

MFC 작동기를 이용한 스마트 Hull 구조물의 능동 진동 제어

Active Vibration Control of Smart Hull Structure Using MFC Actuators

손정우*·김흥수**·최승복†

Jung Woo Sohn, Heung Soo Kim and Seung Bok Choi

Key Words : MFC Actuator(MFC 작동기), Vibration Control(진동 제어), Finite Element Modeling(유한요소모델링), Modal Analysis(모드 해석), Smart Structures(지능 구조물)

ABSTRACT

Active vibration control of smart hull structure using Macro Fiber Composite (MFC) actuator is performed. Finite element modeling is used to obtain governing equations of motion and boundary effects of end-capped smart hull structure. Equivalent interdigitated electrode model is developed to obtain piezoelectric couplings of MFC actuator. Modal analysis is conducted to investigate the dynamic characteristics of the hull structure, and compared to the results of experimental investigation. MFC actuators are attached where the maximum control performance can be obtained. Active controller based on Linear Quadratic Gaussian (LQG) theory is designed to suppress vibration of smart hull structure. It is observed that closed loop damping can be improved with suitable weighting factors in the developed LQG controller and structural vibration is controlled effectively.

1. 서 론

최근까지 구조물의 진동 제어나, 소음 감소와 같은 구조물의 성능 향상을 위한 지능 구조물에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 지능 구조물에 응용되는 지능 재료에는 전기 유변 유체, 자기 유변 유체, 형상기억합금 등이 있으며, 특히 압전 효과와 역압전 효과로 감지기와 작동기로 모두 사용될 수 있는 압전 재료에 대한 연구가 많이 이루어졌다. Crawley 와 de Luis 등은 유도 변형을 작동 방법에 대한 연구로 이 분야에 선구적인 업적을 남겼다.⁽¹⁾ 그 후로 이러한 작동 방법을 이용하여 구조체의 성능 향상을 위한 많은 연구가 계속 되어 왔다.⁽²⁾ 국내에서도 압전 재료를 이용한 구조물의 능동 진동/소음 제어에 대한 연구가 지금까지 많이 진행되고 있다.⁽³⁻⁷⁾ 그러나 대부분의 연구들은 빔 또는 평판 형태의 단순한 구조물에 대한 연구로 국한되어 있다. Tzou 등은 모달 압전 작동기를 이용한 셸 구조물의 제어 기법에 대한 연구를 수행하였다.⁽⁸⁾ Kim 등은 부분적으로 적용된 압전 작동기를 이용하여 단순 지지된 원형 구조물의 진동 제어에 대한 성능을 연구하였다.⁽⁹⁾ 유한요소 모델링 기법을 사용하여 운동방정식을 유도하였고, 구조물의 댐핑 성능 향상을 위하여 LQG 제어를 설계하였다. 반면 Kim 등은 압전 세라믹 작동

기가 부착된 평판 구조물의 능동 소음 제어를 위하여 강건제어기인 H_{∞} 제어를 설계하였다.⁽¹⁰⁾ 이러한 압전 재료의 응용은 주로 압전 세라믹 패치를 사용하였으나, 세라믹 패치는 취성이 매우 커서 깨지기 쉽고, 곡면 형상을 가지는 구조물에는 사용이 제한되는 단점이 있다. 이에 최근 미국 NASA Langley 연구소에서 Macro Fiber Composite (MFC) 작동기를 개발하였다.⁽¹¹⁻¹³⁾ MFC 작동기는 압전 세라믹 fiber 를 기초로 하여 유연하고, 곡면 형상의 구조물에 응용이 가능하다. 또한 맞물림 전극 방식을 사용하여 in-plane 방향의 poling 을 가능하게 함으로써, d_{31} 대신 두 배 정도 큰 값을 갖는 d_{33} 상수를 사용할 수 있어, 큰 작동 효율을 낼 수 있다. 또한 작동기를 적용하는 방향에 따라 작동 변형률이 달라지는 방향성을 가지고 있다. Azzouz 등은⁽¹⁴⁾ MFC 작동기의 유한요소 모델링에 대한 연구를 수행하였으며, Sodano 등은 MFC 작동기를 구조물의 진동 제어에 응용하는 것에 대한 연구를 수행하였다.⁽¹⁵⁾

