

# 경주지역 발생 지진에 대한 지진손실에측 시뮬레이션

## A Simulation of Earthquake Loss Estimation for a Gyeongju Event

강수영\* · 김광희\*\* · 석봉출\*\*\* · 유해수\*\*\*\*

Kang, Su Young · Kim, Kwang-Hee · Suk, Bong-Chool · Yoo, Hai-Soo

### Abstract

Knowledge of expected losses in terms of physical, economic, and social damages due to a potential earthquake will be helpful in the effort to mitigate seismic hazards. In this study, losses due to a magnitude 6.7 scenario earthquake in the Gyeongju area have been estimated using the deterministic method in HAZUS. The attenuation relation proposed by *Sadigh et al.*(1997) for site classes B, C, and D, which are assumed to represent the characteristics of the strong-motion attenuation in the Korean Peninsula, has been applied. Losses due to the hypothetical earthquake have been also calculated using other attenuation relationships to examine their roles in the loss estimation. The findings indicate differences among the estimates based on various attenuation relationships. Estimated losses of the Gyeongju area by a scenario earthquake using HAZUS should be seriously considered in the planning of disaster response and hazard mitigation.

**Keywords:** HAZUS, Earthquake loss estimation, Deterministic method, Attenuation relation

### 요 지

지진이 발생하기 전에 피해규모를 물리적, 경제적, 사회적 재해로 구분하여 예측하고, 이를 이용하여 사전에 충분히 대처한다면 그 피해를 최소한으로 경감할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 HAZUS의 결정론적 방법을 이용하여 경주지역 규모 6.7의 가상지진에 의한 재해를 예측해보았다. 이 방법을 이용하기 위해, 본 연구에서는 한반도 감쇠특성과 가장 잘 부합한다고 판단되는 Sadigh 등(1997)의 식에 지반분류 B, C와 D를 적용하였다. 그 외에도 이 방법에서 사용이 가능한 여러 감쇠식을 적용하여 같은 지역의 지진재해를 예측한 후 서로 상이하게 나타나는 피해규모를 살펴보았다. 각기 다른 감쇠식 적용에 따라 재해 예측결과는 다소 다르게 나타남을 알 수 있었다. 이번 연구에서 산출한 지진재해 예측결과는 연구지역의 지진재해위험성을 미리 살펴 재해발생 시 인명 및 재산 피해를 최대한 경감시키고, 응급상황에 신속히 대처할 수 있도록 재해저감 정책수립 단계에서 효과적으로 활용될 수 있으리라 사료된다.

**핵심용어:** HAZUS, 지진재해, 결정론적 방법, 강진동 감쇠식

### 1. 서 론

미국의 FEMA(Federal Emergency Management Agency)와 NIBS(National Institute of Building Science)에 의해 개발된 자연재해 예측평가시스템인 HAZUS(HAZARD U.S.)를 이용하여 우리나라의 지진재해를 예측 평가할 수 있다는 것을 선행연구인 강익범 등(2002)과 강수영 등(2007b)의 연구에서 밝힌바 있다. HAZUS는 우리 생활에 영향을 주는 자연재해 중 특히 많은 영향을 끼치는 지진, 홍수 그리고 강풍(허리케인)에 의한 재해를 예측함으로써 국토개발, 도시계획, 건설·환경 법규, 공공 교육, 위기상황 대응 매뉴얼구축

등의 재난 대비 및 저감에 도움을 주기위한 목적으로 개발되고 있다. 이 시스템은 지역별 기본 입력 자료와 각각의 재해 발생관련 자료를 입력하여 그 지역별, 구조물별 등 피해유형별로 재해 규모를 예측한다. 지진재해 예측을 위한 HAZUS earthquake은 지진자료와 미리 갖추어진 지역별 기본 입력 자료를 이용하여 크게 세 가지 방법으로 지진재해를 예측할 수 있다. 첫째, 결정론적 방법은 지진자료를 이용하여 계산된 최대지반가속도 값을 이용하는 방법이며, 둘째 확률론적 방법은 재래주기별 확률로 최대지반가속도 값을 계산하여 적용하는 방법이다. 마지막으로 사용자지정 방법은 지진동의 최대지반가속도, 최대지반속도, 스펙트럼가속도를 적용하여 제작한 지진동 지도(ShakeMap)를 이용하는 방법이다. 이러한 방법들

\*정회원 · 한국해양연구원 해양환경연구본부 해양환경특성연구사업단, 연구원 (E-mail: sukan@kordi.re.k)

\*\*정회원 · 한국해양연구원 해양자원연구본부 선임연구원 (교신지자)

\*\*\*한국해양연구원 해양환경연구본부 해양환경특성연구사업단, 책임연구원

\*\*\*\*한국해양연구원 해양자원연구본부 책임연구원

을 통해 얻어진 각각의 재해예측 결과는 물리적, 경제적, 사회적 재해로 구별하여 산정되며, 이는 재해위험을 예측하고 재해저감 계획을 수립할 때 반영될 수 있다(FEMA, 2006a).

HAZUS의 결정론적 방법을 사용하기 위해서는 강진동 감쇠식을 설정해 주어야 한다. 그러나 HAZUS는 미국지역의 자연재해를 평가하는 시스템이므로, 감쇠식 또한 미국지역을 위한 식에서 선정할 수 있도록 설계되어있다. 따라서 강수영 등(2007a)의 연구에서는 한반도의 지진감쇠 현상과 가장 유사한 미국의 강진동 감쇠식을 선정하는 연구를 진행하였다. 그 결과, 미국 서부지역을 위한 감쇠식인 Sadigh 등(1997)의 식에 기반분류 B(rock, 보통암)와 기반분류 D(deep firm soil, 단단한 토사)를 적용하는 것이 가장 적절하다고 제시하였다. 또한 Sun(2004)의 논문에서는 비록 경주의 일부 지역이지만, 시추조사로 지표면 아래 상부 30 m까지의 평균 전단파 속도로 지반을 분류하였다. 그 결과, 경주지역 부지는 기반분류 B(보통암)과 D(단단한 토사) 지반을 일부 포함하지만, 대부분 기반분류 C(연암) 지반으로 형성되어있다고 밝혔다. 따라서 본 연구에서는 Sadigh 등(1997)의 식에 기반분류 B, C, 그리고 D를 적용하여 경주지역의 지진재해를 예측하였다. 이 외에도 HAZUS의 결정론적 방법에서 사용이 가능한 미국의 여러 강진동 감쇠식을 이용하여 각기 다른 감쇠식 적용에 따라 다르게 예측되는 이 지역의 지진재해를 살펴보았다.

