

유압 솔레노이드 밸브의 센서리스 고장진단 시스템 개발

Development of a Sensorless Diagnostic System for the Hydraulic Solenoid Valves

장달식, 유승진, 박종우

Dal Sik Jang, Seung Jin Yoo and Jong Woo Park

1. 서 론

대성나찌유압공업(대표 김영대, 장달식)은 경남 양산시 유산공단에 위치한 건설기계/농업기계/산업기계용 유압밸브 생산업체이다. 1988년 7월 창립 이래 30년 이 넘게 유압 솔레노이드 밸브를 연 20만개 이상 생산하고 있는 핵심 부품 제조 회사이다. 이 기술과 제품을 기반으로 굴삭기와 농기계 그리고 산업차량 용 다양한 밸브를 독자 개발하여 생산하고 있으며, 최근 전자비례감압밸브를 양산하면서 국내는 물론 일본과 중국 등에서 요구되는 다양한 형태의 전자비례밸브를 개발하고 있다.

산업기계, 공작기계, 조선용 유압밸브 및 유압펌프



농기계용 유압밸브



건설기계용 유압밸브



Fig. 1 Products of Daesung Nachi Hydraulics

건설장비의 오토노미와 스마트 제조 시스템으로 변화하면서 다양하게 적용되고 있는 전자밸브와 솔레노이드 직동 시스템의 실시간 진단검사 시스템의 요구가 확실하게 증가하고 있다. 하지만 현재 대부분의 시스템은 센서를 달아야만 가능하거나 비전 시스템에 의한 간접적인 모니터링이 가능할 뿐이다. 특히 센서를 장착할 경우 가격 상승과 장착 공간 확보는 물론 센서가 고장이 날 경우 또 다른 문제를 야기하게 된다.

2. 센서리스 고장진단 시스템 개발 전략

본 논고에서 소개하는 것은 전자 유압의 핵심인 전자비례 감압밸브와 ON/OFF 솔레노이드는 물론 릴레이를 포함한 각종의 전자석의 상태를 작동 중에 특성변화를 감지하여 관찰하고 찾아내는 시스템이다.

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.

이 핵심 기술을 세계 유일하게 개발한 독일의 Ilmenauer Mechatronik사와 협업으로 기본 모듈을 도입하고 이를 활용한 건설기계용 고장 진단 시스템을 개발하고 있다.

여기에 대성나찌유압공업의 30년이 넘는 전자밸브 생산 및 개발 기술에서 획득한 역량을 활용하여 건설장비에 적절한 전자비례감압밸브를 개발하고 회사와 특수 관계인 독일의 Ilmenauer Mechatronik사의 제품과 기술을 활용한다. 또한 한국기계연구원(KIMM) 기계시스템안전연구본부 스마트산업기계연구실의 산업기계 고장진단 프로세스와 인공지능 기반 상태진단/기계학습 프로그램 개발 역량을 활용하여 상업성이 확보된 제품과 기술을 개발한다.

3. 유압 솔레노이드 밸브의 센서리스 고장진단

3.1 유압 솔레노이드 밸브

유압 비례 솔레노이드 밸브는 코일 전류의 크기에 비례하는 전자기력에 의하여 열림량 또는 압력이 조절되는 밸브로서 전자 유압시스템의 근간이 되는 핵심 요소부품이다. 전자비례 감압밸브는 건

설, 농기계는 물론 다양한 용도가 있는 비례 유압 솔레노이드 밸브의 종류로서 입력전류에 비례하는 압력제어 특성을 갖는 전자와 유압 신호의 교량역할을 한다. Fig. 2와 같이 주밸브(MCV)에 장착되어 펌프에서 작동유를 유압액츄에이터로 유량을 분배하여 굴착기의 작업장치를 제어하는 신호를 발생시킨다.

