

센서가 필요 없는 예측 시스템 Sensorless Condition Monitoring

장달식
DAL SIK JANG

1. 서론

역사적으로 보면 자가 진단을 통한 시스템의 유지 보수에 관한 연구는 이미 1980년대에 학계와 산업계에서 시작된 것으로 추정된다.¹⁾ 실시간 혹은 주기적인 관측(Condition monitoring)은 진동이나 온도 또는 마모 물질 등의 차이 분석을 통해 주요한 변화를 감지하여 핵심 부품의 고장을 사전에 예방하고 관리를 행함으로써 초기 증세로 유발되는 결정적인 손상을 회피하려는 것이다.

전자유압제어시스템의 자기진단기술도 이와 일맥상통하는 것으로 최근 V사의 휠로더에 장비 내에 탑재된 자가진단장치를 통해 엔진, 브레이크 등의 상태 및 연료소비량, 작업시간 등 장비에 대한 정보를 실시간으로 모니터링 하여 문제점을 조기에 파악해 장비 고장을 미리 대비할 수 있다.

그러나 이러한 예측 시스템은 다양한 센서를 통해 이루어지고 있어 그 구성이 많은 비용을 요구할 뿐만 아니라 센서들의 유지 보수에도 막대한 비용이 사용되고 있다.

본 논문에서 소개하는 것은 전자 유압의 핵심인 전자비례 감압밸브와 ON/OFF 솔레노이드는 물론 릴레이를 포함한 각종의 전자석의 상태를 작동 중에 특성변화를 감지하여 관찰하고 찾아내는 시스템이다. 특히 전자석의 비 선형성과 히스테리시스 그리고 와전류(Eddy current)등을 센서로 활용하는 획기적인 기술이다.

2. 액추에이터와 센서

2.1 센서로 사용되는 액추에이터

전자석인 솔레노이드는 코일과 순철 계통의 자기력 특성이 우수한 코어의 조합이다. 여기에는 액추에이터로 사용하기 불리한 비선형성과 히스테리시스 B(H) 그리고 와전류(Eddy current) 등과 같은 특성을 지니고 있을 뿐만 아니라 전자석의 국부 포화(saturation) 및 에어 갭 등의 복잡한 관계를 가지고

있다. 그런데 이들의 다양한 왜곡은 역으로 센서로 사용하기에 적합한 고유성(Property)가 된다. 다시 말해 액추에이터로 불리한 것들이 센서로 활용되어 다양한 정보를 주게 된다.

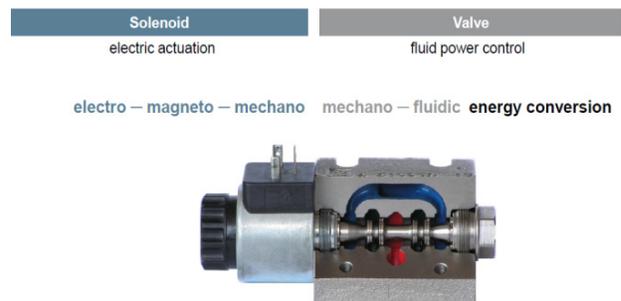


Fig. 1 Energy conversion in the solenoid valve

Fig. 1에서 보면 솔레노이드와 밸브 부분으로 구성되는데, 솔레노이드 부분에서는 전기적 에너지가 자기적 에너지로 변환되고 다시 기계적 에너지로 변환된다. 이 기계적인 에너지는 유체적 에너지를 제어하게 된다.

2.2 기존 전자기적 솔레노이드 시험의 한계와 극복

기존의 솔레노이드는 외부 부하가 연결되지 않은 상태에서 기계적 에너지 즉 출력 힘과 위치 등을 측정하여 시험할 수 있지만 Fig. 2와 같이 부하가 연결되는 경우 위에서 제시한 물리량을 측정할 수가 없게 된다. 중간 단계의 물리량을 측정하지 않고 단지 최종적인 결과 즉 압력이나 전류 등만 측정하여 그 결과가 예상과 다르게 나올 경우 다양한 추정을 하거나, 부품을 변경하면서 원인을 분석하게 된다.

