



지진 재해 대응을 위한 진동 기반 구조적 관로 상태 감시 시스템에 대한 고찰

A review on vibration-based structural pipeline health monitoring method for seismic response

신동협¹·이정훈¹·장용선¹·정동휘¹·박희등¹·안창훈^{1,*}·변역근²·김영준²

Dong-Hyup Shin¹·Jeung-Hoon Lee¹·Yongsun Jang¹·Donghwi Jung¹·Hee-Deung Park¹·Chang-Hoon Ahn^{1,*}·
Yuck-Kun Byun²·Young-Jun Kim²

¹고려대학교 건축사회환경공학과, ²(주)삼안 상하수도부

¹School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University,

²Water supply & Sewerage Dept.1, Saman Corporation

pp. 323-334

pp. 335-349

pp. 351-365

Received 20 July 2021, revised 23 September 2021, accepted 24 September 2021.

*Corresponding author: Chang-Hoon Ahn (E-mail: ch01.ahn68@gmail.com)

- 신동협 (학생) / Dong-Hyup Shin (Student)
서울특별시 성북구 안암로 145, 02841
145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea
- 이정훈 (학생) / Jeung-Hoon Lee (Student)
서울특별시 성북구 안암로 145, 02841
145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea
- 장용선 (학생) / Yongsun Jang (Student)
서울특별시 성북구 안암로 145, 02841
145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea
- 정동휘 (교수) / Donghwi Jung (Professor)
서울특별시 성북구 안암로 145, 02841
145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea
- 박희등 (교수) / Hee-Deung Park (Professor)
서울특별시 성북구 안암로 145, 02841
145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea
- 안창훈 (연구교수) / Chang-Hoon Ahn (Research Professor)
서울특별시 성북구 안암로 145, 02841
145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea
- 변역근 (이사) / Yuck-Kun Byun (Director)
경기도 과천시 별양상가로 13, 13837
13, Byeoryangsangga-ro, Gwacheon-si, Gyeonggi-do 13837, Republic of Korea
- 김영준 (과장) / Young-Jun Kim (Manager)
경기도 과천시 별양상가로 13, 13837
13, Byeoryangsangga-ro, Gwacheon-si, Gyeonggi-do 13837, 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.

ABSTRACT

As the frequency of seismic disasters in Korea has increased rapidly since 2016, interest in systematic maintenance and crisis response technologies for structures has been increasing. A data-based leading management system of Lifeline facilities is important for rapid disaster response. In particular, the water supply network, one of the major Lifeline facilities, must be operated by a systematic maintenance and emergency response system for stable water supply. As one of the methods for this, the importance of the structural health monitoring(SHM) technology has emerged as the recent continuous development of sensor and signal processing technology. Among the various types of SHM, because all machines generate vibration, research and application on the efficiency of a vibration-based SHM are expanding. This paper reviews a vibration-based pipeline SHM system for seismic disaster response of water supply pipelines including types of vibration sensors, the current status of vibration signal processing technology and domestic major research on structural pipeline health monitoring, additionally with application plan for existing pipeline operation system.

Key words: Vibration signal, Signal processing, Pipelines, Seismic response, Structural health monitoring

주제어: 진동 신호, 신호 처리, 관로, 지진 대응, 구조적 상태 감시

1. 서 론

지진은 상수 관망에 영향을 미치는 주요 자연 재해 중 하나로, 관 파손 등 1차 피해에 따른 수도물 공급 가능량 감소와 시설물 파손에 따른 화학적 유해물질 유출 등의 2차 피해 문제로 이어질 수 있다 (PAHO and WHO, 2002). 지진에 의한 매설 관 손상 원인은 파동 전파에 의한 손상은 거의 발생하지 않으며 주로 단층, 액화와 같은 영구적 지반 변형에 의해 발생한다. 영구적 지반 변형 발생 시 연속된 관은 관 재질의 연성 한계를 초과한 경우, 분할된 관은 조인트의 허용 변위 한계를 초과한 경우 관로 손상이 발생한다 (Liang and Sun, 2000). 국내 지진 발생 빈도는 증가하고 있으며 규모 2.0 이상 지진의 경우, 1978~2015년 사이 총 1,208회로 연평균 약 30회 발생하였으나, 2016~2020년 사이 총 746회로 연평균 약 150회 발생하고 있다 (KMA, 2019). 또한 기상청 관측 이후 최대 규모인 경북 경주에서 발생한 진도 5.8 지진을 포함하여 2016년 이후 규모 5.0 이상 지진이 4회(KMA, 2019) 발생하는 등 국내 지진 발생 빈도와 강도가 급격히 증가하는 추세다. Park et al. (2020)에 의하면, 국내에서는 지진 재해에 대비하여 지진·화산 재난대책법에 따라 내진설계기준 적용 시설물을 지정하고, 수도법에 의해 수도시설을 포함하는 등 국가차원에서 법령 및 기준을 지속적으로 관리하고 있으나 이러한 기준들은 태풍, 홍수 등 다양한 자연재해가 함께 고려되어 제정되고 있다. 따라서 각 재해의 특성에 맞게

세분화된 대응 시스템 및 중장기적 관리 제도와 같이 특성화된 대응 체계 구축이 필요하며, 지진 발생 대비를 위한 상하수도시설 운영 관련 기술 연구는 상대적으로 미흡한 실정이므로(Park et al., 2020), 지진 재해 대비 및 신속한 대응을 위한 상수 관망 운영 시스템의 보완 및 대책 마련이 시급히 촉구된다.

최근 ICT 기술이 급격한 발전과 더불어 다양한 분야에 활용됨에 따라 지진 전조 현상 실시간 감시, 지진 조기경보 시스템 등 ICT기반 재난관리 기술과 관련하여 많은 연구가 진행되고 있다 (Park et al., 2020). 특히 센서 및 통신 기술의 발전에 의해 구조적 상태 감시 (Structural health monitoring, SHM) 기술의 효용성이 주목을 받고 있으며, 이는 센서를 기반으로 구조물의 변형, 하중, 변위, 균열, 수분 등과 같은 구조적 상태를 비 파괴 기반으로 실시간 감시하는 기법이다 (Kim, 2016). 기존의 주요 관망 감시 항목인 유량, 압력, 수질 등의 비구조적 항목과 구분되며, 지속적 상태 감시를 통해 사전 예방 및 사후 조기 대응이 가능한 특징이 있다. 특히 모든 기계는 진동을 발생하기 때문에(Goyal and Pabla, 2016), 진동 기반 구조적 상태 감시 기술(Vibration-based SHM)은 항공, 철도, 다리 등 다양한 구조물의 상태 감시를 위해 폭넓게 사용되어 왔으며(Fassois and Kopsaftopoulos, 2013), 관로 시설물의 경우, 플랜트 배관에 관내 유체 흐름 및 압력 변화에 따른 진동이 발생함에 따라 플랜트 시설 위주로 관련 기술이 연구 및 적용됐다. 하지만 상수 관로의 유지관리는 조기 결함 감지를 위한 센서 및 네트워크 기반의 구조적 상태 감시 체제로 패러다임이 변



화하는 추세며(Kim, 2016), 특히 MEMS(Micro-Electro Mechanical Sensor) 기술 개발에 따라 소형 센서가 갖는 장점인 비 침습적(Non-invasive), 간편한 센서 설치, 적은 유지 비용 등의 장점을 이용하여 최근 상수 관로에도 진동 기반 누수 및 위치 탐지 연구가 진행 되고 있다 (Ismail et al., 2018). 한편, 지진 대응 시스템 경우 상수 관망의 지진 신뢰성 평가 모델 개발에 초점을 둔 연구 혹은 EPANET(Rossman, 2000), KYPIPE(Wood, 1995)와 같은 수리학적 모의 SW를 이용한 연구 등이 진행되고 있으나 (Yoo et al., 2016), 관로의 실시간 상태 데이터가 적용된 사례는 드문 상황이다.

