

HAZUS틀을 사용한 서울시 강남구의 건축물 지진피해에 따른 직접적 경제손실 예측

Earthquake Direct Economic Loss Estimation of Building Structures in Gangnam-Gu District in Seoul Using HAZUS Framework

정기현^{1)*} · 이한선¹⁾ · 권오성²⁾ · 황경란¹⁾

Jeong, Gi Hyun^{1)*} · Lee, Han Seon¹⁾ · Kwon, Oh-Sung²⁾ · Hwang, Kyung Ran¹⁾

¹⁾고려대학교 건축사회환경공학부, ²⁾토론토대학교 토목공학과

¹⁾School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, ²⁾Department of Civil Engineering, University of Toronto

/ A B S T R A C T /

For earthquake loss estimation of building structures in Gangnam-Gu district in Seoul, three scenario earthquakes were selected by comparison of the response spectra of these scenario earthquakes with the design spectrum in Korean Building Code (KBC 2009), and then direct losses of the building structures in the Gangnam-Gu district under each scenario earthquake are estimated. The following conclusions are drawn from the results of damage and loss in the second scenario earthquake, which has a magnitude = 6.5 and epicentral distance = 15 km: (1) The ratio of building stocks undergoing the extensive and complete damage level is 40.0% of the total. (2) The amount of direct economic losses appears approximately 19 trillion won, which is 1.2% of the national GDP of Korea. (3) About 25% of high-rise (over 10-story) RC building wall structures, were inflicted with the damage exceeding moderate level, when compared to 60% of low-rise building structures. (4) From the economical view point, the main loss, approximately 50%, was caused by the damage in the high-rise RC wall building structures.

Key words: Korea, Earthquake Scenario, Loss Estimation, Damage

1. 서론

서울시가 연구용역을 통해 서울시 건축물에 대한 건축 구조 안전 현황을 조사한 결과(2011년 기준), 전체 서울시 건축물 중 약 93%가 건축 구조 안전 부적합 건물인 것으로 나타났으며, 그 중 주거용 건물은 94.4%가 내진 성능을 갖추고 있지 않았다. 현재 우리나라 전체 인구의 약 50%가 수도권(서울, 경기, 인천)에 거주하고 있으며, 특히 서울시의 인구밀도는 16,343 명/km²(우리나라 전체 국토의 인구밀도 503명/km²의 약 32배 수준)으로 수도권 지진 발생 시 큰 피해가 우려된다.

해외에서는 2008년 쓰촨성 지진(규모 8.0)으로 인해, 69,225 명이 사망하였고 379,640 명이 부상당하였으며 17,939 명이 실종되는 등 큰 인명피해가 발생하였다[1]. 2010년 칠레 지진(규모 8.8) 시, 521 명의 사상자가 발생하였고 30 만 채 이상의 건물이 크고 작은 피해를 입거나 붕괴되었다

[2]. 2011년 뉴질랜드 크라이스트처치 지진(규모 6.2) 시, 강진동뿐만 아니라 지진과 함께 발생하는 지반의 액상화 및 산사태에 의해 181 명의 사상자가 발생하였고, 건축물의 피해가 상당하였다[3]. 이 당시 주거용 건물에 의한 경제적 피해가 NZ \$13 billion(한화 10.4조 원), 상업용 건물에 의한 피해가 NZ \$4 billion(3.2 조 원), 사회기반구조물에 의한 피해가 NZ \$3 billion(2.73 조 원)으로 총 NZ \$20 billion(16 조 원)의 금전적 피해가 발생했으며, 이는 뉴질랜드 GDP의 10%에 해당한다고 보고되었다[3].

강진 지역에서는 이러한 피해를 줄이기 위해 기존에 발생한 지진으로 인한 피해를 분석하고 이에 따른 재난 대응 제도를 마련할 수 있지만, 우리나라와 같이 지진으로 인한 피해 경험이 거의 전무할 경우 지진 시나리오 분석을 통해 지진 피해를 예측하여 대비할 수 있다.

지진피해예측 연구는 지진 시나리오를 선정하고, 해당 지진에 의한 피해를 예측, 분석하는 분야로 나눌 수 있다. 이는 “우리나라에는 어떠한 지진이 발생할 것인가?”와 “그러한 지진이 발생했을 때, 무슨 일이 벌어질 것인가?” 같은 질문에 대답할 수 있으며, 실제로 시나리오 연구는 정책 및 제도 마련의 의사 결정에 활용되고 있다. 현재 미국의 방재기관인 FEMA

*Corresponding author: Jeong, Gi Hyun

E-mail: ghaposcale@korea.ac.kr

(Received May 20, 2016; Revised July 6, 2016; Accepted July 11, 2016)

(Federal Emergency Management Agency)에서는 오랜 기간 동안 지진 뿐 아니라 허리케인과 홍수에 대한 시나리오 연구를 진행해 왔으며, 그 결과의 하나로 HAZUS(Hazard U.S.)[4] 프로그램을 개발하여 각종 재난에 대한 피해를 예측할 수 있도록 하였다. 우리나라 또한 국민안전처에서 ‘지진 재해대응시스템’[5]을 개발하여 지진으로 인한 피해를 예측할 수 있도록 시스템을 마련하였다. 그러나 ‘지진재해대응시스템’은 소프트웨어가 외부에 공개되어 있지 않으며, 소프트웨어의 내부에 접근하더라도 시설물의 개수 및 위치, 구조적 특성과 같은 정보를 수정하여 실행하는 것은 불가능하다. 또한 피해 예측 결과가 인명피해와 시설물의 손상 및 파괴 수를 추정할 수는 있지만, 작·간접 경제적 손실 피해액 산출은 아직 불가하기 때문에 사회적인 피해수준을 예측하지 못한다.

따라서 본 연구에서는 서울시에서 인구밀도가 높은 곳 중 하나인 강남구에 발생 가능한 지진 시나리오를 선정하고, 이에 따른 서울시 강남구의 건축물 손상수준 및 경제적 피해를 예측하고자 한다. 본 연구에서는 지진피해예측을 위해 위에서 언급한 HAZUS의 분석기법을 활용하였다. HAZUS는 미국의 시설물과 지반 및 지진학적 특징을 표준화하여 개략적인 피해수준을 예측하기에 우리나라에 적용할 경우 실제 피해수준과 다소 상이할 수는 있지만, 본 연구에서는 국내 시설물의 지진피해를 예측할 수 있는 최신 기법의 분석 및 적용을 주요 목적으로 하였다.

2. 지진 피해 예측기법

지진에 의한 피해 지표는 시설물의 파손과 구조물의 균열 및 파단 등과 같은 물리적인 피해(Damage)와 그로 인한 경제적, 시간적, 인적 손실(Loss)로 표현할 수 있다. 또한 주진(Main shock)에 의한 직접적인 피해와 지진과 함께 동반하는 화재, 산사태, 쓰나미, 지반의 액상화 및 시설물 기능 정지에 따른 사회·경제적 파급효과 등에 의한 간접적인 피해로 나뉜다. 본 연구에서는 직접적인 지진 피해로서 연구대상지역의 건축물의 물리적 피해와 그에 따른 경제적 손실을 예측하였다.

