

유압단축제어기(HACD)를 사용한 위치 및 압력제어 Position and Pressure Control Using Hydraulic Axis Digital Controller

김대호 · 허준영

D. H. Kim, J. Y. Huh

접수일: 2011년 04월 11일, 수정일: 2011년 05월 11일, 게재확정일: 2011년 05월 12일

Key Words : HACD(유압단축제어기), Pressure Control(압력제어), Position Control(위치 제어)

Abstract: These days the injection molding work and press work are in the trend of needing the precision control of position and pressure in a high speed. On the other hand the digital computer technology is developing rapidly. And recently the digital servo controller using micro controller become to be used more broadly, because of the merit of digital communication. In this study the sequential control of hydraulic system switching from position to pressure and to position is tried using the HACD(Hydraulic Axis Controller Digital for electrohydraulic drives) which is manufactured by BoschRexroth. Through this, the possibility of the precision sequential control using the digital servo controller HACD is examined.

1. 서 론

국내 사출기 시장의 규모는 연 4000억 원 정도로 추정되며, 오픈루프제어로 생산하는 정밀도가 낮은 바가지 등에서부터 LCD 박막에 이르기 까지 다양한 종류의 물품이 사출성형에 의해 만들어진다. LCD 박막은 매우 얇기 때문에 수지가 굳어지기 전에 성형작업을 완료하기 위해서는 고속작업이 가능해야 하고, 형상이 복잡한 경우에는 압력제어가 정확하게 이루어지지 않으면 충족 불량이 되거나 버(bur)가 발생한다. 따라서 사출성형작업은 고속으로 위치와 압력의 정밀제어를 요구하는 추세에 있다.^{1,2)} 이러한 고속 고정밀 제어를 위해서는 고응답 비례 제어밸브 등을 사용한다. 제작업체로는 LS전선, 우진세텍스, 동신유압기기 등이 있다. 그 외에 전기 서보모터를 사용하는 방법이 있다. 이 방법은 특별히 반도체 제작 등의 청정작업을 요구하는 경우에 유용하다. 그러나 벨트 등을 사용한 동력변환장치로 인해 기구가 복잡해지고 장치가 커진다는 단점과 함께 최대출력에 제한이 있다.

그리고 다이쿠션이나 포징 등의 성형작업을 하는 프레스에서는 위치제어를 하다가 제품의 정밀도를 향상시키기 위해 압력제어를 행한다. 위치제어를 하다가 압력제어로 전환하는 방식에는 리밋스위치를 사용하는 방법과 소재의 접촉을 센싱 하는 방법, 트리거 위치를 사용하는 방법 등이 있다.^{3,4)} 다이쿠션 프레스의 국내제작업체로는 두산 인프라코어와 WIA, 로템 등이 있다. 유압시스템에서 위치와 압력을 제어하는 기술은 유압 사출성형기와 유압 프레스 외에도 유압 클램프와 각종 압연설비 및 공작 기계 등에 사용되고 있다. 한편 디지털 컴퓨터 기술이 급속히 발전함에 따라 최근에는 마이크로컨트롤러를 활용한 디지털방식의 첨단화된 서보컨트롤러가 상용화되고 있다. 대부분의 자동화기기가 디지털화 되는 이유와 유사하게 디지털방식의 서보컨트롤러에서는 상위제어기로부터 지령신호를 아날로그 전압 대신에 디지털통신으로 수신하므로 잡음에 의한 영향을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 양방향 통신을 이용하여 서보컨트롤러 및 제어시스템에 대한 진단기능을 구현할 수 있는 장점이 있다. 이외에도 마이크로컨트롤러를 활용하면 무선통신으로 원격 제어시스템을 구성할 수 있고 비선형제어 알고리즘과 통합제어시스템의 설계가 가능하므로 디지털방식 서보컨트롤러의 활용과 관련기술의 개발이 시급한 실정이다.⁵⁾ 또한 지금까지의 연구들은 유압시스템

접수일: 2011년 04월 11일

김대호(교신저자) : 한국기술교육대학교 대학원
메카트로닉스공학과

E-mail : daeho22@kut.ac.kr, TEL : 041-560-1149

허준영 : 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

의 위치 또는 압력에 대한 연구를 독립적으로 수행에 왔다.^{6~9)}

본 연구에서는 보쉬렉스로스에서 제작된 상용화된 디지털방식 서보컨트롤러인 유압단축제어기 HACD(Hydraulic Axis Controller Digital for electrohydraulic drives)를 사용하여 유압시스템의 위치 및 압력의 순차적 제어를 시도하였다. 이를 통하여 유압사출기 및 유압 프레스 등에서 디지털 서보제어기인 HACD의 위치와 압력의 정밀순차제어의 가능성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 개요

