

지진가속도계측기를 활용한 건축물 긴급 안전성 평가

Building Safety Assessment with Seismic Acceleration Measurement System



박 병 철^{1)*}

Park, Byung Cheol



성 지 영²⁾

Seong, Ji Young



임 기 환³⁾

Lim, Ki Hwan



박 기 종⁴⁾

Park, Ki Jong

1. 머리말

최근 국내지진 발생횟수 증가 및 서해안 연속 지진 발생 등으로 우리나라도 지진에 대해 안전 지대가 아니라는 인식이 증가하고 있다. 지진은 발생 전에는 위치, 규모, 발생시간 등을 예측할 수 없기 때문에 대응이 매우 어려운 재난중의 하나이다. 큰 규모의 지진이 빈발하는 미국, 일본 등과 같은 나라에서는 지진으로 인한 건축물의 손상원인을 규명하고 건축물의 거동을 관찰하기 위해서 가속도 계측을 실시하고 있다. 미국지질조사국(USGS, U.S. Geological Survey)과 일본의 방재과학기술연구소(NIED, National research Institute for Earth science and Disaster prevention) 및 건축연구소(BRI, Building Research

Institute) 등 전문기관에서는 자유장 뿐만 아니라 건축물의 진동을 계측하고 있으며, 계측자료를 외부에 제공하고 있다.

우리나라는 소방방재청에서 지진재해대책법에 의거 “지진가속도계측기 설치 및 운영기준(‘10.9.7. 제정)”을 마련하여 전국 약 690여개 주요 공공 시설물에 지진가속도계측기 설치를 의무화하고 있으며, 설치 및 운영기준을 제시하였다. 주요 공공시설물에 설치된 지진가속도계측기를 통해 국내 지반 및 시설물 특성을 반영한 내진설계기준을 마련할 수 있으며, 시설물의 내진성능과 내진보강 성능 등을 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 일반적으로 지진에 대한 건축물의 안전성 평가시에는 실제 지반에서 계측된 지진파형을 입력하중으로 사용하고 건축물은 수치모형을 이용하지만, 비구조체의 영향 등으로 수치모형과 실제 건축물의 거동 간에는 차이가 발생하게 되어 결과적으로 안전성 평가에 오차가 발생하게 된다. 따라서, 대상 건축물에서 계측한

1) 국립재난안전연구원 시설연구관

2) 국립재난안전연구원 연구원

3) 국립재난안전연구원 연구원

4) 국립재난안전연구원 연구원

* E-mail : bcpark@korea.kr

가속도응답을 직접 사용한다면 보다 정확한 안전성평가가 가능할 것으로 판단된다.

2. 건축물 긴급 안전성 평가 체계

2.1 건축물 안전성 평가

지진가속도계측기 설치대상은 공공시설물로서 청사 및 국립대학교 건축물, 공항시설, 댐 및 저수지, 교량, 가스시설, 고속철도, 원자력 이용시설, 변전소, 발전용 수력설비 및 화력설비이다. 건축물을 제외한 다른 시설물의 경우, 시설물 관리주체에서 안전관리기준을 마련하는 등 전문적으로 관리가 되고 있다. 그러나 중앙행정기관 및 지자체 청사와 국립대학교의 경우에는 전문성이 부족한 시설물 관리자가 관리하는 경우가 대부분으로 일관된 안전성평가 체계를 제공할 필요가 있다. 따라서 설치 대상 공공건축물의 안전성 평가를 현장에서 자동으로 수행하여 건축물 관리자의 의사결정을 지원하고, 전국 단위의 통합 분석 및 정보 가공을 위한 지진가속도계측자료 통합 분석시스템이 필요하다.

지진가속도계측기는 Fig. 1과 같이 지진가속도계측센서, 지진가속도기록계, 계측데이터 처리시스템, 통신기 및 부대설비로 구성된다. 실시간으로 매초 단위의 최대, 최소, 평균(MMA, Maximum, Minimum, Average; 이하 “MMA자료”) 가속도자료가 소방방재청 전용 시스템으로 전송되며, 지진 및 이상진동이 발생한 경우에는 진동 발생 전 30초와 진동기간 60초를 포함하여 총 90초 동안에 계측된 자료가 저장되고, 이를 이용하여



Fig. 1 지진가속도계측기 구성

긴급 안전성 평가를 수행하고, 계측데이터는 소방방재청 시스템에서 수집할 수 있도록 구성되어 있다. 기상청에서는 지진의 발생상황을 신속하게 관측하여 통보하는 것이 주업무로서 지반운동만을 관측하나, 소방방재청에서 운영하는 지진가속도계측기는 지표면 및 시설물의 응답을 모두 계측한다는 것이 다르다. 계측된 데이터는 건축물의 안전성평가에 직접 이용되어 건축물 관리자의 지진재해대응 의사결정을 지원하는 등 현장에서의 활용도가 매우 높을 것으로 기대된다.

