

DSP 기반의 고속 능동 진동제어

조성덕* · 이헌권** · 최형식***

*한국해양대학교 기계정보공학부 대학원, **한국해양대학교 기계정보공학부 대학원, ***한국해양대학교 기계정보공학부 교수

Active Vibration Control System Based on DSP

Sung-Duk Cho · Hun-Kwon Lee** · Hyeung-Sik Choi****

**Division of Mechanical and Information Engineering, Graduate school of Korea Maritime University*

***Division of Mechanical and Information Engineering, Graduate school of Korea Maritime University*

****Division of Mechanical and Information Engineering and Underwater Vehicle Research Center, Korea Maritime University
Busan 606-791, Korea*

요 약 : 본 연구에서는 구조물에 발생하는 진동을 제어하기 위하여 DSP320C6713 마이크로프로세서 기반의 새로운 형태의 고속 능동 제어 시스템을 개발하였다. 능동제어 시스템은 DSP series중에서 가장 뛰어난 성능을 가진 C6713 마이크로프로세서와 PZT driver, PZT actuator, 그리고 진동센서로 구성된다. 또한, 적합한 시스템을 구성하기 위해 메인 컨트롤러와 같은 분해능을 갖도록 A/D와 D/A 장치를 구성하였다. 능동진동제어를 위해서는 빠른 처리속도가 중요하므로, 본 연구에서는 빠른 Loop Time을 얻기 위한 H/W 개발을 중점적으로 수행하였다. 개발된 시스템을 이용한 능동진동제어 테스트와 그 결과를 통해 개발된 제어시스템이 구조물의 진동을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 능동제어, DSP, MIMO, 피에조 액츄에이터, 마이크로프로세서

ABSTRACT : *In this paper, we have developed a new ultra high-speed active control system based on the DSP320C6713 microprocessor to control the vibration of the structure actively. The active control system is composed of the DSP320C6713 microprocessor which is the fastest processor in the DSP series, a PZT driver, PZT actuator, and vibration sensor. To compose a compatible system, we composed the A/D and D/A devices with the same speed resolution of the DSP320C6713. Since fast processing is very important in the active control of the vibration, we mainly worked on achieving a very fast loop time. Some tests and their results would be presented to validate the performance of the control system which reduces the vibration of the structure.*

KEY WORDS : Active Control, DSP, MIMO, Piezo actuator, Microprocessor

1. 서 론

구조물에 대한 진동은 운송수단이나 전자제품 같은 경량 유연 구조물에 있어서 지속적인 문제점으로 부각되어 왔다. 이런 진동을 제어하기 위하여 여러 가지 연구가 진행되어 왔는데 구조물에 감쇠를 증가시키거나, 질량을 증가시키는 기존의 수동적인

진동제어 방법은 제어 할 수 있는 진동의 범위나 제어 효율에서 단점을 가지게 된다. 이런 이유로 과거에는 개념 단계에 있던 Smart Skin 형태의 압전소자를 이용한 능동 제어 시스템의 설계 및 개발에 대한 관심이 증가하고 있다.

능동제어 시스템은 구조물에 다수의 센서 및 액츄에이터, 제어기를 삽입해서 진동을 제어하는 복잡한 진동제어 시스템으로 압전소자의 성능이 향상되고, 다수의 액츄에이터를 동시

* hellen--2@hanmail.net 051)410-4969

** corea-kwon@nate.com 051)410-4969

*** hchoi@mail.hhu.ac.kr 051)410-4297 011-9539-6594

에 제어할 수 있을 정도로 제어기의 속도가 향상되어 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

이러한 제어 시스템은 다수의 센서, 액추에이터 및 제어기를 필요로 하기 때문에 Multi-input Multi-output(MIMO) 제어 시스템으로 구성하는 하드웨어 설계기술이 중요하다. 현재까지 Smart Skin용 MIMO에 대한 연구 결과는 보고된 바가 없고, 이의 기초가 될 수 있는 두 개 이하의 입출력(BIBO)을 갖는 시스템을 구성하여 외팔보나 박판보의 능동제어를 수행 한 연구 결과는 다수 존재한다.

