

2-방향 카트리지 밸브 기반 로직회로에 의한 사출성형기의 형체력 제어 Clamping force control of injection molding machine using 2-way cartridge valve based logic circuit

조승호^{1*}

Seung Ho Cho

Received: 07 Mar. 2016, Revised: 12 Apr. 2016, Accepted: 25 Apr. 2016

Key Words : Cartridge Valve(카트리지 밸브), Clamping Force(형체력), Injection Molding Machine(사출성형기), Logic Circuit(로직회로), Virtual Design(버추얼 디자인)

Abstract: The present study deals with the issue of clamping force control of an injection molding machine using 2-way cartridge valve based logic circuit. The operating principle for the cartridge valve is described with its construction and static opening behavior. Basic module circuits are designed first and analysed according to the basic functions. Then they are combined with a virtual design model for the clamping mechanism to simulate the control performance of the overall system. The backlash inherent in the mechanism is considered while evaluating the time-delay in the process of clamping force build-up. The effects of a couple of design parameters in backlash, i.e. , interval and stiffness have been demonstrated in the time-domain.

기호 설명

bL : viscous damping coefficient of backlash

kL : stiffness of backlash

$p_{A, B, x}$: pressures at port A, B, and x

cv : cartridge valve

prv : pressure relief valve

y_{Rel} : relative displacement

1. 서론

카트리지 밸브를 이용한 유압제어가 산업현장에서 매우 광범위하게 쓰이고 있다.¹⁻²⁾ 최근에 이르러 유압 프레스, 사출성형기, 기타 출력용량이 큰 산업기계 분야에서 제어요소로서 막중한 비중을 차지하게 되었다.

카트리지 밸브를 이용한 기술개발은 유압제어의 활용가치를 한 단계 더 높였다. 특히 제어기능을 추가하는 경우, 별도의 제어요소를 유압회로가 아닌 신호 제어회로에 부가해 주면 되므로 경제적이다. 파일럿 밸브제어에 의하여 압력, 유량, 방향을 제어하고, 또한 조합이 가능하므로 시스템의 변경에 유리하다.

사출성형기는 크게 형체부와 사출부로 나누어진 다.³⁻⁴⁾ 선행 연구결과로서, 본 연구의 기저를 형성하는 사출성형기의 직압식 클램핑 유닛이 Fig. 1에 나타나 있다. 메카니즘의 기하학적 정보를 상용소프트웨어 SimulationX⁵⁾에 내장된 다-물체 시스템(이하 MBS; Multi-Body System)기법을 활용하여 3D CAD 모델링 하였다. 가동형판(Moving platen)이 볼스크루(Ball-screw)에 의하여 원하는 위치에 다다르면, 고정형판(Stationary platen)에 위치한 4개의 유압실린더가 타이바를 인장시켜 850ton의 형체력(Clamping force)을 발생시키는 구조이다. 이 형체력을 이용하여 금형이 충분히 조여지면 비로소 용융된 수지가 주입되는 사출공정이 시작된다. 이때 유압실린더 1개 당 212.5ton(=2.08MN)의 힘 발생이 필요하다. 본 연구에서는 2-방향 카트리지 밸브 기반 로직회로를 사용하

* Corresponding author: shcho@hongik.ac.kr

1 Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea

Copyright © 2016, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

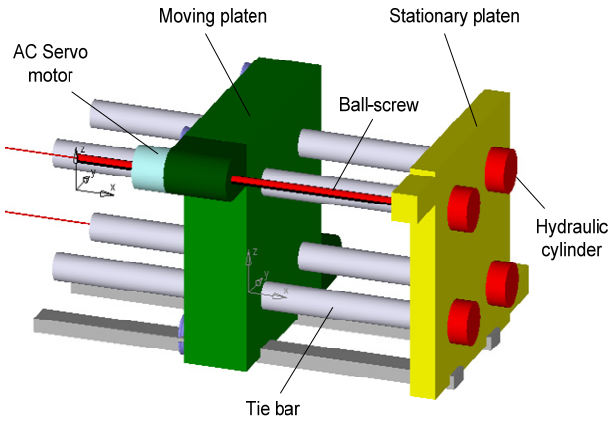


Fig. 1 3D CAD model for clamping unit

여, 사출성형기의 형체력 제어문제를 다룬다. 실제로 형체력 측정에는 많은 시간과 비용이 소요되므로, 사전에 이를 예측하는 프로세스 개발이 필요하다. 형체부 메카니즘과 유압제어회로를 결합하여 버추얼 디자인(Virtual Design) 모델을 구축한다. 그리고 멀티-도메인(Multi-Domain) 시뮬레이션을 통하여 제어특성을 고찰한다

2. 2-방향 카트리지 밸브의 작동원리

카트리지 밸브는 기본적으로 압력에 의하여 작동한다. 카트리지 내부 모습이 Fig. 2에 나타나 있다. 여기에서 X, A, B포트의 면적을 각각 A_x , A_A , A_B 로 나타내며, 용도에 따라 면적 비(예: $A_A/A_x=1/1.6$)가 존재한다. 각 면적에 작용하는 힘들의 크기에 의하여 밸브의 포핏이 움직이게 된다. 면적비에 따라 유량이 $A \rightarrow B$, $B \rightarrow A$, $A \leftrightarrow B$ 와 같이 흐르게 된다. 이에 따라서 카트리지 밸브는 방향제어밸브, 압력 릴리프 밸브, 감압밸브, 배압밸브, 그리고 캐비테이션 방지 밸브와 같은 다양한 형태로 응용되어진다. 그리고 포핏에 작용하는 힘 들 사이의 관계식은 식 (1)로 표현된다.

