

<논 문>

압전 지능 구조물을 이용한 통계적 에너지 해석 기법

Application of Piezoelectric Smart Structures for Statistical Energy Analysis

김 재 환* · 김 정 하** · 김 재 도***

Jaehwan Kim, Jungha Kim and Jae-Do Kim

(2000년 10월 20일 접수 : 2001년 1월 19일 심사완료)

Key Words : SEA(Statistical Energy Analysis)(통계적 에너지 해석), Piezoelectric smart structures(압전지능 구조물), Input power measurement(입력 파워측정), Coupling loss factor(연결손실계수), Internal loss factor(내부손실계수)

ABSTRACT

In this research, piezoelectric smart structures are applied for SEA(Statistical Energy Analysis), which is well known approach for high frequency analysis. A new input power measurement based on piezoelectric electrical power measurement is proposed and compared with the conventional method in SEA. As an example, a simple aluminum beam on which piezoelectric actuator is attached is considered. By measuring the electrical impedance and electrical current of the piezoelectric actuator, the electrical power given on the actuator is found and this is in turn converted into the mechanical energy. From the measured value of the stored energy of the beam, the internal loss factor is calculated and this value shows a good agreement with that given by the conventional method as well as the theoretical value. To compare the coupling loss factor, L-shape beam system which consists of a aluminum beam subsystem and a steel beam subsystem coupled by three pin is taken as second example. The input power and stored energy of each subsystem are found by the proposed approach. The coupling loss factor found by the electrical input power obtained from the piezoelectric actuator exhibits similar trend to the value found by the conventional method as well as the theoretical value. In conclusion, the use of SEA for high frequency application of piezoelectric smart structures is possible. Especially, the input power that is essential for SEA can be found accurately by measuring the electrical input power of the piezoelectric actuator.

1. 서 론

압전 지능 구조물이란 주위 환경변화에 적응하기 위하여 압전 작동기와 감지기를 구조물에 부착한 것으로서 구조물의 소음 및 진동 저감에 사용하거나 유연 로봇 팔의 위치 제어 등, 저주파수 대역에서의 응용에 대하여 많은 연구가 진행되어왔다^(1,2). 최근에는 압전 지능구조물을 수 kHz이상의 높은 주파수대역에서 충격으로 인한 진동이나 소음을

저감하는 것에 관심이 모아지고 있는데, 이를 위해서는 압전재료가 부착된 구조물의 고주파수 대역에서의 해석이 필요하다.

지금까지 자동차, 선박, 항공기와 같이 연속체이며 복잡한 형상으로 이루어진 구조물들의 소음 또는 진동 응답의 예측과 설계를 위해 FEM (finite element method), BEM (boundary element method)과 같은 해석적 모델링 기법이 개발되어 사용되고있다. FEM, BEM 은 비교적 낮은 주파수 범위에서의 해석에 우수한 효과를 보이고 있으나 이런 결정론적인 모델링 기법을 사용하여 높은 주파수 범위에서 구조물을 해석 하고자 할 때 구조물의 작은 변화에도 모달 고유 진동수 변화나 상대적인 모달 위상 응답의 민감도가 모달 밀도의 증가와 함께 증가하게 된다. 따라서 복잡하게 조립되어진 구조물들의 응답은 모드수의

* 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : jedhwan@dragon.inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7326, Fax : (032) 868-1716

** 인하대학교 대학원

*** 인하대학교 기계공학과

증가에 영향을 받아 상세한 소음, 진동 특성을 예측하는데 있어서 불확실성을 포함하며, 많은 모드들이 구조물의 응답에 영향을 미치는 진동수 범위에서 이 방법을 사용하기 위해서는 많은 계산 시간과 비용을 필요로 하게 된다. 따라서, 높은 주파수 대역에서 FEM, BEM의 모델링 기법을 대신 할 수 있는 해석이나 예측 기법으로 SEA (statistical energy analysis)가 개발 되었다⁽³⁾.

SEA는 1960년대 초 Lyon에 의해 정립 되어져 인공위성의 발사대나 그 무게의 로켓 소음에 대한 진동 응답을 예측 등 우주 항공 분야에 적용 되어지기 시작하여 현재 많은 분야에 적용되고 있다. SEA를 사용하여 연결 되어진 구조 요소나 음향 체적의 소음, 진동 수준의 성공적인 예측을 위해서는 각각의 부시스템(subsystem)의 모달 밀도(modal density)와 내부 손실 계수 그리고 연성 손실 계수의 정확한 값을 필요로 한다. 빔이나 판에 대한 내부 손실 계수는 Craik, Wilson 과 Steel에 의해 이론적으로 구해졌으며^(4,5), 연결 손실 계수에 있어서는 무한 연결된 빔, 판, 박판에서의 파동전파로부터 간단한 경우에 대하여 이론적으로 Gibbs 와 Guilford등이 계산 하였고^(6,7) Bies, Hamid, Langhe, Sas 등은 파워 분사법(power injection method)을 사용하여 실험적으로 측정하였다^(8,9). 내부 손실 계수는 파워 평형법의에도 여러 실험적 방법을 통하여 구해지고 있다. 그러나, 복잡한 형상의 구조물에 대하여 이러한 계수들을 정확하게 구하는 것은 그리 쉽지 않다.

