

3위치 솔레노이드 밸브를 이용한 유압 조타 장치의 제어에 관한 연구

심 성 호 · 이 학 도*

부경대학교 대학원 · *부경대학교 교육대학원

(1998년 3월 6일 접수)

A Study on a Control of Hydraulic Steering Gear by Using Three-position Solenoid Valve

Sung-Hyo SHIM and Hak-Do LEE

Pukyong National University, Graduate School,

*Pukyong National university, Graduate School of Education

(Received March 6, 1998)

Abstract

Generally, the three position solenoid valve has been used for the hydraulic steering gear on account of its low cost, simplicity in device, etc. But, there is some off-set because of dead-zone which exists in on-off valves.

In this paper, we proposed a combined controller which was added an integral controller to an only on-off one in hydraulic steering gear control system used low speed three position solenoid valve. Experimental results show that the off-set is removed, and the number of valve switching is reduced considerable. The validity of proposed method comparing with an only on-off control was proved by the response experiments.

서 론

유압 장치는 타 장치에 비해 상대적으로 작은 크기의 작동기(actuator)로서 큰 힘이나 토크를 발생시킬 수 있으며, 비교적 빠른 응답 특성을 가지고 있다. 또한, 작동기 사용 상태의 유연성으로 인하여 연속적 상태, 간헐적 상태, 역전 상태, 및 정동 상태 등에서도 작동기가 이상없이 작동하는 등의 이점을 가지고 있기 때문에, 오늘날 선박의 조타 장치를 비롯한 여러 서보 시스템에 널리 이용되고 있다.

유압 서보 시스템에서 정밀한 위치 제어를 하고자 할 경우에는 서보식 제어 밸브를 이용하는 것

이 바람직하다. 그러나, 시스템을 구성함에 있어 비용이 많이 들고 또한 장치도 복잡해지는 경향이 있다. 이에 반해 on-off식 제어 밸브를 이용할 경우에는 서보식에 비해 가격이 매우 저렴하고 구조도 간단해 지며, 오염에 대해서도 신뢰성이 비교적 높은 장점이 있다. 그러나, on-off식 제어 밸브는 그 작동에 있어서 밸브 입력의 15~20%에 이르는 dead-zone이 있으며, 이로 인하여 off-set이 발생하게 되므로 정밀한 위치 제어가 불가능해진다.

현재, 밸브가 dead-zone을 통과하는 시간을 짧게 하여 off-set을 줄이고자 하는 시도로서 고속 밸브를 이용하려는 연구가 행해지고 있으며, 이 경우 밸브의 구동 방식으로서 펄스폭 변조(Pulse

width modulation, PWM)방식이 널리 이용되고 있다. 그러나, 이 방식은 유체 흐름율이 작아 유량 증폭기를 별도로 사용해야 할 경우도 발생하므로 유압 장치의 구성면에서 다소 복잡해질 뿐만 아니라, 밸브의 빈번한 개폐로 인하여 소음과 밸브의 내구성에 문제가 발생하므로 이에 대한 연구가 현재 진행 중에 있다.^{2),3),4)}

또한, dead-zone의 크기는 밸브 포트 양단의 유압차와 부하의 크기에 따라 변화하며, 밸브 포트 양단의 유압차가 작을수록, 부하가 커질수록 커지는 경향이 있으므로 이를 보상하기 위한 제어기 설계에 대한 연구도 아울러 행해지고 있다.⁵⁾

한편, 선박의 경우에 있어서는 선체의 진동과 선박의 고립성을 감안해 볼 때, 고속 밸브보다는 상대적으로 내구성과 안정성이 뛰어난 저속 밸브를 사용하는 것이 더 적합하다. 저속 밸브를 사용하는 경우에 있어서, 보다 정밀한 위치 제어를 위해서는 밸브의 dead-zone을 줄여야 하나, 이러한 경우에는 유압 시스템이 진동을 하게 되어 불안정해지므로 dead-zone의 크기를 어떤 한도 이하로 작게 할 수는 없으며, 이로 인하여 어느 정도의 off-set 발생은 불가피한 실정이다. 또한, 이를 보상하기 위해서는 밸브가 빈번히 개폐되어야 하므로 밸브의 내구성에 문제가 발생하게 된다.

