

## 충격성 신호 해석을 위한 포락선 인텐시티

### The Envelope Intensity for the Analysis of a Burst Signal

金錫載\*, 鈴木英男\*\*, 金千德\*\*\*

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

#### 요약

포락선 인텐시티는 신호의 진폭 변화에 비해 상대적으로 천천히 변화한다. 본 논문에서는 이러한 성질을 이용하여 종래의 순시 음향 인텐시티법을 수정한 새로운 포락선 인텐시티법을 제안하여 비정상 신호 해석에 이 기술을 적용하였다. 이 기술의 유효성은 반사체가 있는 무향실 내의 충격성 음원에 대해 수치계산 결과의 실험결과와의 비교로부터 검증되었고 또한, 이 기술은 무향실 및 잔향실 내의 평균 타음 음원의 방향특성 해석에 응용되었다. 수치계산 결과 및 측정결과는 잘 일치하였고, 제안된 방법은 종래의 순시 인텐시티법보다 특히 과도특성을 갖는 충격성 음원 분석에 보다 유효함이 확인되었다.

#### ABSTRACT

The envelope intensity changes slowly with respect to the change of the signal amplitude. Using this property, the new envelope intensity technique, which is revised from the conventional instantaneous intensity method, is suggested and applied for the analysis of a non-stationary sound signal.

The efficiency of this method is verified by the comparison between the computer simulation results and the measured results for the analysis of the burst sound in an anechoic room with a reflector. In addition, the method is applied to analyze the directional patterns of the board impact sound in an anechoic room and in a reverberant room.

It is found that the simulated and the measured results are consistent with each other and the envelope intensity method is better than traditional instantaneous intensity method especially in the analysis of a transient or a burst sound.

#### I. 서론

근거리 음장에서 소음원의 해석과 위치 동정 등을 음향 인텐시티 측정으로 수행하고 있다. 또한, 환경 소음이 많이 존재하는 공간에서도 특정 소음원에서 방사되는 에너지를 음향 인텐시티로 측정할 수 있다.

이런 음향 인텐시티 측정에 대한 이론적 배경은 1932년 H. F. Olson<sup>(1)</sup>에 의해 이미 연구되었으나 인텐시티 측정기의 교정 및 여러 조합적인 기술의 부족으로 지연되었다.<sup>(2)</sup> 1977년 Fahy<sup>(3)</sup>와 Chung<sup>(4)</sup>에 의해 재평가된 음향 인텐시티 측정은 신호처리에 의한 디지털 필터링 기술을 이용한 실시간 분석으로 수행되었다.

임의의 위치에서의 음향 인텐시티는 음향 에너지 흐름의 크기와 방향을 가지는 벡터량으로 단위시간

\*韓國海技硏修院

\*\*日本國 小野調器 音響技術硏究所

\*\*\*釜山水産大學校 電氣工學科

접수일자: 1993년 5월 18일

당 단위면적당 에너지인  $W/m^2$ 의 단위를 가진다. 이것은 음향파위의 평균 흐름(mean flow)이 없는 매질에서 임의의 위치에 순간 음압과 순간 입자속도의 곱에 대한 시간평균으로 계산된다.<sup>(5)</sup> 여기서 평가되는 음향 신호와 소음은 시간 변화에 정상적인 신호만이 해당되는 것이다. 실제 경우에는 과도적이고 일시적인 충격성 비정상 신호가 흔히 존재하고 있어, 이 충격성 신호(Burst Signal)의 해석도 중요한 부분이 되고 있다. 소음제어를 위한 소음원 동정, 음장 해석 등에 중요한 도구로 이용되고 있는 음향 인텐시티 기술로 최근에 측정되고 분석된 신호들은 정상 신호이다.<sup>(3)-(6)</sup> 그러나 순간적으로 발생하는 충격성 비정상 신호를 해석하기 위해서는 종래의 음향 인텐시티 기술은 수정되거나 다른 기술의 도입이 필요하다. 충격성 신호에 의한 에너지 흐름의 변화 모양을 분석하기 위해 시간 평균 인텐시티를 이용한 경우 평균시간의 구간에 따라 다른 결과가 나타나기 때문에 정확한 분석이 어렵고, 순시 인텐시티(Instantaneous Intensity)를 이용할 경우 값이 매우 빠르게 변하기 때문에 정확한 해석을 할 수 없었다. 따라서 이 논문에서는 순시 인텐시티와 시간 평균 인텐시티와의 중간적인 성질을 가지는 포락선 인텐시티를 정의·도입하고 비정상적인 음향신호에 대한 기초적인 분석을 하였다.