본 연구에서는 표면에 MFC 작동기가 부착된 양 끝이 단혀진 hull 구조물의 진동 제어에 관한 연구를 수행하였다. MFC 작동기의 등가 전기장 모델을 개발하여 모델링에 적용하였고, 유한요소 모델링을 이용하여 구조물의 운동방정식을 유도하였다. 구조물의 동특성을 유한요소 해석과 실험을 통하여 관찰하고, 유한요소 모델로부터 구조물의 상태 방정식을 유도하였으며, 이를 바탕으로 효과적인 진동 제어를 위한 LQG 제어를 설계하였다. 성능 지수를 최소화하는 적절한 가중치를 선택하여 최적의 제어 입력을 결정하였으며, 이로부터 우수한 진동 제어 성능을 확인하였다.

† 인하대학교 기계공학과
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과

2. MFC 등가 전기장 모델

MFC 작동기의 개념도를 Fig. 1 에 나타내었다. Fig. 1 에 나타난 바와 같이 MFC 작동기는 사각형의 압전 세라믹 fiber 를 정렬하고, 맞물림 전극 (interdigitated electrode)을 사용하였으며, fiber 와 fiber 사이, fiber 와 전극 사이에는 에폭시를 삽입하여 서로 접착하는 것과 동시에 fiber 를 보호할 수 있도록 하였다. 맞물림 전극에 의한 전기장의 분포를 Fig. 2 에 나타내었다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 양극과 음극이 번갈아 형성되므로, 일정한 전기장이 형성되는 부분과 전기장이 없는 부분, 중간 부분의 세 영역이 발생하게 된다. 실제 MFC 작동기의 fiber 와 전극의 형상은 Fig. 3(a)와 같이 구성되어 있으나, MFC 작동기의 간단한 모델링을 위해서 Fig. 3(b)와 같이 fiber 의 길이 방향으로 일정한 전기장이 형성된다고 가정하는 등가 전기장

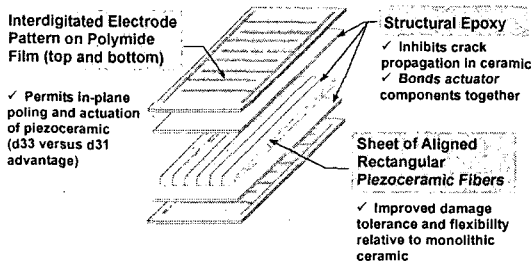


Fig. 1 Schematic diagram of macro fiber composite actuator⁽¹¹⁾

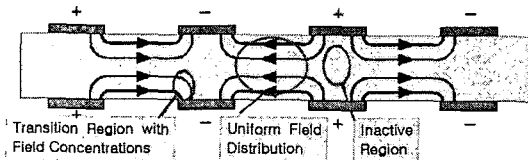


Fig. 2 Electric field distribution for interdigitated electrode⁽¹⁶⁾

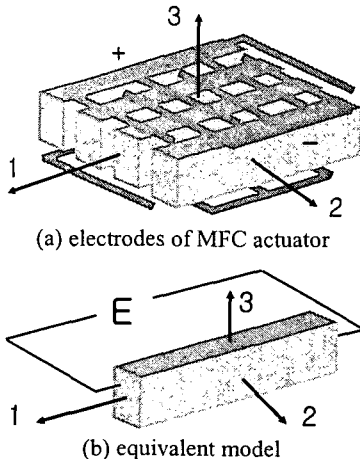


Fig. 3 Equivalent MFC interdigitated electrode model

모델(equivalent interdigitated electrode model)을 제안하였다. 제안된 등가 전기장 모델을 ANSYS 를 이용하여 단위전기장에 대한 MFC 작동기의 자유 변형률(free-strain)을 구한 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 자유 변형률은 작동기에 특별한 구속이 없는 경우에 나타나는 변형률로서 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 균일한 분포를 가지며, 0.74 $\mu\text{strain/V}$ 의 값을 가진다. 이는 제조사(Smart-Material)에서 제시한 0.75 $\mu\text{strain/V}$ 와 1.3%의 차이를 보이며, 제안된 등가 전기장 모델이 MFC 작동 변형률을 잘 예측함을 확인할 수 있다.⁽¹⁷⁾