$$\sum F_{poppet} = p_A \cdot A_A + p_B \cdot A_B - p_x \cdot A_x - F_s \quad (1)$$

위 식에서 $p_A \cdot A_A$ 와 $p_B \cdot A_B$ 는 각각 A포트, B포트에서 포핏을 올리는 힘, $p_x \cdot A_x$ 는 포핏을 누르는 힘, 그리고 F_s 는 내장된 스프링 힘이다. 포핏을 올리는 힘의 합이 포핏을 누르는 힘보다 클 때, 즉 $\sum F_{poppet}$ 가 0보다 크면 포핏은 올려져 유량이 흐르게 된다. 그리고 포핏을 누르는 힘이 포핏을 올리는 힘의 합보다 크게 되면, 포핏은 닫혀진 상태를

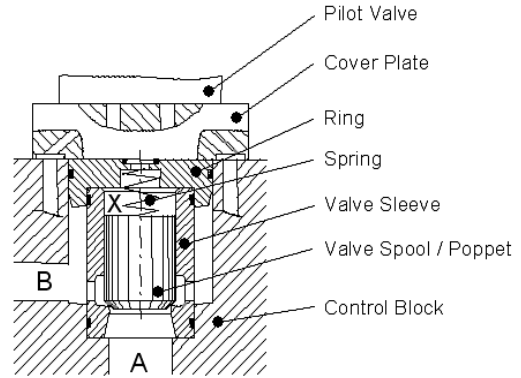


Fig. 2 Construction of a 2-way cartridge valve

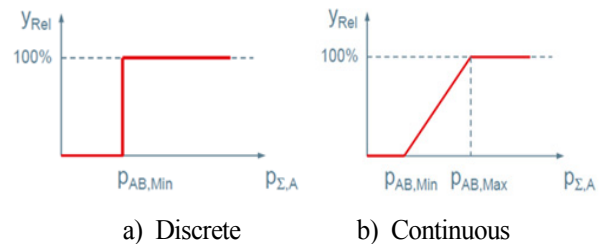


Fig. 3 Static opening behavior

상태를 유지하여 유량이 흐르지 않는다. 카트리지 밸브의 열림 특성이 Fig. 3에 도식적으로 나타나 있다. 그림에 나타나 있듯이, 밸브변위의 개폐특성은 이산적 열림과 연속적 열림으로 나눌 수 있다. 여기에서 $P_{AB,Min}$ 와 $P_{AB,Max}$ 는 각각 크랙킹(Cracking) 압력과 완전 열림(Fully open) 압력을 나타낸다. 이산적 열림은 위치 상태가 오직 열림 또는 닫힘 상태로만 나누어진다. 연속적 열림은 이산적 열림과 반대개념으로서, 포핏을 최대로 열 수 있는 압력과 포핏을 들어올리기 시작할 때의 최소압력이 존재하며, 이 두 압력 사이에서 비례적으로 열림 상태가 변화한다.

3. 기본 모듈회로의 구성 및 제어특성

형체력 제어를 위하여 필요한 전체의 유압회로에서, 핵심이 되는 카트리지 밸브기반 모듈회로를 추출한 후, 각 모듈회로의 제어특성을 시뮬레이션으로 고찰하였다. 카트리지 밸브는 미세한 직경을 통과하는 유량에 의하여 형성되는 파일럿 압력에 의하여 작동되므로, 기본적으로 모듈회로의 성능 규 명은 전체 회로의 성능 검증, 나아가 추후 진단 및 모니터링에도 유용하다.

3.1 파일럿 밸브의 결합

카트리지 밸브를 작동시키는 파일럿 압력을 외부

에서 파일럿 밸브 신호에 의하여 제어하는 방식이다. 실제의 회로와 시뮬레이션을 위하여 설계된 회로가 Fig. 4에 도식적으로 나타나 있다. 아울러 시뮬레이션 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 차례로 파일럿 신호 B의 온-오프 파형(pilotSig_B), 파일럿 밸브 B의 개도(yRel), 그리고 카트리지 밸브 B의 개도(yRel)가 나타나 있다. 파일럿 밸브 B의 상태가 1이면 포켓 하단에 작용하는 힘이 상단의 힘보다 커져서, 포켓이 위로 이동하여 포트 A에서 포트 B로 유량이 흐르게 된다.

