

<論 文>

유압 위치제어 시스템의 단속적 제어방법에 관한 연구(I)

장효환\* · 안병홍\*\* · 이춘호\*\*

(1987년 2월 20일 접수)

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

Hyo Whan Chang, Byeong Hong Ahn and Choon Ho Lee

Key Words: Simple On-Off Control(단순 온-오프 제어), Pulsating On-Off Control(맥동형 온-오프 제어), Deadband(데드밴드), Pulse Band(펄스밴드), Pulse Modulated Value(펄스 변조값), Pulse Frequency(펄스 주파수)

Abstract

Two kinds of discontinuous control methods i.e., simple on-off(SOF) control and pulsating on-off(POF) control methods are implemented and compared each other for a low cost hydraulic position-control system which utilizes a solenoid-operated directional valve instead of a servovalve. Experimental work was carried out to investigate effects of control parameters and loading conditions on step response characteristics of the system for each control method.

The results show that much higher accuracy and much better transient response characteristics can be achieved by POF controller than those by SOF controller. The results may be used as basic data in the selection of control parameters as well as in the design of the hydraulic position-control system.

1. 서 론

전기 유압 서어보 밸브를 사용한 위치제어 시스템은 응답 속도가 빠르고 정밀하여 군사, 우주항공, 정밀자동화 기기 등에 널리 사용되고 있지만 시스템 구성비가 비싸고 작동유의 오염에 민감하여 작업환경이 좋지 못한 일반 산업기계에서의 응용이나 적은 투자의 간이 자

동화에의 응용에 제한을 받고 있다. 이에 대한 대안으로 Baeck<sup>(1)</sup>은 솔레노이드(solenoid) 밸브에 단속적 제어(on-off control)를 적용한 유압위치제어 시스템을 개발하여 수륙양용 차량의 방향타 위치를 제어함으로써 후자의 응용 가능성을 제시하였다. 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 특성상 정교함이 요구되지 않기 때문에 가격이 서어보 밸브의 1/20~1/60로 저가이고 작동유의 오염에도 거

\* 정희원, 고려대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 고려대학교 대학원 기계공학과

의 영향을 받지 않는 장점이 있다. 그러나, Baeck<sup>(1)</sup>이 제안한 시스템은 정확도(accuracy)가 좋지 않아 널리 활용되지 못하였고, 그 후 이 밸브에 펄스 폭 변조(pulse-width modulation) 제어를 적용한 시스템이 연구되었으나<sup>(2,3)</sup>이 제어방법의 가장 큰 단점은 솔레노이드의 수명이 짧게 되고 에너지 손실이 큰 점이다.<sup>(4)</sup>

최근, Eun 등<sup>(5,6)</sup>이 공기압을 사용한 회전각 위치제어 시스템에서 '맥동형 단속적 제어(modified on-off control)'를 적용하여 재래식 단속적 제어에 비해 시스템의 정확도를 크게 개선시킬 수 있음을 보여 주어 단속적 제어 방법의 활용가능성이 높아졌다. 유압을 사용한 단속적 위치제어 시스템은 작동유가 비압축성이라 상승시간이 아주 짧고 밸브가 급격히 열리고 닫힐 때 압력 서어지(surge)현상에 의해 리밋 사이클(limit cycle)이 발생할 가능성이 높은 점등 공기압 시스템과 다른 특성이 있다.<sup>(7)</sup> 더군다나, Eun 등<sup>(5,6)</sup>은 시스템의 안정성(stability)과 제어변수들의 상관관계에 대하여 주로 연구하였고, Baeck<sup>(1)</sup>도 주파수 영역에서의 시스템 안정성을 이론적으로 해석한 것만 발표하였기 때문에 시간 영역에서의 응답특성에 관한 체계적인 연구가 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 솔레노이드 밸브를 사용한 유압위치제어 시스템에 위에서 언급한 두가지 단속적 제어 방법을 적용하여 각각의 제어변수들과 부하조건이 시스템의 시간 영역에서의 응답특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고 각각의 제어특성을 비교 고찰하였다.

## 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

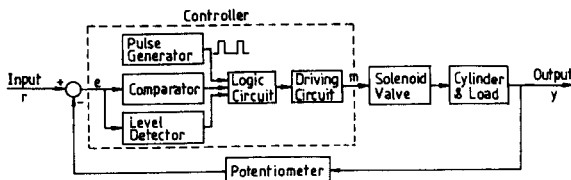


Fig. 1 Block diagram of the hydraulic position-control system

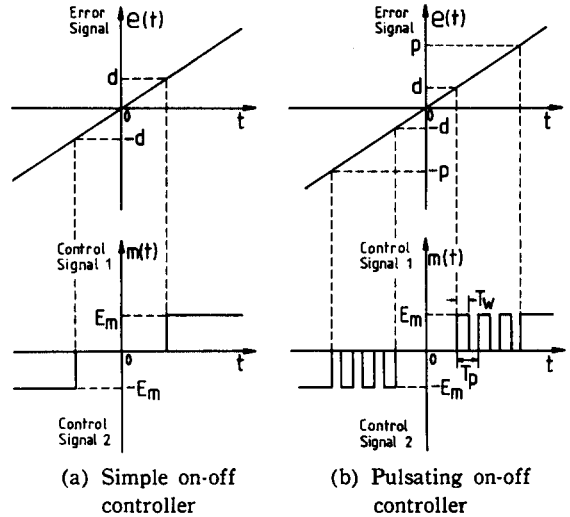


Fig. 2 Input-output characteristics of the controller

(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 펄스열(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 Baeck<sup>(1)</sup>의 방법을 단순 온-오프(Simple On-Off)제어, Eun 등<sup>(5,6)</sup>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.

