

전기유압서보시스템 온-프로세스 진단 기술 On-Process Diagnosis Technique for Electro-Hydraulic Servo System

김성동
Sungdong Kim

1. 서 론

전기유압서보시스템은 제철소의 압연기, 발전설비의 터빈제어, 정밀주조의 다이캐스트, 피로시험기, 인장시험기, 전차용 자동 조준 장치 등의 다양한 산업분야에서 사용되어진다. 또 전기유압서보시스템은 그 구성 가격이 수 백만 원에서 수 천만 원에 이르는 고가이며, 초정밀 부품으로 구성되어지기 때문에 유압유 속에 존재하는 먼지나 오염물질 등에 의하여 쉽게 고장이 초래되어지는 어려움이 있다. 제철소의 압연기, 발전소의 터빈 제어기 등에서 전기유압서보시스템은 핵심 시설이며, 전기유압서보시스템의 고장으로 인하여 초래되어지는 생산 손실액과 영향은 지대하게 큰 규모이다.

국내 P 제철소에서는 시간관리의 개념으로 생산라인의 전기유압서보시스템을 관리하고 있다. 시간관리는 일정한 시간 동안에 사용된 전기유압서보시스템의 핵심 부품을 성능상태의 양/불량에 상관없이 새로운 부품으로 교체하는 방법이며, 서보밸브와 같은 고가의 부품들을 수명 이전에 폐기하게 되어서 경제적 손실을 초래하고 있다. 미국의 Moog, Vickers, Parker와 독일의 Bosh Rexroth 등의 주요 유압서보시스템 전문업체에서는 서보밸브의 동작 가능 여부만을 시험하는 간이 테스터(Fig. 1, Fig. 2) 수준의 장비에서부터 선형성오차, 히스테리시스 누설유량, 유량 계인, 압력 계인, 주파수 응답 성능까지 시험할 수 있는 정밀 시험기까지를 다양하게 제품화하였다. 하지만, 이러한 전용 성능 시험기들의 대부분은 생산설비의 일부분으로 구성되어 있는 온-라인(on-line) 서보밸브에 대해서는 적용에 한계를 가지며, 시험의 대상이 되는 서보밸브를 설비로부터 분리한 후에 적용해야 하는 단점이 존재한다.

국내 P 제철소 G 공장의 일부 라인에서는 유압

서보시스템의 측정신호들을 단순히 모니터링(monitoring)하는 방법이 적용되고 있으나, 측정신호들을 분석처리하여 고장의 원인과 정도를 진단하는 시스템은 존재하지 않는다. 생산설비에 설치되어 사용되어지고 있는 온-프로세스(on-process) 상태에서 전기유압서보시스템의 성능을 진단하는 온-프로세스형 진단기는 국내뿐만 아니라, 외국 선진기술 보유국에서조차 개발된 사례를 찾아보기 어려운 기술이다.

생산설비에 사용되어지고 있는 전기유압서보시스템의 성능진단을 수행하는 온-프로세스형 성능진단기의 개발에 필요한 기술을 소개하고자 한다.

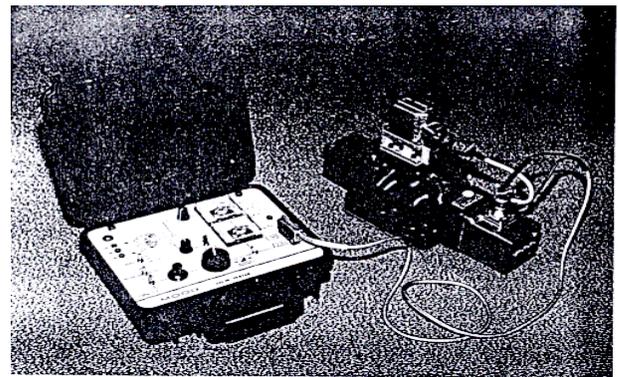


Fig. 1 Moog사 서보밸브 테스터

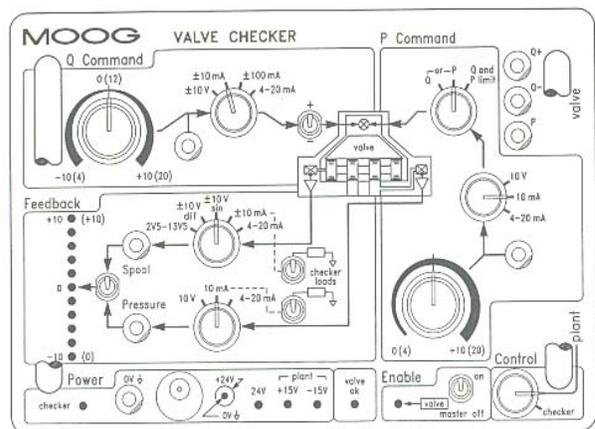


Fig. 2 Moog사 서보밸브 테스터의 조작 패널 모습

2. 전기유압서보시스템 진단 기술의 개요

2.1 측정 신호 종류와 진단 항목

의사가 환자를 진단할 때, 체온계, 혈압기, 혈액성분검사, X선 촬영, MRI 검사 등과 같이 다양한 장비와 검사방법들을 동원하여 신체 각 부위의 증상

