



# 도수관로 실시간 관파손감지를 위한 물수지 분석 방법 적용 및 성능평가

## Application and performance evaluation of mass balance method for real-time pipe burst detection in supply pipeline

신은허<sup>1\*</sup> · 정기문<sup>1</sup> · 김경필<sup>1</sup> · 최태호<sup>1</sup> · 채선하<sup>1</sup> · 조용우<sup>2</sup>

Eunher Shin<sup>1\*</sup> · Gimoon Jeong<sup>1</sup> · Kyoungpil Kim<sup>1</sup> · Taeho Choi<sup>1</sup> · Seon-ha Chae<sup>1</sup> · Yong Woo Cho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>K-water 연구원

<sup>2</sup>K-water 한강유역본부

<sup>1</sup>K-water Research Institute, K-water

<sup>2</sup>Hangang River Basin Head Office, K-water

### ABSTRACT

Water utilities are making various efforts to reduce water losses from water networks, and an essential part of them is to recognize the moment when a pipe burst occurs during operation quickly. Several physics-based methods and data-driven analysis are applied using real-time flow and pressure data measured through a SCADA system or smart meters, and methodologies based on machining learning are currently widely studied. Water utilities should apply various approaches together to increase pipe burst detection. The most intuitive and explainable water balance method and its procedure

Received 19 September 2023, revised 1 November 2023, accepted 15 November 2023.

\*Corresponding author: Eunher Shin (E-mail: [shin2@kwater.or.kr](mailto:shin2@kwater.or.kr); Fax: 82-42-870-7309, Tel. 82-42-870-7514)

#### 1 신은허 (책임연구원) / Eunher Shin (Principal Waterworks Specialist)

대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045  
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea

#### 1 정기문 (선임연구원) / Gimoon Jeong (Senior Researcher)

대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045  
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea

#### 1 김경필 (책임연구원) / Kyoungpil Kim (Principal Researcher)

대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045  
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea

#### 1 최태호 (책임연구원) / Taeho Choi (Principal Researcher)

대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045  
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea

#### 1 채선하 (연구위원) / Seon-ha Chae (Senior Head Researcher)

대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045  
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea

#### 2 조용우 (차장) / Yong Woo Cho (Senior Manager)

경기도 과천시 교육원로 11, 13841  
11, Gyo-yugwon-ro, Gwacheon-si, Gyeonggi-do 13841, 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. 311-324

pp. 325-334

pp. 335-345

pp. 347-361

pp. 363-373

pp. 375-382

pp. 383-394

pp. 395-408

pp. 409-423

pp. 425-435

pp. 437-446

pp. 447-456

were presented in this study, and the applicability and detection performance were evaluated by applying this approach to water supply pipelines. Based on these results, water utilities can establish a mass balance-based pipe burst detection system, give a guideline for installing new flow meters, and set the detection parameters with expected performance. The performance of the water balance analysis method is affected by the water network operation conditions, the characteristics of the installed flow meter, and event data, so there is a limit to the general use of the results in all sites. Therefore, water utilities should accumulate experience by applying the water balance method in more fields.

**Key words:** Pipe burst detection, Physics-based method, Mass balance method, Supply pipeline, Performance evaluation

**주제어:** 관파손감지, 물리모델기반 방법, 물수지 분석 방법, 도수관로, 성과평가

## 1. 서 론

물손실(water loss)은 물 낭비, 기술적 부담, 수질 오염 및 수익 손실을 초래하므로 상수관망 운영관리에서 해결되어야 할 중요한 문제이다. 또한, 도·송수 또는 배·급수 관로에서 누수(leakage)로 인해 물이 수용가에 도달하지 못하면, 처리하고 이송하는데 사용된 에너지를 낭비되게 된다. 따라서 수도사업자는 물수지 분석, 계측 시스템 및 블록 시스템 구축·운영, 누수 탐사, 수압 관리, 관망 정비 등을 통해 명목손실(apparent loss)과 실손실(real loss)을 정량화하고, 그 원인을 규명하며, 손실량을 감소시키기 위해 지속적으로 노력하고 있다.

관의 파손으로 인해 손실되는 물의 양은 수압과 파손면적에 따라 산정되는 누수 유량, 관 파손 시점부터 수리가 완료되기까지의 파손 기간, 그리고 파손 빈도에 영향을 받는다. 이중 파손 기간은 파손부터 관 파손이 있음을 인식할 때까지의 인지 시간(awareness time), 수리작업을 수행할 수 있는 파손 위치를 정확하게 파악하기 위해 소모된 위치 시간(location time), 수리작업에 걸린 수리 시간(repair time)으로 나뉘어진다. 이중 인지를 위해 소모되는 시간이 파손 기간의 대부분을 차지하기 때문에 빠른 누수감지를 통해 인지 시간을 줄이는 것이 매우 중요하며, 이 분야는 지난 20년 동안 수도사업자에게 상당한 관심을 받아 왔다 (Zaman et al., 2020).

현재 누수감지를 위한 다양한 방법들이 제시되고 적용되고 있으며, 이와 같은 방법들은 하드웨어와 소프트웨어(Zhang, 2010; Li et al., 2015; Ismail et al., 2019; Wan et al., 2022), 직접적 접근과 간접적 접근(Zaman et al., 2020), 외면과 내면(Adedeji et al., 2017), 모델기반과 자료기반(Hu et al., 2021), 자료기반 방법

론(Wu and Liu, 2017), 부정류 기반 해석 기법(Colombo et al., 2009; Puust et al., 2010; Abdulshaheed et al., 2017)에 따라 분류될 수 있다. 다양한 특징을 가지고 있는 누수감지 방법들을 단일 기준에 따라 분류하기는 어려움이 있으나, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 진단기반 감지방법과 운영기반 감지방법으로 구분하였다.

진단기반 감지방법은 일반적으로 누수가 발생하고 있는 관로에서 육안으로 관찰하거나 장비를 통해 음향, 진동, 온도 등을 측정하여, 기존에 존재하고 있는 누수를 확인하고 위치를 명확하게 하는 것이 주목적이다. 이러한 진단기반 감지방법의 정확도는 매우 높으나, 고가의 장비와 전문 인력이 필요하여 비용이 많이 들고, 시간이 많이 소요되며, 노동 집약적인 단점이 있다. 이와 같은 진단기반 감지방법은 적용원리에 따라 음향기반 방법(청음봉, 마이크로폰, 누수 노이즈 로거, 상관식 누수 탐지기, 하이드로폰)과 비음향기반 방법(CCTV, 지표 투과 레이더, 열화상 카메라, 가스 주입)으로 나누어질 수 있다.

운영기반 감지방법은 수도사업자가 SCADA 시스템 또는 스마트 미터를 통해 취득한 유량과 수압자료를 활용하여 파손이 발생하는 순간을 다양한 유형의 알고리즘을 적용하여 도출하는 방법이다. 운영기반 감지방법은 크게 물리모델 방법과 자료기반해석 방법으로 나누어질 수 있다. 물리모델 방법은 연속 방정식, 에너지 방정식, 운동량 방정식과 같은 지배 방정식을 적용하여 상수관망의 수리 거동을 모사하고, 예측값과 실측값의 차이가 크면 관 파손으로 인지하며, 더 나아가 파손 지점을 유추할 수 있다. 그러나 사용량 또는 조도 계수와 같은 매개변수의 불확실성과 대상 상수관망의 시설과 운영에 대한 깊은 이해가 필요하여, 폭넓게 활용되고 있지는 못하고 있다. 자료기반해석 방법은 취득된 유량과 압력 자료에 통계 기법 또

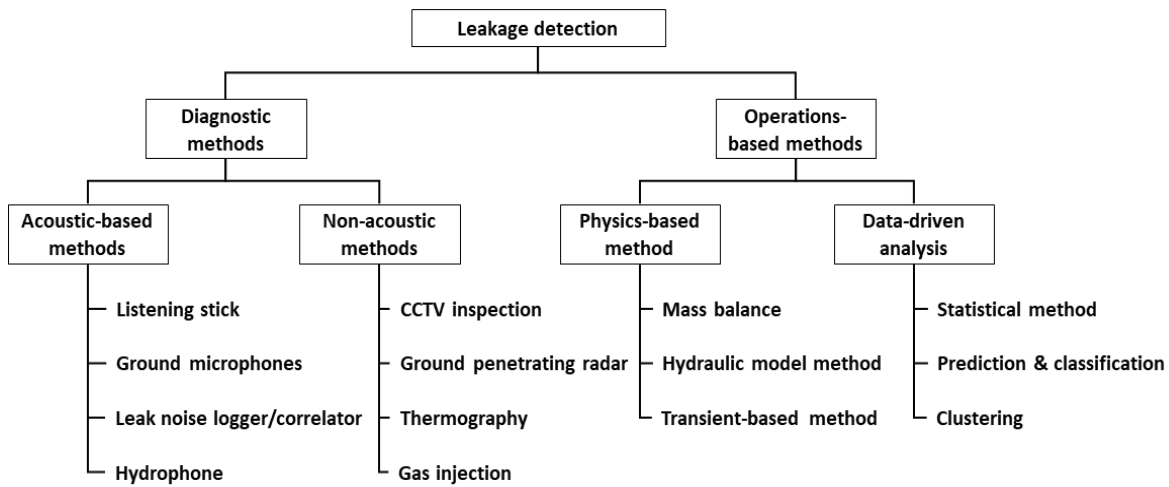


Fig. 1. Classification of leakage detection methods.

