

직접속도 피드백을 이용한 지능판의 능동구조음향제어

Active Structural Acoustical Control of a Smart Panel Using Direct Velocity Feedback

이 영 섭[†] · Stephen J Elliott^{*} · Paolo Gardonio^{*}
Young-Sup Lee, Stephen J Elliott and Paolo Gargonio

(2004년 6월 23일 접수 ; 2004년 9월 10일 심사완료)

Key Words : Active Structural Acoustical Control(능동구조음향제어), Piezoelectric Transducers(압전트랜스듀서), Matched Sensor and Actuator(매치된 센서 및 액추에이터), Direct Velocity Feedback(직접속도피드백), Smart Panel(지능판)

ABSTRACT

This paper presents a study of low frequencies volume velocity vibration control of a smart panel in order to reduce sound transmission. A distributed piezoelectric quadratically shaped polyvinylidene fluoride (PVDF) polymer film is used as a uniform force actuator and an array of 4×4 accelerometer is used as a volume velocity sensor for the implementation of a single-input single-output control system. The theoretical and experimental study of sensor-actuator frequency response function shows that this sensor-actuator arrangement provides a required strictly positive real frequency response function below about 900 Hz. Direct velocity feedback could therefore be implemented with a limited gain which gives reductions of about 15 dB in vibration level and about 8 dB in acoustic power level at the (1,1) mode of the smart panel. It has been also shown that the shaping error of PVDF actuator could limit the stability and performance of the control system.

1. 서 론

능동제어기법은 수동제어가 곤란한 저주파의 소음 제어에 효과적으로 적용되어 왔다.^(1,2) 이 능동제어기법은 판에서의 음향 방사 및 투과의 제어에 대해서도 적용될 수 있다. 이 논문은 판에 대한 저주파의 음향 투과를 피드백을 적용한 능동구조음향제어(ASAC)⁽²⁾ 연구로서 이론과 실험을 포함한다.

능동구조음향제어(ASAC) 시스템은⁽²⁾ 구조부착 액추에이터(structural actuators)와 음향센서(acoustic

sensors) 또는 구조부착 센서(structural sensors)를 적용한다. 구조부착 액추에이터는 음향센서나 구조부착 센서가 감지하는 판의 전체적 음향방사 또는 투과를 최소화 시키도록 구동된다.

Johnson과 Elliott⁽³⁾은 판의 체적속도(volume velocity)는 저주파의 음향방사에 대한 좋은 추정자(estimator)임을 보였다.

실제에 있어 체적속도는 2차함수 형상의 PVDF polyvinylidene fluoride) 폴리머 스트립 배열^(3,4)이나 가변 폭을 가진 PVDF 스트립⁽⁵⁾ 또는 압전 패치 배열⁽⁶⁾ 등을 이용하여 계측하였다. 이러한 구조부착 센서들은 판의 체적속도에 비례하는 단일출력 값을 제공할 수 있으므로, 매치된(matched)⁽⁷⁾ 균일힘 액추에이터를 사용하면 단일 입출력의 동위치화된 센서-액추에이터 쌍을 제공해 준다.

[†] 책임저자 : 정희원, 한국표준과학연구원 스마트계측그룹
E-mail : yslee@kriss.re.kr

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

^{*} ISVR, University of Southampton, UK

참고문헌 (8, 9)는 동위치화된 센서 및 액추에이터 쌍을 이용한 직접속도 피드백(direct velocity feedback, DVFB)⁽⁷⁾ 제어시스템의 구현에 대해 이론적으로 논의하였으며, 또한 보에 대한 능동진동제어의 실험을 통해 그 적용성에 관한 연구결과를 보여주었다. 이 연구는 참고문헌 (8, 9)의 연장적 연구로서 DVFB 제어기를 적용하여 판을 투과하는 음향의 감소를 위한 능동적 구조음향제어에 관해 기술하게 된다.

동위치화된 센서-액추에이터를 가진 피드백 제어 시스템은 DVFB를 이용하여 강인한 안정도(robust stability)와 고성능(high performance)이라는 상당한 잇점을 누릴수 있다.^(8, 9) 그런데 매치된 압전 센서/액추에이터 쌍의 전달함수는 면외(out-of-plane) 운동과 면내운동이 연성(in-plane coupling) 되어 나타나므로 SPR(strictly positive real) 특성을 가지지 못하는 것으로 확인 되었다.^(8, 10, 11) 비록 이에 대한 몇몇의 대안이 제시되었지만 성공적이지는 못하였다.

Maillard 와 Fuller는 가속도계 배열을 이용하여 체적속도 진동을 계측하는 것을 제안 하였다.⁽¹²⁾ 이 연구에서는 이를 바탕으로 면내운동 연성현상을 피하면서 판의 체적속도를 계측하였다. 그래서 한쪽 면엔 2차함수 형상의 PVDF 필름의 액추에이터가 부착되고, 다른 면엔 가속도계 배열을 설치한 지능판이 제작되었다.

