

# 보의 진동제어를 위한 압전 액추에이터의 길이변화 효과 연구

## Effect of Piezoactuator Length Variation for Vibration Control of Beams

이 영 섭†

Young-Sup Lee

(2008년 9월 22일 접수 ; 2008년 10월 22일 심사완료)

**Key Words** : Direct Velocity Feedback(직접속도 피드백), Collocation of Sensor and Actuator(센서 및 액추에이터 동위치화), Optimal Piezo Length(최적압전길이), Active Vibration Control(능동진동제어)

### ABSTRACT

This paper presents an approach to define an optimal piezoactuator length to actively control structural vibration. The optimal ratio of the piezoactuator length against the beam length when a pair of piezoceramic actuator and accelerometer is used to suppress unwanted vibration with direct velocity feedback(DVFB) control strategy is not clearly defined so far. It is well known that DVFB control can be very useful when a pair of sensor and actuator is collocated on structures with a high gain and excellent stability. It is considered that three different collocated pairs of piezoelectric actuators(20, 50 and 100 mm long) and accelerometers installed on three identical clamped-clamped beams(300×20×1 mm). The response of each sensor-actuator pair requires strictly positive real(SPR) property to apply a high feedback gain. However the length of the piezoactuator affects the SPR property of the sensor-actuator response. Intensive simulation and experiment show the effect of the actuator length variation is strongly related with the frequency range of the SPR property. Thus an optimal length ratio was suggested to obtain relevant performance with a good stability under the DVFB strategy.

### 1. 서 론

능동진동 제어기법은 실제 상용화를 위한 연구는 계속 진행되어 오고 있다<sup>(1)</sup>. 직접속도 피드백(direct velocity feedback, DVFB)은 매우 단순한 제어기법임에도 불구하고, 강인한 안정도와 우수한 제어성능을 보인다. 이 기법이 주목받는 이유는 실제 산업계에서 필요로 하는 단순함, 강인한 안정도 및 보장된 제어성능을 제공하기 때문이다<sup>(2,3)</sup>.

그리고 지능재료로 활용도가 높은 압전 액추에이터

와 가속도계의 결합에 의한 센서-액추에이터 쌍은 실제 구현 가능한 능동진동제어 시스템중의 하나이다.

그러나 이런 센서-액추에이터 쌍이 효율적으로 적용되려면 절대 양의 정수(strictly positive real, SPR) 조건이 충족되어 높은 피드백 이득을 적용시켜 우수한 진동제어성능을 확보할 수 있다.

그래서 더 우수한 진동 제어성능을 얻으려면, 더 크고 더 두꺼운 압전 액추에이터를 이용해서 더 큰 굽힘 모멘트를 유발시켜야 가능하다. 그러나 압전 액추에이터의 크기를 지나치게 크게 할 경우 가속도계와 압전 액추에이터 간의 중요한 SPR 응답특성이 높지 않은 주파수에서 붕괴되어 버린다. 즉, 제어시스템에 강인한 안정도 및 높은 피드백 이득을 적용시키기 곤란하게 된다.

† 교신저자: 정희원, 인천대학교  
E-mail: ysl@incheon.ac.kr  
Tel: (032)770-8656, Fax: (032)770-8760

그렇다고 너무 작은 크기의 압전 액추에이터를 사용하면 더 넓은 주파수 영역까지 강인한 안정도의 확보는 되나 제어력(control force) 자체가 작아 우수한 진동억제 효과를 얻기가 어렵다.

그래서 이 논문에서는 이러한 상호 모순적인 현상에 대해서 충분한 안정도를 확보하는 조건하에 가장 좋은 제어성능을 발휘하는 최적의 압전 액추에이터 길이를 결정하기 위한 연구에 대해 기술하고 있다.

이를 위해서 우선 2절에서 DVFB를 적용한 능동 진동제어 시스템에 관해 간단히 기술한다.

3절에서는 실제 제작된 3가지의 양단 고정정보에서 3가지의 압전 액추에이터의 길이 변화 실험에 대해 기술한다.

