

두 개의 Microphone 배열 특성에 의한 음향 Intensity 측정

장 호경, 김 성규, 이 준하, 김 예현
영남대학교 물리학과

Sound Intensity Measurement for Characteristics of Two Microphone Arrangements.

R.G.Chang, S.K.Kim, J.H.Lee, Y.H.Kim.
Department of Physics, Yeungnam University.

Abstract

The errors caused by developmental finite difference approximations in the two microphone acoustic intensity measurement technique are considered in this paper. The frequencies and pressure responses obtained experimentally, are presented for both face to face (FF) and side by side(SS) microphone configurations. The implications of these results by the use of such a configuration for two microphone sound intensity measurement are discussed.

I. 서 론

지난 몇 년 동안 noise source의 위치 측정과 조사 연구등에 많은 관심이 증가하여 왔다. 이 noise source의 위치 측정과 조사는 음파의 방향성을 측정함으로써 분석할 수 있고, 그 방향성은 입자 속도에 의하여 나타내어 지는 sound intensity를 측정함으로써 해석할 수 있다. 입자 속도 측정을 필요로 하는 sound intensity는 그 이론적 배경을 1932년 H.F.Olson이 거의 성립하였으나, 입자 속도 측정의 기술적인 문제로 거의 시도 되지 않고 sound field의 특성 분석에서 전통적으로 sound pressure을 가지고 해석하여 왔다. 그러나 Fahy가 cross-spectral density항에서 sound intensity공식의 유도도 sound intensity의 측정을 가능하게 하였다. 최근 analogue와 digital방법에 의한 신호 처리 기술과 전기 장비에 대한 기술의 향상으로 두 개의 microphone을 가깝게 배열하여, sound int-

ensity를 측정하는 기기의 개발로 vector량인 sound intensity를 가지고 음장의 특성 분석에 많이 활용되고 있다.

sound intensity의 측정에서 microphone의 선택과 배열 특성에 따라 음파의 회절과 반사와 산란등의 현상이 일어나고, 또 finite difference approximation error등이 있으므로, 본 연구에서는 1/3 octave digital filter를 포함하는 real-time sound intensity meter인 B&K Sound Intensity Analyzing System Type 3360을 사용하여 microphone을 face to face, side by side등으로 배열하고, 그 배열 특성에 의한 영향과 sound pressure로부터 환산된 intensity와 실제 두 개의 microphone으로 측정된 intensity 사이에 approximation error을 알아 보고자 한다.

II. 이론적 배경

1) Sound Intensity

sound field에서 어떤 지점의 sound intensity는 주어진 방향에서 단위 면적의 표면을 통하여 흐르는 음향 energy의 시간 평균과 같고, 만약 mean flow가 없는 매질이라면 sound intensity vector는 같은 지점에서 순간 입자속도 $\vec{U}(t)$ 와 순간 압력 $P(t)$ 의 시간 평균의 Product 와 같다.

$$\vec{I} = \overline{P(t) \cdot \vec{U}(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) \cdot \vec{U}(t) dt \quad (eq 1)$$

이상적인 anechoic chamber의 free field에서 plane wave가 완전히 전파될때 active sound field가

형성되고, 이 경우에 Particle velocity는 음압으로 부터 계산 할 수 있다.

$$U = P/\rho c$$

소리의 전파 방향에 있어서 sound intensity의 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$|\vec{I}| = \overline{P \cdot \vec{U}} = P_{rms}^2 / \rho c \quad (\text{eq 2})$$

(ρc : 매질의 impedance)

2) Sound Intensity 측정 이론

$$\vec{I} = P \cdot \vec{U} \quad (\text{eq 3})$$

음압(P)은 scalar 양이므로 쉽게 측정할 수 있으나, 입자속도(\vec{U})는 vector 양인 관계로 직접 측정이 어렵다. 그래서 대기 입자의 운동 방정식에 의하여 입자 가속도는 음압 gradient($\overline{\text{grad}P}$)에 비례 한다는 것을 이용하여 Fig 1과 같이 두 개의 microphone을 가까이 설치하고 압력의 차이를 측정하여 이로부터 입자 속도를 구할 수 있다.

