

유량 및 부하가 변하는 상태에서의 양로드 유압실린더의 위치제어시스템

김대철 김동화 이재규 신범수

Position Control System of a Double-end Rod Hydraulic Cylinder under Variable Flow Rate and Load Conditions

D. C. Kim D. H. Kim J. K. Lee B. S. Shin

Abstract

A double-end rod hydraulic cylinder is widely used with a steering valve for the steering control system in large tractors. For the development of automatic steering controller, the feasibility of using a proportional control valve replacing the conventional manual steering valve to control the position of hydraulic steering cylinder was investigated in terms of the max. overshoot, the steady-state error and the rise time.

A simulation model for the electrohydraulic steering system with load using AMESim package was developed to be valid so that the proper control algorithm could be chosen through the computer simulation. It could be concluded that the P-control algorithm was sufficient to control the electrohydraulic steering system, where the control frequency should be no greater than 20 Hz at the P-gain of 5. In particular, the performance of the developed steering controller was satisfactory even at the conditions of varying flow rates and loads.

Keywords : Position control, E/H steering system, Proportional control valve, Steering controller

1. 서론

근래들어 무인 트랙터 및 농작업기의 자율주행에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 전개되고 있으며 조향 제어 기술은 이중 핵심 부분이다. 미국 JohnDeere사는 작업경로간 오버랩을 최소화하고, 수확효율의 증대 및 작업자의 피로 경감 등을 위하여 자사의 GPS와 연계하여 조향장치를 자동 제어할 수 있는 가이던스 시스템(Integrated AutoTrac steering kit)을 약세서리로 판매하고 있으며(www.deere.com), 이것은 직선주행시 ± 25.4 cm의 오차범위내에서 자동조향을 보장하는 정도로 고도의 정밀제어는 아니지만 트랙터의 자율주행을 위한 조향제어기가 상당부분 상용화단계에 도달하였음을 의미한다.

농용 트랙터를 포함한 현대의 노외차량에는 유압조향장치가 보편적으로 사용되고 있다. 이러한 유압조향장치를 자동화하기 위해서는 전기유압밸브(electrohydraulic valve)-실린더 조합이 가장 중요한 부분인데 심한 비선형성 때문에 제어가 복잡해지며, 특히 이러한 전기유압장치는 동적 입력이나 비선형적인 요소가 가해졌을 때 응답시간, 정확도 및 안정성으로 표현되는 제어 성능에 제한을 받게 된다(Anderson, 1988). 따라서 많은 연구자들이 시스템의 동특성을 이해하고 최적의 제어 알고리즘을 찾기 위해 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. Zhang 등(2000)은 지령신호와 부하를 변화시키며 전기유압 조향장치의 동특성을 조사한 바, 스텝함수와 사인함수를 가했을 때 약 0.1 Hz 및 0.05 Hz의 낮은 주파수에서 는 양호한 응답특성을 보인다고 보고하였다. Kim 등(1997)

This research was supported by Agriculture and Life Sciences Institute, Kangwon National University. The article was submitted for publication on 2009-09-22, reviewed on 2009-10-05, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2009-10-12. The authors are Dae Cheol Kim, Senior Researcher, KSAM member, Jae Kyu Lee, Junior Researcher, R&D center, Tongyang Moolsan Co., LTD., Gongju, Korea., Dong Hwa Kim, Graduate Student, and Beom Soo Shin, Professor, KSAM member, Dept. of Biological Systems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea. Corresponding author: B. S. Shin, Professor, KSAM member, Dept. of Biological Systems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea; Fax: +82-33-255-6406; E-mail: <bshin@kangwon.ac.kr>.

은 스텝모터를 구동시켜 트랙터의 조향핸들을 제어하는 방식의 무인트랙터 개발에 관한 연구에서 분해능 0.2°, 폴스티어링에 소요되는 시간을 1.6~9.4 초 범위에서 제어할 수 있는 조향제어기를 개발한 바 있다. Park 등(2004)은 노면상태, 타이어의 공기압 및 축하중이 조향력에 미치는 영향을 규명한 바 있으며, 이를 근거로 Lee 등(2005)은 트랙터의 조향력을 예측하는 모델을 개발한 후 전동조향장치를 개발한 바 있다.

일반적으로 유압실린더의 위치제어에는 유체를 연속적으로 제어하는 방식으로서 전기유압서보밸브 또는 전자비례제어밸브가 사용되거나, 또는 유체를 펄스적인 방식으로 제어하는 고속응답전자밸브를 이용한 펄스폭변조방식(PWM; Pulse Width Modulation)이 사용되고 있으며(Kwon et al., 1991; Yoo et al., 1999), 제어알고리즘으로서 비례(Proportional) 제어, 비례-미분(Proportional-Derivative) 제어 또는 비례-미분-적분(Proportional-Integral-Derivative) 제어 등이 적용되고 있다. Yoo 등(1999)은 서보밸브나 비례제어밸브에 비하여 상대적으로 저렴한 고속전자밸브를 채택하여 저가의 전기유압서보시스템 개발을 시도하였으며, 여기서 관성부하나 공급압력의 변화보다 외부 부하의 변화에 대해 응답특성이 크게 변하는 것을 확인하였다. 특히 PID제어와 비교하여 슬라이딩모드제어에서는 외부 부하의 변화에 대하여 정상상태오차가 없는 강인한 제어가 가능하다고 보고하였다. Jung(1997)은 PWM방식의 비례제어 솔레노이드 밸브를 사용한 편로드 유압실린더의 위치제어시스템에 관한 연구에서, PID 제어 알고리즘을 사용하였으며 스텝입력에 대하여 다소 큰 오버슈트(overshoot)가 발생하였으나 정상상태 오차(steady-state error)는 발생하지 않았고 0.2 Hz의 정현파 기준 신호에 대한 응답은 매우 양호한 추종성능을 보여 준다고 보고 하였다.

일반 산업적 응용과 관련한 유압실린더의 위치제어와 달리 트랙터에서는 유압펌프가 엔진에 의해 구동되기 때문에 엔진 속도에 따라 발생 유량이 달라지며 또한 조향시 부하조건이 토양 조건 등에 따라 수시로 변화하는 특성이 있어 공급유량 및 부하의 변화에 의한 영향을 주의 깊게 고찰할 필요가 있다. 특히 조향 제어시 과도한 오버슈트의 발생은 트랙터를 지그재그 형태로 움직이게 함으로써 작업속도를 제한하는 중요한 요인이 된다. Zhang 등(2001)은 부하와 유량에 종속된 비선형 특성을 갖는 중심개방형(open-center) 유압시스템에서 PID 제어 방식은 적합하지 않으며 퍼지와 신경망에 근거한 적응제어 방식이 필요하다고 보고한 바 있다.

근래 생산되는 중대형 트랙터의 조향장치는 조향핸들과 이에 직결된 오비트롤(조향제어 밸브) 및 양로드 유압실린더로 구성되는 유압시스템을 채택함으로써 간단한 구조로 고부하의 조향반력도 용이하게 극복할 수 있도록 되어 있다. 본 연구는 68마력급 상용트랙터의 조향장치를 자동제어하기 위하여 기존의 오비트롤과 병렬로 비례제어밸브를 설치하여 전기

유압식 서보기구를 구성함으로써 자율주행이 가능한 조향제어시스템을 개발하기 위한 기초 연구로서 수행되었다.

