

고속응답 전자밸브에 의한 유압 모터계의 PWM 제어

PWM Control of Hydraulic Motor Systems Using High Speed Solenoid Valves

김 도 태 (경일대 기계공학부), 이 왕 성* (경일대 대학원)
D. T. Kim (Kyungil Univ.), Y. S. Lee (Graduate School, Kyungil Univ.)

ABSTRACT

The micro electronic control technology with developing microcomputers make great contribution to electrohydraulic control systems. The electrohydraulic pulse control simplifies in conjunction with power electronic amplifier and high speed operated solenoid valves. It is necessary to valves to convert electronic pulse signal to hydraulic pulse flow as fast as possible. This study deals with the speed control of an oil hydraulic motor operated by two way high speed solenoid valves. The valves acts as converters of electronic-pulse signals to hydraulic power. By constructing systems in which a hydraulic motor is operated by two solenoid valves, the pulse with modulation method (PWM) has adopted as the speed control of hydraulic motor systems. The static and dynamic characteristics of the systems are investigated by the experiment. It is clarify that a hydraulic motor operated PWM show good performance as a control component, achieving accurate velocity control.

Key words : Fluid power systems (유공압 시스템), Hydraulic motor speed control (유압모터 속도제어)
PWM control (PWM 제어), High speed solenoid valve (고속응답 전자밸브)

1. 서론

최근 마이크로 컴퓨터의 급속한 발전과 더불어 유압시스템의 전자화, 메카트로닉스가 급속히 진전되는 추세이며, 이것을 실현하기 위해서는 각종 유압시스템의 디지털 제어가 중요한 기술적 과제이다. 유압 또는 공기압 액추에이터를 디지털 제어하는 하나의 방안으로서, ON/OFF로 작동하는 전자밸브를 펄스폭 변조 (pulse width modulation, 이하 PWM이라 함) 방식으로 구동하는 것이 있으며, 다양한 시스템에 응용되고 있다^{(1), (2), (3)}. 특히 유압시스템에서 PWM 제어를 응용함으로써 마이크로 컴퓨터의 비트 신호에 따른 펄스열로서 고속전자밸브를 ON/OFF 작동하여 유체 펄스열을 형성하고, 그 펄스폭을 제어함으로써 유량을 연속적으로 제어할 수 있고, 유압시스템의 강한 비선형

대한 필터링 효과 및 고속전자밸브와 밸브 구동 회로가 단순하고 마이크로컴퓨터와 적합성이 양호하여 디지털 제어화가 용이하며, 정확한 작동과 신뢰성이 높은 제어 시스템을 구축할 수 있다. 그러나 PWM제어에 사용되는 ON/OFF 전자밸브는 일반적으로 지연시간(delay time)과 밸브 전환 시간이 있고, 이것이 제어계의 고속화, 고성능화에 저해요인이 된다. 또한 고속으로 작동되는 ON/OFF 전자밸브에 의해 압력맥동이 발생하여 기기의 수명을 단축시키거나 진동·소음을 발생시키는 원인이 된다.

본 연구에서는 PWM제어로 구동되는 고속전자밸브를 사용하여, 유압모터의 회전수 제어계에 대한 시스템의 특성을 실험을 통하여 검토하였다. 이 구동방식은 미소한 변조율(duty ratio)에 대해서도 압력차와 변조율간의 특성이 양호

한 선형적 관계로 시스템을 구동할 수 있으며, 제어 정밀도를 대폭 개선할 수 있다. 또한 ON/OFF밸브를 사용함으로써 비교적 저렴한 가격으로 시스템 구성이 가능하고, 작동유의 오염에 강한 이점을 가진다.

