

# 속도제어-정용량 펌프를 사용하는 실린더-부하계의 에너지절약-부하감지형 경로제어 Path Control with Energy-Saving Load-Sensing for a Cylinder-Load System Using Speed-Controlled Fixed Displacement Pump

조 승 호  
S. H. Cho

**Key Words** : Path control(경로제어), Speed-controlled fixed displacement pump(속도제어-정용량 펌프), Load-sensing control(부하감지제어), Energy-saving(에너지절약), Sliding mode controller(슬라이딩 모드 제어기)

**Abstract**: This paper deals with the issue of robust position tracking control and energy-saving control for a valve-controlled cylinder system using speed-controlled fixed displacement pump. The whole feedback control system is composed of a pair of interconnected subsystems, that is, valve-controlled cylinder system and load-sensing control system. From experiments it is shown that position tracking control in the load sensing control system can accomplish significant reduction in input energy to pump comparing to a conventional valve-controlled cylinder system, while exhibiting the same position tracking control accuracy.

## 1. 서 론

유압제어 시스템에서 에너지 절약의 이슈(Issue)는 오일가격이 상승하면서, 환경문제와 더불어 꾸준한 관심을 끌고 있다. 지금까지 에너지절약 관련한 발달 추세는, 주로 부하감지 시스템이 구비된 가변용량 펌프를 사용하는 데에 집중되어 왔다<sup>1, 2)</sup>. 이는 사판제어 유닛을 결합함으로써 이루어진다. 공급압력은 가변용량 펌프를 사용해서 가장 높은 부하압력보다 일반적으로 약간 높게 설정된다. 대부분의 4-방향 방향 제어밸브는 기하학적인 대칭성을 갖고 있어, 비대칭형 실린더에 사용하는 경우에 있어서 특히 에너지 효율적인 운동제어의 경우에 매우 부적합하다<sup>3)</sup>. 선형 유압 액츄에이터의 폐회로 운동제어의 경우에, 부하감지 시스템을 유압실린더 서보구동의 폐회로 위치제어와 함께 고려하는 것은 매우 어려운 일로 알려져 있다. 부하감지제어와 경로제어를 통합하기 위해서는 두개의 피드백 제어시스템 즉, 위치제어시스템

과 압력제어 시스템이 고려된다<sup>4)</sup>. 본 논문에서는 가변용량 펌프를 사용하는 대신에 정용량 펌프가 AC 모터와 결합되어 사용된다. 따라서 펌프의 속도가 부하감지 계획에 따라서 AC모터에 의해서 제어된다<sup>5)</sup>. 부하감지 시스템은 다양한 작동조건하에서 수행되도록 요구된다<sup>7)</sup>. 따라서 운동제어 용도에 있어서 강인제어 성능이 매우 중요하다. 원하는 위치가 시변일 때, 고전적인 피드백 제어기만으로는 양호한 추적거동을 보장하는 데 충분하지 않다. 피이드포워드(Feedforward) 추적제어기에 의해서 성능이 상당히 개선될 수 있다. 그러나 실제의 플랜트와 제어기 설계를 위해서 사용되는 모델 사이의 불일치는 추적성을 상당히 저하시키고, 심지어 전체시스템을 불안정하게 한다. 본 논문에서는 위치제어 루프와 압력제어 루프로 구성된 전기유압 부하감지시스템이 슬라이딩 모드 추적제어에 의해서 어떻게 거동하는가를 보여주고자 한다.