이에 반하여 새롭게 도입되는 혁신안은 독일 Eberhard Kallenbach 교수에 의해 개발된 것으로 앞서 설명한 액추에이터의 단점을 센서로 이용하여 솔레노이드에 가해지는 전류와 전압 그리고 저항값 등을 활용하여 계산해 내는 방법이다.

Limits of mechanical testing
Solenoid build-in or installed in the system

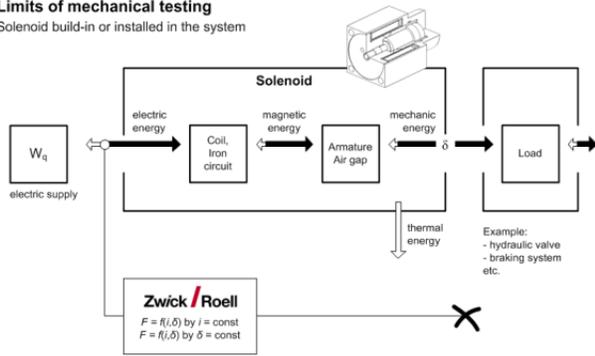


Fig. 2 Layout of the solenoid test

Fig. 3에서 보는 바와 같이 종래의 방법과 달리 센서를 사용하지 않기 때문에, 밸브가 연결된 상태에서 솔레노이드의 특성을 포함하여 밸브 전체를 시험할 수 있다. 기존의 솔레노이드 출력(힘)과 스트로크를 측정하지 않고 입력 전류와 전압 등을 측정하고 이를 사용하여 계산해 내는 방식이다.

$$u = iR + \frac{d\Psi(i, \delta)}{dt} = iR + \left[\frac{\partial\Psi(i, \delta)}{\partial\delta} \frac{d\delta}{dt} + \frac{\partial\Psi(i, \delta)}{\partial i} \frac{di}{dt} \right] \text{ (Eq. 2-1)}$$

Eq. 2-1 에 나타난 미분 방정식을 적분하여 쇄교 자속 Ψ (Magnetic Flux Linkage)을 계산한다.

INNOVATION: Magnetic testing

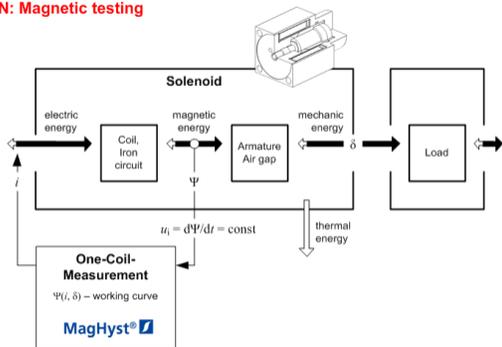


Fig. 3 The innovative solution to test the solenoid

3. 쇄교 자속 특성을 통한 밸브 분석

3.1 전류에 대한 쇄교 자속 Ψ 의 특성도

쇄교 자속의 특성도를 통해 간단하게 물리적인 오류를 파악할 수 있다는 점이 본 기술의 특징이다. Fig. 4는 전형적인 ON/OFF 솔레노이드의 쇄교자속 특성을 보여주고 있다. 전류가 증가함에 따라 자속에 의한 힘이 커지기 시작하고 이는 스프링의 힘과 마찰력을 이기는 1의 위치에서 이동하여 2의 위치

로 가게 되고 계속하여 전류가 증가하면 3의 위치에 이르게 된다. 다시 전류를 감소시켜 자기력을 감소시키면 4의 위치에서 스프링력에 의해 복원되어 5의 위치로 가게 되고 계속 감소하면 0의 위치에 이르게 된다.

