

# MFC 작동기를 이용한 수중 Hull 구조물의 능동 진동 제어

## Active Vibration Control of Underwater Hull Structure Using Macro-Fiber Composite Actuators

권 오 철\*·손 정 우\*\*·최 승 북†

Oh-Cheol Kwon, Jung Woo Sohn and Seung-Bok Choi

(2008년 10월 9일 접수 ; 2008년 11월 10일 심사완료)

**Key Words :** Hull Structure(헬 구조물), Piezoelectric Composite Actuator(압전 복합재 작동기), Finite Element Modeling(유한 요소 모델링), Vibration Control(진동 제어), Underwater Experiment(수중 실험)

### ABSTRACT

Structural vibration and noise are hot issues in underwater vehicles such as submarines for their survivability. Therefore, active vibration and noise control of submarine, which can be modeled as hull structure, have been conducted by the use of piezoelectric materials. Traditional piezoelectric materials are too brittle and not suitable to curved geometry such as hull structures. Therefore, advanced anisotropic piezocomposite actuator named as Macro-Fiber Composite(MFC), which can provide great flexibility, large induced strain and directional actuating force is adopted for this research. In this study, dynamic model of the smart hull structure is established and active vibration control performance of the smart hull structure is evaluated using optimally placed MFC. Actuating performance of MFC is evaluated by finite element analysis and dynamic modeling of the smart hull structure is derived by finite element method considering underwater condition. In order to suppress the vibration of hull structure, Linear Quadratic Gaussian(LQG) algorithm is adopted. After then active vibration control performance of the proposed smart hull structure is evaluated with computer simulation and experimental investigation in underwater. Structural vibration of the hull structure is decreased effectively by applying proper control voltages to the MFC actuators.

### 1. 서 론

구조물의 성능 향상을 위하여 다양한 지능 재료를 적용한 지능 구조물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. ER 유체(electro-rheological fluid), MR 유체(magneto-rheological fluid), 형상기억합금(shape memory alloy) 등이 대표적인 지능 재료이며, 특히 압전 재료는 작동기와 감지기 모두로 사용될 수 있

는 장점이 있어, 이를 구조물에 적용하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히, 구조물의 성능을 현저히 저하시키거나 구조물의 파괴까지 유발할 수 있는 진동의 효율적인 제어를 위하여 압전 재료를 적용하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. Crawley와 de Luis 등은 유도 변형률 작동 방법에 대한 연구로 이 분야에 선구적인 업적을 남겼다<sup>(1)</sup>. 그 후로 이러한 작동 방법을 이용한 지능 구조물에 대한 연구가 국내외에서 활발하게 이루어져 왔으나, 빔 또는 평판 형태의 단순한 구조물에 대한 연구가 주로 이루어지고 있다<sup>(2-5)</sup>. 최근에는 원형 또는 hull 구조물 등의 복잡한 구조물에 압전 재료를 적용하는 연구가 다양하게 진행되고 있는데, Kim 등은 단순 지지된

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학부  
E-mail : seungbok@inha.ac.kr  
Tel : (032)860-7319, Fax : (032)872-7925

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 인하대학교 기계공학부

원형 구조물의 진동 제어를 위하여 압전 작동기와 LQG 제어 알고리즘을 적용하였다<sup>(6)</sup>. 이러한 연구에는 주로 압전 세라믹 패치가 적용되었으나, 압전 세라믹은 깨어지기 쉽고, 곡면 형상의 구조물에는 사용이 제한되는 단점이 있다. 이에 최근 NASA Langley 연구소에서 MFC 작동기를 개발하였다<sup>(7-9)</sup>. MFC 작동기는 압전 세라믹 fiber를 기초로 하여 유연하고, 곡면 형상의 구조물에 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<sup>(10)</sup>. Sohn 등은 MFC 작동기의 등가 전기장 모델을 개발하여 모델링에 적용하여 공기중 스마트 hull 구조물의 모드 해석 및 능동 진동 제어를 수행하였다<sup>(11,12)</sup>. 하지만 수중 hull 구조물과 같은 유체와 구조물이 연성되어 있는 모델링은 이루어지지 않았으며, 이러한 복잡한 수중구조물의 모드 해석 실험이나 능동 진동 제어 실험 또한 수행되지 않았다.

