

유압실린더 힘 제어계의 인-프로세스 서보밸브 마모진단에 관한 연구

In-Process Diagnosis of Servovalve wear in Hydraulic Force Control Systems

김성동 · 전세형 · 장영배
S. D. Kim, S. H. Jeon and Y. Chang

Key Words : In-Process Diagnosis (인-프로세스 진단), Servovalve(서보밸브), Spool Wear(스풀 마모), Null Bias(영점 오차), Pressure Sensitivity(압력 민감도)

Abstract: An in-process method of diagnosing the spool wear of hydraulic servovalves was explored. The diagnostic method discussed in this paper is for force-control hydraulic servo systems. The key principle used is that pressure sensitivity of a servovalve drops as the valve spool wears out so that it is possible to determine the spool condition by monitoring pressure sensitivity. A diagnostic algorithm was developed and evaluated through numerical simulation and experiments. Two major steps of diagnosis are the evaluation of null bias of the servovalve and the approximation of pressure sensitivity, both of which could be successfully done during normal operation of a servo system. The difference between a new servovalve and a worn valve could be clearly detected in-process, and the diagnostic test was found to be repeatable.

기호 설명

A_p : 실린더 피스톤 면적
 F_L : 부하력, 실린더피스톤에 작용하는 부하
 G_c, G_h, G_v : 전달함수
 i : 서보밸브 입력신호
 i_{nb} : 서보밸브 입력신호의 영점오차
 K : 밸브입력에 대한 스펴변위의 비례이득
 K_c : 유량-압력계수
 K_p : 압력민감도
 K_q : 유량이득
 K_{c0}, K_{p0}, K_{q0} : K_c, K_p, K_q 의 영점계수
 P_O : 귀환배관 압력
 P_1, P_2 : 밸브 챔버 1과 2의 압력
 P_L : 부하압력
 P_s :공급압력

$Q_1 \sim Q_4$: 누설경로별 누설유량
 Q_c : 서보밸브 영점에서 총 누설유량
 Q_L : 부하유량
 r_c : 스펴과 슬리브 사이의 틈새
 w : 서보밸브 스펴의 면적구배
 x_p : 실린더 피스톤의 변위
 x_v : 서보밸브 스펴의 변위
 μ : 유압유 점도
 ρ : 유압유 밀도

1. 서 론

유압 서보시스템은 우주항공분야, 발전설비, 제철 설비 등에서 광범위하게 사용되고 있으며, 유압 서보밸브는 이러한 설비들에서 핵심 부품을 이루고 있다. 이러한 유압 서보밸브는 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.

서보밸브의 성능진단에 관한 연구가 많이 존재하지만 대부분이 성능진단을 위하여 생산설비의 가동

접수일 : 2009년 4월 20일, 게재 확정일 : 2009년 5월 29일
 김성동(책임저자): 금오공과대학교 기계공학부
 E-mail:sdkim@kumoh.ac.kr, Tel: 054-478-7395
 전세형: 금오공과대학교 대학원 기계공학부
 Y. Chang: Mechanical Engineering Technology, Oklahoma State University, U.S.A

을 중단시킨 상태에서 수행하거나 성능진단을 위하여 유압배관의 일부를 교체시켜야 하는 오프-프로세스(off-process)형 진단방법¹⁻⁷⁾에 해당하며, 생산설비가 가동되고 있는 상태에서 진단하게 되는 인-프로세스(in-process)형 진단방법⁸⁻¹²⁾은 많지 않다. 일부 서보밸브 제조업체(예, Moog Inc.¹⁾)에서 다양한 서보밸브 테스터와 진단장치를 상품화하였다. 하지만, 그러한 진단장비들은 모두 오프-프로세스형 진단장비들이다. 오프-프로세스 진단은 불편할 뿐만 아니라, 고장이 발생하기 전에 결함을 발견하고 조치를 취하려는 예방보전을 실현하기가 어렵다. 실제, 산업현장의 많은 업체들은 시간관리 예방보전의 방법을 적용하고 있다. 이러한 방법은 온-라인 실시간으로 서보밸브 상태를 관측하지 않으며, 단순히 서보밸브의 사용시간이 관리설정시간에 이르게 되면 새로운 밸브로 교체하는 방법이다. 관리설정시간에 이르게 된 밸브는 생산설비로부터 분리되어서 오프-프로세스형 진단장비에서 진단된 후에 중요도가 낮은 장치에서 재사용되어지기도 하며, 성능상태가 불량이면 폐기되어진다. 이와 같이 관리설정시간을 기반으로 하는 예방보전 방법은 서보밸브가 양호한 상태임에도 불구하고 폐기되어지는 경우가 빈번하기 때문에 비효율적이라고 할 수 있다. 또, 관리설정시간에 도달하기 전에 서보밸브가 급격히 악화되어지는 경우에는 예방보전의 실현이 어렵다. 일부의 유압 서보시스템 설비에서는 경험이 많은 기술자나 작업자가 육안으로 설비상태나 설비신호를 관측하는데, 이러한 방법도 체계적이고 정량적인 진단방법과는 거리가 멀다.