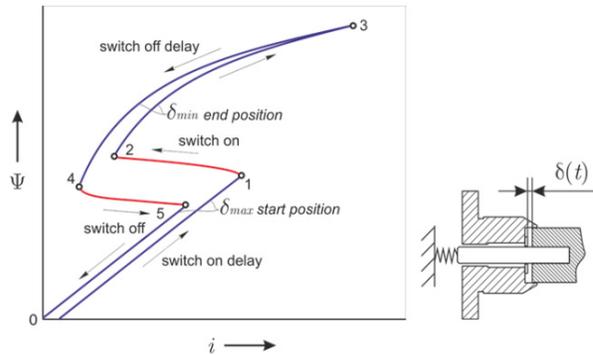


Fig. 4 Magnetic Flux Linkage-ON/OFF Sol.

여기서 중요한 것은 이 특성도를 통해 물리적인 특성을 알 수 있다는 점이다. Fig. 5에서 좌측 그림은 스프링의 설정된 힘(Preload)에 따라 달라지는 특성이고 오른 쪽은 스프링 상수에 따라 달라지기에 간단하게 이종의 스프링 장착 여부와 설정된 힘을 파악하여 오류를 찾아낼 수 있다. 또한 사용시간이 지남에 따라 스프링의 상수 변화나 설정된 힘의 차이를 알 수 있어 이를 통해 상황을 관측할 수 있다.

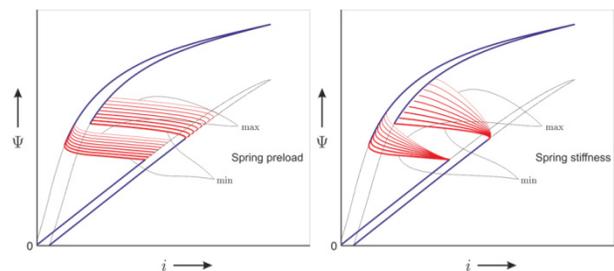


Fig. 5 Magnetic Flux Linkage-Spring

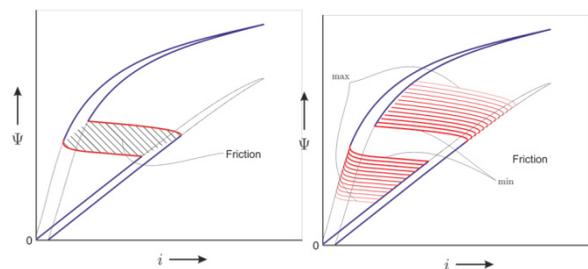


Fig. 6 Magnetic Flux Linkage-Friction

일반적으로 사용시간이 지남에 따라 마찰력이 증가하거나 오염에 의해 급한 변화가 보일 수 있는데 Fig. 6에서 보는 바와 같이 외쪽에 보여준 초기 마찰력이 점점 증가할 경우를 오른쪽 그림이 보여주고 있다.

3.2 쇄교 자속 ψ 의 특성도를 이용한 부품검사

앞서 서술한 특성도를 통해 생산시에도 밸브의 전체적인 특성을 검사할 수 있고 이는 양산라인에서 품질관리에 적용되고 있다. Fig.7에서 검은 색의 특성 선도는 표준 품, 즉 정상 제품의 특성을 보여주고 있다. 적색으로 표시된 것은 10% 코일이 적게 감긴 것과 동일하게 중간 연결(Short cut)인 상태를 나타낸 것이다. 코일의 감긴 권수가 10% 부족하여 정상 제품보다 낮은 수준의 쇄교 자속을 보여주고 있다.

