

유량제어용 서보밸브와 비례방향밸브의 압력신호를 이용한
 정적 성능 진단에 관한 연구

Static Performance Diagnosis Based on Pressure Signal for a
 Flow Control Servovalve or Proportional Direction Valve

김성동^{1*} · 전세형¹ · 김인동¹ · 함영복²

S. D. Kim, S. H. Jeon, I. D. Kim and Y. B. Ham

Received: 13 Jul. 2012, Accepted: 14 Nov. 2012

Key Words : Servovalve(서보밸브), Proportional Direction Valve(비례방향밸브), Pressure Gain(압력이득), Hysteresis(히스테리시스), Null Bias(영점오차), Pressure Signal(압력신호)

Abstract: Most diagnosis methods for servo valves requires installing spool displacement sensor or flow sensor as well as pressure sensor. The measurement of flow is hard to implement and many kinds of servovalves or proportional direction valves do not have a built-in spool displacement sensor. In this study, static performances of servovalve or proportional-direction-valve are studied theoretically and a diagnosis technique, which uses only load pressure and input current signal, is assessed. An experimental setup was made based upon a personal computer and the LabVIEW graphical language. A series of diagnosis tests were performed and the analysis results showed it possible to measure the pressure gain, hysteresis and null bias in a relatively simple methodology.

기호 설명

A_P : piston area of cylinder
 C_d : discharge coefficient
 H : hysteresis
 $i_d \sim i_u$: input signal of servovalve
 i_0 : null bias
 i_R : rated current input
 K_c : flow-pressure coefficient
 K_P : pressure gain or pressure sensitivity
 K_q : flow gain
 K_{c0}, K_{p0}, K_{q0} : null coefficients of K_c, K_p, K_q

P_L : load pressure
 P_s : supply pressure
 $Q_1 \sim Q_4$: leakage flows
 Q_c : center flow or total leakage flow at null
 Q_L : load flow
 r_c : clearance between spool and sleeve
 ω : area gradient of valve orifice
 x_v : displacement of valve spool
 μ : viscosity of hydraulic fluid
 ρ : density of hydraulic fluid

1. 서 론

유압 서보밸브와 비례밸브는 다양한 산업 분야에
 서 정밀한 제어와 자동화에 널리 사용된다. 서보밸브
 의 대부분이 유량제어용이며, 압력제어용은 극히 일
 부분에서 사용된다. 비례방향밸브의 구조가 유량제어
 용 서보밸브의 구조와 확연한 차이를 보이지만, 핵심
 기능 부위인 스톨 부분은 동일한 구조를 가지며, 성
 능 진단의 방법도 서보밸브의 진단 방법과 동일하게

* Corresponding author: sdkim@kumoh.ac.kr
 1 Department of Intelligent Mechanical Engineering, Kumoh
 National Institute of Technology, Gyeongsbuk 730-701, Korea
 2 Extreme Energy Machinery Laboratory, KIMM
 Copyright © 2012, 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.

적용할 수 있다. 이러한 유압 서보밸브와 비례밸브는 고가, 초정밀 부품으로 구성되어지며, 유압유 속의 먼지나 오염물질 등에 의하여 쉽게 고장이 발생한다. 이러한 서보밸브의 고장은 막대한 생산손실을 초래하기 때문에 서보밸브의 성능유지, 관리, 보수가 매우 중요하게 인식된다.

현재까지 서보밸브와 비례방향밸브의 성능진단에 관한 연구와 문헌이 많이 존재하고 있지만 대부분의 방법이 입력신호로서 전류신호를 공통적으로 사용하며 출력신호로 부하압력신호 뿐만 아니라 부하유량신호와 스펙변위신호 등이 추가로 사용되었다.^{1~11)} 서보밸브의 누설유량, 유량 선형성, 유량 대칭성, 유량 히스테리시스 등의 정적 성능 항목을 측정하기 위하여 유량신호를 사용하였다. 유량 선형성, 대칭성 등의 항목은 제조업체가 소비자에게 제공하려는 용도로 주어지는 항목들이라고 볼 수 있으며, 제품 초기 상태에서 주어진 성능이 사용 시간이 경과하더라도 거의 변화하지 않는다. 또 유량신호를 이용하기 위해서는 유량센서가 배관에 직렬연결의 방법으로 설치되어야 하며, Fig.1에서 보여 주는 바와 같이 유량신호의 측정은 매우 복잡한 단점이 있다.^{1,3)} 서보밸브의 동특성을 진단하는 목적으로 스펙변위신호는 매우 유용하다.²⁾ 하지만 많은 서보밸브에서 스펙변위센서가 내장되어 있지 않아서 그 활용에 한계를 가지며, 정적 성능을 진단하는 용도로는 활용도가 매우 낮다.

압력이득과 영점오차의 정적 성능 항목은 측정하기 위해서는 부하압력의 신호가 이용되어 왔다. 이제까지 부하압력의 신호는 압력이득(pressure gain)과 영점오차(null bias), 또 영점오차의 변동(null shift)의 성능항목을 측정하는 용도로 국한되어 사용되었다.^{1,3)} 하지만, 이러한 항목들은 사용시간에 따라 변화할 수 있는 항목들이며, 서보밸브의 상태를 지속적으로 관찰할 수 있는 의미를 가진다. 또 압력센서의 설치가 비교적 단순한 장점도 가진다.

본 연구의 목적은 유량 센서와 스펙변위 신호는 사용하지 않으며, 밸브의 부하압력신호와 입력전류만을 이용하여 서보밸브와 비례방향밸브의 정적성능을 진단할 수 있는 방법을 연구하는 것이다. 압력신호로 진단할 수 있는 기존의 정적성능 항목 외에 추가할 수 있는 진단항목을 모색하고, 그 활용도를 높이고자 한다. 아울러서 측정 데이터의 후처리 방법과 진단방법의 효율성도 조사한다. 이제까지 서보밸브 스펙의 영점오차의 원인에 대하여 정확한 규명이 이루어지지 않았는데, 영점오차의 원인을 규명하고자 한

다. 연구범위는 정적성능에 국한하여 수행되었다.

