

블록별 부지분류 적용 해안시설 영역에서의 HAZUS 기반 지진피해 추정

선창국^{1*} · 천성호²

Preliminary Estimation of Earthquake Losses Based on HAZUS in a Coastal Facility Area with Blocks Applying Site Classification

Chang-Guk SUN^{1*} · Sung-Ho CHUN²

요 약

HAZUS-MH는 지진, 홍수 및 허리케인의 세 가지 다중 재해현상에 대한 잠재적 손실을 추정하기 위한 GIS 기반의 컴퓨터 프로그램이다. 지진 재난에 대해서는 HAZUS에 설정한 가상이나 실제 지진 특성에 따라 지진동의 세기가 평가되고 이에 따라 손실을 계산하게 된다. 본 연구에서는 해안 플랜트시설 영역의 향후 지진에 대한 대비의 일환으로 HAZUS를 활용하였다. 대상 시설 영역의 특성 평가를 위해 기존 지반조사 보고서를 토대로 지반특성 자료들을 취합하였다. 또한, 시설구조물들의 재료 및 구조 특성에 따라서도 분류하였다. 연구 영역은 부지 조성 및 시설 분포 상황을 고려하여 17개 블록으로 나누고 지반 조건을 내진설계기준의 부지분류 체계에 따라 구분하였다. 뿐만 아니라, 수치 모델링을 통해 주요 시설물들의 지진취약도 곡선들을 도출하고 HAZUS 데이터베이스에 적용하였다. 이 연구 영역에 대한 HAZUS 활용 추정 결과는 부지 조건 및 구조물 종류에 따라 다양한 지진 피해와 손실 정도를 보였다. 본 사례 연구를 통해 해안시설 영역의 지진 피해 평가를 위한 HAZUS의 적용 가능성을 확인하였다.

주요어 : 지진피해, 부지분류, HAZUS, 해안영역, 지진취약도

ABSTRACT

HAZUS-MH is a GIS-based computer program that estimates potential losses from multi-hazard phenomena: earthquakes, floods and hurricanes. With respect to seismic disaster, characteristics of a hypothetical or actual earthquake are entered into

2014년 8월 30일 접수 Received on August 30, 2014 / 2014년 9월 29일 수정 Revised on September 29, 2014 /
2014년 10월 7일 심사완료 Accepted on October 7, 2014

1 한국지질자원연구원 지진연구센터 Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

2 대림산업(주) 기술개발원 Technology Research and Development Institute, Daelim Industrial Co., Ltd.

* Corresponding Author E-mail : pungsun@kigam.re.kr

HAZUS. Then HAZUS estimates the intensity of ground shaking and calculates the correspondent losses. In this study, HAZUS was used as a part of the preparations of the future seismic events at a coastal plant facility area. To reliably characterize the target facility area, many geotechnical characteristics data were synthesized from the existing site investigation reports. And the buildings and facilities were sorted by analyzing their material and structural characteristics. In particular, the study area was divided into 17 blocks taking into account the situation of both land development and facility distribution. The ground conditions of blocks were categorized according to the site classification scheme for earthquake-resistant design. Moreover, seismic fragility curves of a main facilities were derived based on the numerical modeling and were incorporated into the database in HAZUS. The results estimated in the study area using HAZUS showed various seismic damage and loss potentials depending on site conditions and structural categories. This case study verified the usefulness of the HAZUS for estimating earthquake losses in coastal facility areas.

KEYWORDS : *Earthquake Loss, Site Classification, HAZUS, Coastal Area, Seismic Fragility*

서론

최근 사회적 안전 의식 고취와 국가적 지속 성장 기반 조성이라는 배경 하에서, 지진을 포함한 자연재해 요인으로 인한 피해 최소화를 위한 다각적 연구 개발이 해외 선진국은 물론 국내에서도 진행되고 있다(KIGAM, 2011). 특히, 국가 기간시설들은 지진으로 인한 직접적인 피해뿐만 아니라 복구 지연이나 파생적 이차 피해가 야기될 경우 국가 산업에 큰 장애를 일으켜 사회 경제적 손실이 막대해 질 수 있다(Um, 2008). 기간 시설들 중 물류 수송이나 영역적 수요의 필요로 인해 최근 해안 지역에 입지를 확보하는 시설들이 많아지고 있다. 또한, 시설 부지 영역들은 대부분 준설 매립이나 절토를 통해 조성되므로, 부지 조건에 따라서는 지반 및 지진공학적인 잠재적 문제점을 내재할 수도 있다(Lee and Jang, 2007; Sun and Chun, 2013). 따라서 국가 주요 시설물의 경우 지반지진공학 전문가 지식 기반의 체계적이고 철저한 대책 방안을 우선 확립해야 한다(Kang and Kim, 2009; Sun *et al.*, 2010).

이러한 이유로 지난 세기 후반부터 금세기 초반에 걸쳐 일부 국가 주요 기간시설들을 대상으로 지진피해를 최소화 목적의 적극적 대책으로서의 평가 예측을 위한 정보기술 기반 프레임 시스템을 개발 적용하고 있다(Rashed and Weeks, 2003; Sun and Chun, 2013).

현재 전세계적으로 적용되고 있는 다양한 지진피해 예측평가 시스템들 중에서도 대표적인 HAZUS는 미국의 FEMA(Federal Emergency Management Agency)와 NIBS(National Institute of Building Science)에 의해 1997 년도에 처음 개발된 시스템으로서 실측 및 가상 지진 자료와 여러 속성 구성 자료를 기반으로 지진유발 피해의 정량적 규모 추정을 위해 이용되고 있다(Schneider and Schauer, 2006). HAZUS는 지리정보시스템(GIS) 기술을 토대로 개발된 시스템이며, 그 성능 및 속성 자료의 양과 질이 지속적으로 향상되고 있어 꾸준히 향상되고 있다(Kang *et al.*, 2007). 이 HAZUS는 미국 내에서의 지진피해 추정을 위해 개발 적용되고 있으며, 그 지역적 한계에 대한 명확한 이해가 선행되어야 그 외 지역에 대한 합리적 이용이 가능하다(Sun and Chun, 2013).

미국 외에도 북미의 캐나다는 물론이고 유럽이나 다른 지역들에서도 HAZUS를 도입 적용하여 지진피해 평가나 예측에 사용되고 있다 (Fäh *et al.*, 2001; Papatheodorou *et al.*, 2007; Nastev, 2014). 그러나 아직까지 우리나라는 일부 예시적 적용 수준에 국한되어 왔으며, 실제 대상 지역에 대한 지반특성의 합리적 고려나 시설물 특성의 개선 반영과 같은 체계적 적용은 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 이와 같은 HAZUS의 지역적 제한성을 극복하고 국내 해안 플랜트시설 영역 한 곳에 대한 체계적 지진피해 평가를 수행함으로써, 국내 해안 시설 영역에 대한 HAZUS의 모범적 적용 방안을 제시하고자 하였다.

GIS 기반 지진피해 예측 시스템 고찰

지진피해 예측을 통한 지역 또는 주요 시설물 영역의 지진대응 방안 수립은 국외의 경우 주로 미국, 일본, 대만, 이란, 터키 등과 같은 강진 발생 지역 국가들이나 이탈리아, 스페인, 그리스, 스위스 등의 유럽 주요 국가들에서 이루어지고 있다. 국내에서는 관련 분야에 대한 관심이 비교적 최근에 대두됨에 따라 현재까지 일부 연구목적의 사례들만이 제시되고 있으며, 지금도 관련 기법이나 정보의 개발이 진행되고 있는 상태이다 (Lee *et al.*, 2006). 특히, 단일 시설 부지와는 달리 목적이나 특징이 상이한 여러 시설들을 포함하는 중소규모 영역에 대한 지진피해 예측 시스템 도입 및 이의 적용 절차에 관한 학술적 노력들이 최근 시도되어 왔다 (Sun, 2010; Sun and Chun, 2013).

