

20CTAP-
C143093
-03

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개() 발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제 3차연도 최종보고서

국토교통 R&D /
20CTAP-C143093-03

2017 포항지진에서 드러난 벽식아파트 수벽과
날개벽 균열하자 및 탈락 등 재발 방지를 위한
내진설계/시공 Solution 개발 최종보고서

2017 포항지진에서 드러난 벽식아파트 수벽과 날개벽 균열하자 및 탈락 등 재발 방지를 위한 내진설계/시공 Solution 개발 최종보고서

2021

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

2021.01.20.

주관연구기관 / 세종대학교 산학협력단
공동연구기관 / 계명대학교 산학협력단
참여기업 / (주) 미래구조 엔지니어링

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'2017 포항지진에서 드러난 벽식아파트 수벽과 날개벽 균열하자 및 탈락 등 재발
방지를 위한 내진설계/시공 Solution 개발' (연구개발 기간 : 2018.04.17 ~
2020.12.31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단 (대표자) 이 수 용

공동연구기관명 : 계명대학교 산학협력단 (대표자) 남 재 열

참여기관명 : ㈜미래구조엔지니어링 (대표자) 김 용 남

주관연구기관책임자: 이 기 학

공동연구기관책임자: 김 승 직

참여기관책임자: 김 용 남

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C143 093-03	해당 단계 연구 기간	2020. 04. 17 ~2020. 12. 31	단계구분	3차년도/3차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	-			
연구과제명	대과제명	2017 포항지진에서 드러난 벽식아파트 수벽과 날개벽 균열하자 및 탈락 등 재발 방지를 위한 내진설계/시공 Solution 개발			
	세부과제명	-			
연구책임자	이기학	해당단계 참여연구원 수	총: 17명 내부: 17명 외부: - 명	해당단계 연구비	정부:150,000천원 민간:50,000천원 정부외: - 천원 상대국: - 천원 계:200,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 27명 내부: 27명 외부: - 명	총 연구비	정부:600,000천원 민간:200,000천원 정부외: - 천원 상대국: - 천원 계:800,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	세종대학교 산학협력단 계명대학교 산학협력단			참여기업명: (주) 미래구조 엔지니어링	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반등급				

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	12	출원2건 등록3건	4								

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

요약

- 수벽과 날개벽 대체시스템에 대한 성능평가 해석모델 개발
- 수벽과 날개벽 대체시스템에 대한 성능평가 가이드라인 개발
- 수벽과 날개벽 대체시스템 상세 개발 및 실험적 검증
- 대체시스템 보수·보강 공법 개발 및 검증
- 비내력벽 내진설계/시공 가이드

보고서 면수 165

요약문

연구의 목적 및 내용	그동안 인지하지 못했던 구조설계 및 시공 관행에 의하여 설계/시공된 벽식 아파트의 수벽과 날개벽에 포항지진(규모 5.4, 2017)으로 인해 균열과 탈락 등 심각한 손상이 발생함. 이를 해결하기 위해 1) 비내력벽 해석모델 및 해석 가이드라인 개발, 2) 비내력벽 상세 개발 및 실험적 성능평가, 3) 구조설계법 및 시공상세 개발을 통한 비내력벽 내진설계/시공 Solution 개발을 목표로 함 • 벽식 아파트의 슬롯형과 PC형 대체 비내력벽시스템의 해석모델 개발 - 포항지진사례의 정밀내진성능 평가를 통한 수벽과 날개벽 시스템 요구 성능제시 - 수벽과 날개벽 대체시스템의 설계 및 성능평가를 위한 해석모델 개발 - 수벽과 날개벽 대체시스템에 대한 구조설계 가이드라인 개발 • 벽식 아파트의 슬롯형과 PC형 대체 비내력벽시스템 상세개발 및 실험적 손상제어성능 평가 - 수벽과 날개벽 대체시스템 모듈 및 상세개발 - 수벽과 날개벽 대체시스템 적용 RC벽체의 실험적 내진성능평가 및 분석 - 수벽과 날개벽 대체시스템 보수·보강 공법 개발 및 검증 • 벽식 아파트의 비내력벽 손상 최소화를 위한 구조설계법 개발 및 시공상세 개발 - RC비내력벽을 포함하는 현행 벽식구조의 설계/시공 문제점 분석 - RC비내력벽을 포함하는 벽식 아파트 구조설계법 제시(PC등 대안공법 포함) - 대체 비내력벽시스템 시공 최적화를 위한 적용성 평가				
연구개발성과	• 수벽과 날개벽 대체시스템에 대한 성능평가 해석모델 개발 • 수벽과 날개벽 대체시스템에 대한 성능평가 가이드라인 개발 • 수벽과 날개벽 대체시스템 실험적 검증을 통한 상세 개발 • 수벽과 날개벽 대체시스템 접합부 보수·보강 공법 및 지침(안) 개발 • 비내력벽 대체시스템 내진설계/시공 가이드라인 개발				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 비내력벽의 균열억제 및 내진성능 확보를 통한 기술의 선진화 및 국내의 독자적인 기술 확보 • 지진에 대응하여 비내력벽의 손상균열을 억제함으로써 피해를 방지하며, 심각한 경제적 보수·보강 비용 절감 • 내진설계/시공 Solution 개발을 통하여 시공성을 확보하며, 향후 공사비의 증대를 방지할 수 있음 • 성능설계를 확보할 수 있는 전단벽식 아파트에 대한 전 세계 유일한 기술로서, 세계시장 독점 가능 • 국가적 차원에서 지진 피해를 저감함으로써 지진방재 국가정책의 신뢰성 확보				
국문핵심어 (5개 이내)	비내력벽 (수벽 및 날개벽)	손상 제어	내진성능평가	벽식 아파트	포항 지진
영문핵심어 (5개 이내)	Non-Bearing Wall	Damage Cont rol	Seismic Perfo rmance Evalu ation	Wall Type A partment	Pohang Earth quake

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구수행내용 및 성과	6
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	157
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	162
붙임. 참고 문헌	164

<별첨> 주관연구기관의 자체 평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목표 개요

(1) 연구개발의 개요

1. 본 연구과제에서는 2017년 포항지진에 의하여 심각한 피해를 입은 벽식 아파트의 수벽과 날개벽 같은 비내력벽의 균열하자 및 탈락 등 재발 방지를 위한 내진설계/시공 Solution 개발을 목표로 함

- 혁신기술(Renovation) : 수벽 및 날개벽에 대한 문제점에 대해 현실적이고 공학적인 해결방안을 개발함으로 국내·외적 독보적인 기술 확보 및 내진기술의 국제 경쟁력 확보
- 경제성(Economy) : 지진 발생 시 구조물에 대한 피해 저감 및 비내력벽 균열하자 및 탈락 등의 피해 방지를 통한 막대한 경제적 손실이 유발되는 보수·보강 비용 절감
- 지속가능성(Sustainability) : 비내력 시스템의 내진설계/시공 Solution을 개발함으로서 구조물의 내구성 증진을 통한 수명 장수화 가능
- 실용성(Practicality) : 공기단축 및 시공성을 요구하는 산업체 요구에 부응할 수 있는 비내력벽의 균열과 손상제어 기술을 제공

2. 본 연구개발진의 비전과 세부연구목표는 다음과 같다.

- 내진설계/시공에 대한 국민의 신뢰감을 확보함을 비전으로 하며
- 세부목표는 벽식 아파트의 슬롯형과 PC형 비내력벽 대체시스템의 해석모델 개발
- 벽식 아파트의 슬롯형과 PC형 비내력벽 대체시스템 상세개발 및 실험적 성능 평가
- 벽식 아파트의 대체시스템 손상 최소화를 위한 구조설계법 개발 및 시공상세 개발



[그림 1.1] 본 연구개발의 비전과 개요

나. 연구개발 배경

(1) 지속적인 지진 발생 가능성에 따른 국내 지진위험도 증가

- 1978년 국내 지진계측 이 후 현재까지 규모 2.0 이상 지진의 발생 총 빈도는 점점 증가하고 있는 추세이며, 특히 내륙에 발생한 규모 5.0이상의 지진은 총 5건이며 이 중 최근 국내 최대 규모의 경주지진(2016년 9월)과 최대 지진피해를 유발한 포항지진(2017년 11월)이 발생함
- 경주지진 발생 시 언급되었던 대경권 전 지역에 걸쳐 이어지는 170km구간의 양산 단층대에서 다른 활성단층의 존재가 입증되었으며, 이는 앞으로도 지속적인 지진 발생 가능성을 나타내고 있음
- 따라서 이와 같이 지속적인 지진 발생 가능성이 높기 때문에 지진에 대응할 수 있는 기술을 시급히 확보하는 것은 중요함



[그림 1.2] 국내 역대 규모 5.0 이상 지진 및 포항·경주 인근 주요 단층 분포

(2) 2017년 포항지진으로 인한 공동주택(아파트)의 심각한 균열과 탈락 등 피해 발생

- 최근 발생한 포항지진(규모 5.4)의 경우 국내 지진계측 이래로 가장 많은 인명피해 및 구조물의 피해가 발생하였으며, 특히, 많은 가구가 거주하고 있는 아파트에서도 피해가 다수 발생하였음
- 흥해읍의 D아파트의 경우, 일부 건축물에서 북쪽으로 약 3도 기울어지는 구조물의 전도가 발생하였으며, 벽체 이격, 접합부 파괴, 및 비내력벽의 전단균열이 발생함에 따라 사람들이 더 이상 거주하지 못할 만큼의 피해가 발생하였음
- 또한, 거주민의 거주가 불가능할 정도는 아니지만 수벽 및 날개벽과 같은 비내력벽의 피해가 발생한 공동주택이 추가적으로 6곳에서도 발견됨
- 이러한 피해의 대부분은, 전단벽 균열로 인한 구조적인 피해보다는 비내력벽의 피해로 인명피해가 발생하지는 않았지만, 높은 비구조 요소의 보수비용이 발생하였으며, 거주

민의 심리적 불안감을 초래함



(A) D아파트



(B) S아파트



(D) O주택



(C) K아파트



(D) M타운

[그림 1.3] 포항지진으로 인한 공동주택의 비내력벽 피해 현황

다. 연구개발의 필요성

(1) 비내력벽 균열하자 재발 방지를 위한 연구 필요성

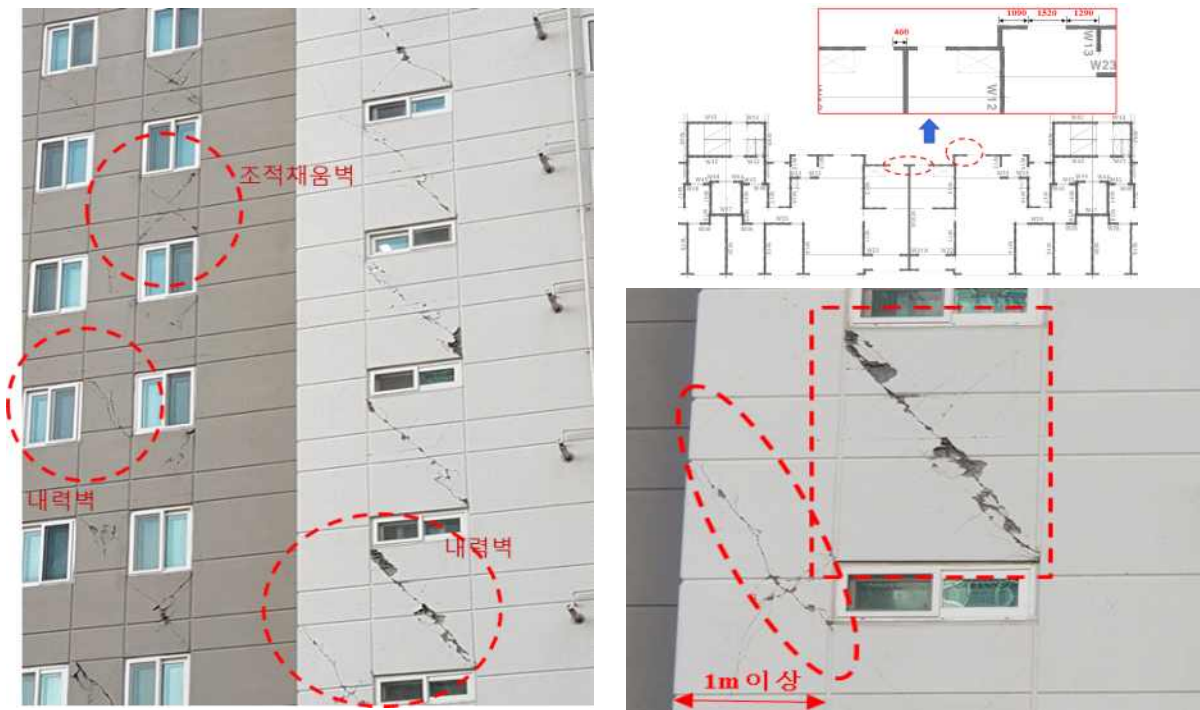
- 본 연구의 필요성은 크게 3가지로 나누어지며 (1) 비내력벽에 대한 내진대응기술 확보, (2) 수벽 및 날개벽 설계 및 시공관행 문제점, (3) 지진대응기술 정부지원의 필요성으로 나눌 수 있음
- 각 필요성에 대한 상세 내용은 아래 [그림 1.4]로 표현함



[그림 1.4] 3가지 관점에서 분석한 본 연구의 필요성

(2) 지속적인 공동주택의 지진 피해 가능성

- 특히 최신건축기준에 따른 내진설계가 적용되어 2014년에 준공된 S아파트 중 3개동의 저층에서 고층까지의 수벽 및 날개벽의 균열이 발생되었으며, 일부 동에서는 내력벽의 전단균열이 다수 발견됨([그림 1.5] 참조)
- 이와 같이 아파트의 경우, 공동주택으로서 많은 가구들이 한 구조물에서 거주를 하고 있는 현실임. 따라서 지진 발생 시 공동주택 구조물에 심각한 손상이 발생한다면, 많은 인명적 피해와 막대한 경제적인 손실을 초래할 가능성이 매우 큼



[그림 1.5] 포항 지진으로 인한 S아파트의 피해 현황

(3) 공동주택 수벽 및 날개벽 구조설계 및 시공 관행 문제점

- 아파트와 같은 공동주택에 대한 구조해석 시 수벽 및 날개벽은 비내력벽으로서 전단벽과 같이 횡력저항부재로서 고려하지 않고 제외하여 해석을 수행하고 있는 현실임
- 만약 수벽 및 날개벽을 구조설계 시 횡 저항 부재로서 고려하여 해석을 수행하면, 비내력벽 요소의 배근설계가 이루어지지 않으며 부재에 대한 오류가 계속적으로 발생함
- 하지만, 국내 공동주택에서는 비내력벽을 제외하더라도 상대적으로 벽체량이 많아 전체 구조물에 대한 시스템 수준에서의 층간변위비에 대한 기준은 만족하므로 구조해석 상 큰 문제가 되지 않고 있는 현실임
- 비내력벽의 경우, 시공 시 조적조 등과 같은 공법을 적용하여 건축물의 구조부재와 일체화를 시키지 않았지만, 현재 인건비 및 시공비 증가로 인해 실제 시공현장에서는 수벽 및 날개벽에 최소철근으로 배근하여 전단벽과 일체화시켜 공동으로 콘크리트 타설을 진행함

- 이는 최소배근으로 설계한 수벽과 날개벽 등 비내력벽이 설계시 의도한 바와는 다르게 강성의 크기에 따라 지진하중을 분담하여 큰 균열손상과 부재의 취성파괴를 유발하게 됨. 이러한 점은 이번 2017년 포항지진에서 발생한 내진설계가 이루어진 35층 S아파트에서 많은 동이 비내력벽에 심각한 균열과 손상을 가져오게 되었음

(4) 공동주택 비내력벽 내진설계/시공 문제점을 해결하기 위한 정부지원 필요성

- 현재 포항지진으로 인해 발생한 고층 공동주택 비내력벽의 심각한 균열은 경제적 재산 가치 보존을 위해 입주민들이 신속한 보수/보강만을 바라는 실정임. 현실적으로 그러한 균열과 손상은 외풍과 빗물의 침투로 인해 공동주택의 사용성에 심각한 훼손을 끼치며 구조적으로도 완전한 보수/보강은 기술적으로 어려운 문제임
- 포항지진보다 더 큰 규모의 지진 발생 가능성이 계속 존재한다는 점에서 이번 비내력벽의 균열과 손상은 우리나라 내진설계/시공 기술이 국민의 일반적 내진성능에 대한 기대에 크게 미치지 못한다는 것을 인식하게 됨
- 비내력벽인 수벽 및 날개벽이 전단벽과 공동 설계되고 공동 타설이 설계/시공현장에서 이루어지는 현실은, 지진과 같은 자연재해 발생 시 비내력벽의 전단균열이 전단벽으로 확산될 수 있음. 이는 구조 부재의 손상으로 이어져 구조물 전체의 취약도가 높아짐
- 또한, 날개벽 및 수벽의 최소철근이 전단벽체와 연결되어 있어 지진 발생으로 인한 손상 시 해체가 쉽지 않고, 보수·보강의 어려움으로 경제적으로 비용이 막대하게 소요됨
- 만약 구조설계 및 시공 관행이 해결되지 않는다면, 포항지진과 유사한 지진 발생 시 비내력벽의 전단균열이 전단벽으로 확산되어 아파트의 심각한 피해를 야기할 수 있음
- 따라서, 벽식 아파트의 수벽과 날개벽의 균열하자 방지를 위한 내진설계/시공 Solution 개발은 그간 문제점으로 인식하지 못했던 관행을 해결할 수 있는 수단이며, 국가 내진 정책의 신뢰성 확보를 위해 국가적인 지원이 절실한 상황임

2. 연구수행내용 및 성과

가. 1차 년도 연구개발 목표 및 결과

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2018)	벽식 아파트의 슬롯형과 PC형 비내력벽 시스템의 해석모델 개발	공동주택 포항지진피해 사례 조사 및 비내력벽의 요구 내진성능제시	벽식 아파트 포항지진피 해 사례 조사 및 비내력벽의 요구 내진성능 제시	- 포항시에 위치한 준공된지 6년밖에 되지 않은 OO공동주택에 대해 피해사례를 조사하며 이에 대한 배경 및 원인을 분석 완료함 - 벽식APT의 정밀해석모델을 통해 해당 대지에 위치한 공동주택에서 강성과 강도의 변화에 따른 내력벽과 비내력벽의 위치와 구성에 따른 피해사례를 묘사할 수 있도록 해석모델을 검증함. 이를 통해 특정 위치에 집중된 피해 원인을 분석하고 데이터를 체계화함
		공동주택 구조해석모델 구축 및 정밀내진상세 평가	벽식 아파트 구조해석모 델 구축 및 정밀 내진상세평 가	- 실험연구를 통해 제안될 공동연구를 진행하기 위한 벽식APT 구조해석 모델을 개발함. 이는 횡력저항을 담당하는 구조시스템뿐만 아니라 비내력벽부재에 포함되는 수벽과 날개벽의 모델링을 통해 벽식APT 구조해석 모델을 개발함 - 구조벽시스템의 상세해석모델과 함께 비구조벽 해석모델의 개발과 이를 통한 전체 구조해석모델의 반영은 벽식APT시스템의 지진운동 발생시 동적거동 특성을 명확히 반영할 수 있는 도구를 제시함. 이와 함께 구조시스템과 비구조시스템의 휨강성 및 전단강성의 고려를 통해 정밀내진상세평가를 실시함
	벽식 아파트의 슬롯형과 PC형 비내력벽 시스템 상세개발 및 실험적 손상제어 성능 평가	RC벽체 지진 피해 사례 및 설계 현황 조사	국내·외 RC벽체 지진 피해 사례 조사 및 국내·외 RC벽체 설계기준 비교 분석	- 국내·외 지진으로 인한 RC벽체의 피해 사례에 대하여 파괴 유형별로 분석 완료 - 국내의 경우 2017년 포항지진에 의한 RC벽체의 피해사례를 분석하였으며, 국외의 경우 2010년에 칠레에서 발생한 지진으로 인한 RC벽체의 피해사례를 분석 - IBC2009, ASCE2010, ACI318 등 선진국에서 제시하고 있는 RC벽체의 설계기준을 비교·분석 완료
		PC형 비내력벽 시스템 모듈 및 상세 개발	힌지형 및 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템 모듈 상세 개발	- 인접 구조 부재의 거동에 영향을 미치지 않으며, 비내력벽의 손상을 제어할 수 있는 힌지형 및 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템 모듈 상세를 개발 완료 - 힌지형 PC 비내력벽의 경우 비내력벽의 상·하부에 힌지를 설치하여 모멘트에 영향을 받

				지 않도록 하였으며, 축력에는 일부 하중을 부담할 수 있도록 개발 • 슬라이딩형 PC 비내력벽의 경우 비내력벽의 상·하부에 충분한 이격 및 횡하중에 저항하지 않도록 개발
		PC형 비내력벽 시스템과 구조부재와의 접합상세 개발	힌지형 및 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템과 인접 구조부재와의 접합상세 개발	• 힌지형 PC 비내력벽 시스템은 비내력벽과 상·하부의 연결재를 힌지로 체결하였으며, 힌지와 구조부재 사이는 에폭시 그라우팅과 앵커볼트를 통해 체결이 되도록 개발 • 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템은 비내력벽의 상·하부에 강판을 이용하여 슬라이딩 시스템에 체결하였으며, 슬라이딩 시스템과 구조부재 사이는 힌지와 유사하도록 에폭시 그라우팅과 볼트를 통해 체결이 되도록 개발
	비내력벽 손상 최소화를 위한 구조설계법 개발 및 시공상세 개발	현행 RC비내력벽에 대한 설계관행 및 RC비내력벽 적용 사례 조사 분석	건설사별 공동주택 구조설계지침서 및 구조평면도 분석	• 건설사별 현행 비내력벽 설계 및 시공에 대한 관행 분석과 비내력벽 시공에서의 문제점 분석 • 1m미만 벽체는 횡력저항요소에서 제외하고 있음 (중력하중만 고려) • 일부 화장실벽체 비구조 RC시공

나. 1차년도 연도 연구 결과 내용

■주관연구기관: 세종대학교

1. 공동주택 포항지진피해 사례 조사 및 비내력벽의 요구 내진성능제시

1.1 포항 지진의 개요

최근 발생한 포항지진(규모 5.4)의 경우 국내 지진계측 이래로 가장 많은 인명피해 및 구조물의 피해가 발생하였으며, 특히, 많은 가구가 거주하고 있는 아파트에서도 피해가 다수 발생하였다. 흥해읍의 한 벽식 아파트는 벽체이격, 접합부 파괴 및 비내력벽의 전단균열이 발생함에 따라 더 이상 거주하지 못할 만큼의 큰 피해가 발생하였을 뿐만 아니라 지진 피해가 발생한 모든 아파트에서 비내력벽의 균열이 다수 발생하여 사회적 경제적 충격을 가져다 주었다.

지진으로 인한 대부분의 아파트 피해는 비내력벽에 대한 균열 발생으로 인명피해까지는 발생하지 않았지만, 비내력벽에 대한 높은 보수비용이 발생하였으며, 육안으로 확인되는 큰 균열로 인한 거주민의 심리적 불안감을 초래하였다.



(A) D아파트



(B) S아파트



(C) K아파트



(D) O주택

[그림 2.1] 포항지진으로 인한 공동주택의 피해 사례

1.2 S아파트 피해사례

포항 S아파트는 현재의 건축구조기준에 따른 내진설계가 적용되어 2014년에 준공되었다. 이 아파트는 2017년 11월 15일에 발생한 포항지진 진앙(36.10°N, 129.37°E)으로부터 2.7km 떨어져있다. 포항지진으로 인해 3개동(106동, 109동, 110동)에서 저층부터 고층까지의 수벽 및 날개벽의 균열과 탈락이 심각하게 발생되었으며, 일부 내력벽에서도 전단균열이 다수 발견되었다. 비내력벽에 대한 균열 발생으로 인명피해까지는 발생하지 않았지만, 비내력벽에 대한 높은 보수비용이 발생하였으며, 육안으로 확인되는 큰 균열로 인한 거주민의 심리적 불안감을 초래하였다.



(A) 피해 전 외관



(B) 피해 후 외관



(C) 평면도

[그림 2.2] 포항 지진으로 인한 S아파트의 피해 현황

1.3 S아파트 피해 원인

아파트와 같은 공동주택에 대한 구조해석 시 수벽 및 날개벽은 비내력벽으로서 전단벽과 같이 횡력저항부재로서 고려하지 않고 존재를 고려하지 않고 구조해석을 수행하고 있는 현실이다. 그러나 실제 시공현장에서는 비내력벽의 경우 시공의 편리성과 공기 단축을 위한 목적으로 수벽 및 날개벽에 최소철근으로 배근하여 전단벽과 일체화시켜 동일하게 콘크리트 타설을 진행한다. 이는 최소배근으로 콘크리트벽으로 시공됨에 따라 수벽과 날개벽 등 비내력벽이 설계시 의도한 바와는 다르게 일정 정도 이상의 강성을 가지게 되고 지진하중 발생시 내력을 분담하여 예상하지 못한 큰 균열손상과 부재의 취성파괴를 유발하게 된다.

이러한 현실조건으로 인해 이번 2017년 포항지진에서 내진설계가 이루어진 비교적 최신 건축물이라 할 수 있는 35층 S아파트에서 많은 동이 비내력벽과 수벽에 심각한 균열과 손상을 가져오게 되었다.

