

공공건축물 안전성 평가를 위한 지진가속도 계측자료의 유효성 검증 방법에 대한 연구

장원석¹, 정성훈^{2*}

A Study on the Validation of Measured Data from the Seismic Accelerometers in the Safety Evaluation System of Public Buildings

Won-Seok Jang¹, Seong-Hoon Jeong^{2*}

Abstract: In this study, an algorithm was developed to validate the seismic acceleration measurement data of the seismic acceleration measurement system using measurement data from public buildings currently in operation. Through the results of the study, an algorithm was developed to detect errors and abnormalities in the measurement data itself and the process of generating real-time data (MMA/sec) and event measurement data (MiniSEED), which are the main data generated by the system, and the basic data for determining the direction of inspection through measurement data analysis. It is expected that this will be used as a guideline to determine whether or not the seismic acceleration measurement system, which was managed as receiving/not receiving, is inspected and abnormal types of conditions.

Keywords: Seismic acceleration measurement system, Building safety assessment, Response acceleration time history, Structure health monitoring

1. 서 론

2011년 동일본 대지진, 2016년 경주 및 울산 지진, 2017년 포항 지진 등 최근 인구 밀집지역을 강타한 지진들은 국민의 안전과 재산을 보호하는데 정부 차원의 재난 대응 체계가 필수적임을 보여주었다. 과거에는 지진으로 인한 피해를 저감하기 위하여 구조물의 안전성을 확보할 수 있는 엄격한 설계와 보강이 전통적인 원칙으로 인식되어 왔으나, 최근 지진 계측 기술과 전자·통신 분야, IoT 기술의 급격한 발전을 기반으로 세계 강진지역을 중심으로 지진 계측기를 활용한 지진 재난 대응 전략 수립의 효용성이 관심을 얻고 있다. 국외에서는 지진 관측과 더불어 건축물의 안전성을 모니터링하기 위한 SHM(Structural Health Monitoring) 기술 융합이 이루어지고 있으며 가속도와 함께 변위, 온도 등을 동시에 측정할 수 있는 광섬유 센서(FBG; Fiber Bragg Grating)를 활용해 건축물 계측 및 분석을 수행하는 연구가 활발히 이루어지고 있다(국토교통과학기술진흥원, 2016). 또한 전문가의 개입이 필수적인 안전성 평가 및 손상 판단 분야에서도 인공지능을 도입해 전

문가 개입 전 현장의 판단으로 점검 필요여부를 추정할 수 있는 기술이 발달하고 있다(Jang et al., 2019; Ren et al., 2017).

우리나라에서도 지진재해대책법[대통령령 제 2136호] 제 6조 및 제 7조, 동법 시행령 제 5조, 동법 시행규칙 제 2조, 제 3조를 근거로 지진재해로 인한 피해를 저감하기 위한 연구와 기술개발이 이루어지고 있다. 또한 중앙행정기관의 청사, 지방자치단체의 청사, 국립대학교, 초고층 공공건축물, 공항·석유·가스·철도 및 원자력발전 관련 시설 등 지진 재해로 인한 구조물의 손상이 발생할 경우 큰 피해가 발생할 것으로 예상되거나 지진 재해 대응의 거점으로 활용되는 주요 공공 시설물에 대한 지진가속도계측기 설치 및 운영기준[소방방재청고시 제 2010-30호]이 2010년 9월에 제정되었다. 그러나 대부분의 지진가속도계측기 설치 대상 시설물은 시설물 관리자의 지진·지진가속도계측기에 대한 이해가 부족하여 전문성을 확보하지 못하였으며 그에 따라 시스템의 관리와 활용에 어려움을 겪고 있다. 또한 2020년 국정감사에서는 전국 265개 지진관측소에 설치·운영되고 있는 지진관측장비가 3.9일마다 한 번씩 오작동하는 것으로 드러나 지진관측망 운영의 적절성에 관한 지적이 있었다. 지진가속도계측기를 통해 계속된 지진 관측자료는 지진 직후의 지진피해 평가 및 재난 대응 방향 수립의 기초자료로 활용되며, 주요 시설물의 구조적 안전성 분석에 활용되므로 지진가속도계측망 운영이 효율적으로 이루어지는 것이 중요하다. 지진가속도계측시스템에 오류가 발생

¹정회원, 정회원, 인하대학교 건축공학과 전임연구원

²정회원, 행정안전부 지진방재관리과 과장

*Corresponding author: jeong@inha.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2020년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

하는 경우 발생 시점을 예측할 수 없는 지진 재해의 특성상, 시스템 운영의 안전성과 효율성에 큰 영향을 미치게 된다.

