

3차원 음향 인텐시티 프로브의 고주파 영역 감도 보상 연구

A Study on the Sensitivity Compensation of Three-dimensional Acoustic Intensity Probe in the Higher Frequency Range

金 錫 載*, 鈴木 英 男**, 金 千 德***
(Suk-Jae Kim, Hideo Suzuki and Chun-Duck Kim)

요 약

본 논문에서는 3차원 음향 인텐시티 프로브의 고주파 영역에서 발생하는 감도 저하 현상을 보정하는 방법에 대해 연구하였다. 고주파 영역에서 측정오차는 음향 인텐시티 프로브를 구성하는 마이크로폰으로 수음한 신호들의 위상차로 인하여 발생한다. 이 오차는 마이크로폰 사이의 간격보다 측정대상 음향신호의 파장이 작을 경우, 즉 신호의 주파수가 높을수록 크게 발생한다. 이 연구에서는 두개의 마이크로폰으로 구성된 1차원 프로브의 보정법들을 제안하여 그 유효성을 컴퓨터 수치계산으로 검토하였다. 음향 인텐시티 프로브를 구성하는 마이크로폰 사이의 위상차를 음원의 추정된 방향으로 보정하는 방법이 가장 유용하였으며, 이를 3차원 프로브에 적용하여 임의의 방향으로 전파하는 음원에 대해 컴퓨터 수치계산으로 검증하였다. 그 결과, 4개의 마이크로폰을 60mm 간격으로 구성된 3차원 프로브로 1dB 이하의 정밀한 측정이 가능한 주파수 범위가 약 1.2kHz 이었던 것을 제안한 보정방법을 적용한 후, 약 2.8kHz까지 감도가 향상됨이 확인되어 제안한 보정법의 유효성이 증명되었다.

Abstract

In this paper, the sensitivity compensation method for three-dimensional acoustic intensity probe in the higher frequency range has been studied. The measurement error in the higher frequency range is generated from the phase mismatch between microphone's signals of the probe. If the wavelength of sound signal measured is less than those of the distance between microphones of the probe, that is, the higher frequency of the sound signal, the bigger measurement error is generated. In this study, we proposed the compensation methods for one-dimensional acoustic intensity probe with two-microphones, and the efficiency of those methods were investigated by numerical calculation of computer. It was most effective method to compensate the phase mismatch between microphone for the acoustic intensity probe on the direction of sound source estimated, and the efficiency of this method in a three-dimensional probe was investigated for the sound wave travelling in the arbitrary direction by numerical calculation of computer. In this result, the efficiency was proved that, for the measurement error of 1dB or less with the three-dimensional probe of 60mm space, the frequency should be less than 1.2kHz without the error compensation method, but the frequency increased up to 2.8kHz with the error compensation method.

*韓國海技研修院

**日本國 小野測器 音響技術研究所

***釜山水產大學校 電氣工學科

접수일자: 1994년 3월 31일

I. 서 론

지난 10여년 동안 소음원의 평가와 위치능성을 위한 음향측정에 음향 인텐시티 측정 기술이 많이 사용되고 있다. 그리고 S/N이 낮은 배경 소음이 존재하는 측정공간에서도 특정 소음원에서 방사되는 음향 에너지를 측정할 수 있는 음향 인텐시티 기술의 잇점 때문이라 생각된다.

1977년 Fahy¹⁾와 Chung²⁾에 의해 제안된 음향 인텐시티의 실용적인 측정 기술은 인접한 두개의 음압 마이크로폰으로 수용한 신호로 측정점의 음압과 입자속도를 디지털 신호처리 기술을 이용하여 근사적으로 구하는 것이다. 그러나 인접한 두 음압 마이크로폰으로 측정된 인텐시티 값은 두 마이크로폰을 가상적으로 연결한 방향의 벡터량이기 때문에 한 방향의 인텐시티 값만 측정할 수 있다. 정확한 음장 해석을 위한 공간의 3차원 음향 인텐시티 값을 1차원 프로브로 측정할 경우에 한 측정점에서 각 축방향으로 프로브의 방향을 전환하면서 3회 반복 측정해야 하는 번거로움 때문에 3차원 인텐시티 값을 동시에 측정할 수 있는 3차원 프로브들이 개발 제안되었다.^{3)~5)}

그러나, 음압 기술키 근사기술로 여러개의 음압 마이크로폰을 이용하여 음향 인텐시티 값을 측정함으로써 오차가 발생한다.^{6)~9)} 이 오차는 근거리 음장, 즉 음원에 근접하여 측정할수록 커지고, 음원의 주파수가 높아질수록 오차가 커진다. 그리고 인텐시티 프로브를 구성하는 마이크로폰 사이의 간격에 의해 음원의 주파수 대역에 따라 오차 발생 정도가 다를뿐만 아니라 음압 마이크로폰의 크기인 직경의 차이에서도 오차가 변화한다.^{7), 8)} 현장에서 실제 사용되는 인텐시티 측정용 프로브의 경우에 마이크로폰의 직경 및 사이의 간격으로 결정되는 유효 측정 주파수 대역폭과 최소 근접 측정 거리가 명시되어 정확한 측정을 할 수 있도록 되어 있다.⁸⁾ 그러므로 측정하려는 대상과 분식 주파수 대역에 따라 구성된 마이크로폰 크기와 간격으로 분류되어 있는 프로브를 선택하여 인텐시티 값을 측정해야 한다. 그러나 3차원 인텐시티 프로브는 마이크로폰 구성이 까다로워 측정 주파수 대역에 따른 다양한 프로브 구성이 어렵다.

이 논문에서는 인텐시티 측정오차 중 높은 주파수 영역에서 발생하는 오차를 검토하여 보정하는 방법을 제안하였다. 그리고 마이크로폰 교환과 마이크로

폰 간격 조정이 어려운 3차원 인텐시티 프로브로 높은 주파수에서 측정할 수 있도록 이 보정법을 적용시켰다. 제안한 3차원 인텐시티 프로브의 고주파수 감도 보정법을 컴퓨터로 시뮬레이션으로 검토하여 그 유효성을 확인하였다.

