

# 기준 가속도계를 이용한 보의 면내 진동인텐시티 측정 Measurements of the In-Plane Vibration Intensity of a Beam Using an Reference Accelerometer

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

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

Key Words: In-Plane Vibration Intensity(면내 진동인텐시티), Reference Accelerometer(기준가속도계)

## ABSTRACT

In this paper, an experimental method using a reference accelerometer has been developed to measure the in-plane vibration intensity of a beam. It has the advantages of reducing accelerometer phase error comparing with the cross spectral intensity measurement technique using an accelerometer array. It needs no measurement of the input force required in the frequency response method using the only one accelerometer. This method has been used to measure the in-plane vibration intensity over the beam. The result has been compared with an input power and the vibration intensity obtained with other methods. It showed that the present experimental method can be effectively used to measure the structural in-plane vibration intensity.

## 1. 서론

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 국내외

에서 주로 면외 진동인텐시티 측정법에 대하여 이루어져 왔다<sup>(1,7)</sup>. 면내 진동인텐시티 측정법에 대한 연구<sup>(8,9)</sup>는 최근에 국외에서 시도되고 있으며, 주로 보에서의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 이루어지고 있다. 그리고 적용 방법으로는 면외 진동인텐시티를 측정하기 위하여 사용하였던 크로스스펙트럼법(Cross Spectrum Method)을 활용하고 있다.

본 연구의 저자들은 이전 연구<sup>(10)</sup>에서 반무한보의 면내진동 인텐시티를 측정하기 위하여 주파수응답함수법(Frequency Response Method)을 적용하였다. 주파수응답함수법에서는 1개의 가속도를 이용하여, 측정점 주위 2지점에서 차례로 주파수 응답함수를 구함으로써 면내진동 인텐시티를 구하는 방법이다. 이 방법의 경우 측정점 주위에 2개의 가속도계 배열을 사용하는 크로스스펙트럼법에 비하여, 두 가속도계간의 상대 위상오차를 줄일 수 있는 장점이 있게 된다. 그러나 주파수 응답함수를 이용하기 때문에 가진력을 알아야 하는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 기준가속도계법(Reference Accelerometer Method)을 제안하였다. 이 방법에서는 기준 가속도계를 임의 위치에 고정시키고 다른 하나의 가속도계를 이동시키면서, 두 가속도계 신호간의 크로스스펙트럼을 이용하여 진동

\* 수원대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : bobo96@hanmail.net  
Tel : (031) 225-8556, Fax : (031) 220-2494  
\*\* 수원대학교 기계공학과  
\*\*\* 수원대학교 기계공학과 대학원  
\*\*\*\* 서울대학교 조선해양공학과

인텐시티를 측정하게 된다. 그러므로 가속도계간의 위상 오차 영향을 줄일 수 있는 장점이 있으며, 또한 가진력을 구할 필요가 없다.

본 연구에서는 기준가속도계법과 기존 방법들을 이용하여 보의 진동 인텐시티 공간 분포를 측정하여 비교하였으며, 가진점에서의 입력 파워 결과와도 비교하였다. 이러한 결과들로부터 보의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 기준 가속도계를 이용하는 방법이 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

## 2. 면내 진동인텐시티 측정 기본 이론

보에서의 면내 진동인텐시티는 단위 폭을 통과하는 진동 파워의 크기와 방향을 나타내는 벡터량에 해당한다. 보의 면내진동과 관련된 수평 방향 변위를  $u$ 로 고려하는 경우, 축 방향인  $x$ 방향으로 전달되는 진동 인텐시티의 시간 평균값은 다음 식으로 정의된다.



Fig 1. Arrangement of accelerometers of a beam.

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

식(1)에 의하여 진동인텐시티를 구하기 위해서는 측정점 ( $x_0$ )에서의 변위에 대한 관련 도함수 값을 알아야 한다. 이러한 도함수 값은 측정점 주위 2지점 (Fig.1)에서 측정된 변위 값으로 다음 식과 같이 근사화 할 수 있다.