그리고 4절에서는 길이비에 따른 붕괴주파수 변화, 개방루프, 폐쇄루프 능동제어 실험결과와 더불어 새로운 제어성능을 판단하기 위한 파라미터의 제안과 이를 검증하는 과정에 대해 언급하고 있다.

## 2. DVFB 제어

DVFB 제어기법에 대해서는 참고문헌 (2)에 기술되어 있으므로, 여기에서는 간략히 언급한다.

Fig. 1과 같은 오일러-베르누이 양단고정정보에 설치된 동위치화된 센서(가속도계)-액추에이터(압전 PZT 패치) 쌍의 경우 센서-액추에이터의 응답은 식 (1)과 같은 식으로 주어진다.

$$G(j\omega) = \frac{\dot{w}(x_s, \omega)}{V_3(\omega)} \tag{1}$$

$$= j\omega C_M \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\phi_n(x_s)[\phi_n'(x_1) - \phi_n'(x_2)]}{M_n[(\omega_n^2 - \omega^2) + j2\zeta_n\omega_n\omega]}$$

여기서  $V_3$ 는 압전 액추에이터에 입력된 전압이고,  $\dot{w}$ 은 가속도계의 신호의 적분된 출력이다.

양단고정정보에 설치된 점(point) 센서-압전 액추에이터의 주파수 응답함수(frequency response function, FRF)는 Fig. 2에서 처럼 주파수의 증가에 따라 공진(resonance) 및 반공진(anti-resonance)이 주파수에 따라 교대로 나타나며, 위상응답은  $\pm 90^\circ$  사이에 항상 위치하는 SPR 특성을 보인다.

이것은 최소위상 시스템(minimum phase system)의 특별한 경우로서 SPR 시스템에서 나타나는 현상

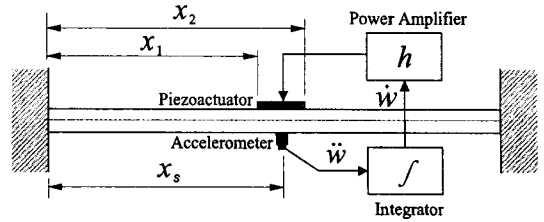


Fig. 1 Piezoactuator and accelerometer pair on a clamped-clamped beam

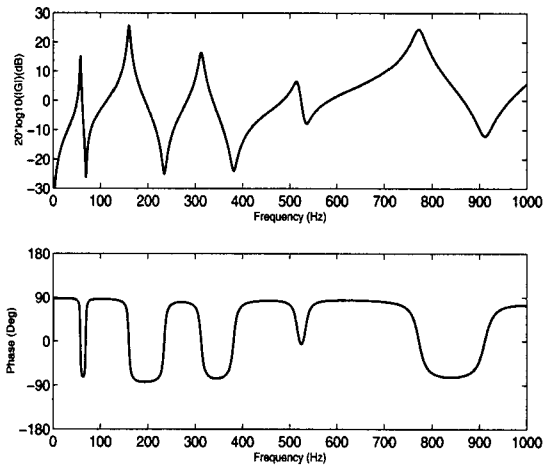


Fig. 2 A typical response of a point sensor-piezo actuator pair on a clamped-clamped beam

으로, FRF의 실수부(real part)는 아래의 실과 같이 모든 주파수에서 항상 양이 된다. 즉,

$$\text{Re}[G(j\omega)] > 0. \quad \omega \in (-\infty, +\infty) \tag{2}$$

그래서, DVFB에서는 위상응답이  $\pm 90^\circ$  사이에 항상 위치하는 SPR 조건을 충족하면, Fig. 1에 나와 있는 것처럼 폐쇄루프를 형성하여 피드백 제어이득(gain)  $h$ 를 이론적으로 무한대로 둘 수 있어 강인한 안정도를 갖는 DVFB 능동진동 제어시스템을 설계할 수 있게 된다<sup>(2)</sup>. 그러나 실제에는 센서, 제어기, 액추에이터의 특성으로 인해 그 이득을 무한대로 올리지 못하지만 상당히 높을 수 있게 된다.

