

<論 文>

유압 위치제어 시스템의 단속적 제어방법에 관한 연구(Ⅱ)

장 효 환* · 안 병 흥**

(1988년 7월 28일 접수)

A Study on Discontinuous Control Methods for a Hydraulic Position-Control System (Ⅱ)

H.W. Chang and B.H. Ahn

Key Words : Simple On-Off Control(단순 온-오프 제어), Pulsating On-Off Control(맥동형 온-오프 제어), Closed-Center Type(클로즈드 센터형), Tandem-Center Type(탠덤 센터형), Pressure Surge(압력 서지)

Abstract

It has recently shown that a solenoid valve can be utilized in a hydraulic position-control system by discontinuous control methods. The objective of this study is to investigate the effects of solenoid valves on the response characteristics of a hydraulic position-control system by applying two kinds of discontinuous control methods i.e., Simple On-Off(SOF) and Pulsating On-Off(POF) controls. Three types of solenoid valves i.e., low-frequency, closed-center type(LF/C), high-frequency, closed-center type(HF/C), low-frequency, tandem-center type(LF/T) were used in this study. Effects of loading conditions and control parameters on the response characteristics were experimentally examined and compared each other. Pressure transients within the actuator were also studied.

기 호 설 명

\bar{a} : 펄스 변조 값(= T_w/T_p)
 B : 점성 부하
 d : 데드 밴드
 d_{min} : 최소 안정 데드 밴드
 e_{ss} : 정상 상태 오차
 f_p : 펄스 주파수
 M : 관성 부하
 M_p : 최대 오버 슈트
 P_1 : 실린더 유입구측 압력
 P_s : 공급 압력

p : 펄스 밴드
 \bar{p} : 무차원화된 펄스 밴드(= p/r)
 Q_s : 공급 유량
 r : 기준 입력
 T_p : 펄스 주기
 T_w : "ON" 상태의 펄스 폭(= a/f_p)
 t_r : 상승 시간
 t_s : 정착 시간

1. 서 론

유압 위치제어 시스템에 전통적으로 사용되어 오던 서보 밸브대신, 가격이 저렴하고 작동유의 오염에도 민감하지 않은 솔레노이드 밸브를 사용하여

* 정회원, 고려대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 대전기계창

단속적 제어(on-off control)를 적용하는 방법이 제안된⁽¹⁾ 이래 최근, Eun 등^(2,3)이 공기압을 사용한 위치제어 시스템에서 맥동형(pulsating) 단속적 제어를 적용하여, 재래식 단속적 제어에 비해 시스템의 정확도와 과도응답성능을 크게 개선시킬 수 있음을 보여주어 이의 활용가능성이 높아졌다.

솔레노이드 밸브는 원래 전기적 제어량에 비례하여 유량을 조정하는 기능을 가진 것이 아니라 전기적 신호에 따라 "ON" 또는 "OFF" 되어 한쪽 또는 다른쪽 방향으로 전유량을 보내어 방향전환을 시키는 기능을 가지고 있으며, 이러한 밸브 원래의 특성상 정교함이 요구되지 않기 때문에 값이 싸고 작동유의 오염에도 거의 영향을 받지않는 장점이 있다.

제1보⁽⁴⁾에서는 이와같은 솔레노이드 밸브를 사용한 유압 위치제어 시스템에 단순 및 맥동형의 두가지 단속적 제어방법을 적용하여 시스템의 응답특성을 비교하였고, 특히 맥동형 온-오프 제어방법을 적용한 경우 이 방법의 제어변수들과 부하조건이 시스템의 과도응답특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

한편 솔레노이드 밸브는 스톱의 중립위치의 형태에 따라 클로즈드 센터(closed-center)형과 탠덤 센터(tandem-center)형의 두가지가 있다. 통상 전자를 많이 사용하지만 압력 보상형 유압펌프와 어큐뮬레이터(accumulator)로 구성된 유압동력원을 필요로해 시스템 구성비가 비싸지게 된다. 후자는 저렴한 일정용량형(fixed displacement)펌프를 유압공급원으로 할 경우 작동유의 온도상승을 막기위해 사용된다.

본 연구의 주 목적이 저렴하면서도 어느 정도의 정확도를 유지하는 유압 위치제어 시스템을 개발하는데 있으므로 이들 두 종류의 밸브를 사용하여 솔레노이드 밸브의 형태가 시스템 성능에 미치는 영향을 비교 연구할 필요가 대두되었다.

