

소방펌프의 안정적 운영을 위한 하드웨어 및 모니터링 소프트웨어 개발

구본휴* · 김두현**† · 김성철***

Development of Hardware and Monitoring Software for Stable Operation of Fire Pumps

Bonhyu Ku* · Doo-Hyun Kim**† · Sung-Chul Kim***

Corresponding Author

Doohyun Kim

Tel : +82-43-223-3650

E-mail : dhk@chungbuk.ac.kr

Received : June 20, 2022

Revised : July 17, 2022

Accepted : August 5, 2022

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : This study is aimed to develop a safety diagnosis system for fire pumps that detects normal and abnormal signals for the stable operation of the system. Hence, the following activities were carried out: first, a threshold value was identified for the normal operation and six abnormal operations (adherence of impeller, absence of water source, separation of pump and motor, run-stop operation, air inflow into the casing, and reverse-phase loss of the power line) reflecting changes in the current, flow and pressure of fire pumps; secondly, based on the identified signals, an algorithm capable of detecting three abnormal signals was developed and in terms of hardware, a current, pressure and flow sensor suitable for the analogue input values of NI-6009 was designed and installed. This combination of the hardware and software is applicable as a diagnosis system to ensure the stable operation of fire pumps.

Key Words : fire pump, current analysis of fire pump motor, fire pump detection, supervisory control of fire pump

1. 서론

화재 시 정상적인 소화수 방출을 위해서는 소방펌프가 안정적으로 작동되어야 한다¹⁾. 소방펌프는 건축물 생애주기 동안 화재가 발생하지 않는 이상 가동하지 않으므로 정상 동작에 대한 신뢰가 낮다. 실제로 특정 소방대상물의 종합정밀점검에서 소방펌프가 동작하지 않는 사례가 발견되고 있다. 이런 사례들은 다양하지만, 고착이나 수원이 없는 경우 또는 결상 운전과 무부하 운전 및 단속 운전 등으로 구분할 수 있다²⁾. 위의 경우 정상적인 전류값이 아닌 비정상적인 전류값을 나타낸다. 특히 펌프 임펠러의 고착은 전동기의 회전을 방해함으로 전류값이 정상인 경우보다 600% 이상의 전류값이 측정된다. 이런 경우에는 테스트 중에도 전동기 과열로 인한 소손 현상이 발생하기도 한다. 또한, 펌프 케이싱 내부에 공기가 유입된 상태, 펌프흡입 측

밸브가 막힌 상태, 역상 운전상태의 경우에는 유량과 압력계에 정상과 다른 신호가 발견되고 있다. 그동안 펌프의 고장을 확인할 수 있는 진단시스템에 관한 많은 연구가 이루어졌고 각 산업 분야에 유용한 고장 예지 시스템이 개발되었다³⁾. 그러나, 대부분의 고장진단 시스템은 평상시 가동하고 있는 모터를 대상으로 운전 중의 전류, 전압, 주파수, 진동, 온도 등을 수집하고 과거에 축적된 데이터와 비교 분석하여 고장 예지 또는 고장진단을 하는 방식^{4,5)}으로써 평상시 정지해 있는 소방펌프에는 적용할 수 없는 점이 문제였다. 이에 평상시 정지 상태로 유지되는 소방펌프를 항상 최적의 상태로 유지하는 시스템 개발이 필요하다.

소방펌프의 안정적 운영을 위한 시스템 개발은 먼저 실험을 통하여 정상상태와 이상 상태의 신호를 도출하여야 하며, 도출된 신호를 바탕으로 전류, 유량 및 압력에 대한 알고리즘을 구축하여야 한다. 최종적으로

* (주)충북소방 대표 (Chungbuk Fire Protection Professional Engineer's Office)

** 충북대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

*** 충북대학교 안전공학과 초빙교수 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

센서 기반 하드웨어와 알고리즘이 적용된 모니터링 소프트웨어를 개발하면 체계적이고 안정적인 소방펌프 관리가 가능하다⁶⁻⁸⁾.

본 연구는 상시 대기 상태로 유지하는 소방펌프의 특성에 적합한 운영 시스템을 구축하여 화재 발생 시 소방펌프가 정상적으로 동작함으로써 원활한 소화 활동을 하는 것이 목적이다. 이를 위해 소방펌프 시스템에서 발생 가능한 전류, 유량 및 압력에 대한 정상 및 비정상 신호를 도출하고, 도출된 신호를 바탕으로 소방펌프의 안정적 운용 알고리즘을 개발하여 하드웨어와 알고리즘이 적용된 모니터링 소프트웨어를 개발하고자 한다.

2. 소화 펌프의 정상과 이상 신호

2.1. 이론적 배경

Fig. 1은 펌프의 유량(Q)과 양정(H), 동력(P) 및 효율(η)의 관계를 나타내었다. 원심펌프의 특성곡선에서 유량(Q)이 증가하면 양정(H)은 감소하고, 유량(Q)의 증가에 따른 동력(P)은 완만한 우상향을 나타낸다⁹⁾. A는 펌프의 운전 점(Duty point)을 나타내었다¹⁰⁾.