는 신호 처리 분석을 적용하여 누수를 감지하는 방법이다. 물 분야의 디지털 전환과 상수관망의 디지털 트윈 구축을 위해 많은 유량계와 수압계가 관로에 설치되고 있어, 수도사업자는 이전보다 많은 양의 정보를 획득할 수 있게 되었으며, 상수관망의 시설과 운영에 대한 이해 없이도 적용이 가능한 자료기반분석 방법은 많은 수도사업자 연구자들의 주목을 받기 시작하였다. 그러나 이 방법은 데이터 품질에 대한 의존성, 모의를 위한 사고자료 부족, 방법론의 본질적인 한계

로 높은 오경보율을 나타내기도 한다.

Fig. 1과 Table 1에 설명된 바와 같이 물리모델 방법은 물수지 분석 방법, 수리모델기반 방법, 부정류모델기반 방법으로, 자료기반분석 방법은 통계적 분석 방법, 시계열예측 및 분류 방법, 군집 방법으로 나뉜다. 물수지 분석 방법은 대상 관로 내 연속 방정식을 적용하여 유입되는 유량과 유출되는 유량의 차이가 일정 값 이상일 경우 누수로 판단하는 방법이다 (Parry et al., 1992; Liou, 1993). 가장 직관적이고 간단

Table 1. Advantage and disadvantage of operations-based methods

Category	Method	Advantage	Disadvantage
Physics-based method	Mass balance	- Intuitive and simple - Very sensitive	- Steady state assumption - Long detection period - Unable to locate leaks - Requiring all input and output flow data
	Hydraulic model	- Applicable with small data - Low sampling frequency - Leakage localization	- Requiring accurate model - Uncertainty of demand - Requiring continuous update
	Transient model	- High accuracy - Leakage localization	- Requiring accurate model - High sampling frequency - Computationally expensive
Data driven analysis	Statistical analysis	- Simple - Widely adopted	- High false alarm - Requiring low autocorrelation
	Prediction & classification	- No deep understanding of network and operation - Applicable to complicated network	- Requiring large historical data
	Clustering	- Unsupervised method	- Requiring large data - Unable to consider trend

하며 적은 누수량의 사고도 감지할 수 있지만, 모든 취수장 또는 배수지의 유출량과 수용가들의 수요량이 실시간 계측되고 있어야 의미 있는 결과를 도출할 수 있다. 이러한 문제로 일반적인 운영 시 누수감지에 활용되기보다 블록 내에 사용량이 적은 심야에 유량을 분석하는 야간최소유량분석 또는 고립된 구간별로 유량을 측정하는 단계시험 형태로 활용되고 있다. 수리모델 기반 방법은 연속 방정식과 에너지 방정식을 해석하는 준정상분석(quasi-steady analysis)을 수행하여, 관 파손 시 유량 증가와 수두손실로 인해 유량과 수압의 예측치와 계측의 차이가 발생 되는 것을 활용하여 관 파손을 감지하는 방법이다 (Misiunas et al., 2006; Kang and Lansey, 2014; Sanz et al., 2016; Steffelbauer et al., 2022). 소수의 계측자료만으로 적용 가능하며 파손 지점까지 도출할 수 있으나, 수요량의 불확실성과 관로의 변동으로 인해 정확한 수리모델을 구축하기 어려우며 주기적으로 모델 갱신을 해야 하는 단점이 존재한다. 부정류기반 방법은 연속 방정식과 운동량 방정식을 수치 분석하는 수충격분석(water hammer analysis) 또는 부정류 압력과 분석을 통해 누수파의 특이성, 반사파, 감쇄 효과를 분석하여 관 파손을 인지한다 (Liggett and Chen, 1994; Ghazali et al., 2010). 모델과 계측값이 정확할 경우 신뢰성 높은 결과를 도출하나, 수리 모델보다 더 복잡한 해석과 100 Hz 이상의 압력계측자료가 필요하여 배·급수 관망과 같은 망목상식 상수관망에 적용하는 데는 한계가 존재한다. 부정류기반 방법은 부정류 신호특성을 활용한 직접분석(direct transient analysis), 부정류해석 모델을 역으로 보정하는 역부정류해석(inverse transient analysis), 그리고 주파수 영역에서 분석하는 주파수 영역기법(frequency domain technique)으로 세분화 될 수 있다.

통계적 기법으로 관리도(control chart), CUSUM (Cumulative SUM), western electric rules, 호텔링  $T^2$  등을 활용하는 통계공정관리(statistical control process)가 널리 활용되고 있다 (Misiunas et al., 2006; Palau et al., 2012; Jung et al., 2015; Loureiro et al., 2016; Ahn and Jung, 2019). 한지점(단변량) 또는 다지점(다변량) 계측값을 실시간으로 직접 활용할 수 있는 간결한 방식이어서 수도사업자에서 널리 채택되고 있는 감지기법이나, 계절 또는 주간별 사용량에 자기상관관계가 존재하는 상수관망에서는 많은 오경보가 발생하는 문제점이 있다. 또한, 설정된 문턱값(thresholding value)과 감

지기준에 따라 모델의 신뢰도와 오류가 크게 변동된다. 이러한 문제들로 인해 현재 통계공정관리는 누수 감지를 위해 단독으로 사용되기보다는 예측 모델(예, 물수지 분석법, 수리모델기반, 부정류 모델, 시계열예측모델)의 산정값과 실측값의 잔차에 적용되는 경우가 점차 증가하고 있다. 시계열예측 및 분류 방법은 유량과 수압의 시계열자료와 다양한 해석 기법을 활용하여 시계열예측모델을 구축하고 모델값과 실측값을 활용하여 이상 여부를 분류하는 방법이다. 시계열예측모델은 이전에는 ARMA, ARIMA, 칼만 필터 등의 확률적 접근(stochastic approach) 방법을 활용하여 개발되었으나(Ye and Fenner, 2011; Jung and Lansey, 2015), 현재는 인공지능망, 순환신경망, LSTM, 서포트 벡터머신 등의 머신러닝기법이 활용되고 있는 (Mounce et al., 2010; Romano et al., 2014; Wang et al., 2020; Xu et al., 2020) 추세이다. 이와 같은 머신러닝 기법을 활용한 시계열예측모델은 배급수 관망과 같은 복잡한 구조의 시설과 다양한 운영에 대한 이해 없이도 적용 가능하며, 수도사업자들에게 활용되는 빈도가 점차 증가하고 있다. 그러나 과거 사고 이력과 같은 자료가 매우 부족하여 모델의 신뢰성과 정확성을 평가하기에는 많은 어려움이 있다. 이와 같은 사고자료의 부족으로 인해 비지도학습 머신러닝기법을 적용한 군집방법이 대안으로 제시되기도 한다 (Aksela et al., 2009; Wu et al., 2018; Huang et al., 2018; Wu and Liu, 2020). 이 방법은 정확도를 높이기 위해 일반적으로 상수관망 전체보다는 블록 단위의 유입량에 많이 적용된다.

일반적으로 수도사업자는 이상 상황의 메커니즘을 설명할 수 있는 물리모델 방법론을 선호한다. 그러나 수요량으로 대표되는 매개변수의 불확실성과 관망의 복잡성으로 현장 적용에 한계가 있어, 자료기반모델 방법론이 점차 더 많이 활용되고 있는 추세이다. 도수관로는 배·급수관로와는 다르게 취수장에서 유입량과 정수장 또는 원수 수용가에서 사용량을 실시간으로 계측하고 있으며, 관로의 구조도 간단한 편이다. 그리고 배경 누수(background leakage)와 보고되지 않은 누수(unreported leakage)가 거의 존재하지 않는 높은 건정성을 가지는 시스템으로 도수관로에서 물수지 분석법과 같은 물리모델 기반의 방법이 활용될 여지가 배·급수 관망에 비해 높다. 그리고 모든 운영기반 감지방법들은 제한적인 조건에서만 적용 가능하며,



모든 누수를 감지하지 못하므로, 수도사업자는 단일 감지기법만 적용하는 것이 아니라 다양한 감지기법을 병행하여 수행하는 하이브리드 누수 감시 시스템을 구축을 하고 있다. 이러한 맥락에서 물리모델 기반의 누수 감지 기법에 관한 연구는 지속되어야 할 필요가 있다.