영역대상의 지진피해 예측은 대부분 일부 시설물과 그 부지에서의 국부적 지진응답해석 보다는 포괄적 영역 내의 여러 시설물과 그 관련 손실을 지진발생 조건으로 가정하여 예측하는 기법을 적용하게 된다 (Sun, 2012). 이에 따라 영역 내의 여러 정보를 체계적으로 관리하고 연산할 수 있는 지리정보시스템(GIS)과 같은 정보 기술이 접목된 시스템 기술이 활용될 수 있다. 이와 관련된 국내외 연구개발 현황의 대

표적인 시스템 기술 사례는 미국 연방재난관리청(FEMA)에서 개발된 HAZUS가 있다 (FEMA, 2006; Schneider and Schauer, 2006). HAZUS는 지진뿐만 아니라 홍수와 허리케인에 대한 피해 예측 모듈도 포함하고 있으며, GIS 모듈의 확장 적용을 통하여 보다 광범위한 종합 피해예측 시스템으로의 활용을 염두에 두고 개발한 시스템이기 때문에 HAZUS-Multi Hazard(HAZUS-MH)라는 명칭을 갖는다. 특히, HAZUS는 ArcGIS Desktop이 플랫폼으로 적용되어 있다.

또한, HAZUS를 자체 실정에 맞게 개선하여 지진피해만을 대상으로 개발한 대만의 TELES (Taiwan Earthquake Loss Estimation System)가 활용되고 있으며, 일본의 경우 자체적인 전문지식 결합과 시스템기술 접목을 통하여 DIS(Disaster Information System)를 개발하여 적용하고 있다 (NIDP, 2003). 이와 같은 시스템 기반의 지진피해 예측 기법은 각 지역별로 고유한 여러 복합 특성을 반영하여 개발 또는 보완하게 되는데, 호주에서는 EQRM (Earthquake Risk Model)을 개발하고 발전시켜서 여러 지진 조건에 대해 적용하고 있다 (Robinson *et al.*, 2006). 유럽의 경우 그동안은 주로 HAZUS를 자체 개발 모듈과 접목하거나 추가적인 인터페이스를 구성하여 활용해 오고 있었으나, 최근에는 GEM(Global Earthquake Model) 컨소시엄을 구성하여 OpenQuake 시스템을 개발하여 지속적으로 활용과 갱신을 진행하고 있다 (Silva *et al.*, 2014).

HAZUS를 개발하고 모범적으로 적용해 오고 있는 지역 중의 한 곳은 미국 캘리포니아의 샌프란시스코이다. 특히, 샌프란시스코는 강지진 구역에 위치하여 1906년 규모 8.3의 대지진과 같은 여러 지진피해 기록들이 축적되어 있고, 해안 도시 지역임에 따라 다양한 지반 및 시설물이 존재한다. 해안 지역의 다양한 지반특성 변화는 지진피해 정도의 공간적 변화와 관계되는데, 샌프란시스코 지역에서의 여러 조건들에 대한 HAZUS 적용 지진피해 평가 결과들과 기존 피해사례들과의 비교를 통해 확인되고 있다

(Rowshandel *et al.*, 2004). 이 연구에서는 HAZUS-MH의 Flood, Hurricane, Earthquake의 세 가지 모듈들 중에서 지진피해 예측을 위해 HAZUS-MH Earthquake를 이용하게 되는데(FEMA, 2006), HAZUS-MH Earthquake는 지속적인 기능 갱신과 보완이 진행되고 있다(Sun and Chun, 2013). 여기서는 HAZUS-MH MR2를 기본 프레임으로 고려하고 MR2로 갱신되지 않은 일부 모듈은 MR1을 이용하였다. 현재는 2010년의 HAZUS-MH MR5 이후 2012년의 HAZUS-MH 2.1까지 버전이 업그레이드되어 있다(FEMA, 2014).

HAZUS는 지진 및 구성 목록(inventory) 자료를 이용하여 대상 지역의 지진피해를 물리적 재해, 경제적 손실, 그리고 사회적 영향으로 나누어 산출한다(FEMA, 2006). 여러 다양한 특성을 포함하는 구성 자료는 인구와 건물, 경제 및 사회 관련 통계자료, 주요 공공 시설물과 교통관련자료 등의 위치 및 속성 정보, 그리고 지반지질 정보를 포함한다. 물리적 피해 산출에서는 거주지나 상업지역 내의 건물 및 학교, 병원 등과 같은 주요한 건물들과 도로나 철도를 포함하는 주요 공공 시설물들의 피해 등을 추정한다. 경제적인 손실에는 재해에 따른 일시적 사업 중지로 인한 손실, 건축물 수리비용 또는 재건축 비용 등을 산출한다. 사회적인 영향은 사상자와 이재민을 산정한다.

HAZUS-MH Earthquake의 지진재해 산출 방법에는 세 가지 유형이 있는데, 확률론적 방법, 결정론적 방법, 그리고 지진동분포도와 같은 정보를 직접 적용할 수 있는 사용자 지정 방법이 있다. 본 연구에서는 국내 지진원 특성 자료의 부족과 대상 지역의 강지진동 정보 부재 환경을 고려하여 확률론적 방법을 우선 적용하여 HAZUS의 적용성을 고찰하였다.

해안시설 영역 자료 확보 및 HAZUS 적용

지반지진공학 전문가 관점의 HAZUS 국내 적용을 위한 대상은 한반도 서해안에 위치한

플랜트 복합 시설영역들 중 한 곳이다. 대상 시설은 지진 시 피해가 발생하여 정상적인 가동이 이루어지지 않게 되면 주변 지역은 물론이고 원거리 주민들에게도 직간접적인 이차 피해를 줄 수 있는 국가 기본 인프라 시설이다. 이러한 중요성에 따라 본 연구 대상으로 선정하게 되었다. 영역 내에는 내륙의 일부 절토 지역과 해안의 넓은 매립 지역이 존재한다. 이로 인해 대상 영역은 현행 내진설계 부지분류체계의 여러 조건들로 이루어 질 것으로 판단되는데, 특히 해안 매립 부지들에서 지진 시 지반운동이 증폭될 가능성이 높아 보인다. 또한, 대상 영역 내에는 다양한 재료와 형식의 구조물들이 분포하고 있다. 따라서 무엇보다도 이 대상 해안시설 영역에 대한 지반조사 자료와 구조물 정보의 확보가 진행되어야 하고, 이들을 HAZUS 기반 지진피해를 위한 기본 자료로 반영해야 한다.

1. 지반지진공학 특성 정량화 및 영역 내

블록별 부지 분류

대상 해안시설에 대한 설계, 시공, 신설 및 증설에 따른 시추조사 및 현장탄성파시험을 포함한 다양한 지반조사 자료를 시설관리 기관을 통해 수집하고 지반공학 견지의 자료 검토를 실시하였다. 수집하여 공학적 신뢰도가 확보된 자료들은 지진공학적 활용 목적의 정형화된 지반 데이터베이스(DB)로 구성하였다(Sun *et al.*, 2008). 지반 DB에 구성된 지반조사 자료의 수는 총 570 개이다. 지반조사 자료를 확인해 본 결과, 대상 영역은 암반부터 매립 토사층까지 비교적 다양한 지반 특성을 보일 뿐만 아니라 지표면 하부 지층의 변화가 상당히 심하여 지진공학 관점의 기반암(Sun *et al.*, 2006)인 연암 이상 경도의 암반의 경우 대부분 30m 정도이나 부분적으로 매립 부지의 경우 이 보다 훨씬 깊은 심도인 100m 정도에서도 조사되었다. 또한, 풍화암의 경우도 80m가 넘는 심도에서 조사되는 부지도 존재한다. 따라서 연구대상 해안시설 영역은 지진공학적 지반응답 특성

의 다양성을 보이게 되고, 이러한 다양성은 HAZUS 기반 지진피해 예측의 기본적 특성 정보로 반영하고자 하였다.

대상 영역에 대해 지반 특성을 지진공학적 관점에서 정량화함으로써 예측 신뢰도를 증진시킬 수 있다. 본 연구에서는 HAZUS를 적용한 지진피해 예측의 기본적 지반 특성으로서 현행 국내외 내진설계기준의 부지분류 체계(MOCT, 1997; ICC, 2000; Sun *et al.*, 2005)에 따른 지반특성 정량화를 수행하고자 하였다. 부지분류 체계에서는 지진 시 지반운동의 증폭 정도를 우선 5 종류(A~E 또는 $S_A \sim S_E$)로 구분하게 된다. 부지분류에서는 알파벳 순서 증가에 따라 정량적 증폭 정도에 해당되는 증폭계수(단주기 증폭계수 F_a 및 중장주기 증폭계수 F_v)가 커진다. 또한, 예외적으로 지반 특성이 지진공학적 견지에서 매우 불리할 경우의 관심 부지를 설정하여 추가적인 부지특성 평가가 요구되는 F(S_F)로 분류한다.

