

홀센서를 이용한 유압실린더의 스트로크 센싱 실린더 개발에 관한 연구

A Study on Development of Stroke Sensing Cylinder for Hydraulic Cylinder Using Hall Sensor

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

Abstract

We developed a part of stroke sensing cylinder and its measurement system for automatic excavator. In this paper, for development of stroke sensing cylinder, we consist of 2-axis control instrument system with magnetic sensor. A Performance of cylinder rod with magnetic scales is evaluated by its system. Furthermore, the position control for good performance of instrument system is achieved by a sliding mode control which is a new method diminishing the chattering in that control by setting 2-dead band along the switching line. The unknown parameters for sliding mode control are estimated by the signal compression method.

1. 서 론

건설기계의 같은 중장비는 작업 조건이 가혹하고 보수, 정비
가 주로 건설 현장인 이외에서 이루어 지는 경우가 많으며, 작
업 중의 소음, 진동 등의 원인으로 지동화의 진진도가 타 기
에 비하여 낮은 실정이다. 특히 유압 굴삭기의 경우 숙련을
요하는 기능 노동자가 부족하고, 건설업 자체가 타산업에 비교
하여 위험한 직업이 많으므로 노동재해 발생률이 많은 점을 고
려하면 굴삭기의 지동화, 로봇화가 진척히 요망되고 있는 추
세이다. 유압 굴삭기의 자동화, 로봇화를 위해서는 무엇보다
도 전기제어 신호에 의해 연속적으로 제어될 수 있는 전기·유압
식 밸브의 제어가 중요하며, 이의 제어를 위해서는 각각의 구
동관절에 대한 위치감측센서의 역할도 대단히 중요하다. 굴삭
기의 각 관절에 대한 위치 감측방식으로는 기도의 감측과 실린
더의 변위를 감측하는 2가지의 방식이 있을 수 있으나, 작업의
상황에 따라 적절한 방식이 선택되어야 한다. 특히 굴삭기
의 비켓 부분은 가혹한 작업환경에 대하여 내구성, 내진성, 내
환경성 등이 요구되므로 실린더의 변위를 직접 센싱하는 것이
안전하고 효과적이라고 할 수 있다. 스트로크를 센싱할 수 있
는 센서로서는 대표적으로 포텐쇼미터, 차동트랜스듀스, 스트레
인 게이지와 스프링 기구를 조합한 방식 등이 있으나, 대부분
가혹한 작업환경 하에서 신뢰성과 내구성을 보장할 수 없다.
이에 비해 위치 감측이 가능한 실린더를 이용하면 위치 조정으
로 동작을 직접 확인하면서 굴삭기 등의 위치 조정을 행할 수
있다. 또한 위치감측이 가능하므로 임의 위치에서의 감속과

정지를 쉽게 행할 수 있어 다단계 이송장치 등에도 응용이 가
능하다. 이러한 위치 감측 실린더를 이용하면 서로 밸브 등과
의 조합에 의해 피드백 제어가 가능해져 유압서보기구의 위치
제어에 및 고중량 로봇의 원격 구동장치 등에도 사용되어질
수 있다. 따라서 유압굴삭기의 자동화, 고중량 로봇의 개발
을 위해서 이러한 실린더 스트로크의 위치감측이 가능한 유압
실린더의 개발이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 실린더 로드와 자기눈금을 형성한 후 이 눈금
을 홀센서⁽¹⁾를 이용하여 측정함으로써 실린더의 스트로크를 센
싱할 수 있는 위치 감측이 가능한 실린더를 개발하고자 한다.
홀센서를 이용하여 위치제어용 실린더를 개발하기 위해 자기눈
금이 형성된 실린더 표면에 따라 가공의 정도 및 센싱한 신호
의 상태를 파악할 수 있어야 하며, 이를 위해서 가공된 자기눈
금에 따라 자장의 상태를 효과적으로 감측할 수 있는 2축 동시
제어 가능한 계측장치를 구성하였다. 이 때, 계측장치의 위치
제어에 필요한 동특성을 파악하기 위하여 비선형 성분이 포함
된 경우에도 계의 선형성분의 미지파라미터를 추정할 수 있는
신호입출법^(2,3)을 적용하여 미지파라미터를 추정하였다. 계측
장치의 위치제어에 있어서는 외란에 대처하면서 상인성을 지닌
고정도의 위치제어가 가능하도록 슬라이딩 모드 제어^(2,3)를 적
용하여 자기눈금 가공된 실린더의 정도를 평가하였으며, 홀센
서를 이용해 계측한 신호를 감측하므로 스트로크 센싱 실린더
개발의 가능성을 밝혔다.