물수지 분석 방법은 물리모델 방법 중에서 가장 간결하며 직관적이고, 운영자가 그 의미를 해석하기가 용이하여, 우선적으로 적용 가능성을 검토해야 하는 방법론이다. 그러나 예측기 자체오류, 통신 오류, 유량 데이터 간 시차 지연으로 인한 예측자료의 낮은 신뢰성, 범용적인 적용 절차 및 방법론 부재, 적정 감지기 준 및 성능 평가방법의 미흡 등과 관련된 다양한 이슈가 존재하여, 이를 해결하는 것이 선행되어야 할 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 도수관로 대상 물수지 분석법에 기반한 관파손감지 방안을 제시하고 이를 현장 적용하여 방법론의 관파손감지 적용 가능성을 검토하였다. 우선적으로 분석범위 설정, 자료 수집, 전처리, 물수지 분석 모델 구축, 관파손감지 성능평가로 구성된 물수지 분석법에 기반한 관파손감지 절차를 제시하였다. 그리고 국내 광역 도수관로 구간에서 실시간 유량 예측자료를 활용하여 6개의 물수지 분석 모델들을 구축하고, 지표 비교와 잔차분석을 통해 모델의 예측정확도와 정상성, 독립성, 정규성 분석을 수행하여 관파손감지에 적합한 모델을 도출하였다. 최종적으로 도출된 모델에 사고 데이터셋을 적용하여 위양성률, 위음성률, 최소감지유량규모, 완전감지유량규모를 통한 감지기준별 성능평가를 수행하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 물수지 분석 기반 관파손감지 절차

물수지 분석 방법에 기반한 관파손감지 절차는 Table 2에 제시된 바와 같이 분석 범위 설정, 자료 수집, 전처리, 물수지 분석 모델 구축, 모델 성능평가 및 적용의 순으로 진행된다. 첫 번째로 유량 관점의 닫힌 계 구성 가능 여부, 실시간 모니터링 여부, 관로의 단 순성, 사고 모의 가능 여부 등을 검토하여, 물수지 분석이 가능한 대상 구역을 선정한다. 다음으로 SCADA 시스템 또는 스마트 미터를 통해 분석범위의 유입 지점과 유출입 지점의 유량 자료를 수집한다. 해당 유량 자료의 샘플링 간격이 짧으며, 적산자료 형태일수록 신뢰도 있는 모델의 구축이 가능하다. 수집된 유량 자료는 센서, 통신장비 및 자료취득·저장시스템의 문제로 인해 오결측 자료를 포함하고 있어, 적합한 자료 전처리가 필요하다. 그리고 연속방정식에 기반하여 물수지 분석 모델을 구축하고, 해당 모델의 예측정확도 분석과 잔차분석을 수행하여, 물수지 분석 모델이 관파손감지에 적용 가능 여부를 판별한다. 관파손감지에 적합한 물수지 분석 모델은 사고 데이터셋(사고이력, 엔지니어드 테스트, 합성)을 적용하여 설정된 관파손감지 기준별 성능을 평가한다. 마지막으로 성능이 검증된 모델에 대해 현장에 적용하게 된다.

Table 2. The application process of mass balance method

No	Stage	Detail
1	Identifying analysis scope	- Determining analysis area considering closed system, real-time monitoring, simplicity, and event simulation
2	Data Collection	- Data collection through SCADA and smart meter
3	Data pre-processing	- Missing and fault data treatment
4	Building mass balance model	- Establishing mass balance model structure - Model accuracy assessment with MAE, MaxAE, MAPE, and RMSE - Residual analysis (stationary, auto correlation, normality) through visualization and hypothesis test
5	Evaluating model performance	- Event(historical, engineered test or synthetic) dataset generation - Setting event detection parameter (thresholding value) - Performance evaluation with FNR, FPR, minimum detectable pipe burst size, completely detected pipe burst size, detection time
6	Implementation	- Implementing the process into field

## 2.2 분석범위 설정, 자료 수집 및 전처리

물수지 분석 방법의 적용을 위한 도수관로 내 분석 구간을 선정할 때, 닫힌계 구성 가능 여부, 실시간 모니터링 여부, 관로의 단순성, 사고 모의 가능 여부를 검토하여야 한다. 대상 관로의 유입부(취수장 토출관, 가압장 토출관), 유출부(가압장 유입관, 정수장 유입관, 원수수용가), 분기점에 유량계가 존재하며, 해당 구간 내부에 원수 수용가가 없거나 소수인 닫힌 시스템은 물수지 분석 방법의 필수 조건이다. 유량계는 자체적으로 오차가 있으며, 잘못된 규격의 유량계를 설치하거나 유량계 전·후단에 적절한 직관부를 확보하지 못한 경우 오류 또는 현팅이 발생할 수 있다. 따라서 분석대상 도수관로의 모든 유량계는 실시간으로

유량(순시)을 계측하는 동시에 분단위 적산 자료가 존재하는 곳으로 고려하였다. 그리고 관로의 길이가 짧으며 수지상으로 구성된 단순한 형태의 도수관로는 분석자가 인지하지 못한 운영여건의 변동과 같은 불확실한 영향 요소가 발생할 가능성이 적고, 사고감지 후 정확한 사고지점을 찾는 데 수월하므로 관로의 단순성을 대상 선정 시 고려하였다. Table 3에서 나타난 바와 같이 이전 연구에서 관파손감지를 평가하기 위해 모의한 사고 유량은 일반적으로 관 평균 유량의 약 3%에서 83%의 범위이었다. 따라서 본 연구에서는 대상 도수관로 내에 10% 내외의 사고를 모의할 수 있는 구간을 고려하였다.

위에 언급된 요소들을 고려하여 Fig. 2에 나타난 바

Table 3. Data characteristics of applied pipe burst detection test

Type of dataset	Pipe burst size [L/s] or [%]	Reference
Historical dataset	9 ~ 32%	Mounce et al. (2010)
	5%	Palau et al. (2012)
	4 ~ 83%	Bakker et al. (2014)
Engineered test dataset	5 ~ 7 L/s	Mounce et al. (2007)
	5 ~ 16%	Romano et al. (2011, 2014)
	10 ~ 50%	Ye & Fenner (2014)
	13.3 ~ 23.1%	Wu et al. (2016, 2018)
	10 ~ 20%	Huang et al. (2018)
	2.79 ~ 13.51%	Wang et al. (2020)
Synthetic dataset	5 ~ 10 L/s	Misiunas et al. (2006)

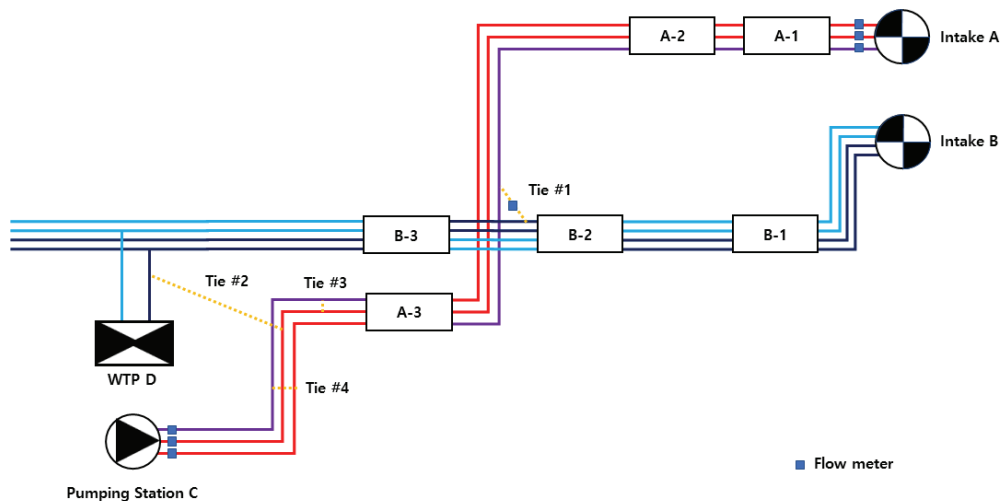


Fig. 2. Schematic diagram of selected supply pipeline.



