

< 논 문 >

평면 음향 홀로그래피에서 센서간 특성 차이와 측정 위치의 부정확성에 의한 음압 추정 오차의 정량화

Quantification of Acoustic Pressure Estimation Error due to Sensor and Position Mismatch in Planar Acoustic Holography

남 경 옥* · 김 양 한**

Kyoung-Uk Nam and Yang-Hann Kim

(1998년 3월 6일 접수 ; 1998년 6월 25일 심사완료)

Key Words : Acoustic Holography (음향 홀로그래피), Bias Error (바이어스 오차), Random Error (랜덤 오차), Amplification Ratio of Random Error (랜덤 오차의 증폭비)

ABSTRACT

When one attempts to construct a hologram, one finds that there are many sources of measurement errors. These errors are even amplified if one predicts the pressures close to the sources. The pressure estimation errors depend on the following parameters: the measurement spacing on the hologram plane, the prediction spacing on the prediction plane, and the distance between the hologram and the prediction plane. This paper analyzes quantitatively the errors when these are distributed irregularly on the hologram plane. The sensor mismatch and inaccurate measurement location, position mismatch, are mainly addressed. In these cases, one can assume that the measurement is a sample of many measurement events. The bias and random error are derived theoretically. Then the relationship between the random error amplification ratio and the parameters mentioned above is examined quantitatively in terms of energy.

1. 서 론

음향 홀로그래피(acoustic holography) 방법⁽¹⁾의 적용을 위해서는 홀로그램면(hologram plane)에서 음압을 측정하는 과정이 우선 이루어져야 한다. 이 때 여러 요인들에 의해 측정 오차가 존재할 수 있으며, 이러한 측정 오차는 음원면과 홀로그램면 사이의 공간에서 음장을 예측하는 후방 예측(backward

prediction)을 할 때 큰 오차를 발생시킬 수 있음은 잘 알려져 있다⁽¹⁾. 이러한 측정 오차의 영향을 줄이기 위해서는 예측면의 해상도를 떨어뜨린다거나 음원면과 홀로그램면 사이의 거리를 줄여야 한다는 것 등이 알려져 있으나⁽¹⁾, 이는 단지 정성적인 수준의 특성 파악에 머물고 있다.

본 논문은 여러 측정 오차들 중에 그 원인이 공간에 불규칙하게 분포한 경우를 다루며, 이 경우 후방 예측을 할 때 각 측정 관련 파라미터들의 영향을 정량화하고자 한다. 이러한 오차의 구체적인 예로 여러 센서를 동시에 사용하여 음압을 측정할 때, 각 센서의 특성이 서로 다르기 때문에 생기는 센서간

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

특성 차이(sensor mismatch)에 의한 오차와 측정을 원하는 위치와 실제 측정 위치가 다르기 때문에 생기는 측정 위치의 부정확성(position mismatch)에 의한 오차를 다룬다.

2. 오차의 원인이 공간 상의 백색 잡음인 경우 측정 오차의 영향

Fig. 1은 이산화된 평면 음향 홀로그래피를 나타낸다. 한 주파수 성분에서 이산화된 홀로그램면에서의 참값 $p_H(m, n)$ 으로부터 추정된 예측면에서의 음압 $p_Z(m, n)$ 은 이산화 과정에 의한 공간상의 앨리어싱⁽¹⁾, 유한한 크기로 인한 창문 함수에 의한 오차⁽²⁾ 등이 있을 수 있다. 그러나 본 논문에서는 홀로그램면에서의 측정값 \hat{p}_H 의 오차가, 예측면에서의 추정 음압 \hat{p}_Z 에 어떻게 영향을 주는가를 다룬다. 이를 위해 \hat{p}_Z 를 이론적인 예측면에서의 음압과 비교하지 않고 홀로그램면의 이산화된 참값 p_H 로 추정된 p_Z 와 비교한다.