3. 유한요소 모델링

본 연구에서는 Fig. 5 와 같이 표면에 MFC 작동기가 부착된 양 끝이 닫혀있는 hull 구조물을 고려하였다. 구조체와 MFC 작동기는 완전히 붙어있는 것으로 가정하였다. 압전 재료의 선형 구성방정식은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & e \\ e & -\epsilon^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S \\ -E \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 T 는 응력벡터, S 는 변형률 벡터이다. E 는 전기장을 나타내고, D 는 전기적 변위를 나타낸다. 위 첨자는 압전 재료의 경계 조건을 나타내는 것이고, 아래 첨자 t 는 전치행렬을 나타낸다. 식 (1)에서 사용된 재료 상수는 기계적, 전기적으로 연성된 구조적 특성을 나타내기 위해 사용되었다. c^E 행렬은 일정한 전기장 하에서의 기계적

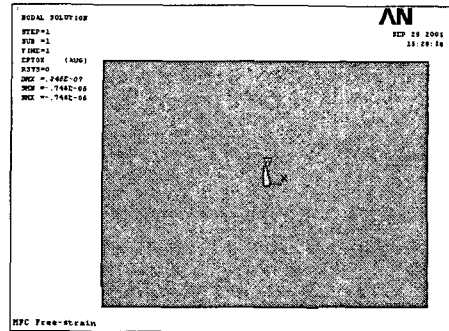


Fig. 4 Free-strain of MFC actuator

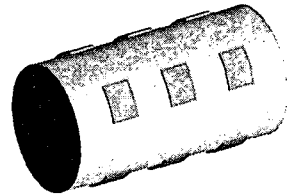


Fig. 5 Schematic of the end-capped hull structure with surface bonded MFC actuators

강성, e 행렬은 압전 상수, ϵ^r 행렬은 일정한 변형을 하에서의 유전율 상수를 나타낸다. 스마트 hull 구조물의 기하학적 구조와 경계 조건의 모델링을 위해서 유한요소모델링 기법이 사용되었다. 변분법과 유한요소 이산법을 적용한 후, 연성된 유한요소 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_d \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_d \\ \boldsymbol{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{\phi u} & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_d \\ \boldsymbol{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_u \\ \mathbf{F}_\phi \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{u}_d 는 노드 변위, $\boldsymbol{\phi}$ 는 전기적 포텐셜 벡터이다. \mathbf{M} 은 구조체의 질량행렬, $\bar{\mathbf{C}}$ 행렬은 댐핑행렬, \mathbf{K}_{uu} 는 강성행렬을 나타낸다. $\mathbf{K}_{u\phi}$ 와 $\mathbf{K}_{\phi u}$ 는 압전-기계 연성에 의한 연성 강성행렬이다. 이 행렬은 입력 전압이나 기계적 변형에 의해 발생하는 전기적 신호에 따라 압전 재료가 작동기나 감지기로 사용되게 한다. $\mathbf{K}_{\phi\phi}$ 는 전기장에 의한 강성행렬이다. 댐핑행렬 $\bar{\mathbf{C}}$ 는 질량과 강성에 비례하는 값으로 정의를 하였다. 벡터 \mathbf{F}_u 는 기계적인 힘 벡터이고, \mathbf{F}_ϕ 는 전기장의 힘 벡터이다. 운동방정식은 노드 변위만을 사용하여 축소 모델 형태로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_d + \bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{K}\mathbf{u}_d = \mathbf{F} \quad (3)$$

여기서

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_{uu} - \mathbf{K}_{u\phi}\mathbf{K}_{\phi\phi}^{-1}\mathbf{K}_{\phi u}, \quad \mathbf{F} = \mathbf{F}_u - \mathbf{K}_{u\phi}\mathbf{K}_{\phi\phi}^{-1}\mathbf{F}_\phi \quad (4)$$

이다.

