

가변용량형 사판식 액셀피스톤 펌프의 모델링 및 사판 강인 제어기 설계

Modeling and Robust Controller Design of a Swash Plate for Swash Plate Type Variable Displacement Axial Piston Pump

박성환¹, 박용호², 이지민¹, ✉김종식¹
Sung-Hwan Park¹, Yong-Ho Park², Ji-Min Lee¹ and ✉Jong-Shik Kim¹

¹ 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.)

² 거제대학교 메카트로닉스계열 (Division of Mechatronics, Koje College)

✉ Corresponding author: jskim@pnu.edu, Tel: 051- 510-2317

Manuscript received: 2007.10.25 / Revised: 2008.8.6 / Accepted: 2008.9.19

A robust controller is proposed for regulating effectively the pressure of control cylinder of swash plate type variable displacement axial piston pump. In order to design a precise and robust pressure control system, a mathematical model for swash plate control system is identified by the signal compression method. Based on the identified mathematical model, an H_∞ robust swash plate controller is designed which is robust to the variation of the load pressure. The precise and robust swash plate control characteristics are verified by experiments.

Key Words: Plate Type Variable Displacement Axial Piston Pump (가변용량형 사판식 액셀피스톤 펌프), Direct Drive Valve (직동형 압력제어 밸브), Pressure Control (압력제어), H_∞ Control (H_∞ 제어)

1. 서론

압축된 유체를 이용한 동력전달 방법인 유압시스템은 제어가 용이하고 대출력을 얻을 수 있으며, 회전운동의 경우 무단으로 속도를 자유롭게 조절할 수 있는 특징이 있다. 또한, 과부하에 대한 안전장치도 간단하게 구성할 수 있어 산업분야 전반에 걸쳐 널리 이용되고 있다. 산업분야에서 널리 사용되는 유압시스템은 정용량형 유압펌프와 릴리프밸브를 사용하는 구조를 갖는다. 그렇지만, 릴리프밸브로 시스템에 공급되는 최고 압력을 설정하면 유압펌프에서 토출되는 여분의 압유는 릴리프밸브를 통하여 탱크로 되돌아 가는 구조로 되어 있어 변동하는 부하에 대해서 효율적인 에너지 공

급이 불가능하다.

또한, 압력 레귤레이터가 내장된 가변용량형 유압펌프를 사용하는 시스템의 경우, 시스템의 압력이 레귤레이터의 설정 압력에 도달하면 유압펌프의 토출유량이 최소로 전환되어 정용량형 유압펌프를 사용하는 경우보다 에너지 효율이 상승한다. 그러나 부하가 다양하게 변하는 경우, 펌프의 설정 압력과 유량을 능동적으로 조절할 수 없으므로 동력전달의 효율은 높지 않다.

다양하게 변동하는 부하에 능동적으로 대처하면서 고효율을 실현하기 위해서는 가변용량형 펌프의 토출유량을 능동적으로 제어하여 부하가 필요로 하는 압유만을 시스템에 공급하는 것이 중요하다. 이와 같은 시스템은 가변용량형 펌프의

도출유량을 정밀하게 제어할 수 있는 시스템을 구성함으로써 실현 가능하다!

건설기계에 사용되는 유압 동력 전달 시스템은 일반 산업현장에서 사용되는 유압 시스템과는 달리 작업 상황에 맞게 가변적으로 동력을 공급해야 한다. 또 돌발적이고 예측할 수 없는 부하의 변동에 대해서도 대처할 수 있는 시스템을 구현하기 위해서는 부하 측의 거동에 외란 요소가 포함되더라도 강인한 제어가 가능한 동력전달 시스템을 구성해야 한다.

