

전기 피드백 직동형 서보 밸브에 관한 역 분석

Reverse Analysis on a Direct Drive Servo Valve with Electric Feedback

김성동^{1*} · 안희욱²

S. D. Kim, H. W. Ahn

Received: 30 Oct. 2013, Revised: 28 Nov. 2013, Accepted: 29 Nov. 2013

Key Words : Direct Drive(직동형), Servo Amplifier(서보 증폭기), Pulse Width Modulation(펄스폭 변조), Natural Frequency(고유 진동수), Integrator(적분기), 미분기(Differentiator), 피드백(Feedback)

Abstract: Mechanical and electrical properties of a DDV(Direct Drive servo Valve) with electric feedback are analysed via reverse analysis technique in this work. The DDV is disassembled and mechanical parameters, such as spool mass, spring stiffness and port size are identified. The servo amplifier, which is built in the valve, is reversely analysed and the control scheme and gains for several control actions are also identified. The electrical feedback for spool displacement improves much better the valve performance, such as hysteresis and dynamic bandwidth frequency, than an ordinary mechanical feedback valve. Integrating control action with very large gain was adopted in the valve amplifier, and it seemed to give high performance.

1. 서 론

다양한 자동화 장치에서 유압 서보 시스템이 적용되고 있는데, 유압 서보 시스템의 특성은 전기 피드백 서보 밸브의 성능에 따라서 좌우된다고 하더라도 과언이 아니다. 일반적인 서보 밸브는 플래퍼-노즐형식이며, 기계식 스프링 피드백 방식을 적용하고 있다. 최근에 전기 피드백 직동형 서보밸브가 출현하면서 서보 밸브와 비례방향밸브의 뚜렷한 구분이 어려워지게 되었다.^{1,2)} 예를 들어 밸브의 제어 정밀도와 동특성의 관점에서 스펙변위 전기 피드백을 가진 서보밸브가 일반적인 기계식 스프링 피드백 서보 밸브보다 우수한 것으로 알려져 있다.³⁾

본 연구에서는 Moog사 D633 직동형(Direct Drive) 서보 밸브를 연구 대상으로 채택하였으며, 이 밸브를 분해하여 특성을 파악하는 역분석(reverse analysis)의 접근을 통해 조사하였다. 스펙 질량과 스프링 탄성계수 등과 같은 기계적 매개 변수들은 다양한 방법을 통하여 측정되었다. 그리고 그러한 매개 변수의 값들이 채택된 이유를 알아내려고 분석하였으며, 밸브 기계부의 특성을 파악하려고 노력하였다. 또한, 밸브 본체에 내장되어 있는 서보 증폭기(servo amplifier)의 부품들을 식별하고 분석하는 과정을 통하여 전기 회로의 기능적 구성을 파악하고, 블록 다이어그램을 분석하였다. 그리고 각 제어 동작의 이득과 구성요소에 대한 물리적 특성 값들이 계산되었다. 일부 제어 이득은 입력과 출력 신호 사이의 상관관계를 분석하여 식별되었다. 이러한 서보 증폭기의 역 분석 과정을 통하여 서보 증폭기에 적용된 제어 방법의 특성을 파악하려고 노력하였다.

2. 밸브의 기계부 부품 및 특성

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 직동형 서보 밸브의 구성을 보여 준다. 서보 밸브의 일반적인 구성은 플

* Corresponding author: sdkim@kumoh.ac.kr.

1 Department of Intelligent Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 730-701, Korea

2 School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea

Copyright © 2013, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

래퍼-노즐 형인데, 입력 신호가 토크 모터에 인가되면 토크 모터가 플래퍼-노즐 부를 구동하게 되고, 밸브 구성의 최종 단계인 스푼(spool)은 플래퍼-노즐 부의 동작에 의하여 간접적으로 제어된다.^{4,5)} 반면에 직동형 서보 밸브에서는 선형 힘 모터 (linear force motor)가 직접 스푼을 구동하는 단순한 구조를 가지며, 밸브의 기계부와 전자부의 특성이 플래퍼-노즐 형과 크게 상이하다. 영구자석과 비례전자석으로 이루어지는 선형 힘 모터는 스푼(spool)을 중심 위치에서 양쪽 방향으로 구동할 수 있다. 모터 구동력이 감소하면 스푼 복귀 스프링(spool centering spring)에 의하여 중심 위치로 복귀한다. 모터 구동력이 없는 상태에서는 센터 스프링에 의하여 스푼이 슬리브 오리피스스의 중립점 혹은 영점(null)에 해당하는 중심에 위치하게 된다. 이러한 양 방향성은 오직 한쪽 방향으로만 힘이 작용하게 되는 비례솔레노이드와 비교했을 때 장점 사항이 된다.