또한 솔레노이드 밸브에 사용되는 전자석(solenoid)은 제작처와 밸브의 크기에 따라 특성이 달라 밸브의 전환 시간(switching time)이 달라지게 된다. 이 전환 시간의 크기가 맥동형 온-오프 제어에서 주요변수의 하나인 펄스 주파수의 사용범위를 제한할 것으로 예측되어 이의 영향에 관한 연구도 필요하다 하겠다.

또한 유압을 사용한 위치제어 시스템은 작동유가 비압축성이라 공기압에 비해 상승시간이 아주 짧고

밸브가 급격히 열리고 닫힐때 압력 서지(surge) 및 공동 현상(cavitation)이 발생할 가능성이 높아⁽⁵⁻⁷⁾ 이에 대한 조사가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 이와같이 형태와 특성이 다른 솔레노이드 밸브를 사용한 위치제어 시스템에 위에서 언급한 두가지 단속적 제어 방법을 적용하여 이들 밸브의 형태와 특성이 시스템의 응답특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고 실린더 내의 압력 변화에 미치는 영향도 조사하였다.

2. 단속적 위치 제어 시스템

본 연구에서 사용한 유압 위치제어 시스템은 Fig. 1의 블록선도에서 볼 수 있는 것처럼 기본적으로 솔레노이드 밸브, 유압 실린더의 부하, 부하의 위치를 검출하는 전위차계(potentiometer), 솔레노이드에 단속적 제어신호를 보내는 제어기(controller)로 구성되어 있다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 두 종류의 단속적 제어 방법을 구분하기 위하여 Baeck⁽¹⁾의 방법을 단순 온-오프(Simple On-Off) 제어, Eun 등^(2,3)의 방법을 맥동형 온-오프(Pulsating On-off) 제어라 칭하였고 각각 SOF와 POF제어로 줄여 표기하였으며, POF 제어의 주요 변수는 펄스 변조값(pulse-modulated value) $\bar{a}(=T_w/T_p)$, 무차원화된 펄스 밴드(pulse band) $\bar{b}(=b/r)$ 그리고 펄스 주파수 f_p 이다. 제어기의 구성과 각 제어 모드에 따른 시스템의 작동 및 제어원리에 관한 세부내용은 제1보⁽⁴⁾에 설명되어 있다.

3. 실험 장치 및 방법

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도가 Fig.2에 나타나 있다. 공급압력 P_s 는 70kgf/cm²(6.865 MPa), 공급유량 Q_s 는 22.3l/min, 실린더 입출구

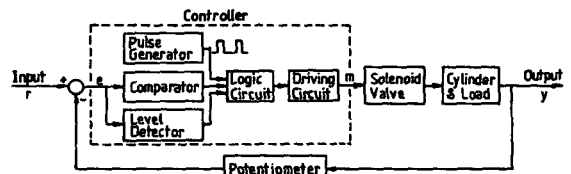


Fig. 1 Block diagram of the hydraulic position-control system

포트 사이에 설치한 릴리프 밸브(crossport relief valve)는 80kgf/cm^2 (7.845MPa)으로 설정하였고, 바이패스 오리피스(by-pass orifice)는 완전잠김 상태로 고정하였다.

