

압전 재료를 이용한 셸형 복합적층판의 진동제어에 대한 실험

Experiments on Vibration Control of Laminated Shell Structure with Piezoelectric Material

황 우 석* · 고 성 현** · 박 현 철***

Woo Seok Hwang, Sung Hyun Ko and Hyun Chul Park

Key Words : Piezoelectric Sensor/Actuator(압전 감지기/작동기), Vibration Control(진동 제어), Shell Structure(셸 구조물), Experiment(실험)

ABSTRACT

Many researchers have tried to develop the piezoelectric shell element and verified them with the benchmarking problem of the piezoelectric bimorph beam since there is no experimental result for the control of shell structure with piezoelectric sensor/actuator. In this paper, the experiments are designed and performed to verify the control performance of piezoelectric sensor/actuator on the shell structure. PVDF is easy to be attached on the surface of a shell structure but makes weak control forces. On the contrary, PZT makes control forces large enough to control the structure, but it is not easy to make a PZT element with curvature. To use PVDF as an actuator, the structure should be designed as flexible as possible and the voltage amplifier could make high control voltage. PVDF actuator powered by a voltage amplifier that generates output voltage from -200 to +200 volts, shows little control performance to control the vibration of an arch type shell structure. The performance of sensor looks good and the negative velocity feedback control works perfectly. The actuator voltage seems to be too small to verify the control effect quantitatively. An experiment with high voltage amplifier is scheduled to verify the control effect quantitatively.

1. 서 론

구조물의 증량은 제작 및 유지 비용에 절대적인 영향을 미치므로 구조물에 대한 경량화에 대한 요구가 높다. 최근 들어 해석/실험 기술의 발달로 구조물의 거동에 대한 정확한 예측이 가능해지고, 신소재의 개발로 고강성, 고강도 재료를 사용할 수 있게 됨에 따라 구조물의 경량 설계가 가능하게 되었다. 하지만, 경량화로 인한 유연성의 증가는 예기치 못한 돌발적인 환경에서 구조물의 안정성을 위협할 수 있다. 이에 대비하여 일상적이지 않는 상황을 전제로 과도하게 안전한 구조물을 설계하는 것은 바람직하지 못하다. 또한 위험하지는 않으나 계속적인 미량의 진동으로 인하여 사용

자에게 불쾌감을 주거나 정밀 기계의 정확도를 저해하는 경우도 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 제안된 방법 중의 하나가 구조 제어이다[1].

구조물은 일반적으로 분포계이므로 분포 측정과 제어가 요구된다. 그러나, 현재 사용되는 제어계는 대부분 이산계이며, 이산 제어계가 갖는 단점을 극복하기 위하여 많은 연구가 수행되었다. 그 대표적인 예가 압전 재료를 이용한 구조물의 제어이다. 이는 압전 재료의 순/역방향 압전 효과를 이용하여 압전 재료를 구조물의 일부로 사용하면서 감지기/작동기의 역할을 할 수 있도록 고안한 기법이다.

최근 들어, 많은 경량 구조물에서 곡률을 가지면서 얇은 셸의 사용이 늘고 있다. 셸의 곡률은 구조적으로 하중을 지지하는데 매우 효율적이어서 셸은 경량화를 위하여 필수적인 구조 형태이다. 지금까지 압전 감지기/작동기를 이용한 구조물의 제어 기법에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히 유한 요소 해석 기법을 이용한 모델링과 해석은 그 연구 사례가 많다[2]. 셸 구조물을 해석하기 위한 유한 요소의 개발은 여러 가지 문제로 인하여 매우 어려우며, 현재도 효

* 정회원, 대구대학교 자동차·산업·기계공학부
E-mail : whwang@taegu.ac.kr
Tel : (053) 850-6672, Fax : (053) 850-6689

** 정회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학부

*** 정회원, 포항공과대학교 기계공학부

올직이고 정확한 셸 요소를 개발하기 위하여 많은 연구가 수행되고 있다. 마찬가지로 이유로 압전 감지기/작동기가 부착된 셸 구조물의 모델링과 해석 분야에서도 압전 셸 요소의 개발에 대한 연구가 아직 미미하다.