직접적인 지진 피해를 예측하는 과정은 Fig. 1과 같다. 본 연구에서 대상 지역은 서울시 강남구로 결정하였으며, 대상 지역 건축물의 개수를 조사하

고 구조형식과 용도에 따라 분류하였다. 대상 지역의 지반조건은 건물의 위치마다 다를 수 있으나 분석을 단순화하기 위하여 모두 S_B 지반으로 가정하였다. 지진시나리오는 건축구조기준(KBC2009)[6]의 설계스펙트럼에 상응하는 지진의 규모와 진원거리를 추정함으로써 결정하였다. HAZUS[4]에서는 건축물을 구조형식과 구조물 전체 높이에 따라 일반화하여 역량곡선을 제시하였으며, 그에 따른 취약도 곡선을 제공하고 있다. 본 연구에서는 우리나라 건축물의 내진성능과 손상수준의 정의가 HAZUS에서 제공하는 건축물 내진성능 및 손상수준과 동일하다는 가정 하에 분석을 수행하였다.

3. 지진 시나리오 선정

Lumantarna et al.[7]은 중약진지역에서 규모 6 이상, 진원거리 10 km 이내의 지진이 일어날 확률은 매우 희박하다고 서술하였다. 이에 근거하여 본 연구에서는 지진 시나리오 범위를 지진규모 5.0~6.5, 진원거리 10~45 km로 결정하였다. 우리나라 환경을 반영하여 조남대와 박창업[8]이 개발한 감쇠식(Eq. (1))이며 우리나라의 넓은 영역에서 보편적으로 사용할 수 있도록 개발된 감쇠식이다. 그러나 감쇠상수가 기존 국내연구결과에 비해 크기 때문에 상대적으로 작은 지반가속도값이 예측되는 특징을 지닌다. Eq. (1)을 이용해 진원거리와 규모 변화에 따라 등재해도 스펙트럼을 작성하고, 이를 건축구조설계기준[6]의 설계스펙트럼(2400년 재현주기 지진의 2/3 수준)과 비교하여 스펙트럼 형태가 유사한 지진 시나리오를 선정하였다.

$$\ln A = C_0 + C_1 R + C_2 \ln R - \ln[\min(R, 100)] - \frac{1}{2} \ln[\max(R, 100)] \quad (1)$$

식(1)에서 A는 암반(S_B 지반)의 가속도(cm/sec^2), R은 진원거리(km), C는 계수이다. 계수 C는 지진 규모와 관련하여 규정되며, Eq. (2)로 계산된다.

$$C_k = \xi_0^k + \xi_1^k (M_w - 6) + \xi_2^k (M_w - 6)^2 + \xi_3^k (M_w - 6)^3, \quad k = 0, 1, 2 \quad (2)$$

Eq. (2)에서의 계수 ξ 는 스펙트럼 가속도의 주파수 또는 PGA, PGV에 따라 주어진다. Eq. (1)과 Eq. (2)를 이용하여 규모가 5.0, 5.5, 6.0, 6.5일 때와 진원거리가 15, 20, 30, 45 km일 때 지진 시나리오의 등재해도 스펙트럼을 작성하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에는 지진 시나리오의 스펙트럼 뿐 아니라 우리나라 건축물의 설계 응답 스펙트럼(지역계수 0.22, S_B 지반)을 같이 작성하여 비교하였다.

전체 지진 시나리오 중에서 설계 응답스펙트럼과 가장 유사한 세 가지 지진을 Table 1과 같이 선정하였다. 본 연구에서 시나리오 1(S.1)과 2(S.2)의 진원거리는 15 km로 진원 깊이 10 km 가정 시 진원거리 11 km이며, 강남구의 중심에서 약 11 km 거리에 위치한 지역 중 남한산성에서 지진이 발생하는 것으로 가정하였다. 시나리오 3(S.3)은 약 20 km 거리에 위치한 용인시 시청 부근으로 가정하였다. 시나리오 1(S.1, $M_w=6, R=15$ km)의 스펙트럼은 설계스펙트럼이 설계스펙트럼의 가속도 값보다 전 주기에서 작게 나타나지만 규모 6의 지진 중에서 가장 큰 응답을 보이며, 시나리오 2(S.2, $M_w=6.5, R=15$ km)는 설계스펙트럼보다 0.7초 이후 가속도 응답이