본 논문에서는 압전 지능구조물을 고주파수 대역에서 소음 및 진동의 해석을 위하여 이 주파수 대역에서 유용한 기법인 SEA를 압전 지능구조물에 적용하여 해석의 타당성을 살펴 본다. 그리고, 압전재료의 전기적 특성을 이용하여 SEA의 연결손실계수, 내부 손실계수를 얼마나 정확하게 구할 수 있는가를 검토한다. 구조물의 예제로서, 단일 알루미늄 보, 그리고 알루미늄 보와 강재 보를 편으로 연결하여 만든 L-형 보를 택하였으며, 이들 모델을 위한 계수들의 이론치를 기준으로 기존의 SEA실험 방법을 이용하여 측정된 계수 값들과 본 논문에서 새로 제안한 입력 파워 측정법을 이용하여 구한 값을 서로 비교 분석하여 고주파수 대역에서 압전 지능구조물 적용의 타당성을 보이고자 한다.

2. SEA 주요 변수

2.1 SEA 일반이론

SEA기법은 어떤 주파수 대역내에 존재하는 모드의 평균응답을 각 모드가 가지는 평균에너지를 미지수로 해서 각 요소간에 에너지 평형의 차로부터 구하는 해석법이다. SEA 기법은 복잡한 시스템을 연결된 부시스템의 네트워

으로 나타내는데 각 부시스템은 공진의 다중모드 응답을 갖는다. 각 부시스템의 응답은 공간평균과 주파수대역 격분 형태의 에너지, E_i 로 나타내어진다. 에너지보존 원리에 의해 연결된 부시스템의 파워평형 방정식을 유도할 수 있다.

$$\omega[A] \begin{bmatrix} E_1/n_1 \\ E_2/n_2 \\ \vdots \\ E_n/n_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \\ \vdots \\ \Pi_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서

$$[A] = \begin{bmatrix} (\eta_1 + \sum_{j \neq 1}^N \eta_{1j})n_1 & -\eta_{12}n_1 & \cdot & -\eta_{1N}n_1 \\ -\eta_{21}n_2 & (\eta_2 + \sum_{j \neq 2}^N \eta_{2j})n_2 & \cdot & -\eta_{2N}n_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\eta_{N1}n_N & \cdot & \cdot & (\eta_N + \sum_{j \neq N}^N \eta_{Nj})n_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

ω 는 가진 각속도, η_i 는 부시스템의 내부손실계수(internal loss factor), η_{ij} 는 부시스템 i 에서 j 로의 에너지 전달 정도를 나타내는 연결 손실 계수이고, n_i 는 부시스템 i 의 모달 밀도, Π_i 는 입력파워를 나타낸다.

SEA의 성공적인 적용을 위해서는 부시스템들이 약한 연결(weak coupling)로 이루어 지고, 가진 하는 힘은 광범위한 주파수 대역이며 부시스템 각각의 모달 밀도가 높아야 한다. SEA에서는 에너지 흐름의 대부분이 다양한 부시스템들의 공진 모드들 사이에서 일어나고, 연결된 부시스템들 내 공진 모드들의 모달 밀도는 비연결 모드들의 모달 밀도와 같다고 가정하고 있으므로 모달 밀도가 높은 주파수 대역에서 정확성을 보인다. 경계조건은 임피던스 크기의 차이가 상당히 커서 파동들이 거의 반사되어지는 경계조건이 적합하다. 복잡한 구조물에서는 굽힘파, 종파, 횡파 등 다양한 파형이 생기고 경계에서 발생하는 반사의 정도는 파형에 따라 변화하므로 같은 구조물에 대해 다른 파형에 따라 다른 경계를 설정해야 한다. 하지만 대부분의 판이나 실린더와 같은 구조물에서의 소음 방사는 굽힘파에 지배적이다.

위의 파워 균형식을 진동, 소음 예측에 적용하는 방법은 다음과 같다. 첫째, 내부손실계수와 연결손실계수를 알고 있고 가진원의 위치와 크기를 알고 있다면 양변에 $\omega[A]$ 의 역행렬을 취해서 시스템의 응답 에너지를 구하여 소음과 진동의 흐름 방향과 크기를 예측할 수 있다. 둘째로, 이미 알고 있는 내부손실계수, 연결손실계수와 함께 서브 시스템들의 응답 에너지를 측정할 수 있다면 위 식으로부터 가진원의 위치와 그 크기를 알 수 있다. 셋째로, 이미 알고 있는 가진원의 크기와 위치, 부시스템의 에너지를 통하여 SEA에서 응답 특성 예측을 위한 주요 계수인 내부손실계수와 연결손실계수를 구할 수 있다.

2.2 SEA 주요 변수

SEA를 통해 시스템의 진동 응답 특성을 예측 하는데 있어서 가장 중요한 부분은 파워 균형식에 나타나는 변수들을 구하는 것이다. 이러한 변수들에 대한 설명과 이론값을 위해 사용된 식을 정리하면 다음과 같다.

(1) 연결 손실 계수 (coupling loss factor)^(6,7)

연결 손실 계수는 부시스템들 간의 파워 흐름을 평형에 내지워 관계시키는 계수이다. 연결체가 직선이고 고체 봉 (rod)이라면 강성은 다음과 같다.

$$K_t = E_r S_t / L_t \quad (3)$$

여기에서 E_t , S_t , L_t 는 연결체의 탄성계수, 단면적, 편의 길이이다. 힘에 대한 속도의 비로 정의된 연결체의 모빌리티 (mobility)는 다음과 같다.

$$Y_{tie} = i\omega / K_t \quad (4)$$

연결체로부터 멀리 떨어져있는 판 1위에서의 속도가 ν_0 이고 판 1위의 연결체에서의 속도가 ν_1 이라면 연결체에 작용 $F = (\nu_0 - \nu_1) / Y_1$ 하는 힘은 다음과 같다.

