

## 연성보의 진동 인텐시티 측정

### Measurements of Vibration Intensity of a Coupled Beam

이효행\* · 김창렬\*\* · 길현권\*\*\* · 이용현\*\*\* · 홍석윤\*\*\*\*

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

Key Words: Out-of-Plane Vibration Intensity (면외 진동인텐시티), In-Plane Vibration Intensity(면내 진동인텐시티), Coupled Beam(연성 보), Measurement of Vibration Intensity (진동인텐시티 측정)

#### ABSTRACT

The objective of this paper is to perform measurements of vibration intensity of a coupled beam. The propagation of flexural waves generates the out-of-plane vibration of the coupled beam. The longitudinal waves are generated due to the mode conversion at the structural joint of the coupled beam. The propagation of longitudinal waves generates the in-plane vibration of the coupled beam. In order to identify the direction of vibrational power on the coupled beam, the in-plane vibration intensity as well as the out-of-plane vibration intensity needs to be measured. The cross spectral method has been implemented to measure the in-plane vibration intensity as well as out-of-plane vibration intensity. The results showed that the experimental method can be effectively used to measure the in-plane vibration intensity as well as the out-of-plane vibration intensity of coupled beams.

#### 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, 두가지 이상의 파동(예로써 굽힘파와 종파 등) 전파에 의하여 진동파워가 전파된다. 이러한 파동들은 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 있으며, 나아가서 주어진 진동수에서 서로 다른 파장을 갖는 각 파동들의 영향을 고려하여야 할 필요가 있다.

기존의 진동인텐시티 측정 기법에 대한 연구는 주로 보와 평판의 면외진동에 대하여 이루어져 오고 있다<sup>(1-7)</sup>. 면내 진동인텐시티 측정법에 대한 연구는 최근에 국내외에서 시도되고 있으며, 주로 보<sup>(8-10)</sup> 및 평판<sup>(11)</sup>에서의 면내 진동인텐시티를 측정하기 위하여 이루어지고 있다. 복합구조물의 경우 연성보에 대한 진동 인텐시티 측정법에 대한 연구<sup>(10)</sup>는 국외에서 최근 시도되고 있으나, 미비한 실정이다. 이러한 연성보에 대한 진동인텐시티 측정 기법에 대한 연구는 실제 복잡한 복합구조물의 진동인텐시티 측정 기법의 초기 연구로서 무엇보다도 필요한 상황이다.

본 연구에서는 복합구조물인 연성보의 진동인텐시티를 측정하였다. 연성보에서 면외 가진인 경우, 굽힘파와 종파에 의하여 진동이 발생하여 진동 파워가 전파된다. 진동 인텐시티를 측정하기 위하여서는 이러한 파동과 해당 파동이 발생시키는 면외 및 면내 진동을 측정하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 사항들을 고려하여 굽힘파와 종파가 발생시키는 진동인텐시티를 측정함으로써, 연성보 구조물에 대하여 진동인텐시티 측정 기법을 활용할 수 있음을 보였다.

\* 수원대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : naya978@naver.com  
Tel: (031) 225-8556 Fax: (031) 220-2494

\*\* 한국건설안전기술원

\*\*\* 수원대학교 기계공학과

\*\*\*\* 서울대학교 조선해양공학과

## 2. 진동인텐시티

면의 가진력에 의한 연성보 진동의 경우, 면의진동 뿐만이 아니라 연결 지점에서의 파동 변환에 의하여 면내진동이 동시에 발생한다. 면의진동은 굽힘파에 의하여 발생하며, 면내진동의 경우 주로 종파에 의하여 발생한다. 보에서 면의진동(진동변위  $w$ )과 면내진동(진동변위  $u$ )에 의하여 축 방향으로 전달되는 단위 폭 당 진동인텐시티는 다음식과 같이 각각 표현된다.

$$I_{x,f} = Q_x \frac{\partial w}{\partial t} + M_x \frac{\partial \theta}{\partial t} = EI \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \right) \quad (1)$$

$$I_{x,t} = -F_x \frac{\partial u}{\partial t} = -ES \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

여기서  $Q_x, M_x, F_x$ 는 전단력, 굽힘모멘트와 인장력을 나타내고,  $\theta$ 는 보의 회전 각도를 나타낸다.  $E, I, S$ 는 탄성계수, 단면 2차 모멘트 그리고 단면적을 각각 나타낸다.

