

고속전자밸브로 제어되는 전기·유압 서보시스템의 특성 개선에 관한 연구

A Study on the Characteristic Improvement of Electro-Hydraulic Servo System Controlled by High Speed Solenoid Valve

박 성 환, 이 진 결
(Sung-Hwan Park and Jin-Kul Lee)

Abstract : In this study, a new PWM method considering the actuation delay of high speed solenoid valves is proposed to improve the response characteristic of electro hydraulic servo systems controlled by high speed solenoid valves. In addition, the decision method for the system gain, the basic period of PWM, and the sampling time is proposed. Since the conventional system controlled by high speed solenoid valves is too slow to apply this method, a high speed driving circuit(Quick-Drive) which enables rapid switching of the high speed solenoid valve at a high speed sampling mode is applied to realize this new method. The experimental result shows that it is possible to achieve precision and quiet control without occurrence of limit cycle and wide range dead band.

Keywords : PWM control, high speed solenoid valve, quick driver

I. 서론

유압시스템의 제어에 사용되는 밸브는 아날로그 제어방식과 디지털 제어방식으로 대별된다. 아날로그 제어방식의 밸브에는 서보밸브, 비례제어밸브 등이 있다. 이들 밸브는 응답성 및 제어 정도(accuracy) 면에서는 매우 뛰어난 성능을 가지고 있지만, 고가이며 작동유의 오염에 취약한 단점을 가지고 있다.

한편, 디지털 제어방식의 밸브에는 솔레노이드밸브와 고속전자밸브(HSSV) 등의 온-오프(on-off)밸브가 있다. 이들 전자밸브는 밸브자체의 구조가 간단하고 가격이 저렴하며 작동유의 오염에 대해서도 비교적 강한 특성을 가지고 있다. 또 제어회로도 간단하여 경제성과 신뢰성 면에서 뛰어난 성능을 가지고 있다. 그러나 전기·유압 서보시스템의 제어에 아날로그 제어방식의 밸브를 사용하는 경우와 비교하면 응답성 및 제어 정도가 뒤떨어지는 결점을 가지고 있다[1].

최근에는 아날로그 제어방식 밸브의 단점을 디지털 제어방식 제어 밸브를 이용하여 보완하고, 디지털 제어방식 밸브 자체의 응답성과 제어 정도를 개선하기 위하여 고속 온-오프가 가능한 고속전자밸브를 이용한 유압 액츄에이터의 제어에 관해서 많은 연구 결과들이 보고되었다. 그 중에서도 특히 펄스폭 변조(Pulse Width Modulation 이하 PWM)에 의한 평균 유량으로 유압 액츄에이터를 제어하는 PWM제어에 관한 많은 연구가 행하여졌다[2][3].

고속전자밸브는 기본적으로 온-오프(on-off) 기능만을

가진 밸브이므로 강한 비선형 특성을 가지고 있다. 또, 전기적 입력 신호에 대한 작동지연(actuation delay)도 존재하므로 제어시에 리미트사이클(limit cycle)의 발생에 의하여 시스템이 불안정해질 수 있는 가능성이 있고, 광역의 불감대(dead band) 때문에 고정도의 제어가 불가능하다. 또, 일반적으로 건설기계, 농업기계 등의 제어에는 경제성과 신뢰성 면에서 뛰어난 고속전자밸브를 이용하는 것이 바람직하지만, 실용화의 측면에서는 고속전자밸브의 고속 온-오프에 의한 격심한 소음의 발생이 심각한 문제점으로 대두되고 있는 실정이므로 고속전자밸브를 이용한 유압 서보 시스템의 실용화를 위해서는 이러한 문제점들을 개선할 필요가 있다.

본 연구에서는 시판되고 있는 고속전자밸브를 강제적으로 보다 고속으로 구동 할 수 있는 고속 구동용 회로를 제작하여 입력 신호에 대한 고속전자밸브의 작동지연(actuation delay) 특성을 현저하게 개선하였다. 또, 개선된 고속전자밸브의 작동지연 특성을 고려한 PWM 변환 방식을 제안하여, 불감대의 감소와 응답성의 향상을 도모하는 한편, 고속전자밸브의 상승시간(rising time) 구간 내의 펄스를 이용하여 정밀한 제어 및 정속한 제어를 실현함으로써 고속전자밸브로 제어되는 전기·유압 서보시스템의 응답 특성을 개선하였으며, PWM의 계인, 기본 변조주기, 샘플링 타임의 선정 지침을 확립하였다.

성능 확인을 위한 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 PWM 방식은 단순히 온-오프 기능만을 가지고 있는 고속 전자밸브의 개폐 과도상태에서의 미소유량을 제어에 이용 가능하게 함으로써 정밀하고 정속한 제어가 가능함을 확인 할 수 있었다.

II. 고속 구동용 회로와 고속전자밸브의 온-오프 특성

종래에는, 컴퓨터로부터 출력되는 5[V]의 온-오프신호

접수일자 : 2000. 9. 22., 수정완료 : 2001. 2. 1.

박성환 : 부산대학교 기계기술연구소(shpark01@hyowon.pusan.ac.kr)

이진결 : 부산대학교 기계공학부 및 부산대학교 기계기술연구소(leejik@hyowon.pusan.ac.kr)

로 고속전자밸브를 구동하기 위하여 전압 증폭 회로와 역전류의 방지를 위한 포토커플러를 결합한 다아링턴(darlington) 회로를 사용하였으나, 본 연구에서는 그림 1에 나타낸 바와 같은 방식으로 솔레노이드에 강제적으로 과여자(overexcitation)전류 및 감자(demagnetization)전류를 인가하여 고속전자밸브의 응답성을 대폭적으로 개선한 고속 구동용 회로(quick drive)를 구성하였다[4][5].