본 연구의 목적은 엔진 구동형 유압펌프, 비례제어밸브 및 양로드 유압실린더로 구성된 유압식 조향장치와 조향반력으로서의 부하에 대하여, 1) 해석용 모델을 개발하여, 2) 컴퓨터 시뮬레이션과 실험적 검증을 통해 적정 제어 알고리즘을 규명하는 것이다.

2. 재료 및 방법

가. 전기유압식 조향장치-부하 모델 개발

1) 시스템의 구성

68마력급 상용트랙터의 유압조향시스템과 동일한 성능을 낼 수 있도록 유압펌프(F10, Joyang hydrotech, Daegu, Korea), 릴리프밸브(BT-04-H, HYDROME, Taipei, Taiwan), 비례제어밸브(0811404613, Bosch Rexroth AG, Lohr am Main, Germany) 및 양로드 유압실린더(T680, Tongyangmoolsan, Changwon, Korea)로 전기유압식 조향장치를 구성하였다. 트랙터의 엔진속도 변화를 시뮬레이션할 수 있도록 인버터(SV075IG5A-2, LS Industrial Systems, Chungju, Korea)와 3상 유도전동기(10 HP, Hyosung motor, Seoul, Korea)를 사용하여 유압펌프를 구동하였다. 일반적으로 자동차에서는 조향 조작후 발생하는 타이어의 복원토크에 의해 조향 완료시 조향핸들이 원위치하는 것에 비하여 트랙터에서의 조향핸들은 자동 원위치하지 않으므로 조향 조작 후 조향핸들을 다시 원위치 시켜주어야 한다. 즉, 트랙터 조향장치에서의 부하는 타이어의 조향 반력이 조향 시와 복원 시 모두 발생되기 때문에 시험을 위한 유압실린더-부하계 장치에서는 항상 저항성 부하가 인가되어야 한다. 그림 1(a)는 본 연구에서 사용한 전기유압식 조향장치 및 부하계에 대한 외관을 나타낸 것이며, 특히 부하장치는 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 폭 64 mm, 길이 500 mm, 두께 12 mm의 철판을 평형사변형 링크에 의해 조임력이 조절될 수 있는 상하 두 편의 브레이크라이닝(140 mm × 195 mm) 사이를 통과시킴으로써 좌·우 이동시 마찰저항이 걸릴 수 있도록 고안되었다.

모델을 개발하는데 필요한 각 변수들을 구하고 또한 성능 평가시 데이터 수집을 위하여 그림 2에서와 같이 계측장치를 구성하였다. 사용한 계측장치는 NI Compact Fieldpoint (cFP 2020, National Instrument, Austin, U.S.A.)로서 400 MHz Power PC real-time processor가 장착되어 있으며 산업적 환경에 적합한 소규모이고 신뢰성있는 모듈형 계측 및 제어장치이며 PC와는 이더넷통신으로 연결된다. 아날로그 전압 및 전류의 입·출력, 디지털 입·출력 등의 모듈을 필요한 만큼 사용하며 LabView로 작성된 프로그램에 의해 구동된다. 인

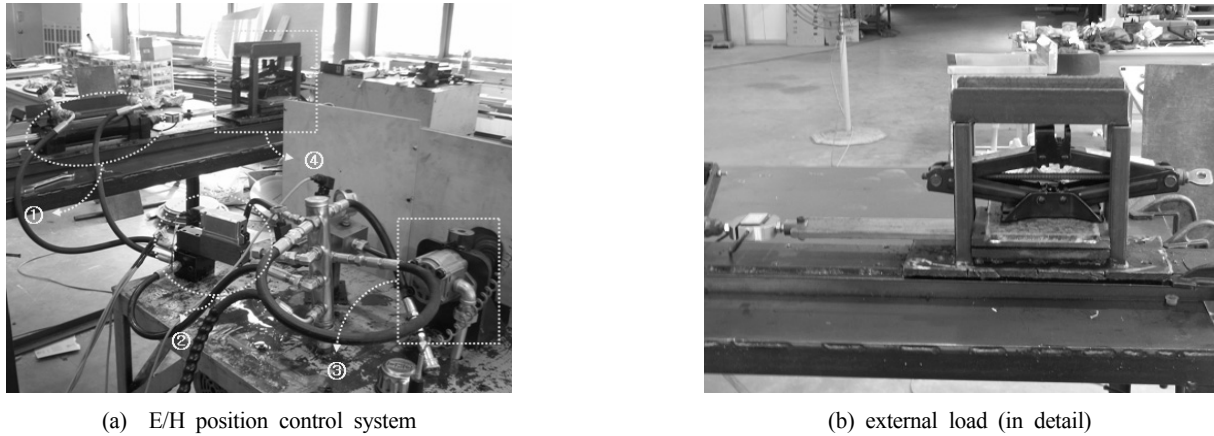


Fig. 1 Experimental apparatus (① cylinder, ② prop. valve, ③ pump, ④ load).

라인 방식의 유량/압력/온도 변환기(GFM-30, Hydratechnik, Limburg, Germany)를 사용하여 비례제어밸브 입·출력단의 유량 및 압력을 측정하였고, 부하는 로드셀을 이용하여 측정할 수 있도록 하였다. 비례제어밸브는 -10~+10 V의 아날로그 전압으로 제어되며, 그 스톱의 위치에 따라 아날로그 전압을 출력하므로 위치 측정이 가능하였고, 유압실린더의 변위는 250 mm의 행정을 갖는 선형 포텐시오미터(LX250, Sanyo, Tokyo, Japan)를 사용하여 측정되었다.

Leuven, Belgium)을 이용하였다. 해석에 이용되는 유압요소의 매개변수는 제조사의 제원을 이용하였으며, 비례제어밸브의 경우 시스템 제어에 가장 중요한 역할을 하므로 단품에 대한 특성실험을 별도로 실시하였다. 단품특성실험에 대한 개별 해석을 진행한 후, 전체시스템에 대한 해석모델로 확장하여 정확성을 높이도록 하였다. 각 구성요소의 특징은 다음과 같다.

2) 시스템 해석을 위한 모델 개발

유압 조향제어시스템에 대한 해석모델을 개발하기 위하여 상용 유압해석 프로그램인 AMESim(ver 4.2, LMS Imagine.Lab,

• 유압펌프

기어식 펌프로 7.2 cc/rev의 유량을 토출한다. 트랙터의 엔진회전수를 고려할 경우 공회전 운전부터 정격속도 운전까지 약 5~18 lpm의 유량을 토출할 수 있다.

