

국민안전처 통합관리시스템 연계 가능한 시설물 진동 감지 및 분석 시스템 개발

임지훈¹, 정진우², 문대중³, 최동호^{4*}

A Development of Real-time Vibration Monitoring and Analysis System Linked to the Integrated Management System of Ministry of Public Safety and Security

Ji-Hoon Lim¹, Jin-Woo Jung², Dae-Joong Moon³, Dong-Ho Choi^{4*}

Abstract: A frequency of earthquake occurrence in the Republic of Korea is increasing over the past few decades. In this situation, an importance of earthquake prevention comes to the fore because the earthquake does damage to structures and causes severe damage of human life. For the earthquake prevention, a real-time vibration measurement for structures is important. As an example, the United States of America and Japan have already been monitoring real-time earthquake acceleration for the important structures and the measured acceleration data has been managed by forming database. This database could be used for revising the seismic design specifications or predicting the damage caused by earthquake. In Korea, Earthquake Recovery Plans Act and Enforcement Regulations are revised and declared lately. Ministry of Public Safety and Security is constructing a integrated management system for the measured earthquake acceleration data. The purpose of this research is to develop a real-time vibration monitoring and analysis system for structures which links to the integrated management system. The developed system contains not only a monitoring function to show real-time acceleration data but also an analysis system to perform fast fourier transform, to obtain natural frequency and earthquake magnitude, to show response spectrum and power spectrum, and to evaluate structural health. Additionally, this system is designed to be able to link to the integrated management system of Ministry of Public Safety and Security. It is concluded that the developed system can be useful to build a safety management network, minimize maintenance cost of structures, and prevention of the structural damage due to earthquake.

Keywords: Ambient vibration measurement, Signal and statistical process, Structural health evaluation, Seismic data analysis, Data connection technique

1. 서 론

기상청의 국내지진 발생추이 자료를 보면, 1978년~1998년 사이에 연평균 19.2회, 1999년~2014년 사이에 연평균 47.8회의 지진이 발생한 것을 알 수 있다. 이를 통해 국내지진 발생 빈도가 증가하는 추세라는 것을 알 수 있으며, 지진재난 발생에 대한 두려움과 시설물 안전성에 대한 우려가 높아지고 있는 상황이다(Park et al., 2014). 이러한 지진 발생 계측 빈도의 증가는 설치된 계측기 수의 증가가 원인일 수 있지만, 지진으로 인해 발생하는 재해에 효과적으로 대응하기 위해서는 지진가속도계측 및 분석 뿐만 아니라 데이터베이스 구축이 필

요하며, 구축된 데이터베이스를 이용해 지진재해에 대비하는 것이 중요하다.

최근에는 선진국을 중심으로 시설물 유지관리를 위한 계측 시스템이 도입되고 있다(Ju et al., 2010). 몇 국가의 경우 이미 계측 및 분석된 지진가속도데이터를 데이터베이스화 하여, 이를 자연재해 대응에 활용하고 있다. 미국 지질조사국(U.S. Geological Survey)은 데이터베이스화된 지진 계측데이터를 내진설계기준 개정시 활용하고 있으며, 일본의 지진피해 조기평가시스템(Early Estimation System)은 지진으로 인한 피해를 예측하기 위해 데이터베이스화된 지진 정보를 활용하고 있다. 국내의 경우, 2014년 10월 14일에 지진재해대책법 시행규칙이 공포되었다. 이에 따르면 명시된 중앙행정기관, 지방자치단체의 청사, 국립대학교 등 주요 시설물에 의무적으로 지진가속도계측기를 설치하여야 한다. 또한 국민안전처에서는 지진가속도계측자료 통합관리시스템을 구축해나가고 있는 상황이다. 이에 따라, 시설물의 상시 진동을 계측하고 동특성 분석 및 건전도를 평가하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Choi and Choi, 2015; Kim et al., 2015a; Kim et al., 2015b).

국내외 상용화된 지진 모니터링 소프트웨어들은 지진가속

¹정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정

²정회원, (주)이제이텍 기술연구소 연구원

³정회원, (주)이제이텍 기술연구소 연구소장

⁴정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: samga@hanyang.ac.kr

Member, Ph.D., Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, 222 Wangshimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04760, Korea.

•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

도데이터 분석 프로그램을 포함하고 있다. 하지만 국내의 상용소프트웨어의 경우 가속도성분표시 및 주파수(FFT) 표시만 가능하거나 응답스펙트럼 분석 및 가속도-속도-변위 변환 기능을 갖추고 있지 않으며, 외국의 상용소프트웨어인 GeoDAS(Razinkov, 2014)의 경우 해당 회사의 지진가속도계를 설치해야만 분석 프로그램을 사용할 수 있다. 또한 상용화된 지진 모니터링 소프트웨어들은 시설물의 건전도 평가 기능을 갖추고 있지 않으며, 국민안전처의 지진가속도계측자료 통합관리시스템과 연계를 목적으로 개발되지 않았다. 따라서 본 연구의 목적은 이 통합관리시스템 연계가 가능하며, 지진 가속도 실시간 계측 및 분석 기능, 시설물 건전도 평가 기능을 모두 포함한 시스템을 개발 하는 것이다. 이 시스템은 사용자에게 편리한 작업환경 제공할 뿐만 아니라 유의미한 지진 및 진동 데이터를 분석할 수 있고, 동시에 평가 결과를 국민안전처 통합관리시스템에 실시간으로 전송이 가능하도록 개발되었다.

2. 진동 감지 및 분석 시스템의 구성

시설물 진동 감지 및 분석 시스템은 Fig. 1과 같이 크게 지진 및 상시진동 모니터링 시스템(earthquake and real-time vibration monitoring system), 지진가속도데이터 분석 시스템(earthquake-acceleration data analysis system), 지진데이터통계처리 및 연계 시스템(statistical process for earthquake data and link system) 들로 구성된다.

지진 및 상시진동 모니터링 시스템은 시설물에 설치된 3축

지진가속도계측센서를 통해 진동을 계측하며, 계측된 아날로그 원시데이터는 초당 20회~100회로 샘플링된 디지털 신호로 추출되어 사용자에게 지진가속도데이터를 제공한다.

지진가속도데이터 분석 시스템에서는 저장된 지진가속도 데이터를 이용하여 지진가속도의 동특성 분석을 수행하며, 이를 토대로 시설물의 고유진동수 변화율, 시설물과 자유장의 고유진동수비, 시설물의 최대층간변위비를 추적하여 건전도 분석을 수행한다.