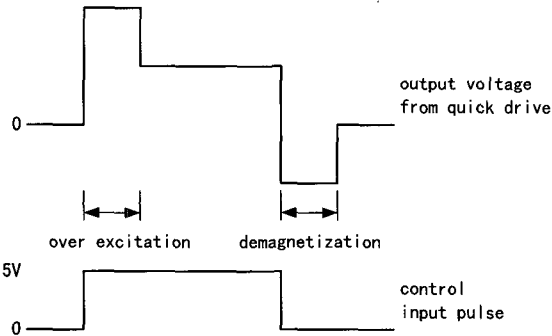


그림 1. 고속구동용 회로의 작동 원리.
Fig. 1. Principle of quick drive.

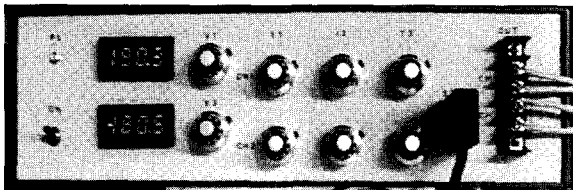


그림 2. 고속전자밸브 구동용 고속구동용 회로.
Fig. 2. Quick driver for HSSV.

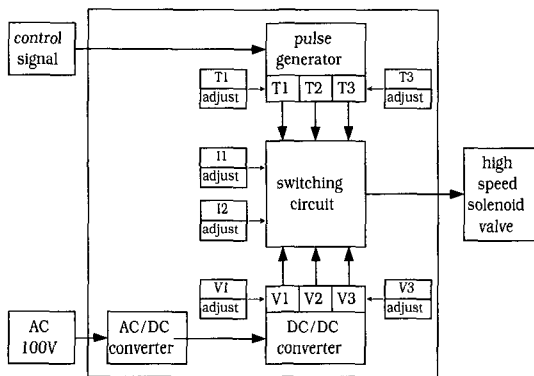


그림 3. 고속구동용 회로의 블록 선도.
Fig. 3. Block diagram of quick driver.

그림 1의 여자(excitation)구간에서는 고전압을 강제적으로 단시간 인가함으로써 인덕턴스에 의한 전류 상승 지연을 보상하여 고속전자밸브의 열림 지연 시간을 단축한다. 또, 고속전자밸브의 열림 유지 구간에서는 정격이하의 저전류로 밸브의 열림 상태를 유지한다. 한편, 소자(demagnetization)구간에서는 역극성의 고전압을 강제적으로 단시간 인가함으로써 역방향의 자계를 이용하여 잔류자기를 강제적으로 소자한다.

그림 2는 본 연구에서 고속전자밸브의 응답 성능 향상을 위하여 제작한 고속전자밸브의 고속 구동용 회로이며 그림 3은 회로의 블록선도를 나타낸다. 이 회로는 두개의 고속전자밸브를 동시에 구동하는 것이 가능하며, 과여자전압 및 인가시간, 감자전압 및 인가시간의 조정과 유지전류의 조정이 각각 독립적으로 가능하도록 구성하였다.

표 1은 고속 구동용 회로의 제원을 나타낸다.

표 1. 고속 구동용 회로의 제원.

Table 1. Specifications of quick driver.

| 적용고속전자밸브: HS-G01-A21-D1B-11 | |
|-----------------------------|-----------------------|
| 정격전압 | DC 12V |
| 정격전류 | 1.2A |
| 고속 구동용 회로 | |
| 작동 전원 | 100V ±10% |
| 구동 입력 레벨 | TTL(Low0.4V,High2.4V) |
| 과여자 전압 | 100~180V |
| 감자 전압 | -100~-180V |
| 과여자 기간 | 0~1msec |
| 감자 기간 | 0~1msec |
| 유지 전류 | 0.3~1.2A |
| 과여자 전류 | ~6A |

한편, 이와 같은 방식으로 고속전자밸브를 구동하는 경우, 과여자 및 감자 전압의 크기와 인가시간에 따라 고속전자밸브의 온-오프 시간 특성이 변화한다.

그림 4와 그림 5의 실험결과는 각각 과여자 전압[V]과 인가시간[ms], 유지전류[A], 감자 전압[V]과 인가시간[ms]을 변화시켰을 때의 고속전자밸브의 온-오프 응답 특성을 나타낸다.

고속전자밸브의 온-오프 응답 특성은 밸브 내부에서 작동되는 포펫의 변위를 직접 측정하여 파악하기는 곤란하므로 고속전자밸브는 온-오프 작동할 때, 포펫이 밸브시트와 고정자에 닿는 순간 큰 속도 변화와 충격이 발생한다는 점에 착안하여 충격센서를 포펫의 작동 방향과 수직으로 고속전자밸브의 외부 면에 설치하여 밸브의 온-오프 응답 시간을 측정하였다[5].

그림 4의 실험 결과로부터 고속 구동용 회로를 이용하여 고속전자밸브를 구동할 때, 과여자 전압을 인가하는 시간을 길게 할수록 밸브의 열림 지연이 단축됨을 알 수 있다. 그러나 밸브의 닫힘 지연의 경우는 그림 5에 나타낸 바와 같이 역전압을 인가하는 시간이 한계점을 초과하면 역극성의 자계가 흡인력을 발생하여 역효과를 발생함을 알 수 있다.