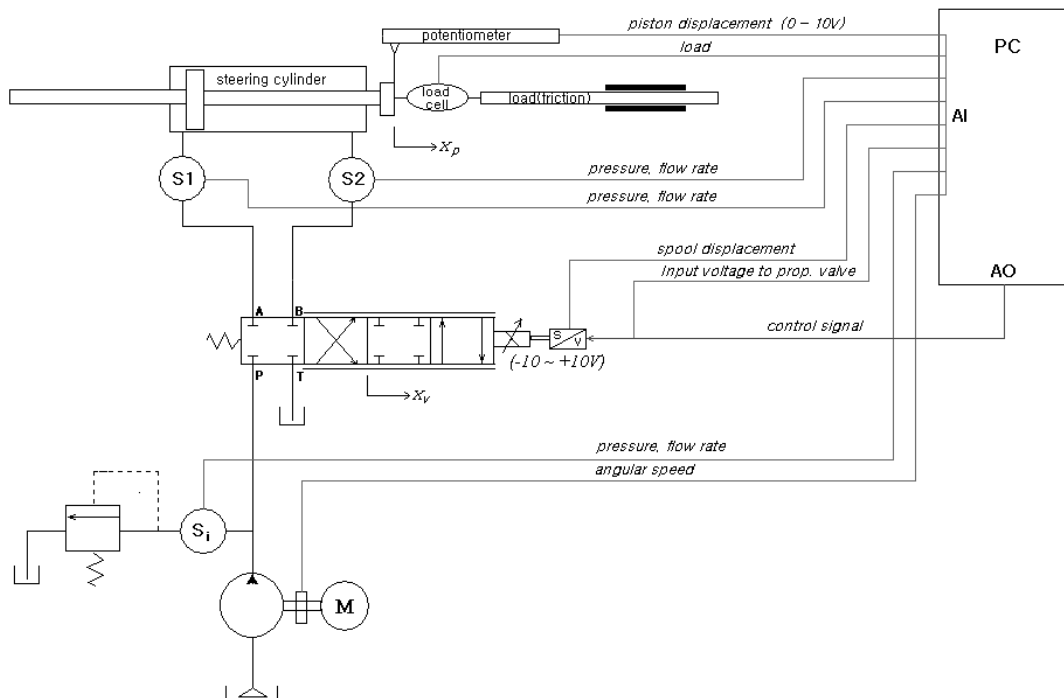


Fig. 2 Schematic diagram of electrohydraulic steering system equipped with instrumentation and control.

● 릴리프밸브

밸브의 설정된 압력이상에서 유량을 바이패스(bypass)시켜, 시스템의 파손을 방지하는 역할을 하며, 트랙터의 조향압력을 고려할 경우 시스템 압력을 최대 15 MPa까지 상승시킬 필요가 있다. 릴리프밸브의 특성시험을 위하여 유압펌프와 릴리프밸브만으로 시스템을 구성한 후 릴리프밸브의 설정 압력을 5 MPa로 고정한 상태에서 유압펌프의 공급유량을 증가시키며 릴리프밸브 입력단의 상승 압력을 측정하였다. 실험 결과 밸브가 열린 후 1 lpm의 유량을 도피시키는데 약 0.1 MPa의 시스템 압력상승을 유발하였다.

● 유압실린더

양로드 복동식이며 피스톤 직경 55 mm, 로드 직경 35 mm로 행정길이는 235 mm이다. 양로드 실린더의 한쪽에만 유압유를 채운 후 출구를 막고 또 다른 유압실린더로 15 MPa의 압력을 걸어 장시간에 걸친 누유시험 결과 누유는 전혀 없는 것으로 나타났다.

● 비례제어밸브

비례제어밸브의 정확한 해석모델을 위해 밸브의 인가전압에 따른 유량계수(flow coefficient), 전압증가에 따른 유량계수의 선형성, 밸브스풀의 동적 응답성을 검토하였다. 유량계수측정을 위해 그림 2에서 비례제어밸브로부터의 출력단 양단 모두를 유압탱크로 직결되도록 시험 장치를 구성하고 비례제어밸브의 작동전압인 -10 V에서 +10 V의 전압을 인가시키며, 밸브 입·출구의 압력과 유량을 측정하였다. 식 (1)을 이용하면 측정된 압력 및 유량으로부터 유량계수를 계산할 수 있다.

$$Q = C_A A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{1}$$

where, Q : flow rate through valve, m^3/s
 C_A : valve orifice coefficient

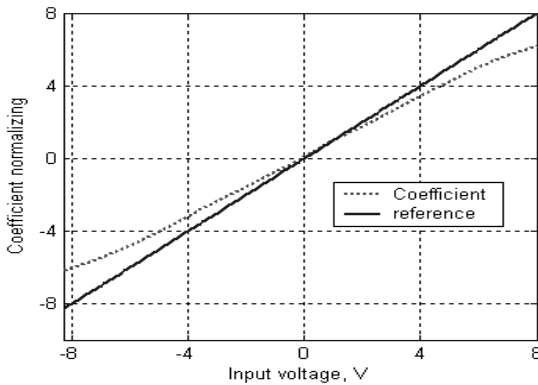


Fig. 3 Linearity of flow coefficient.

A : orifice area of valve, m^2

Δp : pressure difference between inlet and outlet of valve, Pa

ρ : density of fluid, $N \cdot s^2/m^4$ ($= kg/m^3$).

밀도 ρ 가 일정하다고 가정하면 유량계수는 포핏의 형상계수와 스풀의 개구면적의 곱으로 계산될 수 있다.

인가전압에 따른 유량계수의 선형성(linearity)은 그림 3에서 보는 바와 같이 인가전압이 1 V일 때 유량계수를 1로 정규화(normalizing)한 경우 전압증가에 따른 유량계수의 증가가 선형적으로 비례하지 않는 경향을 보였다. AMESim 해석 모델에서 제공되는 비례제어밸브의 경우 입력전압에 대한 유량계수가 선형적으로 비례하므로, 이를 보정하기 위하여 식 (2)에서와 같이 입력전압에 대한 3차 보정식을 사용하였다.

$$V_o = -0.0014 V_i^3 - 0.0006 V_i^2 + 0.858 V_i + 0.1288 \tag{2}$$

where, V_o : input voltage to the model, V

V_i : measured voltage, V.

비례제어밸브의 동적특성을 파악하기 위한 스텝함수 응답 특성은 그림 4에서 보는 바와 같이 입력전압에 따른 스풀의 응답은 1 ms 내외에서 스텝함수를 정확히 추종하는 것으로 나타나, 본 연구에서 진행되는 조향 유압시스템을 제어하기에 충분한 것으로 판단된다.

● 부하

부하는 기본적으로 부하장치에서 가할 수 있는 최대 톨롱 마찰력이며, 여기에 유압실린더의 이동방향이 전환되는 것과 이동속도를 고려하여 식 (3)에서와 같은 모델을 사용하였다.

$$F = F_d \times \tanh[2 \times \frac{V_t}{dV}] \tag{3}$$

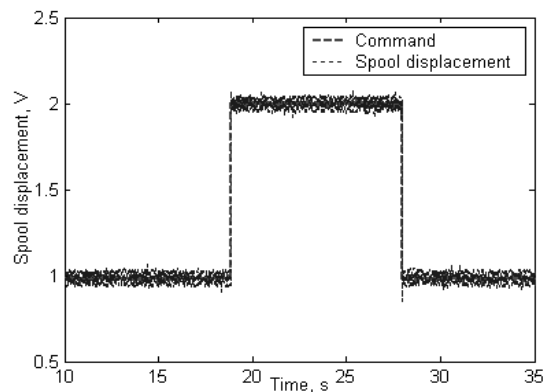


Fig. 4 Dynamic characteristics of the proportional control valve spool.

where, F : load, N
 Fd : max. Coulomb friction force, N
 Vt : stick velocity threshold, 1×10^{-6} m/s
 dV : velocity change rate, m/s

각 구성품들에 대한 특성을 파악한 후 유압 조향제어시스템을 해석하기 위한 AMESim 모델은 그림 5에서와 같이 유압실린더 변위와 지령신호에 따라 PID제어 알고리즘을 적용하여 위치제어를 실시하는 페루프 시스템으로 구축하였다. 이 때 사용된 주요 변수는 표 1에 나타내었다.