실시간 온-라인으로 서보밸브 상태를 효과적으로 진단하는 인-프로세스 진단방법이 요구되어진다. 김경호는 누설유량의 측정을 통하여 서보밸브 상태를 인-프로세스 진단하는 방법⁸⁾을 제시하였다. 하지만 이 방법도 유량센서를 추가로 설치해야하는 단점이 있다.

본 연구에서는 유량센서를 사용하지 않으면서도 실시간 온-라인으로 진단할 수 있는 인-프로세스형 진단방법을 살펴보고자 한다. 서보밸브의 여러 가지 진단항목 중에서도 가장 중요한 항목이라고 할 수 있는 서보밸브 스푼의 마모를 진단하는 방법에 대하여 중점적으로 다루었다. 또한, 스푼의 마모를 진단하기 위하여 필요한 서보밸브 스푼의 영점 오차(null bias)를 진단하는 방법도 제시되어진다.

이론적 해석으로부터 진단 알고리즘(diagnosis

algorithm)이 도출되며, 제시된 진단 알고리즘은 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증된다. 연구의 범위는 유압실린더를 이용한 힘제어 서보시스템에 국한되어진다.

2. 이론 해석

2.1 서보밸브 스푼 마모와 누설 유량

유압실린더 힘제어 서보시스템의 구성을 Fig. 1에서 보여주는데, 서보밸브는 여러 가지 구성부품들 중에서 한 가지 부품에 불과하다. 또, 전체 시스템의 구성부품들은 나머지 부품들의 거동에 영향을 미치게 된다. 그러므로 서보밸브뿐만 아니라 유압실린더와 제어기, 제어출력 피드백을 포함한 전체 서보시스템에 관하여 고찰되어야 한다.

Fig. 2에서 유압실린더와 서보밸브의 구성을 보여준다. 대부분의 서보밸브는 임계 센터형(critical center type)이며, 이상적인 상태에서는 밸브 스푼(valve spool)과 슬리브(sleeve)사이 틈새도 존재하지 않으며, 오버랩(overlap)도 존재하지 않는다. 이러한 이상적인 상태에서는 부하유량 Q_L 이 영인 영점상태(null condition)에서 누설유량에 해당하는 $Q_1 \sim Q_4$ 도 영이다.

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 0 \quad (1)$$

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.

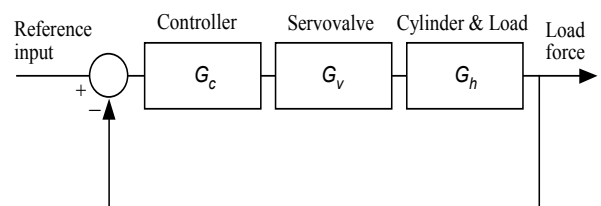


Fig. 1 Block diagram of a typical servo hydraulic system

Wuest^{7,13)}는 날카로운 모서리를 가진 오리피스에서 층류 흐름에 관하여 분석하였다. 만약 Wuest의 이론식을 Fig.2의 오리피스에 적용한다면, 중립누설유량 Q_c 는 (2)식과 같이 표현된다.⁹⁾ 여기서 중립 누설유량은 밸브 스푼이 중립($x_v = 0$) 상태에서의 총

누설유량을 의미한다.

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

(2)식에서 r_c 는 스톱과 슬리브 사이의 틈새이며, w 는 밸브의 면적구배이고, μ 는 유압유 점도이며, P_s 는 시스템압력이며, P_L 는 부하압력이다. (2)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.

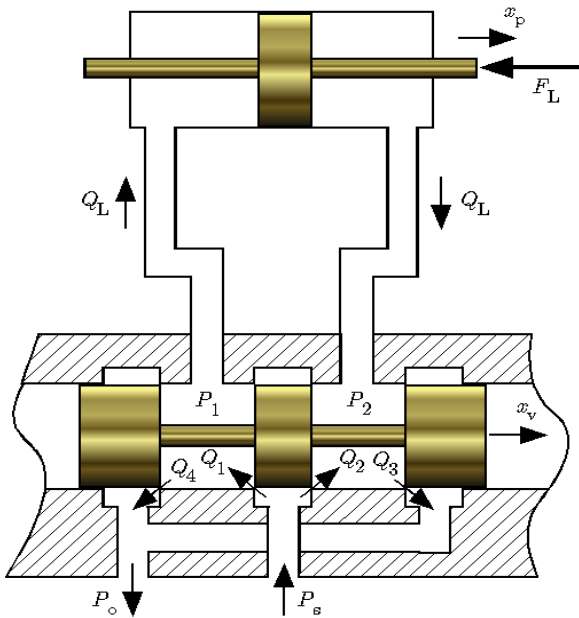


Fig. 2 A critical center servo valve and its Leakage flows

2.2 서보밸브 스톱마모와 압력민감도

서보밸브의 스톱마모를 예측할 수 있는 다른 진단변수는 서보밸브에 관한 수학적 모델 식을 관찰 함으로부터 발견할 수 있다. 누설이 존재하지 않는 이상적인 서보밸브의 유량(혹은 부하유량)은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 x_v 는 밸브 스톱의 변위이다. (3)식의 유량 관계식은 변수들이 정량적으로 미소하게 변화하는