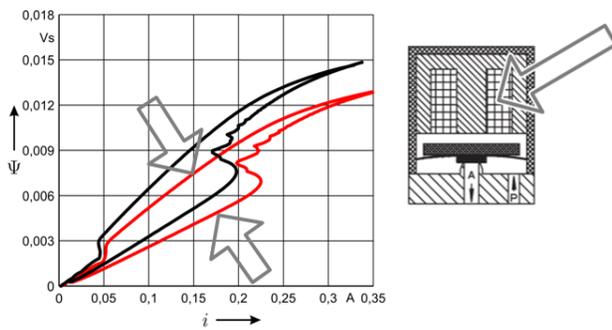


Fig. 7 Magnetic Flux Linkage - coil short cut

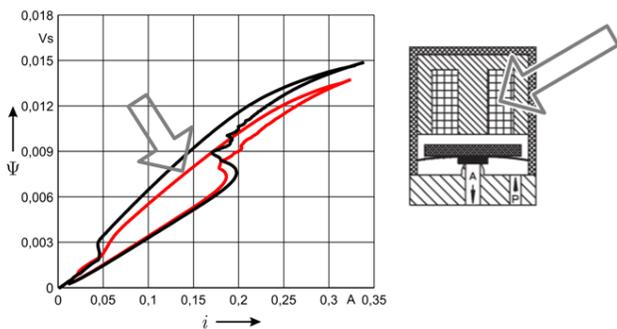


Fig. 8 Magnetic Flux Linkage - stroke error

Fig. 8은 오염으로 인해 스트로크가 정상제품 보다 짧게 된 밸브를 시험한 결과이다. 시작점에서는 동일한 형태의 특성을 가지고 있으나 상부측에 오염으로 스트로크가 제한을 받은 것이기에 마찰력의 특성은 유사하지만, Fig. 4의 2위치가 비정상이 되고 3위치로 가게되는 특성을 보이고 있다.

4. 쇄교 자속 특성을 활용한 주기적인 관측(Condition monitoring)

4.1 현 단계의 적용 사례

원천적으로 센서가 필요하지 않으므로 기존의 밸브 컨트롤러에 프로그램을 추가하여 실시간 관찰이 가능하지만, 현재 다양한 이슈로 인해 3cm x 3cm 크기의 별도 기판을 추가하여 2개의 밸브를 구동하고 있다. 리미트 스위치, 변위, 힘 또는 홀 센서 등에 의한 센서의 기능이 전자 제어 회로로 전자석의 배기 코일의 전류 및 전압 값의 제어, 측정 및 평가로 대체된다.

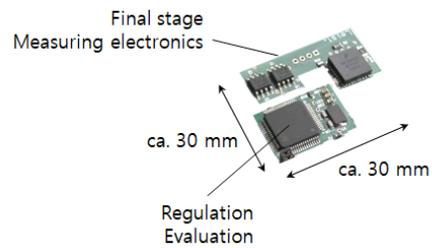


Fig. 9 Control unit for series production

Fig. 9에 장착된 기능 및 상태 모니터링 옵션은 다음과 같다.

- 전환 시간 및 전환 전류
- 앵커 위치, 스트로크 또는 끝 위치 모니터링
- 전체 시스템의 마찰
- 오염
- 대항력

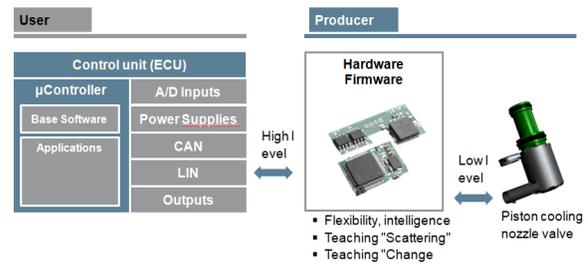


Fig. 10 Layout of Control unit

앞서 서술한 바와 같이 고객(User)의 ECU안에 Firmware로 장착되어 사용할 수 있으나, 현재는 Fig. 10과 같이 별도의 작은 기판을 적용하고 있다. 밸브를 구동하는 장치가 기존의 ECU에서 중간 기판으로 이동하고 노즐밸브는 이 기판에 의해 구동된다. 따라서 ECU와 중간 기판 사이는 고급 통신이 필요

하고, 이 기판과 밸브 사이는 낮은 수준의 통신이 필요하다. 중요한 점은 가격적인 측면인데 백만대 수준의 자동차에 적용되는 경우 매우 낮은 가격에 적용이 가능하고, 확실한 계약과 입증의 있을 경우 단지 소프트웨어(Firmware)만 도입할 수 있어 그 경쟁력은 매우 막강하다.