실험장치의 개략도를 Fig. 1에, 주요제원을 Table 1에 나타낸다. 사용한 펌프는 베인타입의 펌프로 배제용적은 12cc/rev이며 최대 공급유량은 21 l/min이다. Fig. 2에 나타낸 밸브는 NS6급의 양쪽 솔레노이드 방식의 고응답형 비례제어밸브로 클로즈드루프 비례제어밸브라고도 한다.¹⁰⁾ 안내밸브 스펴의 위치가 피드백 되며 안내밸브 위에 장착된 전기전자유닛은 안내밸브 스펴의 피드백신호를 처리하는 회로가 구성되어 있다. 실린더는 관성부하 15kgf가 장착되어 수직으로 설치되었다. 실린더 변위는 디지털센서 타입인 SSI(Serial Synchronous Interfacer)를 사용하여 피드백 하였는데 오차범위는 ±0.01mm이다. 그리고 실린더 압력은 압력변환기를 사용하여 피드백 하였다. HACD에서는 실린더의 변위와 압력을 피드백 받아 신호를 처리한다.

Table 1 Main dimension

	Items	Specification
Pump	Model	PV7-17/10-14RE01MC0-16
	Stroke Volume	12cc/rev
	Maximum RPM	1800rpm
	Maximum Flow	21 l/min
Valve	Model	4WRPEH6
	Size	NS 6
	Nominal Flow ΔP=35bar	12 l/min
	Type	Servo solenoid valves with on board electronics
Cylinder	25mm × 16mm × 300mm	
	Load	15 kgf
Sensor	Pressure	HEDE10A1($P_{max} = 100 \text{ bar}$)
	Displacement	SSI(Digital Sensor)

2.2 HACD와 BODAC

HACD의 실제 모양을 Fig. 3 (a)에 사진으로 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 HACD는 IC칩으로 설계되며 디지털방식으로 신호가 처리되는 서보제어기이다. HACD는 요구되는 특수한 제어 환경에 적합하도록 맞춤형 개루프 및 폐루프 제어 알고리즘 구성이 가능하다. 모듈 타입이며, 분산된 제어 구조를 단일화 할 수 있도록 위치, 속도, 압력/힘 제어를 모두 수행할 수 있는 기능을 가지고 있다. 개인용 컴퓨터에 설치한 BODAC(Bosch Rexroth Operator Interface for Digital Axis Controllers) 소

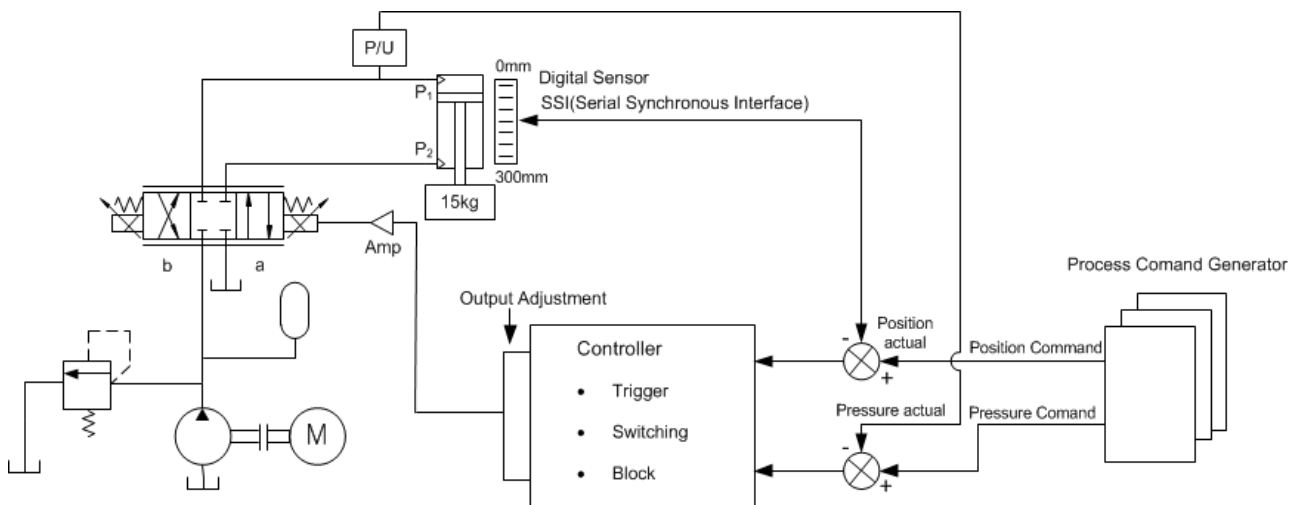
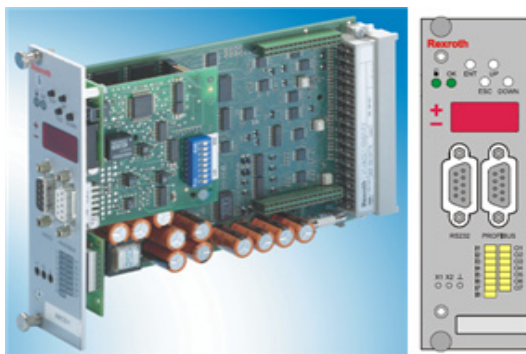