따라서 본 연구에서는 현재 운영중인 지진가속도계측시스템의 가속도 계측자료를 수집·분석하여 시스템의 정상운영 여부를 판단하고 점검이 필요한 개소의 사유를 분류해 주요 오작동 사유를 제시하고자 한다. 본 연구는 직접 현장에 방문하지 않고도 수집된 가속도 계측자료를 활용해 가속도계측시스템의 유효성을 확인하여 이상 원인을 파악할 수 있는 기초 자료로 활용하며, 이상 원인에 따른 대응 방안을 지진가속도계측시스템에 관한 비전문가인 공공시설물 운영자가 수립할 수 있도록 도움을 줄 수 있다. 이를 통해 지진가속도계측시스템의 운영 안정성과 효율성을 제고하고, 지진 발생 시 계측시스템 이상으로 인한 계측자료의 부재를 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 본 론

2.1 실시간 요약 자료(MMA/sec) 기반 유효성 검증

지진가속도계측기 설치 및 운영기준에 따라 공공건축물에 설치된 지진가속도 계측 시스템은 지진가속도 기록계 및 센

서 자체의 오류, 설치 방법·위치 상의 문제, 자료 전송 시스템의 오류 등 다양한 원인에 의해 정상적인 계측 수행이 불가능할 수 있다. 이러한 계측 시스템의 오류는 때초 시스템으로부터 생성되는 MMA/sec (Mean-Max-Average/sec, 1초당 최대/최소/평균 가속도) 자료를 이용하여 파악할 수 있다.

2.1.1 최대지반가속도 기반 오류 감지

공공건축물의 자유장에 설치된 지진가속도계측기로부터 수집된 MMA/sec 자료는 건축물에서 계측되는 응답가속도와는 별개로 해당 건축물의 지반 진동을 대표하는 값이다. 본 연구에서는 자유장 채널의 MMA/sec 자료 중 수평성분 합성 최대지반가속도(PGA; Peak Ground Acceleration)가 560gal을 초과하는 경우 지진가속도 계측 시스템에 이상이 있는 것으로 판단한다. 여기서 판단 기준으로 사용되는 560gal은 우리나라에서 발생할 가능성이 극히 낮은 것으로 판단되는 지반 진동의 크기이다. 건설기준코드: 내진 설계기준(KDS 17 10 00)의 내진설계 지반가속도는 일반적으로 0.22g(215.7gal)이며 이는 약 2,400년 재현주기의 지진이 발생했을 때의 최대지반가속도에 해당한다. 560gal은 4,800년 재현주기 지진의 약 두 배 크기의 지반가속도에 해당한다. 본 연구에서 활용한 560gal의 오류 판단 기준은 사용자의 설정 및 설치 대상 시설물의 지반 현황에 따라 변경이 가능하다.

