

<논 문>

진동원으로부터 지지구조물에 전달되는 진동 파워의 추정

- 수평방향으로 전달되는 진동파워의 추정 및 측정 -

Estimation of Vibrational Power Transmitted from Vibration Source to Supporting Structure

- Estimation and Measurement of Vibrational Power Transmitted in the Horizontal Direction -

김 재 철* · 주 진 수**

Jae Chul Kim and Jin Soo Joo

(1998년 8월 24일 접수 ; 1998년 10월 27일 심사완료)

Key Words : Structure-Borne Sound(고체 전파음), Statistical Energy Analysis(통계적 에너지 해석법), Mechanical Impedance(기계 임피던스), Vibrational Power(진동 파워)

ABSTRACT

This paper describes the method to measure of the vibrational power transmitted from the vibration source to the supporting structure in the horizontal direction. Generally, it is impossible to measure horizontal forces at the coupling points. However, the vibrational power transmitted in the horizontal direction can be measured by using indirect method that is based on the mechanical impedance and velocities at the coupling points. We proposed the method to estimate the vibrational power when the vibration source and supporting structure cannot be separated. In this paper, the vibrational power transmitted in the horizontal direction is also estimated by using this method. The estimated and measured results of the mobilities at the coupling point and vibrational power in the horizontal direction are compared. It is shown that the estimated results agree well with the measured results. For the supporting structure with multiple coupling points, the other coupling points should be considered for measuring the vibrational power transmitted through one coupling points. We examine the effects of other coupling points and measure the vibrational power without considering the other coupling points.

1. 서 론

선박, 차량, 건물 등과 같은 구조물에 엔진, 송풍기 등과 같은 기기를 설치하면, 기기의 가진력에 의

해서 구조물내에 진동이 전파되어 진동원과 멀리 떨어진 곳에서 소음이 발생한다. 이러한 고체전파음을 평가하기위해서 진동 에너지가 오래 전부터 이용되어 1960년경 Lyon이 에너지를 이용하여 음향계와 진동계를 동시에 해석할 수 있는 통계적에너지해석 방법(statistical energy analysis : SEA)⁽¹⁾을 제안하였고, 1970년경에는 noiseux에 의해서 구조물내 진동에너지의 전파과정을 파악하기위해서 진동 인텐

* 정회원, 한국철도기술연구원

** 정회원, 한일장신대학교 건축학부

시티(vibration intensity)⁽²⁾가 제안되었다. 현재 SEA법은 선박, 건축, 자동차, 철도차량 등 다양한 분야에서 널리 이용되고 있다. 이렇게 진동에너지를 이용하여 구조물의 해석, 진동의 제어 및 진동원의 평가를 하기 위해서는 진동원으로부터 구조물에 전달되는 진동파워의 측정이 필요하다.

이 진동파워는 진동원과 구조물이 결합되는 점의 힘과 속도로부터 직접측정을 할 수 있다. 그러나 일반적으로 속도는 용이하게 측정할 수 있으나, 힘은 직접측정하기가 어렵기 때문에 구조물의 기계임피던스 혹은 모빌리티를 이용한 추정방법이 연구되었다. Pinnington⁽³⁾과 Moorhouse⁽⁴⁾ 등은 구조물의 모빌리티와 진동원과 구조물사이의 방진고무를 이용하여 간접적인 측정방법을 제안하였으며, 또한 저자는 진동원과 구조물을 분리하지 않고 구조물에 관한 결합점의 기계임피던스를 추정하여 구조물에 전달되는 진동파워를 추정하는 새로운 방법을 제시하였다⁽⁵⁾.

일반적으로 진동원으로부터 구조물에 전달되는 진동파워는 진동원과 구조물이 결합되는 점에서 3축방향으로 전달된다. 그러나 3축방향으로 전달되는 진동파워를 전부 측정하는 것은 불가능하기 때문에 우선 저자는 일반적으로 가장 큰 진동파워가 전달되는 수직방향만을 고려하여 구조물내에 전달되는 진동파워의 측정과 추정에 대한 실험을 하였다⁽⁶⁾.

