

工學碩士 學位論文

해수용 센서내장형 유압실린더와  
다중실린더의 위치동조 제어에 관한 연구

A Study on the Sensor-Embedded Hydraulic Cylinder for Offshore  
Applications and Position Tuning Control of Multiple Cylinders

指導教授 金 鍾 和

2002년 2월

韓國海洋大學校 大學院

制御計測工學科

金 珍 圭

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

委 員 長 工 學 博 士 柳 吉 洙 印

委 員 工 學 博 士 趙 奭 濟 印

委 員 工 學 博 士 金 鍾 和 印

2002년 1월 7일

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

# 목 차

## Abstract

제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 해수용 센서내장형 유압실린더 .....	3
2.1 해수용 센서내장형 유압실린더 개발의 필요성 .....	3
2.2 해수용 센서내장형 유압실린더의 구성 .....	4
2.2.1 센서내장형 유압실린더의 구성요소 .....	4
2.2.2 내장형 센서를 이용한 스트로크 검출 원리 .....	6
2.3 내장형 센서를 위한 해수용 피스톤 로드 처리 .....	7
2.4 양방향 스트로크 검출을 위한 광파이버헤드의 설치방법 .....	9
제 3 장 내장형 센서 전용앰프의 설계와 각 요소의 기능 .....	11
3.1 내장형 센서앰프의 전체구성 .....	11
3.2 내장형 센서앰프 각 요소의 설계와 기능 .....	12

3.2.1	발/수광 센서 전용의 아날로그 회로	12
3.2.2	출력 안정을 위한 자동 게인 조정회로	14
3.2.3	트리거 및 외부감도조정 회로	15
3.2.4	업/다운 카운터 회로	16
3.3	80C196KC 중심의 데이터 처리	17
<b>제 4 장 다중 실린더 위치동조 제어의 구현</b>		<b>21</b>
4.1	위치동조 제어의 필요성	21
4.2	동조제어기의 구현 방법	22
4.3	동조제어기의 전체 구성	22
<b>제 5 장 실험 및 시뮬레이션</b>		<b>24</b>
5.1	내장형 센서앰프 동작 실험	24
5.1.1	증분방식 스트로크 측정의 가능성	24
5.1.2	양방향 스트로크 측정의 가능성	25
5.1.3	출력위상 안정을 위한 자동 게인 조정 가능성	26

5.1.4	외부 트리거 레벨조정과 감도조정의 가능성	27
5.2	해수용 센서 내장형 실린더의 스트로크 검출 실험	29
5.2.1	스트로크 검출의 선형성 및 정확도 실험	29
5.2.2	스트로크 검출의 반복 정밀도 실험	30
5.3	두개의 유압실린더 위치동조 제어를 위한 시뮬레이션	32
5.3.1	2개의 유압실린더 수학적모델	32
5.3.2	퍼지 PID제어기의 구조 및 응답특성	34
5.3.3	위치동조 제어기의 구현	39
5.3.4	시뮬레이션 결과	40
제 6 장 결 론		48
참 고 문 헌		49

# A Study on the Sensor-Embedded Hydraulic Cylinder for Offshore Application and Position Tuning Control of Multiple Cylinders

*Jin-Gyu Kim*

*Department of Control & Instrumentation Engineering,  
Graduate School, Korea Maritime University*

## ABSTRACT

In this paper, an idea to comprise a sensor-embedded hydraulic cylinder for offshore applications was suggested. The idea not only includes a scale processing method of piston rod using ceramic plasma coating by Ti-ceramic and Al-ceramic, but also includes a remote detecting method using two sets of optical sensors and optical fibers. And it includes exclusive developing methods of circuit elements for the embedded sensor amplifier. Based on the methods mentioned above, a practical sensor-embedded hydraulic cylinder was developed and several experiments were executed in order to verifying the effectiveness of the suggested method.

There are two main advantages of the developed sensor-embedded hydraulic cylinder. One is that the embedded sensor can detect the piston rod strokes without time delay because light is used as a detecting

medium, and it can be adapted to detect instantaneous high speed strokes of piston rod owing to the surge pressure of hydraulic oil. The other advantage is that the embedded sensor is robust against vibrations and shocks during operations, by installing only optical fiber head on the cylinder.

In this paper, a position tuning control method was also discussed, in order to control the positions of multiple cylinders for high power and high precision hydraulic control systems. The discussed method is to comprise a tuning controller based on CPU in view of digital hardware and software. To verify the effectiveness of the discussed method, computer simulations were executed by using two different mathematical models as hydraulic cylinder models. According to the simulation results, the discussed tuning control method was turned out to generate differential tuning control signals accurately. It is expected that the discussed method will be used more effectively than the conventional mechanical tuning control methods in view of accuracy and price burden.

A further study will be concentrated on experiments to analyze the control performance quantitatively for a practical system which is combined the suggested sensor-embedded hydraulic cylinders with the discussed position tuning controller.

# 제 1 장 서 론

부두시설에 사용되는 로드아웃 시스템이나 리프트 시스템, 항만준설장비, 댐이나 간척지 수문, 고 하중 정밀유압프레스 등 고출력 정밀동작을 요구하는 유압시스템에는 정밀제어를 위한 전용센서가 내장된 특수유압실린더의 사용이 필수적이며 그 수요도 꾸준히 증가하고 있는 추세이다.

특히 해수용으로 사용하기 위해서는, 해수에 의한 부식 및 침식으로 발생하는 기존 크롬도금의 박리현상을 방지함으로써 내구성을 확보할 수 있도록 피스톤 로드를 처리하는 것이 필요하다. 또한 심한 온도변화나 거친 작업환경, 과도한 진동과 충격이 발생하는 사용환경을 극복할 수 있어, 잦은 교체로 인한 동작의 신뢰성을 잃은 기존 센서를 대체할 수 있는 실린더 전용의 센서를 개발하는 것이 필요하다.

고 하중 시스템에 적용되는 다중 유압실린더의 경우 복수의 액츄에이터를 동일한 속도로 동일한 스트로크를 발생하도록 제어해 주어야 한다<sup>[1]</sup>. 동일한 규격으로 제작된 실린더의 경우라 할지라도 품질이 균일하지 않을 수 있고 배관이나 유압 작동유 흐름의 특성으로 인해 스트로크의 출력이 동일하지 않게 된다. 즉, 동일한 제어입력이 인가되더라도 스트로크의 출력이 달라질 수 있게 된다. 지금까지는 유압장치에 의한 기계적 동조제어만을 주로 사용하여 왔으나 정밀한 동조제어를 요구하는 시스템에 응용하기에는 분명한 한계를 지니고 있다<sup>[2]</sup>. 따라서 전자적인 하드웨어 및 소프트웨어 기반의 부가적 제어요소를 사용한 다중 유압실린더 위치동조 제어기의 필요성이 강하게 제기되어 왔다.

따라서 본 논문에서는 빛에 의한 간접검출로 기존기술과는 완전히 다른 새로운 측정원리와 방법<sup>[3,4]</sup>을 도입함으로써 기술적 독창성을 확보할 수 있으며, 진동이나 충격의 영향을 근원적으로 해결하여 센서의 내구성을 증대시키고, 적

용 가능한 실린더 크기의 한계를 극복함으로써 모든 크기의 실린더에 적용할 수 있는 전용센서의 개발에 대한 내용을 구체적으로 제안한다. 또한 개발된 전용센서를 사용할 수 있도록 해수용 유압실린더의 피스톤 로드 처리방법을 제안한다. 특히 빛에 의해 스트로크의 검출이 가능하도록 하기 위해서는 피스톤 로드로부터 반사되는 빛의 광양 차이를 얻을 수 있어야 하며, Ti 계열의 세라믹과 Al 계열의 세라믹을 교번 플라즈마 코팅하여 피스톤 로드를 처리하는 방법에 대해 상세히 기술한다. 또한 다중 유압실린더의 위치동조 제어를 위한 동조알고리즘의 구성에 관한 내용을 상세히 전개한다. 제안하는 방법의 유효성을 검증하고 원격검출의 가능성을 확인하기 위하여 내장형 센서앰프와 신호처리를 위한 CPU 기반의 데이터 처리보드를 제작하여 스케일 처리된 유압실린더를 대상으로 실험을 수행한다. 제안된 동조제어기의 유효성을 입증하기 위하여 서로 다른 특성을 갖도록 모델링 된 두 개의 유압시스템 수학적모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 고찰한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 해수용 센서내장형 유압실린더의 구성과 내장형 센서를 이용한 스트로크의 검출 원리에 대한 개요를 설명한다. 제 3장에서는 내장형 센서를 위한 전용앰프의 설계방법을 구체적으로 전개하고 회로내 각 요소의 기능에 대하여 설명하며, 80C196KC 중심의 데이터 처리 방법을 하드웨어 및 소프트웨어 측면에서 기술한다. 제 4장에서는 위치동조 제어의 필요성과 개발된 내장형 센서를 이용하여 위치동조 제어를 구현하는 방법에 대하여 기술한다. 제 5장에서는 제작된 센서 전용앰프와 해수용 특수 유압실린더를 대상으로 스트로크 검출의 가능성 실험을 선형성 및 정확성 측면에서 수행하고, 위치동조 제어의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행함으로써 그 타당성을 검토한다. 마지막으로 제 6장에서는 실험결과를 토대로 총체적인 결론을 내릴 것이며 차후의 연구과제에 대해서도 정리한다.

## 제 2 장 해수용 센서내장형 유압실린더

### 2.1 해수용 센서내장형 유압실린더 개발의 필요성

항만준설기의 동작에 사용되는 유압실린더나 고속선박의 수중 작동기로 사용되는 유압실린더에서는 피스톤 로드와 해수와 직접 접촉되어 오랫동안 잠겨 있어 해수로 인한 부식 및 침식에 대한 대책이 반드시 필요하다. 기존의 크롬도금을 이용한 피스톤 로드와 경우 해수에 의한 박리현상으로 내구성에 치명적인 문제를 안고 있었다. 최근에는 이와 같은 해수의 영향을 극복하면서도 피스톤 로드로서 가져야 하는 기본 기능인 경도와 강도 및 표면조도를 유지할 수 있도록, 세라믹 분말에 Ti 계열 또는 Al 계열의 금속가루를 혼합한 분말을 플라즈마 코팅 처리한 피스톤 로드와 개발되어 사용되고 있으며, 여러 가지의 실험결과 우수한 성능을 나타내는 것으로 보고되고 있다. 뿐만 아니라 진동이나 충격을 동반하면서 열악한 해수 환경에서 정밀 작업을 수행해야 하는 실린더의 경우에는 실린더의 스트로크를 측정할 수 있는 전용의 센서가 반드시 필요하다.

본 논문에서는 Al 계열과 Ti 계열의 세라믹을 이용하여 피스톤 로드와 1mm 간격의 흑색으로 교번 스케일 코팅함으로써, 광에 의하여 스트로크를 간접 측정하는 센서내장형 유압실린더의 구성방법을 제안하였다. 피스톤 로드와 흑색 또는 백색 스케일에 조사된 광의 반사 양에는 차이가 현저히 발생하게 되며 이를 광센서로 측정하여 전기적인 신호로 변환함으로써, 피스톤 로드와 스트로크를 검출할 수 있도록 해수 전용의 센서내장형 유압실린더를 구성할 수 있는 방법이다.

## 2.2 해수용 센서내장형 유압실린더의 구성

### 2.2.1 센서내장형 유압실린더의 구성요소

본 논문에서는 유압실린더의 스트로크 측정을 위하여 자기센서 등에 의한 직접 검출방법이 아닌 광파이버를 이용하여 발/수광 센서에 의한 원격 간접 검출방법을 도입함으로써 기존의 센서가 가지고 있던 진동, 충격의 문제점을 극복할 수 있도록 하였으며, 분해능을 피스톤 로드의 정밀가공을 통한 스케일 처리로 최소 0.5mm 까지 가능하게 하였다.

사진 2.1은 본 논문에서 제안하는 방법을 토대로 실제 제작한 해수용 유압실린더와 센서앰프의 실물사진이며, 그림 2.1은 제작한 센서내장형 유압실린더의 전체 구성도를 보여주는 그림이다.

