

유압펌프 회전속도 제어방식 유압제어시스템의 특성 비교 분석

Comparative Characteristic Analysis of a Hydraulic Control System Using a Speed Controlled Hydraulic Pump

정헌술 · 정승욱

H. S. Jeong, S. W. Jeong

Key Words : System Overall Efficiency(시스템 전효율), AC Motor Speed Control(교류 모터 속도제어), Pump Speed Controlled System(펌프 속도 제어시스템), Pump Capacity Controlled System(펌프 용량 제어시스템), Valve Controlled System(밸브 제어시스템)

Abstract: Hydraulic systems are widely used as a power transfer and/or power control system due to its flexibility, controllability, accuracy and high power density. Valve controlled and/or pump capacity controlled systems are normally adopted as a control device, but nowadays pump speed controlled systems are emerging as a new energy-efficient hydraulic control system. In this paper the pump speed controlled system for the cylinder position control of a counter balance circuit is investigated by simulation study and position control experiments were carried out. As a result, the possibility and efficiency of the pump speed controlled system were verified.

1. 서 론

유압시스템은 건설기계, 공작기계, 자동차, 항공우주 산업분야 등 광범위한 분야에서 주요 동력원, 동력 전달 및 동력 제어 수단으로 사용되고 있으며, 유압시스템의 성능, 제어정밀도 내구성 향상에 많은 개발이 이뤄져 왔다.

최근 환경 및 에너지에 대한 관심의 증가와 석유 자원의 수급 불안정으로 인해, 건설장비, 자동차산업을 포함한 전 산업분야에서 친환경 에너지에 대한 관심이 폭발적으로 증가하고 있다. 이는 국내는 물론 전 세계적인 공통 현상이므로, 새로운 에너지의 원천 기술 개발은 물론, 기존 산업분야에서 에너지 효율 극대화를 꾀하기 위한 다양한 방면의 본격적인 연구 개발이 진행되고 있다.

그에 발맞추어, 본 연구에서는 유압시스템 에너지 효율 향상의 일환으로, 유압펌프를 구동하는 전기모터의 회전속도 제어시스템의 제어성능 및 효율에 대

하여, 기존 밸브제어 및 펌프 용량제어 시스템과의 특성을 비교해 보고자 한다.

보통 유압시스템은 고정용량(fixed displacement)형 유압펌프로 유압 동력을 발생시키고, 액추에이터의 제어는 전담 밸브를 배치하여 해당 힘 또는 속도를 조절하며, 유압회로의 시스템 압력은 압력 레귤레이터로서 유지하는, 밸브제어 시스템(valve controlled system)을 채택하는 것이 일반적이다. 한편 이 경우 발생되기 쉬운 잉여 유압동력의 절감을 목표로, 가변용량(variable displacement)형 유압펌프를 사용하여 시스템에 소요되는 만큼 유압동력을 공급하는 펌프 용량제어 시스템(pump capacity controlled system)을 채택하기도 한다. 반면, 최근 전력전자 요소기기의 발달과 전기모터 동력밀도의 개선으로, 전기모터를 유압동력의 제어기구로 채택한 펌프속도 제어시스템(pump speed controlled system)이 시도되고 있다.

본 연구에서는 이러한 배경을 바탕으로 유압시스템용 제어방식으로 유압펌프 속도제어 시스템의 채택 가능성과 성능 및 효율특성을 검토해 보고자 한다. 본 논문에서는, 위치제어가 어렵다고 알려진 벨트-풀리에 하중에 매달려 있는 카운터 밸런스(counter balance) 회로를 대상으로, AMESim 모델링 및 시물

접수일 : 2010년7월6일, 수정(1차):2010년8월13일, 수정(2차): 2010년8월20일, 게재확정일: 2010년 8월 20일
 정헌술(책임저자): 군산대학교 기계자동차공학부
 E-mail: hsjeong@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-4723
 정승욱: 군산대학교 기계자동차공학부 학사과정