2. PWM제어 고속전자밸브의 구조와 특성

2-1 고속전자밸브의 구조

Fig. 1은 실험에 사용한 고속전자밸브(Nachi사, HS-G01-AR-D2(B)-10)의 구조를 나타낸

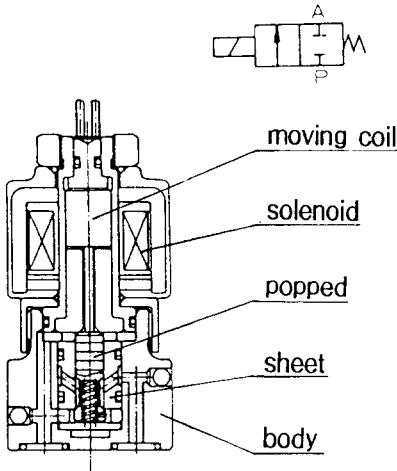


Fig. 1 High speed solenoid valve

Table 1 Specification of solenoid valve

Valve spec.	Max.pressure	17.5MPa
	Max. flow	8 l/min
	Rated flow	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	4~6(<10) ms
	OFF time	1.5~2.5(<10) ms
Operating condition	Max. oil temp.	-20~90℃
	Viscosity	10~300cSt

것이다. 이것은 2포트, 상시폐쇄형(normal closed type) 포핏(poppet) 밸브이며, 공급전압에 의해 솔레노이드(solenoid)가 여자되면, 포핏이 밸브시트(valve seat)로 부터 열려, 고압 작동유가 공급포트(P)에서 부하포트(A)로 흐르게 된다. 전류가 차단되면, 밸브는 스프링에 의해 복원된다. 밸브에서 압력강하가 7MPa일 때, 밸브를 통과하는 유량은 8 l/min이고, 절환 시간은 약 2.5ms이며, 밸브 스트로크는 0.3mm, 밸브 직경은 6mm이다. 이 밸브는 소형·경량이며, 비교적 응답성이 양호한 ON/OFF 전자밸브이고, PWM제어의 변조율을 제어하면 유량 또는 압력의 비례제어가 가능하다. 또한 압력평형형 포핏 구조이고, 작동유의 오염에 강하며, 누설유량이 아주 적은 특징을 가지고 있다. 따라서 건설기계, 차량 등의 원격제어, 자동화, 로봇화의 전자 유압제어 서보 위치제어용, 산업기계, 공작기계용 소형 포핏형 솔레노이드 밸브용 및 각종 전자·유압 파이로트 제어 등에 사용되고 있다.

Table 1은 밸브의 주요 사양을 나타낸 것이다.

Fig.2는 PWM제어기와 고속전자밸브 구동회로를 나타낸 것이다. PWM제어기와 구동회로는 입력신호를 아날로그로 하고, 연산증폭기를 사용하여 발진회로를 구성하여 PWM신호를 형성하였다. 바리스터는 고속전자밸브의 솔레노이드 코일에 전류가 차단되었을 때 발생하는 강한 서지 전압을 흡수하기 위해 사용된다. PWM에서는 삼각파나 톱니파를 반송파(carrier wave)로 사용하여 아날로그 오차 신호를 펄스폭으로 변조하는 방식이며, 열발생이 적으며 에너지 효율이 높고, 유공압 시스템의 디지털 서보화를 도

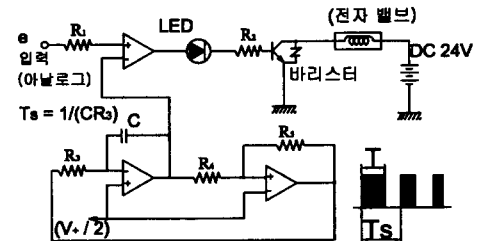


Fig. 2 Driving circuit for operating valve

모할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 2에서, PWM신호의 변조 주기 T_s 는 콘덴서와 저항으로 조정이 가능하며, T 는 입력신호 펄스 폭이며, 이 시간 동안 밸브는 ON상태로 된다. 또한 Fig. 3의 밸브 구동회로에 입력되는 PWM신호의 변조율(duty ratio, $\tau = T/T_s$)에 따른 유량과 압력을 제어할 수 있다.

Fig. 3(a),(b),(c)는 고속전자밸브의 공급압력 $P_s = 40\text{bar}$ 에서 PWM 변조 주기 T_s 를 53.6ms, 80ms, 104ms로 변화시킨 경우, 변조율 변화에 따른 유량특성을 나타낸 것이다. 밸브에서 압력강하가 일정한 경우, 변조율이 약 50% 이상에서는 변조율에 따라 유량이 선형적으로 증가하며, 변조율을 연속적으로 변화시킴으로서 유량을 비례적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다.

