

압전 감지기/작동기를 포함하는 셸 요소의 개발

Development of Shell Element to Analyze an Intelligent Structure with Piezoelectric Sensor/Actuator

황 우 석† · 고 성 현* · 박 현 철**

Woo Seok Hwang, Sung Hyun Ko and Hyun Chul Park

(2003년 1월 14일 접수 : 2003년 2월 18일 심사완료)

Key Words : Piezoelectric Sensor/Actuator(압전 감지기/작동기), Finite Element Formulation(유한요소 정식화), Shell Element(셸 요소)

ABSTRACT

A new three-dimensional thin shell element for a structure containing an integrated distributed piezoelectric sensor and actuator is proposed. The assumed strain formulation and the bubble function are introduced to improve the performance of the shell element. A finite element formulation gives a general tool that can predict the static or dynamic responses of the shell with piezoelectric sensor/actuator. The verification through the calculation of the static response for the piezoelectric bimorph beam shows that the results agree with those from the theoretical analysis very well. Dynamic response of a shell shows that the reduction of vibration is possible with the introduction of the piezoelectric shell sensor and actuator. However, the curvature of sensor/actuator is an obstacle for application, since the flexible PVDF is not strong enough and the PZT with curvature should be made specially.

1. 서 론

구조물의 중량은 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 과도

하게 안전한 구조물을 설계하는 것은 바람직하지 못하다. 또한 위험하지는 않으나 지속적인 미량의 진동으로 인하여 사용자에게 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.

지금까지 압전 감지기/작동기를 이용한 구조물의 제어 기법에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히 유한 요소 해석 기법을 이용한 모델링과 해석은

† 책임저자, 정희원, 대구대학교 자동차·산업·기계공학부
E-mail : whwang@daegu.ac.kr

Tel : (053) 850-6672, Fax : (053) 850-6689

* 정희원, 포항공과대학교 대학원 기계공학부

** 정희원, 포항공과대학교 기계공학부

그 연구 사례가 많다.⁽²⁾ 초기 연구는 각 절점마다 전 기적 자유도를 부가한 3차원 요소의 개발로 시작되었다. 하지만 이 요소들은 압전 발전기를 해석하는데 널리 사용되었고, 구조적으로 얇은 판의 형태를 갖는 압전 감지기나 작동기를 해석하기에는 한계가 있었다. 박판 형태로 주 구조물의 표면에 부착되는 압전 감지기과 작동기를 모델링할 수 있는 2차원 판 요소가 개발되었다.^(3,4)

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. 셸 구조물을 해석하기 위한 유한 요소의 개발은 2장에서 설명할 여러 가지 문제로 인하여 매우 어려우며, 현재도 효율적이고 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.^(5,6)

본 연구에서는 압전 감지기/작동기가 부착된 박판 셸 구조물을 해석할 수 있는 압전 셸 요소를 개발하였다.

2. 유한요소 정식화

2.1 셸 요소의 선정

압전 셸 요소의 개발은 효율적인 구조 셸 요소의 선정이 관건이다.

셸 요소는 형상은 물론 면내 변형 및 굽힘 변형을 포함하는 변형 양상이 매우 복잡하기 때문에 다른 어떤 요소보다 어렵다. 셸 요소는 형상적인 특성으로 인하여 셸의 두께가 얇아질 때, 전단 잠김(transverse shear locking)이나 면내 잠김(membrane locking)이 발생한다. 이를 해결하기 위하여 많은 노력들이 있어 왔는데, 대표적인 기법은 선택적 적분(selective integration)이나 제한적 적분(reduced integration), 또는 가정 변형률 정식화(assumed strain formulation) 등이 있다.

본 연구에서는 구조 해석을 위하여 개발된 많은 셸 요소에 대한 문헌 조사를 수행하였다. 형상이나 메쉬 찌그러짐에 민감하지 않고 효율적인 요소이면서, 향후 비선형 해석을 위한 검증이 된 셸 요소를

대상으로 하였다. 본 논문에서는 Cho가 제안한 4절점 셸 요소⁽⁷⁾를 선정하였다. 이 요소는 잠김 현상을 막기 위하여 가정 변형률 정식화를 사용하였으며, 매쉬 형상에 민감하지 않도록 버블 함수(bubble function)를 도입하였다. 또한 두께 방향 변형이 가능하며, 각 절점마다 6 자유도를 가지고 있고 각 요소는 6개의 내부 자유도를 갖는다. 이 요소를 확장하여 압전 감지기과 작동기의 모델링이 가능하도록 유한요소 정식화를 수행하였다.

