

셸 구조물의 진동제어를 위한 분포형 압전 감지기/작동기의 설계 최적화

황준석 * · 목지원* · 김승조 **

Distributed Piezoelectric Sensor /Actuator Optimal Design for Active Vibration Control of Shell Structure

Joon Seok Hwang, Jiwon Mok and Seung Jo Kim

KEY WORDS : 능동진동제어, 셸 구조물, 감지기/작동기 시스템, 유한 요소법, 유전자 알고리즘

ABSTRACT

Distributed piezoelectric sensor and actuator system has been designed for the active vibration control of shell structure. PVDF is used for the materials of sensor/actuator. To prevent the adverse effect of spillover, distributed modal sensor/actuator system is established. Although shell structure is three-dimensional structure, the PVDF sensor/actuator system can be treated as two-dimensional. Finite element programs are developed to consider curved structures having PVDF modal sensor/actuator. The nine-node Mindlin shell element with five nodal degree of freedoms is used for finite element discretization. The electrode patterns and lamination angle of PVDF sensor/actuator are optimized to design the modal sensor/actuator system. Genetic algorithm is used for optimization. Sensor is designed to minimize the observation spillover, and actuator is designed to minimize the system energy of the control modes under a given initial condition. Modal sensor/actuator for the first and second modes of singly curved cantilevered shell structure are designed using mentioned methods. Discrete LQG method is used as a control law. Experimental demonstrations of the active vibration control with designed sensor/actuator system have been performed successfully.

1. 서론

구조물의 능동 진동 제어 시에 구조물의 진동을 감지하거나 구조물에 작동력을 가하는 변환기(감지기/작동기)의 재료로 널리 쓰이는 압전재료는 압전세라믹과 압전필름의 두 가지가 있다. 압전세라믹은 상대적으로 큰 작동력을 가지는 반면 얇고 유연한 형태의 압전필름은 복잡한 형상을 갖는 분포형 변환기에 활용 가능한 이점이 있다.

한편, 수치계산상의 효율을 도모하고 모델링

오차를 줄이기 위해 모드축약을 이용한다. 이 경우 제어기 설계는 제어모드에 대해서만 이루어지므로 비제어모드와 제어가 이루어지는 폐회로에 대해서는 안정성이 보장되지 않는다. ¹ 제어모드가 아닌 모드들에 의해 시스템이 불안정해지는 스피오버 현상을 방지하기 위해 모달 변환기 개념이 도입되었다. ² 모달 변환기는 특정 모드를 선택적으로 감지/작동할 수 있으므로 이를 통해 스피오버를 극복할 수 있게 된다. 시스템의 안정성 문제가 제어가 아닌 감지기/작동기 설계로 옮겨온 것이 다.

항공기를 이루는 날개, 동체 등의 구조물은 대부분 셸이나 평판의 형태로 이루어져 있다. 최근

* 서울대학교 항공우주공학과 대학원

** 서울대학교 항공우주공학과

Kim^{3,4} 등은 압전필름을 이용한 분포형 변환기의 개념을 평판의 능동 진동 제어에 적용하여 성공적인 결과를 얻었다. 셸 구조물은 3 차원 구조물이지만, 압전필름을 이용한 감지기/작동기는 2 차원적인 접근이 가능하다. 따라서 2 차원 구조물의 능동 진동 제어를 위한 분포형 감지기/작동기 설계에 관한 최근의 연구결과를 셸 구조물에도 확장할 수 있다.

본 연구에서는 유한 요소법과 최적화 기법을 기반으로 셸 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 분포형 모달 감지기/작동기 시스템을 설계하였다. 감지기는 스펙오버를 방지하는 방향으로, 작동기는 주어진 초기 조건에 대해 제어모드의 시스템 에너지를 최소화하는 방향으로 최적화가 진행되었다. 압전필름의 전극 패턴과 적층각의 최적화 과정에는 유전자 알고리즘을 이용하였으며 실시간 진동제어에는 이산형 LQG 제어를 사용하였다.

2. 시스템 모델

유한 요소 정식화

압전 변환기를 포함한 전체 셸 구조물을 대상 구조물로 선정하고 유한 요소법을 이용하여 모델링 하였다. 사용된 요소는 9 절점 Mindlin 셸⁵ 요소로 각 절점 당 5 개의 자유도를 갖는다.