셸 요소 개발에서 가장 어려운 점의 하나는 프로그램을 검증할 실험 데이터가 없다는 사실이다. 또한 해석적인 해도 구하기가 어려우므로 마땅히 검증할만한 데이터가 없다. 기존의 연구에서는 셸의 가장 간단한 형태인 평판에 대하여 검증을 수행하거나 해석해가 존재하는 압전 Bimorph 보에 대한 검증을 마친 후 셸 구조물의 해석을 수행하였다. 하지만 셸 구조물의 곡률은 구조적 거동이나 운동 방식에 영향을 미치므로 엄밀한 의미에서 셸에 대한 검증을 마쳤다고 볼 수는 없다.

본 연구에서는 압전 감지기/작동기가 부착된 박판 셸 구조물의 진동 제어에 대한 실험을 수행하였다. 향후 압전 셸 개발에서 검증 데이터로 활용되기를 기대한다.

2. 실험 장치

2.1 셸 구조물

셸 구조물은 구조물의 기하학적 형상에 따라 가장 간단한 평판에서부터 복잡한 이중곡률 셸까지 다양하다. 실험에 사용될 구조물은 셸의 특성이 곡률을 갖고 있으면서 제작이 용이하고 간단한 형상이어야 한다.

본 연구에서는 Fig.1에 있는 실린더형 셸 구조물을 선정하였다. 이 구조물은 기존의 다른 복합층형 셸의 연구에서도 흔히 사용되는 형상으로 구조가 간단하고 제작이 용이하다. 한쪽 변을 고정할 경우, 외팔보와 유사한 형태가 되어 진동 제어 효과를 측정하기에도 용이하다. 탄소섬유/에폭시 복합 재료를 사용하여 적층하였는데 사용한 재료의 물성치는 Table 1과 같다. 셸의 구조적인 특성으로 이 구조물은 굽힘 강성이 상당히 높는데 제어 효과를 극대화하기 위하여 굽힘 강성을 최대한 줄이도록 세 층의 복합재료 단층을 90° 방향으로 적층하였다.

2.2 감지기/작동기

감지기/작동기로 사용할 수 있는 압전 재료로는 두 가지가 있는데, PVDF(polyvinylidene fluoride)와 PZT(lead zirconate titanates)이다. Table 1에 물성치가 표시된 두 재료를 사용하여 실제 구조물로 제작하고자할 때 각각의 장단점이 있다. PVDF는 크기를 충분히 크게 할 수 있으며 곡률을 가진 셸 구조물에 부착하는 것이 용이하지만 진동 제어 효과를 보기 위하여 필요한 제어력이 너무 작다. 반면에 PZT는 작동 전압이 낮아도 되는 장점이 있지만, 특정 곡률을 갖는 형상을 제작하기 위하여 주문 제작을 하여야 하므로 시간과 비용이 매우 많이 든다. 이는 압전 작동기의 작동력은 압전 재료의 압전 계수인 e 값에 비례하는데,

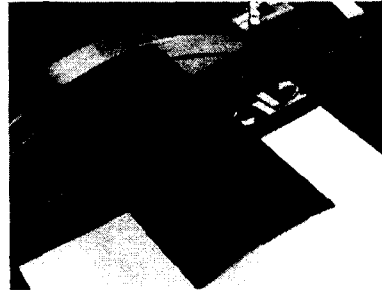


Fig.1 Cylindrical shell structure

Table 1 Material properties of piezo-shell system

Property	Structure	PVDF	PZT
E_1 [N/m ²]	140.3×10^9	2.0×10^9	91.7×10^9
E_2 [N/m ²]	7.36×10^9	2.0×10^9	91.7×10^9
ν	0.319	0.30	0.30
ρ [kg/m ³]	1800.	1780.	7700.
t [m]	4.5×10^{-4}	1.1×10^{-4}	1.0×10^{-4}
d_{31} [C/N]	-	23×10^{-12}	584×10^{-12}
e_{31} [C/m ²]	-	46×10^{-3}	15.07

PZT가 PVDF에 비하여 e 값이 327.6배 크기 때문에 작은 작동 전압에서도 작동력이 충분히 발생한 것으로 보인다.

