

〈論 文〉

Structural Intensity 법을 이용한 구조체의 진동전달량 측정

Measurements of the Vibrational Power Flow in Structure Beam
by Using the Structural Intensity Method

김 흥 식* · Jiri Tichy**

Heung Sik Kim and Jiri Tichy

〈1994년 4월 1일 접수 ; 1994년 5월 26일 심사완료〉

ABSTRACT

This paper presents an experimental method to find the vibrational transmission characteristics of structures by using the structural intensity method which is used as the important techniques of active vibration control method. Experimental results are obtained from measurements performed on a structure beam by 2, 3 and 4 position linear accelerometer array (2, 3 and 4 structural intensity : 2, 3 and 4 S.I.) methods at near and farfield conditions. These results are compared with the measurement values of conventional power flow measurement method called input power measurement in order to verify the accuracy of structural intensity methods. To minimize the errors associated with 2, 3 and 4 S.I. methods, the measurement locations were selected by the result of modal analysis and the averaged data by the inter-change of accelerometer array was utilized. In 3 and 4 S.I. methods measured wavenumber instead of theoretical wavenumber was used. This paper shows that measurements of bending wave power flow by using 2, 3 and 4 S.I. methods can give accurate values under general field conditions in structural beam and the accuracy of 2, 3 S. I. methods is higher than 4 S. I. methods. Finally, 2 position linear accelerometer array method is suggested as the practical structural intensity technique.

1. 서 론

Structural intensity란 구조체 표면의 단위폭, 단위깊이당 파워흐름량(power flow)을 나타낸 것으로서 structural intensity 측정법은 구조체를 통한 파워흐름의 경로에 대한 정확한 파악이 가능하다는 큰 장점이 있어서 고체전달음(structure-borne sound)의 방지대책을 수립하는 경우와 최근 연구가 활발히 진

행되고 있는 능동진동제어(active vibration control)분야 연구의 중요한 요소 기술로써 활용이 기대된다^(1~6,11). structural intensity 측정법은 Noiseux에 의해서 처음 소개되었으며 그는 자유음장(free field) 하에서 종방향 부착 가속도계(rotational accelerometer)와 횡방향 부착 가속도계(transverse accelerometer) 2개를 이용하여 구조체에서의 음향파워를 측정하였다⁽¹⁾. 이후 Fahy와 Verheij는 structural intensity의 주파수 영역 분석을 위한 신호처리 기법을 소개하였으며 실용적인 측정을 할 수 있도록 편리한 수식을 제공하였고^(3,4) Linjama와 Lahti는 휨파(bending wave) intensity 측정치를 주파수 영역으로 나타낼 수 있는 표현식을 발표하였다

*정회원, 대한주택공사 주택연구소

**Graduate Programs in Acoustics, The Pennsylvania State University

(5). structural intensity 측정법은 유한차분평가 (finite difference estimates)를 내포하고 있으며 최근에는 유한차분평가 활용방법으로써 구조체 표면에 가속도 픽업을 접촉시키지 않고도 structural intensity 측정을 할 수 있는 레이저 간섭법(laser interferometric method)과 음향 입체사진법(acoustic holography method) 등이 연구되고 있으나 실험실과 현장에서 실용적으로 활용하기에는 기술적, 경제적으로 제약이 따르고 있다⁽¹¹⁾. 유한차분평가법은 일반적으로 저주파대역에서의 가속도계 상호 위상오차(phase mismatching error)와 고주파대역에서의 유한차분오차(finite difference spacing error)에 의해 신뢰도가 떨어진다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 유한차분평가법을 이용하는 structural intensity 측정법의 오차를 줄이고 일반음장(원음장과 근음장)에서 넓은 주파수영역에 걸쳐 구조체의 진동전달특성을 정확하게 평가할 수 있는 실용적인 측정방법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 2개, 3개, 4개 가속도계 선형배열방식에 의한 structural intensity(2, 3, 4, S.I.) 측정법들을 이용한 구조체의 휨파 파워흐름량(bending wave power flow)을 측정하고 이들 가속도계 배열방식에 따른 측정 정밀도를 분석하였으며 측정오차를 줄이기 위하여 모드분석을 통한 측정점의 선정방법 및 각 배열방법별 가속도계의 상호교환 배열에 의한 평균측정치의 이용방안 등을 검토하였다. 2개, 3개, 4개의 가속도계 선형 배열방식의 변화에 따른 측정정밀도 검증을 위해서 종래의 측정법인 입력파워 측정법(input power measurement techniques)이 활용되었다.