그림 6의 실험 결과는 그림 4와 그림 5의 실험 결과를 근거로 하여, 고속구동용 회로의 과여자 전압과 인가시간을 각각 180[V]와 0.6[ms], 유지전류를 0.6[A], 감자 전압 및 인가시간 각각 180[V]와 0.4[ms]로 조절하였을 때의 온-오프 응답 특성을 나타내며, 고속전자밸브 솔레노이드에 인가되는 전류 파형의 변화는 고속전자밸브의 입력 단자 전선에 전류 프로브(current probe)를 직접 설치하여 측정

하였다.

그림 6의 측정 결과에서 알 수 있는 바와 같이 스텝상의 입력에 대하여 고속전자밸브의 포펫이 완전히 열리거나 닫히게 되어 포펫이 밸브시트나 고정자에 닿는 순간에 큰 충격신호가 발생함을 알 수 있으며, 온-오프 입력신호로부터 충격신호가 발생하는 약 1[ms]의 시간이 밸브의 온-오프 지연 시간이다. 고속 구동용 회로를 이용한 고속전자밸브의 이와 같은 온-오프 지연 특성의 개선은 기존에 시판되고 있는 고속전자밸브의 온-오프 작동지연 시간 특성이 약 7~8[ms] 정도인 점을 감안할 때, 기존 온-오프 밸브의 응답 특성을 대폭적으로 개선한 것이라 할 수 있다.

한편, 이때 측정된 전류 파형도 역기전력의 변화에 의하여 급격한 변화를 나타내고 있음을 알 수 있지만, 고속 구동용 회로의 경우에는 강제적으로 일정 순간 과여자 전압과 감자 전압을 인가하는 방식이므로 고속전자밸브의 구동용으로 종래에 많이 사용되고 있는 다이링턴회로와는 달리 전류 파형의 변곡점의 변화로부터 밸브의 온-오프 지연 시간을 측정하는 것은 바람직하지 못하다.

고속전자밸브는 입력신호를 인가하여도 포펫의 변위가 즉시 발생하지 않으며 일정시간의 지연을 가지고 포펫이 상승 또는 하강하므로 이러한 온-오프 작동지연 특성을 고려한 PWM제어를 위하여 고속전자밸브의 온-오프 특성을

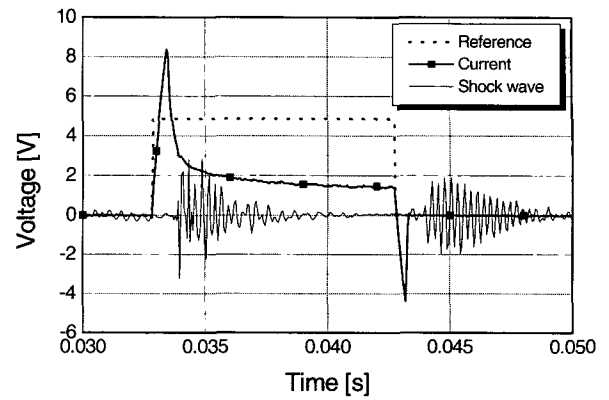


그림 6. 고속전자밸브의 온-오프 특성.
Fig. 6. On-off characteristics of HSSV.

그림 7과 같은 형태로 가정하는 경우, 충격센서를 이용한 그림 6의 측정결과로는 고속전자밸브의 무응답 시간(dead-time) T_1 (또는 T_3)과 포펫이 작동하는 상승시간(rising time) T_2 (또는 T_4)를 합한 작동지연(actuation delay) 시간은 알 수 있으나, 각각의 시간은 측정이 불가능하다.

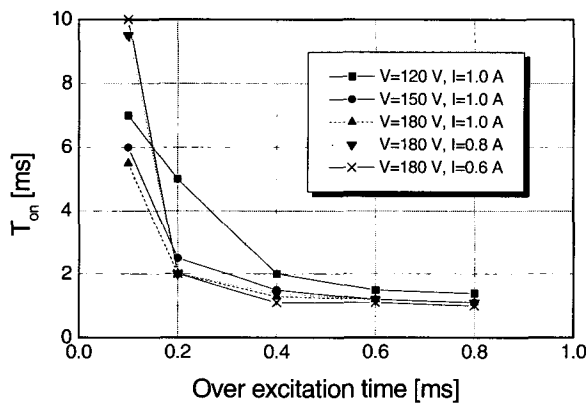


그림 4. 고속전자밸브의 열림 지연 시간 실험 결과.
Fig. 4. Experimental results of valve on delay time.

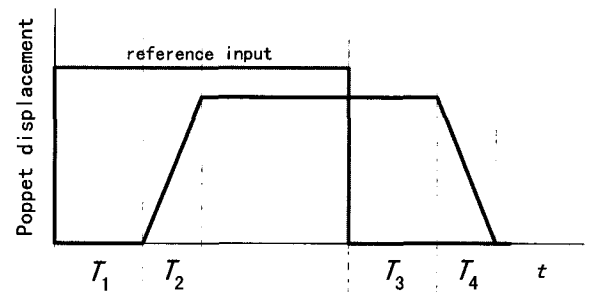


그림 7. 포펫의 온-오프 동작.
Fig. 7. Switching behavior of poppet.