## 3. 압전 액추에이터 길이 변화 실험

### 3.1 센서-액추에이터 응답측정 실험 셋업

Fig. 1과 같이 가속도계(PCB 352C66)-압전 PZT 액추에이터(Fuji Ceramics C83H)로 구성된 3개의

쌍을 3개의 양단고정보(steel beam,  $L_b \times B_b \times t_b = 300 \times 20 \times 1$  mm)의 중앙에 “실제적으로” 동위치화 되도록 설치하였다. PZT 액추에이터는 길이가 각각 20, 50, 100 mm (폭: 20 mm, 두께: 1 mm) 로서 각각의 보에 예폭시로 고착하였다.

액추에이터는 PCB 전원증폭기(790 시리즈)를 통해 작동되며, 가속도계의 신호는 신호조절기(PCB 441A101)를 통해서 적분되며 보의 중앙에서 굽힘운동(flexural motion)의 속도에 비례하는 출력을 나타낸다. 각각의 보에 대한 센서-액추에이터 쌍의 응답은 Fig. 3처럼 측정하였다.

### 3.2 센서-액추에이터 응답 분석

Fig. 3은 위로부터 압전 액추에이터 길이가 20 mm, 50 mm, 100 mm 순서로 그 센서-액추에이터 응답을 0~12000 Hz의 범위에서 측정한 것을 나타내었다. 각 그림의 상부는 응답의 크기(magnitude)를 나타내고 하부는 위상(phase)을 나타내는데, 특히 하부의 주파수에 따른 위상의 변화는 SPR 특성의 변화양상을 잘 보여 준다.

각 그림의 위상변화는 3가지 경우가 모두 다른 형태로 나타난다. 압전길이 20 mm의 경우의 위상응답은 측정 최대주파수인 12000 Hz까지  $\pm 90^\circ$ 를 의미하는 두 선 사이에 존재한다. 압전길이 50 mm인 경우는 중간쯤에서  $\pm 90^\circ$ 사이에서 벗어나고, 압전길이 100 mm인 경우는 좀 더 낮은 주파수에서  $\pm 90^\circ$ 사이를 벗어났다.

즉, 고정된 길이의 보에 대해서 압전 액추에이터의 길이가 길어질수록 위상이  $\pm 90^\circ$  이내에 존재하는 SPR 특성이 사라지는 “SPR 붕괴주파수”(SPR collapse frequency)  $f_c$ 가 낮아지는 경향을 보였다.

압전 길이가 20 mm인 경우, 액추에이터 양단에서 발생하는 굽힘모멘트는 가속도계와 각각 10 mm 씩 떨어져 있는 상태이며 측정최대범위인  $f_c = 12000$  Hz까지는 SPR 붕괴가 측정되지 않았다. 이것은 센서와 액추에이터 쌍이 “사실상” 동위치화 된 것으로 추정 가능하다. 반면에 압전길이가 50 mm인 경우는, 가속도계와 압전 양단 굽힘모멘트간의 거리는 25 mm 씩이 되어 SPR 붕괴주파수는  $f_c = 3200$  Hz로 증가되었다. 그리고 압전길이가 100 mm인 경우, 굽힘모멘트와 가속도계 간의 거리는 50 mm SPR 붕괴주파수는  $f_c = 1200$  Hz에서 관측되었다.

