

고속 온·오프 전자밸브를 사용한 유압실린더 힘 제어계의 응답성 개선

Response Improvement in Hydraulic Cylinder Force Control System by Using a High Speed On-Off Electro-Magnetic Valve

이일영 · 권정호 · 박정환

I. Y. LEE, J. H. Kwon and J. H. Park

Key Words : High Speed On-Off Electro-Magnetic Valve(고속 온·오프 전자밸브), Valve Driver Circuit(밸브 드라이버 회로), Three Power Source Type Driver(3 전원형 드라이버)

Abstract: High speed on-off electro-magnetic valves have been used for pressure control or flow control in automotive or construction machine servomechanisms. These systems require quicker valve switching speed to improve control preciseness. The authors designed and manufactured an electric valve driver with quick response characteristics by using 3 power source type valve driver concept. In experiments by using a hydraulic system incorporating the new valve driver, the new driver shortened the switching lag time from 5 ms to 1.3 ms. And also the new driver showed excellent position tracking control performances.

기호 설명

고속 온·오프 전자밸브를 펄스 폭 변조(PWM) 신호에 의하여 고속으로 개폐함으로써 유체 펄스 열을 만들어서 평균적인 유압출력을 제어하는 유체 펄스 변조 제어법은 컴퓨터와의 적합성이 우수하고 작동 신뢰성이 높은 특징이 있어 자동차, 건설기계 등의 전자유압제어에 널리 사용되고 있다. PWM 제어에 의한 전자유압 서보 기구에서는 변조 주파수를 높임에 따라 제어 정밀도가 높기 때문에 전기적 입력 신호에 대하여 신속히 동작하는 고속응답밸브가 필요하다.¹⁾

일반적으로 고속응답밸브에서 응답 지연에는 솔레노이드의 인덕턴스에 의한 전류 응답의 지연이 주된 원인으로 작용한다. 따라서 밸브의 정격 제어 용량을 유지하면서도 고속화를 달성하려면 솔레노이드를 여자하는 전자회로를 개선하여 응답 지연을 전기적으로 보상하는 방법이 효과적이다.²⁾ 솔레노이드의 인덕턴스에 의한 전류 응답의 지연을 보상하는 밸브

구동회로는 솔레노이드 전류 피드백에 의한 정전류형(constant current type) 회로³⁾, 3전원형(3 power source type) 회로⁴⁾ 등이 알려져 있다. 이러한 전류 응답 지연 보상회로 가운데서 3전원형이 매우 효과적인 방법으로 알려져 있으나, 상기의 문헌⁴⁾에도 그 구체적인 전자회로는 소개되어 있지 않으며, 3전원형 회로 사용시 회로 구동에 관련된 물리인자들의 변화에 따른 유압제어계의 성능 변화 등에 대한 정보가 구체적으로 알려져 있지 않다. 따라서 고속 온·오프 전자밸브 사용자들이 상기의 3전원형 회로를 활용하기가 매우 어려운 것이 현재의 실정이다.

이 연구에서는 종래의 달링턴 회로를 사용한 일반적인 고속 온·오프 전자밸브용 드라이버인 정전압형 밸브 드라이버와 3전원형 회로에 기초하여 본 연구자들이 설계, 제작한 드라이버를 사용하여 고속 온·오프 전자밸브를 구동했을 때의 밸브 응답 특성을 실험적으로 조사하여 보고하기로 한다. 실험에 사용한 밸브는 Nachi-Fujikoshi 사가 제조한 3방향형 고속 온·오프 전자밸브^{5,6)}이며, 부하계로는 스프링 부하를 갖는 편로드 유압실린더를 사용하였다. 대상 유압계에서의 전류, 압력, 피스톤 변위의 개루프 응답과 위치 추종 폐회로 제어시의 응답 등의 제시를 통하여 밸브 드라이버의 차이에 따른 유압계의 성능 차이를 명확히 기술하기로 한다.

접수일 : 2004년 10월 25일

이일영(책임저자) : 부경대학교 기계공학부

E-mail : iylee@pknu.ac.kr, Tel : 051-620-1612

권정호, 박정환 : 부경대학교 기계공학부 메카트로닉스공학전공

2. 대상 밸브 및 밸브 드라이버 회로의 특징

2.1 대상 고속 온·오프 전자 밸브

이 연구에서 사용하는 밸브는 Nachi사가 제조한 3방향형 고속 온·오프 전자 밸브이며, 그 전체 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 이 밸브는 밸런스형 포핏 밸브와 솔레노이드로 구성된 2위치 3방향 밸브이며, Fig. 2는 이 밸브의 포핏부 구조에 대한 이해를 돕기 위한 그림이다.