따라서 본 논문에서는 지진 대응을 위한 진동 기반 구조적 관로 상태 감시 시스템의 소개와 함께 국내외 연구 사례를 살펴보고 시스템의 필요성 및 적용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 진동 기반 구조적 상태 감시 시스템

2.1 구조적 상태 감시 시스템(Structural health monitoring, SHM)

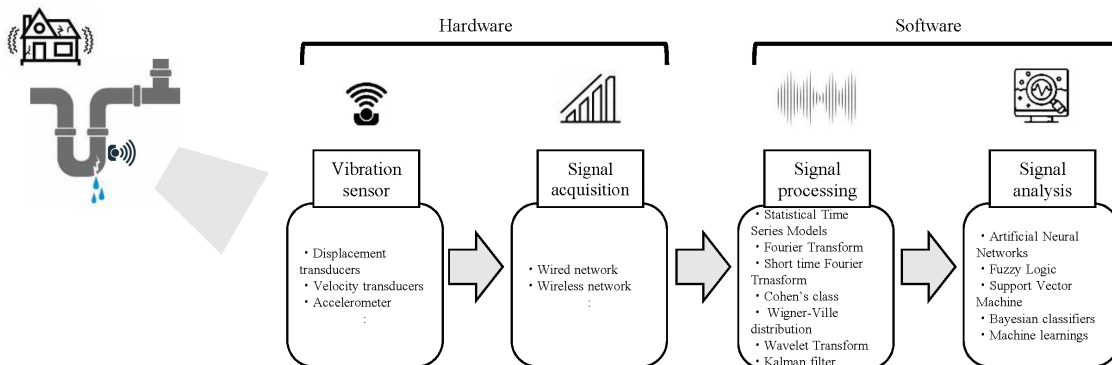
구조적 상태 감시 시스템은 비 파괴 검사 기반으로 (Tushar et al., 2019), 4가지 장점을 갖는다 (Alokita et al., 2019). 첫째, 구조물의 조기 결함 감지가 가능하여 노화로 인한 내부 균열 감지, 구조물 설계 시 구조물에 미치는 영향 분석 등에 적용된다. 둘째, 조기 위험 감지가 가능하여 댐의 홍수 피해 예방, 구조물 붕괴 감시, 산사태 및 지진 대응 감시 등에 적용이 가능하다. 셋째, 지속적인 구조물 상태 감시를 통해 효율적

인 유지보수에 따른 구조물 수명 증가가 가능하며 특히 기본 재료 특성을 유지하지 않아 손상 예측이 어려운 복합 재료(Composite materials) 구조물에도 효과적인 구조물 손상 예측이 가능하다. 넷째, 구조물의 미세 균열 및 파손 감지가 가능하여 신속한 대응에 의한 유지보수 관련 장단기 비용 지출을 절감할 수 있다 (Tushar et al., 2019).

구조적 상태 감시의 국내 실정은 구조물의 경우 제2진도 대교에 무선 스마트 센서를 부착하여 full scale의 구조물 건전성 감시 시스템이 구축됐다 (Yun and Min, 2011). 하지만 상수 관망의 경우 비 파괴 검사보다 관측 직접조사, 예측 모델 및 보수 보강 로봇 연구, 혹은 수리 및 수질 감시 위주로 국가 R&D가 수행됐으며, 사고발생 전 예측 및 대응을 위해 구조적 상태 변화 감시 기술 도입이 필요한 실정이다 (Kim, 2016).

2.2 진동 기반 구조적 상태 감시 시스템(Vibration-based SHM)

진동 기반 구조적 상태 감시 기법은 일반적으로 모드 감쇠, 모드 형상 및 모드 주파수 등의 모드 변수 분석을 통해 구조물의 상태를 분석하며(Jung, 2019), 기계의 시작, 멈춤, 정상 운영 등의 전반적인 운영 단계의 상태 감시를 위한 기술이다 (Scheffer and Girdhar, 2004). 시스템의 세부 구성은 신호 감시, 신호 획득, 신호 처리 및 신호 해석의 네 단계로 구성되며 (Fig. 1.), 작은 범위의 손상을 감지하는 로컬 방법이 아닌 상대적으로 넓은 감지 범위를 갖는 글로벌 방법에 해당한다 (Avci et al., 2021).



Modified from (A. Sanchez and Hojjat, 2016) Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(1), 1-15.

Fig. 1. The step of vibration-based SHM system.

pp. 323-334

pp. 335-349

pp. 351-365

3. 진동 센서

진동 센서는 정확한 상태 감시 시스템 구축의 핵심이다 (Goyal and Pabla, 2016). 이는 진동 센서에서 발생하는 응답 신호가 구조물 상태 분석을 위한 기반 데이터로 사용되기 때문이며 (Avci et al., 2021), 기존 관로 감시에 널리 적용되는 압력 센서에 비해 구조의 무결성 및 더 많은 상태 정보의 획득이 가능한 특징이 있다 (Park et al., 2021). 진동 픽업(Vibration pickup)은 접촉 타입의 변환기(Transducer)와 기타 기기의 결합으로 기계적 진동량을 전기량으로 바꾸는 전기 기계 변환 장치로 (Goyal and Pabla, 2016), 주요 진동 센서의 모식도는 Fig. 2에 표시되었으며 개념 및 연구 사례는 다음과 같다.

3.1 변위계

변위 변환기는 10 Hz 미만의 저주파 진동 측정 혹은 기계 요소 간 간격이 작은 경우에 유용하며, 샤프트 진동 측정 장치에 사용된다 (Goyal and Pabla, 2016). 변위 변환기 중 와류 전류 근접 센서(Eddy current proximity sensor)는 회전체의 축 진동 비 접촉식 측정에 사용되며 (Cho et al., 2011), 유도성 근접 스위치(Inductive proximity switch)는 금속 물체 감지, 특히 철 금속 감지에 가장 적합하다. 또한 정전용량 센서(Capacitive sensors)는 고정밀, 고해상도, 동적 및 비 접촉 측정에 적합하다 (Goyal and Pabla, 2016).

주요 연구 사례로는 국내 지중매설 폴리에틸렌 관의 구조적 단기 거동 예측을 위해 실내모형실험의 관 변위

측정에 사용되었으며, 관 변형 5% 발생 경우의 측정값과 유한요소해석(Finite element analysis) 모델 값의 비교 결과 유사한 경향을 확인했다 (Kim et al., 2012).

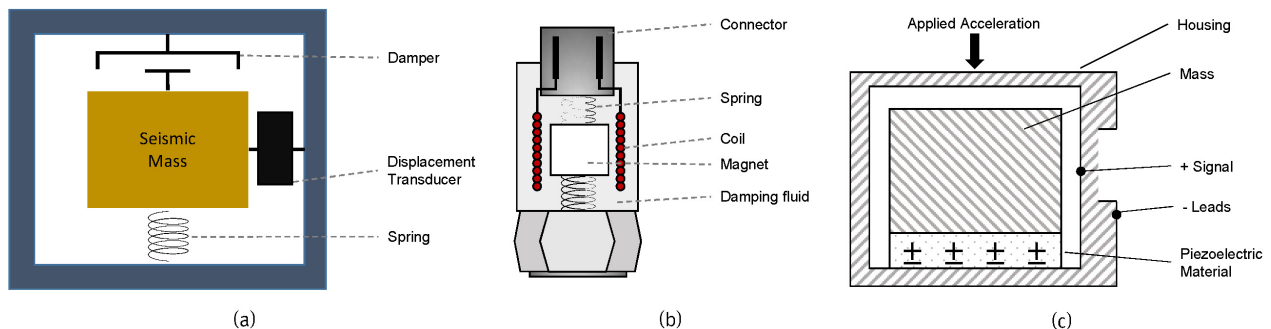
3.2 속도계

속도 변환기는 전자기 유도 원리에 의해 변위 응답을 측정하며 10~1000 Hz 이내 주파수 진동 측정을 위해 사용된다. 장점은 민감도, 간단한 후처리 회로, 속도에 비례하는 출력 신호, 주파수 간섭 방지 능력 등이 있는 반면, 단점은 충격에 민감하기 때문에 큰 설치 공간을 필요로 하는 점이 있다 (Goyal and Pabla, 2016). 일반적으로 지반 진동 산정을 위한 진동 입자 속도 계측을 위해 사용된다 (Kim and Lee, 1999).

주요 연구 사례로는 국내 취수장의 대응량 펌프 및 전동기의 진동에 의해 취수장 건물 내·외부 균열 등이 발생함에 따라 펌프, 모터, 배관 및 건물의 진동 측정에 적용이 되었으며 그 결과 진동 전달 경로를 파악하고 배관계의 고유진동수를 확인했다 (Gu et al., 2007).

