

# 자기센서를 이용한 위치검출 실린더의 온도변화에 따른 성능평가

## Evaluation of Sensing Performance of Stroke Sensing Cylinder under Various Temperature Conditions

김성현\*(부산대원),이민철\*\*(부산대 기계공학과),  
이만형\*\*\*(부산대 제어기계공학과),양순용\*\*\*\*(삼성중공업)

### ABSTRACT

We developed a part of hydraulic stroke sensing cylinder for the purpose of position control by using magnetic sensor and evaluated variously its performance. In this paper, for the evaluating of the developed cylinder under various temperature change, thermal control systems are designed and controlled. It is composed of an heater case, temperature sensor, and interface circuits which included SCR(silicon controlled rectifier) for the control of the voltage's phase. To obtain various temperature conditions, the thermal systems are controlled by using Ziegler-Nichols PID tuning method. The thermal control systems are used to experiment to evaluate whether the developed cylinder can obtain a stable output signal for detecting a stroke of the cylinder under the controlled temperature condition.

**Key Words** : Stroke Sensing Cylinder, Temperature Control, PWM Control, PID Control, Ziegler-Nichols Tuning.

### 1. 서 론

건설기기는 자동화의 진전도가 다른 기기에 비하여 낮은 실정이다. 그 원인으로는 건설기기의 작업 조건이 열악하고 보수, 정비가 주로 건설 현장인 야외에서 이루어지는 경우가 많으며 작업 중의 소음, 진동 등이 발생하기 때문이다. 이러한 건설기기는 속련을 요하는 기능 노동자가 부족하고, 다른산업과 비교하여 위험한 작업이 많으므로 노동재해 발생률이 높기 때문에 자동화가 절실히 요망된다고 할 수 있다. 이러한 건설기기중의 하나인 굴삭기의 유압장치의 자동화를 위해서는 무엇보다도 전기식 신호에 의해 연속적으로 제어될 수 있는 전기·유압식 밸브의 제어가 중요하며, 이의 제어를 위해서는 각각의 구동관절에 대한 위치검출 센서가 중요한 역할을 하게 된다. 위치검출을 할 수 있는 센서로서는 대표적으로 포텐쇼미터, 차동트랜스듀스, 스트레인 게이지와 스프링 기구를 조합한 방식 등이 있으나, 대부분 가혹한 작업 환경 하에서는 신뢰성과 내구성을 보장할 수 없다. 이에 비해 직접 위치검출이 가능한 실린더를 이용하면 가혹한 작업환경하에서도 신뢰성과 내구성을 보장할 수 있다. 이와 같은 배경에서 선행 연구자들은 자기센서를 이용하여 직접 위치 검출이 가능한 실린더를 개발하고자 하였다. 이를 위해서 먼저 로보트 매니퓰레이터와 유사한 2축 계층장치를 구성하여 자기눈금이 가공된 실린더의 자기눈금 가공 정도를

평가하였으며, 자기센서를 이용하여 피스톤 로드의 이동에 따른 계측신호를 위치 데이터로 환용할 수 있는 펄스신호로 변환해 위치를 검출 가능하게 함으로써 스트로크 센싱 실린더의 개발 가능성을 밝혔다<sup>(1)</sup>. 이를 바탕으로 위치검출이 가능한 실린더를 설계·제작하였으며 그리고 스트로크 센싱 실린더의 위치 제어 시에 발생될 수 있는 자성구배(magnetic slope)에 따른 문세점과 자기센서의 증폭율이 커짐에 따른 세반 노이즈 문세들을 디지털 신호처리를 이용함으로써 해결하였다<sup>(2)</sup>.