대상 밸브는 정격전압 및 전류가 12/24 V, 2.4/1.2 A, 제품규격서상의 밸브 개방시간(T_{on}) 및 밸브 폐쇄시간(T_{off})는 각각 4~6 ms와 1.5~2.5 ms, 최고압력 170 bar, 최대/정격유량 8/3 l/min, 코일 저항(20°C에서) 5 Ω이다.

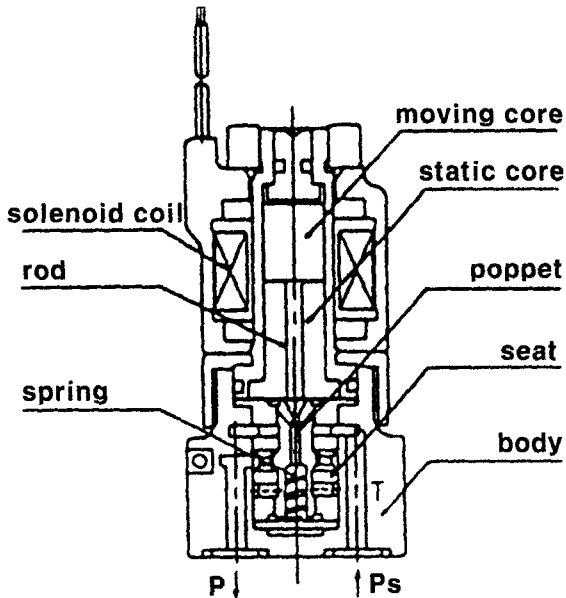


Fig. 1 High speed on-off electro-magnetic valve [3 way 2 position type]

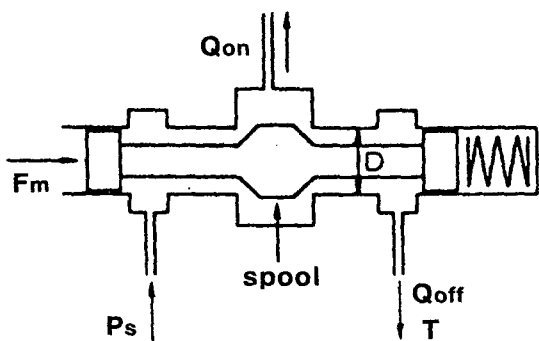


Fig. 2 Structure of the poppet portion of the valve shown in Fig. 1

2.2 밸브 드라이버 회로

Fig. 3은 달링턴 회로를 사용한 종래의 일반적인 고속 온·오프 전자밸브용 정전압형(constant voltage type) 구동회로[이후 드라이버 (1)로 칭함]의 회로도이며, Fig. 4에는 3전원형(3 power source type) 구동회로의 전류응답 개선 원리, Fig. 5는 3전원형 회로의 작동원리에 기초하여 본 연구자들이 설계, 제작한 구동회로[이후 드라이버 (2)로 칭함]의 회로도를 나타낸 것이다. Fig. 6은 제작한 드라이버 (2)의 사진이다.

Fig. 3에 나타낸 드라이버 (1)의 회로 사용시에는 밸브 솔레노이드에 계단상으로 정격 전압신호(on 신호)를 가했을 때에 코일의 인덕턴스 성분 때문에 밸브 개방 시간이 다소 지연되며, 전압공급을 차단했을 때는 코일을 통하여 흐르던 전류의 관성에 의하여 서지(surge) 전압이 발생할 수 있다.

Fig. 4에는 드라이버 회로에 가해지는 입력 전압 신호, 드라이버 회로(2) 사용시 솔레노이드에 가해지는 전압신호(오버슈트 및 언더슈트가 부가된 전압신호), 코일을 통하여 흐르는 전류신호[드라이버(2) 사용에 따른 전류응답의 개선 형태]를 나타내었다.