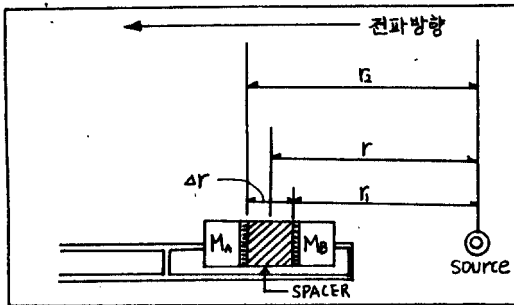


Fig 1. Geometrical configuration.

Newton's Second law인 운동 방정식에 기본을 두고

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -\text{grad}P \quad (\rho: \text{공기의 밀도}) \quad (\text{eq 4})$$

r 방향에서

$$\rho \frac{\partial^2 U_r}{\partial t^2} = -\frac{\partial P}{\partial r} \quad (\text{eq 5})$$

음압의 gradient는 입자 가속도에 비례 함으로 particle velocity는 시간에 대한 음압 gradient의 적분에 의해 얻을 수 있다.

$$U_r = \frac{1}{\rho} \int \frac{\partial P}{\partial r} dt \quad (\text{eq 6})$$

음압의 gradient($\overline{\text{grad}P}$)는 두 개의 가까운 지점 A와 B에서 측정된 음압 PA와 PB의 차를 microphone의 분리거리(Δr)로 나눈 것과 같다.

r방향에 있어서 particle velocity는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{U}_r \approx \frac{1}{\rho \Delta r} \int (P_B - P_A) dt \quad (\text{eq 7})$$

$$\bar{P} \approx \frac{P_A + P_B}{2} \quad (\text{eq 8})$$

(\vec{U}_r : particle velocity 근사값, \bar{P} : 평균 음압)

두 개의 microphone A와 B 사이의 중간점에서 r를 따르는 음향 velocity와 평균 압력은 eq 7과 eq 8에 의해 finite difference approximation을 나타내게 된다. 이 approximation은 분리거리(Δr)가 파장(λ)에 비해 아주 작을 때 작게 나란하다($\Delta r \ll \lambda$). eq 7과 eq 8을 eq 3에 대입하면 r방향에 있어서 sound intensity vector는 다음과 같이 된다.

$$\vec{I}_r = \overline{P \cdot U_r} = -\frac{1}{2\rho \Delta r} (P_A + P_B) \int (P_B - P_A) dt \quad (\text{eq 9})$$

(\vec{I}_r : 측정 음향 intensity의 근사값)

3) Approximation error(L_ξ)

이상적인 sound field와 이상적인 sound source에서 측정된 음압으로 부터 환산된 sound intensity와 두 개의 microphone에 의해 finite difference 압력으로 부터 직접 측정된 sound intensity 사이에 approximation error가 있다. 이 approximation error는 두 개의 microphone A와 B 사이의 중간점에서 r를 따르는 음향 intensity의 finite difference의 approximation으로 나타내므로 원래부터 가지고 있는 error이다.

먼저 far field에서 이상적인 plane sinusoidal wave가 microphone의 중심축을 따라서 전파된다고 가정 했을 때 approximation error는 다음과 같다.

$$L_\xi = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{AP}}{I_{EX}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\sin(K \Delta r)}{K \Delta r} \right) \quad (\text{eq 10})$$

(I_{EX} : exact intensity, I_{AP} : approximated intensity)

approximation error는 두 개의 microphone 사이의 분리

거리 (Δr)가 파장(λ)보다 아주 작을 때 ($\Delta r \ll \lambda$) 작은 error를 가지며, Δr 이 작을 때 Fig 2와 같이 high frequency에서 error가 작다.