와 같이 A 취수장에서 C 가압장까지의 구간을 물수지 분석을 위한 범위로 선정하였다. 해당 구간은 관로 길이 26,218 m, 관경 2,600 mm에서 4,300 mm 범위의 3열 도수관로로 이루어져 있으며, 중간에 A-1, A-2, A-3 터널에서 합류되고 다시 분배된다. 해당 구간은 1번, 2번 타이밸브를 통해 B 취수장 계통과 연계되고 있는데, 1번 타이밸브는 상시 연계되어 있으며 2번 타이밸브는 비상시에만 개방된다. 분석 대상 도수관로 3열을 연계하는 3번, 4번 타이밸브는 상시 개방되어 있었다. 그리고 해당 분석구간에는 원수수용가는 존재하지 않았다. A 취수장 토출관로 3곳, C 가압장 조절지 유입관로 3곳, 1번 타이밸브에 모두 유량계가 설치되어 있으며 유량 순시 값과 분단위 적산값을 실시간으로 계측하고 있다. 해당 구간의 평균 유량, 표준편차, 중위값, 일사분위수, 삼사분위수는 각각 74,605 m<sup>3</sup>/hr, 4,754 m<sup>3</sup>/hr, 74,712 m<sup>3</sup>/hr, 71,837 m<sup>3</sup>/hr, 77,950 m<sup>3</sup>/hr의 값을 나타내었으며, 1번 타이밸브의 평균 유량, 표준편차, 중위값, 일사분위수, 삼사분위수는 각각 5,046 m<sup>3</sup>/hr, 2,396 m<sup>3</sup>/hr, 4,896 m<sup>3</sup>/hr, 3,308 m<sup>3</sup>/hr, 6,736 m<sup>3</sup>/hr의 값을 나타내었다. 1번 타이밸브의 일사분위에서 삼사분위의 범위 유량은 해당구간의 평균 유량대비 4.43%와 9.02%로 사고를 모의하기 적합하였다.

2023년 4월에서 5월까지의 기간동안 A 취수장 토출관 3곳, C 가압장 유입관 3곳, 1번 타이밸브 지점에서 87,840개의 분단위 적산 유량자료를 SCADA 시스템을 통해 취득하였다. 수도사업자가 운영상에서 취득하는 유량 자료는 센서(센서 고장, 오작동, 전원 이상), 통신(회선 장애, 전송선로 이상, 통신장비 고장) 및 자료취득·저장 시스템 문제(데이터 로거 고장, DB 고장, 동기화 오류) 등으로 인해 손상된 데이터들이 포함된다. 이에 따라 오결측 자료를 감지하고 수정하는 신호 분석 절차가 모델링 이전에 수행되어야 한다. 오측 자료를 감지하는 방법은 낮은 수준의 단위 신호 기반 방법과 높은 수준의 모델기반 방법으로 나누어질 수 있으며, 대부분의 수도 사업자들은 단순한 상한치·하한치를 적용하여 감지하고 있다 (Mounce et al., 2011). 그리고 결측 자료와 감지된 오측 자료들은 디폴트 값, 평균값 또는 보간 값들을 활용하여 수정된다. 본 연구에서는 모델의 신뢰성 확보를 위하여 분석자료의 오결측 자료가 없는 구간을 선정하여 적용하여, 특별한 자료 전처리를 수행하지는 않았다.

### 2.3 물수지 분석 모델 구축

물수지 분석 모델 식은 기존의 연속방정식을 적용한 수식(Jun et al., 2021)을 기반으로하여 식 (1)과 같이 유입 유량과 유출 유량의 차를 유량계가 가지는 고유 오차(Intrinsic\_error)와 잔차(Residual)의 합으로 구축하였다. 유입 유량은 취수장 A의 유출 지점에 있는 3개 관로의 유량(In<sub>1,Δt</sub>, In<sub>2,Δt</sub>, In<sub>3,Δt</sub>)을, 유출 유량으로는 1번 타이밸브 유량(Tie<sub>1,Δt</sub>)과 가압장 C의 조절지로 유입되는 3개 관로의 유량(Out<sub>1,Δt</sub>, Out<sub>2,Δt</sub>, Out<sub>3,Δt</sub>)을 고려하였다. 물수지 분석 모델의 샘플링 간격(Δt)은 10분, 20분, 30분, 40분, 60분, 120분을 고려하였으며, SCADA 시스템을 통해 취득된 2023년 4월에서 5월 자료 중 4월 자료를 활용하여 모델을 구축하였다.

$$\begin{aligned} & In_{1,\Delta t} + In_{2,\Delta t} + In_{3,\Delta t} - Tie_{1,\Delta t} - Out_{1,\Delta t} \\ & - Out_{2,\Delta t} - Out_{3,\Delta t} \\ & = Intrinsic\_error + Residual \end{aligned} \quad (1)$$

구축된 물수지 분석 모델의 적합성을 평가하고 다른 샘플링 간격의 모델들 간 비교를 위해, 예측정확도 분석과 잔차분석을 수행하였다. 예측정확도 분석은 모델을 통해 산정된 예측값이 계측된 실제값과 어느 정도 가까운지 분석하는 것을 목적으로 하며, 이를 위해 다양한 평가지표들이 활용되고 있다. 본 연구에서는 예측정확도 평가지표 중 가장 널리 활용되고 있는 평균절대오차(mean absolute error, MAE), 최대절대오차(maximum absolute error, MaxAE), 평균절대백분율오차(mean absolute percentage error, MAPE), 평균제곱근오차(root mean squared error, RMSE)를 적용하였다. MAE는 실측값과 예측값 차의 절대값에 대한 평균으로, 예측에 의한 전체적인 오차의 크기를 나타내는 지표이다. 가장 직관적으로 모델의 정확성을 판단할 수 있는 지표이며, 특이치에 민감하지 않은 지표이다. MaxAE는 오차 중에서 가장 큰 절대값을 나타내는 지표로 분석자는 모델 오차의 범위를 파악할 수 있다. MAPE는 오차를 실측값으로 나눈 절대값의 평균을 백분위로 나타낸 값으로, MAE의 특성과 유사한 특성을 나타내며 평가 자료가 다른 모델 간 비교를 가능하게 한다. RMSE는 실제 값 대비 예측값에 대한 제곱의 평균에 대한 제곱근으로 특이치에 가중을 주는 지표이다. 모델 활용 시 큰 오차가 작은 오차보다 중요할 때

pp. 311-324  
pp. 325-334  
pp. 335-345  
pp. 347-361  
pp. 363-373  
pp. 375-382  
pp. 383-394  
pp. 395-408  
pp. 409-423  
pp. 425-435  
pp. 437-446  
pp. 447-456

활용될 수 있는 지표이다. 각각의 지표들은 개별적으로 장점이 있어 모델을 평가할 때 함께 고려할 필요가 있다.

물수지 분석 모델의 구축 시 시각적인 방법과 가설 검정 방법을 적용하여 잔차의 정상성(stationary), 독립성(independency), 정규성(normality)을 분석하여 모델의 적합성을 판단하여야 한다. 정상성은 잔차가 시간이 변해도 통계적이고 확률적인 성질이 변하지 않는 것을 의미한다. 따라서 정상성을 가지는 잔차는 시간에 따라 뚜렷한 추세가 없으며, 일정한 변동(분산)을 나타낸다. 이와 같은 정상성은 잔차 그림과 Augmented Dickey-Fuller(ADF) 검정 또는 Kwiatkowski Phillips Schmidt Shin(KPSS) 검정을 통해 검토할 수 있다. ADF 검정은 유의확률(p-value)이 낮을수록 정상성을 가짐을 의미하며, KPSS 검정은 유의확률이 높을수록 정상성일 확률이 높다. 독립성은 잔차들이 상호 독립적인지 검증하는 것으로 일반적으로 자기상관(autocorrelation) 테스트를 통해 확인할 수 있다. 시각적 방법으로는 자기상관함수(auto correlation function)가, 가설검정 방법으로는 더빈-왓슨 통계량(Durbin-Watson statistic)이 주로 활용된다. 더빈-왓슨 통계량은 0에서 4 사이의 값을 가지며 0에 가까울수록 양의 상관관계, 4에 가까울수록 음의 상관관계를 가지는 것을 의미하며, 2에 가까운 값을 나타내는 경우 자기상관관계가 약한 독립적인 관계임을 나타낸다. 정규성은 잔차들의 분포가 정규분포를 따르는지 검토하는 것으로 잔차 히스토그램, P-P plot, 그리고 샤피로-윌크(Sapiro-Wilk) 검정을 통해 판단할 수 있다. 샤피로-윌크 검정에서 유의확률이 높은값을 가질수록 잔차가 정규성을 가질 확률은 높아진다.

