

## 3차원 인텐시티 프로브의 근거리 음장 측정에서의 오차 수치해석

### Numerical analysis for nearfield measurement error in a three-dimensional intensity probe.

金錫載\*, 池石根\*\*, 鈴木英男\*\*\*, 金千德\*\*\*\*

(Suk-Jae Kim, Suk-Kun Jee, Hideo Suzuki and Chun-Duck Kim)

#### 요 약

이 연구에서는 3차원 음향 인텐시티를 동시에 측정할 수 있는 프로브를 이용하여 음향 인텐시티를 측정할 때 필연적으로 발생하는 오차를 컴퓨터의 수치계산으로 검토하였다. 이 3차원 음향 인텐시티 프로브는 Suzuki등에 의해 제안된 4개의 마이크로폰으로 구성된 것이고, 수치계산에서는 이상적인 점음원과 유한 크기를 가지는 면음원에 대해서 프로브의 각 축방향 및 임의의 방향에 대한 측정오차를 근거리 음장에서 분석하였다. 그 결과, 점음원의 경우 측정거리가 프로브를 구성하는 마이크로폰 사이의 간격보다 약 2.5배 이상 떨어진 거리에서 오차 1dB 이하의 정밀한 측정을 할 수 있었고, 유한 크기의 면음원의 경우, 면음원의 한 변의 길이가 0.02m 이상일 때 근거리 음장의 측정오차가 크게 감소하기 시작하여, 한 변의 길이가 0.2m일 때 측정거리가 마이크로폰 사이의 간격보다 0.67배로 근접하여 측정하여도 1dB 이하의 정밀한 측정이 가능한 것으로 평가되어 이 프로브의 근거리 음장 측정의 유효성이 확인되었다.

#### Abstract

We studied an inherent error be caused by a measuring acoustic intensity using probe which can measure simultaneously the three-dimensional acoustic intensity. This three-dimensional intensity probe was constructed with four microphones, proposed by Suzuki et al.. In the computer simulation, we analyzed the nearfield measurement error with arbitrary direction and each of axis direction on the ideal point source and the plate sound source which have finite size. From the results, in case of point source, we obtained accurate measurement below about 1dB when the distance of measurement was about 2.5 times with the distance among microphones in this probe. And in the case of plate sound source, the nearfield measurement error was decreased as the length of one side became above 0.02m, we obtained accurate measurement below about 1dB when the length of one side is 0.2m. The nearfield measurement error of finite size sound is small to ignore. Therefore this probe is useful to measure nearfield intensity.

\*韓國海技研修院

\*\*群山大學校 通信學科

\*\*\*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: 1993년 3월 1일

## I. 서 론

지난 10여년간 음향 인텐시티 측정 기술은 급속히 발전하여 음장 해석에 크게 기여하고 있다. 인접한 두개의 마이크로폰 신호의 음압 기술기 군사 기술에 바탕을 두고 있는 음향 인텐시티 측정 시스템은 마이크로폰 프로브에 연결된 두 채널 FFT 분석기와 아나로그 혹은 디지털 형태의 필터와 같은 근사적 신호처리 장비에 인터페이스한 시스템으로 개발되어<sup>1)~4)</sup>, 음향 파워 및 소음원 위치 동정 등 많은 곳에 널리 이용되고 있다.

정확한 음장 해석을 위해 3차원 복소 음향 인텐시티법이 제안되었고<sup>5), 6)</sup>, 초기에는 두개의 마이크로폰으로 구성된 1축식 음향 인텐시티 프로브로 3차원 음향 인텐시티를 측정하기 위해 같은 측정점에서 프로브의 방향을 각 축방향으로 변화시켜 3회 반복·측정을 했다. 실제로 스피커, 흡음재 등과 같은 음향적 제품 개발에 따른 성능 측정, 건축 음향의 연구와 능동소음 제어 시스템의 연구 개발 등과 같은 분야에서 한 측정점을 반복·측정하는 동안 음장의 보존 즉 동시성을 유지해야 하는 어려움이 발생했다. 따라서 음장 변화에 의한 오차를 방지하고, 음장의 정확한 해석을 위해서는 3차원 음향 인텐시티 값을 동시에 측정해야 하므로 3차원 음향 인텐시티 측정용 프로브가 개발되고 있다<sup>5)~7)</sup>. 3차원 프로브의 구조 중 3조의 1축식 프로브를 결합한 것이 마이크로폰 배치의 대칭성이 좋고, 프로브의 사용과 신호의 분석에 있어서 용이하나, 6개의 마이크로폰 및 프리앰플 사용해야 하고, 3대의 두 채널 FFT 분석기 등과 같이 측정 시스템의 구성이 복잡하여 구성비용이 증가하게 되고, 프로브의 부피가 커져 측정 음장에 영향을 줌으로서 측정오차가 증가하게 된다. 그래서 적은 비용으로 정밀하게 측정할 수 있는 3차원 음향 인텐시티 측정용 프로브를 4개의 마이크로폰으로 구성하는 방법이 제안되었다<sup>6), 8), 9)</sup>.

