

## MR유체 스폴을 이용한 온-오프 밸브의 PWM제어

양택주\*, 배형섭(부산대 대학원 지능기계공학과), 박명관(부산대 기계공학부)

### PWM Control of On-Off Valves using MR Fluid Spool

T. J. Yang\*, H. S. Bae(Mech. Eng. Dept., PNU), M. K. Park(Mech. Eng. Dept., PNU)

#### ABSTRACT

Almost the on-off type solenoid valve is used to hydraulic system. It has a strong point that concerned about rapid response, electric and hydraulic characteristic at the same time. In this paper we produced the new type spool using the MR fluid different from the others. Also we controlled a cylinder position through PWM method. And using the AMESim software, We compared our new type spool valve with existed one from data of simulation and experiment.

**Key Words** : Magneto-Rheological Fluid(MR유체) , Pulse Width Modulation(펄스폭 변조) , Solenoid(솔레노이드) , On-off spool valve(온-오프식 스폴밸브) , Cylinder(실린더) , AMESim(Advanced Modeling Environment for performing Simulations)

#### 1. 서론

산업현장에서 사용되어지고 있는 유압 시스템에서 온-오프 솔레노이드 밸브는 많은 부분에서 사용되어지고 있다. 그 이유는 온-오프 솔레노이드 밸브가 전기적이고 유압적인 특성을 동시에 가지고 있으며 또한 신속한 응답특성을 가지고 있기 때문이다. 본 논문에서는 기존의 온-오프 밸브 내부에 들어있는 스폴을 새로운 형태의 스폴로 제작하여 새로운 온-오프식 밸브를 개발 하였다. 새로운 밸브는 스폴의 내부에 초상자성체의 성질을 가지고 있으며 솔레노이드를 통해 전기를 인가하면 자기장을 형성하여 밸브의 온-오프역할을 할 수 있는 MR유체 스폴을 가지고 있는 밸브이다. 이런 새로운 MR유체 스폴을 가진 온-오프 밸브를 제작하여 유량, 압력, 응답특성 그리고 실린더의 정밀위치제어를 수행하고 기존의 밸브와 비교하고자 한다. 또한 밸브의 전체적인 제어는 현재 온-오프 밸브의 제어에 많이 사용되어지고 있는 PWM(Pulse Width Modulation)제어 방식을 사용하였다. 본 논문에서는 실험장치를 제작하여 기존의 온-오프 밸브와 비교하기에 앞서 우선 스폴의 운동 지배 방정식 그리고 솔레노이드와 MR유체 스폴

사이의 상관관계를 수학적인 모델링을 통해 구현하였다. 그리고 이런 수학적인 모델링을 가지고 AMESim V4.0(Advanced Modeling Environment for performing simulation)을 통해 시뮬레이션을 수행하였으며 AMESim을 이용하여 스폴의 사양에 따른 PWM제어시 실린더 사양의 최적환경을 고려한 설계값을 구현 하고자 한다.

#### 2. 운동 지배 방정식

##### 2.1 Valve Spool

유압장치에 사용되는 각종 밸브는 공통적으로 밸브 내의 스폴의 이동에 의해 압력제어, 유량제어 등과 같은 원하는 제어를 하는 원리를 가진다. 따라서 밸브의 동특성은 바로 스폴의 운동 특성이라고 해도 좋다. 스폴의 운동에 미치는 힘에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 스폴의 양단에 미치는 압력과 유체력을 고려하였으며 Spring force(Spring에 의한 feedback 힘)는 밸브 설계시 스프링을 제거하였으므로 존재하지 않는다. 그리고 밸브 몸체와의 마찰력은 고려하지 않으며 밸브 내에서 스폴과 유체 사이에 작용하는

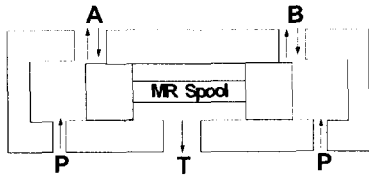


Fig. 1. Picture of MR Spool valve.

