

공학석사 학위논문

TMS320C6713 를 이용한 고속 능동 진동제어  
시스템 개발 및 시뮬 링크 연구

Development of High-Speed Active Vibration Control  
System Based on TMS320C6713 Microprocessor  
and Study the Simulink

지도교수 최 형 식

2008 년 2 월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 동 찬

本 論 文 을 金 東 燦 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 工 學 博 士 金 義 珩 (印)

委 員 工 學 博 士 柳 三 相 (印)

委 員 工 學 博 士 崔 炯 植 (印)

2008 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

機 械 工 學 科

金 東 燦

# 목 차

Abstract

그림목차

표 목차

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
제 2 장 Active Control System의 개요.....	6
2.1 System의 개요 및 구성.....	6
2.2 System의 개발 환경.....	10
제 3 장 System의 수학적 모델링.....	17
3.1 압전 기본식과 변위에 대한 모델링 .....	17
제 4 장 External Device의 개발 .....	22
4.1 A/D Interface .....	22
4.2 D/A Interface .....	25
제 5 장 Actuator Driver의 개발 .....	27
5.1 PZT Actuator Amp Driver .....	27
5.2 고전압 전원 공급장치 .....	30
5.3 Control Cell의 구성 .....	35
5.4 휴대 가능한 제어 시스템 .....	37
5.5 전원부의 분리 .....	40
5.6 시뮬 링크(Simulink)의 적용 .....	43
제 6 장 System의 성능실험 .....	44
6.1 PPF 제어 알고리즘 .....	44

6.2 테스트 환경 .....	46
6.3 PZT의 Signal Sensing.....	48
6.4 Actuator Driver의 성능 테스트.....	49
6.5 능동제어 실험 .....	52
6.6 PZT 센서 위치 시뮬레이션.....	54
제 7 장 결 론 .....	57
참고 문헌 .....	59

Development of High-Speed Active Vibration Control  
System Based on TMS320C6713 Microprocessor  
and Study the Simulink

Kim, Dong Chan

Department of Mechanical Engineering  
Graduate School, Korea Maritime University

Abstract

In this thesis, we have developed a high-speed active control system based on the TMS320C6713 microprocessor to control the vibration of the structure actively. This system is composed of the DSP microprocessor, Piezoelectric(PZT) driver, PZT actuator and sensors.

In particular, PZT actuator can generate  $\pm 200 \sim \pm 450$  variable voltage using the H-bridge circuit and DC-DC converter. In addition, we made a control box which is composed of PCBs for several circuits and A/D, D/A devices with the same speed resolution of the main processor. The designed control box is portable and practical. Also TMS320C6713 microprocessor is conveniently to simulate the vibration system's input

and output signals using the Matlab. The simulation is based on the PPF control algorithm to reduce vibration. Through the extensive experiments, the real-time control performance of the system has been verified. The comparisons are also presented between the experiments and simulation results.

**Key Words** : Active control system, Microprocessor, Piezoelectric

# 그림 목 차

Fig 2.1 Control system using DSP processor .....	9
Fig 2.2 Structure of the TMS320C6713 .....	11
Fig 2.3 Diagram of Main Controller .....	12
Fig 2.4 Memory Map of Main Controller .....	12
Fig 2.5 DSP Main Controller .....	13
Fig 2.6 Code Composer Studio .....	14
Fig 2.7 PZT Sensor/Actuator .....	15
Fig 3.1 THUNDER Actuator .....	19
Fig 4.1 A/D Block Diagram .....	23
Fig 4.2 D/A Block Diagram .....	26
Fig 5.1 PA 95 Equivalent Schematic .....	27
Fig 5.2 Actuator Amp Driver Circuit .....	28
Fig 5.3 The Circuit of the H-Bridge .....	30
Fig 5.4 The PCB of the Bridge Circuit .....	31
Fig 5.5 Figure of the Slidac .....	32
Fig 5.6 The Circuit of the DC-DC Converter .....	33
Fig 5.7 The PCB of the DC-DC Converter .....	33

Fig 5.8 Developed Control System .....	34
Fig 5.9 Figure of the Control Cell .....	35
Fig 5.10 DIGTAL VS ANALOG .....	36
Fig 5.11 Consisted of the Control Cell .....	36
Fig 5.12 Figure of the Control System Kit.....	37
Fig 5.13 Figure of the Control System Kit's Side.....	38
Fig 5.14 Figure of the Opened Control System .....	39
Fig 5.15 Isolated Digital and Analog Power Source.....	40
Fig 5.16 Figure of the Control Part Kit.....	41
Fig 5.17 Application of the Simulink with TMS320C6713.....	43
Fig 6.1 Structure for PZT Test .....	46
Fig 6.2 Figure of the MFC Attached Plate.....	47
Fig 6.3 300V Test Input at 20, 50, 150, 200[Hz] .....	48
Fig 6.4 Delay Time as Input $\pm 1[V]$ .....	49
Fig 6.5 Delay Time as Input $\pm 5[V]$ .....	50
Fig 6.6 Sine Curve as Application of the Algorithm.....	52
Fig 6.7 Vibration as Application of the Algorithm.....	53
Fig 6.8 Simulation of the Plate using Ansys .....	54
Fig 6.9 Acceleration and Frequency of the Plate using Ansys.....	55



## 표 목 차

Table 2.1 Feature of PZT Sensor/Actuator .....	15
Table 3.1 Equation of the Piezoelectricity .....	18
Table 4.1 A/D Operation .....	24
Table 4.2 D/A Operation .....	26
Table 6.1 Frequency Response Values .....	56

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

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 압전 소자를 이용한 능동 제어 시스템의 설계 및 개발에 대한 관심이 증가 하고 있다. 능동제어 시스템은 구조물에 다수의 센서 및 액츄에이터, 제어기를 삽입해서 진동을 제어하는 복합적인 진동제어 시스템으로 압전 소자의 성능이 향상되고, 다수의 액츄에이터를 동시에 제어할 수 있을 정도로 제어기의 속도가 향상 되어 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 제어 시스템에 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 Filterd-X LMS 제어 알고리즘을 구성하여 제어하고[6], 선박 상부구조의 중 진동을 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 있고[10], 고정된 평판에 충격을 MFC 작동기와 PPF 알고리즘을 이용하여 고유진동주파수위 성분을 감소시킨 연구와[11], 실린더 셸(shell)에 MFC 작동기를 부착하고, PPF 알고리즘을 이용한 능동진동제어 실험을 성공하였다.[12]

능동진동제어 연구의 발전으로 구조물에 하나의 진동 성분을 제어하는 것을 넘어 다수의 진동 성분을 제어하는 연구 단계이다. 구조물에 다수의 PZT 와 그것을 제어하기 위한 여러 가지 부가 장치들이 필요하다. 그러나 다수의 PZT 를 제어하기 위해서는 많은 수의 프로세서가 필요하였고, 이것으로 인해 실험장비가 복잡해지고 비효율적이며 고비용이 큰 걸림돌이 되어 왔다. 이것을 해결하기 위해서는 뛰어난 성능을 가진 하나의 메인 컨트롤러를 사용하여 중앙 집중적인 방식으로 다수의 PZT 를 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 위해서는 고성능 DSP 프로세서인 TMS320C6713 을 메인 컨트롤러로 사용하였고, 센서로부터 신호를 받고,

액츄에이터를 제어하는 고속 A/D 및 D/A Interface 회로, PZT 구동을 위한 고전압 Amp 를 하나의 Control cell 부분으로 만들어 Main Controller 와 상호 정보 교환(Interface)할 수 있도록 하였다.

입력에 따른 출력 신호는 공급되는 전압 및 소자에 따라 다른 특성을 보이게 된다. 그래서 여러 특성의 액츄에이터에 따라 다양하고 유동적인 시스템의 설계가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 상황을 고려하여 적용할 수 있도록 가변 Transformer(Slidac)와 DC-DC Converter 의 두 개 전원을 선택적으로 사용할 수 있게 설계하였다. 물론 DC-DC Converter 의 경우는 DC 입력에 따라 출력이 일정한 특성을 가지고 있다.

기존의 평판과 셸(Shell)를 이용한 실험에서는 고 전압 Amp 인 PA 97 의 경우에 외부 노이즈와 전류의 영향으로 인하여 심한 발열 현상과 함께 심한 경우 Amp 가 파손되는 경우가 다수 발생하였으나[13], 전류의 제한이 가능하며, 부 노이즈에 비교적 강한 PA 95 Amp 를 적용하여 실험 함으로서 시스템의 안정성 여부를 검증하였다. 또한 전원부에서 발생하는 근본적인 노이즈를 줄이기 위하여 디지털과 아날로그를 분리하여 시스템을 제작하였고, 원 칩을 비롯한 A/D, D/A 의 경우는 Transformer 나 DC-DC Converter 보다는 비교적 저 전압에 속하므로 이 전원 또한 분리하여 각각의 입출력 상태를 확인하였다.

능동제어 대상 시스템의 고유진동수의 주파수가 빠르기 때문에 제어 시스템의 Loop Time 은 시스템의 성능에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

진동 발생시 Loop Time 에 따른 능동제어의 성능을 검증하기 위하여 평판(Plate)에서 공진 모드 제어로 시스템의 실시간 제어 성능을 검증하였다.

## 제 2 장 Active Control System의 개요

### 2.1 System의 개요 및 구성

능동제어에 대한 연구들은 대부분 압전 액츄에이터를 사용하여 센싱과 구동을 하는데 압전 액츄에이터는 전기를 입력 에너지로 하여 변위 또는 발생력을 출력하는 전기식 액츄에이터이다. 즉, 압전 액츄에이터를 구성하는 압전 세라믹스에 전계를 인가하면 늘어나거나 수축하는 성질을 이용하는 것이다. 압전 액츄에이터의 특징으로는 미소 변위의 고 정밀 제어가 가능하다는 점과 발생력이 크다는 점이다. 또한 응답성이 빠르며 에너지 변환 효율이 높다는 성질을 가지고 있다. 그리고 전자적인 간섭이 없고 형태의 영향이 적다.

이와 같은 압전 소자를 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 입출력 액츄에이터로 구성하는 Multi-Input Multi-Output(MIMO) 시스템이 된다.

이러한 MIMO 제어 시스템에는 기존의 BIBO 이하의 능동 진동제어의 결과를 바탕으로 하고 있지만 시스템의 구성 방법에 있어서는 기존의 방법과는 차이점을 보인다. 즉, 고가의 고성능 DSP 제어기와 고가의 구동 드라이버로 구성된 제어 시스템을 구성하여 Smart skin 형태의 제어 시스템을 구성하기에는 비용적인 면과 공간적인 면에서 상당한 어려움이 따르게 된다. Smart skin 형태의 제어 시스템을 구성하기 위해서는 신호처리 속도는 빨라야 하고, 저가이며 부피가 작아야 한다. 그러기 위해서는 저가의 One-chip 마이크로프로세서, 구동기 및 센서를 한 개의 Control Cell 로 구성하고 이들을 총괄 제어하는 형태의 제어 시스템을 구성해야 한다. 이러한 시스템의 장점은 저가이며 다수의 액츄에이터 중에서 고장이 나더라도 고장의 진단과 교체가 용이하다는 것이다. 그리고 MIMO 제어시스템의 다른 방법은 보다 고성능의 프로세서를 사용하여 제어 시스템을 구성하는 것이다. 최근 마이크로프로세서 기술의 눈부신 발전으로 과거에 능동 진동 제어에 사용하던 TMS320C31/32 DSP 프로세서들의 50 배 이상의 연산 처리가 가능한 프로세서들이 출현하였다. 이러한 발전에 따라 고성능 프로세서를 주 제어기로 사용한 다수의 드라이버와 센서를 모듈로 구성하는 방법이 가능하게 되었다.

