

# 감쇠 단을 갖는 보의 면내 진동인텐시티 측정에 관한 연구

## Study on Measurements of the In-Plane Vibration Intensity In a Beam With a Damped End

김창열\*, 길현권\*\*, 홍석윤\*\*\*  
(Chang-Yeol Kim\*, Hyun-Gwon Kil\*\*, Suk-Yoon Hong\*\*\*)

\*(재)한국건설안전기술원, \*\*수원대학교 기계공학과, \*\*\* 서울대학교 조선해양공학과  
(접수일자: 2005년 8월 11일; 수정일자: 2005년 9월 28일; 채택일자: 2005년 10월 10일)

본 연구에서는 면내 진동하는 감쇠 단을 갖는 보에서 진동파워의 크기와 방향을 나타내는 면내 진동인텐시티를 측정하였다. 보의 면내 진동인텐시티 측정 방법으로서 3가지 다양한 방법을 적용하였다. 이러한 방법들은 2개의 가속도계 선형 배열을 이용하는 가속도계배열법과 하나의 가속도계를 갖고 주파수응답함수를 이용하는 주파수응답함수법 그리고 기준 가속도를 고정시키고 다른 하나의 가속도계를 이용하는 기준가속도계법 들이다. 본 연구에서는 이러한 방법들을 적용하여 보의 진동인텐시티 공간 분포를 측정하여 비교하였으며, 또한 가진 점에서 주어지는 입력 파워와 비교를 통하여 적용 가능성을 확인하였다. 이러한 결과들로부터 보의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 가속도계배열법뿐만 아니라 주파수응답함수법과 기준가속도계법 또한 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

**핵심용어:** 면내 진동인텐시티, 가속도계배열법, 주파수응답함수법, 기준가속도계법

**투고분야:** 구조 음향 및 진동 분야 (11.1)

The objective of this paper is to measure the in-plane vibration intensity of a beam with a damped end that means the magnitude and direction of vibration power. Three experimental methods have been implemented to measure the in-plane vibration intensity over the beam. The first method is the accelerometer array method using two accelerometers. The second method is the frequency response function method using the only one accelerometer. The third method is the reference accelerometer method using a fixed reference accelerometer and another moving accelerometer. Those methods have been used to measure the spatial distribution of in-plane vibration intensity over the beam. The results obtained with those methods have been compared with each other. The results have been compared with an input power. It showed that the frequency response function method and the reference accelerometer method as well as the accelerometer array method can be effectively used to measure the in-plane vibration intensity in beams.

**Keywords:** In-Plane Vibration Intensity, Accelerometer Array Method, Frequency Response Function Method, Reference Accelerometer Method

**ASK subject classification:** Structural Acoustics and Vibration (11.1)

### I. 서론

기계 구조물의 진동과 진동으로 인하여 발생하는 고체 음을 저감시키기 위해서는, 진동원의 위치 및 진동 에너지의 전달 경로를 파악함으로써 효과적으로 대처할 수

있다. 진동원의 위치 및 진동에너지의 전달 경로는 진동 인텐시티를 측정함으로써 파악할 수 있다. 이러한 진동 인텐시티는 구조물내의 단위 폭당 진동 파워의 크기와 방향성을 갖는 벡터량을 나타낸다. 복합구조물의 경우, 연결구조 부위에서의 연성 현상으로 면외 진동과 면내 진동이 동시에 발생하며, 진동인텐시티 또한 면외 진동 뿐만 아니라 면내 진동으로도 발생되어 진다. 그러므로 진동하는 복합구조물에서 진동원의 위치 및 진동 에

책임저자: 길현권 (hgkjl@suwon.ac.kr)  
경기도 화성시 봉담읍 외우리 산 2-2, 수원대학교 기계공학과  
(전화: 031-220-2298; 팩스: 031-220-2494)

너지의 전달 경로를 파악하기 위해서는 면외 진동인텐시티 뿐만이 아니라 면내 진동인텐시티를 측정할 필요가 있다.