이 논문에서는 4개의 마이크로폰으로 구성되어 제안된 3차원 음향 인텐시티 프로브의 구조를 소개하고, 그 중 사용상 방향설정에 편리한 것으로 평가된 Suzuki<sup>8), 9)</sup>이 제안한 프로브의 근거리 음장에 대한 오차를 수치해석으로 평가한다. 먼저, 이상적인 점음원에 의해 형성된 음장에서 근거리 음장을 이 프로브로 측정할 경우 발생하는 근사 오차를 수치 계산으로 검토한다. 일반적인 음원은 유한 크기를 가지므로 점

음원의 가정이 성립하지 않는 경우가 대부분이다. 따라서 유한 크기를 가지는 정사각형의 평판 음원이 무한 버플(baffle)의 중심에 위치하여 진동하는 경우가 프로브로 근접하여 측정할 때 발생하는 오차에 대해 수치계산으로 검토 결과를 기술한다.

## II. 3차원 인텐시티 프로브의 구조와 계산방법

### II-1. 프로브의 구조

음향 인텐시티 측정이 광범위하게 이용됨에 따라 정확하고, 편리하게 사용할 수 있는 여러형태의 편리한 측정용 프로브가 연구 개발되어 판매되고 있으나, 대부분 1축식으로 두개의 음압 마이크로폰으로 구성되어 있다. 1축식 프로브의 마이크로폰은 SS(side by side), FF(face to face), BB(back to back)의 형태로 구성되어 있고, 그중 SS와 FF를 많이 이용하고 있다<sup>3)</sup>. 그러나 1축식 프로브로 3차원 인텐시티를 측정할 경우 같은 측정점에서 프로브의 방향을 바꿔가며 3회 반복·측정을 해야하므로 측정대상 및 측정공간의 안정성이 고려되어야 하며, 이로 인해 음향 인텐시티의 각 방향 성분의 동시성이 결여된 측정이 될 수 있다<sup>5), 6)</sup>.

따라서, 이 문제를 해결하기 위해 한 측정점의 3차원 인텐시티를 동시에 측정할 수 있는 시스템이 개발되었다. 3축 방향을 동시에 측정할 수 있는 인텐시티 프로브가 여러가지 개발되고 있지만, 3조의 1축식 프로브를 결합하여 구성한 것이 구조나 측정근사 알고

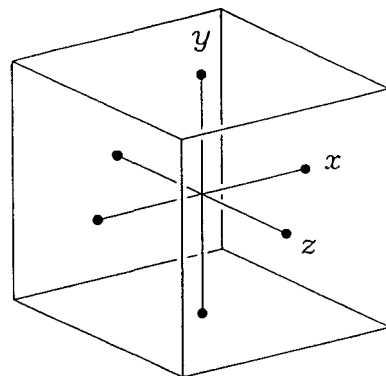


Fig 1. Three-dimensional intensity probe with six-microphones(three pairs of microphone). Six microphones placed at the centers of six planes of a regular cube.

리즘에서 가장 단순할 것이다<sup>5)</sup>. Fig. 1과 같이 정육면체의 6개 면 중심에 마이크로폰을 설치하여 정육면체를 사이에 두고 서로 마주보는 형태, 즉 FF형태로 구성하면 측정용 프로브의 구조적 대칭성과 측정오차 면에서 우수하나, 같은 1축식 측정 시스템이 3조가 필요하게 되어 6개의 프리앰프, 3대의 두 채널 FFT 분석기, 6개의 필터 등 시스템 구성 비용이 증가함은 물론 프로브의 부피가 커짐으로 측정시 오차가 증가하게 된다. 3차원 음향 인텐시티를 동시에 측정하기 위해 4개의 마이크로폰으로 구성된 프로브로 각각 측정점이 다른 X, Y, Z성분의 인텐시티 값을 측정하는 프로브가 제안되기도 했다<sup>6)</sup>. Fig. 2와 같이 정육면체 내부에 표시되는 정사면체의 정점에 마이크로폰 4개를 배치하여 사면체 중심점의 인텐시티 각 성분을 동시에 측정할 수 있는 프로브가 Santos등<sup>6)</sup>에 의해 제안되었다. Fig. 2와 같이 좌표축에 대해 마이크로폰 위치가 정사면체의 정점이기 때문에 대칭성이 좋은 구조가 되지만 프로브를 실제 측정에 사용할 때 각 측방향이 혼돈될 우려가 있다. Suzuki등<sup>8), 9)</sup>은 Santos 등이 제안한 Fig. 2의 인텐시티 프로브를 사용시 방위 설정이 용이하도록 좌표축을 회전 변환하고 재배치하여 Fig 3과 같은 3차원 인텐시티 프로브를 제안했다. Fig. 3의 (a)는 마이크로폰 위치와 좌표축을 나타낸 그림이고, (b)는 프로브의 형태를 나타낸 그림이다.

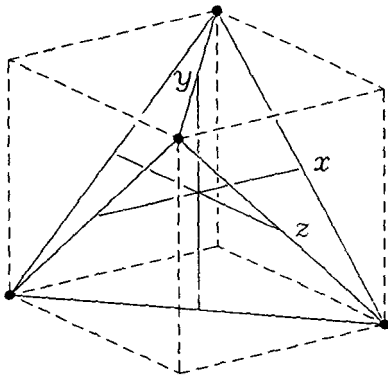
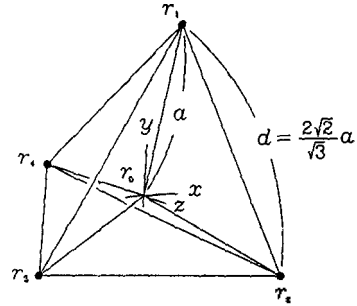
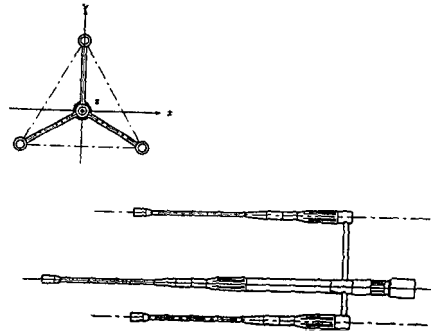


Fig 2. Three-dimensional intensity probe proposed by Santos etc.  
Four microphones placed at apices of a regular cube tetrahedron.