II. 고주파수 영역에서 음향 인텐시티의 오차

음향 인텐시티는 주어진 임의의 위치에서 음향 에너지 흐름의 방향과 크기를 나타내는 벡터량으로 단위시간에 대한 단위면적당 에너지 [W/m^2]이다. 음향 인텐시티 값은 임의의 위치에서 순간음압과 순간입자속도의 곱에 대한 시간평균으로 다음 (1)식과 같이 나타낸다.^{3)~10)}

$$\vec{I} = p(t) \cdot \vec{u}(t) \quad (1)$$

(1) 식을 x 방향 성분만으로 나타내면 다음 (2)식과 같이 된다.

$$I_x = p(t) \cdot u_x(t) \quad (2)$$

음장의 음향 인텐시티를 복소수로 표현하는 것이 용이하므로 (2)식을 복소수의 음압과 입자속도로 나타내면 다음 (3)식과 같이 된다.

$$I_x = \frac{1}{2} \text{Re}(p \cdot u_x^*) \quad (3)$$

여기서 u_x^* 는 u_x 의 공액 복소수를 나타낸다. (3)식으로 음향 인텐시티 값을 구하려면 음압과 입자속도를 측정해야 하는데 음압은 마이크로폰으로 직접적인 측정을 할 수 있으나 입자속도는 다음(4)식과 같이 음압 기울기의 시간적분으로 구한다.^{11)~10)}

$$u_x = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt \quad (4)$$

여기에서 ρ 는 매질의 밀도를 나타낸다. (4)식의 음압 기울기는 실제 인접한 두개의 음압 마이크로폰 A, B의 음압 p_A 와 p_B 를 측정하여 근사시키는 방법을 사용한다. 두 마이크로폰의 음압차를 마이크로폰 사이의 간격 d 로 나누어서 x 방향의 입자속도 항 u_x 를 다음 (5)식과 같이 근사할 수 있다.

$$\hat{u}_x = -\frac{1}{\rho d} \int (p_A - p_B) dt \quad (5)$$

이 (5)식의 입자속도 \hat{u}_x 값은 d 값이 파장보다 아주 작은 경우 유용하다.

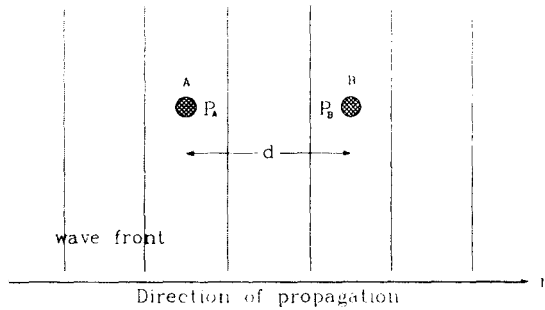


그림 1. 평면 진행파 유장에서 1차원 프로브의 마이크로폰 위치.

그림 1과 같이 특정주파수로 진동하는 점음원에서 멀리 떨어진 위치 즉 원거리 음장에 두개의 음압 마이크로폰을 둔, A, B 두 지점 사이의 거리는 d 이고, 음향에너지는 x 방향으로 전파되며, 파면은 평면파로 주어진다. 이 경우에 입자속도를 두 마이크로폰의 음압차의 음압경도로 근사화함으로써 높은 주파수에서 발생하는 오차를 다음 식에서 나타내고 있다. 그림 1에서 A 마이크로폰이 음원에서 r 만큼 떨어져 있는 것으로 가정하고 두 마이크로폰이 음압 p_A, p_B 는 같은 주파수로 진동하는 진동 주파수항 $e^{j\omega t}$ 항을 무시하여 표현하면 다음 (6), (7)식과 같이 표현할 수 있다.

$$p_A = p_0 e^{-jkr} \quad (6)$$

$$p_B = p_0 e^{-jkr+d} = p_A e^{-jkd} \quad (7)$$

이 (6), (7)식을 이용하여 1차원 프로브에서 두 마이크로폰 중앙의 평균음압과 입자속도를 구하면 (8)식과 (9)식이 된다.

$$\hat{p} = \frac{1}{2} (p_A + p_B) = \frac{1}{2} p_0 (e^{-jkd} + 1) e^{-jkr} \quad (8)$$

$$\hat{u}_x = \frac{1}{\rho d} \frac{1}{j\omega} p_0 (e^{-jkd} - 1) e^{-jkr} \quad (9)$$

여기서 x 는 음의 인텐시티 측정방향을 나타내고 있다. (8), (9)식으로 음향 인텐시티 값을 나타내면 다음 (10)식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \hat{I}_x &= \frac{1}{2} \hat{p} \cdot \hat{u}_x^* = \frac{p_0^2}{2\rho c} \frac{1}{kd} \frac{(e^{-jkd} + 1)(e^{-jkd} - 1)}{2j} \\ &= \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \cdot \frac{\sin(kd)}{kd} = I_0 \cdot \frac{\sin(kd)}{kd} \end{aligned} \quad (10)$$

평면파의 음향 인텐시티 값 I_0 와 측정된 인텐시티 값 \hat{I}_x 사이의 상대오차 값은 다음 (11)식과 같이 주파수와 마이크로폰 간격 d 의 함수가 된다.

$$E_x = 10 \log_{10} \left[\frac{\hat{I}_x}{I_0} \right] = 10 \log_{10} \left[\frac{\sin(kd)}{kd} \right] \quad (11)$$

(11)식의 E_x 를 주파수 함수로 나타내면, 그림 2와 같이 마이크로폰 간격이 클수록 주파수가 높을수록 오차가 커짐을 알 수 있다.

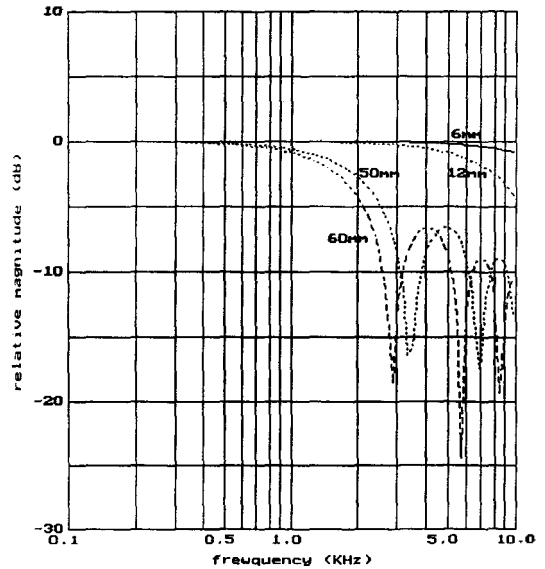


그림 2. 1차원 프로브의 마이크로폰 사이의 간격에 따른 고주파수 영역에서 상대 음향 인텐시티의 근사오차

Ⅲ. 1차원 음향 인텐시티 프로브의 보정법 검토

고주파수 영역에서 음향 인텐시티 측정 오차가 증가하여 프로브의 감도가 떨어지는 현상을 먼저 1차원

프로브에 대해 보정할 수 있는 방법을 검토한다.

