

Ministry of Land Infrastructure and
Transport R&D Report

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()
국토교통기술촉진사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 18CTAP-C129738-02

지진재난대응력 강화를 위한 건축물 손상-손실 관계를 고려한 내진성능 지수 개발

최종보고서

2019. 02. 07.

주관연구기관 / 연세대학교
공동연구기관 / (주)쓰리디구조엔지니어링
위탁연구기관 / 현대해상화재보험(주)

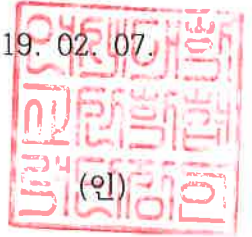
국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘지진재난대응력 강화를 위한 건축물 손상-손실 관계를 고려한 내진성능지수 개발’(연구개발 기간: 2017.04.01. ~ 2018.12.31.)과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 02. 07.



주관연구기관명: 연세대학교 산학협력단 (대표자) 이원용

공동연구기관명: (주)쓰리디구조엔지니어링 (대표자) 정석재

위탁연구기관명: 현대해상화재보험(주) (대표자) 이철영 • 박찬종

주관연구기관책임자: 김 준 희

공동연구기관책임자: 정 석 재

위탁연구기관책임자: 백 천 우

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129738-02	해당 단계 연구 기간	2017.04.01.~ 2018.12.13.	단계구분	2차년도/ 2차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	지진재난대응력 강화를 위한 건축물 손상-손실 관계를 고려한 내진성능지수 개발			
연구책임자	김 준 희	해당단계 참여연구원 수	총: 16명 내부: 8명 외부: 8명	해당단계 연구비	정부: 220,000천원 기업: 74,000천원 계: 294,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 16명 내부: 8명 외부: 8명	총 연구비	정부: 370,000천원 기업: 124,000천원 계: 494,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	연세대학교 산학협력단			참여기업명	(주)쓰리디구조엔지니어링
국제공동연구	해당사항 없음			해당사항 없음	
위탁연구	연구기관명: 현대해상화재보험(주)			연구책임자: 백 천 우	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	해당사항 없음				
-------------------------	---------	--	--	--	--

9대 성과 등록 · 기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록 · 기 탁 번호	3	2									

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설 · 장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

요약

- 본 연구의 목적은 지진시 건축물의 고유기능이 유지되어야 하는 주요시설물을 대상으로 지진에 의한 손상-손실 관계를 고려한 사용자 기반 내진성능지수를 제시함으로써, 지진재난 대비 및 대응단계에서 사용자의 의사결정을 지원할 수 있는 데이터 및 플랫폼을 제공하는데 있음
- 건축물을 구성하는 구조재 및 비구조재를 대상으로 사용자가 고려할 수 있는 요소들을 선택하여 내진성능평가에 반영할 수 있는 최적 지진취약도 평가기법을 개발하였음
- 건축물 구성요소의 물리적 손상과 손실과의 상관관계분석을 통해, 건축물의 수리비용을 평가하는 지진손실통계 기법을 개발하였음
- 재난대비 및 대응단계에서 잠재적 사용자인 정부, 보험회사, 엔지니어의 다양한 의사결정을 지원할 수 있는 데이터를 제공하는 사용자기반 내진성능지수를 제시하였음

보고서 면수: 118쪽

국문 요약문

연구의 목적 및 내용	지진재난에 대한 비구조재의 손상은 지진피해손실에 매우 높은 영향을 미치는데도 불구하고, 현재 <u>내진성능평가법은 비구조재의 손상 및 손실의 영향력을 전혀 고려하지 않는다</u>. 따라서 본 연구에서는 지진재난대응력 강화를 위한 <u>건축물 손상-손실 관계를 고려한 사용자 기반 내진성능지수를 개발</u>하고자 한다. <u>지진재난 대비 및 대응단계에서 사용자의 의사결정을 지원할 수 있는 데이터 및 플랫폼을 제공</u>하고자 한다. 본 연구는 건축물 내진성능평가의 <u>잠재적사용자(정부, 보험회사, 엔지니어)</u>의 중요요인을 반영하여, 건축물의 지진취약도와 지진손실 관계를 고려한 사용자기반 내진성능지수를 제시하고자 한다. 연구목표의 달성의 위하여, <u>다음과 같이 3가지 세부연구가 수행</u>된다. ○ 첫째, <u>내진성능평가지 사용자가 고려할 수 있는 요소들을 선택하여 결과에 반영</u>할 수 있도록, 건축물 구조재 및 비구조재의 지진취약도를 평가하는데 영향을 주는 최적 지진강도(Intensity Measure)와 최적 지진반응계수(Engineering Demand Parameter)를 도출하고, 이를 기반으로 <u>지진취약도를 평가하는 기법 개발</u> ○ 둘째, <u>건축물의 구조재 및 비구조재의 손상도를 지진손실액으로 연결시켜 지진손상에 의한 정량적인 피해규모를 예측</u>하기 위한, 지진에 의한 손상도에 따른 실제 수리비용 및 보수비용의 상관관계를 분석하고, 이를 기반으로 <u>지진손상에 대한 피해규모를 정량화하는 기법 개발</u> ○ 셋째, 앞서 개발된 두 가지 평가 기법을 통합하여, 건축물의 내진성능평가지 내진등급이 하나로 결정되는 것이 아닌, 구조적 안전성, 수리비용, 정책방향 등 <u>잠재적사용자의 실제니즈를 반영한 사용자의 의사결정을 지원할 수 있는 사용자 기반 내진성능지수 개발</u>				
연구개발성과	○ 건축물의 구조재 및 비구조재 요소를 대상으로 사용자가 고려할 수 있는 요소들을 선택하여 내진성능평가에 반영할 수 있도록 도와줄 수 있는, <u>각 요소별 최적 지진강도와 최적 지진반응계수 도출을 통한 최적 지진취약도 평가 기법</u> ○ 건축물의 물리적 손상(균열, 탈락, 등)과 손실(수리비용, 보수비용, 2차적 피해 등)의 상관관계분석을 통해, 건축물의 지진손상정도에 따른 지진손실액의 관계를 규명할 수 있는 <u>목표성능수준 및 손상도지표를 고려한 지진손실평가 기법</u> ○ 재난대비 및 대응단계에서 잠재적사용자인 정부, 보험회사, 엔지니어가 건축물의 내진성능을 파악하여, 다양한 의사결정을 지원할 수 있는 데이터를 제공하는 <u>확률적 피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수</u>				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ <u>연구결과물</u>은 내진성능평가지 사용자에게 따라 다양한 의사결정 과정에서 활용될 수 있다. <u>정부측면</u>에서는 유사조건을 가진 <u>건축물의 내진성능을 피해규모를 고려하여 객관적으로 분류가 가능하며, 보험회사 측면</u>에서는 <u>재해리스크 모델(CAT Model) 개발에 필요한 요소기술로 사용</u>되어 지진손실액을 고려한 정확한 지진보험요율이 책정 가능하며, <u>구조사무소와 같은 엔지니어 측면</u>에서는 정량화된 내진성능지수를 바탕으로 <u>내진성능평가 용역에 대한 합리적인 비용으로 기술제공이 가능하다</u>. ○ <u>연구결과물</u>은 내진설계 및 내진보강이 필요한 건축물들을 대상으로, 보강이 필요한 건축물들을 선별할 수 있으며, <u>내진성능 관련 상담을 수행하는 신사업으로 창출이 가능할 것으로 예상된다</u>. ○ <u>연구결과물</u>은 개별 위험요인이 반영된 합리적인 지진요율산정을 마련하여, 위험특성을 반영한 보험료 현실화 및 차등화가 가해지며, <u>민관 협업을 통해 지진보험 시장 활성화의 계기를 마련</u>할 수 있다.				
핵심어 (5개 이내)	내진성능	손실평가	사용자기반	비구조재	의사결정지원

〈 목 차 〉

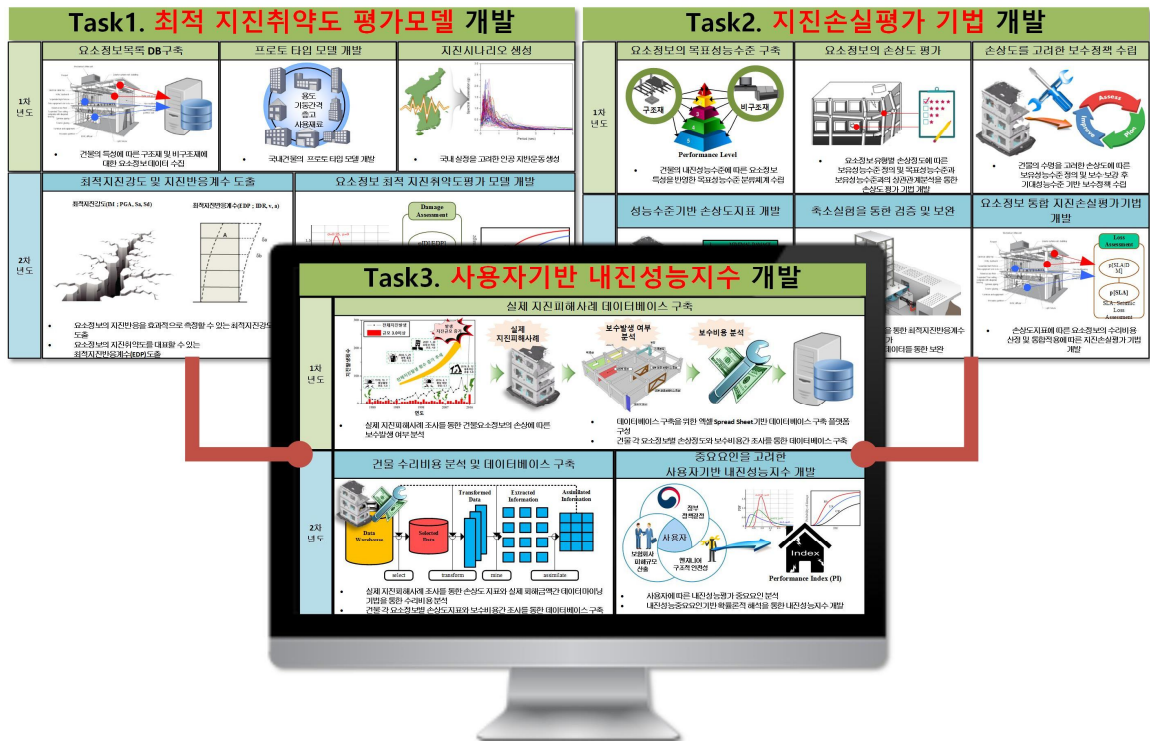
제1장. 연구개발과제의 개요	6
1. 연구개발의 목적	6
2. 연구개발의 필요성	7
가. 연구의 배경	7
나. 연구개발의 중요성	8
다. 국내외 정책현황	9
라. 국내외 연구개발 현황	11
3. 연구개발 범위 및 수행 방법	14
가. 최종목표 및 연구개발 내용	14
나. 연구개발 관련 기술 정의 및 연차별 연구계획	15
다. 연구개발 범위 및 수행방법	18
 제2장. 연구 수행 내용 및 성과	20
1. 핵심성과 1: 구조재 및 비구조재의 최적 지진취약도 평가 기법 개발	20
가. 단위성과 1-1-①: 구조재 및 비구조재의 요소정보 분류체계 수립	20
나. 단위성과 1-2-①: 프로토타입 모델 개발	22
다. 단위성과 1-3-①: 스펙트럼기반 지진하중시나리오 작성	25
라. 단위성과 1-4-①: 최적지진강도 및 최적지진반응계수 도출	27
마. 단위성과 1-5-①: 지진취약도 평가 모델 개발	37
2. 핵심성과 2: 목표성능수준 및 손상도를 고려한 지진손실평가기법 개발	45
가. 단위성과 2-1-①: 요소정보의 목표성능수준 구축	45
나. 단위성과 2-2-①: 요소정보의 손상도 평가	49
다. 단위성과 2-3-①: 손상도를 고려한 보수정책 수립	55
라. 단위성과 2-4-①: 성능수준기반 손상도 평가	59
마. 단위성과 2-5-①: 축소실험을 통한 건축물 손상도 평가	66
바. 단위성과 2-6-①: 요소정보 통합 지진손실평가 기법 개발	69
3. 핵심성과 3: 피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발	73
가. 단위성과 3-1-①: 지진피해사례 데이터베이스 구축	73
나. 단위성과 3-2-①: 건물수리비용 분석	28
다. 단위성과 3-3-①: 사용자기반 내진성능지수 개발	83
4. 핵심성과 및 성과유형	85

제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	86
1. 목표 달성도	86
가. 연구개발성과 및 평가방법	86
나. 정량적 연구성과 목표 및 달성도	87
다. 성과목표에 대한 자체 평가	91
2. 관련분야 기여도	93
제4장. 연구개발성과의 활용 계획	95
1. 연구개발성과의 활용 방안	95
가. 기술 수요처	95
나. 실용화 방안	95
다. 신사업 창출	96
2. 기대효과	96
가. 기술적 측면	96
나. 경제/산업적 측면	96
다. 사회적 측면	98
붙임. 참고 문헌	99
별첨 1. 최종보고서 연구개발의 상세 내용	110
부록 1. 요소정보 지진취약도 데이터 베이스	112
부록 2. 경주지진 지진손실 데이터 베이스	114
부록 3. 포항지진 지진손실 데이터 베이스	116

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 목적

- 연구의 최종목표는 주요시설물의 지진재난에 의한 지진위험도를 정량적으로 평가하기 위한 지진손실액을 고려한 내진성능평가 방법을 개발하고자 한다. 이러한 연구목표의 달성을 위한 방안으로써, 본 연구에서는 구조재 및 비구조재의 최적 지진취약도평가 기법과 지진에 의한 손상과 손실의 상관관계 분석을 통한 새로운 건축물 내진손실평가 기법을 이용하여, 잠재적 사용자인 정부, 보험회사, 엔지니어의 실제 니즈를 반영한 사용자의 의사결정을 지원할 수 있는 사용자 기반 내진성능지수를 개발하고자 한다.
- 연구결과물은 정부, 보험회사, 엔지니어와 같은 잠재적사용자가 필요한 건축물의 내진성능을 평가할 수 있는 기술을 제시하여, 건축분야의 새로운 시장을 창출할 수 있는 계기를 마련할 수 있을 것으로 기대된다.



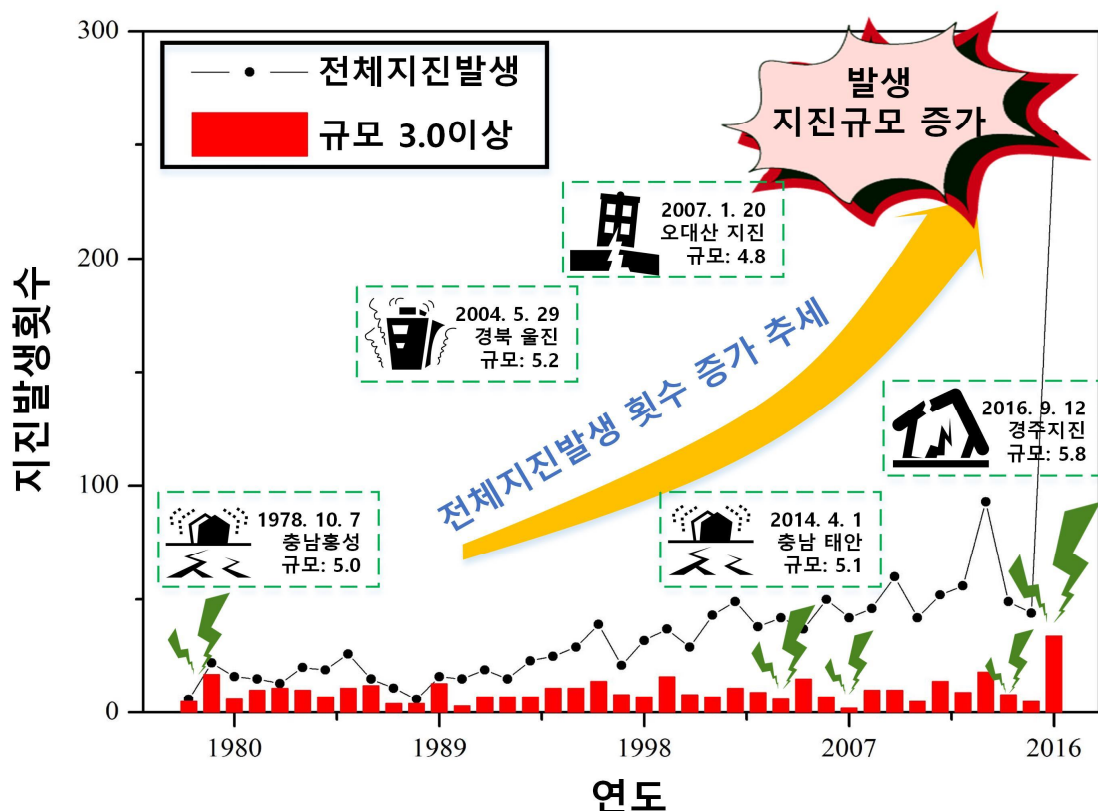
**건축물 손상-손실 관계를 고려한
사용자 기반 내진성능지수 개발을 통한
건축분야의 새로운 시장 창출**

<그림 1.1> 연구의 개념도

2. 연구개발의 필요성

가. 연구의 배경

- 우리나라는 지진관측을 시작한 1978년 이후 지진발생횟수가 증가하고 있는 추세이며, 최근 2016년 규모5.8의 경주지진과 같이 규모가 큰 지진이 발생하면서 지진에 대한 안전의식이 강화되고 있다.
- 국내 건축물의 내진설계는 1988년 건축법 제정 이후 처음 도입되었으며, 이후 지속적으로 확대되어 2017년 1월에는 2층 이상 500m²이상(건축법 시행령 제32조) 건축물에 대해 의무적으로 내진설계를 적용하도록 강화되고 있는 추세이다. 하지만 내진설계가 3층 이상 건물(2005년 7월 18일)로 확대되기 전 지어진 건물이 약 634만동으로 현재 건물의 약 91%로 대다수이며, 2015년 12월을 기준으로 국민안전처에 따르면 전체 건물 6,966,913동 중 내진설계된 건물은 475,336동으로 약 6.8%에 그치는 것으로 보고되고 있다. 이러한 상황에서 국민안전처는 2016년 5월 지진대책 TF를 구성하여 ‘지진방재 개선대책’을 마련하였고, 건축물에 대한 내진보강을 통해 2020년까지 내진성능이 확보된 건축물의 비율을 확대하겠다고 발표하였다.
- 따라서 건축물 재난대응력 강화에 관심이 증가하고 있는 현실적 상황에서 건축물의 내진보강에 가속도가 붙을 것으로 예상되므로, 우선순위 평가의 의사결정을 지원할 수 있는 정확한 내진성능평가 기법의 적용이 필요한 시점이라고 할 수 있다.



<그림 1.2> 국내지진 연도별 지진발생추이 및 주요지진 현황 (기본자료 출처: 기상청, 2017)

나. 연구개발의 중요성

- 국민안전처에서 2005년도부터 운영하고 있는 지진재해대응시스템은 지진발생 직후 인명 및 건축물의 피해를 추정하여 지진발생초기상황에 대한 신속한 의사결정을 지원하는 시스템이다. 2017년 5월 국민안전처에서 발행한 “9.12지진 백서”에는 2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주지진에 대한 실제피해규모와 지진재해대응시스템으로 예측한 피해규모에 대해 정리되어 있다. 정리된 내용을 살펴보면, 인명피해, 이재민, 건축물피해, 경제적 손실부분에서 실제 피해상황과 추정치의 차이는 매우 큰 것으로 조사되었다. 또한 지진재해대응시스템은 지진으로 인해 발생하는 건축물의 경제적 손실을 예측할 수 없어, 정부기관이나 보험회사 등과 같은 사용자의 의사결정을 지원하기 어려운 한계점을 가진다고 할 수 있다.
- 경주지진 이후, 건축물의 내진성능의 확보를 위해 많은 내진관련 정책이 추진되고 있다. 2017년 1월 20일에는 건축물대장에 건축물의 내진설계 여부를 표시하도록 시행하고 있으며, 2017년 2월 4일에는 내진설계 의무대상을 기존 3층 이상 연면적 500m²이상에서 2층 이상 연면적 500m²이상으로 강화되었다. 기존 건축물에 대한 내진성능을 확보하기 위한 방안으로는 2017년 3월 21일 발표된 “기존 공공시설물 내진보강대책”이 있다. 이 대책에 따르면, 2017년도에 총 8,393억원을 투입하여 2,542개소에 내진보강사업을 추진할 계획이다. 이 중 주요시설물에 해당하는 소방서, 학교 등에 할당된 예산은 3,513억원으로 전체 예산의 41.9%에 해당된다. 이는 최근 5년간 실적대비 평균 2배가 증가한 수로, 정부차원에서 기존 공공시설물의 내진성능을 확보하기 위한 노력을 수행중이다.
- 본 연구의 목표는 건축물의 지진에 의한 손상을 손실로 연결시켜, 구조재 및 비구조재의 지진손실을 고려한 내진성능지수를 개발하는데 있다. 또한 주요시설물인 학교, 소방서, 학교, 경찰서, 공공시설 중 대상건축물을 정하여 연구를 진행하기 때문에, 국내의 내진관련 정책의 흐름과 본 연구의 방향은 상당부분 일치한다고 할 수 있다.

<표 1.1> 경주지진에 의한 실제피해규모와 기존 지진대응시스템의 예측피해규모 비교

비교항목	실제 경주지진 피해	지진재해대응시스템 예측 피해
지진 규모	리히터 규모 5.8	리히터 규모 5.8
인명피해	부상자 23명	없음
이재민	111명 발생	없음
건축물피해	5,644동 주택파손 (전파: 8, 반파: 46, 소파: 5,610)	212동 (소파, 경북: 174동, 울산 38동)
경제적 손실	145억원	예측불가

다. 국내외 정책현황

(1) 국내 정책 현황

정부는 건축물에 대한 내진성능확보 비율을 강화하기 위해, 건축법을 개정하거나 관련대책을 마련함으로써 지속적으로 노력하고 있다. 국내에서 건축물의 내진성능을 확보하기 위한 시행 중인 주요 정책을 정리하면 <표 1.2>과 같다.

<표 1.2> 국내 건축물 내진성능 확보를 위한 주요 정책

정책	내용	주요 특징
건축법 개정 (1988)	내진설계 기준 최초 도입	내진설계 적용대상 : 6층 이상 또는 연면적 100,000m²이상, 바닥면적 10,000m² 이상인 판매시설, 5,000m² 이상인 관람집회시설, 1,000m² 이상인 종합병원, 발전소, 공공업무시설
건축법 개정 (2005, 2009)	- 비선형해석법/내진설계 특별고려사항 추가 (2005) - 상세 지진재해도, 내진설계범주 설정, 상세한 구조형식 분류 (2009)	내진설계 적용대상 범위 확대 : 3층 이상 건축물, 연면적 1,000m² 이상
지진재해대책법 (2008)	- 지진재해 대비 및 보호를 위한 국가 및 재난관리책임기관의 책무근거마련 - 내진설계기준 설정 - 기존 시설물에 대한 내진보강기본계획 수립 - 지진재해경감 연구 및 기술개발	- 내진설계기준 제정 이전에 설치된 공공시설물에 대해 내진성능 향상을 위해 5년마다 내진보강기본계획을 수립하고, 내진보강이 필요한 공공시설물에 대해 내진보강사업을 추진하도록 함 - 피해시설물에 대한 사용가능 여부 등 위험도 평가를 위하여 지역본부장이 피해시설물 위험도 평가단을 구성·운영하도록 함
지진방재개선대책 (2016)	- 지진 발생시 신속한 지진정보 전파체계 구축 - 주요시설물 내진설계 강화 - 대응 및 교육·훈련 확대 - 지진대비 인프라 확충	- 내진설계 대상 신규 건축물의 범주를 3층 이상 또는 연면적 500m²에서 2층 이상 또는 연면적 500m²으로 확대 - 내진보강 2단계 계획에 따라 주요시설물 내진보강율을 2020년 까지 49.4% 까지 향상 계획 수립 - 국가 주요기반시설 조기 내진보강 대책 및 비구조체에 대한 내진기준 정립 추진 - 건축물 대장, 부동산 중개물 확인서 등에 내진성능 확보여부 표시 방안 추진

(2) 국외 정책 현황

국가에 따라 차이는 존재하지만, 지진이 빈번히 발생하는 미국, 일본, 호주, 뉴질랜드 등 주요국들은 지진재난에 대한 건축물의 내진성능을 확보하기 위한 다양한 노력을 하고 있고, 시행 중인 주요 정책은 <표 1.3>와 같다.

<표 1.3> 국외 건축물 내진성능 확보를 위한 주요 정책

정책	내용	주요 특징
연방재난관리청 HAZUS시스템 (미국)	• 국가지진재해경감프로그램 (NEHRP) 수립 • USGS에서 확률론적 방법에 의한 국가 광역지진 위험도 지도 발표 및 5년마다 갱신 • 지진 발생 초기에 주요 시설들의 피해예측 및 경제적 손실예측 등을 통해 신속한 대응조치를 가동할 수 있는 기반 구축 • 1977년 지진재해경감법이후 지속적으로 확대 강화	• 미국은 지진재해경감법(1977)을 제정하여 재정지원, 프로그램 운영 등 지진피해 감소를 위해 정책 제시와 추진방안을 구체적으로 제시함 • 지진 발생시 피해감소 방안 개발 및 복구능력 향상을 목적으로 실시되고 있음 • HAZUS는 지진과 같은 자연재해에 의한 피해규모를 평가하기 위하여 개발된 것으로 경제적 및 사회적인 손실도 추정을 하며, 경제적 손실은 구조체 및 비구조체의 피해, 재이주 비용, 상업 자산의 손실, 자본관련 손실 등을 포함함.
재해정보시스템 (일본)	• 2004년 말부터 국가지진위험도에 대한 정보제공 서비스 시작 • 내진개수축진법을 통해 기존 건축물의 내진보강사업을 지속적으로 추진 • 지진 발생으로 큰 피해가 발생했을 때 지진피해예측 및 대응방안에 대한 정보를 제공하는 시스템 구축	• 코드 제정 이전에 지어진 건축물에 대해 내진보강을 추진하였으며, 공공시설로 사용되는 건축물의 내진화를 의무화하는 법이 제정 • 2013년 개정을 통해 주택 및 다수가 이용하는 건축물의 내진성능확보율을 2020년까지 95%로 상향하도록 추진함 • 내진기준 제정 이전 건축물을 대상으로 건물 유형, 지역, 내진성능 보유정도에 따라 차등하게 보조 • DIS는 지진피해조기평가 시스템(EES)와 응급대책지원시스템(EMS)로 구성
지진위험도 AEMI (호주)	• 국가 내진기준 수립 및 건축물의 내진성능평가와 내진보강 설계 및 상세에 대한 최소요건 제시 • 지진위험지도를 통한 현재 지진관련 건축기준들의 개정에 대한 정보 제공	• 지진에 의한 건축물의 붕괴 가능성과 인명피해를 최소화하기 위해 구조재뿐만 아니라 간단한 표를 이용해 비구조체의 지진취약도 평가를 실시하도록 함
지진위원회 법 (뉴질랜드)	• 재난시 지진위원회의 역할, 기능, 피해대상 건물주의 감세, 자연재해 기금 규정	• 지진대책위원회(EQC)에서는 지진발생에 대비할 수 있는 매뉴얼 등을 제공

라. 국내외 연구개발 현황

(1) 국내 연구개발 현황

<표 1.4> 연구과제 관련 국내 주요 연구현황

선행연구	연구기간	연구내용	연구의 특화성
학교안전강화를 위한 내진성능통합 평가 모형 개발	15.01 - 15.12	- 구조재 및 비구조재에 시설상태를 조사하여 국내 학교시설의 내진성능 특성을 도출 - 개발된 평가모델이 효율적으로 적용되도록 프로세스 및 단계별 지원자료 개발	비구조에 대해 육안검사를 통한 개략적인 내진성능 평가 기준 제시
극한 외부사건 리스크평가 기술 개발	12.03 - 17.02	- 설계초과지진 발생 시 구조물 거동의 상세 분석을 통한 지진리스크 평가의 신뢰성 확보기술 개발 - 구조물의 비선형 거동 특성 분석을 통한 강진 시 구조물의 거동 평가기술 개발	지진과 같은 극한 외부사건에 대한 리스크 평가체계 및 툴을 확보하여 외부사건에 대한 재해평가기술 확보
지진피해 취약도함수 국산화 연구	07.01 - 08.12	- 지진취약도함수 도출기법을 비교 검토하는 연구 - 시설별 피해취약도함수를 국산화하는 연구 - 기존 교량 구조물의 지진취약도함수 국산화 연구 및 산업용 시설물의 취약도 분석	지역특성을 고려하여 지진취약도함수를 보강, 개선하여 지진재해의 사전예방효과에 기여
건물의 구조적 용도를 고려한 지진 취약도 도출 기법 개발	15.11 - 18.10	- 건축물의 구조적 이용도를 고려하여 지진에 대한 취약도 곡선을 도출 - 취약도에 따른 붕괴모드를 예측하는 기법을 개발	- 지진재난상황에 대한 구조재의 손상도를 지표화 - 재난관리를 위한 구조물 취약도 평가 방법 검토
장수명화 건축물을 위한 구조성능 평가방법 개발	05.06 - 14.02	- 국내 지반 및 지역 특성을 반영하여 작성한 지진하중과 정확한 해석법을 이용한 내진성능평가 방법 개발 - 등가 단자유도 응답 예측법과 비탄성 변위응답계수를 사용한 지진에 대한 간략하고 정확한 해석법 개발	- 간단한 수식을 이용한 비탄성 응답을 예측 - 지진에 대한 구조물 취약도 평가를 통한 보수, 보강 필요 여부를 검토 - 지진으로 인한 구조물의 경제적 손실 저감
철근콘크리트 공동주택의 내진성능평가와 내진설계기준의 검증	12.09 - 14.08	- 철근콘크리트 주거용 건물의 다양한 프로토타입 해석모델 개발 - 설계하중, 세장비, 구조형식에 따른 내진성능예측 매트릭스 개발 - 예제 건물들의 내진성능 분석	- 신뢰성이 있는 지진 피해 예측이 필요한 분야에 있어 현행 내진설계 기준의 적합성을 판단 - 현행 내진설계에 맞는 한국형 아파트의 기초물량 산출

(2) 국외 연구개발 현황

<표 1.5> 연구과제 관련 국외 주요 연구현황

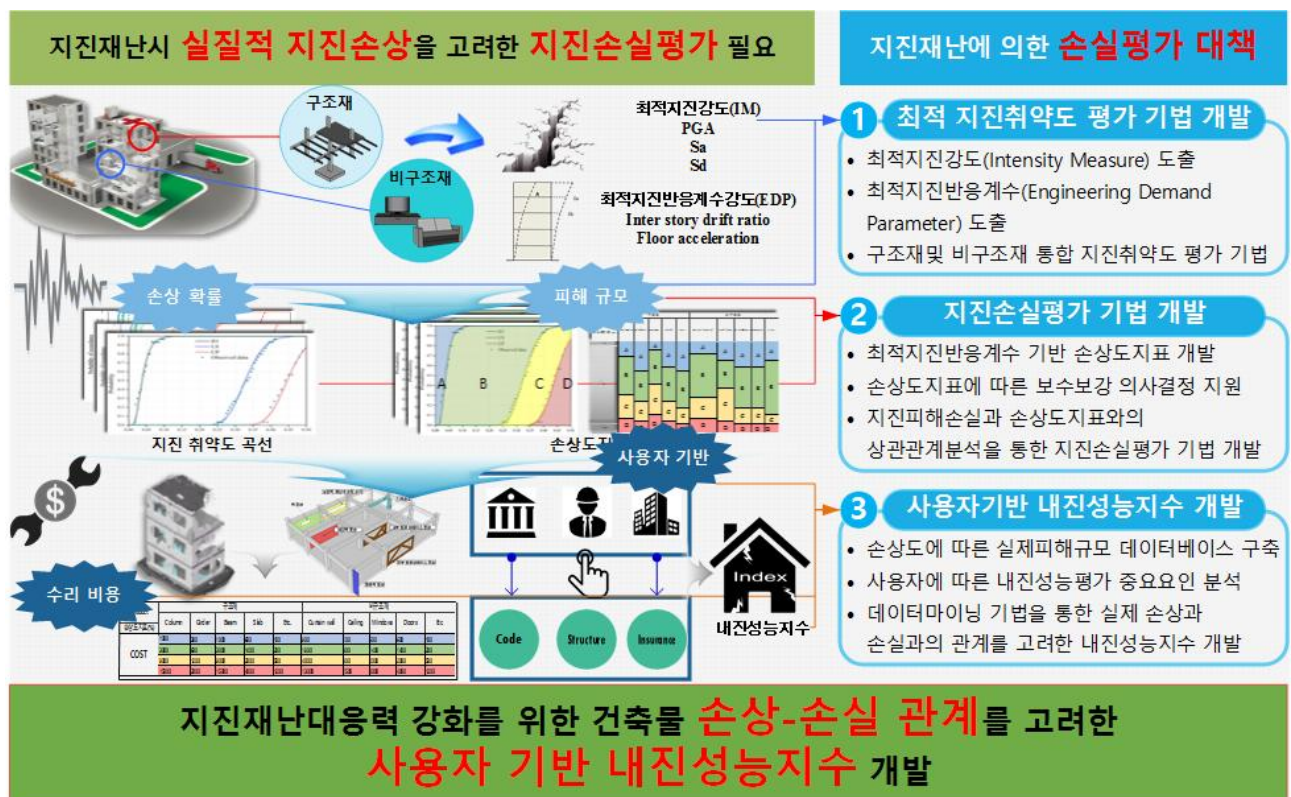
선행연구	연구기간	연구내용	연구의 특화성
Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data	2003	• 유럽환경에서의 지진피해 시나리오를 도출하여 지진취약도 평가 진행 • RC 구조물에 19개의 지진가속도를 사용하여 구조물의 정량적 피해를 예측	• 구조물의 관찰-실험-해석 단계를 통해 신뢰할 수 있는 취약도 곡선을 제안 • RC구조형식에 대한 개략적인 지진취약도 평가
Methodology for the development of analytical fragility curves for retrofitted bridge	2008	• 교량구조물의 지진취약도를 평가하기 위한 해석적 방법 제안 • 교량의 다양한 보강방법에 의한 보강전, 후의 지진취약도 평가	• 보강된 교량구조물의 취약도 곡선을 개발하기 위한 방법론 제시 • 보강방법에 의해 차이를 나타내는 Damage State의 정량화
Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios	2008	• HAZUA-MH의 데이터를 기반으로 한 확률적 손상평가를 위한 대상구조물(교량)의 지진취약도 평가	• 대상구조물의 구조형식과 높이, 지역계수에 따른 지진취약도를 평가하는데 한계가 있음
SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk	2014	• Building, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities의 확률적 손상을 기반으로 지진피해를 예측 • 구조물의 높이, 내진설계의 유무 등을 기준으로 확률적 피해를 예측	• 구조물의 용도, 높이에 따른 구조재 및 비구조재의 정량적 피해를 도출 • 구조물의 용도, 높이에 따른 확률적 피해를 계산하였지만 다양한 구조형식과 재료가 고려되지 않은 한계가 있음
FEMA P-58: Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1- Methodology	2012	• 취약도 데이터 수집하여 건축물의 지진취약도를 평가하는 개략적인 방법을 제시함 • 구조재와 비구조재의 지진에 대한 성능을 평가하기 위한 방법이 제안됨	• 건축물의 증분동적해석 없이, 간략한 지진취약도를 평가하는 방법을 제시 • 건축물의 시공연도, 내구성 등을 고려하여, 지진에 대한 건축물의 손상도를 평가하는 방법을 제시

- 우리나라를 포함한 세계의 주요 국가들은 지진재난에 의한 건축물의 재난대응력을 강화하기 위하여, 건축물의 내진성능을 확보하기 위한 다양한 정책을 시행하고 있다. 현재 시행되는 내진성능확보 정책은 기존 건축물의 내진성능평가와 신축 건축물의 내진설계강화의 측면으로 구분된다.
- 미국의 경우, 지진재해경감법(1977)을 제정하여 재정지원, 프로그램 운영 등 지진피해 감소를 위해 정책 제시와 추진방안을 구체적으로 제시하고 있고, 국가지진재해경감프로그램(National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP)을 수립하여 지진 발생시 피해감소 방안 개발 및 복구능력 향상을 목적으로 실시되고 있다. 특히, 연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency, FEMA)에서 HAZUS시스템을 구축하여 지진 발생 초기에 주요 시설들의 피해예측 및 경제적 손실예측 등을 통해 신속한 대응조치를 가동할 수 있는 기반 구축 및 운영하고 있다. 일본의 경우, 지진 발생으로 큰 피해가 발생했을 때, 피해에 대한 각종 정보가 부재한 상태에서 대응조치를 가능한 한 신속하고 효율적으로 수행할 수 있도록 지진피해예측 및 대응방안에 대한 정보를 제공하는 시스템인 DIS(Disaster Information System)를 구축하여 운영하고 있다.
- 우리나라 또한 내진성능평가지 비구조재에 대한 부분에 대해 고려를 진행하기 위해, 2016년 ‘지진방재 개선대책’에서 비구조재에 대한 내진설계기준을 마련한다고 하여, 앞으로 기존 건축물의 내진성능평가지 비구조재를 고려하여 진행될 가능성이 높다고 할 수 있다. 하지만, 우리나라는 비구조재의 내진성능평가를 위한 관련기준이 없을뿐더러, 지진에 의한 피해규모를 고려할 수 있는 시스템이 없는 실정이다. 이에 따라, 우리나라는 앞으로 비구조재를 포함한 내진성능평가 기법을 개발하는 동시에, 지진에 의한 손상을 손실로 연결시킬 수 있는 방법을 통해 사용자의 의사결정을 도울 수 있는 방안이 모색되어야 할 것이다.
- 대부분의 국내 연구는 지진에 대한 구조재의 손상도를 평가하는데 집중하였고, 다른 한편으로는 비구조재에 대한 내진성능평가에 대한 연구가 수행되었지만, 육안검사를 통해 평가하는 수준에 그치고 있다. 해외에서는 비구조재에 대한 내진성능평가를 지진에 대한 취약도를 통해 평가하는 연구가 수행되었다. 특히, 지진에 의한 피해규모를 예측하는 연구의 필요성에 공감하고, 이를 위한 평가도구의 개발에 관심이 높아지고 있다.
- 하지만, 아직까지 국내에서는 지진에 의한 구조재 및 비구조재의 손상에 따른 손실을 평가하는 연구는 수행되지 않았다. 건축물 내진성능평가 진행시, 단순히 피해규모를 예측하여 내진성능에 반영하는 것이 아닌, 실제 내진성능평가의 결과를 사용하는 정부, 보험회사, 엔지니어의 사용자에 따라 내진성능평가의 중요요소를 반영하여 결과에 포함시킬 수 있는 사용자 중심의 내진성능평가 기법에 대한 연구가 필요하다.

3. 연구개발 범위 및 수행 방법

가. 최종목표 및 연구개발 내용

구분	내용
최종 목표	- 재난대응력 강화를 위한 건축물 손상-손실 관계를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발 - 건축물 내진성능평가 시, 정량적 피해규모가 예측 가능한 요소기술 제시 - 기존 건축물의 사용자기반 내진성능지수를 통한 의사결정을 위한 데이터 제공 - 지진재난 대비단계에서 구조적/비구조적 보수보강 시행 타당성 여부 판단 - 국가 지진재난대비 안전망 구축 및 유지관리 정책에 기여
세부 목표	- 구조재 및 비구조재의 최적 지진취약도 평가 기법 개발 - 구조적/비구조적 요소정보의 지진반응을 효과적으로 측정할 수 있는 최적지진강도(Intensity Measure)도출 - 지진취약도를 대표할 수 있는 최적지진반응계수(Engineering Demand Parameter)도출 - 구조재 및 비구조재의 특성을 고려한 맞춤형 지진취약도 평가 기법 개발 - 목표성능수준 및 손상도지표를 고려한 지진손실평가 기법 개발 - 구조요소뿐만 아니라, 비구조요소의 최적지진반응계수 기반 손상도지표 개발 - 손상도지표에 따른 구조요소 및 비구조요소의 보수보강 의사결정 지원 - 실제 지진피해사례의 피해금액과 손상도지표와의 상관관계분석을 통한 신뢰도 높은 지진손실평가 기법 개발 - 확률적 피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발 - 손상도에 따른 요소정보의 실제 보수보강비용과 피해규모에 대한 데이터베이스 구축 - 손상도지표와 실제피해금액간 데이터마이닝 기법을 통한 수리비용 분석 - 정책입안자, 보험회사, 엔지니어 등 사용자에게 따른 내진성능평가의 중요요인을 반영한 사용자기반 내진성능지수 개발 및 평가



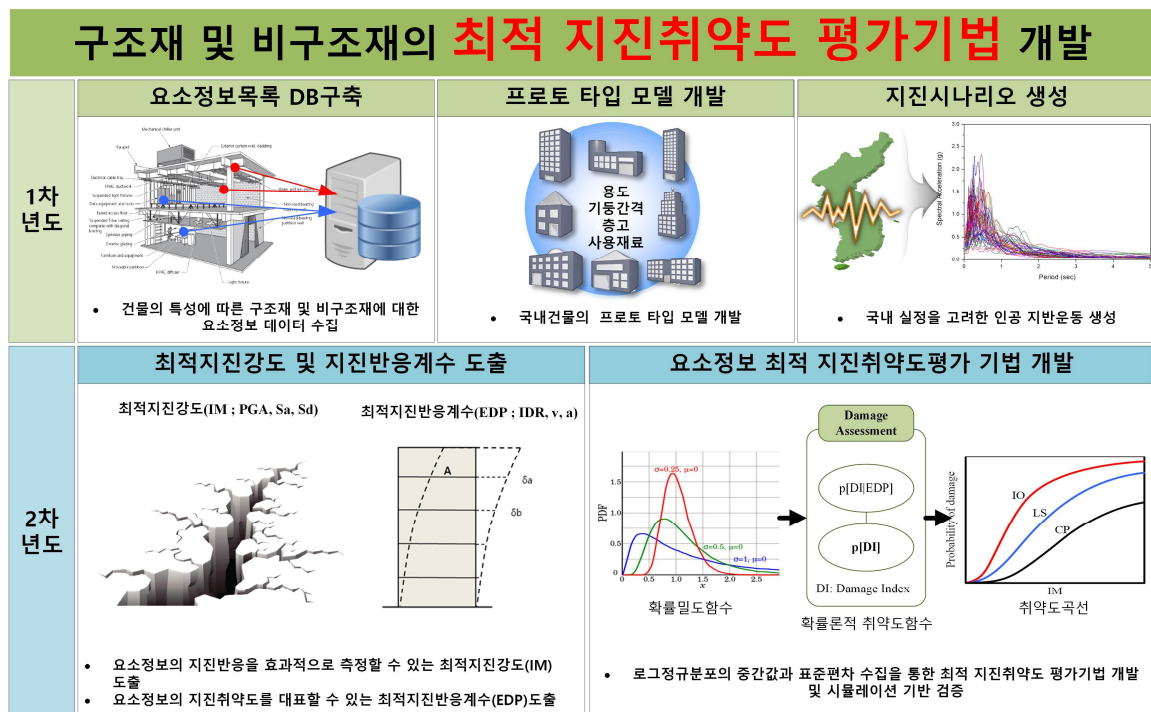
<그림 1.3> 연구개발의 최종목표

나. 연구개발 관련 기술 정의 및 연차별 연구계획

(1) 구조재 및 비구조재의 지진취약도 평가 모델

내진성능평가시 사용자가 고려할 중요요소를 선택하기 위해선, 건축물을 구성하는 구조재뿐만 아니라 비구조재에 대한 지진취약도 평가가 필요하고, 각 요소별 최적 지진강도(IM, Intensity Measure) 및 최적 지진반응계수(EDP, Engineering Demand Parameter)를 도출하여 최적 지진취약도 평가 기법을 개발할 것이다.