3.3 가속도계

가속도계는 압전 효과를 이용한 전기 기계식 변환기로, 가속도 벡터의 크기 및 방향 측정을 위해 최소 세개 이상 서로 다른 방향의 측정 신호가 필요하다. 장점은 가벼운 무게, 높은 주파수 범위, 소형화, 내구성, 높은 민감도 등이며, 단점은 높은 출력 임피던스, 외부 환경 간섭에 대한 취약성, 약한 출력 신호에 따른 증폭 회로를 필요로 하는 점 등이다 (Goyal and Pabla, 2016).



Power-mi. <https://power-mi.com/content/seismic-velocity-transducers> (March 03, 2021)
 Circuitglobe.com. <https://circuitglobe.com/seismic-transducer.html> (March 03, 2021)
 Industrial electronics. http://www.industrial-electronics.com/DAQ/industrial_electronics/input_devices_sensors_transducers_transmitters_measurement/Accelerometers.html (March 03, 2021)

Fig. 2. Vibration sensors component: (a) Displacement transducer; (b) Velocity Transducer; and (c) Accelerometer.



주요 연구로 가속도계 기반의 관로 누수 분석에 적용된 사례가 많다. 국내 실 운용중인 장거리 대구경 지하 매설 관의 손상 위치 검출을 위해 파워 스펙트럼 밀도와 코히어런스 함수의 상호 비교를 통해 최적 주파수 대역을 확인하고, 전파 속도 추정 값을 사용하여 손상 위치의 표정 결과 99%의 높은 정확도를 확인했다 (Lee et al., 2020).

4. 진동 신호 처리 기술

신호 처리 기술은 시스템의 핵심 요소로서 구조물 손상 감지, 규명 및 정량화를 목표로 한다 (A. Sanchez and

Hojjat, 2016). 신호 처리 단계는 초기 진동 신호에 포함된 잡음 제거와 구조물 상태 분석 기법 선정(Goyal and Pabla, 2016) 그리고 구조물 동적 부하 응답 프로세스의 정확한 분석을 위해 필요하며, 이에 따라 시스템 구성 요소 중 가장 유망한 분야다 (A. Sanchez and Hojjat, 2016). 변위, 속도 및 가속도 유형의 진동 응답을 분석하며 정상 신호의 모달 파라미터 식별, 비정상 신호의 시간-주파수 분석 및 감지 등이 포함된다 (Bao and Li, 2020). 본 파트에서는 진동 신호 처리에 적용된 전통적인 알고리즘과 기계학습 및 딥러닝의 주요 알고리즘을 요약하고, 진동 기반 관로 상태 감시의 국내외 주요 연구 사례를 소개하고자 한다 (Table 1).

Table 1. Merits and demerits of signal processing techniques

Method	Pros	Cons	Reference
Statistical TS models	1. Linear model - Simplicity of application - Different models for various application 2. Nonlinear model - available for modeling nonlinear systems	1. Linear model - Acute sensitivity to noise - Not available for complex systems 2. Nonlinear model - Calibration for model order determination	(A. Sanchez and Hojjat, 2016)
FFT	- Simplicity of application - Effective usage of computing resource	- Acute sensitivity to noise - Not available for nonlinear signals analysis - Only frequency expression - Changeable resolution by the amount of samples	
STFT	- Simplicity of application - Time-frequency expression - Effective usage of computing resource	- Limitation of time-frequency resolution - Changeable resolution by the amount of samples - Not available for nonlinear and transient signals analysis	
Cohen's Class	- Advanced resolution in time-frequency domain - Closely spaced mode observation	- Kernel selection affects distribution function characteristics	
WT	- Advanced resolution in time-frequency domain - Superior signal-to-noise ratio	- Affected by spectral leakage - Requires several decomposition levels - Affected by mother wavelet selection	
KF	- Superior signal-to-noise ratio - High quality change ratio estimation in time	- Parameter calibration necessary - Large computing time - Limitation of convergence speed and tracing correctness	
SVM	- Superior generalization properties for a less number of samples - Faults classification	- Low transparency in results - Computationally expensive	
CNN	- Superior computational efficiency - Good multidimensional data analysis - Good performance to extract local feature	- Complex, with network structure - Requiring for long calculation time	(Toh and Park, 2020)

pp. 323-334

pp. 335-349

pp. 351-365

4.1 시계열 분석 모델(Statistical Time Series Models)

시계열 모델은 초기 구조적 상태 감시 연구에 널리 사용된 모델로 선형 모델과 비선형 모델로 구분된다 (Goyal and Pabla, 2016). 선형 모델은 신호 처리와 동적 부하 구조물의 상태 분석을 위해 가장 널리 사용된 기법이며, 비선형 모델은 비선형성 처리를 위한 기법으로 모델 계수의 평가에 효과적이며 최근 10여년간 SHM에서 사용됐다 (A. Sanchez and Hojjat, 2016). 이 모델은 두 단계로 구분되며, 첫째는 초기 기준 단계로 정상 상태 구조물의 진동 반응을 통해 구조물의 특성 및 비 특성 항목을 규명하고 항목 별 특성량을 파악한다. 둘째는 점점 단계로 실측 데이터를 이용하여 첫번째 초기 기준 단계를 연속 시행한 후 손상 규명, 위치 감지 및 정량화를 한다 (A. Sanchez and Hojjat, 2016).

주요 연구 사례로는 호주에서 해저 관로의 진동 특성 감시 및 분석을 위해 대표적인 시계열 모델 중 하나인 ARMA(An integrated autoregressive moving average)를 적용하였으며, 주변 파도 및 토양 등 높은 수준의 노이즈에 노출되는 환경 특성에 따라 주변 진동 응답 분석을 통해 해저 관로 상태를 식별하는 통합 알고리즘을 개발하였다 (Bao et al., 2013).

4.2 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)

고속 푸리에 변환은 오랫동안 널리 사용된 신호처리 방법 중 하나로 불연속적인 정지 신호 분석에 효율적인 장점을 갖는다 (A. Sanchez and Hojjat, 2016). 연속 신호의 이산 샘플을 주파수 영역으로 표현하며 개별 지점의 고유 진동수 및 모드를 의미하는 모달 파라미터를 기반으로 구조물 손상 감지를 한다 (Goyal and Pabla, 2016). 하지만 실제 구조물의 발생 신호는 비 선형적이며 유동적인 특징에 따라, 이를 보완하는 단시간 푸리에 변환 및 웨이블릿 변환 알고리즘 등이 개발됐다 (A. Sanchez and Hojjat, 2016; Goyal and Pabla, 2016).

주요 연구 사례로는 중국 천연 가스 배관의 안정성을 낮추는 비정상적 진동의 원인 분석을 위해 가압장 주요 배관의 현장 진동 테스트 및 해석 모델 결과를 비교했으며, 배관의 와전류 핵심 영역의 압력 변동 스펙트럼 다이어그램을 얻기 위해 고속 푸리에 알고리즘이 적용됐다. 분석 결과로 가스 배관의 진동 저감 방안을 제시했다 (Li et al., 2017; Liu et al., 2020)

4.3 단시간 푸리에 변환(Short-Time Fourier Transform, STFT)

단시간 푸리에 변환은 유동 상태 신호 분석을 위한 시간-주파수 영역 분석 기법 중 하나로(Lee, 2015), 시간 영역의 진동 신호를 작은 세그먼트로 나누고, 개별 세그먼트를 정지 상태로 가정하여 푸리에 변환(Fourier transform)을 적용한다 (Lee et al., 2011). 고속 푸리에 변환(FFT)보다 유동 상태 신호 및 잡음 분석 능력이 향상된 장점이 있는 반면(A. Sanchez and Hojjat, 2016), 시간 및 주파수 영역의 해상도가 서로 반비례 관계이기 때문에 동시에 좋은 해상도를 얻을 수 없는 단점이 있다 (Sejdić et al., 2009). 이를 보완하기 위해 위그너 빌 분포 등의 기법이 개발되었다.

주요 연구 사례로는 미국 상수도 매설관의 조기 손상 발견을 위해 실제 운영중인 플라스틱 및 금속관의 가속도 신호를 측정했으며 주파수 영역 분석을 위해 상관 함수와 단시간 푸리에 변환 기법을 이용하여 주요 주파수 이동을 추적한 결과 금속관의 수압 변동 감지에 효율적임을 확인했다 (Shinozuka et al., 2011).