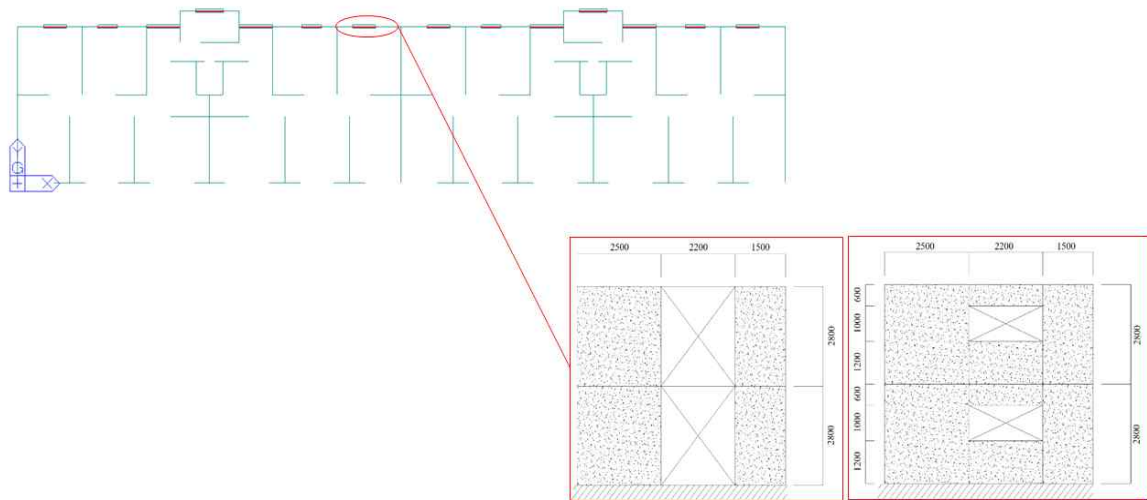
2. 공동주택 구조해석모델 구축 및 정밀내진상세평가

아파트와 같은 공동주택에 대한 구조해석 시 수벽 및 날개벽은 비내력벽으로서 전단벽과 같이 횡력저항부재로서 고려하지 않고 제외하여 해석을 수행하고 있다. 만약 수벽 및 날개벽을 구조설계 시 횡력저항 부재로서 고려하여 해석을 수행하면, 비내력벽 요소에 배근설계가 어려우며 부재에 대한 오류가 계속적으로 발생한다. 하지만, 국내 공동주택에서는 비내력벽을 제외하더라도 상대적으로 벽체량이 많아 전체 구조물에 대한 시스템 수준에서의 층간변위비에 대한 기준은 만족하므로 구조해석상 큰 문제가 되지 않고 있는 현실이다.

따라서 본 연구진은 구조해석모델 구축과 정밀내진상세평가를 위하여 비내력벽의 유무에 따른 예제 모델을 통하여 횡력저항지지에 어떠한 차이가 있는지 1차년도 연구를 진행하였다. 연구방법으로는 국내 마이다스 아יתי사에서 개발한 건축 구조해석 상용소프트웨어인 Midas Gen 2018 R1 와 국외 CSI사에서 개발한 성능설계 및 유한요소해석 프로그램인 Perform 3D를 이용하여 선형정적해석과 비선형정적해석을 진행하였다. 또한 Ansys유한요소해석을 통해 슬롯을 둔 비내력벽에서의 변형상태를 검증할 수 있는 해석모델을 개발하였으며 점차적으로 이를 통해 대규모스케일의 실험수행 전과 후의 검증을 하는데 적용할 예정이다. 본 연구에서 검증을 위해 예제모델로는 21층 공동주택 모델, 2층-1경간 요소모델, 2층-2코어(4세대를 포함한 아파트 평면) 모델이 고려되었다.

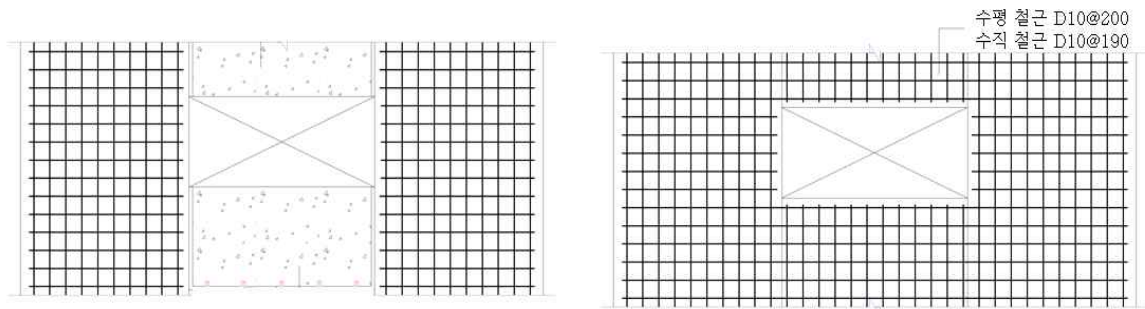
2.1 구조해석 모델 구축 - 2층 1경간 해석 모델

구조해석 모델 구축에 있어 비내력벽에 의한 횡력저항 효과에 대한 검증을 위해 아래와 같은 예제모델을 통하여 사전연구를 진행하였다. 예제 모델의 평면도와 입면도는 [그림 2.3]에 나타내었으며 2층 1경간 LH아파트의 내력벽-철근콘크리트 구조이다.



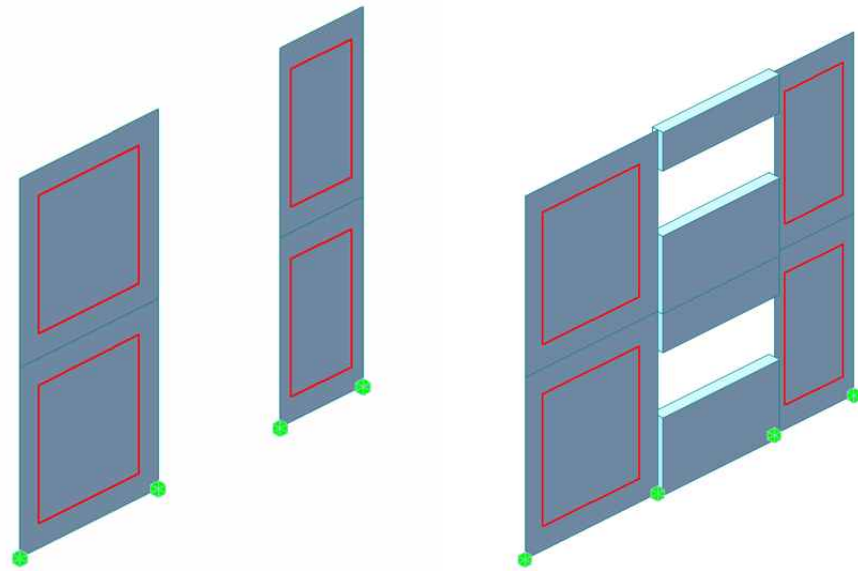
(a) LH 기본 아파트 평면도
[그림 2.3] 2층 1경간 요소모델 예제

비내력벽을 고려하지 않은 모델의 수평 철근량은 내력벽 - D10철근 14개, 비내력벽 - D10철근 9개로 계산되었으며 철근상세는 아래 [그림 2.4]에 나타내었다. [그림 2.4]의 (a) 는 실제 구조설계회사에서 벽식구조에서 모델링하는 기법과 동일하게 나타내었고, (b)는 실제 시공회사에서 벽식구조를 시공하는 것을 나타내었다. 비내력벽의 스티럽은 D10@ 200으로 모델링하였다. 또한 비내력벽을 고려한 모델을 with non-bearing wall로 약어 W/ NBW, 비내력벽을 고려하지 않은 모델을 without non-bearing wall 로 약어 W/O NBW로 표기하였다.



(a) W/O NBW 철근 상세
[그림 2.4] 구조해석 요소모델의 철근상세

비내력벽과 내력벽의 벽두께는 200mm 로 모델링하였으며, 구조해석 모델링은 [그림 2.5]에 나타내었고, FEMA 곡선은 Midas gen 2018 R1에서 제공하는 자동옵션 기능을 사용하였다. 또한 비내력벽의 모델링 방법은 보 요소에 양단 Fixed-Fixed Coupling beam 으로 모델링 하였다.



(a) W/O NBW 요소모델링

(b) W/ NBW 요소모델링

[그림 2.5] 구조해석 요소모델링

선형 정적 해석을 통하여 본 요소모델의 자중을 비교할 수 있었고, 아래 표에 각 층별 자중을 나타냈다.

[표 2.1] W/O NBW 자중 해석 결과

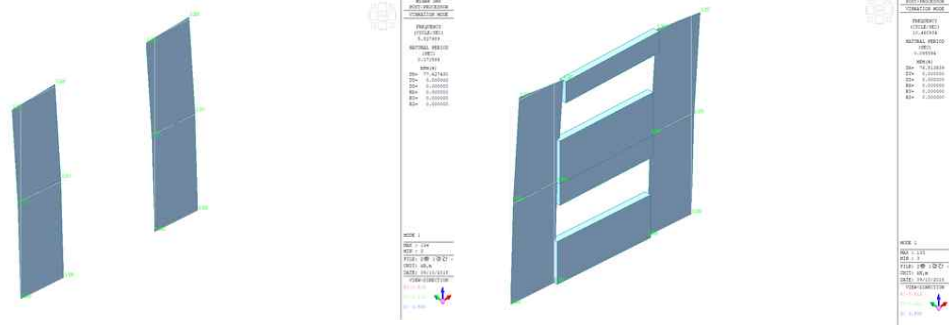
	비내력벽	내력벽	계
Roof	0	26.4	26.4
2F	0	52.7	52.7
1F	0	26.4	26.4
계	0	105.5	105.5

[표 2.2] W/ NBW 자중 해석 결과

	비내력벽	내력벽	계
Roof	6.2	26.4	32.6
2F	18.6	52.7	71.3
1F	12.4	26.4	38.8
계	37.2	105.5	142.7

W/O NBW 2층 1경간 모델의 경우 비내력벽을 전혀 모델링을 하지 않았기 때문에 해석결과와 같이 비내력벽의 자중은 없는 것으로 나타났으며, 105.5kN으로 계산되었다.

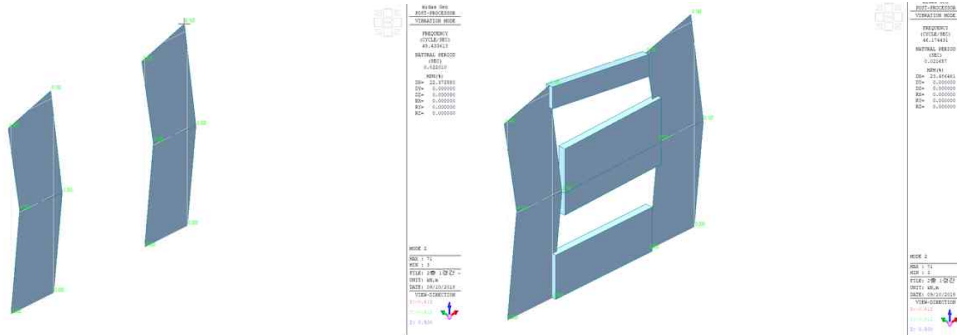
W/ NBW 2층 1경간 모델의 경우 [표 2.2]에 나타난 해석결과와 같이 비내력벽을 모델링을 하였기 때문에 해석결과 내력벽의 자중은 37.2 kN으로 나타났으며, 총자중의 값은 142.7kN으로 36.3% 증가한 값이 나타났다.



(a) W/O NBW 요소모델 1차모드 주기 (b) W/ NBW 요소모델 1차모드 주기 0.

0.171 초 09 초
[그림 2.6] 구조해석 요소모델의 고유주기 해석 결과

고유모드 해석결과 [그림 2.6]에 나타내었고, 비내력벽이 고려된 모델에서 강성의 증가로 진동수는 90% 증가한 것으로 나타났고, 주기는 W/O NBW 요소모델 0.171초 이고, W/ NBW 요소모델 0.09초로 나타났다.



(a) W/O NBW 요소모델 2차모드 주기 (b) W/ NBW 요소모델 2차모드 주기 0.

0.22 초 21 초
[그림 2.7] 구조해석 요소모델의 2차모드 주기 해석 결과

2차모드 해석결과 [그림 2.7]에 나타내었고, 진동수는 조금 증가한 것으로 나타났고, 주기는 W/O NBW 요소모델 0.22초 이고, W/ NBW 요소모델 0.21초로 나타났으며 유사한 결과를 보였다. 비내력벽 요소모델의 고유치해석 강성추정 결과 비내력벽을 고려한 모델의 경우 비내력벽을 고려하지 않은 모델에 비하여 주기는 90% 가 감소하였고, 선형정적해석 결과 자중은 36.3% 증가하였다. 아래의 식을 고려했을 때 강성추정결과 비내력벽을 가진 하나의 벽체 모듈의 강성은 4.2 배정도 증가 한 것으로 나타났다.

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{식 (1)}$$

$$k = w^2 \times m = (2\pi f)^2 \times m \quad \text{식 (2)}$$

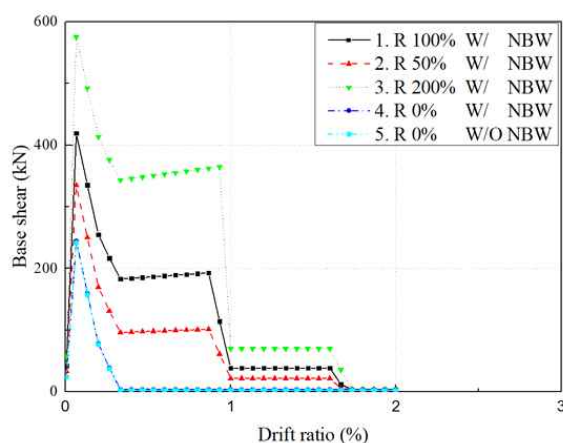
$$k_{(w/)} = 4\pi^2 \times (1.9f)^2 \times 1.36m = 4.2k_{(w/o)} \quad \text{식 (3)}$$

또한 철근량에 따른 비내력벽의 횡력저항을 검증하기 위해 5개의 예제모델을 선정하여 비선형정적해석을 수행하였다. 예제 1번은 위에 언급한 철근 상세로 진행하였고, 예제 2번은 철근량을 50%로 감소하여 진행하였으며, 스티럽 또한 마찬가지로 간격을 2배로 하여 해석을 수행하였다. 예제 3번은 철근량을 200%로 증가시켜 진행하였으며, 스티럽 또한 마찬가지로 간격을 0.5배로 하여 해석을 수행하였다. 예제 4번은 무근 콘크리트로 철근량을 0%로 진행하여 해석을 수행하였지만 Midas 프로그램 특성상 최소한의 스티럽 간격이 필요하여 D6@ 450으로 진행하였다. 예제 5번 또한 위에서 언급한 비내력벽을 고려하지 않은 모델로 진행하였고, 그 내용은 [표 2.3]에 간략하게 나타냈다.

[표 2.3] 철근량에 따른 비내력벽 예제 모델 개요

No.	용어	모델 개요(비내력벽 철근량)	NOTE
1	R100-w NBW	철근량100%	기존 요소모델
2	R50-w NBW	철근량50%	D10 철근 3개@400
3	R200-w NBW	철근량200%	D10 철근 12개@100
4	R0-w NBW	철근량0%	무근 콘크리트-최소철근 스티럽 간격 D6@450
5	R0-w/o NBW	철근량0%	비내력벽 미포함

요소모델을 통한 철근량에 따른 최대 밀면전단력은 다음 [그림 2.8]에 나타내었으며 비선형 정적해석 결과 최대 밀면 전단력은 비내력벽의 수평 철근량에 대하여 매우 연관이 있음을 나타냈고, 그 결과는 [표 2.4]에 간략하게 나타냈다.



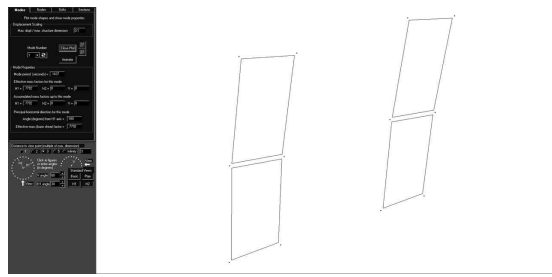
[그림 2.8] 철근량에 따른 비선형 정적해석

[표 2.4] 철근량에 따른 비내력벽 존재에 따른 비선형 정적해석

Example #	최대 밀면전단력(kN)
Example 1	419.0
Example 2	334.7
Example 3	575.2
Example 4	244.3
Example 5	241.8

2.2 구조해석 모델 구축 - 2층 1경간 해석 모델 퍼폼 3D

구조해석 모델 구축에 있어 기본거동파악을 위해 아래와 같은 예제모델을 통하여 사전 연구를 진행하였다. 예제 모델의 평면도와 입면도는 [그림 2.9]에 나타내었으며 2층 1경간 LH아파트의 내력벽-철근콘크리트 구조이다.



(a) W/O NBW 요소모델

- 1차모드 주기 0.144 초



(b) W/O NBW 요소모델

- 2차모드 주기 0.201 초

[그림 2.11] W/O NBW 요소모델의 고유주기 해석 결과

고유모드 해석결과 [그림 2.12]에 나타내었고, W/ NBW 요소모델의 1차 주기는 0.068초 이고, 2차 주기는 0.017초로 나타났다. 2.1 2층 1경간 Midas Gen과 1차 주기의 오차율은 30%이며, 2차 주기의 오차율은 10%이다.



(a) W/ NBW 요소모델

- 1차모드 주기 0.068 초



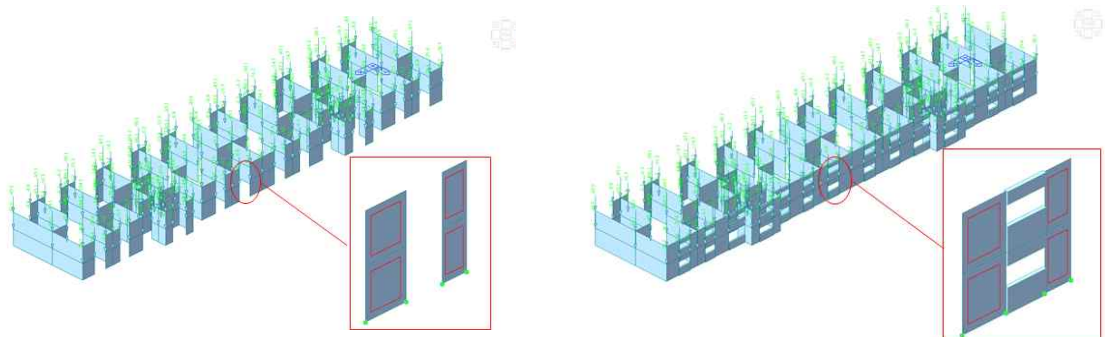
(b) W/ NBW 요소모델

- 2차모드 주기 0.017 초

[그림 2.12] W/ NBW 요소모델의 고유주기 해석 결과

2.3 구조해석 모델 구축 - 2층 2코어 4세대 해석 모델

2층 1경간 예제모델 결과를 바탕으로 비내력벽에 대한 모델링 기법과 횡력 저항 능력을 확인한뒤 2층 2코어 4세대 해석모델링을 진행하였고 [그림 2.13]에 모델링을 나타내었다. (a)는 일반 구조설계 회사에서 모델링하는 기법을 사용하여, Rigid link를 이용하여 다이아 프램을 걸었고, (b)는 그 모델링의 한층 벽면에 비내력벽을 양단 Fixed-Fixed Coupling beam을 걸어서 진행하였다.



(a)W/O NBW 예제 (b)W/ NBW 예제
[그림 2.13] 2층 2코어 4세대 비선형정적해석 모델링 - Midas Gen

선형 정적 해석을 통하여 본 요소모델의 자중을 비교할 수 있었고, 아래 표에 각 층별 자중을 나타냈다.

W/O NBW 2층 4세대 모델의 경우 비내력벽을 전혀 모델링을 하지 않았기 때문에 해석결과와 같이 비내력벽의 자중은 없는 것으로 나타났으며, 총 자중은 8,260kN 으로 나타났다.

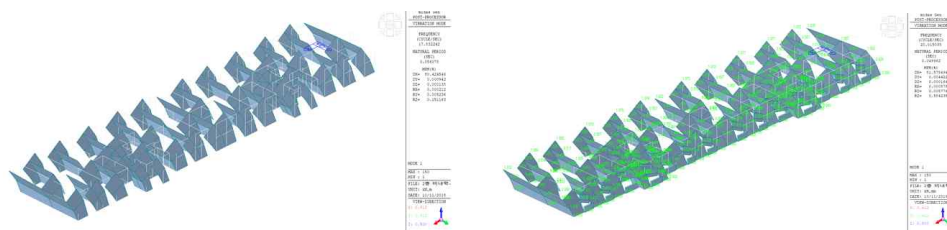
W/ NBW 2층 1경간 모델의 경우 [표 2.5]에 나타난 해석 결과와 같이 비내력벽을 모델링을 하였기 때문에 해석결과 비내력벽의 자중은 886kN으로 나타났으며, 총자중의 값은 9,082kN으로 9.9% 증가한 값이 나타났다.

[표 2.5] W/O NBW 2층 2코어 4세대 모델
자중 해석 결과

	비내력벽	내력벽	계
Roof	0	2,070	2,070
2F	0	4,130	4,130
1F	0	2,070	2,070
계	0	8,260	8,260

[표 2.6] W/ NBW 2층 2코어 4세대 모델
자중 해석 결과

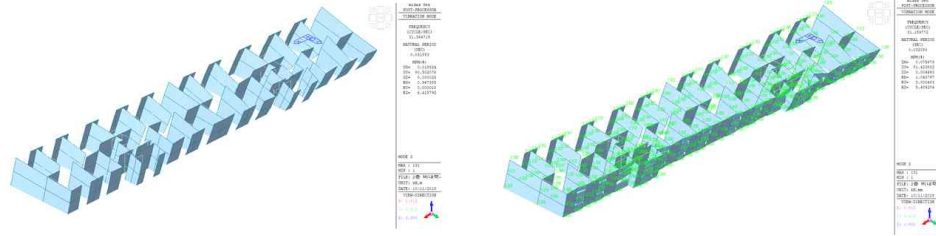
	비내력벽	내력벽	계
Roof	147	2,070	2,217
2F	426	4,130	4,556
1F	239	2,070	2,309
계	866	8,260	9,082



(a) W/O NBW 2층모델 1차모드 주기 0.056 초 (b) W/ NBW 2층모델 1차모드 주기 0.049 초

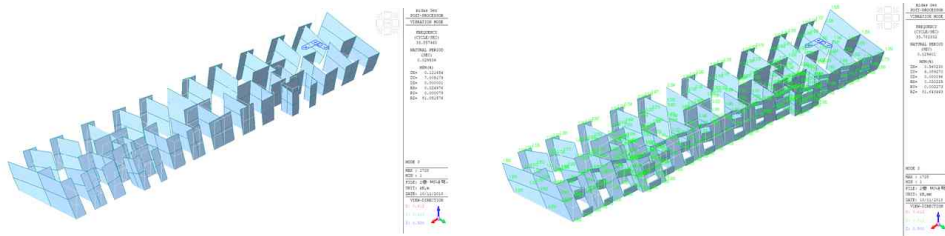
[그림 2.14] 구조해석 모델의 고유주기 해석 결과

고유모드 해석결과는 [그림 2.14]에 나타내었고, 진동수는 14.3% 증가한 것으로 나타났다, 주기는 W/O NBW 2층모델 0.056초 이고, W/ NBW 2층모델 0.049초로 나타났다.



(a) W/O NBW 2층모델 2차모드 주기 0.032 초 (b) W/ NBW 2층모델 2차모드 주기 0.032 초
[그림 2.15] 구조해석 요소모델의 2차모드 주기 해석 결과

2차모드 해석결과는 [그림 2.15]에 나타내었고, 진동수는 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이는 Y방향에 대한 진동수이기 때문에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다. 주기는 W/O NBW 2층모델 0.032초 이고, W/ NBW 2층모델 0.032초로 근사한 것으로 나타났다.



(a) W/O NBW 2층모델 3차모드 주기 0.029 초 (b) W/ NBW 2층모델 3차모드 주기 0.030 초
[그림 2.16] 구조해석 요소모델의 3차모드 주기 해석 결과

3차모드 해석결과는 [그림 2.16]에 나타내었고, 3차모드 또한 진동수가 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 주기는 W/O NBW 2층모델 0.029초 이고, W/ NBW 2층모델 0.030초로 근사한 것으로 나타났다. 이에 따른 2층 2코어 예제모델의 고유치해석 통한 강성추정 결과 비내력벽을 고려한 모델의 경우 비내력벽을 고려하지 않은 모델에 비하여 주기는 12.5% 가 증가하였고, 선형정적해석 결과 자중은 9.9% 증가하였다. 아래 식을 이용하여 강성추정결과 비내력벽을 가진 2층의 강성은 43.6% 정도 증가 한 것으로 나타났다.