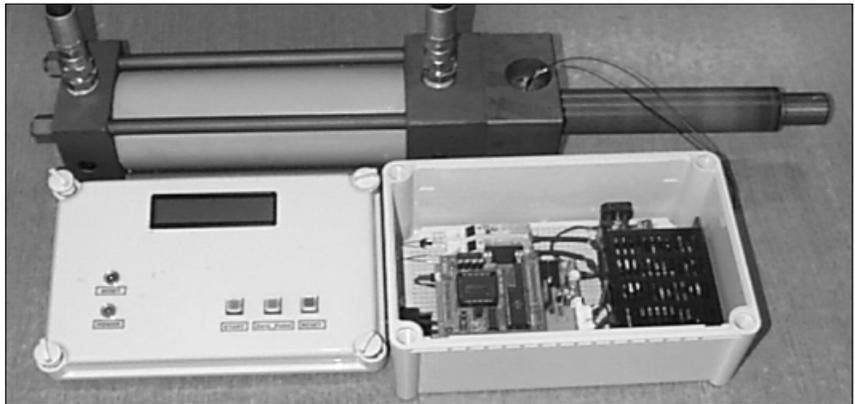


사진 2.1 제작한 해수용 센서내장형 유압실린더와 센서앰프  
Photo. 2.1 A sensor-embedded hydraulic cylinder for offshore application and its sensor amp

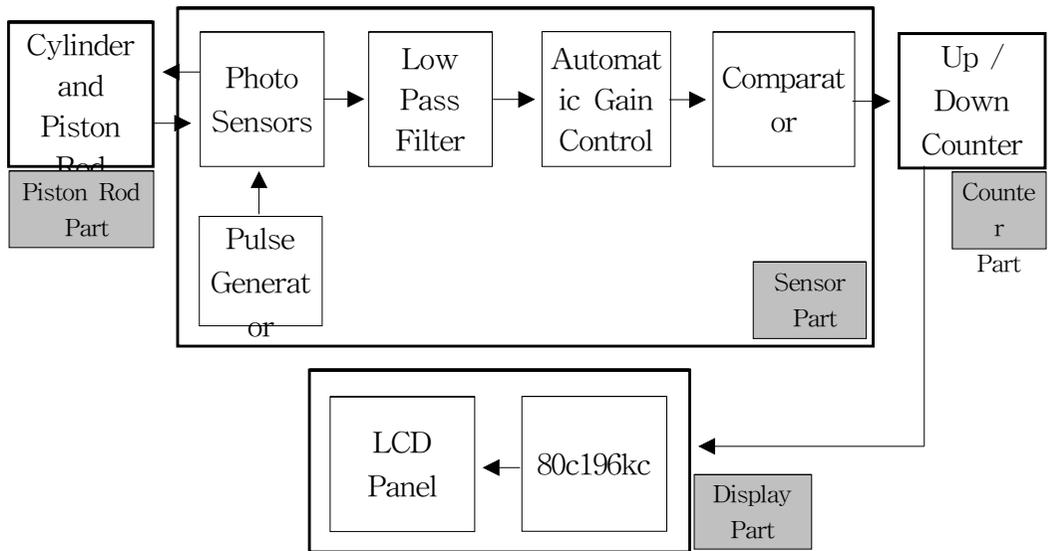


그림 2.1 해수용 센서내장형 유압실린더의 전체 구성도

Figure 2.1 Configuration diagram of a sensor-embedded hydraulic cylinder for offshore application

## 2.2.2 내장형 센서를 이용한 스트로크 검출 원리

내장형 센서를 이용하여 스트로크를 검출하기 위해서는 우선 피스톤 로드의 스케일 처리가 필수적이다. Ti계열의 세라믹과 Al계열의 세라믹을 교대로 코팅 처리함으로써 피스톤 로드가 흑, 백색의 명암 차를 가지게 되며 광을 조사할 경우 반사광의 차이가 발생한다. 이 반사광의 차이를 디지털 펄스신호 형태로 변환한 후 카운트함으로써 스트로크를 검출할 수 있다. 검출의 분해능은 1/4 분주 방법<sup>[5]</sup>을 이용하여 스케일 처리된 간격의 1/2배로 구현할 수 있다.

그림 2.2는 1/4분주 방법을 설명한 그림으로 Al 계열의 세라믹과 Ti 계열의 세라믹 스케일로부터 출력되는 펄스신호를 상승에지와 하강에지에서 각각 카운트함으로써 A상과 B상의 한 주기 즉 2mm동안 총 4번의 카운트를 수행할 수 있다. 따라서 1mm 간격으로 스케일 처리된 피스톤로드의 스트로크 검출 정밀도를 0.5mm까지 향상시킬 수 있다.

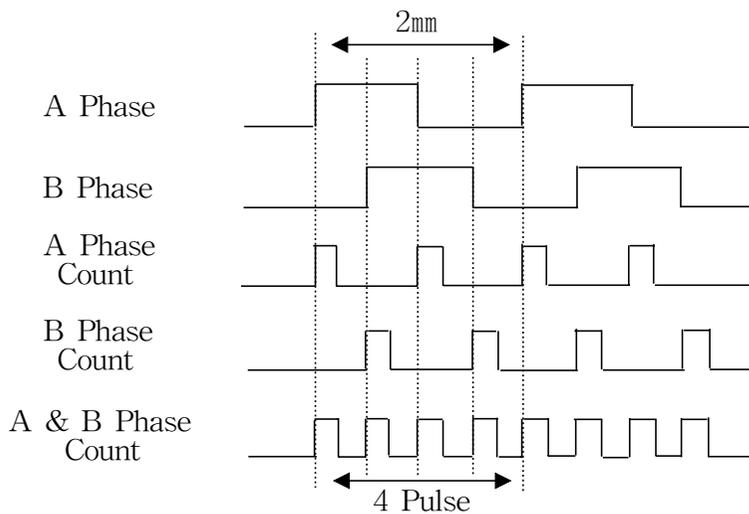


그림 2.2 1/4 분주에 의한 스케일 카운트 방법

Figure 2.2 Counting method of scales by 1/4 partition of one period

## 2.3 내장형 센서를 위한 해수용 피스톤 로드 처리

앞에서도 언급하였듯이 본 논문에서 제안하는 광파이버를 이용한 발/수광 센서에 의한 원격검출 방법을 실현하기 위해서는 피스톤 로드의 스케일 처리가 반드시 필요하다. 반사광의 명암차이를 이용하여 스트로크를 측정하기 위해서는, 스케일을 형성하는 피스톤 로드 표면이 서로 다른 재질에 의해 처리되어야 하며 또한 해수용 피스톤 로드로서의 특성을 갖추어야 한다. 이와 같은 목적을 달성하기 위하여 표면처리 재질로서 Al 계열의 백색 세라믹과 Ti 계열의 흑색 세라믹을 이용하여 피스톤 로드를 스케일 처리하는 방법을 구체적으로 제시한다. 세라믹 처리방법은 최근 피스톤 로드의 표면을 처리하는 재질로 독일이나 네덜란드 등의 선진 기업체에서 이미 개발되어 실용화되어 있으며, 특히 유압실린더의 피스톤 로드 자체가 해수와 자주 접촉되는 특수유압 부분에서 그 효능을 충분히 발휘하는 것으로 여러 가지의 실험을 토대로 판명되었다.

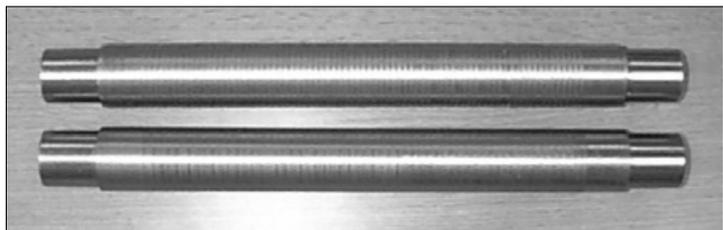
해수 전용으로 사용되는 센서내장형 유압실린더를 구성하는데 있어 핵심적인 기술중의 하나가, 바로 내장형 센서를 위한 피스톤 로드를 처리하는 방법이며, 사용되는 센서의 종류에 따라 그 처리방법이 매우 다양할 수 있다. 광을 스트로크 측정을 위한 매개체로 사용하기 위하여 본 논문에서 제시하는 피스톤 로드의 스케일 처리방법과 그 과정을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

- 단계 1. 로드 기본재료를 원주상으로 1 mm 간격으로 400  $\mu\text{m}$  깊이의 홈을 가공한다.
- 단계 2. 세라믹이 잘 용착되도록 가공된 로드 표면을 샌드 블라스팅 처리한다.
- 단계 3. Ti 계열의 흑색 세라믹으로 300  $\mu\text{m}$  두께로 1차 플라즈마 코팅한다.

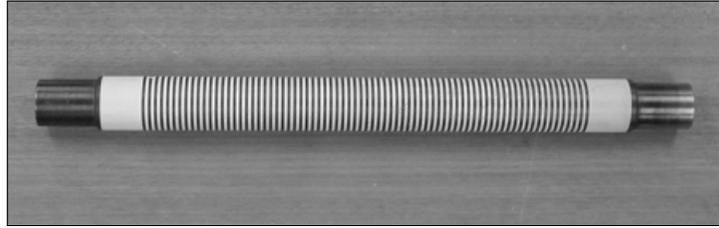
- 단계 4. Al 계열의 백색 세라믹으로 300  $\mu\text{m}$  두께로 2차 플라즈마 코팅한다.
- 단계 5. 유압작동유나 수분의 함유를 방지하기 위하여 100 ~ 200  $^{\circ}\text{C}$ 에서 실링제를 도포한다.
- 단계 6. 흑색과 백색 스케일이 교번되고 세라믹 두께가 200  $\mu\text{m}$  가 되도록 다이아몬드 연마를 한다.
- 단계 7. 피스톤 로드로서의 표면조도가 만족되도록 표면조도를 30  $\mu\text{m}$  이내로 광택 처리한다.

위와 같은 과정을 거치게 되면 일정한 간격의 백색 세라믹과 흑색 세라믹이 교대로 나타나는 스케일을 피스톤 로드의 표면에 형성시킬 수 있다. 이때 일정한 광양이 로드 위에 조사될 경우 흑색의 세라믹 스케일에서는 빛이 흡수되고 백색의 세라믹 스케일에서는 빛이 반사됨으로써 수광센서는 반사광의 차이에 해당되는 전압차이를 출력하게 되고, 피스톤 로드의 움직임은 속도에 비례하는 주파수를 가지는 정현파를 출력하게 된다.

사진 2.2는 본 논문에서 제작한 피스톤 로드의 스케일 처리 전과 처리 후의 모습이다.



(a) Piston rod shape before plasma scale coating



(b) Shape after plasma scale coating

사진 2.2 흑색 및 백색 세라믹 플라즈마 코팅에 의한 스케일 처리

Photo. 2.2 Scale processing by black and white ceramic plasma coating

## 2.4 양방향 스트로크 검출을 위한 광파이버 헤드의 설치방법

스케일 처리된 피스톤 로드의 스트로크를 양방향으로 검출하기 위하여 두 쌍의 광파이버를 사용하였다. 증분방식으로 스트로크를 측정하기 위하여 A상 및 B상 두 광 출력의 위상 차가  $90^\circ$ 가 되도록 광파이버 헤드를 위치시키는 것이 매우 중요하고, 이것은 앰프의 감도조정 및 기계적 헤드 취부와 밀접한 관계가 있다. 따라서 본 논문에서는 피스톤 로드의 스케일이 1mm 간격으로 되어 있기 때문에 두 쌍의 광파이버를 0.5mm 간격으로 위치시켜 A상 및 B상의 출력 파형이  $90^\circ$ 의 위상 차를 가지도록 함으로써 업/다운 카운트를 수행할 수 있도록 하였다. 그리고 정밀 위치조정은 출력신호의 듀티비를 고려한 상태에서 오실로스코프 상의 두 출력의 파형을 지속적으로 검토함으로써 이루어질 수 있다. 그림 2.3은 두 조의 광파이버로부터 광이 피스톤 로드에서 반사 또는 흡수되어 나타나는 펄스신호의 네 가지 경우를 나타낸 것이다.

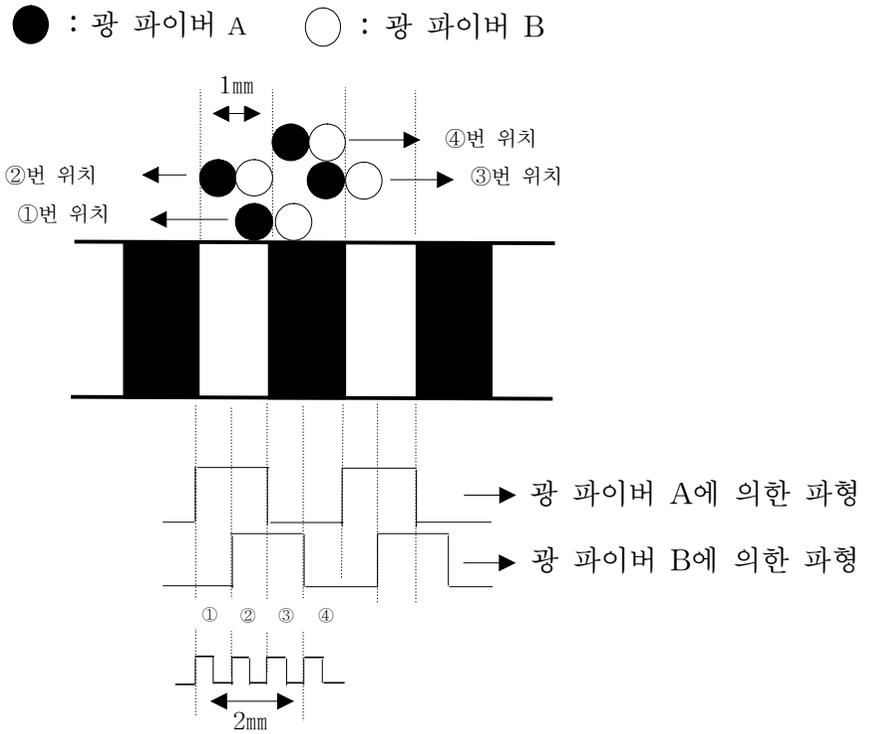


그림 2.3 한 주기동안 네 번 카운트를 위한 광파이버의 위치  
 Figure 2.3 Optical fiber positions for four counts during one period

## 제 3 장 내장형 센서전용앰프의 설계와 각 요소의 기능

### 3.1 내장형 센서앰프의 전체구성

내장형 센서앰프는 피스톤 로드 상에 광을 공급하기 위한 발광센서와 반사광의 광양을 측정하기 위한 수광센서, 그리고 발광 및 수광센서를 구동하기 위한 아날로그 회로를 포함하고 있어야 한다. 이 때 발광되는 빛의 세기가 항상 일정하도록 안정화 시켜 주는 기능을 부여하는 것이 매우 중요하며 피스톤 로드가 움직임에 따라 스케일 처리된 피스톤 로드로부터 반사된 광의 명암차이를 전압으로 변환하는 수광센서의 출력에 의해 스트로크를 측정하는 것이므로, 수광센서의 출력을 사용 가능한 전압레벨로 증폭함은 물론 과형을 정형화 시켜 구형파를 생성하는 기능을 포함해야 한다. 수광센서를 통해 들어오는 정현파 신호는 전압레벨 비교를 통해 과형 정형을 시키기에는 신뢰성을 제공하지 못하며 노이즈도 동반하여 들어오게 되는데, 이러한 고주파의 노이즈 제거와 함께 출력신호를 피스톤 로드의 상태에 관계없이 일정한 세기의 출력 신호를 만들어 주기 위해서는 필터 회로와 자동 게인 조정회로를 포함하는 신호조정회로가 필요하게 된다. 이렇게 함으로써 필터와 자동 게인 조정회로를 통과한 신호는 고주파 노이즈의 제거와 함께 더 넓은 전압범위를 가질 수 있으므로, 신뢰성 있는 과형 정형을 수행할 수 있고 비교기의 비교전압을 조정함으로써 감도 조정을 수행할 수 있으며, 비교기를 통과한 후의 구형파 신호는 카운터의 입력신호로 사용된다.