이러한 점을 개선하기 위하여, 본 연구에서는 저속 3위치 솔레노이드 밸브로서 on-off 제어를 행하는 유압 조타 제어 시스템에 연속 제어가 가능한 제어 시스템을 병행하는 것을 제안한다. 즉, 본 연구에서 제안된 제어기는 일반적인 on-off 제어가 가지는 off-set을 제거할 수 있도록 오차를 적분하는 적분기를 제어 시스템의 전향 경로상에 부가한 것으로서 시뮬레이션과 실시간 실험을 통하여 설계된 제어기의 타당성을 검토하였다.

제어계의 설계

1. 유압 서보 제어계

Fig.1은 본 연구에 이용된 유압 조타 장치의 개략도이다. 그 주요 구성 요소는 오일 탱크, 오일 필터, 유압 펌프, 수동식 3위치 제어 밸브, 3위치 솔

레노이드 제어 밸브, 유압 실린더 및 포텐쇼미터 등으로 이루어져 있다. 수동식 3위치 제어 밸브(이하 수동 밸브) 및 솔레노이드 3위치 밸브(이하 솔레노이드 밸브)는 공히 센터 바이패스형(center bypass type)으로서, 외력이 가해지지 않은 중립 상태에서는 밸브에 유입된 유압유는 오일 탱크로 우회하도록 되어 있다.

조타 장치는 실제 선박에서 적용 가능하도록 수동 및 자동 모드로 작동되게 하였다. 타를 수동으로 제어할 경우에는 수동 밸브를 좌 또는 우로 수동으로 이동시킴에 따라 유압 실린더가 이에 연동되어 구동되도록 함으로써 타를 제어하도록 되어 있다. 이와는 달리, 타를 자동으로 제어할 경우에는 각도 지령 θ , 에 따른 제어 입력 u 의 의해서 솔레노이드 밸브의 좌측 또는 우측의 코일을 여자시킴으로써 솔레노이드 밸브를 작동시켜 타를 제어하도록 되어 있다. 이때, 솔레노이드 밸브의 작동 원리는 다음과 같다. 즉, 조타기의 각도에 따른 potentiometer의 출력 전압을 A/D converter에서 디지털 신호로 변환한 뒤, 이를 컴퓨터가 입력 받아서 조타기의 각도를 계산하고 제어기의 출력을

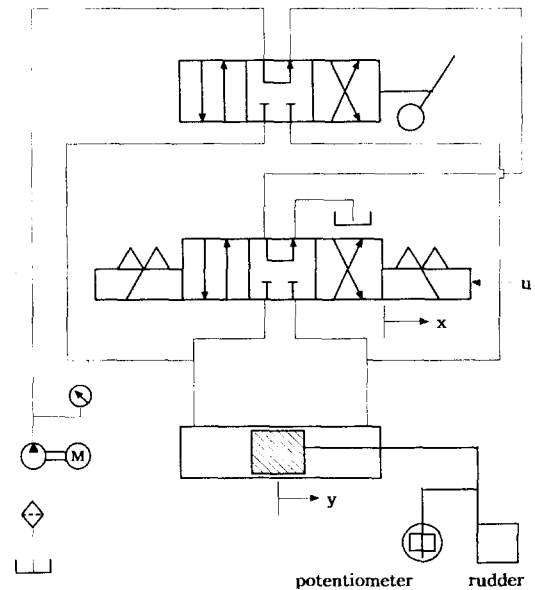


Fig.1. Schematic diagram of hydraulic steering gear.

결정한 뒤, 출력 신호를 D/O를 통하여 출력하고, 이 신호를 Amp.가 증폭하여 제어 입력 신호로 내보냄으로써 솔레노이드 밸브를 작동시킨다.

한편, 조타 장치를 자동 모드로 운전할 경우, 이때 수동 밸브는 반드시 중립 위치에 있어야 하며, 만약 수동 밸브와 솔레노이드 밸브가 동시에 작동되었을 경우에는 수동식 밸브가 솔레노이드 밸브에 우선하게 되어 있다.

Fig.2는 유압 서보 시스템의 개략도이다. 그림에서 점선 부분은 Fig.1중에서 자동 모드 부분을 간략화하여 블록 선도로 표시한 것이다. 증폭기(Amp.)는 솔레노이드 밸브를 구동하기 위해 제어기 출력 신호를 증폭하기 위한 것이고, 제어기는 기존의 on-off 제어기에 본 연구에서 제안하는 방식의 알고리즘이 포함되어 있으며, Potentiometer는 각도 지령 θ_r 에 대한 실제의 각도 변위 θ 를 측정하기 위한 것이다.

