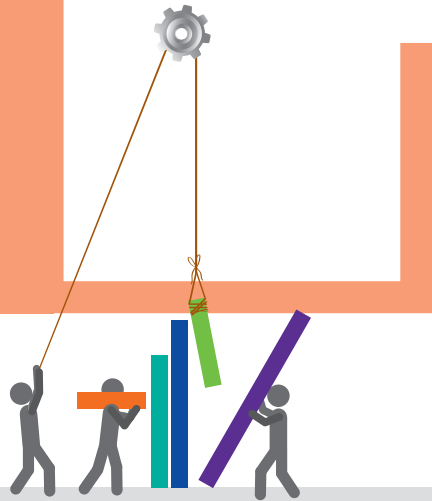


# 지진가속도 계측정보를 이용한 건축물 안전성 분석 시스템



SCIENTIFIC ARTICLE

## 1. 머리말

2016년 9월 12일 경주지역에서 발생한 규모 5.8, 5.1의 강진 사례와 국내·외에서 발생하고 있는 지진의 피해 사례 등을 통해서 재난피해 경감대책이 필수적이라는 공감대가 형성되어왔다. 최근 선진국을 중심으로 지진가속도 계측기를 비롯한 다양한 센서의 설치, 계측자료 통합망 구축, 피해 추정 시스템 운영에 관한 기술개발이 활발하게 진행되고 있다. 일본의 경우 NTT Facilities(일본전신전화주식회사)에서는 자사의 설비들을 관리하고 공익을 위한 목적으로 지진가속도계를 활용하여 건축물의 안전성을 평가할 Yure-Moni 시스템을 개발하였고 이를 고도화하기 위한 연구를 진행하였으며, 최근 발전한 초고속 통신망을 기반으로 지진조기경보시스템 EEW과 개별 시설물의 안전성 모니터링 도구를 통합하는 시스템을 개발하였다. 미국의 경우 CENS Center for Embedded Networked Sensing 연구센터에서 로스앤젤레스의 고층건물을 위주로 다수의 특수 구조물에 가속도계를 설치하여 건물의 안전성 평가와 손상도 분석에 활용하는 연구를 수행하고 있다. 지진 발생 시 긴급대응과 지진 발생 후 상태 평가에 활용할 목적의 시스템을 개발 중이며, 이는 강풍과 중앙진 발생 시 건물의 거동을 기록하여 구조해석 모델을 개선하는데 중요한 자료를 제공할 것으로 기대된다.

우리나라의 경우 2010년 “지진가속도계측기 설치 및 운영기준”의 고시와 함께 전국 공공시설물의 계측기 설치사업이 전국적인 규모로 진행되어 왔다. 관련 산업체들을 중심으로 계측자료의 수집 및 처리를 위한 소프트웨어 개발이 진행되고 있으나 계측자료 및 분석기법의 신뢰도가 미흡한 상태로 계측시스템의 관리와 활용을 위한 분석 프로그램의 고도화 및 안전관리기준의 검증에 대한 연구가 필요하다.

이에 본 고에서는 계측자료 처리 알고리즘 및 안전성평가지표를 중심으



**정성훈 Jeong, Seong-Hoon**  
 인하대학교  
 건축공학과 부교수  
 jeong@inha.ac.kr



**장원석 Jang, Won-Seok**  
 인하대학교  
 건축공학과 박사과정

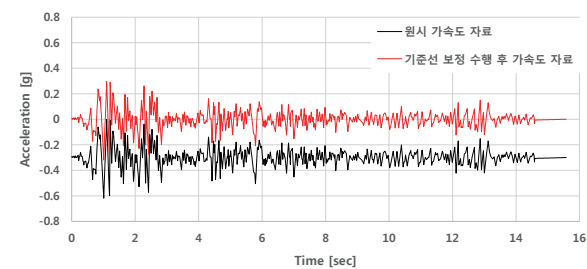
로 지진가속도 계측자료를 이용한 건축물의 긴급 안전성 평가방법에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 계측자료 처리 알고리즘