2. 측정방법

2.1 입력 파워 측정법(Input Power Measurement Techniques)

입력파워 측정법은 structural intensity 측정법의 측정 정밀도를 검증하기 위해서 일반적으로 이용되고 있는 구조체의 파워 측정방법이다. 가진기에 의해 구조체에 전달된 기계적인 파워(mechanical power)는 임피던스 헤드(impedence head)가 있는 입력점에서 가진력과 가속도를 동시에 측정함으로써 구할 수 있으며 파워스펙트럼은 식 (1)을 이용하여 얻을 수 있다⁽⁵⁾.

$$P_i = R_e \left\{ \frac{1}{j\omega} G_{Fa} \right\} = \frac{1}{\omega} I_m \{ G_{Fa} \} \quad (1)$$

여기서, P_i 는 기계적 입력파워(mechanical input power), F 는 기계적 입력가진력(mechanical input force), a 는 기계적 입력가속도(mechanical input acceleration), G_{Fa} 는 F 와 a 의 크로스 스펙트럼밀도(cross spectral density), ω 는 각 주파수, R_e 는 실수부, I_m 은 허수부를 나타낸다.

2.2 Structural Intensity 법

2개, 3개, 4개 가속도계 선형 배열방법을 이용한 경우의 총 실제파워(total active power)는 전달함수를 이용하여 다음 식 (2), (3), (4)로 부터 구한다.^(5,6)

이때 식 (2), (3)은 구조체인 beam에서 evanescent wave가 매우 적다는 가정하에서 유도되었다. 즉, 원음장(far field) 조건에서 성립함을 가정한 것이다.

• 2개의 가속도계 이용시 :

$$P_{2SI} = 2 \frac{\sqrt{Bm}}{\Delta \cdot \omega^2} I_m \{ H_{Fa3}^* H_{Fa1} \cdot G_{FF} \} \quad (2)$$

• 3개의 가속도계 이용시 :

$$P_{3SI} = \frac{\sqrt{Bm}}{\Delta \cdot \omega^2} I_m \{ [H_{Fa3}^* H_{Fa2} + H_{Fa2}^* H_{Fa1}] \cdot G_{FF} \} \quad (3)$$

• 4개의 가속도계 이용시 :

$$P_{4SI} = B \frac{m}{\omega^3 \cdot \Delta^3} I_m \{ [4H_{Fa3}^* H_{Fa2} + H_{Fa2}^* H_{Fa4} - H_{Fa3}^* H_{Fa1}] \cdot G_{FF} \} \quad (4)$$

여기서, B 는 휨강성(bending stiffness), m 은 단위 길이당 질량, Δ 는 가속도계 배열간격, ω 는 각 주파수(angular frequency), H_{Fax} 는 기준 가진력과 x 점에서 선형가속도의 복합 주파수 전달함수(complex frequency transfer function), $*$ 는 복공액(complex conjugate), G_{FF} 는 기준 가진력의 자기 스펙트럼(auto spectrum)을 나타낸다.

실제 파워흐름량(actual power flow : P_{actual})은 실측파워 흐름량(measured power flow : $P_{measured}$)에 유한차분오차(finite difference error)를 고려하여 식 (5)로부터 구한다⁽⁶⁾.

$$P_{actual} = P_{measured} \cdot \left[\frac{k\Delta}{\sin k\Delta} \right] \quad (5)$$

여기서, k 는 이론계산이나 실측으로부터 구한 파정수(wave number)이며 Δ 는 가속도계 배열간격을 나타낸다.

이론계산에 의한 파정수(Δ_i)의 계산은 다음 식 (6)을 이용하여 구한다⁽²⁾.

$$k_i = \sqrt{\frac{m\omega^2}{B}} \quad (6)$$

여기서, B 는 휨강성(bending stiffness), m 은 단위 길이당 질량, Δ 는 가속도계 배열간격, ω 는 각 주파수(angular frequency)를 나타낸다.

3개, 4개의 가속도계 선형배열방식을 이용하는 경우 실측에 의한 파정수는 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 구한다⁽⁶⁾.

• 3개의 가속도계 이용시 :

$$k_{m3} = \frac{1}{\Delta} \sqrt{2 - \left[\frac{H_{Fa3} + H_{Fa1}}{H_{Fa2}} \right]} \quad (7)$$

• 4개의 가속도계 이용시 :

$$k_{m4} = \frac{1}{2\Delta} \left(\sqrt{2 - \left[\frac{H_{Fa3} + H_{Fa1}}{H_{Fa2}} \right]} + \sqrt{2 - \left[\frac{H_{Fa4} + H_{Fa2}}{H_{Fa3}} \right]} \right) \quad (8)$$

여기서, H_{Fa_x} 는 기준 가진력과 x 점에서 선형가속도의 복합 주파수 전달함수(complex frequency transfer function), Δ 는 가속도계 배열간격, G_{FF} 는 기준 가진력의 자기 스펙트럼(auto spectrum)을 나타낸다.