2.2 변위 보간

Fig. 1에 있는 4절점 셸요소를 이용하여 압전 셸요소 정식화를 수행하였다.

유한요소 모델링에서, 어떤 요소 내의 위치 벡터 x 는 각 절점들의 위치 벡터 조합으로 다음과 같이 표현된다.

$$x = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) (x_o)_i + \xi \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \left(\frac{t}{2} a_3 \right)_i \quad (1)$$

여기서, $N_i(\xi, \eta)$ 는 i -번째 절점에 대한 형상 함수이며, $(x_o)_i$ 는 셸 중립면 상에 있는 i -번째 절점의 위치 벡터이다. a_3 는 셸의 중립면에 수직한 단위 벡터를 나타내며, t 는 셸의 두께이다.

마찬가지로, 변위 벡터 u 는 버블 함수를 포함하여 식 (2)와 같이 표현된다.

$$u = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) (u_o)_i + \xi \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \left(\frac{t}{2} u_z \right)_i + N_b(\xi, \eta) \left((u_o)_b + \xi (u_o)_b \right) \quad (2)$$

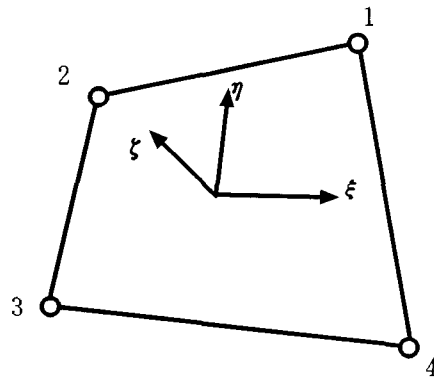


Fig. 1 4-Node shell element

여기서, $(\mathbf{u}_o)_i$ 는 셀의 중립면 위에 위치한 점의 변위 벡터이고, $(\mathbf{u}_z)_i$ 는 변형 전과 후의 셀 방향 벡터의 차이를 나타내는 벡터이다. $N_b(\xi, \eta)$ 는 버블 함수이며, $(\mathbf{u}_o)_b$ 와 $(\mathbf{u}_z)_b$ 는 버블 함수에 해당하는 자유도 벡터이다.

2.3 평형 및 적합 방정식

가정 변형률 개념을 이용한 정식화는 다음의 두 변수 Hellinger-Reissner 범함수로부터 출발한다.

$$\Pi_R = \int_V \left(\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C}_e \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} - \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C}_e \boldsymbol{\varepsilon} \right) dV - W \quad (3)$$

여기서, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 은 변위에 대하여 독립적인 가정 변형률, $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 은 변위로부터 유도되는 변형률이며, W 는 외력에 의한 일이다. 이 범함수의 변분으로부터 구한 정적 조건은 식 (4)의 평형 방정식과 식 (5)의 적합 방정식이다.

$$\int_V \left(\delta \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{C}_e \boldsymbol{\varepsilon} \right) dV - \delta W = 0 \quad (4)$$

$$\int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C}_e (\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} - \boldsymbol{\varepsilon}) dV = 0 \quad (5)$$

2.4 이산화

변위로부터 정의된 실제 변형률은 요소의 변위 벡터를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (6)$$

여기서, \mathbf{B} 는 요소 변위 벡터 \mathbf{u} 와 변형률 벡터와의 관계를 나타내는 행렬이다. 가정 변형률은 미정의 계수 행렬 $\boldsymbol{\alpha}$ 와 가정 변형률 형상 함수 \mathbf{P} 를 이용하여 식 (7)과 같이 표현한다.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{P} \boldsymbol{\alpha} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)을 식 (5)에 대입하여 정리하면

$$\delta \boldsymbol{\alpha}^T \left(\int_A \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dA \mathbf{u} - \int_A \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} dA \boldsymbol{\alpha} \right) = 0 \quad (8)$$

이므로, 이를 간단히 정리하면

$$\mathbf{G} \mathbf{u} - \mathbf{H} \boldsymbol{\alpha} = 0 \quad (9)$$

이다. 여기서,

$$\mathbf{H} = \int_A \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} dA \quad (10)$$

$$\mathbf{G} = \int_A \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dA \quad (11)$$

이다. 식 (9)로부터

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{G} \mathbf{u} \quad (12)$$

이다.