구체적으로는 Controller(H/W)의 설계는 One-Chip 마이크로프로세서와 DSP 프로세서를 각각 이용하여 진동을 감지하는 센서로부터의 신호를 받아 제어알고리즘을 구현하여야 한다. 그러기 위해선 구동 드라이버에 명령을 내리는 고속 Controller 를 설계하는 기술을 확립하여야 하며 이러한



Controller 를 바탕으로 고속 연산이 가능한 여러 채널의 A/D 와 D/A 컨버터, 각각의 압전 소자를 구동시킬 수 있는 앰프(Amp)등이 필수 요건이다. 이러한 시스템을 통해서 하나의 프로세서는 다수의 센서 및 구동 드라이버로 구성된 제어 모듈을 제어하게 되고, 모듈에 개발된 제어 알고리즘을 적용시켜 완전한 형태의 제어 시스템이 개발 되게 된다.

디지털 입력명령을 증폭하여 PZT 액츄에이터에 가하는 구동용 드라이버의 성능은 제어시스템의 성능에 큰 영향을 미치게 되므로 소형이며, 저가인 드라이버를 구성하기 위해 적절한 드라이버의 개발은 필수적이다. 또한 액츄에이터의 증폭된 전압을 Switching 할 때 발생하는 시간 지연 역시 제어 시스템의 특성에 큰 영향을 미치게 되므로 이를 위한 연구도 행해져야 한다.

Shell 구조물에서 발생하는 미세한 진동을 고속으로 감지하기 위해서는 PZT Sensor 가 적합하다. 하지만 이 PZT Sensor 는 노이지 발생, 비선형, 저전류 구동이라는 특성을 가지고 있으므로 노이즈 필터링에 대한 알고리즘 연구와 외부의 Interface 연구 또한 선행 되어야 한다.

본 연구에서는 Smart skin 형태의 제어 시스템을 구성하기 위해 상대적으로 저가이며 고속 신호처리가 가능한 TMS320C6713 프로세서 한 세트와 Controller Cell 인 센서 및 PZT 구동기로 이루어졌다.

각종 Interface 와 다수의 모듈로 구성된 새로운 형태의 능동 제어 시스템을 Fig 2.1 과 같이 구성하였고, DSP 프로세서와 같은 속도의 해상도를 갖는 A/D 및 D/A 변환소자를 선별하여 전체적인 시스템에 적용시켰다.



Fig 2.1 Control system using DSP processor

전체적인 PZT 액추에이터는 PZT 드라이버와 PZT 소자로 구성되는데, 드라이버는 소자를 구동하기 위해 DSP Control Board로부터의 제어신호를  $\pm 400[V]$  이상의 전압으로 증폭하는 부분이고, PZT Sensor 부분은 진동의 크기를 감지하여 A/D 변환기를 통해 DSP control board 에 전달하는 부분이다.

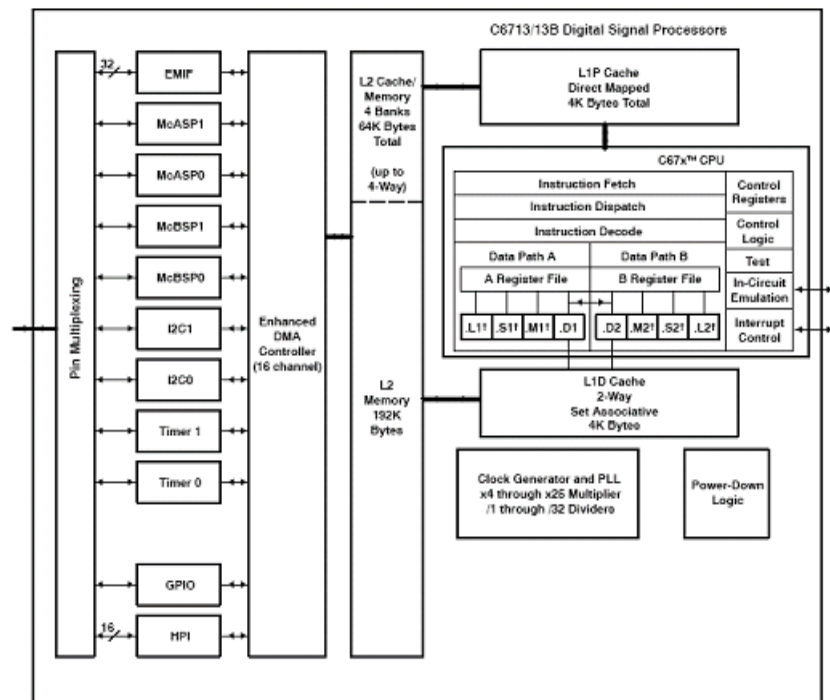
## 2.2 System의 개발 환경

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 내장되어 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 2.2 은 TMS320C6713 의 내부 구조를 나타낸 그림이다. EDMA 를 통하여 CPU 의 과부하를 줄일 수 있는 구조이다.



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

EMIF interfaces to:	McBSPs interface to:	McASPs interface to:
-SDRAM	-SPI Control Port	-I2S Multichannel ADC, DAC, Codec, DIR
-SBSRAM	-High-Speed TDM Codecs	-D/T: Multiple Outputs
-SRAM,	-AC97 Codecs	
-ROM/Flash, and	-Serial EEPROM	
-I/O devices		

Fig 2.2 Structure of TMS320C6713

Fig 2.3 는 TMS320C6713 이 내장된 Main Controller 의 내부 구조를 나타낸 그림이다.

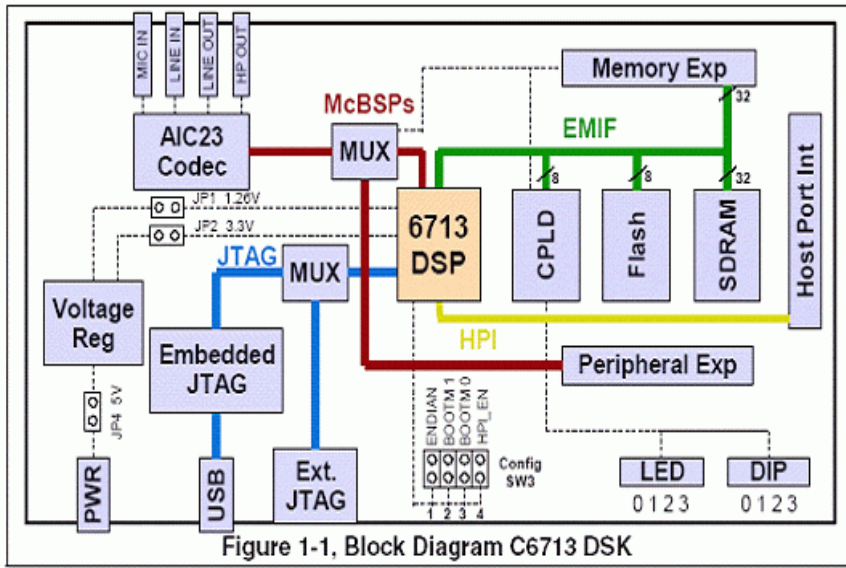


Fig 2.3 Diagram of Main Controller

Address	C67x Family Memory Type	6713 DSK
0x00000000	Internal Memory	Internal Memory
0x00030000	Reserved Space or Peripheral Regs	Reserved or Peripheral
0x80000000	EMIF CE0	SDRAM
0x90000000	EMIF CE1	Flash
0xA0000000	EMIF CE2	CPLD
0xB0000000	EMIF CE3	Daughter Card

0x90080000

Figure 1-2, Memory Map, C6713 DSK

Fig 2.4 Memory Map of Main Controller

Fig 2.4 는 Main Controller 의 내부 Memory Map 을 나타낸 그림이다.  
Memory Map 에서 CE0 과 CE1 은 RAM 과 FLASH 등에 할당되어 있고,  
시스템에서는 CE2 와 CE3 를 사용하여 외부 장치와 연결하게 된다.  
그리고 Fig 2.5 은 DSP Main Controller 의 사진이다.

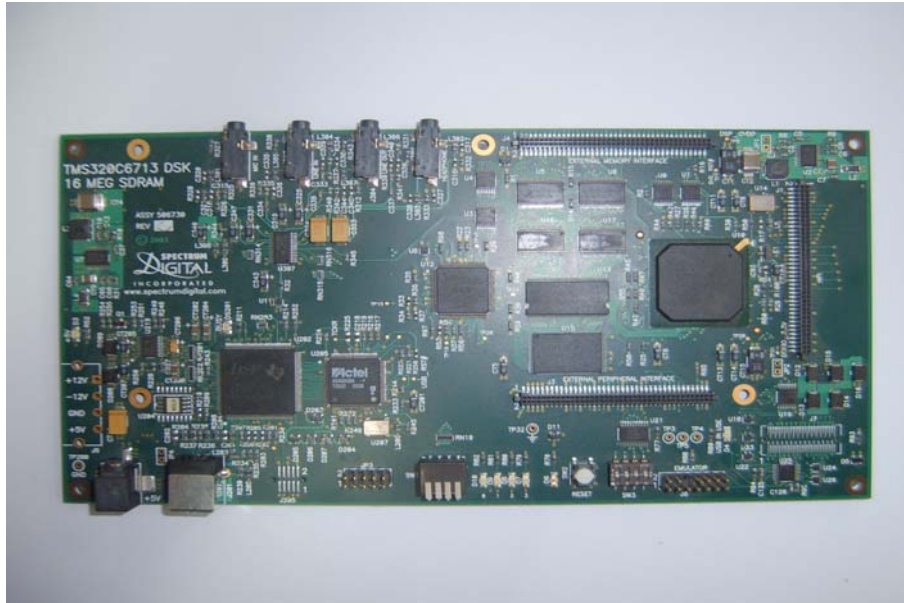


Fig 2.5 DSP Main Controller

DSP Controller 의 EMIF(External Memory Interface)를 사용하여 외부 장치와 통신을 수행하게 된다. 컴파일러는 DSP 계열의 전용 컴파일러인 Code Composer Studio 를 사용하였다.

Code Composer Studio 를 이용하게 되면 실시간 적인 메모리와 변수의 값을 실시간 적으로 확인할 수 있다는 장점을 가진다. 특히 USB 연결을

통하여 TMS320C6713 의 에뮬레이터 기능을 이용한 이러한 기능은 고 성능 칩이 지원하는 특별한 기능이기도 하다.

Fig 2.6 은 Code Composer Studio 의 인터페이스 화면을 나타낸 사진이다.

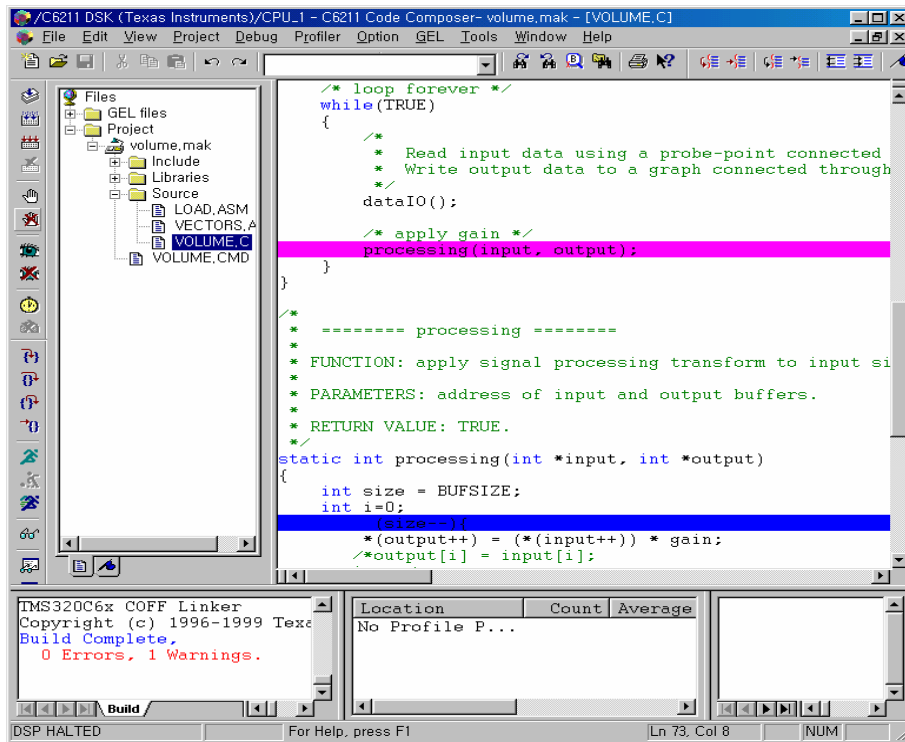


Fig 2.6 Code Composer Studio

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.