솔레노이드 밸브로는 전환 빈도가 낮고 클로즈드 센터형(low-frequency, closed-center type)인 것과

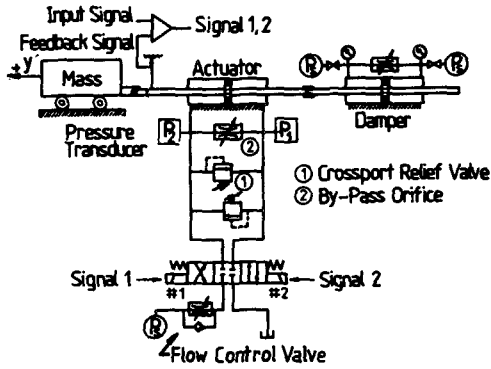


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

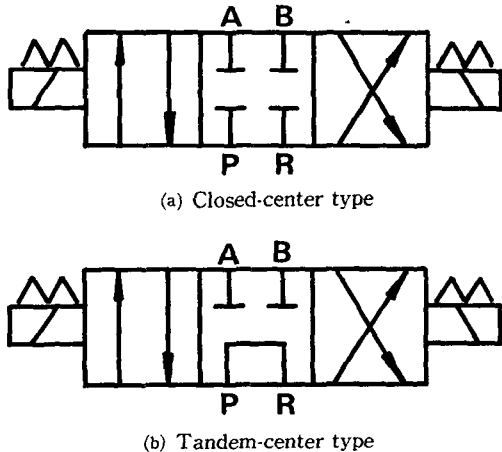


Fig. 3 Graphical symbols of the solenoid valves

전환 빈도가 높고 클로즈드 센터형(high-frequency, closed-center type)인 것, 그리고 전환 빈도가 낮고 탠덤 센터형(low-frequency, tandem-center type)인 밸브가 사용되었으며 편의상 각각 LF/C, HF/C, LF/T로 표시하였다. 클로즈드 센터형과 탠덤 센터형 밸브에서의 유체의 흐름방향은 Fig. 3에 기호로 표시되어 있다. 이 밸브들은 산업용으로 HF/C의 경우 그 전환 빈도가 다른 두 밸브보다 2배 이상 큰 것을 선정하였고, 모두가 DC 24 V 구동의 솔레노이드로서 Table 1에 제작사 사양이 나타나 있다.

본 실험에서 사용한 부하 조건은 세가지이다. 즉, (1)무부하 ($M=0, B=0$), (2)관성부하 ($M=200\text{kg}, B=0$), (3)점성부하 ($M=0, B=218.54\text{ N}\cdot\text{sec/cm}$)인 세가지이며 본 논문에서는 이를 편의상 각각 $M0B0, M2B0, M0B2$ 로 표기하였고 여기서 $M0, B0$ 는 각각 외부 질량과 댐퍼가 없는 상태를 의미한다.

SOF를 적용한 실험에서는 세가지 부하 조건에서 각각의 밸브에 대해 최소 안정 데드 밴드 d_{min} 값을 측정하고 후 시스템의 과도응답 특성을 측정하였고, POF를 적용한 실험에서는 역시 세가지 부하조건에 $d=3.94\text{mV}$ 로 고정하고(4) 제어 변수들을 변화시켜가면서 각 밸브의 응답특성을 측정하였다. 또한 유압 실린더의 유압구측 압력 P_1 을 측정하여 압력 서지와 공동현상의 발생여부도 관측하였다.

본 실험에서 기준입력으로는 $r=2.0\text{V}$ (38.78 mm)인 계단입력(step input)을 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 단순 온-오프 제어(SOF)의 응답 특성

Fig.4는 SOF 제어를 한 경우 각 부하 조건에서

Table 1 Manufacturers' specifications of the solenoid valves

Notation	Type	Switching time(cycle/sec)	Max. flow rate* (l/min)	Model
LF/C	Closed center	4	40	Lotte Daikin JSO-GO2-2C
HF/C	Closed center	8.33	20	Sperry Vickers DG-4M4-32C
LF/T	Tandem center	4	20	Lotte Daikin JSO-GO2-66C

* Max. flow rate at $P_s=70\text{kg/cm}^2$

의 과도 응답을 밸브별로 비교 도시한 것이다. 이 그림을 살펴보면 클로즈드 센터형 밸브의 과도 응답이 탠덤 센터형 밸브에 비해 부하의 영향을 많이 받은 것을 알 수 있다. 특히, HF/C밸브를 사용한 경우, 무부하 조건에서 격렬한 요동의 응답을 얻었고 부하가 있는 상태에서만 비교적 안정된 응답을 얻을 수 있었으며 또한 관성 부하보다는 점성 부하가 있을 때 최대 오버 슈트가 작고 시스템도 안정하였다. 반면, LF/T밸브를 사용한 경우 부하 조건에 관계없이 최대 오버 슈트도 작고 매우 안정된 응답을 얻었다. Table 2는 위의 각 경우에서의 d_{min} 값과 정상상태 오차를 10번씩 측정하여 그 평균치와 편차를 수치로 나타낸 것이다. 여기서 정상상태 오차는 제 1보⁽⁴⁾에서와 같이 데드 밴드 d 값을 d_{min} 의 평균치보다 25% 상향 설정한 상태에서 측정된 값이다. 정상 상태 오차는 HF/C밸브를 사용한 경우에 상당히 컸고, LF/C와 LF/T를 사용한

경우 거의 같아 약 5% 이내에 머물렀다.

