

# 보의 능동진동제어를 통한 직접속도 피드백의 적용성 연구

## Active Vibration Control of a Beam Using Direct Velocity Feedback

이 영 섭<sup>†</sup>

Young-Sup Lee

(2004년 4월 13일 접수 : 2004년 6월 23일 심사완료)

**Key Words** : Direct Velocity Feedback Control(직접속도 피드백제어), Collocation of Sensor and Actuator(센서 및 액추에이터 동위치화), Active Control(능동제어), Smart Structures(지능구조)

### ABSTRACT

Direct velocity feedback (DVFB) control is known that it offers an unconditional stability with very high performance when the control strategy is applied at a point collocated sensor and actuator pair, because the sensor-actuator pair has strictly positive real (SPR) property. In this paper, two types of collocated sensor-actuator pairs are considered for practical active vibration control of a structure. They are a point collocated sensor-actuator pair and a point sensor-distributed actuator pair. Both pairs with DVFB show robust stability and performance. It is noted that the collocated point sensor-actuator ultimately acts as a "skyhook" damper, but the point sensor-distributed actuator pair with DVFB acts as a "skyhook" rotational damper pair.

### 1. 서 론

본 논문은 참고문헌 (1)의 이론적 연구에서 그 가능성을 제시한 동위치화된 점 센서-액추에이터 쌍 그리고 동위치화된 점센서-분포 액추에이터 쌍에 대한 후속적 연구로서, 실험적으로 직접속도 피드백(direct velocity feedback, DVFB) 제어법<sup>(2)</sup>을 보의 능동진동제어에 적용시킨 것이다.

참고문헌 (1)에서 DVFB 제어기법의 능동 진동 및 음향제어에의 적용시 그 장점은 물론 연구배경에 대해 이미 상세히 기술되었다.

특히, 기존의 음향 및 진동에 대한 능동적 제어기법의 실제 상용화를 저해하는 과도한 센서 및 액추에이터의 요구, 이로 인한 복잡한 다중 입출력의 제어

기 그리고 비용 및 중량증대 문제에<sup>(3-6)</sup> 대한 하나의 대안으로서 DVFB 제어가 적용될 수 있는 지를 이론을 바탕으로 실험적으로 증명하는 것이 본 연구의 핵심이라 할 수 있겠다.

동위치화 된 센서-액추에이터 쌍의 응답은 절대 양의 실수(strictly positive real, SPR) 특성을 가지므로<sup>(1)</sup>, 본 제어시스템은 센서와 액추에이터 쌍 그리고 신호조절기(signal conditioner)와 전원증폭기(power amplifier) 만으로 구성되는 매우 단순화된 능동제어 시스템으로 구현가능해지는 것이다.

즉, 이러한 좀 더 단순하면서도 더욱 강인한 안정성 및 성능을 가진 능동제어 시스템을 구현하는데 중점을 두고 있다.

이를 위해 본 연구에서는 두 가지의 보에 대해 동위치화된 점 센서/액추에이터 쌍 그리고 동위치화된 점 센서/분포 액추에이터 쌍을 각각 DVFB 제어에 적용하였다. 이에 대한 이론적 연구 또한 포함하였다.

또한 상기의 두 가지의 센서/액추에이터 쌍이 DVFB 제어기와 함께 작동할때 물리적으로 어떤 형

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 한국표준과학연구원

E-mail : yslee@kriss.re.kr

Tel : (042) 868-5705, Fax : (042) 868-5639

태로 진동을 억제하는지에 대한 분석을 수행하여, DVFB 제어기의 본질적 특성을 수동적 제어기와 비교하여 설명을 하였다.

우선 2절에서 가속도계 및 가진기(shaker)를 이용한 동위치화된(collocated) 점 센서-액추에이터 쌍(a pair of point sensor-actuator)의 특성을 설명하면서 DVFB 제어에 대한 음향 진동제어에의 적용에 관해 이론적으로 요약 기술한다.

그리고 3절에서는 점 센서와 액추에이터 쌍의 배치에 대한 실험적 결과를 바탕으로 그 성능과 안정도에 대해 기술한다.