이 연구에서는 MFC 작동기가 부착된 hull 구조물의 수중에서의 능동 진동 제어에 관한 연구를 수행 하였다. MFC 작동기의 등가 전기장 모델을 모델링에 적용하였고, 유한 요소 모델링을 이용하여 수중 환경을 고려한 구조물의 운동 방정식을 유도하였다. 수중 구조물의 동특성을 유한 요소 해석과 실험을 통하여 관찰하고, 유한 요소 모델로부터 구조물의 상태 방정식을 유도하였으며, 이를 바탕으로 효과적인 진동 제어를 위한 LQG 제어기를 설계하였다. 성능 지수를 최소화하는 적절한 가중치를 선택하여 최적의 제어 입력을 결정하였으며, 이로부터

우수한 진동 제어 성능을 확인하였다.

## 2. 유한 요소 모델링

MFC 작동기가 내부에 부착된 수중 스마트 hull 구조물을 Fig. 1에 나타내었다. 수중 스마트 hull 구조물은 구조물 및 MFC와 같은 능동재료 그리고 물과 같은 유체의 영역으로 나눌 수가 있다. 구조물과 MFC가 부착된 구조물의 영역의 부분은 유한하며 유체의 영역은 무한하다고 볼 수가 있다. 수중 환경을 고려한 운동 방정식은 다음과 같이 표현 된다<sup>(13)</sup>.

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_s \mathbf{U} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_l \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{U}$ 는 노드 변위이다.  $\mathbf{M}_s, \mathbf{C}_s, \mathbf{K}_s$ 는 각각 구조체의 질량 행렬, 댐핑 행렬, 강성 행렬을 나타내며, 댐핑 행렬  $\mathbf{C}_s$ 는 질량과 강성에 비례하는 값으로 정의를 하였다.  $\mathbf{F}_s$ 는 구조물에 작용하는 외력이며,  $\mathbf{F}_l$ 는 유체-구조 상호작용에 의해 접수구조 표면에 작용하는 유체력을 나타낸다. 유체-구조 상호작용 해석은  $\mathbf{F}_l$ 를 구조 응답의 함수로써 구하는 문제라 할 수 있다. 수십 Hz의 고유진동수를 갖는 접수구조물 진동의 경우에는 유체를 이상유체로 취급할 수 있게 되어 접수구조 표면에서는 접선방향의 전단력은 무시될 수 있고, 접수면  $\Gamma_s$ 에 수직인 압력  $\mathbf{P}$ 만 작용하게 되므로 결국  $\mathbf{F}_l$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_l = \int_{\Gamma_s} \mathbf{N}^T \bar{n} \mathbf{P} dS \quad (2)$$

$N$ 는 임의 요소에서의 압력을 근사시키기 위한 형상 함수이며,  $\mathbf{P}$ 는 구조 영역과 유체 영역의 연성해로부터 구한 압력 벡터를 나타낸다.  $\bar{n}$ 은 접수면 표면의 수직 방향 단위 벡터이고,  $dS$ 는 미소 접수면을 나타낸다. 이 압력  $\mathbf{P}$ 는 Euler 해법의 inverse formulation에 근거한 경계 요소법을 적용하여 구할 수 있다. 이렇게 구하여진  $\mathbf{P}dS$ 를 식 (3)에 대입하면  $\mathbf{F}_l$ 를 구할 수 있다.

$$\mathbf{F}_l = -\mathbf{M}_F \ddot{\mathbf{U}} \quad (3)$$

이때  $\mathbf{M}_F$ 는 부가수질량(added mass) 행렬이다. 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 유체-구조 연성해석을 위

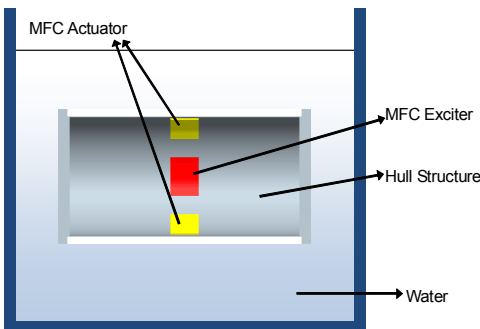


Fig. 1 Configuration of the proposed hull structure

한 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$(\mathbf{M}_S + \mathbf{M}_F)\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_S\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_S\mathbf{U} = \mathbf{F}_S \quad (4)$$