구조물 진동 인텐시티 측정법에 대한 연구는 국내외에서 주로 보 및 평판의 면외 진동인텐시티 측정연구[1-10]에 대하여 이루어져 왔다. 면내 진동인텐시티 측정 연구에 대한 필요성은 대두되어 왔으나, 보의 진동에 대한 초기 연구[11-13]에 그치고 있고 평판에 대한 면내 진동인텐시티 측정 연구는 본 논문의 저자들의 일부에 의하여 기초적인 연구[14]가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 복합구조물의 면내진동 측정법의 개발을 위한 첫 단계로서 보의 면내 진동인텐시티 측정법에 대한 연구를 수행하였다. 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 기존의 방법 외에 새로이 다양한 측정 방법들을 적용하고자 하였으며, 향후 이러한 방법들을 확장하여 평판의 면내 진동인텐시티 측정 방법을 개발하기 위한 기본 연구로 수행하였다. 본 연구에서는 2개의 가속도계 선형 배열을 이용하는 가속도계배열법 (Accelerometer Array Method, AAM)을 적용하였다. 이 방법은 구조물의 면외 진동인텐시티를 측정하기 위하여 일반적으로 적용되는 방법이며, 보의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여서도 시도되고 있는 방법이다. 또한 본 연구에서는 보의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 주파수응답함수법 (Frequency Response Function Method, FRM)과 기준가속도계법 (Reference Accelerometer Method, RAM)을 새로이 적용하였다. 주파수응답함수법은 하나의 가속도계를 이동 시키며 주파수응답함수를 측정하여 면내 진동인텐시티를 측정하는 방법이다. 이 방법은 가속도계에 내재하는 위상 정밀도의 차이에 기인하는 가속도계간의 위상 오차 영향을 상대적으로 줄일 수 있는 장점이 있으나, 가진 지점에서 입력 가진력을 측정하여야 되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 기준가속도계법을 적용할 수 있다. 이 방법에서는 기준 가속도계를 고정시키고 다른 하나의 가속도계를 이동시키기 때문에 가속도계간의 위상 오차 영향을 줄일 수 있으며 또한 입력 가진력을 측정할 필요가 없다. 또한 보의 면내 진동인텐시티를 측정할 경우에는 가속도계배열법이나 기준가속도계법의 경우 같은 2개의 가속도를 사용함으로써 가속도계의 질량 효과가 같으나, 기준가속도계법의 개념을 적용하여 보의 면외 진동인텐시티나 평판의 면외 진동인텐시티 측정을 시도하는 경우에는 가속도계 질량 효과의 영향을 줄일 수 있는 장점이 있다. 근거리장에서 보의 면

외진동인텐시티를 측정할 경우에는 4개의 가속도계가 필요하고 평판의 면외 진동인텐시티를 측정할 경우에는 8개의 가속도계가 필요하지만, 기준가속도계법을 적용하면 2개의 가속도계를 이용할 수 있기 때문이다. 또한 평판에서 면내 진동인텐시티를 측정하고자 하는 경우에도 기준가속도계법이 질량 효과를 줄이면서 효과적으로 사용될 수 있으리라 예상된다. 이러한 방법들을 실제 실험 조건에 대하여 적용할 경우, 가속도계배열법은 과도 진동의 경우에도 적용이 가능하지만, 기준가속도계법과 주파수응답법은 정상 상태 진동의 경우에만 적용 가능하다. 정상상태 진동의 경우 기준가속도계법은 효과적으로 사용될 수 있고, 반면에 주파수 응답법은 가진력의 측정이 어려우므로 단위 가진력에 대한 진동인텐시티 값과 진동 파워 흐름의 방향 정보를 알아내기 위하여 사용될 수 있다.

감쇠가 작은 구조물에서는 고유진동수에서 존재하는 정상파의 발생과 잔향 효과가 크게 발생한다. 이러한 경우에 면외 진동인텐시티 측정 면에서는 신호분석기 채널 사이의 아주 작은 위상 오차도 큰 바이어스 오차를 야기하게 된다[9, 15]. 이러한 점은 면내 진동인텐시티 측정의 경우에도 해당되므로, 본 연구에서는 보에서의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위한 다양한 방법들에 대한 적용 연구에 초점을 맞추고, 실험 모델로서는 잔향 효과를 줄일 수 있는 감쇠 단을 갖는 보를 택하였다. 본 연구에서는 가속도계배열법, 기준가속도계법, 주파수응답법들을 적용하여 한쪽 끝에 감쇠 단을 갖는 보의 면내 진동인텐시티 공간 분포를 측정하여 비교하였으며, 또한 가진점에서 주어지는 입력 파워와 비교를 통하여 적용 가능성을 확인하였다. 이러한 결과들로부터 보의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 가속도계배열법뿐만이 아니라 주파수응답함수법과 기준가속도계법 또한 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다. 본 연구에서의 방법들은 감쇠가 큰 보의 경우에 적용이 가능하며, 감쇠가 작아 잔향 효과가 큰 보에 대한 진동인텐시티 측정 연구는 향후 수행되어야 할 주요 연구 과제로 고려될 수 있다.

## II. 면내 진동인텐시티 측정 이론

보에서의 면내 진동인텐시티는 단면적을 통과하는 진동 파워의 크기와 방향을 나타내는 벡터량에 해당한다.

보의 면내 진동과 관련된 수평 방향 변위를  $u$  로 고려하는 경우, 축 방향인  $x$  방향으로 전달되는 진동 인텐시티의 시간 평균값은 다음 식으로 정의된다[16].

$$\langle I_x \rangle = -ES \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial t} \right\rangle \quad (1)$$

여기서  $E, S$  는 탄성계수와 단면적을 나타낸다. 식 (1)에 의하여 진동인텐시티를 구하기 위해서는 측정점 ( $x_0$ )에서의 변위에 대한 관련 도함수 값을 알아야 한다. 이러한 도함수 값은 측정점 주위 2지점(그림 1)에서 측정된 변위 값으로 다음 식과 같이 유한차분법에 의하여 근사화 할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{1}{\Delta} (u_1 - u_2) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{u_1 + u_2}{2} \right) \quad (3)$$

여기서  $\Delta$ 은 가속도계간의 간격 거리에 해당한다. 그러므로 진동인텐시티는 다음 식과 같이 표현된다[16].