Fig. 1 Overall circuit



Fig. 2 Photo of the high response proportional valve



(a) Total view of the HACD (b) Front panel

Fig. 3 Photo of the HACD and front panel.

소프트웨어를 사용하여 자유롭게 제어기 구조를 변경 및 조합할 수 있어서 아주 유연한 제어기 구성이 가능하다. BODAC는 프로그래밍 기술이 없어도 도움말 메뉴에 따라 시스템 구성과 파라미터 설정 및 진단이 가능하게 되어 있다. BODAC 소프트웨어는 인터넷을 통해 무료로 다운 받을 수 있다. 또한 상위 제어기와 통신을 위해 필드버스(Profibus, DeviceNet, CANopen)가 옵션으로 제공된다. HACD를 사용하여 사출성형기의 사출공정제어와 프레스공정제어, 사축식 가변 유압펌프의 압력 및 유량제어 등의 응용이 가능하다. BODAC의 제어기 구조를 Fig. 4에 나타낸다.¹¹⁾

입력행렬에서는 외부 명령값과 SSI와 같은 위치 센서와 압력센서의 피드백신호 받을 곳을 지정한다. 블록행렬에서는 32개의 블록에 각각의 트리거 조건과 현 상태유지(dwell) 조건과 함께 위치 및 압력 등의 내부 명령값을 지정한다. 파라미터 설정에서는 트리거 조건을 위해 리미트스위치 및 현 상태유지시간 등을 설정할 수 있다. 또한 각 블록의 출력속도

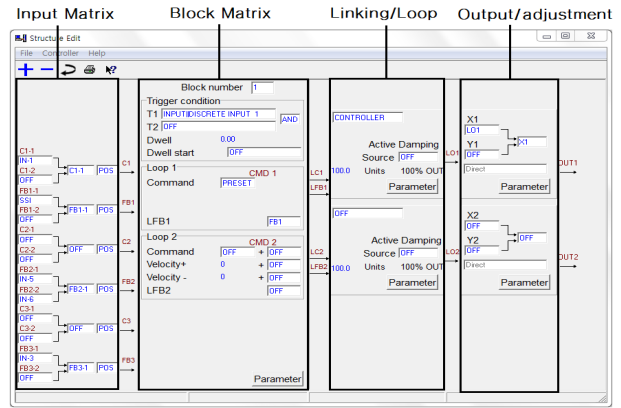


Fig. 4 Structure of the BODAC controller

와 PID 게인 게인 값을 설정 할 수 있다. 링크/루프 부분에서는 블록행렬을 통하여 조정된 루프 명령값(LC1)과 피드백 되어온 값(LFB1)을 비교하여 오차를 구한다.

상태 피드백을 위한 액티브 댐핑의 주파수 설정과 게인을 설정 할 수 있다. 끝으로 출력조정 부분은 제어기의 출력에 관한 모든 것을 설정 하는데 밸브의 오버랩과 오프셋 등도 설정할 수 있다. 예를 들어 밸브의 A 포트와 B 포트가 바뀌었다면 현장에서 밸브의 포트를 직접 바꿔주기 어렵다. 하지만 출력조정 부분에서 게인을 음(-)으로 설정해 주면 쉽게 밸브의 출력을 변경할 수 있다.

2.3 실험방법

실험은 6개의 스텝으로 구성한다. 스텝 1과 2는 각각 실린더 피스톤의 위치를 150mm와 230mm로 제어한다. 스텝 3~5는 각각 실린더 피스톤의 헤드측 압력(P₁)을 35bar, 45bar, 5bar로 압력을 일정하게 유지시키는 제어를 행한다. 그리고 스텝 6에서는 다시 실린더 피스톤의 위치제어로 전환 되어 피스톤의 위치를 30mm가 되도록 제어한다. 실험에서 사용한 공정의 순차제어선도를 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 5에서 일점쇄선은 피스톤의 변위를 나타내고 있으며, 점선은 피스톤 헤드측 압력, 실선은 스텝에 따라 제어되는 위치 또는 압력값을 나타낸다.