SOF 제어기에서는  $e$ 가 비교기 내에 설정된 데드밴드  $d$ 보다 크거나  $-d$ 보다 작으면 각각  $m = E_m$  또는  $m = -E_m$ 이 되며  $d$ 와  $-d$  사이에 있게되면  $m = 0$ 이 된다. 따라서,  $e > d$ 이면 제어신호 1( $m = E_m$ )이 출력되어 솔레노이드 1을 작동(ON)시키고 밸브를 완전히 열어 부하를  $+y$ 방향으로 전진시킨다(Fig. 3 참조). 부하가 목표 지점에 가까워져 오차가 데드밴드 이내로 줄어들면  $m = 0$ 이 되며 솔레노이드 1은 작동이 중지(OFF)되나, 만약 관성에 의해 부하가 목표지점을 지나쳐서  $e < -d$ 가 되면 제어신호 2( $m = -E_m$ )가 출력되어 솔레노이드 2를 작동(ON)시키고 밸브를 반대편으로 완전히 열어 부하를  $-y$ 방향으로 후진시킨다.  $d$ 가 충분히

히 크게 설정되면 부하가 고체마찰이나 점성마찰에 의하여 데드 영역(dead zone)내에 머물게 되어 밸브의 단속이 중단되나,  $d$ 가 작게 설정되면 밸브의 단속 동작이 계속되어 부하가 목표지점 전후로 계속 요동하는 리밋 사이클 현상이 발생한다. 시스템의 리밋 사이클을 유발하지 않는 데드밴드의 최소값을 최소안정데드밴드,  $d_{min}$ 이라 정의하며 이 값이 시스템의 정확도(정상상태 오차)의 지표가 된다.<sup>(6)</sup> 이  $d_{min}$  값은 부하의 질량과 이송속도(즉, 실린더에 공급되는 유량)에 의한 운동에너지와 마찰에 의한 손실에너지의 상대적 크기에 따라 달라지게 된다.

POF 제어기에서는 비교기내에 데드밴드 외에 추가로 펄스밴드  $p$ 를 설정하여 오차신호가  $e > p$ 이거나  $e < -d$ 이면 제어신호가 SOF 제어모드와 같게 출력되나,  $d < e < p$ 에서는 펄스 발생기에 의해 Fig. 2(b)와 같은 제어신호가 출력되어 솔레노이드 1을 맥동형으로 계속하여 온-오프 시키게 된다( $e < 0$ 경우도 동일). 이런 경우 솔레노이드 밸브가 완전히 열린 상태에서 반복적으로 조금씩 열렸다 닫히는 상태로 전환되어 제한된 유량이 간헐적으로 공급되기 때문에 부하가 감속되어  $d_{min}$  값이 SOF 제어를 적용한 경우에 비해 훨씬 작게 설정되어질 수 있다.<sup>(5,6)</sup> 여기서, 부하의 감속 정도는 솔레노이드가 'ON'되는 시간 즉, 펄스 폭  $T_w$ 와 펄스 주파수  $f_s (=1/T_s)$ , 펄스밴드  $p$ 의 기준입력  $r$ 에 대한 상대적 크기에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서 사용한 POF 제어의 주요변수는 무차원화된 펄스 변조값(pulse-modulated value)  $\bar{a} (=T_w/T_s)$ , 펄스밴드  $\bar{p} (=p/r)$ , 펄스주파수  $f_s$ 이다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도가 Fig. 3에 나타나 있다. 유압공급원으로는 가변용량식, 압력보상형 펌프를 사용하였으며 공급압력  $P_s$ 는 70kg/cm<sup>2</sup>(6.865 MPa)로 고정하였다. 솔레노이드밸브는 4 포트, 3 위치, 클로즈드 센터(closed center)형이고 제작사 사양은 정격유량 40l/min, 솔레노이드 DC형(24V, 1.2A), 최고 전환빈도 4회/초(완전히 열림, 닫힘 상태로 작동시킬 경우)이다. 유압 실린더는 양쪽 로드형이고 전 행정(full stroke) 150mm, 내경 40mm, 로드 직경 25mm이다. 전위차제는 정밀형(MOOG)이고 전 행정이 508mm, 이득(gain)은 51.57mV/mm로 고정하였다.

은<sup>(8)</sup>이 개발한 제어기는 오차신호의 부호에 따라 두 개의 동일한 병렬회로에서 각각  $d$ 와  $p$ 를 조정하도록

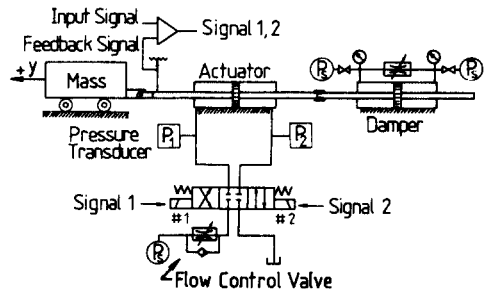


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

되어 있기 때문에 정확하게 대칭시켜 조정하기 어렵은 점이 있고 또한  $p$ 를 독립적으로 조절할 수 없게 되어 있다. 이러한 점들을 개선한 제어기를 새로 설계한 후 연산 증폭기(operational amplifier), TTL(transistor-transistor logic), 스위칭 트랜지스터 등을 사용하여 제작하였다.

