

스마트 Hull 구조물의 동적 모델링 및 능동 진동 제어 Dynamic Modeling and Vibration Control of Smart Hull Structure

손정우*·김흥수**·최승복†

Jung Woo Sohn, Heung Soo Kim and Seung Bok Choi

Key Words : Smart Hull Structure(지능형 헬 구조물), Piezoelectric Actuator(압전 작동기), Finite Element Modeling(유한요소 모델링), Modal Analysis(모드 해석), Vibration Control(진동 제어), Non-resonance Vibration(비공진 진동)

ABSTRACT

Dynamic modeling and active vibration control of smart hull structure using Macro Fiber Composite (MFC) actuator is conducted. Finite element modeling is used to obtain equations of motion and boundary effects of smart hull structure. Modal analysis is carried out to investigate the dynamic characteristics of the smart hull structure, and compared to the results of experimental investigation. Negative velocity feedback control algorithm is employed to investigate active damping of hull structure. It is observed that non-resonant vibration of hull structure is suppressed effectively by the MFC actuators.

1. 서론

구조물의 성능 향상을 위하여 다양한 지능 재료를 적용한 지능 구조물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. ER 유체, MR 유체, 형상기억합금 등이 대표적인 지능 재료이며, 특히 압전 재료는 작동기와 감지기 모두로 사용될 수 있는 장점이 있어, 이를 구조물에 적용하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 구조물의 성능을 현저히 저하 시키거나 구조물의 파괴까지 유발할 수 있는 진동의 효율적인 제어를 위하여 압전 재료를 적용하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. Crawley와 de Luis 등은 유도 변형을 작동 방법에 대한 연구로 이 분야에 선구적인 업적을 남겼다.⁽¹⁾ 그 후로 이러한 작동 방법을 이용한 지능 구조물에 대한 연구가 국내외에서 활발하게 이루어져 왔으나, 빔 또는 평판 형태의 단순한 구조물에 대한 연구가 주를 이루고 있다.⁽²⁻⁵⁾ 최근에는 원형 또는 hull 구조물 등의 복잡한 구조물에 압전 재료를 적용하는 연구가 다양하게 진행되고 있는데, Kim 등은 단순 지지된 원형 구조물의 진동 제어를 위하여 압전 작동기와 LQG 제어 알고리즘을 적용하였다.⁽⁶⁾ 이러한 연구에는 주로 압전 세라믹 패치가 적용되었으나, 압전 세라믹은 깨어지기 쉽고, 곡면 형상의 구조물에는 사용이 제한되는 단점이 있다. 이에 최근 NASA Langley 연구소에서 Macro

Fiber Composite (MFC) 작동기를 개발하였다.⁽⁷⁻⁹⁾ MFC 작동기는 압전 세라믹 fiber를 기초로 하여 유연하고, 곡면 형상의 구조물에 응용이 용이한 장점이 있으며, d_{33} 압전 상수를 사용하여 큰 작동 효율을 낼 수 있고, 작동기의 적용 방향에 따라 작동 변형률이 달라지는 방향성을 가지고 있다. Sonado 등은 MFC 작동기를 구조물의 진동 제어와 health monitoring에 적용하기 위한 연구를 수행하였다.⁽¹⁰⁾ 압전 재료를 이용한 지능 구조물의 능동 진동 제어에 관한 대부분의 연구는 구조물의 공진 영역에서의 진동을 감소시키는 데 초점을 둔다. 그러나 유체의 흐름에 의해 발생하는 구조물 진동의 경우 비공진 영역에서의 진동이 구조물에 심각한 피로를 유발할 수 있고, 잠수함과 같은 구조물의 경우 비공진 영역에서의 진동이 은밀성을 저해할 수 있으므로, 비공진 영역에서 발생하는 외부 가진 또는 외란에 의한 진동의 효과적인 제어를 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. Pasco 등은 비공진 영역에서의 미소 진동 제어를 위하여 압전 작동기를 적용하였고, Zhang 등은 Thunder를 이용하여 실린더의 비공진 영역에서의 진동을 제어하였다.^(11,12)