본 실험에서 사용한 6개 스텝의 순차제어를 위한 명령블록을 Fig. 6에 나타낸다.

블록 1: HACD 전면패널의 디지털입력 1 스위치를 누르면 블록 1이 선택이 되고 실린더의 피스톤 위치를 프리셋(preset)한다. 프리셋 한다는 것은 명령값(CMD)과 실제의 피스톤 변위값을 일치 시키는 동작이다.

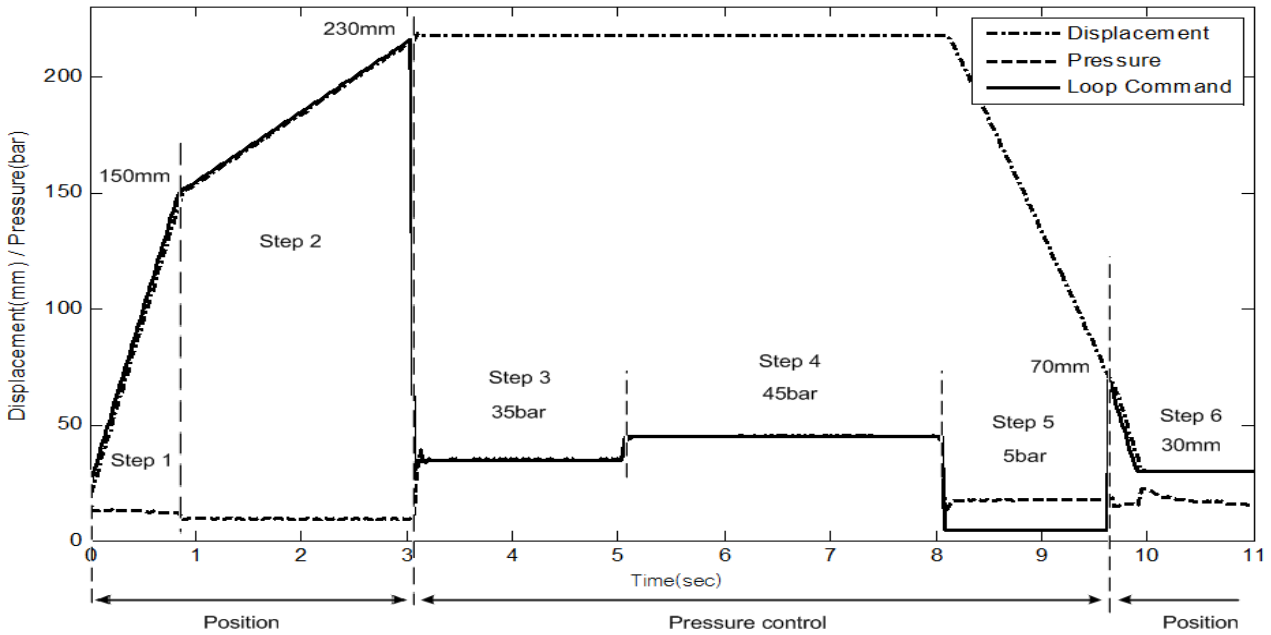


Fig. 5 Step diagram

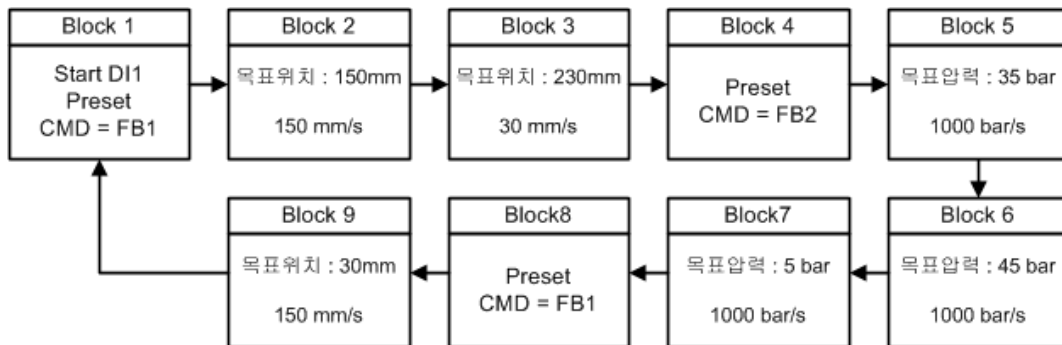


Fig. 6 Command block structure

블록 2: 시동 트리거 조건은 (BLOCK1 || RAMPIDONE)으로 블록 1에서 지정한 (CMD=FB1)이 완료 되었을 때 가동되어 실린더 변위를 150mm로 이동 시킨다. 이때 속도는 150mm/s 이다.