관성부하로는 200kg의 질량을 가이드 레일에 따라 수평으로 이송시키도록 하고 쿨롱(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  $M0B0, M2B0, M0B2$ 로 표기하였고 여기서  $M0, B0$ 는 각각의 부 질량과 댐퍼를 탈착시킨 상태를 의미한다.

SOF 제어를 적용한 실험에서는 세가지 부하조건에서 공급유량을 변화시키면서 최소안정데드밴드  $d_{min}$  값을 측정한 후, 각각의 공급유량에서 시스템의 응답특성을 측정하였다. 공급유량은 유량제어밸브(압력 및 온도 보상형)의 개도를 조정하여 변화시켰으며, 본 논문에서 사용한 밸브개도  $\bar{A}$ ,는 정밀하게 눈금이 매겨져 있는 다이얼식 손잡이를 돌려 각각의 눈금에서 측정한 유량을 완전개방 상태( $\bar{A}_s=1$ )에서의 유량으로 나눈 값이며  $\bar{A}_s=1$ 일 때의 유량은 22.3l/min이다.

POF 제어를 적용한 실험에서는 유량제어밸브의 개도를  $\bar{A}_s=1.0$ 으로 고정하고 세가지 부하조건에서  $d_{min}$  값을 측정한 후, 제어변수들을 변화시켜가면서 시스템의 응답특성을 측정하였다.

본 실험에서 기준 입력으로는  $r=2\text{V}$ (38.78mm)인 계단 신호(step signal)를 사용하였으며, 응답특성은 메모리 기능(16 bits×32K words)이 부착된 신호분석기

(IWATSU)를 사용하여 정상상태 오차, 최대 오버슈트(overshoot), 정정시간(settling time), 상승시간(rise time)을 측정하였다. 여기서, 상승시간은 부하가 0에서부터 목표위치(100%)까지 도달하는데 걸린 시간으로 정의하였으나, 부하가 목표위치에 도달하기 이전에 정지한 경우에는 그 정지점까지 도달하는데 걸린 시간으로 하였다. 정정시간은 부하가 0에서부터 목표위치의  $\pm 5\%$  이내로 정착할 때까지의 시간으로 정의하였으나, 부하가 목표위치의  $\pm 5\%$ 를 초과하여 정지한 경우(즉, 정상상태 오차가 5% 이상인 경우)에는 최종위치까지 도달하는데 걸린 시간으로 하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 단순 온-오프 (SOF) 제어의 응답 특성

단속적 위치제어시스템에서는 부하의 이송 속도를 별도로 제어할 수 없기 때문에 유량제어밸브를 사용하여 공급유량을 수동으로 조정하여야 한다.<sup>(1)</sup> 이 공급유량이 최소안정데드밴드 값과 제단입력에 대한 응답 특성에 미치는 영향을 조사하였고 그 결과가 Fig. 4와 Fig. 5에 나타나 있다.

Fig. 4는 유량제어밸브 개도  $\bar{A}_s$ 의 변화에 따른 최소안정데드밴드  $d_{min}$  값을 나타낸 것이다. 밸브개도 즉 공급유량이 커짐에 따라  $d_{min}$  값은 급격히 증가하다가  $\bar{A}_s \geq 0.4$ 에서는 그 증가정도가 완만하여짐을 볼 수 있다. 또 부하의 영향은 공급유량이 많은 때에 현저하게 나타났으며 점성부하가 있는 경우에  $d_{min}$  값이 크게 감소되었다. 질량부하가 있는 경우, 무부하일 때에 비해  $d_{min}$  값이 감소된 현상은 질량과 가이드 레일사이의 클림마찰에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 5는 유량제어밸브 개도  $\bar{A}_s$ 의 변화에 따른 응답특성을 정상상태 오차  $e_{ss}$ , 최대 오버슈트  $M_p$ , 정정시간  $t_s$ , 상승시간  $t_r$  별로 나타낸 것이다. 세가지 부하

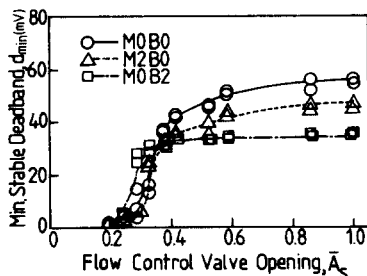


Fig. 4 Effects of flow control valve opening on minimum stable deadband with simple on-off controller

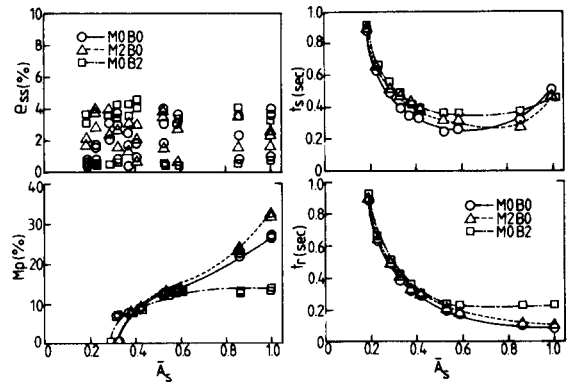


Fig. 5 Effects of flow control valve opening on system response characteristics with simple on-off controller(M0B0 :  $d=69\text{mV}$ , M2B0 :  $d=58\text{mV}$ , M0B2 :  $d=43\text{mV}$ )