식 (3)과 같이 축소된 운동방정식은 각각의 노드 변위가 서로 연성되어 있다. 하지만, 효율적인 제어를 설계하기 위해서는 비연성 운동방정식이 필요한데, 이를 위해 먼저 모드 해석을 수행하고, 얻어진 모달 행렬을 사용하여 전역 변위 벡터 \mathbf{u}_d 를 모달 변위 벡터 $\boldsymbol{\eta}$ 로 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\mathbf{u}_d = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\eta} \quad (5)$$

식 (5)를 식 (2)에 대입하고, 모달 축소를 하게 되면, 되먹임 제어 시스템을 위한 비연성된 운동방정식이 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$\hat{\mathbf{M}}\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\mathbf{C}}\dot{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\mathbf{K}}\boldsymbol{\eta} = \hat{\mathbf{F}} \quad (6)$$

여기서

$$\hat{\mathbf{M}} = \boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{M}\boldsymbol{\Phi}, \quad \hat{\mathbf{C}} = \boldsymbol{\Phi}^T\bar{\mathbf{C}}\boldsymbol{\Phi}, \quad \hat{\mathbf{K}} = \boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{K}\boldsymbol{\Phi}, \quad \hat{\mathbf{F}} = \boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{F} \quad (7)$$

이다.

$\hat{\mathbf{M}}$, $\hat{\mathbf{C}}$, $\hat{\mathbf{K}}$ 는 각각 모달 질량행렬, 모달 댐핑행렬, 모달 강성행렬이다. 이렇게 얻어진 모달 운동방정식으로부터 다음과 같은 상태공간 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (8)$$

여기서

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\mathbf{K}} & -\hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\mathbf{C}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\mathbf{F}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

이다.

제안된 스마트 hull 구조물의 고유진동수와 모드 형상은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 구하였다.

4. 제어기 설계

일반적으로 LQR 제어 기법에서 가정하듯, 시스템의 모든 상태를 측정하는 것은 불가능하다. 만일 이것이 가능하다 할 지라도, 측정값은 측정 소음에 의해 정확하지 않게 된다. 따라서, 본 논문에서는 MFC 작동기를 이용한 스마트 hull 구조물의 진동 제어를 위해서 LQG 제어 기법을 적용하였다. 외란과 측정 잡음을 고려한 LQG 이론을 사용하여 상태공간 운동방정식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t), \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \quad (10)$$

여기서 $\mathbf{x}(t)$ 는 상태 변수 벡터, $\mathbf{u}(t)$ 는 입력 벡터, $\mathbf{y}(t)$ 는 출력 벡터이고 \mathbf{A} 는 시스템 행렬, \mathbf{B} 입력 행렬, \mathbf{C} 는 출력 행렬이다. 외란 $\mathbf{w}(t)$ 와 측정잡음 $\mathbf{v}(t)$ 는 모두 변동없는 영평균을 가지는 Gaussian 백색 잡음으로 가정하고, 다음과 같은 공분산을 가진다.

$$\begin{aligned} E\{\mathbf{w}(t)\mathbf{w}^T(l)\} &= \mathbf{W}\delta(l-t), \\ E\{\mathbf{v}(t)\mathbf{v}^T(l)\} &= \mathbf{V}\delta(l-t), \quad E\{\mathbf{w}(t)\mathbf{v}^T(l)\} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $E[\bullet]$ 는 기대치, δ 는 Kronecker delta 함수를 나타내며, \mathbf{W} 와 \mathbf{V} 는 외란과 측정 잡음의 세기를 나타내는 양한정 행렬이다.

LQG 제어기는 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{L}[\mathbf{y}(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t)] \\ \mathbf{u}(t) &= -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}(t) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $\hat{\mathbf{x}}$ 은 예측된 상태를 나타내며, \mathbf{K} 는 제어 이득 행렬, \mathbf{L} 은 Kalman filter의 이득 행렬이다. 제어 입력은 다음과 같이 표현되는 성능 지수를 최소화하는 값으로 결정되게 된다.

$$J = E \sum_{t=1}^{\infty} [\mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)] \quad (13)$$

여기서 가중치 행렬 \mathbf{Q} 와 \mathbf{R} 은 양반한정이다. 최적 되먹임 제어 이득 행렬 \mathbf{K} 와 Kalman filter 이득 행렬 \mathbf{L} 은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= (\mathbf{R} + \mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{B})\mathbf{B}^{-T}\mathbf{P}\mathbf{A} \\ \mathbf{L} &= \mathbf{A}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{C}^T(\mathbf{C}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{C}^T + \mathbf{V})^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 \mathbf{P} 와 $\boldsymbol{\Sigma}$ 는 Riccati 방정식의 양한정 해이다.

