

〈論 文〉

# 네 가지 음향 홀로그래피의 특성 및 오차

김시문\* · 김양한\*\*

(1994년 8월 19일 접수)

## Characteristics and Errors of Four Acoustic Holographies

Seemoon Kim and Yang-Hann Kim

**Key Words :** Rectangular Type Plane Holography(사각형 평면 홀로그래피), Circular Type Plane Holography(원형 평면 홀로그래피), Cylindrical Holography(원통형 홀로그래피), Spherical Holography(구면 홀로그래피)

### Abstract

Acoustic holography makes it possible to reconstruct the acoustic field based on the measurement of the pressure distribution on the hologram surface. Because of the merit that one can obtain an entire three-dimensional wave field from the data recorded on a two-dimensional surface, the holographic method has been widely studied. Being an experimental method, holography has an unavoidable error which is generate by sampling in space and frequency domain and finite aperture size. Its magnitude is dependent on the shape of hologram surface as well as a sampling distance and aperture size. According to the shape of hologram surface, acoustic holography may be classified into four types of holography : rectangular type planeholography, circular type plane holography, cylindrical holography and spherical holography. In this paper, four types of holography are studied by modal summation method. Numerical simulation is performed using a monopole source with varying parameters to find out effects to the estimation error in each holography. Experiments of circular type plane holography and cylindrical holography explain strong relation between the shape of hologram surface and the acoustic field.

### 1. 서 론

음향 홀로그래피방법은 음장을 해석하는 실험적인 방법 중의 하나로서 자유음장 조건하에 홀로그램면이라는 한 면에서만 음압측정으로부터 공간상의 임의의 위치에서의 음장정보, 예를 들면 음압, 입자속도, 인텐시티(intensity) 등을 알 수 있다는 장점때문에 널리 사용되어지고 있다. 홀로그래피는 홀로그램면의 모양에 따라 평면 홀로그래피

(plane holography), 원통면 홀로그래피(cylindrical holography), 구면 홀로그래피(spherical holography) 등으로 구분되며 평면 홀로그래피는 측정점 위치의 분포에 따라 다시 직각좌표를 사용하는 사각형 평면 홀로그래피(rectangular type plane holography)와 극좌표를 사용하는 원형 평면 홀로그래피(circular type plane holography)로 나눌 수 있다. 홀로그래피에 의한 음장에측은 예측점의 위치에 따라 음원면과 홀로그램면 사이의 음장을 예측하는 후방 음장에측(backward prediction)과 음파의 진행방향쪽의 음장을 구하는 전방 음장에측(forward prediction)으로 나뉜다.

\*한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

처음 홀로그래피방법이 제시되었을 당시에는 음원으로부터 멀리 떨어진 곳에서만 해석이 가능하였으나 1980년대에 들어와서는 감쇠파를 고려하는 근접 음장음향 홀로그래피(nearfield acoustic holography) 방법이 연구되어<sup>(1)</sup> 음원에 가까운 곳에서도 음장예측이 가능하게 되었다. 사각형 평면 홀로그래피를 이용한 근접 음향 홀로그래피는 Maynard와 Williams에 의해 그 가능성을 확인하였으며,<sup>(1)</sup> Veronasi와 Maynard에 의해 오차를 줄이기 위한 여러가지 알고리즘도 제시되어졌다.<sup>(2)</sup> 그 후 전방예측 오차에 큰 영향을 미치는 제로패딩(zero padding)에 의한 연구와<sup>(3)</sup> 후방 예측으로부터 구조물의 진동해석에 관한 연구가 진행되어 왔다. (국내의 경우)<sup>(4)</sup> 그 밖에 원통면 홀로그래피를 이용한 전후방 예측도<sup>(5)</sup> 시도되어졌다.

홀로그래피에 의해 정확한 음장예측을 하기 위해서는 홀로그래피면 전 영역에 걸쳐 음압분포를 알아야 하나 실제로 적용하는 데 있어서는 유한한 크기의 영역내에 이산된 점에서의 음압을 구할 수 밖에 없어 오차를 유발하게 된다. 이러한 오차를 줄이기 위해서 여러가지 방법이 있을 수 있겠으나 그 방법을 찾기에 앞서 오차에 영향을 미치는 여러가지 조건들과 그 조건에 따라 오차의 크기에 관해 살펴보는 것이 필요하다. 또한 각각의 홀로그래피에 따라 홀로그래피면의 모양과 측정점 배열의 차이에 의해 나타나는 오차의 특성이 달라지게 됨을 생각할 수 있으며 음원에 의해 발생하는 음장의 형태와 관련 여부를 알아보는 것도 홀로그래피를 이해하는데 도움을 준다.

본 연구는 앞에서 설명한 네 가지 형태의 홀로그래피에서 나타나는 여러가지 파라미터의 변화에 따라 음장예측에 미치는 영향을 고찰하고 각각의 홀로그래피들을 비교하여 오차 특성을 이해하는데 그 목적을 두고 있다. 우선 홀로그래피의 기본 개념의 설명과 함께 홀로그래피면의 형태와 측정점 위치의 분포에 따른 네 가지 홀로그래피의 형태를 동차 파동 방정식의 해를 각 좌표에 해당하는 특성함수를 이용하여 유도하였다. 그리고 각각 홀로그래피에서 나타나는 파라미터들, 즉 측정점의 개수와 위치, 고려하고자 하는 모드개수, 음원의 위치 등에 따른 효과에 대해서 모의실험을 통하여 해석하였다. 음원으로는 단극(monopole)의 점음원을 사용하였다. 끝으로 점음원과 원통형음원을 가지고 홀로그래피를 이용한 실험을 해석하였다.

## 2. 이론

임의의 영역내에서 매질의 평균유동이 없고 단열과정으로 압축, 팽창을 하며 음압의 변화량이 작은 경우에 음파는 선형적인 거동을 하며 음원이 없다고 하면 다음과 같은 동차 파동방정식(homogeneous wave equation)을 얻을 수 있다.

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서,  $p$ 는 음압을 나타내며 시간과 공간에 대한 함수이다.  $c$ 는 음파속도,  $t$ 는 시간을 의미한다. 만약 음압의 변화가  $\omega$ 의 각주파수(angular frequency)를 가지고 조화운동을 한다면

$$p = Pe^{-i\omega t} \quad (2)$$

와 같이 쓸 수 있으며  $P$ 는 공간의 함수가 된다. 이를 식(1)에 대입하면 다음과 같은 동차 헬름홀츠 방정식(homogeneous Helmholtz equation)을 얻을 수 있다.

$$(\nabla^2 + k^2)P = 0 \quad (3)$$

여기서,  $k$ 는 파수를 나타내며  $\omega/c$ 로 정의된다. 이때 음압  $P$ 는 이 영역을 둘러싸는 경계면의 음압과 입자속도, 그린함수(Green's function)를 이용하여 계산할 수 있다.<sup>(6)</sup> 만약 이 그린함수가 Dirichlet 경계조건 혹은 Neuman 경계조건을 만족한다면 음압분포 혹은 입자속도만으로 음장을 예측할 수가 있으나 실제적으로 입자속도의 측정은 용이하지 않기 때문에 음향 홀로그래피는 홀로그래피면에서의 음압과 Dirichlet 경계조건을 만족하는 그린함수를 이용하여 음장예측을 한다. 그러나 홀로그래피면의 형태가 평면이 아닌 원통형이나 구면인 경우에 Dirichlet 경계조건을 만족하는 그린함수를 구하는 과정이 쉽지 않다. 따라서 여기서는 헬름홀츠방정식의 특성함수(eigen function)를 사용하여 설명하고자 한다.

### 2.1 헬름홀츠방정식의 특성해

식(3)의 일반해는 특성함수라는 기본식들의 선형 조합으로 표현이 가능하며, 여기에 경계조건이 추가됨으로써 각 특성함수의 크기를 구할 수 있고 따라서 유일한 해를 얻게 된다. 특성함수의 형태는 사용하는 좌표에 따라서 다르게 얻어지며 직각좌표

계, 원통좌표계, 구형좌표계를 사용하여 특성 함수를 구하면 다음과 같다.

먼저 음압  $P$ 가  $x, y, z$ 의 함수이고 각각의 좌표로 변수분리가 된다고 가정하여 이를 식(3)에 대입하면 특성함수  $\psi$ 는

$$\psi(x, y, z; k_x, k_y, k_z) = \left\{ \begin{matrix} e^{ik_x x} \\ e^{-ik_x x} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} e^{ik_y y} \\ e^{-ik_y y} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} e^{ik_z z} \\ e^{-ik_z z} \end{matrix} \right\} \quad (4)$$

와 같이 얻는다. 단, 여기서  $k_x, k_y, k_z$ 는

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (5)$$

를 만족해야 한다. 특성함수의 각각의 항은 파수  $k_x, k_y, k_z$ 가 실수인 경우 각 좌표축의 양의 방향과 음의 방향으로 전파되는 성분을 나타내며 허수인 경우라면 지수적으로 증가 또는 감소하는 성분을 의미한다.

$x = r \cos \phi, y = r \sin \phi, z = z$ 와 같이 정의되는 원통 좌표계에서  $P$ 가  $r, \phi, z$ 의 함수이며 각각의 좌표로 변수분리가 된다고 가정하자. 이를 식(3)에 대입하여 정리하면

$$\psi_m(r, \phi, z; k_r, k_z) = \left\{ \begin{matrix} H_m^{(1)}(k_r r) \\ H_m^{(2)}(k_r r) \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} e^{im\phi} \\ e^{-im\phi} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} e^{ik_z z} \\ e^{-ik_z z} \end{matrix} \right\} \quad (6)$$

와 같은 특성함수를 얻는다. 단, 여기서  $k_r, k_z$ 는

$$k_r^2 + k_z^2 = k^2 \quad (7)$$

의 식을 만족해야 하며  $m$ 은 음이 아닌 임의의 정수를,  $H_m^{(1)}$ 와  $H_m^{(2)}$ 는 각각 제1종, 제2종 원통형 한켈함수(cylindrical Hankel function of 1st and 2nd kind)를 의미한다. 파수  $k_r$ 과  $k_z$ 가 실수인 경우  $H_m^{(1)}(k_r r)$ 과  $e^{ik_z z}$ 는 양의 방향으로  $H_m^{(2)}(k_r r)$ 과  $e^{-ik_z z}$ 는 음의 방향으로 전파되는 성분을 나타내며 만약  $k_r$ 이나  $k_z$ 가 허수라면 각 좌표축으로 증가 혹은 감소하는 성분을 의미한다.  $e^{im\phi}$ 와  $e^{-im\phi}$ 는  $\phi$ 방향의 모드형상을 나타낸다.

