

== 기술해설 ==

음향 Intensity 측정이론과 기술

* 은 회 준 (Un, H. J)

I. 서 론

음향은 파동에 의해서 에너지와 모멘텀이 전달되는 동적현상이다.

일반적으로 동적현상에는 "이동"의 개념이 다르기 때문에 음향현상의 완전한 설명을 위해서는 이동을 나타내는 파라미터인 입자속도를 측정해야 할 필요가 있다. 그럼에도 불구하고 이제까지의 음향측정이 대부분 microphone에 의한 음압측정을 기본으로 하고 있는 이유는 아직까지 입자속도를 쉽게 측정할 수 있는 보편적인 기술이 개발되어있지 않기 때문이다. 음압은 scalar 양이기 때문에 측정위치에서의 음파의 질대크기를 나타내는 데는 적절하지만 특별한 경우(예컨대 자유음장)를 제외하고는 두개이상 위치에서의 음향의 상호관계(예컨대 파동전파 경로)를 규명하는 데는 미흡하다.

입자속도에 의해서 나타내질 수 있는 대표적인 이동량은 에너지의 흐름, 즉 음향 intensity이다. Intensity는 파동의 진행방향을 나타낼 수 있는 vector 양이기 때문에 多重音源에 의한 복잡한 음장속에서 특정 음원을 찾는 데 이용될 수 있다. 또한 입사각에 따른 재료의 흡음을 측정과 같이 방향성이 요구되는 측정에도 이용될 수 있다.

본 논문에서 설명하는 두 microphone에 의한 음향 intensity 측정은 기본적으로 음압측정을 바탕으로 하고 있다. 이러한 점에서 이 기술은 입자속도를 직접 측정하는 기술과 혼동하지 않기 바란다. 1977년 Fahy³⁾에 의해서 두 microphone에 의한 음향 intensity 측정 이론이 제시되면서 측정기술의 개발 및 응용을 위한 활발한 연구가 수행되고 있다.^{1) 2) 6)} 이 기술이 이제까지 넘기 힘들었던 벽을 깨고 음향측정의 새로운 장을 연것은 사실이지만 사용방법에 따라서는 상당한

오차와 그릇된 정보를 유발할 수 있다.^{4) 7)}

국내에서도 이미 많은 사람들이 이 기술에 관심을 갖고 그에 관련된 연구를 하고 있는 것으로 알고있다. 본 논문에서는 우리가 흔히 당면한 것으로 받아들이고 있는 intensity의 기본 개념을 파동 이론의 측면에서 검토하고, 두 microphone 시스템에 의한 측정이론과 한계를 설명하고자 한다. 그러나 논문의 지면관계상 측정 hardware에 대한 설명을 생략하기로 한다. 이에 대해서는 논문 끝에 수록되어 있는 참고문헌을 참조하기 바란다.

II. 음파와 음향 intensity

이동의 intensity는 파동 진행 방향에 수직인 단위 면적을 통해서 단위 시간당 흐르는 에너지로서 정의된다. 따라서 intensity의 단위는 Joule/(sec.m) 혹은 Watt/m²가 된다. 음파의 에너지는 입자운동에 의한 운동에너지와 대기의 탄성에 의한 potential 에너지 성분으로 구성되며 음향 intensity는 대기의 운동을 설명하는 운동방정식과 연속방정식 및 단열상태방정식 등 세개의 기본방정식으로부터 유도될 수 있다. 음파에 의한 대기상태의 작은 섭동을 가정하고 이들 방정식의 1차 섭동 방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{Y}_1}{\partial t} = -\nabla p_1 \quad : \text{운동방정식} \dots\dots (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{Y}_1) = -\frac{\partial p_1}{\partial t} \quad : \text{연속방정식} \dots\dots (2)$$

$$p_1 = \rho_1 c^2 \quad : \text{단열상태 방정식} \dots\dots (3)$$

여기서 첨자 0과 1은 각각 배경량(background)과 1차 섭동량(perturbation)을 나타내며, ρ 는 질

량밀도, p 는 압력, v 는 입자속도를 나타낸다.

c 는 음파의 속도이며 $c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}}$ (γ 는 비열)로서

