

1차원 구조물내에서 진동 인텐시티의 계측에 대한 연구

이덕영 · 박성태

울산전대 기계과 · 울산대 자동차공학과

<요 약>

진동 인텐시티는 구조물내의 단위폭 단면을 흐르는 진동 에너지로서 벡터량이다. 본 연구에서는 굽힘 진동을 받는 보에 대한 진동 인텐시티의 계측 이론을 검토하였다. 일차원의 진동 인텐시티는 4점에서의 측정값으로 구할 수 있으며, 원거리장의 가정이 성립하면 2점에서의 측정값으로 구할 수 있으며, 이를 실험을 통해 확인하였다. 그리고 파동해와 진동 인텐시티와의 관계식을 정식화하여 파동해의 각 계수를 분리하여 구할 수 있는 방법을 제시하였으며, 실지 측정에서 큰 영향을 미치는 근접장의 범위를 해석 및 실험을 통해 확인하였다.

A Study on Vibration Intensity Measurement in One-dimensional Structure

Lee, Dug-young · Park, Sung-tae

Dept. of Mechanical Engineering · Dept of Automotive Engineering

<Abstract>

This paper investigated the theory for measuring the vibration intensity (power flow per width of cross section) in uniform beams vibrating in flexure. The intensity is obtained as a vector at measurement point. One-dimensional vibration intensity can be measured at 4 points, or 2 points on the assumption of far field. Formulation of the relation between bending waves in structures and vibration intensity makes it possible to separate the wave component by which one can get a state of the vibration field. Then, the effect of the near field, which is thought to be great in the actual measurement, is examined by computer simulation and confirmed by experiment.

1. 서 론

기계 구조물의 진동과 진동으로 인해 발생하는 고체전달음(Structure borne sound)에 의한 소음의 저감에 대한 능동적인 대책으로 진동원의 규명과 진동의 전달 경로를 찾아 주위로 전달되는 진동 에너지를 흡수 제어하는 방법이 있다. 즉 기계 구조물내의 진동 에너지의 전달량과 주경로를 찾아 전달 경로를 차단하는 등 적극적으로 소음에 대처하는 기법이다. 이 방법은 다수의 운동 모드와 광역 주파수대에 걸쳐 유효한 방법으로 현재 넓은 범위에 걸쳐 활용되고 있다.

구조물의 동적 거동을 파악하는데 유용한 에너지 전달 특성을 파악하는 방법으로서 현재 사용되고 있는 단순한 진동레벨의 측정만으로는 어려운 점이 많다. 왜냐하면 진동 레벨이 에너지 레벨에 직접 관계되지 않기 때문이다. 따라서 단순한 진동레벨의 측정보다는 구조물의 진동에 의해 발생하는 에너지 흐름의 분포를 나타내는 진동 인텐시티(Vibration intensity)를 측정하는 것이 유리하다. 여기서 진동 인텐시티란 단위 시간에 구조물내의 단위폭 단면을 흐르는 진동 에너지를 말하며 에너지의 크기와 방향성을 가진 벡터량이다.

진동 인텐시티의 계측은 1970년대부터 Noiseux¹⁾와 Pavic²⁾에 의해 전개된 이론을 근거로 많은 실험적 방법이 시도되고 있지만, 계측 방법으로서 실용화는 되지 않고 있다. 그 이유는 근접장의 효과, 대상물의 굽힘 강성 값과 측정과의 관계, 실제계측에 있어서의 오차에 대한 평가 등이 명확하게 처리되지 못하기 때문이다³⁾. 그러나 최근 Multi-ch FFT, 고정도 계측기, 컴퓨터 등을 이용한 데이터처리의 발전에 동승하여 급속한 진전을 보이고 있다.

본 연구에서는 진동 인텐시티 계측의 실용화를 위한 기초 연구로 일차원 보(beam)를 대상으로 구조물의 굽힘 진동(flexural vibration)에 관련된 진동에너지의 계측에 대한 이론과 실험 양면을 검토하여 실용화를 위한 적당한 방향을 제시하고자 한다.

2. 진동 인텐시티 이론 해석

2.1 진동 인텐시티 기초식

보의 횡진동에 대한 운동방정식은 보에 작용하는 전단력을 Q , 굽힘 모멘트를 M 이라 할 때 외력이 작용하지 않는 균일보의 경우 얇은 보의 이론(Bernoulli-Euler beam theory)을 적용하면 다음 식(1)과 같은 파동 방정식으로 표현된다.⁴⁾

$$\frac{B}{m} \nabla^2(\nabla^2 \eta) = -\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서, $B = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ 로서 단위 폭당 굽힘 강성이며, E 는 영률(Young's modulus),

h 는 보의 두께, μ 는 프와송비(Poisson's ratio), m 은 선밀도, ∇^2 는 라플라스 연산자, η 는 수직진동변위(normal displacement)이다.