이 연구에서는 무향실내에 반사판을 인위적으로 설정하여 스피커에서 충격성 신호를 방사한 경우에 대해 순시 인텐시티와 포락선 인텐시티를 설정된 음장의 컴퓨터 시뮬레이션 실험과 실제 측정실험을 하여 비교·검토하였다. 그리고, 무향실과 진향실에서 평판을 충격한 충격성 소음(Impact Sound)을 실제 수음하여 음향에너지 전파방향의 해석에 대한 포락선 인텐시티의 유효성을 확인하였다.

## II. 순시 인텐시티와 포락선 인텐시티

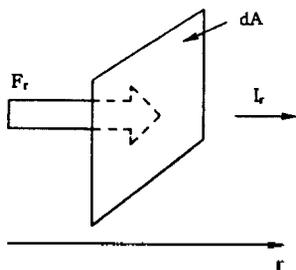


Fig 1. Energy transport through the area  $dA$  in the direction  $r$  due to the total force  $F_r$  acting on the surface in the direction  $r$ .

Fig. 1과 같이 공간 내의 비소평면  $dA$ 를 가정하자. Fig. 1에서  $dE_r$ 는 시간  $dt$ 동안에 전파방향  $r$ 의 수직인 평면  $dA$ 를 통과하여 지나간 음향 에너지이다. 전달되는 음향 에너지  $dE_r$ 는 전체 힘  $F_r$ 이  $r$ 방향의 평면  $dA$ 를 통해 한 일의 양과 같다.<sup>(6), (7)</sup> 즉

$$dE_r = F_r \cdot dr = p_r \cdot dA \cdot dr \quad (1)$$

여기서  $p_r = p_a + p$ , 전체압력  $p_r$ 는 주위압력  $p_a$ 와 음압  $p$ 의 합이다. 그러므로  $r$ 방향의 순시 인텐시티는

$$I_{r, \text{inst.}} = \frac{dE_r}{dt} = \frac{1}{dA} p_r \cdot \frac{dr}{dt} = p_a \cdot u_r + p \cdot u_r \quad (2)$$

여기서,  $dr/dt = u_r$ 은  $r$ 방향의 입자속도이다. 이 항에서 음향 에너지의 평균흐름(Mean flow)이 없을 경우, 주위 압력  $p_a$ 의 시간평균값이 0이 되므로  $r$ 방향의 인텐시티는 순시 음압과 순시 음압속도 곱의 시간평균과 관계된다.<sup>(7)</sup>

일반적으로 순시 인텐시티는

$$\vec{I}(t) = p(t) \cdot \vec{u}(t) \quad (3)$$

이다. 순시 인텐시티에서 음압과 입자속도의 순시값을 보면, 음압의 양(陽)의 부분은 입자속도 방향으로 음향 에너지가 전송되고 음압의 음(陰)의 부분은 입자속도의 반대방향으로 음향 에너지 전송되므로 음압 주파수의 2배의 주파수로 변화된다. 이 변화는 음압과 입자속도의 위상과 다른 양상을 보이는데 Fig. 2(a)와 같이 음압과 입자속도가 같은 위상이면 음압의 한 주기 사이에 양의 방향으로 에너지 흐름의 증대가 2회 발생하고 최저는 0이 된다. 만약 위상이  $90^\circ$  차이가 나면 Fig. 2(b)와 같이 음압의 한 주기 사이에 흐름 방향이 음, 양, 음, 양으로 변하여 평균 에너지 흐름이 0이 된다.

만약  $p(t)$ ,  $\vec{u}(t)$ 가 통계적으로 정상적인 신호라면 식 (3)의  $\vec{I}(t)$ 는 시간평균에 의해 단순히 왕복하는 성분을 0으로 하여 실제 음향 에너지 흐름이 되는 음향 인텐시티  $\vec{I}_a$ 가 식 (4)와 같이 주어진다.