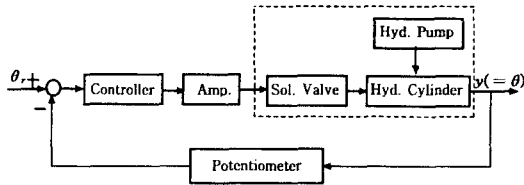


Fig.2. Block diagram of hydraulic servo system.

Fig.3은 솔레노이드 밸브를 구동하기 위한 증폭기 회로도이다. 그림에서 파워 트랜지스터(BDW93C)는 솔레노이드 밸브를 구동하기 위한 것이고, 소자 ULN2803은 트랜지스터의 베이스를 구동하기 위한 것이다.

그림 중의 10[KΩ]의 저항은 컴퓨터로부터 출력된 2차 신호가 하이 임피던스(high impedance)로 되는 것을 방지하기 위한 것이고, S/V로 표기된 솔레노이드 코일에 병렬로 연결된 다이오드는 솔레노이드 코일이 소자될 때 발생하는 큰 유도 기전력을 소멸시켜 트랜지스터를 보호하기 위한 것이다.

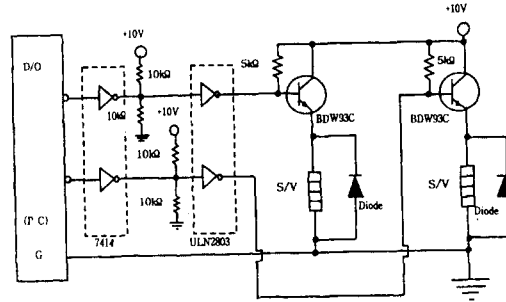


Fig.3. Circuit of drive amplifier.

2. 유압 서보 시스템의 모델링

유압 서보 시스템에 대한 모델링은 기름의 누설과 부하에 가해지는 외력을 무시할 경우에는 일반적으로 다음과 같이 주어진다.^{6),7),8)}

제어 밸브에 있어서 입력 전압 $u(t)$ 와 스톱의 변위 $x(t)$ 와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx(t)}{dt} + \frac{x(t)}{T_1} = K_1 u(t) \quad (1)$$

여기서, T_1 는 제어 밸브의 시정수이며, K_1 은 입력 전압 비례 상수로서 입력 전압에 대한 증폭기 이득과 이에 대한 제어 밸브 이득과의 곱이다

식 (1)을 라플라스 변환하여 제어 밸브 시스템의 전달 함수를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \quad (2)$$

한편, 제어 밸브의 구동에 의해서 유압 실린더에 유입된 기름은 유압 피스톤의 단면적 A 와 피스톤 양면의 압력차 ΔP 의 곱에 해당하는 힘으로 유압 피스톤에 작용한다. 이때, 유압 피스톤에 생성된 힘은 피스톤을 출력 변위 $y(t)$ 만큼 이동시키면서 부하를 움직이게 하므로 유압 실린더 시스템의 운동 방정식은 다음과 같이 된다.

$$A\Delta P = m \frac{d^2 y}{dt^2} + D \frac{dy}{dt} + ky \quad (3)$$

여기서 m 은 유압 피스톤 및 부하의 합성 질량, D 는 유압 실린더 및 부하의 합성 점성 마찰 계수, 그리고 k 는 부하의 스프링 상수이다.

유압 실린더 시스템에 있어서 기름의 체적 유입을 Q 는 입력 변위 $x(t)$ 와 유압 피스톤의 양단에 가해지는 압력차 ΔP 의 함수로서 비선형적이다.

$$Q = g(x, \Delta P) \quad (4)$$

그러나, 시스템이 동작점 $(x_0, \Delta P_0)$ 주위에서 작동하고 입력 신호가 작은 신호인 경우에는 다음 식과 같이 Taylor 급수 선형화할 수 있다.

$$Q = \left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_{x_0, \Delta P_0} x + \left(\frac{\partial g}{\partial \Delta P}\right)_{\Delta P_0, x_0} \Delta P = K_x x - K_{DP} \Delta P \quad (5)$$

여기서, $g = g(x, \Delta P)$ 이며, 각 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$K_x = \left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_{x_0, \Delta P_0}; \text{ 제어 밸브의 유량 이득}$$

$$K_{DP} = \left(\frac{\partial g}{\partial \Delta P}\right)_{\Delta P_0, x_0}; \text{ 제어 밸브의 압력 유량 계수}$$

