



# 머신러닝 기반의 제수밸브 누수 진단 및 압력차를 활용한 유량 예측 방법론의 개발

## Methodology for leakage diagnosis of gate valve using machine learning and flow rate prediction using pressure difference

이수민<sup>1</sup> · 정광준<sup>1</sup> · 김현준<sup>2\*</sup>

Sumin Lee<sup>1</sup> · Kwangjun Jung<sup>1</sup> · Hyunjun Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>주식회사 플로워크연구소, 연구개발팀

<sup>2</sup>부산대학교 기계공학과

<sup>1</sup>Research and development team, Floworklab Inc.

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Pusan National University

### ABSTRACT

Gate valves are hydraulic components used to shut-off the water flow in water distribution systems. Gate valves may fail owing to various aspects such as leakage through seats, wearing of packing, and corrosion. Because it is considerably challenging to detect valve malfunctioning until the operator identifies a significant fault, failure of the gate valve may lead to a severe accident event associated with water distribution systems. In this study, we proposed a methodology to diagnose the faults of gate valves. To measure the pressure difference across a gate valve, two pressure transducers were installed before and after the gate valve in a pilot-scaled water distribution system. The obtained time-series pressure difference data were analyzed using a machine learning algorithm to diagnose faults. The validation of whether the flow rate of the pipeline can be predicted based on the pressure difference between the upstream and downstream sides of the valve was also performed.

**Key words:** Leakage detection, Gate valve, Machine-learning, Flow rate prediction

**주제어:** 누수 진단, 제수밸브, 머신러닝, 유량 예측

Received 17 March 2023, revised 28 April 2023, accepted 30 April 2023.

\*Corresponding author: Hyunjun Kim (E-mail: khj.pnu@gmail.com)

#### 1 이수민 (과장) / Sumin Lee (Manager)

부산광역시 부산진구 서전로 8, 47291  
8, Seojeon-ro, Busanjin-gu, Busan 472912, Republic of Korea

#### 1 정광준 (과장) / Kwangjun Jung (Manager)

부산광역시 부산진구 서전로 8, 47291  
8, Seojeon-ro, Busanjin-gu, Busan 472912, Republic of Korea

#### 2 김현준 (연구교수) / Hyunjun Kim (Research Professor)

부산광역시 금정구 부산대학교 63번길 2, 46241  
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

pp. 119-126

pp. 127-138

pp. 139-146

pp. 147-154

## 1. 서 론

밸브는 상수관망에서 배관 내 유체의 흐름을 유지 또는 차단하기 위하여 사용되는 수리구조물이다. 이 중 제수밸브는 완전 개폐용으로써 유체저항이 작고 압력 손실 또한 낮다는 유리한 특성이 있다. 해당 특성 때문에 상수도의 블록 시스템의 경계면이나 도수 송수관 등에 널리 사용되는 밸브 중 하나이다. 제수밸브는 시트를 통한 누출, 패킹의 마모, 부식 등의 여러 가지 요인들로부터 고장이 발생한다. 하지만, 제수밸브의 고장에 의한 누출량이 경미할 경우 이를 지상에서 파악하는 것은 지하에 설치된 제수밸브의 특성상 매우 어렵다. 제수밸브를 상시 점검하는 것이 제수밸브 고장진단의 좋은 방법이 될 수 있지만, 드물게 사용되는 제수밸브의 조작 빈도수로 인하여 이 또한 실효성이 있는 방법과는 거리가 멀다.

밸브의 고장진단을 위해서 다양한 방법들이 적용되어왔다. Mohamed and Roger (1998)는 밸브의 고장진단을 위하여 고빈도 압력센서를 밸브 액추에이터에 부착하는 시스템을 제안하였다. 이를 통해서 다양한 고장 증상에 따른 액추에이터 압력 변화를 관찰할 수 있었다. 또한, 음향 방출 신호를 통하여 밸브 누출 진단을 하고자 하는 노력이 다양한 연구를 통하여 수행되기도 하였다 (Sharif and Roger, 1998; Juhani and Ibrahim, 2016). 하지만, 음향 신호를 활용한 누수 탐지 방법을 일반 도로나 생활 공간 주변에 설치되어진 제수변에 적용하기에는 높은 불확실성의 한계가 존재한다. 인공지능(Artificial intelligence)을 적용한 밸브의 고장진단 방법론에 관한 연구 역시 다양하게 시도되었다. Karpenko and Sepehri (2002)와 Karpenko et al. (2003)은 밸브 액추에이터의 고장을 진단하기 위해 신경망 방법론(Neural network)을 적용하였다. 해당 연구에서는 밸브의 고장 상황에 따른 액추에이터 내부 압력 변화를 기반으로 구동부의 고장 상황을 진단하는 방법론을 제안하였다. 인공지능 방법론을 활용하여 밸브 구동부의 고장 여부를 진단 할 수 있다는 가능성을 보여주었지만, 액추에이터가 설치되지 않은 대부분 제수변에 적용이 어렵다는 한계가 있다. Venkata and Rao (2019)는 밸브에 직접 진동 센서를 부착하고, 진동 데이터와 인공지능 알고리즘을 활용하여 밸브의 고장을 진단하는 방법론을 제안하였다. 하지만 진동 데이터를 사용하는 진단 방법의 특성상 도로를 경유

하거나 일반 생활 공간으로부터 초래되는 밸브 고장과 다른 진동의 영향이 미칠 수 있다.

