한국동력기계공학회지 제17권 제1호 pp. 77-84 2013년 2월 (ISSN 1226-7813)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering

MRC를 이용한 비례압력제어밸브의 강인한 제어에 관한 연구

Study on Robust Control for Proportional Pressure Control Valve with MRC

윤소남*† · 정황훈* · 이일영**
So-Nam Yun*† , Hwang-Hun Jeong* and Ill-Young Lee**

(접수일 : 2012년 04월 17일, 수정일 : 2012년 08월 13일, 채택확정 : 2012년 08월 29일)

Abstract : The proportional pressure control valve that was used to relief valve has different dynamic characteristics on each case. Because this valve has different assembling or processing error and environmental condition. However, a customer who used the relief valve wants to have a steadily performance even if the dynamic characteristics of valve was changed. For this reason, the manufacturer try to make the robust controller that has simple structure. This paper concerns about the design of robust controller that didn't affected by plant parameter's changing. The control strategy is a model reference control that conducted by on line identification problem, gradient method and Lyapunov equation. This adaptvie control law's validity that this paper deal with was confirmed by an results of step response test or hysteresis test.

Key Words : Proportional pressure control valve, Robustness, Model reference controller

1. 서 론

산업 전반에 사용되는 유압시스템은 작동유체의 압력과 유량, 방향을 제어함으로써 설계자가 원하는 기능을 수행할 수 있도록 설계되었다. 릴리프 밸브는 작동유체의 압력을 설정치 이하로 제어하는 밸브로 유압시스템의 오작동에 의한 과부하를 막는 중요한 밸브 중에 하나이다. 따라서 릴리프 밸브가 설정된 압력에서 제대로 동작하는 것은 유압시스템의 신뢰성에 직접적인 영향을 끼치는 중요한 기능이다.[1,2)]

일반적으로 대량 생산되는 유압제어 밸브들은 산업현장에서 사용되는 조건과 제조 환경에 따라 밸브의 동특성이 다른 특징을 가지고 있다. 하지만, 밸브를 사용하는 유저는 사용할 밸브의 동특성이 일정하기를 원한다. 이에 따라 밸브 제조사에서는 간단한 구조를 가지면서도 변동되는 밸브 내부 변수에 둔감한 강인한 제어기를 설계하고자 노력하고 있다.[3)]

본 연구에서는 모델참조(Model reference)기법을

*† 윤소남(교신저자) : 한국기계연구원 극한기계부품연구본부
E-mail : ysn688@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7155
*정황훈 : 한국기계연구원 극한기계부품연구본부
**이일영 : 부경대학교 기계자동차공학과

*† So-Nam Yun(corresponding author) : Extreme Mechanical Engineering Research Div., KIMM.
E-mail : ysn688@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7155
*Hwang-Hun Jeong : Extreme Mechanical Engineering Research Div., KIMM.
**Ill-Young Lee : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University

이용하여 제어대상의 내부 파라미터가 변동되더라도 일정한 제어성능을 이끌어낼 수 있는 적응제어기를 설계하고자 한다. 또한, 설계된 제어기의 타당성은 실험을 통해 확인하고자 한다.[4-6)]

2. 제어기 설계

2.1 제어대상

Fig. 1은 다단식 비례압력 제어밸브의 개략도이다. 작동 유량이 큰 유압시스템에 적용하기 위하여 파일럿 밸브와 메인 밸브로 구성된 2단의 비례압력 제어밸브이며, 최대 작동압력은 250bar, 최대 유량은400lpm이다.[5)] 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 다단식 비례압력 제어밸브 2대에 대하여 설계한 적응제어기의 타당성을 실험을 통해 확인하였다.