2.1 측정값의 확률적 특성과 가정

홀로그램면에서 측정된 음압에 M 개의 독립적인 오차 요인들이 있고 이 역시 공간의 함수라면, 이산화된 측정값은 이러한 오차 요인들의 함수라고 생각할 수 있고 아래와 같이 표현 가능하다.

$$\hat{p}_H(m, n) = f(\varepsilon_1(m, n), \varepsilon_2(m, n), \dots, \varepsilon_M(m, n), m, n), \quad (1)$$

where $m, n = -N/2 + 1, \dots, 0, \dots, N/2$

$N =$ number of data along one axis

여기서 ε_i 는 각 오차 요인들의 양을 나타낸다. 본 논문에서 다루고자 하는 오차는 ε_i 가 공간에 불규

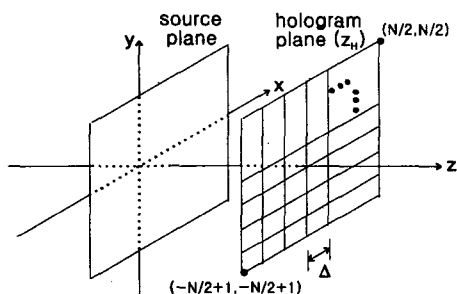


Fig. 1 Discrete planar acoustic holography

칙하게 분포해 수많은 ε_i 값들을 가지고 있는 모집단 S_i 에서 임의로 뽑아서 임의로 공간에 배치한 것으로 생각할 수 있는 경우이다.

이 경우 측정 사건은 수많이 있을 수 있어 하나의 참값에 대해 측정 사건은 앙상블로 존재하고, 실제 측정 사건은 이중의 하나라고 생각할 수 있다. 이때 참값으로 추정된 어떤 물리량의 값이 θ 라고 한다면, 각각의 측정 사건으로부터 θ 를 추정된 $\hat{\theta}$ 은 일반적으로 θ 와는 다를 것이다. 이때 한 측정 사건에서 ε_i 값들을 정확히 알지는 못하더라도 ε_i 의 모집단의 통계적 특성을 안다면, 이 한번의 측정으로 구한 $\hat{\theta}$ 이 정확하다고 생각되는 범위 안에 들어올 확률에 대해서는 이야기할 수 있을 것이다. 이러한 오차의 확률적 특성을 대표하는 양으로 바이어스 오차(bias error)와 랜덤 오차(random error)를 들 수 있다^(3,4).

각 모집단의 평균을 0, 분산을 σ_i^2 라고 한다면, 한 점에서 ε_i 와 ε_j^2 에 대한 앙상블 평균은 임의로 추출해 배열하였으므로 모집단의 평균과 분산을 따를 것이다. 마찬가지로 서로 다른 점에서 ε_i 값들은 아무 관계가 없을 것이다. 즉 오차 원인 ε_i 는 공간상의 백색 잡음이라고 생각할 수 있다. 또한 서로 다른 오차 요인들의 통계적 특성은 서로 독립적이다. 이를 수학적으로는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$E[\varepsilon_i(m, n)] = 0$$

$$E[\varepsilon_i(m, n)\varepsilon_j(m, n)] = \sigma_i^2 \delta(m-m)\delta(n-n) \quad (2)$$

$$E[f(\varepsilon_i)g(\varepsilon_j)] = E[f(\varepsilon_i)]E[g(\varepsilon_j)] \quad i \neq j$$

여기서 E 는 앙상블 평균(ensemble average)을 의미한다.

2.2 홀로그램면의 공간 영역에서 바이어스 오차와 랜덤 오차

만일 오차 요인 ε_i 가 매우 작다면 측정값은 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$\hat{p}_H(m, n) \approx f(0, 0, \dots, 0, m, n) + \sum_{i=1}^M \left. \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_i} \right|_{m, n} \varepsilon_i(m, n) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial \varepsilon_i \partial \varepsilon_j} \right|_{m, n} \varepsilon_i(m, n)\varepsilon_j(m, n)$$

$$= p_H(m, n) + \sum_{i=1}^M a_i(m, n) \varepsilon_i(m, n) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M b_{ij}(m, n) \varepsilon_i(m, n) \varepsilon_j(m, n) \quad (3)$$

여기서 a_i 는 ε_i 의 일차항에 대한 가중치를, b_{ij} 는 이차항에 대한 가중치를 나타낸다.

