

## 연성평판의 면외 진동인텐시티 측정

### Measurements of the Out-of-Plane Vibration Intensity of Coupled Plate

전진숙 \* · 길현권\*\* · 이병철\*\*\* · 김창열\*\*\*\* · 홍석윤\*\*\*\*\*

J.-S. Jeon, H.-G. Kil, B.-C. Lee, C.-R. Kim, S.-Y. Hong

Key Words: Out-of-Plane Vibration Intensity(면외 진동인텐시티), Frequency Response Function (주파수응답함수)

#### ABSTRACT

The objective of this paper is to suggest an experimental technique to measure the out-of-plane vibration intensity of a coupled plate. In order to measure the out-of-plane vibration intensity of the plate, the frequency response technique has been implemented. In this technique, the 2-D intensity vector at a measurement point has been estimated from the frequency response functions measured at 4 points in the neighborhood of the measurement point. The experimental result has been compared with a theoretical result. It showed that the experimental technique can be effectively used to measure the out-of-plane vibration intensity of plates.

#### 1. 서 론

기계 구조물의 진동과 진동으로 인하여 발생하는 고체음을 저감시키기 위해서는, 진동원의 위치 및 진동에너지의 전달 경로를 파악함으로써 효과적으로 대처할 수 있다. 진동원의 위치 및 진동에너지의 전달 경로는 진동인텐시티를 측정함으로써 파악할 수 있다. 이러한 진동인텐시티는 구조물내의 단위 폭당 진동 파워의 크기와 방향성을 갖는 벡터량을 나타낸다.

구조물 진동인텐시티 측정법에 대한 연구는 국내외에서 주로 보의 진동 및 평판의 진동에 대하여 이루어져 왔다<sup>[1]-[10]</sup>. 복합구조물의 진동인텐시티 측정에 대한 필요성은 증가하고 있으나, 관련연구는 미비한 상태이다.

본 연구에서는 연성평판에서의 면외 진동인텐시티를 측정하였다. 진동인텐시티 측정 기법으로서 주파수응답함수법을 적용하였다<sup>[4]</sup>. 이 방법의 경우 1개의 면외

가속도계를 이용하여, 측정점 주위 4지점에서 차례로 가속도 벡터 성분에 대한 주파수응답함수를 구함으로써 면외 진동인텐시티를 구할 수 있다. 그러므로 1개의 면외 가속도계를 이용할 수 있고, 또한 가속도계간의 상대위상오차를 줄일 수 있는 장점이 있게 된다. 이 방법의 경우 단위 가진력에 대한 진동인텐시티 벡터 값을 나타내지만, 진동인텐시티 공간 분포로부터 진동에너지 전달 경로와 진동원의 위치를 쉽게 파악할 수가 있다.

실험결과로부터 본 연구에서 제안된 방법이 연성평판의 면외 진동인텐시티를 측정하기 위하여 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

#### 2. 평판의 면외 진동인텐시티 측정 기본 이론

평판에서의 면외 진동인텐시티는 단위 폭을 통과하는 진동 파워의 크기와 방향을 나타내는 2차원 벡터량에 해당한다. 2차원 좌표계  $(x, y)$ 에 대하여,  $x, y$  방향 진동 변위를  $w(x, y, t)$ 로 고려한다. 평판의 면외 진동인텐시티 벡터의  $x, y$  성분에 대한 시간 평균값은 다음과 같이 표현된다.

$$\langle I_x \rangle = \langle Q_x \frac{\partial w}{\partial t} \rangle + \langle M_x \frac{\partial \theta_x}{\partial t} \rangle + \langle M_{xy} \frac{\partial \theta_x}{\partial t} \rangle$$

\* 수원대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : jshope97@empal.com  
Tel : (031) 225-8556, Fax : (031) 220-2494  
\*\* 수원대학교 기계공학과  
\*\*\* 수원대학교 기계공학과 대학원  
\*\*\*\* 한국건설안전기술원  
\*\*\*\*\* 서울대학교 조선해양공학과

$$= B \left\langle -\frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 w) \frac{\partial w}{\partial t} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial^2 y} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \right. \\ \left. - (1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial t} \right\rangle \quad (1)$$

$$\langle I_y \rangle = \langle Q_y \frac{\partial w}{\partial t} \rangle + \langle M_{yx} \frac{\partial \theta_x}{\partial t} \rangle + \langle M_{xy} \frac{\partial \theta_y}{\partial t} \rangle \\ = B \left\langle -\frac{\partial}{\partial y} (\nabla^2 w) \frac{\partial w}{\partial t} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial^2 x} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial t} \right. \\ \left. - (1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \right\rangle \quad (2)$$

여기서  $Q_x$  는  $x$  방향 전단력,  $M_x$  는  $x$  방향 굽힘 모멘트,  $M_{xy}$  는 비틀림 모멘트 성분이며,  $Q_y$  는  $y$  방향 전단력,  $M_y$  는  $y$  방향 굽힘 모멘트,  $M_{yx}$  는 비틀림 모멘트 성분이며 다음과 같이 표시 된다.  $B(=EI)$  는 평판의 굽힘 강성을 나타내며 탄성계수  $E$ 와 단면 2차모멘트  $I$ 로 표시된다.