이 논문에서는 Suzuki등이 제안한 3차원 인텐시티 프로브에 여러 종류의 측정오차를 고려대상으로 하지만<sup>4), 5)</sup>, 이 중 근거리 음장<sup>7)</sup>을 측정할 경우 발생하는 근사 오차를 평가하고 검토한다.



(a)



(b)

Fig 3. Three-dimensional intensity probe proposed by Suzuki etc.

- (a) Four microphones placed on apices of regular tetrahedron but with different axes from Fig. 2.
- (b) Sketch of intensity probe.

II-2. 계산 방법

3차원 음향 인텐시티를 계산하는 알고리즘은 인접한 두개의 마이크로폰으로 측정하는 1축식 음향 인텐시티법을 확장한 것이다. 3차원 음향 인텐시티는 다음의 두가지 가정으로 구할 수 있다<sup>6)~9)</sup>.

① 정사면체 중심 위치의 음압은 4개의 마이크로폰이 위치한 점의 음압을 평균한 값이다.

$$p(r_0) = \{p(r_1) + p(r_2) + p(r_3) + p(r_4)\} / 4 \quad (1)$$

②  $p(r_0)$ 와  $p(r_i)$ 로 벡터  $AI, RI, v$ 의  $V_i$ 방향 성분을 구한다.

여기서  $AI, RI, v$ 는 각각 액티브 인텐시티(Active Intensity), 리액티브 인텐시티(Reactive Intensity), 입자속도를 나타낸다.  $p(r_0)$ 와  $p(r_i)$ 로 구한  $V_1 \sim V_4$ 를  $V_x, V_y, V_z$  성분으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{2\sqrt{2}}{3} V_y + \frac{1}{3} V_z$$

$$V_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_x - \frac{\sqrt{2}}{3} V_y + \frac{1}{3} V_z \quad (2)$$

$$V_3 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_x - \frac{\sqrt{2}}{3} V_y + \frac{1}{3} V_z$$

$$V_4 = - V_z$$

(2)식의 점  $(V_x, V_y, V_z)$ 에서 각 평면의 거리가 최소가 되도록 최적화하면 다음 (3)식과 같이된다.

$$V_x = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} (V_2 - V_3)$$

$$V_y = \frac{1}{2\sqrt{2}} (2V_1 - V_2 - V_3) \quad (3)$$

$$V_z = \frac{1}{4} (V_1 + V_2 + V_3 - 3V_4)$$

(3)식의  $V_i$  값을  $AI$ 의  $i$ 축 방향 성분에 대입하면  $r_0$ 점의 액티브 인텐시티의  $x, y, z$ 축 성분을 구할 수 있다.  $AI$ 의  $i$ 축 성분은 두 마이크로폰법과 같이 다음식으로 구한다.

$$AI_i = Re\{p(r_0) V_i^*\} \quad (4)$$

단, 여기서  $V_i = -\{p(r_i) - p(r_0)\} / j\omega \rho a$  (5) 이고,  $p(r_0)$ 는 (1)식과 같다. 그러므로 (3)식을 (5)식에 대입한 후 이를 (4)식에 대입하면, 액티브 인텐시티의 각 축성분 값을 구할 수 있는데  $p(r_i) \cdot p(r_j)$ 의 크로스 스펙트럼(Cross-Spectrum)을  $G_{ij}$ 로 표현하여 간단히 하면 다음과 같다.

$$AI_x = \frac{-3}{\omega \rho d} Im \frac{1}{6} \left( \frac{1}{2} G_{34} - \frac{1}{2} G_{24} - G_{23} + \frac{1}{2} G_{12} - \frac{1}{2} G_{13} \right)$$

$$AI_y = \frac{-3}{\omega \rho d} Im \frac{1}{6} \left( \frac{\sqrt{3}}{6} G_{34} + \frac{\sqrt{3}}{6} G_{24} \right)$$

$$- \frac{2\sqrt{3}}{6} G_{14} - \frac{3\sqrt{3}}{6} G_{12} - \frac{3\sqrt{3}}{6} G_{13} \quad (6)$$

$$AI_z = \frac{-3}{\omega \rho d} Im \frac{1}{6} \left( -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} G_{34} - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} G_{24} - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} G_{14} \right)$$

같은 방법으로 리액티브 인텐시티  $RI$ 도  $RI_i = Im\{p(r_0) V_i^*\}$ 식을 이용하면  $x, y, z$ 축의 성분을 다음 (7)식과 같이 구할 수 있다.

$$RI_x = -\frac{1}{4} \frac{1}{\omega \rho d} [ |p_2|^2 - |p_3|^2 + Re(G_{12} - G_{13} + G_{24} - G_{34}) ]$$

$$RI_y = -\frac{1}{4\sqrt{3}} \frac{1}{\omega \rho d} [ 2|p_1|^2 - |p_2|^2 - |p_3|^2 + Re(G_{12} + G_{13} + 2G_{14} - 2G_{23} - G_{24} - G_{34}) ] \quad (7)$$

$$RI_z = -\frac{1}{4\sqrt{6}} \frac{1}{\omega \rho d} [ |p_1|^2 + |p_2|^2 + |p_3|^2 - 3|p_4|^2 + 2Re(G_{12} + G_{13} + G_{23} - G_{34} - G_{24} - G_{34}) ]$$

여기서  $p_i(r_i)$ 의 오노 스펙트럼(Auto-spectrum)이다. 위 (6)식과 (7)식에 의해 4개의 음압 마이크로폰으로 구성된 프로브를 이용하여 3차원 음향 인텐시티 벡터 값을 구할 수 있다.