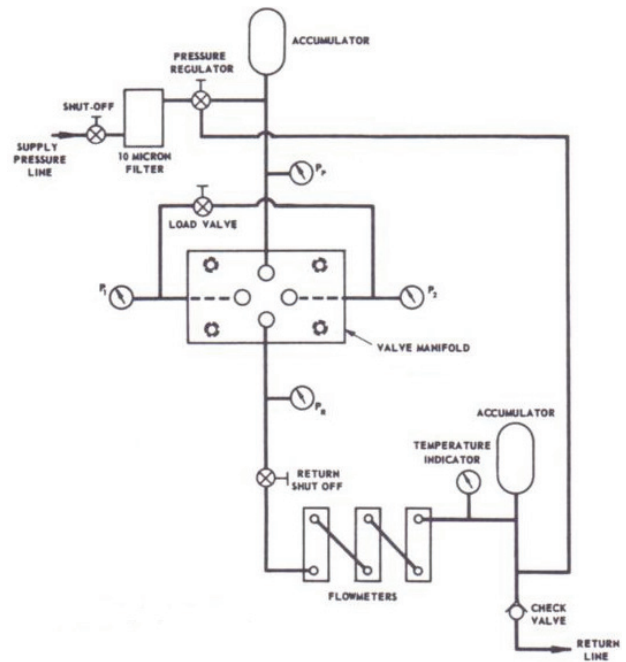


Fig. 1 Schematic of static test equipment using flow signal. (Moog사 자료 인용)

2. 서보밸브 정적 성능 이론

2.1 서보밸브 스펙 마모와 압력이득

서보밸브와 비례방향밸브의 핵심 기능 부위인 스펙과 슬리브의 부분은 Fig. 2에서 경사선으로 음영처리된 부분과 같은 구조를 가지며, 밸브의 정적성능 진단에 있어서도 핵심 부분을 이룬다.

서보밸브를 사용한 시간에 따라 변화하는 성능은 스펙마모에 밀접한 연관을 가진다. 스펙의 마모를 예측할 수 있는 진단변수는 서보밸브에 관한 수학적 모델 식을 관찰함으로써 발견할 수 있다.

누설이 존재하지 않는 이상적인 서보밸브의 유량(혹은 부하유량)은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_L = C_d \omega x_v \sqrt{\frac{P_s - P_L}{\rho}} \quad (1)$$

여기서 x_v 는 밸브 스펙의 변위이다. (1)식의 유량 관계식은 변수들이 정량적으로 미소하게 변화하는 범위 내에서 (2)식과 같이 선형화될 수 있다.

$$\Delta Q_L = K_q \Delta x_v - K_c \Delta P_L \quad (2)$$

여기서 K_q 는 유량이득이라 호칭하며, K_c 는 유량-압력 계수로 호칭하는 매개변수들이다. 이러한 매개

변수들은 (3)식과 (4)식과 같이 정의된다.

$$K_q = \frac{\partial Q_L}{\partial x_v} = C_d w \sqrt{\frac{P_s - P_L}{\rho}} \quad (3)$$

$$K_c = -\frac{\partial Q_L}{\partial P_L} = \frac{C_d w x_v}{2(P_s - P_L)} \sqrt{\frac{P_s - P_L}{\rho}} \quad (4)$$

다른 유용한 매개변수인 압력이득 K_p 는 다음과 같이 정의된다.

$$K_p = \frac{\partial P_L}{\partial x_v} = \frac{K_q}{K_c} = \frac{2(P_s - P_L)}{x_v} \quad (5)$$

서보밸브의 특성을 나타내는 세 가지 매개변수들 중에서 압력이득이 스톱의 마모정도를 가장 효과적으로 예측할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이들 세 가지 매개변수 값들은 밸브의 작동조건에 따라 변화한다. 가장 중요한 작동조건은 영점 상태(null condition)이라고 할 수 있는데, 스톱변위 x_v 와 부하유량 Q_L , 부하압력 P_L 이 영인 상태를 의미한다. 영점 조건이 중요한 이유는 유압 서보시스템의 대부분의 작동시간이 영점 영역이기 때문이다. 누설이 존재하지 않는 이상적인 상태에서 세 가지 매개변수들을 다음과 같이 표현한다.

$$K_{q0} = C_d w \sqrt{\frac{P_s}{\rho}} \quad (6)$$

$$K_{c0} = 0 \quad (7)$$

$$K_{p0} = \infty \quad (8)$$

하지만, 부품사이의 틈새와 누설이 존재하는 실제 유압밸브에서 영점 매개변수들은 (6)~(8)식과 다른 모습이 된다. 실제 밸브에서 유량-압력 계수 K_{c0} 는 참고문헌^{8, 12)}에서 다음과 같이 주어진다.

$$K_{c0} = \frac{\pi w r_c^2}{32\mu} \quad (9)$$

(6)식과 (9)식을 (5)식에 대입하면, 실제 서보밸브의 영점 압력이득은 다음과 같이 주어진다.

$$K_{p0} = \frac{32\mu C_d}{\pi r_c^2} \sqrt{\frac{P_s}{\rho}} \quad (10)$$

(10)식에서 밸브마모의 증가에 비례적으로 증가하는 틈새 r_c 에 따라서 감소하는 영점 압력이득 K_{p0} 가 밸브마모의 진단에 사용될 수 있을 것이다.

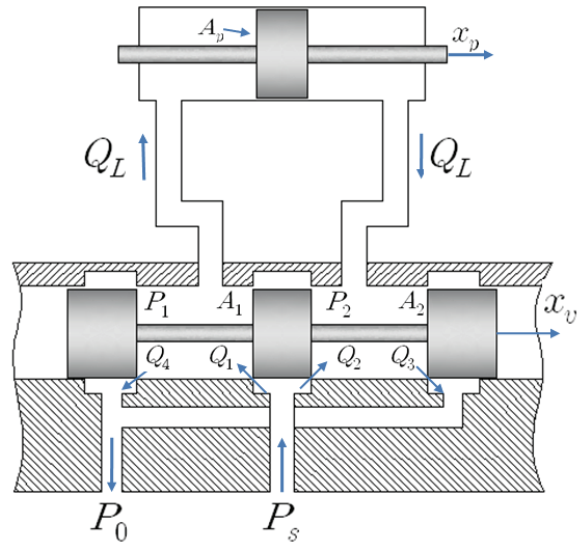


Fig. 2 Schematic of a hydraulic servo valve

이러한 영점 압력이득은 측정방법의 관점에서 부하유량 Q_L 이 차단된 상태에서 밸브스풀의 변위와 부하압력의 상관관계로부터 측정될 수 있다.