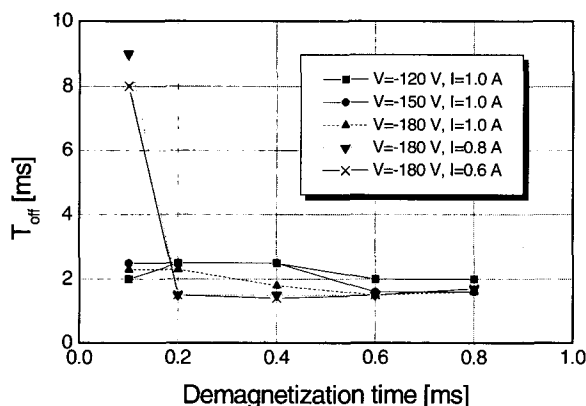


그림 5. 고속전자밸브의 닫힘 지연 시간 실험 결과.
Fig. 5. Experimental results of valve off delay time.

그러므로 입력 신호를 인가해도 응답이 나타나지 않는 무응답 시간(T_1, T_3)의 측정을 위하여 본 연구에서는 그림 8과 같은 유압회로를 구성하고, 압력변환기(pressur transducer)를 이용하여 밸브의 온-오프 시 발생하는 압력의 변동으로부터 무응답 시간을 측정하였다. 일반적으로 입력신호에 대한 밸브의 열림 또는 닫힘은 밸브로부터 유량이 유출되는 순간을 측정하는 것이 타당하다. 그러나 유량계(flow meter)를 이용하여 극히 미소한 유량의 변화를 [ms]단위 이하의 시간에서 측정하는 것은 유량계의 구조상 불가능하므로, 유량의 흐름에 따라 급격하게 변화하는 압력 파형의 변곡점으로부터 무응답 시간을 측정하여 압력센서 1에 의한 밸브의 열림 무응답시간을 그림 9에, 압력센서 2에 의한 밸브의 닫힘 무응답 시간을 그림 10에 나타내었다. 실험 결과에서 알 수 있는 바와 같이 입력신호에 대하여 약 0.7[ms]의 응답 지연 후에 압력파형의 변화가 나타남을 알 수 있다. 그러므로 그림 6, 그림 9, 그림 10의 실험 결과로부터 고속전자밸브의 무응답 시간(T_1, T_3)은 0.7[ms]이고, 상승시간 및 하강시간(T_2, T_4)는 0.3[ms]임을 알 수 있다.

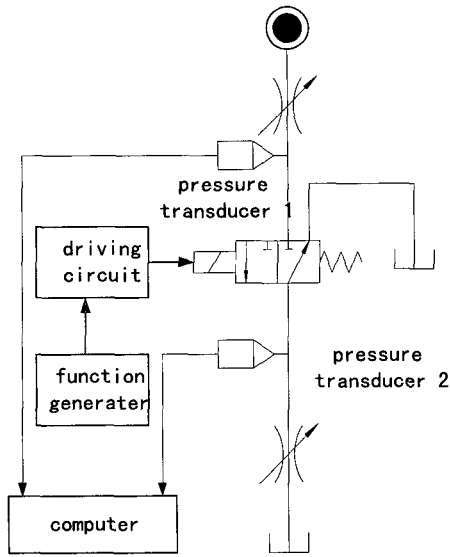


그림 8. 무응답 시간 측정을 위한 유압 회로.
Fig. 8. Hydraulic circuit for measuring the dead-time.

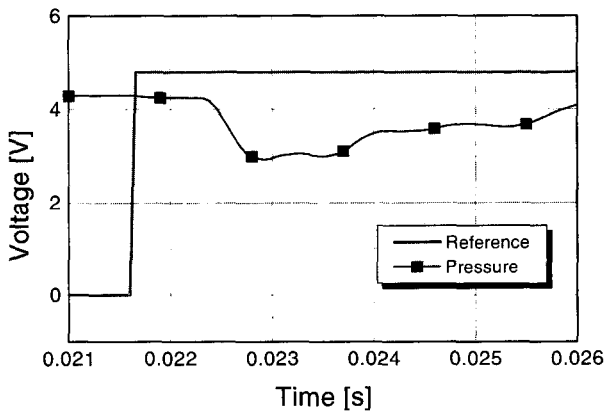


그림 9. 고속전자밸브의 무응답 시간 측정 결과(열림).
Fig. 9. Experimental result of dead-time(on-time).

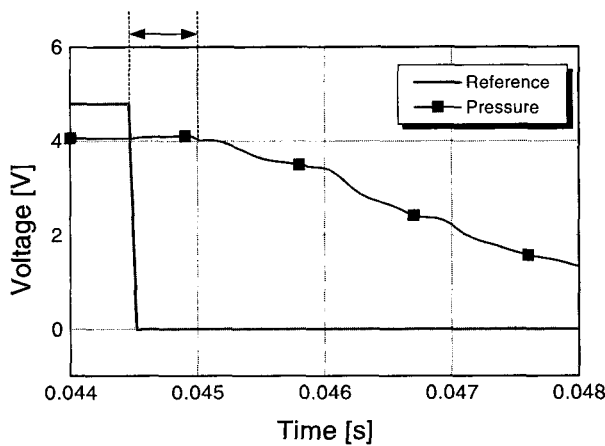


그림 10. 고속전자밸브의 무응답 시간 측정 결과(닫힘).
Fig. 10. Experimental result of dead-time(off-time).