이 연구에서 고려된, 내부에 MFC 작동기가 부착된 양 끝이 단혀있는 hull 구조물의 유한 요소 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_S + \mathbf{M}_F & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\boldsymbol{\phi}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_S & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_S & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{\phi u} & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \boldsymbol{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_S \\ \mathbf{F}_\phi \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $\boldsymbol{\phi}$ 는 전기적 포텐셜 벡터이다.  $\mathbf{K}_{u\phi}$ 와  $\mathbf{K}_{\phi u}$ 는 압전-기계 연성에 의한 연성 강성 행렬이다. 이 행렬은 입력 전압이나 기계적 변형에 의해 발생하는 전기적 신호에 따라 압전 재료가 작동기나 감지기로 사용되게 한다.  $\mathbf{K}_{\phi\phi}$ 는 전기장에 의한 강성 행렬이다.  $\mathbf{F}_\phi$ 는 전기장의 힘 벡터이다. 완성된 구조물은 일반적으로 매우 복잡하여 적절한 형태로 전체 구조물을 유한 요소 모델로 조합하는 것은 어려운 것이 사실이다. 또한 전체 구조물의 유한 요소 모델은 큰 자유도를 갖기 때문에 유한 요소 방정식에 기초한 동역학적인 해석을 수행하는데 어려울 경우가 발생할 수 있다. 이러한 이유로 전체 구조물을 근사적인 수학적 모델인 축소 모델 형태로 표현한다. 그러므로 식(5)의 운동방정식은 노드 변위만을 사용하여 축소 모델 형태로 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{M}_S + \mathbf{M}_F, \\ \mathbf{K} &= \mathbf{K}_S - \mathbf{K}_{u\phi}\mathbf{K}_{\phi\phi}^{-1}\mathbf{K}_{\phi u}, \\ \mathbf{F} &= \mathbf{F}_S - \mathbf{K}_{u\phi}\mathbf{K}_{\phi\phi}^{-1}\mathbf{F}_\phi. \end{aligned}$$

식(6)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 모드 행렬을 사용하여 전역 변위 벡터  $\mathbf{U}$ 를 모드 변위 벡터  $\boldsymbol{\eta}$ 로 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\eta} \quad (7)$$

여기서  $\boldsymbol{\Phi}$ 는 모드 형상 벡터이다. 식(7)을 식(6)에 대입하고, modal 축소를 하게 되면, 되먹임 제어 시스템을 위한 비연성된 운동방정식이 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$\hat{\mathbf{M}}\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\mathbf{C}}\dot{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\mathbf{K}}\boldsymbol{\eta} = \hat{\mathbf{F}} \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{M}} &= \boldsymbol{\Phi}^T(\mathbf{M}_S + \mathbf{M}_F)\boldsymbol{\Phi}, \hat{\mathbf{C}} = \boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{C}\boldsymbol{\Phi}, \\ \hat{\mathbf{K}} &= \boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{K}\boldsymbol{\Phi}, \hat{\mathbf{F}} = \boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{F} \end{aligned}$$

$\hat{\mathbf{M}}$ ,  $\hat{\mathbf{C}}$ ,  $\hat{\mathbf{K}}$ 는 각각 modal 질량 행렬, modal 댐핑 행렬, modal 강성 행렬이다. 이렇게 얻어진 modal 운동방정식으로부터 다음과 같은 상태공간 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (9)$$

여기서

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

제안된 스마트 hull 구조물의 고유진동수와 모드 형상은 상용 유한 요소 해석 소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 구하였다.

### 3. 제어기 설계

일반적으로 LQR 제어 기법에서 가정하듯, 시스템의 모든 상태를 측정하는 것은 불가능하다. 만일 이것이 가능하다 할지라도, 측정값은 측정 소음에 의해 정확하지 않게 된다. 따라서, 이 논문에서는 MFC 작동기를 이용한 스마트 hull 구조물의 진동 제어를 위해서 시스템의 상태를 예측할 수 있고, 측정 잡음과 외란을 고려할 수 있는 LQG 제어 기법을 적용하였다. 외란과 측정 잡음을 고려하여 상태공간 운동방정식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

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

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

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

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

LQG 제어기는 다음과 같이 구성된다.