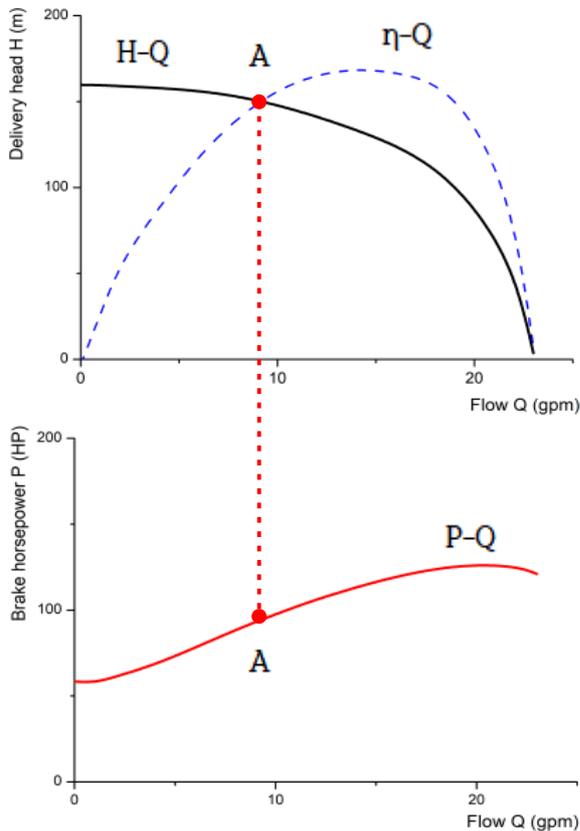


Fig. 1. Characteristic curve of pump.

2.1.1. 유량측정

펌프의 유량측정은 전자식 유량계를 사용하며, 측정 원리는 유량 센서가 도전성 유체가 흐르는 측정관의 위아래에 설치한 코일에 여자전류를 가하여 자계를 생성하고 측정관의 안쪽에 전극을 배치하여 전극이 직접 유체와 접촉하여 발생하는 기전력을 측정하는 방식이다. 식 (1) ~ (3)은 기전력과 체적유량을 나타내었다¹¹⁾.

$$U = K \cdot B \cdot D \cdot v \quad (1)$$

$$Q = A \cdot v = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot v \quad (2)$$

$$U = \frac{4}{(\pi \cdot D)} \cdot K \cdot B \cdot Q \quad (3)$$

여기서, U 는 기전력(ν), K 는 비례상수, B 는 자속밀도(Wb/m^2), D 는 파이프 지름(m), v 는 평균유속(m/s), Q 는 체적유량(m^3/s)을 의미한다.

2.2. 실험 장치

실험 장치는 Fig. 2와 같이 소화수조, 소방펌프, 3상 유도전동기, 전기제어 패널 등으로 구성하였다. 소방펌프의 정격 양정은 34 m, 정격유량은 0.13 m^3/min 인 4단 별류트펌프로 선정하였고 전동기는 전압 3상 380V, 정격출력 3.7 kW, 주파수 60 Hz, 분당 회전수 1750 rpm의 유도전동기를 설치하였다.



Fig. 2. Experiment setups of fire pumps.

2.3. 실험방법

펌프 성능 실험은 크게 3가지로 나누어 실험하였다. 첫 번째는 정상 운전상태에서 측정한 유량, 압력, 전류 값이고, 두 번째는 펌프 가동 시 발생하는 전류값의 변동이 정상과 현격히 다른 경우의 고장 유형을 Case 1, Case 2로 설정하고 고장상태를 실제상황과 같게 만들

어 전류값을 측정하였다. 세 번째는 정상 운전상태와 전류값이 비슷한 경우의 고장 유형을 Case 3으로 설정하고 고장상태를 실제상황과 같게 만들어 전류값과 더불어 유량 및 압력 측정을 병행하여 실시하였다.

2.3.1. 정상상태

정상상태는 프라이밍 워터를 채우고 펌프의 흡입 측 밸브를 개방한 상태에서 펌프를 기동하고 성능시험 배관의 유량조절 밸브를 개방 및 폐쇄를 반복하며 체절 압력, 정격유량에서의 압력, 최대유량에서의 압력을 측정하였다.