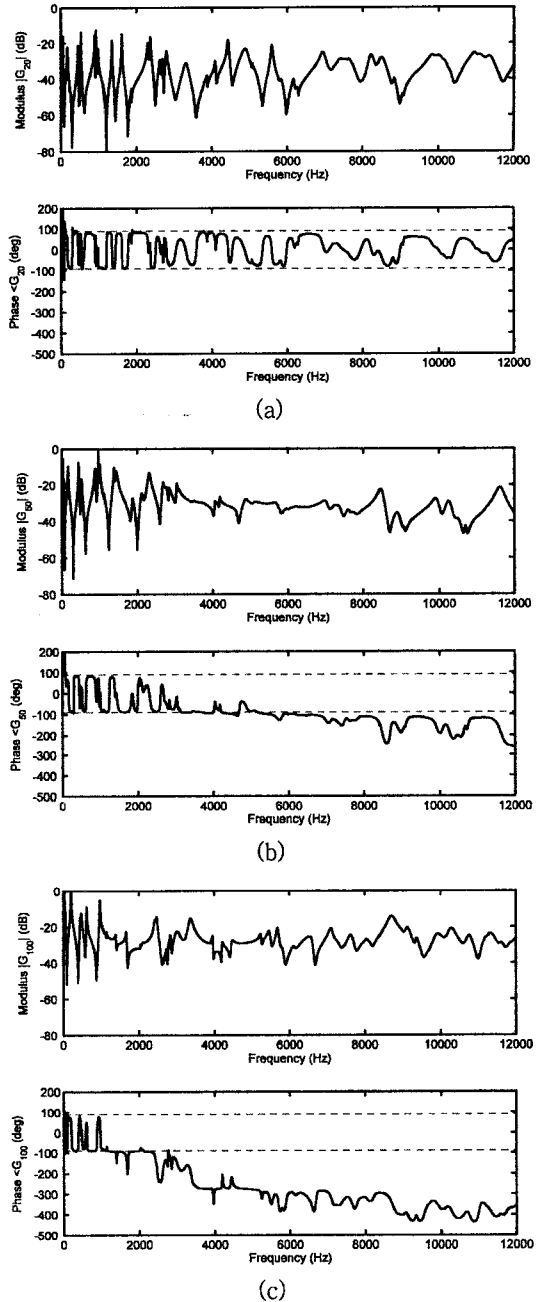


Fig. 3 Sensor-actuator responses of three test beams. (a) PZT length = 20 mm, (b) 50 mm, (c) 100 mm

이러한 압전길이에 따른 SPR 붕괴주파수의 변화는 센서-압전 액추에이터 쌍을 이용한 능동진동제어 시에 압전 액추에이터의 길이 결정에 대한 중요한 정보를 제공함을 알 수 있다.

### 4. 결과 및 분석

#### 4.1 길이비에 따른 붕괴주파수 변화

Fig. 3에서 보는 바와 같이, SPR 붕괴주파수는 압전 액추에이터의 길이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이것은 가속도계와 액추에이터에 의한 굽힘모멘트 간의 거리가 식(1)의 분자(numerator) 부분의 부호를 결정하기 때문이다.

즉, SPR 특성 붕괴 현상은 보의 굽힘운동에서 가속도계와 굽힘모멘트의 상호운동방향이 서로 어긋나는 “out-of-phase”가 될 때 발생하는 것이다.

저주파 운동 영역에서는, 대체로 가속도계와 모멘트의 상호운동 방향이 같은 “in-phase” 상태가 되므로, 센서-액추에이터 응답이 SPR 조건을 유지하게 된다.

SPR조건인 붕괴주파수  $f_c$ 에 대한 길이비(length ratio)를 계산하여 Fig. 4에 도시하였다. 이때 길이비  $r_{pb}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$r_{pb} = L_p / L_b \tag{3}$$

여기서  $L_p$ 는 압전 액추에이터 길이이고  $L_b$ 는 보의 길이이다.

Fig. 4에서는 보의 길이  $L_b$ 가 300, 600, 900 그리고 1200 mm인 경우에 대해 길이비가  $r_{pb}=0.06\sim 0.30$  까지 변할 때 식(1)에 의해 모델링된 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구해진 위상응답의 결과로부터 SPR 붕

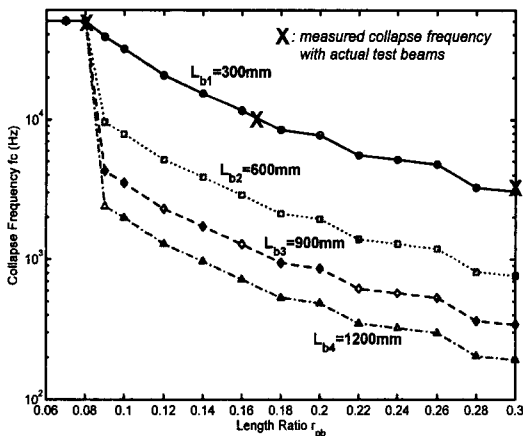


Fig. 4 Collapse frequency of SPR condition against the length ratio with  $Beam_i = L_{bi} \times 20 \times 1$  mm

괴주파수  $f_c$ 를 계산해서 그림으로 나타내었다.