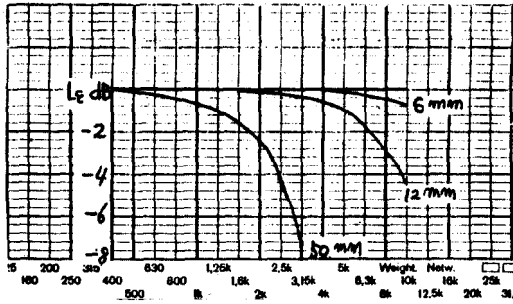


Fig 2. Approximation error. L_{ξ} at high frequencies.

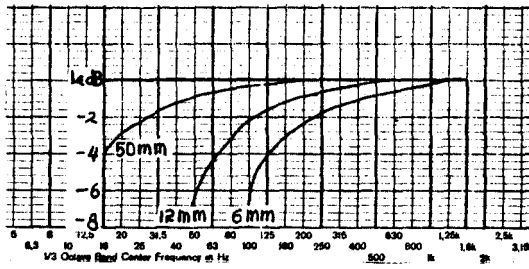


Fig 3. Approximation error. L_{ξ} at low frequencies.

near field에서 monopole source로 방사되는 이상적인 spherical wave가 microphone의 중심축을 따라서 전파될 때 approximation error는 다음과 같다.

$$L_{\xi} = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{AP}}{I_{EK}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\sin(K \Delta r) r^2}{K \Delta r r_1 r_2} \right)$$

$$= 10 \log_{10} \left(\frac{\sin(K \Delta r)}{K \Delta r} \left(1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta r}{r} \right)^2 \right)^{-1} \right) \quad (\text{eq 11})$$

approximation error는 $K \Delta r$ 의 함수일 뿐만 아니라, $\Delta r/r$ 의 함수이기도 하다. 만약 $r > 2 \Delta r$ 이면 작은 error를 가지며, 이 error는 무시될 수 있다. $r = \Delta r$ 일 때 approximation error는 1dB에 근사한다. low frequency에서는 pressure gradient보다도 phase gradient의 측정에 크게 영향을 받으므로 low frequency 영역에서는 Fig 3과 같다.

III. 실험 방법

본 연구에서는 Fig 4와 같은 실험 장치를 총해 두

개의 microphone을 아주 가깝게 설치하여 sound intensity의 측정과 microphone 배열 측정에 의한 sound wave의 reflection, deflection, scattering 등의 영향과 Sound intensity probe의 배열에 의한 preamplifier의 영향 등을 알아 보았다.

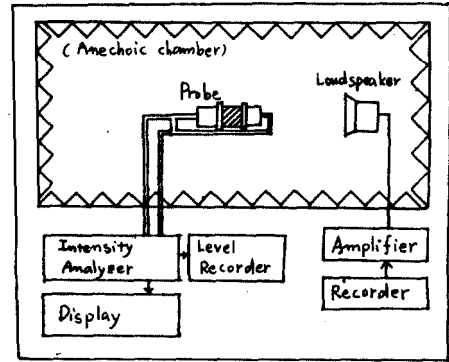


Fig 4. Block diagram for measurements of sound intensity.

anechoic chamber의 free field에서 sound wave가 안전히 전파되어 active sound field가 형성되는 이상적인 음장에서 행하여야 하나, 본 실험에서는 Hair-dryer를 작동하여 발생하는 noise를 녹음시켜 amplifier로 증폭시킨 다음 loudspeaker를 통하여 noise를 발생시켜 monopole source로 사용하고 두 개의 microphone의 중간점과 loudspeaker의 음향 중심 사이의 거리는 1.5 m로 하여 본 연구실에서 제작한 semi-anechoic chamber에서 행하였다.

