

건설기계용 유압실린더 위치 제어시스템의 성능개선에 관한 연구 A Study on Performance Improvement of Position Control System in Hydraulic Cylinder for Heavy Construction Machinery

한석재, 박성환**, 이진걸***

*부산대학교 정밀기계공학과 대학원(Tel: (051)510-1449; Fax: (051)517-7716; E-mail:sjhan@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

**부산대학교 기계기술연구소(Tel: (051)510-1449; Fax: (051)517-7716; E-mail: Shpark01@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

***부산대학교 정밀기계공학과(Tel: (051)510-2330; Fax: (051)517-7716; E-mail:jinklee@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

Abstracts Even though digital control type high speed solenoid valve is a little inferior to analog control type servo valve and proportional control valve in performance, it is cheap and has secure performance against pollutant and simple control circuit. But high speed solenoid valve is hardly used for heavy machinery instead of servo valve or proportional control valve that is used in severe condition because the valve itself is small capacity and it shows wide dead zone during on-off control and chattering of hydraulic cylinder by chattering of pressure. It is desirable to use low-priced and strong pollutant resistant high speed solenoid valve for obtaining reliability of operation from severe working condition because it isn't necessary to acquire response characteristic of high frequency when we consider the characteristic of heavy machinery operation.

In this study, PWM control algorithm for pilot pressure control of large capacity pilot operating valve will be used for precision position control of heavy machinery hydraulic cylinder. Not only cost reduction of main control valve but also high reliability of heavy machinery in severe condition can be obtained by using this pilot operating spool valve with high speed solenoid valve.

Keyword High Speed Solenoid Valve, Solenoid Valve, Pilot Operating Spool Valve,
PWM(Pulse Width Modulation)

1. 서론

최근 전자공학 및 컴퓨터 공학 기술이 눈부시게 발전함에 따라 각종 센서가 기능 및 내환경성 면에서 우수한 성능을 가지게 되었고, 마이크로 컴퓨터를 이용하여 신호의 처리가 편리하고 자유롭게 되면서 기계(mechanics)를 전자회로(electronics)로 조작 또는 제어하는 소위 메카트로닉스(mechatronics) 기술이 급속도로 발전하고 있다. 유압장치가 적용된 대부분의 산업기계와 건설기계 등도 이와 같은 주변기술의 발전에 힘입어 작동의 신뢰성을 보장하고 마이크로 컴퓨터와의 적합성 및 기기의 단순화를 기한 작업성능이 우수한 장치로 개선되어지고 있다.

그러나 기존에 사용되고 있는 건설기계의 경우 작업조건이 혹독하고 보수, 정비가 주로 건설현장인 야외에서 이루어지는 경우가 많으므로 유압 작동유의 오염 및 내환경성 면을 고려할 때 주 제어밸브(main control valve)로 사용되는 비례전자밸브(proportional control valve)로는 작동의 신뢰성을 보장하기 어렵다. 또 작업중의 충격, 진동 등으로 인하여 증폭기 및 D/A변환기를 필요로 하는 복잡한 비례전자밸브의 제어회로도 보존이 용이하지 않다.

따라서 유압식 건설기계의 작업성능 향상과 작동의 신뢰성 보장을 위해서는 오염 및 내환경성 면에서 뛰어나며 디지털 신호로 직접 구동되어 제어회로가 간단한 주 제어밸브(main control valve)의 사용이 절실히 요망된다.

한편 기존의 상품화되어 있는 솔레노이드밸브를 주 제어밸브로 사용하는 경우 대용량의 건설기계용 유압실린더의 제어에는

적합하지만 밸브의 응답지연(40~50[ms])특성으로 인하여 고정도의 제어에는 부적합하다.

최근에 개발된 디지털 제어방식의 고속전자밸브(high speed solenoid valve)는 밸브 실(chamber)내의 유체운동량의 평형화에 의하여 유체력을 보상하여 밸브의 조작력을 저감시키고, 유한요소법과 가정자모법으로 솔레노이드의 자속분포를 해석하여 자속의 저감과 국소적 자기포화문제를 해결함으로써 저전력화와 고속화를 실현하여 응답특성(3~5[ms])이 뛰어나고 오염 및 내환경성 면에서 우수하고 디지털 신호로 직접 구동되므로 제어회로가 간단하고 가격이 저렴하다. 그러나 상품화된 고속전자밸브의 최대 유량이 8[l/min]으로 매우 작기 때문에 대용량의 유압실린더를 작동하기에는 적절하지 못한 성능을 가진다.