SPR 붕괴주파수와 관련한 2가지의 중요한 경향이 Fig. 4와 같이 시뮬레이션 결과에서 관측되었다.

(1) 보의 길이가 일정할 때 높은 길이비  $r_{pb}$ 는 낮은 붕괴주파수를 보였고, 즉, 압전 액추에이터가 길어 질수록 SPR 특성은 낮은 주파수에서 발생하였다. Fig. 4에서 보는 것처럼, 어떤  $L_b$ (즉, 300, 600, 900 또는 1200 mm) 에서도  $L_p$ 가 길어지면 (즉,  $r_{pb}$ 가 커지면)  $f_c$ 는 낮아지는 경향을 보인다.

(2) 길이비  $r_{pb}$ 가 일정할 때 길이가 긴 보일 수록 더 낮은 붕괴주파수를 가지게 됨이 확인되었다. 이것은 Fig. 4에서  $r_{pb}$ 를 일정하게 두면, 예를 들어  $r_{pb}=0.16$ ,  $L_b$ 가 클수록  $f_c$ 가 더 낮아진다.

실제 실험으로 측정된 3개의 테스트 보에 대한 붕괴주파수  $f_c$ 는 Fig. 4에 “X” 로서 표시되었는데, 이 측정된 붕괴주파수들은 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 결과 예측과 매우 유사함을 알 수 있었다.

#### 4.2 능동진동제어 실험

3개의 테스트 보에 대해서 각각 능동진동제어를 수행하였는데, 이때 직접속도 피드백제어(DVFB)를 적용시켰다.

Fig. 5는 각각의 보들이 실험용 테이블 위에 제어 실험을 위해 설치된 모습이다. 맨 위 그림은 압전 액추에이터의 길이가 20 mm이고, 그 밑으로 각각 50 mm 및 100 mm이다.

B&K 4810 가진기가 보에 “primary source”로 사용되었으며 보의 끝에서 중앙 쪽으로 85 mm 정도 떨어진 위치에 부착되어 교란을 유발시키도록 하였다. 압전 PZT 액추에이터가 진동제어를 위한

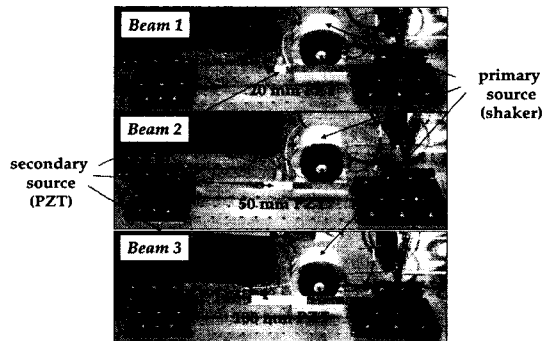


Fig. 5 Active vibration control of 3 beams with DVFB

“secondary source”로 사용되었다. 그리고 보의 중앙에 부착된 가속도계가 센서로 사용되었으며, 가속도 신호는 신호조정기(PCB441A101)를 지나면서 적분과 증폭이 된 속도신호로 변환되었다. 그리고 속도신호는 전원증폭기(PCB power amplifier 790 series)를 지나면서 피드백 제어이득을 얻은 뒤 압전 액추에이터에 전달되도록 DVFB 제어 루프가 구성되었다.