지진데이터통계처리 및 연계 시스템에서는 계측된 지진가속도데이터와 분석된 지진가속도데이터 이력을 보전하고 국민안전처 통합관리시스템과 연계하는 기능을 포함한다. 각 계측소에 저장된 이력데이터는 국민안전처 통합관리시스템에서 요구하는 보고서양식으로 작성되어야 하며, 국민안전처 통합관리시스템 전송을 위한 보고서 전송 대기 폴더인D:\WORK\RPT에 보전되어야 한다. 이는 국민안전처에서 배포한 지진가속도계측자료 통합관리 시스템 운영자 매뉴얼에 명시되어 있다. 시스템들의 상세한 주요기능은 다음과 같다.

2.1 지진 및 상시진동 모니터링 시스템

이 시스템은 계측기에서 감지된 아날로그 신호를 샘플링하여 디지털 신호로 추출된 데이터에 대하여, Table 1과 같이 조회(inquiry) 기능, 실시간 모니터링(real-time monitoring) 기능, 관리(management) 기능을 수행한다.

조회 기능은 채널별조회, 센서별조회, 이벤트조회 기능을 포함한다. 채널별조회 기능은 주로 전체 센서의 취합 여부나 데이터의 흐름을 보기 위해 사용한다. 센서별조회 기능은 건물 내에 구축된 각각의 계측센서에서 수집된 데이터, 동일 계

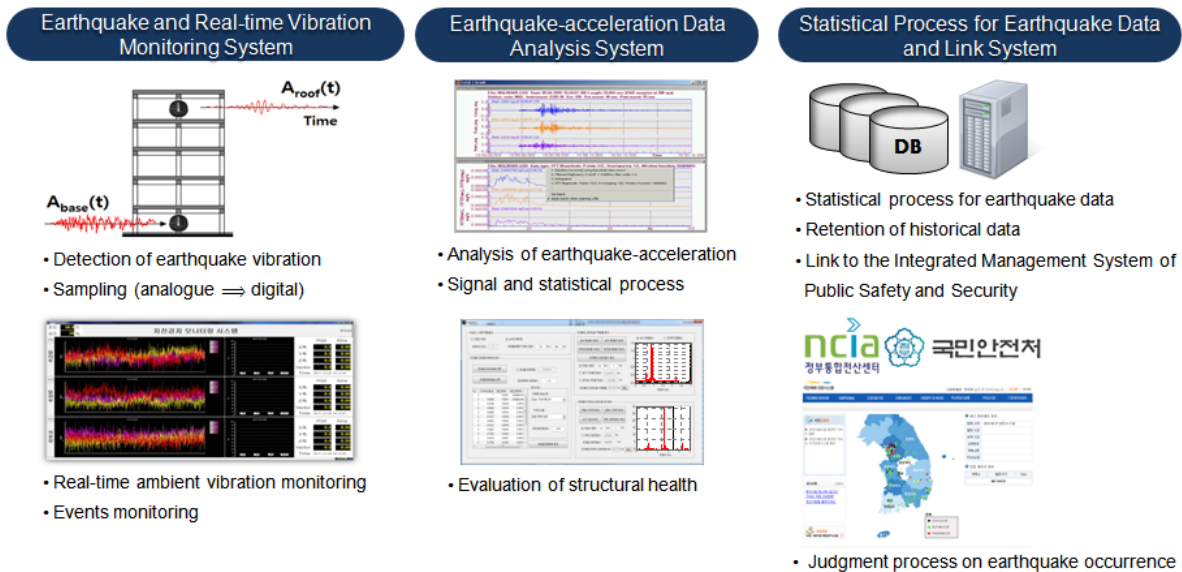


Fig. 1 Real-time vibration and monitoring and analysis systems

Table 1 Main function of the earthquake and real-time vibration monitoring system

Main function	Details
Inquiry	channel, sensor, events
Real-time monitoring	sensor
Management	sensor, recorder, structure and channel, user

측센서 안에서 성분별(동-서, 남-북, 수직 방향)으로 수집된 데이터 등을 개별적으로 조회할 수 있는 기능으로써, 해당 센서를 선택 후 조회데이터 종류와 조회기간을 설정하여 데이터를 조회할 수 있다. 센서별 기능에는 센서별로 데이터를 조회하기 위하여 센서위치별, 성분별에 따라 부여된 센서코드를 적용하여야 하며, 센서별 스트림 데이터를 표출할 수 있는 기능을 포함한다. 이벤트조회 기능은 전체 계측 시스템의 단위 시스템에서 소프트웨어적으로 확인 가능한 문제 상황이나 센서 이벤트(관리기준 초과 등) 결과를 기록한다. 특정 센서에 이상신호가 발생되거나 설정된 관리 기준치를 초과한 데이터가 발생한 경우 계측서버는 이를 감지하여 데이터베이스에 기록한다. 계측 시스템의 IP주소를 부여한 장비(기록계 등)에서 문제가 발생하여 데이터 취합이 되지 않을 경우 이를 감지하여 데이터베이스에 기록하며, 시스템 로그 리스트를 조회할 수 있어야 한다.

실시간 모니터링 기능은 현장의 각 센서별 실시간 조회가 가능한 기능을 지칭한다. 사용자가 원하는 센서의 데이터 차트를 조회할 수 있어야 하며, 여러 개의 센서를 동시에 조회할 수 있어야 한다. 설정 옵션으로 관리기준선의 표시 여부를 선택할 수 있어야 하며, Y축의 최대/최소값을 설정할 수 있어야 한다.