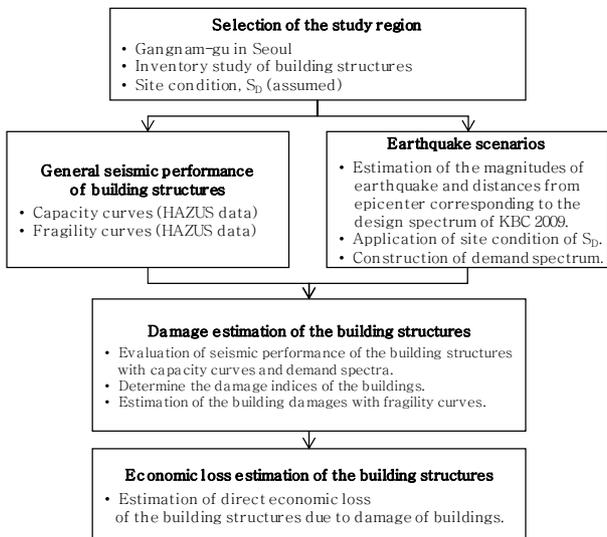


Fig. 1. HAZUS framework for direct economic loss estimation

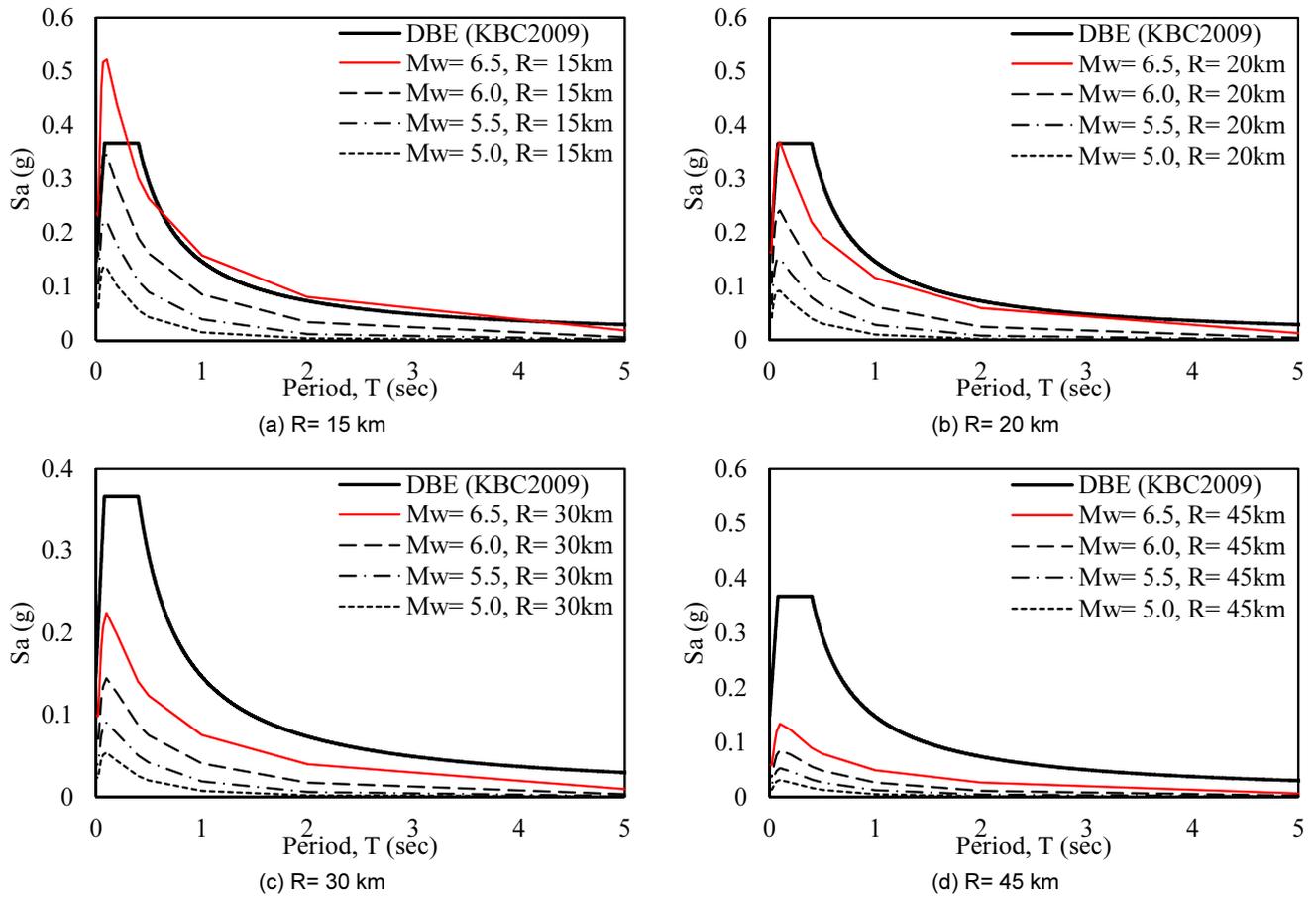


Fig. 2. Comparison scenario earthquake spectrums with design response spectrum of KBC2009[8]

Table 1. Selected earthquake scenarios corresponding design earthquake in Korea

	Magnitude, M_w	Hypocentral dist., R (km)
Scenario 1 (S.1)	6.0	15
Scenario 2 (S.2)	6.5	15
Scenario 3 (S.3)	6.5	20

약간 크고, 시나리오3(S.3, $M_w=6.5$, $R=20$ km)은 1초 이후 장주기 영역의 가속도 응답이 설계스펙트럼과 유사하게 나타났다.

4. 지진 시나리오에 의한 건축물의 구조적 피해

미국 FEMA에서는 지진, 홍수, 태풍, 허리케인 등 재해로 인한 피해를 예측하기 위해 HAZUS프로그램[4]을 개발하였다. HAZUS의 방법론에 따르면 시설물 별 지진발생과 함께 동반하는 범람(Inundation), 화재(Fire), 잔해(Debris), 인명피해(Casualties), 대피(Shelter), 직/간접적 경제피해(Indirect/direct Economic loss) 등을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 HAZUS의 절차 및 방법론을 바탕으로 본 연구의 범위인 건축물 손상으로 인한 직접적인 경제피해를 예측하기 위해 MATLAB 프로그램(The MathWorks)으로 수치예측모델을 수립하였다.

강남구 지역의 남북/동서의 거리가 10.9 km, 9.89 km 이므로 위하여

강남구를 행정동에 따라 14개 구역으로 분할하였으며, 진앙거리를 진원지(S.1과 S.2=남한산성, S.3=용인시 부근)로부터 행정동의 중심까지로 가정하였으며, 모든 건물은 각 행정동의 중심에 위치하는 것으로 가정하였다. 또한 각 행정동의 지반조건은 모두 S_b 지반 특성을 지닌 것으로 가정하였다. Table 2와 3에는 강남구의 각 동에 위치한 건물을 조사한 정보수집 결과를 건물의 구조형식과 용도에 따라 분류하여 정리하였다. 건축물의 정보수집은 국가통계포털[9] 및 강남구 주민센터[10]의 통계자료를 바탕으로 실시되었으며, 부동산 및 지도 웹서비스를 추가적으로 활용하여 건물의 위치 및 개수를 재확인하였다. 총 4명의 인원이 2개월 동안 정보수집을 실시하였으며, 구조형식 분류체계, 위치, 개수를 조사하였다. Table 2에서 구조형식 분류는 ‘구조형식+ 건물높이’에 따라 표현이 되었으며, 구조형식은 S1 철골 모멘트골조, C1 콘크리트 모멘트골조, C2 콘크리트 벽식 구조, C3 조적 채움벽이 있는 콘크리트 모멘트 골조를 의미하며, 높이는 L(Low), M(Mid), H(High) 세 가지 수준으로 각각 5층 이하(L), 6~10층(M), 11층 이상(H)을 의미한다. 구조형식에 따른 건축물 분포는 저층 콘크리트 건물의 벽식 구조(C2L), 모멘트골조(C1L), 조적 채움벽이 있는 모멘트골조(C3L) 순으로 많았다. 고층건물(H) 중 약 87%가 벽식 구조(C2H)였으며, 이는 강남구 내에 고층 아파트 단지가 밀집되어 있기 때문으로 판단된다. HAZUS[4]에서 건물의 용도는 주거용 건물로서 단독주택(RES1), 조립식 주택(RES2), 다가주택(RES3), 숙박기관(RES4), 기숙사(RES5), 양로원(RES6), 상업용 건물로서 소매상점(COM1), 도매상점(COM2), 비전문 서비스센터

Table 2. Building inventory classified by building type

	S1L	S1M	S1H	C1L	C1M	C1H	C2L	C2M	C2H	C3L	Total
Apgujeong	0	0	0	9	0	1	23	2	131	3	169
Cheongdam	12	4	0	293	34	10	427	70	78	370	1298
Sinsa	6	3	1	762	41	2	591	2	7	310	1725
Nonhyeon	1	0	0	682	152	9	1813	8	30	1061	3756
Samseong	0	0	3	426	188	3	932	4	112	235	1903
Daechi	2	0	0	501	103	47	893	5	184	335	2070
Yeoksam	0	0	1	808	303	168	1936	0	103	1007	4326
Dogok	0	1	1	344	12	17	266	0	147	0	788
Gaepo	1	0	0	236	2	2	872	0	521	214	1848
Irwon	0	0	0	143	0	0	448	0	195	237	1023
Suseo	0	0	0	50	0	4	45	0	82	0	181
Jagok	0	0	0	0	0	0	206	0	76	0	282
Segok	0	0	0	3	0	0	224	0	82	0	309
Yulhyeon	2	0	0	5	0	0	175	0	32	0	214
Total	24	8	6	4262	835	263	8851	91	1780	3772	19892

Table 3. Building inventory classified by general occupancy

	Residential	Commercial	Religion	Government	Education	Total
Apgujeong	153	5	1	2	8	169
Cheongdam	749	532	7	2	8	1298
Sinsa	603	1110	8	1	3	1725
Nonhyeon	2745	1001	6	2	2	3756
Samseong	1084	801	5	10	3	1903
Daechi	1404	650	5	3	8	2070
Yeoksam	2903	1391	10	9	13	4326
Dogok	402	372	3	2	9	788
Gaepo	1591	233	4	8	12	1848
Irwon	873	141	4	0	5	1023
Suseo	120	47	2	7	5	181
Jagok	280	0	0	0	2	282
Segok	302	3	1	0	3	309
Yulhyeon	206	5	0	3	0	214
Total	13415	6291	56	49	81	19892

(COM3), 사무실(COM4), 은행(COM5), 종합병원(COM6), 병원 및 요양원(COM7), 음식점(COM8), 극장 및 영화관(COM9), 주차장(COM10), 산업 시설로서 대규모 및 소규모 공장(IND1, IND2), 식·약품 및 화학공장(IND3), 금속 및 광물 공장(IND4), 첨단기술 공장(IND5), 공사현장 사무소(IND6), 농업용 건물로서 농장(AGR1), 종교 건물로서 종교 및 비영리 단체의 건물(REL1), 정부기관으로서 행정사무소(GOV1), 경찰서 및 소방서와 같은 응급대응기관(GOV2), 교육시설로서 초·중·고등학교(EDU1), 대학교(EDU2)로 세분화 되어 있다. Table 3에는 주거, 상업, 종교, 정부기관, 교육시설로 크게 분류하여 건물의 분포를 나타내었다. 정보수집결과에 따르면 70%의 건물이 주거용, 나머지는 상업용 건물이었고, 종교, 정부, 교육시설은 극소수 존재하였다. Fig. 3은 Table 2와 3의 용도 및 구조형식별 시설물 인벤토리 분포를 나타낸다.