III. 고속전자밸브의 작동지연 특성을 고려한 PWM 변조율 조정방식[2][3]

본 연구에서 사용한 PWM의 변조율 조정방식은 삼각파를 이용한 방법을 채용하였으나, 종래보다 빠른 샘플링을 행하였다.

그림 11에 나타낸 바와 같이 PWM 변조주기마다 새로운 샘플링을 행하여 변조율을 결정하는 삼각파를 이용한 방법은 고속전자밸브를 제어한 종래의 연구에 일반적으로 사용되어 왔다. 그러나 이와 같은 종래의 방법으로 고속전자밸브를 제어하는 경우, 밸브에 입력을 인가해도 전혀 응답이 나타나지 않는 무응답 시간(dead-time)의 존재로 인하여 샘플링 타임이 이 무응답 시간보다 길게 설정하지 않으면 안되고, 동시에 시스템의 불감대도 넓어져 고정도의 제어가 불가능한 문제점이 있었다. 또 그림 11에 나타낸 바와 같이 느린 샘플링의 영향으로 인하여 PWM변환 시 비교적 큰 변환오차도 존재하였다.

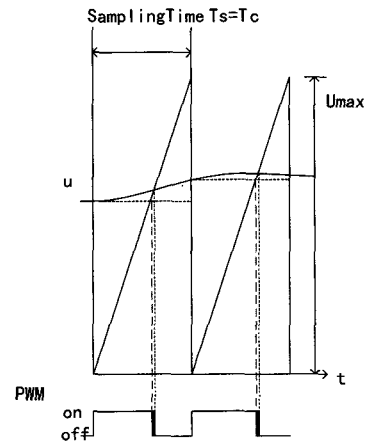


그림 11. 종래의 PWM 방식.
Fig. 11. Conventional PWM method.

본 연구에서 사용한 삼각파를 이용한 PWM방식은, 시스템 제어기로부터의 샘플링 타임마다 변화하는 제어입력 신호를 그에 비례한 온-오프 신호로 변환하는 변환기의 기능으로 사용하였다.

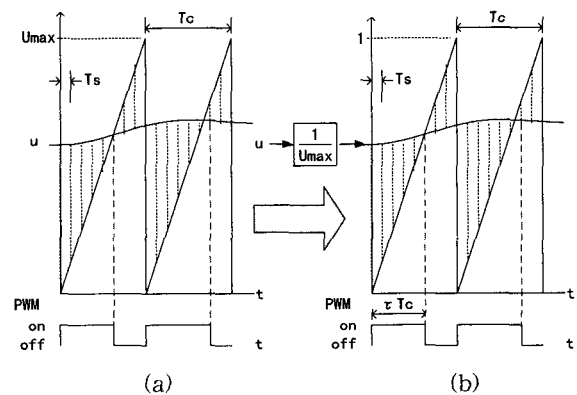


그림 12. 본 연구에서 사용된 PWM 방식.
Fig. 12. PWM method used in this study.

그림 12(a)에 나타난 바와 같이 샘플링 타임을 미소하게 설정하여 그 샘플링 타임마다 제어입력 신호가 삼각파 보다 위에 있는 경우에는 PWM신호가 온(on)상태, 제어입력 신호가 삼각파 보다 밑에 있는 경우에는 PWM신호가 오프(off)의 상태가 된다. 이 방식은 미소한 샘플링 타임마다 제어입력 신호와 삼각파의 비교를 행하기 때문에 PWM의 출력 펄스는 샘플링 타임의 정수배가 되고, 그림 11의 종래의 방식과 비교해 볼 때, 이산적인 변조율이 생성된다.

또, 그림 12(b)와 같이 PWM변환 시에 시스템의 응답 특성에 큰 영향을 미치는 삼각파의 높이를 정규화(normalize)하여 1로 선정하고, 삼각파 높이의 역수를 시스템의 게인(gain) K 로 분리하여 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 실현하였다. 이때 고속전자밸브를 이용한 전기·유압 서보 시스템의 구성은 그림 13과 같이 표현 가능하며, 고속전자밸브의 무응답 시간의 영향으로 인하여 제어가 불가능한 불감대(dead-band)는 (1)로 표현 가능하다.

$$d = \frac{1}{k} \cdot \frac{T_1}{T_c} \quad (1)$$

본 연구에서는 (1)의 불감대를 감소시키기 위하여 고속 구동용 회로를 이용하여 고속전자밸브의 무응답 시간 T_1 을 종래보다 대폭 감소시키는 동시에 시스템의 게인과 PWM의 기본 주기 T_c 를 선정하는 지침을 실험을 통하여 확립하였다. 즉, 불감대를 감소시키기 위해서는, (1)로부터 PWM 변환의 파라메터인 PWM의 기본주기 T_c 와 시스템의 게인을 가능한 한 크게 선정하는 것이 좋으나 이들 파라메터 값의 증가와 더불어 시스템 대역폭(band width)의 감소, 리미트사이클의 발생으로 인한 시스템의 불안정 등이 초래되기 쉬우므로 본 연구에서는 실험을 통하여 선정 지침을 확립하였다.

