

## 절대위치 검출형 실린더 개발 및 외란 부하에 대한 성능평가

김성현<sup>#</sup>, 박민규<sup>\*</sup>, 홍영호<sup>\*\*</sup>, 이민철<sup>\*\*\*</sup>, 이만형<sup>\*\*\*</sup>

### Development of Absolute Position Detecting Cylinder and Evaluation under the Load Disturbance

Sung Hyun Kim<sup>#</sup>, Min Gyu Park<sup>\*</sup>, Young Ho Hong<sup>\*\*</sup>, Min Chol Lee<sup>\*\*\*</sup> and Man Hyung Lee<sup>\*\*\*</sup>

#### ABSTRACT

This paper introduces the development of hydraulic cylinder with magnetic sensors detecting absolute and precise position for automation of excavator. The system which is developed can detect absolute position with a little displacement by using algorithm for recognizing datum points, 1/4 divider algorithm and high precision algorithm improved position precision. We also evaluate the developed system under the load disturbance and add band pass filter to the previous's signal process circuit for the protecting magnetic sensors's saturation.

**Key Words** : Absolute position detecting cylinder (절대위치 검출형 실린더), Magnetic sensor(자기 센서), Datum point(기준점), High precision algorithm(고정도 알고리즘), PWM control(PWM 제어)

#### 1. 서론

메카트로닉스에 의한 기술은 점차 고도화되어 종래의 기계장치들 보다 조작이 간편하며 작업성이 우수한 장치로 변모되고 있다. 센서와 마이크로 프로세서 등의 전자기기는 기능·신뢰성의 면에서 상당히 진보되어 작업환경이 열악한 건설기계에서도 자동화가 가능하게 되었다. 유압 굴삭기의 자동화를 위해서는 전기적 신호에 의한 전기·유압식 밸브의 연속적인 제어가 필요하며 제어를 위해서는 각각의 구동관절에 대한 위치검출센서의 역할이 대

단히 중요하다. 이와 같은 배경하에 선행 연구에서 홀센서를 이용하여 상대위치 검출이 가능한 유압 실린더를 개발하였다.<sup>1,2</sup> 하지만 선행 연구에서 개발된 위치검출 실린더는 위치검출시 상대적인 위치만을 인식하므로 작업 시간전에 절대위치의 기준점을 찾아 주어야 하는 문제점과 장시간 사용할 때 누적되는 오차로 인해 신뢰성을 잃을 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 실린더의 기동시 미소 변위만 주어지면 절대위치를 검출할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다. 이를 위한 절대위치 인식 눈금가공 방법 및 절대위치를

<sup>\*\*\*</sup> 2002년 9월 24일 접수  
<sup>#</sup> 교신저자, 부산대학교 지능기계공학과  
Email pmi0901@hitel.net Tel. (051) 510-1456  
<sup>\*</sup> 부산대학원  
<sup>\*\*</sup> (주) LG 전자  
<sup>\*\*\*</sup> 부산대 기계공학부

안정하게 인식하는 알고리즘 도출 및 절대위치 검출 실린더의 위치 정도를 개선시키기 위해 1/4분주기 및 고정도 알고리즘<sup>4</sup>을 도출하고자 한다. 또한 개발된 위치검출 실린더의 충격 진동에 대한 영향 평가를 수행하여 열악한 환경상에서의 사용 가능성을 확인한다.

## 2. 고정도 절대위치 검출 시스템

### 2.1 홀센서를 이용한 변위 측정 원리

홀센서는 전자나 정공 등의 하전 캐리어(carrier)가 자계중에 놓여진 반도체 내를 움직일 때 운동방향에 수직인 로렌츠(Lorentz)력이 작용하는 것을 이용한 것이다.<sup>1</sup> 사용된 홀센서의 원리는 Fig. 1과 같다. 피스톤 로드에는 이중(異種)의 투자율을 가진 자기눈금을 형성시켜 홀센서로 투자율의 변화를 측정함으로써 피스톤 로드의 변위를 계측할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용된 센서 장착구조는 자기눈금 가공을 한 피스톤 로드와 센서와의 간격이 수백  $\mu\text{m}$  이내로 충격·진동에 관계없이 일정하게 유지되도록 설계·제작되어져 있다.