$$\langle I_x \rangle \approx \frac{ES}{\Delta} \left\langle \frac{\partial u_1}{\partial t} u_2 \right\rangle \quad (4)$$

$$= \frac{ES}{\Delta} \left\langle \int a_1 dt \int a_2 dt \right\rangle \quad (5)$$

여기서  $a_1, a_2$  는 주위 2지점에서의 가속도 값을 나타낸다. 시간 영역에서의 신호 처리를 주파수 영역에서의 신호 처리로 변환하면[3], 진동인텐시티를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\langle I_x \rangle = \int_0^\infty \frac{ES}{\Delta (2\pi f)^3} \text{Im} \{ G_{12} \} df \quad (6)$$

여기서  $f$ 는 진동주파수를 나타내며,  $\text{Im} \{ G_{12} \}$ 는

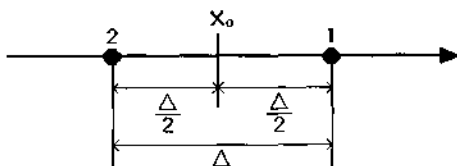


그림 1. 면내 진동인텐시티 측정점( $x_0$ ) 주위의 두 지점  
Fig. 1. Two points around the point ( $x_0$ ) for measurement of in-plane vibration intensity.

가속도  $a_1, a_2$  의 한쪽 면 상호스펙트럼 밀도 (one-sided cross spectral density)의 허수부를 나타낸다. 그러므로 해당 주파수에서의 면내 진동인텐시티는 다음과 같이 표현된다.

$$\langle I_x(f) \rangle = \frac{ES}{\Delta (2\pi f)^3} \text{Im} \{ G_{12} \} \quad (7)$$

식 (7)은 지점  $x_0$ 에서의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 주위 2지점에 가속도를 위치시켜야 함을 의미한다. 그리고 두 가속도 신호간의 상호스펙트럼 밀도로부터 면내 진동인텐시티를 구할 수 있으며, 이러한 방법은 가속도계배열법에 해당한다.

식 (7)과 같이 두 가속도계 신호를 동시에 측정하는 경우 두 가속도계 자체의 위상 정밀도에 기인한 두 신호사이의 위상 오차가 존재할 수 있다. 이 경우 1개의 가속도계와 주파수응답함수를 이용하는 방법을 다음과 같이 고려할 수 있다. 식 (7)은 각 지점에서의 주파수응답함수  $H_{F1}, H_{F2}$  를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\langle I_x(f) \rangle = \frac{ES}{\Delta (2\pi f)^3} \text{Im} \{ H_{F1}^* H_{F2} G_{FF} \} \quad (8)$$

여기서 첨자 \*는 해당 값의 공액 복소수값을 나타내며,  $G_{FF}$ 는 입력 가진력의 자기스펙트럼을 나타낸다. 식 (8)을 사용하는 경우 1개의 가속도계를 이용하여 각 지점에서 주파수응답함수를 구함으로써, 면내 진동인텐시티를 구할 수 있다. 이러한 방법은 주파수응답함수법에 해당한다. 그러므로 2개의 가속도계를 이용하는 방법보다 가속도계 자체간에 내재하는 위상오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 가진력이 정상상태로 주어져야 하고 입력 가진력을 측정하여야하는 어려움이 남게 된다.

식 (8)은 기준가속도계의 신호를 이용하는 경우 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\langle I_x(f) \rangle = \frac{ES}{\Delta (2\pi f)^3} \text{Im} \left\{ G_{r1}^* G_{r2} \frac{1}{G_{rr}} \right\} \quad (9)$$

여기서  $G_{r1}$ 과  $G_{r2}$ 는 기준가속도계의 신호와 1번 그리고 2번 위치에서의 가속도 신호간의 한쪽 면 상호스펙트럼을 나타낸다.  $G_{rr}$ 은 기준가속도 신호의 자기스

팩트럼을 나타낸다. 이 방법의 경우 기준가속도계를 임의 위치에 부착하고, 1개의 가속도계를 이용하여 각 지점에서 가속도와 기준가속도계 신호간의 상호스펙트럼을 구함으로써, 면내 진동인텐시티를 구할 수 있다. 이러한 방법은 기준가속도계법에 해당한다. 그러므로 가속도계 자체간에 내재하는 위상오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이 방법의 경우에도 가진력이 정상상태로 주어지는 경우에 가능하지만, 주파수응답함수법에서 필요한 입력 가진력은 측정할 필요가 없게 된다.

실제 진동인텐시티 값은 실제 진동인텐시티 값에 가속도계 배열을 통하여 진동인텐시티를 구하는 유한차분오차를 고려하여 다음과 같이 보정하게 된다[5,6].

$$\langle I_r(f) \rangle_{actual} = \langle I_r(f) \rangle_{measured} \frac{k\Delta}{\sin(k\Delta)} \quad (10)$$

여기서  $k$ 는 주파수  $f$ 에서 전파하는 종파의 파수를 나타낸다.