5. 수치해석 예제

본 연구에서는 공기 중의 hull 구조물에 대한 능동 진동 제어 성능을 고찰하였다. 본 연구에서 고려된 양끝이 닫힌 hull 구조물에 12 개의 MFC 작동기가 부착된 모델을 Fig. 6 에 나타내었다. 제안된 알루미늄 hull 구조물은 공간상에서 자유경계 조건을 가진다고 가정하였으며, 길이는 500mm, 지름은 250mm, 두께는 2mm 이며, 양 cap 의 두께는 5mm 이다. MFC 작동기는 주어진 기하학적 형상에서 최고의 제어 성능을 얻을 수 있는 곳의 표면에 부착되었으며, 각 작동기는 길이가 60mm, 폭이 70mm, 두께는 1mm 이다. 사용된 알루미늄과 MFC 작동기의 재료 특성을 Table 1 에 나타내었다. 유한요소해석을 위한 모델을 Fig. 7 에 나타내었다. hull 구조물에는 4 절점 shell 요소(SHELL63)를 사용하였으며, MFC 작동기에는 8 절점 solid 요소(SOLID5)를 사용하였다. 1504 개의 shell 요소와 108 개의 solid 요소가 사용되었다.

5.1 구조물의 동적 특성

제안된 시스템의 동적 특성을 파악하기 위한 모드 해석을 수행하였다. 스마트 hull 구조물의 기본적인 모드 형상을 Fig. 8 에 나타내었다. 최대 변형은 MFC 작동기가 부착된 곳에서 일어났다. 이것은 고려된 형상에서 최고의 진동 제어 성능을 얻을 수 있다는 것을 뜻하는 것이다. MFC 작동기가 부착되지 않은 hull 구조물의 모드 형상도 Fig. 8 과 동일하다. MFC 작동기가 부착된 스마트 hull 구조물의 고유진동수가 작동기가 부착되지 않은 hull 구조물의 고유진동수보다 더 작게 나타났다. 이는 압전 재료의 높은 질량 밀도와 식 (4)에 나타난 바와 같이 압전 재료에 의한 연성 강성이 작아짐에 따라 발생한 것이다. MFC 작동기의 유무에 따른 hull 구조물의 고유진동수를 Table 2 에 비교하여 나타내었다. MFC 작동기의 부착에 따라 약 15%의 고유진동수 감소가 나타났다. 실제 구조물을 제작하여 Fig. 9 와 같이 실험 장치를 구성하고

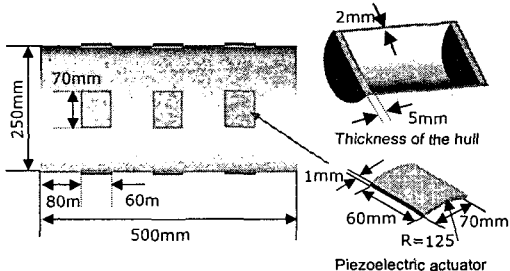


Fig. 6 Geometry of the end-capped hull structure with surface bonded MFC actuators

Table 1. Material properties of the MFC and Aluminum

MFC : Smart Materials (poling direction : 1)			
E_1	30.34 GPa	E_3	15.86 GPa
ν_{12}	0.31	ν_{21}	0.16
G_{12}	5.52 GPa	ρ	7750 kg/m ³
d_{31}	-210 pC/N	d_{33}	460 pC/N
$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	830 C/m ²	$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	916 C/m ²
Aluminum Plate			
Young's modulus	6.8e10 N/m ²	Density	2698 kg/m ³
Poisson ratio	0.32		

Table 2. Natural frequencies of the end-capped hull structure with and without MFC actuator