2.3.2. Case 1

Case 1 고장 유형은 펌프 운전 전류값 측정으로 고장을 판단할 수 있는 경우의 첫 번째로 전원 이상, 펌프의 단속 운전상태, 펌프와 모터 축의 고착, 전원 결상 상태의 운전이 해당한다. 전원 이상은 모터 동력 제어반의 배선용 차단기를 차단한 상태에서 펌프를 가동하여 전류를 측정하였고, 펌프의 단속 운전상태는 펌프를 1초에 1회 기동 정지를 반복하여 출력되는 전류값을 측정하였으며, 펌프와 모터 축의 고착은 바이스를 이용하여 펌프와 모터 사이의 연결축을 기계적으로 고정된 상태로 하고 모터의 운전전류를 측정하였다. 전원 결상 상태의 은 모터 전력 제어 패널의 모터 전원 중 R상을 분리한 상태로 측정하였다.

2.3.3. Case 2

Case 2 고장 유형은 펌프 운전 전류값 측정으로 고장을 판단할 수 있는 경우의 두 번째로 펌프와 모터의 분리 상태의 운전, 수원이 없는 상태에서의 운전이 해당한다. 펌프와 모터의 분리는 펌프와 모터를 연결하는 커플링의 볼트와 너트를 분리하고 모터만 가동한 상태에서 전류값을 측정하였다. 수원이 없는 상태의 운전전류 측정은 수조의 소화수를 모두 방류하고 펌프 흡입 측 밸브와 성능시험 배관의 유량조절 밸브를 개방한 상태에서 펌프를 가동하고 측정하였다.

2.3.4. Case 3

Case 3 고장 유형은 펌프 운전 전류값이 정상상태의 전류값과 유사하여 전류값 만으로 고장을 판단할 수 없는 경우로 전동기 전원선의 역상 결선으로 역방향으로 펌프가 회전하는 상태의 운전, 펌프에 공기가 유입된 상태의 운전, 펌프흡입 측이 막히어 수원을 원활하게 공급받지 못하는 상태의 운전이 해당하며, 각 유형에 따라 펌프와 모터를 실제 고장 상황과 같게 만들고

전류값과 더불어 유량, 압력을 측정하였다. 전동기 전원선의 역상 결선으로 운전하는 경우는 모터 전력 제어 패널의 전원 중 R상과 S상을 상호 교체한 상태에서 펌프를 기동하고 성능시험 배관을 이용하여 전류값, 유량, 압력을 측정하였다. 펌프에 공기가 유입된 상태는 펌프의 흡입 측 밸브를 폐쇄한 상태에서 펌프 내의 물을 모두 방류시킨 후 펌프흡입 측 밸브를 개방하고 펌프를 기동하며 이후 성능시험 배관을 이용하여 전류값, 유량, 압력을 측정하였다. 펌프흡입 측이 막힌 상태의 운전은 펌프흡입 측 밸브 및 성능시험 배관의 밸브를 개방한 후 펌프를 가동하고 펌프흡입 측 밸브를 폐쇄하면서 성능시험 배관의 전류값, 유량, 압력을 측정하였다.

2.4. 정상 신호 및 비정상 신호(Case 1~3)

정상 신호와 비정상 신호의 측정 결과는 Table 1과 같다. 정상상태의 운전전류는 5.06 ~ 6.9A, 압력은 0 ~ 0.47 MPa, 유량은 0 ~ 269 L/min으로 펌프 특성 성능 곡선과 유사한 성능을 확인하였다.

비정상 상태를 전류값으로 판단할 수 있는 경우는 정상상태의 운전전류 5.06 ~ 6.9 A에 부합되지 않는 값을 나타내는 경우로 다음과 같다.

비정상 신호 Case 1의 전원 차단 상태에서의 전류값은 0 A, 펌프의 단속 운전상태의 운전전류는 0 ~ 50 A로 측정되었다. 펌프와 모터 축이 고착된 상태에서 측정된 운전전류는 52.8 A 초과, 전원 결상 상태의 운전에서 운전전류는 45.15 A 초과로 측정되었다. Case 2의 펌프와 모터가 분리된 상태에서 측정된 전류값은 3.8 A 미만, 수원이 없는 경우 측정된 전류값은 4.1 A 미만

Table 1. Pumps' Current, flow rate and pressure values per operation status (3.7 kW Induction Motor)

Pump operation status	Current (A)	Pressure (MPa)	Flow rate (L/min)
Normal	5.06-6.9	0-0.47	0-269
Power supply abnormality	0	0	0
Case 1 Intermittent operation	0~50	-	-
Impeller fixed	> 52.8	0	0
1 phase power disconnection	> 45.15	-	-
Case 2 Disconnection pump and motor	< 3.8	0	0
Without water in the water tank	< 4.1	0	0
Power back-connected state	5.02~7.69	0~0.35	0~121
Case 3 Air flowing into the pump	4.28~4.62	0.14~0.38	0~50
Closed of pump suction side	4.12~7.23	0.01~0.05	0~273

으로 측정되었다. Case 3의 전동기 전원선의 역상 결선으로 역방향으로 펌프가 회전하는 상태의 운전전류는 5.02 ~ 7.69 A, 압력은 0 ~ 0.35 MPa, 유량은 0 ~ 121 L/min으로 측정되었다. 펌프에 공기가 유입된 상태의 운전전류는 4.28 ~ 4.62 A, 압력은 0.14 ~ 0.38 MPa, 유량은 0 ~ 50 L/min으로 측정되었다. 펌프흡입 측이 막힌 경우의 운전전류는 4.12 ~ 7.23 A, 압력은 0.01 ~ 0.05 MPa, 유량은 0 ~ 273 L/min으로 측정되었다.