이 경우 실측에 의한 파정수(k_c)는 최종적으로 유한차분오차를 고려하여 식 (9)에 의해 구한다⁽⁷⁾.

$$k_c = \frac{2}{\Delta} \sin^{-1} \left(\frac{k_m \cdot \Delta}{2} \right) \quad (9)$$

여기서, k_m 은 3개, 4개의 가속도계 선형배열방식을 이용하는 경우의 실측에 의한 파정수, Δ 는 가속도계 배열간격을 나타낸다.

3. 실험개요 및 실험방법

Fig. 1은 실험장치의 개요도를 나타낸 것이다. 실험대상 구조체는 1.425 m(길이) × 0.1016 m(폭) × 0.1016 m(두께)의 크기를 갖는 beam이며 구조체 beam의 한쪽 끝은 에너지 흐름을 원활히 하기 위해서 모래속에 묻고 다른 한쪽은 피아노선을 이용하여 나무 프레임에 지지되도록 하였다. 이때 모래상자를 사용한 경우의 반사계수(reflection coefficient)는 본 연구의 관심 주파수 대역인 160 Hz ~ 1,300 Hz의 주파수 범위에서 0.9 ~ 0.65이며 일반적으로 반사계수

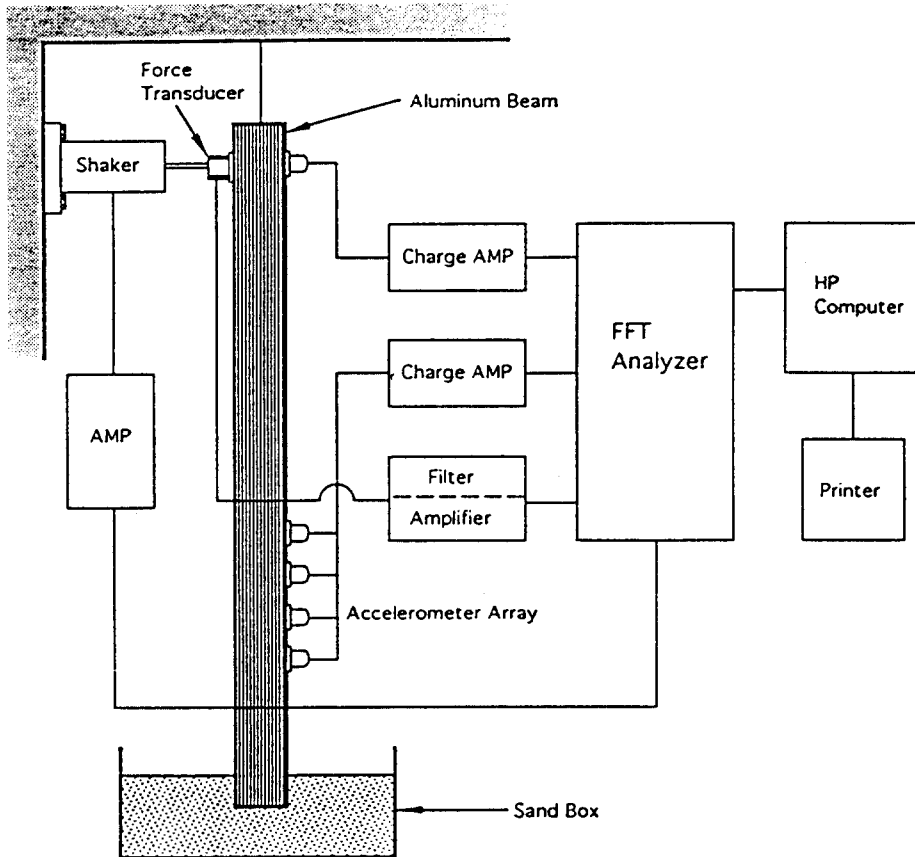


Fig. 1 Experimental setup

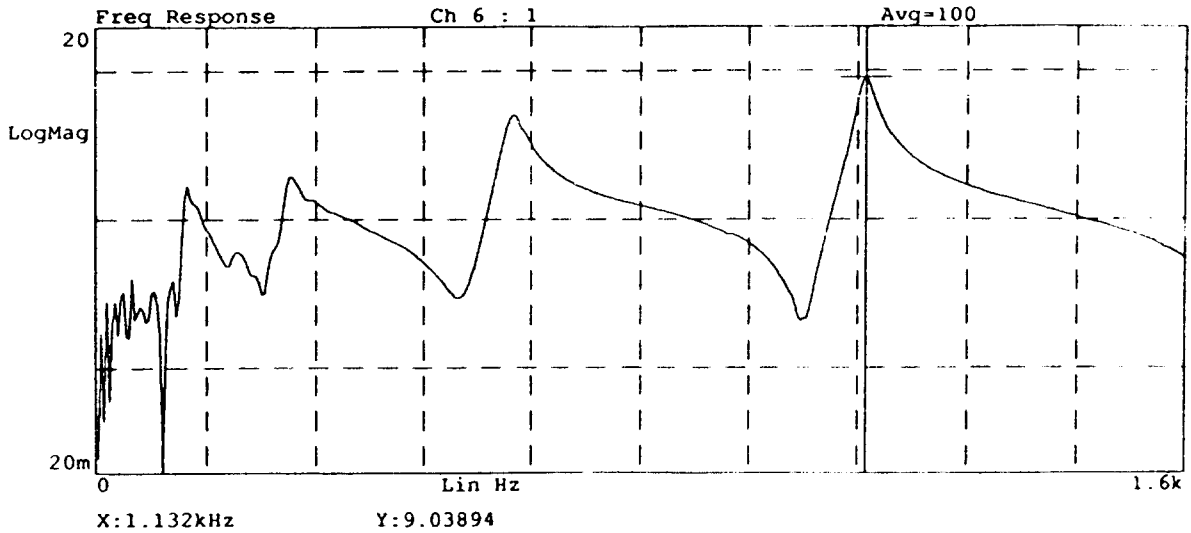


Fig. 2 Response spectrum of structural beam

가 0.99 이하인 경우에는 측정 정밀도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 밝혀지고 있다⁽⁸⁾. 구조체 beam의 재료는 알루미늄이며 알루미늄의 물성치는 영율, $E=7.17 \times 10 \text{ N/m}^2$ 이고 밀도, $\rho=2,710 \text{ kg/m}^3$ 이다.

구조체 진동의 휨 모드에 대응하는 주파수를 결정하기 위해서 가진기를 이용하여 구조체 beam을 가진하였고 가속도계를 사용하여 전달특성에 대한 반응을 측정하였다. Fig. 2는 그 반응을 나타낸 것으로서 최대반응은 4번째 피크치인 1,128 Hz에서 발생하였다. 따라서 이 주파수를 입력파워 측정법과 structural intensity법에 의한 휨파워 흐름량(bending power flow)을 비교하기 위한 정현파 발생 신호 주파수로 선정하였다. 