본 연구에서는 제수밸브의 다양한 고장 중 누수를 진단하기 위한 새로운 방법론을 제안하였다. 밸브를 개도율에 따라 다른 특성을 가지는 오리피스로 볼 수 있다. 이는 결과적으로 개도율에 따라 상이한 밸브 전·후의 압력 차이를 발생시키는데, 이러한 개도율에 따른 압력차를 바탕으로 고장 여부를 판단하고자 하였다. 우리는 상기 방법론의 검증에 위하여 파일럿 규모의 상수도 시스템에 300 mm 직경의 제수밸브를 설치하고 밸브의 전·후단에 압력센서를 설치하여 데이터를 획득하였다. 또한, 밸브 파손으로부터 초래되는 밸브 부근의 파손 상황을 모의하기 위하여 제수밸브 하단부에 볼밸브를 설치하여 누수를 발생시켰다. 볼밸브 조작을 하지 않은 정상상태와 볼밸브 조작을 통한 누수 상태에 대하여 유의한 압력차의 여부에 관한 판단을 목적으로 인공지능 알고리즘을 적용하고 고장 판단을 수행하였다. 또한, 밸브가 가지는 특성곡선(Characteristic curve)을 토대로 밸브 전·후단 압력차를 활용한 유량 예측이 가능한지에 대한 검증 또한 수행하였다.

## 2. 연구 방법 혹은 재료 및 실험방법

### 2.1 제수밸브의 누수 진단

밸브, 펌프 등과 같은 관망 내부의 수리구조물은 해당 구조물의 수리적 특성에 따라서 구조물의 전·후단에 압력 차이가 발생한다. 밸브는 전단에 비해서 후단의 압력이 강하하는 특징을 가지는데 이러한 특성을 이용하여 오리피스 방정식은 유량을 예측해내기도 한다. 밸브의 수리적 특성을 결정하는 가장 큰 요인은 개도율(Opening ratio)이다. 밸브의 개도 정도에 따라서 밸브 내부의 유동 흐름은 완전히 다른 특징을 가지게 되고 이는 곧 상이한 압력 강하의 정도를 나타낸다. 밸브가 가지는 개도율에 따른 압력 강하 특징은  $K_v$  또는  $C_v$ 와 같은 밸브 계수(Valve coefficient)로 나타낼 수 있고, 밸브의 개도율에 따른 이러한 특징의 변화를 밸브 특성곡선(Valve characteristic curve)으로 정리하여 밸브 제조사에서 제공하기도 한다.

본 연구에서는 제수밸브의 개도율에 따른 압력 강하 특징을 이용하여 제수밸브의 고장 여부를 판단하



고자 하였다. 제수밸브의 고장진단을 위하여 제수밸브 전·후단의 압력 차이를 측정하고, 이때 관찰되는 밸브 전·후단의 압력 차이가 제수밸브의 개도율에 따른 정상적인 압력 차이인지 아닌지를 통하여 제수밸브의 고장을 진단하고자 했다. 만약, 제수밸브에 누수와 같은 고장 상황이 발생한다면 밸브의 정상보다 더 큰 압력 차이가 발생할 것이기 때문이다. 압력 차이의 정상/비정상 여부는 머신러닝 알고리즘을 활용하였다. 문턱값(Threshold)과 같은 특정 상수를 기준으로 하여 고장 여부를 판단할 때 문턱값 설정의 기준을 마련하기 어렵고 제수밸브와 연결된 관망에서 발생하는 주기적인 잡음신호(Noise)에 대해서도 고장으로 오진단 할 수 있기 때문이다.

Fig. 1은 제수밸브의 전·후단 압력 차이를 측정하기 위한 실험 장치의 구성을 나타낸 그림이다. 제수밸브 전·후단에 1/4인치의 탭을 설치하고, 압력센서( $P_1$ ,  $P_2$ )를 설치하였다. 두 개의 센서는 동일한 데이터 획득 시스템에 연결되어 압력 신호를 기록하였다.