(5)식에 주어진 바와 같이 스톱변위 x_v 에 대한 부하압력 P_L 의 기울기 값으로 측정된다. Fig. 3에서 도시한 바와 같이 마모된 밸브에서는 영점($x_v = 0$) 부근에서 $\partial P_L / \partial x_v$ 에 해당하는 기울기 값이 사용하지 않은 상태의 밸브의 값보다 상대적으로 작게 나타나는 것으로 예시되어 있다.

서보밸브 압력이득을 효과적으로 진단하는 관점에서는 스톱변위 신호 대신에 밸브 입력전류신호를 사용하여 $\partial P_L / \partial i$ 을 측정하는 것이 효과적이다.

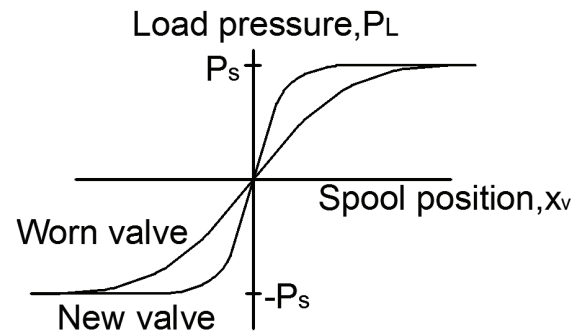


Fig. 3 Load pressure curves and pressure gain

2.2 서보밸브 스톱 마모와 누설유량

Fig. 2에서 보여주는 서보밸브의 스톱이 영점 상태에서 슬리브(sleeve)와 겹치는 정도에 따라 밸브의 특성이 좌우된다. 대부분의 서보밸브는 임계 센터형(critical center type)이며, 이상적인 상태에서는 밸브

스풀과 슬리브사이에 틈새도 존재하지 않으며, 오버랩(overlap)도 존재하지 않는다. 이러한 이상적인 상태에서는 부하유량 Q_L 이 영인 영점 상태(null condition)에서 누설유량에 해당하는 $Q_1 \sim Q_4$ 는 영이다.

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 0 \quad (11)$$

하지만, 실제 서보밸브(한 번도 사용한 적이 없는 신품상태의 서보밸브도 포함함)에서는 부품 사이에 틈새가 존재하며, 누설유량도 존재한다. 이러한 누설유량은 밸브의 마모가 진행됨에 따라 증가하게 된다. Wuest¹²는 날카로운 모서리를 가진 오리피스에서 층류 흐름에 관하여 분석하였다. 만약 Wuest의 이론식을 Fig. 2의 오리피스에 적용한다면, 중립누설 유량 Q_c 는 (12)식과 같이 표현된다. 여기서 중립 누설유량은 밸브 스푼이 중립($x_v = 0$) 상태에서의 총 누설을 의미한다.

$$Q_c = Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 = \frac{\pi w r_c^2}{32\mu} (P_s + P_L) \quad (12)$$

(12)식에서 밸브마모가 진행되면, 틈새 r_c 가 증가하며, 중립 누설유량 Q_c 도 증가하게 된다. 그러므로 유량센서를 사용하여서 중립누설 유량 Q_c 를 측정한다면 마모의 정도를 예측할 수 있다. 하지만, 서론에서 언급한 바와 같이 유량센서를 설치해야 하므로 비효율적이다.

2.3 서보밸브 히스테리시스

기존의 히스테리시스 진단 방법은 서보밸브 입력 신호와 유량신호의 관계 특성을 이용하고 있으며, 측정 방법을 Fig. 4에서 보여준다. 입력 전류 신호를 양의 정격전류에서 음의 정격전류가 될 때까지 천천히 감소시키며, 양의 정격 부하유량의 10% 되는 유량의 전류 값(i_{d10})을 파악한다. 이 히스테리시스 곡선이 음의 정격 전류까지 도달하면 그때 다시 입력 신호를 양의 방향으로 i_{d10} 의 유량 값과 같을 때까지 증가시켜 전류 값(i_{u10})을 구한 후에 (13)식으로 히스테리시스를 표현한다.

$$\% \text{히스테리시스 } H = \left(\frac{i_{u10} - i_{d10}}{i_R} \right) \times 100 \quad (13)$$

하지만 다음에 설명하는 관점에서 유량신호 대신에 압력신호를 사용하는 방안을 고려할 수 있다. 유

압 서보 밸브에 있어서 이러한 히스테리시스의 가장 큰 원인은 밸브 슬레노이드의 자기 히스테리시스이며, 스푼, 포펫(poppet)등이 작동할 때 발생하는 마찰력도 영향을 미친다. 자기 히스테리시스와 마찰력 등은 서보밸브 입력신호의 결과로 스푼변위 사이에서 영향을 미치며, 스푼변위 신호와 밸브 출력 신호인 유량신호 사이에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이러한 사실은 Fig. 5로 주어지는 서보밸브의 스푼변위와 부하압력 사이의 관계 선도로부터 히스테리시스 현상이 존재하지 않는 것으로부터 확인된다. 이러한 사실은 후반부에서 실험적으로도 확인할 것이다. 결론적으로 히스테리시스 원인 인자는 스푼변위에 직접 영향을 미치지 않지만, 스푼변위의 변화에 따라 영향을 받는 유량과 압력 등의 변수에는 간접적으로 영향을 미친다. 그러므로 히스테리시스를 진단하는 목적으로 유량신호와 압력신호 중에 어떤 신호를 선택할 지에는 영향을 거의 받지 않을 것으로 기대된다.

