

〈논 문〉

# 경계요소법에 기초한 음향 홀로그래피에서 오차 최소화 과정에 의한 한국 종의 음장 재구성

## The Sound Field Reconstruction of a Korean Bell Using an Error Minimization Scheme in the BEM-Based Acoustical Holography

김 철 희\* · 이 장 무\*\* · 강 연 준\*\*

Cheol-Hee Kim, Jang Moo Lee and Yeon June Kang

(1998년 9월 28일 접수 : 1998년 12월 12일 심사완료)

**Key Words :** Acoustical Holography(음향 홀로그래피), Boundary Element Method(경계요소법), Korean Bell(한국 종), Sound Field Reconstruction(음장 재구성), Arbitrarily Shaped Sound Sources(임의 형상 음원), Error Minimization Scheme(오차 최소화 과정)

### ABSTRACT

A method to reconstruct the sound field around a Korean bell is developed. The sound radiation problem is formulated based on the boundary element method by using the algorithm of the acoustical holography. Sound pressures at the hologram surface are measured and used as input data for the analysis program that was developed in this study. An error minimization scheme is presented to overcome difficulties that arise in the backward reconstruction of the BEM-based acoustical holography. In the model fictitious source surfaces were also introduced to reduce the complexity stemmed from the source shape. The sound field associated with the (4,0) vibrational mode of the Korean bell was visualized and verified experimentally.

### 1. 서 론

음향 홀로그래피는 하나의 2차원면(평면 혹은 곡면)에서 측정된 음압으로부터 소음원의 소음 방사 특성을 밝혀 내고 소음원 주변 3차원 공간의 음장을 재구성해내는 방법을 말한다. 1980년대초부터 이에 관한 연구가 이루어지기 시작하였고, Williams와 Maynard에 의하여, 소위 근접 음장 홀로그래피(Nearfield Acoustical Holography, NAH)라는 이

름으로 체계화되었다<sup>(1,2)</sup>. 이는 2차원 공간 영역에서의 FFT를 기본 알고리즘으로 사용하며, 분리가능한 좌표계(separable coordinate) 즉, 직교, 원통, 구면 좌표계에 대하여는 그 구현 방법이 잘 알려져 있고 실제 문제의 적용에 있어서도 큰 어려움이 없다. 그러나 임의 형상을 갖는 소음원 즉 평면이나 원통, 구형으로 모델링 할 수 없는 소음원의 경우에는 이 방법을 그대로 적용할 수 없고 별도의 해석 방법을 강구해야만 한다. 본 연구에서는 임의 형상을 갖는 소음원에 대한 음향 방사 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로서 경계요소법(Boundary Element Method, BEM)을 도입한다<sup>(3,4)</sup>. 음향 홀로그래피에 경계요소법을 적용하는 방법은 M. R. Bai에 의하여

\* 서울대학교 공과대학 기계설계학과

\*\* 정희원, 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

4가지 알고리즘과 함께 제시된 바 있다<sup>(5)</sup>. 이 방법에 의하면 소음원 형상이 비교적 단순하여 해석해가 존재하는 경우에는 비교적 작은 오차를 보이는 것을 확인할 수 있지만, 실제로 경험하는 임의 형상의 소음원에 대하여는 각종 오차를 감소시킬 수 있는 대책이 심각하게 고려되어야 한다. 본 연구에서는 소음원 표면에서의 음압 계산에 오차 최소화 과정을 도입함으로써 이러한 어려움을 극복하였다. 이 오차 최소화 과정은 소음원 표면에서의 음압을 단지 몇 개의 파라미터만을 써서 표현하고 그렇게 가정된 소음원 음압에 의해 계산되는 홀로그래프 위치에서의 음압과 실험을 통하여 얻은 홀로그래프 음압과의 차이를 반복적으로 계산하여 줄여나감으로써 소음원 음압을 최적화하는 과정이라 할 수 있다.

임의 형상 소음원의 일례로 한국 종을 대상으로 음장 재구성을 시도하였으며, 상원사 동종<sup>(6)</sup>의 2분의 1축소 모형을 사용하였다. 한국 종의 진동 및 음향 방사 특성에 대한 실험 및 해석은 1970년대 후반에 시작되었는데, 염영하 등은 한국 종의 맥놀이 현상을 비롯한 음향학적 특성에 대하여 연구한 바 있다<sup>(7)</sup>. 또한 음향 홀로그래피에 관련된 한국 종 연구 사례로는 성덕대왕 신종을 들 수 있는데, 김양한 등은 원통형 음향 홀로그래피<sup>(8)</sup>를 활용하여 성덕대왕 신종의 음향 방사 양상을 보인 바 있다<sup>(9)</sup>. 본 연구는 한국 종 그 자체가 갖는 음향학적 특성(예를 들면, 음통(音筒)이나 명동(鳴洞))에 대한 연구를 포함하고 있지는 않으나 종의 실제 모양을 충실히 반영하는 경계 요소 모델을 써서 음장을 가시화하였다는 점에서 이전까지의 한국 종 연구와 구별된다고 할 수 있다.

## 2. 한국 종의 음장 재구성 방법

임의 형상 음원으로서 Fig. 1에 나타난 외관 및 주요 치수를 갖는 한국 종을 택하여 실험하고 거기에서 얻은 홀로그래프 음압 데이터를 이용하여 음원 표면에서의 음압을 계산하였다. 이 과정에서, 음원 표면에서의 음압 분포 양상이 홀로그래프 음압 분포와 유사할 것이라는 가정에 근거하여 몇 개의 파라미터만을 써서 이를 표현한 후 오차 최소화 과정을 거쳐 음원 음압을 도출하였다.