현행 내진설계 기준에서 부지분류는 Borcherdt (1994)가 제안한 지표면부터 지하 30m(100 ft 또는 30.48m)까지의 평균 전단파속도(V_{S30})를 기준으로 이루어진다(Sun *et al.*, 2005). V_{S30} 은 식 (1)과 같이 계산할 수 있는데, d_i 와 V_{Si} 는 각각 30m 심도까지의 i 번째 지층의 두께와 평균 전단파속도이다. 현행 부지분류 체계는 표 1에서 확인할 수 있으며, 소방방재청에서 제주도를 제외한 한반도 전체를 단일 지진구역으로 제시함에 따라(NEMA, 2013), 지진구역계수(Z)가 0.11인 조건에 해당된다. 표 1에 제시된 단주기 및 중장주기 지진계수인 C_a

및 C_v 는 구역계수와 증폭계수(F_a 및 F_v)의 곱으로 표현된다.

$$V_{S30} = 30 / \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{Si}} \quad (1)$$

지진공학적 지반특성에 따른 지반운동 증폭 정도의 정량적 변화를 반영하여 해안시설 영역에서의 지진피해 예측을 합리적으로 수행하기 위하여, 본 연구에서는 대상이 해안 매립 및 인근 내륙 절토를 통해 조성한 복합 시설물 분포 영역이라는 특성을 고려하여 권역화된 여러 제어단위의 구역 형태로 블록화하였다. 대상 영역을 총 17개의 블록으로 권역화하였으며, 이 블록별로 V_{S30} 에 따른 부지분류 수행을 통한 지진공학적 지반특성의 정량화를 실시하고자 하였다. 구축한 지반 DB를 토대로 구역화된 블록별 지반조사 정보들 파악해 본 결과, 5개의 블록(블록 11, 블록 14~블록 17)에는 기존 지반조사 자료가 존재하지 않았다. 이러한 이유로 자료가 존재하지 않는 블록에 대해서는 깊이 증가에 따른 전단파속도(V_S) 분포를 도출하지 않고 지형이나 과거 이력이 유사할 것으로 판단되는 주변 블록의 부지 분류 결과를 참고하기로 하였다.

일반적인 시추지반조사에서 실시되는 표준관입시험 결과인 N 값이 조사 부지에 대해 깊이별 지점 자료로 제시됨에 따라 연속적 자료 분포로 제시되어야 하는 V_S 분포는 Sun *et al.*(2013)이 제시한 N 값과 V_S 의 상관관계

TABLE 1. Current site classification system for seismic design in Korea

Site class			Short-period		Mid-period	
Symbol	Description	Criterion, V_{S30} (m/s)	$Z=0.11$		$Z=0.11$	
			C_a	F_a	C_v	F_v
A (S_A)	Hard rock	$1,500 < V_{S30}$	0.09	0.82	0.09	0.82
B (S_B)	Rock	$760 < V_{S30} \leq 1,500$	0.11	1.00	0.11	1.00
C (S_C)	Very dense soil and soft rock	$360 < V_{S30} \leq 760$	0.13	1.18	0.18	1.64
D (S_D)	Stiff soil	$180 < V_{S30} \leq 360$	0.16	1.45	0.23	2.09
E (S_E)	Soft soil	$V_{S30} \leq 180$	0.22	2.00	0.37	3.36
F (S_F)	Requires site specific evaluation					

TABLE 2. V_{S30} and site class of blocks in the area of interest

Block number	V_{S30} (m/s)	Site class
1	176.5	E
2	153.5	E
3	161.3	E
4	178.4	E
5	155.5	E
6	165.7	E
7	168.1	E
8	220.5	D
9	191.5	D
10	141.1	E
11	No data	D
12	193.3	D
13	697.7	C
14	No data	C
15	No data	C
16	No data	C
17	No data	C

($V_S = 65.64N^{0.41}$)로부터 도출하여 상하 평균 심도까지의 V_S 분포로서 적용하였다. 심도에 따른 V_S 의 분포로부터 깊이 30m까지의 V_S 분포를 추출하여 블록 대표 부지에 대한 V_{S30} 을 산

정하고 이로부터 부지분류를 수행하였다. 블록별로 산정된 V_{S30} 과 그에 따른 부지분류 정보는 표 2와 같다. 대상 해안시설 영역의 지리적 위치 및 위성영상(Google earth 이미지) 기반

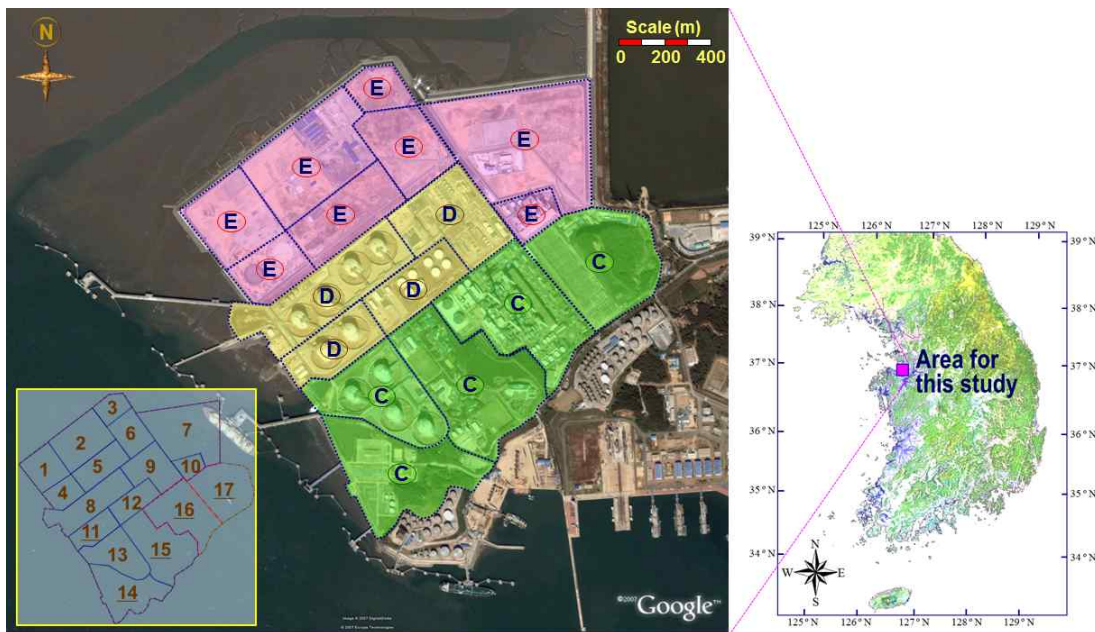


FIGURE 1. Distribution of site class with blocks in a coastal facilities area for the study

의 블록 위치별 부지분류 정보는 그림 1에 제시하였다. 그림 1의 좌측하단에는 영역을 구성하는 블록 번호에 대한 배치 그림도 삽입하였다. 또한, 기존 지반조사 자료가 존재하지 않는 블록의 번호는 타원으로 구분하였다.

대체로 매립 지역들은 부지중폭 정도가 대상 영역 내에서 가장 큰 부지분류 E로 구분되었고, 기존 구릉지의 절토가 이루어 졌을 것으로 보이는 내륙 지역은 부지분류 C로 구분되었다. 이들 중간 지대들은 부지분류 D로 구분되었다. 그런데, 해안 매립의 영향으로 E 부지로 구분된 블록들은 대부분 향후 시설 확충을 위한 지역이었으며, 이에 따라 실제 시설물들은 거의 분포하지 않았다. 블록별 부지분류 정보로 정량화된 지반지진공학특성은 HAZUS 적용 지진피해 평가의 가장 중요한 입력 레이어 중 하나로 사용되며, 블록은 HAZUS 내에서 Tract로 할당하게 된다.