본 연구에서는 다양하게 변동하는 부하에 대하여 부하가 필요로 하는 만큼의 압유만을 시스템에 공급함으로써 고효율의 실현이 가능하고, 부하의 급격한 변동에도 능동적으로 대응하여 효율적으로 에너지를 공급할 수 있는 유압시스템을 구성하기 위하여, 전자 밸브를 사용하여 가변용량형 사판식 액셀피스톤 펌프의 사판각을 정밀하게 제어할 수 있는 시스템을 구성하였다. 구성된 실험 장치를 이용하여 기존의 가변용량 펌프 제어 시스템의 문제점을 파악하고 그 문제점을 해결하기 위한 강인제어기를 설계하기 위하여 신호압축법을 이용하여 가변용량형 펌프 제어시스템을 동정하였다. 또한, 제어대상 시스템의 불확실성 요소를 제어시스템 설계 시 고려할 수 있는 H_{∞} 제어이론을 도입하여 강인 제어기를 설계하였다. 그리고 실험을 통하여 제안된 강인 제어시스템의 바람직한 응답특성과 외란에 대한 강인성을 확인하였다.

2. 가변용량형 사판식 액셀피스톤 펌프 시스템의 동특성 해석 및 수학적 모델

Fig. 1 은 직동형 압력제어 밸브(Direct Drive Valve, 이하 DDV)를 사용하여 부하의 변동에 따라 가변용량형 사판식 액셀피스톤 펌프의 사판각 제어용 실린더 내의 압력을 변화시켜 사판각을 제어할 수 있는 시스템을 나타낸다.

부하 측에 인가될 부하변동(이하 외란)을 재현하기 위하여 펌프의 도출 측에 고속 On-Off 밸브와 스톱 밸브를 이용하여 부하 측에 일정압력을 인가하다가 급작스럽게 압력을 상승시킬 수 있도록 시스템을 구성하였다. DDV 와 고속 On-off 밸브에 대한 사양들을 Table 1 에 비교하여 나타내었다.

가변용량형 사판식 액셀 피스톤펌프의 사판각을 제어하기 위하여 필요한 사판각 제어용 실린더

내의 압력을 파악하기 위하여 사판각 제어 실린더의 압력변화에 따른 펌프의 도출유량을 측정한 결과를 Fig. 2 에 나타내었다.

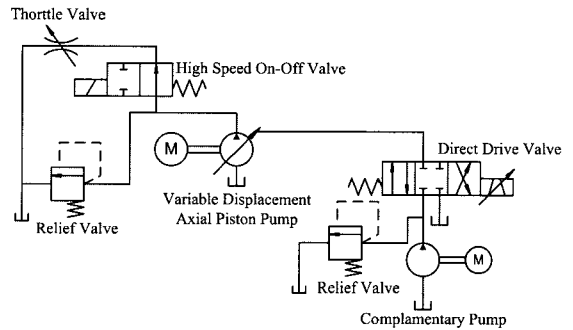


Fig. 1 Hydraulic circuit of the swash plate control system

Table 1 Specifications of DDV and high speed On-Off valve

Description	DDV	High speed On-Off valve
Type	2 position, 3 way	2 position, 2way
Max. pressure	350 [kg _f /cm ²]	175 [kg _f /cm ²]
Max. flow rate	20 L/min	8 L/min
Voltage	24 [V]	12 [V]
Current max.	2 [A]	2.6 [A]
Operating degree	-20 ~ 80 [°C]	-20 ~ 90 [°C]
Response time	50 Hz (no load condition)	On: 4~6 [ms] Off: 1.5~2.5 [ms]

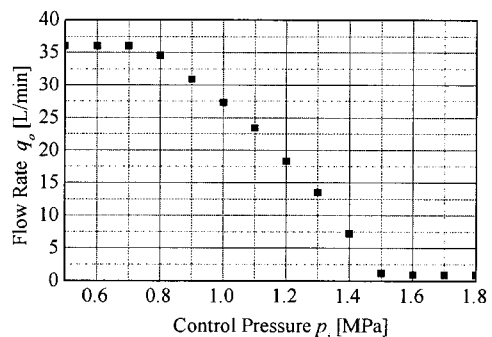


Fig. 2 Relationship between control pressure and flow rate

실험결과 사판각의 각도를 0° 에서 최대 경전

각인 19° 까지 변화시키는데 필요한 사판각 제어용 실린더 내부의 압력은 0.8[MPa]에서 1.6[MPa] 임을 확인하였다. 사판경전각이 최대인 19° 에서 사판각 제어용 실린더 내부의 압력이 0.8[MPa]에 도달할 때까지는 경전각의 변화가 일어나지 않는 이유는 사판을 지지하는 요크가 반력 스프링에 의하여 지지되어 있기 때문이다.