### 2.1 이론

모든 논의는 파동 방정식(wave equation)으로부터 시작된다. 잘 알려진 바와 같이 선형화된 파동

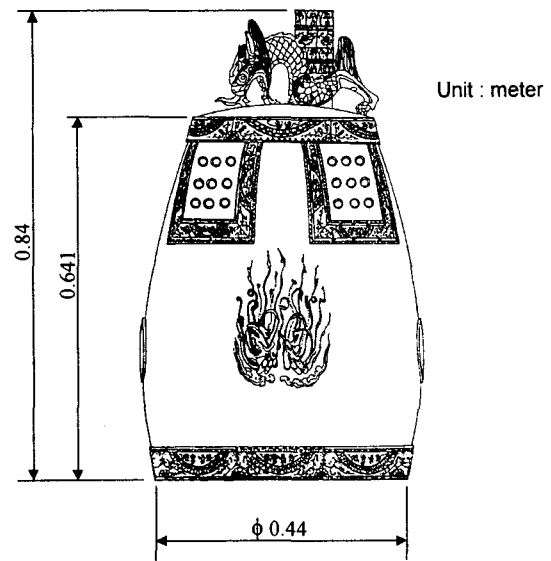


Fig. 1 1/2 scaled Sangwonsa temple bell

방정식(linearized wave equation)은 다음과 같다.

$$\nabla^2 p(\vec{x}, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\vec{x}, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서,  $p(\vec{x}, t)$ 는 공간변수  $\vec{x}$ 와 시간  $t$ 에 따른 음압(acoustic pressure)분포를 나타내며, 상수  $c$ 는 공기중에서의 음속이다. 단일 주파수  $\omega$ 에 대하여  $p(\vec{x}, t) = p(\vec{x})e^{i\omega t}$ 로 time-dependence를 가정하면 다음과 같은 헬름홀츠 방정식(Helmholtz equation)<sup>(10)</sup>을 얻을 수 있다.

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

여기서  $k$ 는 파수(wavenumber)이며,  $k = \omega / c$ 로 정의된다. 그린 함수 이론(theory of Green's function)을 적용하면 앞서 보인 헬름홀츠 방정식은 다음과 같은 헬름홀츠 적분(Helmholtz integral)<sup>(10)</sup> 형태로 변환되며, 이것은 Fig. 2와 같이 설정된 임의 형상 소음원의 외부 음향 방사 문제에 적용된다.

$$p(\vec{x}) = \iint_S \left( p(\vec{x}_s) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{x}_s)}{\partial n_s} - G(\vec{x}, \vec{x}_s) \frac{\partial p(\vec{x}_s)}{\partial n_s} \right) dS \quad (3)$$

여기서  $\vec{x} = \vec{x}_{field}$ 로서 소음원 외부의 임의의 지점을 뜻하며,  $\vec{x}_s$ 는 소음원 표면(또는 소음원을 둘러싸는 가상면)에 있는 점을 나타낸다.  $G$ 는 자유공간 그린함수<sup>(10)</sup>로서,  $G = \frac{e^{jkr}}{4\pi r}$ 로 정의되고,  $r = |\vec{x} - \vec{x}_s|$

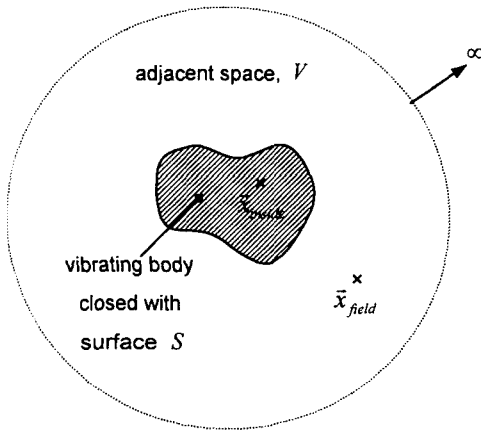


Fig. 2 Acoustic radiation by an arbitrarily shaped sound source

이며,  $\frac{\partial}{\partial n_s}$  는 소음원 표면에 대한 수직 방향 미분을 뜻한다.

다음 단계로, 식 (3)의 적분항들을 이산화 함으로써 경계요소법이 도입된다. 경계요소법에서는 관심을 갖는 영역이 3차원일 경우에 그 경계에 해당되는 2차원면을 이산화하여 경계조건을 부여함으로써 관련 3차원 영역을 해석하게 된다. 식 (3)을 살펴 보면 3차원 공간상의 소음원 외부의 임의의 지점에서의 음압을 2차원면상의 소음원 표면 정보로부터 도출해 내고 있으므로 경계요소법을 적용하기 위한 식이 구성된 것으로 볼 수 있다. 한편, 식 (3)과 관련하여  $\vec{x} = \vec{x}_{inside}$  인 경우 즉, 소음원 내부에 있는 임의의 지점을 고려하면 다음과 같은 관계식이 성립됨이 알려져 있다<sup>(10)</sup>.

$$0 = \iint_S \left( p(\vec{x}_S) \frac{\partial G(\vec{x}_{inside}, \vec{x}_S)}{\partial n_S} - G(\vec{x}_{inside}, \vec{x}_S) \frac{\partial p(\vec{x}_S)}{\partial n_S} \right) dS \quad (4)$$

단락 소음원 표면에서의 음압 또는 음압변화율과 같은 음향학적 정보가 알려졌다고 하면 이와 같이 경계요소법만으로 문제가 해결되며 음향 홀로그래피 개념과도 무관하다. 그러나 이처럼 소음원 표면에서의 정보를 알기 곤란한 경우가 많다. 실제로, 소음원 표면의 법선 방향 속도는 가속도계 등의 센서로 측정 가능하지만 소음원이 회전체라든가 고온(高温)이라든가 하는 이유로 측정하기 곤란한 경우도 있고 또 소음원 표면에서의 음압은 마이크로폰으로 직접 측정하기에 부적당하다. 따라서 음향 홀로그래피가 적용되어야 할 필요성이 여기에 있다. 즉, 소음원으로 어느 정도 떨어진 거리에서 얻어낸 2차원 음압

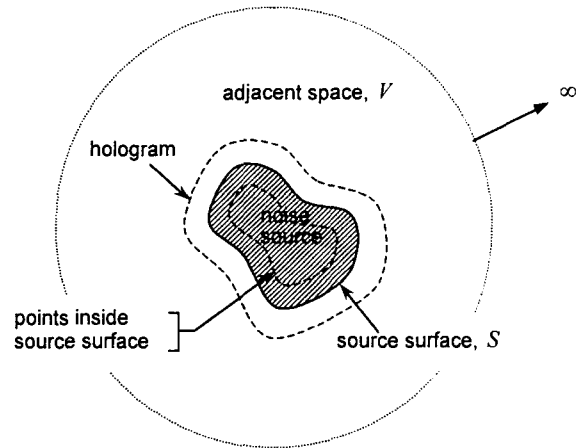


Fig. 3 Schematic diagram of acoustical holography for an arbitrarily shaped sound source

정보만으로 관련 3차원 음장 전체를 풀어낸다는 개념이 요구되며 이것이 곧 음향 홀로그래피의 기본 개념이다. Fig. 3에서 음원, 홀로그램, 주변 음장 등 해석 영역에 대한 정의를 보였다.

