

서울시 모델 구역 지진피해 추정 연구

A Study on the Seismic Damage Estimation in the Model District of Seoul City

윤 의 택*
Yoon, Eui-Taek

류 혁**
Ryu, Hyeuk

강 태 섭***
Kang, Tae-Seob

김 재 관****
Kim, Jae-Kwan

박 창 업****
Baag, Chang-Eob

국문요약

서울시 모델 구역의 건축물을 대상으로 가상 시나리오 지진에 의한 피해를 추정하였다. 다양한 주거 및 구조 특성을 대표할 수 있고 지반 증폭 효과를 고려할 수 있는 지역을 모델 구역으로 선정하였다. 모델 구역 내 건축물은 구조 형식에 따라 11 종류로 분류하였으며 HAZUS에서 제시한 값을 사용하여 역량 곡선(capacity curve)과 취약도 곡선(fragility curve)을 생성하였다. 가상 시나리오 지진의 지반 운동은 인공 지진 운동 생성 방법을 사용하여 생성하였으며 모델 구역을 표토층 두께에 따라 3개의 구역으로 나누고 지반응답해석을 수행하였다. 건축물의 피해 확률은 역량 스펙트럼 방법과 취약도 곡선을 사용하여 계산하였다. 최종적으로 GIS 데이터베이스를 활용하여 모델 구역 내 건축물의 전반적 피해 정도를 추정하였다.

주요어 : 지진 피해 시나리오, 지적 정보 시스템, 역량 스펙트럼 방법, 역량 곡선, 취약도 곡선

ABSTRACT

The seismic damage assessment due to the postulated earthquake was attempted for the buildings in the model district of Seoul City. The model district was selected to represent the typical structural and residential characteristics of Seoul City. The buildings in the model district were classified into 11 structural types. For each structural type, the capacity and fragility curves were constructed with parameters presented in HAZUS. The ground motions due to the postulated earthquakes were artificially generated and ground response analyses were done for three kinds of soil profiles classified with respect to the depth of surface soil layer. The probability of damage state of each structural type was calculated using capacity spectrum method and fragility curve. Finally, the calculated results were translated into GIS database and mapped to evaluate the seismic damage in the model district.

Key words : earthquake damage scenario, GIS(geographic information system), capacity spectrum method, capacity curve, fragility curve

1. 서 론

우리나라는 중약진 지진대에 속하여 지진 재해 위험성이 상대적으로 낮으나 역사 문헌에 기록된 지진 피해를 볼 때 지진 재해 위험성이 항상 존재한다고 판단된다. 우리나라에서 발생 가능한 지진 재해로 인한 피해는 올바른 지진 재해 방지 대책 및 체계적인 대응으로써 최소화 할 수 있으며 이를 위해서 먼저 지진 피해 예측 및 피해 시나리오의 작성이 필요하다.

미국의 경우 지진 피해 예측에 관한 연구⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾를 수행하여 지진 재해 평가 시스템을 구축하고 지진 재해 대응 계획을 수립하는데 활용하고 있다. 대표적으로 HAZUS(Hazard US)는 GIS(Geographic Information System) 기반의 광범위한 데이터베이스를 내장하고 있으며 지진으로 인한 구조적 피해뿐만 아니라 라이프라인 시스템(lifeline system) 피해, 비구조적 피해, 2차적 피해 등을 예측할 수 있다.⁽⁶⁾ 그 외에 REDARS(Risk from Earthquake Damage to Road Way System)는 지진 재해 발생 시 교량 및

도로 시스템의 피해를 종합적으로 평가하고 관리하는 목적으로 구축되었다.⁽⁷⁾ 일본의 경우 HERAS(Hazards Estimation and Restoration Aid System)를 구축하여 지진 대응 계획을 수립하고 실제 지진이 발생하였을 때 조기 경보 시스템 UrEDAS(Urgent Earthquake Detection and Alarm System)와 연동하여 피해를 조기에 평가하는 목적에 활용하고 있다.⁽⁸⁾ 우리나라의 경우 지진 피해 예측에 관한 연구로서 서울시 지진대응모델 개발에 관한 연구⁽⁹⁾와 DEM(Digital Elevation Model)을 이용한 지진피해 평가 시스템의 구축에 관한 연구^{(10),(11)} 그리고 지진재해정보시스템 도입방안에 관한 연구⁽¹²⁾ 등이 있으나 종합적 지진 피해 추정 시스템은 아직 없는 실정이다.

이 연구는 지진 피해 추정 연구의 하나로 미국의 HAZUS 방법론을 활용하여 가상 지진에 의한 서울시 모델 구역 내 건축물의 피해 정도를 추정하였다. 이 연구는 다음과 같은 절차로 진행되었다(그림 1). 먼저 이 연구의 대상 모델 구역을 선정하였다. 이때 모델 구역 내 건축물은 구조 형태에 따라 11 종류로 분류하였고 모델 구역은 표토층 두께에 따라 3 구역으로 나누었다. 그 다음 HAZUS에서 제시한 파라미터 값을 이용하여 구조 형태별 건축물 역량 곡선(capacity curve)을 생성하였다. 그리고 가상 시나리오 지진의 규모와 위치를 역사 지진 기록과 서울시 단층 자료를 바탕으로 결정하였다. 가상 시나리오 지진의 지반 운동은 인공지진 생성 방법으로 생성하였으며 모델

* 정회원·현대건설 대리

** 학생회원·서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사과정

*** 정회원·한국지질자원연구원 선임연구원

**** 정회원·서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

***** 정회원·서울대학교 지구환경과학부 교수

(대표저자:jkwankim@snu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 9. 26 / 심사종료일 : 2005. 11. 10)

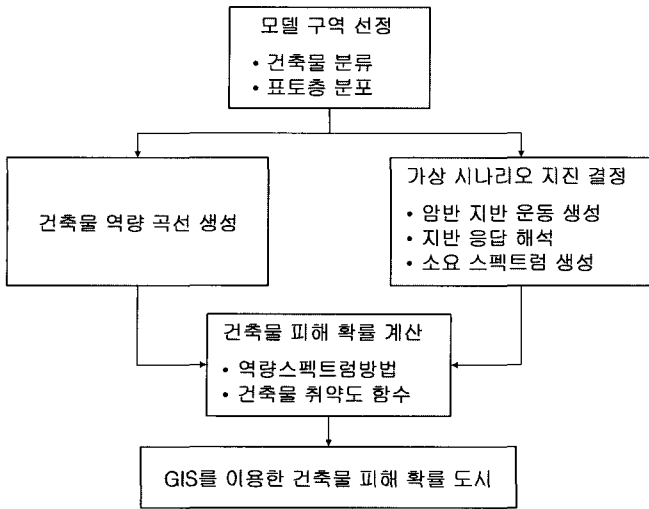


그림 1 지진 피해 추정 절차

구역의 표토층에 의한 증폭 효과를 고려하기 위하여 지반 응답 해석(ground response analysis)을 수행하였다. 다음 단계로 역량 스펙트럼 방법으로 계산한 스펙트럼 변위를 취약도 함수에 입력하여 건축물의 피해 확률을 계산하였다. 마지막으로 GIS 데이터베이스를 활용하여 건축물의 손상 상태 별 확률을 도시하고 모델 구역 내 건축물의 전반적인 손상 상태를 추정하였다. 이 연구는 지진 피해 추정 기법의 전 절차를 실제로 적용해보았는데 그 가치를 찾을 수 있다. 그러나 실제 지진 방재 대책 수립을 위해서는 우리나라 건축물의 특성과 지반 특성 및 지진 특성을 고려한 연구를 수행해야 할 필요가 있다.

2. 지진 피해 추정 기법

지진으로 인한 피해는 크게 직접 피해와 간접 피해로 구분할 수 있다. 직접 피해는 구조물 및 라이프 라인 등에 직접적으로 발생하는 지진 피해를 말하며, 간접 피해는 지진으로 인해 유발되는 화재, 범람, 사상자 등과 같은 경제적, 사회적 손실을 말한다. 일반적으로 지진 피해 추정은 직

접 피해와 간접 피해 모두를 대상으로 하나 이 연구에서는 지진으로 인한 직접 피해 가운데 건축물의 피해에 한정하였다. 이 연구에서 활용한 지진 피해 추정 기법은 HAZUS 방법론을 기초로 하였으며 그 과정은 다음과 같다.