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

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

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

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

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

여기서  $a_1, a_2$  는 주위 2지점에서의 가속도 값을 나타낸다. 시간 영역에서의 신호 처리를 주파수 영역에서의 신호 처리로 변환하면<sup>(3)</sup>, 진동인텐시티를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\langle I_x \rangle = \frac{ES}{\Delta (2\pi f)^3} \int_0^\infty \text{Im} \{G(a_1, a_2)\} df \quad (6)$$

여기서  $f$ 는 진동주파수를 나타내며,  $\text{Im} G(a_1, a_2)$ 는 가속도  $a_1, a_2$ 의 한쪽면 크로스스펙트럼 밀도 (one-sided cross spectral density)의 허수부를 나타낸다.

식(6)은 지점  $x_0$ 에서의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 주위 2지점에 가속도를 위치시켜야 함을 의미한다. 그리고 두 가속도 신호간의 크로스스펙트럼 밀도로부터 면내 진동인텐시티를 구할 수 있다.

식(6)과 같이 두 가속도계 신호를 동시에 측정하는 경우 두 신호사이의 위상 오차가 존재하게 된다. 이 경우 1개의 가속도계와 주파수 응답함수를 이용하여 방법을 다음과 같이 고려할 수 있다. 식(6)은 각 지점에서의 주파수응답함수  $H_1, H_2$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\langle I_x \rangle = \frac{ES}{\Delta (2\pi f)^3} \int_0^\infty \text{Im} \{H_1^* H_2 G_{ff}\} df \quad (7)$$

여기서 첨자 \*는 해당 값의 공액 복소수값을 나타내며,  $G_{ff}$ 는 입력 가진력의 자기스펙트럼을 나타낸다. 식(7)을 사용하는 경우 1개의 가속도계를 이용하여 각 지점에서 주파수응답함수를 구함으로써, 면내 진동인텐시티를 구할 수 있다. 그러므로 2개의 가속도계를 이용하는 방법보다 가속도계 간의 위상오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 입력 가진력을 측정하여야하는 어려움이 남게 된다.

식(6)은 기준가속도계의 신호를 이용하는 경우 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\langle I_x \rangle = \frac{ES}{\Delta (2\pi f)^3} \int_0^\infty \text{Im} \left\{ G_{r1}^* G_{r2} \frac{1}{G_{rr}} \right\} df \quad (8)$$

여기서  $G_{r1}$ 과  $G_{r2}$ 는 기준가속도계의 신호와 1번 그리고 2번 위치에서의 가속도 신호간의 크로스스펙트럼을 나타낸다.  $G_{rr}$ 은 기준가속도 신호의 자기 스펙트럼을 나타낸다. 이 방법의 경우 기준가속도계를 임의 위치에 부착하고, 1개의 가속도계를 이용하여 각 지점에서 가속도와 기준가속도계 신호간의 크로스스펙트럼을 구함으로써, 면내 진동인텐시티를 구할 수 있다. 2개의 가속도계를 이용하는 방법보다

가속도계 간의 위상오차를 줄일 수 있으며, 입력 가진력을 측정할 필요도 없게 된다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 모델

진동 인텐시티 측정을 위한 실험 모델은 (2.2 × 0.3 × 0.008 m) 규격을 갖는 알루미늄 보를 이용하였다. 보의 경계조건으로 반무한보를 고려하였으며, 감쇠단에서 진행파가 다시 반사하지 않고 흡수되도록 하기 위하여 모래를 채운 상자에 보의 한쪽 끝단이 묻히도록 하였다 (Fig.2). 보의 다른 끝단에는 가진기 (B&K4809)를 수평으로 위치시켜, 면내진동을 발생시킬 수 있도록 하였다.