$x = r \sin \phi \cos \theta, y = r \sin \phi \sin \theta, z = r \cos \phi$ 로 정의된 구형좌표계에서  $P$ 가  $r, \theta, \phi$ 의 함수이며 각각의 좌표의 모드로 분리가 되어 이를 식(3)에 대입하여 정리하면<sup>(7)</sup>

$$\psi_{mn}(r, \theta, \phi; k) = \left\{ \begin{matrix} h_m^{(1)}(kr) \\ h_m^{(2)}(kr) \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} P_m^n(\cos \theta) \\ Q_m^n(\cos \theta) \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} e^{in\phi} \\ e^{-in\phi} \end{matrix} \right\} \quad (8)$$

와 같은 특성함수를 얻는다. 여기서,  $m$ 은 음이 아닌 임의의 정수이고  $n$ 은 0과  $m$  사이의 정수 혹은 0이나  $m$ 의 값을 가질 수 있다.  $h_m^{(1)}$ 와  $h_m^{(2)}$ 는 제1종, 제2종 구형 한켈함수(spherical Hankel function of 1st and 2nd kind)를  $P_m^n$ 와  $Q_m^n$ 는 제1종, 제2종 르장드르함수(Legendre polynomial of 1st and 2nd kind)를 나타낸다.  $h_m^{(1)}(kr)$ 과  $h_m^{(2)}(kr)$ 는 각각 양의 방향과 음의 방향으로 전파되는 성분을 나타내며  $P_m^n(\cos \theta), Q_m^n(\cos \theta), e^{in\phi}, e^{-in\phi}$ 는  $\theta$ 방향과  $\phi$ 방향 성분의 모드형상을 나타내고 있다.

홀로그램면의 모양과 사용하는 좌표계에 따라 Fig. 1과 같이 네 종류의 홀로그래피를 생각할 수 있으며 각각의 홀로그래피에 따른 음장예측방법은 다음과 같다.

### 2.2 사각형 평면 홀로그래피

홀로그램면이 평면이고 직각좌표계를 사용하는 경우 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같은 사각형 평면 홀로그래피를 생각할 수 있다. 앞절의 결과로부터 헬름홀츠방정식의 일반해  $P(x, y, z)$ 는

$$P(x, y, z) = \int \hat{P}(\vec{k}) \psi(x, y, z; k_x, k_y, k_z) d\vec{k} \quad (9)$$

와 같이 특성해의 조합으로 표현할 수 있다. 여기서  $\vec{k}$ 는

$$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z) \quad (10)$$

으로 표현되는 벡터로서 각 성분은 식(5)를 만족한다. 여기서,  $z = z_0$ 의 평면 아래에 음원이 분포되어 있다고 가정하고  $z = z_H > z_0$ 의 홀로그램면에서 측정을 한다고 하자. 이 경우 모든 음원은  $z = z_0$  평면 아래에 있으므로 음의  $z$ 축 방향으로 전파하는 성분은 없으며  $z$ 값이 양의 무한대로 갈 때 해는 유한한 값을 가져야 하므로 양의  $z$ 축 방향으로 증가하는 성분은 없다. 따라서 양의  $z$ 축 방향으로 전파되는 성분과 감쇠하는 성분만 남는다.

따라서 식(9)는

$$P(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{P}(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y \quad (11)$$

와 같이 정리된다. 단, 여기서

$$k_z = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} & (k^2 > k_x^2 + k_y^2) \\ i\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2} & (k^2 < k_x^2 + k_y^2) \end{cases} \quad (12)$$

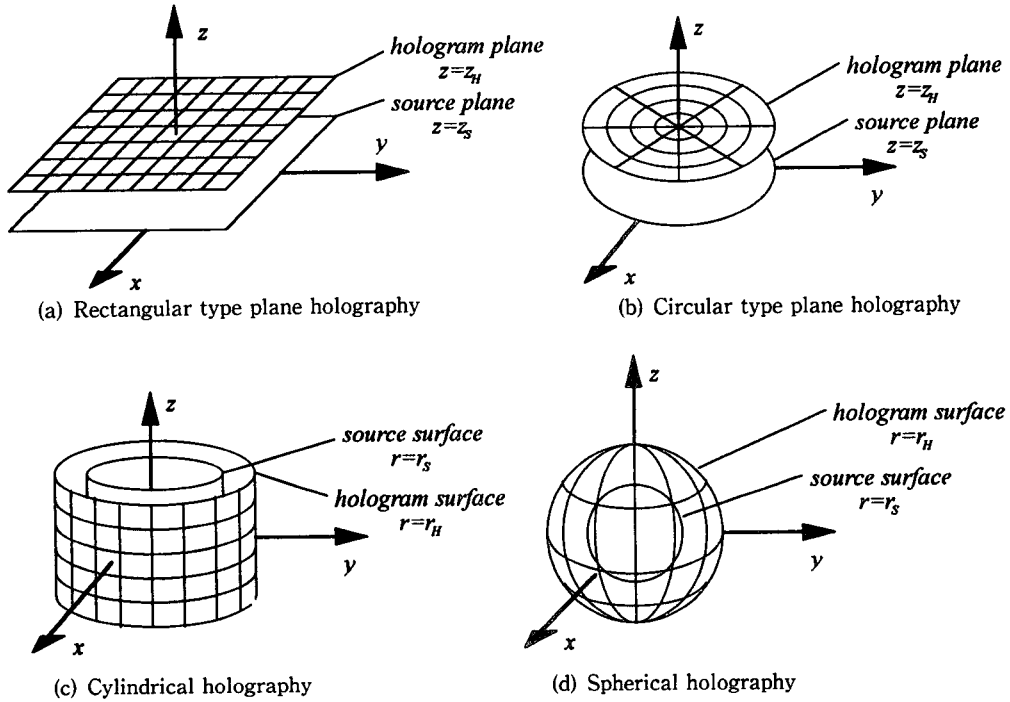


Fig. 1 Four types of holography

의 식을 만족한다. 그런데  $z=z_H$ 의 위치에서 식 (11)의 값을 알고 있으므로  $\bar{P}(k_x, k_y)$ 는 푸리에변환(Fourier transform)을 이용하여

$$\bar{P}(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y, z_H) e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z_H)} dx dy \quad (13)$$

와 같이 구할 수 있다. 이를 식(11)에 대입하면  $z > z_s$ 인 임의의 위치에서 음장예측이 가능하다.

### 2.3 원형 평면 홀로그래피

홀로그램면이 평면이고 원통좌표계를 사용할 경우 Fig. 1(b)와 같은 원형 평면 홀로그래피를 생각할 수 있다. 원통좌표로 나타낸 특성함수  $\psi_m(r, \phi, z; k_r, k_z)$ 로부터 헬름홀츠방정식의 해는

$$P(r, \phi, z) = \int \bar{P}_m(\vec{k}) \psi_m(r, \phi, z; k_r, k_z) d\vec{k} \quad (14)$$

로 표현된다. 여기서,  $\vec{k}$ 는

$$\vec{k} = (k_r, k_z) \quad (15)$$

으로 표현되는 벡터량으로서 각 성분은 식(7)이 성립되는 영역을 나타낸다. 만약  $z=z_s$ 의 평면 아래

에 음원이 분포되어 있고  $z=z_H > z_s$ 에 홀로그램면이 있다고 하면(Fig. 1(b)) 앞의 사각형 평면 홀로그래피와 같은 이유로  $z$ 축의 모드는 양의 방향으로 전파하는 것과 감쇠하는 성분만이 존재하여  $r=0$ 에서 유한한 값을 가져야 하므로 원통형 한켈함수는 다음과 같이 제1종 베셀함수(Bessel function of 1st kind)로 간략화된다.

$$P(r, \phi, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{P}_m(k_r) e^{im\phi} e^{ik_z z} J_m(k_r r) dk_r \quad (16)$$

여기서,  $k_z$ 는

$$k_z = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_r^2} & (k^2 > k_r^2) \\ i\sqrt{k_r^2 - k^2} & (k^2 < k_r^2) \end{cases} \quad (17)$$

의 관계식이 만족해야 한다.  $z=z_H$ 인 곳에서  $P(r, \phi, z)$ 의 값을 알고 있으므로 푸리에베셀변환(Fourier Bessel transformation)과 삼각함수의 직교 특성으로부터 다음과 같이  $\bar{P}_m(k_r)$ 를 구할 수 있다.

$$\bar{P}_m(k_r) = \frac{k_r}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} P(r, \phi, z_H) e^{-im\phi} e^{-ik_z z_H} J_m(k_r r) r dr d\phi \quad (18)$$

이 식(18)을 식(16)에 대입함으로써  $z > z_s$ 인 영역

에서 음압을 예측할 수 있다. 또한 식(18)은 식(13)의  $x, y, z$ 좌표로 표현된 식을  $r, \phi, z$ 로 변수 변환을 하여 얻을 수 있다.<sup>(8)</sup>

#### 2.4 원통면 홀로그래피

홀로그래피면이 원통면일 경우 Fig. 1(c)와 같은 원통면 홀로그래피를 생각할 수 있다. 일반해의 형태는 원형 평면 홀로그래피와 같이 식(14)로 주어진다. 그러나 앞의 경우와는 달리  $r=r_s$ 인 면 안에 음원이 있고  $r=r_H > r_s$ 인 홀로그래피면이 있다고 하자. 이 경우에  $P(r, \phi, z)$ 는  $r$ 이 작아지는 방향으로 전파되는 성분이 없으므로

$$P(r, \phi, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{P}_m(k_z) e^{im\phi} e^{ik_z z} H_m^{(1)}(k_r r) dk_z \quad (19)$$

와 같이 표현되며  $k_r$ 은

$$k_r = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_z^2} & (k^2 > k_z^2) \\ i\sqrt{k_z^2 - k^2} & (k^2 < k_z^2) \end{cases} \quad (20)$$

의 식을 만족한다.  $r=r_H$ 인 곳에서  $P(r, \phi, z)$ 값을 알고 있으므로 식(19)에  $r=r_H$ 를 대입한 식과 푸리에 변환과 삼각함수의 직교 특성을 이용하면

$$\hat{P}_m(k_z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(r_H, \phi, z) e^{-m\phi} e^{-ik_z z} \{H_m^{(1)}(k_r r_H)\}^{-1} dz d\phi \quad (21)$$

와 같이 얻어지므로 이를 식(19)에 대입하여 음장 예측을 할 수 있다.

#### 2.5 구면 홀로그래피

구면 홀로그래피는 Fig. 1(d)에서 보는 바와 같이 홀로그래피면이 구형이다. 헬름홀쯔방정식의 일반해는

$$P(r, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-m}^m \hat{P}_{mn} \psi_{mn}(r, \theta, \phi; k) \quad (22)$$

와 같이 표현되며  $r=r_s$ 의 구면 안에 음원이 존재하고  $r=r_H > r_s$ 의 홀로그래피면에서 측정을 한다고 하자. 이 경우 경계조건으로부터 헬름홀쯔방정식의 해를 좌표계  $(r, \theta, \phi)$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$P(r, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-m}^m \hat{P}_{mn} Y_{mn}(\theta, \phi) h_m^{(1)}(kr) \quad (23)$$

여기서,  $Y_{mn}(\theta, \phi)$ 은

$$Y_{mn}(\theta, \phi) = P_m^{nl}(\cos \theta) e^{in\phi} \quad (24)$$

이며 이를 구형 조화함수(spherical harmonics)라 한다. 식(23)과 식(24)에서 볼 수 있듯이  $r$ 이 증가하는 방향으로의 음압이 존재하므로 제1종 구형함수만 존재하며 또한  $\theta$ 가 0과  $\pi$ 일 때 유한한 크기를 가져야 하므로 제2종 르장드르함수는 존재하지 않는다. 만약에  $r=r_H$ 에서  $P(r, \theta, \phi)$ 값을 알고 있다면 다음과 같은 구형 조화함수  $Y_{mn}(\theta, \phi)$ 의 직교 특성을 이용하여  $\hat{P}_{mn}$ 을 구할 수 있다. 여기서  $Y_{mn}^*(\theta, \phi)$ 는  $Y_{mn}(\theta, \phi)$ 의 공액복소수(complex conjugate)를 의미한다. 즉  $\hat{P}_{mn}$ 은

$$\hat{P}_{mn} = \frac{2m+1}{4\pi h_m^{(1)}(kr_H)} \frac{(m-|n|)!}{(m+|n|)!} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} P(r_H, \theta, \phi) Y_{mn}^*(\theta, \phi) \sin \theta d\phi d\theta \quad (25)$$

이다. 식(23)과 식(25)로부터 음장예측을 할 수 있다.