2.1 가상 시나리오 지진 결정

모델 구역의 지진 피해 추정 수행을 위한 가상 시나리오 지진은 결정론적 방법 또는 확률론적 지진 재해도 해석 방법으로 결정한다. 그 가운데 결정론적 방법은 시나리오 지진의 규모와 위치를 결정한 후 지진동 감쇄식을 사용하여 소요 스펙트럼을 구성하는 순서를 따른다. 시나리오 지진에 의한 소요 스펙트럼은 그림 2와 같이 $S_a(T=0.3 \text{ sec})$, $S_a(T=1.0 \text{ sec})$ 두 파라미터와 지반 증폭계수(F_a , F_v)에 의해 결정된다. 이때 지반 증폭계수는 표층 지반에 의한 증폭 효과를 고려하기 위한 것으로 NEHRP 1997⁽¹³⁾에 제시된 값을 따른다.

이 연구에서는 HAZUS 방법론과 달리 가상 시나리오 지진 운동을 인공적으로 생성하고, 모델 구역을 대상으로 지반 응답 해석을 수행함으로써 표층 지반에 의한 증폭 효과를 고려하였으며 그 결과로 얻은 표토층 지반 운동의 응답 스펙트럼의 중앙값으로부터 $S_a(T=0.3 \text{ sec})$, $S_a(T=1.0 \text{ sec})$ 값을 구하여 소요 스펙트럼을 생성하였다.

2.2 구조물 역량 곡선 생성

구조물의 성능을 나타내는 구조물의 역량 곡선(capacity curve)은 구조 형식에 따라 항복 역량(yield capacity)과 극한 역량(ultimate capacity)의 두 점으로 표현되며 두 점의 중앙값과 표준 편차는 구조 형태 및 설계 등급에 따라 다른 값을 갖는다. 그림 3은 역량 곡선의 예로 내진 설계 미적용(pre-code seismic design) RC 모멘트 프레임(C1L)과 비보강 조적조(URMM) 구조의 역량 곡선이다.

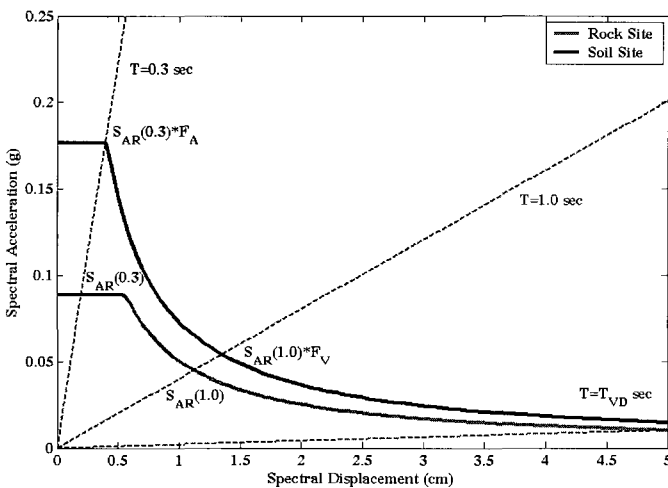


그림 2 지진 소요 스펙트럼

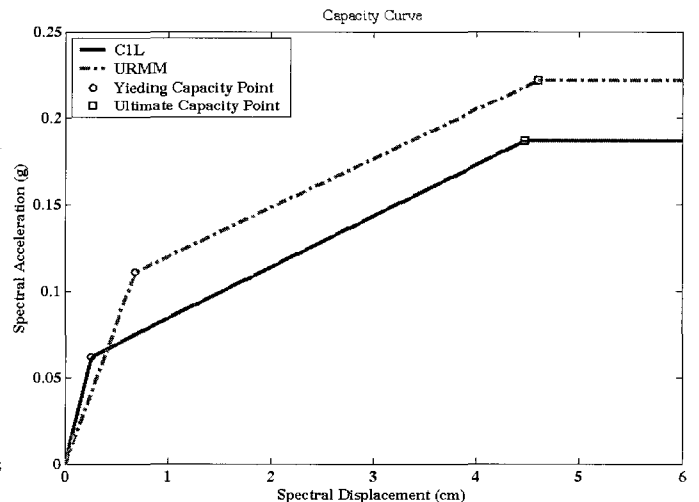


그림 3 구조물 역량 곡선

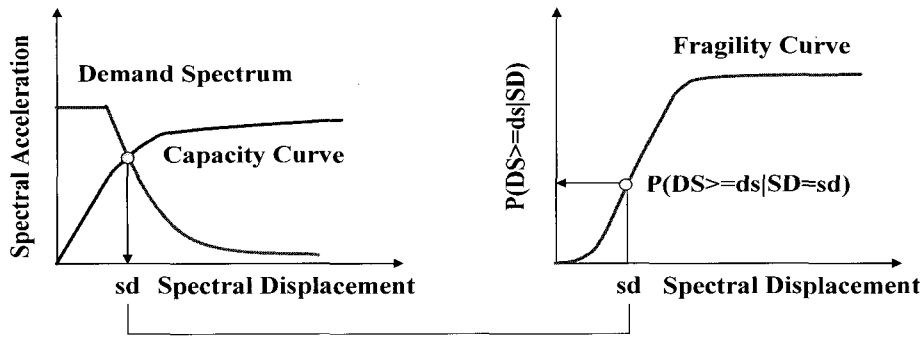


그림 4 역량스펙트럼 방법을 이용한 피해 확률 계산 절차

2.3 구조물 피해 확률 계산

가상 시나리오 지진에 의한 구조물의 피해 확률은 그림 4와 같이 역량스펙트럼 방법⁽¹⁴⁾으로 구한 스펙트럴 변위를 취약도 함수에 대입하여 구한다. 취약도 함수는 구조물의 응답에 대한 피해 상태의 확률 관계식으로 일반적으로 로그 정규 누적 분포로 표현된다. 구조물의 피해 상태 ds 에 이르는 스펙트럴 변위($S_{d,ds}$)의 분포를 로그 정규 분포로 가정하면 구조물의 응답이 스펙트럴 변위 S_d 일 때 피해 상태 ds 이상의 손상을 입을 확률을 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 취약도 함수의 두 파라미터($\bar{S}_{d,ds}$, β_{ds})는 구조 형태와 피해 상태 및 설계 등급에 따라 다른 값을 갖는다.

$$P(DS \geq ds | S_d) = P(S_d \geq S_{d,ds} | S_d) = P(S_{d,ds} \leq S_d) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (1)$$

여기에서, $\bar{S}_{d,ds}$: 피해 상태 ds 에 이르는 스펙트럴 변위의 중앙값

β_{ds} : 피해 상태 ds 에 이르는 스펙트럴 변위의 자연 로그의 표준 편차

Φ : 표준 정규 누적 분포 함수이다.

취약도 함수에 의해 계산되는 확률은 주어진 스펙트럴 변위에서 특정 피해 상태 이상의 피해를 입을 확률이므로 식 (2)와 같이 주어진 스펙트럴 변위 S_d 에서 특정 피해 상태 ds 에 이를 확률을 구할 수 있다.

$$P(DS = ds_i | S_d) = \begin{cases} 1 - P(DS \geq ds_1 | S_d) & i = 0 \\ P(DS \geq ds_i | S_d) - P(DS \geq ds_{i+1} | S_d) & 1 \leq i \leq N-1 \\ P(DS \geq ds_N | S_d) & i = N \end{cases} \quad (2)$$

여기에서 N 은 총 피해 단계이다.

2.4 GIS를 이용한 구조물 피해 확률 도시

계산된 구조물의 피해 확률은 구조물의 종류 및 위치의 기본 자료와 GIS 소프트웨어를 활용하여 지도의 형태로 나타낼 수 있다. 가상 시나리오 지진에 의한 피해 지도

(Damage map)는 실제 지진 재해 시 신속 대응 시스템을 구축하는 근거 자료로 활용할 수 있다.

3. 서울시 모델 구역 지진 피해 추정

앞에서 제시한 지진 피해 추정 기법을 서울시 모델 구역에 적용하여 가상 지진에 의한 모델 구역의 피해 정도를 추정하였다.

3.1 모델 구역 선정

대상 구역은 다양한 건축물을 대상으로 다양한 피해 결과를 도출 할 수 있도록 다음 조건을 만족하도록 선정하였다.