을 진단한다. 또, 터빈, 모터, 펌프 등의 회전 설비의 진단에는 질량체의 회전운동과 긴밀한 상관관계를 가지는 진동, 소음, 온도 등의 정도를 측정된 데이터 자료들이 이용된다. 이와 마찬가지로 전기유압서보시스템의 경우에도 시스템의 각 부위의 특성과 긴밀한 상관관계를 가지는 성능변수들을 가능한 많

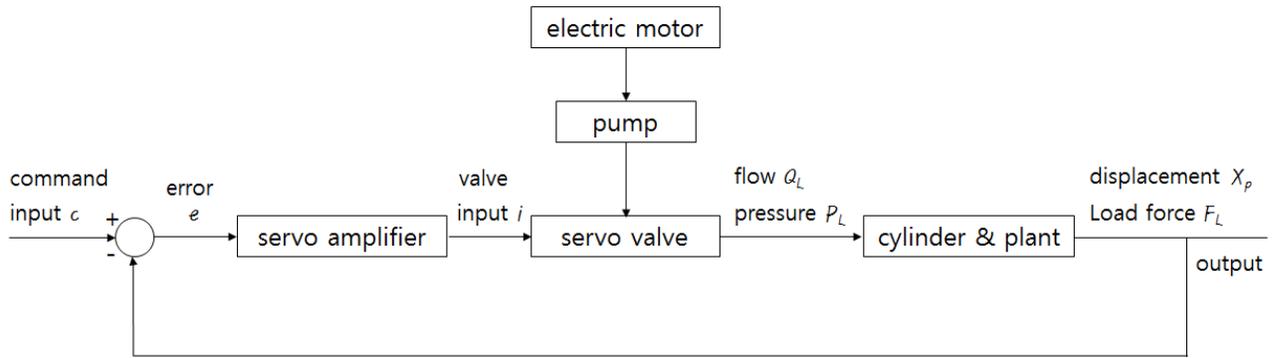


Fig. 3 Configuration of an electro-hydraulic servo system

Table 1 Measuring signals and diagnosis items

부품	측정 신호	진단 항목	비고	
펌프	<ul style="list-style-type: none"> • 펌프동작전원 • 펌프토출압력(공급압력) • 펌프토출유량 	<ul style="list-style-type: none"> • 펌프 고장 • 압력 이상 	타 부품 간섭 없이 독립 진단	
서보증폭기	<ul style="list-style-type: none"> • 지령신호 • 증폭기출력신호(서보밸브입력신호) 	<ul style="list-style-type: none"> • 서보증폭기 고장 • 서보증폭기출력신호의 흔들림(haunting) 	타 부품 간섭 없이 독립 진단	
서보밸브	서보밸브입력신호		서보밸브 스톱 마모와 서보실린더 피스톤 마모는 서로 결합되어 있음. 분리 진단 어려움	
	밸브 스톱 변위			
	압력	공급압력		<ul style="list-style-type: none"> • 서보밸브 스톱 마모상태 및 잔여 수명 • 각종 입출력신호의 slew-rate ratio • 각종 입출력신호 사이 time delay • 입력에 대한 압력민감도 (혹은 압력계인) • 누설유량 • 스톱 고착(stick) • 중립점 오차(null bias)
		1,2 밸브포트압력		
		밸브부하압력		
	유량	부하유량		
누설유량				
서보실린더	압력	1,2 실린더포트압력	<ul style="list-style-type: none"> • 서보실린더 피스톤 마모상태 및 잔여 수명 • 피스톤 고착(stick) 	
		실린더부하압력		
	변위 지령			
	변위 출력 신호			
	부하력 지령			
부하력 출력 신호				

은 종류로 측정하여 진단하는 것이 필요하다.

Fig. 3의 기본 구성으로 이루어지는 전기유압서보시스템의 진단에 사용되어질 수 있는 측정신호의 종류와 진단 항목들은 Table 1과 같이 요약되어질 수 있다.