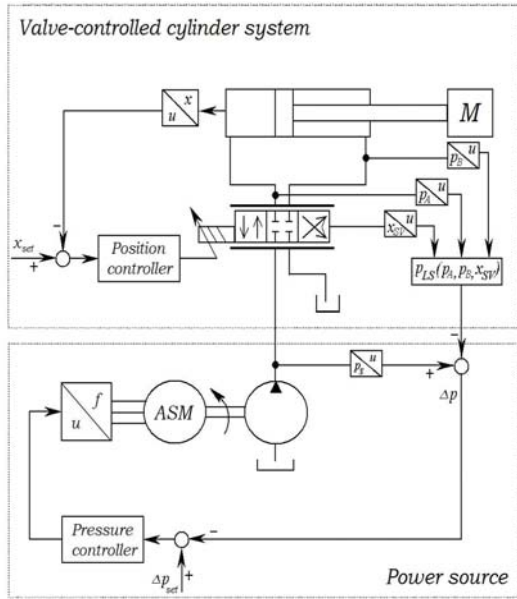


Fig. 1 Electrohydraulic load-sensing system

## 2. 부하감지 시스템

본 연구의 기본이 되는 전기유압 부하감지 시스템의 도식적 표현이 Fig. 1에 나타나있다. 아울러실험 장치의 사진이 Fig. 2에 나타나있다. 위치제어 루프는 비례제어밸브, 유압 비대칭 실린더, 그리고 질량 부하로 이루어진다. 압력제어 루프는 비동기 (Asynchronous) AC모터(Fig.1의 ASM, 이하 AC모터)와 유압펌프로 구성된 파워 유닛에 설치된다. AC모터의 속도제어를 이용하는 이러한 개념의 장점은, 에너지절약 측면에서 여러 가지 종류의 제어 임무를 실현할 수 있다. 피스톤변위가 선형 포텐시오미터에 의하여 측정되어 위치제어 시스템의 피드백 신호로 사용된다. 그리고 공급압력과 부하압력의 차이가 압력제어 시스템에서 피드백 신호로 사용된다. 그리고 이 압력신호는 원하는 압력차와 비교되어 전기유압 부하감지 시스템을 구축하게 된다. 이러한 피드백 제어구조는 시스템압력을 일정하게 제어하는 데에도 적용 가능하다. 부품들의 사양이 Table 1에 나열되어 있다. Fig. 1에 도시된 전기유압 부하감지 시스템에 대해서, 방향제어 밸브는 실린더 부하 동특성에 비해서 동특성이 더 빠르므로 비례 요소로 모델링 하였다. 유체의 압축성과 피스톤에 작용하는 임의의 외란 힘을 무시하면, 개회로 전달함수는 2차의 연속시간 선형시스템으로 모델링 될 수 있다. 슬라이딩모드 추적제어 시스템을 구성하기 위해서, 제로-오더 홀드 (Zero-order hold) 방법에 의한 Z-변환을 적용하였다.