만약 단일 주파수로 진동하는 점음원에 대한 위치의 음장이고 반사가 없는 자유음장에서 1차원 프로브의 방향을 음원의 에너지 전파방향과 동일한 방향에 놓고 음향 인텐시티를 측정한다면 점음원의 주파수가 높아지는 경우 (10)식과 같이 측정된 인텐시티 값에 $kd/\sin(kd)$ 를 곱하는 방법으로 오차값을 제거할 수 있을 것이다. 그러나 실제 음장 측정에서는 음원의 방향 측정과 반사파가 존재하는 등 여러가지 문제로 쉽게 보정할 수 없는 것으로 알려져 있다. 먼저, 1차원 프로브로 음향 인텐시티를 측정할 때 검토할 수 있는 음장의 상태를 다음과 같이 3가지로 분류하였다.

① 음파의 진행방향과 음향 인텐시티 프로브의 방향이 어긋나고 반사파가 없는 경우,

② 방향은 같지만 반사파가 있는 경우,

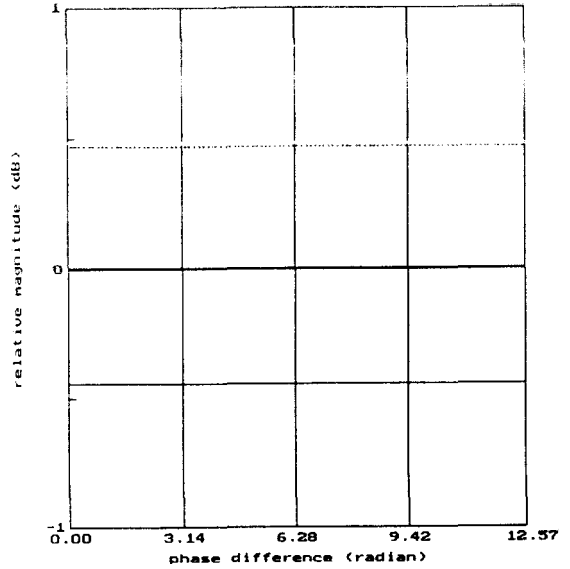
③ 방향이 어긋나고 반사파가 존재하는 경우.

위의 세가지 경우에 대해 우선 다음의 보정 방법을 적용하였다.

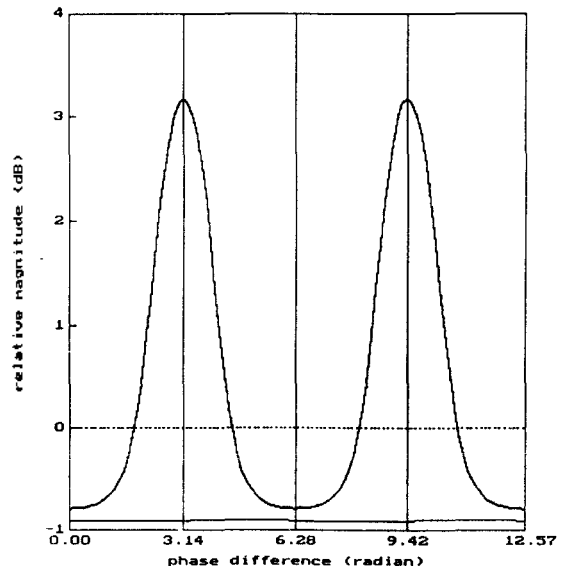
㉔ 측정된 음향 인텐시티 값에 $kd/\sin(kd)$ 를 곱한다.

㉕ 측정된 음향 인텐시티 값에 $\varphi/\sin \varphi$ 를 곱한다.

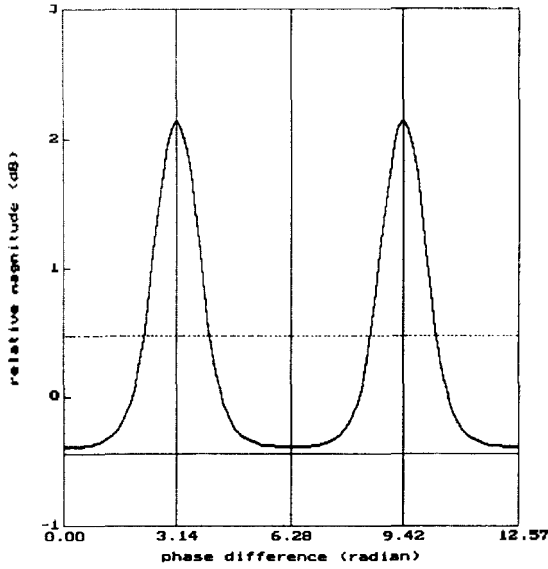
여기에서 φ 는 프로브를 구성하는 두 마이크로폰 신호의 위상차로 측정된 값을 이용한다. 만약 음파의 진행 방향이 프로브 정면이고 반사파가 존재하지 않는다면, 위의 두 방법은 동일한 보정 방법이 된다. 위의 세가지 경우에 대해 1차원 프로브로 측정된 인텐시티 값에 ㉔, ㉕의 변형된 보정방법의 적용한 결과를 컴퓨터 수치계산으로 검토하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 가로축은 음원에서 직접 전달된 진행파와 반사파 사이의 위상차이고, 세로축은 보정된 정도를 평가하기 위해 음향 인텐시티 참값에 대한 상대 오차값을 나타내었다. ①의 경우, 1.2kHz로 진동하는 점음원에서 1000m 떨어진 이상적인 평면진행파 음장의 반사파가 없는 측정점에서 음파의 입사 각도가 45°가 되도록 1차원 프로브를 설치하여 측정된 인텐시티 값의 보정결과를 그림 3(a)에 나타내었다. 실선이 보정하기 전의 값이고, 점선이 ㉔ 보정법, 굵은 직선이 ㉕ 보정법을 적용한 결과이고, ㉕ 보정법으로 보정되는 것을 확인할 수 있었다. ② 경우, 음의 진행방향과 1차원 프로브의 방향이 일치하지만 반사율이 0.5인 반사파가 존재하고 그 외의 조건은 ①의 경우와 동일한 것으로 가정한 결과를 그림 3(b)에 나타냈으며, ㉔ 보정법이 우수함을 볼 수 있었다. ③의 경우, 음의 진행방향과 프로브의 방향이 45° 어긋나고,