2. 시설물 형식 분류 및 지진취약도 함수 적용

지진 시 가속도와 같은 외부 지진력의 크기에 따른 시설물의 피해 정도를 확률 범위로 정

의하는 취약도 함수를 적용하여 지진피해 평가를 수행하게 된다(Park and Choi, 2007). 일반적으로 국외 강진 발생 지역들에서는 시설물들에 대한 지진피해 사례들을 종합하여 취약도 곡선을 도출하고 있다. 그러나 일부 특수 시설물의 경우 설계 측면의 안정성이 충분히 확보된 경우가 대부분이어서 경험적 취약도 도출도 제한적일 수 있다. 또한, 우리나라와 같이 시설물 지진피해 기록이 거의 전무한 경우에도 대상 시설물에 대한 취약도 곡선의 적용에 한계를 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 비록 지역적 특성이 다를 수는 있지만 기본적으로 HAZUS의 구성 DB에 내장된 시설물 지진취약도 곡선을 우선 활용하고자 하였다.

HAZUS 내장 지진취약도 함수를 이용하기 위해서는 관심 시설물들의 구조 및 재료 형식에 따른 전문가적 분류가 이루어져야 한다. 본 연구에서도 대상 영역에 대한 시설물 분류 및 적용을 통한 지진피해 평가 수행을 위하여, 위성영상을 이용한 초기의 가정적 추정 추출 과정과 그 이후 이어진 현장 답사를 통한 구조물 형식 및 재료에 따른 분류를 수행하고 시설물

TABLE 3. Structural building classification in the area of interest excepting storage tanks

Building number	Structural type	Number of stories	Classification in HAZUS
Building 1	CMF	4	C1M
Building 2	CSW	2	C2L
Building 3	CMF	2	C1L
Building 4	CMF	2	C1L
Building 5	CSW	3	C2L
Building 6	CMF	4	C1M
Building 7	CSW	1	C2L
Building 8	SLF	1	S3
Building 9	CMF	1	C1L
Building 10	CSW	2	C2L
Building 11	CSW	1	C2L
Building 12	CSW	2	C2L
Building 13	CSW	2	C2L
Building 14	CMF	4	C1M
Building 15	CMF	2	C1L
Building 16	CMF	1	C1L
Building 17	CMF	1	C1L
Building 18	CMF	1	C1L

CMF: Concrete moment frame, CSW: Concrete shear wall, SLF: Steel light frame

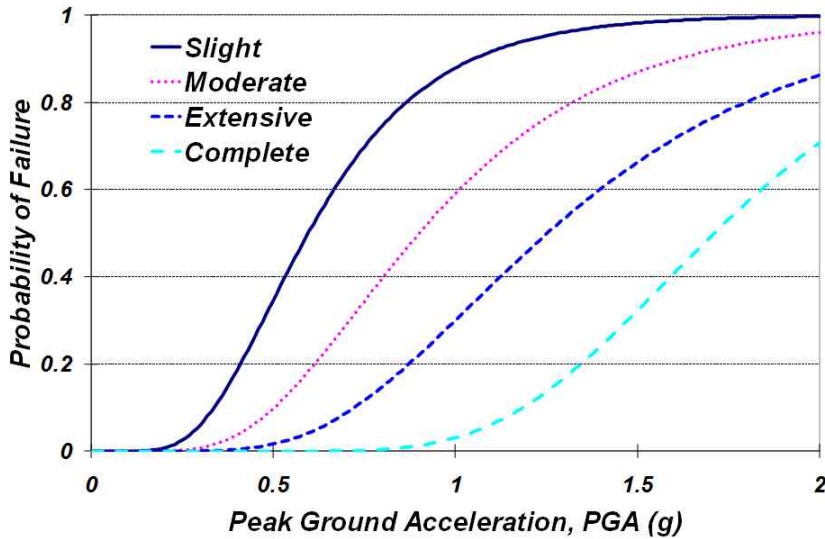


FIGURE 2. Seismic fragility curves for a representative storage tank

TABLE 4. Input statistical values on fragility curves for HAZUS application

Input values	Damage levels			
	slight	moderate	extensive	complete
Median	0.60	0.90	1.25	1.71
Standard deviation	0.44	0.46	0.43	0.29

들의 규모에 해당되는 층수와 면적을 조사하였다. 답사 과정에서 각 시설물별 위치 번호를 부여하고 좌표를 획득하여 그에 따른 HAZUS에서의 유형 속성으로 정리하였다(FEMA, 2006; Zadeh, 2005). 표 3은 구조공학 전문가 관점에서의 자료 분석과 현장 조사를 통해 정리된 대상 시설영역 내 총 18개 건축구조물의 구조 형식과 HAZUS에서의 유형별 분류이다. 18개의 구조물은 연구영역의 1번부터 17번까지의 블록 중 7 개의 블록(7, 10, 12, 13, 14, 15, 16) 내에 분포하였다. 그 외 블록들에 분포하는 구조물들은 주로 저장탱크이다.

대부분의 영역 내 시설물들 대해서는 구조형식 분류를 통해 HAZUS 시스템에 내장된 지진취약도 곡선을 적용할 수 있으나, 일부 특수 플랜트 시설에 대해서는 지진취약도 곡선이 존재하지 않는다. 이러한 이유로 대표적 저장탱크에 대해서는 구조동역학적 모델의 다양한 지진해

석을 수행하고 합리적인 지진취약도 함수를 도출하였다. 총 10종류의 실제 지진기록을 설계 스펙트럼과 유사하게 인공지진으로 합성하여 동적 유한요소해석을 실시하였다. 해석 결과를 토대로 관심 시설물의 지진취약도 곡선을 도출하게 된다. 이 과정에서 손상이 없는 None 외에 손상 수준을 Slight, Moderate, Extensive, Complete의 4단계로 구분한다. HAZUS 기반 지진피해 예측을 위해 도출된 저장탱크 시설물의 지진취약도 곡선은 그림 2와 같다. 실제 HAZUS 자료 적용 과정에서는 이 확률 개념의 취약도 곡선이 표 4와 같은 평균과 분산으로 표현되어 입력해야 한다.

해안시설 영역에서의 HAZUS 기반 지진피해 평가

국내 해안플랜트시설 영역에 대한 지진피해

평가를 목적으로 공간적으로 미국 영토 전용인 HAZUS를 도입하였다. 지진 특성의 규명이 아직까지는 확립되지 않았고 실제 발생 계측지진 기록이 거의 전무한 국내 여건을 고려하여 피해 추정에는 확률론적 방법을 적용하였다. HAZUS 적용을 위해 우선 대상 시설영역의 자료를 미국 영역 한정 지리적 자료로 대체하고 내장 DB 형식에 맞추어 입력하였다.

1. HAZUS 자료 구축 및 토대 조성

HAZUS를 이용한 지진피해 산출 과정에서 보다 정확하고 유용한 결과를 얻기 위해서는 내장 입력 DB 자료의 정확성이 중요하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 연구 영역에 대한 종합적이고 체계적인 방문 조사와 현장자료 확보 분석을 병행하여 가능한 실질적 현황 자료를 반영하여 HAZUS DB에 입력하고자 하였다. HAZUS 활용을 위해 입력하여 구현해야 하는 DB는 미국 전체 주(state)에 대한 위치 정보 및 각 주별 County와 Tract 위치 정보를 저장한 syBoundary.mdb가 있다. 또한, 각 주의 하부 Tract별 건물 유형별 개수, 면적, 인구 통계 자료 등을 포함하는 bndrygbs.mdb, 각 주의 하부 Tract별 병원, 학교 등의 기간 시설 정보

를 저장한 EF.mdb, 원자력 발전소, 군사시설, 제방 및 댐의 정보를 저장한 HPLF.mdb, 교통 시설물의 정보를 담은 TRN.mdb, 통신 및 전기 시설물 등의 정보를 저장한 UTIL.mdb, 농경지에 대한 정보를 담은 flAG.mdb, 교통량에 대한 정보를 담은 flVeh.mdb, 그리고 각 주별 건물에 대한 지진 design level에 대한 정보를 담은 MSH.mdb로 구성된다.