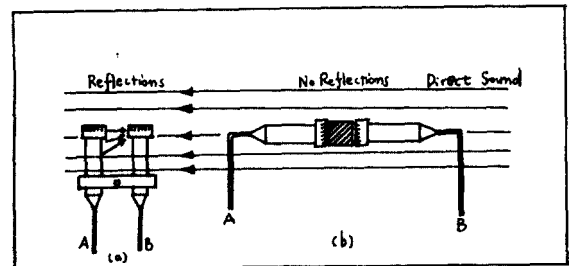


Fig 5. Microphone configurations: (a) side by side. (b) face to face

두 개의 microphone을 Fig 5와 같이 배열하고 B&K Pistonphone Type 4220을 사용하여 microphone과 spacer를 교환할 때 마다 calibration을 시켰다. face

to face의 배열은 고 세 spacer를 사용하고 side by side는 microphone을 유지하는 holder를 제작하여 사용하였다. B&K Microphone Type 4165을 12mm와 50mm로 분리하여 face to face와 side by side에서 음압 PA와 PB를 측정하여 그 차이로 microphone에 의한 reflection과 deflection과 scattering effect를 알아보고 sound wave의 전파 방향에 대한 microphone probe의 방향을 변화시켜 preamplifier에 의한 영향을 조사하였다. B&K Sound Intensity Analyzing System Type 3360을 사용하여 직접 측정된 sound intensity와 음압으로부터 환산한 sound intensity 사이에 approximation error을 알아 보았다.

IV. 결과 및 고찰

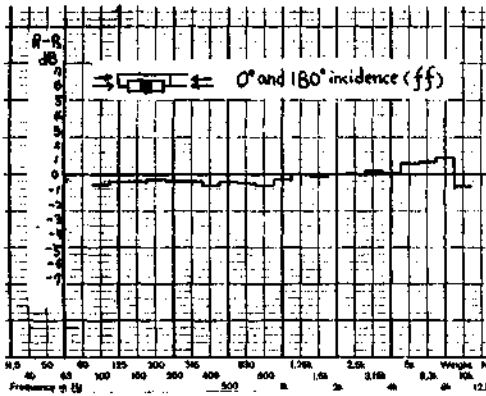


Fig 6. Free field response curves.(ff)

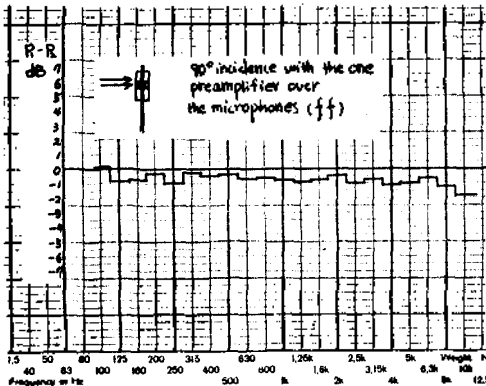


Fig 7. Free field response curves.(ff)

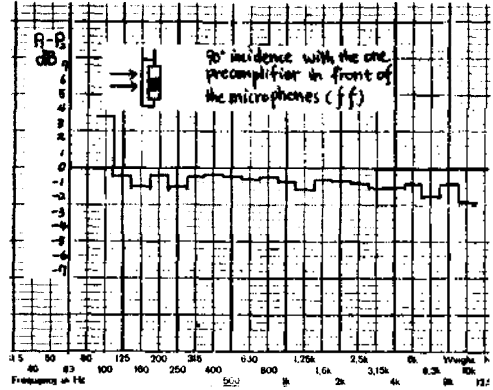


Fig 8. Free field response curves.(ff)