절대위치 검출을 위한 시스템은 Fig. 2와 같이 유압 실린더의 구동을 위한 유압장치, 자기센서가 장착된 센서장착구조, 자기눈금이 가공된 실린더, 자기센서로부터 출력파형을 증폭 및 필터링을 하는 신호처리회로부 및 위치 검출 및 제어를 위한 호스트 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 홀센서로부터 측정된 홀전압 파형을 신호처리를 하여 각종 노이즈를 제거한 후, A/D변환기를 통해 컴퓨터에서 읽고 이 신호를 펄스변환 알고리즘에 의해 펄스로 바꾼 다음 카운트 회로 또는 계수 알고리즘을 이용해서 위치를 검출한다. 절대위치를 인식하기 위한 방법으로 피스톤 로드의 자기스케일을 변형하는 방법을 사용한다. Fig. 3에서와 같이 기준점 사이의 일정한 간격의 요철 눈금이  $n$  ( $n=3, 4, 5, \dots$ )주기마다 철(凸)부분의 눈금을 제거하는 방식으로 L2구

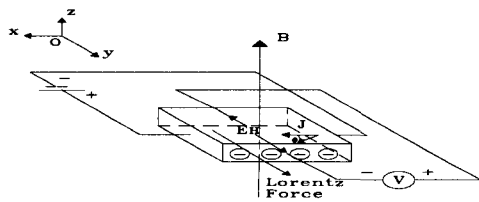


Fig. 1 Principle of Hall sensor

간을 자기눈금 가공한다. 그후 L1구간을 크롬도금하고 평삭가공을 한다. 단순히 요철가공만 된 경우에는 투자율에 의한 홀전압 차이가 거의 없으므로 요철부에 크롬도금을 하고 평삭가공을 해야만 뚜렷한 홀전압의 차이를 측정 할 수 있다.

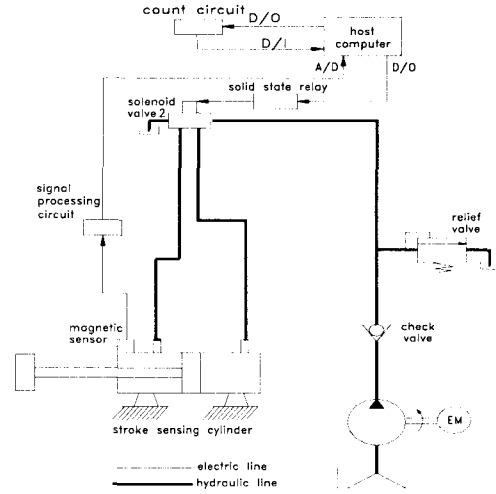


Fig. 2 Operating system of hydraulic cylinder

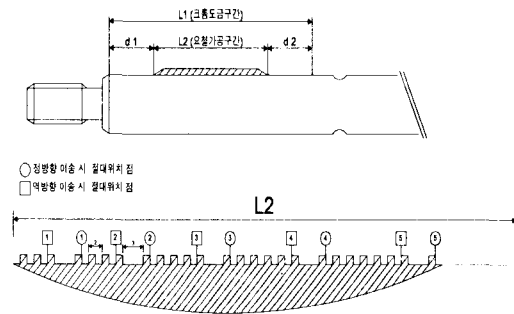


Fig. 3 Section of piston rod and datum points for detecting absolute position

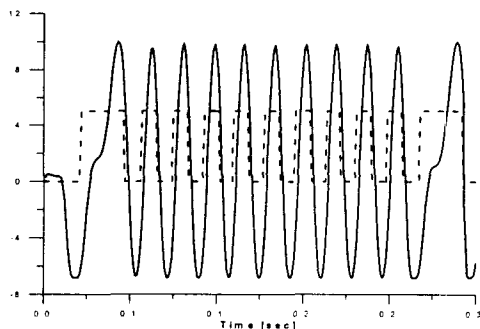
### 2.2 고정도 절대 위치검출 원리

Fig. 4는 피스톤 로드가 정방향으로 이송할 경우의 절대위치 검출 원리를 나타내며, Fig. 4(a)는 피스톤 로드가 정방향으로 이송할 때 홀센서의 출력파형과 이 출력파형을 디지털 신호처리에 의해 구형파로 변환시킨 신호를 나타낸다. 요철을 지난 후 3mm가공한 부분에서의 홀센서 출력파형은 자장의 영향으로 변곡점을 가지며 상승