Fig. 5에 나타낸 드라이버 (2)의 회로는 솔레노이드에 3종의 전압을 가할 수 있는 트랜지스터 회로로 제작하였다. 코일에 20Ω의 저항을 직렬로 연결함으로써 전압 인가 초기에 비교적 높은 전압을 인가하면서도 정상상태 전류치를 정격치 이하로 제한하고, 큰 역기전력의 발생이 없도록 설계하였다. 또한 전압공급 차단시에 코일을 통하여 흐르던 전류의 관성에 의하여 발생하는 서지 전압으로부터 트랜지스터를 보호할 목적으로 솔레노이드 코일에 병렬로 다이오드 및 저항을 설치하였다. 드라이버 (2)의 회로는 Fig. 4에서 보는 바와 같은 오버슈트 전압 존속 시간(T_{os}), 언더슈트 전압 존속 시간(T_{us}), PWM 신호 듀티 시간(duty time)을 설정하고, PWM 신호를 생성하는 기능을 갖는 마이크로프로세서(ATMega 128), 신호증폭용 달링턴 회로(ULN 2803) 등으로 구성하였다.

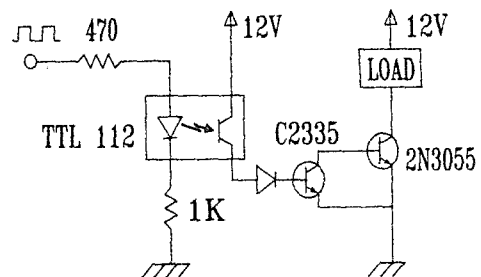


Fig. 3 Electric circuit of the driver (1)

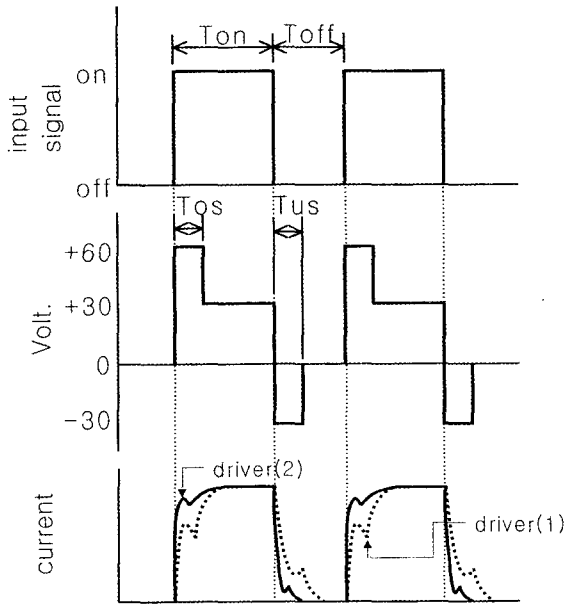


Fig. 4 Pattern of electric switching transients [showing improvement of current response by the driver (2)]

3. 실험장치 및 실험 방법

3.1 실험장치

Fig. 7 및 Fig. 8은 실험에 사용한 유압 시스템의 회로도 및 실험장치의 사진을 나타낸 것이다. 유압실린더 헤드측 단면적은 10 cm², 초기체적 즉, 실린더 내 압력이 0 bar일 때의 체적이 30cm³, 부하 발생용으로 사용한 코일 스프링의 탄성계수는 84,880 N/m이며, 유압실린더는 저마찰형으로 제작된 실린더

이다. 실험에서 계측하는 신호는 컴퓨터로부터의 출력전압, 솔레노이드로 공급되는 전압 및 전류, 실린더 내 압력, 피스톤 변위의 5종이다. 전류측정에는 응답시간 5 μs의 유도형 전류계를 사용하였다.

3.2 실험 방법

실험은 크게 나누어서, i) 드라이버 (1) 및 (2) 사용시 밸브 솔레노이드의 전류 응답, 압력 응답의 측정, ii) 드라이버 (2) 사용시 오버슈트 전압 존속시간 (T_{os}), 언더슈트 전압 존속 시간(T_{us}) 변화에 따른 밸브 개방 및 폐쇄 시간의 측정, iii) 드라이버 (1) 및 (2) 사용시 듀티 비 변화 및 반송 주파수 변화에 따른 실린더 변위(평균압력에 비례함) 측정, iv) 펌프 제어에 의한 실린더 변위(평균압력에 비례함) 추종 성능 측정 실험으로 구분된다.

