

스풀 변위 피드백을 위한 LVDT 적용 비례전자제어밸브의 개발 및 성능평가

Development of Electronic Proportional Control Valve with LVDT for Spool Displacement Feedback and Its Performance Evaluation

신행봉^{1*}, 한성현²

Haeng-Bong Shin^{1*}, Sung-Hyun Han²

〈Abstract〉

This study proposes the development and performance evaluation of electronic proportional control valve having an LVDT. The electronic proportional control valve is composed of hydraulic valve, proportional solenoid and controller. LVDT is to reduce the steady state error for the reference input of the controller by the feedback signal to detect the displacement of the spool. Designed LVDT is applied to the common proportional valve. In order to evaluate the performance of the developed valve, the hydraulic test equipment was developed and flow tests were carried out. From experimental results, it was proved that the hysteresis was less than 1% based on the maximum flow rate.

Keywords :

Electro-hydraulic proportional valve, Proportional solenoid, Linear variable differential transformer(LVDT), Spool of vavle

1* 교신저자, 정회원, 경남대학교 대학원 첨단공학과
(E-mail: hb.shin@sgservo.co.kr)

2 정회원, 경남대학교 기계공학부 교수 工博

1* Corresponding Author, Dept. of Advanced Engineering,
Kyungnam University

2 Prof. school of mechanical Engineering, Kyungnam
University, Ph. D.

1. 서론

유압식 비례전자제어밸브는 입력신호에 비례적으로 유체의 흐름 방향과 통과 유량을 제어하는 밸브를 말한다. 이 밸브는 기계적인 제어 기법을 사용한 유압밸브의 장점과 전기적인 제어 기법을 사용한 솔레노이드 밸브의 장점을 모두 가지고 있으며, 양방향 비례솔레노이드 액추에이터를 적용하여 유체의 방향과 통과 유량을 제어한다.

스플 변위 피드백을 위해 LVDT를 부착한 비례전자제어밸브는 일반 비례전자제어밸브에 비해 고속, 고정도의 성능 발휘하는 반면 서보밸브의 성능에는 미치지 못한다. 그러나 서보밸브에 비해 유체오염의 영향을 덜 받고 가격이 저렴하며 유지보수가 용이한 장점을 지니고 있다.

기존의 비례전자제어밸브는 기계적인 제어기구를 사용하여 선형적으로 압력과 유량을 제어할 수 있는 밸브로 개루프 제어로 사용될 수 있도록 설계되어 왔다. 이러한 형태의 밸브는 히스테리시스가 크고 응답성이 느린 단점이 있다. 우수한 히스테리시스와 응답성을 요구하는 시스템에는 비례전자제어밸브 대신 서보밸브를 적용하고 있다. 최근에는 저렴하면서도 기존의 비례전자제어밸브보다 정밀하고 빠른 응답성을 가지는 밸브의 필요성이 증대되었다.

본 연구에서는 이러한 추세에 따라 히스테리시스와 같은 유량특성 향상을 위해 스프링변위를 제어기로 피드백할 수 있는 LVDT가 적용된 비례전자제어밸브를 개발하였다. 또한 개발된 밸브에 대한 유량특성을 성능예측과 시험을 통해 검증하였다.

2. LVDT를 적용한 비례전자제어 밸브 개발

2.1 비례전자제어밸브 구성

일반적인 비례전자제어밸브는 Fig. 1과 같이 유압밸브, 비례솔레노이드, 제어기로 구성된다.

기준입력 신호가 제어기로 입력되면 제어기는 연산과 증폭 등과 같은 일련의 과정을 거쳐 제어신호를 출력하게 되는데, 이 출력 제어신호가 비례 솔레노이드 액추에이터를 구동하게 되고 비례 솔레노이드 액추에이터에서 발생한 흡인력으로부터 스프링이 동작하여 유압유의 방향과 유량을 조정하게 된다.