### 4.3 개방루프 측정 및 분석

진동제어를 수행하기 이전에 각각의 보에 대해 개방루프(open-loop) 응답을 측정하였다. 이때 전원증폭기에 의한 제어이득(control gain)은  $H(j\omega)=h$ 로서 표현된다. 개방루프의 응답에서 이득여유(gain margin, GM)이 3가지 보의 경우에 모두 일정한 6 dB를 가지도록 측정된 결과를 확인하면서 이득 값  $h$ 를 조정하였다.

이러한 일정한 이득여유 값은 폐쇄루프(closed-loop) 제어에서 그대로 유지하면서 능동제어실험이 진행하였는데, 이것은 피드백제어의 강인한 안정도(robust stability)를 갖도록 하기 위함이다. 또한 이것의 일정한 유지는 실험시에 제어성능의 상호간 비교를 위해서는 중요하게 고려되어야 할 사항이다.

개방루프의 응답 실험에서, 동일한 이득여유에서도 압전 액추에이터의 길이가 짧아 질수록 더 큰 피드백 이득( $h$ )을 적용시킬 수 있음이 판명되었다.

즉, 20 mm 길이의 압전 액추에이터를 사용한 보의 실험에서는 이득  $h=13$ 을 적용시킬 때 GM=6 dB이 얻어 졌다. 반면에 50 mm 길이의 경우  $h=6$ 의 이득을, 길이가 100 mm인 경우엔  $h=2.6$ 의 이득만을 적용시킬 수 있었다.

### 4.4 제어성능 파라미터

이상의 결과에서 일정한 이득여유를 가지는 조건 하에서 PZT 액추에이터의 길이가 길어지면 적용 가능한 피드백 이득은 작아지는 경향을 보이는 것은 SPR 붕괴주파수와 강한 상호 연관성이 있음을 보여주는 것이 명확함을 알 수 있다. 그래서 높은 붕괴주파수( $f_c$ )를 가지는 경우엔 더 큰 피드백 이득( $h$ )을 적용시킬 수 있다.

거의 모든 제어문제에서는 성능과 안정도의 trade-off 라는 것이 중요한 결정사항이 된다. 그래서, DVFB 기반의 이 능동진동제어 연구에서는 새로운 제어성능

파라미터(control performance parameter)  $P_{cp}$ 를 제안한다. 이것은 직접속도 피드백제어 하에서 가속도 계와 압전 PZT로 구성된 센서-액추에이터 쌍의 제어 능력을 간단하게 평가하기 위한 것으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{cp} = r_{pb} h_{6dB} \tag{4}$$

여기서  $h_{6dB}$ 는 개방루프의 이득여유가 GM=6 dB 일 때의 제어이득을 의미한다. 이 제어성능 파라미터는 SPR 붕괴주파수에 따른 제한적인 이득값과 길이비  $r_{pb}$ 를 동시에 고려한 것이다.

식 (3)에서 제시된 길이비는 압전 액추에이터에 의한 굽힘 모멘트의 크기에 비례하므로, 식 (4)의 제어성능 파라미터  $P_{cp}$ 는 최적의 압전 액추에이터 길이와 성능을 결정할 단서를 제공하는 하나의 수단이 될 수 있다.

그리고 식 (3)을 바탕으로, 3개의 실험용 보에 대해서 제어성능 파라미터를 계산한 결과를 Table 1에 나타내었는데, 이것으로부터 2번째 보(압전길이 = 50 mm)가 가장 큰 파라미터  $P_{cp}$ 값을 가짐을 알 수 있었다.

이것은 DVFB 제어 알고리즘 하에서 6 dB의 일정한 GM을 가질 때, 50 mm의 PZT 액추에이터를 가진 보가 3개의 보 중에서 전 주파수 대역에 걸쳐 제어성능 측면에서 가장 효율적인 것임을 의미하는 것이다. 그 다음으로 20 mm PZT의 경우, 그리고 마지막으로 100 mm의 PZT의 경우이다.

