

PVDF 필름 형상최적화에 의한 복합재료 셸의 진동제어 시스템 설계

황준석*, 목지원*, 김승조**

Vibration Control System Design of Composite Shell by Profile Optimization of PVDF film

Joon Seok Hwang, Jiwon Mok and Seung Jo Kim

KEY WORDS : 복합재료셸, 감지기/작동기 시스템, 능동진동제어, 유한요소법, 유전자 알고리즘

ABSTRACT

The active vibration control of laminated composite shell has been performed with the optimized sensor/actuator system. PVDF film is used for the material of sensor/actuator. Finite element method is utilized to model the whole structure including the piezoelectric sensor/actuator system. The distributed selective modal sensor/actuator system is established to prevent the adverse effect of spillover. In the finite element discretization process, the nine-node shell element with five nodal degrees of freedoms is used. Electrode patterns and lamination angles of sensor/actuator are optimized using genetic algorithm. 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 profiles are optimized for the first and the second modes suppression of singly curved cantilevered composite shell structure. Discrete LQG method is used as a control law. The real time vibration control with profile optimized sensor/actuator system has been performed. Experimental result shows successful performance of the integrated structure for the active vibration control.

1. 서론

항공기의 주요한 부분인 날개, 동체 등의 구조물은 대부분 셸이나 평판의 형태로 이루어져 있으며 계속하여 경량화를 꾀하고 있다. 이를 위해 금속재보다 가벼우면서도 강성과 강도가 좋은 복합재료가 대안으로 대두되고 있으며 실제 항공기에도 적용되고 있다. 이런 얇은 셸이나 판 형태의

구조물의 동역학적 안정성을 위해서는 진동을 제어하는 것이 중요하다.

진동을 능동적으로 제어하기 위해서는 감지기와 작동기 그리고 제어가 필요하다. 구조물의 감지기/작동기의 재료로 많이 쓰이는 압전재료에는 크게 압전세라믹과 압전필름, 두 가지 종류가 있다. 압전세라믹은 상대적으로 큰 작동력을 가지는 반면 얇고 유연한 형태의 압전필름은 복잡한 형상을 갖는 분포형 변환기에 활용 가능한 이점이 있다.

한편, 구조물의 진동제어를 위한 모델링시 연속체인 구조물의 모든 모드를 고려할 수는 없으므로 중요한 몇 개의 모드만을 선택적으로 구한다. 하

* 서울대학교 항공우주공학과 대학원

** 서울대학교 항공우주공학과

지만 이런 경우 제어시에 고려되지 않은 모드들에 의해 시스템의 안정성이 보장되지 않기 때문에 스펙오버에 의한 역효과가 발생할 수도 있다. 따라서 비제어모드의 신호를 줄여주는 처리가 필요하다. 복합재 적층판 구조물은 모드가 인접해 있을 가능성이 크기 때문에 전기적 필터에 의해 위상에 변화를 주지 않고 비제어모드 신호만을 줄이는 것이 어려울 수 있다. 특정 모드를 선택적으로 감지/작동할 수 있는 모달 변환기² 개념을 적용하면 이런 경우의 스펙오버 현상을 효과적으로 방지할 수 있다. 압전필름을 이용한 분포형 변환기 개념을 적용하여 Kim³ 등은 평판의 능동 진동 제어에서 실험을 수행하였으며 Kim⁴ 등은 등방성 재료 셀의 능동 진동 제어에 이를 확장하여 성공적인 결과를 얻었다. 본 연구에서는 이러한 최근의 연구결과를 복합재료 셀의 능동 진동 제어에 확장, 적용하기 위하여 PVDF 필름의 전극형상을 최적화 하였다.

2. 시스템 모델

복합재료 적층판과 압전 감지기/작동기로 구성된 전체 셀 구조물을 유한요소법을 이용하여 모델링하였다. 절점 당 5 개의 자유도를 갖는 9 절점 Mindlin 셀⁵ 요소를 사용하였다.