마지막으로 4절에서는 가속도계 및 압전 PZT 패치를 이용한 점 센서와 분포 액추에이터 쌍(a pair of point sensor and distributed actuator)의 배치에 대한 실험적 결과를 바탕으로 그 성능과 안정도에 대해 설명한다.

본 연구는 능동진동제어(active vibration control) 뿐 아니라 능동구조음향제어(active structural acoustical control) 에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 직접속도 피드백(DVFB)

DVFB의 이론적 해석은 이미 참고문헌 (1)에 자세히 기술되어 있으므로, 여기에서는 논문의 전개상 필요한 핵심적 내용으로 간략히 요약한다.

Fig. 1과 같은 오일러-베르누이 외팔보에 설치된 동위치화된( $x_a = x_s$ ) 점 센서(가속도계) - 액추에이터(shaker) 쌍의 경우 점 액추에이터에 의해 조화력  $f(x_a, \omega)$ 이 작용하고, 동일한 지점에서 점 센서가 보의 조화굽힘속도  $\dot{w}(x_s, \omega)$ 를 탐지한다면, 주파수 구간  $\omega \in (-\infty, +\infty)$ 에서 센서-액추에이터의 주파수 응답 함수(frequency response function, FRF)는 다음과 같이 표현된다.

$$G(j\omega) = \frac{\dot{w}(x_s, \omega)}{f(x_a, \omega)} = j\omega \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\phi_n^2(x_s)}{M_n[(\omega_n^2 - \omega^2) + j2\zeta_n\omega\omega_n]} \quad (1)$$

여기서  $M_n$ 은  $n$ 번째 모달질량(modal mass),  $\phi_n(x_s)$ 는  $n$ 번째 굽힘모드 형상,  $\omega_n$ 은  $n$ 번째 고유주파수, 그리고  $\zeta$ 는 점성감쇠비이다.

이 경우, 참고문헌 (1)에 의하면 센서-액추에이터

FRF 에서는 주파수의 증가에 따라 공진의 크기가 줄어들면서, 공진점 및 반공진점이 주파수에 따라 교대로 나타나게 되고, 위상은 사이에 항상 위치하는 SPR 특성을 나타낸다. 즉 시스템의 FRF의 실수부(real part)는 아래와 같이 모든 주파수에서 항상 양으로 표현된다.<sup>(7)</sup>

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

그래서 DVFB 제어는 단순한 제어기로 구성됨에도 불구하고, 이론에 의하면 어떠한 형태의 주 교란(primary disturbance)이 구조물에 작용해도 무조건적으로 안정한(unconditionally stable) 것으로 알려져 있다.<sup>(2)</sup> 그러므로 DVFB를 이용하여 강인한 안정도를 갖는 음향진동 능동제어시스템의 설계시 SPR 특성은 중요한 필요조건이 된다.

## 3. 점 센서/액추에이터 쌍에 대한 DVFB 적용

Fig. 1은 실제 외팔보(길이 × 폭 × 두께 = 200 × 30 × 1 mm, 재질 : 알루미늄)의 변위가 가장 큰 끝단에 점 센서-액추에이터 쌍인 shaker(B&K 4810)와 가속도계(B&K 4375)를 동위치화( $x_a = x_s$ ) 시켜 부착한 것이다. 가속도계에서 나오는 신호는 신호조절기(B&K Nexus)를 지나면서 적분되어 보의 끝단에서의 굽힘속도  $\dot{w}(x_s, \omega)$ 에 비례하는 출력을 주도록 하였다. 그리고 shaker의 출력은 힘 트랜스듀서(B&K 8200)으로 신호조절기(B&K Nexus)를 통해 계측하였다.

그러므로 이 경우 플랜트는 식 (1)에서 주어진 것처럼 센서와 액추에이터 간의 응답에 의해 결정되어 지는데, Fig. 1에 도시된 점선의 사각형이 포함하는 것으로 정의된다.

Fig. 1의 장비배치로서 B&K Pulse를 이용하여 측정된 센서-액추에이터의 플랜트 FRF는 Fig. 2에 나타내었다. 센서와 액추에이터가 동위치화 되어 있어서, 전형적인 SPR 응답을 보이고 있으며, 주어진 주파수 구간에서 식 (2)를 만족하고 있음을 알 수 있다. 굽힘모드는 약 30 Hz에서 처음으로 나타났고, 이후 약 160 Hz, 440 Hz 그리고 900 Hz에서 각각 나타났다.