조건에서 설정된 데드밴드  $d$  값은 M0B0, M2B0, M0B2에서 각각  $69\text{mV}$ (1.34mm),  $58\text{mV}$ (1.13mm),  $43\text{mV}$ (0.83mm)인데 이 값들은  $\bar{A}_s=1$ 인 상태에서 반복 측정하여 구한  $d_{min}$  값의 평균치 보다 25%씩 크게 취한 것들이다. 여기서  $d$  값을  $d_{min}$  값의 1.25배로 설정한 이유는 측정된  $d_{min}$  값들이 흩어짐(scattering)을 보였고 또  $d$  값을  $d_{min}$  값에 좀더 접근하여 설정한 경우 리 및 사이클은 발생하지 않았지만 부하가 목표위치 전후로 요동하는 시간이 상당히 길어지고 응답의 재현성(repeatability)이 나빠졌기 때문이다. 따라서, 정상상태 오차  $e_{ss}$ 의 이론적인 최대값( $100 \times d/r$ )은 M0B0, M2B0, M0B2에서 각각 3.5%, 2.9%, 2.2%이나 실험치는 부하에 상관없이 최대 4.85%로 나타났다. 실험치가 이론치보다 크고 또 부하에 따라 다르게 설정된  $d$  값의 차이(최대  $26\text{mV}$ )가 오차의 크기에 영향을 주지 못한 이유는 제어기내 비교기에 사용된 연산증폭기의 이력(hysteresis)현상과 오프셋(offset)전압등<sup>(9)</sup>에 기인한 탓으로 생각되거나 앞으로 이에 대한 연구가 좀더 필요하다. 측정된  $e_{ss}$  값의 심한 흩어짐현상은 같은 조건에서 반복하여 실험할 때마다 부하가 마찰에 의해 데드 영역( $d$ 와  $-d$  사이)내 임의의 위치에 멈추기 때문이다. 밸브개도를 작게함에 따라  $d_{min}$  값이 감소하므로 어울러  $e_{ss}$  값도 상대적으로 작아질 것으로 기대되어  $\bar{A}_s$ 에 따라 매번  $d$  값을 감소 조정하여 실험한 결과, 본 논문에서 나타내지 않았지만,  $e_{ss}$  값은 약간 감소되었으나 반면 정정시간이 증가하고 재현성이 나빠져 시스템의 안정성 측면에서는 바람직하지 못하였다.<sup>(10)</sup> 최대 오버슈트  $M_p$ 는 공급유량이 많아짐에 따라 점

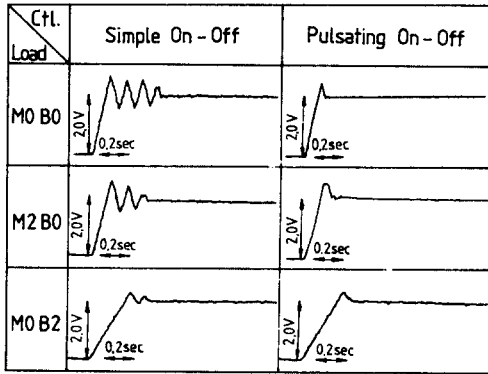


Fig. 6 Typical transient responses of the system for a step input :  $r=2V(\bar{A}_r=1.0)$

성부하가 있는 경우를 제외하고는 거의 비례적으로 증가하였다. 부하의 영향은 공급유량이 많을 수록 현저하게 나타났는데 점성부하는  $M_s$  값을 대폭 감소시킨 반면 질량부하는 관성효과때문에 무부하상태에 비하여 오히려  $M_s$  값을 증가시켰다. 상승시간  $t_r$  과 정정시간  $t_s$  는 밸브 개도  $\bar{A}_r$  의 증가에 따라 급격히 감소하다가  $\bar{A}_r$  값이 1.0에 가까워짐에 따라  $t_r$  은 그 감소정도가 완만하여졌으나 부하가 목표위치 전후로 요동하는 시간이 길어지면서,  $t_s$  는 다시 증가하였다. 부하의 영향은 공급유량이 많은 때에 나타났는데 예컨대,  $\bar{A}_r=1$  에서 점성부하가 있는 경우에 다른 부하조건에 비하여  $t_r$  은 두 배 정도 길어졌으나, 부하의 요동시간이 짧아져 결과적으로  $t_s$  는 거의 같아졌다. 이와 같은 현상은 Fig. 6(a)에서 잘 볼 수 있는데 이 그림은  $\bar{A}_r=1$  일 때 세가지 부하조건에서 Fig. 5의 경우와 같이 메드밴드를 설정한 후 측정된 제단입력에 대한 과도 응답을 나타낸 것이다(Fig. 6(b)에 대해서는 위에서 언급함).