관리 기능은 건물에 접속하는 운영자 및 담당자의 운영관리를 효율적으로 하고 운영자 및 담당자가 건물에 구축되어 있는 계측 기기의 관리가 용이하게 하기 위하여 구성되는 기능이다. 이 기능은 센서관리, 기록계관리, 건물 및 채널관리, 사용자관리 기능으로 구성된다. 센서관리 기능은 센서의 기본 정보(센서 ID, 센서 이름, 센서 타입, 센서의 현재 상태) 및 센서의 세부정보(시리얼 넘버, 설치 위치 및 일자, 설치 좌표, 센서의 사진 및 도면)를 표시한다. 또한 해당 센서 정보의 수정 및 삭제 기능을 포함한다. 기록계관리 기능은 기록계의 기본 정보(로거 ID, 로거 이름, 로거의 총 채널 수) 및 로거의 상세 정보(사용 여부, 기록계의 IP주소와 시리얼 넘버, 데이터 파일 저장 경로, 최종 취합시간, 기록계의 사진 및 도면)을 표시한다. 또한 해당 기록계 정보의 수정 및 삭제 기능을 포함한다. 건물 및 채널관리 기능은 건물 ID, 건물 이름, 최종 수정 날짜, 건물의 종류 및 상태, 이상 센서의 수량, 데이터 측정 주기, 최종 계측 일자 등을 표시한다. 채널관리 화면에서는 채널 ID, 채널 이름, 채널 순번, 해당 채널의 센서 이름, 채널이 속한 로

거의 이름, 로거의 인덱스, 채널 상태(데이터의 취합 여부, 화면 표시 여부, 최종 기록 시간) 등을 표시한다. 또한 해당 채널 정보의 수정 및 삭제 기능을 포함한다. 사용자관리 기능은 건물에 접속이 가능한 사용자 정보와 등급을 관리한다. 사용자 ID, 이름, 사용자 등급 등의 정보를 표시하며, 사용자 정보의 추가/수정/삭제 기능을 포함한다.

2.2 지진가속도데이터 분석 시스템

지진가속도데이터의 동특성을 분석하고 주파수 영역 데이터를 취득 및 분석하기 위해, 동적센서 신호의 실시간 데이터 전체를 파일로 만들어 저장한다. 실시간 데이터 파일은 초당 10~200 Hz Sampling Rate으로 저장된다. 이렇게 생성된 데이터 파일은 시스템에서 지정된 위치에 저장되어 보전되는데 이 파일을 읽어 들여 분석하는 것이 지진가속도데이터 분석 시스템의 기능이다.

이 지진가속도데이터 분석 시스템에는 다음과 같은 가속도 데이터 분석기능을 포함하고 있으며, Fig. 2에 나타내었다.

- (1) 가속도-속도-변위 변환 표출
- (2) 가속도 벡터합 표출
- (3) 누적절대속도(Cumulative Absolute Velocity, CAV)
- (4) 시간이력 감쇠비 추정
- (5) 고속푸리에변환(Fast Fourier Transformation, FFT)
- (6) 파워스펙트럼 추출
- (7) 응답스펙트럼 추출
- (8) 지진 진도 추출(Airas Intensity, JMA Intensity)

이 시스템에는 가속도데이터 분석 기능을 기반으로 시설물 건전도 평가 알고리즘을 포함하고 있다. 시설물 건전도 평가는 아래와 같이 구성된다.

- (1) 시설물의 고유진동수 변화율 평가
- (2) 시설물과 지반의 고유진동수비 평가
- (3) 시설물의 최대충간변위비 평가

시설물의 고유진동수 변화율은 지진이 발생 전후의 고유진동수 변화율을 말한다. 이에 대하여, 지진에 의한 시설물의 건전성 평가 기준은 고유진동수 변화율이 20%를 넘지 않는 것을 시설물이 안전하다고 설정하였다.

시설물과 지반의 고유진동수비 평가의 목적은 자유장(지반)의 고유진동수가 시설물의 고유진동수와 일치한다면 공진 현상이 발생하여 구조물에 큰 피해를 입힐 수 있으므로, 구조물과 지반의 고유진동수의 비를 계산하여 공진 발생 위험성을 피하고자 함이다. 따라서 시설물과 지반의 고유진동수의 비가 100%±10% 범위 내에 있을 경우 공진이 발생할 가능성이 있다고 가정하였다. 즉, 고유진동수 비가 이 범위 외에 있을 경우 시설물이 안전하다고 평가한다.

시설물의 충간변위에 따른 건전도 평가를 하기 위한 최대

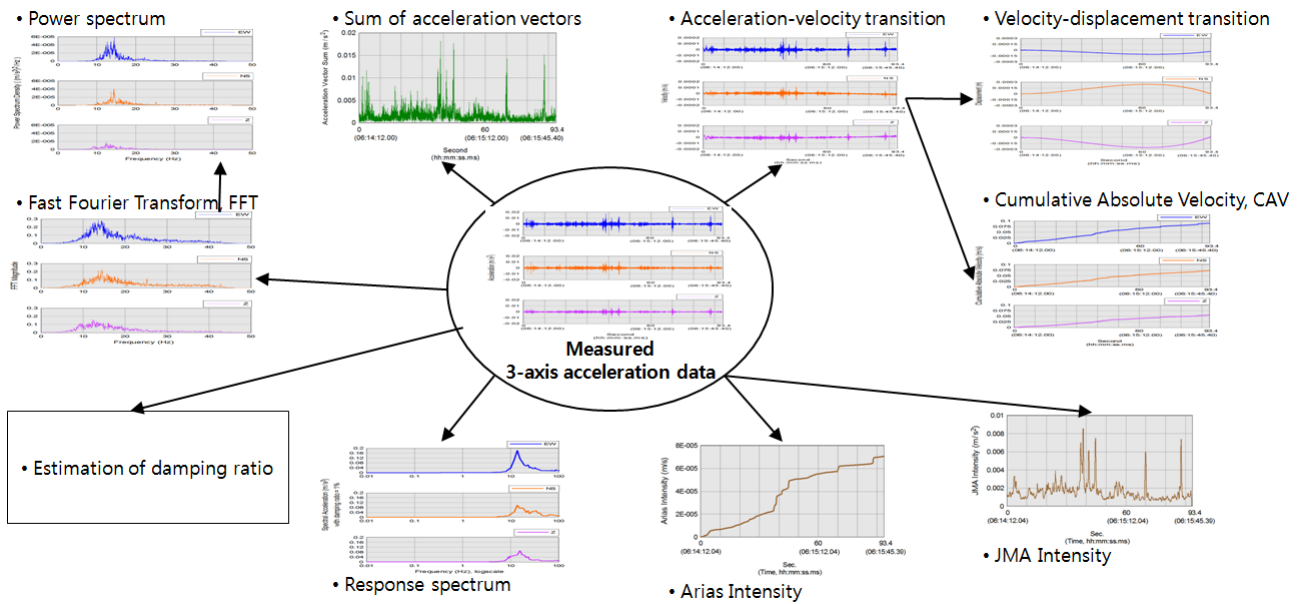


Fig. 2 Analysis functions for the measured 3-axis acceleration data

Table 2 Evaluation criteria for the structural health

Structural System	Maximum allowable relative story displacement(%)				
	Damage Level	Slight	Moderate	Extensive	Complete
	FEMA ¹⁾ 356	OP ²⁾	IO ³⁾	LS ⁴⁾	CP ⁵⁾
Steel moment frame	0.44	0.70	2.50	5.00	
Steel braced frame	0.31	0.50	1.50	2.00	
Concrete frame	0.50	1.00	2.00	4.00	
Concrete shear wall	0.25	0.50	1.00	2.00	
URM ⁶⁾	FEMA 356	0.15	0.30	0.60	1.00
	KISTEC ⁷⁾	0.20	0.40	0.67	1.00
Wood wall	0.40	1.00	2.00	3.00	