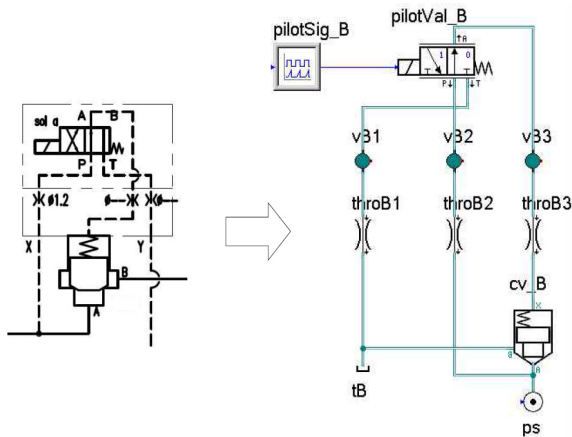


Fig. 4 Module B with pilot valve

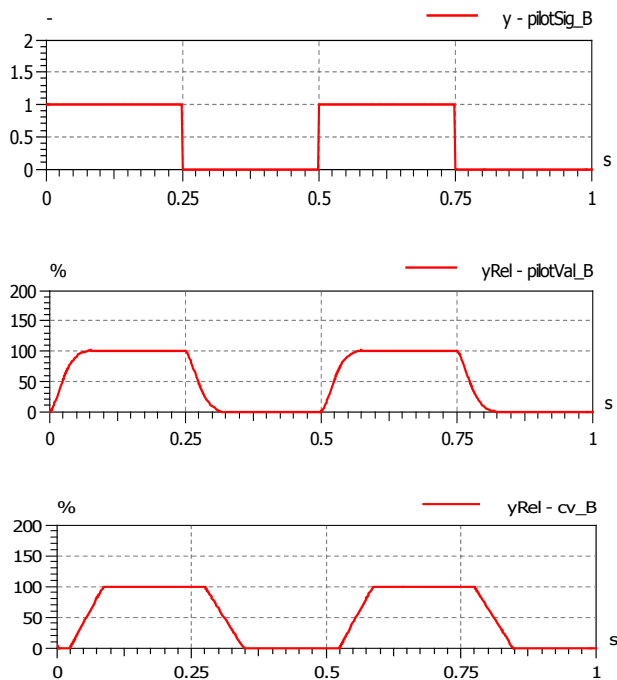


Fig. 5 Simulation results

3.2 압력 릴리프 밸브의 결합

카트리지 밸브를 작동시키는 파일럿 압력을 내부에서 압력 릴리프 밸브의 설정압에 의하여 제어하는

방식이다. 실제 회로와 시뮬레이션을 위하여 설계된 회로가 Fig. 6에 도식적으로 나타나 있다. Fig. 7에는 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값들이 나타나 있다. 이 파라미터 값들을 설정하는 데 기준이 되는 그림이 부록에 나타나 있다. 아울러 시뮬레이션 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 압력 릴리프 밸브와 카트리지 밸브의 시간응답특성을 고찰하기 위하여, 펌프의 압력을 램프(Ramp) 함수 형태로 설정하였다. 위에서부터, 펌프 압력파형(p-ps), 압력 릴리프 밸브 F에서의 압력강하(pPT), 그리고 카트리지 밸브 F의 개도(yRel)가 차례로 나타나 있다. 압력 릴리프 밸브의 설정압력을 70bar로 하였으며, 이를 초과하는 순간 카트리지 밸브가 열림상태로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 파일럿 밸브와 압력 릴리프 밸브의 병렬결합

카트리지 밸브를 작동시키는 파일럿 압력을 외부에서 파일럿 밸브 신호 또는 압력 릴리프 밸브의 설정압에 의하여 제어하는 방식이다. 구체적인 회로도 가 Fig. 9에 나타나 있다. 앞 절의 경우와 동일하게 압력 릴리프 밸브는 Fig. 7에 나타나 있는 파라미터 값들이 시뮬레이션에 사용되었다. 아울러 시뮬레이션 결과가 Fig. 10에 나타나 있다. 위에서부터, 임의로

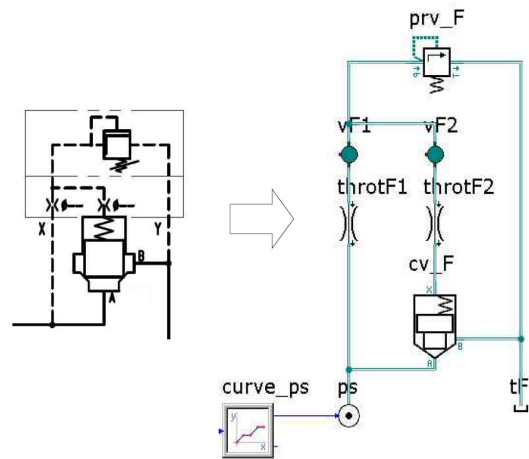


Fig. 6 Module F with pressure relief valve

Static Valve Characteristics (Control Range)		
Set Pressure	pSet:	70 bar
Static Pressure Behavior	dpdQ:	1.33 bar/(l/min)
Control Range Opening	_controlKind:	parabolic
Static Valve Characteristics (Throttle Range)		
Pressure Drop (Throttle Range)	dpThr:	90 bar
Flow (Throttle Range)	QThr:	15 l/min