$$\frac{X(s)}{U_{sv}(s)} = \frac{K_{px}}{s(1+\tau s)} \quad (1)$$

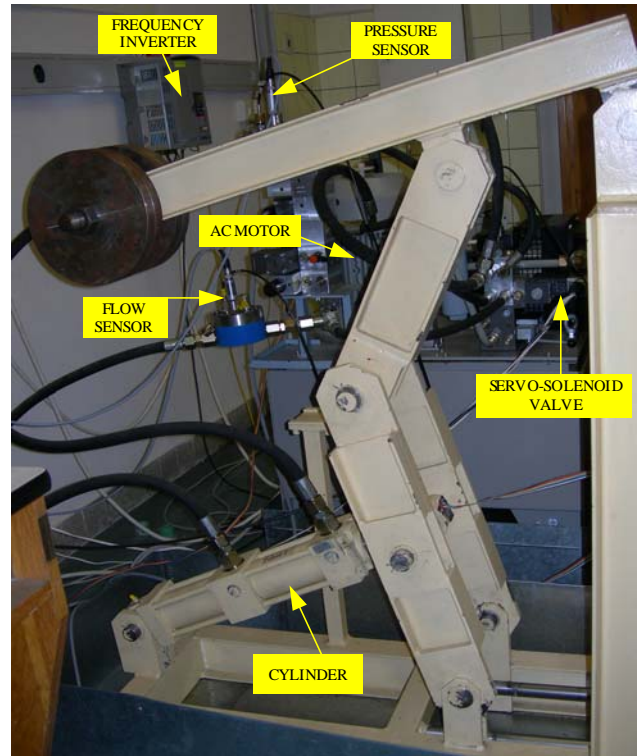


Fig. 2 Overview of experimental apparatus

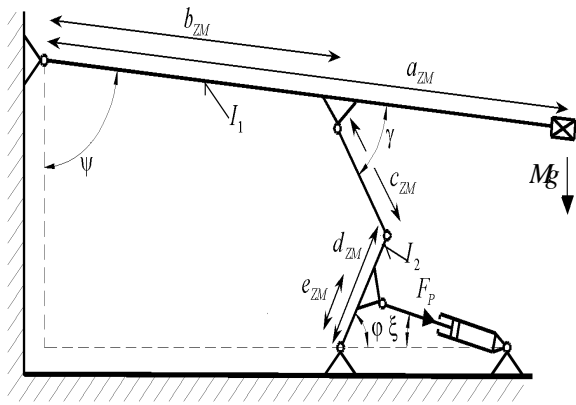
Table 1 Component specifications

Parameters		Value
Double rod cylinder	Piston diameter	63mm
	Rod diameter	45mm
	Stroke	120mm
Directional proportional control valve	Rated pressure	$1.0 \cdot 10^7 \text{Pa}$
	Rated flow	$1.5 \cdot 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$
Pump	Volumetric displacement	$17 \text{cm}^3/\text{rev}$
Asynchronous AC motor	Gain	$2.416/(\text{V}\cdot\text{s})$
	Time constant	0.01s

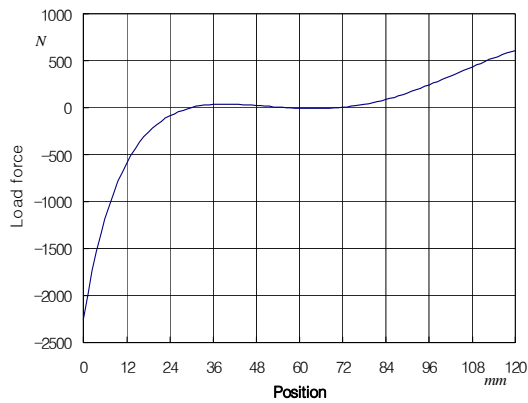
$$\frac{X(z^{-1})}{U_{sv}(z^{-1})} = \frac{z^{-1}(b_0 + b_1 z^{-1})}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (2)$$

여기에서

$$\begin{aligned} a_1 &= -(1 + e^{-T/\tau}), \quad a_2 = e^{-T/\tau}, \\ b_0 &= K_{px}(T + \tau e^{-T/\tau} - \tau), \\ b_1 &= K_{px}(\tau - T e^{-T/\tau} - \tau e^{-T/\tau}). \end{aligned}$$



a) Link mechanism for load-sensing



b) Load force versus position

Fig. 3 Basic characteristics of link mechanism

Fig. 1의 하부, 즉, 파워소스 유닛의 플랜트 동특성은 AC모터와 속도제어-정용량 펌프에 의해서 지배되며, 식(3)으로 나타내어진다<sup>5, 6)</sup>.