이 논문은 단일입력 단일출력(SISO) 제어시스템에 대한 연구를 목표로 하고 있는데, 이는 DVFB 기법을 채택하여 실제 산업체에서 요구하는 단순하면서도 쉽게 구현가능한 제어시스템을 실증해 보이고자 함이다.

이 연구는 아래와 같이 구성되어 있다. 2절에서는 2차함수 형상의 압전 PVDF 액추에이터 및 체적속도 센서에 대한 이론적인 기술이 되 있으며, 3절에서는 플랜트와 SISO 피드백 제어기의 모델링에 대해 언급한다. 4절에서는 지능판에 대한 진동 및 음향 피드백 제어의 실험결과에 대해 논의한다.

2. 액추에이터와 센서의 설계

2.1 균일힘 액추에이터(Uniform Force Actuator)

면외방향의 균일힘을 기진시킬 수 액추에이터는 압전필름 양면에 매우 얇은 전극이 있는 구조이다. 이

액추에이터는 입력전압, e 의해 작동되는데, 이로 인한 판의 강제 면의 굽힘운동은 다음의 식과 같이 표현된다.⁽¹¹⁾

$$(D_s + D_{pe}) \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + m \frac{\partial^2 w(t)}{\partial t^2} = -h_{act} V_3(t) L_{pe} [S(x, y)] + p(x, y, t) \quad (1)$$

여기서 $h_{act} = h_s + h_{pe}/2$ 이며, D_s 와 D_{pe} 는 각각 판과 압전 액추에이터의 굽힘강성(flexural rigidity)이고, $p(x, y, t)$ 는 판에 가해지는 분포된 면외하중이다. 판의 굽힘 기진을 기술하기 위해 공간 미분자를 아래와 같이 정의한다.

$$L_{pe} [S(x, y)] = e_{31} \frac{\partial^2 S(x, y)}{\partial x^2} + 2e_{36} \frac{\partial^2 S(x, y)}{\partial x \partial y} + e_{32} \frac{\partial^2 S(x, y)}{\partial y^2} \quad (2)$$

면외방향 균일힘을 발생하기 위한 필요조건으로 압전 액추에이터는 y 방향을 따라서는 일정한 민감도 함수(sensitivity function)를 가져야 하며, x 방향으로는 아래의 식과 같이 2차함수적 민감도를 가져야 한다.⁽¹¹⁾

$$S(x, y) = -k(x^2 - L_x x) \quad (3)$$

이때 k 는 상수로서 경계조건 $S(0, y) = 0$ 와 $S(L_x, y) = 0$ 를 만족해야 하는데, 이는 $k = 4L_y / L_x^2$ 와 $\partial^2 S(x, y) / \partial x^2 = \text{constant} = -2k$ 가 된다.

그러므로 분포된 면외방향 균일힘 $f_u(t)$ 는 단위면적당 힘으로서 다음과 같이 표현된다.⁽¹¹⁾

$$f_u(t) = -h_{act} V_3(t) L_{pe} [S(x, y)] = 2h_{act} e_{31} k V_3(t) \quad (4)$$

즉, $e_{31} = 0.052 \text{ NV}^{-1} \text{ m}^{-1}$, $k = 16.903 (L_x = 0.313 \text{ m}, L_y = 0.414 \text{ m})$ 그리고 $h_{act} = 0.00075 \text{ m}$ 일 때, Table 1과 같은 특성을 갖는 지능판의 액추에이터에 100 V가 걸리면 약 0.13 Pa의 균일힘이 유도된다.

Table 1에 판과 균일힘 액추에이터로 사용된 PVDF 필름의 치수와 물리적 특성을 나타 내었다.

그런데, Rex와 Elliott⁽⁴⁾의 제안에 의해 x 방향으로 2차함수적 민감도를 갖도록 많은 갯수의 PVDF 스트립을 판에 에폭시로 부착하였다. Fig. 1과 같이 각 스

트립의 폭은 x 의 이차함수적으로 변하도록 PVDF 필름의 표면전극을 에칭(etching) 하였다.

이러한 형상의 액추에이터 스트립은 스트립의 중앙을 따라 일직선의 면외방향의 힘이 작용되게 한다.⁽¹¹⁾ 이러한 가진력은 각 스트립의 폭 ΔL_y 가 판의 면외 굽힘모드의 파장보다 충분히 작을 때 균일힘을 매우 잘 근사화 시킬 수 있다.

이 지능판에는 40개의 2차함수 형상의 PVDF 스트립이 적용되었으며, 각 스트립의 폭은 지능판이 10000 Hz에서의 약 30 mm인 최소 구조 굽힘파장(파수는 206 m^{-1}) 과 비교하여 더 작은 10 mm로 결정하였다. 그래서 각 스트립의 형상 상수(shape constant)는 $k_\Delta = 4\Delta L_y / L_x^2$ 인데 $k = 40k_\Delta$ 를 만족한다.

