

공학석사 학위논문

DSP Processor 를 이용한 고속 Active
Control System 개발

Development of High-Speed Active Control System Based
on DSP320C6713 Microprocessor

지도교수 최 형 식

2006 년 2 월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

조 성 덕

목 차

Abstract

그림목차

표목차

제 1 장 서론.....	1
1.1 연구 배경 및 기존의 연구사례.....	1
1.2 연구목적 및 내용	3
제 2 장 DSP-Based Active Control System의 개요.....	5
2.1 System의 개요 및 구성.....	5
2.2 System의 개발환경.....	10
제 3 장 System의 수학적 모델링.....	19
3.1 압전 기본식과 변위에 대한 모델링.....	19
제 4 장 External Device의 개발.....	24
4.1 A/D Interface	24
4.2 D/A Interface	26
4.3 Timing Circuit Interface.....	29
제 5 장 Actuator Driver의 개발	33
5.1 PZT Bridge Driver	33
5.2 PZT Actuator Amp Driver	37
5.3 고전압 전원 공급장치	41
제 6 장 System의 성능실험	45
6.1 PPF 제어 알고리즘.....	45
6.2 테스트 환경	47

6.3 PZT의 Sensing Signal 테스트	48
6.4 Actuator Driver의 성능 테스트	50
6.5 능동제어 실험.....	54
제 7 장 결 론	61
참고문헌	63

Development of High-Speed Active Control System

Based on DSP320C6713 Microprocessor

Sungduk Cho

Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

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 Piezoelectric(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. Using the developed system, we have tested the processing time of the processor and peripheral devices for the speed of the loop time, and found that the overall processing time was fast enough to control the vibration mode of the prepared aluminum plate. Also, we have presented two test results with different loop times to identify the superior performance of the DSP320C6713 processor in the fast processing time. We applied the PPF control algorithm to reduce the second mode of the plate, and tested the control system with different loop time. We identified that the active

vibration control system shows good vibration reduction performance and that faster loop time shows better result in vibration reduction. In this reason, we have ensured that the proposed control system based on the fast DSP320C6713 would be a prospective control system in active vibration control.

Key Words : Active Control, DSP, MIMO, Piezo actuator, Microprocessor

그림 목 차

Fig 2.1 Control system using DSP processor.....	8
Fig 2.2 Structure of control system	9
Fig 2.3 Structure of TMS320C6713.....	11
Fig 2.4 Diagram of Main Controller	12
Fig 2.5 Memory Map of Main Controller.....	13
Fig 2.6 DSP Main Controller.....	14
Fig 2.7 Code Composer Studio.....	15
Fig 2.8 PZT Sensor/Actuator.....	17
Fig 3.1 THUNDER Actuator.....	21
Fig 4.1 A/D Interface Circuit.....	25
Fig 4.2 A/D Operation.....	26
Fig 4.3 D/A Interface Circuit.....	28
Fig 4.4 D/A Operation.....	29
Fig 4.5 Timing Circuit Interface.....	31
Fig 4.6 A/D & D/A Circuit.....	32
Fig 5.1 H/W Structure using Bridge Driver.....	34
Fig 5.2 Bridge Actuator Driver Circuit.....	35
Fig 5.3 Bridge Actuator Driver	36

Fig 5.4 H/W Structure using High-Voltage AMP.....	38
Fig 5.5 Actuator Amp Driver Circuit.....	39
Fig 5.6 PZT Actuator Amp Driver.....	41
Fig 5.7 Bridge Circuit	42
Fig 5.8 Figure of Bridge Circuit.....	43
Fig 5.9 Slidac.....	43
Fig 5.10 Developed Control System.....	44
Fig 6.1 Structure for PZT Test.....	47
Fig 6.2 100V Test Input at 10[Hz].....	48
Fig 6.3 100V Test Input at 10[Hz].....	49
Fig 6.4 Driver Output at 50[KHz].....	50
Fig 6.5 Driver Output at 200[KHz].....	51
Fig 6.6 Driver Output at 1[KHz].....	52
Fig 6.7 Driver Output at 5[KHz].....	53
Fig 6.8 The Mode of Uncontrolled System.....	56
Fig 6.9 The Mode of Controlled System.....	56
Fig 6.10The Mode of Uncontrolled System.....	58
Fig 6.11 Control Loop Time : 30[μs].....	58
Fig 6.12 Control Loop Time : 200[μs].....	59
Fig 6.13 Control Loop Time : 500[μs].....	59

표 목 차

Table 2.1 Feature of PZT Sensor/Actuator.....	16
Table 3.1 Equation of Piezoelectricity	20
Table 6.1 Parameter of PPF Algorithm	55

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 기존의 연구사례

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 복합적인 진동제어 시스템으로 압전소자의 성능이 향상되고, 다수의 액츄에이터를 동시에 제어할 수 있을 정도로 제어기의 속도가 향상되어 이에 대한 연구가 시작되고 있다.

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

국외에서는 센서, 액츄에이터 및 제어기를 구성한 대표적인 연구들로 센서 및 구동기로 압전 액츄에이터/센서를 적용하고 실시간 제어를 위해 VMEbus 제어기를 사용하여 박판의 능동제어를 성공적으로 구현한 연구가 있다[1]. 또한, ADSP21062 EZKIT 인 DSP 프로세서와 EZ_ANC II 의 프로세서를 적용한 실시간 제어를 수행하여 사각 강판의 능동진동 제어를 수행한 실험적 연구가 있었다[2]. 그리고 미국의 Reinhorn 은 DSP TMS320C40 DSP 보드를 이용한 실시간 능동제어 시뮬레이터를 구현하였다[3]. 한편, 원통 Shell 의 능동 제어를 위해 PZT 구동기를 다양한 형태로 설치하고 TMS320C30 DSP 제어기에 PPF, Filter-x LMS 제어기를 적용한 연구가 있었다[4].

국내에서도 능동 진동 제어 연구로 340x300x0.5[mm] 강철판의 진동 제어를 위하여 DSP320C30 DSP 프로세서를 사용하여 다중 적응 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 중진동을 저감하기 위해서 DSP320C32-60 을 이용하여 위상 제어기를 구성하여 능동 제어한 결과가 있었다[7].

한편, 진동의 주파수가 상대적으로 느린 외팔보의 경우에는 제어 시스템을 구성하는데 있어서, One-chip 마이크로프로세서를 이용한 소형저가의 설계방법을 이용하여 연구를 수행한 결과들이 있었다. One-chip 마이크로프로세서의 일종인 PIC87f 시리즈로 구성된 컨트롤러를 이용해

외팔보의 능동진동제어기를 구현한 연구[8]와 80c196 One-chip 마이크로프로세서로 구성된 컨트롤러를 이용한 외팔보의 능동진동제어기를 구현한 연구가 있었다[9]. 그리고 비교적 낮은 주파수를 갖는 외팔보의 매우 단순한 형태의 능동 제어를 위해 A/D 및 D/A 변환기를 PC 의 CPU 와 Interface 하여 단순한 되먹임 제어 시스템을 구성하여 제어한 결과가 있다[10].

1.2 연구목적 및 내용

구조물에 능동진동제어기를 적용하기 위해서는 다수의 PZT와 그것을 제어하기 위한 여러 가지 부가 장치들이 필요하다. 그러나 프로세서의 성능의 한계로 다수의 PZT를 제어하기 위해서는 많은 수의 프로세서가 필요하였고, 이것으로 인한 비용의 증가와 중량증대 문제는 실제로 상용화 되는데 큰 걸림돌이 되어 왔다. 이것을 해결하기 위해서는 뛰어난 성능을 가진 하나의 메인 컨트롤러를 사용하여 중앙 집중식으로 다수의 PZT를 동시에 제어하는 MIMO 시스템을 구축하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 하나의 메인 컨트롤러를 사용하여 다수의 센서, 액츄에이터와 외부 장치를 제어하는 MIMO 형태의 능동제어 시스템을 개발하였다. 다수의 입출력을 제어하기 위하여 고성능 DSP 프로세서인 TMS320C6713을 메인 컨트롤러로 사용하였고, 센서로부터 신호를 받고, 액츄에이터를 제어하는 고속 A/D 및 D/A Interface 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 Driver를 구동하였다. 제어 시스템이 얼마나 실시간에 가까운 제어를 수행하는가에 따라 다중 입출력 및 능동제어의 성능에 영향을 미침으로 전체 시스템의 제어 loop time을 측정하였고, 알루미늄 평판에 PZT를 부착하여 Positive Position Feedback(PPF) 제어 알고리즘을 적용하여 능동제어가 이루어지는지를 테스트 하였다. 또한, 제어 loop time이 능동제어의 성능에 미치는 영향을 테스트 하기 위하여 loop time을 변경시키면서 테스트 하여 시스템이 실시간에 가까울수록 능동제어에 더 뛰어난 성능을 발휘함을 확인하였다.

제 2 장 DSP-Based Active Control System의 개요

2.1 System의 개요 및 구성

능동제어에 대한 연구들은 대부분 압전액츄에이터를 사용하여 센싱과 구동을 하는데 압전액츄에이터는 전기를 입력 에너지로 하여 변위 또는 발생력을 출력하는 전기식 액츄에이터이다. 즉, 압전 액츄에이터를 구성하는 압전세라믹스에 전계를 인가하면 늘어나거나 수축하는 성질을 이용하는 것이 액츄에이터라고 할 수 있다. 압전액츄에이터의 특징으로는 ① 미소 변위의 고정밀 제어가 가능하다, ② 발생력이 크다, ③ 응답성이 빠르다, ④ 에너지 변환 효율이 높다, ⑤ 전자적인 간섭이 없다, ⑥ 형태의 영향이 적다 등이 있다.

이와 같은 압전소자를 이용한 Smart skin 형태의 능동 제어시스템을 구성하기 위해서는 Hull 구조물의 표면에 능동 액츄에이터를 다수 설치하여야 한다. 따라서, 적용할 다수의 능동 액츄에이터의 수에 해당하는 제어 시스템을 구성해야 하는데, 입력 주파수 혹은 공진 주파수를 제어할 수 있는 범위 내에서 제어 Chip 과 구동 드라이버 및 센서로 구성된 Controller 보드의 모듈 수를 최적으로 구성해야 하며, 이러한 시스템은 다수의 센서와 상응하는 다수의 액츄에이터로부터의 입출력을 구성하는 Multi-Input Multi-Output(MIMO) 시스템이 되게 된다.

이러한 MIMO 제어 시스템에는 기존의 BIBO 이하의 능동 진동제어의 결과를 바탕으로 하지만 시스템의 구성 방법에 있어서는 기존의 방법과는 다른 형태가 되게 된다. 즉, 고가의 고성능 DSP 제어기와 고가의 구동 드라이버로 구성된 제어 시스템을 구성하여 Smart skin 형태의 제어 시스템을 구성하기에는 비용적인 면과 공간적인 면에서 상당한 어려움이 예상된다. Smart skin 형태의 제어 시스템을 구성하기 위해서는 신호처리 속도는 빠르나 저가이며 부피가 작은 형태의 제어 시스템을 구성하여야 되는 것이다. 즉, 저가의 One-chip 마이크로프로세서, 구동기 및 센서를 한 개의 제어 Cell 로 구성하고 이들을 총괄 제어하는 형태의 제어 시스템이 한 가지 대안이 될수 있다. 이러한 시스템의 장점은 저가이며 다수의 액츄에이터 중에서 고장이 나더라도 고장의 진단과 교체가 용이한 장점이 있다. MIMO 제어시스템의 다른 방법은 보다 고성능의 프로세서를 사용하여 제어 시스템을 구성하는 것이다. 최근 마이크로프로세서 기술의 눈부신 발전으로 과거에 능동 진동 제어에 핵심적으로 사용하던 TMS320C31/32 DSP 프로세서들의 50 배 이상의 연산 처리가 가능한 프로세서들이 출현함에 따라, 이들을 주 제어기로 사용하고 다수의 드라이버와 상응하는 센서를 모듈로 구성하는 방법이 가능해 졌다. 이의 장점도 저가이며 소형화가 가능한 것이다.

이러한 제어 시스템을 구성하기 위해서 보다 구체적으로는 Controller(H/W)의 설계는 One-Chip 마이크로프로세서와 DSP 프로세서를 각각 이용하여 진동을 감지하는 센서로부터의 신호를 받아 제어알고리즘을 구현하여 구동 드라이버에 명령을 내리는 고속 Controller 를 설계하는

기술을 확립하고 이를 바탕으로 시스템을 제작해야 한다. 또한, One-chip 마이크로프로세서는 다양한 종류가 있으나 상대적으로 저가이고 고속 신호처리 성능을 갖춘 프로세서를 선택하여 센서와 구동 드라이버와 일체를 이루는 Controller Cell 모듈을 구성하고 관련 연구를 통해 개발한 제어 알고리즘을 이식하여 제어 시스템 모듈을 개발해야 한다. 또한, DSP 프로세서는 초고속이므로 하나의 프로세서로 15 개 이상의 센서와 드라이버를 연결할 수 있으므로 DSP 프로세서를 제어에 적합하도록 해상도가 같도록 고속의 주변소자와 함께 설계하고 다수의 센서와 드라이버와의 고속의 Interface 시스템을 구성해야 한다. 이를 통해서 하나의 프로세서에 다수의 센서 및 구동 드라이버로 구성된 제어 모듈을 구성하고 개발된 제어 알고리즘을 이식하여 완전한 형태의 제어시스템을 개발해야 한다.

Controller 에서의 디지털 입력명령을 증폭하여 PZT Actuator 에 가하는 구동용 드라이버의 성능은 제어시스템의 성능에 큰 영향을 미치므로 다수의 소형 이며 비용 면에서도 저가인 드라이버를 구성하기 위해 선정된 PZT Actuator 의 특성에 적합한 드라이버의 개발은 필수적이다. Actuator 에 고전압을 주기위해 증폭된 전압을 Switching 할 때 발생하는 시간 지연 역시 제어 시스템의 특성에 큰 영향을 미치므로 이를 해결할 연구가 필수적이다. 또한, Shell 구조물에서 일어나는 진동을 총체적으로 고속 감지하기 위해서는 PZT Sensor 가 적합하다. 하지만 이는 비선형적 특성이 있고, 16 개 이상의 센서로부터의 저전류, 고전압 신호를 처리하는데 노이즈의 발생은

필연적이므로 이들을 필터링하는 알고리즘의 연구가 필요하며 고속으로 감지신호를 변화하여 Controller 와 Interface 하는 기술 개발이 필요하다.

본 연구에서는 Smart skin 형태의 제어 시스템을 구성하기 위해 고속 신호처리가 가능하나 상대적으로 저가이며 부피가 작은 DSP320C6713 프로세서 한 개와 Controller Cell 인 센서 및 PZT 구동기로 이루어진 다수의 모듈로 구성된 새로운 형태의 능동 제어시스템을 Fig 2.1 과 같이 구성하였다. 또한, 초고속의 DSP 프로세서와 같은 속도의 해상도를 갖는 A/D 및 D/A 변환소자를 선택하여 고속의 Interface 시스템을 구성하였다.

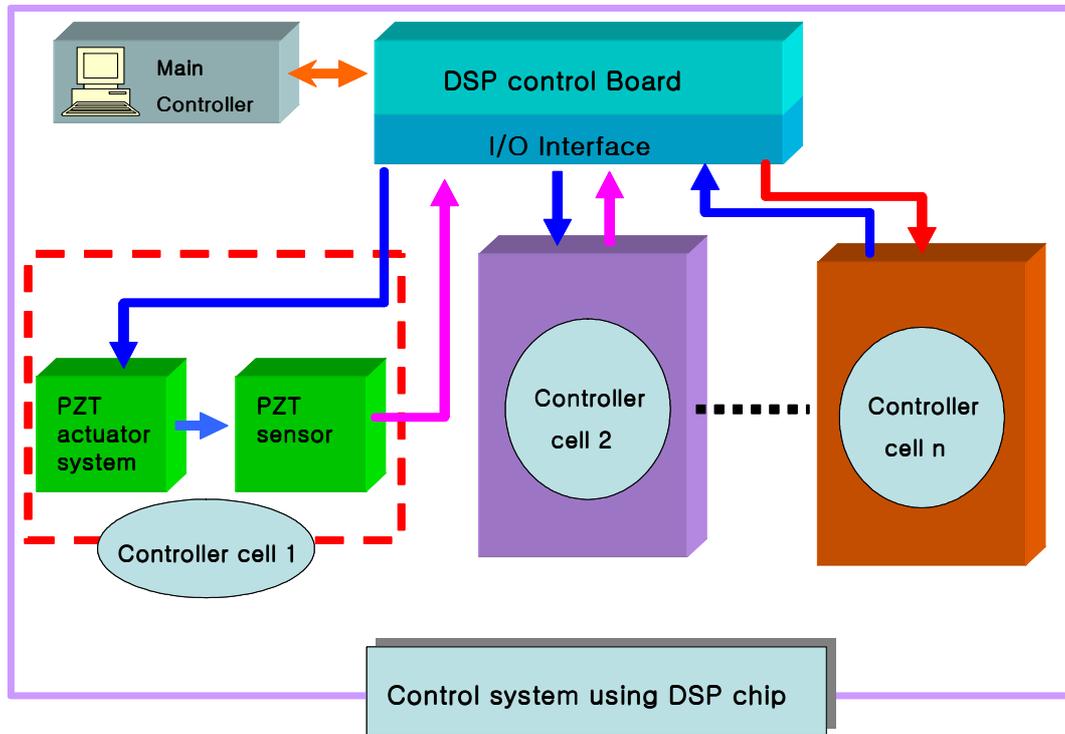


Fig 2.1 Control system using DSP processor

보다 구체적으로 PZT 구동기는 PZT 드라이버와 PZT 소자로 구성되는데, 드라이버는 소자를 구동하기 위해 DSP Control Board 로부터의 제어신호를 $\pm 400[V]$ 이상의 전압으로 증폭하는 부분이고, PZT Sensor 부분은 진동의 크기를 감지하여 A/D 변환기를 통해 DSP control board 에 전달한다. 개발한 제어 시스템의 각 단위 Cell 의 구성을 Hardware 를 중심으로 살펴보면 Fig 2.2 와 같다.