(5)

여기에서 Y_i 는 판 i 의 모빌리티로서 다음과 같다.

$$Y_t = 1/8\sqrt{B_i \rho_{si}} = 1/(2 \cdot 3\rho_{si} h_i^2 C_{ti}) \quad (6)$$

여기에서 B_i , ρ_{si} , C_{ti} , h_i 는 단위 길이 당 굽힘 강성, 면적 밀도, 종파 속도, 두께이다. 두 번째 판 위에 작용하는 힘 F 도 같은 식으로 되며 두 번째 판 위에서의 연결체 속도가 ν_2 이라면, 판 1로부터 판 2로의 파워 흐름은 다음과 같다.

$$\Pi_{12} = Re(F\nu_2^*) \quad (7)$$

여기에서 $*$ 는 공액 복소수를 나타낸다. 연결체에 작용하는 힘은

$$F = \nu_0 / (Y_1 + Y_2 + Y_{tie}) \quad (8)$$

이므로, 속도 ν_2 는

$$\nu_2 = \nu_0 Y_2 / (Y_1 + Y_2 + Y_{tie}) \quad (7)$$

이므로, 따라서, 하나의 연결체를 통하여 전달된 파워는 다음과 같다.

$$\Pi_{12} = \nu_0^2 Y_2 / [(Y_1 + Y_2)^2 + (\omega/K_t)^2] \quad (8)$$

연결 손실 계수의 정의로부터 판 1에서 판 2로의 전달된 파워는 다음과 같이 주어진다.

$$\Pi_{12} = E_1 \omega \eta_{12} = \rho_{s1} \nu_0^2 \omega \eta_{12} \quad (9)$$

식 (8)과 (9)로부터 하나의 연결체에 의한 연결 손실 계수는 다음과 같다.

$$\eta_{12} = Y_2 / \omega S_1 \rho_{s1} [(Y_1 + Y_2)^2 + (\omega/K_t)^2] \quad (10)$$

S_1 는 판 1의 표면적이며 단위 면적 당 r 개의 연결체가 있다면 전체 연결체의 갯수는 rS_1 이고 연결 손실 계수는 다음과 같다.

$$\eta_{12} = r Y_2 / \omega \rho_{s1} [(Y_1 + Y_2)^2 + (\omega/K_t)^2] \quad (11)$$

(2) 내부 손실 계수 (internal loss factor)

내부 손실 계수는 구조물의 감쇠에 의해 소산되어지는 에너지 손실로서 일반적으로 연결되어지지 않은 구조요소들 각각의 에너지 소산을 측정하는 실험을 통하여 구해지며 방사 손실계수와 구조적 손실계수의 합으로 표현되나 일반적으로 구조적 손실계수가 지배적이다. 알루미늄 판넬이나 허니컴 또는 얇은 박막으로 된 실린더와 같이 무게가 가벼운 구조물에서는 방사 손실계수가 구조적 손실 계수와 같은 크기를 갖을 수 있으나 이러한 경우에는 일반적으로 방사 손실 계수는 공기와 구조물의 연결 손실 계수와 값이 같다. 단진자의 파워 소산의 개념을 특정하게 지정한 주파수 대역에서의 단진자들의 집합으로 확대하여 중심 주파수를 이용해 나타내면 다음 식이 된다.

$$\Pi_a = \frac{\omega E}{Q} = \omega E \eta \quad (12)$$

E , Q , η 는 각각 단진자의 저장 에너지, 특성 요소, 내부 손실계수 이다.

(3) 모달 밀도 (modal density)

모달 밀도란 단위 주파수당 모드의 수로서 주어진 가진 함수에 대해 시스템의 공진 응답을 관계시키기 위한 매우 중요한 변수이다. 보에 대한 모달 밀도의 식은 다음과 같다^(6,7).

$$n(\omega) = \frac{L}{\omega^{1/2}} \left(\frac{\rho A}{EI} \right)^{1/4} \quad (13)$$

여기서 L 는 단면 이차 모멘트이다.

3. 입력 파워 및 저장 에너지 측정

앞에서 언급한 바와 같이, 파워 평형식 (1)에서 연결 손실계수 또는 내부손실계수를 알기 위해서는 각 부시스템의 저장에너지와 입력파워를 측정해야한다. 이 값을 정확히 측정할 때 손실계수들을 정확하게 구할 수가 있다. 본 논문

문에서는 압전지능구조물을 이용한 입력파워 측정과 기계적 가진기를 사용할 때의 입력파워측정을 비교하였으며 가속도센서를 이용하여 저장에너지를 측정한 후 파워 평형식으로부터 손실계수들을 구하여 압전지능구조물을 이용할 때의 SEA 적용 가능성에 대하여 검토하였다.