식 (6)과 (7)을 식(4)에 대입하여 정리하면

$$\delta \mathbf{u}^T \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{P} dA \boldsymbol{\alpha} - \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F} = 0 \quad (13)$$

이므로, 이를 간단히 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{G}^T \boldsymbol{\alpha} = \mathbf{F} \quad (14)$$

식 (14)에 식 (12)를 대입하면

$$\mathbf{G}^T \mathbf{H}^{-1} \mathbf{G} \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (15)$$

이다. 식 (15)는 변위와 외력과의 관계를 나타내 주므로, 단위 강성벡터는

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{G}^T \mathbf{H}^{-1} \mathbf{G} \quad (16)$$

이다. 각 요소에 대하여 단위 강성 행렬을 계산한 후 어셈블하면 전체 강성 행렬을 구할 수 있다.

2.5 운동 방정식

셀의 운동 에너지로부터 유도되는 질량 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\delta T = - \int_V \delta u \rho \ddot{u} dV \quad (17)$$

식 (17)에 식 (2)의 이산화된 변위 표현을 대입하면 식 (18)과 같이 단위 질량 행렬식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{M}_e = \int_{V_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \quad (18)$$

식 (16)과 (18)의 단위 강성 행렬과 질량 행렬을 조립하여 전체 시스템의 이산화된 운동 방정식을 구하면 식 (19)와 같다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (19)$$

여기서, 감쇠 행렬 \mathbf{C} 는 비례 감쇠 모델을 사용하였다.

2.6 이산 압전식

압전 재료에서의 탄성장과 전기장을 연계하는 선

형 구성 방정식은 순/역방향 압전식으로 표시된다.

$$D = e\epsilon + \epsilon^s E \quad (20)$$

$$\sigma = c\epsilon - e^T E \quad (21)$$

여기서, D , E , ϵ 과 σ 는 각각 전기적 변위, 전기장, 변형률, 응력 벡터이다. c , e 와 ϵ^s 는 각각 탄성, 압전, 유전 상수 행렬이다.

압전 감지식은 식 (20)의 순방향 압전식으로부터 유도한다. 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. 압전 감지기가 z -축 방향으로 얇은 판형이고, 판의 상하에 전극이 있다면 z -방향 전기적 변위만을 고려하면 된다. 즉,

$$q(t) = \int_A D_z dA = \int_A (e\epsilon)_z dA \quad (22)$$

이다. 이를 이산화하면

$$q(t) = \int_A (eB)_z dA \mathbf{u} \quad (23)$$

이다. 그러므로, 주 구조물의 변위 \mathbf{u} 를 알면 발생하는 전하량을 계산할 수 있고, 이를 전압으로 바꿀 수 있다.

압전 작동식은 역방향 압전식을 이용하여 계산할 수 있다. 압전 작동기에 전기장을 가하면 식 (21)로부터 압전 작동기에 발생하는 변형률을 계산할 수 있다.

$$\epsilon^A = c^{-1} e^T E = dE \quad (24)$$

작동 변형률에 의한 응력은 구조물에 일을 하며, 그 일의 양은 식 (25)와 같다.

$$W = \int_V \epsilon^T c \epsilon^A dV = \int_V \epsilon^T c dE dV \quad (25)$$

식 (25)의 변분을 취하여 작동 전압에 의한 제어력을 계산할 수 있다. 이는 기존의 판에서 작동 모멘트를 구하던 방법과 비교하여 일반적인 형태의 셀에도 적용될 수 있는 방법이다. 식 (25)의 변분은 식 (26)과 같으며,

$$\delta W = \int_V \delta \epsilon^T c dE dV = \delta \mathbf{u}^T \int_V \mathbf{B}^T dV c dE \quad (26)$$

압전 작동기에 의한 제어력은

$$F = \int_V \mathbf{B}^T dV c dE \quad (27)$$

로 표시할 수 있다. 두께 방향 적분은 압전 작동기가 위치한 영역에 대해서만 수행하며, B 는 두께 방향 좌표의 함수이므로 압전 작동기의 위치가 작동력의 중요한 변수가 된다. 일반적으로 구조물의 중립면에서 거리가 먼 표면에 부착할수록 작동력이 증가한다.

