

원통면 음향 홀로그래피를 이용한 음장에측의 오차 해석 및 적용 방법

Errors and Applicabilities of Cylindrical Acoustic Holography

김 시 문* · 권 휴 상* · 김 양 한*

Kim See-moon, Kwon Hyu-Sang, Kim Yang-Hann

(1994년 9월 10일 접수 ; 1995년 1월 12일 심사완료)

ABSTRACT

The prediction of sound pressure using acoustic holography has been recognized as a useful tool for the visualization of sound field. Cylindrical acoustic holography amongst acoustic holographic methods -planar, spherical, and cylindrical ones-has a wide range of application since its rather simple construction and easy implementation for the sources. To utilize the property of cylindrical holographic method, estimation errors associated with holographic parameters such as aperture size and sampling space must be envisaged. In this paper these errors have been studied by numerical simulation and the relation between the errors and the spectrum in wavenumber domain is described. The results are also confirmed by simple experiments.

1. 서 론

소음원의 위치 및 주파수별 공간상의 특성을 파악하기 위하여 종래에 사용되어진 방법으로는 진동하는 물체의 진동 주파수 분석과 함께 소음 분석을 하여 소음원을 유추하거나, 음향 인텐시티 탐촉자(intensity probe)를 이용하여 음원을 파악하는 방법 등을 들 수 있다⁽¹⁾. 그러나 이러한 방법들은 열밀하게는 다만 소음원의 위치를 추산할 뿐 정확성을 이론적으로 보장하지 않는다는 단점은 물론 측정 평면 이외의 공간상의 음장 특성을 제공하지 않는다는 제한성을 갖고 있다. 전술한 방법과는 두 가지 면에서 구별되어지는 방법으로서 1980년대 중반부터 본격적으로 소개되어진 음향 홀로그래피 방법(Acoustic Holography)을 들 수 있다. 즉, 인텐시티 방법이 정상상태의 음장 측정을 위한 경우 단지 한개의 인텐시티 탐촉자를 필요로 하는 반면 비정상 상태의

음장 측정이 현실적으로 불가능한 점과 측정 평면 이외의 인텐시티 분포를 예측하는 기능이 없다는 점과는 대조적으로 음향 홀로그래피 방법은 임의의 면에서 측정된 음압 데이터를 이용하여 음원면의 음압 분포나 입자속도 분포를 구함으로써 소음원을 유추할 수 있을 뿐만 아니라 방사되는 음장의 모든 정보(즉, 음압, 입자속도, 음향 인텐시티 등)를 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다^(1, 2).

음향 홀로그래피 방법은 사용하는 좌표계에 따라서 평면 음향 홀로그래피, 원통면 음향 홀로그래피, 구면 음향 홀로그래피로 나뉘어 진다. 각 홀로그래피는 측정하고자 하는 구조물의 형태나 예상되는 음원의 분포에 따라 선택되어질 것임을 쉽게 알 수 있다. 음향 홀로그래피 방법이 널리 소개된 후^(2,3)로 평면 음향 홀로그래피 방법에 관한 연구는 수중에서의 적용⁽⁴⁾, 음향 인텐시티의 이용⁽⁵⁾, 신호처리 방법을 이용한 예측결과의 향상⁽⁶⁾, 내부 공간에서의 적용⁽⁷⁾등과 같이 다양한 관점에서 활발히 진행되어져 왔다. 이에 반해 원통형 혹은 길쭉한 형상(slender shape)의 많은 적용 대상물에 효과적으로 이용할 수

*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

있는 원통면 음향 홀로그래피 방법에 관한 연구는 상대적으로 미약했다. 원통면 홀로그래피 사용의 이유로는 평면 홀로그래피의 경우 어쩔수 없이 감수해야 하는 측정 평면 이외의 평면으로의 음압 누손의 정도가 원통면 홀로그래피의 경우 측정 대상 음장의 형태가 원통형 좌표계로 가장 적절한 표현될 수 있을 때 유한한 측정평면의 사용으로 인한 실제 음압의 누손 현상이 극소화 될 수 있다는 점이다 (Fig. 1 참조). 보다 실제적인 이유로는 평이하고 단순하지만 간과되어 온 사실 즉, 평면 홀로그래피 방법으로는 재구성이 불가능한 원통형 혹은 보다 일반적인 3차원 형태의 방사 음장을 재구성 할 수 있다는 점일 것이다. 원통면 음향 홀로그래피는 1980년대 후반에 Williams 등에 의해 연구되어졌는데^(8, 9), 이들은 이 방법의 기본적인 이론 전개 및 실험을 통한 응용 등에 주로 관심을 가졌으나 음장 예측 과정에서 필연적으로 포함되는 오차에 관하여 구체적인 고찰을 하지않은 상태로 실험적인 접근 및 분석을 행함으로써 실험결과 및 원통면 홀로그래피 방법을 이용한 음장 재구성에의 한계점 혹은 주의할 사항을 간과한 점이 주목할만 하다. 특히 측정점 사이의 간격에 의한 영향을 예측오차보다는 예측음장의 분해능(resolution)의 관점에서 연구하였으며 유한한 측

정구경의 영향에 대해서는 거의 소개하지 않았다^(8,9).

본 연구에서는 원통면 음향 홀로그래피 방법에서의 예측오차에 관한 고찰을 하고 이를 토대로 이 방법을 이용한 음장 재구성의 유용한 조건을 제시하고자 한다. 이를 위하여 우선 원통면 음향 홀로그래피 방법의 기본적인 이론을 재구성하였다. 이를 토대로 원통면 음향 홀로그래피 방법의 실제 적용시 측정하는 구경의 크기가 유한하기 때문에 나타나는 창문함수의 영향(window effect)이나 연속적이지 못하고 이산화된 측정점 분포를 갖음으로써 나타나는 공간상의 엘리어싱(spatial aliasing)과 같은 오차들을 모의실험을 통하여 살펴 보았다. 그리고 둘러싸기 오차(wraparound error)에 대해서도 고찰하였으며, 개선 방안으로 제로패딩(zero padding)방법을 제시하였다. 예측 음압 오차는 파수 영역에서의 각 파수별 분포와 밀접한 관련을 갖는데, 공간상의 엘리어싱은 측정점 사이의 간격, 즉 주파수 영역에서의 나이퀴스트(Nyquist) 주파수와 직접적인 관계가 있음을 고찰하였으며 창문함수의 영향은 파수 영역에서 살펴보면 누손(leakage)현상에 의해 왜곡된 분포를 얻음으로써 나타나는 오차로써, 이를 줄이기 위하여 Tukey 창문함수(Tukey window)의 사용을 제안하였다. Tukey 창문 함수는 가장자리에서 부드럽게 떨어지는 현상을 가지기 때문에 누손 현상을 줄일 수 있다는 장점과 함께 중앙 부분에서는 그 크기가 1로써 측정값과 동일한 값을 사용하여 실제값에 가깝게 예측을 할 수 있는 특징으로 인해 음향 홀로그래피에 적합하다 하겠다. 이러한 오차해석을 통하여 가능한 한 오차를 줄이고 신뢰할 수 있는 예측결과를 얻을 수 있는 측정조건을 제시하고자 노력하였다.

이러한 기본적인 이해를 바탕으로 원통형 구조물을 이용한 실험을 행하였다. 이 실험을 통하여 원통면 음향 홀로그래피 방법에 실제 적용 가능성을 제시하였으며, 실험 결과에 대한 신뢰성 여부를 공간 주파수 영역의 주파수별 분포에 의해 해석할 수 있음을 확인하였다.