2. 시스템 구성 및 동특성 해석

2.1 시스템의 구성

전체적인 시스템은 Fig. 1과 같이 계측장치를 제어할 수 있는 구동부와 계측장치의 자기센서인 홀센서로부터 측정된 신호를 처리할 수 있는 회로부로 나누어진다.

Fig. 1의 전체 시스템 구성도에서 계측장치의 홀센서에 대한 원리는 Fig. 2에서와 같이 n 형 반도체에 전계를 가해시 전류밀도 J 가 흐르고 있는 것에 자계를 돌린히 가해주면 전계방향에 따라 움직이던 전자는 반도체의 앞방향에 로렌츠력이 가해져서, 전계의 역방향과 θ 의 각도를 이루는 방향으로 움직이고, 이 결과 반도체 앞쪽에 전자가 쏠리 이쪽이 음(-)으로 반대쪽이 양(+)으로 대전되어 횡방향으로 전계가 발생하는 것을 이용한 것이다. 이러한 홀센서로부터 측정된 신호를 처리할 수 있는 회로부에 대한 개략도는 Fig. 3과 같이 나타낸다. 여기서, 노치 필터는 전압에 존재할 수 있는 노이즈를 제거하기 위해서 구성하였다. 또한, 정전류회로를 구성하여 전류방식으로 구동되는 홀센서에 인성된 전류가 공급되도록 하였다. 홀센서는 얻을 수 있는 출력전압이 미약하므로 전압을 증폭시킬 수 있는 회로가 필요하게 된다. 전압을 증폭시키는 회로로 우선 차동연산증폭기를 구성하여 홀센서에서 발생하는 불평형전압을 보상함과 동시에 홀센서에서 발생하는 노이즈성분도 감소하도록 하였다. 또한, 높은 증폭률을 얻기 위해 2차 증폭기를 차동연산증폭기 다음에 구성하였고, 증폭된 신호가 나타내는 전압의 범위가 다를 수 있기 때문에 원하는 전압범위로 이동시키기 위해 shift회로를 구성하였다. 다음으로 저역 통과 필터(low-pass filter)를 구성하여 유입될던 작동시 이동하는 실린더 스트로크의 최대주파수 이상의 노이즈의 성분을 제거할 수 있도록 하였다.

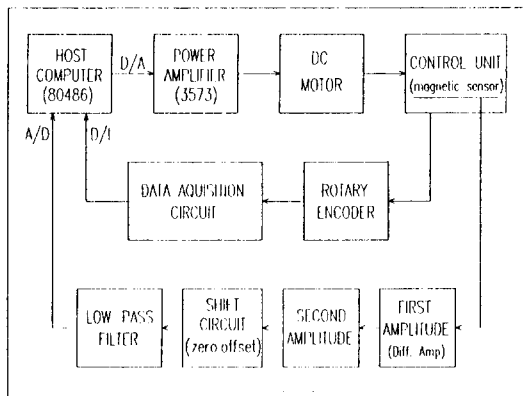


Fig. 1 Block diagram of instrument control system for developing stroke sensing cylinder