## 2.2 수치 해석

경계요소법을 구현하기 위하여 우선 종 모델을 이산화하고 각 요소에 대한 수치 적분을 수행함으로써 시스템 특성 행렬을 구하게 된다. 사용된 요소는 2차 요소(quadratic element)이며 모델 형상을 고려하여 삼각형 요소(triangular element)와 사각형 요소(quadrilateral element)를 각각 30개와 150개씩 사용하였다. 종 둘레 방향 일정한 간격으로 15개씩, 상하 방향 12개로 배치하였고 상부와 하부의 정점에 모이는 부분에 삼각형 요소를 사용하였다. 총 노드(node) 개수는 512개이고 이 중 실제 종 표면에 대응하는 부분은 345개이며 나머지 중에서 61개는 종의 상부, 106개는 하부에 모델링된 가상 음원에 속한다. Fig. 4는 해석에 사용된 요소를 나타낸다. 이것은 문제에서 주어진 실제의 면적분을  $(\xi, \eta)$  평면 내의 일정 영역으로 대응(mapping) 시키는데 사용된다. 그 결과, 원래의 면적분은 단순한 형태로 바뀌고 Gaussian quadrature 를 사용하여 수치 적분을 수행하였다.

식 (3)을 이산화하여 수치 계산에 적합한 형태로 바꾸면 다음과 같은 벡터 형태로 나타낼 수 있다.

$$p(\vec{x}) = \sum_{e=1}^E \left[ \left[ \iint_{S_e} \left( \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{x}_S(\xi, \eta))}{\partial n_S} \varphi(\xi, \eta) J(\xi, \eta) \right) d\xi d\eta \right] \mathbf{p}_e \right]$$

$$-\left[ \iint_{S_i} (G(\bar{x}, \bar{x}_s(\xi, \eta)) \varphi(\xi, \eta) J(\xi, \eta)) d\xi d\eta \right] \mathbf{P}_e^g \quad (5)$$

여기서  $\varphi(\xi, \eta) = [\phi_1(\xi, \eta), \phi_2(\xi, \eta), \dots, \phi_l(\xi, \eta)]$ 로서, 형상함수(shape function)들로 구성되는 행벡터이고  $\mathbf{p}_e = [p_{e1}, p_{e2}, \dots, p_{el}]^T$ ,  $\mathbf{P}_e^g = [(\partial p / \partial n_s)_{e1}, (\partial p / \partial n_s)_{e2}, \dots, (\partial p / \partial n_s)_{el}]^T$ 로서, 각각  $e$ 번째 요소에 대한 로컬 노드(local node)에서의 음압과 음압의 소음원 표면에 대한 수직 방향 미분값을 나타내는 열벡터이다.  $E$ 는 총 요소 개수이고,  $l$ 은 로컬 노드 개수로서, 삼각형 요소일 경우  $l=6$ , 사각형 요소일 경우  $l=8$ 이 된다. 또한  $J(\xi, \eta)$ 는 좌표 변환에 관련된 자코비안(Jacobian)이다. 이처럼 각 요소에 대한 적분함으로 주어진 식을 조립하여 다음과 같은 하나의 식으로 나타낼 수 있다.

$$p(\bar{x}) = \left[ \iint_{S_i} \left( \frac{\partial G(\bar{x}, \bar{x}_s(\xi, \eta))}{\partial n_s} \Phi(\xi, \eta) J(\xi, \eta) \right) d\xi d\eta \right] \mathbf{P}_s - \left[ \iint_{S_i} (G(\bar{x}, \bar{x}_s(\xi, \eta)) \Phi(\xi, \eta) J(\xi, \eta)) d\xi d\eta \right] \mathbf{P}_s^g \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{P}_s = [p_1, p_2, \dots, p_N]^T$ ,  $\mathbf{P}_s^g = [(\partial p / \partial n_s)_1, (\partial p / \partial n_s)_2, \dots, (\partial p / \partial n_s)_N]^T$ 로서, 1, 2, ...,  $N$ 은

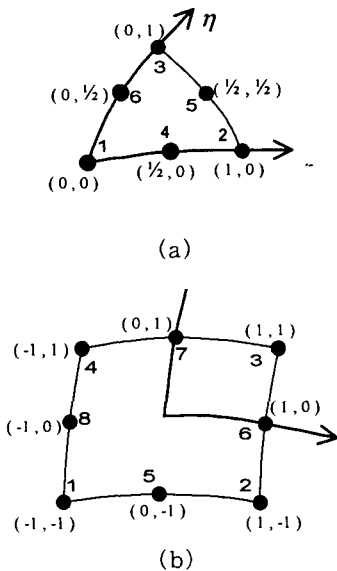


Fig. 4 Quadratic (a) triangular and (b) quadrilateral element used for BEM

글로벌 노드 번호이며, [ ] 내부의 적분은 식 (5)에서와 동일하되  $\mathbf{P}_s, \mathbf{P}_s^g$ 에 맞도록 재정렬된  $1 \times N$ 행벡터로 주어진다. 이것을 각각  $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}$ 라 하면 윗식은

$$p(\bar{x}) = \boldsymbol{\alpha} \mathbf{P}_s - \boldsymbol{\beta} \mathbf{P}_s^g \quad (7)$$

로 축약된다.  $\bar{x}$ 에 홀로그래프로 설정된 위치 좌표  $H$ 개를 대입하면, 다음과 같은 식이 구성된다.