두께가 t 인 판형 작동기에 전압 V 가 두께 방향으로 가해진 경우, 전기장은

$$E = \{ 0 \ 0 \ V/t \}^T \quad (28)$$

이므로, 이를 식 (27)에 대입하면 작동력이 전압의 함수로 표현된다.

3. 프로그램의 검증

3.1 압전 Bimorph 보의 모델링

프로그램이 압전 셀 구조 해석을 제대로 수행하는지 확인하기 위하여 압전 Bimorph 보에 대한 해석을 수행하였다. 압전 Bimorph 보는 가장 간단한 형태의 압전 셀 구조물로서 많은 연구에서 검증용 예제로 사용되고 있다.^(3~6) Bimorph 보는 Fig. 2에서와 같이 극성이 반대인 두 층의 압전판이 결합되어 압전 효과를 배가시키도록 만들어졌다. 압전 재료의 물성은 Table 1에 있다.

참고문헌 (3)에서는 압전 감지기/작동기의 전극을 고려한 해석이 중요함을 보여준다. 본 논문에서도 20 × 5 mm 크기의 전극이 x -방향으로 5개 설치된 경우를 고려하였다. 압전 외팔보는 길이 방향으로 5개와 10개의 셀요소로 각각 모델링하였다. 유한요소 해석을 수행하여 정적 변형을 계산한 결과를 Fig. 3에서 비교하였다. 끝단에 하중이 가해진 경우 외팔보의 변형에 대한 이론식은 다음과 같다.

$$w(x) = \frac{P}{EI} \left(\frac{L}{2} x^2 - \frac{x^3}{6} \right) \quad (29)$$

여기서, P 는 집중 하중의 크기, L 은 보의 길이, I 는 관성 모멘트이다. 변위 양상이나 값이 이론치와 잘 맞는 것을 볼 수 있으므로 개발된 셀 요소의 구조적 성능을 검증할 수 있었다.

3.2 변형에 대한 감지 전압 계산

끝단 변위가 10 mm인 변형 상태에서 감지기로 사

용된 두 층의 압전 재료에 발생하는 전압을 계산하였다. 보의 굽힘으로 인하여 발생하는 감지 전압은 굽힘 변형률의 감지기 면적에 대한 적분값에 비례한다. Fig. 4에서 외팔보의 이론적 굽힘 변형률과 감지 전압을 비교하였다. 감지 전압은 발생 전하량을 전압으로 변환하여 구하는데, 전하 증폭기의 이득에 따라 절댓값이 달라질 수 있으므로 상대적인 크기로 표시하였다. 외팔보의 길이 방향으로 5개의 전극이 존재

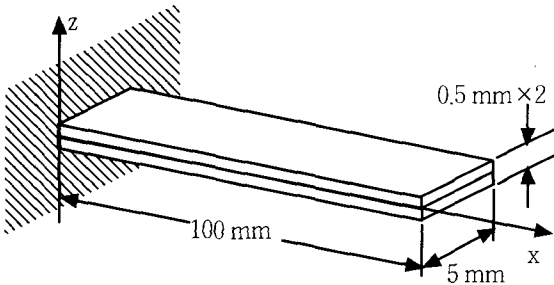


Fig. 2 Piezoelectric PVDF Bimorph beam

Table 1 Material properties of PVDF

Property	Value
Young's modulus (E)	$2.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
Poisson's ratio (ν)	0.29
Dielectric coefficient (d_{31})	$2.3 \times 10^{-11} \text{ C/N}$
Piezoelectric constant (e_{31})	$4.6 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$