2. 기본 이론

2.1 이론적 배경

원통면 음향 홀로그래피의 기본식은 원통 좌표계를 기본 좌표계로 설정하여 유도되어진다. (r, ϕ, z) 좌표계를 이용하여 헬름홀쯔 방정식을 만족하는 특성함수를 구하면 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

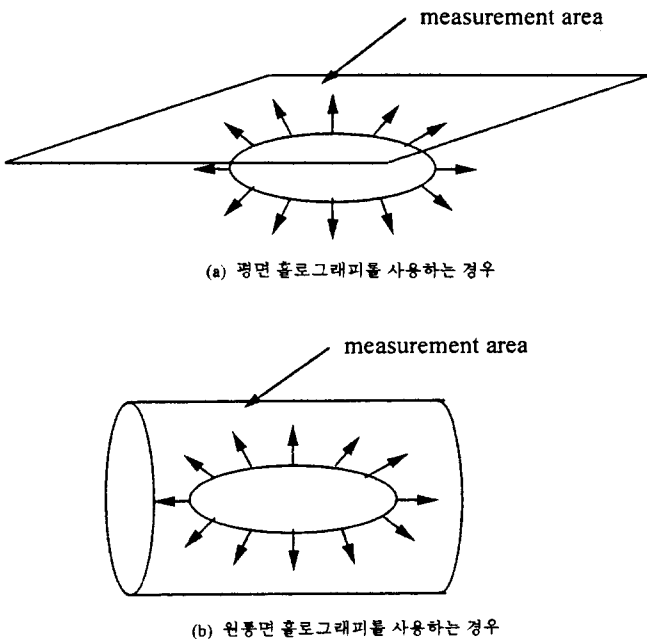


Fig. 1 음원의 모양이 한 방향으로 길쭉한 타원체 모양을 하고 있을 때의 평면 홀로그래피와 원통면 홀로그래피의 비교

$$\Psi_m(r, \phi, z; k_r, k_z) = \begin{Bmatrix} H_m^{(1)}(k_r r) \\ H_m^{(2)}(k_r r) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} e^{im\phi} \\ e^{-im\phi} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} e^{ik_z z} \\ e^{-ik_z z} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 k_r 과 k_z 는 파수의 방향 성분으로써 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

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

$H_m^{(1)}$ 과 $H_m^{(2)}$ 는 각각 제1종, 제2종 원통형 행켈 함수(cylindrical Hankel function of 1st and 2nd kind)를 의미하며 m 은 정수로서 행켈함수의 차수를 나타낸다. 각각의 함수는 k_r 이 실수이면 $H_m^{(1)}$ 은 r 의 방향으로, $H_m^{(2)}$ 는 r 의 역 방향으로 진행하는 파를 의미하며, k_r 이 허수이면 각각의 방향으로 크기가 감소하는 감쇠파(evanescent wave)를 의미한다. 음압을 나타내는 일반해는 이 특성해의 선형조합으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(r, \phi, z) = \sum_m \int \bar{P}_m(\vec{k}) \Psi_m(r, \phi, z; k_r, k_z) d\vec{k} \quad (3)$$

만약 음원이 $r=r_s$ 인 음원면 안에 존재하고, $r>r_s$ 인 공간상에서는 반사면이 존재하지 않는 자유음장(free field) 조건을 만족한다면, 음파는 음원면 바깥쪽으로 진행하는 파만 존재하게 되고 따라서 식 (1)과 (3)의 특성함수 중에서 제2종 행켈 함수는 제외시킬 수 있다. 즉, 식 (3)은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$P(r, \phi, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{P}_m(k_z) e^{im\phi} e^{ik_z z} H_m^{(1)}(k_r, r) dk_z \quad (4)$$

$$k_r = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_z^2} & (k^2 > k_z^2) \\ i\sqrt{k_z^2 - k^2} & (k^2 < k_z^2) \end{cases} \quad (5)$$

여기서 식 (4)의 $\bar{P}_m(k_z)$ 는 특성함수의 직교성과 홀로그래프면($r=r_H$)에서의 음압분포로부터 얻을 수 있으며 이를 수학적으로 표현하면

$$\bar{P}_m(k_z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(r_H, \phi, z) e^{-im\phi} e^{-ik_z z} \left\{ H_m^{(1)}(k, r_H) \right\}^{-1} dz d\phi \quad (6)$$

과 같다. 이때 홀로그래프면이라 불리는 측정면($r=r_H$)의 선정이 식 (4)에 의하여 예측하는 음압의 질을 사실상 결정함을 알 수 있다. 식 (4)의 물리적인 의미는 우리가 관심이 있는 영역, 즉 $r>r_s$ 인 자유공간 내의 임의의 위치에서의 음압을 예측하기 위하여 필요한 것은 특성함수의 크기를 나타내고 있는

$\bar{P}_m(k_z)$ 즉 복소 음압분포의 파수 성분이며 식 (6)과 함께 생각해 보면 홀로그래프면에서의 음압분포만으로 가능하다는 사실이다. 이는 식 (4)가 근본적으로는 선형계의 특성인 중첩의 원리에 기초하고 있으며, 이를 물리적으로 표현하면 원통형 좌표계로 표현되는 임의의 공간상의 음압은 측정 원통면의 음압 분포와 $\bar{P}_m(k_z)$ 의 ϕ , z 및 r 방향의 전파 모델을 이용하여 예측할 수 있다는 것이다. 원통면 음향 홀로그래피 방법은 z 축 방향으로 푸리에(Fourier)변환, 원주 방향으로 푸리에(Fourier) 급수 전개를 통한 해석 방법임을 알 수 있고 각각의 모드의 모양을 고찰해 보면 원통형 음향 홀로그래피 방법은 공간상의 음장분포를 z 축을 중심으로 나선형으로 진행하는 나선형 파(helical wave)들의 중첩으로 해석하는 과정임을 알 수 있다.

2.2 입자속도 및 음향 인텐시티의 예측

홀로그래피 방법을 이용할 경우 종래의 인텐시티 방법과 구별되는 특성 중의 하나가 측정 평면의 음압 분포 뿐만 아니라 전 공간의 음장 특성 즉 인텐시티, 속도 분포, 음향 에너지 분포 등을 얻을 수 있다는 점이다. 이것은 입자 속도가 다음과 같이 표현되는 오일러 방정식(Euler equation)

$$\vec{V}(\vec{r}) = \nabla P(\vec{r}) / i\rho c k \quad (7)$$

으로부터 얻을 수 있다는 단순한 인식에서 출발한다. 여기서 ρ 는 매질의 밀도를 의미한다. 주의할 점은 입자속도는 벡터량이므로 각 좌표의 방향으로 입자속도 성분을 구하고, 이를 합성하여 입자속도를 계산하여야 한다는 점이다. 또한 음향 인텐시티는 음압과 입자속도의 곱이므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{C}(\vec{r}) = \frac{1}{2} P(\vec{r}) \vec{V}^*(\vec{r}) + \vec{I}_{a,mean}(\vec{r}) + i\vec{I}_r(\vec{r}) \quad (8)$$

여기서 $\vec{I}_{a,mean}(\vec{r})$ 는 액티브 인텐시티(active intensity)의 시간에 대한 평균값을 나타내고 $\vec{I}_r(\vec{r})$ 은 리액티브 인텐시티(reactive intensity)를 의미한다. 액티브 인텐시티는 음향 에너지를 전파하는 성분으로, 이를 고찰함으로써 음향 에너지의 전파 경로를 알 수 있다. 반면에 리액티브 인텐시티는 에너지의 형태만 주기적으로 변화하면서 에너지는 보존되는 성분을 나타내는데, 음원 부근에서 큰 값을 가지는 특성을 이용하여 음원을 찾는 방법으로 유용하게 사용될 수 있는 점을 잘 알려진 사실이다.