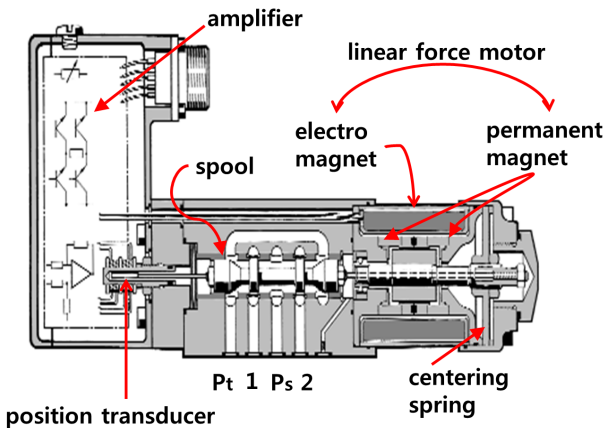


Fig. 1 Construction of a direct drive servo valve (cited from Moog catalog)

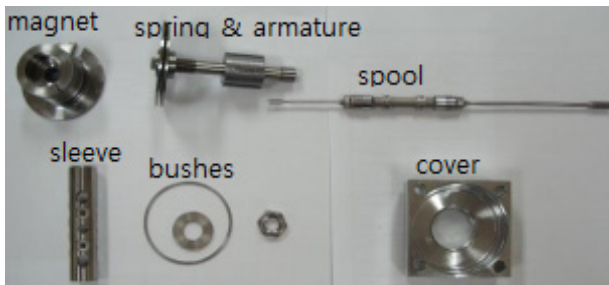


Fig. 2 Mechanical Components of the servo valve

Fig. 2 는 Fig. 1의 밸브를 분해하여 얻어진 스푼, 스프링, 슬리브 등의 기계적 구성 부품들을 보여준다. 스푼 질량, 스프링 강성 계수, 형상 치수 등의 기계적 속성 값들은 다양한 측정 방법을 통하여 계측

되었다. 기계적 구성 부품의 매개 변수 값들은 Table 1에 나타나 있다. Table 1의 기계적 매개 변수의 값들을 분석하여, 밸브 기계부에 관한 두 가지 중요한 특성을 파악하였다.

첫 번째 주요 특성으로서 직동형 서보 밸브는 매우 높은 강성 계수를 가지는 스푼 복귀 스프링을 적용하였다는 것이다. 스푼 스프링의 강성이 매우 높으므로 선형 모터의 구동력도 스프링 저항력을 극복할 만큼 충분히 높아야 한다. 높은 구동력을 얻기 위하여 선형 모터의 운전 전류 수준도 매우 높다. 일반적인 플래퍼-노즐(flapper -nozzle)형 서보 밸브에서 구동 모터의 전류 수준은 수 10 mA인데 반하여, 직동형 서보밸브의 구동 전류 수준은 1000mA에 달한다.

밸브 기계부의 두 번째 특성은 스푼 운동에 관한 특성 주파수로서 고유 진동수(natural frequency)가 매우 높다는 사실이다. 스푼 질량과 스프링의 강성 계수로 표현되는 식 (1)에 Table 1의 매개변수 값들을 적용하여 스푼 운동에 관한 고유 진동수는 195 Hz으로 계산되었다.

$$w_n [Hz] = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K_s}{M_s}} \quad (1)$$

스푼 스프링은 스푼의 낮은 관성질량에 비해 상대적으로 높은 강성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 스푼의 낮은 관성과 스프링의 높은 탄성계수의 결과로 스푼운동에 대한 고유 진동수 또한 높을 것이다.