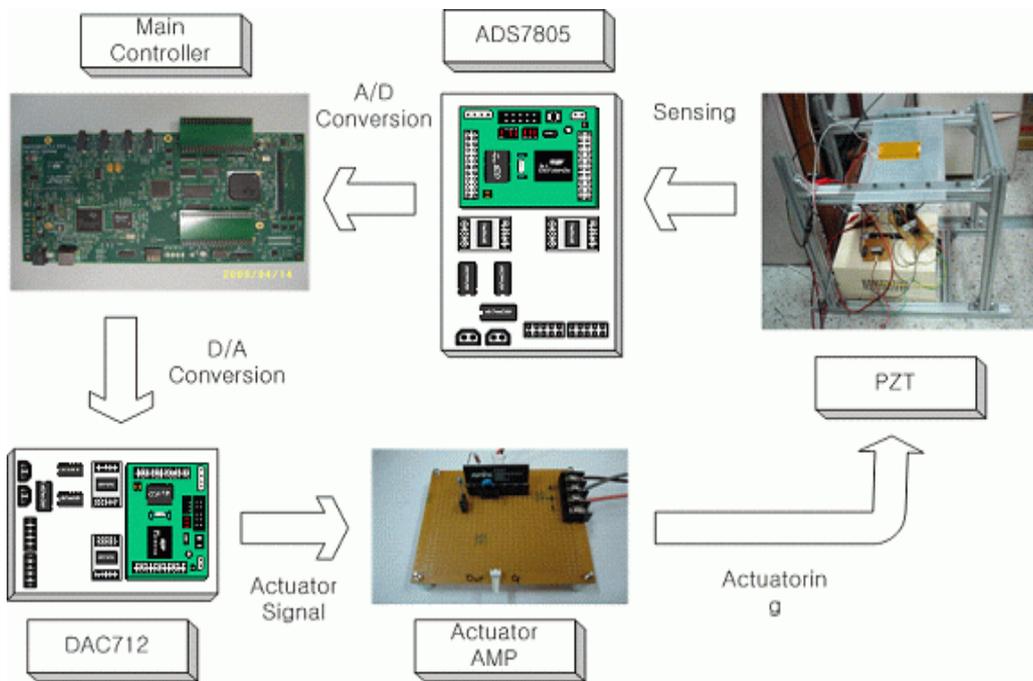


Fig 2.2 Structure of Control System

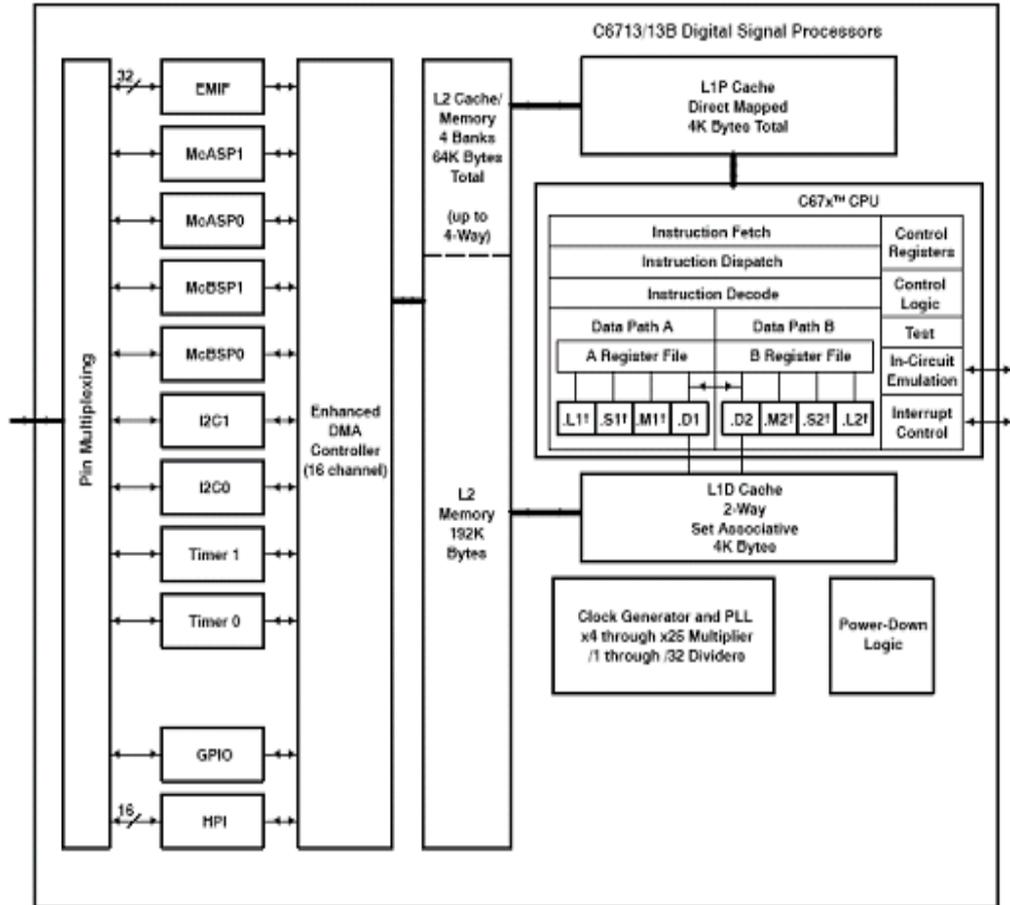
2.2 System의 개발환경

능동제어 시스템은 Main Controller 와 Controller Cell 부분으로 나뉘어져 있다. 그리고 Controller Cell 부분은 Main Controller 와 통신을 수행하는 Interface 부분과 PZT 를 구동하는 Actuator Driver, 그리고 PZT 소자로 이루어진다. Main Controller 는 TI 사의 32bit 고성능 Processor 인 TMS320C6713 을 탑재한 DSP Starter Kit 을 사용하였다. DSP Controller 에는 16Mbyte 의 Memory 와 512Kbyte 의 Flash Memory 가 내장되 있고, USB 를 이용한 JTAG Port 를 사용하여 프로그램을 탑재 할 수 있다. DSP Controller 의 특징은 다음과 같다.

- RISC 구조의 32bit Floating Point Processor
- Advanced Very Long Instruction Word (VLIW) TMS320C67x Core DSP
- 225 MHz, 1600MIPS
- 8KByte 의 L1 Cache 와 256KByte 의 L2 Memory
- 32bit External Memory Interface (EMIF)
- Enhanced Direct-Memory-Access (EDMA) Controller
- 16bit Host-Port-Interface (HPI)
- GPIO Module with 16pin
- Two 32bit General-Purpose Timers
- Flexible Phase-Locked-Loop (PLL) Based Clock Generator Module

- 16Mbytes of SDRAM, 512Kbytes of Flash Memory
- USB host interface 를 이용한 JTAG emulator

Fig 2.3 은 TMS320C6713 의 내부 구조를 나타낸 그림이다.



[†] In addition to fixed-point instructions, these functional units execute floating-point instructions.

EMIF interfaces to:
 -SDRAM
 -SBSRAM
 -SRAM,
 -ROM/Flash, and
 -I/O devices

McBSPs interface to:
 -SPI Control Port
 -High-Speed TDM Codecs
 -AC97 Codecs
 -Serial EEPROM

McASPs interface to:
 -I2S Multichannel ADC, DAC, Codec, DIR
 -DIT, Multiple Outputs

Fig 2.3 Structure of TMS320C6713

Fig 2.4 는 TMS320C6713 이 내장된 Main Controller 의 내부 구조를 나타낸 그림이다.

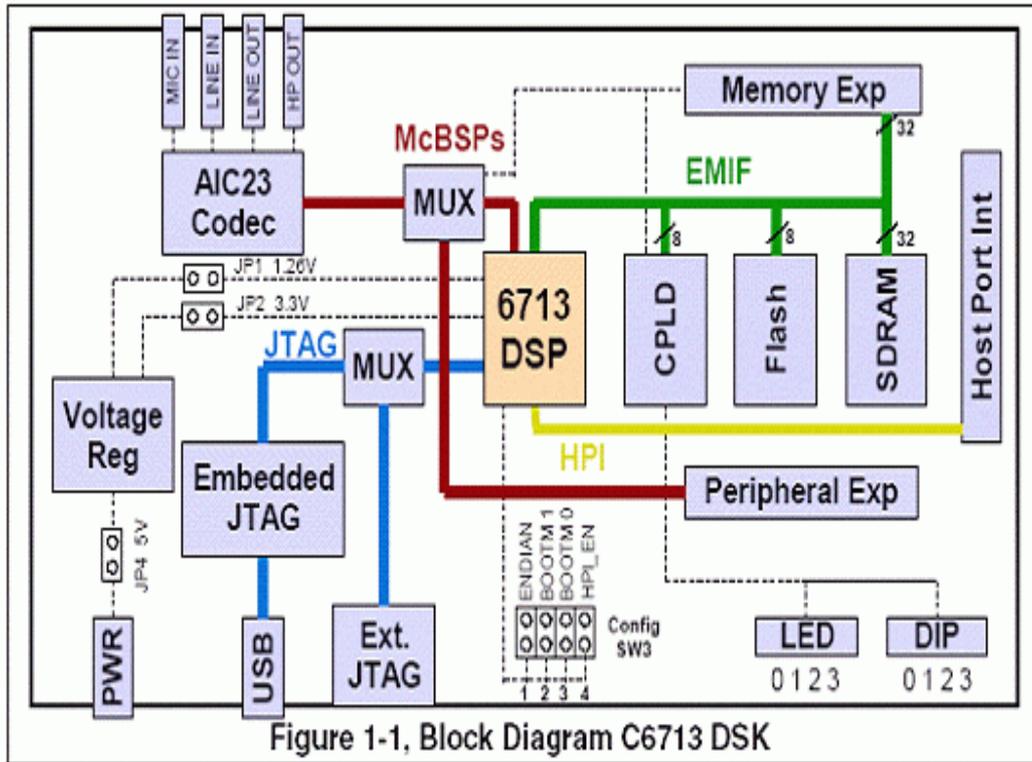


Figure 1-1, Block Diagram C6713 DSK

Fig 2.4 Diagram of Main Controller

Fig 2.5 는 Main Controller 의 내부 Memory Map 을 나타낸 그림이다.

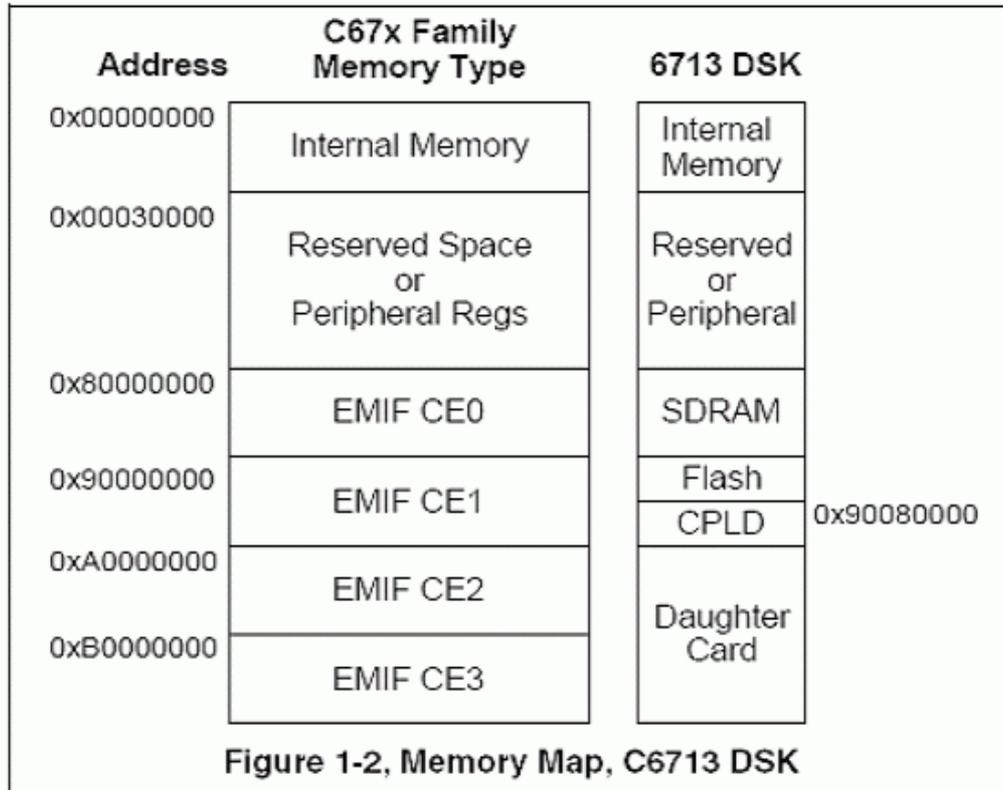


Fig 2.5 Memory Map of Main Controller

Memory Map 에서 CE0 과 CE1 은 RAM 과 FLASH 등에 할당되어 있고, 시스템에서는 CE2 와 CE3 를 사용하여 외부 장치와 연결하게 된다. Fig 2.6 은 DSP Main Controller 의 사진이다.

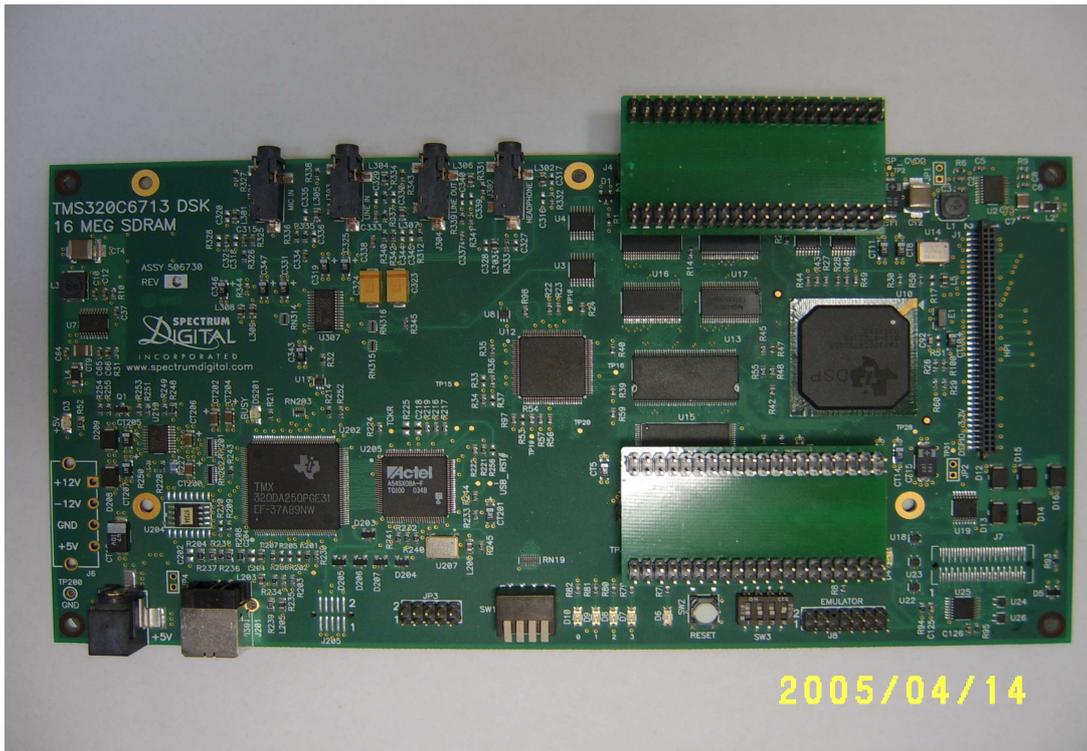


Fig 2.6 DSP Main Controller

DSP Controller 의 EMIF(External Memory Interface)를 사용하여 외부 장치와 통신을 수행하게 된다. 컴파일러는 C6000 계열의 전용 컴파일러인 Code Composer Studio 를 사용하였다. Fig 2.7 은 Code Composer Studio 의 인터페이스 화면을 나타낸 사진이다.