이러한 모드분석 실험을 실시하여 1,128 Hz에서 구조체 beam의 손실계수(loss factor) 0.021을 구하였으며 모드 형태는 구조체 beam을 따라 한 개의 가속도계를 이동 부착시키는 방법을 이용하여 구하였다.

Structural Intensity 측정법의 경우 2개, 3개, 4개의 가속도계 선형배열방식에 따른 각각의 결과를 비교 분석하기 위해서 안정된 광대역 잡음(stationary broadband random noise)이 실험 구조체에 부착된 가진기의 신호로 사용되었다. 구조체에 공급된 기계적 입력파워 측정은 임피던스 헤드를 이용하였고 가진력은 구조체에 부착된 가진력 측정게이지(force gauge)로 측정하였다. 구조체 beam의 휨파워 흐름량은 왁스를 사용하여 구조체에 접촉된 2개, 3개, 4개의 가속도계에 의한 측정치를 적분하여 구하였다. 실험에 사용된 가속도계(PCB 3030 A)의 무게는

2.0 g이고 측정주파수 가능대역은 1 Hz에서 10,000 Hz의 범위이다. 본 실험에서는 가속도계 사이의 배열간격이 20 mm인 것을 고려하여 160 Hz에서 1,600 Hz 범위만을 검토하였다. 2개, 3개, 4개의 선형 가속도계 사이의 배열간격 20 mm를 일정하게 유지하기 위해서 얇고 가벼운 폴리에틸렌재의 간격 유지판을 이용하였다. 측정점은 1,128 Hz에서 모드분석 실험에 의해서 구한 절점(node)과 마디점(antinode)을 선정하였다. 아울러 160 Hz에서 1,600 Hz의 주파수 대역에서 측정점의 음장조건에 따른 영향을 검토하기 위해서 가진점으로부터 98 mm 떨어진 close field("near" near field), 493 mm 떨어진 근음장(near field) 2곳과 937 mm 떨어진 원음장(far field)에서 각각 구조체의 휨파워 흐름량을 측정하였다. 이 경우 각 음장별 측정점의 위치는 유한 구조체의 전단력(shear force)과 모멘트(moment)요소를 전 파워량(total active power)으로 표준화한 시뮬레이션 결과⁽⁶⁾와 모드 분석결과를 활용하여 결정하였다.