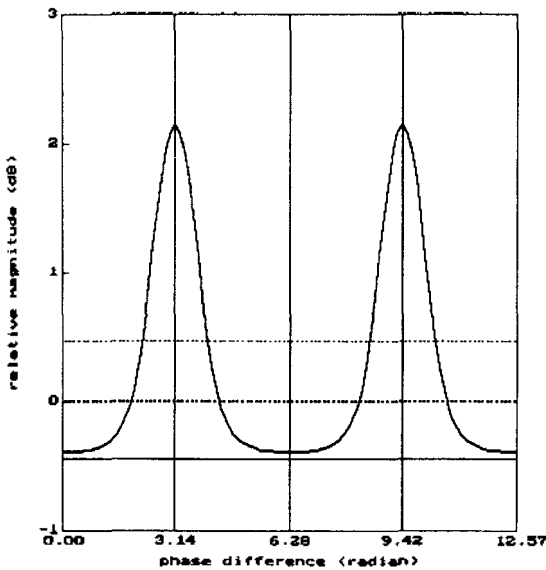
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. 1차원 프로브로 1.2kHz의 점음원에서 1000m 떨어진 거리에서 측정된 인텐시티 값에 여러 변형된 고주파 감도 보정법을 적용한 결과. (가는 실선: 보정전의 결과, 가는 점선: ㉠방법 보정결과, 굵은 직선: ㉡방법 보정결과, 굵은 점선: ㉢방법 보정결과). (a) 프로브의 방향과 음원의 전파방향이 45도 어긋나고, 반사파가 없는 경우, (b) 프로브의 방향과 음원의 전파방향이 같고, 반사율 0.5의 반사파가 존재하는 경우, (c)(d) 프로브의 방향과 음원의 전파방향이 45도 어긋나고, 반사율 0.5의 반사파가 존재하는 경우.

반사율이 0.5인 반사파가 존재한 것으로 가정할 경우를 그림 3(c)에 나타내었지만 ㉠ 방법도 오차를 제거하지 못하는 결과를 볼 수 있었다. 만약 음의 전파 방향 θ 를 알 수 있다면, 다음과 같이 변형시킨 방법을 적용할 수 있다.

㉢ 측정된 음향 인텐시티 값에 $kd \cos \theta / \sin(kd \cos \theta)$ 를 곱한다.

㉢의 경우에 ㉡ 방법의 보정결과를 그림 3(d)에 같은 점선으로 나타내었으며, ㉢ 방법만이 보정됨을 볼 수 있었다.

㉢ 보정방법을 1차원 프로브에 적용할 경우 음향 에너지의 진행방향과 프로브의 측정방향이 일치할 때 측정값이 최대가 되는 것을 이용하여 θ 값을 알 수 있지만 측정방향이 고정된 1차원 프로브에는 문제가 발생한다. 그러나, 3차원 프로브의 경우 측정된 음향 인텐시티 값으로 음원의 방향 θ 값을 직접 추정할 수 있기 때문에 ㉢ 보정법의 적용이 가능하므로 3차원 프로브에서의 보정정도를 검토하였다.

IV. 3차원 음향 인텐시티 프로브의 보정법 검토

IV-1. 3차원 음향 인텐시티 프로브의 보정법

3차원 음향 인텐시티 값은 4개의 마이크로폰으로 구성된 3차원 프로브로 측정할 경우 크로스 스펙트럼 (cross-spectrum)법을 이용하여 다음 (12)식과 같이 일반적인 식으로 표현할 수 있다.³⁾⁻⁵⁾

$$\hat{I}_i = \text{Im}[a_i G_{12} + b_i G_{13} + c_i G_{14} + d_i G_{23} + e_i G_{24} + f_i G_{34}] \quad (12)$$

여기서 G_{ij} 는 마이크로폰 i 와 j 의 신호의 크로스 스펙트럼이고, $a_i \sim f_i$ 는 각각 X, Y, Z축 방향의 인텐시티 성분 $\hat{I}_x, \hat{I}_y, \hat{I}_z$ 를 구하기 위한 계수이다.

Suzuki^{3), 5)} 등이 정사면체의 정점에 4개의 마이크로폰을 배치하고 좌표축을 회전시켜 구성한 그림 4와 같은 3차원 프로브로 음향 인텐시티 값을 측정하면 다음 (13)식과 같이 표현된다.

$$I_x = \frac{-1}{\omega p d} \frac{1}{4} \text{Im}[G_{34} - G_{24} - G_{23} + G_{12} - G_{13}]$$

$$I_y = \frac{-1}{\omega p d} \frac{\sqrt{3}}{12} \text{Im}[G_{34} + G_{24} - G_{14} - 3G_{12} - 3G_{13}] \quad (13)$$

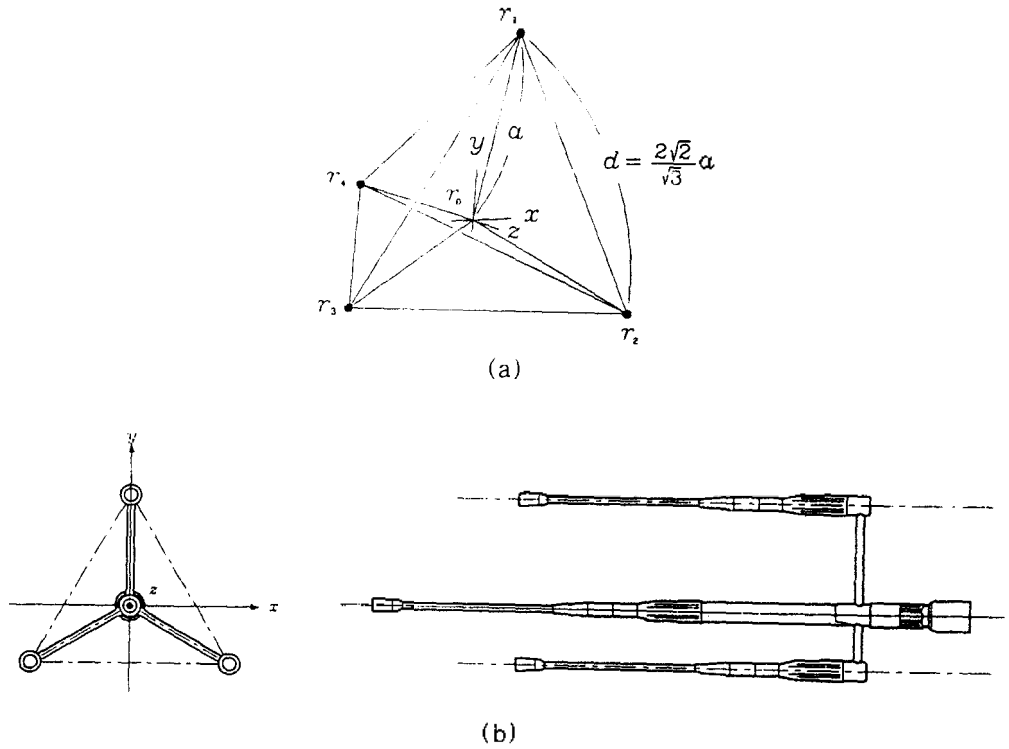


그림 4. Suzuki 등이 제안한 3차원 음향 인텐시티 프로브.
 (a) 4개의 마이크로폰이 정사면체 정점에 위치.
 (b) 인텐시티 프로브의 그림.