또한, 기름의 체적 유입율은 다음과 같이 주어진다.

$$Q_i = Q_i' + \frac{\beta V}{2} \frac{d\Delta P}{dt} \quad (6)$$

식(6)에서 우변의 첫째항은 피스톤을 이동시키는데 이용되는 기름의 체적 유입율을 나타내고 있다. 또한, 둘째항은 피스톤의 이동에 의해 발생하는 피스톤 양단의 압력차의 변화에 따른 기름의 체적 유입율로서 다음식과 같이 주어진다.

$$Q_i' = A \frac{dy}{dt} \quad (7)$$

따라서, 식(3)을 식(5)에 대입한 결과 및 식(3)과 식(7)를 식(6)에 대입한 결과를 정리하면 다음과 같이 선형화된 유압 실린더 시스템의 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$K_x x = \frac{m\beta V}{2A} \frac{d^3 y}{dt^3} + \left(\frac{D\beta V}{2A} + \frac{mK_{AP}}{A}\right) \frac{d^2 y}{dt^2} + \left(\frac{k\beta V}{2A} + \frac{DK_{AP}}{A} + A\right) \frac{dy}{dt} + \frac{kK_{AP}}{A} y \quad (8)$$

식 (8)을 Laplace 변환하여 유압 실린더 시스템의 전달 함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = K_x \left\{ \frac{m\beta V}{2A} s^3 + \left(\frac{D\beta V}{2A} + \frac{mK_{AP}}{A}\right) s^2 + \left(\frac{k\beta V}{2A} + \frac{DK_{AP}}{A} + A\right) s + \frac{kK_{AP}}{A} \right\} \quad (9)$$

유압계와 부하계의 합성 부하가 관성 부하 및 점성 저항 부하만이고, 기름의 압축성을 무시할 수 있는 경우에는 전달 함수는 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{X(s)} &= \frac{K_x}{s \left(\frac{mK_{AP}}{A} s + \frac{DK_{AP}}{A} + A\right)} \\ &= \frac{K_2}{s(T_2 s + 1)} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

$$K_2 = \frac{AK_x}{DK_{AP} + A^2}, \quad T_2 = \frac{mK_{AP}}{DK_{AP} + A^2}$$

따라서, 작동유를 비압축성 유체로 간주하고 관성 및 점성 마찰만을 고려한 경우에 있어서, 전체 시스템의 전달 함수는 식 (2)와 식 (10)으로부터 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (11)$$

여기서,

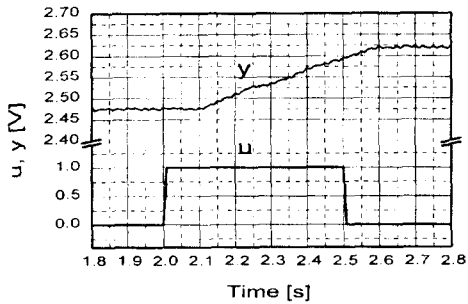
$$K = K_1 K_2$$

유압 서보 시스템에 있어서 on-off식 제어 밸브를 사용하는 경우 등과 같이 시간 지연 요소가 시스템 내에 존재할 경우에는 식 (11)은 다음과 같이 된다.

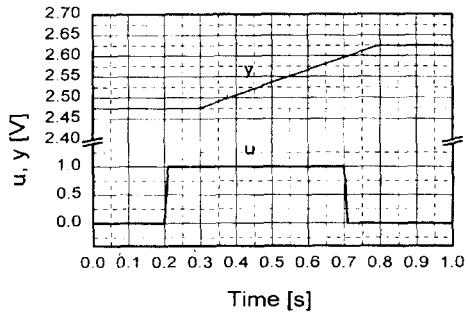
$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-Ls} \quad (12)$$

모델링된 식들 중의 각 파라미터 값들을 동정하기 위하여 개루프상에서 스텝 입력을 0.5초 동안 가한 결과의 응답은 Fig.4 (a)와 같다. 이 그림을 살펴보면, 입력을 가한 후로부터 약 0.1초 정도의 일정 시간이 경과한 후에 응답이 나타나기 시작하였으며, 응답이 나타나기 시작한 후부터는 일정한 기울기로 계속 증가하는 것을 알 수 있다.

이 그림의 응답특성은 지연시간 L 을 갖는 적분계와 유사함을 알 수 있으며, 이는 식(12) 중의 T_1 , T_2 를 매우 작은 값으로 동정할 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 $T_1=T_2=0$, $L=0.1$, $K=0.3$ 으로 동정하였다. 그리고 이 값들을 이용하여 참고로 응답시물레이션한 결과는 Fig.4의 (a)와 같다.