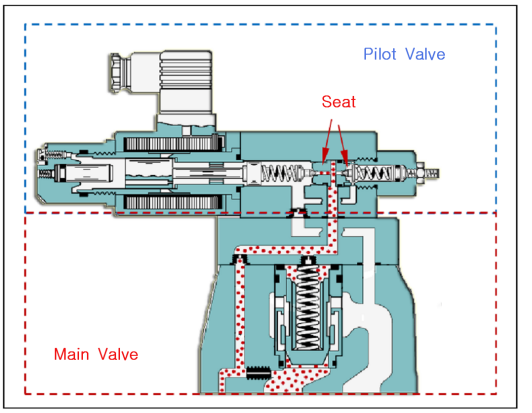


Fig. 1 Schematic diagram of the 2 stage roportional pressure control valve

2.2 적응제어칙의 유도

주어진 시스템의 제어기는 참조모델의 상태와 기준입력을 추종하는 적응제어기이며, 이를 만족하는 제어기를 설계하기 위해서는 제어대상을 블랙박스로 가정한다. 제어대상에 대한 상태방정식을 식(1)과 같이 정의한다.

$$\dot{x} = ax + bu \tag{1}$$

이 때, a, b는 알 수 없는 파라미터 값이다. 단 b의 부호는 알 수 있다고 가정한다.

기준모델에 대한 상태방정식은 식(2)와 같이 정의한다.

$$\dot{x}_m = a_m x_m + b_m r \tag{2}$$

여기서, $r(t)$는 시간의 연속함수이며, a_m>0, b_m은 알 수 있는 값이다.

식(2)를 라플라스 변환하여 정리하면 식(3)과 같다.

$$X_m = \frac{b_m}{s + a_m} R \tag{3}$$

설계자가 원하는 모델의 상태 x를 추종하기 위한 기준입력 r에서 출력 x까지의 폐루프 전달함수의 제어칙은 식(4)와 같다. 0

$$u = -k^* x + l^* r \tag{4}$$

이 제어시스템의 목적은 기준입력 r에 대하여 식(4)와 같은 제어입력을 가지는 시스템의 출력 x가 기준모델의 출력 x_m과 동일하게 제어하는 것이다. 따라서 제어 목적에 따라 식(5)가 성립한다.

$$\frac{X}{R} = \frac{bl^*}{s - a + bk^*} = \frac{b_m}{s + a_m} = \frac{X_m}{R} \tag{5}$$

식(5)의 관계로부터 k^*와 l^*는 식(6), 식(7)과 같이 계산된다.

$$l^* = \frac{b_m}{b} \tag{6}$$

$$k^* = \frac{a_m + a}{b} \tag{7}$$

식(6)과 식(7)의 조건으로부터 제어입력 u가 존재하기 위해서는 $b \neq 0$이어야 한다. 즉, 제어대상에 적응제어칙을 적용하기 위해서는 가제어인 시스템이어야 한다.

주어진 시스템이 기준 모델과의 오차가 0이 되기 위해서는 $x(0) = x_m(0)$일 때, 모든 시간 t에 대하여 $x = x_m$이거나, $x(0) \neq x_m(0)$일 때, 오차 함

수가 지수함수 형태로 0에 빨리 수렴해야 한다.

식(1)과 같은 시스템에 대하여 a, b는 알 수 없는 값이기 때문에 기준 모델과의 오차가 0이 되기 위한 조건을 판단 할 수 없다.

따라서, 임의의 제어입력을 식(8)과 같이 가정한다.

$$u = -kx + lr \tag{8}$$

여기서, $k(t)$, $l(t)$는 각각 시간 t에서 적응칙에 의해 on line 예측된 k^*, l^*의 예측값이다. k와 l을 구하기 위해 주어진 문제를 on line identification 문제로 가정하고, 식(2)에 설계자가 요구하는 입력항인 $-bk^*x + bl^*r$을 포함시켜 식(9)를 정의한다.

$$\dot{x} = -a_m x + b_m r + b(k^*x - l^*r + u) \tag{9}$$

식(3)의 조건과 $e = x - x_m$라는 가정으로부터 식(9)는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e} = -a_m e + b(k^*x - l^*r + u) \tag{10}$$