국외에서는 센서, 액추에이터 및 제어기를 구성한 대표적인 연구들로 센서 및 구동기로 압전 액추에이터/센서를 적용하고 실시간 제어를 위해 VMEbus 실시간 제어기를 사용하여 박판의 능동제어를 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, 원통 shell의 능동제어를 위해PZT 구동기를 다양한형태로 설치하고 TMS320C30 DSP 제어기에 PPF, filter-x LMS제어기를 적용한연구가 있었다[4].

국내에서도 능동 진동 제어 연구로, 340x300x0.5[mm] 강철판의 진동 제어를 위하여 DSP320C30 DSP 프로세서를 사용하여 다중 적용 feedforward 제어 입력을 갖는 feedback 제어 알고리즘을 구성하여 제어하였다[5]. 또한, 270x180x0.6[mm]의 유연한 평판을 TMS320C30 DSP 프로세서를 이용한 제어시스템에 filtered-X LMS 제어 알고리즘을 구성하여 제어하고[6], 선박 상부구조의 중진동을 저감하기 위해서 DSP320C32-60을 이용하여 위상 제어기를 구성하여 능동 제어한 결과가 있었다 [7].

본 논문에서는 다수의 센서, 액추에이터와 제어기를 동시에 제어하는 MIMO 형태의 능동 제어 시스템을 개발하였다. 다수의 입출력을 제어하기 위하여 고성능 DSP Processor인 TMS320C6713 Processor를 메인 컨트롤러로 사용하였고, 센서로부터 신호를 받고, 액추에이터를 제어하는 고속 A/D 및 D/A 인터페이스 회로를 구성하였다. 고전압을 필요로 하는 새로운 PZT 구동기인 M8557 PZT의 구동을 위해 고전압 Amp를 개발하였고, 400[V] 이상의 전원을 공급할 수 있는 전원회로를 설계하여 Actuator 드라이버를 구동하였다. 또한 개발 시스템 구성 요소와 전체 제어 시스템의 성능시험을 하였고 그 결과를 논하였다.

2. DSP Based Active Control System의 구성

본 연구에서는 Smart skin 형태의 제어 시스템을 구성하기 위해 고속 신호처리가 가능하나 상대적으로 저가이며 부피가 작은 DSP320C6713 프로세서 한 개와 Controller Cell인 센서 및 PZT 구동기로 이루어진 다수의 모듈로 구성된 새로운 형태의 능동 제어시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 또한, 초고속의 DSP

프로세서와 같은 속도의 해상도를 갖는 A/D 및 D/A 변환소자를 선택하여 고속의 Interface 시스템을 구성하였다.

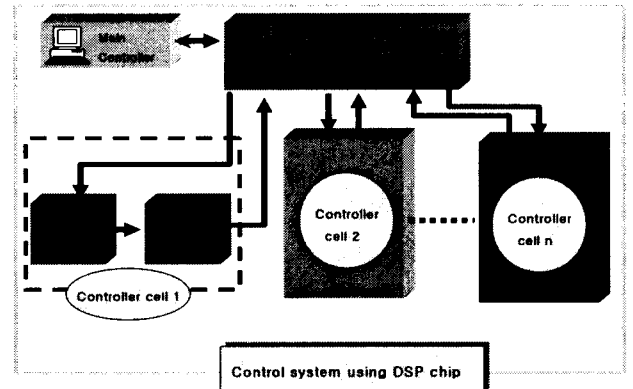


Fig. 1 Control system using DSP processor

보다 구체적으로 PZT 구동기는 PZT 드라이버와 PZT 소자로 구성되는데, 드라이버는 소자를 구동하기 위해 DSP control board로부터의 제어신호를 $\pm 400V$ 이상의 전압으로 증폭하는 부분이고, PZT Sensor부분은 진동의 크기를 감지하여 A/D 변환기를 통해 DSP control board에 전달한다.

개발한 제어 시스템의 각 단위 Cell의 구성을 Hardware를 중심으로 살펴보면 Fig. 2와 같다.