밸브와 실린더의 마모 상태를 진단하는 목적으로 각 부품의 누설 유량을 측정하는 유량센서를 설치하는 것이 가장 직접적인 방법이라 할 수 있다. 하지만 유량센서는 다른 부품들을 연결하는 유압배관 사이에 직렬 구성으로 삽입되어야 하는 단점과, 또 유량센서 자체의 동적 거동이 유압서보시스템의 동적거동에 간섭을 일으킬 수 있는 단점이 존재한다. 보통 시중의 터빈형 유량센서는 정밀도가 3% 수준에 불과하며, 기어용적형 유량센서는 1% 수준이며, 센서 자체의 대역폭주파수도 수 십 헤르츠(Hz) 수준으로 비교적 정밀도가 떨어진다. 반면에 압력센서는 배관 중의 임의 지점에 점 접촉 개념으로 삽입될 수 있으며, 정밀도도 0.3% 수준이며 대역폭주파수도 수 백 헤르츠(Hz) 수준으로 비교적 높다. 다만 보통 압력센서는 스트레인지지 형이나 압전 형으로 수 mV 수준의 신호를 천 배 가까이 증폭하는데, 이 때 노이즈 신호도 함께 증폭될 수 있기 때문에 유량센서보다 전자파 노이즈에 약하다고 할 수 있다.

2.2 평가 기준

각종 진단 항목들에 대한 정상 상태 혹은 최적 상태의 기준 값과 그러한 정상 상태로부터 진단 항목 값들이 어느 정도로 편위될 때까지 허용할 것인지에 대한 평가 기준을 설정하는 것 또한 매우 중요한 사항이다.

측정신호 혹은 진단항목들의 정상 상태에 대한 기준은 일반적으로 모든 제품이 금방 공장에서 출고된 신제품 상태에서 측정된 값들을 사용할 수 있을 것이다.

수명의 한계와 부품 폐기를 위한 기준은 다양한 방법을 고려할 수 있을 것이다. 예를 들어서 부품 제조업체로부터 제공받을 수 있다면 제조업체의 기준 값을 적용하는 것이 효율적이다. 그렇지 못한 경우에는 자체적 기준에 의한 한계사용시간의 부품 혹은 한계성능과 한계수명의 부품에 대해 오프-라인형 전용 진단 장비를 이용하여 비정상 판단의 기준 값을 얻을 수 있다.

2.3 측정신호 후처리 방법

유압서보시스템은 다양한 크기의 입력신호에 대하여 출력 특성이 편차를 보이는 비선형 특성이 강하여, 단순히 출력신호를 입력신호의 진폭으로 나누는 방법으로 표준화(normalization)하기 어렵다. 즉, 성능 진단을 실시하기 위한 특정 조건의 입출력에 대해서만 진단을 적용하는 것이 효과적일 것이다. 입력신호의 진폭이 무작위하게 주어지는 시스템의 경우에는 입력 진폭이 사전에 설정된 범위에 들어올 경우에만 진단을 실시할 수 있을 것이다.

서보밸브 스톱의 고착(stick)과 서보실린더 피스톤의 고착과 같이 돌발적으로 발생할 수 있는 이상 상태는 발생 순간에 경고(warning)를 발령하거나 생산공정을 비상정지 시켜야 할 것이다. 하지만 서보밸브 스톱의 마모와 서보실린더 피스톤의 마모와 같이 점진적으로 발생하는 경우에는 누적 평균값을 기준으로 사전 경고 단계와 폐기 단계로 세분화하여 구분하여 진단하는 것이 합리적일 것이다.

또 경고발령단계의 부품에 대해서도 부품을 생산공정에서 분리하여 오프-라인(off-line)형 진단 장비에서 정밀 진단을 할 것인지, 해당 부품을 생산공정에 설치된 상태에서 별도의 유압원으로 연결하여 온-라인(on-line) 오프-프로세스(off-process) 형으로 정밀진단할 것인지, 생산공정 가동 상태에서 진단한 온-프로세스(on-process)형 진단결과만으로 폐기처분할 것인지 등에 관하여서도 부품의 가격, 이상 상태로부터 유도될 수 있는 손실액, 낮은 정밀도 공정에 전환 사용 가능성 등을 고려하여 소상히 설정하여야 한다.

2.4 서보밸브 마모와 실린더 마모 구별 방법

Table 1의 비교에서 밝힌 바와 같이 서보밸브 스톱 마모와 서보실린더 피스톤 마모는 유량과 압력, 제어변수 등에 미치는 영향이 유사하여 마모 부위를 구별하기에 어려움이 따른다.

