

공학석사 학위논문

*DSP320C6713*을 이용한 고속 다중 능동
진동제어 시스템 개발

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

지도교수 최 형 식

2007년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

고동연

本 論文을 高東延의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 유 삼 상 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 김 의 간 (인)

2007년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract

그림목차

표목차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
제 2 장 시스템의 개요	4
2.1 시스템의 개요 및 구성	4
2.2 시스템의 개발환경	5
제 3 장 압전 소자 및 PPF	11
3.1 압전소자의 기본지식과 변위에 대한 모델링	11
3.2 PPF제어 알고리즘	15
제 4 장 Control cell	17
4.1 Control cell의 구성	17
4.2 센서 필터링	18
4.3 A/D 인터페이스	20
4.4 D/A 인터페이스	23
4.5 PZT Actuator amp driver	26

4.6 Control cell의 PCB제작	29
4.7 Control cell 컨트롤 프로그래밍	31
제 5 장 시스템의 성능 시험	38
5.1 실험용 제어시스템 모듈의 성능 시험	38
5.1.1 필터 시험	38
5.1.2 A/D, D/A 시험	39
5.1.3 실린더 셀 구조물을 이용한 시험	40
제 6 장 결 론	43
참고문헌	45

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

Dong-yeon Ko

*Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University*

ABSTRACT

In this thesis, I have developed a new actuator driver of high-speed active vibration controller and made real-time active control system. This system included fastest processor in the DSP series, a Piezoelectric(PZT) driver, PZT actuator, and sensor. The system was developed to have very fast loop time for application to active vibration control. Also, a stable electronic control system was composed using PCB and a portable control system packed in a small box was composed for a practical purpose. This control system was upgraded from the previously developed system since multi-input and multi-output signals can be interfaced. Using the

developed control system, an active vibration control test of a shell was performed, and through the test, the real-time control performance of the system was verified.

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

그림 목차

Fig 2.1 Diagram of main controller	6
Fig 2.2 Memory map of main controller	6
Fig 2.3 DSP320C6712 DSP starter kit	7
Fig 2.4 Code composer studio	8
Fig 2.5 PZT sensor/actuator	10
Fig 3.1 THUNDER actuator	13
Fig 4.1 Control system	17
Fig 4.2 Filter circuit	18
Fig 4.3 ADS7805 block diagram	21
Fig 4.4 ADS7805 basic operation	22
Fig 4.5 DAC712 block diagram	24
Fig 4.6 PA97 equivalent schematic	26
Fig 4.7 PA97 basic circuit	27
Fig 4.8 Slidac and trans	28
Fig 4.9 Control cell PCB	29
Fig 4.10 Supply circuit of control cell	30
Fig 4.11 A/D and D/A circuit	31
Fig 4.12 Using /CS to control conversion and read timing	32
Fig 4.13 DAC712 timing diagram	34
Fig 4.14 Circuit of PA97	36
Fig 4.15 Film of control cell PCB	37
Fig 5.1 Filter test result	38
Fig 5.2 A/D and D/A test result	39
Fig 5.3 Sylinder shell structure	41
Fig 5.4 The mode of uncontrolled system	41
Fig 5.5 The mode of controlled system	42

표 목 차

Table 2.1 Feature of PZT sensor/actuator	9
Table 3.1 Equation of piezoelectricity	12
Table 4.1 A/D operation	21
Table 4.2 D/A operation	24

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

현대의 산업이 발전하면서 다양하고 복잡한 구조의 형태를 가지게 되고 그에 따른 산업현장의 장비나 건물, 의료장비, 군사 무기 등 그 구조에 따른 진동을 저감하려는 연구가 계속 이어지고 있다. 이러한 진동을 저감시키는 진동제어방법은 구조물의 구조를 변경하거나 댐퍼(damper) 역할을 하는 보조적인 구조를 이용한 수동적인 진동제어 방법이 사용되었다. 수동적인 진동제어 방법은 제어할 수 있는 진동의 범위나 제어 효율에서 단점을 가지게 된다. 이런 이유로 구조물에 감지기(sensor) 및 작동기(actuator)를 부착 또는 삽입하여 구조물 자체가 마치 하나의 두뇌계와 신경계 및 근육계를 형성하도록 하여 예상치 못한 외란에도 안정성을 유지하려는 지능 구조물(smart structures, or intelligent structures)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 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 가능하게 되었다. 이러한 제어 시스템은 다수의 센서, 액츄에이터 및 제어기를 필요로 하기 때문에 Multi-input multi-output(MIMO) 제어 시스템으로 구성하는 하드웨어(Hardware) 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 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]. 또

한, 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 능동 제어를 위해 PZT 구동기를 다양한 형태로 설치하고 TMS320C30 DSP 제어기에 PPF, Filter-x LMS제어기를 적용한 연구가 있었다[4]. 최근에도 알루미늄 외팔보의 양쪽 면에 피에조 센서/액츄에이터를 부착하여 여러 알고리즘을 이용하여 진동을 제어하는 등의 노력들이 많아지고 있다[5][6].

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[7]. 또한, 270x180x0.6[mm]의 유연한 평판을 TMS320C30 DSP 프로세서를 이용한 제어시스템에 Filtered-X LMS 제어 알고리즘을 구성하여 제어하고[8], 선박 상부구조의 종진동을 저감하기 위해서 DSP320C32-60을 이용하여 위상 제어기를 구성하여 능동 제어한 결과가 있었다[9].

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 PIC87f시리즈로 구성된 컨트롤러를 이용해 외팔보의 능동진동제어기를 구현한 연구[10]와 80c196 One-chip 마이크로프로세서로 구성된 컨트롤러를 이용한 외팔보의 능동진동제어기를 구현한 연구가 있었다[11]. 그리고 비교적 낮은 주파수를 갖는 외팔보의 매우 단순한 형태의 능동 제어를 위해 A/D 및 D/A 변환기를 PC의 CPU와 Interface하여 단순한 되먹임 제어 시스템을 구성하여 제어한 결과가 있고[12], 고정된 평판에 충격을 MFC작동기와 PPF알고리즘을 이용하여 고유진동주파수의 성분을 감소시킨 연구와[13], 실린더 쉘에 MFC작동기부착하고 PPF알고리즘을 이용한 능동진동제어 실험을 성공하였다[14].

능동진동제어 연구의 발전으로 구조물에 하나의 진동 성분을 제어하는 것을 넘어 다수의 진동 성분을 제어하는 연구단계이다. 구조물에 다수의 PZT와 그것을 제어하기 위한 여러 가지 부가 장치들이 필요하다. 그러나 다수의 PZT를 제어하기 위해서는 많은 수의 프로세서가 필요하였고, 이것으로 인해 실험장비가 복잡해지고 효율적이지 못하고 높은 가격이 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 회로, PZT구동을 위한 고전압 Amp를 하나의 Control cell부분으로 만들어 Main controller와 상호 정보 교환(Interface)할 수 있도록 하였다. 제어 시스템이 얼마나 실시간에 가까운 제어를 수행하는가에 따라 다중 입출력 및 능동제어의 성능에 영향을 미침으로 전체 시스템의 제어 loop time을 측정하였고, 쉘(shell)구조물에서 비공진 모드제어로 시스템의 실시간 제어 성능을 검증하였다.

제 2 장 시스템의 개요

2.1 시스템의 개요 및 구성

능동제어 연구에서 진동의 센싱과 진동 유발을 하는데 압전소자를 많이 사용한다. 압전소자는 변위나 발생하는 힘이 있으면 전기를 발생하거나 반대로 전계가 입력되면 변위가 발생하는 액츄에이터라고 할 수 있다. 이 압전액츄에이터는 미소 변위의 고정밀 제어가 가능하며, 발생력이 크고, 응답성이 빠르다. 또한 에너지 변환 효율이 높고, 형태의 영향이 적은 이점이 있다. 이러한 압전액츄에이터를 구조물에 부착하여 진동의 능동제어 시스템을 꾸며야 하는데, 압전액츄에이터의 한정된 면적과 구조물의 크기로 인하여 압전액츄에이터를 다수 부착하여야한다. 따라서 다수의 압전액츄에이터와 각각의 입력과 공진주파수로 인한 연산, 그리고 출력을 줄 수 있는 Multi-Input Multi-Output(MIMO)형태의 제어기가 불가피하다.

MIMO형태의 시스템을 구현하기 위해서는 고속 연산을 가능케 하는 컨트롤러와 여러 채널의 A/D와 D/A 컨버터, 각각의 압전소자를 구동시킬 수 있는 앰프(Amp)가 필요하다. 컨트롤러는 다수의 신호와 연산을 수행하기 위해 충분히 빠른 처리속도가 요구되며, 각각의 A/D와 D/A와 같은 다른 장치와 인터페이스(Interface)가 용이하여야한다. A/D컨버터는 컨트롤러의 샘플링 타임(Sampling time)을 줄일 수 있도록 빠른 소자이며, 입력되는 신호의 안정적인 처리를 위해 적절한 해상도를 가져야한다. D/A컨버터는 압전액츄에이터에 출력을 주는 앰프의 입력 전압레벨에 따른 출력을 줄 수 있는 소자여야하며, A/D컨버터보다 뒤지지 않는 해상도를 가져야한다. 시스템에서 압전액츄에이터를 구동하기 위한 고전압과 다른 장치들의 구동전압으로 인한 진동의 신호 전압에 대한 노이즈가 예상되므로 아날로그 신호처리에 대한 필터링을 하여야한다.

2.2 시스템의 개발환경

능동제어 시스템은 Main controller와 Controller cell 부분으로 나뉘어져 있다. 그리고 Controller cell 부분은 Main controller와 통신을 수행하는 인터페이스 부분과 PZT를 구동하는 액츄에이터 드라이버(Actuator driver), 그리고 PZT 소자로 이루어진다. Main controller는 TI사의 32bit 고성능 프로세서인 TMS320C6713을 탑재한 DSP Starter Kit을 사용하였다. DSP 컨트롤러에는 16Mbyte의 메모리(Memory)와 512Kbyte의 Flash 메모리가 내장되어 있고, USB를 이용한 JTAG Port를 사용하여 프로그램을 탑재 할 수 있다. DSP 컨트롤러의 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 interface를 이용한 JTAG emulator

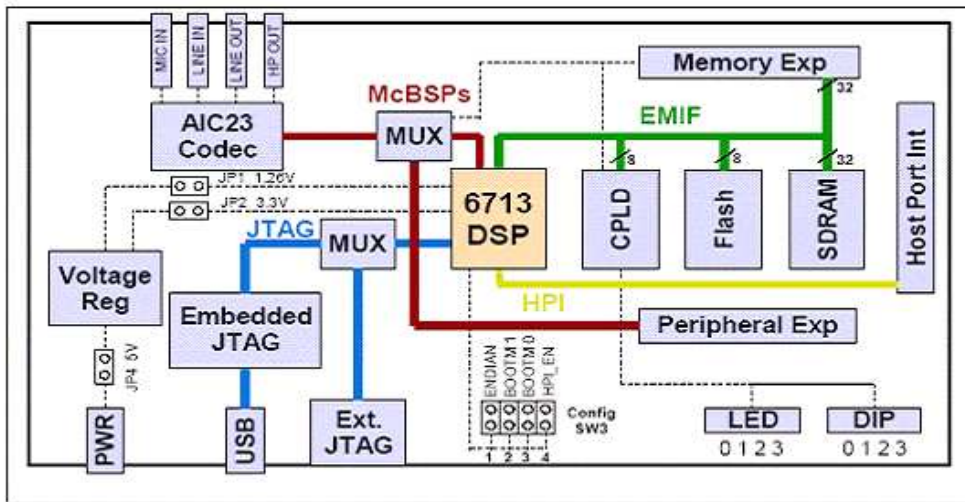


Fig 2.1 Diagram of main controller

Fig 2.1는 TMS320C6713을 장착한 TMS320C6713 DSP Starter Kit의 내부 구조를 나타낸 그림이다. 그림 하단 좌측의 USB포트로 PC와 DSP칩간의 JTAG 에뮬레이션이 가능하고, DSP칩 좌측의 CPLD로 보드상의 입출력 정보를 교환할 수 있다. 본 연구의 제어기에서 사용되는 것은 JATG과 DSP칩, 그리고 CPLD에 연결된 DSP의 어드레스와 데이터 버스가 사용된다.