(4)식의 대상 신호가 충격성 음향 신호일

$$\vec{I}_a = \overline{p(t) \cdot \vec{u}(t)} \quad (4)$$

경우 평균시간 길이에 따라 결과는 다르게 되므로 변화 모양을 관측하기 위한 정확한 방법이 될 수 없어

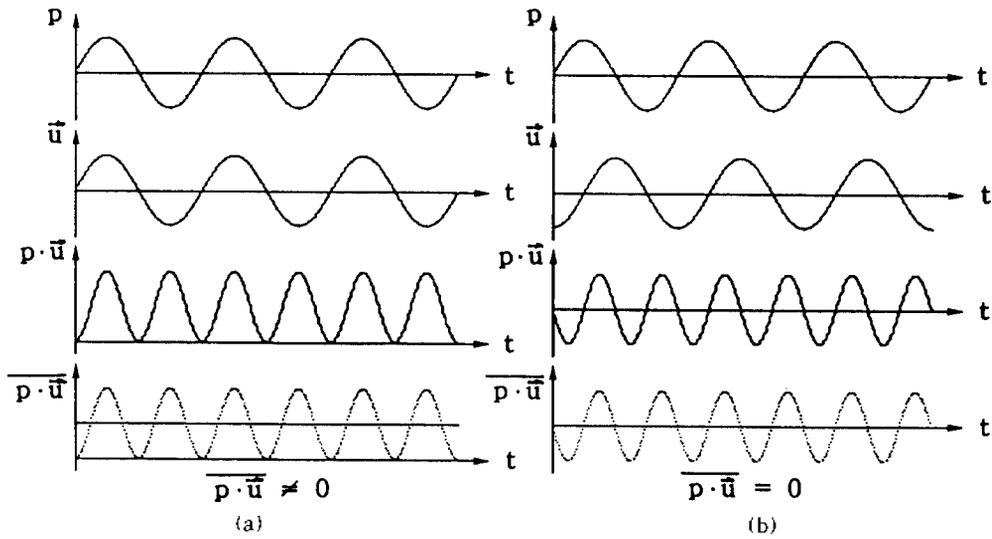


Fig 2. Instantaneous intensity and time average intensity

해석이 불가능하다.

위의 두 음향 인텐시티의 중간적 성질을 가지는 포락선 인텐시티  $\vec{I}_e(t)$ 를 다음 식으로 정의한다.

$$\vec{I}_e(t) = \text{Re}[p_a(t)\vec{u}_a(t)^*] \quad (5)$$

여기서  $p_a(t)$ ,  $\vec{u}_a(t)$ 는  $p(t)$ ,  $\vec{u}(t)$ 의 해석적 신호로 각각의 힐버트(Hilbert) 변환된  $p_h(t)$ ,  $\vec{u}_h(t)$ 를 이용하면 다음과 같다.

$$p_a(t) = [p(t) - jp_h(t)]/\sqrt{2} \quad (6)$$

$$\vec{u}_a(t) = [\vec{u}(t) - j\vec{u}_h(t)]/\sqrt{2} \quad (7)$$

이것은 주어진 파형을 정상적인 파형의 한 부분으로 간주하지 않고 가상적인 정상파의 음향 인텐시티  $\vec{I}_a$ 로 치환한 것이다.

예를 들어 다음과 같은 여현파를 생각하자.

$$p(t) = p \cdot \cos(\omega t), \quad u(t) = u \cdot \cos(\omega t + \phi) \quad (8)$$

이 신호들의 해석적 신호는

$$p_a(t) = \frac{p}{\sqrt{2}} \exp(j\omega t),$$

$$u_a(t) = \frac{u}{\sqrt{2}} \exp[j(\omega t + \phi)] \quad (9)$$

가 되므로

$$\vec{I}_e = \frac{1}{2} pu \cdot \cos \phi \quad (10)$$

가 얻어진다. 이것은 물론 음향 인텐시티  $\vec{I}_a$ 와 같지만 충격파인 경우에도 충격파 주기 중에는 인텐시티 크기가 식 (10)과 같이 표현된다. 순시 인텐시티는

$$I(t) = \frac{1}{2} pu \cdot \cos \phi + \frac{1}{2} pu \cdot \cos(2\omega t + \phi) \quad (11)$$

로 진동하는 리플(ripple)항이 나타난다.

### Ⅲ. 시뮬레이션 및 측정 실험

#### Ⅲ-1. 포락선 인텐시티 방법

음향 인텐시티를 구하기 위한 요소인 입자속도  $\vec{u}(t)$ 는 보통 두개의 마이크로폰을 D만큼 간격을 두어 나란히 설치하고 두 마이크로폰의 음압 차를 이용하여 다음 식 (12)와 같이 구한다.

$$\vec{u}(t) = -\frac{1}{\rho} \int_{-x}^x \frac{\partial p(t')}{\partial x} dt'$$

$$\approx -\frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p_2(t') - p_1(t')}{D} dt' \quad (12)$$

이 식을 푸리에 변환을 하면

$$U(\omega) = -\frac{1}{j\omega\rho D} [P_2(\omega) - P_1(\omega)] \quad (13)$$

가 된다. 또 음압  $P(\omega)$ 는

$$P(\omega) = -\frac{1}{2} [P_1(\omega) - P_2(\omega)] \quad (14)$$

로 구한다. 이 (13), (14)식에서  $\omega < 0$ 의 성분을 0으로 하고  $\omega > 0$ 의 성분을  $\sqrt{2}$  배하여 해석적 신호  $U_a(\omega)$ ,  $P_a(\omega)$ 를 구한다. 그리고 이것을 역푸리에 변환하여  $u_a(t)$ ,  $p_a(t)$ 를 구해 식(5)에 대입하면, 이 논문에서 제안한 포락선 인텐시티를 구할 수 있다.