Mode	w/o MFC [Hz]	with MFC [Hz]
(1, 3)	458.4	390.9
(1, 4)	530.0	452.8
(1, 2)	719.4	596.6
(1, 5)	774.1	662.2
(2, 4)	973.2	823.3
(2, 5)	992.2	846.8

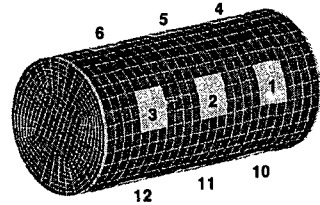


Fig. 7 Finite element mesh configuration

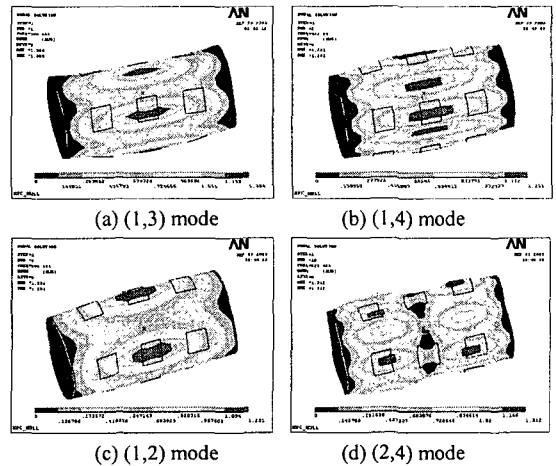


Fig. 8 Fundamental mode shapes of hull structure with surface-bonded MFC actuators

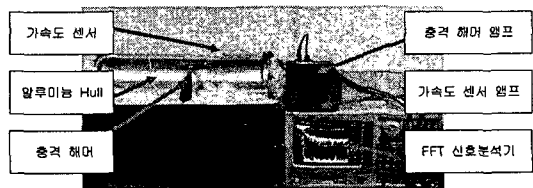


Fig. 9 Experimental setup for modal test

Table 3. Natural frequencies of the end-capped hull structure by FEA and experiment

Mode	FEA [Hz]	Experiment [Hz]
(1, 3)	458.4	482
(1, 4)	530.0	582
(1, 2)	719.4	706
(1, 5)	774.1	850
(2, 4)	973.2	1010
(2, 5)	992.2	1074

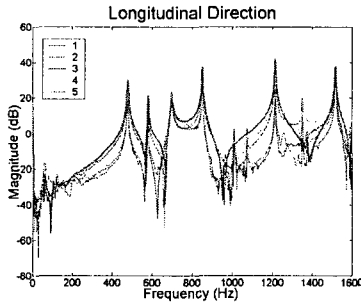
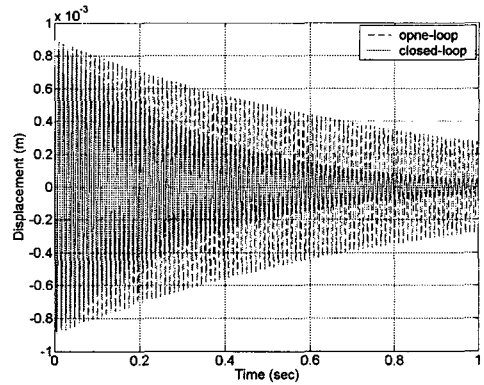


Fig. 10 System response of smart hull structure along length direction

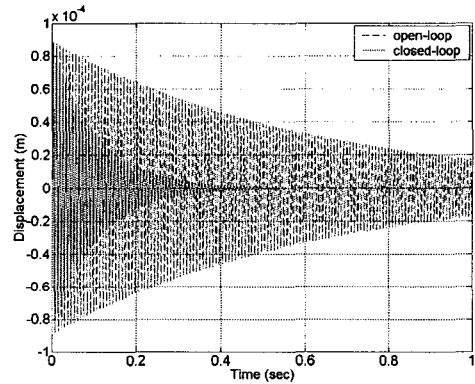
모드 실험을 수행하였다. 구조물의 길이 방향으로 5 개 지점에서 측정된 데이터를 Fig. 10 에 나타내었으며 고유진동수는 정확히 일치하는 것을 확인하였다. 유한요소해석을 통한 구조물의 고유진동수와 실험을 통해 측정된 고유진동수를 비교하여 Table 3 에 나타내었다. 약 5%의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 실험을 위해 제작한 hull 구조물의 end-cap 을 설치하기 위한 플랜지를 유한요소 모델에서 고려하지 않았기 때문에 발생한 것이다.