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

Fig 2.2 Memory map of main controller

Fig 2.2은 Main controller의 내부 Memory map을 나타낸 그림이다. Memory map에서 CE0과 CE1은 RAM과 FLASH등에 할당되어 있고, 시스템에서는 CE0을 사용하여 외부 장치와 연결하게 된다.

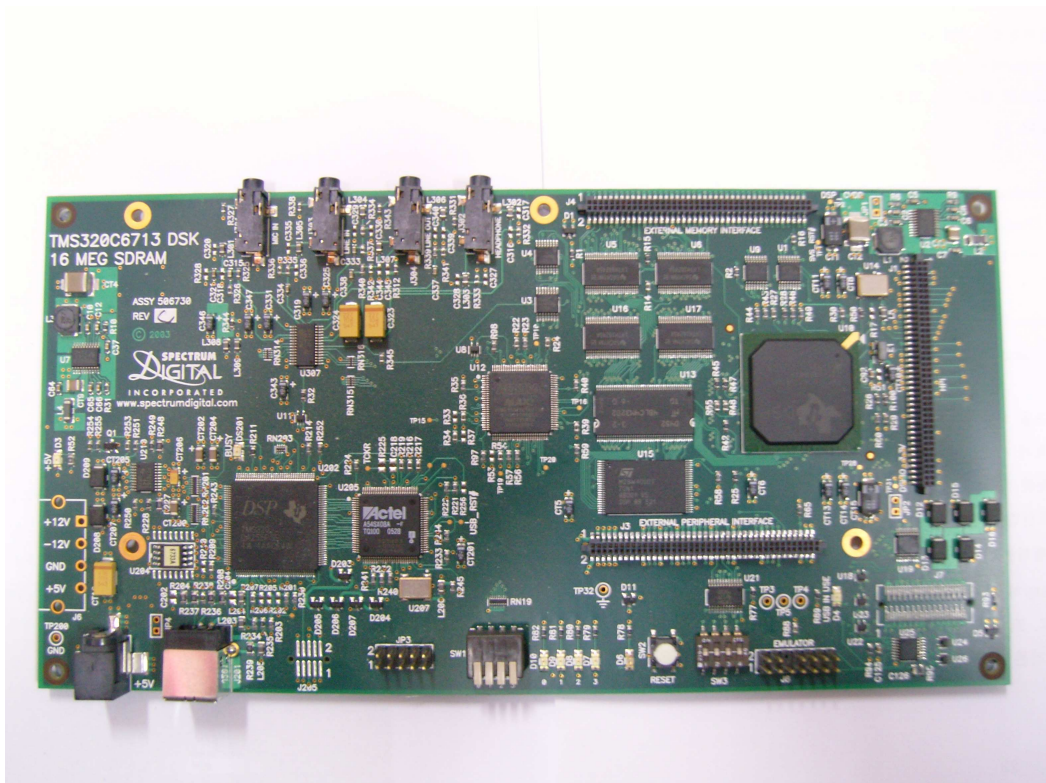


Fig 2.3 DSP320C6713 DSP starter kit

Fig 2.3은 DSP Main controller의 사진이다. DSP 컨트롤러의 EMIF(External Memory Interface)를 사용하여 Control cell과의 통신을 수행하게 된다. 컴파일러는 C6000 계열의 전용 컴파일러인 Code Composer Studio(CCS)를 사용하였다. DSP320C6713 DSP Starter Kit의 구성은 다음과 같다.

- Texas Instrument's TMS320C6713 operating at 255 Mhz
- Embedded USB JTAG controller with plug and play drivers,
- USB cable included

- TLV320AIC23 codec
- 2M x 64 SDRAM, 512K bytes Flash ROM
- 3 Expansion connectors (Memory Interface, Peripheral Interface, and Host Port Interface)
- Four 3.5 mm. audio jacks(microphone, line-in, speaker, line-out)
- 4 user definable LED, 4 position dip switch, user definable
- +5 Volt operation only, power supply included
- Code Composer Studio for C6713 DSK
- "eXpress DSP for Dummies" book
- USB Cable / AC Power Cord(s) and Power Supply
- Technical Reference (includes schematics) / Example Program

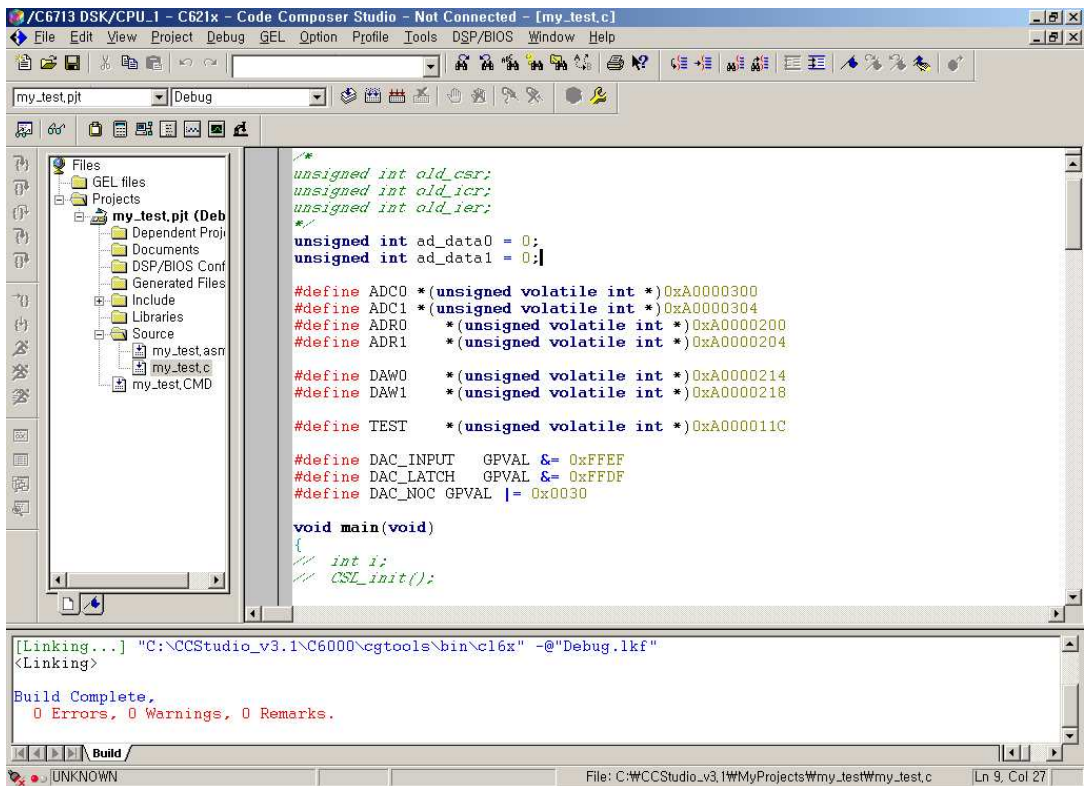


Fig 2.4 Code composer studio

Fig 2.4는 Code Composer Studio(CCS)의 인터페이스 화면을 나타낸 사진이다. Main controller인 DSP320C6713의 프로그래밍을 하기위해 만들어진 Tool이며 C언어 및 어셈블리 언어로 작성된 소스코드를 컴파일해 주고 DSP 칩에 다운로드를 할 수 있는 환경을 제공해준다.

제어를 통해 직접 구조물에 부착되어 진동을 제어하는 소자는 NASA에서 개발된 M8557 S1 Type의 Micro Fiber Composite(MFC)를 사용하였다. 한 소자에 센싱부와 구동부가 내장되어 있고, 유연한 구조로 되어 있어 곡면에 부착이 용이하다. PZT의 특징은 Table 2.1과 같으며, Fig 2.5에 PZT의 외형을 나타내었다.

Table 2.1 Feature of PZT sensor/actuator

overall dimensions	110[mm] × 75[mm] (4.3" × 2.9")
active area (actuator)	85[mm] × 50[mm] (3.4" × 2.0")
active area (sensor)	85[mm] × 3.5[mm] (3.4" × 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 2.5 PZT sensor/actuator

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

제 3 장 압전 소자 및 PPF

3.1 압전소자의 기본식과 변위에 대한 모델링

압전효과(Piezoelectricity)는 100여년전 Jacques Curie와 Pierre에 의해 수정의 크리스탈에 관한 연구로부터 발견되었으며 이후 압전재료들은 의료, 군사, 가전제품 등 여러분야에서 이용되어 왔다. 압전재료의 압전성 표현은 압전 기본식으로 나타낸다. 압전 기본식[15]은 Table3.1과 같이 d, e, g, h형 기본식 등의 종류가 있지만, 그 내용은 동일하며 용도에 따라 형식을 달리 표현한 것이다. 표에서 g는 전압출력계수인 압전정수이며, β 는 역유전율이다. 예를 들어 d형 기본식을 살펴보면,

$$\begin{aligned} S &= s^E T + dE \\ D &= dT + e^T E \end{aligned} \quad (3.1.1)$$

여기서 S는 strain, s는 영율의 역수인 탄성 compliance, T는 응력, d는 압전왜곡정수, E는 단위길이당전압을 나타내는 전계강도, D는 전속밀도, 즉 표면전하밀도이며, e는 유전율을 나타낸다. 위 첨자 E, T는 각각 전계가 일정하거나 zero일때와 응력이 일정하거나 zero일 때의 값을 의미한다. 위 식에서 T=0, E=0의 경우에는 다음식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} T=0인\ 경우 : S &= sdE, \quad D = eE \\ E=0인\ 경우 : S &= sT, \quad D = dT \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

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	d형식	$S = s^E T + dE$
		$D = dT + e^T E$
	e형식	$T = c^E S + eE$
		$D = eS + e^S E$
	g형식	$S = S^D T + gD$
		$E = -gT + \beta^T D$
	h형식	$T = c^{DS} - hD$
		$E = -hS + \beta^S D$

MFC 액추에이터는 NASA Langley 연구소에서 개발한 액추에이터로서 d33 효과를 이용해 변형율을 일반 압전세라믹 액추에이터에 비해 높이고 폴리머 매트릭스를 이용해 유연하게 만들어 곡면형상의 구조물에도 쉽게 적용할 수 있도록 만들었다. MFC 액추에이터는 앞으로 경량 구조물의 능동 진동제어에 많이 응용될 수 있을 것으로 기대된다. 다른 작동기인 THUNDER에 대해 알아보면 이 작동기는 미국 항공우주국 랭리 연구소(NASA-Langley Research Center)에서 개발된 박판 유니모프 작동기(Thin layer Unimorph Driver)로 낮은 입력 전압에 비해 큰 작동 변위를 발생할 수 있는 압전 세라믹 작동기이고, Fig 3.1.1과 같이 금속 재료위에 압전 박판이 적층되어 있다. THUNDER는 스테인리스 스틸 위에 고온 경화용 접착제를 바른 후 압전 세라믹을 놓고, 그 위에

알루미늄 포일을 덮어 325[℃]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 PZT의 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 THUNDER의 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.

$$X_{pe} = \begin{cases} 1, & \gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_2 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3.1.3)$$

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.

$$\frac{1}{R} \frac{dN_\theta}{d\theta} = \hat{q}_\theta \quad (3.1.4)$$

$$\frac{1}{R^2} \frac{d^2 N_\theta}{d\theta^2} + \frac{1}{R} N_\theta = \hat{q}_\theta \quad \frac{1}{R^2} \frac{d^2 \hat{M}_\theta}{d\theta^2} \quad (3.1.5)$$

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

$$N_\theta = Eh \left(\frac{1}{R} \frac{dv}{d\theta} + \frac{w}{R} \right) + E_{pe} \left[\frac{h_{pe}}{R} \left(\frac{dv}{d\theta} + w \right) - \frac{a_2}{2R^2} \frac{d^2 w}{d\theta^2} \right] X_{pe}(\theta) \quad (3.1.6)$$

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 (3.1.7)로 표현되고 이 식을 이용하여 경계 조건에 따른 변위를 계산할 수 있다.

$$\hat{M}_\theta = \frac{-E_{pe} d_{31}}{2} V (h + h_{pe}) X_{pe}(\theta) \quad (3.1.7)$$

3.2 PPF 제어 알고리즘

진동제어에서 시스템은 각각의 입력에 대한 연산을 개별적으로 연산하게 된다. 여기서 사용될 제어 알고리즘은 PPF알고리즘이며 센서에서 입력되는 각각의 값에 Single-Input Single-Output PPF 제어 알고리즘을 사용하며 다음과 같은 전달함수로 표현한다.