그러나, 여기서 중요하게 인식해 두어야 할 사항이 있다. 대개 능동진동제어는 저주파에서의 제어에 관심이 있으므로, 만약 저주파수 진동에 국한된 능동제어성능을 취급하고자 한다면 제어이득이 비록 작더라도 압전의 길이가 길수록 유리할 것이다. 왜냐하면 길이가 긴 압전 액추에이터는 발생시킬 수 있는 제어력 자체가 크므로 낮은 주파수의 제어에

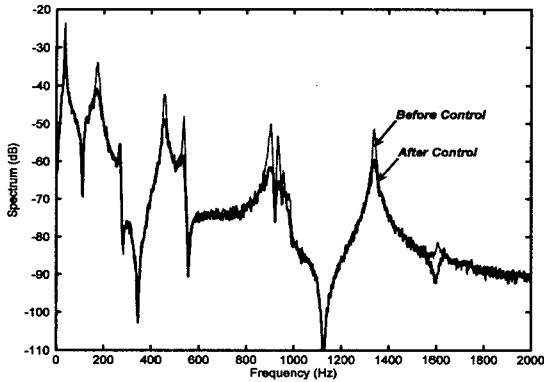
Table 1 Control performance parameter  $P_{cp}$

Test beam	$r_{pb}$	$h_{6dB}$	$P_{cp}$
Beam 1(PZT=20 mm)	0.067	13.0	0.871
Beam 2(PZT=50 mm)	0.167	6.0	1.002
Beam 3(PZT=100 mm)	0.300	2.6	0.780

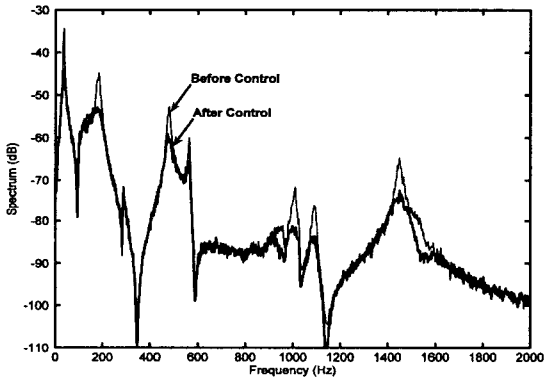
유리하기 때문이다.

#### 4.5 폐쇄루프 제어 및 결과

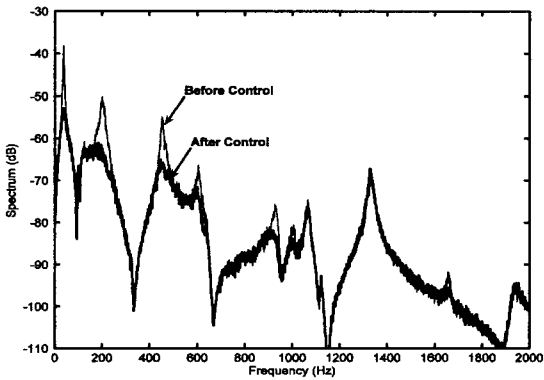
각각의 실험용 보에 대해 폐쇄루프(closed-loop) 능동진동제어 실험 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 위



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Sensor-actuator responses of three test beams. (a) PZT length = 20 mm, (b) 50 mm, (c) 100 mm

로부터 압전 액추에이터 길이가 각각 20, 50, 100 mm일 때의 실험결과로서 파워 스펙트럼을 제어 적용 이전(before control)과 이후(after control)로 비교하였다.

Primary source(shaker)에 의한 첫 번째 보의 경우 진동모드는 가속도계에 의해 2000 Hz 이하에서 35, 170, 455, 535, 905, 935 및 1340 Hz에서 측정이 되었다. 압전길이가 20 mm인 첫 번째 보에 대한 진동의 감소는 secondary source인 압전 액추에이터의 작동으로 Fig. 6(a)와 같이 각 진동모드마다 약 5~15 dB가 달성되었다. Fig. 6(b) 및 6(c)에서 그려진 것처럼, 두 번째 보는 제어결과 각 공진들에 대해 10~15 dB의 감소를 보였으며, 세 번째 보는 약 1000 Hz 이하에서 좀 더 큰 진동감소를 보여 주었다. 즉, 제어결과에서 Fig. 6(c)와 같이 길이가 긴 액추에이터는 저 주파수의 모드에서 더 큰 진동감소를 유발하는 것으로 밝혀졌다.