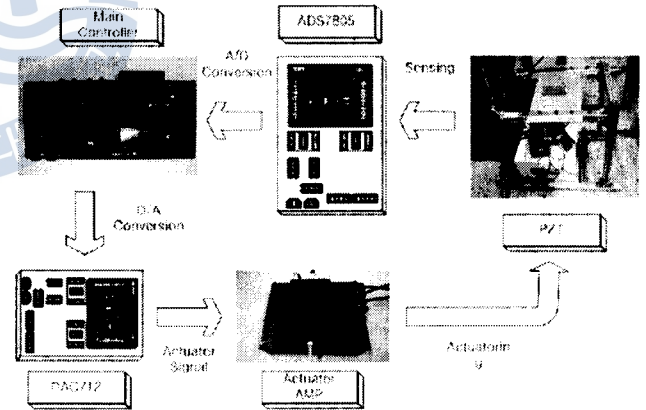


Fig. 2 Control system using DSP320C6713

각 구성 시스템의 구체적인 특성은 다음과 같다.

2.1 Main Processor

시스템 전체를 제어하는 Main Controller는 TI사에서 개발한 고성능 CPU인 TMS320C6713이고 이의 특성은 참고 사이트 [11]에 있다.

2.2 Interface System

외부와 통신을 수행하는 Interface 부분은 PZT 소자의 센서 값을 수신하기 위한 A/D 변환기, 그리고 PZT Actuator Driver 입력신호를 위한 D/A 변환기로 구성되고 이들은 각각

TI사의 ADS7805와 DAC712 Chip 이며 16bit의 분해능을 가지고 있다. Fig. 3은 Main Controller와 통신이 가능하도록 A/D와 D/A를 포함한 I/O 시스템 사진이다.

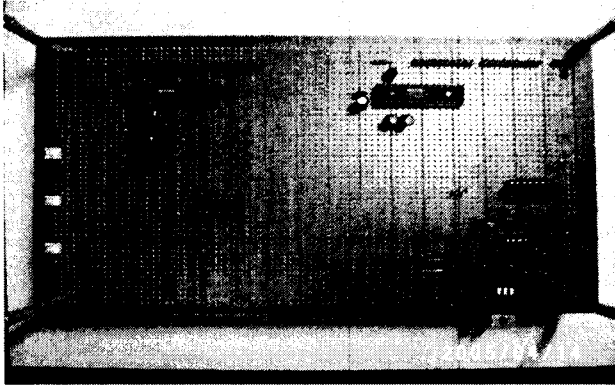


Fig. 3 Interface Board

2.3 Actuator Driver

PZT 구동기는 Main Controller의 제어신호를 능동제어를 수행하는 PZT의 구동전압으로 증폭시킨다. 이를 위해서 상용 Actuator Amp인 PA97을 사용하였고 이를 적용한 시스템 구성은 Fig. 4와 같고 제작한 사진은 Fig. 5와 같다.

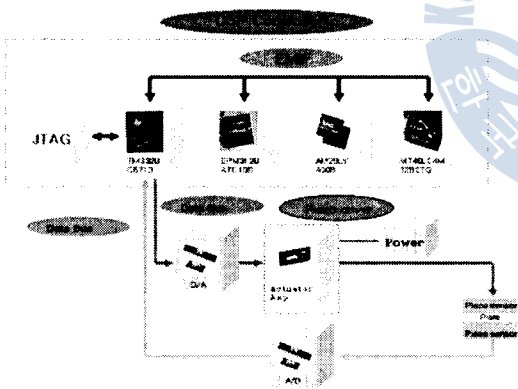


Fig. 4 H/W Construction using High-Voltage AMP

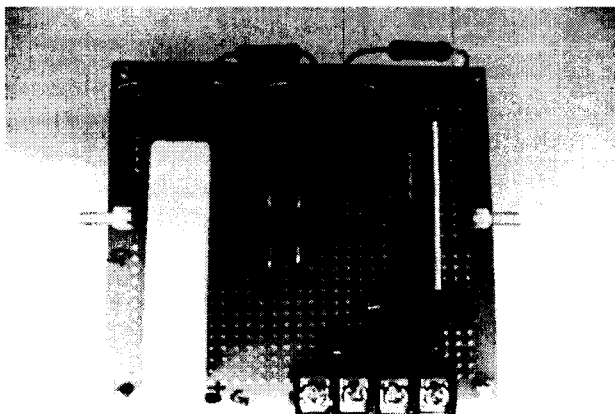


Fig. 5 Driver for PZT Actuator AMP

2.4 Main Processor

능동 진동제어에 사용한 PZT는 NASA에서 개발된 M8557 S1 Type의 제품으로 이의 사양은 참고 사이트 12에 있다.