## 2. HAZUS의 결정론적 방법

HAZUS를 이용하여 지진재해를 예측하는 세 가지 방법 중 확률론적 방법과 사용자지정 방법은 USGS(U.S. Geological Survey)에서 제작한 지도를 이용한다. 반면에 결정론적 방법은 사용자가 시스템에서 직접 지진자료를 입력하거나 이미 시스템에 구축된 데이터베이스에서 선택하여 가상지진을 작성할 수 있다. 이 방법을 이용한 가상지진 작성방법은 크게 세 가지로서, 첫째 전 세계 주요 역사지진으로 구성된 데이터베이스에서 선택하는 방법이고, 둘째는 미국 서부지역의 단층자료를 이용하는 방법이다(FEMA, 2006a). 마지막으로 본 연구에서 적용한 세 번째 방법으로 사용자가 임의로 지진자료를 입력하는 방법이 있다(FEMA, 2006a). 이 방법에서는 지역별 특성에 따른 지진감쇠현상을 고려한 강진동 감쇠식을 선택할 수 있으며, 지진자료 또한 임의로 설정할 수 있다.

이 시스템은 기본적으로 미국 내 Rocky 산맥을 중심으로 서부와 중동부로 나누고, 각 지역의 특성을 고려한 여러 강진동 감쇠식을 지원하고 있다. 기본적인 지진 입력 자료로는 지진의 위치, 규모, 깊이, 단층, 그리고 지질정보 등이 요구된다. 일반적으로 National Earthquake Reduction Program (NEHRP)에서 상부 30 m 지반의 전단파 속도를 고려하여 분류하는 지질정보는 지진재해 산정 시 강진동 감쇠식의 적용과 함께 중요하게 작용하는데, 이들의 서로 다른 적용에 따라 재해예측 결과는 상이하게 나타날 수 있다. 이러한 자료를 이용하여 HAZUS에 입력된 자료는 시스템 내 지진동과 최대지반가속도, 응답스펙트럼 지도 등과 Fragility curve를 이용하여 손상상태를 계산하게 되고, 이 결과를 이용하여 시

설물의 기능판별도 확률로 계산된다. 본 연구에서는 이러한 피해예측 모듈을 위한 조건은 HAZUS 매뉴얼에서 권장하는 시스템의 주어진 기본상태(default)로 진행하였다.

## 3. 기상지진과 연구지역

최근 2001년부터 2005년 사이에 발생한 지진은 경상남북도 지역에서 가장 많이 발생하였고(기상청, 2002; 기상청, 2003; 기상청, 2004; 기상청, 2005; 기상청, 2006), 삼국사기에 따르면 역사상 가장 큰 인명피해를 유발시켰던 지진은 서기 779년 경주에서 발생했던 규모 6.7의 지진으로 추정된다(이기화 등, 1991; 이기화, 1998; 이기화 등, 2000; Chiu와 Kim, 2004). 또한 최근 1997년 6월 경주지역에서 규모 4.3의 지진발생으로 한반도 내 지진위험성이 부각되기도 하였다(노명현, 2003). 따라서 본 연구의 가상지진은 서기 779년 경주지역에서 발생하였던 규모 6.7의 지진을 가정하였고, 지진의 깊이는 10 km, 주향이동단층(Strike slip fault)에 의해 지진이 발생하였음을 가정하였다. 강진동 감쇠식은 강수영 등(2007a)의 연구에서 우리나라 감쇠현상과 가장 유사하다고 밝힌 Sadigh 등(1997)의 식을 사용하였다. 지질특성은 같은 연구에서 제시하였던 기반분류 B(보통암)와 D(단단한 토사)를 기본적으로 적용하였고, Sun(2004)에 의해 제시된 경주 일부 지역의 일반적인 지반특성을 보인 기반분류 C(연암) 또한 이 감쇠식에 적용하였다. 이 밖에 HAZUS에서 사용이 가능한 또 다른 여러 감쇠식을 이용하여 연구지역의 지진재해도 예측하여 보았다. 연구지역의 기본 자료는 수집이 가능한 가장 최신의 통계자료인 2005년도의 자료로 데이터베이스를 구성하였다(통계청, 2007).

지진피해 예측 연구지역은 경상북도 경주시, 포항시 남구, 울산광역시(중구, 남구, 서구, 북구, 울주군)로 제한하였다. 이 지역의 2005년도 총 인구는 1,564,765 명이었고(Fig. 1), 총 가구 수는 521,367 가구였다. 또한 상가와 산업시설을 제외한 주택은 단독주택, 다가구주택, 연립주택, 아파트와 영업용 건물 내 주택으로 분류하여 시스템에 입력하였는데, 같은 해에 전체 주택은 436,282 동이었다(Fig. 1). 이들의 건축 자료는 자료수집이 가능한 1990년의 통계자료로 유추하였으며, 약 78%의 철근콘크리트, 10%의 벽돌, 1%의 목재 건물로 구성되었음을 가정하였다(통계청, 2007). 환자를 돌볼 수 있는 병원, 의원 또는 보건소 등은 같은 해 이 지역에 총 396 곳이 존재하였고, 재해발생 시 이재민을 수용할 수 있는 장소로 사용되는 학교는 초등학교부터 고등학교까지 약 352 곳이 존재하였다. 이 밖에 비상사태에 긴급출동 할 수 있는 경찰서와 소방서는 각각 76곳과 32곳이 있었다. 이들의 통계 정보는 GIS를 이용한 위치정보와 함께 HAZUS에서 연구지역의 지진재해를 예측하기 위한 기본 입력 자료로 사용된다.