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{식 (4)}$$

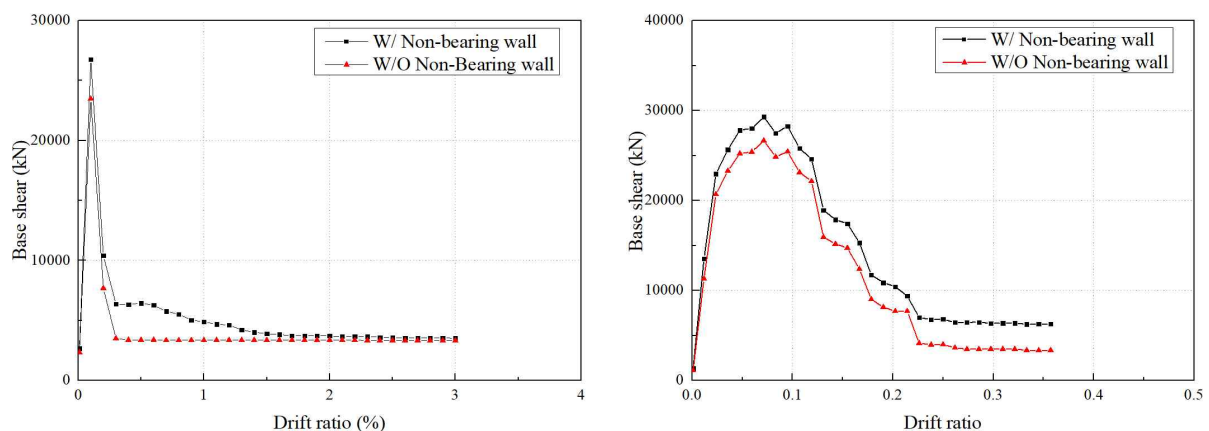
$$k = w^2 \times m = (2\pi f)^2 \times m \quad \text{식 (5)}$$

$$k_{(w/)} = 4\pi^2 \times (1.143f)^2 \times 1.099m = 1.436k_{(w/o)} \quad \text{식 (6)}$$

건축구조기준(KBC2016)에 따르면 비선형정적해석(푸쉬오버 해석, Pushover analysis)은 사용성에 따른 철근 콘크리트 건물의 경우 2%의 층간 허용 변위를 갖는다. 본 예제 모델의 경우 2층 의 높이는 5,600mm 이기 때문에 2%인 112mm의 층간 허용 변위를 가지지만 본

내진상세평가는 연구개발단계이기 때문에 3%인 168mm로 진행을 하였다. 내진상세평가를 위한 푸쉬오버 응답 스펙트럼은 KBC2016을 사용하였고, FEMA 곡선은 Midas에서 제공하는 자동옵션 기능을 사용하였으며, 골조의 철근 상세로는 LH 벽식 아파트의 구조평면도면을 이용하여 내력벽은 수평 배근 D10@200, 수직 배근 D10@190을 이용하였고, 비내력벽은 구조평면도면이 없어 구조엔지니어의 자문을 받아 D10철근 상하 3개씩 그리고 스티럽을 D10@200 으로 설계하였다. 비내력벽의 모델링 방법은 양단 고정단 Coupling beam 방식을 이용하여 진행하였다.

비선형 정적해석결과 최대 밀면전단력은 비내력벽 포함 예제가 29,302.2 kN 으로 나타났고, 비내력벽 미포함 예제가 26,664.3 kN 으로 9.9 %의 강성 증대효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 비교적 빠른 2단계에서 항복을 했기 때문에 0.36%의 허용변위인 20mm를 30 단계에 걸쳐서 다시 비선형정적해석을 수행하여 비내력벽 유무에 따른 차이를 비교 분석하였으며, 그 결과는 [그림 2.17]에 나타내었다. 비선형정적해석에서 2단계에서 항복한 이유는 평면은 길이x방향으로 길지만 높이는 2층으로 상당히 형상비가 작기 때문에 밀면 전단력은 크지만 최대강도에 도달하면 순간적으로 취성파괴가 발생하여 급작스런 강성, 강도의 감소와 불안정성을 가져오는 것으로 조사되었다.



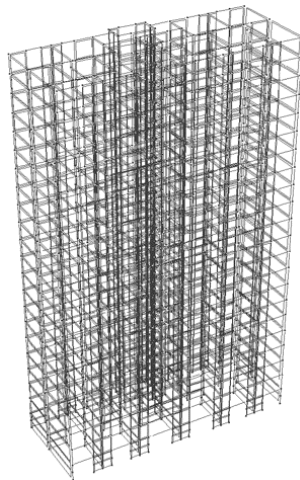
(a)밀면전단력 - Roof층 변위(4%까지)

(b)밀면전단력 - Roof층 변위(0.5%까지)

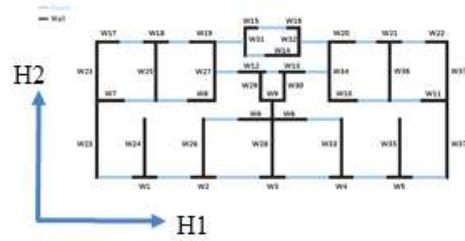
[그림 2.17] 2층 2코어 4세대 예제모델의 비선형정적해석 결과

2.4 22층 공동주택의 해석모델과 내진성능평가

성능기반 내진설계 모델 건물과 현행 내진설계에 따른 건물의 성능을 평가, 비교하였다. 대상건축물은 22층의 전단벽과 연결보로 구성된 공동주택 건축물이며 연결보, 보 및 전단벽에 대한 물성치는 FEMA의 이력곡선 값을 통한 요소 모델링을 수행하였다. 보와 벽의 부재에 고정하중과 활하중을 부여하였다. Modal 해석을 통한 부재와 시스템의 동적특성과 거동 조사, 모델링 검증을 수행하였다.

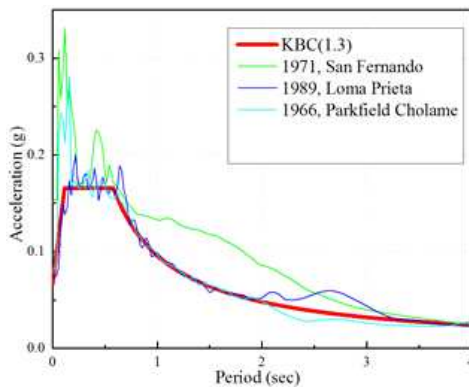


(a) 22층 공동주택 건축물

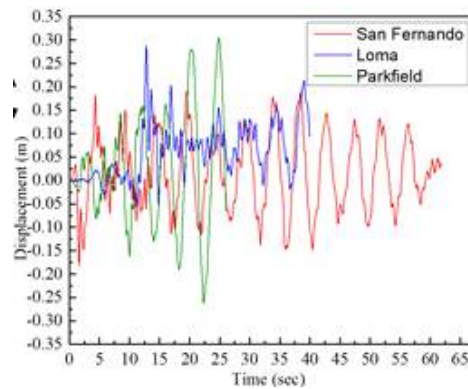


(b) 22층 공동주택 평면도

[그림 2.18] 구조해석 요소모델링

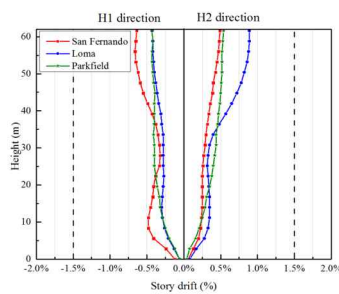


[그림 2.19] 설계응답스펙트럼

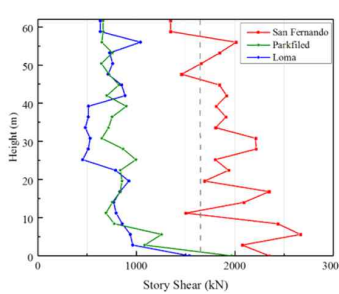


[그림 2.20] 각 절점의 층간변위

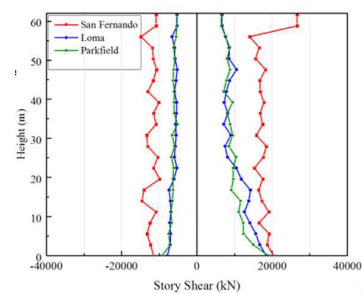
KBC설계스펙트럼에 따른 지반운동을 통해 건축물의 비선형시간이력 해석 수행하였고 각 절점에 대한 가속도, 층간변위, 압축변형률을 대상으로 동적 특성을 조사하였다. 이를 통해 주어진 성능목표에 대한 만족여부를 성능설계를 통해서 확인, 검증하였다.



[그림 2.21] 층간 변위



[그림 2.22] 벽체 전단력



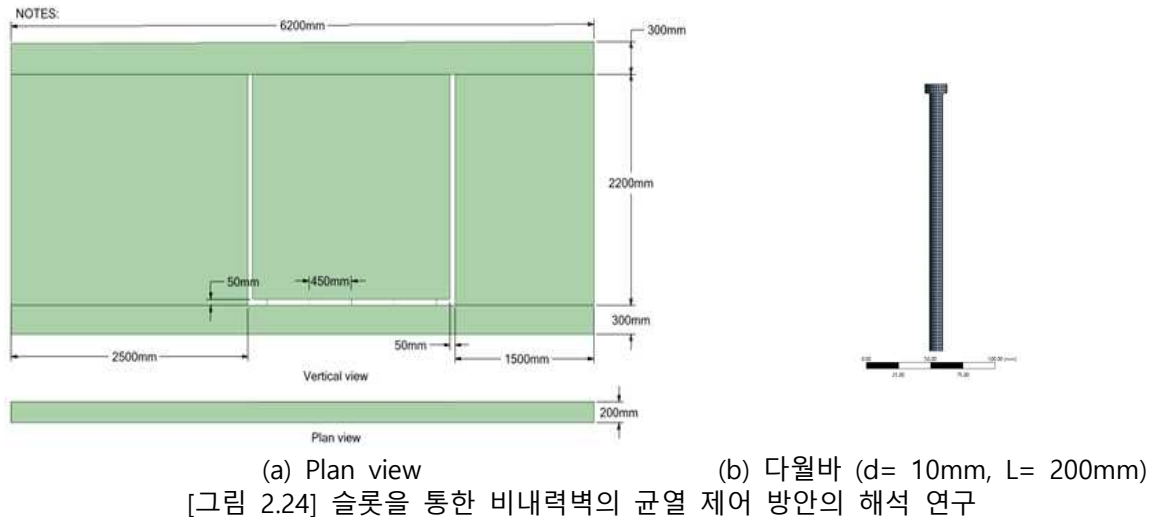
[그림 2.23] 층 전단력

비선형시간이력해석을 통해 예상되는 지진위험도에 대해 지진요구값과 성능값이 검토가 이루어졌으며, 22층 공동주택건축물에 대해 층간변위, 벽체 전단력 및 층 전단력의 검토를 통해 성능기반 내진설계 모델 건물의 성능을 평가, 분석하였다.

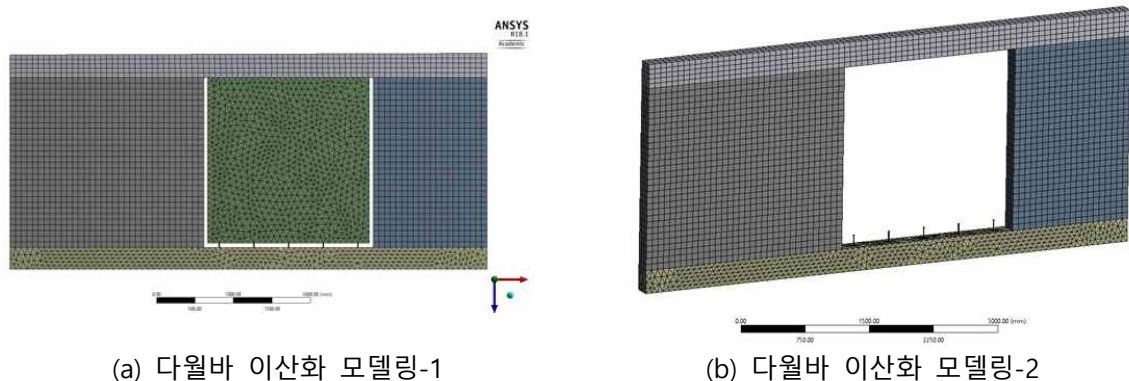
각 층에 대한 H1 및 H2 방향의 층간 변위를 3가지 지진 운동에 비교하여 [그림 2.21]에 나타냈다. Wall 6에 대한 H1 및 H2 방향의 최대 전단력을 3가지 지진 운동에 비교하여 [그림 2.22]에 나타냈다. 각 층에 대한 H1 및 H2 방향의 최대 전단력을 3가지 지진 운동에 대해 평균값을 산출하여 비교하였고 이를 [그림 2.23]에 나타냈다.

2.5 Ansys FEM 해석을 통한 비내력벽 슬롯존재에 따른 균열제어 연구

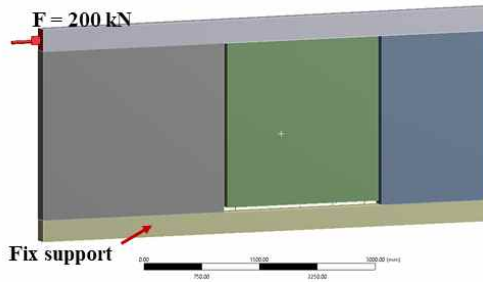
본 연구진이 1차년도 결과물로 제안하는 비내력벽의 균열방지 대책안은 다음 [그림 2.24]와 같다. 먼저 비내력벽을 내력벽과 분리 시키기 위하여 내력벽과 50mm의 이격을 두고 설치하며 상부 슬래브와는 일체화시켰다. 이는 횡력의 존재에 따른 균열을 최소화하며 중력하중에 대해 지지하기 위함이다. 하부 슬래브와는 다월바를 통하여 앵커를 정착시켜 횡하중 작용시 비내력벽은 횡력에 저항하지 않고 다월바의 항복을 통하여 지진에너지를 소산하고 이를 통해 비내력벽의 균열을 방지한다. 이러한 시공안에 대한 균열 발생여부를 Ansys를 통한 유한요소해석을 통해 진행하였다.



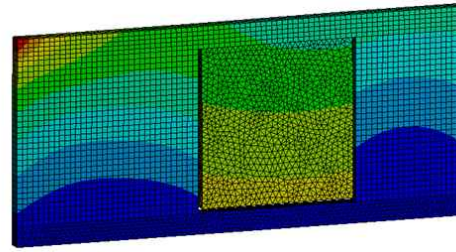
본 제안의 유한요소해석을 위하여 [그림 2.24]와 [그림 2.25]에 각각 전체 모델링과 다월바 모델링을 3차원 이산화 매쉬로 나타내었다.



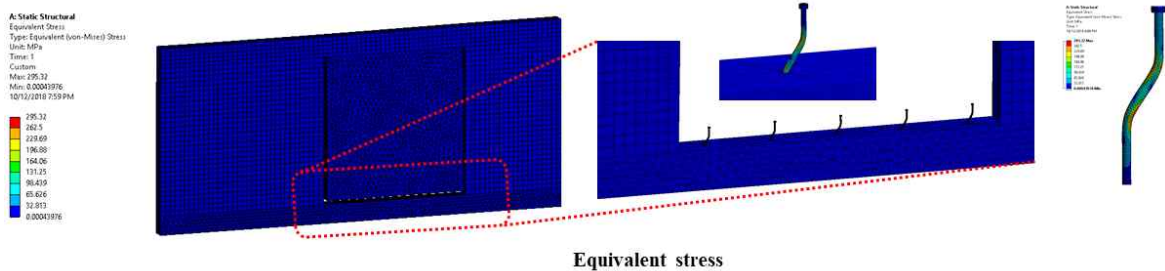
위 유한요소해석의 경계 조건은 아래 [그림 2.26]과 같고, 변위는 [그림 2.27]에 나타내었고, 상당응력은 [그림 2.28]에 나타내었다.



[그림 2.26] 3D Finite Mesh



[그림 2.27] 비내력벽 모델링의 변위



Equivalent stress

[그림 2.28] 다월바의 상당응력

경계조건은 아래 하부슬래브를 고정단, 상부슬래브를 자유단으로 설정하여 200kN의 집중하중을 순수전단을 주어 해석하였다. 그 결과 최대 변위는 집중하중을 받는 위치에 1.05mm 비내력벽의 변위는 상부 약 0.5mm, 하부 약 0.7mm 의 국부적 변위가 나타났다. 또한 다월바의 전단 거동으로는 295MPa의 응력을 받아 지진에너지를 소산하며 국부적으로 다월바에서 집중적으로 전단항복을 하여 의도된 바를 해석을 통해 확인할 수 있었다. 본 연구진은 위 해석 결과를 바탕으로 특허를 진행할 예정이고, 또한 2차년도에 FEM모델링을 발전시켜 예정된 대규모 스케일의 비내력벽 벽체 실험에 대해 사전 해석과 사후해석을 통해 실험결과를 검증하고 분석할 예정이다.

2.6 비내력벽 균열 제어 및 방지를 위한 특허 출원

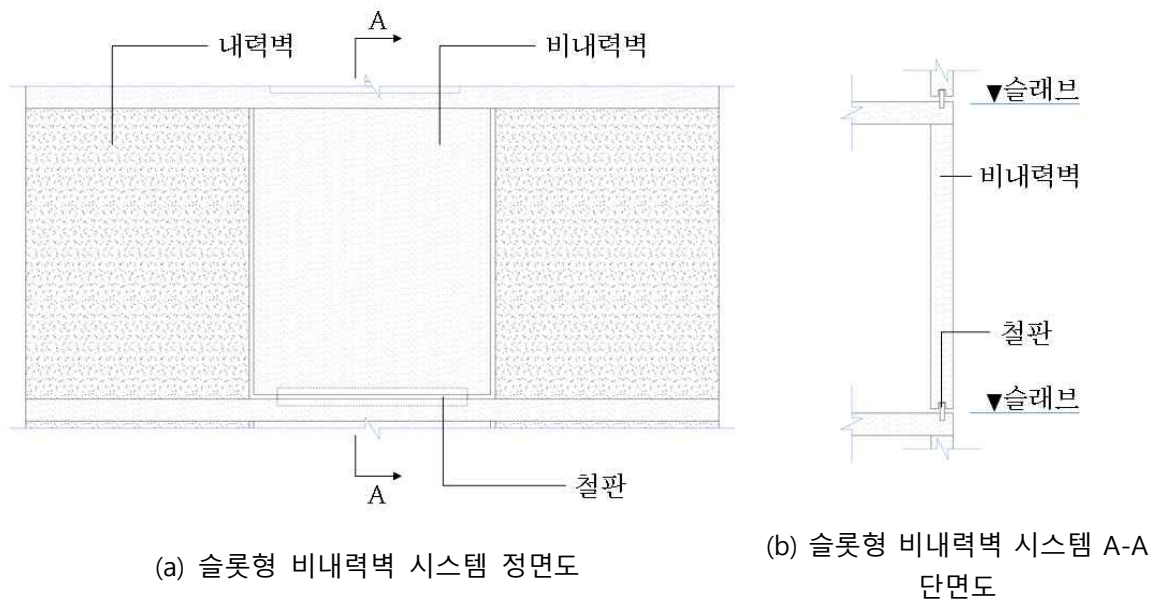
본 발명은 내진 시공이 적용된 비내력벽 시스템에 관한 것으로, 지진 재해에 대한 균열 및 손상을 방지할 수 있는 축력 힌지부를 구비한 내진 시공이 적용된 비내력벽 시스템에 관한 것이다.

상기 축력 힌지부는 상기 비내력벽 길이보다 짧은 길이를 가지는 철판으로 한다. 하부 슬래브의 철근 배근 시 슬래브 상면에 철판의 하부가 매립될 수 있도록 철판을 설치·고정한 후 콘크리트를 타설하여 철판을 매립한다. 그 후 상기 비내력벽 타설시 비내력벽 하단부에 철판의 상부가 끼워지도록 거푸집을 설치하여 타설한다. 비내력벽 타설 시에는 양 옆의 내력벽과 비내력벽 사이, 하부 슬래브와 비내력벽 사이에 유격이 형성되도록 이격재를 끼운 뒤 콘크리트 타설한다. 그리고 비내력벽은 상부 슬래브와 함께 타설되어 일체화 시킨다. 비

내력벽과 하부 슬래브 사이는 철판으로만 연결되어 하중을 받도록 한다.

본발명의 내진 시공이 적용된 비내력벽 시스템은, 철판매립을 통해 선택적 항복위치를 지정함으로써 수벽 및 날개벽과 같은 비내력벽이 의도하지 않은 힘을 받지 않도록 하여 비내력벽의 내진성능 확보, 지진 피해저감, 균열하자 및 탈락 방지 등 비내력벽이 피해로 인한 구조물의 구조요소 손상을 방지할 수 있다.

또한, 본 발명의 내진 시공이 적용된 비내력벽 시스템은, 현재 아파트 비내력벽의 문제점을 해결함으로써 효율적이고 경제적이며 국민이 기대하는 내진성능을 확보할 수 있는 아파트 비내력벽의 대체 시스템을 제공할 수 있다. 자세한 내용은 부록에 포함되어 있다.



[그림 2.29] 비내력벽 균열 제어 및 손상 방지를 위한 슬롯형 비내력벽 시스템 도면

■공동연구기관: 계명대학교

■계명대 연구목표 : 수벽과 날개벽 대체시스템 모듈 및 상세 개발

1.1 연구개요

- 공동연구기관인 계명대학교에서는 2017년 포항지진에서 드러난 벽식 아파트의 수벽과 날개벽 같은 비내력벽의 균열하자 및 탈락 등 재발 방지를 위한 내진설계/시공 Solution 개발을 위하여, 비내력벽 대체시스템의 상세개발 및 실험적 손상제어 성능평가를 수행하는 것을 목표로 하고 있음. 이에 1차년도에서는 “수벽과 날개벽 대체시스템 모듈 및 상세 개발”을 세부연구 목표로 하며, 이를 달성하기 위한 세부 연구내용은 다음과 같음.

- RC 벽체 지진 피해 사례 및 설계 현황 조사
- PC형 비내력벽 시스템 모듈 및 상세 개발
- PC형 비내력벽 시스템과 구조부재와의 접합상세 개발

1.2 국내·외 지진 피해 사례 및 설계 현황 조사

1.2.1 국내 지진 피해 사례 조사

- 국내 지진 피해 사례 조사는 가장 최근에 발생하였으며, 국내 지진 계측 이래 가장 많은 구조물의 피해를 유발한 2017년 포항지진으로 인한 피해 사례를 분석하였음

- 2017년 포항지진은 진앙으로부터 서쪽으로 3km 이내에 위치한 포항시 북구의 7개 공동주택에 대하여 많은 피해를 유발하였으며, 이러한 인구밀집도가 높은 공동주택은 최근 주거 단위가 높은 비율로 증가됨에 따라 지진으로 인한 피해 발생 시 많은 인명피해 및 경제적 손실을 야기할 수 있음

1) 지반에 의한 구조물의 전도 사례

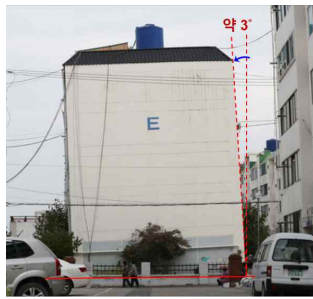
- 포항 지역은 주로 퇴적층이 분포되어 있어 다른 지역에 비해 상대적으로 지반이 약함

- 이러한 지반 특성과 함께 기초 부실로 인해 [그림 2.31]에서 보이는 바와 같이 구조물 전체가 전도되는 현상이 발생하였으며, 인접 동과 이격이 발생하였음

2) 피복탈락에 의한 철근 노출 및 시공줄눈 균열에 대한 사례

- [그림 2.31]에서는 지진으로 인한 피복탈락으로 철근이 노출된 사례로서 장기간 방치하게 되면 외기에 의한 철근의 부식으로 2차적인 재해에 대하여 큰 피해가 야기 될 수 있음

- 또한 시공줄눈(Construction Joint)에 부적절한 수직철근의 배근으로 인하여, 시공줄눈을 따라 균열이 발생하였음



(A) 구조물의 전도



(B) 벽체 이격



(A) 피복탈락에 의한
철근 노출



(B) 벽체 이격

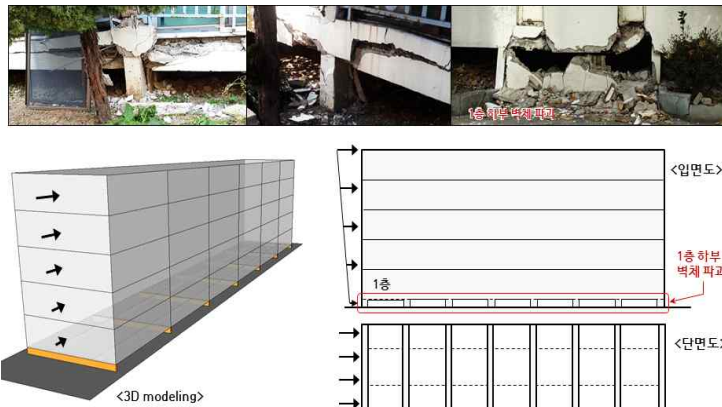
[그림 2.30] 지반에 의한 구조물의 전도 사례

[그림 2.31] 피복탈락에 의한 철근 노출 및
시공줄눈 균열에 대한 사례

3) 기둥 단주현상으로 인한 구조물의 피해 사례

- [그림 2.32]에서 보이는 바와 같이 내진설계가 미적용된 저층 공동주택의 경우 지상층의 내력벽이 하부 단주에 의하여 지지되는 필로티 구조형식으로 되어있음에 따라 지상층 구조가 필로티 기둥에 의해서만 지지되고 있는 상황임

- 따라서, 이와 같은 구조적인 취약성으로 인해 지진발생 시 필로티 기둥에 단주현상에 의하여 전단파괴가 발생하였음



[그림 2.32] 저층 공동주택 피해원인

- [그림 2.33]에서 보이는 바와 같이 기둥 단주현상으로 인하여 기둥의 전단파괴 및 수벽-슬래브 접합부의 파괴가 일어남



(a) 수벽-슬래브
접합부 파괴



(b) 조적채움벽 전단균열
및 미장 탈락



(c) 전단파괴



(d) 허리벽으로 인한
전단 파괴

[그림 2.33] 기둥 단주현상으로 인한 피해 사례

4) 연결보 및 인방보의 전단균열

- [그림 2.34]에서 보이는 바와 같이 비교적 최근에 시공되어 내진설계가 적용된 아파트의 경우 다수의 연결보 및 인방보에서 전단균열이 발생
- 이는 비구조 요소로서 구조물 해석 시 고려되지 않았으나, 시공 시 최소철근량을 배근한 인방보로 내력벽과 일체 타설로 인하여 구조벽체와 함께 하중을 분담하여 심각한 전단균열이 발생하였음