그림 3.1은 본 논문에서 실제로 제작한 내장형 센서앰프의 주요 요소를 기능적으로 나타낸 전체 구성도를 보여 주는 것이며, 각 요소에 대해서는 다음 절에서 세부적으로 설명하기로 한다.

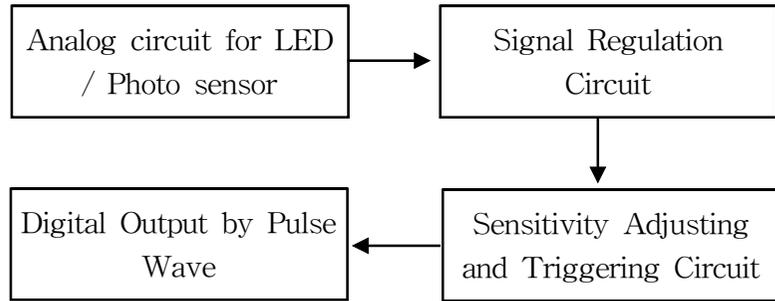


그림 3.1 내장형 센서앰프의 전체 구성도  
 Figure 3.1 Configuration diagram of an embedded sensor amp

## 3.2 내장형 센서앰프 각 요소의 설계와 기능

### 3.2.1 발/수광 센서 전용의 아날로그 회로

수광센서가 동일한 수광 양에 대해 항상 일정한 크기의 전압을 출력하기 위해서는 발광센서 쪽에서 일정한 세기의 광을 조사할 수 있도록 발광센서의 발광 양을 안정화시키는 것이 필요하며, 센서를 더욱 밝게 하기 위해서는 많은 전류를 순간적으로 흘려 보내는 것이 바람직 한 방법이므로, 조사되는 광을 발진시켜 보낼 수 있도록 회로를 설계하였다. 그리고 실험을 통해 최적의 듀티 사이클이 4% 내외라는 것을 알 수 있었다. 광을 발진시키기 위하여 본 논문에서는 0~500 KHz의 범위에서 가장 범용으로 쓰이는 NE555<sup>[6]</sup>를 사용하였으며, 본 논문에서는 8KHz의 간격으로 광을 발진시키고 약 4%의 듀티 사이클을 가지도록 발광부를 설계하여 수광쪽에서 안정된 광을 받을 수 있도록 하였다. 그림 3.2는 전압안정화 회로와 NE555를 이용한 발진부분의 회로이다.

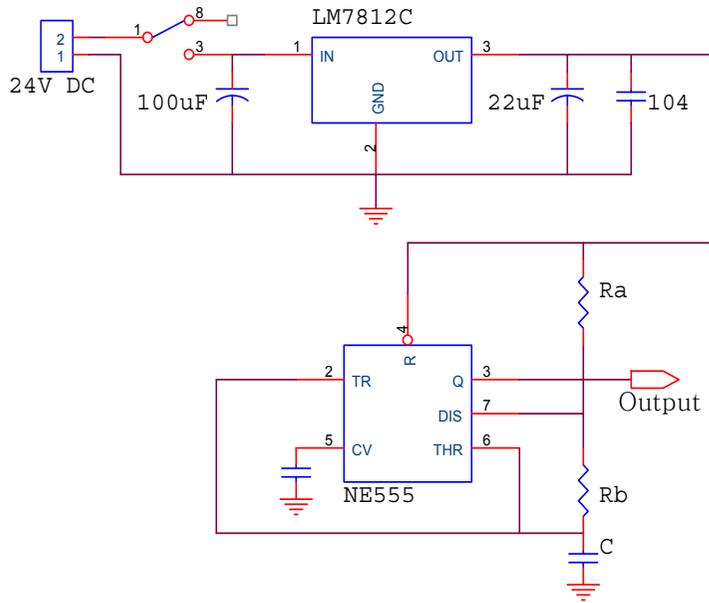


그림 3.2 전압안정화 회로 및 주파수 발진을 위한 NE555 구성도

Figure 3.2 Circuit diagram for a voltage regulation  
and a frequency oscillation using NE555

NE555의 경우 주파수와 듀티 사이클을 구하는 공식은 식 (3.1) 및 (3.2)와 같다.

$$\text{출력주파수} \quad Freq = \frac{1.44}{(Ra + 2Rb)C} \quad (3.1)$$

$$\text{듀티사이클} \quad Duty = \frac{Ra + Rb}{Ra + 2Rb} (100 \%) \quad (3.2)$$

그리고 충전 시정수와 방전 시정수는 식 (3.3) 및 (3.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{충전 시정수} \quad T_c = (Ra + Rb)C \quad (3.3)$$

$$\text{방전 시정수} \quad T_d = Rb \times C \quad (3.4)$$

발광 및 수광 센서는 서로 비슷한 대역의 파장을 가지고 빛의 각도가 발광 시 약 17°수광 시 약 15°를 가지는 각각 EL-7L과 ST-7L을 사용하였다. 특히 EL-7L은 펄스 구동 시 약 500mA 까지 견딜 수 있기 때문에 센서 앰프를 구성하기에는 충분한 전류 한계치이다<sup>[7]</sup>. 그리고 수광센서 측의 부품 선택을 선택할 때는 발광 측에서 발진시키는 주파수인 8KHz에 충분히 응답할 수 있도록 각 부품의 특성을 고려하여 구성하는 것이 필수적이다.

### 3.2.2 출력 안정을 위한 자동 게인 조정회로

발광센서의 발광회로가 안정화 되어 항상 일정한 세기의 광을 피스톤 로드 상에 조사시킬 수 있다고 하더라도, 세라믹에 의해 스케일 처리된 피스톤 로드의 표면상태가 균일하지 못할 경우도 있고 기름이나 먼지 등 외부로부터의 오염 등 여러 가지 이유로 인하여 피스톤 로드에서 반사되어 수광센서로 들어오는 광의 세기가 일정하다는 보장이 없다. 즉, 피스톤 로드 스케일이 흑색 또는 백색 세라믹 스케일로 동일하다 할 지라도 로드의 상태에 따라 스케일에서 반사되는 광양에 차이가 생겨 입력신호가 변할 수 있게 된다. 이와 같은 감도 변화에도 불구하고 출력 전압을 거의 일정하게 유지할 수 있는 회로가 필요하며, AGC(Automatic Gain Control)회로를 도입함으로써 출력전압의 최대값이 거의 일정하게 유지되도록 하였다<sup>[6]</sup>.

그림 3.3은 본 논문에서 개발한 내장형 센서앰프의 AGC 회로이며 FET가 가변저항의 역할을 하여 입력전압의 레벨에 따라 증폭율이 자동적으로 변화되도록 하였다.

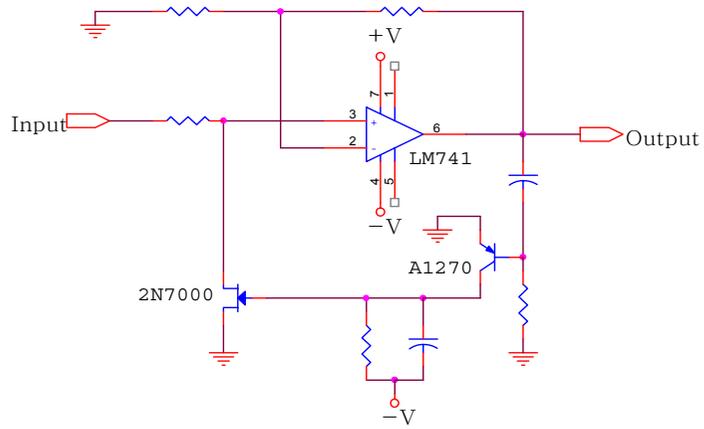


그림 3.3 내장형 센서앰프의 AGC회로 부분

Figure 3.3 AGC circuit for the embedded sensor amp

### 3.2.3 트리거 및 외부감도조정 회로

자동 게인 조정회로를 통과한 신호는 거의 일정한 세기의 아날로그 값이 되었으며, 디지털 값으로 바꾸어 카운터하기 위해서는 특정한 전압레벨에서 비교를 하여 파형 정형을 시켜야 하며, 비교전압의 범위가 넓으면 넓을수록 신뢰성 있는 계측이 가능하다. 앞에서도 언급하였듯이 양방향 스트로크 검출을 위해서는 센서 앰프에서 나오는 두 신호의 파형이 90°의 위상 차를 가져야 하며, 광파이버헤드를 설치할 경우 발생하는 설치오차로 인한 불안정한 위상 차와 검출거리의 변화로 인한 감도변화를 조정할 수 있는 감도조정 회로가 필요하다.

그림 3.4는 LM324를 이용하여 AGC회로의 출력 신호와 기준 전압레벨을 비교하여 파형 정형을 시키는 회로부분이며, 두 개의 가변저항을 이용함으로써

넓은 전압범위에 걸쳐 원하는 값 부근으로 감도를 빨리 조정할 다음 최적 값 주위에서는 미세하게 감도조정을 할 수 있도록 하였다.<sup>[8]</sup>

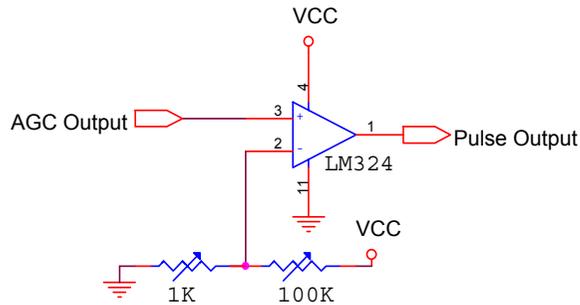


그림 3.4 파형정형을 위한 감도조정 회로

Figure 3.4 A sensitivity adjustment circuit for triggering

### 3.2.4 업/다운 카운터 회로

두 개의 광파이버 센서로부터 90°의 위상 차를 갖고 출력되는 두 개의 신호를 이용하여 피스톤 로드의 스트로크를 양방향으로 검출하기 위해서는, 신호들의 위상을 이용한 스트로크의 증가와 감소방향이 정의되어야 하고 이를 업/다운 카운트할 수 있는 카운트 방법이 모색되어야 한다.

본 논문에서는 스트로크의 업/다운 카운트를 수행하기 위해 일본 NEC사의 PD4701A를 사용하였다. 이 칩은 하드웨어적으로 4분할 내삽을 수행하고 있으며, 여기서 얻어진 데이터 값을 CPU로 처리하여 LCD(Liquid Crystal Display)를 통해 피스톤 로드의 절대위치 값을 표시하도록 하였다. 이 칩은 350 ns의 펄스 폭까지 카운트 할 수 있고 8비트의 데이터 값을 상위와 하위로 나누어

두 번 카운트함으로써 12비트의 카운트 값을 얻을 수 있다.

그림 3.5는 본 논문에서 업/다운 카운트를 위해 채택한 카운터의 내부구조이다.

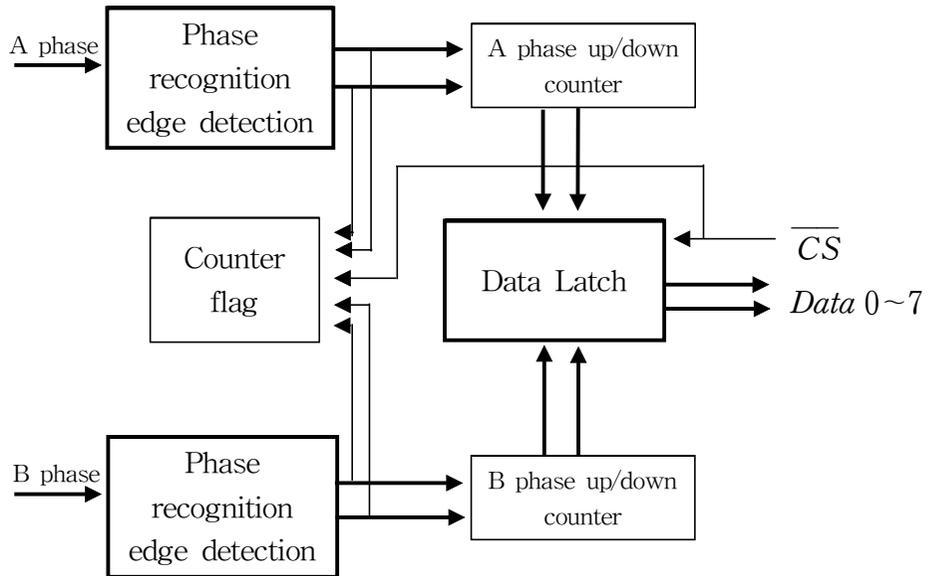


그림 3.5 PD4701A의 내부구조

Figure 3.5 Internal architecture of the PD4701A

### 3.3 80C196KC 중심의 데이터 처리

그림 3.6은 80C196KC 중심의 데이터 처리보드에 대한 구성을 나타낸 것이다. 카운터로부터 피스톤 로드의 스트로크 정보를 받아 LCD에 디스플레이 해 주는 역할을 하며 스트로크 정보를 이용하여 유압실린더 전체의 위치제어를 수행하는 중요한 기능을 갖고 있다. 각 요소들에 대한 상세 설명

은 여기서는 생략하기로 한다.

특징적인 기능으로는 외부 인터럽트 입력에 의해 피스톤 로드의 스트로크를 초기화시키는 제로세팅(Zero-Setting) 기능이 있으며, 제로세팅 이후에는 피스톤 로드의 스트로크가 LCD에 0으로 표시된다.