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차년도	구조재 및 비구조재의 요소정보 DB 구축	미국 FEMA P-58과 유럽 SYNER-G 연구보고서로부터 건물의 규모 및 용도에 따른 구조재 및 비구조재에 대한 요소정보 데이터수집
	프로토타입 모델 개발	국내 건물의 규모 및 용도에 따른 기둥간격, 층고, 사용재료 등으로부터 프로토타입 모델 개발
	확률기반 지진시나리오 작성	건물의 위치에 따른 암반조건과 설계성능수준 및 사용기간을 고려한 확률기반 지진재해 분석
2차년도	최적 지진강도(IM) 및 최적 지진반응계수(EDP) 도출	- 요소정보의 지진반응을 효과적으로 측정할 수 있는 PGA, S_a, S_d 등과 같은 최적 지진강도(IM) 도출 - 최적지진강도에 따른 요소정보의 지진취약도를 대표할 수 있는 층간변위, 최대가속도, 최대속도 등과 같은 최적 지진반응계수(EDP) 도출
	요소정보 최적 지진취약도평가 기법 개발	- 요소정보의 로그정규분포의 중간값과 표준편차 수집을 통한 지진취약도평가 모델 개발 - 실제 현장답사를 통한 지진시나리오를 고려한 시뮬레이션 기반 기술 검증



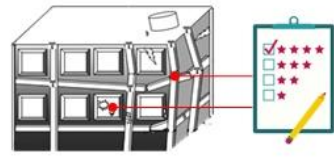
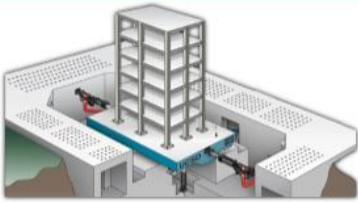
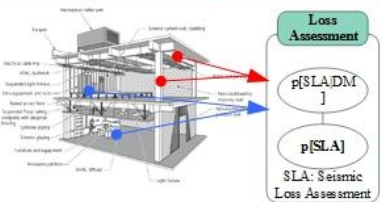
<그림 1.4> 핵심성과물 1 연구목표 및 세부연구내용

(2) 목표성능수준 및 손상도를 고려한 지진손실평가 기법 개발

지진에 대한 건축물의 정량적인 피해규모를 예측하기 위해, 건축물의 손상도를 지표화하여 실제 피해금액과 보수비용 등과 같은 지진손실액과의 상관관계분석을 통해 지진손실평가기법을 개발할 것이다.

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차년도	요소정보의 목표성능수준 구축	• 건물의 내진성능수준에 따른 구조재 및 비구조재 요소정보의 특성을 반영한 성능수준 분류체계 수립
	요소정보의 손상도 평가	• 요소정보 유형별 손상정도에 따른 보유성능수준 정의 • 목표성능수준과 보유성능수준과의 상관관계분석을 통한 손상도 평가 기법 개발
	손상도를 고려한 보수정책 수립	• 건물의 수명을 고려한 손상도에 따른 보유성능수준의 정의 • 보수보강 후 기대되는 건물의 보유성능수준에 따른 보수정책 수립
2차년도	성능수준기반 손상도지표 개발	• 건물 목표성능수준을 고려한 요소정보의 최적지진반응계수 기반 손상도지표 개발 • 손상도지표에 따른 보유성능수준 평가
	축소실험을 통한 검증 및 보완	• 축소모형 가진실험을 통한 최적지진반응계수 기반 손상도지표 평가 • 손상도지표의 실측데이터를 통한 보완
	요소정보 통합 지진손실평가 기법 개발	• 손상도지표에 따른 요소정보의 수리비용 산정 • 손상도지표의 통합적용에 따른 수리비용을 고려한 건축물 지진손실평가 기법 개발

목표성능수준 및 손상도를 고려한 **지진손실평가 기법 개발**

	요소정보의 목표성능수준 구축	요소정보의 손상도 평가	손상도를 고려한 보수정책 수립
1차 년도	 • 건물의 내진성능수준에 따른 요소정보 특성을 반영한 목표성능수준 분류체계 수립	 • 요소정보 유형별 손상정도에 따른 보유성능수준 정의 및 목표성능수준과 보유성능수준과의 상관관계분석을 통한 손상도 평가 기법 개발	 • 건물의 수명을 고려한 손상도에 따른 보유성능수준 정의 및 보수 보강 후 기대성능수준 기반 보수정책 수립
2차 년도	성능수준기반 손상도지표 개발  • 건물 목표성능수준을 고려한 요소정보의 최적지진반응계수 기반 손상도 지표 개발 • 손상도지표에 따른 보유성능수준 평가	축소실험을 통한 검증 및 보완  • 축소모형 가진실험을 통한 최적지진반응계수 기반 손상도지표 평가 • 손상도지표의 실측데이터를 통한 보완	요소정보 통합 지진손실평가기법 개발  • 손상도지표에 따른 요소정보의 수리비용 산정 및 통합적용에 따른 지진손실평가기법 개발

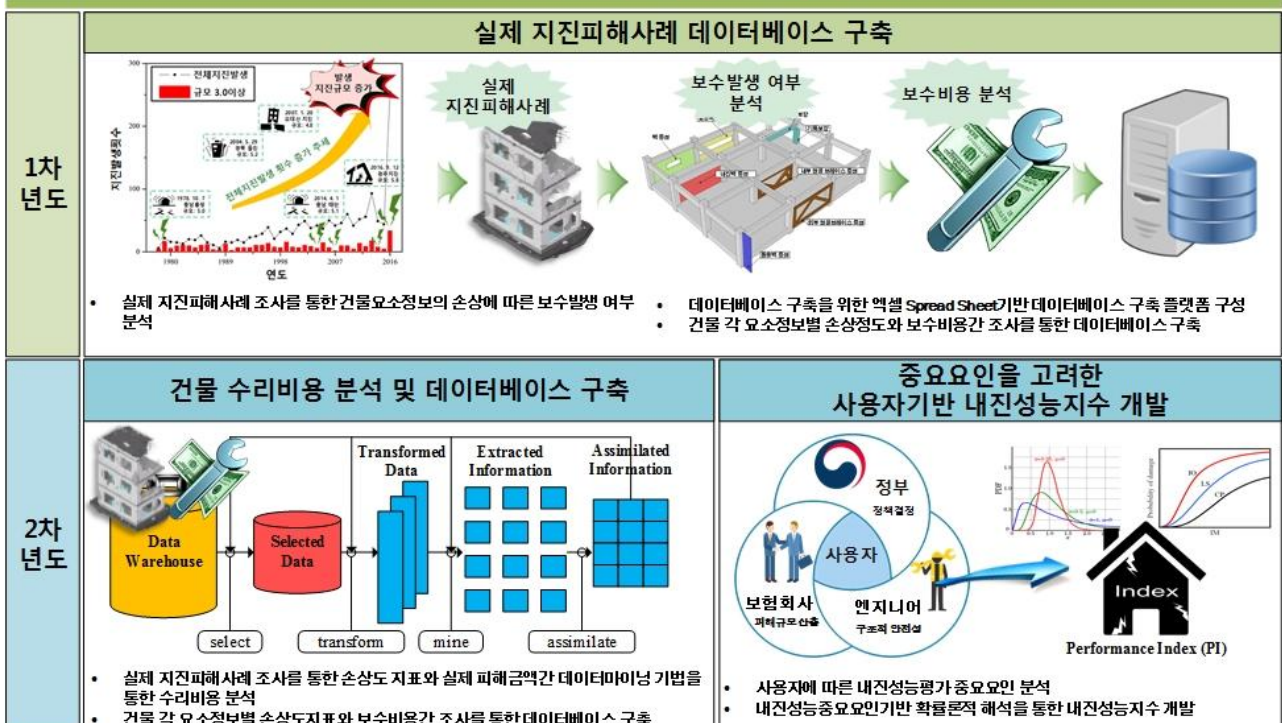
<그림 1.5> 핵심성과물 2 연구목표 및 세부연구내용

(3) 피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발

정부, 보험회사, 엔지니어와 같은 잠재적사용자의 내진성능평가시 중요요인을 반영하기 위해, 실제 지진피해사례에 대한 데이터베이스를 구축 및 분석을 통한 사용자기반 내진성능 지수를 개발할 것이다.

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차년도	실제 지진피해사례 데이터베이스 구축	• 데이터베이스 구축을 위한 엑셀 Spread Sheet기반 DB 구축 플랫폼 구성 • 실제 지진피해사례 조사를 통한 건물요소정보의 손상에 따른 보수발생 여부 분석 • 건물 각 요소정보별 손상정도와 보수비용간 조사를 통한 DB구축
2차년도	건물 수리비용 분석 및 DB구축	• 실제 지진피해사례 조사를 통한 손상도지표와 실제피해금액간 데이터마이닝 기법을 통한 수리비용 분석 • 건물 각 요소정보별 손상도지표와 보수비용간 조사를 통한 DB구축
	중요요인을 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발	• 사용자(정부, 보험회사, 엔지니어)의 실무적 니즈를 반영한 내진성능평가 중요요인 도출 및 분석 • 중요요인에 따른 지진에 대한 피해규모를 고려한 건축물의 내진성능 지수화 • 최적 지진강도로 내진성능중요요인을 반영하기 위해, 확률론적 해석을 통한 내진성능지수 개발

피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발



<그림 1.6> 핵심성과물 3 연구목표 및 세부연구내용

다. 연구개발 범위 및 수행방법

<표 1.7> 세부연구목표 및 연구개발 범위

연구범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
구조재 및 비구조재의 요소정보 분류체계 수립 (단위성과 1-1-①)	미국 FEMA P-58과 유럽 SYNER-G 연구보고서로부터 건물의 규모 및 용도에 따른 구조재 및 비구조재에 대한 요소정보 데이터수집	- 손실평가에 대한 자료를 분석하여, 건축물의 요소정보를 분류하는 체계를 시스템레벨과 부재레벨 2가지로 나눔 - 시스템레벨인 HAZUS, SYNER-G와 부재레벨인 FEMA P-58에 대한 구조재 및 비구조재의 요소정보 분류체계 수립
프로토타입 모델 개발 (단위성과 1-2-①)	국내 건물의 규모 및 용도에 따른 기둥간격, 층고, 사용재료 등으로부터 프로토타입 모델 개발	“학교교사 표준설계도”를 이용한 학교건축물의 프로토타입모델을 층수에 따라 선정함 - 서울시 23개 소방서에 대한 구조도면을 분석하여 소방건축물의 프로토타입모델을 선정함 - 포항지진으로 인해 피해를 받은 필로티건축물 100여동의 구조도면을 분석하여 프로토타입모델을 선정함
확률기반 지진시나리오 작성 (단위성과 1-3-①)	건물의 위치에 따른 암반조건과 설계성능수준 및 사용기간을 고려한 확률기반 지진재해 분석	- 지반조건 및 거리에 의한 지진동 감쇠의 이론적인 내용 분석 - 국내건축구조기준(AIK, KBC)을 분석하여 암반조건과 위치에 따른 국내 설계스펙트럼의 변화 분석 - 건축물의 위치에 따른 지역계수와 암반조건에 따른 증폭효과를 고려하여 설계스펙트럼 기반 지진시나리오를 작성함
최적지진강도 및 최적지진반응계수 도출 (단위성과 1-4-①)	- 요소정보의 지진반응을 효과적으로 측정할 수 있는 PGA, S_a, S_d 등과 같은 최적 지진강도 도출 - 최적지진강도에 따른 요소정보의 지진취약도를 대표할 수 있는 최적 지진반응계수 도출	- 기존 문헌에서 빈번하게 사용되는 지진강도와 지진반응계수를 분석하여 최적 지진강도 및 최적 지진반응계수에 사용될 수 있는 계수 10개 도출 - 소방건축물의 지진취약도 도출시, 지진강도를 PGA와 S_a로사용하여 지진강도가 지진반응계수에 미치는 영향 분석
요소정보 통합 지진취약도평가 모델 개발 (단위성과 1-5-①)	요소정보의 지진반응계수에 대한 중간값과 표준편차 수집을 통한 지진취약도평가 모델 개발	- Analytical method를 이용한 지진취약도를 도출하는 방법론 정리 - HAZUS, FEMA P-58, SYNER-G의 문헌으로부터 구조재 및 비구조재에 대한 지진취약도 DB구축
요소정보의 목표성능수준 구축 (단위성과 2-1-①)	건물의 내진성능수준에 따른 구조재 및 비구조재 요소정보의 특성을 반영한 성능수준 분류체계 수립	- 구조재 및 비구조재의 내진성능수준을 정의하기 위하여, 미국의 UBC, IBC와 한국의 KBC를 활용 - 주요시설물 중 하나인 병원건축물에 대한 내진성능목표는 미국 캘리포니아의 OSHPD의 자료를 활용 - NETAP training workshop을 참여하여, 손실기반 내진성능목표를 고려함

연구범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
요소정보의 손상도 평가 (단위성과 2-2-①)	• 요소정보 유형별 손상정도에 따른 보유성능수준 정의 • 목표성능수준과 보유성능수준과의 상관관계분석을 통한 손상도 평가 기법 개발	• 육안검사를 통해 건축물의 손상도를 Red tag, Green tag, Yellow tag로 구분함 • 포항지진과 대만화론헌지진에 의한 피해건축물의 손상도를 평가함 • 건축물의 손상도에 따른 보유성능수준과 현재 내진설계기준에 따른 목표성능수준의 비교 수행
손상도를 고려한 보수정책 수립 (단위성과 2-3-①)	• 건물의 수명을 고려한 손상도에 따른 보유성능수준의 정의 • 보수보강 후 기대되는 건물의 보유성능수준에 따른 보수정책 수립	• 결정트리(decision tree)를 이용한 구조적/비구조적 손상이 건축물의 피해에 미치는 영향 분석 • 학교건축물의 기둥중설 전후 지진피해에 따른 보유성능을 파악하여, 기둥중설에 대한 보수정책의 효과를 검토함
성능수준기반 손상도 평가 (단위성과 2-4-①)	• 건물 목표성능수준을 고려한 요소정보의 최적지진반응계수 기반 손상도지표 개발 • 손상도지표에 따른 보유성능수준 평가	• 건물의 목표성능수준을 중요도에 따라 4개로 구분하여, 설계년도 및 구조시스템에 따라 구조재 및 비구조재의 층간변위비, 최대층가속도 기반 손상도지표 제시 • 학교건축물의 비선형동적해석을 통한 구조재 및 비구조재의 확률적 보유성능수준 평가
축소실험을 통한 건축물 손상도 평가 (단위성과 2-5-①)	• 축소실험의 가진실험을 통한 손상도 평가	• 3층 규모의 축소실험모형에 대해 층강성을 변수로 하여, 층강성을 도출하는 기법 수립 • 층강성이 축소모형의 주기에 미치는 영향 분석
요소정보 통합 지진손실평가 기법 개발 (단위성과 2-6-①)	• 손상도지표에 따른 요소정보의 수리비용 산정 • 손상도지표의 통합적용에 따른 수리비용을 고려한 건축물 지진손실평가 기법 개발	• 총 9개의 경주지진파를 이용하여 학교건축물에 대한 지진손실평가 수행 • 구조재는 층간변위비, 비구조재는 층간변위비 최대층가속도를 이용하여 지진취약도부터 지진손실평가까지 통합평가 기법 수립 및 결과 제시
실제 지진피해사례 데이터베이스 구축 (단위성과 3-1-①)	• 데이터베이스 구축을 위한 엑셀 Spread Sheet기반 DB 구축 플랫폼 구성 • 실제 지진피해사례 조사를 통한 건물요소정보의 손상에 따른 보수발생 여부 분석	• 경주지진 보험 claim data분석을 통한 지진피해사례 엑셀 Spread Sheet기반 DB 구축 항목 도출 및 DB 플랫폼 구축 • 다변량 데이터를 분석하는 기법인 Copula 함수를 이용하여 구조적 손상이 지진피해에 영향을 미치는 영향 분석
건물 수리비용 분석 (단위성과 3-2-①)	• 실제 지진피해사례 조사를 통한 손상도지표와 실제피해금액간 데이터마이닝 기법을 통한 수리비용 분석	• Bayesian updating 기법을 통한 경주지진 실제 손실데이터 업데이트 기법 개발 • 학교건축물을 대상으로 지진손실평가 업데이트 결과 분석
중요요인을 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발 (단위성과 3-3-①)	• 사용자(정부, 회사, 엔지니어)에 따른 내진성능평가 중요요인 분석 • 최적 지진강도로 내진성능 중요요인을 반영하기 위해, 확률론적 해석을 통한 내진성능지수 개발	• 기존문헌 분석을 통한 건축물의 안전성, 수리비용, 복구기간으로 표현되는 5단계 내진성능지수 제시 • 학교건축물을 대상으로 경주지진에 대한 수리비용 기반 내진성능지수 평가

제2장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 핵심성과 1: 구조재 및 비구조재의 최적 지진취약도 평가 기법 개발

가. 단위성과 1-1-①: 구조재 및 비구조재의 요소정보 분류체계 수립

(1) 기존 요소정보 분류체계 분석

본 연구에서는 구조재와 비구조재에 대한 분류체계를 분석하기 위해 구조재와 비구조재에 대해 아래의 표로 정리된 연구와 기준에 대한 분석을 수행하였다.

<표 2.1> 건축물 구조재 및 비구조재에 대한 기존 연구 및 기준

구조재의 분류체계에 대한 기존 연구	비구조재의 분류체계에 대한 기존 연구 및 기준
• ATC-13 (Earthquake Damage Evaluation Data for California, ATC 1985) • EMS-98 (European Macroseismic Scale, Grunthal 1998) • HAZUS (FEMA 2003) • RISK-UE (The European RISK-UE Project, 2001-2004) • PAGER-STR (Jaiswal and Wald, 2008) • FEMA P-58 (FEMA 2012) • SYNER-G (2013)	• KBC 2016 • IBC 2015, ASCE 7-16 • HAZUS (FEMA 2003) • FEMA P-58 (FEMA 2012) • SYNER-G (2013)

기존 구조재 및 비구조재의 요소정보 분류체계를 분석한 결과, FEMA P-58은 구조재와 비구조재를 부재레벨의 요소단위로 구분하지만, HAZUS나 SYNER-G와 같은 대다수의 기존 문헌에서는 구조재와 비구조재를 시스템레벨의 단위로 구분한다.

(2) 요소정보 정의에 따른 구조재 및 비구조재 분류체계 수립

건축구조물의 외력을 저항하는 요소인 기둥, 보, 슬라브와 같은 요소를 구조재라 할 수 있고, 파티션, 기계설비, 가구 등과 같이 건축물의 용도에 따른 구조재 이외의 요소를 비구조재라 할 수 있다. 지진에 대한 손상을 손실로 연결시키기 위해선, 먼저 구조재와 비구조재에 대한 분류체계를 수립하여, 각 요소정보에 대한 손상을 지진강도와 지진반응계수로 표현하는 과정이 선행되어야 한다. 기존 자료에 대한 분류체계를 분석한 결과, 각 분류체계에 대해서 아래의 관점에 대한 평가를 수행하였다.

1. 명확한 정의 (Clear definitions)
2. 공통된 취약함수 (Common fragility functions)
3. 내진성능의 차이 (Differences seismic performance)
4. 식별성 (Observable)
5. 단순성 (Simple)
6. 표준성 (Standard)
7. 사용성 (User-friendly)

구조재와 비구조재의 분류에 대한 명확한 정의는 건축물의 각 요소정보를 분류하는데 있어서 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 만약 어떠한 요소가 동일한 damage states를 공유하고 있으며, 또한 손상을 발생시키는 지진강도와 지진반응계수가 동일하다면, 공통된 취약함수를 가진다고 생각할 수 있다. 이러한 공통된 취약함수를 가지는 구조재나 비구조재를 동일한 요소로 분류하는 것은 손상평거나 손실평가의 관점에서 유리하다고 할 수 있다. 분류된 체계를 내진성능의 차이의 관점에서 평가를 진행하는 것은 공통된 취약함수의 관점에서 비슷하다고 할 수 있지만, 내진성능의 차이는 각 요소의 분류가 ductile요소와 non-ductile요소로 분류될 수 있는지 여부를 평가하는 기준이다. 그 외의 식별성, 단순성, 표준성, 사용성에 대해 각 분류체계에 대한 평가를 진행하였다.

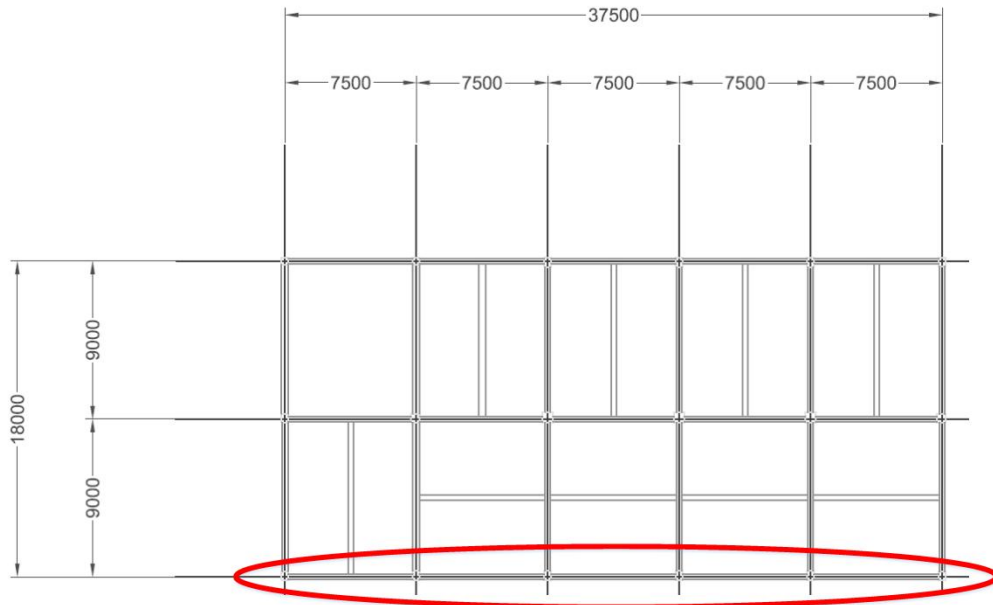
아래의 표에 구조재와 비구조재의 기존 분류체계 중 지진취약도 함수를 보유한 HAZUS, SYNER-G, FEMA P-58에 대한 분류체계를 평가결과를 요약하였다.

<표 2.2> 건축물 구조재 및 비구조재에 대한 기존 분류체계 평가

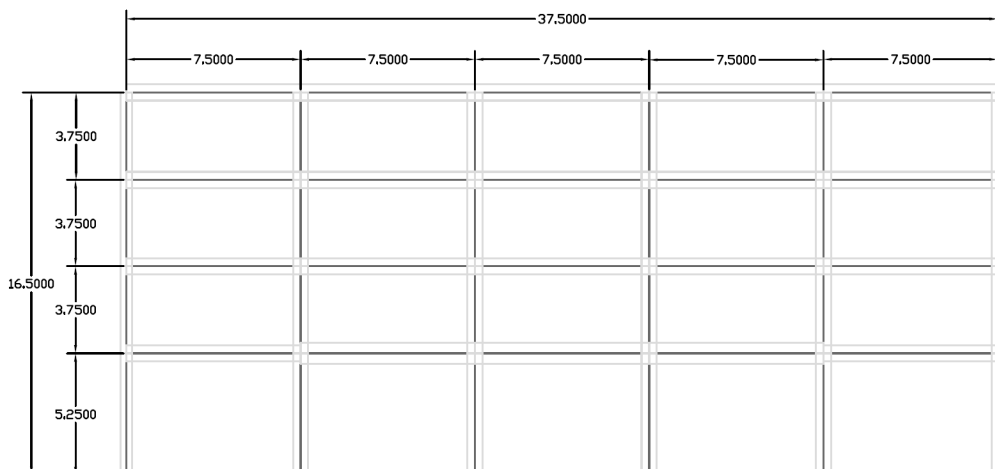
평가 요소	분류체계	명확한 정의	공통된 취약함수	내진성능 의 차이	식별성	단순성	표준성	사용성	점수
구조재	HAZUS	2	2	2	1	1	0	0	8
	SYNER-G	2	2	2	2	0	1	0	9
	FEMA-P58	2	2	2	1	1	1	2	11
비구조재	HAZUS	2	2	0	1	2	0	0	7
	SYNER-G	1	1	2	1	0	0	0	5
	FEMA-P58	2	2	2	1	1	1	2	11

(2) 소방시설물의 프로토타입 모델 개발

소방시설물의 프로토타입 모델을 개발하기 위해, 서울시 23개 소방서에서 정보공개가 진행된 16개 소방서를 대상을 설립년도와 구조시스템에 대하여 조사하였다. 16개의 소방서 중 87.5% 14개의 소방서가 철근 콘크리트 구조형식이였다. 또한 도면이 확보된 5곳에 대한 구조적 특징을 분석한 결과, 1층의 층고는 평균 5.6m이며, 나머지 층의 층고는 3.45m이었다. 소방서의 경우 소방펌프차의 평균 높이가 4.2m, 폭은 6m로 기둥의 간격은 최소 7m이상, 1층의 층고는 최소 5m이상이어야 한다. 소방서의 기능에 따라 결정되는 기둥의 배치를 고려하여 <그림 2.3>과 <그림 2.4>와 같이 소방서프로토타입 모델의 평면도와 입면도를 결정하였다. 소방서의 중력하중 정보는 한국건축구조기준에 의거하여 고정하중은 $6.4N/m^2$, 활하중은 $2N/m^2$ 로 결정하였다.



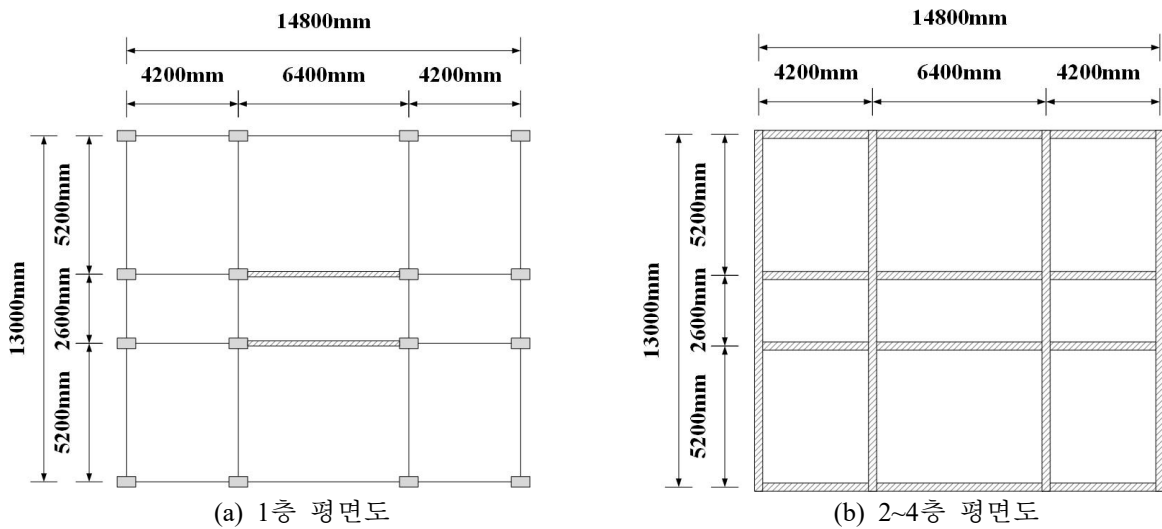
<그림 2.3> 소방서 프로토타입 모델 평면도



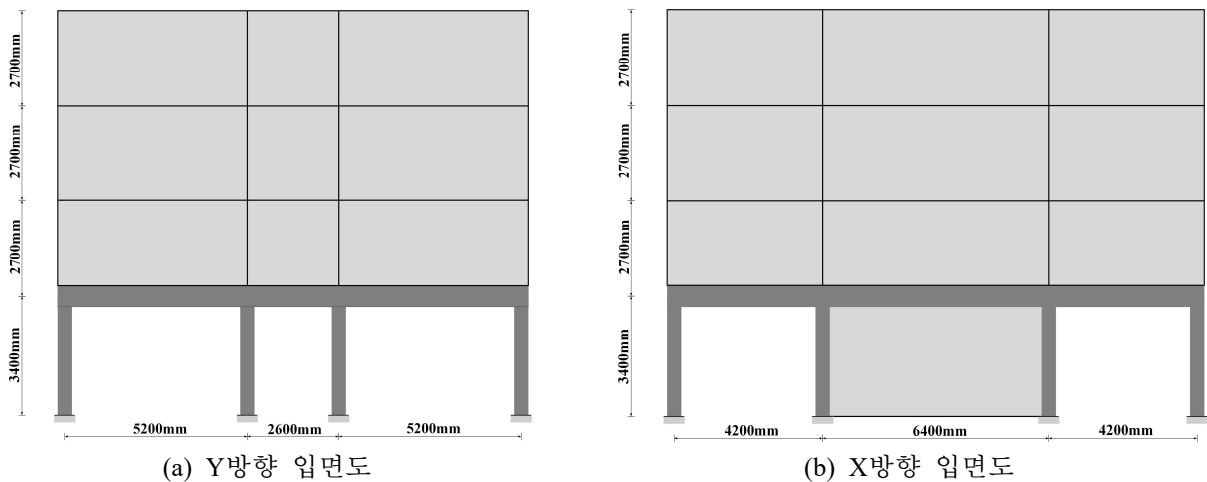
<그림 2.4> 소방서 프로토타입 모델 입면도

(3) 필로티구조물의 프로토타입 모델 개발

2017년 11월 15일 발생한 포항지진으로 인해 100동 이상의 피해를 입은 국내 필로티 건물은 건축적인 이유로 저층부에 기둥을 둔 전단벽식 구조물로 이루어져 있다. 지진피해를 입은 장성동 일대의 131개 필로티건축물 중 도면자료가 존재하는 102개 건축물에 대한 도면의 구조적 특징을 분석하여 필로티구조물의 프로토타입 모델을 개발하였고, 프로토타입 모델의 평면도와 입면도는 각각 <그림 2.5>, <그림 2.6>과 같다.



<그림 2.5> 필로티구조물 프로토타입모델의 평면도



<그림 2.6> 필로티구조물 프로토타입모델의 입면도

건축물 내진성능 평가요령에 따라, 기둥과 보에 사용된 콘크리트의 압축강도는 $21MPa$, 철근의 항복강도는 $375MPa$ 로 결정하였다. 고정하중은 골조하중 및 건축 마감을 고려하여 $4.1kN/m^2$, 활하중은 근린생활시설과 옥상에 대해 건축구조기준에 따라 기준층은 $2kN/m^2$, 지붕층은 $1kN/m^2$ 로 결정하였다.

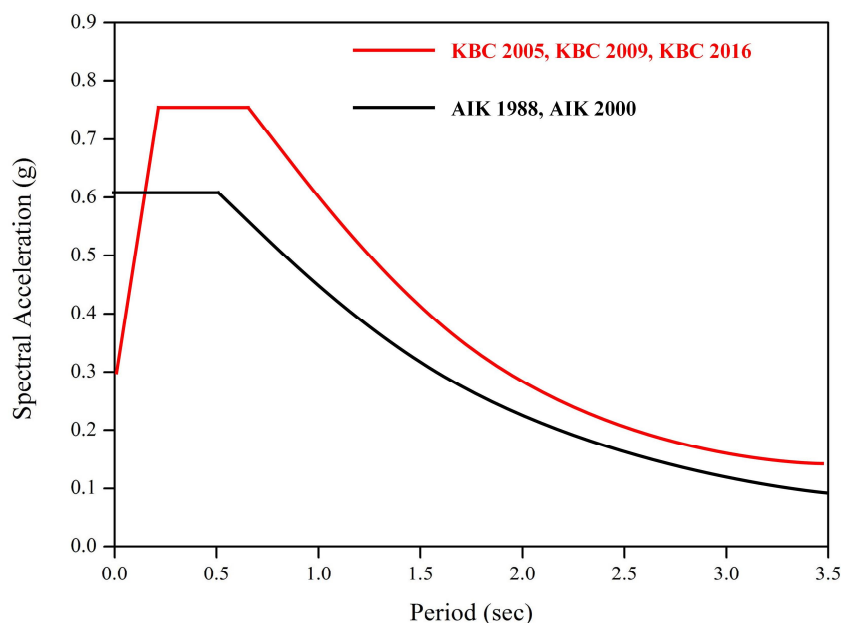
다. 단위성과 1-3-①: 스펙트럼기반 지진하중시나리오 작성

(1) 국내 설계스펙트럼의 변화 분석

1988년부터 2016년까지 국내 내진설계기준의 지진하중을 결정하는 설계스펙트럼가속도 계산식을 <표 2.3>와 같이 비교 정리하였다. 설계스펙트럼가속도 계산식을 비교한 결과, AIK 2000까지는 주기에 따라 일정한 설계스펙트럼가속도 식을 사용하는 반면, KBC 2005부터 KBC 2016까지는 단주기, 1초주기로 나누어 설계스펙트럼가속도를 계산하는데 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이러한 차이로부터, 건축구조물의 고유주기와 지반조건 및 지역에 따라 차이가 발생하여 정확할 순 없지만, <그림 2.7>과 같이 1초 주기보다 낮은 단주기 영역에서 건축구조물에 내진설계에 사용되는 설계스펙트럼가속도에 차이가 클 것으로 예상된다. 구조형식에 따라 주기에 차이가 있겠지만, 대다수의 건축물이 내진설계의 변화에 따라 적용된 설계스펙트럼가속도에 차이가 클 것으로 예상된다. 따라서 실제 지반조건과 지역에 따라 설계스펙트럼가속도의 차이를 비교 분석해 볼 필요가 있다.

<표 2.3> 설계기준별 설계스펙트럼가속도 계산식 비교

설계기준	설계스펙트럼가속도 계산식	
	단주기	1초주기
AIK 1988	$S_a = \frac{AS}{1.2\sqrt{T}}$	
AIK 2000	$S_a = ASC = \frac{AS}{1.2\sqrt{T}}$	
KBC 2005	$S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_o} T + 0.4 S_{DS}$	$S_a = \frac{S_{D1}}{T}$
KBC 2009		
KBC 2016		



<그림 2.7> 설계스펙트럼가속도의 설계기준별 개념적 비교

(2) 설계연도 및 지진구역에 따른 설계스펙트럼기반 지진시나리오

설계스펙트럼기반 지진시나리오를 작성하기 위해, 지진구역 I, II의 S_A , S_B , S_C , S_D , S_E 지반별 스펙트럼계수 S_{DS} , S_{D1} , T_S 를 연대별 내진설계기준에 맞춰 <표 2.4>에 정리하였다. 작성된 설계스펙트럼기반 지진시나리오를 연도별로 분석하면, 설계스펙트럼가속도는 KBC 2005를 기준으로 큰 폭으로 증가하였다. AIK 1988과 KBC 2016의 설계스펙트럼 가속도는 지진구역 1에서 평균 2.24배, 지진구역 2에서 2.38배 증가하였는데 이는 지진의 재현주기를 500년에서 2400년으로 개정된 효과로 분석된다. 설계스펙트럼기반 지진시나리오는 연도 및 지반조건을 고려하여 총 50개를 제시하였다.

<표 2.4> 설계연도, 지진구역, 지반조건에 따른 지진시나리오 작성을 위한 스펙트럼계수

지진 구역	지반 조건	비교량	AIK 1988	AIK 2000	KBC 2005	KBC 2009	KBC 2016
I	S_A	S_{DS}	0.1800	0.1925 (6.9%)	0.2926 (62.6%)	0.2933 (63.0%)	0.2933 (63.0%)
		S_{D1}	0.1000	0.0917 (-8.3%)	0.1170 (17.0%)	0.1173 (17.3%)	0.1173 (17.3%)
		T_S	0.30	0.22	0.40	0.40	0.40
	S_B	S_{DS}	0.1800	0.1925 (6.9%)	0.3658 (103.2%)	0.3667 (103.7%)	0.3667 (103.7%)
		S_{D1}	0.1000	0.0917 (-8.3%)	0.1463 (46.3%)	0.1467 (46.7%)	0.1467 (46.7%)
		T_S	0.30	0.22	0.40	0.40	0.40
	S_C	S_{DS}	0.2100	0.1925 (-8.3%)	0.4389 (109.0%)	0.4327 (106.0%)	0.4327 (106.0%)
		S_{D1}	0.1200	0.1100 (-8.3%)	0.2341 (95.1%)	0.2317 (93.1%)	0.2317 (93.1%)
		T_S	0.32	0.32	0.53	0.54	0.54
	S_D	S_{DS}	0.2100	0.1925 (-8.3%)	0.5267 (150.8%)	0.4987 (137.5%)	0.4987 (137.5%)
		S_{D1}	0.1500	0.1375 (-8.3%)	0.3365 (124.3%)	0.2875 (91.6%)	0.2875 (91.6%)
		T_S	0.51	0.51	0.64	0.58	0.58
	S_E	S_{DS}	0.2100	0.1925 (-8.3%)	0.7315 (248.3%)	0.6527 (210.8%)	0.6527 (210.8%)
		S_{D1}	0.1500	0.1833 (22.2%)	0.4974 (231.6%)	0.4576 (205.1%)	0.4576 (205.1%)
		T_S	0.51	0.90	0.68	0.70	0.70
II	S_A	S_{DS}	0.12	0.1225 (2.1%)	0.1676 (39.7%)	0.1867 (55.6%)	0.1867 (55.6%)
		S_{D1}	0.0667	0.0583 (-12.5%)	0.0931 (-2.2%)	0.0933 (12.0%)	0.0933 (12.0%)
		T_S	0.30	0.22	0.40	0.40	0.40
	S_B	S_{DS}	0.1400	0.1225 (-12.5%)	0.2793 (94.0%)	0.2940 (94.4%)	0.2940 (94.4%)
		S_{D1}	0.0800	0.0700 (-12.5%)	0.1490 (39.7%)	0.1549 (40.0%)	0.1549 (40.0%)
		T_S	0.32	0.32	0.53	0.53	0.53
	S_C	S_{DS}	0.1400	0.1225 (-12.5%)	0.2793 (99.5%)	0.2940 (110.0%)	0.2940 (110.0%)
		S_{D1}	0.0800	0.0700 (-12.5%)	0.1490 (86.2%)	0.1549 (93.7%)	0.1549 (93.7%)
		T_S	0.32	0.32	0.53	0.53	0.53
	S_D	S_{DS}	0.1400	0.1225 (-12.5%)	0.3910 (179.3%)	0.3547 (153.3%)	0.3547 (153.3%)
		S_{D1}	0.1000	0.0875 (-12.5%)	0.2141 (114.1%)	0.1979 (97.9%)	0.1979 (97.9%)
		T_S	0.51	0.51	0.55	0.56	0.56
	S_E	S_{DS}	0.1400	0.1225 (-12.5%)	0.5586 (299.0%)	0.5273 (276.7%)	0.5273 (276.7%)
		S_{D1}	0.1000	0.1167 (16.7%)	0.3165 (216.5%)	0.3211 (221.1%)	0.3211 (221.1%)
		T_S	0.51	0.90	0.57	0.61	0.61

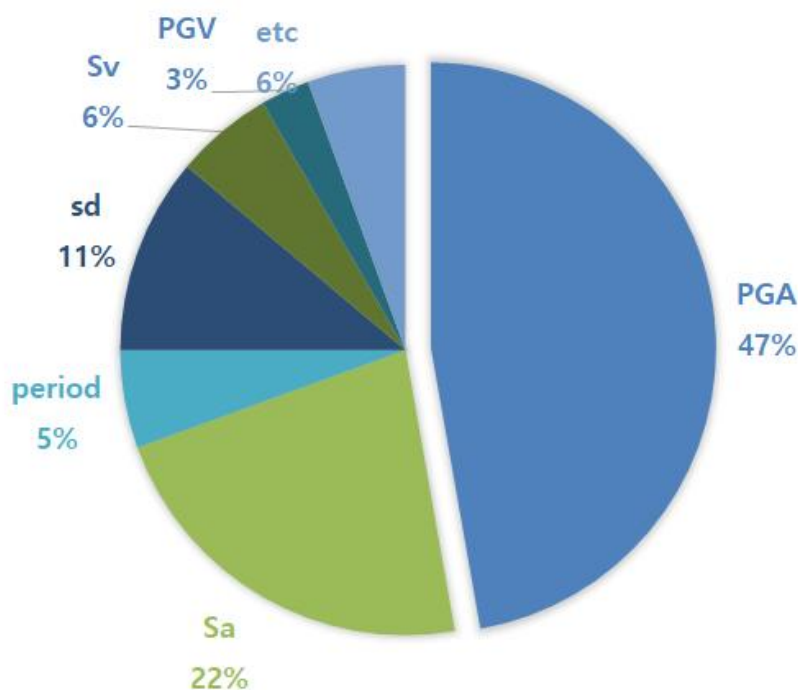
※ ()안의 값은 AIK 1988을 기준으로 각 내진설계기준의 값의 증가율을 비교한 값임.