또한, 반대측에서 사판을 밀어주는 사판각 제어용 실린더의 구조가 쉘을 사용하지 않는 캡형이므로 캡 주위에서 다소 많은 누설이 발생하기 때문에 사판 경전각의 변화가 일어나지 않는 것이다.

사판각 제어시스템의 특성을 파악하기 위하여 밸브 내부에 비례제어회로를 겸비한 DDV 에 스텝 입력을 인가한 경우 사판각 제어용 실린더 내의 압력 응답특성은 Fig. 3 과 같다.

DDV 에 인가되는 기준입력으로는 Fig. 2 의 실험결과를 바탕으로 0.8[MPa]에서 1.6[MPa]까지 0.1[MPa] 씩 증가시켜가면서 실험을 수행하였다.

Fig. 3 에 나타낸 실험결과에서 알 수 있듯이 DDV 자체에 내장된 비례제어기만으로는 사판각 제어시스템의 과도응답 특성이 양호하지 않으며, 정상상태 오차도 발생하고 있다.

사판식 액셀 피스톤 펌프의 출력유량은 사판각의 변화에 비례하며, 반력스프링으로 지지된 사판은 사판각 제어용 실린더의 압력에 비례하여 사판각이 변하므로 Fig. 3 의 결과로부터 사판식 액셀 피스톤 펌프의 출력유량 응답특성이 선형적이지 않다는 것을 확인할 수 있다.

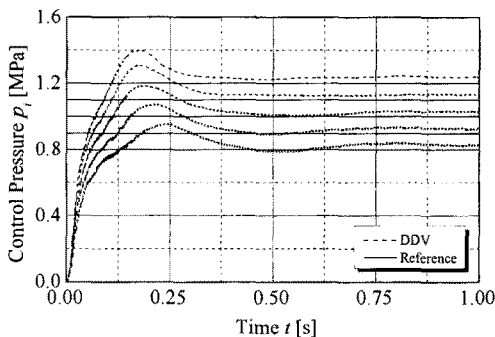


Fig. 3 Step response of the swash plate control system using DDV only

따라서 압력제어용 DDV 만을 이용하여 사판각 제어용 실린더 내의 압력을 제어할 경우, 출력 유

량 제어 성능이 바람직하지 못하다는 것을 알 수 있다.

급격한 외란의 인가에도 강인한 성능을 가진 사판각 제어시스템의 제어기를 설계하기 위해서는 시스템에 내재하는 불확실성을 정확하게 파악할 필요가 있다. 특히, 본 연구에서는 외란에 강인한 특성을 가지는 H_{∞} 제어기를 설계하고자 하므로 제어기 설계시 사용되는 가중함수의 최적값을 선정해야 한다. 그러므로 시스템의 불확실성을 정량적으로 파악하기 위해서는 시스템을 정확하게 해석하여 모델링 하여야 한다.

본 연구에서는 제어기설계를 위한 시스템의 모델링 및 파라미터 동정을 위하여 사판각 제어시스템을 선형시스템으로 가정하고, 신호압축법을 이용하여 시스템 동정을 수행하였다.^{2,3}

Fig. 4 는 신호압축법을 이용한 등가 임펄스 응답에 의해 실험적으로 구한 Bode 선도와 실험적으로 구한 모델식에 의한 페루프 시스템의 Bode 선도를 비교한 그래프이다.

신호압축법을 이용하여 실험으로 구한 Bode 선도로부터 압력제어시스템에 대한 수학적 모델식 (1)을 얻을 수 있다.