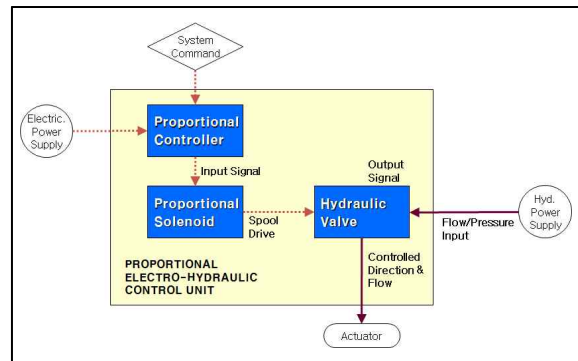


Fig. 1 The schematic diagram of electronic proportional control valve

2.2 LVDT 설계

Fig. 2는 LVDT의 내부구조와 수치해석을 위한 모델을 나타내고 있다. LVDT는 x축을 기준으로 상하 대칭이며, 이에 따라 수치 모델은 z축을 기준으로 대칭인 형태로 둘 수 있다. 이 때, 수치 모델에서 코어의 움직임은 z축을 기준으로 상하 3mm 정도 움직일 수 있다고 가정한다. 엔드 캡과 하우징의 재질은 순철이며, 1차 코일과 2차 코일의 재질은 구리, 코어의 재질은 'permalloy'로 선정하였다. 1차 코일의 권선수는 '498×2' 턴이며, 2차 코일의 권선수는 '716×2' 턴이다.

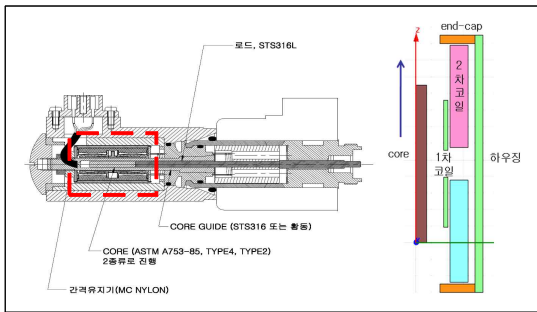
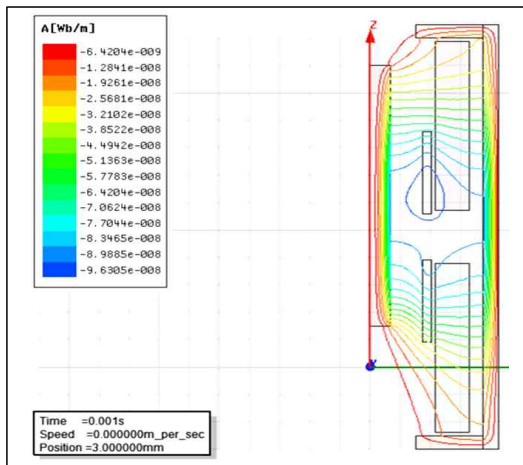
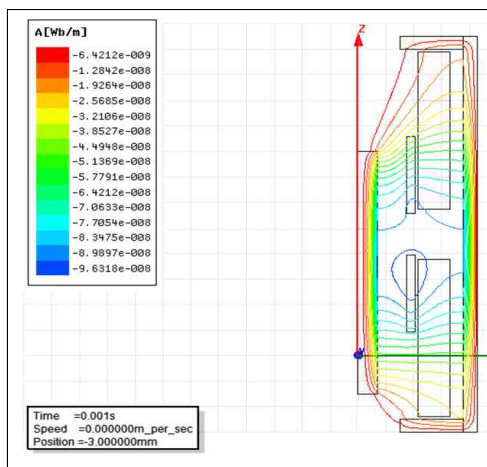