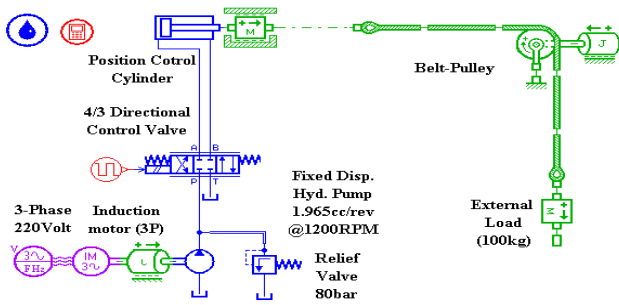


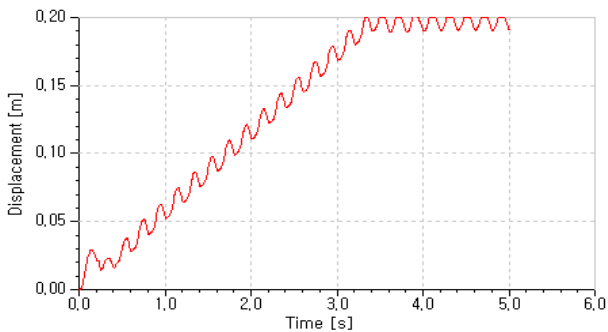
Fig. 1 Hydraulic position control system driving an external load via belt-pulley

레이션 해석을 수행하고 모터제어 시스템에 대한 실험을 수행함으로써, 그 적용 가능성을 분석해 본다.

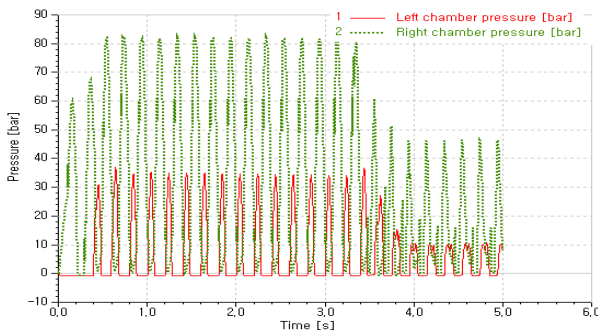
2. 분석대상 유압제어 시스템

크레인이나 윈치와 같이, 벨트-풀리에 큰 부하 하중이 매달려 있는 경우를 대상으로, 3가지 방식의 유압제어시스템의 특성을 비교 분석한다.

대상 유압장치의 펌프는 3상 유도전동기에 의해 구동되며, 대상 하중은 벨트-풀리를 거쳐 유압실린더에 의해 조절된다. 실린더의 위치 조절은 4포트-3위치 방향조절밸브에 의해 이동 방향 또는 공급 유량을 조절함으로써 이뤄진다.



(a) Piston displacement



(b) Cylinder chamber pressures
Fig. 2 Open loop test response

회로의 특성을 파악하기 위해, 방향조절밸브를 5Hz의 좌우 동작 신호로 구동시켰을 경우 실린더의 변위와 압력 응답을 보면 Fig. 2와 같다.

그림으로부터, 외부 부하에 의해 실린더가 점차 우측으로 이동하여 마침내 실린더 끝에 도달하여 더 이상 움직이지 못하게 됨을 발견할 수 있다. 이와 같이 외부 하중이 유압실린더나 모터를 끌어당기는 경우, 회로의 안정적 동작을 위해 보통 meter-out 방식의 속도제어회로 또는 counter balance valve에 의한 배압회로를 구성하는 것이 일반적이다. 이와 같이 실린더에 작용하는 부하가 하강하는 음의 부하의 경우, 유압회로의 능동적 위치제어는 상당히 까다로운 것으로 알려져 있다.

3. 세가지 유압제어시스템 위치제어 특성 분석

앞에서 언급한 세가지 제어방식에 대하여, 각각 외부 부하의 상하 위치를 반복 제어하는 경우의 제어특성 시뮬레이션 해석을 수행함으로써, 각각의 제어 가능성 및 특성을 살펴보고자 한다.

