

솔레노이드 밸브가 유압위치제어 시스템의 응답 특성에 미치는 영향

장 호 환 *
*고려대학교 기계공학과

오 안 병 홍 **
** 대전기계창

Effect of Solenoid Valves on the Response Characteristics
of a Hydraulic Position-Control System

Hyo Whan Chang and Byeong Hong Ahn
Dept. of Mechanical Engr. Daejeon Machine Depot
Korea University

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.

1. 서 론

유압위치제어 시스템에 전통적으로 사용되어 오던 서어보밸브 대신 가격이 저렴하고 작동유의 오염에 민감하지 않은 솔레노이드밸브를 사용하고 단속적 제어 (on-off control)을 적용한 방법이 제안된(1) 이래 최근, Eun등(2,3)과 장 등(4)이 각각 공기압과 유압을 사용한 위치제어시스템에서 맥동형(pulsating) 단속적제어를 적용하여 재래식 단속적제어에 비해 시스템의 정확도와 과도응답능을 크게 개선시킬 수 있음을 보여 주어 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 중립위치의 형태에 따라 클로즈드센터(closed-center)형과 탠덤센터(tandem center)형의 두가지가 있다. 통상 전자를 많이 사용하지만 압력 보상형 유압펌프와 어큐뮬레이터(accumulator)로 구성된 유압공급원을 필요로 해 시스템구성비가 비싸지게 된다. 후자는 저렴한 정용적(fixed displacement) 펌프를 유압공급원으로 할 경우 작동유의 온도상승을 막기 위해 사용된다.

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

한편 솔레노이드 밸브에 사용되는 전자식(solenoid)은 제작처와 밸브의 크기에 따라 특성이 달라 밸브의 전환시간(switching time)이 달라지게 된다. 이 전환시간의 크기가 맥동형 온-오프 제어에서 주요변수의 하나인 펄스 주파수의 사용범위를 제한할 것으로 예측되어 이의 영향에 연구가 필요하다 하겠다.

또한 유압을 사용한 단속적 위치제어 시스템은 작동유가 비압축성이라 공기압에 비해 상승시간이 아주 짧고 밸브가 급격히 열리고 닫힐때 압력 서어지 (surge) 현상 및 공동현상(cavitation)이 발생할 가능성이 높아(5) 이에 대한 조사가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 형태와 특성이 다른 솔레노이드 밸브를 사용한 위치제어 시스템에 있어서 언급한 두가지 단속적 제어방법을 적용하여 이들 밸브의 형태와 특성이 시스템의 응답특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고 실린더내의 압력 변화에 미치는 영향도 조사하였다.

2. 단속적 위치제어 시스템의 개요

본 연구에서 사용한 유압위치제어 시스템은 Fig.1의 블록선도에서 볼 수 있는 것처럼 기본적으로 솔레노이드 밸브, 유압 실린더와 부하, 부하의 위치를 검출하는 전위차계(potentiometer), 솔레노이드에 단속적 제어신호를 보내는 제어기(controller)로 구성되어 있고 제어기는 다음과 같이 5개의 기능을 갖는 회로로 이루어져 있다. 즉, 오차신호 e 의 크기를 각각 데드밴드(deadband) d 와 펄스밴드(pulse band) p 의 크기와 대비하는 비교기(comparator), 오차 신호의 부호검출기(level detector), 주기 T_p 와 폭 T_w 를 갖는 펄스 열(pulse train)을 생성하는 펄스발생기, 오차신호의 크기와 부호에 따라 Fig.2와 같은 제어신호 m 을 형성하는 논리회로와 제어신호에 따라 솔레노이드를 작동시키기 위한 구동회로이다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 두 종류의 단속적 제어방법을 구분하기 위하여 Baek⁽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 POF 제어로 줄여 표기하였다. 제어기의 입력인 오차 신호 $e(t)$ 와 출력인 제어신호 $m(t)$ 사이의 관계는 SOF 제어 모드(mode)와 POF 제어모드에 따라 각각 Fig.2(a)와 2(b)에 도시된 바와 같다. 본 연구에 사용한 POF 제어의 주요변수는 무차원화된 펄스변조값(pulse-modulated value) $\bar{a}(=T_w/T_p)$, 펄스밴드 $\bar{p}(=p/r)$, 펄스주파수 f_p 이다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도가 Fig.3에 나타나 있다. 공급압력 P_s 는 70kgf/cm^2 (6.865 MPa) 이고 공급유량 Q_s 는 22.3 l/min 으로 고정하였다.