여기서, b는 알 수 없는 값이기 때문에. 예측된 제어입력 계수 $\hat{b}$를 통해 다음과 같은 예측된 오차 $\hat{e}$를 구할 수 있다.

$$\dot{\hat{e}} = -a_m e + \hat{b}(k^*x - l^*r + u) \tag{11}$$

$\epsilon_1 = e - \hat{e}$라 가정할 때, ϵ_1은 식(10)과 식(11)에 의해 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_1 = -a_m \epsilon_1 + b(-\tilde{k}x + \tilde{l}r) \tag{12}$$

여기서, $\tilde{k} = k - k^*$, $\tilde{l} = l - l^*$이다.

주어진 문제로부터 오차를 최소하는 적응칙은 gradient method를 이용하여 연속시간 미분방정식으로 표현할 수 있으며, 식(13), 식(14)와 같다.

$$\dot{k} = f_1(\epsilon_1, x, r, u) \tag{13}$$

$$\dot{l} = f_2(\epsilon_1, x, r, u) \tag{14}$$

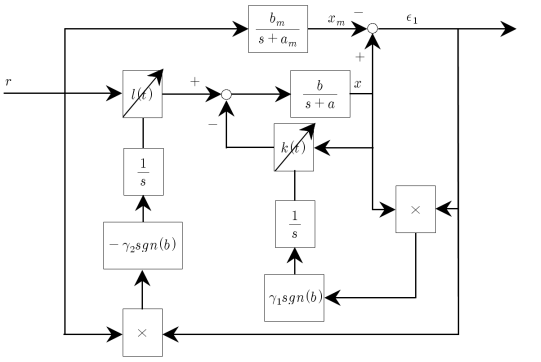


Fig. 2 Block diagram for MRC

식(13), 식(14)의 적응칙을 구하기 위해 비정규화된 SPR-Lyapunov approach 방법을 사용하여 Lyapunov 방정식을 구하면 식(15)와 같다.

$$V(\epsilon_1, \tilde{k}, \tilde{l}) = \frac{\epsilon_1^2}{2} + \frac{\tilde{k}^2}{2\gamma_1}|b| + \frac{\tilde{l}^2}{2\gamma_2}|b| \tag{15}$$

이 Lyapunov 방정식의 시간에 대한 미분은 식(16)과 같다.

$$\dot{V} = -a_m \epsilon_1^2 - b\tilde{k}\epsilon_1 x + b\tilde{l}\epsilon_1 r + \frac{|b|\tilde{k}}{\gamma_1} f_1 + \frac{|b|\tilde{l}}{\gamma_2} f_2 \tag{16}$$

여기서, $|b| = bsgn(b)$로 둘 수 있다. 이 Lyapunov 방정식의 목적은 에러신호 ϵ_1을 최소로 하는 문제이기 때문에, 내부상태 x와 참조모델 기준입력 r이 최소화되기 위해서는 식(17)과 식(28)을 만족해야 한다.

$$f_1 = \gamma_1 \epsilon_1 sgn(b) x \tag{17}$$

$$f_2 = -\gamma_2 \epsilon_1 sgn(b) r \tag{18}$$

따라서, 비정규화된 SPR-Lyapunov approach 방법을 적용한 적응칙은 식(13), 식(14)의 조건에 식(17), 식(18)을 대입한 것으로 식(19), 식(20)과 같다.

$$\dot{k} = \gamma_1 \epsilon_1 x sgn(b) \tag{19}$$

$$\dot{l} = -\gamma_2 \epsilon_1 r sgn(b) \tag{20}$$

Fig. 2는 식(19), 식(20)의 적응제어칙과 참조모델을 포함하는 비례압력 제어밸브 제어시스템의 블록선도이다.