그리고 시스템 파라미터들을 동정한 결과 계인, 고유진동수, 감쇠비, 영점은 각각 $K=1$, $\omega_n=18$, $\zeta=0.5$, $a=0.005$ 로 선정되었다. 본 연구에서는 이 모델식을 실험 모델식이라 정의하며 제어기 설계시 불확실성의 범위를 선정하는 데에 이용하였다.

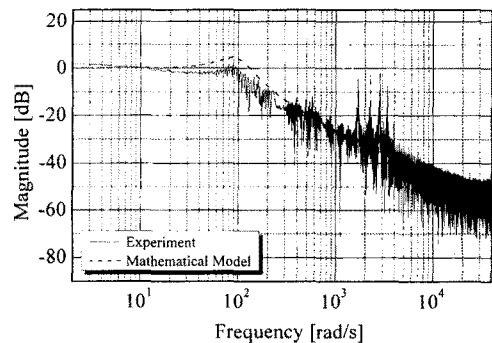


Fig. 4 Bode plots of pressure control system by experiment and mathematical model

$$G_1 = \frac{K\omega_n^2(as+1)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

3. H_∞ 제어기 설계

본 연구에서는 실험 모델식을 근거로 시스템의 이상적인 응답을 고려하여 시스템의 공칭 모델식을 식(2)와 같이 선정하였다. 이 때 공칭 모델의 시스템 파라미터로 게인, 고유진동수, 감쇠비, 영점을 각각 $K_0=1$, $\omega_n=50$, $\zeta_0=0.9$, $a_0=0.005$ 로 선정하였다.

$$G_0 = \frac{K_0 \omega_n^2 (a_0 s + 1)}{s^2 + 2\zeta_0 \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

Fig. 5 와 Fig. 6 은 각각 공칭 모델식과 실험 모델식에 대한 단위스텝응답 및 주파수 응답을 나타낸다.

H_∞ 제어기를 설계하기 위하여 시스템의 불확실성은 신호압축법을 이용하여 동정한 실험 모델과 공칭 모델과의 차이를 식(3)과 같이 곱셈형 불확실성으로 표현할 수 있다.⁴

$$\Delta_m = \frac{G_i(s) - G_0(s)}{G_0(s)} \quad (3)$$

제어기를 설계하는 과정에서 혼합감도 문제로만 제어기를 설계하면 스텝입력을 인가하였을 때 목표 값에 대한 정상상태오차가 발생할 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 제어기에 적분기를 포함하는 서보시스템으로 제어기를 설계할 필요가 있다. 그러나 제어기에 적분기가 포함되면 비표준 H_∞ 제어 문제가 되므로 제어기 설계의 전제조건을 만족하지 못한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 적분 제어가 포함된 $(1+s)/s$ 와 같은 쌍선형변환 형태의 동특성을 플랜트에 추가하여 구성한, 설계플랜트 모델식 (4)에 대한 H_∞ 서보제어시스템을 Fig. 7 과 같이 구성하였다. 여기서 설계 플랜트 모델 G'_0 과 루프 형성 기법을 이용한 H_∞ 제어기 C' 은 각각 다음과 같다.

$$G'_0 = G_0 \frac{1+s}{s} \quad (4)$$

$$C' = W_T C_\infty W_s \quad (5)$$

여기서, W_T 는 강인 안정조건에 대한 가중함수, W_s 는 감도 저감화에 대한 가중함수이고, C_∞ 는 표준 H_∞ 제어기이다.⁵

H_∞ 제어기 설계를 위해서는 시스템의 불확실성을 구체적이고 정량적으로 평가한 가중함수가 선정되어야 한다. 가중함수는 Fig. 8 에 표시된 바와 같이 강인 안정조건에 대한 가중함수 W_T 와 감도 저감화에 대한 가중함수 W_s 가 각각 강인 안정성에 대한 범위와 감도 저감화에 대한 범위를 만족하도록 선정되어야 한다.⁶⁻⁸