4.2 맥동형 온-오프 제어(POF)의 응답 특성

POF 제어에서는 주요 변수인 \bar{a} , f_p , \bar{p} 의 조합에 의해 시스템의 안정성과 정확도가 크게 좌우된다⁽⁴⁾. 따라서 이들 제어 변수가 솔레노이드 밸브의 형태와 특성에 따라 시스템의 응답에 미치는 영향을 알아 보기 위하여, 예비 실험을 통하여 각 밸브를 사용하였을 때 응답 특성이 좋게 되는 특정한 제어 변수 조합을 '기준 조건'으로 설정한 후, 다른 제어 변수는 고정하고 하나의 제어 변수만 각각 변화시키면서 응답특성을 밸브별로 측정하였다. 설정된 기준 조건은 LF/C의 경우 $\bar{a}=0.3$, $f_p=20\text{Hz}$, $\bar{p}=0.1$ 이며, HF/C의 경우 $\bar{a}=0.5$, $f_p=35\text{Hz}$, \bar{p} 는 0.4이고 LF/T의 경우에는 $\bar{a}=0.3$, $f_p=15\text{Hz}$, $\bar{p}=0.1$ 이다. 여기서 HF/C의 펄스 밴드가 기준 입력의 40%($\bar{p}=0.4$)로서 다른 밸브에 비해 상당히 큰 것에 주목할만 하며, 또한 점성 부하가 있으면 이 펄스 밴드는 20%($\bar{p}=0.2$)로 줄어 든다는 것이 예비 실험을 통하여 밝혀졌다.

Fig. 5는 M0B0에서 f_p 를 기준조건으로 고정하였을 때 펄스 변조값 \bar{a} 의 변화가 각 밸브의 응답 특성에 미치는 영향을 나타내고 있다. 전환 빈도가 크면 \bar{a} 의 변화에 따른 정상 상태 오차 e_{ss} 의 변화 폭이 크고 즉, 정상 상태 오차가 적은 응답을 얻을 수 있는 \bar{a} 의 선택 범위가 극히 제한되어 있으며, 전환 빈도가 작은 밸브는 리미트 사이클이 발생하지 않는 \bar{a} 의 범위에서 밸브 형태에 관계없이 e_{ss} 가

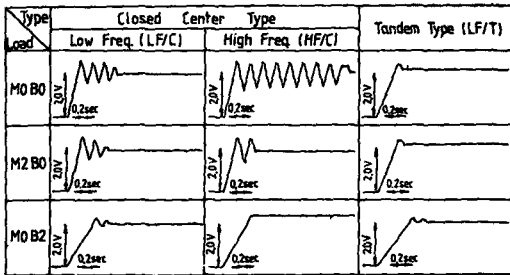


Fig. 4 Typical transient responses of the systems with SOF controller for a step input($r=2.0\text{V}$)

Table 2 Minimum stable deadbands and steady-state errors of the systems with SOF controller

Type	Load	Closed center type		Tandem type(LF/T)
		Low freq.(LF/C)	High freq.(HF/C)	
$d_{min}(\text{mV})$	M0B0	55.44 +3.03 -3.90	204.68 +19.50 -8.47	58.75 +2.20 -3.55
	M2B0	46.75 +3.25 -1.99	248.38 +8.12 -12.77	71.20 +9.18 -5.83
	M0B2	34.56 +3.03 -1.47	141.68 +13.55 -20.33	36.29 +8.39 -11.58
$e_{ss}(\%)$	M0B0	2.33 +3.05 -2.21	8.57 +3.24 -6.68	2.27 +3.45 -1.49
	M2B0	1.67 +0.86 -1.36	11.75 +2.25 -2.38	1.30 +1.30 -0.89
	M0B2	2.18 +1.17 -2.09	3.61 +0.59 -0.61	3.08 +1.22 -2.38

비교적 적은 것을 알 수 있다. 랜덤 센터형의 경우 정착 시간 t_s 와 상승 시간 t_r 이 클로즈드 센터형에 비해 약 1.5배 정도 긴 반면 최대 오버슈트 M_p 가 작은 것을 알 수 있다. 이는 밸브의 특성상 급격한