한편, 보에 전달되는 파워는 전단력과 속도의 곱, 모멘트와 각속도의 곱으로 정의되므로 보내의 한 점에서의 굽힘파에 의한 진동 인텐시티는 다음 식(2)로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} W(x, t) &= Q \frac{\partial \eta}{\partial t} - M \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial t} \\ &= B \left[\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t \partial x} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

그러나 식(2)의 공간변수의 미분항을 직접 측정할 수 있는 방법이 없으므로 Pavic의 제안²⁾과 같이 공간미분항을 유한 차분 근사(Finite difference approximations)를 사용하면 다음 식(3)과 같이 근사화 할 수 있다.

$$W(x, t) = \frac{B}{\delta^3} \{ \dot{\eta}_3(\eta_1 - 2\eta_2 + \eta_3) - \dot{\eta}_2(\eta_2 - 2\eta_3 + \eta_4) \} \quad (3)$$

여기서, δ 는 x축상의 측정점간의 간격, η_i 는 측정점의 변위이며(x축 양의 방향으로 $i=4 \sim 1$), $\dot{\eta}$ 는 η 의 시간에 대한 미분을 의미한다. 이 식(3)은 진동하는 보의 순간 굽힘 파워어 흐름 즉 순간 굽힘 진동 인텐시티를 나타낸다. 그런데 실제 계측은 유한시간 구간동안 수행될 것이므로 시간의 평균값으로 취급하면 편리하다. 정의에 의하여 시계열의 시간평균값은 $\langle f(t) \rangle$ 로 표현하며 다음과 같다.

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4)$$

식(3)에 시간함수들의 특성들을 적용하면 진동 인텐시티의 시간에 대한 평균값은 다음의 식(5)로 표현된다.

$$\langle W(x, t) \rangle = \frac{B}{\delta^3} \langle \dot{\eta}_2(4\eta_3 - \eta_4) - \eta_1 \dot{\eta}_3 \rangle \quad (5)$$

따라서, 진동 인텐시티를 측정하기 위해서는 4곳의 다른 지점에서 동시에 보의 응답을 측정하는 것이 필요하다. 그런데 계측해야 하는 값이 변위 또는 속도이므로 이를 변위 또는 가속도로 통일하여, 보다 간단하게 주파수 영역에서 측정이 이루어질 수 있도록 식(5)를 후리에 변환하고, Verheij의 결과를 이용하면⁵⁾

$$\langle W(x, f) \rangle = \frac{B}{\delta^3 \omega^3} \int_0^\infty \{4\text{Im}G_{23} - \text{Im}G_{13} - \text{Im}G_{24}\} df \quad (6)$$

이 되는데, G_{ij} 는 가속도 $\ddot{\eta}_i$, $\ddot{\eta}_j$ 의 편측 크로스 스펙트럼 밀도(one-sided cross spectral density)를 의미한다. 만일 가속도계 부착으로 인한 질량 증가 효과가 문제가 되는 경우는 비접촉 변위계를 이용하여 변위를 측정하여 인텐시티 스펙트럼을 구할 수 있다. 이 경우 식(6)은

$$\langle W(x, f) \rangle = \frac{B\omega}{\delta^3} \int_0^\infty \{4\text{Im}G_{23} - \text{Im}G_{13} - \text{Im}G_{24}\} df \quad (7)$$

이 되며, G_{ij} 는 변위 η_i , η_j 의 편축 크로스 스펙트럼 밀도를 의미한다. 위 식(6), (7)이 일반적인 진동 인텐시티의 평균값을 구하는 식이 되며 4곳의 지점에서 동시에 가속도 또는 변위를 측정하여 스펙트럼 밀도를 계산하면 임의의 주파수들에 대한 진동 인텐시티를 구할 수 있다.

2.2 파동해와 진동 인텐시티

무한탄성 일차원 보에서의 굽힘파의 파동 방정식(1)의 해는 다음과 같이 식(8)로 표현된다.⁴⁾

$$\eta(x, t) = \{Ae^{-ikx} + \alpha Ae^{ikx} + A_{-j}e^{-kx} + A_{+j}e^{kx}\}e^{i\omega t} \quad (8)$$

여기서, $k = \left(\frac{m}{B}\right)^{1/4} \omega^{1/2}$ 로서 파동수(wave number)이다.

