

누설 유량 계측에 의한 서보밸브 마멸의 인-프로세스 진단 In-Process Diagnosis of Servovalve Wear using Leakage Flow Measurement

김경호 · 한규선 · 김성동 · 이재천 · 함영복

K. H. Kim, G. S. Han, S. D. Kim, J. C. Lee and Y. B. Ham

Key Words : In-process diagnosis(인-프로세스 진단), Null leakage(영점 누설), Load flow(부하유량), Servovalve Wear(서보밸브 마멸)

Abstract: In-process diagnosis is essential to achieve predictive maintenance in industrial plants. An in-process diagnosis method was proposed for hydraulic servo systems, which was based upon leakage flow measurement. Leakage due to servovalve wear was analysed and modeled mathematically for computer simulation work. The key idea of diagnosis algorithm is that when monitoring signals, such as servovalve input and load displacement are in steady states, the return-line flow of hydraulic servo systems can be regarded as null-leakage of servovalve. Virtual experiments were performed to ensure effectiveness of the proposed diagnosis method.

기호 설명

Q_L : load flow
 P_S : pressure of supply
 P_1 : pressure of valve chamber 1
 P_2 : pressure of valve chamber 2
 P_0 : pressure of return line
 C_d : flow coefficient
 ρ : fluid mass density
 x_v : displacement of spool
 ω : area gradient of valve
 Q_C : null leakage flow
 r_c : radial clearance between spool and sleeve
 x_p : displacement of piston
 A_p : area of piston
 A : area of orifice between spool and sleeve
 T_V : time constant of valve

K_{SV} : gain constant of valve
 V_1 : volume of chamber 1
 V_2 : volume of chamber 2
 V_{01} : initial volume of chamber 1
 V_{02} : initial volume of chamber 2
 V_t : total volume of fluid in both chambers
 β_e : effective bulk modulus
 Q_{F0} : leakage flow of nozzle flapper
 μ : absolute viscosity

1. 서 론

현재 전기유압서보밸브(이하 서보밸브라 함)는 전용 시험기에 의해 그 성능 및 사용유무가 판단되어지고 있으며, 실제로 산업현장에서 사용하는 대부분의 서보밸브 또한 이 방식에 의존하고 있다¹⁾. 이와 같은 방식의 문제점은 제철소의 압연공정 설비에 사용되는 서보밸브에 대한 예로 살펴볼 수 있다.

제철소의 압연 공정 설비에 사용되는 서보밸브는 각종 센서, 실린더, 전기계통인 PLC 등과 함께 사용되어지기 때문에 문제 발생시 설비를 개별적으로 점검하여 문제를 해결하기 어려우며 작동중인 서보밸브의 성능 및 고장 유무 또한 확인할 수가 없다. 그리하여 모든 밸브를 시스템 별로 정해 놓은 교환 주기 마다 교환하는 방식을 적용하고 있다. 이처럼

접수일 : 2004년 1월 12일

김성동(책임저자) : 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : sdkim@kumoh.ac.kr, Tel : 054-467-4234

이재천 : 계명대학교 기계·자동차공학부

함영복 : 한국기계연구원

김경호, 한규선 : 금오공과대학교 대학원 생산기계공학과

비용, 인력이 소모되는 비효율적인 노력에도 불구하고, 서보밸브에 이상이 발생할 경우 서보밸브를 전용 시험기가 있는 수리실로 옮겨 성능시험 및 보수를 시행하여야 한다. 이 과정에서 데이터가 현장에 적용되어지는 시간이 길어지고 신속한 처리가 이루어지지 않는 등의 문제점이 발생하고 있다.