3. 소화 펌프 하드웨어 및 모니터링 소프트웨어 설계

3.1. 소방펌프 알고리즘

소화 펌프 고장진단을 위하여 Table 1을 바탕으로 알고리즘을 개발하였다. Fig. 3의 알고리즘은 전류, 유량, 압력 신호를 분석하여 Case 1~3의 신호가 도출할 수 있도록 설계하였다. 먼저 소화 펌프를 가동하고 취득한 데이터를 데이터베이스에 저장하고 알고리즘에 따라 설정된 기준값과 비교하여 정상 또는 경고 신호를 모니터에 표기하는 단계로 구성하였다. 단일 센서

고장진단 알고리즘은 전류값으로 고장을 검출할 수 있는 경우의 유형을 진단하고, 복합 센서 고장진단 알고리즘은 정상상태와 같은 전류 분포에서 유량, 압력 센서의 데이터를 복합적으로 분석하여 진행하게 하였다.

3.2. 소방펌프 센서 및 신호 수집 하드웨어

소방펌프 하드웨어는 입력 센서와 센서에서 신호를 획득하는 신호 수집 장치(Daq, Data acquisition)로 구분된다.

입력 센서는 전류, 압력 및 유량 센서로 구분하며, 전류센서는 감지 종류, 감지 값의 크기와 가격 및 NI-Daq와의 호환성을 고려하였으며 최종적으로 전류값의 신뢰성을 분석하였다. 임펠러 고착의 경우 정상보다 600%나 높은 전류값을 측정하여야 하므로 1~200A의 측정이 가능한 CTL-24-TE를 선택하였다¹²⁾. Fig. 4는 CT의 외형 및 출력전압에 따른 출력 전류값을 나타내었다.