이 중 MSH.mdb는 미국 전역을 West, West-middle 및 East로 분류하여 다양한 지진 사례 및 해석 정보를 활용하여 설정된 DB로써, 수정하고자 할 경우 관심 지역에 대한 상세한 지진특성 자료를 토대로 수정하여야 한다. 이 연구에서는 HAZUS에 내장된 자료를 기본으로 활용하였다. 다만, 내부적으로 결정된 건물 유형(주거, 상업, 산업 등)에 따른 재료 구분은 대상 시설영역 내의 건물 재료 분포를 반영하여 변경하였다. HAZUS를 이용하기 위해 기본적으로 점검하고 대상에 적합하도록 수정해야 하는 DB를 표 5에 제시하였으며, 이러한 DB의 현실적 반영 또는 추가적인 고급 DB의 보완이 지진피해 평가 결과의 신뢰도를 좌우하게 된다.

연구 대상인 국내 해안시설 영역에 대한

TABLE 5. Databases and datasets to be checked or modified in HAZUS

Database	Dataset
syBoundary.mdb	sycounty
	sytract
MSH.mdb	hzGenBldgScheme
	eqrInScheme
bndrygbs.mdb	hzCounty
	hzTact
	hzBldgCountOccupT
	hzDemographicsThzExposureContentOccupT
	hzExposureOccupT
	hzSqFootageOccupT
EF.mdb	-
HPLF.mdb	-
TRN.mdb	-
UTIL.mdb	-
flAG.mdb	-
flVeh.mdb	-

HAZUS 적용 지진피해 평가 해석의 토대 조성을 위해서는, 우선 대상 영역의 위성영상 이용하여 전체 영역과 하부 블록들을 디지털화하여 국내 직교 좌표계를 부여해야 한다. 그리고 영역 내의 시설물과 도로, 배관 등을 디지털화하고 국내 좌표계를 부여하게 된다. 이렇게 디지털화가 완료된 자료들을 미국 영토에서 대체 대상으로 선택한 주(State)의 County로 좌표 변환해야 한다. 선택한 주의 DB 내에 존재하는 County와 Tract에 대한 위치 정보를 연구 영역에 적합하도록 수정하고 속성 정보들을 대상 시설영역의 확보 자료로 대체해야 한다. 최종적으로는 HAZUS 모듈을 활성화하여 수정한 DB 자료들을 통합하고 확률론적 방법으로 고려할 지진 특성을 설정하여 지진피해 예측을 위한 준비 환경을 조성하게 된다.

2. HAZUS 실행을 통한 지진피해 추정 해석

연구영역에 대한 위치 및 속성으로 수정 구현된 DB를 HAZUS 지정 폴더로 이동시키고 대상의 지진피해 추정을 위한 HAZUS 모듈을 실행하게 된다. 그림 3과 같은 HAZUS 초기실행 화면에서 연구 대상영역 DB들을 통합할 수 있다. 만약 구축한 DB에 문제가 있을 경우 통

합 과정이 완료되지 않고 오류 메시지가 나타나게 되므로 입력 자료들을 재수정하여 올바른 DB로 구현해야 한다. 통합한 DB는 그림 4와 같은 ArcGIS Desktop 기반의 HAZUS 메인 화면으로 나타난다. 메인 화면의 Inventory 메뉴를 통해 입력한 DB 자료들을 확인할 수 있고, Hazard 메뉴에서 결정론적, 확률론적 및 사용자지정 방법에 의한 지진 정보를 입력할 수 있다. Analysis 메뉴를 통해 해석에 관한 다양한 옵션들을 설정하고 예측 해석을 수행하게 된다.

다양한 속성 자료 수정 및 선택사항 입력과 조회를 통한 확인 후 HAZUS에서 지진피해 해석을 위한 입력 지진 정보를 설정해야 한다. 그림 5는 Hazard 메뉴의 Scenario 명령을 실행하여 나타난 화면으로서, 결정론적 방법, 확률론적 방법, 그리고 사용자정의 방법이 있다. 이 연구에서는 국내 지진관련 자료의 현실성을 고려하여 확률론적 방법을 선택 적용하였다. 확률론적 방법을 선택하면, 발생 지진의 재현 주기 및 지진 규모를 입력하게 된다. 본 연구에서는 재현주기 500년의 지진 규모는 6.0 및 재현주기 2500년의 지진 규모는 6.5로 scenario를

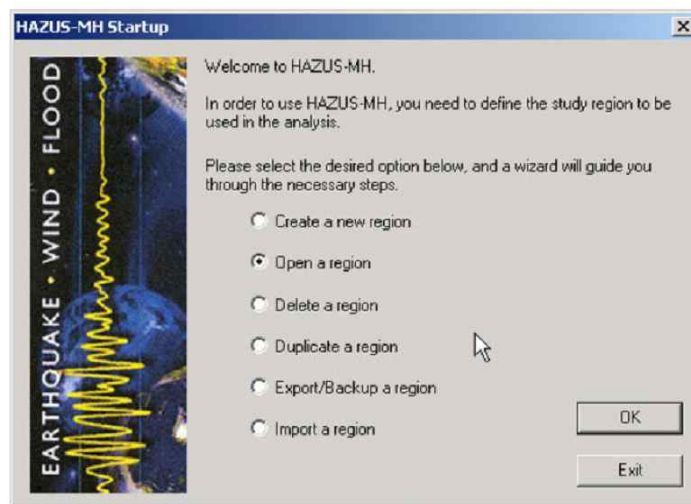


FIGURE 3. Start-up screen of HAZUS

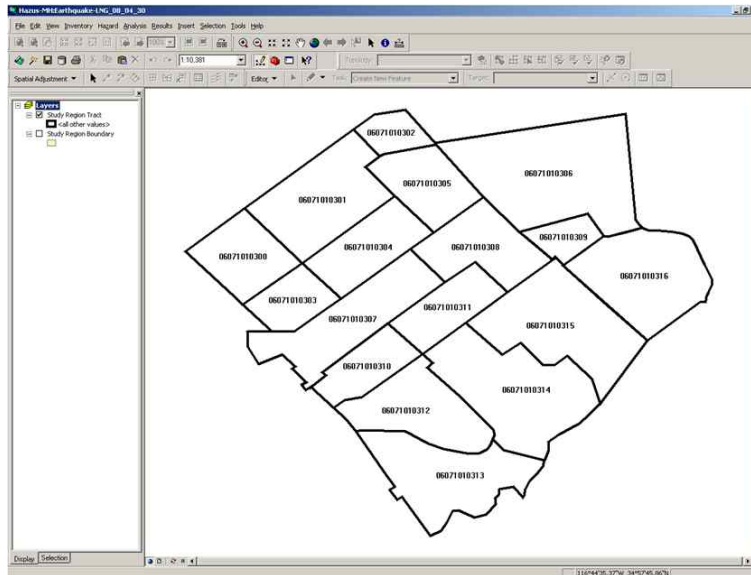


FIGURE 4. Main screen for an area of interest in HAZUS

작성하여 HAZUS를 이용한 지진피해 평가 해석을 실행하였다.