이러한 문제점의 해결을 위해 서보밸브의 성능시험이나 유지, 보수과정에서 밸브의 분리와 운반, 전용 시험기의 사용 등 비효율적 검사방식을 탈피하고, 더욱 효율적으로 현장 설비에 부착된 상태에서 직접 시험을 가능하게 하는 방식에 대한 연구가 필요하다. 이와 같은 인-프로세스 서보밸브 성능진단은 서보밸브의 지속적 사용가능여부를 확인할 수 있으며, 교환 시기를 파악할 수 있는 예방보전을 가능하게 한다. 설비에 문제가 발생한 경우에도 빠른 시간 내에 해결이 가능하게 한다. 서보밸브의 성능에 있어서 누설유량의 정도는 밸브의 불량한 정도나 오랜 반복적 사용으로 인한 밸브 손상, 마멸을 나타내는 척도이며, 이러한 스톱의 마멸은 시스템의 불안정화를 초래하는 원인이 된다. 본 연구에서는 현재 생산라인에 사용되어지는 서보밸브를 인-프로세스 성능 진단방법 개발에 있어서 서보 밸브 성능 판단의 기준이 되는 스톱의 마멸 정도를 누설 유량의 측정을 통해서 진단하는 방법을 제시한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 가상적인 실험을 수행하며, 제시된 진단 방법의 신뢰성을 검증하였다.

2. 서보밸브 누설에 대한 해석

밸브의 누설특성은 실제 밸브의 누설과 이상적인 임계중립(critical center) 밸브의 누설의 차를 의미한다. 이상 밸브(ideal valve)는 기하학적으로 이상화시킨 밸브이므로 누설유량은 영(zero)이다. 실제 밸브는 Fig. 1과 같이 스톱(spool)이 완전히 중립위치(null position 혹은 center position)에 오더라도 슬리브(sleeve)와 스톱 사이의 틈새 때문에 누설이 생긴다. 이러한 누설은 영점 누설(null leakage)로 호칭된다.

이러한 실제 밸브의 누설특성은 밸브의 작동과, 미소 밸브의 개구에 대한 압력-유량곡선을 지배한다.

Wuest는 간극이 δ , 폭이 b 인 사각 sharp-edged 틈새에서 층류 유동에 대한 유량은

$$Q = \frac{\pi \delta^2 b}{32 \mu} \Delta P \quad (1)$$

와 같이 계산된다는 것을 이론적으로 밝혔다²⁾.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 밸브 스톱과 슬리브 사이의 틈새는 네 위치에서 형성되는데, 스톱의 중립상태에서 누설유량은 Q_1 과 Q_2 를 합한 유량이 된다. 유압 실린더에서의 누설을 무시하고, 피스톤이 정지한 상태에서 유량 Q_1 은 유량 Q_4 와 동일하며, 유량 Q_2 는 유량 Q_3 와 동일하다. 무부하 상태로 가정한 경우에 압력 P_1 과 압력 P_2 는 공급 압력 P_s 의 반이 된다. 그러므로 네 위치의 틈새에서 모두 압력차가 $P_s/2$ 가 되며, 유량도 밸브 누설 총 유량의 반이 된다. 식 (1)을 각각의 틈새에 적용하면 하나의 틈새에 관련되는 압력 강하와 유량은 각각 $P_s/2$ 와 $Q_s/2$ 이므로, 총 누설 유량 Q_c 는 다음 식과 같이 유도되어진다.

$$Q_c = \frac{\pi r_c^2 w}{32 \mu} P_s \quad (2)$$

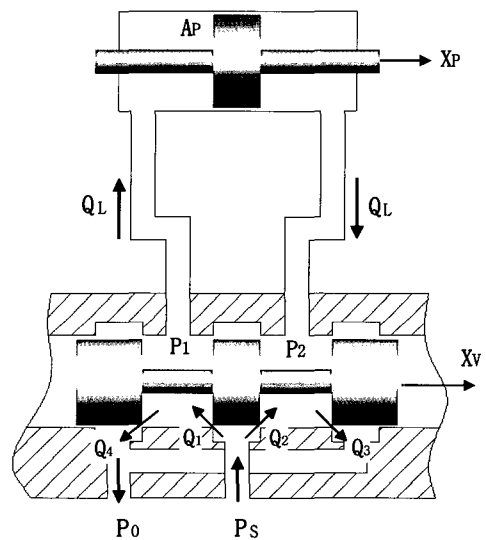


Fig. 1 Schematic diagram of a hydraulic servo system

3. 유압 서보 시스템의 수학적 모델

선형 유압 서보 시스템은 일반적으로 Fig. 1과 같이 서보밸브 및 실린더 등으로 구성된다.