압력이 형성되지 못하여 다른 밸브에 비해 부하가 상대적으로 천천히 움직인 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 MOB0에서 펄스 주파수 f_p 를 변화시키면서 각 밸브의 응답 특성을 측정한 것이다. 각 밸브의 정상 상태 오차 e_{ss} 를 살펴보면 전환 빈도가 큰 밸브는 펄스 주파수의 변화에 따른 정상 상태 오차 폭이 역시 크며 또한 바람직한 응답 특성을 얻을 수 있는 f_p 의 범위가 극히 좁은 반면, 랜덤 센터형 밸브의 경우 선택 가능한 f_p 의 범위가 클로즈드 센터형에 비해 넓은 것을 알 수 있다. f_p 가 작으면 리밋 사이클이 발생하는데 이는 오차가 펄스 밴드내에 있더라도 펄스폭 T_w 가 너무 커서 부하가 감속되지 못하고 계속 요동하기 때문이다. 이러한 리밋 사이클이 발생하는 주파수는 HF/C가 다른 밸브에 비해 큰 것으로 나타났다. 또한 f_p 가 작아짐에 따라 정착 시간이 길어지고 시스템이 불안정하여지는데 이러한 경향 역시 HF/C를 사용한 경우에서 가장 먼저 나타 났다. 한편 f_p 의 변화는 M_p 와 t_r 에 별다른 영향을 주지 않았다.

Fig. 7은 \bar{a} 와 f_p 를 고정하고 MOB0에서 펄스 밴드의 크기를 기준 입력의 5% ($\bar{p}=0.05$)에서 50% ($\bar{p}=0.5$)까지 변화시켰을때 시스템의 응답 특성을 나타내고 있다. 정상 상태 오차는 \bar{p} 의 영향을 거의 받지 않았으나 HF/C의 경우 $\bar{p} \leq 0.01$ 에서 리밋 사이클이 발생하였다. 부하가 펄스 밴드를 지나며 감속되기 때문에 M_p 는 \bar{p} 가 커짐에 따라 거의 비례적으로 줄어들고 있으며 그 줄어드는 정도는 전환 빈도가 낮은 밸브에서 더 컸다.

이상의 관찰을 종합하여 보면 전반적으로 HF/C는 다른 밸브에 비해 최대 오버 슈트 M_p 가 크고 리밋 사이클이 발생하기 쉬우며 선택가능한 제어 변수의 범위가 좁고, LF/T는 최대 오버 슈트 M_p 가 작고 제어 변수의 선택 범위가 비교적 넓은 반면 상승 시간 t_r 이 긴 것으로 나타나 있다. 본 논문에는 나타내지 않았으나 관성 부하와 점성 부하가 있는 경우에도 위와 유사한 결과를 얻었다.

지금까지의 결과로써, 각 밸브의 형태와 특성에 따라 제어 변수의 '적정 조합'이 각각 존재하며 HF/C의 경우 LF/C와 LF/T에 비해 사용 가능한 '적정 조합'의 범위가 극히 좁아서 대단히 '예민한 반응'을 보이고 있음을 알 수 있었다. 여기서 '예민한 반응'이란 선정된 제어 변수의 값이 '적정 조합'의 범위에서 조금만 벗어나도 시스템이 몹시 불안정하거나 정상 상태 오차가 큰 것을 의미하며, 이

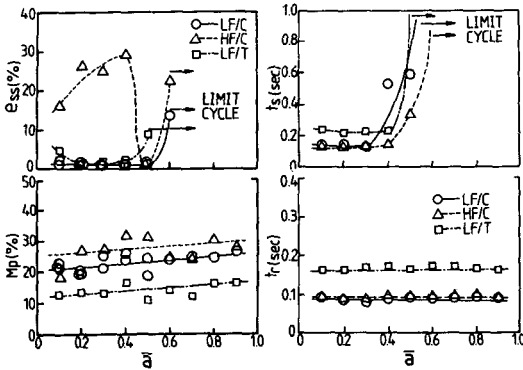


Fig. 5 Effects of pulse modulated value on response characteristics of the system with POF controller(MOB0)