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

$$M\ddot{U} + KU = F_p V + F_{EXT} \dots\dots\dots (1)$$

두께가 상대적으로 얇은 압전재료 단층을 평면 응력상태로 가정하고 두께방향의 전기장만을 고려하면 작동기의 압전력 F_p 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_p = \sum_{N_e} \left(\int B_j^T e dV \right) S_{PVDF} \dots\dots\dots (2)$$

$$B = T_{comp} T_{geo} \bar{B} \dots\dots\dots (3)$$

식(2)에서 B_j 는 변위-변형을 관계행렬로 B 의 면내 성분이다. B 는 전역좌표계에서의 변위-변형을 관계행렬로 지역좌표계에서 얻어진 \bar{B} 를 식(3)와 같이 변환하여 얻는다. T_{comp} 는 복합재료 적층각에 의한 변환행렬이고⁶ T_{geo} 는 셀 구조물의 기하학적 좌표변환 행렬이다.

$$e = T_{PVDF} \bar{e} = T_{PVDF} C d \dots\dots\dots (4)$$

전기적으로 이방성을 가지는 압전 재료의 압전 상수 벡터 e 는 주축 좌표계에서 PVDF 필름 적층각 변환행렬 T_{PVDF} 에 의해 전역 좌표계로 변환된

값이다. C 는 압전재료의 강성행렬, d 는 압전변형도 상수 벡터이다.

전극형상은 해당 요소에서의 전극의 유/무로 표현되는데, 전극이 있는 요소만이 압전효과를 낼 수 있다. 전극형상 행렬 S_{PVDF} 는 유효 전극일 경우는 1, 무효 전극일 때는 0 으로 나타나는 이진 벡터로서 본 연구에서의 설계변수가 된다.

적절한 모달 감쇠를 가정하고 모달 좌표계로 변환한 후 모달 축약 기법을 적용하면 전체 구조물의 운동방정식은 식 (5)와 같이 된다.

$$\ddot{\eta}_R + c_R \dot{\eta}_R + \Lambda_R \eta_R = \Phi_R^T F_p V_a \dots\dots\dots (5)$$

여기서 $c_R = \text{diag}(2\zeta_1 \omega_1, \dots, 2\zeta_n \omega_n)$, $\Phi_R^T F_p$ 는 단위 전압당 모달 작동력이고, Λ_R 과 Φ_R 은 모드축약시 고려한 모드들의 고유치와 고유벡터로 이루어진 행렬이다. 이때 압전 감지기에서 발생하는 전하량 q 는 식(6)으로 표현된다.⁷

$$q = F_p^T u = F_p^T \Phi_R \eta_R \dots\dots\dots (6)$$

위 식에서 $F_p^T \Phi_R$ 는 압전 감지기의 모드력이다.

3. PVDF 필름 형상최적화

감지기/작동기 최적화

PVDF 의 적층각과 전극형상을 이용하여 감지기/작동기 전극형상을 최적화하는 문제는 각 유한요소내의 전극의 유무를 결정하는 이산화 된 문제이므로 이에 적합한 최적화 방법인 유전자 알고리즘⁸ 을 이용하여 최적화를 수행하였다. 전극형상과 달리 적층각은 연속적인 값이지만 유전자 알고리즘을 적용하기 위해 이산화 하였다. -90° 에서 90° 까지를 고려할 수 있도록 하고, -70° 에서 70° 사이는 5° 로 그 이후는 10° 간격으로 나누어 2° 개로 이산화 하였다. PVDF 필름의 형상은 유한요소의 개수와 같도록 각 층별로 120 (12×10)개의 전극조각으로 구성하였다. 설계변수는 전극과 적층각을 포함하여 125 개가 된다.

감지기/작동기 설계 기준

감지기는 제어모드 신호를 최대화하고 비제어모드 신호를 최소화하여 스펙오버를 방지하기 위해 식(7)을 성능지수로 선정하고 이를 최대화한다.

$$J_{sensor} = \min(\Phi_c^T F_p) - \max(\Phi_u^T F_p) \dots\dots\dots (7)$$

작동기는 시스템의 제어모드의 에너지를 최소화하기 위해 아래의 성능지수를 최대화 하는 방향으로 최적화를 수행한다.

$$J_{actuator} = E(0) / \int_0^\infty (\dot{\eta}_c^T \dot{\eta}_c + \eta_c^T \Lambda_c \eta_c + \rho u^2) dt \dots\dots\dots (8)$$

$E(0)$ 는 시스템의 초기 에너지이고, 분모는 LQR 문제를 풀어 구한다. 식(7)과 식(8)에서 아래첨자는 c 는 제어모드, u 는 비제어모드를 나타낸다.