### 3. 모의실험 및 고찰

만약 홀로그래피면 전 영역에 걸쳐서 음압분포를 측정할 수만 있다면 앞에서 유도된 식들에 의해서 정확한 음장분포를 얻게 된다. 실제로는 유한한 영역에서 유한개의 위치에서만 측정하는 것일 불가피하며, 따라서 다음과 같은 기본적인 두 가지 조건이 성립된다고 가정하여 음장 예측을 한다. 첫째, 홀로그래피면의 크기가 무한하더라도 측정 영역 바깥에서의 음압의 크기가 측정 음압에 비해 상대적으로 작아 무시할 수 있다. 둘째, 측정값이 측정점 근방에서의 음압값과 거의 같아 대표값으로 생각할 수 있다. 이 두 가지 가정은 각 모드의 성분을 구하는 무한 적분식을 근사적으로 유한개의 합으로 표현이 가능하게 하지만 어느 정도 오차는 포함하게 된다. 또한 이 오차는 측정면의 크기, 측정점의 개수 및 위치 등에 따라 그 크기가 달라지게 된다. 여기서는 각각의 홀로그래피를 이용하여 음장을 예측하는 과정에서 나타나는 파라미터를 변화시켜 가면서 예측 오차를 계산하여 각 파라미터의 변화가 음장예측에 미치는 영향을 해석하고 있다.

예측하고자 하는 음압은 크기와 위상을 가지 복소수량이기 때문에 실제값과의 차이를 나타내는 오차를 정의하기가 쉽지 않다. 먼저 다음과 같은 상대 오차의 크기  $e_{rel}$ 을 생각할 수 있다.

$$e_{rel} = \frac{|P_e - P|}{|P|} \quad (26)$$

여기서,  $P_e$ 는 예측된 음압을  $P$ 는 실제 음압을 나타낸다. 예측점의 위치가 하나로 고정되어 있는 경우는 식(26)으로 오차를 나타낼 수 있으나 예측점의 위치는 공간상에서 무한히 많이 점을 잡을 수 있으므로 관심있는 영역에서 예측한 오차들의 대표값으로 공간상에 대한 제곱 평균오차  $\bar{e}_{rer}$ 를 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$\bar{e}_{rer}^2 = \frac{1}{M} \sum_i \frac{|P_e^i - P^i|^2 \Delta S^i}{|P^i|^2 \Delta S^i} \quad (27)$$

여기서  $\Delta S$ 는 계산하고자 하는 영역을 작게 나누었을 때 한 조각(segment)의 면적을 의미하며  $M$ 은 전체 조각의 개수를 의미한다. 그러나 홀로그램면에서의 측정값으로부터 음장에측을 하는 경우에 같은 상대 오차의 크기를 가지고 있더라도 예측점에서의 오차는 음압의 크기가 작은 영역에서의 오차에 의한 것보다는 음압의 크기가 큰 영역에서의 오차가 미치는 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 식(27)를 이용하여 오차를 계산할 때 음압의 크기가 큰 값에 대한 영향을 고려하기 위하여 다음과 같이 각각의 위치에서 평균 음압에 대한 상대적인

크기를 나타내는 가중치를 곱하여 정의된 평균 오차  $e$ 을 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$e^2 = \frac{1}{M} \sum_i \frac{|P_e^i - P^i|^2 \Delta S^i}{|P^i|^2 \Delta S^i} \times \frac{|P^i|^2 \Delta S^i}{\frac{1}{M} \sum_j |P^j|^2 \Delta S^j} = \frac{\sum_i |P_e^i - P^i|^2 \Delta S^i}{\sum_j |P^j|^2 \Delta S^j} \quad (28)$$

본문에서는 모든 경우에 있어서 식(28)으로 정의된 오차를 사용하였다.

모의실험에 사용되어진 파라미터는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 사각형 평면 홀로그래피에서  $x$ 축 방향과  $y$ 축 방향의 파라미터들은 서로 같게 하였으며 음원은 창문 중심 바로 아래 두었다. 그 외의 홀로그래피에서는 음원의 위치를 변화시켜 가면서 오차를 계산하였으며 각 홀로그래피에서 공통적으로 나타나는 측정점의 개수, 측정영역의 크기, 모드의 개수 등을 변화시켜 가면서 모의실험을 행하였다. 모든 경우에 있어서 음원으로는 음장의 해석적인 해를 쉽게 구할 수 있는 단일 주파수의 점음원을 이용하였다. 단극에서 발생하는 음파의 파수

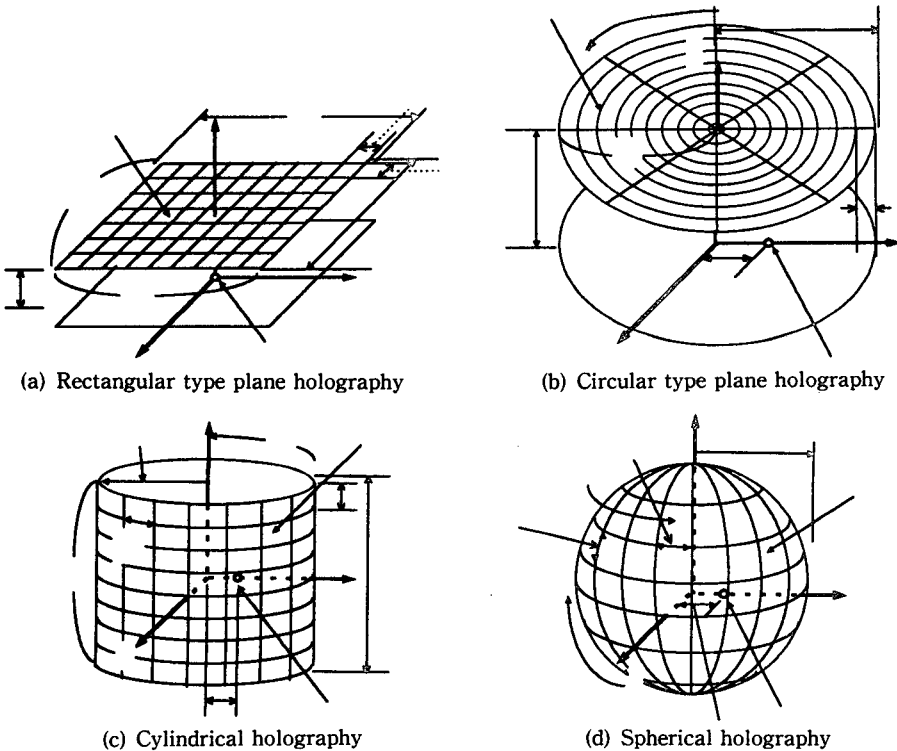


Fig. 2 Parameters in numerical simulation

는  $2\pi$ 로, 즉 파장이 1이 되게 하여 길이 방향에 대한 성분은 파장으로 정규화시킨 것과 같은 효과를 나타내도록 하였다.

3.1 파수성분의 의미

Fig. 3은 각각 단극의 음원이 존재할 때 홀로그램면 위에서 음압의 파수성분의 크기를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 사각형 평면 홀로그래피의  $xy$  방향으로 파수성분의 크기를 나타낸 것으로 음원으로 부터 발생하는 음압의 파수가  $2\pi$ 이기 때문에 인 근방에서 가장 많은 성분을 가지고 있음을 알 수

있다. 파수값이 큰 성분은 작은 것에 비해서 파장이 작기 때문에 단위 길이당의 변화가 크다는 것을 의미하며 따라서 큰 값의 파수성분이 존재할 때는 그에 맞게 측정점 사이의 간격을 작게 취해야 한다. Fig. 3(b)는 원형 평면 홀로그래피의 경우로서 단극의 음원을 중심에 두지 않고 약간 이동시켜 얻은 결과이다. 만약 음원이 홀로그램면 중심 바로 아래 있다면 축대칭의 성질에 의해 원주 방향의 모드는 0 모드만 존재할 것이다. 그러나 음원이 중심에 있지 않음으로 인해서 원주방향의 음압 분포가 달라지며 따라서 (b)와 같이 0이 아닌 모드값이 존

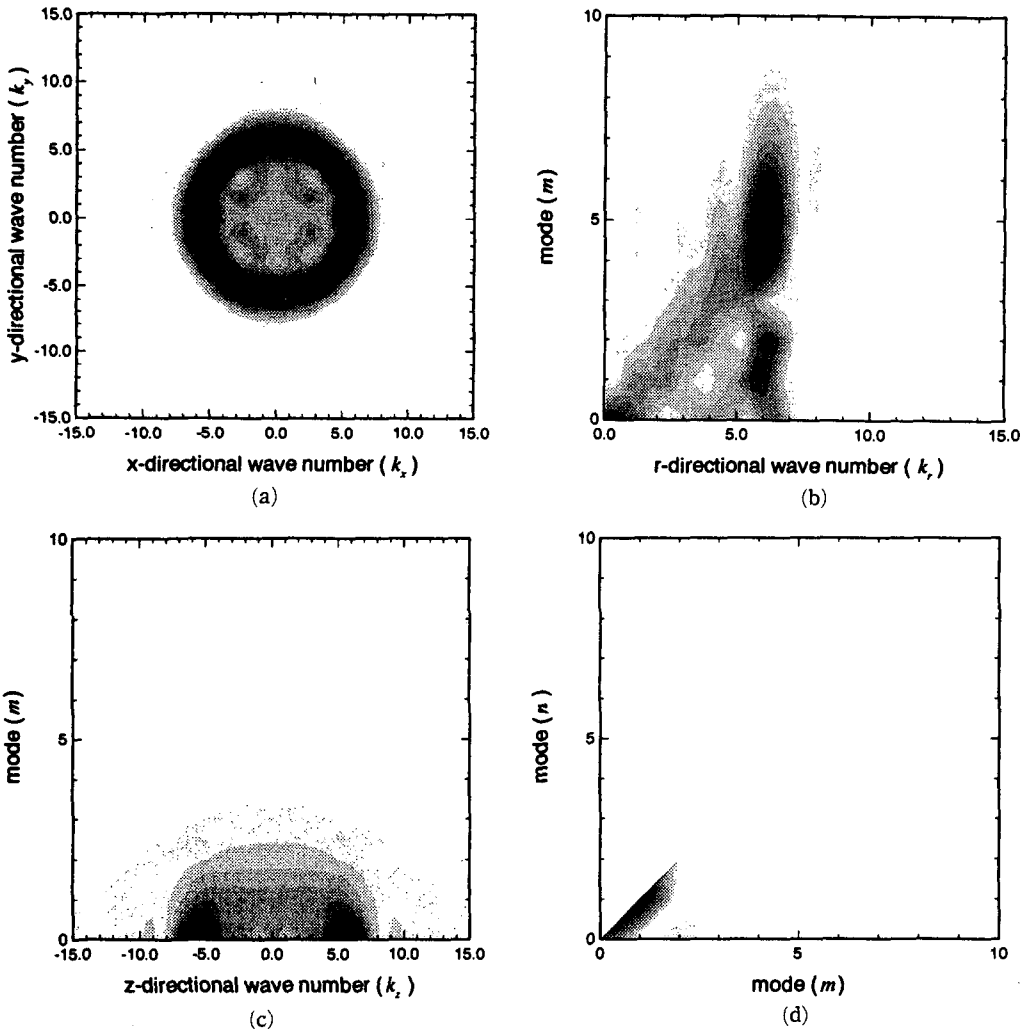


Fig. 3 Frequency component of a monopole ; (a) on a hologram plane in rectangular type plane holography (b) on a hologram plane in circular type plane holography (c) on a hologram surface in cylindrical holography (d) on a hologram surface in spherical holography