4.4 위그너 빌 분포(Wigner-Ville distribution, WVD)

위그너 빌 분포는 토목 구조물의 비선형적 거동 감시에도 사용되는 시간-주파수 분포이며, 높은 해상도를 가지며 적용이 쉬운 장점이 있는 반면, 고유 주파수(Natural frequency) 근접 범위에서 원본 신호에 없는 주파수 및 간섭 항이 발생하여 측정이 어려운 단점을 갖는다 (A. Sanchez and Hojjat, 2016; Spanos et al., 2007) 이를 보완하기 위해 코엔(Cohen)은 일반화된 시간, 주파수 기법을 정리하여 Cohen's class를 제시했다 (Lee, 2007).

주요 연구 사례로는 국내 배관 두께 측정을 위해 주파수 영역의 가속도계 데이터를 이용하여 위그너 빌 분포를 적용하였고, 그 결과 군속도(Group velocity) 및 배관 두께를 측정하는 기술을 제안했다. 실제 실험을 이용한 배관 두께와 군속도 간 상관관계를 증명하고, 관 파열 사고 검사 장치를 구현했다 (Han et al., 2010).

4.5 웨이블릿 변환(Wavelet Transform, WT)

웨이블릿 변환은 시간 영역 기준의 시간-주파수 신호 분석 방법으로 시간 및 공간 변화를 동시에 처리할 수 있다. 측정할 때 이산 시간 저고주파 필터 세트



를 이용하며(A. Sanchez and Hojjat, 2016), 신호를 마더 웨이블릿(Mother wavelet) 세트로 분해한다(Qiao et al., 2012). 장점은 작업 환경 변화에 덜 민감하고, 가속도 시간 응답의 급격한 변화 감지가 가능하며 데이터 압축, 소음 제거 및 효율적인 컴퓨팅이 가능한 점이며, 단점은 마더 웨이블릿 선택이 결과에 영향을 주며, 다양한 단계의 분해가 필요한 점이다(A. Sanchez and Hojjat, 2016; Goyal and Pabla, 2016).

주요 연구 사례로는 국내 송수관의 충격 위치 파악을 위한 알고리즘으로, 기존 웨이블릿 변환 기법이 야기하는 연산 부하 문제를 보완하기 위해 연속 웨이블릿 변환 기반의 알고리즘이 제안됐다. 이를 통해 잡음 제거 성능 향상, 작은 규모 충격 감지 효율 및 충격 위치 추정 정확도 향상 등을 확인했다(Park et al., 2021).

4.6 칼만 필터(Kalman Filter, KF)

칼만 필터는 베이시안 추론(Bayesian inference) 기반의 확률론적 물리량을 추정하는 방법으로 구조물의 수학적 모델에 계측 값을 적용하여 예측 값과의 융합된 결과를 산정한다(Park and Kim, 2020). 선형 동적 시스템 평가를 위한 최적의 신호 처리 알고리즘으로 알려져 있는 반면, 비선형적 동작을 포함하는 실제 구조물에 적용하기는 적합하지 않은 단점이 있다(A. Sanchez and Hojjat, 2016). 따라서 비선형적 응답을 처리할 수 있는 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)(Jazwinski, 2007), 정확도와 효율을 개선한 무향 칼만 필터(Unscented Kalman filter, UKF)(Wu and Smyth, 2007) 및 비선형 칼만 필터(Nonlinear Kalman filter, NKF) 등이 제안됐다(Jung and Lansey, 2015).

주요 연구 사례 중에는 항공기 엔진 유체 배관의 결합 감시를 위해서 가속도계와 FBG(Fiber bragg grating) 센서를 이용하고 시계열 알고리즘 중 하나인 AM(Autoregressive model)과 칼만 필터를 이용하여 진동 신호를 포착하고 분석했다. 그 결과 항공기 엔진 유체 배관의 결합 위치 표정 및 상태 감지에 효과적임을 확인했다(Li et al., 2017).

4.7 서포트 벡터 머신(Support vector machine, SVM)

서포트 벡터 머신은 기계학습 알고리즘 중 하나로 제한된 샘플 내에서 중속성 추정 및 학습을 위한 Vapnik-Chervonenkis(VC) 이론을 기반으로, 분류 및 회

귀 분석을 위한 데이터 분석을 시행하는 지도 학습 알고리즘이다. 우수한 분류 성능에 따라 특수 패턴 인식 및 기계 상태 감시에 폭넓게 사용되며 선형과 비선형 분류 모두 적용이 가능하다(Widodo and Yang, 2007). 적은 수의 샘플로도 일반화가 가능한 장점이 있는 반면, 컴퓨팅 부하가 많다는 단점이 있다(Karamizadeh et al., 2014).

주요 연구 사례 중에는 국내 플랜트의 물-가스가 흐르는 수직 상승 배관에서(Pipeline riser) 발생하는 슬러깅의 조기 식별을 위해서 가속도계와 SVM 알고리즘을 이용하여 정상 흐름과 슬러깅 흐름의 신호를 분류했으며, 이진 분류 결과 99.78%의 분류 정확도를 확인했다(Jung, 2019).

4.8 합성곱 신경망(Convolutional Neural Network, CNN)

딥-러닝 모델은 기계학습 알고리즘과 달리 특징 추출 프로세스의 자체 수행이 가능함에 따라 원시 입력 데이터로부터 최종 출력 데이터의 직접 매핑이 가능하다(Avci et al., 2021). 합성곱 신경망은 진동 데이터에 적용되는 일반적인 딥-러닝 모델 중 하나로(Zhang et al., 2019), 뛰어난 학습 성능에 의하여 토목 구조물의 진동 기반 손상 감지에 사용되고 있다(Avci et al., 2021). 장점은 고차원 데이터의 복잡한 구조 분석 성능과 높은 컴퓨팅 효율 등이 있으며, 단점은 복잡한 네트워크 구조를 가지며 긴 계산 시간을 필요로 하는 점 등이 있다(Avci et al., 2021; LeCun et al., 2015)

주요 연구 사례 중에는 국내 상수 관망 내 누수 감지 및 위치 파악의 정밀도 향상을 위해 합성곱 신경망과 서포트 벡터 머신을 결합한 ID-CNN-SVM 알고리즘을 기반으로 누수 감지 아키텍처를 제시했으며 다른 관련 알고리즘과의 비교를 통해 가장 높은 누수 감지 정확도인 99.3%와 3 m 이내의 위치 표정이 가능함을 확인했다(Kang et al., 2017).

5. 연구 현황

연구 현황은 시스템의 주요 요소인 가속도계와 신호 처리 기술이 적용된 누수, 감육, 변위 감지를 중심으로 조사하였다. 이 항목들은 지진 재해를 대비하여 안정적인 상수 관망 운영 및 유지관리를 위해 감시가