본 연구에서는 PVDF를 사용하였는데, 제어력을 가능하면 크게 하기 위하여 셸 구조물의 상하면 전체에 PVDF를 부착하여 각각 감지기와 작동기로 사용하였다.

2.3 제어 시스템

진동 제어에 사용할 수 있는 제어 기법은 여러 가지가 있다. 가장 간단한 대표적인 기법은 반속도 되먹임 제어(Negative Velocity Feedback Control)이다. 구조물의 속도를 측정하여 이의 반대 방향으로 제어력을 가하면 운동을 방해하여 진동을 제어하는 원리이다. 운동 방정식에서도 속도에 비례하는 제어력이 외력항에 존재할 경우, 이를 이항하면 속도로 묶여져서 감쇠를 증대시키는 것을 볼 수 있다. 이때, 감쇠가 증가하도록 이득의 부호에 유의하여야 한다.

주 구조물이 변형하면 이에 부착된 압전 감지기에 변형률이 발생한다. 이는 압전 감지기에 전기적 변위를 유발한다. 전기적 변위를 감지기의 전극 면적에 대하여 적분하면 이는 감지기에 발생하는 전하량이다. 제어부에서 이 전하량을 전하 증폭기를 사용하여 전압으로 변환하면 이 전압은 변위에 비례하는 신호이다. 이는 반속도 되먹임 제어에서 바로 사용할 수가 없고 90도의 상변이(Phase Shift)를 하여 속도 신

호로 변환하여야 한다. 반면에 전하의 시간 변화량인 전류를 전압으로 변환하면 이는 속도에 비례하는 신호이므로 바로 사용할 수가 있다. 신호 처리 과정에서 상이 약간씩 이동하는 경우도 있는데 이는 제어 효과를 반감시키므로 주의하여야 한다.

감지기에서 나오는 신호와 비절속 변위 감지기로 측정된 신호를 비교한 그림이 Fig.2에 있다. 본 연구에서는 전하 증폭기를 사용하였으므로 정확하게 위상이 180도 차이가 나는 변위 신호가 측정됨을 알 수 있다. 감지 신호의 위상은 압전 감지기의 방향에 따라 위상이 일치하거나 180도 차이가 난다.

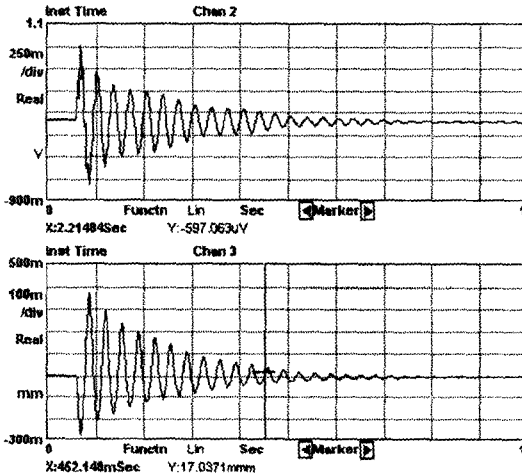


Fig.2 Displacement signal from PVDF sensor

속도 신호에 이득을 곱하여 작동기에 부가하면 구조물의 운동을 방해하는 제어력이 발생한다. 이득을 곱한다는 것은 증폭기를 사용하여 이득의 배수만큼 제어 전압을 증대시킴을 의미한다. 이를 고려하여 구성된 제어시스템은 Fig.3과 같다.