무더운 여름이나 사막등지에서 작업을 수행 할 경우 위치검출 실린더의 주변온도가 60~70℃정도 까지도 상승될수 있으며, 이에 따른 위치 검출 실린더의 신뢰성 및 안전성이 문제가 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 개발된 위치 검출 실린더가 여름이나 사막등지와 같은 무더운 열악한 환경하에서 작업을 할 경우를 고려하여 고온에서의 위치검출이 안정되게 수행 될수 있는지 그 성능을 평가하여 열악한 환경하에서도 개발된 위치검출 실린더의 사용가능성을 밝히고자 한다. 여러 온도 조건을 만들어 주어진 온도 환경하에서 자기센서로 부터 안정된 신호를 측정할 수 있는가를 실험하기 위해 자기센서가 장착되어 있는 센서 케이스부에 공기를 가열하여 온도를 제어할 수 있는 장치를 설계·제작하여 실린더에 장착하였다. 히터(heater)구동에는 사이리스터(thyrister)를 이용하였으며, 이의 게이트 타이밍은 컴퓨터의 D/O(digital output)단자를 이용하여 전압 위상제어를 가

능하게 하였다. 온도제어는 Zigler-Nichols의 PID상수결정에 의해 PI제어방식을 이용하였고 오버슈트(overshoot)를 줄이기 위하여 실험 측정치가 적절한 기용기를 가지고 목표치에 도달될 수 있도록 하기 위해 최적인 제어방법을 제안하였다. 이 온도제어를 이용하여 일정한 온도 상대하에서의 히터 케이스 내부에 있는 홀(hall)소자 주변의 온도에 따른 영향을 평가하였다. 유압 실린더의 구동에는 솔레노이드 밸브를 이용한 유압 시스템을 이용하였으며, 실린더 로드의 위치 제어는 오차에 비례하여 밸브의 개폐 시간폭을 조절하는 PWM<sup>(4)~(7)</sup> (pulse width modulation) 방식을 이용하였다.

## 2. 자기센서를 이용한 스트로크 측정 실린더

자기센서는 전자나 정공 등의 하전 캐리어(carrier)가 자체중에 놓여진 반도체내를 움직일 때 운동 방향에 수직인 로렌츠(Lorentz)력이 작용하는 것을 이용한 것이다<sup>(3)</sup>. 여기에는 크게 홀(Hall)효과를 이용한 것과 자기 저항 효과를 이용한 것으로 분류된다. 이러한 자기센서는 피측정 자계를 혼란시키지 않고, 고감도로서 직선성이 좋은 자선 변환 특성을 가질 수 있다는 장점이 있다. 또한, 소형 경량이며 지능센서(intelligent sensor)IC로서의 활용이 가능하다. 본 연구에서 사용한 자기센서의 원리는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서와 같이 n형 반도체에 전계를 가해서 전류 밀도  $J$ 가 흐르고 있는 것에 자계를 덧붙여 가해 주면 전계 방향에 따라 움직이던 전자는 반도체의 앞 방향에 로렌츠력이 가해져서, 전계의 역방향과  $\theta$ 의 각도를 이루는 방향으로 움직인다. 이 결과 반도체 앞쪽에 전자가 쏠려 이쪽이 음(-)으로 반대쪽이 양(+)으로 대전되어 횡방향으로 전계가 발생하게 된다. 이것을 홀(Hall)효과라고 하며 이 때 생성되는 전계를 홀전계라 한다.

본 연구에서 사용한 스트로크 측정 실린더는 피스톤 로드에서 이종(異種)의 투자율(permeability)을 가진 자기눈금을 형성시켜

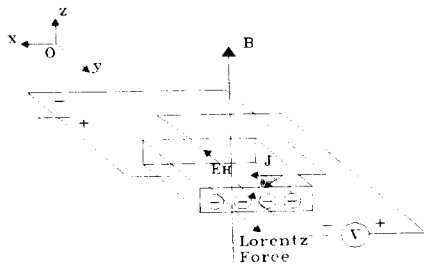


Fig. 1 Principle of Hall sensor

투자율의 변화를 측정하도록 되어 있으며 이를 이용해 피스톤 로드의 이동 위치를 측정할 수 있도록 하였다. 여기서 투자율이란 자력선을 집중시킬 수 있는 능력을 말하며, 연철과 같이 쉽게 자화되는 물질은 큰 투자율을 가지고 있어 유도도 인해 자력선이 집중된다. 유도에 의한 철막대의 자화에 있어서 자속 밀도는 자석과 물체 사이의 간격에 의한 영향보다는 주로 투자율의 차이에 의해 변화된다<sup>(8)</sup>. 이러한 투자율의 차이를 이용하여 형성된 자기눈금에 따른 파형을 검출하기 위해 자기센서를 실제 실린더 로드 위에 일정한 간격을 유지하도록 센서 부착 구조를 설계·제작하여 장착하였다.