본 논문에서는 구조물에 관한 결합점의 기계임피던스와 속도를 이용한 간접적인 방법으로 수평방향으로 전달되는 진동파워를 측정하였으며, 저자가 제안한 추정방법의 결과와 비교하였다. 그리고, 이러한 간접적인 방법을 이용할 경우 진동원과 구조물의 결합점 수에 따라 구조물에 관한 결합점의 기계임피던스의 측정이 증가하여 진동파워 측정시 많은 실험이 필요하기 때문에 결합점 수와 관계없이 간단히 진동파워를 측정 할 수 있는 방법에 대해서도 검토를 하였다.

2. 진동파워의 측정 및 추정방법

2.1 진동파워의 측정방법

진동원과 구조물이 결합되어있는 상태에서 진동원으로부터 구조물에 전달되는 진동파워는 진동원과 구조물이 결합되는 점의 힘 $F(t)$ 와 속도 $V(t)$ 로부터 다음과 같이 측정할 수 있다.

$$P(t) = \langle F(t)V(t) \rangle_t = \frac{1}{T} \int_0^T FV dt \quad (1)$$

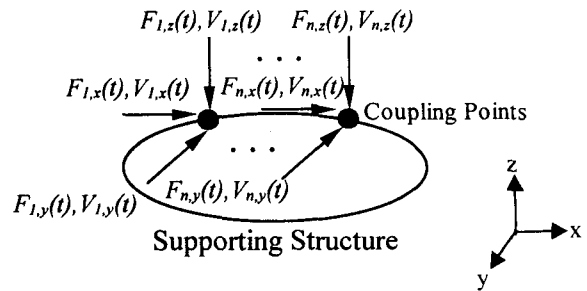


Fig. 1 Forces and velocities at the coupling points on the supporting structure with multiple coupling points

여기서, $\langle \rangle_t$ 는 시간평균, T 는 주기를 나타낸다. 진동원과 구조물이 한점으로 결합되어 있는 경우는 구조물의 결합점의 기계임피던스를 이용하면, 다음과 같이 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$P(\omega) = \frac{1}{2} \text{Re}\{F(\omega)V(\omega)^*\} = \frac{1}{2} |V(\omega)|^2 \text{Re}\{Z(\omega)\} \quad (2)$$

여기서, V^* 는 V 의 공액 복소수이며, Re 은 실수부, $Z(\omega)$ 는 구조물에 관한 결합점의 기계임피던스를 나타낸다.

또한, 진동원과 구조물이 다점으로 결합되어 있는 경우에는 식 (3)과 같이 된다.

$$P(\omega)_i = \frac{1}{2} \text{Re} \sum_{j=1}^n \{Z(\omega)_{ij} V(\omega)_j V(\omega)_i^*\} \quad (i=1 \dots n) \quad (3)$$

여기서, $Z(\omega)_{ij}$ 는 $i=j$ 일때 구동점 기계임피던스이고, $i \neq j$ 일때 전달 기계임피던스이다.

진동원의 가진력에 의해서 구조물의 결합점에 발생하는 힘은 Fig. 1과 같이 x, y, z 축방향으로 작용하기 때문에 진동파워는 3축방향으로 전달된다. 따라서 구조물의 기계임피던스를 이용하여 힘과 속도에 대한 관계식을 세우면 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} & Z_{xz} \\ Z_{yx} & Z_{yy} & Z_{yz} \\ Z_{zx} & Z_{zy} & Z_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)는 행렬로 표현된 식으로 다음과 같은 요소를 갖고 있다.

$$F_x = \begin{bmatrix} F(\omega)_{x1} \\ \vdots \\ F(\omega)_{xn} \end{bmatrix}, Z_{xy} = \begin{bmatrix} Z_{x1y1} & \dots & Z_{x1yn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{xny1} & \dots & Z_{xnyn} \end{bmatrix}$$

$$V_x = \begin{bmatrix} V(\omega)_{x1} \\ \vdots \\ V(\omega)_{xn} \end{bmatrix}$$

상식에서 기계임피던스 $Z_{kl}(k, l=x, y, z)$ 이 직교성에 의해서 $k \neq l$ 인 경우 $Z(\omega)_{kl}=0$ 이 된다고 가정하면 진동원과 구조물이 다수의 결합점으로 결합되어있고, x, y, z 축방향으로 힘이 작용할 경우, 결합점을 통해서 진동원으로부터 구조물에 전달되는 진동파워는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$P_i(\omega) = \frac{1}{2} \text{Re} \{ V_x^T Z_{xx} V_x^* + V_y^T Z_{yy} V_y^* + V_z^T Z_{zz} V_z^* \} \quad (5)$$