2.2 지진가속도계측센서 설치위치

일반적인 직사각형 건축물의 경우 Fig. 2와 같이 최하층에 3축센서(장축, 단축, 연직방향 계측) 1개, 최상층에 2축센서 1개와 1축센서 1개를 각각 설치하게 된다. 동적특성 연구 등을 위한 많은 정보를 얻기 위해서는 지진가속도계측센서를 각 층마다 설치하기도 하고, 한 층에 2개 이상을 설치하기도 하지만 우리나라의 지진발생 특성과 설치 및 유지에 드는 비용 등을 고려하여 고시에서는 설치를 최소화하여 제시하고 있다.

최하층 3축센서와 최상층 2축센서는 수직축이 일치하도록 설치하며, 건축물 장변 및 단변방향의 고유주기와 최대층간변위비 산정 등에 활용될 수 있도록 최대한 건축물의 도심(일반적인

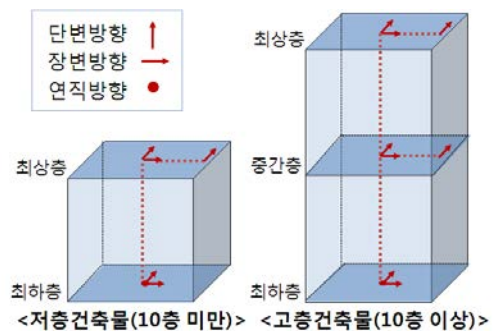


Fig. 2 건축물 지진가속도계측센서 설치위치

경우 평면상의 중심)에 가깝게 설치한다. 또한 최상층 1축센서는 최상층 2축센서와 수평축이 일치하는 위치에 설치하여 건축물의 비틀림 거동을 분석할 수 있게 한다. 다만, 건축물의 정확한 거동 파악을 위해 모드분석이 필요한 경우(10층 이상이거나, 1차 진동모드의 주기가 1.0초 이상인 경우 또는 강성 및 중량이 급격하게 변하는 건축물)는 중간층에도 최상층과 같이 지진가속도계 축센서를 추가로 설치하는 것을 권고하고 있다.

2.3 안전성 평가지표 및 안전관리기준(안)

지진발생시 계측된 가속도응답을 분석하여 안전성을 평가하기 위한 평가지표를 도출하는 과정은 Fig. 3과 같다. 다양한 분석결과 중에서 건축물의 안전성을 신속하게 평가하기 위한 지표로 1) 최대층간변위비, 2) 고유진동수 변화율, 3) 건축물과 자유장 고유진동수비, 4) 설계지반가속도 초과율을 고려하였다. 이 중에서도 특히 최대층간변위비와 고유진동수 변화율은 긴급 안전성 평가의 주요지표로 선정하여 두 지표중 하나라도 관리기준을 초과하는 경우에는 긴급점검을 수행할 것을 권고하였다. 건축물과 자유장의 고

유진동수비와 설계지반가속도 초과율은 긴급 안전성평가의 보조지표로 고려하였다. 또한 모든 평가지표는 전국의 안전성 평가결과를 비교·분석할 수 있도록 각 건축물에서 계측된 절대값이 아닌 무차원화한 값으로 나타내었다.

일반적으로 지진발생시 건축물의 안전성 평가를 위해서 가장 널리 활용되는 방법은 고유진동수 변화율 및 최대층간변위비를 파악하는 것이다. 고유진동수의 경우 건축물의 손상 없이 온·습도 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 정확한 층간변위비를 도출하기 위해서는 건축물의 모드 분석 및 각 층의 응답 등이 필요하지만 현재 지진가속도계측기의 설치 개소수로는 정확한 값을 도출하기가 어려운 실정이다. 따라서 기존의 관련 연구사례 등을 토대로 고유진동수의 변화율은 20% 이하로 제안하였으며, 층간변위비는 보정계수를 적용하여 실제 모드형상을 반영하고자 하였다. 건축 구조형식에 따라 건축물의 허용층간변위비가 달라지므로 지진재해대응 시스템에 적용되고 있는 국내 건축물 지진취약도함수(소방방재청, 2009)의 층간변위비를 사용하여 안전관리기준을 Table 1과 같이 제안하였다. 제안한 안전관리기준은 관련연구 결과 및

