

PWM 제어 고속 온-오프 전자밸브에서 발생하는 압력맥동 저감 Pressure Ripple Reduction in High Speed On-Off Solenoid Valves Driven by PWM Control

김도태 · 이상권

D. T. Kim and S. K. Lee

Key Words : High Speed On-Off Solenoid Valve(고속 온-오프 전자밸브), Pulse Width Modulation(펄스폭 변조), Pressure Ripple Reduction(압력맥동 감쇠), Speed Control(회전속도 제어)

Abstract: This paper investigates a fast, accurate and inexpensive hydraulic motor speed control system using high speed on-off solenoid valves. In order to retain the advantages of the two position valve and obtain better performance, the valves are operated by pulse width modulation(PWM) control. PWM signal is generated from a LabVIEW program in microcomputer in order to set up various duty ratio and frequency of carrier wave in PWM signal with varying system parameters. As the results of experiments, the speed control of a hydraulic motor was successfully implemented using on-off solenoid valves. In order to attenuate the pressure ripple and speed variation due to discontinuously controlled flow through the on-off valves, a resonator hose fabricated for automobile power steering system was connected between the valve and a hydraulic motor. From experimental results obtained in the hydraulic motor system with a resonator hose, it was ascertained that the resonator hose showed excellent performances in reducing pressure ripple and motor speed variation.

1. 서 론

펄스 폭 변조(pulse width modulation; PWM)로 구동하는 고속 온-오프 전자밸브(high speed on-off solenoid valve)는 밸브 구동회로가 단순하고, 작동유의 오염에 강인하며, 마이크로컴퓨터와 적합성이 양호하여 디지털 제어를 쉽게 구현할 수 있다. 특히 밸브가 고속으로 온-오프 작동을 하여 유체 펄스열을 형성하고 그 펄스 폭을 제어함으로써 유량을 연속적으로 제어할 수 있기 때문에 유압시스템의 강한 비선형성에 대한 필터링 효과도 있다.

이 제어방식은 구조가 간단하고, 신뢰성이 높은 장점이 있지만¹⁻³⁾, 밸브 개폐에서 온-오프 전환시간(switching time)의 차이와 시간지연(time delay)이 있고, 온-오프 작동에 따라 작동유가 불연속적으로 흐르기 때문에 서보밸브나 비례전자밸브와 같이 연

속적으로 유량을 제어하는 것과 비교하면, 진폭이 비교적 큰 압력맥동(pressure ripple)이 발생하는 결점이 있다⁴⁾. 이러한 압력맥동은 유압모터 회전수 제어계에서 회전속도를 변동시킬 뿐만 아니라 기기나 시스템의 진동·소음원이 된다. 따라서 시스템의 저소음화와 제어성능 향상을 위해, 밸브 구동에 따른 압력맥동을 저감시키는 것이 중요하다.

본 연구에서는 PWM 제어로 구동되는 고속 온-오프 전자밸브를 사용한 유압모터 회전수 제어계에서, 전자밸브와 유압모터 사이를 연결하는 관로의 형상에 따른 압력맥동 저감 특성, 제어계의 정특성, 동특성을 실험으로 검토하였다. 또한 자동차 파워 스티어링용 유압호스를 사용하여, 온-오프 전자밸브에서 발생하는 압력맥동을 효과적으로 감쇠시키는 방안을 제안하였다.

2. 고속 온-오프 전자밸브의 구조

Fig. 1은 실험에 사용한 고속 온-오프 전자밸브(Nachi사, HS-G01-AR-D2(B)-10)의 구조이다. 이것은 2포트, 상시 폐쇄형(normal closed type) 포핏

접수일 : 2005년 4월 12일

김도태(책임저자) : 경일대학교 기계자동차학부

E-mail : dtkim@kiu.ac.kr, Tel : 053-850-7126

이상권 : (주) 신화테크

(poppet) 밸브이며, 전압이 공급되면 솔레노이드가 여자되어, 포핏이 밸브 시트로부터 열려, 작동유가 펌프포트(P)에서 부하포트(A)로 흐른다. 전류가 차단되면, 포핏은 스프링 힘으로 복원된다. 전자밸브에서 압력강하가 70bar일 때, 밸브를 통과하는 유량은 8ℓ/min 정도이다. 전자밸브의 스트로크는 0.3mm, 밸브 직경은 6mm이다. 이 밸브는 소형·경량이며, 비교적 응답성이 양호한 온-오프 전자밸브이고, PWM 제어의 변조율(duty ratio)을 제어하면 유량이나 압력을 비례제어할 수 있다. 또한 압력평형형 포핏 구조이고, 작동유 오염에 강인하며, 누설유량이 아주 적은 것이 특징이다. 활용분야는 건설기계, 차량 등의 원격제어용, 자동화, 로봇화의 전자 유압제어 서보 위치제어용, 산업기계, 공작기계용 소형 포핏형 솔레노이드 밸브용 및 각종 전자·유압 파일럿 제어 등에 사용하고 있다.

