

환경시설물 대상 MEMS 가속도 센서 실증사례 연구

김형도^{1*}, 박금성¹, 윤영한², 곽필재²

¹한국건설기술연구원 건축연구본부, ²한국건설기술연구원 환경연구본부

Empirical case study of utilizing MEMS accelerometers for environmental facilities

Hyung-Do Kim^{1*}, Keum-Sung Park¹, Younghan Yoon², Pill-Jae Kwak²

¹Department of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Department of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 환경시설물은 지진피해로부터 신속한 복구 및 정상 기능 유지가 요구되나 현행 규정의 지진 가속도 계측 의무 대상시설에서 제외되었다. 환경시설물의 재난 정보를 수집하고 의사결정을 지원하기 위해 MEMS 가속도 센서를 활용한 경제적인 건물 건전도 모니터링(SHM) 기술 개발이 요구된다. MEMS 가속도 센서 모듈은 기존 SHM 시스템의 통신선 매설 비용 절감이 가능하다. 또한 측정 지점 변동에 쉽게 대응할 수 있어 확장성이 뛰어나다. 따라서 본 연구에서는 환경 시설물 2곳을 대상으로 MEMS 가속도 센서 모듈을 활용한 시범 모니터링 시스템을 구축하고, 2년간 실증 및 계측자료 분석을 통해 기존 SHM 시스템 대체 가능성을 확인하였다. 상시 진동 환경 계측에서 모듈의 충격 진동 감지, 24시간 진동 모니터링, 계측 데이터 저장 등 주요기능을 검증하였다. 지진파 계측 데이터 분석에서 2022년과 2023년에 발생한 지진에 대해 모듈이 계측한 데이터 및 파형을 분석하였다. 모듈이 계측한 가속도를 활용하여 재난 표준행동절차(SOP)와 연계하여 건축물 안전성을 평가하고 환경시설의 공정 관리 시스템과 실시간 연동함으로써 2차 피해를 줄일 수 있다.

Abstract Environmental facilities are required to recover quickly from earthquake damage and maintain normal function. On the other hand, they are excluded from the facilities subject to seismic acceleration measurement obligations under the current regulations. The MEMS acceleration sensor module can reduce the cost of burying communication lines in the existing SHM system. In addition, it has excellent scalability because it can respond quickly to changes in the measurement points. Therefore, this study established a pilot monitoring system using MEMS acceleration sensor modules for two environmental facilities and confirmed the possibility of replacing the existing SHM system through analysis of the empirical and measurement data for two years. In measuring the ambient vibration environment, the main functions of the module, such as shock vibration detection, 24-hour vibration monitoring, and measurement data storage, were verified. In seismic wave measurement data analysis, the data and waveforms measured by the module for earthquakes in 2022 and 2023 were analyzed. Using the acceleration measured by the module, building safety could be evaluated in connection with disaster standard operating procedure (SOP), and secondary damage can be reduced by linking with the process management system of environmental facilities in real-time.

Keywords : Environmental Facilities, Earthquakes, MEMS, Acceleration, Modules, Empirical Study

본 논문은 한국건설기술연구원의 주요사업과 한국환경산업기술원의 환경시설 재난재해 대응기술개발사업으로 수행되었음. ((과제번호 20230133) MEMS가속도센서 기반 재난방지시스템 개발 및 실증, (과제번호 20240087) 안전·쾌적·지속가능한 거주환경을 위한 건축도시 구축 기술 연구, (과제번호 2020287001) 환경시설(정수 및 하폐수) 재난 유형별 피해 진단 및 복구 통합패키지 기술개발)

*Corresponding Author : Hyung-Do Kim(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: 0926sky@kict.re.kr

Received December 20, 2023

Revised January 25, 2024

Accepted March 8, 2024

Published March 31, 2024

1. 서론

1.1 연구배경 및 필요성

기상청의 ‘2022년 지진 연보’자료에 따르면, Fig. 1과 같이 규모 3.0 이상의 지진이 총 8회 관측되었다[1,2]. 2023년 11월 기준으로 규모 3.0 이상의 지진이 13회 관측되는 등 한반도에 지진이 꾸준히 증가하고 있다. 전 세계적으로 튀르키예 지진처럼 규모 7.0 이상의 지진이 올해에만 17회, 규모 5.0 이상의 지진은 156회 관측되었다[3,4].

환경시설물은 지진피해로부터 신속한 복구 및 정상 기능 유지가 요구되나 지진화산재해 대책법과 시행령에서 규정하는 ‘지진가속도계측 의무 대상시설: 9종의 건축물과 시설물’에 제외되었다[5]. 한편, 행정안전부의 재난관리기준에서는 ‘재난건전성 모니터링: 센서 등의 시스템을 갖추어 재난 정보를 수집하고 의사결정을 지원’을 통해 재난관리 계획을 수립하도록 요구하고 있다[6].

환경시설물을 대상으로 재난 정보를 수집하고 의사결정을 지원하기 위한 선행 연구로 최용준 외[7]는 기상정보와 GIS를 연계한 재난 상황 인지 및 알림기능, 현장 운영자에게는 임무 카드를 부여하여 관리자가 단계별로 재난 대응조치를 수행할 수 있는 환경시설 재난대응 전문가시스템을 제시하였다. 다만, 선행연구에서는 환경시설물에 직접 센서 설치, 계측, 데이터 취득의 과정을 거치지 않고 기상청으로부터 기상 정보를 수집 후 의사결정에 반영하는 한계도 있었다.