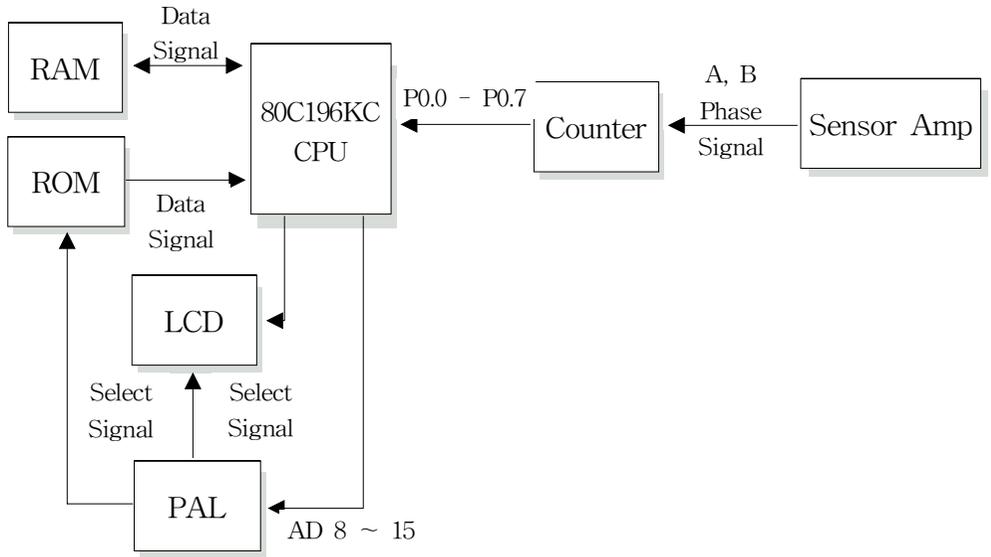


그림 3.6 80C196KC 중심 데이터처리 보드의 기능선도

Figure 3.6 A schematic diagram for data processing board using 80C196KC

그림 3.7은 80C196KC중심의 데이터 처리를 위한 실행 순서도를 나타낸 그림이다.

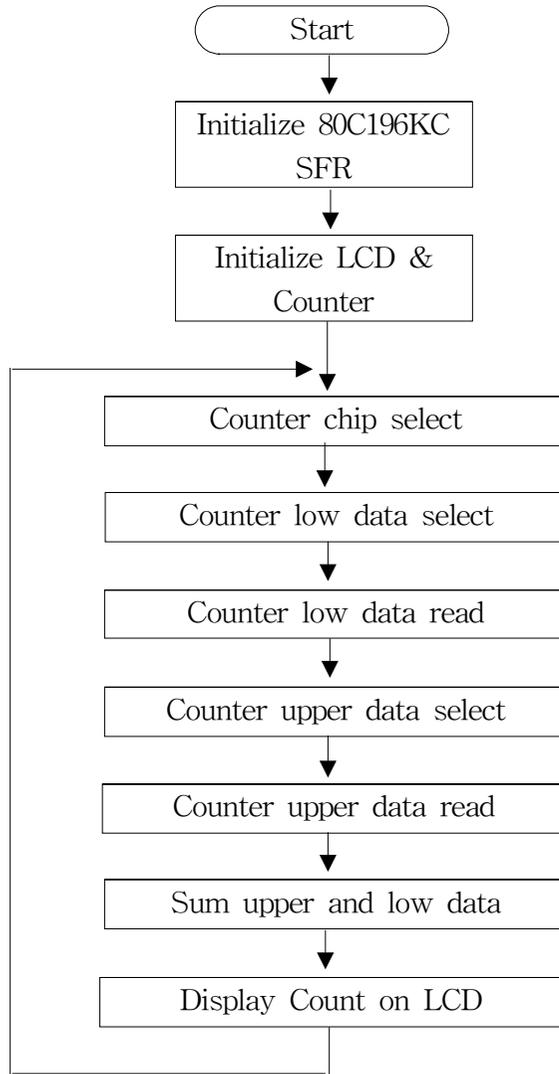


그림 3.7 데이터 처리를 위한 소프트웨어 실행순서도  
Figure 3.7 A software flow chart for data processing

그림 3.8은 외부 인터럽트 처리에 의해 피스톤 로드의 현재 위치가 0이 되도록 제로세팅을 실행하는 순서도를 나타낸 그림이다.

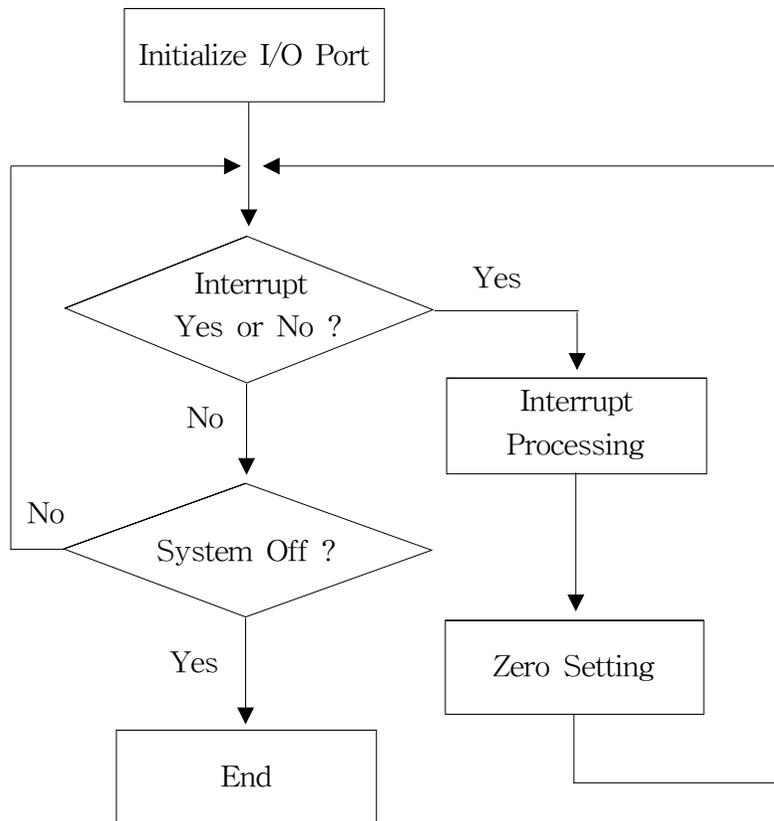


그림 3.8 제로세팅을 위한 외부 인터럽트 처리 실행순서도

Figure 3.8 Flow chart of external interrupt processing  
for zero setting

## 제 4 장 다중실린더 위치동조 제어의 구현

### 4.1 위치동조 제어의 필요성

여러 개의 액츄에이터를 동시에 동일한 속도와 위치를 갖도록 작동시키는 것을 동조시킨다고 한다. 비록 크기가 같도록 제작된 두 실린더에 동일한 명령을 인가하더라도 실제로는 실린더를 제작할 때 발생하는 치수 공차나 시일의 특성 차이로 인한 마찰력의 변화, 배관의 길이 또는 배관저항 등으로 인한 공급유량 차이 때문에 실린더의 동작을 동기화하기가 매우 어렵다.<sup>[1], 9]</sup>

특히 댐, 간척지수문의 개폐나 리프트 시스템, 로드 아웃 시스템 등 고출력 정밀동작을 요구하는 특수유압실린더의 응용에 있어서는 반드시 실린더 사이의 위치동조 제어를 해 주어야 한다. 만일 위치동조 제어가 되지 않아 속도와 위치오차가 크게 발생할 경우에는 유압실린더에 의해 작동되는 부하의 뒤틀림으로 인해 부하가 제대로 작동되지 않을 수 있고, 구동 시스템 전체가 불안정해 질 수 있어 경우에 따라서는 막대한 손실을 초래할 수 있다.

지금까지 연구된 동조제어의 방법에는 유량조절밸브를 사용하는 방법, 오일 모터 및 분류밸브를 사용하는 방법, 동조실린더를 사용하는 방법, 기계적인 결합에 의한 방법<sup>[1]</sup> 등 여러 가지 방법이 있으나 유압장치에 의해 기계적인 방법으로만 동조제어를 구현함으로써 정확한 위치제어의 구현이 매우 제한적이었으며, 또한 기계적 부가장치 자체가 고가이므로 상당한 가격부담을 안고 있었다. 이에 기계적 방법이 아닌 마이크로프로세서를 사용하여 주 실린더를 중심으로 부 실린더들이 차동적으로 움직이도록 위치동조 제어신호를 생성할 수 있는 전자적인 방법의 개발 필요성이 강하게 제기 되고 있다.

## 4.2 동조제어기의 구현 방법

두 개의 유압실린더를 대상으로 동조제어를 행할 경우 먼저 응답이 느린 유압실린더를 기준으로 응답이 빠른 유압실린더의 유량을 조절하여 서로 동조가 될 수 있도록 구현한다. 같은 위치로 도달되는 것이 목표라 하더라도 목표치까지 도달하는 속도도 같도록 제어하는 것이 매우 중요하다. 응답이 느린 유압실린더를 주 실린더로 설정하고 주 실린더는 자체의 위치제어기만에 의해 제어가 수행되도록 하며, 응답이 빠른 유압실린더를 부 실린더로 설정하고 주 실린더의 위치 값과 자신의 위치 값을 이용하여 주 실린더와 같은 속도로 원하는 위치에 도달할 수 있도록 요구되는 차동 제어입력을 생성하도록 구현하는 것이 본 논문에서 제안하는 기본 아이디어이다.

## 4.3 동조제어기의 전체 구성

그림 4.1은 본 논문에서 제안하는 센서내장형 유압실린더의 동조제어를 위한 위치동조 제어시스템의 전체적인 구성도이다. 동조제어기는 주 실린더와 부 실린더의 출력 즉, 두 유압실린더의 위치 값을 입력으로 받아 동조제어 알고리즘에 의해 차동 제어에 필요한 제어입력을 생성한 후, 부 실린더 제어시스템의 오차신호와 합성되도록 피드백 시킨다. 피드백 되는 차동입력에 의해 부실린더의 위치가 최대한 빠른 시간내에 주 실린더의 위치와 일치되도록 한 후, 부 실린더의 속도가 주 실린더의 속도와 일치되도록 보상해 주는 역할을 하는 것이 위치동조 제어기의 주된 임무이다.

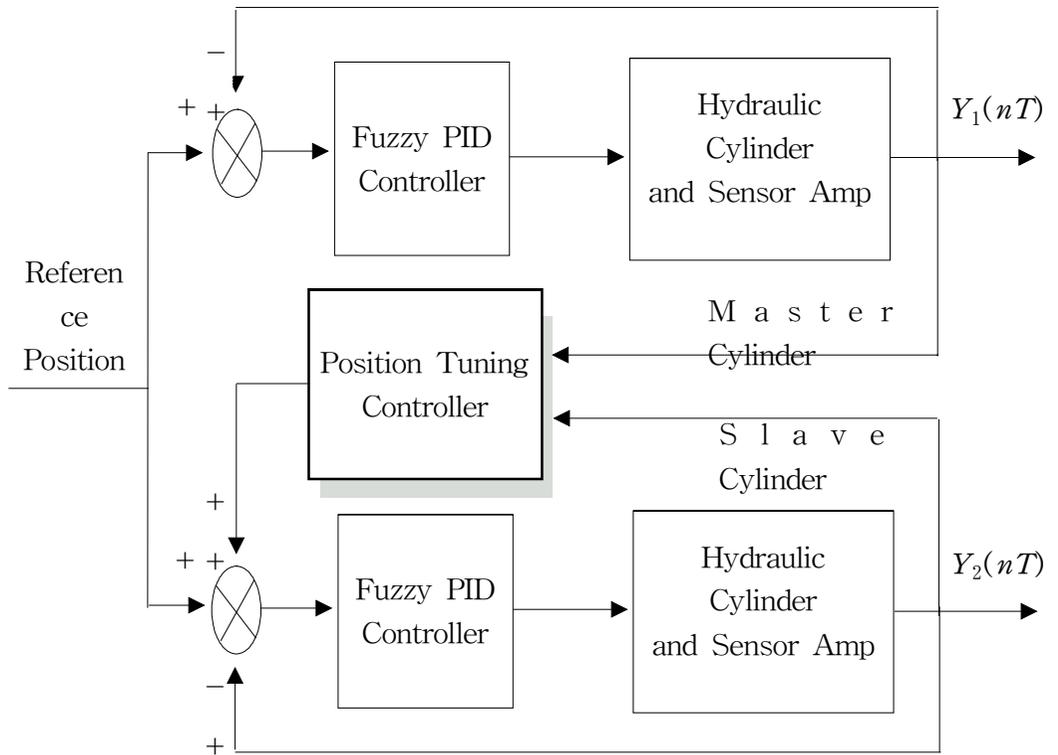


그림 4.1 개별제어기를 포함한 위치동조 제어시스템의 구성도  
 Figure 4.1 Configuration diagram of a position tuning control system including each controllers

## 제 5 장 실험 및 시뮬레이션 결과

### 5.1 내장형 센서앰프 동작 실험

#### 5.1.1 증분방식 스트로크 측정의 가능성

이미 앞에서 제시한 방법을 토대로 Al 계열의 백색 세라믹과 Ti 계열의 흑색 세라믹에 의해 스케일 처리된 피스톤로드의 스트로크를 광 센서와 광 파이버에 의한 원격 간접검출 방법으로 검출 가능한지를 알아보기 위하여 기초실험을 수행하였다.

그림 5.1은 본 논문에서 개발한 센서전용 앰프의 출력실험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Al 계열의 백색 세라믹 스케일에서의 반사되는 광량이 Ti 계열의 흑색 세라믹 스케일에서보다 훨씬 많아 수광센서에서 전압차이를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

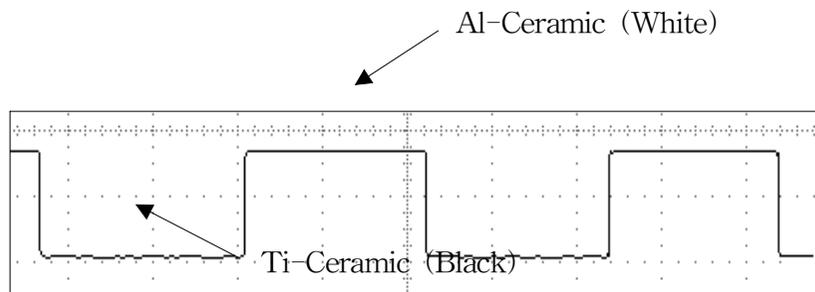


그림 5.1 피스톤 로드 스케일에 대한 센서전용앰프의 출력

Figure 5.1 Output of the developed sensor amp for scales

of the piston rod

### 5.1.2 양방향 스트로크 측정의 가능성

대부분의 증분부호 형태의 센서에서 사용되는 방법과 같이 본 논문에서도 그림 5.1에서 보여 주는 것과 같은 두 개의 출력을 이용하여 스트로크의 증가와 감소의 양방향을 검출할 수 있다. 이것은 0.5mm 간격으로 설치된 두 조의 광파이버에 의해 이루어 질 수 있으며 두 신호는 90°의 위상 차를 가지고 있어야 한다.

