

## 평판의 면내 진동인텐시티 측정

### Measurements of the In-Plane Vibration Intensity of a Plate

전진숙 \* · 길현권\*\* · 김창렬\*\*\* · 이병철\*\*\*\* · 홍석윤\*\*\*\*\*

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

**Key Words :** In-Plane Vibration Intensity(면내 진동인텐시티), Frequency Response Function (주파수응답함수)

#### ABSTRACT

The objective of this paper is to develop an experimental technique to measure the in-plane vibration intensity of a plate. In order to measure the in-plane vibration intensity at a data point, the frequency response functions for the 2 components of an acceleration vector are measured at each point of 4 points in the neighborhood of the data point. This experimental technique has been implemented to measure the in-plane vibration intensity of a plate. The experimental result has been compared with a theoretical result. It showed that the experimental technique can be effectively used to measure the in-plane vibration intensity of plates.

#### 1. 서 론

기계 구조물의 진동과 진동으로 인하여 발생하는 고체음을 저감시키기 위해서는, 진동원의 위치 및 진동 에너지의 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. 복합구조물의 경우, 연결구조 부위에서의 연성 현상으로 면외진동과 면내진동이 동시에 발생하며, 진동인텐시티 또한 면외진동 뿐만이 아니라 면내진동으로도 발생되어 진다. 그러므로 진동하는 복합구조물에서 진동원의 위치 및 진동 에너지의 전달 경로를 파악하기 위해서는 면외진동 인텐시티 뿐만이 아니라 면내 진동인텐시티를

측정할 필요가 있다.

구조물 진동 인텐시티 측정법에 대한 연구는 국내에서 주로 면외 진동인텐시티 측정법에 대하여 이루어져 왔다.<sup>(1-7)</sup> 면내 진동인텐시티 측정법에 대한 연구<sup>(8,9,10)</sup>는 최근에 국내외에서 시도되고 있으며, 주로 보에서의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 이루어지고 있다. 평판의 면내 진동인텐시티 측정에 대한 필요성은 증가하고 있으나, 관련 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 평판에서의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위한 방법을 제안하였다. 면내 진동인텐시티를 측정하고자 하는 해당 지점 주위의 4 지점에서 2차원적인 면내 가속도 벡터를 구함으로써, 면내 진동인텐시티를 측정하는 방법을 고안하였다. 이 경우 주파수응답함수법을 활용할 수 있는데, 1개의 면내 가속도계를 이용하여, 측정점 주위 4지점에서 차례로 가속도 벡터 2성분에 대한 주파수 응답함수를 구함으로써 면내 진동인텐시티를 구할 수 있다. 이 방법의 경우 측정점 주위에 4개의 3축 방향 가속도계 배열 대신에 1개의 면내 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 경로를 쉽게 파악할 수가 있다. 그리고 가진원의

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

가진력을 고려하는 경우, 임의 가진력에 대한 진동인텐시티 값을 구할 수 있다. 이러한 방법에 의하여 진동인텐시티의 공간 분포를 구함으로써 진동원의 위치와 진동에너지 전달 경로를 효과적으로 파악할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 주파수응답함수법을 적용하여 평판의 면내 진동인텐시티 공간 분포를 측정하였다. 실험결과로부터 본 연구에서 제안된 방법이 평판의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

## 2. 평판의 면내 진동인텐시티 측정 기본 이론

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

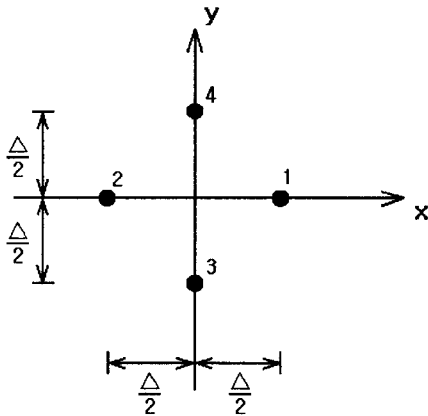


Fig. 1 Arrangement of accelerometers on a plate

$$\begin{aligned} \langle I_x \rangle &= -\rho h \left\langle \left[ C_1^2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial u}{\partial t} + C_s^2 \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{\partial v}{\partial t} \right] \right\rangle \\ \langle I_y \rangle &= -\rho h \left\langle \left[ C_1^2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \nu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial v}{\partial t} + C_s^2 \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{\partial u}{\partial t} \right] \right\rangle \end{aligned} \quad (1), (2)$$