평판의 면의 진동장은 전파성 파동인 굽힘파와 감쇠파의 영향으로 발생된다. 이 경우 근거리 장은 감쇠파와 굽힘파의 영향이 동시에 나타나며, 원거리장에서는 굽힘파만의 영향이 나타나게 된다. 근접장의 영향을 무시한 원거리장에서의 방정식은

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \simeq -k_x^2 w, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \simeq -k_y^2 w \quad (3)$$

로 간략하게 표현할 수 있다. 여기서  $k_x, k_y$  는 파동수  $k$ 의  $x$  성분,  $y$  성분을 의미한다. 따라서  $x, y$  축 방향의 진동인텐시티는 식(1),(2)로부터 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\langle I_x \rangle = B \left\langle -k^2 \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial t} + (k_x^2 + \nu k_y^2) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \right. \\ \left. + (1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial t} \right\rangle \quad (4)$$

$$\langle I_y \rangle = B \left\langle -k^2 \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial t} + (k_y^2 + \nu k_x^2) \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial t} \right. \\ \left. + (1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \right\rangle \quad (5)$$

이 경우 원거리장에서 진동인텐시티에 대한 주 영향이 모멘트와 전단력 성분임을 고려할 수 있다<sup>[1]</sup>. 이는  $\nu=1$ 로 고려함과 같다<sup>[7]</sup>. 식(4),(5)의 진동인텐시티를 구하기 위해서는 변위에 대한 관련도함수 값을 알아야 함을 의미한다. 이러한 도함수 값을 추정하기 위하여 다음과 같은 유한 차분 근사식을 이용할 수 있다. 예로써 진동인텐시티 측정점 ( $x=0, y=0$ )에서 도함수 값을 주위 1,2,3,4 지점의 변

위값을 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial w}{\partial x} \simeq \frac{1}{\Delta} (w_1 - w_2) \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} \simeq \frac{1}{\Delta} (w_3 - w_4) \quad (7)$$

여기서  $\Delta$ 는 측정지점간의 거리를 나타낸다. 유한 차분 근사식(6),(7)을 이용하고, 분산관계 ( $k = (\omega^2 m/B)^{1/4}$ )를 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$I_x = 2 \frac{(Bm)^{1/2} \omega}{\Delta} \langle w_1 \dot{w}_2 \rangle \quad (8)$$

$$I_y = 2 \frac{(Bm)^{1/2} \omega}{\Delta} \langle w_3 \dot{w}_4 \rangle \quad (9)$$

여기서  $m$ 은 단위 길이당 질량,  $w_1, w_3$  는 1번 지점과 3번 지점의 변위, 그리고  $\dot{w}_2, \dot{w}_4$  는 2번 지점과 4번 지점에서의 속도를 나타낸다. 따라서 측정점 주위  $x, y$  축 방향 각각 2지점(Fig.1)에서 변위(혹은 속도)값을 측정함으로써, 진동인텐시티 시간 평균값  $\langle I_x \rangle$  와  $\langle I_y \rangle$ 를 구할 수 있다. 식(8),(9)을 주파수 영역 값을 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[3]</sup>. 주파수  $w$ 에서

$$\langle I_x(x, y, t) \rangle = 2 \frac{\sqrt{Bm} \omega}{\Delta} \text{Im}\{G_{12}\} \quad (10)$$

$$\langle I_y(x, y, t) \rangle = 2 \frac{\sqrt{Bm} \omega}{\Delta} \text{Im}\{G_{34}\} \quad (11)$$

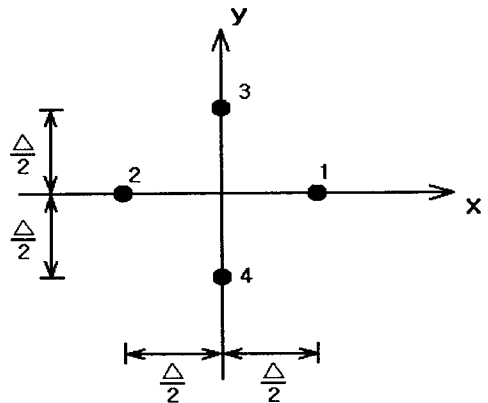


Fig 1. Arrangement of accelerometers on a plate (4points).