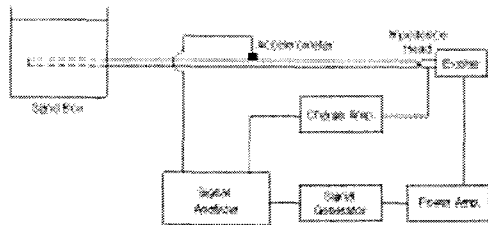


Fig. 2 Overview of the system setup

#### 3.2 실험 방법

첫번째 실험에서는 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 2개 가속도 배열을 이용하는 크로스스펙트럼 밀도법(식(6))을 적용하였다. 면내 진동인텐시티는 보의 33지점에서 측정하였으며, 각 지점 주위에 30cm(= Δ) 간격을 두고 설치한 2개의 면내진동 측정용 가속도계(B&K 4708)의 진동 신호를 이용하였다. 보의 가진은 백색잡음을 이용하여 가진하였으며, 관심 주파수 범위는 0 - 2500Hz 로 하였고, 진동 신호에 대한 평균은 200회로 고려하였다..

두 번째 실험에서는 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 1개의 가속도계를 이동시키는 주파수응답 함수법(식(7))을 적용하였다. 이 경우에도 면내 진동인텐시티는 보의 33지점에서 측정하였으며, 각 지점 주위에 30cm(= Δ) 간격을 두고 위치한 두 지점에서 주파수응답함수를 측정하였다. 이 경우에도 백색잡음 가진 신호를 이용하였으며, 가진기에 부착된 임피던스헤드(B&K8001)를 이용하여 가진력의 자기스펙트럼을 구하였다.

세 번째 실험에서는 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 기준가속도계법(식(8))을 이용하였다. 기준가속도를 임의 위치에 부착하고 1개의 가속도계를 이

동시키면서 보의 33지점에서 측정하였으며, 각 지점 주위에 30cm(= Δ) 간격을 두고 위치한 두 지점에서 기준가속도계와의 신호 크로스스펙트럼을 측정하였다. 이 경우에도 백색잡음 가진 신호를 이용하였다.

### 4. 실험 결과

Figs.3과4는 측정 주파수 700, 1500 Hz에서 측정된 면내 진동인텐시티 결과를 보여준다. 크로스스펙트럼 법, 주파수응답함수법과 기준가속도계법에 의한 결과를 비교하는 경우, 약 3 dB내에서 일치하는 결과를 보여준다. 그리고 면내 진동인텐시티 값이 (+)값은 진동파워가 가진기로부터 감쇠단쪽을 향하고 있음을 나타내준다 (이 경우 보의 축 x는 가진기 지점을 원점으로 감쇠단 쪽을 (+)로 설정하였음). 이 경우 기준가속도계는 가진기로부터 30cm 떨어진 지점에 부착하였다.

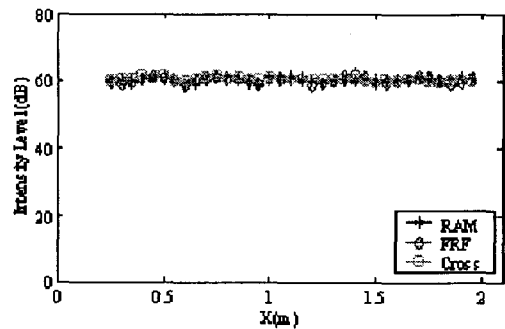


Fig.3 In-plane vibration intensity of a beam at 700 Hz.

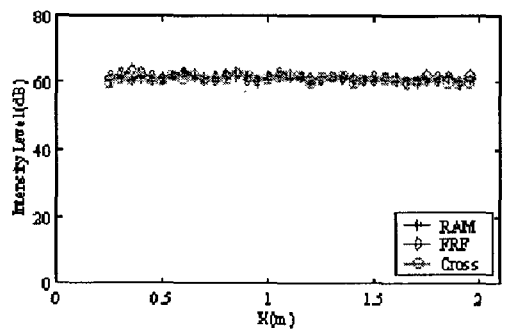


Fig.4 In-plane vibration intensity of a beam at 1500 Hz.