그림 5.2는 제작된 특수유압실린더 내부에 내장형 센서를 설치하여 오실로스코프를 통해 취득한 신호이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 파형이 90°의 위상 차를 가지고 들어움을 알 수 있으며 또한 스트로크의 양방향 검출과 업/다운 카운트가 가능하여 유압실린더의 스트로크를 정확히 측정할 수 있는 가능성을 보여 준다. 파형에서 고출력 부분은 Al 계열의 백색 세라믹의 출력을 나타내고 저출력 부분은 Ti 계열의 흑색 세라믹의 출력을 나타내고 있다.

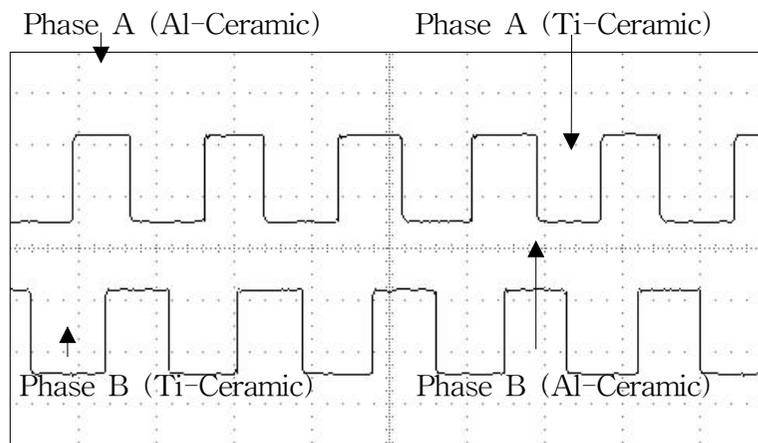


그림 5.2 센서 전용앰프에서 출력된 A상과 B상의 신호

Figure 5.2 Phase A and B signals from the developed sensor amp

### 5.1.3 출력위상 안정을 위한 자동 게인 조정 가능성

그림 5.3은 저역통과 필터를 통과하기 전의 신호와 통과한 후의 신호를 함께 나타낸 그림이다. 저역통과 필터를 거친 후에는 고주파 성분의 노이즈가 확연하게 제거되었음을 알 수 있다. 노이즈를 제거하지 않을 때에는, 과형정형회로에서 비교 수단으로 설정된 트리거 레벨보다 큰 노이즈가 작용될 경우 마치 광센서의 출력전압이 고출력 상태에 있는 것처럼 상승에지를 발생시켜, 증분형 센서의 오차를 유발하는 원인이 되기 때문에 반드시 제거되어야 한다.

그림 5.4는 저역통과 필터를 통과하기 전의 신호와 필터 및 자동 게인 조정 회로를 통과한 후의 신호 파형을 오실로스코프로 포착한 그림으로 자동 게인 조정회로를 통과함으로써 신뢰성 있는 신호의 검출은 물론이고, 트리거 레벨 조정과 감도 조정을 위한 더욱 안정성 있는 전압 범위를 확보할 수 있음을 알 수 있다.

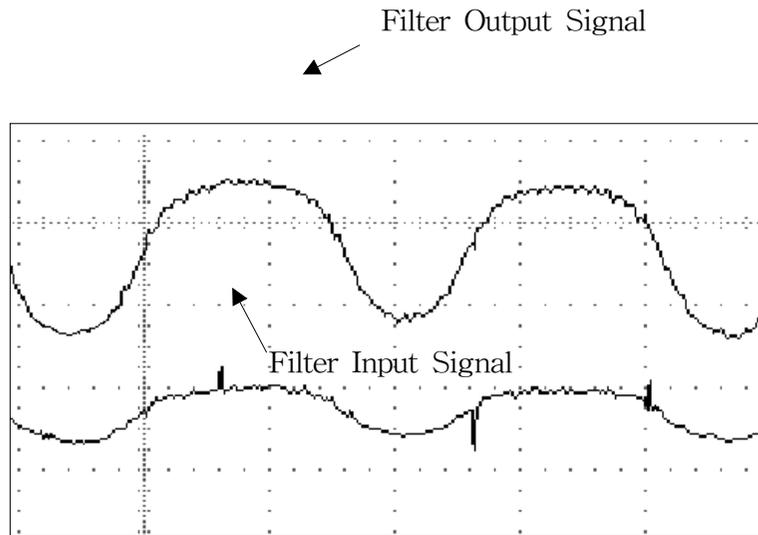


그림 5.3 저역통과 필터를 통과하기 전과 통과 후의 신호

Figure 5.3 Input and output signal of a low pass filter

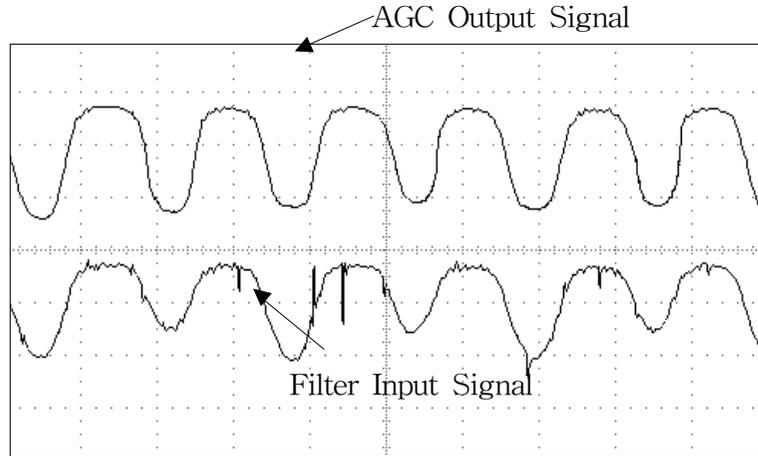


그림 5.4 저역통과 필터를 통과하기 전과 AGC를 통과한 후의 신호

Figure 5.4 Input signal of a low pass filter and output signal of a AGC

#### 5.1.4 외부 트리거 레벨조정과 감도조정의 가능성

그림 5.5는 저역통과 필터와 자동 게인 조정회로를 통과하지 않은 신호와 그에 대한 비교전압을 설정하여 구형과 펄스를 얻은 그림이다. 그림에서도 알 수 있듯이 수광센서로부터 바로 들어온 신호는 전압 폭이 수 백 미리 볼트에 불과하기 때문에 비교기를 통해서 과형 정형을 시키기에는 신뢰할 만한 전압범위가 아니며, 저역통과 필터를 거치기 전에는 많은 잡음도 동반하여 들어오기 때문에 반드시 필터링 작업과 자동 게인 조정이 필요하다. 반면에 그림 5.6은 저역통과 필터와 자동 게인 조정회로를 통과한 후의 신호와 비교기의 특정 전압레벨을 이용하여 정형한 신호의 고출력과 저출력을 구분한 그림으로, 확실히

안정성 있는 전압 파형을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 스케일의 상태나 광파이버의 검출거리의 변화 등으로 인한 불규칙한 신호는 트리거 레벨을 조정함으로써 극복할 수 있으며 동시에 감도조정도 가능해 짐을 알 수 있다.

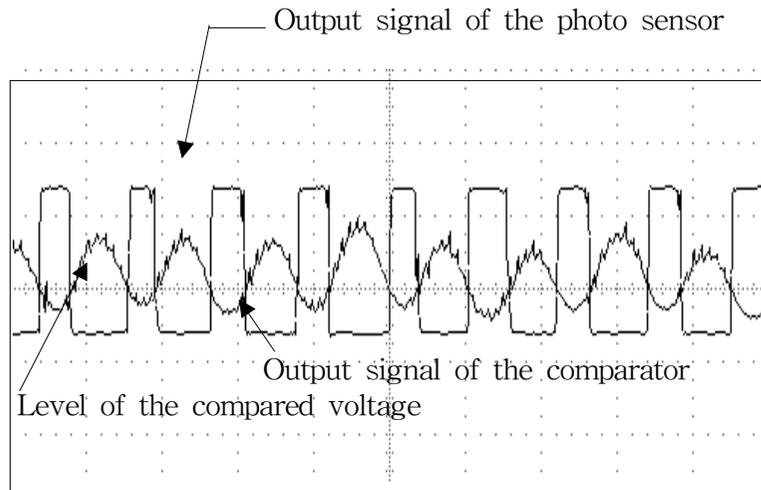


그림 5.5 수광 센서로부터 직접 들어온 신호와 트리거 출력  
Figure 5.5 Output signal of the photo sensor and trigger output

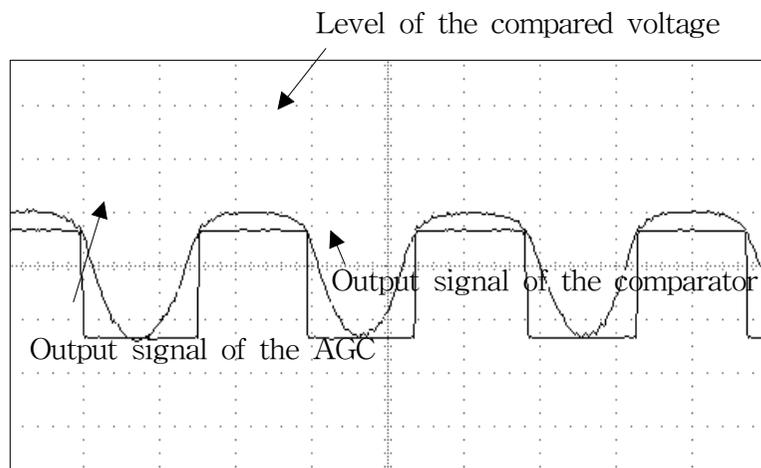


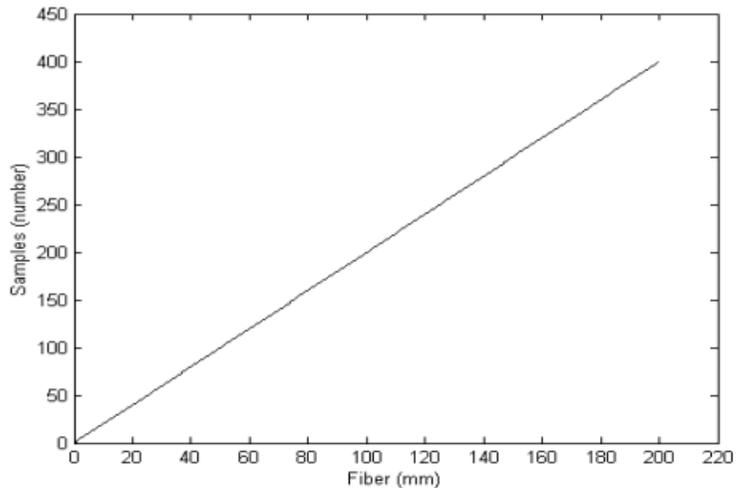
그림 5.6 AGC의 출력 신호와 트리거 출력

Figure 5.6 Output signal of the AGC and trigger output

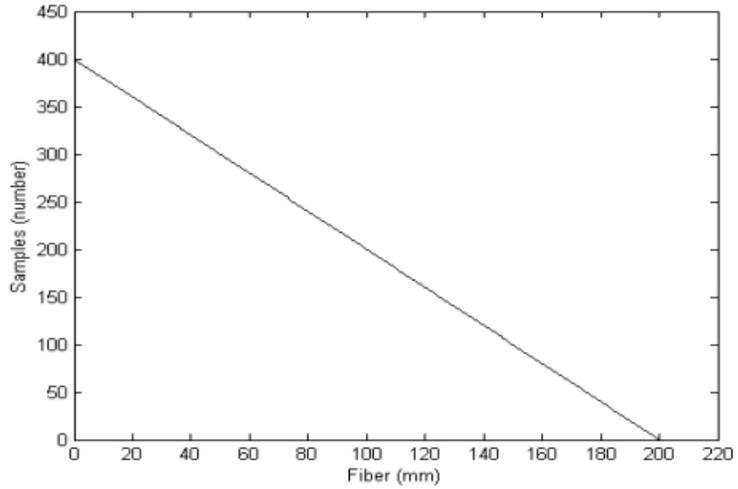
## 5.2 해수용 센서내장형 실린더의 스트로크 검출 실험

### 5.2.1 스트로크 검출의 선형성 및 정확도 실험

본 연구에서 개발한 전용센서는 증분형태이기 때문에 정확한 펄스검출만 이루어진다면 선형성 검토는 큰 의의가 없을 수도 있다. 그러나 펄스의 오검출 가능성 또는 피스톤 로드와 스케일처리가 로드 길이에 따라 정확히 이루어졌는지를 검토하는 측면에서는 큰 의의를 지닐 수 있다. 그림 5.7은 선형성을 검증하기 위하여 실험결과를 토대로 센서 전용앰프의 출력인 카운트 수와 스트로크 사이를 함수 관계로 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 본 연구에서 개발한 스트로크 검출 센서의 선형성은 매우 양호한 것으로 판단된다.



(a) In case of increasing the stroke



(b) In case of decreasing the stroke

그림 5.7 선형성 검토를 위한 카운트 수와 스트로크와의 관계  
 Figure 5.7 Relation between count numbers and stroke length  
 for verifying the linearity

## 5.2.2 스트로크 검출의 반복 정밀도 실험

증분방식 센서의 단점은 펄스의 오 검출로 인한 오차의 발생이라고 할 수 있다. 특히 장시간 동작시킬 경우 오 검출 또는 미 검출된 펄스로 인한 오차가 누적되어 정확도에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

그림 5.8은 센서의 반복정확도를 분석하기 위하여 피스톤 로드를 수없이 왕복 운동시켜 초기지점에서부터 피스톤 로드의 위치에 따라 카운트한 펄스 수를 나타내고 있다. 그리고 그림에서 알 수 있듯이 개발된 센서전용앰프는 펄스

의 오 검출 없이 정확히 스트로크를 측정하고 있는 것을 알 수 있다.