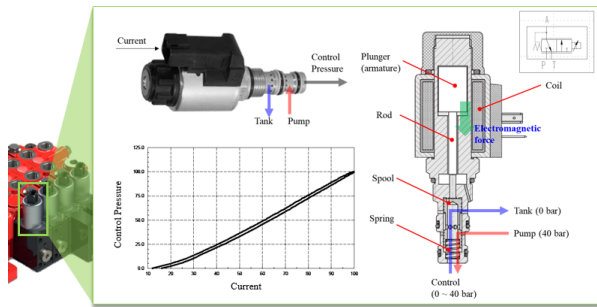


Fig. 2 The electro-proportional pressure reducing valve

3.2 개발 대상 제품의 정의

유압 솔레노이드 밸브의 고장을 부가적인 센서의 장착 없이 제어신호 (코일전류 및 전압) 만 이용하여 정확히 검출할 수 있는 센서리스 고장진단 시스템의 개발을 목표로 한다.

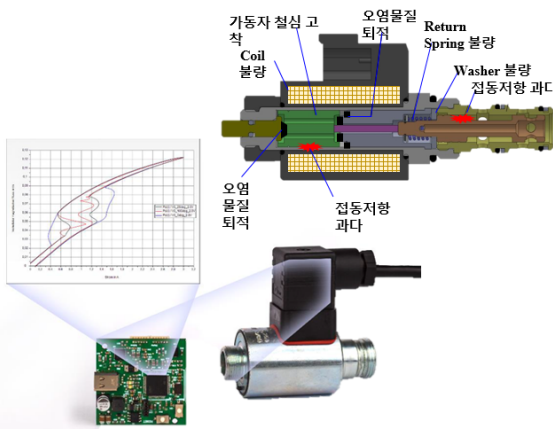


Fig. 3 The sensorless diagnostic system

Fig. 3에서 보는 바처럼 DIN 커넥터에 장착된 센서리스 실시간 모니터링 시스템을 통하여 전자 밸브의 각종의 특성을 모니터링 할수 있다.

3.3 모니터링 대상의 정의

독일 Ilmenauer Mechatronik 사에서 출시된 유압 솔레노이드 밸브의 전류 대비 쇄교자속 특성으로부터 고장을 진단할 수 있는 센서리스 고장진단 제품

을 활용하여 전자밸브의 다양한 특성을 모니터링 할 수 있다.

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

$$u = iR + \frac{d\Psi(i, \delta)}{dt} = iR + \left[\frac{\partial\Psi(i, \delta)}{\partial\delta} \frac{d\delta}{dt} + \frac{\partial\Psi(i, \delta)}{\partial i} \frac{di}{dt} \right] \text{ (Eq. 3-1)}$$

Eq. 3-1 에 나타난 미분 방정식을 적분하여 쇄교자속 Ψ (Magnetic Flux Linkage)을 계산한다.

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 위치로 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.

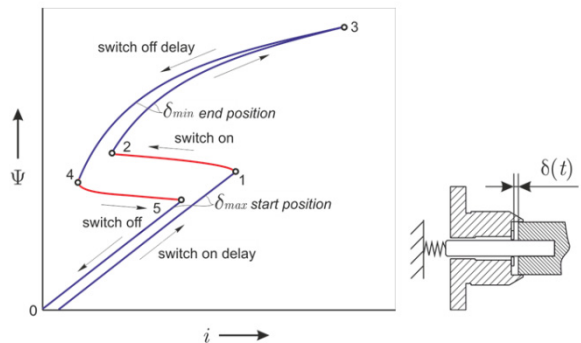


Fig. 4 Magnetic Flux Linkage-ON/OFF Sol.

이러한 특성을 활용하여 Fig. 5에서와 같이 장비 출시의 단계에서도 스프링 선택과 조립의 적정성을 파악할 수 있는데, 이는 유압특성 시험에서는 나타나지 않는 것들이다.

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.