(a) Experiment



(b) Simulation

Fig.4. Step response of open loop system.

3. 제어기의 설계

Fig.5는 본 연구에서 제안된 제어 시스템에 대한 블록 선도를 나타낸 것이다. 본 연구에서 제안

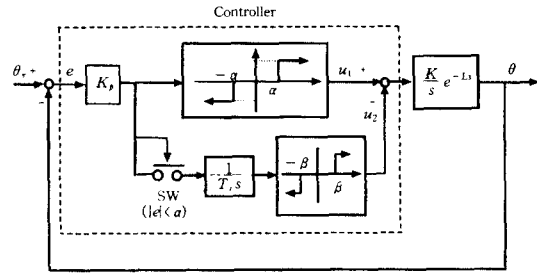


Fig.5. Block diagram of designed control system.

하는 제어기의 구조는 오차 신호 e 에 대해 on-off로 작동하는 제어기와 오차를 적분하는 제어기로 구성되어 있다. 즉, 오차 신호 e 가 어떤 오차 상한값 또는 오차 하한값을 넘을 경우에 작동하는 제어기와, 오차 신호가 오차 상하한값 사이에 있을 때 오차를 적분하여 그 적분값이 어떤 상하한값을 넘을 경우에 작동하는 제어기로 구성되어 있다. 그림에서 $\pm\alpha$ 는 오차 상하한값, $\pm\beta$ 는 적분값의 상하한값, K_p 는 비례 상수, T_i 는 적분 상수이다.

Fig.6은 Fig.5의 점선 부분을 컴퓨터로 실현하

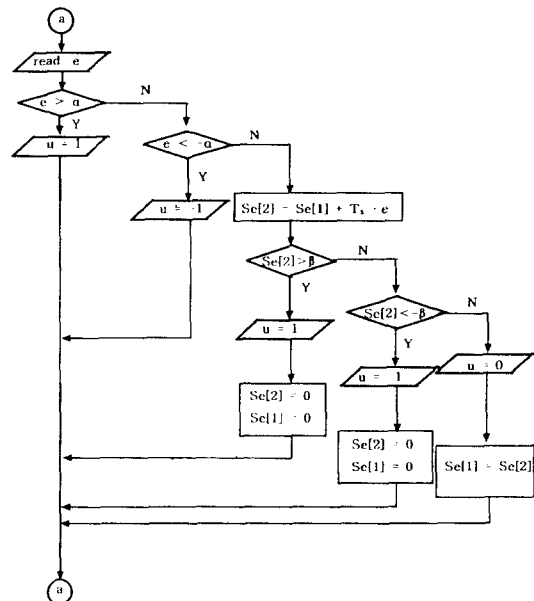
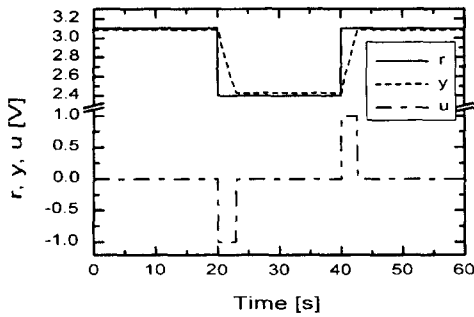
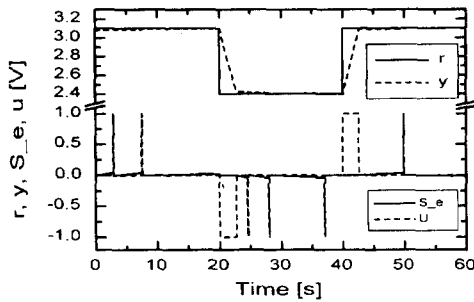


Fig.6. Flow chart of control algorithm.



(a) Only on-off control



(b) Designed on-off control

Fig.7. Step response of control system.