4. 실험 및 결과

실험 시편

실험에 사용된 전체 구조물의 형상은 그림 1과 같다. 주구조물로는 $[\pm 45]_2$ 로 적층된 탄소 복합재료 셸을 사용하였고 주 구조물 윗면의 압전필름을 감지기로, 아래면을 작동기로 선정하였다. 표 1은 이 구조물에 사용된 복합재료와 PVDF 필름의 물성치를 나타낸 것이다. 복합재료 각층의 두께는 0.122mm 이고 PVDF 필름의 두께는 52 μ m이다. 고온압축기를 이용하여 성형하고 1/9 실린더 형상으로 가공한 후 한쪽 끝단을 완전 지지하였다.

설계 결과 및 검토

감지기/작동기를 포함한 복합재료 셸에서 저차의 5 차 모드까지를 고려하고 이중 1,2 차 모드를 제어모드로 3,4,5 차 모드를 비제어 모드로 선정하였다. 그림 2는 앞에서 제시한 방법에 따라 최적화된 감지기/작동기의 전극형상이다. 그림의 검은 부분이 유효 전극이고 하얀 부분은 무효 전극이다. 제작상의 제약에 의해 PVDF 적층각은 0°로 고정하였다. 표 2는 유한요소법과 모드축약에 의해 얻어진 고유진동수와 최적화된 감지기의 단위 전압당 모드력을 나타낸 것이다. 제어모드 모드력에 비해 비제어모드 모드력이 현격히 작은 것을 확인할 수 있다.

능동 진동 제어 실험

설계된 감지기/작동기를 복합재료 셸에 부착하고 이산형 LQG 제어기를 설계하여 실시간 진동 제어 실험을 수행하였다. 충격망치를 가진기로 하여 전 주파수 대역을 고르게 가진 할 수 있도록 하였다. 그림 3은 실험을 통해 얻은 감지기의 전달함수로 최적화의 목적대로 비제어모드의 신호가 제어모드의 신호에 비해 약 20dB 정도 차이가 날 정도로 현격히 작게 감지되고 있는 것을 확인할 수 있으며 표 2의 계산결과와 상당히 일치하는 효과를 확인할 수 있다. 그림 4A는 개/폐회로의 제어모드 부근에서의 전달함수로 진동 제어 시 1 차 모드는 9dB, 2 차 모드는 12dB 정도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그림 4B는 개/폐회로의 시간응답으로 폐회로에서는 개회로 일 때의 약 반정도 시간에서 시스템이 안정화되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

복합재료 셸 구조물의 진동 제어에 적합한 PVDF 감지기/작동기의 형상을 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화하였다. 감지기는 관측 스피로버를 최소화하도록 설계 하였으며 작동기는 시스템의 제어모드의 에너지를 최소화 하도록 설계하였다.

형상설계를 마친 PVDF 감지기/작동기를 복합재료 셸에 적용하여 성능을 실험적으로 확인하였다. 감지기/작동기를 포함한 전체 구조물의 진동을 LQG 제어기를 이용하여 능동적으로 제어하여 1 차 모드는 9dB, 2 차 모드는 12dB 정도 줄어드는 성공적인 결과를 얻었다.

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) S.J. Kim, J.S. Hwang, J. Mok "Sensor/Actuator Optimal Design for Active Vibration Control of Shell Structure", *SPIE's 7th International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, California, U.S.A., March 9, 2000
- (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) Jones, R. M., *Mechanics of Composite Materials* .
- (7) 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
- (8) Goldberg, D.E., *Genetic algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison- Wesley, 1989