3.1 밸브 제어시스템

먼저 Fig. 1의 대상 유압시스템에서 단순 개폐식 방향조절밸브를 응답속도가 20Hz인 서보밸브로 교체한 다음, PID 기법($K_p=120$, $K_i=0$, $K_d=0.1$)을 사용한 실린더 위치제어 알고리즘을 Fig. 3과 같이 구성하였다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

부하 하중이 상하로 반복 이동하도록 실린더의 위치제어 목표궤적을 설정한 경우, 밸브제어시스템의 제어응답을 계산해보면 Fig. 4와 같다.

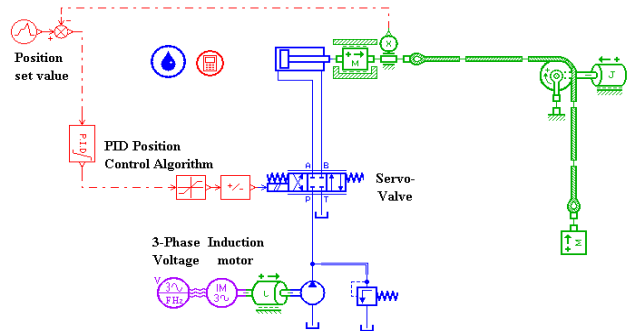
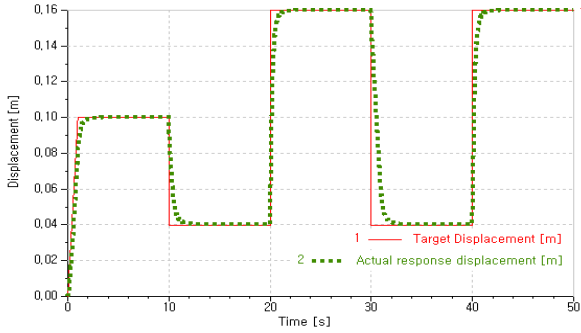
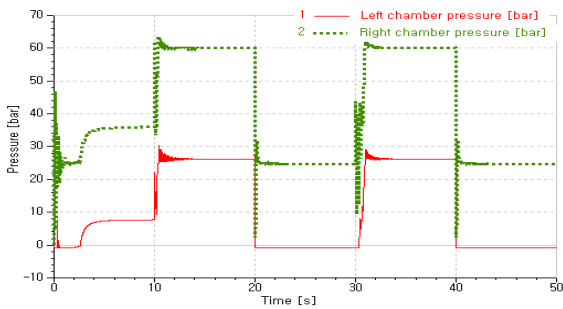


Fig. 3 Valve controlled system with cylinder position control algorithm



(a) Piston displacement



(b) Cylinder chamber pressures

Fig. 4 Close loop response of the valve controlled system

위 그림으로부터, 20Hz 정도의 서보밸브로 음의 하중을 가진 부하실린더의 정확한 위치제어가 가능함을 알 수 있으며, 이때 실린더 좌우 챔버의 압력은 부하 크기에 해당하는 만큼 차이가 벌어짐을 파악할 수 있다.

3.2 펌프용량 제어시스템

Fig. 1의 대상 유압시스템에서 개폐식 솔레노이드 방향조절밸브를 그대로 사용하는 대신, 고정용량형 펌프를 가변용량형 펌프로 교체한 다음, 방향조절밸브와 펌프용량을 조절하는 방식의 실린더 위치제어 알고리즘($K_p=15$, $K_i=0$, $K_d=0.01$)을 Fig. 5와 같이 구성하였다.

부하 하중이 상하로 반복 이동하도록 밸브제어시스템의 경우와 동일한 위치제어 목표궤적을 설정한 경우, 펌프용량 제어시스템의 응답 특성을 보면 Fig. 6과 같다.

이 그림을 살펴보면 정상상태에서의 압력응답에 매우 큰 압력맥동이 수반되고, 그에 따라 목표 위치를 유지하는데 상당한 애로가 있음을 파악할 수 있다. 이는 가변용량형 펌프의 사관각도는 목표 위치에서 거의 중립위치 부근에서 움직이는 한편, 방향조절밸브가 단순 개폐식 솔레노이드 밸브로서 위치 전환이 반복되기 때문에 일어나는 현상이다.