범위 내에서 선형화될 수 있다.

$$\Delta Q_L = K_q \Delta x_v - K_c \Delta P_L \quad (4)$$

여기서 K_q 는 유량이득이라 호칭되며, K_c 는 유량-압력 계수로 호칭되는 매개변수들이다. 이러한 매개변수들은 (5)식과 (6)식과 같이 정의된다.

$$K_q = \frac{\partial Q_L}{\partial x_v} = C_d w \sqrt{\frac{P_s - P_L}{\rho}} \quad (5)$$

$$K_c = -\frac{\partial Q_L}{\partial P_L} = \frac{C_d w x_v}{2(P_s - P_L)} \sqrt{\frac{P_s - P_L}{\rho}} \quad (6)$$

또 다른 유용한 매개변수인 압력민감도 K_p 는 다음과 같이 정의된다.

$$K_p = \frac{\partial P_L}{\partial x_v} = \frac{K_q}{K_c} = \frac{2(P_s - P_L)}{x_v} \quad (7)$$

서보밸브의 특성을 나타내는 세 가지 매개변수들 중에서 압력민감도가 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 부하 유량 Q_L , 부하압력 P_L 이 영인 상태를 의미한다. 영점조건이 중요한 이유는 대부분의 유압 서보시스템이 영점조건 영역에서 작동하기 때문이다. 누설이 존재하지 않는 이상적인 상태에서 세 가지 매개변수들을 다음과 같이 표현한다.

$$K_{q0} = C_d w \sqrt{\frac{P_s}{\rho}} \quad (8)$$

$$K_{c0} = 0 \quad (9)$$

$$K_{p0} = \infty \quad (10)$$

하지만, 부품사이의 틈새와 누설이 존재하는 실제 유압밸브에서 영점매개변수들을 (8)~(10) 식과 다른 모습이 된다. 실제 밸브에서 유량-압력 계수 K_{c0} 는 참고문헌(7)에서 다음과 같이 주어진다.

$$K_{c0} = \frac{\pi w r_c^2}{32\mu} \quad (11)$$

(8)식과 (11)식을 (7)식에 대입하면, 실제 서보밸브의 영점 압력민감도가 다음과 같이 주어진다.

$$K_{p0} = \frac{32\mu C_d}{\pi r_c^2} \sqrt{\frac{P_s}{\rho}} \quad (12)$$

(12)식은 밸브마모의 증가에 비례적으로 증가하는 틱새 r_c 에 따라서 영점 압력민감도 K_{p0} 가 감소함을 보여준다. 즉, 밸브의 마모와 영점 압력민감도가 서로 긴밀히 연관되어 있으므로 영점 압력민감도 K_{p0} 가 밸브마모에 진단에 사용될 수 있을 것이다.

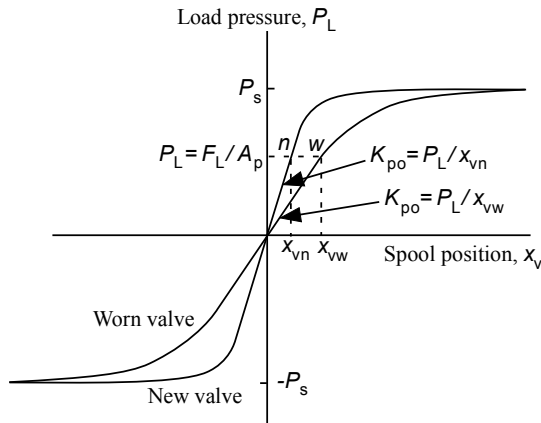


Fig. 3 Load pressure curves and Pressure sensitivity

이러한 영점 압력민감도는 측정방법의 관점에서 부하유량 Q_L 이 차단된 상태에서 밸브스풀의 변위와 부하압력의 상관관계로부터 측정될 수 있다. (7)식에 보는 바와 같이 스푼변위 x_v 에 대한 부하압력 P_L 의 기울기 값으로 측정된다. Fig. 3에서 도시한 바와 같이 마모된 밸브에서는 영점($x_v = 0$) 부근에서 $\partial P_L / \partial x_v$ 의 기울기 값이 신품 밸브보다 상대적으로 작게 나타나는 것으로 예시되어 있다.

3. 진단 알고리즘

3.1 서보밸브의 영점오차

본 연구는 유압실린더 힘 제어 시스템에 사용되는 서보밸브의 인-프로세스 마모진단을 조사하고 있다. 별도의 센서를 추가하여 설치하지 않은 상태에서 서보제어시스템으로부터 기본적으로 주어지는 신호는 서보밸브의 입력신호 i 와 부하력 F_L 이다. 하지만, 식 (7)에서 압력민감도는 밸브스풀 변위 x_v 에 대한 부하압력 P_L 의 기울기로 주어지므로, 입력신호 i 와 스푼변위 x_v 의 상관관계와 부하력 F_L 과 부하압력 P_L 의 상관관계를 알아야 한다. 입력신호

와 스푼변위 신호 사이에는 Fig. 4에 도시한 바와 같은 영점오차가 존재할 수 있기 때문에 압력민감도를 구하기에 앞서서 밸브의 영점오차를 구해야 한다.