재난 건전성 모니터링은 건물 건전도 모니터링(SHM: Structural Health Monitoring, 이하 SHM)으로 불리며, 건축물 및 시설물에 가해진 지진파 또는 진동의 크기를 정량적으로 계측하기 위한 가속도센서와 아날로그 데이터를 디지털 데이터로 변환하는 데이터로거, 장치와 서버를 연결하는 유선 통신망, 계측자료 저장 등의 기능을 수행하는 서버로 구성된다. 문제는 가속도 센서와 데이터로거, 장치와 서버를 연결하는 유선 통신망 매설 등 SHM 구축에 소요되는 비용이 과다하고, SHM 구축 후 장치 유지관리비용도 많이 들고, 담당 전문인력이 부족한 상황을 고려하면, 현장에서 실제 정상적으로 운영 및 가동되는 경우는 더 적을 것으로 사료된다.

초미세 기계 가공 기술의 MEMS(MEMS: Micro Electro Mechanical Systems, 이하 MEMS) 가속도 센서는 미세 전기 기계 시스템을 결합한 것으로, 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시키는 장치가 제품에 내장되어 있어 국내외 다양한 가속도 센서 중 가격 경쟁력이 우수한 제

품군으로 분류된다. 일본, 대만 등 지진발생빈도가 높은 지역에서는 MEMS 가속도 센서를 활용한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

따라서, 한반도의 지진 발생 빈도 증가와 우리 정부의 안전관리 기초 강화에 맞춰, 경제성을 갖춘 MEMS 가속도 센서를 활용한 스마트 건설안전 기술 개발이 필요하다.

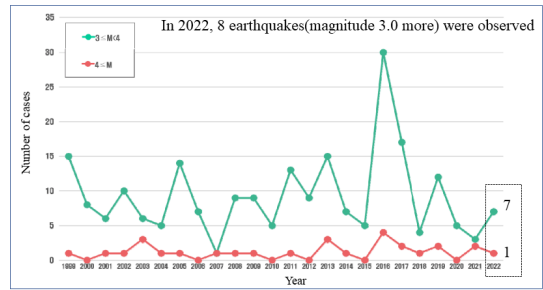


Fig. 1. 2022 Earthquakes on the Korean Peninsula

1.2 연구목적 및 목표

본 연구의 목적은 기존 SHM 대비 비용 절감이 가능한 MEMS 가속도 센서를 활용한 SHM 시스템을 제안하는 것이다. 이를 위한 연구목표는 환경시설물: 정수사업소, 폐수처리사업소 2곳을 대상으로 MEMS 가속도 센서 모듈(Module)을 활용하여 시범 모니터링 시스템을 구축하고 2년간 실증 및 계측자료 분석을 통해 기존 SHM 시스템 대체 가능 여부를 확인하는 것이다.

2. MEMS 가속도 센서 모듈 실증

2.1 연구방법

MEMS 가속도 센서 모듈 실증 및 데이터 검증을 위한 연구방법으로 총 4개의 절차: (1) MEMS 가속도 센서 모듈 기획, (2) 센서 모듈 설치 위치 선정, (3) 모니터링 실증, (4) MEMS 가속도 센서 모듈 계측 성능 분석으로 구성하였다. Fig. 2는 본 연구의 흐름도를 도식화한 것이다.

2.2 MEMS 가속도 센서 모듈 기획

본 연구에 사용된 MEMS 가속도 센서는 국내에서 생산된 동시 3축 측정이 가능한 센서로서 측정 주파수 범위는 0.1~50Hz, 동적 측정 범위는 90dB의 특성을 갖는다. MEMS 가속도 센서 모듈은 Fig. 3과 같이 1개의 보호함체에 MEMS 가속도 센서, 데이터 저장 및 모니터링

용 컴퓨터, 데이터 전송 등을 위한 LTE 모듈 등의 통신 장비를 통합하여 구성한 것이다. 모듈을 통해 실시간으로 모니터링 작동 여부를 확인하고, 저장된 데이터를 전송할 수 있다.