3. 측정 조건의 변화에 따른 오차 해석⁽¹¹⁾

이론적인 해석 즉 식 (4)와 식 (6)에서 알 수 있듯이, 음장예측을 하기 위해서는 무한한 홀로그래프면에서의 음압정보를 측정하여야 한다. 그러나 실제 적용에서는 유한한 크기의 측정구경(aperture) 내의 이산화된 측정점에서의 복소음압 측정만이 가능하다. 이러한 측정상의 제한에 의한 오차가 음장예측 시 필연적으로 발생할 것임을 이해할 수 있고 따라서 음장예측의 신뢰성을 높이고 더 적은 측정만으로 보다 정확한 예측 음장을 얻기 위해서는 측정조건에 따른 오차의 경향을 고찰하는 것이 중요함을 알 수 있다. 그러나 이러한 평이하면서도 합리적으로 보이는 홀로그래피를 이용한 음장 예측과 관련된 문제점, 특별히 오차와 관련된 인식은 사실상 일반적인 상황에서는 완벽히 쓸모없는 관점일 뿐이라는 사실이다. 즉 음향 홀로그래피 방법을 이용하여 3차원 공간에 재구성되는 음장의 오차는 실제 음장을 정확히, 즉 한치의 오차도 없이 아는 경우에만 실제로 의미있는 값을 줄 뿐이라는 사실이다. 즉 홀로그래피 방법에 의하여 발생 가능한 오차의 홀로그래피 측정 시스템과의 관련성에 관한 탐구는 사실상 일반적으로는 이상적 논제에 불과하다. 그러나 임의의 소음원 혹은 음원은 다수의 서로 다른 음의 세기 및 위상을 가진 단순한 점음원들의 조합으로 표시할 수 있다는 점을 고려한다면, 단일 점음원이 공간상에 존재할 경우의 홀로그래피 방법에 의한 음장 예측이 갖는 오차에 관한 고찰은 일반적인 상황에서 발생한 오차에 대하여 의미있는 시작점을 제시하여 줄 것임은 분명하다. 이러한 취지에 의하여 본 연구에서는 측정조건에 따른 오차의 경향을 이해하기 위하여 점음원을 이용한 모의실험을 행하였다.

3.1 측정 조건의 설정 및 오차의 정의

원통면 음향 홀로그래피의 측정면은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 원통면 모양을 하고 있다. 이론적으로는 길이 방향으로 무한대의 크기를 가져야 하나 실제로는 제한된 영역에서의 측정만이 가능하므로 길이 방향의 측정면의 한계성에 따른 오차 변화를 생각할 수 있겠다. 또한 연속적인 음압분포를 알아야 하나 이산화된 점에서의 측정이 불가피하므로 측정점의 개수 또한 오차의 변화에 큰 영향을 끼침을 알 수 있다. 이러한 취지에 의해 본 연구에서는 길이방

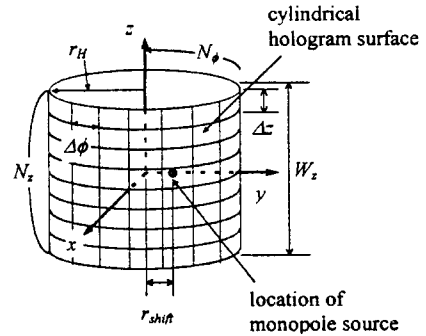


Fig. 2 단극 음원 및 원통면 홀로그래피의 구성 변수 [W_z : 길이방향(z)의 측정면 크기, N_z : 길이방향(z)의 측정점 개수, Δz : 길이 방향(z)의 측정점 사이의 간격, N_ϕ : 원주 방향(ϕ)의 측정점 개수, $\Delta\phi$: 원주 방향(ϕ)의 측정점 사이의 가격, r_H : 홀로그래프면의 반지름, r_{shift} : 단극이 원점으로부터 떨어진 거리]

향으로 측정면의 크기(W_z)와 측정점의 개수(N_z)를, 원주 방향으로의 측정점 개수(N_ϕ)를 변화시켜 가면서 오차의 경향을 고찰하였다. 또한 단일 점음원의 위치에 따라 홀로그래프면에서의 음압 분포가 달라지므로 이에 수반되는 영향도 고찰해 봄이 중요하다 하겠다. 따라서 단일 점음원이 z 축으로부터 떨어진 거리(r_{shift})에 따른 오차를 살펴 보았다. 여기서 홀로그래프면의 위치와 예측면의 위치는 $r=0.3\lambda$ 로 설정하였으며 점음원으로부터 방사되는 음의 주파수는 2π 로, 즉 파장을 1로 함으로써 길이로 표현되는 각 측정조건을 파장으로 정규화시킨 것과 동일하게 하였다.

본 연구에서는 예측 오차의 크기를 예측음압과 참음압과의 차이의 제곱 평균을 참음압의 제곱 평균으로 정규화한

$$e^2 = \frac{\sum_i |P_i^e - P_i^t|^2 \Delta S^i}{\sum_i |P_i^t|^2 \Delta S^i} \quad (9)$$

의 식을 사용하였다. 여기서 P_i^e 는 예측면의 i 번째 요소에서 예측된 음압값이고, P_i^t 는 예측면의 i 번째 요소에서의 참음압값이다. ΔS^i 는 예측면을 요소로 나누었을 때 i 번째 요소의 면적을 나타낸다. 모의실험을 행할 때, 요소면적을 작게 함으로써 예측면을 적분하는 것과 동일한 결과를 얻도록 하였다.

3.2 길이(z 축)방향으로의 측정 조건에 따른 오차의 이해

홀로그래피의 대표적인 예측 오차로서 공간상의

엘리어싱 오차를 들 수 있으며 이는 이론적으로 홀로그램면에서의 연속적인 음압분포를 알아야 하나 실제로 측정시 이산화된 측정을 할 수 밖에 없으므로 필연적으로 나타나는 오차이다. 다시 말하면 측정점 사이의 간격을 홀로그램면에서의 음압 분포를 충분히 표현할 수 있을 정도로 작게 잡아야 오차를 줄일 수 있으며 측정점 사이의 간격 내에 음압분포의 변화가 클수록 더 큰 값을 얻게 된다. 또 하나의 주된 오차 요인으로서 창문함수 영향을 들 수 있으며 이는 측정하는 구경의 크기가 한정되어 있어 홀로그램면의 일부분에서만 음압분포를 얻을 수 밖에 없기 때문에 나타나는 오차이다. 이러한 창문함수의 영향을 줄이려면 구경의 바깥에 있는 음압, 즉 측정하지 못한 음압의 크기가 구경내의 음압에 비해 무시할 수 있을 정도로 작게 되도록 구경의 크기를 넓혀야 한다.

Fig. 3은 z 축 방향의 측정점 사이의 간격 및 측정면의 크기에 따른 예측오차를 모의실험한 결과이다. 모의실험에서는 예측면의 크기를 4λ 로 하였다. 먼저 측정면의 크기가 예측면의 크기보다 작으면 당연히 커다란 오차를 유발시킴을 알 수 있었다. 측정면의 크기가 4λ 보다 커지면 구경의 크기가 충분히 크기 때문에 예측오차에서 창문함수의 영향이 상대적으로 작게 되며, 주된 오차의 원인은 공간상의 엘리어싱으로 생각할 수 있다. 그림으로부터 같은 오차의 크기를 가지기 위해서는 측정면의 크기가 커질수록 측정점의 갯수도 비례하여 커져야 함을 알 수 있으며 이는 엘리어싱 오차가 측정점 사이의 거리와 직접적

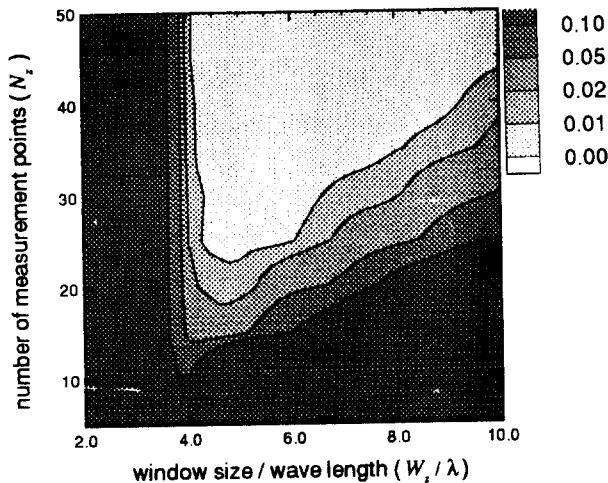


Fig. 3 길이 방향(z 축)의 측정구경의 크기와 측정점의 갯수에 따른 오차의 크기 [$r_H=0.3\lambda$, $r_{shift}=0$, $\Delta W_z=0.2\lambda$, $\Delta N_z=5$, $N_\phi=1$]

인 관계가 있음을 의미한다.