Fig. 7 Input parameters of relief valve

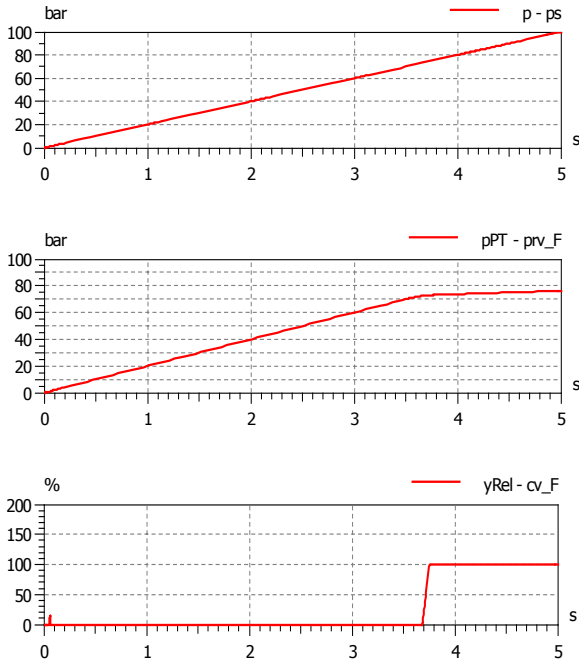


Fig. 8 Simulation results

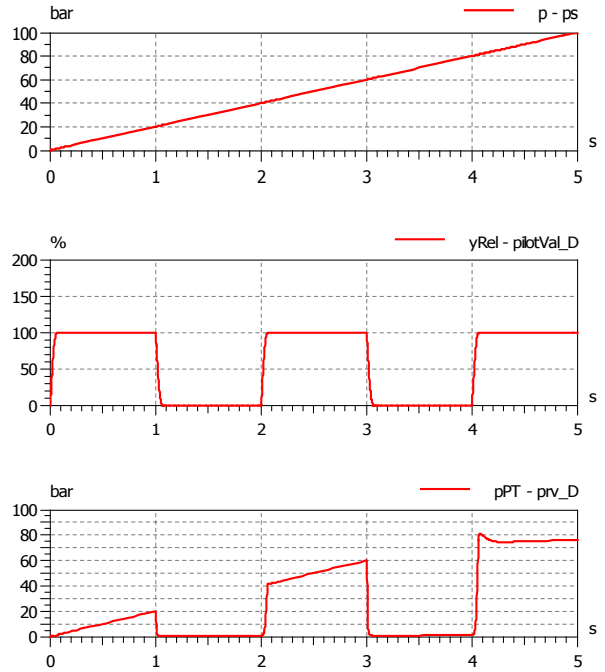


Fig. 10 Simulation results

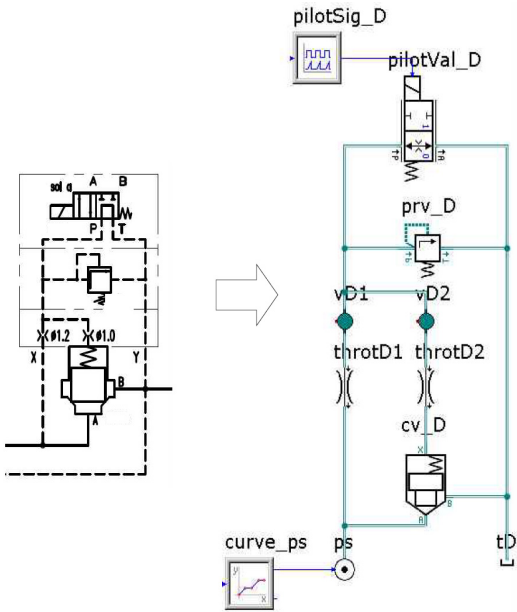
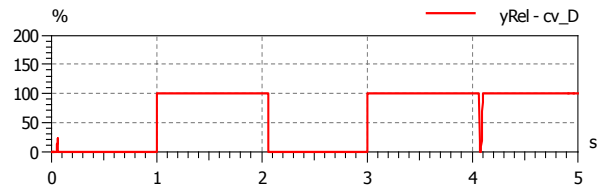


Fig. 9 Module D for parallel combination

설정된 펌프 압력파형(p-ps), 파일럿 밸브 D의 개도(yRel), 압력 릴리프밸브 D에서의 압력강하(pPT), 그리고 카트리지 밸브 D의 개도(yRel)가 나타나 있다. 압력 릴리프밸브의 설정압력은 70bar로 하였다. 압력 릴리프밸브에서의 압력강하가 70bar가 되기 전까지는 카트리지 밸브가 파일럿 밸브의 움직임에 의해서 제어되는 것을 알 수 있다. 그러나 압력이 70bar를 초과하는 약 4.1초 이후로는 압력 릴리프밸브가 열리면서, 카트리지 밸브가 계속 열려있는 것을 보여준다.



3.4 파일럿 밸브와 압력 릴리프밸브의 직렬결합
 파일럿 밸브에의 외부 입력신호와 압력 릴리프 밸브의 설정압에 의하여 카트리지 밸브를 작동시키는 방식이다. 구체적인 회로도가 Fig. 11에 나타나 있다. 앞 절의 경우와 동일하게 압력 릴리프 밸브는 Fig. 7에 나타나 있는 파라미터 값들이 시뮬레이션에 사용되었다. 아울러 시뮬레이션 결과가 Fig. 12에 나타나 있다. 펌프 압력은 앞 절과 동일하게 램프 함수 형태