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 2.7 에 PZT 의 외형을 나타내었다.



Fig 2.7 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 가변적인 전원공급이 가능한 회로를 구성하였다. 또한 DC-DC Converter의 사용으로 소형화가 가능한 간편한 시스템을 선별적으로 사용할 수 있게 설계하였다.

## 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 압전 재료들은 의료, 군사, 가전제품 등 여러 분야에서 이용되어 왔다. 압전재료의 압전성 표현은 압전 기본식으로 나타낸다. 압전 기본식[14]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 일 때와 응력이 일정하거나 zero 일 때의 값을 의미한다. 위 식에서 T=0, E=0 의 경우에는 다음식과 같이 표현된다.

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

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 압전 정수이며,  $\beta$  는 역 유전율이다.

MFC 액츄에이터는 NASA Langley 연구소에서 개발한 액츄에이터로서 d33 효과를 이용해 변형율을 일반 압전 세라믹 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.

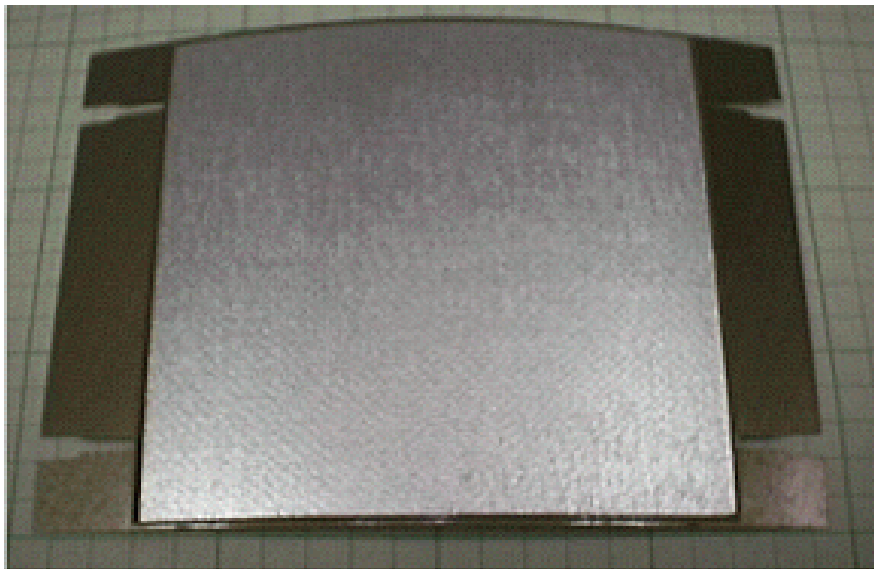


Fig 3.1 THUNDER Actuator

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, 압전 박판이 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 압전 박판은  $[\gamma_1, \gamma_2]$  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  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  는 압전 박판이 붙어있는 각도를 나타낸다. 수직과 수평방향 변위를 각각  $v$  와  $w$  로 나타내었다.

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

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

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

여기서  $N_\theta$  와  $M_\theta$  는 각각 잔류 응력과 모멘트를 나타내고  $\hat{M}_\theta$  는 압전 박판에 인가된 전압에 의해 만들어지는 모멘트를 나타낸다. Backing Material 과 압전 박판의 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. 압전 재료의 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 Minimum 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[  $\mu$ s ] 단위로 고속으로 진동의 값을 측정할 수 있다.

$\pm 10[V]$  입력은 A/D 컨버터가 읽어드릴 전체적인 전원에 인가되고, R/C 와 /CS 로 A/D 에 명령을 주어 입력되는 전압을 읽거나 읽어드릴 값을 데이터 라인으로 전송한다. BYTE 는 입력되는 값(0,1)에 따라 데이터 라인의 수치는 최상위 비트(MSB)와 최하위 비트(LSB)의 형태로 나타나게 된다.

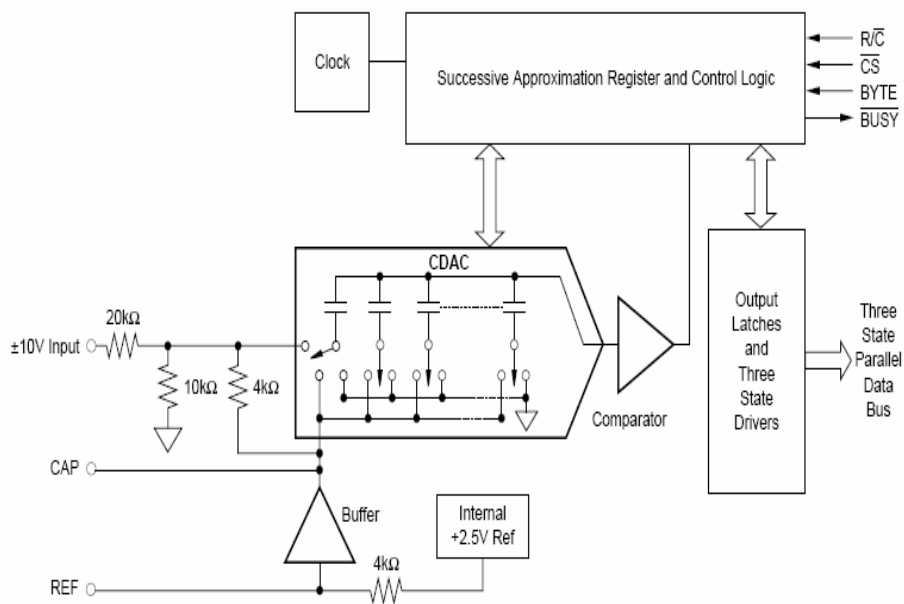


Fig 4.1 A/D Block Diagram



Table 4.1 A/D Operation

$\overline{CS}$	$R/\overline{C}$	$\overline{BUSY}$	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" <sup>(1)</sup> . Conversion n in progress.
0	↑	0	Enables databus with valid data from conversion "n-1" <sup>(1)</sup> . 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".			

Table 4.1 은 A/D를 제어하기 위한 Operation 을 나타낸 것이다. 핀 R/C와 /CS의 명령에 따른 상태와 컨버팅 진행여부를 나타내고 있다.

## 4.2 D/A Interface

PZT sensor로부터의 출력된 신호는 A/D 변환한 후 Controller 통해 디지털 값을 읽어 들이게 되고, Controller에서는 구성된 제어 알고리즘에 따른 신호가 D/A를 통해 아날로그 신호로 출력된다. 이 아날로그 신호는  $\pm 400[V]$  이상의 고전압 출력이 가능한 PZT 드라이버 내의 Amp에 연결되고, 증폭 비율에 따라 D/A의 출력 Analog 값에 비례해서 액추에이터의 구동전압이 출력된다. 사용한 D/A Chip인 DAC712의 특징은 다음과 같다.

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

Fig 4.2은 DAC712의 내부구조를 나타낸 Block Diagram이다. 내부에는 입력 값을 임시로 저장하는 래치(Latch) 회로가 두 개로 되어있고, 이를 제어하는 핀  $/A_0$ 와  $/A_1$ 의 상태에 따라 입력된 16bit 값을 처음 버퍼에 저장하고 다음 버퍼로 값을 넘기며, 전압을 출력하는 명령을 수행하게 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.

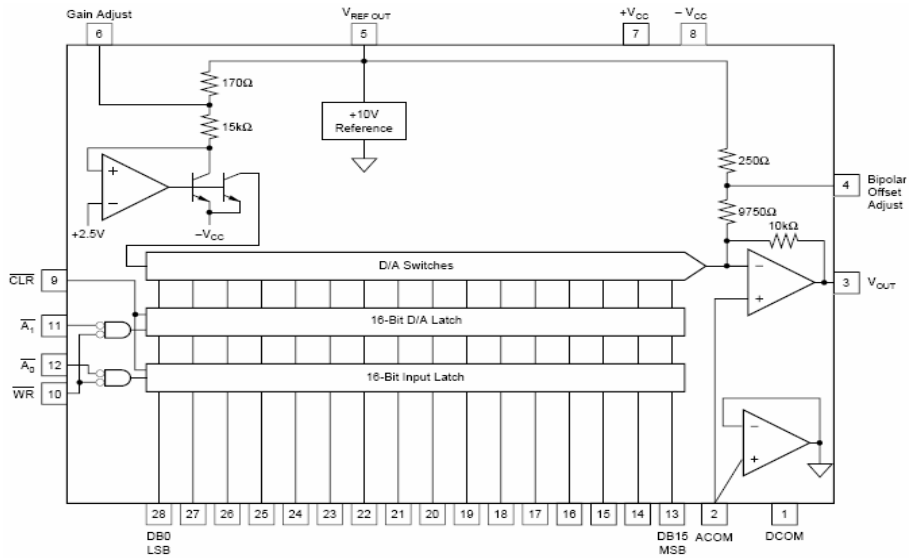


Fig 4.2 D/A Block Diagram

Table 4.2 은 DAC712 의 매뉴얼에 기재되어 있는 DAC712 를 제어하기 위한  $\bar{A}_0$ ,  $\bar{A}_1$ ,  $\bar{WR}$  그리고  $\bar{CLR}$  핀들의 컨트롤 방법을 나타낸 것이다.

Table 4.2 D/A Operation

$\bar{A}_0$	$\bar{A}_1$	$\bar{WR}$	$\bar{CLR}$	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

## 제 5 장 Actuator Driver의 개발

### 5.1 PZT Actuator Amp Driver

본 연구에 있어서 시스템의 구성에서는 A/D 를 통해 출력된 신호를 다시 D/A 로 변환하고, 변환된 아날로그 값에 따라 PZT 액츄에이터에 공급할 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 PA Amp Series 를 사용하였다. 그 중에서도 PA 97 은  $\pm 24[V]$ 의 입력 전압으로  $\pm 450[V]$ 의 출력전압을 낼 수가 있고, 10[mA]까지 전류를 허용하며,  $8[V/\mu s]$ 의 Slew Rate 의 특성을 가진다. Fig 5.1 은 PA 95 의 등가 회로도를 나타낸다.

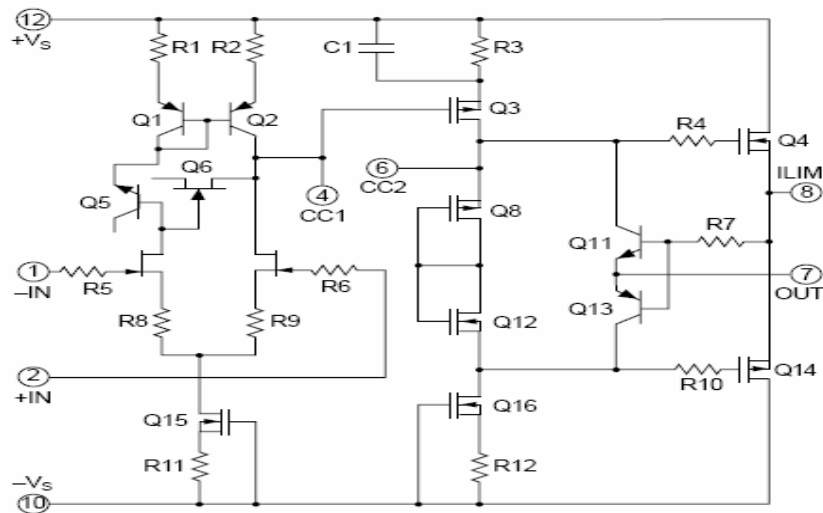


Fig 5.1 PA 95 Equivalent Schematic

PA 97 의 경우 스위칭에 따른 열의 발생으로 인하여 실험시에 Amp 가 파손되는 경우가 종종 발생하였다. 그래서 PA 97 보다 고 사양인 PA 95 Amp 을 적용하게 되었다. 실제 적용하여 구성한 시스템에서 PA 95 는 이전 Series 에 비해 전반적으로 동일한 특성을 가지고 있지만 전류를 제한 할 수 있다는 중요한 특성으로 인하여 보다 안전하게 회로를 구성할 수 있었다.