유체의 압축성 효과는 무시한다. 스푼의 운동 지배 방정식은 Fig. 1.에서 스푼 좌, 우측에서의 유체 분출과 유입을 고려하여 다음과 같다.

① 좌측(A)에서 분출하는 경우

$$\begin{aligned}
 F_{psA} = & -2C_q C_v w x_s (P - P_1) \cos\theta_1 \\
 & - \rho L_A C_q w \sqrt{2(P - P_1)/\rho} \frac{dx_s}{dt} \\
 & - \frac{C_q w L_A x_s}{\sqrt{2(P - P_1)/\rho}} \frac{d(P - P_1)}{dt}
 \end{aligned} \quad (1)$$

② 우측(B)에서 유입되는 경우

$$\begin{aligned}
 F_{psB} = & -2C_q C_v w x_s P_2 \cos\theta_2 \\
 & + \rho L_B C_q w \sqrt{2P_2/\rho} \frac{dx_s}{dt} \\
 & + \frac{C_q w L_B x_s}{\sqrt{2P_2/\rho}} \frac{dP_2}{dt}
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $C_q$ 는 유량계수,  $C_v$ 는 속도계수,  $C_e$ 는 수축계수,  $P$ 는 공급압력,  $P_1, P_2$ 는 실린더 좌우 공급압력,  $x_s$ 는 스푼의 변위,  $w$ 는 스푼의 폭,  $\theta$ 는 유체의 세트각도,  $\rho$ 는 밀도,  $L$ 은 스푼의 길이이다. 그러므로 식(1)과 식(2)를 통하여 밸브 내에 작용하는 총 유체력을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_m = & F_{psA} + F_{psB} \\
 = & -2C_q C_v w x_s \{ (P - P_1) \cos\theta_1 \\
 & + P_2 \cos\theta_2 \} - \rho C_q w \{ L_A \sqrt{2(P - P_1)/\rho} \\
 & - L_B \sqrt{2P_2/\rho} \} \frac{dx_s}{dt} - C_q w \{ L_A x_s \\
 & \left[ \frac{1}{\sqrt{2(P - P_1)/\rho}} \frac{d(P - P_1)}{dt} - \frac{1}{\sqrt{2P_2/\rho}} \frac{dP_2}{dt} \right] \}
 \end{aligned}$$

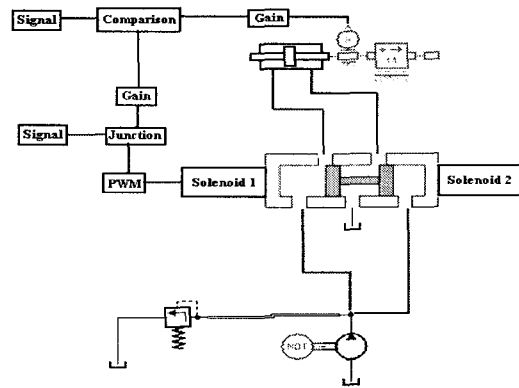


Fig. 2. Simulation model in AMESim.

## 2.2 MR유체 Spool

Fig. 2.는 밸브 내에 새로운 형태의 MR유체 스푼을 넣어서 AMESim 소프트웨어를 사용하여 디자인을 한 것이다. 그리고 MR 유체 스푼과 솔레노이드와의 상관관계는 다음 식들을 통해서 모델링 하였다.

③ MR 유체 스푼의 지배 방정식

$$\begin{aligned}
 M \frac{d^2 x_s}{dt^2} + C \frac{dx_s}{dt} \\
 = -F_{ml} + F_{mE} + F_f
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$F_{ml} = \frac{\mu_s N^2 A l^2}{2x_s^2} \quad (5)$$