재하게 된다. 여기서 큰 차수의 모드는 원주방향의 변화가 크다는 것을 의미한다. Fig. 3(c)는 원통면 홀로그래피의 경우로서 여기서도 음원을 중심에 두지 않고  $r$  방향으로 이동시켜 구하였다. 따라서 (b)의 경우와 마찬가지로 0이 아닌 모드가 존재한다. Fig. 3(d)는 구면 홀로그래피의 경우로서 가로축은  $\theta$ 방향의 모드차수 세로축은  $\phi$ 방향의 모드차수를 나타내며 각각 차수가 큰 경우는 홀로그램면에서의 변화가 크다는 것을 의미한다. 이 경우도 음원을 중심에 두지 않았기 때문에 0이 아닌 모드 값이 존재함을 볼 수 있다.

### 3.2 창문의 크기와 측정점 개수

구면 홀로그래피를 제외한 세 가지 형태의 홀로그래피에서는 홀로그램면의 크기가 무한하나 측정 영역의 크기가 제한되어 있어 측정 영역의 크기에 따라 오차가 달라지며, 측정점의 간격에 따라 오차의 크기가 변한다. Fig. 4는 단극의 음원을 가지고 창문의 크기와 측정점 개수를 변화시켜 가면서 오차를 계산한 것이다. 오차를 계산하는 예측면의 범위를  $4\lambda$ (파장의 4배)로 하였기 때문에 창문의 크기가  $4\lambda$ 보다 크면 오차가 급격히 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 이는 구하고자 하는 음장의 영

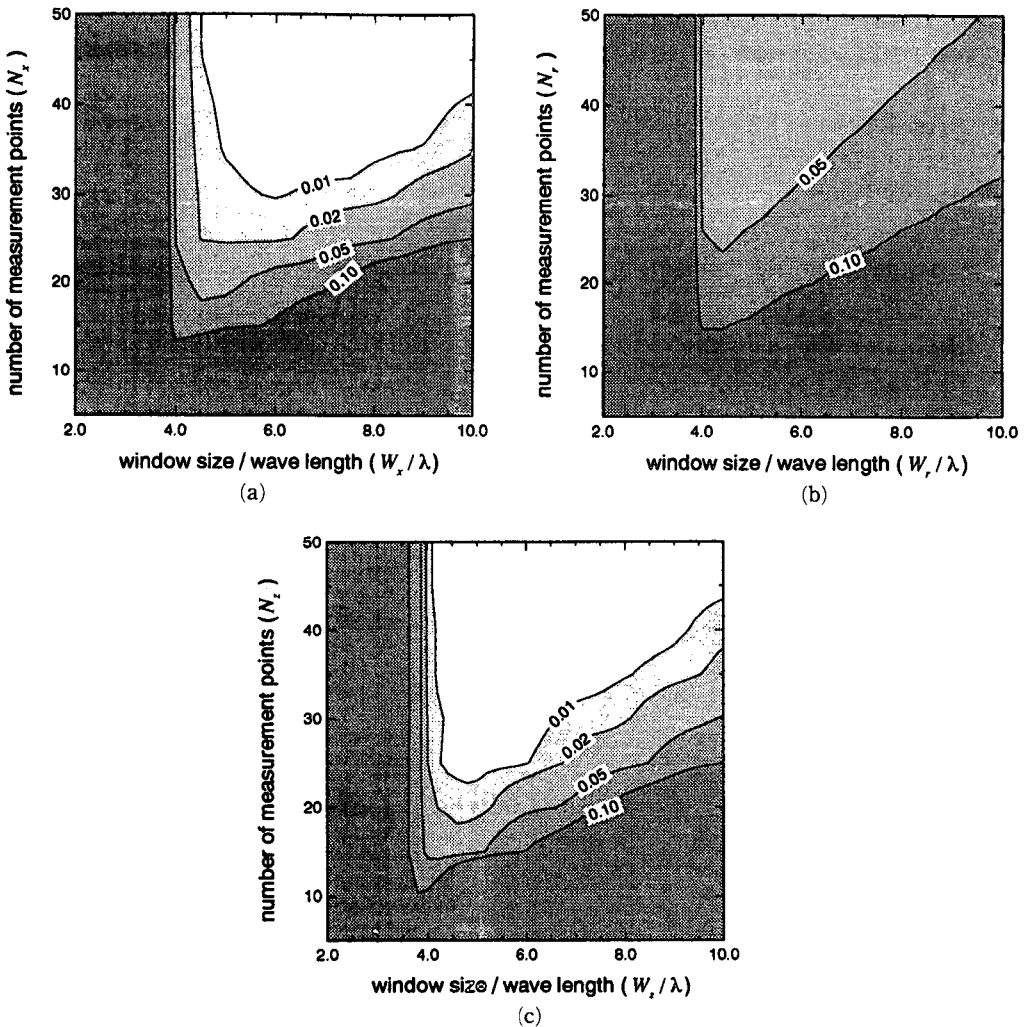


Fig. 4 Contour plot of averaged error varying window size and number of measurement points; (a) rectangular type plane holography (b) circular type plane holography (c) cylindrical holography



역보다는 큰 범위에서 측정을 해야 함을 의미한다. 또한 앨리어싱(aliasing)효과를 없애려면 한 파장 안에 2개 이상의 측정점을 두어야 하나 실제 적용을 위해서는 약 5~6개 이상의 측정점을 취해야 함을 보여주고 있다.

3.3 음원의 위치와 모드

사각형 평면 홀로그래피를 제외한 세 가지 형태의 홀로그래피의 측정면 형상은 축대칭을 이루고 있어 원주( $\phi$ ) 방향으로 측정을 하여 그 모드를 얻는다. 만약 음장의 형태가 축대칭을 이루고 있다면 측정면 원주방향으로의 음압 분포가 동일하기 때문

에 이론적으로 하나의 모드만으로 표현이 가능하다. 축대칭이 아니더라도 원주방향으로의 음압분포 변화가 급격히 변하지 않는다면 고차수의 성분은 무시할 정도로 작아 적은 모드로 표현이 가능하며 그만큼 적은 양의 측정점 개수가 필요하기 때문에 수고를 덜 수 있다.

Fig. 5는 단극이 중심으로부터 이동된 거리와 고려하고자 하는 최고차수를 변화시켜 가면서 예측 음장의 오차를 계산한 것이다. 음원의 위치가 중심에서 멀어질수록 많은 오차를 보이며 그 오차를 줄이기 위해서는 그만큼 많은 차수를 고려해야 함을 보여주고 있다. 이는  $\phi$ 방향의 음압분포의 변화가

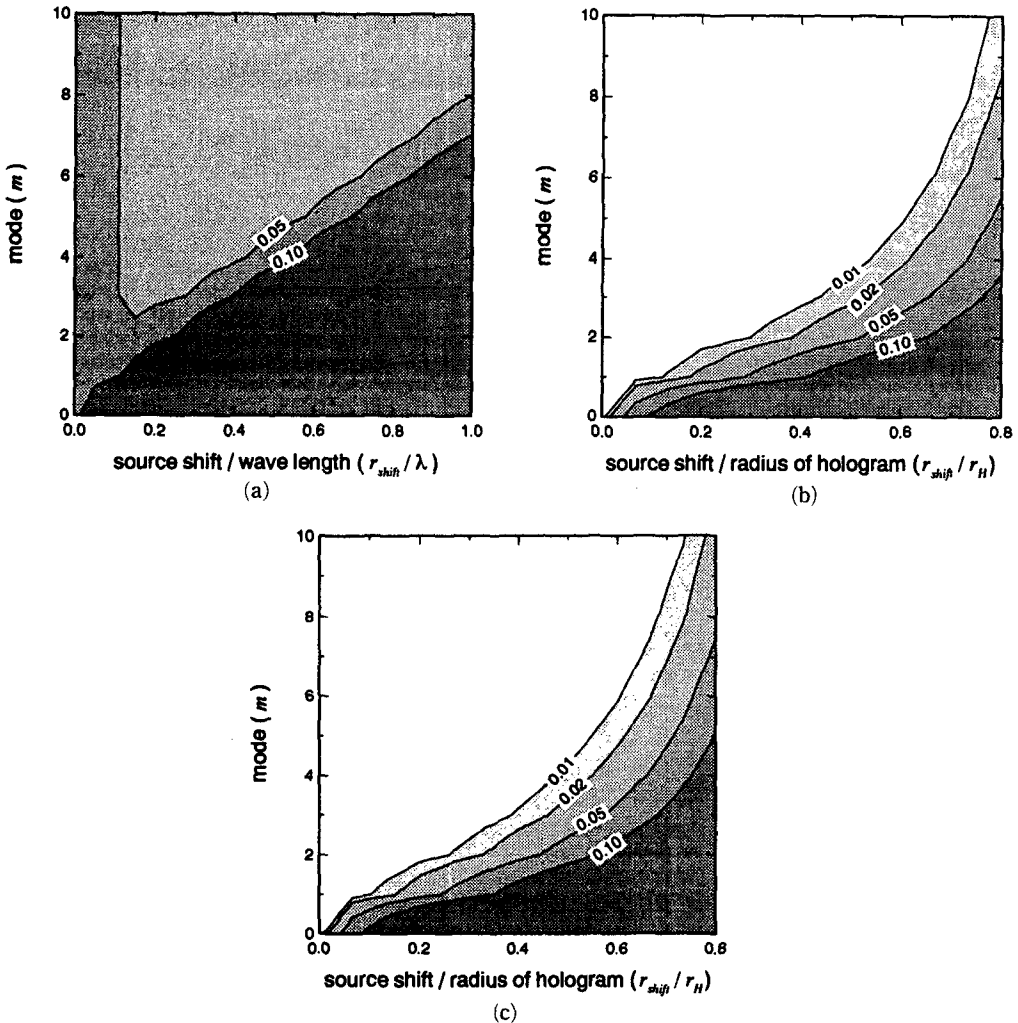


Fig. 5 Contour plot of averaged error with various position of a monopole source; (a) circular type plane holography (b) cylindrical holography (c) spherical holography

음원이 중심에서 멀어질수록 커지기 때문이다. 따라서 단극과 같은 축대칭 음원을 원형 평면 홀로그래피에 이용하려면 음원을 가급적 측정면 중앙에 두는 것이 유리하며 축대칭이 아니더라도 원주방향으로의 음압분포의 변화가 적은 음장에서 큰 이점을 가지고 있다.