주파수  $f$ 에서 가진지점으로부터 입력되는 입력 파워의 시간 평균 값은 다음과 같이 가진지점에서의 가진력  $F$ 와 속도  $v$ 의 한쪽 면 상호스펙트럼  $G_{Fv}$  혹은 가속도  $a$ 와의 한쪽 면 상호스펙트럼  $G_{Fa}$ 를 측정함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\langle P(f) \rangle = \text{Re}\{G_{Fv}\} = \text{Re}\left\{\frac{1}{i2\pi f} G_{Fa}\right\} \quad (11)$$

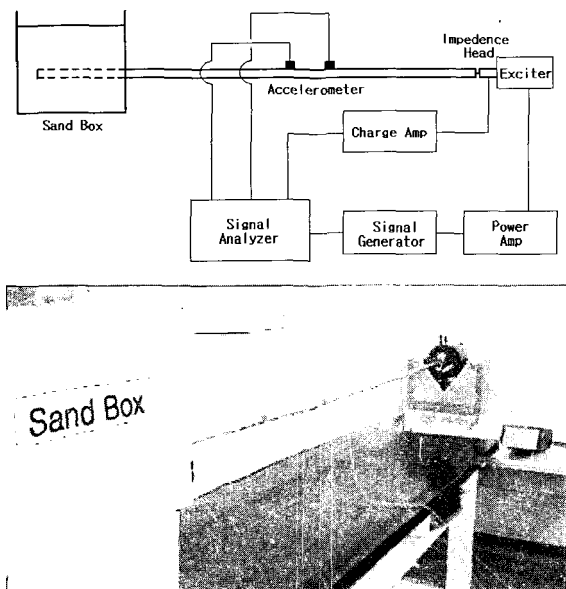


그림 2. 실험 장치 배열  
Fig. 2. Overview of the measurement set-up.

### III. 실험 및 고찰

#### 3.1. 실험 모델

진동인텐시티 측정을 위한 실험 모델은 길이 2.5m, 폭 0.03m, 두께 0.008m 규격을 갖는 알루미늄 보를 이용하였다. 보의 한쪽 끝단에는 가진기 (B&K4809)를 수평으로 위치시켜, 면내 진동을 발생시킬 수 있도록 하였다 (그림 2). 또한 가진기 끝단에는 임피던스헤드 (B&K8001)를 부착하여 입력파위를 측정할 수 있도록 하였다. 보의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위한 가속도계로서는 면내진동 측정용 가속도계 (B&K 4507, 질량 4.8g)를 사용하였다.

보의 다른 쪽 끝단에서는 진행파의 반사를 가능한 줄이기 위하여 모래를 채운 상자에 보의 끝단이 0.4m 묻히도록 하였다 (그림 2). 보의 면외 진동에 있어서 끝단에 대한 모래의 효과는 문헌[6,17]에 알려져 있으나, 면내 진동에 있어 끝단에 대한 모래의 효과는 알려져 있지 않아서, 반사계수를 측정하여 다음과 같이 검토하였다. 보의 면내 진동은 종파인 진행파와 반사파의 영향으로 표시할 수 있기 때문에[18] 보의 2지점에서 진동을 측정하여 진행파의 크기에 대한 반사파의 크기 비인 반사계수를 측정할 수 있다. 보의 모래상자 끝단으로부터 45cm인 지점에서 간격 30cm(=Δ) 간격을 두고 위치한 두 지점에서 동시에 측정한 면내 진동 데이터를 이용하여 반사계수를 구하였다. 그림 3은 반사계수에 대한 측정 결과를 보여 준다. 주파수 700~3000 Hz 영역에서 반사계수 0.4~0.6범위내의 값을 보여 주고 있어서, 반사파의 영향을 무시할 수 없음을 알 수 있다.

#### 3.2. 실험 방법

면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여, 본 실험에서

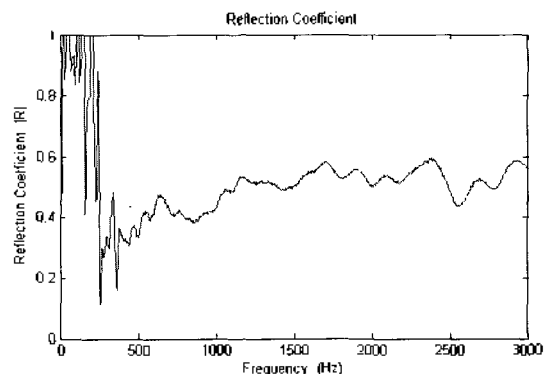


그림 3. 보에서의 종파에 대한 반사계수  
Fig. 3. Reflection coefficient of longitudinal wave in a beam.

채택한 가속도계간의 간격은  $\Delta = 30\text{ cm}$  이다. 이러한  $\Delta$ 값은 해당 주파수에서 전파하는 종파의 파장을 고려하여 설정할 수 있으며, 면외진동 인텐시티 측정의 경우 적용되는  $0.25 \leq k\Delta \leq 1.0$  범위를 면내 진동인텐시티 측정의 경우에도 고려할 수 있다[6]. 여기서  $k(=2\pi/\lambda)$  는 종파의 파수를 나타낸다. 이러한 범위는 주파수 범위  $680\text{ Hz} \leq f \leq 2700\text{ Hz}$ 에 해당하게 된다. 그리고 본 실험에서 고려한 종파의 파장  $\lambda$  는 주파수  $1000\text{ Hz}$  와  $2000\text{ Hz}$  에서 각각  $5.1\text{ m}$  와  $2.6\text{ m}$  에 해당한다.

