

# TMS320C6713 기반의 고속 다입출력 능동 진동제어기 개발

최형식\* · 허재관\*\* · 서해용\*\*

\*한국해양대학교 기계정보공학부 교수, \*\*한국해양대학교 대학원 기계공학과

## Development of High-Speed MIMO Active Vibration Control System using TMS320C6713DSK

Hyeung-Sik Choi\* · Jae-Gwan Her\*\* · Hae-Yong Seo\*\*

\*Division of Mechanical system Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*Graduate school of National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요약** : 본 논문은 스마트 구조물의 고속의 MIMO 능동진동 제어 시스템의 개발에 관한 것이다. A/D 및 D/A converters, piezoelectric (PZT) actuator/sensors, PA95 기반의 드라이버를 적용하는 DSP 중에서 가장 빠른 TMS320C6713DSK 프로세서 기반의 제어시스템에 대하여 설명하였다. 고속의 4채널 MIMO 시스템을 갖춘 능동진동 제어 시스템을 개발하였다. 사용자의 편의를 위한 matlab기반의 simulink를 이용하는 GUI 프로그램을 개발하고 이를 적용하여 성공적인 평판 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 실험 내용을 소개하였다.

**핵심용어** : 능동 진동 제어, 디지털 시그널 프로세싱, 압전소자, MIMO

**ABSTRACT** : This paper deals with the development of a very fast MIMO active vibration suppression system of the smart structures. First, we have presented the paper about the new high-speed active control system using the DSP320C6713 microprocessor and a peripheral system composed of a data acquisition system, A/D and D/A converters, piezoelectric (PZT) actuator/sensors, and drivers using PA95. We developed a fast MIMO data processor for a fast control loop. For this, input and output channels are expanded by making extended 4 channel module of the MIMO system.

To easily use the active vibration control system, a GUI control algorithm was developed using the simulink of the matlab. Using the developed system, successful experiment results to control vibration of the plate actively is introduced.

**KEY WORDS** : Active vibration control, DSP(digital signal processing), MIMO

### 1. 서 론

최근 Smart Skin 형태의 압전소자를 이용한 능동 진동 제어 시스템의 설계 및 개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 제어 시스템은 다수의 센서와 액츄에이터를 필요로 하여 고성능의 제어기를 적용하는 능동진동제어에 대한 연구가 시작되고 있다.

국외에서는 센서, 액츄에이터 및 제어기를 구성한 대표적인 연구들로 센서 및 구동기로 압전 액츄에이터/센서를 적용하고 실시간 제어를 위해 VMEbus 제어기를 사용하여 박판의 능동

제어를 성공적으로 구현한 연구가 있다[1]. 또한, ADSP21062 EZKIT인 DSP 프로세서와 EZ\_ANC II의 프로세서를 적용한 실시간 제어를 수행하여 사각 강판의 능동진동 제어를 수행한 실험적 연구가 있었다[2]. 그리고 미국의 Reinhorn은 DSP TMS320C40 DSP 보드를 이용한 실시간 능동제어 시뮬레이터를 구현하였다[3]. 한편, 수중 구조물의 형태인 원통 Shell의 능동 제어를 위해 PZT 구동기를 다양한 형태로 설치하고 TMS320C30 DSP 제어기에 PPF(Positive Position Feedback), Filter-x LMS제어기를 적용한 연구가 있었다[4].

국내에서도 능동 진동제어 연구로 340x300x0.5[mm] 강철판

\* hchoi@hhu.ac.kr 051)410-4297

\*\* jaegani@nate.com \*\* speede7@naver.com 051)410-4969

의 진동 제어를 위하여 DSP320C30 DSP 프로세서를 사용하여 다중 적용 Feedforward 제어 입력을 갖는 Feedback 제어 알고리즘을 구성하여 제어한 연구가 있다[5]. 또한, 270x180x0.6[mm]의 유연한 평판을 TMS320C30 DSP 프로세서를 이용한 제어시스템에 Filtered-X LMS 제어 알고리즘을 구성하여 제어하고[6], 선박 상부구조의 종진동을 저감하기 위해서 DSP320C32-60을 이용하여 위상 제어기를 구성하여 능동 제어한 결과가 있었다[7].