여기서  $C_1, C_s$ 는 종파와 전단파의 전파 속도를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$C_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}, \quad C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (3)$$

$E, \rho, \nu$ 는 탄성계수, 밀도 및 Poisson비를 각각 나타

낸다. 식(1)에 의하여 진동인텐시티 성분들을 구하기 위해서는 측정점  $(x=0, y=0)$ 에서의 변위에 대한 관련도함수 값을 알아야 한다. 이러한 도함수 값은 측정점 주위 4지점(Fig.1)에서 측정된 변위 값으로 다음 식과 같이 근사화할 수 있다.  $\langle I_x \rangle$ 에 대해서는

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &\approx \frac{u_1 - u_2}{\Delta}, \quad \frac{\partial v}{\partial y} \approx \frac{v_3 - v_4}{\Delta} \\ \frac{\partial v}{\partial x} &\approx \frac{v_1 - v_2}{\Delta}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{u_3 - u_4}{\Delta} \\ \frac{\partial u}{\partial t} &\approx \frac{\partial}{\partial t} \frac{u_1 + u_2}{2}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} \approx \frac{\partial}{\partial t} \frac{v_3 + v_4}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

$\langle I_y \rangle$ 에 대해서는

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &\approx \frac{u_3 - u_4}{\Delta}, \quad \frac{\partial v}{\partial y} \approx \frac{v_3 - v_4}{\Delta} \\ \frac{\partial v}{\partial x} &\approx \frac{v_1 - v_2}{\Delta}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{u_3 - u_4}{\Delta} \\ \frac{\partial u}{\partial t} &\approx \frac{\partial}{\partial t} \frac{u_3 + u_4}{2}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} \approx \frac{\partial}{\partial t} \frac{v_3 + v_4}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

을 고려할 수 있다. 여기서  $\Delta$ 는 측정 지점간의 거리를 나타낸다. 식(4), (5)의 관계를 이용하여 식(1), (2)를 표시하고, 주파수 영역 값을 이용한다면,  $x$  성분 및  $y$  성분 진동인텐시티의 시간 평균값  $\langle I_x \rangle$  과  $\langle I_y \rangle$ 는 주파수 영역에서 다음과 같이 표현된다. 주파수  $f$ 에서

$$\begin{aligned} \langle I_x(x, y, f) \rangle &= -\frac{\rho h C_1^2}{\Delta \omega^3} \text{Im} \left[ -2 G_{x_1 x_2} + \nu (G_{x_2 y_3} + G_{y_4 x_1} \right. \\ &\quad \left. + G_{x_1 y_3} + G_{y_4 x_2}) \right] \\ &\quad -\frac{\rho h C_s^2}{\Delta \omega^3} \text{Im} \left[ -2 G_{y_1 y_2} + \nu (G_{y_2 y_3} + G_{x_1 y_1} \right. \\ &\quad \left. + G_{y_1 x_3} + G_{x_2 y_2}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \langle I_y(x, y, f) \rangle &= -\frac{\rho h C_1^2}{\Delta \omega^3} \text{Im} \left[ -2 G_{y_3 y_4} + \nu (G_{x_2 y_3} + G_{y_4 x_1} \right. \\ &\quad \left. - G_{x_1 y_3} - G_{y_4 x_2}) \right] \\ &\quad -\frac{\rho h C_s^2}{\Delta \omega^3} \text{Im} \left[ -2 G_{x_3 x_4} + \nu (G_{y_2 x_3} + G_{x_4 y_1} \right. \\ &\quad \left. - G_{y_1 x_3} - G_{x_4 y_1}) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $G_{x_2 y_3}$ 는 지점 2에서의  $x$  방향 가속도 신호

$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ 와 지점 3에서의  $y$  방향 가속도 신호  $\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$  간의

한쪽면 크로스스펙트럼 밀도를 나타낸다. 식(6)와 (7)은 지점에서의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 주위 4지점 각 지점에  $x$  및  $y$  방향 면내 진동 측정용 가속도계 (혹은 3축 방향 가속도계)를 위치시켜야 함을 의미한다. 그리고 4지점에서 측정된  $x$  및  $y$  방향을 고려한 8개의 면내 진동가속도 신호간의 크로스스펙트럼 밀도로부터 면내 진동인텐시티를 구할 수 있음을 의미한다.