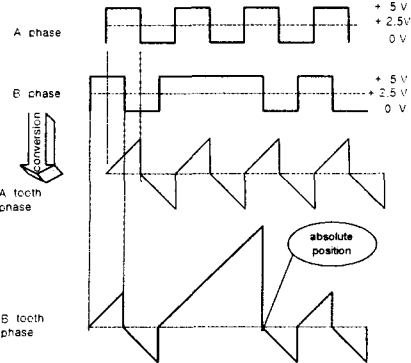
함을 알 수 있고 이 부분에서 구형파는 5V로 유지하고 있다. Fig. 4 (b)는 (a)의 구형파 신호를 톱니파 신호로 변환해서 절대위치를 인식하는 방법에 대한 그림이다. 톱니파 변환 원리는 구형파 크기의 중심인 2.5V를 기준으로 5V까지는 톱니파를 점진적으로 증가시키고, 2.5V에서 0V까지는 점진적으로 감소시킴으로써 구형파를 톱니파로 변환할 수 있다. 톱니파 변환 시 요철(凸)부분의 눈금을 하나 제거한 기준점 부분에서의 톱니파의 크기가 요철 가공한 부분의 피크치보다 약 3배정도 큼을 알 수 있다.

이 점을 첫 번째 기준점으로 인식한 후 피스톤 로드가 어느 위치에 있어도 두 번째 기준점을 통과하는 순간 기준점 사이의 요철 개수를 계수화함으로써 절대위치를 인식할 수 있다. 역방향으로 이송할 경우에도 기본적인 검출 원리는 정방향과 같다. 거리를 계수하기 위해서는 먼저 절대위치를 인식하기 위해 가공한 기준점 부분의 톱니파를 보상해 주어야 한다. Fig. 5는 톱니파 보상원리를 나타낸다. 톱니파의 크기가 요철 가공한 부분의 톱니파의 피크치보다 임의의 배수의 구간에서는 0에서 점진적으로 감소시키고, 그 이상의 구간에서 톱니파의 최대값까지는 다시 0에서 점진적으로 증가시킴으로써 톱니파를 보상해 주고, 이 보상된 톱니파를 다시 구형파로 변환하여 1/4분 주기를 이용해서 계수한다. Fig. 6은 본 연구에서 사용된 1/4분 주기의 개괄적인 블록도이다. 기존의 1/4분 주기 카운트 회로'를 응용하여 알고리즘적으로 처리함으로써 노이즈에 강인하고 하드웨어 구성이 간단해 지도록 하였다.

먼저 보상된 A, B 상 구형파를 입력으로 하고



(a) Hall sensor signal and square wave signal



(b) Transform square wave signal into tooth wave signal  
Fig. 4 Principle for detecting absolute position in forward direction

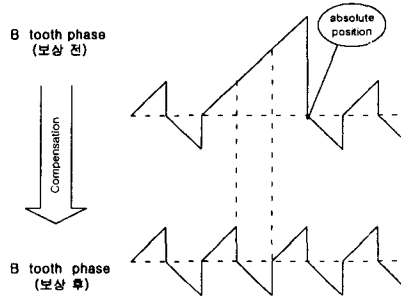


Fig. 5 Compensation tooth wave

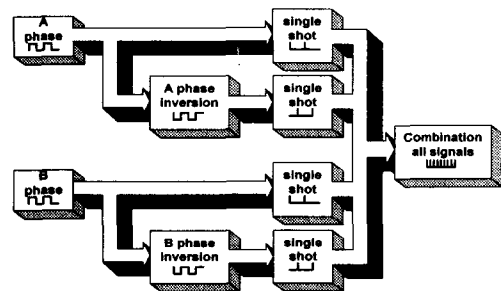


Fig. 6 Schematic diagram for 1/4 divider

A, B 상을 반전하여  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  신호를 만들며, 이 신호들을 샘플링 타임을 이용하여 싱글쇼트(single shot)시켜서  $\Delta A$ ,  $\Delta B$ 와  $\Delta \bar{A}$ ,  $\Delta \bar{B}$ 를 만들고 위의 신호를 조합해서 1/4분 주기를 설계하였다.

이와 같이 피스톤 로드의 가공주기가 1mm이므로 1/4분 주기를 이용해서 1/4mm정도(精度)를 가질 수 있다. 그리고 1/10mm이하의 정도를 가지기 위해