유한 요소법을 이용하면 구조물의 운동방정식은 Eq.(1)과 같이 얻어진다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}_p\mathbf{V} + \mathbf{F}_{EXT} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{U} 는 변위벡터, \mathbf{V} 는 작동기에 가해지는 전압, \mathbf{M} 은 질량행렬, \mathbf{K} 는 강성 행렬이고 \mathbf{F}_{EXT} 는 외부력이다. 두께가 상대적으로 얇은 압전재료 단층을 평면응력상태로 가정하고 두께방향의 전기장만을 고려하면 작동기의 압전력 \mathbf{F}_p 는 Eq.(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{F}_p = \sum_{N_e} \left(\int \mathbf{B}_l^T \mathbf{e} dV \right) \mathbf{S}_{PVDf} \quad (2)$$

이때 \mathbf{B}_l 는 면내 변위-변형률 관계행렬로 기하학적인 좌표변환을 통해 전역 좌표계로 표현된 식이다. 전기적으로 이방성을 가지는 압전 재료의 압전 상수 벡터 \mathbf{e} 는 주축 좌표계에서 적층각에 의해 전역 좌표계로 변환된 값이다. 전극패턴은 해당 요소에서의 전극의 유/무로 표현되는데, 전극이 있는 요소만이 압전효과를 낼 수 있다. 전극패턴 행렬 \mathbf{S}_{PVDf} 는 유효 전극일 경우는 1, 무효 전극일 때는 0 으로 나타나는 이진벡터로 설계변수가 된다.

운동방정식의 모달 변환

적절한 모달 감쇠를 가정하고 모달 좌표계로 변환한 후 모드 축약을 기법을 적용하면 전체 구조물의 운동방정식은 Eq.(3)과 같이 된다.

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}_R + \mathbf{c}_R \dot{\boldsymbol{\eta}}_R + \boldsymbol{\Lambda}_R \boldsymbol{\eta}_R = \boldsymbol{\Phi}_R^T \mathbf{F}_p \mathbf{V}_a \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{c}_R = \text{diag}(2\zeta_1\omega_1, \dots, 2\zeta_n\omega_n)$, $\boldsymbol{\Phi}_R^T \mathbf{F}_p$ 는 단위 전압당 모달 작동력이고, $\boldsymbol{\Lambda}_R$ 과 $\boldsymbol{\Phi}_R$ 은 각각 모드축약시 고려한 모드들의 고유치와 고유벡터로 이루어진 행렬이다. 이때 압전 감지기에서 발생하는 전하량 q 는 Eq.(4)와 같이 표현된다.⁶

$$q = \mathbf{F}_p^T \mathbf{u} = \mathbf{F}_p^T \boldsymbol{\Phi}_R \boldsymbol{\eta}_R \quad (4)$$

위 식에서 $\mathbf{F}_p^T \boldsymbol{\Phi}_R$ 는 압전 감지기의 모달력이다.

3. 감지기/작동기의 최적 설계

셸 구조물 시편

수치해석과 실험에 사용된 셸 구조물의 형상은 Fig. 1 과 같다. 1/9 실린더 형상으로 한쪽 끝단이 완전 지지 되어 있다. Table. 1 은 이 구조물에 사용된 알루미늄과 압전필름의 물성치를 나타낸 것이다. 주 구조물 윗면의 압전필름을 작동기로, 아래면의 압전필름을 감지기로 선정하고 각각의 전극패턴과 적층각에 대해 최적화를 수행하였다.

최적화 방법

압전 감지기/작동기의 최적화는 적층각과 전극패턴을 결정하는 문제이다. 전극패턴의 최적화는 각 유한요소내의 전극의 유무를 결정하는 이산화된 문제의 최적화로서 유전자 알고리즘⁷의 적용이 용이하다. 적층각은 연속적인 값을 가지는 변수지만 유전자 알고리즘에 적용하기 위해 5 비트로 이산화 하였다. -90° 에서 90° 까지의 적층각을 2^5 개로 이산화 하기 위해 -70° 에서 70° 사이는 5° 로 그 이후는 10° 간격으로 나누었다. 압전필름은 120 (12×10)개의 전극조각으로 구성하였다. 따라서 설계변수는 전극패턴과 적층각을 포함하여 125 개가 된다.

감지기/작동기의 설계기준

앞에서 제시했듯이 비제어모드에 의한 스펙오버의 방지는 감지기의 설계에서 이루어진다. 따라서 감지기의 제어모드 작동력은 최대화하고 비제어모드 작동력은 최소화 하도록 아래와 같은 성능지수를 선정하여 이를 최대화하였다.

$$J = \min \left(\left| \boldsymbol{\Phi}_c^T \mathbf{F}_p \right| \right) - \max \left(\left| \boldsymbol{\Phi}_{uc}^T \mathbf{F}_p \right| \right) \quad (5)$$

작동기 설계에는 제어모드만을 고려하여 아래의 성능지수를 최대화 하는 방향으로 최적화를 수행

한다.

$$J = E(0) / \int_0^{\infty} (\dot{\eta}_c^T \dot{\eta}_c + \eta_c^T \Lambda_c \eta_c + \rho u^2) dt \quad (6)$$

$E(0)$ 는 시스템의 초기 에너지이고, 분모는 제어모드의 시스템 에너지를 의미한다.