Fig. 2 The structure of LVDT and its modeling



(a) Core displacement : +3mm

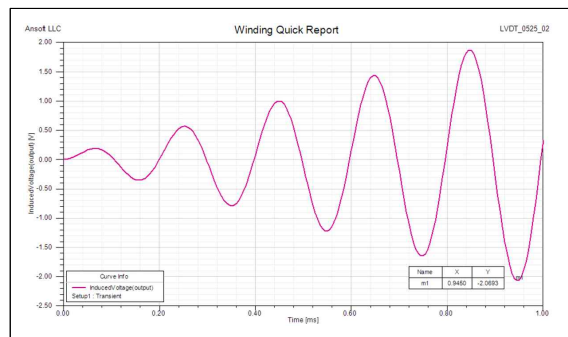


(b) Core displacement : -3mm
Fig. 3 The magnetic field distribution of LVDT

Fig. 3은 코어의 위치가 z축을 기준으로 위로 3mm일 때와 아래로 3mm일 때의 자기장 분포를 나타낸 그림이다. 여기서 가장 먼저 확인할 부분은 자료가 폐회로를 이루고 있어 외부로 누설되는 자속이 적다는 점이다. 이는 하우징이 내부의 누설 자속을 잘 차폐하고 있다는 것을 의미하며, 이는 외부에서 영향을 끼칠 수 있는 솔레노이드 액추에이터의 누설 자속에 의한 영향 또한 막을 수 있음을 의미한다. 또한, 자기장의 중심은 이동되는 코어의 변위에 따라 위 아래로 편중되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 2개의 2차 코일에서 유도되는 전압의 차이를 생성하며, 이에 따라 코어의 위치가 중립에서 멀어지면 멀어질수록 코어의 변위에 비례한 전압 출력을 낼 수 있음을 의미한다.



(a) Core displacement : 0 ~ 3 mm, 1sec



(b) Core displacement : 0 ~ -3 mm, 1sec
Fig. 4 The output of LVDT

Fig. 4는 코어의 변위가 중립에서 z축을 기준으로 1초 동안 3mm 정도 움직일 때, 2차 코일의 출력을 계산한 결과이다. Fig. 3에서 확인한 것처럼 코어의 변위가 변동됨에 따라 2차 코일의 출력은 선형적으로 변동되고 있음을 확인하였다. 따라서 설계된 변위센서는 중립위치를 기준으로 $\pm 3\text{mm}$ 구간에서 사용가능하다.

2.2 비례전자제어밸브에 LVDT 적용

스풀변위를 제어기로 피드백하기 위해 LVDT를 적용한 비례전자제어밸브의 블록선도는 Fig. 5와 같다. LVDT는 스푼의 변위를 검출하여 그 신호를 제어기로 피드백 함으로써 기준입력에 대한 정상상태 오차를 줄이는 역할을 하게 된다.

Fig. 6은 개발한 LVDT 적용 비례전자제어밸브를 나타내고 있다. 유압밸브부 양쪽에 스푼을 구동하기 위한 비례솔레노이드가 부착되어 있고, 비례솔레노이드 한쪽에 스푼변위를 피드백하기 위한 LVDT가 부착되어 있다. 유압밸브 위쪽에 제어기가 부착되어 있다.

이 밸브 시스템의 스푼 변위는 $\pm 2.4\text{mm}$ 이며 최대 통과유량은 60 lpm이고 최고 사용압력은 350 bar이다.