장착된 센서 부착 구조는 실린더 로드의 자기 스케일을 읽는 부분으로서, 충격 등에 의한 진동에 대해서도 센서와 피스톤 로드의 거리를 일정하게 유지될 수 있도록 설계·제작하였다. 또한 센서 부착 구조와 실린더 로드가 접촉하는 부분은 재료의 마멸 및 열 발생이 예상되므로 이 부분의 재질로서 고온, 저온 등 각종 환경에서 내마모성을 지닌 오일리스 베어링(oilless bearing)을 사용하였다.

## 3. 온도 영향 평가를 위한 시스템의 구성

스트로크 측정 실린더의 센서 주변에 일정한 온도의 조건을 형성하기 위한 온도 제어시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다. PC(personal computer)와 온도 제어 주변 장치와의 인터페이스 카드는 A/D, D/A, DIO 기능이 있는 Darim 보드를 사용하였으며 히터와 PC를 분리시키기 위하여 포토커플러(photocoupler)를 사용하였다. 그리고 히터가 구동중인가를 확인하기 위하여 포토커플러의 애노드(anode)단자에 LED(light emitting diode)를 접부하였으며 온도 표시를 위하여 7-Segment를 설치하였다. 또한 실제 사이리스터(thyristor)의 스위칭전압은 220V의 고전압이므로

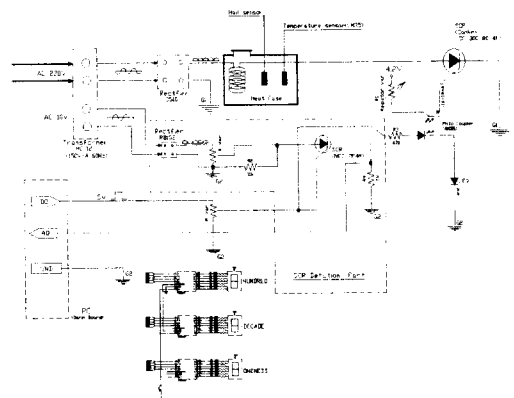


Fig. 2. Thermal control system for temperature control

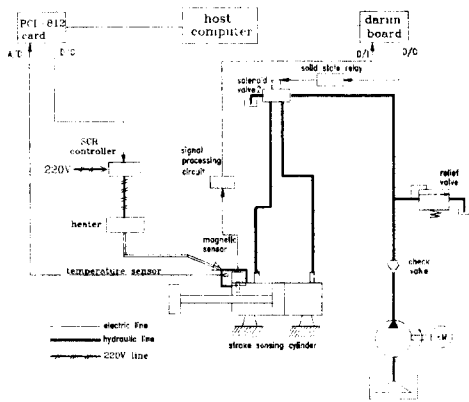


Fig. 3. Experimental Set up for evaluating a performance of the stroke sensing cylinder under various temperature conditions