4.2 맥동형 온-오프(POF)제어의 응답 특성

POF 제어를 적용한 예비실험을 통하여 최소안정메드밴드  $d_{min}$  값은  $\bar{a}$  와  $f_p$  를 특이한 조합으로 설정한 경우(이에 대해서는 위에 자세히 언급되어 있음)를 제외하고는 다른 제어변수와 부하의 영향을 받지 않는 것으로 확인되었고, 메드밴드 값을 제어기에서 조정가능한  $d=0.1mV(0.002mm)$  로 설정하여도 리밋 사이클은 발생하지 않았으나 정정시간이 길어지고 시스템이 불안정하여지는 성향이 생겼다. 따라서, 본 실험에서는  $d=0.1mV$  로 설정한 경우에 비해 정상상태 오차는 거의 증가하지 않으면서도 정정시간이 훨씬 짧게되는

$d=3.94mV(0.076mm)$  를 메드밴드로 고정 설정하였고 다른 제어변수들이 시스템의 응답특성에 미치는 영향을 다음과 같이 조사하였다. 즉, 응답특성이 좋게되는 경우의 제어변수들의 조합인  $\bar{a}=0.3, f_p=20Hz, \bar{p}=0.1$  을 '기준조건'으로 설정한 후 세가지 부하상태에서 다른 두 제어변수는 이 '기준조건'으로 고정하고 하나의 제어변수만 변화시키면서 실험하였다. 그 결과가 Fig.7~9에 나타나 있다.

Fig. 7은 세가지 부하조건에서 펄스 변조값  $\bar{a}$  의 변화가 시스템의 응답특성에 미치는 영향을 나타내고 있다( $f_p=20Hz, \bar{p}=0.1$  고정).  $\bar{a}=0.6$  이상에서 리밋 사이클이 발생하는데 이는 오차가 펄스밴드이내에 있더라도 펄스 폭  $T_w(=\bar{a}/f_p)$  가 너무 커서 부하가 효과적으로 감속되지 못하고 SOF 제어 경우처럼 목표위치 전후로 계속 요동하기 때문이다. 또한  $\bar{a}=0.2$  이하에서는 부하가 있는 경우에 정상상태 오차  $e_{ss}$  가 급격히 증가하는데 이는  $T_w$  가 이번에는 너무 작아서 밸브를 반대편으로 작동시킬만한 압력이 실린더내에 형성되지 못하기 때문이다. 상승시간  $t_r$  은  $\bar{a}$  값에 상관없이 일정하였으며, 최대 오버슈트  $M_p$  는  $\bar{a}$  가 커짐에 따라 약간 증가하였으나 측정치의 흠어짐을 고려하면 그 증가정도는 주목할 만하지 못하다. 부하의 영향으로 점성부하는 다른 두 부하에 비해  $M_p$  값을 1/2로 감소시킨 반면  $t_r$  을 2배로 증가시켰다. Fig. 7의 결과를 종합하여 보면,  $f_p$  와  $\bar{p}$  가 고정된 경우 시스템의 바람직한 응답(정상상태 오차가 작고 정정시간이 짧은 응답으로 정의함)을 얻을 수 있는 펄스 변조값  $\bar{a}$  값의 범위가 존재함을 알 수 있었으며 본 실험의 경우 최적값은  $\bar{a}=0.3$  이었다.

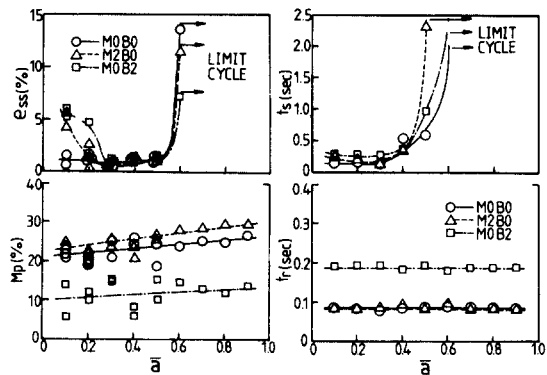


Fig. 7 Effects of pulse-modulated value on system response characteristics with pulsating on-off controller ( $f_p=20Hz, \bar{p}=0.1$ )

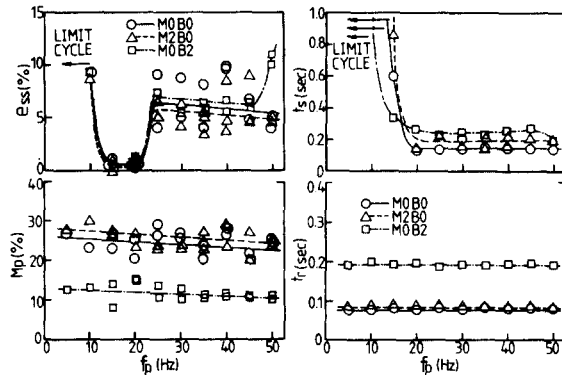


Fig. 8 Effects of pulse frequency on system response characteristics with pulsating on-off controller ( $\bar{a}=0.3$ ,  $\bar{b}=0.1$ )

Fig. 8은 세가지 부하조건에서 펄스 주파수  $f_p$ 의 변화가 시스템의 응답특성에 미치는 영향을 나타내고 있다( $\bar{a}=0.3$ ,  $\bar{b}=0.1$  고정).  $f_p=10\text{Hz}$  이하에서는 리미트 사이클이 발생하는데 이는 오차가 펄스밴드내에 있더라도 펄스 폭  $T_w$ 가 너무 커서 부하가 감속되지 못하고 계속 요동하기 때문이다. 또한  $f_p=25\text{Hz}$  이상에서는 정상상태 오차  $e_{ss}$ 가 급격히 증가하고 측정치의 흠어짐이 심하여지는데 이는  $T_w$ 가 이번에는 너무 작아서 밸브를 미처 반대편으로 작동시키지 못할 뿐더러 작동상태가 불규칙하여지기 때문이다. 상승시간  $t_r$ 은  $f_p$ 값에 상관없이 일정하였으며, 최대 오버슈트  $M_p$ 는  $f_p$ 가 커짐에 따라 약간 감소하였으나 측정치의 흠어짐을 고려하면 그 감소정도는 주목할 만하지 못하다. 부하의 영향은  $\bar{a}$ 값 변화의 경우와 동일하다. Fig. 8의 결과를 종합하여 보면,  $\bar{a}$ 와  $\bar{b}$ 가 고정된 경우 시스템의 바람직한 응답을 얻을 수 있는 펄스 주파수  $f_p$ 값의 범위가 제한되어 존재함을 알 수 있었으며 본 실험의 경우 최적값은  $f_p=20\text{Hz}$ 이었다.