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \quad (3.2.1)$$

여기서 ω_f 와 ζ_f 는 각각 PPF 보상회로의 필터 주파수와 감쇠인자이다. 일반적으로 PPF제어기는 ω_f 를 대상 구조물의 고유진동수와 일치시킴으로써 능동진동 제어를 이룩한다. 식(3.2.1)로 표현되는 PPF 제어기는 실제로는 저주파수 통과 필터 회로와 그 형태가 동일하다. 따라서 OP Amp를 사용하여 아날로그 PPF제어기의 구성이 가능하다. 식(3.2.1)을 디지털 제어기로 전환하기 위해서 다음과 같은 Bilinear 변환을 사용한다.

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (3.2.2)$$

여기서 T_s 는 디지털 제어기의 Sampling 시간을 나타낸다. 불안정을 일으키지 않도록 충분히 빨라야 한다. (3.2.2)식을 (3.2.1)식에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$H(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \quad (3.2.3)$$

여기서

$$b_2 = \frac{\omega_f^2}{\Delta}, \quad b_1 = \frac{2\omega_f^2}{\Delta}, \quad b_0 = \frac{\omega_f^2}{\Delta},$$

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{(2\omega_f^2 - \frac{8}{T_s^2})}{\Delta}, \\
a_0 &= \frac{(\frac{4}{T_s^2} - \frac{4\zeta_f\omega_f}{T_s} + \omega_f^2)}{\Delta}, \\
\Delta &= (\frac{4}{T_s^2} + \frac{4\zeta_f\omega_f}{T_s} + \omega_f^2)
\end{aligned} \tag{3.2.4}$$

(3.2.3)식을 이산화된 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$u_k = -a_1 u_{k-1} - a_0 u_{k-2} + b_2 (y_k + 2y_{k-1} + y_{k-2}) \tag{3.2.5}$$

여기서 y_k 는 센서의 입력 값을 나타내며 u_k 는 제어기의 출력을 의미한다. 그리고 a_0 , a_1 , b_0 는 상수이다. 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 감쇠율, ω_f 는 FFT 를 사용하여 찾게 된다. (3.2.5)식은 C 코드 등으로 프로그래밍 되어 디지털 제어기에 사용된다.

제 4 장 Control cell

4.1 Control cell의 구성

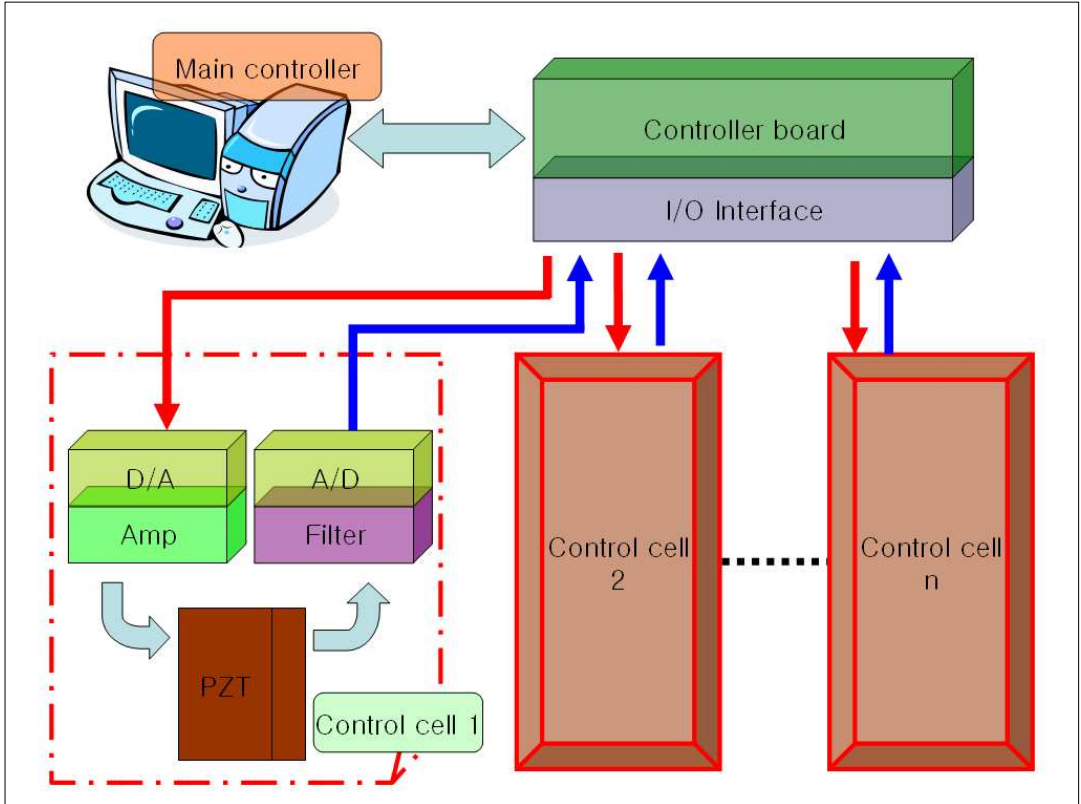


Fig 4.1 Control system

Fig 4.1은 이와 같은 구성으로 구성된 시스템을 나타내었다. 하나의 압전 액추에이터에 필요한 A/D와 D/A같은 장치들을 하나의 Control cell로 모듈화 (module)하여 구성하고 A/D에서 입력되는 진동의 데이터 값과 D/A로 주는 출력 데이터는 하나의 데이터 버스(Data bus)를 이용하며, 각각의 Control cell의 선택과 인터페이스를 담당하는 중간 보드(board)를 구성하여 능동제어 알고리즘을 연산하는 컨트롤러와 각각의 Control cell간의 인터페이스를 담당하게 된다.

4.2 센서 필터링

본 연구에서 사용된 M8557 S1 Type의 Micro Fiber Composite(MFC)의 소형 셀 구조물에서의 출력은 약 $\pm 0.25[V]$ 에 불과 하였다. 그리고 실험중 사용 센서의 출력이 다양하고, 발생하는 노이즈로 인해 필터의 사용이 불가피 하였다. 최종적인 필터의 구성은 $150[Hz] \sim 2[kHz]$ 의 신호를 통과시키는 밴드 패스 필터를 사용하였으며, 소형 셀 구조물에서의 출력을 최대한 A/D입력 범위에 맞추어 약 30배의 증폭률로 설계하였다.

필터에 사용된 OPamp 소자는 OP07 2개으로써 구성 하였다. OP07의 입력 전압 범위는 $0 \sim \pm 14 [V]$ 이고, 칩의 공급전압 범의는 $\pm 3 \sim \pm 18 [V]$ 이다. Fig 4.2은 OP07 2개로 구성된 필터 회로이다.

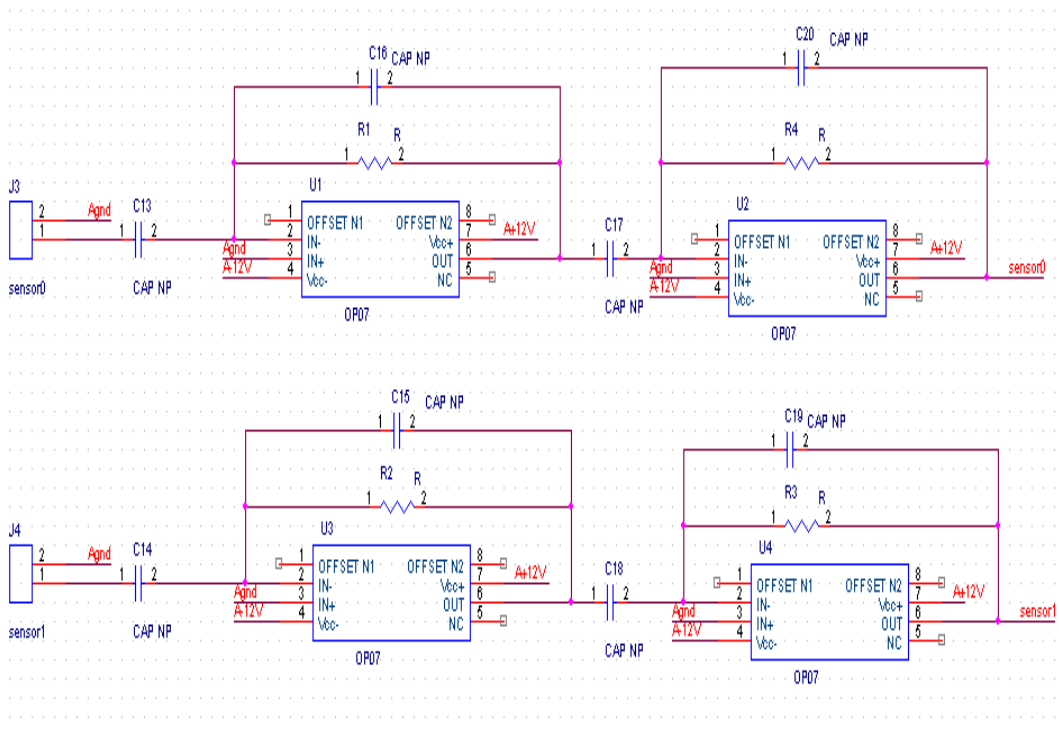


Fig 4.2 Filter circuit

그림에서의 회로구성은 하이패스 필터(High pass filter)를 연속으로 2개 연결한 형태이며, 60[Hz]노이즈의 영향을 줄이기 위해 뒤쪽 회로에서 + 입력의 커패시터를 저항으로 바꾸어 로우패스 필터(Low pass filter)로 만들어 사용하였다. 모두 반전 회로로 구성되어있으며 상황에 따라 수동소자를 바꿈으로써 필터의 종류와 증폭률을 조절할 수 있다.