Table 1은 밸브의 주요 사양을 나타낸 것이다.

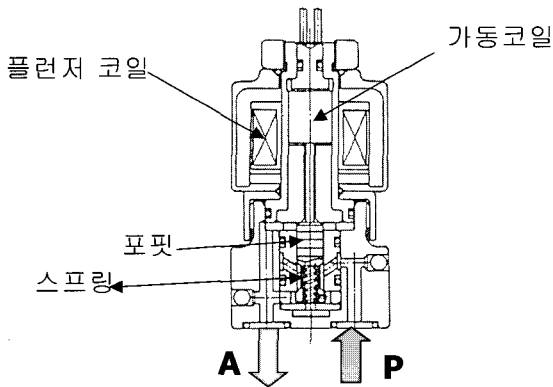


Fig. 1 High speed on-off solenoid valve

Table 1 Specifications of the high speed on-off solenoid valve

Valve spec.	Max. pressure	17.5MPa
	Max. flow Rated flow	8 ℓ/min 3 ℓ/min
	Flow configuration	normal closed
Solenoid spec.	Rated Voltage	12/24 V
	Rated Current	2.4/1.2 A
	Permissible voltage fluctuation	±10%
Performance	Max. switchover frequency	3,000cycle/min
	ON time OFF time	4~6(<10) ms 1.5~2.5(<10) ms
	Operating condition	Max. oil temp. Viscosity

3. 실험장치

3.1 PWM 신호 생성

PWM은 방형파나 톱니파를 반송파(carrier wave)로 하여, 아날로그 신호를 펄스폭으로 변조하는 방식이며, 에너지 효율이 높고, 열 발생이 적기 때문에 유공압의 디지털 제어에 활용하고 있다. 여기서는 PWM 제어의 인가 펄스폭을 조절함에 있어, 일정한 주기를 설정해 두고 오차량에 비례하여 변조율을 조절하는 방법을 사용하였다. 변조율은 일정한 반송파 주기에 대해 밸브가 열리는 시간 비율로 나타낼 수 있다.

PWM 신호는 마이크로컴퓨터에서 LabVIEW 프로그램으로 생성하였다. 이것은 PWM 신호발생에서 전자회로 방식 보다 제어계의 파라미터 변동에 따른 PWM 신호의 주기, 변조율 등을 쉽게 변경할 수 있어 유연한 제어와 연산처리가 가능하다.

3.2 실험장치

Fig. 2는 고속전자밸브를 사용한 유압모터 회전수 제어시스템 및 압력맥동 감쇠 특성을 조사하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 유압펌프·고속 온-오프 전자밸브·유압모터로 구성된 유압시스템과 PWM 신호 발생, 압력계측을 포함한 제어·계측부로 구성되어 있다. 유압펌프는 배제체적 8cc/rev인 사판식 피스톤 펌프, 유압모터는 배제체적 8.2cc/rev인 geroler형(EATON社, J-2 Series)을 사용하였다. 전자밸브는 유압모터의 입구와 출구에 각각 설치하여 미터 인(meter-in), 미터 아웃(meter-out)방식으로 유압모터의 회전속도를 제어할 수 있도록 하였다.

전자밸브 입구와 출구에는 압력변환기를 설치하여 압력변동을 측정하였다. 특히 전자밸브 (1)의 출구와 유압모터 입구를 연결하는 관로(Fig. 2의 hose부)를 바꾸어 가면서 전자밸브의 온-오프 구동에 따른 압력변동과 회전속도 변동을 측정하였다.