각각의 구성 시스템을 모두 결합하여 완성된 전체 제어 시스템은 Fig. 6에 나타내었다. PZT의 sensor 단자를 A/D의 입력단에 연결하고 A/D는 Data와 Address Bus를 통해 DSP에 연결하였다. 또한, DSP의 Data와 Address Bus에 D/A 변환기의 data 단자를 연결하였다. D/A 변환기의 Analog 출력단은 PZT Actuator Amp의 입력단으로 연결하였고 비반전 증폭회로로 구성된 Amp의 출력단은 PZT Actuator Amp의 입력신호가 되도록 연결하였다.

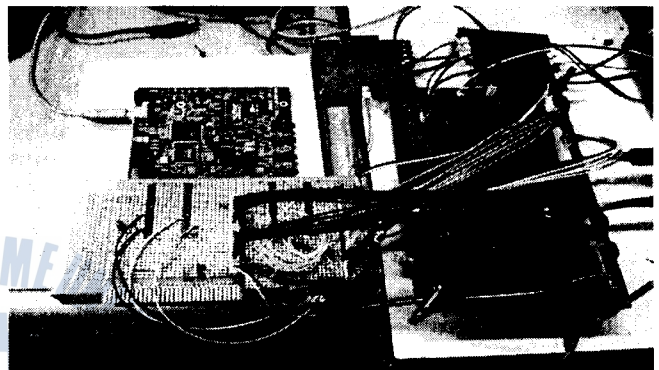


Fig. 6 the developed control system

3. 제어 시스템의 성능시험

3.1 시험장치 구성

M8557 PZT 센서의 sensing 시험을 위해 알루미늄 평판 위에 PZT actuator/sensor를 부착하고, 평판을 양면 지지하는 실험용 구조물을 Fig. 7과 같이 제작하였다. 알루미늄 평판은 210*400[mm]의 넓이와 1.5[mm]의 알루미늄판을 사용하였다. 진동은 PZT의 Actuator부에 전압을 주기적으로 가하고 신호측정은 400[MHz]의 오실로스코프를 이용하였다.

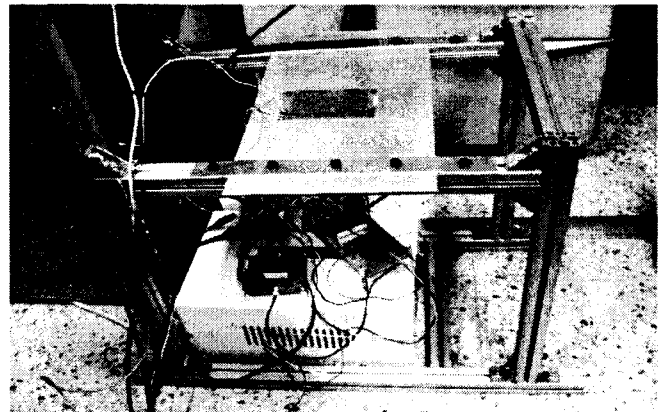


Fig. 7 Test bed for vibration control system

3.2 PZT 소자의 Sensing 시험

PZT 센서의 Sensing Test는 400 [MHz] 디지털 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 함수 발생기를 통해 pulse를 인가하였고, Actuator Amp로 전압을 증폭하여 PZT Actuator를 구동시켜 알루미늄판을 진동시키고 이 진동발생으로 인한 PZT sensor로부터의 출력 전압을 계측하였다.