### 3.4 측정점 개수와 모드

앞에서 살핀 바와 같이 원주방향으로의 음압분포가 달라진다면 많은 모드를 필요로 하며 그만큼 측정점 개수도 커져야 할 것이다. 여기서는 원주( $\phi$ ) 방향의 변화를 주기 위해서 단극을 중심에 두지 않

고  $x$ 축 양의 방향으로 0.1만큼 옮겨서 모의실험을 하여 모드개수와 그때 필요한 측정점 개수와와의 관계를 살펴 보았다.

Fig. 6(a)~(c)는  $\phi$ 방향으로의 측정점 개수와 고려하고자 하는 최고차 모드의 최고차수를 변화시킬 때 예측된 결과의 오차를 나타낸 것이다. 고려하는 모드가 크면 클수록 많은 측정점 개수를 요구하고 있다. 식(6), (8)에서와 같이  $\phi$ 방향으로는 삼각함수의 형태를 가지기 때문에 엘리어싱효과를 막기 위해서는 적어도 모드의 차수보다는 더 많은 측정점 개수를 가져야 하며 실제로는 약 2배 이상의 측정점을 가져야 함을 보이고 있다.

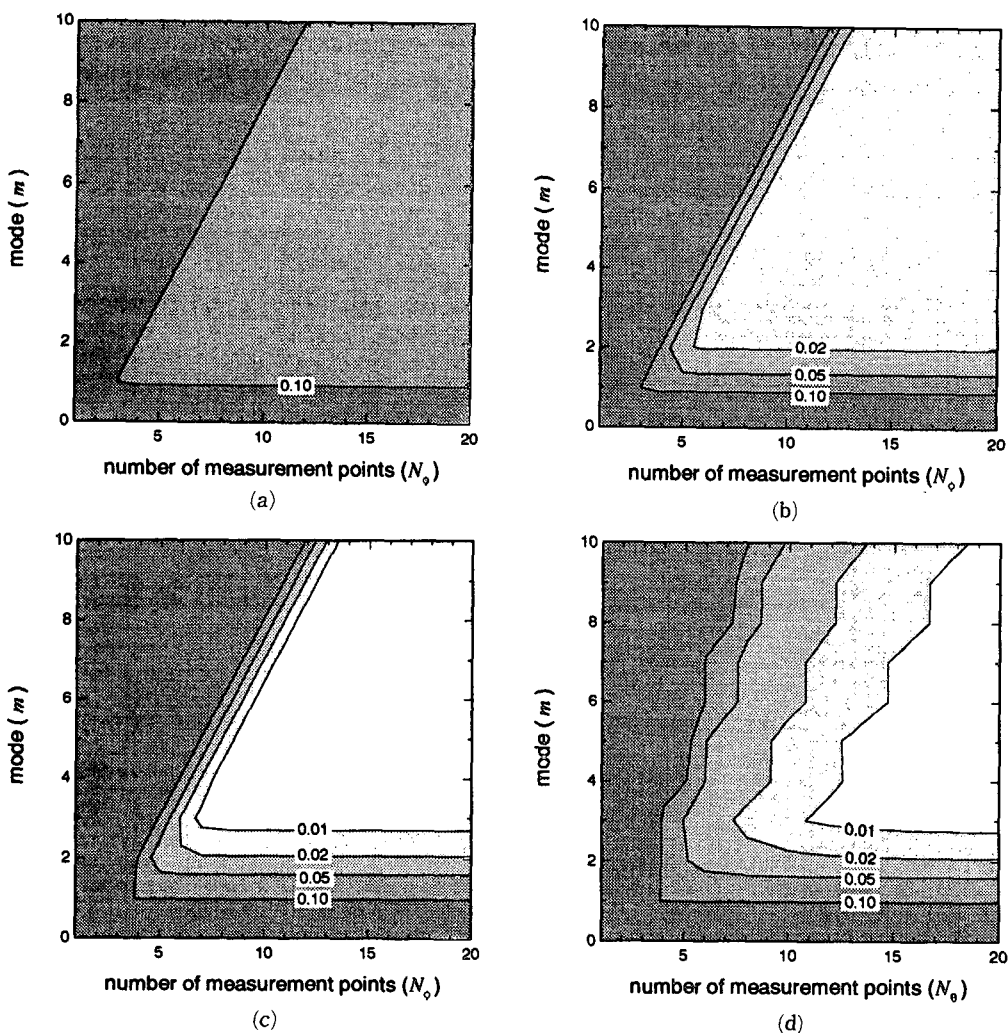


Fig. 6 Contour plot of averaged error with various number of measurement of points and modes ; (a) circular type plane holography (b) cylindrical holography (c) spherical holography( $\phi$ -directional) (d) spherical holograph( $\theta$ -directional)

구면 홀로그래피에서  $\phi$ 방향의 측정점 개수의 변화 대신  $\theta$ 방향의 측정점 개수를 변화시켜가며 Fig. 6(c)의 경우와 동일한 모의실험을 하였다. 구형 조화함수가  $\theta$ 방향으로는 르장드르함수의 형태로서  $\theta = 0, \pi$  근방에서 변화가 크기 때문에 식(25)에 의해서 모드의 기여도를 구하려면 방향보다도 더 많은 측정점을 두어야 한다. Fig. 6(d)는 고려하고자 하는 차수의 2배 이상의 측정점을 두어야 1% 이내의 오차를 가짐을 보여주고 있다.

3.5 제로패딩과 랩어라운드효과

사각형 평면 홀로그래피에서는 이론적으로  $xy$

전 평면에서 측정을 해야 하나 실지 적용시에는 측정면의 크기와 개수에 한계가 있기 마련이다. 측정 영역의 한계와 그에 따른 파수영역에서의 샘플링에 의해서 공간영역에서 보면 마치 측정 영역에서 얻은 음압분포가  $x, y$ 축의 사방으로 같은 크기만큼 배열되어 있는 효과를 얻는다.<sup>(3)</sup> 따라서 전방 예측을 하는 경우에는 창문 밖의 잘못된 예측된 음압 분포의 영향이 상대적으로 커지기 때문에 많은 오차를 유발한다. 이러한 오차를 둘러싸기오차(wrap-around error)라고 한다. 이러한 둘러싸기 오차를 줄이기 위해서 측정영역 밖으로는 인위적으로 0이라는 값을 주어 파수영역에서의 샘플링 간격을 좁게

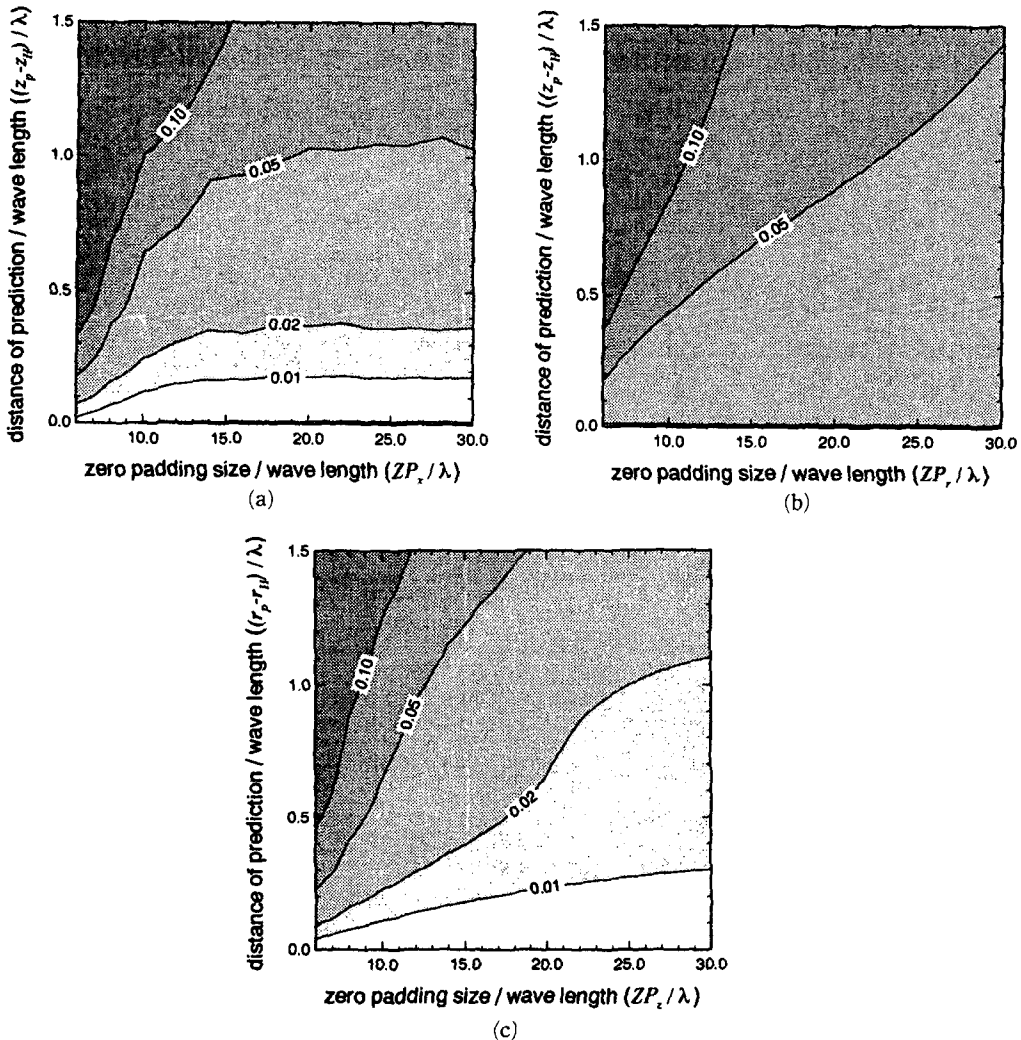


Fig. 7 Contour plot of averaged error in forward prediction with various zero padding size ; (a) rectangular type plane holography (b) circular type plane holography (c) cylindrical holography

만드는 방법을 이용한다. 이를 제로패딩이라 하는데 이런 경우에는 둘러싸기 오차로 인해 이웃해 나타나는 음압분포를 멀리 보낼 수 있기 때문에 보다 정확한 전방 예측이 가능하다.

사각형 평면 홀로그래피와 마찬가지로 원형 평면 홀로그래피도 측정영역의 한계와 파수영역에서의 샘플링에 의해서 둘러싸기 오차가 발생한다. 단 측정점 배열의 차이로 인해서 그 효과가 사각형 평면 홀로그래피의 것과는 다르게 나타난다. Fig. 7(b)는 예측면의 위치와 제로패딩 영역의 크기를 변화시켜 가면서 오차의 크기를 나타낸 것으로 예측면이 음원에서 멀어지면 멀어질수록 더 많은 범위의 제로

패딩이 필요함을 알 수 있다.