전자식 유량 센서는 측정범위 0.1~15 %, 정확도 0.5%, 출력 4~20 mA 기능의 KEI-1000 Series를 설치하

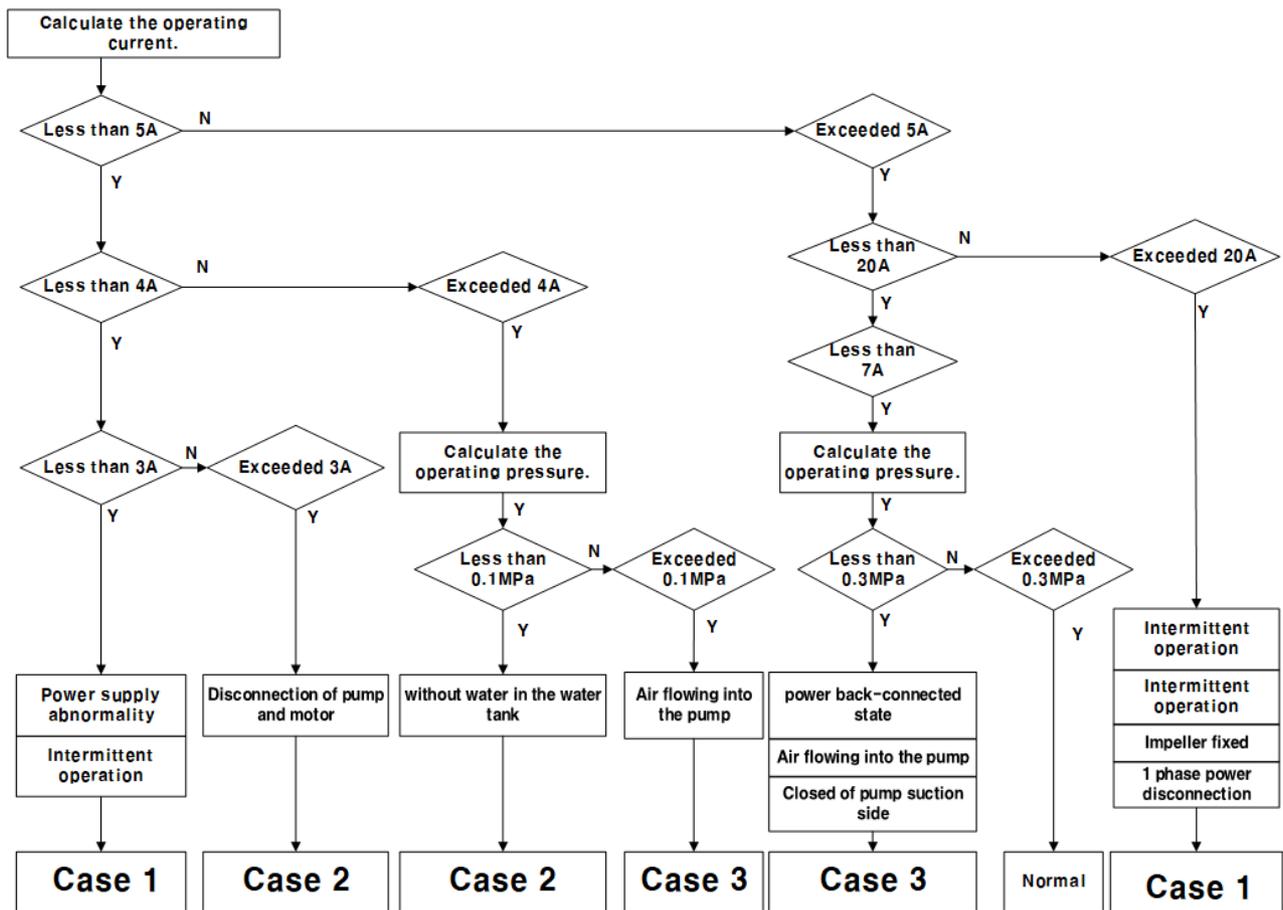


Fig. 3. Algorithm of fire pump.

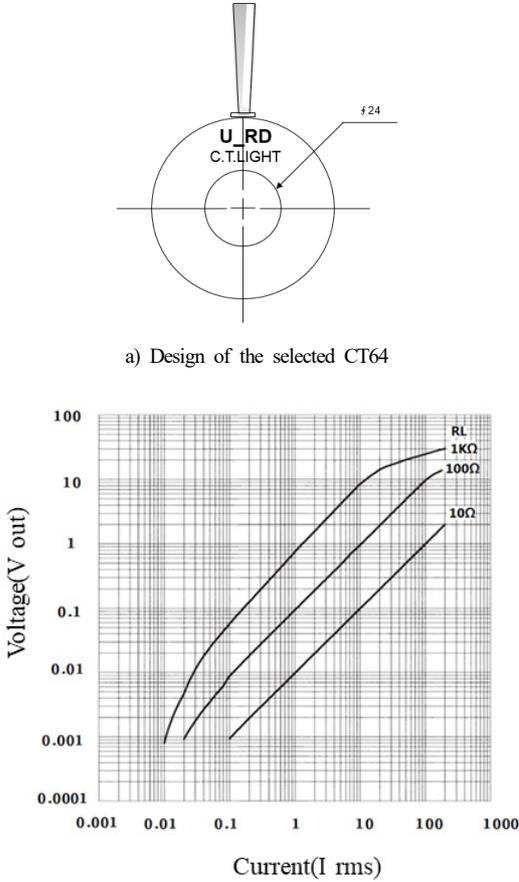


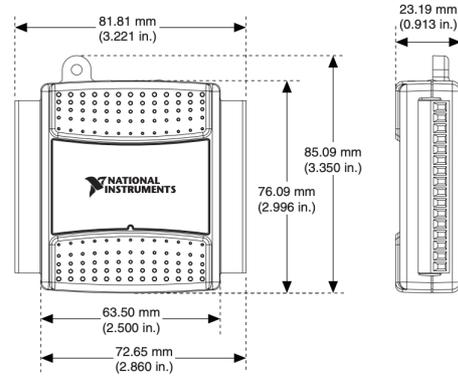
Fig. 4. CT sensor detecting current value.



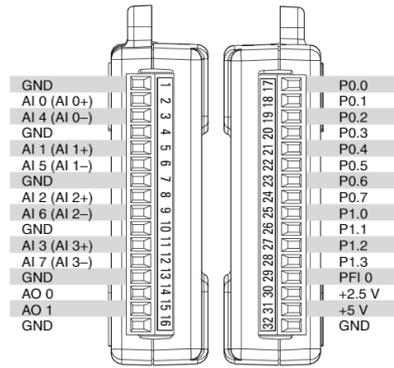
Fig. 5. Pressure sensor of PT-506.

였으며, 전자식 압력 센서는 NI-DAQ의 호환성을 고려하여 입력 전압은 DC 24 V, 출력전류는 4~20 mA, 측정 범위는 0~16 bar, Accuracy 0.5% 기능의 제품을 선정하였다. Fig. 5는 전자식 압력 센서를 나타내었다.

신호 수집 장치는 디지털 분해능을 고려하여 NI (National instrument)-6009(14 bit, ±10V)를 선정하였다. 4개의 차동 아날로그 신호 입력(AI) 채널과 2개의 아날로그 신호 출력(AO) 채널, 12개의 디지털 신호 입/출력(DIO) 채널 및 1개의 32 bit 카운터로 구성되어 있다. NI-6009의 4개의 차동 아날로그 신호 입력 채널을 연결하여 감지되는 과전류, 유량 및 압력 신호를 표본을



a) Design and size of NI-6009



b) Input and output port

Fig. 6. Data acquisition hardware(NI-6009) of fire pump.