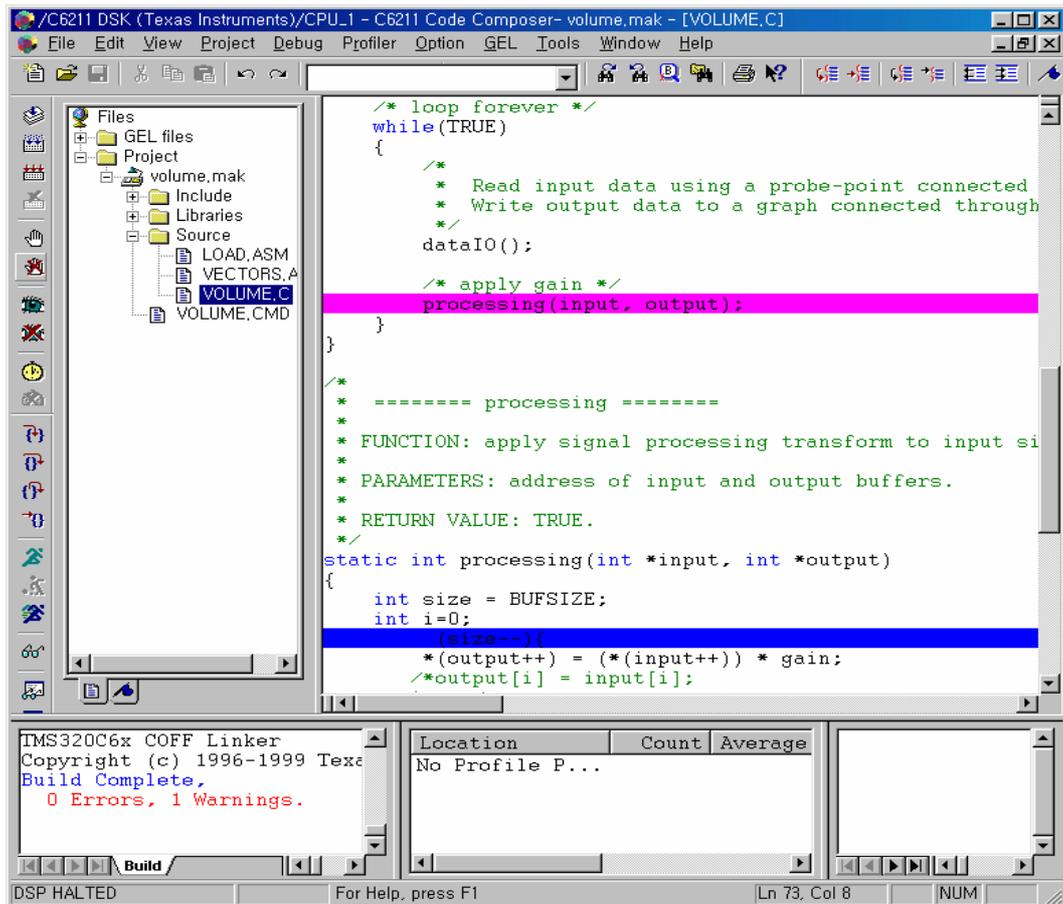


Fig 2.7 Code Composer Studio

제어를 통해 직접 구조물에 부착되어 진동을 제어하는 소자는 NASA 에서 개발된 M8557 S1 Type 의 Micro Fiber Composite(MFC)를 사용하였다. 한 소자에 센싱부와 구동부가 내장되어 있고, 유연한 구조로 되어 있어 부착이 용이하다. PZT 의 특징은 Table 2.1 과 같다. Fig 2.8 에 PZT 의 외형을 나타내었다.

Table 2.1 Feature of PZT Sensor/Actuator

Overall dimensions:	110[mm] x 75[mm] (4.3" x 2.9")
active area (actuator):	85[mm] x 50[mm] (3.4" x 2.0")
active area (sensor):	85[mm] x 3.5[mm] (3.4" x 0.14")
IDE Spacing:	0.5[mm] (20 mil)
Capacitance:	Approx. 12[nF]
PZT Type:	Navy Type II
max Voltage:	-500[V] to + 1500[V]
max Tensile Strain:	4500 Part Per Million(ppm)



Fig 2.8 PZT Sensor/Actuator

DSP Controller를 통해 PZT의 센서 값을 읽어 들이고, 구동을 시키기 위해서는 두 장치를 연결하는 Interface 부분이 필요하다. 전압으로 출력되는 센서 값을 읽기 위해서 A/D 회로가 부가적으로 필요하고, PZT를 제어하기 위해 Controller의 명령을 변화시켜주는 D/A 회로가 있어야 된다. TI사의 16bit Chip인 ADS7805와 DAC712를 사용하여 각각의 Interface 부분을 구현하였다. 그리고 높은 구동전압이 필요한 PZT를 사용하기 위해 Slidac을 이용하여 전원공급 회로를 구성하였다.

Main Controller에서의 제어 신호를 PZT용 구동전압으로 변경시켜주는 PZT Actuator Driver는 시스템에서 중요한 부분이다. 이 장치를 구현하기

위해 두 가지 형태의 Driver를 개발하였다. Bridge Circuit을 이용한 형태와, 고전압 Amp를 이용한 형태가 있다. 각각 장단점이 있으나, 본 논문에서는 고전압 Amp를 이용한 Actuator Driver를 이용하여 제어시스템을 구성하였다.

제 3 장 System의 수학적 모델링

3.1 압전 기본식과 변위에 대한 모델링

압전효과(Piezoelectricity)는 100 여년전 Jacques Curie 와 Pierre 에 의해 수정의 크리스털에 관한 연구로부터 발견되었으며 이후 압전재료들은 의료, 군사, 가전제품 등 여러분야에서 이용되어 왔다. 압전재료의 압전성 표현은 압전 기본식으로 나타낸다. 압전 기본식[11]은 Table3.1 과 같이 d, e, g, h 형 기본식 등의 종류가 있지만, 그 내용은 동일하며 용도에 따라 형식을 달리 표현한 것이다. 예를 들어 d 형 기본식을 살펴보면,

$$\begin{aligned} S &= s^E T + dE \\ D &= dT + e^T E \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 S 는 strain, s 는 영율의 역수인 탄성 compliance, T 는 응력, d 는 압전왜곡정수, E 는 단위길이당 전압을 나타내는 전기장도, D 는 전속밀도, 즉 표면전하밀도이며, e 는 유전율을 나타낸다. 위 첨자 E, T 는 각각 전계가 일정하거나 zero 일때와 응력이 일정하거나 zero 일 때의 값을 의미한다. 위 식에서 T=0, E=0 의 경우에는 다음식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} T=0 \text{ 인 경우} &: S = sdE, \quad D = eE \\ E=0 \text{ 인 경우} &: S = sT, \quad D = dT \end{aligned} \quad (2)$$

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.

Table 3.1 Equation of Piezoelectricity

변수	기계적 변수	S(strain), T(stress)
	전기적 변수	D(dielectric displacement), E(field strength)
기본식	d 형식	$S = s^E T + dE$
		$D = dT + e^T E$
	e 형식	$T = c^E S + eE$
		$D = eS + e^S E$
	g 형식	$S = S^D T + gD$
		$E = -gT + \beta^T D$
	h 형식	$T = c^{DS} - hD$
		$E = -hS + \beta^S D$

여기서 g 는 전압출력계수인 압전정수이며, β 는 역유전율이다.

MFC 액츄에이터는 NASA Langley 연구소에서 개발한 액츄에이터로서 d33 효과를 이용해 변형율을 일반 압전세라믹 액츄에이터에 비해 높이고 폴리머 매트릭스를 이용해 유연하게 만들어 곡면형상의 구조물에도 쉽게 적용할 수 있도록 만들었다. MFC 액츄에이터는 앞으로 경량 구조물의 능동

진동제어에 많이 응용될 수 있을 것으로 기대된다. 다른 작동기인 THUNDER 에 대해 알아보면 이 작동기는 미국 항공우주국 랭리 연구소(NASA-Langley Research Center)에서 개발된 박판 유니모프 작동기(Thin layer Unimorph Driver)로 낮은 입력전압에 비해 큰 작동 변위를 발생할 수 있는 압전 세라믹 작동기이고, Fig 3.1 과 같이 금속 재료위에 압전 박판이 적층되어 있다. THUNDER 는 스테인리스 스틸 위에 고온 경화용 접착제를 바른 후 압전 세라믹을 놓고, 그 위에 알루미늄 포일을 덮어 325[°C]에서 경화시킨 후 상온으로 냉각시키면, 각 구성 요소의 열팽창 계수 차이로 인하여 곡률을 가지게 된다. 이러한 기하학적인 형상 때문에 전기장이 걸리게 되면 압전 세라믹 층의 변형은 곡률 변화를 가져오고 중앙 부분에서 작동 변위를 발생시킨다.

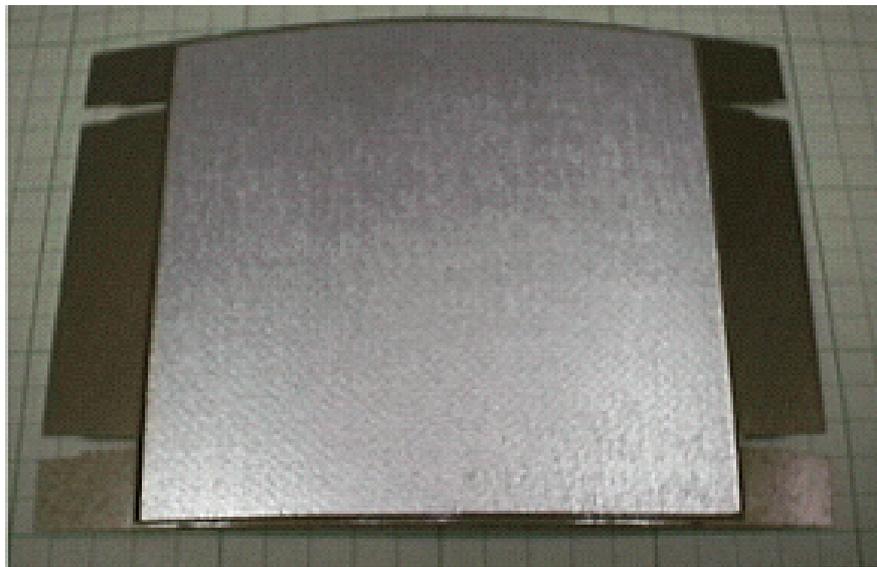


Fig 3.1 THUNDER Actuator

압전재료의 변위에 대한 모델링을 위해 PZT 의 한 종류인 THUNDER 작동기에 압전 기본식을 적용하여 계산하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. THUNDER 작동기의 형상 곡률을 R, 압전박판이 붙어 있는 금속의 너비를 b, 두께를 h, 그리고 탄성계수를 E 로 하고 이에 상응하는 THUNDER 의 너비, 두께, 탄성계수를 각각 b_{pe}, h_{pe} 그리고 E_{pe} 라하자. 그리고 Backing Material 은 $\theta=0$ 에서 $\theta=L$ 에 걸쳐있고 압전박판은 $[\gamma_1, \gamma_2]$ 영역에 걸쳐 있는 것을 함수로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_{pe} = \begin{cases} 1, & \gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_2 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $\gamma_1 = R\theta_1$, $\gamma_2 = R\theta_2$, 그리고 θ_1 , θ_2 는 압전박판이 붙어있는 각도를 나타낸다. 수직과 수평방향 변위를 각각 v 와 w 로 나타내었다.

Euler Beam 이론을 적용하면 힘과 모멘트 평형식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{R} \frac{dN_\theta}{d\theta} = \hat{q}_\theta \quad (4)$$

$$\frac{1}{R^2} \frac{d^2N_\theta}{d\theta^2} + \frac{1}{R} N_\theta = \hat{q}_\theta \quad \frac{1}{R^2} \frac{d^2\hat{M}_\theta}{d\theta^2} \quad (5)$$

여기서 N_θ 와 M_θ 는 각각 잔류 응력과 모멘트를 나타내고 \hat{M}_θ 는 압전박판에 인가된 전압에 의해 만들어지는 모멘트를 나타낸다. Backing Material 과 압전박판의 물성치를 포함해서 유도하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N_\theta = Eh \left(\frac{1}{R} \frac{dv}{d\theta} + \frac{w}{R} \right) + E_{pe} \left[\frac{h_{pe}}{R} \left(\frac{dv}{d\theta} + w \right) - \frac{a_2}{2R^2} \frac{d^2w}{d\theta^2} \right] X_{pe}(\theta) \quad (6)$$

여기서 $a_2 \equiv (h/2 + h_{pe})^2 - (h/2)^2$, $a_3 \equiv (h/2 + h_{pe})^3 - (h/2)^3$ 이다. 압전재료의 선형성이 보장되는 영역에서 작동시킨다고 가정하면 인가된 전압[V]에 대한 모멘트는 다음과 같은 식 (7)로 표현되고 이 식을 이용하여 경계 조건에 따른 변위를 계산할 수 있다.

$$\hat{M}_\theta = \frac{-E_{pe}d_{31}}{2} V (h + h_{pe}) X_{pe}(\theta) \quad (7)$$

제 4 장 External Device의 개발

4.1 A/D Interface

PZT Sensor 에서 나오는 출력 전압을 A/D 를 통해 디지털 값으로 변화시켜 Controller 로 보내게 된다. ADS7805 는 아날로그 전압을 16bit 의 디지털 값으로 바꿔주고 $\pm 10[V]$ 의 전압 범위를 측정할 수 있다. PZT Sensor 에서 나오는 전압은 1[V] 정도의 전압이 출력되므로 충분히 측정할 수 있고 낮은 전압이 나오는 PZT 에서는 Op-Amp 를 사용하여 전압을 증폭하여 측정할 수 있도록 구성하였다. 본 연구에서 사용한 PZT 센서는 NASA 에서 개발된 M8557 S1 Type 의 제품으로 출력 전압이 직접 A/D 변환 가능하므로 부가적인 증폭장치는 불필요하다. ADS7805 의 특징은 다음과 같다.

- TI 사의 16bit 10us Sampling CMOS Analog-To-Digital Converter
- 100 KHz min Sampling Rate
- Standard + 10[V] ~ -10[V] Input Range
- Pull Parallel Data Output
- Uses internal or external reference
- 100mW max Power dissipation

A/D 변환기는 Address Line 과 Data Line 을 통해 Controller 와 통신을 하고 EMIF 의 CE3 영역을 사용하여 주소를 Mapping 하게 된다. 또한, 100[KHz]의 Sampling rate 를 가지고 있으므로 10[μs] 단위로 고속으로 진동의 값을 측정할 수 있다. Fig 4.1 의 인터페이스 회로에 나타난 바와 같이 DSP 의 16 개의 Data Bus 에 A/D 의 Data Line 을 연결하고 /CS 를 /CE3 에 연결하여 활성화 시킨다. Address Line 에 R/C Pin 을 연결하여 주소 값 지정을 통해 Read, Convert 를 제어하고 BYTE Pin 은 GND 에 연결하여 16 개의 Data Line 을 모두 사용하게 된다. /BUSY 는 I/O Port Pin 에 연결하여 Conversion 이 진행 중인지, 완료했는지를 체크하여 sampling 완료 후에 데이터를 읽어 들인다. Fig 4.2 는 A/D 를 제어하기 위한 Operation 을 나타낸 것이다.

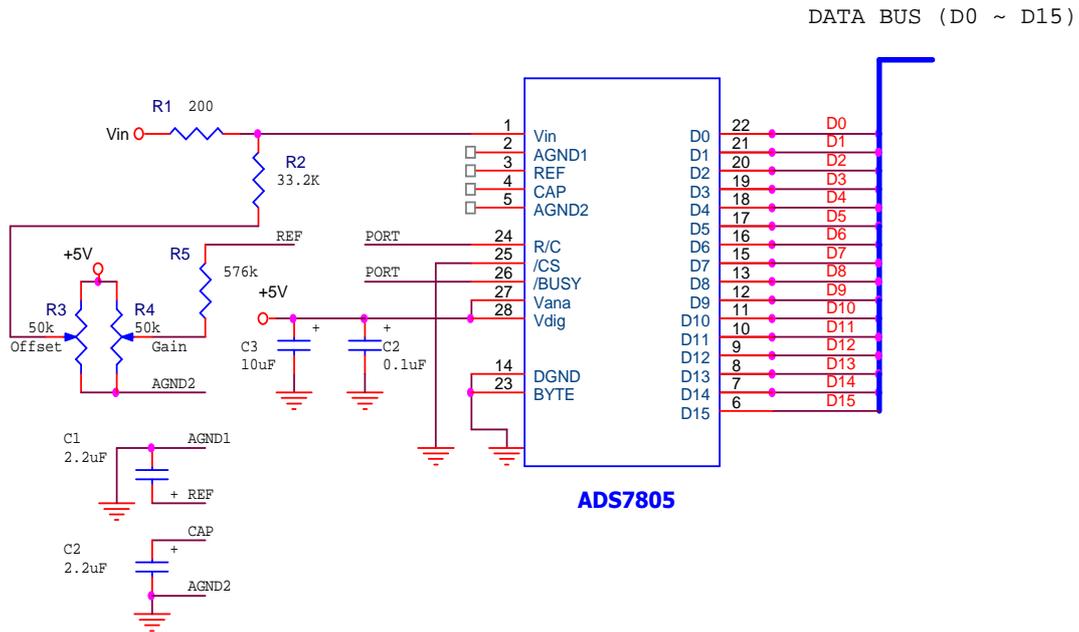


Fig 4.1 A/D Interface Circuit

\overline{CS}	R/\overline{C}	\overline{BUSY}	OPERATION
1	X	X	None. Databus is in Hi-Z state.
↓	0	1	Initiates conversion "n". Databus remains in Hi-Z state.
0	↓	1	Initiates conversion "n". Databus enters Hi-Z state.
0	1	↑	Conversion "n" completed. Valid data from conversion "n" on the databus.
↓	1	1	Enables databus with valid data from conversion "n".
↓	1	0	Enables databus with valid data from conversion "n-1" ⁽¹⁾ . Conversion n in progress.
0	↑	0	Enables databus with valid data from conversion "n-1" ⁽¹⁾ . Conversion "n" in progress.
0	0	↑	New conversion initiated without acquisition of a new signal. Data will be invalid. \overline{CS} and/or R/\overline{C} must be HIGH when \overline{BUSY} goes HIGH.
X	X	0	New convert commands ignored. Conversion "n" in progress.
NOTE: (1) See Figures 3 and 4 for constraints on data valid from conversion "n-1".			