3.3 원주 방향의 측정 조건에 따른 오차의 이해

원주 방향으로는 좌표계의 특성상 유한한 범위를 가지며 측정구경 크기의 한계에 의한 영향이 존재하지 않음을 알 수 있다. 만약 음장이 z 축에 대하여 축대칭이라면 원주 방향으로는 모우드가 존재하지 않게 된다. 그러므로 원주 방향의 측정조건은 음원의 원주 방향의 특성과 직접적으로 관련이 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 원주 방향의 특성을 살펴보기 위하여 단일 점음원을 z 축상에 두지 않고 거

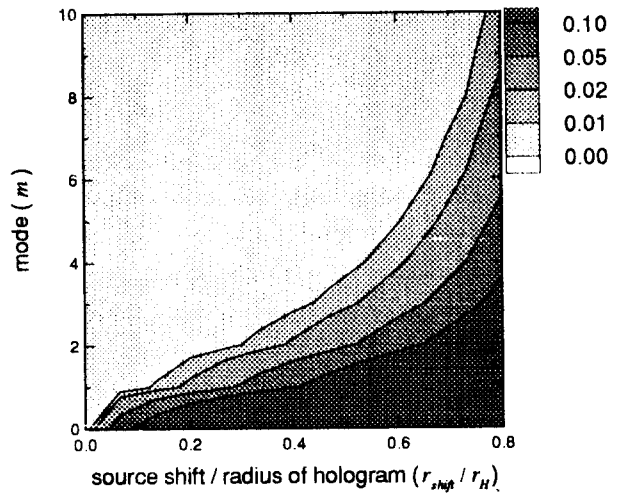


Fig. 4 (a) 단일점음원이 z 축으로부터 떨어진 거리에 따른 오차의 크기 [$r_H=0.3\lambda$, $\Delta r_{shift}=0.05\lambda$, $W_z=5\lambda$, $N_z=50$, $N_\phi=40$]

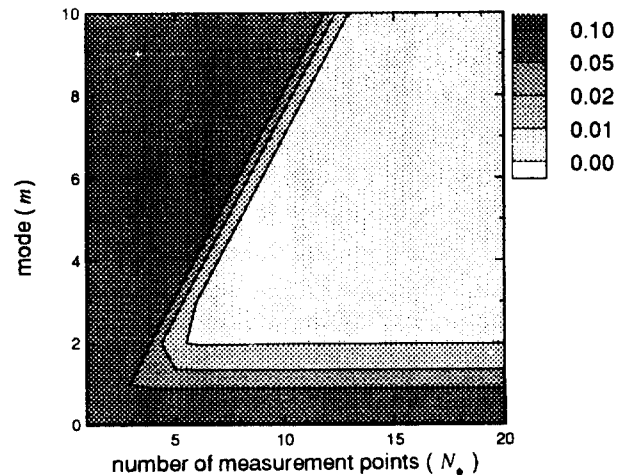


Fig. 4 (b) 원주 방향의 측정점 갯수의 변화에 따른 오차의 크기 [$r_H=0.3\lambda$, $r_{shift}=0.1$, $W_z=5\lambda$, $N_z=50$, $\Delta N_\phi=1$]

리를 됴으로써, 축대칭이 아닌 음원으로 고려하여 원주 방향의 측정조건의 변화에 따른 오차의 상관관계를 고찰하였다. Fig. 4(a)는 점음원의 위치와 모드 갯수를 변화시켜가면서 오차를 계산한 그림으로 단일 점음원이 z축으로부터 멀어질수록 원주 방향의 모드를 더 많이 포함시켜야 함을 알 수 있다. 이는 단일 점음원이 z축으로부터 멀어질수록 원주 방향의 음압분포가 더욱 급격히 변화하므로 이를 표현하기 위해서는 더 많은 모드가 필요함을 의미한다. Fig. 4(b)는 단극 음원의 위치를 z축으로부터 0.1λ 만큼 거리를 두고 측정점 갯수와 모드 갯수를 변화시켜가면서 오차를 계산한 그림으로서 모드가 갯수가 커질수록 더 많은 측정점이 필요함을 알 수 있다. 이를 Fig. 4(a)의 결과와 결부지어 생각해보면 측정면에서의 음압분포 변화가 심할수록 더 많은 측정점이 요구됨을 의미하여 이는 z축 방향의 엘리싱 효과와 유사성이 있음을 알 수 있다.

3.4 둘러싸기(wraparound error)와 제로패딩(zero padding)방법의 적용 (12, 13)

z축 방향의 측정에 있어서 측정구경의 크기의 유한성에 의해서 나타나는 또하나의 영향으로는 둘러싸기 오차를 생각할 수 있다. 이는 유한하고 이산화된 데이터를 푸리에(Fourier) 해석할 때 주기적인 데이터로 해석하듯이, 측정구경의 크기를 주기로 배열된 가상의 음원에 의한 오차로 생각할 수 있다. 그러므로 이 오차를 줄이기 위해서는 구경의 크기를 넓힘으로써 가상음원을 멀리 보내는 방법을 생각할 수 있다. 측정구경의 크기를 변화하지 않으면서 구경의 크기를 넓히기 위해서는 측정구경 밖의 음압을 추정하여야 하는데, 측정구경 밖의 음압이 충분히 작다는 가정으로부터 이 음압을 0으로 둔다. 이런 과정은 일반적인 스펙트럼 해석(spectral analysis)에서의 제로패딩(zero padding)방법과 동일함을 알 수 있다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 각각 제로패딩을 하지 않았을 경우와 제로패딩을 했을 경우의 예측된 음압의 크기를 보여 주고 있다. 제로패딩에 의해 예측결과가 좋아짐을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)는 제로패딩의 정도와 홀로그램면과 예측면의 거리에 따른 오차의 경향을 보여 준다. 제로패딩은 특히 전방 음장에 측에서 좋은 결과를 주는데, 예측면이 홀로그램면으로부터 멀어 질수록 제로패딩을 더 많이 해야 한다.

3.5 측정조건의 설정 및 예측방법

모의실험을 통하여 얻은 여러 결과를 토대로 원통

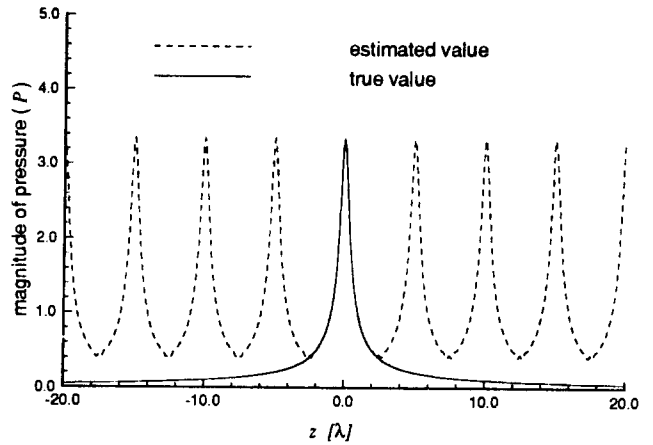


Fig. 5 (a) 제로패딩을 사용하지 않았을 경우의 예측음압의 크기 [$r_H=0.3\lambda$, $r_{shift}=0$, $W_z=5\lambda$, $N_z=26$, $N_\phi=1$]

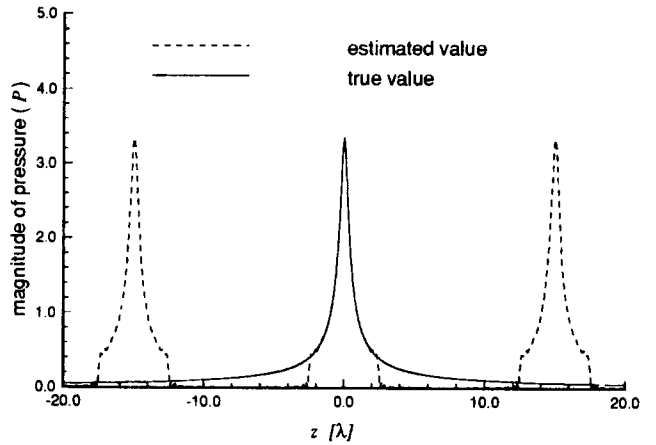


Fig. 5 (b) 3배의 제로패딩을 사용하였을 경우의 예측음압의 크기 [$r_H=0.3\lambda$, $r_{shift}=0$, $W_z=5\lambda$, $N_z=26$, $N_\phi=1$]