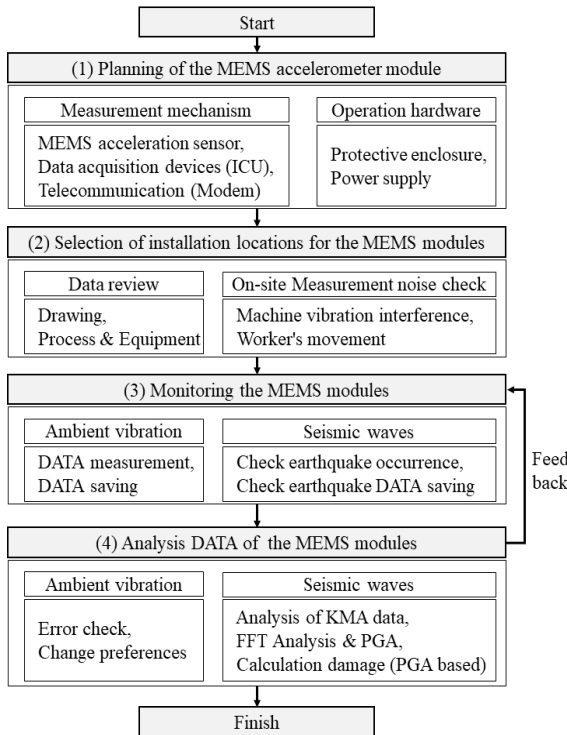


Fig. 2. Research flow chart

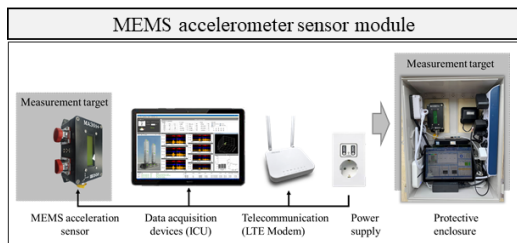


Fig. 3. MEMS accelerometer sensor module

모듈을 적용함으로써 Fig. 4와 같이 기존 SHM의 센서, 데이터로거, 허브 등의 데이터 전송 장비, 서버와 연결되는 광케이블, 서버를 대체할 수 있다. 이는 기존 유선 통신망 SHM 시스템보다 측정과 데이터 저장이 보다 간편하고, 기존 SHM 시스템의 광섬유 통신선 매설, 포설의 필수 수반 업무로 발생하는 비용과 기간, 인력 절감이 가능하다.

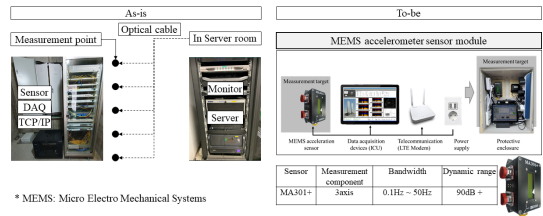


Fig. 4. Effect of application MEMS accelerometer sensor module

2.3 센서 모듈 설치 위치 선정

센서 모듈 설치 위치 선정 시 모터 등 기계장비 영향이 있을 것으로 판단되는 경우, 현장의 간섭영향을 체크한다. 정수사업소에서 Fig. 5와 같이 계측지점 위치를 선정하기 위해 도면을 검토하고, 현장에서 기계장비로 인한 계측 데이터 간섭영향을 확인하였다. 그 결과, 센서 모듈 설치 예정위치에서 계측한 단층 건축물의 주파수 13Hz와 지하실 기계진동의 주파수 23Hz의 차이를 확인하고, 센서 모듈 설치 위치에서 계측한 데이터를 통상 지진파 주파수 대역값인 0.1Hz~10Hz으로 밴드필터 적용 시 기계장비의 간섭영향은 적다고 판단했다.

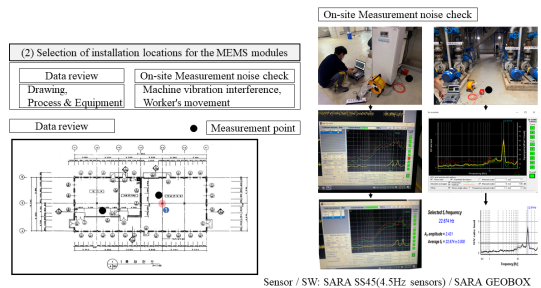


Fig. 5. Selection of installation locations for the MEMS modules: Data review and On-site Measurement noise check

2.4 MEMS 가속도 센서 모듈 모니터링 실증

환경시설은 지하에 수조와 펌프 등 기계장비가 위치한 토목구조물과 지하 구조물과 연속된 상부 지상 건축물로 구성된다. 지상 건축물은 지하 토목구조물의 지붕 및 장비 운영관리 제어실 역할을 수행한다.

본 연구 실증지의 지하 구조물은 지표면으로부터 지하 구조물의 최하층 바닥 상면까지 깊이가 대체로 5.0m 이내, 층수는 1개 층이다. 지하 구조물과 연속된 상부 지상 건축물은 층수는 2개 층 이하, 연면적은 500㎡ 이하의 특징을 갖는다. 이는 현행 KDS 건축물 내진설계기준의

‘지하구조물 내진설계’ 규정 적용의 제외 사유에 해당한다[8].

또한 지하 구조물은 지반으로 둘러싸여 있으므로 상부 지상 건축물과 같은 관성력에 의한 자유진동이 제한된다. 이를 고려하여 본 연구에서는 센서 모듈 설치 위치로 지하 구조물과 연속된 상부 지상 건축물의 기둥 또는 벽체로 선정하였다.

2.4.1 정수사업소 (SITE 1)

정수사업소의 계측 대상 건축물은 Fig. 6과 같이 정수사업소 주요 작업 공정의 3개소: 약품투입동, 여과지, 흡착지의 지하 구조물과 연속된 상부 지상 건축물로 선정하였다. 정수사업소 공정 특성 상 대상 건축물은 지하 구조물에 위치한 펌프의 주기적인 가동, 관로를 통한 유량 이동 등 기계 장비 간섭영향을 받는다.

정수사업소의 지하 수조 구조물과 연속된 상부 지상 건축물은 철근콘크리트 구조형식 건축물로서 층수는 지상 1층, 층고는 3~8m이다.