$$F_{mE} = \frac{\mu_s N^2 A l^2}{2x_s^2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 F_f = & -2C_q C_v w x_s \{ (P - P_1) \cos\theta_1 + P_2 \cos\theta_2 \} \\
 & - \rho C_q w \{ L_A \sqrt{2(P - P_1)/\rho} - L_B \sqrt{2P_2/\rho} \} \frac{dx_s}{dt} \\
 & - C_q w \{ L_A x_s \left[ \frac{1}{\sqrt{2(P - P_1)/\rho}} \frac{d(P - P_1)}{dt} - \frac{1}{\sqrt{2P_2/\rho}} \frac{dP_2}{dt} \right] \}
 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $M$ 은 스푼질량,  $C$ 는 스푼의 마찰력,  $F_{ml}, F_{mE}$ 는 솔레노이드에 의한 당기는 힘,  $F_f$ 는 유체력,  $\mu_s$ 는 자유공간 내의 투자율,  $N$

는 코일의 감은 수,  $A$ 는 코일의 단면적,  $i$ 는 전류이다. 그러나 시간에 따른 압력의 변화가 일정하고 좌, 우측의 제트 양상과 틈새 폭 등의 각종 계수는 대칭으로 서로 같으므로 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{jet} = -2C_d C_{jw} x_s \{ (P - P_1 + P_2) \cos \theta \} - \rho C_{d,w} \{ L_A \sqrt{2(P - P_1) \rho} - L_B \sqrt{2P_2 \rho} \} \frac{dx_s}{dt} \quad (8)$$

그래서 MR 유체 스프링과 슬래노이드 사이에 작용하는 힘은 식(9)로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} M \frac{d^2 x_s}{dt^2} + C \frac{dx_s}{dt} &= -F_{mi} + F_{me} + F_f \\ &= -\frac{\mu_s N^2 A i^2}{2x_s^2} + \frac{\mu_s N^2 A i^2}{2x_s^2} \\ &= -2C_d C_{jw} x_s \{ (P - P_1 + P_2) \cos \theta \} - \rho C_{d,w} \{ L_A \sqrt{2(P - P_1) \rho} - L_B \sqrt{2P_2 \rho} \} \frac{dx_s}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

### 3. Simulation 및 결과

MR 유체 밸브 시스템은 Fig. 2와 같이 시스템을 디자인을 했으며 전체 시뮬레이션 시간은 30s로 하였으며 밸브의 유량, 압력, 실린더의 변위 그리고 피스톤의 속도를 시뮬레이션 통하여 알아보았으며 각각에 대한 결과는 Fig.3, Fig.4, Fig.5, Fig.6에 나타나 있다. Fig.5.에서는 실린더 입구 포트에서의 입력속도를 나타내고 있으며 Fig.4.는 실린더 출구 포트에서의 유량을 나타낸다. 입구에서 들어가는 유량과 출구에서 나오는 유량은 상반되는 결과로 나타남을 알 수 있다. Fig.6.은 실린더 입, 출구에서의 압력을 나타내고 있으며 입구측은 입력 신호에 따른 압력 특성(1)을 나타내고 있으며 출구에서의 압력(2)은 탱크로 귀환 되므로 입력 신호의 영향을 받지 않는 압력 특성을 보여주고 있다. Fig.3.은 PWM신호에 따른 실린더 변위를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 0.04m의 입력신호를 주었을 때 약0.041m의 변위를 가지며 약 2.4%의 오차를 나타내고 있다. 또한 상승시간은 유량과 관련이 있으며 이것은 실린더나 스프링의 사양에 따라 조절할 수 있다.

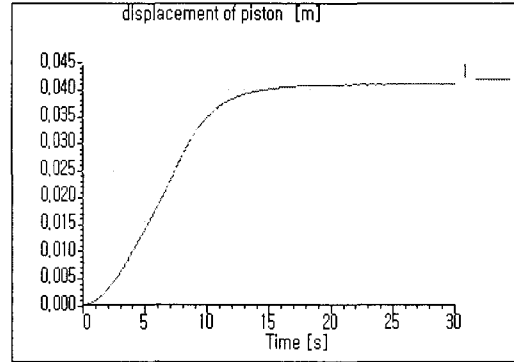


Fig. 3. Picture of displacement of piston.