그러므로, 폐쇄루프 제어 실험결과, DVFB 제어법으로 압전 액추에이터는 보의 진동억제에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

#### 4.6 제어성능 파라미터의 검증

한편으로, DVFB를 이용한 능동진동제어에 의한 진동 감소(attenuation)의 정도는 Fig. 6에서 제어적용 이전의 파워스펙트럼과 제어적용 이후의 파워스펙트럼의 차이를 2000 Hz 이하까지 각 주파수별로 모두 합산하여 전체 진동감소량을 계산하였다. 이 결과 전체 진동감소량은 첫 번째 보의 경우 -1046 dB, 두 번째의 경우는 -1356 dB, 세 번째는 -814 dB가 얻어졌다. 이 결과는 식 (4)의 제어성능 파라미터에 의한 결과와 정확히 일치한다. 즉 두 번째 보가 동일한 안정도 하에서는 3가지의 경우 중에 최적임을 다시 확인한 것이다.

그러므로, 보 및 판의 진동제어에 있어 가속도계와 압전 액추에이터 쌍으로서 DVFB 기법을 적용할 때 제어성능 파라미터  $P_{cp}$ 는 압전 액추에이터의 길이를 최적화 시켜 결정할 수 있는 하나의 방법이 되리라 판단된다.

### 5. 결 론

이 논문은 보의 능동진동제어에 있어 가속도계와

압전 액추에이터 쌍으로서 DVFB 기법을 적용할 때 최적의 압전 길이비를 정의하기 위하여 기술한 것이다. 이를 위해 동일한 치수를 가지는 3개의 실험용 양단고정보(길이×폭×두께 = 300×20×1 mm)가 제작되었는데, 압전 액추에이터는 각각 20, 50, 100 mm의 길이를 가지도록 하였다. 실험 및 해석의 결과는 아래와 같다.

- 센서-액추에이터 응답은 높은 피드백 이득을 적용시키기 위해서는 SPR 특성을 필요로 한다. 즉, PZT 액추에이터의 길이는 보의 응답에서 SPR 붕괴 주파수에 영향을 준다.

- 길이가 긴 압전 액추에이터 일수록 동일한 이득 여유를 유지하기 위해서는 더 작은 피드백 이득을 선택해야 하며, 이것은 더 낮은 SPR 조건 붕괴주파수와 연관이 있다.

- 파라미터  $P_{cp}$ 가 제안되었는데, 이것은 제어성능을 최고로 하기 위한 최적의 압전 액추에이터 길이를 결정하는데 이용된다. 제어 실험결과와 파라미터  $P_{cp}$ 는 좋은 일치를 보였다.

- 50 mm 길이의 압전 액추에이터가 3개의 액추에이터 중에서 최고의 제어 성능을 보였다.

## 후 기

이 논문은 인천대학교 2007년도 자체연구비 지원

에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Fuller, C. R., Elliott, S. J. and Nelson, P. A., 1996, "Active Control of Vibration", Academic Press.
- (2) Lee, Y.-S., 2004, "Active Vibration Control of a Beam with Direct Velocity Feedback", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 619~625.
- (3) Balas, M. J., 1979, "Direct Velocity Feedback Control of Large Space Structures", Journal of Guidance and Control, Vol. 2, No. 3, pp. 252~253.
- (4) Lee, Y.-S., Gardonio, P. and Elliott, S. J., 2002, "Coupling Analysis of a Matched Piezoelectric Sensor and Actuator Pair for Vibration Control of a Smart Beam", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 111, No. 6, pp. 2715~2726.
- (5) Lee, Y.-S., Elliott, S. J. and Gardonio, P., 2003, "Matched Piezoelectric Double Sensor/Actuator Pairs for Beam Motion Control", Smart Materials and Structures, Vol. 12, No. 4, pp. 541~548.