원통면 홀로그래피에서도 측정영역의 한계와 이에 따른 파수영역에서의 이산화에 의해서 주기적으로 나타난다. Fig. 7(c)는 제로패딩된 크기와 예측면의 위치를 변화시켜 가면서 예측오차를 나타낸 것이다. 이는 음원 면에서 멀리 떨어진 영역에서 음장을 구할 경우에는 제로패딩을 많이 해야 함을 보여주고 있다.

### 3.6 전후방 예측

Fig. 8(a)~(d)는 홀로그램면과 예측면의 위치를 변화시켜 가면서 얻은 음압분포의 오차를 나타낸

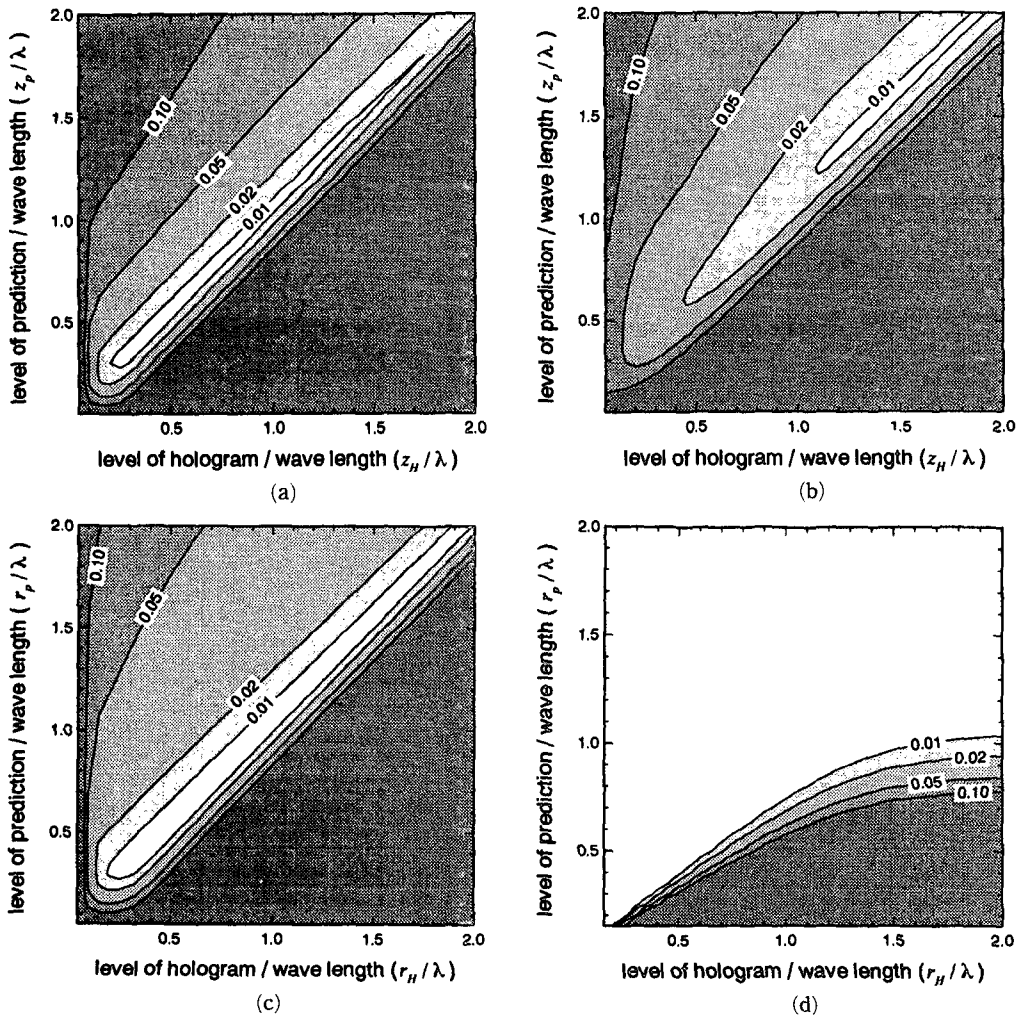


Fig. 8 Contour plot of averaged error in forward and backward prediction; (a) rectangular type plane holography (b) circular type plane holography (c) cylindrical holography (d) spherical holography

것이다. 구면 홀로그래피를 제외한 세 가지 형태의 홀로그래피에서 제로패딩은 측정영역의 3배로 하여 구한 것인데, 전후방 예측 모두 오차가 나타남을 보이고 있다. 전방 예측시 나타나는 오차는 대부분이 랩어라운드(wraparound) 효과에 의한 것이며 이를 줄이기 위해서는 제로패딩을 크게 해주면 된다. 구면 홀로그래피에서는 앞의 세 가지 형태의 홀로그래피와는 달리 오차가 상당히 적은 것을 볼 수 있다. 이는 구면 홀로그래피의 최대 장점으로 구면 홀로그래피의 그 크기가 유한하여 둘러싸기 오차가 나타나지 않기 때문이다.

후방 예측은 전방 예측보다 큰 오차를 보이고 있으며 음원면에 근접할수록 그 오차는 증가한다. 이는 음원면에 가까워질수록 그 영향이 상대적으로 커지는 고주파성분의 크기를 제대로 예측하지 못하는 데서 기인한다. 따라서 후방 예측을 하고자 할 경우는 가능한한 음원면에 가깝게 홀로그래프면을 두는 것이 유리함을 의미하고 있다. 그러나 그 간격을 너무 작게 잡으면 오차가 다시 커지는데 이는 홀로그래프면 위의 공간상에서의 분포가 급격히 변하기 때문에 그 변화를 따라갈만큼 충분한 측정점 개수를 두어야 함을 의미한다. 즉, 홀로그래프면을 가능한 한 음원면에 가깝게 하되 단 공간상의 분포를 충분히 표현할 수 있을 정도는 되어야 한다.

### 4. 실험 및 결과

앞의 모의실험에서 사용된 파라미터뿐만 아니라 음장의 형태에 따른 홀로그래피의 선택도 예측 결과에 중요한 영향을 미친다. 여기서는 실제로 적용하는 데 있어서 어느 정도 결과가 일치하는지 알아보고 또한 음원의 형태와 홀로그래피 사이의 관계로부터 홀로그래피의 특성을 파악하기 위하여 음향 홀로그래피의 적용 예로 다음의 두 가지 실험을 행하였다.

첫째는 축대칭 음장을 형성하는 단극 음원을 가지고 원형 평면 홀로그래피를 적용하여 실험하여 전후방 예측을 하였다. 그 결과를 측정치와 비교하여 축대칭 음장에서 원형 평면 홀로그래피의 선택이 유리함을 설명하고 있다. 둘째는 원통면 구조를 갖는 음원으로부터 발생하는 음장을 원통면 홀로그래피를 이용하여 예측을 하여 음원과 홀로그래프면이 유사한 형상을 가지고 있을 때의 이점을 설명하고 있다.

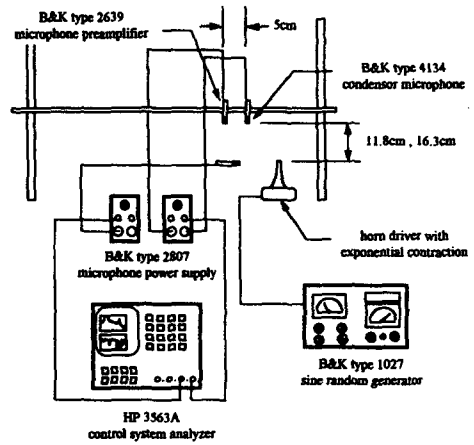


Fig. 9 Experimental setup(monopole experiment)

### 4.1 단극 음원실험

#### 4.1.1 실험방법

자유음장 조건을 만족시키기 위하여 무향실 안에서 실험을 행하였다. 음원으로는 축대칭 음장을 형성할 수 있게 단극 음원의 성질을 갖는 스피커를 사용하였다. 하나의 마이크로폰은 Fig. 9에서와 같이 음원에서 약 10 cm 떨어져서 고정시켜 기준 마이크로폰으로 사용하였으며 다른 두 개의 마이크로폰을 움직여 가면서 전달함수를 계산하여 음압분포를 구하였다. 축대칭의 특성에 의하여 평면 전체에서 측정을 하는 대신 반경방향으로 한 라인 위에서만 측정을 행하였다. 측정은 음원으로부터 떨어진 거리가 각각 11.8 cm와 16.3 cm가 되는 평면 위에서 하였으며 측정점 사이의 간격은 파장의 약 7분의 1인 5 cm로 하였고 20개의 위치에서 측정을 하여 파장의 약 3배가 되는 길이만큼의 반지름을 갖는 영역에서 음압 분포를 얻도록 하였다.

#### 4.1.2 실험결과 및 고찰

Fig. 10은 원형 평면 홀로그래피를 이용하여 음장 예측을 한 결과를 나타낸다. (a)는 측정점 사이의 간격을 5 cm로 하였을 때  $z=11.8$  cm에서의 음압 레벨을 그린 것이며 실선은 측정된 음압분포를 파선은  $z=11.8$  cm에서의 측정값으로부터 예측한 홀로그래프면에서의 음압분포를 점선은  $z=16.3$  cm에서의 데이터로부터 후방 예측을 하여 얻은 음압분포를 나타낸다. 한 파장안에 약 7개의 측정점을 두었으므로 홀로그래프면 위치에서 예측한 음압분포