3.1 압전 지능 구조물의 입력 파워

기계적 시스템에서의 힘, 속도는 전기적 시스템에서의 전압과 전류에 상사하므로 관심 주파수 대역에 대해 압전 지능 구조물의 가진 입력 파워는 부하 전압 V 와 전류 I 를 곱한 값으로 표현된다. 저주파수 대역에서 압전 지능구조물의 부하 전류 값이 작아 측정하기 어려워 본 연구에서는 임피던스 측정기를 사용해 측정한 압전 지능 구조물의 임피던스 값의 역수 값인 어드미턴스(admittance)를 이용한 측정 방법을 사용하였다. 어드미턴스 Y 는 복소수 형태이므로 실질적으로 실수의 값만이 정량적 파워 측정에 영향을 미치게 되고 이러한 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Pi_E = V \cdot I = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[1/Z] \cdot V^2 = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[Y] \cdot V^2 \quad (14)$$

이렇게 구한 전기적 입력 파워는 압전재료의 전기-기계적 연결 계수 k 를 이용하여 기계적 입력 파워로 변환시킬 수 있다.

$$k = \sqrt{\frac{\text{mechanical energy stored}}{\text{electrical energy applied}}} \quad (15)$$

결과적으로 기계적 입력 파워는

$$\Pi_M = k^2 \cdot \Pi_E \quad (16)$$

3.2 가진기에 의한 입력 파워

SEA에서 입력파워를 구하는 종래 방법으로는 가진기(exciter)에 의한 것이 있다. 주파수 ω_1, ω_2 대역으로 점 가진 시 부시스템에 입력되는 시간 및 주파수 평균 파워는 힘과 가속도의 교차 스펙트럼 S_{af} 를 이용하여 아래와 같이 표현된다.

$$\Pi_{\omega_1, \omega_2} = \frac{1}{\omega} I_m \left[\int_{\omega_1}^{\omega_2} S_{af}(\omega) d\omega \right] \quad (17)$$

가진점에서의 가속도와 힘 간의 위상차는 중요한 영향을 미치므로 위상차가 없는 정확한 측정을 하기 위해서 임피던스 헤드를 사용하였다^(8,9).

3.3 저장 에너지 측정^(8,9)

SEA에서는 서브시스템의 공진 모드들의 운동에너지와

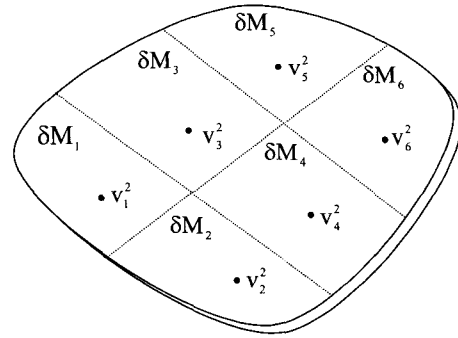


Fig. 1 Schematic representation of structural energy measurement

위치에너지의 크기가 같다는 가정하에서 저장되는 전체 에너지를 운동 에너지로 나타낸다.

$$E_{Total} = 2 \cdot E_{Kinetic} \quad (18)$$

부시스템에 대해 전체 공간 평균 진동 에너지는 응답 측정이 이루어지는 부시스템의 부분의 질량에 속도 제곱을 곱한 항들의 합으로 나타낸다 (Fig. 1). 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$E = \int \rho v^2 dA \cong \delta M_1 \cdot v_1^2 + \delta M_2 \cdot v_2^2 + \dots + \delta M_N \cdot v_N^2 \quad (19)$$

이를 다시 관심 주파수 대역에서의 스펙트럼 항을 사용하고 부시스템의 응답은 가속도계를 사용하여 측정해 공간 및 주파수 평균 부시스템의 저장 에너지를 가속도 파워 스펙트럼 S_{aa} 와 전체 질량 M 을 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$E_{\omega_1, \omega_2} \cong M \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\omega^2} \cdot \sum_{i=1}^N \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_{i,aa}(\omega) d\omega \quad (20)$$

4. 실험 및 결과

4.1 알루미늄 직선 보

본 실험은 압전 작동기를 이용한 부시스템 가진 시에 입력되는 전기적 파워를 기계적 파워로 상사 시킴을 통하여 SEA의 내부손실계수를 측정할 수 있음을 보이기 위한 실험으로서 크기 $110 \times 5 \times 0.3$ cm (길이×너비×두께), 질량 0.458 kg인 알루미늄 직선 보를 대상으로 실행했으며 동일 보에 대해 가진기를 이용하여 측정된 값과 비교하였다.

(1) 압전 지능 구조물 입력 파워 및 저장 에너지 측정

압전 지능구조물의 입력 파워측정을 위하여 알루미늄 보의 중앙 지점에 $65 \times 2.5 \times 0.1$ cm(길이×너비×두께)의 압전 작동기를 에폭시로 붙인 지능 구조물을 자유 경계 조건

을 형성 시키기 위해 Fig. 2와 같이 양 끝단을 고무줄로 매달았다. 압전 작동기의 전극에 연결된 리드선을 임피던스 해석기(HP4192A)에 연결한 후 1.1 Voltage의 일정 출력 전압을 걸어주고 주파수 대역 50 Hz~6400 Hz에 대해

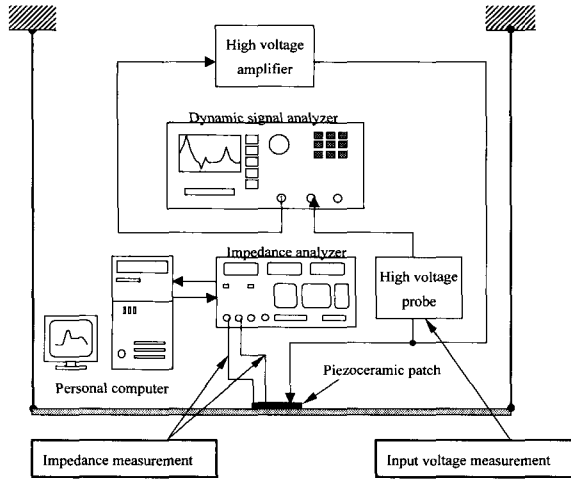


Fig. 2 Experimental set up for measuring impedance of PZT bonded straight aluminum beam