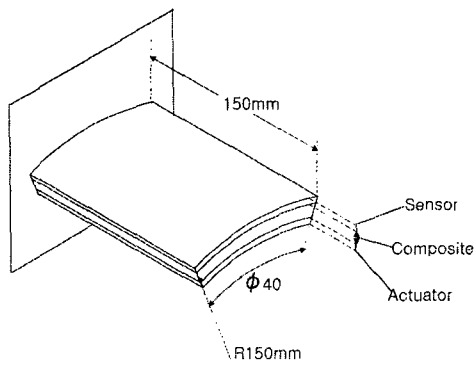


그림 1 시편 형상

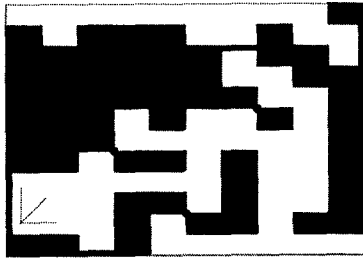


그림. 2A 감지기 전극형상

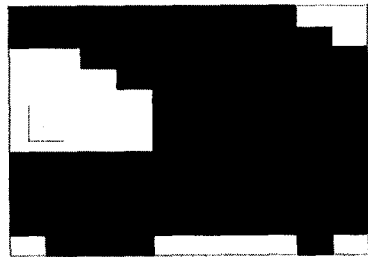


그림. 2B 작동기 전극형상

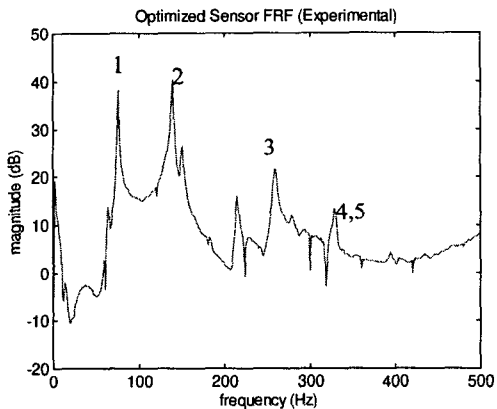


그림 3 감지기의 전달함수 (실험)

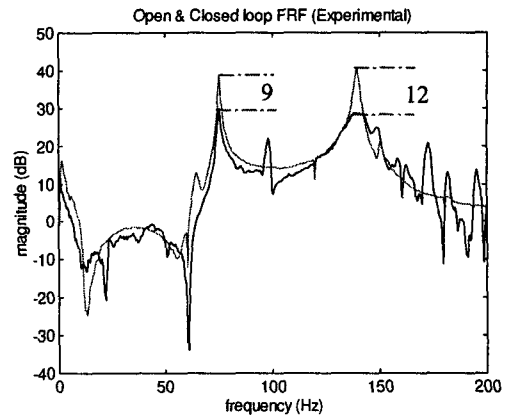


그림 4A 개폐회로 전달함수 (실험)

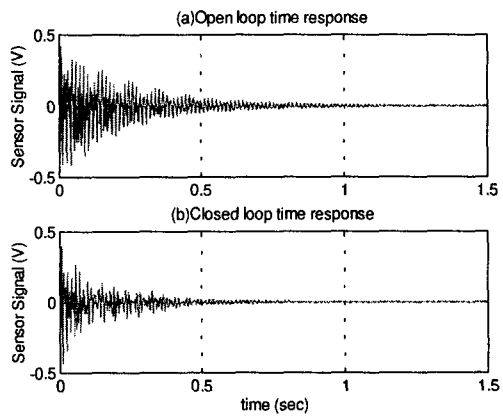


그림 4B 개폐회로 시간 응답 (실험)

표 1 PVDF 필름과 Carbon/Epoxy prepreg 의 물성치

PVDF	Carbon/Epoxy prepreg
$E = 3.0 \text{ Gpa}$	$E_{11} = 137.85 \text{ Gpa}$
$\nu = 0.33$	$E_{22} = 9.83 \text{ Gpa}$
$\rho = 1532 \text{ kg/m}^3$	$G_{12} = 5.6 \text{ Gpa}$
$d_{31} = 23e-12 \text{ V/m}$	$G_{13} = 5.6 \text{ Gpa}$
$d_{32} = 3e-12 \text{ V/m}$	$G_{23} = 2.8 \text{ Gpa}$
	$\nu_{12} = 0.295$
	$\rho = 1532 \text{ kg/m}^3$

표 2 최적화된 감지기의 단위전압 당 모드력

	고유진동수 (Hz)	감지기 모드력
1 st	99.7	4.272398e-04
2 nd	185.6	-5.472428e-04
3 rd	319.4	1.780752e-07
4 th	425.9	-3.447899e-07
5 th	445.3	6.252322e-07