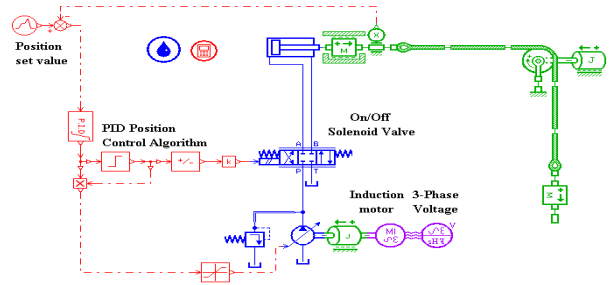
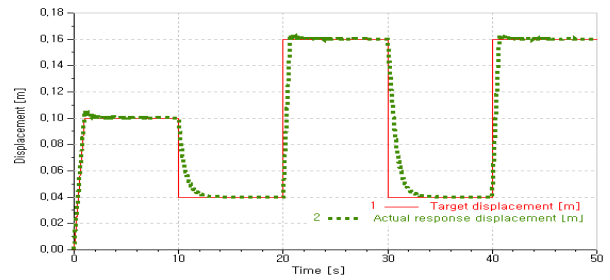
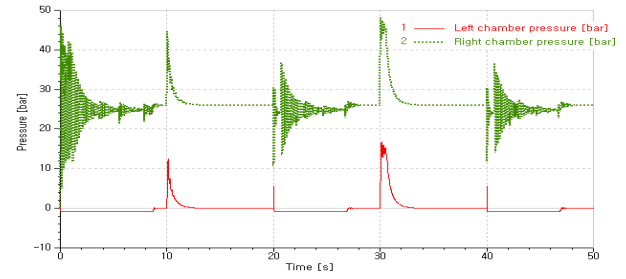


Fig. 5 Pump controlled system with cylinder position control algorithm



(a) Piston displacement



(b) Cylinder chamber pressures

Fig. 6 Close loop response of the pump controlled system

이는 방향제어밸브의 용량이 실린더의 운동에 비해 상대적으로 크기 때문이며, 따라서 적절한 크기의 밸브를 선정함으로써 완화시킬 수가 있다.

3.3 펌프속도 제어시스템

Fig. 1의 대상 유압시스템에서 개폐식 솔레노이드 방향조절밸브를 그대로 사용하는 대신, 유압펌프를 구동하는 3상 교류 유도전동기의 속도를 조절하기 위해 인버터(inverter)를 장착한 다음, 방향조절밸브와 펌프속도를 조절하는 방식의 실린더 위치제어 알고리즘($K_p=1000$, $K_i=0$, $K_d=0$)을 Fig. 7와 같이 구성하였다.

부하 하중이 상하로 반복 이동하도록 밸브제어시스템의 경우와 동일한 위치제어 목표궤적을 설정한 경우, 펌프속도 제어시스템의 응답 특성을 시뮬레이션해보면 Fig. 8과 같다.

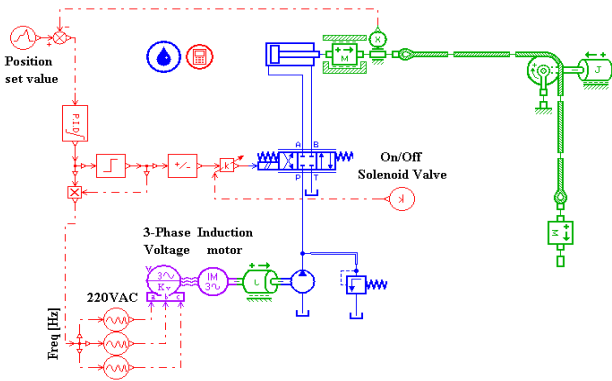
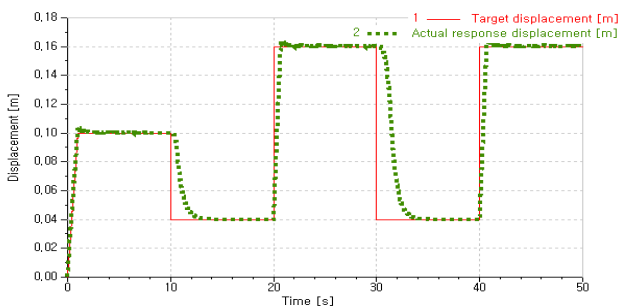
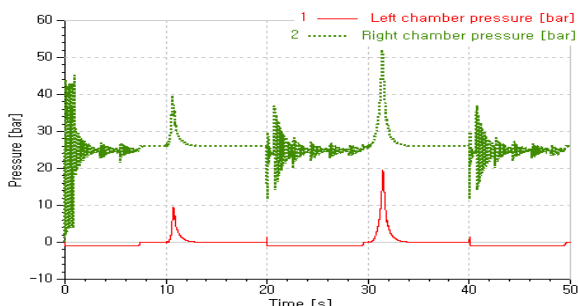