라. 단위성과 1-4-①: 최적지진강도 및 최적지진반응계수 도출

(1) 최적지진강도의 정의

지진취약도 곡선을 도출할 때, 지진취약도 곡선의 가로축에 해당하는 값은 일반적으로 지진의 강도로 표현된다. 기록된 지진데이터의 지진강도는 여러 가지 방법으로 표현될 수 있지만, 최적지진강도는 지진강도 중 구조물의 손상을 분석하고자 하는 대상(구조재 및 비구조재)의 손상이 발생할 확률을 가장 잘 표현할 수 있는 지진강도를 의미한다. SYNER-G, HAZUS와 같은 구조재와 비구조재의 지진취약도함수를 제공하는 기존 문헌을 분석한 결과, 지진의 강도는 지진의 특성에 따라 크게 지반의 운동 (ground motion), 스펙트럴 값 (spectral values), 에너지 상관계수 (energy parameters), 기타 지진과 관련 계수 (earthquake parameters)로 구분할 수 있다.

<그림 2.8>는 FEMA P-58, SYNER-G, HAZUS에서 지진취약도 곡선에 사용되는 지진강도의 비교한 통계자료이다. 지진강도는 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA), 스펙트럴가속도(spectral acceleration, Sa), 재현주기(period), 스펙트럴변위(spectral displacement, Sd), 스펙트럴속도(spectral velocity, Sv)순으로 빈번히 사용되는 것을 알 수 있다. 단순히 지진강도가 빈번히 사용되는 것을 기준으로 최적지진강도를 선정한다면, 지진강도에 대한 물리적 의미를 지진취약도 곡선에 표현할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 지진취약도 곡선에 도출에 필요한 최적지진강도를 물리적 의미가 명확한 PGA, PGV(peak ground velocity), PGD(peak ground displacement), Sa, Sd로 결정하였다.



<그림 2.8> 지진취약도 곡선에 사용되는 지진강도 비교

(2) 최적지진반응계수의 정의

지진취약도 곡선의 세로축에 해당하는 손상확률은 구조재 및 비구조재의 지진반응계수로 부터 얻어진다. 지진강도가 구조물이나 구조재, 비구조재 등의 분석대상에 관한 계수라면, 지진반응계수는 발생하는 손상 정도(Damage State)를 도출하기 위한 계수이다. 따라서 최적 지진반응계수는 손상정도를 나타내는 지진반응계수를 기존 문헌 및 구조 기준을 참고하여 선정하였고, 구조 기준의 경우 국외의 여러 기준을 참고하여 산정하였다. 손상 정도에 대한 지진반응계수를 다른 연구내용을 참고하여 <표 2.5>에 정리하였다.

<표 2.5> 해외 연구에 기술되어 있는 손상정도 분류 정리

Damage Index	HAZUS	VISION 2000	FEMA 273	EMS98	MSK	AIJ	ATC-13	ATC-21	EPPO	
0	No damage limit state									
10	Slight damage	Fully operational	Immediate occupancy	Grade 1	D1	Light	Slight	Green tag	Green tag	
20		Operational		Grade 2	D2	Minor	Light			
30			Moderate				Yellow tag			Yellow tag
40										
50	Moderate damage	Life safe		Life safe	Grade 3	D3		Moderate	Heavy	
60										
70										
80	Extensive damage	Near collapse	Limited safety	Grade 4	D4	Moderate	Major	Major	Red tag	Red tag
90			Collapse prevention							
100										
	Collapse limit state									

손상 정도에 대한 지진반응계수는 각 기준에서 제시하고 있는 정도가 각각 다르고, 대부분의 연구들에서 보통 3~6단계의 손상 정도를 가지고 손상 상태를 정의하고 있다. 최적지진반응계수는 최적지진강도에 의해 결정되는 구조재나 비구조재의 지진반응을 대표할 수 있는 계수로 결정되어야 한다. 다섯 가지 최적 지진강도인 PGA, PGV, PGD, Sa, Sd에 대한 최적지진반응계수는 다음과 같이 도출 할 수 있다.

- 층간변위비(interstory drift ratio, IDR): 구조재 및 변위민감 비구조재에 사용 됨
- 최대층가속도(Peak Floor Acceleration, PFA): 가속도민감 비구조재에 사용 됨

기존 문헌조사와 연구동향을 파악했을 때, 구조재의 손상 지수를 반영하기에 최적인 지진반응계수는 IDR, PFA, 그 외의 층가속도와 가속도비, 그리고 회전각으로 나눌 수 있다. 다섯 가지 최적지진강도와 두 가지 최적지진반응계수를 이용하여 총 10개의 최적지진강도 및 최적지진반응계수의 조합을 도출하였다.

(3) 지진강도 선택에 따른 지진취약도 곡선 비교

지진강도의 종류에 따른 지진취약도 곡선의 차이를 분석하기 위해, 소방시설물 프로토타입모델에 대한 지진취약도 분석을 수행하였다. 구조재의 경우 최적지진반응계수로 층간변위비를 사용하였고, 지진강도는 최대지반가속도, 스펙트럼 가속도 2가지를 변수로 선정하였다. 증분동적해석(incremental dynamic analysis, IDA)을 통해 지진취약도를 평가하였으며, FEMA P695에서 제시된 22쌍의 원단층 지진파를 해석에 사용하였다(<표 2.6> 참조).

지진파 기록은 진원에서 직접적으로 측정된 데이터가 아닌, 진원으로부터 길게는 수십, 수백키로 떨어진 관측소에서 기록되어진다. 따라서 얻어진 지진 데이터 속에는 지진의 규모, 진앙거리, 지반조건에 따른 불확실성요소가 내포되어있다. 수많은 관측소에서 측정된 서로 다른 지진에 대하여 신뢰성분석을 기초로 한 내진성능평가를 진행하게 된다면, 평가 결과에 대한 신뢰도는 감소할 수밖에 없다. 따라서 지진데이터 속의 불확실성요소를 제거하기 위해 원 지진파의 정규화 과정이 필요하다. 정규화는 FEMA P695에서 제시하고 있는 방법을 사용하였다. 총 44개의 지진데이터에서 PGV의 중간값을 도출하여, 각각의 지진에 대한 정규화 계수를 구하게 된다. 앞서 구한 정규화 계수를 지진데이터에 곱하여 지진데이터의 정규화를 진행하였다. 정규화를 위한 자세한 식은 식 (2.1)과 같으며, 정규화된 지진데이터의 normalization factor, PGA, PGV를 <표 2.6>에 정리하였다

$$NM_i = Median(PGV_{PEER,i}) / PGV_{PEER,i} \quad (2.1)$$

$$NTH_{1,i} = NM_i \times TH_{1,i} \quad (2.2)$$

$$NTH_{2,i} = NM_i \times TH_{2,i} \quad (2.3)$$

여기서,

NM_i : i번째 지진기록의 정규화 계수

$Median(PGV_{PEER,i})$: i번째 지진기록의 PGV의 중앙값(median)

$PGV_{PEER,i}$: i번째 지진기록의 PGV

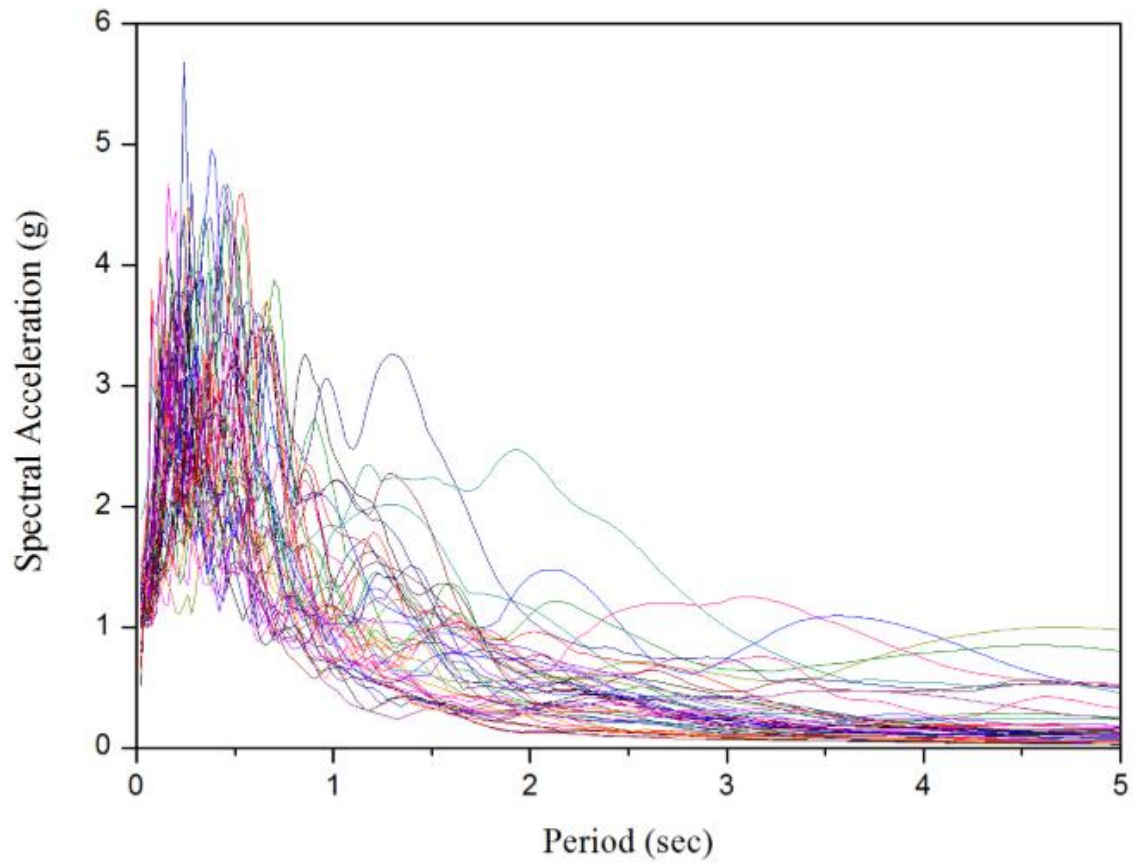
NTH : 정규화된 지진기록

TH : 원 지진기록

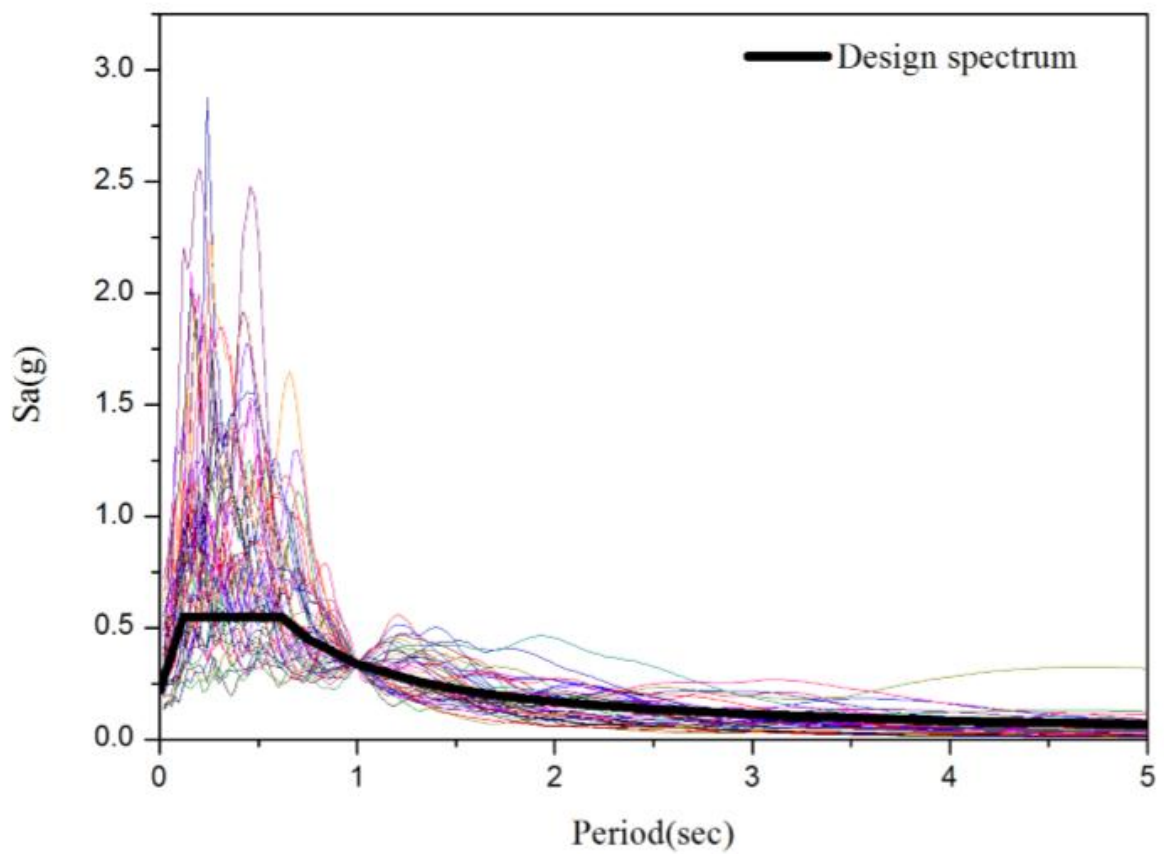
<그림 2.9>은 22쌍의 원 지진기록에 대한 가속도응답스펙트럼, <그림 2.10>는 정규화를 진행한 지진기록의 가속도 스펙트럼이다. 두 그림을 비교해 보았을 때, 정규화를 통하여 각각의 지진파에 대한 응답스펙트럼을 지진파 전체에 대한 응답스펙트럼에 맞출 수 있었다.

<표 2.6> 원단층 지반운동 22쌍의 PGA와 PGV 및 정규화된 데이터의 PGA와 PGV

EQ ID	PEER-NGA Record Information		Recorded Motion		Normaliz. Factor	Normalized Motions	
	File Names - Horizontal Records		PGA (g)	PGV (cm/s.)		PGA (g)	PGV (cm/s.)
	Comp. 1	Comp. 2					
12011	NOTHR/MUL009	NOTHR/MUL279	0.52	63	0.65	0.34	41
12012	NOTHR/LOS000	NOTHR/LOS270	0.48	45	0.83	0.40	38
12041	DUZCE/BOL000	DUZCE/BOL090	0.82	62	0.63	0.52	39
12052	HECTOR/HEC000	HECTOR/HEC090	0.34	42	1.09	0.37	46
12061	IMPVALL/H-DLT262	IMPVALL/H-DLT352	0.35	33	1.31	0.46	43
12062	IMPVALL/H-E11140	IMPVALL/H-E11230	0.38	42	1.01	0.39	43
12071	KOBE/NIS000	KOBE/NIS090	0.51	37	1.03	0.53	39
12072	KOBE/SHI000	KOBE/SHI090	0.24	38	1.10	0.26	42
12081	KOCAELI/DZC180	KOCAELI/DZC270	0.36	59	0.69	0.25	41
12082	KOCAELI/ARC000	KOCAELI/ARC090	0.22	40	1.36	0.30	54
12091	LANDERS/YER270	LANDERS/YER360	0.24	52	0.99	0.24	51
12092	LANDERS/CLW-LN	LANDERS/CLW-TR	0.42	42	1.15	0.48	49
12101	LOMAP/CAP000	LOMAP/CAP090	0.53	35	1.09	0.58	38
12102	LOMAP/G03000	LOMAP/G03090	0.56	45	0.88	0.49	39
12111	MANJIL/ABBAR--L	MANJIL/ABBAR--T	0.51	54	0.79	0.40	43
12121	SUPERST/B-ICC000	SUPERST/B-ICC090	0.36	46	0.87	0.31	40
12122	SUPERST/B-POE270	SUPERST/B-POE360	0.45	36	1.17	0.53	42
12132	CAPEMEND/RIO270	CAPEMEND/RIO360	0.55	44	0.82	0.45	36
12141	CHICHI/CHY101-E	CHICHI/CHY101-N	0.44	115	0.41	0.18	47
12142	CHICHI/TCU045-E	CHICHI/TCU045-N	0.51	39	0.96	0.49	38
12151	SFERN/PEL090	SFERN/PEL180	0.21	19	2.10	0.44	40
12171	FRIULI/A-TMZ000	FRIULI/A-TMZ270	0.35	31	1.44	0.50	44



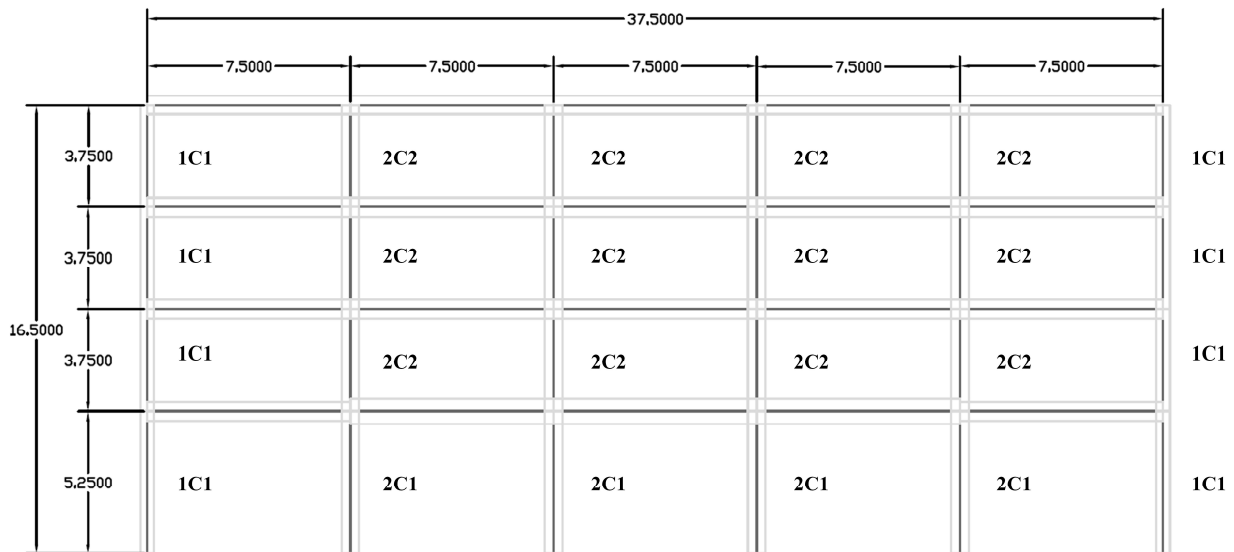
<그림 2.9> 원 지진데이터의 응답스펙트럼



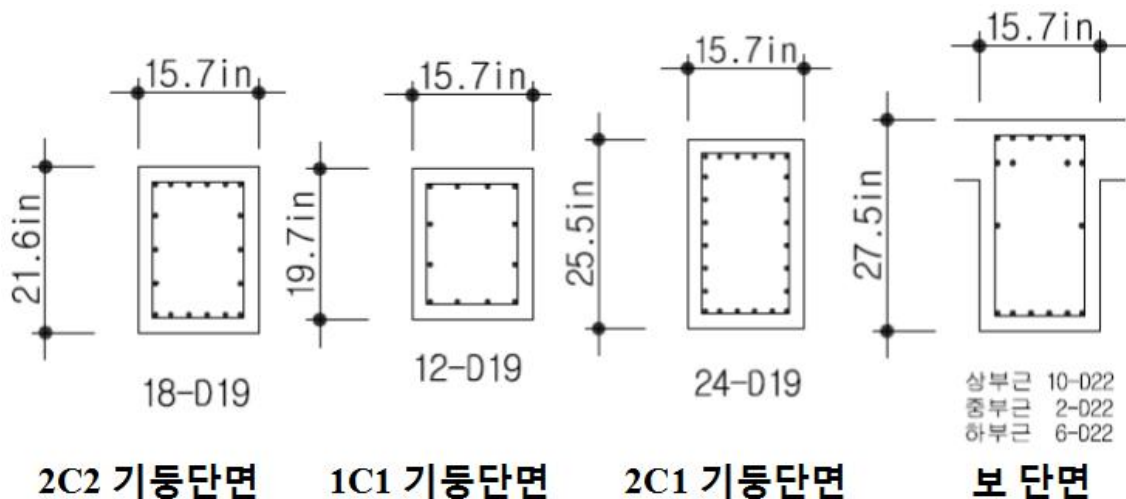
<그림 2.10> 스케일링한 지진데이터의 응답스펙트럼

(가) 소방시설물의 모델링

소방시설물 2D 프로토타입모델에 대한 상세 치수 및 부재정보는 <그림 2.11>과 같다. 소방시설물의 모델링 및 해석은 OpenSees를 사용하였다. 프로토타입모델의 부재는 비선형성에 의한 층간변위 또는 처짐을 자세하게 구현하기 위해, 비선형보기둥요소로 모델링하였다. 비선형보기둥요소는 두 절점사이의 부재에 대한 5개의 integration point로 구분하고 비선형요소를 모델링하였다. 콘크리트의 재료모델은 전단보강근 의해 구속된 콘크리트(confined concrete)와 전단보강근 외부의 비구속된 콘크리트(unconfined concrete)를 구분할 수 있는 linear tension softening model을 사용하였다. 철근의 재료모델은 Giuffren-Menegotto-Pinto Steel Model을 사용하여 철근의 이력거동을 구현하였다.



(a) 소방시설물 2D 프로토타입모델의 입면도



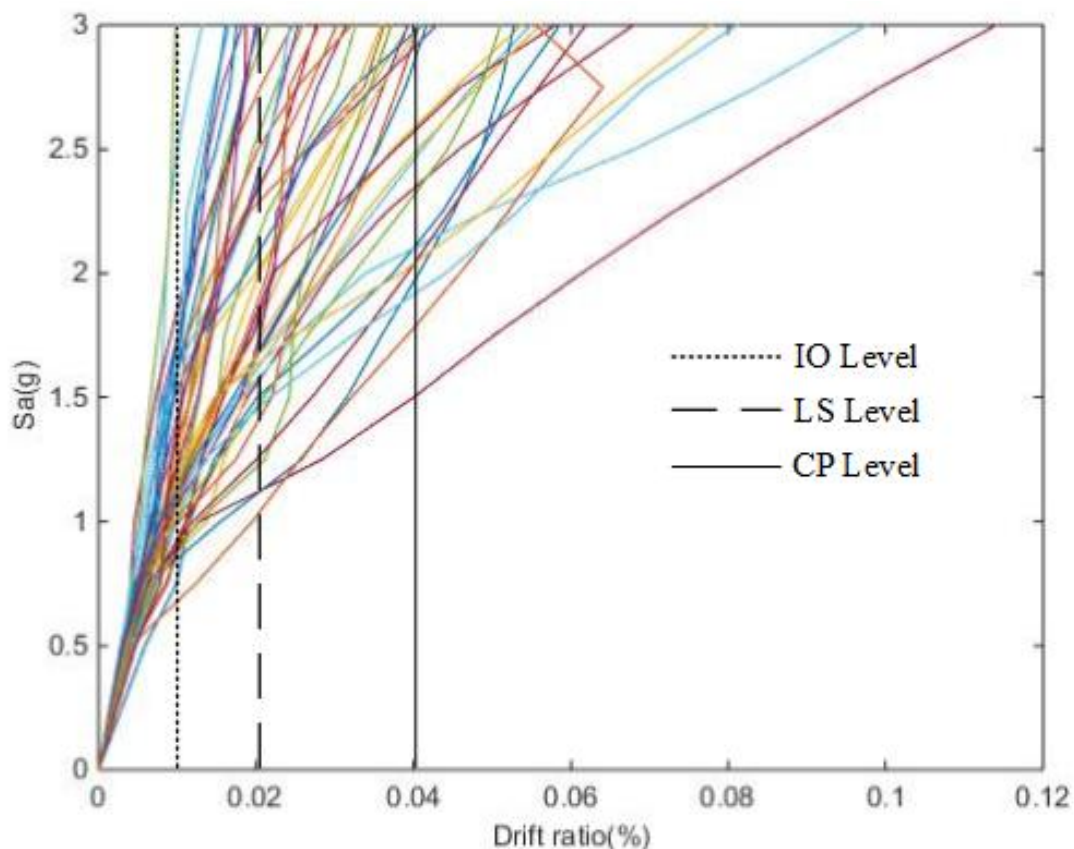
(b) 소방시설물 프로토타입 단면상세

<그림 2.11> 소방시설물 프로토타입 모델의 구조 상세

(나) 스펙트럼가속도 지진강도에 대한 증분동적해석 결과

스펙트럼가속도를 지진강도로 사용하기 위해선, 소방시설물 프로토타입모델의 1차 고유주기를 산정하여야 한다. 소방시설물 프로토타입모델의 1차 고유주기는 0.46초로 $T_n=0.46$ 일 때, 스펙트럼가속도를 통하여 지진파를 0g부터 3g까지 0.25g를 간격으로 스케일링하였다. 각 지진파에 대한 지진취약도를 평가하기 위한 구조물의 응답인 최적지진반응계수는 최대층간 변위비를 사용하였다.

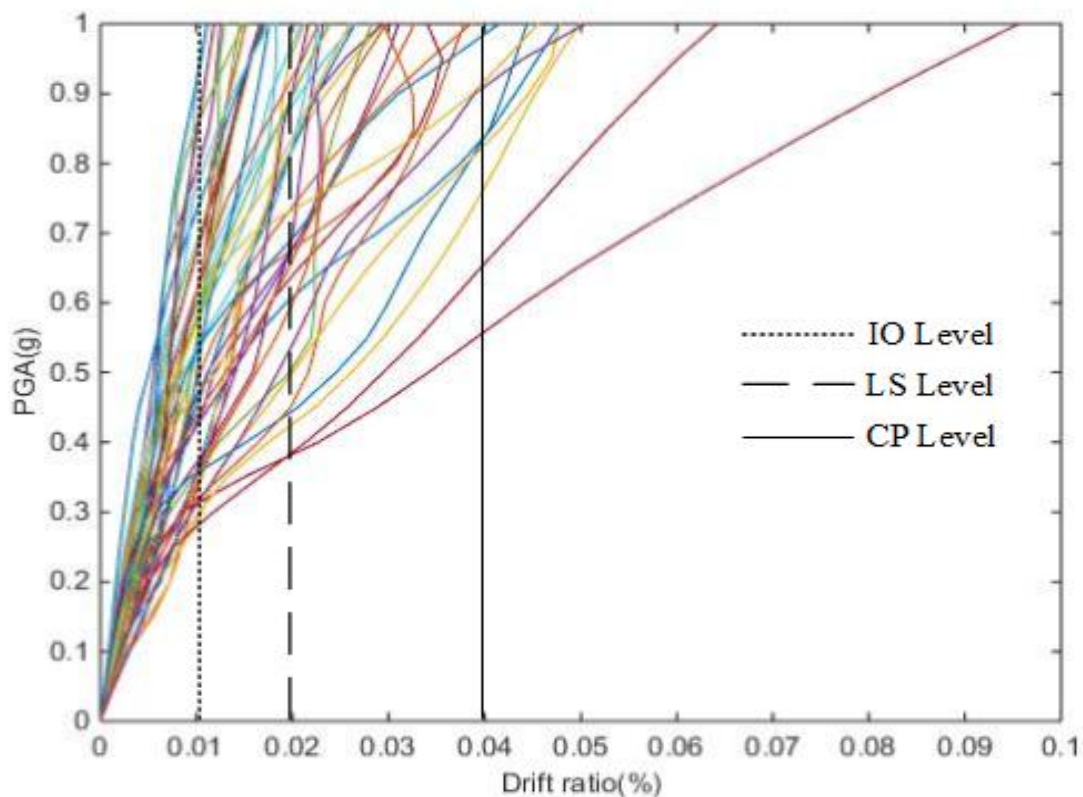
스펙트럼가속도를 지진강도로 사용한 증분동적해석 결과인 최대층간변위비-스펙트럼가속도의 관계를 <그림 2.12>에 정리하였다. 또한 손상수준에 따른 지진취약도곡선을 도출하기 위해, 프로토타입모델의 성능수준을 즉시거주(immediately occupancy, IO), 인명안전(life safety, LS), 붕괴방지(collapse prevention)으로 구분하였다. 각 성능수준에 대한 허용층간변위비는 FMEA 356에서 정의된 철근콘크리트 건축물에 대한 값을 사용하였다. 해당 문헌에서 성능수준별 허용 층간변위비는 IO일 경우 1%, LS일 경우 2%, CP일 경우 4%로 정의하고 있다. 또한 성능수준에 대한 불확실성은 FEMA P695를 참고하여 0.4로 결정하였다. FEMA 356에서 정의된 철근콘크리트 구조물의 3단계 성능수준(IO, LS, CP)을 비교해보면, 스펙트럼가속도가 커질수록 각 성능수준을 만족하지 못하는 경향을 파악할 수 있다.



<그림 2.12> 소방시설물 프로토타입모델의 증분동적해석결과(스펙트럼 가속도)

(다) 최대지반가속도 지진강도에 대한 증분동적해석 결과

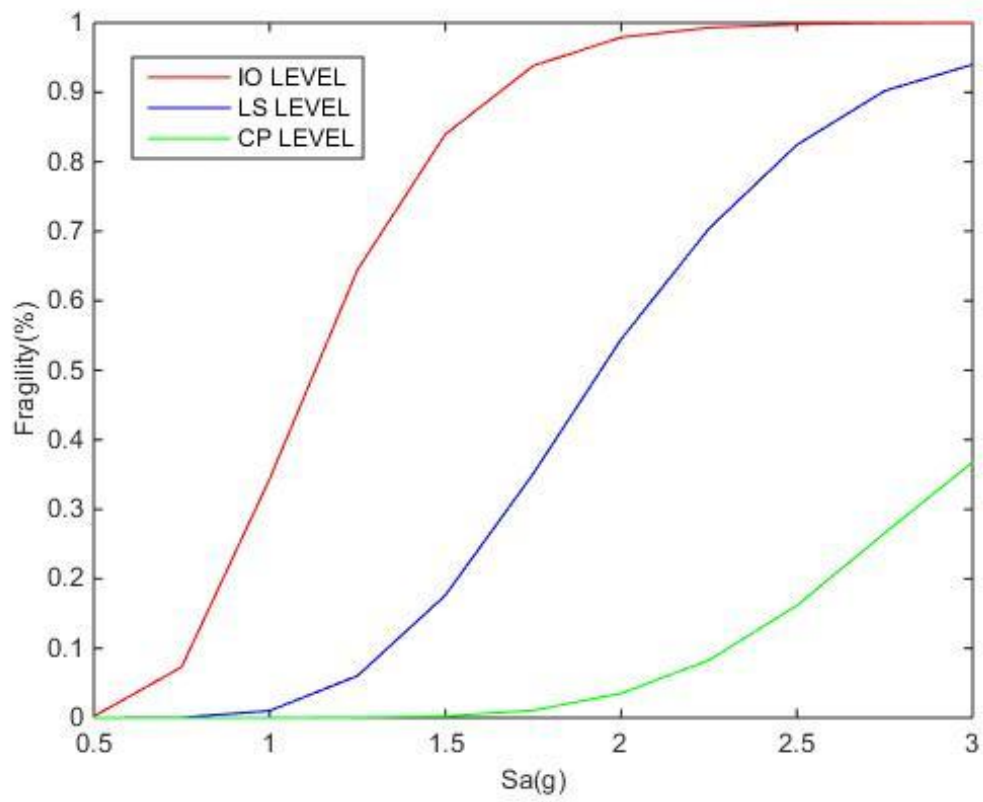
총 44개의 지진데이터에 대한 최대지반가속도를 0g부터 1g까지 0.5g를 간격으로 20등분으로 스케일링하여 증분동적해석을 수행하였다. <그림 2.13>은 증분동적해석을 통해 얻어진 최대층간변위비-최대지반가속도의 관계를 나타낸 것이다. FEMA 356에서 정의된 철근콘크리트 구조물의 3단계 성능수준을 비교해보면, 최대지반가속도(PGA)가 커질수록 각 성능수준을 만족하지 못하는 경향을 파악할 수 있다.



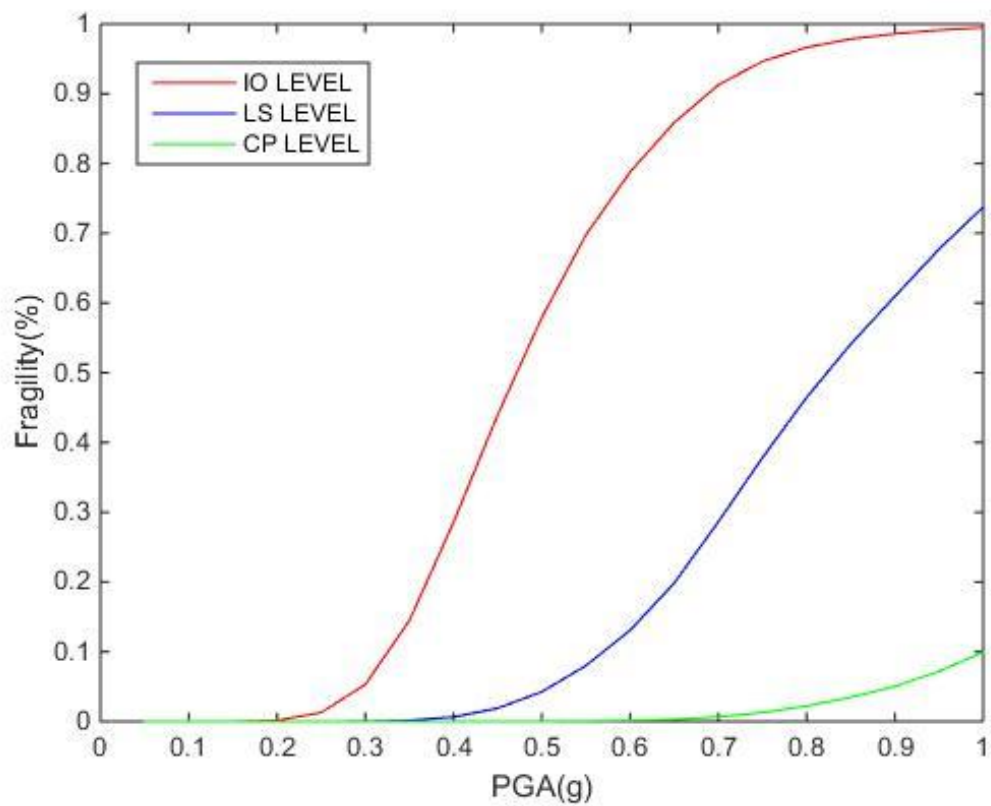
<그림 2.13> 소방시설물 프로토타입모델의 증분동적해석결과(최대지반가속도)

(라) 지진강도에 따른 지진취약도 곡선 비교 분석

<그림 2.14>와 <그림 2.15>는 각각 지진강도가 스펙트럼가속도와 최대지반가속도에 대한 지진취약도곡선이다. 지진취약도곡선을 analytical method를 통해 도출하는 자세한 방법은 단위성과 1-1-⑤에 정리되어 있다. 지진강도에 따른 구조물의 손상확률을 정량적으로 분석하기 위해 예제 지진시나리오에 대한 손상확률을 지진강도에 따라 분석하였다.



<그림 2.14> 지진취약도곡선(스펙트럼 가속도)



<그림 2.15> 지진 취약도 곡선(최대지반가속도)

예제 지진시나리오에 사용된 지진데이터는 Northridge지진과 Elcentro지진을 사용하였다. Elcentro지진은 단주기성분이 많이 포함된 지진으로, 단주기건물에 영향력이 큰 지진이다 반면, Northridge지진은 장주기성분이 많이 포함된 지진으로, 장주기 건물에 영향력이 큰 지진이기 때문에, 지진파의 특성이 상이한 두 지진파를 예제 시나리오로 선정하였다. <표 2.7>에 Elcentro지진과 Northridge지진의 최대지반가속도와 프로토타입모델의 1차 고유주기에 대한 스펙트럼가속도를 정리하였다.

<표 2.7> Elcentro, Northridge지진의 최대지반가속도 및 스펙트럼가속도

지진파	최대지반가속도(g)	스펙트럼가속도(g)
Elcentro 180	0.21	0.60
Elcentro 270	0.35	0.88
Northridge	0.37	0.53

3가지 예제 지진시나리오에 따라 소방서 프로토타입모델의 지진취약도를 <표 2.8>에 정리하였다. Elcentro 180지진의 경우, 최대지반가속도에 대한 IO level의 손상확률은 0.2%인 반면, 스펙트럼가속도에 대한 IO level의 손상확률은 3.0%이다. Elcentro 270지진은 최대지반가속도와 스펙트럼가속도에 대한 IO level의 손상확률이 각각 14%, 21%로, 지진강도에 따라 손상확률에 차이가 있음을 알 수 있다. 마지막으로 Northridge지진의 최대지반가속도와 스펙트럼가속도에 대한 IO level의 손상확률이 각각 20.1%, 0.8%로, Elcentro지진과 달리 최대지반가속도에 대한 손상확률이 스펙트럼가속도보다 높은 것을 알 수 있다. 즉, 지진강도는 건축물의 손상확률에 밀접한 관련이 있으므로, 지진취약도 분석 시 다양한 지진강도를 고려해야 한다.

<표 2.8> 지진강도에 따른 손상확률의 차이 비교

지진파	지진강도	지진강도 수치	성능수준	손상확률
Elcentro 180	최대지반가속도(g)	0.21	IO level	0.2%
			LS level	0%
			CP level	0%
	스펙트럼가속도(g)	0.60	IO level	3.0%
			LS level	0%
			CP level	0%
Elcentro 270	최대지반가속도(g)	0.35	IO level	14%
			LS level	0.1%
			CP level	0%
	스펙트럼가속도(g)	0.88	IO level	21%
			LS level	0.5%
			CP level	0%
Northridge Santa 0	최대지반가속도(g)	0.37	IO level	20.1%
			LS level	0.3%
			CP level	0%
	스펙트럼가속도(g)	0.53	IO level	0.8%
			LS level	0%
			CP level	0%

마. 단위성과 1-5-①: 지진취약도 평가 모델 개발

(1) 지진취약도 함수의 정의와 도출방법

(가) 정의

지진취약도함수(seismic fragility function 또는 간단히 fragility function)는 건축물의 지진하중에 대한 손상을 확률적으로 나타내기 위한 함수이다. 좀 더 정밀히 정의하면, 지진취약도 함수는 건축물이 주어진 지진의 강도(intensity measure)에 대해 특정한 손상상태를 만족하거나 초과할 가능성을 제공하는 조건부 확률이라고 할 수 있다. 지진취약도함수의 조건부 확률은 일반적으로 아래의 식 (2.4)와 같이 정의할 수 있다.

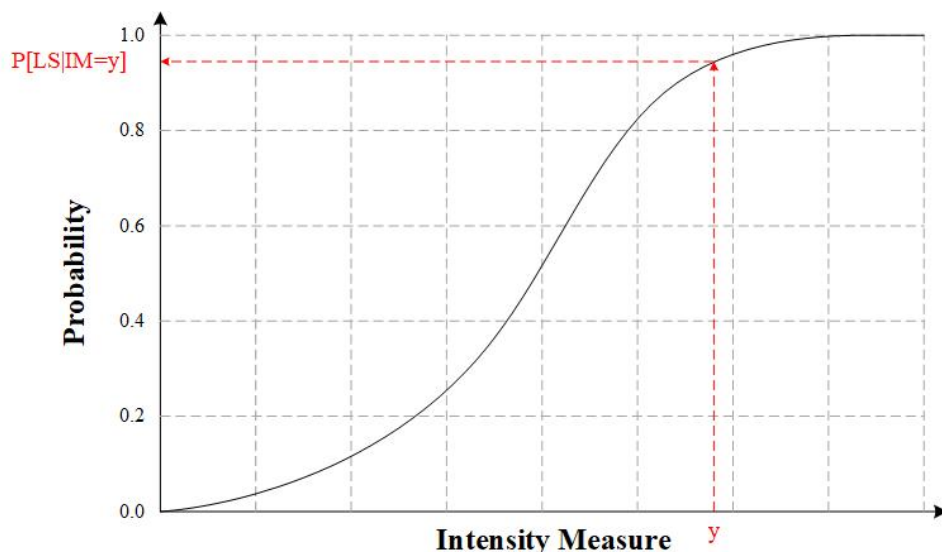
$$Fragility = P[LS|IM = y] \quad (2.4)$$

여기서, LS : 건축물 구성요소의 손상상태(limit state) 또는 손상정도(damage level)

IM : 지진의 강도

y : 선택된 지진의 강도

지진취약도함수의 정의로부터, 지진취약도함수를 도출하기 위해선 지진의 강도, 손상상태가 필요한 것을 알 수 있다. HAZUS는 구조재와 비구조재의 손상상태를 총 4가지 단계(slight, moderate, extensive, complete)로 구분하여, 한 가지 건축물에 대해 각 손상상태에 대한 지진취약도함수를 제공하고 있다. <그림 2.16>는 지진취약도함수를 그래프로 나타낸 것이며, 가로축은 지진의 강도, 세로축은 특정한 지진강도에 대한 손상상태에 도달할 확률을 나타낸다.