로 위상 제어진 결과를 PC를 이용해 관측하기 위해서 변압기를 이용해 10V이내의 전압으로 감압하여 PC로 계속 가능한 검출부를 구성하였다. 또한 온도를 검출하기 위한 센서로는 직선성이 우수하고 정밀도가 뛰어난 IC 온도 센서인 LM35를 사용하였다. 온도제어에 필요한 SCR(silicon controlled rectifier)은 대전력 제어용인 SanRex사의 SC30C-804F를 사용하였고 검출부에서는 소전력 제어용인 NEC사의 2P4M을 사용하였다. 이상에서 구성한 온도제어시스템은 스트로크 측정 실린더의 개발 및 성능 평가를 위해 구성된 유압실험장치에 부착하였다. 부착한 실험장치의 구성은 Fig. 3과 같다. 본 실험장치는 자기눈금이 형성된 실린더로드와 이 자기눈금을 측정하기 위한 자기센서가 장착된 센서 부착 구조, 유압 실린더를 구동시키기 위한 유압장치(hydraulic equipment), 자기센서로부터 획득한 신호를 처리하는 신호처리회로부와 온도제어를 위한 열제어시스템(thermal control system)의 4부분으로 나누어진다. 실험에 사용된 스트로크 측정 실린더의 신호처리, 위치제어등을 위한 PC의 인터페이스는 A/D변환기, D/A변환기, D/I(digital input), D/O(digital output)용의 PC-Labcard는 EDlaboratory사의 PCL-812카드를 사용하였다. 자기센서로부터 나온 출력 전압은 신호처리를 거쳐 펄스로 변환한 후 성도가 높은 카운터 회로를 제작하여 펄스를 계수하도록 하였으며, 이 계수된 위치 데이터의 값은 D/I용의 입력 신호로 사용하여 실린더로드의 위치를 검출하도록 하였다. 단, 피스톤 로드에 대한 자기 눈금의 주기는 2mm로 가공하였다. 유압 장치에 있어서 솔레노이드 밸브의 구동에 사용되는 부접점 릴레이(solid state relay)는 사용 동작 전압 범위가 3~32V (DC)이고 응답시간이 1msec인 대신 엔지니어링사의 DSS-2025를 선정하여 사용하였고, 솔레노이드 밸브는 ON/OFF 전환 시간이 30msec인 UCHIDA-REXROTH사의 4WE10G를 사용하였다. 유압 모터로는 정격 전압이 220~380V이고 회전수가

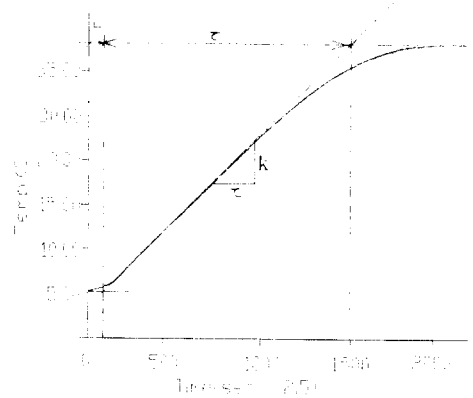


Fig. 4 Step response using Ziegler-Nichols tuning

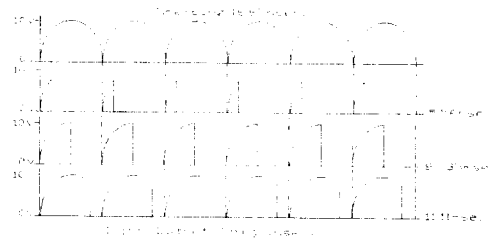


Fig. 5 Voltage phase using thyristor

1140rpm인 (주)을지 전기의 3상 유도 전동기를 사용하였고, 유압 펌프는 UCHIDA OIL HYDRAULICS사의 GXPO를 사용하였다. 유압시스템을 제어하기 위한 솔레노이드 밸브의 ON/OFF 동작은 톨니파를 이용한 PWM 제어 방식을 사용하였다<sup>2)</sup>.

#### 4. 온도제어 실험 및 성능 평가

##### 4.1 온도제어 실험

PI 제어를 실행할 경우는 최적의 제어제인 파라미터를 선정하지 않으면 좋은 응답(출력)은 기대할 수 없을 뿐더러 제어대상이나 제어계 전체의 파손 등 위험한 경우가 발생할 수도 있다. 본 실험에서는 가장 일반적인 파라미터 설정법인 Ziegler-Nichols 스텝 응답법을 이용하여 파라미터를 설정하였다. 제어 대상의 스텝 응답은 기술기에 관계되는 Fig. 4와 같이 되어 Ziegler-Nichols PI제어에 관한 설정 조건에 따라  $k=3.4$ ,  $L=125$ ,  $T_1=3.3 \cdot L=412.5(\text{sec})$ ,  $\tau=3650(\text{sec})$ ,  $K_p=0.9\tau/(k \cdot L)=2.448$  가 구해진다. 단, T는 샘플링 주기로 2.5초이다. 여기서는 목표값의 변경이나 정상적인 외란이 있어도 편차가 없는 PI제어를 선택하였으며 그 관계식은 다음과 같다.