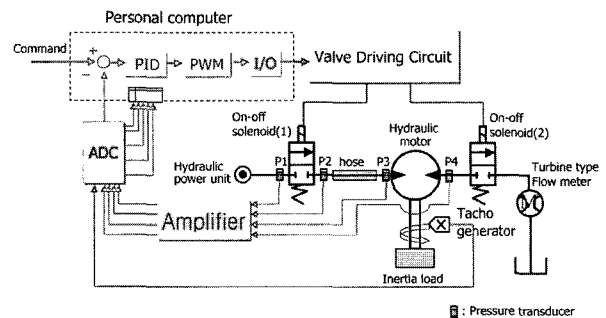


Fig. 2 Experimental apparatus

PWM 신호 발생부는 오차에 비례하는 변조율로 온-오프 펄스열로 변환시킨 후, 구동회로를 거쳐 고속 온-오프 전자밸브를 구동한다. 따라서 유압펌프에서 공급된 작동유의 유량은 PWM 제어의 변조율에 따라 제어되어 유압모터에 공급된다.

전자밸브 입·출구와 유압모터 입·출구의 압력은 고속 응답형 압력변환기와 고정밀도 증폭기를 사용하여 계측하였고, 유압모터의 회전수는 타코 제너레이터(tachogenerator)로 측정하여 피드백 신호로도 사용한다. 유량은 터빈형 유량계, 작동유의 온도는 더미스터형 온도계로 계측하였다. 입력신호, PWM 신호, 압력 및 회전속도는 12bit A/D 변환기를 거쳐 마이크로컴퓨터에 입력된다.

작동유는 고점도지수 유압작동유(HVI #46)를 사용하였고, 유온은 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하여 실험을 하였다. 실험은 고속 온-오프 전자밸브의 특성, 유압모터 회전속도 변동저감 특성, 유압모터 회전속도 제어성능에 대하여 수행하였다.

Fig. 3은 LabVIEW front panel을 나타낸 것이다. 여기서 실험에 필요한 파라미터, PWM 파형의 주기 및 변조율, 제어계의 이득 등을 유연하게 설정할 수 있으며, 계측파형을 모니터링 할 수 있는 장점이 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 PWM 제어 온-오프 전자밸브의 유량특성

Fig. 4 (a), (b), (c)는 공급압력(P_s) 70bar에서 PWM 반송파 주기 T_s 를 25ms, 50ms, 70ms로 변화시켰을 때, 밸브를 통과하는 유량을 측정하였다. 그림에서 보듯이, 주기가 25ms일 때, 변조율의 사용범위가 가장 좁으며 주기가 커질수록 변조율 사용범위가 커지는 반면에 압력맥동의 진폭이 커질 것으로

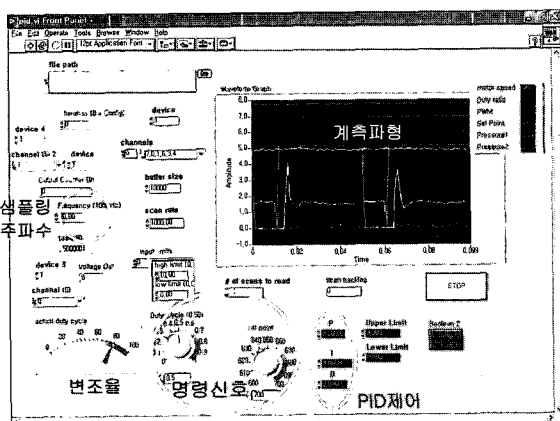


Fig. 3 LabVIEW front panel

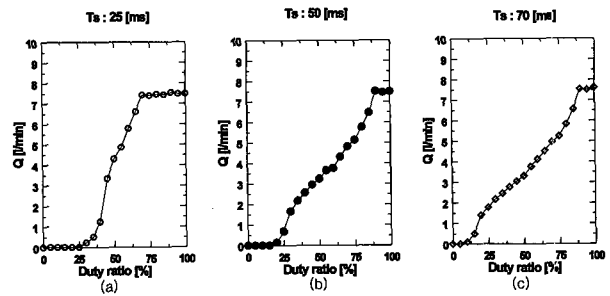
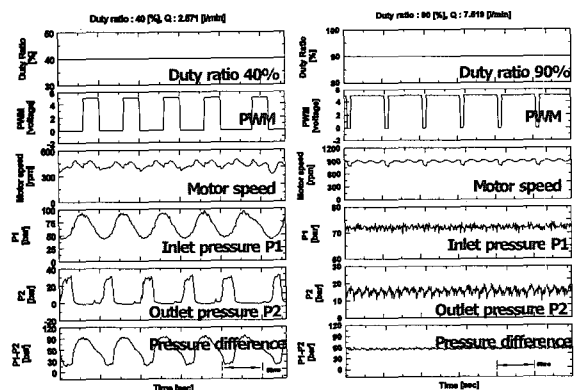