- (1) 서울시의 대표적인 주거 특성을 나타내는 지역
- (2) 다양한 종류와 용도의 건물 존재
- (3) 구역 내 지반 특성 변화 존재

위 조건을 만족하는 지역 가운데 강남대로변 1km×1km 규모의 지역을 모델 구역으로 선정하였다. 모델 구역은 그림 5와 같이 중앙을 가로지르는 도로 양 옆으로



그림 5 모델 구역



그림 6 현장 조사(조적 채움벽이 있는 RC 건물)

표 1 모델 구역 건축물 분류

분류	기호	호 수	소 계	총계
RC 모멘트 프레임 (1-3층)	C1L	61	460	780
RC 모멘트 프레임 (4-7층)	C1M	241		
RC 모멘트 프레임 (8층 이상)	C1H	158		
RC 전단벽 (4-7층)	C2M	20	31	
RC 전단벽 (8층 이상)	C2H	11		
조적 채움벽이 있는 RC (1-3층)	C3L	1	231	
조적 채움벽이 있는 RC (4-7층)	C3M	230		
철골 프레임	S1L	1	1	
경량 철골	S3	17	17	
비보강 조적조 (1-2층)	URML	36	40	
비보강 조적조 (3층 이상)	URMM	4		

상업용 고층 RC 건물이 분포하고 있으며 우측 중앙부에는 주거용 조적조 건물과 조적 채움벽 RC 건물이, 좌측에는 RC 전단벽 구조의 아파트가 분포하고 있다.

모델 구역 내 건축물 목록 조사를 위하여 관련 기관(서울시, 구청 등)의 협조를 얻어 문헌과 도면을 조사하였으며 현장 조사(그림 6)도 함께 실시하였다. 조사된 모델 구역 내 총 780호의 건축물은 구조 형태에 따라 표 1과 같이 11종류로 분류하였다. 건축물 분류 기준은 HAZUS⁽¹⁵⁾에서 제시한 분류 기준 가운데 국내 실정에 맞지 않는 구조 형태를 제외하고 단순화한 것이다. 구조 형태 및 층수별 분포를 보면 구조 형태로는 RC 모멘트 프레임 구조와 조적 채움벽이 있는 RC 구조가 대부분이며 층별로는 4-7층의 건축물이 다수를 차지하였다(그림 7).

모델 구역의 건축물 분포는 GIS 소프트웨어 ArcView⁽¹⁶⁾를 이용하여 데이터베이스화 하였다. 이때 전산 입력 수치지도 기본도는 서울시 GIS 기본도를 사용하였으며 폴리라인으로 구성된 개체를 폴리곤으로 변환하여 활용하였다. 건축물의 데이터베이스 자료는 건축물 일련번호, 좌표, 번지수, 건축물 분류, 지상 및 지하 층고, 높이, 면적, 전체 면적, 건축 연도 등을 필드별로 입력하여 구성하였다. 그림 8은 조사된 모델 구역 내 건축물 자료를 입력하여

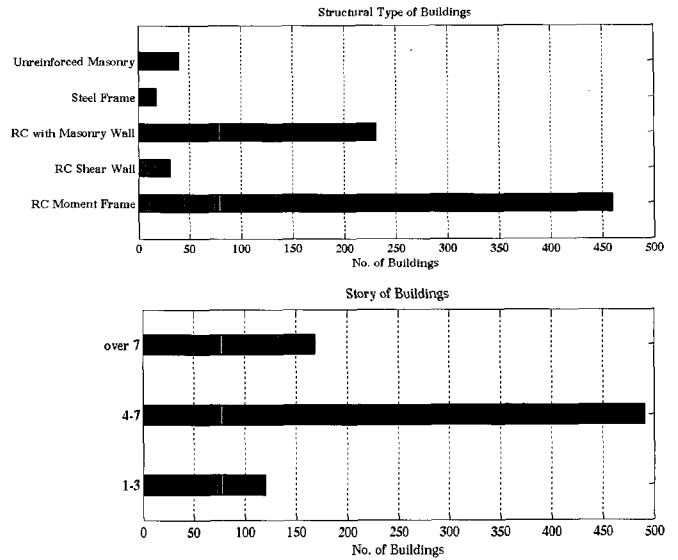


그림 7 구조 형태 및 층수별 도수 분포

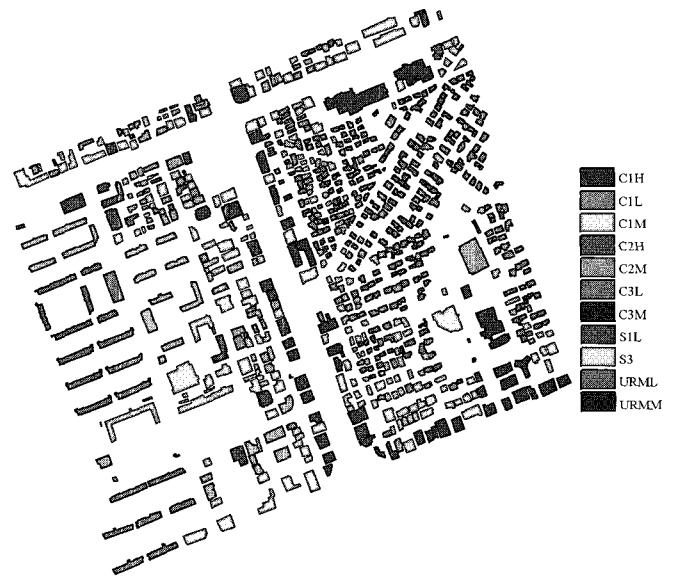


그림 8 구조 형태별 건축물 분포도

GIS 소프트웨어를 이용하여 도시한 결과이다.

모델 구역의 지층 분포를 파악하기 위하여 모델 구역 내 20여개의 시추조사 자료와 모델 구역 외곽부의 시추공 자료를 조사하였다. 이 자료는 각종 토목공사 및 지하수 개발을 위해 조사된 것으로 서울시 지하수 관리계획 기본조사보고서⁽¹⁷⁾에 정리된 것을 이용하였다. 이와 별도로 모델 구역 내 전반적인 표토층 깊이 분포를 얻기 위하여 모델 구역을 대상으로 지구물리 탐사 방법의 하나인 상시미동 측정을 실시하였다. 위에서 언급한 자료를 종합하여 내삽(interpolation)을 통해 최종적으로 격자화된 모델 구역의 표토층 깊이 분포를 계산하였다. GIS 데이터베이스 입력을 위하여 모델 구역에 해당하는 지역의 토양층 두께 분포를 TM 좌표계를 기준으로 추출하여 각 건물 중심에서 토양층 두께를 계산하였다. 그림 9는 모델 구역 내 토양층 두께 자료를 입력하여 GIS 소프트웨어를 이용하여 도시한 결과이다.

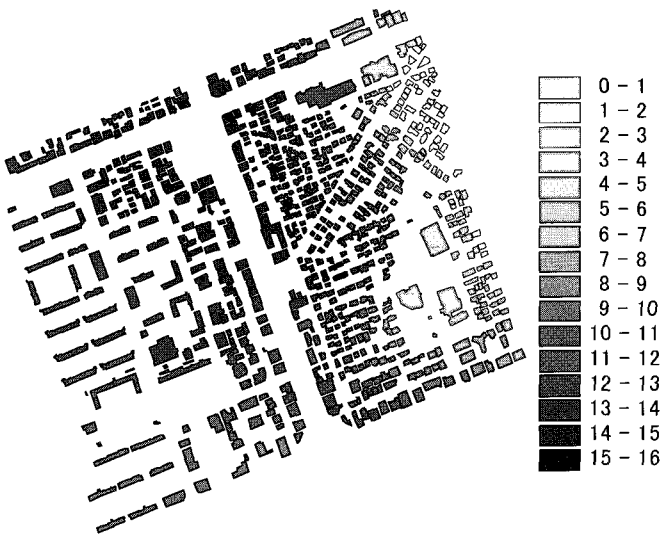


그림 9 표토층 깊이 분포

3.2 건축물 역량 곡선 생성

건축물 역량 곡선의 항복 역량점과 극한 역량점의 중앙값은 개별 건축물의 역량 곡선을 통계적으로 처리한 대푯값으로 이를 위해서는 많은 실험적, 이론적 연구가 필요하다. 우리나라의 경우 이에 관한 연구 자료가 부족하므로 이 연구에서는 HAZUS에서 제시한 값을 사용하였다. 이때 항복 역량점과 극한 역량점은 설계 등급에 따라 다른 값을 갖게 되는데 이 연구에서는 모델 구역 내 모든 구조 형태의 건물에 내진 설계 미적용 구조로 가정하였다.

3.3 가상 시나리오 지진 결정

가상 지진의 규모와 위치는 수도권 일대에서 발생한 역사지진 자료와 서울 지역의 선구조선도(Lineament map)를 이용하여 결정하였다. 역사 지진 자료 가운데 삼국사기에 따르면 서기 27년과 서기 89년에 지진이 일어나 집이 무너지고 사람이 죽었다는 피해 기록이 있다(표 2). 피해 기록을 근거로 MM 진도 8과 9로 평가할 수 있으며 이를 미 동부 지역의 규모-진도 관계식⁽¹⁸⁾ 사용하여 규모로 환산하면 5.7과 6.3에 이르는 강진에 해당한다. 이로부터 서울 지역이 지진에 대해 안전한 지역이 결코 아니며 빈번하진 않지만 강진이 발생할 가능성이 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 삼국사기에 기록된 규모 6.3의 역사 지진을 가상 시나리오 지진의 하나로 결정하였다.