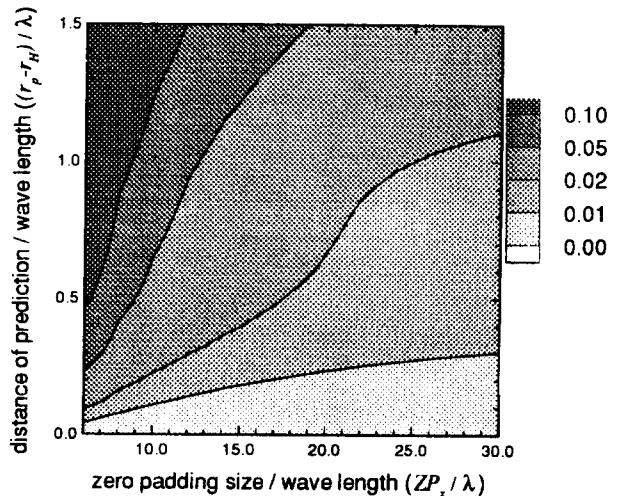


Fig. 5 (c) 제로패딩의 크기에 따른 전방 음장에 측에서의 오차의 크기 [$r_H=0.3\lambda$, $r_{shift}=0$, $W_z=5\lambda$, $N_z=26$, $N_\phi=1$]

면 음향 홀로그래피 방법을 적용하는 경우의 측정조건 및 예측방법을 제시할 수 있다. 측정점은 길이 방향으로 한 파장 안에 5개 이상으로 하고 원주 방향으로는 고려하고자 하는 모우드 갯수의 2배 이상으로 하며, 측정구경의 크기는 예측면보다 크게 하는 것이 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있음을 알았다. 또한 음장예측시 제로패딩을 함으로써 구경을 넓히는 것이 예측결과에서 오차를 줄이는 방법임을 알 수 있다.

4. 파수 성분과 오차와의 관계에 대한 고찰

4.1 파수 성분의 의미

앞의 식 (4)와 식 (6)을 특성함수의 크기로 정규화 하면

$$P(r, \phi, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{P}_m(k_z) e^{im\phi} e^{ik_z z} H_m^{(1)}(k_r) / H_m^{(1)}(k_r r_H) dk_z \quad (10)$$

$$\bar{P}_m(k_z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(r_H, \phi, z) e^{-im\phi} e^{-ik_z z} dz d\phi \quad (11)$$

와 같이 표현할 수 있으며 이때 P 는 공간 영역에서의 음압의 크기를 나타내고 $\bar{P}_m(k_z)$ 는 파수 영역에서의 음압의 크기를 나타낸다. 여기서 $\bar{P}_m(k_z)$ 은 m 과 k_z 의 함수이며 앞에서 살펴 보았듯이 특성 함수의 크기를 나타낸다. 물리적으로는 m 모우드와 k_z 파수를 가진 성분의 크기를 의미함을 알 수 있다. 위의 두 관계식이 푸리에 쌍(Fourier pair)인 사실이 시사하는 바는 홀로그램면에서의 음압 분포 변화가 심하지 않다면 파수 영역에서는 대부분의 성분이 낮은 파수에서 존재할 것이며 반대로 그 변화가 크다면 높은 파수 성분을 가지게 된다는 의미일 것이다.

4.2 파수 성분 분포와 오차와의 관계

엘리어싱 오차는 측정점 사이의 간격 내에 음압 분포가 클수록 커지는 경향을 얻었는데 이는 파수 영역에서 높은 파수성분을 포함할수록 더 큰 오차를 유발함을 의미한다. 다시말하면 음압 분포를 공간상의 푸리에(Fourier) 변환함으로써 얻어지는 파수 성분에 측정점 사이의 간격에 의하여 정해지는 최대 파수 혹은 나이퀴스트(Nyquist)파수 보다 높은 파수 성분의 영향이 포함되어 있거나 혹은 나이퀴스트 파수보다 낮더라도 공간상의 변화가 비교적 커서 왜곡된 값을 얻을 가능성이 큰 높은 파수 성분에 의해 오차가 유발되는 것이다. 창문함수의 영향은 공간

영역에서 실제의 음압 분포에 구경의 크기에 해당하는 창문함수를 곱한 것으로 생각할 수 있으며, 실제 값과 다른 파수 성분 분포를 갖게 되는 직접적인 요인이 된다.

Fig. 6(a)는 z 방향으로 측정점 사이의 간격을 반파장보다 작은 0.15λ (측정면 크기: 6λ , 측정점 갯수: 40)로 한 경우이며 Fig. 6(b)는 반파장보다 큰 0.53λ (측정면 크기: 8λ , 측정점 갯수: 15)로 하였을 경우로 각각 홀로그램면에서의 파수별 성분 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 나이퀴스트 파수보다 작은 영역 안에 대부분의 성분이 존재하는 반면 Fig. 6(b)

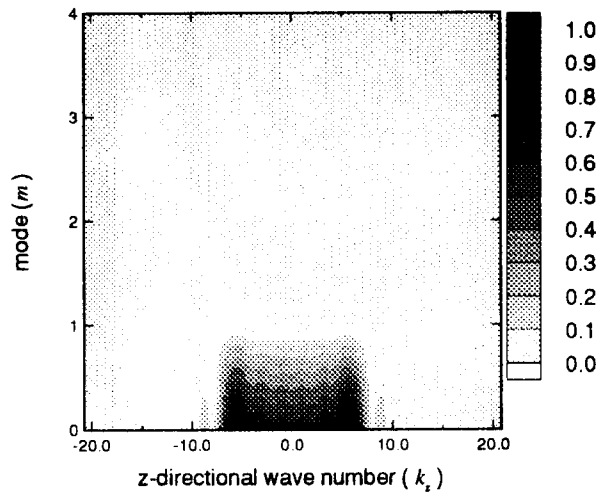


Fig. 6 (a) 측정구경이 6λ 이고 측정점 갯수가 40일 때의 파수 성분 분포 [$\gamma_H=0.3\lambda$, $\gamma_{shift}=0$, $W_z=6\lambda$, $N_z=40$, $N_\phi=1$]

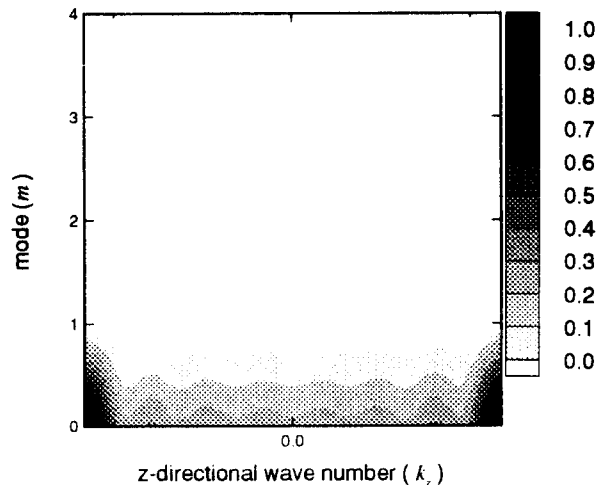


Fig. 6 (b) 측정구경이 8λ 이고 측정점 갯수가 15일 때의 파수 성분 분포 [$\gamma_H=0.3\lambda$, $\gamma_{shift}=0$, $W_z=8\lambda$, $N_z=15$, $N_\phi=1$]

에서는 나이퀴스트 파수까지 많은 성분이 존재함을 알 수 있으며 나이퀴스트 파수보다 더 큰 성분도 많을 것이라는 예측을 할 수 있다. 따라서 높은 파수 성분을 충분히 표현하지 못함으로써 (a)의 경우보다 더 큰 오차가 나타나게 된다. (Fig. 3 참조) Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 각각 점음원이 z축으로부터 각각 0.09λ과 0.21λ 떨어졌을 경우의 주파수 성분 분포를 나타낸 것으로 z축으로부터 멀리 떨어질수록 홀로그램면에서의 음압 분포의 변화가 크므로 더 높은 모우드의 성분을 많이 포함하고 있으며 이는 더 많은 원주방향의 측정점을 요구하고 있음을 의힘한다. 즉

같은 측정점 갯수를 갖는다면 (b)의 경우가 더 큰 오차를 유발할 것이라는 것을 쉽게 알 수 있다. (Fig. 4(a)참조)