[그림 2.34] 연결보 및 인방보 전단균열

5) 전단벽 및 비내력벽 전단균열

- 국내의 대부분 아파트는 벽식구조로서 상대적으로 많은 벽체량 때문에 전체 구조물에 대한 시스템 수준에서의 층간변위비에 대한 기준을 만족하므로 구조해석상 수벽 및 날개벽과 같은 비내력벽을 고려하지 않고 수행됨
- 실제로 비내력벽은 하중에 대한 영향을 받지 않는 부재지만, 구조부재와 맞닿고 있어 날개벽에서는 수직하중의 영향을 받으며 수벽에서는 수직 구조부재의 유효길이를 단축하여 단주현상을 유발함
- 실제 구조물 시공 시 인건비 절감 및 공사기간 단축을 위하여 수벽 및 날개벽과 같은 비내력벽에 최소철근으로 배근한 후 전단벽과 일체 타설로 작업됨
- 따라서, [그림 2.35]에서 보이는 바와 같이 비내력과 전단벽의 일체 타설로 인하여 비내력벽에서 발생하는 전단균열의 영향이 전단벽에도 미침으로서 건축물의 구조에 큰 문제

를 야기함



[그림 2.35] 전단벽 및 비내력벽 전단균열

1.2.2 국외 지진 피해 사례 조사

- 국외 지진 피해 사례 조사는 2010년 칠레에서 발생한 지진으로서 많은 인명피해 및 RC구조물의 피해를 유발하였음, 특히 RC벽체에 대한 피해가 많이 나타났으며, 다양한 사례를 분석 할 수 있음

1) 전단벽 전단균열

- [그림 2.36]에서 나타난 바와 같이 전단벽에서 전단균열이 발생함에 따라 콘크리트의 피복 및 구속 콘크리트의 탈락이 발생하면서 내부의 철근이 노출됨

- 이러한 피해는 철근콘크리트 내부 구속력이 상실되어 지진과 같은 횡력에 저항할 수 있는 능력이 저하되며, 내부 철근의 노출로 부식이 진행됨에 따라 구조물의 취약성 증대



[그림 2.36] 전단벽체의 피해 현황



[그림 2.37] 전단벽체의 피해 현황

2) 벽체 경계요소의 파괴

- [그림 2.37]에서는 벽의 경계영역인 단부에서 파괴가 발생한 사례로서 콘크리트의 탈락 이후 철근의 좌굴과 함께 구속 콘크리트가 탈락하였음

- 이러한 피해는 RC벽체에서 취약한 경계요소의 콘크리트 구속력을 향상시키는 전단철근의 능력이 상실함에 따라 신속한 보수·보강이 이루어지지 않는다면 추가적인 피해 예상

3) 전단벽의 좌굴로 인한 파괴

- 좌굴로 인한 RC벽체의 피해는 세장한 벽체에서 많이 나타나며, 좌굴로 인한 벽의 잔류 인장변형으로 구조물의 취약성이 증대됨

4) 구조물의 비정형성으로 인한 RC벽체의 파괴

- [그림 2.39]은 벽체의 수직 및 수평 방향의 비정형적 특징으로 인한 지진피해사례로서, 국내 KBC 2016에서도 비정형성의 조건에 따라 내진등급을 강화하고 있음
- 또한, RC벽체 하단부에 기둥으로 지지하는 접합부에서도 많은 균열이 발생하였는데 이는 연직하중이 최하단부의 기둥으로 밀집되어 전달되어 과도한 축력을 받고 있는 기둥에 횡력이 작용함으로서 전단내력이 저하되었기 때문이라고 판단됨



[그림 2.38] 벽 전체의 좌굴



[그림 2.39] 수직 및 수평 비정형성으로 인한 파괴

1.2.3 국내·외 RC벽체 설계 현황 조사 및 비교

1) RC벽체 설계 기준

- [표 2.7]에서 보이는 바와 같이 미국 ACI318, 국내 KBC2016, 뉴질랜드 NZS2101의 설계기준을 분석하면 ACI318과 KBC2016의 설계기준은 상당부분 동일함
- 뉴질랜드의 설계기준인 NZS3101의 경우 압축영역의 너비에 대한 특별한 요구사항은 없지만 벽 최소두께, 보강간격 등 나머지 항목에서는 ACI318 및 KBC2016 설계기준과는 차이가 있음

[표 2.7] RC벽체 설계기준 비교

요구 사항	ACI 318		NZS 3101:2006 (A3)
	ACI 318-05, KBC 2016	ACI 318-14	
벽체 최소 두께 (t)	t = max (100mm, 1/25hu) for bearing wall		1) 10db 2) t ≥ hu/20, if P/Ag f'c ≥ 0.2
압축영역 너비 (b)	(no limit)	1). b ≥ hu/16 2) 300mm, if c/lw ≥ 3/8	(no limit)
구속 길이 (c'')	c''= max (c - 0.1lw, c/2)		압축 영역의 전체 길이, c
횡방향 철근 간격 (s)	s ≤ min (200mm, 8db)		s ≤ min (6db, (1/2)t)
횡방향 최소 철근량 (A _{sh})	-	s ≤ min (150mm, 6db) within max(lw, Mu/4Vu)	

2) 5개국의 내진설계기준에서 RC전단벽 시트메의 분류에 따른 반응수정계수(R)

- [표 2.8]에서 보이는 바와 같이 각 지진력 저항 시스템에 따라 반응수정계수 R값은 국내의 KBC2016과 미국의 ASCE7 기준이 동일함
- 국내와 미국의 설계기준에서는 지진력 저항 시스템에 따라 특수전단벽과 보통전단벽으로 분류하여 반응수정계수 값을 고려하지만 역추형 시스템 중 철근콘크리트 보통 전단벽-골조 상호작용 시스템에서는 따로 분류하여 고려하지 않음

[표 2.8] 반응수정계수 'R'을 갖는 나라별 RC구조벽 시스템의 분류

Korea (KBC 2016)	Bearing wall systems	R= 5(Special), R= 4 (Ordinary)
	Building frame systems	R= 6(Special), R= 5 (Ordinary)
	Dual system with special MFs	R= 7(Special), R= 6 (Ordinary)
	Dual system with intermediate MFs	R= 6.5(Special), R= 5.5 (Ordinary)
US (ASCE 7-05)	Shear-wall frame interactive system	R= 5.5
New Zealand (NZS 3101)	Nominally ductile structures	$\mu = 1.25$
	Structures of limited ductility wall	$\mu = 3$
	Ductile structures:	i. $\mu = 5/\beta a$
	i. two or more cantilevers; ii. two or more coupled; iii. single cantilevers	ii. $\mu = 5/\beta a < (3A+4)/\beta a < 6/\beta a$ iii. $\mu = 4/\beta a$ ($1.0 < \beta a < 2.0$)
Canada (CS A-A23.3)	Ductile coupled walls (at least 66% OTM)	$R_d=4.0, R_0= 1.7, R_dR_0= 6.8$
	Ductile partially coupled walls	$R_d=3.5, R_0= 1.7, R_dR_0= 5.95$
	Ductile shear walls	$R_d=3.5, R_0= 1.6, R_dR_0= 5.6$
	Moderately ductile shear walls	$R_d=2.0, R_0= 1.4, R_dR_0= 2.8$
	Shear walls with conventional construction	$R_d=1.5, R_0= 1.3, R_dR_0= 1.95$
Europe (EC 8)	Dual system	$q_0= 3.0\alpha u/\alpha 1(\text{DCM}), 4.5\alpha u/\alpha 1(\text{DCH})$
	Coupled wall system	$q_0= 3.0\alpha u/\alpha 1(\text{DCM}), 4.5\alpha u/\alpha 1(\text{DCH})$
	Uncoupled wall system	$q_0= 3.0(\text{DCM}), 4.0\alpha u/\alpha 1(\text{DCH})$
	Large lightly reinforced wall system	$q_0= 3.0$ should be designed as DCM

3) RC전단벽 시스템에 대한“Specific capacity-design”고려사항

- [표 2.9]에서 나타난 바와 같이 국내 및 미국의 설계기준을 제외하고 대부분의 선진국에서는 연성 벽체 설계를 별도로 고려하고 있음
- 특히, 유럽의 뉴질랜드는 전체적인 거동뿐만 아니라 연성 벽체 설계에 대한 모든 항목을 고려하지만, 캐나다 및 일본에서는 연성 벽체 설계에서 벽체 종방향 철근의 축소를 고려한 인장 시프트 및 고차모드 효과와 미끄럼전단파괴 방지를 위한 항목은 고려되지 않음

[표2.9] Specific capacity-design measures implemented

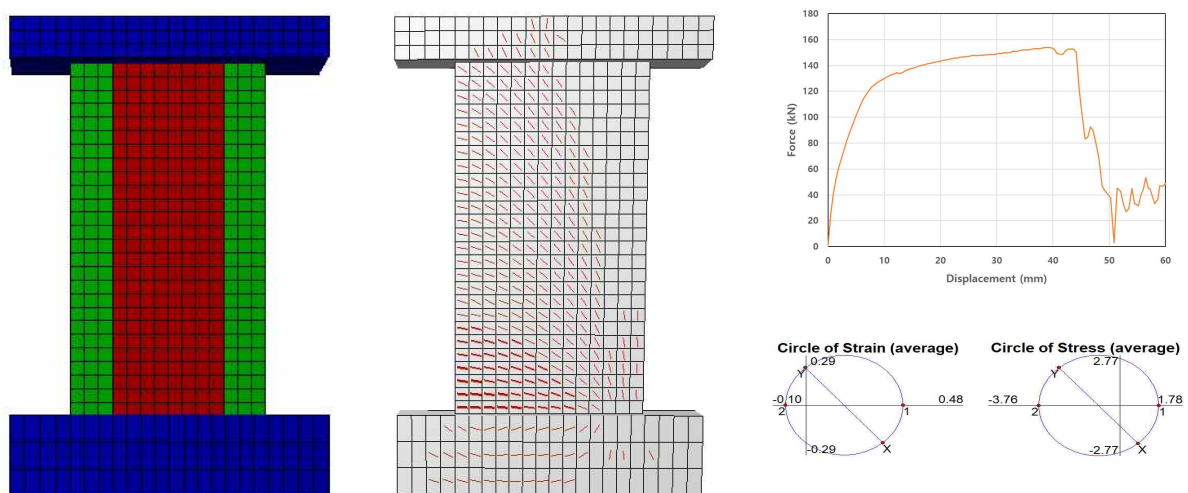
Specific capacity-design measures implemented	Canada	Europe	Japan	New Zealand	Korea and USA
Global behavior					
응답의 비선형 메커니즘의 명시적 식별	Yes	Yes	Yes	Yes	No
메커니즘 초과 강도로부터 얻어진	No	Yes	Yes	Yes	No
다이어프램 전단 및 모멘트 강도 메커니즘 강도 또는 명시적으로 확인 된	Yes	Yes	Yes	Yes	No
기초 - 진동 메커니즘을 위해 설계된 기반					
Ductile wall design					
모든 전단 강도가 휨과 강도를 초과	Yes	Yes	Yes	Yes	No
벽체의 전단에 대한 비탄성 동적 증폭 효과	Yes	Yes	Yes	Yes	No
벽체 종방향 철근의 축소를 고려한	No	Yes	No	Yes	No
인장시프트 및 고차모드 효과	No	Yes	No	Yes	No
미끄럼전단파괴 방지	No	Yes	No	Yes	No

2. PC형 비내력벽 시스템 모듈 및 접합상세 개발

2.1 기존 벽체의 내진성능 평가

- 차년도 실험의 변수들을 고려하기 위해 기존 RC벽체에 대하여 수정압축장이론으로 RC부재의 거동 예측을 목적으로 개발된 Vector2를 이용한 내진성능을 평가하였음

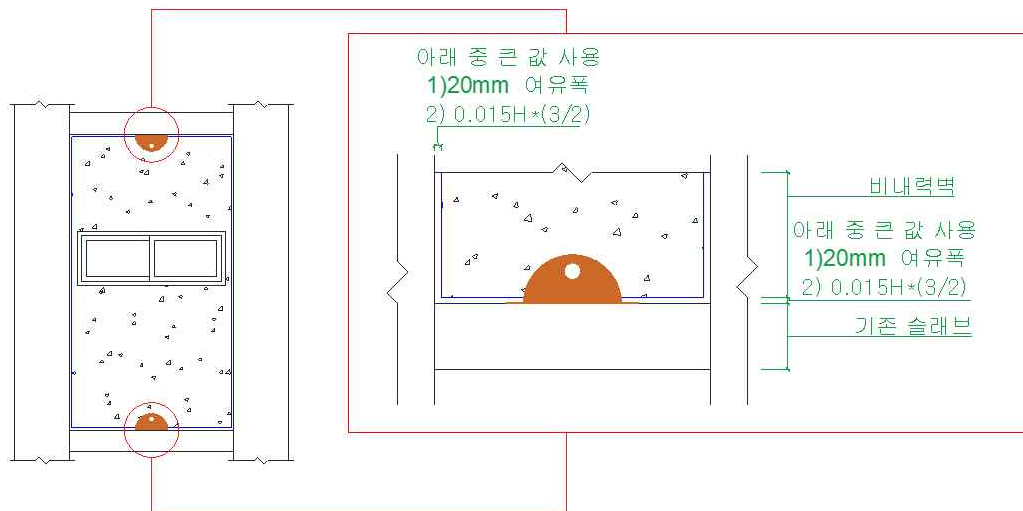
- [그림 2.40]에서 보이듯이 기존 RC벽체에 대하여 Vector2를 이용한 모델링을 수행하였으며, 정적가력해석을 수행한 결과 균열 양상을 예측할 뿐만 아니라 RC벽체의 전단거동을 예측하였음



[그림 2.40] 기존 RC벽체의 해석적 성능평가

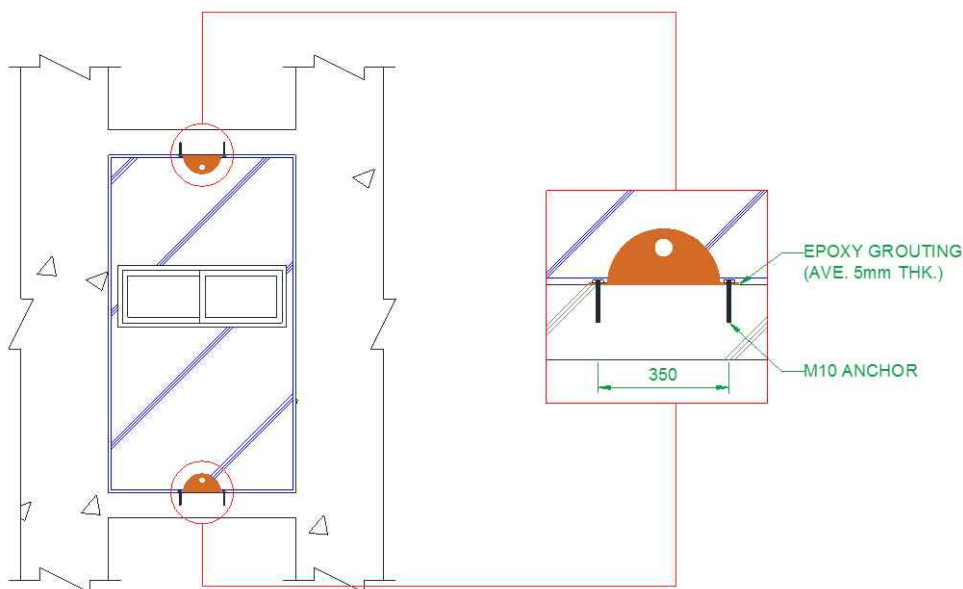
2.2 힌지형 PC 비내력벽 시스템

- 힌지형 PC 비내력벽 시스템은 상·하부 및 구조 부재와 맞닿는 양측면에 구조물이 지진과 같은 횡력으로 인해 발생할 수 있는 변위를 고려하여 이격을 두었음
- 또한, 상·하부 힌지를 통하여 지진과 같은 횡력 작용 시 구조부재의 거동에는 영향을 주지 않고 비내력벽으로는 일부 축력만 전달되도록 개발되었음



[그림 2.41] 힌지형 PC 비내력벽 시스템 상세도

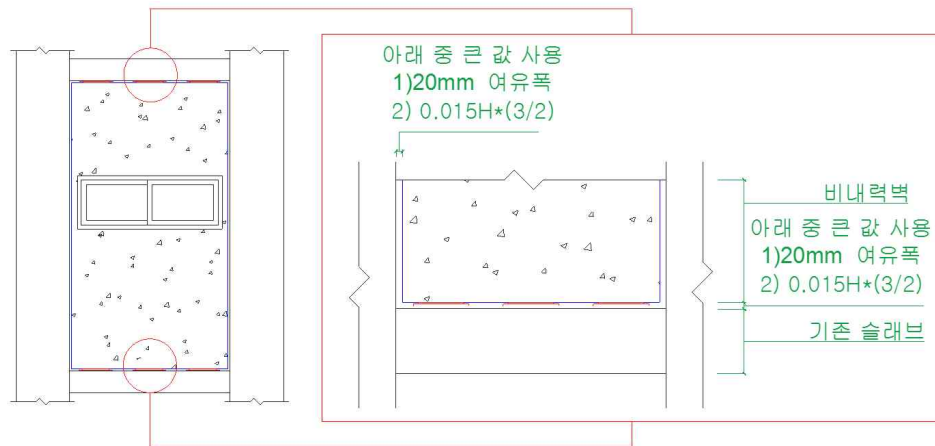
- 또한, [그림 2.41]에서 보이듯이 인접 구조부재와의 이격은 KBC2016에서 제시하고 있는 공동주택의 허용 층간변위에서 최대고려지진을 고려하기 위한 계수를 적용한 길이와 일반적으로 PC벽체에서 시공성을 위해 고려하는 20mm 중 큰 값을 선정하였음
- 힌지형 PC 비내력벽 시스템과 인접 구조부재의 접합은 상·하단 슬래에 먼저 평균 약 5mm 정도의 에폭시를 그라우팅 한 후 M10 ANCHOR를 이용하여 정착하였음



[그림 2.42] 힌지형 PC 비내력벽 시스템 접합상세

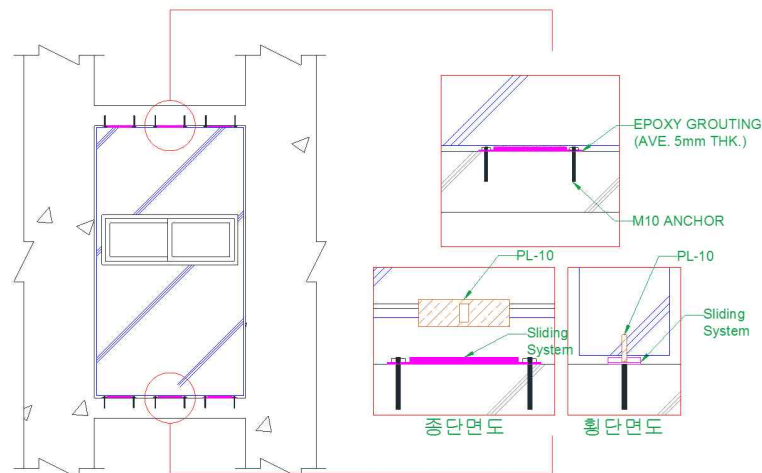
2.3 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템

- 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템은 힌지형과 동일하게 4면 모두 인접한 구조부재와는 이격을 두었으며, 상·하부에 고안 된 슬라이딩 시스템을 이용하여 지진과 같은 횡력 작용 시 구조부재의 거동에는 영향을 주지 않고 비내력벽으로는 하중이 전달되지 않도록 시스템을 개발하였음
- 슬라이딩형과 힌지형 PC 비내력벽 시스템의 차이는 힌지형의 경우 모멘트가 걸리지는 않지만 수평 및 수직에 대해서는 하중이 작용되는 반면에 슬라이딩형은 고안된 시스템을 통하여 수평 및 수직의 충분한 이격 확보로 하중에 영향을 미치지 않음



[그림 2.43] 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템 상세도

- 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템에서 슬라이딩 시스템은 [그림 2.44]의 종 및 횡 단면도에서 보이듯이 비내력벽 상·하부에 매립되는 10mm 두께의 플레이가 이동이 자유롭도록 1~2mm의 이격을 두고 제작하였으며, 이를 통하여 제작 오차로 인한 시공의 불편함도 해결할 수 있음
- 슬라이딩 시스템의 설치는 힌지형과 유사하게 상·하단의 슬래브에 먼저 평균 약 5mm 정도의 에폭시를 그라우팅 한 후 M10 ANCHOR를 이용하여 정착됨



[그림 2.44] 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템 접합상세

1. 연구개요

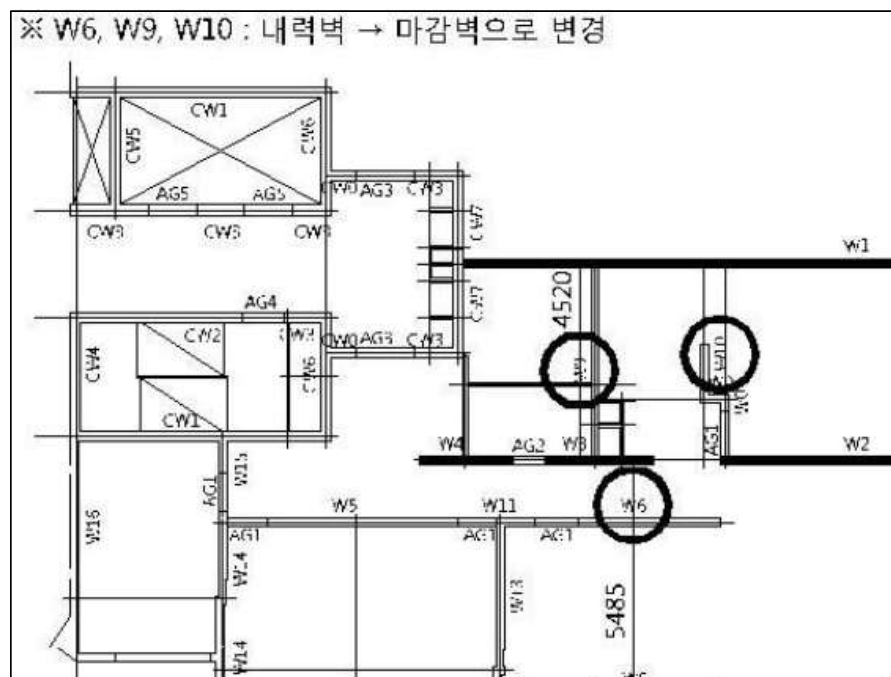
- 공동연구기관인 미래구조엔지니어링에서는 2017년 포항지진에서 드러난 벽식 아파트의 수벽과 날개벽 같은 비내력벽의 균열하자의 원인이 구조설계 과정이나 현장의 시공과정에 있을 수 있다는 점에 주목하여, 국내의 건설사 및 구조설계회사에서 공동주택을 설계하는 데 있어서, 비내력벽(비내력 인방보)의 구조설계 및 시공관행을 조사, 분석하였음

2. 구조설계지침서 조사

2.1 주요시공사의 구조설계지침

1) A사

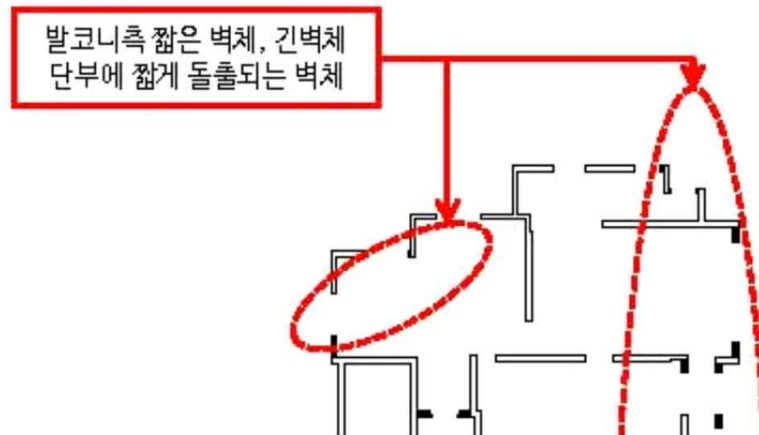
- “내력벽은 5-6m 간격으로 배치하고, 이보다 좁은 간격으로 배치될 경우, 사잇벽체는 마감벽체(경량칸막이, 조적, 경량복합판넬 등)로 변경 : 내부벽체의 처리방법



[그림 2.45] 내부 벽체의 내력-비내력 구분 및 처리방안

- “1m 미만벽체는 횡력저항요소에서 제외하고, 중력하중만 고려하여 배근하되, 가급적 W0으로 배근을 통일”: 외부의 전후면에 있는 짧은 벽체의 처리방안

- “벽체의 강성을 무시하기 위하여 Member Properties/Member Stiffness/Bending&Axial, Shear에 각각 0.0001을 입력”



[그림 2.46] A사 구조설계지침 중 비내력벽체 관련사항

- “코어와 내부벽체 사이 인방보는 배근설계가 가능한 수준까지 강성저감(10% 내외의 강성만 고려)”, “강축방향은 인방보를 배치하지 않는다”: 일반적인 아파트에서는 인방보를 배치하지 않아도 내력이나 변위를 만족하므로, 별도로 배치하지 않도록 유도하고 있음