서 Fig. 5에서의 보정된 톱니파를 이용하여 고정도 계수가 가능하도록 하는 알고리즘을 제안하였다. 고정도 계수 원리는 현재의 톱니파의 절대값을 가장 최근에 측정된 톱니파 피크치로 나누어 계산하며, 초기 기동 시에는 이전에 실험을 통해 얻었던 피크치의 추측값으로 나눈다. 이 보정된 톱니파는 샘플링 시간을 기준으로 누적되었기 때문에 샘플링 시간을 좀 더 빠르게 하면 구형파 한 주기에 많은 단계가 이루어져 더 높은 정도를 얻을 수 있게 된다. 절대위치 검출 실린더를 이용한 위치제어 및 디지털 신호처리 알고리즘의 흐름도는 Fig. 7과 같다. 먼저 실린더의 최초 기동 시 피스톤 로드 방향을 이송한다. 피스톤 로드 이송하면서 홀센서의 신호가 검출되며 컴퓨터에서 디지털 구형파 변환 알고리즘을 통해 구형파로 변환되고, 이 변환된 구형파를 다시 톱니파로 변환한다. 기준점에선 톱니파의 피크치가 전 단계의 피크치보다 약 3배 가량 큰 것을 이용하여 기준점을 찾을 수 있고, 기

준점을 두 번 찾게 되면 그 사이의 피크치를 계수화 함으로써 현재의 절대위치를 알 수 있다. 사용자가 목표했던 절대위치와 현재의 절대위치를 이용해서 새로운 거리 입력값을 구하고 위치제어를 한다.

위치제어를 함으로써 현재의 절대위치점에서 목표했던 절대위치로 피스톤 로드가 이송하게 되고 기준점을 통과할 때마다 기준점의 절대위치값과 계산된 위치값을 비교하면서 예상치 못한 외란이나 노이즈로 생긴 오차를 보정한다.

### 2.3 위치 알고리즘을 이용한 실험

1/4분 주기와 고정도 알고리즘을 동시에 적용한 경우와 1/4분 주기 카운트 회로만을 적용한 경우의 정도를 비교한 결과는 Fig. 8과 같다. 1/4분 주기 카운트회로만을 사용한 경우 정도가 0.5mm이지만 1/4분 주기와 고정도 알고리즘을 사용한 경우에는 샘플링 시간이 1ms일 때 0.2mm이하로 정도가 높아짐을 알 수 있다. 만약 샘플링 시간을 아주 짧게 하면 분해능을 더욱 더 높일 수 있다.

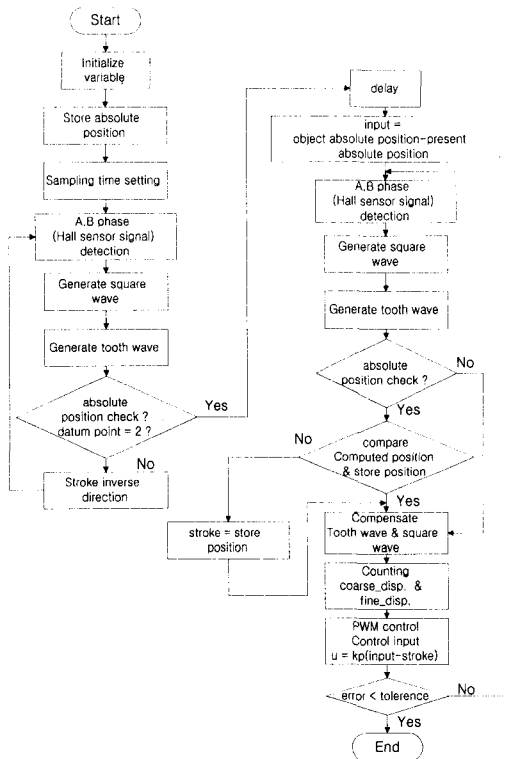


Fig. 7 Flow chart for position control of the cylinder detecting absolute position

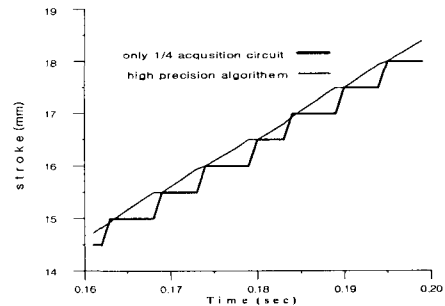


Fig. 8 Comparison of sensing accuracy

본 연구에서 제안한 방법으로 가공된 자기눈금을 가진 피스톤 로드에서 개발한 알고리즘을 적용시켜 절대위치 검출 및 절대위치 제어실험을 수행하였다. 이 때 목표로 하는 절대위치값으로 30.3mm를 주었다. 먼저 피스톤 로드상의 기준점들의 절대위치값을 Table 1과 같이 실제 거리를 계산하여 격납했다. Fig. 9는 초기 기동 시부터 기준점을 두 개 인식할 때까지의 홀센서의 출력신호와 이 출력신호를 디지털 신호처리에 의해 구형파로 변환한 결과이다. 그리고 Fig. 10은 기준점을 인식하기 위해 Fig. 9의 구형파를 다시 톱니파로 변환하고 톱니파의 피크치를 비교함으로써 기준점을 인식하는 과정을 보여주고 있으며 기준점을 두 개 검출했을 때 기준점