### III-2. 충격성 신호에 대한 시뮬레이션 및 실험

측정은 무향실(7m×7.4m×7.5m) 내에서 실행했다. 측정 시스템과 반사판 및 스피커와 마이크로폰들의 위치를 Fig. 3에 표시하였다. 컴퓨터 시뮬레이션도 똑같은 환경으로 가정하고, 스피커에서 방사된 정현파 모양의 충격성 신호가 마이크로폰에 직접 전파되거나 반사판 및 스피커 전면에서 반사되어 전파된

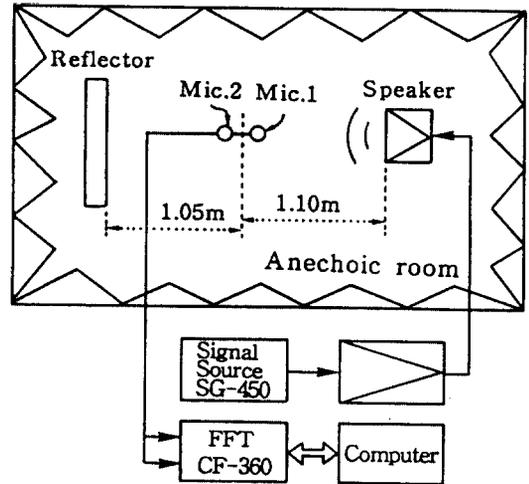
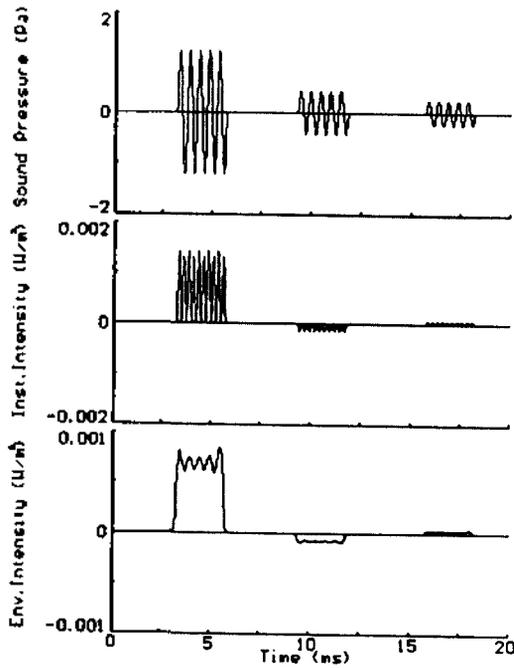


Fig 3. Measurement set up for burst sounds.

신호를 이용하여 순시 인텐시티와 포락선 인텐시티에 대해 시뮬레이션 실험을 실행했다. 2 kHz 정현파를 5주기(Cycle, 2.5ms) 및 20주기(10ms)만 발생시켜 스피커를 구동한 경우에 대해 시뮬레이션 계산 결



(a)

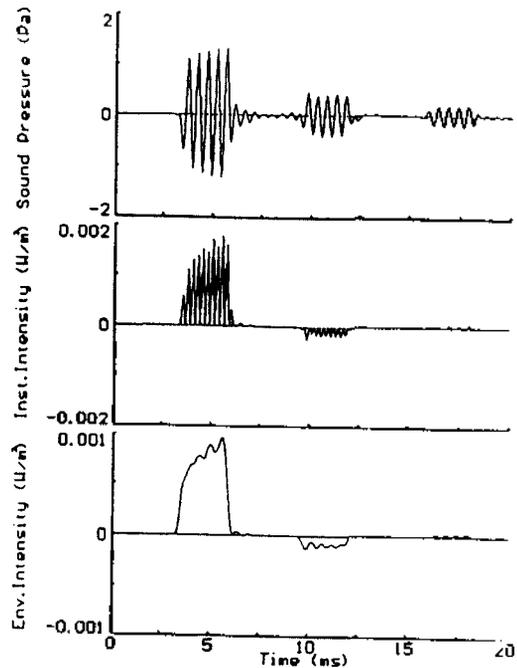


Fig 4. Simulation results(a) and measurement results(b) of 2kHz sinusoidal wave(5-wave burst).

