

# MFC 작동기를 이용한 실린더 셸의 능동진동제어 실험

## Active Vibration Control Experiment on Cylindrical Shell equipped with MFC Actuators

배병찬\*·곽문규†·정문산\*\*

Byungchan Bae, Moon K. Kwak and Moonsan Jung,

**Key Words :** Shell Structure(셸구조물), Active Vibration Control(능동진동제어), Positive Position Feedback Control(양변위되먹임제어)

### ABSTRACT

This paper is concerned with the active vibration control experiment on cylindrical shell equipped with Macro Fiber Composite(MFC) actuators. The MFC actuators were glued to the cylindrical shell in circumferential directions. To verify the theoretical result, vibration test using impact hammer and accelerometer was carried out. It was found from experiments that theoretical result predicts experimental result to some extent. The positive position feedback controllers were designed and applied to the test article. It was observed that the resonant amplitude of the fundamental mode was reduced by 20dB thus achieving active vibration control. The active vibration control of the response subject to non resonant excitation has been of interest. We developed the combination of the positive position feedback controller which can cope with the fundamental mode and the positive position feedback controller which can counteract the external disturbance with non resonant frequency. It was found from experiments that the hybrid controller can suppress the vibration amplitude successfully.

### 1. 서론

얇은 원통형의 셸 구조물의 운동방정식의 유도는 Arnold and Waburton[1]으로부터 시작하였는데, 다양한 셸 구조물의 연구에 관해서는 Leissa[2]의 책을 참조하는 것이 유용할 것이다.

많은 연구자들이 셸에 대해서 다양한 가정을 하고 운동방정식을 유도하였는데 가장 단순한 이론은 Donnel and Mushtari[2] 이론이다. 이 이론이 유용하게 사용될 수 있지만 좀더 정확한 계산을 위해 다양한 이론이 제안되었다[3-8].

본 연구에서는 원통형 셸 구조물에 MFC 작동기가 부착된 경우를 고려하여 이 작동기를 이용해 능동진동제어를 수행하고자 한다. 원통형 셸을 압전 작동기를 이용해 진동 및 음향을 제어하고자 하는 연구 결과로는 Tzou 등[9], Lester and Lefebvre[10], Sonti and Jones[11], Clark and Fuller [12]의 연구가 있다. Tzou 등[9]은 모달 압전작동기를 이용한 셸 구조물의 제어기법에 대한 연구를 수행하였다. Lester and Lefebvre[10]는 압전체가 원통형 셸과 결합된 구조물에 대한 운동방정식을 유도하고 모달 스펙트라를 이용해 실린더와 내부음향 캐

비티사이의 연성 효과를 조사하고 압전작동기를 이용해 내부 소음제어를 이룩할 수 있음을 이론으로 입증하였다. Sonti and Jones[11]는 원통형 셸에 압전작동기가 결합된 구조물에 대해 단순화된 해석 모델을 개발하고 수치계산을 통해 큰 크기의 압전작동기가 보다 효과적임을 주장하였다. Clark and Fuller [12]는 압전세라믹 작동기, 마이크, PVDF 센서를 알루미늄 셸에 부착하고 Filtered-x LMS 제어기 기법을 이용해 음향 제어를 수행하였는데 실린더 셸의 진동 모드 중 아코디온 형태의 모드는 제어가 쉬운 반면에 실린더 모드는 가진하는 진동수가 높아짐으로 인해 제어하기가 쉽지 않음을 보여주었다. 기존에 사용한 압전세라믹 작동기는 취성이 매우 커 깨지기 쉽고 곡면형상을 가지는 구조물에는 사용할 수 없다는 단점이 있다. 이런 단점을 극복하고 압전상수  $d_{33}$ 를 이용하는 작동기로 개발된 것이 MFC(Macro Fiber Composite) 작동기 [13]이다. 손정우 등[14]은 MFC 작동기의 유한요소 모델링 방법과 제어 특성을 토의하고, 유한요소 해석 소프트웨어 ANSYS를 이용해 운동방정식을 유도하였다. 제어기로는 LQG를 고려하여 수치해석을 통해 제어가 가능함을 입증하였다.