4. 실험 결과

Fig. 3은 구조체 beam의 대표적인 4개의 진동 모드 형태를 나타낸 것이다. 실험대상 구조체를 동일간격으로 12개의 측정점으로 나누고 이들 각 점에서의 변위량을 측정하여 결과를 나타낸 것으로서 4번째 휨모드(mode 4)에 상응하는 1,128 Hz에서의 변위량이 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 이 결과로

부터 1,128 Hz를 기준으로한 실험대상 구조체의 절점과 마디점이 structural intensity법과 입력파워 측정법을 이용한 구조체의 휨과 파워 측정점으로 선정되었다.

Fig. 4는 가진점으로부터 937 mm 떨어진 원음장

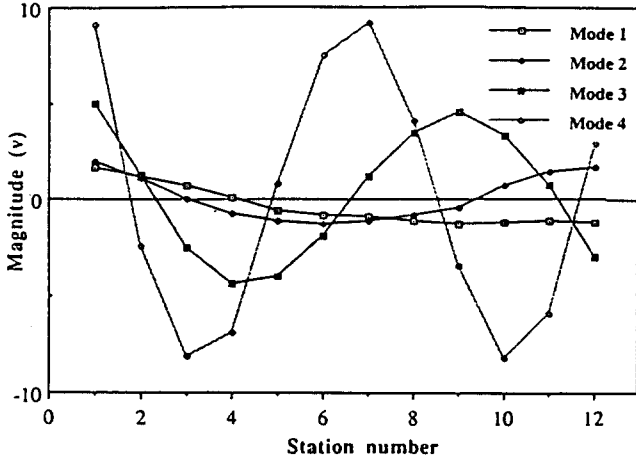


Fig. 3 Representative four mode shapes of structural beam

(far field)에서 2개, 3개, 4개의 선형 가속도계 배열에 따른 structural intensity(2, 3, 4 S.I.) 측정법들에 의한 실험구조체의 휨과 파워 흐름량 측정치와 종래의 입력파워 측정법에 의한 실험 구조체의 휨과 파워흐름량 측정치를 비교한 것이다. Fig. 4에서와 같이 160 Hz에서 1,300 Hz의 주파수 범위에서는 2개, 3개, 4개의 가속도계 선형 배열방식에 따른 차이가 적고 거의 유사한 결과를 보이나 1,300 Hz 이상의 주파수에서는 2개, 3개의 가속도계 선형 배열방식과 4개의 가속도계 선형 배열방식 사이에 차이가 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 결과에서는 2개, 3개의 가속도계 선형 배열방식의 경우가 4개의 가속도계 선형 배열방식에 비하여 원음장(far field)에서보다 신뢰성이 높음을 알 수 있으며, 이러한 현상은 근음장(close field, near field)에서도 동일하게 나타났다. 그러나 4개의 가속도계 선형 배열방식을 사용할 경우 주파수별 휨과의 파워 흐름량에 대한 진폭의 변화 범위는 2개, 3개의 가속도계 선형 배열방식에 비해 전 음장(close, near and far field)에서 가장 적게 나타나는 특징을 보였다. 이러한 결과와 측정의 편리성을 고려할 때 2개의 선형 배열방

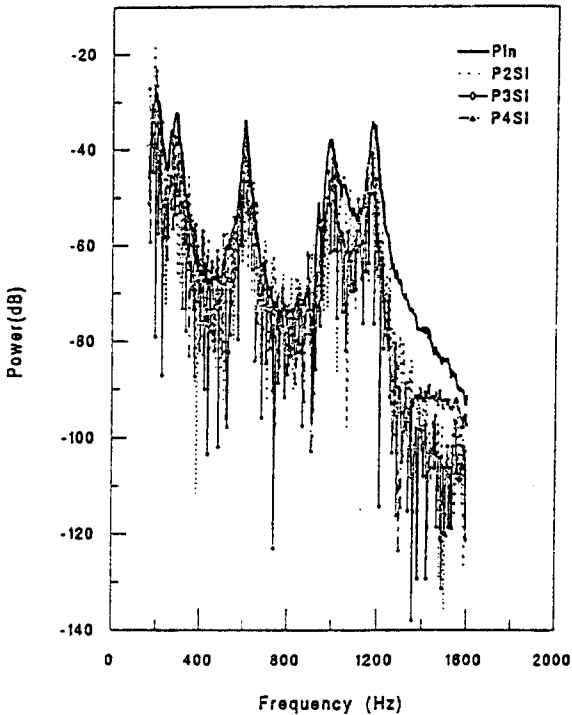


Fig. 4 Comparisons of power flow between using input power flow measurement and using structural intensity measurements at far field (937 mm from the exiter end)