진동원에 의해서 구조물상에 발생하는 힘은 일반적으로 랜덤진동으로 속도에 관한 스펙트럼을 이용하여 식 (5)을 표시하면 다음과 같다.

$$P_i = \text{Re} \sum_{j=1}^n \{ (Z_{xixj} G_{xjxi}) + (Z_{yiyj} G_{yjyi}) + (Z_{zizj} G_{zjzi}) \}_{(i=1-n)} \quad (6)$$

여기서, $G_{kiki}(k=x, y, z)$ 는 속도에 대한 스펙트럼으로, $i=j$ 인 경우는 파워 스펙트럼이며, $i \neq j$ 인 경우에는 크로스 스펙트럼이다.

식 (6)을 이용하여 각 방향으로 전달되는 진동파워를 추정할 수 있다.

2.2 진동파워의 추정방법⁽⁵⁾

위의 방법으로 진동파워를 구할 경우 식 (3)의 $Z(\omega)_{ij}$ 는 진동원과 구조물이 분리되면 구조물의 결합점에 가진실험을 하여 직접추정할 수 있다. 그러나 분리되지않는 경우에는 구조물에 대한 결합점의 기계임피던스의 추정이 불가능하므로 저자는 진동원과 구조물을 분리하지않고 결합된 상태에서 간단한 가진실험으로부터 추정할 수 있는 진동응답을 이용하여 결합점의 기계임피던스를 추정할 수 있는 방법을 제안하였고, 이 기계임피던스의 추정치와 결합점에 대한 속도의 추정치를 이용하여 진동파워를 추정하는 방법을 제안하였다. 식 (7)은 저자가 제안한 구조물에 대한 결합점의 기계임피던스를 추정하는 식이다.

$$H_{cc} = (T_{ca} T_{da}^{-1}) \{ T_{cd}^T - T_{bd}^T (T_{ba}^T)^{-1} T_{ca}^T \} \times \{ I - (T_{ba}^T)^{-1} T_{ca}^T \}^{-1} \quad (7)$$

상식에서 H 는 구조물의 모빌리티의 행렬, T 는 결합된 구조물의 모빌리티의 행렬, I 는 단위 행렬,

첨자 T 는 전치행렬을 나타내고 a, b, c, d 는 진동원의 결합점 이외의 점, 진동원의 결합점, 구조물의 결합점, 구조물의 결합점 이외의 점을 나타낸다. 그리고 앞의 첨자가 응답점, 뒤의 첨자가 가진점을 나타낸다.

식 (7)를 이용하여 진동원과 구조물이 결합되어있는 상태에서 점 a, b 에 가진력을 가하여 결합구조물에 관한 모빌리티의 행렬 $T_{ba}, T_{ca}, T_{da}, T_{bd}, T_{cd}$ 를 측정하면 구조물에 대한 결합점의 모빌리티 H_{cc} 를 추정할 수 있으며, 역행렬 H_{cc}^{-1} 를 구하면 식 (3)의 기계임피던스 $Z(\omega)_{ij}$ 를 구할 수 있다.

3. 실험

본 장에서는 진동원으로부터 구조물에 수평방향으로 전달되는 진동파워의 측정 및 추정을 하기위해서 제작한 실험장치 및 실험방법에 대해서 기술한다.

3.1 실험장치

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 장치를 나타낸 것으로서 가진기와 가로×세로×두께가 500×400×5 mm의 강판을 진동원으로하고, 가로×세로×두께가 700×600×5 mm의 강판과 방진고무, 베드 및 마루 전체를 구조물로 설정하였다. 가진기의 진동판에는 직경 120 mm, 두께 20 mm의 강철 원판을 부착해서 원판의 관성반력을 진동원의 가진력으로 하였다. 또한 가진실험으로부터 수평방향에 대한 결합구조물의 모빌리티를 측정하기위해서 상하강판 위에 직각사각