본 연구에서는 표면에 MFC 작동기가 부착된 hull 구조물의 동적 특성을 파악하고, 능동 진동 제어를 수행하였다. MFC 작동기의 등가 전기장 모델을 적용한 전체 구조물의 유한요소 모델링을 통하여 운동방정식을 유도하였다. 또한 유한요소 해석과 모달 실험을 통하여 구조물의 동적 특성을 관찰하였다. 비공진 영역에서의 외란에 대한 능동 진동 제어를 위하여 간단한 부귀환 제어 알고리즘을 적용하였으며, 효과적인 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. 유한요소 모델링

일반적인 압전 재료의 선형 구성 방정식은 다음과 같다.

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

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 강성, e 행렬은 압전 상수, ϵ^s 행렬은 일정한 변형률 하에서의 유전율 상수를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 MFC 작동기는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 압전 세라믹 fiber로 구성되어 있으며, fiber와 fiber 사이, fiber와 전극 사이에 에폭시를 사용하여 fiber를 보호할 수 있도록 하였다. MFC 작동기의 가장 큰 특징은 Fig. 1에서와 같이 맞물림 전극을 적용하여, 면내 방향으로 d_{33} 압전 상수를 사용하는 큰 작동력을 발생시킬 수 있다는 것이다. 이는 기존의 압전 세라믹 패치가 상대적으로 작은 값을 가지는 d_{31} 압전 상수를 사용하여 면내 방향의 작동력을 발생시키는 것을 보완할 수 있는 장점을 가진다. MFC 작동기의 유한요소 모델을 구성하는 것은 각각의 fiber와 전극을 모델링 하므로 많은 시간적 비용을 필요로 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 작동기의 성능을 정확하게 예측하면서, 간단한 형태를 가지는 등가 전기장 모델을 적용하였다.⁽¹³⁾ 등가 전기장 모델의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 3과 같이 MFC 작동기를 포함한 스프라이트 hull 구조물의 기하학적 구조와 경계 조건의 모델링을 위해서 유한요소 모델링을 수행하였다. 변분법과 유한요소 이산법을 적용한 후, 연성된 유한요소 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 u_d 는 노드 변위, ϕ 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 감지기

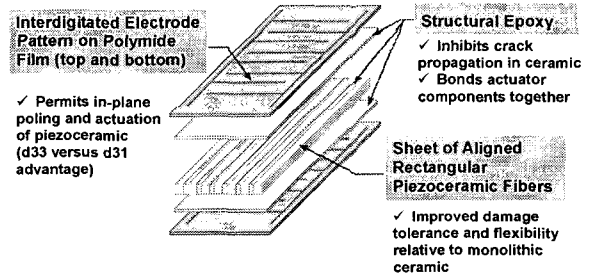


Fig. 1 Schematic diagram of macro fiber composite actuator⁽⁷⁾

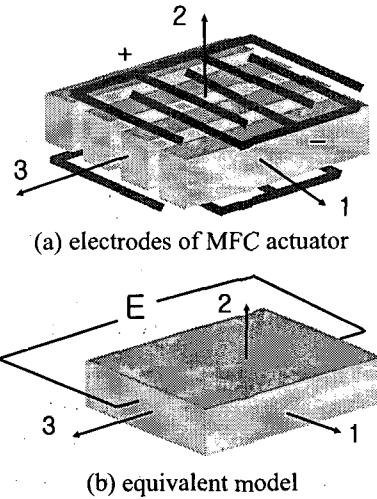


Fig. 2 Equivalent MFC interdigitated electrode model

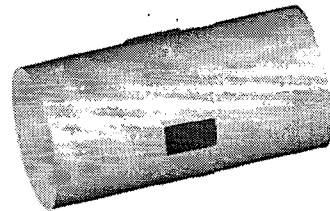


Fig. 3 Schematic of the end-capped hull structure with surface bonded MFC actuators

로 사용되게 한다. $\mathbf{K}_{u\phi}$ 는 전기장에 의한 강성 행렬이다. 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.