Table 2. Research status on vibration-based pipeline SHM system

Nation	Classification	Vibration sensor			Pipeline				Signal processing	Reference
		Type	Distance (m)	Quantity	Outer diameter (mm)	Material	Length (m)	Installation type		
Domestic	Leakage	Accelerometer	564	2	1,200	Steel	564	underground	IDFT	(Lee et al., 2020)
		Accelerometer	253.9	2	100	Cast-iron	253.9	underground	SCOT, PHAT, ML	(Lee and Yoon, 2014)
		Accelerometer	-	6	300	Ductile cast-iron	1280	underground	SVN, CNN	(Kang et al., 2017)
		Accelerometer	31	2	100	Ductile cast-iron	340	Pilot plant	FFT, Correlation	(Kim, 2015)
	Wall-thinning	Accelerometer	0.05	1	115	Carbon steel	13.5	plant	FEA	(Han and Park, 2013)
		Accelerometer	-	2	620, 165	-	-	plant	WVD	(Han et al., 2014)
		Accelerometer	-	2	75	-	-	plant	WVD	(Choi et al., 2008)
		Accelerometer	0.05	2	75	Carbon steel	-	plant	WVD	(Han et al., 2010)
		Accelerometer	-	1	42.7	Carbon steel	-	plant	HHT, SVM, CNN,LSTM	(Chae et al., 2020)
	Crack	Accelerometer, Acoustic	-	-	-	-	-	plant	GA, SVM, HHT	(Kim et al., 2017)
		Accelerometer, Acoustic	-	-	-	-	-	plant	GA, SVM	(Choi et al., 2020)
	Displacement	Accelerometer	-	2	-	-	-	plant	FT, DFT, IDFT	(Suh, 2014)
		Accelerometer	-	-	-	-	-	Lab-scale	-	(Park et al., 2017)
	Localization	Accelerometer	82	2	1,200	Steel	136	underground	IFT	(Lee et al., 2019)
U.S.	Damage	Accelerometer	-	8	1(inch)	PVC	20(Ft.) * 40 ea.	lab-scale	FFT	(Shinozuka et al., 2010)
		Piezoelectric accelerometer	-	1	24(inch)	PVC, Metal	-	underground	STFT	(Shinozuka et al., 2011)
Canada	Leakage	Accelerometer	1.04 ~ 1.07	5	1, 2(inch)	PVC	10	lab-scale	SVM, DT NB	(El-Zahab et al., 2018)
	Wall-thinning	Piezoelectric accelerometer	-	2	4	Carbon steel	0.08	lab-scale	FT, FEA, CWT	(Martin, 2016)
Italy	Leakage	Accelerometer	3,8,26	3	90, 32	PVC HDPE	28	lab-scale	Autocorrelation	(Martini et al., 2018)
		Accelerometer	10	2	90, 32	PVC	10	lab-scale	RMS, PSD	(Martini et al., 2014)
Ireland	Leakage	Piezoelectric	20,60,20	3	40	Galvanized Steel pipe	1	lab-scale	FFT	(Okosun et al., 2019)
Greece	Leakage	Accelerometer	-	1	32	Plastic polyethylene pipe	30	lab-scale	FFT, PSD CPSD, WT	(Marmarokopos et al., 2018)
Germany	Strain, vibration	dielectric elastomer sensors	-	2	60	PVC	7	lab-scale	FEM	(Pargen et al., 2016)



Table 2. Continuation

Nation	Classification	Vibration sensor			Pipeline				Signal processing	Reference
		Type	Distance (m)	Quantity	Outer diameter (mm)	Material	Length (m)	Installation type		
Japan	Wall thinning	Accelerometer	0.25	4	76.3	Stainless steel	0.65	-	Fourier Transform	(Kawazu et al., 2013)
China	Displacement	Accelerometer	-	1	1219, 1016, 711, 457	-	-	gas pipe	FFT	(Liu et al., 2020)
	Damage	FBG Accelerometer	0.13~0.15	4, 1	-	-	-	Aero-engine hydraulic pipeline	Time series(AR), Kalman filter	(Li et al., 2017)
Malaysia	Leakage	Accelerometer	-	1	25	ABS	10	Test-bed	FFT	(Ismail et al., 2018)
Australia	Damage	Accelerometer	0.5	19	238	Steel	10	lab-scale	Time series (ARMA)	(Bao et al., 2013)
	Crack	Piezoelectric wafer	0.25	3	305	Steel	1.5	lab-scale	SVN	(Mustapha et al., 2017)

FT: Fourier Transform, DFT: Discrete Fourier Transform, IDFT: Inverse Discrete Fourier Transform, WVD: Wigner-Ville distribution, SVM: Support vector machine, HHT: Hilbert-Huang transform, SCOT: Smoothed Coherence Transform, PHAT: Phase Transform, ML: Maximum likelihood, FEA: Finite element analysis, GA: Genetic algorithm, CNN: Convolutional neural network, LSTM: Long-short term memory, DT: Decision Tree, NB: Naive Bayes, FBD: Fiber Bragg Gratings-based fiber optics, FEM: Finite element method, ARMA: An integrated autoregressive moving average

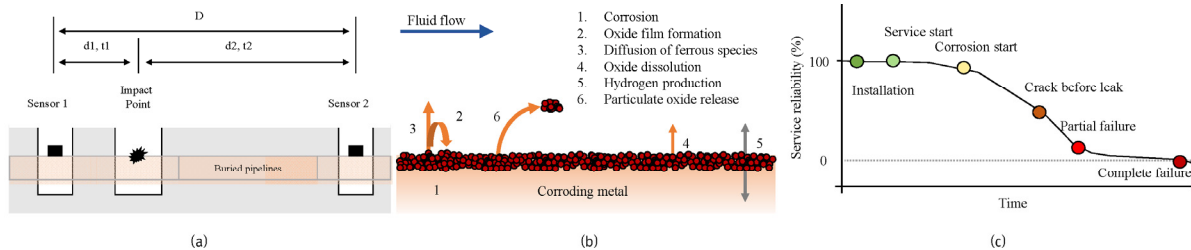


Fig. 3. Schema of pipe health concept: (a) leak detection with two sensors; (b) Processes during fluid acceleration corrosion (FAC); (c) Development of pipe failure.

필요한 주요 항목에 해당된다. 각 항목의 모식도는 Fig. 3에 표시되었으며, 국내외 주요 연구 현황은 다음과 같다 (Table 2).

5.1 국내 연구 현황

5.1.1 누수 감지

누수 감지 연구는 최근 들어 실제 파일렛 플랜트 및 매설관에 적용된 연구 사례가 나오고 있다. 김주언은 파일렛 플랜트 덕타일 주철관 재질의 상수도관 내 누수

지점을 추정하였으며, 고속 푸리에 변환 등을 통해 누수 공 크기가 0.5 mm인 경우 평균 ± 15 m의 오차범위를 확인했다 (Kim, 2015). 이선호는 실제 1200 A 대구경 매설 강관에 충격 손상 위치 실험을 하였으며 역푸리에 변환 등을 통해 관 연장의 1%인 6 m 오차의 정확도를 확인했다 (Lee et al., 2020). 또한 강지현은 덕타일 주철관 재질의 실제 매설관에서 누수 감지 실험을 진행하여 기계학습 및 딥-러닝을 결합한 알고리즘 개발 및 적용을 통해 99.3%의 누출 탐지 정확도와 3 m 미만의 오차를 확인했으며(Kang et al., 2017), 최광묵은 배관의 누수음이 지닌

유체와 배관의 연성 진동에 의한 횡파를 이용하고, 장거리 전달이 가능한 저주파수 영역의 탄성파를 가속도계 측정 및 신호 처리에 적용하여 누수 지점을 탐지했다. 누수 탐지 알고리즘에 의해 가속도 신호 간의 상호 상관 함수를 도출하여 도달 시간차를 산정했으며, 분석 과정은 신호 계측-기여도 함수 계산-주파수 구간 설정-웨이블릿 변환을 이용한 대역통과 필터 설정-상호스펙트럼 계산-역푸리에 변환을 통한 상호 상관 함수 계산-도달 시간차 추정-누수 지점 추정으로 진행됐다 (Choi et al., 2020).

5.1.2 감육 감지

감육, 즉 관 두께 감소(Wall-thinning) 감지 연구는 주로 플랜트 배관의 유체 가속 부식(Flow Acceleration Corrosion, FAC)에 대해 진행됐다. 배관 두께에 의해 고유 진동수 또는 전파 속도가 변동되는 점을 이용하며, 전통적인 초음파 방식보다 넓은 범위의 평균 두께 추정이 가능하다 (Han et al., 2014). 한순우는 저주파수 신호를 이용한 배관 감육 검사 연구를 수행하였으며 위그너 빌 분포 방식을 이용한 추정 값과 초음파 측정치가 유사함을 확인했다 (Han et al., 2014). 또한 채영호는 테스트 베드의 인공 연삭을 한 탄소 강관 시료에 감육 감지 실험을 진행했으며, 딥-러닝 알고리즘인 SVM, CNN 및 LSTM를 이용하여 각 알고리즘의 진동 신호 기반 배관 두께 측정 결과를 비교했으며, 관 두께 변화가 0.4 mm 미만인 경우에도 LSTM 알고리즘의 결과값이 가장 높은 96%의 정확도를 보였다 (Chae et al., 2020).

5.1.3 변위 감지

관로의 변위는 지반 변형, 누수, 손상 등에 의해 발생할 수 있다. 지하 매설관의 기계적 거동은 지상에서 감시 및 분석이 어렵지만, 변위는 관로의 각도 변화를 발생하기 때문에 3축 가속도 센서를 이용하여 효율적으로 측정할 수 있다 (Park et al., 2017). 박상혁은 DCIP(Ductile cast iron)관과 PVC(Poly vinyl chloride)관의 연결지점에 수직 압력을 가하여 배관이 파손되는 각도를 확인했다 (Park et al., 2017). 또한 서진성은 플랜트 배관의 변위 진동 측정을 위해 가속도계를 사용하였고, 패스 필터(Pass-filter)와 FT, DFT, IDFT 등의 신호처리 과정을 통해 지배적인 주파수 대역을 확인했다 (Suh, 2014).