## 4. 재해예측 결과

2005년 경주지역에서 규모 6.7의 지진이 발생함을 가정으로 Sadigh 등(1997)의 강진동 감쇠식을 적용하여 지진재해를

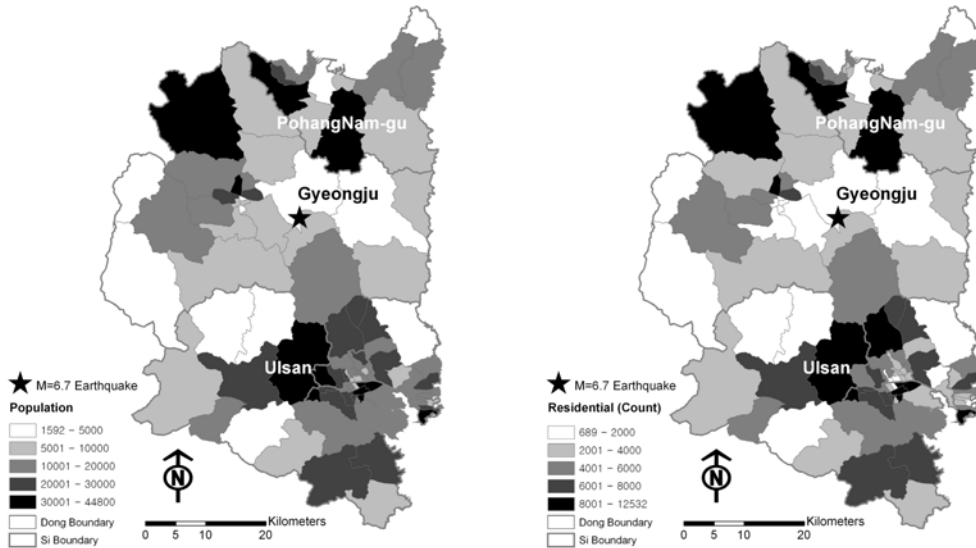


Fig 1. Population and houses of the study area in 2005

예측한 결과, 지반이 지반분류 B(보통암)를 비롯한 이보다 연약한 지반(지반분류 C 혹은 D)일 경우에 총 436,282 동의 주택 중 최소한 0.4%의 주택이 붕괴할 가능성이 있고, 총 인구 1,564,76명 중 적어도 약 0.2%의 이재민을 위한 대피소가 필요하다. 또한 지진이 새벽 두시에 발생한다면 최소 75명 이상의 사망자가 발생할 수도 있겠다. 이러한 예측결과는 적용하는 지질의 특성과 강진동 감쇠식에 따라 상이하게 나타나게 된다. 경주지역 규모 6.7의 가상지진에 관한 재해예측 결과를 피해유형별로 정리하면 다음과 같다.

#### 4.1 주택의 피해

연구지역 내 주택은 2005년도에 전체 436,282동이였다. 이들의 주택이 모두 보통암인 지반분류 B지반에 위치하였을 경우, 전체 주택수의 약 16%인 68,176동의 주택에서 중간규모 이상의 피해가 발생할 수 있다. 이 중에서 1,668동의 주택은 완전히 붕괴될 수도 있다. 지반분류 C(연암) 지반에 모든 주택이 위치하였을 경우에는 약 26%의 주택에서 중간규모 이상의 피해가 발생할 수 있고, 이 중 6,524동은 완전히 붕괴될 가능성이 높다. 반면에 지반분류 D(단단한 토사) 지반에 주택들이 위치하였을 경우에는 전체 주택의 약 36%인 156,743동에서 중간규모 이상의 피해가 발생할 수 있다. 이 수치는 완전히 붕괴될 수 있는 15,080동을 포함하고 있다 (Fig. 2).

#### 4.2 주요 건축물의 피해

##### 4.2.1 의료기관

재해발생시 가장 신속히 응급상황에 대처해야하는 주요한 기관 중 하나인 의료기관은 2005년도 연구지역 내에 396곳이 있었다. 의료기관의 경우에는 시설의 피해수준과 기능상실 정도로 나누어서 응급상황 시 대응력을 평가할 수 있다. 우선 규모 6.7의 지진으로 연구지역의 모든 의료기관이 완전히 붕괴되거나 혹은 기능을 완전히 상실할 정도의 피해는 없을 것으로 예측된다. 그러나 지반특성에 따라 피해수준과 기능상

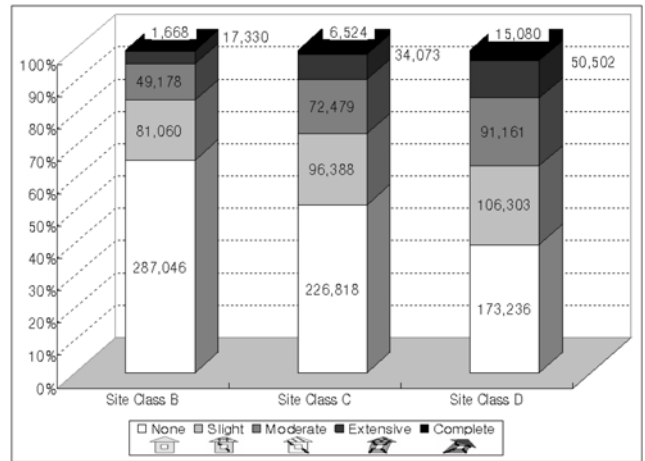


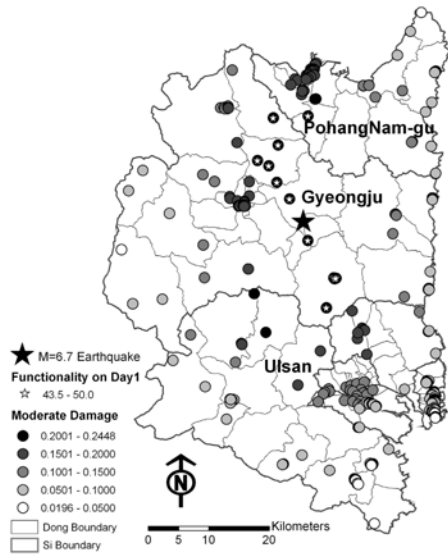
Fig 2. Potential house damage in the Gyeongju area by M 6.7 earthquake with the attenuation relation proposed by Sadigh et al.(1997) for site classes B, C, and D

실정도에 있어서는 차이가 있다.