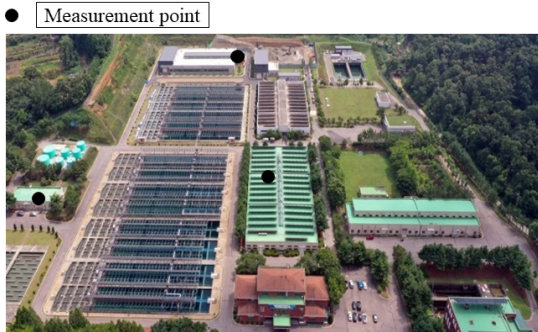


Fig. 6. Measurement points of water purification plants

대상 건축물 내 센서 모듈 설치 위치는 건축물의 강성 중심, 질량 중심 위치를 최대한 우선으로 고려하되, 현장 요구사항과 기계 장비 간섭영향 등을 고려하여 Fig. 7과 같이 건축물의 내부 기둥 중 기계장비의 간섭영향이 비교적 적다고 판단된 기둥 부재로 선정하였다.

약품투입동은 모듈 설치 위치를 선정하기 전 건축물 기둥 부재에서 측정한 진동 주파수와 기계장비 인근에서 측정한 진동 주파수 간 간섭영향을 검토하였다. 기계장비로 발생한 진동의 간섭영향은 앞서 ‘2.3. 센서 모듈 설치 위치 선정’에서 설명한 것과 같이 적다고 판단했다.

또한 약품투입동과 여과지동은 평면 기준으로 비교적 강성 중심, 질량 중심의 내부기둥 부재에서 계측하였으

나, 흡착지동은 현장 요구사항과 출입제한 등 제약사항으로 외곽부 내부 기둥 부재에서 계측하였다.

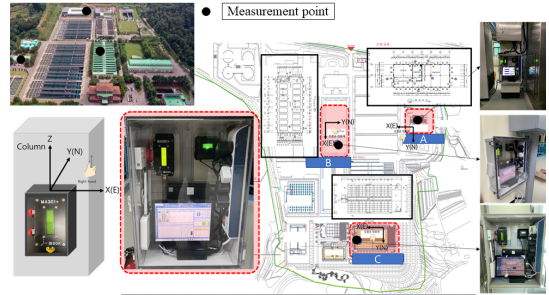


Fig. 7. Installation photos of water purification plants

2.4.2 폐수처리사업소 (SITE 2)

본 연구 대상 폐수처리사업소에서는 대체로 지하 수조 토목구조물의 지붕 역할을 하는 상부 지상 건축물이 없었다. 또한 지붕이 없는 지상 수조 구조물도 운영되고 있었다. 이는 섬유염색 폐수처리 공정의 특성과 1995년도 건설 당시 폐수처리기술과 관련 법령 등의 규제 때문일 것으로 사료된다.

폐수처리사업소 계측 대상 건축물은 Fig. 8과 같이 작업 공정의 3개소: 응집조, 폭기조, 탈수기동의 지상 건축물로 선정하였다. 이는 현장 요구사항과 제약사항을 반영한 결과이다.

계측 대상 건축물은 철근콘크리트 구조형식 건축물로서 응집조는 층고 4~5m의 변 단면 단층 건축물, 폭기조는 층고 6~7m의 지하 1층, 지상 1층 건축물, 탈수기동은 층고 7~7m의 지하 1층, 지상 2층 건축물이다. 또한 폭기조와 탈수기동은 서로 같은 벽을 일부 공유하고 있어 두 개의 건축물의 거동을 명확하게 구분하기 어려운 특이점이 있다.

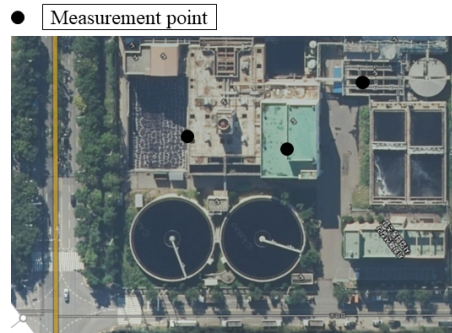


Fig. 8. Measurement points of wastewater treatment plants

대상 건축물 내 센서 모듈 설치 위치는 Fig. 9와 같이 응집조 및 폭기조의 외벽과 탈수기동의 내부 기동 부재로 선정하였다. 이는 응집조 및 폭기조의 경우 강성 중심, 질량 중심 위치의 기동 부재가 수조에 잠겨있어 접근이 불가하고, 탈수기동의 경우 최대한 강성 중심, 질량 중심 위치에 가까운 내부 기동 부재 중 기계 장비 간섭영향이 적은 곳을 선정하였다.

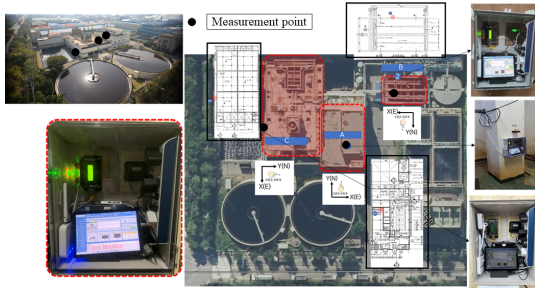


Fig. 9. Installation photos of wastewater treatment plants

2.5 MEMS 가속도 센서 모듈 계측 데이터 분석

MEMS 가속도 센서 모듈 계측 모니터링을 위해 MEMS 가속도 센서 제작사의 모니터링 프로그램을 활용하였다. 이를 통해 Fig. 10과 같이 실시간 계측 데이터를 수치와 그래프로 확인하고, 계측 데이터를 미니시드(Mseed) 파일 형식으로 저장하였다. 계측 데이터는 단발성 충격 등 진동 감지 시 데이터와 24시간 시계열 계측 데이터로 구분되어 저장된다.