파수 성분은 크게 $k_z^2 < k^2$ 인 진행파 성분과 $k_z^2 > k^2$ 인 감쇠파 성분으로 나눌 수 있다. 그중 감쇠파 성분은 전방 음장 예측의 경우 그 크기가 감소하여 영향이 작아지므로 왜곡된 파수성분 분포가 오차의 영향을 크게 미치지 않는 반면 후방 예측의 경우는 예측점이 측정면에서 멀어질수록 급격히 커지기 때문에 큰 오차를 보인다. 그러므로 가능한한 측정횟수를 줄이면서 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는,

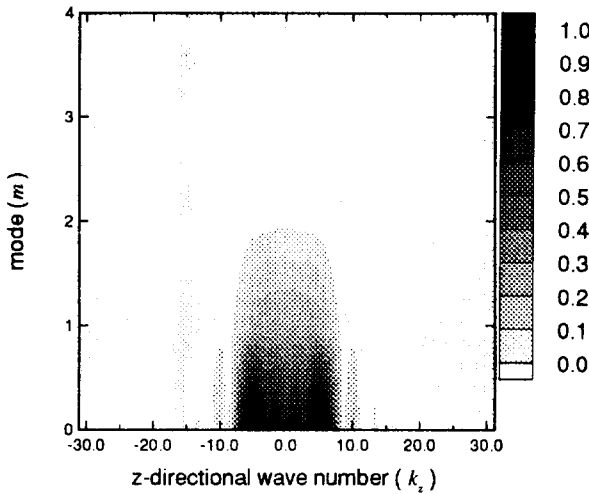


Fig. 7 (a) 점음원이 z축으로부터 0.09λ만큼 떨어졌을 경우의 파수 성분 분포 [$r_H=0.3\lambda$, $r_{shift}=0.09\lambda$, $W_z=5\lambda$, $N_z=26$, $N_\phi=1$]

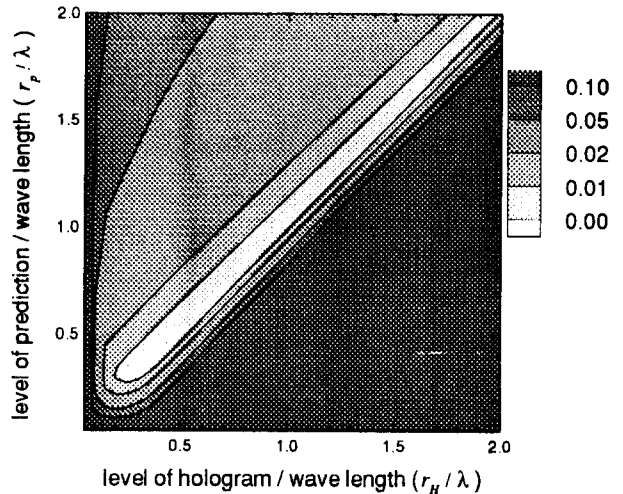


Fig. 8 (a) 사각 창문함수를 이용했을 경우의 전, 후방 음장예측의 오차의 크기 [$r_H=0.3\lambda$, $r_{shift}=0$, $W_z=5\lambda$, $N_z=26$, $N_\phi=1$]

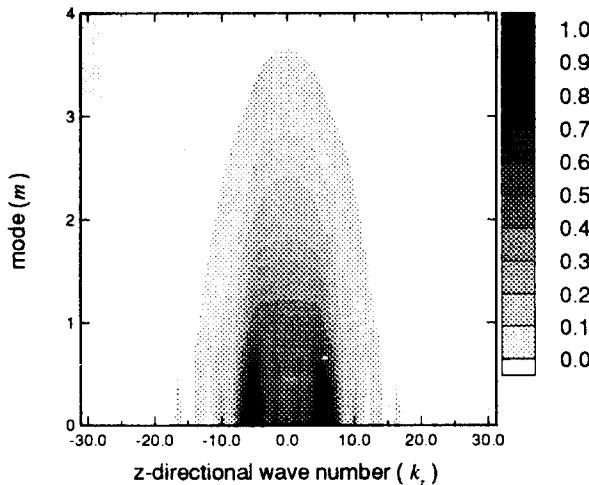


Fig. 7 (b) 점음원이 z축으로부터 0.21λ만큼 떨어졌을 경우의 파수 성분 분포 [$r_H=0.3\lambda$, $r_{shift}=0.21\lambda$, $W_z=5\lambda$, $N_z=26$, $N_\phi=1$]

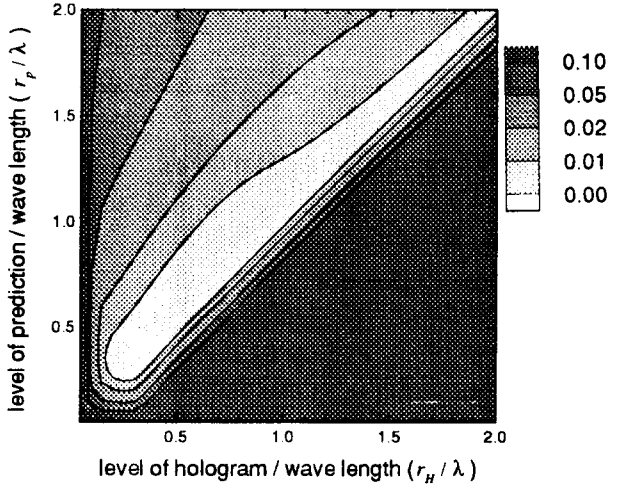


Fig. 8 (b) 20% Tukey 창문함수를 이용했던 경우의 전, 후방 음장예측의 오차의 크기 [$r_H=0.3\lambda$, $r_{shift}=0$, $W_z=5\lambda$, $N_z=26$, $N_\phi=1$]

같은 측정조건으로부터 얻은 측정 음압으로부터 가장 작은 예측 오차를 발생시키는 신호처리 기법을 적용해야 한다. 그 하나의 방법으로써 본 연구에서는 사각 창문함수(rectangular window)대신에 다른 창문함수의 사용을 제안한다. 측정 구경의 유한한 크기에 의하여 존재하는 사각 창문함수는 누손(leakage)이 많기 때문에 파수 성분 분포에 변화를 주며 따라서 음장에측에 큰 오차를 유발 시킨다. 누손을 줄이기 위해서는 잘 알려진 바와 같이 창문함수의 형상을 부드럽게 만들어야 하는데, 본 연구에서는 널리 알려진 20% Tukey창문함수(20% Tukey window)를 사용하였다⁽¹⁴⁾. Fig. 8(a)는 사각 창문함수를 이용한 전, 후방 음장 예측을 보여 주고 있으며, Fig. 8(b)는 Tukey창문 함수를 이용한 경우의 오차의 크기를 보여 준다. 이 모의실험을 통하여 Tukey 창문 함수의 사용이 전방 음장 예측뿐만 아니라 후방 예측도 좋은 결과를 가져다 줄 수 있다. 그런데 이러한 창문함수의 사용은 주엽(mainlobe)의 폭을 넓히기 때문에 예측 음장의 해상도를 떨어뜨린다는 단점을 가지고 있음에 유의하여야 한다.