Fig. 4 Flow rate characteristics vs duty ratio

예측된다. 밸브에서 압력강하가 일정한 경우, 변조율이 약 50% 이상에서는 변조율에 따라 유량이 거의 선형적으로 증가하며, 변조율을 연속적으로 변화시킴으로써 유량을 비례적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 고속 온-오프 전자밸브의 압력맥동 저감

Fig. 5 (a), (b)는 전자밸브와 유압모터 사이를 일 반 유압용 고압호스로 배관하고, 공급압력 70bar, PWM 반송파의 주기 50ms에서, 변조율 40%, 90%인 경우에 대한 유압모터의 회전수, 밸브 입·출구 압력 계측 파형이다. (a)는 변조율이 40%이므로 반송파의 한 주기당 밸브가 약 20ms 동안 열린 상태로 되고, (b)는 한 주기당 45ms 동안 밸브가 열리기 때문에 변조율 증가에 따라 평균유량도 증가함을 볼 수 있다. 또한 변조율이 변하면 포핏을 개폐하는 PWM 제어 신호의 ON 시간이 변하기 때문에 전자밸브 입·출구에서 압력이 크게 변하며, 변조율 증가에 따라 압력맥동의 진폭은 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 발생된 압력맥동은 유압모터의 회전속도를 변화시켜 제어성능을 나쁘게 하는 하나의 원인이 된다. 따라서 고속 온-오프 전자밸브로 액추에이터를 제어할 때는 압력맥동을 저감시키는 것이 중요한 과제이다.



(a) duty ratio 40%

(b) duty ratio 90%

Fig. 5 The measured wave forms for hydraulic hose

Fig. 6 (a), (b), (c), (d)는 전자밸브와 유압모터 사이를 배관하는 관로형상과 변조율에 따라 유압모터의 회전속도 변동을 나타낸다. 첫 번째 파형은 일반 유압용 고압호스, 두 번째는 자동차 파워 스티어링의 배관에 사용하는 압력맥동 감쇠용 호스(이하 맥동감쇠용 호스), 세 번째는 맥동 감쇠용 호스 2개를 직렬로 배관한 경우이며, 변조율은 30%, 50%, 60%, 80%이다. 실험 결과, 맥동감쇠용 호스로 배관하였을 때 유압용 고압호스에 비교하여 진폭이 크게 감소함을 볼 수 있다. 맥동감쇠용 호스의 구조를 살펴보면, 바깥은 유압용 고압호스이고, 그 호스 안에 한쪽이나 양쪽 끝단이 지지되지 않은 금속관(flexible metal tube)을 삽입하여 2중 관로 형상인 환상형 관로를 형성하고 있다. 작동유는 주로 금속관으로 흐르고, 금속관 속의 압력과 환상형 관로 속의 압력이 상호 작용하여 압력맥동을 저감하는 것이다. 즉 맥동감쇠용 호스 속에서 압력파의 진행과 반사파가 상호 전달, 흡수, 반사되는 현상을 이용하여 압력맥동을 감쇠시키는 메커니즘으로 생각할 수 있다. 맥동감쇠용 호스 2개를 직렬 연결하였을 때, 회전속도 변동은 어느 변조율에서나 약 100rpm 이상 감소되는 것을 볼 수 있다.