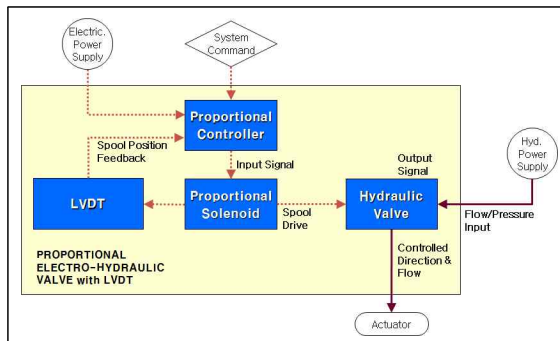


Fig. 5 The schematic diagram of electronic proportional control valve with LVDT

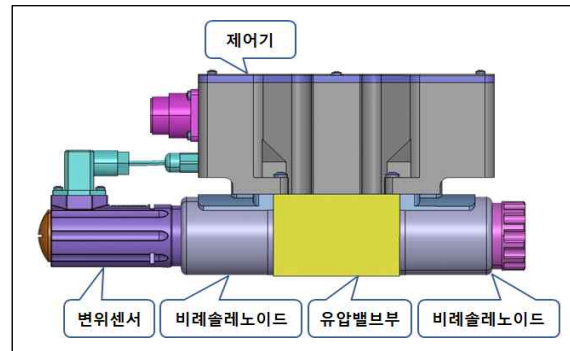


Fig. 6 The electronic proportional control valve with LVDT

3. 성능평가

3.1 성능예측

Fig. 7은 LVDT가 적용된 비례전자제어밸브의 정상상태에서의 블록선도를 나타내었다.

입력 필터가 루프 내부에 포함되었고, 변위센서(LVDT)의 게인 값과 동일한 값을 가지도록 설계하였다. 정상상태만을 나타내었으므로 모든 요소가 상수로 구성되어 있다. 또한, 실제 시험을 통해 분석된 물성치를 밸브 모델링에 반영하였다. 스푼 형상에 대한 작동유 흐름 특성 및 비례솔레

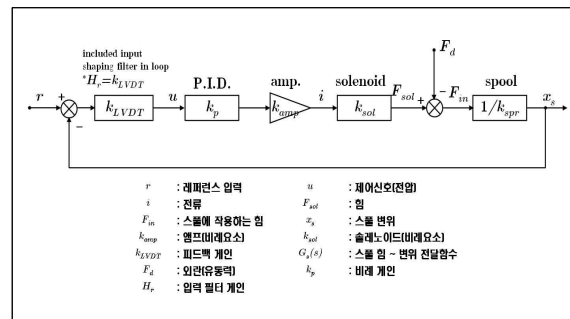


Fig. 7 The block diagram of electronic proportional control valve with LVDT

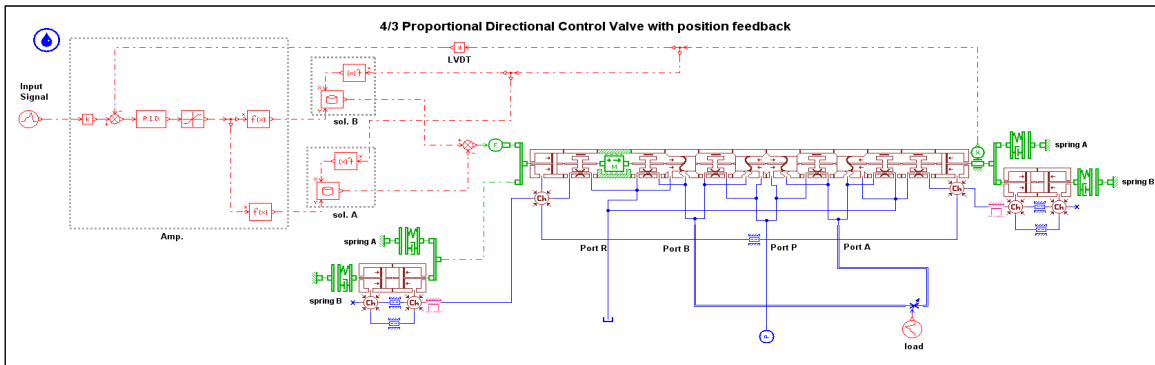
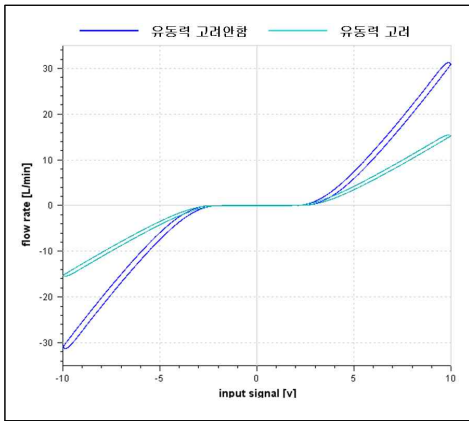
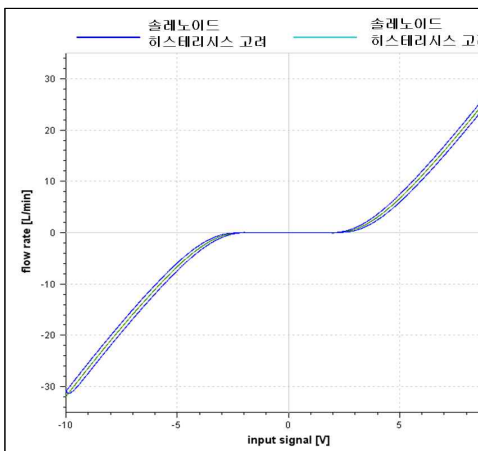