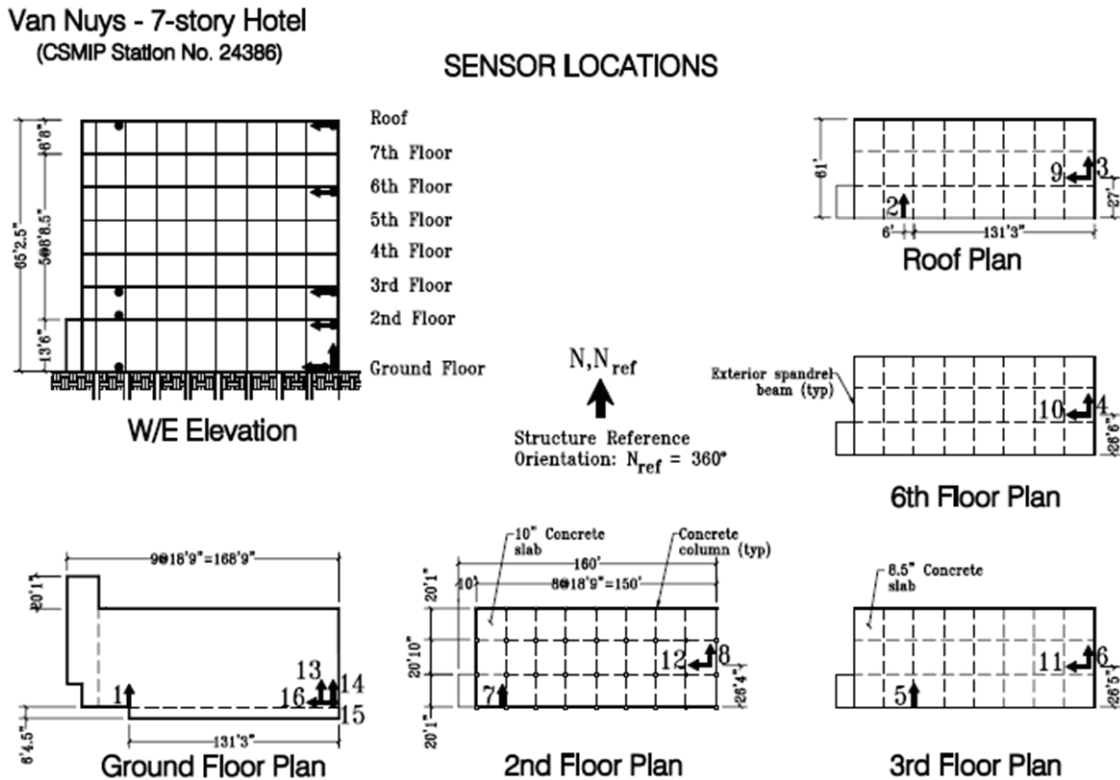


Fig. 1 Elevation and Plan of Example Building, Location and Direction of Accelerometers

2.1.2 MMA/sec 수신 여부를 통한 오류 감지

MMA/sec는 계측 채널별로 매 초 생성되는 가속도 계측 자료의 요약본이며 이를 행정안전부의 지진가속도통합시스템으로 즉시 전송한다. 따라서 이 MMA/sec 자료가 일정 시간동안 수신되지 않는 경우 계측 시스템 운영상의 문제 또는 각 서버 사이의 통신망에 이상이 있음을 의미한다. 본 연구를 통해 개발된 알고리즘에서는 MMA/sec 자료를 5분 이상 수신하지 못하는 경우 시스템 운영상의 문제가 있는 것으로 판단한다. 일상적 운영 과정에서 종종 이루어지는 시스템 재구동 과정이 일반적으로 5분 이내에 완료되는 것으로 조사되었으며, 이 값은 운영 과정에서 변경하여 설정할 수 있다.

2.2 이벤트 계측자료(MiniSEED) 기반 유효성 검증 알고리즘

건축물 자체 감지 및 기상청 통보문을 통한 이벤트 발생 시 건축물의 지진가속도계측시스템은 자유장의 지반 거동과 함께 건축물의 응답가속도 시간이력을 MiniSEED 형식으로 압축하여 보관 전송한다. 이벤트가 종료된 이후 해당 자료를 활용하여 건축물의 안전성을 평가하고 지진으로 인한 영향을 평가하기 위하여 MiniSEED 자료가 활용되기 때문에 이벤트 계측자료의 유효성을 검증하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 응답가속도 시간이력, 최대 응답가속도와 건축물 고유진동수를 활용하여 계측자료의 이상여부를 판단한다.