본 연구에서는 아직은 실용화 단계에 있지 않은 소용량의 고속전자밸브와 대용량의 스푼밸브(spool valve)를 결합하여 건설기계용 대용량 유압실린더의 위치를 고정도(high accuracy)로 제어함으로써 유압식 건설기계의 주 제어밸브(main control valve)의 가격절감은 물론 오염 및 내환경성 면에서 신뢰할 수 있는 실용화 가능한 주 제어밸브 유니트(main control valve unit)를 개발하고자 한다.

2. 시스템 구성

본 연구에서 대상으로 하는 고속전자밸브를 이용한 건설기계용 유압실린더 위치 제어시스템의 구성은 Fig.1과 같다. 유압 파워 장치로서 전동기에 연결된 정용량형 유압 펌프를 사용하며, 보조 펌프로부터 토출되는 유량을 파일럿 압력 제어용으로 사용한다. 파일럿 압력 조절 밸브로 사용되는 고속전자밸브는 3포트

2위치 질환형(HS-G01-A21-D1B10) 2개를 사용한다.

현재 상용화된 고속전자밸브는 밸브 실(chamber) 내의 유체력 보상과 솔레노이드의 저전력화와 고속화의 실현을 위하여 최대 유량은 약 8[l/min] 정도이므로 이러한 고속전자밸브를 이용하여 대용량의 건설기계용 유압실린더를 직접 제어하기는 불가능하다. 그러므로 응답특성이 월등히 빠른 고속전자밸브를 Fig.1과 같이 파일럿 압력 제어용 밸브로 사용하면 기존의 솔레노이드로 작동되는 파일럿 작동형 밸브를 사용한 경우보다 더 우수한 응답특성을 기대할 수 있다. 또 고속전자밸브는 디지털 신호로 직접 제어가 가능하므로 제어회로가 간단해지며 오염에 강한 내환경성 특성으로 인하여 시스템의 작동의 신뢰성 또한 보장할 수 있다.

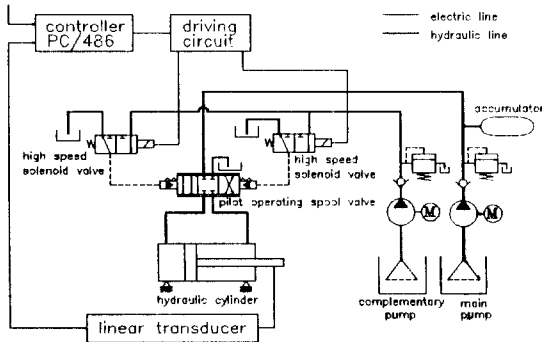


그림 1. 전기·유압 위치 제어시스템의 구성도

Fig. 1. Schematic diagram of the electro-hydraulic position control system using pilot operating spool valve

표 1. 실험 장비의 제원

Table 1. Specifications of experimental apparatus

Instruments		Specification
Main Hydraulic system	Electric Motor	1,150[rpm], 7.5[kW]
	Hydraulic Pump	28[cc/rev]
	Solenoid Valve	Max. Press160[Kg/cm ²] Max. Flow 100[l/min]
	Cylinder	A1(Head)
A2(Rod)		28.274[cm ²]
Complementary Hydraulic system	Electric Motor	1,160[rpm], 1.5[kW]
	Hydraulic Pump	10[cc/rev]
	High Speed Solenoid Valve	Max. Press175[Kg/cm ²] Max. Flow 8[l/min]
Sensor	Displacement Sensor	Max. range 5[cm]
I/O Device	A/D, D/O Converter	12 bit ±5[V] Range
Input	Function Generator	0.0001[Hz]~1[MHz]

본 연구에서는 고속전자밸브의 응답특성과 솔레노이드밸브의 응답특성, 그리고 고속전자밸브를 결합한 파일럿 작동형 스톱밸브의 응답특성을 고찰하기 위하여 기존의 솔레노이드밸브에서 솔레노이드를 제거하여 스톱밸브만을 사용하고 그 측면에 고속전자밸브를 연결할 수 있도록 개조하였다. Fig.2는 기존의 솔레노이드밸브의 구조이고, Fig.3은 고속전자밸브를 결합한 파일럿 작동형 스톱밸브이다. P1은 보조펌프에서 나오는 포트이고 T1은 보조탱크로 들어가는 포트를 나타낸다.