블록 3: 시동 트리거 조건은 (BLOCK2 || RAMPIDONE)으로 블록2에서 지정한 목표 변위 150mm에 도착 했을 때 실린더 변위를 230mm로 이동 시킨다. 이때 속도는 30mm/s 이다. 그리고 다음 블록을 위한 트리거 조건을 지정한다. 리미트 스위치 LS1을 215mm로 지정한다.

블록 4: 시동 트리거 조건은 실린더 변위가 블록3에서 지정한 LS1 보다 커지는 (BLOCK || LFB1 > =LS1)이다. 이 트리거 조건을 만족하면 실린더의 P₁의 압력을 프리셋 한다. 여기서 프리셋 한다는 것은 명령값(CMD)과 실제의 실린더압 P₁을 일치 시키는

것이다. 여기서 동작이 필요하다면 5000bar/s의 압력 변화율로 목표값에 도달 하도록 한다.

블록 5: 시동 트리거 조건은 (BLOCK4 || RAMPIDONE)으로 블록 4에서 지정한 (CMD=FB2)가 완료 되었을 때 실린더의 압력을 35bar로 조정한다. 여기서 압력 변화율은 100bar/s로 지정하였다. 이 동작을 2초 동안 유지시킨다. 그러기 위해서 상태 유지시간(dwell)을 2초로 지정하고, 상태유지시작(dwell start)을 블록시작(block start)로 지정한다.

블록 6: 시동 트리거 조건은 (block5 Dwell Finish)로 블록 5에서 지정한 압력유지시간 2초가 경과하면 실린더의 P₁ 압력을 45bar로 3초 동안 유지시킨다. 이 동작을 3초 동안 유지시키기 위해서는 상태유지시간(dwell)을 3초로 지정하고, 상태유지시작(dwell start)을 블록시작(block start)로 지정한다.

이때 변화율은 1000bar/s로 한다.

블록 7: 시동 트리거 조건은 (block6 Dwell Finish)로 블록 6에서 지정한 압력유지시간 3초가 경과하면 실린더 P₁ 압력을 5bar로 유지시킨다. 변화율은 1000bar/s로 한다. 이때 P₁을 5bar로 제어 시키면 P₂의 압력이 P₁ 보다 높게 되고 따라서 실린더 피스톤이 후진하면서 변위는 감소한다. 다음 블록을 위한 트리거 조건을 설정한다. 압력제어에서 위치 제어로 넘어가기 위해서는 제어루프 2를 사용해서 실린더 변위 피드백 신호인 FB1을 읽어 드린다. 그리고 리미트스위치 LS2를 70mm로 설정한다.

블록 8: 시동 트리거 조건은 (Block7 LFB2 <=LS2)로 실린더 변위가 블록 7에서 설정한 LS2가 70mm 보다 작아지면 실린더 피스톤 위치를 프리셋한다. 여기서 프리셋 한다는 것은 명령값(CMD)과 실제의 변위값을 일치시키는 동작이다.

블록 9: 시동 트리거 조건은 (BLOCK8 || RAMPIDONE)이며 블록 8에서 지정한 (CMD=FB1)이 되었을 때 실린더 변위는 30mm 위치로 이동한다.

블록 1~9 의 동작에서 게인 설정은 P게인이 1일 경우와 Ziegler-Nichols 방법에 의해 찾은 최적 게인을 적용하여 실험을 수행하였다. 비례제어동작만을 사용하여 K_p값을 0에서부터 증가시켜 가면서 출력이 최초로 지속적인 진동을 하게 되는 임계값 K_{pcr}을 찾고, 그 진동에서의 주기 T_{cr}을 찾아 Table 2에서와 같이 Ziegler-Nichols 방법에 의해 최적 게인을 구한다.^{12,13} 여기서 T_n, T_v는 적분시간과 미분 시간이다.