굽힘파에 의한 진동인텐시티는 식(1)에서와 같이 면의진동 변위 및 면의진동 변위의 공간 미분값을 측정함으로써 구할 수 있다. 또한 종파에 의한 진동인텐시티는 식(2)에서와 같이 면내진동 변위 및 면내진동 변위의 공간 미분 값을 측정함으로써 구할 수 있다. 또한 종파에 의한 면내 진동인텐시티를 구하기 위해서는 굽힘파에 의하여 발생하는 면내진동의 영향을 분리할 필요가 있다. 이 경우 굽힘파에 의하여서는 보의 윗면과 아랫면에 서로 다른 방향의 면내진동 또한 발생 시키게 된다는 점을 이용할 수 있다. 이러한 점을 고려하는 경우 각 파동에 의한 진동인텐시티는 다음과 같은 방법으로 측정할 수 있다.

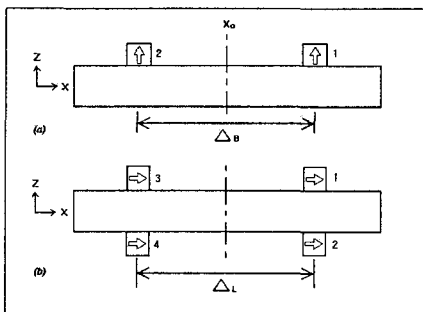


그림 1. 측정지점  $x_0$  지점에서 (a) 굽힘파에 의한 면의 진동인텐시티와 (b) 종파에 의한 면내진동인텐시티를 측정하기 위한 가속도계 배열 방법

그림 1은 측정지점 지점에서 굽힘파와 종파에 의한 면의 진동인텐시티와 면내 진동인텐시티를 측정하기 위한 가속도계 배열 방법을 보여 준다. 측정점  $x_0$  지점에서 식(1), (2)에서 주어지는 해당 변위의 공간 도함수 값을 추정하기 위하여, 측정점 주위 2지점에서의 면의 진동 및 면내 진동 변위를 이용하는 유한차분 근사 방법을 이용하게 된다. 그리고 굽힘파에 의한 진동의 경우 감쇠파의 영향을 받지 않는 원거리장을 고려한다. 유한차분 근사 방법과 또한 주파수 영역을 고려하면, 주파수  $f$ 에서 진동인텐시티의 시간 평균값은 다음 식에 의하여 표현된다.<sup>(2,3)</sup>

$$\langle I_{x,f}(x, y, f) \rangle_B = 2 \frac{\sqrt{Bm}}{\Delta_B (2\pi f)^2} \text{Im} \{ G(\dot{w}_1, \dot{w}_2, f) \} \quad (3)$$

$$\langle I_{x,t}(x, f) \rangle_L = \frac{ES}{4\Delta_L (2\pi f)^3} \text{Im} \{ G(\ddot{u}_1 + \ddot{u}_2, \ddot{u}_3 + \ddot{u}_4, f) \} \quad (4)$$

여기서  $G(\dot{w}_1, \dot{w}_2, f)$ 는 그림 1(a)에서 지점 1과 2에서의 면의진동 가속도 신호간의 크로스스펙트럼밀도이며  $G(\ddot{u}_1 + \ddot{u}_2, \ddot{u}_3 + \ddot{u}_4, f)$ 는 그림 1(b)에서 보의 윗면 1 지점과 아랫면 2지점에서 면내 가속도의 합 신호와 보의 윗면 3 지점과 아랫면 4 지점에서 면내 가속도의 합 신호간의 크로스스펙트럼밀도이다. 이 경우 두 가속도계 간의 거리  $\Delta$ 는 주어진 주파수에서 굽힘파와 종파의 파장을 고려하여 결정할 수 있으며, 해당하는 파동의 파수  $k$ 에 대하여  $0.25 \leq k\Delta \leq 1.0$ 의 범위를 고려할 수 있다<sup>(6)</sup>.