FEMA¹⁾=Federal Emergency Management Agency, OP²⁾=operational, IO³⁾=immediate occupancy, LS⁴⁾=life safety, CP⁵⁾=collapse prevention, URM⁶⁾=unreinforced masonry wall, KISTEC⁷⁾=Korea Infrastructure Safety & Technology Coporation

허용층간변위비는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 구조물의 지진감지를 위한 3축 지진계 및 프로그램 개발에 관한 연구보고서(Moon, 2015)로부터 Table 2와 같이 인용하였으며, 이는 건축구조설계기준(2009) 및 미국연방재난관리청의 FEMA 356(FEMA, 2000)을 참조한 결과이다. 시설물의 층간변위비는 최상층의 계측센서로부터 얻은 가속도데이터를 가속도-속도 변위 알고리즘을 통해 최상층의 최대변위를 계산하고, 이에 1차 모드형상을 곱하여 각층의 변위를 구한 후, 각 층에 대한 층간변위비를 산정하며, 각 층간변위비는 Table 2에 따라 평가된다. Fig. 3은 시설물의 건전도 평가 시스템을 구현한 프로그램의 인터페이스이다.

2.3 지진데이터통계처리 및 연계 시스템

지진데이터통계처리 시스템은 원시데이터를 통계 처리하여 대표값만을 저장하는 기능을 갖추고 있다. 통계처리된 지진가속도데이터를 통계데이터라고 정의한다. 통계처리는 매 10분, 매 시, 매 일을 기준으로 하며, 통계시간은 계측장비나 서버 시간이 아닌 한국표준시를 기준으로 한다. 원시데이터는 정해진 시간 간격으로 통계처리가 수행되어야 하며, 매 10분 단위를 권장한다. 즉 10분 동안 측정된 원시데이터로부터 대표적인 통계데이터를 구한다. 통계데이터로는 평균값(mean), 최대값(max), 최소값(min), 범위(range), 중앙값(median), 최빈값(mode), 분산(variance) 또는 표준편차(standard deviation), 평균제곱근(root mean square), 왜도(skewness), 첨도(kurtosis), 원시데이터 수(count), 백분위 수(percentile)이 있다.

연계 시스템의 기능은 현장에서 관리되는 계측, 분석, 통계 처리된 가속도데이터 관리시스템을 국민안전처 지진가속도 계측자료 통합관리시스템에 연계시키는 기능이다. 연계를 위해, 국민안전처의 지진가속도계측자료 통합관리시스템 운영자 매뉴얼을 참고하여 소재지별 MMA(Min, Max, Average) DATA PORT, 기관코드, 계측소코드, 시설물별 지진가속도 계 분류코드 및 센서위치코드 등이 설정되어야 한다. 국민안전처의 통합관리시스템과 연계되는 대표적인 정보로는 지진가속도 계측기 설치 위치정보, 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA), MMA, mini-SEED 파일, 지진 및 자체 이벤트 발생현황, 시설물 건전도 평가 결과가 있다.



Fig. 3 Structural health evaluation system

3. 시스템 적용

본 연구에서 개발된 지진가속도데이터 분석 기능을 충청남도 아산시에 소재한 철근콘크리트조 5층 건물의 자유장에 설치한 계측센서로부터 얻은 가속도데이터에 적용하였다. 계측데이터는 국민안전처 고시 지진가속도계측기 설치 및 운영기준의 제 8장 제 40조 별지 제 1호 서식 관련 별표 27, 28에 따라 mini-SEED형식의 파일로 저장되었으며, Table 3에 계측파일에 대한 정보를 나타내었다. 이 계측데이터는 대상 구조물의 자유장(지반)에 설치된 3축(동-서 축, 북-남 축, 수직 축) 가속

Table 3 Measured acceleration data

Provision	Value	Note
Organization Code	CN	Chungcheongnam-do
Measuring-station Code	XX	Arbitrary value
Sensor Location Code	G	Free field (ground), 3 axis (EW, NS, Z)
Channel	HGE	EW axis, 100 sample/s
	HGN	NS axis, 100 sample/s
	HGZ	Z axis, 100 sample/s
Creation Date	20151202061412	Dec. 2, 2015, 6:14:12 am
File Name	CN_XXG_HGE_20151202061412.mseed, CN_XXG_HGN_20151202061412.mseed, CN_XXG_HGZ_20151202061412.mseed	

도계로부터 각 축에 대하여, 2015년 12월 2일 오전 6시 14분 12.0초부터 6시 15분 45.40초까지 93.4초 동안, 샘플링 비율 (sampling ratio) 100 Hz로 취득되었다. 즉 93.4초간 9340개의 샘플이 취득되었다. 동-서(EW), 북-남(NS), 수직(Z) 축에 대하여 각각 취득된 mini-SEED형식의 가속도데이터에 대하여 고역필터(High Pass Filter, HPF)를 통해 0.5 Hz 미만의 신호를 제거하여 Fig. 4에 나타내었다.

이 계측데이터에 본 시스템의 기능 중 가속도 벡터합 표출 기능을 적용하여 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, 가속도 벡터는 3축 지반가속도데이터에서 각 축의 가속도 값을 성분으로 하는 벡터를 의미하며, 가속도 벡터합은 각 축의 가속도 성분값에 대한 제곱 합의 제곱근을 의미한다. 외력이 없는 상태에서, 각 축의 가속도가 0 m/s²가 되도록 정렬되었기 때문에 3축 개별가속도의 벡터총합은 0 m/s²을 나타낸다(Lee et al., 2014).

계측된 3축 지반가속도데이터의 각 축에 대하여 가속도-속도-변위 변환 기능을 수행하였다. 가속도데이터에서 속도데이터로 변환과 속도데이터에서 변위데이터로 변환은 수치적 적분을 통해 수행된다. Trapezoid Method를 사용하여 결과를 표출하였다. 3축의 가속도데이터에 대한 수치적 적분을 통해 얻어진 속도데이터는 Fig. 6에 나타내었다. 동일한 방법으로, 이 속도데이터를 수치적 적분하면 변위데이터를 얻을 수 있으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다.