PA 95 의 경우 일반적인 Amp 와 같이 간단하게 Interface 하여 사용할 수 있으며 D/A 의 출력전압을 받아서 증폭한 후, PZT 액츄에이터에서 적용하는 PA 95 의 회로를 Fig 5.2 와 같이 구성하였다.

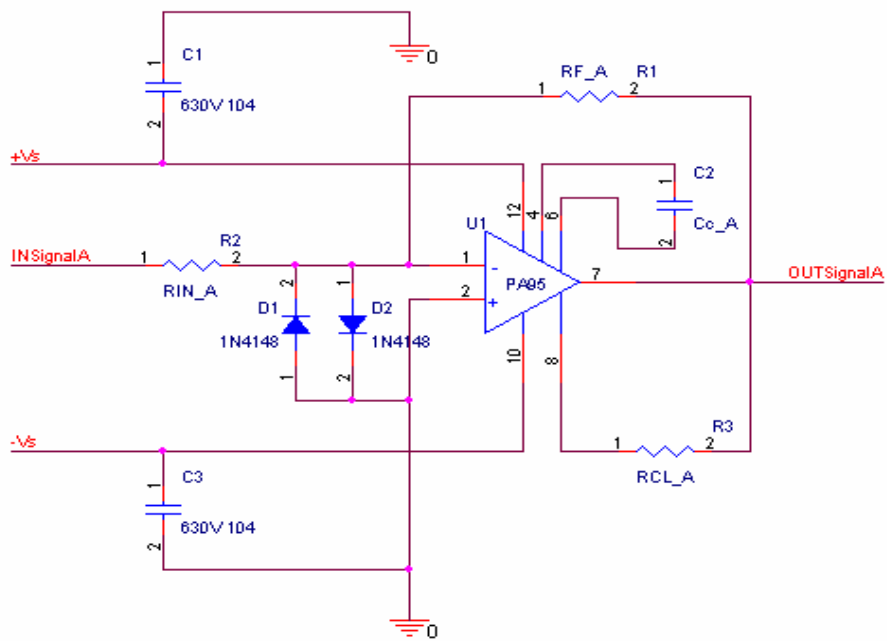


Fig 5.2 Actuator Amp Driver Circuit

PA 95 를 이용한 전압증폭 방법은 비 반전 증폭을 사용하였으며, 입력 전압은 D/A 의 출력전압인  $-10[V]$ 에서  $+10[V]$ 를 직접 연결하였다. 전원은 H-Bridge 회로를 출력에 연결하여 사용하였고, 이득(Gain)는 Fig 5.2 의  $R_{IN\_A}$  와  $R_{F\_A}$  를 이용한  $-R_{F\_A}/R_{IN\_A}$  형태(반전 증폭) 이다.

PA 95 은 입력 신호에 따른 고속 스위칭이 요구 되므로 그에 따른 노이즈 때문에 두 개의 입력단에 각각 다이오드를 부착하여 신호에 대한 정류 회로를 구성하였다. 그리고  $+V_s$ ,  $-V_s$  에 커패시터를 설치하여 Amp 와 전원의 안정화를 추구하였다. 마지막으로 PA 95 의 전류 제한 특성을 이용하여  $C_{c\_A}$  에  $20[\Omega]$  사용하여  $30[mA]$ 로 전류를 제한하였다.

## 5.2 고전압 전원 공급장치

PZT 를 구동시키기 위해서는  $\pm 400[V]$ 이상의 전압이 필요하다. 이 전압을 얻기 위해 AC220[V]를 600[V]까지 증폭해주는 Slidac 를 사용하였다.

Fig 5.3 은 H-Bridge 와 평활 회로를 이용한 회로도이며, Sildac 은 교류를 발생시키므로 직류로 변환시켜서 구동전압으로 사용하였다. 그리고 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.

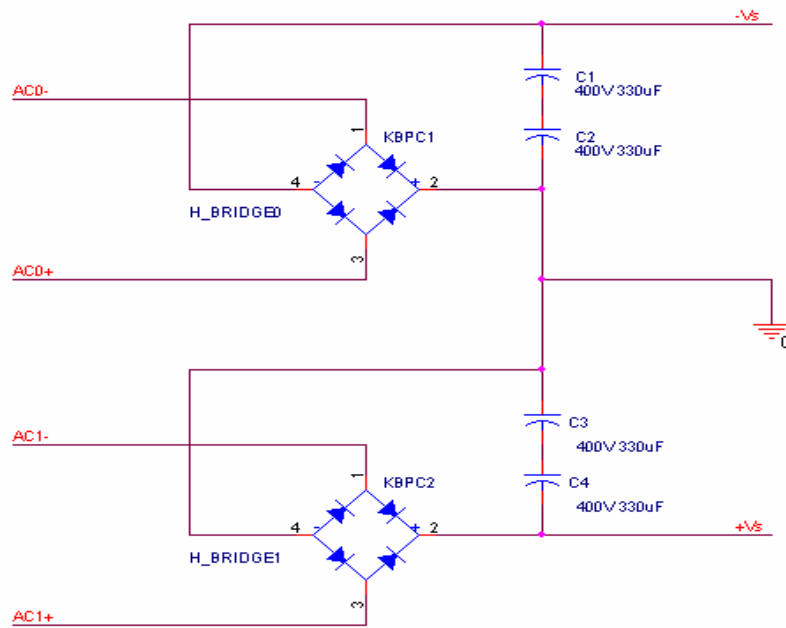


Fig 5.3 The Circuit of the H-Bridge

PZT 용 Actuator Amp 를 구동하기 위해서는 수백 볼트의 양전원과 음전원이 필요하므로 Bridge Circuit 에서 중간 탭을 두어 GND 로 잡고 + 전원과, - 전원으로 분리하였다.

Fig 5.4 는 실제 Bridge 회로를 이용하여 제작한 PCB 기판이고 Fig 5.5 는 가변적인 교류 전압을 변화시키는데 사용된 Slidac 사진이다.



Fig 5.4 The PCB of the Bridge Circuit

최대 AC 450[V]의 두 전원을 이용하여  $\pm 450[V]$ 까지의 직류의 전원이 생성 가능하며 이렇게 가변적인 전원을 이용하여 Amp 및 전체적인 시스템에 가장 적절한 전원을 구성하게 되며, 이 전압은 전압계로서 확인 가능하다.





Fig 5.5 Figure of the Slidac

본 연구에서는 일상 생활에서 사용되는 AC 220[V]를 이용한 방법 이외에도 경량화와 소형화를 위하여 DC-DC Converter 이용한 전원부를 선택적으로 사용할 수 있게 설계하였다. Fig 5.6 는 PICO 사의 12AV/250D 를 사용하여 입력 DC 12[V]에 따라 출력이  $\pm$  DC 250[V]가 가능한 회로를 구성하였다. 물론 작은 전류에도 구동이 가능한 MFC 소자를 기반으로 한 시스템이므로 가능하다. 하지만 DC-DC Converter 는 노이즈에 대하여 아주 민감한 반응을 보이므로 사용시에는 반드시 주의 하여야 한다. 입력 전원은 Power Supplier 통하여 사용하였고, 전체적인 시스템의 경량화, 소형화를 위해서 선별 되었다.

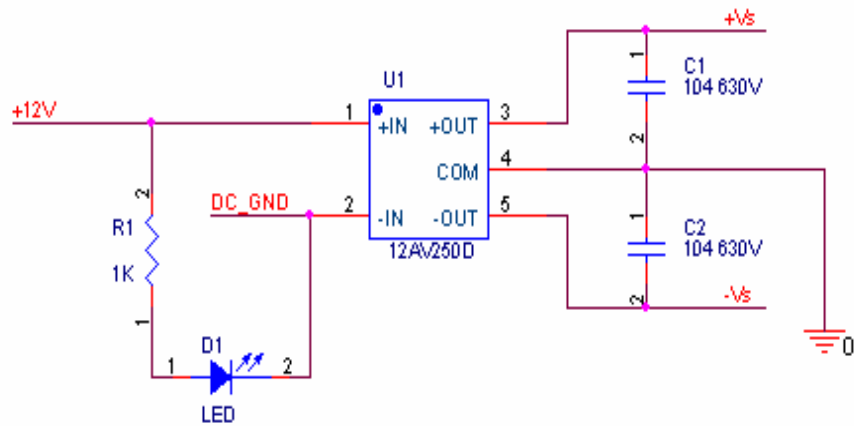


Fig 5.6 The circuit of the DC-DC Converter

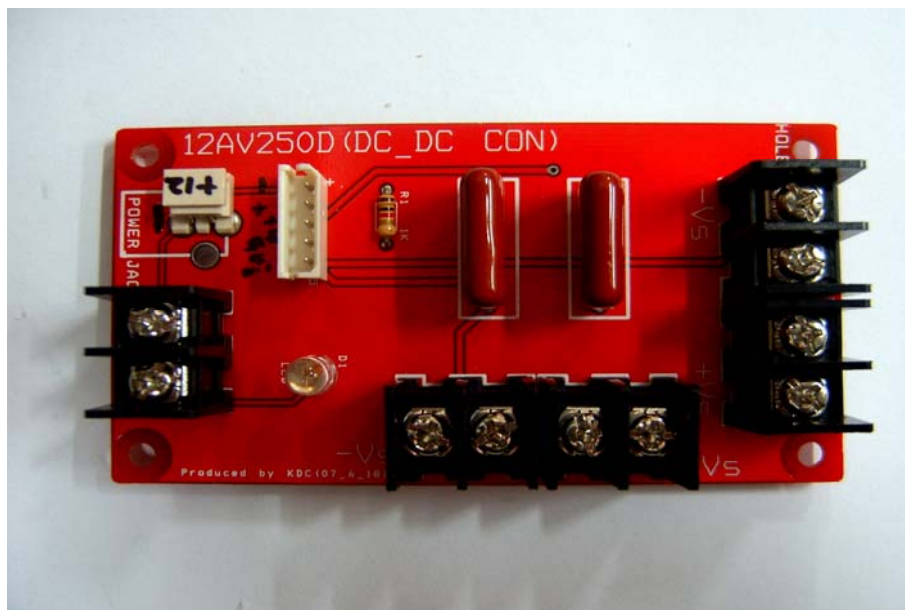


Fig 5.7 The PCB of the DC-DC Converter

Fig 5.7 은 Fig 5.6 의 회로도를 바탕으로 구성된 컨버터의 PCB 기판이다. 각각의 구성 시스템을 모두 결합하여 완성된 전체 제어 시스템을 Fig 5.8 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 의 Data 단자를 연결하였다. D/A 의 Analog 출력 단은 PZT Actuator Amp 의 입력 단으로 연결되고, 비 반전 증폭 회로로 구성된 Amp 의 출력 단은 PZT 액츄에이터의 입력신호가 되도록 연결하였다.