4.1 손상수준의 정의

건물의 손상수준은 HAZUS의 정의를 그대로 사용하였다. 손상수준(Damage state; Limit state)은 4단계로 손상정도가 미세 손상(Slight damage), 일반 손상(Moderate damage), 심각한 손상(Extensive damage), 완전 파괴(Complete damage)로 정의하였다. 손상수준은 건물의 구조형식에 따라 그 정의의 상세를 달리하고 있지만, 대체적으로, 미세손상은 주요 구조부재 단부에 미세균열이 발견되거나 접합부에 작은 변형이 일어났을 경우를 의미하며, 일반 손상은 주요 구조부재 단부에 큰 균열이 발생하거나, 철골조의 경우 일부 부재가 항복함을 의미하며, 심각한 손상은 대부분의 주요 구조부재가 항복함을 의미하며, 완전 파괴는 구조물이 무너지거나 그렇지 아니더라도 즉시 붕괴될 가능성이 높은 상태임을 뜻한다.

4.2 손상수준 도달 확률 및 피해 분포

지진 발생 시, 구조물이 정의된 손상수준에 도달할 확률을 구하기 위해서는 내진성능평가 및 지진 취약도 분석을 수행하여야 한다. 내진성능평가는 본 논문 2장에서 작성된 지진 시나리오를 ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum) 형태로 작성한 후에, 구조물의 역량스펙트럼 (Capacity spectrum)을 이용하여 성능점(Performance Point)를 구함으로서 수행하였다. 성능점은 S_d (Spectral displacement)와 S_a (Spectral Acceleration)로 표현되며, 구조물 및 비구조요소의 취약도 함수를 통해 두 개의 스펙트럼 값에 상응하는 손상 확률을 구할 수 있다.

본 연구에서는 우리나라 건축물의 내진특성이 HAZUS에서 정의하는 건축물 구조 형식 및 이에 따른 역량스펙트럼, 취약도 곡선과 동일한 것으로 가정하였으며 이를 지진시나리오 분석에 사용하였다. HAZUS의 역량스펙트럼과 취약도 곡선은 구조물에 적용된 내진설계 적용 여부에 따라 High-, Moderate-, Low-, Pre-code로 나누어 제공한다. 내진설계 등급은 UBC[11]의 지역분류에 따라 정의되며, High-code는 지진지역4(지역계수 0.4), Moderate-code는 지진지역 2B(지역계수 0.2), Low-code는 지진지역 1(지역계수 0.075), Pre-code는 내진설계가 수행되지 않은 경우로 정의되어 있다. 서울시에 위치한 건축물 중 약 93%가 내진성능을 확보하고 있지 못하다는 점을 감안하여 강남구 시설물을 Pre-code(비내진)로 가정하였다. 그러나 고층 건물(11층 이상)의 경우 대부분 아파트이며, 내진설계 기준이 제정되기 전에 축조된 아파트의 대개는 재건축 등으로 멸실되어 다른 건물들에 비해 비교적 내진설계 확보 비율이 높다. 이러한 점을 감안하여 강남구의 고층건물 모두를 Low-code로 가정하였다. Fig. 4는 HAZUS에서 지진 시나리오를 일반화된 ADRS로 작성하는 방법을 보여준다. 가속도 일정구간은 감쇠식을 통해 얻어진 단주기($T=0.3$ 초)일 때 스펙트럼 가속도 값으로 지정된다. 속도일정구간은 주기가 1초일 때 스펙트럼 가속도 값을 기준으로 $1/T$ 값과 비례하는 곡선으로 작성된다. 가속도 일정구간의 직선과 속도일정구간의 곡선이 교차하는 지점이 'Corner period' T_{AV} 가 된다. 속도일정구간에서 변위일정구간으로 바뀌는 지점인 T_{VD} 는 Eq. (3)을 통해 구할 수 있으며, 변위일정구간의 스펙트럼 가속도 값은 $1/T^2$ 과 비례한 값을 지닌다.

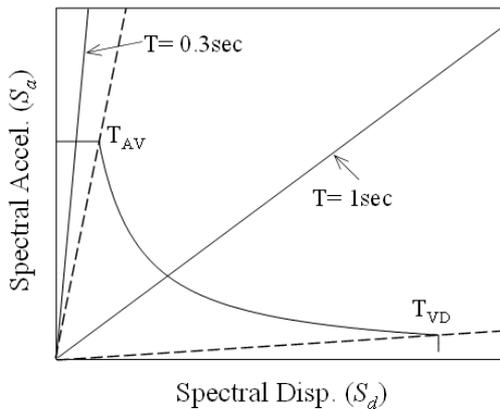


Fig. 4. Standardized Acceleration-Displacement Response Spectrum (ADRS) in HAZUS

$$T_{VD} = 10^{\frac{M-5}{2}} \quad (3)$$

이를 통해 작성된 스펙트럼은 S_B 지반의 ADRS이며, S_D 지반의 스펙트럼을 작성하기 위해 HAZUS의 미국 중-동부 지역(CEUS)을 대상으로 한 지반증폭계수를 적용하였고 S_D 지반의 경우 KBC2009에서 제시하는 증폭계수와 동일한 값을 지닌다.

Fig. 5는 성능점 산정 방법을 시나리오 2($M_w=6.5$, $R=15$ km)에 대해 압구정동에 위치한 고층 콘크리트 벽식 건물을 예시로 보여준다. 일반화된 ADRS 형태의 지진 시나리오 스펙트럼은 가속도영역의 감소계수 R_A 와 속도영역 감소계수 R_V 로 크기가 축소된다. 구조물의 역량스펙트럼이 감소된 시나리오 지진 스펙트럼과의 교차점이 성능점이 되며, 정확한 성능점을 계산하기 위해서는 반복적인 계산이 필요하다. Eq. (4)와 Eq. (5)는 유효감쇠율(β_{eff})로 표현된 R_A 와 R_V 의 식이다.

$$R_A = 2.12 / (3.21 - 0.68 \ln(100\beta_{eff})) \quad (4)$$

$$R_V = 1.65 / (2.31 - 0.41 \ln(100\beta_{eff})) \quad (5)$$

유효감쇠율(β_{eff})은 탄성 감쇠율 5%에 시간이력감쇠 β_H 를 더한 값으로 β_H 는 Eq. (6)과 같이 정의한다.