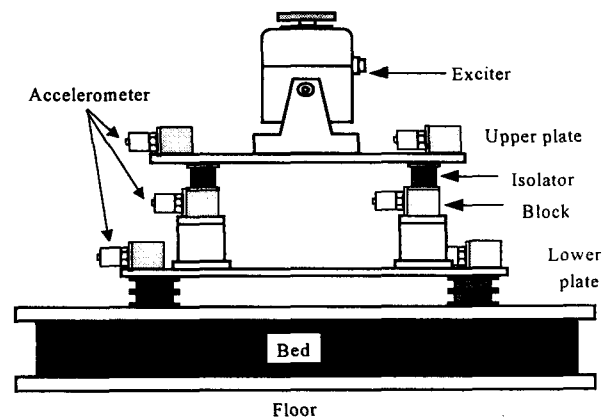


Fig. 2 Schematic diagram of the vibration source supporting structure

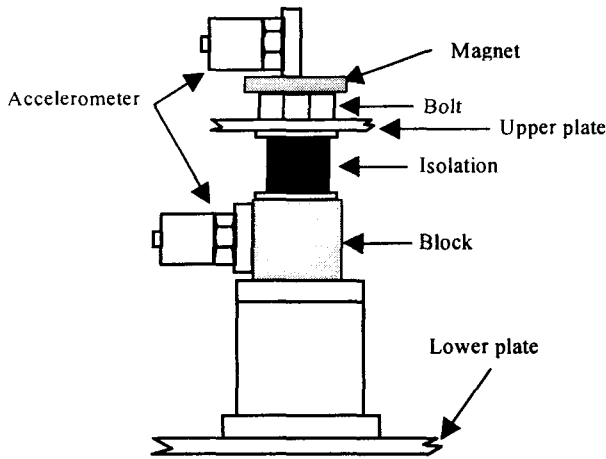


Fig. 3 Experimental layout at the coupling points

형의 블록을 4개씩 부착하고 블록 측면에는 가속도계를 보울트로 고정하였다.

Fig. 3은 상하 강판사이의 결합부분의 상세도를 나타낸 것이다. 강판 사이의 원통형방진고무 하단에 직사각형의 블록을 삽입하여 블록의 상단을 구조물의 결합점으로 설정하였다. 직사각형의 블록 측면에 가속도계를 설치하여 구조물의 결합점의 속도를 측정하였으며, 위 강판과 방진고무를 연결하는 보울트에 가속도계를 자석으로 부착하여 진동원의 결합점의 속도를 측정하였다.

3.2 결합구조물에 관한 모빌리티의 측정

본 연구에서 제안한 결합점의 기계임피던스와 진동파워를 추정하기 위해서 Fig. 2의 실험장치의 상하강판에 설치된 직사각형의 블록측면을 임펄스 해머로 가진하고 블록측면에 고정된 가속도계로부터 진동응답을 측정하여 결합구조물의 모빌리티 T_{ba} ,

T_{ca} , T_{da} , T_{bd} , T_{cd} 를 측정하였다.

3.3 구조물에 관한 결합점 모빌리티의 측정

추정식 (7)의 결과와 비교하기 위해서 진동원에 해당하는 가진기, 상부의 강판 및 방진고무를 제거한 상태에서 Fig. 3의 직사각형의 블록측면을 임펄스 해머로 가진하고 블록에 설치된 가속도계로부터 속도를 측정하여 구조물에 관한 결합점의 모빌리티 H_{cc} 를 측정하였다.

3.4 진동파워의 측정

Fig. 2에서 가진기에 랜덤신호를 보내어 진동파워

가 가진기로부터 구조물에 전달되도록 하였다. 진동파워의 측정은 가진기 작동시 Fig. 3의 블록에 고정된 가속도계로 측정된 결합점의 속도와 3.3절에서 측정된 모빌리티를 이용하여 진동파워를 측정하였다.

또한 Fig. 2의 가진기를 45도, 90도 눕힌 상태에서 수평방향으로 전달되는 진동파워를 측정하여 진동파워의 변화를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 구조물에 관한 결합점 모빌리티의 측정 및 추정결과

본 실험장치는 진동원과 구조물이 4점으로 결합되어 있어 수평방향에 대해서 16개의 결합점의 모빌리티를 측정할 수 있으며, 추정식 (7)로부터 16개의 모빌리티를 추정할 수 있다. Fig. 4는 1개의 모빌리티에 대한 결과이며 기준치는 1 m/Ns이다. 실선은 3.3절에서 설명한 측정치이며 점선은 3.2절의 방법으로 측정된 모빌리티를 식 (7)에 대입해서 계산한 추정치이다. 추정치와 측정치가 T_{ba} , T_{ca} , T_{da} , T_{bd} , T_{cd} 의 측정오차로 인하여 약간의 오차가 있지만, 전체적으로 동일한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

4.2 진동파워의 측정 및 추정결과

본 실험에서는 구조물의 결합점에서 수평방향의 힘을 직접측정할 수 없기 때문에 기계임피던스와 속도를 이용한 간접적인 측정방법을 이용하여 측정된 결과와 저자가 제안한 추정방법의 결과를 비교하였다.