식 (2), (3)으로부터 홀로그래피면의 공간 영역에서 바이어스 오차와 랜덤 오차를 구해 보면 다음과 같다.

$$b(\hat{p}_H(m, n)) = \sum_{i=1}^M \sigma_i^2 b_{ii}(m, n) \quad (4)$$

$$\sigma^2(\hat{p}_H(m, n)) = \sum_{i=1}^M \sigma_i^2 |a_i(m, n)|^2 \quad (5)$$

식 (4)에서 바이어스 오차는 이차항의 영향만이, 반대로 식 (5)의 랜덤 오차는 일차항의 영향만이 지배적으로 나타남을 볼 수 있다. 본 논문에서는 표기의 편의를 위해 오차의 분산인 $\sigma^2(\hat{p}_H(m, n))$ 를 랜덤 오차로 정의하였지만 일반적으로는 표준편차인 $\sigma(\hat{p}_H(m, n))$ 를 랜덤 오차로 정의한다. 이 경우 바이어스 오차와 랜덤 오차는 같은 차원을 가지게 되어 그 둘의 직접적인 비교가 가능하다. 식 (4)에서 바이어스 오차는 σ_i^2 의 차수를 가지지만, 식 (5)에서 $\sigma(\hat{p}_H(m, n))$ 는 σ_i 의 차수를 가진다. 따라서 σ_i 가 매우 작은 경우, 랜덤 오차가 바이어스 오차보다 더 큰 값을 가진다고 할 수 있다.

(1) 센서간 특성 차이에 의한 오차

센서간 특성 차이가 있는 경우 한 주파수 성분에서 측정값은 센서의 특성 함수가 참값에 곱해진 것으로 생각할 수 있다. 이 특성 함수의 값은 이상적인 센서라면 1이어야 한다. 특성 함수를 그 크기와 위상을 나누어 생각한다면 측정값은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{p}_H(m, n) = (1 + \varepsilon_m(m, n)) e^{j\varepsilon_\phi(m, n)} p_H(m, n) \quad (6)$$

여기서 ε_m 은 이상적인 센서와의 크기 차이, ε_ϕ 는 이상적인 센서와의 위상 차이를 나타낸다. 이 경우 앞과 마찬가지로 전개를 통해 홀로그래피면의 바이어스 오차와 랜덤 오차는 다음과 같이 구해진다.

$$b(\hat{p}_H(m, n)) = -\frac{1}{2} \sigma_\phi^2 p_H(m, n) \quad (7)$$

$$\sigma^2(\hat{p}_H(m, n)) = (\sigma_m^2 + \sigma_\phi^2) |p_H(m, n)|^2 \quad (8)$$

여기서 σ_m^2 와 σ_ϕ^2 는 ε_m 과 ε_ϕ 의 분산을 표현한다.

(2) 측정 위치의 부정확성에 의한 오차

Fig. 1의 홀로그래피면의 (m, n) 의 위치에서 $(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$ 만큼 떨어진 위치에서 음압은 아래와 같이 근사할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{p}_H(m, n) &\approx p_H(m, n) + v_{Hx}(m, n) \varepsilon_x(m, n) \\ &\quad + v_{Hy}(m, n) \varepsilon_y(m, n) + b_{xx}(m, n) \varepsilon_x^2(m, n) \\ &\quad + b_{xy}(m, n) \varepsilon_x(m, n) \varepsilon_y(m, n) + b_{yy}(m, n) \varepsilon_y^2(m, n) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{where } v_{Hx} = \frac{\partial p_H}{\partial x}, v_{Hy} = \frac{\partial p_H}{\partial y}$$

$$b_{xx} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p_H}{\partial x^2}, b_{xy} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p_H}{\partial x \partial y}, b_{yy} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p_H}{\partial y^2}$$

이로부터 홀로그래피면에서 바이어스 오차와 랜덤 오차는 다음과 같이 구해진다.

$$b(\hat{p}_H(m, n)) = \sigma_x^2 b_{xx}(m, n) + \sigma_y^2 b_{yy}(m, n) \quad (10)$$

$$\sigma^2(\hat{p}_H(m, n)) = \sigma_x^2 |v_{Hx}(m, n)|^2 + \sigma_y^2 |v_{Hy}(m, n)|^2 \quad (11)$$

여기서 σ_x^2 와 σ_y^2 는 ε_x 와 ε_y 의 분산을 표현한다.