Fig. 1에 나타나 있는 유압 서보 시스템의 해석에 필요한 기초 방정식을 정립함에 있어서 다음과 같은 가정을 둔다.

- 1) 유압원에서 공급되어지는 공급압력은 항상 일정하다.

- 2) 연구에 사용된 밸브는 산업현장에서 널리 사용되는 임계 중립형이고, 스톨 변위의 음, 양 방향에 대해서 대칭이다.
- 3) 실린더의 외부누설과 내부누설은 무시한다.
- 4) 서보밸브의 플래퍼-노즐부에서의 누설은 항상 일정하다.

3.1 서보밸브 스톨부의 특성식

서보밸브의 특성 방정식은 스톨의 변위, 부하압력과 유량 사이의 관계로써, 앞에서 유압 서보 시스템의 기초방정식에서 구하였다. 위에서 언급한 가정조건에 의하여 시뮬레이션에 적용되어진 특성방정식에 대하여 기술하기로 한다.

아래 Fig. 2는 스톨과 슬리브 사이를 확대한 것이다. 스톨의 변위 및 스톨과 슬리브 사이의 틈새에 의하여 개구면적은

$$A = \omega \sqrt{x_v^2 + r_c^2} \quad (3)$$

과 같다.

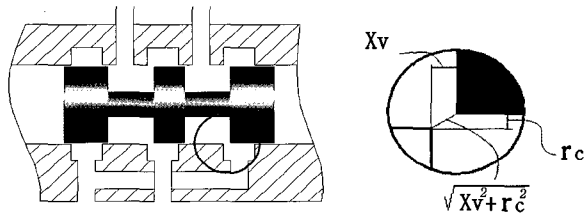


Fig. 2 Appearance of spool end

서보밸브는 임계 중립형이고, 좌우 대칭형인 이상적인 밸브이며, 틈새를 통과하는 유량 Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 는 다음과 같이 적용한다^{3,4)}.

틈새 유량은 스톨 변위의 정도에 따라서 누설유량이 지배하는 영역과 부하유량이 지배하는 영역으로 나누어 생각할 수 있다. 스톨의 변위가 미소하며 유체 유동이 층류(레이놀즈 수 2000이하)인 영역에서는 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

스톨 변위 x_v 가 양의 값일 때

$$Q_1 = \frac{\pi \omega (x_v^2 + r_c^2)}{32 \mu} (P_S - P_1) \quad (4)$$

$$Q_2 = \frac{\pi \omega r_c^2}{32 \mu} (P_S - P_2) \quad (5)$$

$$Q_3 = \frac{\pi \omega (x_v^2 + r_c^2)}{32 \mu} (P_2 - P_0) \quad (6)$$

$$Q_4 = \frac{\pi \omega r_c^2}{32 \mu} (P_1 - P_0) \quad (7)$$

스톨 변위 x_v 가 음의 값일 때

$$Q_1 = \frac{\pi \omega r_c^2}{32 \mu} (P_S - P_1) \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{\pi \omega (x_v^2 + r_c^2)}{32 \mu} (P_S - P_2) \quad (9)$$

$$Q_3 = \frac{\pi \omega r_c^2}{32 \mu} (P_2 - P_0) \quad (10)$$

$$Q_4 = \frac{\pi \omega (x_v^2 + r_c^2)}{32 \mu} (P_1 - P_0) \quad (11)$$

스톨 변위가 어느 정도의 크기로 형성되어서 유체 유동이 난류(본 연구에서는 레이놀즈 수 2000이상)인 영역에서는 일반적으로 알려져 있는 틈새 유량관계식의 형태로 표현될 수 있다.