Fig. 1의 센서-액추에이터 쌍에 대해 DVFB를 적용하여 제어를 포함한 것을 블록 다이어그램으로 나타내면 Fig. 3과 같이 그려 질 수 있다. 이것은 전형적인 외란제거(disturbance rejection)를 위한 단일 입출력 피드백 제어시스템으로서 보에 설치된 센서-액추에이터에 대한 플랜트응답(plant response),  $G(s)$  DVFB 피드백 제어기  $H(s)$  그리고 외란(disturbance)  $d$ 으로 구성된다.

이때 DVFB 피드백 제어기는 에러센서(error sensor)

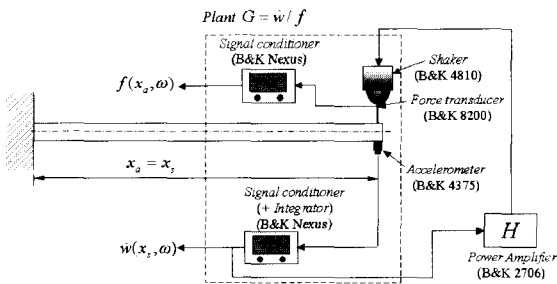


Fig. 1 DVFB control with a point collocated sensor-actuator pair on a cantilever beam

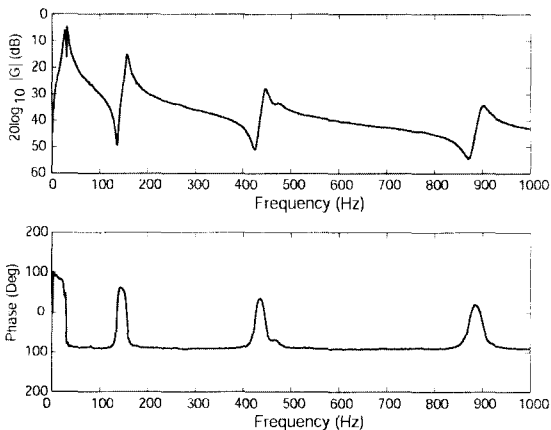


Fig. 2 Measured sensor-actuator FRF of a point collocated system: Shaker input and integrated accelerometer(velocity) output

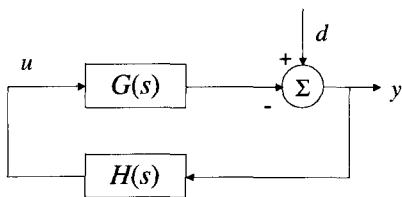


Fig. 3 A single-channel feedback control system for disturbance rejection

인 가속도계로 부터 적분된 신호를 받은 뒤 secondary source인 shaker에 전원을 공급하는 전원앰프(power amplifier, B&K 2706)이다.

이것은 이미 Fig. 1에 개략적으로 나타내었듯이 기존의 저역통과필터(low pass filter)나 디지털신호처리기(digital signal processor) 없이 DVFB 제어기는 간단하게 구현하였다. 즉, 이 경우 제어기는 전 주파수에 걸쳐 일정한 이득이므로, 즉  $H(j\omega) = h$  ( $h > 0$ )로 나타낼 수 있다.

센서-액추에이터 응답이 SPR 조건을 만족하므로, 전원공급기가 선형적이면, 이 DVFB 피드백 시스템은 안정적이 되므로, 에러센서의 출력 스펙트럼  $y(j\omega)$  및 액추에이터에 재한 제어입력  $u(j\omega)$ 은 다음과 같이 각각 표현된다.<sup>(8)</sup>

$$\begin{aligned} y(j\omega) &= [1 + G(j\omega)H(j\omega)]^{-1}d(j\omega) \\ u(j\omega) &= H(j\omega)[1 + G(j\omega)H(j\omega)]^{-1}d(j\omega) \end{aligned} \quad (3)$$

그러나 실제에 있어서는 반드시 시스템의 개방루프(open-loop) FRF  $G(j\omega)H(j\omega)$ 가 Nyquist 안정도 조건<sup>(7)</sup>을 충족하는지 확인할 필요가 있다.

