

# 인공지능을 이용한 유압 솔레노이드 밸브 고장진단 Fault Diagnosis of Hydraulic Solenoid Valves using Artificial Intelligence

유승진, 장달식, 박종우, 이재경

Seungjin Yoo, Dal Sik Jang, Jong Woo Park and Jai-Kyung Lee

## 1. 서 론

인구 고령화와 숙련 작업자 부족문제에 대응하기 위해 건설기계 및 농기계의 전자화·자동화는 시장의 메가트렌드로 정립되었다. 주요 구동장치가 유압시스템에 의해 제어되는 건설기계 및 농기계의 자동화 개발에 있어 유압 솔레노이드 밸브는 이를 구현하기 위한 근간이 되는 핵심 요소 부품이다.

유압 솔레노이드 밸브는 코일 전류 크기에 비례하는 전자기력에 의해 열림량이 조절되는 밸브로서 건설기계와 농기계의 전자화·자동화 추세에 따라 꾸준히 수요가 증가하고 있으며 특히 신뢰성 확보에 대한 중요성이 더욱 더 증가하고 있다.

종래 유압 솔레노이드 밸브의 신뢰성 시험은 유압 파워팩과 압력센서, 밸브제어장치가 구비된 테스트 벤치에서 이루어지며 압력제어성능 (히스테리시스 및 선형성), 누유발생 여부, 제어전압별 동작특성등을 확인하여 수행된다.

독일 Ilmenauer Mechatronik 사에서는 유압솔레노이드 밸브의 제어 전류와 전압신호만을 이용하여 밸브의 제조결함 및 성능열화를 신속하게 검출할 수 있는 비파괴 검사 장비를 출시하였다. (상표명: MagHyst) 해당 검사장비는 솔레노이드 코어의 자기적 비선형성과 히스테리시스 특성, 아마추어 변위에 따라 자기저항이 변동되는 특성을 이용하여 밸브의 상태를 진단한다<sup>1-2)</sup>.

특히, 솔레노이드 밸브의 전류 및 전압으로부터 쇄교자속을 추정하여, 전류 - 쇄교 자속의 특성곡선을 도식화 하여 이로부터 밸브의 상태진단을 지원하는 것을 특징으로 한다.

독일 Ilmenauer Mechatronik사의 밸브 상태감시 모듈은 생산라인에서 밸브의 품질을 검사하기 위한 검사모듈의 형태와 밸브 제어장치에 탑재되어 실시간 상태감시를 지원하는 임베디드 제품의 형태로 공급되고 있다.

이러한 비파괴 검사장비를 밸브 생산라인에 도입

하면 신속한 검사 속도로 인하여 생산된 제품의 준수검사를 용이하게 수행할 수 있으며, 조기에 제조결함뿐 아니라 결함유형을 검출할 수 있으므로 밸브의 품질과 생산성을 크게 높일 수 있다.

또한 건설기계와 농기계에 적용 시, 기존 제어장치의 소프트웨어 업그레이드만으로 고장진단 기능구현이 가능하므로 적은비용으로 고장진단 기능을 구현할 수 있기 때문에 전자유압시스템의 신뢰성 및 안전성 향상 요구에 현실적으로 대응 가능한 유망기술이다.

그러나 밸브의 전류-쇄교자속 특성곡선은 밸브의 설계특성에 따라 고유한 형태를 가지고 있으므로 이로부터 밸브의 고장여부와 고장의 유형을 판단하기 위해서는 밸브 제품에 따라 숙련된 엔지니어를 통한 별도의 튜닝 과정이 요구된다.

특히 다양한 고장원인에 대해 전류-쇄교자속 특성을 분석하여 고장을 정확히 판별하기 위해서는 많은 시험결과를 분석하여 고장을 분류할 수 있는 적절한 기준을 찾아내는 과정이 필요할 것이다.

본 연구에서는 인공지능경망을 이용하여 전류-쇄교자속 특성을 분석하여 밸브의 고장여부 뿐만아니라 고장의 유형을 정확하게 검출할 수 있는 방법을 제안하였다.

제안된 고장진단 방법은 전류-쇄교 자속 곡선을 입력 받아 1차원 CNN 모델로 구성된 다중클래스 분류 모델을 통해 고장유형을 판단하도록 구성하였고 밸브의 제조과정 및 필드에서 발생하는 대표적인 고장 7가지를 구현한 시료용 밸브를 이용하여 머신러닝을 통해 학습시켰다.