100 V가 작용할 때 균일힘 액추에이터에 의한 압

력의 크기인 0.13 Pa은 음압레벨로는 약 76 dB와 동등하다. 만약 더 높은 입사 음압을 제어해야 할 경우, 더 높은 전압을 작용시키거나 더 좋은 효율을 가진 압전 필름을 선택해야 할 것이다.

2.2 가속도계 배열

조화적으로 진동하는 판($L_x \times L_y \times 2h_s$)의 체적속도 $Q(\omega)$ 는 다음과 같이 수학적으로 표현 가능하다.

$$Q(\omega) = j\omega \left[\int_0^{L_x} \int_0^{L_y} w(x, y, \omega) dx dy \right] \quad (5)$$

여기서 $w(x, y, \omega)$ 는 판의 굽힘 변위이다. Maillard와 Fuller⁽¹²⁾에 의해 제안된 것처럼, 판의 표면에 16개의 가속도계를 균등하게 분포시키면 판의 체적속도를 근사적으로 추정 가능하다. 이는 식 (6)과 같이 표현된다.

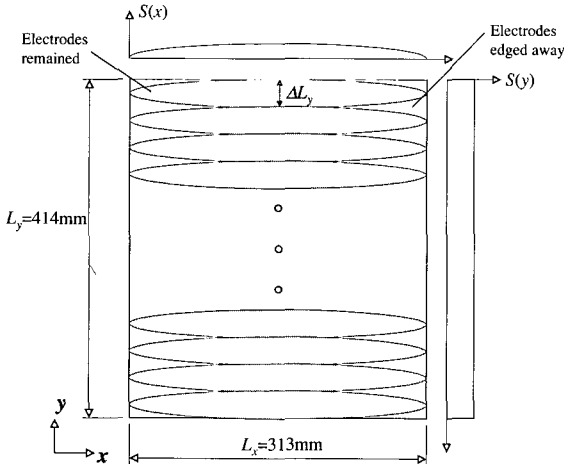


Fig. 1 Arrangement of a matched quadratic piezoelectric PVDF actuator and sensor pair

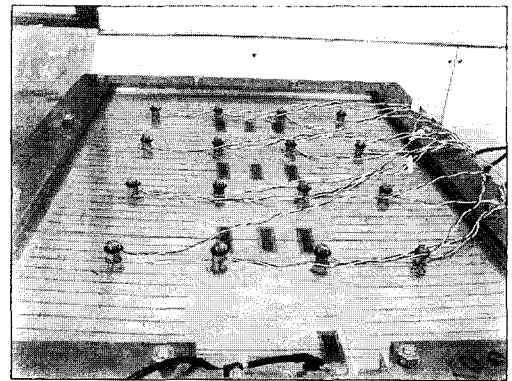


Fig. 2 Experimental set-up of a smart panel with the PVDF actuator and accelerometer array

Table 1 Physical properties of a panel and film

	Panel	PVDF film
Dimension (length × width)	$L_x \times L_y = 313 \times 414 \text{ mm}$ (aluminum)	$L_x \times \Delta L_y = 313 \times 10 \text{ mm}$ (forty quadratically shaped)
Thickness	$2h_s = 1 \text{ mm}$	$h_{pe} = 0.5 \text{ mm}$
Mass density	$\rho_s = 2700 \text{ kgm}^{-3}$	$\rho_s = 1780 \text{ kgm}^{-3}$
Young's modulus	$Y_s = 7.1 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$	$Y_{pe} = 2.0 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$
Poisson ratio	$\nu_s = 0.33$	$\nu_{pe} = 0.31$
Hysteresis	$\eta_s = 0.05$	$\eta_{pe} = 0.05$
Loss factor		

$$\tilde{Q}(\omega) = \sum_{i=1}^{16} v_i(x_i, y_i, \omega) \quad (6)$$

16개의 가속도계는 4×4배열로서 Fig. 2에 보는 것과 같이 지능판의 L_x 와 L_y 의 1/8, 3/8, 5/8, 7/8 위치에 하나씩 배치가 되었다.

이 배치는 지능판에 부착된 센서와 액추에이터 간의 면내운동 연성 문제를 피하기 위한 것이다. 참고 문헌 (8, 10, 11)에 자세히 기술이 되어 있는 대로, 매치된 센서와 액추에이터 쌍은 Fig. 3에 그려진 것처럼 면내 진동으로 인한 면의 진동과의 연성현상을 가진 주파수 응답함수(FRF)를 보이게 된다.