계측 데이터 분석은 상시 진동환경 계측 데이터 분석과 지진파 계측 데이터 분석으로 구분하였다. 측정 데이터 분석은 'Seismology Research Center'의 무료 프로그램인 'Waves'를 활용하였다. 모듈에서 계측한 시계열 데이터의 최대 가속도 도출, FFT 분석, 밴드필터를 통한 데이터 가공 등을 수행하였다.

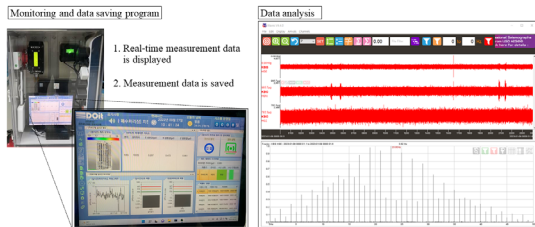


Fig. 10. Monitoring program and data analysis program

2.5.1 상시 진동 환경 계측 데이터 분석

환경시설의 경우 펌프 등의 기계장비 영향으로 Fig. 11과 같이 주기적인 기계 진동과 단발성 충격 진동이 모두 관측되었다.

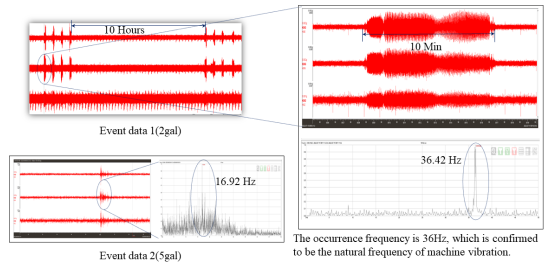


Fig. 11. Periodic machine vibration and shock vibration

주기적인 기계 진동 데이터는 일정 시간 간격으로 발생한 점과 FFT 분석에 의한 최고값은 36.42Hz로 0.1~10Hz의 일반적인 지진파 대역 주파수를 벗어나는 특징을 갖는다. 또한 단발성 충격 진동 데이터도 FFT 분석에 의한 최고값은 16.92Hz로 지진파 대역 주파수를 벗어났다.

행정안전부에서 발간한 지진 가속도 계측관리 오류는 Fig. 12와 같이 총 4종류이며[9], 실증 사이트에서 관측된 오류는 '불연속적인 단절 파형'이다. 계측 오류 발생 원인은 데이터 저장 및 모니터링용 컴퓨터의 메모리 부족으로 판단된다.

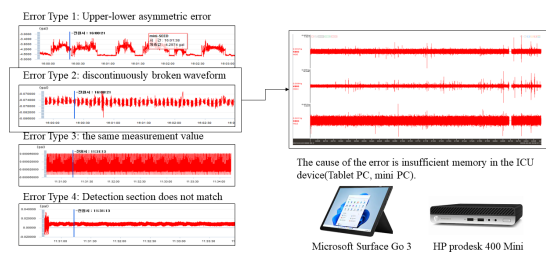


Fig. 12. Monitoring Error of ambient vibration

2.5.2 지진파 계측 데이터 분석

2022년부터 현재까지 실증을 실시한 후로 국내에 규모 3.0 이상의 지진이 다수 발생하였다. 2022년 10월 규모 4.1의 충북 괴산 지진과 2023년 1월 규모 3.7의 인천 강화 지진으로 계측된 지진파 데이터는 유의미한 파형으로 분석되었다.

계측 지진파 데이터 분석을 위해 Fig. 13, 14 및 Table 1과 같이 기상청에서 발간한 지진 분석서에 기초 하여[10,11], 발생 지진 정보, 실증지 지진파 도착 추정 시각, 진앙과 실증지 간 거리, 기상청 분석서에 기반한 실증지 계기 진도를 확인하였다.

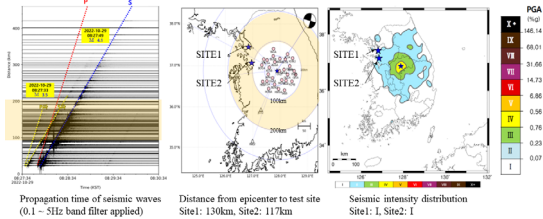


Fig. 13. 2022 Goesan, Chungcheongbuk Earthquake (M 4.1)

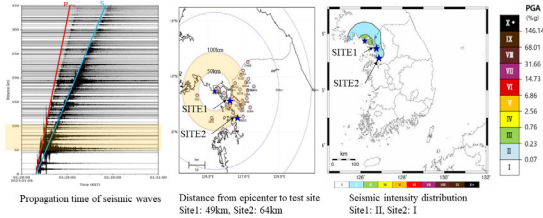


Fig. 14. 2023 Ganghwa, Incheon Earthquake (M3.7)

Table 1. Earthquake information

Category		2022 Goesan Earthquake	2023 Ganghwa Earthquake
Occurrence Time (Korea Standard Time)		2022.10.29. 08:27:49	2023.01.09. 01:28:15
Epicenter	Latitude	36.877°	37.742°
	Longitude	127.883°	126.196°
	Depth	12 Km	19 Km
Magnitude @ Epicenter	M _L	4.1	3.7
	MMI	V	IV
PGA @ Epicenter	%g	6.653	0.668
	Observatory	CHJ3	GODA
Estimated time of arrival (Korea Standard Time)		08:27:59 ~ 08:28:56	01:28:25 ~ 01:28:45
Distance (Epicenter to site)	SITE1	130 Km	49 Km
	SITE2	117 Km	64 Km
Seismic intensity (by KMA)	SITE1	I	II
	SITE2	I	I