또한 진단데이터를 체계적으로 관리하고 새롭게 추가되는 고장유형과 고장정도에 따른 전류-쇄교 자속 특성 변화를 지속적으로 반영하여 진단 정확도를 업그레이드 할 수 있는 진단데이터 통합관리 소프트웨어를 개발하였다.

본 기고문에서는 한국기계연구원과 대성나찌유압공업(주)에서 공동개발한 인공지능을 이용한 유압 솔레노이드 밸브 고장진단 시스템을 소개한다.

## 2. 진단 데이터 수집 시스템

### 2.1 시료용 밸브

고장데이터 수집을 위한 유압 솔레노이드 밸브 시료는 방향제어 밸브 2종과 비례제어 밸브 1종으로 선정하였으며 각각 20 set 씩 정상품 및 고장품을 제작하였다.

Table 1 Hydraulic solenoid valves

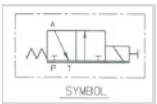

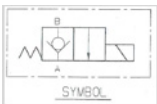

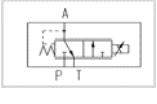

밸브 사양	시료 제작
기능 : 방향제어 구동전압 : 12V 최대전류 : 1.2A 유량 : 4 lpm 	
기능 : 방향제어 구동전압 : 12V 최대전류 : 1.6A 유량 : 20 lpm 	
기능 : 비례제어 구동전압 : 12V 최대전류 : 1.2A 유량 : 20 lpm 	

Table 2 Failure types

시료 번호	고장 유형
1 ~ 6	정상품
7, 8	Coil 불량
9, 10	Spring 불량
11, 12	Spring 누락
13, 14	상단부 오염
15, 16	가동자 철심 하단부 고착
17, 18	가동자 철심 상단부 고착
19, 20	마찰 과다

유압 솔레노이드 밸브의 고장유형은 코일불량, 스프링불량, 스프링누락, 상단부오염물질 퇴적, 가동자 철심 하단부 고착, 가동자 철심 상단부 고착, 습동저항 과다로 밸브의 제조과정 및 필드에서 발생하는 대표적인 고장유형 7종으로 정의하였다.

### 2.2 밸브 제어 및 데이터 수집 장치

유압솔레노이드 밸브의 진단을 위해서 솔레노이드 코일에 최대전류가 흐를 때 까지 구동전압을 인가하고, 최대 전류에 도달하면 전원을 차단하도록 하였다<sup>3,4)</sup>.

이를 위해 마이크로컨트롤러 (TI사의 TMS320F28335) 가 탑재된 범용 개발보드와 MOSFET 기반의 PWM 구동 드라이버, 12Vdc 와 5Vdc SMPS를 통합하여 제어기를 제작 하였으며 션트저항을 통하여 코일의 전류를 전압신호로 변환하여 데이터 수집장치에서 측정할 수 있도록 시스템을 구축하였다.