2.3 적응제어칙의 적용

MRC를 구현하기 위한 초기 기준모델은 식(21)과 같이 감쇄비가 0.6이고, 2% 정착시간이 0.1초 이내이며, 정상상태 오차가 0인 단순이차 시스템으로 선정하였다.

$$G_r(s) = \frac{3600}{s^2 + 72s + 3600} \tag{21}$$

앞에서 제어대상에 적응제어칙을 적용하기 위해서는 식(6), 식(7)의 조건으로부터 반드시 가제어성을 만족해야만 한다고 정의하였다. 하지만, 제어대상인 비례압력 제어밸브의 경우, 내부 누설로 인하여 일정한 제어압력 이하에서 제어가 불가능한 영역이 존재한다. 이러한 제어불능 영역의 존재는 적응제어기를 포함하는 전체 시스템을 발산시키는 역할을 한다.

본 연구에서는 이러한 제어대상의 특성을 고려하여 식(22)와 같은 기준모델을 제어불능인 영역을 포함하는 형태로 최종 선정하였다.

$$G_r(s) = \begin{cases} 0.215 & , \ G_r(s) \leqq 0.215 \\ \dfrac{3600}{s^2 + 72s + 3600} & , \ G_r(s) > 0.215 \end{cases} \tag{22}$$

여기서, 0.215는 비례압력 제어밸브의 내부 누설에 의해 발생하는 압력을 초과하는 바이어스 값이다. 설계된 적응제어 시스템의 타당성은 실험을 통해 확인하고자 한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험장치 및 제어기 적용

Fig. 3은 스텝응답 실험과 히스테리시스 실험을 수행하기 위한 실험장치의 사진이다. 실험장치는 실험용 밸브와 밸브 구동앰프, 파워 팩과 PXI(NI), 압력센서(PCH-100MP, NTS)와 센서 앰프로 구성되어 있다. 실험을 위한 작동유는 ISO VG46이며, 실험 시 작동유의 온도는 48.5℃에서 50.5℃이었다. 전체 시스템의 sampling time은 0.001s(1kHz)이며, 실험 시간은(22) 30s이다. 실험을 위한 제어기는 MATLAB의 real time window target toolbox를 이용하여 구현하였다. 이 때, 스텝 응답과 히스테리시스에 사용된 제어기의 형태는 Open loop 상태와 PID ($K_p = 0.7$, $K_I = 15$, $K_D = 0.002$), MRC ($\gamma_1 = \gamma_2 = 7$)이다. Fig. 4는 MRC의 simulink 프로그램을 나타낸 그림이다.

3.2 스텝응답 실험결과

Fig. 5에서 Fig. 7은 스텝응답 시험결과를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 y축은 압력센서의 출력전압을 나타내며, 압력센서의 게인은 1V당 100bar이다.

Fig. 3 Experimental equipment for step response and hysteresis test

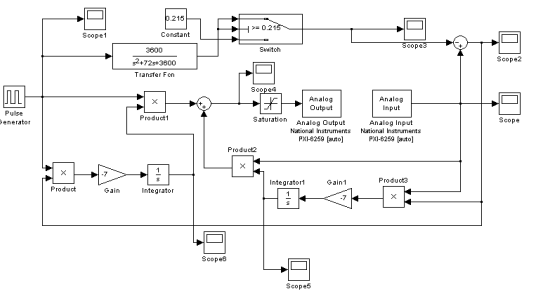
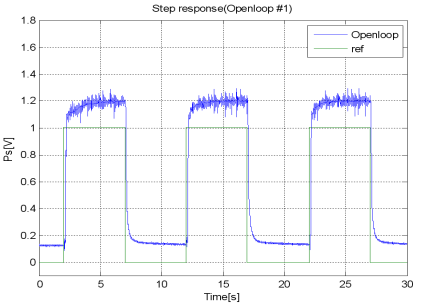
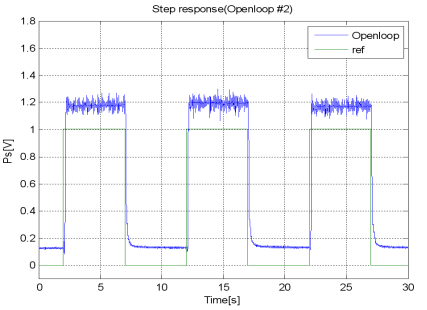