4.3 A/D 인터페이스

PZT 센서에서 나오는 출력 전압을 A/D를 통해 디지털 값으로 변화시켜 Main controller로 보내게 된다. ADS7805는 아날로그 전압을 16bit의 디지털 값으로 바꿔주고 $\pm 10[V]$ 의 전압 범위를 측정할 수 있다. PZT 센서에서 나오는 전압은 1[V] 정도의 전압이 출력되므로 충분히 측정할 수 있고 낮은 전압이 나오는 PZT에서는 Op-Amp를 사용하여 전압을 증폭하여 측정할 수 있도록 구성하였다. ADS7805의 특징은 다음과 같다[16].

- * TI사의 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 어드레스 라인(Address line)과 데이터 라인(Data line)을 통해 컨트롤러와 통신을 하고 EMIF의 CE3영역을 사용하여 주소를 Mapping하게 된다. 또한, 100[KHz]의 Sampling rate를 가지고 있으므로 10[μs] 단위로 고속으로 진동의 값을 측정할 수 있다. Fig 4.3은 ADS7805의 내부 구조를 나타낸 그림이다. Fig 4.3에서 $\pm 10V$ Input은 A/D컨버터가 읽어드릴 전압이 인가되는 곳이다. R/C와 /CS로 A/D에 명령을 주어 입력되는 전압을 읽거나, 읽어드린 값을 데이터 라인으로 전송 할 수 있다. BYTE은 여기에 입력되는 논리 값이 1인가 0가에 따라서 데이터 라인의 최상위 비트(MSB)와 최하위 비트(LSB)의 순서를 정할 수 있다. /BUSY핀은 A/D컨버터가 입력된 전압을 샘플링 하는 동안 low값을 취하며 평소에는 high값을 하고 있다. 이 핀은 전압을 바꾸

는 명령을 주고 샘플링 타임이 끝나는 시기를 알려주는 핀으로 사용된다.

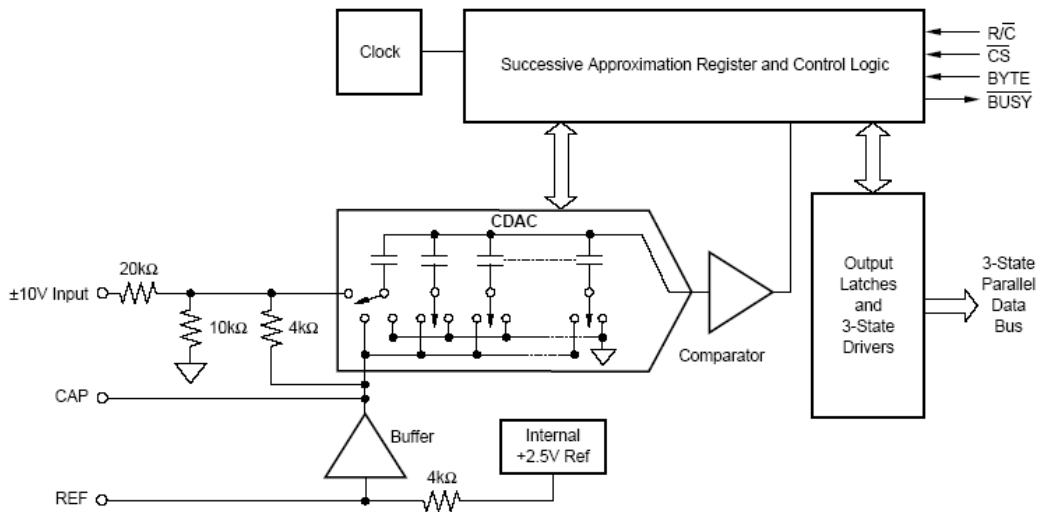


Fig 4.3 ADS7805 block diagram

Table 4.1 A/D operation

/CS	R/C	/BUSY	OPERATION
1	×	×	None. Data bus is in Hi-Z state.
↓	0	1	Initiates conversion "n". Data bus remains in Hi-Z State.
0	↓	1	Initiates conversion "n". Data bus enters Hi-z state.
0	1	↑	Conversion "n" completed. Valid data from conversion "n" on the data bus.
↓	1	1	Enables data bus with valid data from conversion "n".
↓	1	0	Enables data bus with valid data from conversion "n-1". Conversion "n" in progress.
0	↑	0	Enables data bus with valid data from conversion "n-1". Conversion "n" in progress.
0	0	↑	New conversion initiated without acquisition of a new signal. Data will be invalid. /CS and/or R/C must be HIGH when /BUSY goes HIGH.
×	×	0	New convert commands ignored. Conversion "n" in progress.

Table 4.1은 ADS7805의 매뉴얼에 기재되어있는 핀 R/C와 /CS의 명령에 따른 상태와 /BUSY핀의 상태를 표시한 것이다. DSP는 ADS7805를 R//C, /CS, /BUSY 3개의 핀으로 컨트롤 하게 된다. 표에서 ‘×’ 표시는 핀의 상태에 상관이 없다는 표시이다.

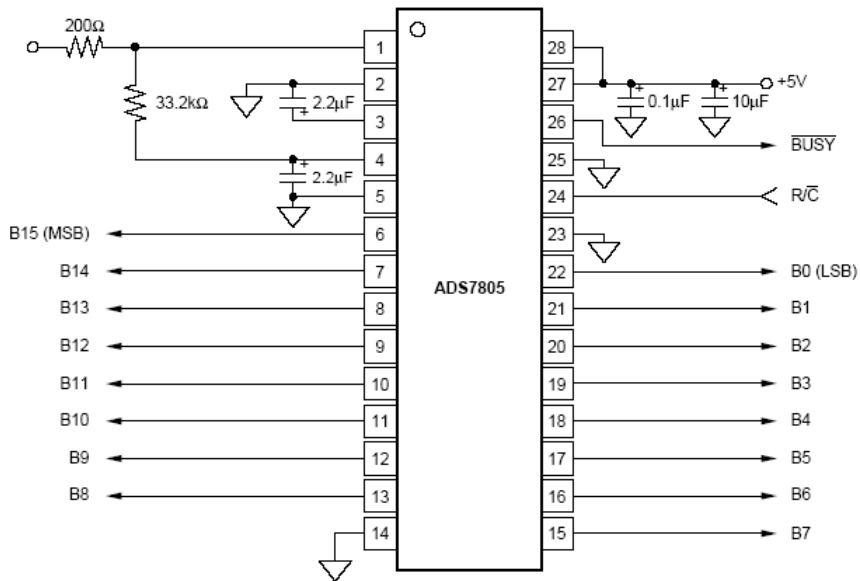


Fig 4.4 ADS7805 basic operation

Fig 4.4는 ADS7805의 매뉴얼에 기재되어있는 7805의 기본적인 회로 구성을 나타낸 것이다. 그림 좌측의 저항들과 컨덴서들이 있는 부분이 아날로그 값을 인가하는 부분이다. 왼쪽의 컨덴서들이 있는 곳은 ADS7805에 공급전압을 인가시키는 곳이며 B0부터 B15핀들은 아날로그 값을 변환하여 디지털 값으로 출력하는 부분이며 이 부분의 전위는 Table 4.1에서의 내용에 따라 변하게 된다.

4.4 D/A 인터페이스

Main controller에서 제어 값을 16bit 값으로 출력이 된다. 이 신호를 아날로그 값으로 바꾸기 위해 D/A 컨버터가 필요하다. 본 연구에서는 D/A 컨버터로 TI사의 DAC712를 사용하였다. DAC712는 16bit의 디지털 값을 $\pm 10[V]$ 의 전압으로 출력할 수 있으며, 출력전압의 0점 조절할 수 있도록 되어있다. 능동진동 제어기에서 Main controller에서 나오는 제어 값을 PZT 액츄에이터 드라이버입력에 쓰이는 아날로그 값으로 변환하는 역할을 한다. 사용한 D/A Chip인 DAC712의 특징은 다음과 같다[17].

- * TI 사의 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 4.5은 DAC712의 내부 구조를 나타낸 Block diagram이다. 내부에는 입력 값을 임시로 저장하는 래치(latch)회로가 두 개로 되어있고, 이를 제어하는 핀 $/A_0$ 와 $/A_1$ 이 있다. 두 핀의 상태에 따라 입력된 16bit값을 처음 버퍼에 저장하고 다음 버퍼로 값을 넘기며, 출력전압을 출력하는 명령을 수행하게 된다. $+10[V]$ 에서 $-10[V]$ 까지의 전압범위를 $5[V/\mu s]$ 의 Slew rate로 Transition이 가능하므로 최대 $4[\mu s]$ 의 Delay가 발생한다.

Table 4.2은 DAC712의 매뉴얼에 기재되어있는 712를 제어하기 위한 /A0, /A1, /WR, 그리고 /CLR 핀들의 컨트롤 방법을 나타낸 것이다. ADS7085의 설명과 같이 '×'는 핀의 상태를 상관하지 않는다는 표현이며 '1→0→1'은 다른 핀의 상태를 유지하며 핀의 상태를 '1'에서 '0'으로 떨어졌다가 다시 '1'로 만드는 표시이다. 표와 같은 제어명령으로써 DSP의 데이터 버스에서 DAC712에 디지털 값을 보내거나 DAC712가 디지털 값을 아날로그 값으로 출력하게 할 수 있다.

4.5 PZT Actuator amp driver

본 연구에서 사용되는 PZT인 M8557 MFC소자는 높은 전압을 필요로 한다. D/A에서 나오는 제어 신호를 비례적으로 증폭하여 M8557을 구동시키는 Driver로 APEX사의 PA97을 사용하였다. PA97은 $\pm 24[V]$ 의 입력전압으로 $\pm 450[V]$ 의 출력전압을 낼 수가 있고, $10[mA]$ 까지 전류를 출력할 수가 있다. $8[V/\mu s]$ 의 Slew rate를 가지고 있고, 일반적인 Amp와 같이 간단하게 인터페이스하여 사용할 수 있다.