2) B사

- “평면상 길이가 500mm이하로 해석에 포함되지 않은 짧은 벽체는”으로 언급: 짧은 벽이 해석에 포함되지 않음을 전제하고 있음

- “발코니 입면변화가 적용된 현장의 외벽을 내력벽으로 사용한 경우”를 언급하고 있음: 아파트의 측벽이 아닌 전면, 후면의 벽체는 내력벽으로 사용하지 않는 경우가 많다는 것을 보여줌

- “세대내의 인방보와 발코니의 캔틸레버 보는 삭제하는 것을 원칙으로 한다”로 하여 구조계획에서 보를 사용하지 않도록 유도

3) C사

- “해석에 고려안된 벽체는 기본배근만 한다”로 언급하여 해석에 고려하지 않는 벽체를 언급

- 인방보에 관하여, “과도한 응력이 발생하는 경우는 아래와 같이 수정하여 재설계한다”
 “a. 해당 인방보 없이도 건물의 횡변위(전체변위, 층간변위)가 허용치 이내면 해석시 제외”

“b. 벽체 해석시 무시되는 보는 최소 철근량으로 배근한다”

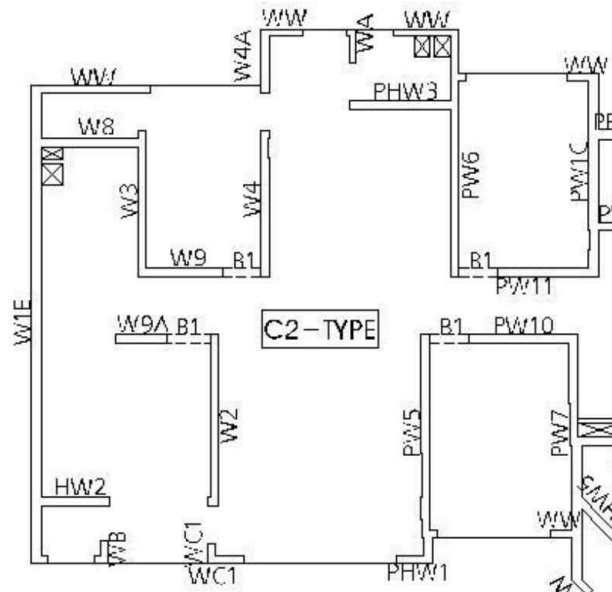
“c. 강성을 적절히 저감(NG없이)하여 재설계”

2.2 소결

- 벽식구조 공동주택에 있어서, 실의 구획, 입면형상을 유지하기 위하여 설치되는 벽체의 내력벽, 비내력벽 구분은 구조설계 의도에 따라서 구분되고 있음.
- 벽체와 연결되어 시공되는 인방보과 관련하여 내부의 인방보는 삭제하도록 하고 있으며, 전후면 입면에 배치되는 인방보는 구조해석에 반영하지 않는 것으로 고려하는 것이 보통임
- 일부 지침서에서는 [KBC2016 0306.6.5.1 상호작용효과]를 고려하도록하고 있으나, 임의로 저감한 강성을 고려하여 구조해석할 경우에는 이러한 검토가 곤란함

3. 사례 분석

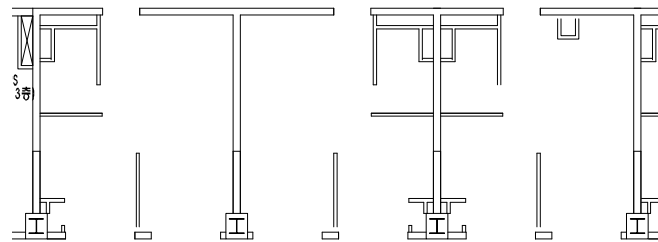
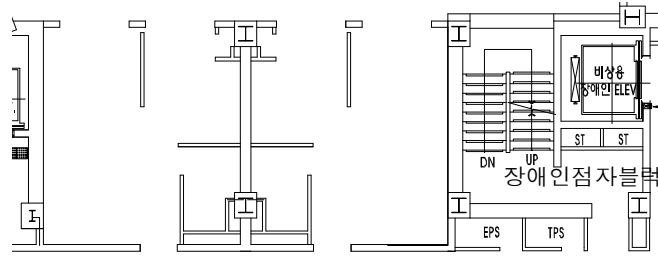
3.1 A프로젝트 - 구조평면도 사례



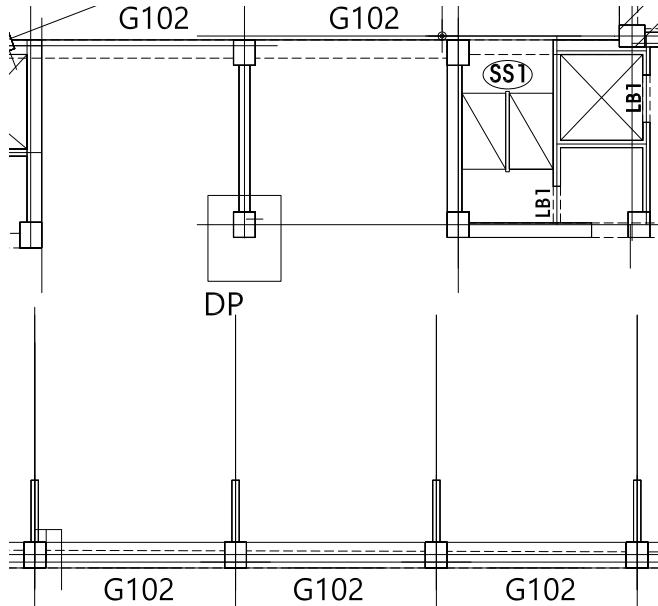
[그림 2.47] 공동주택 기본형 구조평면도

- [그림 2.47]에서 WW로 표기된 벽체는 비내력벽으로 분류된 것이며, 구조평면도상에서 벽체를 연결하는 부위에 “B1”과 같이 표기되지 않은 부위에 설치되는 부재는 비구조 요소로 분류된다. 즉 W1E와 같이 길이가 긴 측벽을 제외하면 전후면에 보이는 벽체는 대체로 비구조요소로 분류되고 있으며, 벽체와 벽체를 연결하는 인방보 역시 비구조요소로 분류되고 있다.

3.2 B프로젝트 - 건축평면-구조평면 비교



[그림 2.48] B프로젝트 건축평면(칸막이벽)



[그림 2.49] B프로젝트 구조평면(내력벽만 표시)

- [그림 2.48]와 [그림 2.49]는 동일 평면에 대한 건축평면과 구조평면 표시이다. 구조평면에는 없는 내부벽이 건축평면에는 많이 보이는데, 이것은 비내력벽으로 처리된다. 당초 내부비내력벽은 조적으로 설계되었으나, 현장시공단계에서 철근 콘크리트를 적용하는 것으로 변경된 것이다.

- 구조평면도에 표시되지 않는 부재는 비구조벽체로 일률적인 배근을 적용하게 되며, 별도의 상세를 제공하지 않을 경우에는 구조부재와 동일한 철근 및 콘크리트 재질이 적용되며 타설역시 동시에 이루어지게 된다.

3.3 소결

- 시공 및 구조설계 현장에서는 편의에 의하여 내력벽과 비내력벽으로 구분되고 있으며, 비내력벽 및 비구조요소인 벽체, 인방보는 비내력벽으로 분류하여 최소한의 배근을 적용하고 있다
- 비내력벽의 재료를 조적으로 설계하더라도, 현장시공단계에서 동일한 두께의 철근콘크리트로 적용하는 경우가 있으며, 이 경우 별도의 상세를 적용하지 않고 있다

4. 비구조벽체 관련 구조설계 및 시공 대안 도출

4.1 구조설계관련

- 구조설계 과정을 확인한 결과 동일한 재료를 사용하고, 유사한 형상을 하고 있더라도 구조설계자의 의도에 따라서 구조벽체 - 비구조벽체로 구분이 되고 있는 것이 확인되었다.
- 구조요소로 간주하고 구조설계에 반영한 경우에도 임의로 강성을 조절하는 경우가 많은데, 이것은 하중 부담이 미미한 부재는 전체 건물의 구조안전에 영향을 주지 못하는데도, 탄성해석과정에서 이러한 부재의 내력초과가 두드러지게 나타나는 현상을 피하려는 것이다. 이는 대부분의 구조설계사에서 통용되고 있다. 큰 지진에 대하여 전체적인 건물의 붕괴와 같은 대규모 피해를 막는다는 관점에서는 옳은 접근이지만, 내진설계에 도입되고 있는 성능설계 개념에서 볼 때, 구조설계 관행에 개선의 필요성이 확인되었다.
- 비구조요소로 고려할 때, 인근의 구조요소의 강성을 고려하여 적절한 수준의 강성저감한계 또는 최소한의 철근보강을 통하여 중,약진시 적절한 거동이 될 수 있도록 2, 3차년도에 지속적으로 연구가 필요하다

4.2 시공단계

- 건설현장의 구인난으로 인력수요가 많은 공법이 점차 다른 공법으로 바뀌고 있는데, 기존에 조적벽으로 설계된 내부 비내력벽도 시공단계에서 철근콘크리트로 바뀌는 경우가 발생하고 있다
- 이 때, 비내력 철근콘크리트 벽체가 설계의도와 같이 거동하도록 하기 위해서는 적절한 상세가 적용되어야 함에도 불구하고, 아직까지 특별한 상세 없이 구조체와 동일한 절차와 방법으로 시공되고 있다
- 이를 위하여 주요부위에 슬릿을 두는 상세를 도출하였으며, 이에 대한 시공법은 2, 3차년도에 연구를 통하여 완성할 예정이다.

다. 2차 년도 개발 목표 및 결과

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차 연도 (2019)	벽식 아파트의 슬롯형과 PC형 비내력벽 시스템의 해석모델 개발	슬롯형 및 PC형 비내력벽에 대한 실험결과 기반 상세 평가모델 개발	슬롯형 및 PC형 비내력벽 시스템 에 대한 실험결 과 기반 상세 평 가모델 개발	1차년도에 개발된 해석모델에 대해 비구조 벽 내진설계/시공의 대안으로 제시된 슬롯형 및 PC형 비내력벽에 대한 상세 구조해석 모델을 개발 완료함 - 구조시스템과 독립된 비구조벽으로 거동을 하며 피해손상이 슬롯과 PC접합부에 집중되는 거동 특성을 이상화하여 해석모델에 반영함 - 실험결과 기반 이력모델의 비선형 유한요소 해석모델을 개발을 통해 하중별 독립된 비내력벽이 슬롯과 PC연결부에서 변형에 대한 요구 값을 계산할 수 있는 tool을 확보 완료함
		슬롯형 및 PC형 비내력벽시스 템 설계 및 평가 프로세스 개발	현행 설계 기준 에 따라 슬롯형 및 PC형 비내력 벽 시스템 설계 및 평가프로세 스 개발	- 주어진 성능목표에 대해 구조물의 안전을 통한 붕괴방지, 인명안전의 성능목표뿐만 아니라 사용성 중단 및 보수에 따른 경제적 측면에서 비내력벽 시스템의 손상을 지진위험도에 따라 방지하거나 최소화할 수 있는 설계 프로세스를 개발 완료함 - 개발된 설계시스템에 따라 예상되는 지진위험도에 따라 구조시스템과 비구조 시스템의 내진성능을 평가할 수 있는 프로세스를 개발함 - 예상되는 지진위험도와 주어진 성능목표에 따라 예상되는 지진거동의 시뮬레이션을 통해 예상되는 성능을 평가하고 예측되는 구조 시스템 및 비구조 시스템의 피해를 예측, 평가 가능함
	벽식 아파트의 슬롯형과 PC형 비내력벽 시스템 상세개발 및 실험적 손상제어 성능 평가	실험방법 설정 및 실험체 설계	실험적 내진성능평 가를 위한 실험체 설계, 하중 가력 및 계측장비 계획	2017년 포항지진으로 피해가 발생한 벽식 아파트를 기반으로 기준 실험체 및 개발한 비내력벽 대체시스템을 적용한 실험체를 포함하여 총 5개의 실험체 설계 완료함 - 실험적 내진성능평가를 위하여 LVDT 및 변형률 게이지와 같은 계측장비 설치 계획 완료함 - 정적반복가력 실험 수행을 위해 실험실 여건 및 가력장치의 용량을 고려하여 실험체의 축적, 하중의 크기 등 계획 완료함
		슬롯형 및 PC형 비내력벽	비교 및 비내력벽 대체시스템	- 계획한 하중 가력을 이용하여 일정한 축력에 서의 정적반복가력 실험을 수행 완료함 - 비내력벽 대체시스템 적용 실험체는 기준 실

		시스템의 실험적 내진성능평가	적용 실험체의 정적반복가 력 실험을 통한 내진성능평 가	협체와 비교를 통하여 평가 완료함 • 2017년 포항지진의 피해사례를 이용하여 각 실험체에서 시스템 수준에서의 영향을 평가 완료함 • 비내력벽 대체시스템 적용 실험체는 최대 전단강도, 강성, 연성비, 에너지 소산량을 이용하여 부재 수준에서의 영향을 평가 완료함 • Dowel bar 및 Steel plate의 변형률 분포에 대한 분석을 통하여 비내력벽 대체시스템의 거동 분석을 완료함
	비내력벽 손상 최소화를 위한 구조설계 법 개발 및 시공상세 개발	RC비내력벽을 포함하는 벽식 아파트 구조설계법 제시(PC 등 대안공법 포함)	비내력벽의 포함여부에 따른 구조해석결 과 검토	• 비내력벽의 포함여부에 따라 구조물의 응답에 차이가 큼(고유진동수 등) • 비내력벽을 포함한 해석결과를 분석한 결과, 설계지진에 의하여 비내력이 파괴되는 결과 도출 → 비내력벽은 지진력을 부담하지 않도록 조치 필요 • 비내력벽이 지진력을 부담하지 않도록 하는 상세개발(RC 및 PC공법 활용)

라. 2차 년도 연도 연구 결과 내용

■주관연구기관: 세종대학교

■연구목표: 수벽과 날개벽 대체시스템의 설계 및 성능평가를 위한 해석모델 개발

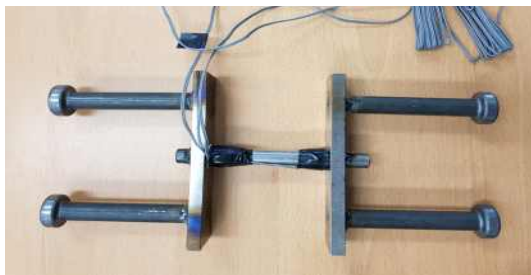
1. 슬롯형 및 PC형 비내력벽에 대한 상세평가모델 개발

아파트와 같은 공동주택에 대한 구조해석 시 실무에서는 비내력벽을 횡력저항부재로서 고려하지 않고 모델에서 제외하여 해석을 수행하고 있다. 본 연구진이 연구 수행한 22층 아파트모델의 비내력벽 부재 해석고려 유무에 따라 전체 아파트의 내진거동의 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 이는 결국 포항지진에서 비내력벽을 모델링 하지 않고 구조설계한 아파트가 프로그램 해석결과와 실제 거동에 차이가 나면서 예측하지 못한 비내력벽 파괴 문제가 발생하였음을 나타내고 있다. 아파트와 같은 공동주택은 내력벽과 비내력벽이 일체화되어 시공되기 때문에 비내력벽이 구조벽과 함께 구조적 거동을 할뿐더러 일체화된 RC구조 비내력벽은 균열파괴 시 보수가 까다로울 수 있는 문제가 발생한다. 다음은 KDS에서 요구하는 콘크리트구조와 비구조요소에 대한 요구사항이다.

[표 2.10] 현 KDS에서 콘크리트구조와 건축비구조요소에 대한 요구 사항

현 KDS 기준(2019. 3. 14 개정 고시)	현 KDS 기준(2019. 3. 14 고시)
9. 콘크리트구조의 고려사항 9.8.2 비구조요소와의 연결 큰 강성을 발휘할 수 있는 비구조요소는 구조부재와 <u>이격하여야 한다</u>. 그렇지 않을 경우에는 비구조요소를 구조요소로 고려하여 구조해석과 설계에 반영해야 한다. 9.8.3 조적채움벽과 허리벽의 고려사항	18.3 건축비구조요소 18.3.3 칸막이벽 칸막이벽이 <u>조적조</u> 혹은 <u>비구조 콘크리트벽</u>으로 구성된 경우 다음을 만족하여야 한다. (1) 구조설계 시 구조요소로 고려되지 않은 경우 <u>내진슬립</u>과 같은 적절한 구조상세를 통해 인접한 기둥에 영향을 미치지 않도록 하여야 한다. (2) <u>내진슬립</u> 없이 기둥과 <u>밀실하게 접촉</u>하도록 시공되는 경우 9.8.2 및 9.8.3의 규정에 따라 반드시 구조요소와의 상호작용을 고려하여 <u>설계</u>되어야 한다.

개정된 기준인 KDS41 17: 9.8.2에 따르면 큰 강성을 발휘할 수 있는 비구조요소는 구조부재와 이격하거나, 비구조요소를 구조요소로 고려하도록 명시되어 있다. 후자의 경우에 비구조요소를 구조설계 시 고려하여 해석을 수행하게 되면 비내력벽 요소에 배근설계가 어려워지며 부재에 대한 오류가 계속적으로 발생할 수 있기에 실무적으로 적용하기 어려운 부분이 있다. 따라서 본 연구진은 전자의 기준을 따라 아파트 비내력벽을 구조벽에서 이격시켜 고정하고 동시에 균열을 막는 방법에 대한 공학적 제시안을 연구·개발하였다. [그림 2.50]은 본 연구진이 제시한 수벽과 날개벽 대체시스템의 제작 작업 및 완료된 모습이며 [그림 2.51]는 해당 시스템을 적용하여 시공 중인 벽체 실험체의 모습이다.



(a) 다월바 비내력벽 연결 시스템 철물
(스트레인 게이지 작업)



(b) 철판형 비내력벽 연결 시스템 철물
(스트레인 게이지 작업)



(c) 다월바 비내력벽 연결 시스템



(d) 철판형 비내력벽 연결 시스템

[그림 2.50] 비구조벽의 격리를 위한 공학적 발명품



(a) 다월바형 비내력벽 연결 시스템
슬릿 거꾸집 제작



(b) 다월바형 비내력벽 연결 시스템 시공



(c) 철판형 비내력벽 연결 시스템
슬릿 거꾸집 제작



(d) 철판형 비내력벽 연결 시스템 시공

[그림 2.51] 비구조벽의 격리를 위한 발명품의 시공 예

1.1 1차년도 공학적 제시안 상세평가

1.1.1 구조해석 모델 구축

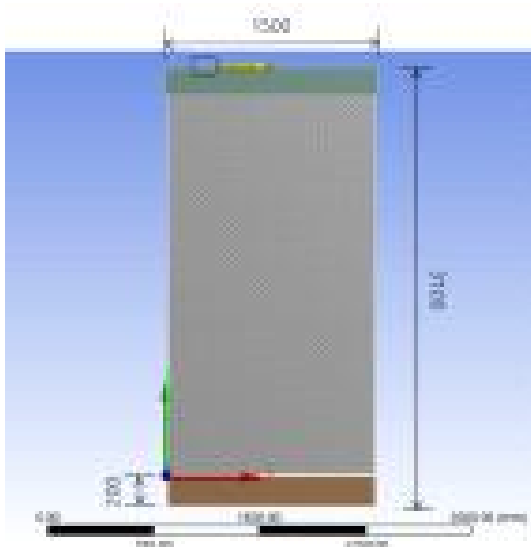
본 연구진의 1차년도 결과물로 제안했던 비내력벽 균열방지 대책안에서 비내력벽에 대한 영향력을 고려하기 위해 상용화된 유한요소 해석프로그램인 ANSYS 프로그램을 통하여 FEM 해석을 진행하였다. FEM 해석을 통해 상부 슬래브에 연결된 비내력벽의 횡 거동에 의해서 하부슬래브와 비내력벽을 연결 및 고정하는 슬릿형 비내력벽 연결시스템의 거동과 이에 따른 비내력벽에 대한 영향력을 살펴보았다. 콘크리트는 항복응력 24MPa, 철근은 항복응력 400MPa의 값을 적용했고 콘크리트와 철근의 자세한 물성치는 [표 2.11]와 [표 2.12]과 같다. 비내력벽의 철근비는 최소로 모델링하였다. 연결시스템들은 철근 물성치와 동일하나 항복응력에 차이를 두어 철판형 245MPa, 다월바 400MPa으로 입력하였다. 해석모델의 전체적인 모습은 [그림 2.52]과 같다. 하부 슬래브와 비내력벽 사이의 20mm 이격을 두었고 이 사이에 1차년도 균열방지 대책안 [그림 2.53], [그림 2.54]을 모델링하여 연결시켰다. 하부슬래브를 완전고정 시킨 후 상부 슬래브를 X축 방향으로 변위를 작용시키면서 비내력벽의 상태와 연결시스템들의 항복을 관찰하였다. 각각의 연결 시스템들은 모두 콘크리트와 완전결합된 것으로 가정하여 해석하였다.

[표 2.11] 콘크리트 물성치

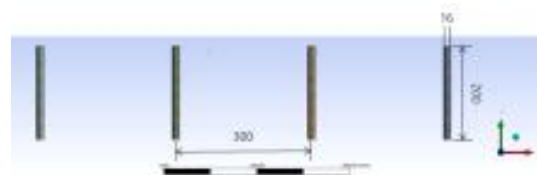
Property	Value
Density	2300kg/m ³
Young's Modulus	27000 MPa
Poisson's Ratio	0.18
Bulk Modulus	1.4063×10 ⁴ MPa
Shear Modulus	1.1441×10 ⁴ MPa
Tensile Yield Strength	2 MPa
Tensile Ultimate Strength	3 MPa
Compressive Yield Strength	24 MPa

[표 2.12] 철근 물성치

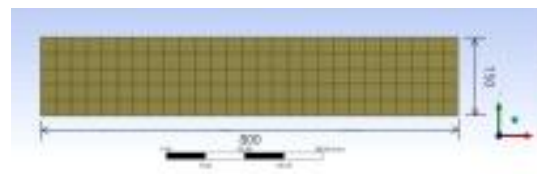
Property	Value
Density	7850kg/m ³
Young's Modulus	200 GPa
Poisson's Ratio	0.3
Bulk Modulus	1.6667×10 ⁵ MPa
Shear Modulus	7.6923×10 ⁴ MPa
Yield Strength	400 MPa
Tangent Modulus	1450 MPa



[그림 2.52] 비내력벽 해석모델 상세



[그림 2.53] 다월바 연결 시스템 상세

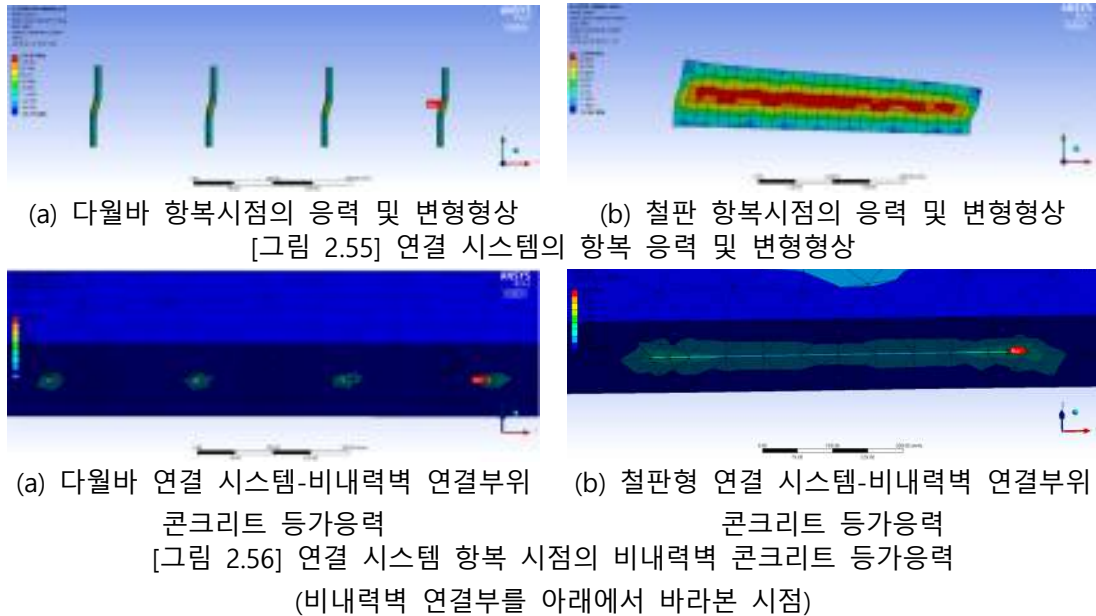


[그림 2.54] 철판형 연결 시스템 상세

1.1.2 구조해석 결과 검토

먼저 다월바 및 철판형 연결 시스템은 비내력벽이 X축 방향으로 1mm 횡거동하기 이전 초기에 모두 항복한 것으로 나타났다. 항복 이후의 다월바 및 철판의 비내력벽에 대한 영향은 낮기 때문에 두 연결 시스템들의 항복시점에서 비내력벽의 변형률과 응력을 비교해 보았다. 이에 대한 결과는 [그림 2.55], [그림 2.56]와 같다. 항복 시점의 비내력벽 변형률은 다월바 연결 시스템에서는 0.0043, 철판형 연결 시스템에서는 0.0011로 나타났다. 연결시스템과 콘크리트가 맞닿는 표면에서의 비내력벽 등가응력은 다월바 시스템 127.02MPa, 철판형 시스템 29.44MPa으로 나타났다. 두 시스템 모두 콘크리트의 항복강도를 모두 초과하였기 때문에 비내력벽 연결부 주위에서 국부적인 콘크리트 파괴가 나타날 것으로 판단되었다. 철판형 연결시스템의 변형률이 0.0011로 낮아 파괴예상 변형률에 미치지 못했다. 그러나 이 경우 철판형 연결시스템과 콘크리트와의 연결 상태를 완전결합으로 가정했기 때문에 철판

의 전 방향의 면적에서 콘크리트의 응력이 넓게 분산되어 변형률 결과가 낮은 것으로 판별되었다. 실제 거동 시 콘크리트의 특성을 고려해 볼 때 해석과 같이 전 방향에서 콘크리트가 철판을 붙잡으며 거동하는 것은 어렵기 때문에 실제 응력과 변형률의 값은 이보다 높고 콘크리트의 국부적인 파괴가 일어난다고 판단되었다.