본 실험에서는 끝단에 위치한 가진기에 의하여 면내 진동을 발생시키게 된다. 이 경우 가진기 부착 방향 오차, 보의 자중에 의한 처짐 등에 의하여 면외 진동 또한 발생하게 된다. 이러한 면외 진동 발생을 줄이기 위하여 가진기 부착 방향을 최대한 조절하였으며, 보의 중앙에는 고무줄을 이용하여 가능한 처짐을 줄이도록 하였다. 이 경우 고무줄 방향은 보의 면내 진동과는 수직 방향으로 설치되어 면내 진동에는 거의 영향을 주지 않음을 상대 비교를 통하여 실험적으로 확인하였다. 또한 실험적으로 면내 및 면외 진동을 측정하여 본 결과, 면내 진동에 비하여 면외 진동은 보의 위치에 따라 다르지만 같은 위치에서 10 dB 이상 차이만큼 작게 발생하였다. 그러므로 면외 진동에 의한 영향 즉 보의 중심축과 표면에서의 면내 진동의 차이는 무시할 수 있다고 가정하였다. 물론 면내 가진력 뿐만이 아니라 면외 가진력이 작용하여 면외 진동을 무시할 수 없는 보의 경우, 혹은 복합구조물에서는 면내 및 면외 진동을 모두 고려하여 진동인텐시티 측정을 하여야 한다. 이러한 경우는 실 구조물에서 일반적으로 발생하는 현상이며, 면외 및 면내 진동을 모두 고려한 진동인텐시티 측정 연구는 향후 수행되어야 할 주요한 연구 주제에 해당한다.

첫번째 실험에서는 보에서 가진기로부터  $0.6\text{ m}$  떨어진 지점( $x = 0.6\text{ m}$ )에서 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 가속도계배열법(식(7))과 기준가속도계법(식(9))을 적용하였다. 이 경우 기준가속도는 임의 위치( $x = 0.3\text{ m}$ )에 부착하였다. 측정된 면내 진동인텐시티를 입력파워와 비교하기 위하여 가진기 끝단에 부착된 임피던스헤드를 이용하여 입력파워(식(11))를 측정하였다.

두 번째 실험에서는 면내 진동인텐시티의 공간 분포를 측정하기 위하여 2개의 가속도계 배열을 이동시키는 가속도계배열법(식(7))을 적용하였다. 면내 진동인텐시티를 보의 17지점에서 측정하였으며, 각 지점 주위에

$30\text{ cm}(=\Delta)$  간격을 두고 위치한 두 지점에서 두 가속도계 신호간의 상호스펙트럼을 구하였다. 보의 가진은 랜덤잡음을 이용하여 가진하였으며, 진동 신호에 대한 평균은 200회로 고려하였다.

세 번째 실험에서는 면내 진동인텐시티의 공간 분포를 측정하기 위하여 1개의 가속도계를 이동시키는 주파수 응답함수법(식(8))을 적용하였다. 이 경우에도 면내 진동인텐시티는 보의 17지점에서 측정하였으며, 각 지점 주위에  $30\text{ cm}(=\Delta)$  간격을 두고 위치한 두 지점에서 주파수응답함수를 측정하였다. 이 경우에도 랜덤잡음 가진 신호를 이용하였으며, 가진기에 부착된 임피던스헤드를 이용하여 가진력의 자기스펙트럼을 구하였다.

네 번째 실험에서는 면내 진동인텐시티의 공간 분포를 측정하기 위하여 기준가속도계법(식(9))을 이용하였다. 기준가속도를 임의 위치( $x = 0.3\text{ m}$ )에 부착하고 1개

