보의 진동제어를 위한 압전 액추에이터의 길이변화 효과 연구

Effect of Piezoactuator Length Variation for Vibration Control of Beams

이영섭*

Young-Sup Lee

Key Words : Direct velocity feedback control (직접속도 피드백제어), Collocation of sensor and actuator (센서 및 액추에이터 동위치화), Active control (능동제어), Smart structures (지능구조).

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 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 direct velocity feedback (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) 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 SPR property of the sensor-actuator response. Intensive simulation and experiment shows the effect of the actuator length variation is strongly related with the frequency range of SPR property. A shorter actuator gave a wider SPR frequency range as a longer one had a narrower range. The shorter actuator showed limited control performance in spite of a higher gain was applied because the actuation force was relatively small. Thus an optimal length ratio (actuator length/beam length) was suggested to obtain relevant performance with good stability with DVFB strategy. The result of this investigation could give important information in the design of active control system to suppress unwanted vibration of smart structures with piezoelectric actuators and accelerometers.

1. 서론

능동진동 제어기법은 실제 상용화를 위한 연구가 가속되고 있다.[1] 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, 보장된 제어성능을 제공하기 때문이다.[2,3]

그리고 지능재료로 활용도가 높은 압전 액추에이터와 가속도계의 결합에 의한 센서-액추에이터 쌍은 실제 구현 가능한 능동진동제어 시스템의 현실성 있는 대안중의 하나이다.

그러나 이런 센서-액추에이터 쌍이 효율적으로 적용되려면 절대 양의 정수 (strictly positive real, SPR) 조건이 충족되어 높은 피드백 이득을 적용시켜 우수한 제어성능을 확보할 수 있게 된다. 더 우수한 제어성능을 얻으려면, 더 큰 압전 액추에이터를 이용해서 더 큰 굽힘 모멘트를 써야 가능해 진다. 그러나 이 경우 SPR 특성이 높지 않은 주파수에서 붕괴되어 강인한 안정도 및 높은 피드백 이득을 적용시키기 곤란해 진다. 그렇다고 너무 작은 크기의 압전 액추에이터를 사용하면 강인한 안정도는 확보가 되나 제어력 자체가 작아 우수한 진동억제 효과를 얻기가 어렵다.

이러한 상호 모순적인 현상에 대해서 최적의 압전 액추에이터 길이를 결정하기 위한 연구를 본 논문에서는 기술하고 있다.

우선 2 절에서 DVFB 를 적용한 능동진동제어 시스템에 관해 간단히 기술한다.

3 절에서는 압전 액추에이터의 길이 변화 실험에 대해 기술한다.

그리고 4 절에서는 능동제어 실험결과와 더불어 새로운 제어성능을 판단하기 위한 파라미터의 제안과 이를 검증하는 과정에 대해 언급하고 있다.

* 인천대학교
E-mail : ysl@incheon.ac.kr
Tel: (042) 868-5705, Fax: (042) 868-5639

2. DVFB 제어

DVFB 제어기법에 대해서는 이미 참고문헌 [2]에 기술되어 있으므로, 여기에서는 간략히 언급한다.

Fig. 1 과 같은 오일러-베르누이 양단고정보에 설치된 동위치화된 센서 (가속도계) - 액추에이터 (PZT 패치) 쌍의 경우 적정한 주파수 범위내에서는 센서-액추에이터의 응답은 아래와 같은 수식으로 주어지게 된다.

$$G(j\omega)=\frac{\dot{w}(x_s,\omega)}{V_3(\omega)}=j\omega C_M\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\phi_n(x_s)[\phi_n'(x_1)-\phi_n'(x_2)]}{M_n[(\omega_n^2-\omega^2)+j2\zeta\omega_n\omega]} \quad (1)$$

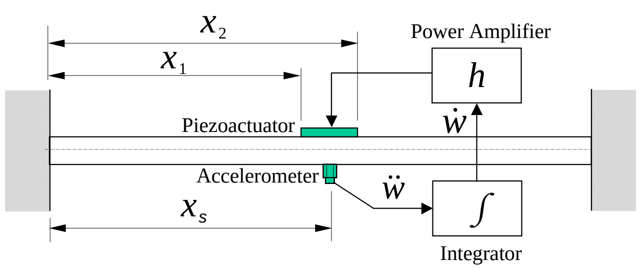


Fig. 1 Piezoactuator and accelerometer pair on a clamped-clamped beam.