사이의 구형과 개수를 계수화 함으로써 현재의 절대위치 값을 알 수 있다. 실험에선 역방향으로 이송했으며 기준점 사이의 구형과 개수가 9개 이므로 Table 1에서 현재의 절대위치 값이 94mm임을 확인할 수 있다. 그리고 이 톱니파 보정 알고리즘을 통해 기준점에서의 톱니파를 보정하고 다시 구형파로 변환해서 1/4분 주기와 고정도 알고리즘을 적용하여 0.2mm 정도(精度)의 위치를 계수화 한다. Fig. 11은 절대위치 30.3mm의 제어 결과이며, 초기 기동시 역방향으로 이송하면서 2개의 기준점을 인식해서 절대위치 점을 찾은 후 절대위치 30.3mm 위치 제어를 하기 위해 역방향으로 다시 64.3mm 움직여 정확한 위치제어를 수행하였다.

Table 1 Absolute position storage values for datum points

기준점 사이의 구형파 개수	정방향에 대한 절대위치 값	역방향에 대한 절대위치 값
...	...	...
6	61	40
7	79	56
8	99	74
9	121	94
...	...	...

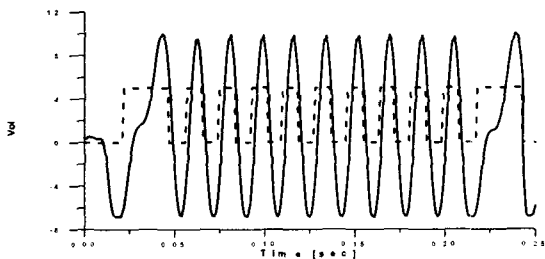


Fig. 9 Hall sensor signal and square wave signal

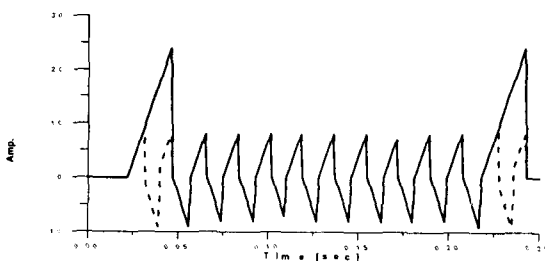


Fig. 10 Tooth wave signal and compensated tooth wave signal

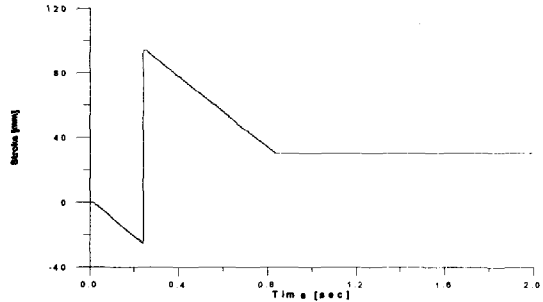


Fig. 11 Control result of absolute position 30.3mm

### 3. 부하 외란 시험

본 장에서는 위치검출 실린더의 성능평가를 위한 부하외란 유압시스템을 구성하였으며, 개발된 위치검출 실린더의 외부 충격·진동 등에 대한 영향 평가 실시 및 발생된 문제점에 대해 대책방안을 강구하여 그 영향을 최소화 하고자 한다.

#### 3.1 부하 외란 실험

Fig. 12의 실험장치 구성은 개발된 위치 검출 실린더용 구동 제어 시스템과 횡방향 부하 외란 부가용 구동 시스템의 두 부분으로 나누어진다. 외란 인가용 유압 실린더 구동을 위해 비례전자 감압밸브를 사용하였고, 또한 위치검출 실린더 측에 부하 외란 인가시 큰 공급압력에서도 안정된 실험조건을 유지하기 위해 테스트 벤치(test bench)를 설계·제작하였다. 이 때 Fig. 13은 위치검출용 유압실린더에 정지시와 위치제어시에 부가한 정현파 형태의 외란이다. 이 경우 양의 값은 횡방향 부하 외란 실린더의 미는 방향, 음의 값은 당기는 방향으로서, 외란의 최대크기 압력은  $25 \text{ Kg/cm}^2$  크기로 정현파 형태의 외란을 비례전자 감압밸브에 가했다. Fig. 14는