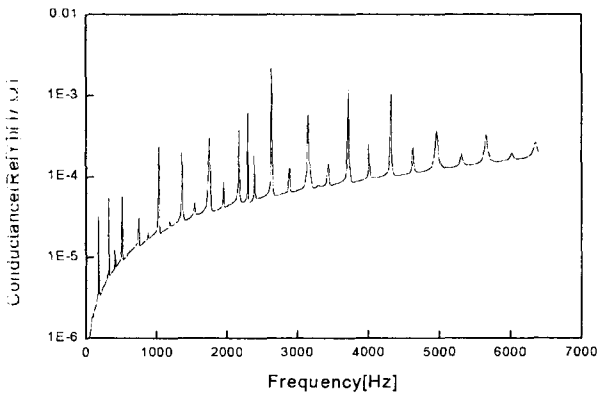


Fig. 3 Conductance of PZT bonded straight aluminum beam

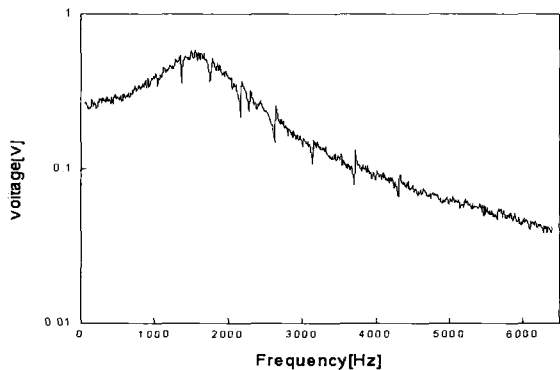


Fig. 4 Input voltage of the PZT bonded straight aluminum beam

전기적 임피던스를 측정하였으며 이로부터 컨덕턴스 (conductance)를 구하였다 (Fig. 3). 압전 지능 구조물의 가진 신호 분석기에서 내보내는 랜덤신호의 전압을 앰프를 통하여 150배로 증가 시켜 압전 작동기에 연결 하고 실행했으며 이때의 부하전압을 1/1000 프루브와 신호 분석기를 사용해 측정하였다 (Fig. 4). 이 두 값을 식 (14)에 대입해 구한 전기적 입력 파워를 식 (15)에 의해 기계적 입력 파워로 변환하였다 (Fig. 5). 이 때 전기-기계적 연결

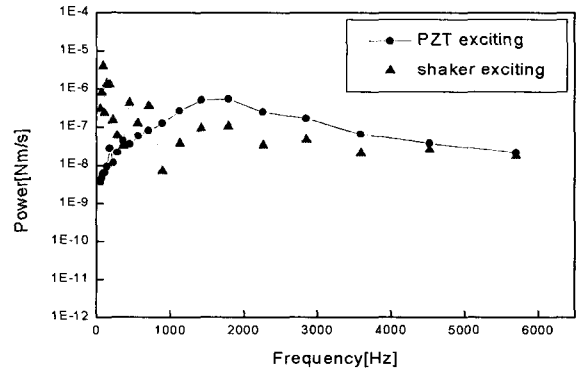


Fig. 5 Input power of the straight aluminum beam

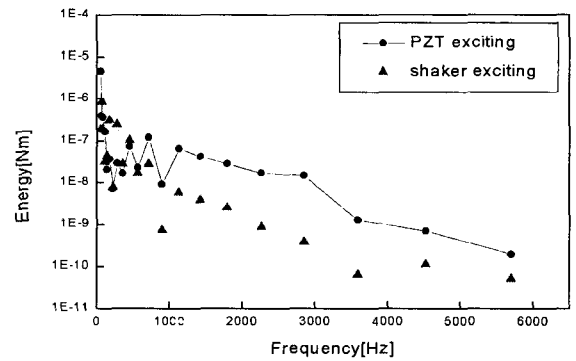


Fig. 6 Stored energy of the straight aluminum beam

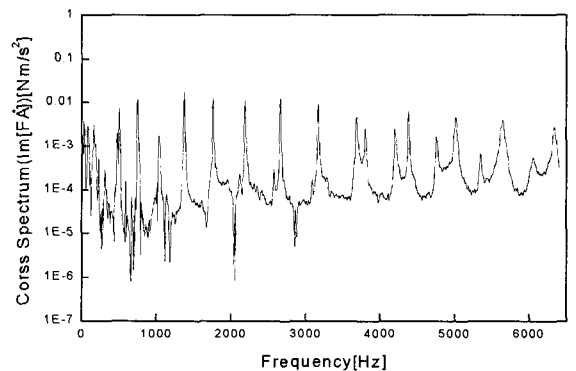


Fig. 7 Force-acceleration cross spectrum of straight aluminum beam (Imaginary part)

계수 로 PZT-4의 값을 택하였다. 랜덤 가진 시 압전 지능 구조물에 저장되는 에너지 측정은 우선 지능 구조물의 전체 질량을 측정하고 등 간격의 20개 지점에 가속도계를 부착하여 각 지점의 가속도 파워 스펙트럼을 구하여 전체 평균한 가속도 값을 앞서 측정한 전체 질량 값과 함께 식 (20)에 대입하여 구하였다 (Fig. 6).