Fig. 4 Simulink program for MRC

Fig. 5는 제어기를 사용하지 않은 시스템의 스텝응답 실험결과이다. 두 개의 샘플 모두 정상상

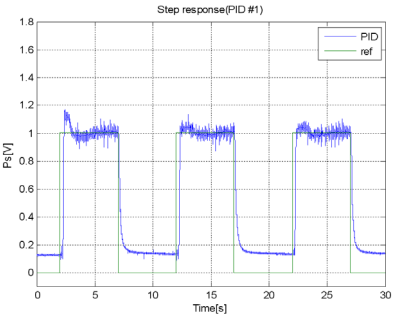


(a) Sample 1

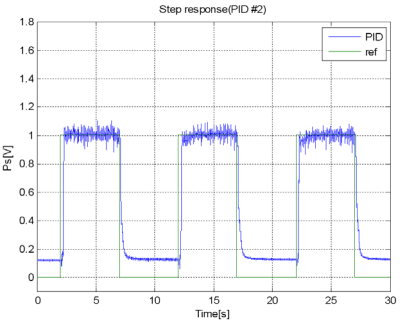


(b) Sample 2

Fig. 5 Step response for open loop



(a) Sample 1



(b) Sample 2

Fig. 6 Step response for PID controller

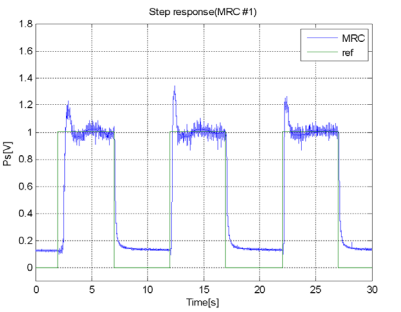
태 오차를 가지고 있으며, 과도상태 때 시간응답 특성이 차이를 나타내고 있다. 또한, 제어대상의 특성 상 밸브가 완전히 닫히지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 PID제어기를 적용한 시스템의 스텝응답 실험결과이다. 개루프 응답 특성과는 다르게 정상상태 오차가 없으며, 약간의 시간 지연은 발생하였지만 양호한 응답특성을 확인할 수 있었다.

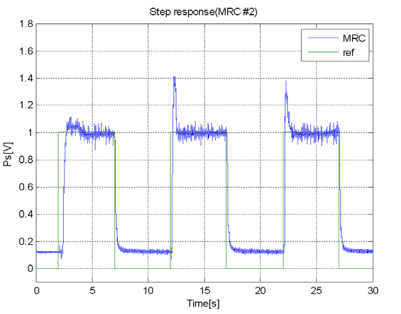
Fig. 7은 MRC를 적용한 시스템의 스텝응답 실험결과이다. PID제어기와 마찬가지로 정상상태 오차는 없으며, PID제어기보다 큰 오버슈트를 나타내고 있다. 하지만, 적응제어기의 특성 상 제어가 수행됨에 따라 오버슈트가 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, PID제어기에서 발생한 시간지연의 문제가 개선되어있음을 확인할 수 있다.

3.3 히스테리시스 실험결과

Fig. 8에서 Fig. 10은 히스테리시스 시험결과를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 y축은 Fig. 5에서 Fig 7과 같이 압력센서의 출력전압을 나타낸다.