서울지역의 단층의 크기와 위치를 가늠할 수 있는 선구조선도(그림 10)를 이용하여 또 다른 가상 시나리오 지진의

표 2 삼국사기 지진피해 기록⁽⁹⁾

발생 년도	기록	규모	진도
27년	땅이 흔들리고 사람이 사는 집들이 기울고 넘어졌다.	5.7	8
89년	땅이 흔들려 갈라지고 민옥이 함몰되어 죽은 사람이 많았다.	6.3	9

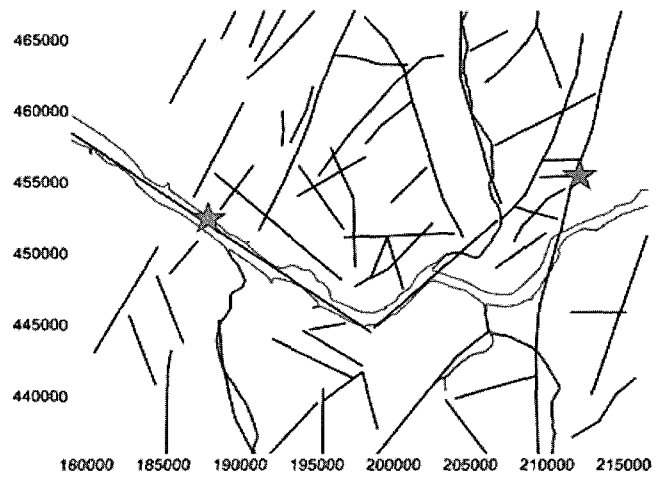


그림 10 서울지역의 선구조선도 (별표: 규모 5.0 가상지진 위치)

규모와 위치를 결정하였다. 선구조선도를 살펴보면 서울 동부지역을 남북으로 가로지르는 큰 단층과 서울 서부지역에서 한강 하류를 따라 생성된 큰 단층을 확인할 수 있다. 두 단층은 다른 선구조에 비해 길이가 길어 큰 규모의 지진이 일어날 가능성이 높으므로 가상 시나리오 지진으로 결정하였다. 이때 단층에서 발생 가능한 최대 지진 규모는 5.0으로 평가하였다. 역사지진 자료와 선구조선도를 바탕으로 결정한 가상 시나리오 지진의 목록을 표 3에 정리하였다.

표 3 가상 시나리오 지진

명칭	규모(Magnitude)	거리(km)	지진원
M6.3R27.3	6.3	27.3	남한산성 부근
M5.0R9.2	5.0	9.2	서울 동부 단층
M5.0R16.8	5.0	16.8	서울 서부 단층

3.4 암반 지반 운동 생성

모델 구역의 지진 피해 추정을 위한 지반 운동은 크게 두 가지 방법으로 구할 수 있다. 하나는 가상 시나리오 지진의 규모와 거리에 해당하거나 유사한 규모와 거리의 계측 지반 운동 군의 지반 운동을 이용하는 것이다. 이 방법은 계측 지반 운동을 그대로 이용하기 때문에 얻기 쉬운 장점이 있으나 우리나라 지반 운동의 특성을 고려할 수 없는 단점이 있다. 다른 하나는 가상 지진 군의 규모와 거리에 해당하는 지반 운동을 인공적으로 생성하는 방법이다. 이 방법은 우리나라 지반 운동의 특성을 고려할 수 있는 장점이 있으나 파형 및 지속 시간 등 실제 지진과의 특성을 충분히 재현할 수 없는 단점이 있다.

이 연구에서는 기존의 인공 지진 생성 방법 가운데 NUREG/CR-6728⁽¹⁹⁾에서 제시한 방법을 사용하였다. 이 방법은 계측된 강진 운동을 변형하여 인공 지진 운동을 생성하는 방법으로 그 과정 가운데 우리나라의 지진동 감쇄식의 가속도 스펙트럼을 이용함으로써 우리나라 지반 운동의 특성을 고려할 수 있다. NUREG/CR-6728에서 제시

한 지진 운동 생성 과정은 다음과 같다.

- (1) 가상 시나리오 지진의 규모와 거리에 대응하는 계측 지진 군을 선택한다. 이 연구에서는 NUREG/CR-6728에 수록된 계측 지진 운동 데이터베이스 가운데 가상 시나리오 지진의 규모와 거리에 대응하는 계측 지진 군을 선택하였다. 각 가상 시나리오 지진에 대응하는 계측 지진 군을 표 4에 정리하였다.

표 4 계측 지진 군

가상 시나리오 지진	계측 지진 군		
	명칭	규모(Magnitude)	거리(km)
M6.3R27.3	M6.5R010.050	6.0-7.0	10.0-50.0
M5.0R9.2	M5.5R000.050	5.0-6.0	0.0-50.0
M5.0R16.8	M5.5R000.050	5.0-6.0	0.0-50.0

- (2) 우리나라 지진동 감쇄식⁽²⁰⁾의 가속도 중앙값 스펙트럼($med(Sa, Kor)$) (그림 11)과 계측 지진 군의 응답 가속도 중앙값 스펙트럼($med(Sa, Rec)$)의 비(그림 12)를 계산한다.
- (3) 계측 지진 군에 속한 개별 지진 운동의 응답 가속도 스펙트럼에 2에서 계산한 스펙트럼의 비($med(Sa, Kor)/med(Sa, Rec)$)를 곱한다. 계산된 가속도 스펙트럼은 스펙트럴 일치 과정(spectral matching process)의 목표 스펙트럼(target spectrum)이 된다 (그림 13).
- (4) 최종적으로 계측 지진 군의 지진 운동에 대응하는 가상 지진 군의 인공 지진은 RASCAL⁽²¹⁾ 프로그램을 사용하여 생성한다. RASCAL 프로그램은 인공 지진의 응답 스펙트럼이 목표 스펙트럼에 일치할 때까지 보통 1-2회의 반복 계산을 수행한다.

앞에서 제시한 지진 운동 생성 과정으로 각 가상 시나리오 지진에 대하여 10개의 암반 지반 운동을 생성하였다. 그림 14는 계측 지진 군 M6.5R010.050의 San Fernando 지진(규모 6.6, 거리 24.2km)에 대응하는 가상 시나리오