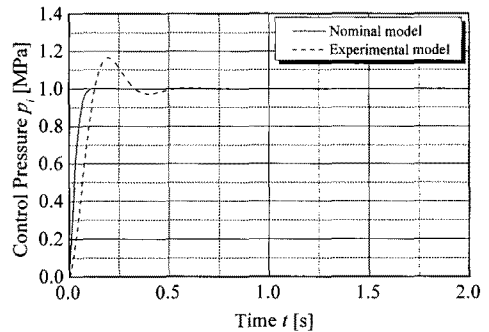


Fig. 5 Step response of nominal and experimental models

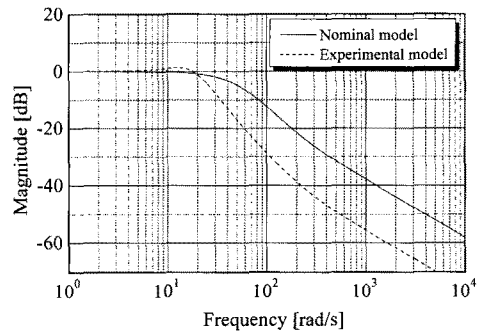


Fig. 6 Bode plot of nominal and experimental models

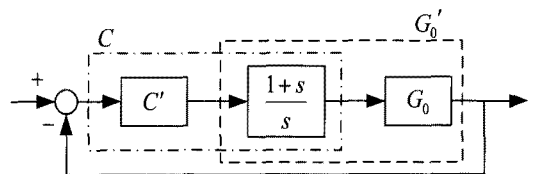


Fig. 7 Block diagram of the H_∞ servo system with augmented integrator

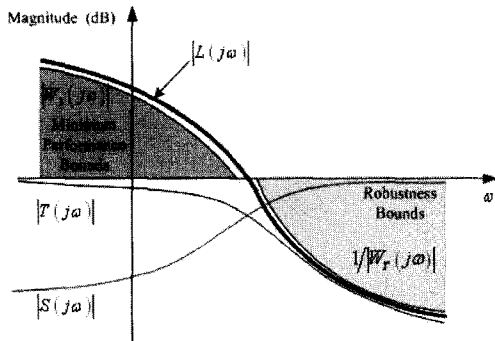


Fig. 8 Desired loop shaping

구체적으로는 식(6)에 나타낸 바와 같이 제어기는 혼합감도 문제에서의 강인안정성과 감도 저감화에 대한 성능을 가지게 되는 조건을 만족시키도록 설계되어야 한다.⁹

$$\left\| \frac{W_T T}{W_S S} \right\|_\infty < 1 \tag{6}$$

강인 안정조건에 대한 가중함수 W_T 는 식(7)을 만족하도록 선정되어야 한다.⁷

$$\sigma_{\max}(\Delta_m(j\omega)) < |W_T(j\omega)|, \forall \omega \tag{7}$$

여기서 강인안정성에 대한 가중함수의 분자차수는 공칭모델의 분모 차수와 같아야 하고 분모 차수는 공칭모델의 분자 차수와 같아야 한다.¹⁰

그리고 감도저감화에 대한 가중함수 W_S 는 식(8)을 만족하도록 선정하여야 한다.

$$\sigma_{\max}(S(j\omega)) < 1/|W_S(j\omega)|, \forall \omega \tag{8}$$

그러나 이상과 같은 가중함수의 선정지침에도 불구하고 가중함수를 선정하는 데에는 많은 어려운 점이 존재한다. 본 연구에서는 최적의 가중함수를 선정하기 위하여 가중함수의 파라미터들을 식(6), (7), (8)을 근거로 제어기 설계가 가능한 범위 안에서 세밀하게 변동시키면서, 실험을 통하여 시스템의 시간응답 특성이 가장 양호한 파라미터를 가중함수의 파라미터로 선정하여 제어기를 설계하