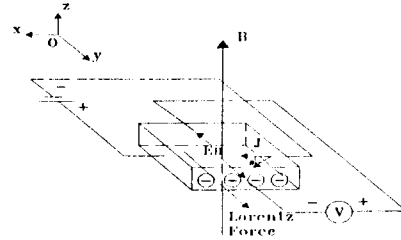


Fig. 2 Principle of hall sensor

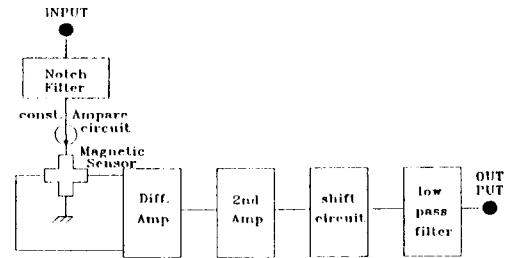


Fig. 3 Outline of circuit for using magnetic sensor

2.2 신호압축법에 의한 계측장치의 동특성 해석

비선형요소가 포함된 단일입출력을 가지는 시스템의 경우 미지파라미터인 관성모멘트나 점성마찰계수 등을 추정하는 방법으로 신호압축법이 알려져 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 신호압축법을 이용하면 선형요소와 비선형요소의 응답을 분리할 수 있으므로 선형요소의 임펄스응답만을 얻을 수 있고, 구한 임펄스응답을 이용해 선형요소의 미지 파라미터를 근사적으로 구할 수 있다. 즉, 측정하고자 하는 시스템과 같은 차수만큼 가진 모델의 전달함수에 대한 Bode 선도과 신호압축법에 의해 구한 선형요소의 임펄스응답으로부터의 Bode 선도와의 비교를 수행하여, 가장 잘 일치할 때까지 모델식의 파라미터를 변화시키, 그 때의 파라미터를 추정값으로 선정하면 된다⁽⁷⁾. Fig. 4는 신호압축법에서 사용된 시험신호(test signal)이고, Fig. 5는 신호압축법의 전체적인 개략도를 나타낸다.

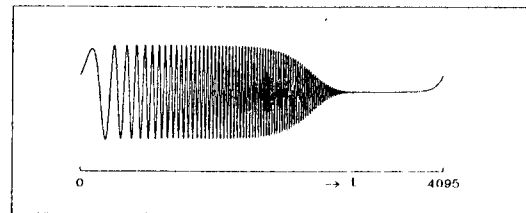


Fig. 4 The test signal of the signal compression method

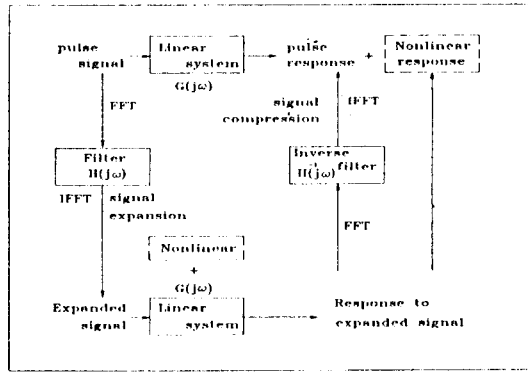


Fig. 5 Principle of signal compression method

3. 계측장치의 슬라이딩 모드 제어기 설계

로봇 매니퓰레이터와 유사한 DC 서보시스템의 구동축에 연결된 시스템의 구동에 의한 운동방정식을 간단히 표기하면 식 (1)과 같다.

$$D(\theta)\ddot{\theta} + c(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = T \quad (1)$$

여기서, $D(\theta)$ 는 관성모멘트, $c(\theta, \dot{\theta})$ 는 원심력, 코리올리 힘, $g(\theta)$ 는 중력항을 나타내고 T 는 모터에 구동하는 토크를 나타낸다. 단, 본 연구에서 구성한 계측시스템의 경우에는 식 (1)의 $c(\theta, \dot{\theta})$ 가 있는 경우에 해당된다. 한편, 일반적인 DC 서보계의 운동방정식은 식 (2)와 같다.

$$J_M \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + T = k u \quad (2)$$

여기서 J_M , B , k 는 각각 구동축모터의 회전자 관성모멘트, 점성감쇠계수, 제어입력을 나타낸다. T 는 식 (1)에서의 구동 토크와 같다.

제 i 번째 축에 대해 식 (2)에서의 미선형으로 나타나는 요소를 전부 외란으로 간주하여 변수 F_i 로 두면 구동축과 서보계를 위한 전체운동방정식은 식 (1)과 식 (2)로부터 식 (3)과 같은 비교적 간단한 운동방정식으로 기술될 수 있다.

$$J \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + F = k u \quad (3)$$

여기서, J 는 식 (1)에서의 전령관성모멘트의 선형요소와 식 (2)에서의 각 구동축모터의 회전자 전령관성모멘트를 위한 선형성분의 전령관성요소를 나타낸다. F 는 외란으로 간주한 변수 F_i 로 구성된 n 차원 벡터이다.