면내운동 연성현상은 Fig. 3에 나타난 것처럼, 주파수와 함께 공진의 크기가 증가해 가는 경향을 보이며, 급격한 위상 치점이 공진점에서 발생하게 된다. (12000 Hz에서의 위상변화를 볼것.) 이로 인해 센서-액추에이터 사이의 위상응답이 $\pm 90^\circ$ 를 초과하게 되어 SPR 특성을 잃어 버리게 된다. 이것은 SPR 특성⁽⁸⁾을 갖는 시스템의 경우 DVFB 제어기법을 적용하여 무조건적 안정성을 가지는 제어기의 설계가 더 이상은 불가능하게 된다는 의미를 가진다.

그래서 PVDF 액추에이터와 면내운동 연성문제를 일으키지 않는 가속도계를 체적속도 센서로 이용하여 DVFB 제어를 지능판에 대해 적용시키고자 하는 것이다.

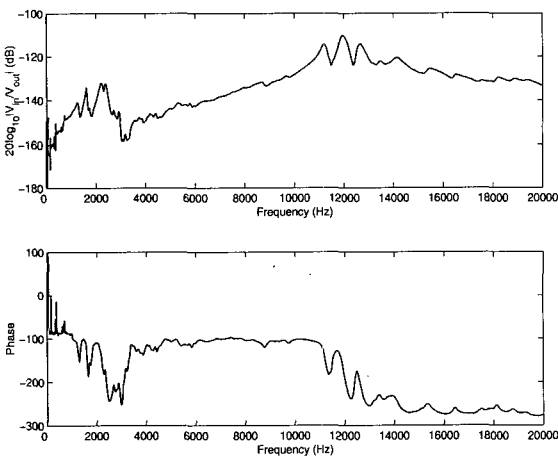


Fig. 3 Measured FRF of the matched PVDF sensor/actuator pair with the coupling problem

3. 제어기와 플랜트 모델링

3.1 SISO 피드백 제어

가속도계 배열과 압전 액추에이터가 설치된 지능판은 Fig. 2 및 4와 같이 윗면이 뚫리게 만든 나무 상자의 윗면에 고정되어 졌다.

상자의 내부에는 스피커가 지능판에 주 교란 소음(primary disturbance noise)을 발생시키기 위해 설치되어 졌다. 사용된 16개의 가속도계는 모두 PCB A352C67였으며, 16개의 가속도 신호는 PCB 481A 신호 컨디셔너(signal conditioner)에 연결되면서 모두 더해지도록 하였다. 그리고 난후, 더해진 단일 신호는 PCB 480B10 적분기를 통과하여 지능판 전체의 근사적 체적속도 신호 $\tilde{Q}(\omega)$ 가 되었다.

Fig. 5에서 보는 것과 같이, 지능판의 전체 시스템은 플랜트 응답 $G(S)$, 제어기 $H(S)$ 그리고 주 교란원(primary source)인 스피커로 구성되었다. 플랜트 $G(S)$ 는 판, 제2 가진원(secondary source)인 PVDF 액추에이터 그리고 에러 센서인 가속도계 배열을 포함하는 것이다.

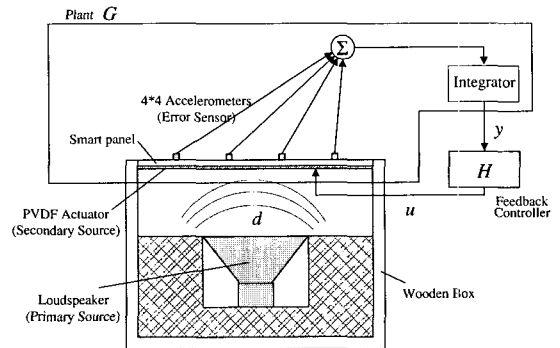


Fig. 4 Experimental set-up of a smart panel with the PVDF actuator and accelerometer array

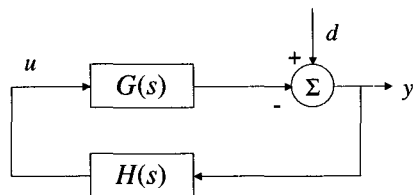


Fig. 5 Velocity feedback control scheme

만약 피드백 제어 시스템이 안정하다면, 예러 센서 출력 스펙트럼 $y(j\omega)$ 은 제어되기 전의 센서 출력 스펙트럼인 $d(j\omega)$ 와 연관되어 있는데 이는 다음과 같이 표현된다.⁽¹³⁾

$$y(j\omega) = [1 + G(j\omega)H(j\omega)]^{-1}d(j\omega) \quad (7)$$

이러한 제어 기법에 있어서는, 제2 가진원인 압전 액추에이터에 대한 입력 $u(j\omega)$ 는 $u(j\omega) = H(j\omega)[1 + G(j\omega)H(j\omega)]^{-1}d(j\omega)$ 로 주어진다.⁽⁸⁾ 그러므로, DVFB 제어기 $H(j\omega)$ 는 일정한 이득을 가지는 것으로 가정하므로 $H(j\omega) = h$ 이 된다. 이때 h 는 피드백 이득이다.