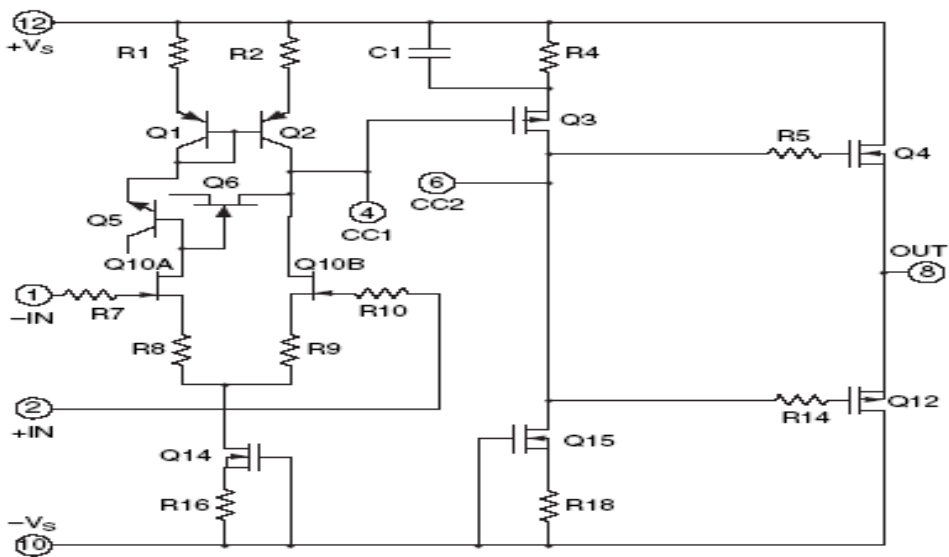


Fig 4.6 PA97 equivalent schematic

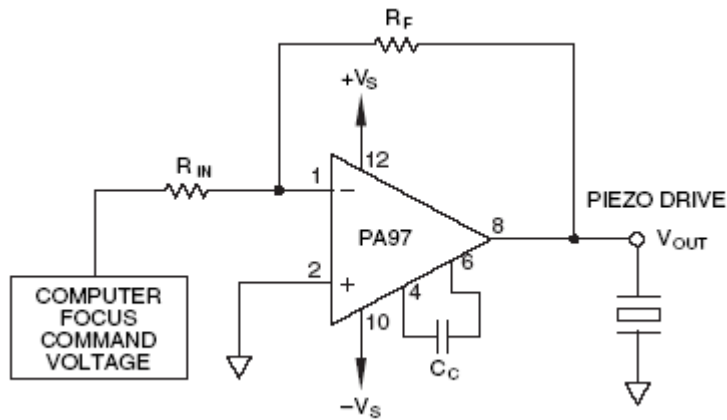


Fig 4.7 PA97 basic circuit

Fig 4.6과 Fig 4.7는 PA97의 매뉴얼에 기재되어있는 PA97의 내부 구조와 기본구성 회로를 나타낸 그림이다[18]. 두 그림에서 10번과 12번은 PA97에 공급전압을 인가하는 곳으로 본 연구에서 사용될 고압의 전압을 인가하는 곳이다. 1번,2번 그리고 8번 핀을 이용하여 일반 OPamp와 같은 회로를 구성하여 증폭회로를 구성하면 된다. Fig4.7의 그림이 기본적인 반전 증폭회로이며, 저항 ' R_F '와 ' R_{IN} '의 크기의 비로써 증폭률을 정할 수 있다. 그림에서의 증폭률은 ' $-R_F/R_{IN}$ '가된다. 이것은 매뉴얼에서 제공하는 기본적인 회로이고 본 연구에서 제어기 개발 할 때에는 여러 가지 형태로 시험하였다.

PA97과 PZT소자를 구동하기 위해서는 $\pm 50[V]$ 에서 $\pm 450[V]$ 의 DC전압이 필요하다. 100[V]가 넘는 전압공급을 위하여 DC-DC 컨버터를 사용하는 방법도 있으나 본 연구에서는 일상생활에서 사용되는 AC 220[V]를 이용한 방법을 사용하였다. 변압기를 사용하여 교류전압을 조절하고 다이오드를 이용한 브릿지(bridge) 회로와 커패시터를 사용하여 평활 회로를 구성하였다. 변압기는 전압조절이 가능한 Slidac을 사용하였다. Slidac에서 나온 전압을 Transformer에 입력하여 2개의 전압을 만들었다. 두 개의 전압은 각각 브릿지 다이오드로 설계한 평활 회로에서 2개의 DC전원으로 출력되고 시스템에서 $\pm$ 의 양전원으로 사용된다.

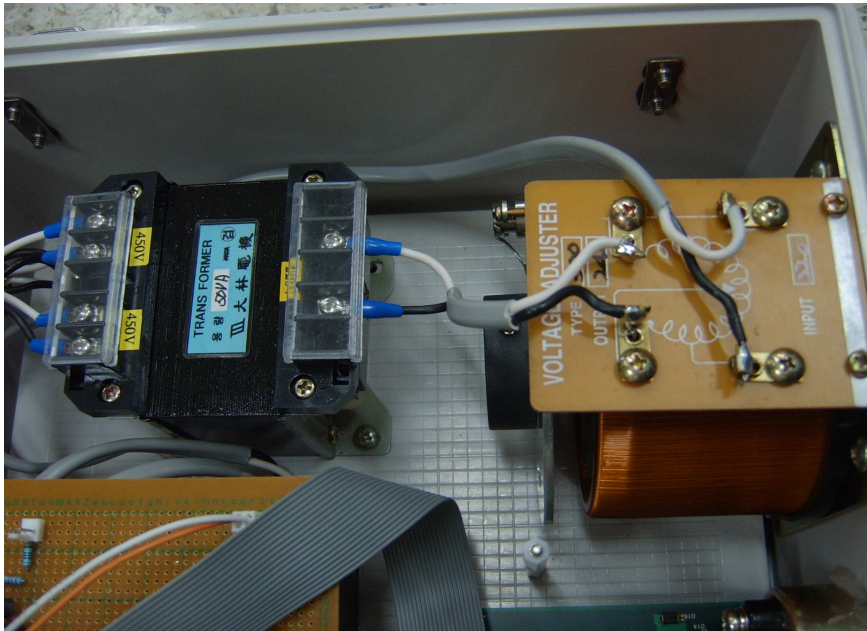


Fig 4.8 Slidac and trans

Fig 4.8에서 우측에 위치한 것이 교류 전원을 조절하는 Slidac이고 좌측에 위치한 것이 Transformer이다.

4.6 Control cell의 PCB제작

Control cell의 PCB를 제작하였다. 센서입력에 대한 필터, A/D(ADC7805), D/A(DAC712), 그리고 PA97회로를 하나의 기판으로 제작하였다. 제어기는 A/D와 D/A를 한 쌍으로 하여 4채널과 2채널용으로 제작하였으며 Fig 4.9는 2채널용 Control cell의 PCB의 모습이다.

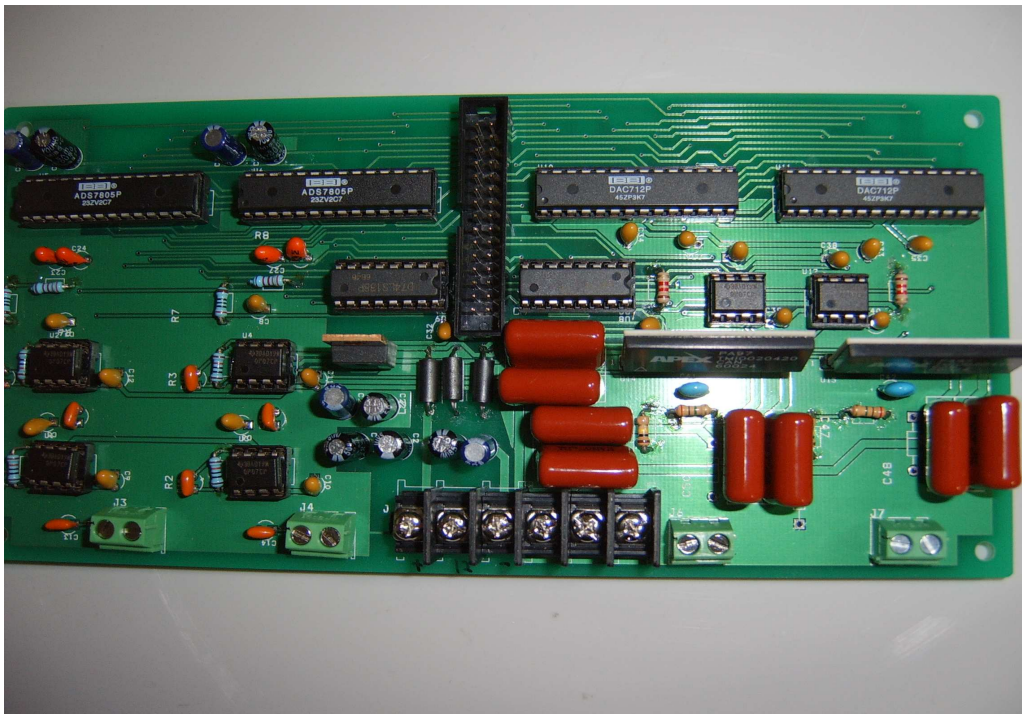


Fig 4.9 Control cell PCB

그림의 좌측하단이 센서신호를 입력하는 부분이며, 신호처리에서 노이즈가 가장 심한 60Hz성분을 줄이기 위해 하이패스 필터를 각 채널 마다 2개씩 설계하였다. 아날로그 신호가 흐르는 패턴은 최대한 짧게 배치하였으며 아날로그 전원과 디지털 전원을 비드(Bead)를 통해 각각 인터페이스 하였다. 제어기의 전원은 DAC712와 OPAMP(OP07)에 들어가는 $\pm 12V$ 와 PA97에 사용되는 고

전압이 필요하다. 입력되는 12V를 레귤레이터(regulator)인 7805로 5V를 만들어 디코더인 74138에 전원을 공급하였다. Fig 4.10은 전원부 회로도이다.

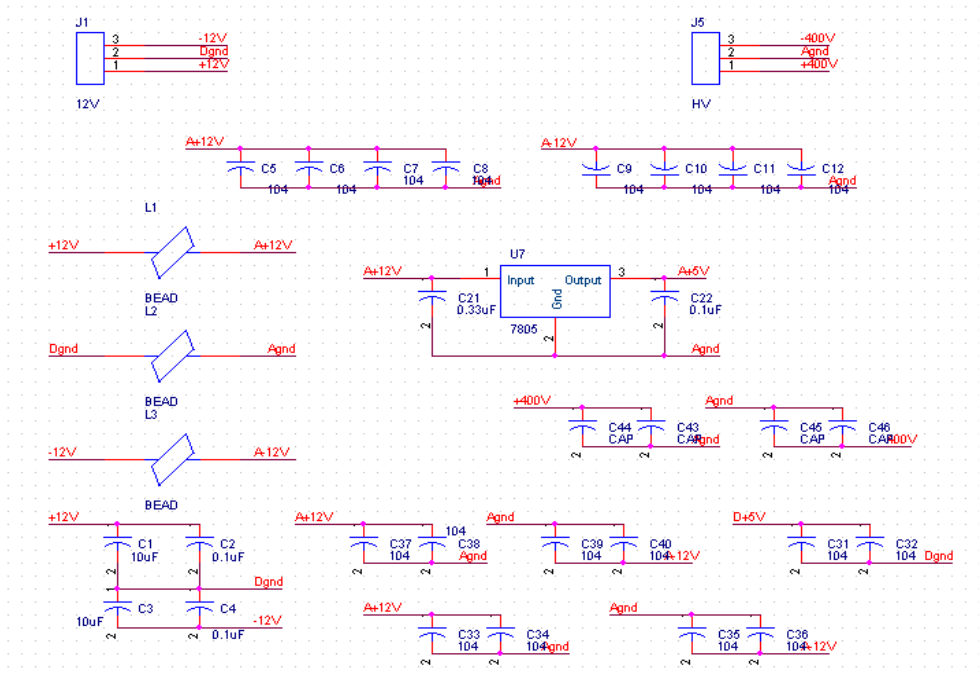


Fig 4.10 Supply circuit of control cell

입력 핀으로 $\pm 12V$ 와 고전압이 들어오는 단자 2개가 있으며 중앙에 5V생성을 위한 레귤레이터인 7805가 있다. 좌측에는 아날로그 전원에 사용될 $\pm 12V$ 를 필터링 하기위해 bead가 설치되어있고 나머지 컨덴서들은 각 IC들의 전원의 by-pass역할을 하는 컨덴서들이다.

4.7 Control cell 컨트롤 프로그래밍

A/D와 D/A의 인터페이스 회로에는 74138 2개를 이용하였으며 DSP의 address pin 4pin과 data pin, GPIO 4pin을 사용하였다. Fig 4.11에서 좌측하단에 DSP와 연결되는 버스 라인 단자가 있다. 어드레스 핀으로는 디코더(74138)를 컨트롤하여 각 칩 마다 /RC 신호와 /CS 신호를 인가한다. GPIO핀 2개로 A/D의 /BUSY핀을 체크한다.