Table 1 Parameter Values of Mechanical Components

Nomenclature	Parameters	Value & Unit
M_s	spool mass	0.08772 kg
K_s	stiffness of spool centering spring	131,200 N/m
f_s	viscous friction coefficient	3.566 Ns/m
F_c	Coulomb friction coefficient	2.4×10^{-7} N/m
W	width of spool port	5.8×10^{-3} m
V_1, V_2	volume in P_1, P_2 chamber	3.5×10^{-4} m ³
c	spool-sleeve clearance	3×10^{-6} m
O_{ab}, O_{cd}	overlap between P_1, P_2 ports and spool lands	5.34×10^{-6} m
M_e	mismatch between P_1, P_2 spool land	6×10^{-6} m

D633 서보 밸브의 제품 홍보 자료에 제시되어 있는 대역폭 주파수(bandwidth frequency)가 입력 신호의 진폭 크기에 따라서 25~85 Hz로 주어지 있는데, 스톱 운동의 고유 주파수가 대역폭 주파수의 2.3~8 배에 이를 정도로 높다. 즉, 스톱 운동에 관한 기계적 거동 특성이 서보 밸브 전체의 거동 특성이나 기민성에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 예측된다. 그러므로 서보 증폭기를 설계하는 과정에서 기계부의 거동 특성을 고려하지 않고 서보 증폭기의 특성만을 독립적으로 고려하더라도 목표하는 밸브의 거동 특성을 실현하는 것이 가능할 것이다.

3. 전기 서보 증폭기

D633 서보 밸브에 내장된 전기 서보 증폭기는 Fig. 3에서 보여주는 두 개의 인쇄회로기판(PCB)으로 이루어진다. PCB의 부품 단위로 역 분석하여 증폭기의 기능적 구성을 도출하였다. 전기 회로의 각 부분에 대한 기능과 증폭 이득은 관련 구성요소의 물리적 속성 값에 대한 계산에 의해 확인되었다. 일부 기능부의 이득 값은 해당 기능 부분에 대한 입력-출력 신호의 관계를 비교하여 측정되었다. 이와 같은 일련의 방법을 통하여 분석된 서보 증폭기의 블록 다이어그램을 Fig. 4에서 보여준다. D633 직동형 서보 밸브의 서보 증폭기 및 전기 부의 특성은 스톱의 변위, 속도, 가속도의 피드백과 비례·적분(PI 혹은 Proportional-Integral) 제어, 전류신호 피드백과 PWM(Pulse Width Modulation)⁶⁾에 의한 전류 구동(current drive) 등의 다양한 제어 방법들이 적용되고 있다.

3.1 비례·적분 제어 및 스톱 변위, 속도, 가속도 피드백

Fig. 4의 블록 다이어그램에서 스톱 변위는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)에서 전기 신호로 변환되어 기준 입력(reference input)부로 피드백 되는데 스톱 변위 신호에 대한 전기적 피드백을 형성한다. 기준 입력 신호에서 스톱 변위 신호를 차감한 오차 신호에 대하여 적용되는 기본 제어 알고리즘은 다음 식으로 표현되는 비례·적분(PI) 제어이다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e dt \quad (2)$$



Fig. 3 Two PCBs of the servo amplifier

Fig. 1의 직동형 서보밸브에서 제어의 대상이 되는 선형 힘 모터와 스톱 질량-스프링의 운동부에서 적분기(integrator) 요소가 존재하지 않는다. 이러한 영 형식(type 0)의 시스템을 제어하는 제어기에 적분 제어 동작이 포함되지 않으면 정상 상태 오차를 유발하게 된다.⁴⁾ 정상 상태 오차를 제거하기 위한 목적으로 적분 제어 동작은 필수적인 요소로 여겨진다.

스톱 변위 신호는 속도와 가속도 신호를 만들기 위해 두 번 미분되어 각각 피드백 루프를 형성한다. 일반적인 제어 이론에 의하면 가속도와 속도의 피드백은 시스템의 안정성 향상을 위해 적용되는 것으로 알려져 있다. 속도 피드백 제어와 가속도 피드백 제어는 일반적인 비례·적분·미분(PID) 제어의 미분 제어 동작과 유사한 효과를 얻을 수 있는 것으로 제어이론에서 알려져 있다.⁷⁻⁹⁾ 가속도 피드백 루프는 속도 피드백 루프의 내부에 포함되어 있으며, 속도 피드백 루프는 변위 피드백 루프의 내부에 위치해 있다. 가장 큰 피드백 루프를 형성하는 변위 피드백이 가장 중요한 역할을 수행하고, 속도 피드백과 가속도 피드백이 보조 기능을 수행하는 것으로 생각할 수 있다. 또한 속도 피드백이 가속도 피드백을 내포하므로 보다 더 중요한 역할을 수행하는 것으로 추정된다. 스톱 가속도 신호를 얻기 위하여 스톱변위 신호를 미분하는 미분기는 노이즈(noise)에 취약한 문제점이 있는데, 노이즈 신호를 걸러내기 위하여 저대역 필터(LPF)를 적용하였다.