였다. 이상과 같은 선정 과정을 거쳐 최종적으로 선정된 가중함수는 식(9)와 같다.

$$W_T = \frac{s^2 + 54}{55}, W_S = \frac{0.01}{s + 0.01} \tag{9}$$

Fig. 9 는 제어기를 포함한 폐루프 제어시스템의 감도함수 S , 상보감도함수 T 와 가중함수들과의 관계를 나타낸다. Fig. 9 에서 알 수 있듯이 설계된 제어시스템이 식(6)에 나타낸 혼합감도 문제에서의 강인안정성과 감도 저감화에 대한 성능을 가질 수 있는 조건을 동시에 만족시키는 것을 확인할 수 있다.

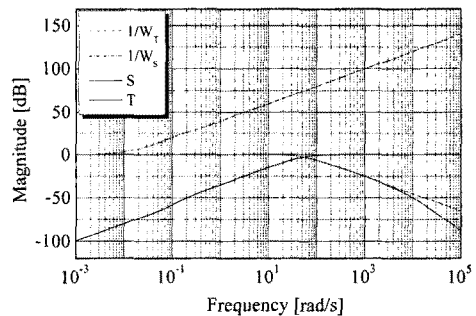


Fig. 9 Bode plot of sensitivity functions and weighting functions

4. 실험 및 고찰

Fig. 10 은 H_∞ 제어기를 이용한 가변용량형 펌프의 사판각 제어시스템의 시간응답 특성을 나타낸다. DDV 만을 이용하여 제어한 Fig. 3 의 응답특성과 비교하면 과도응답특성이 현저하게 개선된 것을 확인할 수 있다. 또한 정상상태 오차도 역시 확연히 개선되었음을 알 수 있다.

부하 외란에 대한 강인성을 평가하기 위하여 부하 측에 급격한 외란을 인가할 수 있도록 부하 측에 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 고속 On-Off 밸브와 스톱 밸브를 설치하였다.

실험조건으로는 부하압력이 초기에 3[MPa]를 유지하다가 고속 On-Off 밸브가 순간적으로 닫히게 되면 부하압력이 릴리프 밸브에 의하여 설정된 최대 압력인 10[MPa]로 상승되도록 실험장치를 구성하였다.

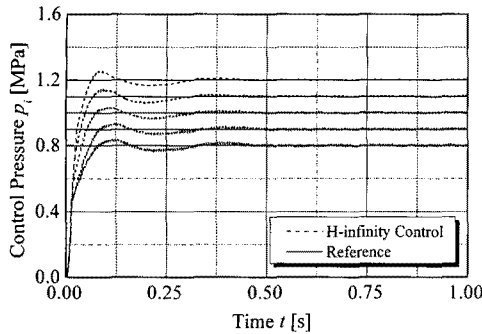


Fig. 10 Step response of the swash plate control system using H^∞ control techniques

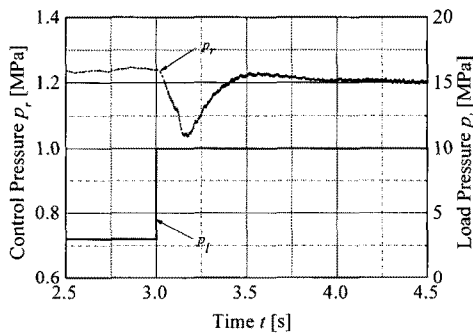


Fig. 11(a) Disturbance rejection performance (DDV only)

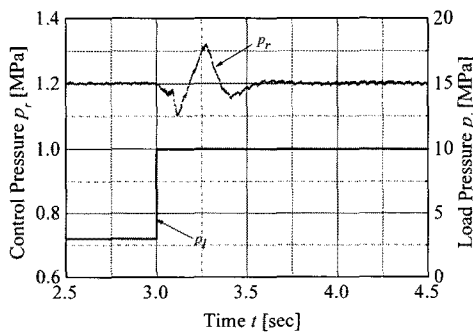


Fig. 11(b) Disturbance rejection performance (H^∞ control)

Fig. 11 은 사판각 제어용 실린더에 인가되는 기준 입력을 1.2[MPa]로 선정하여 비례제어기가 내장된 DDV 만 사용하여 제어한 경우와 본 연구에서 제안된 H^∞ 제어기를 적용한 경우에 외란에 대

한 강인성을 실험한 결과이다.