(2) 가진기에 의한 입력 파워 및 저장 에너지 측정

가진기에 의해 보에 입력되는 파워를 식 (17)을 이용하여 종래 방법대로 측정을 하는데 있어서 가장 중요한 점은 힘과 가속도 신호의 위상차가 없도록 하는 것이다. 그러기 위해서는 힘 변환기와 가속도계를 따로 사용하는 것 보다는 함께 부착된 임피던스 헤드를 사용하는 것이 바람직하며⁽¹⁰⁾, 보의 기울어짐을 방지하여 가진 시 모멘트가 발생하지 않도록 해야 한다. Fig. 7에 힘-가속도의 교차 스펙트럼 허수부를 나타냈다. 입력 파워는 Fig. 5에 압전 지능 구조물의 입력 파워 그래프와 함께 나타냈다. 저장에너지는 압전 지능 구조물 가진 시와 동일한 측정 방법을 사용하여 Fig. 6에 함께 나타내었고, 한 그래프에 나타낸 측정된 두 에너지 값의 크기를 비교해 볼 때 서로 근접함을 알 수 있다. 대역 평균은 1/3 옥타브 평균을 이용하였기 때문에 Fig. 5 와 Fig. 6의 1000 Hz 미만 주파수 대역에서는 모드 밀도가 낮아 측정된 값들이 변동함을 보이고 있다. 이 주파수 영역에서는 실험값의 신뢰도가 근본적으로 낮으므로 본 기법의 적용이 타당치 못하다.

(3) 내부 손실 계수

식 (12)를 이용하여 구한 내부 손실 계수를 Fig. 8에 나타내었다. 입력 파워는 Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 압전 작동기의 가진 때가 가진기 가진에 비해 큰 값이 입력 되었고 저장 에너지도 Fig. 6에서 보이는 것처럼 이에 준하여 압전 작동기의 가진 때가 더 크게 나타나고 있지만 상대적인 비례를 볼 때 압전 작동기 가진 때가 좀더 큰 비례 관계를 보이고 있다. 결과적으로 압전 지능 구조물의 내부 손실 계수가 가진기 사용 때 보다 작은 값이 나왔다. 일반적으로 사용되고 있는 알루미늄의 내부 손실 계수 값이 0.0001이기 때문에⁽⁶⁾ 고무줄로 매단 보에 압전 작동기를 부착한 압전 지능 구조물을 이용한 실험 방법이 가진기에 의한 실험 방법 보다 자유 경계 조건을 좀더 만족 시켜 더욱 정확한 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

4.2 L-형 보

본 실험에서는 내부손실계수를 실험적으로 구하기 위하여 서로 다른 재료로 구성된 L형 보를 사용하였다. 사용된 L형 보는, 질량 0.4585 kg인 알루미늄 보(110 cm×5 cm×0.3 cm)와 질량 1.596 kg인 강재 보(90 cm×5 cm×0.45 cm)를 3개의 스테인레스 핀(지름:0.7 cm, 길

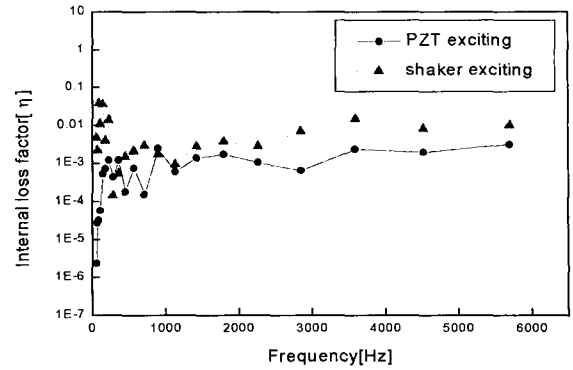


Fig. 8 Internal loss factor of the straight aluminum beam

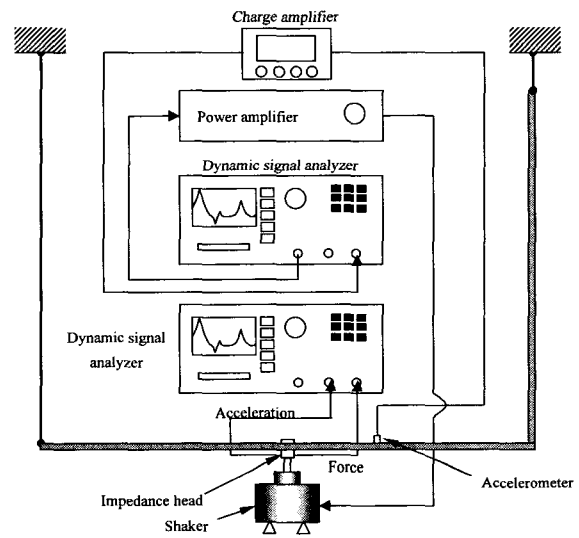


Fig. 9 Experimental set up of L-shape coupled beam

이:0.75 cm)을 사용하여 연결한 시스템으로서, 자유 경계 조건을 만족 시키기 위하여 고무줄에 매달았다 (Fig. 9).

부시스템에 대한 연결 손실 계수를 구하기 위해 식 (12)와 상호 교환 원칙 식 (21), 파워 균형 방정식 (22)로부터 유도된 식 (23)을 사용 하였다.

$$\frac{\gamma}{n_1} = \omega \eta_{12}, \quad \frac{\gamma}{n_2} = \omega \eta_{21}, \quad n_1 \eta_{21} = n_2 \eta_{12} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \Pi_{1,a} + \Pi_{12} = \omega E_1 \eta_1 + \omega E_1 \eta_{12} - \omega E_2 \eta_{21} \\ \Pi_2 &= \Pi_{2,a} + \Pi_{21} = \omega E_2 \eta_2 + \omega E_2 \eta_{21} - \omega E_1 \eta_{12} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\frac{\eta_{as}}{\eta_s} = \frac{n_2 E_s}{n_s E_a - n_a E_s} \quad (23)$$