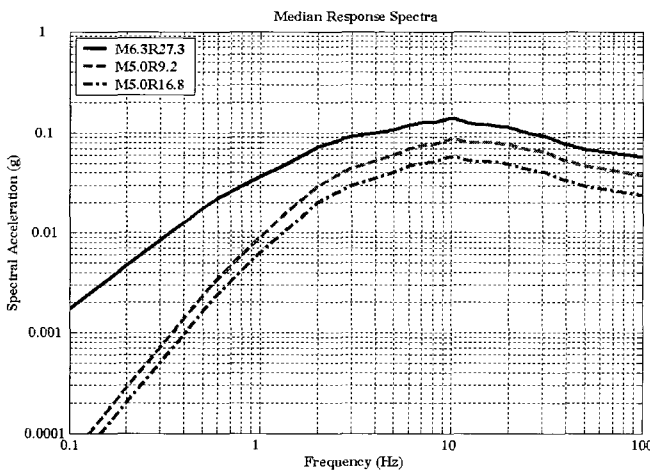


그림 11 우리나라 지진동 감쇄식의 가속도 중앙값 스펙트럼

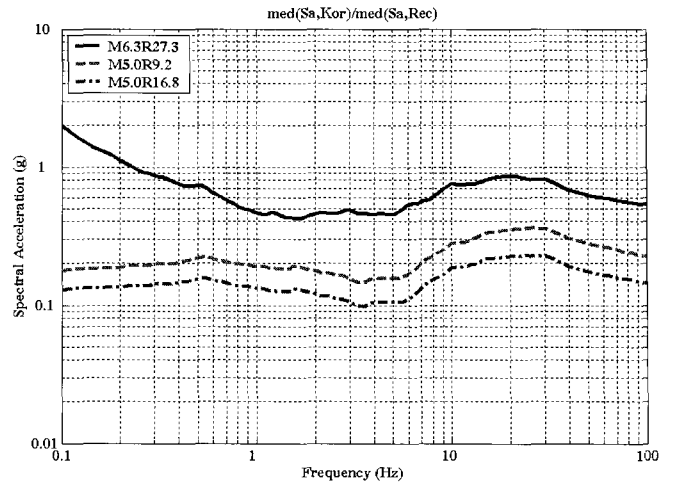


그림 12 우리나라 지진동 감쇄식의 가속도 중앙값 스펙트럼과 계측 지진 군의 응답 가속도 중앙값 스펙트럼의 비

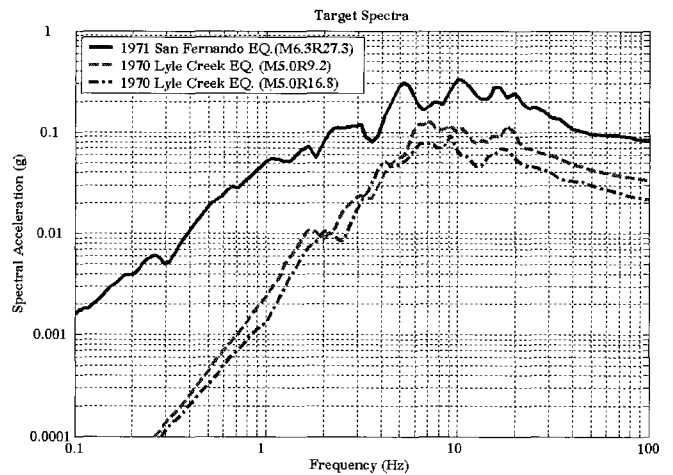


그림 13 목표 스펙트럼

M6.3R27.3의 인공 지진 가속도, 속도, 변위 시간 이력이다. 인공 지진 운동은 계측 지진 운동에 비하여 전체적으로 크기가 줄어들었으며 이는 그림 12의 스펙트럼의 비를 통해서도 알 수 있다.

생성한 인공 지진 운동의 응답 중앙값 스펙트럼을 우리나라 지진동 감쇄식의 가속도 중앙값 스펙트럼과 비교한 그림 15를 보면 두 곡선이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이 사실로부터 위 과정으로 생성한 인공 지진 운동은 해당 가상 시나리오 지진의 대표성을 갖는다고 말할 수 있다.

3.5 지반 응답 해석

모델 구역의 건축물은 건축물이 위치한 지반의 표토층에 의하여 증폭된 지진 하중을 경험하게 되므로 가상 시나리오 지진의 암반 지반 운동에 대하여 지반 응답해석을 수행하였다. 모델 구역 내 토양층 두께 값은 최소 0.26m, 최대 14.20m 사이에 분포하므로, 각각 5m, 10m, 15m의 두께의 토양층을 갖는 구역으로 나누었다(그림 16). 이때 각 구역은 깊이에 따라 풍화토(Weathered soil), 풍화암(Weathered rock), 기반암(Bed rock)의 3개의 지층으로

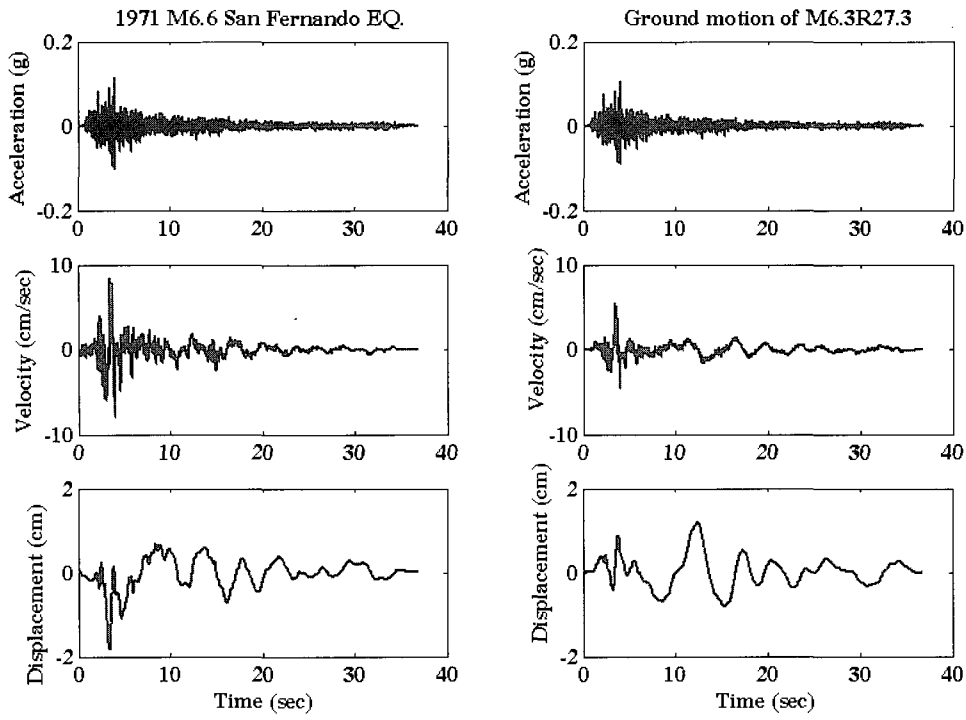


그림 14 1971년 San Fernando 지진과 가상 시나리오 지진 M6.3R27.3 인공 지반 운동의 가속도, 속도, 변위 시간이력

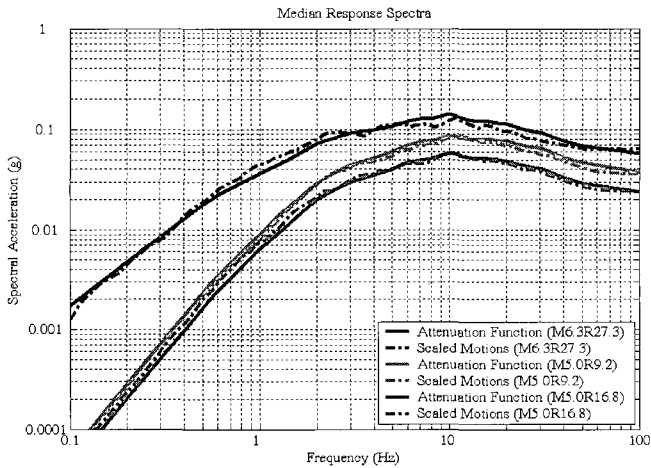


그림 15 가상 지진 균의 응답 가속도 중앙값 스펙트럼과 우리나라 지진동 감쇠식의 가속도 중앙값 스펙트럼 비교

구분하여 모델링하였다(그림 17).

지반 응답 해석은 등가선형 해석법(equivalent linear analysis)에 기초한 지반 응답 해석 프로그램 SHAKE91⁽²²⁾을 사용하여 수행하였다. 이때 각 지층의 물성치는 표 5와 같고 전단계수와 감쇠비의 비선형 관계는 그림 18과 같다. 그림 19에 나타난 각 구역의 대표적 전달 함수를 보면 2.0~3.0Hz 구간에서 표토층에 의한 증폭이 일어나

표 5 지층의 단위 중량 및 전단파 속도

	단위중량 (kN/m ³)	전단파 속도 (m/sec)
풍화토	17.50	330
풍화암	19.0	550
기반암	21.0	1000



그림 16 표토층 두께에 따른 구역 구분

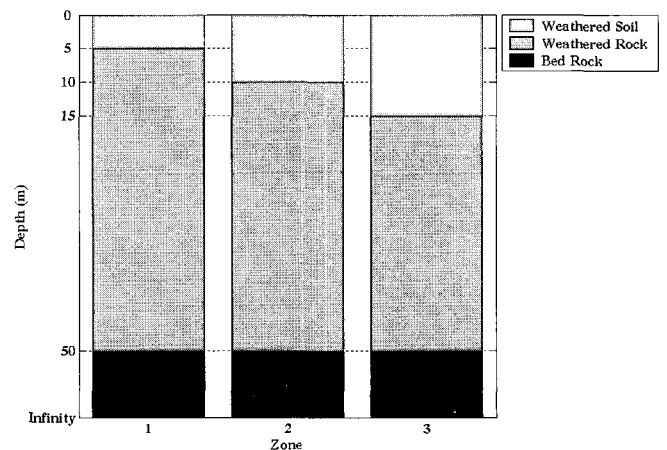


그림 17 모델 구역 각 구역별 지층 모델링

며 토양층의 두께가 두꺼울수록 저주파(장주기) 성분의 증폭비가 커짐을 알 수 있다. 그림 20은 각 구역의 표토층과 암반에서의 응답 가속도 스펙트럼의 중앙값을 비교한 것으로 토양층의 두께가 가장 두꺼운 구역 3이 건축물의 응답에 영향을 미치는 구간에서 가장 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

3.6 소요 스펙트럼 생성

지반 응답 해석을 통하여 얻은 각 가상 시나리오 지진의 각 구역별 응답 스펙트럼의 중앙값으로부터 $S_a(T=0.3\text{sec})$, $S_a(T=1.0\text{sec})$ 두 값을 구하여 소요 스펙트럼을 생성하였다. 그림 21은 각 가상 시나리오 지진의 각 구역별 $S_a(T=0.3\text{sec})$, $S_a(T=1.0\text{sec})$ 을 나타낸 것으로 전달 함수(그림 19)의 증폭 구간 2.0~3.0Hz (0.33~0.5sec)에 가까운 $S_a(T=0.3\text{sec})$ 값의 증가는 50% 이상으로 약 15% 증가한 $S_a(T=1.0\text{sec})$ 의 경우보다 컸다.