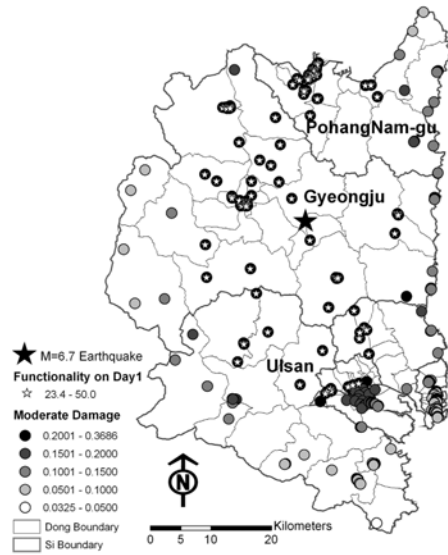
의료기관이 지반분류 B(보통암) 지반에 위치하였을 경우, 이 지진으로 인해 중간규모 이상의 피해가 나타나는 기관은 없고, 지진발생 하루 후에는 전체 기관 중 약 380(전체의 96%) 곳에서 50% 이상의 정상적인 운영 가능성을 보인다 (Fig. 3). 지반분류 C(연암) 지반에 위치한 경우에는 적어도 2곳에서 중간규모 이상의 피해를 입을 수 있는 확률이 50% 이상이며, 약 265(전체의 67%) 곳에서 지진발생 하루 후에 50% 이상의 정상적인 운영 가능성으로 응급상황에 대처할 수 있다(Fig. 3). 이러한 기관들이 지반분류 D(단단한 토사) 지반에 위치하면 적어도 5곳은 중간규모 이상의 피해를 입고, 지진발생 하루 후에도 약 161(전체의 41%) 곳에서만 정상적인 운영 가능성이 50% 이상으로서 응급환자를 돌보는데 차질이 있을 수 있겠다.

##### 4.2.2 학교, 경찰서와 소방서

학교는 재해발생 시 주민들이 대피할 수 있는 피난처로 사



(a) Site Class B



(b) Site Class C

Fig 3. Estimated damage of hospitals in Gyeongju area by M 6.7 earthquake with the attenuation relation proposed by Sadigh et al.(1997) for site classes B and C.

용할 수 있기 때문에 주요 건축물 중의 하나로 분류된다. 2005년도 연구지역 내 학교는 전체 352곳이 있었다. 이들의 학교가 지반분류 B(보통암)나 C(연암) 지반에 존재한다면 지진발생 하루 후에는 모든 학교에서 정상적인 기능을 제공함으로써 많은 이재민을 수용할 수 있을 것으로 보인다. 그러

나 학교가 지반분류 D(단단한 토사) 지반 위에 위치한다면, 지진발생 하루 후에 적어도 68곳에서는 50% 이상의 기능상 실로 이 지역에서 발생하는 이재민을 충분히 수용할 수 없을 수도 있다(Table 1).

연구지역 내 경찰서와 소방서는 각각 76곳과 32곳이 존재하

Table 1. Damages estimated to the schools, the police stations, and the fire stations in the Gyeongju area due to M=6.7 earthquake.

With Functionality >50% on day 1		Number of Facilities								
		School			Police Station			Fire Station		
		Total	Site Class B	Site Class D	Total	Site Class B	Site Class D	Total	Site Class B	Site Class D
Central and Eastern	Toro et al. (1997)	352	341	270	76	73	67	32	29	24
	Sommerville et al.(2002)		352	286		76	68		32	24
	Frankel et al. (1996)		288	153		68	38		24	15
	CEUS Event		345	251		73	62		30	22
	CEUS Characteristic Event		348	254		75	62		31	22
	Campbell (2003)		348	277		75	67		31	24
	Atkinson & Boore (1995)		352	280		76	67		32	24
Western	Young et al. (1997)	352	352	335	76	76	73	32	32	29
	WUS Shallow Crustal Event - Non Extensional		352	274		76	60		32	23
	WUS Shallow Crustal Event - Extensional		352	319		76	66		32	26
	WUS Deep Event		352	352		76	76		32	32
	Spudich et al. (1999)		352	324		76	67		32	27
	Sadigh et al. (1997)		352	284		76	60		32	23
	Campbell & Bozorgnia (2003)		352	326		76	68		32	27
	Boore et al. (1997)		346	310		75	65		31	26
	Atkinson & Boore (2003) - Global		352	352		76	76		32	32
	Atkinson & Boore (2003)		352	352		76	76		32	32
	Abrahamson & Silva (1997) -Hanging Wall		352	339		76	73		32	29
	Abrahamson & Silva (1997) - Foot Wall		352	352		76	76		32	32

였다. 이 기관들이 지반분류 B(보통암) 또는 C(연암) 지반위에 존재하면 지진발생 하루 후에 100% 모든 기관에서 비상상태에 대비할 수 있다. 그러나 학교의 경우와 마찬가지로, 지반분류 D(단단한 토사) 지반 위에 이들이 위치하고 있다면 지진발생 하루 후에 경찰서는 60곳에서, 소방서는 23곳에서 응급상황에 대처할 수 있는 가능성이 50 % 이상이다(Table 1).

### 4.3 화재, 이재민, 사상자

연구지역이 지반분류 B(보통암) 지반으로 이루어진 곳에 위치한다면 999건의 화재발생 가능성이 있고, 이로 인해 65,108명이 화재에 노출될 것으로 보인다. 연구지역이 지반분류 C(연암) 지반에 위치한다면 약 1,013건의 화재발생으로 66,362명이 화재에 노출될 수 있다. 반면에 연구지역이 지반분류 D(단단한 토사) 지반에 위치하고 있다면 이보다 많은 화재발생으로 약 70,965 명의 인구가 화재에 노출될 가능성을 보여 가장 큰 피해가 예상된다.

이 지진으로 인해 이재민도 발생할 수 있는데, 연구지역이 지반분류 B(보통암) 지반에 위치하고 있다면 약 7,132가구가 피해를 입어 2,939명의 이재민이 발생할 수 있다(Fig. 4). 지반분류 C(연암) 지반에 위치한 연구지역에서는 약 21,488 가구 피해로 8,797명이 임시 피난처가 필요하다. 반면에 연구지역이 지반분류 D(단단한 토사) 지반으로 이루어져 있다면 43,386가구의 피해로 17,692명의 이재민이 발생할 수 있겠다. 만약 이들을 수용할 수 있을 정도의 학교가 충분히 준비되지 않는다면, 마을회관 또는 노인정 같은 새로운 대피소를 모색해야 할 것이다.