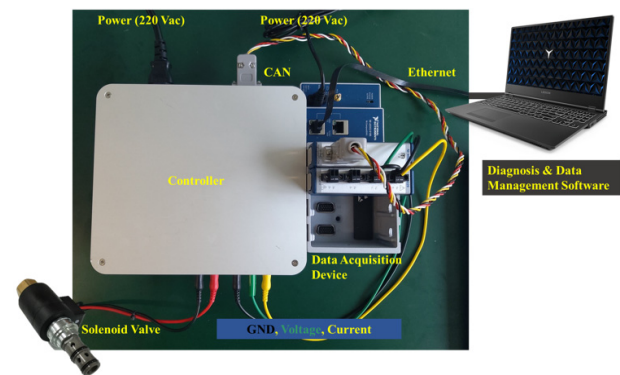


Fig. 1 Valve controller and DAQ system

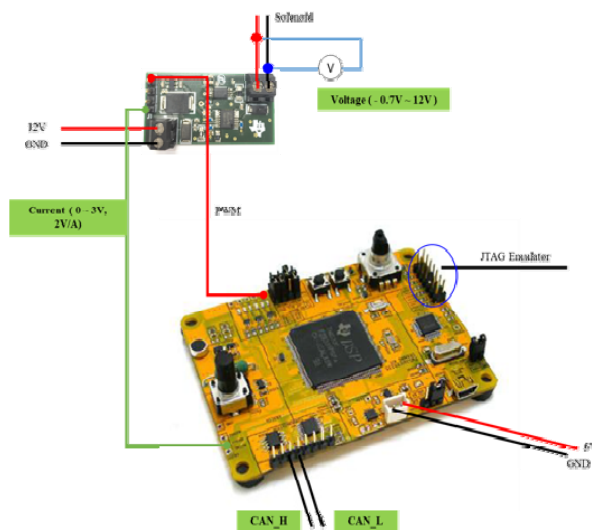


Fig. 2 PWM drive and microcontroller for valve controller

밸브 제어기는 데이터 수집장치와 CAN 통신으로 인터페이스 하였으며 밸브의 최대전류 설정치와 측정명령을 입력받고 데이터 수집장치에 측정상태를 전달하도록 통신프로토콜을 설계하였다.

진단 데이터 수집용 DAQ 장비는 National Instrument 사의 cDAQ 시리즈 제품을 적용하였으며, CAN 통신 모듈과 차동전압 측정모듈을 통합하여 구성하였다.

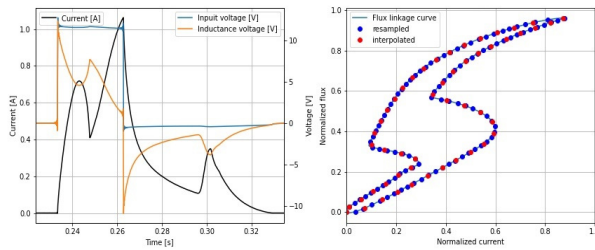
개발된 밸브 시료, 밸브 제어기 및 DAQ 시스템을 이용하여 진단 데이터를 수집하였으며 밸브 3종에 대하여 각각 20 set 수량으로 제작된 시료를 이용하여 시료별로 5회씩 반복측정을 하여 총 100 set의 진단 데이터 (labeled data set)를 확보하였다.

유압솔레노이드 밸브 코일의 전압방정식은 식 (1)-(2)로 정의된다. 코일 전류( $i$ )와 전압신호( $u$ )를 이용하여 코일의 저항 ( $R$ ) 및 쇠교자속( $\psi$ )을 방정식 (3)-(4)를 통해 도출하였다.

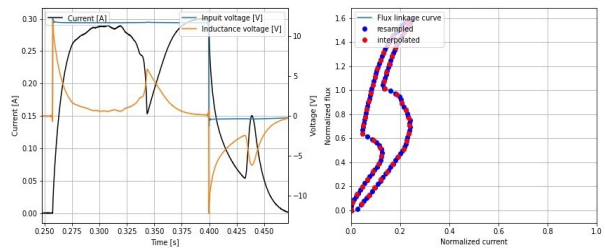
$$\frac{d\psi}{dt} + iR = u \tag{1}$$

$$\frac{d\psi(x, i)}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dt} \tag{2}$$

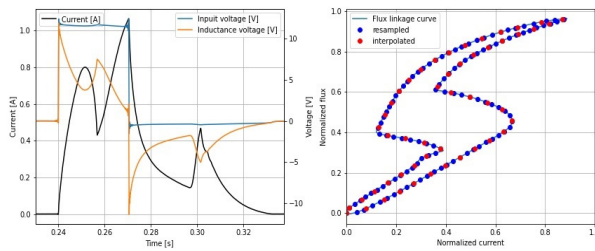
$$R = \frac{\int_0^T u dt}{\int_0^T i dt} \tag{3}$$