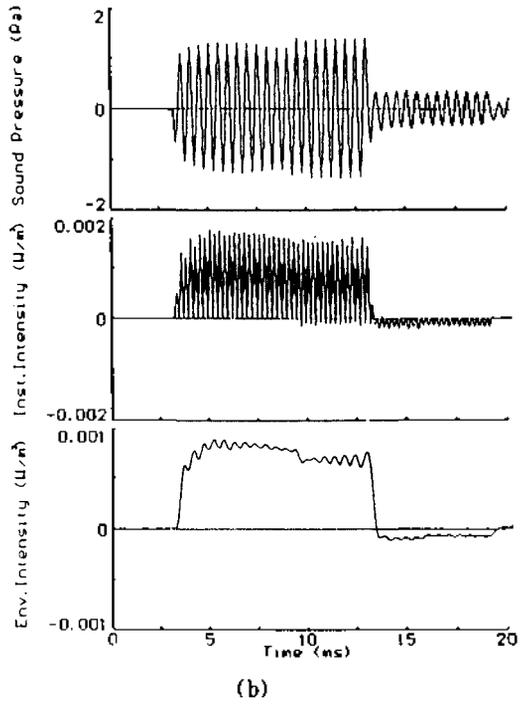
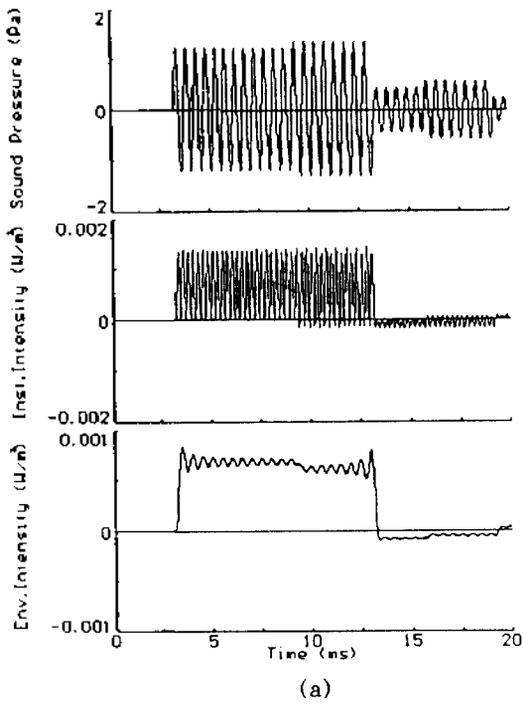


Fig 5. Simulation results(a) and measurement results(b) of 2kHz sinusoidal wave(20 wave burst).

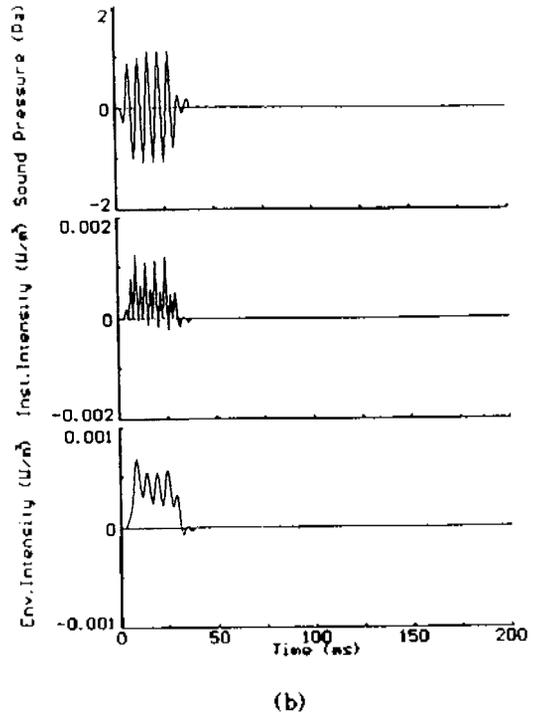
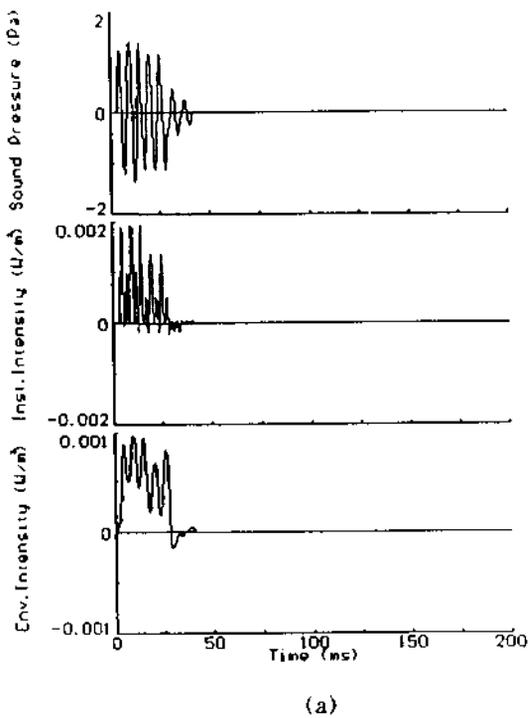