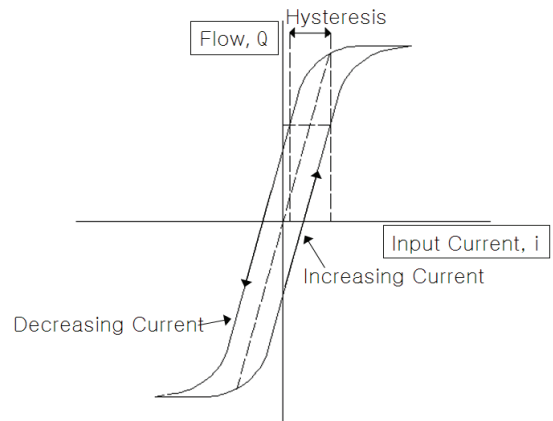


Fig. 4 Flow hysteresis curve

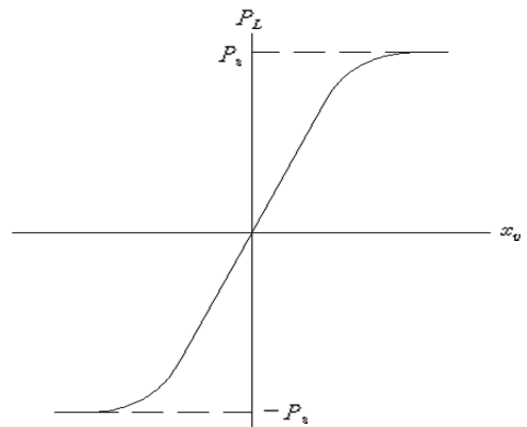


Fig. 5 Spool position(x_v) versus Load pressure(P_L) curve

2.4 서보밸브 영점(null)과 영점오차(null bias)

서보밸브 스톱의 랜드 부위가 오리피스스의 포트 부위와 정합되는 상태가 영점(null)이다. 영점의 개념은 간단하지만, 영점을 측정하는 것은 간단하지 않다. 스톱의 변위를 변위 센서로 측정하는 경우라고 하더라도 측정신호 값이 영인 상태가 실제로 스톱이 슬리브와 정합상태인 것을 의미하는 것은 아니기 때문이다. 즉, 스톱변위 센서의 물리적 데이터로서 영의 값이 스톱 랜드와 슬리브 사이의 정합 상태를 보장하지 않는다. 효과적인 영점 측정 방법으로서 부하압력을 이용하는 방법을 고려할 수 있다. 스톱변위와 부하압력 사이의 관계를 보여주는 Fig. 5에서 히스테리시스 현상이 존재하지 않을 뿐만 아니라, 서보밸브 스톱변위 x_v 가 정확히 영점에서 부하압력 P_L 이 '0'이 된다. 즉, 스톱변위와 부하압력 선도에서는 영점오차(null bias)도 존재하지 않는다. 이러한 사실도 후반부에서 실험적으로 확인할 것이다. 그러므로 스톱변위 센서의 측정신호가 영인 조건이 영점이라고 정의하는 것보다 부하압력이 영인 상태에서의 스톱변위 값을 영점으로 정의하는 것이 더 합리적이다. 스톱의 영점 상태에 대한 스톱변위 측정신호나 입력전류의 신호를 결정하는 기준으로써 부하압력이 '0'인 조건을 응용한다.

서보밸브의 영점오차는 밸브 스톱의 영점 상태에서의 밸브 입력이 '0'으로 부터 벗어난 정도를 말한다.

영점오차에 대한 기존의 측정 방법은 Fig. 6과 같이 주기적으로 변화하는 신호의 진폭을 점진적으로 감소시킨 입력전류를 인가하여 히스테리시스의 효과를 제거한다. 최종적으로 부하압력이 영으로 수렴하는 부하압력의 입력 값으로부터 영점오차를 진단한다. 구체적으로 설명하면, 영점 부근에서 서보밸브 입력신호를 증가하는 과정에서 부하압력이 '0'에 대응하는 영점 입력 i_{uo} 와 입력신호를 감소하는 과정에서 동일한 개념의 영점 입력 i_{do} 의 평균값으로서 (14)식과 같이 표현된다. 이러한 영점오차를 입력전류의 정격값(i_R)으로 나누어준 무차원 영점오차는 (15)식으로 표현된다.

$$i_0 = \frac{i_{uo} + i_{do}}{2} \tag{14}$$

$$\bar{i} = \frac{i_{uo} + i_{do}}{2i_R} \times 100 \tag{15}$$

기존의 영점오차 측정 방법에서 서보밸브의 입력 변화의 폭을 점진적으로 줄여가는 이유는 히스테리시스 효과를 제거하기 위함이었다. 하지만, 토크모터, 플래터-노즐, 스톱 등의 서보밸브 부품과 비례방향밸브의 대부분의 구조가 밸브 영점(null)에 대하여 대칭이며, 부품 재료의 자기 히스테리시스 물성도 대칭성을 가진다고 기대한다면 히스테리시스도 스톱의 영점을 기준으로 대칭적으로 작용할 것이다. 이러한 가정에서, (14)식과 (15)식과 같이 입력전류의 증가 경우와 감소 경우에서 구한 각각의 영점오차를 평균한다면 자기 히스테리시스와 마찰력과 같이 대칭성을 띠는 효과는 제거될 것으로 기대된다. 이러한 관점에서 서보밸브 입력신호의 레벨을 점진적으로 감소시키지 않더라도, 단 한 번의 주기의 대칭된 입력신호에 대한 측정신호만으로도 영점오차를 측정 가능할 것으로 기대할 수 있다. 또 영점오차를 유발하는 원인인자를 비대칭적 특성의 인자로 국한한다면, 스톱과 슬리브 사이의 조립오차와 전기 증폭기의 전기적 영점오차 등을 생각할 수 있다.

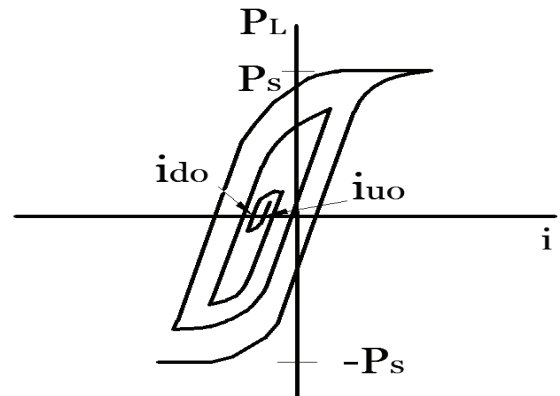


Fig. 6 Conventional diagnosis of null bias

3. 진단 항목 및 방법

3.1 압력이득

기본적으로 입력전류와 부하압력만을 이용하여 서보밸브의 정적성능을 진단하는 방법을 검토하였다. 압력이득의 진단방법은 기존의 진단 방법과 큰 차이가 없지만 공급압력으로 무차원화시킨 압력이득의 의미와 효용성을 조사하기 위하여 무차원화 방법도 아울러 적용하여 검토하였다. 서보밸브 입력 정격전류의 $\pm 20\%$ 영역을 감소하고 증가하는 한 주기 변화를 1000초 정도로 충분히 긴 시간으로 설정하여 입력전류를 연속적으로 변화시켰다. 부하압력 신호에서