$$I_z = \frac{-1}{\omega p d} \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} \text{Im}[-G_{31} - G_{21} - 3G_{14}]$$

(13)식에 ©의 보정방법을 적용하려면 먼저 음향 인텐시티 측정점에서 음향 에너지의 전파방향을 구해야 한다. 음향 인텐시티의 전체 크기의 값과 X, Y, Z 각축 사이의 여현(Cosine) 값을 나타내면 다음 (14) 식으로 주어진다.

$$\cos \alpha = \frac{\hat{I}_x}{|\hat{I}|}, \cos \beta = \frac{\hat{I}_y}{|\hat{I}|}, \cos \gamma = \frac{\hat{I}_z}{|\hat{I}|} \quad (14)$$

여기에서 $|\hat{I}|$ 는 음향 인텐시티의 크기로 다음 (15) 식과 같다.

$$|\hat{I}| = \sqrt{\hat{I}_x^2 + \hat{I}_y^2 + \hat{I}_z^2} \quad (15)$$

(14)식의 3개의 여현을 이용하여 4개의 마이크로폰

들 중 두 마이크로폰의 조합으로 이루어지는 각각의 방향과 음향 에너지 전파방향과 방향여현을 다음 (16) 식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \cos \theta_{12} &= \frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \beta \\ \cos \theta_{13} &= -\frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \beta \\ \cos \theta_{14} &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \cos \alpha - \frac{2}{\sqrt{6}} \cos \gamma \end{aligned} \quad (16)$$

$$\cos \theta_{23} = -\cos \alpha$$

$$\cos \theta_{24} = -\frac{1}{2} \cos \alpha + \frac{1}{2\sqrt{3}} \cos \beta - \frac{2}{\sqrt{6}} \cos \gamma$$

$$\cos \theta_{34} = \frac{1}{2} \cos \alpha + \frac{1}{2\sqrt{3}} \cos \beta - \frac{2}{\sqrt{6}} \cos \gamma$$

의 (16)식에서 구한 방향이론으로 각각의 크로스 스펙트럼을 (17)식과 같이 보정한다.

$$G_{mn} = G_{mn}(kd \cos \theta_{mn} / \sin(kd \cos \theta_{mn})) \quad (17)$$

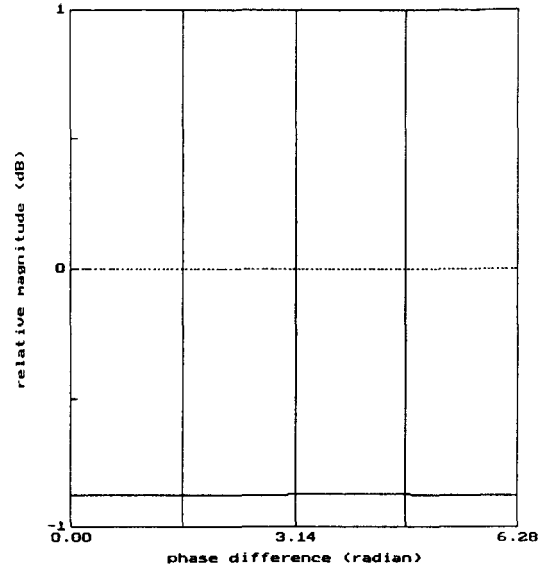
음향 인텐시티의 계산식 (13)에서 G_{mn} 을 (17)식의 G_{mn} 으로 대입하면 보정된 음향 인텐시티 값을 구할 수 있다.

IV-2. 제안한 보정법의 수치계산 결과 및 검토

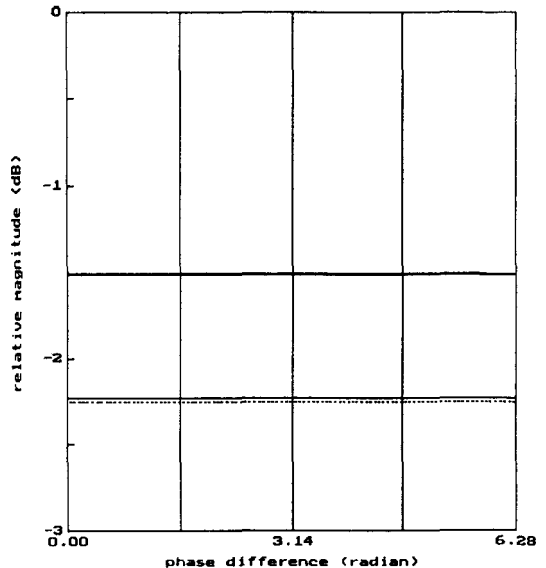
3차원 프로브에 적용된 고주파 영역의 오차 보정법을 검토하기 위해 1.2kHz의 단일 주파수로 진동하는 점 음원을 먼저 Z축 방향의 1000m 떨어진 지점에 위치시킨 경우로 가정하여 음향 인텐시티 값의 보정정도를 컴퓨터 수치계산으로 평가하여 그림 5(a)에 나타내었다. 그림 5(a)에서 실선은 보정전의 값이고, 점선은 보정후의 값으로 서로 보정됨을 볼 수 있었다. 그림 5(b)는 음원을 X축과 Z축 사이의 45° 방향에 위치시킨 경우의 결과로 보정전 음향 인텐시티의 X축 및 Z축 방향성분의 상대오차를 각각 가는 실선과 점선으로, 보정후의 값을 각각 붉은 실선과 점선으로 나타내었지만 보정후의 값은 서로 일치하여 하나의 실선으로 보였다. 보정값 $-1.5dB (= 10 \log(1/\sqrt{2}))$ 는 음원의 진행방향이 측정 프로브의 45° 방향이므로 정확히 보정된 것을 알 수 있다. 음향 인텐시티 측정용 프로브에 사용되는 마이크로폰들이 같은 위상특성을 가지는 것을 매우 힘들기 때문에 이 위상특성의 차에 의해서도 오차가 발생한다. 그림 5(c)는 그림 5(b)와 같은 경우에 대해 그림 4의 3차원 프로브에서 r_1 이외의 마이크로폰에 약 1.5°의 위상특성 차이가 있는 것으로 가정한 경우의 결과로 붉은 실선 및 점선으로 표시한 보정된 값이 $-1.5dB$ 의 참값 부근에 위치하여 잘 보정됨을 알 수 있었다. 따라서 그림 5의 결과와 같이 제안된 보정방법으로 특정 주파수의 음원의 3차원 음향 인텐시티 측정값에 잘 적용됨을 증명되었다.