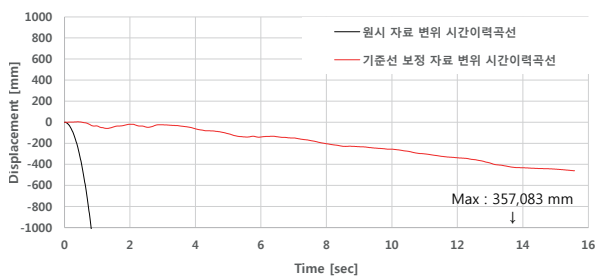
### 2.1. 지진가속도계측기 계측신호의 노이즈 제거 알고리즘

100Hz이상의 주기로 계측되는 지진가속도계측의 경우 계측센서가 설치된 장소의 주변으로부터 다양한 원인으로부터 노이즈가 유발되어 지속적으로 계측자료에 기록되며, 그 주파수 대역이 0.001~ 수 십 Hz의 폭 넓은 범위에 분포한다. 이러한 노이즈는 지속적으로 발생되며 시간적, 공간적으로 변하며 모든 주파수에 일정하지 않다(한국자원연구소, 2000).

그림 1-(a)는 El Centro 지진의 기준선 보정 전·후의 가속도 시간이력곡선(원시자료, 1940)을 보여주고 있으며, 1-(b)는 기준선 보정 유·무에 따른 지반의 변위를 보여주고 있다. 기준선 보정이 수행되지 않는 경우 지진가속도 계측 시스템 상의 오차로 인한 기준선의 오차가 보정되지 않아 지반의 변위가 한 방향으로 발산하는 경향



a. El Centro 원시자료 및 기준선 보정 수행 후의 가속도 시간이력 곡선



b. El Centro 원시자료 및 기준선 보정 수행 후의 변위 시간이력 곡선

Fig. 1 원시자료의 기준선 보정 유·무에 따른 지반 변위 비교

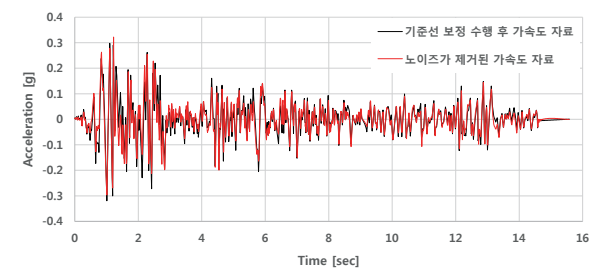
을 보이게 된다. 그림 2-(a)는 기준선 보정 알고리즘이 수행된 후의 가속도 시간이력 곡선과 노이즈 필터링 과정이 수행된 가속도 시간이력 곡선을 보여주고 있으며, 그림 2-(b)는 그림 2-(a) 가속도 자료의 변위 시간이력 곡선을 보여주고 있다. 그림 1에서 보인바와 같이 노이즈가 포함된 자료의 경우 시간이력의 뒤로 갈수록 가속도 계측자료에 포함된 오차가 누적되어 한 방향으로 발산하는 경향을 보이고 있다. 이러한 오차는 계측 자료의 노이즈 필터링을 이용하여 제거될 수 있다. 지진가속도 계측 자료의 노이즈 제거를 위해 주로 사용되는 필터의 종류는 다음과 같다.

#### (1) Bessel Filter

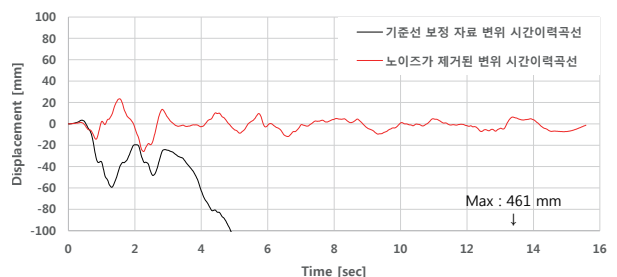
Bessel 필터는 통과 대역에서의 응답이 일정하며 위상 선형성을 가지고 있어 다른 필터에서 흔히 보이는 Input에 대한 왜곡이 적은 장점이 있으나 차단 대역에서의 완만한 특성 곡선으로 인해 천이 구간이 넓어지는 단점이 있다.