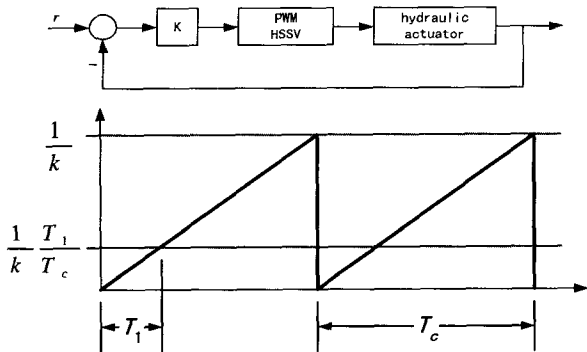


그림 13. 고속전자밸브로 제어되는 전기·유압 서보 시스템의 블록 선도.
Fig. 13. Block diagram for hydraulic servo system controlled by HSSV.

또, PWM변환의 또 다른 파라메터인 샘플링 타임의 선정시 그림 12의 PWM방식을 사용하면 이산적인 변조율이 생성된다는 점과 고속전자밸브의 작동지연 특성을 무응답 시간과 상승시간으로 나누어 고려함으로써 제어 정도를 현저하게 개선하였다. 즉, 그림 6에 나타난 고속전자밸브

의 온-오프 작동지연 특성을 그림 14에 나타난 바와 같이 입력을 인가해도 전혀 응답이 나타나지 않는 무응답 시간(dead-time) T_1 (또는 T_3)과 포펫이 작동하는 상승시간(rising time) T_2 (또는 T_4)로 나누어 고속 샘플링에 의한 이산적인 PWM 변환을 이용하면, 포펫이 상승 또는 하강하는 구간 중에 유출되는 극히 미소한 유량을 제어에 이용하는 것이 가능하므로 제어 정도가 현저하게 개선된다.

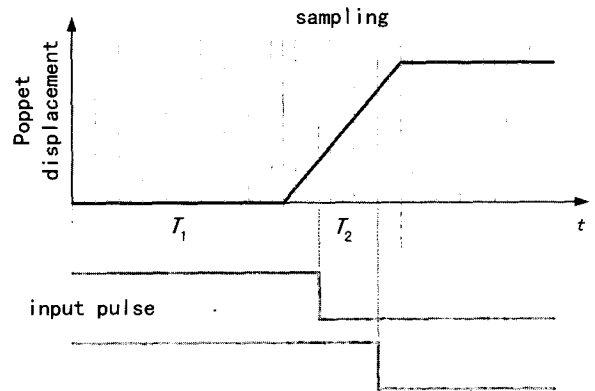


그림 14. 고속전자밸브를 이용한 고정도 제어의 개념.
Fig. 14. Concept for precision control using HSSV.

한편, 그림 12의 PWM변환 방식을 종래에 고속전자밸브의 구동에 주로 사용된 달링턴 회로를 사용하여 시스템에 적용한 경우에는, 고속전자밸브의 온-오프 작동지연 시간이 길기 때문에 미소한 샘플링 타임마다 PWM신호의 온-오프 상태가 변화해도 밸브가 전혀 작동하지 않는 문제점이 있다. 그러므로 T_c 에 의한 이산적인 변조율 방식을 적용시 그림 12와 같이 고속전자밸브를 보다 고속으로 구동 가능한 경우에만 적용 가능하다.

IV. PWM의 파라메타 결정 방법

본 연구에서 제안한 고속전자밸브의 작동지연 특성을 고려한 PWM방식을 사용하기 위해서는 PWM의 기본 변조주기인 삼각파의 주기 T_c 역수가 PWM변환을 위한 삼각파의 의미로 사용되는 게인 K 및 샘플링 타임 등의 설정 방법과 이들 파라메타가 시스템에 미치는 영향을 명확하

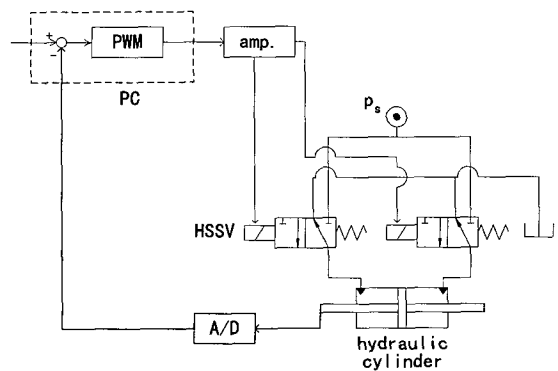


그림 15. 고속전자밸브로 제어되는 유압 시스템.
Fig. 15. Electro-hydraulic system controlled by HSSV.

계 할 필요가 있다. 본 연구에서는 고속전자밸브의 작동지연을 고려한 그림 12와 같은 PWM방식의 파라미터 결정 지침을 실험을 통하여 확립하였다.

1. 실험장치의 구성

실험장치는 두 개의 3방향형 고속전자밸브, 유압실린더, 제어기와 PWM 변환을 위한 퍼스널 컴퓨터를 주요 요소로 하여 그림 15와 같이 구성하였다. 피스톤의 변위는 포텐쇼미터에 의하여 검출되고, A/D변환기를 거쳐 컴퓨터에 입력된다. 또, 고속전자밸브의 구동 회로로는 고속전자밸브를 강제적으로 여자 또는 소자하여 고속으로 온-오프시키는 고속 구동용 회로를 이용하였다.

2. PWM 기본 변조주기 T_c 의 영향과 결정방법

PWM 변조주기 T_c 가 시스템의 응답에 미치는 영향을 조사하기 위하여 유압시스템의 공급 압력을 12[MPa], 시스템의 게인을 1, 샘플링 타임을 0.03[ms]로 일정하게 한 후, PWM의 기본 변조주기 T_c 만을 변화시켜 실린더의 변위를 측정하여 결과를 그림 16에 나타내었다.