위 식(8)에서, 1항은 진행파, 2항은 후퇴파, 3,4항은 감쇠파를 의미하는데, 감쇠파란 입력 위치에서 멀어짐에 따라 소멸되어 가는 근접장(near field)에서의 응답을 나타내며, 이들 근접장의 영향은 가진점 근처뿐만 아니라 경계점과 구조물내의 임피던스 변화가 있는 구역에서도 일어난다. 이 식(8)을 식(2)에 대입하여 $\langle W(x, f) \rangle$ 를 구하면 다음 식(9)를 얻을 수 있다.

$$\langle W(x, f) \rangle = \omega B k^3 [A^2(1 - |\alpha|^2) - 2|A_{-j}||A_{+j}| \sin(\phi_{-j} - \phi_{+j})] \quad (9)$$

$$\text{단, } A_{-j} = |A_{-j}|e^{i\phi_{-j}}, \quad A_{+j} = |A_{+j}|e^{i\phi_{+j}}$$

따라서 진동 인텐시티는 식(6)과 같이 가속도 신호끼리의 크로스 스펙트럼 계산으로부터 직접 구하는 방법 외에 위 식(9)와 같이 파동해의 각계수로부터 구할 수도 있다. 이를 위해 식(8)의 각 파동 성분을 개별적으로 분리해 보는 것을 고찰해 보면 다음과 같다. 우선 식(8)의 위치 의존 항을 다음 식(10)으로 간단히 표현할 수 있으므로 이를 활용하면 (11)과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\eta(x) = Z_+ + Z_- + Z_{-j} + Z_{+j} \quad (10)$$

$$\text{단, } Z_+ = Ae^{-ikx}, \quad Z_- = \alpha Ae^{ikx}, \quad Z_{-j} = A_{-j}e^{-kx}, \quad Z_{+j} = A_{+j}e^{kx}$$

$$\begin{bmatrix} \eta \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -ik & ik & -k & k \\ -k^2 & -k^2 & k^2 & k^2 \\ ik^3 & -ik^3 & -k^3 & k^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_+ \\ Z_- \\ Z_{-j} \\ Z_{+j} \end{bmatrix} \quad (11)$$

위 식(11)에서 k 는 파동수로서 주파수, 보의 제원으로 부터 바로 결정되어지므로 4×4 행렬이 결정되고, 또 공간미분항은 계측신호 데이터로부터 유한차분 근사로 구할 수 있으므로 식(10)의 각 Z 가 구해진다. 이와 같이 각 파동성분을 분리할 수 있으면, 진행파, 후퇴파의 비율(반사계수: α)과 그 점에 걸리는 근접장 항의 크기 등을 알 수 있으므로 진동장을 파악할 수 있다.

2.3 자유장에서의 진동 인텐시티

파동 방정식의 해(8)에서 전체 보의 길이 L 의 굽힘 파장에 대한 비가 1이상이 되면 식(8)의 3항, 4항이 전체 파우어에 미치는 영향은 1%이하가 되므로 무시할 수 있다²⁾. 다시 말해 측정이 가진점이나 경계에서 파장 길이 보다 멀리 떨어진 구조물의 자유장(far field or free field)에서 이루어지면 파동 방정식의 해는 다음 식(12)로 고쳐 쓸 수 있다.

$$\eta(x, t) = (Ae^{-ikx} + \alpha Ae^{ikx})e^{i\omega t} \quad (12)$$

이 경우에는 전단력에 의한 인텐시티와 굽힘 모멘트에 의한 인텐시티가 같아지므로 둘을 따로 구할 필요없이 한쪽 성분을 구해 2배를 하면 전체 인텐시티가 구해진다.⁴⁾

이 식(12)를 식(2)에 대입하여 $\langle W(x, f) \rangle$ 에 대해 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\langle W(x, f) \rangle = \omega B k^3 [A^2 (1 - |\alpha|^2)] \quad (13)$$

그런데 식(12)로 부터 속도와 각가속도를 구해 둘의 곱에 대한 시간 평균값을 구하면

$$\left\langle \frac{\partial \eta}{\partial t} \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial t^2} \right\rangle = -\frac{\omega^3 k}{2} [A^2 (1 - |\alpha|^2)] \quad (14)$$

이 되므로 식(13)과 식(14)로 부터

$$\langle W(x, t) \rangle = \frac{2B}{C_f^2} \left\langle \frac{\partial \eta}{\partial t} \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial t^2} \right\rangle \quad (15)$$

여기서, $C_f = \frac{\omega}{k}$ 는 굽힘파의 위상 속도(flexural phase velocity)이다.