#### (2) Chebyshev Filter

Chebyshev 필터는 고차원으로 구성할 경우 차단 대역



a. El Centro 기준선 보정 자료 및 필터링 수행 후의 가속도 시간이력 곡선



b. El Centro 기준선 보정 자료 및 필터링 수행 후의 변위 시간이력 곡선

Fig. 2 원시자료의 필터링 유·무에 따른 지반 변위 비교

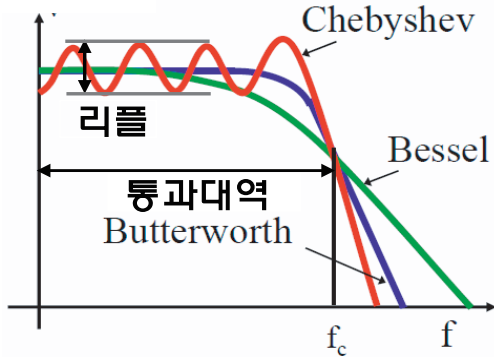


Fig. 3 필터의 종류에 따른 특성 곡선의 형태

에서 특성 곡선이 급격하게 감소하는 특징이 있어 차단 대역을 급격히 제거할 수 있는 장점이 있으나 통과 대역에서의 Ripple으로 인해 통과 대역의 왜곡이 발생할 가능성이 있다는 단점이 있다.

### (3) Butterworth Filter

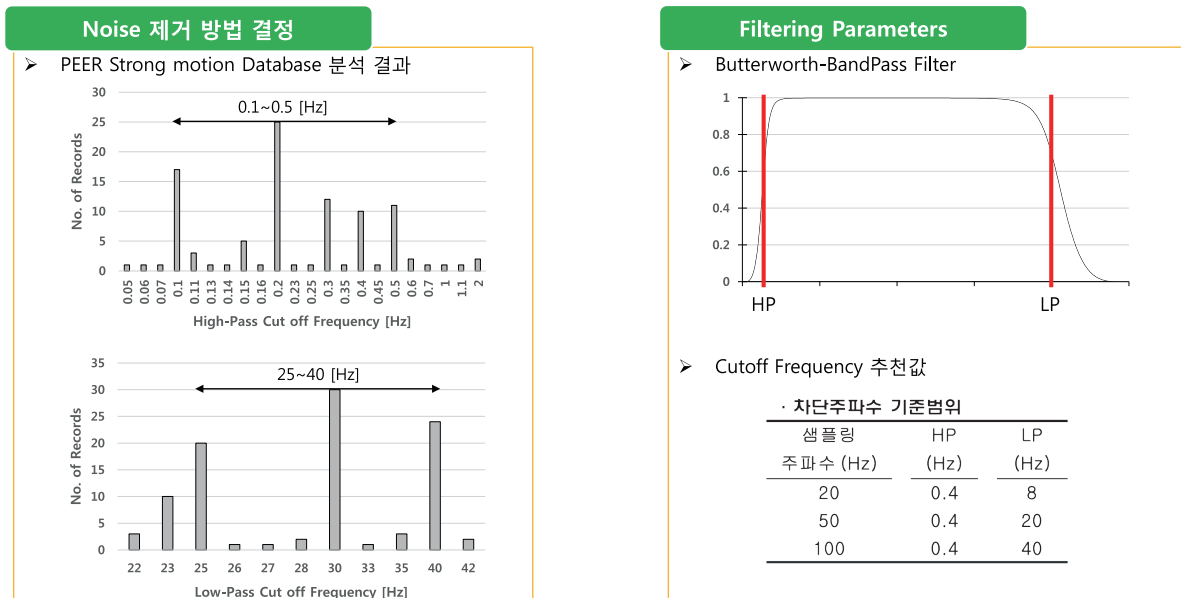
Butterworth 필터는 통과 대역에서 최대의 편평성을 가지며 필터의 차수가 증가 할수록 특성곡선의 기울기가 커져 천이 대역을 줄일 수 있는 장점이 있으며 일반적으로 지진가속도 계측자료 필터링에 가장 많이 사용되고 있다.