$$\beta_H = \kappa \left(\frac{Area}{2\pi DA} \right) \quad (6)$$

Eq. (6)에서 κ 는 HAZUS에서 구조형식에 따라 정의하는 감쇠계수이며, Area는 이력곡선의 전체 면적이고, D와 A는 최대 변위 및 가속도 응답을 의미한다. Fig. 6은 C2H 건물의 스펙트럼 변위에 따른 각각의 손상수준별 취약도 함수를 보여준다. 산정된 성능점 값은 $S_d=9.51$ cm, $S_a=0.14$ g으로, 취약도 곡선 상에서 $S_d=9.51$ cm에 상응하는 확률을 각 손상수준 별로 구할 수 있다. 이때 확률은 정의된 손상수준에 도달하거나 그 수준을 넘어설 확률을 의미한다. Fig. 6에서 N, S, M, E, C는 비손상(None damaged), 미세 손상(Slight damage), 일반 손상(Moderate damage), 심각한 손상(Extensive damage), 완전 파괴(Complete damage)를 의미한다. 1개 동

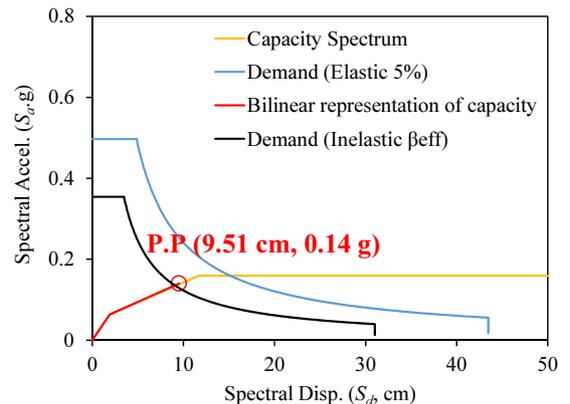


Fig. 5. Calculation of performance point for building type C2H

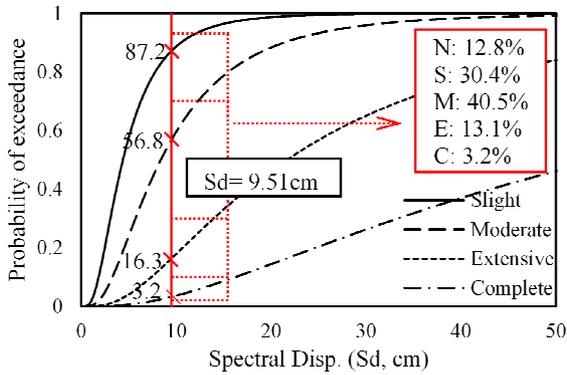


Fig. 6. Fragility curves for calculation of the probability of reaching damage states (Apgujeong-Dong, C2H, Mw=6.5, R=15 km)

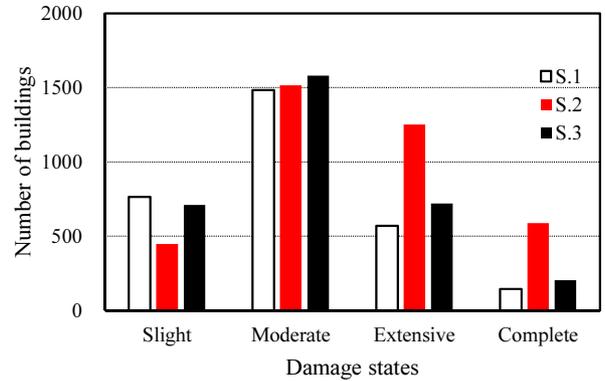
Table 4. Relationship of probabilities and ratios of exceeding damage states (Apgujeong-Dong, C2H, Mw=6.5, R=15 km)

Damage state	Probability (P)		Ratio (R)
None	-	$1 - P_S = R_N$	12.8
Slight	87.2	$P_S - P_M = R_S$	30.4
Moderated	56.8	$P_M - P_E = R_M$	40.5
Extensive	16.3	$P_E - P_C = R_E$	13.1
Complete	3.2	$P_C = R_C$	3.2

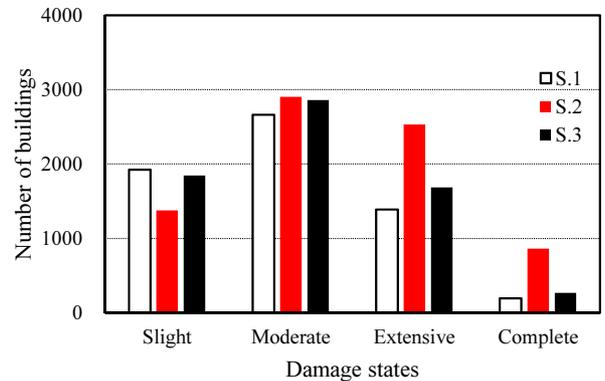
Table 5. Probabilities of reaching damage states located in Apgujeong-Dong

Building type	S.1 (M _w 6.0, Dist.15 km)			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
C1L	0.190	0.321	0.099	0.021
C1H	0.247	0.289	0.081	0.018
C2L	0.228	0.277	0.119	0.011
C2M	0.295	0.247	0.029	0.008
C2H	0.327	0.183	0.030	0.005
C3L	0.223	0.282	0.173	0.023
S.2 (M _w 6.5, Dist.15 km)				
C1L	0.129	0.379	0.249	0.093
C1H	0.158	0.406	0.267	0.113
C2L	0.179	0.339	0.254	0.060
C2M	0.241	0.422	0.132	0.044
C2H	0.303	0.405	0.131	0.032
C3L	0.147	0.303	0.305	0.130
S.3 (M _w 6.5, Dist.20 km)				
C1L	0.175	0.364	0.150	0.039
C1H	0.249	0.352	0.124	0.032
C2L	0.223	0.301	0.148	0.017
C2M	0.295	0.320	0.054	0.016
C2H	0.354	0.266	0.055	0.010
C3L	0.209	0.301	0.212	0.039

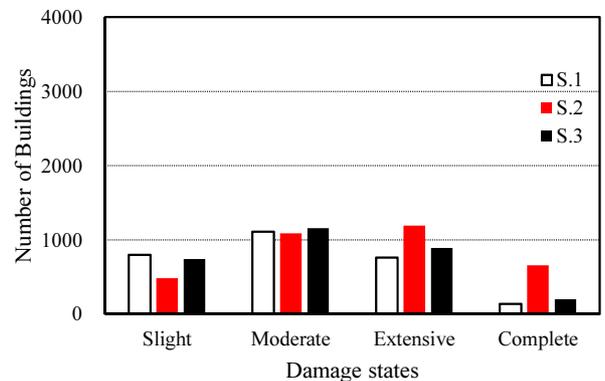
의 건물을 대상으로 정의된 손상수준을 넘어설 확률로써 피해정도를 평가할 수 있지만, 다수의 건물을 대상으로 할 때는 비율의 개념이 필요하다. 특정한 건물이 완전 파괴 수준에 도달한 경우는 하위 손상수준에 해당하는 미세 손상, 일반 손상, 심각한 손상 수준을 이미 넘어선 상태이나, 피해 수준을 표현 시에는 완전 파괴라 칭한다. 이러한 개념을 적용하여 완전 파괴에 도달할 확률에서 심각한 손상 도달 확률을 제외하여 완전 파괴 손상수준의 비율을