위의 식 (3)과 같이 간단한 운동방정식을 이용하여 계가

슬라이딩 모드상에 존재하도록 하는 전환피라미드를 유도하기 위해 우선 계측장치의 제 i 번째 축의 목표기동, 각(角)속도, 각(角)가속도를 각각 θ_{di} , $\dot{\theta}_{di}$, $\ddot{\theta}_{di}$ 로 두고, i 번째 축의 측정된 회전기동도를 θ_i 로 두면 그 추종오차와 오차의 속도 및 가속도는 식 (4)와 같다.

$$e_i = \theta_i - \theta_{di}, \quad \dot{e}_i = \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{di}, \quad \ddot{e}_i = \ddot{\theta}_i - \ddot{\theta}_{di} \quad (4)$$

오차상대공간상에서 슬라이딩 모드가 발생하는 전환조건을 구하기 위하여 전환면을 나타내는 변수 s_i 를 식 (4)에서 정의한 오차의 오차의 속도를 이용하여 정의하면 식 (5)와 같다.

$$s_i = c_i e_i + \dot{e}_i \quad (5)$$

여기서 c_i 는 각 축의 전환면의 기울기를 나타낸다.

본 연구에서는 외란에 대응하는 제어입력을 식 (6)과 같이 제안하므로 채터링을 줄이고자 한다.

$$u_i = \phi_{oi} e_i + \phi_{fi} \quad (6)$$

만,

$$\phi_{oi} = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } s_i e_i > 0 \\ -\alpha_i & \text{if } s_i e_i < 0 \end{cases}$$

$$\phi_{fi} = \begin{cases} u_{fi}^+ = M_{1i} + M_{2i} \times |e_i| & \text{if } s_i > 0 \\ u_{fi}^- = -M_{2i} - M_{2i} \times |e_i| & \text{if } s_i < 0 \end{cases}$$

$$M_{1i} = \begin{cases} \frac{M_{1i}}{\Delta 1_{1i}} \cdot D_{1i} & \text{if } |\Delta 2_{1i}| < |D_{1i}| < |\Delta 1_{1i}| \\ \frac{M_{1i}}{N_{1i}} & \text{if } |\Delta 2_{1i}| > |D_{1i}| \end{cases}$$

where, $N_{1i} > M_{1i}$

여기서, ϕ_{fi} 는 외란 F_i 에 대응하기 위해 부가하는 입력이며, N_{1i} 는 일정한 상수를 의미한다. 이 때 외란으로 가정된 운동방정식 (1)에서 나타나는 비선형성분의 크기는 오차가 수렴되어짐에 따라 줄어든다. 즉 척인하여 ϕ_{fi} 의 M_{2i} 의 값이 오차의 절대값에 비례하도록 주므로 채터링의 영향을 줄일 수 있도록 하였다. 또한, Fig. 6과 같이 오차상대공간상의 전환면 주변에 분간대 $\Delta 1_{1i}$, $\Delta 2_{1i}$ 를 설정하여 Fig. 7과 같이 전환면과 오차상대면수와의 거리 D_{1i} 에 따라 M_{1i} 의 값을 조절하여 주므로 채터링을 줄이고자 하였다. Fig. 6에서 o-o'은 $s=0$ 인 전환면을 나타내고, a-a', b-b'는 첫번째 분간대인 $\Delta 1_{1i}$ 를 나타내고, c-c', d-d'는 두번째분간대인 $\Delta 2_{1i}$ 를 나타낸다.

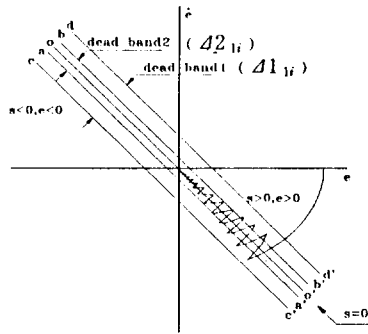


Fig. 6 Phase plane with a dead band around the switching line

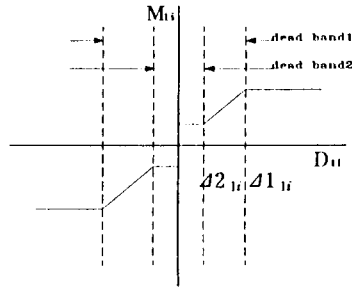


Fig. 7 Modified control input within dead band

이 때, 슬라이딩 모드의 존재조건을 만족하도록 식 (3)~(6)을 이용하여 관계식을 유도하면 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 s_i \dot{s}_i &= s_i (c_i \dot{e}_i + \ddot{e}_i) \\
 &= s_i^2 (c_i - \frac{B_i}{J_i}) + s_i (-c_i - \frac{B_i}{J_i}) c_i e_i + \frac{k_i u_i}{J_i} \\
 &\quad - \frac{B_i}{J_i} \theta_{d1} - \frac{F_i}{J_i} - \ddot{\theta}_{d1} < 0
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 신호압축법에 의한 동특성 측정