정의된다. 식 2 와 3 으로부터 다음 식을 얻는다.

$$\nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{v}_1) = - \frac{1}{c^2} \frac{\partial p_1}{\partial t} \dots\dots\dots (4)$$

식 (1)에 \mathbf{v}_1 로서 scalar 곱을 하고 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\frac{1}{2} \rho_0 v_1^2) = - \nabla \cdot (\mathbf{v}_1 p_1) + p_1 \nabla \cdot \mathbf{v}_1 \dots (5)$$

식 (4)에 p_1 을 곱하고 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$p_1 \nabla \cdot \mathbf{v}_1 = - \frac{\partial}{\partial t} (\frac{p_1^2}{2c^2 \rho_0}) \dots\dots\dots (6)$$

식 (5)와 (6)을 합하면,

$$\nabla \cdot (\mathbf{v}_1 p_1) = - \frac{\partial}{\partial t} (\frac{1}{2} \rho_0 v_1^2 + \frac{p_1^2}{2c^2 \rho_0}) \dots\dots\dots (7)$$

식 (7)의 오른쪽 괄호안의 첫번째 항은 대기입자의 운동 (\mathbf{v}_1) 에 의한 운동 에너지를 나타내고 두번째 항은 대

기의 압축성 (단열 압축율 = $\frac{1}{c^2 \rho_0}$) 에 의한 potential

에너지를 나타낸다. 이 식은 음파 에너지 밀도의 시간 변화율 (식의 오른쪽) 을 단위시간당 단위 부피를 둘러싼 면을 통해 흐르는 파동에너지 (왼쪽의 divergence) 와 관련시키는 에너지 보존법칙을 나타내고 있다. 따라서 $\mathbf{v}_1 p_1$ 은 순간 음향 intensity 를 나타내며 intensity 의 방향은 vector \mathbf{v}_1 의 방향과 동일하다.

시간평균 intensity 는 순간 intensity 를 적절한 시간 동안 평균한 것으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\underline{I} = \langle \mathbf{v} p \rangle \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $\langle \rangle$ 는 시간 평균을 의미하고 밑줄은 vector 양을 나타낸다. 편의상 이제부터는 1 차 섭동량의 첨자 "1" 을 생략하고 모든 파동량을 나타내기로 한다.

평면파의 음향 임피던스는 $\rho_0 c$ 로 주어지며, p 와 v 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{p}{v} = \rho_0 c \dots\dots\dots (9)$$

따라서 평면파의 intensity 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{1}{\rho_0 c} \langle p^2 \rangle = \frac{P_{rms}^2}{\rho_0 c} = \rho_0 c V_{rms}^2 = P_{rms} \cdot V_{rms} \dots (10)$$

여기서 P 와 V 는 각각 압력과 속도의 진폭을 나타내고 첨자 rms 는 실효치 (root mean square) 를 나타낸다. 구면파의 음향 임피던스는 복소수로서 주어지기 때문에 p 와 v 의 관계 역시 복소수 함수로서 나타내어 진다. 그러나 물리적으로 의미가 있는 실수 양만을 고려할때 p 와 v 는 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p = P \cos(\omega t - kr)$$

$$v = \frac{v}{\rho_0 c \cos \theta} \cos(\omega t - kr - \theta)$$

$$= V \cos(\omega t - kr - \theta) \dots\dots\dots (11)$$

$$\cos \theta = \frac{kr}{\sqrt{1+k^2 r^2}}$$

여기서 r 은 음원으로부터의 거리를 나타내고 k 는 파동수 (wavenumber) 이다. $\rho_0 c \cos \theta$ 는 구면파임피던스의 절대크기를 나타낸다. 식(11)을 intensity 의 정의인 식(8)에 대입하고 시간 평균을 다음의 식을 얻는다.

$$I = \frac{P^2_{rms}}{\rho_0 c} = \rho_0 c V^2_{rms} \cos^2 \theta = P_{rms} V_{rms} \cos \theta \dots\dots\dots (12)$$

식(10)과(12)를 비교하면 음압을 이용해서 표현되는 intensity 는 평면파와 구면파 모두 동일하지만 다른 표현 방법들은 서로 다르다. 그러나 $\cos \theta = 1$, 즉 $\theta = 0$ 일때는 평면파와 구면파의 intensity 표현이 동일하다. 이것은 $kr \gg 1$ 조건을 만족시키는 경우로서 음원으로부터 충분히 떨어진 위치, 혹은 고주파 파동에 해당한다.