5.2 국외 연구 현황

5.2.1 북미

El-Zahab은 누수 감시를 위해 무선 가속도계 기반 시스템을 제안했으며, 관로를 연결하는 밸브 외부에 센서를 설치하고 주철관 및 PVC관에서 실험했다. 진동 신호 측정값 분석을 통해 Monitoring Index(MI)를 산정하고 추가 실험 데이터와 SVM, NB(Naive-Bayes), DT(Decision Tree) 모델에 적용하여 각 모델의 결과값을 비교한 결과, 평균 98%의 정확도를 확인했으며 그 중 DT 모델의 결과값이 가장 높은 정확도를 보였다 (El-Zahab et al., 2018).

5.2.2 유럽

Okosun은 관로 상태 감시를 위해 PVDF 필름을 이용한 압전 진동 센서의 사용 가능성을 확인했다. 이 센서는 외부 전원에 의존하지 않고 신호의 통신에 전력이 소비되기 때문에 필요한 전력이 다른 센서에 비해 현저히 적다. 반면에 모든 진동 기반 감시 기술과 동일하게 환경적 섭동에 의한 오경보가 발생한 가능성이 있는 단점이 있지만, 센서의 출력을 누수 감시를 위한 마커로 직접 사용이 가능하고 2차 센서 및 감시 기술이 불필요함에 따라서 모든 수도관에 적용할 경우 상태 감시의 설정을 단순화할 수 있다 (Okosun et al., 2019).

5.2.3 아시아

Kawazu는 일본 플랜트의 관 두께 측정을 위해 기존의 초음파 검사가 아닌 가속도 센서를 이용한 검사 방법을 제안하였다. 배관의 진동에 의한 유동 측정 및 진동 특성 분석을 통해 배관의 건전성 평가 기법을 제안하였으며, 그 결과 푸리에 스펙트럼을 적용한 결과값은 전달 함수보다는 명확한 결과를 얻었다. 또한 파손의 크기는 예측 가능하지만 파손 위치는 예측이 어렵다는 결론을 제시했다 (Kawazu et al., 2013).

6. 적용 방안

구조적 관로 상태 감시의 적용 방안은 다음과 같이 6단계로 구성하였다. 기존 연구 사례를 기반으로 하여 제시한 참고 방안이며, 향후 관련 연구 및 적용 사례 분석을 통해 국내 실정에 적합한 구체적인 가이드라

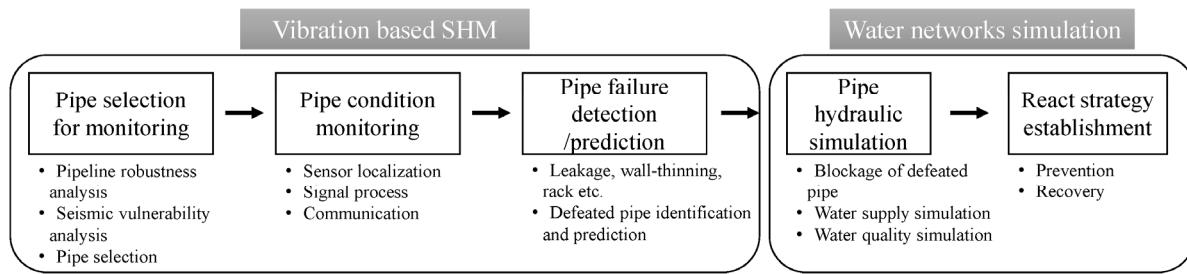


Fig. 4. Responding steps for pipe failure using pipeline monitoring and simulation system.

인이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

첫째, 관로 선정 단계이며 감시 우선순위를 선정하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 먼저 취약점 분석을 통해 선정할 수 있다. 취약도 곡선은 지진에 의한 시설물 상태를 모의하기 위해 사용되며 지중매설관의 취약도 식은 지진파의 진동에 의한 최대지반속도와 영구지반변형에 의한 취약도 식에 의해 산정된다(K-water, 2019). 이 외에 관로 갱생 우선순위 분석 절차를 통해 상태 감시 관로를 선정할 수 있으며, 관 내부(재질, 직경, 운전시간, 내부 부식률 등) 및 외부(외부 부식률, 퇴 메움 토양 유형 등)요소에 따라 요소별 비중을 적용하여 정상상태의 관 별 부식률을 정량화하고 비정상상태의 수리학적 중요도를 반영하여 산정하는 방식이다(Yoo et al., 2014).

둘째, 신호 획득 단계로 센서 선정 및 설치 과정을 포함한다. 가속도계는 기존 상태 모니터링에 사용되던 변위계와 속도계를 대체하여 적용되고 있으며(Cawley, 2018; Mitchell, 2007) 속도계에 비해 다중 누수 및 간섭 잡음이 발생하는 상황에서 배관 누수 위치 탐지에 더 효과적이다(Gao et al., 2005). 누수 탐지를 위해 맨홀 밸브 상자 내의 밸브 스피들 표면에 가속도계를 부착하여 진동 신호를 측정할 수 있으며(Kang et al., 2017), 대구경 장거리 매설 배관(관경 1,200 mm, 길이 564 m)의 충격 손상 위치 검출에도 적합하다(Lee et al., 2020).

셋째, 신호 처리 단계로 Kang (2017)의 연구 사례에서는 진동 신호 획득 후 고 주파수 성분을 제한하기 위해 차단 주파수 1 kHz에서 antialiasing 필터링을 하였으며 ADC(Analog to digital converter)를 통해 신호를 디지털화 했다. 구조적 상태 감시에서 사용된 가장 일반적인 신호 처리 기술은 시계열 분석 모델, 웨이블릿 변환과 힐베르트-황 변환(Hilbert Huang transform, HHT)이며 때때로 두 알고리즘을 결합해서 사용한다

(A. Sanchez and Hojjat, 2016).

넷째, 신호 저장 단계로 현장 취득 신호는 현장 통신 시스템을 이용하여 게이트웨이를 통해 원격 서버로 전송 및 저장되며 신호 분석을 위해 데이터 분류 및 라벨링 단계를 거쳐 데이터셋으로 활용된다(Kang et al., 2017).

다섯째, 신호 해석 단계다. Kang (2017)은 딥러닝 알고리즘을 적용하여 누수 위치를 추정하였는데, CNN을 이용하여 특징 추출을 진행하고 SVM을 통해 특징 추출 결과의 결합 및 누출 진단을 진행했으며, 다중 교차 상관 및 최단 경로 알고리즘을 이용하여 누설 위치를 추정하고 최종 누출 위치를 시각화하여 표현했다(Kang et al., 2017). 한편, 신호 처리 및 해석 알고리즘의 선정 기준은 향후 연구를 통한 국내 적용 가이드라인의 제시가 필요한 것으로 판단된다.

여섯째, 관망 모의 시행 및 대응 전략 설정 단계로서 신호 해석 단계에 의한 이상 관로 정보를 관망 모의 시스템에 적용하고, 모의 결과를 통해 지진 발생 시 급수 시스템의 적절한 압력 유지 및 유량 공급 여부를 분석하고 지진 발생 시 대응 전략을 수립할 수 있을 것으로 사료된다. 이는 기존 관망 모의 시스템 활용도 향상에 긍정적인 영향을 줄 것으로 사료되며, 전체 적용 방안에 대한 모식도는 Fig. 4에 표시되었다.