스톨 변위 x_v 가 양의 값일 때

$$Q_1 = C_d \omega \sqrt{(x_v^2 + r_c^2)} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_S - P_1)} \quad (12)$$

$$Q_3 = C_d \omega \sqrt{(x_v^2 + r_c^2)} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 - P_0)} \quad (13)$$

$$Q_2, Q_4 \approx 0$$

스톨 변위 x_v 가 음의 값일 때

$$Q_2 = C_d \omega \sqrt{(x_v^2 + r_c^2)} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_S - P_2)} \quad (15)$$

$$Q_4 = C_d \omega \sqrt{(x_v^2 + r_c^2)} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_0)} \quad (16)$$

$$Q_1, Q_3 \approx 0 \quad (17)$$

귀환측 유량은 $Q_3 + Q_4 + Q_{P_0}$ 와 같이 스톨부에서의 유량과 플래퍼-노즐에서의 누설유량 Q_{P_0} 의 합이 된다.

3.2 서보밸브의 동적 거동 모델

서보밸브의 토크 모터에서는 서보 증폭기로부터 공급되어지는 입력 전류(i)에 의하여 코일에 자기력이 발생하며, 이 자기력이 아마추어, 플래퍼 기구를 거쳐 밸브의 스톨을 움직인다. 서보밸브는 많은 비선

형 특성을 갖고 있지만, 일반적으로 서보밸브의 반응 속도가 부하 구동부보다 매우 빠르기 때문에 하나의 시정수(time constant)를 가지는 등가적인 1차 모델로 간주하더라도 큰 오차는 없다. 밸브의 입력 전류와 스톱 변위 사이의 관계식은 다음과 같다⁵⁾.

$$T_V \frac{dx_v}{dt} + x_v = K_{sv} i \quad (18)$$

3.3 유압 실린더-부하계의 특성식

유압실린더의 각 체적에 유량의 연속방정식을 적용하면 아래 식을 얻는다.

$$Q_1 - Q_4 = \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dP_1}{dt} \quad (19)$$

$$Q_2 - Q_3 = \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dP_2}{dt} \quad (20)$$

여기서 V_1 과 V_2 는 각각의 유로를 포함하는 피스톤 양단의 체적이고, β_e 는 유압작동유의 유효 체적 탄성계수를 나타낸다.

또한 실린더 체적은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_1 = V_{01} + A_P x_p \quad (21)$$

$$V_2 = V_{02} - A_P x_p \quad (22)$$

그리고 양쪽 체적의 합을 V_t 로 표시하면 다음과 같다.

$$V_t = V_1 + V_2 = V_{01} + V_{02} \quad (23)$$

4. 인-프로세스 진단 방법

서보밸브의 스톱이 영점(null)에 있을 때, 스톱 주위의 유체흐름은 스톱의 마멸 때문에 발생하는 누설유량이다. 그러므로 생산 공정에서 사용되어지고 있는 서보밸브에 대해서 서보밸브의 스톱이 영점위치에 있음을 판단하고, 그 때의 밸브 유량을 측정할 수 있다면 밸브 스톱의 마멸 정도를 진단할 수 있다.

서보밸브 스톱이 영점으로부터 벗어나서 부하유량(load flow)이 지배하는 경우에는 부하가 움직이게 된다. 그러므로 서보밸브 스톱이 영점에 있음을 판단하는 방법들 중에 하나로써, 실린더 피스톤의 변위 신호가 변화하지 않는 상태, 즉 일정하게 정상상태를 유지하는 경우를 생각할 수 있다.