이 보정방법을 높은 주파수로 확대, 적용시키기 위해 5kHz까지 변하는 음원을 각각 X, Y, Z축 방향에 위치시키고 반사율이 0.7인 큰 반사파가 존재하는 경우에 대해 음향 인텐시티 측정값의 보정결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 X축 방향에 음원을 위치시킨 결과로 가는 실선은 보정전 값을 나타내고 첫 번째 보정한 결과를 작은 점선으로, 두 번째 보정한 결과를 큰 점선으로 나타내었다. 두 번째 보정결과

첫 번째 보정한 음향 인텐시티 값으로 음원의 방향을 추정하고 그것을 이용하여 다시 보정한 값을 나타낸다. 그림 6(b)는 Y축 방향에 음원을 위치시킨 결과이고, (c)는 Z축 방향에 음원을 위치시킨 결과이다. 좋은 보정결과를 볼 수 있었으나 Y축 방향에 음원을 위치시킨 경우 약 3kHz 이상의 주파수에서 보정정도가



(a)



(b)

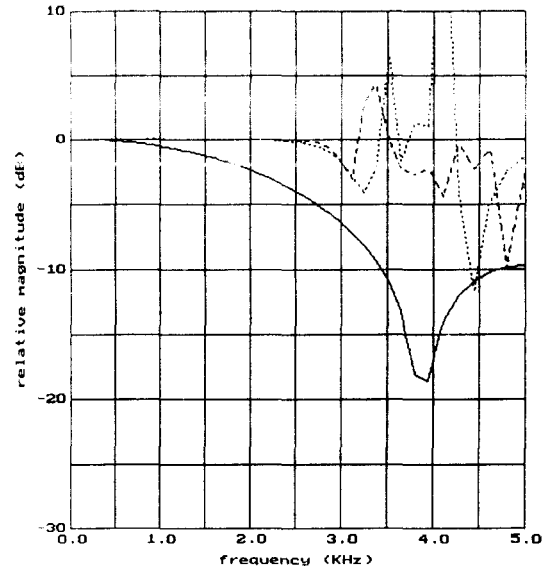
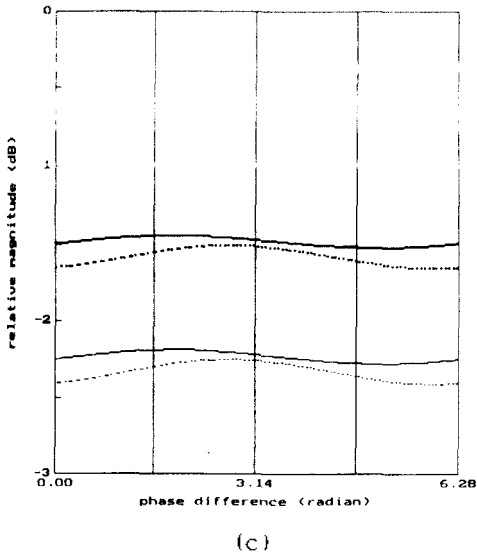


그림 5. 3차원 프로브로 1.2kHz의 점음원에서 1000m의 거리에서 측정된 인텐시티 값에 감도 보정법을 적용한 결과. (반사율:0.5). (a) 프로브의 Z축 방향에 음원이 위치한 경우, 음향 인텐시티 Z축 방향 성분의 결과. (실선: 보정전의 결과, 점선: 보정후 결과). (b) 프로브의 XZ평면의 45도 방향에 음원이 위치한 경우, 음향 인텐시티 X축 및 Z축 방향 성분의 결과. (가늘 실선과 점선: 각각 보정전의 X축 및 Z축방향 성분의 결과, 작은 실선과 점선: 각각 보정후 X축 및 Z축방향 성분의 결과). (c) (b)의 경우와 같지만, 4개의 마이크보론 사이에 1.5도의 위상차가 있는 경우의 결과. ((b)의 경우와 동일하게 표시)

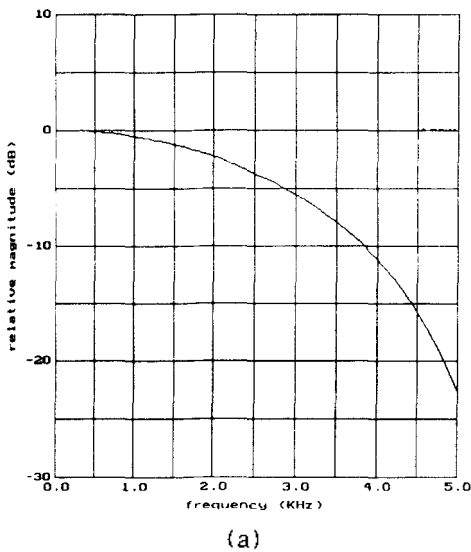
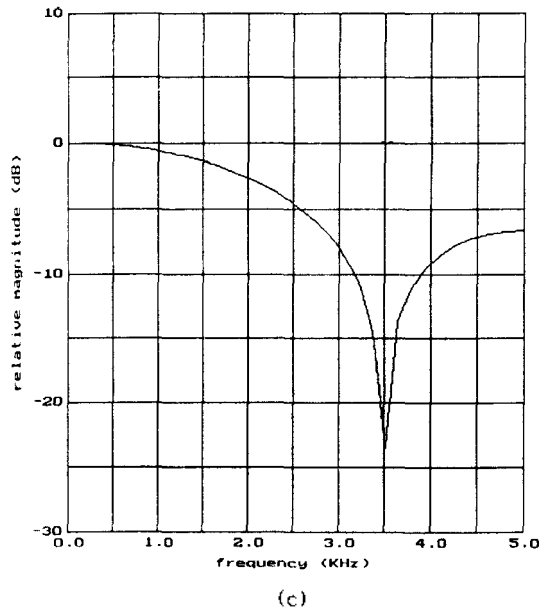
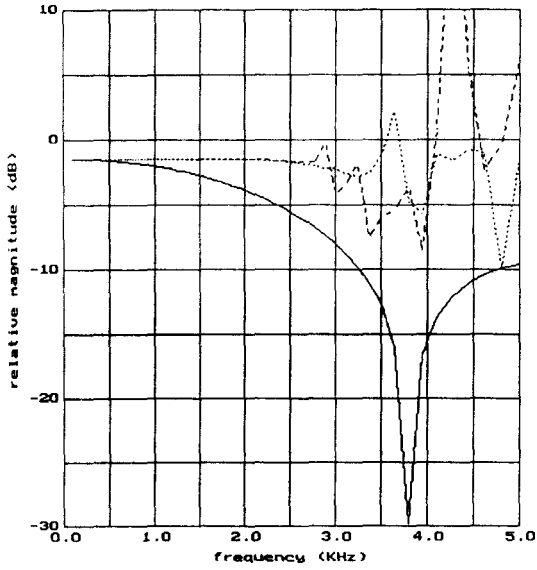
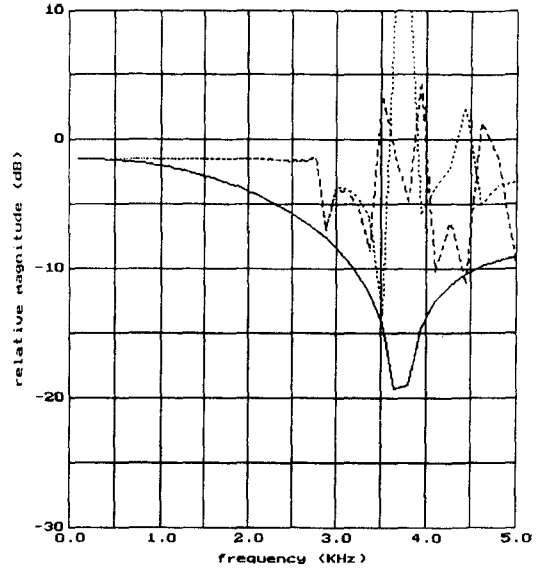