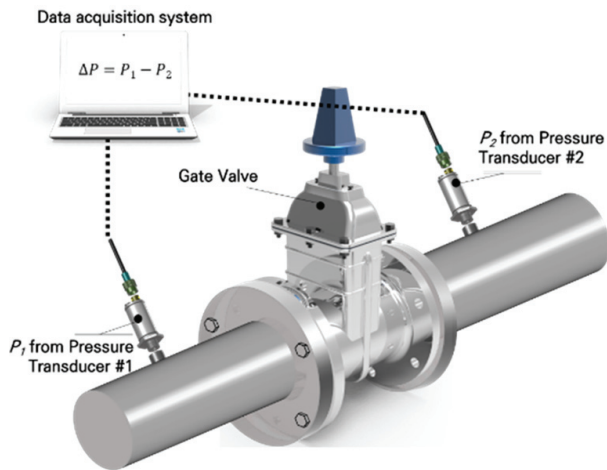


Fig. 1. Schematic diagram of fault diagnosis system of gate valve.

## 2.2 기계학습 기반의 제수밸브 누수 진단

### 2.2.1 시계열 포레스트

다양한 시계열 데이터 분류기법은 크게 5가지 유형으로 나타낼 수 있다 (Bagnall et al., 2017). 각 시계열 데이터의 유클리드 거리를 비교하는 거리 기반 방법, 각 시계열 데이터를 대표 단어(Representative words)로

변환하여 이것의 분포를 비교하는 사전(Dictionary) 기반 방법, 같은 시계열 데이터의 부분적 유사성을 감지하는 Shapelet 방법, 각 데이터의 간격에서 특징을 추출하고 비교하는 간격 기반 방법, 그리고 각 방법을 조합하는 앙상블(Ensemble) 방법이 있다. 이 중 데이터를 일정 간격으로 나누어 비교하는 간격 기반 방법은 각 시점 기반의 정보를 전달하지 않으므로 신호 잡음에 덜 민감한 특징이 있다.

본 연구는 대상 실험 관망에서 수집한 압력 시계열 데이터도 잡음이 심한 특성이 있으므로 간격 기반 방법 중 대표적인 기법인 시계열 포레스트를 적용하였다. 시계열 포레스트 방법론은 Houtao et al. (2013)이 유클리드 거리 기반 시계열 분류기법의 한계를 극복하고자 제안한 트리모델 기반의 앙상블 기법(Tree-ensemble)이다. 의사결정트리(Decision tree)와 같은 시계열 트리(Time series tree)를 구성하고, 랜덤 포레스트(Random forest)의 데이터 샘플링 기법을 사용하는 것은 기존 트리 모델과 유사하지만, 트리의 노드에서 속성을 분리할 때, 의사결정나무에서 사용하는 기준인 지니계수나 엔트로피와 달리 엔트로피와 거리를 함께 고려한 entrance(Entropy and distance) gain이라는 새로운 기준을 사용한다는 점에서 차이점이 있다.

### 2.2.2 평가지표

분류 문제의 성능을 평가하는 지표는 정확도(Accuracy), 재현율(Recall), 정밀도(Precision) 그리고 재현율과 정밀도의 조화평균인 F1-Score가 있다. 본 연구에서는 정밀도보다 재현율을 더 중요한 지표로 고려한다. 실제 음성(정상)이지만 모델이 양성(고장, 누수)으로 오분류하는 것은 관망 운영자를 번거롭게 하는 일이지만 누수가 발생하지 않았으므로 큰 피해가 있다고 하긴 어렵다. 하지만 실제 양성(고장, 누수)인 데이터를 모델이 음성(정상)으로 잘못 예측하게 되는 것은 실제 누수를 감지하지 못했으므로 상수관망에 치명적이기 때문이다. 분류모델 성능을 나타내는 혼돈행렬(Confusion matrix)에서 이러한 2종 오류(실제 양성을 음성으로 예측)가 많아지면 재현율 점수가 떨어진다. 따라서 재현율을 중점적으로 고장진단 성능을 판단하되, 1종 오류(실제 음성을 양성으로 예측) 때문에 정밀도 점수가 동시에 떨어지는 것도 좋지 못한 분류 결과이므로 F1-score를 같이 고려하여 분류모델 성능을 판단하였다.

### 2.2.3 제수밸브의 누수 진단

본 연구에서 상기 시계열 포레스트 방법을 활용하여 제수밸브의 누수를 진단하기 위해 정상상태의 밸브로부터 획득한 압력차 데이터와 누수 상태의 밸브로부터 획득한 압력차 데이터를 학습데이터로 활용하였다. 확보된 학습데이터는 1,000개의 간격으로 잘라내며 시간대별 특징(Feature)으로 정리하였다. 정상 또는 누수 여부에 따라 0(정상), 1(누수)로 레이블링하여 학습데이터를 전처리하였다. 이렇게 전처리를 완료한 학습데이터를 시계열 포레스트 방법으로 기계 학습하여 모델 생성을 하고, 모델이 학습하지 않은 검증용 데이터를 활용하여 누수 여부 판단에 대한 모델의 성능 검증을 수행한다. 이렇게 검증을 수행하며 제수밸브 누수 진단에 활용할 모형의 매개변수(Parameter)를 보정하고 F1-score가 잘 평가될 수 있는 매개변수로 선정하여 모형을 완성하는 것이다.