컴퓨터로부터 제어 입력신호로서 DC 0~10 V의 연속 신호가 밸브 드라이버로 가해지며, 밸브 드라이버 (2)에서는 입력 신호에 비례한 0~100%의 듀티비를 갖는 PWM 신호가 마이크로프로세서(ATMega 128)에 의하여 소프트웨어적으로 생성된 신호가 달링턴 회로로 출력되고, 이 신호에 의하여 최종적으로 트랜지스터 회로가 작동하여 솔레노이드로 전류가 공급된다.

밸브 드라이버 (1)의 회로는 별도로 제작하는 대신에 Fig. 5의 회로를 일부 변경함으로써 실현하였다. 즉 솔레노이드에 직렬 연결된 20 Ω의 저항은 점프시키고, 솔레노이드에 병렬로 연결된 서지 전압 억제용 다이오드 경로를 해제하였으며, 3전원 회로의

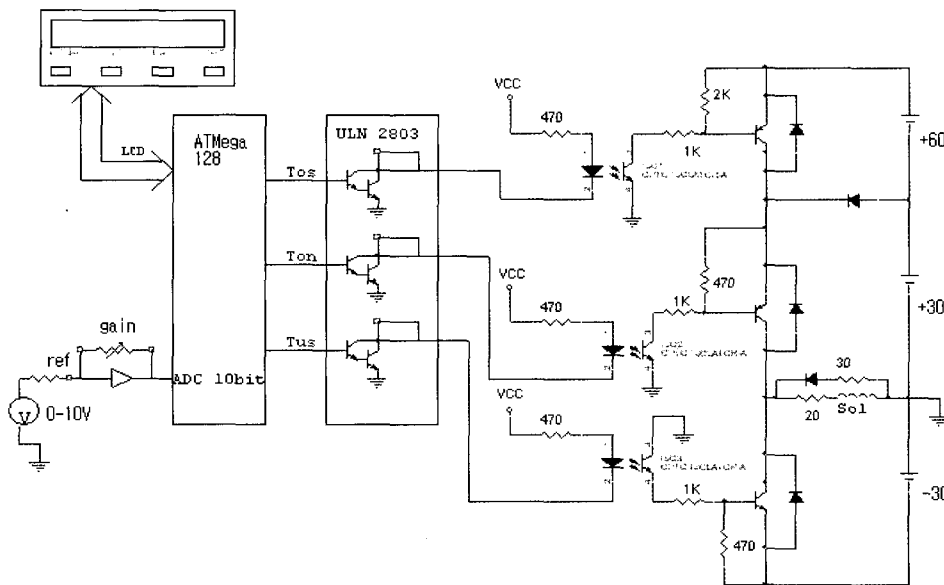


Fig. 5 Electric circuit of the driver (2)

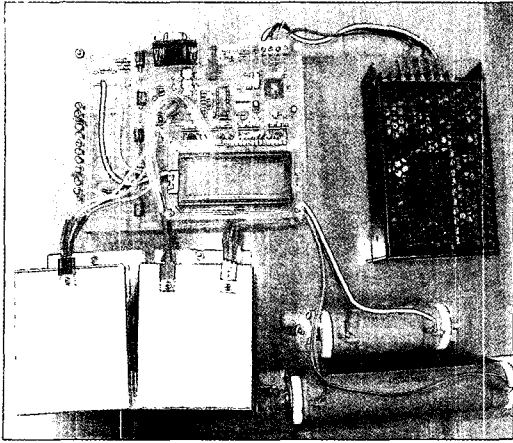


Fig. 6 Photograph of the driver (2)