2.3 홀로그래피면의 파수 영역에서 바이어스 오차와 랜덤 오차

보다 물리적인 이해를 위해 공간의 푸리에 변환된 영역, 즉 파수 영역에서 각각의 오차들을 다시 살펴보는 것은 의미있다.

공간 영역에서 파수 영역으로의 푸리에 변환을 아래와 같이 정의한다면,

$$P(r, s) = \Delta^2 \sum_m \sum_n p(m, n) e^{-j2\pi m r / N - j2\pi n s / N} \quad (12)$$

$$\text{where } r, s = -N/2 + 1, \dots, 0, \dots, N/2$$

홀로그래피면의 파수 영역에서 바이어스 오차와 랜덤 오차는 다음과 같다.

$$b(\hat{P}_H(r, s)) = \sum_{i=1}^M \sigma_i^2 B_{ii}(r, s) \quad (13)$$

$$\sigma^2(\hat{P}_H(r, s)) = \sum_{i=1}^M \frac{\sigma_i^2}{N^2} \sum_r \sum_s |A_i(r, s)|^2 \quad (14)$$

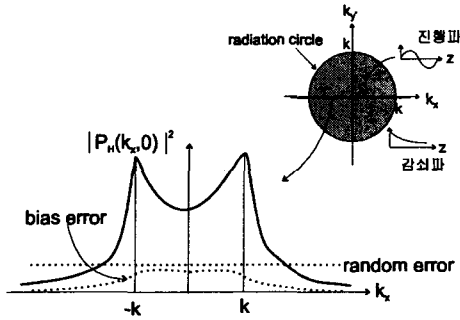


Fig. 2 The bias and random error in wave number domain

여기서 A_i, B_{ij} 는 각각 a_i, b_{ij} 의 푸리에 변환을 나타낸다.

b_{ij} 의 값이 음압이나 속도처럼 음장과 관계 있는 양이라면, 음압과 마찬가지로 그 에너지는 파수 영역에서 진행파 성분을 나타내는 방사원 내에 집중되어 있을 것이다. 여기에 매우 작은 값인 σ_i^2 가 곱해지므로 식 (13)의 바이어스 오차는 Fig. 2에서 보듯이 전 파수 영역에서 음압에 비해 매우 작을 것이다. 따라서 크게 왜곡되는 파수 성분이 없으므로 예측면에서 바이어스 오차 역시 전 파수 영역에서 상대적으로 매우 작은 값일 것이다. 따라서 센서간 특성 차이와 측정 위치가 부정확한 경우에 바이어스 오차는 무시할 수 있다.

식 (14)는 파수 영역에서의 랜덤 오차는 전 파수 영역에서 일정하게 나타남을 보여준다. 이때 a_i 는 파수 영역에서 그 크기 제공의 평균값, 즉 파수 영역의 해석 범위 내에서 단위 면적당 에너지로 영향을 미친다. 랜덤 오차가 전 파수 영역에서 일정하다는 것은 전체적으로는 랜덤 오차의 에너지가 음압 에너지에 비해 매우 작을 지라도, Fig. 2에서 보듯이 음압의 크기가 작은 방사원 밖의 감쇠파 성분이 상대적으로 크게 왜곡된다는 것을 의미한다. 따라서 감쇠파 성분을 지수적으로 증가시키는 후방 예측시에는 랜덤 오차가 상당히 증폭되서 나타난다. Fig. 2에서 랜덤 오차를 바이어스 오차보다 크게 그린 것은 $\sigma^2(\hat{P}_H(r, s))$ 가 아니라 $\sigma(\hat{P}_H(m, n))$ 를 바이어스 오차와 비교해 그렸기 때문이다.