3.7 건축물 피해 확률 계산

건축물의 피해 확률은 각 시나리오 지진의 소요 스펙트럼과 각 구조 형태별 건축물의 성능 곡선을 사용하여 역량 스펙트럼 방법으로 구한 스펙트럴 변위를 식 (1)의 취약도 함수에 대입하여 구하였다. 취약도 함수의 두 파라미터 값은 지진 피해로부터 경험적으로 얻거나 실험과 수치 해석을 통하여 얻게 되는데 우리나라의 경우 이에 대한 연구 자료가 부족하므로 이 연구에서는 HAZUS에서 제시한 값을 사용하였다. 이때 모델 구역의 모든 구조 형태의 건축물은 내진 설계 미적용 구조로 가정하였으며 건축물의 피해 상태는 경미(slight), 반파 (moderate), 광범위(extensive), 완파(complete)의 4단계로 나누었다.

세 가지 가상 시나리오 지진에 대하여 모델 구역의 건축물별 피해 확률을 계산한 결과 예상대로 M6.3R27.3에 의한 피해가 가장 컸다. 가상 시나리오 지진 M6.3R27.3에 의하여 건축물이 반파 이상의 피해를 입을 확률은 모

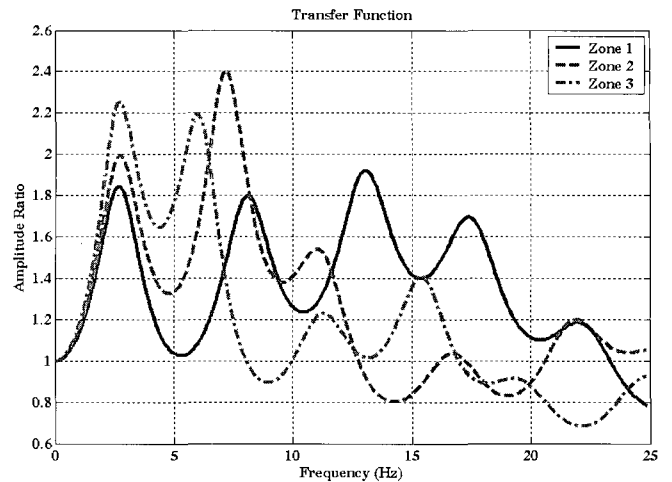
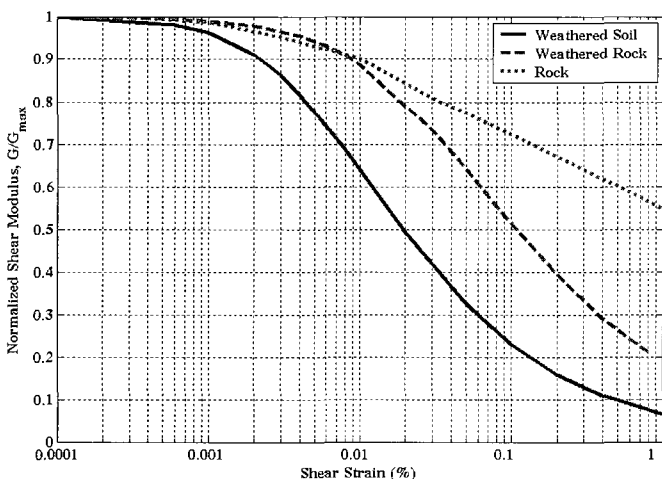


그림 19 각 구역의 대표적 전달함수

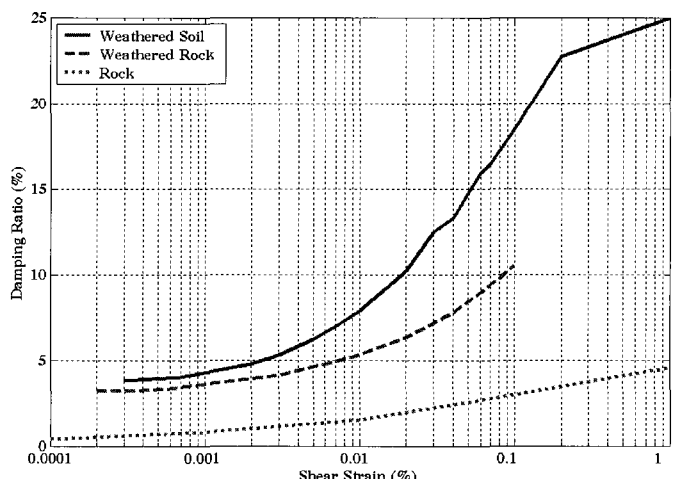
든 형태의 건축물에 대해서 50% 이하였으나 M5.0R9.2와 M5.0R16.8의 경우 각각 10%, 5% 내외로 낮았다. 그림 22는 가상 시나리오 지진 M6.3R27.3에 의하여 각 손상 상태를 초과할 확률을 구조 형태와 구역별로 도시한 것이다. 구조 형태별 피해 확률을 살펴보면 비보강 조적조 (URML, URMM), 조적 채움벽이 있는 철근콘크리트 구조(C3L), 경량철골조(S3) 건축물이 상대적으로 피해 확률이 높았으며 동일한 구조 형태의 경우 저층 건축물이 전반적으로 피해 확률이 높았다.

건축물 피해 확률을 구역별로 비교하면 표토층 두께에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 표토층이 가장 두꺼운 구역 3에서 피해 확률은 표토층의 두께가 가장 얇은 구역 1에 비하여 약 10% 이상 큰 값을 보였다. 이 결과로부터 표토층에서 증폭된 지반 운동이 피해에 미치는 영향을 확인 할 수 있으며, 지진 피해 추정 시 지반의 증폭 효과를 반드시 고려해야 하는 것을 알 수 있다.

가상 시나리오 지진 M6.3R27.3에 의하여 건축물이 특정 피해 상태에 이를 확률을 식 (2)를 사용하여 계산하고 그 결과를 그림 23에 나타냈다. 이 결과를 통하여 시나리오 지진