비례제어기가 내장된 DDV 만을 이용하여 제어하는 경우 응답특성이 외란에 대하여 많은 영향을 받고 있는 것을 실험결과로부터 알 수 있다.

그러나 본 연구에서 제안된 H^∞ 제어기를 적용한 경우 응답특성이 매우 강인한 특성을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결론

가변용량형 사판식 액셀피스톤 펌프의 사판각 제어용 실린더 내의 압력을 변화시켜 사판각을 제어하여 부하가 필요로 하는 유량만을 공급하는 시스템은 사판각을 고정도로 제어함으로써 에너지를 절감할 수 있는 고효율 시스템을 구현할 수 있다. 또한 돌발적이고 예측할 수 없는 부하 변동에 대해서도 대처할 수 있는 시스템을 구현하기 위해서 펌프에서 나오는 토출 유량을 이용한 부하 측의 거동에 외란 요소가 포함되더라도 강인한 제어가 될 수 있는 시스템을 구성하여야 한다.

이러한 시스템을 구성하기 위해서 DDV를 이용하여 사판각 제어용 실린더의 압력 제어시스템을 구성하였다. 그러나 DDV만을 이용한 경우 과도응답 특성과 외란 제거 성능이 만족스럽지 못하다는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 바람직한 과도응답 특성과 외란 제거 성능을 실현하기 위하여 제어 대상의 불확실성을 제어시스템 설계 시 고려할 수 있는 H^∞ 제어기법을 적용하였다. 제어기 설계를 위한 가중함수의 선정에 위하여 신호압축법을 이용한 사판각 제어시스템의 동정을 수행하였고, 이를 근거로 설계된 H^∞ 제어기를 이용하여 사판각 제어시스템에 적용한 결과 바람직한 과도응답 특성과 외란에 대한 강인성이 우수함을 확인하였다.

후 기

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Lee, J. C., "Robust Control of Efficient Hydraulic Servo Systems with Servo-Pump," Proc. of the National Conference on Fluid Power, Vol. 46, pp

- 73-84, 1994.
2. Aoshima, N., "Measurement of Nonlinear Vibration by Signal Compression Method," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 76, No. 3, pp. 794-801, 1984.
 3. Lee, M. C. and Aoshima, N., "Microprocessor-Based System Identification by Signal Compression Method," *Reidel Publishing Company*, pp. 81-103, 1986.
 4. Ryu, K., "Linear Robust Control," *Koronashya*, pp. 78-100, 2002.
 5. McFarlane, D. C. and Glover, K., "Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions," *Springer-Verlag*, pp. 106-108, 1990.
 6. Safanov, M. G. and Limbeer, D. J. N., "Simplifying the theory via loop shaping," *IEEE Decision and control conf.*, Vol. 2, pp. 1399-1404, 1988.
 7. Kim, Y. G. and Ryu, C. G., " H_∞ Optimal Controller Synthesis by the Frequency Domain Analysis of Weighting Function," *Journal of IEEK*, Vol. 37(SC), No. 2, pp. 8-15, 2000.
 8. Glover, K. and Doyle, J. C., "State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H_∞ -norm bound and relations to relations to risk sensitivity," *Systems & Control Letters*, Vol. 11, Issue 3, pp. 167-171, 1988.
 9. Doyle, J. C., Francis, B. A. and Tannenbaum, A. R., "Feedback Control Theory," *Macmillan*, p. 223, 1992.
 10. Beaven, R. W., Wright, M. T. and Seaward, D. R., "Weighting function selection in the H_∞ design process," *Control Eng. Practice*, Vol. 4, No. 5, pp. 625-633, 1996.