식(15)에는 단 1차의 공간미분항이 필요하므로 2개의 가속도계로 측정된 값을 이용한 유한 차분 근사가 가능하다²⁾. 따라서 식(15)는

$$\langle W(x, t) \rangle = \frac{2B}{\delta C_f^2} \langle \ddot{\eta}_1 \dot{\eta}_2 \rangle \quad (16)$$

이 되며 이를 후리에 변환하고, Verheij의 결과를 이용하면⁵⁾ 자유장에서의 진동 인텐시티 스펙트럼은 다음 식(17)이 된다.

$$\langle W(x, f) \rangle = \frac{2\sqrt{Bm}}{\omega^2 \delta} \int_0^\infty \text{Im}G_{12} df \quad (17)$$

여기서 G_{12} 는 가속도 $\ddot{\eta}_1$, $\ddot{\eta}_2$ 의 편측 크로스 스펙트럼 밀도이다. 만일 계층값이 변위라면 식(17)대신 다음 식(18)을 이용하여 진동 인텐시티 스펙트럼을 구한다.

$$\langle W(x, f) \rangle = \frac{2\omega^2 \sqrt{Bm}}{\delta} \int_0^\infty \text{Im}G_{12} df \quad (18)$$

여기서 G_{12} 는 변위 η_1 , η_2 의 편측 크로스 스펙트럼 밀도이다.

3. 일차원 보의 전산 모의실험

실제 실험에 앞서 측정법에 대한 기초자료를 얻고자 전산 모의 실험을 수행한다. 우선 먼저 근접장의 영향을 무시할 수 있는 원거리장(far field)에서는 2점의 다른 지점의 계층값으로 진동 인텐시티를 식(17)또는 (18)로 구할 수 있으므로 1차원 보의 근접장의 영향, 진동 인텐시티 각 성분의 크기, 반사의 상황 등을 확인한다.

다음 Fig.1과 같은 간단한 외팔보의 자유단에 $F_0 \sin \omega t$ 의 크기로 정현파 가진된 경우를 고려한다.

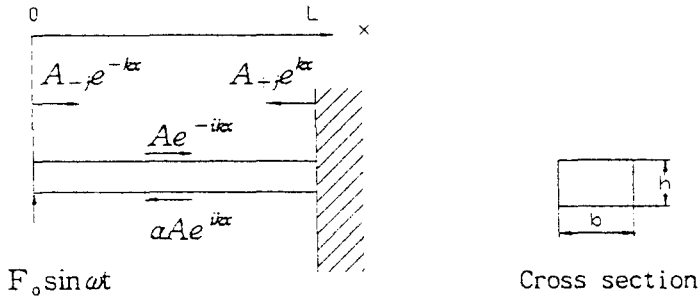


Fig.1 일차원 보

파동해의 각 복소 진폭은 경계 조건에 의해 구해지며, $x=L$ 이 완전 고정단이면 경계조건은

$x=0$ 에서

$$F_0 = EI \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \quad 0 = \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}$$

$x=L$ 에서

$$0 = \eta \quad 0 = \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

이 되며, 파동방정식의 해에 위의 경계조건을 대입하여 행렬로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 1 \\ i & -i & -1 & 1 \\ e^{-ikL} & e^{ikL} & e^{-kL} & e^{kL} \\ -ie^{-ikL} & ie^{ikL} & -e^{-kL} & e^{kL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ \alpha A \\ A_{-j} \\ A_{+j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_0/(bBk^3) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

위 행렬(19)로부터 각 계수를 구할 수 있으며, Fig.1에서 αA 를 포함하는 항은 고정단에서 반사된 항이므로 고정단의 반사계수 $|\alpha|=1$ 이고 보의 중앙에서 발생하는 동력손실을 고려하지 않으면 진동 인텐시티 $W=0$ 이다.

그리고 고정단이 불완전하여 에너지가 밖으로 전달하는 경우를 고려할 때 자유단의 경계조건만을 고려하여 감쇠파 $A_{\pm j}$ 를 무시하고 구하면

$$A_{-j} = (1+\alpha)A, \quad A = -\frac{F_0}{bBk^3} \frac{1}{(1+\alpha) - i(1-\alpha)} \quad (20)$$

$$\alpha = |\alpha|e^{i(\varepsilon-2kL)} = |\alpha|e^{i\theta}$$

단, ε : 고정단측에서 반사하는 경우의 위상의 틀어짐

$2kL$: 보를 왕복하는 경우에 생기는 위상차

이 된다. 가진점으로부터 입력되는 파워 P_{in} 은 가진점에서의 힘 F 와 속도 v 로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{1}{2} Re(F v^*) \\ &= \frac{\omega}{bBk^3} |F_0|^2 \frac{1-|\alpha|^2}{2(1+|\alpha|^2-2|\alpha|\sin\theta)} \end{aligned} \quad (21)$$

이 값을 $\alpha=0$ 의 반무한보 경우의 가진 동력과의 비로 무차원화하여 θ, α 의 변화에 대해 그리면 다음 Fig.2와 같다.