(a) C1L



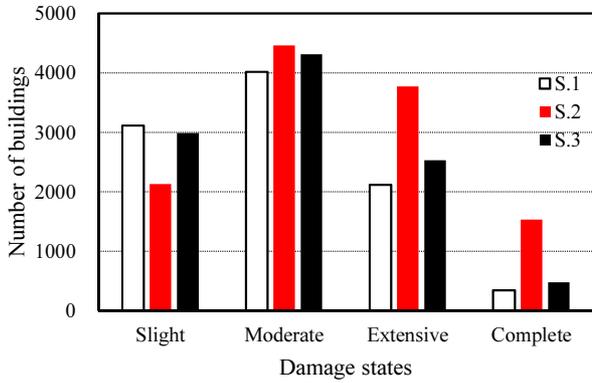
(b) C2L



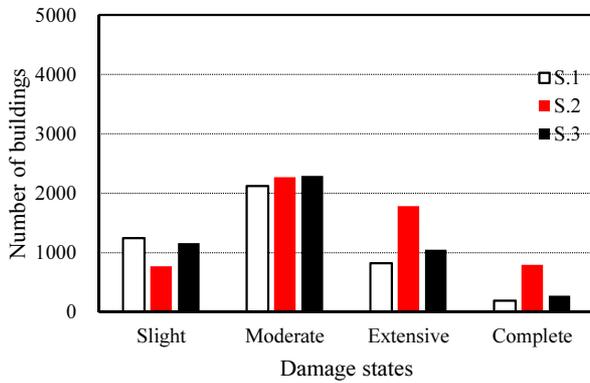
(c) C3L

Fig. 7. Number of damaged building with C1L(a), C2L(b), C3L(c) type according to each damage state

산정함이 마땅하다. Table 4는 손상수준 초과확률과 손상수준 비율에 대한 관계를 보여준다. 이러한 방식으로 시나리오 1(S.1), 2(S.2), 3(S.3)에 대해 각 행정동에 위치한 건물들의 성능점을 각기 계산하였다. 성능점 계산 시 사용된 지진스펙트럼은 시나리오에 따라 남한산성 또는 용인시에서 지진 발생 시 각 행정동까지의 거리에 따른 감쇠를 적용한 스펙트럼을 사용하였다. 이 때 모든 건축물은 위치하고 있는 행정동의 중심에 위치하는 것으로 가정하였다. 각 행정동에 위치한 건축물의 성능점 계산 결과를 통해 각 손상수준에 도달한 건물들의 비율을 구하였으며, 대표적으로 압구정동의 결과는 Table 5에 주어졌다. 시나리오 분석 결과, 고층 건물보다 저층 건물에서 피해 수준이 큰 것으로 나타났다. Fig. 7 (a), (b), (c)는 강남구에 위치한 저층 콘크리트 건물의 피해 분포를 보여주며, Fig. 8 (a), (b)는 건물 중 가장 많



(a) Residential building



(b) Commercial building

Fig. 8. Number of damaged building with residential (a) and commercial (b) occupancies according to each damage state

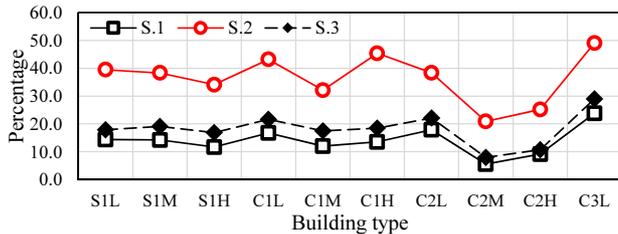


Fig. 9. Ratios of exceeding extensive damage states

은 용도로 사용된 주거와 상업용 건물의 피해 분포를 나타낸다.

Fig. 9는 3 가지 지진 시나리오에서 전체 건물에서 심각한 손상 이상의 피해를 입은 건물의 비율을 나타낸다. 대체적으로 규모 6.5 진원거리 15 km 에 해당하는 지진 시나리오(S.2)에 의한 피해가 컸다. 구조형식 별로는 첫 번째 시나리오(S.1, 규모 6.0 진원거리 15 km)에서 저층 철골 모멘트골조 (S1L), 저층 콘크리트 모멘트골조(C1L)와 채움벽이 있는 저층 콘크리트 모멘트 골조(C3L)의 건물들 중 각각 14.4%, 16.7%, 23.8%가 심각한 손상 이상의 피해를 입었고, 두 번째 시나리오(S.2, 규모 6.5 진원거리 15 km)에서는 저층 철골 모멘트골조(S1L), 저층 및 고층 콘크리트 모멘트골조(C1L, C1H), 채움벽이 있는 저층 콘크리트 모멘트 골조(C3L) 건물 중 39.5%, 43.2%, 45.4%, 49.1%가 심각한 손상 이상의 구조적 피해를 입었다.

Fig. 10은 강남구에 위치한 건물에 가장 큰 피해를 입힌 두 번째 시나리오(S.2)에서 구조형식별 피해수준 분포를 나타낸다. 콘크리트 벽식 건물의

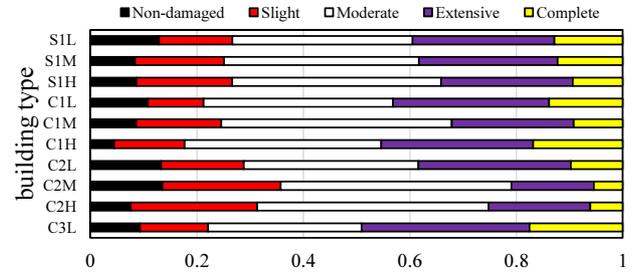


Fig. 10. Ratios of reaching damage states classified by each building type in scenario 2.

경우 심각한 손상 수준 이상의 피해를 입은 건물의 비율이 중층 건물은 31.1%, 고층 건물은 27.8%로 저층 건물에 비해 피해의 정도가 경미하였다. 저층 콘크리트 건물(C1L, C2L, C3L)과 저층 철골 모멘트골조(S1L)의 경우 심각한 손상 수준 이상의 피해를 입은 건물의 비율이 각각 39.5%, 43.2%, 38.4%, 49.1%로 중층 및 고층 건물에 비해서 피해 비율이 7~22% 가 더 크게 나타났다.

5. 직접적인 경제피해 예측

본 연구에서는 직접적인 경제적 손실을 지진 발생 시 구조물 손상으로 인한 보수비용 및 재건비용의 합으로 정의하였다. 보수비용은 재건비용의 비율로서 계산되는데 이는 건물의 손상 수준에 따라 결정된다. Eq. (7)과 Eq. (8)은 보수비용 계산식이다.

$$CS_{ds,i} = \sum_i BRC_i \times PMBTSTR_{ds,i} \times RCS_{ds,i} \quad (7)$$

$$CS_i = \sum_{ds} CS_{ds,i} \quad (8)$$

Eq. (6), Eq. (7)에서 $CS_{ds,i}$ 는 손상수준(ds ; damage state)에 도달한 i 용도의 수리비용(Cost of structural damage)을, BRC_i 는 i 용도 건물의 재건 비용(Building Replacement Cost)을, $PMBTSTR_{ds,i}$ 는 i 용도의 건물이 해당 손상을 입은 비율(the Probability of the Model Building Type)을 의미하며, $RCS_{ds,i}$ 는 i 용도의 건물이 정의된 손상수준에 도달했을 때 재건 비용의 일정 비율(보수비용/재건비용)로 표현되는 구조물 보수계수이며, HAZUS의 데이터를 사용하였다. 재건비용은 강남구 건물의 현물가치 (2015. 9. 기준)[12]를 조사하여 사용하였다. Eq. (9)는 Eq. (7), Eq. (8)로 시나리오 2(S.2)일 때 압구정동에 위치한 C2L 구조형식 주거용 건물의 보수비용 계산 예시를 보여준다.