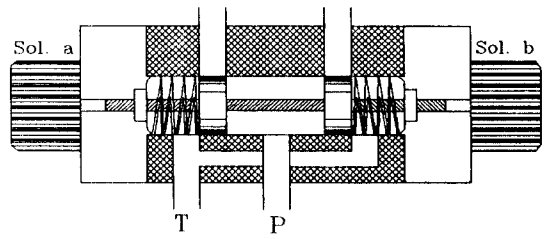


그림 2. 솔레노이드밸브의 구조

Fig. 2. Schematic diagram of the solenoid valve

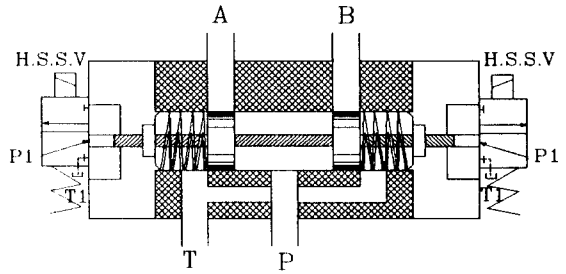


그림 3. 고속전자밸브와 결합된 파일럿 작동형 스톱밸브의 구조

Fig. 3. Schematic diagram of the pilot operating spool valve with high speed solenoid valve

3. 제어기 설계

고속전자밸브와 같은 온-오프(on-off)형 밸브의 제어에 사용된 PWM 제어방식은 펄스폭을 변조함에 있어 임의로 선정된 반송파의 주기에 대하여 PWM 변환기에 입력되는 오차량에 비례하여 출력되는 펄스의 폭을 변조하는 방식이었다. 따라서 고속전자밸브의 온-오프 시간지연 특성을 고려할 때 샘플링 타임을 어느 한도 이하의 짧은 시간으로 설정하기는 곤란하였다. 또, 시스템의 안정한 작동을 위해서는 비교적 큰 불감대(dead zone)를 설정하지 않으면 안되기 때문에 고정도의 제어 및 속응성의 구현이 곤란한 것이 결점이다.

[7]에서 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 짧은 샘플링 타임의 선정이 가능하고 고정도의 제어 및 속응성의 구현이 가능한 톱니파형 반송파(saw-toothed carrier wave)를 이용한 개선된 펄스폭 형성방식을 제안했다. 본 연구에서도 이와 같은 톱니파형 반송파를 이용한 펄스폭 형성방식을 채택했다. 이때 PWM 변환기 및 제어기로는 A/D, D/O변환기를 장착한 마이크로 컴퓨터를 사용하며, 제어 논리 회로는 C 프로그래밍 언어를 사용하여 구성한다. 또 제어기는 유압 실린더의 출력인 변위를 전압[V]으로 변환하는 LDT의 신호를 피드백 신호로 사용한다.

이와 같은 개선된 펄스폭 형성방식의 제어기를 사용하는 경우 Fig.4에 나타난 것과 같이 제어입력이 음영 처리된 부분에 존재할 때는 고속전자밸브가 항상 온(on) 상태를 유지하므로 유압 실린더의 위치 또한 음영 처리된 영역까지 정정동작 없이 바로 이동하며, 톱니파형 반송파가 존재하는 영역부터 정정동작이 행하여진다. 즉, 톱니파형 반송파의 높이는 제어동작이 한정된 영역에서 일어나도록 제어 범위를 제한하고 있으므로 이러한 형태의 제어기를 사용하면 속응성 면에서 대폭적인 개선이 가능하다. 또, 각 샘플링 타임 마다 톱니파형 반송파와 제어입력을 비교하여 고속전자밸브의 온-오프(on-off)가 결정되므로 제어입력에 갑작스러운 변화가 일어날 경우 기존의 PWM 제어 방식들보다 양호한 응답 특성을 가진다.