신호압축법을 이용하여 구성된 계측장치의 1축과 2축에 대한 계의 미지파라미터를 추정하기 위해 Fig. 4의 시험신호를 사용하였다. 작성한 시험신호를 D/A변환기를 통해 계측장치의 1축과 2축에 인가함에 따른 모터의 회전각도는 로터리 엔코더에 의해 펄스신호로 추출된다. 이 신호를 카운터 회로와 D/A채널을 이용하면 Fig. 8(a), Fig. 9(a)와 같은 출력신호가 구해진다. 검출된 신호를 C언어로 작성한 FFT 프로그램에 의하여 주파수영역으로 변환하고 수학적인 시간전진 필터를 통과시켜 신호를 압축한 후 비선형성분은 제거시키면 Fig. 8(b)와 Fig. 9(b)의 실선과 같은 입력스 응답 파형을 구할 수 있다. 이 선형성분만

의 동기 입력스 응답을 이용하여 2차계의 동특성을 나타내는 고유주파수 ω_n 과 감쇠계수 ζ 를 구하면 Table. 1과 같고, 계측장치 1축과 2축의 추정된 동적 파라미터는 Table. 2에 같이 구해진다.

Table. 1 Estimated parameters by the signal compression method

	1 axis	2 axis
Natural frequency ω_n (rad/sec)	20.39	67.20
Damping coefficient ζ	0.41	0.59

Table. 2 Estimated unknown parameters of experiment system

	1 axis	2 axis
Equivalent mass inertia moment ($kg \cdot m^2$)	5.037E-2	1.50E-3
Equivalent viscosity friction coefficient	0.852	0.119

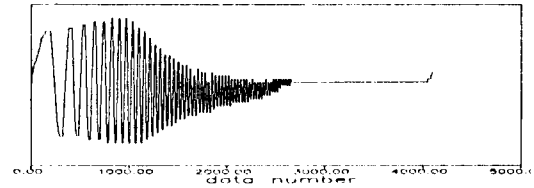


Fig. 8(a) Response waveforms of 1-axis for input signal of Fig. 4

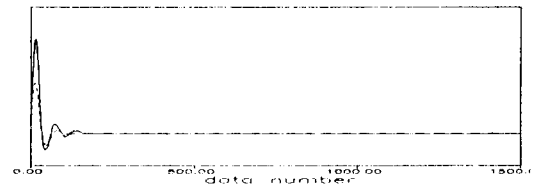


Fig. 8(b) The compressed signal of 1-axis, whose nonlinear components are eliminated

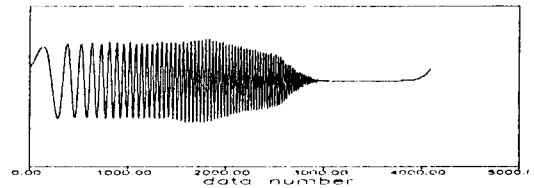


Fig. 9(a) Response waveforms of 2-axis for input signal of Fig. 4

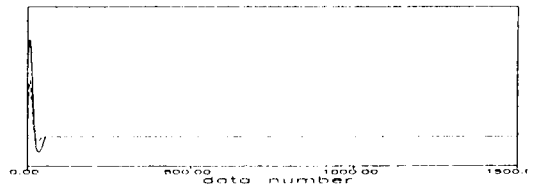


Fig. 9(b) The compressed signal of 2-axis, whose nonlinear components are eliminated

4.2. 슬라이딩 모드 제어

신호입축법에서 구한 계의 동특성을 바탕으로 슬라이딩 모드의 존재조건을 만족시키는 실현 파라미터의 경계치는 식(7)에 의해 Table. 3과 같이 구해지고, 실험에서 선택된 전환조건을 만족하는 실현 파라미터와 채터링 경감을 위한 불감대의 폭을 Table. 4에 나타내었다.