1.2 개선된 공학적 제시안 상세평가

1.2.1 비내력벽 시스템 모델 상세설계

본 연구진은 비내력벽 시스템 설계 시 세 가지 조건을 고려하였다. 먼저 면외 하중인 풍하중에 대하여 항복하지 말아야 하고 동시에 지진하중에 대해서는 항복해야하며 마지막으로 시공성을 고려해야했다. 풍하중은 수계산을 통해 산정하여 안전성을 고려하였으며 지진하중에 대해서는 앞의 연구와 같이 비내력벽에 수평변위를 가하는 FEM해석을 적용했다. 시공성에 있어는 전 부품이 하나의 제품화된 연결 시스템 설계를 통해 현장에서의 적용이 무리가 없도록 고려했다.

1차년도에서 제시한 공학적 제시안들은 FEM 해석 결과를 비추어 볼 때 비내력벽 연결부의 국부적인 파괴가 나타날 것으로 판단되었다. 따라서 비내력벽 시스템 설계를 위해서는 연결 시스템연결부에 가하는 응력을 분산시켜 줄 필요가 있다. 또한 풍하중을 견디는 한도 내에서 연결 시스템의 단면적을 감소시켜 비내력벽에 영향을 줄여야 한다. 다월바의 경우 강재의 항복강도를 245MPa로 낮췄고 철판의 경우 타공하여 단면적을 감소시켰다. 20mm의 이격으로 비내력벽에 영향을 적게 미치면서 연결 시스템의 항복을 유도하기에는 시스템의 단면적을 더욱 작게 할 필요성이 있다. 그러나 연구 초기에 강재의 단면적 감소로 인해 풍하중과 같은 면외 하중에 대해서 시스템이 항복해버리는 문제가 발생했다.

따라서 본 연구진은 시어커넥터와 단열재 등을 이용해 해당 문제를 해결하였다. 시어커넥터를 통해 연결시스템이 콘크리트에 가하는 힘을 넓게 분산시켰다. 또한 주변에서 쉽게

(a) 다웰바 연결 시스템

(b) 철판형 연결 시스템

[그림 2.58] 비내력벽 연결 시스템 시공 예상도

– 44 –

만족하는 결과를 나타낸다.

$$D = 13mm$$

식 (3)

$$Z = \frac{\pi \times D^3}{32} = \frac{\pi \times 13^3}{32} = 215.69mm^3$$

$$M = R_B \times e = 0.338 \times 0.090 = 30.42 \times 10^{-3} kN \cdot m \quad (e = 90mm)$$

$$\text{한쪽 단부모멘트} : 15.21kN \cdot mm$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{15.21 \times 10^3}{215.69} = 70.52 N/mm^2$$

$$\ast 70.52 N/mm^2 < 163.3 N/mm^2 \quad (OK)$$

$$h = 5mm, \quad b = 12mm$$

식 (4)

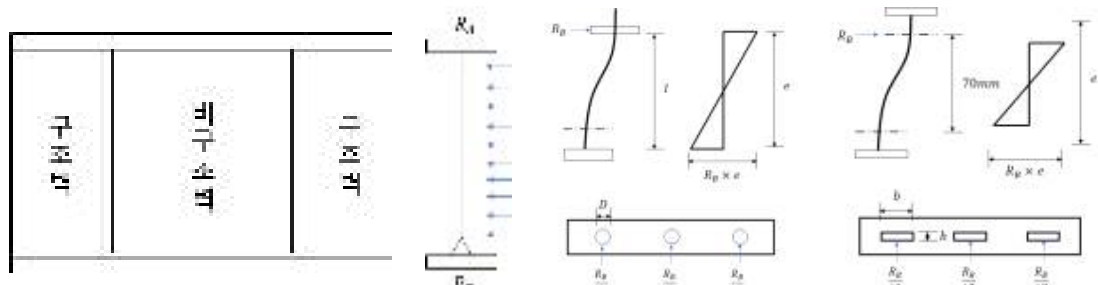
$$Z = \frac{b \times h^2}{6} = \frac{12 \times 5^3}{6} = 50.00mm^3$$

$$M = R_B \times e = 0.113 \times 0.070 = 7.91 \times 10^{-3} kN \cdot m \quad (e = 70mm)$$

$$\text{한쪽 단부모멘트} : 3.955kN \cdot mm$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{3.96 \times 10^3}{50.00} = 79.20 N/mm^2$$

$$\ast 79.20 N/mm^2 < 163.33 N/mm^2 \quad (OK)$$



(a) 비내력벽 풍하중 산정 기본조건 (b) 다월바 하중 산정 (c) 철판형 하중 산정

[그림 2.59] 비내력벽 연결시스템 풍하중 설계 조건

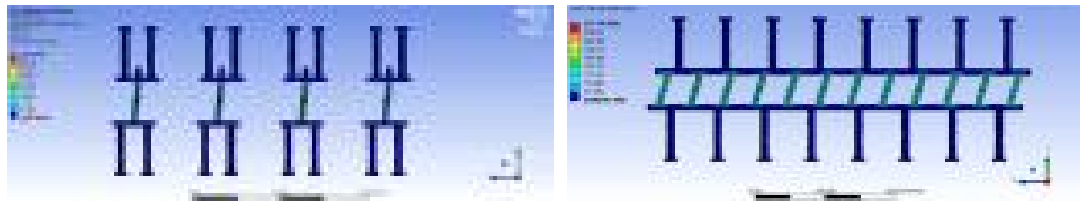
1.2.3 구조해석 결과 검토

앞선 과정을 통해 설계한 비내력벽 연결 시스템들에 대하여 상세정밀해석을 Ansys 프로그램을 통해 진행했다. 기본적인 재료 데이터는 앞서 진행한 결과물들의 해석과 동일하게 진행하였고 다월바 항복응력이 245MPa로 변경되었다. 2/3 축소 벽체 실험 크기와 동일하게 모델 크기를 조정하여 실험결과와 비교하였다.

해석결과 다월바 모델과 철판형 모델 모두 횡변위 작용 초기에 항복하여 비내력벽에 대한 영향이 최소화 되었다. 항복시점의 다월바 모델의 경우 연결부위 콘크리트 등가응력이 8.4~14.5MPa 정도로 나타났고 철판형 모델의 경우 3.88~7.04MPa 정도로 나타났다. [그림 2.60]과 [그림 2.61]는 각 시스템 철물들의 항복시점 응력 해석결과이다. 다만 철판형의 경

우 앞서 진행한 해석결과와 같이 완전결합으로 가정했기 때문에 실제 거동 시에는 컴퓨터 시뮬레이션결과보다 더 큰 응력이 발생한다고 판단되었다.

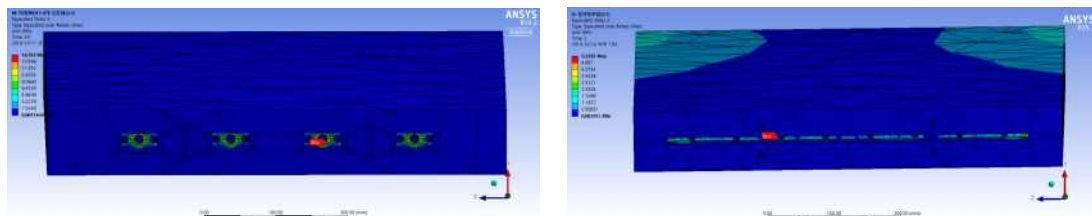
이 결과는 [표 2.13]과 같이 1차년도 대안 결과물의 해석결과에서 콘크리트 연결부에 작용하는 등가응력이 다월바의 경우 88.6% 철판형의 경우 76.0% 줄어든 것으로 나타났다. 구조해석 결과에 따라 시어커넥터 부착과 비내력벽 연결 시스템의 안정적인 항복을 위한 벽 내부 공간 확보는 비내력벽의 연결과 횡하중에 따른 균열방지에 효과적이었다고 판단하였다. 또한 이 결과는 이는 공동연구기관이 진행한 2/3 축소 실험에서도 다월바(DBW) 및 철판형(SPW)의 비내력벽 균열이 미미한 점을 보아 해석의 타당성이 드러난다.



(a) 다월바 시스템 항복시점의 응력

(b) 철판 시스템 항복시점의 응력

[그림 2.60] 연결 시스템의 항복 응력



(a) 다월바 연결 시스템-비내력벽 연결부위

(b) 철판형 연결 시스템-비내력벽 연결부위

콘크리트 등가응력

콘크리트 등가응력

[그림 2.61] 연결 시스템 항복 시점의 비내력벽 콘크리트 등가응력

(비내력벽 연결부를 아래에서 바라본 시점)

[표 2.13] 비내력벽 콘크리트 연결부 등가응력·변형률 비교

종류		기존 비내력벽	개선 비내력벽 연결시스템	감소율
		연결시스템 콘크리트	콘크리트	
다월바	등가응력	127.02 MPa	14.5 MPa	88.6%
	변형률	0.0043	0.00055	87.2%
철판형	등가응력	29.44 MPa	7.04 MPa	76.0%
	변형률	0.0011	0.00032	70.9%

2. 슬롯형 및 PC형 비내력벽시스템 설계 및 평가 프로세스 개발

아파트와 같은 공동주택에 대한 구조해석 시 수벽 및 날개벽은 비내력벽으로서 전단벽과 같이 횡력저항부재로서 고려하지 않고 제외하여 해석을 수행하고 있다. 만약 수벽 및 날개벽을 구조설계 시 횡력저항 부재로서 고려하여 해석을 수행하면, 비내력벽 요소에 배근설계가 어려워 부재에 대한 오류가 계속적으로 발생한다. 하지만, 국내 공동주택에서는 비내력벽을 제외하더라도 상대적으로 벽체량이 많아 전체 구조물에 대한 시스템 수준에서의 층간변위비에 대한 기준은 만족하므로 구조해석상 큰 문제가 되지 않고 있는 현실이다.

따라서 본 연구진은 구조해석모델 구축과 정밀내진상세평가를 위하여 비내력벽의 유무

에 따른 모델을 통하여 횡력저항지지에 어떠한 차이가 있는지 1차년도 연구를 진행하였다. 연구방법으로는 국외 CSI사에서 개발한 성능설계 및 유한요소해석 프로그램인 Perform 3D를 이용하여 비선형정적해석과 비선형동적해석을 진행하였다. 본 연구에서 검증을 위해 국내의 전형적인 아파트 평면을 갖는 22층의 공동주택 건축물 모델이 고려되었다.

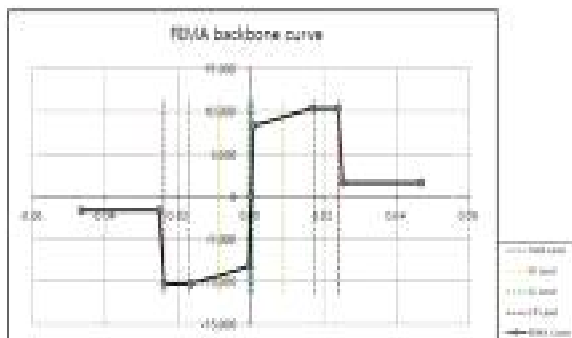
2.1 구조해석 모델 구축

해석모델은 비선형해석프로그램인 Perform-3D 프로그램을 이용하여 비내력벽 유무에 따라 모델링되었다. 비내력벽이 없는 건축물은 (Without Non Bearing Wall 이하 W/O NBW) 22층의 전단벽과 연결보로 구성된 공동주택 건축물이다. 연결보, 보 및 전단벽에 대한 물성치는 FEMA의 이력곡선 값을 통한 요소 모델링을 하였다.

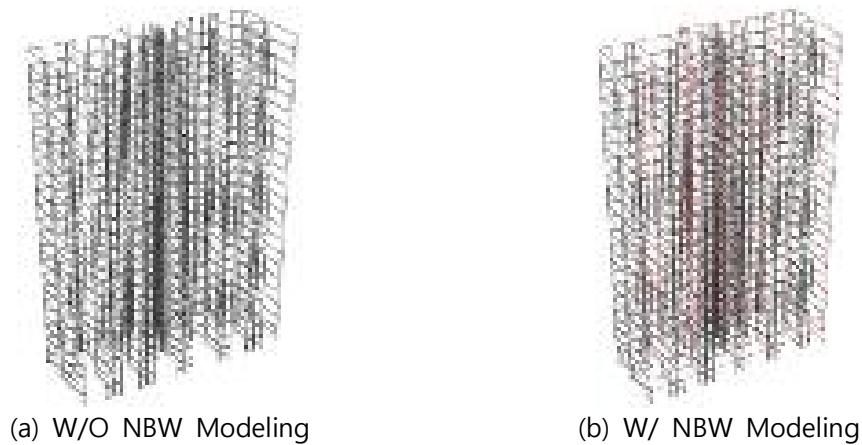
Perform-3D 프로그램을 이용하여 비내력벽이 있는 해석모델(W/ Non Bearing Wall 이하 W/ NBW)을 구현하였다. [그림 2.63(b)]의 빨간색 부분이 비내력벽 부분으로 연결보로 모델링되었다. Perform-3D에서는 벽체를 모사할 수 있는 두가지 방법이 있다. Shear wall은 면내방향 수평 축-휨거동을 탄성으로만 적용할 수 있으며, 대각 압축 거동의 옵션이 없다. 반면 General wall은 수직/수평 축-휨거동 모두 Inelastic fiber section을 이용하여 비탄성 거동을 적용할 수 있으며, 대각 압축 거동도 모사할 수 있는 옵션이 있다. 해당 건축물은 General wall로 비내력벽 모델링을 고려하였고 이를 연결보로 대체하여 모델링하였다. 연결보의 물성치는 FEMA의 이력곡선 값을 통한 요소 모델링하였다. FEMA의 이력곡선은 비선형 정적 및 동적 해석을 위한 구성 요소 모델을 개발하기 위한 기초로 지진 설계 표준에 사용된다. FEMA 이력곡선은 [그림 2.62]에 나타나 있다.

[표 2.14] 대상 건축물 개요

Building floor	22 floor
Load	DL = 5.62kN/m^2
	DLroof = 5.20kN/m^2
	LL = 2.00kN/m^2
Strength of materials	$f_y = 440\text{MPa}$
	$f_{ce} = 26.4\text{MPa}$
Slab thickness	200mm
Wall thickness	200mm
Coupling beam size	200×600, 200×750



[그림 2.62] FEMA 이력곡선



[그림 2.63] 비내력벽 유무에 따른 모델링

2.2 비선형 정적해석

비선형 정적해석은 구조물이 항복한 이후의 동적 거동과 하중의 재분배를 고려한 시스템의 안정 한계 상태를 효과적으로 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 일반적인 해석 방법이다. 비선형 정적 해석에 의한 공동 주택 성능수준은 최대 층간 변위비와 부재별 및 전체 구조물의 성능수준에 의해 판별되며 이는 성능점에서 판정된다. 성능점을 산정하기 위해서는 역량스펙트럼법 (Capacity Spectrum Method)과 변위계수법 (Displacement Coefficient Method)을 사용한다. 본 연구에서는 역량스펙트럼법을 사용하였다.

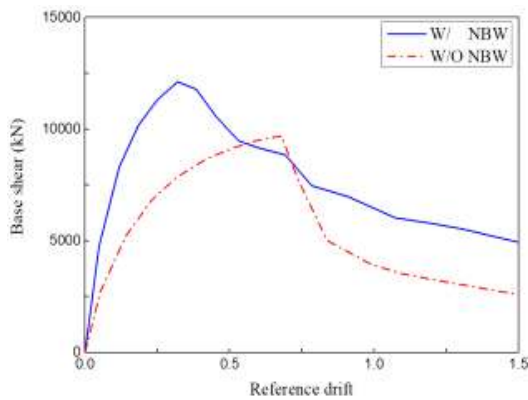
역량스펙트럼법은 비선형 정적 해석으로 얻을 수 있는 대상 구조물 전체의 밀면전단력-최상층변위 역량곡선 (Capacity Curve)과 구조물의 고려하는 지진에 대한 요구를 응답스펙트럼으로 나타낸다. 이 두 그래프를 동일한 그래프 상에서 표현함으로써 요구와 역량의 상호관계를 동시에 나타낼 수 있다. 여기서 설계 지진에 대한 요구응답스펙트럼은 5% 감쇠비를 고려하였다.

2.2.1 Pushover Curve

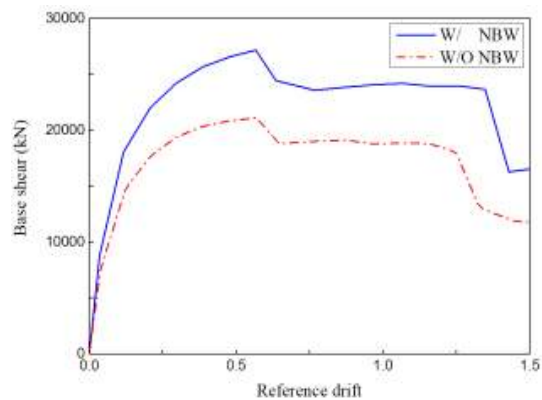
비내력벽 유무에 따른 Pushover Curve를 검토하였다. 밀면 전단력을 비교한 결과, X방향의 W/ NBW Model은 25.1% 증가하였고, Y방향의 W/ NBW Model은 28.7% 증가하였다. 비내력벽이 없는 구조물과 다르게 비내력벽을 포함한 구조물은 기존 구조벽을 일체화하는 효과가 발생하고 이를 통해 공동주택의 강성 및 강도가 증가하였다.

[표 2.15] 비내력벽 유무에 따른 밀면전단력 비교

	W/O NBW	W/ NBW	Ratio (%)
X-Dir	9688.28	12121.31	25.1
Y-Dir	21120.3	27172.84	28.7



(a) X방향 Pushover curve



(b) Y방향 Pushover curve

[그림 2.64] 비내력벽 유무에 따른 Pushover curve 비교

2.2.2 성능점

비내력벽 유무에 따른 건축물 각각의 X방향과 Y방향으로 비선형 정적 해석을 실시한 결과, 두 방향에서 성능점이 형성되었다. 아래 [표 2.16], [표 2.17]에 W/ NBW, W/O NBW 각각 성능점의 밀면전단력과 지붕의 변형률을 나타내었다.

[표 2.16] W/O NBW의 성능점

	Base Shear (kN)	Reference Drift
X-Dir	9,578	0.00649
Y-Dir	22,000	0.00223

[표 2.17] W/ NBW의 성능점

	Base Shear (kN)	Reference Drift
X-Dir	11,280	0.00249
Y-Dir	18,150	0.00236

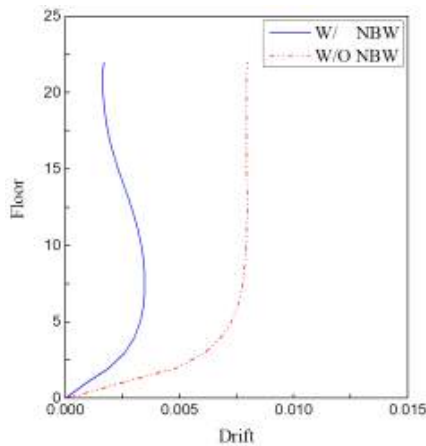
2.2.3 층간 변위비

최종적으로 산정된 성능점에서의 최대 허용 층간 변위비가 범위 내에 존재하는지 여부를 검증하였다. 목표성능수준은 내진 I 등급을 고려하여 해당 최대 허용 층간 변위비는 0.015를 초과하지 않아야 한다. 성능점에서 층간 변위비를 검토한 결과 목표성능을 만족하는 것으로 나타났다. 아래 [그림 2.65]에 X방향의 최대 층간 변위비를 나타내었다.

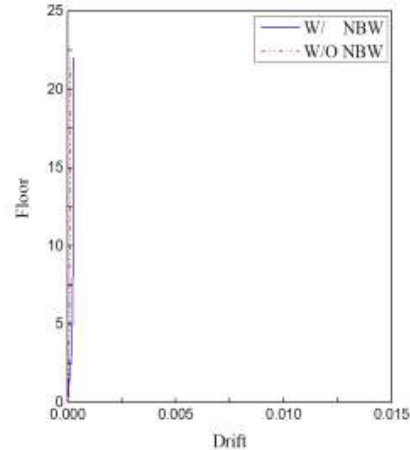
비내력벽 유무에 따른 최대 층간 변위비를 계산한 결과, X방향의 W/ NBW Model의 층간 변위비가 56.4% 감소하였고, Y방향의 W/ NBW Model의 층간 변위비가 75.4% 감소하였다. 비내력벽의 존재로 구조벽이 일체화되고 이는 강성과 강도의 증가로 전체 구조물의 층간 변위비가 감소하였다.

[표 2.15] 비내력벽 유무에 따른 story drift 비교

	W/O NBW	W/ NBW	Ratio (%)
X-Dir	0.007969	0.003475	56.4
Y-Dir	0.00103	0.00025341	75.4



[그림 2.65] X방향 story drift 비교



[그림 2.66] Y방향 story drift 비교

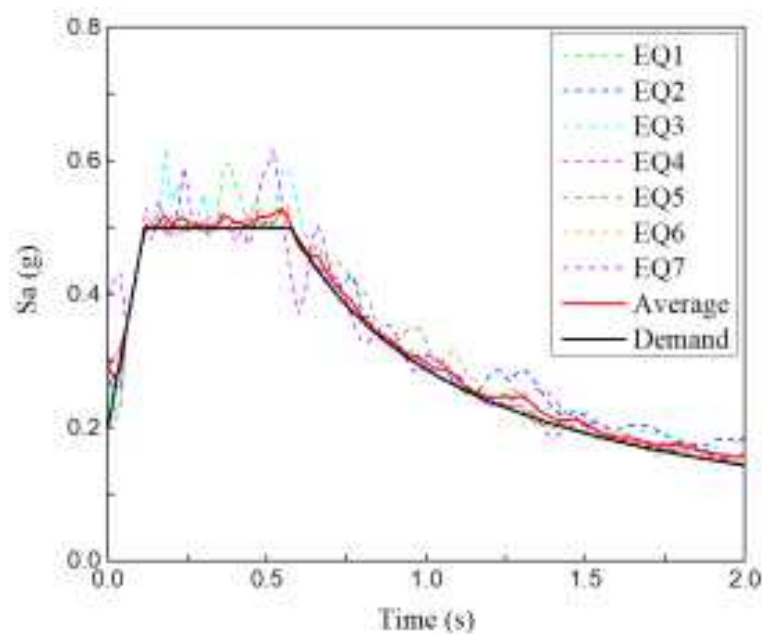
2.3 비선형 동적해석

Pushover 해석으로 알려진 비선형 정적해석은 탄성설계만을 실시하는 하중기반 설계법에 비해 구조물의 비선형 거동을 고려함으로써 지진하중이 작용할 때 실제 구조물의 거동을 보다 명확하게 평가할 수 있지만, 정적 해석에 기반을 두고 있기 때문에 비선형 동적해석 결과보다 부정확하다고 할 수 있다. 따라서 고층 또는 비정형 건축물의 경우 정확한 동적 거동을 파악하기 위해 비선형 동적해석을 실시하여야 한다. 비선형동적해석은 재료 및 부재의 비선형특성과 시간의존적인 특성을 반영하여, 구조물의 변위, 속도 및 가속도 응답이력을 구할 수 있는 가장 정확한 해석방법으로, 일반적으로 직접적분법(Direct Integration Method)의 수치적분법을 통해서 시간의 증분에 따른 구조물의 변위증분을 반복적인 계산으로 산정한다.

2.3.1 적용 지반운동 모델

시간이력해석은 지반조건에 상응하는 지반운동기록을 최소한 3개 이상 사용하여 실시하여야 한다. KBC2016의 0306.7.4.에 따라 개별 지반운동의 성분별로 5% 감쇠비의 응답스펙트럼을 작성하고, 주기별로 제곱합 제곱근 (SRSS)을 취하여 제곱합 제곱근 스펙트럼을 산정하며, 이 제곱합 제곱근 스펙트럼들의 평균값이 설계대상 구조물 기본진동주기의 0.2배부터 1.5배 사이 ($0.2T_1 < T < 1.5T_1$)에 해당되는 주기에 대해서 설계스펙트럼의 1.3배보다 10% 이상 작지 않도록 해야 한다. 3개의 지반운동을 이용하여 해석할 경우에는 최대 응답을 사용해야하며, 7개 이상의 지반운동을 이용하여 해석할 경우에는 평균응답을 사용할 수

있다. 본 연구에서는 보다 정확한 해석을 위하여 7개의 지반운동을 사용하였으며, 총 7개의 지반운동을 KBC2016의 스펙트럼 [그림 2.67]에 맞게 Seismo Match 컴퓨터응용 프로그램을 사용하여 스케일링 후 비선형 동적 해석을 실시하였다. 스케일링 방법을 통한 7개 지반 운동은 [표 2.19]에 나타나있다. 또한 해석에 사용된 지진 하중 조건은 [표 2.20]에 나타나있다.