## 2.4 물수지 분석 모델기반 관파손감지 성능평가

다양한 관파손감지 방법들이 제시되었지만 어떤 방법이 관파손감지에 가장 적합한 방법인지에 대한 결론을 내리기는 매우 어렵다. 각각의 방법은 고유한 장단점을 가지고 있으며, 해당 방법의 성능은 관파손 유형과 크기 그리고 발생 시간에 영향을 받기 때문이다. 또한, 기존 연구의 관파손감지 방법들은 제시된 방법론을 설명하고 검증하기 위하여 개별적으로 사고사례 데이터 세트를 적용하고, 다양한 평가지표를 통하여 성능을 평가하여, 방법 간의 객관적인 비교는 매우 어

려운 실정이다.

적용된 사고사례 데이터 세트는 Table 3에서 제시된 바와 같이 자료의 생성 방법에 따라 사고이력 데이터 세트(historical dataset), 엔지니어링 테스트 데이터 세트(engineering test dataset), 합성 데이터 세트(synthetic dataset)로 구분될 수 있다. 사고이력 데이터 세트는 실제 관파손이 포함된 모니터링 자료이어서 실제 상황에서 감지방법의 효과를 분석할 수 있다. 그러나 실사고 자료는 한정적이고 정확한 파손시간을 파악하는 데 어려움이 있어 활용에 한계가 존재한다. 엔지니어링 테스트 데이터 세트는 소화전 또는 배수밸브의 개방을 통해 인위적인 사고를 유발하여 실제 사고를 유사하게 모사한 자료이다. 해당 데이터 세트는 사고지점과 사고량을 명확하게 파악할 수 있고 운영되고 있는 시스템에서 실험한 자료이어서 관파손감지 방법론의 성과평가를 할 때 가장 널리 활용되고 있다. 그러나 사고 모의 시 수압감소와 대규모 방류로 인해 시스템 운영 시 제약사항이 발생할 수 있어 데이터를 확보하기 어려우며, 도·송수관과 같은 대구경 관로의 자료를 확보하기는 특히 어렵다. 합성 데이터 세트는 물사용량과 패턴을 가정하고 관망을 간략화한 수리모델을 시뮬레이션하여 생성된다. 다양한 사고형태, 사고지점, 관파손 유출량을 포함하는 데이터 세트 구성이 가능하며, 연구자의 목적에 적합한 데이터를 구성할 수 있다. 그러나 해당 자료는 수리모델의 정확성이 담보되어야 하는 한계가 존재한다. 본연구에서는 식 1의 1번 타이 밸브 유량을 사고유량으로 고려하는 엔지니어링 테스트 데이터 세트를 적용하였다. 2023년 5월 취득된 자료를 활용하여 1번 타이밸브의 유량을 인지하고 있는 정상상황과, 미인지하고 있는 사고상황으로 고려하여 제시한 물수지 분석 방법론의 평가를 수행하였다.

제시된 관파손감지 방법들의 성능평가 및 비교를 위해서는 적합한 평가지표가 선정되어야 한다. 평가지표는 일반적으로 Table 4와 같은 혼동행렬(confusion matrix)에 기반한 지표와 혼동행렬에 기반하지 않은 지표들이 활용되고 있으며, 각각의 지표들은 Table 5에 설명된 바와 같다. 혼동행렬은 분류모델의 성능을 평가하기 위해 널리 사용되는 예측분류와 실제분류로 구성되는 행렬로, 진양성(true positive, TP), 위양성(false positive, FP), 위음성(false negative, FN), 진음성(true negative, TN)으로 구성된 네 가지 상황을 빈도별로 정





Table 4. Confusion matrix

		Predicted class	
		Positive	Negative
Actual class	Positive	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	Negative	False Positive (FP)	True Negative (TN)

Table 5. Performance metrics for pipe burst detection methods

Category	Metric	Definition or equation
Confusion matrix-based	Accuracy	$\frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN}$
	Precision	$\frac{TP}{TP + FP}$
	Recall or sensitivity (true positive rate, TPR)	$\frac{TP}{TP + FN}$
	Specificity (true negative rate, TNR)	$\frac{TN}{TN + FP}$
	False negative rate (type I error)	$\frac{FN}{TP + FN}$
	False positive rate (type II error)	$\frac{FP}{FP + TN}$
	F1-score	$\frac{2TP}{2TP + FN + FP}$
	Receiver operating characteristic (ROC) curve	- Plot of the true positive rate against the false positive rate
	Area under the curve (AUC)	- Area under the ROC curve
Non-confusion matrix-based	Minimum detectable pipe burst size (MDBS)	- Smallest pipe burst flow rate that can be detected by the proposed method
	Completely detected pipe burst size (CDBS)	- Biggest pipe burst flow rate that can be completely detected by the proposed method
	Detection time (or average detection time)	- Elapsed time between the beginning of a pipe burst and its detection

리한다. 해당 혼동행렬을 활용하여 정확도(accuracy), 정밀도(precision), 민감도(sensitivity), 특이도(specificity)와 같이 모델이 실제 상황과 동일하게 분류한 정도를 나타내는 지표와 위음성률(false negative rate), 위양성률(false positive rate)과 같이 모델 오류를 나타내는 지표들이 사용된다. 일반적으로 관파손감지 분류 시 정상적인 상황에 비해 관파손사례가 적어 정확성과 관련된 지표들은 편향된 결과가 도출된 소지가 크다. 이를 보완하기 위해 정밀도와 민감도의 조화평균인 F1 score를 활용하기도 한다. 그리고 전체적인 성능을 나타내기 위해 ROC(Receiver Operating Characteristic) curve와 AUC(Area Under the Curve)를 적용할 수 있다.

비혼동행렬 기반 지표는 제시된 모델이 감지할 수 있는 가장 작은 유량을 의미하는 최소감지유량규모(minimum detectable pipe burst size), 해당 값 이상의 값들은 100% 감지할 수 있는 완전감지유량규모(completely detected pipe burst size), 그리고 파손에서 감지까지 걸리는 시간인 감지시간(detection time)이 있다.

연구자들은 민감도(Bakker et al., 2014; Jung et al., 2015; Loureiro et al., 2016; Wu et al., 2016; Huang et al., 2018; Ahn and Jung, 2019; Wang et al., 2020; Wu and Liu, 2020) 위양성률(Bakker et al., 2014; Loureiro et al., 2016; Wu et al., 2016; Huang et al., 2018; Ahn and Jung, 2019; Wang et al., 2020; Wu and Liu, 2020)

pp. 311-324  
pp. 325-334  
pp. 335-345  
pp. 347-361  
pp. 363-373  
pp. 375-382  
pp. 383-394  
pp. 395-408  
pp. 409-423  
pp. 425-435  
pp. 437-446  
pp. 447-456

AUC(Bakker et al., 2014; Romano et al., 2014; Wu and Liu, 2020) 및 감지시간(Misiunas et al., 2006; Mounce et al., 2010; Romano et al., 2014; Jung et al., 2015; Sanz et al., 2016; Wang et al., 2020; Xu et al., 2020)들을 활용하여 모델의 성능을 평가하였다. 수도사업자의 경우 상수관망 운영 시 대부분은 정상적인 경우이어서 관파손감지 모델의 정확성과 관련된 지표는 매우 높을 수밖에 없다. 따라서 관파손감지 모델의 오류와 연관된 위양성률과 위음성률이 운영상 중요하다. 그리고 해당 모델의 감지 유량과 연관 있는 최소감지유량규모와 완전감지유량규모, 그리고 감지시간을 사전에 인지하고 있으면, 누수관파손감지 시스템을 효율적으로 운영할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 위양성률, 위음성률, 최소감지유량규모, 완전감지유량규모, 감지시간을 물수지분석 방법의 평가지표로 적용하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 물수지 분석 모델

본 연구에서는 Table 2에 제시된 절차에 따라 물수지 분석 모델을 구축·평가하고, 관파손감지 성능을 평가하였다. 우선적으로 예측정확도 분석과 잔차분석을 통해 6개의 다른 샘플링 간격(10분, 20분, 30분, 40분, 60분, 120분)을 가지는 물수지 분석 모델 중에서 관파손감지에 적합한 모델을 선정하고자 하였다. 샘플링 간격이 30분인 모델의 경우, 30분간의 평균 유량을 모델에 적용한 결과이며 해당 모델의 감지시간은 샘플링 간격과 동일한 30분으로 판단하였다.