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

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 제어기를 설계하기 위해서는 비연성 운동방정식이 필요한데, 이를 위해 먼저 모드 해석을 수행하고

얻어진 모달 행렬을 사용하여 전역 변위 벡터 u_d 를 모달 변위 벡터 η 로 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$u_d = \Phi \eta \quad (5)$$

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

$$\hat{M}\ddot{\eta} + \hat{C}\dot{\eta} + \hat{K}\eta = \hat{F}_u - \hat{F}_\phi \quad (6)$$

여기서

$$\begin{aligned} \hat{M} &= \Phi^T M \Phi, \hat{C} = \Phi^T C \Phi, \hat{K} = \Phi^T K \Phi, \\ \hat{F}_u &= \Phi^T F_u, \hat{F}_\phi = \Phi^T K_{u\phi} K_{\phi\phi} F_\phi \end{aligned} \quad (7)$$

이다.

\hat{M} , \hat{C} , \hat{K} 는 각각 모달 질량행렬, 모달 댐핑행렬, 모달 강성행렬이다. 제안된 스마트 hull 구조물의 고유진동수와 모드 형상은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS 를 사용하여 구하였다.

3. 구조물의 동적 특성

본 연구에서는 Fig. 4 와 같은 hull 구조물의 공기중에서의 동적 특성을 유한요소해석과 실험을 통하여 고찰하였다. 제안된 구조물은 공기 중에서 자유경계조건을 가진다고 가정하였다. MFC 작동기는 hull 구조물의 길이 방향의 중간에 위치하며 원주 방향으로는 같은 간격으로 3 개가 부착되었다. Hull 구조물과 MFC 작동기는 완벽한 결합을 가진다고 가정하였으며, 사용된 알루미늄과 MFC 작동기의 재료 특성은 Table 1 에 나타내었다. 유한요소해석을 위한 모델을 Fig. 5 에 나타내었다. Hull 구조물에는 8 절점 solid 요소 (SOLID45)를 사용하였으며, MFC 작동기에는 8 절점 solid 요소 (SOLID5)를 사용하였다. 제안된 시스템의 동적 특성을 파악하기 위한 모드 해석을 수행하였다. 스마트 hull 구조물의 기본적인 모드 형상을 Fig. 6 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. 5 와 동일하다. MFC 작동기의 유무에 따른 hull 구조물의 고유진동수를 Table 2 에 비교하여 나타내었다. MFC 작동기의 부착에 따라 최대 5%의 고유진동수 감소가 나타났다. 이는 압전 재료의 높은 질량 밀도와 식 (4)에 나타난 바와 같이 압전 재료에 의한 연성 강성이 작아짐에 따라 발생한 것이다. 유한요소해석 결과의 타당성을 확인하기 위하여 Fig. 7 과 같이 실험 장

치를 구성하여 모드 실험을 수행하였다. Fig. 8 과 같이 구조물의 길이 방향으로 세 지점에서 측정하였으며, MFC 작동기가 있을 때의 측정 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 각 측정점에서의 고유진동수가 잘 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 9 에서 100Hz 이하에서 발생하는 고유 진동은 hull 구조물의 두께 방향 진동 특성이 아니라 양쪽 cap 에서 발생하는 모드로서, 본 연구에서는 고려하지 않았다. MFC 작동기의 유무에 따른 측정 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. 구조물의 고유진동수가 MFC 작동기가 있는 경우 조금씩 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 ANSYS 를 이용한 유한요소해석 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 유한요소해석 결과와 실험 결과를 비교하여 Table 3 에 나타내었으며, 최고 8%의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 실험을 위해 제작한 hull 구조물의 end-cap 을 설치하기 위한 플랜지를 유한요소 모델에서 고려하지 않았기 때문에 발생한 것이다.