그리고, 이러한 센서-액추에이터의 배치는 Fig. 1 과 같은 페쇄루프를 적용시키면 능동진동억제 장치로서 우수한 안정도를 가진 DVFB 제어기를 만들수 있게 된다.[4,5]

3. 압전 액추에이터 길이 변화 실험

Fig. 2 와 같이 가속도계 (PCB 352C66) - 압전 PZT 액추에이터 (Fuji Ceramics C83H)로 구성된 3 개의 쌍을 3 개의 양단고정보 (steel beam, $L_b \times B_b \times t_b$=300 * 20 * 1 mm)의 중앙에 "실제적으로" 동위치화 되도록 설치 하였다. PZT 액추에이터는 길이가 각각 20, 50, 100 mm (폭: 20 mm, 두께: 1 mm) 로서 각각의 보에 에폭시로 고착되었다.

액추에이터는 PCB 전원앰프 (790 시리즈) 를 통해 작동되며, 가속도계의 신호는 signa; conditioner (PCB 441A101) 를 통해서 적분되며 보의 중앙에서 굽힘속도에 비례하는 출력을 보여 준다. 각각의 보에 대한 센서-액추에이터 쌍의 응답은 Fig. 3 처럼 측정되어 졌다.

Fig. 3 은 위에서 부터 압전길이가 20 mm, 50 mm, 100 mm 순서로 나타내어 졌다. 각 그림은 상부는 응답의 크기를 나타내고 하부는 위상을 나타내는데, 특히 하부의 주파수에 따른 위상의 변화는 SPR 특성의 변화양상을 잘 보여 주고 있다.

즉, 압전의 길이가 길어질수록 위상이 ± 90° 이내에 존재하는 SPR 특성이 사라지는 SPR 붕괴 주파수 (SPR collapse frequency) f_c 가 낮아지는 경향을 보였다. 압전길이가 20 mm 인 경우, 액추에이터 양단에서 발생되는 굽힘모멘트는 가속도계와 각각 10 mm 씩 떨어져 있는 상태이며 측정최대범위인 f_c = 12000 Hz 까지는 SPR 붕괴가 측정되지 않았다. 이것은 센서와 액추에이터 쌍이 "사실상" 동위치화 된 것으로 추정 가능하다. 반면에 압전길이가 50 mm 인 경우는, 가속도계와 압전 양단 굽힘모멘트간의 거리는 25 mm 씩이 되어 SPR 붕괴 주파수는 f_c = 3200 Hz 로 증가됨이 측정 되었다. 그리고 압전길이가 100 mm 인 경우, 굽힘모멘트와 가속도계 간의 거리는 50 mm SPR 붕괴 주파수는 f_c = 1200 Hz 에서 관측되었다.

이러한 압전길이에 따른 SPR 붕괴 주파수의 변화는 센서-압전액추에이터 쌍을 이용한 능동진동 제어시에 압전 액추에이터의 길이 결정에 대한 중요한 정보를 제공함을 알 수 있다.