Fig. 9는 세가지 부하조건에서 펄스밴드의 크기를 기준입력의 5% ( $\bar{b}=0.05$ )에서 50% ( $\bar{b}=0.5$ )까지 변화시켰을 때 시스템의 응답특성을 나타내고 있다( $\bar{a}=0.3$ ,  $f_p=20\text{Hz}$  고정).  $\bar{b}\leq 0.05$ 에서는 펄스밴드가 너무 작아서 부하가 별로 감속되지 못하기 때문에 정정시간이 길어지며 시스템이 불안정하여지려는 성향이 생겼으나 그 외의 어떤  $\bar{b}$ 값에서도 시스템은 안정하였다. 앞의 두 제어변수의 영향과 비교하여 주목할 점은 최대 오버슈트  $M_p$ 가  $\bar{b}$ 의 증가에 따라 거의 비례적으로 감소한 점이다. 이는  $\bar{b}$ 가 커질수록 부하가 더 많이 감속된 후 목표위치에 접근하기 때문이다. 정상상태 오차  $e_{ss}$ 는 점성부하가 있는 경우를 제외하고는  $\bar{b}$ 값의 영향을

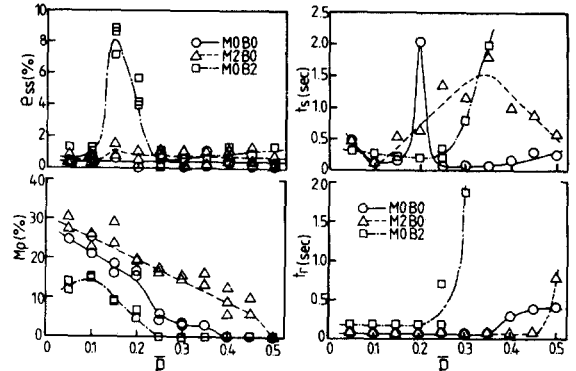


Fig. 9 Effects of pulse band on system response characteristics with pulsating on-off controller ( $\bar{a}=0.3$ ,  $f_p=20\text{Hz}$ )

거의 받지 않았다. 점성부하가 있는 경우에는  $\bar{b}=0.15\sim 0.2$ 일때  $e_{ss}$ 값이 급격히 커지고  $\bar{b}\geq 0.25$ 일 때는  $e_{ss}$ 는 다시 줄었으나 정정시간  $t_s$ 와 상승시간  $t_r$ 이 급격히 증가하는 현상이 나타났는데 이 현상은 과도응답을 측정하여 분석한 결과 다음과 같이 설명되어질 수 있다. 즉,  $\bar{b}\leq 0.1$ 일 때는 첫번째 최대 오차( $M_p$ 와 같은 값)가 펄스밴드보다 커서( $M_p > \bar{b}$ ) 솔레노이드 밸브가 반대편으로 완전히 열리며 부하를 데드영역 부근으로 밀어 보내  $e_{ss}$ 를 줄일 수 있었으나,  $\bar{b}=0.15\sim 0.2$ 일 때는 첫번째 최대 오차가 펄스밴드 이내( $M_p < \bar{b}$ )에 있게 되며 앞에서 언급한 것처럼 펄스 폭  $T_w$ 가 너무 작아 밸브를 반대편으로 작동시킬 만한 압력이 실린더 내에 형성되지 못하기 때문에 부하가 더 이상 이동되지 않아  $e_{ss}$ 가 커졌다. 또  $\bar{b}\geq 0.25$ 일 때는 부하가 목표 위치에 도달하기 전부터 너무 감속되어 오버슈트가 생기지 않은 상태에서 서서히 목표 지점에 접근해 가기 때문에  $e_{ss}$ 는 다시 줄었으나 대신 상승시간과 정정시간이 급격히 증가하였다. 무부하 조건에서  $\bar{b}=0.2$ 일 때 특이하게 정정시간이 길어진 이유는 첫번째 최대 오차가 펄스밴드 경계 바로 안쪽에 있게 되어 그 지점에서 서서히 목표위치를 향해 되돌아오기 때문이며  $\bar{b}\geq 0.25$ 에서는  $M_p$ 값이 급격히 감소된 탓으로 목표 위치에 되돌아오는 시간도 짧아졌다. 질량부하 조건에서  $\bar{b}$ 값의 증가에 따라  $t_s$ 가 커지는 현상도 앞에서와 마찬가지로 설명되어질 수 있다.