2.4 예측면의 공간 영역에서 랜덤 오차

한 주파수 성분에서 예측면에서의 음압은 파수 영역을 거쳐 구한다면, 다음과 같이 원형 컨볼루션(circular convolution) 형태로 나타난다.

$$p_z(m, n) = \Delta^2 \sum_m \sum_n p_H(m', n') h_{ZH}(m - m' + pN, n - n' + qN) \quad (15)$$

여기서 h_{ZH} 는 홀로그래프면에서의 음압을 예측면으로 전파시키는 전파자(propagator)로서 공간에 대한 필터의 역할을 한다. Δ 는 측정 간격을, p 와 q 는 정수를 나타낸다. 이때 예측면의 랜덤 오차는 아래와 같다.

$$\sigma^2(\hat{p}_z(m, n)) = \Delta^4 \sum_m \sum_n \sigma^2(\hat{p}_H(m', n')) \times |h_{ZH}(m' - m + pN, n - n' + qN)|^2 \quad (16)$$

즉, 예측면에서 랜덤 오차는 홀로그래프면의 랜덤 오차가 $|h_{ZH}|^2 \Delta^2$ 의 필터를 통과해 나타남을 볼 수 있다.

3. 에너지 관점에서 랜덤 오차의 증폭비

3.1 랜덤 오차의 에너지

식 (16)으로부터 홀로그래프면에서의 랜덤 오차를 알면 예측면에서의 랜덤 오차를 각 점에서 구할 수 있다. 하지만 에너지 관점에서 랜덤 오차가 전체적으로 얼마나 증가하였는가를 살피는 것이 랜덤 오차의 증폭 특성에 대한 효과적인 정보를 비교적 더 쉽게 줄 것이다.

홀로그래프면에서 랜덤 오차 에너지 g_H 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$g_H = \Delta^2 \sum_m \sum_n \sigma^2(\hat{p}_H(m, n)) \quad (17)$$

예측면에서의 랜덤 오차 에너지 g_Z 도 마찬가지로 정의되고, 이들의 관계는 다음과 같이 표현되어진다.

$$g_Z = R_\sigma \times g_H, \quad R_\sigma = \Delta^4 \sum_m \sum_n |h_{ZH}(m, n)|^2 \quad (18)$$

여기서 R_σ 는 홀로그래프면에서 예측면으로의 랜덤 오차의 증폭비라고 할 수 있고, 식 (18)에서 보듯이 전파자와 측정 간격에 의해서만 결정된다.

3.2 랜덤 오차의 증폭비

랜덤 오차 증폭비를 파스발 정리에 의해 파수 영역에서 표현하면 아래와 같다.

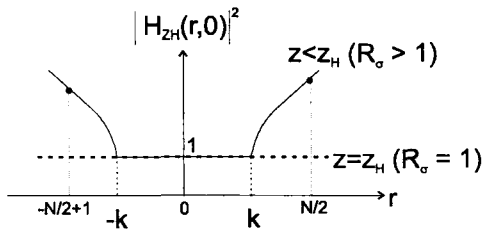


Fig. 3 The magnitude of propagator in wave number domain

$$R_o = \frac{1}{N^2} \sum_r \sum_s |H_{ZH}(r,s)|^2 \quad (19)$$

식 (19)는 랜덤 오차의 증폭비는 식 (14)와 마찬가지로 파수 영역의 해석 범위 내에서 전파자의 단위 면적당 에너지라는 것을 의미한다.