$$\frac{P_s(s)}{U(s)} = \frac{K_{ps}}{(T_M s + 1)(T_p s + 1)} \quad (3)$$

시상수  $T_M$ 은 AC모터와 주파수 제어기의 동적 거동을 나타낸다. 그리고  $K_{QG}$ 는 펌프 유량 계인이다. 유압용량  $C_H$ 은 체적  $V$ 와 체적탄성계수  $\beta$ 에 의존한다. 상수  $G_L$ 는 펌프의 누설은 나타낸다. 파라미터  $K_{ps}(=K_{QG}/G_L)$ 는 전체의 개회로 계인을 나타낸다. 시상수  $T_p(=C_H/G_L)$ 는 파워유닛의 유압부분의 동적 거동을 나타내며, 유압용량과 펌프의 누설에 의존한다. 식(3)은 디지털제어를 위해서 Z-변환된다. Fig. 2의 로봇틱 링크 메카니즘이 기구학의 관점에서 Fig. 3(a)에 도시되어 있다. 이 그림에 기초하여 피스톤에 작용하는 부하 힘을 시물레이션으로 해석한 결과가 Fig. 3(b)에 나타나 있다. 위치에 따른 부하 힘의 관

계로부터, 부하 힘의 방향이 행정 중간영역 근처에서 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 2의 로봇틱 링크 메카니즘이 부하감지 시스템의 테스트 장치로서 적합한 것을 시사한다.

Table 2 Model parameter values

Parameters	Values
$K_{px}$	4.58(m/sec)/volt
$K_{ps}$	50.02(bar/volt)
$T_M$	0.01sec
$T_p$	1.5sec
$\tau$	0.1sec

### 3. 제어기 설계

본 논문에서는 내재된 비선형성을 보상하고, 강인한 추적성능을 이루기 위하여 이산시간 슬라이딩모드 제어를 채택하였다. 제어기설계를 위한 플랜트모델을 식(4)로 표현한다.

$$x(k) = \frac{z^{-d} B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) + \eta(k) \quad (4)$$

식(4)에서  $u(k)$ 와  $x(k)$ 은 각각 측정가능한 입출력을 나타내고,  $\eta(k)$ 는 모델링오차이다.  $A(z^{-1})$ 와  $B(z^{-1})$ 는 다음과 같은 형태의 다항식이다.

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}, b_0 \neq 0 \quad (5)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \quad (6)$$

차수  $n$ ,  $m$  그리고 시간지연  $d$ 는 기지의 값으로 가정한다. 제어기설계에 사용된 모델의 파라미터 값들이 Table 2에 나타나있다. 추적제어성능을 증진시키기 위하여, PID제어와 결합된 이산시간 슬라이딩모드 제어기를 사용하였다. 제어기설계를 위한 블록선도가 Fig. 4에 도시되어있다. 여기에서 PID제어기는 식(7)로 표현되고, 다항식  $R(z^{-1})$ ,  $S(z^{-1})$ 는 식(8), (9)와 같다.

$$G_c(z^{-1}) = \frac{R(z^{-1})}{S(z^{-1})} \quad (7)$$

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} \quad (8)$$

$$S(z^{-1}) = 1 + s_1 z^{-1} \quad (9)$$

여기에서

$$r_0 = K_p \left( 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right), \quad r_1 = -K_p \left( 1 + \frac{2T_d}{T} \right),$$