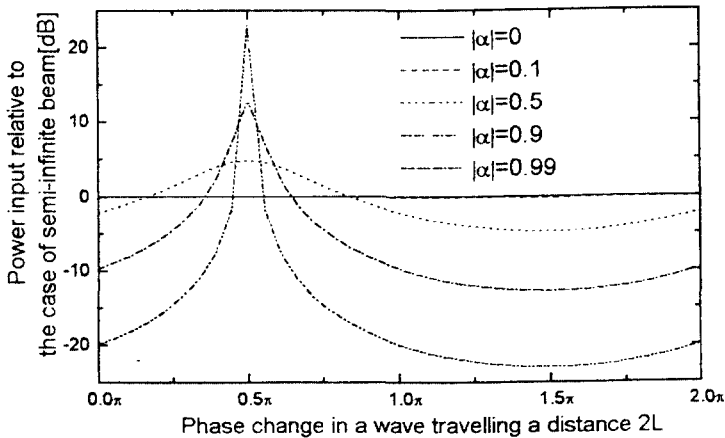


Fig. 2 반사계수 $|\alpha|$ 에 따른 가진 동력의 변화

위 Fig.2로부터 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 일 때, 즉 공진시에 가진 동력의 최대치가 얻어지며, 이 값은 반사계수 $|a|$ 가 1에 가까워짐에 따라 급격히 증가함을 알 수 있다. 결국 가진력의 절대치가 주파수와 관계없이 일정하면 반사가 대부분 잔향적이 될 때 공진주파수에서 가진 동력과 그 이외의 주파수에서 가진 되는 동력의 비는 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 근접장의 영향을 평가하기 위해 Fig.1과 같은 유한보에서 길이가 파장의 2배인 때의 진동 인텐시티의 전단력 성분, 굽힘 모멘트 성분을 이론식으로부터 구해본 결과가 Fig.3과 같다.

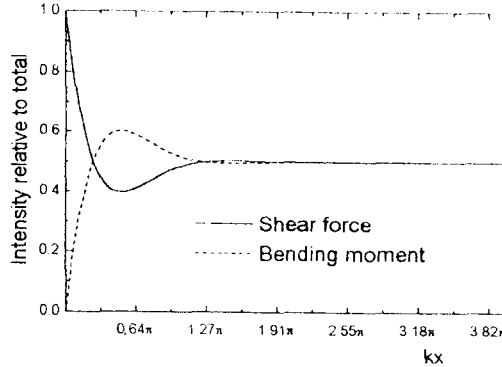


Fig.3 유한보에서의 인텐시티 각 성분

이로부터 근접장의 감쇠파의 진폭이 충분히 작아지는 1/2파장 이후부터 원거리장(far field)의 가정이 성립하고, 2개의 가속도계에 의해 전단력 또는 굽힘 모멘트에 의한 인텐시티 성분의 한쪽을 구해 2배하여 전인텐시티를 구할 수 있다. 그러나 측정 대상물의 제원, 주파수에 따라 굽힘 파의 파장은 변화하기 때문에 실제의 계측에 있어서 계측 위치가 원거리장인지 아닌지의 판단은 즉석에서 할 수는 없으며 수백 Hz의 주파수역에서도 파장이 상당히 길므로 주의가 필요하다. 예를 들면 폭 3.2cm, 높이 9mm의 연강보에서 100Hz 일 때 굽힘파의 파장은 약 0.9m로 되기 때문에 상당한 영역에서 근접장의 영향이 문제가 된다.

4. 실험 및 고찰

4.1 실험 대상

일차원 보의 진동 인텐시티의 계측을 위한 실험 대상으로는 강성의 영향을 확인하기 위하여 알루미늄과 연강보 두 가지를 사용하며 그 제원은 다음 Table 1과 같다.

Table 1 보의 제원

보의 종류	길이	단면 치수	인장강도(kg/mm ²)	비 고
알루미늄 보	2.4m	35mm x 3mm	14.2	
연강 보	2.4m	35mm x 2mm	48.2	

보의 설치는 진행파가 다시 반사되지 않고 흡수되도록 하기 위하여 모래를 채운 상자에 보의 양끝단이 묻히도록 한다. 이때 묻히는 부분은 가능한 한 반사파를 줄이기 위하여 두터운 스폰지를 통과하도록 하고 보의 중앙에서 가진기를 설치하여 정현파 가진을 한다. 가진 주파수는 1/3 옥타브 밴드로 25Hz에서 1000Hz로 한다.

4.2 실험 측정 장치의 배열

실험 장치는 Fig. 4와 같이 구성하며, 설치 상태는 Photo 1과 같다.