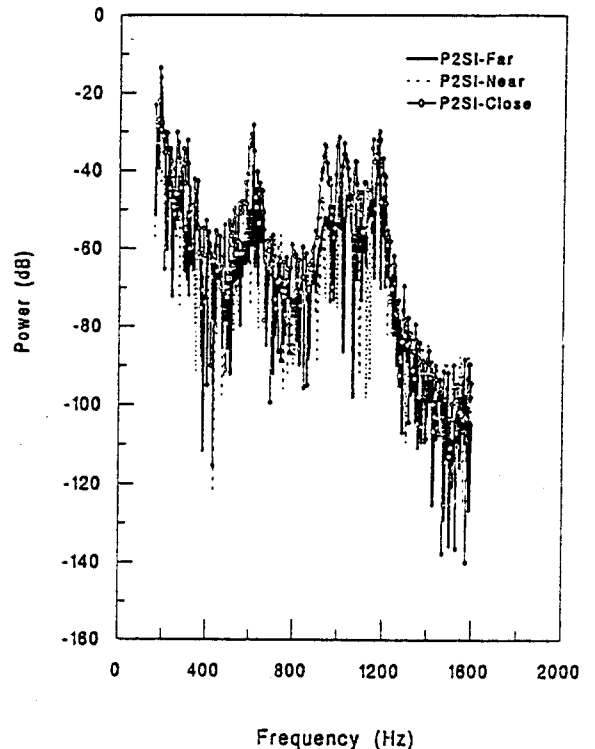


Fig. 5 Comparisons of power flow according to the acoustic fields by 2.S.I. method

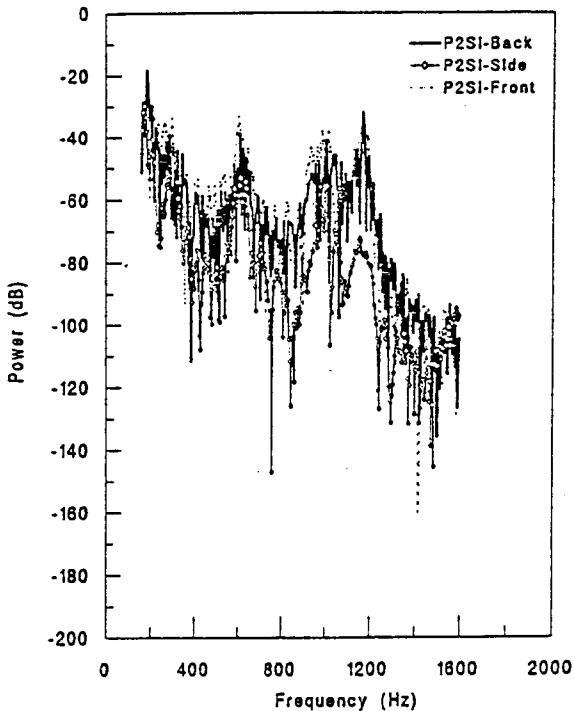


Fig. 6 Comparisons of power flow according to the measurement positions by 2.S.I. method

식이 가장 실용적인 structural intensity 측정법으로 판단된다.

Fig. 5는 2개의 가속도계 선형 배열방식을 이용한 structural intensity 측정법의 경우 측정점의 음장조건 변화에 따른 파워 측정치의 변화를 검토한 것이

다. 가진점으로부터 937 mm 떨어진 원음장(far field)과 493 mm 떨어진 근음장(near field)에서는 측정편차가 적으나 98 mm 떨어진 지점(close field)에서는 937 mm 떨어진 원음장에서의 측정치에 비하여 400 Hz부터 1,200 Hz의 주파수 대역에서 휨파 파워 흐름량의 크기가 높게 나타나 가진점에 매우 근접한 음장조건에서는 측정오차가 다소 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 2개의 가속도계 선형 배열방식을 이용한 structural intensity 측정법의 의한 구조체 측정점의 표면위치(가속도계 부착위치) 변화에 대한 영향을 검토한 것으로서 측정점을 가진기가 부착된 구조체의 전면부(front surface)로 한 경우와 가진점의 반대 표면인 후면부(back surface)로 한 경우에는 측정치가 유사하나 구조체의 측면부(side surface)의 경우에는 큰 차이가 발생하고 있음을 보이고 있다.

Fig. 7은 3개의 가속도계 선형 배열방식을 이용한 structural intensity 측정법의 경우 이론계산에 의한 파정수(theoretical wave number)와 원음장에서 측정된 실측 파정수(measured wave number)와의 비교를 나타낸 것이다. 실측에 의한 파정수를 이용하는 경우에는 여러 개의 공진현상이 발생하기 때문에 이론에 의한 계산치와 상당히 큰 오차가 발생하고 있음을 알 수 있으며 근음장에서도 동일한 현상이 나타났다.