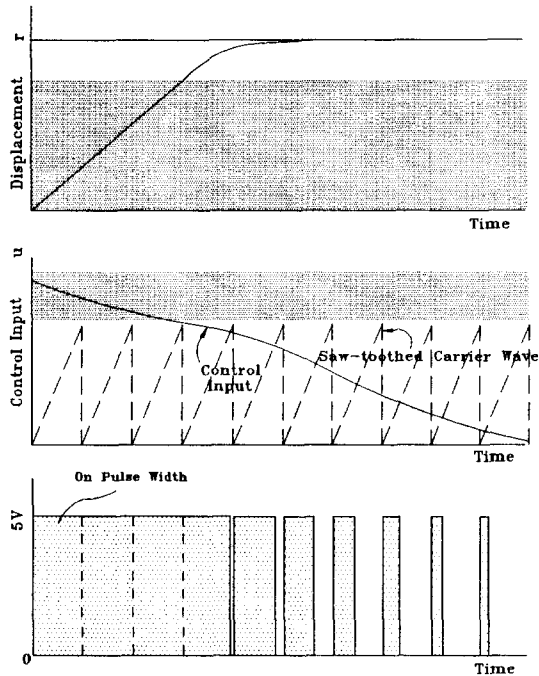


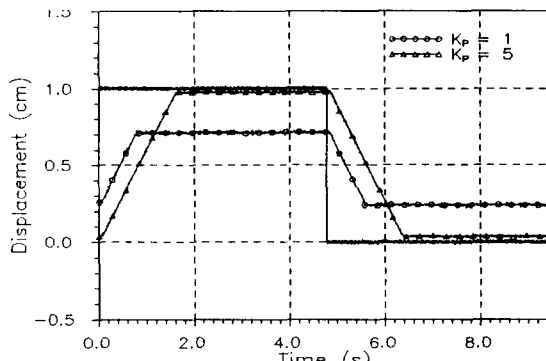
그림 4. PWM방식의 제어기 구성도

Fig. 4. Schematic diagram for control concept of PWM method

4. 결과 및 고찰

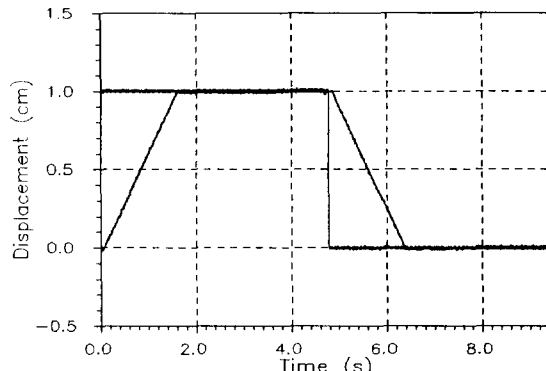
본 연구에서는 고속전자밸브, 솔레노이드밸브, 고속전자밸브를 이용한 파일럿 작동형 스피들밸브에 대하여 각각 단순 페루프 제어(simple feedback control), 비례 제어(proportional control), PID제어에 관한 위치제어 실험을 하였다. 각각의 샘플링 타임은 0.5[ms]로 하고 기준입력 주파수는 약 0.1[Hz]이다. 대용량 유압 실린더가 사용되는 건설기계는 고주파의 응답특성을 필요로 하지 않기 때문에 저주파의 영역에서 실험하였다. 먼저 Fig.5는 고속전자밸브를 사용한 실험으로써 톱니파형 반송파의 높이는 양자화된 수 100으로 하고 주기는 10[ms]이다. 여기서 톱니파형 반송파의 최적주기는 고속전자밸브가 열리고 닫힐때 각각 10[ms]씩의 시간지연을 가지므로 최소 10[ms]로부터 시행착오법으로 정하였다. 톱니파형 반송파의 최적높이는 제어범위를 제한하는 역할을 하므로 기준입력이 1[cm](양자화된 수 409)인 전기·유압 위치 제어시스템에서는 최대 409에서부터 여러 번의 예비실험을 거쳐 선정하였다. Fig.5의 (a)에서 보듯이 단순 페루프 제어의 경우 약 38%의 정상상태오차가 발생하고 비례제어의 경우에도 약 2.5%의 정상상태 오차가 발생함을 알 수 있다. Fig.5의 (b)에서 PID제어의 경우는 정상상태오차가 발생하지 않고 정착시간은 약 1.7[s]이고, 수압면적이 다른 펌로드 실린더 양쪽방향의 응답특성이 일치함을 나타내고 있다.