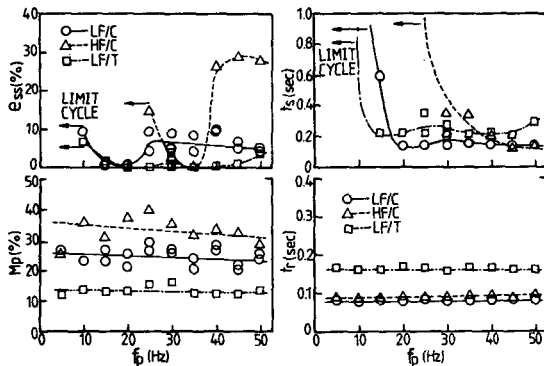


Fig. 6 Effects of pules frequency on response characteristics of the system with POF controller(MOB0)

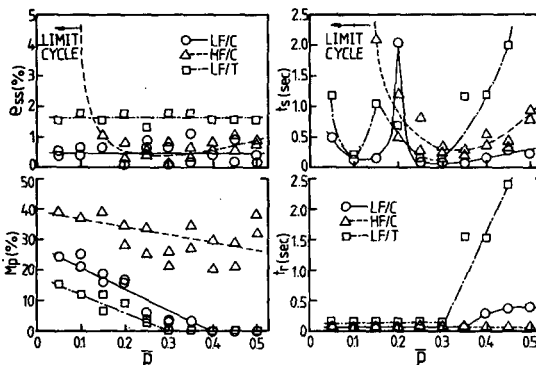


Fig. 7 Effects of pulse band on response characteristics of the system with POF controller(MOB0)

와같은 특정한 제어 변수 조합의 존재와 '에민한 반응'의 정도를 가시화하고, '적정 조합'에서의 펄스 폭 T_w 의 크기를 알아보기 위하여, 무부하 조건에서 HF/C를 사용한 경우에는 $\beta=0.4$, LF/C와 LF/T를 사용한 경우에는 $\beta=0.1$ 로 고정된 채 \bar{a} 와 f_p 의 여러가지 조합에서 계단 입력에 대한 과도 응답을 종합적으로 측정하였고, 그 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다.

HF/C밸브를 사용한 경우(Fig. 8), 대각선 방향의 굵은선 네모 표시는 시스템의 가장 바람직한 응답(정상 상태 오차가 적고 정착 시간이 짧은 응답)을 얻을 수 있는 \bar{a} 와 f_p 의 '적정 조합'을 나타낸 것인데 이들을 연결한 선이 거의 직선을 이루고 있고 이 선을 경계로 하여 상단에서는 시스템은 안정하나 정상 상태 오차가 크게 되고, 하단에서는 시스템이 극히 불안정하여졌다. LF/T밸브를 사용한 경우(Fig. 9), 위와 유사한 경향을 나타냈으나 '적정 조합'을 이루는 선 부근에서의 응답 특성의 변화가 HF/C를 사용한 경우에 비해 매우 적은 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 이들 '적정 조합'을 이루는 선을 세 가지 밸브별로 모두 비교 도시한 것으로서 '적정 조합'들에 해당하는 펄스 폭 $T_w(=\bar{a}/f_p)$ 는 펄스 주파수가 아주 낮거나 높은 조합을 제외하면 LF/C와 HF/C밸브를 사용한 경우 $15 \pm 1.7\text{ms}$ 로 슬레노

이드의 전환 빈도에 무관하게 거의 일정하고, LF/T밸브를 사용한 경우에는 20ms로 T_w 값은 밸브 형태의 영향을 많이 받을 수 있었다.

4.3 SOF와 POF의 비교 및 압력 서지

Fig. 11은 POF 제어를 적용하였을때(제어 변수는 '기준조건'으로 설정) 각 부하 조건에서의 계단 입력에 대한 과도 응답을 밸브별로 도시한 것이다. 이 그림을 SOF제어의 경우(Fig. 4)와 비교하여 보면 POF제어를 적용하므로써 클로드 센터형 밸브의 경우에는 시스템의 과도 응답 특성과 정확