Fig. 7 Motor controlled system with cylinder position control algorithm



(a) Piston displacement



(b) Cylinder chamber pressures

Fig. 8 Close loop response of the motor controlled system

그림으로부터 펌프속도제어시스템에 의한 카운터 밸런스 회로의 실린더 위치제어가 가능함을 알 수 있다. 한편 외부 하중이 하강할 때와 상승할 때의 응답이 다르게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 인버터와 전기모터의 응답 지연에 의한 현상으로 파악된다. 이로서, 상승시와 하강시의 PID 제어이득을 서로 다르게 설정해야 함을 파악할 수 있다.

3.4 제어시스템 종류에 따른 효율특성 분석

본 절에서 검토한 세가지 유압제어시스템의 경우에 대하여, 각 시스템의 효율을 검토해 보았다. Fig. 4,

Fig. 6 및 Fig. 8과 같이, 유압실린더에 매달려 있는 외부 하중을 상하로 반복 이동시키는데 사용되는 동력을 다음 (2)식과 같이 계산하여, 그 결과를 정리하면 Table 1과 같다.

$$\text{소요 동력} = \int_{t_0=0}^{t=50} pQ dt \quad (2)$$

시스템 소모동력에 해당하는 유압펌프의 기계적 입력 동력을 보면, 밸브제어시스템이 펌프용량제어 및 펌프속도 제어시스템에 비해 월등히 많은 동력을 소모함을 알 수 있고, 실린더가 외부하중을 이동하는데 사용되는 유효 동력에 비해, 대다수의 유압동력이 릴리프밸브를 통해 유출되는 무효동력임을 볼 수 있다. 한편, 펌프용량제어시스템과 펌프속도제어시스템의 소모동력은 그 크기가 유사하며, 특히 주목할 점은 시스템 압력이 밸브제어시스템에 비해 매우 낮으며 또한 릴리프밸브를 통해 유출되는 동력이 전혀 없다는 점이다.

Table 1 유압제어시스템 종류에 따른 각 부분 소모 동력 비교 (단위: kJ)

소모동력	밸브제어	펌프용량 제어	펌프속도 제어
유압펌프 입력동력	14.954	0.339	0.295
유압펌프 발생동력	8.972	0.204	0.194
릴리프밸브 유출동력	8.473	0.0	0.0
유압실린더 사용동력	0.504	0.607	0.601

4. 펌프속도 제어시스템 특성 실험

4.1 유압펌프 속도제어시스템 실험장치 구성

유압제어시스템의 구성에 따른 특성을 시험하기 위해 다음 사진과 같은 실험장치를 구성하였다.