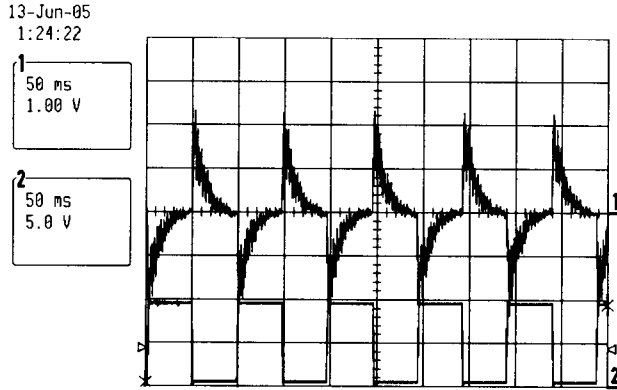


Fig. 8 100[V] test input 10[Hz] : 50[ms]

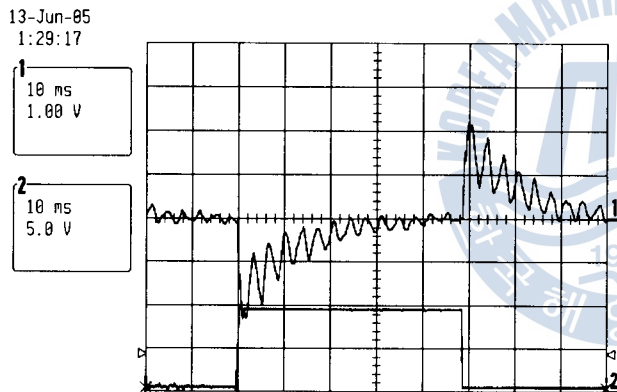


Fig. 9 100[V] test input 10[Hz] : 10[ms]

위의 각 그래프는 1번 신호는 1:1, 2번 신호는 10:1 프로브를 사용하여 측정하였다. 10[Hz], 100[V]로 PZT를 구동시킬 때 센서에서 나오는 신호는 Fig. 8과 같이 약 2[V]의 전압이 출력된다. 전압이 100[V]로 올라가는 순간에 음의 방향으로 출력이 나타나고, 다시 전압이 0[V]로 떨어지는 순간에 양의 방향으로 출력이 나타난다. 하나의 구형파 펄스가 가해질 때 입력의 상승부와 하강부에서 각각 출력이 음양의 방향으로 두 번 나타나는 것을 알 수 있다. 아래의 그래프는 time/div을 1/5로 줄여서 나타낸 그래프로 구형파의 입력 전압이 상승할 때의 센서 신호를 나타내었다. 진동의 발생 순간에 신호가 발생한 후 점점 감소하여 진동이 없어진다. PZT에서 발생하는 센서 값을 통해서 제어 입력이 시작된다.

3.3 Actuator Driver의 성능 시험

Driver의 성능시험은 개발된 두 개의 장치를 각각 시험 하였고 직접 제작한 Bridge 드라이버의 성능을 시험 한 결과는 Fig. 10 및 11과 같다.

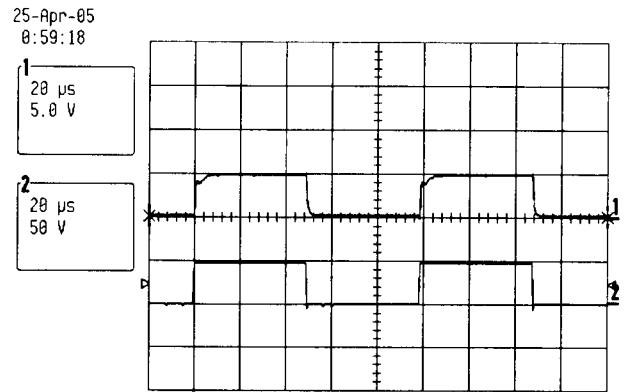


Fig. 10 AMP Driver Output at 50[KHz]

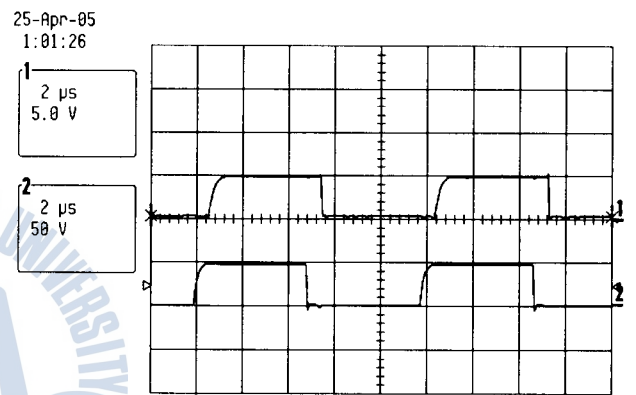


Fig. 11 AMP Driver Output at 200[KHz]