영점을 중심으로 공급압력의 $\pm 40\%$ 를 추출하여 데이터 신호에 대한 선형 맞춤 함수(linear fitting function)의 기울기 값을 구하였다. 입력신호 증가 과정의 기울기와 감소 과정의 기울기의 평균값을 기존의 압력이득으로서 (16)식으로 측정하였다. 무차원 압력이득은 (17)식과 같이 정의한다.

$$K_{P0} = \frac{\Delta P_L}{\Delta i} \quad (16)$$

$$\overline{K_P} = \frac{\Delta P_L / P_s}{\Delta i / i_R} \quad (17)$$

3.2 히스테리시스(Hysteresis)

서보밸브의 유량신호 대신에 부하압력 신호를 이용하여 히스테리시스를 진단하는 방법을 고려했다. 입력신호 증가 과정의 신호에서 부하압력이 '0'에 대응하는 입력신호 i_{u0} 와 입력신호 감소과정의 신호에서 동일 개념의 입력신호 i_{d0} 의 차이 값을 히스테리시스로 정의하며, 이 값을 정격 입력 전류 i_R 로 나누어 준 값을 무차원 히스테리시스로 정의하여 (18)식과 같이 표현된다.

$$\overline{H} = \frac{i_{u0} - i_{d0}}{i_R} \times 100 \quad (18)$$

3.3 영점 오차(Null bias)

서보밸브에서 부하 구동용 포트의 압력 P_1 과 P_2 를 측정하는 압력센서로 검교정(Calibration)을 거친 센서를 사용하였으며, P_1 과 P_2 의 차압으로써 부하압력 P_L 이 '0'인 상태를 감지함으로써 서보밸브 스펴의 영점을 감지하는 방법을 적용하였다. 서보밸브 입력신호 i , 스펴 변위 신호 x_v , 부하압력 P_L 을 측정 신호로 사용한 경우에, 부하압력 P_L 이 '0'값에 대응하는 스펴 변위 신호 x_{v0} 와 입력신호 i_0 값이 영점 신호에 해당된다.

본 연구에서 적용한 영점오차의 측정 방법은 정격 전류의 $\pm 20\%$ 영역을 감소하고 증가하는 한 주기 변화로부터 얻어진 입력전류-부하압력의 선도에 대하여 (14)식과 (15)식을 적용하는 것이다.

4. 성능 진단 시스템

4.1 하드웨어 구성

본 연구에서 제시되어진 서보밸브의 진단방법을

실험적으로 검증하기 위하여 Fig. 7과 8에서 보여주는 실험 장치를 구성하였다.

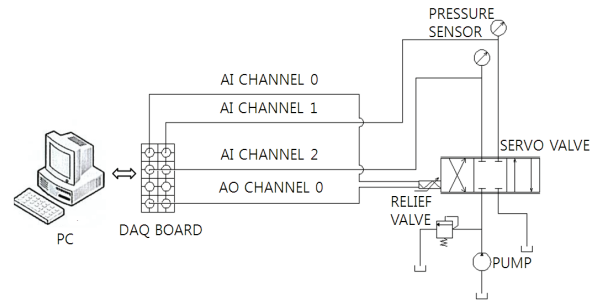


Fig. 7 Overview of the test apparatus

서보밸브의 출구 측에 압력계와 압력센서가 연결되어 있으며, PC 컴퓨터에서는 데이터획득장치(DAQ board)의 아날로그 신호 출력 채널 AO 0를 통해서 전류신호를 출력하여 아날로그 신호 입력 채널(AI)을 통하여 입력되는 데이터를 읽는다. Fig. 8은 시스템의 구성을 나타내며, Table. 1은 본 실험에 사용된 센서 및 밸브와 기타 장치의 사양을 나타낸다.

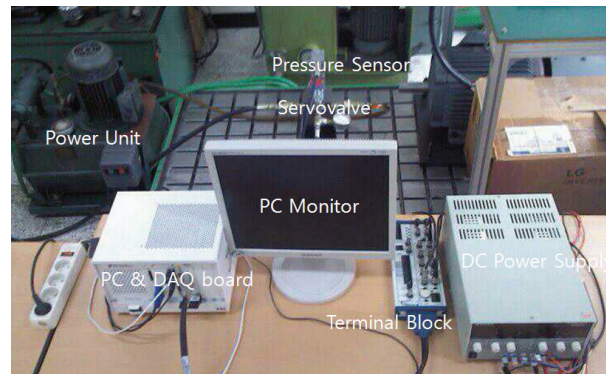


Fig. 8 Experimental apparatus

Table 1 Specification of instruments used in experiment

Instruments	Specification	Model Number	Manufacturer
Power unit	5.7 [Lpm]	HPS161	Feedback
Servovalve	40[l/min]	D633	MOOG
DAQ board	Resolution 16bit, A/D 16, D/A 2	NI PXI - 6251 M Series	National Instrument
PC	2.00GHz 504MB of RAM	NI PXI - 1031	National Instrument
B N C connector	-	NI BNC-2120	National Instrument
Pressure sensor	0.5 ~ 600[bar] 4 ~ 20[mA]	PA 21 R	KELLER

4.2 소프트웨어 구성

본 연구에서는 National Instrument사의 그래픽 프로그램 언어인 LabVIEW를 사용하여 소프트웨어를 구성하였다. Fig. 9는 본 실험에서 사용되어진 진단 프로그램의 사용자 화면인 프론트 패널이다. 밸브에 신호를 입력하는 입력부와 진행 상황을 알 수 있도록 설정 하였다.