노이즈를 제거하기 위한 필터는 다양하지만 주로 버터워스-대역통과 필터 Butterworth-Bandpass filter가 사용된다. 이 필터는 PEER Strong motion database를 비롯한 주요 지진파 기록 데이터베이스에서 사용되는 노이즈 제거 방법이다.

그림 4는 PEER strong motion database의 계측 자료 중에서 최대지반가속도 PGA가 0.1~0.3g이고 1초당 샘플링 개수가 100개인 지진가속도 계측자료의 차단주파수를 분석한 결과와 지진가속도 계측자료의 샘플링 개수에 따른 차단주파수 추천값을 보여주고 있다. 고역 통과HP와 저역통과LP 필터의 차단주파수 범위가 각각 0.1~0.5Hz와 20~40Hz인 경우, 전체 계측자료의 90%와 85%를 차지하고 있음을 확인할 수 있다.

### 2.2. 계측자료 변환 알고리즘(MiniSEED 자료형식의 변환)

지진가속도 계측기의 계측신호는 기록계를 통해서 MiniSEED형식의 데이터 파일로 저장된다. MiniSEED 파일은 현장으로부터 수집된 자료를 binary형식으로 압축 저장한 것으로 이를 자료의 분석에 활용하기 위해서는



a. 차단 주파수 분석

b. 필터링 특성 곡선 작성 및 추천값 제시

Fig. 4 노이즈 제거를 위한 필터 특성값 결정

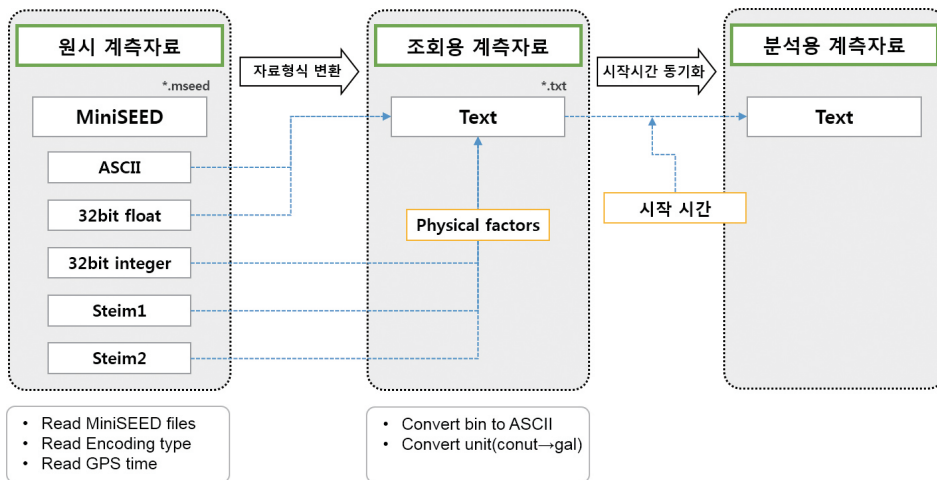


Fig. 5 MiniSEED 파일 변환 알고리즘의 개요

(i) binary형식에서 text형식으로의 변환, (ii) 측정된 전압 변화의 count에서 물리량으로의 변환, (iii) 계측신호의 시작시간 동기화 과정이 필요하다. 이 과정을 정리하기 위해서 본 고에서는 계측 자료의 변환 과정에 따라서 『원시 계측자료』, 『조회용 계측자료』, 『분석용 계측자료』로 분류하였다. 여기서 원시 계측자료는 현장의 기록계로부터 바로 저장된 binary형식의 압축 파일이다. 조회용 계측자료는 가속도 물리량의 시간이력인 text형식으로 저장된 파일로서 개별 채널의 독립적인 자료 조회용으로 사용할 수 있다. 분석용 계측자료는 한 시설물에서 모든 채널의 계측 시작시간을 동기화시킨 가속도 시간이력 text파일로서 채널간의 상호 응답 차이를 시간이력으로 도출할 수 있고, 시설물의 안전성 분석에 사용할 수 있다.