여기서  $G_{12}$ 는 1지점과 2지점의 가속도 신호의 크로스 스펙트럼을 나타낸다. 식(10),(11)은 측정점에서 진동

인텐시티를 측정하기 위해서는 측정점 주위 4지점에 가속도계를 위치시켜야 함을 의미한다. 그리고 4 가속도 신호간의 크로스 스펙트럼 밀도를 구함으로써 면의 진동인텐시티를 구할 수 있다.

식(10),(11)과 같이 4 가속도계를 이용하는 경우, 가속도계간 내재하는 위상오차가 존재하게 된다. 이 경우 1개의 가속도계와 주파수 응답함수를 이용하는 방법을 다음과 같이 고려할 수 있다. 식(9)은 각 지점에서의 주파수 응답함수를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\langle I_x(x, y, t) \rangle = 2 \frac{\sqrt{Bm} \omega}{\Delta} \text{Im}\{H_{\beta}^* H_{\alpha} G_{ff}\} \quad (12)$$

$$\langle I_y(x, y, t) \rangle = 2 \frac{\sqrt{Bm} \omega}{\Delta} \text{Im}\{H_{\beta}^* H_{\beta} G_{ff}\} \quad (13)$$

여기서 첨자 \*는 해당 값의 공액 복소수값을 나타내며,  $G_{ff}$ 는 입력 가진력의 자기 스펙트럼을 나타낸다. 식(12),(13)을 사용하는 경우 1개의 가속도계를 이동시키면서 각 지점에서 주파수응답함수를 구함으로써, 평판의 면의 진동인텐시티를 구할 수 있다. 그러므로 가속도계 배열을 이용하는 방법보다 가속도계 간의 위상오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이 경우  $G_{ff}=1$ 를 고려하면 단위가진력에 대한 진동인텐시티 값을 구할 수 있다.

주파수응답함수를 구하기 위해서는 가역성의 원리를 적용할 수 있다. 즉 가진점 위치에 가속도계를 고정시키고, 측정점마다 충격해머로 가진시키면서 주파수응답함수를 구할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 모델

진동 인텐시티 측정을 위한 실험 모델은  $(0.6 \times 0.9 \times 0.003 \text{ m})$  규격을 갖는 연강 평판을 이용하였다. 평판의 경계조건으로 반무한평판을 고려하였으며, 경계단에서 진행파가 다시 반사하지 않고 흡수되도록 하기 위하여 모래를 채운 상자에 평판의 양 끝단이 묻히도록 하였다 (Fig.2).

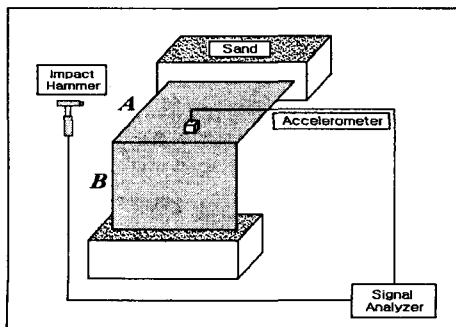


Fig. 2 Overview of the system setup

#### 3.2 실험 방법

연성평판의 면의 진동인텐시티를 측정하기 위하여 주파수응답함수법을 적용하였다. Fig.3의 A평판의 가운데 부분에 면의 진동가속도계(B&K4508)를 고정시키고, 연성평판의 측정점들을 충격해머로 가진하였다. 측정 지점은 49 지점을 고려하고, 각 지점 주위에  $20\text{cm}(=\Delta)$  간격을 두고 위치한 4 지점에서  $x$  및  $y$  방향 가속도에 대한 주파수응답함수를 측정하였다. 관심 주파수 범위는  $1000 - 2000\text{Hz}$  로 하였고, 진동신호에 대한 평균은 5회로 고려하였다.

### 4. 실험 결과

Figs.3-4는 주파수 측정된 연성평판의 면의 진동인텐시티 결과를 각각 보여준다. 이 경우 주파수대역( $1000-1500\text{Hz}$ ) 과 주파수대역( $1000-2000\text{Hz}$ )의 평균값을 각각 고려하였다. 이러한 결과들은 진동원의 위치와 진동에너지 전달 경로를 잘 나타내주고 있다.