$$\mathbf{P}_h = \boldsymbol{\alpha}^h \mathbf{P}_s - \boldsymbol{\beta}^h \mathbf{P}_s^g \quad (8)$$

여기서,  $\mathbf{P}_h$ 는  $H \times 1$ 열벡터,  $\boldsymbol{\alpha}^h, \boldsymbol{\beta}^h$ 는  $H \times N$ 행렬이다. 유사한 방법으로,  $\bar{x}$ 에 소음원 내부의 점  $N$ 개를 대입하면, 식 (4)에 근거하여 다음 식이 구성된다.

$$0 = \boldsymbol{\alpha}^m \mathbf{P}_s - \boldsymbol{\beta}^m \mathbf{P}_s^g \quad (9)$$

여기서,  $\boldsymbol{\alpha}^m, \boldsymbol{\beta}^m$ 는  $H \times N$ 행렬로 주어진다. 식 (8)과 (9)에서  $\mathbf{P}_s^g$ 를 소거하면

$$[\boldsymbol{\alpha}^h - \boldsymbol{\beta}^h (\boldsymbol{\beta}^m)^{-1} \boldsymbol{\alpha}^m] \mathbf{P}_s = \mathbf{P}_h \quad (10)$$

가 되며, 이로부터  $\mathbf{P}_s$ 를 구하는 과정은 뒤에 소개하는 오차 최소화 과정에서 보인다. 일단  $\mathbf{P}_s$ 가 구해지면 이를 식 (9)에 대입하여  $\mathbf{P}_s^g$ 를 구하게 되며, 그 결과를 식 (7)에 다시 대입함으로써 임의 지점에서의 음압  $p$ 를 얻는다.

### 2.3 가상의 음원면 설정

한국 종의 형상은 그 두께가 전체적인 크기에 비하여 작으므로 종의 외부면과 내부면을 모두 소음원 표면으로 취급하는데 어려움이 있다. 경계요소법을 따르자면 내부,외부로 연결된 모든 종의 표면을 이산화해야 하는데 그러기 위해서는 메쉬(mesh) 크기가 매우 작아져야 하고 그 결과로 계산 시간이 매우 많이 걸리게 된다. 뿐만 아니라 시스템 특성 행렬에도 불리하게 작용한다.

따라서 본 연구에서는 종의 외부 표면만을 실제 음원면으로 취급하였고 종의 내부면은 실제 음원면으로 취급하지 않고 이 부분을 둘러싸는 가상 음원면을 설정하여 실험 및 해석에 사용하였다. 앞서 살펴본 헬름홀츠 적분식은 일반적으로 소음원 표면에 대한 적분이지만 어떤 소음원을 둘러싸는 가상의 곡면에 대하여도 동일하게 적용된다<sup>(10)</sup>. 또한 한국 종

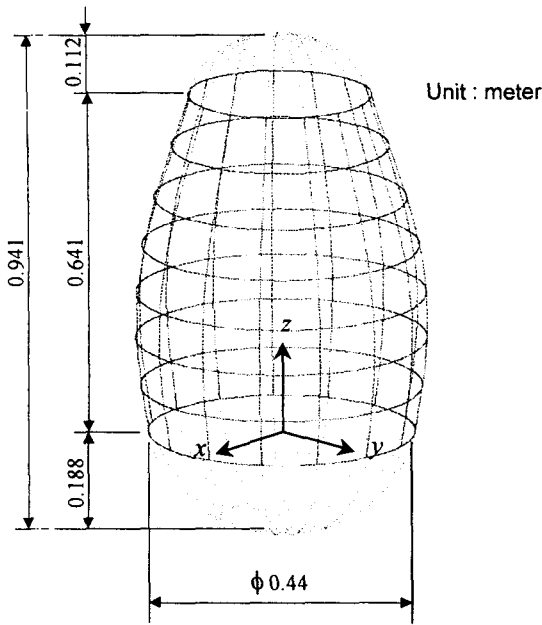


Fig. 5 Boundary element model for the Korean bell

은 용뉴와 음통 등이 마련된 종의 상부가 매우 복잡한 형태를 갖는다. 그러므로 이를 그대로 모델링하기에는 많은 어려움이 따를 뿐더러 실제로 종의 상부에서는 음향 방사가 거의 없으므로 종의 상부 형태는 적당히 다른 형상으로 대체하여 모델링하였다. 그 결과 실제 한국 종의 모양에서 상부와 하부는 가상 음원면으로 대체되고 해석코자 하는 모델 형상은 부드러운 계란형 곡면으로 구성되었으며 메시의 크기도 특별히 작아야 할 필요가 없다. 그 결과로 생성된 경계 요소 모델을 Fig. 5에 보였다.

2.4 오차 최소화 과정

실측을 통하여 얻는 홀로그램 음압은 얼마간의 오차를 분명히 포함하고 있으며, 앞서 설명된 시스템 특성 행렬도 수치적 적분에 의한 오차나, 이산화된 요소에 의해 재구성된 음원 형상과 실제 형상 간의 불일치에서 기인한 오차 등 많은 오차 요인을 가지고 있다. 이러한 상황에서, 주어진 문제를 가우스 소거법(Gauss Elimination) 등의 방법으로 직접 풀면 물리적으로 무의미한 답을 얻게 됨을 경험하였다. 또한 대안으로서 극값 분해방법(Singular Value Decomposition)을 사용하는 것도 실용적으로는 좋은 결과를 기대하기 어렵다는 것을 문헌을 통하여 알 수 있었다<sup>(11)</sup>. 결국 본 연구에서는 종 표면의 음압 분포가 홀로그램 데이터와 유사한 형태를 갖는 것으로 가정함으로써 미지수의 개수를 대폭 줄이고 이 미지수들을 파라미터로 하여 오차를 최소화하는

Table 1 Convergence of error minimization scheme

Cases	Step	Initial value of parameters		Final value of parameters	Mean error(%)
Case I	0.01	a	1.0	0.8136	6.503
		b	2.0	1.9316	
		c	4.0	3.9802	
		d	6.0	6.0030	
		e	4.0	3.9537	
Case II	0.2	a	2.0	0.8113	6.800
		b	3.0	1.9357	
		c	5.0	3.9880	
		d	7.0	6.0010	
		e	5.0	3.9850	
Case III	0.02	a	0.2	0.2519	6.498

방법을 취하였다.