한편, 진동의 주파수가 상대적으로 느린 외팔보의 경우에는 제어 시스템을 구성하는데 있어서, 원칩 마이크로프로세서를 이용한 소형저가의 설계방법을 이용하여 연구를 수행한 결과들이 있었다. 원칩 마이크로프로세서의 일종인 PIC87f시리즈로 구성된 컨트롤러를 이용해 외팔보의 능동진동제어기를 구현한 연구[8]와 80c196 원칩 마이크로프로세서로 구성된 컨트롤러를 이용한 외팔보의 능동진동제어기를 구현한 연구가 있었다[9]. 그리고 비교적 낮은 주파수를 갖는 매우 단순한 형태의 외팔보에 대한 능동 제어를 위해 A/D 및 D/A 변환기를 PC의 CPU와 인터페이스하여 단순한 되먹임 제어시스템을 구성하여 제어한 결과가 있었고[10], 고정된 평판에 대한 진동을 MFC(MacCP Fiber Composite) 작동기와 PPF 알고리즘을 이용하여 고유진동주파수의 성분을 감소시킨 연구가 있었다[11].

본 연구에서는 기존의 연구에 사용하였던 PA97의 문제점을 보완해서 진류 제한 기능 및 노이즈에 강한 성능을 가진 PA95를 사용하여 4채널 MIMO 시스템을 갖춘 능동진동제어 시스템을 개발하였다. DSP 프로세서 중에서 가장 빠른 TMS320C6713DSK 프로세서 기반의 제어시스템을 이용한 제어장치를 기반으로 TMS320C6713의 Matlab Simulink연구, AD/DA interface에 대한 최적화된 Simulink 환경을 구현하고 알고리즘을 개발 하였고, 제어시스템의 하드웨어 구성에 대한 설명 및 실험을 통하여 시스템의 안정성을 확인하고 이를 적용하여 평판 구조물의 능동진동 제어 실험을 수행한 연구결과를 소개하였다.

## 2. 압전 소자의 특성

### 2.1 일반적 압전 소자의 수학적 모델링

압전소자의 전기적·기계적 특성은 용도에 따라 달리 표현할 수 있는데, PZT에 적용된 응력에 비례해서 발생하는 전하량과 역으로 PZT를 액추에이터로 사용할 경우 입력된 전기적 에너지에 비례해서 발생하는 물리적 에너지의 관계를 일반적인 압전기본식으로 살펴보면 다음과 같다.

$$S = s_E T + dE \quad (1)$$

$$D = dT + \epsilon_T E \quad (2)$$

여기서  $S$ 는 strain,  $s$ 는 영율의 역수인 탄성 compliance,  $T$ 는 응력,  $d$ 는 압전왜곡정수,  $E$ 는 단위길이 당 전압을 나타내는 전계강도,  $D$ 는 전속밀도, 즉 표면전하밀도이며,  $\epsilon$ 는 유전율을 나타낸다.  $s_E, \epsilon_T$ 는 각각 전계가 일정하거나 '0' 일 때와 응력이 일정하거나 '0' 일 때의 값을 의미한다. 위 식에서  $T=0, E=0$ 의 경우에는 다음식과 같이 표현된다.

$$T=0인\ 경우: S = dE, D = \epsilon E \quad (3)$$

$$E=0인\ 경우: S = sT, D = dT$$

즉 전계에 비례한 strain, 응력에 비례한 전계가 얻어지는 식으로 표현된다. 이것은 정적 응력과 정전계를 가한 경우의 표현이다. 그러나 실제로 압전체의 진동이 있을 때에는 일반적으로  $T \neq 0$ , 혹은  $E \neq 0$  이기 때문에 위의 식의 해석은 달리 표현된다.