주파수 응답함수를 이용하면 1개의 가속도계를 이용할 수 있고, 이러한 아이디어를 이용하여 면내 진동인텐시티를 측정할 수 있는 방법을 다음과 같이 고려할 수 있다. 식(6)과 (7)은 각 지점에서의 주파수응답함수를 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle I_x(x, y, f) \rangle = & -\frac{\rho h C_1^2}{\Delta \omega^3} \text{Im} \left[ \left\{ -2 H_{fx_1}^* H_{fx_2} + \nu (H_{fx_1}^* H_{fy_3} \right. \right. \\ & \left. \left. + H_{fy_1}^* H_{fx_3} + H_{fx_1}^* H_{fy_3} + H_{fy_1}^* H_{fx_3}) \right\} G_{ff} \right] \\ & -\frac{\rho h C_2^2}{\Delta \omega^3} \text{Im} \left[ \left\{ -2 H_{fy_1}^* H_{fy_2} + \nu (H_{fy_1}^* H_{fx_3} \right. \right. \\ & \left. \left. + H_{fx_1}^* H_{fy_3} + H_{fx_1}^* H_{fy_3} + H_{fy_1}^* H_{fx_3}) \right\} G_{ff} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \langle I_y(x, y, f) \rangle = & -\frac{\rho h C_1^2}{\Delta \omega^3} \text{Im} \left[ \left\{ -2 H_{fx_1}^* H_{fy_1} + \nu (H_{fx_1}^* H_{fy_2} \right. \right. \\ & \left. \left. + H_{fy_1}^* H_{fx_3} - H_{fx_1}^* H_{fy_3} - H_{fy_1}^* H_{fx_3}) \right\} G_{ff} \right] \\ & -\frac{\rho h C_2^2}{\Delta \omega^3} \text{Im} \left[ \left\{ -2 H_{fx_1}^* H_{fx_2} + \nu (H_{fx_1}^* H_{fx_3} \right. \right. \\ & \left. \left. - H_{fy_1}^* H_{fx_3} + H_{fx_1}^* H_{fy_3} - H_{fx_1}^* H_{fy_3}) \right\} G_{ff} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 첨자 \*는 해당 값의 공액 복소수값을 나타내며,  $G_{ff}$ 는 입력 가진력의 자기 스펙트럼을 나타낸다. 식(8)과 (9)를 사용하는 경우 1개의 가속도계를 이용하여 각 지점에서 주파수응답함수를 구함으로써, 평판의 면내 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.

### 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 세 단이 묻히

도록 하였다 (Fig.2). 평판의 한쪽 경계단의 중심에 가진기(B&K4809)를 수평으로 위치시켜, 면내 진동을 발생시킬 수 있도록 하였다.

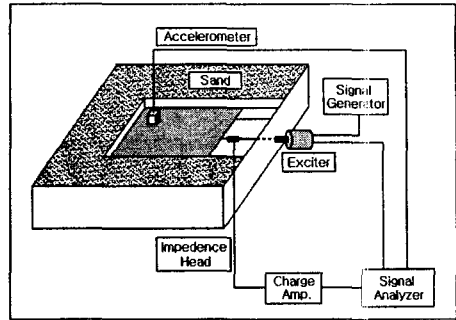


Fig. 2 Overview of the system setup

#### 3.2 실험 방법

평판의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 주파수응답함수법을 적용하였다. 가진기로 평판을 가진시키면서 1개의 면내 진동가속도계(B&K4708)를 이동시키면서 해당 지점에서 주파수응답함수를 구하고 식(8)과 (9)를 적용하였다. 측정 지점은 12 지점을 고려하고, 각 지점 주위에  $30\text{cm}(=\Delta)$  간격을 두고 위치한 4 지점에서  $x$  및  $y$  방향 가속도에 대한 주파수응답함수를 측정하였다. 가진 신호로서는 백색잡음 가진 신호를 이용하였으며, 가진기에 부착된 임피던스헤드(B&K8001)를 이용하여 가진력의 자기스펙트럼을 구하였다. 관심 주파수 범위는  $1000 - 2000\text{Hz}$ 로 하였고, 진동 신호에 대한 평균은  $200\text{s}$ 로 고려하였다.