## 3. 실험

### 3.1 실험 모델

진동 인텐시티 측정을 위한 실험 모델은 "L"자형 알루미늄 연성보로써 규격은  $((1+1.2) \times 0.3 \times 0.008 \text{ m})$ 이다(그림 2). 그림 3은 연성보의 진동인텐시티 측정을 위한 실험 장치 배열을 보여 준다. 연성보의 A요소 끝단에는 가진기(B&K4809)를 위치시켜 면의 가진이 되도록 하였다. 그리고 연성보의 B요소 끝단은 모래를 채운 상자에 묻히도록 하여 끝단에서 진행파가 다시 반사하지 않고 흡수되도록 하였다.

### 3.2 실험 방법

연성보의 진동인텐시티를 측정하기 위하여 식(3),(4)에서 주어지는 크로스스펙트럼법<sup>(6)</sup>을 적용하였다. 가진기로 보를 가진시키면서 2개의 면의 진동가속도계 및 면내진동가속도계(B&K4708, 방향을 변동함에 따라서 3축 방향 가속도 측정 가능)를 이동 시키면서 면의 및 면내 진동을 측정하였다. 두 가속도계 간격으로서 면의진동인텐시티와 면내진동인텐시티를 측정하기 위하여 각각  $\Delta = 2 \text{ cm}$ 와  $\Delta = 30 \text{ cm}$

을 이용하였으며, 관심 주파수 범위는  $800\text{ Hz} \sim 2300\text{ Hz}$ 에 해당한다. 굽힘파 고려시 측정점 주위에 위치한 2 지점에서 면의 진동 가속도에 대한 크로스스펙트럼을 구하여 식(3)을 적용하였다. 또한 종파를 고려하여 간격을 두고 위치한 보의 윗면 2 지점, 아랫면 2 지점에서 면내 진동 가속도에 대한 크로스스펙트럼을 식(4)와 같이 적용함으로써 면내진동 인텐시티를 구하였다. 가진 신호로서는 백색잡음 가진 신호를 이용하였다.

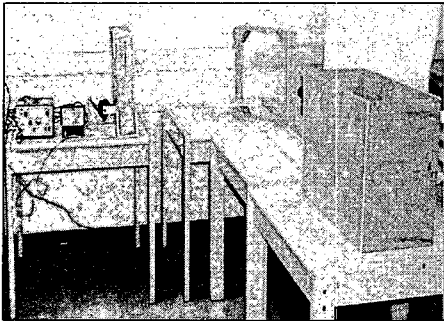


그림 2. 실험 모델인 L형 연성 보

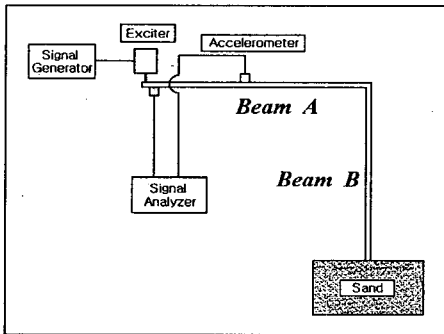
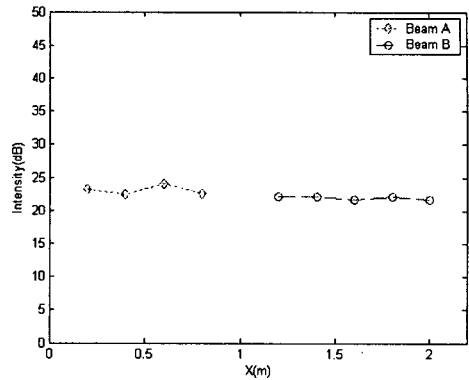