Fig. 9의 결과를 종합하여 보면 다음과 같다. 즉,  $\bar{a}$ 와  $f_p$ 가 고정된 경우 펄스밴드  $\bar{b}$ 를 증가시키면 최대 오버슈트  $M_p$ 는 거의 비례적으로 감소하였으나 설정된  $\bar{b}$ 와 그 결과로 나타난  $M_p$ 의 상대적 크기는 정상상태 오차 및 정정시간과 상승시간에 영향을 미쳤다. 시스

펄스의 바람직한 응답을 얻을 수 있는  $\beta$  값의 범위가 무부하경우 비교적 넓게 존재하나 질량과 점성부하경우는 제한되어 존재함을 알 수 있었고 모든 부하조건에서 최적의 응답을 얻을 수 있는  $\beta$  값은 본 실험에서  $\beta = 0.1$  이었다.

앞에서의 고찰에서 시스템의 안정성에 영향을 미치는 주요 제어변수는  $\bar{a}$ 와  $f_s$ 이며 이 두 변수의 설정값에 의해 결정되는 펄스 폭  $T_w (= \bar{a}/f_s)$ 의 크기가 시스템의 안정성 뿐만 아니라 정확도(정상상태 오차)에까지 영향을 미침을 알 수 있었다. 이  $T_w$  값의 적정 크기를 알아보고 좀더 일반화된 결론을 얻기 위하여 무부하 조건에서  $\beta = 0.1$ 로 고정된 채  $\bar{a}$ 와  $f_s$ 의 90가지 조합에서 각각 계단입력에 대한 과도응답을 측정하였고 그 결과가 Fig. 10에 종합적으로 나타나 있다. 그림에서 굵은 선 비모 표시는 시스템의 바람직한 응답을 얻을 수 있는  $\bar{a}$ 와  $f_s$ 의 '적정조합'을 나타낸 것인데 이 '적정조합'을 연결한 선이 거의 직선을 이루고 있음을 볼 수 있다. 이 선의 상단영역에서는 시스템은 안정하나 정상상태 오차가 크게 되고 하단영역에서는 시스템이 불안정하여진다. 이 '적정조합'들에 해당하는 펄스 폭은 펄스 주파수가 제일 낮은 조합( $f_s = 10\text{Hz}$ ,  $\bar{a} = 0.1$ ) 하나를 제외하면  $T_w = 15 \pm 1.7\text{ms}$ 로 거의 일정하였다. 이 값은 솔레노이드 밸브의 동특성과 상관이 있을 것으로 생각되나 이에 대한 연구가 좀 더 필요하다. '적정조합' 중에서도 펄스 주파수가 너무 높은 조합은 밸브의

작동상태가 불규칙하여지는 경향이 있었을 뿐만 아니라 밸브의 수명이 짧아지므로 바람직하지 못하고, 펄스 주파수가 너무 낮은 조합은 펄스 주기  $T_s$ 와 상승시간이 거의 같아지므로 초기 제어능력이 떨어지므로 역시 바람직하지 못하다. 본 실험에서는  $f_s = 20\text{Hz}$ 인 조합에서 가장 좋은 응답을 얻을 수 있었다. 공기압을 사용한 위치제어시스템에서는<sup>(6)</sup>  $T_w = 30\text{ms}$ 로 고정된 채  $T_s = 300, 100, 50\text{ms}$ 로 변화시키면서 각각 측정된 실험결과  $T_s$ 가 작을수록(즉,  $f_s$ 가 클수록) 상승시간이 빨라지고  $T_s = 50\text{ms}$ 에서는 리미트 사이클까지 발생한 것으로 보고되었으나, 본 실험에서는 상승시간이  $f_s$  값에 상관없이 일정하였다.

### 4.3 SOF 제어와 POF 제어의 비교

Fig. 6은 POF 제어와 SOF 제어를 각각 적용하였을 때 계단입력( $r = 2\text{V}$ )에 대한 과도응답을 세가지 부하조건에서 비교하여 나타낸 것이다.

SOF 제어를 적용한 경우에는(Fig. 6a) 무부하 또는 질량부하만 있을 때 부하가 목표위치 전후로 요동하여 정정시간이 길어졌으나(M0B0에서 0.5sec) 점성부하가 있을 때에는 요동이 현저히 줄어들고 최대 오버슈트값도 감소된 비교적 안정된 응답을 얻을 수 있었다. 하지만, 어느 부하조건에서나 정상상태 오차가 약 5%이내로 비교적 컸다.

POF 제어를 적용한 경우에는(Fig. 6b) 본 측정에서 설정한 '기준조건'처럼 제어변수를 적정하게 설정하면 SOF 제어를 적용한 경우에 비해 정정시간이 훨씬 짧고(M0B0에서 0.14sec) 정상상태 오차도 약 1%이내로 크게 개선된 양호한 응답을 얻을 수 있었다.

상승시간은 제어방법의 영향을 거의받지 않았으며(M0B0에서 0.08sec), 최대 오버슈트값은 POF 제어에서 '기준조건'으로 설정한 경우 SOF 제어에 비해 약간 작게 나타났으나(M0B0에서 21~25%) 무부하일 때 펄스밸브를 좀 더 크게 하여  $\beta = 0.35$ 로 설정하면 3.2%까지 줄일 수 있었다(Fig. 9 참조).