<그림 2.16> 지진취약도 함수의 예

(나) 지진취약도 함수 도출방법

지진취약도 함수를 도출하기 위해 과거 전문가들의 설문조사를 통한 expert-based method 나 실제 지진피해데이터를 이용한 empirical-based method를 사용하였다. 최근에는 컴퓨터의 발달과 원하는 건축물의 지진취약도 함수를 도출하기 위한 목적으로, 건축물의 지진취약도 함수는 analytical method를 통해 도출하는 경우가 많다.

지진에 대한 건축물의 실제 손상데이터나 지진동에 대한 데이터가 없을 때, 지진취약도 함수는 analytical method를 이용하여 도출할 수 있다. 모든 건축물이나 구조물은 각각의 지진취약도를 가지는데, 기본적인 도출방법은 식 (2.4)을 이용하여 얻어진다. 건축물을 구성하는 구조재, 비구조재 그 외 기계장비와 같은 contents에 대한 손상확률(p_f)을 나타내는 지진취약도는 건축물 또는 건축물 구성요소의 capacity(C)와 지진의 강도와 관련된 건축물의 demand(D)로 아래의 식 (2.5)과 같이 표현할 수 있다.

$$p_f = P[D \geq C] \quad (2.5)$$

여기서 지진의 강도와 관련된 건축물의 demand는 층간변위비와 같은 지진의 강도에 대한 지진반응계수(EDP_{IM})이며, 좀 더 일반적으로 아래의 식 (2.6)과 같이 나타낸다.

$$p_f = P[EDP_{IM} \geq C] \quad (2.6)$$

지진의 강도를 나타내는 D 는 지진의 재현주기, 지반조건, 지진동의 크기 등에 의해 어떠한 확률분포를 이루며, 건축물 구성요소의 성능을 나타내는 C 는 사용재료, 시공의 질, 사용년수 등에 의해 어떠한 확률분포를 이룬다. 만일 어떤 특정한 지진의 강도에 대한 확률분포를 d , 특정한 건축물의 성능을 c 라고 한다면, 지진에 의해 발생하는 전체사건에 대한 집합 U 는 아래의 식 (3.63)과 같이 정의된다.

$$U = \{(d, c) | d \in D, c \in C\} \quad (2.7)$$

지진에 의해 건축물이 손상을 받는 경우는 다음의 2가지 경우로 생각할 수 있다.

- Excessively high demand case, EHD: 지진에 의한 demand가 건축물 capacity의 대푯값보다 큰 경우
- Excessively low capacity case, ELC: 건축물의 capacity가 지진에 의한 demand의 대푯값보다 작은 경우

EHD , ELC 경우에 대한 사건에 대한 집합은 전체사건에 대한 집합 U 의 부분집합이며, 아래의 식 (2.8), 식 (2.9)와 같이 정의된다.

$$EHD = \{(d, c) | d \in D, c \in C \text{ and } d > m_C\} \quad (2.8)$$

$$ELC = \{(d, c) | d \in D, c \in C \text{ and } c < m_D\} \quad (2.9)$$

여기서, m_C : 건축물 구성요소의 성능에 대한 중앙값(median)

m_D : 지진의 강도에 대한 중앙값

사건 EHD , ELC 에 대한 확률을 각각 p_{EHD} , p_{ELC} 라 하면 아래의 식과 같이 정의할 수 있다.

$$p_{EHD} = P[EHD] = 1 - F_D(m_C) \quad (2.10)$$

$$p_{ELC} = P[ELC] = F_C(m_D) \quad (2.11)$$

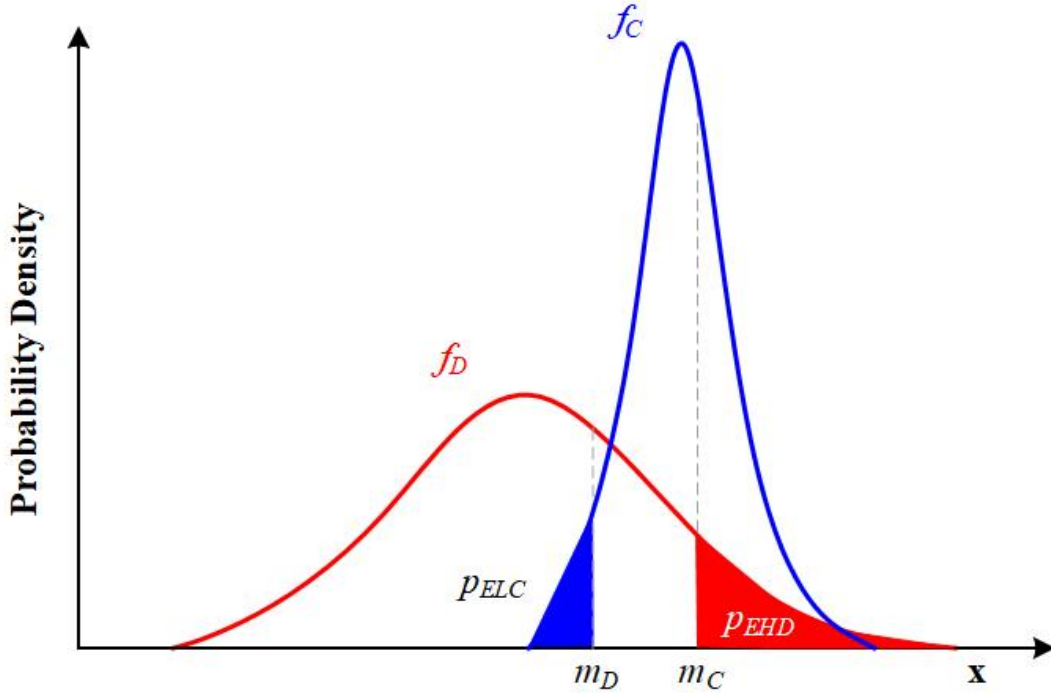
여기서, $P[X]$: 사건 X 에 대한 확률

$F_X(x)$: 집합 X 에 대한 누적분포함수

식 (2.10)와 식 (2.11)에 대한 내용을 그림으로 표현하면 <그림 2.17>와 같다. 그림에서 p_{EHD} 는 집합 D 에 대한 확률밀도함수가 m_C 보다 큰 부분을 의미하며, p_{ELC} 는 집합 C 에 대한 확률밀도 함수가 m_D 보다 작은 부분을 의미한다. 즉, 지진취약도를 나타내는 손상확률 p_f 는 p_{EHD} 와 p_{ELC} 의 합으로 아래의 식 (2.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_f = p_{EHD} + p_{ELC} \quad (2.12)$$

하지만, 두 개의 분포 f_C 와 f_D 각각을 고려하여 손상확률 p_f 을 계산하는 것보다, 건축물의 성능에 대해 표준화된 지진강도에 대한 건축물의 demand (D/C)의 확률밀도함수를 이용하여 직접적으로 지진취약도함수를 도출하는 방법이 좀 더 편리하다. 이를 수식으로 표현하면 아래의 식 (2.13)과 같다.



<그림 2.17> 사건 EHD, ELC에 대한 수학적 확률 개념도

$$p_f = P[D \geq C] = P\left[\ln\left(\frac{D}{C}\right) \geq 0\right] = \Phi\left[\frac{\ln(D/C)}{\beta_t}\right] \quad (2.13)$$

여기서, $\Phi[\dots]$: 로그정규분포의 누적분포

β_t : 총 분산

식 (2.6)를 참고하여 식 (2.13)을 자세히 정리하면 아래의 식 (2.14)과 같다.

$$p_f = \Phi\left[\frac{\ln(EDP_{IM}/C)}{\sqrt{\beta_{EDP/IM}^2 + \beta_C^2}}\right] \quad (2.14)$$

여기서, $\beta_{EDP/IM}$: 지진에 대한 건축물의 응답에 대한 분산

β_C : 건축물 성능에 대한 분산

식 (2.14)에서 $\beta_{EDP/IM}$ 는 지진에 대한 건축물의 응답(지진응답계수)의 불확실성, β_C 는 건축물 성능에 대한 불확실성을 나타낸다. 두 불확실성이 독립적이라고 가정한다면, 건축물 손상에 대한 총 불확실성 β_t 는 식 (2.14)의 분포와 같이 나타낼 수 있다. 기존 지진취약도함수를 살펴보면, 총 불확실성을 구성하는 $\beta_{EDP/IM}$ 와 β_C 는 고려하는 요소에 따라 차이가 있다. 예를 들어, FEMA P695에서는 건축물 손상상태가 붕괴일 경우, 총 불확실성에 대해 아

래의 식 (2.15)과 같이 정의한다.

$$\beta_t = \sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_{DR}^2 + \beta_{TD}^2 + \beta_{MDL}^2} \quad (2.15)$$

여기서, β_{RTR} : record-to-record collapse uncertainty (0.20-0.40)

β_{DR} : design requirements-related collapse uncertainty (0.10-0.50)

β_{TD} : test data-related collapse uncertainty (0.10-0.50)

β_{MDL} : modeling-related collapse uncertainty (0.10-0.50)

FEMA P695에서 제시하는 건축물 붕괴에 대한 총 불확실성을 $\beta_{EDP/IM}$ 와 β_C 로 구분할 수 있다. 지진에 대한 건축물의 응답에 대한 불확실성 $\beta_{EDP/IM}$ 은 지진데이터의 불확실성인 β_{RTR} , 모델링의 불확실성인 β_{MDL} 을 포함하며, 건축물 성능에 대한 불확실성 β_C 은 설계요구 조건의 불확실성인 β_{DR} , 실험데이터의 불확실성인 β_{TD} 을 포함한다. 건축물 구성요소의 손상 확률을 나타내는 지진취약도는 이러한 불확실성에 의해 크게 좌우되므로, 지진의 특성, 건축물의 특성을 고려하여 전체 불확실성을 도출해야 한다.

식 (2.14)으로부터 건축물의 손상확률에 대한 지진취약도는 다음의 4가지 요소를 도출할 수 있다면 정의가 가능하다.

- 지진에 대한 건축물 응답(지진반응계수)의 중앙값 [=EDP_{IM}]
- 지진에 대한 건축물 응답(지진반응계수)의 불확실성(분산) [=β_{EDP/IM}]
- 건축물 성능에 대한 중앙값 [=C]
- 건축물 성능에 대한 불확실성(분산) [=β_C]

위의 4가지 요소는 비선형정적해석이나 비선형동적해석을 통해 도출할 수 있다.

(2) 지진취약도 함수 데이터베이스 구축

지진취약도 곡선을 정의하기 위해선 구조재와 비구조재의 지진반응계수(engineering demand parameter)로 damage state에 대한 정의가 필요하고, 각 damage state의 지진취약도를 로그정규분포로 표현하기 위해, 로그정규분포의 누적분포함수를 정의하기 위한 중앙값(median)과 표준편차(dispersion)가 필요하다. 요소정보의 지진취약도 곡선에 대한 데이터베이스 구축을 진행하기 위해, 본 연구에서는 HAZUS, SYNER-G, FEMA P-58의 요소정보 분류 체계에 따른 지진취약도 곡선 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 지진취약도 데이터베이스

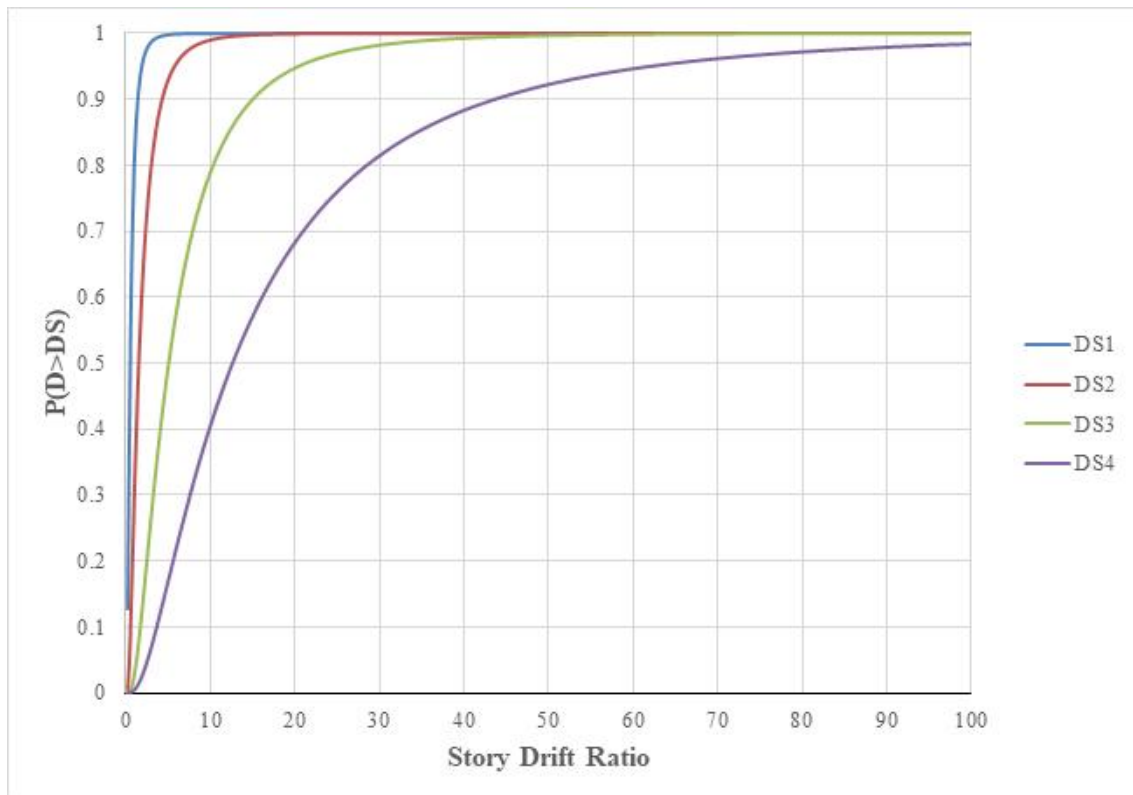
는 구조재 1058건, 비구조재 985건에 대해 구축하였다.

(가) HAZUS 지진취약도곡선 DB

HAZUS에서 제공하는 시스템레벨에서의 구조요소에 대한 지진취약도곡선은 총 288개 이며, 총 36개의 구조요소(건축물)에 대해 4개의 내진설계레벨, 2개의 지진강도로 지진취약도곡선을 제공한다. FEMA P-58처럼 각 비구조요소에 대한 지진취약도 곡선을 제공하지는 않으며, 총 288개로 분류된 구조요소에 대하여 변위민감 비구조요소, 가속도민감 비구조요소에 대해 지진취약도 곡선을 총 576개 제공한다. HAZUS에서 구조재와 비구조재에 대해 제공하는 총 864개의 지진취약도곡선을 데이터베이스화 하였으며, <표 2.9>은 high code level에서 구조요소의 지진취약도 곡선을 정의하는 damage state에 따른 중앙값과 표준편차를 정리한 것이다. <그림 2.18>은 지진취약도곡선 DB를 이용하여 얻어지는 지진취약도 곡선의 예이다.

<표 2.9> Structural Fragility Curve Parameters - High-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Displacement (cm)							
Type	Height (cm)		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	427	320	1.27	0.80	3.84	0.81	12.80	0.85	32.00	0.97
W2	732	549	2.18	0.81	6.58	0.88	21.95	0.90	54.86	0.83
S1L	732	549	3.30	0.80	6.58	0.76	16.46	0.69	43.89	0.72
S1M	1829	1372	5.49	0.65	10.97	0.66	27.43	0.67	73.15	0.74
S1H	4755	2852	8.56	0.64	17.12	0.64	42.80	0.65	114.12	0.67
S2L	732	549	2.74	0.81	5.49	0.89	16.46	0.94	43.89	0.83
S2M	1829	1372	4.57	0.67	9.14	0.67	27.43	0.68	73.15	0.79
S2H	4755	2852	7.14	0.63	14.27	0.63	42.80	0.64	114.12	0.71
S3	457	343	1.37	0.81	2.74	0.82	8.23	0.91	24.00	0.90
S4L	732	549	2.18	0.89	4.39	0.89	13.16	0.98	38.40	0.87
S4M	1829	1372	3.66	0.77	7.32	0.72	21.95	0.70	64.01	0.89
S4H	4755	2852	5.72	0.64	11.40	0.66	34.24	0.69	99.85	0.77
C1L	610	457	2.29	0.81	4.57	0.84	13.72	0.86	36.58	0.81
C1M	1524	1143	3.81	0.68	7.62	0.67	22.86	0.68	60.96	0.81
C1H	3658	2195	5.49	0.66	10.97	0.64	32.92	0.67	87.78	0.78
C2L	610	457	1.83	0.81	4.57	0.84	13.72	0.93	36.58	0.92
C2M	1524	1143	3.05	0.74	7.62	0.77	22.86	0.68	60.96	0.77
C2H	3658	2195	4.39	0.68	10.97	0.65	32.92	0.66	87.78	0.75
PC1	457	343	1.37	0.76	2.74	0.86	8.23	0.88	24.00	0.99
PC2L	610	457	1.83	0.84	3.66	0.88	10.97	0.98	32.00	0.94
PC2M	1524	1143	3.05	0.77	6.10	0.81	18.29	0.70	53.34	0.82
PC2H	3658	2195	4.39	0.64	8.79	0.66	26.34	0.68	76.81	0.81
RM1L	610	457	1.83	0.84	3.66	0.86	10.97	0.92	32.00	1.01
RM1M	1524	1143	3.05	0.71	6.10	0.81	18.29	0.76	53.34	0.75
RM2L	610	457	1.83	0.80	3.66	0.81	10.97	0.91	32.00	0.98
RM2M	1524	1143	3.05	0.71	6.10	0.79	18.29	0.70	53.34	0.73
RM2H	3658	2195	4.39	0.66	8.79	0.65	26.34	0.66	76.81	0.72
MH	305	305	1.22	0.91	2.44	1.00	7.32	1.03	21.34	0.92

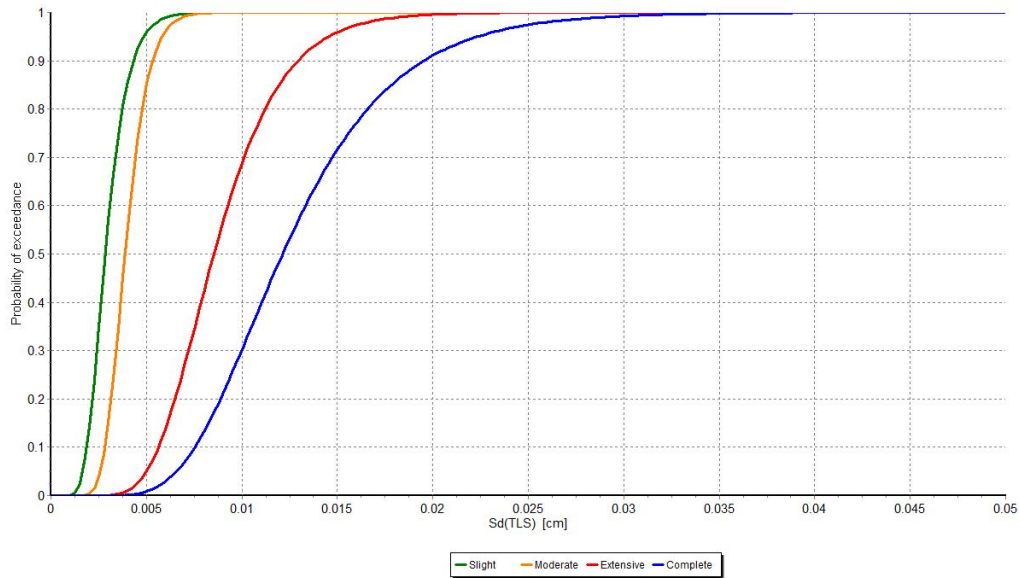


<그림 2.18> Fragility Curve for Structural component - High Code (W1-Low Rise)

(나) SYNER-G 지진취약도곡선 DB

SYNER-G에서는 HAZUS와 동일하게 건축물 레벨에서 구조요소에 대한 지진취약도 곡선을 제공한다. HAZUS는 36개의 건축물 타입에 대해 지진취약도 곡선을 제공하는 반면, SYNER-G에서는 SYNER-G에서 사용하는 분류체계에 따라 지진취약도 곡선을 제공하는 차이가 있다. SYNER-G에서는 하중전달 메커니즘, 사용재료, 수평 및 수직 비정형성 등을 포함해 총 10개의 category로 건축물 레벨에서 구조요소를 분류하기 때문에 각각 지진취약도 곡선의 세부적인 사항을 알 수 있는 장점이 있다. 아래는 SYNER-G에서의 구조요소 분류체계에 대한 예이다. <그림 2.19>은 구축된 지진취약도 곡선 DB를 이용하여 얻어지는 지진취약도 곡선의 예이다.

MRF/C-RC/X/X/RI-FB-H%/ND/R-RC/X/L-2/NS: moment resisting frame, in reinforced concrete with regular external infill panels in brick with a high percentages of voids, with non-ductile design details, with rigid reinforced concrete floor, low-rise, 2stories, not designed to a seismic code



<그림 2.19> Fragility curve for MABrick(High)-2storeys according to the damage states

(다) FEMA P-58 지진취약도곡선 DB

FEMA P-58에서는 총 764개 요소에 대한 지진취약도 함수가 제공된다. 이 중 구조요소는 355개, 비구조요소는 409개로 파티션, 캐비닛, 냉각기, 파이프 등 비구조요소에 대한 다양한 지진취약도 함수를 제시한다. FEMA P-58은 부재레벨에서 요소정보를 분류하기 때문에 구조요소와 비구조요소를 구분할 수 있으며, 실험을 통해 damage state를 정의하고 지진취약도에 필요한 매개변수를 도출하는 경우가 많아 다른 연구와 달리 통일된 damage state를 정의하기는 어렵다. FEMA P-58은 부재레벨에서 요소정보의 지진취약도를 제공하고 있기 때문에, 실제 실험으로 얻어진 경우가 많아, 위의 그림과 같이 실험에 사용된 부재의 상세 내용이 함께 정리되어 있다. 자세한 지진취약도 곡선 DB는 부록으로 첨부하였다.

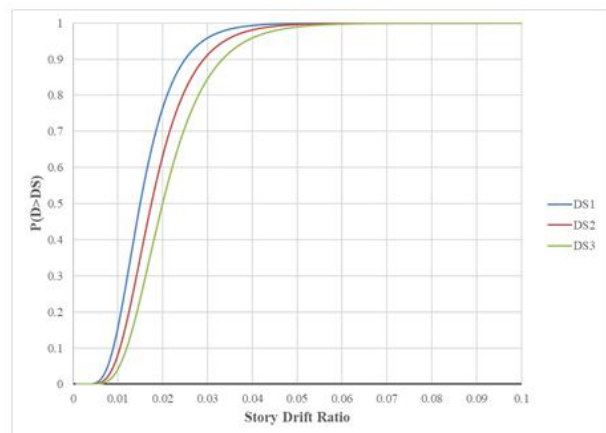
B1041.041a

Component Name : ACI 318 OMF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side

Component Description : ACI318 OMF, joint shear failure, beam flexural response. Meets the following requirements: (1) $\sum M_{col} / \sum M_{beam} > 1.2$, (2) Beam $V_n > V_{eq}$, (3) Column $V_n > V_{eq}$. Costing is on a per joint basis.

Demand Parameter : Story Drift Ratio

DS1		DS2		DS3	
Median Demand	Dispersion	Median Demand	Dispersion	Median Demand	Dispersion
0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4



<그림 2.20> B1041.041a의 지진취약도 곡선 데이터베이스 상세 목록

2. 핵심성과 2: 목표성능수준 및 손상도를 고려한 지진손실평가기법 개발

가. 단위성과 2-1-①: 요소정보의 목표성능수준 구축

(1) 성능수준의 정의

구조재에 대한 내진설계는 미국의 경우 UBC 1927(Uniform Building Code)에서 처음 건축물에 대한 내진설계기준이 적용되었고, 이후 UBC 1935에서 비교구조요소에 대한 내진설계기준이 도입되었다. 국내의 경우, 국내 건축법이 처음 도입된 1962년 건축법 제 10조 구조내력에서는 건축물이 지진에 대하여 안전한 구조를 가져야 한다고 명시하고 있지만, 건축물의 내진설계기준에 대한 상세내용은 1988년 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙에 처음 규정이 되었다. 국내 건축물의 비구조재에 대한 내진설계 기준은 한국건축구조기준(Korean Building Code, KBC) 2005에서 처음 도입이 되었다.

처음 내진설계가 도입되었을 당시 지진에 대한 성능수준은 명확히 정의되지 않았다. 강한지진에 대해 견딘 건축물의 구조를 모방하거나, 붕괴 및 파괴가 발생한 건축물 구조를 피하는 방법으로 내진설계의 개념을 도입하였다. 처음 건축물의 내진성능목표에 대한 정의는 1973년 Blue Book¹⁾에서 아래와 같이 도입 되었다.

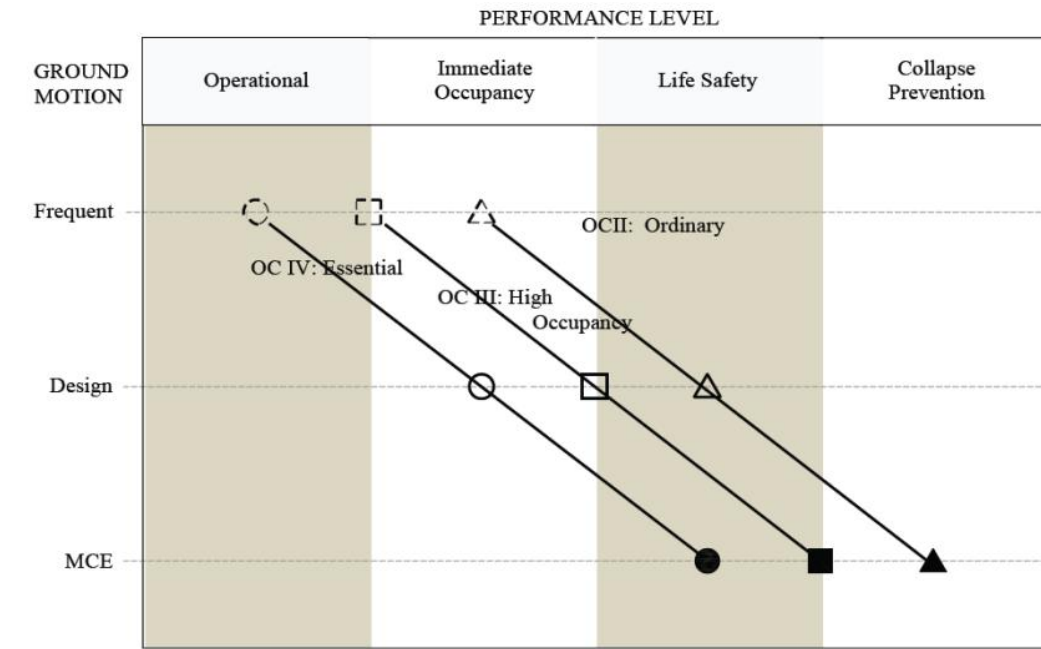
- 주요지진(major earthquake)에 대해 붕괴수준이 아닌 손상 허용
- 중간지진(moderate earthquake)에 대해 복구가 가능한 손상 허용
- 약한지진(minor earthquake)에 대해 중요 손상 발생 없음

1973년 Blue Book에 대한 영향으로 1976년 UBC에서는 건축물의 설계가속도를 최대 50%까지 증가시킬 수 있는 건축물의 용도에 따른 중요도 계수(importance factor)를 도입하였다. 1976년 UBC의 중요도 계수는 주요시설물에 대해선 1.5, 한 방에 300명 이상 수용할 수 있는 시설에 대해선 1.25, 그 외 건축물에 대해선 1.0으로 정의하고 있다. 즉, 건축물의 용도에 따라 내진설계의 정도를 반영하기 시작하였다.

1978년 ATC-3(Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings)는 500년 재현주기 지진(50년동안 10% 발생가능성)에 대해 건축물이 인명안전수준(life safety)의 성능을 제공하여야 한다고 명시하고 있다. 설계가속도에 대한 중요도계수는 삭제되었고, 그 대신 주요시설물에 대해선 변형에 대한 제한을 설정하였다. 이후 1997년 미국의 재해경감프로그램(National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP)에서 2500년

1) SEAOC (Structural Engineer Association of California)에서 발간한 Seismic Design Recommendations로 일반적으로 Blue Book으로 불림

재현주기 지진(50년 동안 2% 발생가능성)인 최대고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)에 대해 낮은 붕괴가능성을 건축물의 성능목표로 제시하였다. 또한 중요도계수를 다시 도입하였다. 2009년에 ATC-63프로젝트의 보고서인 FEMA P695 (Quantification of Building Seismic Performance Factors)에서 낮은 붕괴가능성을 10%로 정의하고 있다.



<그림 2.21> 건축물 용도에 따른 내진성능목표

현재 건축물의 용도에 따른 내진성능목표는 NEHRP 2009에서 제시하고 있으며, 미국의 IBC(International Building Code)나 우리나라의 KBC에서도 <그림 2.21>에 제시된 내진성능목표를 사용하고 있다. 건축물의 category는 용도에 따라 나뉘며 아래와 같이 붕괴가능성을 정량적으로 제시하고 있다.

- Category II (중요도 2): MCE_{R2} 에 대한 10% 붕괴가능성
- Category III (중요도 1): MCE_R 에 대한 5~10% 붕괴가능성
- Category IV (중요도 특): MCE_R 에 대한 2.5~5% 붕괴가능성

건축물에 적용되는 구조재와 비구조재의 내진성능목표는 위와 같지만, 건축물의 용도 (특히 병원), 경제적 손실에 대한 내진성능목표에 대해선 따로 정의가 필요하다. 왜냐하면 건축물의 내진성능목표는 건축물의 기능을 수행하기 위한 안전성(safety)측면의 목표이기 때문에, 건축물의 사용성(serviceability)나 재해복구와 같은 의사결정을 지원할 수 있는 경제적 손실에 대한 자료를 제공하기 어렵기 때문이다.

2) Risk Targeted Maximum Considered Earthquake, 위험도기반최대고려지진

(2) 병원건축물 구조재 및 비구조재의 내진성능목표

우리나라에서는 병원건축물의 수술시설과 응급시설의 유무, 연면적에 따라 중요도를 분류하여 내진성능목표를 설정한다. 종합병원·수술시설이나 응급시설이 있는 병원은 중요도(특)으로 분류되고, 수술시설과 응급시설 모두 없는 병원이나 연면적 1000m²이상인 의료시설은 중요도(1), 이외의 건축물은 중요도(2)에 해당한다. 하지만 병원건축물은 구조재의 구조적 안전성도 중요하지만, 비구조재나 수술시설과 같은 content의 사용성도 내진성능목표에 고려하여야 한다.

미국 캘리포니아주의 병원건축물은 구조재 및 비구조재의 구체적인 내진성능목표를 설정하고 있다. 1971년 발생한 산페르난도 지진시 병원건축물의 붕괴 및 인명피해가 발생하여, 병원건축물에 대한 내진성능향상 프로그램을 수립하는 법안인 Alfred E. Alquist Hospital Facilities Seismic Safety Act(이하 Alfred Act)가 시행되었다. 그리고 이 프로그램은 캘리포니아주 보건개발국(Office of Statewide Health Planning and Development, OSHPD)의 관할하에 주도되었다.

Alfred Act 시행 후 병원건축물의 내진성능의 향상을 기대할 수 있었지만, 1994년에 발생한 노스리지 지진에서 줄어든 구조재의 피해에 비해 비구조재의 피해가 막심하게 발생하게 되었다. 이에 따라 캘리포니아 주는 Alfred Act를 확장하여 Senate Bill 1953(1994, SB 1953)을 시행하였다. SB 1953에 따라 캘리포니아주 내의 모든 병원 건물에는 구조요소 및 비구조요소의 성능 분류가 적용되었다. 구조재 성능 분류인 SPC(Structural Performance Category)와 비구조재성능 분류인 NPC(Non-structural Performance Category)는 각각 1~5등급의 5개의 세부분류사항으로 나누어진다. 자세한 내용은 <표 2.10>과 같다.

<표 2.10> OSHPD에서 정의된 병원건축물 구조재 및 비구조재의 등급에 따른 정의

요소분류	등급	정의
구조재	SPC 1	• 1973년 이전에 설계되었으며, 붕괴의 위험이 있는 건물. • 2008년까지 SPC 2등급으로 상향되어야 함.
	SPC 2	• 1973년 이전에 설계되었으며, Alfred Act지진 안전법의 조항을 준수하지 않는 건물. • 강한 지진에 정상적인 의료서비스 제공에 제한이 있는 건물. • 2030년까지 Alfred Act 지진 안전법의 조항을 준수하여야 함.
	SPC 3	• 높은 지진발생지역에서 철골 모멘트골조를 사용하는 건물. • 1994년 이전에 설계되었으며, Alfred Act지진 안전법의 조항을 준수하는 건물. • 강한 지진에 정상적인 의료서비스 제공에 제한이 있는 건물. • 2030년 이후까지 사용이 가능.
	SPC 4	• Alfred Act 지진 안전법의 조항을 준수하는 건물. • 강한 지진에 정상적인 의료서비스 제공에 제한이 있는 건물. • 2030년 이후까지 사용이 가능.
	SPC 5	• Alfred Act 지진 안전법의 조항을 준수하는 건물. • 강한 지진에도 정상적인 의료서비스 제공이 가능한 건물. • 2030년 이후에도 제한 없이 사용이 가능.

요소분류	등급	정의
비구조재	NPC 1	• 다른 NPC 비구조요소 정착기준을 충족하지 못하는 건물.
	NPC 2	• 통신, 의료가스, 화재경보 등의 설비가 CBC(California Building Code) Part 2, title 24에 따라 정착되어 있는 건물. • 2002년까지 본 등급의 유지가 가능.
	NPC 3	• NPC 2의 기준을 충족하며, 수술실, 임상실험실, 방사선실 등에서 비구조요소가 Part 2, title 24에 따라 정착된 건물. • 2008년까지 본 등급의 유지가 가능.
	NPC 4	• NPC 3의 기준을 충족하며, 모든 비구조요소는 Part 2, title 24에 따라 정착된 건물. • 내진설계범주 및 연장요청에 따라 2020년 또는 2030년까지 본 등급의 유지가 가능.
	NPC 5	• NPC 4의 기준을 충족하며, 의료시스템의 정상운영을 위한 72시간의 비상공급이 가능한 건물. • 2030년까지 본 등급의 유지가 가능.

(3) 손실기반 목표성능 구축

1990년대부터 적용이 시작된 성능기반내진설계법(performance-based seismic design, PBSO)은 건축물의 구조재의 물리적 손상을 기준으로 목표 및 보유성능을 기능유지, 즉시거주, 인명안전, 붕괴방지와 같이 구분한다. 하지만 구조재의 물리적 손상측면의 성능목표는 경제적 손실과 직접적으로 연관되어 있지 않아, 의사결정권을 가지는 비전문가가 경제적인 손실을 판단하기 어려운 한계점이 있다. 현재 손실기반 목표성능수준에 대해 법제화된 기준은 없지만, 본 연구에서는 NETAP(national earthquake technical assistance program) training workshop을 참석하여 <표 2.11>와 같은 손실기반 목표성능수준을 정리하였다. 손실기반 목표성능은 수리비용(repair cost), 복구기간(repair time), 영구변형이 발생할 확률(probability of unrepairable permanent drift) 등으로 설계지진과 최대고려지진에 대해 구분된다.

<표 2.11> 손실기반 목표성능수준(NETAP training workshop)

Performance Measure	Design Earthquake	MCE
Median Repair Cost	5%	10%
90th percentile Repair Cost	10%	20%
Median Repair Time	30 days	60 days
90th percentile Repair Time	60 days	120 days
Probability of Unrepairable Permanent Drift	1%	3%
Probability of Unsafe Placard	5%	10%
Probability of Collapse	2%	5%

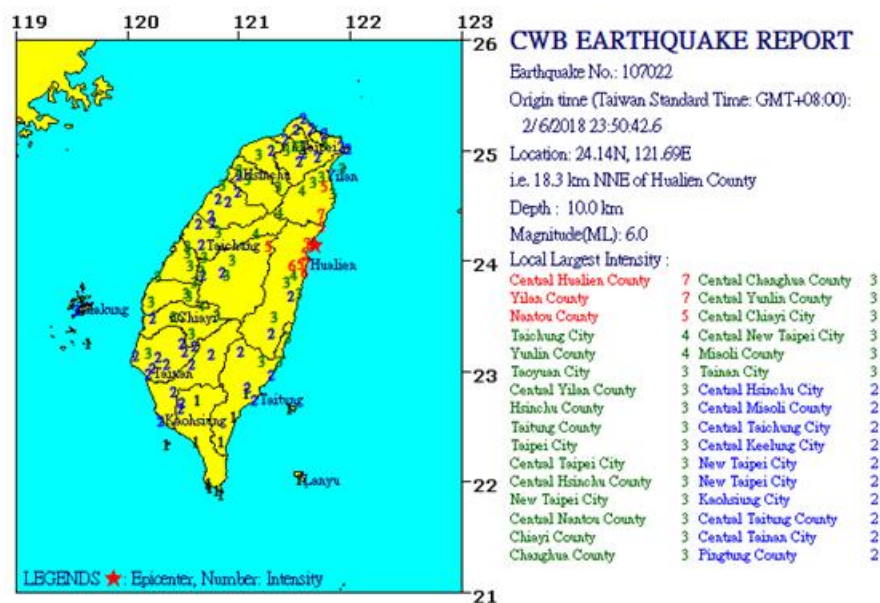
나. 단위성과 2-2-①: 요소정보의 손상도 평가

(1) 대만 화롄지진 건축물 손상도 평가

(가) 대만 화롄지진 개요

2018년 2월 6일 현지시각 23시 50분에 리히터 규모(M_L) 6.0³⁾, 모멘트 규모(M_W) 6.4⁴⁾의 지진이 대만 화롄지역에 발생하였다. 진앙의 위치는 <그림 2.22>에서 나타나듯이 (24.14 °N, 121.69 °E) 깊이는 10.0km이며, 화롄시청으로부터 북동쪽으로 18.3km떨어진 지점에서 발생하였다. 화롄시청에서 감지된 MMI 진도는 7(very strong)로 보고되었다. 본 연구에서는 화롄지진에 대한 지진피해현장을 찾아 지진피해현황을 조사(reconnaissance)하였다.

화롄지진으로 인해 총 4개의 건축물이 붕괴되었으며, 총 302명의 사상자 중 17명이 사망하였다. Taiwan Residential Earthquake Insurance Fund는 화롄지진으로 인해 주거건축물에 대한 재산피해를 약 NT\$137 million (US\$4.7 million)으로 추정하고 있다.



<그림 2.22> 대만기상청 화롄지진 요약

(나) 건축물 손상도 평가 조사 결과

총 6개 건축물에 대해 지진피해 조사를 수행하였다. <표 2.11>은 조사된 6개의 건축물중 5개 건축물에 대한 구조시스템과 대만현지조사팀에서 조사한 결과(tag), 본 연구진이 조사한 결과를 정리한 것이다. 대만의 경우, 지진피해를 받은 건축물을 조사하여 yellow, red tag로

3) source: Central Weather Bureau, CWB

4) source: United States Geological Survey, USGS

손상을 평가한다. <그림 2.23>부터 <그림 2.27>은 지진피해 현장을 조사하며 손상이 발생한 부분을 촬영한 사진이다. 3번 건축물의 경우, 지하층 1층 기둥에서 전단균열이 아닌 휨균열이 관측되었다. 기둥의 휨균열은 지반의 영향으로 판단되며, 해당 층 구조부재는 안전상의 이유로 서포트를 이용하여 지지해 놓았다. 수평증축을 한 5번 건축물의 경우, 수평증축이 진행된 부분에서 1층부터 3층까지 바닥과 천장에 균열이 발생하였다.