이 방법은 적당한 초기값을 가정할 때의 음원의 음압에 의해 계산되는 홀로그램 음압과 실제 홀로그램 음압과의 차이를 최소화함으로써 음원 음압  $P_s$ 를 결정하는 과정이다. 이와 같이 정의한 목적 함수를 수식으로 표현하면 다음과 같은 형태가 된다.

$$C(a,b,c,\dots) = \frac{1}{H} \sum_{j=1}^H \left\{ \left[ \text{강} - \text{강}(a,b,c,\dots) \right]^2 P_s(a,b,c,\dots) \right\} - \{P_h\} \tag{11}$$

여기서  $a, b, c, \dots$ 는 음원 표면의 음압 분포를 결정하는 파라미터이며,  $\{ \}_j$ 는 그 벡터의  $j$ 번째 요소를 나타낸다. 우선 종 표면의 음압 분포를 상하방향과 원주방향 성분 2가지로 나누어 생각하고 그 곱을 전체적인 분포로 생각한다. 또 원주방향 분포는 홀로그램 음압 분포로 미루어 볼 때 거의 일정한 양상을 띠고 있으므로 홀로그램 음압의 원주방향 분포를 그대로 사용하고 상하방향의 분포는 다항식(polynomial)으로 가정하여 여기서 적용된 다항식의 계수를 종 표면의 음압 분포를 결정하는 파라미터로 선정하였다. 오차 최소화 과정은 위의 목적 함수  $C(a, b, c, \dots)$ 에 대하여 적절한 초기조건을 주고 그 점에서의 구배(gradient)를 구한 후 그 방향으로 파라미터 값을 적당량 변화시킴으로써 목적함수가 최소화되는 점을 찾는 과정을 계속 반복하는 것으로 이루어진다.

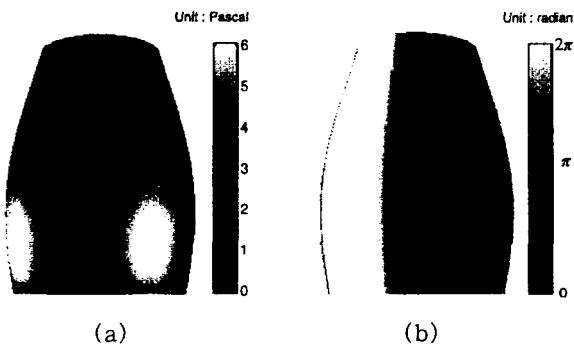


Fig. 6 Sound pressure distribution at the source surface : (a) magnitude and (b) phase

Table 1에서 오차 최소화 방법의 적용 결과를 보인다. 여기서 서로 다른 초기조건들을 부여해도 수렴되는 값에 큰 차이가 없는 것을 알 수 있으며, 최소화된 오차는 실험에서 얻은 홀로그램 음압 크기의 6.5%가 됨을 확인하였다. 이러한 과정을 거쳐서 결정된 음원 음압을 Fig. 6에 나타내었다.

### 2.5 실험

본 연구에서는 두 가지의 실험이 수행되었다. 첫째는, 수치 해석 과정에서 입력 데이터로 이용되는 홀로그램 및 가상 음원면에서의 음압을 측정하는 것이고, 둘째는 원거리에서의 음장을 측정하여 예측한 결과와 비교 검증하는 실험이다.

실제의 한국 종은 대개 종각에 설치되어 있으므로 타종시 음향 방사는 지붕과 바닥면에서의 반사 등에 영향을 받으며 그 밖의 여러 가지 조건에 지배된다.

그러나 본 연구에서는 자유 음장 조건을 가정하고 있으므로, 실험을 위해서 간이 무향실 내에 종을 설치함으로써 이러한 조건을 근사적으로 구현하였다. 또 실제의 타종은 임펄스에 의한 가진으로 생각된다. 그러나 대개의 음향 홀로그래피 실험에 있어서 겪게 되는 실험 장비의 제약, 즉 동시에 수백개의 측정점에서 신호를 받아들이기 곤란하다는 점 때문에, 재연성이 있는 가진력이 주어져야 할 필요가 있다. 따라서 임펄스에 의한 타종 대신 본 실험에서는 B & K type 4810소형 가진기를 사용하여 일정한 크기 및 특성을 갖는 가진력을 줄 수 있게 하였다. Fig. 7은 실험 장치의 개략을 보여 준다. 간이 무향실 천장의 중앙에 매달린 종을 중심으로 어레이 마이크론(array microphone)의 고정 및 위치 이동을 위한 지그를 설치하였고, 그 지그에 설치된 B & K type 4196어레이 마이크론에서 나온 음압 신호는 B & K type 2690A 시그널 콘디셔너를 거쳐 무향실 외부에 있는 데이터 획득용 컴퓨터로 전송된다. 가진기는 별도의 고정대로 간이 무향실 바닥에 고정하였으며, 가진기에 연결된 가는 막대의 끝은 접착제를 이용하여 종 표면에 부착하였다. 또한 이 부착 위치에서 되도록 가까운 위치에 기준 마이크론(reference microphone)을 설치하여 위상 정보를 얻었다. 7개의 어레이 마이크론을 한 조로 하여 종의 주변 7개 지점에서의 음압 크기를 동시에 얻으며, 별도로 설치된 기준 마이크론과 각 어레이 마이크론 간의 음압 위상차를 데이터로 저장하였다. 이러한 작업을 60회 반복하여 홀로그램면에 존재하