이에 따라, 만약 센서-액추에이터의 FRF와 제어기의 FRF가 모두 SPR 특성을 가진다면, Fig. 5의 속도 피드백 제어 시스템은 무조건적으로 안정적(unconditionally stable)일 것이다. 그러므로 원칙적으로는 제어 센서로부터의 신호를 영(zero)으로 만들기 위해 피드백 이득은 무한대로 증가시킬 수 있다.

그러나, 실제에 있어서 이 연구에서 다루는 시스템은 체적속도 센서와 균일힘 액추에이터를 근사화 시킨 것이므로 시스템의 개방루프 FRF $G(j\omega)H(j\omega)$ 는 Nyquist 안정도 판별법으로 분석이 되어 져야만 한다.

3.2 플랜트의 해석적 모델링

판의 사방이 고정되고(C-C-C-C) 횡방향 진동의 지배를 받을 때, 판에 부착된 16개의 가속도계 중의 i 번째 지점의 가속도계에서의 속도는 다음과 같이 주어진다.

$$v_i(x_i, y_i, \omega) = j\omega \sum_{m,n} B_{mn}(\omega)\phi_{mn}(x_i, y_i) \quad (8)$$

여기서 $f_u(\omega)$ 는 균일힘 액추에이터에 의한 가진력이며, $B_{mn}(\omega)$ 는 모달 진폭으로 아래와 같이 표현된다.

$$B_{mn}(\omega) = \frac{\int_0^{L_x} \int_0^{L_y} f_u(\omega)\phi_{mn}(x, y)dx dy}{\Lambda_{mn}[\omega^2(1 + j\eta_s) - \omega^2]} \quad (9)$$

여기서 η_s 는 판의 히스테레시스 손실계수이고, 정규화 인자 Λ_{mn} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\Lambda_{mn} = \rho_s(2h_s)^2 \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \phi_{mn}^2(x, y)dx dy = \rho_s h_s^2 L_x L_y \quad (10)$$

판의 m, n 번째 면의 굽힘 고유진동수 ω_{mn} 은 아래처럼 표현된다.⁽⁹⁾

$$\omega_{mn} = \frac{\pi^2 h_s}{L_y} \left\{ \frac{Y_s \alpha}{3\rho_s(1 - \nu_s^2)} \right\}^{1/2} \quad (11)$$

여기서 α 는 참고문헌 (9)에 자세히 기술되어 있다. i 번째 지점의 센서에서 얻어지는 면의 굽힘 속도는 이렇게 다시 쓰여진다.

$$v_i(x_i, y_i, \omega) = j\omega \sum_{m,n} f_u(\omega)C_{mn}D_{mn}\phi_{mn}(x_i, y_i) \quad (12)$$

여기서 $C_{mn} = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \phi_{mn}(x, y)dx dy$ 이고,

$D_{mn} = \frac{1}{\Lambda_{mn}[\omega_{mn}^2(1 + j\eta_s) - \omega^2]}$ 가 된다. 판의 굽힘 모드는 참고문헌(9)에 보여진 것처럼 두개의 보 함수(beam function)의 곱으로 계산될 수 있다. 즉 $\phi_{mn}(x_i, y_i) = \phi_m(x_i)\phi_n(y_i)$. 주어진 수식계산 과정 후, 계수 C_{mn} 은 아래와 같이 주어짐이 밝혀졌다.⁽¹¹⁾

$$C_{mn} = \frac{16L_x L_y}{\gamma_m \gamma_n} \sin\left(\frac{\gamma_m}{2}\right) \sin\left(\frac{\gamma_n}{2}\right) \quad (13)$$

이때 $m, n = 1, 3, 5 \dots$ 이고 상수 $\gamma_{m,n}$ 은 참고문헌 (11)에 주어져 있다. 그러므로 전체시스템의 플랜트는 아래와 같은 수식으로 표현되어 질 수 있다.

$$G(\omega) = \tilde{Q}(\omega)/V_s(\omega) = -h_{act} L_{pe} [S(x, y)] \sum_{i=1}^{16} [j\omega \sum_{m,n} C_{mn} D_{mn} \phi_{mn}(x_i, y_i)] \quad (14)$$

4. 실험 및 결과

4.1 플랜트의 FRF

Fig. 6에 그려진 것과 같이, 측정된 플랜트의 FRF, 즉 균일힘 액추에이터에 인가된 전압에 대한 점 속도(point velocity)들의 합은 가속도계 배열이 면내 연성 현상을 만나지 않음을 보여 준다. 그래서 Fig. 5에는 가속도계 배열 체적속도 센서가 Fig. 3의 매치된 압전센서의 측정결과와 비교할 때 훨씬 더 많은

수의 면의 운동의 공진을 측정해 념을 명확히 보여 준다.