본 실험에 사용된 솔레노이드 밸브는 전환빈도가 낮은 클로즈드 센터형(low-frequency, closed-center type)과 전환빈도가 높은 클로즈드 센터형(high-frequency, closed-center type) 그리고 전환빈도가 낮은 랜덤센터형(low-frequency, tandem-center type)의 밸브를 선정하였으며 편의상 각각 LF/C, HF/C, LF/T 로 표시하였다. 이 밸브들은 산업용으로 HF/C의 경우 그 전환빈도가 다른 밸브보다 2배 이상 큰 것을 선정하였고, 모두가 DC24V 구동의 솔레노이드로서 Table 1에 그 제작사 사양이 나타나 있다.

유압 실린더는 양쪽로드형이고 전행정(full stroke) 150mm, 내경 40mm, 로드직경 25mm 이다. 전위차계는 정밀형(MOOG)으로서 전행정이 508mm, 이득(gain)은 51.57 mv/mm 로 고정하였다.

제어기는 d 와 p 를 각각 독립적으로 조정할 수 있으며 오차신호의 부호에 따라 정확히 좌우 대칭이 되도록 설계하여 연산증폭기(Op-Amp), TTL(transistor-transistor logic), 스위칭트랜지스터 등을 사용하여 제작하였다.

관성부하로는 200kg의 질량을 가이드 레일에 따라 수평으로 이송시키도록 하고 쿨롬(Coulomb)마찰을 최소화하기 위하여 보울베어링을 사용하였으며, 점성부하로는 댐퍼(damper)를 제작하여 사용하였는데(Fig.3 참조) 측정된 점성계수는 $B=218.54\text{ N}\cdot\text{sec/cm}$ 이다. 본 실험에서 사용한 부하조건은 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 MOBO, M2BO, MOB2 로 표기하였고 여기서 MO, BO 는 각각 외부 질량과 댐퍼를 탈착시킨 상태를 의미한다.

SOF를 적용한 실험에서는 세가지 부하조건에서 각각의 밸브에 대해 최소안정 데드밴드 d_{min} 값을 측정후 시스템의 과도응답 특성을 측정하였고, POF를 적용한 실험에서는 역시 세가지 부하조건에 $d=3.94\text{mV}$ 로 고정하고 (6) 제어변수들을 변화시켜가면서 각 밸브의 응답특성을 측정하였다. 본 실험에서 기존 입력으로는 $r=2\text{V}$ (38.78mm)인 계단신호(step signal)을 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 단순 온-오프 제어 (SOF)의 응답 특성

Fig.4는 세가지 밸브를 사용하여 SOF제어를 한 경우 각 부하조건에서의 과도응답을 비교 도시한 것이다. HF/C밸브를 사용한 경우 무부하조건에서 격렬한 오동의 응답을 얻었고 부하가 있는 상태에서만 비교적 안정된 응답을 얻을 수 있었다. 반면, LF/T 밸브를 사용한 경우 부하조건에 관계없이 최대오버슈트도 작고 매우 안정된 응답을 얻었다. Table 2는 세가지 밸브를 사용한 경우 각 부하조건에서의 d_{min} 값과 정상상태 오차를 10번씩 측정하여 그 평균치와 편차를 나타낸 것이다. 여기서, 정상상태 오차는 데드밴드 d 값을 d_{min} 의 평균치보다 25% 상향 설정한 상태에서 측정된 값이다(6). 정상상태 오차는 HF/C 밸브를 사용한 경우 가장 컸고, LF/C와 LF/T 밸브를 사용한 경우는 거의 같아 약 5% 이내에 머물렀다.