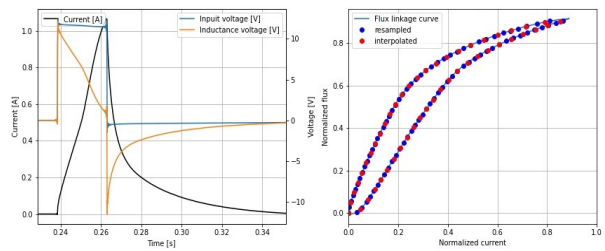
(a) 정상품



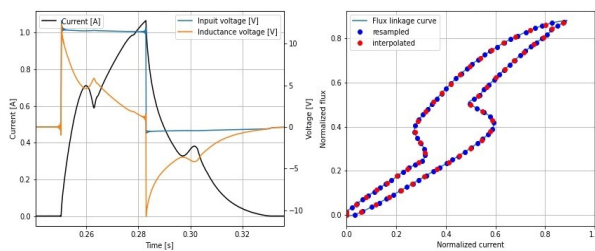
(b) Coil 불량



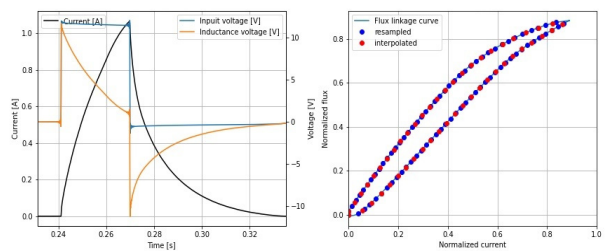
(c) Spring 불량



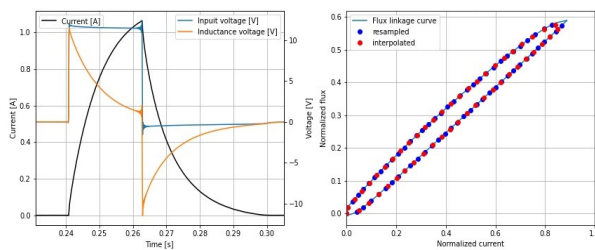
(d) Spring 누락



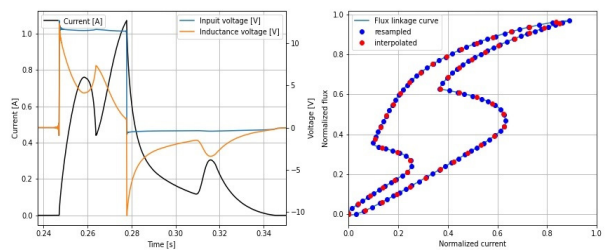
(e) 상단부 오염



(f) 가동자 철심 하단부 고착



(g) 가동자 철심 상단부 고착



(h) 마찰 과다

Fig. 3 Measurement result for sample valves

$$\psi(t) = \int_0^t u - iR \, d\tau \quad (4)$$

Fig. 3은 방향제어 밸브의 정상품 및 고장품 7종에 대한 시료의 측정결과를 나타낸다.

### 3. 인공지능을 이용한 고장진단

슬레노이드 밸브의 전류-쇄교자속 선도의 형상을 이용하여 고장진단을 수행하기 위해 전류와 쇄교자속을 각각의 최대 측정치로 정규화 시킨 후, 50개의 등간격 point를 추출하여 인공신경망의 입력데이터로 활용하였다. ( Fig. 4에서 빨간 점 )

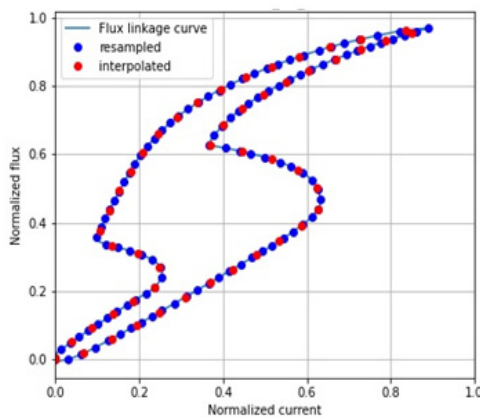


Fig. 4 Input data of fault diagnosis model

인공신경망 모델은 1차원 CNN (Convolutional Neural Network) 모델과 FCN (Fully Connected Network)을 적용하여 구성하였으며, 출력단에 softmax 함수를 적용한 다중클래스 분류 모델로 설계하였다<sup>5)</sup>.

인공신경망 모델의 출력은 해당 밸브에 기 정의된 고장이 발생한 확률을 나타내며, 가장 큰 확률을 나타내는 고장모드를 최종 진단결과로 출력하도록 하였다.