제수밸브의 누수에 관한 판단은 Fig. 1과 같이 누수 진단 시스템으로부터 연속적으로 획득하는 데이터를 구성된 시계열 포레스트 모형을 통해 연속적으로 진단하고 이를 통해 누수와 정상 여부를 판단하는 방식으로 구성된다. 모형의 학습 및 제수밸브 누수 진단 방법에 관한 내용은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

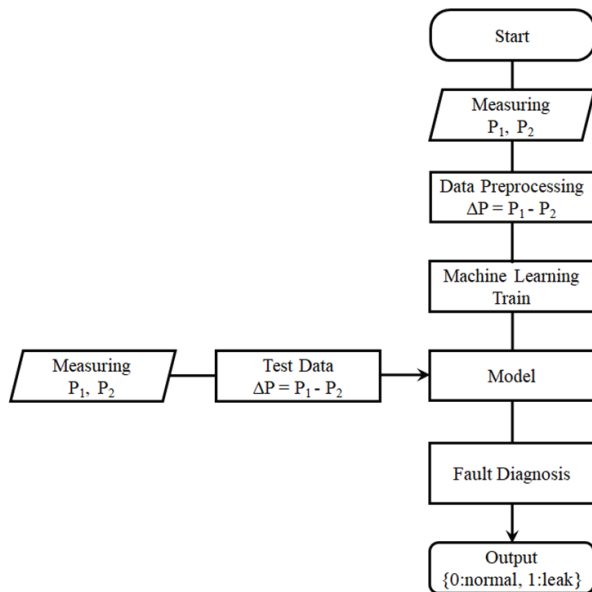


Fig. 2. Flowchart of Leakage diagnosis of gate valve.

### 2.3 제수밸브를 통한 유량의 평가

일반적으로 밸브는 하나의 오리피스로 역할을 하며 밸브 전후의 압력 차이를 이용하면 Eq. 1과 같은 방식으로 유량을 계산할 수 있다.

$$Q = K_v \sqrt{\frac{\Delta P}{SP}} \quad (1)$$

여기서,  $Q$ 는 유량( $m^3/sec$ ),  $K_v$ 는 밸브 상수( $m^{2.5}/sec$ ),  $\Delta P(mH_2O)$ 는 밸브 전 후단의 압력 차이 그리고  $SP$ 는 비중량(물=1.0)이다.

$K_v$ 는 밸브의 개도율에 따라 변동되는데 이에 따라 변화되는  $\Delta P$ 값을 토대로 해당 밸브를 지나는 유량을 계산해낼 수 있다. 본 연구에서는 제수밸브의 유량 값과 개도율을 바탕으로 밸브 특성곡선(Valve characteristic curve)을 도출하고 이를 바탕으로  $\Delta P$ 에 따른 유량 예측의 가능 여부를 판단하였다.

### 2.4 실험 설계

제안된 제수밸브의 누수 진단 알고리즘은 국가물산업클러스터(Korea Water Cluster, 대구, 대한민국)에 설치된 파일럿 규모의 상수관망 시스템에 제수밸브를 설치하여 검증하였다. 대상 시스템은 2개의 저수조와 85개의 절점, 87개의 파이프라인으로 구성하였다. 파이프라인의 총길이는 1,418 m였으며, 직경이 0.3 m인 4개의 서로 다른 파이프 재료(Polyvinyl chloride, Ductile iron pipe, Polyethylene, Steel pipe)로 구성되었다.

본 연구에 사용된 제수밸브(AA300-CAS3, ㈜삼진정밀, South Korea)는 상류 저수조로부터 764 m 거리의 직선 관 가운데 설치하였다. 밸브로부터 충분한 이격 거리를 확보하기 위해 제수밸브 전·후 0.6 m 거리에 압력센서(PXJ409-1.0 MGI, Omega Engineering Inc., USA)를 설치하였다. 압력센서의 측정 범위는 0~1.0 MPa이고 정확도는 0.08%이다. 모의 관망 시스템의 유량을 측정하기 위해 초음파 유량계(Xonic-100L, Jain Technology Co., Ltd., South Korea)를 충분한 이격거리 이후에 설치하였다. Fig. 3은 본 연구의 실험을 위한 모의 상수도 관망 시스템을 개략적으로 표현한 그림이다.