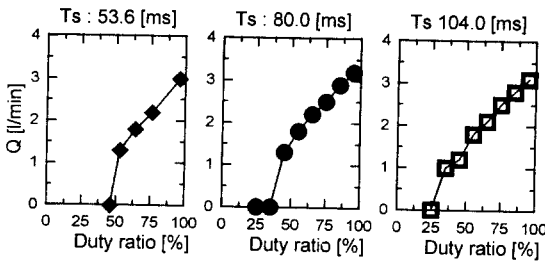


Fig. 3 Flow characteristics vs duty ratio

3. 실험장치

Fig. 4는 본 연구의 제어대상인 고속전자밸브에 의한 유압모터 회전수 제어시스템의 실험장치의 개략도, Fig. 5는 블록선도이다. 실험장치는 유압발생부, PWM 구동방식에 의해 작동되는 고속전자밸브, 유압모터(배제용적 8.2cc/rev, geroler형, EATON社) 및 계측·제어 신호처리부로 구성되어 있다. 유압발생부는 배제용적이 8cc/rev인 사판식 액셀 피스톤을 사용하였고, 펌프에서 발생하는 압력맥동을 제거하기 위하여 축압기를 설치하였다. 고속전자밸브는 유압모터의 입·출구에 설치함으로써 meter-in, meter-out 제어가 가능하다. 또한 두 개의 고속전자밸브의 변조율을 동시에 제어하여, ON/OFF 전자

밸브의 제어에서 발생하는 밸브 전환에 의한 지연시간을 단축시킬 수 있도록 하였다.

PWM 제어부는 입력 신호에 대한 피드백 신호와의 오차가 PWM 제어기에 입력되면, 오차에 비례하는 변조율로 PWM의 ON/OFF 신호를 발생하여 고속전자밸브를 작동하게 된다.

유압모터의 회전수는 tachogenerator(이득 $H = 0.0062 \text{ V/rpm}$)로 계측하였다. 밸브 전후와 유압모터 입·출구의 압력변동은 고속 응답형 압력변환기와 고정밀도 증폭기를 사용하여 계측하였다. 입력신호, PWM 신호, 압력 P_1, P_2, P_3, P_4 및 tachogenerator의 출력은 12bit A/D 변환기를 통하여 마이크로 컴퓨터에 입력된다. 터빈형 유량계를 사용하여 유압모터를 통과하는 유량을 계측하였고, 작동유의 온도는 더미스터형 온도계로 계측하였다.

작동유는 고점도지수 유압작동유(HVI #46)을 사용하였다. 작동유의 온도를 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하면서 실험을 수행하였다.

실험은 고속전자밸브의 유량-압력강하특성, 개루프 제어, 폐루프 제어 특성에 대하여 수행하였다.

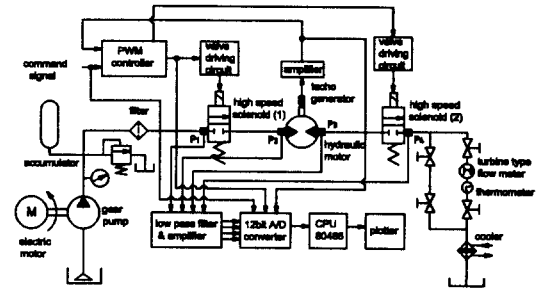


Fig. 4 Experimental apparatus

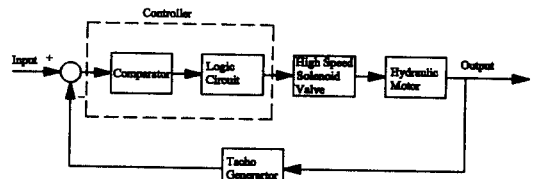


Fig. 5 Block diagram of control systems

3.2. 실험결과 및 고찰

3.2.1 고속전자밸브의 특성

Fig. 6 (a)는 오차신호를 일정한 경우, 변조율 변화에 따른 밸브의 유량-압력 응답 특성을 나타낸 것이다. 공급압력은 40bar이며, 부하압력(밸브 출구압력)은 작용하지 않는다. PWM 반송파의 주기는 80ms이다. Fig. 6(a)에서 변조율이 55%인 경우, PWM 제어기의 출력 펄스에서 전압이 5V로 일정하게 유지되는 동안 솔레노이드에 전류가 흘러 밸브가 작동하게 되며, 주기가 80ms이므로 약 44ms 동안 밸브가 열려 유량이 흐르게 된다. 따라서 변조율이 증가할수록 밸브를 통과하는 유량은 증가한다. 이것은 Fig. 3의 결과에서도 잘 나타나 있다. Table 1에서, 밸브 ON/OFF시에 ON 시간이 평균 5ms, OFF 시간이 2ms이기 때문에, 밸브가 닫힐 때보다도 열릴 때 응답능력이 나쁘다. 이러한 不動作 時