본 시스템은 누적절대속도(CAV) 표출이 가능하다. CAV는 지진가속도데이터로부터 얻을 수 있으며, 특정 시점에서의 CAV의 값은 계측 시점부터 특정 시점까지의 가속도데이터 절대값에 대한 수치적 적분을 통해 구해진다(Electric Power

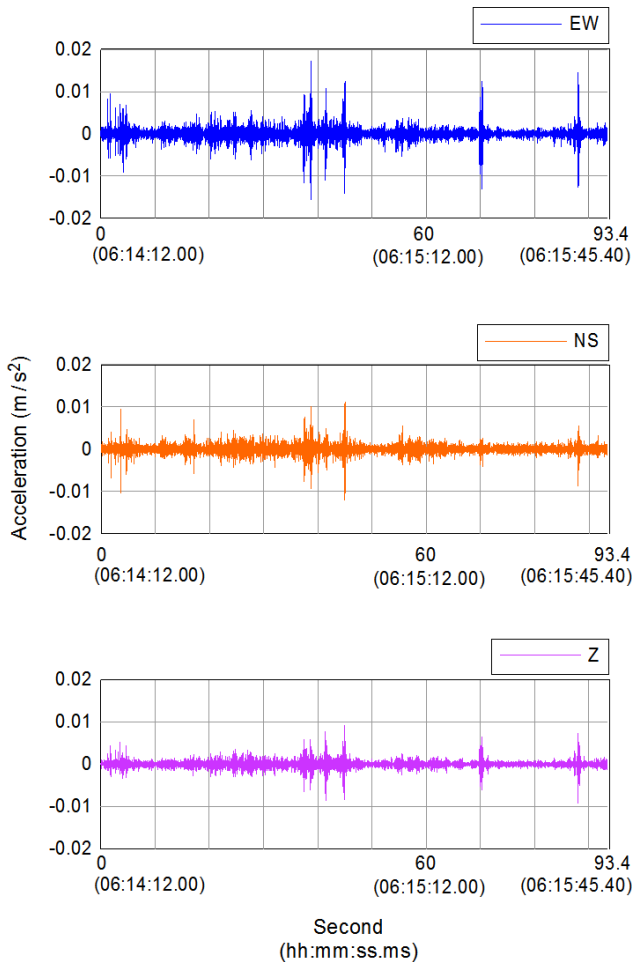


Fig. 4 The measured 3-axis acceleration data

Research Institute, 1991). 수치적 적분은 Trapezoid Method를 사용하여 수행되었다. 3축 지반가속도데이터에 대하여 누적 절대속도 표출 기능을 수행하여 산출된 데이터는 Fig. 8과 같다. CAV는 지진 및 진동으로 인해 발생될 수 있는 시설물의 손상에 대한 지표로 활용될 수 있다(Jiening, 2014).

시간이력 감쇠비는 가속도응답에서 최대가속도응답 후 자유진동하는 단자유도시스템으로 가정한 후에 로그감쇠율법(Logarithmic decrement method)을 사용하여 추정하였다(Chopra, 2006). 동-서(EW), 북-남(NS), 수직(Z) 축에 대한 가속도데이터에 시간이력 감쇠비 추정 기능을 수행한 결과, 각 축의 감쇠비 값은 0.00040, 0.00043, 0.00038이었다.

고속푸리에변환(Fast Fourier Transformation, FFT) 기능은 시간 영역의 지진가속도계측데이터를 주파수영역의 데이터로 변환하는 것이며, 시간영역으로부터 변환된 주파수영역의 데이터 값들 중에서 가장 큰 신호 크기를 갖는 주파수를 고유주파수 혹은 고유진동수라고 정의할 수 있다(Van Loan, 1992). 시설물의 건전도를 분석하기 시설물과 지반 각각의 고유진동

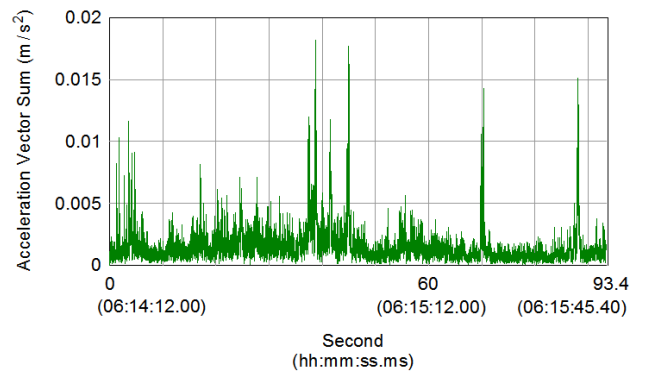


Fig. 5 The acceleration vector sum

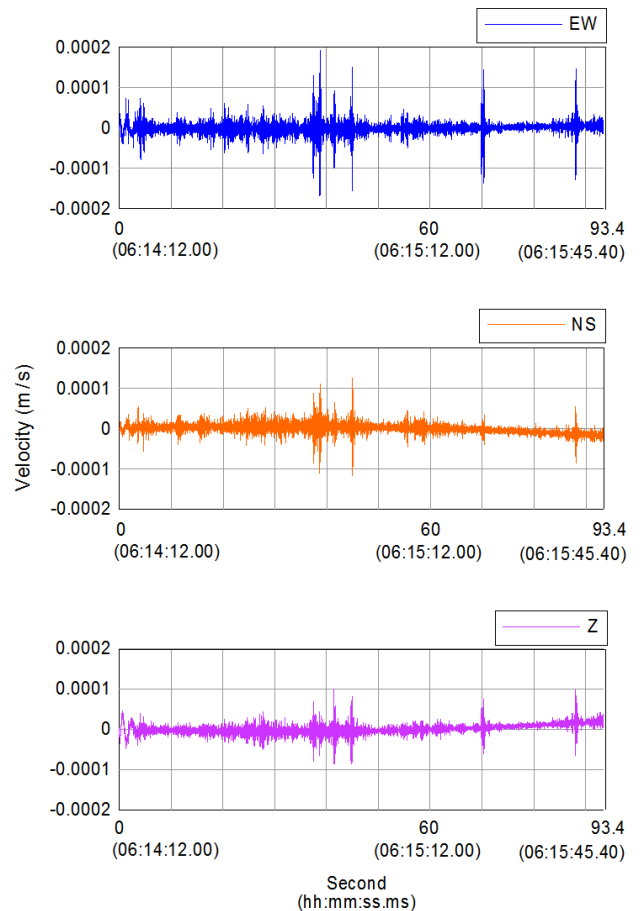


Fig. 6 The velocity obtained from the acceleration

수를 파악해야하며, 이를 위해 FFT 기능을 사용할 수 있다(Yoo and Song, 2009). Fig. 9는 3축 지반가속도데이터에 대하여 FFT를 수행한 결과이다.