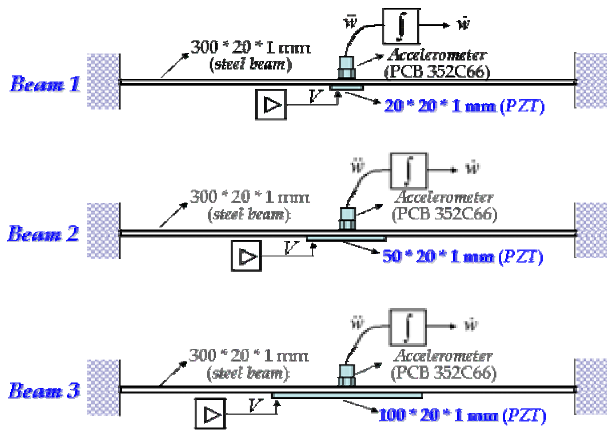
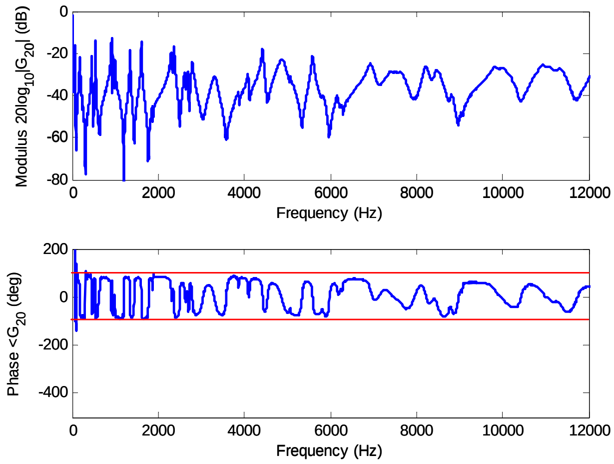


Fig. 2 Three test beams with different piezoactuator lengths (Beam 1: 20 mm, Beam 2: 50 mm, Beam 3: 100 mm).

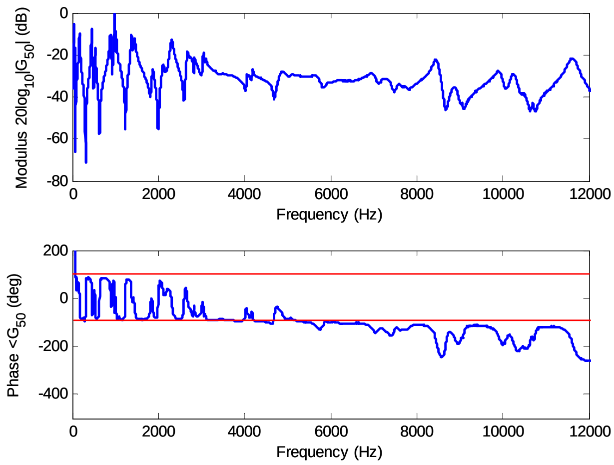
4. 결과 및 분석

Fig. 3 에서 보는 바와 같이, SPR 붕괴 주파수는 압전 액추에이터의 길이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이것은 가속도계와 액추에이터에 의한 굽힘모멘트 간의 거리가 식(1)의 분자 부분의 부호를 결정하기 때문이다. 즉, SPR 붕괴 현상은 보의 굽힘운동 (flexural motion)에서 가속도계와 굽힘모멘트의 상호위치가 "out-of-phase" 가 될

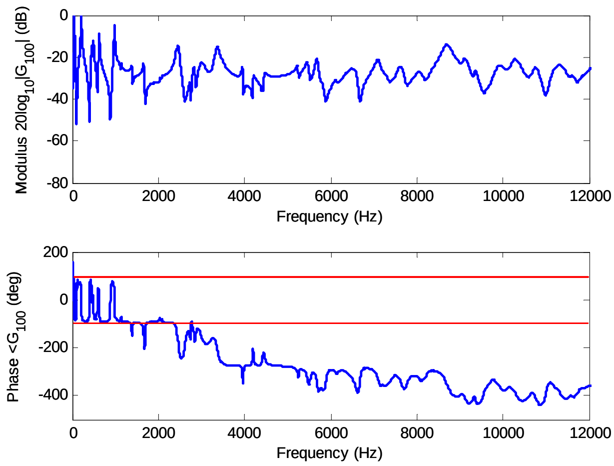
때 발생하는 것이다.



(a)



(b)



(c)

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

저주파 운동 영역에서는, 대체로 가속도계와 모멘트의 그 위치가 "in-phase" 상태가 되므로, 센서-액추에이터 응답이 SPR 조건을 유지하게 된다.

SPR 조건의 붕괴 주파수 (f_c) 에 대한 길이비 (length ratio) 가 계산되어 Fig. 4 에 도시 되었다. 이때 길이비 r_{pb} 는 다음과 같이 정의된다.

$$r_{pb} = L_p / L_b , \qquad (2)$$

여기서 L_p 는 압전 액추에이터 길이이고 L_b 는 보의 길이 이다.