<표 2.12> 대만 화롄지진에 의해 손상된 건축물의 정리

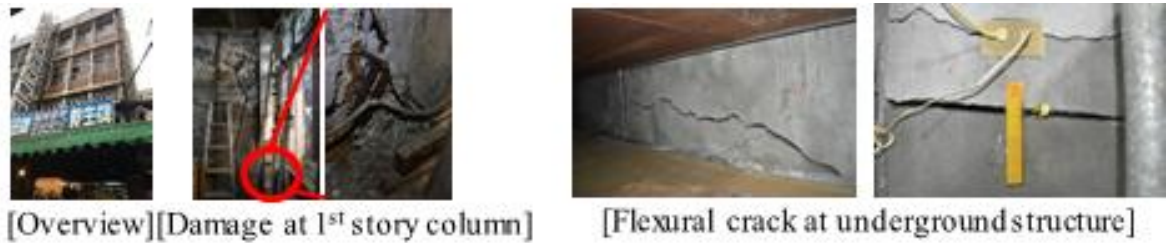
No.	Structural System	Tag	Observation
1	6-stories piloti-structure	-	• 1층 기둥과 조적채움벽의 전단균열 발생 (남북방향) • 철골기둥과 콘크리트벽사이의 접합부 파괴 발생 (큰 변형의 증거)
2	7-stories piloti-structure	Yellow	• 붕괴가 발생한 Platinum Double Star Building과 비슷한 구조 • 1층 기둥과 조적채움벽에서 전단균열 발생 • 1층 기둥 일부를 철골부재로 지지해 둠
3	4-stories moment resisting frame	Yellow	• 1층 기둥과 조적채움벽의 전단균열 발생 • 지하 1층 기둥에서 휨균열 관측됨 • 지하층 구조부재를 임시로 지지해 둠
4	10-stories moment resisting frame	Yellow	• 2층 기둥과 조적채움벽에서 전단균열 발생 • Yellow tag를 건축물 앞에 붙여, 지진피해 현황을 알림
5	3-stories moment resisting frame	Yellow	• 1층부터 3층까지 수평증축 한 바닥부분에 균열이 발생함 • 1층 기둥과 조적채움벽에 전단균열 발생 • 1층 구조부재를 임시로 지지대 둠



<그림 2.23> 1번 건축물 지진피해 조사 사진



<그림 2.24> 2번 건축물 지진피해 조사 사진



<그림 2.25> 3번 건축물 지진피해 조사 사진



<그림 2.26> 4번 건축물 지진피해 조사 사진



<그림 2.27> 5번 건축물 지진피해 조사 사진

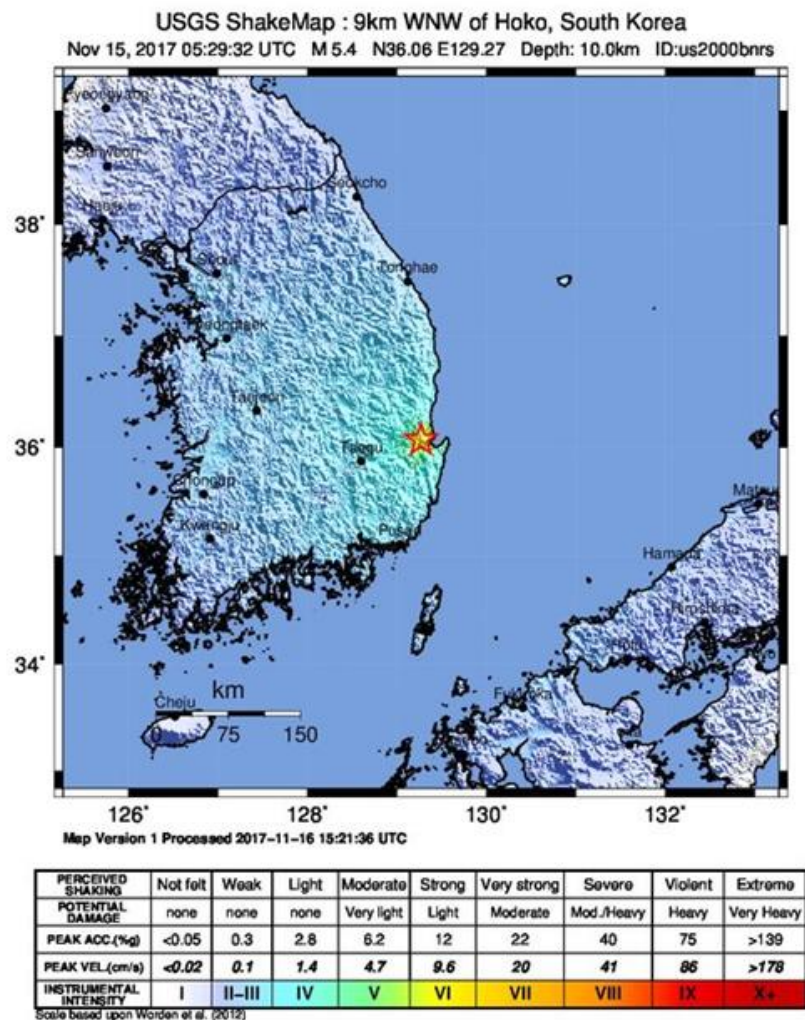
2~5층 규모(중저층) 건축물에 발생한 구조재(기둥)와 비구조재(조적채움벽)에 대한 손상은 남북방향(NS)이 큰 것으로 확인되었다. 이는 화롄지진의 응답스펙트럼에 대한 NS성분이 주기가 0.3초부터 약 1초까지 가장 큰 것과 일치하는 결과이다. 반면 붕괴가 발생한 7~12층 규모(중고층) 건축물의 대략적인 고유주기는 내진설계규정을 참고하면 약 0.67~1.14초로 추정할 수 있다. 해당 주기 범위에서 화롄지진의 응답스펙트럼의 NS성분과 EW성분이 설계스펙트럼을 초과하는 것으로 분석되었다. 따라서 붕괴가 발생한 건축물은 설계지진력 이상의 지진하중을 받아 건축물이 붕괴하였을 것이라고 추정할 수 있다.

FEMA P154에서는 지진피해 후 조사된 건축물에 대한 손상상태를 green tag, yellow tag, red tag로 구분한다. Green tag는 건축물을 조사하였지만 일부 비구조재를 제외한 구조재에는 큰 손상이 없다는 결과를 나타낸다. Yellow tag는 건축물의 사용을 제한하고, 정밀한 검사가 필요한 건축물에 대해 부착된다. Red tag는 안전하지 않은 건축물에 대해 부착되며, red tag가 부착된 건축물의 사용은 전면 금지시킨다. 대만의 경우 지진피해 조사과정을 거쳐 건축물에 yellow 또는 red tag를 부착한다.

(2) 포항지진 건축물 손상도 평가

(가) 포항지진 개요

2017년 11월 15일 한국기준시 14시 29분 31초, 경상북도 포항시 흥해읍 남송리(위도 36.074°N 경도 129.280°E) 진원깊이 3~7km에서 리히터규모 5.4(기상청), 모멘트 규모 5.5(미국지질조사국)의 지진이 발생하였다. 본진발생 3분 27초 후인 14시 32분 59초에는 리히터규모 4.3(기상청), 모멘트 규모 4.7(미국지질조사국)의 여진이 발생하였다.



<그림 2.28> 포항지진 진앙위치 및 진도

포항지진으로 인해 2017년 12월 7일 기준으로 부상자 92명, 이재민 1700여명의 인명피해가 발생하였으며, 재산피해는 551억원으로 경주지진의 5배가 넘는 규모로 확인되었다(중앙재난안전대책본부).

(나) 건축물 손상도 평가 조사 결과

포항지진으로 인해 피해를 입은 학교건축물 중 피해현황을 분석한 건축물은 총 4개이며, 그 중 흥해초등학교, 대도중학교, 장성초등학교는 구조재의 직접적인 피해가 확인되었고, 장흥초등학교는 비구조재의 피해를 확인하였다. 학교건축물 뿐만 아니라 주거형 주택 즉 필로티건축물에도 큰 피해가 발생하였다. <표 2.13>은 포항지진에 의해 손상된 건축물의 조사결과이며, <그림 2.29>부터 <그림 2.34>은 6개의 건축물 지진피해 조사 사진이다.

<표 2.13> 포항지진에 의해 손상된 건축물의 정리

No.	Structural System	Observation
1	흥해초등학교	1층 기둥 중 7개 기둥에 4,5 등급의 전단균열이 발생(콘크리트 탈락, 주근 변형 및 전단스트립 파단) - 비내력 조적벽과 연결된 기둥에서 상대적으로 적은 손상이 발생(3등급 이하의 손상발생)
2	대도중학교	- 건물 모서리부분 1층기둥이 손상, 콘크리트가 탈락하고 주근이 변형된 모습이 관찰 - 주차장 콘크리트 바닥에 균열이 발생
3	장성초등학교	- 전층에 걸쳐 치장벽돌에 X전단균열 발생 1층 기둥 상부에 X형 전단균열 발생(구조부재 손상)
4	장흥초등학교	- 구조부재 손상은 존재하지 않지만, 비구조재의 피해가 큼. - 지반 침하에 따른 계단 단차발생
5	C 오피스텔	8개 기둥 중 3개의 기둥에서 5등급 전단파괴가 발생. - 기둥철근에서 좌굴이 발생하고 전단스트립이 파단. - 건물의 수직비정형성과 전단스트립 간격 시공오류로 인해 건축물의 피해 증대
6	P 오피스텔	- 기둥에 3단계 이하의 전단균열이 발생. - 중앙 코어에 전단균열로 인한 4단계 손상이 발생함.



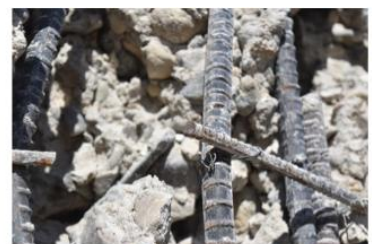
전체 전경



기둥 전단 균열



기둥 전단 파괴



전단스트립 파단

<그림 2.29> 1번 건축물 지진피해 조사 사진



전체 전경



주차장 바닥 균열



기둥 전단 파괴



기둥 콘크리트 탈락

<그림 2.30> 2번 건축물 지진피해 조사 사진



기둥 전단 균열



치장벽돌 전단균열



비내력 조적벽 균열

<그림 2.31> 3번 건축물 지진피해 조사 사진



지반침하에 따른
비구조재 손상



지반침하에 따른
계단 단차발생



비내력 조적벽, 계단 균열 및 손상

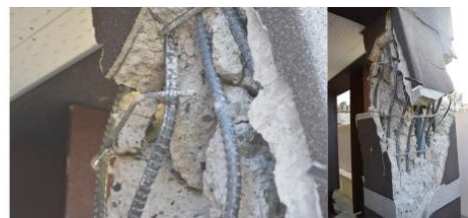
<그림 2.32> 4번 건축물 지진피해 조사 사진



전체 전경



기둥의 전단파괴와 보강



주근의 좌굴 및 전단스트립 파단

<그림 2.33> 5번 건축물 지진피해 조사 사진



전체 전경



기둥의 전단크랙



코어의 전단파괴

<그림 2.34> 6번 건축물 지진피해 조사사진

포항지진피해 현장조사 결과 주요시설물(학교건축물)과 주거형 필로티건축물의 피해가 큰 것으로 확인되었다. 학교건축물의 경우, 시공년도 오래된 건축물에서 구조재의 손상이 많이 발생하였다. 이는 내진설계 개념이 정립되기 이전에 시공된 건축물이고, 콘크리트의 품질이 좋지 않은 것을 원인으로 판단할 수 있다. 주거형 필로티건축물의 경우, 1층 기둥에서 다수의 손상이 발생하였다. 이는 필로티 구조물의 1층 강성이 상부층 보다 낮고, 수평비정형이 더해져 건물에 비틀림 현상이 발생된 것이 원인으로 추정할 수 있다.

다. 단위성과 2-3-①: 손상도를 고려한 보수정책 수립

(1) 지진손상여부 판별을 위한 decision tree 구축

Decision tree(결정트리)는 어떤 항목에 대한 관측값과 목표값을 연결시켜주는 예측모델로, machine learning기법의 일종이다. 결정트리는 통계학과 데이터마이닝, 기계 학습분야에서 사용하는 예측 모델링 방법 중 하나로, 의사결정 분석에서 결정트리는 시각적이고 명시적인 방법으로 의사결정과정과 결정된 의사를 보여주는데 사용된다. 본 연구에서는데이터 마이닝을 이용한 손상-손실관계를 규명하는 연구를 수행하기 위해, 결정트리를 이용하여 건축물의 구조적 손상에 미치는 요소에 대해 분석을 진행하였다.

결정트리는 목표값에 도달하는 정보 획득량(information gain)이 큰 순서로 구성되는데, 정보 획득량은 정보 이론의 엔트로피(entropy)의 개념에 근거를 두고 있다. 어떠한 정보에 대한 엔트로피는 아래의 식을 통해 얻을 수 있다.

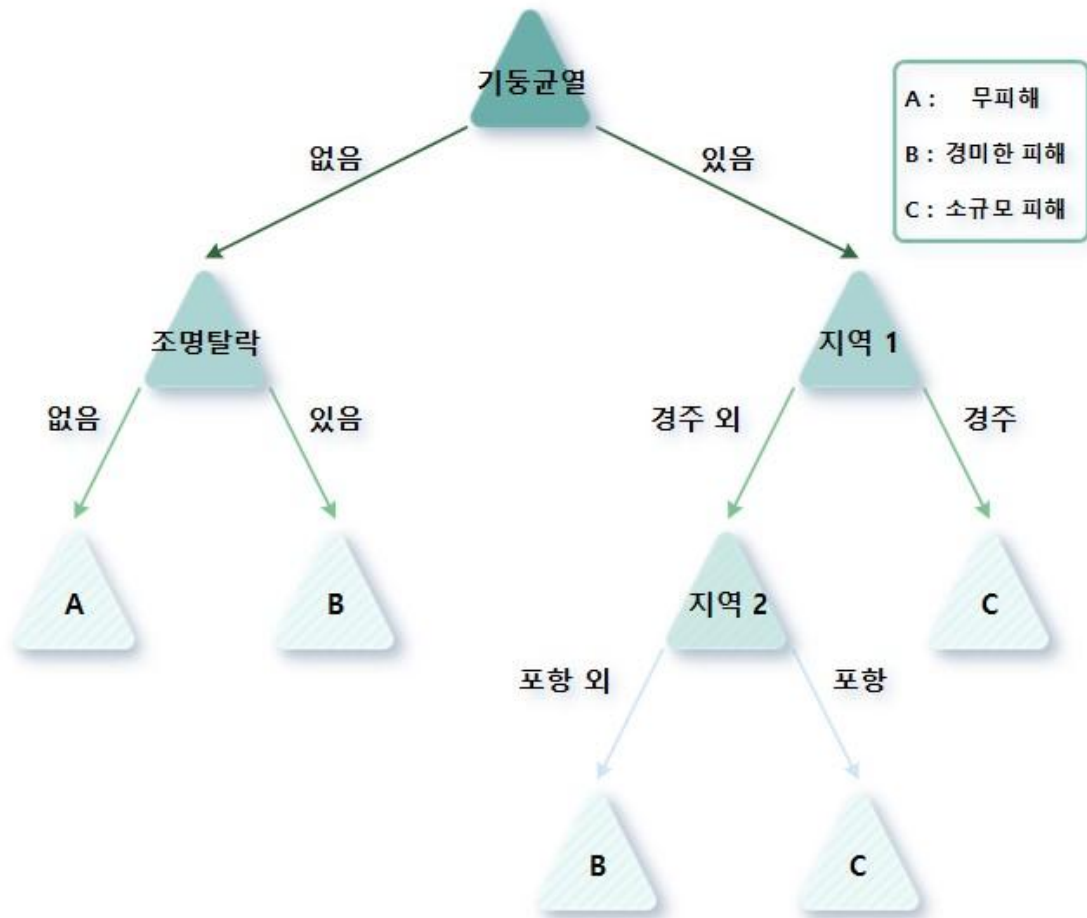
$$E(s) = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i \quad (2.16)$$

여기서, p_i : 관측값으로 이루어진 집합

결정트리는 다른 데이터 마이닝 기법과 비교하면 직관적으로 결과를 해석하고 이해하기 쉽다. 또한 자료를 가공할 필요가 거의 없고, 수치자료와 범주자료에 모두 적용될 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 학교건축물의 조사된 피해규모(무피해, 경미한피해, 소규모피해)를 목표값으로 설정하였고, 관측값으로는 (지역, 기둥균열, 천정마감, 조명탈락, 마감균열, 누수, 조적벽체균열)을 설정하여 엔트로피분석을 통한 지진피해규모에 대한 결정트리를 구축하였다. 결정트리 구축에 사용된 관측값과 목표값을 정리하면 아래의 표와 같다.

<표 2.14> 결정트리 구축을 위해 엔트로피분석에 사용된 관측값과 목표값

관측값	목표값
지역 (김해, 양산, 울산, 포항, 경주)	피해도 (무피해, 경미한피해, 소규모피해)
기둥균열 (있음, 없음)	
천정마감 (있음, 없음)	
조명탈락 (있음, 없음)	
마감탈락 (있음, 없음)	
마감균열 (있음, 없음)	
누수 (있음, 없음)	
조적벽체 균열 (있음, 없음)	



<그림 2.35> 엔트로피 분석을 통한 학교건축물의 지진피해규모의 결정트리

엔트로피분석을 통해 학교건축물의 지진피해규모에 대한 결정트리를 구축한 결과, 위의 그림과 같으며, 지진피해규모 의사결정에 가장 많은 영향을 미치는 관측값은 기둥균열의 유무로 분석되었다. 만약 경주지진에 의해 학교건축물이 기둥균열이 있고 지역이 경주나 포항이면, 지진피해규모는 소규모 피해인 것을 알 수 있다. 또한 비구조재인 조명탈락의 유무가 무피해 또는 경미한 피해의 의사결정의 지원하는데 큰 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다. 그 외 천정마감, 마감탈락, 마감균열, 누수, 조적벽체 균열은 학교건축물 전체의 지진손상규모를 결정하는데 큰 영향이 없는 것으로 분석되었다.

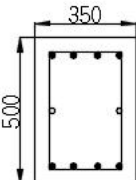
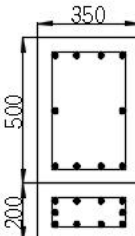
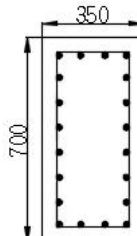
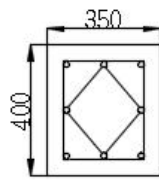
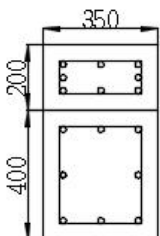
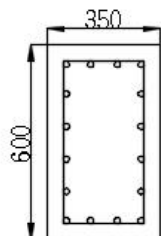
학교건축물 지진피해규모 결정트리 구축을 통해, 구조재의 손상이 전체 지진손상에 가장 많은 영향을 미치는 요소임을 알 수 있고, 비구조재 또한 전체 지진손상에 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다. 지진에 의한 손상과 손실과의 관계를 규명하기 위해, 단순히 손상에 미치는 요소만 분석하는 것이 아닌, 손실에 미치는 영향을 구축된 데이터베이스를 활용하여 연구를 진행할 계획이다. 또한 학교건축물의 지진피해규모를 결정하는데 가장 영향을 많이 미치는 요소는 기둥균열의 유무로 분석되어, 기둥보강에 따른 보수보강 정책을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 학교건축물의 보수보강 시나리오 구축 및 지진취약도 비교

구축된 학교건축물의 지진취약도 평가모델을 대상으로 보수보강 시나리오와 보수보강 전후 지진취약도를 비교하였다. RC자켓을 이용한 기둥의 단면증설 보강은 기존 기둥을 구축할 수 있도록 하는 것이 이상적인 방법이다. 하지만 조적채움벽 및 허리벽을 가지고 있는 골조의 경우 기존 기둥의 모든 면에 대해 증설하기 위해서는 기존 조적벽을 허물고 기둥의 단면증설을 수행한 뒤 다시 조적벽을 쌓아야 한다. 따라서 모든 면에 대해 증설하는 방법은 시간 및 경제적 측면에서 불리한 단점이 존재한다. 본 연구에서는 조적채움벽 및 허리벽이 없는 방향으로 기둥의 단면을 200mm 증설하고 철근량을 2배 늘리는 방안 단면증설을 하는 방안을 고안하였다.

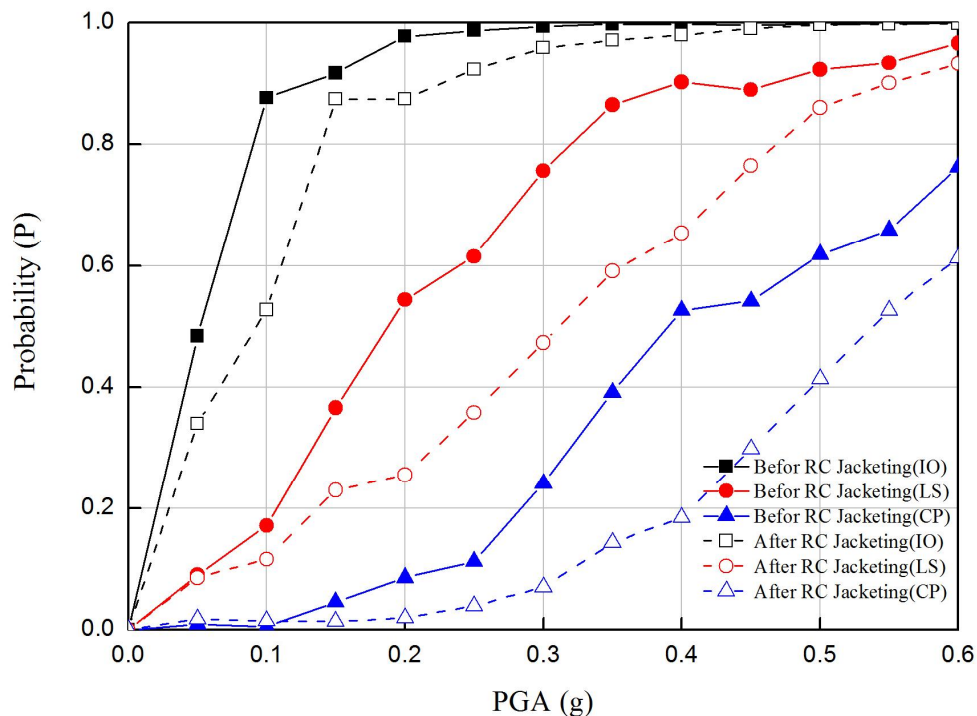
단면증설 보강된 기둥을 모델링 하기 위해 <표 2.15>와 같이 기둥의 단면크기와 철근량을 수정하였다. RC자켓의 재료 물성은 콘크리트 강도와 철근의 강도는 각각 21MPa, 240MPa로 동일하게 하였다. 1층과 2층 기둥을 대상으로 보강된 기둥을 적용하였으며 증분 동적해석을 통해 보수보강 전후 지진취약도를 비교하였다.

<표 2.15> 단면증설 보강 방안 및 모델링

외곽 기둥부재					
					
보강전	10-D19	보강방안	20-D19	모델 적용	20-D16
	대근 D10@300		대근 D10@300		대근 D10@300
	보조근 D10@900		보조근 D10@900		보조근 D10@900
내부 기둥부재					
					
보강전	8-D16	보강방안	16-D16	모델 적용	16-D16
	대근 D10@300		대근 D10@300		대근 D10@300
	보조근 D10@900		보조근 D10@900		보조근 D10@900

단면증설 보강이 적용된 예제 학교시설물을 대상으로 보강 전의 경우와 동일한 지진파에

대해 증분 동적 해석을 수행하였으며 최대 층간변위비의 평균값과 표준편차 및 불확실성 매개변수를 산정하였다. 단면증설 보강 전후의 지진취약도 곡선 도출 결과를 <그림 2.36>에 나타내었다. 전체적으로 보강 후 손상확률이 줄어드는 경향을 보이는 것으로 조사 되었다. 0.05g와 0.1g의 경우는 비선형 동적 해석상의 수렴성에 의한 것으로 판단된다. <표 2.16>는 단면증설 보강 후의 손상확률 감소의 절대차를 정리한 것이다. 낮은 PGA에서는 심각한 손상이 발생할 확률이 매우 낮기 때문에 LS 및 CP수준의 보강효과는 미미한 것으로 조사 되었다. CP수준의 경우 최고 34.10%의 손상확률 감소효과를 보인 것으로 조사되었다.



<그림 2.36> 단면증설 보강 전과 보강 후의 지진 취약도 곡선

<표 2.16> 단면증설 보강 후 손상확률 감소의 절대차

PGA (g)	Damage probability reduction each limit state with respect to PGA		
	IO	LS	CP
0.05	0.1441	0.0045	0.0081
0.1	0.3495	0.0551	0.0099
0.15	0.0429	0.1357	0.0319
0.2	0.1034	0.2884	0.0660
0.25	0.0636	0.2570	0.0728
0.3	0.0347	0.2839	0.1708
0.35	0.0268	0.2743	0.2483
0.4	0.0178	0.2485	0.3410
0.45	0.0060	0.1249	0.2435
0.5	0.0009	0.0624	0.2046
0.55	0.0003	0.0327	0.1326
0.6	0.0006	0.0332	0.1503

라. 단위성과 2-4-①: 성능수준기반 손상도 평가

(1) 구조재 및 비구조재의 지진반응계수기반 손상도지표

건축물의 성능수준에 따른 손상도를 확률적으로 평가하기 위해선, 우선적으로 구조재 및 비구조재의 지진반응계수로 손상도지표를 정의하여야 한다. 본 연구에서는 학교건축물에 설치되는 구조재 및 비구조재의 지진반응계수기반 손상도지표로 성능수준기반 손상도를 평가하였다. 학교건축물의 구조재의 손상도지표는 성능수준별 허용 층간변위로 아래의 <표 2.17>와 같다.

<표 2.17> 구조시스템 및 성능수준별 허용 층간변위비(한구시설안전공단, 2011)

구조시스템	내진설계가 된 경우			내진설계가 되지 않은 경우		
	IO	LS	CP	IO	LS	CP
조적채움벽이 있는 RC모멘트골조	0.7%	1.4%	2.4%	0.35%	0.7%	1.2%

학교건축물에는 천장재, 바닥마감, 파티션과 같은 건축적 비구조재와 배관, 덕트와 같은 전기 및 기계적 비구조재가 설치된다. 본 연구에서는 학교건축물의 건축적 비구조재에 대한 손상도 평가를 수행하였고, <표 2.18>은 본 연구에서 고려한 각 비구조재의 한계한태별 성능에 대한 중앙값과 불확실성을 정리한 것이다. 여기서 비구조재의 한계상태는 손상상태(damage state)에 따라 최대 3가지로 구분된다. 치장벽돌, 파티션, 타일은 구조재와 동일하게 층간변위비를 지진반응계수로 사용하며, 바닥마감과 천장재는 최대층가속도를 지진반응계수로 사용한다. 따라서 비구조재의 지진취약도를 평가하기 위해선, 지진강도에 따라 층별로 층간변위비와 최대층가속도에 대한 응답의 중앙값 및 불확실성이 도출되어야 한다.

<표 2.18> 학교건축물 비구조재의 성능수준별 capacity parameter의 중앙값과 불확실성

비구조재	Capacity Parameter	Unit	DS1		DS2		DS3	
			C	β_C	C	β_C	C	β_C
치장벽돌 ⁵⁾	Story Drift Ratio	Unit less	0.0021	0.60	0.0071	0.45	0.0120	0.45
바닥마감 ⁶⁾	Peak Floor Acceleration	g	0.5	0.4	0.7	0.4	-	-
파티션 ⁷⁾	Story Drift Ratio	Unit less	0.0064	0.3	-	-	-	-
타일 ⁸⁾	Story Drift Ratio	Unit less	0.0021	0.60	0.0071	0.45	-	-
천장재 ⁹⁾	Peak Floor Acceleration	g	0.7	0.25	1.2	0.25	1.43	0.25

5) B1071.041, [별첨]연구개발의 상세내용, 요소정보 지진취약도 데이터베이스, P. 329

6) B3011.013, [별첨]연구개발의 상세내용, 요소정보 지진취약도 데이터베이스, P. 343

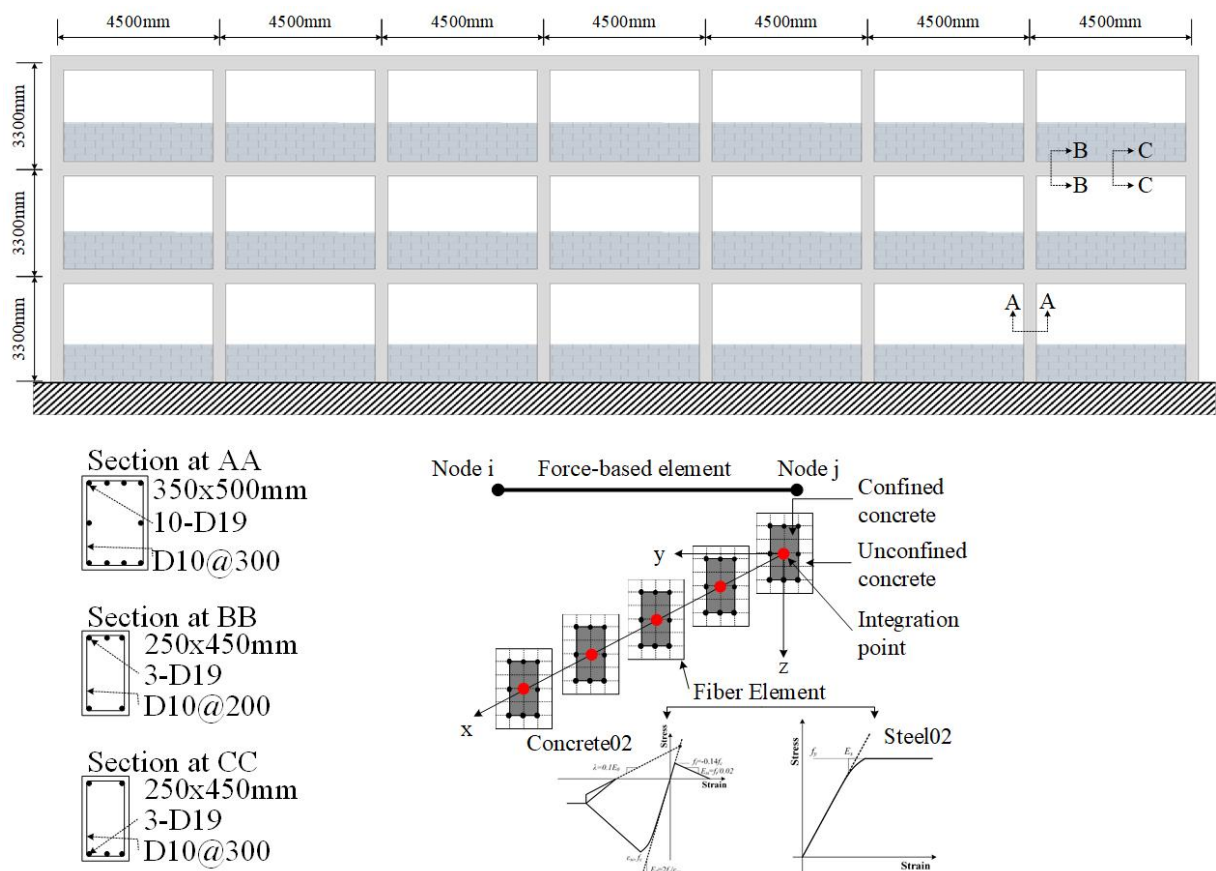
7) C3011.001b, [별첨]연구개발의 상세내용, 요소정보 지진취약도 데이터베이스, P. 345

8) C3011.002b, [별첨]연구개발의 상세내용, 요소정보 지진취약도 데이터베이스, P. 345

9) C3032.001c, [별첨]연구개발의 상세내용, 요소정보 지진취약도 데이터베이스, P. 347

(2) 학교건축물의 확률적 보유성능수준 평가

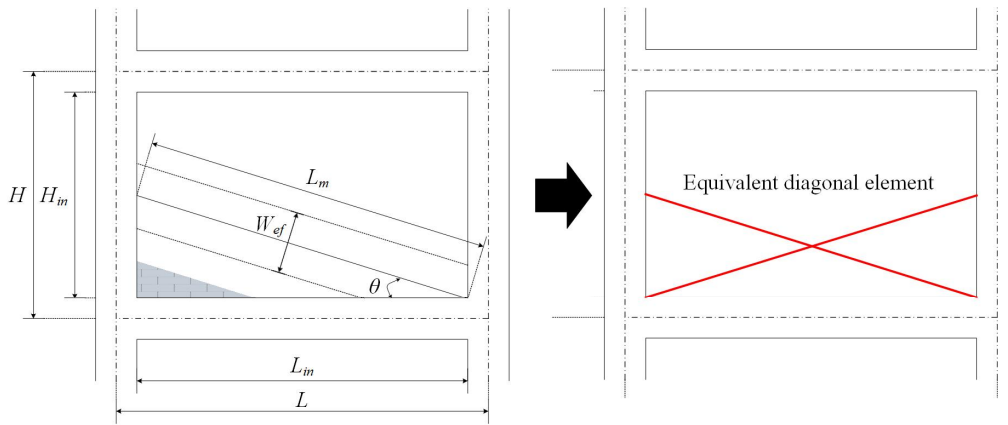
학교건축물의 지진해석을 위한 모델링은 구조재를 대상으로 진행하였고, 비구조재에 대한 해석모델링은 따로 진행하지 않았으며, 구조재 모델링을 통한 최대층가속도와 층간변위비를 통해 비구조재의 지진취약도를 평가하였다. 학교건축물에 대한 비선형해석은 OpenSees를 이용하여 수행하였다. <그림 2.37>은 2D해석에 사용된 학교건축물의 입면도와 부재상세 및 모델링 방식에 대해 표현한 것이다. 3층 7경간 RC모멘트골조를 학교건축물의 해석에 사용하였고, 기둥단면의 크기는 350x500mm, 보단면의 크기는 250x400mm이다. 기둥과 보 부재는 fiber element로 모델링하였으며, 콘크리트의 경우 전단보강근안의 confined concrete와 전단보강근 밖의 unconfined concrete로 구분하였다. 콘크리트의 재료모델은 OpenSees에서 제공하는 Concrete02를 사용하였고, 철근의 재료모델은 Steel02를 사용하여, 재료비선형성을 고려하였다. 해당 학교시설물의 1차 고유주기는 0.278초이다.



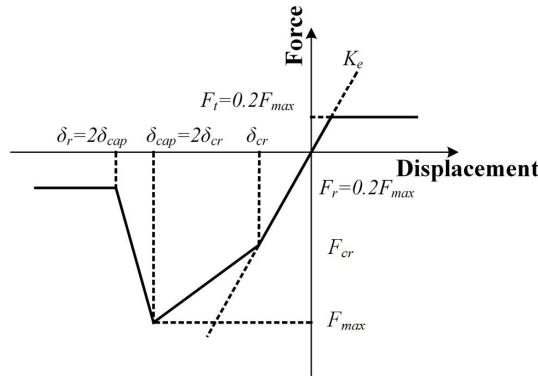
<그림 2.37> 해석대상 학교건축물의 입면도와 부재상세 및 모델링 방법

학교건축물의 큰 구조적 특징은 비구조재로 분류되는 기둥사이의 조적허리벽이 구조재인 기둥의 거동에 영향을 미친다는 점이다. 따라서 조적허리벽이 비구조재로 분류된다 할지라도 구조재인 기둥의 거동에 영향을 미치므로, 조적허리벽에 대한 모델링을 해석모델에 추가

하여 비선형해석을 수행하였다. 본 연구에서는 기존 연구를 참고하여 학교건축물 기둥사이에 설치되는 조적허리벽을 등가대각압축가새로 <그림 2.38>과 같이 모델링하였다. 등가대각압축가새에 대한 analytical modeling을 결정하는 parameter는 등가압축가새의 유효폭(W_{ef}), 등가압축가새의 유효강성(K_e), 등가압축가새의 최대하중(F_{max})가 있다. 조적허리벽의 등가대각압축가새는 1.0B쌓기를 기준으로 하여, 각 parameter를 식 (2.17)부터 식 (2.19)까지를 이용하여 계산하였다. 또한 등가압축가새의 균열하중(F_{cr})은 $0.55F_{max}$, 인장강도(F_t)와 residual 강도(F_r)은 $0.2F_{max}$ 로 가정하였고, 최대강도시 변위(δ_{cap})는 $2\delta_{cr}$ (균열변위), residual 강도시 변위(δ_r)는 $2\delta_{cap}$ 으로 가정하였다.



Analytical model of masonry infill



<그림 2.38> 연구에서 사용된 조적허리벽의 등가대각압축가새

$$W_{ef} = 0.175(\lambda_h H)^{-0.4} \sqrt{H^2 + L^2} \quad (2.17)$$

$$K_e = \frac{E_w W_{ef} t_w}{\sqrt{H^2 + L^2}} \cos^2 \theta \quad (2.18)$$

$$F_{max} = 0.818 \frac{L \in t_w f_{tp}}{C_I} (1 + \sqrt{C_I^2 + 1}) \quad (2.19)$$

여기서, $\lambda_h = \sqrt[4]{\frac{E_w t_w \sin(2\theta)}{4E_c I_c H_{in}}}$

$$C_I = 1.925 \frac{L_{in}}{H_{in}}$$

E_w : 조적허리벽의 탄성계수

E_c : 콘크리트의 탄성계수

t_w : 조적허리벽의 두께

I_c : 기둥의 단면2차 모멘트

H : 층높이

L : 경간길이

H_{in} : 조적허리벽의 순높이

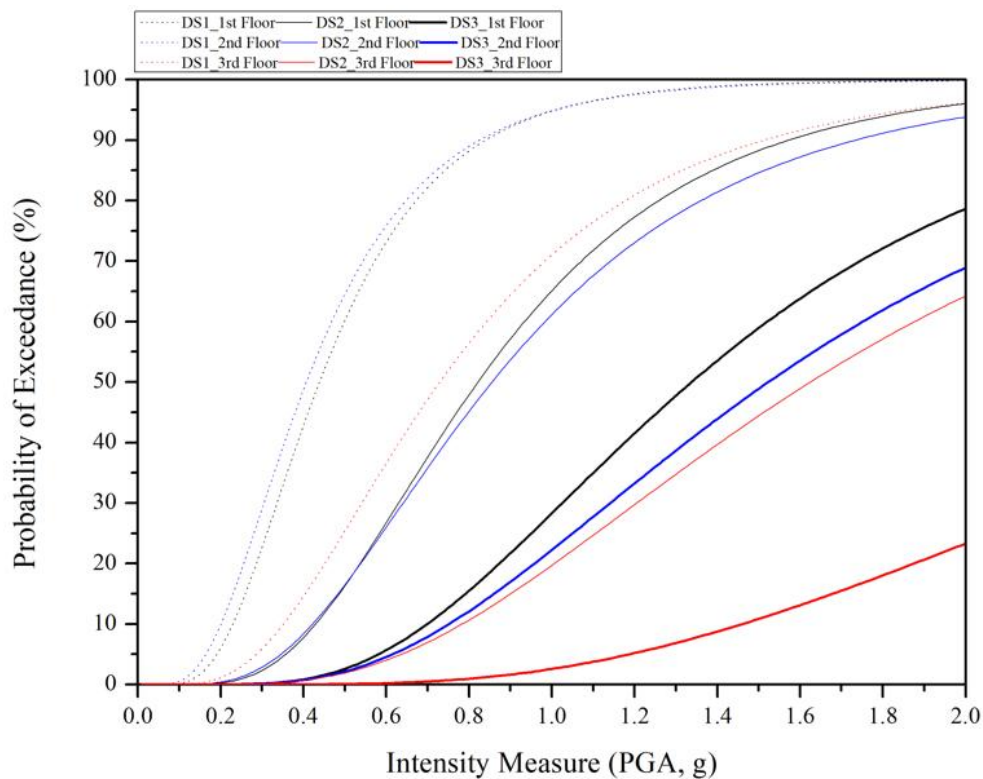
L_{in} : 조적허리벽의 순길이

f_{tp} : 조적허리벽의 균열강도

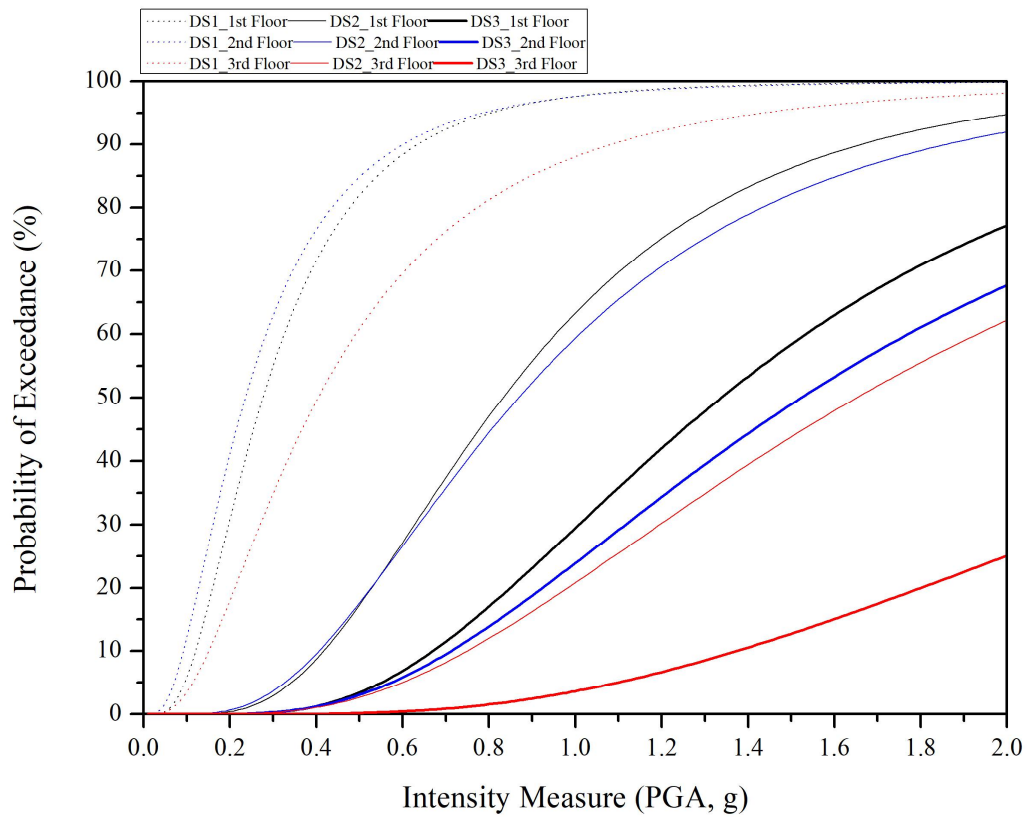
θ : 대각선기울기

(3) 구조재 및 비구조재의 지진취약도 평가

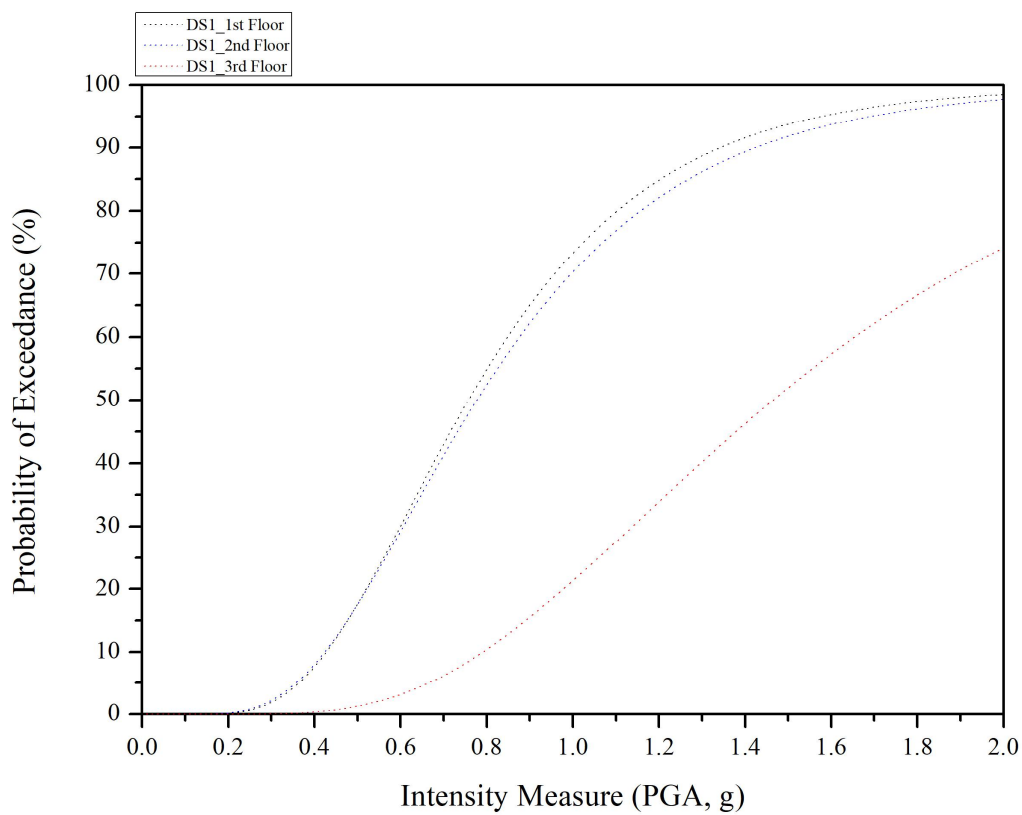
학교건축물의 구조재 및 비구조재의 지진취약도 평가를 위한 비선형시간이력을 수행하였다. 비선형시간이력해석은 FEMA P695에서 제시하는 44개의 지진파를 사용하였다. <그림 2.39>는 구조재의 지진취약도 곡선 <그림 2.40>부터 <그림 2.44>는 학교건축물의 비구조재에 대한 지진취약도 곡선이다.