2.2.1 건축물 응답가속도의 크기를 이용한 오류 감지

지진에 의한 지반 진동이 발생한 경우 건축물의 응답 가속

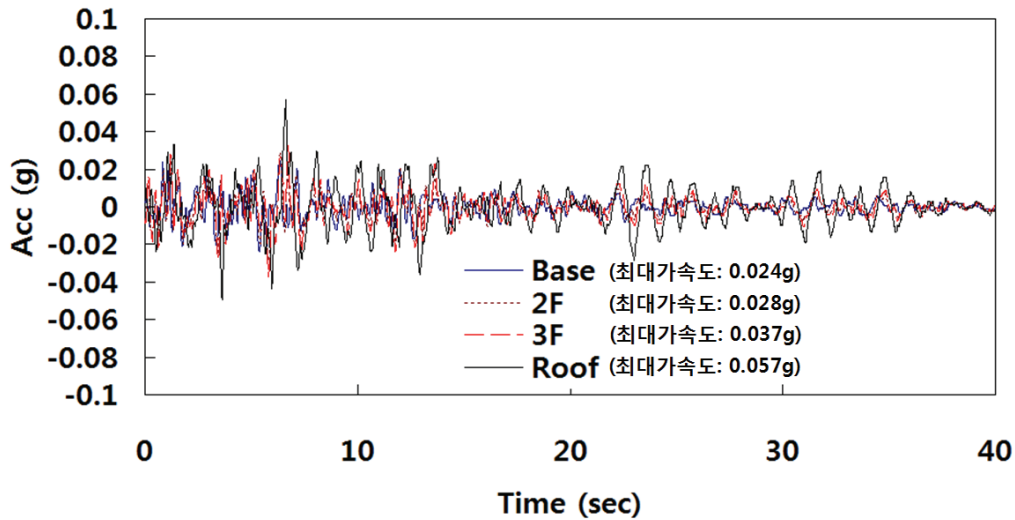


Fig. 2 Response Acceleration Time History at Top-, Mid-, Bottom floor of Example Building

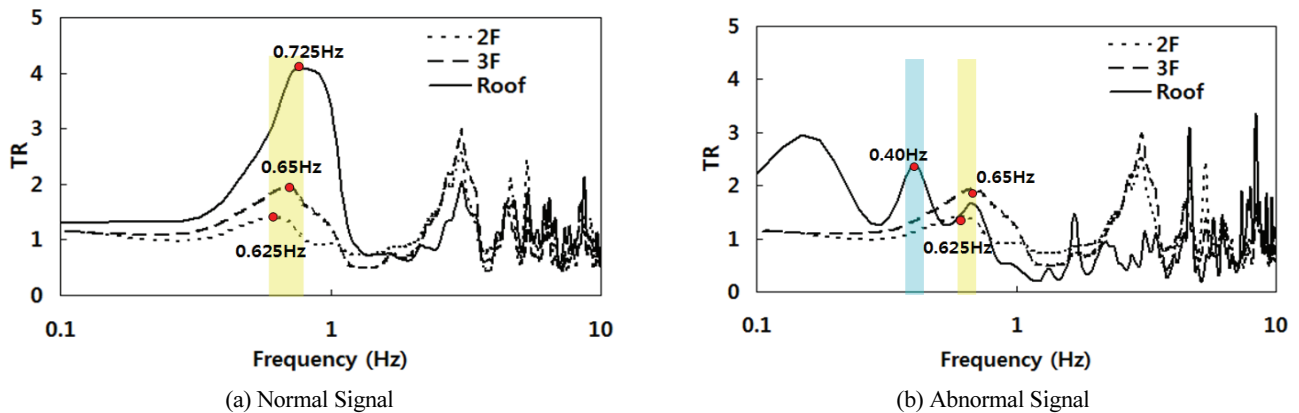


Fig. 3 Error Detection using Natural Frequency of Building

도는 최상층에서 측정된 값이 가장 크고 중간층, 최하층의 순서로 계측된다. 따라서 응답 가속도 시간이력 절대최대값의 크기가 [최상층 > 중간층 > 최하층] 순서가 아닌 경우 계측값에 이상이 있는 것으로 판단한다.

Fig. 1은 계측신호 오류 감지 알고리즘을 검증하기 위해 사용된 예제 건축물의 개요를 나타내고 있으며 그림의 화살표와 번호는 계측센서의 번호와 계측 방향을 나타내고 있다. 검증에는 1992년에 발생한 Bigbear 지진(PGA 23.5gal)이 사용되었다.

Fig. 2는 최하층(#1), 중간층(#7 on 2F, #5 on 3F), 최상층(#2)에 설치되어 있는 지진가속도계측기로부터 계측된 응답 가속도 시간이력을 나타내고 있으며, 그 크기는 최하층에서 가장 작고 최상층에서 가장 크게 측정되었다. 일반적으로 최상층(옥상층)에서 계측된 최대가속도는 중간층과 최하층에서 계측된 최대가속도보다 커야하지만, 그 크기가 합리적인 범위 이내여야 한다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 최상층에서

계측된 최대가속도는 중간층(2, 3층)에서 계측된 최대가속도 값 보다 크며 이 결과를 통해 직관적으로 계측신호의 이상 여부를 판단할 수 있다. 그러나 국부적인 응답가속도 증폭 요인이 존재할 가능성이 있기 때문에 계측 오류 판정 이전에 기존 계측자료와의 검토를 수행할 필요가 있다.