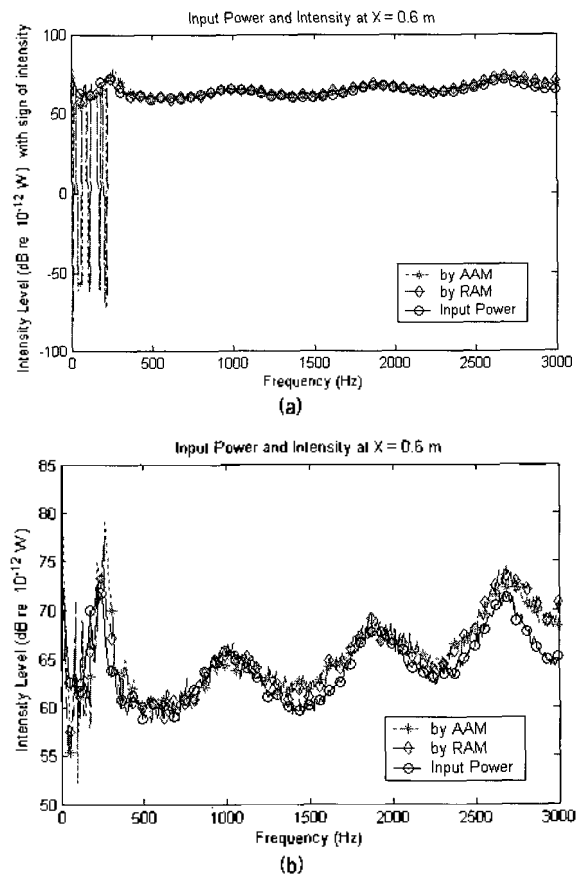


그림 4.  $x = 0.6\text{ m}$  지점에서 측정한 면내 진동인텐시티와 가진지점에서의 입력 파워와의 비교

(a) 면내 진동인텐시티와 입력파워(부호 고려), (b) 면내 진동인텐시티와 입력 파워(절대 값 고려). (가속도계배열법(AAM)과 기준가속도계법(RAM) 적용)  
 Fig. 4. Comparison of the input power with the in-plane vibration intensity measured at  $x = 0.6\text{ m}$  (a) in-plane vibration intensity and input power (with sign), (b) in-plane vibration intensity and input power (absolute value), (application of accelerometer array method(AAM) and reference accelerometer method (RAM)).

의 가속도계를 이동시키면서 보의 17지점에서 측정하였으며, 각 지점 주위에  $30\text{cm}(=\Delta)$  간격을 두고 위치한 두 지점에서 기준가속도계와의 신호 크로스스펙트럼을 측정하였다. 이 경우에도 랜덤잡음 가진 신호를 이용하였다.

### 3.3. 실험 결과 및 검토

그림 4는 측정된 면내 진동인텐시티 값의 검증을 위하여  $x = 0.6\text{m}$  지점에서 측정된 면내 진동 인텐시티와 가진지점에서 입력되는 입력파워와 비교한 결과이다. 이 경우 면내 진동 인텐시티는 가속도계배열법과 기준가속도계법을 적용하여 측정된 결과이다.  $0.6\text{m}$ 는 주파수

$1000\text{Hz}$ 에서 종파 파장의 0.12배에 해당하는 거리이다. 측정된 면내 진동인텐시티의 시간 평균값의 부호는 진동에너지 흐름의 방향을 나타내는 중요한 정보이다. 그림 4(a)에서는 면내 진동인텐시티 값을 dB로 나타낼 경우, 진동에너지 흐름의 방향을 함께 나타내기 위하여 면내 진동인텐시티의 선형 값이 (+)값인 경우에는 (+) dB 값으로, (-)값일 경우에는 (-) dB 값으로 표현하였다. 본 실험에서 가진기는 보의 한쪽 끝단을 원점으로 하여 감쇠단 쪽을 (+)로 설정하였기 때문에, 진동에너지 흐름은 (+) 방향으로 전파되게 된다. 그림 4(a)는  $250\text{Hz}$  이하의 저주파수 영역에서는 주파수에 따라서 (-) 값의 면내 진동인텐시티를 보여 주고 있다. 주파수

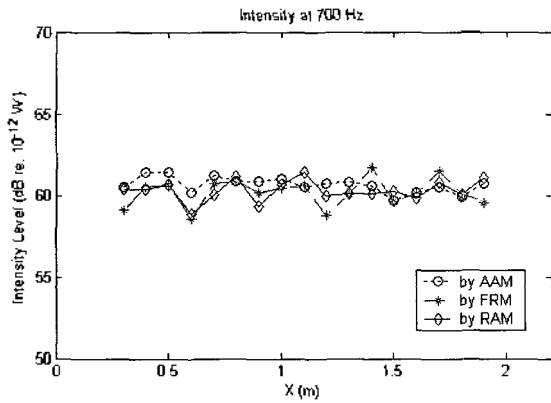


그림 5. 700 Hz에서 보의 길이에 따른 면내 진동인텐시티 측정 값 (가속도계배열법(AAM), 주파수응답함수법(FRM)과 기준가속도계법(RAM) 적용)

Fig. 5. In-plane vibration intensity measured over the beam at 700 Hz (application of accelerometer array method (AAM), frequency response function method (FRM) and reference accelerometer method (RAM)).

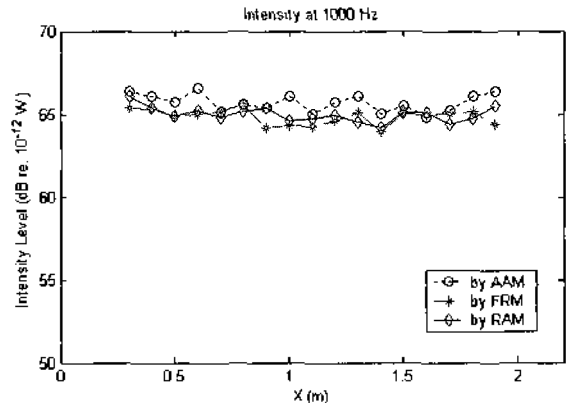


그림 6. 1000 Hz에서 보의 길이에 따른 면내 진동인텐시티 측정 값 (가속도계배열법(AAM), 주파수응답함수법(FRM)과 기준가속도계법(RAM) 적용)

Fig. 6. In-plane vibration intensity measured over the beam at 1000 Hz (application of accelerometer array method (AAM), frequency response function method (FRM) and reference accelerometer method (RAM)).