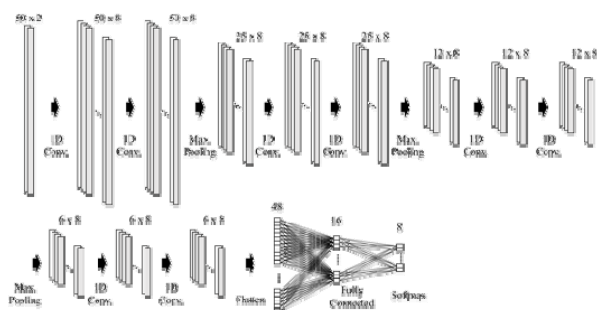


Fig. 5 AI based fault diagnosis model

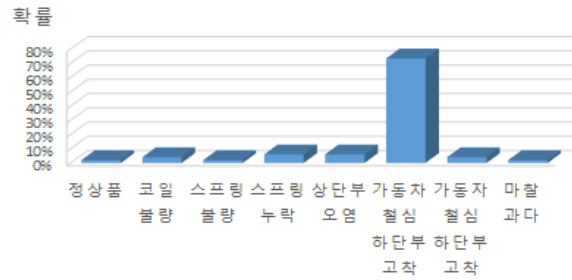


Fig. 6 Output of fault diagnosis model

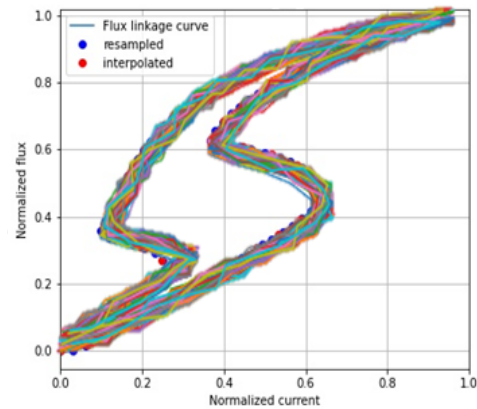


Fig. 7 Data augmentation for model training

인공신경망 모델의 학습을 위해 유압슬레노이드 밸브 시료로부터 추출된 100 set의 데이터를 이용하였으며, 5% 수준의 random noise를 추가 하여 학습데이터의 다양성을 보완하였다.

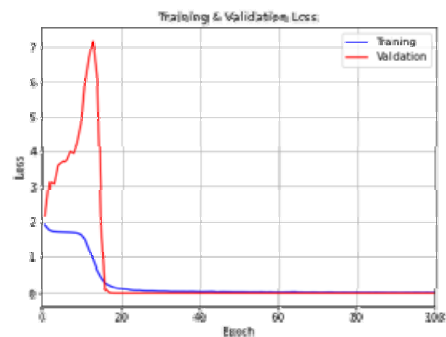
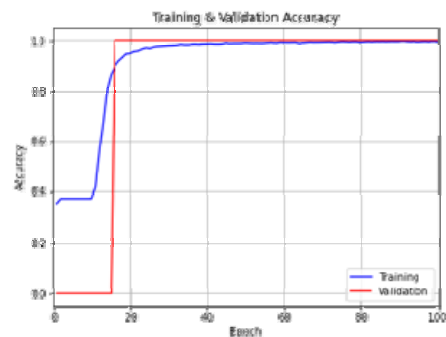


Fig. 8 Training result

이와 같은 절차를 통하여 유압솔레노이드 밸브 3 종에 대해 각각 고장진단 알고리즘을 도출하였으며, 제작된 샘플에 대해 진단정확도 100%를 갖도록 튜닝하여 초기 진단알고리즘으로 활용할 수 있도록 하였다.

인공신경망 기반의 고장진단 알고리즘은 Python 기반의 머신러닝 프로그램을 통해 학습될 수 있도록 소프트웨어를 개발하였으며, 솔레노이드 밸브 생산 현장에서 진단데이터가 축적되면 이를 활용하여 진단모델의 정확도를 높일 수 있도록 활용가능하도록 설계하였다.

#### 4. 진단데이터 통합관리 소프트웨어

개발된 유압 솔레노이드 밸브 고장진단 시스템은 측정(Measurement) - 진단 (Diagnosis) - 분해검사 (Inspection) - 진단모델 업데이트 (Update model) 의 프로세스에 따라 운용되며, 현장의 밸브시험데이터가 축적될수록 머신러닝 기법을 통해 진단 정확도를 향상 시킬 수 있도록 개발하였다.

이러한 일련의 절차는 고장진단 데이터 통합관리 소프트웨어에서 모두 수행할 수 있도록 LabVIEW 응용 프로그램으로 개발하였다.