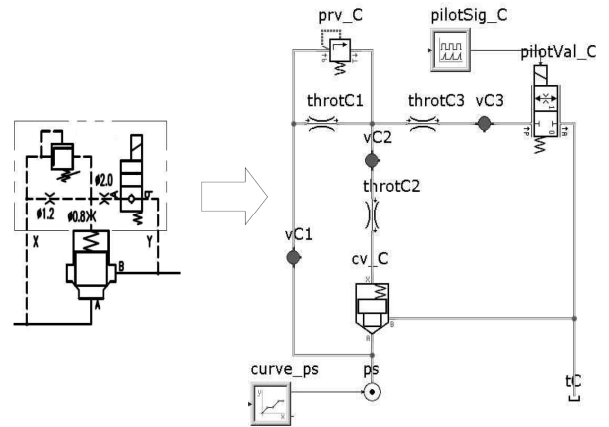


Fig. 11 Module C for series combination

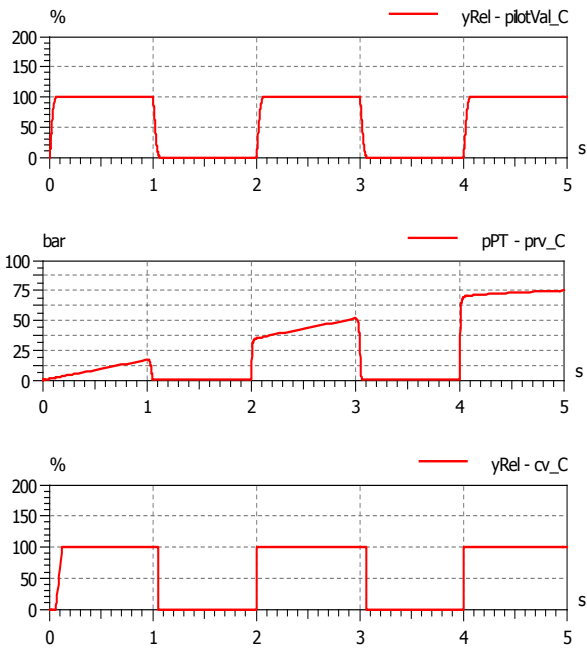


Fig. 12 Simulation results

Table 1 Control mode of pilot valve

Pilot Valve	A	B	C	D	E	Clamping Force
Mode 1	1	0	0	1	0	Build-up
Mode 2	1	0	0	1	1	Release

로 설정하였다. 위에서부터 차례로, 파일럿 밸브 C의 개도(yRel), 압력 릴리프 밸브 C에서의 압력강하(pPT), 그리고 카트리지 밸브 C의 개도(yRel)가 나타나 있다. 압력 릴리프 밸브 C는 파일럿 라인에서 압력만을 제어하여, 카트리지 밸브를 작동시키는 역할을 한다.