Fig. 6은 10000 Hz까지 주파수에 따라 공진의 크기가 감소하는 경향을 가지고 있음을 보여 주므로, 압전 PVDF 액추에이터와 4×4 가속도계 배열로 구성된 센서-액추에이터 배치는 판의 면내 진동과 연성되지 않았음을 확인하였다.

그런데, 식 (3)으로 주어진 PVDF 액추에이터의 2차 함수적 전극 형상은 약간의 제작상의 에러를 가지고 있음으로 인해, 설계치와는 약간 다른 형태의 가진력을 가짐을 확인하였다.

Fig. 7에는 비교적 저주파 영역인 0~2000 Hz에서의 센서-액추에이터의 FRF를 나타낸 것인데, 측정된 FRF는 두꺼운 선, 설계된 형상에 대한 계산된 FRF는 점선, 형상에러를 고려한 계산된 FRF는 가는 선으로 각각 그려져 서로 비교하였다.

설계된 형상을 가진 플랜트의 계산된 FRF는 주파수에 따라 공진의 크기가 연속적으로 감소하고 있음을 보여 준다. 그리고 위상응답은 900 Hz까지는 ±90° 사이에 존재한다. 900 Hz 이상에서의 위상응답은 약 1100 Hz의 주파수에서 위상지연이 갑작스럽게 나타난 것이 중요하다.

이것은 판의 체적속도를 근사화하기 위해 사용된 가속도계의 제한된 갯수에 기인한 “공간 에일리어징 문제(spatial aliasing problem)” 때문이다. 즉, 더 많은 가속도계를 배치하면 급작스런 위상지연이 발생하는 주파수를 좀 더 높은 주파수로 올릴 수 있어 결국엔 더 넓은 주파수대역에 대해 SPR 특성을 얻을 수

있게 된다.

측정된 FRF는 약 350 Hz 이하에서 전형적인 점모빌리티(point mobility) 응답 형태를 보인다. 이것은 첫 3개의 홀수 굽힘모드를 포함하는데, 이들이 저주파에서 판의 음향 방사에 지대한 부분을 차지한다. 공진은 반공진(anti-resonance)과 교대로 생겼는데, 반공진의 주파수는 그 다음 공진 주파수에 매우 근접한 채로 발생하였다. 또한 위상응답은 ±90° 사이에 존재하고, 응답의 크기는 주파수에 따라 감소하는 경향을 보여 주었다.

그런데, 약 350 Hz와 900 Hz 사이에서 측정된 FRF는 두개의 예상치 못한 큰 피크의 공진을 보여준다. 이것은 4번째와 5번째의 굽힘 공진주파수에 대응되는 것들 이었다. 900 Hz 이상에서는, 측정된 센서-액추에이터 FRF는 날카로운 공진과 급격한 위상지연으로 특징지을 수 있다.

1000 Hz와 1200 Hz 사이에 위치한 두개의 날카로운 공진은 높은 피드백 이득이 적용될 시 피드백제어 시스템을 불안정 상태로 이끌기에 충분하다. 액추에이터의 형상에러를 고려한 계산된 FRF는 측정된 그것과 유사한 경향을 보이고 있다.

그래서 형상에러를 PVDF 액추에이터와 4×4 가속도계 배열의 구성을 가진 이 연구의 지능판으로 약 900 Hz 까지는 SPR 응답을 제공하여 조건부로 안정한(conditionally stable) SISO 제어를 구현가능 하였다. 이 제어시스템의 피드백 이득은 1000 Hz와 1200 Hz 사이의 두개의 날카로운 공진크기에 의해 제한되어 진다.