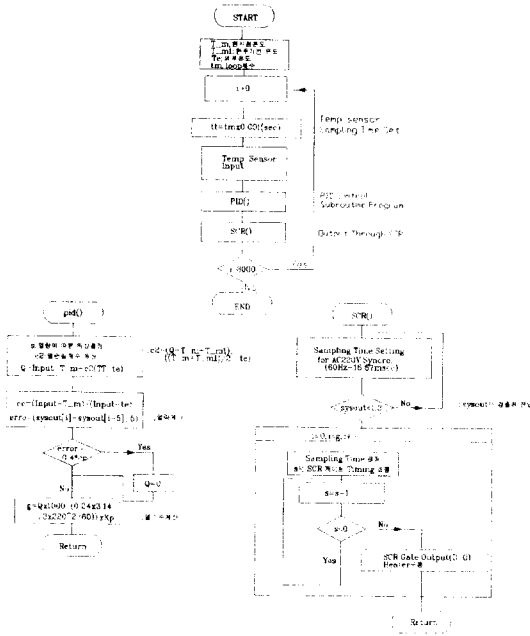


Fig. 6 Flow Chart for Temperature Control

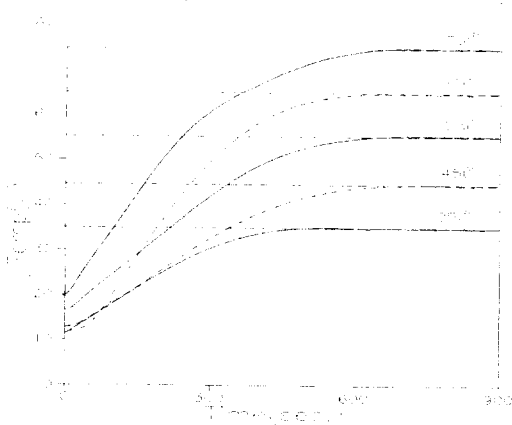


Fig. 7 Results of temperature control

$$u(kT) = K_p e(kT) + T_i \cdot \sum_{i=0}^k e(iT) \quad (1)$$

이때  $K_p$ 와  $T_i$ 는 Ziegler-Nichols 스텝응답법을 이용하여 구한 값으로 각각 2.448과 412.5이다. 본 시스템의 경우 네워진 공기를 혼합하는 교환기가 없어 순전히 대류에 의해 열이 전달되며 지연시간 (time delay)이 요구하는 온도에 따라 각기 다르다. 따라서, 게인을 크게 두면 발산하여 불안정하게 될 것이다. 또한 냉각기가 없기 때문에 오버슈트를 아주 적게 해야 한다. 따라서 이러한 특성을 고려하여 다음과 같이 파라미터를 선정하였다. 먼저 요구하는 온도 범위에 따라 적절한 게이트 타이밍을 주어 Fig. 5와 같은 사이리스터 위상의 전력크기를 선택한다. 다음은 선택된 게이트 타이밍을 고정시킨 후 온도가 올라가는 초기 측정온

도의 기울기(0.5)를 미리 구한다. 이어서 오버슈트를 줄이기 위하여 다음과 같은 조건식을 정의 한다.

$$| \text{측정된 기울기} | > \frac{|T_c - T_d|}{|T_r - T_c|} \cdot \text{초기측정온도의 기울기} \quad (2)$$