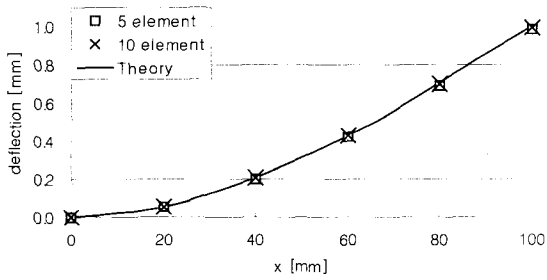


Fig. 3 Static deflection of cantilevered beam

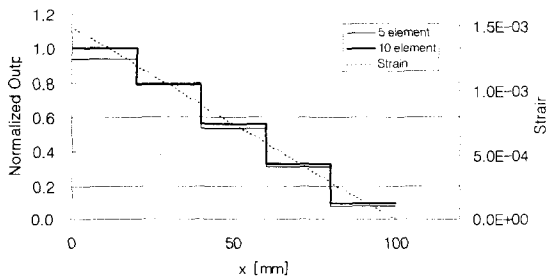


Fig. 4 Sensor output and strain

한다고 했을 때, 전극마다 발생하는 전압을 계산한 결과이다. 10개의 요소로 모델링한 경우, 더 정확한 변형률이 계산되고 따라서 출력 전압도 정확함을 알 수 있다. 이로부터 식 (23)의 압전 감지식이 타당함을 검증하였다.

3.3 작동 전압에 의한 보의 변형 계산

전압이 가해지면 압전 재료는 변형을 일으키고, 이는 구조물에 제어력을 발생시킨다. 단위 전압 1 Volt가 두께 방향으로 가해졌을 때 보의 변형을 계산하였다. 이 때, 두 층의 압전 재료는 모두 작동기의 역할을 한다. 보 이론에 의하여 계산한 변형은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$u(x) = \frac{3 d_{31} V}{2 t^2} x^2 \quad (30)$$

유한요소 해석으로 계산한 변형을 이론치와 비교하면 Fig. 5와 같이 잘 일치함을 볼 수 있다. 이로부터 식 (27)의 압전 작동식이 타당함을 검증하였다.

4. 압전 셀의 진동제어

셀형 박판 구조물에 부착된 압전 감지기와 작동기를 이용하여 진동을 제어하는 예제에 대한 해석을 수행하였다. 3절에서 가장 간단한 셀 구조인 평판에 대한 검증을 수행하였으나, 셀에 대한 검증에 사용할 수 있는 실험 자료는 아직 없다. 많은 참고 문헌에서도 압전 Bimorph 보에 대한 검증을 수행한 후 셀 구조에 대한 해석 예를 보이고 있다. 본 연구에서는 향후 실험적 검증을 염두에 두고 압전 셀의 진동 제어에 관련한 실질적인 문제를 예측해 보고자 한다. Fig. 6에서와 같이 한 변이 고정된 외팔 셀 구조물의 진동 제어를 대상으로 하였다. 셀은 복합재료를 제작되며, 압전 재료로는 PVDF(polyvinylidene fluoride)

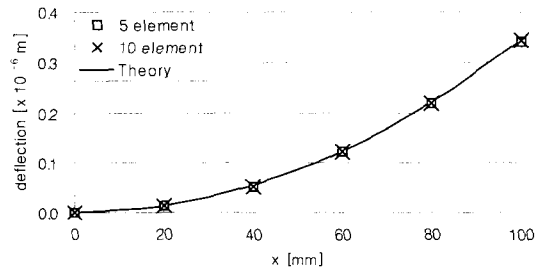


Fig. 5 Deflection by actuator

와 PZT(lead zirconate titanates)를 고려하였다. 각 재료의 물성은 Table 2와 같다. 기초적인 해석을 통하여 이 구조물은 굽힘 강성이 상당히 높음을 알 수 있었고, 제어 효과를 극대화하기 위하여 굽힘 강성을 최대한 줄이도록 세 층의 복합재료 단층을 90° 방향으로 적층하였다. 복합 적층판의 상면에는 감지기로, 하면에는 작동기로 압전 재료를 부착하였다.