Fig. 4 에서는 보의 길이 L_b 가 300, 600, 900 그리고 1200 mm 인 경우에 대해 길이비가 r_{pb} = 0.06 - 0.30 까지 변할 때 SPR 붕괴 주파수 (f_c) 를 계산해서 그림으로 나타내었다. 몇 가지 중요한 경향이 이 계산에서 관측되었다.

보의 길이가 일정할 때 높은 길이비는 낮은 붕괴주파수를 보였고, 길이비가 일정할 때 길이가 긴 보일 수록 더 낮은 붕괴주파수를 가지게 됨이 확인되었다. 실제 3 개의 테스트 보에 의한 실험으로 측정된 붕괴주파수는 Fig. 4 에 "X" 로서 표시되었는데, 이 측정된 붕괴주파수들은 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 결과 예측과 매우 유사함을 알 수 있었다.

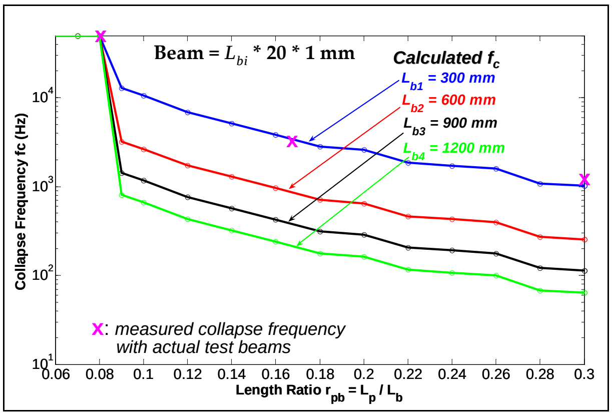


Fig. 4 SPR condition collapse frequency against length ratio.

Fig. 2 에서의 3 개의 테스트 보에 대해서 각각 능동진동제어를 수행하였는데, 이때 직접속도 피드백제어 (DVFB) 를 적용시켰다. Fig. 5 는 각각의 보들이 실험용 테이블 위에 제어실험을 위해 설치된 모습을 보여 준다.

B&K 4810 가진기가 보에 "primary source" 로 사용되었으며 보의 끝에서 85 mm 정도 떨어진 위치에 부착되었다. 압전 PZT 액추에이터가 제어를 위한 "secondary source" 로 사용되었다. 그리고 보의 중

앙에 부착된 가속도계가 센서로 사용되었으며, 가속도 신호는 신호조절기 (PCB441A101)를 지나면서 적분과 증폭이 된 속도신호가 능동진동제어에 사용되었다. 그리고 속도신호는 전원증폭기 (PCB power amplifier 90 series)를 지나면서 피드백 제어이득을 얻은 뒤 압전 액추에이터에 전달되도록 제어루프가 구성되었다.

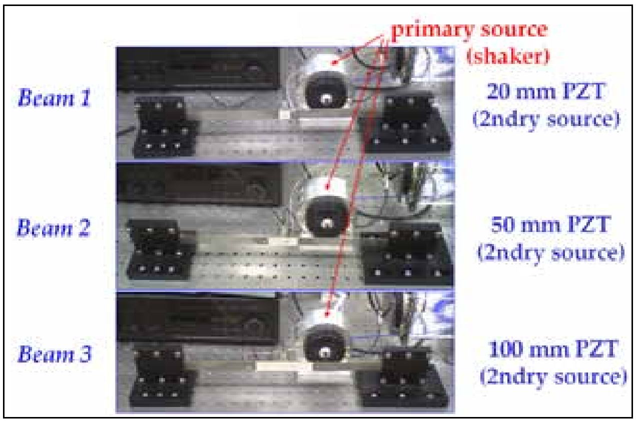


Fig. 5 Active vibration control with DVFB.