3상 유도전동기(효성중공업, SMD094 0.75kW 3상 220VAC 3Pole)로 구동되는 기어형 유압펌프(Nihon Spindle PA4RA66, 1.965cc/rev, 1200RPM)로 발생된 유압시스템의 공급압력은 소형 파워팩에 부착된 압력 릴리프밸브(Lotte-Daikin SR-G03 -1-10)에 의해 80bar로 설정하였으며, 실린더에 공급 배출되는 유량

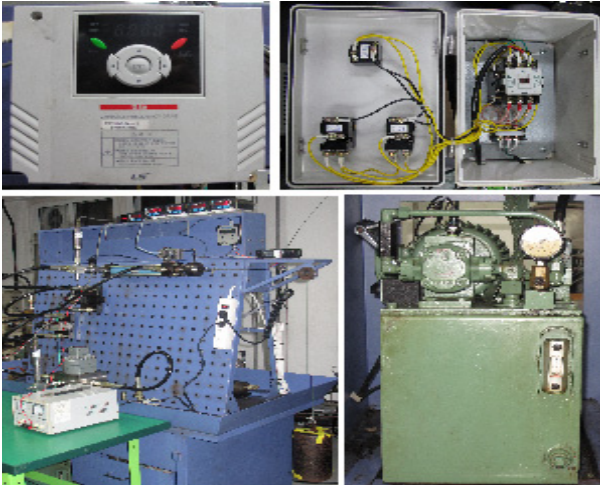


Photo. 1 Experimental apparatus (LH: Inverter, RH: power panel, LL: Hydraulic circuit and cylinder, RL: Hydraulic pump and tank)

은 유량계(터빈타입 EF 0.1 ARO 14V-PNP/1), 압력과 온도는 압력센서(Sensotec, FPG2DR 5000 psig, 0~5V DC), 온도센서(한스테크 R35e, Pt100, DIN 43760)에 의해 측정된다. 유압펌프의 회전속도는 근접센서(Autronics PR18-8DN), 실린더의 변위는 직선형 포텐쇼미터(WayCon SX 50-500-420A-SA)에 의해 측정한다.

한편, 유도전동기의 회전속도는 3상 인버터(LS SVO37iG5A-2)로, 4/3 방향조절밸브(Lotte KSO-G02-2BP-10)의 위치는 고체상태 릴레이(Solid State Relay, G3FD-X03SN DC5-24V)에 의해 조작된다. 이상 유압제어시스템의 센서들과 솔레노이드밸브 및 유도전동기의 속도는, 데이터획득장치(NI DAQ Card 6062E)를 사용해 모두 컴퓨터에서 수집하고 조절할 수 있도록 구성하였다.

4.2 개루프 조작시험 결과

전동기의 회전속도를 60Hz로 일정하게 구동한 상태에서 솔레노이드 밸브를 5초간 좌우 방향으로 조작하였을 때, 유압시스템 각 부분의 응답을 살펴보면 Fig. 9와 같다.

실험에서 펌프 상승시간은 0.43초 정도이며, 위 그림에서 5초에서 8초 사이에 발생하는 실린더 좌·우의 압력 차이는 외부 하중을 끌어올리는 힘에 해당한다. 실린더 이동시간은 상승할 때보다 오히려 하강할 때에 더 많이 소요되는데, 이는 편로드 실린더가 사용되었기 때문이다.

4.3 개폐식 방향제어밸브에 의한 위치제어 시험

일반적인 밸브제어시스템은 비례제어밸브 또는 서보밸브와 같은 연속조절형 방향제어밸브를 사용하지만, 본 실험장치에 구축된 지연시간 약 0.08초대역폭 약 5Hz정도의 단순 개폐식(on/off) 방향제어밸브만을 사용한 카운터 밸런스회로의 위치제어 가능성을 알아보기 위해, 전용 제어알고리즘을 구성하여 원형추의 위치제어 시험을 실시하였다.

Fig. 10과 Fig. 11로부터 단순 개폐식 방향제어밸브만으로도, 실린더를 끌어당기는 음의 방향의 하중에도 불구하고, 적절한 제어 알고리즘을 사용하면 위치제어가 가능함을 볼 수 있다. 다만, 실험에 사용된 개폐식 방향제어밸브의 느린 응답성으로 인해 실린더가 제자리 위치를 유지하는 경우에 상당한 크기의 채터링 현상이 발생하는 한계점을 발견할 수 있다.