밸브 모델	고유번호	측정ID	저장값	머신러닝 진단 일시	진단 결과	확인 결과	검사 데이터 파일
LCS-021-2	10	1	7.55963			Spring 불량	LCS-021-2_10_1.csv
LCS-021-2	10	2	7.55452			Spring 불량	LCS-021-2_10_2.csv
LCS-021-2	10	3	7.55426			Spring 불량	LCS-021-2_10_3.csv
LCS-021-2	10	4	7.55466			Spring 불량	LCS-021-2_10_4.csv
LCS-021-2	10	5	7.55403			Spring 불량	LCS-021-2_10_5.csv
LCS-021-2	11	1	7.58481			구상부용 누락	LCS-021-2_11_1.csv
LCS-021-2	11	2	7.52691			구상부용 누락	LCS-021-2_11_2.csv
LCS-021-2	11	3	7.52731			구상부용 누락	LCS-021-2_11_3.csv
LCS-021-2	11	4	7.52881			구상부용 누락	LCS-021-2_11_4.csv
LCS-021-2	11	5	7.52972			구상부용 누락	LCS-021-2_11_5.csv
LCS-021-2	12	1	7.58748			구상부용 누락	LCS-021-2_12_1.csv
LCS-021-2	12	2	7.54572			구상부용 누락	LCS-021-2_12_2.csv
LCS-021-2	12	3	7.54400			구상부용 누락	LCS-021-2_12_3.csv
LCS-021-2	12	4	7.54514			구상부용 누락	LCS-021-2_12_4.csv
LCS-021-2	12	5	7.54494			구상부용 누락	LCS-021-2_12_5.csv
LCS-021-2	13	1	7.54821			편자기 상단 오명	LCS-021-2_13_1.csv
LCS-021-2	13	2	7.53749			편자기 상단 오명	LCS-021-2_13_2.csv
LCS-021-2	13	3	7.53780			편자기 상단 오명	LCS-021-2_13_3.csv
LCS-021-2	13	4	7.54054			편자기 상단 오명	LCS-021-2_13_4.csv

Fig. 9 Database for diagnostic data management

데이터베이스는 밸브모델명, 고유번호, 측정ID, 저장값, 진단결과 및 분해확인결과, 원본데이터파일 경로를 필드값으로 하여 관리되도록 하였다. (Fig. 9)

메인화면의 화면에서 측정버튼을 누르면 밸브의

기본정보와 최대전류 값들을 설정할 수 있도록 하였으며, 측정시작 버튼을 누르면 이러한 정보를 밸브제어기에 CAN 통신을 통해 전달하도록 하였다.

측정이 완료되면 데이터베이스의 새로운 열에 진단정보가 추가된다. 진단데이터는 CSV 포맷으로 저장되며 측정데이터 뿐 아니라 밸브시료의 기본정보도 함께 저장되도록 하였다.

진단버튼을 누르면 선택창이 생성되며 좌측에는 데이터베이스에 등록된 진단데이터 목록이 조회되며, 진단을 원하는 데이터를 선택하면 우측의 리스트에 등록 되도록 하였다.

진단데이터의 밸브 모델을 참조하여 진단모델을 선택한 후 확인을 누르면 Python 기반의 고장진단 프로그램이 호출이 되어 진단이 수행되며 그 결과는 메인화면의 데이터베이스에 업데이트 되도록 하였다.

Table 3 Operating process of the fault diagnosis system

단계	수행 내용
Measurement	<ul style="list-style-type: none"> <li>솔레노이드밸브에 최대전류가 흐를 때까지 구동 전압을 인가하고 최대전류 도달 시 전압차단</li> <li>초기 진단모델은 밸브 고장을 인위적으로 구현한 시료를 이용하여 학습</li> </ul>
Diagnosis	<ul style="list-style-type: none"> <li>솔레노이드 밸브 모델별로 학습된 고장진단 알고리즘을 선택</li> <li>솔레노이드 밸브의 전압 - 쇄교자속 특성곡선을 이용하여 고장 검출</li> </ul>
Inspection	<ul style="list-style-type: none"> <li>필요시 밸브를 분해하여 고장 유형을 확인후 데이터베이스에 추가</li> <li>분해확인이 완료된 시료의 진단데이터는 향후 진단모델의 업데이트를 위한 데이터셋으로 활용</li> </ul>
Update model	<ul style="list-style-type: none"> <li>축적된 고장데이터를 이용, 인공신경망 기반의 진단모델을 머신러닝을 통해 업데이트</li> <li>신규 고장모드 추가 및 진단 정확도 향상가능</li> </ul>