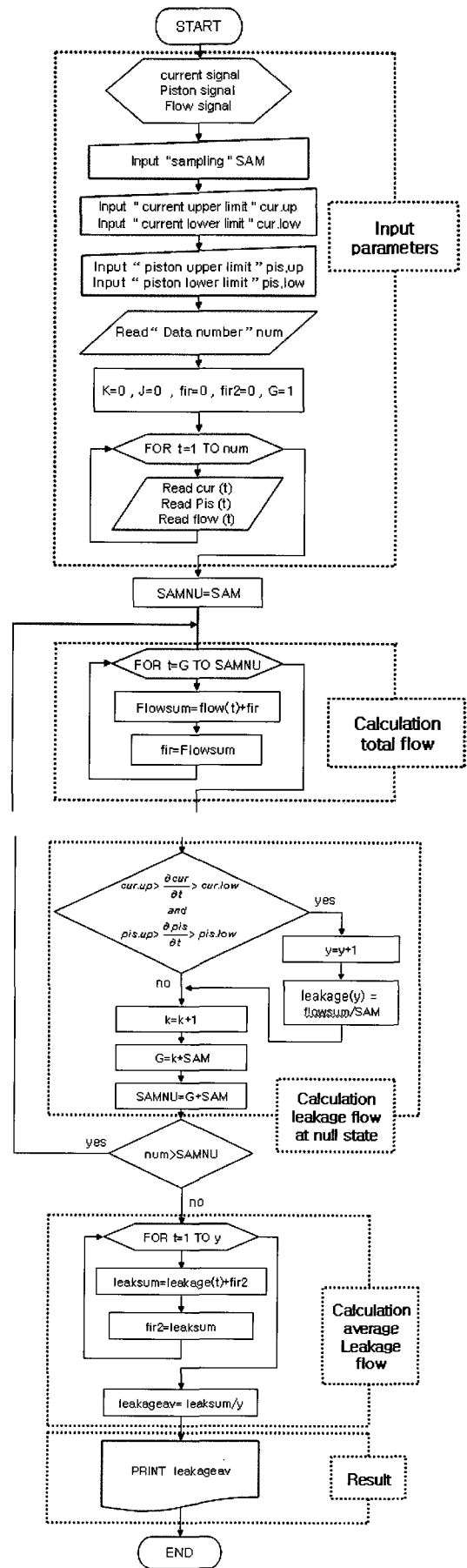


Fig. 3 Flowchart of in-process servovalve tester

서보밸브의 스톱이 영점 영역에 있음을 판단하는 직접적인 방법으로써 서보밸브의 입력 신호 값을 이용할 수 있다. 즉 서보밸브 입력이 미소한 값으로 정상상태로 유지되는 것을 밸브스풀의 영점상태로 간주할 수 있다.

본 연구에서는 진단결과의 신뢰성을 높이기 위하여 실린더 피스톤의 변위신호와 서보밸브의 입력신호를 이중으로 이용하는 방법을 고려하였다.

이상에서 설명한 진단 방법을 적용한 진단 프로그램의 순서도를 Fig. 3에서 보여준다. Fig. 3에서 좌측 상단은 스톱의 영점위치 판단을 위한 영점의 범위 및 데이터의 획득 개수를 결정하고, 파라미터 값을 초기화하는 과정이다. 우측 상단은 데이터들을 취득하고, 누설유량을 구한다. 좌측 하단은 피스톤의 변위 신호와 서보밸브 입력신호를 가지고 영점상태를 판단하는 과정이며, 우측 하단은 스톱이 영점에 있을 때의 귀환측 유량을 측정된 데이터를 평균하여 출력하는 과정이다.

5. 가상 실험

서보밸브 스톱의 마멸에 대한 실험을 수행하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서 제시된 진단방법을 평가하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 방법으로 가상 실험을 수행하였다.

5.1 진단 시스템의 전체 구성

진단시스템 전체구성은 Fig. 4와 같다. 인버터를 부착하여 전기모터의 속도를 제어하고 피스톤 펌프를 구동시키며, 릴리프 밸브를 이용하여 입력측 압력을 일정하게 유지시킨다. 다음으로 컴퓨터에서 증폭기(amplifier)를 통하여 전류 값을 주어 서보밸브를 구동한다. 그리고 서보밸브의 귀환측에 유량계를 부착하고 데이터 획득을 통하여 누설 유량을 측정한다.

5.2 진단 대상 시스템의 컴퓨터 시뮬레이션

스풀의 마멸과 영점누설과의 상관관계를 실험적으로 구현하기 위해서는 스톱의 마멸을 인위적으로 주어어야하는데 현실적인 어려움이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 4에서의 장치 구성을 수치해석에 의한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 구현하고자 한다. 유압 시스템은 MATLAB 수치해석 프로그램을 이용하여 피스톤의 변위와 귀환측의 유량을 구현하였다.