여기에서 η_{as} , η_s , η_a , η_s , E_a , E_s 는 각각 알루미늄 보로 부터 강재 보로의 연결 손실 계수, 강재 보의 내부 손실 계수, 알루미늄 보의 모달 밀도, 강재 보의 모달 밀도, 알루미늄 보에 저장되는 에너지, 강재 보에 저장되는 에너지

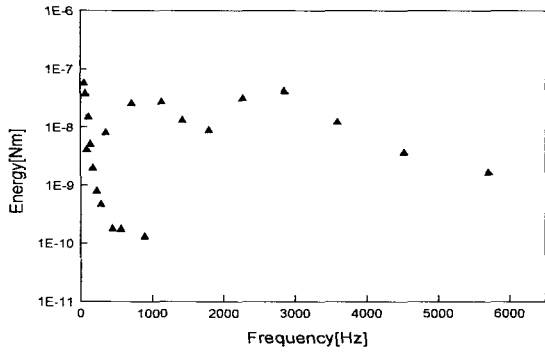


Fig. 10 Stored energy of the steel beam subsystem in L-beam

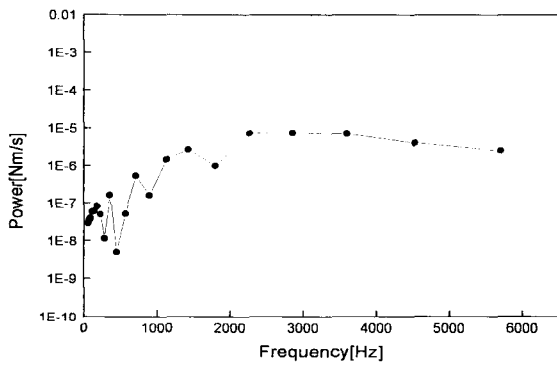


Fig. 11 Input power of the straight steel beam subsystem in L-beam

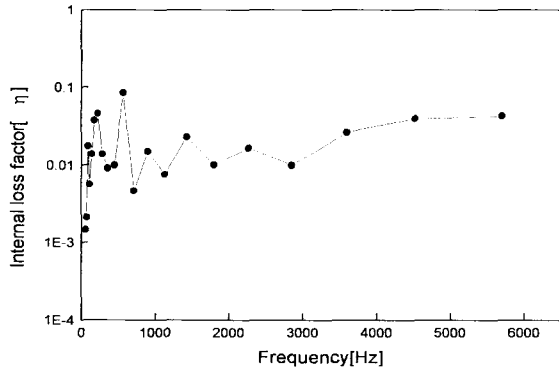


Fig. 12 Internal loss factor of the steel beam subsystem in L-beam

이것 식 (13)로부터 $n_a = 0.002259$, $n_s = 0.001734$ 이다.

구선 강제 보의 내부 손실 계수 η_s 를 앞서 단일 알루미늄 보의 압전 지능 구조물에 대한 내부 손실 계수를 구한 방법을 이용해 구하였고 그 결과로 강제 단일 보에 대한 저장 에너지, 입력 파워, 내부손실 계수를 각각 Fig. 10~12에 나타냈다.

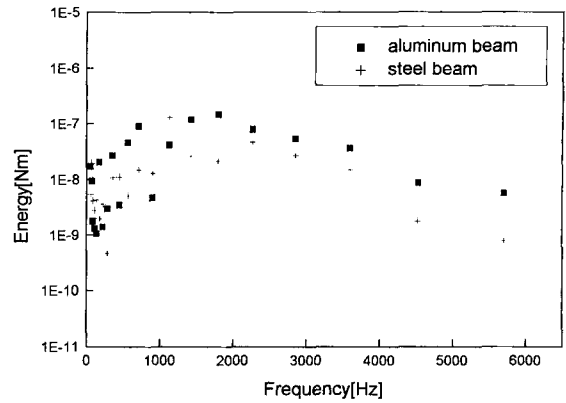


Fig. 13 Stored energy in each subsystem of L beam (PZT excitation on the aluminum beam)

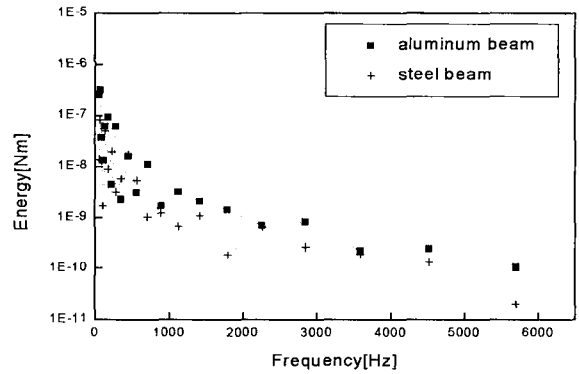


Fig. 14 Stored energy in each subsystem of L-beam (Shaker excitation on the aluminum beam)

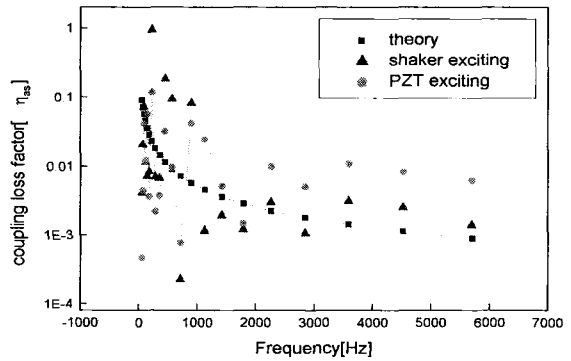


Fig. 15 Coupling loss factor from aluminum beam to steel beam when aluminum beam is excited