이상에서 구한 전환 파라미터를 이용하여, 슬라이딩 모드 제어를 적용하기 위해 샘플링주기를 2 ms로 하고 정상상태를 초기값으로 하여 회전당 이동거리가 4 mm인 계측장치를 180도의 목표값으로 추종하도록 한 실험결과를 Fig. 10(a)와 10(b)에 나타내었다. Fig. 10(a)는 오차상태공간에서의 추종을 보여주고 있으며, Fig. 10(b)는 위치를 나타내고 있다.

Table. 3 Maximum value of switching parameters for occurring sliding mode

	1 axis	2 axis
C_i	16.72	79.26
a_i	-120.0	-0.86

Table. 4 Values of switching parameters and dead band width for using to experiment

	1 axis	2 axis
C_i	8.0	78
a_i	-121	-3
M_{1i}	-0.8	-1.2
M_{2i}	-0.05	-0.05
$\Delta 1_{li}$	0.5	0.5
$\Delta 2_{li}$	0.1	0.1
N_{li}	0.5	0.5

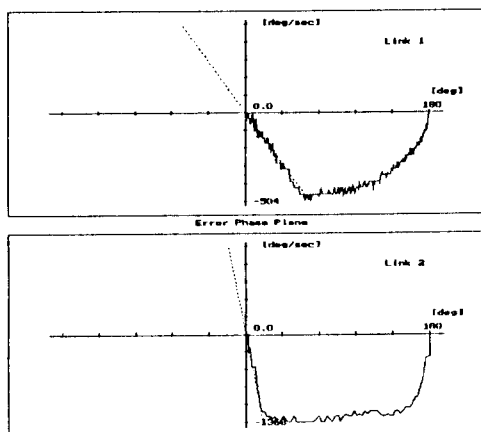


Fig. 10(a) Error state space for each axes

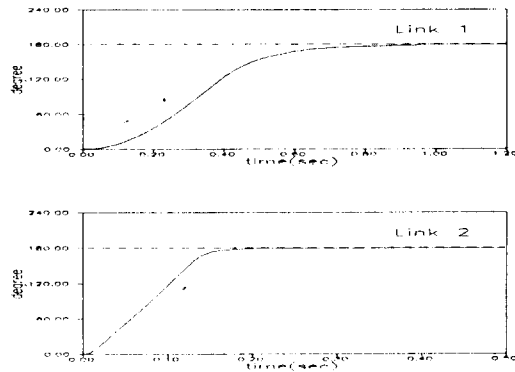


Fig. 10(b) Experiment results of position control for each axes

4.3. 자기센서에 의한 추종결과

이상에서 구성한 계측장치와 홀센서에 대하여 설계한 회로부를 이용하여 자기 스케일이 형성된 실린더표면의 자장의 변화를 실험을 통하여 확인하였다. Fig. 11은 실린더표면과 홀센서와의 거리가 거의 zero이고 1축을 이송시킨 경우에 대한 실험결과를 나타내고, Fig. 12는 2개의 홀센서에 대해서 90도의 위상차를 가지도록 1축을 이송시킨 실험결과이다. 그 결과를 보면 약간의 노이즈 성분은 있으나, 뚜렷한 파형이 검출됨을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 13은 Fig. 12의 파형에 대해 펄스변환회로를 사용하여 스트로크 센싱이 가능하도록 파형을 구성한 경우의 실험결과이다. 그리고, 2축의 높이변화에 따른 파형의 형태는 Fig. 14와 같으며 높이인 거리 d가 250 μ m인 경우에는 비슷한 파형이 검출되나, 거리가 500 μ m에서는 파형의 형태가 거의 상실됨을 알 수 있다.