2.2.2 건축물 고유진동수를 이용한 오류 감지

전달함수(Transfer function)를 이용한 고유진동수 계산에는 평면상 동일한 위치를 기준으로 상, 하층에 설치(e.g.: #1, #2, #5, #7 in Fig. 1)된 두 개의 가속도 계측자료가 사용된다. 구조체에 이상이 없는 건축물에서는 중간층과 최하층 가속도 계측자료를 통해 얻은 고유진동수와 최상층-중간층의 고유진동수, 최상층-최하층 고유진동수가 모두 유사한 것이 일반적이다(Fig. 3(a)). 따라서 안전성 평가 결과에서 이상 없음을 판정을 받았음에도 세 고유진동수 사이의 큰 차이가 있는 경우에는 계측 오류로 판단 할 수 있다(Fig. 3(b)). 본 연구에서는

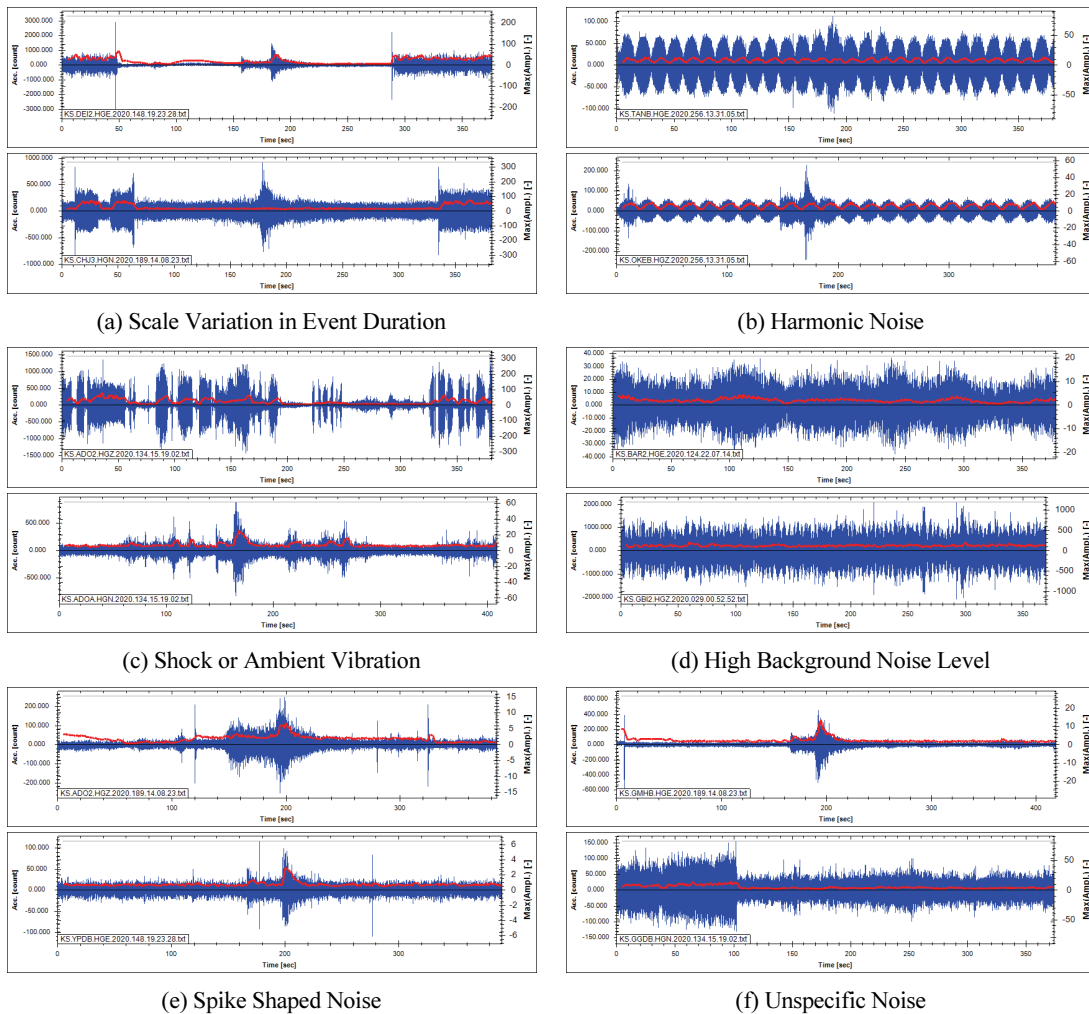


Fig. 4 Error Type Example of Time History Waveform

최상층-중간층, 중간층-최하층, 최상층-최하층 지진가속도계 측기로부터 도출한 고유진동수가 상호간의 1.5배 ~ 0.5배 범위 밖에 위치하는 경우 계측기 또는 시스템의 오류가 발생한 것으로 판단하며, 이 값은 사용자가 원하는 값으로 설정을 변경할 수 있도록 하였다.