FFT 기능을 통해 변환된 주파수영역에 대하여, 주파수당 강도(intensity)를 나타내는 파워스펙트럼을 표출할 수 있다(Youngworth et al., 2005). 파워스펙트럼을 구하는 방법으로는 Periodogram Method, Autocorrelation Method, Averaging Periodogram Method, Welch's Method 등이 있으며, Fig 10은

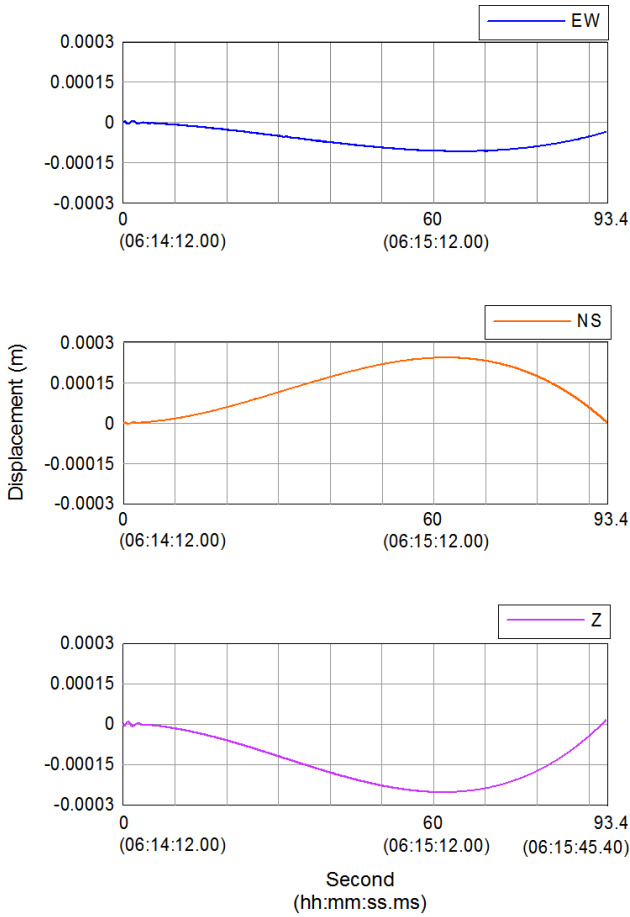


Fig. 7 The displacement obtained from the velocity

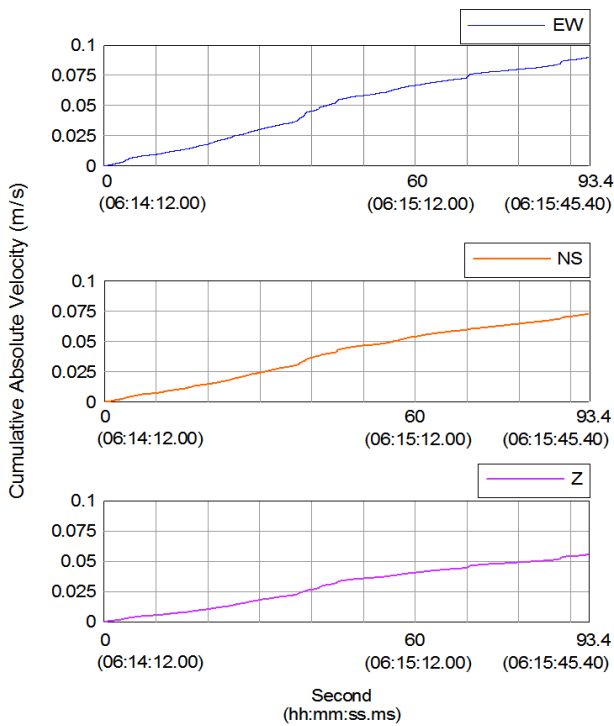


Fig. 8 Cumulative absolute velocity

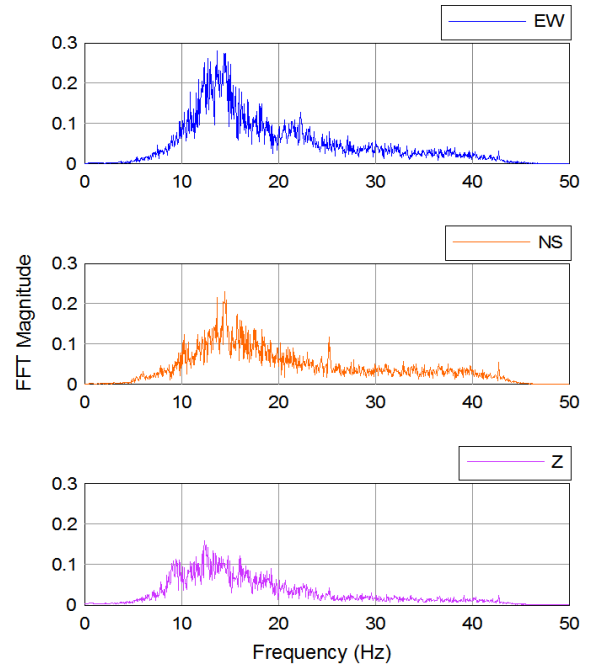


Fig. 9 Fast Fourier Transform

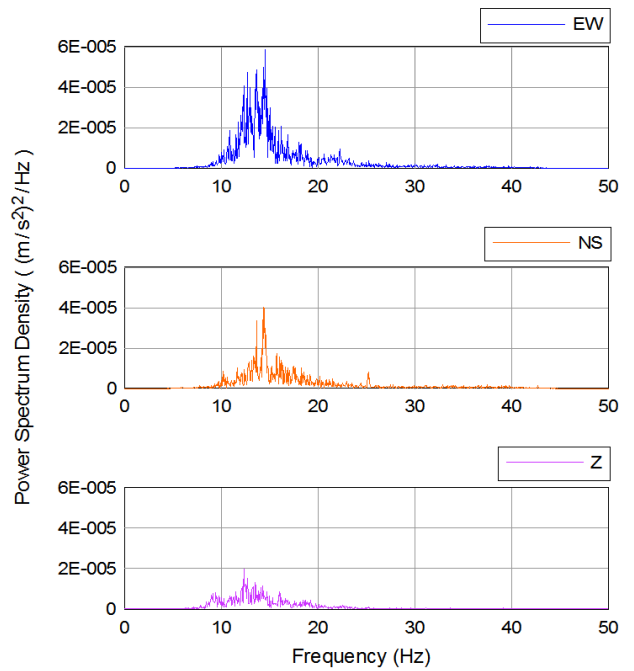


Fig. 10 Power spectrum

Welch's Method을 사용하여 표출된 파워스펙트럼이다.