본 연구에서는 먼저 고유진동수 계산에 대한 이론 결과의 검증을 위해 알루미늄 원통형 셸 구조물에 대해 충격해머 진동 실험을 수행하였다. 이론 결과는 양변위 되먹임(Positive Position Feedback, PPF) 제어기를 이용해 진동제어가 가능함을 보여준다. 이론 결과를 검증하기 위해 MFC

† 책임저자; 동국대학교 기계공학과, 정회원  
E-mail : kwakm@dongguk.edu  
Tel : (02) 2260-3705, Fax : (02) 2263-9379

\* 동국대학교 대학원 기계공학과, 학생회원

\*\* 동국대학교 대학원 기계공학과, 학생회원

작동기를 쉘 구조물에 부착하고 PPF 제어기를 적용하여 능동 진동제어를 시도하였다. 실험 결과는 MFC 작동기를 이용해 진동 및 음향을 제어할 수 있음을 보여준다.

## 2. 실린더 쉘의 진동 실험

Fig. 1 은 본 실험을 위해 제작된 알루미늄 쉘을 보여 주고 있다. 알루미늄 쉘의 두께는 2mm, 내경은 250mm, 길이는 500mm 이다. 끝단 플랜지는 가스킷 처리를 했다. 본 실험에 사용한 알루미늄의 물성치는  $\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $E = 70 \text{ GPa}$  이다.

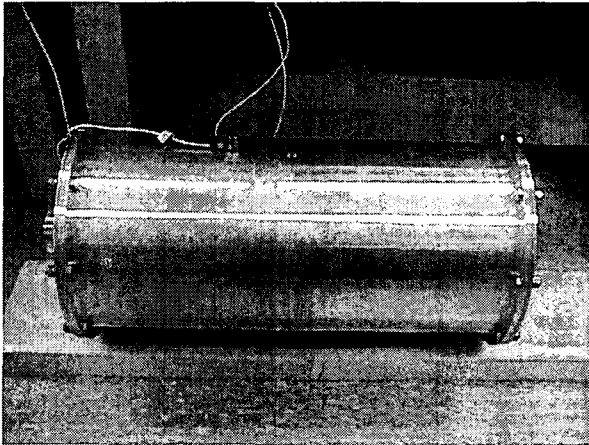


Fig. 1 Aluminum cylindrical shell

고유진동수 계산에 대한 이론 연구 결과를 검증하기 위해 먼저 진동 실험을 수행하였다. 본 연구에서 채택한 진동 실험방법은 가속도계와 충격 해머, FFT 신호 분석기를 이용하는 방법이다. 본 실험에서 사용한 가속도계는 PCB Piezotronics 사의 353B03 이며, 충격해머는 PCB Piezotronics 사의 086C03 이다[15]. 주파수 응답곡선은 90 dB dynamic range 을 가지는 HP 35670A FFT Dynamic Signal Analyzer 로 측정하였다[16]. 충격 해머 진동시험에 의해 얻어진 주파수 응답 곡선은 Fig2 와 같다.

수치해석을 통한 이론 결과는 고유진동수가 479 Hz (3,1), 549 Hz (4,1), 767 Hz (2,1), 792 Hz (5,1), 1005 Hz (5,2), 1342 Hz (3,2)로 나타났다. 여기서 괄호안의 숫자는 원주방향  $n$  값과 그 원주방향모드에서의 차수이다. 진동시험에 의해 얻어진 고유진동수 값은 486 Hz, 622 Hz, 688 Hz, 916 Hz, 1032 Hz, 1130Hz 이다. 앞의 이론값과 비교하였을 때 조금

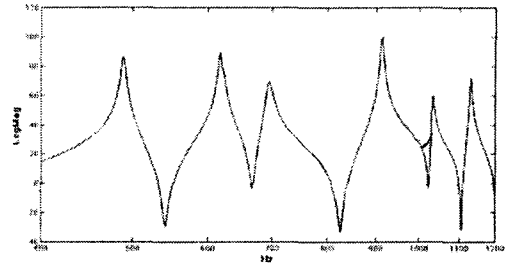


Fig. 2 Experimental frequency response curve

차이가 남을 알 수 있는데, 양단의 플랜지와 원판이 완벽한 Shear Diaphragm 경계조건을 형성하지 못하는 것에서 비롯되는 것으로 판단된다.