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

여기서  $\hat{x}$ 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.

$$J = E \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (13)$$

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

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

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

#### 4. 제어 성능 평가

이 연구에서는 수중 hull 구조물에 대한 능동 진동 제어 성능을 고찰 하였다. 이 연구에서 고려된 양끝이 닫힌 hull 구조물에 4개의 MFC 작동기가 부착된 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 알루미늄 hull 구조물의 길이는 500 mm, 지름은 250 mm, 두께는 2 mm이며, 양 cap의 두께는 10 mm이다. MFC 작동기는 주어진 기하학적 형상에서 최고의 제어 성능

을 얻을 수 있는 곳의 표면에 부착되었으며, 각 작동기는 길이가 60 mm, 폭이 70 mm, 두께는 1 mm이다. 사용된 알루미늄, MFC 작동기와 물의 재료 특성은 Table 1에 나타 내었다. 유한 요소 해석을 위한 모델을 Fig. 3에 나타내었다. Hull 구조물에는 8절점 solid 요소(SOLID45)를 사용하였으며, MFC 작동기에는 8절점 solid 요소 (SOLID5)를 사용하였다. 유체요소는 8절점 fluid(FLIUD30) 요소를 사용하였고, 유체-구조 연성(fluid-structure interface)에는 8절점 fluid 요소(FLUID30)를 사용하였다.

수중 구조물의 동적 특성을 파악하기 위한 모드 해석을 수행하였다. MFC 작동기가 부착된 스마트 hull 구조물의 기본적인 모드 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 최대 변형이 일어나는 곳을 모드형상으로 확인한 뒤 MFC 작동기의 부착 위치를 선정하였다. Hull 구조물 내부에는 총 4개의 MFC 작동기를 부착 하였으며 1 개의 MFC 작동기는 가진기로, 3개의 MFC 작동기는 액추에이터로 사용하였다. 이것은 고려된 형상에서 최고의 진동 제어 성능을 얻을 수 있다는 것을

Table 1 Material properties

| MFC : Smart materials(poling direction : 1) |                         |                              |                        |
|---|-------------------------|------------------------------|------------------------|
| $E_1$                                       | 30.34 GPa               | $E_3$                        | 15.86 GPa              |
| $\nu_{12}$                                  | 0.31                    | $\nu_{21}$                   | 0.16                   |
| $G_{12}$                                    | 5.52 GPa                | $\rho$                       | 7750 kg/m <sup>3</sup> |
| $d_{31}$                                    | -210 pC/N               | $d_{33}$                     | 460 pC/N               |
| $\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$                | 830 C/m2                | $\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$ | 916 C/m <sup>2</sup>   |
| Aluminum plate                              |                         |                              |                        |
| Young's modulus                             | 6.8e10 N/m <sup>2</sup> | Density                      | 2698 kg/m <sup>3</sup> |
| Poisson ratio                               | 0.32                    |                              |                        |
| Water                                       |                         |                              |                        |
| Density                                     | 1000 kg/m <sup>3</sup>  | Speed of sound               | 1500 m/s               |

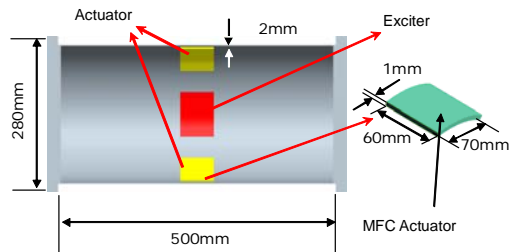


Fig. 2 Geometry of the end-capped hull structure with surface bonded MFC actuators

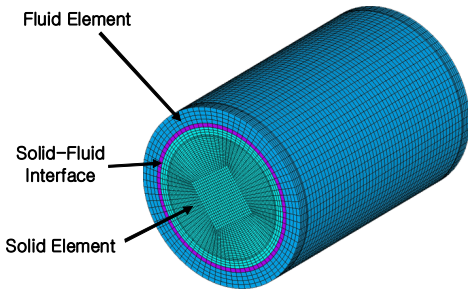
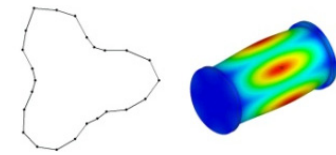