이러한 실험결과는 작은 유량으로 대용량의 건설기계용 유압 실린더를 제어하는데 나타나는 문제점으로써 제어는 가능하나 속응성면에서 적절하지 못함을 알 수 있다.



(a) 단순 페루프 제어와 비례 제어

(a) Simple feedback control and proportional control



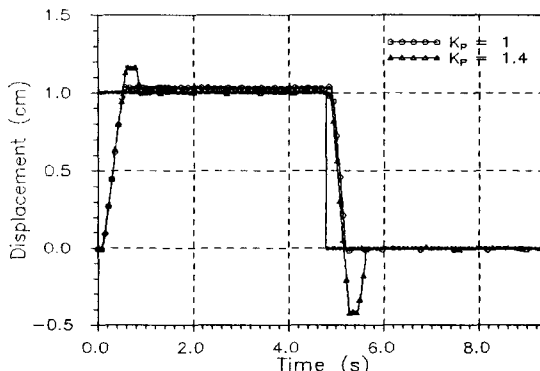
(b) 비례·적분·미분 제어

(b) PID control

그림 5. 고속전자밸브의 실험결과

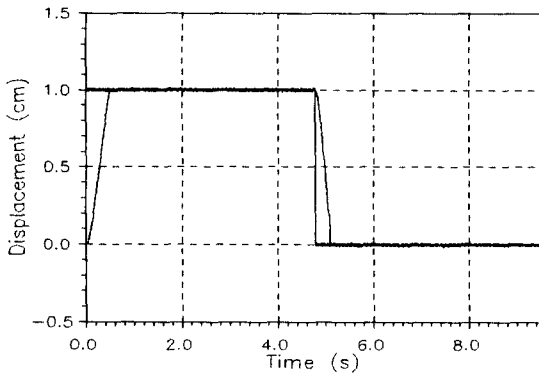
Fig. 5. Experimental results of high speed solenoid valve

Fig.6의 솔레노이드 밸브를 사용한 실험결과에서 앞에서의 선정기준과 마찬가지로 톱니파형 반송파의 높이는 양자화된 수 175이고 주기는 200[ms]이다. Fig.6의 (a)에서 단순 페루프 제어의 경우 약 3.4%의 정상상태오차가 발생하고 비례제어에서는 밸브의 응답 지연시간은 길고 제어유량 자체는 크기 때문에 약 17.1%의 오버슈트와 약 42%의 언더슈트가 발생한다. Fig.6의 (b)에서 PID제어의 경우에는 오버슈트와 정상상태오차가 발생하지 않고 약 0.5[s]의 정착시간을 가진다. 또한 고속전자밸브의 경우와 마찬가지로 실린더 양쪽방향의 특성이 일치함을 나타내고 있다. Fig.6에서 보듯이 솔레노이드 밸브만으로 실험하였을 경우 그래프에서는 전체 시간이 길어 나타나지 않으나 데이터를 분석해 보면 약 0.1[s]의 시간 지연이 생겨 과도응답특성이 양호하지 못하다.