압력 및 유량 데이터를 획득하기 위하여 데이터 획득 시스템인 NI-9253(National Instrument Inc., USA)를 활용하여 데이터 획득 시스템을 구성하였다. 실험 시



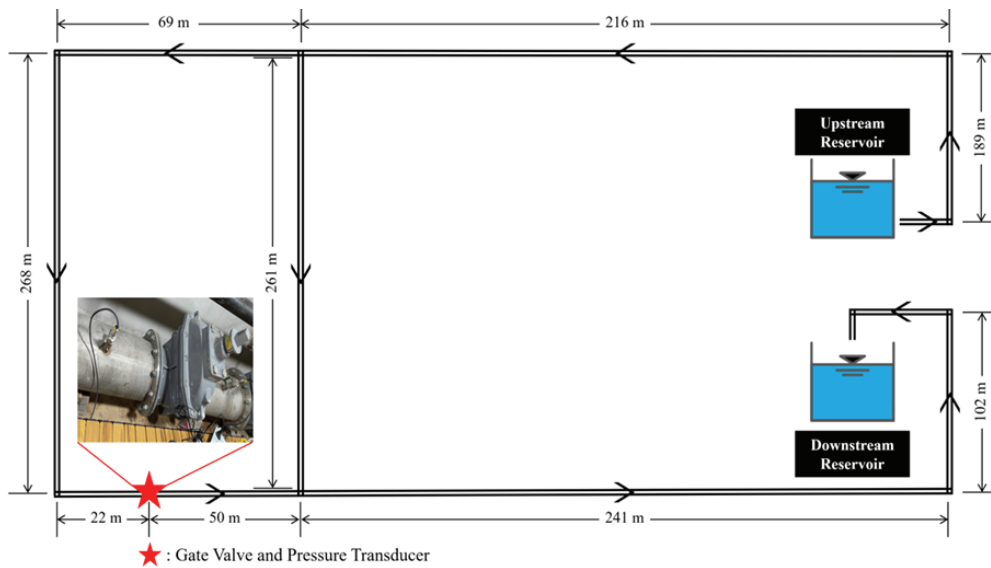


Fig. 3. Schematic diagram of pipeline system.

압력 데이터의 획득 빈도는 1,000 Hz 이고 Labview를 활용한 프로그램을 제작하고 이를 활용 하여 데이터 획득 시스템 구성하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 제수밸브의 누수 진단

제수밸브의 누출을 모의하기 위해, Fig. 4와 같이 1/4 인치 크기의 볼밸브를 제수밸브의 전·후단에 설치하여 볼밸브의 개폐를 통해 제수밸브의 누수를 모의하였다.

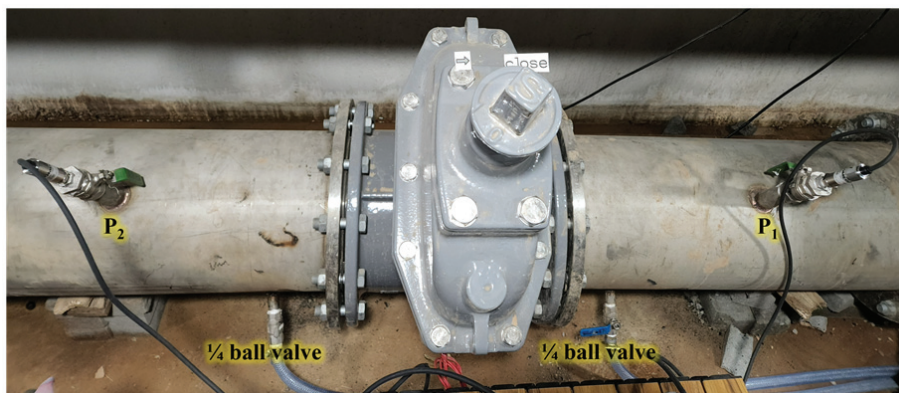


Fig. 4. Leakage simulation for gate valve. Opening of 1/4-inch ball valve next to gate valves considered as leakage of gate valve.

Fig. 5는 누수 발생 상황(Leak)과 정상 운전 상황(Normal)에서  $P_1$ 으로부터 획득되는 압력 데이터의 시계열을 나타낸 것이다. 정상과 누수 상황 모두에서 모의 상수관망에서 발생하는 주기적인 잡음이 사인파의 형태로 관찰된다. 누수와 정상 상황에서 발생하는 압력 시계열에서 뚜렷한 차이를 살필 수 없는데, 이는 압력 신호 자체에서 발생하는 신호 잡음의 크기가 누수에 의한 차이보다 크기 때문으로 판단된다.

이러한 신호 잡음의 영향 및 모의 관망 내부에서 발생하는 주기적 잡음신호를 상쇄하기 위하여  $P_1$ 과  $P_2$  압력센서 값의 차이( $\Delta P$ )에 대한 시계열 데이터를 그려보면 Fig. 6과 같다. Fig. 5에서 단일 압력센서로부