(a) 전단계수-전단변형률 관계



(b) 감쇠비-전단변형률 관계

그림 18 전단계수-전단변형률 관계 및 감쇠비-전단변형률 관계

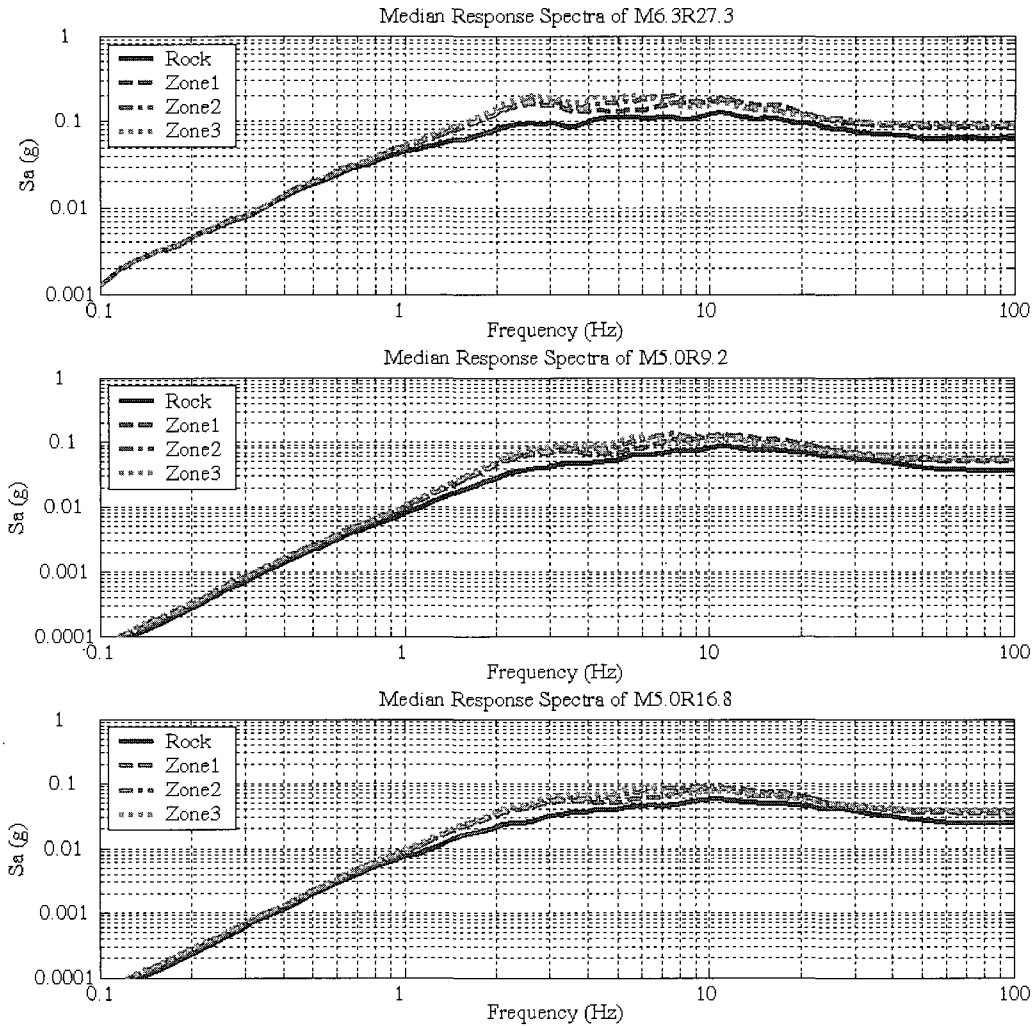


그림 20 가상 시나리오 지진 응답 가속도 중간값 스펙트럼

M6.3R27.3 발생 시 구역 3에 위치한 비보강 조적조 건물의 경우 100채 가운데 20채~30채 정도가 경미한 피해를, 10채~20채 정도가 반파의 피해를, 10채 미만이 광범위한 피해를, 5채 미만이 완파의 피해를 입을 것으로 예상 할 수 있다.

지금까지 수행한 모델 구역의 피해 추정 결과를 검증하기 위하여 가상 시나리오 지진 M6.3R27.3에 의한 건축물

피해를 역사 지진 피해(표 2)와 비교해 보았다. 역사 기록을 근거로 평가한 진도는 진앙 진도이므로 진앙으로부터

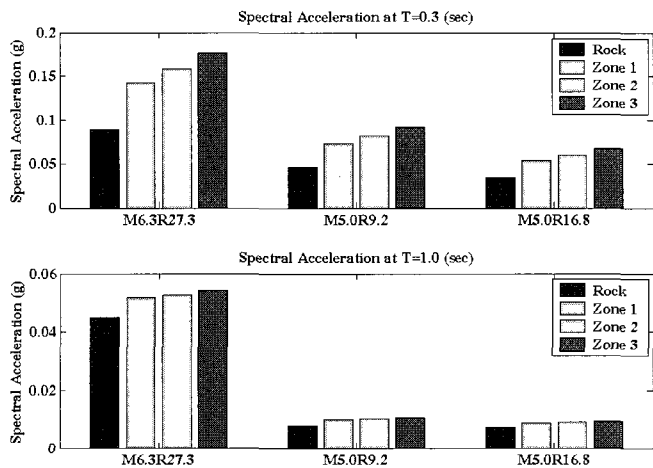


그림 21 가상 시나리오 지진의 구역별 $S_a(T=0.3\text{sec})$ 와 $S_a(T=1.0\text{sec})$ 값

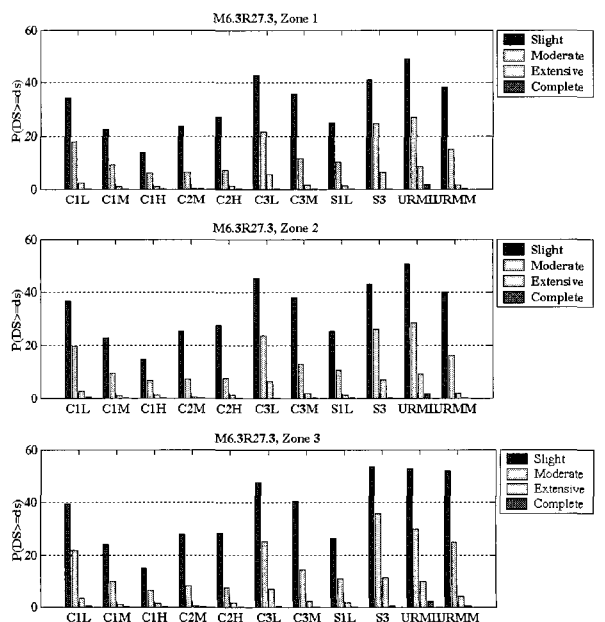


그림 22 가상 시나리오 지진 M6.3R27.3에 의하여 각 손상 상태를 초과할 확률

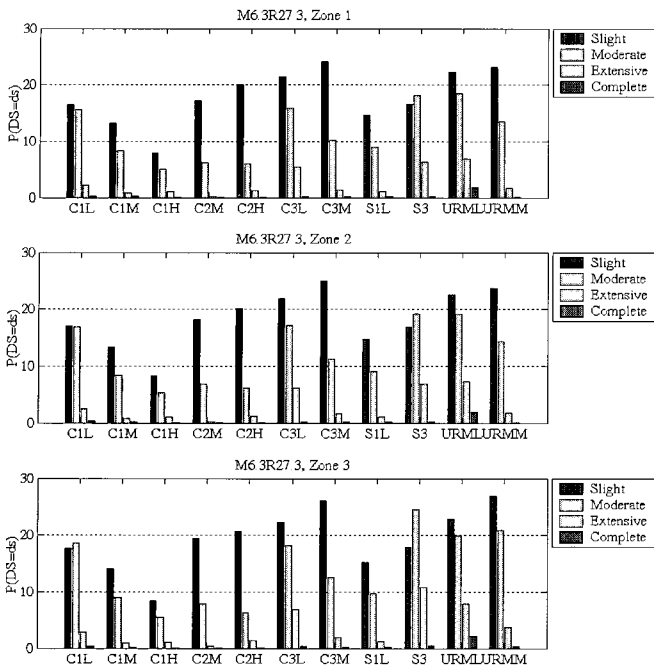


그림 23 가상 시나리오 지진 M6.3R27.3에 의하여 각 손상 상태에 이를 확률

27.3km 떨어진 모델 구역의 진도는 이보다 낮을 것으로 예상할 수 있다. 영국의 진도 감쇄식⁽²³⁾(식 3)을 이용하여 거리에 따른 진도를 계산하면 진원의 깊이를 10km로 가정하였을 때 규모 6.3의 경우 진앙에서의 진도는 9로 계산되며 27.3km 떨어진 모델 구역에서의 진도는 7 또는 8로 평가할 수 있다.

$$I = 3.32 + 1.44 M - 3.34 \log(R) \quad (3)$$

여기에서 I: 진도, M: 규모, R: 진원거리를 나타낸다.

가상 시나리오 지진 M6.3R27.3에 의한 모델 구역 건축물의 전반적 피해는 낮은 수준의 건물에 균열이 발생하고 파손이나 붕괴 등의 피해가 일어나는 진도 7 또는 8의 기술과 비교적 일치함을 알 수 있다.

3.8 GIS를 이용한 건축물 피해 확률 도시

가상 시나리오 지진에 대하여 각 구조 형태별로 계산한 피해 확률을 피해 상태별로 GIS 데이터베이스에 입력하고 GIS 소프트웨어를 이용하여 모델 구역 내 건축물의 피해 확률을 도시하였다. 그림 24와 25는 가상 시나리오 지진 M6.3R27.3에 의하여 모델 구역의 건물이 경미(slight)와 반파(moderate) 이상의 피해를 입을 확률을 2차원 평면 지도의 형태로 도시한 것이다. 전반적 피해 상황을 살펴보면 저층의 비보강 조적조가 위치한 주택 밀집 지역에서 피해가 광범위하게 발생하고 도로 주변에 위치한 RC 모멘트 프레임 구조의 빌딩과 RC 전단벽 구조의 아파트에서는 상대적으로 피해가 적은 것을 알 수 있다.