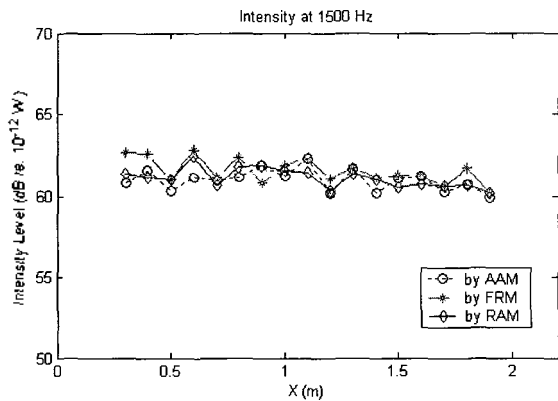


그림 7. 1500 Hz에서 보의 길이에 따른 면내 진동인텐시티 측정 값 (가속도계배열법(AAM), 주파수응답함수법(FRM)과 기준가속도계법(RAM) 적용)

Fig. 7. In-plane vibration intensity measured over the beam at 1500 Hz (application of accelerometer array method (AAM), frequency response function method (FRM) and reference accelerometer method (RAM)).

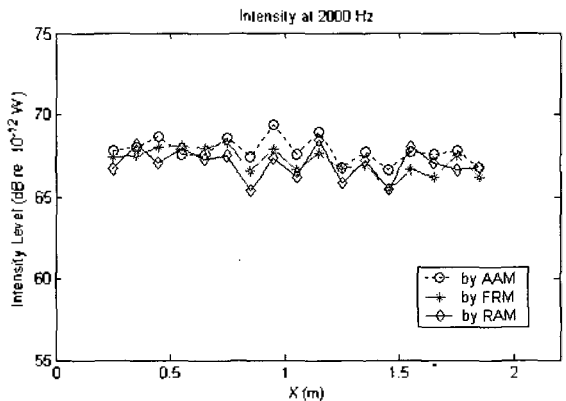


그림 8. 2000 Hz에서 보의 길이에 따른 면내 진동인텐시티 측정 값 (가속도계배열법(AAM), 주파수응답함수법(FRM)과 기준가속도계법(RAM) 적용)

Fig. 8. In-plane vibration intensity measured over the beam at 2000 Hz (application of accelerometer array method (AAM), frequency response function method (FRM) and reference accelerometer method (RAM)).

250 Hz에서의 종파의 파장은 20.5 m에 해당한다. 이러한 경우 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 간격  $\Delta = 0.3 m$ 로 배치된 두 가속도계에서 측정되는 신호의 위상 차이는 거의 없게 된다. 그러므로 신호 노이즈, 실험 오차 혹은 두 가속도계간의 내재된 위상 오차가 면내 진동인텐시티의 부호에 영향을 상대적으로 크게 주게 되어서 (-) 값의 면내 진동인텐시티 값을 나타내게 된 것으로 추정된다. 그림 4 (b)는 그림 4 (a)에서 주어진 진동파워와 면내 진동인텐시티 값에 대한 절대값을 취하여 비교하고 있다. 면내 진동인텐시티 값은 주파수 500 ~ 2700 Hz 영역을 고려 할 경우, 1400 Hz 부근에서 3 dB 정도의 오차를 그리고 나머지 영역에서는 2 dB 오차 범위 내에서 진동파워 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 5~9는 측정 주파수 700, 1000, 1500, 2000, 2300 Hz에서 측정한 면내 진동인텐시티 결과를 각각 보여준다. 가속도계배열법 (AAM), 주파수응답함수법 (FRM) 과 기준가속도계법 (RAM)에 의한 결과를 비교하는 경우, 2000 Hz와 2300 Hz에서 17지점 중 각각 한 지점에서만 약 3 dB의 차이를 보이고, 다른 주파수에서 모든 공간 지점에 걸쳐 2 dB 이하의 오차 범위에서 일치하는 결과를 보여준다. 이러한 오차의 원인은 가속도계를 부착하는 위치 오차에 기인하는 것으로 추정된다. 즉 각 방법을 적용하여 실험을 하는 경우, 보의 길이에 걸쳐 가속도계를 총 34지점 (17 측정 지점 주위 두 지점 고려) 에 차례로 위치시켜가면서 면내 진동인텐시티의 공간 분포를 측정하는데, 이러한 과정에서 가속도계 위치 선정과 관련된 실험 오차로 추정된다.