그림 5와 6은 가진기로부터 0.6m와 1m 지점에서 측정된 진동 인텐시티 값과 가진기에 부착된 임피던스헤드로부터 측정된 입력 파워 값을 비교한 결과가

다. 500Hz와 2000Hz 범위의 주파수 영역에서는 진동 인텐시티와 입력파워가 거의 같은 크기를 보여 주고 있다.

면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여, 본 실험에서 채택한 가속도계간의 간격은  $\Delta = 30\text{cm}$ 이다. 이러한  $\Delta$  값은 해당 주파수에서 전파하는 종파의 파장을 고려하여 설정할 수 있으며, 면외진동 인텐시티 측정의 경우 제안되었던  $0.25 \leq k\Delta \leq 1.0$  범위를 참고할 수 있다<sup>(6)</sup>. 여기서  $k(=2\pi/\lambda)$ 는 종파의 파수를 나타낸다. 그리고 본 실험에서 고려한 종파의 파장  $\lambda$ 는 주파수 700Hz와 1500Hz에서 각각 7.3m와 3.4m에 해당한다.

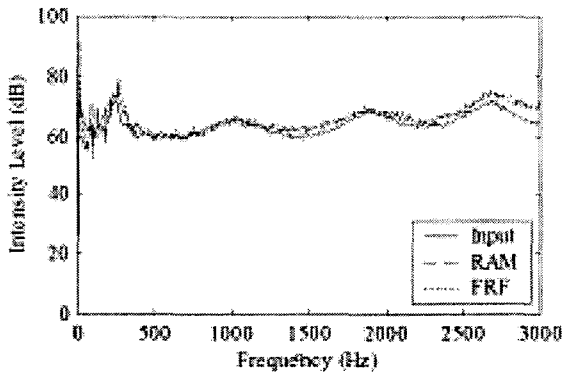


Fig.5 Comparison of input power with in-plane vibration intensity at  $x=0.6\text{m}$  on a beam.

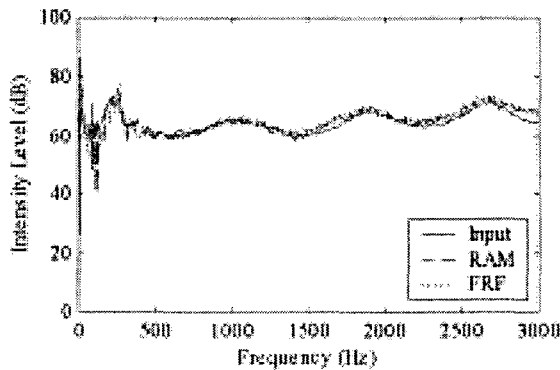


Fig.6 Comparison of input power with in-plane vibration intensity at  $x=1\text{m}$  on a beam.

### 5. 결론

본 연구에서는 반무한보의 면내 진동인텐시티를 측정하였다. 측정 방법으로는 기존 가속도계법을 제안하였다. 이 방법의 경우 기존 가속도계를 고정시키고 다른 하나의 가속도계를 이동시키기 때문에 두 가속도계 배열을 이용하는 크로스스펙트럼법에 비교하여, 가속도계간의 위

상 오차 영향을 줄일 수 있는 장점이 있으며, 주파수 응답함수법에서 필요한 입력 가진력을 측정할 필요가 없다. 본 연구에서는 이러한 기준가속도계법과 기존 방법을 이용하여 보의 진동 인텐시티 공간 분포를 측정하여 비교하였으며, 가진점에서의 입력 파워와도 비교하였다. 이러한 결과들로부터 보의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 기준 가속도계를 이용하는 방법이 효과적으로 사용될 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 Usingthe 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 추계학술대회논문집, pp. 409-414,
- (6) 이덕영, 박성태, 1997, "반무한보의 진동 인텐시티 측정에 대한 연구", 한국소음진동공학회지, 제 7권 제1호, pp. 43-53,
- (7) 김영완, 박병전, 1997 "보에 있어서 진동 인텐시티에 관한 연구," 한국음향학회지, 16(5), pp. 37-42,
- (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,홍석운, "반무한보의 면내진동인텐시티 측정," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.1185-1188, 2002.