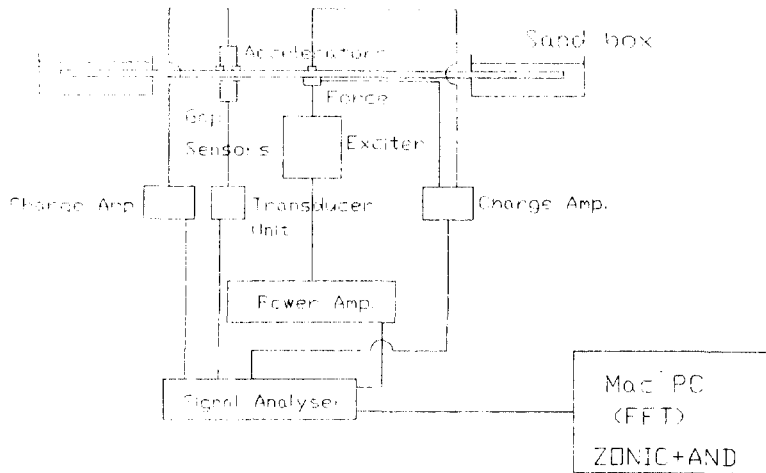


Fig. 4 실험 장치의 구성

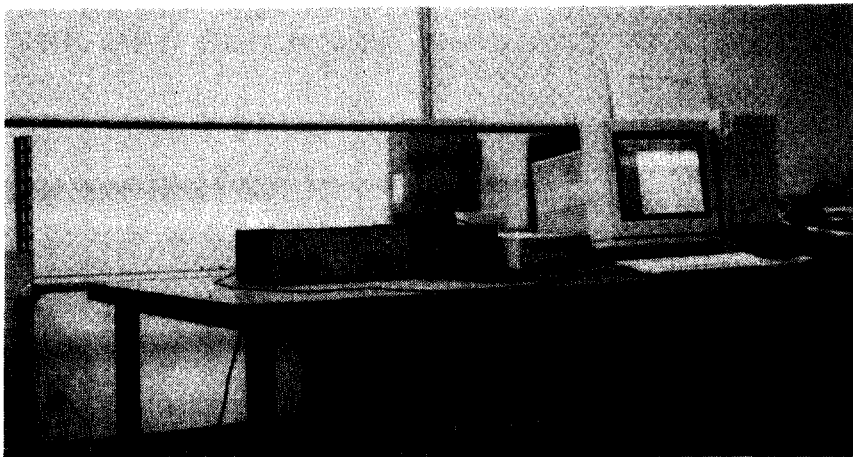


Photo 1 실험 장치의 설치

가진은 신호발생기(Zonic+AND 4001)에서 발생한 신호를 증폭기(B&K 2712)로 증폭하여 가진기(B&K 4808)로 보의 하단에서 가진 한다. 입력 파우어는 힘변환기(B&K 8200)와 가속도계(B&K 4371)로 가진점에서 측정하며, 진동 인텐시티는 가속도계와 변위계 각각을 이용하여 측정한다. 가속도계를 사용하는 경우는 소형 경량의 가속도계(B&K 4375) 2개를 사용하여 영구 자석 또는 전용 왁스로 고정한다. 측정된 가속도 신호는 진하증폭기 (B&K 2635)를 통하여 데이터 수집용 소프트웨어인 ZONIC사의 ZETA를 이용하여 처리한다. 변위 신호는 비접촉 변위계 AEC 5505 및 AEC 5509 두 종류를 보의 하단에 설치된 별도의 가이드에 각각2개씩 고정하여 변위를 측정한다. 가속도 및 변위 신호의 FFT연산 처리는 4096점 시계열 데이터를 해닝 윈도우 처리한 후 50회 평균을 하였다.

4.3 실험 내용

구조체에 전달되는 진동 인텐시티 스펙트럼과 비교되는 기준값으로서 가진기에 의하여 구조체에 입력된 기계적인 파워 즉 입력 파워 스펙트럼 P_{in} 은 임피던스 헤드에 걸리는 가진력과 가속도를 동시에 검출하여 다음 식(22)를 이용하여 측정할 수 있다.

$$P_{in} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\frac{1}{j\omega} G_{Fa} \right] \quad (22)$$

단, 여기서 Re 는 실수부, ω 는 각주파수, 그리고 G_{Fa} 는 임피던스 헤드의 가진력과 가속도의 크로스 스펙트럼밀도이다.

원거리장에서의 진동 인텐시티를 측정하고자 가속도계 및 비접촉 변위계 각각 한 쌍을 이용하여, 가진기와 좌측 모래상자 사이의 1/2지점에서 식(16)및 식(17)의 값을 측정한다. 이때 측정점 간격은 비접촉 변위계의 특성을 감안하여 AEC 5505는 40mm, AEC 5509는 80mm의 두 경우로 한다.

4.4 결과

연강보의 경우 비접촉 변위계를 이용한 측정 결과는 Fig.5, 가속도계를 이용한 결과는 Fig.6, 그리고 Fig.7은 측정점 간격을 40mm로 하였을 때 비접촉 변위계, 가속도계 결과를 비교한 것이다.