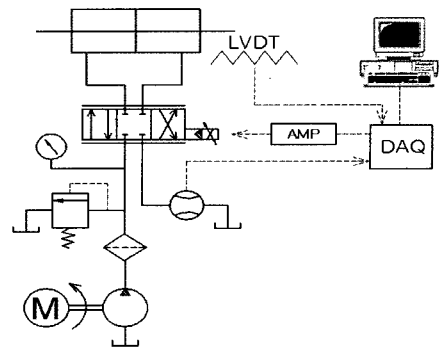


Fig. 4 Experimental apparatus diagram

Table 1 Parameter of Hydraulic System

Parameter	Value	Units
T_V	0.03	s
K_{SV}	0.001	m/mA
ω	0.0314	m/m
P_S	70×10^5	Pa
μ	14×10^{-3}	Pa · s
C_d	0.61	dimensionless
ρ	875	kg/m ³
A_P	0.0942	m ²
Q_{P0}	2.0	ℓ/min

Table 1에 열거된 서보밸브 시정수 (T_V)와 이득 (K_{SV})의 값은 일반적인 서보밸브의 수준에 해당되는 값이다. Fig. 5에서는 입력 전류가 계단 입력(step input)으로 주어질 때, 스톱 변위 x_v 의 거동 특성을 보여준다. 시중의 일반적인 서보밸브 특성과 유사함을 알 수 있으며, 식 (18)의 동적 거동 모델식과 Table 1의 매개변수 값들이 실제 서보밸브를 양호하게 표현하는 것이라 할 수 있다.

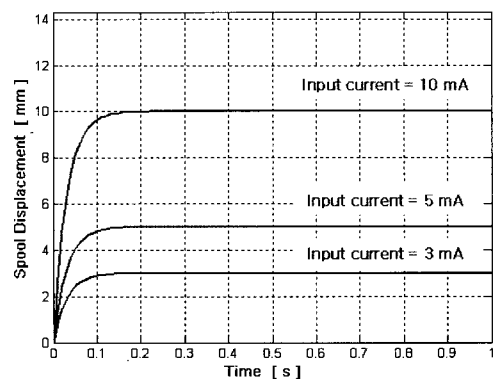


Fig. 5 Curve of spool displacement ($T_V = 0.03$, $K_{SV} = 0.001$)

가상 실험의 결과를 통하여 실제 시스템의 경우를 판단하는 것에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 서보밸브의 입력 신호를 실제 공정의 유압 서보 시스템으로부터 측정하여 얻어진 데이터를 적용하였다.

Fig. 6은 제철소 압연공정 중에서 가이드 바 (Guide Bar)의 유압실린더를 제어하는 서보밸브의 입력신호를 시뮬레이션의 서보밸브 입력 전류로 사용한 것이다.

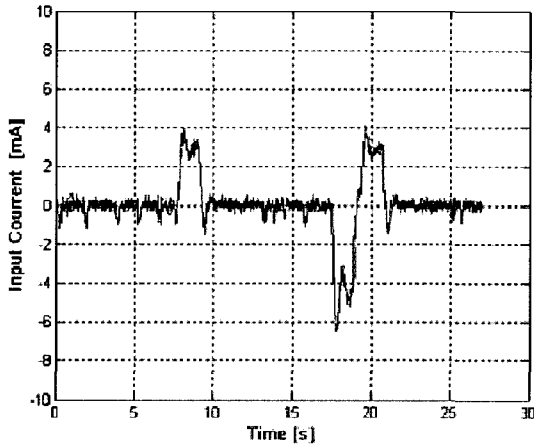


Fig. 6 Curve of input current

5.3 인-프로세스 진단 프로그램

Fig. 7은 LabVIEW를 이용한 인-프로세스 성능 진단 프로그램의 사용자 화면이다.