### 2.2 사용된 MFC 작동기의 구조

본 연구는 NASA Langley 연구소에서 개발하였고, Smart Material 사에서 상용화하여 유통되고 있는 MFC(Macro Fiber Composite) 작동기를 적용하여 구성하였다. MFC 작동기는 압전 소자인 세라믹 파이버를 기초로 하여 기존의 소자들과는 달리 곡면 형상의 구조물에도 적용이 용이하며,  $d_{33}$  압전 상수를 사용하여 큰 작동 효율을 낼 수 있고, 이방성 구동이 가능하다. MFC 작동기는 사각형의 압전 세라믹 파이버를 정렬하고, 맞물림 전극(interdigitated electrode)을 사용하였으며, 파이버와 파이버 사이, 파이버와 전극 사이에는 에폭시를 삽입하여 서로 접착하는 것과 동시에 파이버를 보호할 수 있도록 하였다. Fig. 1에서 MFC 작동기의 기본 구조도를 나타내었다.

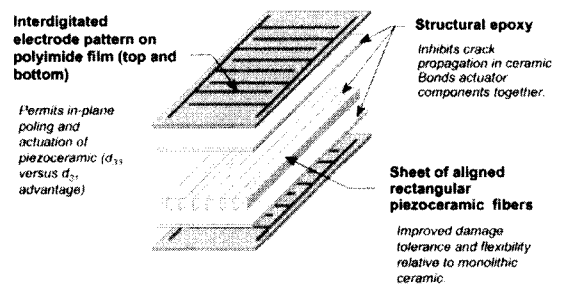


Fig. 1 Structure of MFC actuator

## 3. 제어 시스템의 설계

초고속 프로세서인 TMS320C6713DSK를 이용하여 능동 진동 제어시스템의 성능을 시험하기 위하여 Fig. 2와 같이 구조물에 발생하는 진동을 능동적으로 제어하기 위한 시스템을 목

표로 연구를 수행하였다.

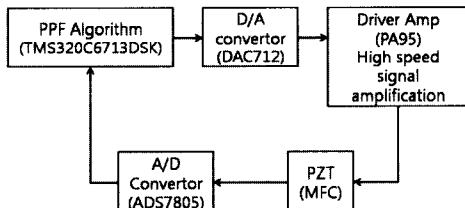


Fig. 2 Block diagram of controller

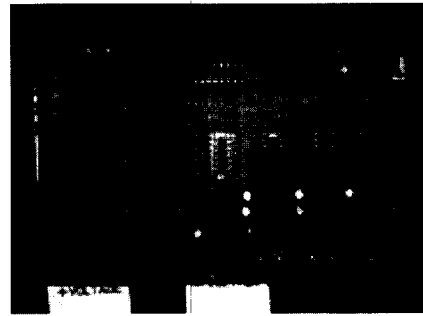


Fig. 4 Controller based on TMS320C6713DSK

3.1 TMS320C6713DSK 의 특성

프로세서 TMS320C6713DSK는 PLL을 이용한 clock rate의 증폭으로 최대 1800MIPS의 성능을 갖고 있다. 이는 기존의 atmega128(16MIPS) 이나 TSM320C32(30MIPS) 계열의 DSP 와 비교하여 60~112배에 달하는 성능이다. 또한 RISC 구조의 32bit Floating point processor이며, 32bit의 EMIF와 EDMA, 16pin의 GPIO를 지원하여 주변장치의 제어 및 응용이 가능하다. 그리고 USBhost interface를 이용한 임베디드 JTAG emulator가 채택되어 있어 전용 프로그램인 Code Composer studio를 이용한 프로그래밍 및 시뮬레이션이 가능하다.