서보밸브 스톱 마모와 서보실린더 피스톤 마모를 구별 진단하는 첫 번째 방법은 온-프로세스 진단에서 부품의 마모가 존재함을 1차 확인한 후에 마모가 예상되는 각 부품을 설비에서 분리하여 오프-라인형 시험기에서 확인하는 방법이다. 혹은 생산 설비에 서보밸브와 실린더가 설치된 상태에서 유압 배관을 분리 연결하여 온-라인 오프-프로세스형 시험을 통해 확인하는 방법도 고려할 수 있다.

서보밸브 스톱 마모와 서보실린더 피스톤 마모를 구별 진단하는 두 번째 방법은 서보밸브 중립 상태

에서 서보밸브 인접 1-2 포트 지점의 부하압력에 대한 실린더 입출구 인접 지점 부하압력의 비율 값을 이용하는 방법이다. 자세한 이론 설명은 생략하지만, 실린더 피스톤의 마모가 증가함에 따라 서보밸브 부하압력에 대한 실린더 부하압력의 비율 감소하게 되는 특성을 이용하는 방법이다.

3. 위치제어형 서보시스템 진단 사례

Fig. 4에서 보여주는 위치제어형 서보시스템에서 계단형상의 입력신호(step input)에 대한 과도응답특성 (transient-response)을 시간영역 (time domain) 상에서 나타낸 응답선도가 Fig. 5이다.⁶⁾

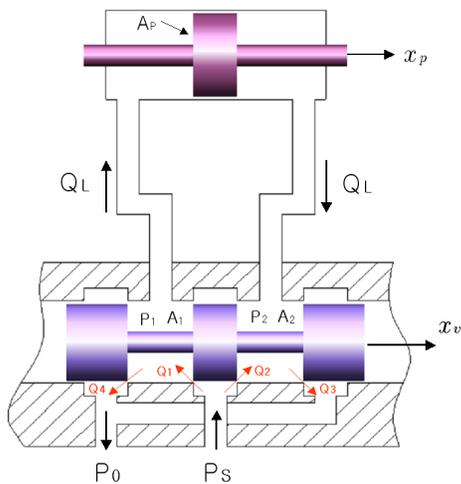


Fig. 4 Schematic diagram of a hydraulic position control servo system

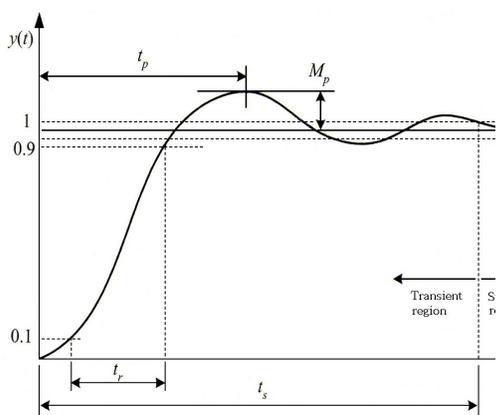


Fig. 5 Transient-response curve

Fig. 5에서 t_r 은 상승시간, y_r 는 상승구간의 출력값 진폭으로 정의할 때, 상승구간의 출력값 진폭을 상승시간으로 나누어준 변화율 y_r/t_r 이 출력신호의

슬루율(slew-rate)이다.

서보밸브 내의 스푼(spool)은 반복적인 직선왕복 운동을 하게 되는데, 스푼의 반복운동으로 인해 마멸(wear)이 진행되어 스푼 외경이 줄어들게 된다. 스푼 외경의 감소로 인해 스푼-슬리브(spool-sleeve) 사이의 틈새(clearance)는 증가하게 되고, 그 틈새를 통해 흐르는 중립 누설(null leakage) 또한 증가하게 된다. 누설량(leakage flow)이 증가하면 상승 시간과 지연 시간은 증가하게 된다. 즉, 서보밸브의 스푼이 마멸됨에 따라 출력신호의 상승시간과 지연시간은 증가하게 된다. 따라서 시간에 대한 입력신호의 변화율(slew-rate)과 출력신호의 변화율의 비(slew-rate ratio, 슬루율 비)를 성능진단 항목으로 사용한다. 또한 지연시간도 성능진단 항목으로 사용할 수 있다.

Fig. 6과 같이 구성된 위치제어계 유압서보시스템 진단시험장치를 이용하여 스푼의 마멸과 슬루율 비에 대한 상관관계를 실험을 통하여 밝혔다.