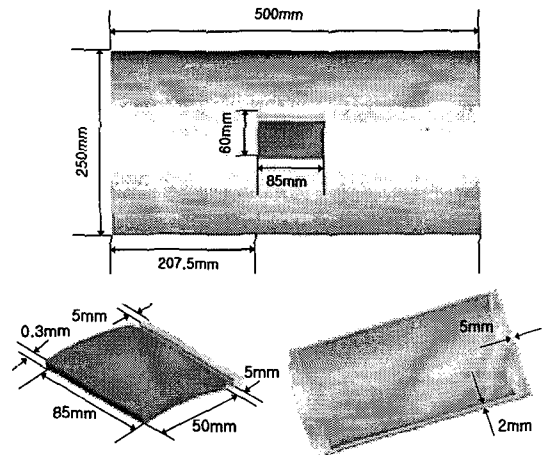


Fig. 4 Geometry of the end-capped hull structure with surface bonded MFC actuators

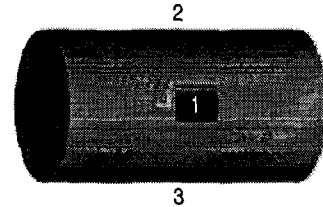


Fig. 5 Finite element mesh configuration

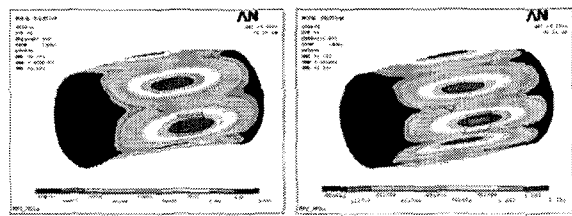


Fig. 6 Fundamental mode shapes of hull structure with surface-bonded MFC actuators

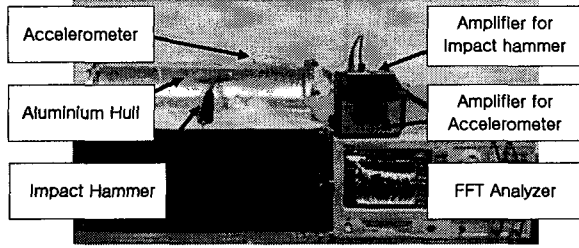


Fig. 7 Experimental setup for modal test

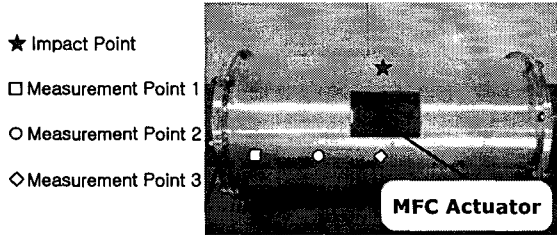


Fig. 8 Measurement and impact point for modal test

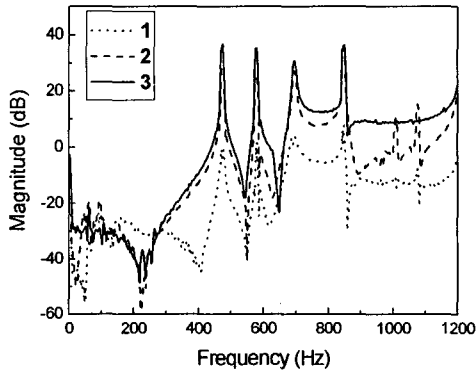


Fig. 9 Natural frequency of smart hull structure at 3 different measurement points

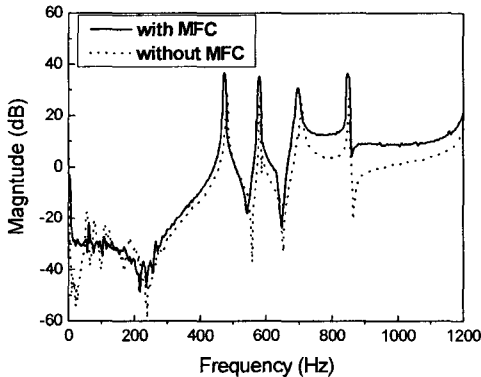


Fig. 10 Comparison of natural frequency with and without MFC actuators by experiment