Bridge Driver는 제어루프를 실행시킬 때 진동이 발생하는 순간에서 제어가 시작되는 순간까지의 delay를 최소화할 목적으로 구성하였다. Driver의 성능시험은 함수발생기를 이용하여 Op-Amp에 신호를 인가하였고, I/O Port를 통해 인터럽트가 발생된 후 DSP Controller의 ISR에서 제어신호가 발생되어 드라이버를 구동하고, PZT와 연결되는 출력부에서 전원이 나오기까지의 delay를 측정하였다. 시험은 400[MHz]의 오실로스코프를 이용하였고, 함수발생기의 입력 신호는 5[V]로 설정하였으며, 드라이버의 전원은 50[V]로 인가하였다. 입력 주파수는 50[KHz], 200[KHz]로 주어서 시험하였다.

그래프에서 두 개의 신호 중에서 2번이 입력신호이고, 1번이 Driver에서 출력되는 전압을 나타낸다. 실험을 통해서 신호가 인가되는 순간부터 Driver를 통해 출력이 나갈 때까지의 delay가 1[µs] 미만으로 실시간 제어가 가능하다.

Fig. 12 및 13은 Actuator 앰프 드라이버의 성능을 시험 한 결과이다. DSP Controller에서 A/D를 통해 신호를 받고, 그 신호의 크기에 비례하여 D/A 컨버터를 통해 전압을 출력하고, 그 전압을 Actuator Amp에서 증폭하여 PZT를 구동하게 된다. A/D변환기로 신호가 들어오고 Actuator Amp로 신호가 출력 될 때까지의 delay를 시험한 결과를 Fig. 12 및 13에 나타내었다.

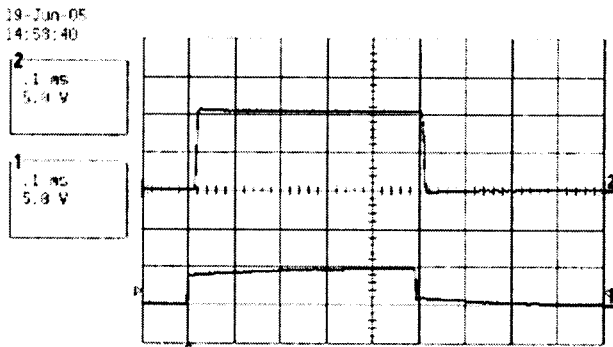


Fig. 12 AMP Driver Output at 1[KHz]

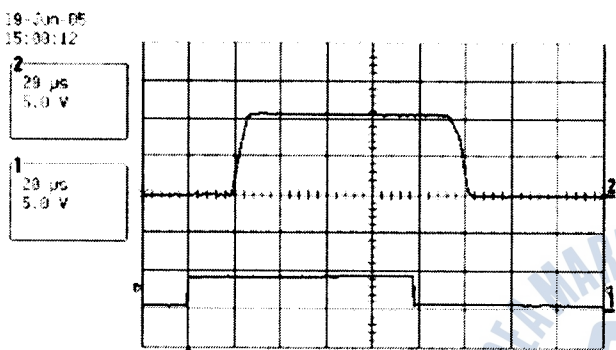


Fig. 13 AMP Driver Output at 5[KHz]

위의 각 그래프는 1번 신호는 1:1, 2번 신호는 10:1 프로브를 사용하여 측정하였다. 각 실험 결과에서 아래 신호는 함수발생기를 이용하여 A/D에 인가하는 신호이며, 위의 신호는 Amp의 출력신호를 나타낸다. A/D에 인가되는 신호는 함수 발생기를 이용해서 구형파를 입력하였고, 이 신호가 DSP Controller를 거친후 D/A를 통해 아날로그 값으로 변환되고, 이 아날로그 값이 PZT Actuator Amp에 입력되어 PZT를 구동시키는 전압으로 출력된다. 각각 1[KHz]와 5[KHz]의 주파수로 A/D에 신호를 인가하였다. 그림의 위쪽은 하나의 칸이 50[V]를 나타내고, 아래쪽은 한 칸이 5[V]를 나타낸다. Amp의 증폭율은 20배를 주었기 때문에, 입력전압의 20배의 전압이 출력되게 된다.