앞에서 설명한 비례·적분 제어의 제어 이득과 속도와 가속도 피드백의 이득 값들을 기존의 비례·적분·미분 제어 동작의 이득 값들과 정량적으로 비교함으로써 적용되는 제어 방법의 특성을 판단할 수 있을 것이다. 각 제어 동작들은 물리적 차원이 다르

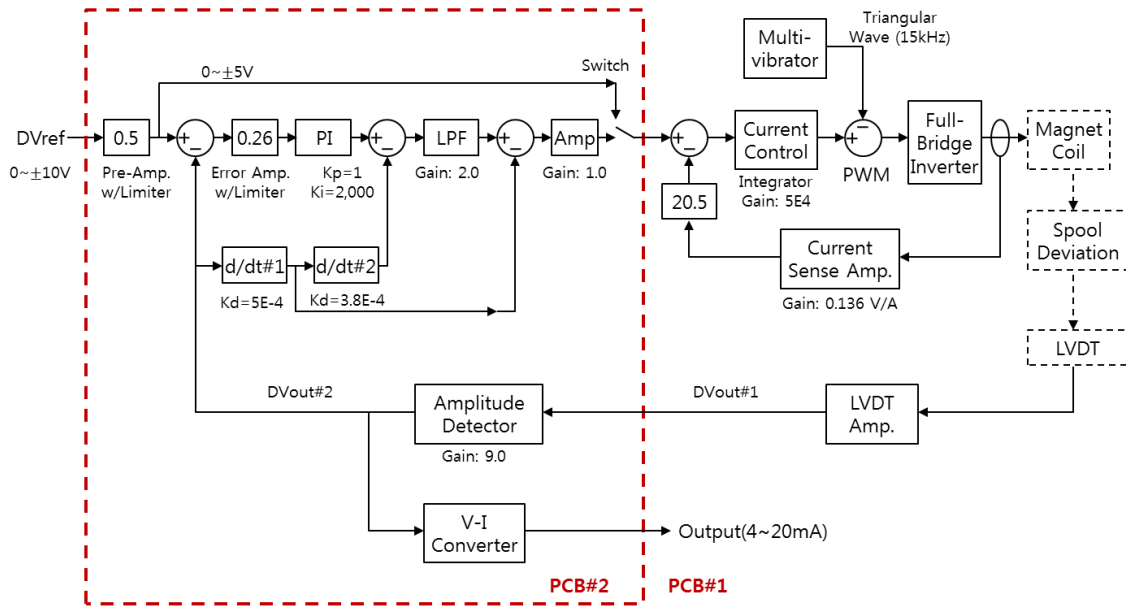


Fig. 4 Block Diagram for the Servo Amplifier

기 때문에 정량적인 크기만으로 상대 비교가 어려우며, 아래의 식 (3)과 (4)에 주어진 적분 시간과 미분 시간과 같이 시간 영역의 매개 변수로 변환하여 비교함이 효율적이다. 변위 오차 신호의 PI 제어에서 적분기 이득 K_i 는 1,740으로 확인되었다. 이것은 약 1의 비례이득보다 훨씬 큰 결과로서 거의 적분 제어에 가까운 것이다. 다음의 식(3), (4)을 이용하여 계산된 적분기의 적분 시간 T_i 는 약 0.5 ms이다. 이러한 적분 시간은 스푼 질량 스프링의 고유 진동수 197Hz의 주기 시간인 5 ms 보다 훨씬 짧다고 할 수 있다.

$$U = K_p(e + \frac{1}{T_i} \int e d\tau + T_d \frac{de}{dt}) \quad (3)$$

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad \text{and} \quad T_d = \frac{K_d}{K_p} \quad (4)$$

또, 지글러와 니콜스가 제시한 PID 제어기의 동조 방법⁸⁾에 근거하여 얻어진 적분 시간 4 ms보다 매우 작은 수준이며, 적분 제어 동작이 훨씬 더 강하게 설정된 결과이다. 결론적으로 이러한 적분기 이득은 일반적인 PI제어기의 적분 이득 값보다 훨씬 큰 것으로 확인되었다.