$$\begin{aligned} & \text{C2L·주거(RE33C) 건물의 보수비용} \\ &= 25\text{억원}(1\text{개동 재건비용}) \times 17(\text{건물 개수}) \\ & \times (0.179 \times 0.003(S) + 0.339 \times 0.014(M) \\ & + 0.254 \times 0.069(E) + 0.060 \times 0.138(C)) \\ & (\text{각 손상수준 분포비율} \times \text{구조물 보수계수}) \\ &= 13.2\text{억원} \end{aligned} \quad (9)$$

Table 6. Ratios of replacement cost of each building type to located in Apgujeong-Dong

Scenario 1											
Building type	Occupancies										
	RES3B	RES3C	RES3D	RES3F	COM1	COM2	COM4	REL1	GOV1	GOV2	EDU1
C1L	-	-	-	-	0.0547	0.0569	0.0483	0.0490	0.0471	0.0452	-
C1H	-	-	-	-	-	0.0386	-	-	-	-	-
C2L	-	0.0464	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2M	-	-	0.0204	-	-	-	-	-	-	-	-
C2H	-	-	-	0.0138	-	-	-	-	-	-	-
C3L	0.0520	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0544
Scenario 2											
Building type	Occupancies										
	RES3B	RES3C	RES3D	RES3F	COM1	COM2	COM4	REL1	GOV1	GOV2	EDU1
C1L	-	-	-	-	0.1354	0.1408	0.1200	0.1213	0.1172	0.1130	-
C1H	-	-	-	-	-	0.1266	-	-	-	-	-
C2L	-	0.1095	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2M	-	-	0.0597	-	-	-	-	-	-	-	-
C2H	-	-	-	0.0471	-	-	-	-	-	-	-
C3L	0.1271	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1305
Scenario 3											
Building type	Occupancies										
	RES3B	RES3C	RES3D	RES3F	COM1	COM2	COM4	REL1	GOV1	GOV2	EDU1
C1L	-	-	-	-	0.0792	0.0824	0.0699	0.0708	0.0683	0.0656	-
C1H	-	-	-	-	-	0.0569	-	-	-	-	-
C2L	-	0.0576	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2M	-	-	0.0305	-	-	-	-	-	-	-	-
C2H	-	-	-	0.0222	-	-	-	-	-	-	-
C3L	0.0676	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0705

이와 동일하게 Eq. (7), Eq. (8)로 비구조요소의 직접적인 경제손실을 예측할 수 있다. HAZUS의 비구조요소 취약도 곡선으로 손상수준에 따른 초과확률을 계산할 수 있으며, 그래서 계산한 각 손상수준에 상응하는 비율과 비구조요소 보수 계수를 이용하여 경제손실을 예측하였다. 비구조요소의 보수비용은 창문, 가구, 바닥, 천장 등 비구조요소의 파손으로 인한 손실을 의미한다.

Table 6에는 압구정동에 위치한 건물들의 구조 및 비구조요소 손상으로 인한 직접적 경제피해를 재건비용의 비율로서 나타내어 용도별로 정리하였으며, 값이 1이 되면 해당 용도의 건물은 모두 재건돼야 함을 의미한다. C2L-RES3C 건물을 예시로, 해당 건물 유형의 전체 재건비용이 425억 원(25억, 17개 건물)으로 구조물 피해로 인한 경제손실 6.06억 원, 비구조요소 피해로 인한 경제손실 13.7억 원이 나타났으며, 재건비용에 대한 경제손실 비율이 0.0464(19.7억 원/425억 원)로 나타났다. Table 6에서 RES3(B~F)는 한 건물에 B: 3~4, C: 5~9, D: 10~19, E: 20~49, F: 50이상의 세대가 있는 다가구 주택을 의미하며 그 외 용도는 3장에서 언급한 바와 같다. COM2 용도의 C1L 건물의 손실액은 지진 시나리오에 따라 건물 재건비용의 5.69%(S.1), 14.08%(S.2), 8.24%(S.3)로 타 건물에 비해 가장 크게 나타났으며, RES3F 용도의 C2H 건물(아파트)의 경우 1.38%(S.1), 4.71%(S.2), 2.22%(S.3)로 가장 작았다.

Fig. 11은 강남구 전체의 직접적 경제피해 예측 결과를 나타낸다. Fig. 11(a)를 통해 고층 콘크리트 벽식 건물(C2H)의 경제적 손실이 3.8조 원(S.1), 9.1조 원(S.2), 4.4조 원(S.3)으로 각 시나리오별로 강남구 전체 경제손실의 47.3%, 47.0%, 44.8%에 해당하였다. Fig. 11(b)는 건물 용도에 따른 직접적 경제피해 분포를 나타낸다. 전체 피해 중 70.3%(S.1), 68.5%

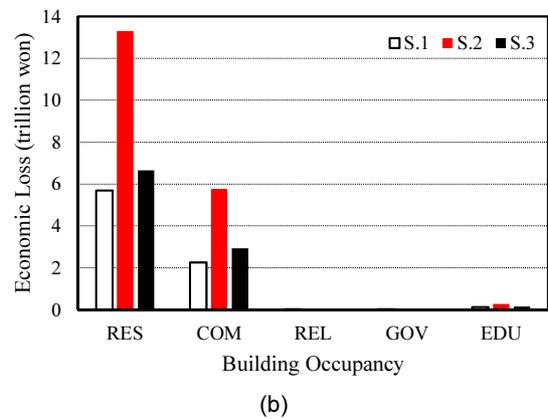
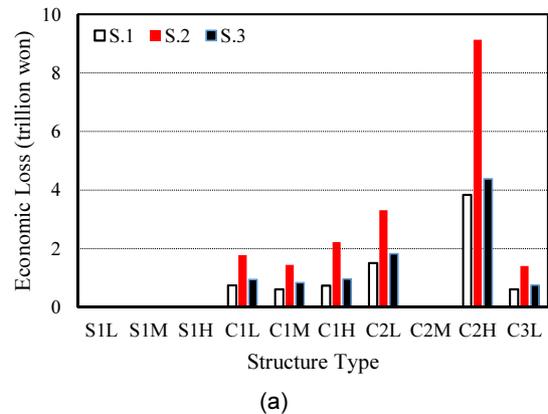


Fig. 11. Direct economic losses for (a) building type and (b) occupancy classification

Table 7. Direct economic losses (unit: trillion won)

Scenario	Structural	Non-Structural	Total
S.1	3.4 (42.6%)	4.6 (57.4%)	8
S.2	7.9 (41.0%)	11 (59.0%)	19
S.3	4.1 (42.3%)	5.6 (57.7%)	9.7

(S.2), 68.1%(S.3)가 주거용 건물, 전체의 27.8%(S.1), 29.7%(S.2), 30.0%(S.3)가 상업용 건물의 손실로 나타났다. 그 외 용도의 건물로 인한 경제손실은 2%수준이었다.