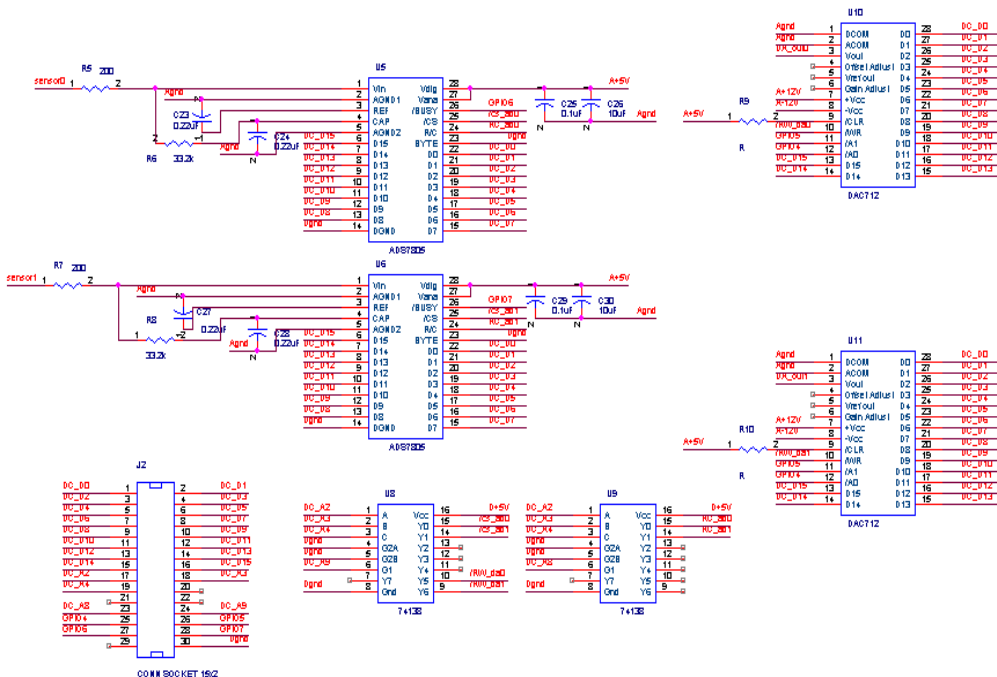


Fig 4.11 A/D and D/A circuit

센서나 필터에서 나온 전원은 ADS7805의 1번 핀 앞에 있는 200[Ω]저항에 걸리며, 여기까지가 아날로그 부분에 해당된다. Main controller의 어드레스 핀 중에서 A2,A3,A4를 2개의 74138의 1,2,3번 단자에 연결하고 A8과 A9 pin은 74138의 6번 핀에 각각 연결하였다. A8과 A9번의 상태에 따라 74138을 선택할 수 있으며 A2부터 A4의 상태에 따라 디코더의 출력을 결정할 수 있다.

74138의 출력에는 ADS7805의 /CS 핀과 /RW 핀이 연결되고 DAC712의 /RW 핀이 연결되어있다. 다음은 각각의 장치의 chip select를 위한 C 코드 (code)이다.

```
#define ADC0      *(unsigned volatile int *)0xA0000300
#define ADC1      *(unsigned volatile int *)0xA0000304
#define ADR0      *(unsigned volatile int *)0xA0000200
#define ADR1      *(unsigned volatile int *)0xA0000204
#define DAW0      *(unsigned volatile int *)0xA0000214
#define DAW1      *(unsigned volatile int *)0xA0000218
```

EMIF의 0번 채널(channel)을 사용하므로 0xA0000000부터 사용하면 된다. ADC0과 ADC1은 ADS7805에 입력된 전압을 컨버트(convert)를 시작하기위한 것이며, ADR0과 ADR1은 컨버트 된 값을 데이터 라인으로부터 읽어 드리기 위한 것이다. DAW0과 DAW1은 각각의 DAC712를 선택하기 위한 것이다.

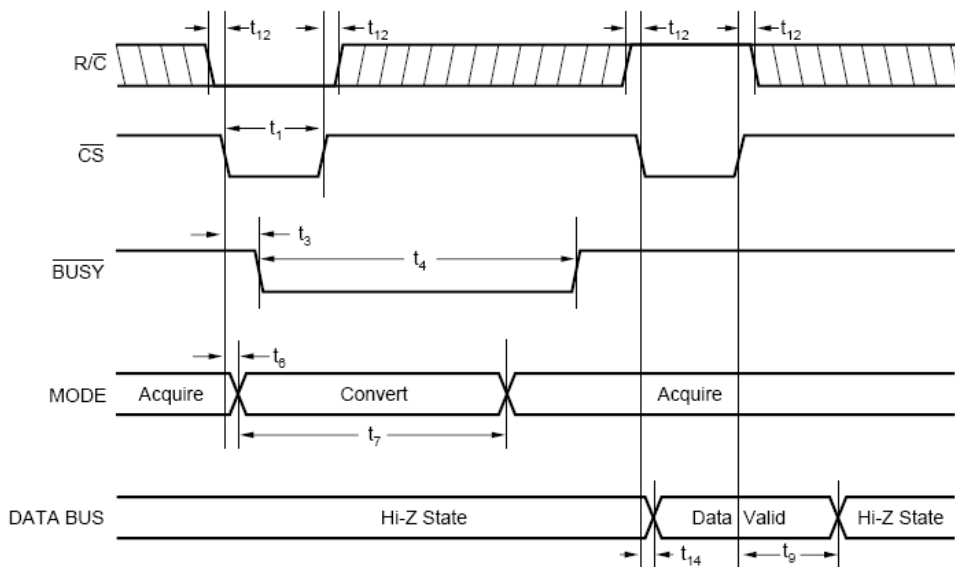


Fig 4.12 Using /CS to control conversion and read timing

ADS7805를 컨트롤하는 방식은 두 가지가 있다. 하나는 /CS를 사용하지 않는 방식과 /CS 핀을 사용하는 방식이 있다. 전자의 방식은 1개의 ADS7805를 사용할 때 유용한 방식이고 후자의 방식은 다수의 ADS7805를 제어할 때 사용하는 방식이다.

본 연구에서는 다수의 장치를 사용하므로 후자의 방식을 사용하였으며 Fig 4.12는 /CS를 사용하였을 때의 A/D 컨버트 타이밍을 나타내었다. 가로로 그려진 선들은 위에서부터 ADS7805의 컨트롤에 필요한 R//C, /CS, /BUSY 핀의 상태를 나타낸 것이고 선이 아래로 그어져 있으면 값이 '0'이고 위로 그어져 있으면 인가된 값이 '1'이라는 표이다. 가로 축은 시간축으로 보면 된다. MODE의 선도는 ADS7805의 상태를 나타내며 DATA BUS의 선도는 ADS7805의 데이터 핀의 상태를 나타낸다. t1부터 t14까지의 시간은 ADS7805의 매뉴얼에 기재되어있다. Fig 4.12의 타이밍대로 사용하기 위한 C 코드는 다음과 같다.

```
#define GPVAL      *(unsigned volatile int*)0x01B00008
unsigned int ad_data0 = 0;
unsigned int ad_data1 = 0;

ADC0 = 0;
ADC1 = 0;
while((GPVAL & 0x0080) == 0);
ad_data0 = ADR0;
ad_data1 = ADR1;
```

코드에서 GPVAL은 DSP의 GPIO(General Purpose Input/Output)가 출력일 때는 GPIO 핀에 출력을 내고 입력일 때에는 핀의 상태를 나타내는 레지스터(register)이다. Fig 4.12에서 보면 처음에 /CS 핀과 R/C 핀 같이 low가 되어

야한다. ADC0 주소에 0이라는 값을 쓰면 어드레스 핀에서 ADC0의 주소값이 출력된다. 그리고 난 후에 데이터 핀에서 0을 출력한다. ADC0와 ADC1을 같이 연달아 하면 2개의 채널의 ADS7802가 샘플링을 시작한다. while문장은 샘플링이 되기를 기다리는 문장으로 ADS7805의 /BUSY 핀들이 GPIO 핀에 연결되어있어 Fig 4.12에서처럼 /BUSY 핀이 다시 high값이 되었는지를 확인하는 code이다. 샘플링 타임이 끝나는 시간을 while문 동안 기다린 후 /CS 핀만 low로 만들면 ADS7805의 값을 읽을 수 있다. code에서는 미리 ad_data0과 ad_data1이라는 변수를 만들고 ADR0과 ADR1을 이용하여 값을 저장하였다.

Fig 4.11에서 DAC712의 구성은 출력 게인(gain)과 0점 조절 회로를 제외한 회로이다. 본 연구에서는 크게 영향이 없으므로 생략하였다. Main controller인 DSP320C6713의 데이터 핀들은 DAC712의 데이터 핀에 연결되어있고 74138의 출력중 하나와 DAC712의 /WR 핀과 연결하였다. GPIO 핀 2개를 각각 DAC712 각각의 /A0와 /A1 핀에 연결하였다.

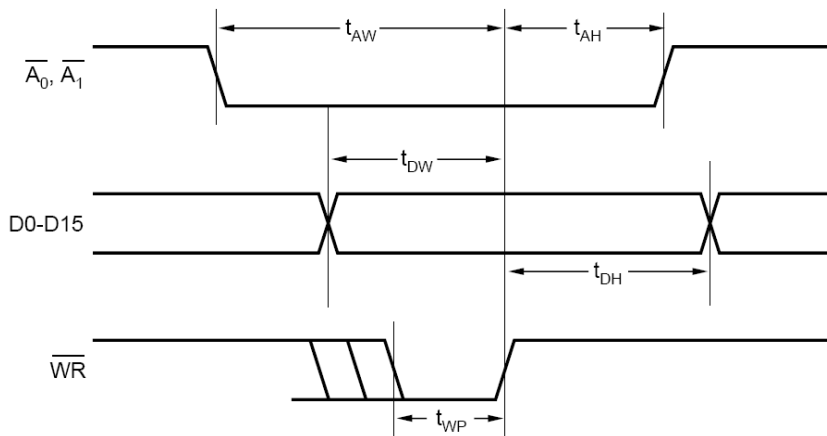


Fig 4.13 DAC712 timing diagram

Fig 4.13은 DAC712의 매뉴얼에 기재된 DAC712의 신호의 타이밍을 나타낸 그림이다. /A0, /A1, /WR의 3개의 핀이 상태가 변함에 따라 데이터 핀(D0 ~ D15)의 상태 변환을 나타낸 것이며 DSP에서 DAC712로의 컨트롤 명령은 위

와 같이 타이밍 선도에 따라야 한다. 타이밍 선도에 따른 DAC712에 관한 C 코드는 다음과 같다.

```
#define    DAC_INPUT    GPVAL &= 0xFFEF
#define    DAC_LATCH    GPVAL &= 0xFFDF
#define    DAC_NOC      GPVAL |= 0x0030
```

```
DAC_INPUT;
DAW0 = ad_data0;
DAW1 = ad_data1;
DAC_NOC;
DAC_LATCH;
DAW0 = ad_data0;
DAW1 = ad_data1;
DAC_NOC;
```

코드에서 DAC_INPUT과 DAC_LATCH는 DAC712의 명령으로 Fig 4.13에 나타난 A0와 A1의 상태를 바꿔주는 역할을 한다. DAC_NOC는 A0과 A1을 모두 high로 만들어주는 명령이다. 처음 DAC_INPUT로써 Fig 4.13의 타이밍에 따라 A0와 A1을 먼저 바꾸고 DAW0와 DAW1를 사용하여 74138에서 /WR 핀의 상태를 바꾸어준다. 그리고 DAW의 주소에 값을 쓰는 것으로 데이터 핀에 값이 나타난다. 이렇게 DAC712의 래치에 값을 넣고 래치 된 값을 아날로그 값으로 출력하기 위하여 A0과 A1의 상태를 DAC_LATCH로 바꾸고 DAW를 다시 사용함으로써 DAC712의 /WR pin에 신호를 준다.