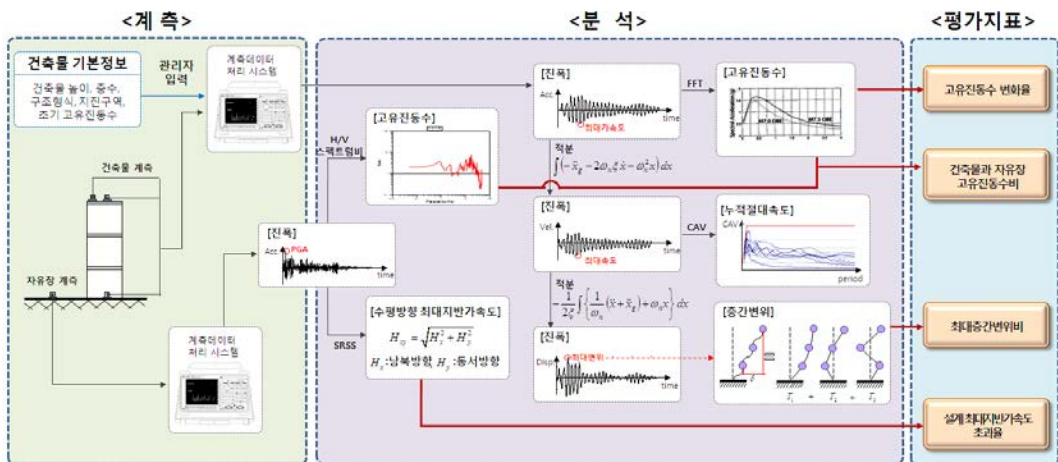


Fig. 3 지진가속도 계측분석 및 평가 체계

Table 1 안전성 평가지표별 분석절차 및 안전관리기준(안)

평가지표		분석절차	안전관리기준(안)
주요 지표	최대층간변위비	$\frac{\text{최대상대변위}}{\text{건축물의 높이}} \times 100(\%)$	철골 모멘트 골조: 0.44% 이하 철골 편심 가새 골조: 0.31% 이하 철근 콘크리트 골조: 0.5% 이하 철근 콘크리트 전단벽: 0.25% 이하
	고유진동수 변화율	$\frac{\text{지진전후 고유진동수}}{\text{상시 고유진동수}} \times 100(\%)$	20% 이하
보조 지표	건축물과 자유장 고유진동수비	$\frac{\text{건축물 고유진동수}}{\text{자유장 고유진동수}} \times 100(\%)$	100±10% 이외
	설계지반가속도 초과율	$\frac{\text{계측 PGA} - \text{설계 PGA}}{\text{설계 PGA}} \times 100(\%)$	0% 이하

지진가속도 계측자료 누적 및 분석에 따라 변동될 수 있을 것이다.

3. 건축물 긴급 안전성 평가

3.1 긴급 안전성 평가 프로그램

국립재난안전연구원에서는 긴급 안전성평가 지표 및 안전관리기준을 토대로 지진발생시 건축물 관리자가 안전성을 평가할 수 있는 프로그램과 전문가가 지진가속도 계측자료를 상세히 분석할 수 있는 프로그램을 각각 개발하여 배포하였다.

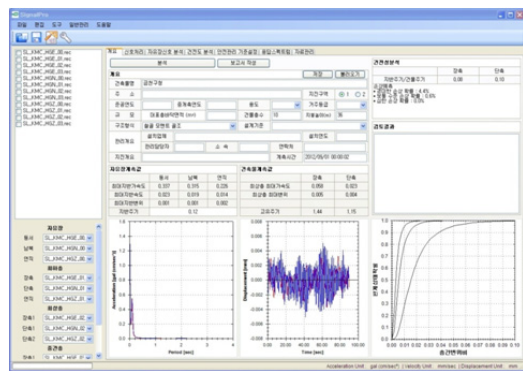
건축물 관리자용 프로그램(Fig. 4(a))은 건축

물의 구조형식, 높이 등의 정보를 사전에 입력해 놓고, 계측된 지진가속도자료를 이용하여 『안전』 및 『점검필요』의 두 결과만을 도출하도록 하였으며, 이 결과를 이용하여 건축물 관리자가 신속한 의사결정을 수행 할 수 있도록 구성하였다. 건축물 정보는 프로그램 실행 초기에 한번만 설정하면 동일 건축물에 대한 이후 분석 수행시에는 재입력하지 않아도 된다. 계측자료 분석 후 해당 건축물의 안전성평가 결과는 Fig. 5와 같은 형태의 간단한 보고서로 산출되며, 파일로 저장 및 출력할 수 있다.