변위 피드백 신호와 기준 입력 신호가 물리적 차원을 동일하게 설정하면, 변위 피드백이 이득 값이 1인 단위 피드백으로 간주된다. 1의 변위 피드백 이득에 대하여 속도 피드백 이득이 5×10^{-4} 으로 상대적

으로 매우 작으며, 가속도 피드백 이득은 19×10^{-8} 으로 더욱 작은 값이다. 속도 피드백 이득을 미분 이득으로 간주하고, 식 (4)을 이용하여 얻어진 미분 시간 T_d 는 약 0.5 ms이었는데, 지글러와 니콜스 동조 방법⁸⁾에 근거하여 얻어진 미분 시간도 0.6 ms이어서 거의 유사한 수준으로 파악되었다. 하지만, 가속도 피드백 이득 값에 대하여는 경중에 대한 판단 기준을 찾기 어려운 상태이다.

3.2 펄스 폭 변조(PWM)와 전류 구동

Fig. 4에서 선형 모터의 전자석 코일은 펄스 폭 변조(PWM)된 전류 신호에 의해 구동된다. 전류 신호의 정밀한 제어를 위하여 전류 값을 감지하여 피드백하는 피드백 루프(feedback loop)를 형성하며, 전류 피드백 루프 안에서 적분제어가 적용되었다. 비례 제어가 없이 적분 제어 단독으로 구현된 점이 특이한 사항이며, 적분 이득의 값도 5×10^4 에 이르는 매우 큰 이득 값이 적용되었다. 이러한 적분 이득 값은 두 가지 방법을 통하여 계산되고 확인되었다. Fig. 4의 관련 적분 증폭기에서 205 kΩ 저항과 100 pF 콘덴서가 사용되어 적분 이득은 다음 식과 같이 계산된다.

$$K_{ci} = \frac{1}{RC} = \frac{1}{205K\Omega \cdot 100pF} \approx 5 \times 10^4 \quad (5)$$

5×10^4 의 적분기 이득은 전류 제어 루프내의 적분기에 대한 입력력 신호를 비교측정으로도 확인할

수 있다. Fig. 5는 전류 제어 루프내의 적분기에 2 V 신호를 입력하여 일정한 증가율의 램프(ramp) 신호가 출력되는 것을 그래프로 그린 것이다. 적분기 이득 K_{ci} 는 다음과 같은 식으로도 계산될 수 있다.

$$K_{ci} = \frac{\Delta V_{out}}{V_{in} \cdot \Delta t} = \frac{13 \cdot 4V}{2V \cdot 136\mu s} \approx 5 \times 10^4 \quad (6)$$

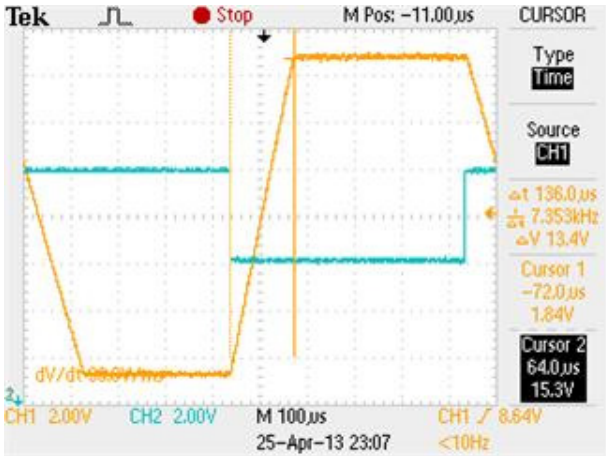


Fig. 5 Constant Input and Ramp Output of Integrator in Current Feedback Loop

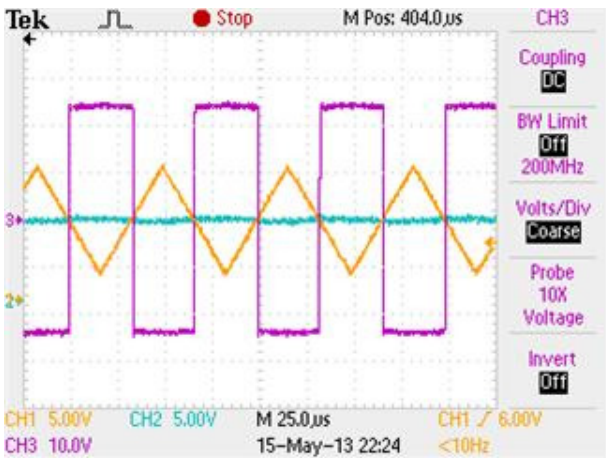


Fig. 6 A Case of Zero output when $+V_{ref}$ and $-V_{ref}$ Pulse Widths are 50%:50%.