間(dead time)과 지연시간(dead time)을 줄이는 것이 중요하다. 유압모터 회전수 제어에서는 유압모터 전후의 밸브의 전환시간을 제어하여 이 현상에 의한 영향을 최대한 배제하여 응답성을 향상시켰다.

또한 밸브가 작동하는 동안 공급압력 P_1 은 40bar로 거의 일정하지만, 밸브출구압력 P_2 은 밸브 열림과 동시에 급격하게 상승하며, 이 때 공급압력 P_1 과 출구압력 P_2 의 차이, 즉 밸브에서 압력강하 dp 가 증가하게 된다.

Fig. 6(b)는 15Hz의 정현파를 오차신호로 PWM 제어기에 입력한 경우의 계측파형이다. 규칙적인 정현파. 오차신호에 따라 출력펄스도 규칙적으로 PWM 제어기에서 출력된다. 압력 응답 시간은 밸브가 열릴 때 약 16ms정도, 닫힐 때 약 3ms 정도 지연이 발생된다. 또한 밸브가 열려 출구압력 압력이 상승할 때 약간의 오버슈트(overshoot)이 발생함을 볼 수 있다.

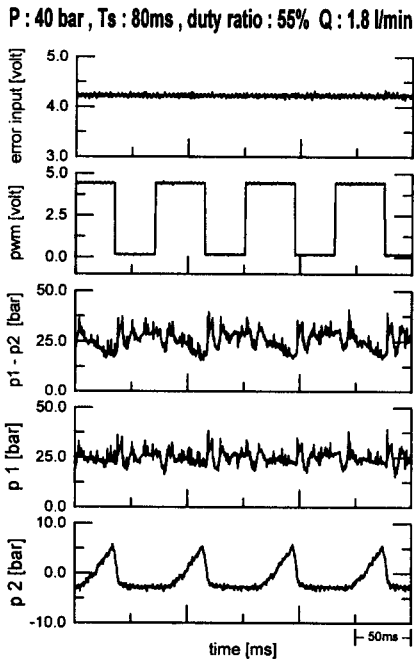


Fig. 6 (a) The measured waveforms for constant error input

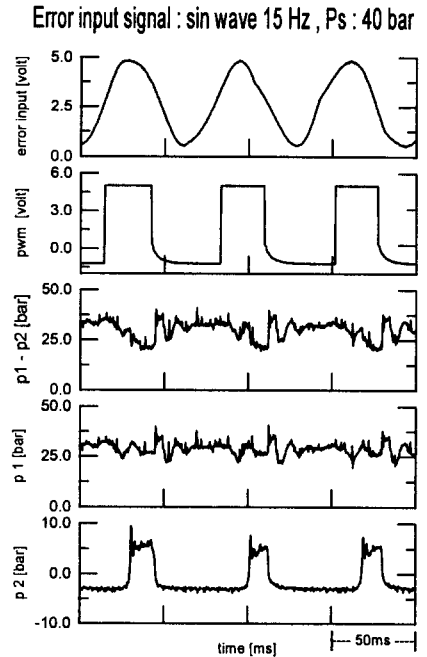


Fig. 6 (b) The measured waveforms for sinusoidal error input

3.2.2 유압모터 회전수 제어계의 특성