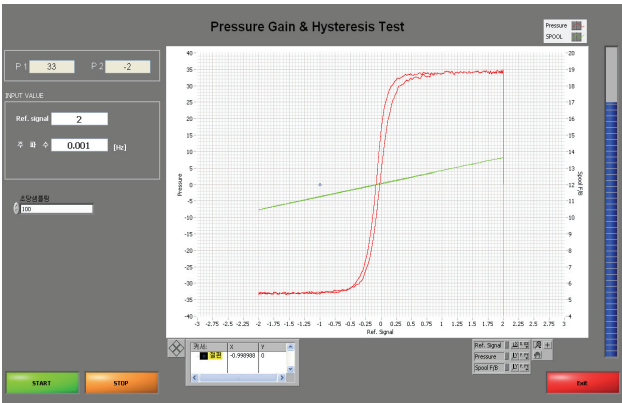


Fig. 9 Front panel of LabVIEW diagnosis program

5. 성능 진단 결과

공급압력(P_s)을 30bar, 50bar, 70bar의 세 가지 값에 대하여 각각 3번씩 반복 측정을 하여 각각의 공급압력 조건에서 측정하였다. 측정결과는 서보밸브 입력(i)과 부하압력(P_L)의 관계를 Fig. 9의 프론트 패널의 그래프 창을 통해서 확인할 수 있다. Fig. 10은 공급압력이 50bar일 때의 서보밸브 입력과 부하압력간의 관계를 그래프로 표현한 것이며, 3번의 반복 측정 결과에서 시각적으로 관측한 바에 의하면 재현성(repeatability)이 있음을 확인할 수 있다.

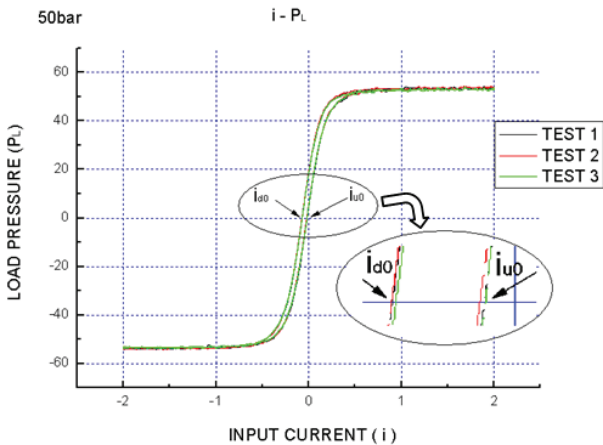
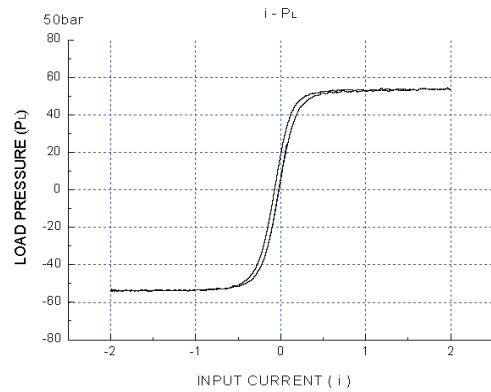
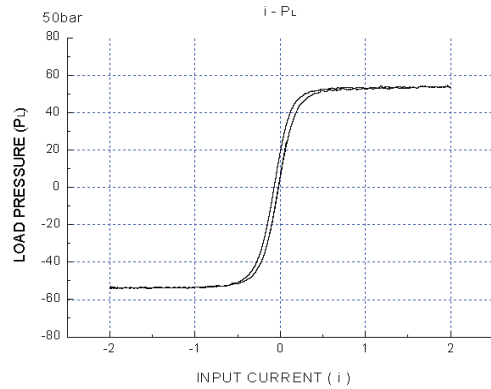


Fig. 10 Input current versus Load pressure curve

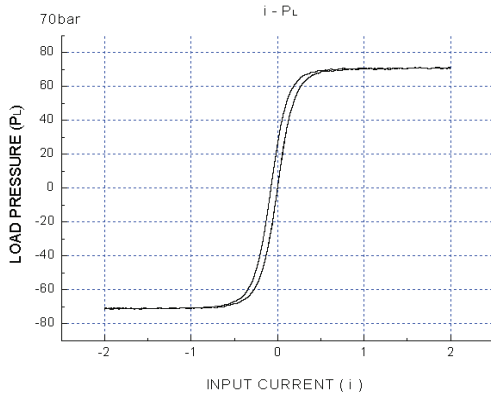
Fig. 11은 공급압력이 30bar, 50bar, 70bar의 세 가지 조건에 대하여 서보밸브 입력과 부하압력 사이의 관계 특성을 측정된 선도를 각각 그래프로 대비시킨 것이다. 영점 부근에서 서보밸브 입력 변화에 대한 부하압력의 변화의 비율인 압력이득은 공급압력이 증가할수록 증가함을 관측할 수 있다. 하지만 압력이득에서 부하압력을 공급압력으로 나누어서 무차원화하고 밸브입력을 정격 전류로 나누어서 무차원화시키면 공급압력에 무관하게 거의 일정한 결과를 얻게 됨을 Table 2에서 확인할 수 있다.



a) $P_s = 30\text{bar}$



b) $P_s = 50\text{bar}$



c) $P_s = 70\text{bar}$

Fig. 11 Input current versus Load pressure curve for 30bar, 50bar, 70bar supply pressure

Table 2 Diagnosis result of pressure gain

item \ condition		30bar	50bar	70bar
hysteresis	$(i_{u0} - i_{d0})$	5.9×10^{-2}	5.4×10^{-2}	6.2×10^{-2}
		6.1×10^{-2}	5.2×10^{-2}	7.7×10^{-2}
		6.2×10^{-2}	5.3×10^{-2}	8.2×10^{-2}
	평균 $(i_{u0} - i_{d0})$	6.1×10^{-2}	5.3×10^{-2}	7.4×10^{-2}
	무차원 $\frac{(i_{u0} - i_{d0})}{i_R}$	5.9×10^{-3}	5.4×10^{-3}	6.2×10^{-3}
		6.1×10^{-3}	5.2×10^{-3}	7.7×10^{-3}
무차원 평균 $\frac{(i_{u0} - i_{d0})}{i_R}$	6.2×10^{-3}	5.3×10^{-3}	8.2×10^{-3}	