4. 제어 성능 평가

구조물의 효과적인 진동 제어를 위하여 부귀환 제어 알고리즘을 적용하였다. 식 (6)에서 전기적 힘 벡터 \hat{F}_ϕ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{F}_\phi = K_{cv} V_a \quad (8)$$

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: FEA

Mode	w/o MFC [Hz]	with MFC [Hz]
(1, 3)	477	469
(1, 4)	541	535
(1, 2)	759	749
(1, 5)	787	781
(2, 4)	1010	1010

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

Mode	FEA [Hz]	Experiment [Hz]
(1, 3)	469	474
(1, 4)	535	578
(1, 2)	749	696
(1, 5)	781	848
(2, 4)	1010	1006

여기서 K_w 는 각각의 작동기에 단위 전압이 가해지는 경우 나타나는 전기연성 힘벡터의 모달축소 벡터이고, V_a 는 작동기에 가해지는 입력전압을 나타낸다. 직접 압전 효과로부터 다음과 같이 감지기 식을 유도할 수 있고, 등가전기장 모델에 의해 나타나는 감지기의 전기적 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$D_3 = e_{33} \epsilon_3 \quad (9)$$

감지기에 발생하는 전체 전하는 다음과 같이 감지기 각 노드에서 발생하는 전하의 합으로 표현할 수 있다.

$$q_s(t) = \sum_{i=1}^N \int_A D_3 dA \quad (10)$$

따라서 감지기 표면에서의 전류는 다음과 같이 표현된다.

$$i(t) = \frac{dq_s(t)}{dt} = K_w \dot{\eta} \quad (11)$$

여기서 K_w 는 각각의 모드 변형에서 감지기에 발생하는 전류를 나타내는 모달축소벡터이다. 압전 감지기에 발생하는 전류는 감지기 출력 전압으로 전환된다.

$$V_s = G_c i(t) = G_c K_w \dot{\eta} \quad (12)$$

여기서, G_c 는 감지기 전류를 출력 전압으로 변환

하는 이득이다. 구조물의 진동에 의해 발생한 감지기의 전압은 제어 알고리즘을 거쳐 다음과 같이 작동기의 입력 전압으로 귀환된다. 따라서 작동기의 입력 전압은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_a = -G_c G_i K_{sv} \dot{\eta} \quad (13)$$

여기서, G_c 는 귀환 제어 이득이다. 따라서, 전기적 힘 \hat{F}_ϕ 는 다음과 같이 제어력으로 고려될 수 있게 된다.

$$\hat{F}_\phi = K_{av} G_c G_i K_{sv} \dot{\eta} \quad (14)$$

이 때, 상수 값들을 다음과 같이 정의하게 되면,

$$C_v = -K_{av} G_c G_i K_{sv} \quad (15)$$

부귀환 제어 알고리즘을 고려한 전체 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$\hat{M} \ddot{\eta} + (\hat{C} + C_v) \dot{\eta} + \hat{K} \eta = \hat{F}_a - \hat{F}_{ext} \quad (16)$$

여기서, \hat{F}_{ext} 는 MFC 작동기 중 가진기로 사용된 것의 모달축소 힘벡터이다. 식 (16)에 나타난 바와 같이 C_v 는 압전 감지기와 작동기를 사용한 부귀환 제어의 능동 댐핑 항으로서 진동하는 전체 시스템의 댐핑 효과를 증가시키게 된다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제어 알고리즘을 적용한 구조물의 진동 제어 성능을 확인하였다. 일반적인 능동 진동 제어는 구조물의 공진 영역에서 진동을 감소시키는 것을 목적으로 한다. 그러나 본 연구에서는 비공진 영역에서 외란이나 임의 주파수의 가진이 발생할 때 이를 효과적으로 제어하기 위한 연구를 수행하였다. 잠수함과 같은 구조물의 경우 비공진 영역에서 발생하는 외란이나 엔진의 진동과 같은 가진으로 인해 은밀성을 저해할 수 있다. 시뮬레이션을 위해 구조물에 20Hz 의 조화 가진이 있는 것으로 가정하였다. 부귀환 제어 알고리즘을 적용하여 구조물의 진동 제어를 수행한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. 제어 이득을 증가시키에 따라 진동의 감소 폭이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