이와 같이 본 논문에서 개발한 센서 전용애플은 피스톤 로드 스케일에 대응하는 펄스를 정확히 검출함으로써 증분방식 센서가 가질 수 있는 펄스의 오 검출로 인한 오차누적 요인을 배제할 수 있기 때문에 우수한 반복정확도를 갖고 있음을 알 수 있다.

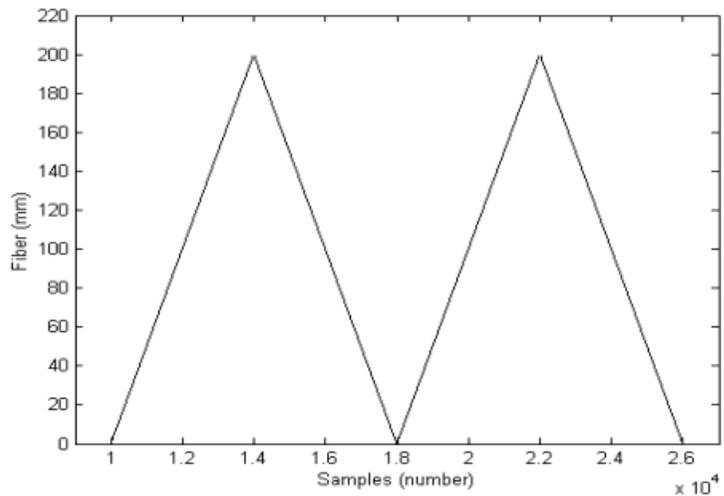


그림 5.8 양방향 스트로크 검출의 반복 정확도 실험결과

Figure 5.8 Output of the stroke sensor for verifying the bidirectional repeatability

## 5.3 두 개의 유압실린더 위치동조 제어를 위한 시뮬레이션

### 5.3.1 2개의 유압실린더 수학적모델

본 논문에서는 편로드 복동 유압실린더를 모델로 삼았으며, 선형화 모델로 가정하여 오차변위  $E$ 와 피스톤의 변위  $x_p$ 사이의 개회로 전달함수를 구하면 식 (5.1)과 같다.<sup>[10]</sup>

$$G(s) = \frac{x_p}{E} = \frac{K}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (5.1)$$

여기서,

$$\alpha_0 = \frac{V_e M_t}{4 \beta_e A_e A_{me}}, \quad \alpha_1 = \frac{K_{ca} M_t}{A_e A_{me}} + \frac{B_p V_e}{4 \beta_e A_e A_{me}}$$

$$\alpha_2 = 1 + \frac{B_p K_{ca}}{A_e A_{me}} + \frac{L V_e}{4 \beta_e A_e A_{me}}, \quad \alpha_3 = \frac{K_{ca} L}{A_e A_{me}}$$

$$K = K_a K_m K_t K_{qa} / A_{me}, \quad A_e = \frac{(1 + \eta^3) A_1}{1 + \eta^2}, \quad \eta = \frac{A_2}{A_1}$$

이다.

그림 5.9는 유압시스템 전체의 블록선도이다.

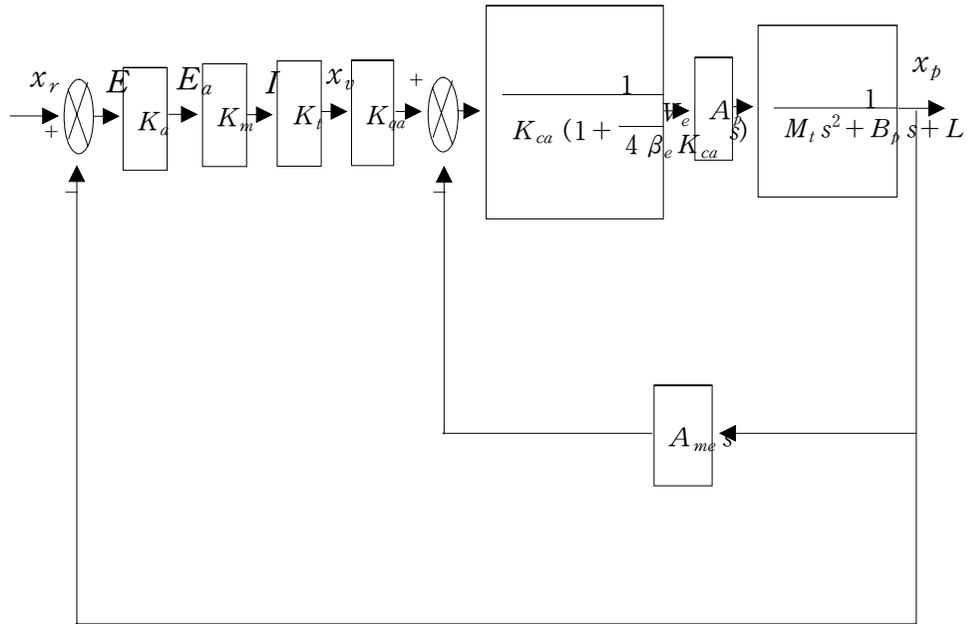


그림 5.9 유압 시스템 전체의 블록선도

Figure 5.9 Block diagram of a hydraulic system

그리고 두 개의 유압실린더에 대해서 위치동조 제어를 수행하였으며 각각의 유압실린더에 대한 파라미터 값들을 표 5.1에 나타내었다.<sup>[11]</sup>

표 5.1 두 실린더의 파라미터

Table 5.1 Parameters of two cylinders

Parameters	Dimension	Value		Description of parameters
		Master	Slave	
$A_{me}$	$\text{cm}^2$	33.07	33.07	Average area
$V_e$	$\text{cm}^3$	410	410	Average volume
$A_1$	$\text{cm}^2$	50.24	50.24	Head side area of piston
$A_2$	$\text{cm}^2$	15.9	15.9	Rod side area of piston
$B_p$	$\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{cm}$	5.46	5.66	Viscous damping coefficient
$L$	$\text{kgf}/\text{cm}$	55	59	Spring constant
$\beta_e$	$\text{kgf}/\text{cm}^2$	12000	12000	Effective bulk modulus of fluid
$M_t$	$\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{cm}$	1500	1200	Total mass of system
$K_{ca}$	$\text{cm}^5/\text{kgf} \cdot \text{s}$	1.252	1.279	Flow-pressure coefficient of servo-valve
$K_a$	$\text{V}/\text{cm}$	10	10	Gain of position transformer
$K_m K_t K_{qa}$	$\text{cm}^3/\text{V} \cdot \text{s}$	91.97	93.42	Gain of servo amp, torque motor and servo valve

### 5.3.2 퍼지 PID제어기의 구조 및 응답특성

각각의 유압실린더를 제어하기 위한 제어기로는 퍼지 PID 제어기를 사용하였으며, 그 구조는 그림 5.10과 같다.<sup>[12]</sup>

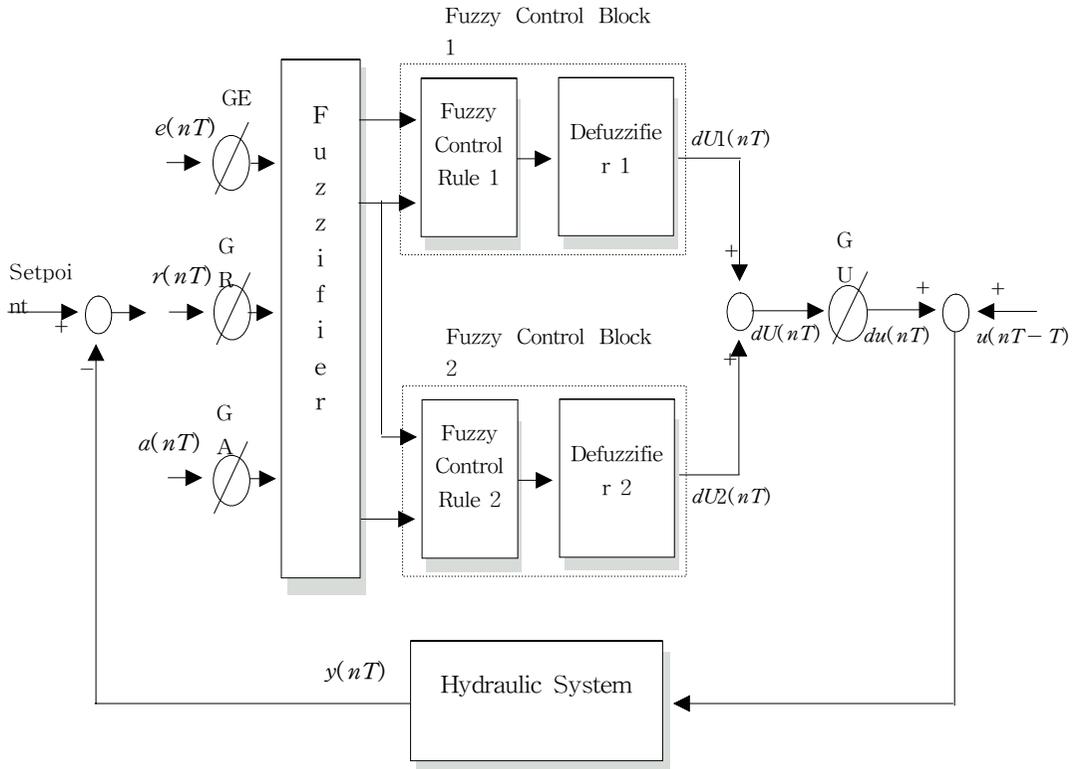
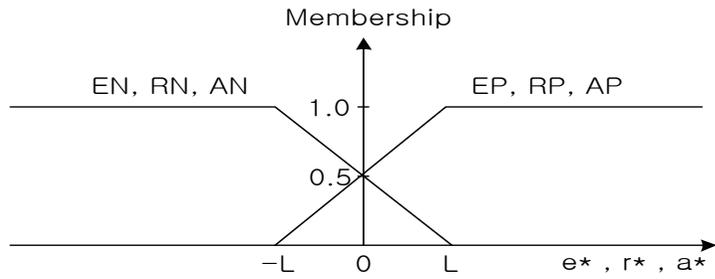


그림 5.10 퍼지 PID 제어시스템의 구조

Figure 5.10 Structure of a fuzzy PID control system



$e^*$  : error about a setpoint

$r^*$  : rate of change of error about a setpoint

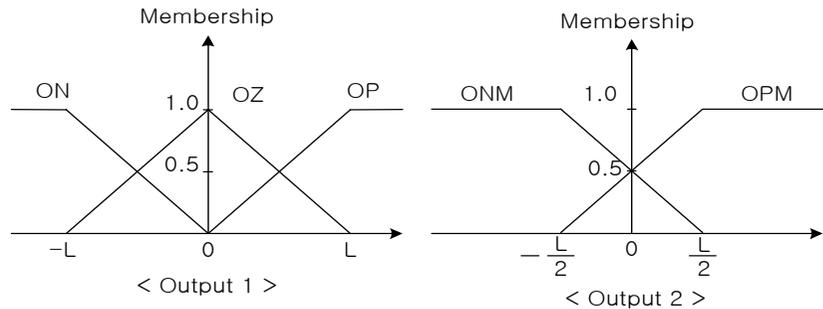
$a^*$  : accelerated rate of change of error

EP : error\_positive, EN : error\_negative, RP : rate\_positive

RN : rate\_negative, AP : acc\_positive, AN : acc\_negative

그림 5.11 퍼지 제어기의 입력 멤버십 함수

Figure 5.11 Input membership functions of the fuzzy controller



OP : output\_positive, OZ : output\_zero, ON : output\_negative

OPM : output\_positive\_middle, ONM : output\_negative\_middle

그림 5.12 퍼지 제어기의 Output1, Output2 멤버십 함수

Figure 5.12 Output1, 2 membership functions of the fuzzy controller

그림 5.11은 퍼지 제어기에서의 입력 파라미터들의 멤버쉽 함수이며, 그림 5.12는 그림 5.10에서의 퍼지 블록1과 블록2의 출력 멤버쉽 함수들이다.

퍼지 제어기의 control rule은 다음과 같다.

퍼지 제어 블록 1에 대해서는

(R1)<sub>1</sub> : if error = EP and rate = RP then output = OP

(R2)<sub>1</sub> : if error = EP and rate = RN then output = OZ

(R3)<sub>1</sub> : if error = EN and rate = RP then output = OZ

(R4)<sub>1</sub> : if error = EN and rate = RN then output = ON

과 같고, 퍼지 제어 블록 2에서는

(R1)<sub>2</sub> : if rate = RP and acc = AP then output = OPM

(R2)<sub>2</sub> : if rate = RP and acc = AN then output = ONM

(R3)<sub>2</sub> : if rate = RN and acc = AP then output = OPM

(R4)<sub>2</sub> : if rate = RN and acc = AN then output = ONM

와 같다.

특성이 서로 다른 두 개의 유압실린더에 대해 각각 기준 입력위치를 50cm로 하였을 경우에 대한 출력응답을 구해 보았다. 그림 5.13은 기준이 되는 주 유압실린더의 출력 응답이며 그림 5.14는 기준 유압실린더에 따라가는 부 유압실린더의 출력 응답이다. 이 때 퍼지 PID 제어기의 게인은 각각  $GE = 0.8$ ,  $GR = 1.2$ ,  $GA = 0.01$  로 설정하였다.