Ziegler-Nichols법에 의해 찾은 최적 튜닝 값은 Table 3과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 7에 P게인 1, I게인 0으로 설정된 경우의 스

Table 2 Ziegler-Nichols method finding optimal P,I,D gain based on K_{cr} and T_{cr}

Controller type	K _p	T _n	T _v	K _I	K _D
P	0.5K _{pcr}	-	-	-	-
PI	0.45K _{pcr}	0.85T _{cr}	-	K _p /T _n	-
PID	0.6K _{pcr}	0.5T _{cr}	0.125T _{cr}	K _p /T _n	K _p T _v

Table 3 P,I,D gain obtained by the Ziegler-Nichols method

	P	PI	PID
위치(전진) K _{pcr} =25 T _{cr} =0.04s	P=12.5	P=11.25 I=330.88	P=15 I=750 D=0.072
위치(후진) K _{pcr} =29 T _{cr} =0.036s	P=14.5	P=13.05 I=426.47	P=17.4 I=967 D=0.075
압력 K _{pcr} =5.5 T _{cr} =0.07s	P=2.75	P=2.475 I=41.59	P=3.3 I=94.285 D=0.0277

텝 1과 2, 6에서 실린더 피스톤의 위치를 제어한 실험결과를 나타낸다. 명령값(Command)은 일점쇄선으로 나타내었다. 교정값(Correction)은 블록행렬을 통과하면서 교정된 값으로 제어기에 가해지는 입력 신호인데 실선으로 나타내었다. 피드백 되어 온 실제값(Actual)은 점선으로 나타내었다. 명령값(Command)은 스텝 1(St1)과 2(St2), 6(St6)에서 각각 150mm과 230mm, 30mm로 계단 형상으로 주어진다. 교정값(Correction)은 설정된 램프에 따라 일정한 기울기를 갖는다. 스텝 1(St1)에서 실린더의 변위가 150mm에 도착하면 스텝 2(St2)로 넘어간다. 여기서는 램프가 낮게 설정 되어 피스톤의 하강 속도가 크게 줄어들게 된다. Fig. 7에서는 P게인이 1로 낮게 설정되었고, I게인도 0으로 설정되어 스텝 2(St2)에서 압력제어로 전환 되기 직전에 8.93mm의 추종오차가 발생하였다. 실린더의 변위가 215mm에 도달하면 압력제어로 전환 되므로, 명령값은 압력값 35bar를 취하게 되고 따라서 명령값 곡선은 수직으

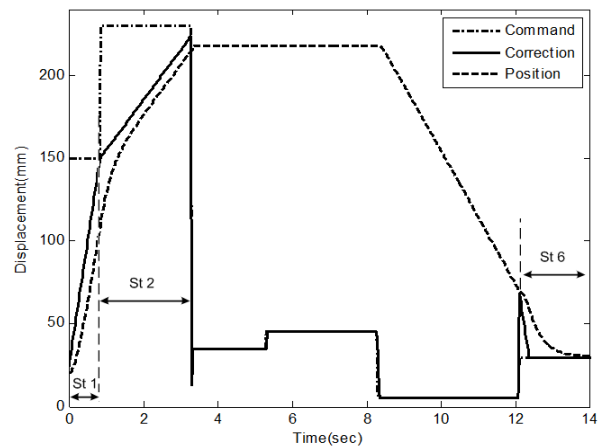


Fig. 7 Position control (P gain: 1)

로 떨어지게 된다. 그리고 스텝 6(St6)에서는 압력 제어에서 다시 위치제어로 전환 되므로 명령값 곡선은 수직으로 상승하여 70mm에 도달하면 30mm의 위치까지 지정된 램프에 따라 일정한 속도로 떨어진 후 30mm의 위치를 유지하게 된다. 여기서는 2.4s 뒤에 30mm로 수렴 되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8에 P게인 1, I게인 0으로 설정된 경우의 스텝 3~5(St3~5)에서 실린더 피스톤 헤드측의 압력을 제어한 실험결과를 나타낸다. 스텝 3(St3)에서 명령값(Command)은 35bar 이고 2초간 유지 되도록 하였다. 앞의 스텝은 위치제어이었기 때문에 실린더 헤드측 압력인 P_1 은 9.2bar로 머물다가 목표압력 35bar로 제어되었다. 그러나 명령값에 비해서 1.4bar의 정상상태 오차를 나타내었다. 그 이유로는 P 게인이 1, I 게인이 0으로 설정한 경우로 게인 설정이 제대로 이루어지지 않았기 때문이다. 스텝 4에서 명령값(Command)은 45bar이고 3초간 유지 되도록 하였다. 스텝 4(St4)에서도 스텝 3(St3)과 같은 이유로 명령값에 비해서 2.3bar의 정상상태 오차를 나타내었다. 스텝 5(St5)에서는 명령값(Command)을 5bar로 설정 하였다. 이 경우 배압인 실린더 로드측 압력 P_2 가 실린더 헤드측 압력 P_1 보다 크므로 실린더 피스톤은 후진하게 된다.

Fig. 9에 Ziegler-Nichols 방법에 의하여 구해진 P게인, I게인, D게인을 설정한 경우의 스텝 1(St1)과 2(St2), 6(St6)에서 실린더 피스톤의 위치를 제어한 실험결과를 나타낸다. 명령값과 교정값, 피드백된 실제값을 각각 일점쇄선, 실선, 점선으로 나타내었다.