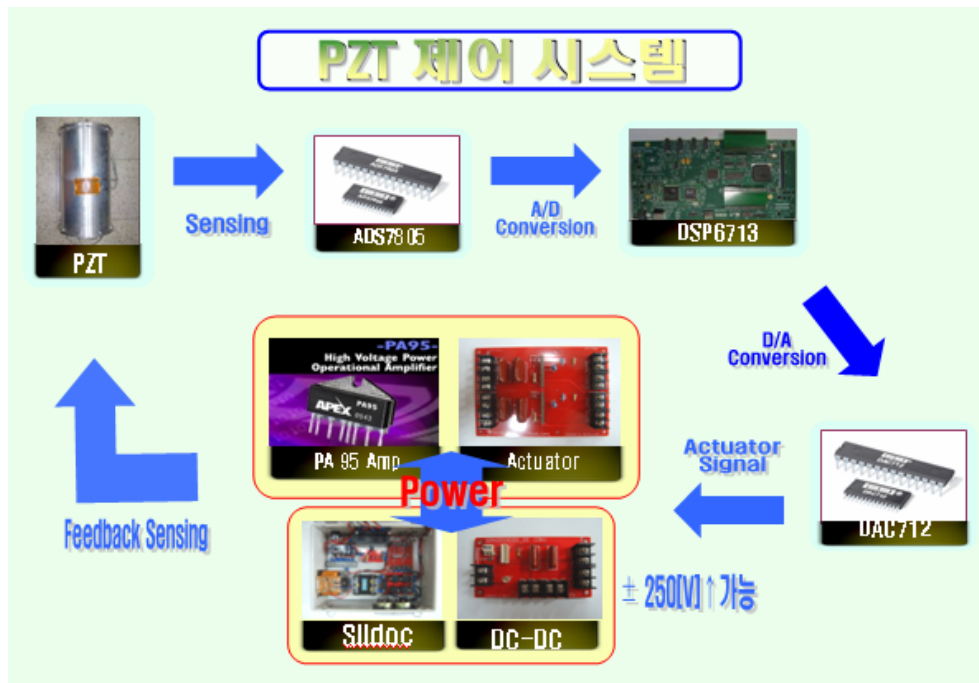


Fig 5.8 Developed Control System

### 5.3 Control Cell의 구성

미세한 진동에 의한 MFC의 센싱 값들은 A/D를 통하여 디지털 값으로 변환되어 원 칩(TMS320C6713)에 저장된다. 두 채널에 의한 센싱 값들은 74138의 디코더를 통하여 각각의 A/D와 D/A를 사용하게 된다.

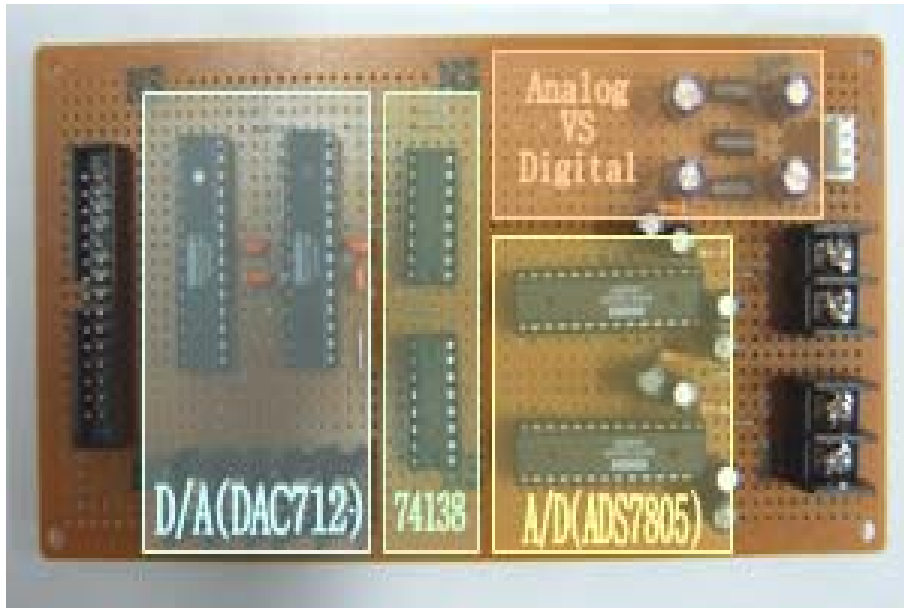


Fig 5.9 Figure of the Control Cell

Fig 5.9은 Control Cell의 형태를 보여주고 있고, D/A, 74138, A/D, 전원부에 대하여 각 영역에 따른 부품 실장의 형태를 보여주고 있다.

전원부의 경우 센서로부터의 입력되는 값이므로 아날로그 전원과 디지털 전원부를 분리하여야 하는데 BEAD를 통하여  $\pm 12[V]$  전원과 GND를 분리하였다. Fig 5.10는 이러한 회로도를 바탕으로 한 전원의 분리 형태를 보여주고 있다.

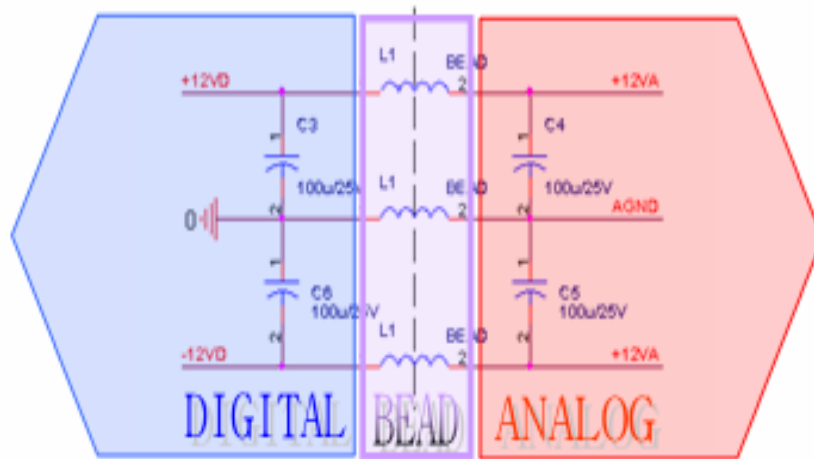


Fig 5.10 DIGITAL VS ANALOG

전원부의 경우 센서로부터의 입력되는 값이므로 아날로그 전원과 디지털 전원과를 분리하여야 하는데 BEAD를 통하여 12[V] 전원과 GND를 분리하였다. Fig 5.11는 이러한 회로도를 보여주고 있다.

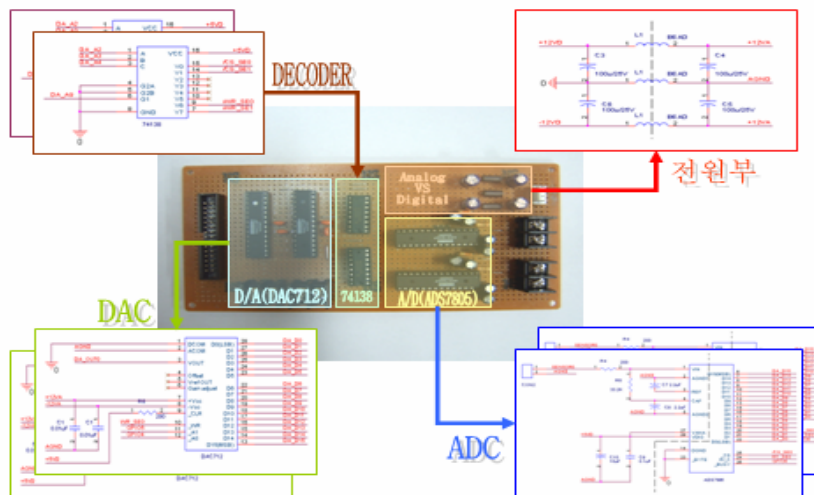


Fig 5.11 Consisted of the Control Cell

## 5.4 휴대 가능한 제어 시스템

Slidac 의 AC를 이용한 전원과 DC-DC Converter를 이용한 전원으로 인한 소형화와 경량화로 인해 하나의 컨트롤 박스에 휴대 가능한 시스템의 구현이 가능해지게 되었다. 전원을 비롯한 각각의 모듈화를 통하여 손 쉽게 디버깅이 가능하며, 스위치를 이용하여 Ramp를 통한 전체 시스템을 가시화 하였다.



Fig 5.12 Figure of the Control System Kit

Fig 5.12 직접 제작한 Control System Kit를 보여 주고 있고, ON/OFF 스위치를 통하여 모듈을 선택적으로 이용할 수 있다.

또한 차지 Amp를 통한 MFC의 경우 컨덴서의 용량이 큰 만큼 방전을 하는데에 따른 소요시간이 길다. 이러한 불편한 점을 해소하기 위하여

방전램프를 이용하여 남겨진 양전원 및 음전원을 소비하였다. Fig 5.13은 제작한 Kit의 좌 측면과 우 측면의 구성을 보여준다.



Fig 5.13 Figure of the Control System Kit's Side

또한 시스템 키트의 좌 측면은 함수 발생기나 오실로스코프와의 원활한 측정을 위하여 BNC 단자로 제작하였다. 이 BNC 단자는 각각의 입력에 따른 차지 Amp를 지난 증폭된 출력 신호이므로 총 2 SET로 구성된다.

전원부의 경우 Slidac에 의한 가변적인 전압 조절이 가능하므로 우 측면에는 그에 따른 양전원과 음전원의 정확한 수치를 보기 위하여 두 개의 전압계를 설치하였다. 그리고 고 전압과 저 전압의 전원부 분리를 위하여 TMS320C6713의 원 칩과 A/D, D/A는 키트 내부의 Power Supplier의 +5[V], ±12[V] 전원을 사용하였다.

Fig 5.14 은 키트의 전면부의 개방 시 Control System의 모습을 보여주고 있다.

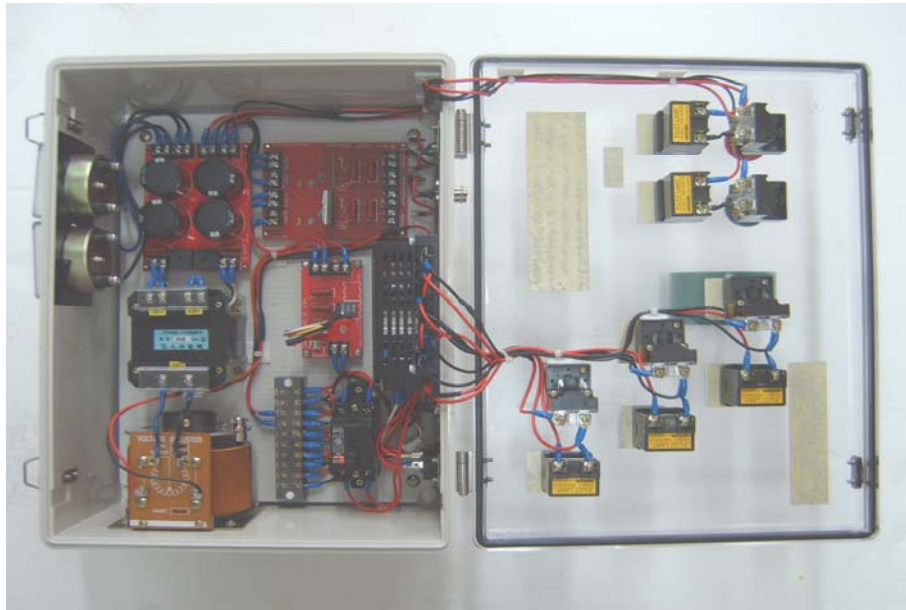


Fig 5.14 Figure of the Opened Control System

모듈의 상태를 표시하기 위한 목적으로 구성된 전면부는 전원 ON/OFF 스위치와 상태 표시 Ramp, 방전 스위치로 구성되어 있고 안전을 위하여 250[V] 10[A]의 퓨즈와 누전 차단기를 설치 하였다.



## 5.5 전원부의 분리

기존의 평판과 셸(Shell)를 이용한 실험에서는 고 전압 Amp 인 PA 97 의 경우에 외부 노이즈와 전류의 영향으로 인하여 심한 발열 현상과 함께 심한 경우 Amp 가 파손되는 경우가 다수 발생하였다. 이에 대한 개선책으로 같은 고 전압 Amp 계열에 전류 제한 기능과 노이즈에 비교적 강한 특성을 지닌 PA 95 Amp 를 적용시킨 시스템은 발열 현상 및 노이즈 특성에서 상당한 이점을 보여주었다. 또한 전원부에서 발생하는 근본적인 노이즈를 줄이기 위하여 디지털과 아날로그를 분리하여 각각의 Control Box 를 제작하였다. Fig 5.15 는 분리된 Control Box 를 보여준다.