4.2 맥동형 온-오프 제어 (POF)의 응답 특성

예비실험을 통하여 얻은 각 밸브의 특정한 하나의 최적 제어 변수 조합을 기준조건으로 설정한 후 다른 두 제어변수는 고정하고 하나의 제어변수만 각각 변화시키면서 응답특성을 측정하였다. 설정된 기준조건은 LF/C의 경우 $\bar{a}=0.3$, $f_p=20\text{Hz}$, $\bar{p}=0.1$ 이며, HF/C의 경우 $\bar{a}=0.5$, $f_p=35\text{Hz}$, $\bar{p}=0.4$ 이고 LF/T의 경우에는 $\bar{a}=0.3$, $f_p=15\text{Hz}$, $\bar{p}=0.1$ 이다. 여기서 HF/C의 펄스밴드가 기준 입력의 40% ($p=0.4$)로서 다른 밸브에 비해 상당히 큰 것에 주목할만 하며 또한 짐성부하가 있으면 최적의 \bar{p} 는 0.2로 줄어든다는 것이 예비실험을 통하여 밝혀졌다.

Fig.5는 MOBO에서 f_p, \bar{p} 를 기준조건으로 고정하고 펄스변조값 \bar{a} 의 변화가 각 밸브의 응답특성에 미치는 영향을 나타내고 있다. 전환빈도가 크면 \bar{a} 의 변화에 따른 정상상태 오차 e_{ss} 의 변화폭이 크고 즉, \bar{a} 의 선택범위가 극히 제한되어 있으며, 전환빈도가 작은 밸브는 리미트사이클이 발생하지 않는 \bar{a} 의 범위에서 밸브형태에 관계없이 e_{ss} 가 비교적 적은 것을 알 수 있다.

탠덤 센터형의 경우 정착시간 t_s 와 상승시간 t_r 이 클로즈드 센터형에 비해 약 1.5배 정도긴 반면 최대 오버슈트 M_p 가 작은 것을 알 수 있다. 이는 밸브의 특성상 급격한 압력이 형성되지 못하여 부하가 다른 밸브에 비해 상대적으로 천천히 움직인 때문으로 판단된다.

Fig.6은 MOBO에서 펄스 주파수 f_p 를 변화시키면서 각 밸브의 응답특성을 측정하는 것이다. 각 밸브의 정상상태 오차 e_{ss} 를 살펴보면 전환빈도가 큰 밸브는 펄스주파수의 변화에 따른 정상상태 오차 폭이 역시 크며 또한 바람직한 응답특성을 얻을 수 있는 f_p 의 범위가 극히 좁은 반면, 탠덤센터형 밸브의 경우 선택가능한 f_p 의 범위가 클로즈드 센터형에 비해 넓은 것을 알 수 있다. f_p 가 작으면 리미트사이클이 발생하는데 이는 오차가 펄스밴드내에 있더라도 펄스폭 T_w 가 너무커서 부하가 감속되지 못하고 계속오동하기 때문이다. 이러한 리미트사이클이 발생하는 주파수는 HF/C가 다른 밸브에 비해 큰 것으로 나타났다.

Fig.7은 \bar{a} 와 f_p 를 고정하고 MOBO에서 펄스 밴드의 크기를 기준 입력의 5% ($\bar{p}=0.05$)에서 50% ($\bar{p}=0.5$)까지 변화시켰을 때 시스템의 응답특성을 나타내고 있다. 정상상태 오차는 \bar{p} 의 영향을 거의 받지 않았으나 HF/C의 경우 $\bar{p} \leq 0.1$ 에서 리미트사이클이 발생하였다. 부하가 펄스밴드를 지나며 감속되기 때문에 M_p 는 \bar{p} 가 커짐에 따라 거의 비례적으로 줄어들고 있으며 여기서 $M_p=0$ 인 것은 부하가 목표위치를 지나기 전에 정지한 상태를 나타낸다.