Fig 4.14는 제어기에 사용된 고전압 Amp인 PA97의 회로이다. 비반전 회로로 꾸며져 있다. 저항을 이용하여 증폭률을 20배로 한다면, D/A에서 출력되는 값이 $\pm 10V$ 이므로 최고 $\pm 200V$ 까지 증폭된 전압이 나온다. 고압전원부에서 입

력 전압을 $\pm 200\text{V}$ 이상으로 설정하고 보드 설계 시 증폭률을 더 높이면 PA97의 최고 출력전압인 ± 450 까지 가능하다. 시험에서도 증폭률을 20배로 설정 하였다.

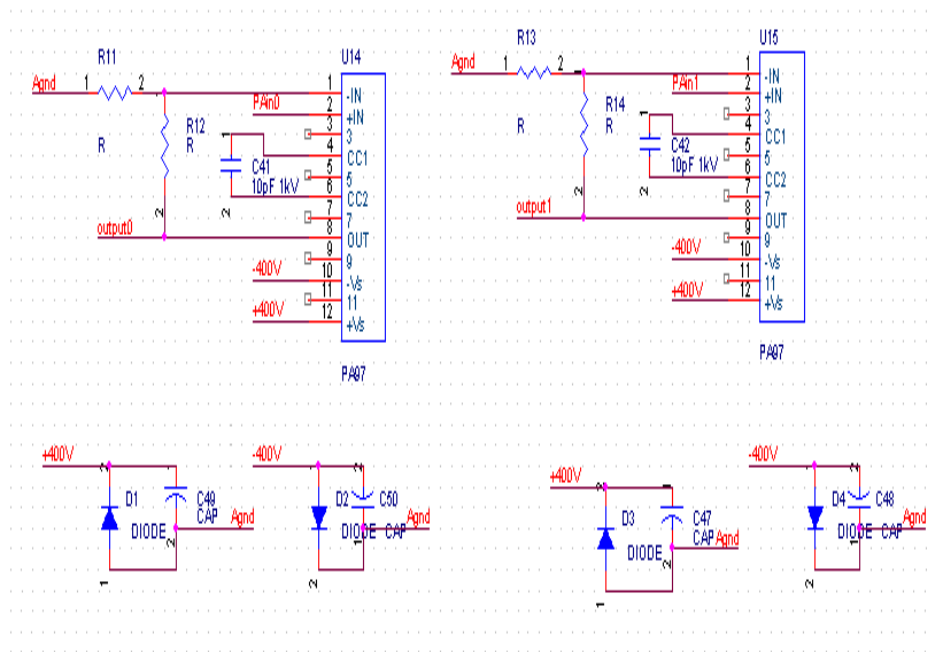


Fig 4.14 Circuit of PA97

제 5 장 시스템의 성능 시험

5.1 실험용 제어시스템 모듈의 성능 시험

5.1.1 필터 시험

만들어진 PCB의 필터회로를 시험 하였다. 실험 환경은 원통형 셀 안쪽과 바깥쪽에 PZT소자를 원주 방향으로 부착하고 안쪽 PZT에 함수발생기로 발생한 신호를 증폭시켜 진동시키고 바깥쪽에 있는 PZT의 센서부에서 신호를 받아 필터 입력에 연결하였다. 실험에서 필요로 하는 센서신호의 주파수 영역은 약 150Hz에서 2kHz이다. 필터의 구성은 하이패스와 로우패스 필터를 차례로 사용하여 설계하였다. 입력단자에 들어오는 센서신호의 크기는 평균 $\pm 0.15V$ 이므로 필터에서 증폭률을 약 30배 주었다.

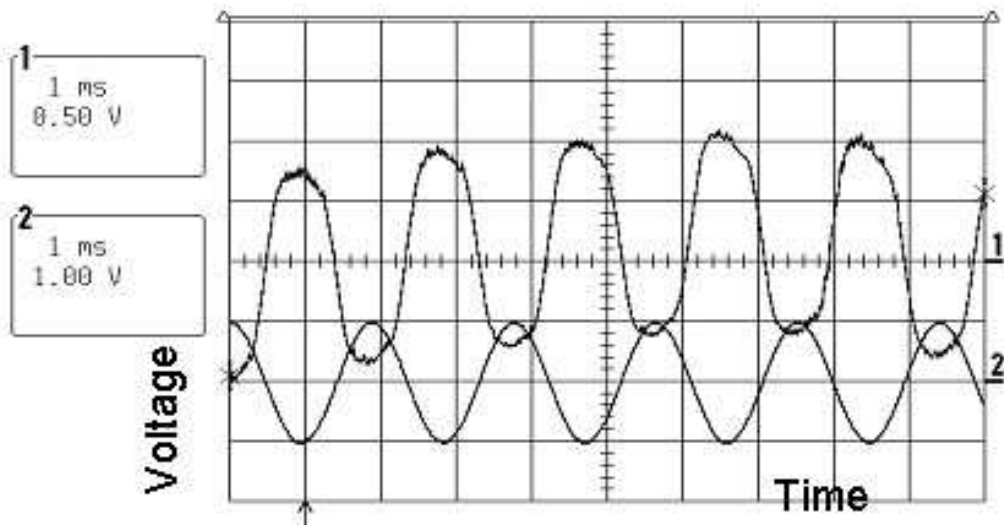


Fig 5.1 Filter test result

Fig 5.1에서 아래쪽 2번 파형은 함수발생기에서 발생하는 진동을 유발하는 파형의 신호이다. 이 신호가 증폭되어 셀 안쪽의 PZT가 진동한다. 같은 그림에서 위쪽 1번 파형은 셀의 바깥쪽의 PZT의 센서가 진동을 받아 나오는 신호가 필터를 통과한 후의 파형이다. 그라운드가 전원 그라운드로 인한 시스템 전체의 60Hz노이즈가 존재하여 로우패스 필터 통과 후에 약 0.8ms정도의 위상지연이 있다.

5.1.2 A/D, D/A 시험

실험 환경은 함수 발생기를 이용하여 필터에 입력을 넣고 필터에서 출력되는 전압을 측정하고 이 신호가 A/D에 들어가서 DSP에서 PPF알고리즘 연산 후 D/A를 통하여 나온 신호들을 측정하였다. DSP프로세서는 처리속도가 매우 빨라 A/D에서 읽어 드린 신호가 지연 시간이 별로 없이 바로 D/A로 출력 하게 되어있다.

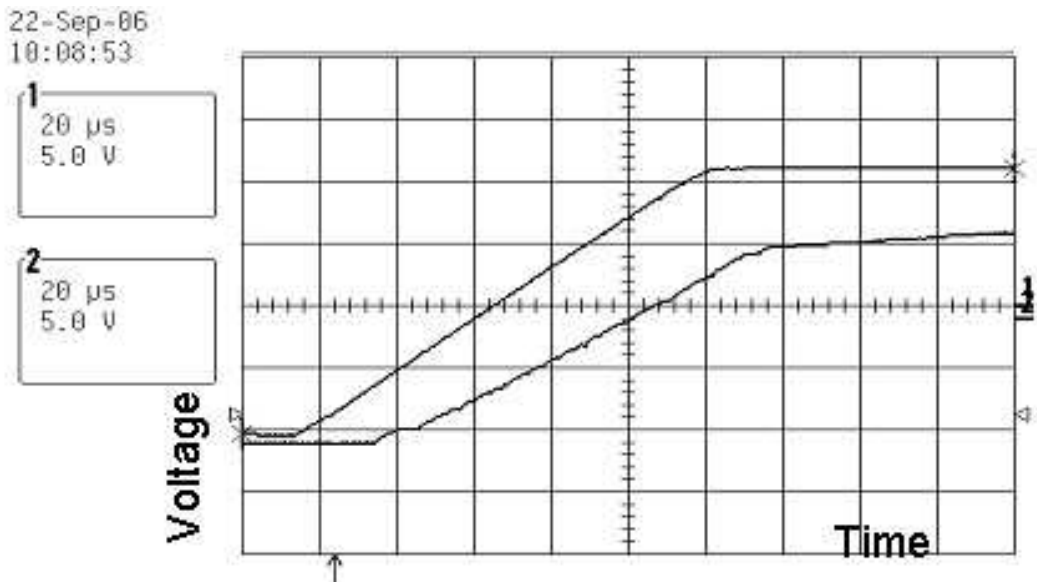


Fig 5.2 A/D and D/A test result

Fig 5.2는 입력신호가 500Hz일 때 실험한 파형으로 입력과 출력의 지연을 알아보기 위해 파형에서 한 주기 중 처음 시작부분을 알아 볼 수 있게 측정 시간을 줄여본 것이다. 1번 파형이 A/D입력 파형이고 2번 파형이 D/A출력 파형이다. A/D의 샘플링 시간이 약 $10\mu s$ 이고 프로그램 설정 상 DSP의 처리 시간을 합쳐 약 $20\mu s$ 의 지연으로 고속처리 가능함을 알 수 있다.

5.1.3 실린더 쉘 구조물을 이용한 시험

원통의 안과 밖에 PZT를 부착한 상태에서 안쪽 PZT를 일정한 주파수로 진동시키고 밖에 부착된 PZT에서 감지된 진동으로 역위상의 신호를 만들어 실시간(realtime)으로 제어하는 실험을 실시하였다. 실험은 함수발생기에서 20Hz의 신호를 발생시켜 원통 안에서 진동을 만들었다. 그리고 FFT를 이용하여 주파수별 진동의 세기를 측정하여 진동의 변화를 관찰하였다. 실험은 진동을 가하는 신호를 구형파, 삼각파, 사인파 등으로 변화하면서 실험을 하였다. 20Hz의 실험이므로 센서의 신호를 로우패스 필터를 사용하였다. 원통 밖에 붙어있는 PZT에서 측정한 신호가 필터를 들어오면서 출력의 지연시간이 생기므로 프로세서에서는 시스템 시작시에 입력신호의 상승부분으로부터 얼마간의 지연시간을 설정하도록 함으로 해서 파형의 한 주기 뒤에서부터 출력파형을 출력하게 하여 입력파형에 대한 반대 파형을 진각 혹은 지각 시키거나 같은 타이밍에 출력할 수 있도록 타이밍을 조정하였다.

Fig 5.3은 실험에 사용된 원통형 쉘 구조물의 사진이다.