Fig 5.15 Isolated Digital and Analog Power Source

디지털 전원의 경우 Control Cell 부분에 속하는 A/D, D/A, Decoder 와 원 칩인 TMS320C6713 가 속하게 되고 Transformer(Slidac)나 DC-DC Converter 의 아날로그 전원에 비해 비교적 저 전압에 해당된다. Fig 5.16 은 제어부의 Control Box 모습을 보여준다.

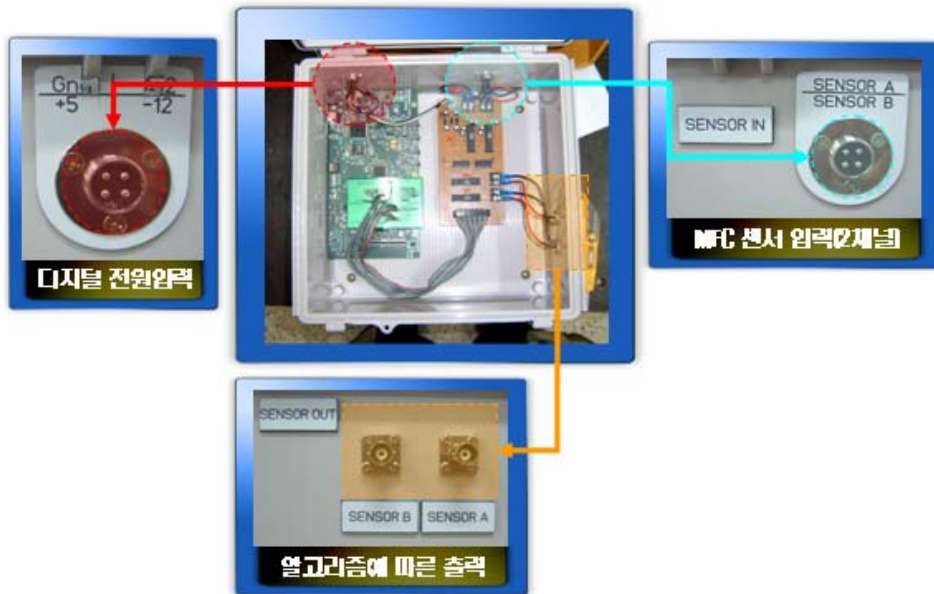


Fig 5.16 Figure of the Control Part Kit

제어부의 Control Box 는 크게 원 칩 부분과 Control Cell 부분으로 나누어지는데 디지털 전원의 4pin Connector 를 통해서 GND, +5[V], -12[V], +12[V]의 전원이 공급되게 된다. 이러한 전원은 원 칩과 Control Cell 의 A/D, D/A 에 인가되어 동작하게 된다.

MFC 센서의 입력의 경우 2 개의 채널이 전원과 동일한 형태의 4 pin Connector 를 통하여 Control Cell 에 입력되고, 입력된 신호는 TMS320C6713 의 PPF 제어 알고리즘에 의하여 능동 제어가 이루어진다. 그리고 이렇게 알고리즘 처리된 신호는 BNC 단자를 이용하여 Actuator Driver 의 입력 단자를 통하여 PA 95 Amp 에 입력된다.

## 5.6 시뮬 링크(Simulink)의 적용

Active Control System의 경우 기본적인 입력의 테스트를 위하여 함수 발생기를 사용하였는데 시스템 신뢰성과 신호 발생에 따른 실시간을 확보하기 위하여 TMS320C6713 DSK 키트를 이용한 Matlab의 Simulink 기능을 적용하였다. Fig 5.12는 Simulink를 이용한 DSP 6xxx 계열의 전체적인 시스템 Block Diagram을 보여주고 있다.

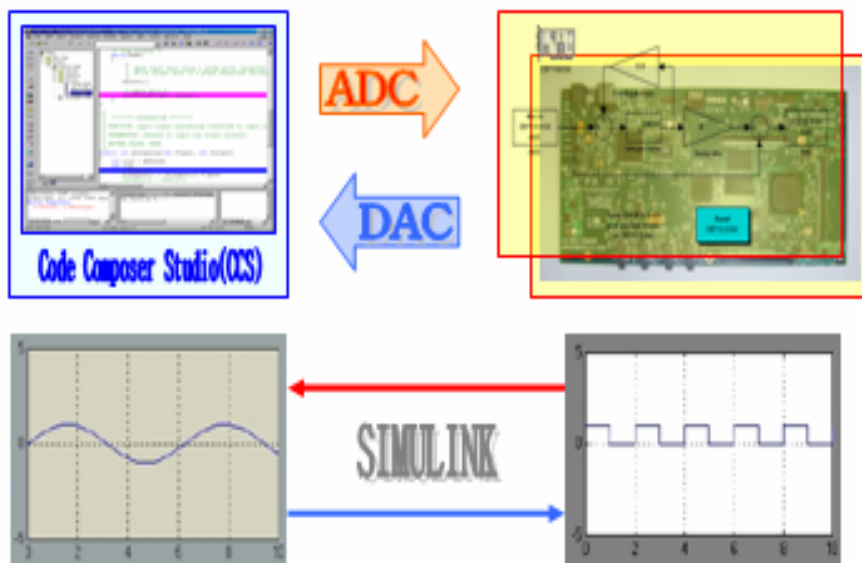


Fig 5.17 Application of the Simulink with TMS320C6713

Simulink를 통하여 연동하는 TMS320C6713 DSK는 하드웨어적인 구성 없이도 소프트웨어적인 시뮬레이션이 가능하므로 A/D뿐만 아니라 D/A의 기능도 적용시켜 시스템의 결과 여부를 손 쉽게 확인 할 수 있다.

## 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  $\omega_f$  와  $\zeta_f$  는 각각 PPF 보상회로의 필터 주파수와 감쇠인자이다. 일반적으로 PPF 제어기는  $\omega_f$  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 제어를 구현함에 있어 가장 중요한 파라미터는  $T_s$  인데 그 역은 디지털 제어기의 샘플링 속력이 된다. 디지털 PPF 제어가 효과적으로 작동하기 위해서는 샘플링 속력이 제어 대상인 진동 모드의 고유 진동수보다 빨라야 한다.  $\zeta_f$  는 0.3 의 감쇠율로 정하였으며  $\omega_f$  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 365x330[mm] 의 넓이와 150[mm] 높이의 알루미늄 판을 사용하였다.

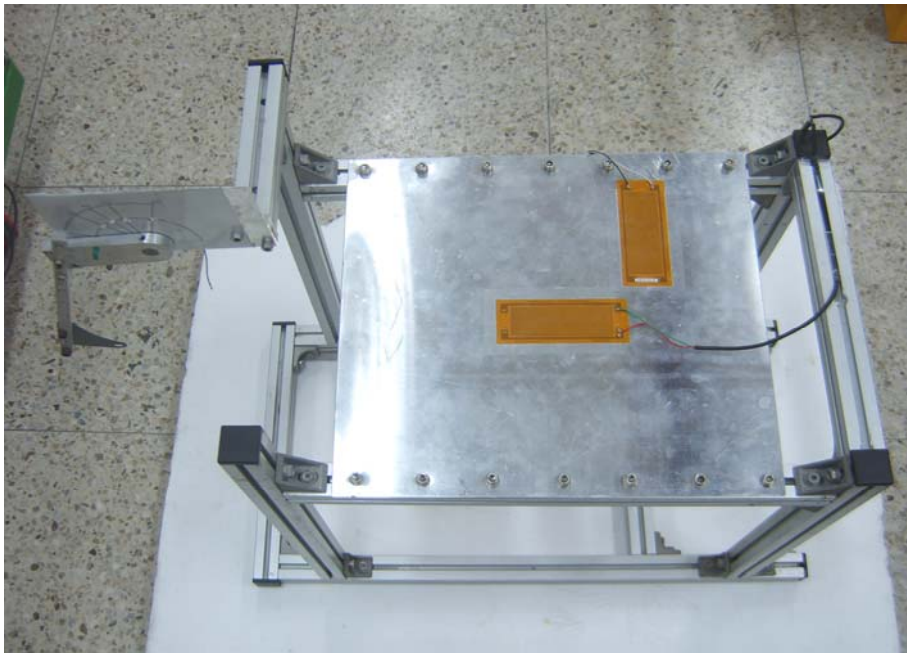


Fig 6.1 Structure for PZT Test

평판에 입력을 주기 위하여 시험을 할 때마다 일정한 높이에서 막대를 내려놓게 되고 평판과의 충격에 의해서 진동이 발생하게 된다. 발생한 진동을 센싱하여, 각각의 두 개 MFC 모듈에 의해 검출되게 되며, 이러한 진동은

A/D를 통하여 원 칩 프로세서를 통하여 디지털 값으로 변환 시킨다.

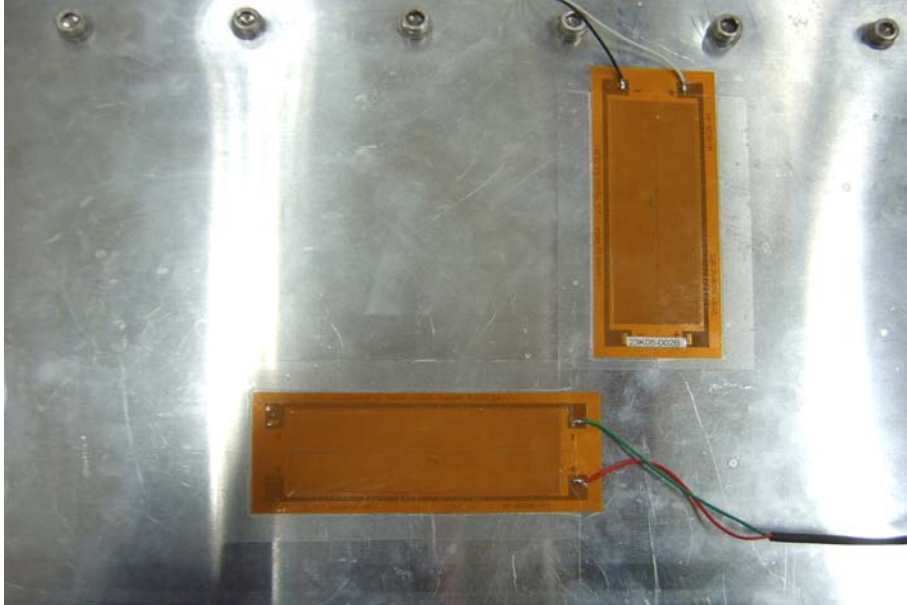


Fig 6.2 Figure of the MFC Attached Plate

Fig 6.2는 실제 평판의 입력을 검출하기 위한 MFC로 가로, 세로의 길이가 112x43[mm]의 MFC를 평판의 중앙과 가장 자리에 각각 설치한 후 시험을 시행하였다.



### 6.3 PZT의 Signal Sensing

PZT 센서의 Sensing Signal Test는 400[MHz] 디지털 오실로스코프를 이용하여 측정하였고 함수 발생기를 통해 20, 50, 150, 200[Hz]의 Pulse를 인가하였다. 입력 Pulse의 주파수에 따라 센싱 되는 파형을 비교해 보았다. Fig 6.3은 입력 300[V] 시의 PZT 센서의 진동에 따른 파형을 나타내고 있다.