Fig. 12 및 13에서와 같이 신호가 인가되고 Amp에서 출력 전압이 나오기 시작할 때 까지 약 20[μs]의 delay가 발생한다. 이 오차는 PZT에서 sensing된 값이 제어 loop를 거쳐서 제어가 시작될 때까지의 delay 시간이 된다. 이 시간은 A/D의 sampling time과 D/A의 출력시간, 그리고 Amp의 처리시간이다. A/D는 10[μs]의 sampling delay가 있고, D/A는 2[μs], Amp는 8[μs]정도의 delay가 발생한다. 그리고 Amp의 출력 전압이 원하는 목표전압까지 도달하는 slew rate가 생기는데 이것은 8[V/μs]가 된다. 즉 원하는 목표가 400[V]일때 현재의 값이 0[V]라면 400[V]로 전압이 변하는데 50[μs]의 transition time이 생기게 된다. 현재 그래프에서는 100[V]까지 도달하는데 10[μs]정도의 시간이 걸린다. 1[KHz]와 5[KHz]에서 delay는 전체적으로 약 30[μs]정도가 발생하게 된다. 이 delay time은 A/D와 D/A, 그리고 Amp를 보다 고속의 소자로 교체하면 좀 더 줄

일 수 있다.

3.4 능동제어 실험

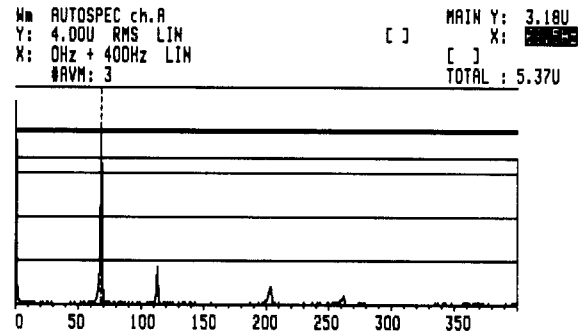


Fig. 14 the mode of uncontrolled system

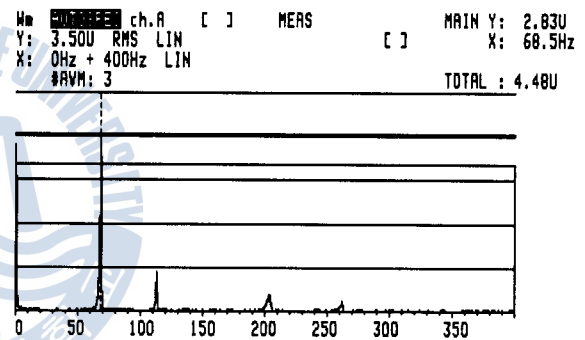


Fig. 15 the mode of controlled system

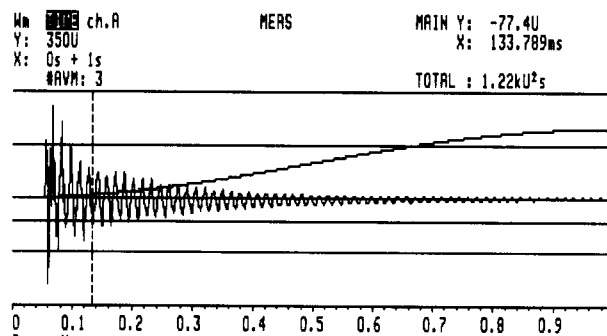


Fig. 16 time response of uncontrolled system

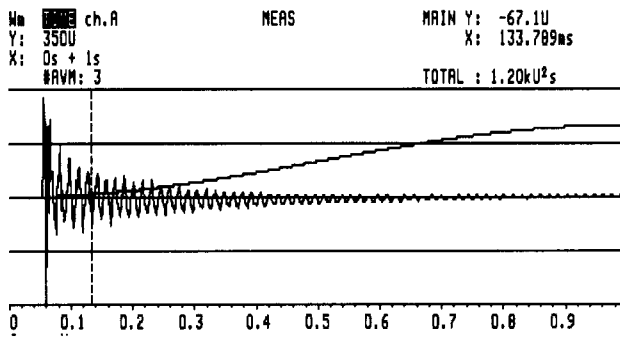


Fig. 17 time response of controlled system

능동제어 실험은 FFT를 이용하여 진동의 크기를 측정하였고, impact pulse를 가한 후에 능동제어를 수행하지 않았을 때와 수행했을 때의 결과를 비교하였다. Fig. 14와 15는 제어를 테스트 판의 첫 번째 공진주파수인 68.5[Hz]에 맞춰 수행 했을 때의 결과이고 Fig. 16과 17은 시간에 따른 진동의 변화를 나타낸 그림이다. 제어를 수행했을 때 첫 번째 공진주파수가 3.18[U] 에서 2.83[U]로 약 10% 감소되었음을 알 수 있다. 여기서 측정단위 [U]는 FFT의 가속도 센서 값으로 $[m/s^2]$ 를 나타낸다. 시간영역에서 보았을 때도 제어를 수행한 경우 진동의 감소효과가 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 초고속 프로세서인 DSP320C6713 소자와 센서 및 고성능 PZT구동기로 이루어진 다수의 모듈로 구성된 새로운 형태의 능동 진동제어시스템을 구성하였다. 또한, PZT를 구동하기 위한 고전압 구동기와 신호 처리를 위해 A/D 및 D/A 변환기로 구성된 인터페이스 시스템을 구성하였다.