[그림 2.67] KBC2016 설계스펙트럼과 스케일링된 7개의 지반 운동

[표 2.19] 비선형 동적 해석 시 사용된 지반 운동 기록

Earthquake	Year	Site	Record Time (sec)	Magnitude (Mw)	Scale Factor
EQ 1. Imperial Valley -02	1940	El Centro Array #9	53.7	6.95	0.563
EQ 2. San Fernando	1971	LB - Terminal Island	79.99	6.61	3.956
EQ 3. Imperial Valley -06	1979	Delta	100.14	6.53	0.508
EQ 4. Imperial Valley -06	1979	El Centro Array #4	39.09	6.53	0.418
EQ 5. Imperial Valley -06	1979	El Centro Array #8	37.77	6.53	0.436
EQ 6. Hollywood	1952	Hollywood Storage P.E	78.62	7.3	3.468
EQ 7. Parkfield	1966	Parkfield Cholame,Sh andon	26.06	6.1	3.520

[표 2.20] 지진 하중 조건

항목	내용	비고
지역계수	0.22g	지진구역 I
중요도계수	1.2	내진 I 등급
지반분류	S_D	보통암 20cm이상
지반증폭계수	$F_a=1.36$ $F_v=1.96$	
설계스펙트럼 가속도	$S_{DS}=0.4987$ $S_{D1}=0.2875$	
내진설계범주	D	
반응수정계수	4	
지진력저항시스템	보통전단벽	

2.3.2 층간 변위비

7개의 지반운동에 대한 평균값을 사용하여 대상 건축물의 X방향과 Y방향의 층간변위를 검토하였다. W/O NBW X방향으로는 22층에서 최대 변위비 0.0154로 나타났고, Y방향으로는 20층에서 최대 변위비 0.0074로 나타났다. W/ NBW X방향으로는 16층에서 최대 변위비 0.0050으로 나타났고, Y방향으로는 18층에서 최대 변위비 0.0051로 나타났다. W/NBW의 두 방향 및 W/O NBW Y방향은 최대 변위비 모두 허용 층간 변위비인 0.015를 초과하지 않아서 목표성능을 만족하는 것으로 판단되었다.

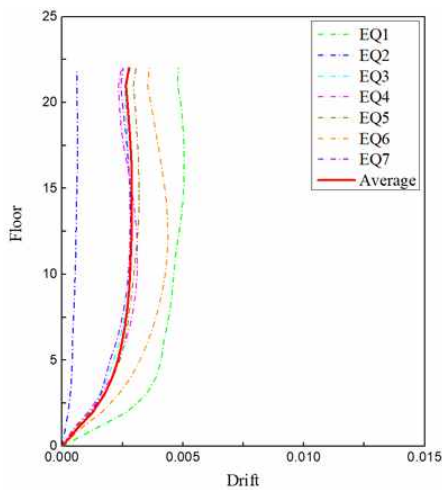
아래 각각 X방향과 Y방향의 7개 지반운동에 대한 층간 변위비와 그에 대한 평균값, 허용 층간 변위비를 나타내고 있다.

[표 2.21] W/ NBW의 층간 변위비

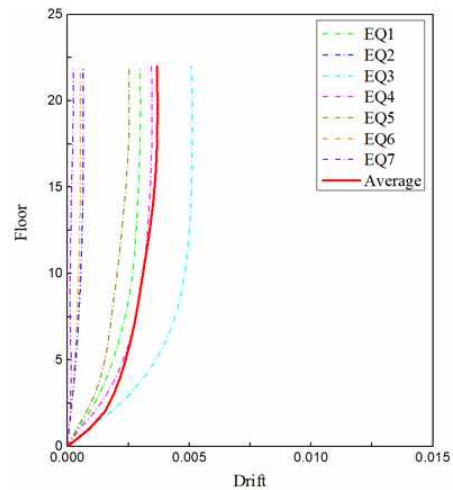
	X방향MAX	Y방향MAX
Q1	0.0050	0.0030
Q2	0.0006	0.0007
Q3	0.0029	0.0051
Q4	0.0031	0.0035
Q5	0.0032	0.0025
Q6	0.0044	0.0005
Q7	0.0028	0.0002
Average	0.0031	0.0022

[표 2.22] W/O NBW의 층간 변위비

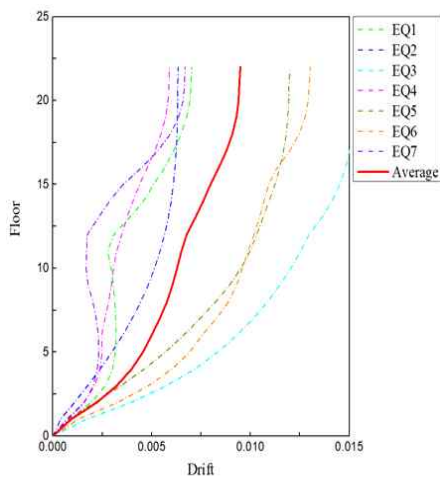
	X방향MAX	Y방향MAX
Q1	0.0070	0.0040
Q2	0.0063	0.0005
Q3	0.0154	0.0074
Q4	0.0059	0.0028
Q5	0.0120	0.0040
Q6	0.0130	0.0002
Q7	0.0067	0.0001
Average	0.0095	0.0027



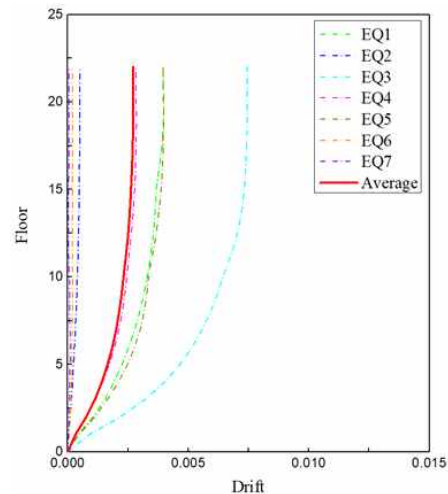
(a) W/ NBW X방향 최대 층간 변위비
[그림 2.68] W/ NBW의 최대 층간 변위비



(b) W/ NBW Y방향 최대 층간 변위비
[그림 2.68] W/ NBW의 최대 층간 변위비



(a) W/O NBW X방향 최대 층간 변위비
[그림 2.69] W/O NBW의 최대 층간 변위비



(b) W/O NBW Y방향 최대 층간 변위비
[그림 2.69] W/O NBW의 최대 층간 변위비

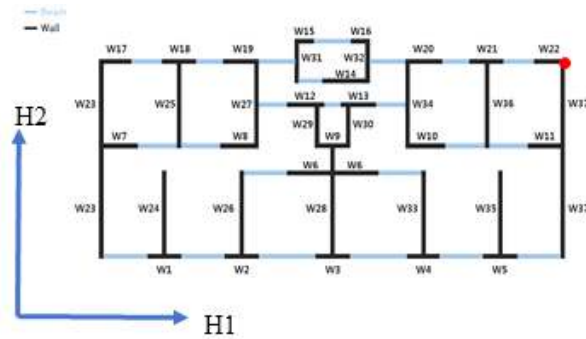
2.3.3 압축변형률

RC전단벽으로 대표되는 공동주택은 층간변위비와 함께 벽체의 압축변형률이 내진성능에 중요한 영향을 미친다. 벽체 단부의 수직방향 변형률 응답이 가장 클 것으로 예상되는 최외각에 위치한 벽체에서 압축변형률 검토를 수행하였다. 해당 벽체는 [그림 2.70]에 빨간 점으로 표시되어있다.

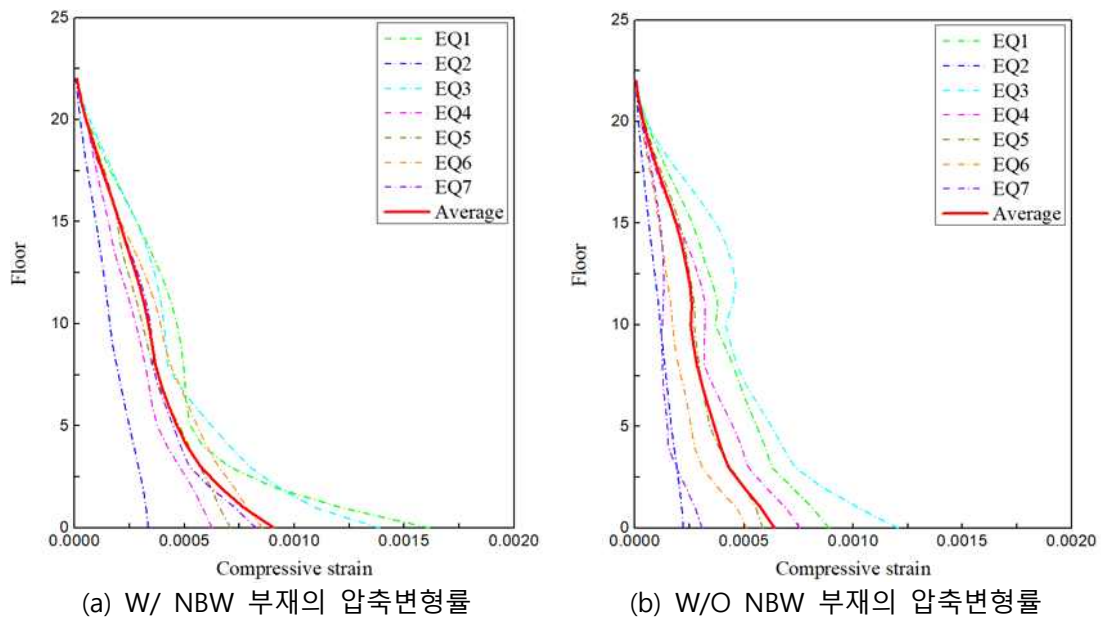
벽체의 압축변형률에 대한 검토는 중요한 사항으로 ASCE 41-06에 따라 콘크리트 허용 압축변형률을 0.002로 설정하였다.

W/O NBW에 대해서 7개 지진파의 평균값은 0.0006, 개별 지진파의 최대값은 0.0012 (Q3)로 나타났고, W/ NBW에 대해서 7개 지진파의 평균값은 0.0009, 개별 지진파의 최대값은 0.0016 (Q1)로 허용 기준을 만족하는 것으로 평가되었다. W/ NBW 및 W/O NBW 모두 허용 기준값을 만족하였지만 비구조벽의 존재는 양 옆에 존재하는 구조벽을 일체화

(coupling)하는 효과를 발생하게 하며 이는 강도와 강성의 증가를 가져왔다는 것을 알 수 있다.



[그림 2.70] 최외각 압축변형을 검토 지점



[그림 2.71] 비내력벽 유무에 따른 압축변형률 비교

[표 2.23] 비내력벽 유무에 따른 압축변형률

	W/ NBW MAX	W/O NBW MAX
Q1	0.0016	0.0009
Q2	0.0003	0.0002
Q3	0.0014	0.0012
Q4	0.0006	0.0008
Q5	0.0007	0.0006
Q6	0.0009	0.0005
Q7	0.0008	0.0003
Average	0.0009	0.0006

2.4 소결

본 논문에서는 국내의 전형적인 아파트 평면을 갖는 22층의 공동주택 건축물을 선정하여 비내력벽 유무에 따라 비선형 정적 해석과 비선형 동적 해석을 실시하여 구조물의 지진 거동을 보다 명확히 예측하고 내진성능을 평가하여 구조벽과 비내력벽의 일체화 효과에 대해 연구하였다. 본 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

2.4.1 비선형 정적해석 결과

본 연구에서 적용된 22층의 공동주택 해석 모델을 검증하기 위하여 비선형 정적 해석을 실시하였다.

(1) Pushover curve를 통하여 밀면 전단력을 비교한 결과, X방향의 W/ NBW Model은 25.1% 증가하였고, Y방향의 W/ NBW Model은 28.7% 증가하였다.

(2) 성능점 검토 결과, X방향과 Y방향의 성능점에서 밀면전단력은 각각 17,780 kN, 23,650 kN이며 변위는 각각 1.638 mm과 1.327 mm로 확인되었다.

(3) 비내력벽 유무에 따른 최대 층간 변위비를 계산한 결과, X방향의 W/ NBW Model의 층간 변위비가 56.4% 감소하였고, Y방향의 W/ NBW Model의 층간 변위비가 75.4% 감소하였다.

2.4.2 비선형 동적해석 결과

지반 조건이 고려되어 KDS 스펙트럼에 맞게 스케일링된 7개의 지반운동을 적용하여 비선형 동적 해석을 실시하였다.

(1) 층간 최대 변위비를 검토 결과, W/ NBW의 두 방향 모두 허용 층간 변위비인 0.015를 초과하지 않아서 목표성능을 만족하는 것으로 판단되었다. 비내력벽 유무에 따른 최대 층간 변위비를 계산한 결과, X방향의 W/ NBW Model의 층간 변위비가 67.4% 감소하였고 Y방향의 W/ NBW Model의 층간 변위비가 18.5% 감소하였다.

(2) 최외각에 위치해 있는 벽체를 선정하여 압축변형률에 대한 검증을 실시하였다. 7개의 지진에 대해 0.002를 초과하지 않아서 목표 성능을 만족하는 것으로 평가하였다. 압축변형률에 대한 검증을 실시한 결과, W/O NBW에 대해서 7개 지진과의 평균값은 0.0006으로 나타났고, W/ NBW에 대해서 7개 지진과의 평균값은 0.0009으로 나타났다.

대부분의 벽체 관련 연구는 전단벽 및 구조물 전체의 내진성능 확보를 위한 보강재로서의 연구만 수행되었다. 본 연구는 수벽 및 날개벽과 같은 비내력벽에 대한 내진성능 확보, 균열하자 및 탈락 방지 등 비내력벽의 피해로 인한 구조물의 구조 요소 손상을 방지할 수 있는 기술로서 기존 연구와 비교하여 차별성이 뚜렷하다. 본 연구와 유사한 끼움벽, 개구부가 있는 조적조 내진 보강 연구가 있지만 전체 시스템에서의 내진성능 향상을 중점으로 연구가 수행되었다. 비구조벽의 존재는 양 옆에 존재하는 구조벽을 일체화(coupling)하는 효과를 발생하게 하며 이는 강도와 강성의 증가를 가져오게 된다. 또한 의도치 않게 비

구조벽의 지진력의 에너지 소산을 일정 부분 담당하게 되어 손상이 발생할 수 있다. 이러한 효과에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

3. 세종대학교 비내력벽 추가 특허 진행

주관 연구기관인 세종대학교는 연구성과로 2차년도 목표였던 특허출원 1건 (내진 시공이 적용된 비내력벽 시스템, 출원번호 10-2018-0131520,[그림 2.72])을 1차년도에 제출함으로써 연구성과를 이미 완료하였다. 추가적으로 세종대학교에서는 2차년도 연구과정을 거치면서, 개선된 비내력벽 연결시스템과 연구결과들을 토대로 특허출원을 추가로 완료하였다. “지진재해 발생시 공동주택 비내력벽의 손상과 탈락을 방지하기 위한 매립형 에너지소산 강재 다웰바 시스템”의 발명 명칭으로 특허출원을 완료하였다.(출원번호 10-2019-0153509, [그림 2.73])

관인생략 출원번호통지서

출원일자 2018.10.31
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(SP180097)
출원번호 10-2018-0131520 (접수번호 1-1-2018-1076452-86)
출원인명칭 세종대학교산학협력단(2-2005-011470-2)
대리인성명 유병욱(9-2007-000605-1)
발명자성명 이기학 김은서 박아론
발명의명칭 내진 시공이 적용된 비내력벽 시스템

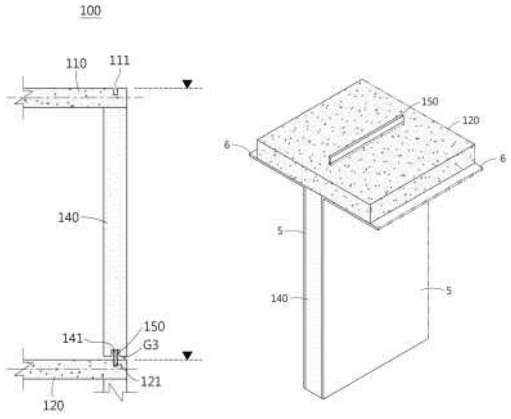
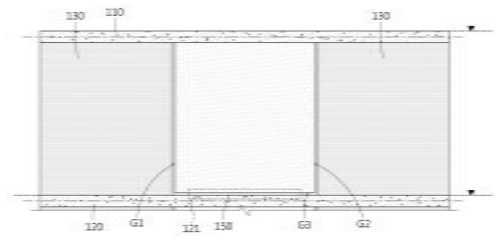
특허청장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고려번호 정보변경(감정), 잠정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다오프로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일로부터 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr> > 특허·실용신안 > 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장할 수, 선출원이 미국개성대미, 우선권일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자특고판해가서(PTOSH399)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 중립원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허가결결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.

(a) 출원번호 통지서

[그림 2.72] 1차년도 세종대학교 특허 출원 증빙



(b) 1차년도 발명의 대표도

관인생략 출원번호통지서

출원일자 2018.11.26
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(SP180122)
출원번호 10-2018-0131520 (접수번호 1-1-2018-121849-03)
출원인명칭 세종대학교산학협력단(2-2005-011470-2)
대리인성명 유병욱(9-2007-000605-1)
발명자성명 이기학 김은서 박아론
발명의명칭 내진 시공이 적용된 비내력벽 시스템

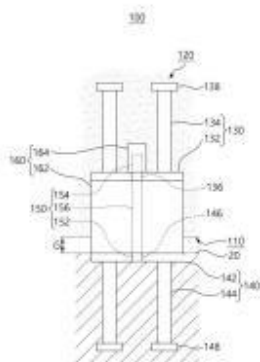
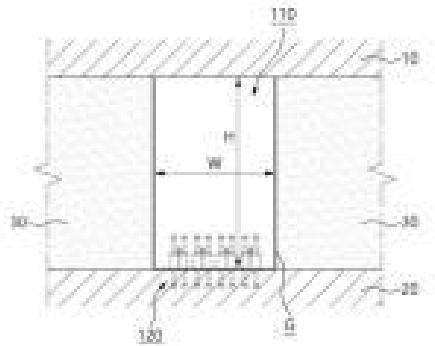
특허청장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고려번호 정보변경(감정), 잠정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다오프로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일로부터 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr> > 특허·실용신안 > 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장할 수, 선출원이 미국개성대미, 우선권일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자특고판해가서(PTOSH399)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 중립원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허가결결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8. 기타 심사 절차와 관련 사항은 출원인 안내서를 참조하시기 바랍니다.

(a) 출원번호 통지서

[그림 2.73] 2차년도 세종대학교 추가 특허출원



(b) 2차년도 발명의 대표도

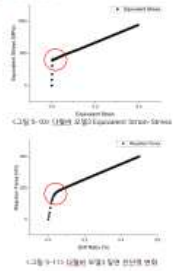
4. 평가해석모델에 대한 전문가 자문 진행

세종대학교의 2차년도 연구결과내용 1, 2에서 제시된 평가해석모델들의 검증에 대해 전문가 자문을 3건 진행하였다. 평가해석모델들의 연구결과를 토대로 발표자료들을 작성하여 연구내용을 전문가들에게 제시하였고 전문가대상 설문조사지를 통하여 전문가 의견과 각 항목들에 대해 점수를 받아 해석모델들의 검증을 진행하였다. [그림 2.74]는 전문가들에게 제시했던 평가해석모델 연구내용 중 일부이고 [그림 2.75]은 진행한 전문가대상 설문조사지이다. 진행하였던 자세한 전문가대상 설문조사지 내용은 성과증빙자료집에 모두 포함되어있다.

05. 다월배 모델 FEM 해석

콘크리트/내진공학 연구실

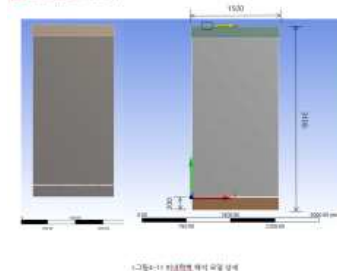
■ 다월배 모델 3 분석



04. 비내력벽 모델 FEM 해석

콘크리트/내진공학 연구실

■ 비내력벽 모델 상세

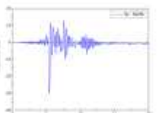
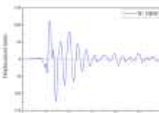
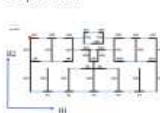


3. LH 공동주택 - 22층 모델

콘크리트/내진공학 연구실

■ 비선형시간이력해석

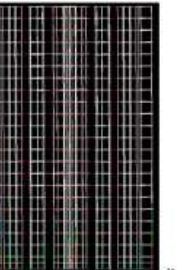
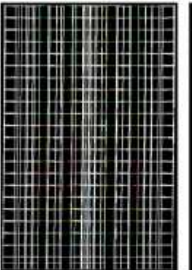
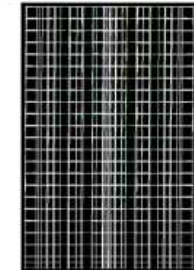
• Displacement



3. LH 공동주택 - 22층 모델

콘크리트/내진공학 연구실

■ 비선형시간이력해석



[그림 2.74] 전문가자문 연구내용 제시자료

전문가 대상 설문조사지

본 설문조사는 2023년 10월 10일부터 10월 15일까지 진행되며, 설문조사 결과는 10월 15일 이후 10월 20일까지 발표될 예정입니다. 설문조사 결과는 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다. 설문조사 결과는 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다. 설문조사 결과는 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.

질문	답	답	답	답	답
1. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
2. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
3. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
4. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
5. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
6. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
7. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
8. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
9. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
10. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예

본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.

전문가 대상 설문조사지

본 설문조사는 2023년 10월 10일부터 10월 15일까지 진행되며, 설문조사 결과는 10월 15일 이후 10월 20일까지 발표될 예정입니다. 설문조사 결과는 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다. 설문조사 결과는 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다. 설문조사 결과는 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.

질문	답	답	답	답	답
1. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
2. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
3. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
4. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
5. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
6. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
7. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
8. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
9. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예
10. 본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.	예	아니오	예	아니오	예

본 연구실의 연구결과에 반영될 예정입니다.

[그림 2.75] 전문가대상 설문조사지

■주관연구기관: 개명대학교

■계명대 연구목표 : 정적반복가력실험을 통한 대체시스템의 내진성능평가

1. 수벽과 날개벽 대체시스템 적용 RC벽체의 실험적 내진성능평가 및 분석

1.1 연구개요

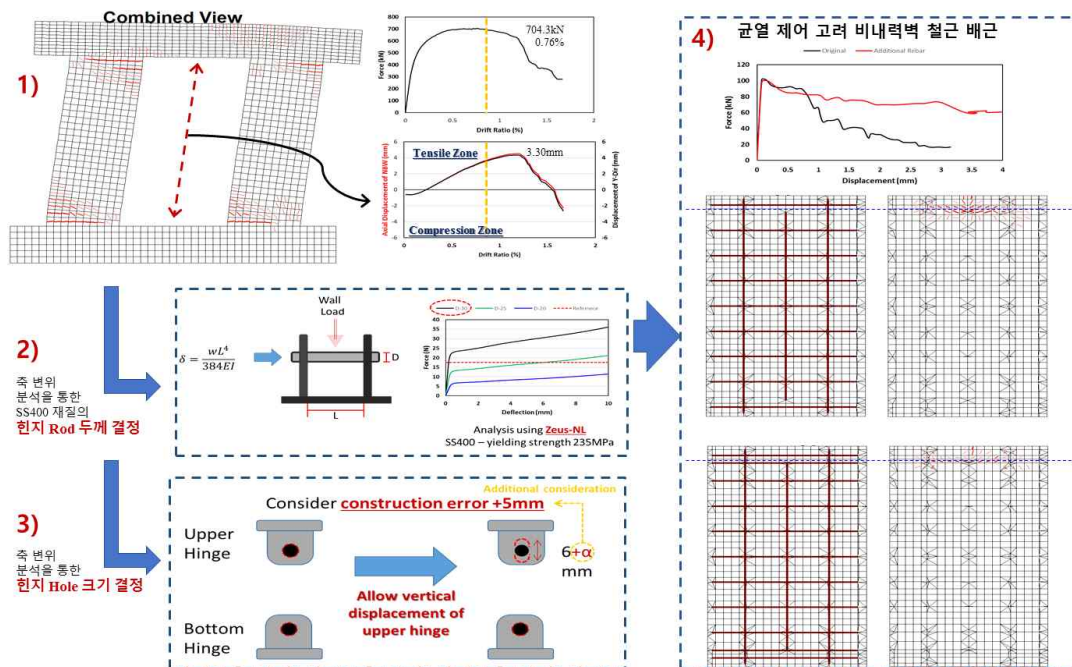
공동연구기관인 계명대학교는 비내력벽 대체시스템 적용 RC벽체의 실험적 내진성능평가를 2차년도 목표로 하며, 이를 달성하기 위하여 아래와 같이 연구를 수행하였다.