부하압력이 영이며, 밸브입력신호 i 가 영으로 주어짐에도 불구하고 밸브스풀의 변위가 영점으로부터 벗어나 있다면, 이 서보밸브는 영점으로부터 벗어난 스푼변화량만큼 편위되었다고 한다. 하지만, 본 연구에서는 스푼변위의 편위량보다는 유용한 신호인 밸브입력신호의 편위량으로 대체하기로 한다. Fig. 4에서 도시한 바와 같이 입력신호 i 가 영인 상태에서 스푼변위 x_v 가 양의 방향으로 편위되었다고 가정하면, 유압 서보시스템에서는 스푼변위가 영이 되어지며, 입력신호 i 는 스푼변위를 영점으로 줄이기 위해서 음의 방향으로 편위되어야 한다.

이러한 입력신호의 보상동작은 피드백 제어시스템에서 자동적으로 이루어진다. 그러므로, 서보밸브가 영점오차를 가지고 있다고 하더라도 제어동작이 정상상태에 이르면 스푼변위 x_v 는 자동적으로 영의 값이 되어지며, 입력신호는 음의 값을 가지게 되어서 Fig. 4에서 NC점에 해당하는 위치에 위치하게 된다. 이와 같이 무부하 정상상태에서 얻어진 서보밸브 입력신호 값의 부호를 바꾸어 준 것이 입력신호의 영점오차 i_{nb} 으로 정의된다. 서보밸브 입력신호의 영점오차를 인-프로세스로 진단하는 알고리즘은 Fig. 5와 Table1에서 표현되어 있다. 여기서 'steady state'는 시스템의 입출력 변수가 일정한 상태로 유지됨을 의미한다. 실제 진단에서는 부하력 신호 F_L 이 아주 작은 설정 값 ϵ_1 보다 작으면 무부하 상태로 간주하며, 또한, 모든 측정 변수의 변화율이 기준 설정 값들보다 작으면 정상상태로 간주한다.

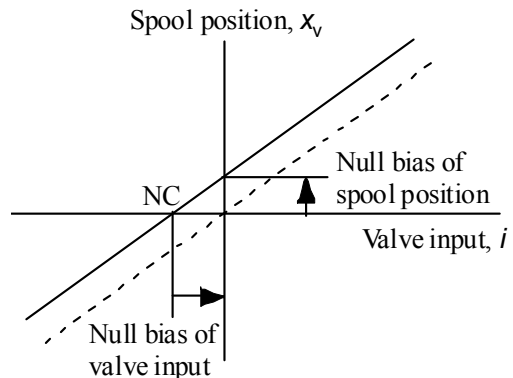


Fig. 4 Null bias of a servovalve

Table 1 Conceptual algorithm of detail parts

Content	Algorithm
Signal	Averaging
Signal rate	Slope of linear-fit curve
No-load condition	Load signal is less than ε_1
Finite-load condition	Load signal is greater than C_1
Steady-state condition	Changing rate of valve input is less than ε_2 and changing rate of load force is less than ε_3
Null bias of valve input	Negative of valve input deviation from zero
Pressure sensitivity	$\frac{\text{Load force signal}}{\text{Valve input} + \text{Null bias}}$
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Upper limits of variables that are assumed to be zero
C_1	Lower limit of a variable that is considered finite

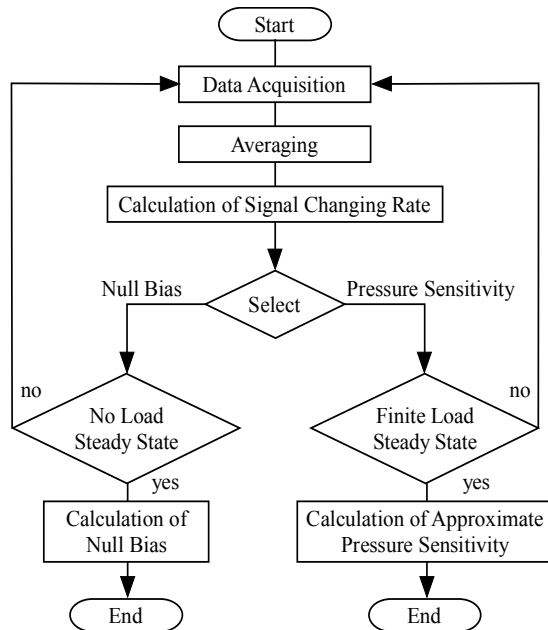


Fig. 5 Flowchart of null bias and approximate pressure sensitivity

3.2 서보밸브의 스톱 마모

Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 서보 밸브의 스톱 마모는 압력민감도를 통하여 간접적으로 계측될 수 있다. 유용한 신호로서 부하력과 밸브 압력신호를 고려하였는데, 부하압력과 서보밸브 스톱변위는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_L = \frac{F_L}{A_P} \quad (13)$$

$$x_v = K(i + i_{nb}) \quad (14)$$

여기서 A_P 는 실린더 피스톤의 유효면적이며, K 는 밸브입력 i 에 대한 밸브변위 x_v 의 이득이며, i_{nb} 는 입력신호의 영점오차이다.