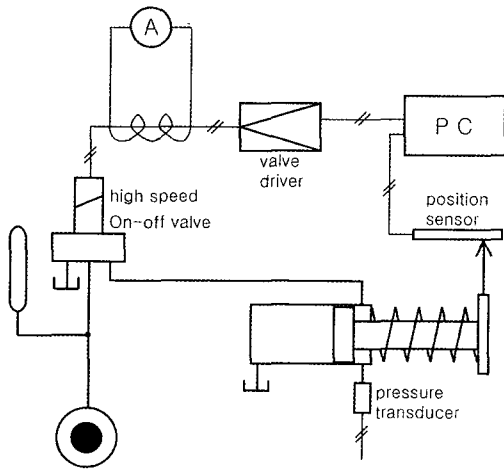


Fig. 7 Configuration of the test system

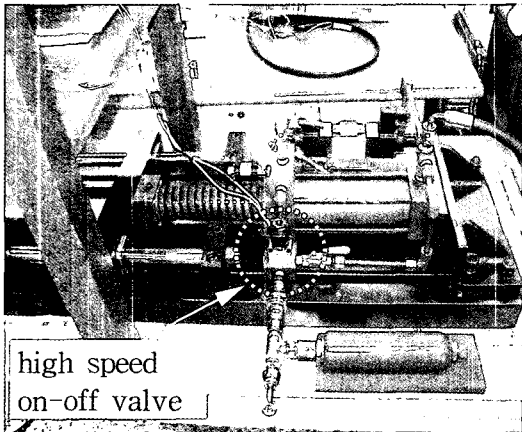


Fig. 8 Photograph of the test system

+60, +30, -30 V 전원 투입 단자 가운데서 +30 V 단자에만 +12 V를 가하고, 나머지 전원회로는 개방함으로써 실현하였다.

실험시 각종 신호의 계측에는 별도의 계측용 컴퓨터를 사용하여 데이터를 취득하고 저장하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 밸브의 응답성

Fig. 9는 Fig. 7의 실험장치에서 밸브 드라이버 (1)을 사용하여 개루프 상태로 고속 온·오프 밸브를 구동했을 때 코일에 가해지는 전압 V_c , 코일을 통하여 흐르는 전류 I_c , 유압실린더 내 압력 p 의 계측치를 나타낸 것이다. 이 때 PWM 반송파 주파수는 30 Hz, 듀티 비는 80 %, 펌프로부터의 공급압력 p_s 는 80 bar로 하였다. 계측 결과로부터 전류 응답에 시간 지연이 발생하며, 전압 차단시에 부의 방향으로 절대치가 큰 서지 전압이 발생하고 있음을 알 수 있다. 전자밸브의 개방 시각은 전류 파형으로부터, 밸브 폐쇄 시각은 전압 파형으로부터 계측이 가능한 것으로 알려져 있다.^{3,4)} 계측된 전류 파형에서 전류 흐름 개시 후 약 5 ms의 시점에서 전류치가 감소하며, 이러한 현상은 플런저의 이동에 따라서 코일에 발생하는 역기전력이 변화함에 따라 발생한다. 이 시점에서 밸브가 개방되기 시작함을 압력 파형으로부터도 확인할 수 있다. 이 때의 지연 시간을 밸브 개방 지연 시간 T_{on} 이라 부르기로 한다. 그 후 다시 전류치가 상승하기 시작하는 점이 플런저 및 포켓의 이동이 완료되는 시점이다. 전압 차단시의 전압 파형에는 서지 전압이 발생하고, 서지 전압이 소멸하는 과정에서 전압 파형 기울기가 급격하게 변화하는 곳(전압 차단 후 약 2.2 ms의 시점)이 존재하며, 이것은 플런저가 이동하면서 역기전력이 변화함에 따른 현상이다. 이 실험에서 드라이버 (1) 사용시의 밸브 개방 및 폐쇄 지연 시간인 T_{on} , T_{off} 는 각각 5 ms와 2.2 ms로 나타났다.

Fig. 10에는 3전원형인 밸브 드라이버 (2)를 사용하여 개루프 상태로 고속 온·오프 밸브를 구동했을 때 코일과 직렬 연결 저항 결합체에 가해지는 전압 V_c , 코일을 통하여 흐르는 전류 I_c , 유압실린더 내 압력 p 의 계측치를 나타내었다. 이 때 PWM 반송 주파수는 100 Hz, 듀티 비는 80 %, 공급압력 p_s 는 80 bar로 하였다. 이 실험에서는 +60 V의 오버슈트 전압을 가하는 시간 T_{os} 를 2 ms로, -30 V의 언더슈트 전압을 가하는 시간 T_{us} 를 2 ms로 설정하였다. 밸브 개방 지연 시간 T_{on} 이 1.1 ms로 나타났으며, 오버슈트 전압의 공급으로 드라이버 (1)에 비하여 T_{on} 이 대폭 단축되었음을 알 수 있다. 밸브 폐쇄 지연 시간 T_{off} 는 2.1 ms로 계측되었으며, 드라이버

(1)에서와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이러한 결과는 드라이버 (2) 회로에서는 전압공급 차단시에 발생하는 서지 전압으로부터 트랜지스터를 보호할 목적으로 솔레노이드 코일에 병렬로 다이오드 및 저항을 설치하였기 때문이며, 보호회로의 영향을 I_c 의 기록으로부터도 확인할 수 있다.