### 2.3. 계측 channel 별 자료의 시작시간 동기화 알고리즘

Steim-1,2 압축방식은 자료의 압축률을 극대화하기 위한 자체 알고리즘에 의해서 채널별로 계측자료의 시작 시각이 다르게 기록될 수 있다. 이러한 특징은 개별 채널의 시간이력을 조회하기 위한 용도로는 문제가 없지만 채널간의 상대값을 시간이력으로 산출해야 하는 경우에는 오차의 원인이 된다. 즉, 시설물의 안전성평가를 위한 분석에서는 모든 채널의 시작시간 동기화 작업이 선행되어야 한다. 본 고에서는 시설물 내의 모든 채널 계측값이 같은 시각에 시작하도록 하는 시작시간 동기화 알고

리즘을 통해 서로 다른 채널의 계측자료들 상호 간 상대적인 계산값에 오류가 발생하지 않도록 하였다. 이 알고리즘은 이벤트 시작과 종료시각이 다를 수 있는 계측자료들의 시작 및 종료시각을 일치시키는 것으로 그림 6에 그 개요가 나타나있다. 여기서, 시작시각과 지속시간은 사용자에게 의해서 설정되는 것을 원칙으로 한다. 사용자에게 의한 설정값이 없는 경우, 시작시각은 동일 시설물에서 수집된 모든 채널의 계측값 중에서 가장 늦게 기록이 시작된 채널의 시작시각으로 설정된다. 지속시간도 사용자에게 의한 설정값을 반영하는 것을 원칙으로 한다. 종료시각은 시작시각에 지속시간을 더한 시점이 된다. 단, 이 시점보다 가장 먼저 기록이 종료된 채널의 기록종료시점(최선순위 종료시점)을 우선하여 종료시각으로 최종 설정함으로써, 동일 시설물의 모든 채널에 하나의 종료시각이 공통 적용될 수 있도록 한다.

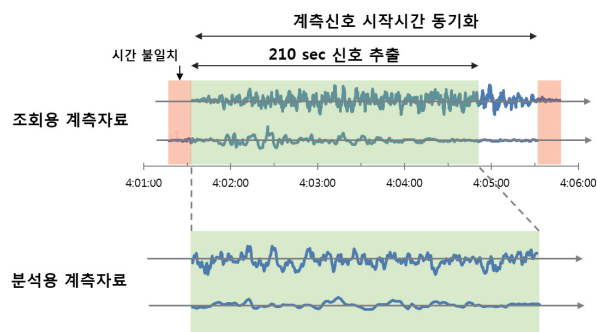


Fig. 6 계측신호 시작시간 동기화 및 분석용 계측자료 추출 절차

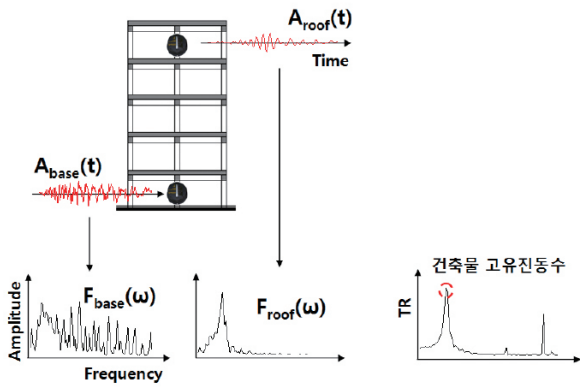


Fig. 7 건축물 고유진동수 도출 개념도

### 2.4. 건축물의 동적 특성 분석 알고리즘

그림 7은 시설물에 설치되어 있는 계측 센서로부터 계측신호를 받은 후 전달함수(Transfer Function, TR)를 이용하여 시설물의 고유진동수를 도출하는 개념을 보여주고 있다. 시설물의 최하층과 최상층 계측신호의 노이즈를 제거한 후, 고속 푸리에 변환(FFT)을 이용하여 시간 영역의 계측자료를 주파수 영역으로 변환한다. 식 1과 같이 주파수 영역으로 변환된 최상층 계측자료를 최하층 계측자료로 나누면 전달함수가 계산된다. 이 때 계산된 전달함수는 고유진동수를 의미하는 피크점을 찾기 어려우므로 3점 가중 평균 필터를 이용하여 평활화하면 전달함수의 피크점, 즉 시설물의 고유진동수를 쉽게 찾을 수 있다. 여기서,  $F(\omega)_{roof}$ 와  $F(\omega)_{base}$ 는 각각 최상층과 최하층에서 측정된 시간이력 계측자료를 주파수 영역으로 변환한 결과이다.