Fig. 7은 변조율을 50%로 일정하게 유지한 상태에서, 공급압력의 상승에 따른 유압모터의 회전수와 통과유량을 나타낸 것이다. 이 때 밸브가 부착된 매니폴드에 직경 2mm의 초크를 가공하여 일정량의 유량이 유압모터에 공급되도록 하였다. 이것은 고속으로 밸브를 ON/OFF 작동시켜 유압모터의 회전수를 제어하는 경우, 밸브가 완전히 닫히는 경우에 유압모터에 순간적으로 공급유량이 없으므로 유압모터의 회전관성에 의해 모터 출구부분에서 부압이 발생하는 것을 방지하기 위하여 설치하였다. 초크의 유무에 따라 제어특성이 변하기 때문에 초크 설계, 가공시 시스템의 설계사양을 고려하여야 한다. 또한 밸브통과 유량 $Q = C A \tau \sqrt{dp}$ 로 표시할 수 있다. 모터에는 부하를 가하지 때문에 모터 자체의 마찰손실에 의한 토크 성분만이 부하로 작용하기 때문에 거의 무부하 상태이며, 모터 출구압력 $P_3 \approx 0$ 로 고려할 수 있다. 따라서 공급압력이 높아지면 유압모터부의 압력강하 ($dp_m = P_2 - P_3$)가 증가하여 통과유량이 증가하며, 식에서 C 는 유량계수 (≈ 0.72), A 는 개구면적, τ 는 변조율이다. 그리고 무부하 운전시, 유량 Q 와 모터 회전수와와의 기울기가 모터의 배제용적에 상당한다.

또한 Fig. 7의 실험결과에 대한 제측파형의 일례를 Fig. 8(a), (b)에 제시하였다. 실험조건은 공급압력40bar, 70bar이고, 변조율이 75%인 경우에 대한 것이다.

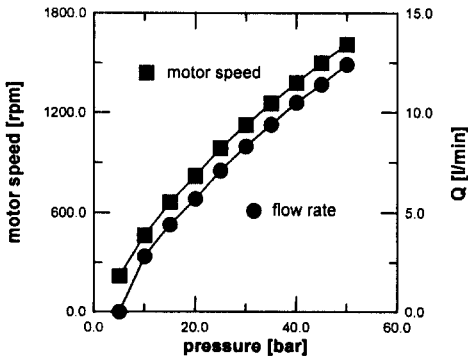
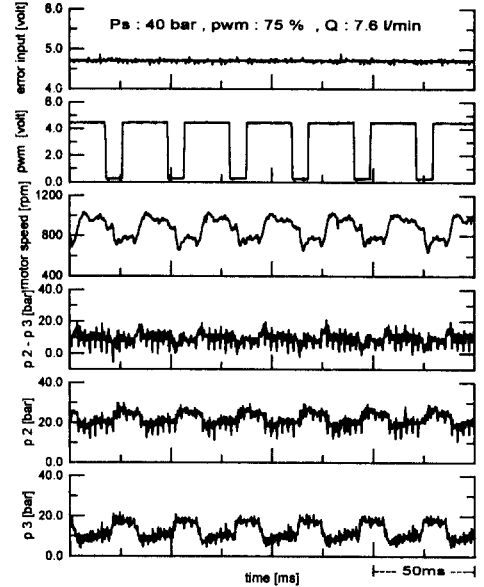
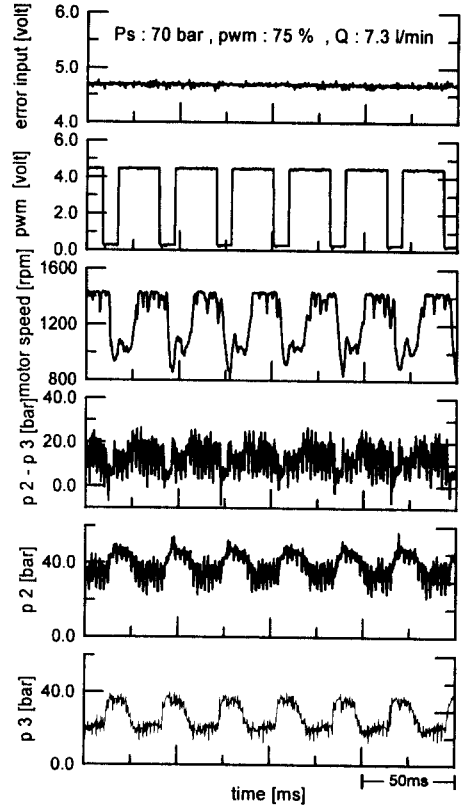