Fig 6. Simulation results(a) and measurement results(b) of 200Hz sinusoidal wave(5 wave burst).

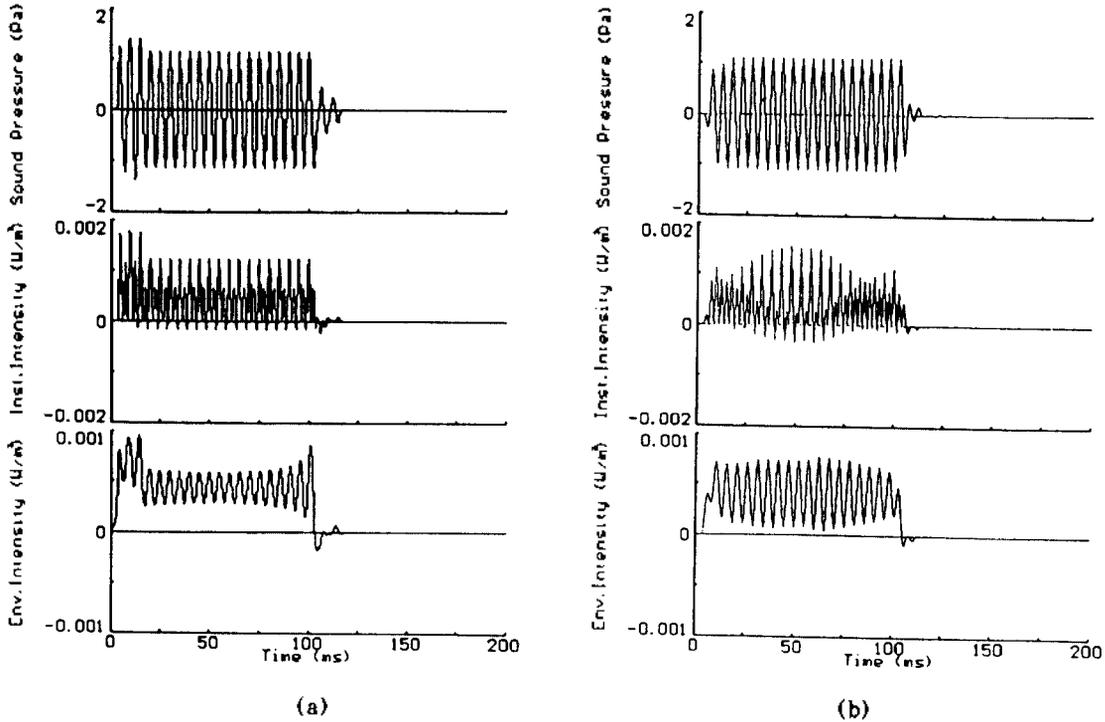


Fig 7. Simulation results(a) and measurement results(b) of 200Hz sinusoidal wave(20-wave burst).

과와 실제 측정실험 결과 각각의 음압파형, 순시 인텐시티, 포락선 인텐시티를 Fig. 4, 5에 나타냈다.

Fig. 4의 2 kHz 정현파 5주기인 경우 스피커에서의 직접파와 반사판(90cm×90cm×20cm)에서의 반사파가 확실히 분리되어 관측되었고, 또한 스피커 면에서의 반사파까지 관측·고려되었다. 시뮬레이션 계산 결과인 Fig. 4, 5의 (a)와 측정 결과를 나타낸 Fig. 4, 5의 (b)의 차이점은 스피커 구동에서 발생하는 지연 및 손실효과의 유무이다. 2 kHz 정현파 5주기를 구동한 경우 즉, 직접파와 반사파가 혼성되지 않은 경우인 Fig. 4의 순시 인텐시티와 포락선 인텐시티의 두 결과는 똑같이 음향 에너지 흐름의 방향을 확실히 식별할 수 있다. 그리고 포락선 인텐시티의 진폭이 완만하게 변화함을 볼 수 있다.