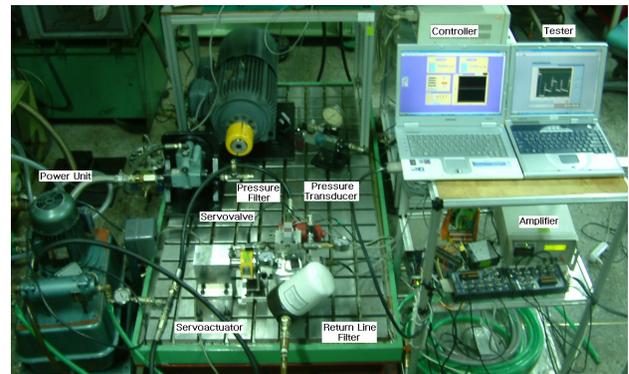


Fig. 6 Photograph of experimental hydraulic position control servo system

실험에서 밸브 스푼의 마멸 정도를 달리한 3종의 밸브가 사용되었는데, 3종의 서보밸브의 스푼마모 상태와 누설지수는 Table 2에 표기된 바와 같다. 여기서 누설지수(leakage index)는 아래 식으로 정의되었다.

$$\text{누설지수} = \frac{\text{중립 누설 유량}}{\text{과외 유닛의 펌프 용량}} \quad (1)$$

Fig. 7은 Table 2에 표기된 3종의 서보밸브에 대하여 실험 결과로 얻어진 슬루율 비를 나타낸 그래프이다. 스푼 마모가 일정한 상태에서 서보밸브에 대해서 일정한 값의 슬루율 비 값을 보인다. 또한 마멸 정도가 큰 밸브의 경우에는 슬루율 비가 감소

하였는데, 스톱 마멸이 증가함에 따라 슬루율 비가 감소함을 알 수 있다. Fig. 8의 그래프는 3 종의 서보밸브에 대한 지연 시간을 나타낸 그래프이다. 슬루율 비 경우와 마찬가지로 동일한 스톱 마모의 밸브에 대해 동일한 정도(level)의 지연 시간 값이 측정됨을 알 수 있다. 지연 시간은 마멸이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다.

Table 2 Experimental condition for clearance between spool and sleeve and leakage index

No.	Leakage index	Clearance [μm]
1	0.007	1.5
2	0.501	12.5
3	0.982	17.5

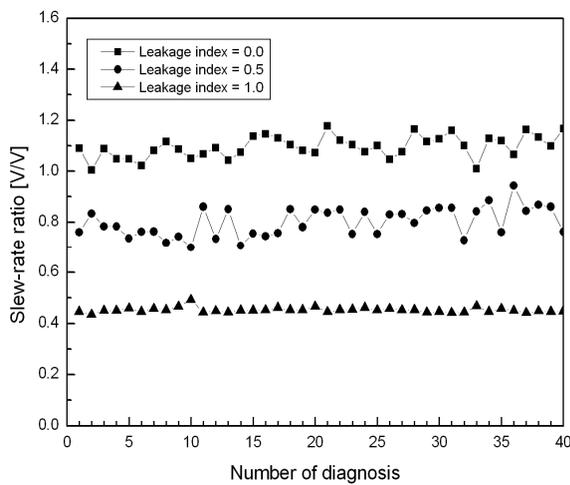


Fig. 7 Experimental result of slew-rate ratio

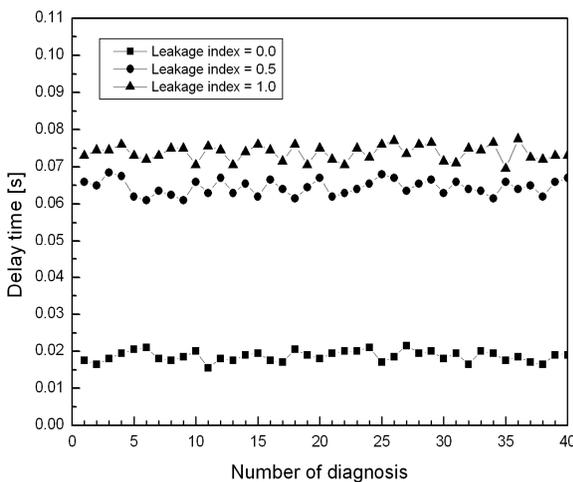


Fig. 8 Experimental result of delay time

4. 힘제어형 서보시스템 진단 사례

Fig. 4에서 보여주는 서보시스템의 실린더 피스톤에 부하력 센서(load cell)를 부착하여 구성된 힘제어형 서보시스템에서 서보밸브 마모진단 사례를 소개한다.

제로랩(zero lap) 임계센터형 서보밸브의 영점 압력 민감도는 다음과 같이 주어진다⁷⁾.