진동 제어기의 다양한 알고리즘 적용에 있어서 이러한 고성능의 제어기를 사용하는 것은 MIMO(Multi Input Multi Output) 시스템의 구현에 있어서 알고리즘 적용에 따른 딜레이가 적다는 장점을 제공한다. 또한, AD/DA(Analog to Digital/Digital to Analog)변환으로 인한 시간지연을 최소화 시켜준다. Fig. 3은 시스템에 사용한 TMS320C6713DSK starter kit이다.

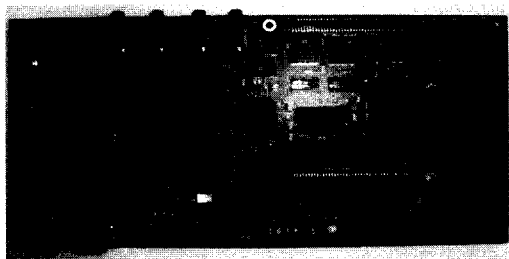


Fig. 3 TMS320C6713DSK starter kit

3.2 A/D, D/A 신호 변환 장치 구성

고성능의 시스템을 구성하기 위하여 본 연구에서는 16bit의 고분해능과 10μs의 고속의 샘플링 속도를 갖춘 AD 및 DA 변환 회로인 ADS7805와 DAC712를 이용하여 회로를 구성하였다.

Fig. 4는 1대의 고속 프로세서에 여러 진동 모드를 제어할 수 있도록 4개의 AD/DA 소자를 동시에 적용하여 신호를 실시간 처리할 수 있는 4 채널의 A/D 및 D/A 신호처리 보드의 제작 사진이다.

3.3 PA95를 이용한 증폭회로의 구성

PA95는 ±50~300V의 전압 공급을 필요로 하며, 30V/μs의 slew rate를 가진 고전압 · 고성능의 연산 증폭기이다.

Fig. 5의 회로를 사용하여 앰프를 구성하였으며, 여기서 다이오드 D1, D2는 입력단의 과전압 방지를 위한 보호 회로이다. 그리고 RCL\_A는 외부 저항에 의한 전류 제한용 소자로, 20Ω을 사용하여 30mA로 전류를 제한하였다. 20배의 반전 증폭을 사용하였으며, 실제 성능 테스트에서 Fig. 6과 같이 20배의 증폭률을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 고전압 앰프의 경우 빠른 응답성을 위해서는 slew rate 특성이 중요하다. Fig. 7의 측정 결과에서 27.6V/μs의 측정값으로 데이터 시트상의 30V/μs와 근사한 성능을 확인할 수 있었다.