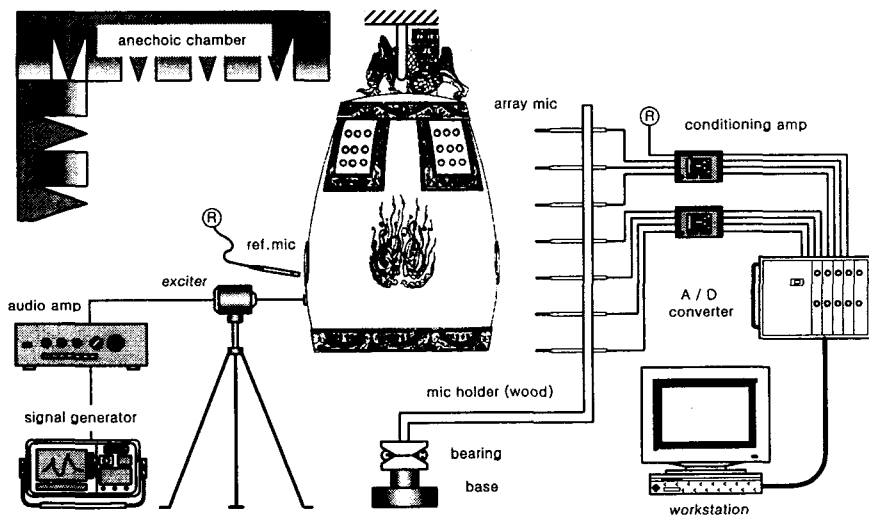


Fig. 7 Schematic diagram of experimental setup

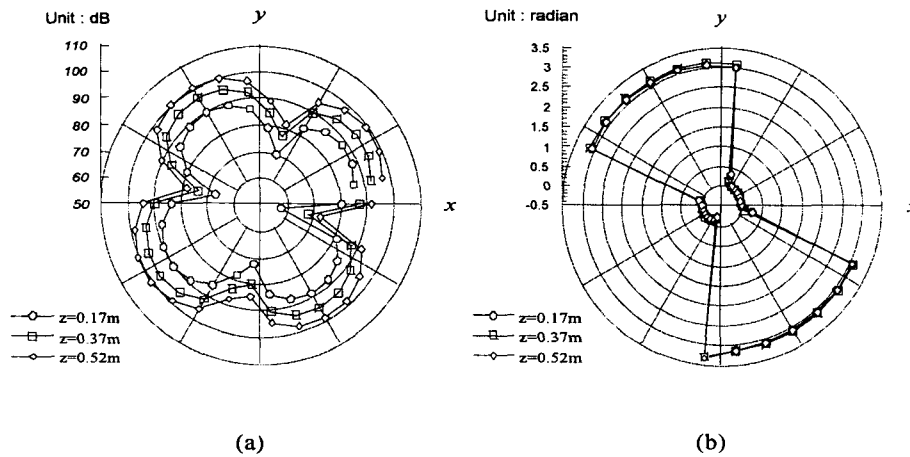


Fig. 8 Measured hologram pressure (a) magnitude and (b) phase at various heights

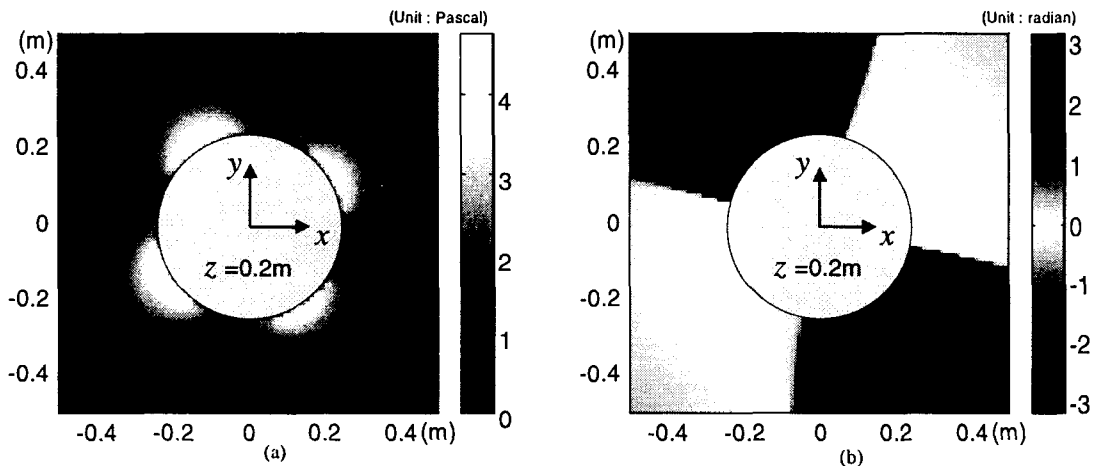


Fig. 9 Reconstructed sound field around the Korean bell (a) magnitude and (b) phase

는 420 개의 점에 대한 음압을 측정하였다. 가진 신호는 정현파 187.7 Hz 로 하였는데 이는 실험에 사용된 종의 기본 고유 모드, 즉 (4,0) 모드에 해당하는 주파수이다. 또한 앞서 설명된 가상 음원면에서의 음압을 측정하기 위하여 종의 상부와 하부에 어레이 마이크로폰을 다시 설치하고 유사한 방법으로 음압의 크기와 위상을 얻었다. 홀로그램 음압 측정 결과는 Fig. 8에 보였다.

### 2.6 해석 결과 및 비교 실험

Fig. 9에서 재구성된 종 주변 음장을 보였다. 종의 대표적인 음향 방사 패턴을 보이기 위하여 종 표면에서 음압 레벨이 가장 큰 부분인  $z=0.2$  m인 수평 1차면에서의 음압 분포를 보였다. 그림에 나타난 음압의 크기는 종표면에 매우 근접한 위치(종 표면에서 약 3~4 cm 이내)에서는 잘 맞지 않음을 알 수 있고 이는 계산에 사용된 헬름홀쯔 적분이 소음

원 내부와 외부 사이에 존재하는 음압의 불연속성을 완전히 표현하지 못하기 때문이다. 종의 기본 진동 모드에 의한 음장은 그림에서 보인 것과 같이 4극음원(quadrupole)에 의한 것과 흡사하다. 음압의 크기는 종의 표면 근처를 벗어남에 따라 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며 음압의 위상에 있어서는 그 절대값은 의미가 없고 서로  $180^\circ$ 반대 위상인 4개의 부분으로 나뉘는 것이 특징이다. 또 위상의 반경방향의 변화는 그림에 두드러지게 나타나지는 않으나 거의 동심원을 그리며 서서히 변화하는 것을 알 수 있다. 4개의 절선(nodal line)은 정확히  $90^\circ$  간격을 이루지는 않는데, 이는 종이 갖는 약간의 비대칭성(asymmetry)에 기인한 것으로 생각된다.