스텝 2(St2)에서 압력제어로 전환 되기 직전에 추종오차는 1.08mm이었으며, 스텝 6(St6)에서 압력제어

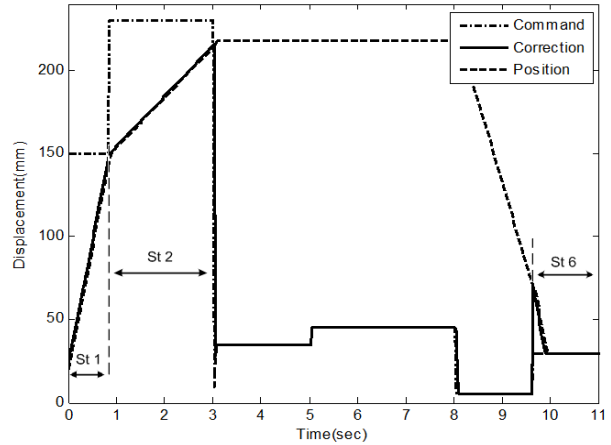


Fig. 9 Position Control (P,I,D gain obtained by the Ziegler-Nichols method)

에서 다시 위치제어로 전환 된 후의 정상상태오차는 0.01mm로 피드백 위치변환기인 SSI의 오차범위 이내로 매우 높은 추종성을 나타내고 있다.

Fig. 10에 Ziegler-Nichols 방법에 의하여 구해진 P게인, I게인, D게인을 설정한 경우의 스텝 3~5(St3~5)에서 실린더 피스톤 헤드측의 압력을 제어한 실험결과를 나타낸다. 명령값과 교정값, 피드백된 실제값을 각각 일점쇄선, 실선, 점선으로 나타내었다. 스텝 3(St3)의 명령값 35bar와 스텝 4(St4)의 명령값 45bar에 대하여 정상상태오차는 0.1bar로 매우 높은 추종성을 나타내고 있다. 스텝 5(St5)에서 압력제어의 목표값으로 5bar를 주면, 실린더 헤드측 압력인 P_1 의 압력을 45bar에서 5bar로 낮추기 위하여 4포트 3위치 고응답 비례방향제어밸브의 스폴 위치를 “a”위치에서 “b”위치로 미소 전환 하게 되는데 이 때 피스톤은 서서히 상승하게 되고, 실린더 헤드

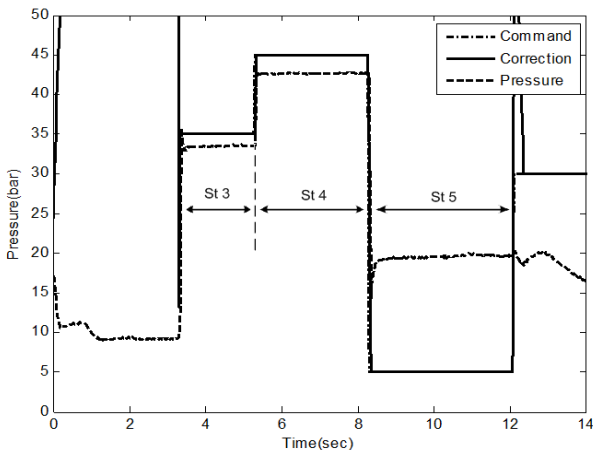


Fig. 8 Pressure control (P gain: 1)

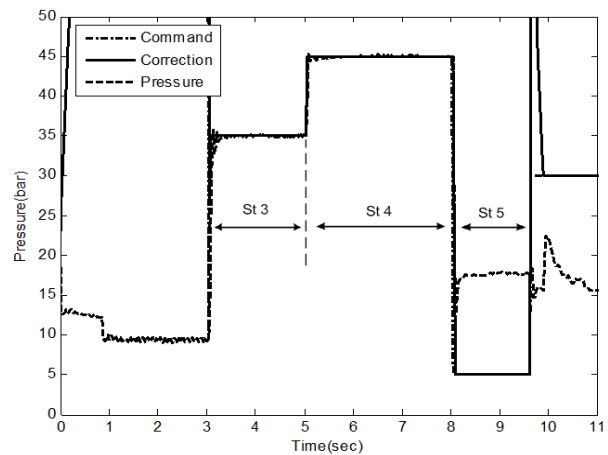


Fig. 10 Pressure Control (P,I,D gain obtained by the Ziegler-Nichols method)