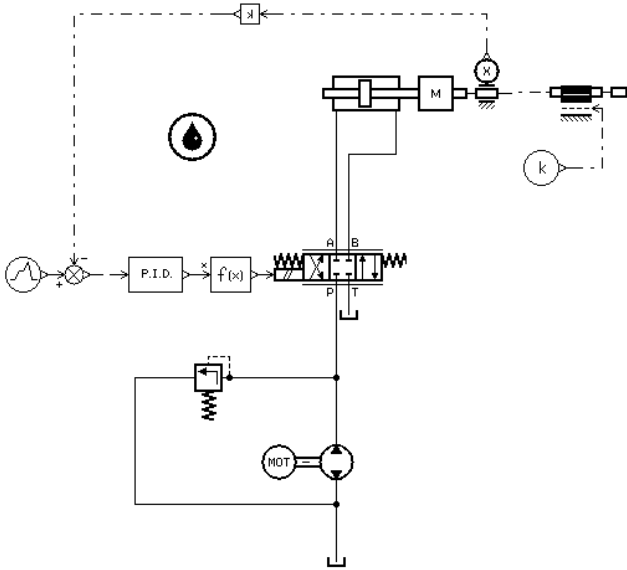


Fig. 5 Simulation model for the electrohydraulic steering control system.

Table 1 Major parameters for AMESim modelling

Component	Parameters	Value
Pump	pump displacement	7.2 cc
	shaft speed	800~2400 rpm
Relief valve	cracking pressure	5~15 MPa
	flow rate pressure gradient	10 lpm/Mpa
Cylinder	piston diameter	55 mm
	rod diameter	35 mm
	length of stroke	235 mm
Proportional control valve	port P to (A,B) flow rate	23 lpm
	port P to (A,B) pressure drop	1 MPa
	port (A,B) to T flow rate	100 lpm
	port (A,B) to T pressure drop	1 MPa
	valve natural frequency	30 Hz
	damping ratio	0.8

3) 비례제어밸브 모델의 검증

유압식 조향제어시스템에 대한 해석을 수행하기에 앞서, 해석모델의 정확도를 높이기 위하여 비례제어밸브에 대한 단품특성실험을 수행하여 해석 결과와 비교하였다. 펌프의 유량이 5 lpm일 때 릴리프밸브의 설정압을 5 MPa로 한 후, 밸브의 인가전압을 선형적으로 증가시키며 시스템 압력 및 밸브의 토출유량을 측정하였다. 이때, 펌프의 유량을 5, 10 및 15 lpm의 세 수준에 대하여 동일한 실험을 수행하였다.

4) 부하계를 포함한 전기유압식 조향제어시스템의 모델의 검증

시물레이션 모델을 검증하기 위하여 그림 2의 실험장치에서 비례제어만을 적용하여 응답 특성을 구하여 시물레이션 결과와 비교하였다. 이때 비례계인은 1, 유압펌프의 유량은 15 lpm으로 세팅하고 부하는 무부하와 2 kN의 부하의 2가지 경우로 하였다.

나. 컴퓨터 시물레이션을 통한 제어 알고리즘 선정

개발된 시물레이션 모델의 타당성을 검증한 후 다양한 시물레이션을 통해 최적의 알고리즘을 선정하였다. 특히, 트랙터는 엔진속도에 따라 유압펌프에서 발생하는 유량에 변동이 있으며, 작업상태에 따라 조향작용에 의한 마찰부하도 변동하므로, 조향제어시스템은 이러한 변동요인에 강인하도록 설계되어야 한다.

먼저 제어 알고리즘을 선정하기 위하여 비례제어, 비례-미분제어, 비례-적분-미분제어의 순으로 임의의 게인값들을 입력하여 과도응답특성을 규명하였으며, 적정 알고리즘이 선정되면 본 연구에서의 주요 관심 대상인 유량 및 부하의 변동에 따른 시스템의 과도응답특성을 규명하였다. 마지막으로 제어 알고리즘 적용시 제어주기가 과도응답특성에 미치는 영향을 시물레이션하여 본 전기유압식 조향장치에 가장 적합하다고 판단되는 알고리즘을 다각도로 검토하였다.

다. 성능 평가

선정된 제어 알고리즘을 실제 조향제어시스템에 적용함에 있어서 공급유량 및 부하의 변화가 제어 성능에 미치는 영향을 규명하고 또한 동적 지령신호에 대하여 추종 가능한 주파수를 규명하기 위하여 두 수준의 공급유량(10 및 15 lpm)과 두 수준의 부하(0 및 2 kN)에서 sine파와 사각파 등의 주기적인 지령신호를 조향제어시스템에 가하여 유압실린더의 추종성을 평가하였다. 또한, 본 조향제어시스템이 실제로 트랙터에 장착되어 작동하는 것을 가정하여 다양한 스텝입력을 연속적으로 가하면서 유압실린더의 추종성과 유압시스템내의 압력 변화를 검토하였다.

마지막으로 실제 상황에서 수시로 변할 수 있는 공급유량

과 부하의 영향을 시뮬레이션해 보기 위하여 본 연구에서 개발한 조향제어시스템에 100 s 주기의 사인파입력을 가하면서 중간에 유압펌프의 회전속도를 변화시키거나 부하 장치의 수직하중을 변화시키며 지령신호에 대한 유압실린더의 추종성을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 유압실린더 위치제어 시스템 및 부하계에 대한 모델 검증

1) 비례제어밸브 모델의 검증 결과

그림 6은 펌프 및 비례제어밸브 시스템의 압력 변화를 나타내며, 그림 7은 밸브를 통과하는 유량의 변화를 나타내고 있다. 결과를 보면 인가전압의 증가에 따라 밸브 유량은 증가하며, 시스템의 압력은 감소하게 되는데, 유압펌프의 공급 유량이 작을수록 시스템 압력은 빨리 감소됨을 알 수 있다. 시험 및 해석결과에서 펌프유량에 따른 시스템압력, 인가전압에 따른 시스템압력 및 밸브유량이 잘 일치하므로, 단품해석에 이용된 릴리프밸브, 유압펌프, 비례제어밸브 모델은 시험 결과를 예측하는데 타당함을 알 수 있다.

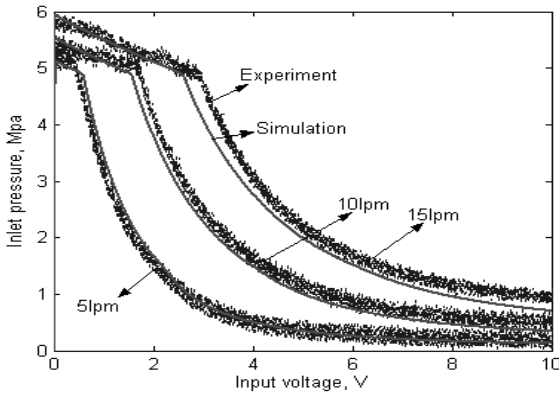


Fig. 6 Comparison of inlet pressure on different flow rates.

2) 부하계를 포함한 전기유압식 조향제어시스템 모델의 검증 결과

스텝함수에 대한 유압실린더의 응답특성으로 시험 결과와 시뮬레이션 결과를 그림 8에 나타내었다. 실제시험 및 개발된 모델에 근거한 시뮬레이션 결과는 잘 일치하였으며, 오버슈트 및 정상상태 오차는 발생하지 않았고 마찰부하에 따른 영향도 없는 것으로 나타났다. 이는 그림 4에서 같이 비례제어밸브의 응답성이 우수할 뿐 아니라 유압실린더에서 누유가 전혀없고 약 20 kN의 추력을 낼 수 있었기 때문으로 판단된다.