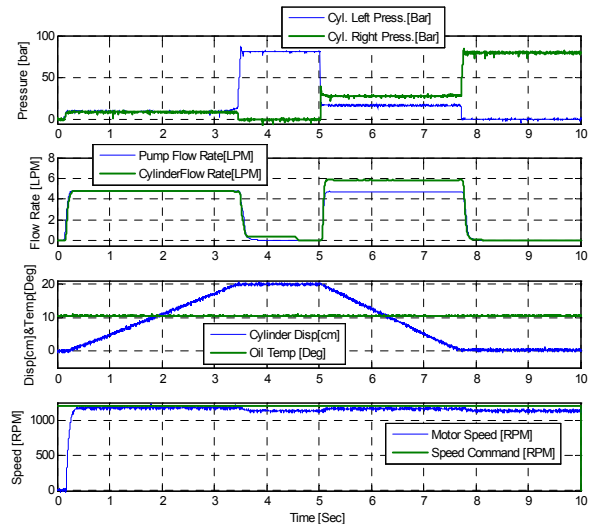


Fig. 9 Open loop test result with the solenoid valve operated at left or right direction

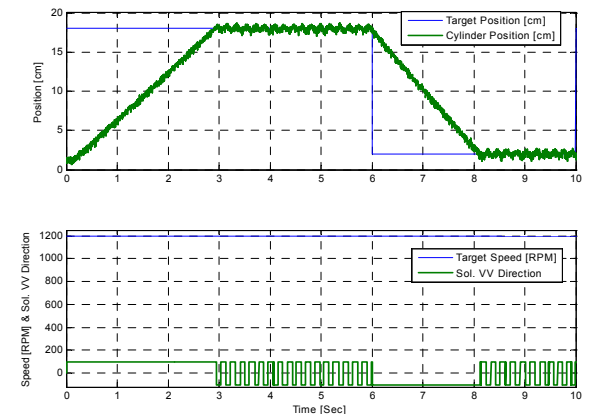


Fig. 10 Position control test result of the on/off solenoid controlled hydraulic system

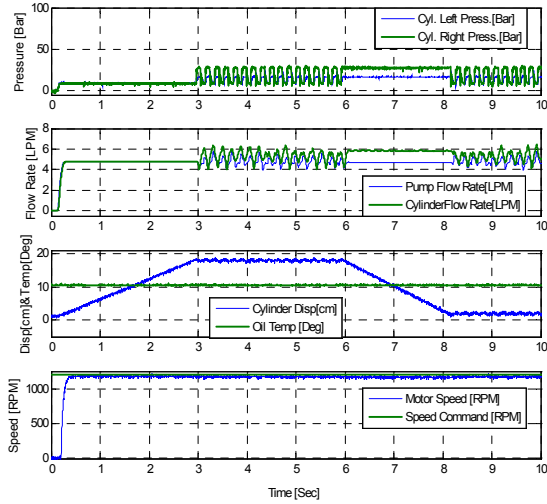


Fig. 11 Responses of the on/off solenoid valve controlled system during position control