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

(2) 식에서 μ 는 유압유 점도, C_d 는 밸브 유량계수, P_s 는 공급압력, ρ 는 유압유 밀도이다.

(2) 식은 밸브마모의 증가에 비례적으로 증가하는 틈새 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. 이러한 이론식의 영점 압력민감도를 실험적으로 측정한다면 정상상태에서 스톱변위에 대한 부하압력의 비율 값으로 근사적으로 표현된다.

$$K_{p0} = \frac{P_L}{x_v} \quad (3)$$

(3) 식에서 스톱변위 x_v 는 밸브 입력 i 에 중립점 오차 i_{nb} 를 더한 값에 비례하며, 부하압력 P_L 은 부하력 F_L 에 비례한다는 개념을 적용하면 영점 압력 민감도 K_{p0} 는 다음 식과 같이 변환된다.

$$K_{p0} = \frac{F_L}{A_p K(i + i_{nb})} \propto \frac{F_L}{i + i_{nb}} \quad (4)$$

Table 3에 주어진 신품 상태 스톱과 마모 상태 스톱에 대하여 식 (4)를 적용하여 측정된 압력민감도의 실험 결과를 Fig. 9~10에서 보여준다. 진단에 사용된 모든 신호는 전압신호로 측정되었다. Fig. 9에서 서보시스템의 기준명령신호가 계단형상으로 변화할 때에 부하력 F_L 과 서보밸브 입력 i 의 응답선도를 보여준다. Fig. 9-(a)는 신품밸브에 대한 결과이며, Fig. 9-(b)는 마모된 밸브에 대한 결과이다. 그림에서 약 0~17초 구간영역과 65~80초 영역에서 서

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 중립점오차가 작으며 마모된 밸브는 중립점오차가 크게 형성되어 있는데, 중립점오차를 감안하여서 부하작용구간에서 압력민감도를 관측한다면 신품 밸브에서는 압력민감도가 크며 마모된 밸브에서는 압력민감도가 작다. 이러한 결과는 Fig. 10의 반복 실험결과에서도 확인된다.

Table 3 Wear and null bias of the two valves

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

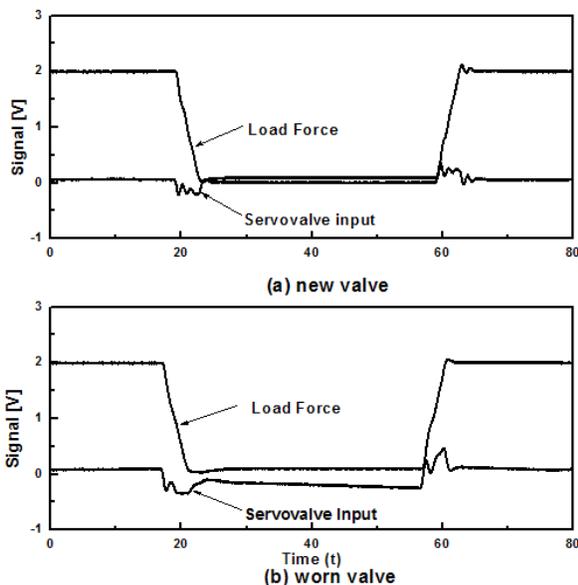


Fig. 9 Effect of spool wear on the behavior of servo valve

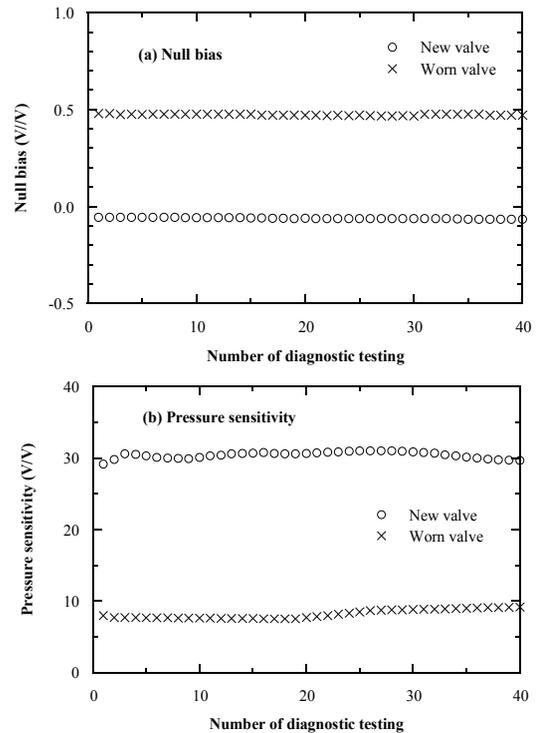


Fig. 10 Repetitive diagnosis results of null bias and pressure sensitivity

Fig. 10-(a)는 두 종류 밸브에 대하여 중립점오차를 온-프로세스 진단한 결과를 보여준다. 반복된 실험에서 거의 동일한 수준의 중립점오차 값을 보이고 있으며, 두 종류 밸브에서 확연하게 구별되며 신뢰성이 있는 진단 결과를 보여준다. 두 종류의 밸브에 대한 중립점오차의 진단 결과는 Table 3에서 보여주는 평가 값과도 잘 일치된 결과라고 할 수 있다.