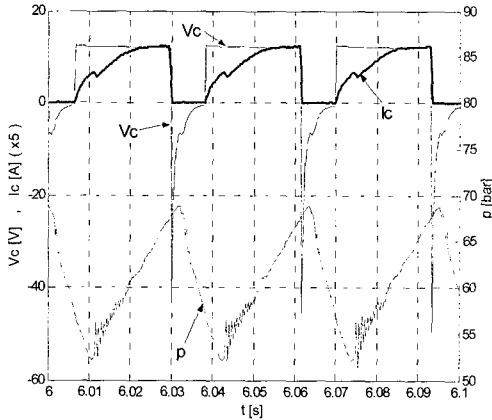


Fig. 9 Measured voltage (V_c), electric current (I_c) in the driver circuit and pressure in the cylinder (p) [driver(1)]

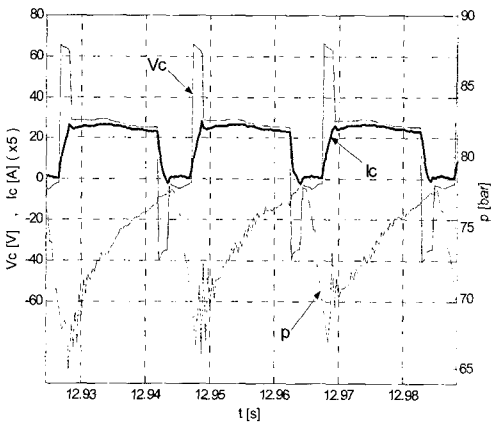


Fig. 10 Measured voltage (V_c), electric current (I_c) in the driver circuit and pressure in the cylinder (p) [driver(2)]

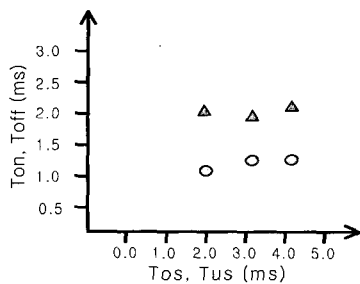


Fig. 11 Measured switching lag time [T_{on} (●) versus T_{os} , T_{off} (▲) versus T_{us}]

Fig. 11은 밸브 드라이버 (2) 사용시의 밸브 개방 지연시간 T_{on} 및 폐쇄 지연시간 T_{off} 를 나타낸 것이다. Fig. 10에서와 동일한 실험 조건에서 데이터를 계속하되 T_{os} 및 T_{us} 를 변경시키면서 실험을 수행하였으며, T_{os} 가 2~4 ms의 범위에서 T_{on} 이 1.3 ms 이하, T_{us} 가 2~4 ms의 범위에서 2.1 ms 이하로 나타났다.

4.2 정상상태 압력 제어 특성

드라이버 (1) 및 드라이버 (2) 사용시에 듀티 비 변화에 따른 실린더 변위의 정상상태 특성을 Fig. 12에 나타내었다. 실험에 사용한 유압 시스템이 스프링으로 지지된 저마찰형 유압실린더이기 때문에 이 실험에서 기록된 변위는 근사적으로 평균압력과 비례 관계를 갖는다. 실험 결과로부터, 드라이버 (1)로는 PWM 신호를 100 Hz로 구동시에 응답 가능 듀티 비의 범위가 매우 좁음을 알 수 있다.

4.3 위치 추적 제어 특성

Fig. 13, 14 및 15는 대상 유압시스템에 PI 제어를 적용하여 목표 변위(계단상으로 0→4 cm를 움직여서 7초 동안 유지한 이후에 0.5초 동안에 0.5 cm의 거리를 등속도로 이동한 후 그 위치에 머무르는 변위 궤적)을 추적하는 폐회로 제어를 수행했을 때의 계측 결과를 나타낸 것이다. 실험에서 공급압력 p_s 는 50 bar, 비례제어 게인 K_p 및 적분제어 게인 K_i 는 각각 30 및 20로 설정하였으며, 제어의 루프 시간은 1 ms로 하였다. 또한, 드라이버 (2) 사용시의 T_{os} 및 T_{us} 는 공히 2 ms로 설정하였다. PI 제어에서 와인드업(wind-up) 현상 방지를 위하여 제어 출력이 포화할 동안에는 적분제어 기능을 중지시켰다.