(a) 단순 페루프 제어와 비례 제어

(a) Simple feedback control and proportional control



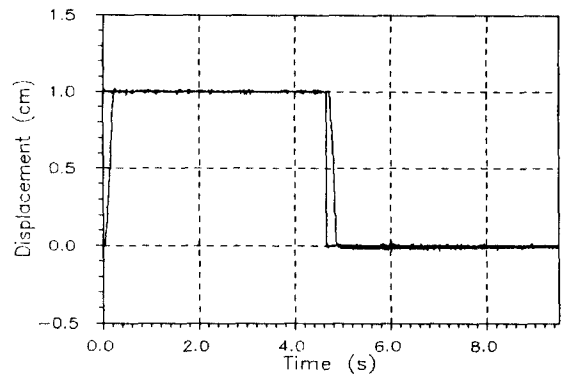
(b) 비례·적분·미분 제어
(b) PID control

그림 6. 솔레노이드밸브의 실험결과

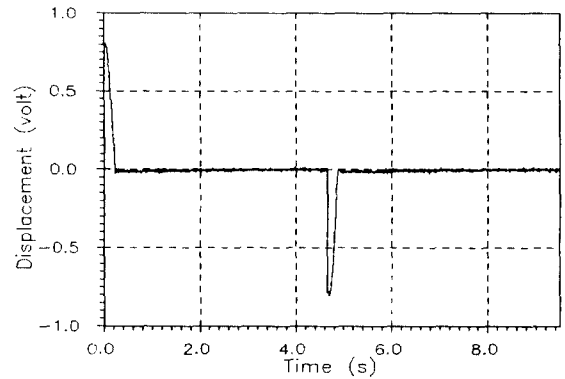
Fig. 6. Experimental results of solenoid valve

Fig.7은 고속전자밸브를 이용한 파일럿 작동형 스폴밸브의 실험 결과로서 앞에서의 선정기준과 마찬가지로 방법으로 톱니파형 반송파의 높이는 양자화된 수 150이고 주기는 10[ms]로 하였다. Fig.7의 (a)에서 단순피드백의 경우 약 5~14%의 정상상태오차가 발생한다. 이 현상은 고속전자밸브를 2개 사용함에 따라 각각의 개체차로 인한 특성과 편로드 실린더의 수압면적이 다른 특성으로 인해 나타나는 것으로 사료된다. 비례제어의 경우에는 약 23%의 오버슈트와 약 29%의 언더슈트가 발생한다. Fig.7의 (b)에서 PID제어의 경우 정상상태오차는 발생하지 않고 약 0.224[s]의 정착시간을 가진다. Fig.7의 (c)는 톱니파형 반송파에 의한 펄스폭 변조가 행하여진 제어입력을 나타낸다. Fig.7의 (d)에서 검게 표시된 부분은 톱니파형 반송파를 거치면서 연속적으로 온-오프(on-off) 되는데 스위칭 시간이 아주 짧고, 파일럿 작동형 스폴밸브의 스폴이 저주파 통과 필터(low-pass-filter)의 역할을 수행하기 때문에 압력맥동으로 인한 영향은 아주 작아 Fig.7의 (b)에서 나타난 것과 같이 안정한 제어가 가능하다.

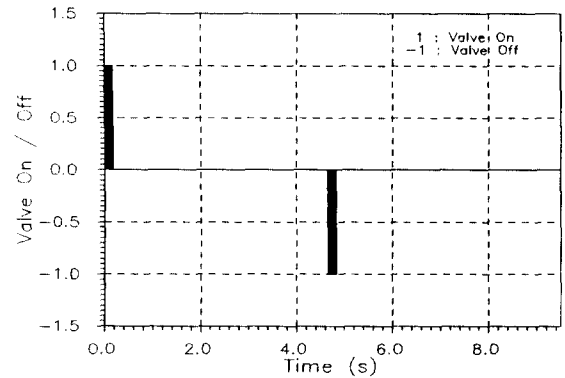
이상의 결과에서 보듯이 건설기계와 같이 저주파에서 작동되는 유압실린더의 제어에는 고속전자밸브를 이용하여 파일럿 작동형 스폴밸브로 유압실린더를 제어할 경우 솔레노이드밸브에서 나타나는 시간지연을 줄일 수 있으므로 속응성과 고정도의 응답을 얻을 수 있고 가격면에서도 저렴하기 때문에 실용화가 가능하다.