본 연구에서는 시간대별 유동인구 변화를 반영한 재해규모 산정을 위하여 새벽, 출퇴근시간, 그리고 대부분의 지역주민이 생업 혹은 학업에 종사하는 시간대에 지진이 발생하였을 상황을 가정하여 재해정도를 추정하여 보았다. HAZUS의 모사결과, 지진이 새벽 2시에 발생하였을 때가 활동시간이 많

은 낮이나 출퇴근시간에 발생하였을 때보다 사상자 발생률이 훨씬 높다(Fig. 5). 사상자 피해수준은 병원치료가 필요하지 않은 가벼운 경상(Level 1), 병원치료가 필요한 부상(Level 2), 생명이 위협한 중상(Level 3), 그리고 사망자(Level 4)로 나뉜다(FEMA, 2006a). 새벽 두시에 지진이 발생할 경우, 연구지역이 지반분류 B(보통암) 지반일 경우에는 75 명의 사망자가 발생하고, 지반분류 C(연암) 지반일 경우에는 296 명의 사망자가 발생할 수 있다. 또한 연구지역이 지반분류 D(단단한 토사)지역일 경우에는 685 명의 사망자가 발생할 수 있을 정도로 큰 인명피해가 있겠다(Fig. 5).

### 4.4 경제적 손실

건물관련 경제적인 손실은 건물피해액과 임대비용으로 나뉠 수 있다. 건물 피해액은 주택수리비용이나 재건축 비용을 포함하고, 임대비용은 주택손상으로 인해 임대를 할 경우에 발생한다. 이번 연구에서는 임대비용을 예측하여 보았다. 주택이 지반분류 B(보통암) 지반으로 이루어진 곳에 있을 경우에는 약 1,130억 원가량의 임대비용이 발생할 수 있으며, 지반분류 C(연암) 지반의 경우에는 약 2천2백억 원정도가 발생할 수 있겠다. 또한 연구지역 내 주택들이 지반분류 D(단단한 토사) 지역에 위치할 경우에는 약 3천6백억 원정도가 임대비용으로 필요할 수 있겠다. 이 밖의 경제관련 피해액은 건물 내의 시설물과 구조물, 물품, 건축공법, 건축 재료비, 인건비 등 더욱 풍부하고 자세한 자료수집이 요구된다.

### 4.5 상이한 감쇠식 적용에 따른 여러 재해예측 결과

본 연구는 강수영 등(2007a)의 연구결과에 따라, Sadigh 등(1997)의 식을 적용하여 경주지역의 규모 6.7 지진에 대한 재해를 중점으로 예측하여 보았다. 그러나 이 감쇠식의 적용은 한반도의 지진과 지질현상을 충분히 고려하였다고 할 수 없고, HAZUS의 결정론적 방법에서는 이외에도 여러 가지

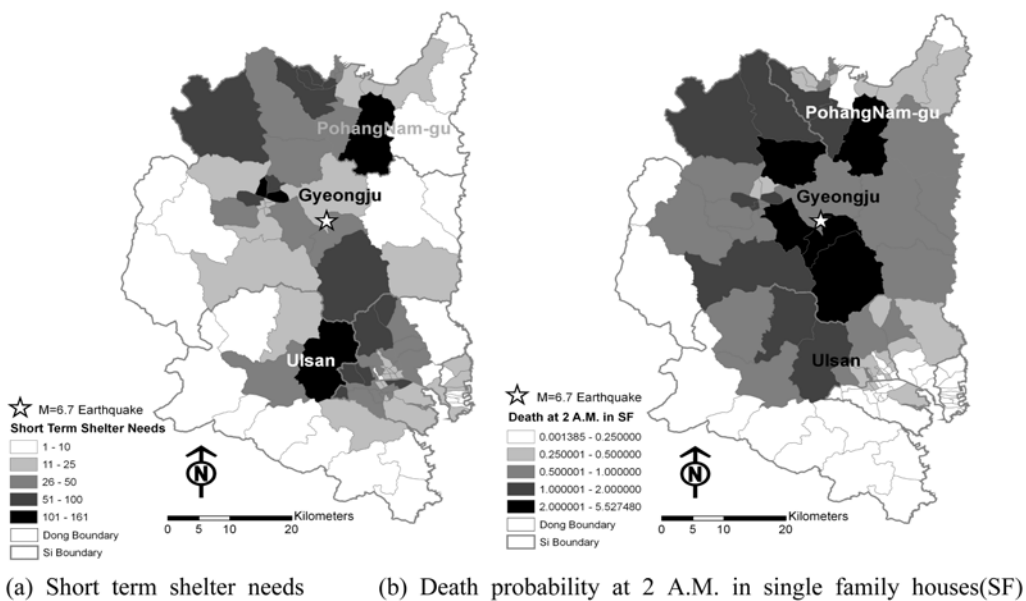


Fig 4. Short term shelter needs and causality probability occurring M 6.7 earthquake at 2 A.M. with the attenuation relation proposed by Sadigh et al.(1997) for site class B.

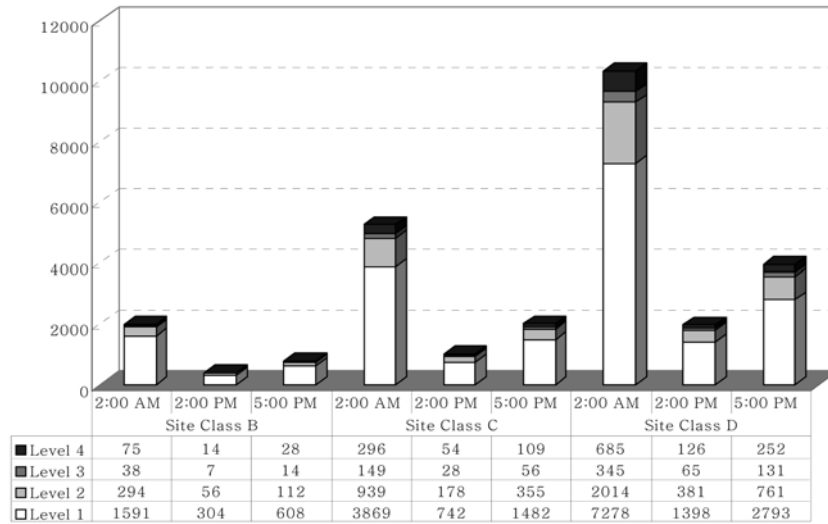


Fig 5. Casualties occurring M 6.7 earthquake with Sadigh et al.(1997) attenuation relation.

감쇠식을 지원하고 있다. 이번에는 Sadigh 등(1997)의 감쇠식 외에 다른 감쇠식을 적용할 경우 동일한 조건의 지진발생으로 경주지역의 지진재해예측 결과에는 어떠한 변화가 있는지 살펴보고자 한다.