Fig 4.2 A/D Operation

Fig 4.1 의 Analog 입력 단에 연결된 가변저항을 통해서 A/D 입력 오프셋을 조절할 수 있다. Sampling time 이 $10[\mu s]$ 가 되므로 Conversion 명령을 내리고 $10[\mu s]$ 후에 값을 읽어 오는 방법이 있고, \overline{BUSY} Pin 을 통해서 Conversion 이 끝나는 때를 측정한 후 값을 읽어 들일수도 있다.

4.2 D/A Interface

PZT sensor로부터의 진동신호를 A/D 변환한 후 디지털 신호를 Controller 에서 읽어 들이고, Controller 에서 구성된 제어 알고리즘에 따라 명령신호가 D/A 를 통해 출력된다. D/A 에서 나온 제어 신호는 Actuator

Driver 에 연결되어 PZT 를 구동하게 된다. 사용한 D/A Chip 인 DAC712 의 특징은 다음과 같다.

- TI 사의 16bit Digital-To-Analog Converter with 16bit Bus Interface
- High-Speed 16bit Parallel Double-Buffered Interface
- Voltage Output : + 10[V] ~ -10[V]
- Gain and Offset Adjust
- 600mW max power dissipation
- 16bit monotonic over temperature

Fig 4.3 은 D/A 를 DSP Controller 와 연결할 수 있도록 구성한 회로이다. Controller 에서 출력되는 디지털 레벨의 제어명령은 D/A 를 통해 $\pm 10[V]$ 내의 Analog 신호로 변환되어 PZT Driver 의 증폭회로로 들어가도록 시스템을 구성하였다. 이 아날로그 신호는 400[V] 이상의 고전압 출력이 가능한 PZT 드라이버 내의 OP-Amp 에 연결되고, 증폭 비율에 따라 D/A 변환기의 출력 Analog 값에 비례해서 Actuator 의 구동전압이 출력된다. D/A 변환기도 A/D 변환기와 유사하게 Address Line 과 Data Line 을 통해 CE2 영역에 Mapping 된다. + 10[V]에서 -10[V]까지의 전압범위를 $5[V/\mu s]$ 의 Slew rate 로 Transition 이 가능하므로 최대 $4[\mu s]$ 의 Delay 가 발생한다.

DSP 의 16 개의 Data Bus 에 D/A 의 Data Line 을 연결하고, Address Bus 를 /A0, /A1 에 연결한다. /WR Pin 은 DSP 의 /WE 와 /CE2 에 OR 시켜서 연결하고, /CLR Pin 은 Pull Up 시켜 놓는다. 가변 저항을 통해 출력 전압의 Offset 을 조절할 수 있고 출력 단의 전압을 통해 PZT Amp 의 출력전압을 조절하게 된다. Fig 4.4 는 D/A 를 제어하기 위한 Operation 을 나타낸 그림이다.

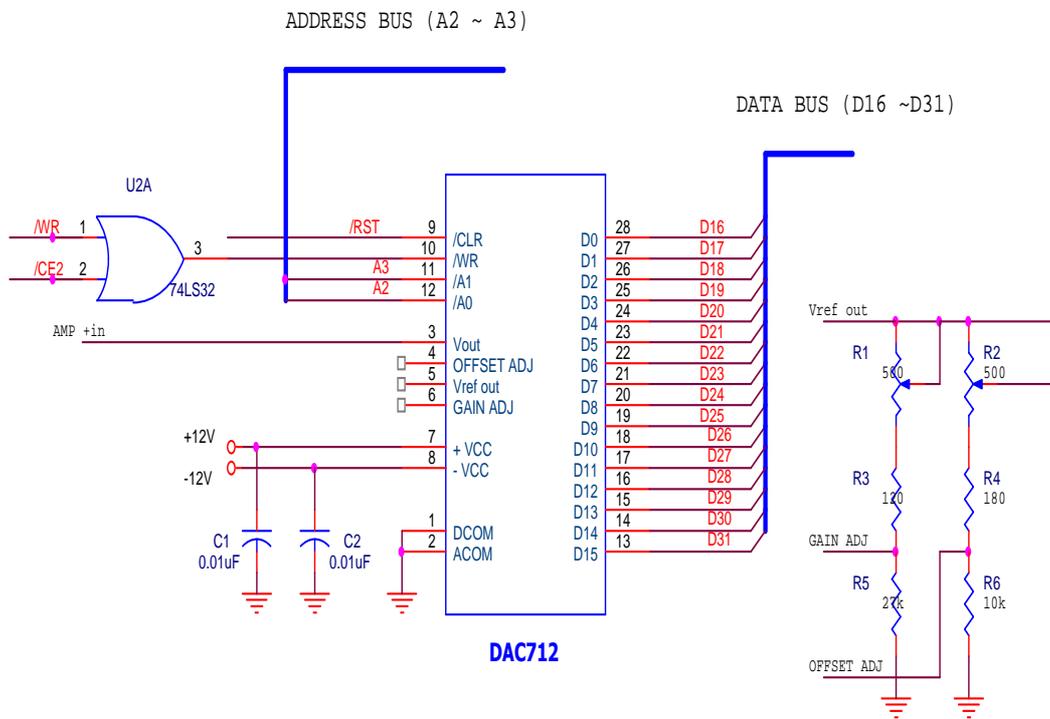


Fig 4.3 D/A Interface Circuit

\overline{A}_0	\overline{A}_1	\overline{WR}	\overline{CLR}	DESCRIPTION
0	1	1 → 0 → 1	1	Load Input Latch
1	0	1 → 0 → 1	1	Load D/A Latch
1	1	1 → 0 → 1	1	No Change
0	0	0	1	Latches Transparent
X	X	1	1	No Change
X	X	X	0	Reset D/A Latch

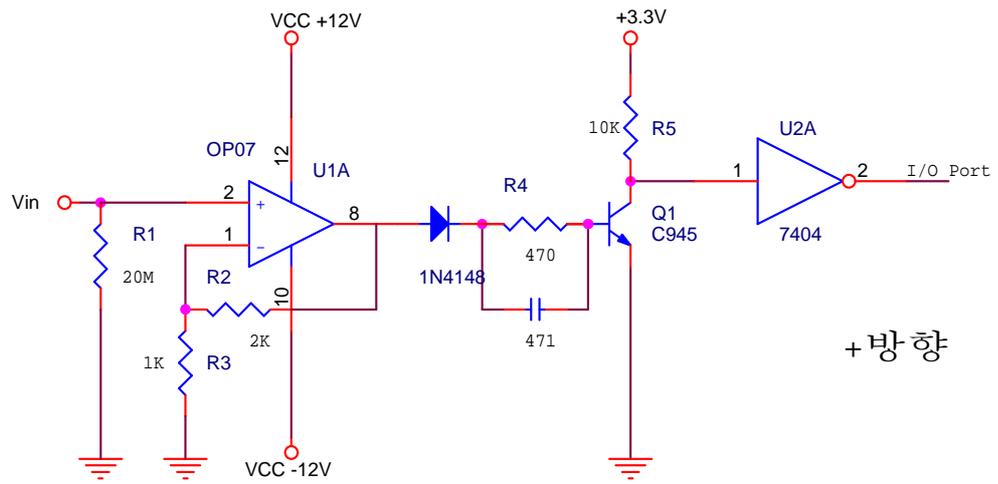
Fig 4.4 D/A Operation

4.3 Timing Circuit Interface

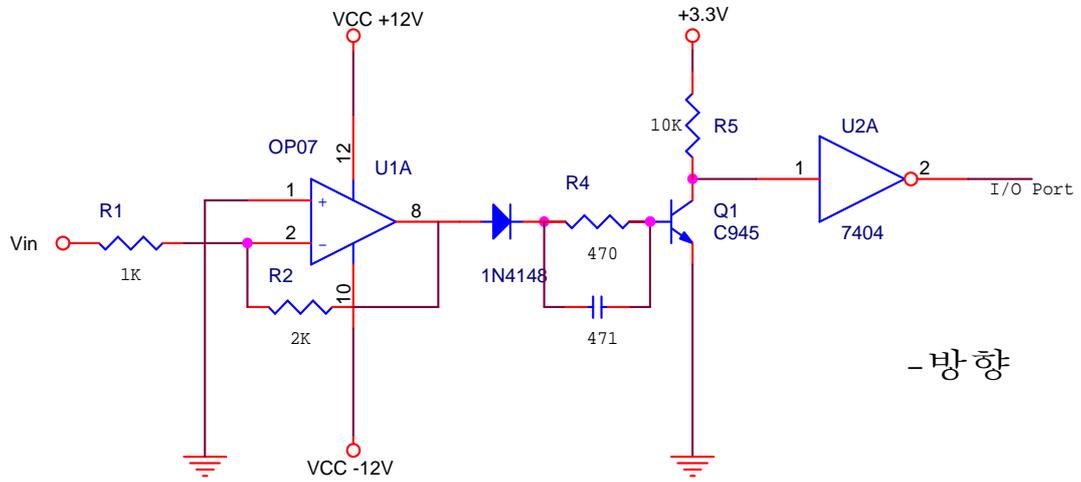
Timing Circuit 은 두 가지 형태의 Driver 중에서 Bridge driver 를 사용했을 시에 필요한 회로로 진동이 발생하는 순간을 정확히 측정하여, 그 Timing 에 맞추어 제어가 진행될 수 있도록 해주는 부분이다. PZT 센서에서 발생된 진동이 Op-Amp 를 거쳐서 증폭되고, 이 신호는 TR 의 Base 단에 연결된다. 초기 개발 시에 만든 Timing Circuit 은 압전 소자를 통해 테스트 하였고, 압전 소자에서 발생된 미약한 전압을 증폭하여 TR 을 구동시키도록 구성하였다. 현재의 PZT 소자는 진동이 발생할 때 TR 을 구동시킬 수 있는 0.7[V]보다 큰 전압이 발생되므로, S1 type 의 PZT 에서는 전압을 입력전압 이하로 감쇠시킬 수 있는 반전 증폭기로 회로를 수정해야 한다. 증폭도의 결정은 어느 정도 이상의 진동에서 제어를 수행할 것인지를 정한 후에, 테스트를 통해서 설정해야 한다. Amp 에서 출력되는 신호가 0.7[V] 이상이

되었을때 TR 은 구동되므로, 제어를 수행 할 기준이 되는 전압의 증폭률을 0.7[V] 이상이 되도록 하면 된다. TR 의 Collector Pin 에는 DSP Controller 의 사용전압인 3.3[V]로 맞추면 된다.

Timing Circuit 의 설계 목표는 제어가 시작될 때까지의 Delay 시간을 최소화 시키는 것이다. 그러나 일반적으로 TR 의 스위칭 가능한 주파수는 10[KHz] 정도이고, 그 이상의 고주파에서는 스위칭이 제대로 이루어 지지 않는 문제가 있다. 이것은 스위칭 시에 Base 단에 과잉 캐리어가 쌓여 있기에 갑자기 이것을 제거할 수 가 없기 때문이다. 고속 스위칭을 위해서는 Base 에 쌓인 과잉 캐리어를 고속으로 제거해야 하며, 이것을 위해서 Base 단과 병렬로 콘덴서를 삽입하면 된다. 스위칭 시 콘덴서를 통해 역전류가 발생하여, 캐리어가 쌓이지 못하고 빠른 시간 안에 제거가 되어 고속 스위칭이 가능하게 된다. 콘덴서의 용량은 보통 수백 [pF] 정도의 크기면 무난하다. Fig 4.5 에 Timing Circuit 의 회로를 나타내었다. Fig 4.6 은 A/D 와 D/A 를 PCB 기판에 구현한 사진이다.



+ 방향



- 방향

Fig 4.5 Timing Circuit Interface

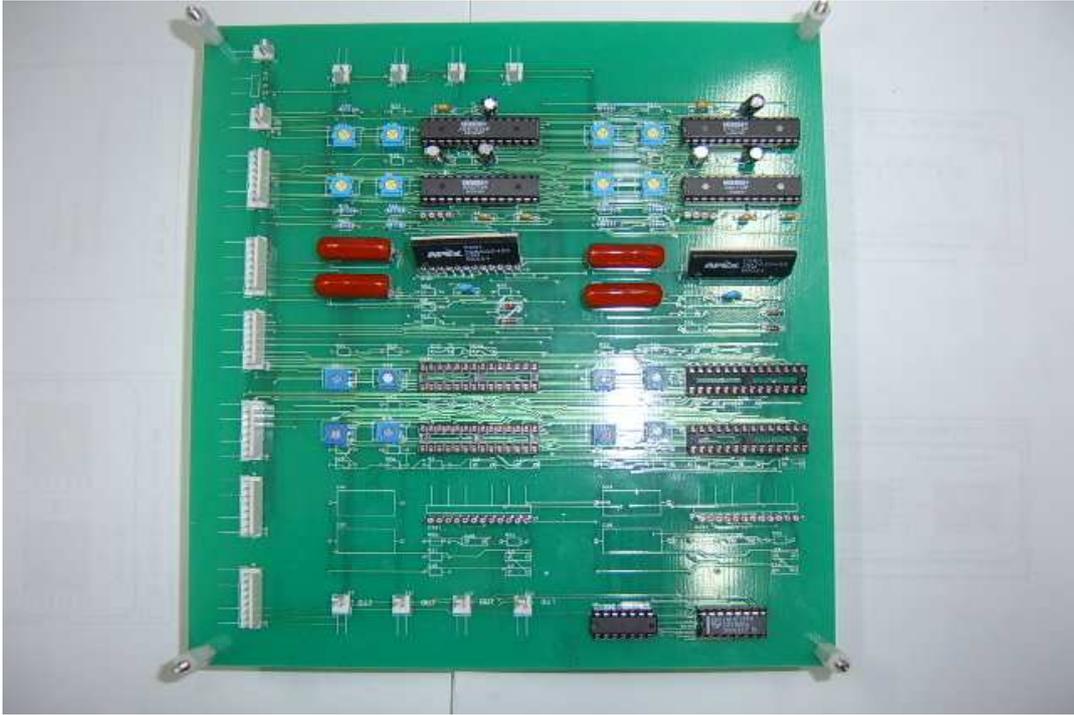


Fig 4.6 A/D & D/A Circuit

제 5 장 Actuator Driver의 개발

5.1 PZT Bridge Driver

PZT 를 구동시키기 위한 Driver 를 구성하는 데는 2 가지 방법이 있다. 하나는 PZT 용 고전압 Amp 를 사용하여 PZT 를 구동시킬 수 있고, 또 다른 방법은 Bridge Circuit 을 사용하는 방법이다. Actuator Amp 를 사용할 때의 장점은 A/D, D/A, Amp 만을 이용하므로 간단히 회로를 구성할 수 있고 구동전압의 크기를 손쉽게 변화시킬 수 있다. 반면 Bridge Driver 를 사용하면 단일전원만을 사용하여 PZT 의 구동전원의 방향을 Switching 할 수 있고, 제어 루프 상에서의 Delay 를 더 줄 일수 있다. 두 개의 Driver 는 각각 장단점을 가지고 있으며, 현재는 구성이 간단한 고전압 Amp 를 이용한 Driver 를 사용하고 있다. Bridge Driver 를 사용할 때의 시스템 구성을 Fig 5.1 에 나타내었다.

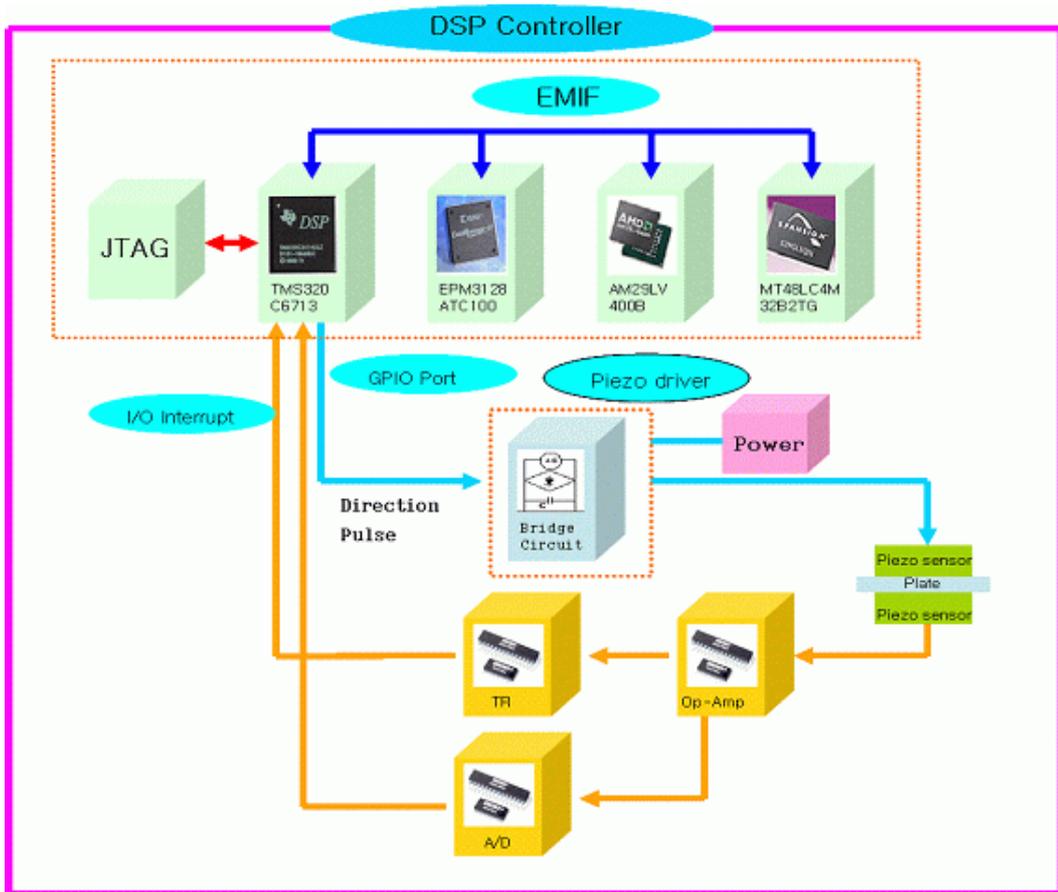


Fig 5.1 H/W Structure using Bridge Driver

Bridge Actuator Driver 를 사용하였을 때의 하드웨어의 제어흐름은 다음과 같다. Sensor Signal 을 Op-Amp 를 사용하여 받아들이고, 이 값을 TR 을 통해 Controller 에서 인식할 수 있는 신호로 변환한다. 이 신호는 DSP Controller 의 I/O Port 에 연결되어 진동이 발생할 때 마다 Interrupt 를 발생시키게 된다. Interrupt 가 발생되면 ISR (interrupt Service Routine) 에서 Bridge Actuator Driver 로 Direction Signal 과 Pulse 를 I/O Port 를 통해 내보내게 된다. 이 두 개의 신호를 통해 Bridge Actuator Driver 는 PZT 의

구동방향을 결정하고, 인가전압을 출력하여 PZT 를 구동하게 된다. Bridge Driver 의 구성은 Fig 5.2 에 나타내었다. Bridge Driver 를 보드에 구현한 사진은 Fig 5.3 에 나타내었다.