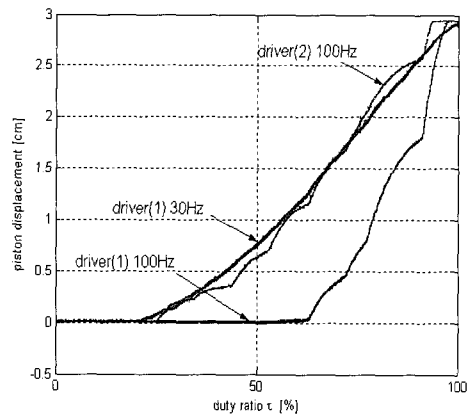


Fig. 12 Steady state pressure control characteristics in the test system [p_s : 50 bar, T_{os} and T_{us} in Driver (2): 2 ms as the same value]

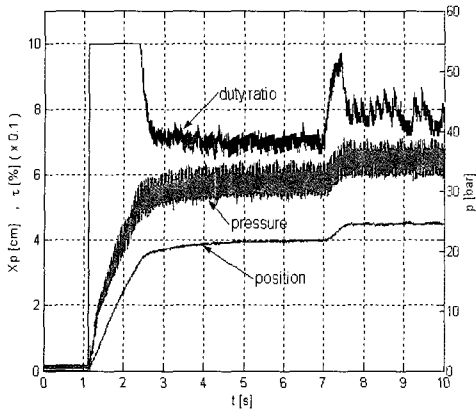


Fig. 13 Position tracking control characteristics in the test system [driver (1), carrier wave frequency 30 Hz, PI controller with K_p : 30, K_i : 20]

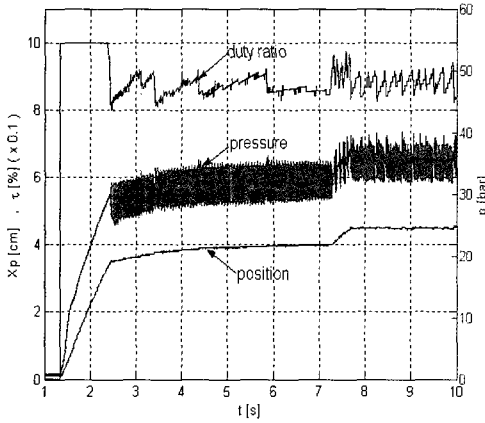


Fig. 14 Position tracking control characteristics in the test system [driver (1), carrier wave frequency 100 Hz, PI controller with K_p : 30, K_i : 20]

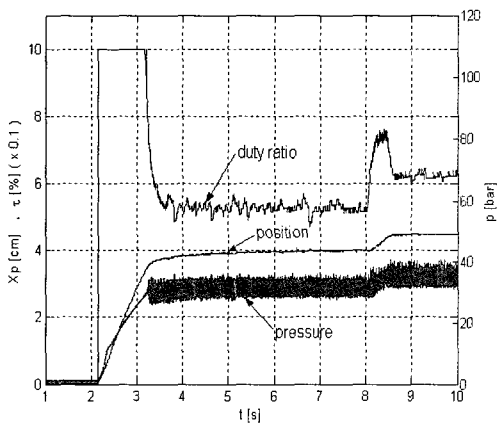
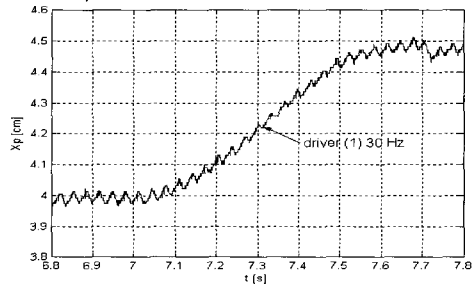


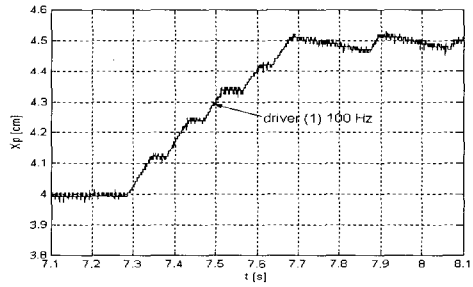
Fig. 15 Position tracking control characteristics in the test system [driver (2), carrier wave frequency 100 Hz, PI controller with K_p : 30, K_i : 20]