또한, 건축물의 분석결과를 지속적으로 누적 관리하는 기능을 부여하여 고유진동수의 변화를 검토할 수 있도록 하였다. 이러한 기능을 통해

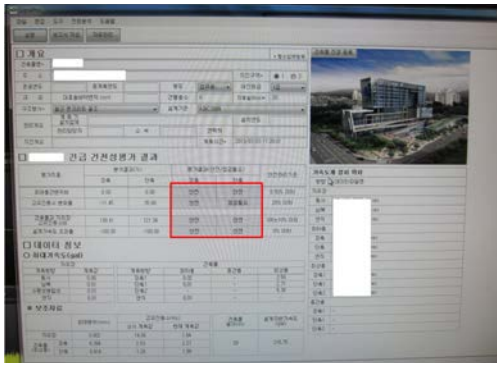


(a) 일반관리자용



(b) 전문분석용

Fig. 4 건축물 긴급 안전성평가 프로그램



(a) 분석실행 결과 화면

안전성 평가 (이벤트시각 : 2013-08-12 15:32:22)		
평가지표	평가결과	안전성 판정
최대출간변위비	안전	안전
고유진동수비	안전	
지반과 공진가능성	안전	
최대가속도비	안전	

(b) 평가지표별 안전성평가 결과

Fig. 5 건축물 긴급 안전성평가 프로그램 실제 활용사례

개별 건축물에서 축적한 고유진동수의 변화양상을 분석하여 대상 건축물의 안전관리기준을 설정할 수 있다.

전문분석용 프로그램(Fig. 4(b))은 노이즈 제거를 위한 필터 적용 진동수 범위 및 지진 취약도합수 등을 전문가가 변경하여 설정할 수 있도록 하였다. 또한 계측자료별 변위, 속도, 가속도 등의 응답스펙트럼을 도출하는 기능을 갖고 있어 전문적인 분석이 가능하다.

3.2 활용 사례

현재 소방방재청 고시에 따라 지진가속도계측기를 설치·운영하고 있는 지자체 및 국립대학교의 건축물을 대상으로 긴급 안전성 평가프로그램을 시범 적용하여 운영하고 있다. 개정

YY.MM.DD.(월) 00000 밀 홍길동

○○○○ 긴급 안전성평가 결과 보고

□ ○○○○ 긴급 안전성평가 결과

평가지표	분석결과*(%)		평가결과(안전/점진권위)		안전관리기준
	정축	단축	정축	단축	
최대출간변위비 ¹⁾	00.00	00.00	정축	단축	0.5% 이하
고유진동수 변화율 ²⁾	00.00	00.00			20% 이하
※보조자료					
건축물과 자유장 고유진동수비 ³⁾	00.00	00.00			100%≤10 이위
설계지반가속도 초과율 ⁴⁾	00.00	00.00			0% 이하

* 평가결과는 [안전] 또는 [점진권위]로 표현하며, 건축물과 자유장 고유진동수비와 '설계지반가속도 초과율'은 점진권위로써 활용

※ 건물마다 다른 변동수준을 판라하기 위해서 분석결과에는 우차원화하여 비율로 나타냄(단위 없음)

주¹⁾ 최대출간변위비 = $g \cdot (\text{최상층}-\text{최하층 최대출간변위/건물높이}) \cdot 100 \cdot \text{가}$ 로드프로그래수

주²⁾ 고유진동수 변화율 = $[(\text{제진발생후 고유진동수}-\text{상시고유진동수})/\text{상시고유진동수}] \cdot 100$

주³⁾ 건축물/자유장 고유진동수비 = $(\text{건축물 고유진동수}/\text{자유장 고유진동수}) \cdot 100$

주⁴⁾ 설계지반가속도 초과율 = $[(\text{자유장 최대지반가속도})/\text{설계지반가속도}] \cdot 100$

□ 데이터 정보

○ 최대가속도(gal)

자유장		건축물			
계측방향	계측값	계측방향	최하층	중간층	최상층
동서	00.00	정축1	00.00	00.00	00.00
남북	00.00	단축1	00.00	00.00	00.00
수평성분합성	00.00	단축2	-	00.00	00.00
연직	00.00	연직	00.00	-	-