### III. 시뮬레이션 방법 및 검토

#### III-1. 점음원의 음장

Fig. 4와 같은 직교좌표 원점 0에 3차원 음향 인텐

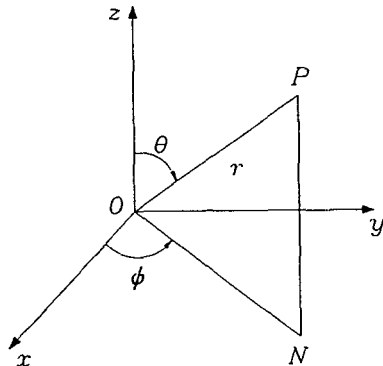


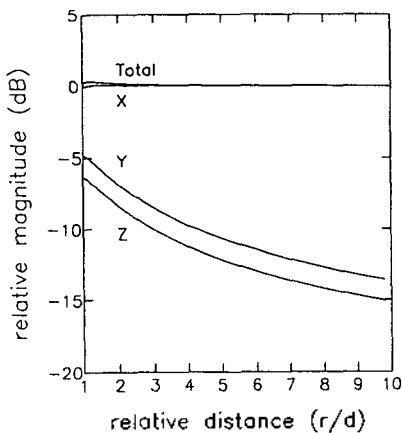
Fig 4. Spherical coordinates  $(r, \theta, \phi)$  related to cartesian coordinates  $(x, y, z)$ .

시티 프로브를 배치하고, 프로브를 구성하는 마이크로폰 사이의 간격  $d$ 와 측정 거리  $r$ 에 대한 근거리 음장의 오차를 분석하기 위하여 200Hz의 낮은 주파수로 진동하는 이상적인 점음원으로 가정하였다. 이 점음원의 거리  $r$ 을  $10d$ 에서부터  $d$ 까지 프로브의 각 축 방향 또는 임의의 방향으로 근접시켰을 경우에 대하여 이 프로브의 상대오차를 컴퓨터 수치계산으로 검토하였다. 여기서는, Fig. 4에 표시된 것과 같이 점음원의 방향과 거리 계산이 편리하도록 좌좌표계를 직교좌표계와 함께 사용하였다.

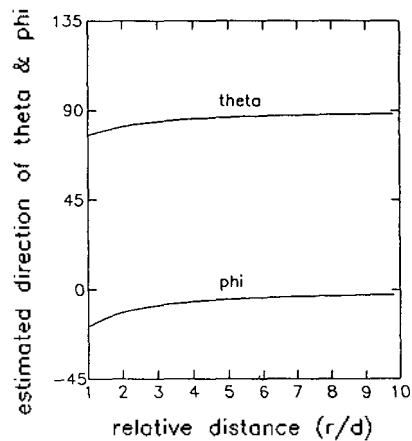
3차원 음향 인텐시티 프로브의 X축 방향으로 점음원의  $r/d$  상대거리를 10에서 1로 근접시킨 경우, 측정점의 액티브 인텐시티 참값과 이 프로브의 측정 근사값 사이의 각 축 성분 및 전체 합성 값의 상대오차와 음원 위치의 추정 방향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)의 결과와 같이 X축 방향에 음원이 있을 경우 액티브 음향 인텐시티 근사값의 X축 성분 값은 측정점  $r$ 이  $d$ 일때 1dB이하의 오차가 발생했으며, 원거리로 갈수록 더 작아졌다. X축 위의 점음원의 근거리 오차 평가에서 Y축 및 Z축 방향 성분의 상대오차는 계속 증가하였으나, 거리가 멀어질수록 X축 방향의 액티브 음향 인텐시티 값에 비해 Y축 및 Z축 방향의 값은 큰 폭으로 감소하여 전체 합성 액티브 음향 인

텐시티 값에 대한 오차의 영향이 적어졌다. 그리고, Fig. 5(b)의 음원 방향의 추정 오차도 거리가 멀어질수록 적어짐을 볼 수 있었다.

3차원 음향 인텐시티 프로브의 Y축 및 Z축 방향으로 점음원을 근접시킨 경우도 X축 경우와 마찬가지로 전체 합성 액티브 인텐시티의 상대오차 값과 근접시킨 축방향 성분의 상대오차 값이 거의 유사하게 나타났고, 이 오차값은 거리가 멀어질수록 감소했으며, 음원 방향의 추정 오차는 거의 나타나지 않았다. 결국 점음원을 3차원 프로브의 각 축 방향으로 근접시켰을 때 액티브 음향 인텐시티 값에 대한 상대오차는 X축의 경우 거의 없었고, Y축 및 Z축 방향에 대해 측정거리  $r$ 이  $d$ 인 경우 평가된 오차가 각각 약 2.1dB, -2.9dB 정도였으나, X, Y, Z축 전부를 평가하여 상대오차가 1dB이하로 측정할 수 있는 거리  $r$ 를 분석한 결과, 측정거리  $r$ 이 약 2.5 $d$ 정도 이상의 거리에서 오차 1dB이하의 정밀한 측정이 가능한 것으로 나타났다. 이것은 4개의 마이크로폰 사이의 간격을 60mm로 구성한 3차원 프로브의 경우 약 0.15m 이상의 측정 거리를 두어야만 1dB이하의 정밀한 측정을 할 수 있음을 의미한다. 반면, 음향 인텐시티에 의한 방향에 대한 추정오차는 X축 방향에 점음원을 위치시켰을 때 가장 컸고, Y축 및 Z축 방향에 점음원을 두었