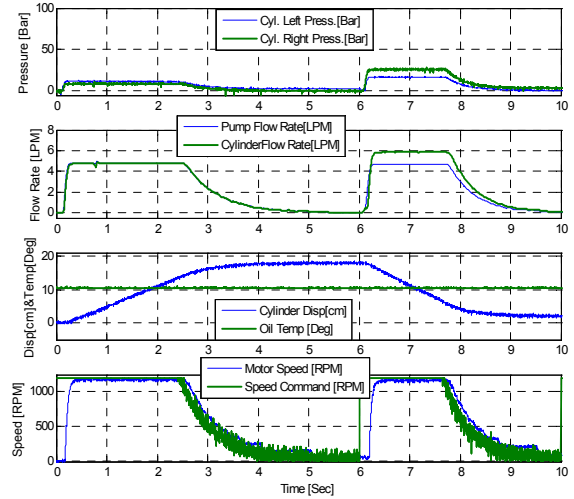


Fig. 14 Responses of the pump speed control-led system during position control

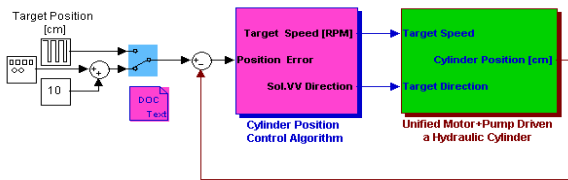


Fig. 12 Real-time position control program

4.4 펌프 속도 제어시스템의 실린더 위치제어 결과

3.3 절에서 개발한 유압펌프 속도제어 알고리즘을 사용해, Fig. 12과 같은 Simulink 환경 하에서 실시간으로 유압실린더의 위치를 제어한 실험결과를 보면 다음 Fig. 13~14과 같다.

Fig. 13과 Fig. 14로부터, 펌프속도 제어시스템에 의한 오버슈트와 정상상태 오차가 없는 실린더 위치제어가 실현 가능함을 파악할 수 있다. 한편 유압실린더 사용동력을 식 (2)와 같이 측정한 결과 0.675kJ

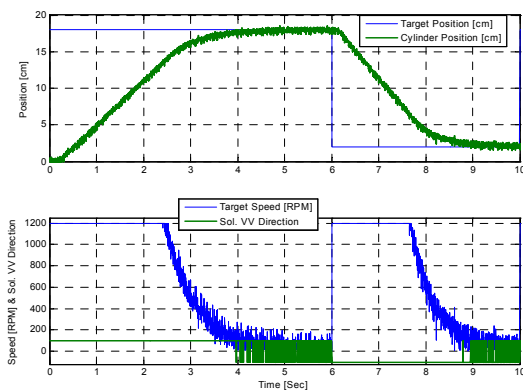


Fig. 13 Position control result of the pump speed controlled hydraulic system

의 매우 적은 동력이 사용되었으며, 그 주된 이유는 실린더와 시스템 압력은 3절의 분석과 같이 릴리프밸브 설정압력 80bar 보다 훨씬 아래에서 작동하고 있기 때문임을 파악할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는, 유압동력시스템에서 일반적으로 채택되는 밸브 제어시스템과 더불어 펌프 용량 제어시스템 및 펌프 속도 제어시스템의 제어특성 및 시스템 효율에 대하여 시뮬레이션 해석을 수행하고, 펌프 속도 제어시스템 실험장치를 구성하여, 음의 방향의 하중이 작용하는 카운터 밸런스 회로의 실린더 위치제어 시험을 수행하였다.

그 결과 펌프 속도 제어시스템과 펌프 용량 제어시스템의 소모동력은 밸브 제어시스템에 비해 매우 적는데, 그 이유는 시스템 압력이 밸브 제어시스템에 비해 낮으며 릴리프밸브를 통해 유출되는 동력이 전혀 없기 때문임을 파악할 수 있었다.

또한 인버터를 사용하여 한쪽 방향의 유압펌프의 회전속도를 조절할 수 있는 펌프속도 제어시스템 실험장치를 구축하고, 유압펌프의 회전속도와 개폐식 솔레노이드 밸브의 위치 즉 방향을 조절함으로써, 음의 하중이 작용하는 카운터 밸런스 회로의 실린더 위치제어 시험을 수행한 결과, 펌프속도 제어시스템에 의해 오버슈트와 정상상태 오차가 없는 위치제어 구현이 가능함을 확인하였다.

참고 문헌

- 1) 정헌술, “전동기 일체형 유압펌프 및 제어기 모듈 기술개발,” 부품소재기술개발사업 연차보고서, 2009. 5. 30.
- 2) 조승호, “속도제어-정용량 펌프를 사용하는 실린더-부하계의 에너지절약 부하감지형 경로제어”, 유공압시스템학회논문집, 제6권, 제3호, pp. 16~22, 2009.
- 3) J. Jansen, R. Lind et. al. "Design and control of a ship motion simulation platform from an energy efficiency perspective", Int. J. of Fluid Power, vol. 10 no. 2, pp. 19~28, 2009.
- 4) LS 산전, “인버터 SVO37iG5A-2 사용법 설명서”, 2009.