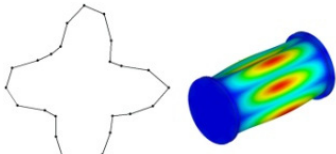
Fig. 3 Finite element mesh configuration

Table 2 Natural frequencies of the end-capped hull structure in air and in underwater environment (FEA)

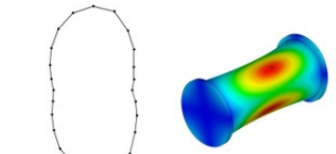
| Mode | In the air [Hz] | Underwater [Hz] |
|------|-----------------|-----------------|
| 1st  | 587.4           | 193.7           |
| 2nd  | 617.5           | 215.9           |
| 3rd  | 802.8           | 235.6           |
| 4th  | 830.7           | 351.7           |



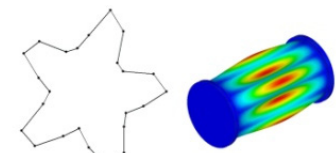
(a) 1st mode



(b) 2nd mode



(c) 3rd mode



(d) 4th mode

Fig. 4 Fundamental mode shapes of hull structure with MFC actuators

뜻한다. MFC 작동기가 부착된 수중 스마트 hull 구조물의 고유진동수가 공기중의 hull 구조물의 고유진동수보다 더 작게 나타났다. 이는 식 (4)에 나타난 바와 같이 부가수질량에 의한 질량 행렬의 증가에 따라 발생한 것이다. 유한 요소 해석 결과에 의한 공기중과 수중에서 hull 구조물의 고유진동수를 Table 2에 비교하여 나타내었다. 수중에서의 고유진동수는 공기중의 그것에 비해 약 30~40% 정도 감소하였다. 유한 요소 해석의 결과를 확인하기 위해 실제 구조물을 제작하여 Fig. 5와 같이 실험 장치를 구성하였다. 수면으로 부터 hull 구조물의 중앙까지의 거리가 1 m가 되도록 잠수 시킨 뒤, 랜덤 입력으로 가진 하였을 때 수중 hull 구조물의 주파수 응답 실험을 수행하였다. 구조물의 주파수 응답 데이터는 Fig. 6에 나타내었으며 유한 요소 해석으로 얻은 고유진동수와 실험으로 구한 고유진동수는 Table 3에 나타내었다. 실험에서 구한 고유진동수는 유한 요소 해석으로 얻은 결과보다 약 10% 증가함을 확인하였다.

모드 해석을 통해 얻어진 상태 공간 운동방정식을 바탕으로 LQG 제어기를 설계하였다. 식 (18)에서의 가중치 행렬의 값은  $diag(Q) = 3 \times 10^7$ ,  $diag(R) = 1$ 로 설정하였다. 또한 모든 모드에 대해서 0.2%의 비례 감쇠를 가정하였다.

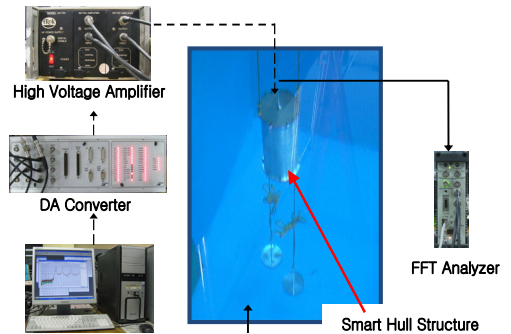


Fig. 5 Experimental setup for modal test

Table 3 Natural frequencies of the end-capped hull structure in underwater environment

| Mode | FEA [Hz] | Experiment [Hz] |
|------|----------|-----------------|
| 1st  | 193.7    | 208             |
| 2nd  | 215.9    | 251             |
| 3rd  | 235.6    | 268             |
| 4th  | 351.7    | 381             |