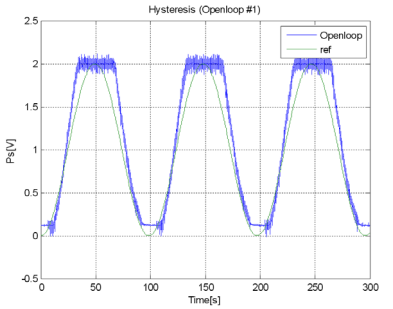


(a) Sample 1

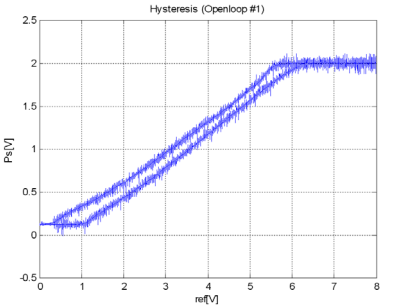


(b) Sample 2

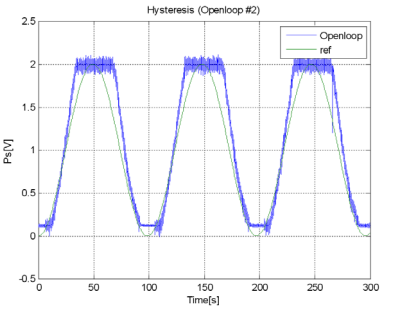
Fig. 7 Step response for MRC



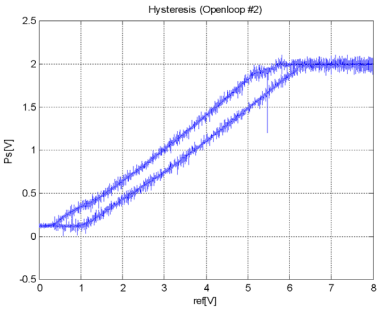
(a) Sinusoidal wave response for sample 1



(b) Hysteresis result for sample 1

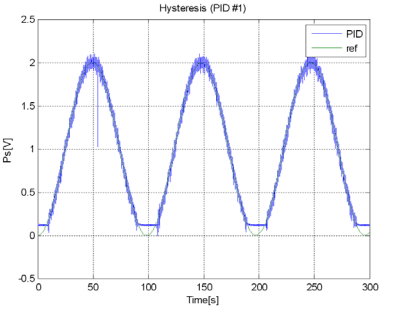


(c) Sinusoidal wave response for sample 2

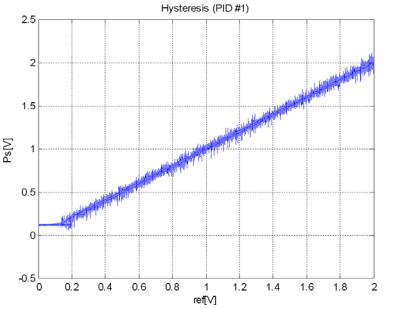


(d) Hysteresis result for sample 2

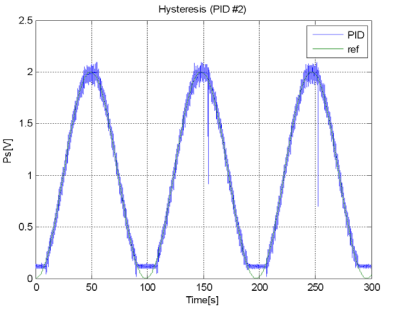
Fig. 8 Hysteresis test for open loop



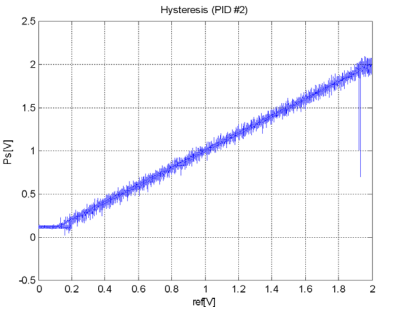
(a) Sinusoidal wave response for sample 1