$$r_2 = K_p \left( \frac{T_d}{T} \right), \quad s_1 = -1.$$

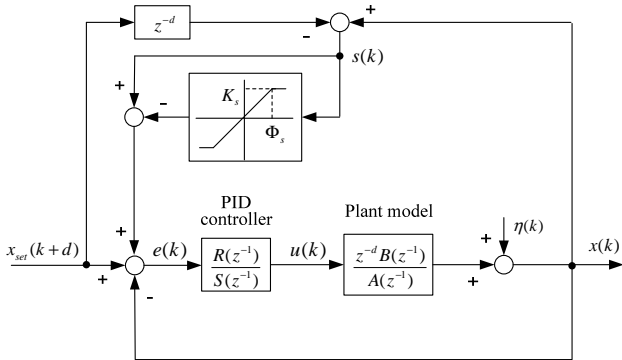


Fig. 4 Block diagram for sliding mode control

파라미터  $\phi_s$ 는  $s(k) = 0$  주위의 경계층 크기를 결정한다. 경계층은 모델링오차에 대한 강인성을 가져다 준다. 추적 성능에 영향을 주는 모델링오차는 포화 함수에 의하여 슬라이딩 경계층 내부에 머무르게 되고, 이로 인하여 강인성을 증가시킨다. 이 제어방식의 수렴성에 대한 증명과 파라미터  $K_s$ 와  $\phi_s$ 의 선정에 대해서는 참고문헌<sup>8, 9)</sup>에 나타나있다. 본 연구에서 채택한 제어방식이 Table 3에 나타나있다. 압력제어 루프로부터 위치제어 루프에 작용하는 외란에 대한 강인제어를 위하여 슬라이딩모드 제어를 위치제어 루프에 적용하였다. 실험에 사용된 PID제어와 슬라이딩모드 제어의 설계 파라미터 값들이 Table 4에 열거되어있다. PID제어기의 계인은 실제 실험에서 미세조정을 통하여 구하였으며, 이를 선형 플랜트 모델의 제어관점에서 비교 고찰하였을 때 지배적 폐회로극점 (Dominant closed-loop pole)이  $-24.3+j60.3$ 에 해당하였다. 슬라이딩모드 제어의 고유치는  $-0.8$ 로 설정하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

효율적이고 유연한 제어실험을 수행하기 위해서, Matlab-Simulink의 실시간 프로세싱을 위한 데이터 획득 보드 AD512가 내장된 PC가 사용되었다. 실험

수행에서 샘플링 시간은 비례방향제어밸브의 대역폭, 그리고 폐회로 시스템의 요구되는 동특성을 고려하여  $T=0.005s$ 로 설정하였다. 원하는 기준신호는 가속도, 등속도, 감속 그리고 정지의 서로 다른 동작모드를 구현할 수 있도록, 스무스 사다리꼴(Smooth trapezoidal) 형태로 설정하였다. Fig. 5에는 부하감지, 일정한 공급압력 그리고 압력제어를 하지 않은 경우에 있어서 슬라이딩 모드 기반 제어결과를 비교하고 있다. 슬라이딩 모드를 결합한 결과 위치추적오차 관점에서의 성능이 거의 동일하게 우수함을 알 수 있다. 초기에  $\Delta p$ 가 흔들리는 이유는 위치제어루프와의 커플링에 따른 외란에 기인한다. Fig. 6에는 부하감지제어 하에서 압력설정치  $\Delta p_{set}$ 에 따른 피스톤 위치와 오차신호를 나타낸다. 압력 설정이 감소할수록 위치오차가 현격하게 증가되는 것을 알 수 있다. Fig. 7에는 부하감지, 일정한 공급압력 그리고 압력제어를 하지 않은 경우에 있어서 유압펌프의 입력에너지의 비교를 나타낸다. 전체 사이클을 포함하는 시간(1s~13s)을 고려할 때에, 압력제어를 하지 않은 경우의 입력에너지가 가장 크다. 그리고 부하감지제어의 입력에너지에 비해서 일정한 공급압력제어 하에서의 입력에너지가 약간 더 낮다. 이는 부하감지제어에 내재되어 있는 작동원리에 의해서 야기된 것으로 사료된다. 부하감지 제어는 밸브가 닫혀있을 때, 즉,

Table 3 Control method classification

	PID-control (position loop)	P-control (pressure loop)	Sliding mode control (position loop)
Control 1a	O	O	O
Control 2a	O	O	O
Control 3a	O		O

\* Control 1a : Load-sensing control( $\Delta p_{set} = 35bar$ )

\* Control 2a : Constant system pressure control  
( $P_{S\_set} = 63bar$ )

\* Control 3a : No pressure control

Table 4 Design parameters for controller

Parameters		Values
PID-control	$K_p$	100
	$T_i$	0.15
	$T_d$	0.01
Sliding mode control	$K_s$	18
	$\Phi_s$	10