지진파형 분석은 시계열 계측된 지진파 계측 데이터 중 실증지 지진파 도착 추정시각의 계측 데이터에 한정

하였다. 세부적으로는 해당 시각 계측 데이터에 통상 지진파 주파수 대역값으로 밴드필터를 적용하고, FFT 분석을 통해 피크 주파수 대역값과 밴드필터 된 계측 파형을 확인하였다. 지진파 파형이 불명확 할 경우, FFT 분석으로 확인한 최고 주파수 대역으로 밴드필터를 추가 적용하였다.

3. 환경시설 계측 지진파 분석 및 활용

3.1 계측 지진파 데이터 분석

환경시설에 설치한 MEMS 가속도 센서 모듈이 2022년과 2023년에 발생한 지진파를 계측하였다.

Fig. 15는 정수사업소의 여과지동에서 계측한 지진파에 대해 분석한 결과로서, 지진파 계측 전후로 최대 가속도, 최고 주파수 대역 분석 결과가 뚜렷하게 대비됨을 보여준다.

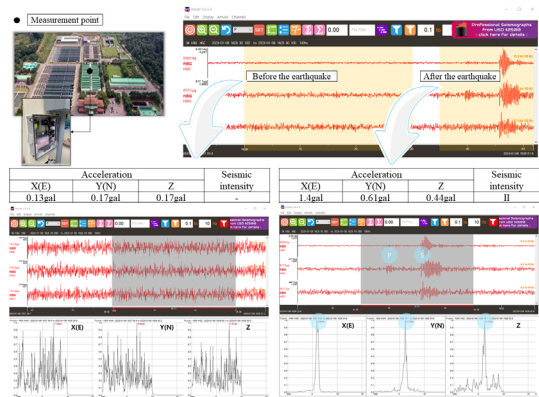


Fig. 15. Comparison of seismic waveform analysis results before and after the earthquake

정수사업소의 경우 2번의 지진파에 대해 Fig. 16와 같이 계측 지진파형을 분석하였다. 2023년 분석결과가 2022년 분석 결과 대비 뚜렷한 이유는 진앙과 실증지까지 거리가 상대적으로 가깝고 다른 계측지점 대비 여과지동의 안정적인 전원 공급에 의한 계측 노이즈가 상대적으로 적은 탓이다.

폐수처리사업소의 경우 2번의 계측 지진파 모두 진도 I로 분석되었다. Fig. 17은 계측 지진파형 분석결과로서 정수사업소 대비 지진 파형이 뚜렷하지 않았다. 이는 건물의 노후화와 폭기조의 거동을 명확하게 구분하기 어려운 현장 특이점에 기인한다.

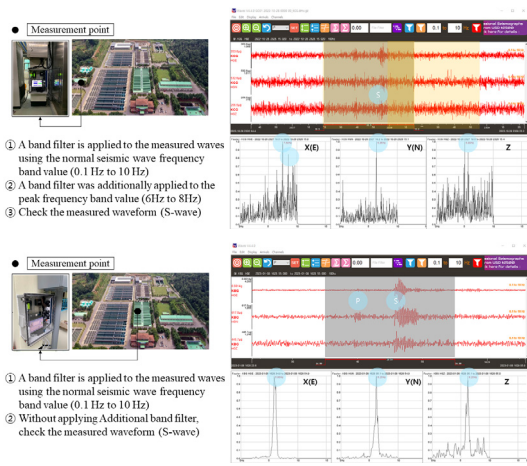


Fig. 16. SITE 1 seismic waveform data analysis 2022 Earthquake(up) and 2023 Earthquake(down)

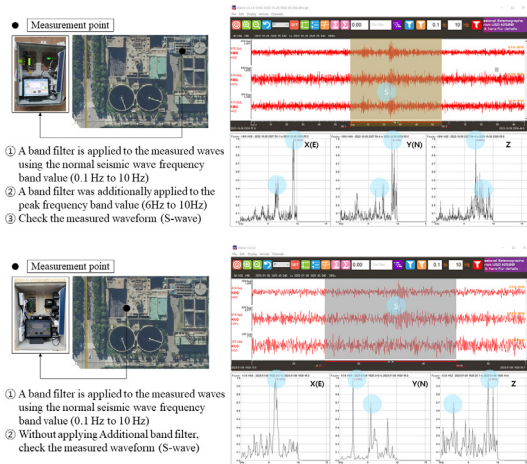


Fig. 17. SITE 2 seismic waveform data analysis 2022 Earthquake(up) and 2023 Earthquake(down)

Table 2는 2022년 지진과 2023년 지진으로 구분하여 정수사업소와 폐수처리사업소의 밴드필터 추가 적용 여부, 최고 주파수 대역, 최대 가속도, 최대 가속도 기반 진도 분석결과를 나타낸다.