다음으로 압전 작동기를 알루미늄 보에 부착해 가진하여 각각의 보에 저장된 에너지를 Fig. 13에 나타내었고, 가진기로 알루미늄 보를 가진하여 각각의 보에 저장된 에너지를 Fig. 14에 나타냈다. 이렇게 측정된 값들을 이용해 구한 연결 손실 계수와 이론식 (21)을 이용하여 구한 연결 손실

계수를 Fig. 15에 나타냈다. 또한 식 (7)을 이용하여 강재 보로부터 알루미늄 보로의 연결 손실 계수를 구할 수 있다. Fig. 13 와 Fig. 14에서 서로 다른 가진 방법에 따른 저장 에너지의 분포가 다르게 나타남에도 불구하고, Fig. 15에서 보아서 알 수 있듯이, 연결 손실 계수의 값이 근사함을 알 수 있고 또한 이론 값 과도 근사함을 보이고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 압전 지능구조물을 높은 주파수 대역의 해석에 잘 알려진 SEA에 적용하여보았다. SEA기법에서 중요 계수들을 정확히 구하기 위해서는 정확한 입력파워의 측정이 필수적인데, 압전 지능구조물의 압전작동기에 입력되는 전기적 파워를 측정하여 기계적에너지로 변환하고 중요계수들을 구하여 종래의 SEA실험기법 및 이론치와 비교하였다.

예제로서, 단일 알루미늄 보와 강재 보의 내부 손실 계수 측정과 이 두 보를 각각 하나의 부시스템으로 하여 만든 L-형 시스템에 대해 연결 손실 계수 값을 측정하고 이론 값과 비교하였다. 지금까지는 SEA의 주요 변수를 실험적으로 측정하는데 있어서 가진기, 임팩트 햄머, 스피커에 의한 가진 방법을 사용해 부시스템의 입력 파워를 힘과 가속도 또는 힘과 속도를 측정해 구했으나, 본 연구에서는 압전 재료를 부착된 압전 지능구조물을 이용해 전기적 입력 파워를 측정하고 이를 기계적 입력 파워 값으로 상사시키는 새로운 입력 파워 측정법을 제안 하였고, L-형 시스템에 대해 압전 지능 구조물을 이용하여 측정된 연결 손실 계수와 가진기를 사용해 측정된 손실 계수, 이론식으로부터 구한 손실 계수 값의 비교를 통해서 새로운 입력 파워 측정법의 타당성을 보였다. 그 결과, 연결손실계수 값들이 서로 근접함을 보였다. 따라서, 높은 주파수 대역에서 압전 지능구조물을 사용하면 비교적 정확하게 파워의 흐름 및 필요한 손실계수를 구할 있다.

본 연구를 통하여 압전 지능구조물을 높은 주파수에 이용하는 경우에 SEA기법을 사용하여 해석하는 것이 가능함을 알 수 있었고, 더욱이, 압전 작동기의 입력파워를 측정하여 정확하게 입력파워를 구할 수 있음을 확인하였다. 앞으로 압전지능구조물을 이용한 저장에너지의 측정 등, 보다 많은 실험적 연구를 통하여 높은 주파수 대역에서 SEA기법이 압전 지능 구조물에도 유용함을 실질적으로 검증 하는 것이 필요하다.

후 기

본 논문은 1999년도 학술진흥재단의 연구비 지원(KRF-

99-005-E00007)에 의해서 연구 되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Varadan, V.V., Kim, J. and Varadan, V.K., 1997, "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators for Active Noise Control," AIAA Journal, Vol. 35, No. 3, pp. 526~533.
- (2) Han, S.-S., Choi, S.-B. and Kim, J., 1999, "Position Control of a Flexible Gantry Robot Arm Using Smart Material Actuators," J. of Robotic Systems, Vol. 16, No. 10, pp. 581~595.
- (3) Keane, A.J. and Price, W.G., 1994, "Statistical Energy Analysis: An Overview, with Applications in Structural Dynamics", Cambridge University Press, United Kingdom.
- (4) Craik, R. J. M. and Wilson, R., 1995, "Sound Transmission Through Masonry Cavity Walls", J. of Sound and Vibration, Vol. 179, No. 1, pp. 79~96.
- (5) Steel, J. A., 1996, "The Prediction of Structural Vibration Transmission Through a Motor Vehicle Using Statistical Energy Analysis", J. of Sound and Vibration, Vol. 193, No. 3, pp. 691~703.
- (6) Cremer, L., Heckl, M. and Ungar, E. E., 1988, "Structure-borne Sound, Springer-Verlag", Berlin.
- (7) Ver, I. L. and Holmer, C. I., 1971, "Interaction of Sound Waves with Solid Structures", Chapter11 in Noise and Vibration Control, Edited by L. L. Beranek, McGraw-Hill.
- (8) Bies, D. A. and Hamid, S., 1980, "In Situ Determination of Loss and Coupling Loss Factors by the Power Injection Method", J. of Sound and Vibration, Vol. 70, No. 2, pp. 187~204.
- (9) De Langhe, K. and Sas, P., 1996, "Statistical Analysis of the Power Injection Method", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 100, No. 1, pp. 294~303.
- (10) Cimerman, B., Bharj, T. and Borello, G., 1997, "Overview of Experimental Approach to Statistical Energy Analysis", Society of Automotive Engineers Inc. pp. 783~788.