Fig. 8은 원음장 조건에서 2개의 가속도계를 이용한 structural intensity 측정법에 있어서 2개의 가속

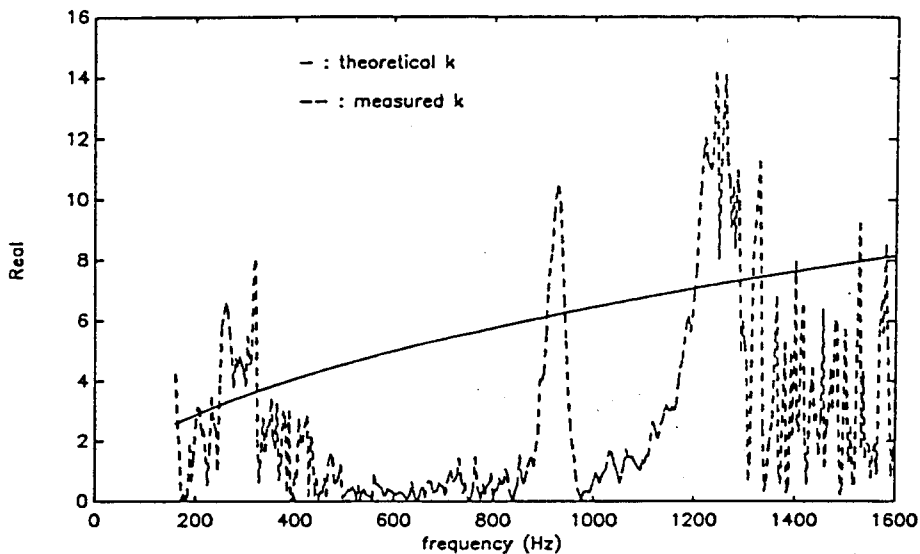


Fig. 7 Comparisons of theoretical wave number and measured bending wave number by 3.S.I. method

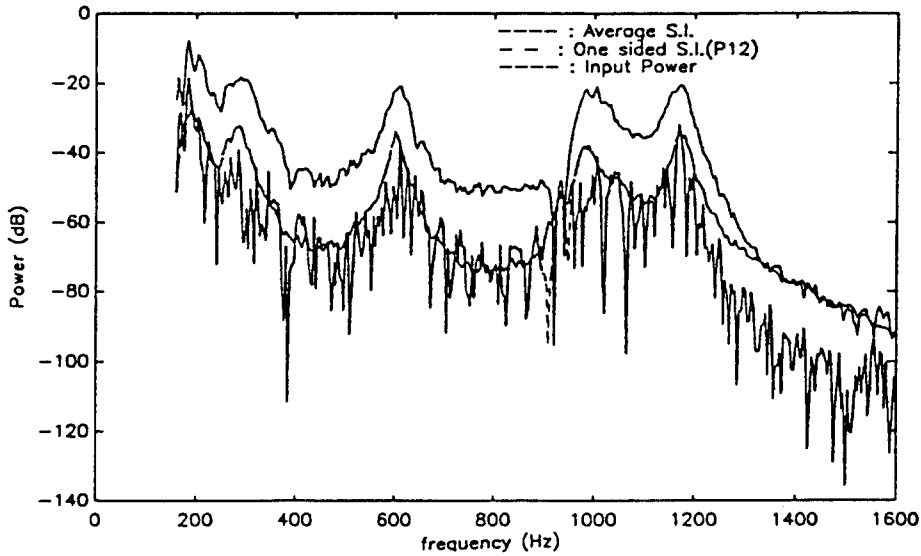


Fig. 8 Comparisons of power flow between one sided S. I. and averaged S.I. at far field

도계 위치를 상호교환하고 이때 각각의 측정치를 평균하여 이를 측정 결과치로 한 경우와 가속도계의 위치를 교환하지 않고 한번 측정한 결과를 측정결과치로 했을 때를 비교한 것이다. 1,200 Hz 이하의 저주파수 대역에서 가속도계 위치의 상호교환에 의한 평균치를 사용함으로써 위상오차(phase mismatching error)에 의해 발생하는 10~20 dB의 큰 오차를 줄일 수 있음을 보이고 있다.