## 3. 능동진동제어 실험 장치

능동 진동 제어 실험을 위해 세 개의 MFC 작동기를 Fig3 과 같이 부착하였다.

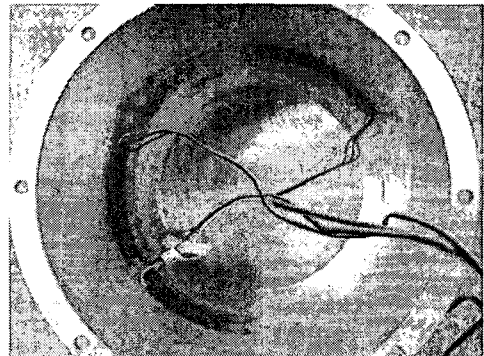


Fig. 3 Macro-composite actuator attached to the cylindrical shell

MFC 작동기는 Smart Material 사의 MFC 작동기 M8557S1 으로 작동기와 감지기가 동시에 장착되어 있는 작동기로서, PZT 형태는 Navy Type II 이다. 전체 크기는 110mm × 75mm 이며, 작동기 부분은 85mm × 50mm, 감지기 부분은 85mm × 3.5mm 이다. 그 외의 물성치값은  $E_1 = 30.34 \text{ GPa}$ ,  $E_2 = 15.86 \text{ GPa}$  (Electrode 방향),  $\nu_{12} = 0.31$ ,  $\nu_{21} = 0.16$ ,  $G_{12} = 5.52 \text{ GPa}$  으로 주어졌다. MFC 작동기와 같이 압전작동기의 가장 중요한 파라미터는 압전상수인데, MFC 작동기는  $d_{33}$  를 이용한다. 따라서 기존의  $d_{31}$  을 이용하는 압전작동기에 비해 작동력이 배가되는 효과를 줄 수 있다. 사양서에서  $d_{33} = 4.6 \times 10^2 \text{ pm/V}$  로 주어져 있다.

능동 진동 제어 실험을 위해서 Fig4 와 같은 실험

험 장치를 설계하였다. MFC 작동기는 감지기를 내장하고 있는데, 감지기의 신호는 전하앰프를 통해 dSpace 사의 DS1104 의 A/D 입력에 Fig4 와 같이 연결된다.

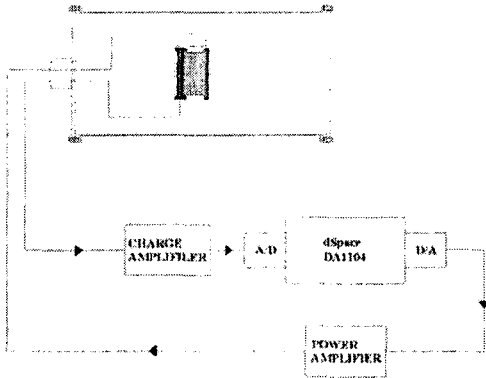


Fig. 4 MFC connected to dSpace and Power Amp

dSpace 사의 DS1104 는 Simulink 에서 제작된 제어기를 다운로드 받아 제어를 수행하게 된다. 그리고 그 출력은 D/A 단자를 통해 파워 앰프에 전달되며 파워앰프의 출력은 MFC 작동기에 전달된다. 이 루프를 통해 능동진동제어가 이루어진다. Fig5 는 실제로 구성된 제어 장치를 보여주고 있다.

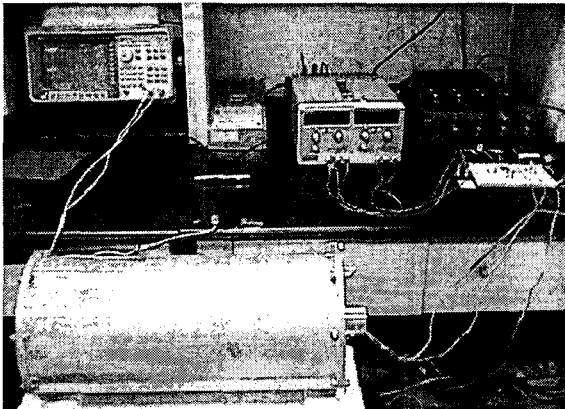


Fig. 5 Aluminum cylindrical shell connected to equipment

위에서 언급하였듯이 MFC 작동기에 함께 부착되어 있는 감지기를 사용하기 위해서는 전하앰프가 필요하다. 전하앰프는 브레드보드 상에 Fig6 와 같은 전기 회로를 구성하여 구현하였다.