Fig. 8 The modeling of electronic proportional control valve with LVDT(AMESim)



(a) Consideration of flow force



(b) Consideration of solenoid hysteresis
Fig. 9 The result of simulation

노이드부 흡인력 특성 시험 결과를 반영하였으며, 운동량 이론으로부터 밸브 스푼에 작용하는 정상 유동력을 계산하여 이를 반영하였다.

밸브 모델링은 Fig. 8과 같이 유압 시스템 해석용 소프트웨어인 AMESim을 사용하여 구성한 후, 시뮬레이션을 수행하였다. 밸브의 정상상태 거동을 분석하기 위하여 정특성 해석(입력 신호가 고정된 값 또는 매우 긴 시간동안 느린 입력 값의 변화)을 수행하였다.

시뮬레이션 모델을 사용하여 무부하 상태에서의 유량특성을 시뮬레이션한 결과가 Fig. 9에 나타나 있다. Fig. 9 (a)는 밸브 스푼에 대한 유동력 유무에 따른 시뮬레이션 결과이고 (b)는 솔레노이드의 히스테리시스의 유무에 따른 시뮬레이션 결과이다. 유동력과 히스테리시스의 유무에 따라 결과가 차이가 있음을 확인할 수 있다. 시뮬레이션결과로부터 설계된 밸브의 타당성을 확인하였고 이결과를 바탕으로 제품을 제작하여 성능시험을 수행하였다.

3.2 유량특성시험

LVDT가 적용된 비례전자제어밸브의 유량특성을 확인하기 위한 시험회로도가 Fig. 10에 나타나

있고, 이를 구현한 시험장치는 Fig. 11과 같다. 시험장치의 최대공급유량은 120 lpm이고 최고 사용 압력은 350bar이다. 사용 유체는 VG32를 적용하였다.