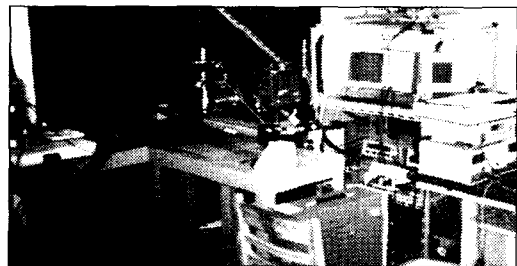


Fig. 12 Picture of experiment

위치검출 실린더 정지시 정현파 외란에 의해 출력된 홀센서의 전압을 살펴보면 압력부하의 최대 피크(peak)시 약 0.2초씩의 시간지연이 발생하면서 포화전압이 발생하였다. 시간지연의 원인은 지령전압에 대한 유압의 이송시간 및 가압되는데 필요한 시간에 의한 것으로 판단되며, 포화전압으로 인해 위치검출이 어려움을 간접적으로 알 수 있다. Fig. 15는 동일 조건에서 20mm 위치제어 수행시 홀센서 출력전압과 위치제어 결과이다. 예측한대로 포화전압이 발생되어 1/4분 주기 회로를 통해 계수화를

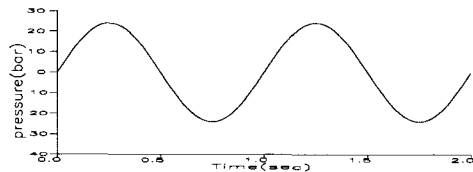


Fig. 13 The sine signal for vertical load disturbance

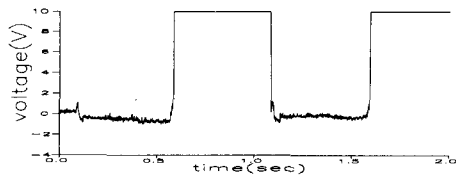
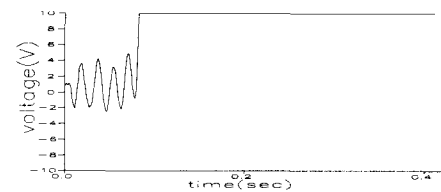
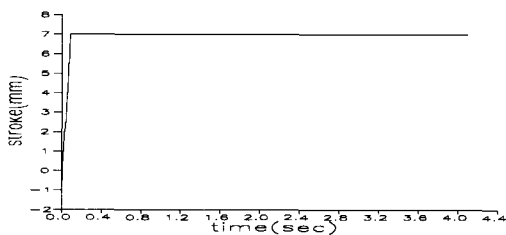


Fig. 14 Output voltage signal from Hall sensor [at stop]



(a) Output signal from Hall sensor



(b) Result of position control of 20mm

Fig. 15 Position control under the load disturbance

하는 도중 펄스신호가 제대로 계수화 되지 못하여 위치제어가 정상적으로 수행되지 못하였다. 목표위치까지 컴퓨터는 도달하지 못한 것으로 인식되어 유압류를 계속해서 공급함으로 실린더의 피스톤 실제 위치는 훨씬 멀리가 있음이 확인되었다.

### 3.2 Band-Pass Filter 설치 후 재시험

횡방향 외란 영향에 의한 자기눈금과 센서 사이의 거리 변화로 인한 홀전압 포화 영향을 막기 위해 BPF(band pass filter)를 설치하였다.

포화되는 원인을 분석하기 위해 홀센서의 신호처리 과정을 대략적으로 살펴보면, 노치필터는 전원선에 존재할 수 있는 노이즈를 제거하고, 전류방식으로 구동되는 자기센서(THS103A)에 일정한 전류가 공급되도록 정전류회로를 구성하였다. 홀전압 발생시 차동증폭기는 동상의 노이즈를 제거시키면서 아울러 약 50배 정도 증폭을 시키고, 이어서 1차 오프셋 조정 회로를 거쳐 비반전증폭회로에서 약 300배 증폭한다. 미소 전위조정을 위해 2차 오프셋 조정회로를 통과한 후 실린더 최대 속도 이상의 불필요한 신호 및 노이즈를 제거하기 위해 LPF(low pass filter)를 통과한다. 이 때 차단(cut off)주파수는 약 1000Hz정도로 하여 원하는 신호를 가능하면 노이즈 없이 검출하도록 하였다. 이러한 신호처리 과정에 의해 약 만오천배 정도 증폭되어 출력되는 전압은 초기 측정된 홀전압이 조금만 변해도 아주 크게 변화가 되어 쉽게 포화전압이 되고 만다.