$$TR = \frac{F(\omega)_{roof}}{F(\omega)_{base}} \quad \text{식 (1)}$$

### 3. 건축물의 긴급 안전성 평가 지표

(1) 최대 층간변위 기반 : 소방방재청 연구보고서(2009)는 지진력 저항 시스템과 최대 층간변위비에 따른 건물의 성능수준을 명기하고 있으므로 이를 바탕으로 작성된 층간변위 기반 건전도 분석 기준은 표 1과 같다. 지진력 저항 시스템이 철근콘크리트 골

조인 건물에서 측정된 장축과 단축의 최대 층간변위비가 각각 0.9%와 1.2%일 경우, 이 건물의 안전성 평가결과는 ‘안전’과 ‘점검필요’로 판단된다.

지진력 저항 시스템	건전도 평가 기준	
	안전	점검필요
철골 모멘트 골조	0.7% 이하	0.7% 초과
철골 편심 가새 골조	0.5% 이하	0.5% 초과
철근 콘크리트 골조	1.0% 이하	1.0% 초과
철근 콘크리트 전단벽	0.5% 이하	0.5% 초과

Table. 1 층간변위 기반 건전도 분석 기준

(2) 고유진동수 변화율 기반 : 고유진동수는 건축물의 손상을 판단하는 일반적인 지표 중 하나로서 시설물의 손상 정도는 강성의 변화에 따라 산정되며 그림 8은 구조물의 손상 정도에 따른 구조물의 강성 변화를 보여주고 있다. 이러한 강성 변화를 직접 파악하는 것은 쉽지 않으므로 지진하중에 의해 손상을 받은 건물에서 측정된 고유진동수를 손상이 발생하기 전의 고유진동수로 나눈 값으로 정의된 고유진동수 변화율을 이용하여 강성의 변화를 파악한다. 실제 건축물의 손상전후 진동특성을 확인한 연구결과(윤성원 외 3인, 2009)에서는 대상 건물의 가력실험 전·후의 강성 변화율이 대략 66%일 때 시설물의 손상이 육안으로 관찰되었다. 강성 변화율은 시설물의 손상 후에 측정된 강성을 손상 전에 측정된 강성으로 나눈 값이며 이 때의 고유진동

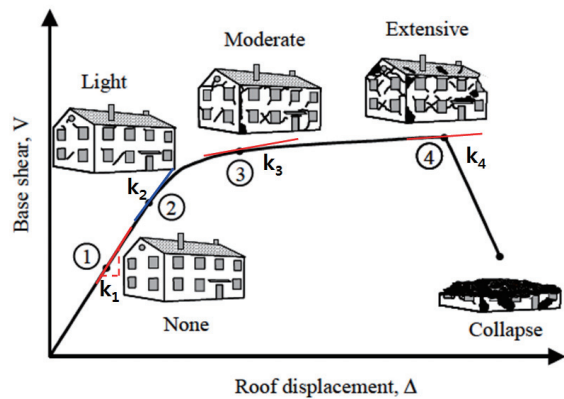


Fig. 8 시설물의 횡변위 증가에 따른 강성 변화

수 변화율은 대략 20%이다. 따라서 지진하중에 의한 안전성 평가기준으로 건축물의 고유진동수 변화율을 20%로 설정하는 것은 타당한 것으로 확인되었다.