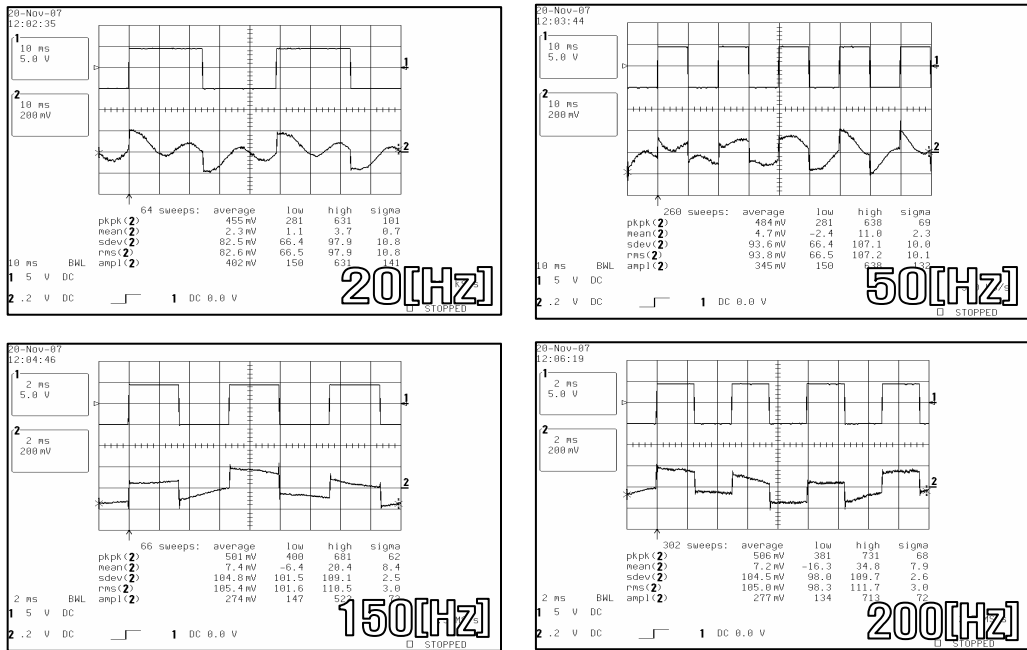


Fig 6.3 300V Test Input at 20, 50, 150, 200[Hz]

2개의 신호 파형 중에서 위쪽의 1번 짜 파형은 함수 발생기를 통하여 인가한 20[Hz]의 파형으로서 입력 파형에 대한 2번의 센싱 파형은 20 배 정도 적은 형태의 전압 레벨에서 이루어 지고 있다.

## 6.4 Actuator Driver의 성능 테스트

PZT를 통한 센서의 진동 입력에 따라 출력이 결정되는 Actuator Driver는 소자의 Sampling Time에 의해 성능이 결정된다. 그래서 센싱된 신호를 A/D, D/A를 통해서 얼마의 지연이 발생하는지를 측정하는 것은 시스템의 결과를 예측할 수 있는 중요한 정보라고 할 수 있다. Fig 6.4는 함수 발생기를 사용하여 일정한 주파수 입력에 따른 출력 신호의 지연 시간을 보여준다.

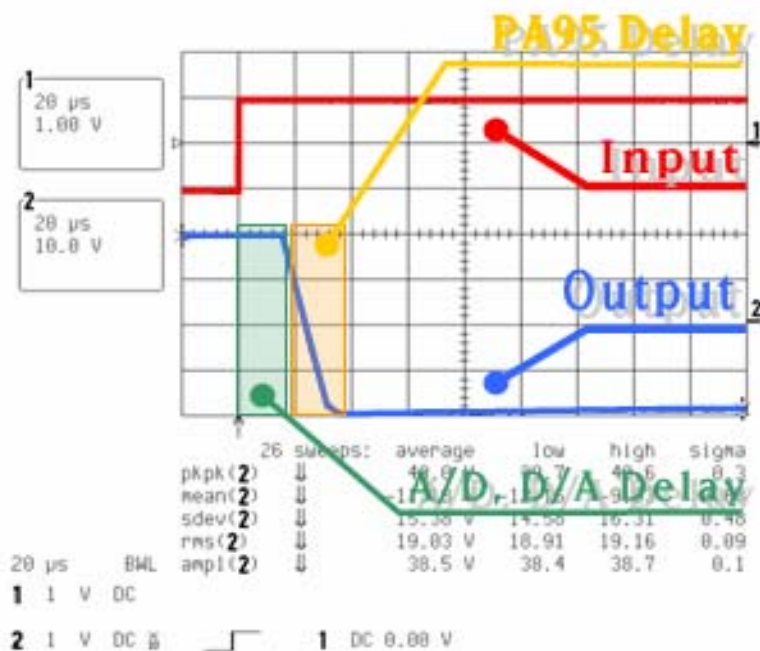


Fig 6.4 Delay Time as Input  $\pm 1[V]$

함수 발생기에서 약  $\pm 1[V]$ 의 구형파 입력 신호에 의하여 Actuator Driver를 통과한 신호는 20배 증폭에 따른 약  $\pm 20[V]$  출력으로  $40[\mu s]$

지연 시간을 가진다. 대략적으로 A/D의 경우는 약 10[ $\mu\text{s}$ ]의 Sampling Delay, D/A는 약 10[ $\mu\text{s}$ ], 74138 Decoder의 경우는 21[ $\text{ns}$ ]의 시간이 소요된다. 그리고 PA 95 Amp는 전압까지 도달하기 위하여 소요되는 Slew Rate가 30[V/ $\mu\text{s}$ ]의 특성을 가지고 있으나, 데이터 시트상의 증폭률과 커패시터를 사용하지 않았기 때문에 실험을 통한 실제 지연 시간은 대략 20[ $\mu\text{s}$ ]으로 나타났다.

실제적으로 PZT 센서의 경우 대체적으로  $\pm 250[\text{V}]$ 의 고압에 따라 실험을 하게 되므로 그에 따른 지연 시간을 측정해야 한다.

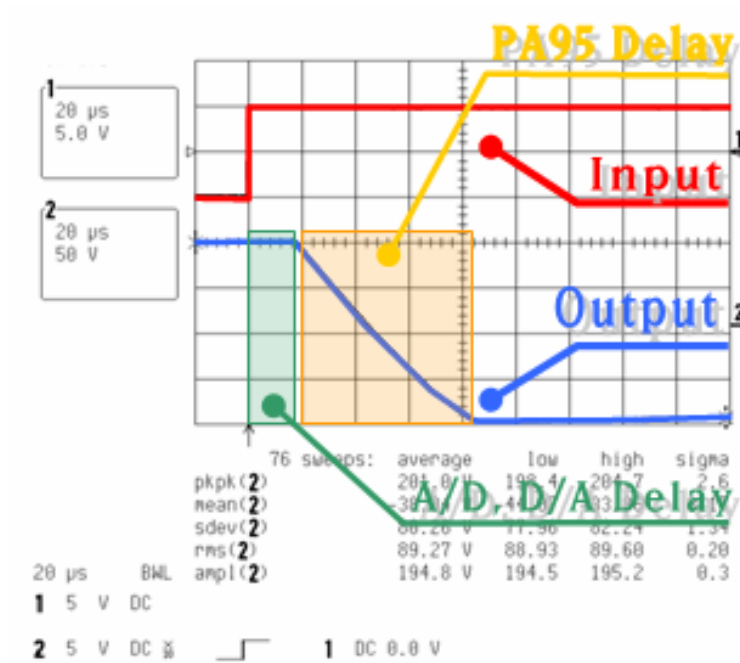


Fig 6.5 Delay Time as Input  $\pm 5[\text{V}]$

Fig 6.5 는 Actuator Driver에  $\pm 5[V]$  입력에 따른 출력을 보여주고 있고,  $20[\mu s]$ 의 A/D, D/A의 지연 시간과 전압에 따른 PA 95 Amp의 지연 시간을 보여주고 있다. 증폭에 따른 신호의 출력이  $\pm 100[V]$ 이고, 대략  $60[\mu s]$ 의 지연 시간을 보여주고 있다.

실제 PA 95 Amp의 Slew Rate는  $30[V/\mu s]$  이지만, 실제 제작한 시스템의 실제적인 Slew Rate는 대략  $3.5[V/\mu s]$ 의 특성을 가진다는 사실을 실험을 통하여 알 수 있었다.

예를 들어 이러한 시스템을 이용하여 능동 제어를 목표로 하고 있는 주파수 대역대가  $20 \sim 200[Hz]$  이고, PZT 센서를 구동시키는 최대 전압을  $\pm 400[V]$ 로 가정한다면 PA 95 Amp의 Slew Rate에 의해서 약  $2.8[ms]$ 의 지연 시간을 예상할 수 있지만 입력 주파수에 따른 주기는  $50 \sim 5[ms]$ 이므로 실시간 제어가 가능하다.

Actuator Driver에서의 지연 시간은 고속의 Control Cell 소자나 고성능 Amp, 적절한 증폭비와 커패시터를 교체한다면 보다 실시간에 가까운 결과를 얻을 수 있다.

## 6.5 능동제어 실험

입력된 센서의 신호는 PZT 구동 알고리즘(PPF 알고리즘)에 따라 처리되고 처리된 신호는 주어진 신호에 대한 역 신호이므로 결국에 알루미늄 평판의 전체 진동은 감쇄하게 된다.

Fig 6.6는 PZT의 구동 알고리즘을 적용하지 않았을 때와 적용 시의 파형을 비교하였다.

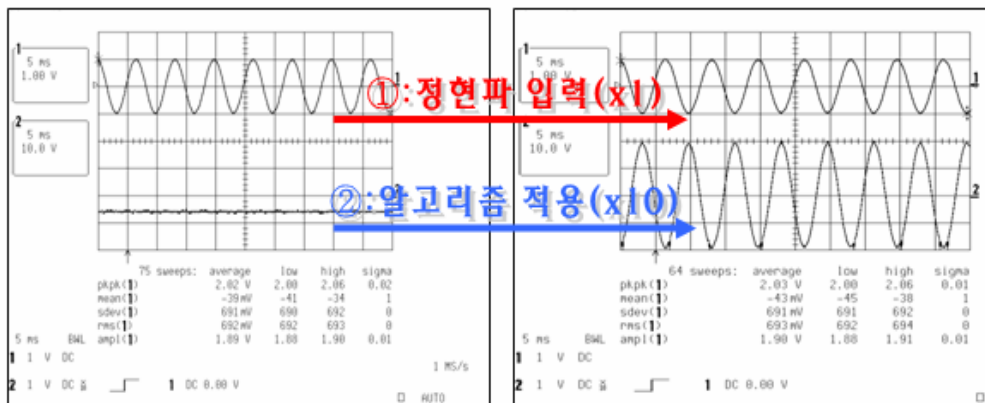


Fig 6.6 Sine Curve as Application of the Algorithm

실제적인 진동 발생에 의한 실험 이전에 함수 발생기를 이용하여 실험을 테스트 하였다. 함수 발생기의 정현과 입력에 따라 오실로스코프의 1번 파형은 나타나게 되고, 원 칩(TMS320C6713)을 통한 신호는 PPF 알고리즘 적용 여부에 따라 2번과 같은 증폭된 역 신호가 출력 된다.

입력에 따른 PZT의 출력은 입력에 비해 약 20배 정도 낮은 전압이기

때문에 입력된 신호를 감쇄시키기 위해선 원 신호를 약 20배 증폭해서 사용해야 한다.

Fig 6.7 은 충격에 의한 진동에 따라 발생하는 출력을 나타내고 있다.

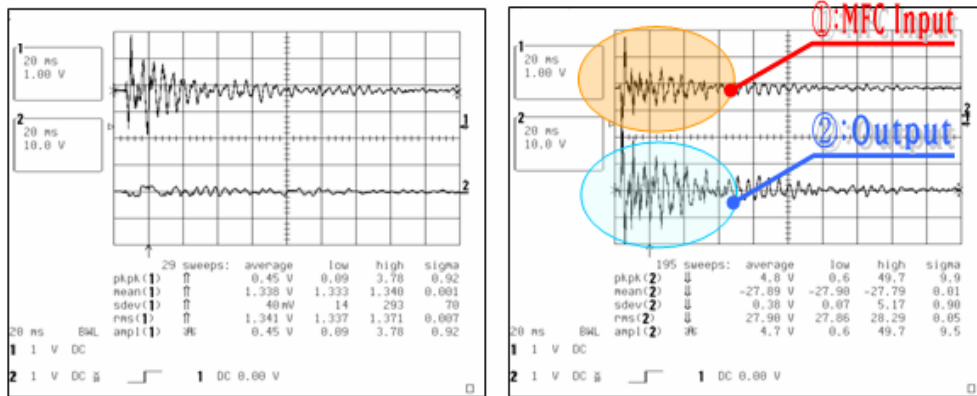


Fig 6.7 Vibration as Application of the Algorithm

충격에 의한 진동은 오실로스코프의 1번 파형과 같은 고주파 형태를 나타내는데 함수 발생기를 이용한 실험에서와 같이 Control Cell과 원 칩의 PPF 알고리즘 적용 여부에 따라 2번과 같은 역 신호가 발생하게 되고, 결국 알루미늄 평판에 생기는 진동을 감쇄시키게 된다.