나. 적정 제어알고리즘의 선정

검증이 완료된 AMESim 모델을 사용하여 가장 간단하고 기본적인 비례제어 알고리즘을 적용하여 시행착오법으로 비례게인을 조정하며 시뮬레이션을 수행한 결과 부하가 있음에도 불구하고 어떤 작동조건에서도 정상상태오차가 나타나지 않았다. 따라서, 유압실린더 작동 시 요구되는 상승시간만 충분히 보장할 수 있다면 오버슈트가 발생할 수 있는 비례-미분 또는 비례-적분-미분 알고리즘을 적용해야 할 필요성이

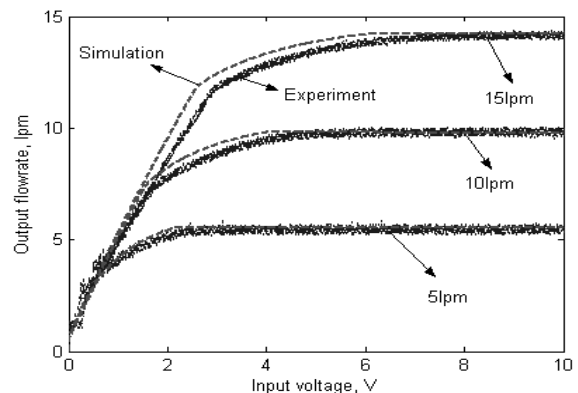
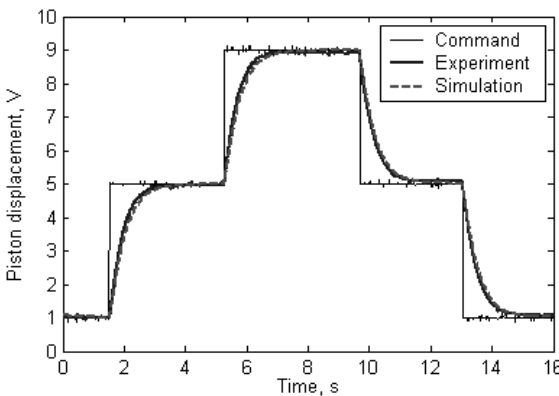
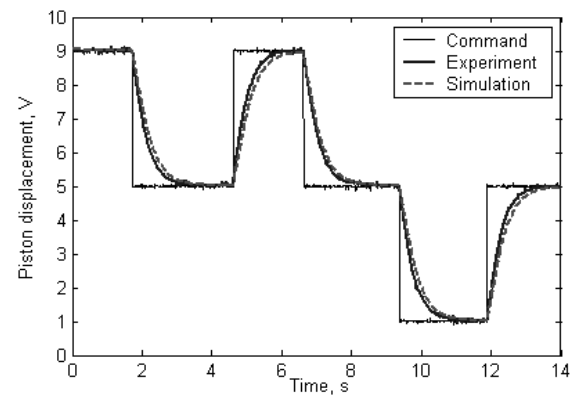


Fig. 7 Comparison of outlet flow rate on different flow rates.



(a) load of 2 kN



(b) no load

Fig. 8 Step function response of proportional valve spool.

없다고 판단되었다. 시뮬레이션을 통해 비례-미분 및 비례-적분-미분 제어 알고리즘을 검토하였으나 오버슈트 또는 진동 발생 등의 역효과가 나타났으며 상승시간 또한 크게 개선되지 않았다. 따라서, 본 연구에서의 전기유압식 조향제어시스템에서는 비례제어가 적합한 것으로 판단하였다.

이와 같은 판단에 근거하여 그림 5의 AMESim 모델의 PID 함수에서 적분 및 미분 게인값들 모두 0로 세팅하고 다양한 작동 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 공급유량 및 부하 변동이 제어 성능에 미치는 효과를 규명하고 또한 적정한 비례 게인 및 적절한 제어 주기 등 제어 알고리즘 구현에 필요한 작동 인자들을 결정하였다.

그림 9는 비례게인의 크기에 따른 실린더의 응답성을 해석한 결과이다. 펌프의 유량은 정격속도를 고려하여 17.2 lpm으로 하였으며, 스텝입력으로 5 V (유압실린더 변위 125 mm에 해당)를 인가하는 동안, 비례게인의 크기를 1, 2, 5 및 10으로 증가시켰다. 해석결과 비례게인이 클수록 실린더의 상승시간은 짧아졌으며, 오버슈트는 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 비례게인의 크기가 5 이상 증가할 때, 비례게인 증가에 따른 응답속도의 증가는 거의 발생하지 않는 것으로 보아 비례게인 값이 5 수준 내외일 때 펌프의 모든 유량을 공급하는 것으로 판단된다. 따라서 응답성을 높이기 위한 비례게인은 5 수준 안에서 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

그림 10은 유압펌프의 회전수에 따른 실린더의 응답성을 해석한 결과이다. 비례게인은 앞선 해석을 통해 5로 설정하였으며, 스텝입력으로서 제어신호 5 V를 인가하였다. 해석결과 실린더의 상승시간은 펌프의 토출 유량에 비례하여 감소하였으며, 오버슈트 및 정상상태오차는 발생하지 않았다.

그림 11은 조향륜의 마찰부하의 크기에 따른 실린더의 응답성을 해석한 결과이다. 유압펌프의 유량은 17.2 lpm, 최대 압력은 15 MPa로 설정하였으며 비례게인은 5를 이용하였다. 해석결과 마찰부하가 5 kN이하에서 발생할 때는 실린더의 상승시간에 거의 영향을 주지 않지만, 마찰부하가 크게 증가하여 20 kN 수준일 때 상승시간이 증가하여 조향속도가 감소될 수 있을 것으로 보이지만 어느 경우도 오버슈트나 정상상태오차를 발생시키지 않는 것으로 나타났다.

그림 12~14는 제어루프 시간, 즉 제어시간의 변화에 따른 시스템의 응답특성으로서 제어시간이 길어지면 비례게인이 높은 경우 오버슈트가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 제어 주기가 50 ms인 경우 비례게인이 5일 때는 오버슈트가 없었으나 비례게인이 10이 되면서 오버슈트가 나타나기 시작하였다. 따라서, 제어가 위치센서의 값을 읽고 지령신호와 비교 연산을 수행 후 디지털-아날로그 변환을 통해 제어신호를 출력하는 것을 고려하여 제어신호의 주기는 빠를수록 좋다고 판단하였다.

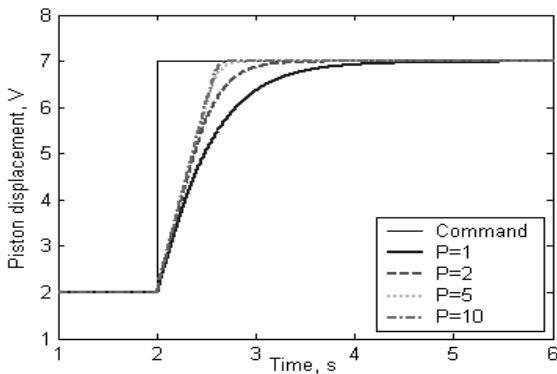


Fig. 9 Step function responses on different P-gains.