뽑을 수 있다. 그 성능은 14 bit 디지털 분해능에 아날로그 신호 입력과 샘플비는 48 kS/s를 갖추고 있다. 또한, 타 기종의 데이터 수집 장치와 비교 시에도 가격 대비 높은 수행력과 상호 호환성을 갖고 있다. NI-6009는 ADC(analog to digital converter)와 모니터링 소프트웨어(monitoring software)의 연결 기능으로, 이것은 NI-6009 모듈에 입력 및 저장된 전류 데이터를 모니터링 소프트웨어의 모듈로 전달하는 기능을 가진다¹³⁾. Fig. 6. a)는 NI-6009의 외형도를, Fig. 6. b)는 아날로그 입력과 디지털 출력을 나타내었다.

3.3. 소방펌프 모니터링 소프트웨어

랩뷰¹⁴⁾로 구성된 사용자 인터페이스 화면은 프론트 패널과 블록다이어그램으로 구분된다. 프론트 패널에서는 입력 아이콘 및 출력 아이콘으로 구성하였다. 입력 아이콘(3개)으로 과전류, 압력, 유량은 미터기(meter)와 숫자 형(numeric)과 컨트롤을 이용하며, 출력 아이콘(3개)은 녹색(정상 신호)과 적색(이상 신호)의 원형 컨트롤을 이용하여 표현하였다. 입력과 출력 사이의 본 연구에서 개발된 소방펌프 알고리즘을 적용하였다.

4. 소방펌프의 하드웨어 및 모니터링 소프트웨어 검증

개발된 소방펌프의 하드웨어와 알고리즘이 적용된 모니터링 소프트웨어 검증을 실시하였다.

하드웨어 검증은 Fig. 2의 실험 장치에 전류, 압력 및 유량 센서들의 출력값을 분석하였다. 전류값은 hioki사의 전류계와 압력 값은 명성효다계기(주) 제품의 부르동관 압력계와 비교하였으며, 유량은 (주)삼성테크의 디지털 유량계와 비교하였다. Table 2와 같이 전류센서는 ±1의 오차, 압력은 ±0.01, 유량은 ±18, 오차가 나타났으며 소방펌프에 고장 감지 센서로는 모두 다 적합하였다.

모니터링 소프트웨어는 알고리즘의 적합성 분석으로 Case 1~3의 상태에서 Case마다 20회의 입력값에 대한 출력값의 타당성 검증을 하였다.

Case 1, Case 2, Case 3 모두 20회 정상 출력 확인 및 검증하였으며, Table 3은 Case 별로 정상 출력에 대한 값을 나타내었다.

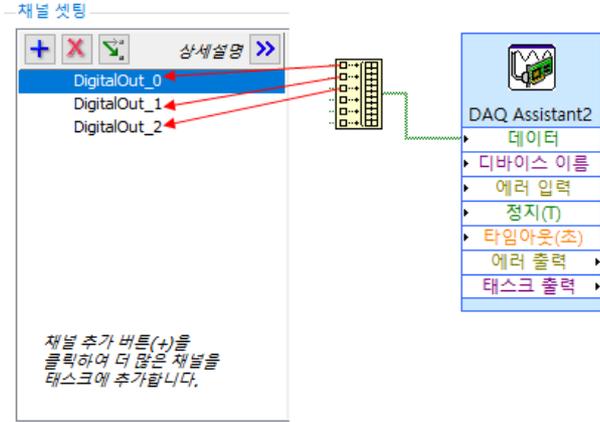


Fig. 7. Output part of monitoring software.

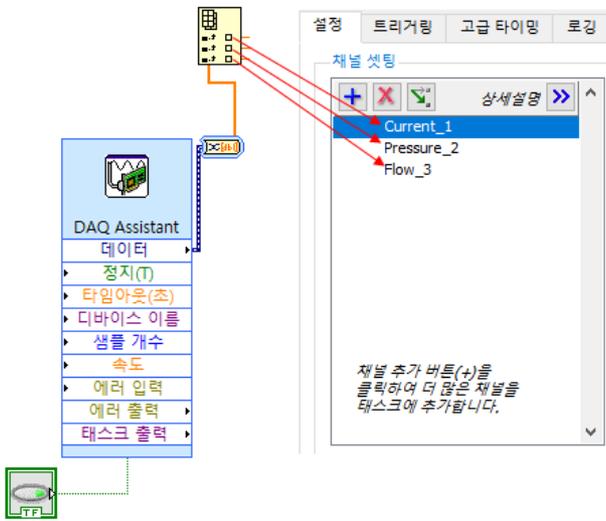


Fig. 8. Input part of monitoring software.

Fig. 7과 Fig. 8은 사용자 인터페이스의 입력 및 출력 모니터링 소프트웨어를 나타낸 것이다.