Table 2. Seismic data analysis of SITE 1, 2

Category		2022 Goesan Earthquake	2023 Ganghwa Earthquake
Additional band filter apply	SITE1	○	×
	SITE2	○	×
Peak frequency band	SITE1	X	7.5Hz
		Y	6.35Hz
		Z	5.0Hz

Acceleration	SITE2	X	9.42Hz	6.15Hz
		Y	9.11Hz	2.34Hz
		Z	6.96Hz	8.40Hz
	SITE1	X	0.35gal	1.4gal
		Y	0.53gal	0.61gal
		Z	0.25gal	0.44gal
SITE2	X	0.67gal	0.42gal	
	Y	0.64gal	0.67gal	
	Z	0.47gal	0.25gal	
Seismic intensity	SITE1	I	II	
	SITE2	I	I	

또한 실증지에서 계측된 2번의 지진파는 모두 파형의 진폭이 크지 않아 사람의 인지 수준에 미치지 못하는 작은 파형임에도 불구하고, MEMS 가속도 센서 모듈은 지진 파형 분석 시 충분한 성능임을 확인하였다.

3.2 계측 지진파 분석 결과 활용

MEMS 가속도 센서 모듈을 통해 계측된 가속도를 활용하여 재난 표준행동절차(SOP: Standard Operating Procedure, 이하 SOP)와 연계하여 건축물 안전성을 평가한다.

SOP는 재난 발생 상황에서의 행동 요령 및 업무 프로세스로 정의된다. 이는 「재난 및 안전관리 기본법」에 근거하여 재난 유형별 대응 업무 매뉴얼 형태로 작성되고 있다[12].

환경시설의 경우 다수의 재난 대응 매뉴얼에서 위기경보 수준이 4단계로 구성되며, 본 연구에서도 재난 SOP를 징후감지, 초기대응, 비상대응, 수습 및 복구의 4단계로 구분하였으며, SOP 1, 2, 4단계에서 Fig. 18과 같이 모듈을 통해 계측된 가속도를 활용하여 건축물 안전성을 평가한다.

SOP 1단계(징후감지)는 지진 발생 시 모듈의 계측 가속도와 기상청의 수정메르칼리의 진도등급(MMI)에 기반하여 계측된 최대가속도별 진도등급 및 진도등급별 피해 정도를 신속히 평가할 수 있다[13].

SOP 2단계(초기대응)는 시그모이드 함수 형태의 건축물 취약도 함수에 계측 가속도를 적용하여 건축물 안전성을 평가할 수 있다[14].

SOP 4단계(수습 및 복구)는 계측 가속도로 분석한 건물의 최대 층간 변위비로 건축물 안전성을 평가할 수 있다. 이는 현행 KDS 건축물 내진설계기준의 층간 변위비 설계 허용치를 고려하였다.

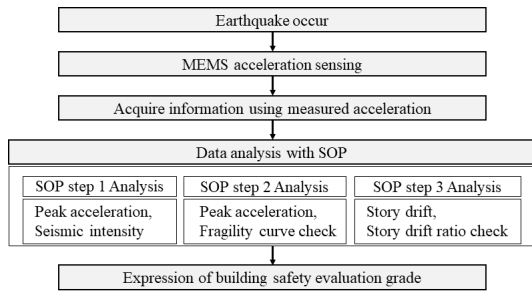


Fig. 18. Building safety assessment with disaster SOP

또한 환경시설의 경우 주요 작업 공정에 대한 수질 관리용 관리 시스템이 상재할 가능성이 높다. MEMS 가속도 센서 모듈을 통해 계측된 가속도를 환경시설의 위기 정보 수준 판별에 활용하거나, 사업소 별 전문 관리 시스템에 실시간 연동함으로써, 지진 발생 시 펌프, 모터 등의 기계 장비 손상에 따른 1차 피해와 기능상실 및 오염 물질 유출 등에 따른 2차 피해를 줄일 수 있다[15].

4. 시사점

본 연구에서는 MEMS 가속도 센서 모듈을 이용한 SHM 시스템을 시범적으로 구축하고 2년간 환경시설에서 실증하였다. 이를 통해 기존 SHM 시스템 대체 가능 여부를 확인하였다.

상시 진동 환경 계측에서 일부 불연속적인 단절 파형이 발견되었으나 주기적인 기계 진동과 단발성 충격 진동 감지, 24시간 진동 모니터링, 계측 데이터 저장 등 기존 SHM 시스템의 주요기능을 수행하였다.

지진파 계측 데이터 분석에서 2022년과 2023년에 발생한 지진에 대해 실증지의 모듈이 계측한 데이터 및 파형을 분석하였다. 이를 통해 동적 측정 범위 90dB, 측정 주파수 범위 0.1~50Hz의 MEMS 가속도 센서는 지진파 데이터 및 파형 분석에 충분한 분해 성능을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 환경시설에 2년간 실증한 MEMS 가속도 센서 모듈의 성능 검증을 통해 기존 SHM 시스템의 대체 가능성을 확인하였다.

MEMS 가속도 센서 모듈은 측정 지점의 변화에 쉽게 대응할 수 있어 기존 SHM에 비해 확장성이 뛰어나다.

이를 통해 기존 유선 통신망 SHM 시스템의 광섬유 통신선 매설, 포설의 필수 수반 업무로 발생하는 비용과 기간, 인력 절감이 가능하다. 이는 더 많은 건축물에 SHM을 적용할 수 있는 중요한 이점이 된다.