유압서보시스템이 작동하고 있는 상태에서 스톱 변위의 전체 영역에 대한 부하압력의 특정 곡선을 얻는다는 것은 매우 어렵다. 그러나, 주된 관심 영역이 영점(null) 영역이므로 Fig. 3에서 도시한 바와 같이 영점영역에서의 부하 압력 P_L 과 스톱변위 x_v 의 한 점의 데이터 값만으로도 압력민감도를 근사적으로 추정할 수 있다. Fig. 3에서 n은 사용한 적이 없는 신폼(new)밸브를 의미하며 w는 마모(worn)되어진 밸브를 의미한다.

Fig. 2에서 부하 저항력 F_L 이 증가함에 따라서 압력 P_1 은 증가하며 압력 P_2 는 감소한다. 압력 P_1 이 증가하며 압력 P_2 가 감소함에 따라서 누설유량 Q_4 와 Q_2 는 증가하며, 누설유량 Q_1 과 Q_3 는 대칭적으로 감소한다. P_1 챔버에 대한 유출유량 Q_4 와 유입유량 Q_1 의 차이는 밸브스풀의 마모가 진행되어짐에 따라 스톱과 슬리브 사이의 틈새가 커지면서 더욱 증가하게 될 것이다. 유출유량과 유입유량의 차를 보상해주기 위해서는 유입유량을 증가시키고 유출유량을 감소시켜야 하며, 결과적으로 스톱변위 x_v 가 양의 방향으로 움직이게 된다. 이러한 보상 변위 값이 마모된 상태에서 신폼 상태보다 더 큰 값이 된다. Fig. 3에서 x_{vw} 의 값이 x_{vn} 의 값보다 크다는 것이 그러한 사실을 도시한 것이다. 밸브 스톱의 보상 변위는 피드백 제어에 의하여 자동적으로 이루어지게 될 것이다.

이러한 스톱보상변위에 대한 부하압력의 비율 값은 서보밸브의 영점압력민감도를 근사적으로 나타낸다.

$$K_{po} = \frac{P_L}{x_v} \quad (15)$$

(15)식이 성립하기 위해서는 서보시스템이 정상상태를 유지하여야 한다. 여기서 정상상태라 함은 피스톤이 움직이지 아니하며 부하유량 Q_L 이 영이며, 유량 $Q_1 \sim Q_4$ 가 순수하게 누설유량인 상태를 의미한다. (13)식과 (14)식을 (15)식에 대입하면 압력민감도는 부하력 F_L 과 밸브입력 i 의 함수로 표현된다.

$$K_{po} = \frac{F_L}{A_p K(i + i_{nb})} \quad (16)$$

만약 신폴상상태 밸브의 압력민감도에 대하여 마모상태 밸브의 민감도의 상대적인 비율만을 중요하게 고려하는 경우에는 밸브이득 K 와 실린더 피스톤 면적 A_p 의 값은 구하지 않아도 되며, 영점 압력민감도도 다음과 같이 변환될 수 있을 것이다.

$$K'_{po} = \frac{F_L}{A_p(i + i_{nb})} \quad (17)$$

$$K''_{po} = \frac{F_L}{i + i_{nb}} \quad (18)$$

지금까지 설명한 바와 같은 서보밸브의 스톱마모에 대한 진단 알고리즘은 Fig. 5와 Table 1에 나타난 바와 같이 구현되었다.

4. 수치해석 시뮬레이션

본 연구에서 제시되어진 인-프로세스 진단방법을 검증하기 위하여 일련의 수치해석 시뮬레이션이 수행되었다. 수치해석의 도구로써 상용화된 수치해석 프로그램인 AMESIM (Advanced Modeling Environment for Simulation) 이 사용되었다. Fig. 6에서 기하학적 시뮬레이션 모델을 보여주고 있다. 수치해석에 사용된 서보밸브, 유압실린더, 펌프 등의 유압부품들의 수치해석 모델은 실험 장치에 사용된 실제 유압부품들을 모델화한 것이다. 주요부품들에 대한 간략한 사양을 Table 2에 나타나 있다.