스마트 hull 구조물의 진동 제어를 위하여 Fig. 12 와 같이 실험 장치를 구성하였다. 표면에 부착된 3 개의 MFC 중 하나는 가진기로 사용하고, 나머지 2 개를 진동 제어를 위한 작동기로 사용하였다. 실험에서 사용한 MFC 작동기는 Fig. 12 에서 보는 바와 같이 작동기 부분과 감지기 부분이 함께 구성되어 있는 모델이어서, 구조물의 변위 측정은 MFC 감지기를 사용하였다. 컴퓨터를 통하여 20Hz 의 조화 가진을 발생시키고, 하나의 MFC 작동기를 이용하여 구조물에 진동을 발생시켰다. MFC 감지기를 통해 구조물의 진동을 감지하고,

제어 알고리즘을 적용하여 적절한 제어 입력을 두 개의 MFC 작동기에 인가하게 된다. 부귀환 제어 알고리즘을 적용한 진동 제어 실험 결과와 입력 전압을 Fig. 13 에 나타내었다. 0.5 초부터 제어 입력이 인가되고, 구조물의 진동이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 제어 이득을 증가시키에 따라, 감소하는 진동의 폭이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 Fig. 14 에 함께 나타내었다. 유한요소 모델을 적용한 컴퓨터 시뮬레이션이 정확하게 진동 제어 성능을 예측할 수 있었다. MFC 작동기와 부귀환 제어 알고리즘을 적용하여 비공진 영역에서도 효과적으로 구조물의 진동을 감소할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

MFC 작동기가 부착된 hull 구조물의 동적 특성을 파악하고, 진동 제어 성능을 확인하였다. 유한요소 모델을 사용하여 제안된 스마트 hull 구조물의 운동방정식을 도출하였다. 상용 해석 프로그램을 사용하여 모드 해석을 수행하고 구조물의 동적 특성을 파악하였으며, 실험을 통하여 해석 결과를 검증하였다. 스마트 hull 구조물의 진동 제어를 위하여 부귀환 제어 알고리즘을 적용하였으며, 비공진 영역에서도 효과적으로 구조물의 진동을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. MFC 작동기의 특성을 고려한 작동기의 부착 위치와 방향에 따른 진동 제어 성능 변화에 대한 연구와 함께 강건 제어 알고리즘을 적용한 제어 성능에 대한 연구가 계속 될 예정이다.

후 기

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

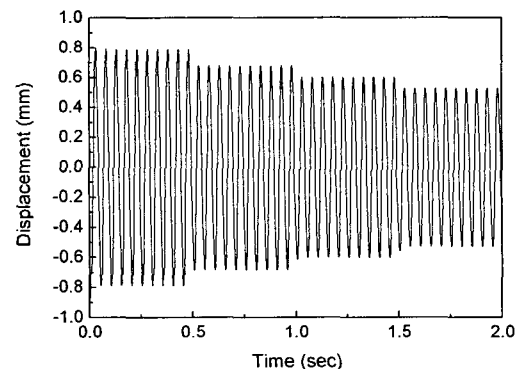


Fig. 11 Simulation result of negative velocity feedback control of structural vibration