그림 6은 발생 지진에 대한 정보 설정 후 지진피해 해석을 실행한 화면이며, 해석하고자 하는 자료 및 관심 결과를 선택하여 해석을 수행

할 수 있다. 본 연구에서는 입력한 건물 자료를 고려하여 기본 건물 정보만이 입력되었으므로, General Building, Induced physical damage, Direct Social Losses 및 Indirect economic impact의 inventory들만을 선택하고 Contour

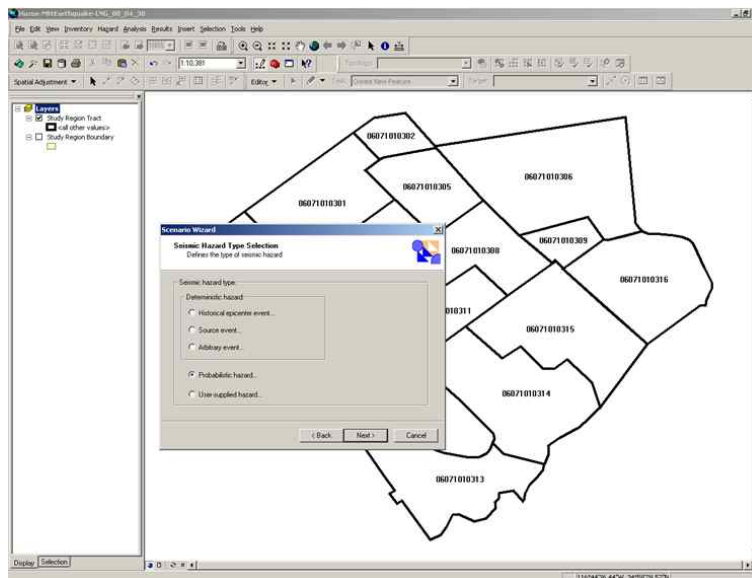


FIGURE 5. Decision of seismic hazard type in HAZUS

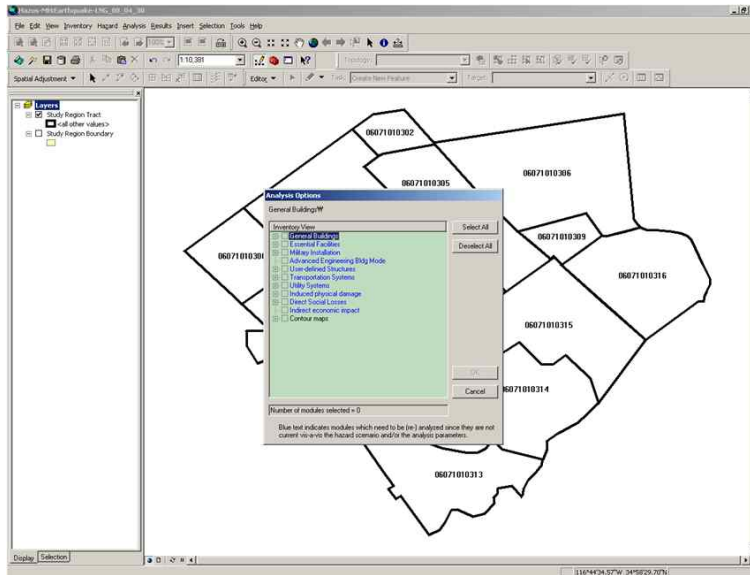


FIGURE 6. Selection of analysis options on inventories as targets in HAZUS

maps을 추가로 선택하여 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Analysis 메뉴에서 Inventory 메뉴와 유사한 방법으로 확인할 수 있다. HAZUS

에서는 해석 결과를 종합적으로 보고서화 하는 기능도 포함되어 있다.

HAZUS에서는 Hazard 메뉴의 Data Maps

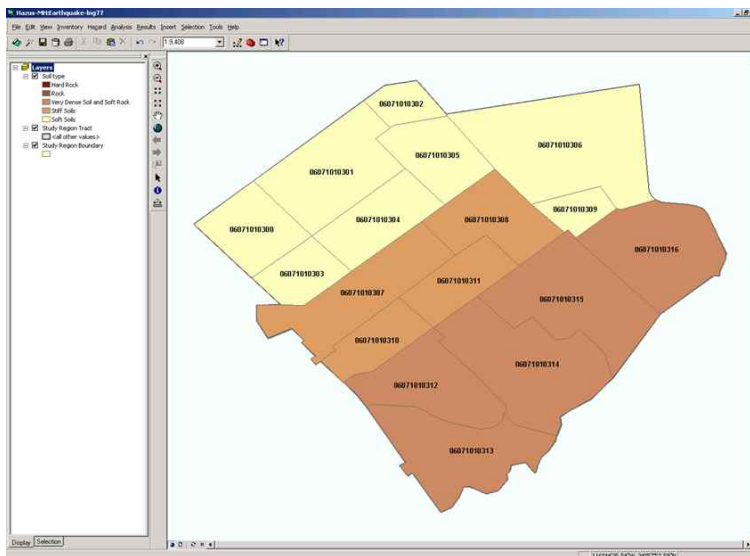


FIGURE 7. Application of site classification map with blocks of the study area in HAZUS

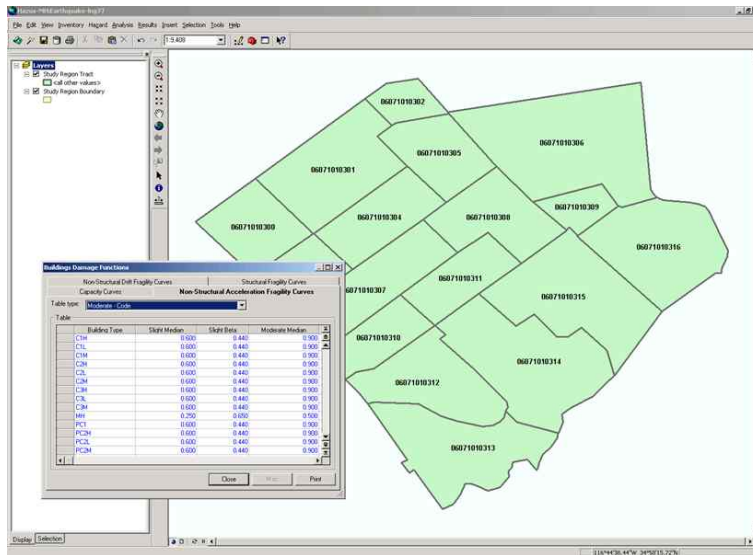


FIGURE 8. Application of fragility curves for the storage tank of the study area in HAZUS

기능을 활용하여 지반특성에 따른 지진동 증폭 정도의 차이를 부지별로 고려한 부지분류 정보를 반영할 수 있다. Data Maps에서는 부지분류와 같은 지진공학적인 유용한 정보로서의 액상화, 산사태 및 지하수위 지도들뿐만 아니라 발생 지진에 따라 작성되는 진도분포도(shake map)도 등록하여 적용할 수 있다. 그림 7은 대상 국내 해안시설 영역의 17개 블록별 구분 형태인 부지분류 지도를 Data Map 기능으로 등록하여 화면에 표출한 것이다. 부지분류 구분은 서로 다른 색상을 통해 기본적으로 파악할 수 있다. 등록된 부지분류 지도를 HAZUS 해석 시 활용하기 위해서는 Hazard 메뉴의 Scenario wizard를 실행하고 Define hazard maps 메뉴에서 등록된 부지분류 지도를 선택해야 한다. 이러한 과정을 통해 지반지진공학적인 특성이 반영된 보다 신뢰성 높은 지진피해 평가 결과를 획득할 수 있다.

본 연구에서는 지진피해 평가의 절차적 체계화 및 신뢰도 향상을 위하여 대상 영역 내 주요 시설물인 저장탱크를 대상으로 해석적 접근을 통한 지진취약도 곡선(그림 2)을 도출하였

다. 이를 토대로 HAZUS 적용을 위한 입력 확률변수인 평균과 분산으로 정리하였다(표 4). 그림 8과 같이 HAZUS의 Analysis 메뉴의 하위 Damage Functions 기능에서 Fragility Curves의 Moderate-Code 탭 선택을 통해 도출한 취약도 곡선의 평균과 분산을 특정 취약도 곡선에 대해 수정 입력하였다. 그 외 건축물이나 시설물들의 지진취약도 곡선들은 구조물 형식별로 이미 HAZUS에 내장된 정보들을 이용하여 지진피해 평가 해석을 수행하였다.