(b) Hysteresis result for sample 1

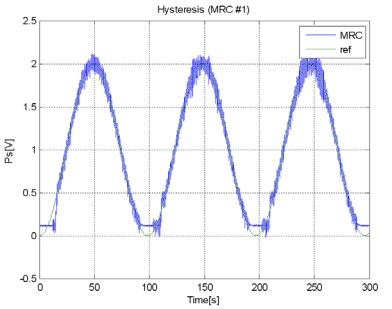


(c) Sinusoidal wave response for sample 2

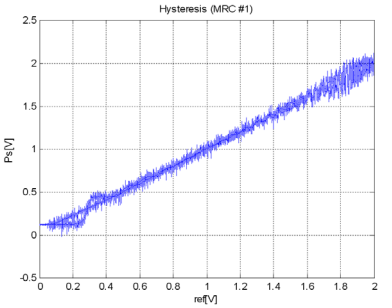


(d) Hysteresis result for sample 2

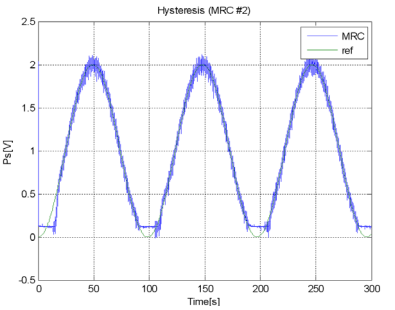
Fig. 9 Hysteresis test for PID controller



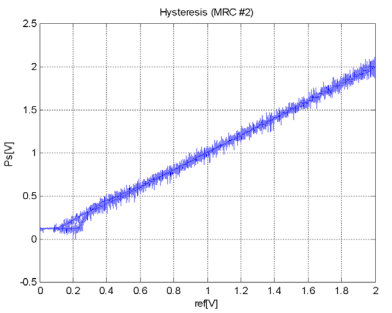
(a) Sinusoidal wave response for sample 1



(b) Hysteresis result for sample 1



(c) Sinusoidal wave response for sample 2



(d) Hysteresis result for sample 2

Fig. 10 Hysteresis test for MRC

Fig. 8은 제어기를 사용하지 않은 시스템의 히스테리시스 실험결과이다. 두 개의 샘플 모두 큰 히스테리시스 오차를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 PID제어기를 적용한 시스템의 히스테리시스 실험결과이다. 히스테리시스 실험은 밸브의 정특성을 실험하는 것으로 가장 나은 히스테리시스 특성을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 MRC를 적용한 시스템의 히스테리시스 실험결과이다. 많은 반복수행을 통한 적응제어기의 향상이 일어나지 않은 상태에서 측정되어졌기 때문에 약간의 히스테리시스 오차를 확인할 수 있지만, PID제어기와 마찬가지로 양호한 히스테리시스 특성을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 블랙박스로 가정된 다단 비례압력 제어 밸브에 대하여 MRC를 설계하고, 가제어성을 만족하지 않는 제어대상의 특성을 고려한 기준모델을 설계하였다. 설계된 적응제어 시스템의 타당성은 실험을 통해 확인하였다. 본 연구의 결과는 비례압력제어를 이용하여 유압시스템을 제어하는 데에 매우 유용한 정보를 제공할 것이며, 디지털 피드백 제어기를 개발하는 데에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. D. Cristofori and A. Vacca, 2012, "The modeling of electrohydraulic proportional valves", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, Vol. 132, Issue 2, Article 021008 pp. 1-13.
2. H. Chen and P. Jiang, 2004, "Adaptive iterative learning control for nonlinear systems with unknown control gain", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, Vol. 126, Issue 4, pp. 916-920.
3. T. Radpukee and P. Jirawattana, 2009,

"Uncertainty learning and compensation: An application to pressure tracking of an electro-hydraulic proportional relief valve", Control Engineering Practice, Vol. 17, Issue 2, pp. 291-301.

4. C. H. Lu and Y. R. Hwang, 2012, "A model reference robust multiple-surfaces design for tracking control of radial pneumatic motion systems, Nonlinear Dynamics", Vol. 67, Issue 4, pp. 2585-2597.
5. S. N. Yun et al., 2009, "A Study on the Performance Evaluation of a Proportional Pressure Control Valve", the 2009 Annual fall conference on the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 931-936.
6. J. S. Kim, 2003, "Linear control system engineering", Cheong Moon Gak, Seoul, Korea, p. 228.