전파자의 파수 영역에서의 모양을 나타내는 Fig. 3과 식 (19)에서 보듯이 후방 예측($Z < Z_H$)인 경우 R_o 는 1보다 커서 랜덤 오차의 에너지를 증가시킨다. 이때 R_o 의 영향은 음압 에너지의 증폭비 R_b 와의 비교를 통해 생각해야 한다. 음압이 진행파 성분만 존재하는 경우, 에너지의 증폭이나 감소는 일어나지 않으므로 R_b 의 값은 1이다. 다른 극단적인 경우로 모든 파수 영역에서 그 크기가 같다고 하면, 파수 영역에서 랜덤 오차가 전 구간에서 일정하므로 $R_o = R_b$ 가 된다. 보통 홀로그램면에서 음압 에너지는 방사원 내에 집중되어 있으므로 이 두 극단의 사이에 존재한다. 따라서 후방 예측인 경우 $R_o > R_b > 1$ 로서 랜덤 오차의 증폭비가 음압의 증폭비보다 커져 홀로그램면에서는 비록 작더라도 예측면에서 심각한 오차를 유발시킬 수 있다. 이것은 앞의 파수 영역에서의 해석과 동일하다.

R_o 는 Fig. 3에서 파수 영역에서 해석 범위를 결정하는 측정 간격 Δ 와 전파자의 모양을 결정하는 예측면-홀로그램면 사이의 거리 d 의 비를 나타내는 d/Δ 와 해석 영역내 방사원의 넓이를 결정하는 파수 k 와 d 를 곱한 kd 의 함수이다.

Fig. 4는 d/Δ 와 kd 에 대해서 R_o 의 값을 그린 것이다. d/Δ 의 영향이 지배적이고, 증가할수록 R_o 가 커짐을 볼 수 있다. 테일러 전개에 기초해 Fig. 4에서 임의의 다섯점을 뽑아 R_o 의 근사식을 구해보면,

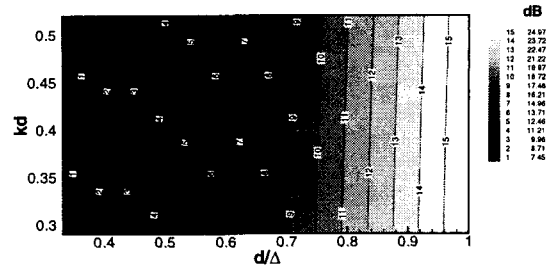


Fig. 4 The contour plot of R_o with respect to d/Δ

$$R_o \approx 24.9(d/\Delta) - 5.92(kd) + 1.55(d/\Delta)^2 + 5.07(d/\Delta)(kd) - 0.25(kd)^2 \text{ dB} \quad (20)$$

과 같이 구할 수 있다. 이 근사식은 Fig. 4의 영역 내에서 0.5 dB 이내에서 맞는다. 이 근사식은 d/Δ 의 1차항의 영향이 지배적임을 보여준다.

3.3 홀로그램면과 예측면의 해상도가 다른 경우 랜덤 오차의 증폭비

2.3절의 파수 영역의 해석에서 높은 파수 성분으로 갈수록 정보의 왜곡은 상대적으로 커짐을 보았다. 따라서 이러한 높은 파수 성분들을 제거하고, 신호처리 한다면 더 좋은 결과를 얻을 것이라는 생각을 할 수 있다. 이는 홀로그램면의 측정 간격 Δ_H 와 예측면의 예측 간격 Δ_Z 가 달라지는 것을 의미한다.

실제로 어느 파수 성분까지 해석할 것인가는 Δ_Z 에 의해, 측정으로 어느 파수 성분까지 얻을 수 있는가는 Δ_H 에 의해 결정된다. Δ_Z 가 Δ_H 의 두배가 되는 경우 파수 영역에서 해석 넓이는 Δ_Z 와 Δ_H 가 같은 경우보다 1/4로 줄어 든다. 파수 영역에서 랜덤 오차는 전 구간에서 같으므로, 이 경우 실제 해석 범위 안에 포함되는 랜덤 오차의 에너지는 1/4 (6 dB)로 줄어 든다. 따라서 Δ_Z 와 Δ_H 가 같은 경우 예측면에서 랜덤 오차의 증폭비를 나타내는 식 (20)은 다음과 같이 수정되어진다.

$$R_o \approx 24.9(d/\Delta_Z) - 5.92(kd) + 1.55(d/\Delta_Z)^2 + 5.07(d/\Delta_Z)(kd) - 0.25(kd)^2 + 20 \log(\Delta_H/\Delta_Z) \text{ dB} \quad (21)$$

여기서 식 (20)에서 R_o 에 영향을 미치는 요소였던

Δ 는 결국 어느 파수 성분까지 해석할 것인가와 관계 있으므로 예측면의 예측 간격 Δ_z 로 대체되었다.