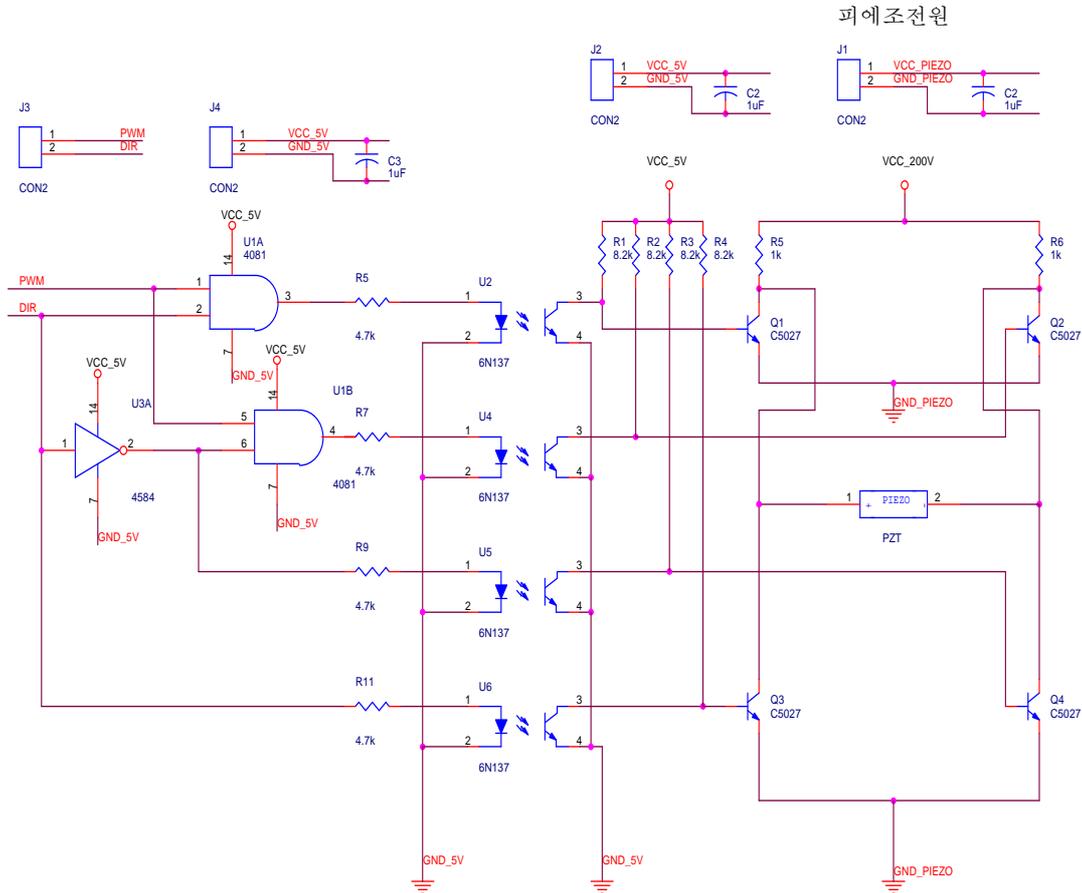


Fig 5.2 Bridge Actuator Driver Circuit

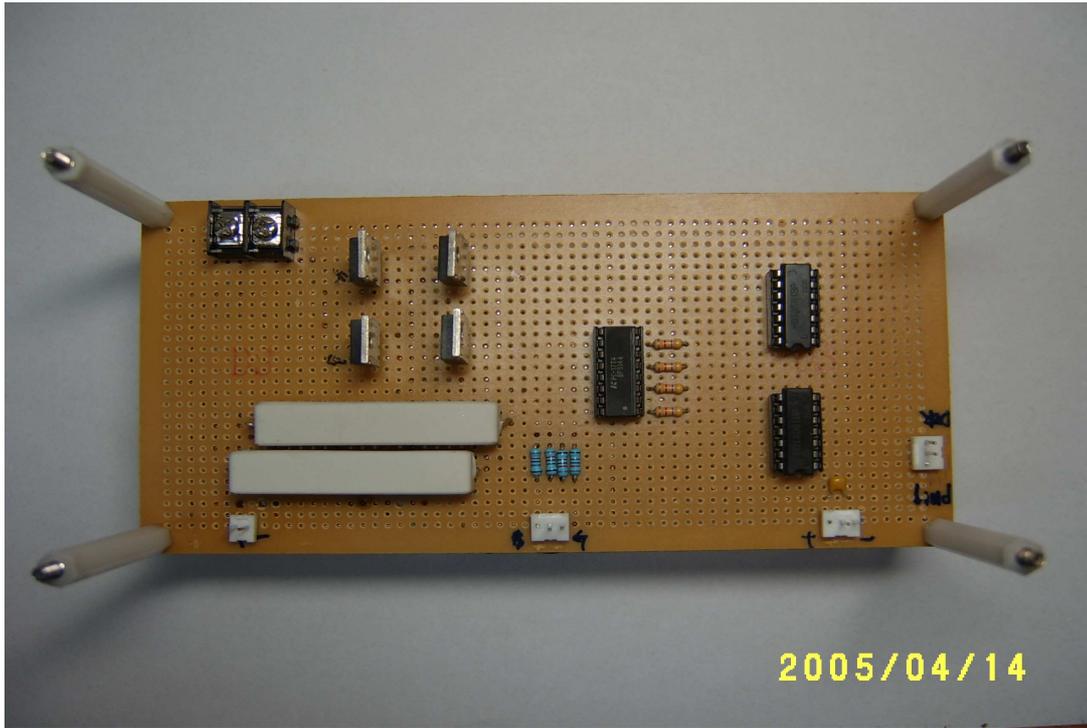


Fig 5.3 Bridge Actuator Driver

Bridge Actuator Driver 는 DSP Controller 에서 나오는 Direction, Pulse Signal 을 받아서 PZT 에 구동전원을 인가하게 된다. Direction 과 Pulse 는 Controller 의 ISR 에서 제어하게 된다. Driver 의 구성 회로에서 나타난 것처럼 구동 부에서 발생하는 Noise 의 영향으로부터 제어 부를 분리하기 위해서 포토 커플러를 사용하였다. 4 개의 TR 을 이용하여 PZT 의 방향을 정/역으로 변환시킬 수 있고, 공급 전원의 크기에 따라서 PZT 에 인가되는 전압이 변하게 된다. Bridge Actuator Driver 는 현재는 고정전원에서 동작하게 구성되어 있다. PZT 의 구동전원을 가변적으로 변환시키기 위해서는

Driver 의 전원 부에 고전압 Amp 등을 설치하여 인가전압을 변화시키는 회로를 구성해야 한다.

5.2 PZT Actuator Amp Driver

제어시스템에서는 A/D 에서 받은 신호를 다시 D/A 로 변환하고, 그 아날로그 값에 따라 PZT actuator 에 공급하는 구동전압을 변화시켜줄 수 있는 증폭 Amplifier 가 필수적이다. 또한, PZT 구동기에 인가되는 전압은 제어입력의 형태와 크기에 비례하여야 한다. 고전압인 400[V] 정도의 전압으로 증폭시키기 위한 전압증폭기를 제작할 수도 있으나 시스템의 신뢰성과 소형화를 위하여 미국 APEX 사의 PZT 전용 PA97 Amp 를 사용하였다. 고전압 Amp 를 사용했을 때의 시스템 구성은 Fig 5.4 와 같다.

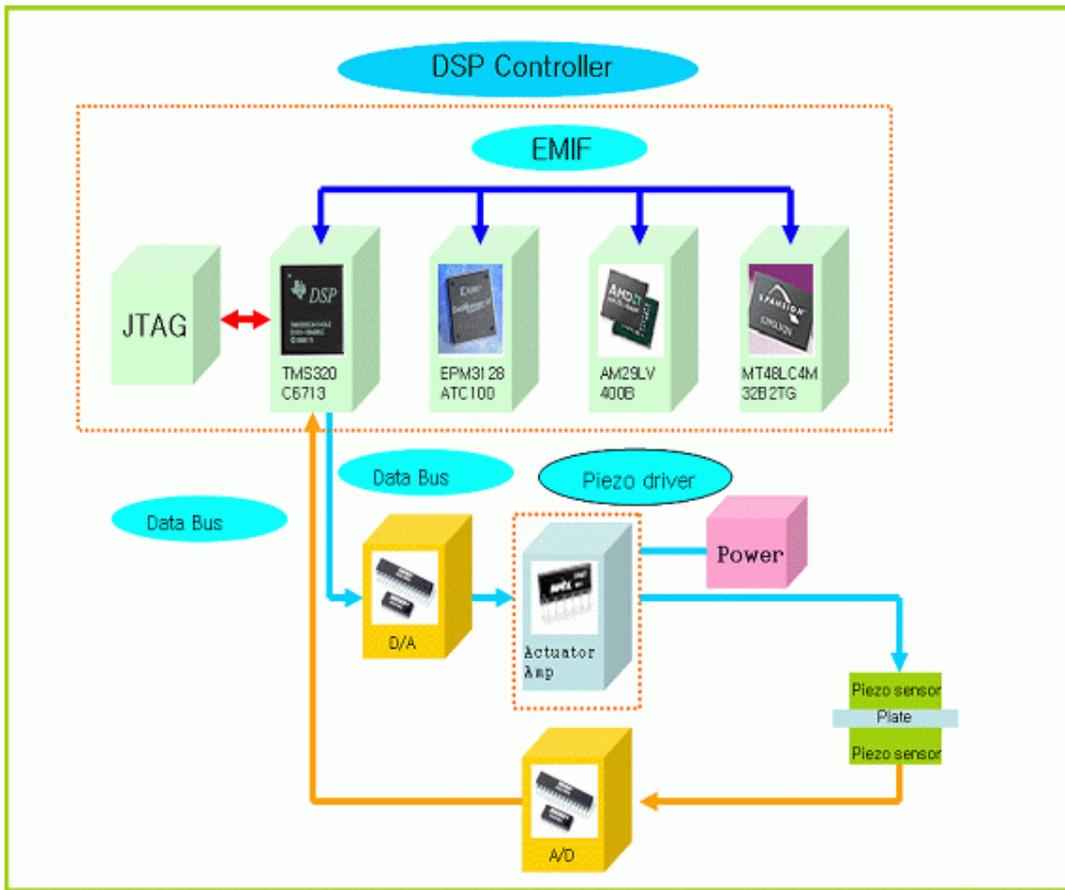


Fig 5.4 H/W Structure using High-Voltage AMP

PA97 은 $\pm 24[V]$ 의 입력전압으로 $\pm 450[V]$ 의 출력전압을 낼 수가 있고, 10[mA]까지 전류를 출력할 수가 있다. $8[V/\mu s]$ 의 Slew Rate 를 가지고 있고, 일반적인 Amp 와 같이 간단하게 Interface 하여 사용할 수 있다. D/A 의 출력전압을 받아서 증폭한 후, PZT Actuator 에 PA97 를 직접 연결하는 회로를 Fig 5.5 와 같이 구성하였다.

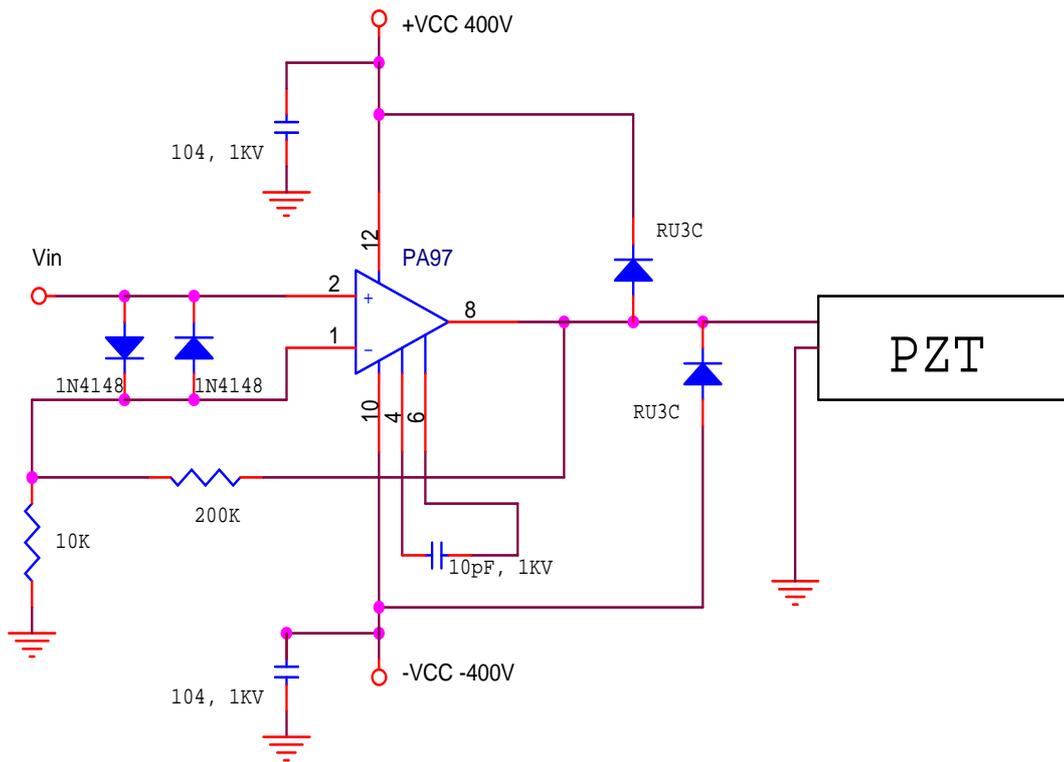


Fig 5.5 Actuator Amp Driver Circuit

PA97 을 이용한 전압증폭 방법은 비 반전 증폭을 사용하였으며, 입력 전압은 D/A 의 출력전압인 $-10[V]$ 에서 $+10[V]$ 를 직접 연결하였다. 전원은 Bridge Circuit 의 출력을 연결하여 사용하였고, PZT 의 구동테스트에 따라 증폭도를 조절하게 된다. Gain 은 최소 10 배 이상 사용해야 하며, $10[pF]$ - $1[KV]$ 의 콘덴서를 사용하여 출력을 안정화 시킨다.

PA97 은 고전압을 사용하기 때문에 두 개의 입력단에 각각 다이오드를 부착하여 리미트 회로를 구성하였다. 불안정한 입력으로 회로의 손상을

방지하기 위해서다. 출력과 PZT 와 연결되는 부분은 높은 역기전력이 발생했을 시의 Chip 의 손상을 방지하기 위해서 두 개의 고전압용 다이오드를 플러스 전원과 마이너스 전원으로 연결하였다. Amp 의 증폭 율을 결정하는 Gain 과 Feedback 저항을 높은 값으로 설정 하였을 시에 Chip 에 고열이 발생하여 손상되는 경우가 있으므로, $10[K\Omega]$ - $200[K\Omega]$ 나 그보다 좀더 낮은 저항을 사용하여 증폭 율을 설정하는 것이 안전하다. 저항을 $100[K\Omega]$ - $2[M\Omega]$ 로 설정해서 테스트 했을 때와 $1[K\Omega]$ - $20[K\Omega]$ 로 테스트 했을 때 Chip 이 손상되는 상황이 발생하였으므로 너무 높거나 너무 낮은 저항의 사용은 피해야 한다. 증폭 도를 바꿀 시에는 Feedback 저항을 신중히 고려해서 결정해야 Chip 의 손상을 방지할 수 있다. Fig 5.6 은 Actuator Amp Driver 를 보드에 구현한 사진이다.