식(2)와 같이 측정된 기울기가 요구온도( $T_r$ )와 측정온도( $T_d$ )차에 대한 요구온도와 초기온도( $T_c$ )의 비(比)에 초기측정온도의 기울기를 곱한것과 비교하여 사이리스터의 출력을 제어한다. 즉 상기 조건이 만족되는 경우 히터를 가열하지 않도록 사이리스터를 OFF 시킴으로 측정치 매순간마다 최적의 피드포워드 게인을 찾아주는 역할을 하게 된다. 전체적으로는 Ziegler-Nichols의 스텝응답으로 제어계인을 결정하며 비선형 부분을 보상하기 위하여 게인을 미소 조정한다. 이상과 같은 과정을 통해 목표치 도달까지 온도가 이상적인 온도곡선의 기울기에 지배를 받고 도달후에는 계속해서 적분항에 의해 내부온도가 지배를 받으며 이때 방열되는 미소의 열을 보충하기 위하여 사이리스터의 위상을 적분되어진 열량에 따라 매 순간 조절하여 제어한다. 온도 제어를 위한 전체 순서도는 Fig. 6과 같고 실험 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 제안한 방법에 의해서 양호한 온도제어 결과를 가져옴을 확인 할 수 있었다.

#### 4.2 스트로크 측정 실린더의 온도영향에 따른 위치 측정 성능평가

스트로크 센싱 실린더의 위치검출을 위해 구성된 유압시스템 (Fig. 3)을 이용하면 피스톤로드의 이송에 따른 두 자기센서로부터 출력파형이 증폭회로와 필터로 구성된 신호처리회로를 거치고 디지털신호처리되어 Fig.8과 같은 약 90°의 위상차를 가지는 펄스신호로 변환되어 검출된다. 변환된 펄스 출력 파형은 데이터 획득회로(data acquisition circuit)에 입력되어 피스톤 로드와 이송에 따라 계수된 디지털 신호로 바뀐다. 이 신호를 D/A채널을 이용하여 컴퓨터에 입력시켜 스트로크를 측정하게 된다. 먼저 일정한 여러가지의 온도 환경하에서 피스톤 로드를

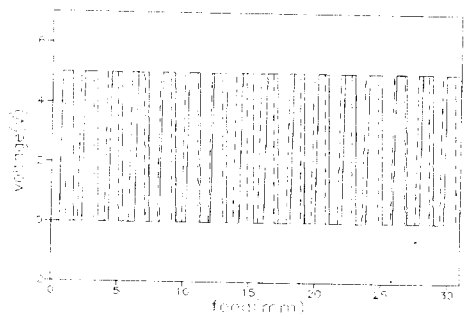


Fig. 8 Transformed pulse signal of output signal from magnetic sensor

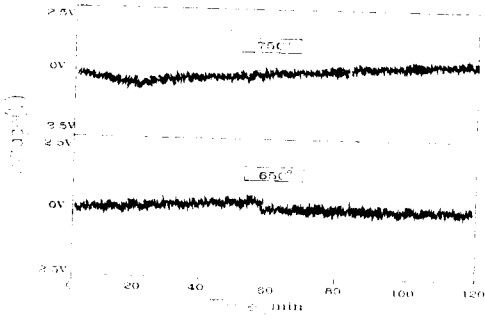


Fig. 9 Output signals from Hall sensor under various temperature conditions

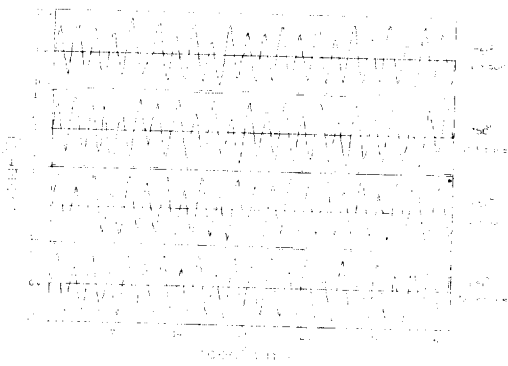


Fig. 10 Output signal from magnetic sensor during position control under various temperature conditions.