5.2 능동 진동 제어

모드 해석을 통해 얻어진 상태 공간 운동방정식을 바탕으로 진동 제어를 위한 LQG 제어기를 설계 하였다. 식 (13)에서의 가중치 행렬의 값은 $diag(Q) = 5 \times 10^6$, $diag(R) = 1$ 로 설정하였다. 또한 모든 모드에 대해서 0.2%의 비례 댐핑을 가정하였다. 본 연구에서는 기본적인 6 개의 모드만 고려하였다. 초기 조건 (1,2) 모드와 (2,4) 모드의 open-loop 과도 응답과 closed-loop 과도 응답을 Fig. 11 에 나타내었다. LQG 제어기의 적절한 가중치를 선정함으로써 높은 closed-loop 댐핑을 얻을 수 있었다. 초기 조건이 (1,2) 모드와 (2,4) 모드에 대해서 각 작동기의 제어 입력 전압을 Fig. 12 에 나타내었다. (2,4) 모드의 초기 조건에서는 Fig. 8(d)에 나타난 바와 같이 hull 구조물의 길이 방향으로 대칭적인 모드 형상을 가짐으로써, 가운데 위치한 작동기들(작동기 2,5,8,11)은 작동하지 않은 것을 볼 수 있다. 그러나 (1,2) 모드의 경우에는 구조체



(a) (1,2) mode



(b) (2,4) mode

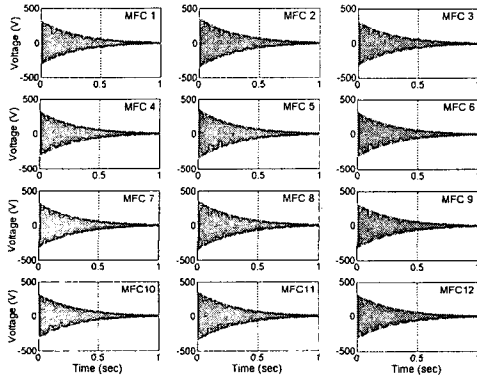
Fig. 11 Open-loop and closed-loop transient response under (1,2) mode and (2,4) mode motion

의 큰 변형량에 따라 큰 작동력을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. (1,2) 모드에서는 길이 방향축에 대해 대칭적으로 위치한 작동기 (작동기 1,2,3 과 작동기 7,8,9)들은 같은 크기와 위상을 보이고 있다. 반면, 옆에 위치한 다른 작동기들(작동기 4,5,6 과 작동기 10,11,12)은 Fig. 8(c)에 나타난 바와 같이 반대 방향의 구조체 변형 때문에 크기는 같으나 반대 위상을 가지게 된다.

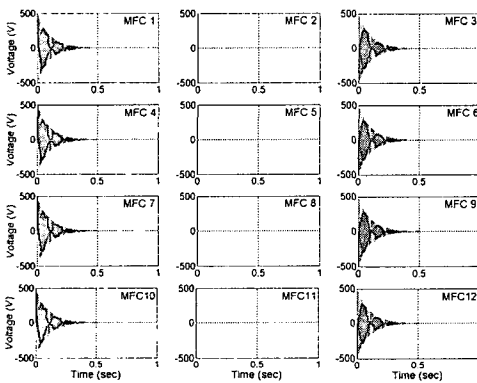
6. 결론

표면에 MFC 작동기가 부착되어 있고, 양끝이 단려있는 hull 구조물의 동적 특성을 분석하고 제어 성능을 고찰하였다. MFC 등가 전기장 모델을 도입하여 간단한 MFC 유한요소모델을 구성하였고, 단위 전기장에 대한 자유 변형률을 구해 등가 전기장 모델의 타당성을 검증하였다. 제안된 hull 구조물의 운동방정식은 상용 해석프로그램인 ANSYS 를 이용하여 구하였다. 또한 모드 특성 실험을 통해 유한요소 해석으로 얻은 모드 특성을