제어를 수행하기 이전에 각각의 보에 대해 개방루프 (open-loop) 응답을 측정하였다. 이때 전원증폭기에 의한 제어이득 (control gain) 은 $H(j\omega) = h$ 로서 표현된다. Fig. 6 은 개방루프의 응답에서 이득여유 (gain margin) GM = 6 dB 를 가지도록 이득 값이 조정되었음을 보여 주고 있다. 이러한 일정한 이득여유 값은 폐쇄루프 (closed-loop) 제어에서 그대로 유지되면서 능동제어실험이 진행되었는데, 피드백제어의 강인한 안정도 (robust stability) 를 위해 이와 같이 선정되었다. 또한 이것의 일정한 유지는 실험시에 제어성능의 상호간 비교를 위해 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, Fig. 6 에서 보는 것처럼, 20 mm 길이의 압전 액추에이터를 사용한 보의 실험에서는 이득 $h = 13$ 을 적용시킬 때 GM = 6 dB 가 얻어 졌다. 반면에 50 mm 길이의 경우 $h = 6$ 의 이득을, 길이가 100 mm 인 경우엔 $h = 2.6$ 의 이득만을 적용시킬 수 있었다. 이상의 결과에서 일정한 이득여유를 가지는 조건하에서 PZT 액추에이터의 길이가 길어지면 적용 가능한 피드백 이득은 작아지는 경향을 보이는 것은 SPR 붕괴 주파수와 강한 상호 연관성이 있음을 보여 주는 것이 명확함을 알 수 있다. 그래서 높은 붕괴 주파수 (f_c) 를 가지는 경우엔 더 큰 피드백 이득 (h) 을 적용시킬 수 있다는 것이다.

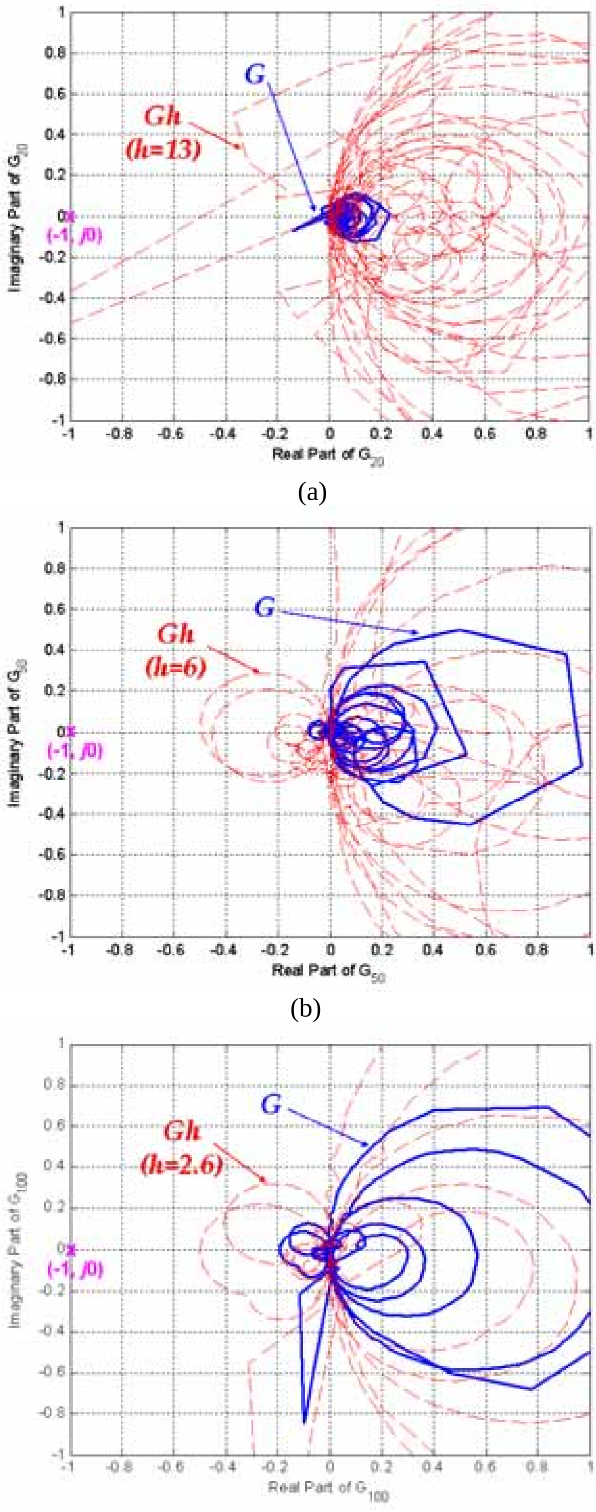


Fig. 6 Sensor-actuator responses of three test beams. (a) PZT length = 20 mm, (b) 50 mm, (c) 100 mm