Table 3 Diagnosis result of hysteresis

item \ condition		30bar	50bar	70bar	
pressure gain	$i - P_L$	$\frac{\Delta P_L}{\Delta i}$	164.59	257.49	338.99
			160.48	256.01	339.92
			159.66	256.03	358.04
	평균 $\frac{\Delta P_L}{\Delta i}$	161.58	256.51	345.65	
	무차원 $\frac{\Delta P_L / \Delta P_s}{\Delta i / \Delta i_R}$	49.88	46.82	46.44	
		48.63	46.55	46.56	
	48.38	46.55	49.05		
	무차원 평균 $\frac{\Delta P_L / \Delta P_s}{\Delta i / \Delta i_R}$	48.96	46.64	47.35	

Table. 3은 30bar, 50bar, 70bar 3가지 공급압력 조건에서 각각 3회씩 측정된 서보밸브 입력-부하압력 선도로부터 산출된 히스테리시스를 기록하였으며, 각각의 조건에서 평균과 무차원화시킨 결과도 함께 보여주고 있다. 동일한 공급압력 조건에서 3회씩 측정된 히스테리시스 값들 사이의 오차가 미미한 수준으로 작으므로 측정값들이 재현성이 있다고 판단할 수 있다. $(i_{u0} - i_{d0})$ 로 측정된 히스테리시스와 이 값을 정격 입력 전류(i_R)로 나누어서 무차원화시킨 히스테리시스 사이에 차별화된 특성을 발견하기 어렵다. 그러므로 무차원 히스테리시스는 무차원화된 데이터 이외의 의미는 없다고 판단된다. 히스테리시스의 원인으로 서보밸브의 구성부품인 토크모터에서 자기 히스테리시스와 스프링과 슬러브 사이의 마찰 등을 고려할 수 있는데, 이러한 원인들이 공급압력의 크기와 무관한 변수들이므로 공급압력의 크기와 무관한 결

과를 보여주는 것으로 판단된다.

서보밸브 히스테리시스를 측정하는 기존의 방법은 유량신호를 사용하고 있으나, 3.2절에서 설명한 바와 같이 유량신호 대신에 부하압력 신호를 사용하더라도 히스테리시스를 측정할 수 있다고 판단된다. 참고로 본 실험에 사용된 서보밸브의 제조회사에서 제공하는 히스테리시스 성능 사양이 정격전류의 1% 이내이며, Table. 3의 측정 결과도 0.5~0.8% 범위의 값으로 일치함을 알 수 있다.

Table. 4는 30bar, 50bar, 70bar의 세 가지 공급압력 조건에서 측정된 서보밸브 입력-부하압력 선도로부터 산출된 영점오차 값들과 평균, 무차원 데이터 등을 보여 준다. Table. 3의 히스테리시스 경우와 마찬가지로 무차원 데이터는 무차원이라는 이외의 별다른 의미를 찾기 어렵다. 동일 공급압력에서 실시한 3회 측정 결과 사이에 재현성이 있는 결과로 판단된다.

Table 4 Diagnosis result of null bias

item \ condition		30bar	50bar	70bar
null bias	$\frac{(i_{u0} + i_{d0})}{2}$	-4.9×10^{-2}	-4.5×10^{-2}	-3.9×10^{-2}
		-5.0×10^{-2}	-4.7×10^{-2}	-3.9×10^{-2}
		-4.5×10^{-2}	-4.4×10^{-2}	-4.0×10^{-2}
	평균 $\frac{(i_{u0} + i_{d0})}{2}$	-4.8×10^{-2}	-4.5×10^{-2}	-3.9×10^{-2}
	무차원 $\frac{(i_{u0} + i_{d0})}{2i_R}$	-4.9×10^{-3}	-4.5×10^{-3}	-3.9×10^{-3}
		-5.0×10^{-3}	-4.7×10^{-3}	-3.9×10^{-3}
무차원 평균 $\frac{(i_{u0} + i_{d0})}{2i_R}$	-4.5×10^{-3}	-4.4×10^{-3}	-4.0×10^{-3}	

기존의 영점오차의 측정방법은 크기가 점진적으로 감소하는 여러 주기의 입력신호로 서서히 영점 부근으로 접근하는 측정방법을 사용하고 있는데, 본 연구에서와 같이 음과 양의 정격전류의 영역을 변화하는 한 주기의 밸브입력을 사용하며, 밸브입력의 증가 과정에서 부하압력이 '0'인 값 i_{u0} 와 밸브입력의 감소과정에서 부하압력이 '0'인 값 i_{d0} 의 평균을 취하는 것으로도 영점오차의 측정 결과를 일관되게 보여주며 신뢰할 수 있는 방법이라 판단된다.

Fig. 5와 같이 주어지는 서보밸브의 스프링변위와 부하압력 사이의 관계 선도에서 히스테리시스 현상과 영점오차가 존재하지 않는 사실을 확인하는 실험을 수행하였으며, Fig. 14에서 그 결과를 보여 준다.

Table 5 Diagnosis result of the pressure gain using spool displacement and load pressure signals

item		condition			
		30bar	50bar	70bar	
p r e s s u r e g a i n	$x_v - P_L$	$\frac{\Delta P_L}{\Delta x_v}$	220.23	326.23	460.72
			212.54	280.23	409.85
			200.64	312.72	477.41
		평균 $\frac{\Delta P_L}{\Delta x_v}$	211.14	306.39	449.33
		무차원 $\frac{\Delta P_L}{P_s}$	51.19	47.45	50.49
		$\frac{\Delta x_v}{x_{max}}$	48.64	45.49	52.32
	무차원평균 $\frac{\Delta P_L}{P_s}$	50.45	44.57	49.24	
	$\frac{\Delta x_v}{x_{max}}$				