펄스 폭 변조(PWM) 신호는 반송파 신호와 입력 신호를 비교하여 생성된다. Fig. 6과 8은 PWM 모듈에서 두 가지 입력 신호에 대하여 측정된 PWM 출력의 두 가지 사례를 보여준다. Fig. 6의 경우에 입력신호로 0이 입력되어, 15.2 kHz의 삼각형 반송파의 신호와 비교되어 +24V 펄스폭과 -24V 펄스폭이 동일한 비율로 출력된다. 비교적 긴 주기 시간동안에 출력되는 전류의 평균값은 0 A가 된다. 최종 출력 신

호가 전류 신호로 변환되는 것은 전류신호를 피드백하여 전류 신호가 입력 신호와 일치하도록 제어하기 때문이다. Fig. 7은 3 V 입력신호에 대해서 $+V_{ref}$ 와 $-V_{ref}$ 의 펄스폭의 비율은 74:26%이다. 비교적 긴 주기 시간동안에 출력되는 전류의 평균값은 1.8 A가 되는데, PWM 모듈은 일종의 비례 제어에 해당한다. 여기서 PWM 모듈의 등가 비례 이득 K_{PWM} 은 0.6으로 산출되었다.

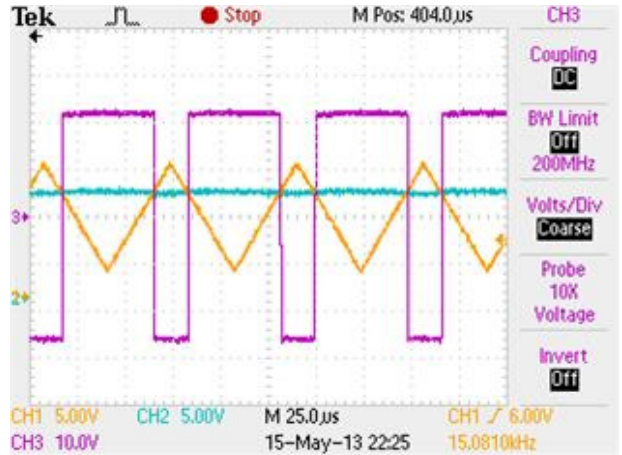


Fig. 7 A Case of 1.8 A Output when $+V_{ref}$ and $-V_{ref}$ Pulse Widths are 74%:26%.

Fig. 4의 우측 전류 피드백 루프의 입력 신호에 대한 전류 출력 신호의 전달 함수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$G_{loop}(s) = \frac{G_f(s)}{1 + G_f(s) \cdot G_b(s)} \quad (7)$$

식(7)에서 $G_f(s)$ 는 피드포워드(feedforward) 전달함수이며, $G_b(s)$ 는 피드백 전달함수를 의미한다. Fig. 4의 전류 피드백 루프의 전달 함수 G_{cf} 는 식(7)에 이득 값들을 적용하여 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$G_{cf}(s) = \frac{\frac{50000}{s} \times 0.6}{1 + (\frac{50000}{s} \times 0.6) \times (0.136 \times 20.5)} \approx 0.36 \quad (8)$$

식 (8)에서 적분기 이득이 매우 크므로, 분모 항에서 1은 무시될 수 있다. 또, 분자 항과 분모 항의 공통 항인 피드포워드(feedforward) 전달함수 부분이 소거되어서 전체 전류 피드백 루프의 전달함수 G_{cf} 는 피드백 전달함수의 역수로 간략하게 정리된다. 결과

로 얻어지는 전류 피드백과 적분 제어 및 PWM 모듈로 구성되는 전류 피드백 루프 전체의 전달 함수는 피드백 이득 0.136×20.5 의 역수인 0.36 의 비례상수로 표현되는 전류변환기로 간주될 수 있다.