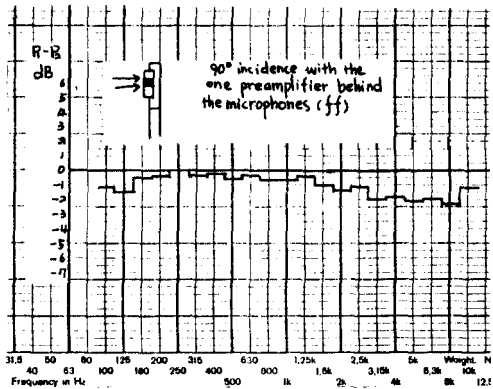


Fig 9. Free field response curves.(ff)

Fig 6-Fig 9의 결과는 sound wave의 전파 방향에 대하여 B&K Sound Intensity Probe 3519의 방향을 변화시켰을 때 preamplifier에 의한 PA와 PB의 음압차를 나타낸 것이다.

Fig 6은 모든 진동수 영역에서 비교적 preamplifier에 의한 영향이 적은 PA-PB의 차가 근일한 좋은 결과이다.

Fig 7에서도 Fig 6과 같이 대체로 좋은 결과이다.

Fig 8은 probe의 preamplifier가 앞에 있는 관계로 preamplifier에 의한 영향이 크게 나타나 전반적으로 PA와 PB의 차이가 일정하지 못했다. 중간 주파수 영역에서는 최절호 결과가 있어 다소 차이가 작아졌다.

Fig 9는 probe의 preamplifier가 뒤에 있는 관계로 high frequency영역 (3.15k)Hz-(8k)Hz 사이에서 sound wave가 반사하여 PA와 PB의 차이가 high frequency영역에서 일정하지 못했다.

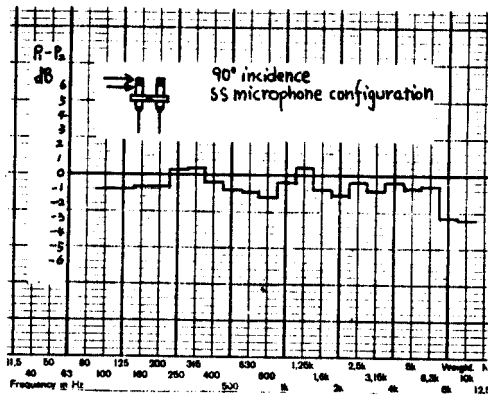


Fig 10. Free field response curve. (ss)

face to face의 방법으로 microphones을 배열하여 PA와 PB의 차를 나타내는 Fig 6과 side by side로 microphone을 배열하여 PA와 PB의 차를 나타낸 Fig 10을 비교하여 볼때 Fig 10의 결과가 frequency(400)Hz-(8k)Hz 사이에서 입력의 차이가 일정하지 못한 것은 microphone의 cylinder와 holder등의 reflection과 scattering 효과가 나타난 것이다.

Fig 7-Fig 10 사이의 결과에서 (8k)Hz-(10k)Hz 사이에서 전반적으로 음압차가 일정하지 못한 것은 Type 4165 microphone이 $\Delta r=12\text{mm}$ 로 high frequency에서 잘 반응하지 못하기 때문이다.

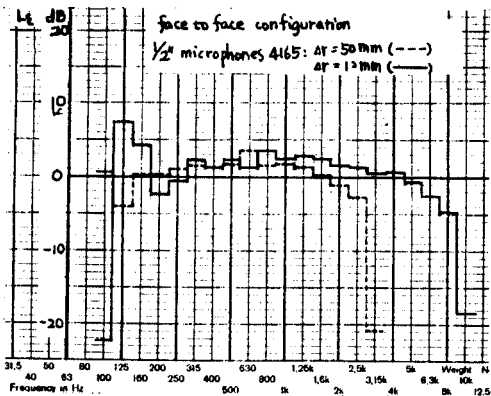


Fig 11 Approximation error(face to face)

Fig 11과 Fig 12는 측정 음압으로부터 환산된 sound intensity와 두 개의 microphone으로 직접 측정한 approximated sound intensity 사이에 approximation error를 나타낸 것이다.