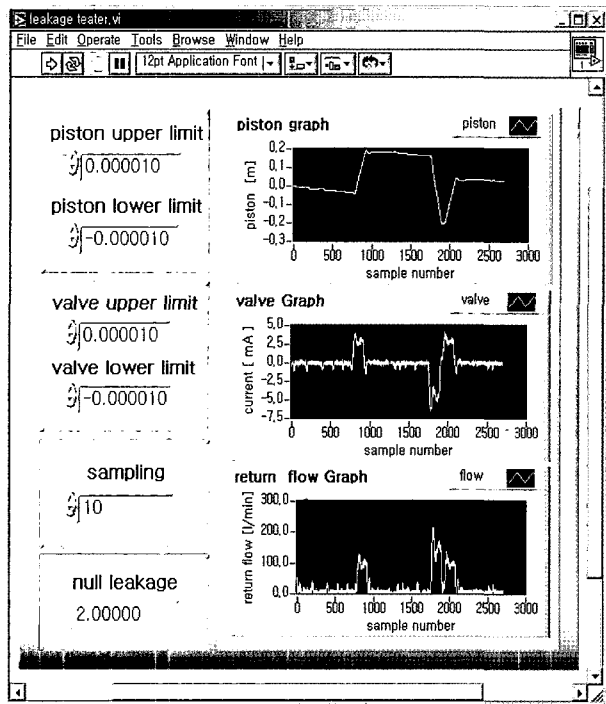


Fig. 7 Front panel of in-process servovalve tester

입력된 전류신호와 실린더의 변위 신호 그리고 귀환측 유량신호를 가지고 누설유량에 의한 인-프로세스 성능진단을 하고자 하였다. 스펀의 마멸을 0 ~ 20 μ m 까지 변화시켜 가면서 실험하였다. 입력된 전류 및 실린더의 변위 신호를 10개씩 끊어서, 그 데이터의 기울기가 0이거나 어느 특정 범위 내에 있으면 취하고 그렇지 않으면 버린다. 즉 입력된 전류신호가 중립위치이고, 피스톤이 정지해 있을 때의 귀환측의 누설유량 신호를 취하고 그때의 누설유량 Q_c 를 평균하여 데이터로 저장한다. 저장된 데이터는 누적되어져 하나의 그래프로 보여준다.

6. 결과 및 고찰

아래의 Fig. 8은 서보 시스템의 MATLAB 수치 해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과로서 입력 전류에 대한 피스톤의 변위를 보여준다.

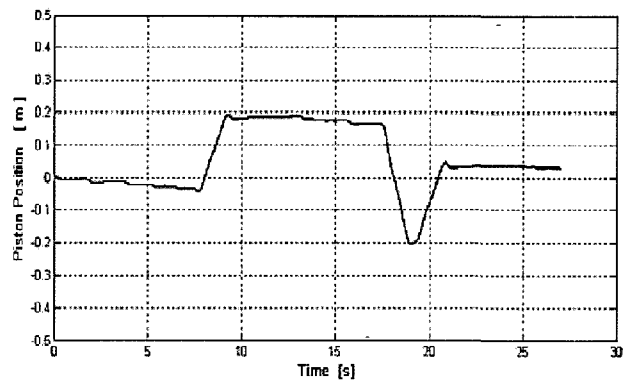


Fig. 8 Curve of piston position

Fig. 9는 스펀 마멸량의 2가지 값에 대한 귀환측의 유량 선도이다.

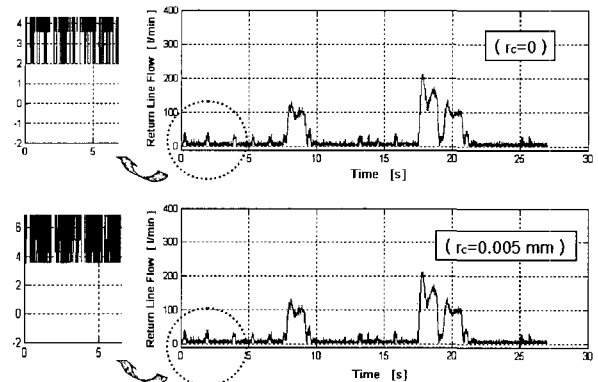


Fig. 9 Curve of return line flow

Fig. 6의 서보밸브 입력신호 값이 '0'에 가까운 값으로 정상상태를 이루며, 동시에 Fig. 8의 피스톤 변위 신호 값이 일정하게 정상상태를 이루는 밸브 스푼 영점 구간을 진단 프로그램이 구분한다. Fig. 9에서 점선으로 동그랗게 표시된 구간이 진단 프로그램이 구분하여서 얻어낸 스푼 영점구간이며, 구간내의 데이터 선도는 누설 유량의 선도이다. 왼쪽 그림은 확대한 그림이며, 누설유량의 데이터를 평균한 결과가 최종적인 진단 결과가 된다.