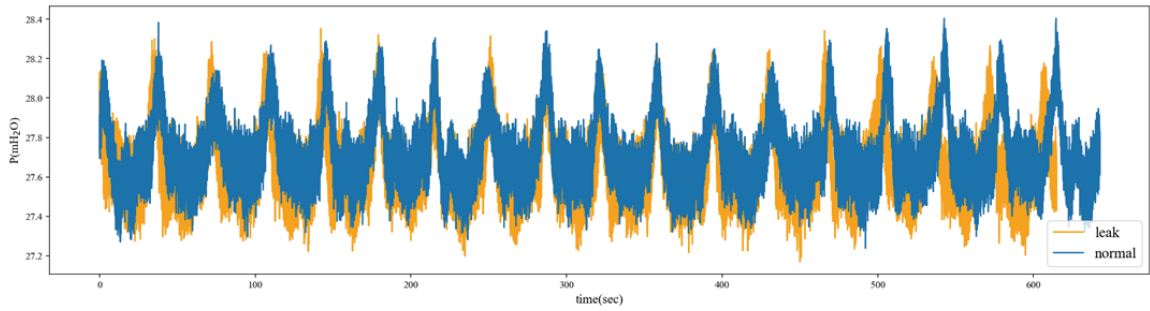


Fig. 5. Time series pressure data under leak and normal status of gate valve from single pressure transducer( $P_1$ ).

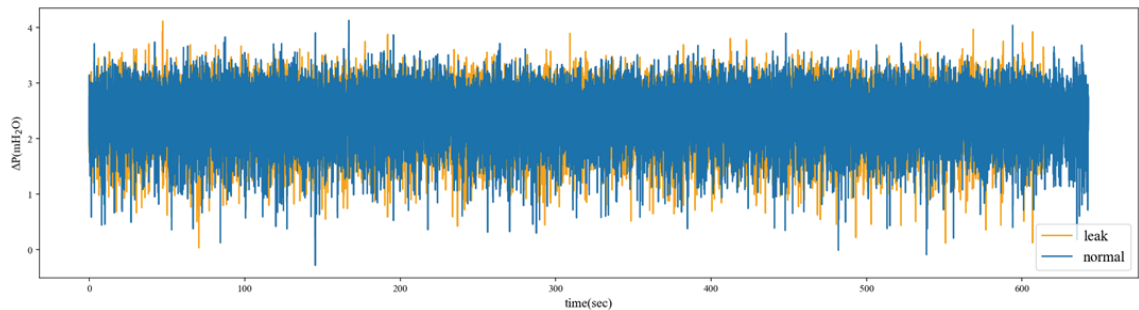


Fig. 6. Time series pressure difference ( $\Delta P=P_1-P_2$ ) data under leak and normal status of gate valve.

터의 결과와 달리 모의 상수관망 잡음 데이터 패턴이 제거된 것을 확인할 수 있다. 해당 결과를 통해서도 센서 자체에서 발생하는 잡음 신호의 영향으로 누수 및 정상상태에 따른 압력 경향의 차이를 분석할 수는 없었다.

Fig. 6에서와 같이 획득한  $\Delta P$  데이터의 시계열을 이용하여 랜덤 포레스트와 시계열 포레스트 알고리즘을 적용하여 누수 진단에 관한 판단 여부를 비교한 결과 Table 1과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

잡음에 의한 정현파의 영향을 상쇄시킨  $\Delta P$  데이

터의 정상과 누수 분류는 랜덤 포레스트가 상대적으로 성능이 우수하였다. F1-score와 재현율(Recall) 모두 랜덤 포레스트가 시계열 포레스트보다 점수가 높다.  $P_1$ 을 활용한 단일 시계열 데이터로 분류했을 때는 두 모델의 F1-score가 비슷하나, 랜덤 포레스트와 시계열 포레스트의 재현율(Recall)은 각각 0.52, 0.66이므로 시계열 포레스트의 성능이 우수하다. 이를 통해서 시간에 따른 주기성을 없애지 않은 단일 시계열 데이터에는 시계열 포레스트가 더 적합한 모델임을 확인할 수 있다.

Table 1. Summary of performance of random forest and time series forest algorithm based on the single pressure transducer data( $P_1$ ) and pressure difference data ( $\Delta P$ )

Performance \ Data	Random Forest		Time Series Forest	
	Recall	F1-Score	Recall	F1-Score
Single pressure transducer data( $P_1$ )	0.52	0.57	0.66	0.57
Pressure difference data( $\Delta P$ )	0.64	0.63	0.57	0.56

### 3.2 유량에 대한 예측력

밸브 전후 단의 압력 차  $\Delta P$  및 유량계로부터 획득되는 유량을 이용하여 밸브 개도율에 따른 밸브 상수  $K_v$ 의 값을 Eq. 1을 이용하여 도출하였다. Fig. 7은 밸브 개도율에 따른 유량을 나타낸 그림이고, 이를 통하여 밸브의 조작 비율(%)에 따른 밸브 상수를 도출한 그래프는 Fig. 8과 같다. 제수밸브는 일반적 유량 조절 밸브로 활용되기보다는 유체의 관망 내부의 흐름 방향을 바꾸거나 차단하는 용도로 활용됨에 따라 밸브의 조작 비율(%)에 따른 유량 변화가 크지 않지

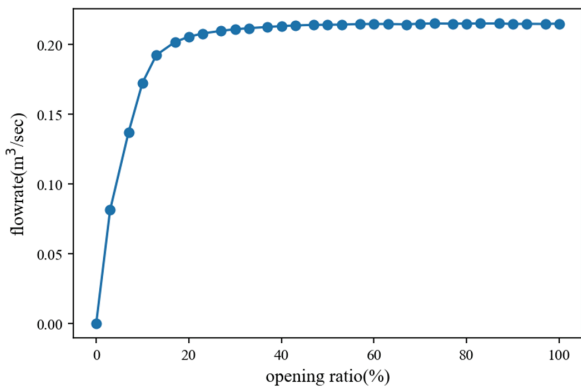


Fig. 7. Opening ratio(%) flow rate data under normal status of gate valve.