4. 설계 결과

Fig.1 에서 제시된 구조물의 1 차부터 5 차까지의 저차 모드를 고려하고 이중 1,2 차 모드를 제어모드로 3,4,5 차 모드를 비제어모드로 선정하였다. 모드축약과 수치해석으로 얻은 고유진동수는 각각 158.6, 290.8, 573.5, 649.0, 759.5Hz 이다.

Fig. 2A 는 최적화된 감지기의 전극패턴으로 적층각은 -30° 이고, Fig. 2B 는 작동기의 전극패턴으로 그 적층각은 -45° 이다. 최적화된 압전 감지기의 모달 작동력은 Table. 2 와 같다. 최적화의 목적대로 비제어모드의 작동력이 제어모드의 작동력에 비해 현격히 작은 것을 알 수 있다.

5. 실험 및 결과

앞에서 설계한 압전 감지기/작동기의 성능을 확인하기 위해 이산형 LQG 제어기를 이용하여 실시간 진동 제어를 수행하였다.

Fig.3A 와 Fig.3B 는 각각 실험을 통해 얻은 개회로 시스템의 감지기/작동기 전달 함수로 최적 설계된 감지기의 비제어모드 신호와 제어모드 신호의 차이가 작동기의 경우보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. Fig.4 는 구조물의 개회로와 폐회로 주파수 응답 함수로 제어모드 부근만을 표시한 것이다. 제어 모드인 1, 2 차의 제어효과는 각각 9.2, 9.0 dB 이다. Fig.5 는 개/폐회로의 시간 응답과 제어 입력전압을 수록한 것이다. 개/폐회로의 감지기신호를 비교해보면 제어 시에는 구조물이 안정화되는데 걸리는 시간이 감소하는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 분포형 모달 감지기/작동기 시스템을 이용한 쉘 구조물의 능동 진동 제어를 수행하였다. 이 분포형 모달 감지기/작동기에는 PVDF 가 사용되었다. 9 절점 Mindlin 쉘 요소를 이용한 유한 요소법을 분포형 모달 감지기/작동기 시스템을 포함한 전체 구조에 적용하였다.

유전자 알고리즘을 통해 이산화 된 전극 조각과 적층각을 최적화하여, 구조물의 특성에 맞는 압전

감지기/작동기 설계 기법을 제안하였다. 이 기법에 의해 압전 감지기/작동기를 설계하고 1/9 실린더 형상의 쉘 구조물에 적용하였다. 실시간 제어 실험 결과로부터 감지기의 모드 선택 효과와 작동기의 진동제어 효과를 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육부 기계분야 BK21 사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) Balas, M.J., "Feedback Control of Flexible Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-23, No. 4, 1978, pp. 673-679.
- (2) Meirovitch, L. and Baruh, H., "The Implementation of Modal Filters for Control of Structures," *Journal of Guidance and Control*, Vol.8, No.6, 1985, pp.707-716.
- (3) S.J. Kim, J.S. Hwang, J. Kim, "System design of distributed modal transducer by adjusting spatial gain distribution," *SPIE's 6th International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, California, U.S.A., March 2, 1999
- (4) Seung Jo Kim, Jung-Kyu Ryu, Joon-Seok Hwang and Jichul Kim, "Design of Distributed Modal Transducer By Optimizing Gain-Weights of Interface Circuit," *The First Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-1)*, Vol. II, Paper No. 633, October 7-9, 1998, Osaka, Japan
- (5) Cook, R.D., Malkus, D.S. and Plesha, M.E., *Concepts and application of finite element analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1989
- (6) Lee, C.K., "Theory of laminated piezoelectric plates for the design of distributed sensors/actuators: part I: Governing equations and reciprocal relationships," *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 87, No. 3, pp. 1144-1158
- (7) Goldberg, D.E., *Genetic algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison- Wesley, 1989

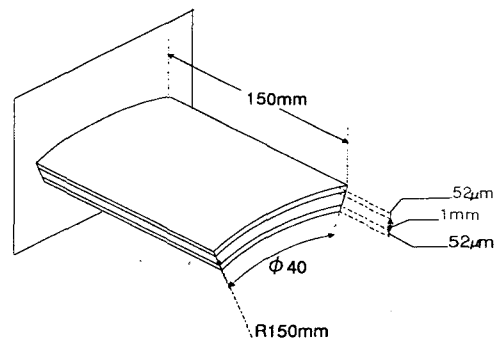


Fig.1 시편 형상

Table 1 PVDF and AL1050

	Density (kg/m ³)	Young's Modulus (Gpa)	Poisson Ratio	Thickness (mm)	d31 (V/m)	d32 (V/m)
PVDF	1780	3.0	0.33	52e-3	23e-12	3e-12
AL1050	2710	70	0.33	1	N/A	N/A