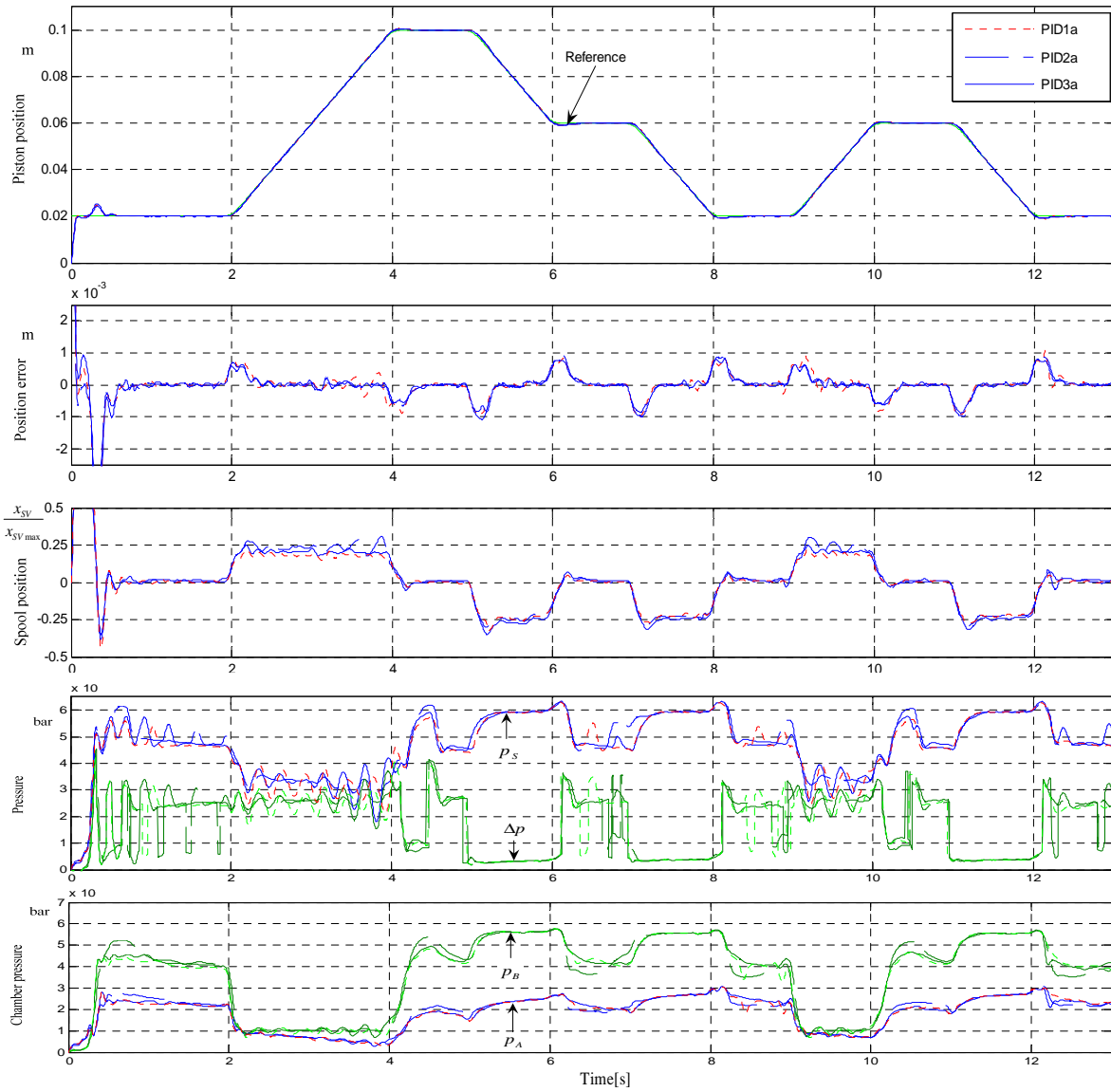


Fig. 5 Responses under load-sensing, constant supply pressure, and no pressure control