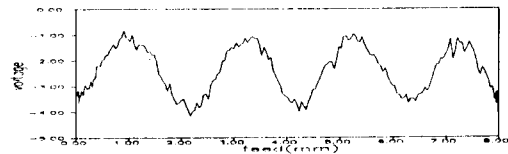


Fig. 11 Experiment result as 8mm feed of x-table with hall sensor

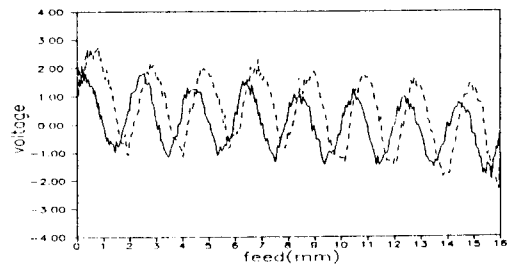


Fig. 12 Experiment result as 16mm feed of x-table with two hall sensors

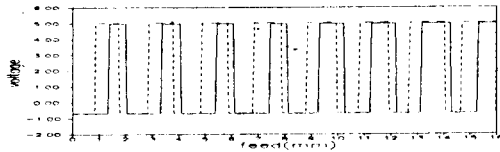


Fig. 13 Experiment result of the pulse transformation circuit

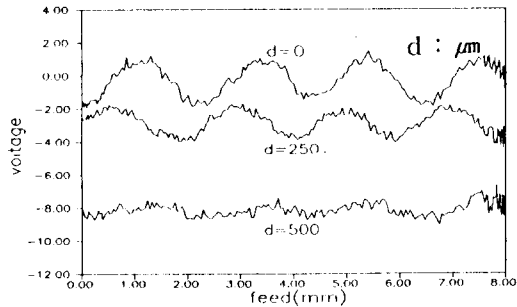


Fig. 14 Experiment result as 8mm feed of x-table and change of vertical distance between rod and sensor

따라서, 홀센서를 이용해 본 실험에서 가공한 실린더로드의 스트로크를 센싱하기 위해서는 실린더로드와 센서의 거리가 약 $250 \mu\text{m}$ 이내로 유지해야 할 수 있었다. 이상의 실험에서 구성된 회로부는 홀센서로부터의 신호 증폭률이 10,000배 정도 높지만 만족스러운 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었고, 본 연구에서 가공한 실린더로드도 스트로크의 센싱이 가능함이 증명되었다.

5. 결론

본 연구에서는 진동기계의 자동화를 위한 스트로크 센싱용 실린더의 개발을 위해, 홀센서를 이용하여 자기눈금이 형성된 실린더표면의 자성의 특성을 효과적으로 측정하기 위한 2축 측정장치를 구성하여 측정된 신호의 특성을 파악하였다. 이때 홀센서로부터 측정된 신호를 처리함에 있어서의 문제점인 노이즈를 감감시키고, 높은 증폭률을 얻을 수 있는 회로부를 설계하였다.

실린더로드의 이송에 따른 신호의 상태를 검증하기 위해 필요한 계측장치의 위치제어를 외원과 파라미터의 변동에 강인한 슬라이딩 모드제어를 사용하므로 신뢰성 높은 측정결과를 얻을 수 있었다. 이때 필요한 계측장치의 미지파라미터는 신호압축법을 이용하여 추정됨을 보였고, 이 파라미터를 이용해 슬라이딩 모드제어에 적용한 결과 슬라이딩 모드의 존재조건은 만족하고 있음이 실험적으로 판명되었다.

본 실험에서 사용한 자기눈금이 형성된 실린더로드에 홀센서를 이용함으로써 로드 스트로크 센싱이 가능함이 증명되었고,

본 연구에서 제작한 계측장치를 이용하여 실린더로드와 센서간의 유지해야 하는 최대 간격이 얼마인지 개발한 실험장치를 통해 구할 수 있었다.

참고 문헌

- (1)片岡照榮, 柴田幸男, 高橋清, 山岐弘郎, Sensor Handbook, 世和出版, 1990, pp.100~104, 331~351
- (2)Hashimoto, H., et al., 1987, "A Microprocessor-Based Robot Manipulator Control with Sliding Mode," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 134, No.1, pp 11~18.
- (3)이민철, 齊島伸治, 1992, "슬라이딩 모드를 이용한 로봇 매니퓰레이터의 실시간제어에 관한 연구," 大韓機械學會論文集 第16卷 第11號, pp. 2011~2020.
- (4)Aoshima, N., 1986, "Microprocessor-Based System Identification by Signal Compression Method", D.Reidel Pub. Com., pp. 81~103.
- (5)Aoshima, N., 1984, "Measurement of Nonlinear Vibration by Signal Compression Method", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 76, No. 3, pp. 794~801.
- (6)Lee, M. C., Aoshima, N., 1989, "Identification and Its evaluation of the System with a Nonlinear Element by Signal Compression Method", Trans. of SICE, Vol. 25, No. 7, pp. 729~736.
- (7)진상영, 이민철 외 5인, 1993, "신호압축법과 상관계수를 이용한 비선형시스템의 동특성 규명에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(1)