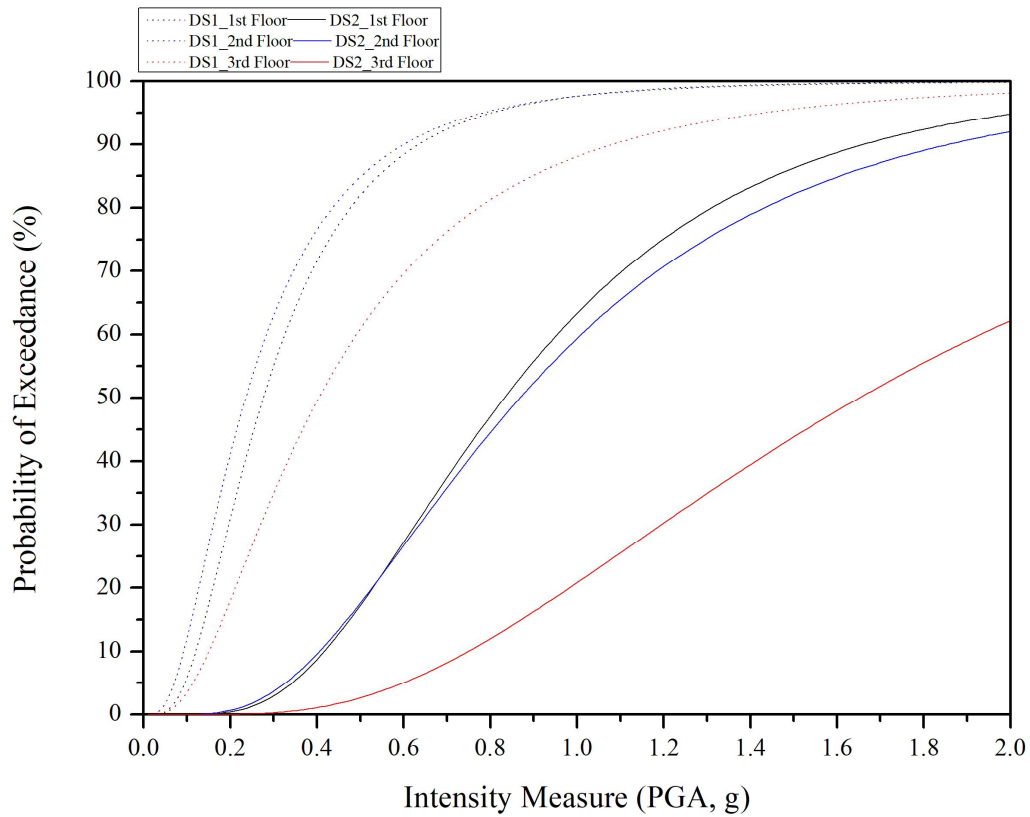
<그림 2.39> 학교건축물 구조재에 대한 층별 지진취약도 곡선



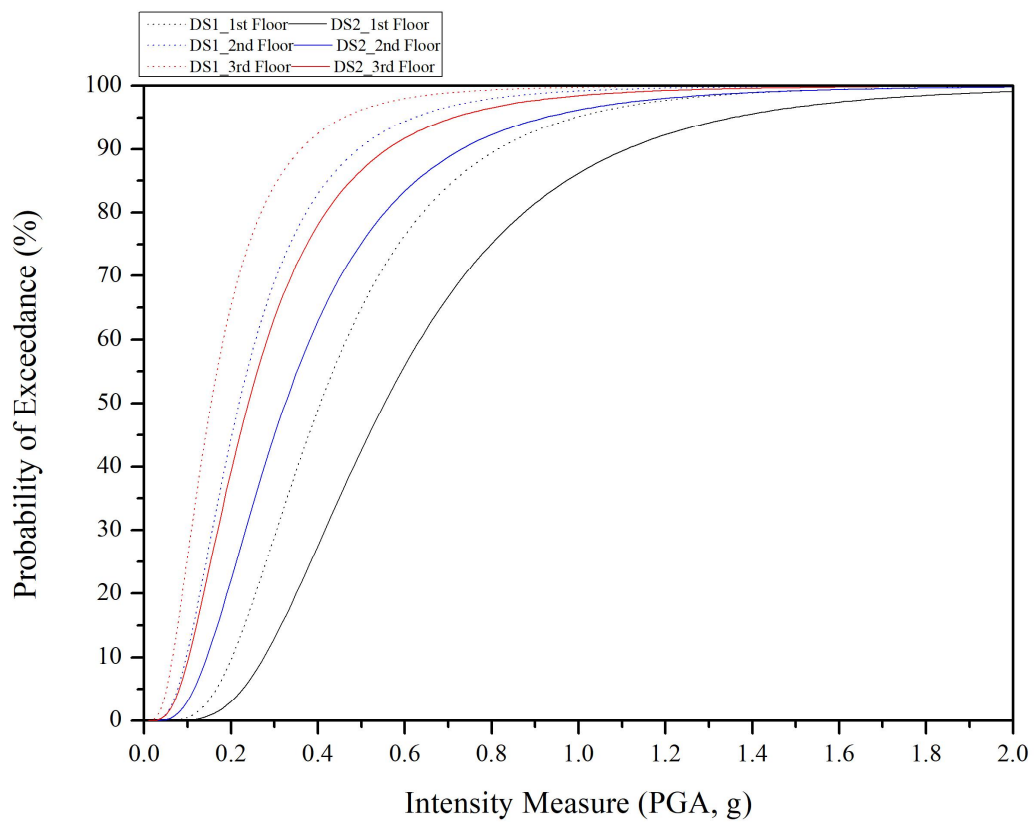
<그림 2.40> 학교건축물 비구조재(치장벽돌)에 대한 층별 지진취약도 곡선



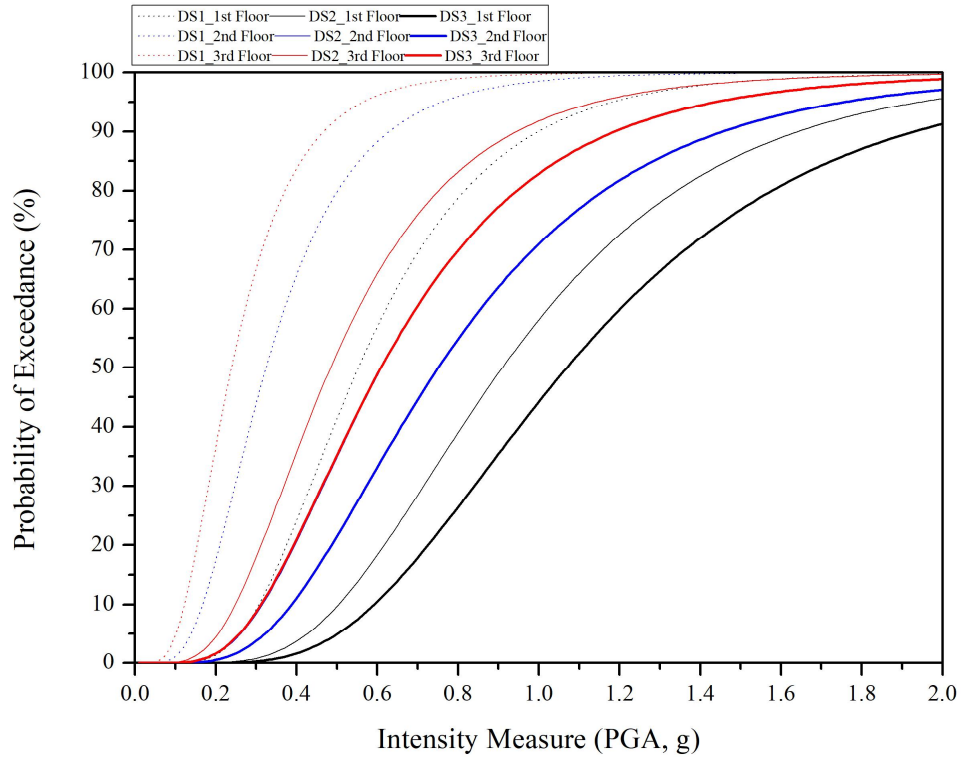
<그림 2.41> 학교건축물 비구조재(파티션)에 대한 층별 지진취약도 곡선



<그림 2.42> 학교건축물 비구조조재(타일)에 대한 층별 지진취약도 곡선



<그림 2.43> 학교건축물 비구조조재(바닥마감)에 대한 층별 지진취약도 곡선



<그림 2.44> 학교건축물 비구조재(천장재)에 대한 층별 지진취약도 곡선

울산관측소에서 측정된 경주지진에 대한 PGA값이 0.434g로 해당 지진강도에서 구조재 및 비구조재의 각 damage state별 손상확률을 <표 2.19>에 정리하였다. 손상확률로 학교건축물에 발생하는 손실을 평가하기 어려우므로, 정책입안자나 보험회사와 같은 사용자는 건축물의 손실이 cost로 표현되어야 의사결정을 지원하는데 도움을 줄 수 있다.

<표 2.19> 학교건축물 구조재 및 비구조요소의 경주지진(IM=0.434g)에 대한 각 DS별 손상확률

구성요소	층	Probability of Reaching Damage State (%)			
		None	DS1	DS2	DS3
구조재	1층	84.93	13.92	1.10	0.06
	2층	79.23	19.24	1.47	0.07
	3층	96.50	3.44	0.06	0.00
치장벽돌	1층	23.66	64.45	9.92	1.97
	2층	19.63	67.77	10.78	1.82
	3층	45.60	52.79	1.52	0.09
파티션	1층	88.82	11.18	-	-
	2층	88.56	11.44	-	-
	3층	99.39	0.61	-	-
타일	1층	23.66	64.45	11.89	-
	2층	19.63	67.77	12.60	-
	3층	45.60	52.79	1.61	-
바닥마감	1층	44.06	22.28	33.66	-
	2층	13.50	18.09	68.41	-
	3층	5.67	12.24	82.09	-
천장재	1층	69.05	25.20	3.05	2.70
	2층	27.83	46.00	11.18	14.99
	3층	12.16	45.15	16.05	26.63

마. 단위성과 2-5-①: 축소실험을 통한 건축물 손상도 평가

실제 건축물의 손상을 평가하기 위해선, 실측된 데이터를 통해 손상정보를 도출하는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 건축물의 손상과 밀접한 관련이 있는 건축의 층강성을 변위 데이터로부터 추출하였다.

(1) 운동방정식을 이용한 층강성 평가기법

외력을 받는 구조물의 거동은 운동방정식을 통해 수학적으로 얻을 수 있다. 구조물의 damping term을 제외한다면, 지반가속도 $\ddot{u}_g$ 에 의해 가력된 3층 전단구조물의 운동방정식은 아래의 식 (2.20)과 같이 표현 될 수 있다. 또한 운동방정식을 각층에 작용하는 힘 F_i 에 대해 정리한다면, 아래의 식 (2.21)부터 식 (2.23)로 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2.20)$$

$$k_1 u_1 + k_2 (u_1 - u_2) = -m_1 (\ddot{u}_1 + \ddot{u}_g) = -m_1 \ddot{u}_1^t = F_1 \quad (2.21)$$

$$-k_1 u_1 + k_2 u_2 + k_3 (u_2 - u_3) = -m_2 (\ddot{u}_2 + \ddot{u}_g) = -m_2 \ddot{u}_2^t = F_2 \quad (2.22)$$

$$k_3 (u_3 - u_2) = -m_2 (\ddot{u}_3 + \ddot{u}_g) = -m_3 \ddot{u}_3^t = F_3 \quad (2.23)$$

여기서,

m_i : i번째 층의 질량

k_i : i번째 층의 휨강성

u_i : i번째 층의 구조물변위

$\ddot{u}_i$: i번째 층의 구조물가속도

$\ddot{u}_i^t$: i번째 층의 구조물과 지반가속도를 합한 총가속도

만약 건축물의 모든 층에 대한 변위와 가속도데이터가 있고 지반가속도에 대한 정보가 있다면, 건축물의 3층의 강성인 k_3 에 대한 평가가 가능하다. 식 (2.23)를 식 (2.22)에 대입하여, 식 (2.21)와 더하면 아래와 같은 식 (2.24)가 도출되고, 이를 통해 2층의 강성 k_2 을 평가할 수 있다. 마지막으로 식 (2.23)와 식 (2.22)을 더한 식 (2.25)로부터, 1층의 강성 k_1 을 평가할 수 있다.

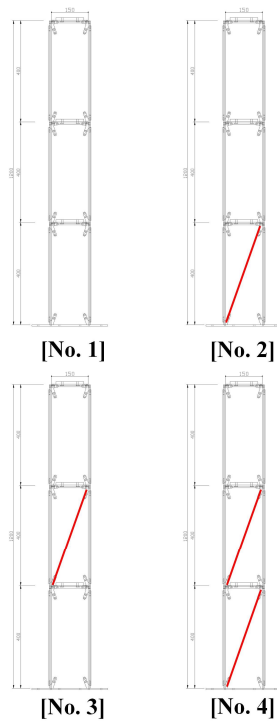
$$k_2 u_1 = F_1 + F_2 + F_3 \quad (2.24)$$

$$-k_1 u_1 = F_2 + F_3 - k_2 u_2 \quad (2.25)$$

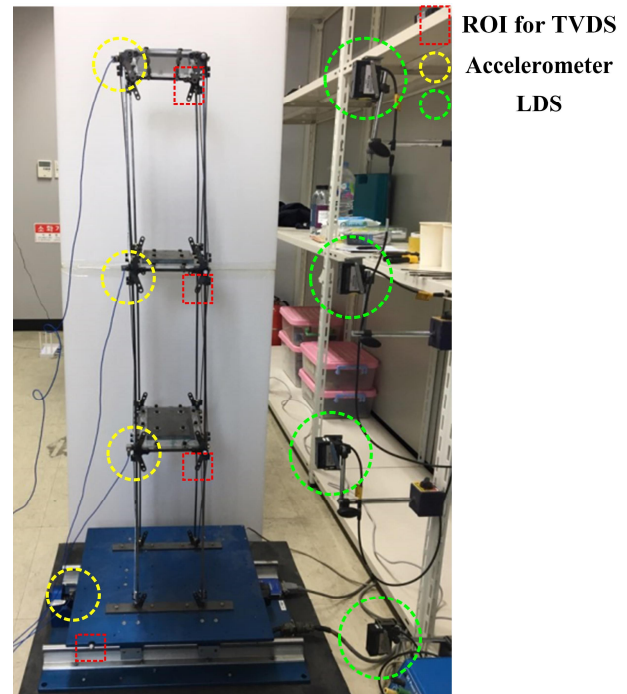
본 연구에서는 변위데이터를 통해 2번 미분하여 각층의 가속도데이터를 얻고, 이를 다시 운동방정식을 통해 각 층에 작용하는 힘과 변위와의 관계를 통해 층강성을 평가 하였다. 평가된 층강성의 변화량으로부터 손상위치를 탐지할 수 있고, 평가된 층강성을 이용하여 eigenvalue analysis를 통해 얻어진 구조물의 고유진동수와 모드형상을 비교함으로써, 평가된 강성에 대한 정확도를 검증하는 동시에 실제 구조물의 강성을 직접적으로 평가 할 수 있는 장점이 있다.

(2) 축소모형 실험을 통한 건축물 손상도 평가

층강성 평가기법의 적용성을 검증하기 위해, 구조물의 손상전후 층강성을 평가하여 손상 위치를 추정하는 실험을 진행하였다. 3층 규모 축소모형이 사용되었으며, 브레이스의 유무에 따라 구조물의 손상시나리오를 구성하였다. 50Hz band-width white noise로 가력된 구조물의 응답을 영상기반센서(100Hz, 140만화소), LDS(100Hz), Accelerometer(100Hz)로 측정하였다. 또한 진동대의 변위와 가속도를 측정하여, 층강성평가 기법에 필요한 데이터를 확보하였다. 각 측정기기의 동기화를 위해 각 측정기기의 sampling rate를 100Hz로 동일하게 설정하였다.



<그림 2.45> 브레이스 유무에 따른 손상 정의

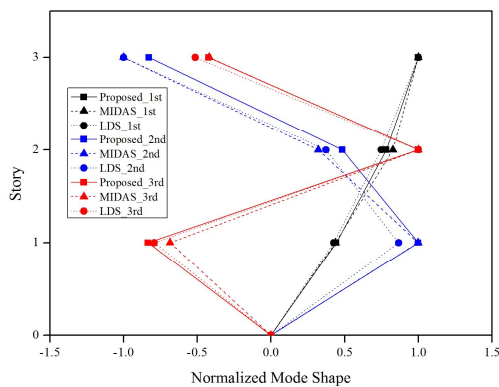


<그림 2.46> 실험세팅 및 측정계획

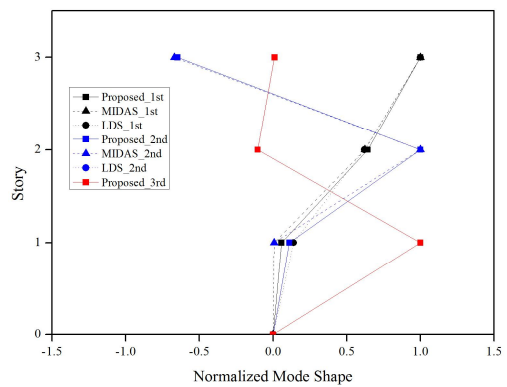
<표 2.20> 브레이스 유무에 따른 손상시나리오 구성

손상시나리오	브레이스 위치			비고
	1층	2층	3층	
1번	X	X	X	손상후
2번	O	X	X	
3번	X	O	X	
4번	O	O	X	손상전

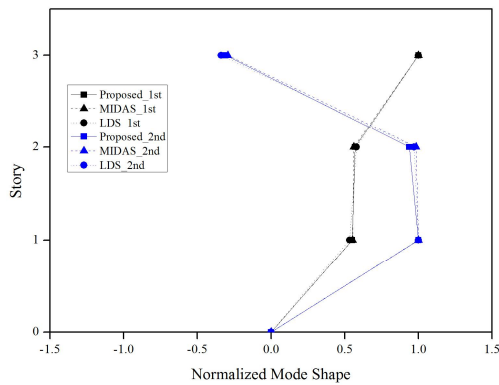
제안하는 방식을 통해 얻어진 층강성을 이용하여 eigenvalue analysis를 통해 구조물의 모드형상을 추출하였고, 이를 각 센서로 측정된 결과와 비교하였다. 각 손상시나리오에 대해 제안방법과, MIDAS, LDS로부터 얻은 모드형상을 <그림 2.47>과 같이 비교하였다.



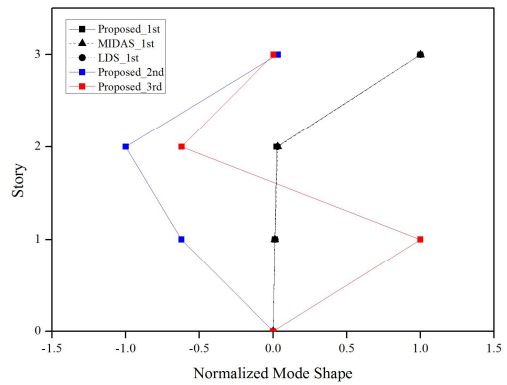
(a) 손상시나리오 1번



(b) 손상시나리오 2번



(c) 손상시나리오 3번



(d) 손상시나리오 4번

<그림 2.47> 손상시나리오에 따른 층강성 평가기법으로 추출된 모드형상 비교

층강성평가 기법은 <표 2.21>에 정리된 바와 같이 건축물의 층강성을 직접적으로 평가하여 손상도를 평가 할 수 있고, 층단위로 건축물의 손상위치를 추정할 수 있다.

<표 2.21> 층강성평가 기법을 이용한 손상위치 추정기법의 결과

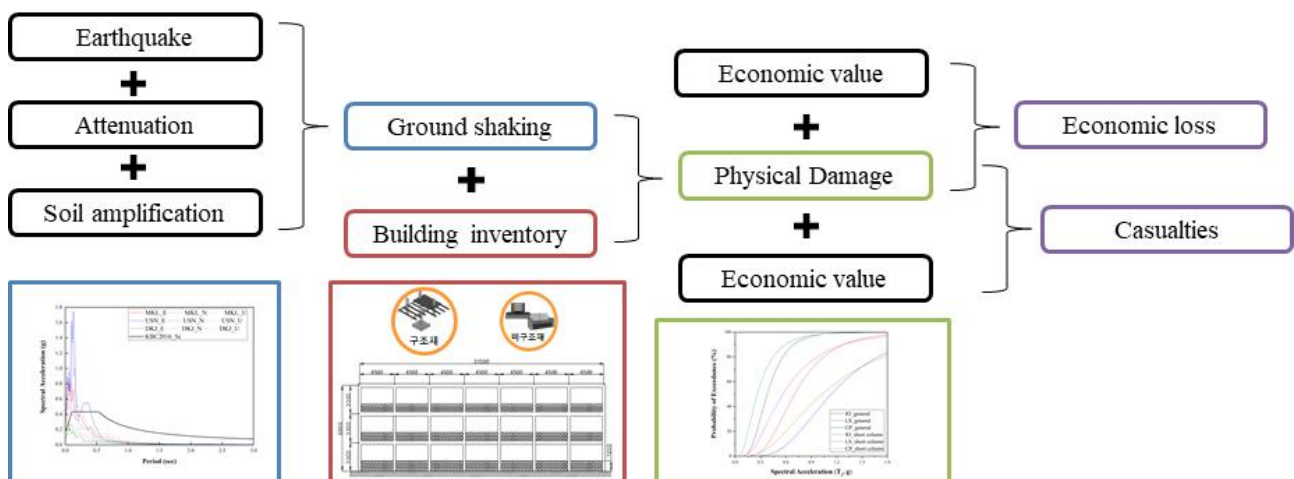
손상시나리오	Stiffness (kN/m)	Damage	Stiffness (kN/m)	Damage	Stiffness (kN/m)	Damage
1번	5542.1	O	5845.3	O	5768.5	-
2번	55894.2	X	5284.2	O	5273.14	-
3번	5877.5	O	56475.9	X	5858.8	-
4번	55476.2	X	55431.6	X	5672.6	-

바. 단위성과 2-6-①: 요소정보 통합 지진손실평가 기법 개발

(1) 지진손실평가기법의 정의

지진손실평가는 지진이 건축물에 발생시 예상되는 경제적손실(economic loss)이나 인명피해(casualties), 복구기간(downtime) 등과 같은 지진에 의한 건축물에 손상에 대한 결과를 평가하는 것을 말한다. 1975년 US Nuclear Regulatory Commission에서 Reactor Safety Study¹⁰⁾연구를 수행하여, 원자력 발전소의 방사선 유출에 의한 건강, 경제적, 사회적 위험도를 평가하기 시작하면서 지진손실평가가 시작되었다. 이후 건축구조물에 대해선 1978년 Cornell교수에 의해 도입이 되었다. <그림 2.48>는 일반적인 지진손실평가의 과정을 나타낸 것이다. 지진손실평가 과정은 크게 다음의 4단계로 구분된다.

- Hazard Modeling: 재현주기별 지진의 강도 및 빈도를 결정하여, 건축물의 거리에 따른 지진의 감쇠와 지반증폭을 고려한 지반운동 결정 (e.g. design spectrum, earthquake data)
- Inventory Modeling: 건축물의 구조시스템, 규모, 용도, 사용년수 등에 따른 구조재 및 비구조재의 모델링 정보
- Fragility Assessment: 예상되는 hazard에 대한 건축물의 손상평가
- Loss Assessment: 손상에 의한 건축물의 경제적손실, 인명피해, 복구기간 평가



<그림 2.48> 일반적인 지진손실평가의 과정

$$P(Loss \geq x) = \sum_{DS_i} \iint P(Loss \geq x | D = DS_i) P(D = DS_i | F, \delta, a) P(F, \delta, a | S_a) P(S_a) dz \quad (2.26)$$

10) WASH-1400

식 (2.26)는 위의 지진손실평가 과정을 수식으로 표현한 것이다. 지진강도 S_a 에 의해 건축물에 발생하는 부재력 F , 변위 δ , 가속도 a 이 특정한 건축물의 손상도(damage state, DS)에 도달했을 때, 발생하는 손실(loss)을 확률적으로 평가하는 것이다. 즉, 지진손실평가를 수행하기 위해선 위의 수식에 표현된 각 항목들이 확률적으로 평가할 수 있어야 한다.

기존 지진손실평가 방법은 지역단위 지진손실을 평가하는 방법과 건축물 단위 지진손실을 평가하는 방법으로 구분된다. 지역단위 지진손실을 평가하는 방법은 건축물 하나하나를 수학적 모델링기법을 이용해 건축물을 해석하지 않고, 건축물의 구조시스템, 용도, 규모, 내진설계에 따라 건축물의 손상함수(fragility function)를 정의하여 지진손실을 평가한다. 반면, 건축물 단위 지진손실평가 방법은 건축물의 수학적 모델링에 의한 시뮬레이션 결과로 도출된 손상함수를 통해 지진손실을 평가한다. 즉, 지역단위 지진손실평가 방법은 건축물 전체 레벨에서 지진손실을 평가하는 방법(system based method), 건축물 단위 지진손실평가 방법은 건축물의 구조재 및 비구조재와 같은 부재레벨에서 지진손실을 평가하는 방법(component based method)로 구분할 수 있다. <표 2.22>는 기존 지진손실평가 방법론에 대해 정리한 것이다. 본 연구에서는 component based method 중 미국의 FEMA P-58 방법론을 차용하여 경주지진데이터를 이용한 학교건축물의 지진손실평가를 수행하였다.

<표 2.22> 기존 지진손실평가 방법론 정리

Tool	Intensity Measure	Estimation Level	Region	Loss			Availability
				Building Economic Loss	Life-line Economic Loss	Casualties	
ABV (Assembly-Based Vulnerability) [Porter and Kiremidjian, 2001]	Spectral parameter	Component based	California	O	X	X	X
EPEDAT (Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool) [Eguchi et al., 1997]	Spectral parameter	System based	North America	O	O	O	X
HAZUS-MH [FEMA, 2004]	Spectral parameter Seismic intensity	System based	North America	O	O	O	O
LNECloss [Campos et al. 2006]	Spectral parameter	System based	Europe	O	X	O	X
MDLA (MATLAB Damage and Loss Analysis) [Muto et al. 2008]	Seismic intensity Structural response	Component based	California	O	X	X	O
PACT (FEMA P-58) [FEMA, 2012]	Seismic intensity Structural response	Component based	North America	O	X	O	O

(2) 지진손실평가 결과 및 분석

추후 학교건축물의 지진손실평가 결과로부터 내진성능지수를 평가하기 위해, 실제 손실 데이터베이스에 있는 학교건축물을 대상으로 지진손실평가를 수행하였다. 지진손실데이터베이스에서 대상건축물의 층수 및 고려된 비구조재의 정보는 <표 2.23>과 같다. 지진손실평가 기법에 사용된 시물레이션 모델은 지진취약도를 분석하는데 사용된 시물레이션 모델을 사용하였다. 지진해석에 사용된 경주지진데이터의 특성을 <표 2.24>에 정리하였다.

<표 2.23> 지진손실평가 대상 건축물 비구조재 정보

번호	위치	층수	Gross area (m2)	Exterior wall (m)	Roof area (m2)	Interior partition length (m)	Tile floor (m2)	Tile wall (m)	Ceiling (m2)
3	포항	4	3121.2	1346.4	780.3	573.4	246.6	143.4	2965
5	포항	2	1377	596.4	688.5	253.0	108.8	63.2	1308
12	울산	3	3304.8	1413	1101.6	607.2	261.1	151.8	3140
16	경주	3	3304.8	1413	1101.6	607.2	261.1	151.8	3140
18	경주	4	4773.6	2037.6	1193.4	877.0	377.1	219.3	4535

<표 2.24> 관측소별 경주지진기록 특성

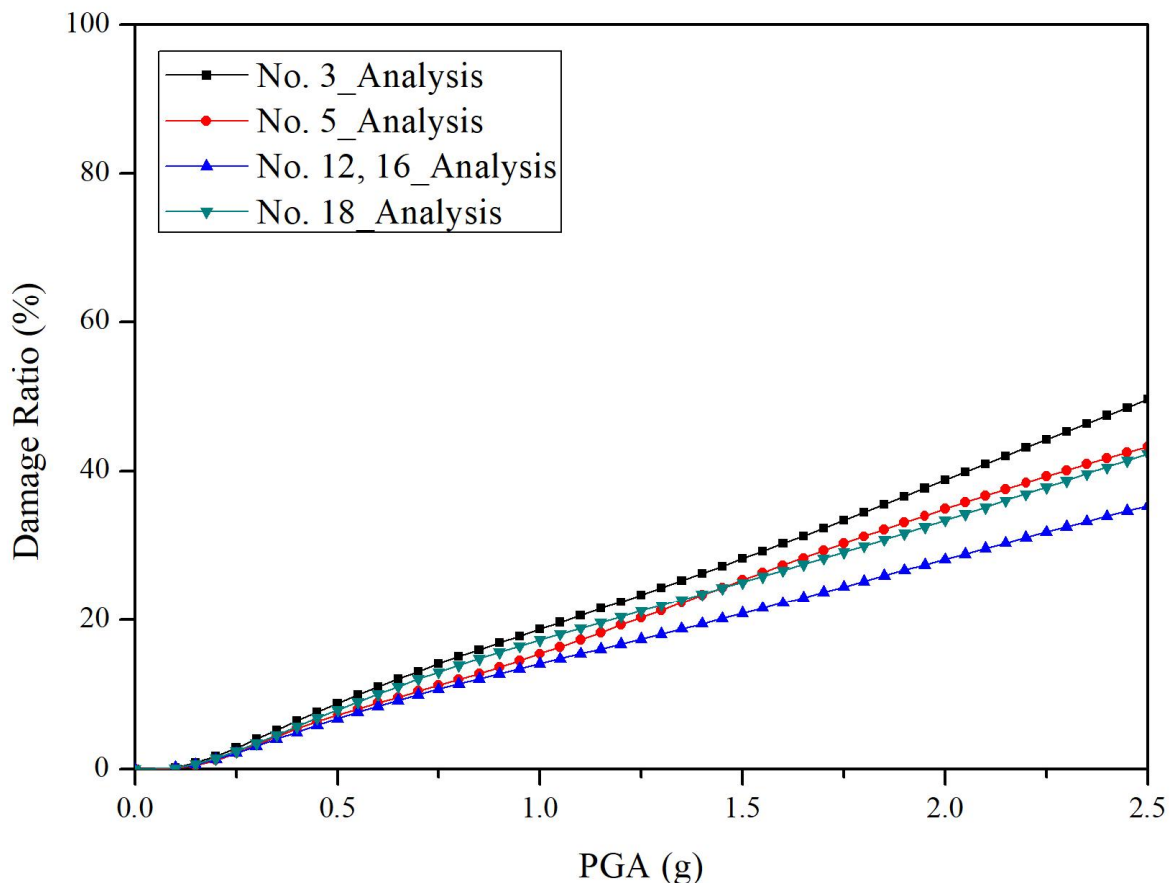
Station	명계리 (지질자원연구원 관측소)			울산 (기상청 관측소)			덕정리 (지질자원연구원 관측소)		
	MKL_E	MKL_N	MKL_U	USN_E	USN_N	USN_U	DKJ_E	DKJ_N	DKJ_U
epi_dist.(km)	5.89	5.89	5.89	8.23	8.23	8.23	22.15	22.15	22.15
PGA(gal)	282.2	291.3	172.1	433.7	383.2	221.6	84.6	98.5	71.0
Sa(g)	0.828	0.827	0.855	1.753	1.568	0.783	0.288	0.292	0.188
Sd(mm)	13.591	16.626	4.509	19.133	11.481	7.351	4.998	7.651	6.352

학교건축물의 지진손실평가를 위해서, 우선적으로 지진취약도평가를 수행하였다. 지진취약도평가는 OpenSees 해석모델을 이용한 증분동적해석을 통해 수행하였다. 증분동적해석시 지진파의 PGA (Peak Ground Acceleration)을 기준으로 0.1g부터 0.05g간격으로 1.5g까지 지진파를 scaling하여 해석 수행하였다. 각 층별 층간변위비(IDR, Interstory Drift Ratio), 최대층가속도(PFA, Peak Floor Acceleration)를 이용하여 구조재 및 비구조재의 지진취약도를 평가하였다. <표 2.25>에 정리된 지진취약도곡선으로부터 지진손실을 평가하기 위한 구조재 및 비구조재의 loss estimation parameter를 이용하여 지진손실평가를 수행하였다.

<표 2.25> 지진손실을 평가하기 위한 loss estimation parameters

Building Component	Unit of Measurement	Mean Repair Cost (₩/unit of measurement)		
		DS1	DS2	DS3
구조재(기둥, 보)	EA	2,300,172	3,645,325	4,360,324
외부치장벽돌	m / 100m ²	233,200	604,998	2,173,876
내벽(파티션)	m / 100m ²	311,175	-	-
내벽(타일)	m / 100m ²	777,331	3,296,747	-
천장재	m ² / 100m ²	280,500	2,188,496	4,726,505
바닥마감	m ² / 100m ²	72,149	121,465	-

학교건축물에 대한 지진손실평가 결과는 <그림 2.49>과 같다. 해당 그림에서 세로축의 damage ratio는 손실평가로 얻어진 repair cost를 대체비용인 replacement cost로 나눈 값이다. 해당결과를 살펴보면, 상당히 높은 지진강도인 PGA=2.5g에서도 damage ratio가 50%내외인 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과가 발생한 이유는 경주지진과의 특징이 단주기 영역대의 성분이 많이 포함되어, 손실에 영향을 주는 구조재 및 비구조재의 손상이 크게 발생하지 않았기 때문이다. 본 연구에서는 <그림 2.49>와 같이 건축물의 해석모델에서부터 구조재 및 비구조재의 지진응답에 따른 지진손실을 평가할 수 있는 기법을 주요시설물 중 하나인 학교건축물에 대해 적용하였다.



<그림 2.49> 경주지진에 의한 학교건축물별 손실함수

3. 핵심성과 3: 피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발

가. 단위성과 3-1-①: 지진피해사례 데이터베이스 구축

(1) 경주지진 피해사례 claim data분석을 통한 DB구축 항목 도출

2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주지진피해사례에 대한 지진손실액을 조사하여 연구에 활용될 DB구축을 수행하였다. 우선적으로 위탁연구기관인 현대해상화재보험의 지진피해관련 claim data를 통해 지진손실액에 대한 DB구축을 진행하였다. 지진손실액에 대한 DB는 피해 건축물의 손상과의 관계를 규명하는데 사용될 것이므로 손실액을 추정하는 방법론에 따른 DB가 구축되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 실제 전문 손해사정보고서를 통해 지진손실액 DB구축에 필요한 항목과 손상과 연결시키기 위한 항목을 <표 2.26>와 같이 도출하여 지진손실DB를 구축하였다.

<표 2.26> 지진손실 DB구축 항목

1. 사고사항	사고일시		2. 총괄표	보험목적물		
	사고장소			보험가입금액 (원)		
	사고원인			재조달가액 (원)		
3. 건물개요	구조/용도			보험가액 (원)		
	신축년도			손해액 (원)		
	건물연면적					
4. 손해상태(사진)						
5. 보험가액 및 손해액						
5.1 평균감가율						
구조	용도	경년감가율	경과년수	총감가율	면적(m ²)	가중치
계						
평균감가율						
5.2 재조달가액 및 보험가액						
구분		산식	면적(m ²)	단가(원)	금액(원)	
순공사비	공정명					
	-					
	계					
간접비	일반관리비					
	이윤					
	계					
재조달가액						
보험가액						
5.3 손해액						
구분			손해액			
수리비	공정명					
	-					
	계					
	공과잡비					
	합계					
총계						

(2) 경주지진 피해사례에 대한 지진손실 DB구축

일반건축물에 대해 총 35건에 대한 DB를 구축하였고, 추가적으로 학교건축물에 대해 36건에 대한 DB를 구축하였다. DB는 부록에 제공되어 있다. 일반건축물의 경우 지진피해에 대한 데이터는 개인정보보호법에 위배되는 항목이 많기 때문에, 개인정보에 해당하는 항목은 위탁연구기관인 현대해상화재보험에서 필터링하여 DB를 구축하였다.

(3) 포항지진 피해사례에 대한 지진손실 DB구축

포항지진의 경우 일반건축물에 대해 총 93개에 대한 DB를 구축하였다. DB는 부록에 제공되어 있지만, 지진손실액과 같은 개인정보는 삭제하였고, 지진손상평가만을 DB에 수록하였다.

(4) 경주지진의 손상-손실데이터 상관관계 분석

(가) 다변량 데이터 분석 방법

구조물의 손상과 손실을 그 상관관계가 분명히 존재하지만, 손상-손실에 영향을 주는 변수가 너무 많아 하나의 함수식으로 정의하기는 쉽지 않다. 또한 이런 여러 변수의 결합 분포를 알기 위해 필요한 계산량은 변수가 증가함에 따라 기하급수적으로 늘어나게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 최근 상관관계 사이의 다양한 변수를 갖는 금융학, 대기학 등의 다양한 분야의 연구에서 Copula 함수를 사용하여 그 결합확률을 표현하고 있다.

(나) Copula 함수의 정의

Copula 함수란 다변량 확률 분포 함수를 개별 주변 확률 분포로 연결시키는 함수이다. 데이터의 다변수 함수 분석을 할 때, 자료의 관계를 선형상관계수만으로 설명하기엔 어려우므로, 하나의 함수로 표현할 수 있다는 것은 큰 장점을 가진다. Copula는 ‘결합’이라는 뜻을 가진 라틴어으로써, 1995년 Sklar에 의해 처음 언급되었다. Sklar는 2개의 한계분포함수 F_1, F_2 가 연속 함수인 경우 아래와 같은 식을 만족하는 함수 C 가 유일하게 존재한다.

$$F(x_1, x_2) = C(F_1(x_1), F_2(x_2)) \quad (2.27)$$

이후 이 정리는 다변량에 대해 일반화 되었고, 이러한 Copula 함수를 사용함으로써 일반적으로 다루기 힘든 n 변량 결합분포함수를 1 변량 한계분포함수를 통하여 계산할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

(다) Copula 함수의 추정법

Copula 함수를 사용하기 위해서는 그 함수의 정확한 분포를 알아야하지만, 정확한 분포를 모르는 채로 데이터의 값만 아는 경우도 있다. 데이터의 분포를 정확히 알 수 없을 때 통계학에서는 모수 추정을 통해 데이터의 분포를 예측한다. 모수 추정에는 비모수적 방법과 모수적인 방법으로 나뉘고, 이것은 데이터의 모수의 특징을 알고 있는지와 없는지에 따라 나뉜다.