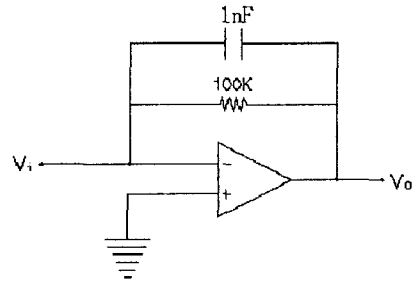


Fig. 6 Charge amplifiers connected to sensors

#### 4. 능동진동제어 실험

본 연구에서 사용한 제어기는 PPF 제어기[17]이며, 이 제어기의 장점은 제어할 고유진동모드의 고유진동수 값을 알고 있을 때 그 고유진동모드를 선택적으로 제어할 수 있다는 것이다. 본 연구에서 채택한 MFC 작동기는 준 동위치제어기 (Collocated Controller)로서 동위치제어기의 안정성에 대해서는 이미 입증된바 있다[17]. 따라서 PPF 제어기를 적용할 수 있다. PPF 제어 알고리즘을 통해 계산된 제어력 값은 D/A 단자를 통해 증폭 앰프에 전달되고, 증폭된 전압이 MFC 작동기에 인가된다.

본 연구의 첫 번째 실험으로 한 개의 작동기를 이용해 첫 번째 모드를 제어하는 실험을 수행하였다. Fig7 과 같은 Simulink 블록 다이어그램을 이용하였으며, 첫 번째 진동 모드를 제어하도록 설계되었다.

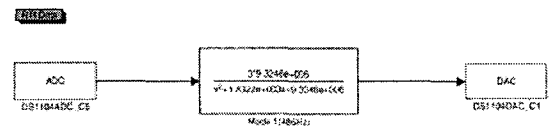


Fig. 7 Simulink block diagram for active vibration suppression control

한 개의 MFC 작동기를 구동시켰을 경우 주파수 응답 곡선은 Fig8 과 같이 나타난다. 그림에서 제어기를 구동시키지 않았을 경우보다 약 7dB 이상의 제어 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fig8 에서 두 번째 진동모드 또한 제어가 되고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 기본 진동수에 맞추어진 PPF 제어기에 의해 두 번째 모드의 강성이 증대된 효과를 일으키기 때문이다.

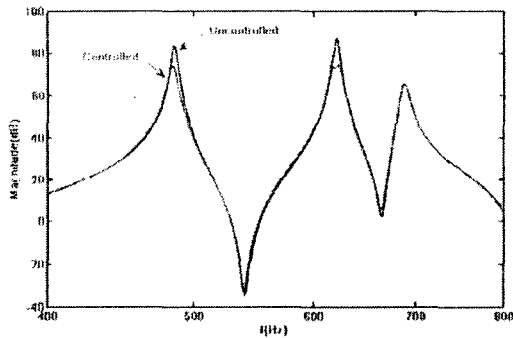


Fig. 8 Simulink block diagram for active vibration suppression control

본 연구의 두 번째 실험으로 두 개의 작동기를 이용해 첫 번째 모드를 제어하는 실험을 수행하였다. Fig9 와 같은 Simulink 블록 다이어그램을 이용하였으며, 두 작동기가 첫 번째 진동 모드를 제어하도록 설계되었다.