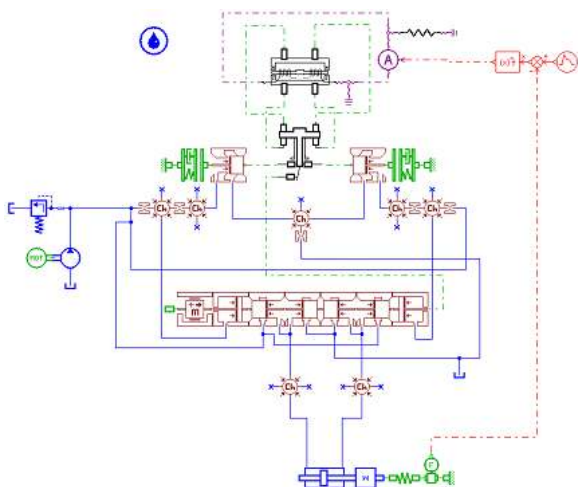


Fig. 6 AMESim hydraulic circuit diagram of the force-control servo system

수치해석의 결과를 평가하기 위하여 누설척도 (LI) 라고 하는 무차원 변수를 도입하였다.

$$LI = \frac{Q_c}{Q_{pump}} \quad (19)$$

누설척도는 펌프유량에 대한 영점누설유량의 상대적 비율이며, 스톱마모의 간접적 척도이다.

Fig. 7에서 세 종류의 실린더 피스톤 면적에 대하여 근사적 압력 민감도의 시뮬레이션 결과를 보여 준다. 압력민감도의 계산에는 (17)식의 방법이 적용되었다. 누설척도가 작은 영역에서는 누설척도가 증가함에 따라서 압력민감도가 급격히 감소하는 양상을 보이는데, 실제 서보밸브의 마모진단을 수행하여야 하는 영역도 이러한 영역에 해당한다. 즉, 시뮬레이션 결과에서 압력민감도를 이용한 밸브마모의 진단이 효율적임을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

Table 2 Major hydraulic components used in the simulation

Instrument	Type	Model	Maker
Servovalve	2-stage	G761-3004	Moog
Cylinder	Double rods	A85302-640	Moog
Power unit	Gear pump	HPS161	Feedback

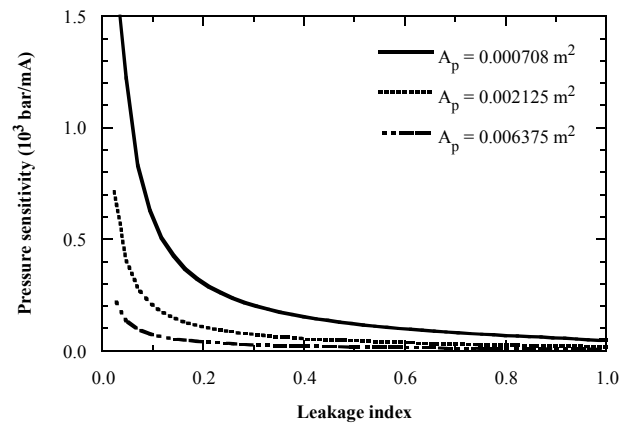


Fig. 7 Simulation curves of the approximate pressure sensitivity

5. 검증 실험

5.1 실험장치 구성

제시되어진 진단 방법을 실험적으로 검증하기 위하여 Fig. 8에서 보여주는 실험 장치를 구성하였다.

유압실린더에 부하력을 인가시키기 위해서 스프링 장치가 사용되었다. 진단을 수행하는 프로그램은 LABVIEW 그래픽 언어를 사용하여 구현되었다. 실험장치의 구성에 두 개의 노트북 컴퓨터가 사용되었는데, 하나는 서보밸브를 제어하는 목적으로 사용되었으며, 다른 하나는 서보밸브를 진단하는 목적으로 사용되었다. 서보밸브의 제어방법은 비례-적분 제어 (proportional and integral control) 방법이 적용되었다. 실험장치의 주요 구성부품들에 대한 재원은 Table 3에 열거되어 있다.

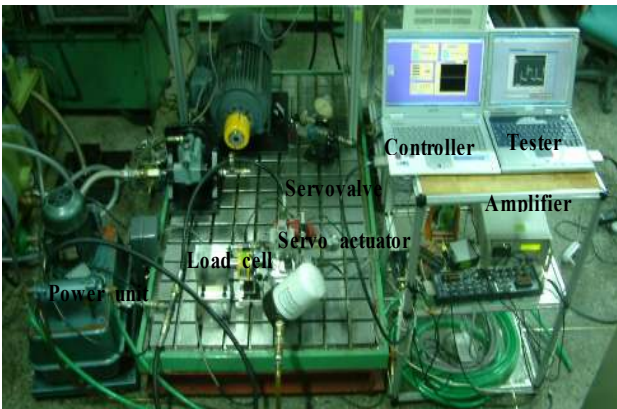


Fig. 8 Overview of the test apparatus

Table 3 Specifications of major components of the test apparatus

Instrument	Specification	Model	Maker
Power unit	5.7 Lpm	HPS161	Feedback
Servovalve	38 Lpm	G761-3004	Moog
Servoactuator	25.4 mm	A85302-640	Moog
Load cell	0-2000 kg _f	YG38-2T	Setech
Pressure filter	3 μm	DFBHHC6003B1.0	Hydac
Return filter	3 μm	A72266-1	Moog
Amplifier	4 ch, 16 bit, 100 kHz	YSA-700DS	Setech
Notebook PC	Pentium M-1.7 GHz	SENS-X30	Samsung
DAQ Card	16 input, 2 output, 12 bit,	6024E	National Instruments

밸브의 마모정도를 다양하게 준비하는 것이 비용이 많이 소요되고 어렵기 때문에 본 연구에서는 두 종류의 밸브만이 사용되었다. 하나는 사용된 적이 없는 신품상태의 밸브이며, 다른 하나는 슬리브를 연마하여 인위적으로 마모상태를 조성한 밸브이다.