Fig. 13, 14 및 15를 비교할 때 위치 추적 성능에서는 그다지 큰 차이를 나타내지는 않았으며, 어느 경우에서나 피스톤 위치의 최종 목표치를 정상편차 없이 추적할 수 있음을 보였다. Fig. 14에서는 다른 경우에 비하여 듀티 비가 큰 값으로 나타났으며, 이는 Fig. 12에서 보는 바와 같이 드라이버 (1)로 PWM 신호 100 Hz로 구동시의 응답 가능 듀티 비의 범위가 좁기 때문이다.

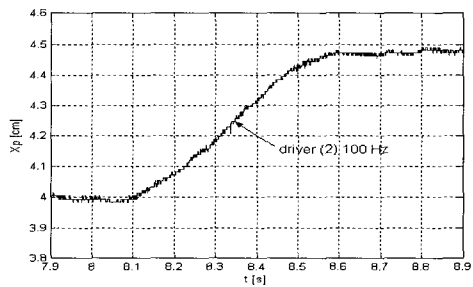
Fig. 16은 Fig. 13, 14 및 15에서 위치 신호의 목표치가 0.5초 동안에 0.5 cm의 거리를 등속도로 이동하는 구간에서의 위치 신호 계측치를 확대하여 나타낸 것이다. 이 그림의 (a), (b), (c)를 비교해보면 밸브 드라이버 (2)를 100 Hz로 구동하여 제어를 수행한 (c)의 경우[Fig. 15의 위치신호 확대]에서 가장 정밀한 제어가 수행되었음을 알 수 있다.



(a) X_p in Fig. 13



(b) X_p in Fig. 14



(c) X_p in Fig. 15

Fig. 16 Partial enlargement of position X_p curves in Fig. 13, 14 and 15

5. 결 론

이 연구에서는 고속 온·오프 전자밸브 구동을 위하여 종래에 사용해 온 정전압형 밸브 드라이버와 3전원형 회로에 기초하여 본 연구자들이 설계, 제작한 드라이버를 사용하여 고속 온·오프 전자밸브를 구동했을 때의 밸브 응답 개선 특성을 실험적으로 조사하여 보고하였다. 이 연구에서 설계, 제작한 3전원형 드라이버 사용시의 밸브 개방 시간은 1.3 ms 정도, 폐쇄 시간은 2.1 ms 정도였다. 따라서 밸브 개방 시간은 종래의 정전압형 드라이버에 비하여 1/5 정도로 대폭 단축되었음을 알 수 있다.

또한, 설계, 제작한 밸브 드라이버를 실제 유압 시스템 제어에 적용하여 정상상태 제어 특성, 펄스폭 위치추적 제어 특성을 조사하였으며, 3전원형 드라이버인 드라이버 (2)를 사용하였을 때에 더욱 우수한 위치 추적 제어가 가능함을 확인하였다.

끝으로, 이 연구에 사용된 밸브 드라이버 하드웨어 제작에 도움을 받은 Digix사 김기열 실장께 감사드린다.

참 고 문 헌

- 1) H. Tanaka, "A Study on High Speed Electro-Magnetic Valve", Trans. of JSME, Vol. 50, No.475C, 1984.
- 2) Y. Okada, K. Matsuda and B. Nagai, "Development of a High Speed Solenoid Actuator and the Application to a Linear Servo-Valve", Journal of JHPS, Vol. 16, No. 4, pp. 281~287, 1985.
- 3) K. Araki, "On Electro-Hydraulic Digital Interface Valve System -HYDIS-", Fujikoshi Technical Reviews, Vol. 42, No. 1, pp.51~66, 1986.
- 4) Y. Sato, S. Sato and H. Tanaka, "High Speed Switching of a High Response On/Off Solenoid Valve", Proceedings of JSME Mechanics and Control Conference '93, Vol. B, Paper No. 930-42, pp. 560~565, 1993.
- 5) www.nachi-fujikoshi.co.jp/eng/yua/valve/car01a.html.
- 6) H.-S. Jung, H.-E. Kim, "Experimental Based Analysis of the Pressure Control Characteristics of an Oil Hydraulic Three-Way In/Off Solenoid Valve Controlled by PWM Signal", Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 124, pp. 196~205, 2002.