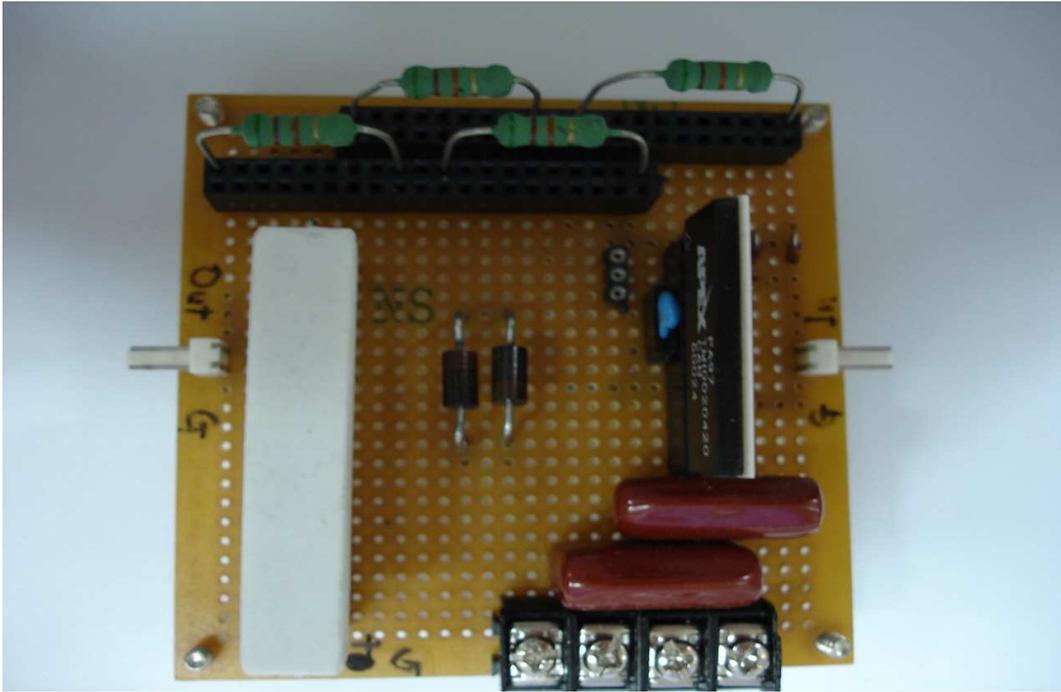


Fig 5.6 PZT Actuator Amp Driver

5.3 고전압 전원 공급장치

PZT 를 구동시키기 위해서는 400[V]이상의 전압이 필요하다. 이 전압을 얻기 위해 AC220[V]를 600[V]까지 증폭해주는 Slidac 를 사용하였다. Slidac 는 교류를 출력해주므로 Bridge 와 평활 회로를 사용하여 직류로 변환시켜서 구동전압으로 사용하였다.

발생하는 Ripple 을 줄이기 위해 용량이 큰 극성을 가진 콘덴서를 사용하였다. 전원장치의 소형화를 위해서 일반적인 콘덴서의 전압범위는 400[V]까지 이므로, 여러 개의 콘덴서를 직렬로 연결한 후, 저항을 병렬로 연결하여 전압을 분배하여 출력하는 구조로 구성하였다. PZT 용 Actuator

Amp 를 구동하기 위해서는 수백 볼트의 양전원과 음전원이 필요하므로 Bridge Circuit 에서 중간 탭을 두어 GND 로 잡고 + 전원과, - 전원으로 분리하였다. 전원 부를 소형으로 하기 위해서는 DC-DC Converter 를 사용하면 되고, 입력전압 5[V]로 3[KV]까지의 출력전압을 사용할 수 있는 제품이 상용으로 출시되어 있다. Fig 5.7 은 교류를 직류로 변경해주는 Bridge Circuit 을 나타낸다. Fig 5.8 은 회로를 보드에 구현한 사진이다. Fig 5.9 는 교류 전원을 증폭해주는 Slidac 의 사진이다.

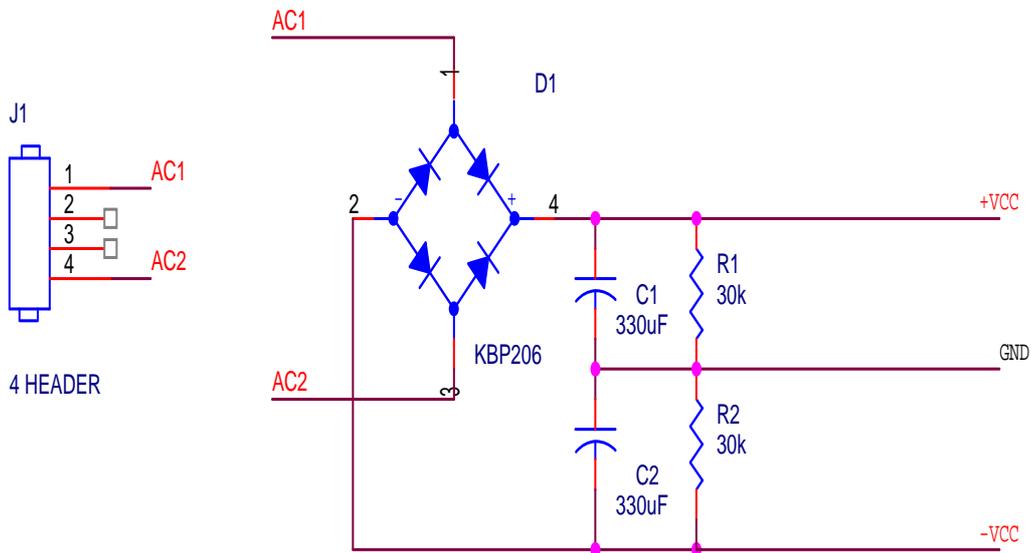


Fig 5.7 Bridge Circuit

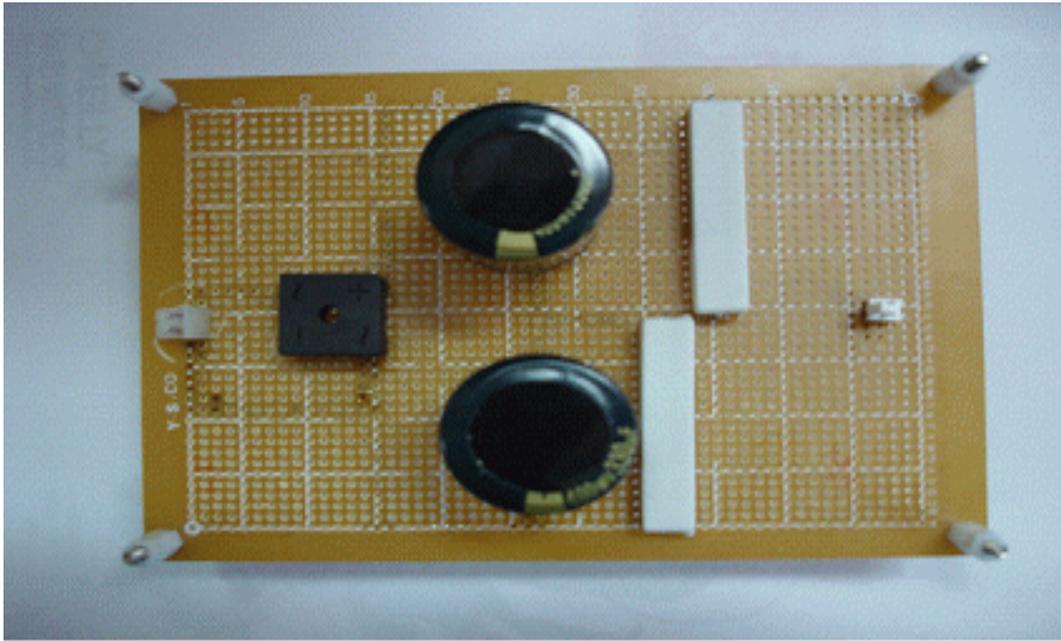


Fig 5.8 Figure of Bridge Circuit

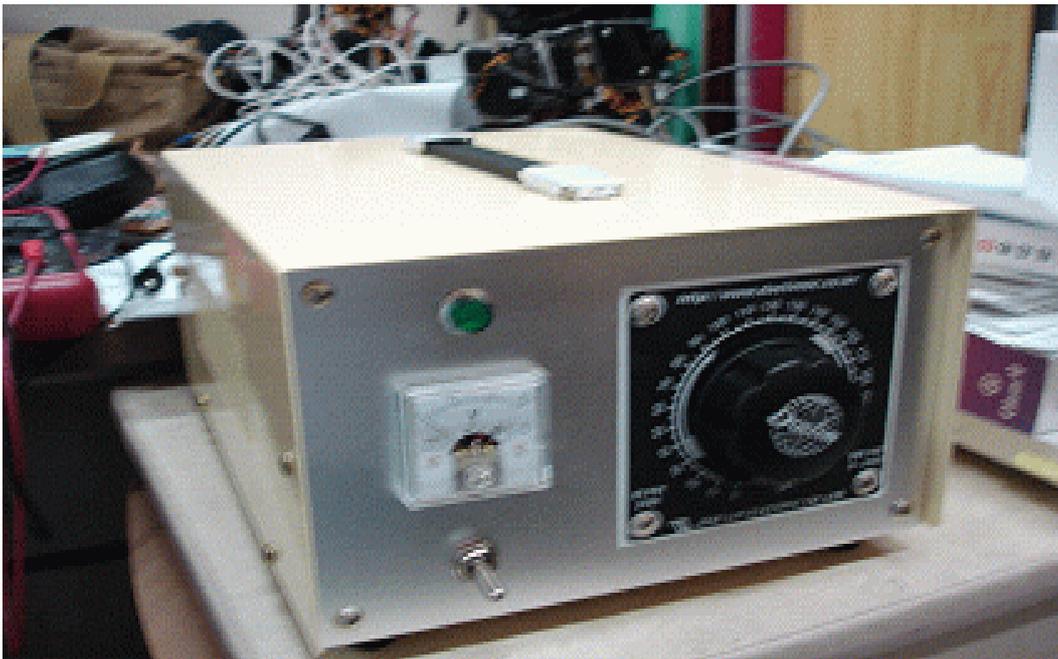


Fig 5.9 Slidac

각각의 구성 시스템을 모두 결합하여 완성된 전체 제어 시스템을 Fig 5.10 에 나타내었다. PZT 의 sensor 단자를 A/D 의 입력 단에 연결하고 A/D 는 Data Bus 와 Address Bus 를 통해 DSP 에 연결하였다. 또한, DSP 의 Data Bus 와 Address Bus 에 D/A 변환기의 Data 단자를 연결하였다. D/A 변환기의 Analog 출력 단은 PZT Actuator Amp 의 입력 단으로 연결하였고 비 반전 증폭회로로 구성된 Amp 의 출력 단은 PZT Actuator 의 입력신호가 되도록 연결하였다.

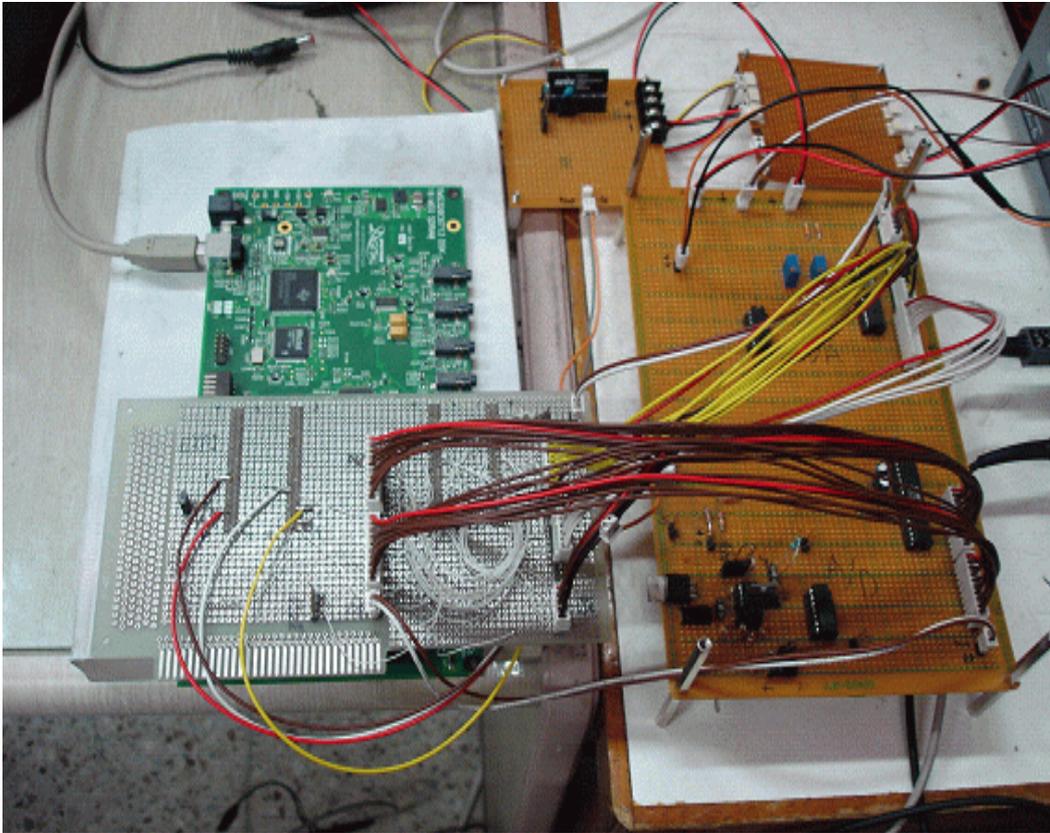


Fig 5.10 Developed Control System

제 6 장 System의 성능실험

6.1 PPF 제어 알고리즘

디지털 PPF 제어기는 다음과 같은 전달 함수로 표현이 된다.

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \quad (8)$$

여기서 ω_f 와 ζ_f 는 각각 PPF 보상회로의 필터 주파수와 감쇠인자이다. 일반적으로 PPF 제어기는 ω_f 를 대상 구조물의 고유진동수와 일치시킴으로써 능동 진동 제어를 이룩한다. 식(8)로 표현되는 PPF 제어기는 실제로는 저주파수 통과 필터 회로와 그 형태가 동일하다. 따라서 OP Amp 를 사용하여 아날로그 PPF 제어기의 구성이 가능하다. 식(8)을 디지털 제어기로 전환하기 위해서 다음과 같은 Bilinear 변환을 사용한다.

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (9)$$

여기서 T_s 는 디지털 제어기의 Sampling 시간을 나타낸다. 불안정을 일으키지 않도록 충분히 빨라야 한다. (9)식을 (8)식에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$H(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} b_2 &= \frac{\omega_f^2}{\Delta}, \quad b_1 = \frac{2\omega_f^2}{\Delta}, \quad b_0 = \frac{\omega_f^2}{\Delta}, \\ a_1 &= \frac{(2\omega_f^2 - \frac{8}{T_s^2})}{\Delta}, \\ a_0 &= \frac{(\frac{4}{T_s^2} - \frac{4\zeta_f \omega_f}{T_s} + \omega_f^2)}{\Delta}, \\ \Delta &= (\frac{4}{T_s^2} + \frac{4\zeta_f \omega_f}{T_s} + \omega_f^2) \end{aligned} \quad (11)$$

(10)식을 이산화된 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$u_k = -a_1 u_{k-1} - a_0 u_{k-2} + b_2 (y_k + 2y_{k-1} + y_{k-2}) \quad (12)$$

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 속력이 된다. 디지털 PPF 제어기가 효과적으로 작동하기 위해서는 샘플링 속력이 제어 대상인 진동 모드의 고유 진동수보다 빨라야 한다. ζ_f 는 0.3 의 감쇠율로 정하였으며 ω_f 는 FFT 를 사용하여 찾게

된다. PPF 제어 알고리즘에 의해 유도된 식 (12)를 프로그램으로 구현하여 제어 시스템의 능동제어 실험을 수행하였다.

6.2 테스트 환경

M8557 PZT 센서의 Sensing 시험을 위해 알루미늄 평판 위에 PZT Actuator/Sensor를 부착하고, 평판을 양면 지지하는 실험용 구조물을 Fig 6.1과 같이 제작하였다. 평판은 210*400[mm]의 넓이와 1.5[mm] 높이의 알루미늄 판을 사용하였다.

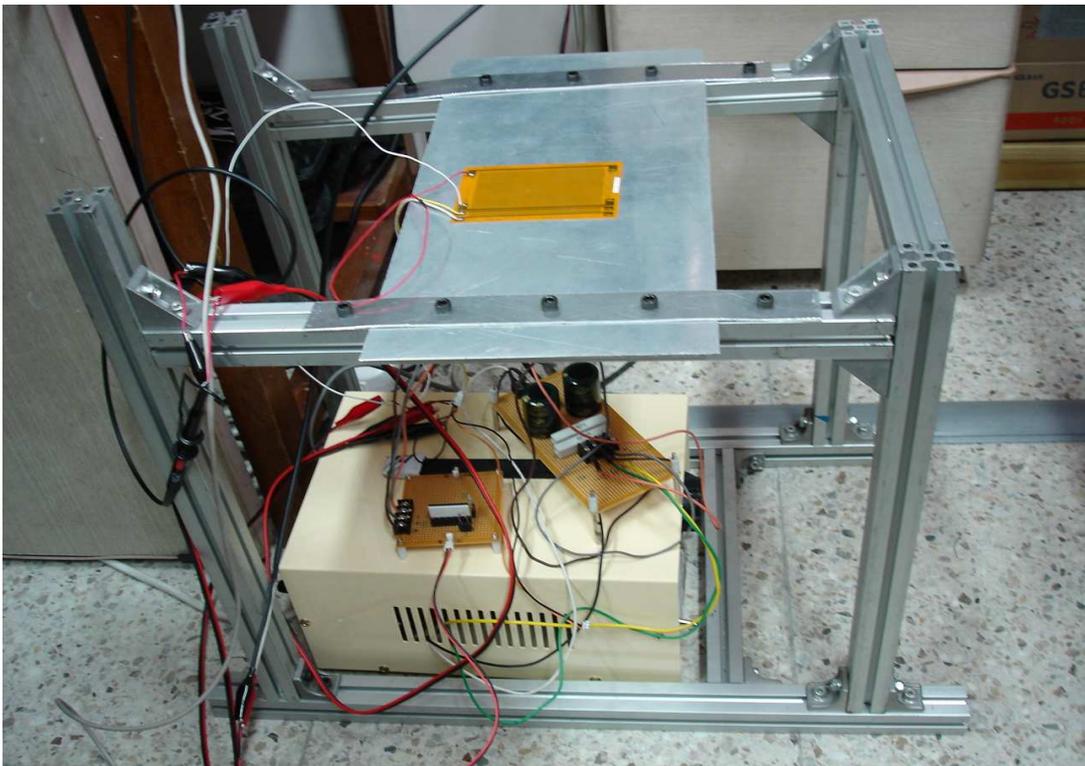


Fig 6.1 Structure for PZT Test

6.3 PZT의 Sensing Signal 테스트

PZT 센서의 Sensing Signal Test는 400[MHz] 디지털 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 함수 발생기를 통해 10[Hz]의 Pulse를 인가하였고, Actuator Amp Driver를 통해 함수 발생기에서 출력되는 전압을 증폭하여 PZT Actuator를 구동시켜 진동을 가하였다. 진동발생으로 인한 PZT Sensor로부터의 출력 전압을 오실로그코프와 연결하여 출력 신호를 계측하였다. Fig 6.2와 Fig 6.3은 오실로스코프에서 측정된 결과를 Capture한 그림이다.