식 (21)으로부터 홀로그램면과 예측면 사이의 거리 d 는 작을수록 랜덤 오차의 증폭비는 작아짐을 알 수 있다. 그러나 음원면에 가까이 갈수록 음장은 그만큼 높은 파수 성분들의 값이 커지므로 공간상의 앨리어싱 문제를 일으킬 수 있으므로 이러한 문제와 타협해야 한다.

예측면의 예측 간격 Δ_z 는 그 값이 클수록 증폭비는 감소함을 볼 수 있다. 하지만 예측면의 예측 간격이 커질수록 그만큼 해상도는 떨어지므로 역시 이러한 문제와 타협해야 한다.

홀로그램면의 측정 간격 Δ_H 는 작아질수록 증폭비가 감소함을 볼 수 있다. 식 (21)은 극단적으로 Δ_H 가 0으로 가게 되면 랜덤 오차의 증폭비는 0으로 가게 된다는 것을 의미한다. 그러나 홀로그램면의 측정 간격이 작으면 작을수록 같은 측정 면적을 유지하기 위해서는 더 많은 측정을 해야 하므로 역시 이러한 문제와 타협해 측정 간격을 정해야 할 것이다.

4. 모의 실험을 통한 검증

앞의 이론적인 내용을 확인하기 위해서 센서간 특성 차이와 측정 위치의 부정확성에 의한 오차에 대해 모의 실험을 수행하였다.

Fig. 1에서 음장은 (0,0,0)의 위치에 있는 단극 음원을 선택하였다. 홀로그램면의 위치 Z_H 는 0.15 m, 예측면의 위치 z 는 0.01 m로 하였다. 주파수는 300 Hz이고, 창문 함수는 직각 창문 함수를 사용하였다.

센서간 특성 차이에 의한 오차의 경우 측정값은 식 (6)에서 ϵ_m 에 평균이 0이고 표준 편차가 0.05인 정규 분포로부터, ϵ_ϕ 에는 평균이 0이고 표준 편차가 5° , 즉 0.0872 rad인 정규분포로부터 임의의 값을 추출 대입해 구하였다. 측정 위치의 부정확성에 의한 오차의 경우 홀로그램면의 $(x+\epsilon_x, y+\epsilon_y)$ 위치에서 음압을 측정값으로 하였다. 여기서 ϵ_x 와 ϵ_y 에는 평균이 0이고, 표준 편차가 0.01 m인 정규 분포로부터 임의의 값을 추출해 대입하였다.

첫번째 모의 실험은 홀로그램면의 측정 간격과 예

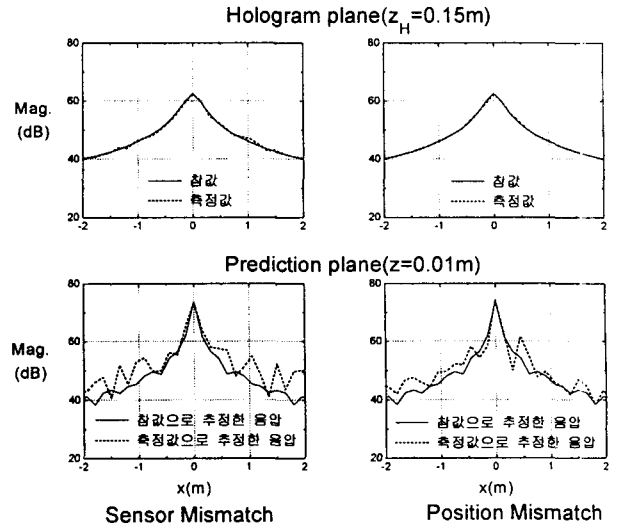


Fig. 5 The magnitude of acoustic pressure of one measurement event in hologram and prediction plane ($\Delta_H = \Delta_z = 0.15$ m)