(3) 설계가속도 초과율 기반 : 건축물의 내진설계시 지반 조건에 따라 설계가속도를 다르게 적용하는데 이는 지진과 증폭현상 때문이다. 일반적으로 연약 지반 위에 건설된 시설물은 암반 위에 세워진 시설물보다 지반에서 크게 증폭된 지진하중에 의해 크게 흔들리며 더 큰 횡력에 저항해야 한다. 지진하중은 건축물의 자중과 지진가속도를 곱하여 계산되므로 지진가속도는 건축물의 피해를 평가하는데 중요한 지표가 된다. 건축물의 최하층에 설치된 지진가속도 계측기는 건축물에 따라서 1층 혹은 지하층에 설치되어 있지만 지하층의 경우에도 설치층수가 건축물에 따라 제각각이다. 또한 건축물의 종류에 따라 반응수정계수 및 설계밀면전단력이 달라지므로 이를 통해 전국적으로 다양한 건축물의 안전성 평가 및 비교가 어려운 실정이다. 따라서 근사적으로 자유장(지반)의 설계가속도를 활용하여 건축물이 구축될 지반의 설계 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA 대비 실제 발생한 지진에 의해 계속된 자유장 수평방향 최대가속도의 초과율을 검토하여 건축물의 안전성 평가에 활용하고 있다. 설계가속도 초과율은 건축물 인근 자유장에서 계속한 최대지반가속도의 값이 건축구조설계기준에 명기된 설계지반가속도를 얼마나 초과하는 지에 대한 값으로써 최대지반가속도가 설계지반가속도보다 작으면 안전하다. 설계지반가속도는 건축구조설계기준에 명기된 지역계수(지역 1: 0.22, 지역 2: 0.14)에  $g(980.7 \text{ gal})$ 를 곱하여 계산된다.

#### 4. 맺음말

본 고에서 기술한 건축물 안전성 분석 시스템의 기대

효과 및 활용방안은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 건축물의 긴급 안전성 분석 및 재해평가 정보 처리 절차 자동화를 통한 효율적 지진재해 대응
- 지진재해 대응 유관기관에 보유한 다양한 재난대상 시설물 정보 등의 기초 정보를 연계 및 통합하여 공유할 수 있는 기반 마련
- GIS 기반 종합적 지진계측 및 지진재해대응 기술 기반의 신속한 의사결정 지원을 위한 건축물별 재난 및 피해상황의 신속한 가시적 표출
- 국가 및 지자체별 지진 방재 대책 수립에 필요한 기반 정보 제공
- 주요 공공시설물의 지진안전성 평가 시스템을 사회 기반시설 건설 및 유지관리에 활용함으로써 지자체 운영의 경제성 및 효율성 제고

상기한 바와 같이 건축물 안전성 분석 시스템을 이용하여 향후 국내 건축물의 지진안전성 평가 기술 발전에 활용할 수 있는 기반 정보를 수집함과 더불어 지진가속도 계측정보를 활용한 관련연구에 도움이 되고자 하였다. ■

#### 참고문헌 references

- 1 한국자원연구소, "지진연구망 구축 및 운영", KR-00-(T)-07, 한국자원연구소, 2000.
- 2 정란 외, "국내 건축물의 지진취약도함수 개발", 소방방재청, 2009.
- 3 국립방재연구원, 지진가속도계측기를 활용한 공공건축물 긴급 안전성평가 기술 개발, 연구보고서, 2012.
- 4 국립재난안전연구원, 지진가속도 응답신호 종합분석 및 관리기술 개발, 연구보고서, 2013.
- 5 국립재난안전연구원, 진동자료기반 시설물 재난대비 기반 기술 개발, 연구보고서, 2014.
- 6 윤성원 외, "3층 철근콘크리트조 건물의 손상전후의 진동특성", 한국공간구조학회, Vol.9, No.3, 2009, pp. 56-66.
- 7 Jeong, S-H. and Elnashai, A.S., "Probabilistic Fragility Analysis Parameterized by Fundamental Response Quantities", Engineering Structures, Vol.29, No.6, 2007, pp. 1238-1251.
- 8 ㈜건이기술단, 인하대학교 60주년 기념관 신축공사 지반조사보고서, 조사보고서, 2013.