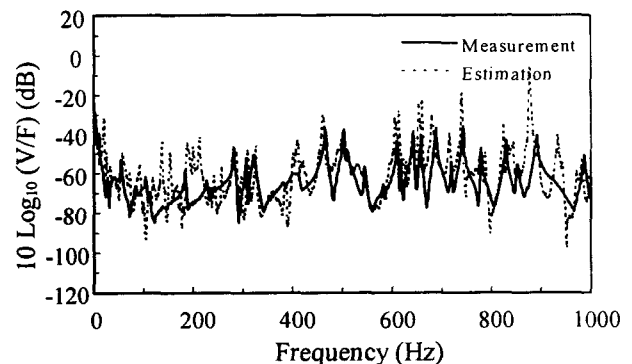


Fig. 4 Comparison of measured and estimated mobilities at the coupling point

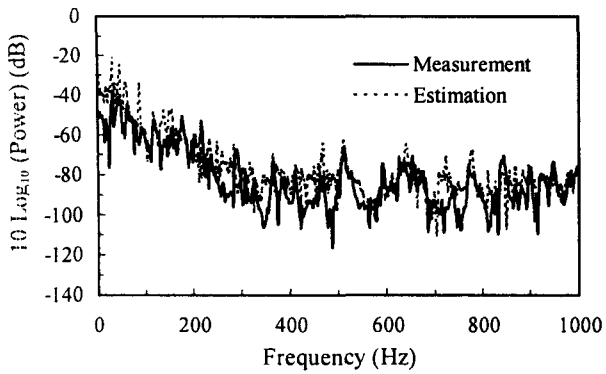


Fig. 5 Comparison of measured and estimated values of vibrational powers

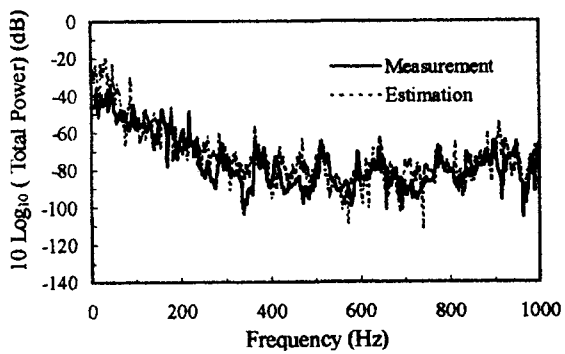


Fig. 6 Comparison of measured and estimated values of total vibrational power

Fig. 5는 한 개의 결합점을 통해서 전달되는 진동 파워의 측정치와 추정치의 결과이며, Fig. 6은 각 결합점을 통해서 전달되는 진동파워의 합, 다시 말해서 진동원으로부터 구조물에 전달되는 총 진동파워의 측정치와 추정치의 결과이다.

Fig. 5와 6으로부터 측정치와 추정치의 결과가 일치하고 있는 것을 확인 할 수가 있다.

Fig. 7은 가진기를 수직인 상태에서 45도와 90도로 놓혀 수직방향과 수평방향으로 전달되는 진동파워를 측정 한 결과이다. △표시가 수직방향으로 전달되는 진동파워이며, ○표시가 수평방향으로 전달되는 진동파워이다. 그리고 □표시가 수직방향과 수평방향에 대한 진동파워의 합이다.