Fig. 4는 측정된 센서-액추에이터 FRF(Fig. 2)  $G(j\omega)$ 에 대해 피드백 이득이 일정한 선형적 제어기  $H(j\omega) = h$ 를 적용하여 계산된 개방루프 응답을 Nyquist plot으로 나타내었다. 이때  $h$ 는 각각 100과 500이 적용되었다. Fig. 4의 '\*'는 Nyquist point(-1,  $j0$ )

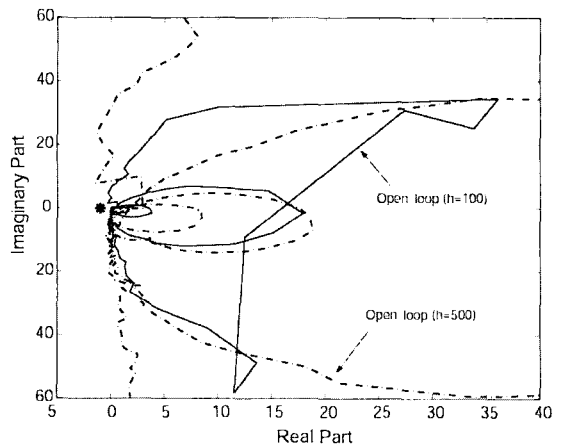


Fig. 4 Nyquist plot of the open-loop responses with feedback gains( $h=100$  and  $h=500$ ). '\*' represents the Nyquist point(-1,  $j0$ )

이며, 각각의 이득에 대한 개방루프 FRF들은 이 점을 감싸지 않음으로 DVFB 제어시스템이 안정적임을 확인하였다.

Fig. 5는 DVFB 제어의 적용전(before control,  $h=0$ )과 적용후(after control,  $h=100$ 과  $h=500$ )의 에러신호 출력 스펙트럼  $y(j\omega)$ 을 보여 주고 있다. 적용전의 는 실험을 통해 측정된 결과이고, 적용후의 두가지 결과는 선형적 제어기와 식 (3)을 이용하여 계산한 것이다.

DVFB 적용후, Fig. 5에 보이는 것처럼 첫번째 면 외진동 모드의 경우 피드백 이득이  $h=100$ 일 때 약 11 dB 그리고  $h=500$ 일 때 약 18 dB의 감쇠(attenuation)을 보였다.

그래서 Fig. 5에 나타난 것처럼, DVFB 제어를 적용하면 우수한 능동진동제어를 수행할 수 있는데, 동 위치화된 점 센서-액추에이터 쌍이 부착된 위치에서 굽힘속도에 비례하는 제어력(control force)을 발생 시키게 된다.

그러므로 shaker는 아래와 같이 표현 가능한 secondary force  $f_s$ 를 유발시키게 된다.

$$f_s(x_a) \propto -h\dot{w}(x_s) \quad (4)$$

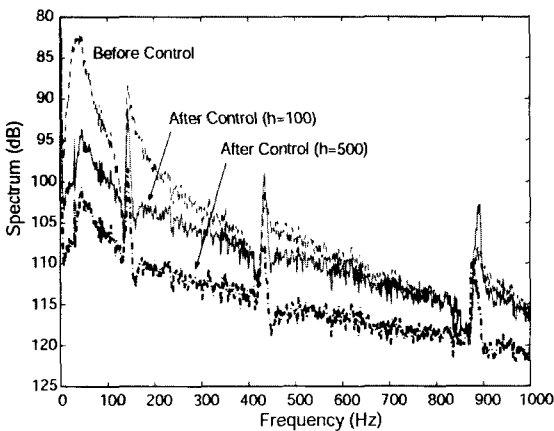


Fig. 5 Calculated power spectra of  $y(j\omega)$  'after control' with two different DVFB feedback gains ( $h=100$  and  $h=500$ ). 'Before control': a measured power spectrum of  $y(j\omega)$

이때  $x_a=x_s$ 이고,  $h$ 는 피드백 이득이다.