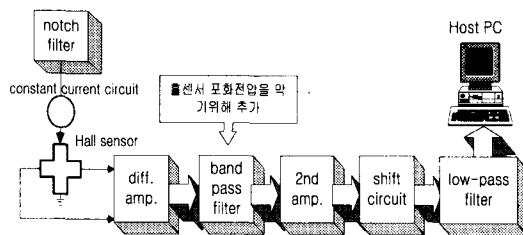


Fig. 16 Signal passing circuit

본 연구에서는 횡방향 외란에 의해 발생하는 저주파역의 바이어스 전압이 홀전압에 더해져 증폭 후에 포화전압이 되는 문제를 신호처리 과정에서 근원적으로 해결하기 위해 Fig. 16과 같이 차동증폭기 후단에 1차 오프셋 대신 BPF를 설치하였다. 설계한 BPF 사양은 주파수 통과역 범위  $\omega_0$ 를 232.5

rad/sec로 두고 감쇠량 3dB이내에서 리플이 없는 것으로 가정하였으며 0 rad/sec에서 감쇠량은 적어도 20dB이라고 가정하였다. 식 (1)은 버터워스(Butterworth) 특성에서 주어진 설계사양을 만족하면서 아날로그 회로 설계 타입을 고려하여 적절한 LPF의 차수(N=2)를 선정된 전달함수이다.

$$G(s) = \frac{-0.625 \cdot S}{S^2 + 0.155S + 0.0545} \quad (1)$$

전달함수를 아날로그 회로로 실현하기 위해 무한대이득 증폭기법을 사용하여 구성하였다. 회로설계 순서는 주어진 목적에 따라 버터워스의 특성을 이용하여 전달함수를 다음 식과 같이 결정한다.

$$G(s) = G_o \cdot S / (S^2 + a \cdot S + b) \quad (2)$$

$$\text{단, } G_o = \frac{R_3 \cdot C_2}{R_1(C_1 + C_2)}, \quad a = \frac{1}{R_3} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right),$$

$$b = \frac{1}{C_1 C_2 R_3} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

식 (2)를 이용하면  $G_o$ ,  $a$ ,  $b$ 를 알 수 있다. 이 때  $C_1, C_2 = C$ 로 하여  $C$ 를 임의로 고르면, 나머지 저항 값이 식 (3)과 같이 구해진다.

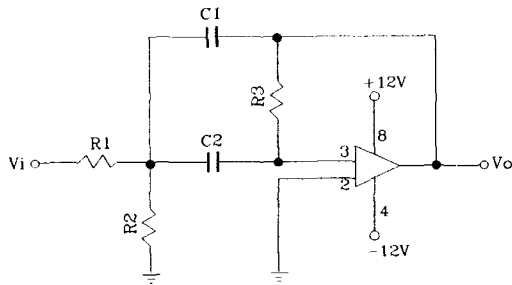


Fig. 17 BPF analog circuit

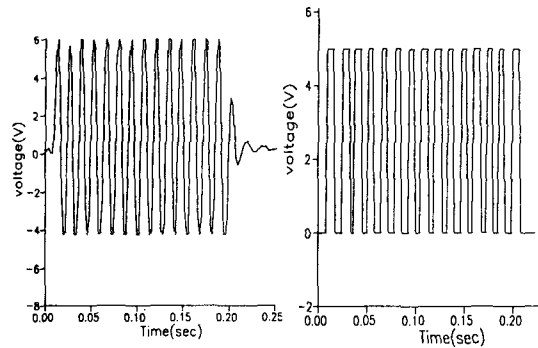
$$R_1 = R_3 / (a \cdot C) \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{b \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C^2 - 1} = \frac{1}{C \left( \frac{2b}{a} - dG_d \right)}$$

$$R_3 = 2 / (a \cdot C)$$

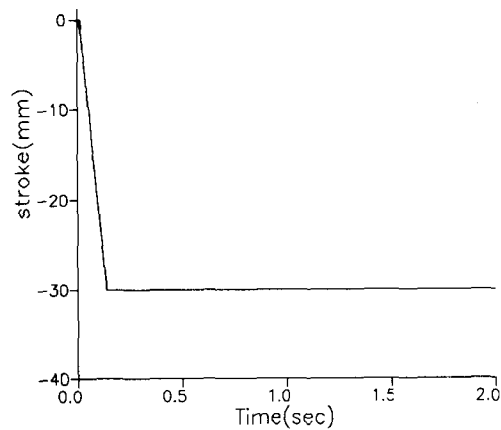
$C$ 를  $1\mu F$ 로 선택하여 식 (3)에서  $R_1 = 1.6k\Omega$ ,  $R_2 = 12.9k\Omega$ ,  $R_3 = 12.9k\Omega$ 인 값을 구하였다. 횡방향 외란에 의한 홀전압의 변화는 직류성분에 가까운 비교적 아주 낮은 신호가 주종이므로 설계된 대역필터의 특성에 의해 0Hz에 가까운 직류성분은 제거되어 요구하는 신호성분인 교류성분만 남게 된다. 따라서 홀전압이 종방향 외란에 의해 전체적으로 직류성분이 바이어스 되어 포화상태가 되는 현상을 제거할 수 있으므로 자기눈금에 따른 안정적인 홀전압을 얻을 수 있게 된다.