두 종류 밸브의 스푼과 슬리브의 형상치수를 측정하였으며, 영점누설유량은 식(2)을 적용하여 계산되었다. 밸브스푼의 영점오차는 별도 전용 시험 장치에서 평가 되었다. 이러한 결과들이 Table 4에 열거되어 있다. 여기서 영점오차 비는 밸브 스푼의 최대 변위에 대한 영점오차변위의 비율을 의미한다.

Table 4 Wear and null bias of the two valves tested

	Sleeve dia.	Spool dia.	Clearance	Center leakage	Null bias ratio
New	6.611 mm	6.607 mm	2 μm	1.45 lpm	-1.2%
Worn	6.603 mm	6.568 mm	17.5 μm	7.50 lpm	+8.6%

5.2 실험 결과

Fig. 9-10에서 실험 결과를 보여준다. 진단에 사용된 모든 신호는 전압신호로 계측되었다. Fig. 9에서 서보시스템의 기준명령신호가 계단형상으로 변화할 때에 부하력 F_L 과 서보밸브 입력 i 의 응답신호를 보여준다. Fig. 9-(a)는 신품밸브에 대한 결과이며, Fig. 9-(b)는 마모된 밸브에 대한 결과이다. 그림에서 약 0-17초 구간영역과 65-80초 구간영역에서 서보시스템이 정상상태를 유지하며, 실린더에 작용하는 부하력이 일정한 상태를 유지한다. 반면에 약 25-55초 영역에서는 무부하 정상상태를 형성하며, 나머지 시간영역에서는 시스템이 변화하며 유압실린더가 움직이는 천이상태에 해당한다. Fig. 9-(a)의 무부하 정상상태 구간에서 밸브의 입력신호가 거의 영에 근접되어 있는데 반하여, 마모된 밸브의 Fig. 9-(b)에서는 무부하 정상상태의 영역에서 서보밸브의 입력신호가 음의 방향으로 크게 편위되어 있다. 밸브입력신호가 음의 방향으로 편위된 것은 입력신호가 영일 때에는 밸브 스푼이 양의 방향으로 변위되어 있음을 의미한다. Fig. 9의 (a)와 (b)를 종합적으로 분석하면 신품 밸브는 영점오차가 작으며 마모된 밸브는 영점오차가 크게 형성되어 있는데, 영점오차를 감안하여서 부하작용구간에서 압력민감도를 관측한다면 신품 밸브에서는 압력민감도가 크며 마모된 밸브에서는 압력민감도가 작다. 이러한 결과는 Fig. 10의 반복 실험결과에서도 확인된다.