앞의 실험으로부터 제어성능 파라미터 (control performance parameter) P_{cp} 가 제안 되었는데, 이것은

직접속도 피드백제어 하에서 가속도계와 압전 PZT 로 구성된 센서 - 액추에이터 쌍의 제어 능력을 간단하게 평가하기 위한 것이다. 이것은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{cp} = r_{pb} h_{6dB} , \tag{3}$$

여기서 h_{6dB} 는 이득여유 GM = 6 dB 일때의 제어 이득을 의미한다. 이 제어성능 파라미터는 SPR 붕괴 주파수에 의한 제한적인 이득값과 길이비 r_{pb} 를 동시에 고려한 것이다. 식(2)에서 제시된 길이비는 압전 액추에이터에 의한 굽힘 모멘트의 크기에 비례하므로, 파라미터 P_{cp} 는 최적의 압전 액추에이터 길이와 성능을 결정할 단서를 제공하는 하나의 수단이 될 수 있다.
그리고 Fig. 6 과 식(3)을 바탕으로, 3 개의 실험용 보에 대해서 제어성능 파라미터를 계산한 결과를 Table 1 에 나타내었는데, 이것은 2 번째 보 (압전 길이 = 50 mm) 가 가장 큰 파라미터 P_{cp} 값을 가짐을 알 수 이었다. 이것은 50 mm 의 PZT 액추에이터를 가진 보가 3 개의 보 중에서 제어성능 측면에서 가장 효율적인 것임을 의미하는 것이다.

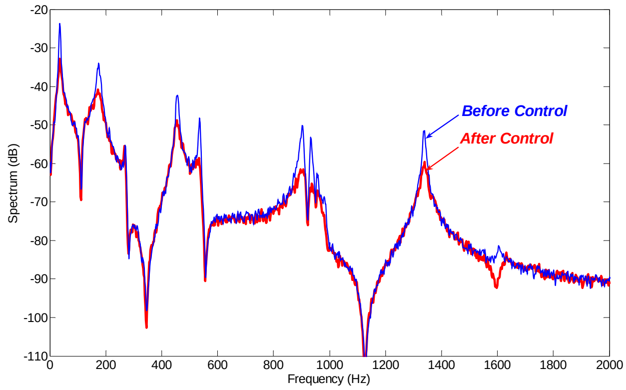
Table 1. Control performance parameters.

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

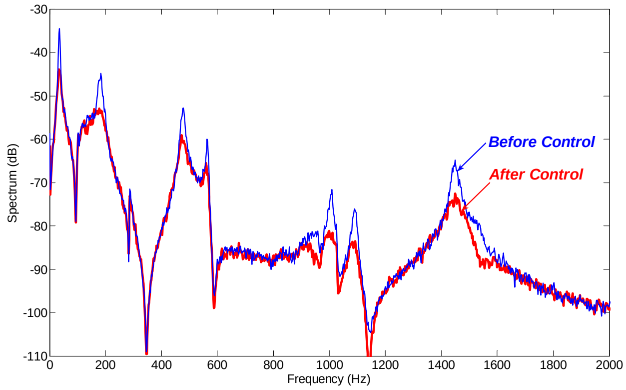
각각의 실험용 보에 대해 폐쇄루프 능동진동제어 실험 결과는 Fig. 7 에 나타내었다. 위 에서부터 압전 길이가 각각 20, 50, 100 mm 일 때의 실험결과로서 파워 스펙트럼을 제어 적용 이전 (before control) 과 이후 (after control) 로 비교하였다. Primary source (shaker) 에 의한 첫 번째 보의 경우 진동모드는 가속도계에 의해 2000 Hz 이하에서 35, 170, 455, 535, 905, 935 및 1340 Hz 에서 측정이 되었다. 첫번째 보에 대한 진동의 감소는 secondary source 인 압전 액추에이터의 작동으로 Fig. 7 (a) 와 같이 각 진동모드 마다 약 5 - 15 dB 가 달성되어졌다. 두 번째 및 세 번째 보의 경우도 유사한 감소가 측정되었다. 폐쇄루프 제어 실험결과, DVFB 제어법으로 압전 액추에이터는 보의 진동 억제에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 한편으로, 감소 (attenuation) 의 정도를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$Att(f) = 10\log_{10} | S_{ee}(f) / S_{dd}(f) |, \tag{4}$$