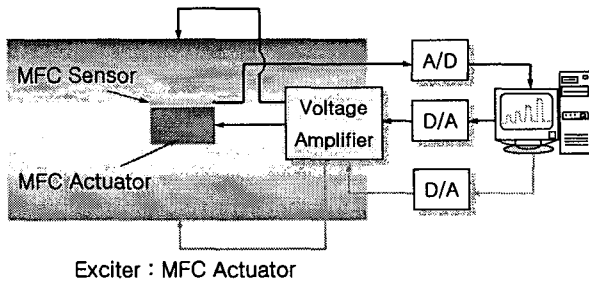


Fig. 12 Experimental setup for vibration control

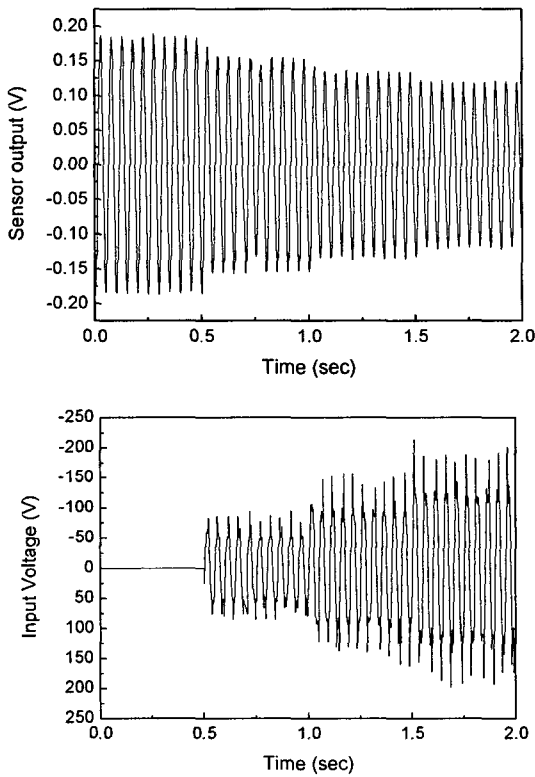


Fig. 13 Experimental results of negative velocity feedback control of structural vibration and input voltage history

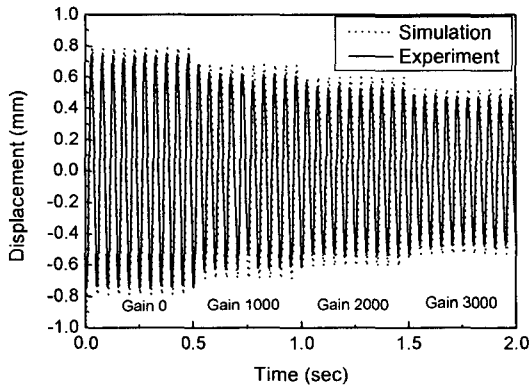


Fig. 14 Comparison of simulation and experimental results

참고문헌

- (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) 광문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", *한국소음진동공학회지*, 제 5 권, 제 3 호, pp. 292~302.
- (5) 김홍수, 2005, "압전재료를 이용한 지능구조물의 최근 연구동향", *소음진동*, 제 15 권, 제 1 호, pp. 33~42.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Wilkie, W., High, J. and Bockman, J., 2002, "Reliability Testing of NASA Piezocomposite Actuators", *ACTUATOR 2002*, pp.270~273.
- (9) 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.
- (10) Sodano, H. A., Park, G. and Inman, D. J., 2004, "An Investigation into the Performance of Macro-fiber Composites for Sensing and Structural Vibration Applications", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 18, pp.683~697.
- (11) Pasco, Y. and berry, A., 2006, "Consideration of Piezoelectric Actuator Nonlinearity in the Active isolation of Deterministic Vibration", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 289, pp.481~508.
- (12) Zhang, M. M. Cheng, L and Zhou Y, 2005, "Control of Vortex-induced Non-resonance Vibration Using Piezo-ceramic Actuators Embedded in a Structure", *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, pp.1217~1226.
- (13) 손정우, 김홍수, 최승복, 2005, "MFC 작동기를 이용한 스마트 hull 구조물의 능동 진동 제어", *한국소음진동공학회논문집*, 제 15 권, 제 12 호, pp. 1408~1415.