본 논문에는 나타내지 않았지만 관성부하와 짐성부하가 있는 경우에도 위와 유사한 결과를 얻었다. 지금까지 결과를 종합하여 보면 각 밸브의 형태와 특성에 따라 제어변수의 '적정조합'이 각각 존재하며 HF/C의 경우 LF/C와 LF/T에 비해 사용가능한 '적정조합'의 범위가 극히 좁아서 대단히 예민한 반응을 보이고 있음을 알 수 있었다. 시스템의 안정성에 미치는 주요변수는 \bar{a} 와 f_p 이기 때문에(4) LF/C와 LF/T 밸브를 사용한 경우에는 $\bar{p}=0.1$, HF/C 밸브를 사용한 경우에는 $\bar{p}=0.4$ 로 고정한 채 \bar{a} 와 f_p 의 여러가지 조합에서 계단입력에 대한 과도응답을 측정하였다. Fig.8은 시스템의 가장 바람직한 응답 (정상상태 오차가 작고 정착시간이

짧은 응답)을 얻을 수 있는 \bar{a} 와 f_p 의 '적정조합'을 나타낸 것인데 이 선의 상단에서는 시스템은 안정하나 정상상태 오차가 크게 되고, 하단에서는 시스템이 불안정하여진다.

이 '적정조합'들에 해당하는 펄스폭 $T_w (= \bar{a}/f_p)$ 은 펄스주파수가 아주 낮거나 높은 조합을 제외하면 LF/C와 HF/C 밸브를 사용한 경우 15 ± 1.7 ms로 솔레노이드의 전환빈도에 상관없이 거의 일정하고, LF/T 밸브로 사용한 경우는 20 ms로 T_w 값은 밸브형태의 영향을 많이 받음을 알 수 있었다.

4.3 압력 서어지

Fig.9는 세가지 밸브를 사용하여 FOF 제어를 적용하였을 때 (제어변수는 '기준조건'으로 설정) 각 부하조건에서의 계단입력에 대한 과도 응답을 보여주고 있고 Fig.10은 그 때의 실린더내 부하압력 P_1 을 나타내고 있다. 어느 경우에서도 공동현상은 발생하지 않았으며 LF/C 밸브를 사용한 경우보다 HF/C 밸브를 사용했을 때 압력서어지가 감소되었고, LF/T 밸브를 사용한 경우 압력서어지가 거의 발생하지 않았다.

5. 결 론

특성과 형태가 다른 솔레노이드밸브를 사용한 유압 위치제어시스템에 단속적 제어방법을 적용하여 부하조건에 따른 응답특성을 실험적으로 연구하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 텐덤센터형 밸브(LF/T)를 사용하면 상승시간과 정상상태 오차는 증가하지만 최대오버슈트값이 줄어들고 전반적으로 안정된 응답을 얻을 수 있었다.
- (2) 전환빈도가 큰 밸브(HF/C)를 사용하면 시스템의 응답특성이 제어변수의 선정에 따라 매우 민감하게 변화하였으며 전반적으로 전환빈도가 작은 밸브(LF/C)를 사용하였을 때보다 응답특성이 좋지 않았다.
- (3) 바람직한 응답을 얻을 수 있는 펄스폭 T_w 의 값은 밸브의 솔레노이드 특성보다 밸브의 중립위치

형태의 영향을 받았다.

- (4) 공동현상은 발생하지 않았으며 실린더내 압력서어지는 LF/C, HF/C, LF/T 밸브를 사용한 순으로 감소하였으며 특히 LF/T 밸브를 사용하면 압력서어지가 거의 발생하지 않았다.

6. 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 "유압위치제어시스템의 단속적제어방법에 관한 연구(I)", 대한기계학회 논문집 제11권 제3호, pp.465-472.
- (5) Martin, H.A. and McCloy, 1971, "Some Aspect of the Response of Bistable Hydraulic Servo", 2nd Fluid Power Symposium, B.H. R.A., Cranfield, Bedford, England, pp. B3. 49-66.
- (6) 안병홍, 1986 "단속적 제어에 의한 유압 서어보 시스템의 과도응답 특성 연구", 고려대학교 석사학위논문, pp. 23-24, 81.