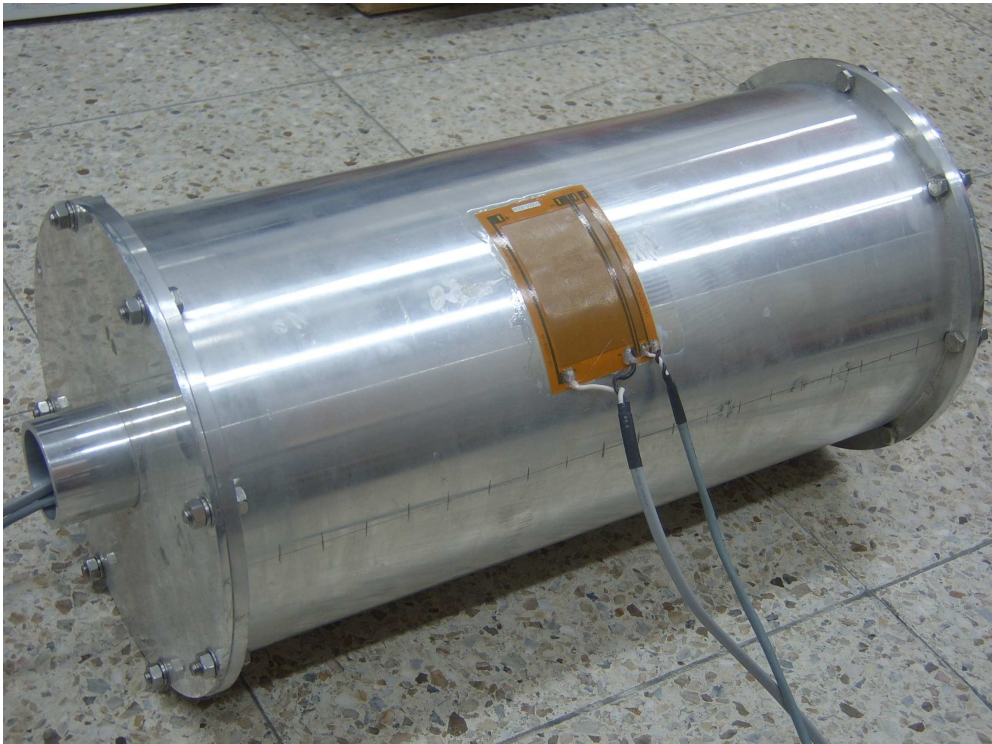


Fig 5.3 Cylinder shell structure

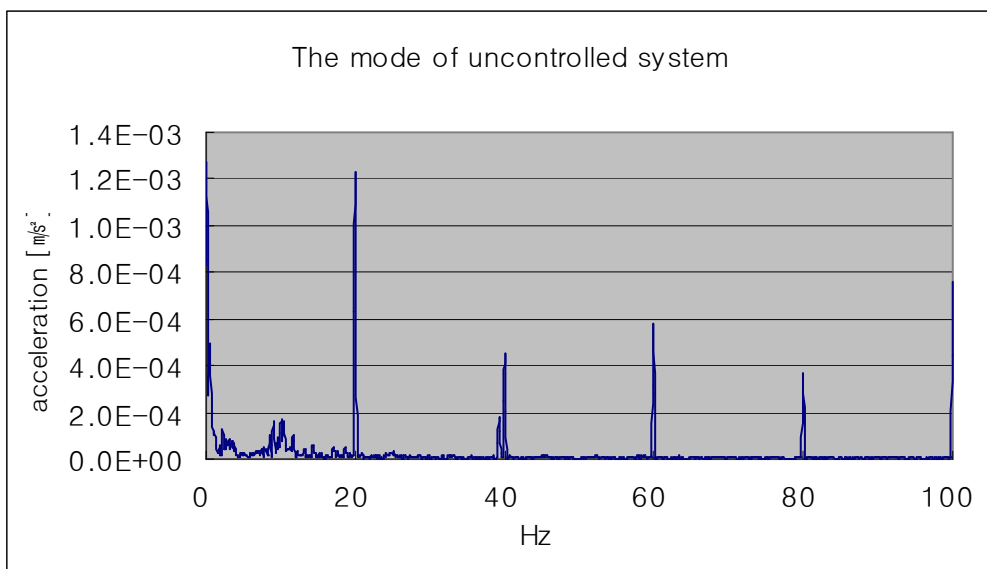


Fig 5.4 The mode of uncontrolled system

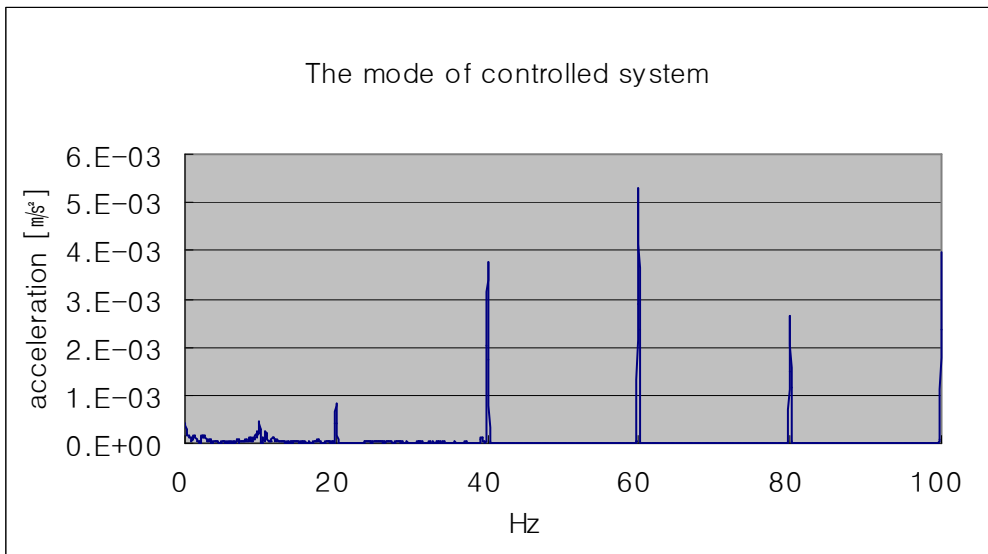


Fig 5.5 The mode of controlled system

Fig 5.4는 원통을 20Hz로 진동을 주었을 때 주파수별 응답 그래프이다. 가로축은 주파수축이며 세로축은 FFT에서 감지된 주파수별 진동의 크기이다. 실험에서 반대 위상 출력의 타이밍을 수차례의 조절 과정을 거쳐 입력과 출력의 위상이 같을 때 주파수별 진동의 크기를 관찰하였다. Fig 5.5는 진동의 역 위상으로 진동을 가했을 때 주파수별 크기를 나타낸 그림이다. 본 실험은 개발한 제어 시스템에 실시간으로 가진신호를 계측하고 단순한 제어알고리즘을 적용하여 특정 주파수의 가진을 실시간으로 제어할 수 있음을 확인하는 것이 목적이다. 실험에서 20Hz의 주파수 성분은 조금 줄어든 것을 관찰할 수 있으나 주위의 성분이 증가한 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 개발한 초고속 제어 시스템에 단순한 제어 알고리즘을 적용하여 real time으로 제어한 것이다. 가진기로는 MFC 액추에이터를 이용하였다. 본 실험에서는 개발한 제어시스템을 이용하여 특정 주파수의 가진을 감쇄시킬 수 있음을 보여주었다.

제 6 장 결론

기존에 연구된 능동진동 제어기의 하드웨어 최적구성 방안과 액츄에이터 설계를 바탕으로 본 논문에서는 새로운 고속 능동 진동제어기에서 액츄에이터 드라이버를 완성하고 이들을 조합하여 실시간 제어 가능한 능동제어시스템을 구축하였다. 고속의 제어에 필요성으로 연산속도가 빠른 CPU로써 TI사의 DSP320C6713을 선택하였다. 진동제어 실험에 사용되는 PZT 센서/액츄에이터의 신호 입력과 출력에 사용될 A/D 컨버터와, D/A컨버터를 선정하고, 보조적인 필터부를 포함한 Control cell부분을 안정적인 PCB화 하였다. Control cell 부분은 진동제어에서 제어될 주파수 성분의 개수만큼 DSP에 인터페이스 할 수 있게 만들어졌다. PZT 액츄에이터 구동에 필요한 고압의 전원부를 직접 제작하고, 실험 환경에 유용한 형태의 박스 형태로 통합하였다. Control cell의 구동에 필요한 프로그램을 작성하여 쉽게 사용할 수 있도록 정리하였고, 제어 알고리즘을 코드화하여 사용할 수 있도록 하였다. 제작된 제어기의 성능 시험을 위해 PZT센서신호의 필터제작 및 조절 실험을 통하여 필터의 성능시험을 수행하였고, A/D에서 디지털화된 신호들이 DSP로 들어가 D/A컨버터로 아날로그 신호가 나오는 루프의 시험을 수행하여 2채널 이상에서도 고속으로 연산이 수행할 수 있다는 것을 증명하였다. 마지막으로 실린더 셀 구조물에 PZT 센서/액츄에이터를 내면과 외면에 부착하여 내면의 액츄에이터에서 일정한 진동을 유발하고 외면의 센서에서 진동을 받아 단순한 역위상의 진동을 가하여 실시간적으로 작동하는 시험을 수행하였으며, 시험의 결과로 내면의 진동성분에서 역위상의 진동성분만을 감소시킴으로 시스템이 제어 속도가 진동에 뒤처지지 않고 실시간적으로 가동할 수 있음을 보여주었고, 앞으로의 진동제어 연구에서 사용될 구조물과 제어알고리즘에 안정적으로 사용될 수 있음을 증명하였다.

향후, 개발한 제어 시스템의 노이즈 발생 대비를 위해서 가변 앰프 드라이버를 제어 박스에서 분리제작 하고자 한다. 그리고 제어시스템의 회로도 여러 개

의 PZT를 동시에 제어할 수 있도록 센서와 TMS320C6713 사이에 parallel 입출력 시스템을 구성하여 보다 고속의 MIMO 제어 가능한 제어시스템을 구축하고자 한다. 그리고 이 시스템에 제어 대상인 셀의 수중 능동제어를 위해서 다양한 능동제어 제어알고리즘을 이식하여 고성능 능동제어를 수행 할 예정이다.

참고 문헌

- [1] M. Strassberger외, “Active noise reduction by structural control using piezo-electric actuators”, *Mechatronics* 10, pp.851-868, (2000)
- [2] S. D. Snyder외, “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] C.M.A. Vasques, J. Dias Rodrigues, “Active vibration control of smart piezoelectric beams: Comparison of classical and optimal feedback control strategies”, *Computers and Structures* 84, pp.1402-1414, (2006)
- [6] J. Lin, Wei-Zheng Liu, “Experimental evaluation of a piezoelectric vibration absorber using a simplified fuzzy controller in a cantilever beam”, *Journal of Sound and Vibration* 296, pp.567-582, (2006)
- [7] 김영식, 이철, 김인수, “압전작동기/가진기를 이용한 평판의 혼합용 능동 진동 제어 기술”, *한국소음진동공학회* 10(6), pp.1048-1058, (2000)

[8] 박수홍, 김홍섭, 홍진석, 오재응, “피에조 세라믹을 이용한 평판의 능동 제어”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회, pp.434-439, (1997)

[9] 조대승외 7인, “선박의 상부구조 진동 저감을 위한 능동형 제어장치의 실용화 연구”, 대한조선학회논문집41(4), pp.77-84, (2004)

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

[11] 홍이표, “마이크로 컨트롤러를 이용한 디지털PPF 제어기의 구현과 실험”, 항공대 석사논문, (2001)

[12] 강영규, 최진영, 김재환, “능동구속감쇠 기법을 이용한 보의 능동 제어”, 한국소음진동공학회11(4), pp.52-57 (2001)

[13] 조성덕, “DSP Processor를 이용한 고속 Active Control System 개발”, 한국해양대학교 석사논문(2006)

[14] 배병찬, 광문규, 정문산, “MFC 작동기를 이용한 실린더 쉘의 능동진동 제어 실험”, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 13-04 (2006)

[15] 광문규, 2005년도 수중 운동체 특화센타 SM33과제 중간보고서

[16] Texas Instruments Inc, “16-bit 10us sampling CMOS analog to digital converter”, ADS7805 Data sheet, (2004)

[17] Texas Instruments Inc, “16-bit digital to analog converter with 16-bit bus interface”, DAC712 Data sheet

[18] Apex micro technology Corp, “PA97” PA97 Data sheet, (2005)