그래서 Fig. 6(a)와 같이 DVFB 제어를 적용시킬 때, 피드백 이득이  $h=0$ 이면 Fig. 6(b)와 같이 아무런 제어효과를 볼 수는 없으나,  $h>0$ 가 되면 보에 제어력을 보이게 된다. 즉, 식 (4)의 속도  $\dot{w}(x_s)$ 에 비례하는 secondary force  $f_s$ 가 피드백 이득에 비례하여 보의 점 액추에이터(shaker) 위치, 즉  $x_a=x_s$  지점에 작용하여 Fig. 6(c)처럼 소위 "스카이훅 감쇠기(skyhook damper)"가 설치된 것 같은 효과를 발생시킨다.

이때 감쇠기의 감쇠계수는 당연히 피드백 이득의 크기에 비례하게 된다. 이것은 만약 피드백 이득이 무한대, 즉  $h=\infty$ , 가 된다면 Fig. 6(d)처럼 스카이훅 감쇠기가 단순지지(simple support)가 됨을 의미한다.

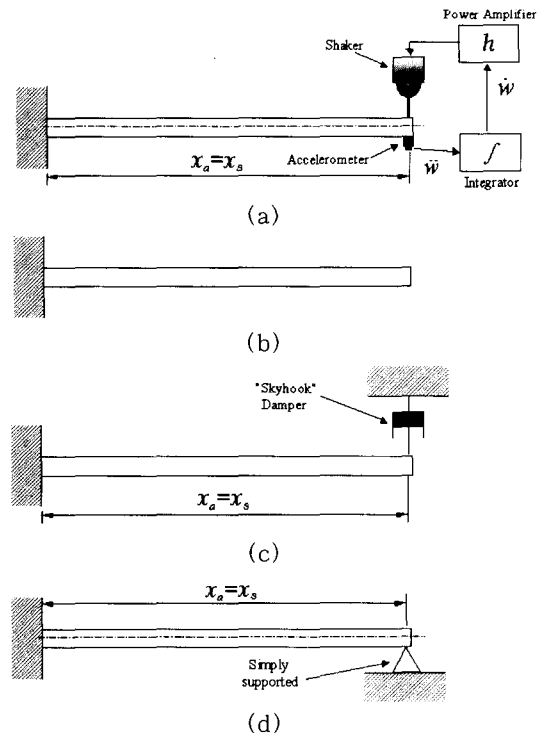


Fig. 6 Effect of DVFB control with a point collocated sensor-actuator pair. (a) DVFB strategy. (b) No effect with  $h=0$ , (c) Additional damping: equivalent to a damper on a "skyhook" when  $0 < h < \infty$ , (d) A simple support with  $h=\infty$

왜냐면, 만약 Fig. 6(a)와 같은 감쇠기를 가진 보의 임의의 위치에 면외방향 단위 임펄스(impulse)가 가해진다면, 이에 대한  $x_a = x_s$  위치에서의 굽힘에 대한 임펄스 응답함수  $g(t)$ 는 다음의 관계를 가진다.<sup>(9)</sup>

$$g(t) \propto e^{-\zeta \omega_n t} \quad (5)$$

여기서  $\zeta$ 는 감쇠비이고,  $\omega_n$ 은  $n$ 차 고유진동수이다. 즉, 보의 굽힘변형은  $\zeta$ 가 증가할수록 굽힘변형은 지수함수적으로 감소된다. 그래서 결국 무한대의 감쇠계수(즉,  $h \rightarrow \infty$ )에서는 굽힘변형은 완전히 없어진다(즉,  $g(t) \rightarrow 0$ ).

이것은 Hooke의 법칙( $F = kw$ )에서 외력  $g$ 가 가해져도 전혀 변형이 없는 상태( $w \rightarrow 0$ )가 되는 것과 동일한 의미이므로, 강성  $k \rightarrow \infty$ 가 되어 DVFB 제어에서  $h \rightarrow \infty$ 가 되면 Fig. 6(d)에서처럼 동위치화된 점 센서-액추에이터 쌍 지점( $x_a = x_s$ )에 단순지지가 위치하는 것과 동일한 효과를 유발하게 되는 것이다.

#### 4. 동위치화된 점 센서/분포 액추에이터 쌍에 대한 DVFB 적용

참고문헌 (1)에 의하면 동위치화된 점 센서와 분포 액추에이터 쌍은 양단고정보에서 SPR 조건을 가진다고 알려져 있다. 본 절에서는 이에 따라 점 센서와 분포 액추에이터 쌍이 DVFB 제어를 통해 진동의 능동제어에 적용가능한지를 실험적으로 확인한다.