이 연구에서는 기본적인 4개의 모드만 고려하였다. LQG 제어기의 적절한 가중치를 선정함으로써 높은 댐핑을 얻을 수 있었다. 제어 실험에 사용한 수중 hull 구조물에는 4개의 MFC를 부착하였는데, 이 중 1개의 MFC는 구조물에 가진 입력을 가하고 3개의 MFC는 각각 독립적인 가진력을 구조물에 가하였다. 수밀 깊이는 모드 해석 실험시와 동일하게 1m를 유지 하였다. 음향 센서(hydrophone)는 hull 구조물의 중심을 기준으로 원주방향으로 1m 떨어진 곳에서 8곳, 2m 떨어진 곳에서 8곳 총 16장소에 설치하였다. 다음의 그래프에 나오는 모든 데이터는 16위치 중에 한 곳인 1번 작동기가 부착된 위치로부터 원주방향으로 1m 떨어진 거리에 설치된 음향센서로 받은 데이터를 참조하였다. Fig. 7은 랜덤 가인을 입력한 상태에서 수중 hull 구조물의 제어 입력 유무에 따른 주파수 응답을 나타내었다. 수중에서도 제어력의 유무에 따라 구조물의 주파수 응답이 상당히 감소함을 알 수 있다. 150V의 진폭으로 381 Hz,

577 Hz의 단일 주파수로 구조물을 가진할 때의 구조물에 부착된 센서 출력과 제어 입력을 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 150V의 가진 입력보다 적은

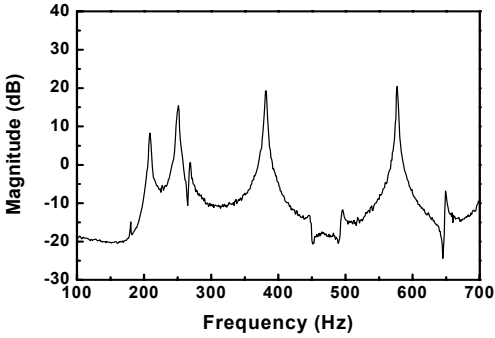


Fig. 6 Frequency response of hull structure in under-water

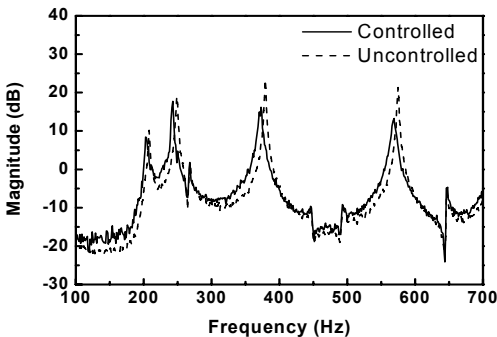


Fig. 7 Frequency response of hull structure in under-water with control and w/o control