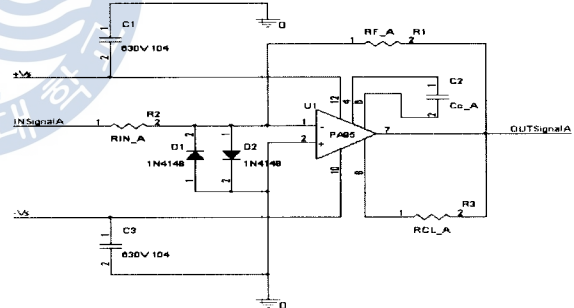


Fig. 5 Actuator Amp Driver Circuit with PA95

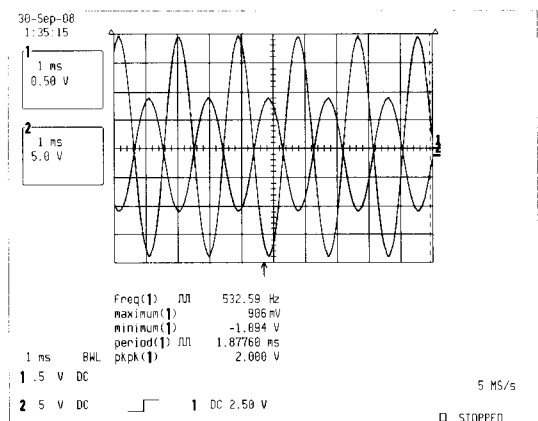


Fig. 6 Amplitude at 1V input

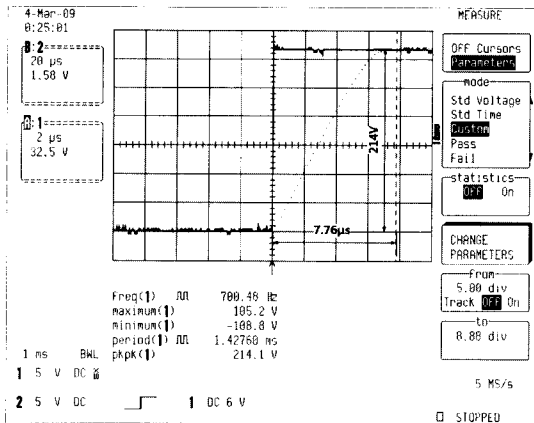


Fig. 7 Slew rate of PA95 amp

### 3.4 제어부의 성능시험

실제적인 진동 발생에 대한 실험 이전에 함수 발생기를 이용하여 AD/DA 인터페이스를 포함한 전체 시스템을 테스트 하였다. Fig. 8의 오실로스코프 파형의 ①(프로브×1) 번은 함수 발생기의 정현파 입력을 나타내고, 제어부(TMS320C6713DSK) 및 고전압 증폭기를 통과한 신호는 알고리즘의 적용에 따라 ②(프로브×10) 번과 같은 20배의 반전 증폭 신호가 출력 되는 것을 통해 성능을 확인하였다.

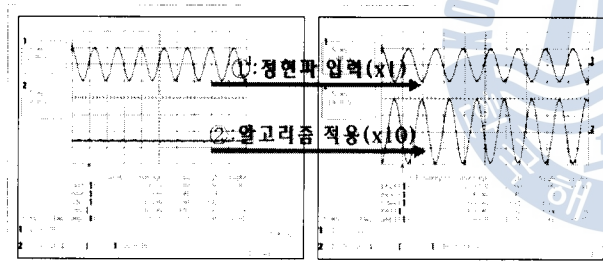


Fig. 8 Sine Curve as Application of the Algorithm

## 4. 제어 알고리즘

### 4.1 PPF 제어 알고리즘

다음의 PPF 제어 알고리즘을 적용하였다.

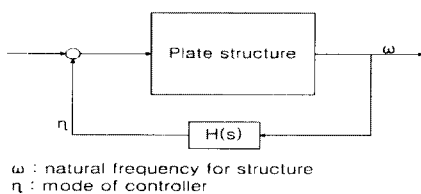


Fig. 9 Block diagram of PPF algorithm

디지털 PPF 제어기의 블록선도는 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있으며, 피드백의 전달함수  $H(s)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있

다.

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \quad (4)$$

여기서  $\omega_f$ 와  $\zeta_f$ 는 각각 PPF 보상회로의 필터 주파수와 감쇠인자이다. 일반적으로 PPF제어기는  $\omega_f$ 를 대상 구조물의 고유진동수와 일치시킴으로써 능동 진동 제어를 달성한다. 식 (4)를 디지털 제어기로 전환하기 위해서 다음과 같은 Bilinear 변환을 사용한다.

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (5)$$

여기서  $T_s$ 는 디지털 제어기의 Sampling 시간을 나타내며 불안정을 일으키지 않도록 충분히 빨라야 한다. 식 (5)를 식 (4)에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$H(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \quad (6)$$

여기서,

$$a_0 = (4/T_s^2 - 4\zeta_f \omega_f / T_s + \omega_f^2) / \Delta$$

$$a_1 = (2\omega_f^2 - 8/T_s^2) / \Delta$$

$$b_0 = \omega_f^2 / \Delta$$

$$b_1 = 2\omega_f^2 / \Delta$$

$$b_2 = \omega_f^2 / \Delta$$

$$\Delta = 4/T_s^2 + 4\zeta_f \omega_f / T_s + \omega_f^2$$

식 (6)을 이산화된 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$u_k = -a_1 u_{k-1} - a_0 u_{k-2} + b_2 (y_k + 2y_{k-1} + y_{k-2}) \quad (7)$$