7. 결론 및 고찰

기존의 국내 상수 관망 운영 기술의 연구는 주로 유량, 수압, 수질 등의 감시 항목을 중심으로 용수 공급의 양적, 질적 관리를 목적으로 진행됐다. 하지만 이는 사후 대응에 초점을 둔 연구이며, 예방적 관리체계를 위해 관로의 열화, 변화, 결합 등 실시간 구조적 상태 감시를 적용한 연구는 미흡한 상황이다. 센서, 통신 및 신호 처리 등 ICT기술 기반의 상태 감시를 이용하여 관망의 취

약 구간을 판별하는 연구가 선진 연구를 중심으로 진행되고 있으며, 재난 발생 시 안정적인 용수 공급을 위해 상수관망 신뢰도(Reliability)가 중요함에 따라 구조적 상태 감시 데이터의 필요성이 증가하는 추세다. 본 논문에서는 구조물, 플랜트 등의 상태 감시에 폭넓게 적용된 진동 센서 기반의 구조적 상태 감시 연구 중 누수, 감육, 변위 감시 항목을 선정하여 국내외 관망 적용 연구 사례를 조사하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 지진 대비를 위한 주요 관로 상태 감시 항목으로 누수, 감육 및 변위를 선정하여 용수공급 관로와 플랜트 배관의 진동 신호 기반의 관련 연구 사례를 조사하였으며, 지진 대비 관로 상태 감시 및 예방 예측에 적합한 시스템으로 판단된다.
- (2) 관로 상태 감시를 위해 센서의 영구적인 부착 및 감시 시스템의 적용이 보편화되는 추세이다. 기존 매설관에 적용하기 위해 공사 및 높은 비용이 발생함에 따라 실 운용관의 상태 감시 적용 속도가 낮을 수 있으나 초기 설치 이후에는 지속적인 결합 감지를 통해 유지보수 효율성을 향상시키고 비용을 절감할 수 있다.
- (3) 기존 관망 상태 감시 연구는 주로 배·급수관 같은 중, 소구경 관로에 적용되었다. 하지만 최근 관망의 수리학적 중요도가 높은 대구경 송수관에 관련 연구가 시작되었으며, 실 운용 대구경 매설관의 상태 감시 연구가 활발히 진행된다면 재난 재해 상황의 상수 관망 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.
- (4) 구조적 상태 감시 적용을 위한 가이드라인은 2000년대부터 북미, 유럽 및 아시아의 여러 나라에서 연구 및 제시 되었다. 국내의 경우 최근 구조적 상태 감시 연구가 진행되는 추세임에 따라, 국내 실정에 적합한 가이드라인 연구 및 제시가 필요한 것으로 판단된다.
- (5) 진동 신호 특성에 따른 잡음 신호 처리 및 방대한 양의 신호 분석 기술 연구는 구조적 상태 감시의 현장 적용 능력을 향상시킬 것으로 사료된다. 특히 전통적인 신호 처리 기법 외에도 최근 주목받고 있는 기계학습 및 딥러닝 알고리즘도 적용되고 있으며 높은 정확도의 상태 감지 성능을 보인다. 이는 비 파괴 검사 기반의 관망 유지관리 기술 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경시설 재난재해 대응기술개발사업(2019002850005)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- A. Sanchez, J.P. and Hojjat, A. (2016). Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures, *Arch. Comput. Methods Eng.*, 23(1), 1-15.
- Alokita, S., Rahul, V., Jayakrishna, K., Kar, V.R., Rajesh, M., Thirumalini, S. and Manikandan, M. (2019). *Recent advances and trends in structural health monitoring, Structural health monitoring of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 53-73.
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M. and Inman, D.J. (2021). A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to machine learning and deep learning applications, *Mech. Syst. Signal Process.*, 147, 107077.
- Bao, C., Hao, H. and Li, Z. (2013). Vibration-based structural health monitoring of offshore pipelines: numerical and experimental study, *Struct. Health Monit.*, 20(5), 769-788.
- Bao, Y. and Li, H. (2020). Machine learning paradigm for structural health monitoring, *Struct. Health Monit.*, 20(4), 1353-1372.
- Cawley, P. (2018). Structural health monitoring: Closing the gap between research and industrial deployment, *Struct. Health Monit.*, 17(5), 1225-1244.
- Chae, Y.H., Kim, S.G., Kim, H., Kim, J.T. and Seong, P.H. (2020). A methodology for diagnosing FAC induced pipe thinning using accelerometers and deep learning models, *Ann. Nucl. Energy*, 143, 107501.
- Circuitglobe. com. <https://circuitglobe.com/seismic-transducer.html> (March 03, 2021).
- Cho, C.W., Cho, S.T. and Yang, K.H. (2011). Study on characteristics of noncontact vibrating displacement sensor, *J. Power Syst. Eng.*, 15(2), 13-18.
- Choi, K., Lee, H., Shin, G. and Hong, S. (2020). Analysis



- of Elastic Wave Based Leakage Detection Technology Using Accelerometers, *J. Korea Inst. Inform. Commun. Eng.*, 24(9), 1231-1240.
- Choi, Y.C., Park, J.H. and Yoon, D.B. (2008). Monitoring pipe thinning using two accelerometers, *Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, 18(12), 1286-1292.
- Choi, Y.O., Kim, J.M., Ahn, B.H. and Choi, B.K. (2020). Feature analysis of acoustic emission and vibration signal according to pipe cracking shape and valve opening/closing, *Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, 30(1), 5-10.
- Dooley, B. and Lister, D. (2018). Flow-Accelerated Corrosion in Steam Generating Plants, *PPEC*, 20(4), 194-244.
- El-Zahab, S., Abdelkader, E.M. and Zayed, T. (2018). An accelerometer-based leak detection system, *Mech. Syst. Signal Process.*, 108, 276-291.
- Fassois, S.D. and Kopsaftopoulos, F.P. (2013). Statistical time series methods for vibration based structural health monitoring, *New Trends Struct. Health Monit.*, 209-264.
- Gao, Y., Brennan, M.J., Joseph, P., Muggleton, J. and Hunaidi, O. (2005). On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water pipes, *J. Sound Vib.*, 283(3-5), 927-941.
- Goyal, D. and Pabla, B. (2016). The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: a review, *Arch. Comput. Methods Eng.*, 23(4), 585-594.
- Gu, D.S., Kim, H.J., Jeong, H.E., Kim, H.E. and Choi, B.K. (2007). Structural vibration analysis caused by piping resonance, *Korean Soc. Mech. Eng.*, 31(2), 190-196.
- Han, S.H., Hwang, J.M. and Lee, J.M. (2010). Estimation of the Pipe Thickness using the Variation of the Group Velocity, *J. Korea Robot. Soc.*, 5(1), 32-40.
- Han, S.W. and Park, J.H. (2013). Monitoring of wall thinning of a pipe by measuring natural frequencies of shell vibration modes, *Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, 860-861.
- Han, S.W., Park, J.H., Kang, T. and Sohn, K.S. (2014). Development of portable vibration signal-based pipe wall thinning inspection device, *Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, 545-547.
- Industrial electronics. http://www.industrial-electronics.com/DAQ/industrial_electronics/input_devices_sensors_transducers_transmitters_measurement/Accelerometers.html (March 03, 2021).
- Ismail, M.I.M., Dziyauddin, R., Ahmad, N. and Ahmad, N. (2018). Vibration detection in water pipelines leakage using wireless three-axis accelerometer sensor, *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, 112, 137-150.
- Jazwinski, A.H. (2007). *Stochastic processes and filtering theory*. Courier Corporation.
- Jung, D. and Lansey, K. (2015). Water distribution system burst detection using a nonlinear Kalman filter, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 141(5), 04014070.
- Jung, S. (2019). Vibration-based Structural Health Monitoring using Machine Learning with Applications to Plate and Pipeline Structures, Ph.D., Seoul National University, Korea.
- K-water. (2019). Seismic risk assessment of water supply networks, 2020-WS-RR-28-61, 82.
- Kang, J., Park, Y.J., Lee, J., Wang, S.H. and Eom, D.S. (2017). Novel leakage detection by ensemble CNN-SVM and graph-based localization in water distribution systems, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 65(5), 4279-4289.
- Karamizadeh, S., Abdullah, S.M., Halimi, M., Shayan, J. and Javad Rajabi, M. (2014). "Advantage and drawback of support vector machine functionality", *2014 international conference on computer, communications, and control technology (I4CT)*, IEEE.
- Kawazu, S., Fujita, S. and Minagawa, K. (2013). "Fundamental Study on Health Monitoring for Pipe by Vibration Analysis", *Pressure Vessels and Piping Conference*, American Society of Mechanical Engineers.
- Kim, D.S. and Lee, J.S. (1999). Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 19(3-5), 1021-1032.
- Kim, E.H., Park, J., Lee, Y.G., Kim, S. and Park, J.H. (2012). Prediction of short-term behavior of buried polyethylene pipe, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 26(6), 907-914.
- Kim, J. (2015). The Leak Signal Characteristics and the Leak Point Estimation of Water Pipe, Master's Thesis, The University of Seoul, Korea.
- Kim, J.H. K-water. (2016). Performance evaluation of non-destructive precision diagnosis and development planning of operation monitoring system for large-scale water supply pipelines, 11-1613000-001355-01.
- Kim, J.M., Ahn, B.H., Lee, J.M., Yu, H.T. and Choi, B.K. (2017). Feature analysis of vibration and acoustic emission according to pipe cracking and valve