향후 추가 연구를 통해 MEMS 가속도 센서 모듈의 기능을 단일 제품에 탑재한 소형 제품 또는 MEMS 가속도 센서에 GPS와 WIFI 센서, 배터리를 내장함으로써 MEMS 가속도 센서모듈 보다 비용이 절감되는 센서 개발이 필요하다. 이를 통해 전국적으로 SHM 시스템 적용확대 및 MEMS 가속도 센서를 활용한 스마트 건설안전 기술 개발이 요구된다.

References

- [1] Earthquake and Volcano Monitoring Department, 2022 Seismological Annual Report, p.328, Korea Meteorological Administration, 2023, pp.5
- [2] Korea Meteorological Administration, observation-earthquake-Current status of earthquakes in Korea, Available From: https://www.kma.go.kr/eqk_pub/obsrEarthquake.do?tab=3 (accessed Dec. 05, 2023)
- [3] Korea Meteorological Administration, Earthquake Volcano - Earthquake Views - Domestic, Available From: <https://www.weather.go.kr/w/eqk-vol/search/korea.do> (accessed Dec. 05, 2023)
- [4] Korea Meteorological Administration, Earthquake Volcano - Earthquake Views - Domestic, Available From: <https://www.weather.go.kr/w/eqk-vol/search/worldwide.do> (accessed Dec. 05, 2023)
- [5] Korea Law Information Center, Earthquake and Volcano Disaster Countermeasures Act, Available From: <https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=233113&lsId=010726&chrClsCd=010202&urlMode=lsEfnfoR&viewCls=thdCmpNewScP&ancYnChk=0> (accessed Dec. 05, 2023)
- [6] Korea Law Information Center, Disaster management standards, Available From: <https://www.law.go.kr/admRulSc.do?menuId=5&subMenuId=41&tabMenuId=183&query=%EC%9E%AC%EB%82%9C%EA%B4%80%EB%A6%AC%EA%B8%B0%EC%A4%80#liBgcolor1> (accessed Dec. 05, 2023)
- [7] Yongjun Choi, Juyoung Lee, Dongseop Lee, Sangho Lee, "Development of Expert System to Manage the Disaster on Environmental Facility", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, No.3, pp.509-522, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.3.509>
- [8] Architectural Institute of Korea, KDS 41 17 00: 2022 Seismic Building Design Code, p.125, Ministry of

Land, Infrastructure and Transport, 2022, pp.52

- [9] Earthquake Disaster Management Division, Seismic acceleration measurement management program (ver 5.0.0) user guide, p.86, Ministry of the Interior and Safety, 2022, pp.46~47
- [10] Earthquake and Volcano Monitoring Department, Earthquake analysis report: 2022.10.29. Goesan, Chungcheongbuk Earthquake (M 4.1), p.12, Korea Meteorological Administration, 2022, pp.1~7
- [11] Earthquake and Volcano Monitoring Department, Earthquake analysis report: 2023.01.09. Ganghwa, Incheon Earthquake (M3.7), p.10, Korea Meteorological Administration, 2023, pp.1~5
- [12] Ji-Eun Kim, "Study on System-based Standard Operating Procedure(S-SOP) Tool for Disaster Response", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, No.8, pp.1-11, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.8.1>
- [13] Korea Meteorological Administration, Phenomenon by Seismic intensity progress level, Available From: https://www.weather.go.kr/w/eqk-vol/manual/pheno_m.do (accessed Dec. 05, 2023)
- [14] FEMA, Hazus Earthquake Model: Technical Manual, p.436, FEMA, 2020, pp.5-3, 8-13~15
- [15] Yongjun Choi, Juyoung Lee, Dongseop Lee, Sangho Lee, "Development of Expert System to Manage the Disaster on Environmental Facility", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, No.3, pp.509-522, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.3.509>

김 형 도(Hyung-Do Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 경상대학교 건축공과 (공학학사)
- 2003년 2월 : 서울대학교 건축학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 서울대학교 건축학과 (박사수료)
- 2002년 11월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 건축연구본부 수석연구원

<관심분야>

콘크리트구조, 합성구조, PC구조, 대공간구조, 초고층건축물, 지진 피해 예측/분석 시스템, 건축물 유지관리 ICT 융합, 시스템 기반 재난 대응

박 금 성(Keum-Sung Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 한양대학교 건축공학과 (공학학사)
- 1997년 8월 : 한양대학교 일반대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 한양대학교 일반대학원 건축공학과 (공학박사)

• 1998년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 건축연구본부 선임연구원

<관심분야>

모듈러 시스템, 합성구조, PC구조, 목구조 및 대공간구조, 재난대응 시스템

윤 영 한(Younghan Yoon)

[정회원]



- 2001년 2월 : 고려대학교 환경공학과 (공학학사)
- 2003년 2월 : 광주과학기술원 환경공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 연세대학교 대학원 토목환경공학 (공학박사)
- 2002년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구본부 수석연구원

<관심분야>

환경공학, 상하수도 수처리, 오염물제거 소재개발 등

곽 필 재(Pill-Jae Kwak)

[정회원]



- 1990년 2월 : 건국대학교 화학과 (공학학사)
- 1995년 2월 : 건축대학교 환경공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 건축대학교 환경공학과 (공학박사)
- 2000년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구본부 연구위원

<관심분야>

환경공학, 상하수도 수처리, 오염물제거 소재개발, 시스템 기반 재난 대응 등