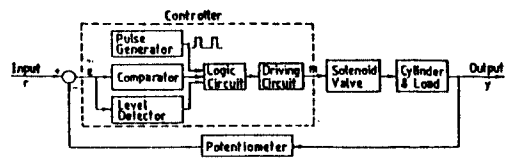


Fig.1 Block diagram of the hydraulic position-control system.

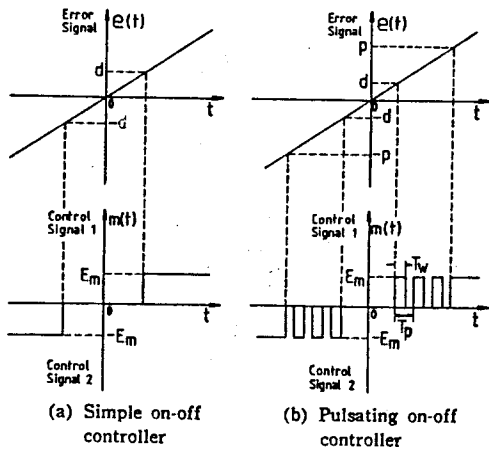


Fig. 2 Input-output characteristics of the controller.

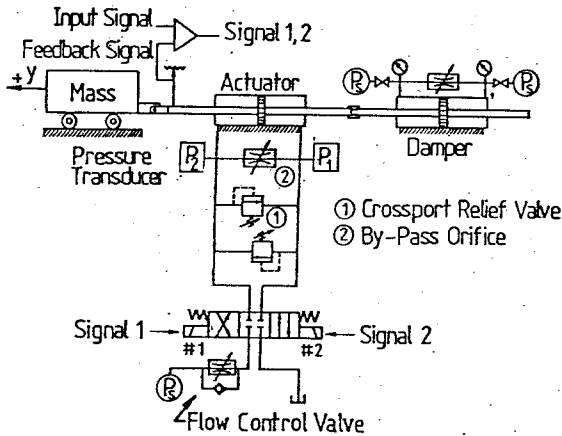


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus.

NOTATION	TYPE	SWITCHING TIME	MAX. FLOW RATE Ps=70 kg/cm ²	MANUFACTURER	PART NUMBER
LF/C	Closed center	4 cycle/sec	40 l/min	Lotte Daikin	J50-G02-2C
HF/C	Closed center	833 cycle/sec	20 l/min	Sperry Vickers	DG-4M4-32C
LF/T	Tandem center	4 cycle/sec	20 l/min	Lotte Daikin	J50-G02-66C

Table 1 Manufacturer specifications of solenoid valves.

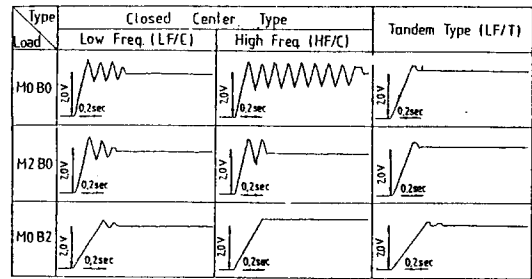


Fig. 4 Effects of pulse modulated value on response characteristics of the system with POF controller (MOBO).

Type	Load	Closed Center Type		Tandem Type(LF/T)
		Low Freq. (LF/C)	High Freq. (HF/C)	
d _{min} (mV)	MOB0	55.44 +3.03 -3.90	204.68 +19.50 -8.47	58.75 +2.20 -3.55
	H2B0	46.75 +3.25 -1.99	248.38 +8.12 -12.77	71.20 +9.18 -5.83
	MOB2	34.56 +3.03 -1.47	141.68 +13.55 -20.33	36.29 +8.39 -11.58
e _{ss} (%)	MOB0	2.33 +3.05 -2.21	8.57 +3.24 -6.68	2.27 +3.45 -1.49
	H2B0	1.67 +0.86 -1.36	11.75 +2.25 -2.38	1.30 +1.30 -0.89
	MOB2	2.18 +1.17 -2.09	3.61 +0.59 -0.61	3.08 +1.22 -2.38

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

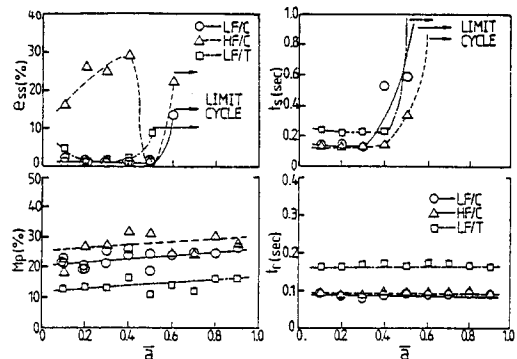


Fig. 5 Effects of pulse modulated value on response characteristics of the system with POF controller (MOBO).