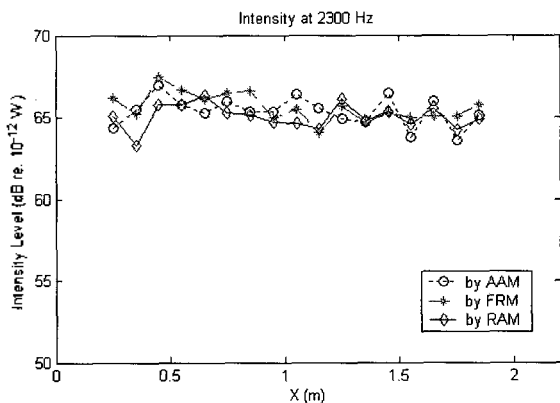


그림 9. 2300 Hz에서 보의 길이)에 따른 면내 진동인텐시티 측정 값 (가속도계배열법(AAM), 주파수응답함수법(FRM)과 기준가속도계법 (RAM) 적용)

Fig. 9. In-plane vibration intensity measured over the beam at 2300 Hz (application of accelerometer array method (AAM), frequency response function method (FRM) and reference accelerometer method (RAM)).

### IV. 결론

본 연구에서는 감쇠 단을 갖는 보의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 3가지 다양한 방법을 적용하였다. 이러한 방법들은 2개의 가속도계 선형 배열을 이용하는 가속도계배열법과 하나의 가속도계를 갖고 주파수응답함수를 이용하는 주파수응답함수법 그리고 기준 가속도를 고정시키고 다른 하나의 가속도계를 이용하는 기준가속도계법 들이다. 이러한 방법들을 적용하여 감쇠 단을 갖는 보의 면내 진동인텐시티 공간 분포를 측정하여 비교하였으며, 또한 면내진동인텐시티와 가진점에서 주어지는 입력 파워와 비교를 통하여 이러한 방법들의 적용가능성을 확인하였다. 이러한 결과들로부터 보의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 가속도계배열법뿐만 아니라 주파수응답함수법과 기준가속도계법 또한 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 수중음향특화연구센터 연구과제의 일부분으로서 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- Noiseux, D.U., "Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plates", JASA, 47 (1), 238-247, 1970.
- Pavic, G., "Measurement of Structure Borne wave Intensity", Journal of Sound and Vibration, 221-230, 1976.
- Verheij, J.W., "Cross Spectral Density Methods for Measuring Structure Borne Power Flow on Beams and Pipes", JASA, 70 (1), 133-139, 1980.
- Linjama, J., and Lathi, T., "Estimation of Bending Wave Intensity in Beams Using the Frequency Response Technique", Journal of Sound and Vibration, 153 (1) 21-36, 1992.
- 김홍식, J. Tichy, "Structural Intensity 법을 이용한 구조체의 진동전달량 측정," 한국소음진동공학회지, 4 (2), 231-238, 1994.
- 이덕영, 박성태, "반무한보의 진동 인텐시티 계측에 대한 연구," 한국소음진동공학회지, 7 (1), 43-53, 1997.
- 김영환, 박병전, "보에 있어서 진동 인텐시티에 관한 연구," 한국 음향학회지, 16 (5), 37-42, 1997.
- 이덕영, 박성태, "2차원 구조물의 진동 인텐시티 계측에 대한 연구", 한국소음진동공학회지, 7 (3), 477-488, 1997.

9. 이덕영, "진동인텐시티계측에 관한 연구," (박사학위 논문, 울산대학교, 1996).
10. 이장우, 홍석운, "가역성원리를 이용한 보와 평판의 진동인텐시티 측정," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 409-414, 1998.
11. T. E. McDevitt, "Two-Channel Laser vibrometer techniques for Vibrational intensity measurements part 2: Longitudinal Intensity," J. of Vibration and Acoustics, **116**, 100-104, 1994.
12. Walsh, S.J. and R.G. White, 2001, "Measurement of Vibrational Power Transmission in Curved Beams," Journal of Sound and Vibration, **241** (2), 157-183.
13. 김창열, 김현권, 전진속, 홍석운, "반무한보의 면내진동인텐시티 측정," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, 1185-1188, 2002.
14. 전진속, 김현권, 이병철, 홍석운, "평판의 면내진동인텐시티 측정," 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 816-820, 2003.
15. D. Quinlan, "Measurement of Complex Intensity and Potential Energy Density on Structural bending Waves," M.S. Thesis, The Pennsylvania State University, 1985.
16. T. E. McDevitt, "Development and Evaluation of Laser Doppler Techniques for Measurements of Flexural and Longitudinal Structural Intensity," Ph.D. Thesis, the Pennsylvania State University, State College, PA, 1991.
17. L. Cremer, M. Heckl, *Structure-Borne Sound*, (2ed. Springer-Verlag Berlin, 1988).
18. L.E. Kinsler, A. R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, (4ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000).

---

## 저자 약력

---

### • 김 창 열 (Chang-Yeol Kim)



2001년 2월: 수원대학교 기계공학과(공학사)  
 2003년 2월: 수원대학교 기계공학과(공학석사)  
 2003년 2월~현재: (재)한국건설안전기술원 환경진단팀  
 ※주관상분야: 환경, 건설 및 기계 소음 진동 측정 분석 및 해석

### • 김 현 권 (Hyun-Gwon Kil)

한국음향학회지 제17권 6호 (1998) 참조.

### • 홍 석 운 (Suk-Yoon Hong)

한국음향학회지 제17권 6호 (1998) 참조.