주택피해의 경우 Figs. 6과 7을 살펴보면, Toro 등(1997)

또는 Frankel 등(1996)의 여러 미국 중동부 지역을 위한 감쇠식 적용이 Sadigh 등(1997)의 식 등의 미국 서부지역을 위한 감쇠식을 적용하였을 때보다 그 피해가 훨씬 크게 예측되고 있다. 또한 지반분류 B(보통암)의 지질특성을 적용한 재해크기가 지반분류 D(단단한 토사)의 적용에서 얻는 피해보

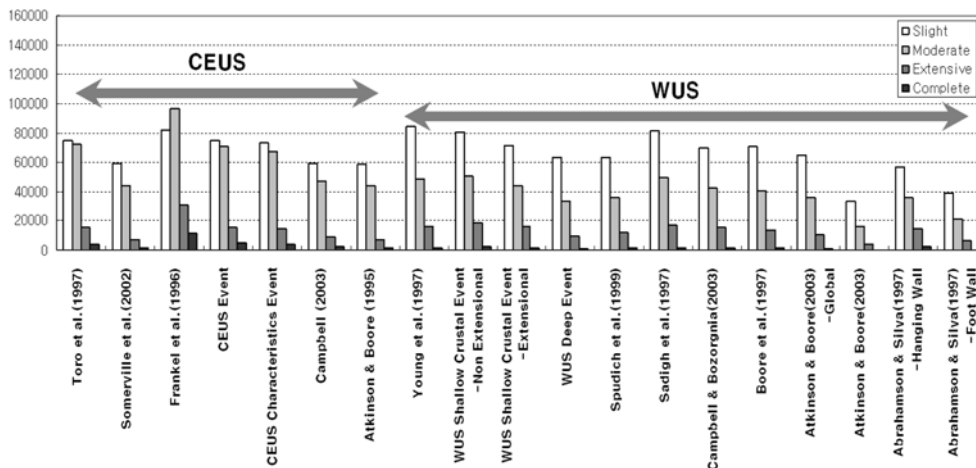


Fig 6. House damages in the Gyeongju area for different attenuation relations (M = 6.7, site class B)

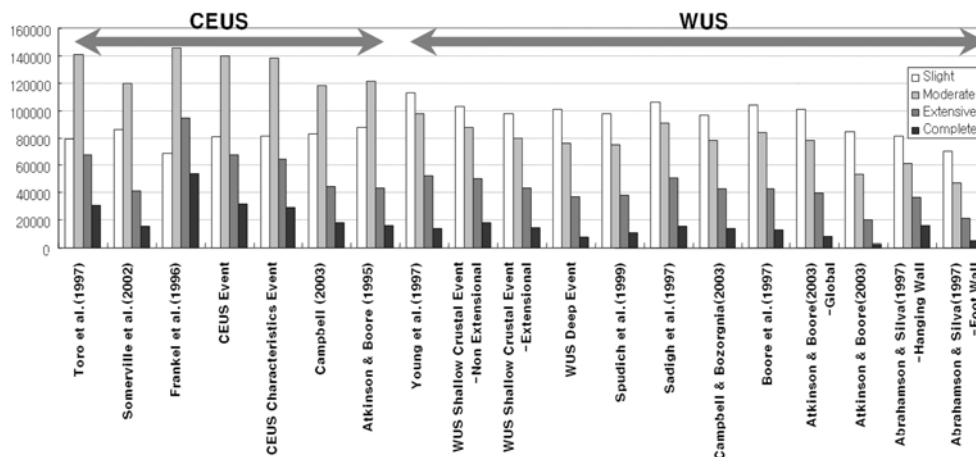


Fig 7. House damages in Gyeongju area for different attenuation relations (M = 6.7, site class D)

다 더 적게 나타남을 알 수 있다. 가장 피해가 크다고 예측하는 감쇠식은 중동부지역을 위한 식인 Frankel 등(1996)의 연구에서 제시된 감쇠식이고, 반대로 서부지역을 위한 식인 Atkinson와 Boore(2003)의 감쇠식이 가장 적은 피해를 예측한다. 이러한 재해예측 경향들은 주택의 피해뿐만 아니라 여러 다른 피해에서도 같은 추세로 나타난다.

주요 건물의 하나인 의료기관이 지반분류 B(보통암) 지반에 위치한 경우는 중동부지역을 위한 식인 Frankel 등(1996)의 식 적용에서 전체 396곳 중 42곳이 중간규모 이상의 피해가 있을 확률이 50% 이상으로 가장 큰 피해를 예측하고, 이외의 중동부지역을 위한 식의 적용에서는 한두 곳에서만 같은 피해가 있을 것으로 예측한다. 서부식에서는 Boore 등(1997)을 제외한 모든 식에서 중간규모 이상의 피해는 없을 것으로 예측된다. 그러나 이들의 기관이 지반분류 D(단단한 토사) 지반에 위치한 경우에는 중동부식 적용으로 적어도 약 40곳 이상에서 중간규모 이상의 피해가 발생할 가능성이 50% 이상이다. 특히 Frankel 등(1996)의 식 적용으로는 171곳이 중간규모 이상의 피해가 있을 수 있다. 서부식 적용에서는 지진발생 하루 후에는 적어도 약 45% 이상의 기관에서 정상적인 운영이 가능할 것으로 보인다.

다른 주요건물의 피해상황을 각각의 감쇠식과 지반의 분류에 따라 Table 1에 정리하였다. 이를 간단히 살펴보면, 이들의 기관이 지반분류 B(보통암) 지반에 위치하였을 경우, Frankel 등(1996)의 식 적용을 제외하고는 지진발생 하루 후에는 정상적인 운영이 가능한 것으로 예측된다. 반면에 이들의 기관이 지반분류 D(단단한 토사) 지반에 위치하였다면, 다른 건물의 피해상황과 마찬가지로 지반분류 B에 위치하였을 때보다는 많은 피해가 발생할 수 있겠다.

일반적으로 중동부지역을 위한 모든 감쇠식은 933 건의 화재발생 가능성이 있다고 예측하고, 서부지역을 위한 각 감쇠식 적용결과로는 평균 999건의 화재가 발생할 수 있다. 이 화재로 인해 평균 4.3%의 인구가 화재에 노출될 수 있다. 연구지역이 지반분류 B(보통암) 지반이라면, 전체 가구 중 약 0.1~6.0%의 가구가 이 지진으로 인해 피해를 입고, 총 인구의 약 0.1~0.8% 이재민 발생으로 학교 등의 피난처가 필요하다. 가장 큰 이재민이 발생할 것이라 예측하는 감쇠식은 Frankel 등(1996)의 적용이다. 그러나 연구지역이 지반분류 D(단단한 토사) 지반으로 이루어져 있다면, 각 감쇠식에 따라 작게는 약 0.2% 정도(Atkinson와 Boore(2003)의 식 적용)에서 크게는 약 3.3%(Frankel 등(1996)의 식 적용)의 지역주민이 이재민이 될 수 있다.