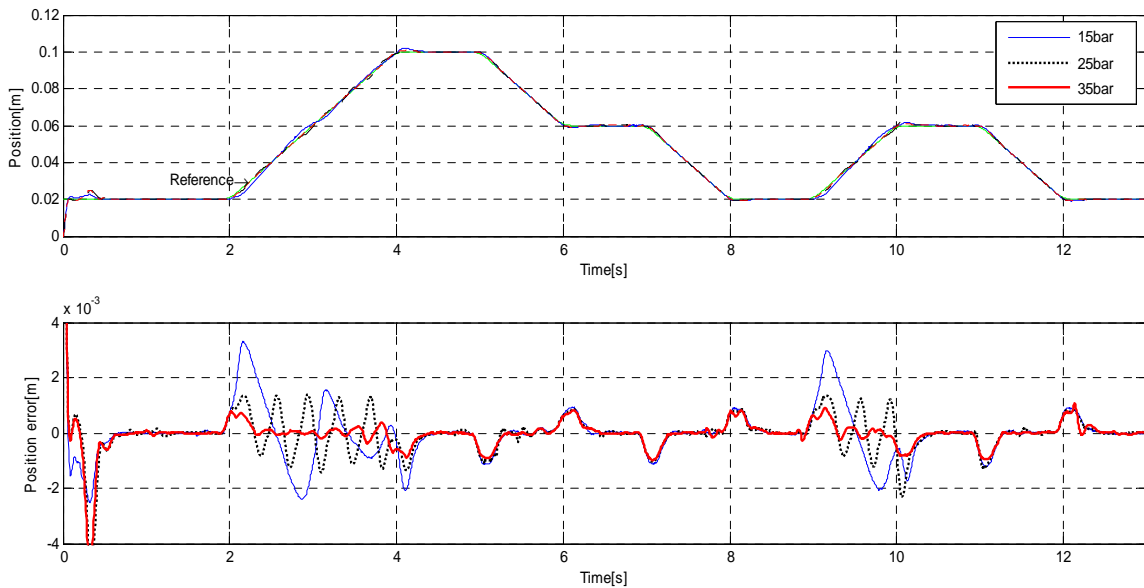


Fig. 6 Responses in terms of pressure setting  $\Delta p_{set}$  under load-sensing

최대 시스템 압력 근처에서는 액티브(Active)하게 작동하지 않는다. 부하감지가 액티브하게 작동하는 일정속도 모드 동안, 즉, 2s~4s 사이를 고려하면, 부하감지 제어 하에서의 입력에너지가 가장 작다. Fig. 8에는 부하감지 제어 하에서 압력설정치  $\Delta p_{set}$ 에 따른 유압펌프의 입력에너지를 나타낸다. 압력설정치가 감소함에 따라 입력에너지가 역시 현격하게 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 6과 8은 위치오차와 입력에너지 사이에 합리적인 조율이 필요하다는 것을 시사하고 있다.

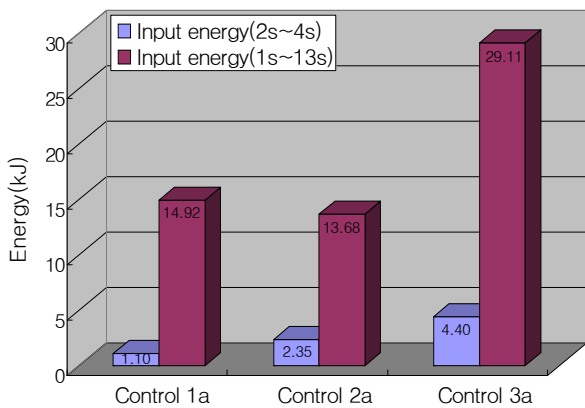


Fig. 7 Input energy to hydraulic pump under load-sensing, constant supply pressure, and no pressure control