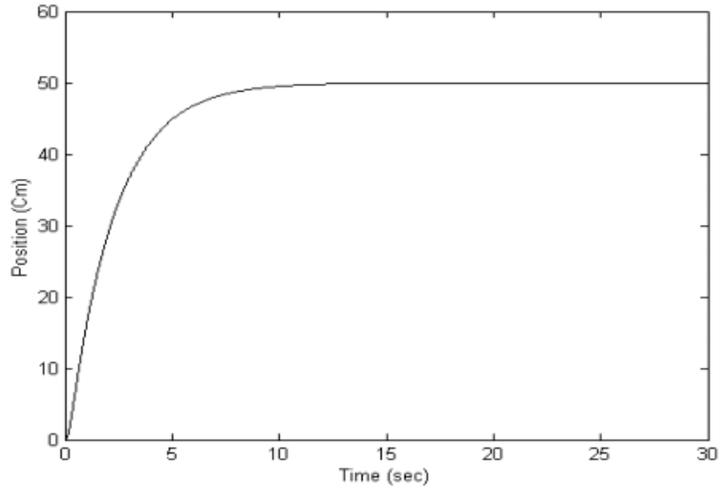


그림 5.13 주 유압실린더의 위치제어 시뮬레이션 결과

Figure 5.13 Position control result for the master hydraulic cylinder

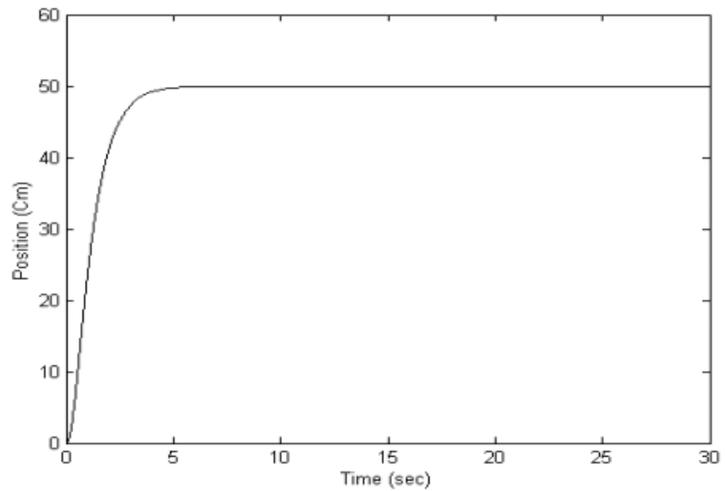


그림 5.14 부 유압실린더의 위치제어 시뮬레이션 결과

Figure 5.14 Position control result for the slave hydraulic cylinder

### 5.3.3 위치동조 제어기의 구현

응답이 느린 쪽의 유압실린더를 주 실린더로 하고, 빠른 쪽의 유압실린더를 부 실린더로 하여 주 실린더의 동작을 추종하도록 위치동조 제어를 할 수 있으며, 기준 실린더와 따라가는 실린더의 위치오차를 입력으로 하는 PID 형태의 위치동조 제어기를 설계하였다. 그림 5.15는 위치동조 제어기의 기본 블록선도를 나타낸 것이다.

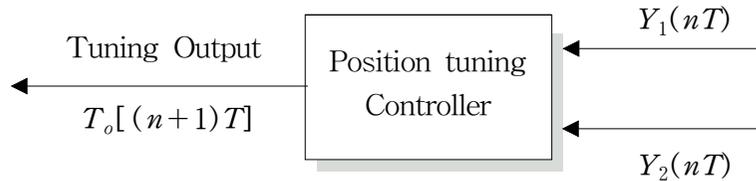


그림 5.15 위치동조 제어기의 기본 흐름

Figure 5.15 Basic flow of a position tuning controller

여기서  $Y_1(nT)$ 와  $Y_2(nT)$ 는 현재시간  $nT$ 에서 각각 주 실린더와 부 실린더의 출력 위치이며,  $T_o[(n+1)T]$ 는  $(n+1)T$  시간에 부 실린더의 개별 제어기에 추가되는 위치동조 제어기의 출력이다.

본 논문에서 위치동조 제어기로 사용한 PID 제어기의 내부구조는 다음과 같다.  $(n+1)T$  시간에 인가될 위치동조 제어기의 출력 값, 즉 PID 제어기의 출력 값을  $T_o[(n+1)T]$ 라고 하면,

$$T_o[(n+1)T] = K_p[e(nT) + \frac{1}{T_i}(\frac{T}{2} \sum_{k=n-1}^n e(kT)) + T_d \frac{e(nT) - e(nT-T)}{T}]$$

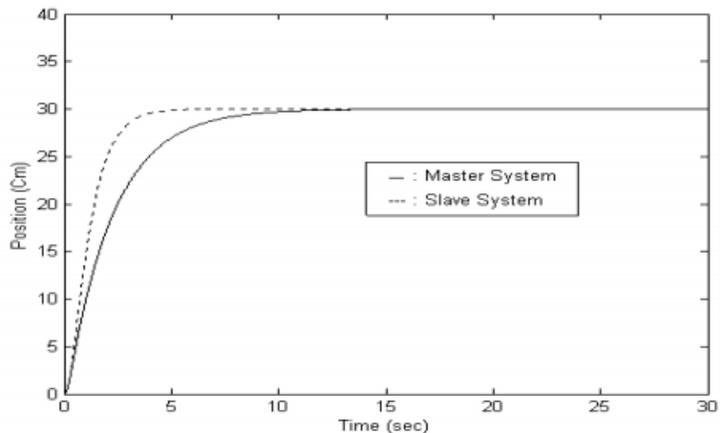
이 되고,  $n=1,2,3,\dots$  이다.

여기서  $e(nT)$ 는  $Y_1(nT) - Y_2(nT)$ 을 나타낸 것으로써  $nT$  시간에 있어 두 유압실린더 사이의 위치오차이다. 그리고 비례계수는  $K_p$ , 적분시간은  $T_i$ , 미분시간은  $T_d$  로 각각 표시하고 그 값은  $K_p = 50$ ,  $T_i = 1.2$ ,  $T_d = 0.5$ 로 설정한다.

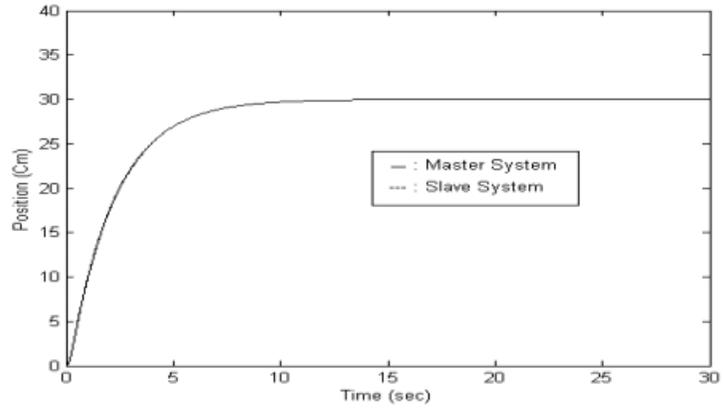
### 5.3.4 시뮬레이션 결과

다음의 시뮬레이션 결과는 여러 조건에 대하여 실시한 것이며, 피스톤이 양방향으로 작동되도록 기준입력을 인가한 모든 경우에 있어서 두 실린더 사이의 위치동조 제어가 잘 수행되었음을 알 수 있다.

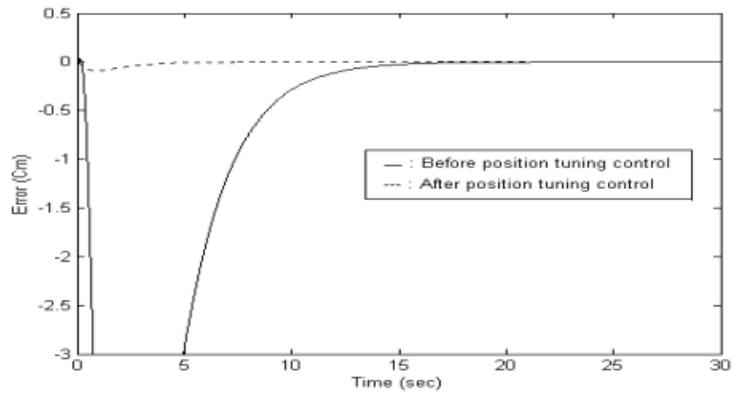
그림 5.16은 기준위치 30cm에 대하여 위치동조 제어를 수행하기 전과 동조제어를 수행한 후 두 유압실린더 사이의 위치오차를 나타낸 그림이다.



(a) Simulation result before executing position tuning control



(b) Simulation result after executing position tuning control

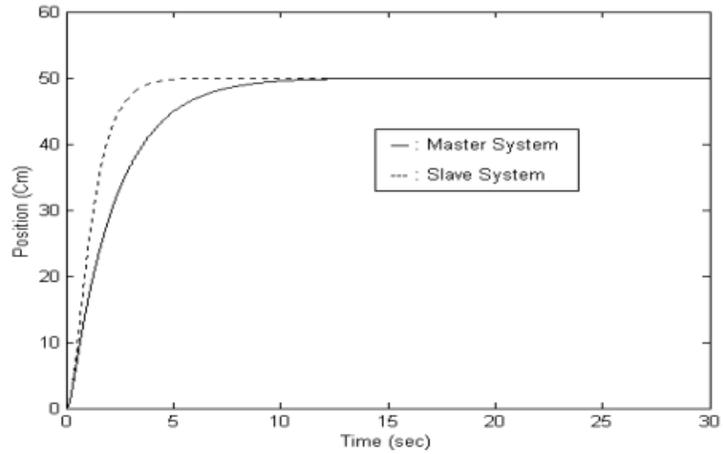


(c) Position error between cylinder 1 and 2 before and after executing position tuning control

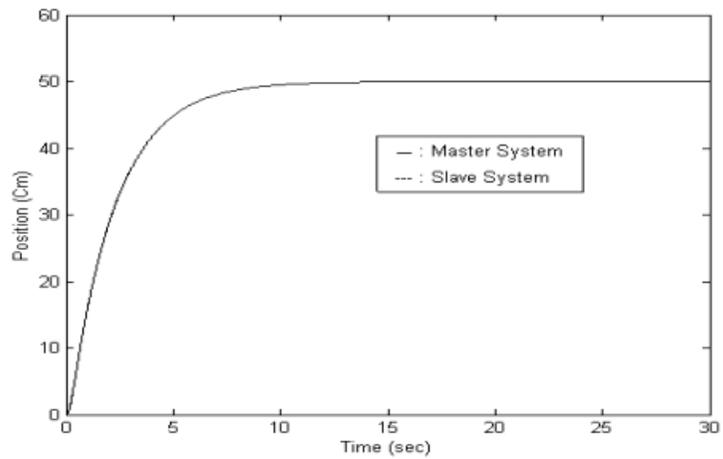
그림 5.16 기준위치 30cm에 대한 위치동조 제어 시뮬레이션 결과

Figure 5.16 Simulation results of position tuning control for reference position 30cm

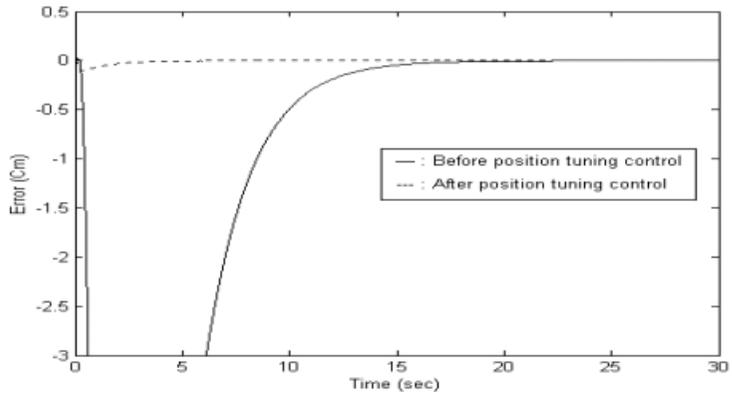
그림 5.17은 기준위치 50cm에 대하여 위치동조 제어를 수행하기 전과 동조제어를 수행한 후 두 유압실린더 사이의 위치오차를 나타낸 그림이다.



(a) Simulation result before executing position tuning control



(b) Simulation result after executing position tuning control

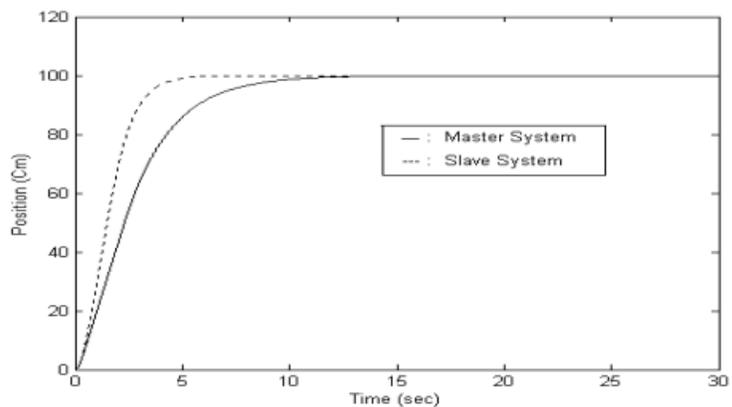


(c) Position error between cylinder 1 and 2 before and after executing position tuning control

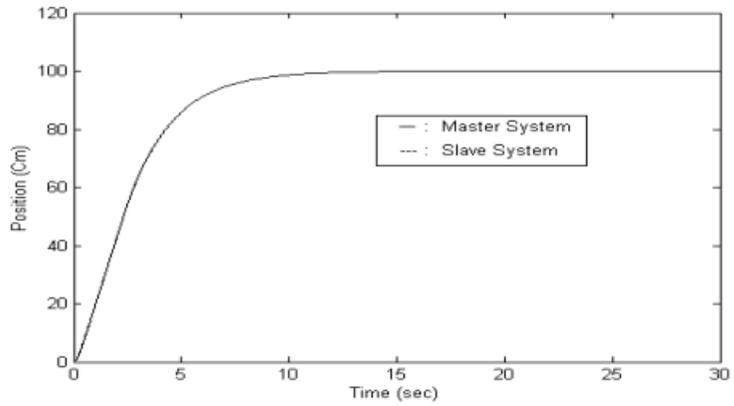
그림 5.17 기준위치 50cm에 대한 위치동조 제어 시뮬레이션 결과

Figure 5.17 Simulation results of position tuning control for reference position 50cm

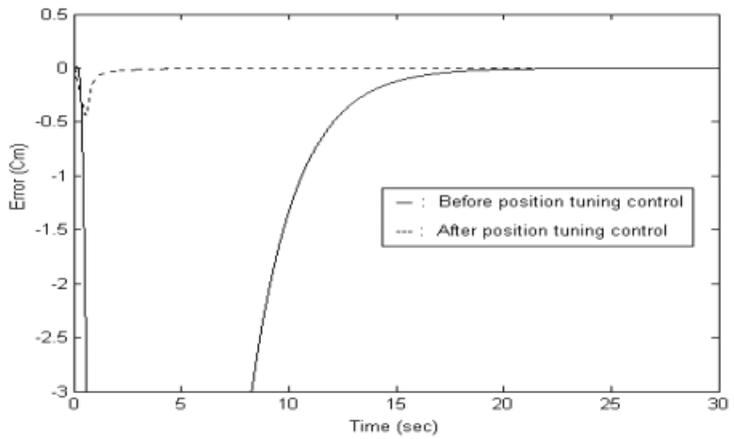
그림 5.18은 기준위치 100cm에 대하여 위치동조 제어를 수행하기 전과 동조제어를 수행한 후 두 유압실린더 사이의 위치오차를 나타낸 그림이다.