Fig. 5의 2kHz 정현파 20 주기를 구동시킨 경우 스피커에서 직접 전달된 신호와 반사판의 반사파가 중첩되어 복잡한 형태를 나타낸다. 약 8ms-12.5ms에서 직접파와 반사파가 중첩되어 음압의 진폭이 크게 되고 순시 인텐시티는 신호 주파수의 2배 속도로 진동하는 양의 방향 인텐시티와 함께 반사파에 의한 음의

성분도 나타나고 있다. 그러나 포락선 인텐시티는 양 방향으로의 에너지 흐름과 그 흐름의 차이만이 나타나고 있다. 200Hz 정현파를 5주기 및 20주기 구동시킨 경우에 대한 시뮬레이션 및 측정실험결과의 각각의 음압 파형, 순시 인텐시티, 포락선 인텐시티를 Fig. 6, 7에 나타냈다. 이 경우 정현파의 두번째 파에서 반사파가 중첩되기 시작하므로 그 결과 순시 인텐시티에서는 양과 음의 값이 반복적으로 나타나고, 포락선 인텐시티는 진폭에 큰 리플이 나타나고 있다. 만약 반사판에서 위상을 제어할 수 있다면 이 리플모양의 변화를 관측할 수 있을 것이다.

### III-3. 평판의 충격에 대한 실험

무향실 내에 평판(90cm×90cm×2cm)를 설치하고 평판 뒷면의 한 곳을 망치로 때려 충격성 소음을 발생시킨 경우에 대해 평판 앞쪽의 임의의 점 a, b 두 곳에서 X, Y 두 방향 인텐시티를 중심 주파수 800Hz 인 1 옥타브 대역통과필터를 이용하여 측정했다. Fig. 8은 X, Y 두 방향 인텐시티를 이용하여 a, b 두 측정위치의 순시 인텐시티와 포락선 인텐시티를 각

각 2차원적으로 표시한 것이다. Fig. 8에서 두 인텐시티법 모두 충격점의 위치를 나타내고 있지만 포락선 인텐시티의 파형에서 하나가 크게 나타나 쉽게 식별할 수 있다. 그러나 순시 인텐시티법에서는 파형이 여러개 나타나고 전파방향을 식별하기에 자이도 작기 때문에 평판의 충격선 위치와 음향 에너지 이동에 대한 해석이 어렵다. 따라서 포락선 인텐시티가 평판

의 충격성 음원의 위치와 평판에서 시간에 따른 음향 에너지의 전파방향을 쉽게 해석할 수 있다. 그리고, 포락선 인텐시티에서 평판 충격점의 대칭점이라 생각되는 방향에 작은 파형이 나타남을 볼 수 있어 공간에 의한 음원의 흔적을 관찰할 수 있다.

무향실 실험과 같은 방법으로 잔향실에서 실험을 실행하여 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 여기에서는 포락선 인텐시티가 가장 크게되는 방향으로 그 크기만을 직선으로 표시했다. 이 경우에도 충격점과 대칭으로 보이는 방향에 신호가 보인다. 잔향실 내의 실험이라 뒤쪽벽면의 반사음에 의한 효과를 예상하였지만 충격성 소음과 첨예한 파에 대한 반사때문인지 대부분 작은 파워를 나타내었다.

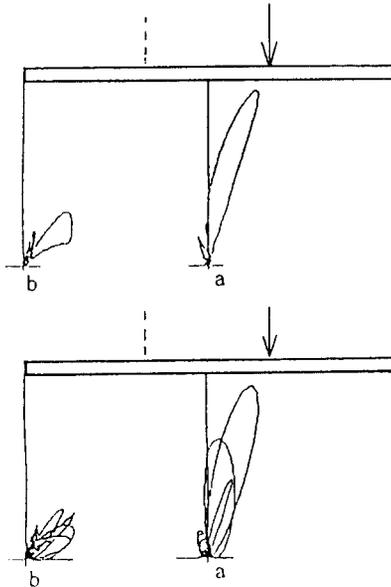


Fig 8. Instantaneous intensity (lower) and Envelope intensity (upper) patterns a board impact sound in an anechoic room using a one octave bandpass filter with the center frequency at 800Hz.