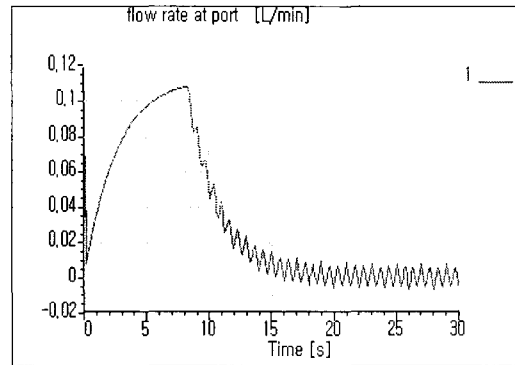


Fig. 4. Picture of flow rate at port

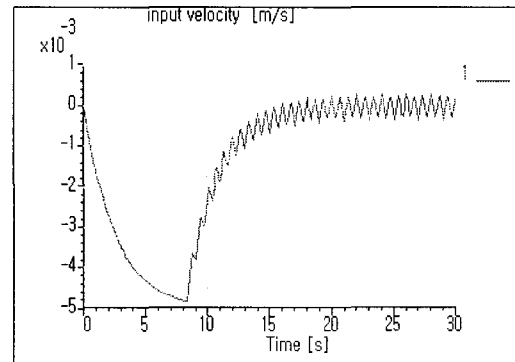


Fig. 5. Picture of input velocity.

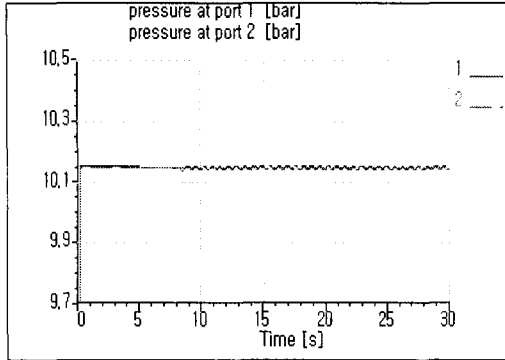


Fig. 6. Picture of pressure at port 1, 2.

#### 4. 결론

본 논문에서는 기존의 온-오프 밸브내의 스펙과 다른 형태의 MR 유체 스펙을 가지고 PWM 제어를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과를 가지고 실제 시스템을 만들어 비교하고자 한다. Fig. 3-6에서 볼 수 있듯이 기존의 온-오프 밸브와 흡사한 결과들을 얻을 수 있었다. 그리고 또한 직접 시스템을 설계하여 제작하지 않고 시뮬레이션만으로도 최적의 시스템 모델을 디자인하고 성능을 알아 볼 수 있다는 이점을 가지고 있다. 또한 시뮬레이션을 통해서 시스템 모델시 필요한 최적의 설계 파라미터들을 얻을 수 있다는 것 또한 하나의 장점이라고 할 수 있으며 이것으로 최적설계 프로그램을 개발 할 수 있다.

#### 참고문헌

1. AMESim, "AMESim ver\_4.0", 2002.
2. Herbert E. Merritt, "Hydraulic control systems," John Wiley & Sons, Inc. pp.112-118, 1967.
3. John Watton, "Fluid Power Systems," Prentice Hall, pp.95-116, 1989.
4. R. E. Rosensweig, "Ferrohydrodynamics," Dover Publications, Inc.
5. H. R. Martin and D. McCloy, "The control of fluid power," John Wiley & Sons, Inc. pp.81-98, 1973.
6. Anthony Esposito, "Fluid Power with Applications," Prentice Hall, pp.347-359.
7. 송동주, 부정숙, 김정천, 석용권, "유체역학," Pearson Education Korea.
8. 석용권, "유압제어공학," 경분사, pp.193-198.

9. 배상기, 현장환, 이정오, "유체력을 이용한 직동식 비례 조절 밸브에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 4, 1998.
10. 黄世俊, "油空壓의 디지털制御와 應用," 機電研究社, pp.30-40, 1989.