Fig. 10과 Table 2는 스푼의 마멸을 0~20 μm 까지 2 μm 간격으로 증가시켜 누설유량을 측정할 결과와 이론값을 보여준다. 가상실험에서 얻어진 진단 결과와 이론 결과의 차가 플래퍼-노즐부의 유량 때문이며, 실질적인 진단결과는 이론과 잘 부합된다.

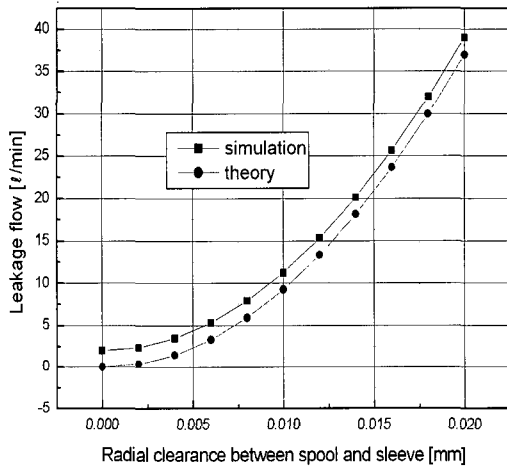


Fig. 10 Curve of null leakage flow

Table 2 Data of null leakage flow

rc [mm]	Leakage Flow [l/min]	
	Simulation	Theory
0	2.0000	0
0.002	2.3697	0.3697
0.004	3.4789	1.4789
0.006	5.3276	3.3276
0.008	7.9158	5.9158
0.010	11.2434	9.2434
0.012	15.3105	13.3105
0.014	20.1170	18.1170
0.016	25.6630	23.6630
0.018	31.9485	29.9485
0.020	38.9735	36.9735

7. 결 론

본 연구에서는 서보 밸브의 성능을 인-프로세스 진단하는 방법을 개발하고, 서보밸브 성능 중 가장 중요한 스푼의 마멸정도를 누설 유량의 측정에 의하여 진단하고자 가상 실험을 수행하였으며, 실험 결과로부터 얻어진 결론은 다음과 같이 요약된다.

1) 스푼의 마멸정도를 0~20 μm 까지 2 μm 간격으로 증가시켜 중립위치에서의 서보밸브 누설유량을 측정해 본 결과 누설유량 또한 증가하는 것을 보였다. 서보밸브의 스푼이 중립 상태에 있을 때의 영점 누설은 스푼의 마멸상태에 대한 척도가 된다.

2) 영점 누설을 이용한 인-프로세스 서보밸브 진단 방법으로 밸브의 오랜 반복적 사용으로 인한 스푼의 마멸정도를 누설유량으로 판단하는 방법을 적용, 누설유량정도에 따른 밸브의 지속적 사용 가능 여부 및 교환 시기를 파악할 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) Moog Co, "Servo and Proportional Systems Catalog", New York, pp. 19~29, 1992.
- 2) W. Wuest, "Stromung durch Schlitz und Lochblenden bei kleinen Reynolds-Zahlen", Ingenieur Archiv, No. 22, pp. 357~367, 1954.
- 3) H. E. Merritt, "Hydraulic Control System", Published by Wiley and Sons, New York, pp. 88~91, 1967.
- 4) H. E. Merritt, "Hydraulic Control System", Published by Wiley and Sons, New York, pp. 80~83, 1967.
- 5) 김성동, 김영태, "유압 서어보 시스템의 에너지 절약을 위한 서어보 펌프의 제어 방법에 관한 연구", 금오공과대학교 산업기술연구소 논문집, 제 4집, pp. 11~19, 1988.