여기서  $y_k$ 는 감지기 값을 나타내며  $u_k$ 는 계산된 제어력을 의미한다. 디지털 PPF 제어기를 구현함에 있어 가장 중요한 파라미터는  $T_s$  인데 그 역은 디지털 제어기의 샘플링 주파수가 된다. 디지털 PPF 제어기가 효과적으로 작동하기 위해서는 샘플링 주파수가 제어 대상인 진동 모드의 고유 진동수보다 커야 한다.  $\zeta_f$ 는 0.3의 감쇠율로 정하였으며  $\omega_f$ 는 FFT분석기를 사용하여 찾게 된다. 식 (7)의 이산화된 PPF 알고리즘을 C언어로 프로그래밍하여 TMS320C6713DSK을 이용한 실험을 행하였다.

#### 4.2 Simulink를 이용한 GUI 환경 구성

사용자 편의와 신호 발생에 따른 데이터의 실시간 확보를 위하여 Matlab의 Simulink 기반의 GUI 화면을 구성하였다. Fig. 10은 개발한 Simulink기반의 DSP 6xxx 계열의 전체적인 시스템 Block Diagram을 보여주고 있다. Simulink를 통하여 연동하는 TMS320C6713DSK는 하드웨어적인 구성없이도 소프트웨어적인 시뮬레이션이 가능하므로 A/D뿐만 아니라 D/A의 기능도 적용시켜 시스템의 결과 여부를 손쉽게 확인할 수 있어서 이를 이용하는 제어 알고리즘을 적용하는 시스템의 기초적인 환경을 구성하였다.

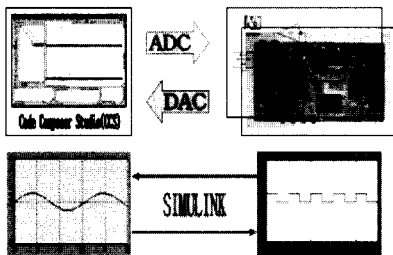


Fig. 10 Application of the Simulink with TMS320C6713

#### 4.3 PPF알고리즘을 적용한 성능 시험결과

개발한 실험용 구조물로 Fig. 11의 좌상단과 같은 130 × 450 × 1.5 크기의 알루미늄 평판을 제작하고, 경계조건에 고 중량의 지지대를 설치하여 외란으로 인한 오차를 줄이고자 하였다. MFC 센서는 가진 및 제어력 발생에 사용되는 M-8528 (112 × 43.5) × 4 매와 센서용인 M-8507(102.5 × 16) × 2 매를 부착하고, MFC를 부착한 구조물에 대한 가속도 센서 및 FFT 변환기를 사용하여 모달 테스트를 수행하여 1, 2차 모드 (533Hz, 702Hz)의 고유진동수를 파악하여 PPF 알고리즘에 적용하였다.

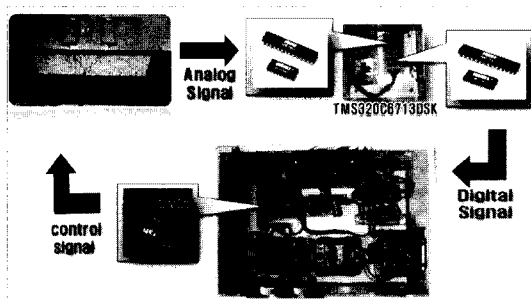


Fig. 11 Construction of system

제어알고리즘은 Simulink 기반의 GUI 화면을 이용하여 코딩하였다. 알고리즘에 의한 제어 성능을 확인하기 위하여 함수 발생기를 이용하여 1, 2 차 모드에 해당하는 정현파(±5V)를 각각 발생시켜 앰프를 통해 20배 증폭된 신호를 2매의

MFC(M-8528)로 인가하여 진동을 발생시켰다. 평판의 진동에 따른 센서 MFC(M-8507)의 출력을 Fig. 11의 시스템을 통해 제어 시그널을 발생 시키고 나머지 2매의 제어 MFC(M-8528)에 인가하여, 그에 따른 변화를 가속도 센서를 이용하여 측정하였다.