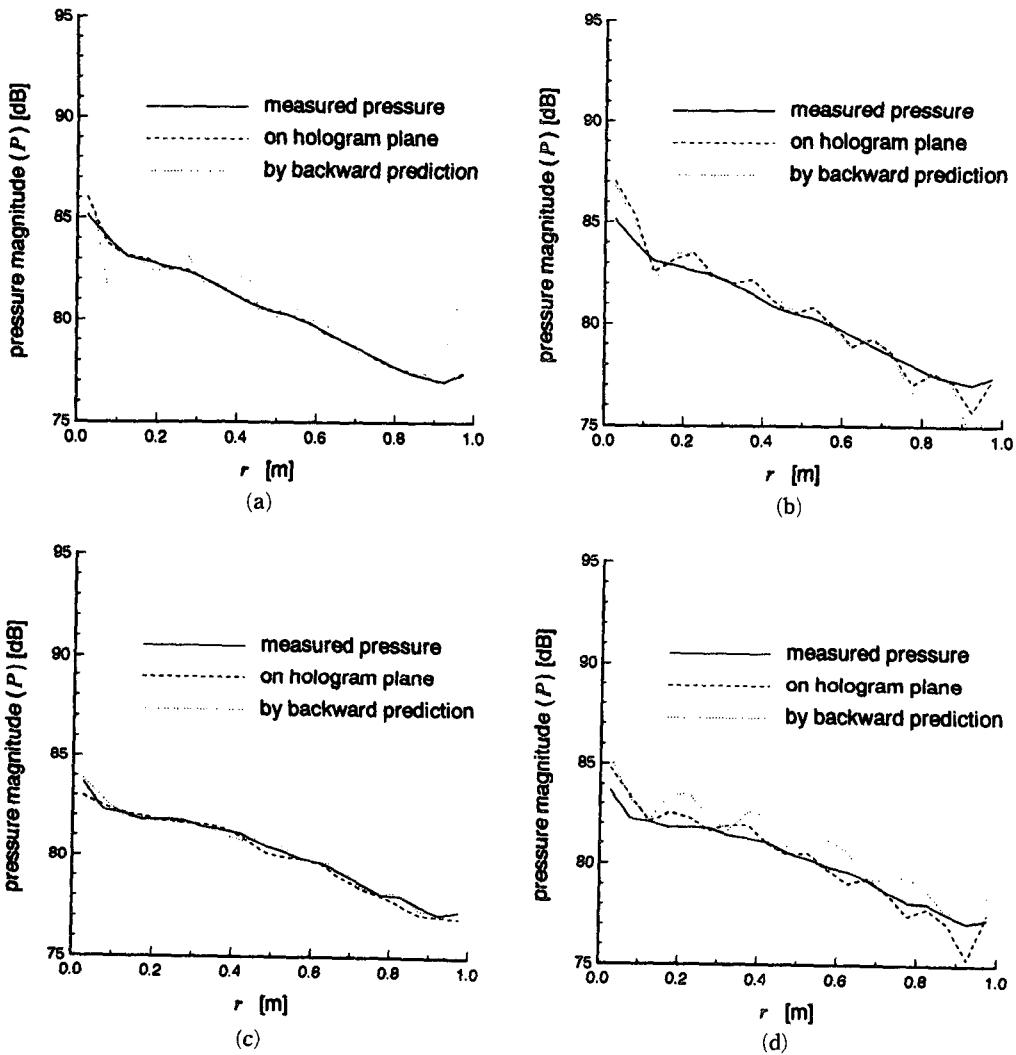


Fig. 10 Prediction of pressure using circular type plane holography ; (a) on the plane  $z=11.8$  cm with 5 cm of measurement interval (b) on the plane  $z=11.8$  cm with 10 cm of measurement interval (c) on the plane  $z=16.3$  cm with 5 cm of measurement interval (d) on the plane  $z=16.3$  cm with 10 cm of measurement interval

는 오차가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 그러나 후방 예측은 모의실험에서 얻은 결과와 마찬가지로 큰 오차를 포함하고 있다. (b)는 측정점 사이의 간격을 10 cm로 하였을 경우로 한 파장 안에 약 4개 미만의 측정점 개수를 가진다는 것을 의미하며 (a)와 비교하여 보면 홀로그램면에서 예측은 좋지 못한 결과를 나타내고 있다. 이는 한 파장안에 약 5~6개 이상의 측정점을 가져야 함을 보이고 있다. 후방 예측에 의하여 얻은 음압분포도 큰 오차를 보이고 있다.

(c)와 (b)는  $z=16.3$  cm에서의 음압분포를 나타내고 있으며 실선은 측정된 음압 레벨을 파선은  $z=16.3$  cm에서의 측정값으로 예측한 홀로그램면에서의 음압 레벨을 점선은  $z=11.8$  cm에서의 측정 데이터 가지고 전방 예측하여 얻은 음압 레벨을 의미한다. (c)는 측정점의 간격을 5 cm로 한 경우로서 홀로그램면 위치에서 예측 음압과 전방 예측에 의한 음압 모두 비교적 정확한 값을 나타내고 있다. (d)는 10 cm의 측정점 간격을 가지는 경우인데 예측 결과에 많은 오차를 포함하고 있음을 알 수

있다.

결론적으로 확대칭 음장을 갖는 경우에 측정점 간격을 충분히 작게 잡는다면 한 라인에서의 측정으로부터 전방 예측이 가능함을 알 수 있다.

#### 4.2 원통형 구조물의 음원에 대한 실험

##### 4.2.1 실험방법

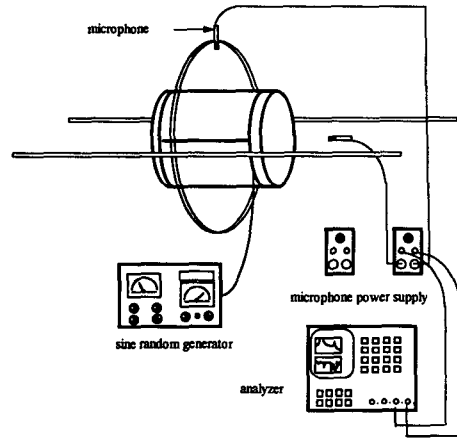
자유음장 조건을 만족시키기 위하여 무향실 안에서 실험을 행하였다. 음원으로는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 원통형 모양의 구조물을 사용하였다. 원통형 구조물은 0.5 mm의 합석판으로 만들어졌으며 지름은 25 cm이고 높이는 51 cm이고 양 끝은 소리가 새어 나가지 않게 같은 재료로 만든 덮개를 사용하여 막았다. 음장을 형성시키기 위하여 스피커를 원통형 구조물 안에 넣고 가진하여 구조물의 진동을 유발시켰다. 스피커에는 파수발생기로 680 Hz를 중심주파수로 하고 31.6 Hz의 대역폭을 가진 전원을 공급하였다.

하나의 마이크로폰은 Fig. 11(a)에서와 같이 원통형 구조물의 한쪽 평면에서 약 18 cm 떨어뜨려 고정시켜 기준 마이크로폰으로 사용하였으며 다른 세 개의 마이크로폰을 이동시켜 가면서 측정을 하였다.

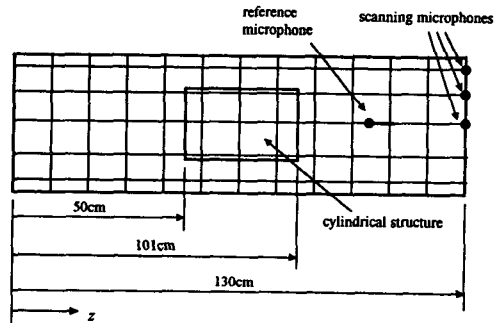
음압분포는 마이크로폰들 사이에 상관성이 있는 680 Hz에서 기준점의 음압과 이동점의 음압 사이의 전달 함수를 구하여 얻었다. Fig. 11(b)와 (c)에서 보는 바와 같이 z축으로는 파장의 약 5분의 1인 10 cm 간격으로 14개의 측정점을 두어 파장의 약 3배가 되는 길이만큼의 영역에서 측정하게 하였으며 원주방향으로는 45도 간격으로 8개의 측정점을 두어 14×8개의 위치에서 음압분포를 구하였다. 원통면의 형태를 가지는 측정면의 반지름이 각각 22 cm와 26 cm인 경우에 대하여 측정을 하였다.

##### 4.2.2 실험결과 및 고찰

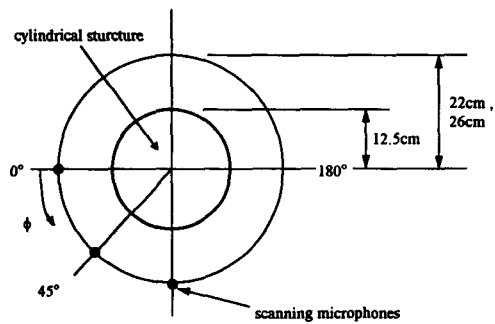
Fig. 12는  $r=22$  cm와  $r=26$  cm인 곳에서의 음압 분포를 dB 단위로 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는  $r=22$  cm에서 측정한 음압분포를, Fig. 12(b)는  $r=26$  cm에서 측정한 음압분포를 나타내고 있다. 두 가지 경우 모두  $z=1$  m 근방에서 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있는데 이는 원통형 구조물을 덮고 있는 덮개가 정확히 맞지 않기 때문이며 또한 스피커에 연결되어 있는 선이 밖으로 나와 있는 부분에서 틈이 생겨 소리가 흘러나오기 때문이다. Fig.



(a) Total view of experimental setup



(b) Front view of experimental setup



(c) Right side view of experimental setup

Fig. 11 Experimental setup(source of cylindrical shape structure)

12(c)는  $r=26$  cm에서 측정한 음압으로부터 후방 예측을 하여  $r=22$  cm에서 구한 음압분포다. Fig. 12(a)와 흡사함을 볼 수 있다. 여기서는 앞의 실험에 비하여 후방 예측의 결과가 실지값과 비교적 잘 맞고 있는데 이는 후방 예측된 거리가 파장에 비해서 짧으며 얻을 수 있는 z방향으로의 최대 파수값

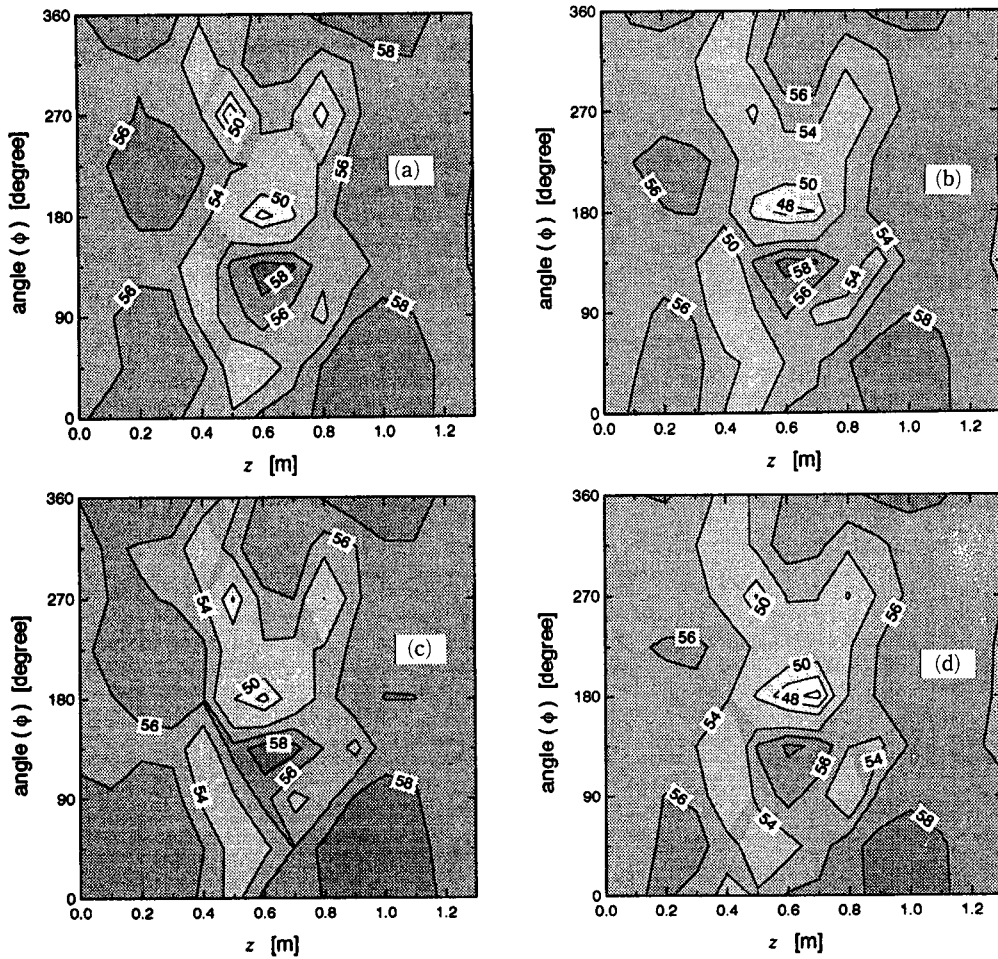


Fig. 12 Pressure distribution of sound field caused by cylindrical structure; (a) on  $r=22$  cm from measurement data (b) on  $r=26$  cm from measurement data (c) on  $r=22$  cm by backward prediction with data on  $r=26$  cm (d) on  $r=26$  cm forward prediction with data on  $r=22$  cm