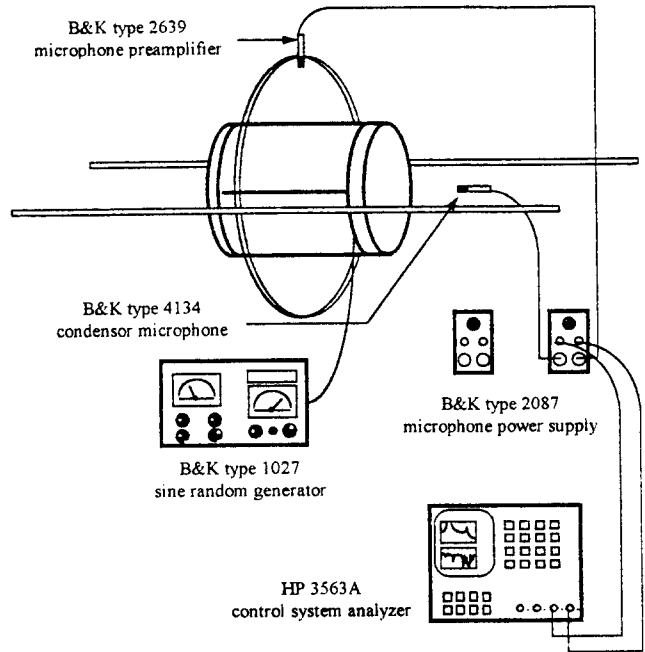
4.3 파수 성분 분포와 예측 방법

파수 성분을 나이퀴스트 파수까지 구하였을 때 모든 파수 성분이 그 안에 존재하여야 하며 더 적은 오차를 위해서는 즉 신뢰성 있는 결과를 위해서는 가급적 적은 파수 영역에 존재하여야 함을 알 수 있다. 만약 Fig. 6(b)의 경우와 같이 파수 성분을 충분히 포함하지 못한 경우에는 오차가 큼을 알 수 있으며 이런 경우에는 측정 조건에 재 조정이 필요함을 간접적으로 알 수 있다. 결론적으로 파수 성분 분포로부터 결과의 신뢰성 여부를 판단할 수 있다. 잘못 예측된 감쇠파 성분은 특히 후방 예측시 큰 오차를 유발하기 때문에 가급적 음원면에 가깝게 측정면을 두는 것이 좋으며 사각 창문함수 대신 Tukey 창문 함수를 사용하여 어느정도 오차를 줄일 수 있었다.

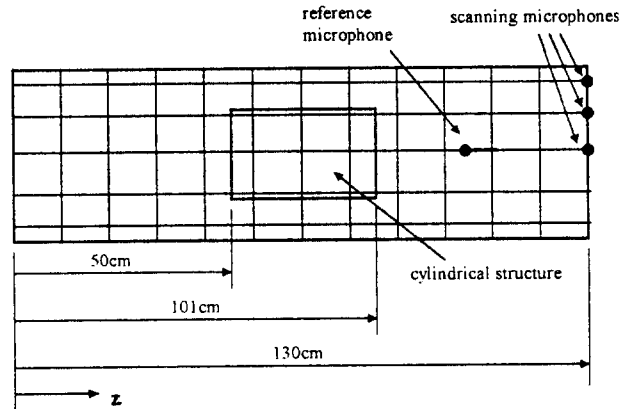
5. 실험 및 결과

5.1 실험장치 및 방법

원통면 음향 홀로그래피 방법의 실제 적용 가능성 및 모의실험 결과의 검증은 위하여 원통형 구조물에서 방사되는 음장분포를 실험을 통하여 예측해 보았다. 원통형 구조물은 0.5 mm의 합석판으로 제작하였으며, 지름은 25 cm, 높이는 51 cm이고 양 끝면은



(a) 실험 장치



(b) 측정조건 및 마이크로폰의 위치

Fig. 9 실험 장치 및 측정 위치

소리가 방사되지 않도록 밀봉하였다. 방사음은 스피커를 원통안에 장치하고 B & K Type 1027주파수 발생기 (sine random generator)를 사용하여 원통을 가진함으로써 발생시켰다. 가진 주파수는 680 Hz를 중심 주파수로 하고 31.6 Hz의 대역을 주었으며, 음압은 B & K Type 4134 마이크로폰(condenser microphone)과 B & K Type 2639 마이크로폰 전치 증폭기(microphone preamplifier), B & K Type 2807 마이크로폰 전원 공급 장치(microphone power supply)로써 측정하였다. 실험에서는 4개의 마이크

로폰을 사용하였는데, Fig. 9에서 처럼 하나의 마이크로폰은 기준 마이크로폰으로써, z축상의 막힌 면으로 18 cm 떨어진 곳에 위치시켜 놓고 다른 3개의 마이크로폰을 이동시켜가며 음압을 측정하였다. 측정 주파수는 680 Hz로 하였고, z축으로의 측정점 사이의 간격은 모의실험으로부터 얻은 결과를 토대로 큰 오차가 발생하지 않는 범위인 10 cm(약 파장의 1/5)로 하였다. 측정점의 개수는 14개로하여 측정면의 크기가 130 cm가 되게 하였으며 이는 원통형 구조물을 충분히 포함할 수 있는 크기가 된다. 원주방향의 모우드는 4차까지 고려하고자 하여 원주 방향의 측정점의 개수를 8개로 하였다. 측정면의 반지름은 각각 22 cm와 26 cm로 하였고, 측정은 무향실내에서 하였다.

5.2 실험 결과와 고찰

Fig. 10(a) 및 Fig 10(b)는 각각 $r=22$ cm와 $r=26$ cm에서 측정한 음압분포를 보여주고 있다. 이 각각의 측정 데이터로부터 $r=26$ cm, $r=22$ cm인 면에서 음압분포를 예측해 보고 측정값과 비교해 보았다. Fig. 10(c)는 $r=26$ cm의 홀로그램면에서 측정된 음압분포로부터 $r=22$ cm인 면의 음압의 크기를 예측한 결과이다. 이는 Fig. 10(a)와 잘 일치함을 보여 준다. 또한 Fig. 10(b)는 $r=22$ cm인 홀로그램면에서 측정된 음압분포로부터 $r=26$ cm인 면의 음압의 크기를 예측한 결과인데, Fig. 10(b)와 같음을 볼 수 있는데, 이는 스피커를 장치한 막힌 면으로 음이 방사되는 것을 보여 주고 있다. Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)는 각각 $r=22$ cm와 $r=26$ cm에서의 주