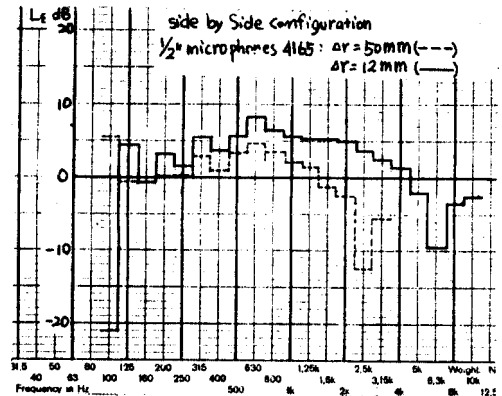


Fig 12. Approximation error.(side by side)

Fig 11의 approximation error는 이상적인 free field에서의 결과인 Fig 2, Fig 3과 거의 비슷했다. 그러나 Fig 2와 Fig 3에 비하여 error가 다소 큰 것은 semi-anechoic chamber가 monopole source에서 방사하는 sound energy를 완전히 흡수하지 못하고 반사하기 때문에 source가 마치 quadrupole source와 같이 작용했기 때문이다.

Δr 이 12mm인 것은 high frequency 영역에서 작은 error를 나타냈고 $\Delta r=50\text{mm}$ 인 것은 low frequency 영역에서 작은 error를 나타내었다.

Fig 12의 side by side microphone 배열에서 approximation error가 크게 나온 것은 Fig 10의 결과와 같이 microphone cylinder 등에서 reflection과 deflection과 scattering 등의 효과가 발생한 것으로 해석된다.

V. 결론

본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. sound pressure의 측정시 sound intensity probe의 방향은 sound wave의 전파 방향에 대하여 microphone 동축과 0° - 180° 인 방향에서 preamplifier의 영향이 가장 작다.
2. sound intensity의 측정시 두 개의 microphone configuration 방법에 있어서 microphone 예외한 reflection과 scattering 효과가 작은 face to face가 side by side 방법보다 좋다.

3. approximation error는 face to face 가 side by side보다 작게 나타났다. high frequency에서는 이상적인 anechoic chamber에서 실험한 것과 거의 일치하나, low frequency에서는 error가 약간 크게 나타났다.
4. approximation error가 free field에서의 error인 Fig 2, Fig 3과 같지는 않지만 semi-anechoic chamber에서, 그리고 pink noise를 가지고도 Fig 2, Fig 3의 값에 근사함을 보여준다.
5. approximation error가 크지 않기 때문에 두 개의 microphone을 사용하여 sound intensity를 직접 측정할 수 있으며, 그 결과 noise source의 위치 측정 및 sound power의 측정등과 같이 sound field의 특성 분석에 많은 응용이 기대된다.

Reference

- (1) F.J.Fahy, "Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of microphone signals", J.Acoust.Soc.Am, vol 62(4), pp 1057-1059, (1977)
- (2) J.Y.Chung and J.Pope, "Practical measurement of acoustic intensity-the two microphone cross-spectral method", Internoise 78 Proceeding, pp 893-900, (1978)
- (3) J.Y.Chung, "Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch", J.Acoust.Soc.Am, vol 64(6), pp 1613-1616, (1978)
- (4) J.K.Thompson and D.R.Tree, "Finite difference approximation errors in acoustic intensity measurements", Journal of Sound and Vibration, vol 75(2), pp 229-238, (1981)
- (5) K.Beissner, "On the plane-wave approximation of acoustic intensity", J.Acoust. Soc. Am, vol 71(6), pp 1406-1411, (1982)
- (6) S.Gade and M.Sc, "Sound intensity", B&K Technical Review, No 3. 4-1982 Part I.II, (1982)
- (7) P.S.Watkinson and F.J.Fahy, "Characteristics of microphone arrangements for sound intensity measurement", Journal of Sound and Vibration, vol 94(2), pp 299-306, (1984)