3. HAZUS 적용 지진피해 평가 결과 및 토의

지진피해 예측을 통해 결과로 제시되는 피해 수준은 확률 근거에 따라 여러 단계로 구분된다. HAZUS에서는 피해 정도를 None부터 Slight, Moderate, Extensive, Complete의 순서로 총 5 단계로 제시하며, 지진취약도 곡선의 구분 단계와 동일하다. 또한, 각 시설물별 손상에 따른 피해액이 설정된 경우 손상 정도에 따라 자동적으로 피해액을 산출하여 제시해 준다. 본 연구에서는 대상 영역 내의 다양한 시설구

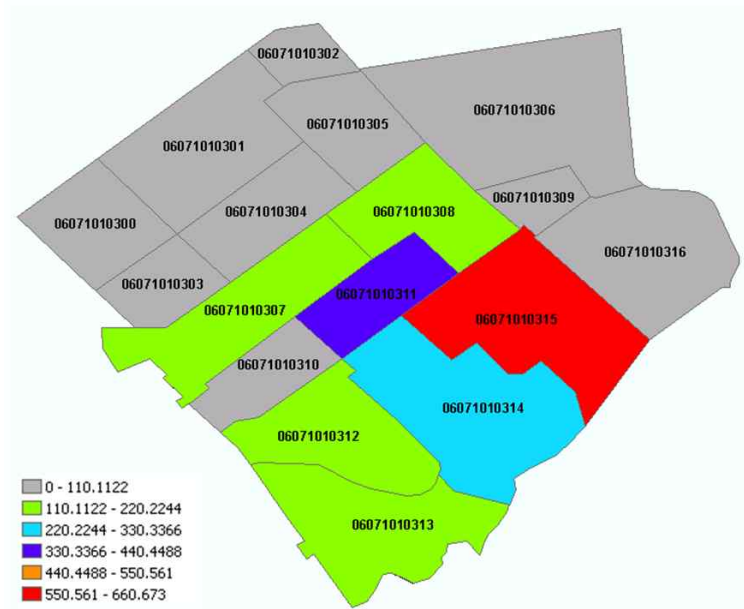


FIGURE 9. Estimated earthquake(magnitude 6.0) damage for building type S3 in the study area

조물들에 대해 유형을 분류하고 유형별 개수를 블록별로 구분하여 DB로 구현하였다. 피해액은 유형별 HAZUS의 기본 단위액을 적용하였다.

본 연구에서는 재현주기 500년 규모 6.0 및 재현주기 2500년 규모 6.5의 두 종류 지진 조건에 대해 피해평가를 수행하였다. 그림 9는 규모 6.0에 대한 구조물 재료유형 중 한 종류인 S3(steel light frame)에 대한 블록으로 할당된 Tract별 피해환산 면적을 피해정도에 따라 다른 색상으로 표출한 결과이다. 또한, 그림 10에는 규모 6.5에 대한 구조물 유형 C1L(low-rise concrete moment frame)의 Tract별 피해환산 면적을 가시화하였으며, 적색으로 제시된 블록이 피해정도가 가장 큰 Tract이다. 결과에 해당되는 구조물들은 Moderate-Code의 설계 조건에 대한 지진취약도 곡선이 적용된 사례이다. 비교 결과로 제시하지는 않았으나 이 연구의 해석 결과에서는 지진 규모 6.5가 규모 6.0에 비해 동일 구조물 형식의 경우 모두 피해정도가 크게 나타났다. 또한, 그림 9 및 10에

서 직관적으로 파악할 수 있듯이 시설물들이 많이 분포하는 블록에서 Tract별 지진피해 정도가 크게 발생함을 알 수 있다.

블록별 부지분류 정보에 따라 공간적으로 다른 피해정도를 보이는 결과들도 확인할 수 있었다. 저장탱크와 같은 대규모 시설물보다는 다양한 중소규모 시설물과 건축물들이 다수 분포하는 블록이 상대적으로 큰 피해 결과를 보였다. 주요 시설물의 경우 내진성능 수준이 일반 시설물들에 비해 상대적으로 높게 고려되므로 동일 지진 환경에서는 피해 정도가 경미할 수 있다. 반면, 중규모 지진에도 피해가 발생할 수 있는 여러 부속 시설물들에 대한 내진성능 재고가 필요할 것이다. 이 연구의 비교 결과는 제한적 지진 수준의 적용을 통해 도출된 것이므로, 향후 여기서 제시된 절차적 방법을 토대로 다양한 지진 환경에 대한 반영이 요구되며 대상 해안영역의 시설물 확충에 따른 추가적 HAZUS 적용 지진피해 예측도 고려될 수 있을 것이다.

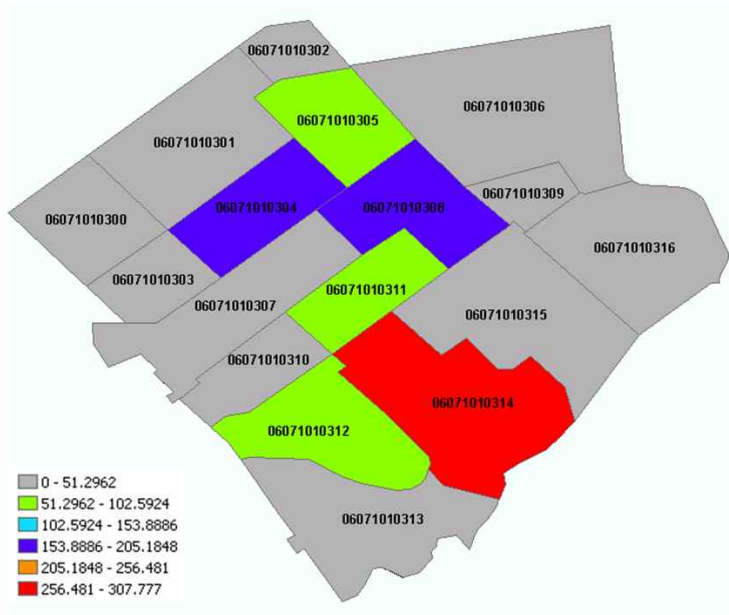


FIGURE 10. Estimated earthquake(magnitude 6.5) damage for building type C1L in the study area

요약 및 결론

다양한 해안시설 영역에 대한 효율적 지진피해 예측 평가 목적의 기법적 방안 제시를 위하여, 본 연구에서는 국내 해안 플랜트시설 영역을 선정하여 전세계적으로 가장 폭넓게 이용되고 있는 GIS 기반 지진피해 평가 시스템인 HAZUS를 적용한 예측 평가를 수행하였다. 특히, 금 번 HAZUS 기반 피해평가 과정에서는 실제 대상영역의 지반조사 자료의 종합 분석에 근거한 부지분류 조건을 HAZUS 내에서 분류 지도로 적용하여 지역적 지반 특성을 반영한 평가를 수행하였다. 이러한 분류 지도를 적용하지 않게 되면 대상 영역은 단일 부지로 분류되므로 그 지진피해 예측의 공간적 신뢰성이 저하될 수 있다. 또한, 대표적 시설구조물인 저장탱크의 지진취약도 함수를 차별적으로 도출 반영하여 예측 신뢰도를 향상시키기 위한 노력을 병행하였다. 다양하고 복잡한 HAZUS 구성 DB를 파악 분석하고 연구 영역의 지진피해 해석을


위한 DB 수정 반영을 성공적으로 진행하여 체계적인 HAZUS 적용 절차 기법을 확립하였다.

HAZUS 기반 지진피해 예측은 다양한 접근 기법 중 확률론적 방법을 적용하여 재현주기 500년의 규모 6.0 및 재현주기 2500년의 규모 6.5의 두 종류 지진 환경에 대해 수행하였다. 전체적인 예측 지진피해는 규모가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 그렇다 할지라도, 평가된 주요 지진피해는 저장 탱크와 같은 주요 시설물이 위치한 블록이 아닌 부속 시설물이나 건축물이 위치한 블록에서 발생하였다. 따라서 내진설계가 충분히 이루어진 주요 시설물보다는 내진성능 수준이 상대적으로 낮은 시설물들에서 중규모 지진 발생 시 피해가 발생할 가능성이 높다고 할 수 있다.

금번 연구에서는 HAZUS를 적용한 시범적 지진피해 추정을 위한 평가 해석을 통해 전반적인 HAZUS 활용 지진피해 예측 프레임워크를 제공하였으므로, 제시된 HAZUS 활용 절차 기법의 다양한 응용 및 확대 적용을 통해 다각적이

고 정밀한 지진피해 예측을 수행할 수 있을 것이다. 특히, 해안 매립 지역의 여러 지반 정보의 체계화를 통해 액상화 평가와 같은 추가적 지진피해 예측이 가능할 수 있다. 뿐만 아니라, 대상 영역 주변의 종합적인 지진학적 조사 및 특성 정량화에 따라서는 결정론적 지진피해 예측 적용과 함께 정밀 대축척 지반특성 분포 고려를 통한 진도분포도 기반의 다양한 시나리오 적용도 가능할 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 주요사업의 일환으로 수행 및 정리되었으며, 더불어 여러 결과 도출을 위해 직·간접적으로 도움을 주신 전문가들께도 감사드립니다. 