5. 압연 공정 사이드 가이드 시스템 진단 사례

국내 P 제철소 압연공정 사이드 가이드 시스템을 대상으로 온-프로세스 진단을 적용한 사례를 소개한다. 사이드 가이드 시스템은 판 형태의 강편(slap)을 중앙에 위치하도록 하는 전형적인 위치서보제어계이다. 진단 시스템의 하드웨어 구성은 Fig. 11에서 보여주는 구성을 가지는데, 계측 신호로서 서보밸브의 입력신호, 부하압력신호, 실린더 변위신호가 사용되었다. Fig. 12에서 압연공정 중에 측정된 서보밸브 입력신호, 부하압력신호, 액추에이터 변위신호의 모습을 보여준다. 밸브 입력 신호의 변화에 부하압력은 예민하게 반응하는 반면에 실린더 피스톤 변위 신호는 매우 무디게 반응하였다. 이러한 이유로 밸브 스푼이 마모될 경우에 그 영향이 부하압력에 예민하게 반영될 것이므로 부하압력을 밸브 진단용

신호로 채택하였다.

진단 항목은 밸브입력에 대한 부하압력의 슬루율 비와 지연시간, 밸브 중립점 오차, 밸브 스톱 고착의 네 가지 항목이었다. 밸브입력-부하압력의 슬루율 비와 지연시간은 궁극적으로 밸브 스톱의 마모 정도를 진단하는 목적으로 사용될 수 있다.

진단 결과는 Fig. 13~15에 그려져 있다. 진단 측정의 기간이 수 일 정도로 짧았기 때문에 고장이나 이상 감지는 발견하지 못하였다. 실제 공정에서 채취한 측정 신호는 예상하지 못한 노이즈와 흔들림이 많았기 때문에 진단 변수 값들도 심하게 요동치는

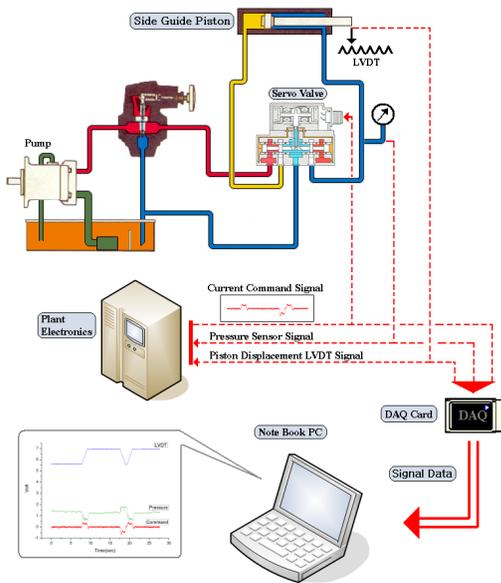


Fig. 11 Hardware configuration of diagnosis equipments

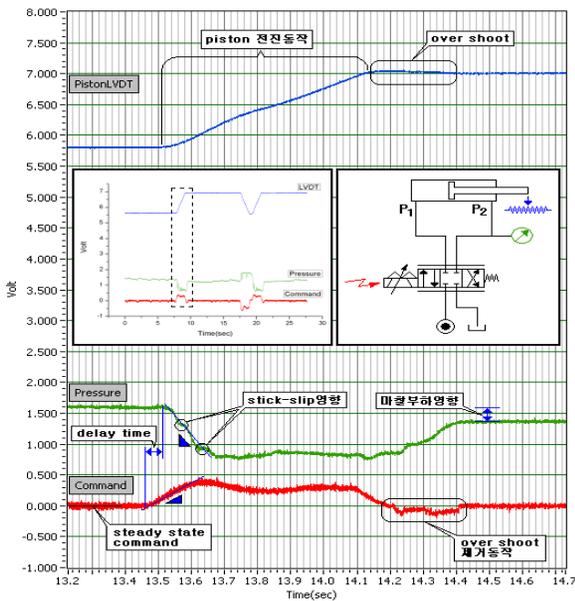


Fig. 12 Magnified side guide system signal

모습을 보였다. 그러므로 단순히 순간순간의 진단 값을 그대로 이용하기보다 하루 누적 평균, 일주일 누적 평균, 한달 누적 평균 등의 형태로 누적 평균 데이터를 적극 활용하여야 할 것으로 판단되었다.