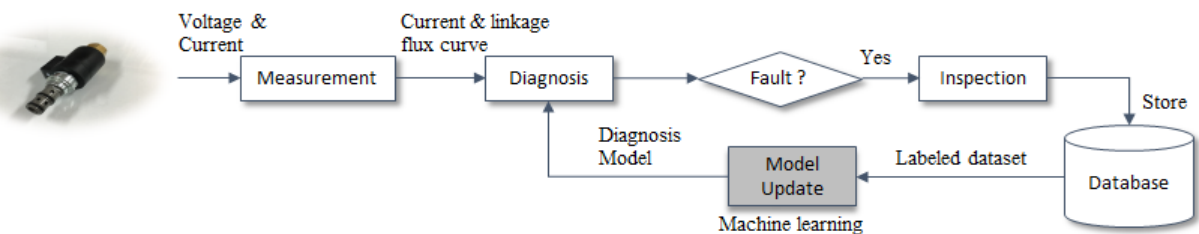


Fig. 10 Operating process of the fault diagnosis system

고품질밸브를 실제 분해하여 확인한 결과는 분해확인 버튼을 눌러 정보를 입력할 수 있도록 하였으며, 이와 같이 분해확인을 마친 검사결과는 추후 고장진단 모델의 업데이트(머신러닝)를 위한 기초데이터로 활용될 수 있도록 하였다.

개발된 고장진단 시스템의 운용 프로세스 및 각단계의 세부 수행내용은 Fig. 10 과 Table 3 에 요약하였다.

### 5. 결론

본 기고문에서는 한국기계연구원과 대성나찌유압공업(주)에서 공동개발한 인공지능 기반의 유압 솔레노이드 밸브 고장진단 시스템을 소개하였다.

개발된 고장진단 시스템은 솔레노이드 밸브의 다양한 제조결함 및 성능열화를 검출할 수 있는 기술로서 솔레노이드 밸브의 품질검사 시스템에 도입 시 솔레노이드 밸브의 생산성 및 품질을 향상 시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

향후에는 인공지능 기반의 밸브 진단 알고리즘의 최적화 및 임베디드 소프트웨어 개발, 진단 장비의 소형화 개발을 위한 후속 연구를 수행할 계획이다.

### 참고 문헌

- 1) Gadyuchko, A., Kireev, V. and Rosenbaum, S., "Magnetic Precision Measurement for Electromagnetic Actuators", In Proceedings of the IKMT 2015; 10. ETG/GMM-Symposium Innovative small Drives and Micro-Motor Systems, Cologne, Germany, September 2015
- 2) Gadyuchko, A. and Rosenbaum, S., "Nondestructive quality inspection of solenoid valves" 10th International Fluid Power Conference, Dresden 2016
- 3) 장달식, 유승진, 박종우, "유압 솔레노이드 밸브의 센서리스 고장진단 시스템 개발" 드라이브·컨트롤 제 18권 1호, 2021년 3월
- 4) 장달식, "센서가 필요 없는 예측 시스템" 드라이브·컨트롤 제 16권 3호, 2019년 9월

- 5) J. Brownlee, Deep Learning for Time Series Forecasting - Predict the Future with MLPs, CNNs and LSTMs in Python, Edition v1.7, Machine Learning Mastery, 2020.

### [저자 소개]



**유승진**  
E-mail : seungjinyoo@kimm.re.kr  
Tel : \*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\*

2007년 서울대학교 기계항공공학부 박사, 현재 한국기계연구원 책임연구원, 동역학제어, 유압시스템제어, 전기동력시스템 제어, 임베디드시스템, 머신러닝, 산업기계 자율작업 기술 분야 연구에 종사



**장달식**  
E-mail : kairosjang@dasung.co.kr  
Tel : \*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\*

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



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



**이재경**  
E-mail : jkleece@kimm.re.kr  
Tel : 042-868-7645

2008년 충남대학교 전기정보통신공학부 박사. 현재 한국기계연구원 책임연구원. 산업기계 모니터링 및 고장진단, 인공지능, 빅데이터 처리/분석 분야 연구에 종사