1. 음향 intensity 측정 기술과 측정한계

식(8)로서 정의되는 음향 intensity를 결정하기 위해서는 음압 p 와 입자속도 v 를 측정해야 한다. 현재의 음향 측정기술로써 음압은 직접 정밀하게 측정할 수 있으나 입자속도를 직접 측정할 수 있는 민율만한 기술은 아직 보편화되어 있지 않다. 두 개의 microphone에 의한 intensity 측정기술은 기본적으로 식(1)로써 주어지는 운동 방정식에 의해서 입자속도가 음압의 공간 gradient의 함수로써 주어진다는 원리에 바탕을 두고 있다. 간단한 경우로써 그림 1과 같이 점음원에 의해서 발생되는 음파의 radial 방향 (r 방향)의 intensity 측정을 생각해 보자.

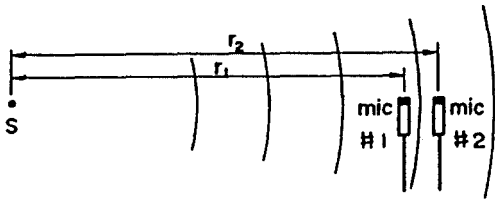


그림 1. 두 microphone에 의한 intensity 측정

임의의 위치 r 에서의 입자속도는 식(1)에 의해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v(r, t) = -\frac{1}{\rho_0} \int^t \frac{\partial p(r', t')}{\partial r'} dt' \dots (13)$$

위치 r 근방에서 Δr 의 거리차이를 갖는 r_1 와 r_2 에 설치된 두 개의 microphone에 의한 음압을 각각 p_1 과 p_2 라고 하자. Δr 이 파장에 비해서 충분히 작다면 식(13)의 입자속도는 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$v(r, t) = -\frac{1}{\rho_0} \int^t \frac{(p_2 - p_1)}{\Delta r} dt' \dots (14)$$

또한 이들 microphone 위치에서의 음압은 다음과 같은 평균음압으로서 대표될 수 있다.

$$p(r, t) = \frac{(p_1 + p_2)}{2} \dots (15)$$

식(14)와(15)를 식(8)에 대입함으로써 intensity를 결정할 수 있다. 이 과정에서 신호처리를 위한 한가지 방법은 시간 평균의 성의에 따라서 음압의 시간신호를 직접 처리하는 것이다. 이 방법에 의해서 intensity의 wideband

(옥타브, 혹은 1/3 옥타브) 스펙트럼을 거의 real-time으로 구할 수 있으며, 현재 상용화되어 있는 intensity 측정기들은 대부분 이 방법을 사용하고 있다.

Intensity를 결정하는 또 다른 방법은 측정된 음압의 시간 신호를 주파수 영역에서 처리하는 것이다. 이 방법은 근래 FFT분석기의 사용이 보편화되면서 이제까지 많은 시간과 노력이 소모되던 신호처리를 손쉽게 할 수 있게 되면서 가능하게 되었다. 이론에 의하면 음향 intensity는 두 microphone 신호의 cross-spectrum의 허수부분의 함수로서 나타낼 수 있다.

$$I(r, \omega) = -\frac{I_m(G_{12})}{\omega \rho_0 \Delta r} \dots (16)$$

여기서 G_{12} 는 microphone #1과 #2 신호의 cross-spectrum이고 ω 는 角 진동수이다. 이 식에서 보듯이 이 방법의 장점은 intensity의 narrow-band 스펙트럼을 구할 수 있다는 것이다. 그러나 FFT분석에 따르는 시간의 유한성 때문에 이 방법에 의해서 비정상(non-stationary) 신호를 처리하기는 힘들며, 따라서 이 방법은 기계나 내연기관 소음과 같이 비교적 정상적인(stationary) 신호에 대해서만 이용될 수 있다. 반면에 환경소음과 같은 비정상 소음에 대해서는 앞서 언급한 시간 신호의 직접 처리 방법이 주로 이용된다.