- opening/closing, Korean Soc. Noise Vib. Eng., 27(7), 857-862.
- LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G. (2015). Deep learning, Nature, 521(7553), 436-444.
- Lee, J.Y. (2015). Variable short-time Fourier transform for vibration signals with transients, J. Vib. Control, 21(7), 1383-1397.
- Lee, S.G. (2007). About the theory and application of acoustic and noise vibration signal processing technology, Korean Soc. Noise Vib. Eng., 17(1): 9-15.
- Lee, S.H., Park, C.S. and Yoon, D.J. (2019). Empirical wave velocity estimation in a large diameter water supply pipeline for impact source localization, J. Korean Soc. Nondestruct. Test., 39(2), 100-108.
- Lee, S.H., Park, C.S. and Yoon, D.J. (2020). Experimental verification of impact damage detection in long range buried water supply pipeline, J. Korean Soc. Nondestruct. Test., 40(4), 241-250.
- Lee, S.J., Lee, S.J., Choi, I.S., Park, K.K., Kim, H.T. and Kim, K.T. (2011). Performance improvement of radar target classification using UWB measured signals, J. Electromagn. Eng. Sci., 22(10), 981-989.
- Lee, Y.S. and Yoon, D.J. (2014). Improved estimation of leak location of pipelines using frequency band variation, J. Korean Soc. Nondestruct. Test., 34(1), 44-52.
- Li, Z., Gao, P., Zhao, D. and Liu, J. (2017). Fault diagnosis and location of the aero-engine hydraulic pipeline based on Kalman filter, AIME, 9(12), 1687814017742811.
- Liang, J. and Sun, S. (2000). Site effects on seismic behavior of pipelines: a review, J. Press. Vessel. Technol., 122(4), 469-475.
- Liu, E., Wang, X., Zhao, W., Su, Z. and Chen, Q. (2020). Analysis and research on pipeline vibration of a natural gas compressor station and vibration reduction measures, Energy Fuel, 35(1), 479-492.
- Marmarokopos, K., Doukakis, D., Frantziskonis, G. and Avlonitis, M. (2018). Leak detection in plastic water supply pipes with a high signal-to-noise ratio accelerometer, Meas. Control, 51(1-2), 27-37.
- Martin, A. (2016). Acoustic Emissions and Response for Detection and Monitoring of Flow-accelerated Corrosion, Master's Thesis, University of New Brunswick.
- Martini, A., Rivola, A. and Troncosi, M. (2018). Autocorrelation analysis of vibro-acoustic signals measured in a test field for water leak detection, Appl. Sci., 8(12), 2450.
- Martini, A., Troncosi, M., Rivola, A. and Nascetti, D. (2014). Preliminary investigations on automatic detection of leaks in water distribution networks by means of vibration monitoring. Advances in condition monitoring of machinery in non-stationary operations, 535-544.
- Mitchell, J.S. (2007). From vibration measurements to condition-based maintenance, Sound and vibration, 41(1), 62-79.
- Mustapha, S., Braytee, A. and Ye, L. (2017). "Detection of surface cracking in steel pipes based on vibration data using a multi-class support vector machine classifier", Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2017, SPIE, Portland, USA.
- Okosun, F., Cahill, P., Hazra, B. and Pakrashi, V. (2019). Vibration-based leak detection and monitoring of water pipes using output-only piezoelectric sensors, Eur. Phys. J. Spec. Top., 228(7), 1659-1675.
- PAHO and WHO. (2002). Health in the Americas. PAHO.
- Pargen, S., Magerstaedt, M., Larink, D., Mönster, T. and Rentmeister, N. (2016). "Pipeline Strain and Vibration Monitoring by Smart Materials", International Pipeline Conference, American Society of Mechanical Engineers, Calgary, Canada.
- Park, C.S., Lee, S.H. and Yoon, D.J. (2021). Enhancing impact localization from fluid-pipe coupled vibration under noisy environment, Appl. Sci., 11(9), 4197.
- Park, J., Choi, J.S., Kim, K., Yoon, Y. and Park, J.H. (2020). A review on recent advances in water and wastewater treatment facilities management for earthquake disaster response, J Korean Soc. Water Wastewater, 34(1), 9-21.
- Park, M.J. and Kim, Y. (2020). A basic study on structural health monitoring using the Kalman filter, J. Soc. Nav. Archit. Korea, 57(3), 175-181.
- Park, S., Kwak, P., Lee, H. and Choi, C. (2017). Methodology of Displacement Detection for Water Supply Pipeline by IMU Sensors, Int. J. Appl. Eng. Res., 12(20), 9914-9918.
- Power-mi. <https://power-mi.com/content/seismic-velocity-transducers> (March 03, 2021).
- Qiao, S., Torkamani-Azar, M., Salama, P. and Yoshida, K. (2012). Stationary wavelet transform and higher order statistical analyses of intrafascicular nerve recordings,



- J. Neural Eng., 9(5), 056014.
- Rizzo, P. (2010). Water and wastewater pipe nondestructive evaluation and health monitoring: a review, *Adv. Civ. Eng.*, 2010. 13
- Rossman (2000). *Epanet 2. User's Manual*, Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, OH, 45268:200.
- Scheffer, C. and Girdhar, P. (2004). *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*. Elsevier.
- Sejdić, E., Djurović, I. and Jiang, J. (2009). Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances, *Digit. Signal Process.*, 19(1), 153-183.
- Shinozuka, M., Chou, P.H., Kim, S., Kim, H.R., Yoon, E., Mustafa, H., Karmakar, D. and Pul, S. (2010). "Nondestructive monitoring of a pipe network using a MEMS-based wireless network", *SPIE, International Society for Optics and Photonics*.
- Shinozuka, M., Lee, S., Kim, S. and Chou, P.H. (2011). "Lessons from two field tests on pipeline damage detection using acceleration measurement", *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2011*, International Society for Optics and Photonics, San diego, USA.
- Spanos, P., Giaralis, A. and Politis, N. (2007). Time-frequency representation of earthquake accelerograms and inelastic structural response records using the adaptive chirplet decomposition and empirical mode decomposition, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 27(7), 675-689.
- Suh, J.S. (2014). A study on the measurement of the pipeline displacement vibration using accelerometers, *Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, 24(6), 476-482.
- Toh, G. and Park, J. (2020). Review of vibration-based structural health monitoring using deep learning, *Appl. Sci.*, 10(5), 1680.
- Tushar, C., Ralish, R., Rajesh, M., Manikandan, M., Rajapandi, R., Kar, V. and Jayakrishna, K. (2019). *Maintenance and monitoring of composites, Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Elsevier, 129-151.
- Widodo, A. and Yang, B.S. (2007). Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis, *Mech. Syst. Signal Process.*, 21(6), 2560-2574.
- Wood, D. (1995). *KYPipe reference manual*, Civil Engineering Software Center, University of Kentucky, Lexington, KY, USA.
- Wu, M. and Smyth, A.W. (2007). Application of the unscented Kalman filter for real-time nonlinear structural system identification, *Struct. Control Health Monit*, 14(7), 971-990.
- Yoo, D.G., Jung, D., Kang, D., Kim, J.H. and Lansey, K. (2016). Seismic hazard assessment model for urban water supply networks, *J. Water Res. Plann. Manag.* 142(2), 04015055.
- Yoo, D.G., Kang, D., Jun, H. and Kim, J.H. (2014). Rehabilitation priority determination of water pipes based on hydraulic importance, *Water*, 6(12), 3864-3887.
- Yun, C.B. and Min, J. (2011). Smart sensing, monitoring, and damage detection for civil infrastructures, *KSCE J. Civ. Eng.*, 15(1), 1-14.
- Zhang, L., Lin, J., Liu, B., Zhang, Z., Yan, X. and Wei, M. (2019). A review on deep learning applications in prognostics and health management, *Ieee Access*, 7, 162415-162438.