기 위한 제어 알고리즘을 나타낸 플로 차트이다. $e > \alpha$ 인 경우에는 $u = 1$ 을, $e < -\alpha$ 인 경우에는 $u = -1$ 을 솔레노이드 밸브를 구동시키는 제어 입력으로 내보냄으로써 조타 장치를 좌우로 작동할 수 있도록 한다. 또한, $-\alpha \leq e \leq \alpha$ 인 구간에서는 오차 신호 e 의 적분값 Se 가 $-\beta \leq Se \leq \beta$ 인 구간 사이에 있는 동안에는 e 를 계속 적분하여 그 적분값이 $\pm\beta$ 를 넘게 되면 솔레노이드 밸브를 구동시키는 신호를 내보내게 되며, 동시에 그때까지의 적분값을 0으로 되돌린다. 이렇게 함으로써 dead-zone을 갖는 on-off 제어에 의존할 경우에 발생하는 off-set을 제거할 수 있다.

실험 결과

Fig.7 (a)는 각 위치 지령에 대해 단순 on-off 제어기에 의한 응답 실험 결과로서, 솔레노이드 밸브

를 구동시키는 신호 u 에 대해서 추종값 y 와 지령값 r 사이에 off-set이 존재함을 알 수 있다.

한편, Fig.7 (b)는 본 연구에서 제안된 on-off 제어기에 의한 응답 실험 결과이며, 오차 신호를 적분하여 솔레노이드 밸브를 구동시키는 펄스를 발생시킴으로써 off-set이 점차 제거되어 지는 것을 볼 수 있다. 또한, off-set이 줄어들며 따라 오차 신호의 적분에 의한 구동 펄스의 간격도 점차 길어짐을 알 수 있으며, 만약 off-set이 0이 되면 구동 펄스도 발생되지 않게 된다. 지령값에 대한 명령 추종성과 밸브의 개폐 빈도는 요구되는 사양에 따라 Fig.5의 각 계수값을 변경함으로써 조정이 가능하며, 본 연구에서는 각 계수값을 다음과 같이 실험적으로 결정하였다.

$$\alpha = 0.1, \beta = 0.04, K_p = 2.0, T_i = 0.4$$

결 론

본 연구에서 제안한 제어기는 on-off 제어와 적분기를 결합한 것으로, 오차의 크기가 큰 과도상태에서는 on-off 제어 동작을 행하여 속응성을 향상시키고, 오차의 크기가 비교적 작은 정상상태에서는 오차를 적분함으로써 off-set을 현저하게 감소시켰으며, 목표치에 대한 명령 추종성과 밸브의 개폐 빈도도 요구되는 사양에 따라 제어기의 계수값을 변경함으로써 조정이 가능하였다.

또한, 유압 조타 장치의 구성면에 있어서 수동 제어 모드와 자동 제어 모드 운전을 위한 제어 밸브들을 센터 바이패스형으로서 적절히 구성함으로써 릴리프 밸브를 생략할 수 있었다.

아울러 본 연구에서 제안된 제어기와 유압 장치의 구성이 유압 조타 장치에 적용될 경우, 저속 on-off 제어 밸브를 이용하면서도 보다 정밀한 위치 제어가 가능하며, 저렴하고 간단하면서도 신뢰성이 높은 시스템의 구성과 제어 밸브의 내구성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) Katsuhiko Ogata(1990) : Modern Control Engineering, Prentice-Hall, Inc., 209~210.

- 2) Shigeru IKEO, Kennichi FURUKAWA, Shinji YAKABE, Yasuo SAKURAI and Koji TAKAHASHI(1996) : Characteristics of New Type Flow Control Cartridge Valve Using PWM Method. The third JHPS International Symposium. 213~216.
- 3) Ato KITAGAWA, Kazushi SANADA, and Pingdong WU (1996) : A Study on Continuous Control of Flow Rate with a PWM-controlled Logic Valve. The third JHPS International Symposium. 325~330.
- 4) Hirano YMADA, Guy Wennmacher, Takayoshi MUTO, Yoshikazu SUEMATSU (1996): Development of a High-speed On/Off Digital valve for Hydraulic control systems Using a Multilayered PZT Actuator. The third JHPS International Symposium. 331~336.
- 5) Wang Qing, Gu Linyi, Han Bo and Yongxiang(1996): Research on Compensation for Variable Dead-zone Characteristic of Electro-hydraulic Proportional Direction Valve Position Control. The third JHPS International Symposium. 207~212.
- 6) Katsuhiko Ogata(1990) : Modern Control Engineering, Prentice-Hall, Inc., 146~149.
- 7) 이일영(1997) : 제어용 서보 구동 시스템 설계 기술, 부경대학교 산학협동연구센터, 6-13~15.
- 8) 岡田養二, 長坂長彦(1985) : サ-ボアクチュエタその制御, コロナ社, 169~172.