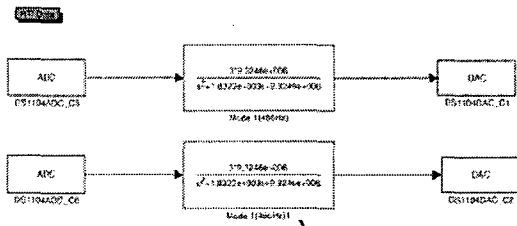


Fig. 9 Simulink block diagram for active vibration suppression control

두 개의 MFC 작동기를 구동시켰을 경우 주파수 응답 곡선은 Fig10 과 같이 나타난다. 그림에서 제어기를 구동시키지 않았을 경우보다 약 15dB 이상의 제어 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

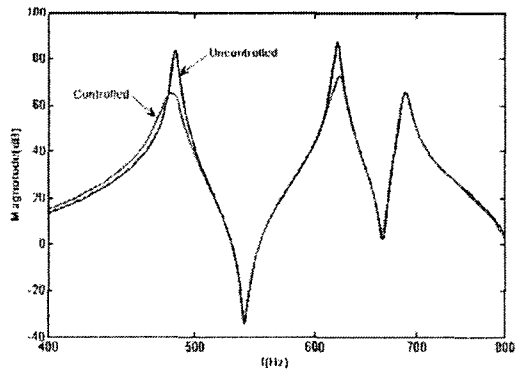


Fig. 10 Simulink block diagram for active vibration suppression control

본 연구의 세 번째 실험으로 세 개의 작동기를 이용해 첫 번째 모드를 제어하는 실험을 수행하였다. Fig11 과 같은 Simulink 블록 다이어그램을 이용하였으며, 모두 첫 번째 진동 모드를 제어하도록 설계되었다.

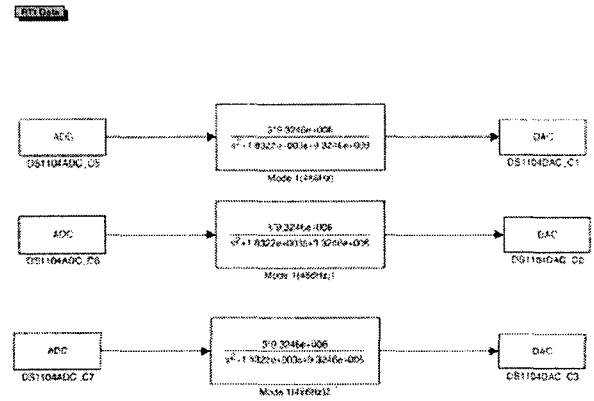


Fig. 11 Simulink block diagram for active vibration suppression control

세 개의 MFC 작동기를 구동시켰을 경우 주파수 응답 곡선은 Fig12 와 같이 나타난다. 그림에서 제어기를 구동시키지 않았을 경우보다 약 20dB 이상의 제어 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fig 8,10,12 를 비교해본 결과 세 개의 작동기를 구동하였을 때 가장 큰 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

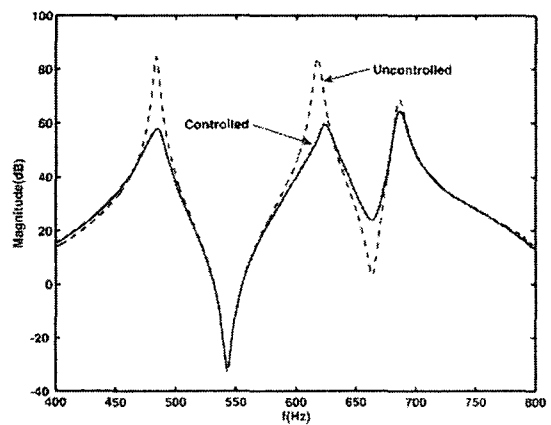


Fig. 12 Uncontrolled and controlled experimental frequency response curves

Fig13 은 셀에 충격을 가하고 일정 시간이 지난 다음 제어기를 가동 시켰을 경우의 시간 응답을 보여준다. Fig13 에서 알 수 있듯이 제어기를 구동

시켰을 경우 응답이 급속히 감소됨을 확인할 수 있다.