(a)



(b)

Fig 5. Calculated results of 3-D intensity measurement error in case of sound field of X-axis point source. (a)Relative magnitude errors for each directions of 3-D intensity probe. (b) Estimated directions error for theta and phi( $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ )

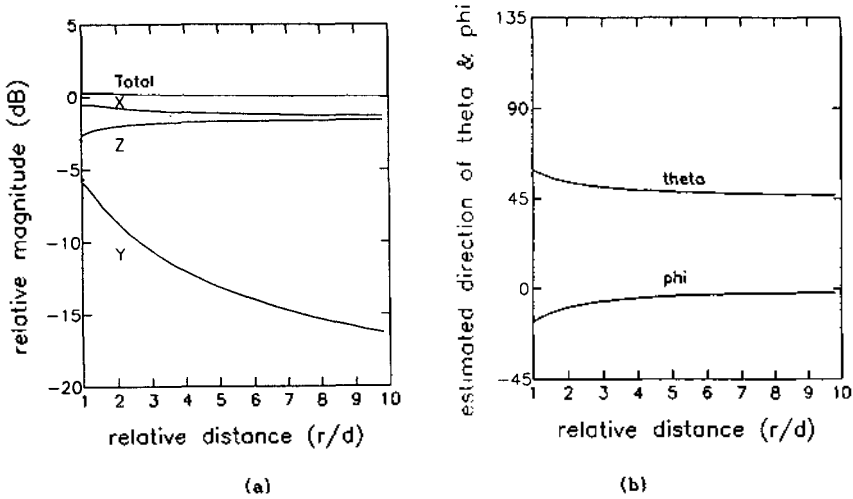


Fig 6. Calculated results of 3-D intensity measurement error in case of sound field of point source in direction ( $\theta = 45^\circ, \phi = 0^\circ$ ). (a) Relative magnitude errors for each directions of 3-D intensity probe. (b) Estimated directions for theta and phi.

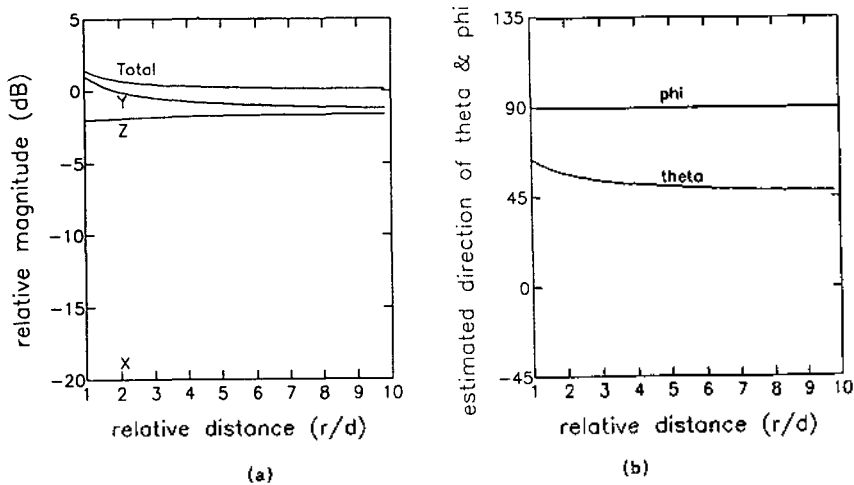


Fig 7. Calculated results of 3-D intensity measurement error in case of sound field of point source in direction ( $\theta = 45^\circ, \phi = 90^\circ$ ). (a) Relative magnitude errors for each directions of 3-D intensity probe. (b) Estimated directions error for theta and phi.

을 경우에는 거의 나타나지 않았다.

Fig. 6은 원점에 위치한 3차원 인텐시티 프로브에 점음원을 극좌표계의  $\theta = 45^\circ, \phi = 0^\circ$  방향 즉 X, Z평면의  $45^\circ$  방향으로 근접시킨 경우이다. Fig. 6의 (a)는 액티브 인텐시티 크기에 대한 각 성분의 상대적 오차를 나타내었고, (b)는  $\theta$ 와  $\phi$ 방향의 추정 값을 나

타내었다. Fig. 7은 점음원을  $\theta = 45^\circ, \phi = 90^\circ$  방향 즉, Y, Z평면의  $45^\circ$  방향으로 프로브에 근접시킨 경우이다. Fig. 7(a)는 액티브 인텐시티 크기에 대한 각 성분의 상대 오차를 나타내었고, (b)는  $\theta$ 와  $\phi$ 방향의 추정 값을 나타내었다. Fig. 7(b)와  $\phi$ 에 대한 오차값이 거의 없는 원인은 액티브 인텐시티의 X축 성분이

상대적으로 작기 때문이다.