Fig. 8과 같이 실제 양단고정보(길이  $\times$  폭  $\times$  두께 =  $200 \times 20 \times 2$  mm, 재질 : 알루미늄)의 중앙에 압전 액추에이터 패치(Morgan Matroc PZT5H, 길이  $\times$  폭  $\times$  두께 =  $15 \times 20 \times 1$  mm)와 가속도계(PCB 352C66)를 동위치화시켜 부착하였다. 즉 가속도계는 압전패

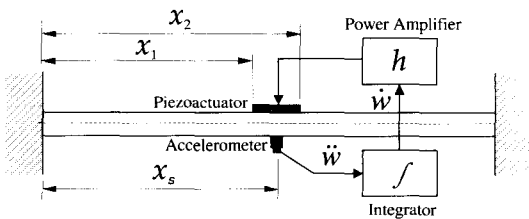


Fig. 7 Point sensor and distributed actuator pair system on a clamped-clamped beam

치의 중앙위치에 대응되도록 부착하였다. 즉,  $x_s = 100$  mm,  $x_1 = 92.5$  mm 그리고  $x_2 = 107.5$  mm이다.

Fig. 8은 B&K Pulse를 이용해 측정된 센서-액추에이터 FRF로서, 이때 가속도계에서 나오는 신호는 신호조정기(PCB Dual Mode Vibration Amplifier 441A101)를 지나면서 적분되어 파워앰프(PCB Power Amplifier 790 Series)를 지나면서 속도에 비례하는 출력을 주도록 하였다.

이 경우 12000 Hz까지는 공진과 반공진이 교대로 나타나며, 위상은  $\pm 90^\circ$  사이에 존재하며 강인한 안정도를 보장해주는 SPR 조건을 가짐을 확인하였다.

이 경우 점 센서-액추에이터 처럼 공진모드의 크기가 주파수에 따라 감소해가는 경향이 뚜렷하게 관찰되지는 않았다. 이것은 압전 액추에이터는 분포된 굽힘모멘트를 자신의 양끝에 발생시키므로 점 액추에이터와는 다른 양상을 보이는 것이다. 이것은 동위치화된 점 센서-액추에이터 쌍에 비해 더 큰 피드백 이득을 적용시키는 것을 제한할 수도 있다.

참고로 Fig. 8에서는 센서의 배치가 보의 정중앙에 위치한 관계로 홀수 모드( $n = 1, 3, 5, \dots$ )만 측정되었음을 알 수 있다. 이것은 양단고정보의 고유진동수

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi L^2} \left( \frac{EI}{M} \right)^{1/2} \text{ 를 계산하여 확인할 수 있다.}^{(10)}$$

여기서  $\lambda_n$ 은  $n$ 이 1, 2, 3, 4, 5일 때 각각 4.73004, 7.85320, 10.99561, 14.13717, 17.27876이며,<sup>(10)</sup>  $L, E, I, M$ 은 각각 보의 길이, 영계수, 굽힘 2차 모멘트, 단

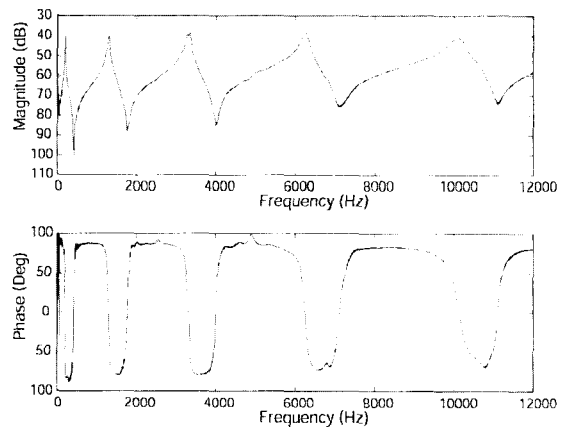


Fig. 8 Measured sensor-actuator FRF of a collocated point sensor and a distributed actuator pair: piezoceramic actuator input (voltage) and integrated accelerometer output (velocity)

위길이당 증량이다.