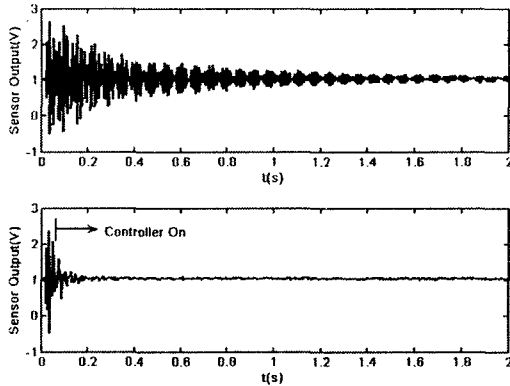


Fig. 13 Uncontrolled and controlled time histories

### 5. 외부조화교란에 대한 능동진동제어 실험

본 연구에서는 한 개의 MFC 를 이용하여 임의 주파수로 가진 하고, 두 개의 MFC 를 각각 1 차 모드와 임의 주파수(400Hz)를 제어할 수 있도록 Fig14 와 같이 Matlab 의 Simulink 를 이용하여 블록 다이어그램을 설계 하였다.

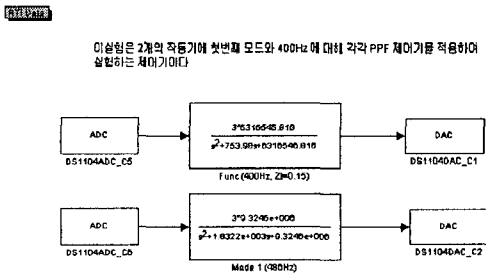


Fig. 14 . Simulink block diagram for active vibration suppression control

PPF 제어기로 기본진동모드와 임의 가진 모드를 제어하였다. 두 개의 MFC 작동기를 구동시켰을 경우 주파수 응답 곡선은 Fig15 와 같이 나타난다. Fig15 에서 제어기를 구동시키지 않았을 경우보다 약 20dB 이상의 제어 효과를 1 차 모드에서 얻을 수 있었고, 임의 가진 주파수에서 약 10dB 정도의 제어효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

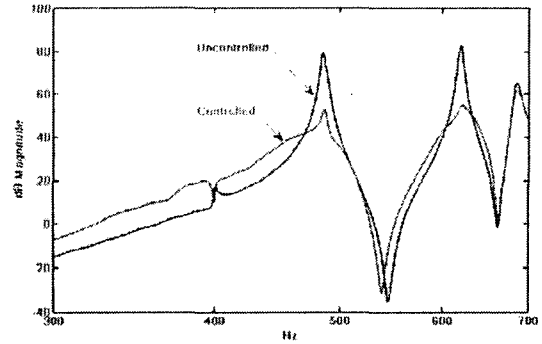


Fig. 15 Uncontrolled and controlled experimental frequency response curves

Fig16 은 임의 가진 후 일정시간이 지난 다음 제어기를 가동시켰을 경우 시간응답을 보여주고 있다. 진폭이 50% 감소됨을 알 수 있다.

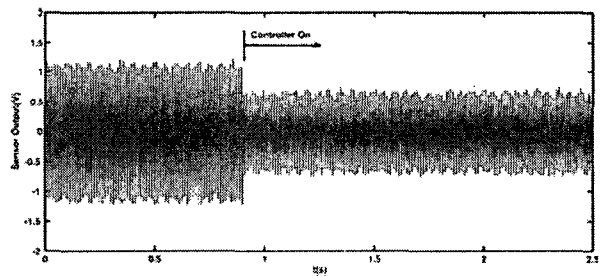


Fig. 16 . Uncontrolled and controlled time histories

### 6. 토의 및 결론

본 연구에서는 이론 계산 결과의 검증을 위해 충격 해머와 가속도계를 이용한 진동실험을 수행하였다. 실험 결과는 이론 결과와 잘 일치하여 Rayleigh-Ritz 방법을 이용한 고유진동해석이 유효함을 입증하였다.

셀 구조물에 세 개의 MFC 작동기를 부착하고 능동진동제어 실험을 수행하였다. 한 개의 작동기를 첫 번째 진동모드를 제어하도록 설계하였을 경우, 첫 번째 모드의 공진 진폭이 7dB 감소됨을 확인하였고, 두 개의 작동기를 첫 번째 진동모드를 제어하도록 하였을 경우에는 첫 번째 모드가 공진 진폭이 15dB 감소되었다. 세 개의 작동기 모두를 첫 번째 진동 모드에 맞추어 PPF 제어기를 구현한 경우에는 첫 번째 모드의 공진 진폭이 20dB 감소되어 가장 큰 효과를 볼 수 있음을 확인하였다. 능동진동제어 실험 결과는 셀 구조물의 능동

진동제어에 MFC 작동기가 효과적으로 사용될 수 있음을 보여주었다.