응답스펙트럼은 지진으로 인해 생기는 진동의 고유진동수에 따른 구조물의 최대응답을 나타내는 스펙트럼이다(Chopra, 2006). 고정된 감쇠비에 대하여, 주기를 변화시키면서 진동에 대한 운동방정식을 풀어 최대응답을 구해나간다. 운동방정식을 풀기 위한 수치해석법으로는 Interpolation Method, Newmark's

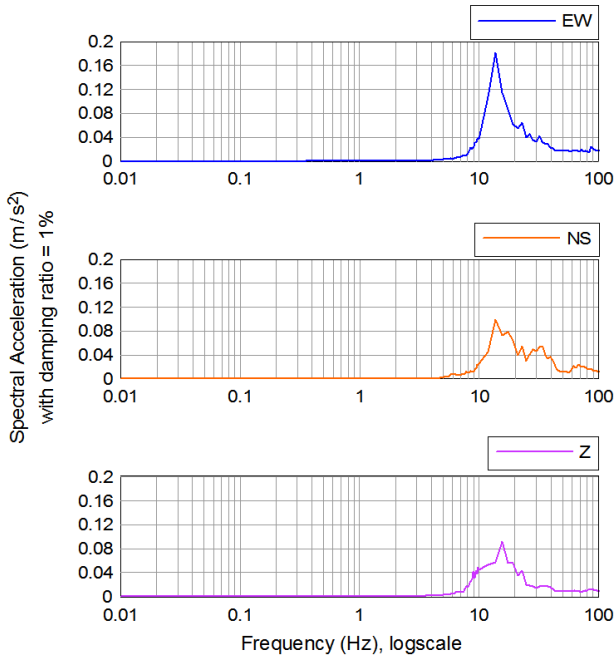


Fig. 11 Response spectrum

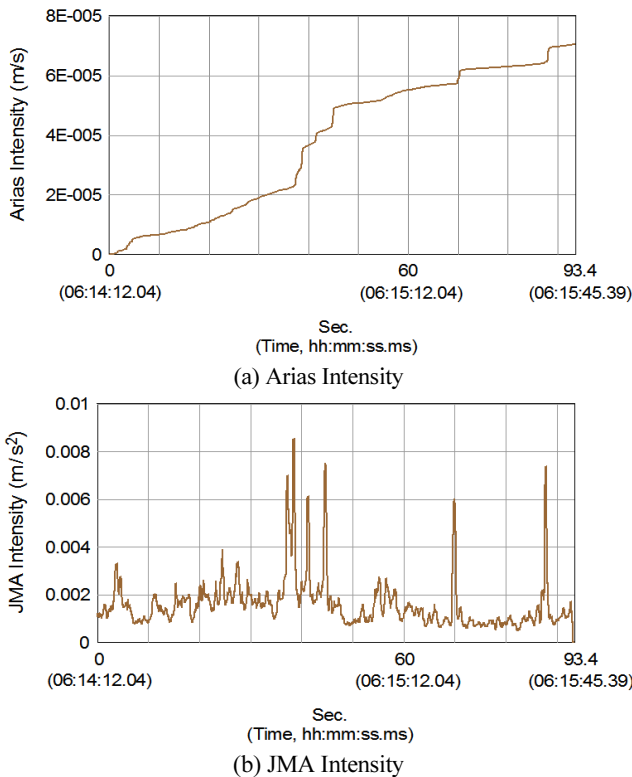


Fig. 12 Earthquake intensity

Method, Explicit Runge-Kutta Method 등이 있으며, Fig. 11은 Interpolation Method를 사용하여 표출된 가속도 응답스펙트럼이다.

지진 진도에 대한 지표는 Arias Intensity와 JMA Intensity를

Table 4 JMA scale and approximate MM scale

Ground acceleration(gal, cm/s ²)	JMA scale	Approximate MM scale
< 0.8	0	I
0.8 - 2.5	1	I - II
2.8 - 8	2	II - IV
8 - 25	3	III - IV
25 - 80	4	V - VII
80 - 140	Lower 5	V - VIII
140 - 250	Upper 5	VI - IX
250 - 315	Lower 6	VIII - X
315 - 400	Upper 6	IX - X
> 400	7	X - XII

사용하였다. Arias Intensity는 지진의 잠재적 파괴력을 나타내는 지진동 파라미터라고 할 수 있다. JMA Intensity는 계측 장소에서의 지진동의 강도를 추정하기 위해 계산된다.

Arias Intensity는 수평 축(동-서 축 및 남-북 축)에 대한 지반 가속도계측데이터로부터 구해지며, 특정 시점에서의 각 축에 대한 Arias Intensity 값은 계측 시점부터 특정 시점까지의 가속도데이터 제공에 대한 적분 값에 $\pi/(2g)$ 를 곱하여 계산된다. 여기서 g 는 중력가속도이다. 수평 방향에 대한 Arias Intensity 값은 동-서 축과 남-북 축에 대한 Arias Intensity 값의 합으로 구해진다(Tselentis, 2011). Fig. 12(a)는 지반가속도데이터의 수평 방향에 대한 Arias Intensity를 보여준다.

JMA(Japan Meteorological Agency, 일본 기상청) Intensity는 3축 지반가속도계측데이터로 결정된다(Karim and Yamazaki, 2002). JMA Intensity 계산하기 전에, 지반가속도데이터는 가속도 벡터합 기능으로 처리된다. 이 처리된 데이터는 재가공되어 Fig. 12(b)와 같이 JMA Intensity 데이터로 표출된다. 표출된 JMA Intensity 데이터에서 최대가속도를 산정할 수 있으며, 산정된 최대가속도와 Table 4에 나타난 JMA 진도 계급 기준을 비교하여 JMA 진도를 결정할 수 있다. 또한 Table 4에 나타난 것과 같이, JMA 진도 계급은 국내에서 기준으로 사용하고 있는 MM 진도(Modified Mercalli, 수정된 메르칼리 진도) 계급으로 근사될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 지진 및 상시진동 모니터링 시스템, 지진가속도데이터 분석 시스템, 지진데이터통계처리 및 국민안전처와의 연계 시스템들이 하나로 통합된 시스템을 개발하였다. 이 시스템의 특징 및 효과는 다음과 같다.