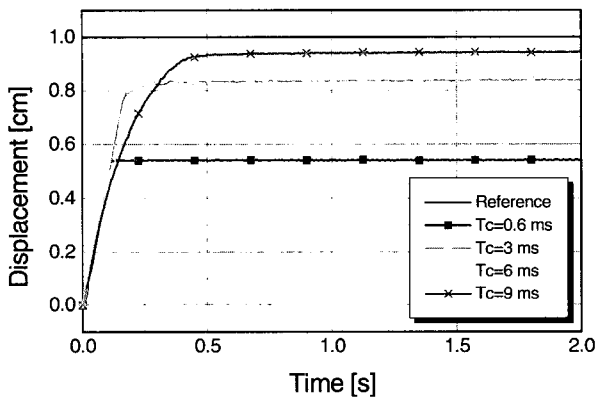


그림 16. PWM 변조주기 T_c 의 영향.

Fig. 16. Effect of PWM period T_c .

그림 16의 실험결과로부터 PWM의 기본 변조주기 T_c 가 길어지면 전체적으로 정상상태 오차는 감소하지만, 응답시간이 느려짐을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 고속전자밸브를 이용한 시스템의 대역폭은 PWM 기본 변조주기의 영향을 받으며, 기본 변조 주파수의 약 1/4 정도와 일치한다는 기존의 연구[6]와 맥락을 같이하는 결과이다. 그러므로 PWM의 기본 변조주기 T_c 를 선정할 때는 불감대를 감소시키기 위해서 큰 값으로 선정하는 것이 바람직하지만, 값이 커짐에 따라 시스템의 응답속도가 느려지고 궁극적으로는 대역폭이 좁아진다. 그러므로 PWM 기본 변조주기는 먼저, 밸브의 무응답 시간 이상으로 설정할 필요가 있으며, PWM 기본 변조주기로 밸브의 작동 지연시간 $T_1 + T_2$ 이상을 사용하면, 제어 시 밸브의 온-오프 과도 상태도 제어에 이용 가능하므로 PWM 기본변조주기의 최소치로는 밸브의 작동지연 시간 이상을 사용하는 것이 바람직하다. 또, 기본 변조주기의 최대치로는 시스템의 설계 사양에서 요구되는 시스템의 대역폭을 고려하여 설계하는 것이 바람직하며, 정상상태 오차는 게인의 조절로도 일부 보상 가능하다.

3. 샘플링타임의 영향과 결정방법

일반적으로 샘플링타임의 선정은 시스템의 안정성에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 가능한 짧은 편이 좋다고 알려져 있다. 그러나 종래의 고속전자밸브를 이용한 시스템에서는 밸브 자체의 온-오프 작동 지연 때문에 샘플링타임을 비교적 길게 설정하였다.

한편, 그림 12와 같은 PWM방식에서는 샘플링 타임이 무응답 시간보다 긴 경우, 이산적으로 생성되는 가장 짧은 펄스가 샘플링 타임과 같은 길이가 되기 때문에 미소한 입력신호에도 무응답 시간 이상의 펄스가 고속전자밸브에 인가되어 유량이 유출된다. 그러므로 목표치 주변에서는 고속전자밸브의 연속적인 온-오프에 의한 심한 리미트사이클(limit cycle)이 발생한다.

고속전자밸브를 이용한 시스템에서 리미트사이클이 발생하지 않는 고정도의 제어를 행하기 위해서는 우선 샘플링 타임을 고속전자밸브의 무응답 시간 T_1 을 초과하지 않도록 설정할 필요가 있다. 또 제어의 정도를 향상시키기 위해서는 고속전자밸브의 온-오프 과도 상태를 이용할 수 있도록, 고속으로 샘플링을 행하면 된다. 더욱이 고속전자밸브의 무응답 시간과 상승시간의 경계에서 나타나는 미소한 온-오프에 의한 소음을 억제하기 위해서는 그림 17에 나타낸 바와 같이 먼저, T_1 구간을 넘지 않는 가능한 짧은 샘플링 타임을 설정하고, 샘플링 타임을 정수배 한 값이 무응답 시간 T_1 의 측정 오차 범위 내에 들어가는 것을 피하는 것이 좋다. 만약 고속전자밸브에 인가되는 입력 펄스가 그림 17의 오차 범위 내에 들어가면, 밸브로부터 유출되는 유량은 매우 미소하여 실린더의 변위는 거의 검출되지 않지만, 밸브의 온-오프가 연속적으로 반복될 가능성이 있고 이로 인한 심한 소음의 발생이 우려된다.

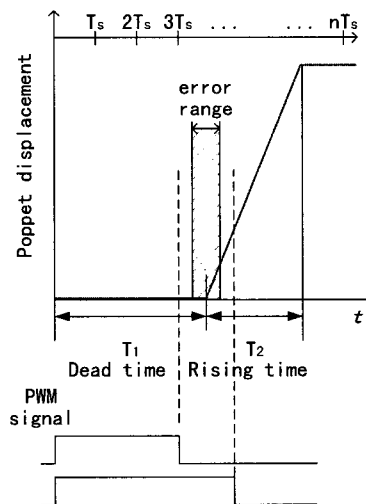


그림 17. 샘플링 타임의 결정 방법.