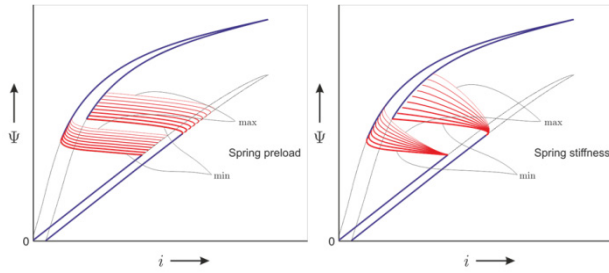


Fig. 5 Magnetic Flux Linkage-Spring

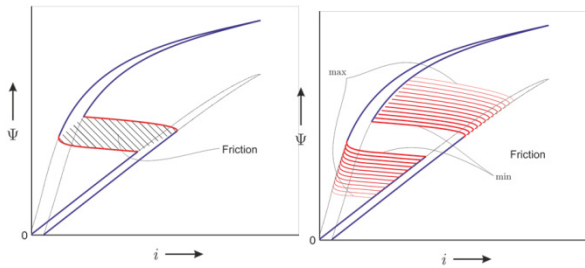


Fig. 6 Magnetic Flux Linkage-Friction

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. 이를 통해 사용 중 코일의 표피가 손상을 입은 상태를 찾아낼 수 있다.

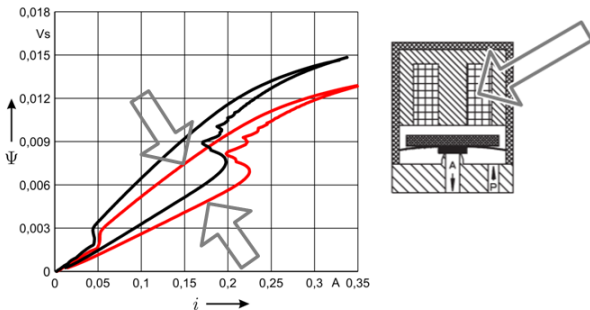


Fig. 7 Magnetic Flux Linkage - coil short cut

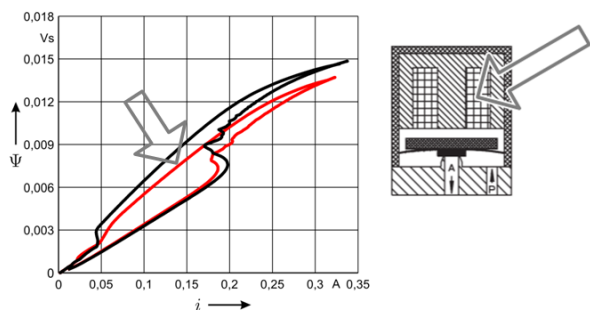


Fig. 8 Magnetic Flux Linkage - stroke error

또 Fig. 8은 오염으로 인해 스트로크가 정상제품보다 짧게 된 밸브를 시험한 결과를 보여주고 있는데, 이를 통해 오염이나 스틱에 의한 밸브의 오류를 발견할 수 있다.

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

3.4 센서리스 고장진단 알고리즘

코일전류 및 전압을 입력 받아 밸브의 고장여부 및 고장유형을 정확히 식별할 수 있는 인공지능망 기반의 고장진단 알고리즘 및 기계학습 프로그램 개발을 목표로 한다

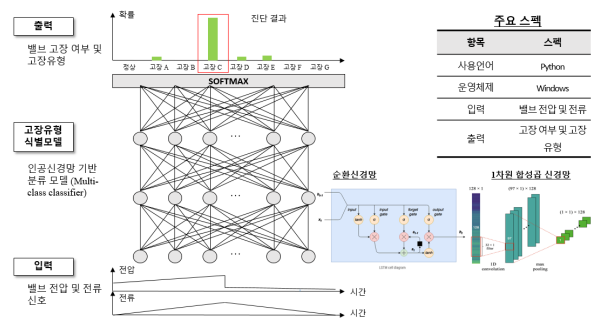


Fig. 9 The sensorless diagnostic system algorithm

Fig. 9에 나타난 바와 같이 출력으로는 밸브 고장 여부 및 고장유형이며, AI 알고리즘을 활용하다. 고장유형 식별모델을 찾아내기 위해 인공지능망 기반 분류 모델 (Multi-class classifier)이 활용된다. 입력으로는 센서가 필요 없기에 밸브 전압 및 전류 신호이다.