Fig. 12는 533Hz와 702Hz 두 개의 공진 모드에서의 실험 결과에 대한 주파수 응답 곡선을 나타내었다. 각각의 실험 결과 1차 모드인 533Hz에서는 약 13.5dB의 진동 저감 효과를 확인할 수 있었70, 2차 모드인 702Hz에서는 약 11.8dB의 진동 저감 효과를 확인할 수 있었다.

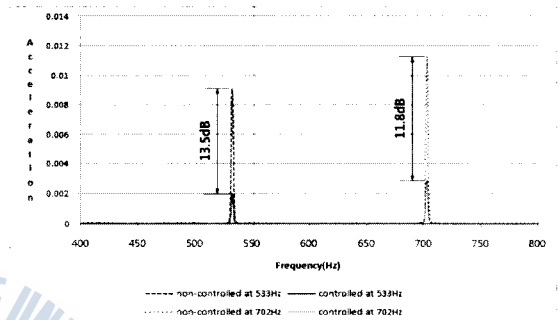


Fig. 12 Vibration reduction at the natural frequency

### 5. 결 론

고속 4채널 MIMO 시스템을 갖춘 능동진동제어 시스템을 개발하였다. 사용자의 편의를 위한 matlab기반의 simulink를 이용하는 GUI 프로그램을 개발하고 MIMO시스템을 적용하여 성공적인 평판 구조물의 능동진동 제어 실험을 수행하였다.

PA95를 적용한 앰프 부는 고전압에서도 안정적인 동작이 가능한 것을 확인할 수 있었고, PPF 알고리즘을 적용한 시스템의 제어 실험에서 최대 13.5dB의 제어 성능을 확인할 수 있었다.

### 후 기

이 연구는 방위사업청/국방과학연구소가 지정한 UVRC(수중운동체특화센터)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

[1] M. Strassberger 외, 2000: Active noise reduction by structural control using piezo-electric actuators, Mechatronics 10, pp.851-868  
 [2] S. D. Snyder외, 2004: Acoustic-centric modal filter



- design for active noise control, Control Engineering Practice 12, pp.1055-1064
- [3] S. Y. Chu., T.T. Soong., A.M. Reinhorn, 2002: Real-time active control verification via a structural simulator, Engineering Structures 24(3), pp.343-353
- [4] Sumali. H, 1992: Demonstration of active structural acoustic control of cylinders, MS. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA
- [5] Y. S. Kim, C. Lee, I. S. Kim, 2000: Active vibration control skill of plate by using piezo actuator, The korean society for noise and vibration engineering 10(6), pp.1048-1058
- [6] S. H. Park., H. S. Kim., J. S. Hong., J. E. Oh, 1997: Active control of plate by using piezo ceramic, The korean society for noise and vibration engineering scholarship conference at spring, pp.434-439
- [7] D. S. Cho, 2004: Study about practical use of active control system for superstructure of ship, The society of naval architects of korea collections of learned papers41(4), pp.77-84
- [8] M. G. Gwark, 2003: Experiment about digital PPF controller by using micro controller, The korean society for noise and vibration engineering, pp.148-152
- [9] L. P. Hong, 2001: Experiment about digital PPF controller by using micro controller, Korea aero space university master's thesis
- [10] Y. G. Kang., J. Y. Choi., J. H. Kim, 2001: Active control of a beam by susing active restriction reduction method, The korean society for noise and vibration engineering 11(4), pp.52-57
- [11] S. D. Cho, 2006: Development of high speed active control system by using DSP processor, Korea maritime university master's thesis

---

원고접수일 : 2010년 01월 11일

원고채택일 : 2010년 02월 10일