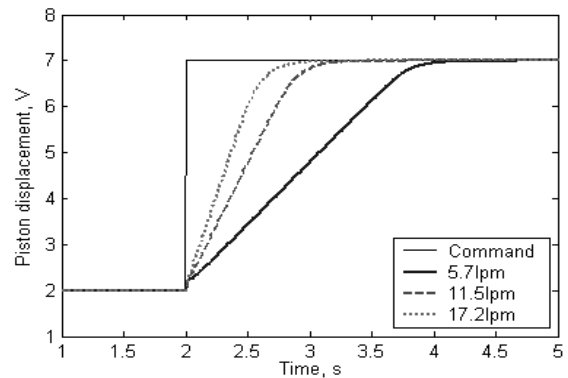


Fig. 10 Step function responses on different flow rates.

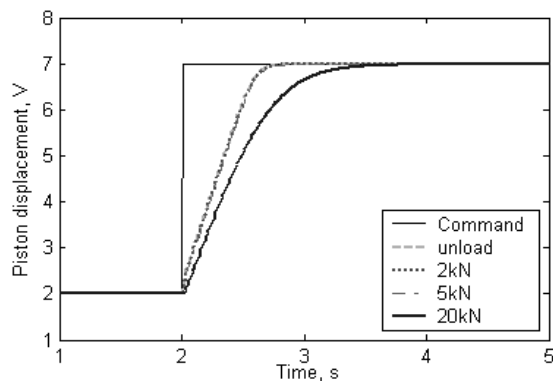


Fig. 11 Step function responses on different external loads.

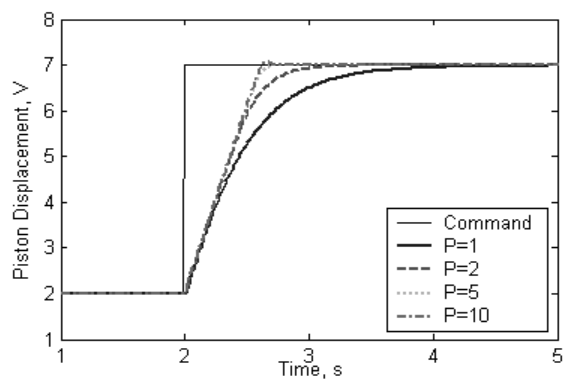


Fig. 12 Step function responses on fig. 9 (control time = 50 ms).

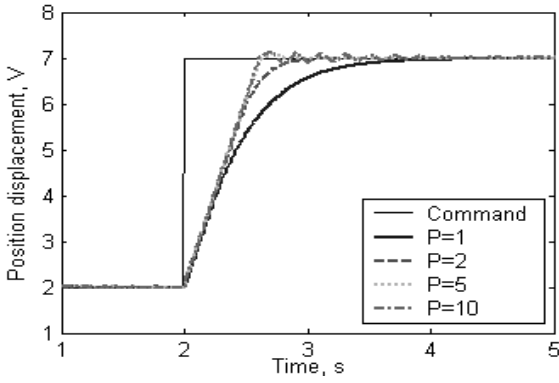


Fig. 13 Step function responses on fig. 9 (control time = 100 ms).

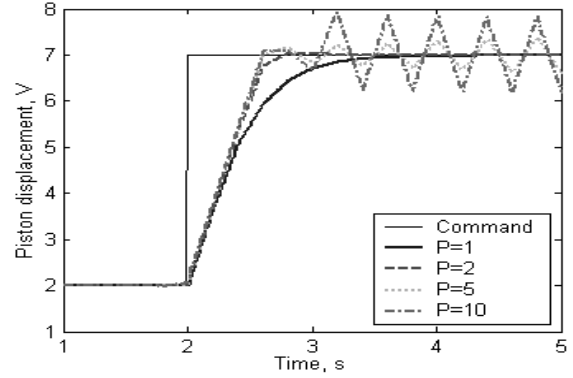
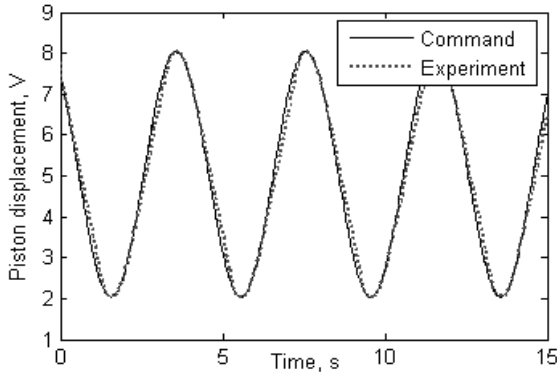
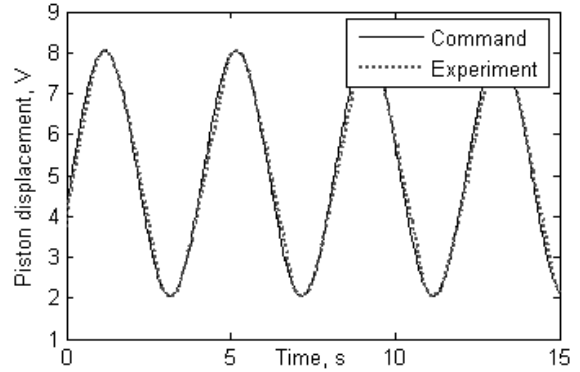


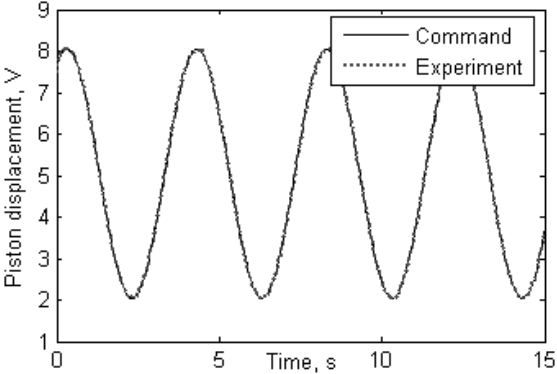
Fig. 14 Step function responses on fig. 9 (control time = 200 ms).



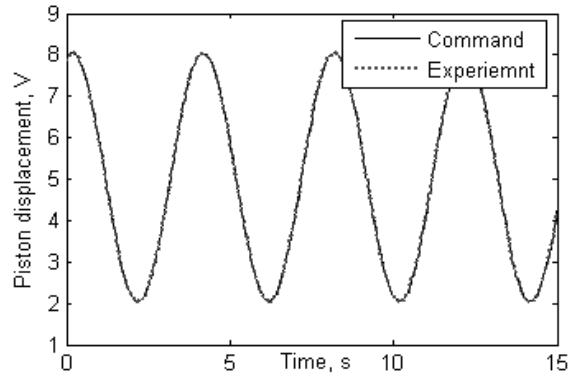
(a) 10 lpm / loading



(b) 10 lpm / unloading



(c) 15 lpm / loading



(d) 15 lpm / unloading

Fig. 15 Tracking responses of cylinder to sinusoidal command.

다. 성능평가

그림 15는 사인과 지령신호에 대한 실린더의 응답특성을 나타내고 있다. 주파수가 0.25 Hz, 최대진폭이 6 V인 sine 파형에 대하여, 각 수준의 유량 및 부하 조건에서 응답특성을 분석한 경우이다. 펌프공급유량이 10 lpm 및 15 lpm인 경우 모두 현 주파수의 sine파형을 정확히 추종하는 것으로 나타났으며 오버슈트 등의 불안정한 요소는 발생하지 않았다. 다만, 근소한 차이로 유량이 10 lpm인 경우 상대적으로 응답 지연이 발생하는 것을 알 수 있는데, 본 해석모델을 통하여 조

향속도에 따라 요구되는 유압펌프 공급유량을 규명하는데 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 부하 유무에 따른 응답특성에서 마찰부하가 있는 경우 상승시간이 3% 증가하여 그 차이가 크지 않았다.