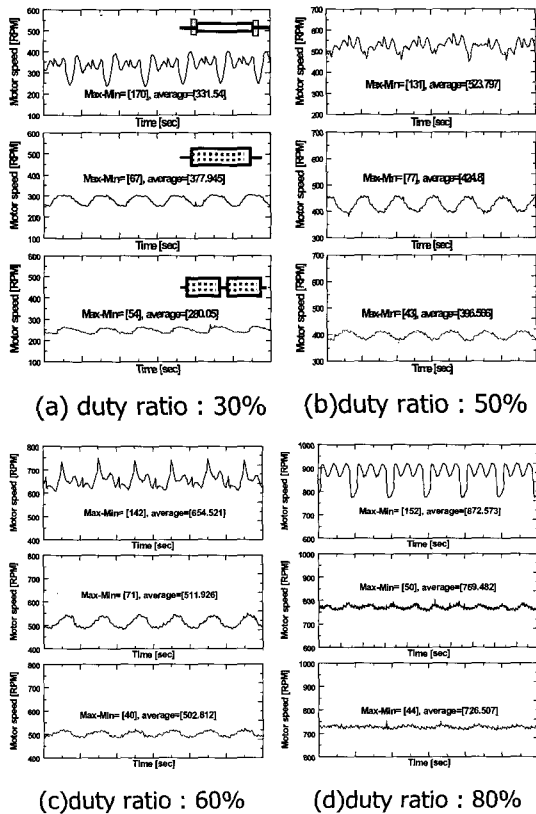


Fig. 6 Rotation speed fluctuation for various piping systems

Fig. 7은 공급압력 70bar, PWM 주기 50ms에 대해, 전자밸브와 유압모터를 연결하는 관로 형상에 따른 회전속도(N), 회전속도 변동(ΔN), 회전속도 변동률(δ_N)을 변조율에 따라 나타낸 것이다. 여기서 유압모터의 회전속도 N 은 평균 회전속도, 회전속도 변동은 유압모터의 회전속도 최대값과 최소값의 차이인 $\Delta N = N_{max} - N_{min}$, 회전속도 변동률은 회전속도 변동을 회전속도 평균값으로 나눈 값 $\delta_N = \Delta N / N_{mean}$ 으로 하였다. (a)에서 보면, 유압용 고압호스인 경우가 압력맥동 감쇠용 호스일 때 보다 같은 변조율에 대해 회전속도가 약간 높게 나타난다. 이것은 유압용 고압호스인 경우, Fig. 6에서 보듯이 회전속도 변동의 진폭이 크기 때문에 나타나는 현상이며, 관로 형상에 따른 영향으로는 볼 수 없다. (b), (c)에서 볼 수 있듯이, 맥동감쇠용 호스를 사용한 경우, 유압모터의 회전속도 변동이 크게 감소하며, 속도 변동률은 변조율이 커짐에 따라 감소하는 경향을 나타낸다.

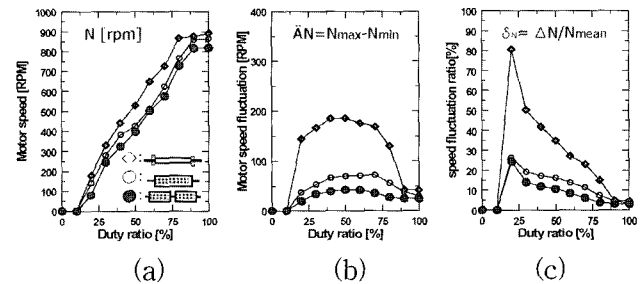
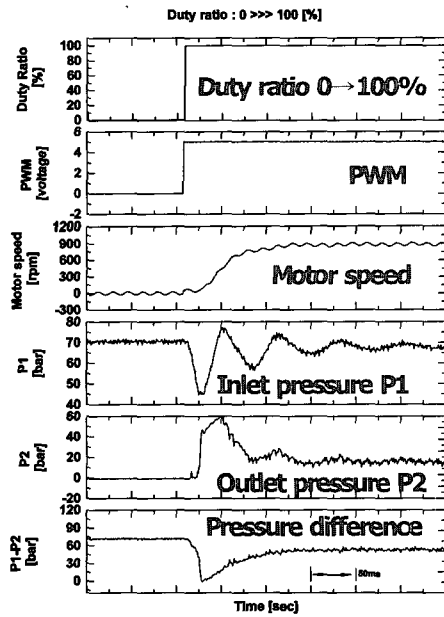