Table 2. Analysis of output and error for sensor signals

Sensors	Output	Error
Current(A)	0~60	±1
Pressure(MPa)	0~0.47	±0.01
Flow rate(L/min)	0~273	±18

Table 3. Number of normal and error signals by case

Case	Number of normal signals	Number of error signals
1	20	0
2	20	0
3	20	0

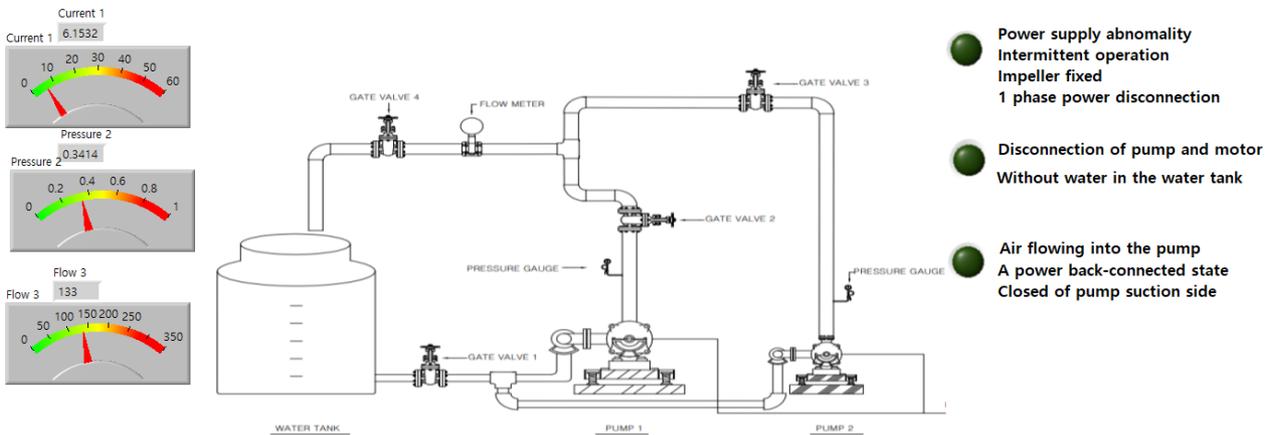
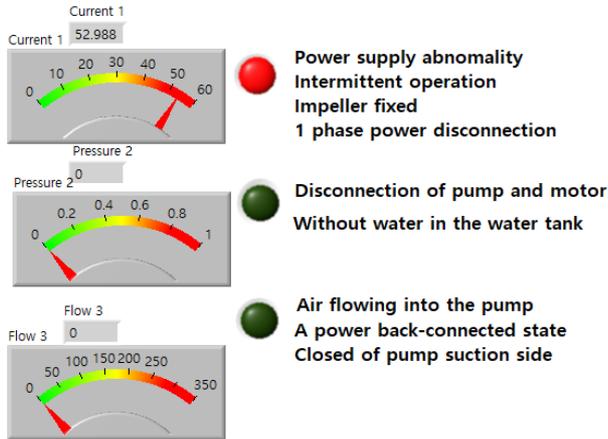
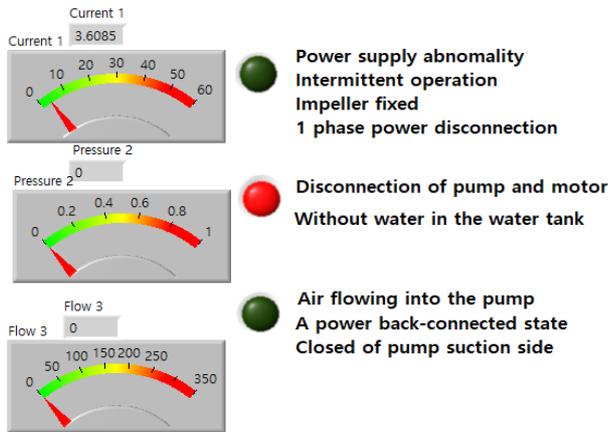


Fig. 9. Detecting(output part) for current, pressure, flow signals of normal state.

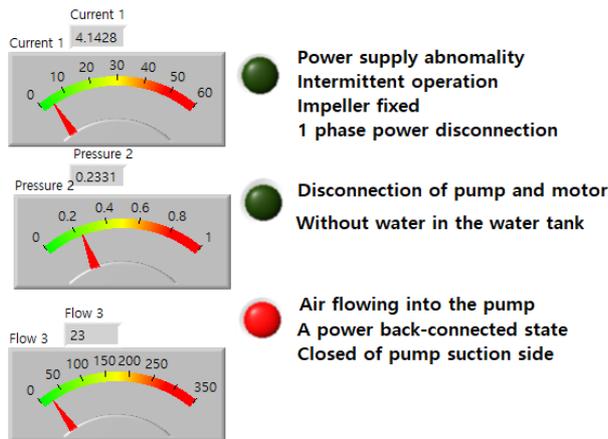
Fig. 9는 정상상태에서의 전류, 압력 및 유량에 대한 모니터 출력 화면이며, Fig. 10 a)~c)는 Case 1~3의 고장 상태별 진단 결과의 출력을 나타내었다.



a) Case 1



b) Case 2



c) Case 3

Fig. 10. Detecting(output part) for current, pressure, flow signals of abnormal states.