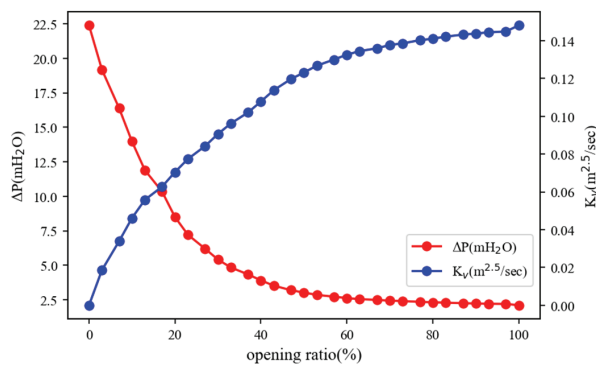


Fig. 8. Opening ratio(%) flow rate data under normal status of gate valve.

만 80% 이후부터 급격히 유량 변동이 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 8과 같이 도출한 밸브 특성곡선의 검증을 수행하기 위해서 제수밸브를 조작하여 0.2040 m<sup>3</sup>/sec, 0.2024 m<sup>3</sup>/sec, 0.1994 m<sup>3</sup>/sec, 0.1923 m<sup>3</sup>/sec, 0.1651 m<sup>3</sup>/sec, 0.1313 m<sup>3</sup>/sec, 0.0779 m<sup>3</sup>/sec의 7개의 유량을 임의로 발생시키고, 이때 측정되는  $\Delta P$  및 밸브의 조작 비율에 따른  $K_v$  값을 도출하였다. 측정되는  $\Delta P$  및 도출된  $K_v$  값을 Eq. 1에 대입하여 유량 값을 산정하여 이를 실제의 유량 값과 비교하여 유량에 대한 예측력을 검증하였다. Table 2는 상기한 검증의 결과이다.

밸브 조작에 따른 유량의 증가에 따라 제수밸브 전·후단의 압력차  $\Delta P$ 의 값은 감소하였다. 실제 유량계를 통한 측정 유량과 본 연구에서 활용한 유량 계산 방법 사이에는 크지 않은 오차율이 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 기본적인 오리피스 수식을 활용하여

Table 2. Comparison result of flow rate result derived from  $\Delta P$  value

No.	$\Delta P$ (mH <sub>2</sub> O)	Experimental flow rate (m <sup>3</sup> /sec)	Calculated flow rate (m <sup>3</sup> /sec)	Error (%)
1	2.1059	0.2149	0.2040	5.0279
2	3.9081	0.2131	0.2024	4.9906
3	6.2029	0.2097	0.1994	4.9118
4	10.3405	0.2017	0.1923	4.6604
5	13.9727	0.1725	0.1651	4.2899
6	16.3904	0.1371	0.1313	4.2305
7	19.1840	0.0813	0.0779	4.1820

유량을 계산하는 방법과 같지만, 제수밸브와 같이 섬세한 유량에 대한 제어가 어려운 수리구조물에서도 적용할 수 있음을 확인하였다는 점에서 의의가 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 실험적 연구 결과를 토대로 기계학습 알고리즘을 이용한 제수밸브의 누수 진단 방법론과 제수밸브를 활용한 유량 예측 방안에 개발 및 검증을 수행하였다. 제수밸브의 전·후단에 압력센서를 설치함으로써 상기 두 가지 효과를 모두 확인할 수 있었고, 상수관망 시스템에서 발생하는 잠음신호를 제거할 수 있었다. 밸브를 개도율에 따라 특성이 바뀌는 오리피스로 고려하여 이를 바탕으로 고장 여부를 판단하고, 유량까지 예측한다는 측면에서 고전적인 유체역학의 개념을 활용하였다. 또한, 고장 여부의 판단에는 인공지능 알고리즘을 활용하여 고전적인 고장 진단 알고리즘의 문턱값(Threshold) 활용을 대체하였다.