전하 증폭기에서 나오는 감지 전압을 AD 변환기(PCL 818 Lab Card)를 사용하여 PC에 구현된 제어기로 보낸다. 제어기에서는 변위 정보를 가진 감지 전압을 상변이하여 속도 신호로 바꾼 후 제어이득을 곱하여 DA 변환기(PCL 818 Lab Card)로 출력한다.

DA 변환기에서 출력된 작동 전압은 전압 증폭기에서 다시 한번 증폭된 후 작동기로 부가된다. 사용한 전압 증폭기는 PCB Piezotronics사의 Power Amp. 790 모델로서 출력 전압은 최대 ± 200 볼트이다.

셸 구조물의 자유단 중심에 일정한 초기 변위를 부가한 후 초기 변위를 제거하면 셸 구조물은 자유 진동을 한다. 이때, 변위 신호를 측정하여 제어 효과를 확인하였다.

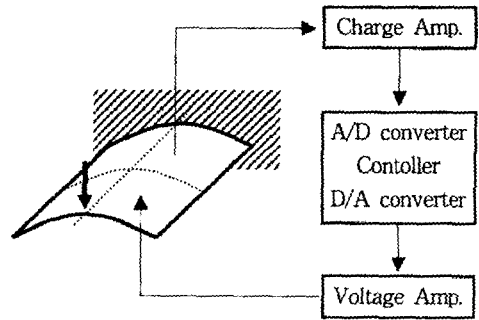


Fig.3 Experimental set-up

3. 실험 결과

3.1 셸 구조물의 비선형 효과

실험 과정에서 독특한 현상을 볼 수 있었다. 기존 평판에 서는 심각하게 생각하지 않았지만, 셸의 구조적인 특성상 나타나는 현상들이다. 초기 변위를 부가하기 위하여 자유단을 누르면 스냅 현상이 심하게 발생하였다. 즉, Fig.3에서와 같이 곡률면의 바깥쪽에서 누르면 작은 하중에도 급격한 비틀림 변형이 일어나 적절한 초기 변위를 주는 것이 매우 어려웠다. Fig.4는 이러한 변형 상태를 나타낸다. 그러므로, 곡률면의 안쪽에서 하중을 주어 초기 변위를 부가하는 방법을 사용하여야 했다.

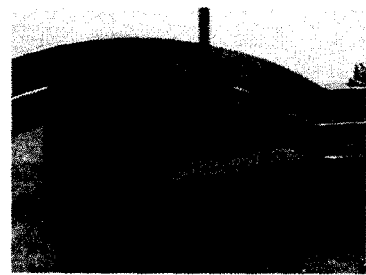


Fig.4 Snap of shell structure

초기 변위의 크기에 대해서도 세심한 주의가 필요하다. Fig.5은 자유단 중심에 5mm의 초기 변위를 부가한 경우의 감지 전압을 나타낸다. 그림에서와 같이 한쪽으로 응답이 물리는데, 초기 변위를 어느 방향으로 주느냐에 따라 응답이 치우치는 방향이 달라진다. 이는 셸이 형상적인 비선형성을 갖고 있는데 초기 변위를 과도하게 부가하여 비선형 효과가 극명하게 나타난 경우이다. 그러므로, 본 예제에서는 초기