위의 결과로부터 가진기의 각도가 커질수록 주파수 80 Hz부근 이하에서 수직방향의 진동파워는 점점 감소하고, 80 Hz부근 이상에서부터 300 Hz부근 이하의 진동파워가 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 가진기의 각도가 커질수록 수평방향으로 작용하는 가진력의 증가와 함께 결합점에서 모우멘트가 발생하여 나타난 결과로 생각되어진다. 또

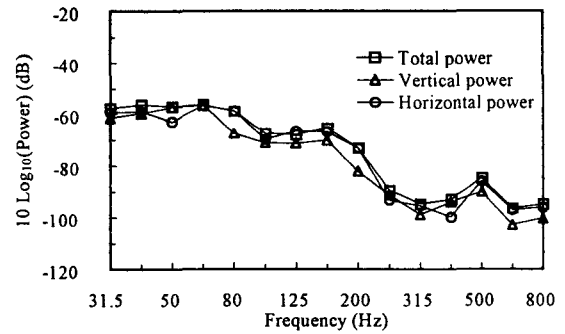
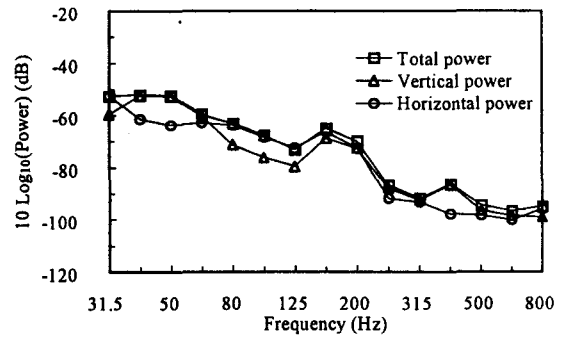
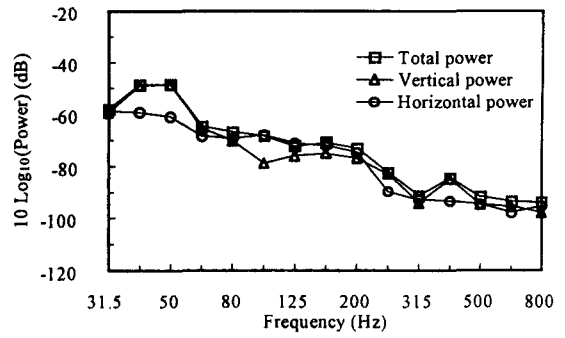


Fig. 7 Measured values of vibrational power transmitted in the each direction

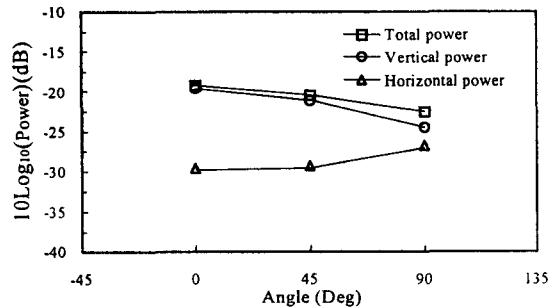


Fig. 8 Overall values of vibrational power transmitted in the each direction

한 가진기의 각도가 커질수록 점차적으로 수평방향의 기여도가 커져 수직방향과 수평방향의 진동파위가 거의 동일하게 전달되는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 위의 결과에 대한 주파수전체의 합을 나타낸 것으로서 가진기의 각도가 커질수록 수직방향의 진동파위는 감소하고 수평방향의 진동파위가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 구조물에 전달되는 진동파위는 가진기의 가진방향에 따라 다양한 경로를 갖는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서 수직방향과 수평방향의 진동파위의 합이 가진기의 각도가 커질수록 약간 감소하는 것은 본 실험에서 고려하지 않은 방향으로 전달되는 진동파위의 영향으로 생각된다.

4.4 타결합점의 영향

진동원과 구조물이 다점으로 결합되어있는 경우 각 결합점을 통해서 전달되는 진동파위는 서로 상호관계를 갖는다. 따라서 기계임피던스와 속도를 이용하여 진동파위를 측정할 경우 결합점의 수에 따라 측정해야 하는 기계임피던스가 증가 하기 때문에 각 결합점간의 상호관계를 무시하여 식 (3)에서 전달임피던스를 생략하면 식 (8)과 같이 쓸 수 있어 각 결합점을 통해서 전달되는 진동파위는 결합점의 수에 관계없이 간단히 측정된다.

$$P(\omega)_i = \text{Re}(Z_{ii}) G_{vvi} \quad (i=1 \sim n) \quad (8)$$

본 실험에서는 결합점간의 상호관계를 조사하기 위해서 식 (6)의 수평방향만을 고려한 식과 식 (8)로부터 얻은 진동파위의 결과를 비교하였다.