5. 결 론

2개, 3개, 4개의 가속도계 선형 배열방식을 이용한 structural intensity 측정법은 모두 일반음장에서 구조체의 휨파 파워흐름량(bending wave power flow)을 신뢰성 있게 측정할 수 있는 방법이며 측정의 정밀도는 2개, 3개의 가속도계 선형 배열방식이 4개의 가속도계 선형 배열방식에 비해 높으며 실용성의 측면에서는 2개의 가속도계 선형 배열방식이 가장 유리함을 나타냈다. 이 때 2개, 3개의 가속도계 선형배열방식을 이용하여 근음장(near field)에서 일반 구조물의 휨파 파워흐름량을 측정할 경우에는 가속도계 배열간격과 측정주파수 대역을 고려하여 모우드 분석을 통한 측정점의 위치선정에 신중을 도모함이 요구된다. 2개, 3개, 4개의 가속도계 선형 배열방식을 이용한 structural intensity 측정법의 경우 측정점의 위치 설정시 모우드해석의 결과를 활용하여 절점(node)과 마디점(anti node)을 측정점으로 선정하고 가속도계의 상호교환에 의한 측정 평균치

를 이용하면 측정오차를 크게 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한 3개, 4개의 가속도계를 이용하는 경우에는 이론계산에 의한 파정수보다는 간단한 실측에 의한 파정수를 사용함으로써 측정오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 이 결과는 진동의 주된 전달파형인 휨파의 파워흐름(bending wave power flow)에 대한 경로를 보다 정확히 파악할 수 있는 측정방법을 제안한 것으로써 금후 고체전달음의 방지대책 수립이나 structural intensity법을 이용한 능동진동제어 기술개발의 기초자료로써 그 활용이 기대된다.

감사의 글

본 연구를 성공적으로 수행할 수 있도록 도와주신 미국 펜실베니아 주립대학의 관련교수, 연구원들께 감사드리며 실험 및 컴퓨터 프로그램 작성시 많은 도움을 준 오정배 박사과 김재환 씨에게 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) Noiseux, D. U., 1970, "Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plates," JASA, 47(1, part 2).
- (2) Pavic, G., 1976, "Measurement of Structure Borne Wave Intensity, Part 1: Formulation of the Methods," Journal of Sound and Vibration, 49(2), pp. 221~230.

- (3) Fahy, F. J. and Pierry, R., 1977, "Application of the Cross-Spectral Density to a Measurement of Vibration Power Flow between Connected Plates," JASA, 62, pp. 1297~1298.
- (4) Verheij, J. W., 1980, "Cross Spectral Density Methods for Measuring Structure Borne Power Flow on Beams and Pipes," Journal of Sound and Vibration, 70(1).
- (5) Linjama, J. and Lahti, T., 1989, "Measurement of Bending Wave Power Flow by the Structural Intensity Technique," Technical Research Centre of Finland, Report 583, Feb.
- (6) Bauman, P. D., 1991, "A Comparison of Structural Intensity Measurement Techniques," SIVB Riksgransen, April, pp. 315~322.
- (7) Wagstaff, PR., Bouizem, B. and Henrio, JC., 1990, "Optimization of Structural Intensity Measurements for Lightly Damped Structures," CETIM International Congress on Intensity Techniques, Senlis, France, 27~29, Aug.
- (8) Xie, H. and Crocker, M. J., 1992, "Measurements of the Vibrational Power Flow in Beams and Plates using the structural Intensity Method," Proc., Noise-Con 91, Canada, pp. 537~540, July.
- (9) Kay, K. and Swanson, D. C., 1992, "Error Induced in Bending Wave Power Measurements Resulting From the Presence of Longitudinal Waves," inter-noise 92, Canada, pp. 537~540, July.
- (10) Carrol, G. P., 1987, "Structural Response and Power Flow Measurements utilizing Cross Spectra," PhD. Dissertation, Catholic University of America, Washington DC.
- (11) McDevitt, T. E., 1991, "Development and Evaluation of Laser Doffler Techniques for Measurements of Flexural and Longitudinal Structural Intensity," PhD Thesis, The Penn. State University.
- (12) Bouchard, G. and Bogy, D. B., 1985, "Experimental Measurement of Scattered Surface Waves Using a Laser-Doppler Probe," JASA, Vol. 77, No. 3, March.
- (13) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1980, "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis," Wiley, New York.
- (14) Meyer, B., 1988, "Comparative Techniques for Structural Intensity in Cylinders," Noise-Con 88 Proceedings, Purdue University, pp. 347-352.
- (15) Quinlan, D., 1985, "Measurement of Complex Intensity and Potential Energy Density on Structural Bending Waves," M. S. Thesis, The Pennsylvania State University.
- (16) Rasmussen, P., 1983, "Measurement of Vibration Intensity," B & K Technical Report 30/5 c1~c12.
- (17) Seybert, A. F., 1981, "Statistical Errors in Acoustic Intensity Measurements," Journal of Sound and Vibration, Vol. 75, No. 4, pp. 519~526.