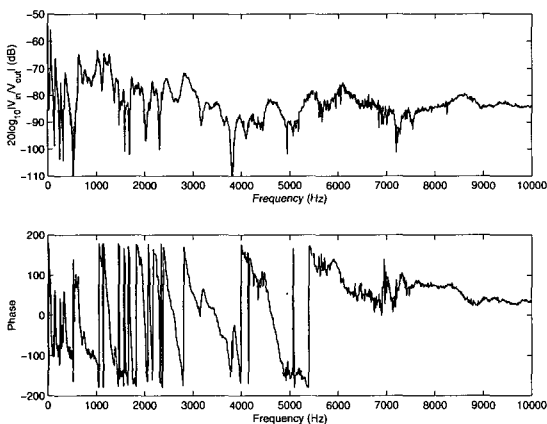


Fig. 6 Measured FRF of the PVDF actuator and accelerometers array at 0~10000 Hz

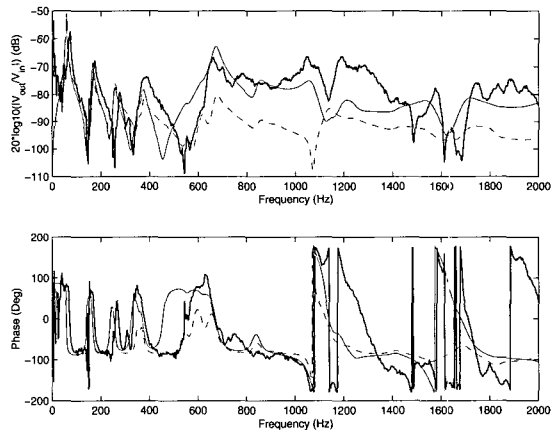


Fig. 7 Measured FRF of the PVDF actuator and accelerometers array at 0~2000 Hz

4.2 속도 피드백을 이용한 음향 제어

이 연구의 지능판이 전 주파수 대역에서 SPR 특성을 제공하지 못하므로, 다음의 기술은 조건부로 안정한 피드백 제어기를 구현하기 위해 제한된 이득을 적용한 실험의 결과에 대한 것이다.

우선 지능판에 부착되어 있는 가속도계 배열을 오차센서로 이용한 판의 진동으로 인한 체적속도의 결과에 대해 분석한다. Fig. 8은 측정된 체적속도 응답으로 점선은 제어기가 작동중일 때이고, 실선은 제어기가 작동하지 않을 때이다.

이 결과는 나무 상자 속의 스피커에 의한 백색잡음의 음장에 의해 지능판의 진동이 발생하는 상황에 대한 것이다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이, 체적속도에 대한 제어 시험결과 첫번째 모드에서 약 15 dB의 감쇠를 보였는데, 이때 이득 여유(gain margin)는 6 dB를 유지하였다. 두번째와 세번째 모드에 대한 감쇠는 각각 6 dB와 5 dB를 나타내었다. 그리고 세번째 모드 이상 1000 Hz 이하에서는 약 5 dB의 전반적 감쇠를 기록하였다.

그리고 Fig. 9는 지능판 위의 공기중에 마이크로폰을 설치하여 Fig. 8과 같은 속도 피드백 제어 유무에 따른 마이크로폰에 전해지는 음압을 측정한 지능판에 대한 음향투과 제어(sound transmission control) 시험의 결과이다.

음향투과 제어시험은 Fig. 8의 시험 때와 동일한 피드백 이득을 적용시켰다. 이 실험에서는 B&K Type 4165 1/2" 마이크로폰이 지능판의 정중앙면

상부로부터 10 cm 떨어진 곳에 설치가 되었는데, 이것은 판이 방사하는 음압을 측정하기 위해서이다.

Fig. 9는 제어 작동시(점선)와 제어 미작동시(실선) 측정된 음향파위를 도시한 것이다. 이 시험에서는 첫번째 모드에서 8 dB의 음향투과 감쇠를 보였다. 그리고 두 번째 및 세번째 모드에서는 각각 5 dB의 감쇠를 보였다. 세번째 모드와 800 Hz 사이에서는 대체로 적은 감쇠를 나타내었으나, 특히 800 Hz~900 Hz 사이의 작은 피이크에서는 오히려 음향파위가 증대되는 현상도 미미하지만 나타났다.

음향투과 제어시험의 결과는 같은 조건하의 체적속도 제어시험에 비해 다소 떨어지는 제어성능을 보여주었다. 그런데, 이 음향투과 제어실험은 일반적인 실험실내에서 나무 상자의 상부에 체결로서 부착된 지능판에 대해서 수행되어 졌다. 만약 실험장치가 무향실 내부에서 행해진다면 좀 더 나은 측정이 이루어질 것이라 추정된다. 즉, 이러한 결과는 제어시험이 잔향성이 강한 일반 실험실에서 행하여 졌기 때문일 것으로 추정된다. 참고로 이론적 측면에서 체적속도는 지능판의 상부 방향으로의 원음압(far-field sound pressure)과 직접 비례하는 것으로 알려져 있다.

한편 Fig. 4와 같은 장치를 이용한 이 음향투과 실험에 사용된 지능판 하부의 나무 상자내 빈공간(cavity)의 크기는 420 mm(L)×320 mm(B)×120 mm (D)였다. 이 빈공간을 가로 지르는 횡단 공진주파수(cross resonance frequency)는 약 290 Hz였다. 그래서 지능판 하부 빈공간 내부에서의 음압 분포는 이 주파수 이상에서는 강한 불균일성을 보이는 특성

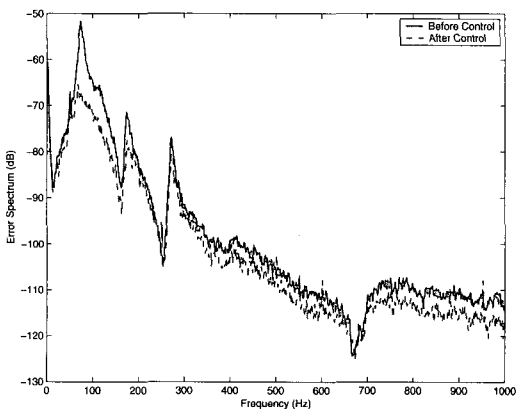


Fig. 8 Measured vibration control result with error spectra in dB. Before control: solid line and after control: dashed line