이 컴퓨터의 수치계산 결과에서, 이상적인 점음원에 근접하여 4개의 마이크로폰으로 구성된 3차원 음향 인텐시티 프로브로 측정할 경우 액티브 인텐시티 크기에 대한 오차가 1dB 이하의 정밀한 측정을 하려면, 음원과 프로브의 측정점 사이의 거리  $r$ 가 최소한  $2.5d$  이상 되어야 하는 결과를 볼 수 있었다. 점음원에 근접하여 측정할 경우에 대해 평가된 오차에서 4개의 마이크로폰으로 구성된 음향 인텐시티 프로브의 각 측방향에 따라 마이크로폰 사이의 수평거리 차이가 있어 평가된 오차도 다르게 나타났으며, Z축 방향의 근거리 오차가 가장 크게 나타났고, 다음이 Y축, X축 순서로 나타났다. 그리고 3차원 음향 인텐시티 값으로 추정된 방향의 오차가  $2^\circ$  이하가 되려면  $10d$  이상의 측정 거리가 필요함을 알 수 있었다. 이 결과는 점음원의 근거리 음장을 측정할 때 방향에 대한 추정 오차를 줄이는 방법을 고안해야함을 의미한다. 그러나 실제의 음원은 보통 유한 크기를 가지고 있으므로 점음원의 가정이 성립하지 않는 경우가 대부분이다. 크기를 가지는 음원의 근거리 음장에서 측정오차를 평가하기 위해 다음 절에 유한 크기의 정사각형 평판 면음원이 무한 버플의 중심에서 진동하는 경우에 대해 검토한다.

### III-2. 면음원의 음장

Fig. 8과 같이  $A \times A$ 의 정사각형 음원이 무한 크기의 버플 중앙에 위치하고, 다음과 같은 두 종류의 모드로 진동할 경우에 대해 검토한다. 단, 평면 위의 음원 좌표는  $(x', y', 0)$ 가 되고, 3차원 인텐시티 프로브의 측정 좌표는  $(x, y, z)$ 로 표시한다.

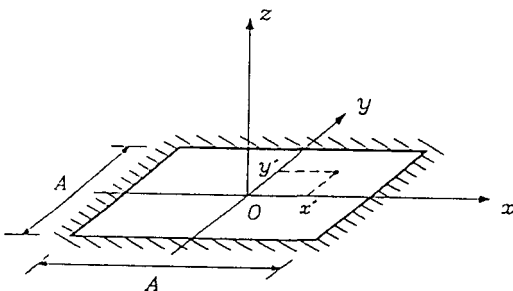


Fig 8. A planner sound in an infinite baffle.

$$\textcircled{1} W(x', y') = 1$$

$$\textcircled{2} W(x', y') = \sin(\pi x'/A)$$

무한 크기 버플 중심에 있는 임의의 진동 속도 분포  $W(x', y') \exp(j\omega t)$ 를 가지는 음원으로 반무한 공간의 한점에서의 음압  $p$ 는 다음 식 (8)로 주어진다.

$$p(x, y, z) = \frac{j\rho ck}{2\pi} \int_s W(x', y') \frac{e^{jkr}}{r} dx' dy' \quad (8)$$

여기서  $r$ 은 측정점과 진동점 사이의 거리이고, 시간항  $\exp(j\omega t)$ 는 간략화하기 위해 생략했다. 또  $\rho$  및  $c$ 는 각각 매질 밀도와 음속이다. 정사각형 음원을 아주 작은 면적의 요소로 분할하여 (8)식의 적분을 가산으로 근사하면, (9)식과 같이 된다.

$$p(x, y, z) = \frac{j\rho ck}{2\pi} \left(\frac{A}{N}\right)^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \frac{e^{jkr_{ij}}}{r_{ij}} \quad (9)$$

여기서  $W_{ij}$ 는  $(i, j)$ 번째 미소 요소가 가지는 속도,  $r_{ij}$ 는 미소 요소와 측정점 사이의 거리이다. 또한, X축 방향의 입자속도는 (9)식을 X에 대해 미분한 것으로 이를 가산형태로 근사하면, 다음 (10)식과 같이 된다.

$$u_x(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{A}{N}\right)^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \frac{e^{-jkr_{ij}(X-X'_i)}(1+jkr_{ij})}{r_{ij}^3} \quad (10)$$

(9), (10)식에서 분할수 N을 충분히 크게하면, 정밀한 음압과 입자속도를 구할 수 있다.

먼저, 평면 음원을 점음원으로 근사 시킬 때 발생하는 오차의 변화를 보기위해 면음원이 ①의 경우와 같이 평판면의 모든 진동속도가 1인 피스톤 운동하는 것으로 가정한다. 4개의 마이크로폰 사이의 간격  $d$ 가 0.06m인 3차원 음향 인텐시티 프로브의 측정점을 평판의 중앙 위로 변화시킨  $(0, 0, 0.04)$ ,  $(0, 0, 0.07)$ ,  $(0, 0, 0.12)$ 로 하여 측정거리가 Z축으로 각각  $0.67d$ ,  $1.17d$ ,  $2d$ 로 하고 평판의 피스톤 운동의 진동 주파수는 근거리 음장에서 측정거리  $r$ 와 프로브의 마이크로폰 간격  $d$  사이의 관계에 의한 오차를 분석하기 위해 낮은 주파수 200Hz로 하였다. 그리고 평판의 한 변의 길이  $A$ 가 0.003m에서 1m까지 변화할 때 측정점에서 발생하는 음향 인텐시티 상대오차를 수치계산으로 평가하여, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