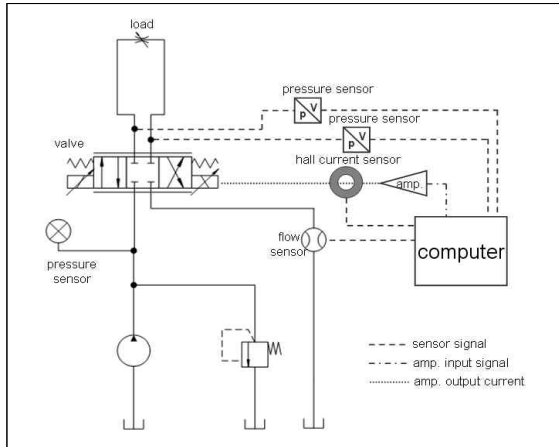


Fig. 10 The hydraulic circuit of flow test

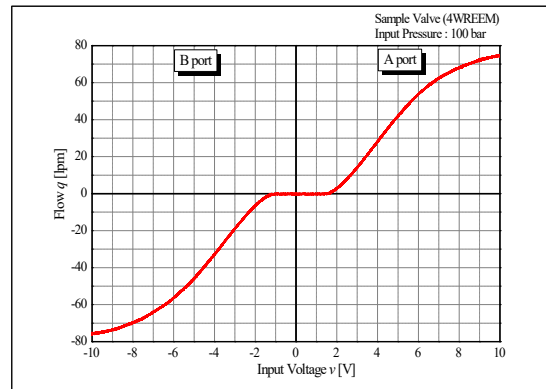


Fig. 11 The test equipment of electronic proportional control valve

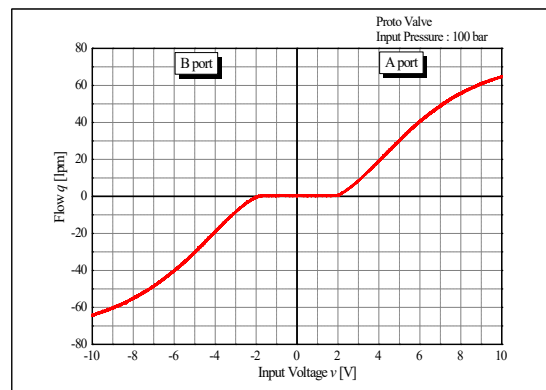
입력신호에 대한 선형성 및 히스테리시스와 유량 제어 오차 등을 확인하기 위해 유량특성시험을 수행하였다. 입력신호는 $\pm 10V$ 의 전 범위를 약 8분간 선형적으로 인가하여 유량 특성 시험 결과를 분석하였다. 여기서 공급 유량은 120 lpm이며, 공급 압력은 100bar로 설정하였다. 개발 밸브의

유량특성의 신뢰성을 확보하기 위해 동일사양의 Rexroth사의 제품을 기준품으로 하여 시험을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

기준품과 개발품의 유량특성 시험결과는 Fig. 12와 같다. 입력신호 약 20%(2V) 지점에서 유량이 발생하며, 100%(10V)에서 스푼이 완전히 열린다. 또한, 스푼 개도 시작점과 완전히 열리는 신호구간의 유량은 신호와 비례하여 선형적으로 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 히스테리시스는 최대 유량 기준 $\pm 1\%$ 이하임을 확인하였다.



(a) Flow characteristics of Rexroth valve



(b) Flow characteristics of Developments

Fig. 12 The test result of flow characteristics (P = 100bar)

동시에 대칭성은 2% 이내임을 확인하였다. 또한 기준품과 유사한 유량특성을 나타내고 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 최대 통과유량 60lpm급의 LVDT 적용 비례전자제어밸브의 개발 및 유량특성에 대한 성능평가를 수행하였다. 기존의 밸브에 스프링변위를 피드백하기 위한 LVDT를 설계하여 적용하고, 시험장치를 구축하여 개발 밸브와 동급의 해외제품에 대한 비교시험을 수행하여 유량특성에 대한 신뢰성을 검증하였다.

시험결과 히스테리시스는 $\pm 1\%$ 이하, 대칭성은 2% 이하로 해외 제품과 동등한 수준의 성능을 가짐을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Bruno P. Lequesne, "Finite Element Analysis of a Constant-Force Solenoid for Fluid Flow Control", IEEE, Tran. Industrial Application, Vol. 24, No. 4, 1988.
- [2] M. Guo and K. Nakano, "Numerical Analysis for the Flow in a Spool Valve by a Boundary Element Method(1st, 2nd Report)", JFPS, Vol. 20, No. 6, 1989.
- [3] S. Y. Lee and J. F. Blackburn, "Contribution to Hydraulic Control 1. Steady State Axial Forces on Control-Valve Pistons", Trans. ASME, Vol. 74, 1952.
- [4] 이현철, "고집적형 비례 방향/유량 제어기술 개발", 대한기계학회 생산 및 설계부문 춘계학술대회논문집, 2011.
- [5] H. E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons Inc, 1976.

(접수:2016.07.30.,수정:2016.08.23, 게재확정:2016.08.30)