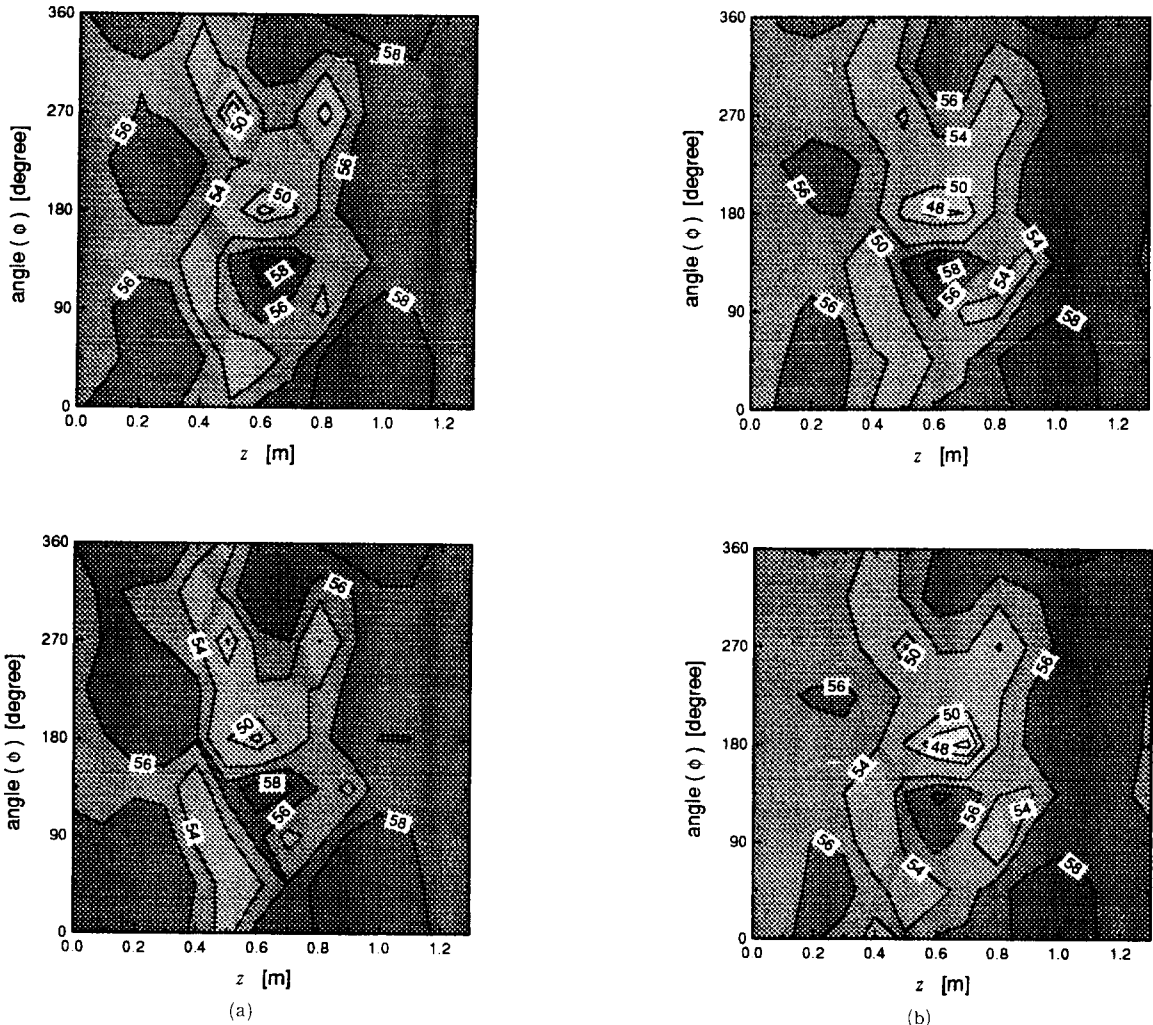


Fig. 10 측정음압 및 예측음압의 비교

파수 성분 분포를 보여주고 있는데 두 경우 모두 주된 파수 성분을 포함할 수 있을만큼 큰 나이퀴스트 파수를 가지고 있으며 실험에서 정한 측정점의 간격 및 갯수가 타당함을 보여준다. 즉 Fig. 10과 Fig. 11의 결과로부터 파수 성분 분포는 예측 오차와 관련 지을 수 있으며 예측 음압의 신뢰성 여부를 판단할 수 있음을 보여주고 있다. 이는 앞의 모의실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 이 실험으로써 원통형의 구조물에서 방사되는 음장을 예측하는데, 원통면 음향 홀로그래피는 매우 효과적인 방법임을 알 수 있다.

6. 결 론

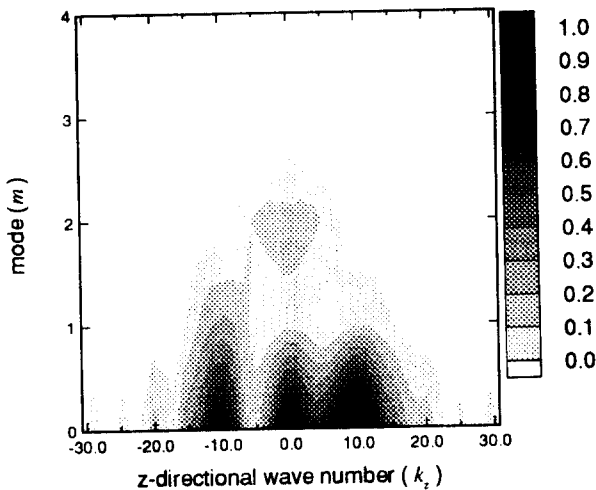
본 연구에서는 원통면 음향 홀로그래피 방법을 실제로 적용하는데 있어서 예측오차를 줄이고 예측음장의 신뢰성을 높이기 위한 측정조건 및 신호처리 방법을 제안하였다. 먼저 측정면은 되도록 음원으로부터 가까이 두도록 하고, 측정점 사이의 간격은 음압분포의 변화를 충분히 측정할 수 있도록 하기 위하여 1/5 파장보다 작게 하여야 한다. 또한 측정구경의 크기는 예측면보다 크게 하는 것이 창문함수의 영향을 줄일 수 있는 방법임을 알 수 있었다. 그리고 측정된 음압분포로부터 음장을 예측할 때, 사각 창문함수보다 Tukey 창문함수를 사용함으로써 창문함수의 영향을 줄일 수 있으며, 전방 음장예측시 제로패딩을 함으로써 둘러싸기 오차를 줄일 수 있었다.

홀로그래피 적용시 나타나는 오차는 파수 성분 분포와 연관지을 수 있으며 특히 실험 결과에 대한 신뢰성을 판단하는데 좋은 기준을 제시하고 있음을 확인하였다.

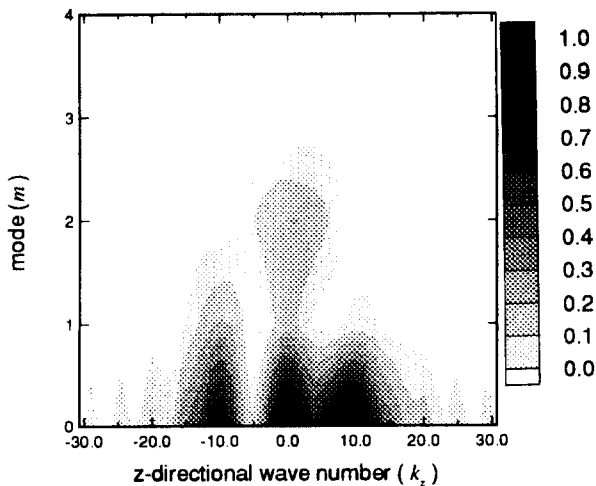
원통형 구조물의 이용한 실험을 통하여 음향 홀로그래피 방법의 적용에 대하여 오차 및 성분 분포와 연관지어 고찰해 보았으며, 원통형의 구조물에서 방사되는 음장을 예측하기 위해서는 원통면 음향 홀로그래피 방법의 사용이 타당함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) F. J. Fahy, Sound Intensity, ELSEVIER, New York, 1989, pp. 174~230.
- (2) J. D. Maynard, E. G. Williams and Y. Lee, "Nearfield Acoustic Holography: I. Theory of Generalized Holography and Development of NAH," J. Acoust. Soc. Am., 78(4), Oct. 1985, pp. 1395~1413
- (3) W. A. Veronesi and J. D. Maynard, "Nearfield Acoustic Holography: II. Holographic Reconstruction Algorithms and Computer Implementation," J. Acoust. Soc. Am., 81(5), May 1987, pp. 1307~1322.
- (4) E. G. Williams, H. D. Dardy and R. G. Fink, "Nearfield Acoustical Holography Using and Underwater, Automated Scanner," J. Acoust. Soc. Am., 78(2), Aug. 1985, pp. 789~798



(a)



(b)

Fig. 11 측정면에서의 파수 성분 분포

- (5) T. Loyau, J. C. Pascal and P. Gaillard, "Broadband Acoustic Holography Reconstruction From Acoustic Intensity Measurements I: Principle of the Method," J. Acoust. Soc. Am., 84(5), Nov. 1987, pp. 1744~1750.
- (6) Hua Lee, "Resolution Enhancement of Backward Propagated Images by Wavefield Orthogonalization," J. Acoust. Soc. Am., 77(5), May 1985, pp. 1845~1848.
- (7) D. L. Hallman and J. S. Boltion, "Nearfield Acoustical Holography for Interior sound Fields," Proc. Inter-noise 94, pp. 1879~1881.
- (8) E. G. Williams and H. D. Dardy, "Generalized Nearfield Acoustical Holography for Cylindrical Geometry: Theory and Experiment," J. Acoust. Soc. Am., 81(2), Feb. 1987, pp. 389~407.
- (9) E. G. Williams, B. H. Houston and J. A. Bucaro, "Broadband Nearfield Acoustical Holography for Vibrating Cylinders," J. Acoust. Soc. Am., 86(2), Aug. 1989, pp. 674~678.
- (10) P. M. Morse and K. U. Ingard, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 332~341, 356~358.
- (11) 김시문, "음향홀로그래피에서 파라미터들이 음장 예측에 미치는 영향에 관한 연구," 한국과학기술원 석사 학위 논문, 1994.
- (12) 권휴상, "음향 홀로그래피를 이용한 방사 음장의 전망 예측," 한국과학기술원 석사 학위 논문, 1992.
- (13) 김양한, 권휴상, "음향 홀로그래피를 이용한 방사 음장의 전망 예측 방법에 관한 기본 이론 및 신호처리 방법," 대한기계학회 논문집, 제16권, 제9호, 1992년, pp. 1654~1668.
- (14) Frediric, J. Harris, "On the Use of Windows for Harmonic Analysis With The Discrete Fourier Transform," Proceeding of The IEEE, 66(1), 1978, pp. 66~67.