2.2.3 이벤트 계측자료 가속도 시간이력 파형을 이용한 오류 감지

지진가속도계측기는 지진으로 인한 지반의 진동 뿐만 아니라 건축물을 사용하면서 발생하는 미소 진동을 계측할 수 있는 고감도 계측장비이다. 따라서 다양한 원인으로부터 발생하는 노이즈가 계측자료에 포함될 수 있으며 이 노이즈는 이벤트 계측자료를 통해 건축물의 안전성을 분석하는 과정에서 안전성 평가의 신뢰도를 떨어트리는 큰 원인이 된다. 따라서 적절한 설치-운영 환경을 구축하여야 한다. 본 연구에서는 전국 단위 지진 관측자료를 통해 정상 MiniSEED 파일에 포함된 노이즈, 이상진동을 분석하여 여섯 가지 유형으로 분류하였으며, 이 유형들의 대표적 파형을 Fig. 4에 나타내었다. 이 분류에는 기상청 국가지진종합정보시스템(NECIS)에서 제공하고 있는 2020년 규모 2.5 이상의 지진 7건이 사용되었으며, 계측 성분을 기준으로 5,616건의 MiniSEED 계측자료가 사용되었다. 그 결과는 Table 1과 같다.

2.3 이벤트 계측자료(MiniSEED) 저장 및 생성 과정 오류

건축물의 지진가속도계측시스템에서 운영 소프트웨어 상의 오류 또는 지진가속도기록계 상의 오류로 인하여 이벤트 계측자료(MiniSEED)가 이상 생성되는 경우, 지진 이벤트 발생 직후 이어지는 안전성 평가가 정상적으로 수행될 수 없다. 더불어 이상 생성된 계측자료가 상위기관으로 전파되면 지진 재해로 인한 피해 예측에 어려움이 발생하게 된다. 현장의 지

Table 1 Noise Type Analysis Result of Time History Waveform

Waveform Type	No. of Samples
Normal	4,863 (86.6%)
Scale Variation in Event Duration	44 (0.8%)
Harmonic Noise	12 (0.2%)
Shock or Ambient Vibration	492 (8.8%)
High Background Noise Level	164 (2.9%)
Spike Shaped Noise	31 (0.6%)
Unspecific Noise	12 (0.2%)
Sum	5,616 (100.0%)

진가속도계측시스템에서 발생하는 오류의 현황을 파악하기 위하여 전국의 공공시설물로부터 수집한 지진 이벤트 계측자료(MiniSEED)의 표본 검사를 수행하였다. 그 결과 계측자료의 오류를 12가지의 Error Type으로 분류하였으며 그 과정과 내역을 Fig. 5와 Table 2에 정리하였다.

Table 2의 Error Type ⑪(동 시설물의 지진 계측자료를 취

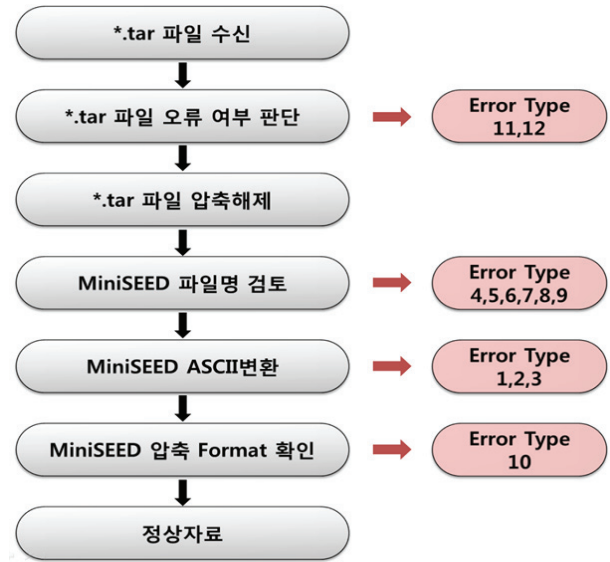


Fig. 5 Error Detection Process for MiniSEED Event File

Table 2 Error Type Code & Description

Error Type	
①	Network Code Error
②	MiniSEED Header Information Error (Not Exist in WhiteList i)
③	Station Code Error
④	File Naming Rule Violation
⑤	MiniSEED Filename Error (Network Code Error)
⑥	(Not Exist in WhiteList i)
⑦	Station Code Error
⑧	MiniSEED is mixed with compressed file of another building
⑨	Compressed file contains multiple buildings` MiniSEED
⑩	Unable to determine encoding format
⑪	.tar file has Undecompressible
⑫	Empty .tar file or not contain MiniSEED