모델의 예측정확도를 평가하는 지표로는 MAE, MaxAE, MAPE, RMSE를 적용하였으며 각각의 모델별 해당 지표 값은 Table 6에 나타난 바와 같다. 모든 지표들이 샘플링 시간이 길어질수록 감소하여, 모델의 예측정확도가 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 실

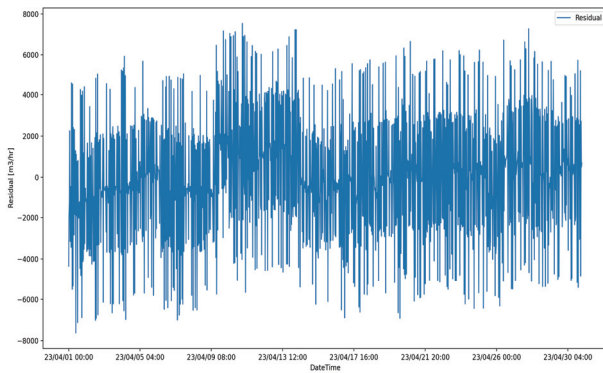
제 유량 대비 예측값의 오차를 퍼센트로 나타내는 MAPE를 살펴보면 10분에서 30분까지는 7.35%에서 3.09%로 4.26% 감소하였으나 30분부터 60분까지는 3.09%에서 1.60%로 완만하게 감소하였고, 120분에는 1.08%로 예측값과 실측값의 차이는 거의 없어 매우 높은 정확도를 나타내었다.

모델 구축 시 적용된 가정사항에 대한 만족 여부를 검증하기 위해 잔차분석을 수행하였으며, 정상성, 자기상관관계, 정규성을 시각적인 방법(잔차 그림, 자기상관함수, 잔차 히스토그램, P-P plot)과 가설 검증(ADF 검정, KPSS 검정, 더빈-왓슨 통계량, 샤피로-윌크 검정)을 통해 검토하였다. 30분 샘플링 간격 모델의 잔차 그림과, 자기상관함수, 잔차 히스토그램, P-P plot은 Fig. 3과 Fig. 4와 같으며, 6개 모든 모델의 가설 검정 결과는 Table 7에 제시되어 있다. 정상성 검정을 위해 유의수준을 0.05로 고려할 경우 ADF 검정은 모든 모델에서 정상성을 가지는 것으로 판단하였으나, KPSS 검정에서는 모든 모델이 정상성을 띄지 않는 것으로 나타났다. 이를 통해 모든 모델은 약한 정상성을 가지는 것으로 판단된다. 자기상관관계를 판단하기 위한 더빈-왓슨의 통계량은 10분(2.34)과 120분(1.62)을 제외하고 샘플링 간격이 증가하면서 점차 2에 가까운 값으로 변화하였다. 40분 샘플링 간격에서는 2.11의 값을 나타내어서 40분 이상 샘플링 간격의 모델은 자기상관관계가 없는 것으로 판단된다. 정규성 검토를 위해 수행된 샤피로-윌크 검정에서는 유의수준 0.05에서 40분 이상의 샘플링 간격에서는 잔차가 정규분포를 따르는 것으로 분석되었다.

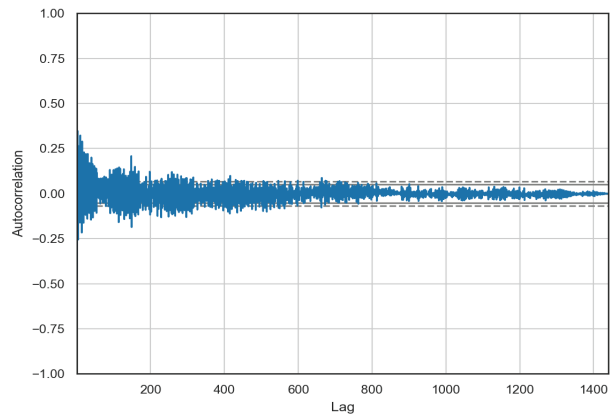
분단위 적산 유량값은 유량계 민감도와 통신설비 또는 SCADA 시스템의 설정에 따라 해당 시간에 계측값이 0인 경우들이 존재한다. 따라서 적산 유량계를 통해 산정된 유량값은 샘플링 간격이 길어질수록 중첩 효과에 의해 실제 유량값과 가까운 값을 가지며, 이에 따라 물수지 분석 모델의 샘플링 간격이 증가할

Table 6. Performance metric values of mass balance models with different sampling interval

Metric \ $\Delta t$	10 min	20 min	30 min	40 min	60 min	120 min
MAE [m <sup>3</sup> /hr]	5,817	3,912	2,461	1,558	1,274	856
MaxAE [m <sup>3</sup> /hr]	22,783	14,883	7,626	6,231	4,542	2,778
MAPE [%]	7.35	4.93	3.09	1.96	1.60	1.08
RMSE [m <sup>3</sup> /hr]	7,525	4,904	3,069	1,945	1,559	1,070

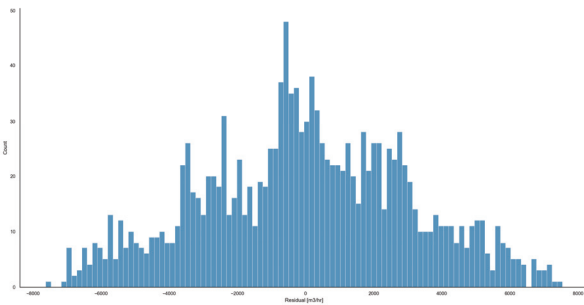


(a) Residual plot

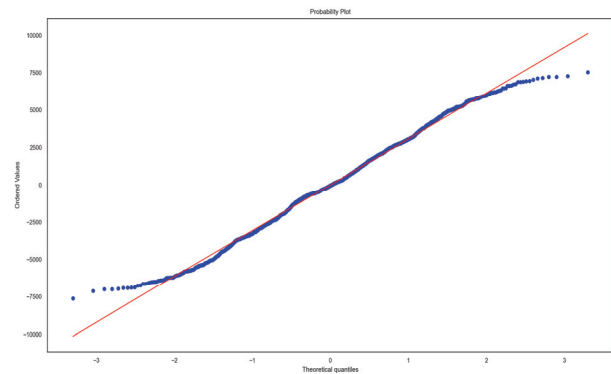


(b) auto correlation

Fig. 3. Residual plot and auto correlation function of 30 minute time interval model.



(a) Residual histogram



(b) P-P plot

Fig. 4. Residual histogram and P-P plot of 30 minute time interval model.

Table 7. P-value and statistics of mass balance model with different time interval

Category	Test	10 min	20 min	30 min	40 min	60 min	120 min
Stationary	ADF	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04
	KPSS	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04
Auto correlation	Durbin-Watson	2.34	3.37	2.95	2.11	2.07	1.62
Normality	Sapiro-Wilk	0.00	0.00	0.00	0.60	0.11	0.14

수록 정확도와 가정사항의 만족도가 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 대상이 되는 도수관로는 통수 유량이 많고 수압이 높아서 파손이 발생할 경우 피해가 크며, 주변의 시민들이 수도사업자들보다 먼저 인지하는 경우들이 종종 존재하다. 따라서 수도사업자는 모델을 적용하여 최대한 빠른 시간에 관파손을 인지하는 것이 매우 중요하다. 위에 논의된 바와 같이 수

도사업자는 모델의 정확도를 위해서 샘플링 간격을 증가시키는 것이 필요하며, 감지시간을 줄이기 위해 샘플링 간격을 작게 하는 상충하는 두 가지 목적을 만족하도록 관파손감지 시스템을 구축하여야 한다. 본 연구서는 모델의 정확도와 잔차분석을 통해 30분 샘플링 간격이 두 가지 조건을 만족하는 경우로 판단하였으며, 해당 모델의 성능평가를 수행하였다.