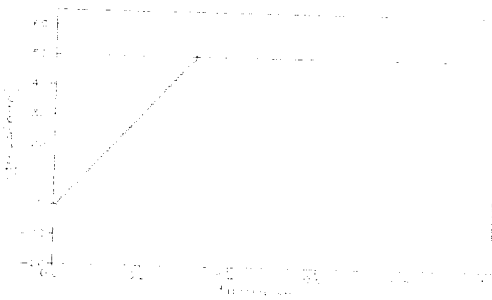


Fig. 11 Result of position control of 50mm feed by PWM method under condition of 75°C

움직이지 않았을 경우의 자기센서로부터의 신호처리된 출력과 형은 Fig. 9와 같다. 주어진 시간내에서 측정된 각 온도에 따른 자기센서로 부터의 전압의 변화는 거의 비미함을 확인 할 수 있다. 일정하게 주어진 각각의 온도하에서 2시간까지 경과 한 후의 위치제어를 수행 했을때의 자기센서로 부터의 출력 전압은 Fig. 10과 같다. 실험결과를 보면 75°C까지의 온도를 일정하

게 장시간 주어도 스트로크 측정에는 영향이 거의 없음을 알 수 있어 사막과 같이 부드러운 열악한 외부 온도 환경변화에 대해서도 홀센서를 이용하여 위치를 안정되게 검출 할 수 있었다. 이 결과를 통해 위치제어에 신뢰성을 부여 할 수 있음이 입증 되었다. Fig. 11은 75°C에서 PWM제어에 의해 정확하게 위치제어가 수행되었음을 보여 준다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 자기센서를 이용하여 개발한 스트로크 측정 실린더의 측정 성능을 부드러운 사막과 같은 열악한 온도환경하에서 평가하기 위해 자기능급이 형성된 피스톤 로드 표면에 가공된 자기능급의 자장의 변화를 측정할 수 있는 센서 장착구조 위에 온도제어 시스템을 구성하였다. 이때 임의의 일정한 온도를 유지하기 위한 온도제어는 Ziegler-Nichols 조정에 의한 PI 제어 방법이다. 오버슈트를 가장작게하기 위해 매 순간 측정치가 식별한 기울기를 가지고 목표치에 도달될수 있도록 최적의 제어를 수행하였다. 이상의 실험을 통해 실제 작업환경의 열악한 온도변온도에 관계없이 선행연구에서 개발된 스트로크 측정 실린더의 피스톤 로드의 이송에 대한 정확한 위치 검출과 위치 제어가 안정되게 이루어짐이 판명되었다.

## 참고 문헌

- (1) 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, 363-368 (1995).
- (2) 홍영호, 이민철, 1995, "신호압축법을 이용한 위치제어용 유압실린더의 성능평가", 95한국자동제어학술회의논문집, pp. 693 ~ 696.
- (3) 片岡照榮, 柴田幸男, 高橋清, 山岐弘郎, 1990, "Sensor Handbook", 世和出版, pp.100~104, 331~351.
- (4) 武藤高義, 山田宏尚, 末松良一, 1987, "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.
- (5) P. Gill, P. R. Ukrainetz and R. T. Burton, 1989, "Physical Effects of Pulse Width Modulation on Valves and Loads," SAE Technical Paper Series, 891862.
- (6) H. S. Ramirez, 1987, "A Geometric Approach to Pulse Width Modulated Control Design," Proceeding of the 26th Conference on Decision and Control, IEEE., pp. 1771 ~ 1776.
- (7) 武藤高義, 山田宏尚, 末松良一, 塚本哲也, 1991, "差動PWM方式による電気・油壓サ-ボ系のデジタル制御", 日本機械學會論文集, 第57卷, 第537號, pp. 178 ~ 185.
- (8) 이양성, 권영순, 황창선, 조성수, 김철우 공저, 1979, "기초전기전자공학", 부인사, pp. 35 ~ 46.
- (9) Malvino 原著, 崔成在, 方根泰, 李弘民 共譯, 1993, "Electronic Principles (3 版)", 尙學堂, pp. 577 ~ 584.