- 1) 가속도계측데이터에 대하여 다양한 분석 기능을 갖추고 있으므로, 시설물 및 자유장의 최대가속도진폭, 시설물의 감쇠비, 고유진동수, 응답스펙트럼 및 파워스펙트럼 등 다양한 동특성을 추정할 수 있다.
- 2) 평시 계측되는 가속도데이터를 토대로 실시간 시설물 건전도 평가가 가능하며, 지진의 진도 표출이 가능하다.
- 3) 가속도계측데이터 상시 모니터링 및 분석을 통해 재난으로 인한 건축물 및 시설물의 피해에 대비 및 평가가 가능하므로 유지관리 비용을 최소화 할 수 있다고 판단된다.
- 4) 국민안전처 지진가속도계측자료 통합관리시스템과 연계가 가능하므로, 국가 주요 기반 시설물의 안전관리 네트워크 구축 및 관리하기 위해 사용될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 중소기업청에서 지원하는 2016년도 산학연협력 기술개발사업(C0298244)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

1. Choi, S. and Choi, J. M. (2015), Application of Structural Health Monitoring System for High-rise Building, *Proceeding of 2015 Architectural Institute of Korea Spring Conference*, 35(1), 363-364 (in Korean).
2. Chopra, A. K. (2006). *Dynamics of Structures*, 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, U.S.
3. Electric Power Research Institute (1991), *Standardization of the Cumulative Absolute Velocity*, EPRI TR-100082-T2, Palo Alto, California.
4. FEMA (2000), *FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
5. Razinkov, O. (2014), *GeoDAS Software Manual*, GeoSIG Ltd., Switzerland.
6. Jiening, X., Zhigao, C., Jun, H., Jiang, Y., Jian, Y., and Peng, W. (2014), Comparison of the Cumulative Absolute Velocity and Acceleration Peak Value Based on Wenchuan Earthquake Data, *Geodesy and Geodynamics*, 5(3), 46-54.

7. Ju, S. H., Seo, H. S., Lee, S. H., and Kim, M. S. (2010), Integrated Health Monitoring System for Infra-Structure, *Journal of the Korea Society for Simulation*, 19(2), 147-155 (in Korean).
8. Karim, K. R. and Yamazaki, F. (2002), Correlation of JMA Instrumental Seismic Intensity with Strong Motion Parameters. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(5), 1191-1212.
9. Kim, E. J., Cho, S. J., and Sim, S. H. (2015a), A Recent Research Summary on Smart Sensors for Structural Health Monitoring, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(3), 10-21 (in Korean).
10. Kim, H. J., Kim, C. G., and Yoo, S. H. (2015b), Design and Implementation of Real-time Safety Diagnosis Evaluation System Using the Dynamic Response Signal Information of Building, *Journal of Knowledge Information Technology and Systems*, 10(1), 25-33 (in Korean).
11. Lee, B. L., Lee, S. J., Moon, D. J., and Jung, J. W. (2014), Efficiency Test for Low Electric Power Type and MEMS Based 3-axis Accelerometer, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(1), 160-165 (in Korean).
12. Moon, D. J. (2015), A 3-axis Seismometer and the Program Development for Earthquake Sensing of Structure, Final report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
13. Park, B. C., Seong, J. Y., and Chang, S. H. (2014), Building Disaster and Safety Management Using Seismic Acceleration Measurements, *Architecture*, 58(10), 36-40 (in Korean).
14. Tselentis, G. A. (2011), Assessment of Arias Intensity of Historical Earthquakes Using Modified Mercalli Intensities and Artificial Neural Networks, *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(12), 3097-3105.
15. Van Loan, C. (1992), *Computational Frameworks for the Fast Fourier Transform*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, U.S.
16. Yoo, S. H. and Song, J. K. (2013), Damage Detection of Shear Building Structures Using Wavelet Transform, *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure and Construction Section*, 29(5), 11-18 (in Korean).
17. Youngworth, R. N., Gallagher, B. B., and Stamper, B. L. (2005), An Overview of Power Spectral Density (PSD) Calculations, *Proceeding of 2005 Society of Photographic Instrumentation Engineers*, International Society for Optics and Photonics, 58690U-58690U-11.

Received : 03/11/2016

Revised : 04/27/2016

Accepted : 04/29/2016

요 지 : 국내의 지진 발생 추이가 증가세를 보이고 있으며, 이에 따라 시설물 피해를 주고 큰 인명 피해를 초래하는 지진재해에 대한 대비의 중요성이 대두되고 있다. 지진재해에 대비하기 위해서는 지진 또는 진동가속도에 대한 실시간 계측을 하는 것이 중요하다. 일본과 미국의 경우 중요 시설물에 대하여 이미 실시간 지진가속도계측을 시행하고 있으며 계측된 지진가속도데이터는 데이터베이스화되어 관리되고 있다. 이를 이용해 내진설계기준 개정시 또는 지진으로 인한 피해 예측시 활용하고 있다. 국내의 경우, 최근 지진재해대책법 및 시행규칙이 개정되어 공포되었으며, 국민안전처에서 지진가속도계측자료 통합관리시스템을 구축해 나가고 있는 상황이다. 본 연구의 목적은 국민안전처 통합관리시스템에 연계가 가능한 시설물 실시간 진동 감지 및 분석 시스템을 개발 하는 것이다. 이 시스템은 지진가속도계측데이터 모니터링 기능을 포함하며, 또한 고속푸리에변환, 고유진동수 추출, 응답스펙트럼, 파워스펙트럼, 진도 표출, 시설물 건전도 평가 등 다양한 가속도데이터 분석 기능을 갖추고 있을 뿐만 아니라 국민안전처 지진가속도계측자료 시스템에 연계가 가능하도록 설계되었다. 개발된 시스템은 시설물의 안전관리 네트워크 구축, 지진 또는 진동으로 인한 시설물의 피해에 대한 대비, 유지관리 비용의 최소화에 긍정적인 효과가 있을 것이라고 판단된다.

핵심용어 : 상시 진동 계측, 신호 및 통계 처리, 시설물 건전도 평가, 지진데이터 분석, 데이터 연계 기술