횡방향 영향을 막기 위한 BPF를 설계한 후, 이를 실 시스템에 적용하여 부하 외란에 의한 영향 평가를 재 수행하였다. Fig. 13과 같은 정현파 신호의 횡방향 외란을 부가하면서 역방향으로 30mm 위



(a) Output signal from Hall sensor

(b) Pulse conversion



(c) Result of position control of -30mm

Fig. 18 Position control test under vertical load disturbance

치제어를 하여 Fig. 18 (a)와 같은 출력 전압을 얻었다. 후단부인 0.2초 부근에서 신호의 진폭이 줄어들음을 알 수 있는데, 이것은 PWM제어에 의해 속도가 저하되면서 필터의 영향을 받아 나타난 현상으로 이 부분의 펄스변환도 역시 다른 부분과 마찬가지로 양호하게 나타남을 Fig. 18 (b)에서 확인할 수 있었다. Fig. 18 (c)의 위치제어 결과도 1/4분 주기를 거쳐 역방향으로 30mm의 위치제어를 정확히 수행하여, BPF를 설치함으로 주어진 하중 외란에 대해 영향이 거의 없음을 실험을 통해 입증되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서 개발한 절대위치 검출형 실린더는 피스톤 로드에서 여러 개의 기준점을 설정함으로써 미소한 변위로도 절대위치 검출을 가능하게 하였으며 기준점을 인식할 때마다 거리보정을 함으로써 오차의 누적이 없도록 하였다. 또한 제안한 피스톤 로드는 비교적 간단한 가공방법으로 피스톤 로드를 가공할 수 있어 제작이 용이하다. 기준점을 설정하기 위해 가공 폭을 조절함으로써 기준점에서 정도가 떨어지는 문제점이 있었으나 알고리즘적으로 보정하였고, 톱니파를 이용한 고정도 알고리즘을 개발함으로써 기존의 0.5mm 정도(精度)를 0.2mm이하의 정도까지 낼 수 있도록 하여 미세한 작업도 가능하게 하였다. 또한 기존의 1/4분 주기 카운트 회로를 사용함으로써 유발될 수 있는 노이즈 등의 문제를 해결하기 위해 디지털 신호처리를 이용한 1/4분 주기를 설계함으로써 아날로그 신호에서 첨가될 수 있는 노이즈의 영향을 제거하므로 신뢰도를 개선시켰다.

열악한 환경조건에 대한 신뢰도 평가를 위해 위치제어용 실린더와 부하 외란용 구동 시스템을 커플링 하여 외란을 인가하고 위치제어용 실린더의 부하 외란에 대한 성능 평가를 하였다. 성능평가의 실험을 통해 야기되었던 출력전압의 영향을 없애기 위하여 본 연구에서는 기존의 신호처리 과정에서 BPF를 추가 설치함으로, 개발된 위치제어용 실린더가 외부의 진동에 대해서도 안정성과 신뢰성을 갖추게 되었다.

#### 참고문헌

1. Lee, M. C., Lee, M. H., Choi, Y. J., Yang, S. Y. and Yoon, K. S., "On Development of Stroke Sensing Cylinder for Automatic Excavator," Proc. of IEEE ISIE 95, Vol. 1 of 2, pp. 363-368, 1995.
2. 홍영호, 이민철, "신호압축법을 이용한 위치제어용 유압실린더의 성능평가," 95한국자동제어학술회의논문집, pp. 693-696, 1995.
3. 武藤高義, 山田宏尙, 末松良一, "PWM Digital Control of Hydraulic Actuator Utilizing 2-way Solenoid Valves," 油壓 と 空氣壓, 第19 卷 第7 號, pp. 52-59, 1987.
4. 김성현외 9명, "절대위치 검출형 실린더에 관한 연구," 삼성중공업 건기연구소 1차년도 중간보고서, 1997.