Fig. 7 Steady state characteristics of hydraulic motor speed system



(a) Result for 40bar, duty ratio 75%



(b) Result for 70bar, duty ratio 75%

Fig. 8 The measured waveforms open loop control

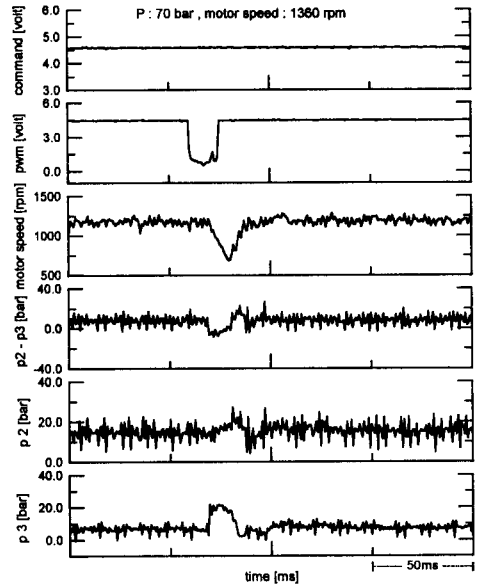
Fig. 9 (a), (b)는 공급압력 70bar인 경우, 유압모터의 회전수에 대한 페루프 제어의 제측 결과이다. Fig. 9에서, 상단부터 제측파형은 command 신호, PWM제어기에서의 밸브구동 ON/OFF 신호, 유압모터 입·출구에서의 압력 강하 신호, 유압모터 입구의 압력파형 및 출구 압력파형을 나타낸다. Fig. 9(a)는 밸브가 완전히 열린 상태에서 순간적으로 밸브를 닫은 경우의 과도응답 특성이며, Fig. 9(b)는 (a)와 같이 밸브가 완전히 열린 상태에서 밸브를 순간적으로 ON/OFF 작동을 반복하였을 때 응답특성을 제측한 결과이다. 피드백을 가한 경우, 실험에서 알 수 있는 바와 같이 PWM제어기의 출력신호 ON/OFF에 대한 유압모터의 회전수의 응답특성은 개선됨을 알 수 있다.

4. 결론

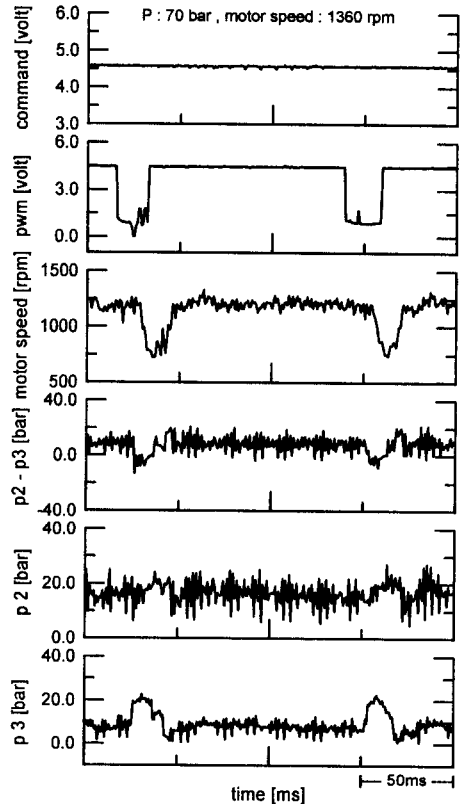
본 연구에서는 유압모터의 회전수 제어에 PWM제어로 구동되는 고속전자밸브를 하여, 시스템의 정특성 및 동특성에 대한 실험적으로 검토하였다. 실험결과, 정특성과 과도응답 특성 실험결과 고속전자밸브를 이용한 PWM제어방식이 양호한 제어성능을 나타내며, 본 제어법의 유효성을 실험적으로 확인하였다. 향후 페루프 제어 특성 및 ON/OFF 지연시간의 효과적인 단축법에 대하여 검토할 예정이다.

참고문헌

- (1) Tanaka, H., Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., (in Japanese), Vol. 50, No.457, (C) p. 1594, 1984
- (2) Muto, T., Suematsu, Y., JSME Int. J. Series III, Vol. 33, No.4 p. 641, 1990
- (3) Muto, T., et al., JHPS (in Japanese), Vol. 19, No. 7, p. 564, 1988
- (4) Koyanagi, Y., et al., JHPS (in Japanese), Vol. 18, No. 2, p. 57, 1987



(a) Result for transient impulse input



(b) Result for repeated impulse input

Fig. 9 The measured waveforms for closed-loop control