4. 스톨 변위 전기 신호 피드백

PWM 모듈의 출력전류 i 는 Fig. 8의 선형 힘 모터에 입력되어 전자력을 생성하며, 스톨을 구동한다. 선형 모터의 전자력은 전류 입력에 비례하는데, 스톨 복귀 스프링의 반력과 평형을 이루어 스톨이 입력신호에 비례하는 변위를 얻게 된다. 즉, 스프링 강성계수 K_s 에 스톨 변위 x_v 를 곱하여 얻어지는 스프링 복원력은 모터 구동력에 반대로 차감하여 피드백 루프를 형성한다. 그러므로 스톨 복귀 스프링은 그 자체로 스톨 변위 x_v 에 대한 하나의 피드백 루프를 형성한다는 것을 보여준다. Fig. 8에서 스톨 속도 피드백은 점성마찰력의 효과를 나타내며 정상상태에서는 그 영향이 사라진다. 스톨 변위에 대한 또 다른 피드백은 LVDT(Linear Variable Differential

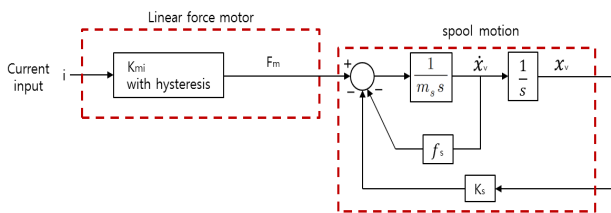


Fig. 8 Block diagram for linear force motor and spool motion

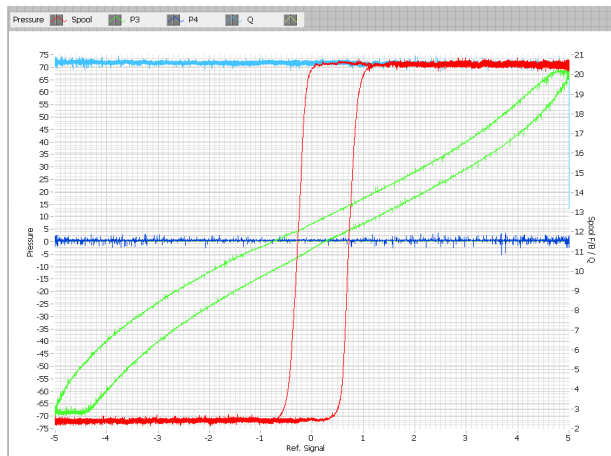


Fig. 9 Hysteresis of block port load pressure and spool displacement for open loop control without LVDT (green: spool displacement, red: load pressure)

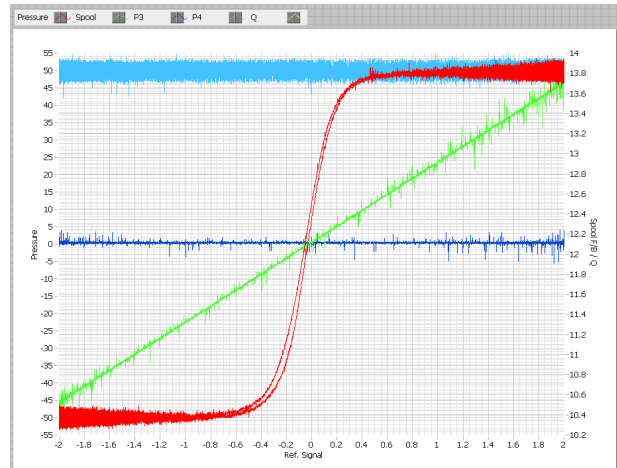


Fig. 10 Hysteresis disappears for closed loop control with LVDT feedback (green: spool displacement, red: load pressure)

Transformer)에 의해 만들어진다. 그리고 LVDT의 전기 신호에 의한 전기적 피드백은 직동형 서보 밸브의 대부분의 구성요소를 포함하는 가장 큰 피드백 루프를 형성한다.