### 3.2 물수지 분석 모델 기반 관파손감지 성능평가

30분 샘플링 간격의 물수지 분석 모델에 대한 성능 평가 지표로 위양성률, 위음성률, 최소감지유량규모, 완전감지유량규모를 적용하여 모델의 관파손감지 성능을 평가하였다. 그리고 해당 모델의 감지시간은 샘플링 간격과 동일한 30분이다. 해당 모델의 성능은 감지 기준값(문턱값)을 1,000 m<sup>3</sup>/hr에서 12,000 m<sup>3</sup>/hr까지 1,000 m<sup>3</sup>/hr 씩 증가하면서 감지 기준값 별로 평가하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 Table 8에 제시된 바와 같다. 위양성률은 감지기준이 1,000 m<sup>3</sup>/hr일 경우 72.6%에서 감지기준이 증가하면서 점점 감소하다가 10,000 m<sup>3</sup>/hr 일 경우 0.1%로 감소하였으며 그 이상의 기준에서는 거의 발생되지 않았다. 위음성률의 경우 감지기준을 1,000 m<sup>3</sup>/hr로 설정한 경우 9.3%이었으며 감지기준을 10,000 m<sup>3</sup>/hr로 설정할 경우 92.6%로 증가하여 사고 대부분을 감지하지 못하는 것으로 분석되었다. 이를 통해 높은 감지기준을 설정할 경우, 위양성률은 감소하여 관파손감지 시스템 운영자에게 운영 부하량은 점차 줄어들게 되었으나, 위음성률은 증가하여 사고를 인지하지 못하는 경우가 증가하게 되는 것을 정량적으로 확인할 수 있었다. 그리고 감지 기준이 증가함에 따라 최소감지유량규모와 완전감지유량규모도 점차적으로 증가하여, 큰 사고에서만 감지가 가능한 것으로 나타났다.

제시된 Fig. 5와 Table 8을 적용하여 도수관로내 물수지 분석 기반 관파손감지시스템 운영자는 적절한 감지기준을 수립할 수 있다. 운영자가 감지기준을

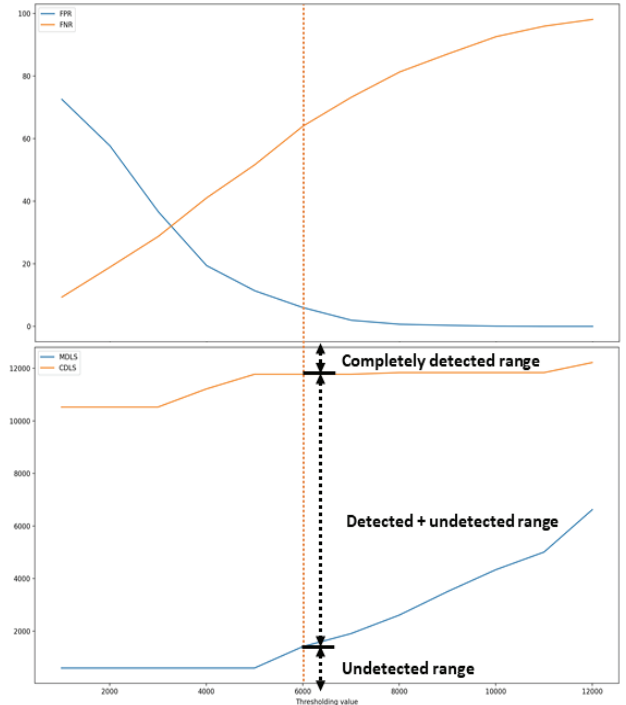


Fig. 5. FPR, FNR, MDLS and CDLS according to thresholding value.

Table 8. Normal and burst cases according to thresholding value

TV (감지기준)	Total	Normal case			Burst case					
		TN (진음성)	FP (위양성)	FPR (위양성률)	TP (진양성)	FN (위음성)	FNR (위음성률)	MDPS (최소감지 유량규모)	CDPS (완전감지 유량규모)	
1,000	1,488	408	1,080	72.6	1,349	139	9.3	592	10,528	
2,000	1,488	630	858	57.7	1,206	282	19.0	592	10,528	
3,000	1,488	943	545	36.6	1,060	428	28.8	592	10,528	
4,000	1,488	1,199	289	19.4	877	611	41.1	592	11,216	
5,000	1,488	1,319	169	11.4	719	769	51.7	592	11,776	
6,000	1,488	1,399	89	6.0	535	953	64.0	1,408	11,776	
7,000	1,488	1,459	29	1.9	398	1,090	73.3	1,904	11,776	
8,000	1,488	1,478	10	0.7	278	1,210	81.3	2,608	11,840	
9,000	1,488	1,483	5	0.3	192	1,296	87.1	3,504	11,840	
10,000	1,488	1,487	1	0.1	110	1,378	92.6	4,336	11,840	
11,000	1,488	1,488	0	0.0	60	1,428	96.0	5,008	11,840	
12,000	1,488	1,488	0	0.0	28	1,460	98.1	6,624	12,224	



6,000 m<sup>3</sup>/hr으로 설정하였을 경우, 사고 알람이 울렸을 경우 잘못된 알람인 경우는 6.0%이며, 사고감지 시스템이 사고를 인지하지 못할 확률은 64.0% 이었다. 그리고 1,408 m<sup>3</sup>/hr 이하 규모의 관파손은 감지하지 못하였으며, 11,776 m<sup>3</sup>/hr 이상의 사고는 모두 다 감지할 수 있었다. 그리고 1,408 m<sup>3</sup>/hr과 11,776 m<sup>3</sup>/hr 사이 규모의 사고는 감지 시점과 운영여건에 따라 감지가 되는 경우와 되는 경우와 되지 않는 경우가 존재하였다. 해당 기준보다 더 엄격한(더 작은) 감지기준을 적용할 경우 잘못된 알람은 증가하여 운영상의 어려움은 점차 증가하나, 인지하지 못하는 알람은 감소하고, 최소 감지유량규모와 완전감지유량규모도 감소하여 감지 성능은 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 느슨한(더 높은) 감지기준을 적용할 경우 운영상에 편의는 있으나, 감지 능력은 현격히 감소하였다. 수도사업자는 이와 같은 성능평가를 토대로 운영적 관점과 감지 효율 측면을 고려한 물수지 기반 감지시스템 운영 기준을 설정할 수 있다.

#### 4. 결 론

수도사업자는 상수관망에서 발생하는 물손실을 줄이기 위해서 다양한 노력을 수행하고 있으며, 그 중 중요한 부분은 운영 시 관파손이 발생한 순간을 빠르게 인지하는 것이다. 이처럼 관파손이 발생한 순간을 인지하기 위해서 SCADA 시스템이나 스마트 미터를 통해 실시간으로 측정되는 유량과 수압자료를 활용하여 물리모델 방법과 자료기반 해석 방법들이 적용되고 있으며 현재 많은 데이터를 동시에 고려하기 용이한 인공지능과 머신러닝 기법에 기반한 방법론이 널리 연구되고 있는 추세이다. 그러나 수도사업자는 한 가지 방법만을 관파손감지 시스템에 적용하는 것이 아니라, 각각의 방법론의 장단점을 파악하고 여러 가지 방법을 동시에 적용하여 관파손감지 시스템을 구축하여야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 가장 직관적이고 설명 가능한 유량 기반의 물수지 분석 방법론 및 절차를 제시하였으며, 해당 방법론을 도수관로 현장 구간에 적용하여 모델의 적용 가능성과 감지시스템 매개변수(샘플링 기간 및 감지기준) 별 감지성능을 평가하였다. 해당 구간에서 평가지표를 통한 예측정확도 평가와 잔차분석을

활용한 정상성, 자기상관관계 및 정규성을 검토한 결과 30분 이상의 샘플링 기간의 모델이 적합한 것으로 판단되었다. 그리고 30분 분석 모델에 6,000 m<sup>3</sup>/hr의 감지기준을 설정할 경우, 위양성률, 위음성률, 최소감지유량규모, 완전감지유량규모는 각각 6.0%, 64.0%, 1,408 m<sup>3</sup>/hr, 11,776 m<sup>3</sup>/hr의 값을 나타냈다. 이를 통해 물수지 분석 방법에 기반한 관파손감지 시스템 구축, 신규 유량계 설치, 그리고 감지기준 수립 시 정량적인 값에 기반한 의사결정이 가능하게 되었다.

본 연구를 통해 도수관로에서 유량계 기반의 물수지 분석 방법론의 적용 가능성을 확인하였으며, 더 높은 활용성을 위해 아래와 같은 사항들의 개선이 필요하다. 첫 번째로, 물수지 분석 방법을 적용한 본 연구의 결과는 특정한 관망 형태, 운영 조건, 설치된 유량계의 특성, 사고 모의 자료를 고려해 도출된 결과로, 해당 결과를 모든 구간에 범용적으로 적용하는 데는 한계가 있다. 따라서 수도사업자는 더 많은 구간에서 물수지 분석 방법을 적용하여 자료를 축적할 필요가 있다. 두 번째로, 감지기간을 줄이기 위해 수도사업자는 짧은 샘플링 구간에서 신뢰성 있는 모델을 구축하여야 하며, 이를 위해 정밀할 유량계를 설치조건에 적합한 위치에 설치하여야 한다. 그리고 지속적으로 유량계 검보정을 수행하여 유량계 계측 자료의 신뢰성을 확보하여야 한다. 세 번째로, SCADA 시스템과 같은 관제 시스템 내에서 자료를 실시간으로 저장하고 처리하는 중에 발생하는 오류를 줄여야 한다. 네 번째로는 수도사업자는 도수관로 내 중요지점에 유량계 설치를 통해 해당 방법론을 적용할 수 있는 구간들을 더 많이 확보해야 할 것이다. 마지막으로 상수관망에서 관파손감지를 위해 제시되는 모든 방법은 각각의 장단점이 있으므로, 수도사업자는 여러 가지의 많은 방법론을 수용하여 관파손감지 시스템을 구축하고 이에 대한 지속적인 현장 적용과 성능 평가를 수행하여야 할 것이다.