① 비모수적 추정

비모수적 추정은 데이터의 분포를 모르는 경우에 활용한다. n개의 변수에 대해 T개의 데이터를 측정한 자료를 갖고 있는 경우 아래의 식으로 표현한다.

$$\hat{C}(\frac{t_1}{T}, \dots, \frac{t_n}{T}) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T 1_{[x_1^i \leq x_1^{t_1}, \dots, x_n^i \leq x_n^{t_n}]} \quad (2.28)$$

이 함수는 주어진 데이터만을 활용하였기에 오차가 존재하지 않는다. 이 경우 Copula 함수를 적용하기 위해 아래의 식을 통해 여러 대안적인 Copula 함수 중 최적 Copula를 선택하게 된다.

$$\bar{d}_n(\hat{C}, C_k) = \left(\sum_{t_1=1}^T \dots \sum_{t_n=1}^T [\hat{C}(\frac{t_1}{T}, \dots, \frac{t_n}{T}) - C_k(\frac{t_1}{T}, \dots, \frac{t_n}{T})]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.29)$$

② 모수적 추정

모수적 추정 방법은 크게 3가지로 나뉜다. 최우추정법, IFM(method of Inference Functions for Margins), CML(method of Canonical Maximum Likelihood) 가 그것이다. 최우추정방법은 통계학에서 모수를 추정하기 위해 가장 많이 쓰는 방법으로 아래의 식을 통해 모수를 파악한다.

$$L(\theta) = \sum_{t=1}^T \ln C(F_1(x_1^t; \phi_1), \dots, F_n(x_n^t; \phi_n); \theta) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \ln f_i(x_i^t; \phi_i) \quad (2.30)$$

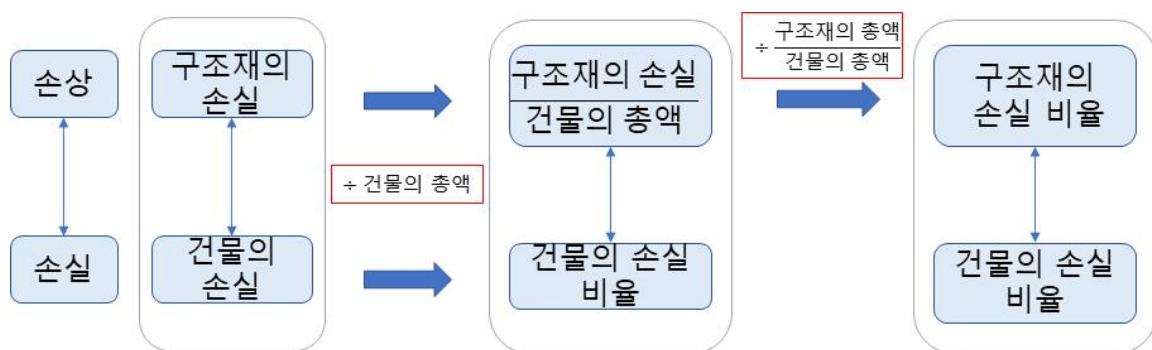
$$\hat{\theta} = \operatorname{argmax} L(\theta)$$

이런 최우추정방법은 파라미터 ϕ 의 값을 알아야 적용이 가능한데, 이 ϕ 의 값을 알기 위해 적용하는 방법이 IFM과 CML이다. IFM은 데이터의 분포가 어떤 함수(Gaussian, student-t,

...)를 따른다고 가정을 하여 파라미터 값을 구하는 것이고, CML은 비모수적 추정법을 사용하여 각 변수의 분포를 추정 한 뒤, 최우추정법에 대입하여 파라미터를 추정하는 것이다.

(라) Copula 함수의 적용

2016년 9월 12일 발생한 경주지진으로 인한 손상과 손실 데이터를 코플라 함수를 통해 검증하고자 한다. 손상을 나타내는 척도로 구조재의 손실 비율(구조재의 손실액/총 구조재의 가치)을 사용하였고, 손실은 건물의 손실 비율(건물의 손실액/총 건물의 가치)을 사용하였다. (구조재의 총액/건물의 총액)이 건물마다 큰 차이가 없다고 가정할 때, 이 상관관계 모형은 구조재의 손실과 건물의 손실 상관관계 모형과 일치하게 된다.



<그림 2.50> 구조물의 손상과 손실관계 모델링

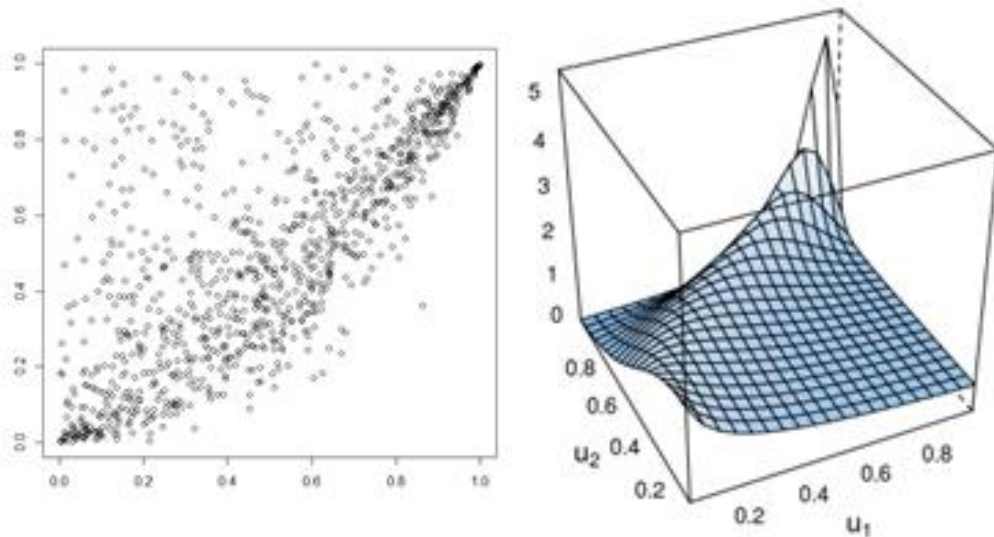
<표 2.27> 경주지진 구조재의 손실과 총 손실액 비교

건물번호	구조재의 손실 (원)	건축물의 손실 (원)
1	28,134,792	358,196,047
2	5,814,717	10,647,097
3	12,150,000	94,936,149
4	2,739,662	3,082,717
5	2,203,641	3,464,625
6	3,859,350	11,197,833
7	4,049,936	7,740,706
8	1,727,178	1,943,452
9	398,400	398,400
10	10,727,772	11,058,081
11	14,403,709	16,189,769

R 프로그램을 사용하여 손상과 손실의 최적 Copula 함수를 나타낸 결과 적정 Copula 함수는 Gumell Copula 함수의 유사 함수인 Tawn Type 2 Copula 함수로 제시되었다. 함수식과 분포 모형은

아래와 같다.

$$C(u_1, u_2) = u_1 u_2 e^{-\tau \frac{\log(u_1) \log(u_2)}{\log(u_1 u_2)}} \quad (2.31)$$



<그림 2.51> 코풀라 함수를 활용한 경주지진 손상-손실 데이터분포

<표 2.28> 실제 데이터와 상관관계 추정에 의한 확률 비교

Copula	Real Data	Error
1	1	0
0.6675	0.75	0.09
0.1531	0.1667	0.01
0.0352	0.0833	0.048
0.0257	0.0833	0.058
0.2407	0.25	0.01
0.4458	0.5	0.054
0.1430	0.25	0.107
0.3271	0.4167	0.09
0.4228	0.5	0.07
0.2142	0.3333	0.119
0.8621	0.9167	0.046

건물의 손상 확률과 구조재의 손실 확률, 2가지 변수를 갖는 Copula 함수는 Gumbell Copula 함수를 따른다. 또한 이 함수를 통해 구한 확률값과 실제 확률값은 평균적으로 9.3%의 오차를 나타내었다.

나. 단위성과 3-2-①: 건물수리비용 분석

본 연구에서는 건축물의 지진손실인 수리비용을 분석하여, 시뮬레이션기반 손실함수를 업데이트할 수 있는 방법론을 제시하였다. 실제 지진손실데이터는 경주지진에 의한 학교건축물의 수리비용을 사용하였으며, 시뮬레이션기반 손실함수는 HAZUS를 이용하여 도출하였다. 실제 지진손실데이터가 요소레벨로 정리되어 있지 않고 전체 수리비용으로만 정리되어 있어서, 단위성과 2-6-① (요소정보 통합 지진손실평가 기법)에서 제시된 건축물 요소레벨 기반 손실함수를 사용하지 않고, HAZUS의 건축물 시스템레벨 기반 손실함수를 사용하였다. 도출된 손실함수는 베이지안 업데이트 기법을 이용하여 업데이트 하였다.

(1) 경주지진에 의한 학교건축물 수리비용

손실함수의 가로축은 지진강도, 세로축은 수리비용(repair cost)을 대체비용(replacement cost)로 나눈 값인 damage ratio(%)로 정의되기 때문에, 경주지진에 의한 학교건축물의 수리비용을 지진의 강도에 대한 damage ratio로 정리하였다. 학교건축물의 replacement cost를 산정하기 위해선 층수 및 면적에 대한 정보가 필요하므로, 경주지진에 의해 손실데이터가 확보된 건축물은 총 36건이지만, 층수 및 면적에 대한 정보가 있는 18개의 건축물에 대한 damage ratio를 도출하였다¹¹⁾¹²⁾. 또한 학교건축물의 위치에 따른 최대지반가속도와 스펙트럴 가속도는 USGS의 데이터를 이용하여 <표 2.29>에 정리하였다.

<표 2.29> 18개 학교건축물에 대한 지진강도 및 damage ratio

No.	Location	Num. of Stories	PGA(g)	Sa(g)	Damage Ratio (%)
1	Yongsan	4	0.05	0.12	0.340
2	Yongsan	4	0.05	0.12	0.319
3	Pohang	4	0.06	0.16	1.081
4	Ulsan	4	0.08	0.21	0.102
5	Pohang	2	0.08	0.22	2.219
6	Gyeongju	4	0.09	0.23	0.201
7	Pohang	2	0.09	0.25	1.361
8	Ulsan	4	0.10	0.25	0.322
9	Gyeongju	3	0.12	0.26	4.849
10	Ulsan	2	0.12	0.29	0.783
11	Ulsan	4	0.11	0.29	0.677
12	Ulsan	3	0.11	0.29	0.578
13	Gyeongju	2	0.12	0.30	0.070
14	Ulsan	5	0.11	0.31	0.146
15	Gyeongju	4	0.14	0.34	0.580
16	Gyeongju	3	0.15	0.38	1.413
17	Gyeongju	3	0.18	0.48	0.652
18	Gyeongju	4	0.18	0.48	1.044

11) 전용일, 학교건축의 공사비 분석 및 예측에 관한 연구, 목원대학교 석사학위논문, 2004.

12) 조달청, 2014년 공공건축물 유형별 공사비 분석, 2015

(2) HAZUS의 손실평가 방법론

HAZUS-MH에서 평가하는 economic loss는 건축물 손상에 의한 direct economic loss와 공사시간, 영업손실 등을 고려한 indirect economic loss로 나눈다. 본 연구에서는 지진에 의한 물리적손상과 고려된 direct economic loss만 평가를 수행하였으며, direct economic loss를 repair cost(수리비용)로 정의하였다.

Repair cost인 total cost of building damage(CBD)는 총 33개의 occupancy class에 대해 식 32을 이용하여 계산된다. 학교건축물의 occupancy class는 32번째로, 학교건축물의 지진손실을 평가하기 위해선 식 (2.32)에서 $i=32$ 일 경우를 산출하면 된다.

$$CBD = \sum_i CBD_i \quad (2.32)$$

Occupancy class i 에 대한 total cost of building damage(CBD_i)는 구조재의 수리비용(cost of structural damage, CS_i)와 비구조재의 수리비용(cost of nonstructural damage, CNS_i)의 합으로 식 (2.33)과 같이 계산된다.

$$CBD_i = CS_i + CNS_i \quad (2.33)$$

구조재의 수리비용은 occupancy class가 i 인 건축물이 특정한 damage state일 때 정의되는 구조재 수리비용($CS_{ds,i}$)의 합으로 식 (2.34)과 같이 계산된다. HAZUS-MH에서는 구조재의 damage state를 총 5단계(none, slight, moderate, extensive, complete)로 구분하한다. 수리비용이 발생하는 damage state는 none을 제외한 총 4단계이므로, damage state가 slight($ds=2$)부터 complete($ds=5$)까지 합하여 구조재의 수리비용을 계산한다.

$$CS_i = \sum_{ds=2}^5 CS_{ds,i} \quad (2.34)$$

각 damage state에 대한 구조재의 수리비용, $CS_{ds,i}$ 은 occupancy class에 따라 정의된 building replacement cost(BRC_i), 각 damage state에 대한 구조재에 손상이 발생할 확률($POSTR_{ds,i}$), 해당 damage state에 대한 구조재의 수리비용($RCS_{ds,i}$)의 곱으로 식 (2.35)과 같이 계산된다.

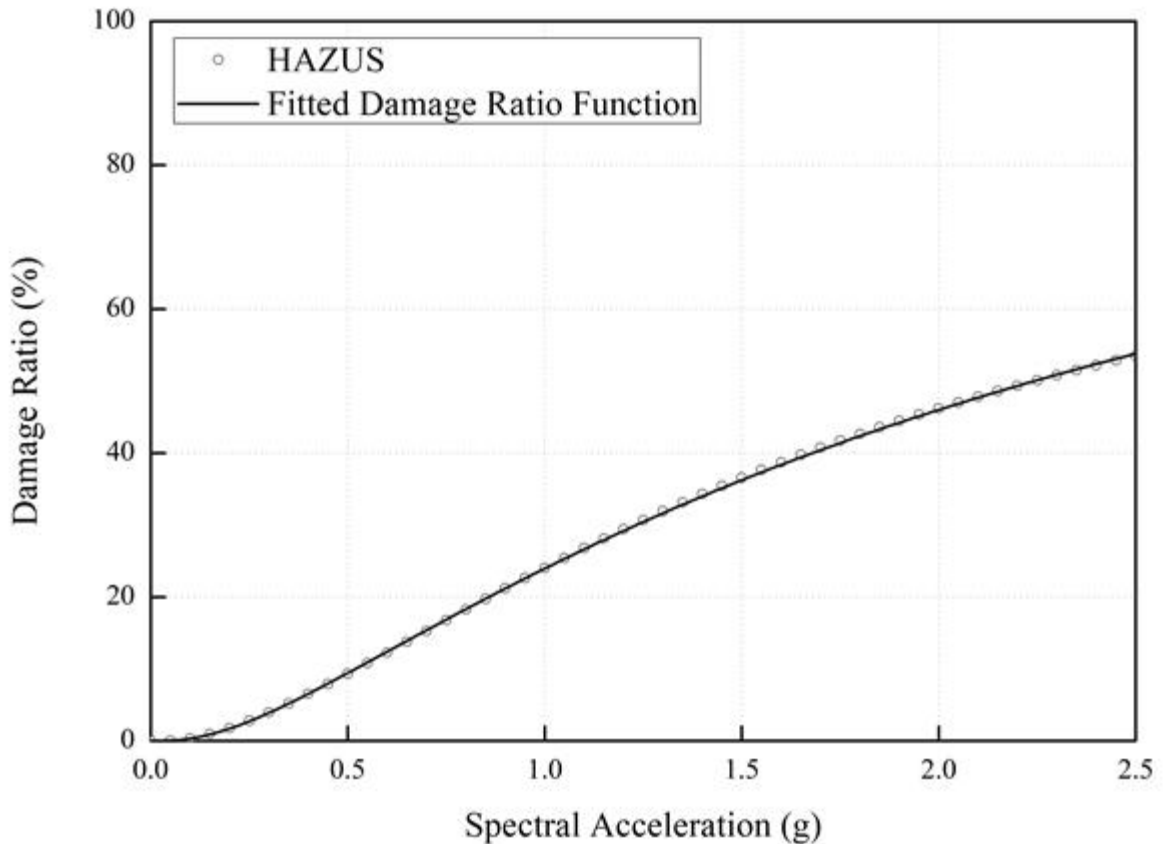
$$CS_{ds,i} = BRC_i \times POSTR_{ds,i} \times RCS_{ds,i} \quad (2.35)$$

비구조재의 경우, 크게 가속도민감 비구조재와 변위민감 비구조재로 구분하여 수리비용을 계산한다. 계산방법은 구조재에 대한 수리비용 산출방식과 비슷하게 진행한다. 각 damage state에 대한 가속도민감 비구조재의 수리비용($CNSA_i$)과 변위민감 비구조재에 대한 수리비용($CNSD_i$)는 각각 식 (2.36), 식 (2.37)을 이용하여 계산한다.

$$CNSA_i = \sum_{ds=2}^5 CNSA_{ds,i} \quad (2.36)$$

$$CNSD_i = \sum_{ds=2}^5 CNSD_{ds,i} \quad (2.37)$$

본 연구에서는 학교건축물의 HAZUS를 이용한 손실함수를 도출하기 위해, 내진설계가 되지 않은 조적채움벽이 있는 철근콘크리트건축물(pre-code, C3M)에 대해 손실함수를 위의 식을 이용하여 도출하였다. 도출된 손실함수는 <그림 2.52>의 점으로 표현하였으며, <그림 2.52>의 실선은 최우도법을 이용하여 HAZUS 손실함수를 flitting한 손실함수를 나타낸다.



<그림 2.52> HAZUS로 도출된 학교건축물의 손실함수

(3) 손실함수의 업데이트를 위한 베이저안 방법론 및 적용

Bayesian updating method는 이용가능한 정보가 항상 제한되어 있고 주관적 판단이 필요한 공학문제에 있어서 모수(θ)를 추정하는데 사용된다. 만약 실제 관측된 데이터와 같은 추가적인 정보가 있다면, 모수는 식 (2.38)로 표현되는 Bayes's Theorem을 이용해 수정(update)될 수 있다.

$$f'(\theta) = \frac{P(\epsilon|\theta)f'(\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\epsilon|\theta)f'(\theta)d\theta} \quad (2.38)$$

여기서 $f'(\theta)$ 는 사전확률밀도함수(prior probability density function), $f''(\theta)$ 는 사후확률밀도함수(posterior probability density function), $P(\epsilon|\theta)$ 는 모수가 θ 일때 실제 데이터 ϵ 가 관측될 조건부 확률이나 가능성을 나타내는 우도함수(likelihood function)이다. 일반적으로 우도함수는 $L(\theta)$ 로 나타낸다.

보통 실제 데이터 ϵ 는 관측치 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 의 조합이므로, 이 관측치가 모집단 X 로부터 얻을 수 있는 무작위 표본이라 가정한다면 관측치는 어떠한 확률밀도함수(probability density function, PDF)인 $f_X(x)$ 로 나타낼 수 있다. 또한 분포의 매개변수를 θ 라고 한다면, 실제데이터에 ϵ 가 관측될 확률인 $P(\epsilon|\theta)$ 는 식 (2.39)로 정의할 수 있다.

$$P(\epsilon|\theta) = \prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta) \quad (2.39)$$

또한 만약 사전확률밀도함수가 $f'(\theta)$ 하면, 식 (2.38)에 따라 사후확률밀도함수는 아래의 식 (2.40)으로 정의할 수 있다.

$$f''(\theta) = \frac{\left[\prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta) \right] f'(\theta) d\theta}{\int_{-\infty}^{\infty} \left[\prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta) \right] f'(\theta) d\theta} = kL(\theta)f'(\theta) \quad (2.40)$$

여기서 k 는 정규화 계수, $L(\theta)$ 는 우도함수로 각각 식 (2.41), 식 (2.42)로 정의된다.

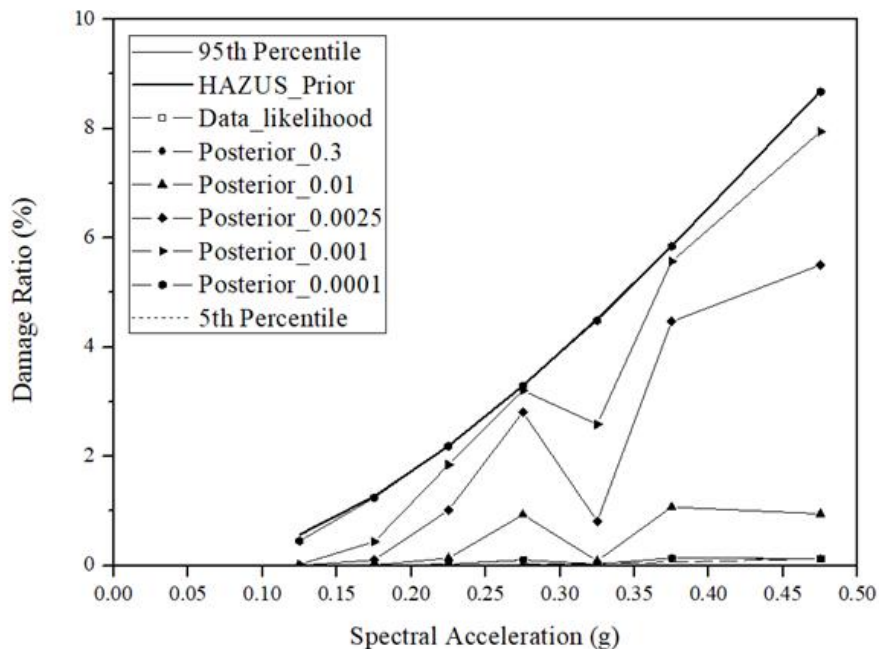
$$k = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta) f'(\theta) d\theta \right]^{-1} \quad (2.41)$$

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f_X(x_i | \theta) \quad (2.42)$$

Bayesian updating method를 이용하여 손실함수를 업데이트하기 위해서는 학교건축물의 지진강도에 따른 damage ratio의 분포를 통계적으로 추정하여야 한다. USGS에서 경주진에 의한 지진강도를 알 수 있는 총 건축물의 개수는 5034개이지만, 이 중 스펙트럴가속도가 0.10g미만인 학교건축물 4080개는 피해가 거의 없다고 판단할 수 있으므로 제외하였다. 스펙트럴가속도가 0.1g이상인 학교건축물 총 954개와 손실데이터가 있는 학교건축물 18개를 이용하여, 지진의 강도를 0.1g간격으로 나누어 정규분포를 이용한 damage ratio의 중앙값(median), 표준편차(sigma), 공분산(Cov)을 <표 2.30>에 정리하였다.

<표 2.30> 학교건축물의 지진강도에 따른 damage ratio의 정규분포 계수

Sa (g)	Median loss (%)	Sigma	COV
0.1	0.317	0.00002	0.00702
0.2	1.651	0.00033	0.01998
0.3	3.738	0.00093	0.02477
0.4	6.256	0.00169	0.02699
0.5	8.995	0.00253	0.02808



<그림 2.53> 베이저안 업데이트링 방법이 적용된 손실함수

<그림 2.53>은 베이저안 업데이트링을 적용된 손실함수(posterior function)을 나타낸 것이다. 해당그림에서 posterior 뒤의 숫자의 의미는 prior function인 HAZUS손실함수의 불확실성(표준편차)을 의미하며, HAZUS손실함수의 불확실성이 실제 데이터의 불확실성보다 충분히 낮다면, HAZUS의 손실함수와 유사하게 손실함수가 업데이트 되는 것을 알 수 있다.

다. 단위성과 3-3-①: 사용자기반 내진성능지수 개발

(1) 손실기반 내진성능지수

단위성과 2-6-① (요소정보 통합 지진손실평가 기법)으로 도출된 지진손실기반 내진성능지수를 제시하기 위해, 본 연구에서는 United States Resiliency Council (USRC)에서 제시하는 내진성능평가 방법을 차용하였다. USRC에서는 건축물의 내진성능을 인명안전과 관련된 safety, 건축물의 경제적 손실과 관련된 damage, 건축물의 복구기간과 관련된 recovery로 3가지를 통해 평가한다. 각각의 평가기준은 세부적으로 1star에서 5stars까지 구분되어 있으며, 3가지 항목을 평가하여 건축물의 내진성능을 platinum, gold, silver, bronze 4단계로 구분한다.

(가) Safety

Safety 등급은 지진 발생 후 건물 외부로 나갔을 때, 지진에 의해 부상을 당하거나 생명을 잃을 수 있는 가능성을 고려하여 아래와 같이 5단계로 구분된다.

<표 2.31> Safety rating에 대한 내진성능지수 정의

Rating	Description
★★★★★	• 부상 및 출구경로 차단 가능성: 거주자가 부상을 입을 가능성의 거의 없는 상태
★★★★	• 거주자가 심각한 부상을 입을 가능성은 희박함
★★★	• 거주자의 생명이 잃을 가능성이 희박함
★★	• 건축물 안팎의 일부지역에서 사망자가 발생한 가능성이 있음
★	• 건축물의 붕괴에 의한 건축물 내에서 사망자가 발생할 확률이 높음

(나) Damage

Damage 등급은 지진 발생 후, 건물을 수리하기 위한 비용 견적을 반영하기 때문에 평가가 마지막으로 이루어진 시점의 데이터를 사용한다. Damage는 지진이 발생하기 전과 똑같은 건축물을 만드는데 필요한 비용인 repair cost를 건축물의 대체비용인 replacement cost로 나눈 값으로 정의된다. 즉, damage는 앞서 핵심성과 2-6-① (요소정보 통합 지진손실평가 기

법)에서 도출된 학교건축물의 손실함수 중 세로축에 해당되는 값이다.

<표 2.32> Damage rating에 대한 내진성능지수 정의

Rating	Description
★★★★★	• 경미한피해: repair cost가 건축물의 replacement cost의 5%미만
★★★★	• 소규모피해: repair cost가 건축물의 replacement cost의 10%미만
★★★	• 중규모피해: repair cost가 건축물의 replacement cost의 20%미만
★★	• 대규모피해: repair cost가 건축물의 replacement cost의 40%미만
★	• 전도붕괴: repair cost가 건축물의 replacement cost의 40%이상

(다) Recovery

Recovery는 부동산 소유주 또는 세입자가 본래의 기능을 위해 건물에 들어갈 수 있을 때 까지의 예상 시간인 복구기간에 대해 내진성능을 평가하는 지표이다. Recovery Rating은 필요한 수리를 수행하고 주요 안전 위협을 제거하고 사용이 가능하기까지의 최소 시간을 나타내기도 한다. 이 등급은 기능을 회복하기 위한 시간을 지연시킬 수 있는 외부 인프라, 건물 내용의 손상 또는 상태, 인접한 건물의 형태 등의 요소를 다루지는 않는다.

<표 2.33> Recovery rating에 대한 내진성능지수 정의

Rating	Description
★★★★★	• Immediately to days: 사람들이 신속하게 건축물을 재진입할 수 있고, 외부 요인을 제외하고 며칠 내에 즉시 건축물을 사용할 수 있음
★★★★	• Within days to weeks: 수일에서 몇 주 내에 건축물을 재사용 할 수 있음
★★★	• Within weeks to months: 몇 주에서 몇 달 내에 건축물을 재사용 할 수 있음
★★	• Within months to a year: 몇 달에서 일 년 내에 건축물을 재사용 할 수 있음
★	• More than one year: 건축물 재사용에 적어도 일 년 이상의 시간이 소요됨

(2) Damage Rating 기반 학교건축물의 내진성능지수 평가

본 연구에서는 핵심성과 2-6-① (요소정보 통합 지진손실평가 기법)에서 도출된 학교건축물의 지진강도에 따른 손실함수를 이용하여 damage rating 기반 학교건축물의 내진성능지수를 평가하였다. 지진의 강도(PGA)에 따라 학교건축물의 damage ratio에 대한 damage rating을 평가한 결과, PGA=0.3g에서는 minimal damage (5-stars)를 만족하지만, PGA의 범위가 0.4~0.6g에서는 moderate damage (4-stars), PGA의 범위가 0.7~1.0g에서는 significant damage (3-stars)로 평가됨을 알 수 있다.

<표 2.34> 경주지진데이터를 통해 얻어진 학교건축물의 손실기반 내진성능지수 평가

PGA (g)	Damage Ratio	Damage Rating
0.1	0.176%	5-stars
0.2	1.145%	5-stars
0.25	2.412%	5-stars
0.3	3.472%	5-stars
0.4	5.640%	4-stars
0.5	7.696%	4-stars
0.6	9.599%	4-stars
0.7	11.379%	3-stars
0.8	13.079%	3-stars
0.9	14.739%	3-stars
1	16.389%	3-stars

4. 핵심성과 및 성과유형

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	구조재 및 비구조재의 최적 지진취약도 평가 기법 개발	건축물 용도에 따른 프로토타입 모델 개발; 요소정보의 지진취약도 데이터베이스 구축; 최적 지진강도 및 최적 지진반응계수를 고려한 요소정보 통합 지진취약도 평가 기법 개발	시스템	연세대, 3D구조	2	4
2	목표성능수준 및 손상도를 고려한 지진손실평가 기법 개발	요소정보의 목표성능수준 구축; 성능수준기반 학교건축물 구조재 및 비구조재의 손상도 평가; 축소실험을 통한 건축물 손상도 평가; 학교건축물의 구조재 및 비구조재 요소정보 통합 지진손실평가 기법 결과 제시	시스템	연세대	2	4
3	피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발	경주 및 포항지진 지진피해사례 데이터베이스 구축; Bayesian updating기법을 통한 지진손실평가기법 제시; 학교건축물의 경제적 손실기반 내진성능지수 결과 제시	시스템	연세대, 현대해상	2	4

제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 연구개발성과 및 평가방법

- 1차년도 연구개발목표를 달성하기 위한 핵심성과는 총 3개로 구성되어 있으며, 핵심성과를 달성하기 위한 단위성과는 총 7개이다.
- 핵심성과는 ‘CTE1: 구조재 및 비구조재의 최적지진취약도 평가기법 개발’, ‘CTE2: 목표성능수준 및 손상도를 고려한 지진손실평가 기법 개발’, ‘CTE3: 피해규모를 고려한 사용자 기반 내진성능지수 개발’로 구성되며, 핵심성과에 대한 정량적 연구성과목표로는 국외논문 2건, 국내논문 1건, 특허출원 2건, 학술발표대회 3건, 인력양성 2건이 있다.
- 1차년도 정량적 성과지표에 따른 성과목표와 최소성과목표는 아래와 같다.
- 성과목표

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	1건	1건
SCI(E)급 학술지(IF 평균 미만) 게재(1점)	1건	1건
일반학술지게재(1점)	2건	2건
특허출원(1점)	2건	1건
학술발표대회 발표 건수(1점)	3건	-
인력양성 배출 실적(1점)	2건	-
소계(점수)	12점	6점

나. 정량적 연구성과 목표 및 달성도

구분		목표	성과	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	2	2(3)	(초과달성예정)	리뷰 중
	비SCI	-	-	-	
	계	2	2(3)	(초과달성예정)	
국내 논문 게재	SCI	-	-	-	
	비SCI	2	1(3)	(초과달성예정)	리뷰 중
	계	2	1		
학술회의 발표	국내	2	14	초과달성	
	국외	1	6	초과달성	
	계	3	20	초과달성	
특허 출원	국내	2	2	달성	
	국외	-	-		
	계	2	2		
인력 양성	학사	1	1	달성	
	석사	1	2	초과달성	
	박사	-	-		
	계	2	3	초과달성	
국내외연수지 원 성과	장기	-	-		
	단기	-	1	추가달성	
	계	-	1	추가달성	
포상	국내	-	1	추가달성	
	국외	-	-		
	계	-	1	추가달성	

* 괄호안의 달성예정 성과를 포함한 수

(1) 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호
1	역량스펙트럼법을 통한 구조물 성능점의 확률적 기반 내진성능평가기법 개발	한국 전산구조공학 회 논문집	최인섭 장지상 김준희	30	대한 민국	한국전산 구조 공학회	비SCI	2017.12. 11	1229-3059
2	Mainshock-Aftershock Response Analyses of FRP-Jacketed Columns in Existing RC Building Frames	Engineering Structures	김준희 신지욱	165	영국	Elsevier	SCI	2018.6.1 5	0141-0296
3	Development of Marker-Free Night-Vision Displacement Sensor System by Using Image Convex Hull Optimization	Sensors	김준희	18	스위스	MDPI	SCI	2018.11. 27.	1424-8220
4	Experimental Study and Analytical Evaluation of Rotational Constraint on Steel Double-Beam Systems Reinforced with Beam-End Concrete Panel	Engineering Structures	김준희	165	영국	Elsevier	SCI	†	0141-0296

† 리뷰 중

(2) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	발표논문명	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	Seismic Performance Assessment of Steel Moment frame with various type of steel connection designed by Artificial Neural Network	COMPDYN 2017	장학중	2017.06.16	Rhodos island	Greece
2	역량스펙트럼법을 이용한 구조물 성능점의 확률적 해석	2017년 한국지진공학회 학술발표회	최인섭	2017.09.15	경주 힐튼호텔	대한민국
3	지진하중의 변화에 따른 내진성능의 영향평가	2017년 한국지진공학회 학술발표회	이주희	2017.09.15	경주 힐튼호텔	대한민국
4	지진담보 정책성 보험 운영 방안에 대한 연구	2017 대한토목학회 정기학술대회	박홍규	2017.10.20	부산 벡스코	대한민국
5	기둥의 단면확대에 따른 저층 RC 모멘트 골조의 내진성능평가	2017년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회	김동현	2017.11.02	안동 그랜드호텔	대한민국

번호	발표논문명	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
6	지진강도선택에 따른 3층 5경간 철근콘크리트 구조물의 지진취약도평가에 관한 연구	2017 한국전산구조공학회 학술심포지엄	장학중	2017.11.17	양양 솔비치리조트	대한민국
7	구조물 해석모델의 단순화가 고유진동수 예상값에 미치는 영향평가	2017 한국전산구조공학회 학술심포지엄	손정훈	2017.11.17	양양 솔비치리조트	대한민국
8	동특성데이터를 활용한 4층 철골모멘트 골조의 집합부 손상모델 설계기법에 관한 연구	2017 한국전산구조공학회 학술심포지엄	장학중	2017.11.17	양양 솔비치리조트	대한민국
9	일반보험 지진사고 특성분석	2018 한국방재학회 학술발표대회	백천우	2018.02.27	서울과학기술대학교	대한민국
10	허용층간변위를 고려한 비구조요소의 내진설계 기준 분석	2018 한국전산구조공학회 정기학술대회	이주희	2018.4.2	창원 컨벤션센터	대한민국
11	지진강도선택에 따른 철근콘크리트구조물의 취약도평가	2018 한국전산구조공학회 정기학술대회	장학중	2018.4.3	창원 컨벤션센터	대한민국
12	3층 예제 구조물의 층강성 고려여부가 층가속도 비율에 미치는 영향평가	2018 한국전산구조공학회 정기학술대회	손정훈	2018.4.3	창원 컨벤션센터	대한민국
13	The Hualien earthquake of February 06, 2018: field investigation of damaged structure	COmputational Design in Engineering 2018	최인섭	2018.4.4	창원 컨벤션센터	대한민국
14	Successive seismic performance assessment considering structure damaged by mainshock	COmputational Design in Engineering 2018	장학중	2018.4.4	창원 컨벤션센터	대한민국
15	기둥의 파괴모드를 고려한 RC모멘트골조의 지진취약도 분석	2018 한국콘크리트학회 봄 학술대회	최인섭	2018.5.3	창원 컨벤션센터	대한민국
16	이중보 합성바닥구조의 보 단부 회전스프링 모델개발을 위한 유한요소 해석	2018 한국콘크리트학회 봄 학술대회	장지상	2018.5.4	창원 컨벤션센터	대한민국
17	최적 지진강도 선정을 위한 지진 취약도 곡선 연구	2018 한국콘크리트학회 봄 학술대회	정범규	2018.5.4	창원 컨벤션센터	대한민국
18	Fragility Analysis of a School Building before and after Seismic Retrofit	11th National Conference on Earthquake Engineering	정범규	2018.6.26	The Westin Bonaventure Hotel & Suites	Los Angeles, US
19	Experimental Evaluation for a Novel Concrete Masonry Wall without Mortar Paste	11th National Conference on Earthquake Engineering	최인섭	2018.6.27	The Westin Bonaventure Hotel & Suites	Los Angeles, US
20	Successive Seismic Performance Assessment Reflecting Damaged Structure	11th National Conference on Earthquake Engineering	장학중	2018.6.27	The Westin Bonaventure Hotel & Suites	Los Angeles, US

(3) 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 그로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기 여 율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호 *	등록인	등록일	등록번호	등록 번호*	
1	손실기반 해석방법을 이용한 내진성능 평가방법 및 평가시스템	KR	연세대 산학협 력단	2018. 12.27.	10-201 8-0170 227	-					100
2	탄소나노튜브 도선을 이용한 기둥의 휨균열 및 전단균열 평가방법 및 평가시스템	KR	연세대 산학협 력단	2019. 01.17.	10-201 9-0006 212	-					100

(4) 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별			성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도 권	충청 권	영남 권	호남 권	기타
1	건축구조	2018		2	1		3		3				

(5) 국내외 장·단기 연수지원 성과

번호	국내구분	연수구분	연수목적	이름	연수명	연수기관
1	국내	단기	산업기술습 득	최인섭, 손정훈	포항지진이후 건축물 내진기준 개정 방향 및 내진보강 실무기술	사단법인 한국지진공학회

(6) 포상

번호	포상명	포상자	소속기관	포상기관
1	우수논문 발표상	장지상	연세대학교	사단법인 한국콘크리트학회

다. 성과목표에 대한 자체 평가

핵심성과 (CTE)	성과 목표	자체 평가
구조재 및 비구조재의 최적지진취약도 평가기법 개발	요소정보 분류체계 수립 (단위성과 1-1-①)	- 지진취약도함수를 보유한 HAZUS, SYNER-G, FEMA P-58에 대한 구조재 및 비구조재의 요소정보 분류체계 분석 완료 - 요소정보 분류체계를 시스템레벨(HAZUS, SYNER-G)과 부재레벨(FEMA P-58)로 구분하여 수립 함
	프로토타입모델 개발 (단위성과 1-2-①)	- 기존 도면 분석을 통해, 지진에 대해 취약한 구조를 가지는 건축물에 대한 프로토타입모델을 개발하였음 - 학교건축물(단주), 소방건축물(장주), 필로티건축물(연약층)에 대한 프로토타입모델을 개발 함
	스펙트럼기반 지진하중시나리오 작성 (단위성과 1-3-①)	- 국내건축구조기준(AIK, KBC)을 분석하여, 설계스펙트럼에 따른 지진하중시나리오 작성 완료 - 연도별, 위치(지역계수), 암반조건(증폭계수)에 따라 총 50개의 지진하중시나리오를 작성 함 (보고서 1-3-① 참고)
	최적지진강도 및 최적지진반응계수 도출 (단위성과 1-4-①)	- 건축물을 대상으로 빈번하게 사용되는 지진강도와 지진반응계수를 최적지진강도 및 최적지진반응계수의 후보군으로 도출 함 - 지진강도 선택에 따른 지진취약도함수의 영향을 분석하기 위해, 소방건축물을 대상으로 지진강도(PGA, S_a)에 대한 지진취약도함수의 변화에 대한 사례분석을 수행하였음
	지진취약도평가 모델 개발 (단위성과 1-5-①)	- 지진취약도를 평가하는 모델을 개발하기 위한 방법론(analytical method)에 대한 이론적 내용 정리 완료 - HAZUS, SYNER-G의 시스템레벨 지진취약도함수와 FEMA P-58의 부재레벨 지진취약도함수에 대한 DB구축 완료
목표성능수준 및 손상도를 고려한	요소정보의 목표성능수준 구축 (단위성과 2-1-①)	내진설계 및 성능평가를 위한, 물리적 손상기반 내진성능목표, 병원건축물의 내진성능목표, 손실(repair cost, repair time 등)기반 내진성능목표를 구축 완료 함
지진손실평가 기법 개발	요소정보의 손상도 평가 (단위성과 2-2-①)	포항지진과 대만화롄지진에 의한 피해건축물의 구조재 및 비구조재에 대한 손상도 평가 수행

핵심성과 (CTE)	성과 목표	자체 평가
	손상도를 고려한 보수정책 수립 (단위성과 2-3-①)	• 데이터마이닝기법(decision tree)을 이용한 경주지진피해 건축물의 구조적/비구조적 손상이 피해규모에 미치는 영향 분석 완료 • 피해규모에 가장 큰 영향을 미치는 기둥의 내진보강 전/후 지진 취약도 변화에 대한 사례분석 수행
	성능수준기반 손상도평가 (단위성과 2-4-①)	• 목표성능수준에 따라 4개로 구분된 손상도지표를 이용하여, 학교 건축물의 구조재 및 비구조재의 확률적 손상도평가 수행 완료
	축소실험을 통한 손상도 평가 (단위성과 2-5-①)	• 건축물의 계측된 데이터를 통해 손상도를 평가할 수 있는 증강성 평가기법 수립 및 축소실험을 통한 검증 수행 완료
	지진손실평가 기법 개발 (단위성과 2-6-①)	• 구조재 및 비구조재의 통합 지진손실평가 기법을 개발하였으며, 학교건축물을 대상으로 지진의 강도에 따른 damage ratio을 분석
피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발	지진피해사례 DB구축 (단위성과 3-1-①)	• 위탁연구(현대해상)를 통해, 경주지진 claim data 분석을 통한 DB 플랫폼 구축 및 경주지진과 포항지진에 대한 지진손실 DB구축 • 다변량 데이터 분석기법인 Copula 함수를 이용한 구조적 손상이 비구조재를 포함한 지진손실액에 미치는 영향 분석 완료
	건물 수리비용 분석 (단위성과 3-2-①)	• 실제 손실데이터를 이용한 지진손실함수의 업데이트가 가능한 Bayesian updating기법의 제시 • 개발된 기법을 경주지진 피해 학교건축물을 대상으로 적용하였으며, 그 결과는 보고서에 제시 함(보고서 3-2-①참고)
	사용자기반 내진성능지수 개발 (단위성과 3-3-①)	• 기존 문헌 분석을 통한 건축물의 safety, damage, recovery로 표현 되는 5단계 내진성능지수 제시 • 내진성능지수의 국산화를 위해, 지진하중(경주지진)부터 건축물 (국내 학교건축물)까지 damage-based 내진성능지수 평가 수행

2. 관련분야 기여도

[경주지진으로 드러난 국내 지진재해대응시스템의 한계점과 내진관련 정책 추진]

- 국민안전처에서 2005년도부터 운영하고 있는 지진재해대응시스템은 지진발생 직후 인명 및 건축물의 피해를 추정하여 피해상황과악이 어려운 지진발생초기상황에 신속한 의사결정을 지원하는 시스템이다. 2016년 9월 12일 경주에서 발생한 규모 5.8의 경주지진에 대하여 지진재해대응시스템을 이용하여 의사결정을 지원하는데 사용되었다.
- 2017년 5월 국민안전처에서 발행한 “9.12지진 백서”에 따르면, 경주지진시 지진재해대응시스템을 이용하여 피해현황을 추정한 결과와 조사된 실제피해사례를 비교하면, 인명피해, 이재민, 건축물피해, 경제적 손실부분에서 실제 피해상황과 추정지의 차이는 매우 큰 것으로 조사되었다.
- 또한 지진재해대응시스템은 지진으로 인해 손상을 받은 건축물의 손실에 해당하는 경제적 손실액 예측이 불가능하여, 정부기관이나 보험회사 등과 같은 사용자의 의사결정을 지원하기 어려운 한계점을 가진다고 할 수 있다.
- 경주지진 이후, 건축물의 내진성능의 확보를 위해 많은 내진관련 정책이 추진되고 있는데, 2017년 1월 20일에는 건축물대장에 건축물의 내진설계 여부를 표시하도록 시행하고 있으며, 2017년 2월 4일에는 내진설계 의무대상을 기존 3층 이상 연면적 500m²이상에서 2층 이상 연면적 500m²이상으로 강화되어 신설되는 건축물에 대한 내진설계가 강화되고 있다.
- 기존 건축물의 내진성능을 확보하기 위해 기존 공공시설물을 대상으로 내진보강대책을 수립하였는데, 2017년 3월 21일 발표된 “기존 공공시설물 내진보강대책”을 살펴보면, 2017년도에 총 8,393억원을 투입하여 2,542개소에 내진보강사업을 추진할 계획을 발표하였다. 이 중 주요시설물에 해당하는 소방서, 학교 등에 할당된 예산은 3,513억원으로 전체 예산의 41.9%에 해당된다. 이는 최근 5년간 실적대비 평균 2배가 증가한 수로, 정부차원에서 기존 공공시설물의 내진성능을 확보하기 위한 노력을 수행중이다.
- 본 연구의 목표는 건축물의 지진에 의한 손상을 손실로 연결시켜, 구조재 및 비구조재의 지진손실을 고려한 내진성능지수를 개발하는데 있다. 또한 주요시설물인 학교, 소방서, 학교, 경찰서, 공공시설 중 대상건축물을 정하여 연구를 진행하기 때문에, 국내의 내진관련 정책의 흐름과 본 연구의 방향은 상당부분 일치한다고 할 수 있다.