4.2 다음 단계의 적용 영역

아직도 끝이 없을 듯 연구가 되어지고 있는 스마트 팩토리와 무인 자동차등 편리성과 효율성이 극대화되는 반면 만일의 사고시 막대한 재난을 초래할 수 있는 세상이 다가오고 있어 이 시스템의 영역은 무한히 크고 넓다.



Fig. 11 Magnet society

자동차 1대에 100개가 넘는 솔레노이드(릴레이 포함)가 장착 되고 있을 뿐만 아니라, 가정에서도 도어 락(Door Lock)을 비롯 홈 오토메이션용 각양의 자동 조정장치, 건물의 관리 장치, 자동 주차 장치 그리고 건설 중장비와 산업용 자동장치에 빠짐없이 솔레노이드가 장착되고 있다. 특히 안전을 위해 장착되는 것들이 자체점검이 안 된다면 위기시에 무용지물이 될 수밖에 없어 이에대한 상시적인 점검이 필요하다. 세월호 사고시에도 솔레노이드가 녹이 슬어 있었지만 이 상태 파악이 안되었는데, 본 기술이 적용되었다면 간단하게 파악이 되는 것이었다.

5. 결 론

기존의 실시간 또는 주기적인 모니터링에 많은

센서가 들어가고 이로인해 가격이 큰 부담이 될 뿐만 아니라, 센서 자체의 고장에 대한 리스크가 여전히 존재하고 있다. 이를 혁신적으로 해결할 수 있는 센서가 없는 실시간 모니터링 시스템의 원리와 그 적용 예를 통해 미래 사회의 확장 가능성을 살펴보았다. 스마트 팩토리와 무인 자동차등 편리성과 효율성이 극대화되는 유익한 점을 많이 연구하지만, 이에 반하여 사고시에 발생할 막대한 피해와 수명의 예측이 어려워 대비하지 못하거나 너무 빨리 교체하여 과도한 비용이 발생할 가능성에 대한 연구는 상대적으로 적게 이루어지고 있다.

본 논고는 이러한 미래의 문제를 해결 할 수 있는 혁신적인 방안을 소개하였으며, 앞으로 그 적용분야의 개척이 활발히 이루어지고 사회적인 합의를 통해 미래 사회의 안전을 구축하는데 새로운 발전 동력이 되길 바란다.

참고 문헌

- 1) Mitchell, J.S. 1981. An Introduction to Machinery Analysis and Monitoring, Penwell, Los Angeles
- 2) Andrey Gadyuchko, Magnetic Precision Measurement for Electromagnetic Actuators
- 3) Andrey Gadyuchko, Magnetic Measurement - new Ways of Functional Testing
- 4) MagHyst technology(기술 소개자료)

[저자 소개]



장달식
 E-mail : kairosjang@daum.net
 Tel : 010-3259-7014
 1997년 독일 Aachen 대학교 기계공학과 박사. 30년간 대우 - 두산 연구소 근무(상무). 2018년~현재 대성나찌유압 공업 전무(COO+CTO). 전자비례 감압밸브, 건설기계용 전자 유압 시스템, 피스톤 펌프 및 모터, MCV, 지게차용 브레이크 밸브 및 미션 컨트롤밸브 등 개발/연구에 종사. 대한기계학회, 유공압건설기계학회 등의 회원, 시인, 오페라 작곡가, 공학박사(Dr.-Ing.)