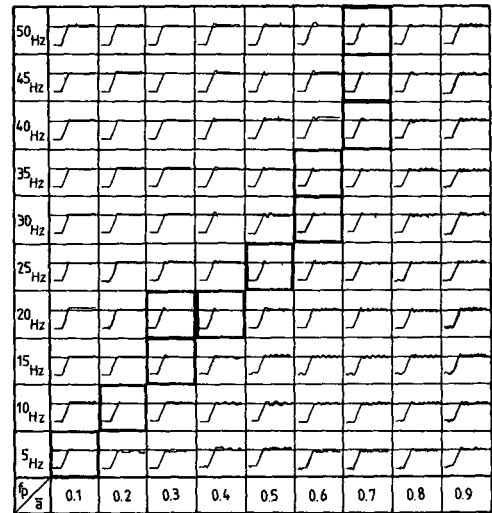


Fig. 9 Step responses of the system with POF controller for various pulse-modulated values and pulse frequencies(LF/T : $r=2.0\text{V}$, $\beta=0.1$, $M0B0$)

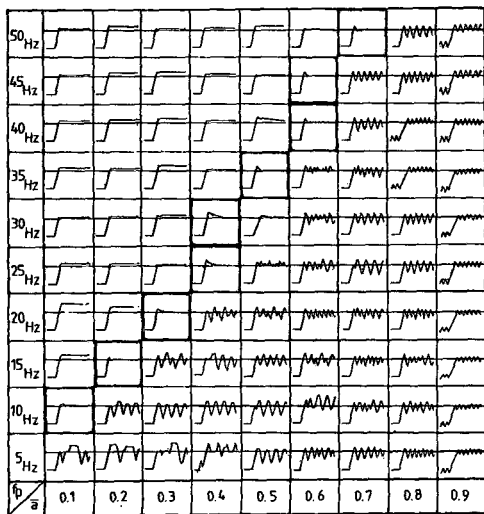


Fig. 8 Step responses of the system with POF controller for various pulse-modulated values and pulse frequencies(HF/C : $r=2.0\text{V}$, $\beta=0.4$, $M0B0$)

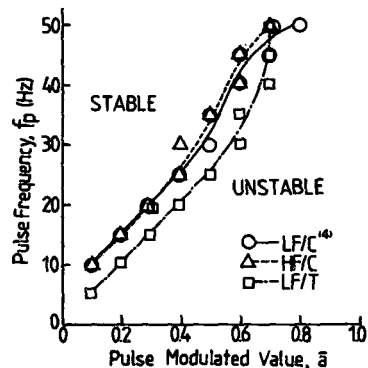


Fig. 10 Appropriate combinations of control parameters for near best response of the system with POF controller($M0B0$)

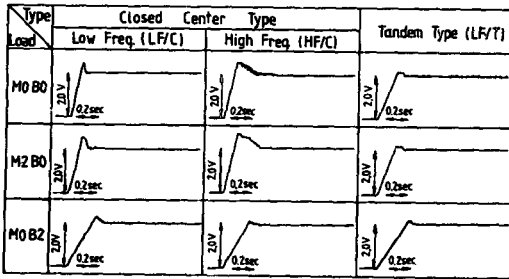


Fig. 11 Typical transient responses of the system with POF controller for a step input($r=2.0V$)

도가 크게 개선된 것을 알 수 있었으며, 탠덤 센터형 밸브의 경우에는 과도 응답 특성은 큰 변화를 보이지 않았으나 정확도는 역시 크게 개선되었음을 알 수 있었다.

Fig.12는 위의 각 경우에서의 실린더내 부하 압력 P_1 을 나타내고 있다. LF/C밸브를 사용한 경우보다 HF/C밸브를 사용하였을때 압력 서지가 감소되었는데 이는 전환빈도가 큰 밸브(HF/C)의 자화 시간이 짧고 또 '기준 조건'으로 사용된 HF/C의 펄스 밴드 f 가 LF/C보다 크기 때문에 부하가 목표 위치에 도달하기 전에 펄스 밴드 내에서 효과적으로 감속되었기 때문인 것으로 사료된다. LF/T 밸브를 사용한 경우 압력 서지가 거의 발생하지 않았는데 이는 탠덤 센터형 밸브의 중립 위치에서의 유량이 대부분 배출구로 귀환되어 압력이 형성되지 않기 때문이다. 한편, 공동 현상은 어느 경우에서도 발생하지 않았다.