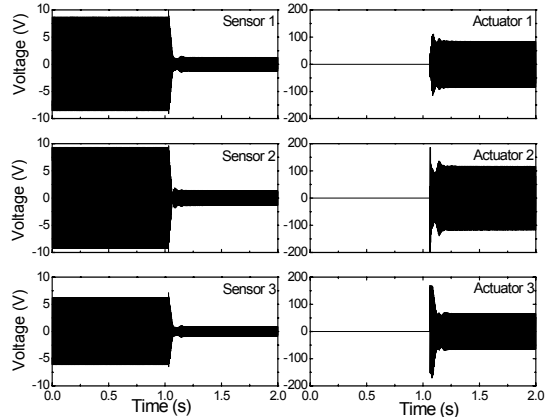


Fig. 8 Control response and input voltage under 381 Hz excitation

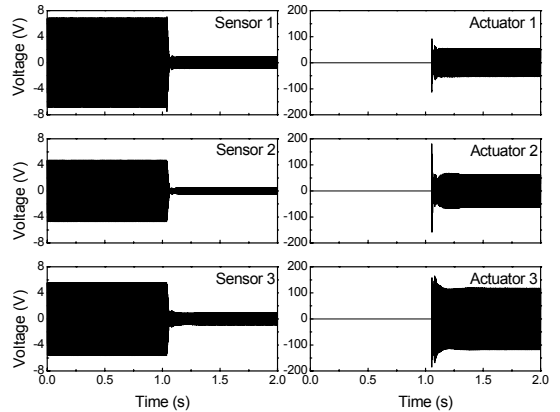


Fig. 9 Control response and input voltage under 577 Hz excitation

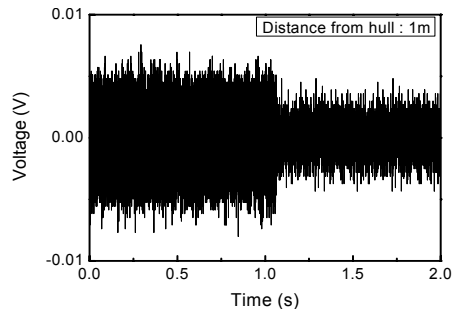


Fig. 10 Radiated sound reduction under 382 Hz excitation

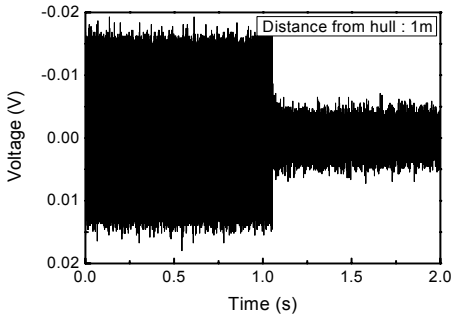


Fig. 11 Radiated sound reduction under 577 Hz excitation

제어력으로 효율적인 수중 hull 구조물의 진동 제어 성능을 보여준다. 동일한 조건 아래 hull 구조물의 진동 제어에 의한 수중 방사 소음의 감소를 Fig. 10 과 Fig. 11에 나타내었다. 수중에서 hull 구조물 자체의 진동 제어 효과로 인하여 수중 방사 소음이 감소된 것을 확인하였다.

## 5. 결 론

내부에 MFC 작동기가 부착되어 있고, 양끝이 단 령있는 수중 hull 구조물의 동적 특성을 분석하고 진동 제어 성능을 고찰하였다. MFC 등가 전기장 모델을 도입하여 간단한 MFC 유한 요소 모델을 구성하였다. 제안된 hull 구조물의 운동방정식은 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 구하였고 또한 모드 특성 실험을 통해 유한 요소 해석으로 얻은 모드 특성을 검증하였다. hull 구조물의 능동 진동 제어를 위하여 LQG 제어 알고리즘을 적용하였다. 적절한 제어 입력을 인가함으로써 효과적인 진동 제어 성능을 확인할 수 있었다. 수중 hull 구조물의 능동 진동제어로 인한 구조물 자체의 진동 감소 효과를 확인하였고, 이로 인한 수중 방사 소음의 감소 효과도 확인할 수 있었다. MFC 작동기는 방향성을 가지고 있으므로, 작동기의 부착 위치 선정과 작동기의 방향에 따른 진동 제어 성능 변화에 대한 연구가 계속 될 예정이다. 또한 비공진 영역에서 더욱 효과적인 진동 감소를 위한 연구 또한 계속 될 예정이다.

## 후 기

이 연구는 방위사업청/국방과학연구소가 지정한

UVRC(수중운동체특화센터)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (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) Shin, H. C. and Choi, S. B., 1996, "Vibration Control of a Very Flexible Robot Arm via Piezoactuators," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 6, No. 2, pp.187~196.
- (4) Kwak, M. K., 1995, "Active Vibration Control of Smart Structures Using Piezoelectric Materials," Journal of KSNVE, Vol. 5, No. 3, pp.292~302.
- (5) Kim, H. S., 2005, "Smart Structures Featuring Piezoelectric Materials : State of the Art," Journal of KSNVE, Vol. 15, No. 1, 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) Sohn, J. W., Kim, H. S. and Choi, S. B., 2005, "Active Vibration Control of Smart Hull Structure Using MFC Actuators," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 1408~1415.

(12) Sohn, J. W., Kim, H. S. and Choi, S. B., 2006, "Dynamic Modeling and Vibration Control of Smart Hull Structure", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 840~847.

(13) Sohn, C. Y., Kim, K. S. and Byun, H. I., 2001, "A Study on the Vibration Characteristics of 3-Dimension Submerged Vehicle in Consideration of Fluid-Structure Interaction," *Transactions of the KSOE*, Vol. 15, No. 1, pp. 19~25.