4. 형체력 형성과 해제

앞에서 해석한 모듈 회로들을 조합하여, 사출성형기의 형체력 형성과 해제 동작을 수행하는 전체 회

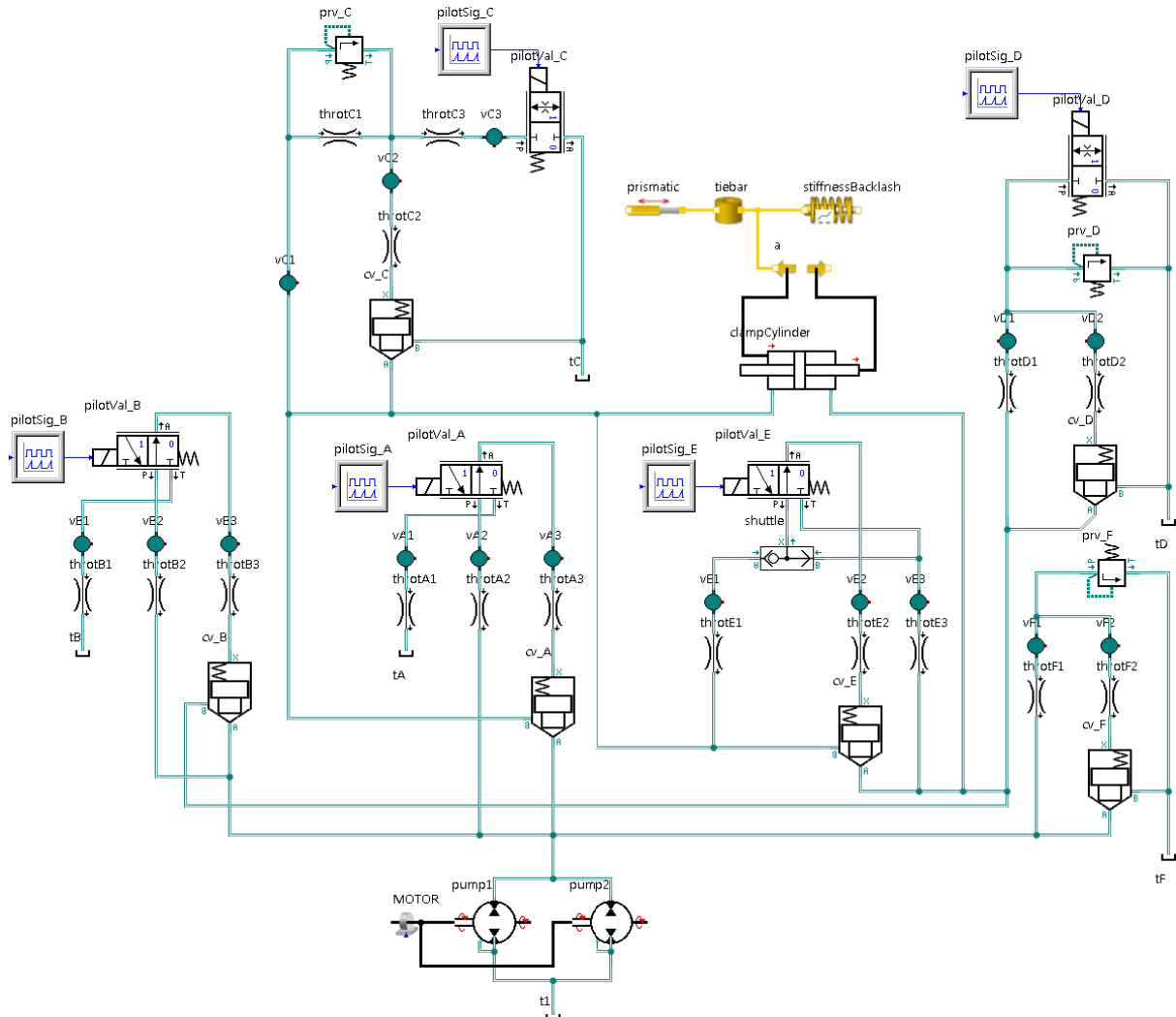


Fig. 13 Overall hydraulic circuit

로가 Fig. 13에 나타나 있다. 크게 나누어 유압동력발생부, 카트리지 밸브 기반 모듈회로, 그리고 유압실린더-타이바 메카니즘으로 구성되어 있다. 여기에서 실린더-타이바 메카니즘은 앞의 Fig. 1에서 실린더-타이바 1개 세트(Set)에 해당하는 MBS모델이다. 타이바를 인장하는 데 필요한 힘, 즉 강성부하와 더불어 내재된 백래시(Backlash)를 고려하였다. 카트리지 밸브 기반 모듈회로는 Fig. 13에서 볼 수 있듯이 구성부품들에 알파벳 첨자 A~F를 붙여, 모듈회로들이 서로 구분되게 하였다. 즉, 펌프와 실린더부를 제외하면 총 6개 모듈로 나누어지며, 이 중 파일럿 신호를 입력할 수 있는 부분은 A~E, 5개 모듈이다. 이 부분들은 각각 파일럿 밸브에 의해 형성되는 파일럿 압력이 카트리지 밸브를 작동시킨다. 파일럿 밸브 A, B는 피스톤의 전진과 후진, 그리고 파일럿 밸브 C, D는 후진 시 와 전진 시 탱크로 유량을 귀환시키는 데 사용된다. 형체력 조절은 메인 압력제어밸브(prv_F)에 의하여 이루어진다. 대표적인 동작모드가 Table 1에 나타나 있다. 여기에서 숫자 “1”과 “0”은 각각 파일럿 밸브의 온-오프 동작을 나타낸다. 동작모드 1, 2에 해당하는 형체력 형성과 해제의 시뮬레이션 결과가 Fig. 14에 나타나 있다. 클램프 실린더와 펌프의 파라미터 값들이 Table 2에 나타나 있다. 설정한 1초 동안에 형체력 형성과 해제를 위한 동작을 각각 1회

시행하였다. 이때 각각의 모듈회로에서 카트리지 밸브를 통과하는 유량, 형체력 형성과 해제, 그리고 피스톤 위치가 나타나 있다. 형체력이 형성되는 0.0 ~ 0.5s 동안에는 파일럿 밸브 E에 들어가는 입력신호가 “0”으로서, 카트리지밸브 E의 상단의 압력이 펌프압이 되어 전진동작을 수행한다. 실린더 초기 상태에서 0.04s 경과 후 형체력이 형성되며, 이때 실린더의 변위는 0.78mm로서, 이는 실제로 타이바의 인장길이에 해당한다. 이 때 형체력 형성에 필요한 유량이 카트리지밸브 A와 D를 통하여 흐르는 것을 보여준다. 전진동작에서 형체력이 형성되면, 유량이 더 이상 실린더로 유입되지 못하여 펌프와 카트리지 밸브 사이에 높은 압력이 생성된다. 이 부분의 압력은 압력 릴리프 밸브 F를 작동시켜, 카트리지 밸브 F의 상단의 압력이 탱크압 수준으로 되어 카트리지 밸브 F가 열려 유량이 탱크로 귀환된다. 형체력 해제 동작이 발생하는 0.5 ~ 1.0s 동안에는 카트리지 밸브 E에 들어가는 신호가 “1”로서, 카트리지 밸브 E의 상단이 탱크압 수준이 되어 카트리지 밸브 E의 B포트에서 A포트로 유량이 흐르게 된다.

이로 인하여 피스톤을 전진시키는 힘이 더 이상 생성되지 못하고 형체력은 해제되며, 카트리지 밸브 E와 D를 통해 유량이 탱크로 귀환된다.