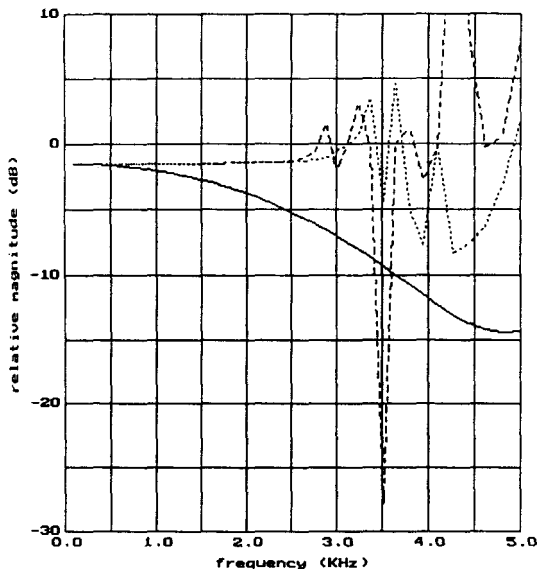
그림 6. 3차원 음향 인텐시티 프로브로 높은 주파수의 점음원을 1000m의 거리에 각 축방향으로 배치시키고 반사율 0.7의 반사체가 존재하는 경우, 감도 보정법의 적용한 결과. (실선은 보정전의 결과, 작은 점선은 첫번째 보정결과, 큰 점선은 두번째 보정결과). (a) 음원이 X축상에 있는 경우 X축 방향 성분의 보정결과. (b) 음원이 Y축상에 있는 경우 Y축 방향 성분의 보정결과. (c) 음원이 Z축상에 있는 경우 Z축 방향 성분의 보정결과.



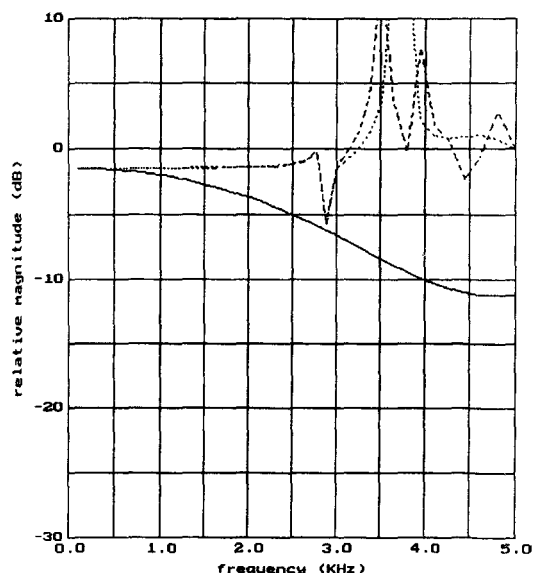
(a)



(a)



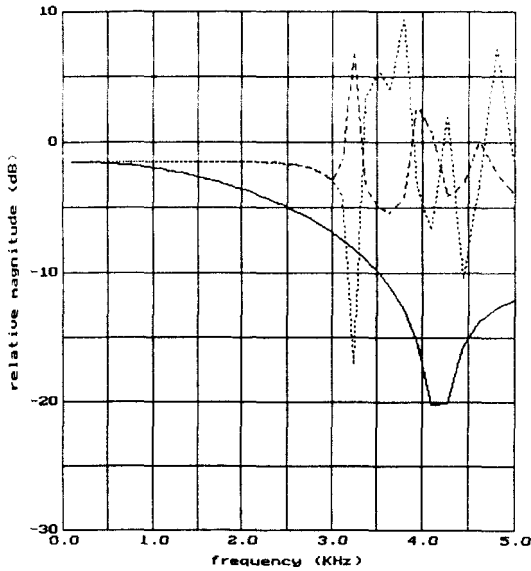
(b)



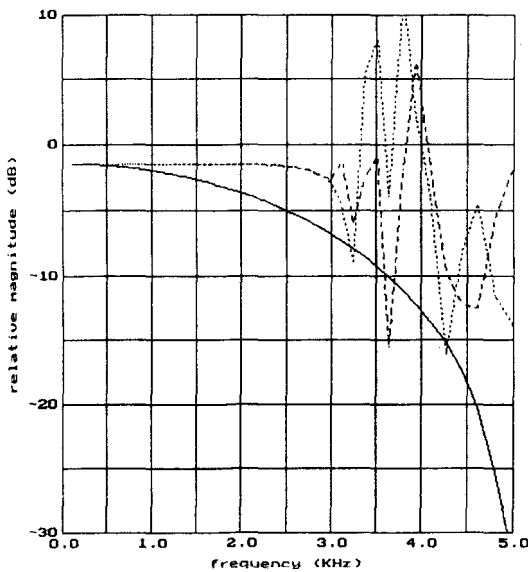
(b)

그림 7. 3차원 음향 인텐시티 프로브로 높은 주파수의 점 음원을 1000m의 거리에 XY평면 45도 방향에 배치 시키고 0.7의 반사율을 가지는 반사파가 존재하는 경우, 감도 보정법의 적용한 결과.(실선은 보정전의 결과, 작은 점선은 첫번째 보정결과, 큰 점선은 두번째 보정결과), (a)음향 인텐시티 X축 성분의 보정결과, (b)음향 인텐시티 Y축 성분 보정결과.

