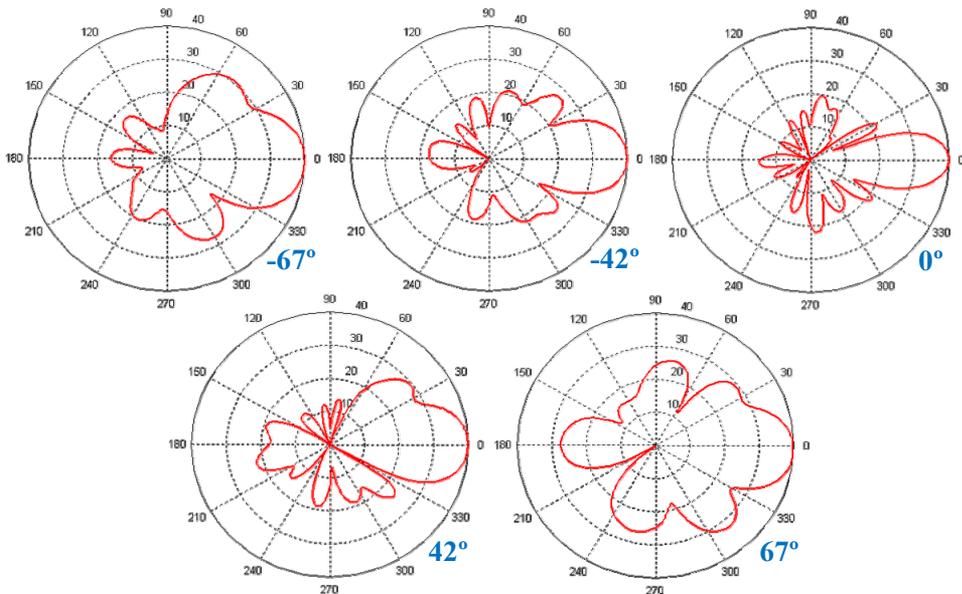


Fig. 7 Far-field beam patterns for different elevation angles

## 5. 결 론

수중 음향센서의 성능을 나타내는 원거리 음장과 빔 패턴을 실험적으로 평가하기 위하여 원통면 음향 홀로그래피 측정 시스템과 방법을 개발하였다. 실험실 환경으로 수조에서 근거리의 음압분포를 하이드로폰 배열을 사용하여 측정하고, 이 홀로그램으로부터 근거리의 음원면의 음장과 원거리 빔 패턴을 각각 계산하는 알고리즘을 개발하였으며 음장을 개선할 수 있는 신호처리 기법을 적용하였다.

이론적인 해석연구를 바탕으로 실험 시스템을 구성하였고 사용자 편의 계산 프로그램을 제작하였다 그리고 시뮬레이션과 실험을 통하여 이를 확인하고 검증하였으며 제안한 기법의 효과적인 사용 가능성을 확인하였다. 이와 같은 연구를 바탕으로 크기가 협소한 음향수조에서 근거리 음장을 측정하여 음원의 방사특성과 원거리의 빔 패턴을 예측하는 음향 홀로그래피 기반의 음장해석 방법의 효과적이고 유용한 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사로 드립니다.(계약번호UD070054AD)

## 참 고 문 헌

(1) Bobber, R., 1998, Underwater Electroacoustic Measurements, Peninsula Press.  
 (2) Robinson, S. P., 1999, "Review of Methods for Low Frequency Transducer Calibration in Reverberant Tanks," NPL Report CMAM 034.  
 (3) Maynard, J. D., Williams, E. G. and Lee, Y., 1985, "Nearfield Acoustic Holography: I. Theory of Generalized Holography and the Development of NAH," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 78, pp. 1395~1413.  
 (4) Veronesi, W. A. and Dardy, H. D., 1987, "Nearfield Acoustic Holography(NAH) II. Holographic Reconstruction Algorithms and Computer Implementation," J. Acoust. Soc. Am. 81, pp. 1307~1322.

(5) Williams, E. G., 1999, Fourier Acoustics, Academic Press.

(6) Kim, S.-M., Choi, Y.-C. and Lim, Y.-K., 2004, "Study on the Applicability of Nearfield Acoustic Holography to Underwater Acoustic Fields with Surface Reflections," The Acoustical Society of Korea, Vol. 23, No. 1, pp. 163~166.

(7) Kim, S.-M., Choi, Y.-C. and Lim, Y.-K., 2004, "Development of a Sound Visualization System for an Anechoic Tank Using Acoustic Holography," The Acoustical Society of Korea. Vol. 23, No.2, pp. 397~400.

(8) Horton, C. W. and Innis, Jr., G. S., 1961, "The Computation of Far-field Radiation Patterns from Measurements Made Near the Source," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 33, No. 7, pp. 877~880.

(9) Baker, D. D., 1962, "Determination of Far-field Characteristics of Large Underwater Sound Transducers from Near-field Measurements," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 34, No. 11, pp. 1737~1744.

(10) Trott, W. J., 1964, "Underwater - Sound - Transducer Calibration from Nearfield Data," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 36, No. 8, pp. 1557~1568.

(11) VanBuren, A. L., 1991, "Near-field Transmitting and Receiving Properties of Planar Near-field Calibration Arrays," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 89, No. 3, pp. 1423~1427.

(12) Kwon, H.-S., 1997, "Sound Visualization by Using Enhanced Planar Acoustic Holographic Reconstruction," Ph.D. thesis, Mechanical Engineering Department, Korea Advanced institute of Science and Technology.

(13) Kwon, H.-S. and Kim, Y.-H., 1995, "Minimization of Bias Error Due to Window in Planar Acoustic Holography Using Minimum Error Window," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 98, No. 4, pp. 2104~2111.

(14) Kwon, H.-S., Kim, Y.-J. and Bolton, J. S., 2003, "Compensation for Source Non-stationarity in Multi-reference, Scan-based Nearfield Acoustical Holography," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 113, No. 1, pp. 360~368.