Table 2 Modal forces per unit voltage of the optimized sensor and actuator

Mode	1st	2nd	3rd	4th	5th
Sensor	-3.081140e-04	4.185850e-04	-8.894493e-06	-5.926671e-06	8.455144e-06

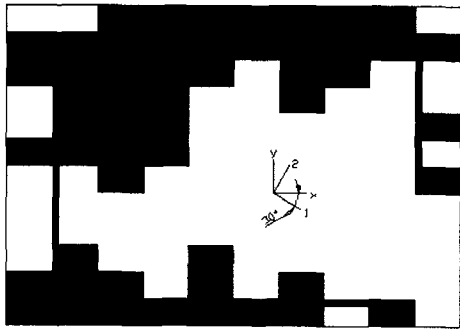


Fig.2A 감지기 전극패턴
Optimized Sensor FRF-Experiment

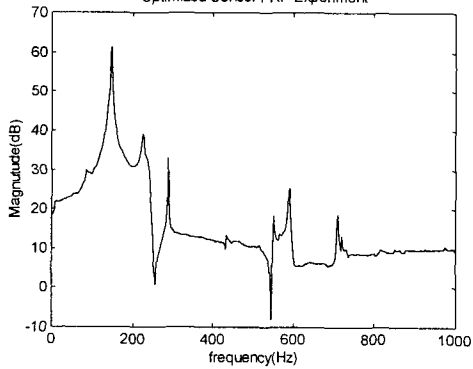


Fig.3A 감지기 전달함수

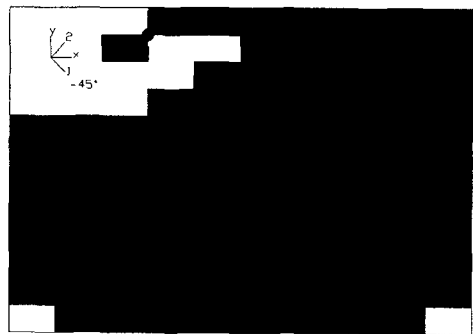


Fig.2B 작동기 전극패턴
Optimized Actuator FRF-Experiment

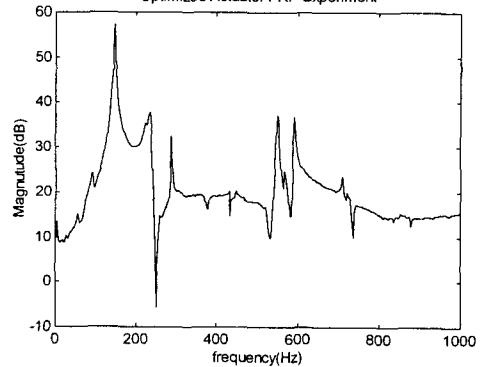


Fig.3B 작동기 전달함수

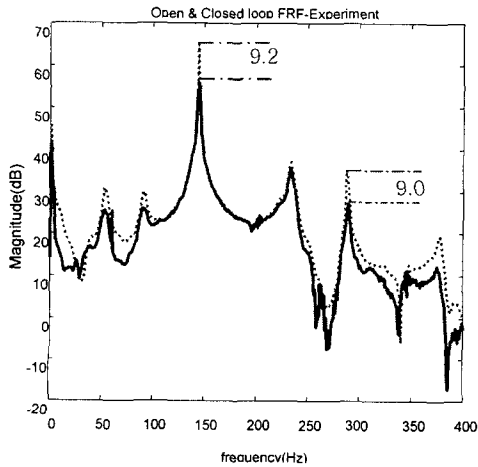


Fig.4A 개/폐회로 전달함수

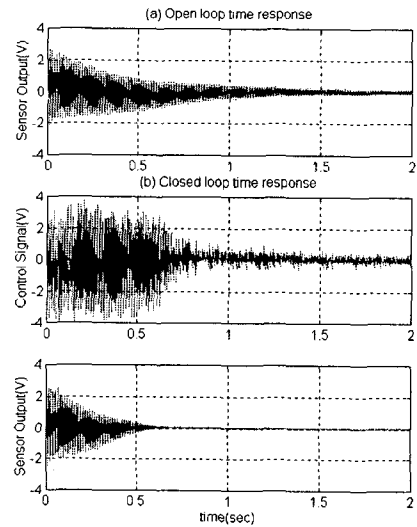


Fig.4B 개/폐회로 시간 응답