Fig. 4에서 LVDT 스톨 변위 신호의 피드백이 제거된다면, 서보 밸브의 성능에서 어떠한 영향이 발생할 것인지에 대해서 분석하였다. LVDT 스톨 변위 피드백을 제거하면 선형 모터의 자기 히스테리시스(hysteresis) 인자가 스톨 피드백 루프의 외부에 있기 때문에 그 영향을 보상할 수 없으며, 스톨 변위 신호에 히스테리시스 현상이 전이되어 발생한다. 스톨 변위의 히스테리시스의 결과로서 서보 밸브의 출력 유량과 압력의 성능에도 히스테리시스가 전이되어 나타나게 된다.

Fig. 9는 LVDT 전기적 피드백이 제거 되었을 경우에 스톨변위와 부하 압력 신호에서 히스테리시스 오차가 크게 형성됨을 보여준다. 이러한 히스테리시스 오차는 LVDT의 피드백을 복원한 Fig. 10에서는 사라지는 것을 알 수 있다. 선형 힘 모터의 히스테리시스 효과는 LVDT 피드백 루프의 내부에 존재하게 되며, 자동 피드백 제어 동작에 의해 보상되기 때문에 히스테리시스 현상이 거의 사라진다.

5. 결 론

본 연구에서 LVDT 스톨변위 피드백 기능을 가지는 직동형 서보 밸브에 관하여 역분석 (reverse analysis)을 수행하였으며, 주요한 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 스톱 복귀 스프링의 강성이 매우 높고 선형 힘 모터의 전류의 수준 또한 1000mA 범위로 높다.

2) 스톱 스프링의 강성에 비교하여 스톱 질량은 상대적으로 작으며 스톱질량 - 스프링계의 고유 주파수는 195 Hz로 매우 높다.

3) 비례·적분(PI) 제어 방법과 속도·가속도 피드백이 서보 증폭기에 적용되었다. 적분기 이득은 일반적인 PI 제어기의 적분 이득보다 훨씬 크다. 적분 이득이 매우 큰 경우에 시스템의 안정성이 떨어질 가능성이 높은데, 매우 큰 적분 이득과 시스템의 안정성을 향상시키기 위해 속도·가속도 피드백이 적용된 것으로 보인다.

4) 선형 모터의 구동 전류를 생성하는 부분에서 비교적 정밀도가 떨어지는 PWM 제어방법이 사용되고 있지만 전류 피드백이 적용되고 있어서 선형 힘 모터의 정밀한 전류 구동을 가능하게 한다. 5×10^4 정도의 큰 적분기 이득은 전류 피드백 루프 안에서 사용되는데, 전류 피드백 루프 전체의 전달함수는 일정한 비례이득의 비례제어로 생각할 수 있다. 즉, 단순한 전압-전류변환기로 간주 될 수 있다.

5) 선형 힘 모터는 자기 히스테리시스 특성을 가지는데, LVDT 전기 피드백은 히스테리시스 효과를 보상해 줌으로써 서보 밸브의 출력 신호인 스톱 변위와 유량, 압력에서는 히스테리시스 효과를 거의 완벽하게 제거한다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 (승인번호: NRF-2012RA1A2041242)의 재원으로 한국 연구 재단(National Research Foundation of Korea)을 통해 기초 과학 연구 프로그램에 의해 지원되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

- 1) I. Lee and Education Division of Bosch Rexroth Korea, "Hydraulic Engineering", Munundang. Co. kr, Seoul Korea, 2012 August.
- 2) Moog Industrial Controls Division, "D633 and D634 Series Direct Drive Servo-Proportional Control Valves with integrated 24V Electronics, ISO 4401 Size 03 and 05", Moog Inc, New York USA.
- 3) M. Galal Rabie, "Fluid Power Engineering", McGraw-Hill Companies, New York USA, 2009.
- 4) Urata, E. "Study of Magnetic Circuits for Servovalve Torque Motor", Bath Workshop on Power Transmission and Control (PTMC00), 269-282, 2000.
- 5) H. E. Merritt "Hydraulic Control System", Wiley and Sons, New York, pp.79-91. 1967.
- 6) D. T. Kim and S. K. Lee, "Pressure Ripple Reduction in High Speed On-Off Solenoid Valves Driven by PWM Control", Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society, Vol. 2 No. 2, 2005
- 7) K. Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall Inc., London, pp.216-282, 1970.
- 8) Ziegler, J. G. and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers", Trans. ASME 64:759-768, 1942.
- 9) Astrom, K. J. and T. Haggglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins", Automatica 20: 645-651, 1984.