Fig. 7 Rotation speed variation vs duty ratio

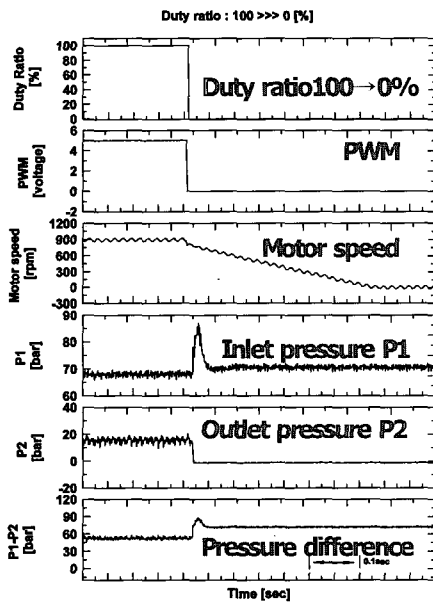
4.3 유압모터 회전속도 제어계의 특성

Fig. 8은 일반 유압용 고압호스로 배관하여 공급압력 70bar, PWM 반송파의 주기 50ms, 개루프 제어인 경우, (a)는 변조율을 0%에서 100%, (b)는 100%에서 0%로 인가하였을 때의 계측파형이다. 과도응답 특성에서, 회전속도가 0rpm에서 500rpm까지 급상승하는 (a)와 900rpm에서 0rpm으로 급감소하는 (b)를 비교해 보면, PWM 신호가 ON되어 모터 회전수가 계단 응답과 같이 상승할 때는 하강할 때보다 시간지연(time delay)의 영향이 크게 나타난다. 이것은 Table 1에서 알 수 있듯이 밸브가 열리는 시간(ON)이 닫히는 시간(OFF) 보다 시간 지연이 길기 때문이며, (b)에서 유압모터의 회전속도가 서서히 감소하는 것은 유압모터에 작용하는 관성부하의 영향으로 생각된다. 또한 (a)에서 전자밸브 전후의 압력과 압력차를 보면, 밸브 동작과 함께 빠르게 응답하여 부하를 구동하여야 하므로 압력변동이 크다. (b)는 관성부하가

정지할 때까지 모터의 회전속도는 일정하게 감소함을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 Transient response for step input

Fig. 9는 공급압력 70bar, 주기 50ms에서 변조율 60%에서 80%로 계단 입력한 경우, 관로 형상에 따른 회전속도 응답이다. 첫 번째 파형은 일반 유압용 고압호스로 배관한 경우이며, 속응성은 양호하지만 정상상태에서 회전속도의 변동이 크다. 그러나 회전속도의 변동률을 줄이기 위해 압력맥동 감쇠용 호스로 배관한 두 번째와 세 번째 파형을 비교해 보면,

고압호스로 배관하였을 때 나타나지 않는 오버슈트(overshoot)가 나타난다. 이것은 맥동감쇠용 호스 속에 있는 금속관의 영향으로 생각된다. 맥동감쇠용 호스 2개를 직렬로 연결한 세 번째 파형에서는 이러한 영향이 더욱 크게 나타난다. 따라서 맥동감쇠용 호스로 온-오프 전자밸브에서 발생하는 압력맥동을 제거할 때는 이러한 점을 고려하여야 한다. 향후 이러한 문제점을 해결하기 위한 맥동감쇠용 호스의 설계와 제작에 대해 검토할 예정이다.

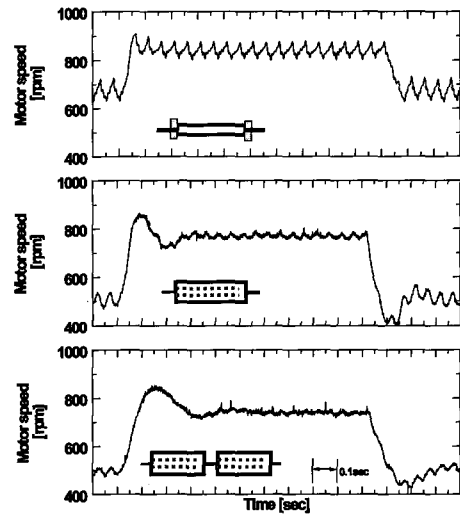


Fig. 9 Step response for various piping system

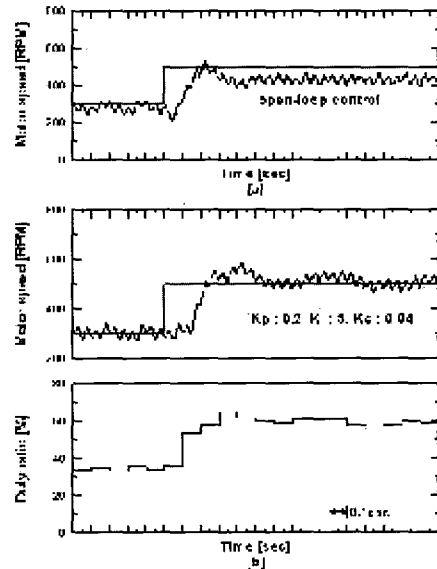


Fig. 10 Step response for open and PID control

Fig. 10은 유압모터의 회전수가 300rpm에서 500rpm으로 계단 입력하였을 때, 관성부하가 작용할 때 개루프 제어와 PID제어의 계측파형을 나타낸다. (a)에서 보듯이 개루프인 경우, 정상 편차가 약