i) 행정안전부 지진 가속도 계측자료 저장방법 및 전송방식 세부지침

한 압축 파일 해제 불가), ⑫(압축 파일 내부에 자료가 존재하지 않거나, 존재하더라도 MiniSEED 파일을 찾을 수 없음)는 해당 현장(local)의 지진가속도계측자료를 전체 취합하여 tar 파일을 생성하는 과정에서 발생하는 오류이며, 이는 통합서버에서 자료의 수신과 동시에 오류 판단이 가능하다. Error Type ④(MiniSEED 파일 명명규칙 위반), ⑤(Network 코드가 존재하지 않음), ⑥(파일명에는 문제가 없으나 행정안전부에 등록된 계측소가 아님), ⑦(Station 코드가 존재하지 않음), ⑧(압축파일명과 포함된 MiniSEED 파일의 시설물명이 다름), ⑨(하나의 압축파일에 복수의 시설물 MiniSEED가 포함되어 있음)에 해당하는 오류는 MiniSEED 파일명명 규칙을 벗어난 경우에 발생하며 tar 파일의 압축 해제 이후에 오류 판단을 수행할 수 있다. 이후 MiniSEED 파일을 ASCII 형식의 텍스트 파일로 변환하는 과정에서 SEED Header에 포함된 정보를 확

인하여 ①(MiniSEED Header에 Network 코드가 존재하지 않음), ②(MiniSEED Header에 문제가 없으나 행정안전부에 등록된 계측소가 아님), ③(MiniSEED Header에 Station 코드가 존재하지 않음)에 해당하는 오류 여부를 판단할 수 있고, SEED Data Blockette 분석 과정을 수행하여 ⑩(복호화를 위한 Encoding 형식이 존재하지 않음)에 해당하는 오류를 판단할 수 있다.

전국의 공공 건축물로부터 수집한 자료를 분석한 결과 Error Type ⑪과 ⑫가 가장 많이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 계측자료의 오류가 발생한 현장은 시스템 점검이 이루어지기 전까지 동일한 오류를 지속적으로 발생시키는 경향을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 수행된 계측자료 오류 분석 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Error Analysis Result of MiniSEED Event Data

Event #1.		Event #2.		Event #3.	
Station	Error Type	Station	Error Type	Station	Error Type
KW_U*	2,4,6	KW_U*	2,4,6	KW_U*	2,4,6
CP_C*	3	CP_C*	3	CP_C*	3
CP_Y*	3	CP_Y*	3	CP_Y*	3
AC_I*	8			AC_I*	8
AC_S*	8	AC_S*	8	AC_S*	8
AC_D*	9	AC_D*	9,10	AC_D*	9
				AC_J*	9,10
		AC_G*	10	GS_K*	2,3,6
JN_G*	10	JN_G*	10		
				GS_O*	2,3,6
AC_G*	11	AC_G*	11	AC_G*	11
				AC_Y*	11
AC_K*	11	AC_K*	11	SL_G*	11
AC_P*	11	AC_P*	11	GK_S*	11
AC_Y*	11	AC_Y*	11		
GK_P*	11	GK_P*	11		
GN_G*	11	GN_G*	11	GN_G*	11
GN_J*	11	GN_J*	11	GN_J*	11
GN_T*	11	GN_T*	11	GN_T*	11
GP_S*	11				
				GW_P*	11
JP_I*	11	JP_I*	11	JP_I*	11
AC_K*	12	AC_K*	12	AC_K*	12
		CN_S*	12		
CP_J*	12				
DG_G*	12	DG_G*	12	DG_G*	12
DG_K*	12	DG_K*	12	DG_K*	12
GK_G*	12	GK_G*	12		
JJ_S*	12	JJ_S*	12		
				GK_I*	12

3. 결 론

본 연구에서는 현재 운영중인 공공건축물 지진가속도계측 시스템의 계측자료를 수집·분석하여 지진가속도 계측자료의 유효성을 검증할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에 대한 결과는 다음과 같다.