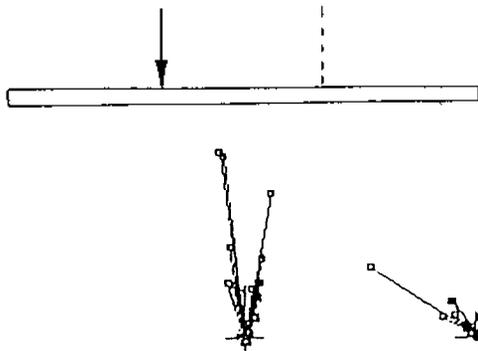


Fig 9. Directional patterns of Envelope intensity of a board impact sound in a reverberation using a one octave bandpass filter with the center frequency at 800Hz.

### III. 결 론

비정상 음향신호의 에너지 흐름을 해석하기 위해 포락선 인텐시티를 제안하고, 그 유용성을 컴퓨터 시뮬레이션 및 측정 실험을 통해 검증하였다. 특히 포락선 인텐시티의 음향 에너지 변화에 대하여 완만하게 변화하는 특성은 순시 인텐시티법에서 볼 수 없는 이점으로 나타났다. 그리고 첫번째 실험에서 저주파수의 충격성 음향 신호와 그 신호의 반사파와의 간섭을 나타내어 음향 에너지의 전파방향을 추정하였으나 반사파의 위상 변화에 의한 포락선 인텐시티의 변화 실험도 필요하다고 생각한다. 평판의 충격실험에서 포락선 인텐시티 방법에 의해 평판의 충격점 및 음향 에너지의 전파 방향을 명확하게 해석할 수 있음이 나타났다. 이 해석에서 사용된 중심 주파수 800Hz 의 1 옥타브 대역통과필터의 중심 주파수 및 통과 대역폭을 변화·축소시켜 정밀하게 측정하면 평판의 충격에 의한 음의 방사 형태를 전 주파수에 대해 해석할 수 있을 것이다.

본 논문은 한국 과학 재단 1989-1990년도 일반 연구 과제 지원비에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

1. H.F. Olson, "System Respose to the Energy Flow of Sound Wave." U.S. Patent No.1, 892, 644, 1932.
2. H.F. Olson, "Field-Type Acoustic Wattmeter." J. Audio Eng. Soc., Vol. 22, No.5, pp.321-327, 1974.

3. 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.
4. 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.
5. D.H. Munro and K.U. Ingard, "On Acoustic Intensity Measurements in the Presence of Mean Flow." J. Acoust. Soc. Am., Vol. 65, No.6, pp.1057-1059, 1979.
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. S. Gade, "Sound Intensity-Part I, II," Brüel & Kjær Technical Review, No.3-No.4, 1982.
8. J. F. Degeorges and J. Tichy, "Energy Radiation and Propagation in the Near-field of A Vibration Plate." Noise-Con. 87 Proc. Pennsylvania, pp. 189-194.
9. C.D. KIM, J. Adin Mann, C. Kongelman and J. Tichy, "Acoustic Intensity Measurements and Calculation in the Nearfield of A Ring Source Driven Simply Supported Rectangular Plate." Inter-Noise 87 Proc. Beozing, pp.1235-1238, 1987-9.
10. 김천덕, 차경환, "단순지지된 평판의 근거리 음장에서 음향인텐시티 측정." 한국 음향 학회지, 8권 3호, pp. 65-73, 1989.
11. 安齋, 他 4名, 日本音響學會講演論文集, 平成 3年 3月, pp.531, 1991.
12. 鈴木, 他 3名, 機械學會講演論文集, No. 900-59, Vol. D, pp.733.

▲김 석 재



1962년 12월 10일생  
 1985년 2월 : 부산수산대학 전자통신공학과 졸업 (공학사)  
 1991년 2월 : 부산수산대학 대학원 전자통신공학과 졸업 (공학석사)  
 1991년 3월 ~ 현재 : 부산수산대학 대학원 전자통신공학과 박사과정중

현재 : 한국해기연구소 조교수로 재직중  
 주관심분야 : 디지털 신호처리, 전기음향(인텐시티)

▲鈴木 英 南



1967년 : 東北大學 대학원 전기 및 통신공학전공 졸업  
 1967년 ~ 1979년 : 三菱電機 스피커 연구개발에 종사  
 1972년 ~ 1974년 : Pennsylvania 주립대학 대학원 석사과정 (음향공학)

1979년 ~ 1981년 : Pennsylvania 주립대학 대학원 박사과정(음향공학 : 공학박사)

1981년 ~ 1985년 : 미국 CBS연구소 근무(주로 피아노 연구에 종사)

1985년 ~ 현재 : (株)小野測器 取締役 音響技術研究所長

1992년 ~ 현재 : (株)OnTeck 사장 겸무

▲김 천 덕

1946년 5월 23일생

현재 : 부산수산대학교 전기공학과 부교수  
 (1988년 제7권 2호 참조)