그림 8. 3차원 음향 인텐시티 프로브로 높은 주파수의 점 음원을 1000m의 거리에 YZ평면 45도 방향에 배치 시키고 0.7의 반사율을 가지는 반사파가 존재하는 경우, 감도 보정법의 적용한 결과.(실선은 보정전의 결과, 작은 점선은 첫번째 보정결과, 큰 점선은 두번째 보정결과), (a)음향 인텐시티 Y축 성분의 보정결과, (b)음향 인텐시티 Z축 성분 보정결과.



(a)



(b)

그림 9. 3차원 음향 인텐시티 프로브로 높은 주파수의 직 음원을 1000m의 거리에 XZ평면 45도 방향에 배치시키고 반사파가 존재하지 않는 경우, 감도 보정법의 적용한 결과.(실선은 보정전의 결과, 작은 점선은 첫번째 보정결과, 큰 점선은 두번째 보정결과), (a)음향 인텐시티 X축 성분의 보정결과, (b)음향 인텐시티 Z축 성분 보정결과.

떨어졌다. 동일한 방법으로 X축과 Y축 사이의 45° 방향에 음원을 위치시켜 검토한 각 축방향의 음향 인텐시티 보정결과를 그림 7에 나타내었고, X축과 Z축 사이의 45° 방향인 경우 그림 8에, X축과 Y축 사이의 45° 방향인 경우 그림 9에 나타내었다. 그림 7, 8의 결과, 거의 2.8kHz까지 안정된 보정정도가 나타났으나 그 이상의 주파수에서 오차가 증가하고 급격히 변화하는 형태를 보였다. 그림 9는 반사파가 없는 경우 음향 인텐시티의 X축, Z축 방향 값에 대한 보정정도를 나타낸 것으로 약간 높은 약 3kHz의 주파수까지 보정됨을 볼 수 있었다.

V. 결 론

4개의 마이크로폰으로 구성된 3차원 음향 인텐시티 측정용 프로브는 음압 가운치의 근사기술을 이용하여 음향 인텐시티를 측정함으로써 오차가 발생한다. 이 논문에서는 1차원 음향 인텐시티 프로브를 구성하고 있는 마이크로폰의 사이의 간격이 측정하려는 신호의 파장보다 클 경우 각 마이크로폰 신호의 위상차에 의해 발생하는 오차를 해석하여 음원의 전파 방향의 값으로 보정할 수 있는 방법을 제안했다. 그리고 이 방법을 3차원 프로브에 적용하여 보정정도를 컴퓨터 수치계산으로 검토하였다.

제안한 보정 방법은 측정된 3차원 음향 인텐시티 값으로 음원의 방향을 추정하고, 그 음원방향의 여현 값을 이용하여 음향 인텐시티 값을 보정한다. 이 보정방법의 유효성을 증명하기 위해 마이크로폰의 간격이 60mm인 3차원 프로브로 임의의 여러 음원방향 혹은 임의의 반사파가 존재하는 경우에 대한 컴퓨터 수치계산을 한 결과, 1dB 이하의 오차 범위로 약 1.2kHz의 신호 주파수까지 밖에 측정할 수 없었던 프로브의 측정범위를 약 2.8kHz까지 측정할 수 있도록 오차 보정의 결과를 얻을 수 있었다.

앞으로 이 방법을 3차원 인텐시티 측정 시스템에 실제 적용하여 그 유효성을 검토할 것이다. 그리고, 이 3차원 프로브로 구성된 측정시스템을 근거리 음장에서 고주파 영역을 측정할 때 발생하는 오차에 대해서도 검토할 것이다.

참 고 문 헌

1. F.J. Fahy, "Measurements of Acoustic Intensity

- Meter Using the Cross Spectral Density of Two Microphone Sensors." *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 62, No. 4, pp. 1057-1059, 1977.
2. J.Y. Chung, "Cross-Spectral Method of Measuring Acoustic Intensity without Error Caused by Instrument Phase Mismatch," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 64, No. 6, pp. 1613-1616, 1978.
 3. L.M.C. Santos, C.C. Rodrigues and J.L. Bento Coelho, "Measuring the Three-Dimensional Acoustic Intensity Vector with a Four-Microphone Probe," Inter-Noise 89 Proc. Newport Beach(CA, USA), pp. 965-968, 1989.
 4. S. Oguro, M. Anzai, H. Suzuki and T. Ono, "A Three-Dimensional Sound Intensity Probe," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, No. 4, pt. 2, pp.2370, 1992.
 5. 小黒 瞬, 安齊 正人, 鈴木 英男, "新型 3次元 音響 インテンシティプロブの 評價," 日本音響學會講演論文集, 平成 4年 10月, pp. 563-564, 1992.
 6. G.W. Elko, "Frequency Domain Estimation of the Complex Acoustic Intensity and Acoustic Energy Density," Ph. D. Theses, The Pennsylvania State University, 1984.
 7. Per V. Brüel, "Accuracy of Probes for Intensity Measurements," 音響 インテンシティシンポジウム論文集, pp. 88-102, 1987.
 8. S. Gade, "Sound Intensity-Part I, II," Brüel & Kjær Technical Review, No.3-No.4, 1982.
 9. F.J. Fahy and S.J. Elliott, "Practical Considerations in the Choice of Transducers and Signal Processing Techniques for Sound Intensity Measurements," Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement, Senlis(France), pp. 37-44, 1981.
 10. F.J. Fahy, SOUND INTENSITY, Elsevier Applied Science Publishers LTD., 1990.

▲金 錫 載(Suk-Jae Kim)

1993년 제12권 3호 참조

현재: 韓國海技研修院 조교수로 재직중

▲鈴木 英 男(Hideo Suzuki)

1993년 제12권 3호 참조

현재: (株)小野測器 取締役 音響技術研究所長과 (株) OnTeck 사장 겸무

▲金 千 德(Chun-Duck Kim)

1988년 제7권 2호 참조

현재: 釜山水産大學校 電氣工學科 정교수