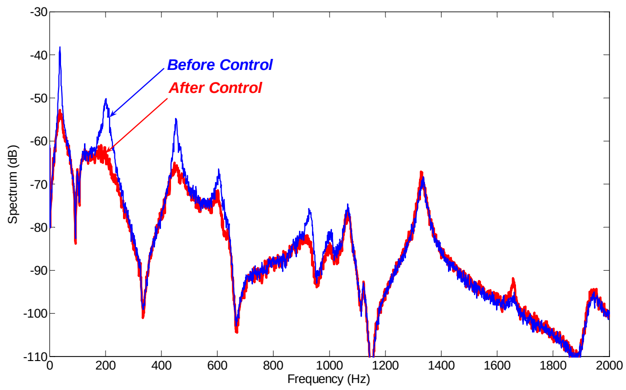
이때 S_{ee} 는 측정된 제어 이후의 오차 파워 스펙트럼이고, S_{dd} 는 제어 이전의 교란 파워 스펙트럼이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Sensor-actuator responses of three test beams. (a) PZT length = 20 mm, (b) 50 mm, (c) 100 mm

제어결과에서 길이가 긴 액추에이터는 저 주파수의 모드에서 더 큰 진동감소를 유발하는 것으로

밝혀졌다. 특히 3 번째 보의 경우 대부분의 감소는 저 주파수에서 이루어졌다.
또한 다른 성능 파라미터 P_{cpa} 가 제안되었는데, 이것은 감소의 결과를 고려한 것이다. 즉, 2000 Hz 이하의 각 주파수 별 감소를 모두 합하여 전체적으로 어느 정도의 감소가 달성되는가를 평가하기 위한 것으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

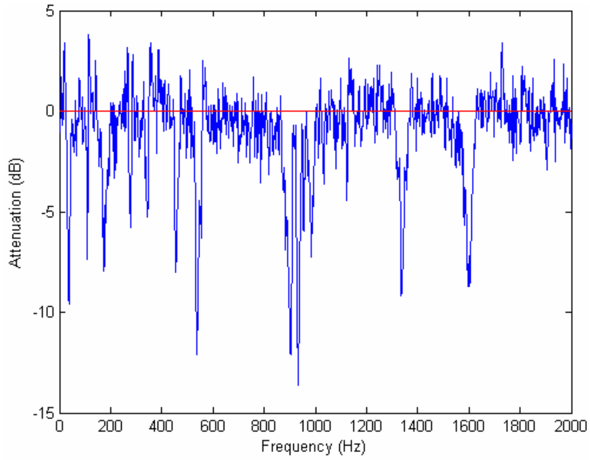
$$P_{cpa} = \sum_i Att(f_i) \cdot \qquad (5)$$

식(5)를 바탕으로 새로운 제어성능 파라미터인 P_{cpa} 를 계산하면 Fig. 8 처럼 각각 보에 대해 -1046, -1356 및 -814 가 얻어진다. 즉, 이 새로운 파라미터 P_{cpa} 도 식(3)의 파라미터인 P_{cp} 에서와 같이 두번째 보가 3 개의 보 중에서 최적의 제어 성능을 가졌다는 결과를 보여 주었다. 즉, 파라미터 Pcp 의 유효성은 이와 같은 진동크기의 감소량으로도 간접적으로 증명이 되었다.
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.