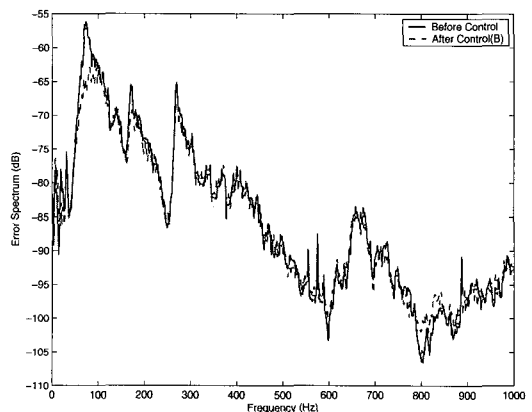


Fig. 9 Measured acoustic control result. before control: solid line and after control: dashed line

을 가지고 있을 것으로 추정된다.

그리고, 제어실험 결과로부터 약 1000 Hz~1200 Hz의 주파수 영역에서 개방 루프 FRF를 변경시킬 수 있는 위상지연 제어기(phase lag compensator)를 사용으로 약간의 성능개선을 기대할 수 있을 것으로 사려된다. 왜냐하면 이 주파수 영역에서 Fig. 7에서 그려진 것과 같이 플랜트의 FRF가 급격한 위상변화를 보였기 때문이다.

참고로, 이 제어기법을 적용하여 1000 Hz 까지의 체적속도 관련 진동레벨의 전반적 감소(overall reduction)는 약 3.4 dB였고, 음향투과 관련 음압감소는 약 0.2 dB를 달성하였다.

5. 결 론

이 논문은 음향투과를 줄이기 위한 지능판의 설계와 이에 대한 저주파에서의 체적속도 제어에 대한 연구를 요약한 것이다. 이 지능판은 사방이 고정된 알루미늄으로 제작된 사각형의 판으로서 치수는 $414 \times 313 \times 1$ mm였다. 이 지능판은 2차함수적 형상의 PVDF 액추에이터 배열과 4×4 의 가속도계 배열로 구성되었으며, DVFB 제어기법을 SISO 시스템으로 구현하였다. 체적속도 피드백제어를 적용한 실험을 통해, 지능판의 첫번째 모드에 대해서 진동레벨에서 약 15 dB, 음압레벨에서 약 8 dB의 감쇠를 달성 하였다.

참 고 문 헌

(1) Nelson, P. A. and Elliott, S. J., 1992, Active Control of Sound, Academic Press.
 (2) C. R. Fuller, S. J. Elliott, and P. A. Nelson, 1996, Active Control of Vibration, Academic Press.
 (3) Johnson, M. E. and Elliott, S. J., 1995, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 98, No. 4, 2174~2186, Active Control of Sound Radiation Using Volume Velocity Cancellation.
 (4) Rex, J. and Elliott, S. J., 1992, The QWSIS-A New Sensor for Structural Radiation

Control, Proceedings of MOVIC, 339~343.

(5) Charette, F., Berry, A. and Guigou, C., 1998, Active Control of Sound Radiation From a Plate Using a Polyvinylidene Fluoride Volume Displacement Sensor, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 103, No. 3, 1493~1503.

(6) Preumont, A., Francois, A. and Debru, S., 1999, Piezoelectric Array Sensing for Real-time, Broad-band Sound Radiation Measurement, ASME Journal of Vibration and Acoustics, 121, 446~452.

(7) Gardonio, P., Lee, Y.-S., Elliott, S. J. and Debost, S., 2001, Analysis and Measurement of a Matched Volume Velocity Sensor and Uniform Force Actuator for Active Structural Acoustic Control, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 110, No. 6, 3025~3031.

(8) 이영섭, 2004, “능동음향진동제어를 위한 센서와 액추에이터의 동위치화 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 3 호, 253~263.

(9) 이영섭, 2004, “보의 능동진동제어를 통한 직접속도 피드백의 적용성 연구”, 한국소음진동공학회 논문집, 제 14 권, 제 7 호, 619~625.

(10) Lee Y.-S., Gardonio P. and Elliott S. J., 2002, “Coupling Analysis of a Matched Piezoelectric Fluoride Sensor and Actuator Pair for Vibration Control of a Smart Beam”, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 111, No. 6, pp. 2715~2726.

(11) Lee, Y.-S., 2000, Active Control of Smart Structures Using Distributed Piezoelectric Transducers, PhD Thesis, University of Southampton.

(12) Maillard, J. P. and Fuller, C. R., 1998, Comparison of Two Structural Sensing Approaches for Active Structural Acoustic Control, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 103, No. 1, 396~400.

(13) Elliott, S. J., 2001, Signal Processing for Active Control, Academic Press.