비공진 주파수 대역에서의 능동진동제어 효과를 검증하기 위해 비공진 주파수인 400Hz 사인파로 쉘 구조물을 가진하고 두 개의 MFC 작동기를 이용해 능동 진동제어를 수행하였다. 두 개의 MFC 작동기 중 첫 번째 작동기는 첫 번째 모드를 제어하는 PPF 제어기이며, 두 번째 작동기는 비공진 주파수 대역의 외부 교란을 감소시키는 PPF 제어기이다. 실험 결과는 제안한 제어기가 비공진 주파수의 조화 외부 교란에 효과적으로 대응하여 진동 응답을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 이 결과는 차후에 이론으로 보완하여야 할 부분이다.

### 후 기

본 연구는 국방과학연구소가 지원하는 수중운 동특화 연구센터의 수중/구조진동 연구실의 지원으로 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사드린다.

### 참고문헌

(1) Arnold, R.N. and Waburton, G.B., 1949, "Flexural Vibrations of the Walls of Thin Cylindrical Shells having Freely Supported Ends," Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 197, pp. 238-256.

(2) Leissa, A., 1993, Vibration of Shells, Acoustical Society of America, Originally issued by NASA, 1973.

(3) Yuan, J. and Dickinson, S.M., "The Free Vibration of Circularly Cylindrical Shell and Plate Systems," Journal of Sound and Vibration, Vol. 175, No. 2, pp. 241-263.

(4) Markus, S., 1988, The Mechanics of Vibrations of Cylindrical Shells, Studies in Applied Mechanics 17, Elsevier.

(5) 임정식, 1996, "일단고정-일단자유 원통 쉘의 진동 해석," 한국소음진동공학회지, 제 6 권 제 1 호, pp. 45-56.

(6) 임정식, 이영신, 1996, "원판 덮개를 갖는 고정-자유 원통셸의 고유진동 해석," 한국소음진동공학회지, 제 6 권 제 6 호, pp. 801-818.

(7) 한창환, 이영신, 2002, "양단이 고정지지된 연속 원통셸의 진동특성 해석," 한국소음진동공학회지, 제 12 권 제 2 호, pp. 97-107.

(8) 문덕홍, 여동준, 1994, "전달영향계수법에 의한 탄성지지를 갖는 원통형 셸구조물의 자유진동해석," 한국소음진동공학회지, 제 4 권 제 4 호, pp. 469-478.

(9) Tzou, H.S. Zhong, J.P. and Hollkamp, J.J., 1994, "Spatially Distributed Orthogonal Piezoelectric Shell Actuator: Theory and Applications," Journal of Sound and Vibration, Vol. 188, pp. 363-378.

(10) Lester, H.C. and Lefebvre, S., 1991, "Piezoelectric Actuator Models for Active Sound and Vibration Control of Cylinders," Proceedings of the Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, pp. 3-26.

(11) Sonti, V.R. and Jones, J.D., 1991, "Active Vibration Control of Thin Cylindrical Shells Using Piezoelectric Actuators," Proceedings of the Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, pp. 27-38.

(12) Clark, R.L. and Fuller, C.R., 1991, "Active Control of Structurally Radiated Sound from an Enclosed Finite Cylinder," Proceedings of the Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, pp. 380-402.

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

(14) 손정우, 김홍수, 최승복, 2005, "MFC 작동기를 이용한 스마트 Hull 구조물의 능동진동제어," 한국소음진동공학회지, 제 15 권 제 12 호, pp. 1408-1415

(15) <http://www.pcb.com>

(16) <http://www.home.agilent.com/agilent/home.jsp?cc=US&lc=eng>

(17) 곽문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어," 한국소음진동공학회지, 제 5 권, 제 3 호, pp. 292-302.