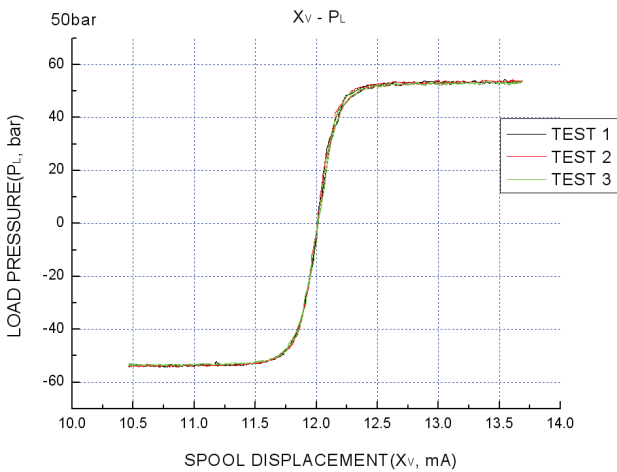


Fig. 14 Spool displacement versus Load pressure curve

Fig. 14는 공급압력이 50bar일 때의 서보밸브 스톱 변위와 부하압력 사이의 관계를 그래프로 표현한 것이다. 35bar와 70bar의 경우에도 유사한 경향을 보이는 것으로 관측되었다. 주어진 실험 조건에서 3번의 반복 측정된 결과 선도가 매우 유사하여 재현성이 있음을 확인할 수 있다. 앞에서 이론적으로 예측한 바와 같이 스톱 변위와 부하압력 사이의 선도로부터 히스테리시스와 영점오차를 측정할 수 없으므로 스톱 변위 신호는 서보밸브 정적성능 측정용 신호로서 효율성이 떨어진다. 스톱 변위와 부하압력의 선도로부터 압력이득을 측정할 수 있으며, 세 가지 압력 조건에서 3회씩 실시하여 측정된 결과들은 Table. 5에 기록되어 있다. Table. 5로부터 도출한 스톱 변위에 대한 부하압력의 압력이득은 Table. 2의 서보밸브

입력에 대한 부하압력 신호의 압력이득과 물리적 차원은 다르지만, 이 외의 경향은 대동소이함을 알 수 있다.

6. 결 론

서보밸브와 비례방향밸브의 정적 성능에 관하여 이론적으로 고찰하고, 입력전류와 부하압력 신호만을 이용하여 압력이득, 히스테리시스, 영점오차 등의 정적 성능을 진단하는 실험을 수행하였으며, 유도되어진 결론은 다음과 같이 요약 된다.

- 1) 압력이득은 스톱 마모의 정도와 누설의 정도를 간접적으로 측정함에 활용될 수 있다.
- 2) 서보밸브 입력에 대한 부하압력의 압력이득은 공급압력에 비례하여 증가하는데, 부하압력으로 나누어서 무차원화시키면 공급압력에 무관하게 일정하다.
- 3) 기존의 히스테리시스 측정방법은 유량신호를 이용하는데 반하여 유량신호 대신에 부하압력 신호를 사용하더라도 히스테리시스의 측정이 가능하다.
- 4) 자기 히스테리시스와 스톱의 마찰력과 같이 방향성과 대칭성을 가지는 요소는 밸브 히스테리시스의 주된 원인이 되며, 영점오차에는 무관하다.
- 5) 영점오차의 원인으로 스톱-슬리브의 조립 오차와 증폭기의 전기적 오차와 같이 비대칭성을 가지는 요소일 것으로 추정된다.
- 6) 서보밸브 영점오차를 측정하는 방법으로써 한 주기의 대칭적 진폭의 입력으로 측정 가능하다.
- 7) 서보밸브 스톱이 영점에 있다는 것을 판별하는 방법으로써 부하압력이 영인 조건을 이용하는 것이 효과적이다.
- 8) 스톱변위-부하압력의 선도에는 히스테리시스와 영점오차가 존재하지 않는다. 스톱변위 신호는 밸브의 정적 성능의 진단하는 신호로는 효율성이 떨어진다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구 되었습니다.

참고 문헌

- 1) William J. Thayer, "Specification Standards for Electrohydraulic Flow Control Servovalves, Moog Technical Bulletin 117", Moog Inc. Control

- Division, 1962
- 2) Moog Inc., "D633 Direct Drive Proportional valve manual"
 - 3) Robert A. Nasca, "Testing Fluid Power Components", Industrial Press Inc. (New York USA), pp 212-240, 1990
 - 4) Moog Inc., "Portable Valve Testers/ Monitors", <http://www.moog.com/media/1/overview.pdf>, 2008.
 - 5) T.Y. Feng, "Static and Dynamic Control Characteristics of Flapper/Nozzle Valves", Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, pp.275-284. 1959.
 - 6) D. Wang, R. Dolid and M. Donath., "Development and Verification of a Two-Stage Flow Control Servo Valve", ASME, FPST-Vol.2, pp. 121-129, 1995.
 - 7) P.N. Nikiforuk, P.R. Ukrainetz and S.C. Tsai, "Detailed Analysis of a Two-Stage Four-Way Electrohydraulic Flow-Control Valve", I.Mech. Engineering, J.Mech. Engineering Science, Vol.11,No.2,pp.168-174,1969.
 - 8) H. E. Merritt, "Hydraulic Control System," Wiley and Sons, New York, pp.79 ~ 91. 1967.
 - 9) S.D. Kim, S.H Jeon and Y. Chang, "In-process Diagnosis of Servo Valve Wear in Hydraulic Force Control System", Journal of the Korea Fluid Power Systems Society Vol.6 No.2, 2009.
 - 10) S.D. Kim, K.H. kim, J.S. Song, Y.B. Ham and J.C. Lee, "A Study on In-Process Performance Diagnosis of Hydraulic Servovalves, First Report: Position Control System", Journal of the Korea Fluid Power Systems Society Vol.3 No.1, 2006.
 - 11) Go-Do Kim, Soo-Tae Kim, "A Study on the Design and the Dynamic Characteristics of Electro-Hydraulic Flow Control Servo Valve", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 17, No. 2, 2000
 - 12) W. Wuest, "Stromung durch Schlitz-und Lochblenden bei kleinen Reynolds-Zahlen", Ingenieur Archiv, No.22, pp.357-367. 1954.
 - 13) Watton J., "Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Fluid Power Systems", Ellis Horwood, 1992
 - 14) Watton J., "Modelling, Monitoring and Diagnostic Techniques for Fluid Power Systems", Springer, 2007
 - 15) Watton J, "Modeling, Simulation, analog and microcomputer control" Prentice Hall International (UK) ltd, 1989.
 - 16) H. S. Jeong and J. W. Nam, "Experimental Analysis of the Static and Dynamic Characteristics for a Pilot Proportional Pressure Control Valve", Journal of the Korea Fluid Power Systems Society Vol.8 No.4 pp9~16, 2011
 - 17) S. G. Oh and S. G. Jeong, "Dynamic Characteristics Tester for Hydraulic Servovalves", Korean Intellectual Property office, Patent Enrollment Number 10-0784489, 2007