이와 같이 재구성된 음장을 검증하기 위해서 수치 해석 결과와 실험을 통한 측정값을 비교해 보았다. 비교를 위한 실험은 종의 크기에 비하여 약 3~4배 정도 이내의 거리에서 이루어졌으며 이는 간이 무향

실의 내부 크기(2.8 m 2.9 m 1.3 m)에 의하여 제한되는 거리이다. 측정점의 위치는 Fig. 10의 상단에 나타내었으며 측정 결과로부터 알 수 있는 것은, 대체로 수치해석 결과와 일치하거나 비슷한 경향을 보이지만 음압의 위상은 거리가 멀어질수록 무시할 수 없는 차이가 발생하며 음압 크기도 간이 무향실의 내부 벽에 근접할수록 차이가 난다는 것이다. 이러한 차이는 간이 무향실의 특성에서 기인한 것으로 생각되며 이를 뒷받침하기 위하여 별도의 실험을 하였다. 즉, 간이 무향실 내에서 스피커를 이용하여 단

일주파수( 1 kHz와 187.7 Hz 각각)를 발생시키고, 거리에 따른 음압 변화를 측정하였으며 똑같은 실험을 실외에서 반복하였다. 물론 실외에서의 측정 환경을 자유 음장으로 볼 수는 없지만 그 결과를 나타낸 Fig. 11에서 알 수 있는 것은, 간이 무향실의 특성이 중 실험 주파수인 187.7 Hz에서는 만족스럽지 않으며 비교적 고주파에서 흡음 성능이 나타난다고 볼 수 있다. 즉, 저주파에서는 벽면 및 바닥에서의 반사파가 무시할 수 없을 만큼 존재하고 이것이 측정에 합산되어 음압 위상의 공간상 분포에 영향을

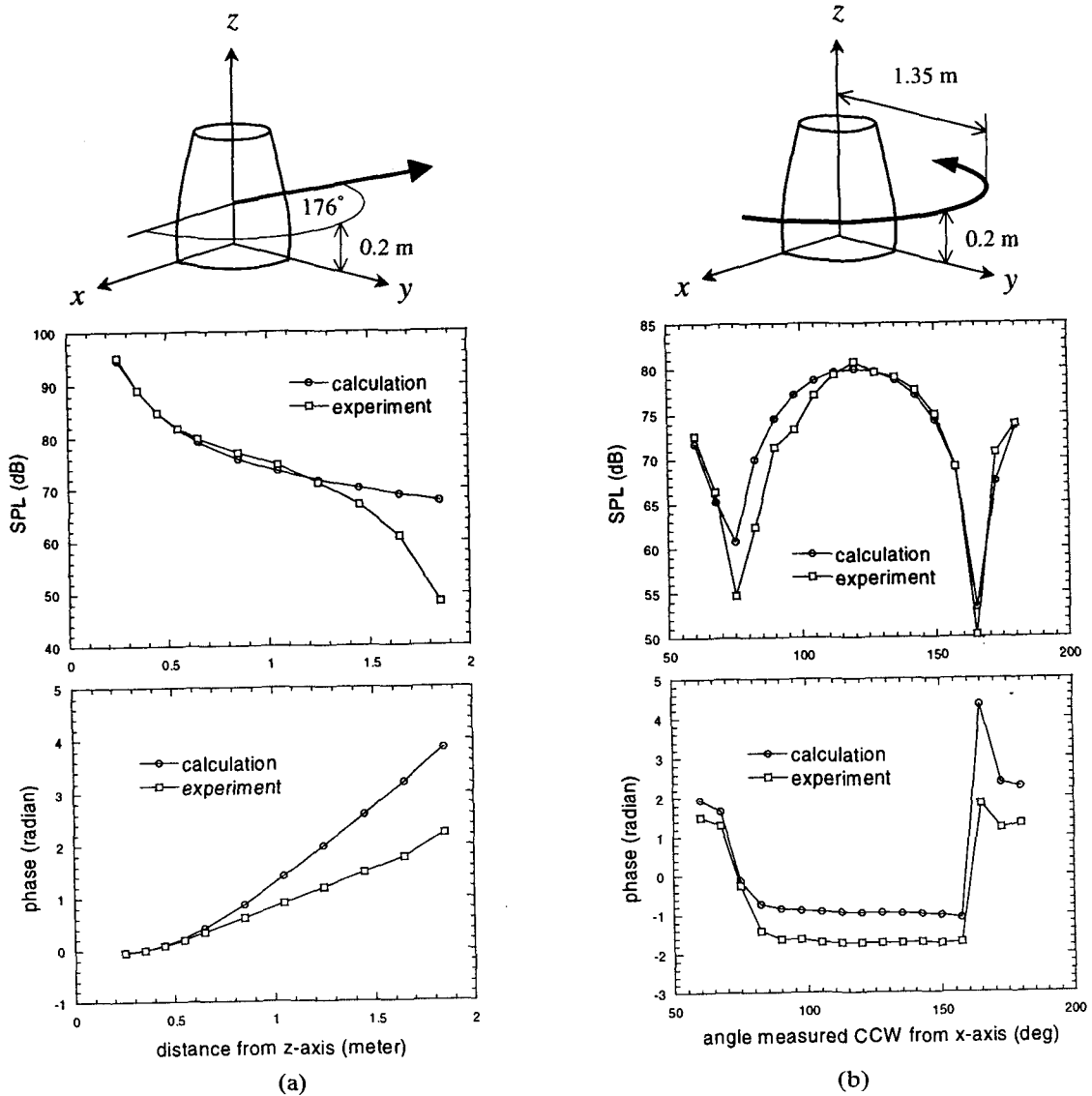


Fig. 10 Comparisons of forward prediction results and the corresponding experimental results (a) along a radial direction and (b) around the source