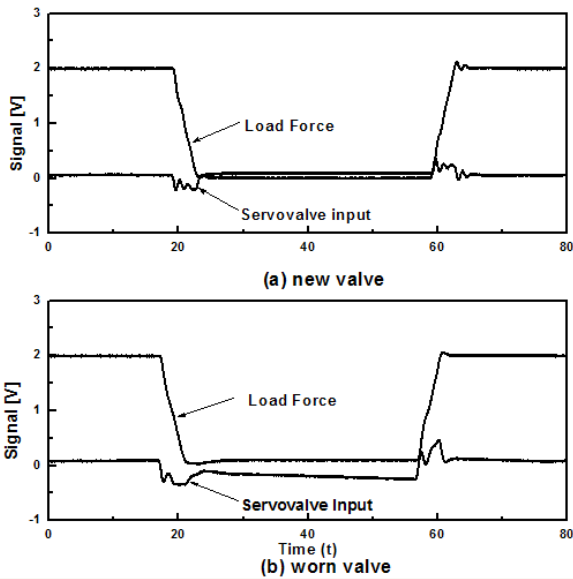


Fig. 9 Effect of spool wear on the behavior of servovalve

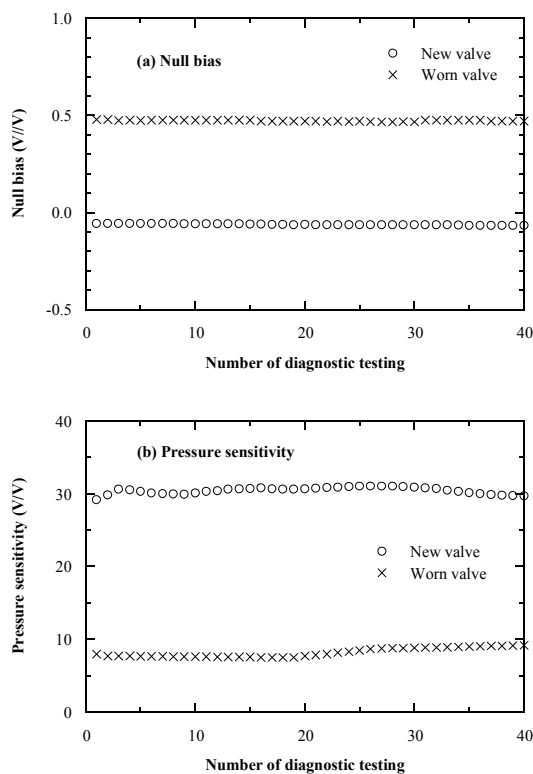


Fig. 10 Effect of spool wear on null bias and pressure sensitivity

Fig. 10-(a)는 두 종류 밸브에 대하여 영점오차를 인-프로세스 진단한 결과를 보여준다. 반복된 실험에서 거의 동일한 수준의 영점오차 값을 보이고 있으며, 두 종류 밸브에서 확연하게 구별되며 신뢰성이 있는 진단 결과를 보여준다. 두 종류의 밸브에

대한 영점오차의 진단 결과는 Table 4에서 보여주는 평가 값과도 잘 일치된 결과라고 할 수 있다.

Fig. 10-(b)에서 근사적 압력민감도에 대한 진단 결과도 Table 4의 결과와 일치되고 있으며, 신폼밸브와 마모된 밸브를 구별할 수 있음을 보여준다. 하지만, 압력민감도의 진단 값은 영점오차의 진단 값에 비교하여서 반복성이 조금 떨어지는 결과이다.

6. 결 론

유압실린더 힘 제어시스템에서 사용되는 서보밸브의 마모를 인-프로세스 진단하는 방법이 개발 제시되었으며 검증되었다. 검증실험부분에서 신폼 밸브와 크게 마모된 밸브의 두 종류에 대해서만 실험이 이루어졌었는데, 보다 다양한 수준의 밸브스풀에 대하여 실험이 이루어지는 것이 바람직하다. 주된 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 서보밸브의 입력신호와 부하력 신호만을 이용하여서 서보밸브의 영점오차와 스펴마모를 인-프로세스 진단하는 것이 가능하다.
2. 서보시스템이 무부하, 정상상태의 조건에서 서보밸브 입력신호가 영으로부터 벗어나는 편위량으로 영점오차를 측정할 수 있다.
3. 유압실린더에 부하가 작용하는 정상상태 조건에서 근사적 압력민감도를 측정함으로써 밸브의 마모량을 예측할 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- 1) Moog Inc., "Portable Valve Testers/ Monitors", <http://www.moog.com/media/1/overview.pdf>, 2008.
- 2) D. Wang, R. Dolid and M. Donath, "Development and Verification of a Two-Stage Flow Control Servovalve", ASME, FPST-Vol. 2, pp. 121~129, 1995.
- 3) P. N. Nikiforuk, P. R. Ukrainetz and S. C. Tsai, "Detailed Analysis of a Two-Stage Four-Way Electrohydraulic Flow-Control Val-

- ve", I.Mech. Engineering, J.Mech. Engineering Science, Vol. 11, No. 2, pp. 168~174, 1969.
- 4) J. R. Dowd and F. T. Barwell, "Tribological interaction between piston and cylinder of a model high pressure hydraulic pump", Transactions ASLE, Vol. 18, pp. 21~30, 1974.
 - 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. J. Martin and C. R. Burrows, "The Dynamic Characteristics of an Electro-hydraulic Servo-valve", Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement, Control, pp. 395~406, 1976.
 - 7) H. E. Merritt, "Hydraulic Control System", Wiley and Sons, New York, pp. 79~91, 1967.
 - 8) 김경호, 한규선, 김성동, 이재천, 함영복, 누설 유량 계측에 의한 서보밸브 마멸의 인-프로세스 진단", 유공압시스템학회지, 제1권 2호, pp. 1~7, 2004.
 - 9) K. W. Gale and J. Watton, "A Real-time expert System for Control Systems in a HOT Steel Strip Finishing Mill", Proc. Instn Mech Engrs, Vol. 213, Part I, pp. 359~374, 1999.
 - 10) Carl S. Byington, Matthew Watson and Doug Edwards, "Data-Driven Neural Network Methodology to Remaining Life Predictions for Aircraft Actuator Components", 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings, pp. 3581~3589, 2004.
 - 11) song Liu and Bin Yao, "Indirect Adaptive Robust Control of Electro-Hydraulic Systems Driven by Single-Rod Hydraulic Actuator", Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM 2003), pp. 296~301, 2003.
 - 12) J. Watton, "Modelling, Monitoring and Diagnostic Technics for Fluid Power Systems", Springer, London England, 2007.
 - 13) W. Wuest, "Stromung durch Schlitz-und Lochblenden bei kleinen Reynolds-Zahlen", Ingenieur Archiv, No. 22, pp. 357~367, 1954.
 - 14) K. Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice-HallInc., London, pp. 216~282, 1970.