4. 결론

기존의 실시간 또는 주기적인 모니터링에 많은 센서가 들어가고 이로 인해 가격이 큰 부담이 될 뿐만 아니라, 센서 자체의 고장에 대한 리스크가 여전히 존재하고 있다. 이를 혁신적으로 해결할 수 있는 센서가 없는 실시간 모니터링 시스템의 활용을 통한 유압 솔레노이드 밸브의 센서리스 고장진단 시스템 개발에 대하여 간단하게 설명하였다. 한국 기계연구원(KIMM)과 협업을 통해 중견기업인 대성

나찌유압공업은 기존의 하드웨어적인 제품의 개발과 생산의 한계를 극복하고 선형적으로 고장을 진단하는 제품과 시스템의 개발은 물론 AI를 응용한 고장의 예측과 분류가 되는 시스템의 공급이 가능한 업체로 역량이 강화될 예정이다. 또한 세계 최초로 센서리스 실시간 고장 진단이 가능한 전자비례밸브의 개발과 판매로 국내는 물론 국제적인 브랜드 가치가 상승할 것이다. 이번 과제를 계기로 앞으로 한국 기계연구원과 같이 개발된 기술과 제품을 차량에 탑재할 수 있는 모듈을 개발하여 자체 개발 역량 약한 업체의 장비에 적용할 수 있고 이를 통해 수집한 데이터는 더 높은 수준의 알고리즘 개발에 활용될 것으로 추정된다.

본 논고는 이러한 미래의 문제를 해결 할 수 있는 혁신적인 기술을 소개하였으며, 앞으로 그 적용분야의 응용이 활발히 이루어지고 총체적인 작업 효율 증대와 미래 사회의 안전을 구축하는데 새로운 발전 동력이 되길 바란다.

참고 문헌

- 1) Andrey Gadyuchko, Magnetic Precision Measurement for Electromagnetic Actuators
- 2) Andrey Gadyuchko, Magnetic Measurement - new Ways of Functional Testing
- 3) MagHyst technology(기술 소개자료)

[저자 소개]

장달식

E-mail : kairosjang@dasung.co.kr

Tel : 055-371-9775

1997년 독일 Aachen 대학교 기계공학과 박사. 30년간 대우 - 두산 연구소 근무(상무). 2018년~현재 대성나찌유압공업 대표이사(CEO). 겸) 대성기계(소주)유한



공사 이사장(董事長). (사)기독교대학인회(ESF) 이사장. 전자비례 감압밸브, 건설기계용 전자 유압 시스템, 피스톤 펌프 및 모터, MCV, 지게차용 브레이크 밸브 및 미션 컨트롤밸브 등 개발/연구에 종사. 유공압건설기계학회 부회장, 시인, 오페라 작곡가, 공학박사(Dr.-Ing.)

유승진

E-mail : seungjinyoo@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7063

2007년 서울대학교 기계항공공학부 박사, 현재 한국기계연구원 선임연구원, 동역학제어, 유압시스템제어, 전기동력시스템 제어, 임베디드시스템, 머신러닝, 산업



산업기계 자율작업 기술 분야 연구에 종사

박종우

E-mail : 110pjw@daesung.co.kr

Tel : 055-371-9700

2015년~현재 대성나찌유압공업 1996년 2월 경남대학교 기계공학과 학사 졸업. 1996년~2000년 농기용 유압밸브 국산화 개발. 2002년~2007년 K1 KRV용 비



제어 MCV 개발. 2013년~2015년 천무 탄약운반차용 비례제어 MCV 개발. 2017년~2019년 농업기계 전자제어 품질고도화 전자유압비례제어밸브 개발.