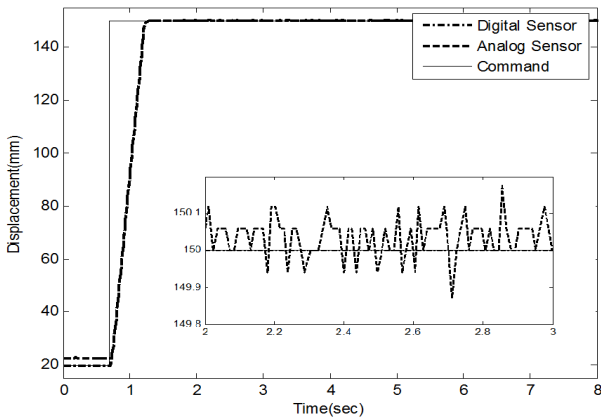


Fig. 11 Comparison of Digital sensor(SSI) and analog sensor

측에서 나오는 유량은 미소 변위된 4포트 3위치 고 응답 비례방향제어밸브의 “b” 스톱위치를 통과하면서 압력 강하량이 크게 발생하여 최소압력은 17.7bar로 나타났다. 따라서 스텝 5(St5)에서는 압력 제어를 하기 위함이 아니고 서서히 피스톤을 상승시켜 스텝 6(St6)에서의 위치제어로 연계시키기 위함이다.

디지털 제어기에서는 각각의 블록에서 서로 다른 계인을 설정할 수 있다. 특히 관성부하가 있는 수직형 실린더에서는 하강시 계인인 P=12.5에 대하여 상승시 최적 계인 P=14.5를 적용하여 응답을 개선할 수 있었다.

Fig. 11에 디지털 센서(SSI)와 아날로그 센서로 포 텐쇼미터를 사용하여 샘플링 시간 10ms로 수집한 데이터를 비교하여 나타내었다. 아날로그 센서에서는 ±0.1mm 이상의 노이즈가 수반되는 것에 비해 디지털센서를 이용할 때 노이즈의 영향이 없는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유압 사출기 및 유압 프레스 등에 사용되는 유압 시스템의 위치 및 압력 제어를 디지털 서보 제어기의 일종인 HACD를 사용하여 구현한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 디지털 서보 제어기인 HACD로 위치에서 압력 또 다시 위치제어로 변환이 필요한 경우에 적용이 가능한 유연성 높은 제어를 구현할 수 있다.
2. 디지털 제어기에서는 트리거와 명령블록을 사

용하고 있고 각각의 블록에서 계인 등을 서로 다르게 설정할 수 있어서 공정이 복잡한 경우에도 용이하게 제어 할 수 있다.

3. 디지털 센서(SSI)를 사용하여 노이즈 영향이 거의 없는 양호한 변위응답을 얻을 수 있다.

참고문헌

- 1) 황철진 외 4인, “사출 성형된 마이크로 채널의 전사성 향상에 관한 연구,” 월간금형저널, 2007년 1월, pp.91~95, 2007.
- 2) 정현석 외 1인, “유압식 사출 성형기 신뢰성 평가에 관한 실험적 연구,” 한국정밀공학학회, Vol. 11, pp471~472, 2007.
- 3) K. Isamu, “프레스 성형기술의 현상과 전망,” 월간금형기술, 2008년 8월, pp.51~60, 2008.
- 4) Y. Tobi, “최신 정밀 고속프레스와 가공공정,” 월간프레스, 2007년 6월, pp.25~32, 2007.
- 5) 정규홍, “멀티채널 서보컨트롤러 모듈 설계,” 유공압시스템학회지, 2008년 6월, pp.2~11, 2008.
- 6) 양경욱 외 1인, “예견학습 제어기를 사용한 유압서보계의 압력제어,” 한국기계기술학회, Vol.2 No.2, pp.119~125, 2000.
- 7) 양경욱 외 2인, “비례전자밸브를 사용한 유압서보계의 압력제어,” 대한기계학회, Vol.21 No.8, pp1229~1240, 1997.
- 8) 문봉호 외 2인, “유압 서보 시스템의 압력제어에 관한 연구,” 여수대학교, Vol.14 No.2, pp125~132, 1999.
- 9) 박경섭 외 1인, “H_∞ 제어에 의한 전기·유압 서보계의 위치,” 한국공작기계학회, 2005.
- 10) Servo solenoid valves with on-board electronics: Types 4WRPEH6, BoschRexroth (RE 29035/01.05), 2003.
- 11) VT-HACD-1 Digital controller for electrohydraulic drives, BoschRexroth (RE30143/09.07), 2007.
- 12) Pro. & Servo Technology Digital Control, BoschRexroth, 2007.
- 13) A. Zimmermann, “Closed-Loop Hydraulics,” FESTO, 2000.