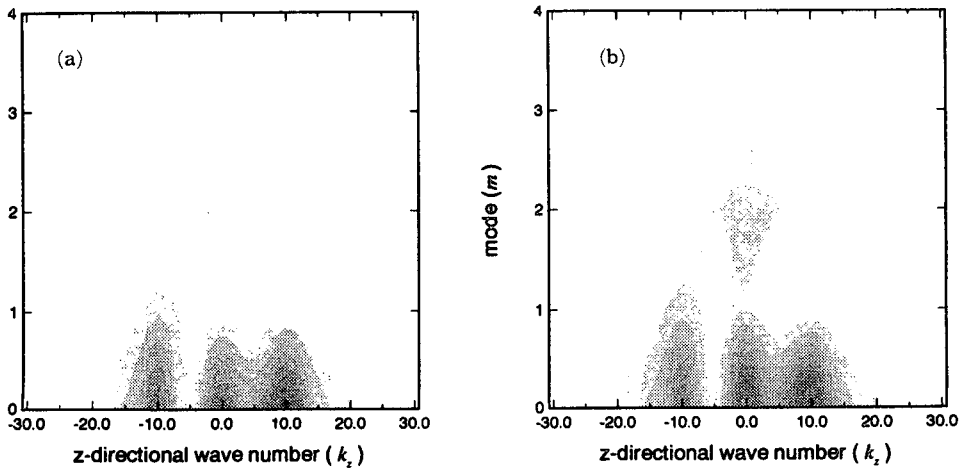


Fig. 13 Frequency component; (a) on the hologram surface of  $r=22$  cm (b) on the hologram surface of  $r=26$  cm



이 크지 않아 후방 예측시 잘못 예측된 파수성분의 증폭량이 작기 때문이다. Fig. 12(d)는  $r=22$  cm에서 측정된 음압으로부터 전방 예측을 하여  $r=26$  cm에서 구한 음압분포로서 Fig. 12(b)와 비슷한 분포를 나타낸다.

Fig. 13은 각각의 홀로그래프면에서 파수성분을 나타낸 것으로 (a)와 (b)가 같음을 확인할 수 있다. 대부분의 파수성분이  $k_z=15$ 안에 있으며 본 실험에서 사용된 측정점 간격으로 충분히 표현할 수 있음을 알 수 있다. 모드는 2차 모드까지 존재하며 따라서 원주방향으로의 측정점 개수는 적어도 4개 이상이 필요하며 오차가 적은 예측을 하기 위해서는

약 8개 이상이 필요하다.

Fig. 14는 원주방향으로의 측정점을 4개로 하여 얻은 결과로서 (a)와 (b)는 각각  $r=22$  cm와  $r=26$  cm인 면에서의 파수성분을 (c)와 (d)는 전후방 예측을 하여 얻은 음압분포를 나타내고 있다. (a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 2차 모드의 값을 무시할 수 없으며 따라서 4개의 측정점을 가지고 예측을 하는 경우는 (c), (d)와 같이 실제 분포 Fig. 12(a), (b)와는 전혀 다른 값을 얻는 것을 알 수 있다.

따라서 대부분의 파수성분이 얻을 수 있는 저차수의 모드와 낮은 파수의 성분에 존재하는 경우에 예측된 결과는 잘 맞는 반면 Fig. 12의 결과와 같

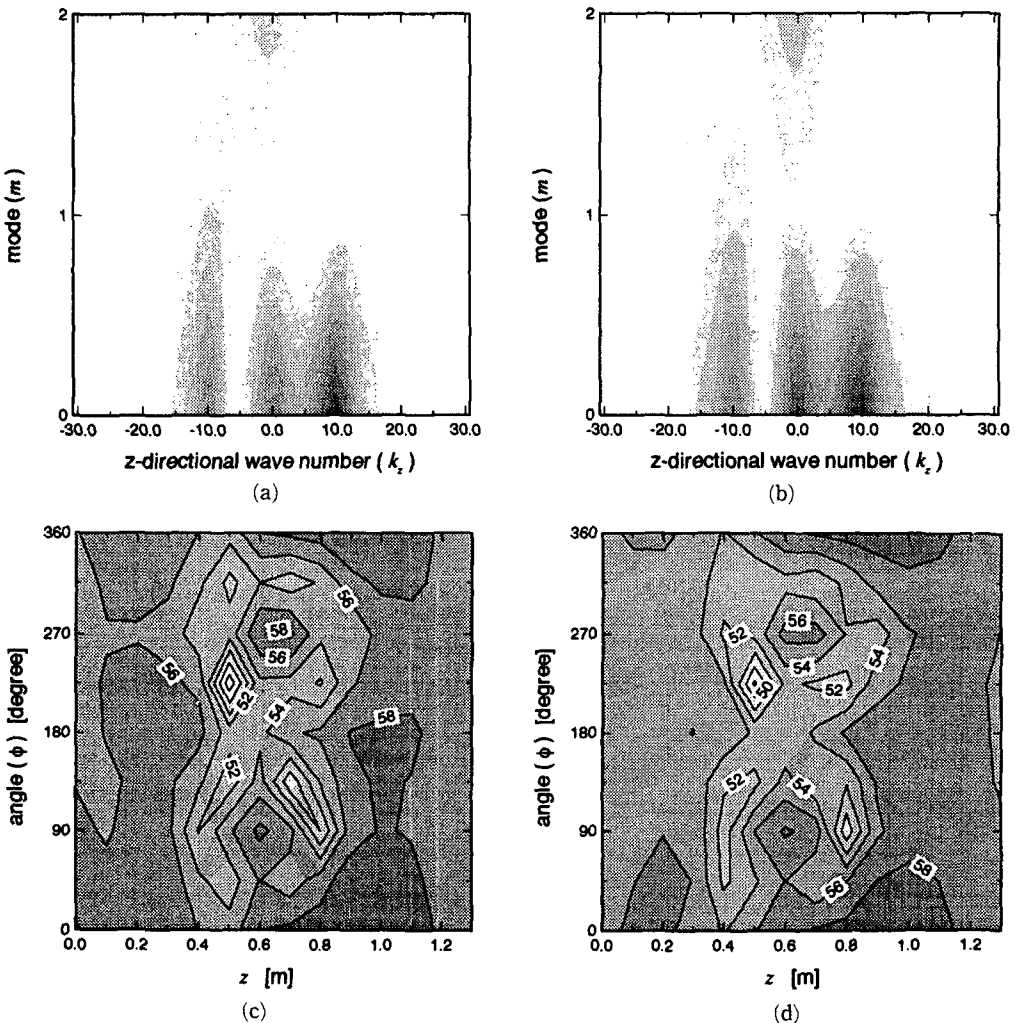


Fig. 14 Prediction with four measurement points; (a) frequency component on the surface of  $r=22$  cm (b) frequency component on the surface of  $r=26$  cm (c) pressure distribution on  $r=22$  cm by backward prediction (d) pressure distribution on  $r=26$  cm by forward prediction

이 얻을 수 없는 높은 파수가 있는 경우는 큰 오차를 포함하고 있는 것을 볼 수 있다. 원통형 구조물로부터 발생하는 음압의 분포는 원통면의 형태와 비슷하여 원통면 홀로그래피를 적용하는 경우 저차수 모드로 표현이 가능하여 전후방 예측에 유리하며 모든 원주방향의 음압분포를 알 수 있으므로 주요 음원의 위치를 찾는 데도 유리함을 알 수 있다.

이와 같이 원통형의 구조물은 원통면 홀로그래피를 통해서 음장의 분포와 음원의 근사적인 위치를 알아내는 것이 다른 홀로그래피를 적용하는 것보다 유리함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

홀로그래피에서의 음압분포 변화량은 파수영역에서 각 모드의 크기와 관계가 있으며 측정점 간격과 홀로그래피 종류를 선택하는데 기준을 제시하고 있다. 즉, 홀로그래피에서의 음압분포 변화량이 커서 높은 차수의 파수성분을 많이 가지고 있는 경우는 측정점 사이의 간격을 줄여야 오차를 막을 수 있다.

측정점 사이의 간격은 엘리어싱효과를 막기 위해서는 한 파장안에 2개 이상의 측정점을 두면 되나 음압분포의 변화를 생각한다면 적어도 5~6개 이상의 측정점을 두어야 실제 음장에 가깝게 음장 예측을 할 수 있다. 원주방향으로의 모드를 얻기 위해서는 적어도 모드 차수의 2배 이상의 측정점을 가져야 큰 오차를 막을 수 있다.

홀로그래피의 선택은 홀로그래피에서 음압분포의 변화가 가장 작도록 하는 것이 좋으며, 일반적으로 구조물의 형상과 음압의 분포의 형상이 비슷하기 때문에 구조물의 형상과 비슷한 홀로그래피를 선택함이 좋다. 또한 구조물의 형상과 홀로그래피의 형상이 같으면 후방 예측에 의해 구조물의 진동 모드를 구하는 데 더욱 유리하다.

구면 홀로그래피를 제외한 다른 종류의 홀로그래피에서는 파수영역에서의 샘플링에 의해 램어라운드효과가 나타나기 때문에 전방 예측시 제로 패딩

을 크게 해 주어야 한다. 후방 예측을 하는 경우에는 창문 안팎의 값 차이에 의해서 나타난 오차가 증폭되는 결과를 얻는다.

## 참고문헌

- (1) Maynard, J. D., Williams, E. G. and Lee, Y., 1985, "Nearfield Acoustic Holography: I. Theory of Generalized Holography and Development of NAH," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 78, pp. 1395~1413.
- (2) Wvronesi, W. A. and Maynard, J. D., 1987, "Nearfield Acoustic Holography: II. Holographic Reconstruction Algorithms and Computer Implementation," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 81, pp. 1307~1322.
- (3) 김양한, 권휴상, 1992, "음향 홀로그래피를 이용한 방사 음장의 전방예측 방법에 관한 기본 이론 및 신호처리 방법," 대한기계학회논문집, 제 16권, 제9호, pp. 1654~1668.
- (4) 권오훈, 1994, "근접 음향 홀로그래피를 이용한 평판 내의 속도 분포 예측," 대한기계학회논문집, 제18권, 제2호, pp. 251~259.
- (5) Williams, E. G. and Dardy, H. D., 1987, "Generalized Nearfield Acoustical Holography for Chlindrical Geometry: Theory and Experiment," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 81, pp. 389~407.
- (6) Prerce, A. D., 1981, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, McGraw-Hill, New York, pp. 180~1
- (7) Morse, P. M. and Ingard, K. U., 1968, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, New York, pp. 332~341, 356~358.
- (8) Herrick, R. W., "Measurement and Prediction of Sound Propagation Over an Absorbing Plane," A Graduate Research Facility of The School of Mechanical Engineering, Purdue University, pp. 186~188.