앞서 언급하였듯이, 새벽 두시에 지진이 발생하였을 때 사상자 발생률이 가장 높다. 여러 감쇠식의 적용결과, 지반분류 B(보통암)로 이루어진 지역이라면, 경상이 329~5,915명까지 발생할 수 있으며, 사망자는 약 5~473명까지도 발생할 수 있다. 가장 작은 사상자가 발생한다고 예측하는 감쇠식은 Atkinson와 Boore(2003)의 식 적용에서다. 그러나 연구지역이 지반분류 D(단단한 토사) 지역에 위치하고 있다고 가정한다면, 사망자가 약 2,254명까지도(Frankel 등(1996)의 식 적용) 발생할 수 있다.

이러한 규모 6.7의 경주지진으로 2005년도에 피해자들이 집이 수리되거나 재건축되는 동안 임대하는데 드는 비용은 지반특성과 감쇠식 적용에 따라 작게는 약 250억원 정도(Atkinson와 Boore(2003)의 site class B 적용)가 들며, 크게는 약 9천9백억원 정도(Frankel 등(1996)의 site class D 적용)가 들 수도 있다.

## 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 HAZUS의 결정론적 방법을 이용하여 경주지역의 규모 6.7 지진에 대한 재해를 예측하여 보았다. 강수영 등(2007a)의 연구에서 우리나라 지진 감쇠현상과 가장 유사하다고 제시한 Sadigh 등(1997)의 식을 중점으로 연구를 진행하였다. 그러나 이 감쇠식 또한 미국지역을 위한 감쇠식으로서 우리나라 특성을 충분히 고려했다고는 할 수 없다. 따라서 이번 연구에서는 이외에 적용할 수 있는 여러 감쇠식을 같은 방법을 이용하여 그에 따른 재해도 함께 살펴보았다. 이번 연구에서는 관심지역의 지반특성이 지반분류 B(보통암), C(연암), D(단단한 토사)라고 가정할 경우, 가상지진으로 인한 피해가 어떻게 변화하는지도 함께 고찰하였다. 향후 연구에서는 부분지역별 지반의 특성을 고려하여 보다 정확한 재해를 예측할 수 있어야 할 것이다.

우리나라에서는 재해가 보고될 만큼의 큰 지진재해 사례가 없었으므로, 이번 연구에서 예측한 재해크기를 미국의 캘리포니아 Northridge에서 1994년 1월에 발생한 규모 6.7지진으로 인한 재해와 비교해볼 수 있겠다. 이 지진은 미국 FEMA에서 선정한 근래에 발생한 10대 자연재해 중 하나이다(FEMA, 2008). 이 지진의 주요 피해상황은 57명의 사망자와 12,000 여명의 부상자가 발생하였고, 25,000여명의 이재민이 발생하였다. 또한 약 100,000여동의 건물피해로 인해 약 10조원 정도의 커다란 손실이 발생하였던 지진이였다. 이 지진은 Los Angeles 도심지 주변에서 발생하여 그 피해가 더욱 컸던 지진이였다. 본 연구의 연구지역이 비록 Los Angeles 만큼 큰 도시지역도 아니고 지진재해 예측결과도 이보다 상대적으로 작게 추정되었지만, 산업시설물과 인구 집중지역인 울산광역시를 포함하고 있는 이 지역에서 사망자가 크게는 685명까지 발생할 수 있다는 예측결과 측면에서 살펴보면, 규모 6.7경주의 가상지진으로 인한 재해는 국가적 차원의 사상 최대의 재난이 될 수도 있겠다.

이번 연구에서는 비록 미국지역 특성을 고려하여 제안된 하나의 감쇠식인 Sadigh 등(1997)의 식을 적용하였으나, 이는 한반도의 지진감쇠현상과 가장 유사하다고 제시된 식이었고(강수영 등, 2007a), 연구지역의 지질특성 또한 한반도 내 가장 보편적인 지질특성을 보이는 세 가지 경우를 가정하여 재해를 예측하였으므로 기존의 방식(강수영 등, 2007b)보다 향상된 방법을 이용하여 경주지역의 재해를 예측하였다 할 것이다. 단지 이번 연구를 토대로 향후 연구에서 보완해야 할 점은, 지역별 기본 입력자료 구축 시 보다 정확하고 풍부한 자료를 위해 전문가의 자문을 구하고, 최신의 자료로 지속적인 업데이트가 필요하겠다. 자료구축의 신속성과 효율

성을 높이기 위해 통합적인 자료운영시스템의 구축 또한 요구된다.

본 연구결과는 경주인근지역에 지진재해가 발생할 경우를 대비해 빠른 시간 내 피해최소화를 위한 재난관리 및 안전관리 계획 수립에 효과적인 정보를 제공할 수 있다는데 의미가 있다. 예를 들면, 본 연구의 피해 예측 결과는 재난예방 목적의 사전점검관리를 위하여 사용될 수 있으며, 위기상황 하에서는 손상 혹은 파괴된 기능과 시설을 사전 선정된 우선순위에 의거 신속히 그리고 체계적으로 원상복구 시키고, 응급 시설과 지원인력 확보 등 인명 및 주요시설 피해를 최소화하기 위한 초기 재난관리계획 및 안전관리계획 수립에 효율적인 정보를 제공할 수 있을 것이다. 또한 본 연구의 재해예측 결과는 신속하면서 계획적이고 지속적인 사회기능 회복을 위한 대책 수립 및 시행에 도움이 될 수 있을 것이다. 이러한 일련의 의사결정 지원 시스템은 결과적으로 재해특성에 맞는 효율적인 재해저감 정책수립을 가능케 할 것이다.