5. 결 론

특성과 형태가 다른 솔레노이드 밸브를 사용한 유압 위치제어 시스템에 단속적 제어 방법을 적용하여 부하조건에 따른 응답 특성을 실험적으로 연구하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 탠덤 센터형 밸브(LF/T)를 사용하면 제어 방법에 관계없이 최대 오버슈트 값이 줄어들고 전반적으로 안정된 응답을 얻을 수 있었으나, 상승 시간과 정상 상태 오차는 증가하였다.
- (2) 전환 빈도가 큰 밸브(HF/C)를 사용하면 단순 온오프(SOF)제어에서는 시스템의 안정성과 정확도가 크게 떨어지고, 맥동형 온오프(POF)제어에서는 시스템의 응답 특성이 제어 변수의 선정에 따라 매우 민감하게 변하였으며 전반적으로 전환 빈도가 작은 밸브(LF/C)를 사용했을 때보다 응답 특성이 좋지 않았다.
- (3) POF 제어에서는 바람직한 응답을 얻을 수 있는 펄스 폭 T_w 값이 존재하였고 이 T_w 값은 밸브의 솔레노이드 특성보다 밸브의 중립 위치 형태의 영향을 받았다.
- (4) 공동 현상은 발생하지 않았으며 실린더내 압력 서지는 LF/C, HF/C, LF/T 밸브를 사용한 순으로 감소하였으며 특히 LF/T 밸브를 사용하면 압력 서지가 거의 발생하지 않았다.

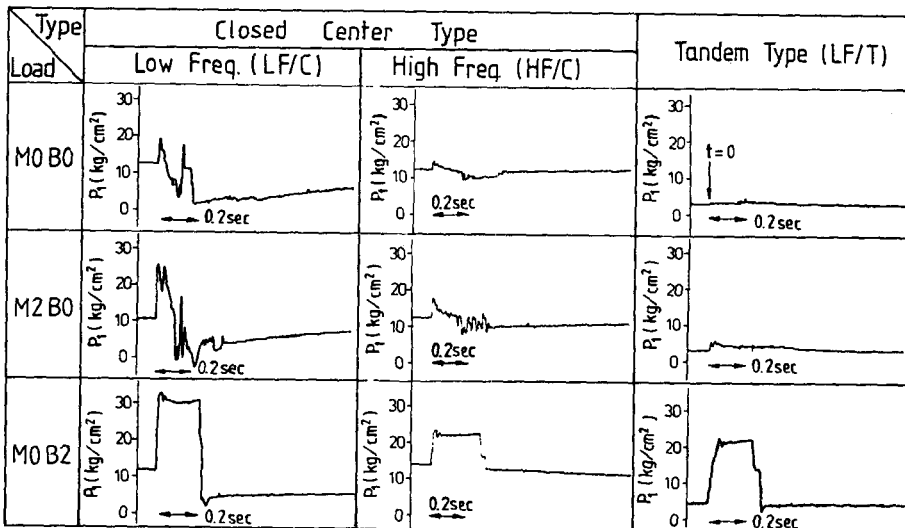


Fig. 12 Inlet pressure transients in the actuator with POF controller for a step input($r=2.0V$)

참 고 문 헌

- (1) Baeck, H.S., 1967, "Hydraulic On-Off Servo : Simple, Rugged Positioner", *Control Engineering*, Dec. pp. 79~82.
- (2) Eun, T., Cho, H.S. and Lee, C.W., 1984, "On the Development of a Modified On-Off Controller for Pneumatic Servo Mechanism", *Proc. 1984 A.C.C.*, San Diego Cal., USA, pp. 468~473.
- (3) Eun, T., Cho, Y.J. and Cho, H. S., 1982. "Stability and Position Accuracy of a Pneumatic On-Off Servomechanism", *Proc. 1982 A.C.C.* Arlington, Virginia, USA, pp. 1189~1194.
- (4) 장효환, 안병홍, 이춘호, 1987, "유압 위치제어 시스템의 단속적 제어 방법에 관한 연구(Ⅰ)", *대한기계학회논문집*, 제11권, 제3호, pp. 465~472.
- (5) McCloy, D., 1969, "Cavitation Effects in On-Off Controlled Hydraulic Servos", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Mar. pp. 50~56.
- (6) Martin, H.A. and McCloy, D., 1971, "Some Aspects of the Response of Bistable Hydraulic Servo", *2nd Fluid Power Symposium*, B.H.T.A., Cranfield, Bedford, England, pp. B3. 49~66.
- (7) McCloy, D., 1969, "Cavity Formation in Valve Controlled Hydraulic Cylinders", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, London, Vol. 189, Part 1.