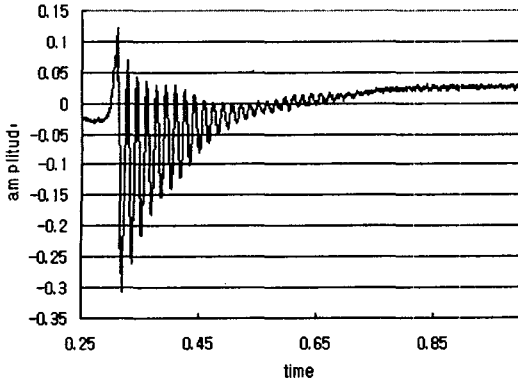


Fig.5 Nonlinear effect of shell structure

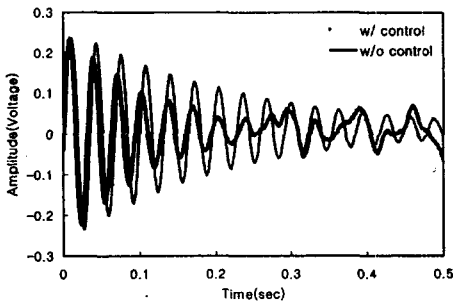


Fig.6 Sensor output with and without control

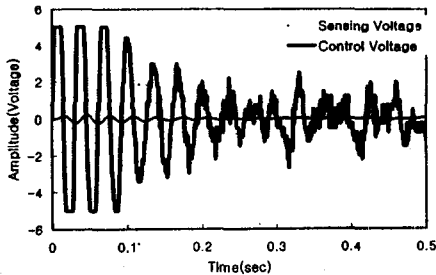


Fig.7 Control voltage in actuator

변위를 1mm만 주도록 장치를 제작하였다. 이 초기 변위에 대해서는 변위 치우침 현상이 발생하지 않았다.

3.2 셸 구조물의 진동 제어

셸 구조물의 자유단 중심에 1mm의 초기 변위를 가했다가 제거한 후 발생하는 자유 진동을 제어하였다.

Fig.6은 제어 전후의 감지 신호를 비교한 그림이며, Fig.7은 작동 전압을 표시한다. 셸 구조물의 진동은 약간 저감되는 것을 볼 수 있으나, 확연하지는 않다. 이는 Fig.8에서와 같이 전압 증폭기의 최대 전압이 200 볼트로 제한되어 있어

필요한 충분한 작동 전압을 가해주지 못했기 때문으로 보인다. 참고문헌 [3]에서는 같은 구조물에 대하여 PVDF를 사용하는 경우 적어도 1000 볼트 정도의 작동 전압을 주어야 제어 효과가 명확하게 보인다고 보고한 바 있다. 제어 효과를 명확히 확인하고 정량화하기 위하여 높은 전압을 발생시키는 전압 증폭기를 사용할 예정이다.

4. 토 론

셸형 박판 구조물에 부착된 압전 감지기와 작동기를 이용하여 구조물의 진동을 제어하는 실험을 수행하였다. 압전 감지기/작동기의 크기나 형상을 조절할 수 있고 부착이 용이한 PVDF를 셸 구조물의 상하면에 부착하여 각각 감지기와 작동기로 사용하였다.

감지기의 성능을 비접촉 변위 감지기의 신호와 비교하여 확인하였다. 전하 증폭기를 사용하는 경우 정확한 변위 정보를 제공하는 것을 알 수 있었다. 또한 작동기에 가해지는 작동 전압이 반속도 되먹임제어를 구현할 수 있도록 제어를 구성하였다.

셸 구조물은 구조물의 특성상 비선형성이 강하고 스냅 현상이 쉽게 발생하므로 선형 범위 내에서 정확한 초기 변위를 가할 수 있는 장치를 구성하였다.

압전 감지기/작동기를 이용한 진동 제어 실험에서는 명확한 진동 제어 효과를 나타내지 못했는데, 이는 작동 전압을 발생하는 전압 증폭기의 한계 때문으로 사료된다. 제어 효과를 명확히 확인하고 정량화하기 위하여 높은 전압을 발생시키는 전압 증폭기를 사용할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R05-2001-000-01169-0)의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Leipholtz, H.H.E., 1985, Structural Control, Martinus Nijhoff Pub., The Netherlands.
- (2) Benjeddou, A., 2000, "Advances in Piezoelectric Finite Element Modeling of Adaptive Structural Element : A Survey," Computer and Structures, Vol.76, pp. 347~364.
- (3) 황우석, 고성현, 박현철, 2003, "압전 감지기/작동기를 포함하는 셸 요소의 개발", 한국소음진동공학회논문집, 제13권, 제3호, pp. 225~231.