참고문헌



(a) (1,2) mode



(b) (2,4) mode

Fig. 12 Voltage history of each actuator

검증하였다. MFC 작동기의 유무에 따라 10% 정도의 고유진동수 감소를 확인할 수 있었다. hull 구조물의 능동 진동 제어를 위하여 LQG 제어 알고리즘을 적용하였다. 적절한 제어 입력을 인가함으로써 효과적인 진동 제어 성능을 확인할 수 있었다. MFC 작동기는 방향성을 가지고 있으므로, 작동기의 부착 위치 선정과 작동기의 방향에 따른 진동 제어 성능 변화에 대한 연구가 계속될 예정이다.

후 기

본 연구는 국방부가 지정한 UVRC(수중운동체특화센터)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

(1) Crawley, E. F., and de Luis, J., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures", *AIAA Journal*, Vol. 25, pp. 1373~1385.

(2) Chopra, I., 2002, "Review of State-of-Art of Smart Structures and Integrated Systems", *AIAA Journal*, Vol. 40, pp.2145~2187.

(3) 신호철, 최승복, 1996, "압전작동기를 이용한 매우 유연한 로봇 팔의 진동 제어", *한국소음진동공학회지*, 제 6 권, 제 2 호, pp. 187~196.

(4) 고범진, 이종근, 김재환, 최승복, 정재천, 1998, "실내 소음제어를 위한 압전지능구조물의 최적 설계", *한국소음진동공학회지*, 제 8 권, 제 3 호, pp. 428~434.

(5) 김재환, 1996, "압전 지능구조물의 원리와 소음제어에의 응용", *한국소음진동공학회지*, 제 6 권, 제 3 호, pp. 267~273.

(6) 광문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", *한국소음진동공학회지*, 제 5 권, 제 3 호, pp. 292~302.

(7) 김홍수, 2005, "압전재료를 이용한 지능구조물의 최근연구동향", *소음진동*, 제 15 권, 제 1 호, pp. 33~42.

(8) Tzou, H. S., Zhong J. P., and Hollkamp, J. J., 1994, "Spatially Distributed Orthogonal Piezoelectric Shell Actuators: Theory and Applications", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 177, pp.363~378.

(9) Kim, H. S., Chattopadhyay, A., and Nam, C., 2002, "Implementation of a Coupled Thermo-Piezoelectric-Mechanical Model in the LQG Controller Design for Smart Composite Shell", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, pp.713~724.

(10) Kim, J. H., Choi, S. B., Cheong, C. C., Han, S. S., and Lee, J. K., 1999, "H ∞ Control of Structure-borne Noise of a Plate Featuring Piezoceramic Actuators", *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, pp. 1~12.

(11) Wilkie, W. K., Bryant, R. G., High, J. W., Fox, R. L., Hellbaum, R. F., Jalink, A., Little, B. D. and Mirick, P. H., 2000. "Low-cost Piezocomposite actuator for structural control applications", *Proceedings of Seventh SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, CA, March 5-9, 2000, pp.329~334.

(12) Wilkie, W., High, J. and Bockman, J., 2002, "Reliability Testing of NASA Piezocomposite Actuators", *ACTUATOR 2002*, pp.270~273.

(13) Williams, R. B., Schultz, M. R., Hyer, M. W., Inman, D. J. and Wilkie W. K., 2004, "Nonlinear Tensile and Shear Behavior of Macro Fiber Composite Actuators", *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, No, 10, pp. 855~870.

(14) Wilkie, W., High, J. and Bockman, J., 2002, "Reliability Testing of NASA Piezocomposite Actuators", *ACTUATOR 2002*, pp.270~273.

(15) Williams, R. B., Schultz, M. R., Hyer, M. W., Inman, D. J. and Wilkie W. K., 2004, "Nonlinear Tensile and Shear Behavior of Macro Fiber Composite Actuators", *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, No, 10, pp. 855~870.

(16) Williams, R. B., 2004, "Nonlinear Mechanical and Actuation Characterization of Piezoceramic Fiber Composites", Ph.D Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University

(17) <http://www.smart-material.com>