단속적 제어방법에서는 정상상태 오차의 절대치(절대오차)가 밴드폭  $d$  값에 의해 상대적으로 결정되어지기 때문에 절대오차의 크기는 기준입력에 크기에 상관없이 일정하게 된다. 이러한 가설은 SOF 제어를 적용하여 계단입력  $r = 0.05 \sim 2.25\text{V}$ 에 대한 응답을 측정 한 실험에서 확인되었으며 아울러 같은 실험에서 최대 오버슈트의 절대치도 기준입력의 크기에 상관없이 거의 일정함이 확인되었다.<sup>(11)</sup> 따라서, 기준입력이 2V보다 크게 되면 상대오차(%오차)값과 최대 오버슈트의

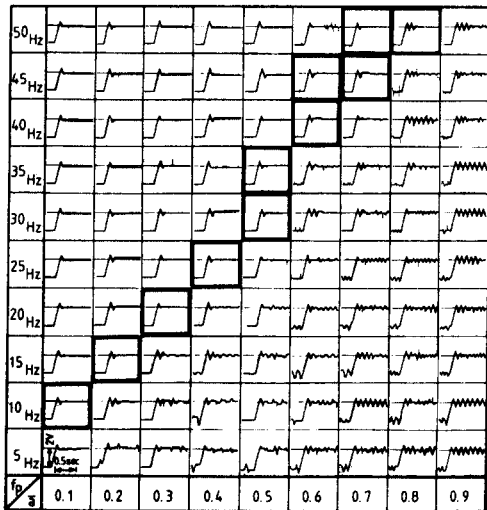


Fig. 10 Step responses of the system with pulsating on-off controller for various pulse-modulated values and pulse frequencies( $r = 2\text{V}$ ,  $\beta = 0.1$ , M0B0)

상대치(%최대 오버슈트)가 본 논문에서 제시한 값들보다 더 작게 될 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

솔레노이드 밸브를 사용한 유압위치제어 시스템에 두 종류의 단속적 제어를 적용하여 각각의 제어변수들과 부하조건이 시스템의 시간영역에서의 응답특성에 미치는 영향을 비교 연구하여 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 단순 온-오프(SOF)제어를 적용한 경우, 점성부하가 있거나 공급유량이 적은 때에 비교적 안정된 응답을 얻을 수 있었으나 그 외의 조건에서는 부하가 목표위치 전후로 요동하여 정정시간이 길어졌고 어느 조건에서도 정상상태 오차가 비교적 컸다.

(2) 맥동형 온-오프(POF)제어를 적용한 경우, 제어변수를 적정하게 선정하면 모든 부하조건에서 SOF 제어를 적용한 경우에 비해 정정시간이 훨씬 짧고 정상상태 오차도 크게 줄어든 양호한 응답을 얻을 수 있었다.

(3) POF 제어에서 주요 제어변수는 펄스 변조값  $\bar{a}$ 와 펄스 주파수  $f_p$ 이며 이 두 변수에 의해 결정되는 펄스 폭  $T_w(=\bar{a}/f_p)$ 의 크기가 시스템의 안정성 뿐만 아니라 정확도(정상상태 오차)에까지 영향을 미쳤고 바람직한 응답을 얻을 수 있는  $T_w$  값이 존재하였다. 나머지 제어변수인 펄스밴드  $\bar{b}$ 를 증가시키면 최대 오버슈트  $M_s$ 는 거의 비례적으로 감소하였으나 설정된  $\bar{b}$ 와 그 결과로 나타난  $M_s$ 의 상대적 크기는 정상상태 오차 및 정정시간과 상승시간에 영향을 미쳤다.

(4) 부하의 영향으로 질량부하가 있는 경우에는 무부하상태와 비교하여 응답특성상에 차이가 거의 없었으며, 점성부하가 있는 경우에는 다른 부하상태와 비교하여 최대 오버슈트는 약 1/2로 감소된 반면 상승시간은 약 2배로 증가하였다.

## 후 기

이 논문은 한국학술진흥재단의 1985년도 연구비에 의해 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Baeck, H.S., 1967, "Hydraulic On-Off Servo: Simple, Rugged Positioner", Control Engineering, Dec. pp.79~82.
- (2) Tanaka, H., Tanaka, H., Araki, K., Ogiura, Y. and Hamamoto, S., 1985, "Electro-Hydraulic Digital Servo-Mechanism by the Pulse Flow Control", Proc. Int. Symposium on Fluid Control and Measurement, Tokyo, Japan, pp.429~434.
- (3) Okada, Y., Matsuda, K. and Nagai, B., 1985, "Application of a High Speed Solenoid Actuator to Linear Hydraulic Servo-Mechanism", *ibid.*, pp.441~446.
- (4) McCloy, D. and Martin, H.R., 1980, Control of Fluid Power: Analysis and Design", 2nd ed., Ellis Horwood, pp.442~456.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Martin, H.A. and McCloy, D., 1971, "Some Aspect of the Response of Bistable Hydraulic Servos", 2nd Fluid Power Symposium, B.H. R.A., Cranfield, Bedford, England, pp. B3. 49~66.
- (8) 은탁, 1982, "공기압 위치제어 장치를 위한 맥동형 단속적 제어기술의 개발," 한국과학기술원 석사학위 논문, p.40.
- (9) Jung, W.G., 1974, IC Op-Amp Cookbook, Howard W. Sams, pp.218~221.
- (10) 안병홍, 1986, "단속적 제어에 의한 유압 서보 시스템의 과도 응답 특성 연구," 고려대학교 석사학위 논문, pp.36~42.
- (11) 이춘호, 1985, "유압 서어보 장치의 단속적 제어 방법에 관한 연구," 고려대학교 석사학위 논문, pp.22~26.