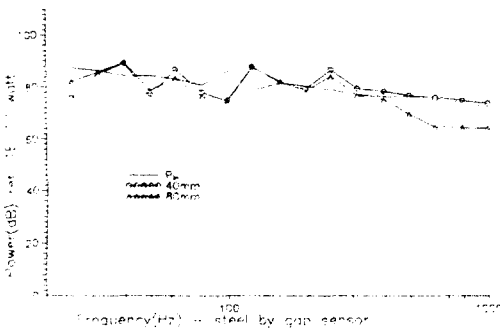


Fig.5 연강보-비접촉 변위계 측정 결과

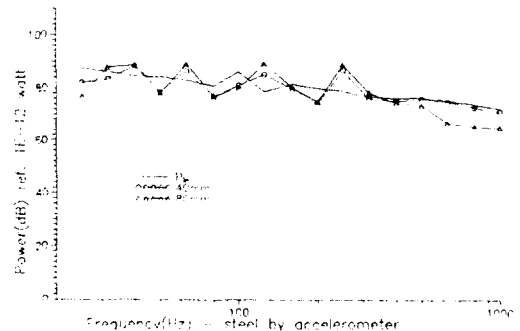


Fig.6 연강보-가속도계 측정 결과

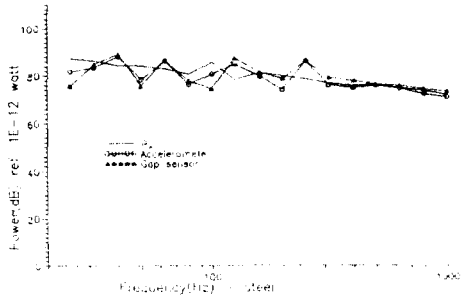


Fig.7 연강보 - $\delta=40\text{mm}$ 인 경우

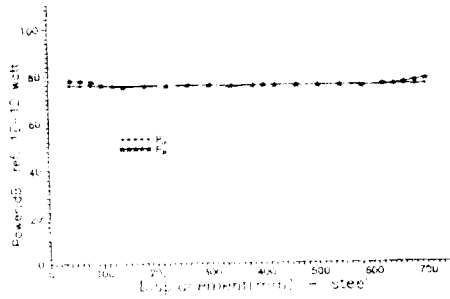


Fig.8 연강보-측정위치에 따른 결과

측정점 간격이 40mm인 경우 센서의 종류에 관계없이 300Hz이상의 고주파 구간에서 비교적 1dB전후의 양호한 결과를 얻을 수 있으나 측정점 간격이 80mm인 경우 파장에 비해 측정점 간격이 커지므로 오차가 고주파가 될수록 증가한 것을 볼 수 있다. Kamata¹⁾의 이론적 해석에 의하면 측정점 간격/파장의 비가 0.35보다 크면 오차가 4dB이상이 된다고 하며, 본 실험에 사용된 연강보의 경우 가진 주파수가 1000Hz인 경우 측정점 간격/파장이 0.46에 근접하게 되므로 오차가 커진 것으로 사료된다. 그리고 근접장의 범위에 대한 전산모의 실험 결과를 확인해 보고자 측정점 간격이 40mm인 경우 거의 측정 오차가 없는 500Hz 주파수에서 비접촉 변위계로 측정 위치를 변화시키면서 측정한 결과가 Fig.8과 같다. 가진점 및 경계점 부근으로부터 약 100mm이상 벗어나면 원거리장의 가정이 성립함을 볼 수 있으며 이는 본 실험에 사용된 연강보의 500Hz에서의 파장이 195mm이므로 전산모의 실험의 결과 1/2파장 이후부터 원거리장의 가정이 성립한다는 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

알루미늄보의 경우 비접촉 변위계의 측정 결과는 Fig.9, 가속도계 측정결과는 Fig.10 이다. 측정 간격이 40mm인 경우 결과인 Fig.11을 보면 비접촉 변위계의 측정값이 가속도계 결과 보다 약간씩 크게 측정되었는데 이는 가속도계 부착으로 질량이 연강보 보다 상대적으로 더 큰 비율로 증가한 것이 원인으로 짐작된다. 전체적인 결과는 연강보에 비해 측정값이 입력 파우어와 유사한 경향을 보이며 오차가 적으나 고주파 구간에서 입력값에 비해 최대 3dB정도의 비교적 큰 오차를 보이는 것으로 보아 강성이 낮은 것이 그 원인으로 사료된다.