## 6.6 PZT 센서 위치 시뮬레이션

능동제어 실험은 가속도 센서를 PZT가 부착된 알루미늄 평판 위에 부착시켜 충격을 가한 후에 알루미늄 평판의 고유 진동수를 측정해야 한다. 하지만 고유 진동수를 측정하기 이전에 PZT센서를 부착하게 될 최적의 위치를 찾아내기 위해서 Ansys 10.0를 이용하여 진동에 따른 주파수 및 가속도의 세기를 시뮬레이션을 통하여 알아보았다. Fig 6.8는 시뮬레이션의 결과를 나타내고 있다.

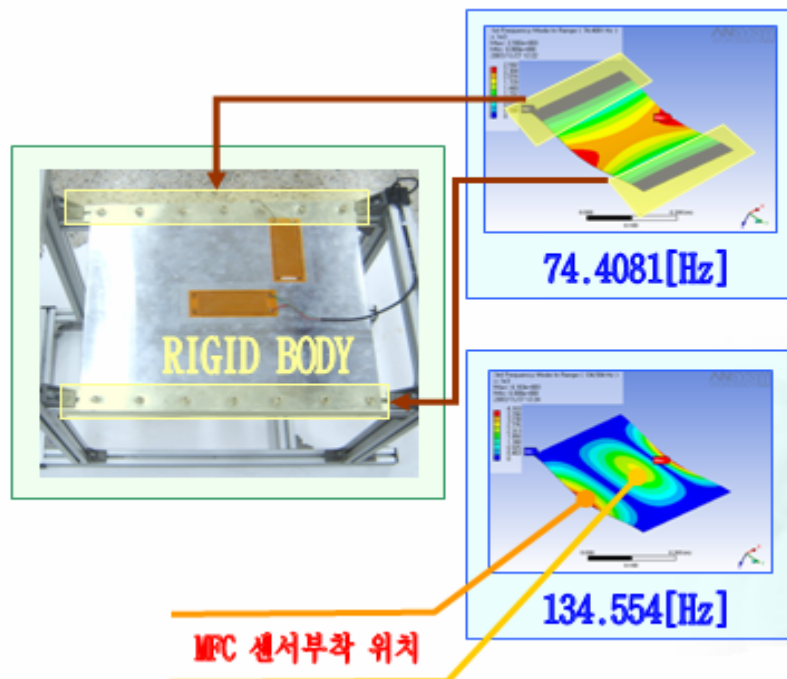


Fig 6.8 Simulation of the Plate using the Ansys

알루미늄 평판을 이용한 실험에서 알루미늄 평판의 양팔보는 강체(Rigid Body)로 가정하고, 그에 따라 X, Y, Z축의 주파수에 따른 가속도를 측정하였다. Fig 6.9는 알루미늄 평판을 주파수에 따른 가속도 측정 결과를 나타내고 있다.

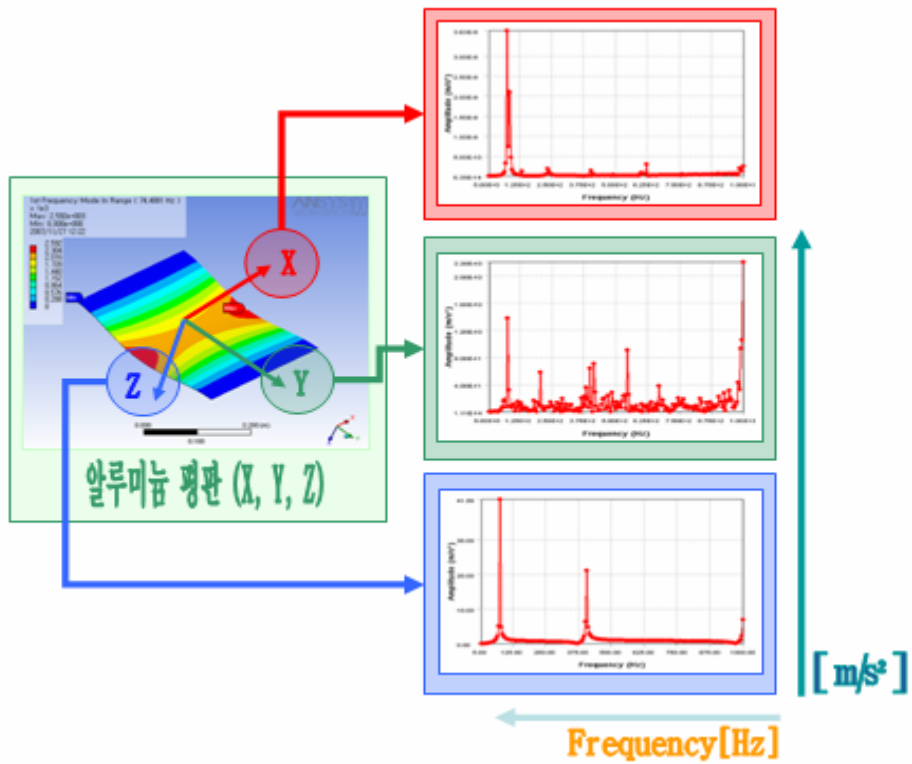


Fig 6.9 Acceleration and Frequency of the Plate using the Ansys



Name	Type	Scope	Minimum Frequency	Maximum Frequency	Display	Maximum Amplitude	Frequency at Max Amplitude
"Frequency Response 1"	Directional Acceleration, X Axis	Face(s) on "Solid"	0.0Hz	1,000.0Hz	Amplitude	$3.63 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$	75.0Hz
"Frequency Response 2"	Directional Acceleration, Y Axis	Face(s) on "Solid"	0.0Hz	1,000.0Hz	Amplitude	$2.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$	1,000.0Hz
"Frequency Response 3"	Directional Acceleration, Z Axis	Face(s) on "Solid"	0.0Hz	1,000.0Hz	Amplitude	41.58 $\text{ m/s}^2$	75.0Hz

Table 6.1은 각 축의 주파수에 따른 가속도를 나타내고, 이러한 시뮬레이션 데이터를 기준으로 평판의 중앙과 외곽 부근에 센서를 부착할 위치를 결정하였다.

## 제 7 장 결 론

본 연구에서는 초고속의 원 칩 DSP 프로세서인 TMS320C6713 과 MFC 센서를 구동하기 위한 PZT 액츄에이터 형태의 능동 진동 제어시스템을 개발하였다. 그리고 PZT 액츄에이터를 구동하기 위하여 필수적인 고 전압 Amp 와 센싱에 의하여 입력 되는 신호 처리를 위해 A/D 와 D/A Converter 의 Interface 회로를 설계 적용 하였다. 이들 각각의 회로들은 모듈화 하여 디버깅이 손쉽게 가능하며 전체적으로 소형화 하였다.

또한 시스템의 모듈화와 소형화에 따라 하나의 Control Box 의 구성이 가능해졌고, 선택적이고 가변적인 전원에 따라서 최적의 실험 조건들을 구축 및 실험할 수 있었다. 아날로그 전원과 디지털 전원, 고 전원과 저 전원을 분리하여 각 영역에 대한 부분들을 보다 안전하게 관리하였다.

Amp 의 경우 기존에 사용하던 PA 97 의 경우 주위에 노이즈 발생과 고 전압 등의 여러 상호 작용으로 인해 Amp 에 발열현상이 생기거나 파손 되었지만 대체한 PA 95 의 경우 전류제한 및 노이즈에 강한 기능을 바탕으로 시스템의 성능에 신뢰감을 더해 주었다.

MIMO 시스템의 적용을 위해 입력에 대한 출력 모듈은 2 채널 사용하여 테스트 하였고, 테스트에 의한 결과는 Matlab 과 TMS320C6713 DSK 의 Simulink 를 통한 결과를 상호 비교 분석 할 수 있었다.

시스템을 이용한 능동제어 실험을 수행 한 결과 PPF 제어 알고리즘을 이용하면 입력에 따라 성공적으로 제어가 수행됨을 확인 할 수 있었다. 또한 개발 시스템(Actuator Driver)의 응답 성능이 능동제어에 미치는 영향을 테스트하여 제어 Loop time 이 짧을수록 능동제어에 더 뛰어난 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

향후 주파수 입력에 대한 처리를 PPF 알고리즘 이외에 VMEbus 제어기, Filter-x LMS 제어기를 각각 적용하여 실험 후 가장 효율적인 시스템을 비교 분석할 것이다.

또한 기존의 공기 중 실험의 결과를 바탕으로 수중의 Hull 구조물 내에서 실제적인 실험을 바탕으로 한 시스템을 개발할 계획이다. 공기 중이 아닌 수중의 경우 구조물이나 센서에 대한 고유의 진동수 및 물성치가 변할 수 있기 때문에 그에 따라 전체적인 시스템의 알고리즘을 재구성 할 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] 곽문규 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] 조성덕, "DSP Processor 를 이용한 고속 Active Control System 개발", 한국해양대학교 석사논문 (2006)
- [12] 배병찬, 곽문규, 정문산, "MFC 작동기를 이용한 실린더 셀의 능동진동 제어 실험", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 13-04 (2006)
- [13] 고동연, "DSP320C6713 을 이용한 고속 다중 능동 진동제어 시스템 개발", 한국해양대학교 석사논문 (2007)
- [14] 곽문규, 2005 년도 수중 운동체 특화센터 SM33 과제 중간보고서

## 감사의 글

4년이라는 시간을 이 곳 지능로봇 실험실에서 보내왔습니다. 때로는 집보다 더 편안한 안식처로서의 이 곳은 제가 사회에 나가 어느 단체에 속해 있더라도 잊을 수 없는 나의 고향과도 같습니다.

수 많은 날들을 실험실의 여러 동료들과 동이 트는 새벽을 맞이하며 지식뿐만 아니라 참된 연구의 의미를 알아 갈수 있었고, 오랜 시간 서로에게 의지하면서 가족과 같은 정(精)을 느낄 수 있었습니다.

이별이라는 단어는 항상 많은 아쉬움을 남기는 거 같습니다. 많은 시간 동고동락 해왔던 경기, 종훈, 태형이형, 앞으로 실험실의 신화를 창조할 동완, 동현, 원현, 재관, 형석, 진일, 막내 동호까지. 생각하면 웃음이 절로 나는 친구들이자 동생들 이었습니다. 그리고 현재의 저를 있게 해준 수많은 선배님들과 든든한 인생의 선배이자 후원자이신 최형식 교수님, 조용성 교수님 오래도록 건강하십시오. 진심으로 감사합니다.

2007년은 저에게 많은 추억과 아픔과 아쉬움을 남겼던 한 해였지만 2008년의 무자년(戊子年)은 사회생활의 첫발걸음인 만큼 언제나 웃음과 행복과 흐릿함이 넘쳐나는 한 해가 되었으면 합니다.

끝으로 제가 잘 되기만을 항상 기도하고 염려해주신 어머니와 동생 혜진이, 5년이라는 긴 시간을 언제나 곁에 있어 준 혜경이에게 진심으로 감사하다는 말을 전하고 싶고, 지금은 고통이 없는 하늘 나라에서 저와 가족들을 지켜보고 계실 아버지께 이 논문을 바칩니다.

사랑합니다. 이 글을 읽고 있을 당신을...

천재는

노력하는 사람을

이길 수 없고,

노력하는 사람은

즐기는 사람을

이길 수 없다.



2008年 1月 1日

金東燦