Fig. 6의 셸 구조물의 자유단 중앙에 힘을 가하여 변위가 5mm 발생하도록 하였다. 그 상태에서 힘을 제거할 경우, 셸은 진동을 하기 시작한다. 이때, 셸의 상면에 부착된 압전 재료는 구조물의 변형에 비례하는 전하를 발생시킨다. 전하의 시간 변화량이 전류이므로 압전 감지기에서 발생하는 전류를 저항에 통과 시키면서 전압을 측정하면 셸의 진동 속도에 비례하는 감지 전압을 구할 수 있다. 이에 적절한 되먹임 이득을 곱하여 셸의 하면에 부착된 압전 재료에 가하였다. 즉, 가장 간단한 형태의 제어인 반속도 되먹임 제어를 적용하여 능동 진동제어를 수행하였다. 이때, 식 (19)의 감쇠 행렬은 계산된 강성 행렬의 0.00002배인 비례 감쇠를 사용하였다. 압전 재료로

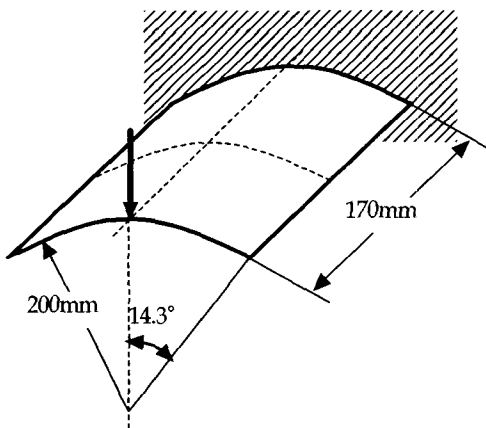
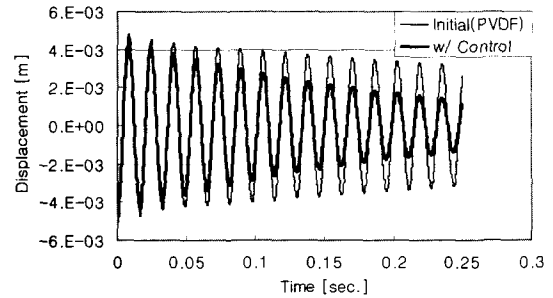


Fig. 6 Geometry of Piezo-shell model

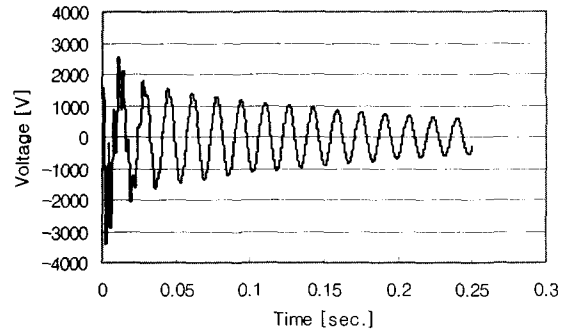
Table 2 Material properties of Piezo-shell system