이 계산에 의하면 홀수모드는 약 263 Hz( $f_1$ ), 1425 Hz( $f_3$ ), 3517 Hz( $f_5$ )이며 이들은 선명히 계측되어 Fig. 10에 나타났다. 반면에 짝수모드는 계산에 의하면 약 726 Hz( $f_2$ ), 2355 Hz( $f_4$ )인데, 이들은 계측되지 않았다.

한편 본 실험에서는 센서와 액추에이터 쌍의 위치를 가장 큰 변형을 일으키는 보의 중앙으로 선정하였는데, DVFB 제어의 특성상 보의 어느 위치에 두어도 보의 진동제어가 가능하다. 즉, 짝수모드 또는 홀수모드만 제어하는 것과 같은 특정 모드만을 제어하는 개념(specific mode control)이 아니고 모든 모드를 제어하는(all mode control) 개념이다.

센서-액추에이터 응답 측정을 통해 SPR 조건을 확인한 후, 개방루프(open-loop)에 응답이 안정적인

되도록 DVFB 제어기인 파워앰프의 이득  $H(j\omega) = k$  을 조정하였다. 이때 제어시스템의 이득여유(gain margin)는 6 dB가 되도록 하였다.

그리고나서 Fig. 9에서 보는 바와 같이 Fig. 7의 양단고정보에 대한 능동진동제어 실험을 수행하였다. Primary source는 shaker(B&K 4810)를 고정단의 한쪽 끝에서 약 150 mm 떨어진 곳에 부착하였다.

DVFB 제어의 적용전(before control)과 적용후(after control)의 에러신호 스펙트럼  $y(j\omega)$ 을 비교한 것을 Fig. 10에 나타 내었다. DVFB 적용후, Fig. 10에 보이는 것처럼 각각의 공진모드에서 적게는 약 3~4 dB 많게는 특히 3000 Hz 근방에서는 약 15 dB의 감쇠(attenuation)를 보였다.

참고로 Fig. 10의 경우 primary source의 가진으로 인한 에러센서의 계측신호에 대한 파워스펙트럼이므로 Fig. 8의 센서-액추에이터 FRF와는 다른 공진모드를 보이고 있다.

한편 압전 액추에이터는 작용된 전기장에 비례하는 굽힘모멘트를 압전 패치의 양 끝단에 발생시킨다. 그래서 압전패치의 중앙에 위치한 가속도계는 그곳에서의 보의 면외방향 굽힘속도가 에러신호가 된다. DVFB 제어는 이 굽힘속도에 비례하는 제어력(control force)을 압전 액추에이터를 통해 발생시킨다.

그래서 압전 액추에이터는 아래와 같이 표현 가능한 한 쌍의 secondary moments  $m_s$ 를 유발시키게 된다.

$$m_s(x_1) = -m_s(x_2) = -C_m h \dot{w}(x_s) \quad (8)$$

여기서  $C_m$ 은 상수로서 보와 압전액추에이터의 치수, 그리고 압전상수(piezoelectric constant)에 의해 결정된다.<sup>(3)</sup>

그러므로, 점 센서-액추에이터 경우에는 달리, 이 경우에는 Fig. 11과 같이 및 위치에 “스카이훅 회전 감쇠기(skyhook rotational damper)”가 설치된 것 같은 효과를 발생시키게 된다. 이때도 물론 회전 감쇠기의 감쇠계수는 피드백 이득의 크기에 비례하게 된다.

이 배치의 경우엔 만약 피드백 이득이 무한대, 즉, 가 된다면 스카이훅 회전 감쇠기가 압전패치의 양 끝단에 가상의 회전방향 단순지지(simply support) 쌍이 됨을 의미한다.