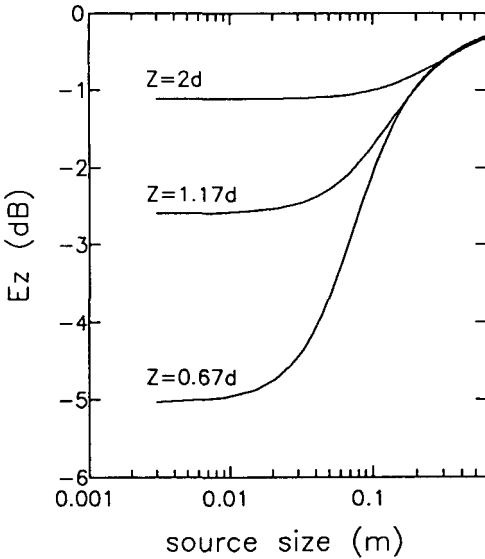


Fig 9. Effect of source size on the approximation errors in case of a piston-like motion.

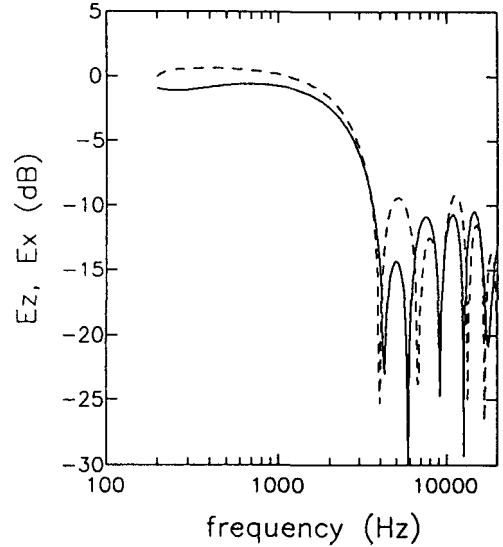


Fig 10. Frequency dependence of the approximation errors for the sound source with a sinusoidal vibration pattern(Symmetric).

Fig. 9는 액타브 인텐시티 값의 Z성분만으로  $E_z = 10 \log \hat{I}_z / I_z [\text{dB}]$ 를 이용하여 상대오차 값을 나타내었다. 여기서  $\hat{I}_z$  및  $I_z$ 는 각각 인텐시티 Z성분 값의 측정 근사값과 참값을 나타낸다.  $A = 0.003\text{m}$ 의 경우는 거의 점음원의 결과와 동일하였고,  $A$ 값이 증가할수록 즉 음원의 크기가 커질수록 오차는 급격히 감소하였다. 그리고 측정점의 위치가 음원에 근접할수록 오차가 감소되었다. 이 현상은 음원이 어느 정도의 크기를 가지게 되면, 음원 부근에서 음압 상승이 완만하게 되어 근사 오차는 줄어들게 되는 것으로 생각된다. 따라서 면음원의 크기가  $0.2\text{m} \times 0.02\text{m}$ 일 때부터 오차가 크게 감소하기 시작하여 크기가  $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$  이상 되면, 측정거리와 관계없이 오차가 1dB 이하로 되었고, 면음원의 크기가  $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$  이상이 되면, 측정점의 거리  $r$ 가  $0.67 d$ 가 되어도 관계없이 오차가 거의 0.6dB이하로 되어 정밀한 측정이 가능한 것으로 나타났다.

이 결과를 이용하여  $A = 0.3\text{m}$  크기의 정사각형 평판을 ②의 경우와 같이 분할 진동( $W(x', y') = \sin(\pi x'/A)$ )하는 경우 평판의 면음원 근처에서 발생하는 오차를 검토한다. 3차원 음향 인텐시티 프로브의 측정점을 (0.1, 0, 0.07)로 하고 면음원 주파수를 200Hz에서 20kHz까지 변화시킨 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 실선은 Z축 성분의 상대오차  $E_z$ , 점선은

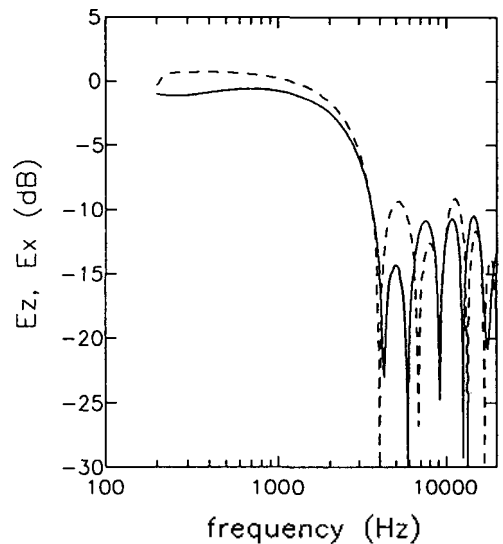


Fig 11. Frequency dependence of the approximation errors for the sound source with a sinusoidal vibration pattern(Asymmetric).