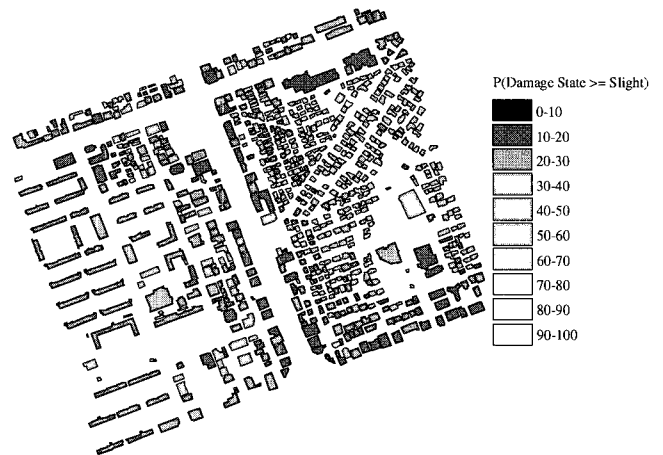


그림 24 가상 시나리오 지진 M6.3R27.3에 의하여 경미 이상의 피해를 입을 확률

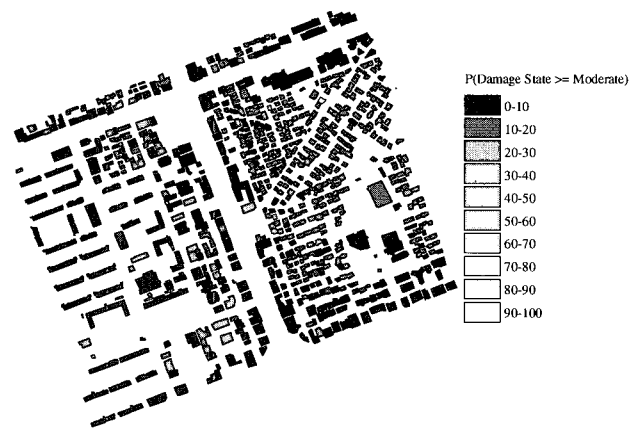


그림 25 가상 시나리오 지진 M6.3R27.3에 의하여 반파 이상의 피해를 입을 확률

4. 결 론

서울시 모델 구역을 대상으로 건축물의 지진 피해 확률을 계산하고 GIS 데이터베이스를 활용하여 모델 구역 내 건축물의 전반적 피해 정도를 추정하였다. 모델 구역 내 건축물이 가상 시나리오 지진에 의하여 반파 이상의 손상을 입을 확률은 50%이하로 낮았다. 다만 상대적으로 비보강 조적조(URML, URMM), 조적 채움벽이 있는 철근 콘크리트 구조(C3L), 경량철골조(S3) 등의 건물과 저층 건축물은 피해를 입을 확률이 높았다. 또한 건축물의 피해 확률은 지반의 토양층 두께에 비례하여 증가하는 경향을 보였다. 이는 지진 피해 추정 시 지반의 증폭 효과를 반드시 고려해야 하는 것을 의미한다.

이 연구는 지진 피해 추정 기법을 대도시에 실제 적용하여 지진 피해의 체계적 대응에 필요한 정보를 얻을 수 있음을 보여주었다는 데 그 의의가 있다. 그러나 이 연구에서 활용한 역량 곡선 및 취약도 함수의 파라미터 값들은 우리나라 건축물과 우리나라 지진 특성에 근거한 값이 아니므로 추후 연구를 통해 개선할 필요가 있다. 또한 이 연구는 모델 구역 1km×1km 내 건축물을 중심으로 지진 피해 추정을 실시한 것으로 보다 실제적인 지진 피해 추

정을 위해서는 다양한 구조물을 포함하는 더 넓은 지역을 대상으로 확장시켜야 하며 지진에 의한 구조물 피해 이외에 이로 인한 경제적, 사회적 손실도 함께 추정해야 할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 서울시 지진대응모델 개발 연구의 일환으로 수행되었으며 서울시정개발연구원과 서울대학교 지진공학 연구센터의 연구비 지원에 감사드리는 바이다.

참고 문헌

1. King, S. A., Kiremidjian, A. S., Basoz, N., Law, K., Vucetic M., Doroudian, M., Olson, R. A., Eidinger, J. M., Goettel, K. A. and Horner G., "Methodologies for Evaluating the Socio-Economic Consequences of Large Earthquakes," *Earthquake Spectra*, Vol 13, No. 4, 1997, pp. 565-584.
2. Whitman, R. V., Anagnos, T., Kircher, C. A., Lagorio, H. J., Lawson, R. S. and Schneider, P., "Development of a National Earthquake Loss Estimation Methodology," *Earthquake Spectra*, Vol 13, No. 4, 1997, pp. 643-661.
3. Kircher, C. A., Nassar, A. A., Kustu, O. and Holmes, W. T., "Development of Building Damage Functions for Earthquake Loss Estimation," *Earthquake Spectra*, Vol 13, No. 4, 1997, pp. 663-682.
4. Brookshire, D. S., Chang, S. E., Cochrane, H., Olson, R. A., Rose A. and Steenson, J., "Direct and Indirect Economic Losses from Earthquake Damage," *Earthquake Spectra*, Vol 13, No. 4, 1997, pp. 683-701.
5. Kircher C. A., Reitherman, R. K., Whitman, R. V. and Arnold, C., "Estimation of Earthquake Losses to Buildings," *Earthquake Spectra*, Vol 13, No. 4, 1997, pp. 703-720.
6. NIBS, *Earthquake Loss Estimation Technology-HAZUS, User's Manual*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1997.
7. Werner, S. D., Lavoie, J.-P., Eitzel, C., Cho, S., Huyck, C., Ghosh, S., Eguchi, R. T., Taylor C. E. and Moore II., J. E., *REDARS 1: Demonstration Software for Seismic Risk Analysis of Highway Systems*, Research Progress and Accomplishments 2001-2003, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2003.

8. Nakamura, Y., "Research and Development of Intelligent Earthquake Disaster Prevention System UrEDAS and HERAS," *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, Japan Society of Civil Engineers, No.531/ I-34, 1996, pp. 1-33.
9. 서울특별시, "서울시 지진대응모델 개발", 1999.
10. 정병표, Zama, S., Hosokawa, M., and Hatayama, K., "서울시의 지진피해 평가시스템의 구축에 대한 연구 (I. DEM자료를 이용한 지형분류와 지반중폭도의 추정)", 한국지진공학회 학술발표회 논문집, Vol 8, No.1, 2004, 44-51.
11. 정병표, Zama, S., Hosokawa, M., and Hatayama, K., "서울시의 지진피해 평가시스템의 구축에 대한 연구 (2. 서울시의 지진피해 평가시스템의 구축)", 한국지진공학회 학술발표회 논문집, Vol 8, No.1, 2004, 52-58.
12. 국립방재연구소, "지진재해정보시스템 도입방안 연구", NIDP-2003-06, 2003.
13. Federal Emergency Management Agency, "1997 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures," *Report No. FEMA-302*, Washington, D.C., 1997.
14. Freeman, S.A., "Development and Use of Capacity Spectrum Method," *Proceedings of 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, Washington, USA, Paper No. 269, 1998.
15. NIBS, *Earthquake Loss Estimation Technology-HAZUS, Technical Manual*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1997.
16. ESRI, *Using ArcView GIS*, Environment System Research Institute, Inc., New York Street, Redlands, California, 1996.
17. 서울특별시, "서울특별시 지하수 관리계획 기본조사보고서", 1996.
18. Nuttli, O. W. and Herrman, R. B., "State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States, Credible Earthquakes for the Central United States," *Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Misc. Paper S-73-1, Report 12*, Vicksburg, Mississippi, 1978.
19. McGuire, R. K., Silva, W. J., and Costantino, C. J., *Technical Basis for Revision of Regulatory Guidance on Design Ground Motions: Hazard- and Risk-consistent Ground Motion Spectra Guidelines*, NUREG/CR-6728, 2001.
20. 이종립, 장천중, 최원학, 연관희, 박동희, "원전부지 지진안전성 정밀평가 기술개발", 01NS17 최종보고서, 한국수력원자력(주), 한전전력연구원, 2004.

21. Silva, W. J. and Lee, K., "WES RASCAL Code for Synthesizing Earthquake Ground Motions," *US Army Engineer Waterways Experiment Station, Report 24, Misc. Paper S-73-1, 1987.*
22. Idriss, I. M. and Sun, J. I., *User's manual for SHAKE91 : a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits*, Center for Geotechnical Modeling, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, 1993.
23. Musson, R. M. W., "A catalogue of British earthquakes," *BGS Technical Report No WL/94/04, 1994.*