그림 16은 사각파형 지령신호에 대한 실린더의 응답특성으로 주파수가 0.25 Hz, 최대진폭이 4 V이며, 유량 및 마찰부하를 단계별로 변화시키며 실험한 결과이다. 실린더의 응답속도는 펌프공급유량에 정비례하는 것으로 나타났으며, 따라서 유량이 15 lpm인 경우 응답시간은 10 lpm인 경우에 비하여 70% 수준으로 짧게 나타났다. 또한 마찰부하가 존재하

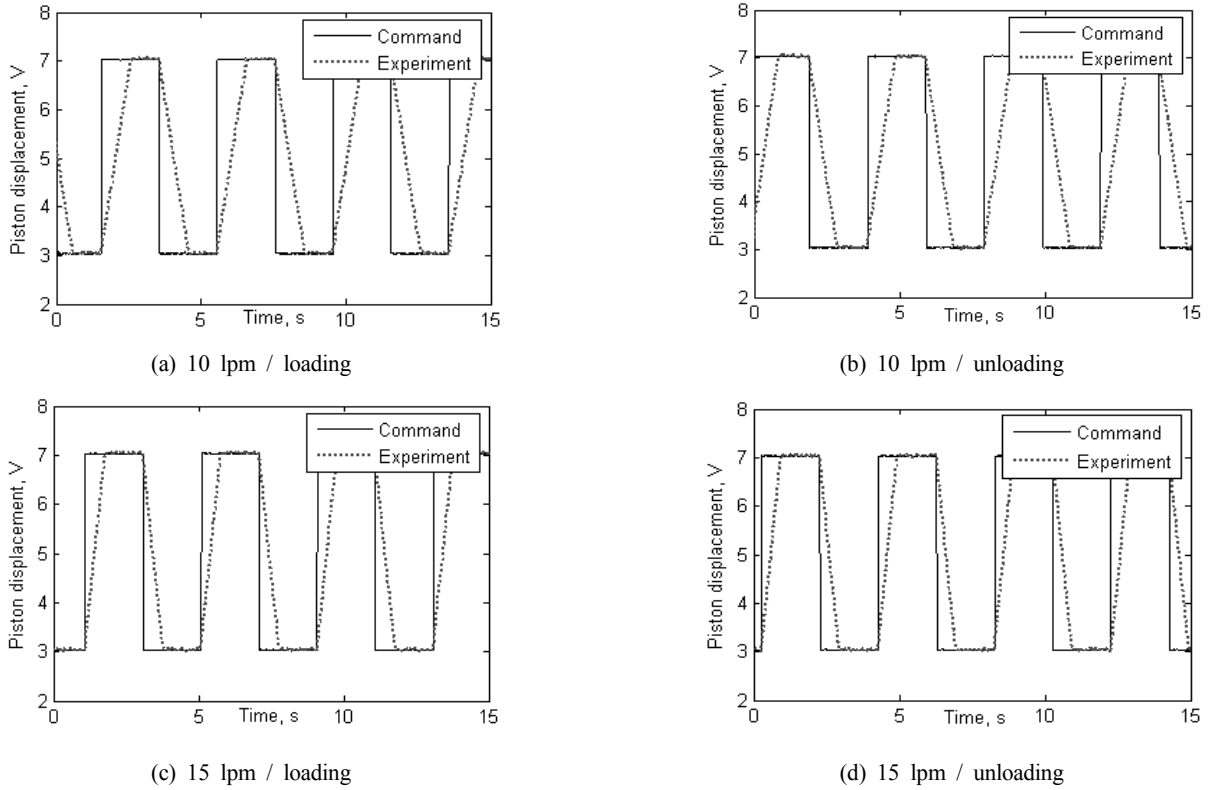


Fig. 16 Tracking responses of cylinder to squarewave command.

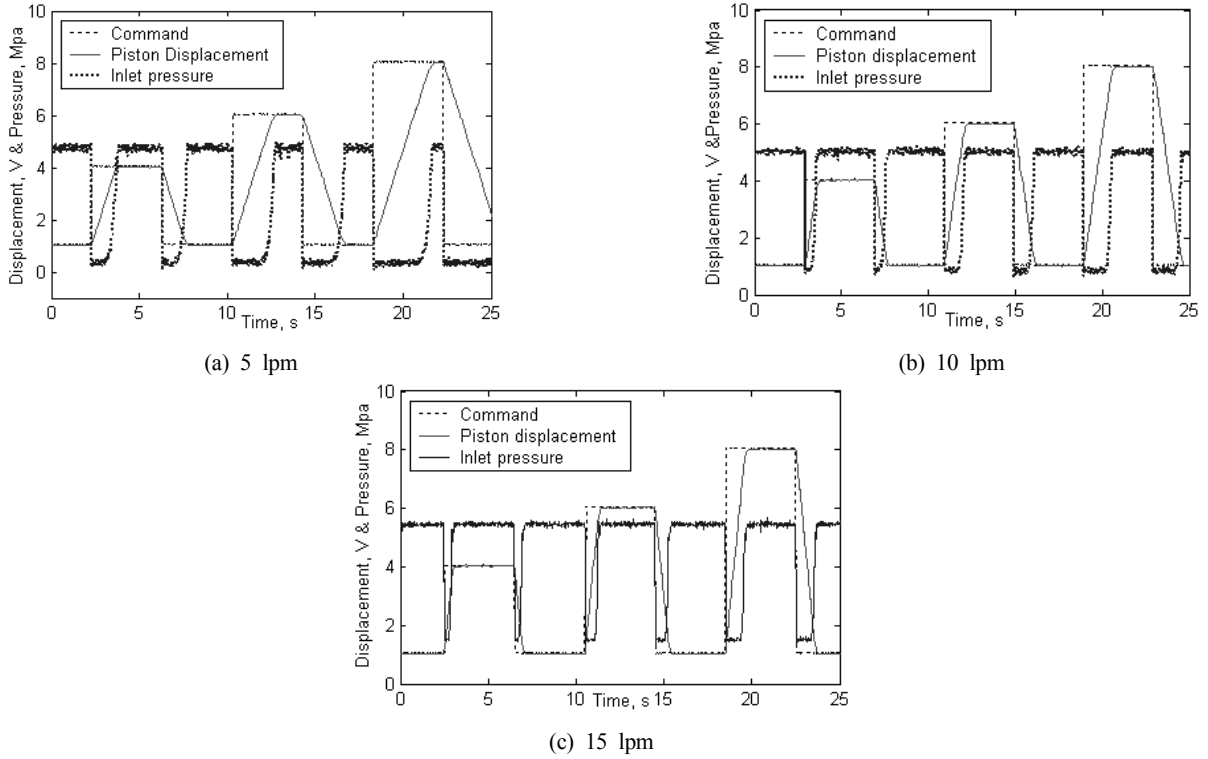
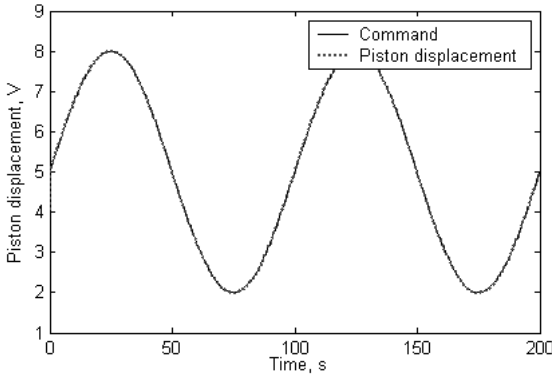


Fig. 17 Tacking responses and inlet pressures of cylinder to stepwise command.