Pr	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

PVDF를 사용한 경우에 대한 계산 예는 Fig. 7과 같다. 셸 끝단의 진동은 효과적으로 감소되었지만, 이

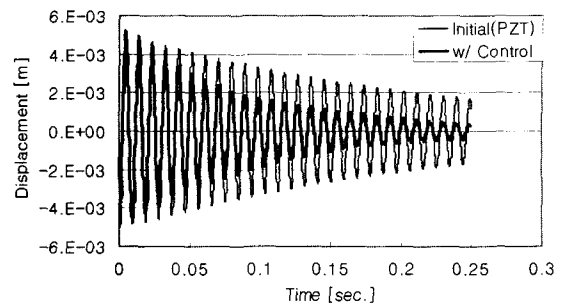


(a) Displacement

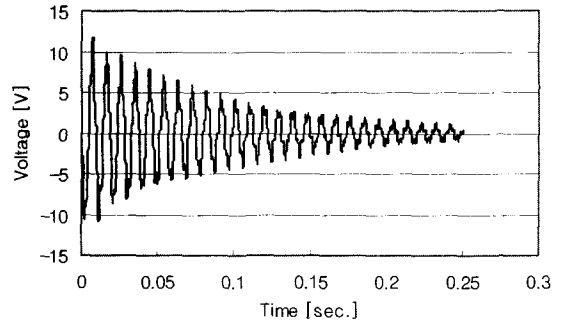


(b) Feedback control voltage

Fig. 7 Active control with PVDF sensor/actuator



(a) Displacement



(b) Feedback control voltage

Fig. 8 Active control with PZT sensor/actuator

를 감소시키기 위하여 필요한 작동 전압은 1000 V 이상이 요구되었다. Fig. 8은 압전 재료로 PZT를 사용한 경우에 대한 해석 결과이다. 마찬가지로 끝단 진동이 효과적으로 감소되고 있으며, 이 때 필요한 작동 전압은 5 V 내외이다. PVDF를 부착하였을 때에 비하여 강성이 큰 PZT를 표면에 부착하였으므로 구조물의 고유 진동수가 증대되어 시간 응답이 빠르게 변화함을 볼 수 있으며, 이로 인하여 끝단 변위도 빠르게 감소되고 있다. 또한 식 (27)에서 보듯이 압전 작동기의 작동력은 압전 재료의 압전 계수인 e 값에 비례하는데, PZT가 PVDF에 비하여 327.6배 크기 때문에 작은 작동 전압에서도 작동력이 충분히 발생한 것으로 보인다.

각 경우를 실제 구조물로 제작하고자할 때 각각의 장단점이 있다. PVDF는 크기를 충분히 크게 할 수 있으며 곡률을 가진 셀 구조물에 부착하는 것이 용이하지만 진동 제어 효과를 보기 위하여 필요한 작동 전압이 너무 크다. 반면에 PZT는 작동 전압이 낮아도 되는 장점이 있지만, 특정 곡률을 갖는 형상을 제작하기 위하여 주문 제작을 하여야 하므로 시간과 비용이 매우 많이 든다. 이를 고려하여 PVDF를 부착되 구조물의 길이를 크게 하면 같은 작동력으로 큰 제어 효과를 볼 수 있으리라 기대된다.

5. 결 론

셀형 박판 구조물에 부착된 압전 감지기와 작동기를 해석하기 위한 압전 셀 요소를 개발하였다. 사용된 셀 요소는 4절점 요소이며, 가정 변형을 정식화와 버블 함수 기법을 사용하여 셀 요소가 갖는 잠김 문제를 배제하였다.

가장 널리 사용되는 압전 Bimorph 보 예제를 해석하여 프로그램의 타당성을 검증하였다. 구조물로서의 보에 변형, 감지기 및 작동기의 적정성을 검증하였다. 기존 연구 결과와 잘 일치하면서 자유도가 작은 효율적인 압전 셀 요소가 개발되었다.

셀형 박판 구조물에 부착된 압전 감지기와 작동기를 이용하여 진동을 제어하는 예제에 대한 해석을 수행하였다. 수치적으로 압전 감지기/작동기를 이용하여 한 변이 고정된 셀의 자유단 진동을 효과적으로 제어할 수 있었다. 하지만, 셀은 구조적으로 굽힘 강성이 크고, 형상이 곡률을 갖기 때문에 실제적으로

적용할 때는 평판의 경우보다 기술적인 어려움이 있을 것으로 예측되었다. 크기나 곡률에 대한 제약이 없는 PVDF는 충분한 작동력을 발생시키기 위하여 높은 작동 전압을 필요로 하며, 작동력이 큰 PZT는 곡률을 가진 형상을 제작하는데 어려움이 있다.

향후 본 논문에서 개발한 유한요소 해석 프로그램을 활용하여 충분히 검토한 후, 압전 감지기/작동기를 이용한 셀 구조물의 진동 제어에 관련한 실험적 검증을 수행할 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) Hwang, W. S. and Park, H. C., 1993, "Finite Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators," AIAA Journal, Vol. 31, No. 5, pp. 930~937.
- (4) Tzou, H. S. and Tseng, C. I., 1991, "Distributed Vibration Control and Identification of Coupled Elastic/Piezoelectric Systems : Finite Element Formulation and Applications," Mechanical System and Signal Processing, Vol. 5, No. 3, pp. 215~231.
- (5) 강영규, 구근희, 박현철, 2001, "압전세라믹을 이용한 지능 복합적층판의 강제진동의 능동제어," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 6 호, pp. 193~199.
- (6) 황우석, 오진택, 박현철, 2001, "압전 감지기/작동기를 포함하는 셀 요소의 개발," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 225~228.
- (7) Cho, C., 1996, An Improved Assumed Strain Shell Element Formulation Including Bubble Function Displacement, PhD Thesis, University of Maryland, U.S.A.