(b) 비례·적분·미분 제어
(b) PID control



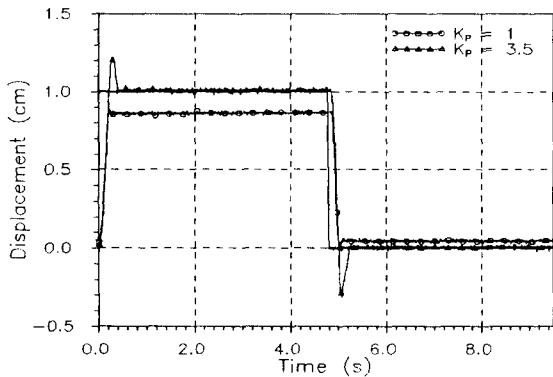
(c) 제어 입력
(c) Control input



(d) 제어 입력 펄스
(d) Control input pulse

그림 7. 고속전자밸브를 이용한 파일럿 작동형 스폴밸브의 실험결과

Fig. 7. Experimental results of pilot operating spool valve with high speed solenoid



(a) 단순 피드백 제어와 비례 제어

(a) Simple feedback control and proportional control

5. 결론

본 연구에서는 소유량의 고속전자밸브와 대유량의 스폴밸브를 결합한 고속전자밸브를 이용한 파일럿 작동형 스폴밸브를 이용하여 건설기계용 대용량 유압실린더를 제어함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 온-오프(on-off) 응답특성이 뛰어난 고속전자밸브를 파일럿 압력 제어용 밸브로 사용함으로써 기존의 솔레노이드를 이용한 파일럿 작동형 밸브를 사용한 위치 제어시스템보다 속응성이 뛰어난 고정도의 응답특성을 기대할 수 있다.

· 건설기계의 주제어밸브(main control valve)로 사용되고 있는 비례전자밸브는 제어회로가 복잡하고 작동유의 오염에 취약하지만 본 연구에서 제안한 고속전자밸브를 이용한 제어방식을 사용하면 제어회로도 간단하고 작동유의 오염에도 강하여 작동의 신뢰성을 향상시킬 수 있으며 가격절감효과도 기대할 수 있다.

6. 참고문헌

- [1] Shing-Gwo Wu, "Analysis and PID Controller Design of PWM Systems", *Transaction of the ASTM*, Vol.110, pp.355~360, 1988
- [2] 伊藤博, "油壓機器のメカトロ化", 油壓と空氣壓, 第18卷, 第5號, pp.363~369, 1987
- [3] 田中裕久, "油空壓のデジタル制御", 油壓と空氣壓, 第16卷, 第1號, pp.3~11, 1985
- [4] 池尾茂, "システムのインテリジェント化と油壓電磁弁", 파워-디자인, 第26卷, 第6號, pp.26~31, 1981
- [5] 田中裕久, "高速電磁弁に關する研究", 日本機械學會論文集, 第50卷, pp.1594~1601, 1984
- [6] 김대근, 정순배, 이교일, "고속전자밸브를 이용한 압력제어에 관한 연구", 한국자동제어 학술회의 논문집, pp.426~431, 1994
- [7] 박성환, "고속전자밸브를 이용한 전기·유압서보시스템의 제어에 관한 연구", 부산대학교 박사학위논문, 1996
- [8] 송창섭, 양해정, 송성배, "PWM방식 고속 전자식에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 第11卷, 第6號, pp.127~135, 1994
- [9] 이진걸, 박성환, "고속전자밸브를 이용한 유압실린더의 PWM 제어에 관한 연구", 한국정밀공학회 논문집, 第12卷, 第7號, pp.138~147, 1995
- [10] 이진걸, 박성환, "고속전자밸브를 이용한 유압전동장치의 속도제어에 관한 연구", 한국정밀공학회 논문집, 第12卷, 第7號, pp.148~157, 1995
- [11] 임달호, "전자계의 유한요소법", 동명사, pp.65~147, 1987
- [12] 정순배, 김대근, 이교일, "PWM밸브의 유압맥동 감소 및 비선형성 특성에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회, pp.226~232, 1993
- [13] 최인호 외 3명, "솔레노이드 액츄에이터 전자기 시스템의 유한요소해석", 전기학회논문집, 第40卷, 第11號, 1991