그리고 개발 시스템의 구성 모듈들과 전체 제어시스템의 성능시험을 수행하였다. driver를 이용한 능동제어기의 성능시험은, 제어 루프의 delay time이 1[μs] 미만으로 측정되었다. Bridge driver를 사용하였을 시의 장점은 저가로 시스템을 구성할 수 있고, 더욱 고속의 loop time을 구현하는 제어를 할 수 있었다. Actuator Amp driver는 A/D, D/A 변환과 Amp에서 발생하는 slew rate로 약 30[μs]의 delay가 발생하는 결과를 얻었다. Actuator Amp driver를 사용하면, 보다 간단한 시스템을 구축할 수 있지만, 각 주변장치의 처리속도의 한계로 제어루프에서 보다 많은 delay가 발생하게 된다. 이 delay는 보다 고속의 소자를 사용하면 줄일 수 있을 것으로 보이지만, 비용 면에서 고가인 단점이 있다. 향후 개발 시스템의 초고속 응답 성능이 능동 진동 제어에 효과적인 결과를 나타내는 실험을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] M. Strassberger, "Active noise reduction by structural control using piezo-electric actuators", Mechatronics, (2000)
 [2] S. D. Snyder, "Acoustic-centric modal filter design for active noise control", Control Engineering Practice, (2004)

[3] S. Y. Chu, T.T. Soong, A.M. Reinhorn, "Real-time active control verification via a structural simulator", Engineering Structures, 24, pp.343-353, (2002)
 [4] Sumali, "Demonstration of active structural acoustic control of cylinders", MS thesis Virginia Tech, (1992)
 [5] 김영식, 이철, 김인수, "압전작동기/가진기를 이용한 평판의 혼합용 능동 진동 제어 기술", 한국소음진동공학회, 10(6), pp. 1048-1058, (2000)
 [6] 박수홍, 김홍섭, 홍진석, 오재웅, "피에조 세라믹을 이용한 평판의 능동제어", 한국소음진동공학회 춘계학술대회, pp.434-439, (1997)
 [7] 조대승의 7인, "선박의 상부구조 진동 저감을 위한 능동형 제어 장치의 실용화 연구", 대한조선학회논문집, 41(4), pp. 77-84, (2004)
 [8] 광문규 외 "마이크로 컨트롤러를 이용한 디지털 PPF 제어기의 구현과 실험", 한국소음진동공학회, (2003)
 [9] 홍이표, "마이크로 컨트롤러를 이용한 디지털 PPF 제어기의 구현과 실험", 항공대 석사논문, (2001)
 [10] 강영균, 최진영, 김재환, "능동구속감쇠 기법을 이용한 보의 능동 제어", 한국소음진동공학회, 11(4), pp. 52-57, (2001)
 [11] <http://dspvillage.ti.com>
 [12] <http://www.smart-material.com>

원고접수일 : 2005년 12월 30일
 원고채택일 : 2006년 1월 7일