압력센서 설치를 통해 측정된  $\Delta P$  값을 통해 제수밸브 누수 진단을 수행하기 위해 랜덤 포레스트 및 시계열 포레스트 알고리즘을 적용하여 보았다. 두 모형의 진단 성능 평가를 F1-score 지수와 재현율(Recall)을 이용하여 비교하였다.  $\Delta P$  데이터 분류성능은 랜덤 포레스트가 우수하였으나 단일 시계열 데이터 분류성능을 보면 두 모형의 F1-score가 비슷하나, 재현율이 높은 시계열 포레스트의 성능이 높다고 할 수 있었다. 또한, 밸브의 개도율에 따른  $K_v$  특성곡선을 활용하여 관망의 유량 예측을 수행하였다. 사전에 확보

한  $K_v$  및 실시간 측정되는  $\Delta P$ 의 값을 토대로 유량에 대해 낮은 오차로 예측할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 누수 진단 방법 및 유량 예측 방법의 적용을 위해서는 기존 상수관망 내에 설치된 제수밸브의 전·후단에 압력센서를 설치해야 한다는 선행 조건이 필요하다. 이것은 안정적으로 운영되는 상수관망에 적용하기에 다소 무리한 조건으로 보일 수 있지만 새로운 경계면의 설치 시에 압력센서를 함께 설치하여 활용한다면 주요 경계면 구간에 설치된 제수밸브의 누수 여부를 판단할 수 있는 좋은 방법이 될 수 있다. 본 연구에서 제안한 유량의 예측 방법 역시도 압력센서 설치에 대한 한계점이 존재하지만, 파악하기 어려운 소구역 내부의 상수도 흐름 방향 및 유량을 파악할 수 있는 대안적인 방법으로 고려해볼 수 있다. 현재 개발되고 있는 미세 전기 기계 시스템 (Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)) 기반의 압력센서 등을 활용하면 기설치된 제수밸브에서의 전·후단 압력 값을 더욱 용이하게 획득할 수 있으리라 여겨져서 더욱 활용성이 높아질 것으로 생각한다.

## 사 사

본 논문은 국가물산업클러스터사업단의 “2021년도 물기술 능동형 디지털화 지원사업(Water-tech digitization supporting project)”으로부터 지원받았습니다. [2021200003]

## References

- Bagnall, A., Lines, J., Bostrom, A., Large, J., and Keogh, E. (2017). The great time series classification bake off: a review and experimental evaluation of recent algorithmic advances, *Data Min. Knowl. Discov.*, 31(3), 606-660.
- Heydarzadeh, M. and Nourani, M. (2016). A Two-stage fault detection and isolation platform for industrial systems using residual evaluation, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 65(10), 2424-2432.
- Houtao, D., George, R., Eugene, T. and Martyanov, V. (2013). A time series forest for classification and feature extraction, *Inf.*, 239, 142-153.
- Huang, X., Xia, H., LIU, Y. and Miyombo, M.E. (2022). Improved Fault Diagnosis Method of Electric Gate Valve in Nuclear Power Plant, SSRN, 1. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4243810>
- Jason, M., Brian, L., Lidia, A., Christie, D. and Steven, B. (2016). Fault detection for simulated valve faults in a high pressure leaching process, *IFAC-PapersOnLine*, 49(7), 394-399.
- Juwita, B.M.J. and Rosdiazli, B.I. (2016). “Acoustic emission technique for early leakage detection of in-service control valve”, *Proceeding of 2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, 15-17 August, IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Karpenko, M. and Sepehri, N. (2003). Neural network classifiers applied to condition monitoring of a pneumatic process valve actuator, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 15, 273-283.
- Karpenko, M., Sepehri, N. and Scuse, D. (2003). Diagnosis of process valve actuator faults using a multilayer neural network, *Control Eng. Pract.*, 11(11), 1289-1299.
- Ma, D., Liu, Z., Gao, Q. and Huang, T. (2022). Fault diagnosis of a solenoid valve based on multi-feature fusion, *Appl. Sci.*, 12, 5904.
- Santhosh, K.V. and Bhagya, R.N. (2018). “Soft Computational Technique to Estimate Inflow for Fault Detection in Control Valve”, *Proceeding of 2018 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology*, 1-2 June, IEEE, Shillong, India.
- Santhosh, K.V. and Swetha, R. (2019). Fault detection of a flow a control valve using vibration analysis and support vector machine, *Electronics*, 8(10), 1062.
- Sharif, M.A. and Grosvenor, R.I. (1998). “Fault diagnosis in industrial control valves and actuators”, *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 18-21 May, IEEE, Saint Paul, USA.
- Sharif, M.A. and Grosvenor, R.I. (1998). Internal valve leakage detection using an acoustic emission measurement system, *Trans. Inst. Meas. Control*, 20(5), 233-242.
- Yan, L., Yanshen, L., and Yi, L. (2020). Interval Feature transformation for time series classification using perceptually important points, *Appl. Sci.*, 10(16), 5428.
- Zhilong, L., Tongxi, L., Yanping, H., Jie, L., Changhua, N., Li, Z. and Zhang, C.T. (2022). “Research on fault diagnosis of nuclear gate valve based on analysis of energy variation characteristics of vibration signal”, *Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management*, 6-8 June, IEEE, Detroit, USA.