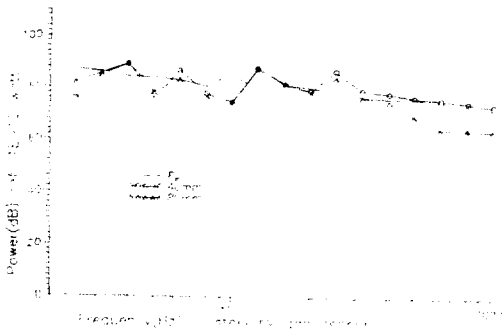


Fig.9 알루미늄보-비접촉변위계 측정 결과

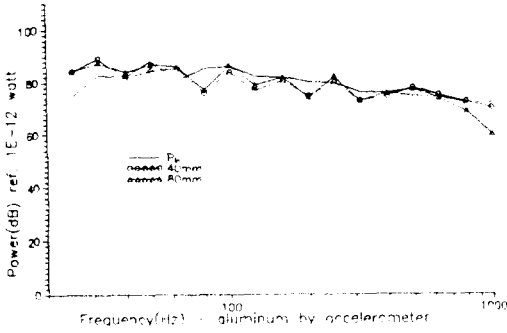


Fig.10 알루미늄보-가속도계 측정 결과

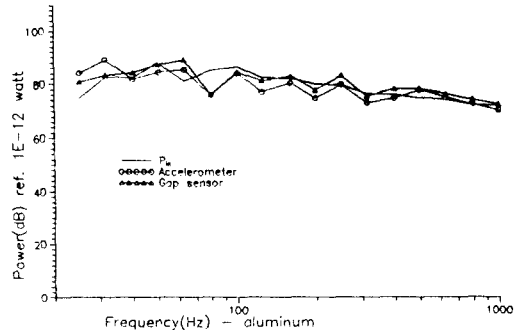


Fig.11 알루미늄보- $\delta=40\text{mm}$ 인 경우

5. 결 론

구조물내의 단위폭 단면을 흐르는 진동에너지를 진동 인텐시티라고 하는데, 굽힘 진동을 받는 보에 대한 진동 인텐시티의 이론 및 계측에 대한 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일차원의 진동 인텐시티는 4점에서의 가속도 또는 변위를 측정하여 구할 수 있으며 원거리장의 가정이 성립하면 2점에서의 가속도 또는 변위만으로도 구할 수 있다.
- 2) 계측 결과에 의하면 전주파수 구간에서 알루미늄보의 측정 결과가 연강보 보다 조금 더 양호하나 연강보의 경우 300Hz 이상 구간에서 $\delta=40\text{mm}$ 인 경우 가속도계, 비접촉 변위계 모두 1dB이내의 오차를 보였다.
- 3) 계측시 유한 차분 구간 즉 측정점 간격(δ)을 달리했을 때, 연강 보 및 알루미늄 보 모두 측정점 간격이 80mm인 경우 1,000Hz에 이르게 되면 δ/λ (λ :파장)가 커지므로 측정 결과 오차가 극심해진다.(대체로 δ/λ 의 값이 0.35보다 크면 오차가 4dB 이상이 된다.)³⁾
- 4) 근접장의 영향을 확인하고자 연강보의 경우 거의 오차 없이 측정된 500Hz의 경우(파장 195mm) 보의 가진점으로 부터 모래상자 사이의 측정 위치에 따른 시험을 수행해 본 결과 1/2파장 이후 거의 이론과 같이 원거리장의 가정이 성립함을 확인해 볼 수 있었다.
- 5) 그리고 파동해와 진동 인텐시티와의 관계식을 정식화하여 파동해의 각 계수를 분리하여 구할 수 있는 방법을 제시하였으며 이를 활용하면 진행파와 후퇴파의 반사계수를 구할 수 있으므로 이를 활용하여 반사 에너지를 구할 수 있는 방안과, 4점에서의 측정값과 2점에서의 측정값 비교, 여러 가지 오차 등에 대하여 추후 보완 실험을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Noiseux D.U., "Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plates", Journal of the Acoustical Society of America, 1969, Vol.47, No.1, pp 238-247
2. Pavic G., "Measurement of Structure Borne Wave Intensity", Journal of Sound and Vibration, 1976, Vol.49, No.2, pp 221-230
3. 鎌田 實, 島谷 和憲, "振動インテンシテイ計測に関する基礎研究", 日本機械學會論文集(C編), 57卷 535號(1991-3), pp 54-59
4. Graff, K.F., "Wave Motion in Elastic Solids", Ohio State University Press, 1975, Chapter 3.
5. Verheij, J.W., "Cross Spectral Density Methods for Measuring Structure Borne Power Flow on Beams and Pipes", Journal of Sound Vibration, 1980, Vol.70, No.1, pp 133-139
6. 加藤 正名ほか 3名, "一次元振動インテンシテイ計測における測定條件の設定", 日本機械學會論文集(C編), 59卷 558號(1993-2), pp 132-136