X축 성분의 상대오차  $E_x$ 이다. 어느 경우에도 1.2kHz 이하에서는 1dB이하의 오차를 나타내었고, 음원의 가까운 곳에서 측정하여도 오차가 작은 좋은 결과를 나타내었다. 다음으로 평판의 분할 진동의 진폭이 비대칭이 될 경우 즉  $W(-x', y') = 0.5W(x', y')$ 일 때



대칭 분할 진동과 같은 측정점에서  $E_x$ 와  $E_y$ 가 변화하는 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 그 결과 평판의 면 음원 부근의 측정에서도 약 1.2kHz 미만의 주파수에서 평가된 오차는 1dB이하였으나, 그 이상의 주파수에서 오차가 큰 폭으로 증가하였다. 따라서 이 프로브로 1.2kHz이상의 주파수 영역의 음향 인텐시티를 측정하기 위해서는 오차를 줄이는 방법이나 보정방법을 제안해야 될 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

이 논문에서는 Suzuki등이 제안한 정사면체의 정점에 4개의 마이크로폰을 배치시켜 구성한 3차원 인텐시티 프로브로 근거리 음장의 3차원 복소 음향 인텐시티를 측정할 때 발생하는 오차를 컴퓨터의 수치계산으로 검토하였다. 이때 음원의 근거리 음장에서 측정점의 거리와 프로브를 구성하는 마이크로폰 사이의 간격으로 인해 발생하는 오차만을 분석하기 위해 음원의 진동 주파수를 저주파수로 선택함으로써 주파수가 높아짐에 따라 각 마이크로폰 신호의 위상차로 인해 발생하는 오차를 무시할 수 있도록 하였다.

먼저, 저주파수로 진동하는 이상적인 점음원으로 형성된 음장에서 음원 부근을 3차원 인텐시티 프로브로 측정한 경우 음원과 측정점 사이의 거리  $r$ 가 프로브를 구성하는 마이크로폰 사이의 간격  $d$ 에 2.5배 이상일 때 상대오차가 1dB 이하의 정밀한 측정할 수 있음을 알았다. 그리고 3차원 음향 인텐시티 값으로 추정된 음원 방향의 오차가  $2^\circ$  이하가 되려면,  $10d$  이상의 측정 거리가 필요함을 알 수 있었고, 이것은 점음원의 근거리 음장을 측정할 때 방향에 대한 추정 오차를 줄이는 방법을 검토해야함을 의미한다. 이것은 이상적인 점음원으로 가정하여 검토한 오차이고, 실제 존재하는 음원의 유한한 크기를 가지므로 면음원에 대한 경우도 검토하였다. 면음원의 크기에 대한 3차원 음향 인텐시티 프로브의 오차 평가에서 면음원의 크기가  $0.02m \times 0.02m$ 일 때부터 오차가 크게 감소하기 시작하여 크기가  $0.2m \times 0.2m$  이상 되면, 오차가 1dB 이하로 되어 어느 정도 크기를 가지는 음원일 경우는 작은 오차의 근접 측정이 가능함을 알았다. 면음원의 크기가  $0.3m \times 0.3m$  이상이 되면, 측정점의 거리  $r$ 가  $0.67d$ 가 되어 근접측정하여도 오차가 거의 0.6dB이하인 정밀한 측정이 가능한 것으로 나타났다. 그리고 면음원이 모드 분할 대칭 및 비대칭 진동

울할 경우에도 일반적인 측정 주파수 범위인 1.2kHz 미만에서 1dB 이하의 오차로 정밀한 측정을 할 수 있음을 알았다. 그러나 그 이상의 주파수에서 큰 폭으로 오차가 증가하였다.

이 논문에서 많은 경우에 대한 충분한 검토라 할 수 없지만, 검토 결과와 같이 3차원 음향 인텐시티 프로브로 크기를 가지는 음원의 근거리 음장을 측정할 때 발생하는 근사오차가 크지 않다는 것이 확인되어 Suzuki등이 개발한 3차원 인텐시티 프로브가 근거리 측정에 유용함을 나타냈다. 그러나 3차원 인텐시티 프로브의 고주파수 음원의 측정에 대한 오차 검토과 함께 측정 가능한 주파수 범위를 확장할 수 있는 보정법의 검토가 따라야 할 것으로 생각된다.

#### 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. S. Gade, "Sound Intensity-Part I, II," Brüel & Kjaer Technical Review, No. 3-NO. 4, 1982.
3. 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.
4. G. W. Elko, "Frequency Domain Estimation of the Complex Acoustic Intensity and Acoustic Energy Density," Ph. D. Theses, The Pennsylvania State University, 1984.
5. 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.
6. 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.
7. P. Sas, R. Snoeys, "Visualisation and Estimation of the Near Field Acoustic Intensity," "Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement, Senlis (France), pp.119-126, 1981.
8. 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.

9. S. Oguro, M. Anzai and H. Suzuki. “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.

10. F. J. Fahy, SOUND INTENSITY, Elsevier Applied  
 Science Publishers LTD., 1990.

▲김 석 재(1993년 제12권 3호 참조)

현재 : 韓國海技研修院 조교수로 재직중

▲鈴木英男(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

▲지 석 근 1962년 4월 20일생

1985년 2월 : 釜山水産大學校 電子工學科 졸업(공학사)

1987년 2월 : 釜山水産大學校 大學院 電子通信工學科  
 수료(공학석사)

1994년 2월 : 釜山大學校 大學院電子通信工學科 박사  
 과정수료

1990년 2월 4월~1992년 7월 : 群山水産專門大學校  
 船舶電子科 전임강사

1992년 7월~현재 : 群山大學校 通信學科 전임강사

▲김 천 덕(1988년 제7권 2호 참조)

현재 : 釜山水産大學校 電氣工學科 정교수