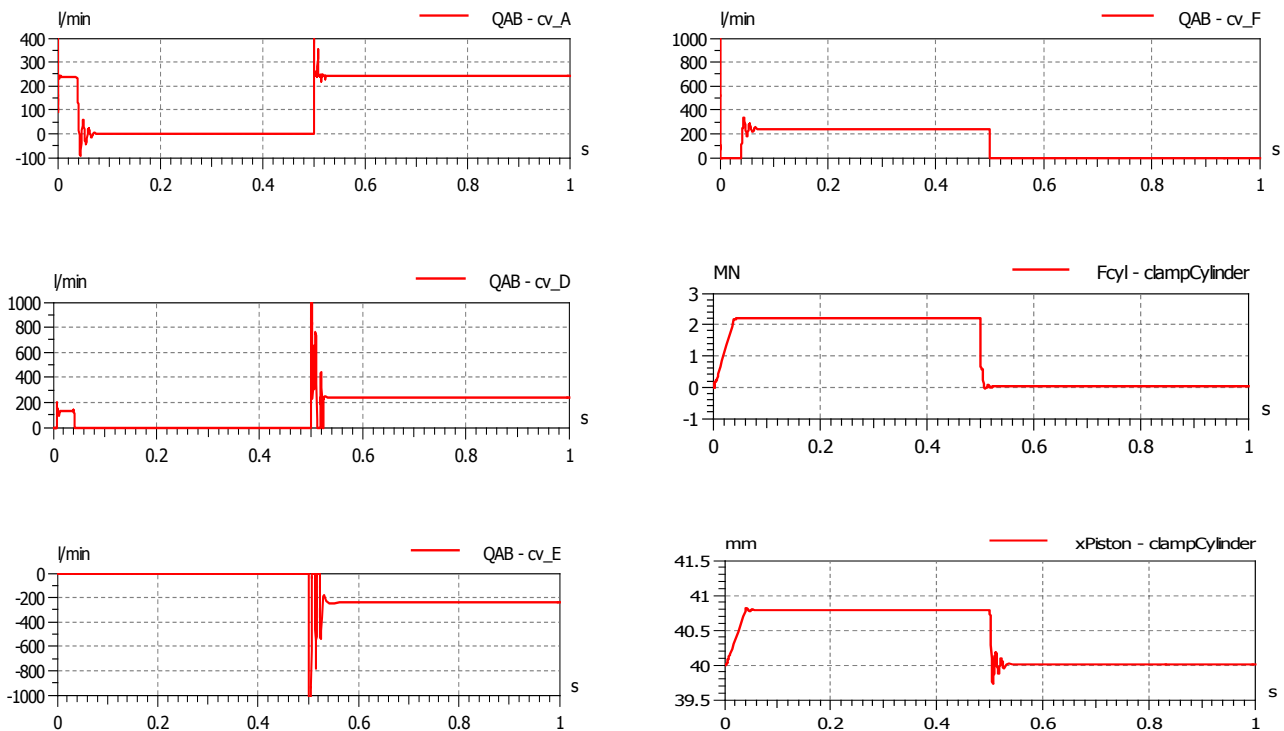


Fig. 14 Simulation results

5. 메카니즘에 내재된 백래시의 영향

직압식 사출성형기는 하프 너트(Half-nut)에 의하여 타이바(Tie-bar)를 고정시킨 후, 유압에 의하여 타이바를 인장시켜 형체력을 발생시키는 구조로 되어있다. 그런데 형체력 지연 현상이 발생하여, 사출제품의 성능을 저하시키는 경우가 생산 현장에서 심심치 않게 발생한다. 본 연구에서는 타이바를 고정시키는 메카니즘에 내재되어 있는 백래시가 형체력 지연에 미치는 영향을 고찰한다. Fig. 15에는 백래시의 파라미터들이 도시되어 있다. 이를 기초로, 백래시 간격 L과 강성 kL이 형체력 지연에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였다. Table 3에는 백래시 간격을 다르게 설정한 경우와, 백래시 간격을 일정하게 유지한 상태에서, 백래시 강성에 변화를 준 경우의 파라미터 값들이 나타나 있다. Table 3에서 Case 1, 2, 3의 경우에 따라 시뮬레이션 한 결과가 Fig. 16(a)(b)에 나타나 있다. 백래시 간격이 증가할수록 형체력 발생의 지연이 증가하는 것을 Fig. 16(a)로부터 알 수 있다. 백래시의 영향으로 실린더 피스톤 위치가 초기 상태에서 벗어나서 형체력이 발생하는 모습이 Fig. 16(b)에 나타나 있다. 형체력 해제 시 초기 위치로 복귀하지 않는 이유는, 원 위치로 복귀하는 과정에서 백래시가 영향을 미친 것으로 사료된다. 형체력 발생에 필요한 순수 피스톤 변위가 0.78mm임을 역시 보여주고 있다. 실린더의 초기위치를 40mm로 설정하였다. 다음에는 Table 3에서 Case 3, 3a, 3b의 경우에 따라, 백래시 강성이 미치는 영향을 시뮬레이션 한 결과가 Fig. 17(a)(b)에 나타나 있다. 백래시 강성이 작아질수록 형체력 발생의 지연이 증가하는 것을 Fig. 17(a)로부터 알 수 있다. 아울러 백래시 강성의 영향으로 인하여, 실린더 위치가 초기 상태에서 벗어나서 형체력이 발생하는 것이 Fig. 17(b)에 나타나 있다.

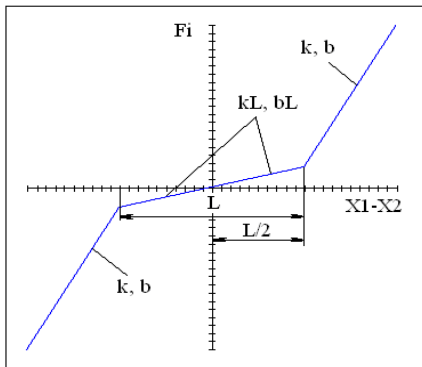


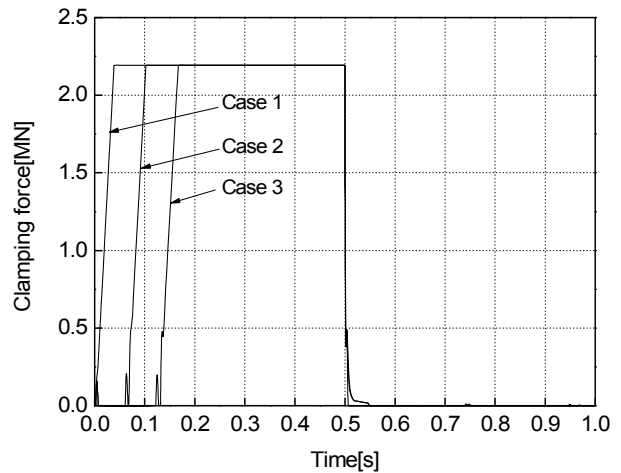
Fig. 15 Parameters around backlash

Table 2 Component specifications

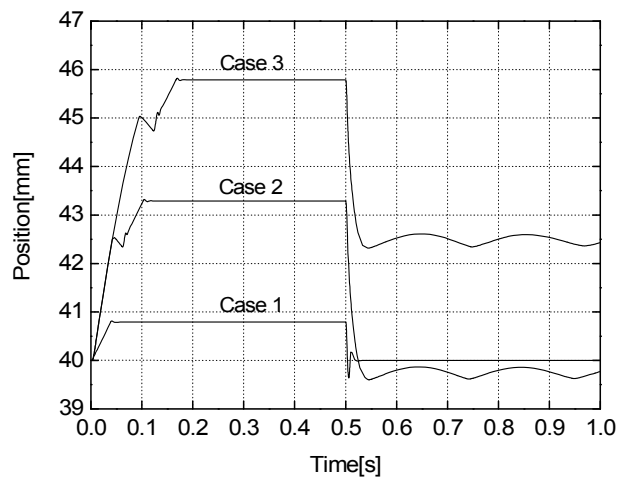
Parameters		Value
Cylinder	Piston diameter	410mm
	Rod diameter	190mm
	Stroke	80mm
Pump	Displacement	81cm ³
	Rotational speed	1500rpm