※ 보조자료

	최대변위(mm)	고유진동수(Hz)		건축물 높이(m)	설계지반가속도 (gal)
		상시	지진 후		
자유장					
건축물 정축					
(최상층) 단축					

□ 검토결과

--

Fig. 6 건축물 긴급 안전성평가 결과보고 양식

(2013년 5월 3일)된 고시에서는 반드시 지진가속도 계측자료 분석 시스템을 구축하도록 명시하였으며, 현재 시범 적용중인 프로그램에 대한 적용성 등을 검토하여 보완하고 있다.

건축물의 긴급 안전성 평가를 위해서는 지자체 청사 및 국립대학교 건축물 관리자가 건축물의 기본정보를 입력하고 [실행] 단추를 누르면 자동으로 분석이 수행되며 결과가 Fig. 5와 같이 나타난다. 여기서 Fig. 5는 실제로 지진가속도계측기가 설치된 지자체 청사의 긴급 안전성평가 결과를 보여주며, 분석프로그램의 정상 작동여부를 검토하기 위해서 지진으로 인한 건축물의 응답이 아닌 상시 진동에 대한 건축물의 응답을 임의로 저장하여 분석에 사용하였다. 분석이 끝나면 화면에 바로 결과가 도출되며, Fig. 6과 같은 결과보고 파일이 생성된다. 설치 초기에 분석

결과가 『점검필요』로 나타나는 건축물은 이를 통해 지진가속도계측기의 정상 설치 여부 등을 점검할 수 있으며, 관리자가 손쉽게 조작할 수 있다. 지진가속도 계측자료를 이용한 개별 건축물에 대한 긴급 안전성평가 프로그램은 건축물의 동특성 분석 및 안전성평가에 활용되고 있다.

3.3 전국단위 종합분석 시스템 구축

전국적인 지진가속도 계측자료는 소방방재청의 지진가속도 계측자료 통합관리시스템에서 관리하고 있으며, 국립재난안전관리연구원에서는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 지진가속도 계측자료를 활용한 시설물의 상세한 안전성 분석 및 시설물 종류별, 지역별 피해상황을 시각화하는 전문 분석용 지진가속도 응답신호 종합분석시스템(가칭)을 2013년 말까지 구축중이다.

구축중인 시스템은 지진발생시 계측된 이벤트

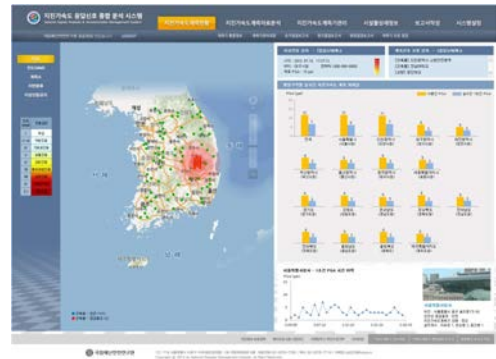
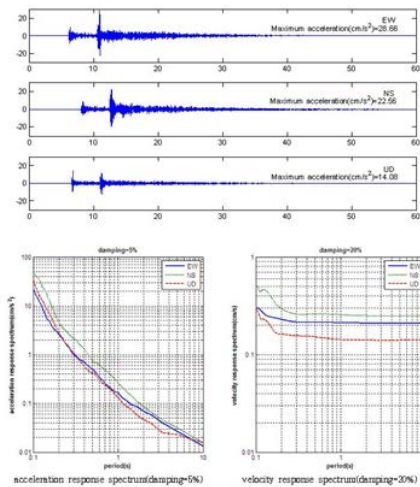


Fig. 7 지진가속도 응답신호 종합분석시스템 초기화면(안)

자료뿐만 아니라 실시간 MMA자료로 전국의 계측자료를 모니터링 하는 기능을 지닌다. 이를 활용하여 이상 진동발생 지역을 관리할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 지진가속도 계측자료를 분석한 지진파형 및 응답스펙트럼을 지역별로 나타낼 수 있는 자료를 Fig. 8(a)에 나타난 양식으로 저장 및 출력될 수 있도록 하였다. 그리고 시

□ 지진발생자료 보고서(안)