[4차 산업혁명에 따른 연구의 패러다임 변화와 본 연구와의 관련성]

- 지난 2016년 1월 다보스 포럼(WEF, World Economic Forum)에서 발간한 “The Future of Jobs”의 보고서에 따르면, 4차 산업혁명을 디지털 혁명에 기반 하여 물리적 공간, 디지털 공간 및 생물학적 공간의 경계가 희석되는 기술융합의 시대라고 정의하면서, 4차 산업혁명은 전 세계의 산업구조 및 시장경제 모델에 커다란 영향을 미칠 것으로 전망하고 있다.
- 1차 산업혁명의 기반은 철강 산업과 같은 증기엔진에 있고, 2차 산업혁명의 기반은 대량 생산과 전기 분야, 3차 산업혁명의 기반은 컴퓨터를 포함한 디지털 기술에 있다. 4차 산업혁명의 기반이 되는 시스템은 integrations of computation, networking, physical process로 구성된 Cyber-Physical System으로 인공지능, 로봇공학, 사물인터넷(IoT)와 같은 기술이 4차 산업을 주도할 것이라 전망하고 있다.
- 본 연구의 목표를 달성하기 위한 가장 중요한 연구내용은 지진에 의한 물리적 손상을 경제적 손실로 연결시키는데 있다. 지진에 의한 손상을 구조재와 비구조재로 나누어 지진취약도 함수의 형태로 DB화 하였고, 지진에 의한 손실은 경주지진의 사례를 조사하여 실제 피해사진과 수리비용을 DB화 하였다. 당초 연구계획상 손상과 손실의 관계를 분석하기 위해, 손상에 대한 description, damage index등과 같은 손상에 대한 정보와 실제 손실데이터간의 데이터마이닝 기법을 통해 수리비용을 분석하는 것을 연구내용으로 설정하였다.
- 하지만, 실제 손실데이터는 손해사정사가 평가하는 수리비용으로 산정되어, 손상에 대한 데이터와 직접적으로 관계를 분석하기엔 데이터마이닝 기법으로 한계가 있다. 학교건축물에 대한 경주지진의 피해사례 DB를 통해, 학교건축물의 지진피해규모에 영향을 미치는 요소를 machine learning의 기법인 entropy분석을 통한 decision tree를 도출한 결과, 지진피해규모의 미치는 영향요소는 기둥 균열, 지역, 조명탈락 순으로 분석되었다. Machine learning을 이용하여 지진손상과 지진손실의 관계를 시험적으로 분석한 결과, 피해규모에 영향을 미치는 요소를 정량적으로 분석할 수 있었으며, 손상과 손실과의 관계를 규명할 수 있을 것이라 판단된다.
- 4차 산업혁명은 학문간의 경계가 없이, 타 분야의 기술과 관련 분야의 기술을 접목하여 새로운 기술을 개발하는데 의의가 있고, 데이터의 심층 분석을 통해 사람들의 의사결정을 지원하는 데이터를 제공하는데 큰 목적이 있다. 본 연구가 성공적으로 마무리된다면, 4차 산업혁명을 주도하는 관련분야의 전문지식을 갖춘 인재의 양성 및 관련 기술을 선점하는데 유리하다고 판단된다.

제4장. 연구개발성과의 활용 계획

1. 연구개발성과의 활용 방안

가. 기술 수요처

본 연구의 최종 성과물은 구조재 및 비구조재의 각 요소 정보의 지진취약도를 평가하는 기술과, 실제 지진피해사례 분석을 통한 피해금액과 손상도지표와의 상관관계 분석을 통한 지진손실평가 기법을 통해, 잠재적사용자(정부, 회사, 엔지니어)가 필요한 건축물의 내진성능을 평가할 수 있는 기술을 제시한다. 따라서 다음과 같은 기술수요처를 고려해볼 수 있다.

- 정부: 유사조건을 가진 건축물의 내진성능을 구조재 및 비구조재의 피해규모를 고려하여 좀 더 객관적으로 분류 할 수 있으며, 지진대비의 단계에서 국가주요시설물(critical facility)의 내진보강여부를 판단하기 위한 의사결정 과정에 활용될 수 있다.
- 보험회사: 지진에 대한 위험도를 평가할 수 있는 재해리스크모델(CAT Model) 개발에 필요한 취약성 모듈 및 손실모듈 개발에 필요한 요소기술로 사용함으로써 CAT Model의 국산화를 통한 비용절감이 가능하며, 건축물의 지진손실액을 고려하여 지진보험에 대한 합리적인 요율을 제시할 수 있다.
- 엔지니어(구조사무소 및 관련기업): 내진성능평가를 수행하고 있는 엔지니어는 본 연구의 최종성과물을 이용하여 도출된 정량화된 내진성능지수를 바탕으로 내진성능평가 용역에 대한 합리적인 비용으로 소비자들에게 기술제공이 가능. 또한, 건축물의 내진성능지수 평가를 통해 사전에 건축물의 내진성능을 확인하여 경제적인 업무수행이 가능하다.

나. 실용화 방안

기존 건축물의 내진성능을 확보하기 위해서, 정부의 ‘지진재해대책법(2008)’에 이은 ‘지진방재개선대책(2016)’에서 강조하는 내진설계 및 내진보강이 필요한 건축물들을 대상으로, 본 연구의 최종성과물을 이용하여 내진성능지수평가를 통한 보강이 필요한 건축물을 선별할 수 있다. 또한 본 연구에서 내진성능지수를 개발하기 위한 프레임워크를 다른 범주의 건축물에 적용하여 확장시킬 수 있음. 특히, 실질적으로 보험회사와의 협력을 통해 실제 지진피해 사례에 근거한 피해규모를 예측하여 지진보험요율을 책정하는데 도움이 될 수 있음. 또한 현재 내진성능평가지 육안검사로 분류되는 건축물의 내진등급(A~E등급)을 본 연구에서 제안한 방법을 통해 현실적인 피해규모를 고려한 내진성능지수 개발로 평가할 수 있다.

다. 신사업 창출

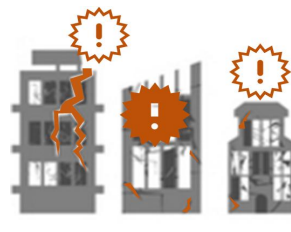
최근 규모 5이상의 경주지진발생으로 내진설계 및 내진성능평가에 대한 수요가 증가하고 있는 현실이다. 하지만, 기존의 내진성능평가 방법은 구조재에 대한 상세평가에 국한될 뿐만 아니라, 지진피해 비중이 높은 비구조재에 대한 손상을 정량적으로 나타내기 어려운 것이 현실이다. 그리고 이러한 방법은 보험회사와 같은 피해를 측정하는 기관에서 건축물의 지진에 대한 실질적 피해를 고려한 적절한 지진보험 요율을 도출해 내는데 어려움이 있다. 본 연구의 결과물을 통해 현실적인 지진피해규모를 고려한 신사업 창출이 가능할 것으로 판단된다.

- 사용자기반 건축물 내진성능평가 컨설팅 사업: 건축물의 지진피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수를 활용하여, 내진성능평가가 필요로 하는 구조물을 발굴하는 것은 물론 기존 건축물의 자가 사용자를 대상으로 내진성능 관련 상담을 수행하는 신사업 창출 가능. 이를 통해 건축물 내진성능평가 관련 시장을 확대가능하다.

또한 정량적 지진피해규모 산출을 통한 피해규모 예측: 국내, 외의 보험회사에서 지진보험요율을 결정하기 위한 지진공학 및 구조공학 기반으로 산출된 건축물 지진피해규모 예측 자료 제공가능. 이를 통해, 건축물 지진피해규모에 대한 고려 가능하다.



지진에 대한 손상 확인



구조물 지진피해규모 예측



사용자기반 내진성능
컨설팅

2. 기대효과

가. 기술적 측면

현실적인 지진피해규모를 고려한 건축물 내진성능지수평가를 통해 건축물의 구조재와 비구조재의 내진성능을 평가해주는 조건 내에서 최적안을 도출하는 의사결정을 지원함으로써, 사업추진의 효율성 개선

연구개발 범위를 공동주택, 주요시설물과 같은 다양한 용도의 건축물로 확장할 수 있으

며, 실무에서 다양한 건축물에 대한 합리적인 내진성능이 어려운 시간적/비용적 측면을 해결하여 관련 실무자들에게 신뢰성과 경제성을 갖춘 객관적인 자료의 제공이 가능하다.

사용자에 따른 내진성능평가지 중요요소를 반영함으로써, 지속적으로 관련 정보의 업데이트를 통한 지속적으로 성장하는 기술로 개선/개발이 가능하며, 관련 데이터를 통해 내진 보강의 의사결정을 지원할 수 있다.

나. 경제/산업적 측면

(1) 리모델링 산업의 활성화

기존 구조물의 리모델링을 위해 2014년 한국시설안전공단에서 ‘중축형 리모델링 안전진단 매뉴얼’에 리모델링을 위한 구조부재의 구조적 성능을 제시하고 있지만 비구조부재의 성능에 대한 지침이 존재하지 않음. 즉, 구조물의 리모델링 시, 지진하중에 대한 구조부재에 대한 지침은 존재하지만 비구조부재에 대한 지침은 존재하지 않아, 리모델링 이후 안전성의 고려가 미흡하다.

본 연구를 통해 구조부재 뿐만 아니라 비구조부재의 지진하중에 대한 피해규모를 고려, 현실적인 지진피해규모를 통한 구조물의 구조재와 비구조재의 내구성 및 안전성을 확보한 리모델링 사업이 수행 가능하다. 따라서, 본 연구결과의 구조재와 비구조재의 내진성능평가를 통한 리모델링 산업의 활성화를 통한 건축경기 활성화에 기초가 될 수 있다.

(2) 해외개발지진 Cat Model의 사용을 위한 비용절감

재해예측모델 활용이 일반화된 해외의 경우 관련 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 국내의 경우 관련 연구가 전무하여 해외기술에 의존하고 있고, 특히 국내 보험관련업계에서는 보험가입물건의 지진위험 평가를 위해, 해외 지진 Cat model 개발사에 매년 수십억원의 사용료를 지불하고 있다.

지진보험요율을 결정하기 위한 지진공학 및 구조공학 기반으로 산출된 구조물의 지진피해규모예측자료 제공가능, 추후 발생할 수 있는 지진피해를 기존의 내진성능평가 방법에 비해 높은 정확도로 예측하여, 국내 실정에 적합한 지진 Cat model에 필요한 원천기술의 확보를 통해, 해외개발 Cat model과의 경쟁을 통한 합리적인 사용료 지불 또는 독자적인 개발이 가능할 것으로 기대된다. 또한 지진규모예측을 통해 지진하중에 의한 구조물의 피해를 정량적으로 계산, 이를 통한 지진피해에 대한 보상에 대해 양측에 고려가 가능하다.

다. 사회적 측면

(1) 문화재 및 주요 시설물의 내진성능평가

시설물의 사회적, 역사적 중요도가 높은 시설물이 위치한 지역의 지질학적 특성, 구조물의 형식이나 준공연도등의 기본적인 시설물 정보 등을 이용하여 구조물의 내진등급을 정량적으로 평가하였다. 또한 2016년 경주지진 피해사례에서의 구조/비구조요소별 실제 피해량 산출의 필요성이 있음을 확인하였다.

본 연구결과를 통해 사회적으로 보존의 의무가 있는 문화재(Cultural Heritage), 자연재해 시 인명안전과 직접적으로 연결된 주요시설물(Critical Facility)등의 지진안전성을 확보할 수 있다.

(2) 자연재해에 대한 피해 감소

지진과 같은 자연재해에 대해 안전성을 확보해야만 하는 병원, 소방서 등과 같은 ‘주요시설물’의 안전성 검토가 필수적이다. 본 연구의 최종결과물인 현실적 지진피해규모를 고려한 건축물 내진성능지수를 평가하여 대상 구조물의 자연재해에 대한 안전성 검토가 가능하며, 이를 통해 자연재해시 인명안전에 필수적인 주요시설물의 재난안전성을 확보할 수 있다.

(3) 지진보험 활성화를 통한 국민안전 확보 및 재해복구 역량 강화

국내 건축물의 지진담보 보험의 가입률은 1%미만으로, 그 원인은 민간보험사에서는 지진보험에 필요한 관련 근거의 부족과 비현실적으로 낮은 보험료 등의 이유로 지진담보 보험 판매에 소극적인 이유가 있으며, 지진발생시 국가가 지원하는 보상금 제외하면 대부분의 국민들이 지진위험에 무방비로 노출되어 있는 실정이다.

본 연구의 최종성과물을 통해, 개별 위험요인이 반영된 합리적인 요율산정 근거가 마련될 경우, 위험특성을 반영한 보험료 현실화 및 차등화가 가능해 지며, 민관 협업을 통해 지진보험 시장 활성화의 계기를 마련 할 수 있다. 또한 지진보험이 활성화될 경우 지진리스크에 대한 위험관리 수단을 제공함으로써 재해발생 시 신속한 복구를 지원하고 국민경제의 안정적인 활동을 보조하여 국가안전망 구축에 기여 할 수 있다.

(4) 일자리 창출

기존 또는 신축 건축물에 대한 내진성능지수를 평가하는 모델을 통해, 현실적인 지진피해 규모를 고려한 건축분야 신사업 창출이 가능하다. 또한, 내진성능평가지수 관련 컨설팅 분야의 전문기업(보험회사) 및 새로운 일자리 창출 가능하다.

붙임. 참고 문헌

- 1) 강범서. (2013). 손실분포법을 이용한 국내기상재해의 최대피해가능 금액 추정연구.
- 2) 고현, 김현수, 박용구, & 이동근. (2010). 비내력벽을 가진 RC 모멘트저항골조의 지진거동 평가. Jorunal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 14(5), 13-22.
- 3) 국민안전처. (2016). 기존 공공시설물 내진보강 기본계획.
- 4) 국민안전처. (2016). 보도자료 우리 동네 지진대피소는 어디에?.
- 5) 국민안전처. (2017). 보도자료 2017년 내진보강사업, 전년 대비 6배 이상 추진.
- 6) 기상청홈페이지. <http://kma.go.kr>.
- 7) 김광전, & 송종걸. (2014). 역량스펙트럼방법을 이용한 PSC 박스교의 지진취약도해석. 한국방재학회논문집, 14, 249-260.
- 8) 김남희, & 홍성걸. (2009). HAZUS 자료를 이용한 국내 건축물의 취약도 분석.
- 9) 김재천, 변지석, & 신수봉. (2008). 지반특성을 고려한 FCM 교량의지진취약도분석. 한국지진공학회논문집, 12(3), 37-44.
- 10) 김태완, & 민찬기. (2013). 조적채움벽 및 허리벽이 학교 건물 내진 성능에 미치는 영향에 대한 해석적 연구. Jorunal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 17(5), 197-207.
- 11) 김학수, & 송종걸. (2008). 확률론적 내진성능평가를 위한 다자유도 교량구조물의 지진취약도해석. 3. 한국방재학회 학술대회논문집, 2008, 269-272.
- 12) 류승현, 윤현도, 김선우, 이강석, & 김용철. (2011). 국내 기존 학교건축물의 내진보강 후 비선형 거동특성. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 15(1), 243-253.
- 13) 문기훈, 전용률, 이창석, & 한상환. (2012). 조적조 비내력벽을 가진 기존 학교 구조물의 내진 성능평가. Jorunal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 16(6), 37-46.
- 14) 박영미, 한상환, & 오승룡. (2006). 플랫 플레이트 슬래브 해석을 위한 강성감소계수. 대한건축학회 논문집-구조계, 22(11), 105-114.
- 15) 박주남, 최은수. (2007). 취약도 해석을 통한 빌딩구조물의 내진성능 비교 및 평가. 한국지진공학회논문집, 1(3), 11-21.
- 16) 박지훈, 전성하, & 강경수. (2012). 등가 스트럿 모델을 이용한 조적조 채움벽 골조의 내진성능평가. Jorunal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 16(1), 47-59.
- 17) 박춘욱, 이형주, 주치홍, & 홍원화. (2013). 복합소재를 이용한 교육시설의 기둥 내진보강공법에 관한 연구. 교육시설 논문지, 20(1), 45-52.
- 18) 백동걸, 권광호, & 김진구. (2012). 격간벽 구조의 취약도 해석. 한국전산구조공학회 논문집, 25(5), 397-404.
- 19) 소방방재청. (2013). 건축물 내진성능평가 가이드라인.

- 20) 송정국. (2011). 국내 원전시설의 지진 안정성 평가 절차 및 방법은?. 대한토목학회지, 59(8), 86-88.
- 21) 송종걸. (2002). 역량스펙트럼 방법을 이용한 교량의 내진성능 평가. 대한토목학회논문집 A, 22(5A), 1011-1021.
- 22) 신지욱, 이기학, & 정성훈. (2009). 다양한이력접합부가적용된철골모멘트저항골조의내진 성능평가에대한연구. 대한건축학회논문집-구조계, 25(11), 19-27.
- 23) 윤길호, 김성호, 김용철, & 윤현도. (2012). 현장타설 끼움 전단벽 및 철골가새를 활용한 기존 학교 건물의 내진보강. 교육시설 논문지, 19(4), 21-28.
- 24) 윤종구, 김동수, & 방은석. (2006). 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답 스펙트럼 개선에 대한 연구 (I)-국내 내진설계기준의 문제점 분석. Jorunal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 10(2), 39-50.
- 25) 이진학, 김상훈, & 윤정방. (2004). 지진취약도 분석을 위한 확률밀도함수 보간 기법. 대한토목학회논문집 A, 24(2A), 391-399.
- 26) 이현호. (2017, September). 2016 경주지진에 대한 문헌적 고찰. In 2017 한국구조물진단 유지관리공학회 가을 학술발표 및 포럼 논문집 (pp. 169-170).
- 27) 장동휘, 송종걸, 강성립, & 박창호. (2011). 다양한비선형지진해석방법에따른철근콘크리트전단벽구조물의취약도곡선평가. Jorunal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 15(4), 1-12.
- 28) 장준호, & 김영문. (2002). 비내진 저층 철근콘크리트 골조의 횡방향 반복 하중에 관한 거동. 대한건축학회연합논문집, 4(4), 127-133.
- 29) 정기현, 이한선, 황경란, 권오성, & 김승직. (2016). 고층RC 벽식건물의 지진취약도분석. Jorunal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 20(3), 155-162.
- 30) 정영수, 박창영, & 박지호. (2007). 철근콘크리트교각의연성능력에따른지진취약도. 한국콘크리트학회논문집, 19(1), 91-102.
- 31) 조원선, 이상현, 정란, 김혜진, 김승진, & 유은중. (2012). 비보강 조적 끼움벽체를 가지는 철근콘크리트 골조 구조물 내진성능평가. 대한건축학회 논문집-구조계, 28(3), 31-41.
- 32) 최병정. (2013). 학술기사: PBD 에 근거한 ATC-40 의 능력스펙트럼법을 이용한 성능점 산출방법 소개. 한국공간구조학회지, 13(4), 11-16.
- 33) 한국교육개발원. (2012). 학교시설 내진성능 평가 및 내진보강 가이드라인.
- 34) 한국시설안전공단. (2005). 시설안전지. 18, 94-111.
- 35) 한국시설안전공단. (2011). 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령.
- 36) Aboutaha, R. S., Engelhardt, M. D., Jirsa, J. O., & Kreger, M. E. (1999). Rehabilitation of shear critical concrete columns by use of rectangular steel jackets. Structural Journal, 96(1),

68-78.

- 37) Altin, S., Anil, Ö., & Kara, M. E. (2008). Strengthening of RC nonductile frames with RC infills: An experimental study. *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 612-621.
- 38) American Society of Civil Engineers. (1994). Minimum design loads for buildings and other structures (Vol. 7). Amer Society of Civil Engineers.
- 39) ATC, A. (1996). 40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Applied Technology Council, report ATC-40. Redwood City.
- 40) Azizinamini, A., & Radzinski, J. B. (1989). Static and cyclic performance of semirigid steel beam-to-column connections. *Journal of Structural Engineering*, 115(12), 2979-2999.
- 41) Badillo-Almaraz, H., Whittaker, A. S., & Reinhorn, A. M. (2007). Seismic fragility of suspended ceiling systems. *Earthquake Spectra*, 23(1), 21-40.
- 42) Bai, J. W. (2004). Seismic fragility and retrofitting for a reinforced concrete flat-slab (Doctoral dissertation, Texas A&M Univ.).
- 43) Baker, J. W., & Cornell, C. A. (2003). Uncertainty specification and propagation for loss estimation using FOSM method (p. 100). Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.
- 44) Basu, B., & Gupta, V. K. (1998). A damage-based definition of effective peak acceleration. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 27(5), 503-512.
- 45) Beak, D., Kwon, K., & Kim, J. (2012). Fragility analysis of staggered wall structures. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 25(5), 397-404.
- 46) Beres, A., El-Borgi, S., White, R.N., and Gergely, P. 1992. Experimental results of repaired and retrofitted beam-column joint tests in lightly reinforced concrete frame buildings. In: Report No, NCEER-92- 25. Buffalo (NY): National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- 47) Berry, M. P., & Eberhard, M. O. (2004). Performance models for flexural damage in reinforced concrete columns. Pacific Earthquake Engineering Research Center
- 48) Boore, D. M., Joyner, W. B., & 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*, 68(1), 128-153.
- 49) Bousias, S., Spathis, A. L., & Fardis, M. N. (2007). Seismic retrofitting of columns with lap spliced smooth bars through FRP or concrete jackets. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(5), 653-674.
- 50) Campbell, K. W., Bozorgnia, Y., Bozorgnia, Y., Bozorgnia, Y., & Bozorgnia, Y. (2010).

Analysis of Cumulative Absolute Velocity (CAV) and JMA instrumental seismic intensity (IJMA) using the PEER-NGA strong motion database. University of California, Berkeley, PEER, 102.

- 51) Canbay, E., Ersoy, U., & Ozcebe, G. (2003). Contribution of reinforced concrete infills to seismic behavior of structural systems. *ACI Structural Journal*, 100(5), 637-643.
- 52) Chan, S. L., & Chui, P. P. T. (2000). Non-linear static and cyclic analysis of semi-rigid steel frames. Elsevier Science, 336.
- 53) Charette, R. P., & Marshall, H. E. NISTIR 6389. UNIFORMAT II Elemental classification for building specifications, cost estimating and cost analysis (NIST, 1999).
- 54) Choi, E., DesRoches, R., & Nielson, B. (2004). Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones. *Engineering Structures*, 26(2), 187-199.
- 55) Code, A. K. B. (2009). KBC 2009. Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea.
- 56) Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). Seismic resilience of a hospital system. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), 127-144.
- 57) Cosenza, E., Di Sarno, L., Maddaloni, G., Magliulo, G., Petrone, C., & Prota, A. (2015). Shake table tests for the seismic fragility evaluation of hospital rooms. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(1), 23-40.
- 58) Douglas, J. (2011). Ground-motion prediction equations 1964-2010 (p. 444). Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- 59) El-Amoury, T., & Ghobarah, A. (2005). Retrofit of RC frames using FRP jacketing or steel bracing. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 7(2), 83.
- 60) Elnashai, A. S., & Elghazouli, A. Y. (1994). Seismic behaviour of semi-rigid steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 29(1), 149-174.
- 61) Elnashai, A. S. (2001). Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications. *Structural engineering and mechanics*, 12(1), 51-70.
- 62) Elnashai, A. S., Pinho, R., & Antoniou, S. (2000). INDYAS-A Program for INelastic DYnamic Analysis of Structures. Engineering Seismology and Earthquake Engineering Report No. ESEE 00-2, Imperial College, London.
- 63) Elnashai, A. S., Papanikolaou, V., & Lee, D. H. (2008). Zeus-NL user manual version 1.8. 1. Mid-America Earthquake Center, University of Illinois Urbana-Champaign.
- 64) Elnashai, A. S., & Di Sarno, L. (2008). Fundamentals of earthquake engineering (p. 34). New York: Wiley.
- 65) Elwood, K. J., & Eberhard, M. O. (2009). Effective stiffness of reinforced concrete columns.

- ACI Structural Journal, 106(4), 476.
- 66) Erberik, M. A., & Elnashai, A. S. (2004). Fragility analysis of flat-slab structures. *Engineering Structures*, 26(7), 937-948.
 - 67) Erduran, E. (2012). Evaluation of Rayleigh damping and its influence on engineering demand parameter estimates. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(14), 1905-1919.
 - 68) Fajfar, P., & Krawinkler, H. (Eds.). (2004). *Performance-based Seismic Design: Concepts and Implementation: Proceedings of the International Workshop, Bled, Slovenia, 28 June-1 July 2004*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
 - 69) Erberik, M. A., & Elnashai, A. S. (2004). Fragility analysis of flat-slab structures. *Engineering Structures*, 26(7), 937-948.
 - 70) FEMA, P. (2000). *Commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
 - 71) FEMA, P. (2009). 695. *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Federal Emergency Management Agency.
 - 72) Fotopoulou, S. D., & Pitilakis, K. D. (2013). Fragility curves for reinforced concrete buildings to seismically triggered slow-moving slides. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 48, 143-161.
 - 73) Fragiacomio, M., Amadio, C., & Macorini, L. (2004). Seismic response of steel frames under repeated earthquake ground motions. *Engineering structures*, 26(13), 2021-2035.
 - 74) Gao, S., Liu, H., Davis, P. M., & Knopoff, L. (1996). Localized amplification of seismic waves and correlation with damage due to the Northridge earthquake: evidence for focusing in Santa Monica. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(1B), S209-S230.
 - 75) Ghobarah, A., Aziz, T. S., & Biddah, A. (1996). Seismic rehabilitation of reinforced concrete beam-column connections. *Earthquake Spectra*, 12(4), 761-780.
 - 76) Goel, S. C., & Masri, A. C. (1996). Seismic strengthening of an RC slab-column frames with ductile steel bracing. In *Proc., 11th world conference on earthquake engineering*.
 - 77) Gregorian, Z. B., & Gregorian, G. B. (1996). *Seismic Upgrading of Hospital Buildings No. 6 and 7, VA Medical Center, Bedford, Mass. Special Publication*, 160, 131-148.
 - 78) Grünthal, G. (1998). *CONSEIL DE L'EUROPE*.
 - 79) Haselton, C. B., & Deierlein, G. G. (2008). *Assessing seismic collapse safety of modern reinforced concrete moment-frame buildings* (Doctoral dissertation, Pacific Earthquake Engineering Research Center).
 - 80) Haselton, C. B., Baker, J. W., Bozorgnia, Y., Goulet, C. A., Kalkan, E., Luco, N., ... &

- Watson-Lamprey, J. (2009). Evaluation of ground motion selection and modification methods: Predicting median interstory drift response of buildings. PEER Report 2009, 1.
- 81) 'Haselton, C. B., Liel, A. B., Deierlein, G. G., Dean, B. S., & Chou, J. H. (2010). Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. I: Assessment of ductile moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 137(4), 481-491.
- 82) Hashemi, S. A. (2007). Seismic evaluation of reinforced concrete buildings including effects of masonry infill walls. University of California, Berkeley.
- 83) Howell, B. F., & Schultz, T. R. (1975). Attenuation of modified Mercalli intensity with distance from the epicenter. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), 651-665.
- 84) IBC, I. (2006). International building code. International Code Council, Inc.(formerly BOCA, ICBO and SBCCI), 4051, 60478-5795.
- 85) Jaiswal, K., Wald, D., & D'Ayala, D. (2011). Developing empirical collapse fragility functions for global building types. *Earthquake Spectra*, 27(3), 775-795.
- 86) Jaspart, J. P. (2002). Design of structural joints in building frames. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(1), 18-34.
- 87) Jeong, S. H., & Elnashai, A. S. (2007). Fragility relationships for torsionally-imbalanced buildings using three-dimensional damage characterization. *Engineering structures*, 29(9), 2172-2182.
- 88) Johnson, G. S., Sheppard, R. E., Quilici, M. D., Eder, S. J., & Scawthorn, C. (1999). Seismic reliability assessment of critical facilities: A handbook, supporting documentation, and model code provisions.
- 89) Júlio, E. N., & Branco, F. A. (2008). Reinforced concrete jacketing-Interface influence on cyclic loading response. *ACI Structural Journal*, 105(4), 471.
- 90) Júlio, E. N., Branco, F. A., & Silva, V. D. (2005). Reinforced concrete jacketing-interface influence on monotonic loading response. *ACI Structural Journal*, 102(2), 252.
- 91) Júlio, E. S., Branco, F., & Silva, V. D. (2003). Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 5(1), 29-37.
- 92) Kaka, S. I., & Atkinson, G. M. (2004). Relationships between instrumental ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(5), 1728-1736.
- 93) Kanai, K. (1983). *Engineering seismology*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1983.
- 94) Karim, K. R., & Yamazaki, F. (2001). Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation. *Earthquake engineering &*

- structural dynamics, 30(12), 1839-1856.
- 95) Katsanos, E. I., Sextos, A. G., & Manolis, G. D. (2010). Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(4), 157-169.
 - 96) Kennedy, R., & Ravindra, M. (1984). Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies. *Nuclear Engineering and Design*, 79(1), 47-68.
 - 97) Kim, H. J., Park, T. W., Cho, S. H., Lee, K. K., Roh, Y. S., & Chung, L. (2010). Experimental Study on Seismic Retrofitting Methods for School Building using Aramid Strip. *Journal of the Korean Society of Safety*, 25(3), 100-106.
 - 98) Kim, S. H., & Shinozuka, M. (2004). Development of fragility curves of bridges retrofitted by column jacketing. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19(1), 105-112.
 - 99) Kirçil, M. S., & Polat, Z. (2006). Fragility analysis of mid-rise R/C frame buildings. *Engineering Structures*, 28(9), 1335-1345.
 - 100) Kissling, E. (1988). Geotomography with local earthquake data. *Reviews of Geophysics*, 26(4), 659-698.
 - 101) Krawinkler, H., & Mohasseb, S. (1987). Effects of panel zone deformations on seismic response. *Journal of Constructional Steel Research*, 8, 233-250.
 - 102) Lee, H. S., & Woo, S. W. (2002). Effect of masonry infills on seismic performance of a 3-storey R/C frame with non-seismic detailing. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(2), 353-378.
 - 103) Lee, T. H., & Mosalam, K. M. (2006). Probabilistic seismic evaluation of reinforced concrete structural components and systems. Report 2006/04, Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, USA.
 - 104) Liu, H. L., Fei, K., & Gao, Y. F. (2003). Time history analysis method of slope seismic stability. *ROCK AND SOIL MECHANICS-WUHAN-*, 24(4; ISSU 85), 553-556.
 - 105) Mackie, K., & Stojadinović, B. (2003). Seismic demands for performance-based design of bridges. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
 - 106) Mackie, K. R., & Stojadinović, B. (2005). Fragility basis for California highway overpass bridge seismic decision making. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
 - 107) Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1804-1826.
 - 108) Martin, S., & Szeliga, W. (2010). A catalog of felt intensity data for 570 earthquakes in

- India from 1636 to 2009. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(2), 562-569.
- 109) Mazzolani, F. M. (1986). The seismic resistant structures of the New Fire Station of Naples. *Costruzioni Metalliche*, 38(6), 343-362.
- 110) McGuire, R. K. (2008). Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(3), 329-338.
- 111) MIDAS, G. (2012). Analysis manual for MIDAS/GEN. MIDAS Information Technology Co. Ltd., Seoul, Korea.
- 112) Miller, J. T., & Reaveley, L. D. (1996). Historic hotel Utah remodel and seismic upgrade. *Special Publication*, 160, 115-130.
- 113) Moehle, J. P. (2000). State of research on seismic retrofit of concrete building structures in the US. In *US-Japan symposium and workshop on seismic retrofit of concrete structures*.
- 114) Moehle, J., & Deierlein, G. G. (2004, August). A framework methodology for performance-based earthquake engineering. In *13th world conference on earthquake engineering* (pp. 3812-3814).
- 115) Moon, K. H., Jeon, Y. R., Lee, C. S., & Han, S. W. (2012). Evaluation of Performance of Korean Existing School Buildings with Masonry Infilled Walls Against Earthquakes. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 16(6), 37-46.
- 116) Mouroux, P., & Le Brun, B. (2006). Presentation of RISK-UE project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 323-339.
- 117) Mwafy, A. M., & Elnashai, A. S. (2001). Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings. *Engineering structures*, 23(5), 407-424.
- 118) Naeim, F. (1995). On seismic design implications of the 1994 Northridge earthquake records. *Earthquake Spectra*, 11(1), 91-109.
- 119) Newmark, N. M., & Rosenblueth, E. (1971). *Fundamentals of earthquake engineering*. Civil engineering and engineering mechanics series, 12.
- 120) O'Rourke, M. J., & So, P. (2000). Seismic fragility curves for on-grade steel tanks. *Earthquake spectra*, 16(4), 801-815.
- 121) Padgett, J. E., Nielson, B. G., & DesRoches, R. (2008). Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(5), 711-725.
- 122) Park, J., & Kim, J. (2010). Fragility analysis of steel moment frames with various seismic connections subjected to sudden loss of a column. *Engineering Structures*, 32(6), 1547-1555.
- 123) Pitilakis, K., Franchin, P., Khazai, B., & Wenzel, H. (Eds.). (2014). *SYNER-G: Systemic*

- seismic vulnerability and risk assessment of complex urban, utility, lifeline systems and critical facilities: Methodology and applications (Vol. 31). Springer.
- 124) Priestley, M. N., Seible, F., & Xiao, Y. (1994). Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength--Part 2: Test results and comparison with theory. *Structural Journal*, 91(5), 537-551.
 - 125) Rodriguez, M., & Park, R. (1991). Repair and strengthening of reinforced concrete buildings for seismic resistance. *Earthquake Spectra*, 7(3), 439-459.
 - 126) Rojahn, C., & Sharpe, R. L. (1985). Earthquake damage evaluation data for California. Applied technology council.
 - 127) Rodriguez, M., & Park, R. (1994). Seismic load tests on reinforced concrete columns strengthened by jacketing. *Structural Journal*, 91(2), 150-159.
 - 128) Rossetto, T., & Elnashai, A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering structures*, 25(10), 1241-1263.
 - 129) Seyed, D. M., Gehl, P., Douglas, J., Davenne, L., Mezher, N., & Ghavamian, S. (2010). Development of seismic fragility surfaces for reinforced concrete buildings by means of nonlinear time-history analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(1), 91-108.
 - 130) Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J., & Naganuma, T. (2000). Statistical analysis of fragility curves. *Journal of engineering mechanics*, 126(12), 1224-1231.
 - 131) Skinner, R. I., Robinson, W. H., & McVerry, G. H. (1993). An introduction to seismic isolation. John Wiley & Sons.
 - 132) Song, J., Der Kiureghian, K., & Sackman, J. L. (2004). Seismic response and reliability of electrical substation equipment and systems (Doctoral dissertation, University of California, Berkeley).
 - 133) Spence, R. J. S., Coburn, A. W., Pomonis, A., & Sakai, S. (1992, July). Correlation of ground motion with building damage: the definition of a new damage-based seismic intensity scale. In *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain (Vol. 1, pp. 551-56).
 - 134) Stepp, J. C., Ponti, D. J., Turner, L. T., Swift, J. N., Devlin, S., Benoît, J., & Bobbitt, J. (2009). "PEER Lifelines Geotechnical Virtual Data Center", PEER Report 2009/108.
 - 135) Tena-Colunga, A. (1997). Mathematical modelling of the ADAS energy dissipation device. *Engineering Structures*, 19(10), 811-821.
 - 136) Tesfamariam, S., & Saatcioglu, M. (2010). Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings using hierarchical fuzzy rule base modeling. *Earthquake Spectra*, 26(1),

235-256.

- 137) Thermou, G. E., & Elnashai, A. S. (2006). Seismic retrofit schemes for RC structures and local-global consequences. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 8(1), 1-15.
- 138) Thermou, G., & Elnashai, A. S. (2002). Performance Parameters and Criteria for Assessment and Rehabilitation. *Seismic Performance Evaluation and Retrofit of Structures (SPEAR)*, European Earthquake Engineering Research Network Report, Imperial College, UK.
- 139) Tothong, P., & Luco, N. (2007). Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13), 1837-1860.
- 140) Tokoro, K. A. T., Anderson, J. C., & Bertero, V. V. (2004). Seismic performance of masonry buildings and design implications. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- 141) Trifunac, M. D., & Brady, A. G. (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), 581-626.
- 142) Turk, A. M. (1998). Rehabilitation of reinforced concrete infill walls. A Doctor of Philosophy Thesis in Civil Engineering, Bogazici University, Istanbul.
- 143) Udwadia, F. E., & Trifunac, M. D. (1973). Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63(4), 1227-1253.
- 144) Unnikrishnan, V. U., Prasad, A. M., & Rao, B. N. (2013). Development of fragility curves using high-dimensional model representation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(3), 419-430.
- 145) Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491-514.
- 146) Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491-514.
- 147) Vadoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2006). Axial preloading effects when reinforced concrete columns are strengthened by concrete jackets. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 8(3), 79-92.
- 148) Vadoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. *Construction and Building Materials*, 22(3), 264-276.
- 149) Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., & Kanamori, H. (1999). Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. *Earthquake spectra*, 15(3), 557-564.

- 150) Wen, Y., Ellingwood, B. R., & Bracci, J. M. (2004). Vulnerability function framework for consequence-based engineering. MAE Center Report 04-04.
- 151) Wood, H. O., & Neumann, F. (1931). Modified Mercalli intensity scale of 1931. Bulletin of the Seismological Society of America, 21(4), 277-283.
- 152) Zareian, F., & Medina, R. A. (2010). A practical method for proper modeling of structural damping in inelastic plane structural systems. Computers & structures, 88(1), 45-53.
- 153) Zelaschi, C., Monteiro, R., & Pinho, R. (2015, May). Improved fragility functions for RC bridge populations. In 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn 2015), Crete Island, Greece, 25-27 May.
- 154) Zhang, J., & Zirakian, T. (2015). Probabilistic assessment of structures with SPSW systems and LYP steel infill plates using fragility function method. Engineering Structures, 85, 195-205.

과 제 번 호
18CTAP-C129738-02

연구개발의 상세내용

2019. 02. 07.

- 주관연구기관 / 연세대학교
- 공동연구기관 / (주)쓰리디구조엔지니어링
- 위탁연구기관 / 현대해상화재보험(주)

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

※ 별첨 보고서 내용 참고

과 제 번 호
18CTAP-C129738-02

요소정보 지진취약도 데이터베이스

2019. 02. 07.

- 주관연구기관 / 연세대학교
- 공동연구기관 / (주)쓰리디구조엔지니어링
- 위탁연구기관 / 현대해상화재보험(주)

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

※ 별첨 보고서 부록 1 참고

과 제 번 호
18CTAP-C129738-02

경주지진 지진손실 데이터베이스

2019. 02. 07.

- 주관연구기관 / 연세대학교
- 공동연구기관 / (주)쓰리디구조엔지니어링
- 위탁연구기관 / 현대해상화재보험(주)

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

※ 별첨 보고서 부록 2 참고

과 제 번 호
18CTAP-C129738-02

포항지진 지진손실 데이터베이스

2019. 02. 07.

- 주관연구기관 / 연세대학교
- 공동연구기관 / (주)쓰리디구조엔지니어링
- 위탁연구기관 / 현대해상화재보험(주)

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

※ 별첨 보고서 부록 3 참고

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발 성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.