Fig. 17. Method for determination of sampling time.

4. 게인의 영향과 결정방법

고속전자밸브로 제어되는 전기·유압 서보시스템에서 발생하는 정상상태오차는 그림 12(b)에 나타낸 PWM변환의 게인 $1/U_{max}$ 를 조정해서 0에 근접시킬 수 있다. 그림 18

은 앞 절에서의 설명을 근거로 PWM 파라미터의 선정 지침에 따라 PWM 기본 변조주기 T_c 를 6[ms], 샘플링 타임을 0.03[ms]로 선정한 후, 게인이 시스템의 응답에 미치는 영향을 실험한 결과이다. 실험 결과로부터 알 수 있듯이 게인을 조정하면 정상오차가 발생하지 않으며, 정상상태에서 온-오프가 연속적으로 반복되는 리미트사이클도 발생하지 않는 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 또, 고속전자밸브의 실용화에 있어서 상당한 문제점으로 대두되었던 격심한 소음의 발생도 거의 나타나지 않는 정숙한 제어의 실현이 가능하였다.

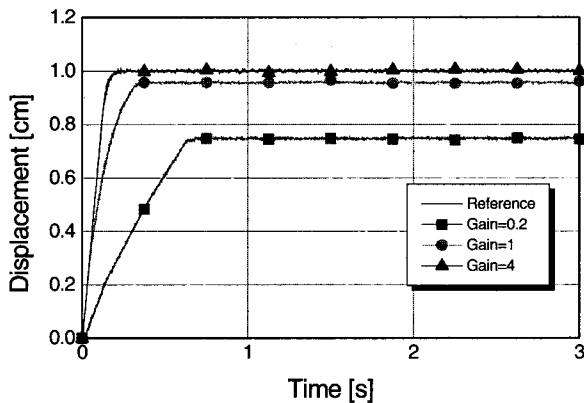


그림 18. 시스템 게인의 영향.
Fig. 18. Effect of system gain.

V. 결론

본 연구는 시판되고 있는 고속전자밸브를 강제적으로 종래 보다 고속으로 개폐하는 고속 구동용 회로를 제작하여, 고속전자밸브의 무응답 시간(dead-time)을 대폭 감소시키는 동시에 PWM의 파라미터인 게인, PWM의 기본 주기, 샘플링 타임을 선정하는 지침을 실험을 통하여 확립하였다. 더욱이 본 연구에서 제안한 고속 샘플링에 의한 이

산적인 PWM 변환을 이용하면, 고속전자밸브의 포펫이 상승 또는 하강하는 구간 중에 유출되는 극히 미소한 유량을 제어에 이용하는 것이 가능하므로 제어 정도가 현저하게 개선됨을 실험을 통하여 확인하였다.

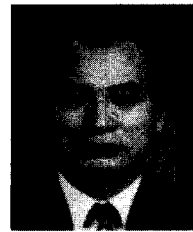
이러한 PWM방식은 PWM의 파라미터가 부하 및 시스템의 다른 파라미터 변동에 영향을 받지 않으므로 제어기로부터의 제어입력신호를 단순히 온-오프 신호로 변환하는 변환기로서 사용 가능하다. 또, PWM변환을 실현함에 있어 퍼스널 컴퓨터를 이용하면, 역수가 PWM변환을 위한 삼각파의 높이의 의미를 가지는 PWM게인을 수치적으로 자유롭게 조정 가능하다. 그러므로 게인의 조절에 다른 로버스트 제어기를 병행하면 보다 양호한 결과가 예상된다.

참고문헌

- [1] 田中裕久, 油空圧のデジタル制御と応用, 近代図書, 東京, 1995.
- [2] 박성환, 이진걸, “고속전자밸브를 이용한 유압실린더의 PWM제어에 관한 연구”, 한국정밀공학회 논문집, 제12권, 제7호, pp. 138-147, 7. 1995.
- [3] 박성환, 이진걸, “고속전자밸브를 이용한 유압전동장치 속도 제어에 관한 연구”, 한국정밀공학회 논문집, 제12권, 제7호, pp. 148-159, 7. 1995.
- [4] 佐藤恭一, 佐藤正次郎, 田中裕久, 矢内恭之, “高速電磁弁の切換え特性におよぼす渦電流の影響”, 油圧と空気圧, 第24巻, 第4号, pp. 504-510, 7. 1993.
- [5] 荒木一雄, 荻浦洋市, 浜本智, “電子油圧デジタル制御機器HYDISについて”, 不二越技報, 第42巻, 第1号, pp. 51-66, 1986.
- [6] Y. Shuxing, W. Shulan, L. Xiangzhu, and C. Fan, “On the frequency response characteristic of PWM high-speed on-off valves”, 2nd JHPS Symp. on Fluid Power, pp. 459-463, 1993.



박 성 환
1967년 11월 8일생. 1990년 부산대 정밀기계공학과 졸업. 1992년 동대학원 석사, 1996년 동대학원 박사. 1994년 ~ 현재 부산대학교 기계기술연구소 전임 연구원. 1998 ~ 현재 東京工業大學 大学院 理工學研究科 외국인 특별연구원. 관심분야는 유압제어 및 강인제어.



이 진 걸
1940년 9월 10일생. 1969년 건국대 축산대 졸업. 1973년 Kyoto 대학 대학원 석사, 1976년 동대학원 박사. 1977년 ~ 현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 유압제어 및 계측.