#### References

Abdulshaheed, A., Mustapha, F., and Ghavamian, A. (2017). A pressurebased method for monitoring leaks in a pipe distribution system: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 69(Mar), 902-911.

Adedeji, K.B., Hamam, Y., Abe, B.T., and Abu-Mahfouz, A.M.

pp. 311-324  
pp. 325-334  
pp. 335-345  
pp. 347-361  
pp. 363-373  
pp. 375-382  
pp. 383-394  
pp. 395-408  
pp. 409-423  
pp. 425-435  
pp. 437-446  
pp. 447-456

- (2017). Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview, *J. IEEE Access* 5, 20272-20285.
- Aksela, K., Aksela, M., and Vahala, R. (2009). Leakage detection in a real distribution network using a SOM, *Urban Water J.* 6(4), 279-289.
- Ahn, J., and D. Jung. (2019). Hybrid statistical process control method for water distribution pipe burst detection, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 145(9), 06019008.
- Bakker, M.,J., Vreeburg, H.G., Van De Roer, M., and Rietveld, L.C. (2014). Heuristic burst detection method using flow and pressure measurements, *J. Hydroinf.* 16(5), 1194-1209.
- Colombo, A.F., Lee, P., and Karney, B.W. (2009). A selective literature review of transient-based leak detection methods, *J. Hydro-Environ. Res.*, 2(4), 212-227.
- Ghazali, M, Staszewski, W.J., Shucksmith, J.D., Boxall, J., and Beck, S. (2010). Instantaneous phase and frequency for the detection of leaks and features in a pipeline system, *Struct. Health Monitor.*, 10(4), 351-360.
- Hu, Z., Chen, B., Chen, W., Tan, D., and Shen, D. (2021). Review of model-based and data-driven approaches for leak detection and location in water distribution systems, *J. Water Supply*, 21, 3282-3306.
- Huang, P.N., Zhu, D., Hou, J., Chen, Y., Xiao, J., Yu, G., and Zhang, H. (2018). Real-time burst detection in district metering areas in water distribution system based on patterns of water demand with supervised learning, *Water*, 10(12), 1765.
- Ismail, M.I.M., Dziyauddin, R.A., Salleh, N.A.A., Muhammad-Sukki, F., Bani, N.A., Izhar, M.A.M., and Latiff, L.A. (2019). A review of vibration detection methods using accelerometer sensors for water pipeline leakage, *J. IEEE Access*, 7, 51965-51981.
- Loureiro, D., Amado, C., Martins, A., Vitorino, D., Mamade, A. and Coelho, S.T. (2016). Water distribution systems flow monitoring and anomalous event detection: a practical approach, *Urban Water J.*, 13(3), 242-252.
- Jun, S., Jung, D., Lansley, K. (2021). Comparison of inputation methods for end-user demands in water distribution systems, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 147(12), 04021080.
- Jung, D., Kang, D., Liu, J., and Lansley, K. (2015). Improving the rapidity of responses to pipe burst in water distribution systems: A comparison of statistical process control methods., *J. Hydroinf.*, 17, (2), 307-328.
- Jung, D., and Lansley, K. (2015). Water distribution system burst detection using a nonlinear Kalman filter, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 141(5) 04014070.
- Kang, D., and Lansley, K. (2014). Novel approach to detecting pipe bursts in water distribution networks, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 140(1), 121-127.
- Li, R., Huang, H., Xin, K., and Tao, T. (2015). A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems, *Water Sci. Technol. Water Supply.*, 15(3), 429-441.
- Liggett, J.A. and Chen, L.C. (1994). Inverse transient analysis in pipe networks for leakage detection, quantification and roughness calibration, *J. Hydraulic Eng.*, 120(8), 934-955.
- Liou, C.P. (1993). Pipeline leak detection based on mass balance, *Pipeline Infrastructure II, Preceeding of the International Conference*, ASCE.
- Misiunas, D.J., Vitkovský, G., Olsson, M., Lambert, and Simpson, A. (2006). Failure monitoring in water distribution networks, *Water Sci. Technol.*, 53(4 - 5), 503-511.
- Mounce, S.R., Boxall, J.B., and Machell, J. (2007). An artificial neural network/fuzzy logic system for DMA flow meter data analysis providing burst identification and size estimation, *In Proc., Combined Int. Conf. of Computing and Control for the Water Industry, CCWI2007 and Sustainable Urban Water Management, SUWM2007*, London, UK, Taylor & Francis.
- Mounce, S.R., Boxall, J.B., and Machell, J. (2010). Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 136(3), 309-318.
- Mounce, S.R., Mounce R.B., and Boxall, J.B. (2011). Novelty detection for time series data analysis in water distribution systems using support vector machines, *J. Hydroinf.*, 13(4), 672-686.
- Palau, C.V., Arregui, F.J., and Carlos, M. (2012). Burst detection in water networks using principal component analysis, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 138(1), 47-54.
- Parry, B, Mactaggart, R., and Toerper C. (1992). Compensated volume balance leak detection on a batched LPG pipeline, *Proc. Int. Offshore Mech. Arctic Eng. Symp.*, 5, 501-507.
- Puust, R., Kapelan, Z., Savić, D.A., and Koppel. T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks, *Urban Water J.*, 7(1), 25-45.
- Romano, M., Kapelan, Z., and Savić, D.A. (2011). Real-time leak detection in water distribution systems, *In Water distribution systems analysis 2010*, Reston, VA, ASCE.
- Romano, M., Kapelan, Z., and Savić, D.A. (2014). Automated detection of pipe bursts and other events in water



- distribution systems, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 140(4), 457-467.
- Sanz, G., Pérez, R., Kapelan, Z., and Savić, D. (2016). Leak detection and localization through demand components calibration, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 142(2), 04015057.
- Steffelbauer, D. B., Deuerlein, J., Gilbert, D., Abraham, E., and Piller, O. (2022). Pressure-leak duality for leak detection and localization in water distribution systems, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 148(3), 1-13.
- Wan, X., Kuhanestani, P.K., Farmani, R., Keedwell, E. (2022). Literature review of data analytics for leak detection in water distribution networks: A focus on pressure and flow smart sensors, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 148, 03122002.
- Wang, X., Guo, G., Liu, S., Wu, Y., Xu, X., and Smith, K. (2020). Burst detection in district metering areas using deep learning method, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 146(6), 04020031.
- Wu, Y., Liu, S., Wu, X., Liu, Y., and Guan, Y. (2016). Burst detection in district metering areas using a data driven clustering algorithm *Water Res.*, 100(Sep), 28-37.
- Wu, Y., and Liu, S. (2017). A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems, *Urban Water J.*, 14(9), 972-983.
- Wu, Y., Liu, S., Smith, K., and Wang, X. (2018). Using correlation between data from multiple monitoring sensors to detect bursts in water distribution systems, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 144(2), 04017084.
- Wu, Y., and Liu, S., (2020). Burst detection by analyzing shape similarity of time series subsequences in district metering areas, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 146(1), 04019068.
- Xu, Z., Ying, Z., Li, Y., He, B., and Chen., Y. (2020). Pressure prediction and abnormal working conditions detection of water supply network based on LSTM, *Water Sci. Technol. Water Supply*, 20(3), 963-974.
- Ye, G., and Fenner, R.A. (2011). Kalman filtering of hydraulic measurements for burst detection in water distribution systems, *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.*, 2(1), 14-22.
- Zaman, D., Tiwari, M.K., Gupta, A.K., and Sen, D.A. (2020). Review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state, *J. Eng. Fail. Anal.*, 109, 104264.

pp. 311-324

pp. 325-334

pp. 335-345

pp. 347-361

pp. 363-373

pp. 375-382

pp. 383-394

pp. 395-408

pp. 409-423

pp. 425-435

pp. 437-446

pp. 447-456