그림 3. 연성보의 진동인텐시티 측정을 위한 실험 장치 배열

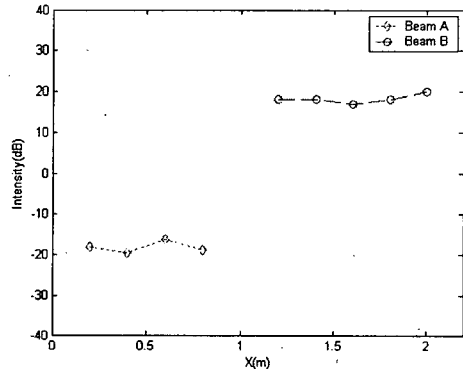
### 3.3 실험 결과

그림 4(a)와 (b)는 주파수  $1100\text{ Hz}$ 에서 측정된 연성보의 면의 및 면내 진동인텐시티 결과를 각각 보여준다. 그림 4(a)는 굽힘파에 의한 면의 진동인텐시티의 경우 가진지점으로부터 연성보의 "A" 요소로부터 "B" 요소로 (+)방향으로 전파되어 나가는 현상을 보여 준다(연성보 요소 "A"와 "B" 그림 3 참조). 또한 그림 4(b)로부터는 종파의 경우 연결 지점의 파동 연성에 의하여 발생하여 보 "A" 요소의 경우 (-) 방향으로, 보 요소 "B"의 경우 (+) 방향으로 전파되어 나가는 현상을 확인 할 수 있다. 그림 5(a)와 (b)는 주파수  $1900\text{ Hz}$ 에서 측정된 연성보의 면의 및 면내 진동인텐시티

결과를 각각 보여준다. 그림4(a)와 (b)와 유사한 현상을 확인할 수 있다.

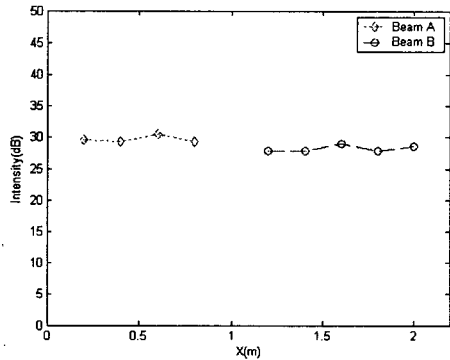


(a)



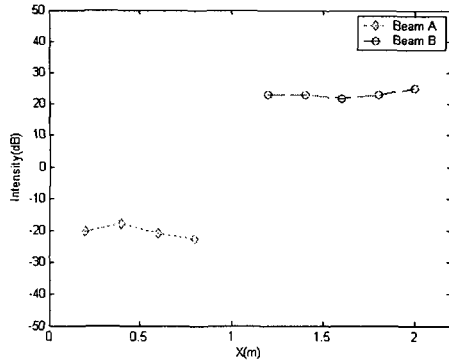
(b)

그림 4. 연성보에서의 진동인텐시티 ( $1100\text{ Hz}$ ). (a) 면의진동인텐시티 (굽힘파의 영향), (b) 면내진동인텐시티 (종파의 영향).



(a)

## 참 고 문 헌



(b)

그림 5. 연성보에서의 진동인텐시티 (1900 Hz). (a) 면의 진동인텐시티 (굽힘파의 영향), (b) 면내 진동인텐시티 (종파의 영향).

## 4. 결 론

본 연구에서는 복합구조물인 연성보의 진동인텐시티를 측정하였다. 연성보에서 면의 가진인 경우, 굽힘파에 의하여 면의 진동이 발생하며, 연성보의 연결 지점에서 파동 변환에 의하여 발생하는 종파에 의하여 면내 진동 또한 발생한다. 연성보의 면의 및 면내 진동 인텐시티를 측정하기 위하여서 굽힘파와 종파가 발생시키는 면의 및 면내 진동을 측정하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 사항들을 고려하여 굽힘파와 종파가 발생시키는 진동인텐시티를 분리하여 측정함으로써, 연성보 구조물에 대하여 진동인텐시티 측정 기법을 효과적으로 활용할 수 있음을 보였다.

## 후 기

본 연구는 수중음향특화연구센터 연구과제의 일부분으로서 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 Using the 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] 이덕영, 박성태, 1997, "반무한보의 진동 인텐시티 측정에 대한 연구", 한국소음진동공학회지, 제 7권 제1호, pp. 43-53,
- [7] 김영완, 박병진, 1997 "보에 있어서 진동 인텐시티에 관한 연구", 한국음향학회지, 16(5), pp. 37-42,
- [8] 김창렬, 길현권, 전진숙, 홍석윤, "반무한보의 면내진동인텐시티 측정", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 1185-1188, 2002.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 전진숙, 길현권, 김창렬, 이병철, 홍석윤, "평판의 면내진동인텐시티 측정", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 816-820, 2003.