70rpm 정도 생긴다. PID 제어인 (b)는 목표값에 추종하기 위해 PWM의 변조율이 세 번째 파형과 같이 변하여 정상상태 오차가 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 11은 공급압력 70bar, PWM 제어 반송파의 주기 50ms, 유압모터의 회전수가 500rpm으로 일정한 상태에서 외란 토크($T_L = 6.1 \text{ N}\cdot\text{m}$)을 순간적으로 부가하였을 때, 회전속도 제어계의 응답특성이다. 개루프 제어는 외란 토크에 대해 목표값을 추종하지 못하여 약 130rpm 정도의 정상오차가 발생함을 볼 수 있다. PID제어에서는 개루프와 같은 크기의 외란 토크($T_L = 6.1 \text{ N}\cdot\text{m}$)가 부가되었을 때, PID 제어에서는 PWM 제어의 변조율이 증가하여 약 0.5초 이내에 외란 토크의 영향이 제거되고, 정상오차도 발생하지 않는 것을 볼 수 있다.

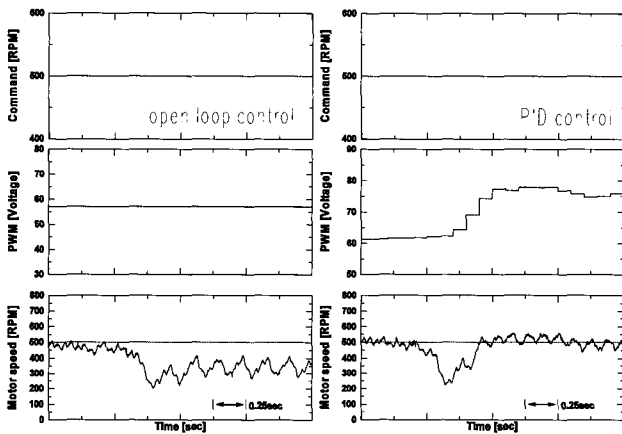


Fig. 11 Disturbance rejection for open and PID control

5. 결 론

본 연구에서는 PWM 제어 고속 온-오프 전자밸브로 구동되는 유압모터의 회전수 제어계에 대해, 밸브 작동에 따른 압력맥동 저감 특성, 시스템의 정특성 및 동특성에 대하여 실험적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고속 온-오프 전자밸브 구동용 PWM 신호발생기를 LabVIEW S/W로 구축하여 시스템 변동에 따른 PWM 반송파의 주기, 변조율 등의 변경이 용이하며, 제어의 유연성을 확보하였다.

(2) PWM 제어 고속 온-오프 전자밸브에서는 유량이 불연속적으로 흘러 압력맥동이 발생하지만, 압력맥동 감쇠용 호스를 사용하여 효과적으로 제거할 수 있었다.

(3) 유압모터의 회전속도 제어계에 PWM 제어와 PID 제어를 적용하여 외란제거 능력, 과도응답 및 정상상태 응답이 개선되었다.

향후 유압모터 회전속도 제어계에 대한 강인제어 알고리즘 보완 및 온-오프 전자밸브의 절환시간 단축 방안에 대하여 검토할 예정이다.

참 고 문 헌

- 1) H. Tanaka, H. Tanaka and K. Araki, "Electro-Hydraulic Digital Control of 3-Way On/Off Solenoid Valves", Trans. of JSME (B) (in Japanese), Vol. 50, No. 458, pp. 2663~2666, 1984.
- 2) Y. Suematz, H. Yamada, T. Tsukamoto and T. Muto, "Digital Control of Electrohydraulic Servo System Operated by Differential Pulse Width Modulation" JSME Int. J. Series C, Vol. 36, No.1, pp. 61~68, 1993.
- 3) 이일영, 권정호, 박정환, "고속 온·오프 전자밸브를 사용한 유압실린더의 힘 제어계의 응답성 개선", 유공압시스템학회지, Vol. 1, No. 4, pp. 15~21, 2004.
- 4) H. Yanada and Y. Yamamoto, "Speed Control of a Hydraulic Motor Using an On/Off Solenoid Valve", Trans. of JSME (B) (in Japanese), Vol. 56, No. 521, pp. 88~93, 1990.