#### 4. 실험 결과

Figs.3-5는 주파수  $1200\text{Hz}$ ,  $1500\text{Hz}$ ,  $1700\text{Hz}$ 에서 측정된 평판의 면내 진동 인텐시티 결과를 각각 보여준다. 이 경우 각 해당 주파수에서 결과들은 가진기로 가진하면서 1개의 면내진동 가속도계를 이동시키는 주파수응답함수법을 적용한 결과들이다. 진동원의 위치와 전파되어 나가는 진동 파워의 방향을 잘 보여주고 있다.

Fig.6는 주파수  $1200\text{Hz}$ 에서 파워흐름해석(Power Flow Analysis)에 의한 평판의 면내 진동인텐시티 수치 해석 결과(손실계수  $\eta=0.001$  고려)를 보여 주고 있다. 실험 결과(Fig.3)와 비교하는 경우 진동인텐시티 전달 방향면에서 일치하는 결과를 보여준다.

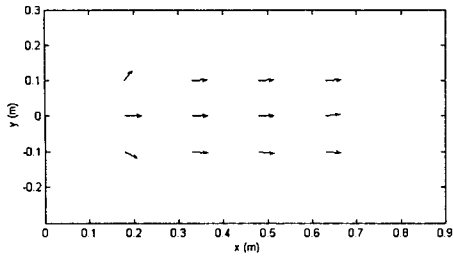


Fig.3 In-plane vibration intensity of a plate at 1200 Hz.

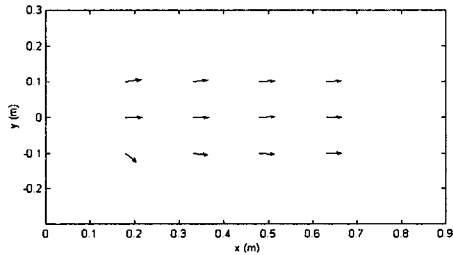


Fig.4 In-plane vibration intensity of a plate at 1500 Hz.

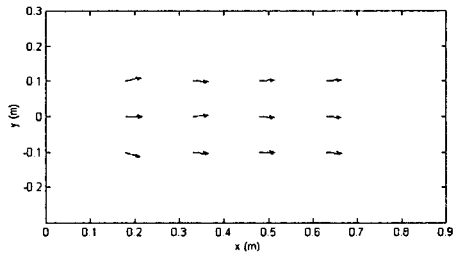


Fig.5 In-plane vibration intensity of a plate at 1700 Hz.

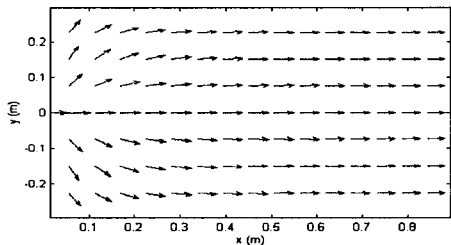


Fig.6 Theoretical result for in-plane vibration intensity at 1200 Hz by PFA.

## 5. 결론

본 연구에서는 평판의 면내 진동인텐시티를 측정할 수 있는 실험 기법을 제안하였다. 측정 기법으로서는 주파수 응답 함수법을 제안하였다. 이 방법의 경우 진동인텐시티 측정 지점 주위 4지점에서 2차원 면내가속도 벡터의 두 성분을 각각 고려한 주파수 응답함수를 구함으로써, 진동인텐시티 벡터 값을 구하게 된다. 본 연구에서는 이러한 주파수 응답함수법을 이용하여 평판의 면내진동인텐시티를 측정하였다. 이러한 측정 결과로부터 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 평판의 면내진동인텐시티를 효과적으로 측정할 수 있음을 보였다.

## 후 기

본 연구는 수중음향특화연구센터 연구과제의 일 부분으로서 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [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 Using the Frequency Response Technique", Journal of Sound and Vibration, 153(1) pp. 21~36, 1992
- [5] 이장우, 홍석운, 1998, "가역성원리를 이용한 보와 평판의 진동인텐시티 측정", 한국소음진동공학회 추계 학술대회논문집, pp. 409~414,
- [6] 김영완, 박병전, 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 면내진동 인텐시티 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