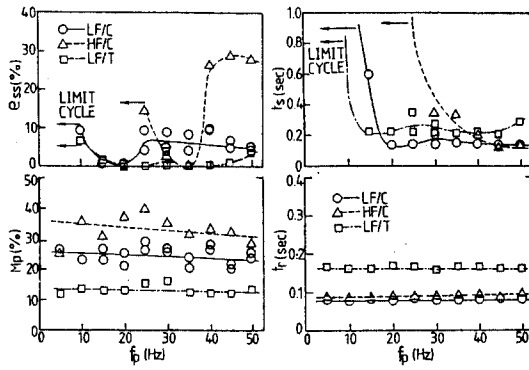


Fig.6 Effects of pulse frequency on response characteristics of the system with POF controller (MOBO).

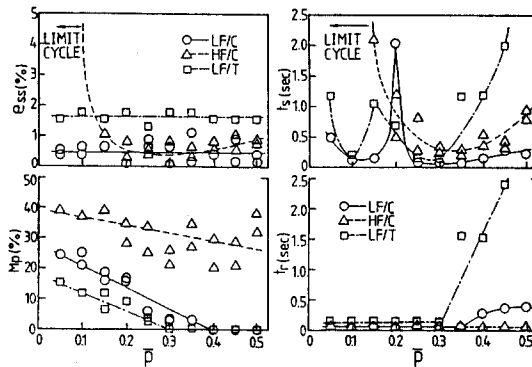


Fig.7 Effects of pulse band on response characteristics of the system with POF controller (MOBO).

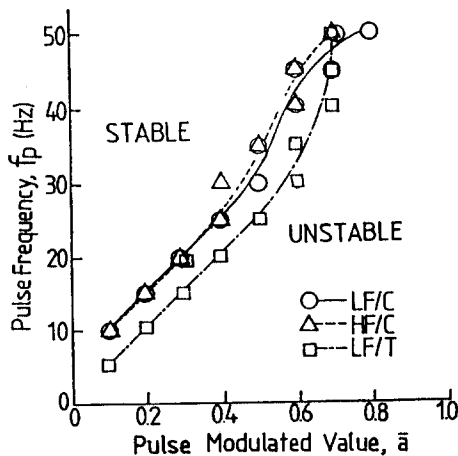


Fig.8 Appropriate combinations of control parameters for near best response of the system with POF controller (MOBO).

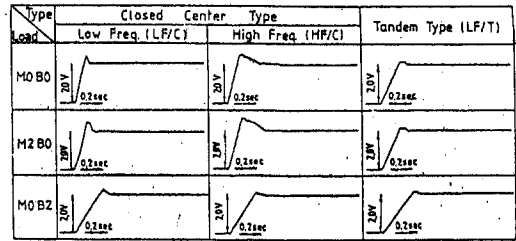


Fig.9 Typical transient responses of the system with POF controller.

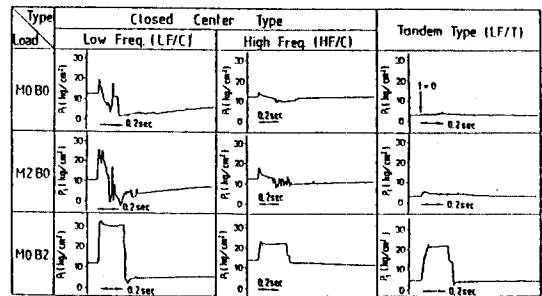


Fig.10 Inlet pressure transients in the actuator with POF controller.