Table 7에는 직접적인 경제피해 예측 결과를 정리하였다. 시나리오 1(S.1, $M_w = 6.0$, $R=15$ km)에 의한 강남구의 직접적 경제피해는 8조 원(US\$ 6.96 billion)으로 구조물 피해로 인한 경제적 손실이 3.4 조 원(US\$ 2.97 billion), 비구조물피해로 인한 경제적 손실이 4.6 조 원(US\$ 3.99 billion)이었다. 시나리오 2(S.2, $M_w = 6.5$, $R=15$ km)에 의한 피해는 19 조 원(US\$ 16.7 billion)으로 구조물 피해로 인한 경제손실이 7.9 조 원(US\$ 6.83 billion), 비구조물피해로 인한 손실이 11 조 원(US\$ 9.85 billion)이었다. 시나리오 3(S.3, $M_w = 6.5$, $R=20$ km)에 의한 피해는 9.7 조 원(US\$ 8.39 billion)으로 구조물피해로 인한 손실 4.1 조 원(US\$ 3.55 billion), 비구조물피해로 인한 손실이 5.6 조 원(US\$ 4.84 billion)으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 KBC 2009에서 정의하고 있는 우리나라 설계응답스펙트럼을 바탕으로 지진 시나리오(규모(M_w): 5.0~6.5, 진원거리(R):15~45 km)을 선정하였으며, 이에 따른 서울시 강남구의 건축물 손상 및 직접적인 경제손실을 예측하였다. 지진 시나리오에 따른 건축물 손상 및 경제적 피해 수준을 산정하기 위해, 미국 FEMA에서 개발한 HAZUS [4] 프로그램의 분석 절차 및 방법을 활용하였다. 또한 본 연구에서는 강진동에 의한 건축물의 직접적인 경제적 피해만을 산정하였으며, 지진과 동반하여 발생하는 화재, 산사태, 지반의 액상화, 그 외의 간접피해 등은 반영하지 않았다.

본 연구를 수행하며 사용한 가정은 다음과 같다.

- 1) 강남구를 14개 행정동에 따라 분할하였고, 모든 건축물은 행정동의 중심에 위치하는 것으로 가정하여 진원거리를 계산하였으며, 강남구 전체의 지반은 SD로 가정하였다.)
- 2) 우리나라 건축물의 취약도 곡선(Fragility Curve)과 역량 곡선(Capacity Curve)은 HAZUS와 동일한 것으로 가정하였다.
- 3) 강남구에 위치한 건축물의 재건비용은 부동산통계자료를 활용하였으며, 같은 구조형식 및 용도의 건물은 동일한 경제적 가치를 지니는 것으로 가정하였다. 손상정도에 따른 보수 비용은 재건비용의 비율로서 계산되었으며, 해당 비율은 HAZUS와 동일한 것으로 가정하였다.

상기 가정에 따른 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 우리나라 환경을 반영한 감쇠식을 이용하여 규모 및 진원거리를 변수로 둔 시나리오 지진의 등재해도 스펙트럼을 작성하였으며, 그 중 KBC 2009의 설계 응답스펙트럼과 형태 및 크기가 유사한 지진 시나리오 1 ($M_w = 6.0$, $R=15$ km), 2 ($M_w = 6.5$, $R=15$ km), 3 ($M_w = 6.5$, $R=20$ km)를 결정하였다.
- 2) 건축 구조 형식 별 손상수준을 네 단계(미세 손상(Slight), 일반 손상(Moderate), 심각한 손상(Extensive), 완전 파괴(Complete))로 분류하였으며, 이에 따른 취약도 곡선을 이용하여 해당 지진 시나리오에서의 건물 손상 범위를 예측하였다. 그 결과, 지진 시나리오 2에서 전체 대상 건물 중 심각한 손상 수준을 넘어서는 비율이 39.9%로 지진 시나리오 1(17.6%)과 3(21.9%)에 비해 약 2배 정도 크게 나타났다. 지진 시나리오 2에서 구조형식 및 건물 높이에 따른 심각한 손상 수준을 넘어서는 비율은 S1L 39.5%, S1M 38.3%, S1H 34.1%, C1L 43.2%, C1M 32.1%, C1H 45.4%, C2L 38.4%, C2M 20.9%, C2H 25.2%, C3L 49.1%로 나타났다. C1H 건물을 제외하면, 같은 구조형식인 경우 저층 건물의 피해 비율이 중·고층에 비해 높게 나타났다.
- 3) 지진 시나리오 별 강남구의 건축물 손상에 의한 직접적인 경제적 손실은 시나리오 1의 경우 8 조 원(US\$ 6.96 billion), 시나리오 2의 경우 19 조 원(US\$ 16.7 billion), 시나리오 3의 경우 9.7 조 원(US\$ 8.39 billion)으로, 시나리오 2에 의한 피해가 가장 크게 나타났으며, 우리나라 2015년 GDP 대비 약 1.2%에 해당한다. 또한 이는 2011년 뉴질랜드 Christchurch 지진($M_w = 6.2$, $R=13$ km)의 직간접적인 경제적 손실액(약 16조원(NZ\$ 20 billion))보다도 큰 수준이다.
- 4) 고층 RC 벽식 구조(C2H)는 대부분 주거용 건물로 사용되고 있으며, 전체 주거용 건물의 12.9%를 차지하고 있다. 지진 시나리오 2에 의해 이 구조의 건물 중 일반 손상 수준을 넘어서는 비율은 25.2%로, 앞서 언급한 5층 이하 RC 건물의 손상 비율(약 42%)보다 낮다. 그러나 이에 따른 경제적 손실은 9.1 조 원으로 전체 주거용 건물의 손실액인 13 조 원(전체 19조원)의 약 70%에 해당하여, 주요 손실 요소임을 나타내었다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2015년 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해예측및저감연구개발(MPSS-자연-2015-70)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Yifan Y. Impact of Intensity and Loss Assessment Following the Great Wenchuan Earthquake, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008;7(3):247-254.
2. Elnashai AS, Gencturk B, Kwon OS, Al-Qadi I, Hashash T, Roesler JR, Kim SJ, Jeong SH, Dukes J, Valdivia A. The Maule (Chile) Earthquake of February 27, 2010. Mid-America Earthquake Center, 2010. MAE Center Report No. 10-04. c2010.
3. Volume 5: summary and Recommendations in Volumes 5-7, Christchurch,

- the city and approach to this inquiry. Canterbury Earthquakes Royal Commission, c2012, 72 p.
4. Multi-Hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model, HAZUS® MH Technical Manual, National Institute of Building Sciences and Federal Emergency Management Agency: Washington DC, c2003, 690 p.
 5. Jung GH, Park JY, Kang BH. Development and Application of Earthquake Disaster Response System of Korea, Earthquake Engineering Society of Korea, 2009; 09' Autumn meeting and conference, c2009, pp. 167-194.
 6. Korean Building Code, KBC 2009: Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea; c2009.
 7. Lumantarna E, Wilson JL, Lam, NTK. Bi-linear displacement response spectrum model for engineering applications in low and moderate seismicity regions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012;43:85-96.
 8. Jo ND, Baag CE. Estimation of spectrum decay parameter κ and stochastic prediction of strong ground motions in southeastern Korea, Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 2003; 7(3):59-70.
 9. Korean Statistical Information Service [internet]. Available from: http://kosis.kr/statisticsList/statisticsList_01List.jsp?vwcd=MT_ZTITLE&parentId=H
 10. Web service of Gangnam-gu Office [internet]. Available from: http://www.gangnam.go.kr/integ/#b02_03
 11. Uniform Building Code, UBC, International Conference of Building Officials, Whittier, CA; c1997.
 12. Korea Appraisal Board [internet]. Available from: <http://www.r-one.co.kr/rone/resis/statistics/statisticsViewer.do>