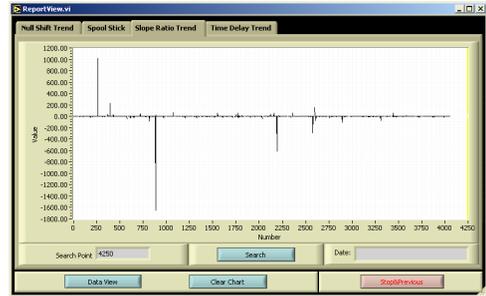


Fig. 13 Report graph of the slew-rate ratio

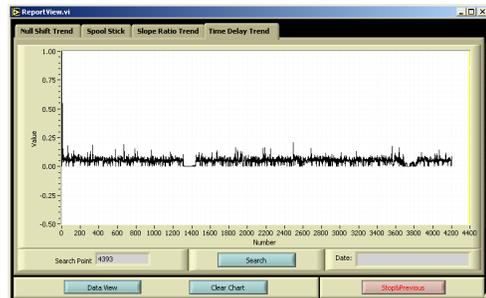


Fig. 14 Report graph of the time delay

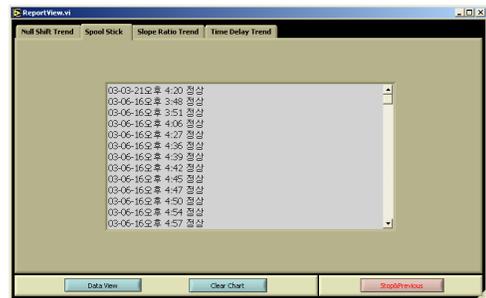


Fig. 15 Report view on the stick occurrence

6. 결론

전기유압 서보시스템의 각 구성 부품의 성능을 온-프로세스 진단하는 방법을 제시하고, 제시된 성능 진단 항목으로 마멸된 서보밸브에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 서보밸브 입력신호의 슬루율에 대한 압력신호의 슬루율의 비가 스톱 마멸에 대한 성능 진단의 척도가 될 수 있다.

2) 스톱의 마멸이 진행됨에 따라 슬루율 비가 감소하는데, 이러한 슬루율 비의 정도에 따라 밸브의

사용 가능 여부 및 교환 시기를 파악할 수 있다.

3) 스톱의 마멸이 진행됨에 따라 지연 시간이 증가하는데, 지연 시간의 증가량을 사용해서 밸브의 사용가능 여부 및 교환 시기를 파악할 수 있다.

4) 서보밸브의 입력신호와 부하력 신호만을 이용하여서 서보밸브의 중립점오차와 스톱마모를 온-프로세스 진단하는 것이 가능하다.

5) 서보시스템이 무부하 정상상태의 조건에서 서보밸브 입력신호가 영으로부터 벗어나는 편위량으로 중립점오차를 측정할 수 있다.

6) 유압실린더에 부하가 작용하는 정상상태 조건에서 근사적 압력민감도를 측정함으로써 밸브의 마모량을 예측할 수 있다.

7) 실험실에서 인공적으로 서보밸브 스톱은 마모된 상태에서 상기 결론 사항들이 양호하게 부합하지만 제철소 압연공정에 적용한 결과에서는 측정 신호는 예상하지 못한 노이즈와 흔들림이 많았기 때문에 진단 변수 값들도 심하게 요동치는 모습을 보였다.

그러므로 하루 누적 평균, 일주일 누적 평균, 한 달 누적 평균 등의 형태로 누적 평균 데이터를 적극 활용하여야 할 것으로 판단되었다.

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 Valve", 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 Vaves", 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 Servovalve", 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, pp. 296~301, 2003.
- 12) J. Watton, "Modelling, Monitoring and Diagnostic Technics for Fluid Dower 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.

[저자 소개]

이름 김성동

E-mail : sdkim@kumoh.ac.kr

Tel : 054-478-7395

1987년 KAIST 생산공학과 박사 학위 취득.

1981년 대우중공업 입사, 1988년 금오공

과대학교 기계시스템공학과 조교수, 2000년

동 대학 교수. 유공압제어, 유공압부품의

연구에 중사. 유공압건설기계학회, 대한기계학회, 정밀공학회 등의 회원, 공학박사