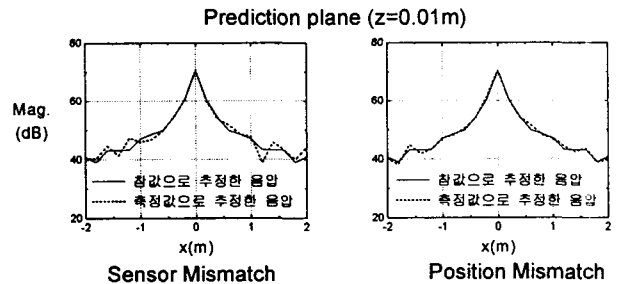


Fig. 6 The magnitude of acoustic pressure of one measurement event in prediction plane ($\Delta_H = 0.1$ m, $\Delta_z = 0.2$ m)

측면의 예측 간격은 똑같이 0.15 m로 하고, 측정점의 갯수는 32×32 로 하였다. Fig. 5는 이 경우 한 측정 사건에서 홀로그램면과 예측면에서 $y=0$ 에서 음압의 크기를 보여 준다. 센서간 특성 차이와 측정 위치의 부정확성 두 경우 모두 홀로그램면에서는 거의 측정 오차가 없는 듯이 보이지만, 예측면에서는 상당히 큰 오차가 발생함을 볼 수 있다. 이 경우 1000개의 측정 사건으로부터 랜덤 오차를 구해 증폭비를 구해 보면, 식 (21)의 결과를 통해 구한 값과 같이 약 23.5 dB의 값을 가진다.

두번째 모의 실험은 첫번째 모의 실험과 달리 홀로그램면의 측정 간격은 0.1 m 예측면의 예측 간격은 0.2 m로 하여 수행하였다. 이때 첫번째 모의 실험과 같은 측정과 예측 면적을 유지하기 위해서 측정점의 수는 48×48 로, 예측점은 24×24 로 하였

다. 이 경우 랜덤 오차의 증폭비는 식 (21)에서 예측한 대로 약 13 dB 감소한 10.2 dB이다. Fig. 6은 이 경우에 한 측정 사건에서 예측면에서 추정된 음압을 보여주는데 랜덤 오차 증폭비의 감소로 인해 Fig. 5에서의 오차가 전체적으로 상당히 감소하고 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 평면 음향 홀로그래피에서 측정 오차의 원인이 공간에 불규칙하게 분포한 경우에 임의의 점에서 음압 추정 오차를 해석하였다. 이를 위해 확률의 관점에서 바이어스 오차와 랜덤 오차를 정량적으로 구하였다. 후방 예측시 랜덤 오차의 영향이 크게 나타남을 확인하고, 이 랜덤 오차를 에너지 관점에서 다룸으로써 각 파라미터들의 영향을 정량적으로 구하였다. 이러한 정량화를 통해 예측면의 랜덤 오차를 감소시키기 위해서 제한된 조건하에서 파라미터들을 변화시킬 때 얼마나 큰 효과를 거둘 수 있을지 알 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) J. D. Maynard, E. G. Williams and Y. Lee, 1985, "Nearfield acoustic holography : I. Theory of generalized holography and development of NAH," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78, pp. 1395~1413.
- (2) Hyu-Sang Kwon and Yang-Hann Kim, 1995, "Minimization of bias error due to windows in planar acoustic holography using a minimum error window," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 98(4), pp. 2104~2111.
- (3) J. S. Bendat and A. G. Piersol, 1986, Random Data : Analysis and Measurement Procedure, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., pp. 252~290.
- (4) J. L. Devore, 1995, Probability and Statistics for Engineering and Sciences, Fourth Edition, Duxbury Press, pp. 247~274.