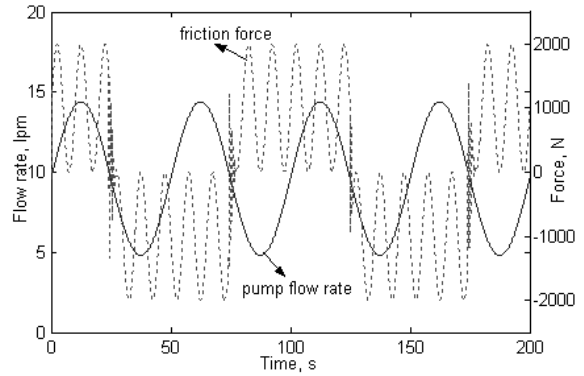
는 경우 실린더에 배압이 형성되므로 응답속도는 조금 감소하여 상승시간이 증가하나, 그 크기가 약 3% 수준으로 큰 차

이를 나타내지 않았다.

그림 17은 동일한 공급유량에서 스텝함수의 크기만을 변



(a) piston displacement



(b) change of flow rate and external load

Fig. 18 Tracking response of cylinder to sinusoidal command with long period while changing flow rate and external load.

화시키며 응답 특성을 시험한 것으로서, 공급 유량 증가에 따라 상승시간의 차이만 있을 뿐 오버슈트 및 정상상태오차 없이 정확하게 실린더의 위치제어가 가능함을 보여준다. 표 2에서와 같이 동일한 유량에서 3, 5 및 7V 이동시 상승시간은 스텝의 크기에 정비례하여 증가하며, 유량 증가에 따른 상승시간은 반비례하는 것으로 나타났다. 또한 시스템의 공급압력은 실린더가 정지한 경우 릴리프의 설정압력을 유지하지만 실린더가 이동하는 구간에서 유량의 소모로 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 실린더가 이동하는 동안 펌프에서 토출되는 모든 유량이 실린더로 유입됨을 의미한다.

Table 2 Change of rise time on different flow rates and amplitudes

Flow rates	Amplitude of step function		
	3 V	5 V	7 V
5 lpm	1.4	2.5	3.5
10 lpm	0.8	1.3	1.7
15 lpm	0.5	0.8	1.2

주기 100 s 및 최대진폭 6 V의 사인과 입력을 조향제어시스템에 가하면서 임의로 공급유량과 부하를 변화시키면서 유압실린더의 응답특성을 시험한 결과 지령신호에 잘 추종하는 것으로 확인되었다.

그림 18은 변동 유량 및 변동 부하에 대한 영향을 가시화하기 위하여, 개발된 AMESim 모델을 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. 그림 18(b)에서와 같이 공급유량 및 부하가 각각 0.02 Hz 및 0.1 Hz의 주기로 그 크기가 변동되더라도 그림 18(a)에서 보는 바와 같이 유압실린더는 지령신호를 잘 추종함으로써 본 연구에서 개발한 조향제어시스템은 비례제어만으로도 외란에는 둔감하며, 정확한 위치제어를 수행할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

AMESim을 이용하여 비례제어밸브, 양로드 유압실린더 및 부하로 구성된 조향제어시스템에 대한 해석 모델이 개발되었다. 이때, 개루프(open-loop) 상태에서 각 구성품의 유량특성과 밸브의 응답특성을 조사하여 모델에 사용되는 매개변수 값들을 구하였다. 개발된 모델은 실제 장치에서의 시험을 통해 그 유효성이 검증되었다.

다양한 컴퓨터 시뮬레이션과 실제 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 응답성이 우수한 비례제어밸브를 사용하여 누유가 발생하지 않는 양로드 유압실린더로 유압조향제어기를 구성하여, 비례게인 5와 50 ms이내의 제어주기를 유지한다면 비례제어만으로도 오버슈트와 정상상태오차가 나타나지 않았다.
- (2) 공급 유량이 증가함에 따라 또는 부하가 감소함에 따라 제어시스템의 상승시간은 비례하여 줄었으나, 오버슈트 및 정상상태오차를 야기시키지 않았다.
- (3) 유압실린더를 최대진폭 150 mm(입력전압 6 V에 해당)를 유지할 때 유압실린더가 사인과 지령신호를 잘 추종할 수 있는 최소 주기는 4 s이었으며, 이는 유압실린더가 75 mm/s의 속도로 이동하였음을 의미하는 바, 짧은 거리를 이동하는 경우에 최소주기는 비례하여 빨라질 수 있다.
- (4) 100 s의 주기와 최대진폭 150 mm로 유압실린더를 이동시키면서 공급유량이 5~15 lpm, 동시에 부하도 0~2 kN의 범위내에서 변하는 조건에서도 유압실린더는 지령신호를 정확히 추종함으로써 트랙터의 조향장치에서 나타날 수 있는 유량 및 부하 변동에 영향을 받지 않고 유압조향시스템을 안정적으로 작동할 수 있는 제어시스템이 개발된 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Anderson, W. R. 1988. Controlling Electrohydraulic Systems. Marcel Dekker, NewYork, N.Y. USA.
2. Jung, G. H. 1997. Position control system design of a single-rod hydraulic cylinder by using proportional PWM solenoid valve. Proceedings of 1997 Fall Korean Society for Mechanical Engineering Symposium A:663-668. (In Korean)
3. Kim, S. C., W. P. Park, J. P. Cha, S. O. Chung and I. G. Jung. 1997. Study on steering control for autonomous tractor - Path tracking with setting a target point -. Proceedings of 1997 Summer conference, Korean Society for Agricultural Machinery 2(2):41-48. (In Korean)
4. Kwon, K. S., C. D. Lee and J. K. Lee. 1991. Position control of a hydraulic cylinder by a differential PWM method. Journal of Korean Society of Marine Engineers 15(4):54-69. (In Korean)
5. Lee, K. S., W. Y. Park, C. H. Lee, J. Y. Lee, K. S. Lee and J. H. Mun. 2005. Development for electronic power steering control system for tractor. Proceedings of 2005 Winter conference, Korean Society for Agricultural Machinery 10(1): 159-164. (In Korean)
6. Park, W. Y., S. Y. Kim, C. H. Lee, D. M. Choi, S. S. Lee and K. S. Lee. 2004. Effects of road condition, Tire pressure and axle load on the steering force. Journal of Biosystems Engineering 29(4):419-424. (In Korean)
7. Yoo, T. J., J. Y. Huh and K. S. Rhyu. 1999. A study on position control of an electro-hydraulic servo system using high speed on-off valves. Journal of Korean Society of Marine Engineers 23(3):95-104. (In Korean)
8. Zhang, Q., J. F. Reid and D. Wu. 2000. Hardware-in-the-loop simulator of an off-road vehicle electrohydraulic steering system. Transactions of American Society of Agricultural Engineers 43(6):1323-1330.
9. Zhang, Q., S. Centinkunt, T. Hwang, U. Pinsopon, M. A. Cobo and R. G. Ingram. 2001. Use of adaptive control algorithms for automatic calibration of electrohydraulic actuator control. Applied Engineering in Agriculture 17(3): 259-265.