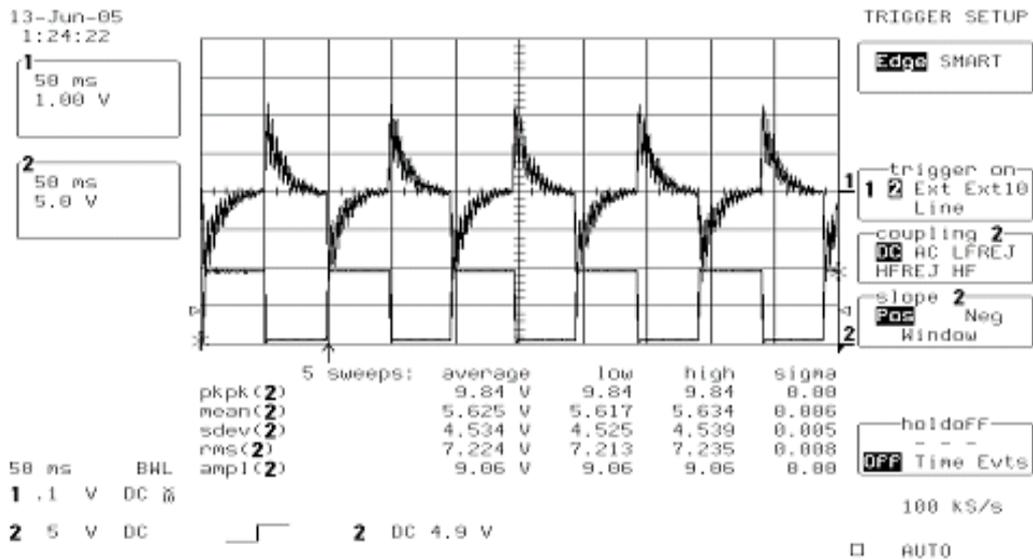


Fig 6.2 100V Test Input at 10[Hz]

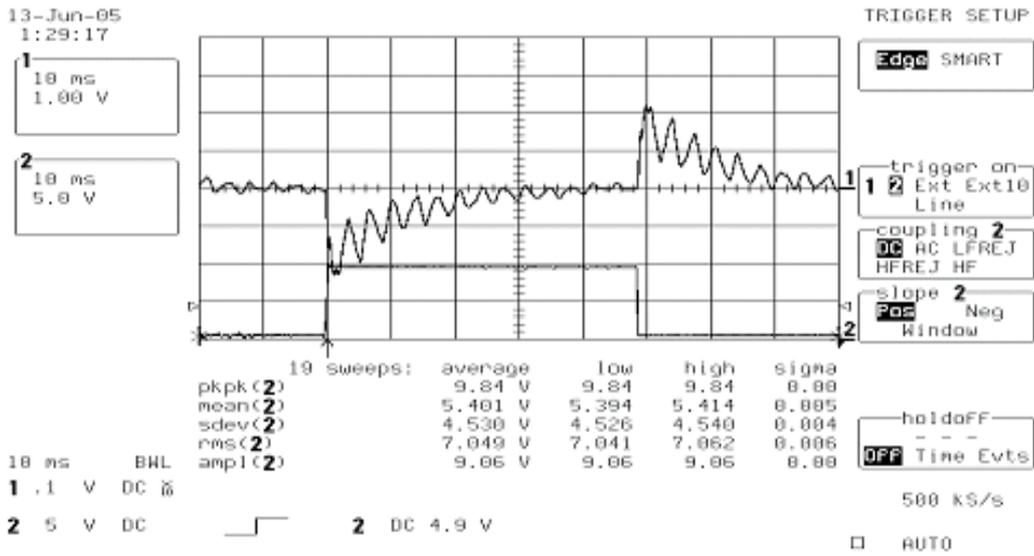


Fig 6.3 100V Test Input at 10[Hz]

10[Hz], 100[V]로 PZT 를 구동시킬 때 Sensor 에서 나오는 신호는 Fig 6.2 와 같이 약 2[V]의 전압이 출력된다. 그림 안에 있는 1 번 그래프는 센서 값을 나타내고, 2 번 그래프는 인가한 전압을 나타낸다. 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 음과 양의 방향으로 두 번 나타나는 것을 알 수 있다. 아래의 그래프는 [Time/Div]을 1/5 로 줄여서 나타낸 그래프로 구형파의 입력전압이 상승할 때의 Sensor 신호를 나타내었다. 진동의 발생 순간에 신호가 발생한 후 점점 감소하여 진동이

없어진다. PZT 에서 발생하는 진동을 센서에서 감지한 후, 그 값을 통해서 시스템의 제어가 시작된다.

6.4 Actuator Driver의 성능 테스트

Driver 의 성능시험은 개발된 두 개의 장치를 각각 시험 하였고 직접 제작한 Bridge Driver 의 성능을 시험 한 결과는 Fig 6.4 및 Fig 6.5 와 같다.

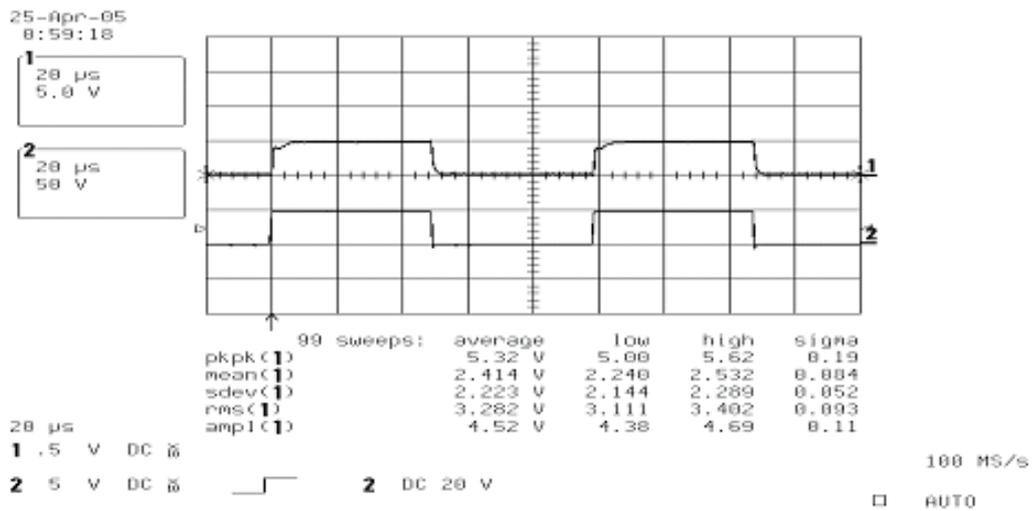


Fig 6.4 Driver Output at 50[KHz]

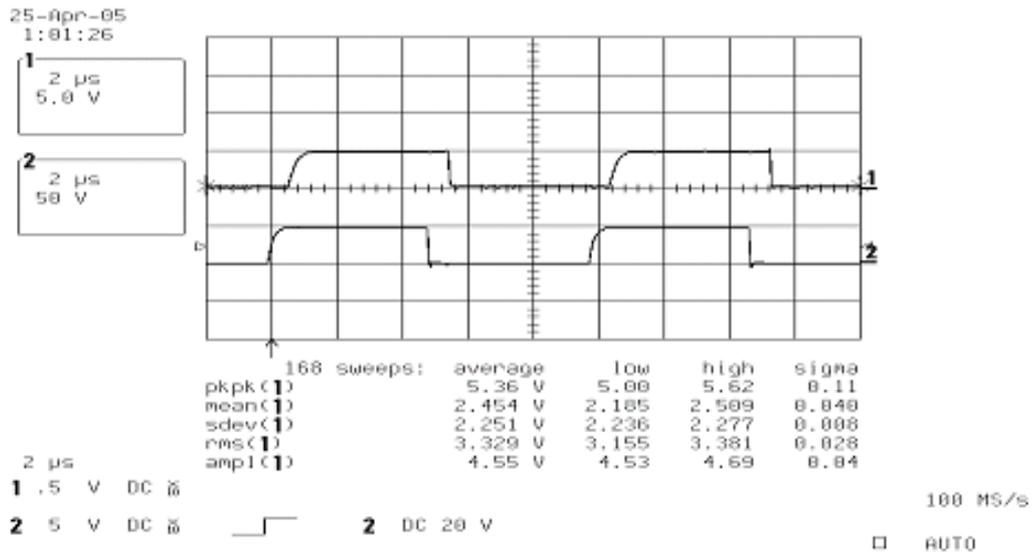


Fig 6.5 Driver Output at 200[KHz]

Bridge Driver 는 제어루프를 실행시킬 때, 진동이 발생하는 순간에서 제어가 이루어지는 때까지의 Delay 의 최소화를 목적으로 개발하였다. Driver 의 성능시험은 함수발생기를 이용하여 Op-Amp 에 신호를 인가하였고, I/O Port 를 통해 Interrupt 가 발생된 후 DSP Controller 의 ISR 에서 제어신호가 발생되어 Driver 를 구동하고, PZT 와 연결되는 출력부에서 전원이 나오기까지의 Delay 를 측정하였다. 시험은 400[MHz]의 오실로스코프를 이용하였고, 함수발생기의 입력 신호는 5[V]로 설정하였으며, Driver 의 전원은 50[V]로 인가하였다. 입력 주파수는 50[KHz], 200[KHz]로 설정하여 시험 하였다. 그래프에서 두 개의 신호 중에서 2 번이 입력신호이고, 1 번이 Driver 에서 출력되는 전압을 나타낸다. 실험을 통해서 신호가 인가되는 순간부터 Driver 를 통해 출력이 나갈

때까지의 Delay 가 $1[\mu s]$ 미만으로 거의 실시간에 가깝게 제어가 가능함을 알 수 있다.

Fig 6.6 및 Fig 6.7 은 Actuator Amp Driver 의 성능을 시험 한 결과이다. DSP Controller 에서 A/D 를 통해 신호를 받고, 그 신호의 크기에 비례하여 D/A Converter 를 통해 전압을 출력하고, 그 전압을 Actuator Amp 에서 증폭하여 PZT 를 구동하게 된다. A/D 변환기로 신호가 들어오고 Actuator Amp 로 신호가 출력 될 때까지의 Delay 를 시험한 결과는 다음과 같다.

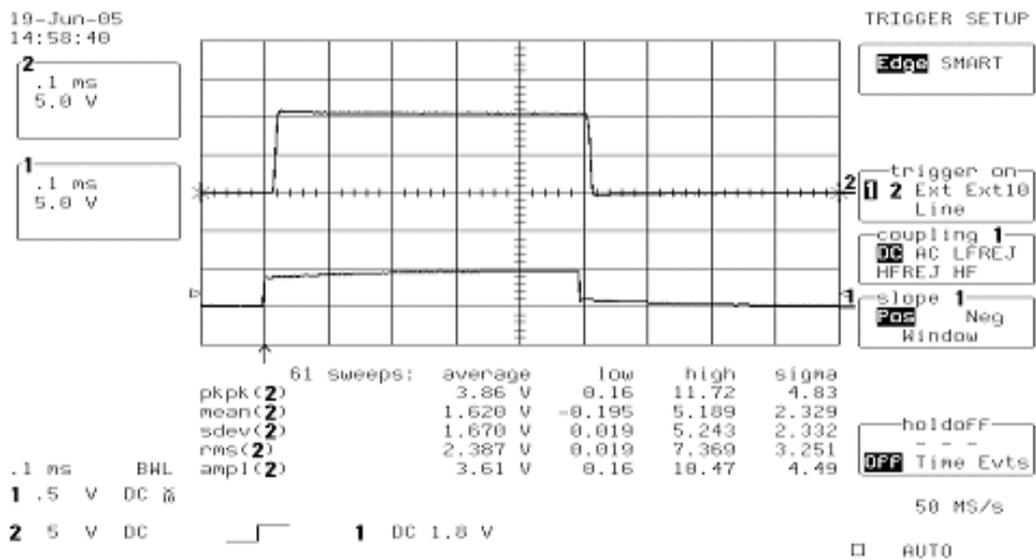


Fig 6.6 Driver Output at 1[KHz]

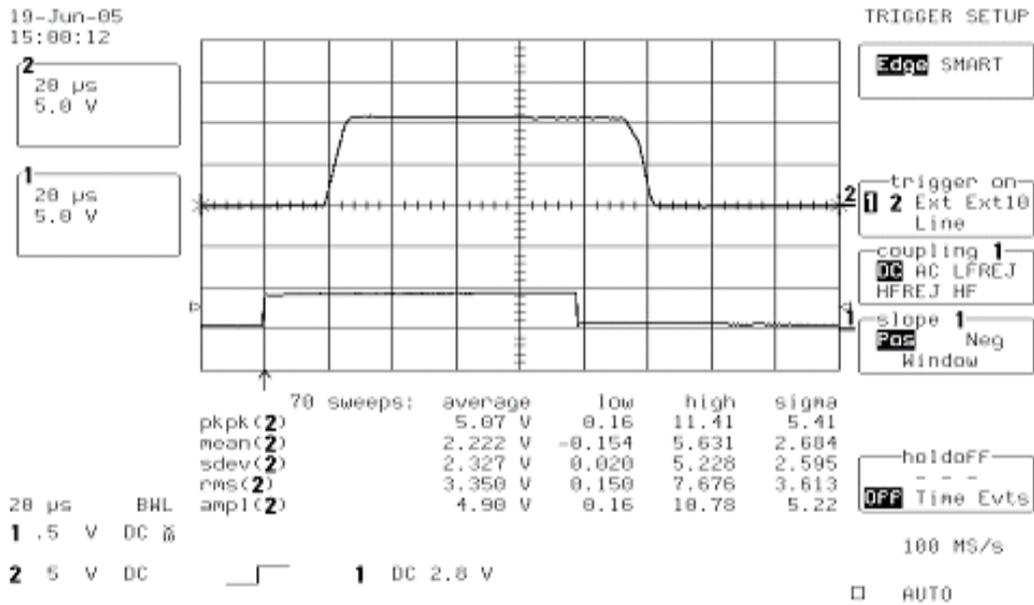


Fig 6.7 Driver Output at 5[KHz]

각 실험 결과에서 아래 신호는 함수발생기를 이용하여 A/D 에 인가하는 신호이며, 위의 신호는 Amp 의 출력신호를 나타낸다. A/D 에 인가되는 신호는 함수 발생기를 이용해서 구형파를 입력하였고, 이 신호가 DSP Controller 를 거친 후 D/A 를 통해 아날로그 값으로 변환되고, 이 아날로그 값이 PZT Actuator Amp 에 입력되어 PZT 를 구동시키는 전압으로 출력된다. 각각 1[KHz]와 5[KHz]의 주파수로 A/D 에 신호를 인가하였다. 그림의 위쪽은 하나의 칸이 50[V]를 나타내고, 아래쪽은 한 칸이 5[V]를 나타낸다. Amp 의 증폭율은 20 배를 주었기 때문에, 입력전압의 20 배의 전압이 출력되게 된다.

Fig 6.6 및 Fig 6.7 에서와 같이 신호가 인가되고 Amp 에서 출력 전압이 나오기 시작할 때까지 약 $20[\mu s]$ 의 Delay 가 발생한다. 이 오차는 PZT 에서 Sensing 된 값이 제어 loop 를 거쳐서 제어가 시작될 때까지의 Delay 시간이 된다. 이 시간은 A/D 의 Sampling Time 과 D/A 의 출력시간, 그리고 Amp 의 처리시간이다. A/D 는 $10[\mu s]$ 의 Sampling Delay 가 있고, D/A 는 $2[\mu s]$, Amp 는 $8[\mu s]$ 정도의 Delay 가 발생한다. 그리고 Amp 의 출력 전압이 원하는 목표전압까지 도달하는 Slew Rate 가 생기는데 이것은 $8[V/\mu s]$ 가 된다. 즉 원하는 목표가 $400[V]$ 일때 현재의 값이 $0[V]$ 라면 $400[V]$ 로 전압이 변하는데 $50[\mu s]$ 의 Transition Time 이 생기게 된다. 현재 그래프에서는 $100[V]$ 까지 도달하는데 $10[\mu s]$ 정도의 시간이 걸린다. $1[KHz]$ 와 $5[KHz]$ 에서 Delay 는 전체적으로 약 $30[\mu s]$ 정도가 발생하게 된다. 이 Delay Time 은 A/D 와 D/A, 그리고 Amp 를 보다 고속의 소자로 교체하면 좀더 줄일 수 있다.