REFERENCES

- Borcherdt, R.D. 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra* 10(4):617-653.
- Fäh, D., F. Kind, K. Lang and D. Giardini. 2001. Earthquake scenarios for the city of Basel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 21(5):405-413.
- FEMA. 2006. HAZUS[®]MH MR2 User Manual. Federal Emergency Management Agency, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C.
- ICC. 2000. 2000 International Building Code. International Code Council.
- Kang, S.Y. and K.H. Kim. 2009. A case study of GIS-based site classification in the Gyeongsang Province constrained by geologic and topographic information. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 12(4): 136-145 (강수영, 김광희. 2009. GIS기반의 지질·지형 자료를 활용한 경상도지역의 지반분류 사례. *한국지리정보학회지* 12(4): 136-145).
- Kang, S.Y., K.H. Kim, D.C. Kim, H.S. Yoo, D.J. Min and B.C. Suk. 2007. A preliminary study of the global application of HAZUS and ShakeMap for loss estimation from a scenario earthquake in the Korean peninsula. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 10(1): 47-59 (강수영, 김광희, 김동춘, 유해수, 민동주, 석봉출. 2007. 지진재해예측을 위한 HAZUS와 ShakeMap의 한반도에서의 적용 가능성 연구. *한국지리정보학회지* 10(1):47-59).
- KIGAM. 2011. Development on technology of the real-time seismic monitoring and the seismic hazard prediction at metropolitan areas. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Ministry of Knowledge Economy. 147pp (한국지질자원연구원. 2011. 실시간 지진관측 및 대도시 지진위험도 예측 기술 개발. 지식경제부. 147쪽).
- Lee, S.H., B.G. Kim and D.G. Jeong. 2006. Database design for development of the GIS-based earthquake damage evaluation system of highway bridges. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea* 10(3):135-147 (이상호, 김봉근, 정동균. 2006. 도로교의 GIS 기반 지진피해 평가체계 구축을 위한 데이터베이스 설계. *한국지진공학회논문집* 10(3):135-147).
- Lee, S.H. and Y.G. Jang. 2007. Development of a web-based geospatial information system for analyzing and assessing geotechnical information. *Journal of the*

- Korean Association of Geographic Information Studies 10(4):142-152 (이상훈, 장용구. 2007. 지반정보 분석 및 평가를 위한 웹기반 지리공간정보 시스템 개발. 한국지리정보학회지 10(4):142-152).
- MOCT. 1997. Study of seismic design guideline(II). Ministry of Construction and Transportation. 492pp (건설교통부. 1997. 내진설계기준연구(II). 492 쪽).
- Nastev M. 2014. Adapting Hazus for seismic risk assessment in Canada. Canadian Geotechnical Journal 51(2): 217-222.
- NEMA. 2013. Public announcement of national seismic hazard maps. NEMA Announcement No. 2013-179, National Emergency Management Agency (소방방재청. 2013. 국가지진위험지도 공표. 소방방재청 공고 제2013-179호).
- NIDP. 2003. Study for the establishment of earthquake disaster information system. National Institute for Disaster Prevention, Ministry of Government Administration and Home Affairs. 109pp (국립방재연구소. 2003. 지진재해정보시스템 도입방안 연구. 행정자치부. 109쪽).
- Papatheodorou, C., N. Klimis, Pr. Moutsokapas, S. Koutrakis and B. Margaris. 2007. Geotechnical earthquake hazard assessment based on a GIS platform. Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Thessaloniki, Greece, June 25-28, 2007. Paper No. 1441.
- Park, J.N. and E.S. Choi. 2007. Fragility analysis for evaluation and comparison of seismic performance of building structures. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea 11(3): 11-21 (박주남, 최은수. 2007. 취약도 해석을 통한 빌딩구조물의 내진성능 비교 및 평가. 한국지진공학회논문집 11(3):11-21).
- Rashed, T. and J. Weeks. 2003. Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. International Journal of Geographical Information Science 17(6):547-576.
- Robinson, D., G. Fulford and T. Dhu. 2006. EQRM: Geoscience Australia's Earthquake Risk Model, Technical Manual Version 3.0. Record 2005/001. Geoscience Australia, Canberra, Australia.
- Rowshandel, B., M. Reichle, C. Wills, T. Cao, M. Petersen, D. Branum and J. Davis. 2004. Estimation of Future Earthquake Losses in California. California Geological Survey. 492pp.
- Schneider, P.J. and B.A. Schauer. 2006. HAZUS - Its development and its future. Natural Hazards Review 7(2):40-44.
- Silva, V., H. Crowley, M. Pagani, D. Monelli and R. Pinho. 2014. Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. Natural Hazards 72(3): 1409-1427.
- Sun, C.G. 2010. Seismic site classes according to site period by predicting spatial geotechnical layers. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 13(4):32-49 (선창국. 2010. 홍성 지역의 공간 지층정보 예측을 통한 부지주기 토대의 지진공학적 부지분류. 한국지리정보학회지 13(4):32-49).

- Sun, C.G. 2012. Applications of a GIS-based geotechnical tool to assess spatial earthquake hazards in an urban area. *Environmental Earth Sciences* 65(7): 1987-2001.
- Sun, C.G., B.S. Jung, J.H. Kim, S.K. Hong and K.S. Kim. 2010. Implementation of earthquake alarming system based on acceleration monitoring for coastal LNG receiving terminals. *The Journal of Engineering Geology* 20(3):339-348 (선창국, 정병선, 김준호, 홍성경, 김기석. 2010. 해안 천연가스 인수기지에 대한 가속도 계측 기반의 지진경보 시스템 구축. *지질공학* 20(3):339-348).
- Sun, C.G., C.S. Cho, M. Son and J.S. Shin. 2013. Correlations between shear wave velocity and in-situ penetration test results for Korean soil deposits. *Pure and Applied Geophysics* 170(3):271-281.
- Sun, C.G., D.S. Kim and C.K. Chung. 2005. Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea. *Engineering Geology* 81(4):446-469.
- Sun, C.G. and S.H. Chun. 2013. A preparatory study on the application of HAZUS for earthquake loss estimation at a coastal facility area in Korea. *Proceedings of the Earthquake Engineering Society of Korea Conference 2013*. pp.15-18 (선창국, 천성호. 2013. 국내 해안 시설 영역의 지진피해 예측을 위한 HAZUS 적용성 고찰. 2013년 한국지진공학회 학술 발표회 논문집. 15-18쪽).
- Sun, C.G., S.H. Chun, T.G. Ha, C.K. Chung and D.S. Kim. 2008. Development and application of GIS-based tool for earthquake-induced hazard prediction. *Computers and Geotechnics* 35(3):436-449.
- Sun, C.G., Y.J. Mok, C.K. Chung and M.M. Kim. 2006. Reliable evaluation of dynamic ground properties from cross-hole seismic test using spring-loaded lateral impact source. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea* 10(4):1-13 (선창국, 목영진, 정충기, 김명모. 2006. 스프링식 횡방향 발진 크로스홀 탄성과 시험을 통한 지반 동적 특성의 합리적 산정. *한국지진공학회 논문집* 10(4):1-13).
- Um, D.Y. 2008. A study of damage district forecast by imaginary tsunami scenario. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 11(1):105-115 (엄대용. 2008. 가상 지진해일 시나리오에 의한 피해지역 예측에 관한 연구. *한국지리정보학회지* 11(1): 105-115).
- Zadeh, M.M. 2005. An overview of HAZUS-MH earthquake loss estimation module. *Proceedings of the Earthquake Engineering Society of Korea Workshop 2005*. pp.117-129 (Zadeh, M.M. 2005. An overview of HAZUS-MH earthquake loss estimation module. *한국지진공학회 2005년도 Workshop 발표집*. 117-129쪽).
- FEMA. 2014. Hazus Software. <http://www.fema.gov/hazus-software>. 