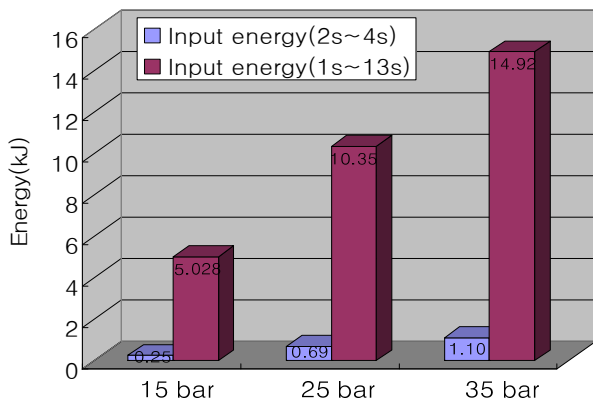


Fig. 8 Input energy to hydraulic pump in terms of pressure setting  $\Delta p_{set}$

## 5. 결 론

본 논문에서는 에너지절약의 관점에서, 비례제어 밸브-실린더시스템과 전기유압 부하감지시스템의 통합을 구현하고자 하였다. 위치 추적제어는 세 가지 종류의 공급압력 제어시스템, 즉, 부하감지제어, 일정

한 공급압력제어, 그리고 압력제어를 하지 않는 기존의 밸브제어 실린더시스템에 의해서 시도되었다. 부하감지가 액티브(Active)한 모드에서 작동하는 2초와 4초 사이를 고려하였을 때, 부하감지 제어시스템에서의 위치추적 제어 동안에 기존의 밸브제어 실린더 시스템에서와 동일한 위치추적제어 정확성을 나타내면서, 펌프 입력에너지를 상당히 줄일 수 있었다. 일정한 공급압력 제어시스템에서도 위치추적제어 정확성을 유지하면서 입력에너지를 역시 절약할 수 있다는 것을 보여주었다. 이상으로부터 밸브제어 실린더 시스템에서의 위치추적제어와 부하감지 시스템에서의 에너지절약제어를 통합하는 것이 가능함을 보여주었다.

## 후 기

이 논문은 2009학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

## 참고 문헌

- 1) B. Zähe, R. Schmitz, and M. Eschweiler, "Electrohydraulisches Load Sensing", O+P ölhydraulik und Pneumatik, 8/1990, pp. 538~553.
- 2) W. Backe and B. Zähe, "Electrohydraulic Loadsensing. In Vehicle Hydraulic Systems and Digital/Electrohydraulic Controls", SAE paper 911814.
- 3) J. Mattila and T. Virvalo, "On Energy-efficient Motion Control of a 3 DOF Hydraulic Crane with Computed Force Control Method", 1st International Conference on Fluid Power, March 17-18, 1999.
- 4) M. H. Chiang and Y. W. Chien, "Integration of Load-Sensing Control and Path Control on a Hydraulic Valve-Controlled Cylinder System", Internationales Fluidtechnisches Kolloquium, Aachen 2002.
- 5) MAŇÁSEK,R., "Simulation of Electro- hydraulic Load-Sensing System with AC Motor and Frequency Changer", Proc. of the 1st FPNI-PhD Symposium, Str.311-323, 2000.
- 6) P. Noskievič, "Hydraulic power unit with speed controlled fix displacement pump", The Eighth

Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICEF'03, May7-9, 2003.

- 7) B. Lantto, J. O. Palmberg and P. Krus, "Interaction between Loads in Load-Sensing Systems", 2nd Tampere International Conference on Fluid Power, März, 1991.
- 8) S. H. Cho and K. A. Edge, "Adaptive sliding mode tracking control of hydraulic servo systems with unknown nonlinear friction and modelling error", Journal of Systems and Control Engineering, 214(4), pp. 247~257. 2000.
- 9) S. H. Cho, "Robust Discrete Time Tracking Control Using Sliding Surfaces", KSME International Journal, 9(1), pp. 80~90, 1995.