(a) Simulation result before executing position tuning control



(b) Simulation result after executing position tuning control

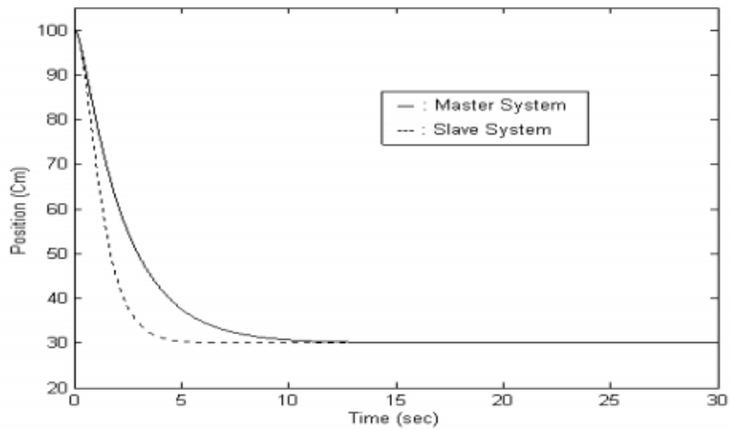


(c) Position error between cylinder 1 and 2 before and after executing position tuning control

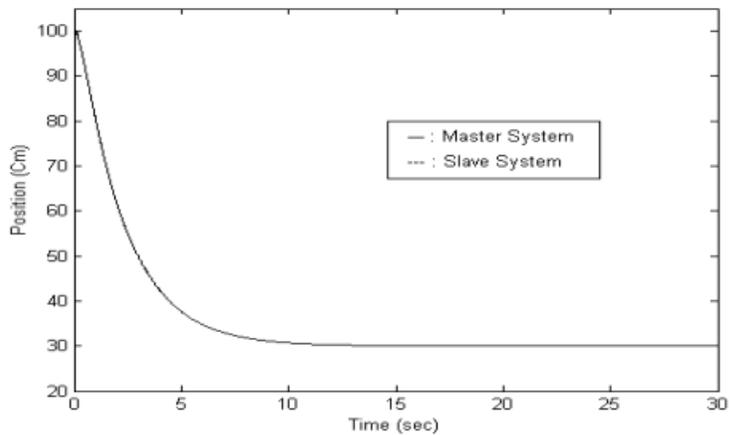
그림 5.18 기준위치 100cm에 대한 위치동조 제어 시뮬레이션 결과

Figure 5.18 Simulation results of position tuning control for reference position 100cm

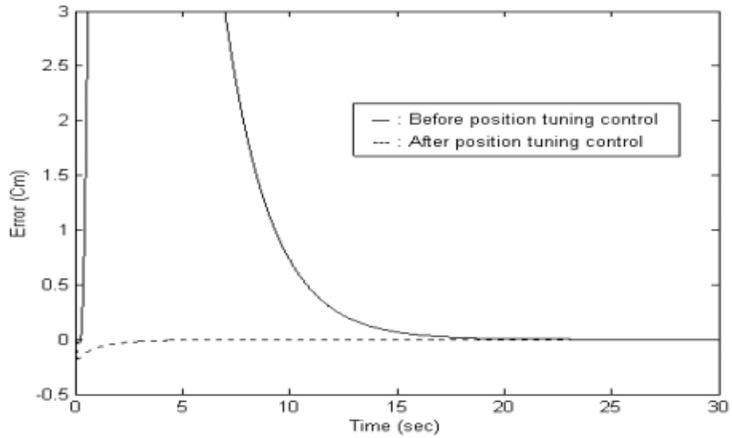
그림 5.19와 그림 5.20은 유압실린더 피스톤 로드 방향이 밖에서 안으로 들어오는 쪽에 대하여 위치동조 제어 시뮬레이션을 수행하였으며, 각각 처음 위치가 100cm일 때 30cm와 0cm로 돌아올 때의 시뮬레이션 결과이다.



(a) Simulation result before executing position tuning control



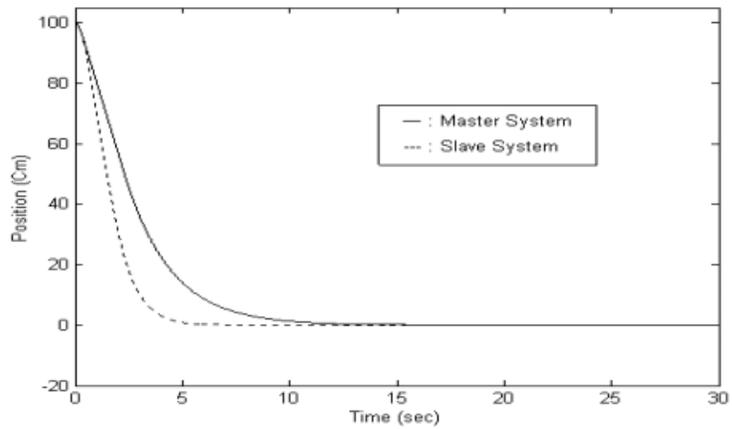
(b) Simulation result after executing position tuning control



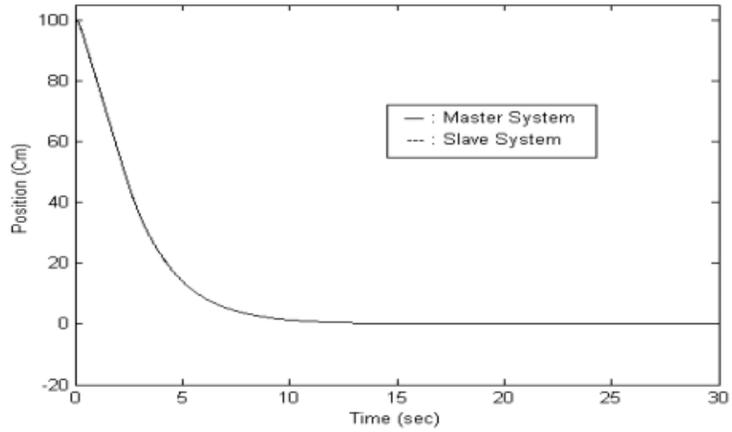
(c) Position error between cylinder 1 and 2 before and after executing position tuning control

그림 5.19 기준위치 30cm에 대한 위치동조 제어 시뮬레이션 결과

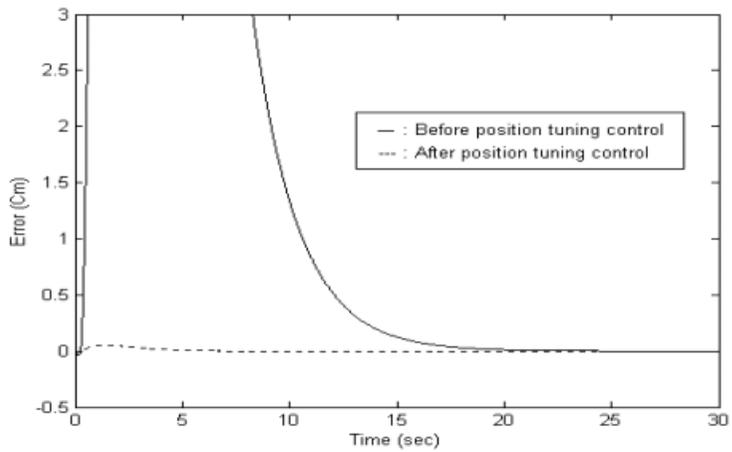
Figure 5.19 Simulation results of position tuning control for reference position 30cm



(a) Simulation result before executing position tuning control



(b) Simulation result after executing position tuning control



(c) Position error between cylinder 1 and 2 before and after executing position tuning control

그림 5.20 기준위치 0cm에 대한 위치동조 제어 시뮬레이션 결과

Figure 5.20 Simulation results of position tuning control for reference position 0cm

## 제 6 장 결 론

본 논문에서는 해수용 센서내장형 유압실린더를 구성하는 방법을 제안하였다. 구체적으로는 해수용 피스톤 로드와 로드 고정방법을 제안하였고, 광센서와 광파이버를 이용한 원격 검출방법, 내장형 센서의 전용앰프를 구성하기 위한 요소들의 구성방법을 제안하였다. 이를 바탕으로 실제의 해수용 센서내장형 유압실린더를 제작하여 다양한 실험을 수행함으로써 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

제안된 방법에서의 검출 수단은 광이므로 유압작동유의 서지압등으로 인해 발생하는 피스톤로드의 갑작스런 동작에도 지연 없이 반응할 수가 있기 때문에 스트로크의 오 검출로 인해 생기는 오차의 누적을 배제시킬 수 있는 것이 장점이며, 광파이버 헤드만을 검출부위에 설치함으로써 동작 중에 발생하는 과도한 충격과 진동 등 열악한 환경에서도 안정적으로 스트로크를 검출할 수 있는 강인성을 지니고 있다.

고 하중, 정밀 제어시스템에서 요구되는 위치동조 제어를 실현하기 위하여 전자적인 요소만으로 구성할 수 있는 위치동조 제어방법을 논하였다. 서로 다른 특성을 지닌 유압실린더의 수학적모델을 토대로 시뮬레이션을 수행함으로써 제안된 위치동조 제어기의 사용 가능성을 입증하였다. 현재 기계적인 부가요소에 의한 동조제어 방법이 통용되고 있지만, 성능과 가격 면에서 우수하리라 예상되는 본 논문의 디지털 위치동조 제어방법이 훨씬 유용하게 사용될 수 있으리라 판단된다.

앞으로의 연구에서는 개발된 내장형 센서앰프와 해수용 특수 유압실린더를 결합하여 여러 개의 유압실린더를 대상으로 실제적인 정량적 실험을 수행함으로써 제안된 위치동조 제어의 타당성과 효용성을 입증해야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 韓 相華, 유압기계, 성안당, 1994.
- [2] 金德潤, 유압기술편람, 大光書林, 1988.
- [3] 梅地 正 外 著, 全在昇 譯, 센서 인터페이싱 no. 4, 光센서徹底活用篇, 機電硏究社, pp. 30-36, 1989.
- [4] 金常鎭, 實用 OP 앰프회로 디지털회로, 성안당, 2000.
- [5] 尾關方隆 外 著, 全在昇 譯, 센서 인터페이싱 no. 3, 메카트로닉스 센서 活用篇 PART-II, 機電硏究社, pp. 16-21, 1989.
- [6] MALVINO, *ELECTRONIC PRINCIPLES*, 大英社, 1996.
- [7] 신정환, C가 미는 로봇트 I, Ohm사, 1997.
- [8] 신정환, C가 미는 로봇트 II, Ohm사, 1998.
- [9] 不二超油壓硏究그룹, 알고 싶은 油壓, 機電硏究社 編輯部, 1981.
- [10] 허 준영, “가변구조 제어를 이용한 유압굴삭기의 자동화에 관한 연구,” 부산대학교 공학박사 논문, 1989.
- [11] 兪 泰在, “고속전자밸브를 사용한 전기유압서보 시스템의 PWM 제어에 관한 연구,” 한국해양대학교 공학박사 논문, 1999.
- [12] J. H. Kim, "A Suggestion of Nonlinear Fuzzy PID Controller to Improve Transient Responses of Nonlinear or Uncertain Systems," 한국퍼지 및 지능시스템학회 논문지, Vol. 5, No. 4, pp. 87-100, 1995.

- [13] 김진근, 박민규, 이민철, “절대위치 검출형 유압 실린더 개발 및 성능 평가,” *98한국정밀공학회지*, pp. 329-333, 1998.
- [14] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, 1997.
- [15] H. E. Merritt, *HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS*, John Willey & Sons, Inc, New York, 1967.
- [16] Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, *Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits*, Prentice Hall, 1998.
- [17] 이 한, “유압실린더 스트로크 센싱을 위한 전용센서 개발에 관한 연구,” *한국해양대학교 제어계측공학과 석사 논문*, 2000.
- [18] 김종화, 배건성, “굴삭기 작업장치의 위치검출 센서개발,” *삼성중공업(주) 연구보고서*, 1992.
- [19] S. Y. Yang, M. C. Lee, M. H. Lee, "Measuring System for Development of Stroke-Sensing Cylinder for Automatic Excavator," *IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 3*, pp. 379-384, June 1998.
- [20] 박선호 著, *FA 센서 응용백과 2*, 永進出版社, pp. 36-53, 1995.
- [21] 大河出版, *油壓 서보 制御의 設計*, 機電研究社, 1989.
- [22] 宋 昌燮, *油空壓工學*, 圖書出版 技術, 1994.
- [23] 차영배 著, *MICRO CONTROLLER 80196*, 다다미디어, 1997.
- [24] 김종화, 류길수, “굴삭기 전용 위치검출 센서의 개발에 관한 연구,” *한국해양대 부설 산업기술연구소 논문집, 제10집*, pp. 61-76, 1992.

- [25] S. Y. Yang, M. C. Lee, M. H. Lee, and S. Arimoto, "Development of digital stroke sensing cylinder and its performance evaluation," *Robotica*, Vol.14, No. 6, pp. 687-694, 1996.
- [26] M. C. Lee, M. H. Lee, Y. J. Choi, S. Y. Yang and K. S. Yoon, "On Development of Stroke Sensing Cylinder for Automatic Excavator," *Proc. of the IEEE ISIE '95*, Vol. 1 of 2, pp. 363-368, 1995.