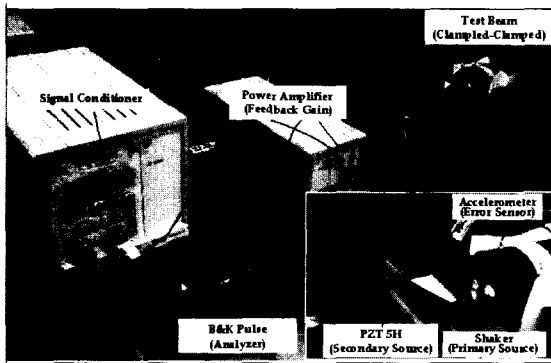


Fig. 9 DVFB control experiment with a point sensor and a distributed actuator

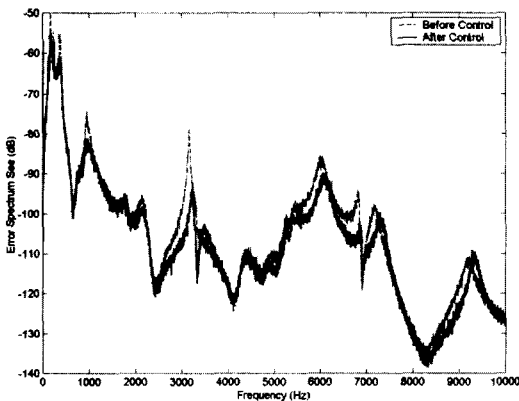


Fig. 10 Comparison of measured power spectra of the error sensor outputs before and after control with DVFB(Gain margin: 6 dB)

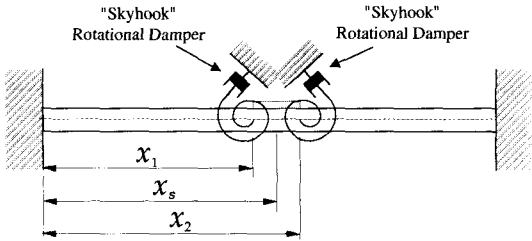


Fig. 11 Additional damping provided by DVFB with a point sensor and a distributed actuator pair: equivalent to rotational dampers on a "skyhook"

### 5. 결론

본 논문은 능동적인 방법으로 진동을 제어함에 있어 현실적으로 가능한 두가지의 센서와 액추에이터 쌍의 동위치화 문제에 대해 직접속도 피드백제어 기법과 함께 연계시켜서 성능과 안정도를 실험적 결과와 함께 분석하였는데 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 동위치화된 점 센서-액추에이터 쌍은 SPR 특성으로 인해 DVFB 적용시 매우 우수한 안정도와 성능을 나타내며, 이 경우엔 "스카이훅 감쇠기(skyhook damper)"가 설치된 것 같은 효과를 준다.

(2) 동위치화된 점 센서- 분포 액추에이터 쌍 또한 SPR 특성을 가져 DVFB 적용시 우수한 안정도와 성능을 나타내며, 이 경우엔 "스카이훅 회전 감쇠기(skyhook rotational damper)"가 설치된 것 같은 효과를 준다. 특히 이 배치는 스마트구조화가 가능하여 능동음향진동제어로의 응용이 기대된다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(NRL)인 "스마트구조를 위한 자기감지 기능용 센서기술 개발" 과제에 대한 연구결과의 일부임.

### 참 고 문 헌

- (1) 이영섭, 2004, "능동음향진동제어를 위한 센서와 액추에이터의 동위치화 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 3 호, pp. 253~263.
- (2) Balas M. J., "Direct velocity feedback control of large space structures", 1979, Journal of Guidance and Control, Vol. 2, No. 3, pp. 252~253.
- (3) Fuller C. R., Elliott S. J. and Nelson P. A., 1996, Active Control of Vibration, Academic Press.
- (4) Nelson P. A. and Elliott S. J., 1992, Active Control of Sound, Academic Press.
- (5) Preumont A., 2002, Vibration Control of Active Structures: An Introduction(2nd Ed.), Kluwer Academic Publishers.
- (6) Elliott S. J., Gardonio P., Sors T. J. and Brennan M. J., 2001, "Active vibroacoustic control with multiple local feedback loops", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 111, No. 2, 908~915.
- (7) Elliott S. J., 2001, Signal Processing for Active Control, Academic Press.
- (8) Franklin G. F., Powell J. D. and Emami-Naeini A., 1994, Feedback Control of Dynamic Systems 3rd edition, Addison-Wesley.
- (9) Fahy F. J. and Walker J. G., 1998, Fundamentals of Noise and Vibration, E & FN Spon.
- (10) Blevins R. D., 1979, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Van Nostrand Reinhold.