1. 실시간 데이터(MMA/sec)를 기반으로 하여 지진가속도 계측시스템이 정상적으로 운영되고 있는지 검증할 수 있는 방안을 제시하였다. 실시간 데이터가 포함하고 있는 가속도 대표값과 실시간 데이터의 수신 여부를 활용 해 계측 시스템의 이상 여부를 신속하게 파악할 수 있는 방법인 것으로 판단된다.
2. 이벤트 계측자료(MiniSEED)를 활용하여 운영중인 지진 가속도계측시스템의 계측 자료를 검증할 수 있는 방안을 제시하였다. 응답가속도의 크기와 고유진동수를 활용한 오류 감지 방안을 통해 건축물에 설치된 계측기 사이의 이상 계측 여부를 상호 점검할 수 있고, 오류 가속도 시간 이력 파형을 조사해 계측 자료의 주요 오류 유형을 제시 하였다. 동일한 오류 유형이 지속되는 사례를 수집하여 향후 지진가속도계측기 설치 및 운영 기준 제·개정 의 기초자료로 활용될 수 있다.
3. 이벤트 계측자료(MiniSEED) 파일의 저장·생성 과정의 오류 유형을 분류하였으며 이를 실제 운영중인 공공시 설물에 적용해 표본 검사 및 분석을 수행하였다. 분석 결 과 동일한 계측소에서 동일한 오류가 지속적으로 발생 하는 현상을 확인하였으며, 오류 분석 결과를 통해 사전 에 점검 방향을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 상술한 연구 결과를 통해 수신/미수신으로 관리되던 기존 지진가속도계측시스템의 이상 계측자료를 구분하여 점검할 수 있는 방안을 제시하였으며, 시스템 상에서 이 상 작동의 종류를 판단할 수 있는 가이드라인으로 활용 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원 (20SCIP-B146946-03)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (2000), Construction and Operation of Earthquake Research Stations, KR-00-(T)-07 (in Korean).
2. Jang, J., An, H., Lee, J.H., Shin, S. (2019) Construction of Faster R-CNN Deep Learning Model for Surface Damage Detection of Blade Systems, J. Korea Inst. Struct. Maint. & Insp., 23(7), 80-86.
3. Ren, S., He, K., Girshick, R., and Sun, J. (2017), Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE, 39(6), 1137-1149.
4. Korea Construction Standards Center (2018), Korean Design Standard : General Seismic Design(KDS 17 10 00 :2018).
5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(2016), “건축물 실시간 안전진단을 위한 ICT기반 핵심기술개발 기획연구 최종보고서”, 45-46.
6. IRIS (2014), SEED Reference Manual, SEED Format version 2.4.
7. NDMI (National Disaster Management Research Institute) (2013), “Development of the Advanced Seismic Acceleration Analysis and Management System”, 11-1312184-00007-01 (in Korean).
8. NDMI (National Disaster Management Research Institute) (2013), “Development of Comprehensive Management and Information Service System for Seismic Acceleration Response Signal of Public Buildings”, 11-1312184-00039-01 (in Korean)
9. NDMI (National Disaster Management Research Institute) (2012), “Emergency Integrity Assessment Program for a Building using Structural Seismic Response”, 11-1311526-000069-01 (in Korean)
10. US Geological Survey, California Geological Survey, CESMD; Center for Engineering Strong Motion Data, <http://www.strongmotioncenter.org/>
11. Korea Meteorological Administration, NECIS; National Earthquake Comprehensive Information System, <http://necis.kma.go.kr/>

Received : 10/22/2020
Revised : 10/26/2020
Accepted : 10/30/2020

요 지 : 본 연구에서는 지진가속도계측시스템의 정상 운영여부를 판단하고 지진가속도 계측자료의 유효성을 검증할 수 있는 알고리즘을 개발하기 위하여 현재 운영 중인 공공건축물 지진가속도계측시스템 계측자료를 이용한 조사 분석을 수행하였다. 연구 결과를 통해 시스템에서 생성하는 주요 자료인 실시간 데이터(MMA/sec) 자료와 이벤트 계측자료(MiniSEED)의 생성 절차에서 발생하는 오류와 계측자료 자체의 이상 여부를 감지할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며, 오류 유형을 분석하여 계측 데이터 분석을 통한 점검 방향 판단의 기초자료를 마련하였다. 이를 통해 수신/미수신으로 관리되던 지진가속도계측시스템의 점검 여부 및 이상 종류를 판단할 수 있는 가이드라인으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 지진가속도계측시스템, 건축물 안전성평가, 응답가속도 시간이력, 구조물 안전성 모니터링