지진재해 저감을 위하여 새로운 기술 도입 혹은 기존 개발된 시스템의 성능 향상을 위한 지속적인 관심과 투자도 필요 하겠다. 보다 효율적인 재해저감연구를 위하여 유관기관 간의 정보교류 활성화를 비롯한 협력체계 구축과 홍보·교육 차원의 대국민 정보제공 서비스가 필요하다. 이를 위해서는 본 연구에서 적용한 HAZUS의 적극적인 활용도 생각해 볼 수 있겠다. 선행연구와 본 연구를 통해 우리나라에서도 이 시스템 사용이 가능하다는 것을 알았고, 지진재해뿐만 아니라 홍수와 태풍으로 인한 재해 또한 이 시스템을 사용하여 예측 가능하므로 기존의 특정재해예측 혹은 단일재해예측 시스템보다 그 활용도 면에서 우수하다. 또한 이 시스템을 이용하여 재해를 예측함에 있어서 가장 큰 장점은 공공기관 뿐만 아니라 관심이 있는 지역 혹은 민간부문에서도 사용이 가능하다는 것이다. 비록 현재까지는 우리나라 적용에 있어서 약간의 기술적 제약이 있으나, 향후 지속적인 관심과 연구를 통하여 우리나라 실정에 맞게 시스템 개선을 추진한다면 우리나라의 체계적인 통합재해예측 시스템으로 활용할 수도 있을 것이다.

## 감사의 글

익명의 세분 심사자께서 원고를 검토해 주셨고, 원고의 완성도를 높이는데 많은 도움이 되었습니다. 감사드립니다. 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2600-5101)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

강익범, 박정호 (2002) HAZUS를 이용한 충남지역의 지진피해 연구. **한국방재학회 논문집**, 한국방재학회, 제2권, 제2호, pp. 73-83.  
 강수영, 김광희, 석봉출, 유해수 (2007) 한반도 지진재해예측을 위한 HAZUS의 강진동감쇠식 비교연구. **한국지진공학회 논문집**, 한국지진공학회, 제11권, 제6호, pp. 15-21.  
 강수영, 김광희, 김동춘, 유해수, 민동주, 석봉출 (2007) 지진재해

예측을 위한 HAZUS와 ShakeMap의 한반도에서의 적용가능성 연구. **한국지리정보학회지**. 한국지리정보학회, 제10권, 제1호, pp. 47-59.  
 기상청 (2002) 2001 지진연보. 기상청.  
 기상청 (2003) 2002 지진연보. 기상청.  
 기상청 (2004) 2003 지진연보. 기상청.  
 기상청 (2005) 2004 지진연보. 기상청.  
 기상청 (2006) 2005 지진연보. 기상청.  
 노명현 (2003) 우리나라의 지진특성. **대한지질공학회 정기총회 및 학술발표회**, 대한지질공학회, 원자력안전기술원.  
 이기화 (1998) 한반도의 역사지진자료. **지구물리**, 제1권, 제1호, pp. 4-22.  
 이기화, 김정기 (2000) 한반도 주요 지체구조별 지진학적 특성. **지구물리**, 제3권, 제2호, pp.91-98.  
 이기화, 진영근 (1991) 양산단층의 구역화: 경상분지내 주요 단층대의 지구물리학적 연구. **지질학회지**, 지질학회, 제27권, 제4호, pp. 434-449.  
 통계청 (2007) <http://www.kosis.kr/>. visited in April, 2007.  
 Abrahamson, N.A., and Silva, W.J. (1997) Empirical response spectral attenuation relationships for shallow crustal earthquakes. *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 94-127.  
 Atkinson, G.M., and Boore, D.M. (1995) Ground-motion relations for Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 1, pp. 17-30.  
 Atkinson, G.M., and Boore, D.M. (2003) Empirical ground-motion relationships for subduction zone earthquake and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 4, pp. 1703-1729.  
 Boore, D.M., Joyner, W.B., and Fumal, T.E. (1997) Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American earthquakes: A summary of recent work. *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 128-153.  
 Campbell, K.W. (2003) Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground-motion (Attenuation). *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 3, pp. 1012-1033.  
 Campbell, K.W., and Bozorgnia Y. (2003) Updated near-source ground-motion (Attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 1, pp. 314-331.  
 Chiu, J-M, and Kim S.G. (2004) Estimation of regional seismic hazard in the Korean Peninsula using historical earthquake data between A.D. 2 and 1995. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 1, pp. 269-284.  
 FEMA (2006a) *Multi hazard loss estimation methodology, earthquake model. HAZUS-MH MR2 User manual*. Federal Emergency Management Agency.  
 FEMA (2006b) *Multi hazard loss estimation methodology, earthquake model. HAZUS-MH MR2 Technical manual*. Federal Emergency Management Agency.  
 FEMA (2008) *Northridge earthquake*, <http://www.fema.gov/hazard/earthquake/usquakes.shtm>, <http://www.fema.gov/kids/north5.htm>, <http://www.fema.gov/hazard/topten.shtm>, accessed on Jan. 14, 2008.  
 Frankel, A., Muller, C., Barnhard, T., Perkins, D., Leyendecker, E., Dickman, N., Hanson, S., and Hopper, M. (1996) *National seismic hazard maps: Documentation June 1996*, U.S. Geological Survey, Open-File Report, pp. 96-532.  
 Sadigh, K., Chang, C.Y., Egan, J., Makdisi, F., and Youngs, R.R. (1997) Attenuation relationships for shallow crustal earth-



- quakes based on California strong motion data. *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 180-189.
- Somerville, P., Collins, N., Abrahamson, N., Graves, R., and Saikia, C. (2002) *Ground motion attenuation relationships for the Central and Eastern United States*, U.S. Geological Survey. Final Report to the U.S. Geological Survey.
- Spudich, P., Joyner, W.B., Lindh, A.G., Boore, D.M., Margaris, B.M., and Flecher, J.B. (1999) SEA96: A revised ground motion prediction relation for use in extensional tectonic regimes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 89, pp. 1156-1170.
- Sun, C.G. (2004) *Geotechnical information system and site amplification characteristics for earthquake ground motions at inland of the Korean peninsula*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.
- Toro, G.R., Abrahamson, N.A., and Schneider, J.F. (1997) Model of strong ground motions from earthquakes in Central and Eastern North America: Best estimates and uncertainties, *Seismological Research Letter*, Vol. 68, pp. 41-57.
- Young R.R., Chiou S.J., Silva W.J., and Humphrey J.R. (1997) Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 58-73.

◎ 논문접수일 : 2008년 03월 06일  
 ◎ 심사의뢰일 : 2008년 03월 07일  
 ◎ 심사완료일 : 2008년 04월 14일