특별한 경우로서 시간 조화 함수로써 나타낼 수 있는 정현파의 시간평균 intensity는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{1}{2} R_e(p^* v) \dots (17)$$

여기서 p^* 와 v 는 각각 복소수 함수로써 나타내지는 음압과 입자 속도이고, p^* 는 p 의 complex conjugate이다. 즉 정현파의 시간평균 intensity는 $p^* v$ 의 실수 부분으로서 주어진다. 앞의 식(14)와(15)를 식(17)에 대입하고 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I = -\frac{I_m(p_1^* p_2)}{2 \omega \rho_0 \Delta r} \dots (18)$$

정현파의 경우에

$$p_1 = P_1 e^{i(\omega t - kr)}$$

$$p_2 = P_2 e^{i(\omega t - k(r + \Delta r))} \dots \dots \dots (19)$$

식(19)를 식(18)에 대입하면

$$I = \left(\frac{P_{1rms} P_{2rms}}{\rho_0 c} \right) \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} \dots \dots \dots (20)$$

이 식의 왼쪽 괄호안의 두 음압 실효치의 곱은 두 microphone 위치에서의 평균 음압 실효치의 곱과 같다고 볼 수 있다. 따라서 식(20)은 앞의 식(10)과 동일하여 평면파 진행 방향에 대한 시간 평균 intensity를 나타낸다. 이 두 식의 비를 취하면 다음과 같다.

$$\delta = \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} \dots \dots \dots (21)$$

이 식은 비록 평면파에 대해서 유도된 것이지만 두 microphone에 의한 intensity 측정의 오차를 나타내는 일차적인 지표로서 이용될 수 있다. 이 식에 의하면 $k\Delta r$ 이 영(0)으로 접근함에 따라서 δ 는 "1"로 접근하여 두 microphone에 의한 intensity 측정값은 실제의 값과 일치하게 된다. 그러나 실제로는 이 식의 sine 함수의 argument는 두 microphone으로 측정된 신호의 위상차를 나타내어서 일반적으로 $k\Delta r + \alpha$ 로 쓰는 것이 타당하다. 여기 α 는 microphone 측정 시스템의 고유한 위상차를 나타낸다. α 의 역할은 $k\Delta r$ 값이 작을수록 상대적으로 커져서 측정 오차가 증가하게 된다. $k\Delta r$ 값은 저주파로 갈수록 또한 두 microphone 사이의 간격이 작을수록 작아진다. 따라서 저주파 성분 측정을 위해서는 두 microphone 사이의 간격을 증가시킬 필요가 있으며, 주어진 microphone 간격에 대해서는 저주파 측정 한계가 존재하게 된다. 이 한계는 측정 시스템의 특성에 따라서 결정되기 때문에 진마티르 성질수는 없으나 일반적으로 5cm 정도의 microphone 간격을 사용하는 경우에 30Hz 정도까지의 주파수 범위에 대해서 ± 1 dB 이내의 측정 오차를 유지할 수 있다.¹⁵⁾

위에서 논술한 저주파 측정 한계와는 반대로 식(21)에서 $k\Delta r$ 값이 증가하면 δ 값이 "1" 이하로 감소되어 측정된 intensity 값이 실제보다 낮게 나타나는 경향이 있다. 주어진 간격 Δr 에 대해서 $k\Delta r$ 의 증가는 고주파 파동

을 의미하기 때문에 두 microphone에 의한 intensity 측정에는 고주파 한계가 존재하게 된다. 대체로 $k\Delta r$ 값이 0.85를 초과하지 않으면 ± 1 dB 이내의 오차로서 intensity를 측정할 수 있다고 알려져 있다.¹⁷⁾ 따라서 $\Delta r = 2$ cm인 경우에는 주파수 상한은 2300 kHz 정도이고 $\Delta r = 1.5$ cm인 경우에는 3 kHz 정도가 된다.