지진개요(기상청)						
발생시간	발생지역	진앙위도(°)	진앙경도(°)	진원깊이(km)	규모	
2012/05/11 12:46:04	전북 무주군 용북동쪽 5km	36.02 N	127.71 E	11.8	3.9	
관측소개요			계측기특성			
관측소정보	관측소명	기록소	기록시작시간	계측시간	진도(MM)	수평성분 합성 최대가속도(cm/s ²)
GIC	집현	자유장	2012/05/11 12:46:04	80	IV	36.47



(a) 지진발생자료 보고양식

 건축물 현황	건축물명	□□구형
	건축물 주소	△△시 □□구 ○○○로
	지진가속도계 설치정보	자유장 지향#F 1개(3축), #F 2개(2축 1축), #RF 2개(2축 1축)
	참고(내진설계 적용기준)	KBC-2005

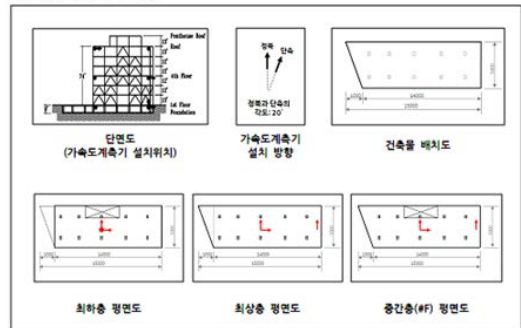
□ 건축물 필수정보

구조 형식	○○□□
기초 형식	○○○○○
지진구역	○구역
내진등급	특급
층수(지상/지하)	X X / X
높이(m)	○○

□ 건축물 추가정보

준공연도	0000
중개년도	XXXX
대지면적	00,000
대표층 바닥면적	0000*0000
하중분담 시스템	-
형식저항 시스템	-

□ 지진가속도계 위치정보



(b) 건축물 기본정보 제공양식

Fig. 8 지진가속도 응답신호 종합분석시스템 보고서(안)

설물의 안전성 평가를 위해 시설물의 일반 정보 및 지진가속도계측센서의 설치위치를 나타낸 Fig. 8(b)와 같은 자료를 관리·제공하는 기능을 시스템에 구현할 예정이다. 마지막으로 신뢰도 높은 계측데이터 취득을 위해 각 시설물별 지진가속도계측기의 설치 및 운영현장을 점검한 보고서 등을 관리할 수 있는 기능을 갖도록 하였다. 지진가속도 응답신호 종합분석시스템을 통해 지진가속도계측기가 설치된 공공시설물 및 소방방재청과 국립재난안전연구원에서 계측자료 및 분석자료를 공유하고 관리함으로써 국내 지반조건 및 시설물 동특성을 반영한 내진설계기준 재·개정에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 맺음말

소방방재청 고시에 의거하여 설치되는 지진가속도계측기는 지표면과 시설물에 설치되며, 지진발생시 실제 지반과 시설물의 거동을 계측함으로써 안전성 평가 및 지진재난관리업무에 활용된다.

현재 배포·운영중인 건축물 긴급 안전성평가 프로그램의 안전관리기준은 개별 건축물의 특성을 완전히 반영하기 보다는 다소 일반적인 범위로 설정되어 있는 한계는 있으나, 지진발생 즉시 신속하게 건축물의 안전성을 평가할 수 있다는

장점이 있다. 국내에서 지진에 대한 건축물의 응답을 실제로 계측한 사례가 거의 전무한 실정이며, 현재는 지진가속도계측기가 설치되고 있는 초기 단계로서 문헌 및 수치자료에 기반한 안전관리기준을 제안하였으나, 향후 누적데이터 분석을 통해 개별 건축물에 적합한 안전관리기준을 재설정할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 계측된 자료는 지반공학 및 시설물 내진공학 연구의 활성화에 크게 기여할 수 있을 것이다.

소방방재청의 업무용 지진가속도계측자료 통합관리시스템(소방방재청)과 전문분석용 지진가속도 응답신호 종합분석시스템(국립재난안전연구원)을 통해 우리나라 내진분야의 발전을 도모하고 지진재난관리 컨트롤 타워로서의 의사결정 지원에 중요한 기능을 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 국립방재연구원, “지진가속도계측기를 활용한 공공 건축물 긴급 건전성평가 기술 개발”, 2012.
2. 소방방재청, “국내 건축물의 지진취약도함수 개발”, 2009.
3. “지진가속도계측기 설치 및 운영기준”, 소방방재청 고시 제2013-12호, 2013.5.3. 일부개정.

담당 편집위원: 유석형
(경남과학기술대학교 교수)
piter31@gntech.ac.kr