5. 결론

본 연구는 소방펌프에 대하여 전류, 유량 및 압력의 변화 등에 대하여 정상상태와 Case 3가지(이상 상태)에 대한 신호를 도출하였으며 이를 바탕으로 소방펌프의 이상을 검증할 수 있는 알고리즘과 이 알고리즘이 적용된 하드웨어와 모니터링 소프트웨어를 개발하였다. 구체적인 결론은 다음과 같다.

1. 정상상태의 운전전류는 5.06 ~ 6.9 A, 압력은 0 ~ 0.47 MPa, 유량은 0~269 L/min, 비정상 상태 Case 1은 전류값 0 ~ 50 A, 52.8 A 초과 및 45.15A 초과로, Case 2는 전류값 3.8 A 미만, 4.1 A 미만으로, Case 3은 전류 5.02 ~ 7.69 A일 때 압력은 0 ~ 0.35 MPa, 유량은 0~121 L/min으로, 전류값 4.28 ~ 4.62 A일 때 압력은 0.14 ~ 0.38 MPa, 유량은 0 ~ 50 L/min, 전류값 4.12 ~ 7.23 A 일 때 압력은 0.01 ~ 0.05 MPa, 유량은 0 ~ 273 L/min으로 각각의 기준값을 제시하였다.

2. 도출된 기준값을 바탕으로 전류, 압력 및 유량에 대한 알고리즘을 개발하였고, 이를 모니터링 소프트웨어에 적용하였다.

3. 하드웨어에서 전류센서는 $\pm 1A$, 압력은 $\pm 0.01 MPa$, 유량은 $\pm 18 L/min$ 의 오차가 나타났으며 소방펌프의 감지 센서로는 적합하였다. 모니터링 소프트웨어에서 Case 1, Case 2, Case 3 모두 20회 검증에서 정상 출력되었으며 정상 및 고장의 판단이 가능하였다.

4. 본 하드웨어와 모니터링 소프트웨어는 소방펌프의 안정적 운용을 위한 진단시스템으로 활용 가능하다.

References

- 1) NFPA, "Standard for the Installation of Stationary Pumps for Fire Protection", NFPA 20, 2016.
- 2) National Fire Agency, "Act on Fire Prevention, Installation and Maintenance of Firefighting Facilities, and Safety Management", Article 25, 2019.
- 3) P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler and B. Lu, "A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-voltage Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, Issue 1, pp. 34-46, 2010.
- 4) J. de Jesus Rangel-Magdaleno, H. Peregrina-Barreto, J. M. Ramirez-Cortes, P. Gomez-Gil and R. Morales-Caporal, "FPGA-based Broken Bars Detection on Induction Motors under Different Load using Motor Current Signature Analysis and Mathematical Morphology", IEEE

- Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 63, Issue 5, pp. 1032-1040, 2013.
- 5) E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, F. Auger and M. El H. Benbouzid, “Motor Current Signal Analysis based on a Matched Subspace Detector”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 66, Issue 12, pp. 3260-3270, 2017.
 - 6) D. H. Kim, E. J. Kim and S. C. Kim, “A Study on Intelligent Technique for Correlation Application of Overcurrent and Leakage Current Signals in the Indoor Wiring”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 30, No. 4, pp. 14-19, 2015.
 - 7) E. J. Kim, D. H. Kim and S. C. Kim, “Analysis for Electrical Fire Possibility Using Fuzzy Logic with Input Variables of Overcurrent and Saturation Time in the Indoor Wiring”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 30, No. 6, pp. 34-39, 2015.
 - 8) D. H. Kim, S. C. Kim and J. Y. Park, “Development of Leakage Detector for Electric Equipment Failure in Fountain”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 1, pp. 35-40, 2018.
 - 9) NFPA, “The SFPE Hand Book of Fire Protection Engineering”, 2020 Edition.
 - 10) Wilo, “Pump Technology Hand Book”, 2017 Edition.
 - 11) Korea E&I Electromagnetic Flowmeter Data, <http://koreaei.com/main/index.html>
 - 12) CT and ZCT Sensor Data, <http://www.u-rd.com/products/CTL-24-TE.html>, 2022.
 - 13) USB-6009-ni Datasheet, <https://www.ni.com/ko-kr/support/model.usb-6009.html>, 2022.
 - 14) NI-LabVIEW Application, <https://www.ni.com/ko-kr/shop/labview.html>, 2022.