Fig. 9는 모빌리티와 속도의 측정치를 이용하여 얻은 결과이다. 실선은 식 (6)으로부터 구한 결과이고, 점선은 식 (8)로부터 구한 결과이다. Fig. 9로부터 본 실험에서는 결합점간의 영향이 적어서 결합점

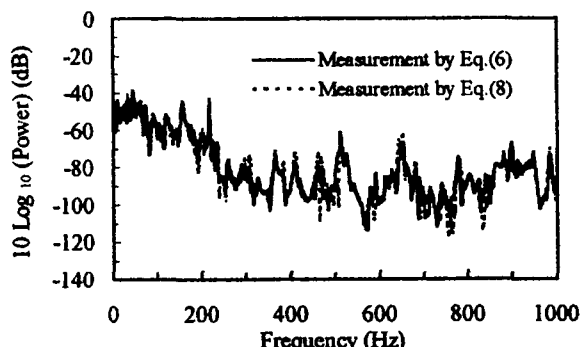


Fig. 9 Effect of other coupling points on vibrational power using measured mechanical impedances

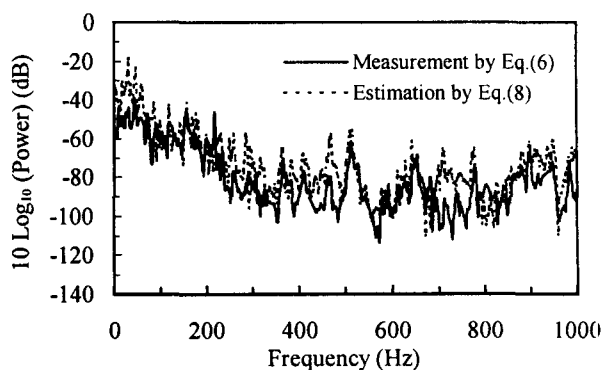


Fig. 10 Effect of other coupling points on vibrational power using measured and estimated mechanical impedances

의 상호관계를 무시한 식 (8)을 이용하여도 결합점을 통해서 전달되는 진동파위를 측정할 수 있는 것을 확인하였다.

Fig. 10은 저자가 제안한 진동파위의 추정방법을 이용한 결과이다. 실선은 Fig. 9의 실선과 동일한 결과이고 점선은 Fig. 4의 모빌리티의 추정치와 속도의 측정치를 식 (8)에 대입해서 얻은 결과이다. 약간의 오차가 있지만 추정치와 측정치가 전체적으로 동일한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구의 결과를 정리하면, 다음과 같다.

- (1) 결합점의 기계임피던스와 속도를 이용하여 구조물에 수평방향으로 전달되는 진동파위를 간접적으로 측정하였다.
- (2) 진동원과 구조물에 결합된 상태에서 진동원과 구조물을 분리하지 않고도 결합구조물의 모빌리티를 이용하여 수평방향에 대한 구조물의 기계임피던스와 진동파위를 추정하였다.
- (3) 진동원의 가진상태에 따라 구조물에 전달되는 진동파위는 다양한 전달경로를 갖고 있는 것을 확인 하였다.
- (4) 결합점간의 상호영향이 적을 경우에는 다른 결합점의 영향을 무시하고 구조물에 전달되는 진동파위를 측정할 수 있는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Lyon, R. H., 1975, "Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems Theory and

- Application," MIT Press, pp. 373.
- (2) Noiseux, D. U., 1970, "Measurement of Power from in Uniform Beams and Plates," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 47, pp. 238~247.
- (3) Pinnington, R. J and White, R. G., 1981, "Power Flow through Machine isolators to Resonant and Non-resonant Beams," Journal of Sound and Vibration, Vol. 75(2), pp. 179~197.
- (4) Moorhouse, A. T and Gibbs, B. M., 1993, "Prediction of the Structure-Borne Noise Emission of Machines: Development of a Methodology" Journal of Sound and Vibration, Vol. 167(2), pp. 223 ~237.
- (5) 김재철, 이종원, 1998, "기계임피던스의 추정에 의한 진동파워의 예측방법," 기계학회논문집, 제 22 권, 제 5 호, pp. 929~937.
- (6) 김재철, 이종원, 1998, "진동원으로부터 지지구조물에 전달되는 진동파워의 추정방법," 소음진동학회논문집, 제 8 권, 제 2 호, pp. 397~384.