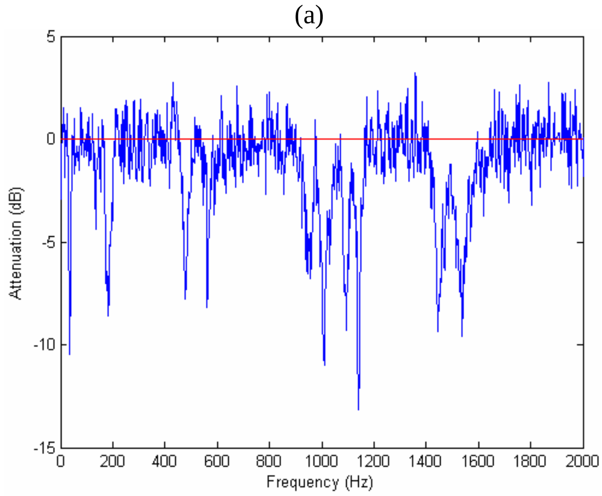
5. 결론

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

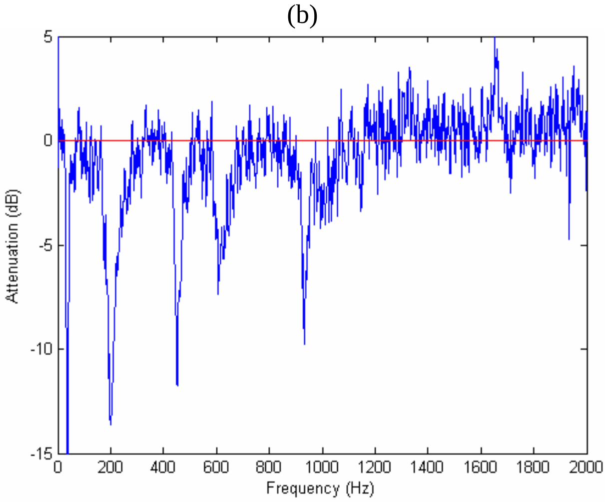
- 센서-액추에이터 응답은 높은 피드백 이득을 적용시키기 위해서는 SPR 특성을 필요로 한다. 즉, PZT 액추에이터의 길이는 보의 응답에서 SPR 붕괴 주파수에 영향을 준다.
- 길이가 긴 압전 액추에이터 일수록 동일한 이득여유를 유지하기 위해서는 더 작은 피드백 이득을 선택해야 하며, 이것은 더 낮은 SPR 조건 붕괴 주파수와 연관이 있다.
- 파라미터 Pcp 가 제안되었는데, 이것은 제어 성능을 최고로 하기 위한 최적의 압전 액추에이터 길이를 결정하는데 이용된다. 제어 실험결과와 파라미터 Pcp 는 좋은 일치를 보였다.
- 50 mm 길이의 압전 액추에이터가 3 개의 액추에이터 중에서 최고의 제어 성능을 보였다.
- 진동크기 감소량의 비교에서도 파라미터 P_{cp} 의 유효성이 증명되었다. 즉, 이 방법은 능동진동 제어시스템의 설계에 적용가능할 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Comparison of attenuations after control with DVFB of each test beam (Gain margin: 6 dB). Sum of attenuation: (a) -1046, (b) -1356, (c) -814.

참고문헌

(1) Fuller C R, Elliott S J and Nelson P A, 1996, *Active Control of Vibration*, Academic Press.

(2) 이영섭, "보의 능동진동제어를 통한 직접속도피드백의 적용성 연구", 2004, 한국소음진동공학회논문집, **14**(7), 619-625.

(3) Balas M J, 1979, *Journal of Guidance and Control*, **2**(3), 252-253, Direct Velocity Feedback Control of Large Space Structures.

(4) Lee Y-S, Gardonio P and Elliott S J, 2002, *Journal of Acoustical Society of America*, **111**(6), 2715-2726, Coupling analysis of a matched piezoelectric sensor and actuator pair for vibration control of a smart beam.

(5) Lee Y-S, Elliott S J and Gardonio P, 2003, *Smart Materials and Structures*, **12**(4), 541-548, Matched piezoelectric double sensor/actuator pairs for beam motion control.