Table 3 Parameter values for backlash

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 3a	Case 3b
L(mm)	0	5	10	10	10
kL(GN/m)	0	0	0	0.278	2.78

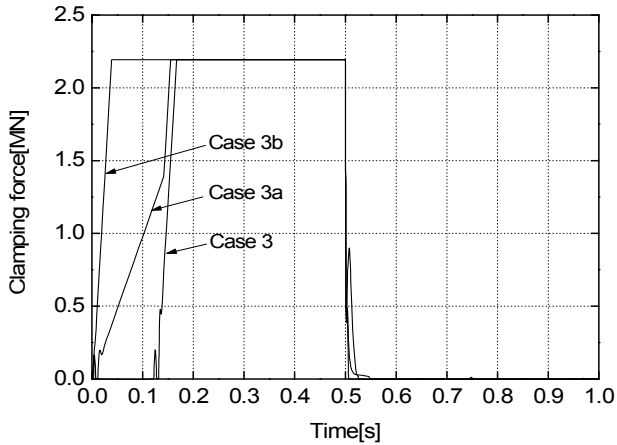


(a) Clamping force

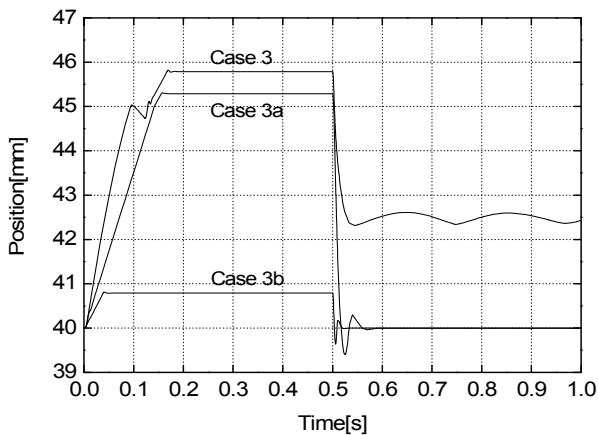


(b) Cylinder position

Fig. 16 Effects due to interval of backlash



(a) Clamping force



(b) Cylinder position

Fig. 17 Effects due to stiffness of backlash

6. 결론

본 연구에서는 직압식 사출성형기의 형체력을 제어하기 위하여, MBS 기반 형체장치 모델과 2-방향 카트리지 밸브 기반 로직회로를 결합한 후, 멀티 도메인 시뮬레이션을 통하여 성능을 고찰하였다.

전체 유압회로를 6개의 모듈로 나누고, 각각의 모듈에서 파일럿 밸브와 카트리지 밸브의 온-오프 특성과 압력 릴리프 밸브의 유량-압력 제어특성을 고찰하였다. 클램핑 공정에서는 타이바의 인장을 통하여 형체력이 형성되므로, 타이바의 강성을 실린더의 지배

적인 부하로 설정하였다. 그리고 형체력 형성, 해제, 아울러 관계된 카트리지 밸브들의 유량제어 특성을 시뮬레이션으로 고찰하였다. 또한 사출제품의 성능 저하를 유발하는 요인으로서, 형체력 지연을 규명하기 위하여 메카니즘에 내재된 백래시의 영향을 시뮬레이션으로 고찰하였다.

후 기

이 논문은 2016학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

- 1) H. Murrenhoff, Grundlagen der Fluidtechnik, Teil 1, Shaker Verlag Aachen, pp. 262-266, 2006.
- 2) A. Esposito, Fluid Power with Applications, 7th Edition, Pearson Prentice Hall, pp. 295-300, 2009.
- 3) F. Johannaber, Injection Molding Machines, 4th Edition, Hanser, pp. 131-139, 2008.
- 4) J. S. Jang, "Development of Analysis Model for Characteristics Study of Fluid Power Systems in Injection Molding Machine," Journal of Drive and Control, Vol. 8, No. 4, pp. 1-8, 2011.
- 5) <https://www.iti.de>.

부 록

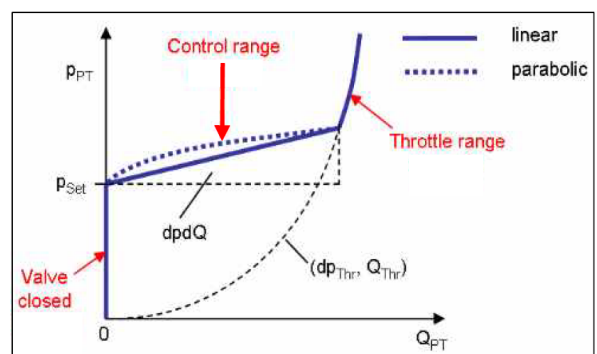


Fig. A1 Specification for input parameters