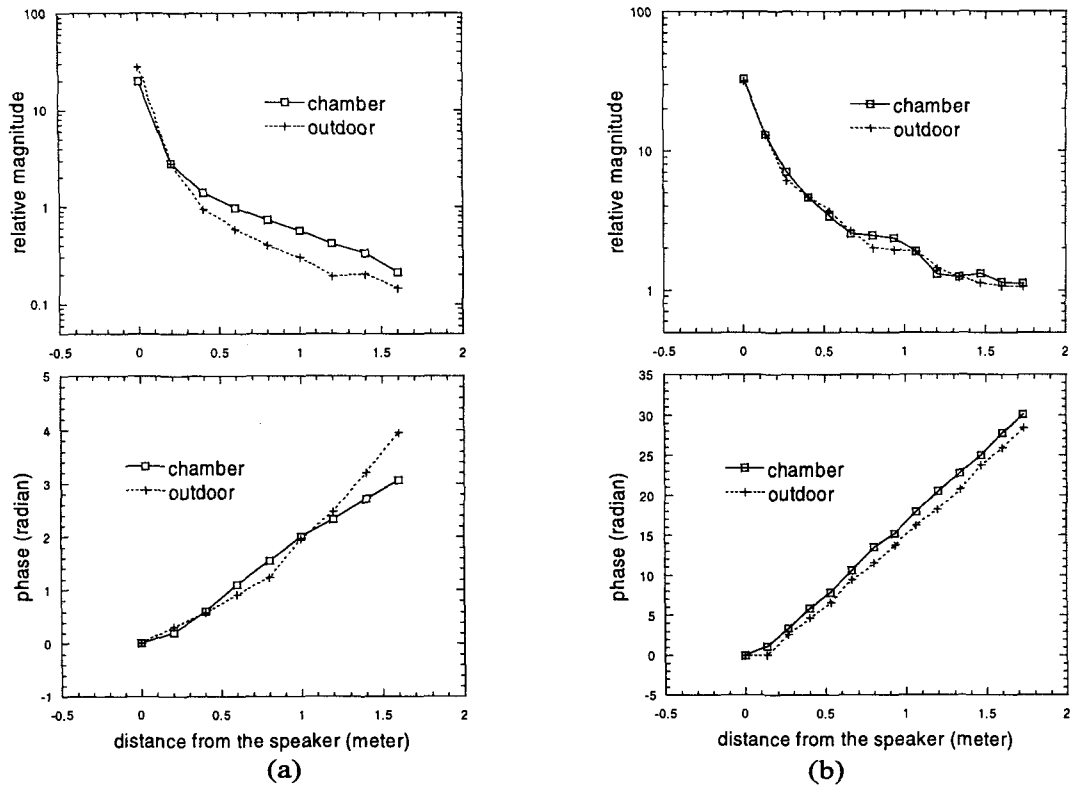


Fig. 11 Sound pressure measured from a speaker radiating pure tone of (a) 187.7 Hz and (b) 1 kHz : inside the semi-anechoic chamber vs. outdoor

미치는 것으로 생각된다.

### 3. 결 론

경계요소법을 음향 홀로그래피 방법에 적용하여 한국 종의 방사 음장을 재구성하였다. 종의 형상을 임의 형상 소음원으로 취급하여 모델링하였고 실험을 통해 얻은 홀로그램 데이터를 활용하여 고유 진동 모드인 (4,0) 모드에 대하여 종 주변 음압을 계산하였다. 그 과정에 적용된 가상의 음원면과 오차 최소화 방법은 한국 종과 같은 기존의 음향 홀로그래피 방법으로 풀기 어려운 임의 형상 소음원의 음장 해석에 적용될 수 있으며 이와 같은 방법을 통하여 임의 형상 소음원을 갖는 음향 홀로그래피 문제에 대한 해석 방법에 있어 새로운 대안을 제시하였다.

### 후 기

본 연구내용은 교육부 기계공학 학술연구조성비 (과제번호 ME97-D-12) 및 서울대학교 발전기금

포항제철 학술연구비 (과제번호 98-09-2101)의 지원을 받아 수행된 연구결과의 일부이며, 관계자에게 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Maynard, J. D., Williams, E. G., and Lee, Y., 1985, "Nearfield Acoustic Holography (NAH) : I. Theory of Generalized Holography and the Development of NAH," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78, No. 4, pp. 1395~1413.
- (2) Hargreaves, C. M., and Brown L., 1994, "Nearfield Acoustic Holography : From Background Theory to Modern Developments," Math.Science Vol. 19 , pp. 11~21.
- (3) Brebbia, C. A., and Dominguez, J., 1989, "Boundary Elements : An Introductory Course," Computational Mechanics Publications.
- (4) Huang Y., 1990, "Computer Techniques for Three-Dimensional Source Radiation," Ph. D. dissertation , Pennsylvania State University.

- (5) Bai, M. R., 1992, "Application of BEM (boundary element method)-based Acoustic Holography to Radiation Analysis of Sound Sources with Arbitrarily Shaped Geometries," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 92, No. 1, pp. 533~549.
- (6) 염영하, 1991, 한국의 종, 서울대학교 출판부, 서울, p. 95
- (7) Yum, Y. H., Lee, J. M., and Kim, S. H., 1986. 2., "A Study on the Vibration and Sound of Bells with Slight Asymmetry," Proceedings 4th International Modal Analysis Conference, L.A., USA, pp. 75~80.
- (8) Williams, E. G., Dardy, H. D., and Washburn, K. B., 1987, "Generalized Nearfield Acoustical Holography for Cylindrical Geometry: Theory and Experiment," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 81, No. 2, pp. 389~407.
- (9) 김양한, 김시문, 1997, "원통형 음향 홀로그래피를 이용한 성덕대왕 신종의 방사음장특성분석," 한국음향학회지, 제 16 권, 제 4 호, pp. 94~100.
- (10) Pierce, A. D., 1981, Acoustics, McGraw-Hill, New York, pp. 26~27, 180~182.
- (11) Ih, J. G., and Kim, B. K., 1998, "On the Use of the BEM-based NAH for the Vibro-Acoustic Source Imaging on the Nonregular Exterior Surfaces," Proceedings of NOISE-CON 98, pp. 665~670.