IV. 결 론

Intensity 측정에 의해서 파동의 경로와 진행 상태를 결정할 수 있다는 사실은 음향 이론가들에게는 그들의 이론을 테스트할 수 있는 새로운 실험방법을 마련해 주고 있으며, 응용개발 연구자들에게는 이제까지 힘들게 수행해야만 했던 많은 종류의 측정을 비교적 쉽게 수행할 수 있게 하고 있다. 이같은 intensity 측정 기술의 이용은 국내에서도 이미 상당히 시도되고 있다고 본다. 그러나 intensity 측정 기술 자체는 아직도 완성된 기술은 아니며, 측정 한계와 분해능의 개선 및 3차원 intensity 측정 등 지속적인 연구 노력이 요구되는 문제들이 많이 남아있다. 특히 이 기술의 실용화가 가능했던 것은 마이크로프로세서의 대량 보급에 따라서 신호 처리를 쉽게 할 수 있다는 것이 큰 원인 이었던 만큼 앞으로 예상되는 고밀도 칩의 개발과 고성능 컴퓨터의 출현은 이 기술의 개선과 확장에 크게 기여할 것으로 기대된다. 우리도 이 같은 새로운 도전을 찾아서 노력함으로써 남들이 개발한 기술의 이용에 그칠 것이 아니라 새로운 기술 창조에 기여해야 할 것이다. 이와 관련하여 근래 새로이 제시되고 있는 intensity 측정 기술을 소개하고자 한다. 1980년에 Williams와 Maynard¹⁸⁾에 의해서 처음 소개된 이 기술은 근접장 holography라고 이름지어졌으며, 두 microphone 측정 기술의 경우와 마찬가지로 이 기술도 컴퓨터에 의한 대량 데이터 처리가 가능하였기에 실현 될 수 있었다. 이 기술은 음발생원 가까이 설치된 microphone array에 의해서 탐지된 시간 신호를 컴퓨터에 의해서 처리함으로써 intensity 분포도를 작성함과 동시에 음원의 3차원 진동 형태를 시각적으로 재생시킬 수 있다.¹⁸⁾ 아직 연구 단계인 기술이므로 해결되어야 할 문제들이 많이 있으나 이 기술이 실용화 되었을 때의 이용 가치는 쉽게 상상할 수 있다. 두 microphone에 의한 intensity 측정 이론이 본격적으로 제시된지 불과 3, 4년 후에 실용상품이 나왔던 것을 회고

함께 근접장 holography를 이용한 측정장비가 활용될날도 멀지 않았다고 본다. 우리 국내 학자들도 이러한 세계적인 추세에 뒤떨어지지않게 새로운 정보의 습득과 교환에 더욱 적극적인 노력을 기울여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Beissner, K., "On the Plane-wave Approximation of Acoustic Intensity," Journal of the Acoustical Society of America, 71-6, pp1406-1411 (1982).
2. Chung, J.Y., "Cross-spectral Method of Measuring Acoustic Intensity without Error Caused by Instrument Phase Mismatch," Journal of the Acoustical Society of America, 64-6, pp1613-1616 (1978).
3. Fahy, Frank K., "Measurement of Acoustic Intensity Using the Cross-spectral Density of Two Microphone Signals," Journal of the Acoustical Society of America, 62-4, pp1057-1059 (1977).
4. Forssen, Bjorn, "Errors in the Estimation of Surface Velocity by Use of the Two-Microphone Technique," Inter-Noise Proceedings, pp1063-1066 (1983).
5. Gade, S., Sound Intensity, Technical Review, Bruel & Kjaer No. 3 (1982).
6. Gade, S. et al, "Sound Power Determination in Highly Reactive Environments Using Sound Intensity Measurements," Inter-Noise Proceedings, pp047-1050 (1983).
7. Thompson, J.K., "Finite Difference Approximation Errors in Acoustic Intensity Measurements," Journal of Sound and Vibration, 75-2, pp229-238 (1981).
8. Williams, Earl G. and J.D. Maynard, "Holographic Imaging without the Wavelength Resolution Limit," Physical Review Letter, 45-7, pp554-557 (1980).
9. Williams, Earl G. and J.D. Maynard, "Intensity Vector Field Mapping with Near-field Holography," Inter-Noise Proceedings, pp1009-1012 (1981).