6.5 능동제어 실험

능동제어 실험은 가속도 센서를 PZT가 부착된 알루미늄 평판 위에 부착시켜 충격을 가한 후에 측정된 값을 FFT를 이용하여 분석하였다. 사용된 능동제어 방법은 PPF 알고리즘이며 평판에 일정한 충격을 가한 후에 능동제어장치를 작동하지 않았을 때와 작동시켰을 때의 결과 값을 비교하였고, 고속 능동제어 시스템의 효과를 알아보기 위해 제어 loop time을

변화시키면서 결과 값을 측정하였다. PPF 알고리즘에 사용한 Parameter 값을 Table 6.1에 나타내었다.

Table 6.1 Parameter of PPF Algorithm

Parameter	Value
ζ_f	0.3
ω_f	124[Hz]
T_s	0.03[ms], 0.2[ms], 0.5[ms]

FFT를 사용하여 측정한 결과는 다음과 같다. 그래프의 가로축은 [Hz]를 나타내고, 세로축은 [dB]를 나타낸다.

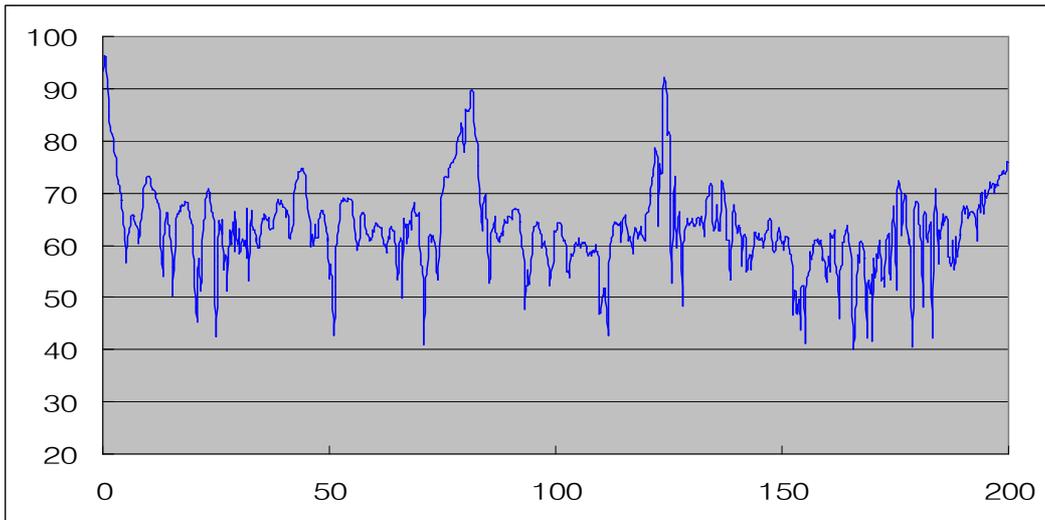


Fig 6.8 The Mode of Uncontrolled System

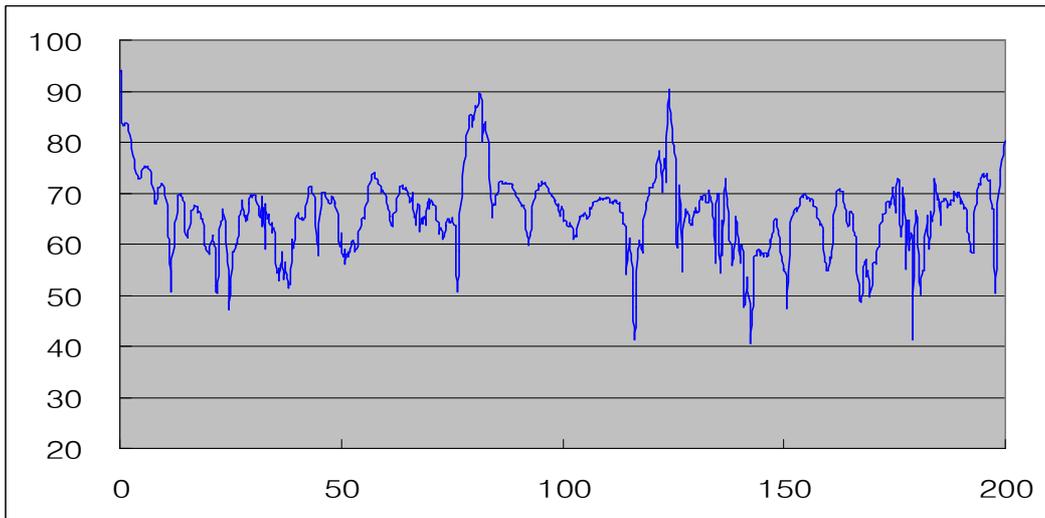


Fig 6.9 The Mode of Controlled System

Fig 6.8 과 Fig 6.9 는 알루미늄 평판의 두 번째 공진주파수인 124[Hz]를 시스템의 제어 주파수로 설정한 후에 능동제어기를 구동하지 않았을 때와 구동했을 때의 결과 값을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯 비구동시의 값은 92.1[dB]을 나타내고, 제어기를 구동했을 때는 90.3[dB]으로 약 2[dB] 정도의 진동 감소 효과가 나타남을 알 수 있다. 이때 시스템의 제어 loop time 은 약 30[μ s] 가 된다.

다음 실험은 시스템의 제어 loop time 을 변화 시켜 가면서 성능을 측정한 그림이다. 현재 시스템이 낼 수 있는 최대 성능의 loop time 은 약 30[μ s] 정도가 된다. 지금까지 나온 디지털 능동 제어기 중에서 가장 빠른 장치는 TMS320C32 DSP Processor 를 이용한 제어기로 Processor 의 속도와 A/D, D/A 변환과정에서 생기는 Delay Time 으로 인해 본 연구에서 개발한 시스템과는 10 배 이상의 속도 차이가 나게 된다. 실험은 loop time 을 30[μ s] 에서 500[μ s]까지 변화 시켜 가면서 고속 능동제어 시스템의 효과를 측정하였다.

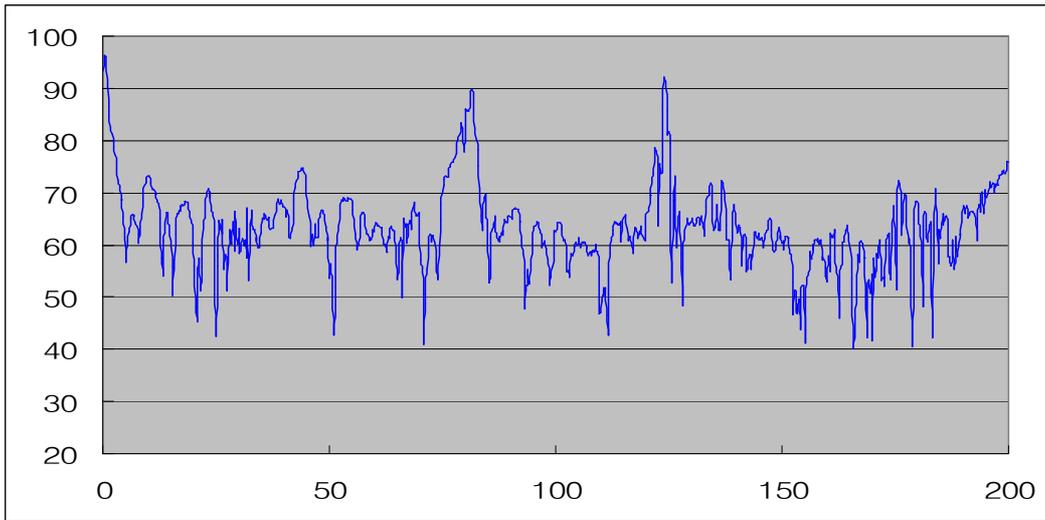


Fig 6.10 The Mode of Uncontrolled System

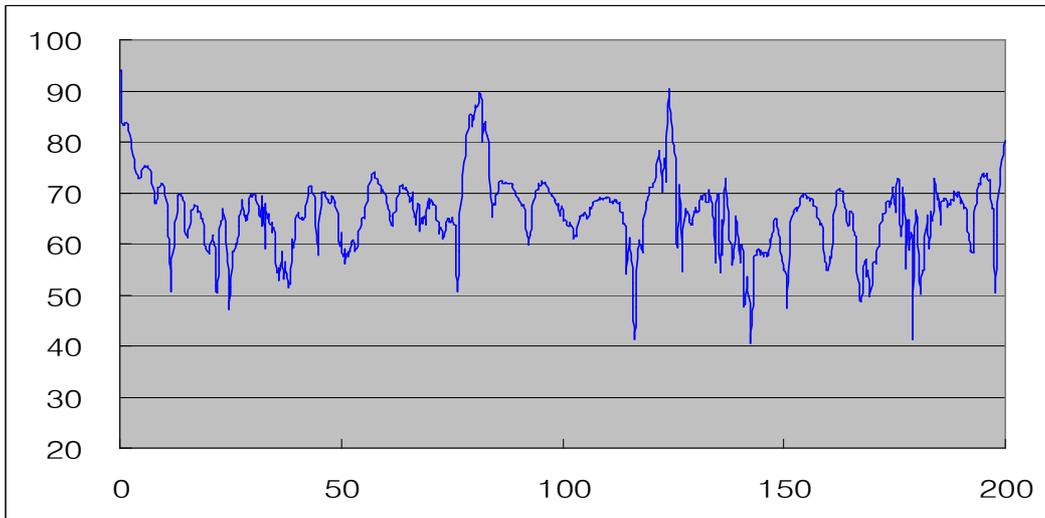


Fig 6.11 Control Loop Time : 30[μs]

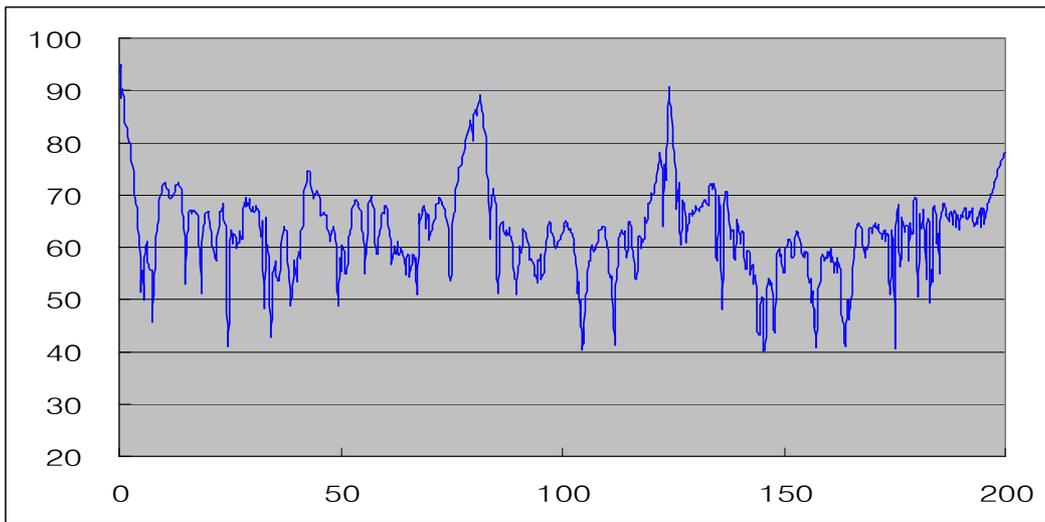


Fig 6.12 Control Loop Time : 200[μs]

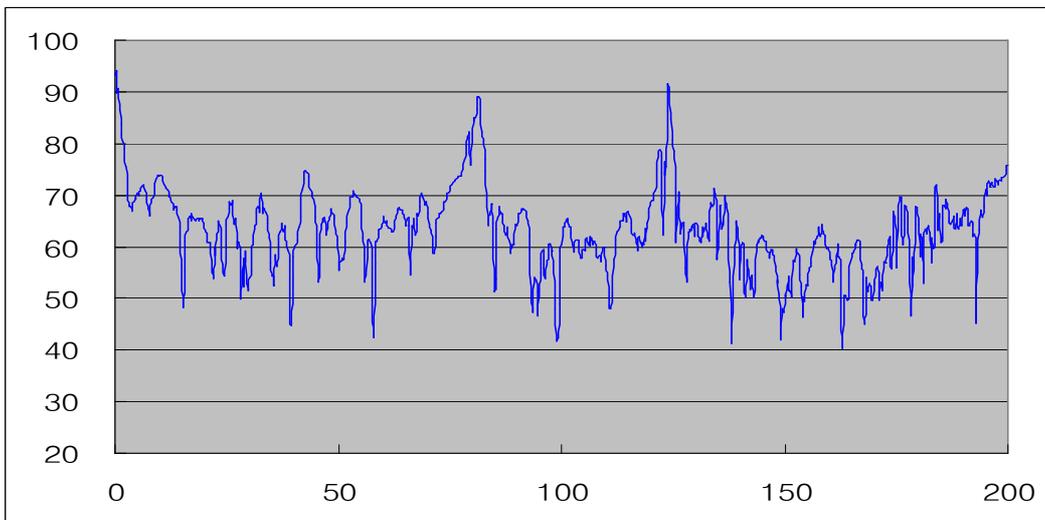


Fig 6.13 Control Loop Time : 500[μs]

Fig 6.10, 6.11, 6.12, 6.13은 능동제어 시스템을 구동하지 않았을 때의 공진주파수와 시스템의 loop time을 변화 시켜가면서 구동했을 때의 공진주파수를 측정한 결과 값이다. 제어는 두 번째 공진 주파수인 124[Hz]를 대상으로 하였고, 결과 값은 그림에서 보이는 것처럼 제어하지 않았을 때 92.1[dB], loop time이 30[μ s] 일 때 90.3[dB], 200[μ s] 일 때 90.6[dB], 500[μ s] 일 때 91.7[dB]로 측정되었다. 실험 결과를 통해 알 수 있듯이 시스템의 제어 속도가 빠를수록 능동제어에 있어서 더 뛰어난 성능을 발휘함을 확인할 수 있다.

제 7 장 결 론

본 연구에서는 초고속 DSP 프로세서인 DSP320C6713 과 고성능 PZT 구동기로 이루어진 다수의 모듈로 구성된 새로운 형태의 능동 진동제어시스템을 개발하였다. 또한, PZT 를 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. Bridge Driver 를 이용한 능동제어기의 성능시험은, 제어루프의 Delay Time 이 $1[\mu s]$ 미만으로 측정되었다. Bridge Driver 를 사용하였을 시의 장점은 저가로 시스템을 구성할 수 있고, 더욱 고속의 loop time 을 구현하는 제어를 할 수 있었다. Actuator Amp Driver 는 A/D, D/A 변환과 Amp 에서 발생하는 Slew rate 로 약 $30[\mu s]$ 의 Delay 가 발생하는 결과를 얻었다. Actuator Amp Driver 를 사용하면, 보다 간단한 시스템을 구축할 수 있지만, 각 주변장치의 처리속도의 한계로 제어루프에서 보다 많은 Delay 가 발생하게 된다. 이 Delay 는 보다 고속의 소자를 사용하면 줄일 수 있을 것으로 보이지만, 비용 면에서 고가인 단점이 있다.

시스템을 이용한 능동제어 실험을 수행한 결과 PPF 제어 알고리즘을 이용하여 성공적으로 제어가 수행됨을 확인할 수 있었다. 또한 개발 시스템의 초고속 응답 성능이 능동제어에 미치는 영향을 테스트하여 제어 loop time 이 짧을수록 능동제어에 더 뛰어난 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

향후에는 다수의 모듈을 동시에 제어하는 MIMO 형태의 능동제어 실험을 수행하고, 공진주파수뿐만이 아닌 비공진 진동 또한 제어 할 수 있도록 시스템을 개발할 계획이다.

참고문헌

- [1] M. Strassberger 외, "Active noise reduction by structural control using piezo-electric actuators", Mechatronics 10, pp.851-868, (2000)
- [2] S. D. Snyder 외, "Acoustic-centric modal filter design for active noise control", Control Engineering Practice 12, pp.1055-1064, (2004)
- [3] S. Y. Chu, T.T. Soong, A.M. Reinhorn, "Real-time active control verification via a structural simulator", Engineering Structures 24(3), pp.343-353, (2002)
- [4] Sumali. H., "Demonstration of active structural acoustic control of cylinders", MS. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, (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, 오재응, "피에조 세라믹을 이용한 평판의 능동제어", 한국소음진동공학회 춘계학술대회, pp.434-439, (1997)
- [7] 조대승외 7 인, "선박의 상부구조 진동 저감을 위한 능동형 제어장치의 실용화 연구", 대한조선학회논문집 41(4), pp.77-84, (2004)

[8] 광문규 외, "마이크로 컨트롤러를 이용한 디지털 PPF 제어기의 구현과 실험", 한국소음진동공학회, pp.148-152, (2003)

[9] 홍이표, "마이크로 컨트롤러를 이용한 디지털 PPF 제어기의 구현과 실험", 항공대 석사논문, (2001)

[10] 강영규, 최진영, 김재환, "능동구속감쇠 기법을 이용한 보의 능동 제어", 한국소음진동공학회 11(4), pp.52-57 (2001)

[11] 광문규, 2005 년도 수중 운동체 특화센타 SM33 과제 중간보고서