Fig.5는 주파수  $1500 \text{ Hz}$ 에서 파워흐름해석(Power Flow Analysis)<sup>[11]</sup>에 의한 연성평판의 면의 진동인텐시티 수치 해석 결과(손실계수  $\eta = 0.001$  고려)를 보여 주고 있다. 이러한 결과는 Fig.3,4의 실험결과와 진동원의 위치와 진동에너지 전달 경로면에서 비교될 수 있다.

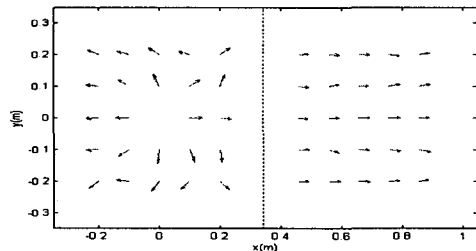


Fig.3 Out-of-plane vibration intensity of coupled-plate at 1000 - 1500 Hz.

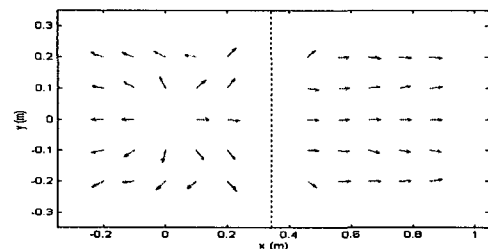


Fig.4 Out-of-plane vibration intensity of coupled-plate at 1000 - 1500 Hz.



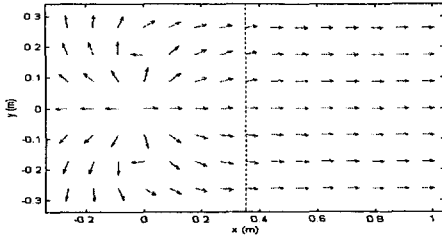


Fig.5 Theoretical resultt forin-plane vibration intensity at 1500 Hz by PFA.

### 5. 결 론

본 연구에서는 연성평판의 면의 진동인텐시티를 측정할 수 있는 실험 기법을 제안하였다. 측정 기법으로서서는 주파수응답함수법을 적용하였으며, 이 방법의 경우 진동인텐시티 측정 지점 주위 4지점에서 2차원 면외가속도 벡터의 두 성분을 각각 고려한 주파수 응답함수를 구함으로써, 진동인텐시티 벡터 값을 구할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 주파수 응답함수법을 이용하여 연성평판의 면외진동인텐시티를 측정하였다. 이러한 측정 결과로부터 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 연성평판의 면외진동인텐시티를 효과적으로 측정할 수 있음을 보였다.

### 후 기

본 연구는 수중음향특화연구센터 연구과제의 일 부분으로서 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

[1] Noiseux, D.U. . 1970, "Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plates", JASA, 47(1), pp. 238-247,

[2] Pavic, G., 1976, "Measurement of Structure Borne wave Intensity", Journal of Sound and Vibration, pp. 221-230,

[3] Verheij, J.W., 1980, "Cross Spectral Density Methods for Measuring Structure Borne Power Flow on Beams and Pipes", JASA, 70(1), pp. 133-139,

[4] Linjama, J., and Lathi,T., 1992, "Estimation of Bending Wave Intensity in Beams Usingthe Frequency Response Technique", Journal of Sound and Vibration, 153(1) pp. 21-36, 1992

[5] 이장우, 홍석윤, 1998, "가역성원리를 이용한 보와 평판의 진동인텐시티 측정", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 409-414,

[6] 김영완, 박병진, 1997 "보에 있어서 진동 인텐시티에 관한 연구," 한국음향학회지, 16(5), pp. 37-42

[7] 이덕영, 박성태, 1997, "2차원 구조물의 진동 인텐시티 계측에 대한 연구" 한국소음진동공학회지, 제7권 제3호, pp. 477-488,

[8] Troshin, A.G. and Sanderson, M.A., 1998, "Structural Energy Flow in a Resiliently Coupled T-Shaped Beam by Wave Intensity and Mobility Approaches," Acoustica, 84, pp. 860-869.

[9] Walsh, S.J. and R.G. White, 2001, "Measurement of Vibrational Power Transmission In Curved Beams," Journal of Sound and Vibration, 241(2), pp. 157-183.

[10] 김창렬, 길현권, 전진숙, 홍석윤, "반무한보의 면내진동인텐시티 측정," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp.1185-1188, 2002.

[11] 최재성, 길현권, 홍석윤, 2001, "입의의 방향 점가진력에 의한 연성 평판 진동의 파워흐름해석", 한국소음진동공학회지, 제13권 제6호, pp.181-192