- PC 비내력벽 시스템 개발
- 실제 2017년 포항지진으로부터 피해가 발생한 공동주택을 선정하여 실험체 설계 및 제작
- 계측장비 및 가력 계획 수립
- 일정한 축력하에서 정적반복가력 실험 수행
- 비내력벽 대체시스템 적용 RC벽체의 실험적 내진성능평가

1.2 PC 비내력벽 시스템 개발

많은 구조물의 피해가 야기된 2017년 포항지진으로 인하여 벽식 아파트에 전단균열과 같은 심각한 손상으로 막대한 보수·보강 비용이 발생하였다. 일반적으로 비내력벽의 경우, 시공 시 조적조 등과 같은 공법을 적용하여 건축물의 구조부재와 일체화를 시키지 않았지만, 최근 인건비 및 시공비 증가로 인해 실제 시공현장에서는 비내력벽에 최소 철근으로 배근하여 전단벽과 일체화시켜 공동으로 콘크리트를 타설하였다. 이러한 문제로 인하여 보강량이 적은 비내력벽이 전단벽과 함께 횡력에 저항함으로 쉽게 손상을 입게 되며, 이 때 발생하는 전단균열은 일체화 타설로 인하여 인접 전단벽까지 확장되었다.

따라서, 본 연구에서는 PC형 시스템을 개발함으로써 비내력벽의 균열 및 손상을 제어하고 인접 내력벽으로 손상이 확장 되는 것을 방지하고자 한다.



[그림 2.76] PC 비내력벽 시스템 개발 과정



[그림 2.77] PC 비내력벽 시스템 개요도

PC 비내력벽 시스템은 [그림 2.76]에서 나타난 바와 같이 PC형 비내력벽과 상/하부의 힌지로 구성되며, PC형 비내력벽은 긴급 보수 및 교체가 가능하도록 프리캐스트로 제작되며, 상/하부 힌지와 접합되는 부분에서 미비한 인장에 균열이 발생하지 않도록 비선형시간 이력 해석을 통해 철근을 배근하였다. 프리캐스트로 제작된 비내력벽은 철물로 제작된 힌지를 이용하여 상·하 슬래브 사이에 끼워넣을 수 있도록 개발되었으며, 힌지의 스티드는 상/하부 슬래브 철근에 고정 및 거치할 수 있도록 설계하였다. 또한, 한국건축구조기준에서 제시하고 있는 허용층간변위비와 실무에서 일반적으로 고려할 수 있는 변위를 고려하여 비내력벽 양단부에 20mm, 상·하부에 30mm 슬릿(slit)을 두었다. 이는 내부 비내력벽과 인접 내력벽을 분리함으로써 내부 비내력벽에 의한 균열 및 손상이 전달되는 것을 방지하고 지진 하중이 작용할 때 구조부재의 거동에는 영향을 주지 않기 위함이다.

1.3 실제 2017년 포항지진으로부터 피해가 발생한 공동주택을 선정하여 실험체 설계 및 제작



[그림 2.78] 포항지진(2017)으로 인하여 피해가 발생한 벽식 아파트

[그림 2.78]는 2017년 포항지진으로 인하여 벽식 아파트의 심각한 피해를 나타내고 있으며, 도면을 분석한 결과 고층의 벽체 길이 1.5m 이내의 날개벽에서 발생하였다. 실험체는 실제 구조물의 거동과 비교·분석하기 위하여 상·하부 슬래브 사이에 벽체가 있는 형상(Double bending)으로 설계하였다. 실험체는 액츄에이터 용량 및 실험실의 여건을 고려하여 실제 크기의 2/3 Scale로 축소하여 설계하였다.

실험체는 기존 실험체 2개(NBW 및 REF) 및 개발한 비내력벽 시스템을 적용한 실험체 3개(DBW, SPW, HW)로 총 5개 설계하였으며, 실험체 변수 및 상세는 [표 2.24]와 같다. 실험체의 상부 및 하부 기초는 횡 하중 가력 시 본 연구의 목적에 맞추어 변형이 발생하지 않도록 강성을 증가시키기 위하여 과보강 하였다.

[표 2.24] 실험체 상세

Specimen		Dimension, mm		Concrete Strength (MPa)	Rebar ratio, %			
					Longitudinal		Transverse	
		Bearing Wall	Non-Bearing Wall		Bearing Wall	Non-Bearing Wall	Bearing Wall	Non-Bearing Wall
NBW	Conventional system	670x1800x135	1000x1800x135	24.7	0.47	0.21	0.29	0.29
REF	Reference specimen	670x1800x135	-	24.8	0.47	-	0.29	-
DBW	Dowel bar system	670x1800x135	960x1800x135	20.4	0.47	0.21	0.29	0.29
SPW	steel plate system	670x1800x135	960x1800x135	23.5	0.47	0.21	0.29	0.29
HW	precast wall with hinge	670x1800x135	960x1740x135	23.6	0.47	0.21	0.29	0.29

모든 실험체에서 벽체의 수직 및 수평 철근은 피해가 발생한 벽식 아파트의 철근배근을 기반으로 하였으며, 제작을 고려하여 모두 D10으로 배근하였다. 또한, 수직철근비의 경우 내력벽 및 비내력벽 각각 0.47% 및 0.21%이며, 수평철근비는 모두 0.29%로 배근하였다.

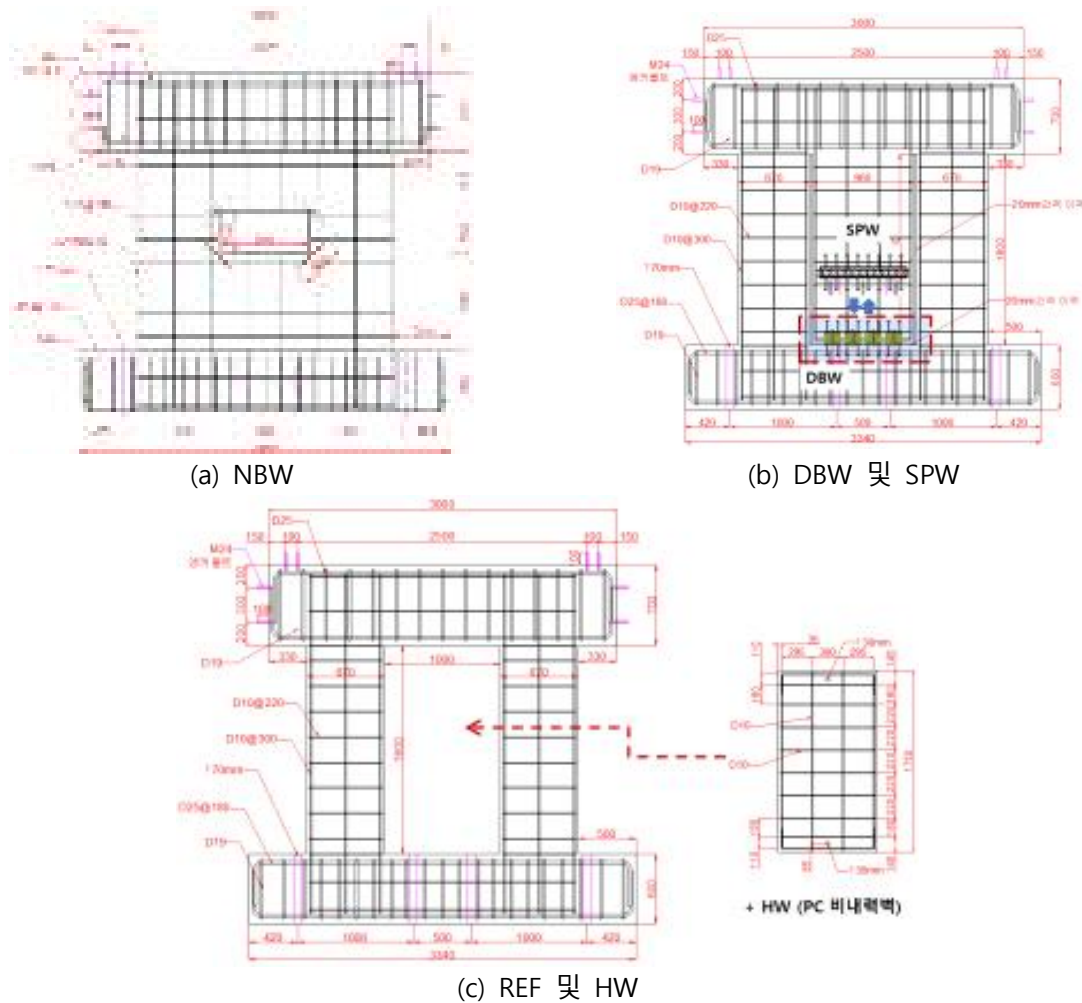
NBW의 상세는 [그림 2.79]과 같으며, 2017년 포항지진에 의한 피해 아파트의 도면을 이용하여 축소한 모델로서 실험을 통하여 피해를 분석하고, 비내력벽 대체시스템을 적용하여 RC벽체의 내진성능을 평가하는 비교 실험체이다. 또한, NBW의 비내력벽에 780x350mm 크기의 개구부가 있으며, 개구부 주위에는 보강기준을 고려하여 수직, 수평 및 사선으로 보강근을 배근하였다.

REF의 상세는 [그림 2.79]과 같으며, NBW와 비교하여 비내력벽 유·무에 따른 거동 확인과 더불어 개발된 비내력벽 대체시스템 적용 RC벽체의 성능을 평가하기 위한 기준 실험체이다.

DBW 및 SPW는 슬롯형 비내력벽 시스템으로 비내력벽의 상부는 상부 기초와 일체화되어 있으며, 단부 및 하부에는 20mm의 슬릿을 두고 있다. DBW 및 SPW 비내력벽 시스템의 주된 목적은 지진하중 발생 시 비내력벽 하부에 매립되어 있는 Dowel bar 및 Steel Plate가 이력 댐퍼의 이력과 같이 에너지를 소산시키며, 비내력벽의 균열 및 손상을 제어한다.

HW는 PC형 비내력벽을 제작 후 개발된 힌지를 이용하여 조립함으로서 지진 발생 후 긴급시공 및 RC구조물 신축 시 PC형으로 시공이 가능하다. HW 비내력벽 시스템의 주된 목적은 비내력벽을 프리캐스트로 제작하여 끼워 넣음으로써 공기를 단축시키고, PC 비내력벽 양단에 20mm, 상·하부에 30mm 슬릿을 두어 외력으로 인한 구조부재에 변형 발생 시 힌지 시스템으로 비내력벽에 대한 하중 전달을 완전히 차단하여 균열 및 손상을 제어하는

것이다.



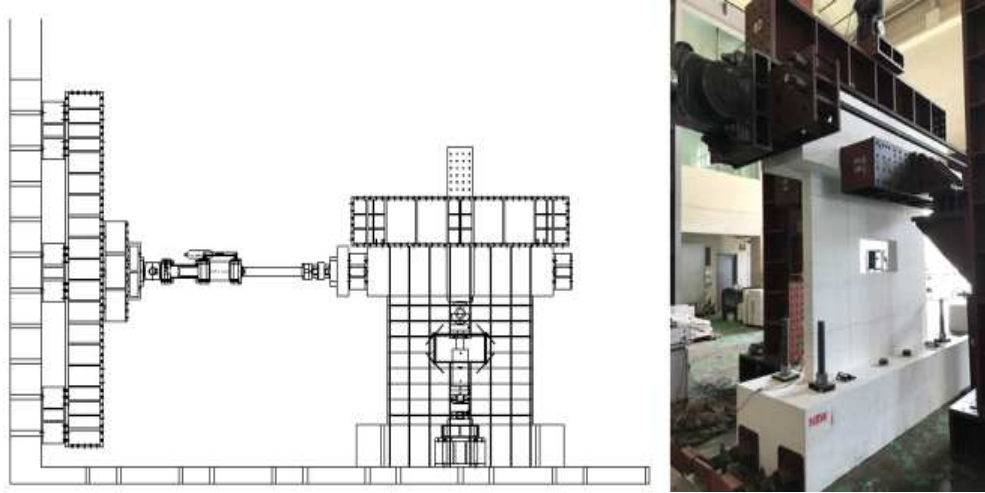
[그림 2.79] 기준 및 비내력벽 대체시스템 적용 실험체 설계상세

1.4 계측장비 및 가력 계획 수립

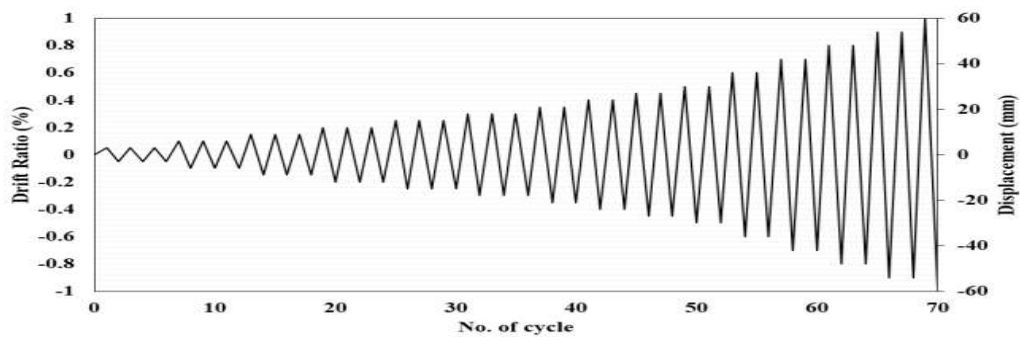
[그림 2.80]에서 보이는 바와 같이 일정한 축력 하에서의 정적반복가력 실험을 수행하기 위하여 2개의 가력장치를 사용하였다. 모든 실험체의 축력은 벽체 압축 용량의 10% ($0.1f_{ck}A_g$, 758kN)이며, 2,000kN 용량의 가력장치를 사용하여 일정하게 가력하였다. 축력은 국부적으로 가력하게 되면 상부 기초에 손상 및 변형이 발생하게 되고, 본 연구의 목적에 부합하지 않고 실제와 상이하게 비내력벽의 손상을 초래 할 수 있다. 따라서, 축하중 가력 시 등분포로 상부기초에 전달될 수 있도록 높은 강성 및 면적을 가지는 프레임을 설치하였다.

횡력은 정가력 방향으로 2,000kN 및 부가력 방향으로 1,300kN의 용량을 가지는 엑츄에이터를 이용하여 횡 하중 계획을 기반으로 변위 제어 방식으로 가력하였다. 횡력이 작용할 때 실험체가 면외 방향으로 전도 및 비틀림이 발생하는 것을 방지하기 위하여 상부 양단에 강봉과 M24앵커볼트를 이용하여 가이드를 설치하였다. 횡 하중 계획은 [그림 2.81]과 같이

변위를 기반으로 점진적 증가 및 감소하며, 반복되는 하중에서 강성 저감을 분석하기 위하여 층간변위비 0.3%까지는 3 사이클, 이 후에는 2 사이클 반복 가력하였다.

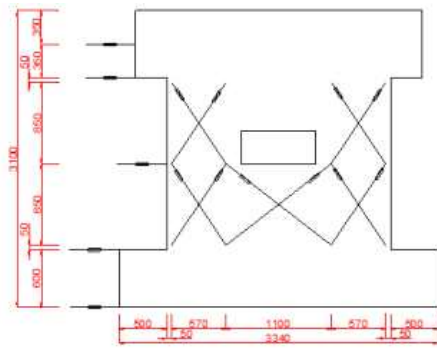


[그림 2.80] 실험체 세팅

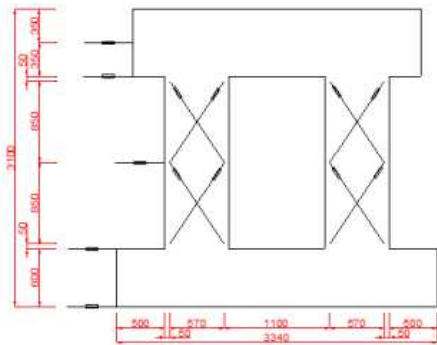


[그림 2.81] 횡 방향 가력 패턴

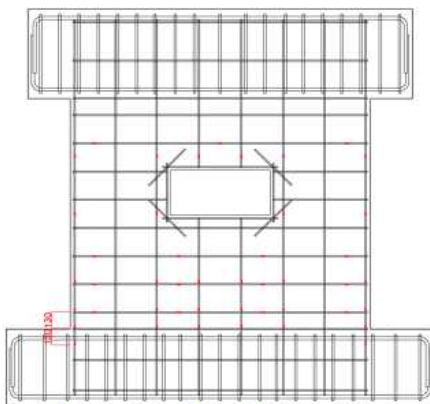
모든 실험체에서 상부 기초에 횡력이 작용 할 때의 변위를 측정하기 위하여 상부 기초에 2개 및 벽체 중앙부에 1개의 LVDT를 각각 설치하였으며, 하부 기초에서는 횡력으로 인한 슬라이딩 및 회전을 고려하여 상·하부에 각 1개씩 LVDT를 설치하였다. 또한, 횡력에 따른 RC벽체의 전단변형을 측정하기 위하여 면내 방향에 대하여 ‘X’형상으로 LVDT를 설치하였다. 또한, 실험체에 횡 하중이 가력될 때 개발된 비내력벽 대체시스템의 영향을 분석하기 위하여 [그림 2.84]와 같이 변형률 게이지를 부착하였으며, 실험체의 철근 변형률과 비교·분석을 통하여 실험체의 거동에 미치는 영향을 분석하고자 한다.



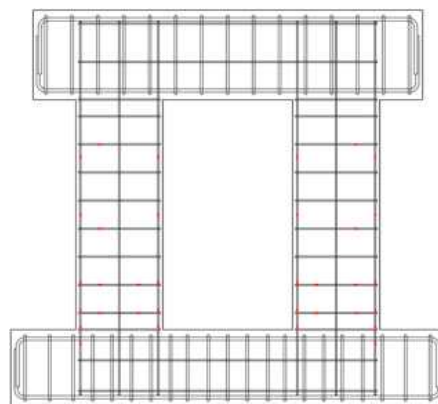
[그림 2.82] NBW의 LVDT 위치 및 설치 상황



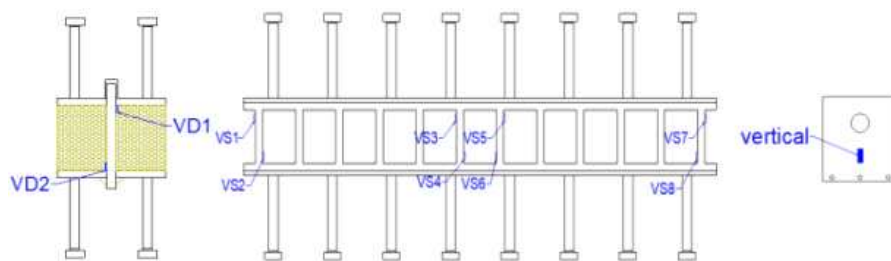
[그림 2.83] REF, DBW, SPW, HW의 LVDT 위치 및 설치 상황



(a) NBW (최대 개수-45개)



(b) REF (최소 개수-33개)



(c) 비내력벽 대체시스템 부착 변형률 게이지
[그림 2.84] 변형률 게이지 계측 계획

2. 실험결과 분석을 통한 비내력벽 대체시스템 적용 RC벽체의 실험적 내진성능 평가

2.1 균열양상

2.1.1 층간변위비 0.2%일 때

층간변위비 0.2%에서 NBW, DBW, SPW, HW의 균열 양상은 [그림 2.85]와 같다. 기준 실험체인 NBW는 양단 내력벽에 발생한 다수의 균열이 중간까지 확장되었으며, 개구부 모서리 부분에서는 다수의 대각균열이 발견되었다. DBW, SPW, HW의 균열양상을 보면 내력벽에 휜균열이 발생하였으나 하단부에만 일부 발생하였고, 비내력벽에는 균열이 전혀 발견되지 않았다.



(a) NBW



(b) DBW



(c) SPW

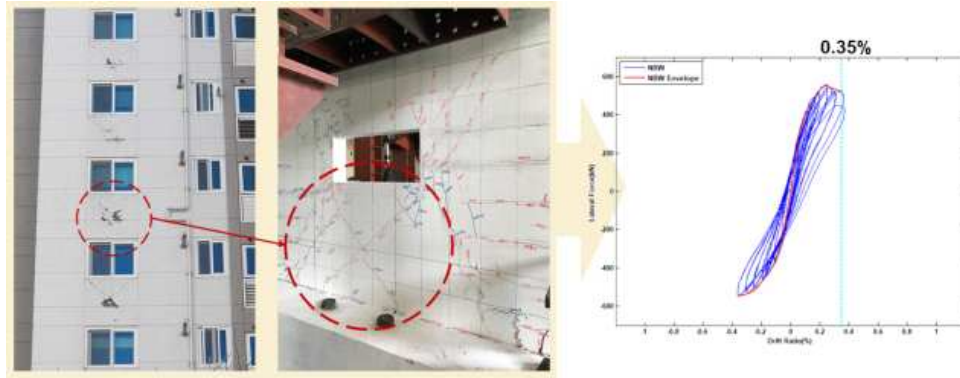


(d) HW

[그림 2.85] 층간변위 0.2%일 때 실험체의 균열 양상

2.1.2 층간변위비 0.35%일 때

[그림 2.86]에 나타난 바와 같이 NBW는 층간변위비 0.35%일 때 2017년 포항지진으로 피해가 발생한 구조물과 동일한 균열양상을 나타낸다. 층간변위비 0.35%일 때 DBW, SPW, HW의 균열양상은 [그림 2.85]과 같다.



[그림 2.86] 층간변위비 0.35%일 때 NBW의 균열양상 비교

[그림 2.87 (a)] 및 [그림 2.87 (c)]에 보이는 바와 같이 층간변위비 0.35%일 때 DBW와 HW 모두 양단 내력벽에서 균열이 발생하였으나, 비내력벽에는 균열이 발생하지 않았다. [그림 2.87 (b)]에 보이는 바와 같이 층간변위비 0.35%일 때 SPW 실험체의 양단 내력벽에는 일부 균열이 발생하였다. 하지만 비내력벽에 균열이 전혀 발생하지 않은 DBW 및 HW 실험체와는 달리 SPW 실험체 비내력벽 상부에는 일부 균열이 발생하였다.



(a) DBW



(b) SPW



(c) HW

[그림 2.87] 층간변위 0.35%일 때 DBW, SPW, HW의 균열 양상

2.1.3 층간변위비 0.5%일 때

층간변위비 0.5%일 때 NBW, DBW, SPW, HW의 균열 양상은 [그림 2.88]과 같다. NBW는 층간변위비 0.45%일 때 균열이 확장되었고, 대각균열을 따라 발생한 콘크리트 피복의 박리로 인하여 철근이 표면으로 노출되었다. DBW 및 HW의 경우 내력벽 하단부에서 다수의 균열이 발생하면서 상단부에는 일부 균열이 발견되었지만, 모두 비내력벽에서는 균열이 발견되지 않았다. SPW의 경우 내력벽 하단부 및 상단부에 휨균열이 발생하였으며, 비내력벽에서도 상단부의 균열이 발견되었다.



(a) NBW



(b) DBW



(c) SPW



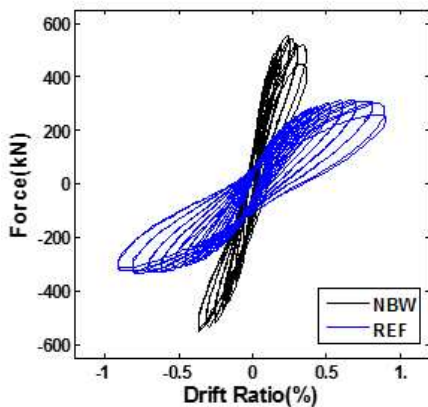
(d) HW

[그림 2.88] 층간변위 0.5%일 때 NBW, DBW, SPW, HW의 균열 양상

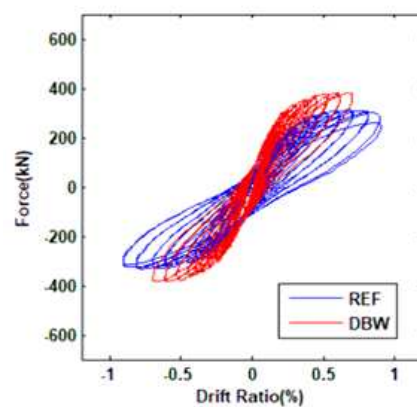
2.2 하중-충간변위비 관계

NBW는 평균 최대강도 및 초기 강성이 554.04kN 및 273.08kN/m으로 비내력벽이 횡력에 저항됨에 따라 REF의 평균 최대강도 및 강성 325.78kN 및 110.33kN/m보다 70.07% 및 147.51% 높게 나타났으며, 다른 실험체와 비교하여 최대강도 급격한 강도 감소를 나타냄에 따라 취성적 거동을 나타내었다. NBW의 강성은 내력벽과 일체화 타설로 동일한 비내력벽이 횡력에 같이 부담하기 때문이며, 개구부를 고려하여도 실험체에 충분히 높은 강성을 기여한다고 판단된다.

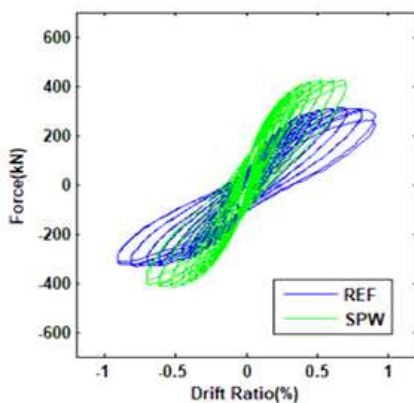
본 연구에서 개발된 비내력벽 대체시스템은 일부 횡력에 저항을 하더라도 비내력벽의 균열 및 손상을 제어하는 것이 궁극적인 목표이다. 비내력벽 대체시스템을 적용한 DBW, SPW 및 HW의 초기 강성은 REF와 비교하여 각각 16.05%, 34.75% 및 13.70% 증가하였다. 이는 비내력벽의 대체시스템인 Dowel bar, Steel plate, Hinge가 비내력벽에 균열 및 손상이 발생하기 전까지 횡력의 저항에 기여하기 때문이다. 따라서, 비내력벽 대체시스템을 적용한 DBW, SPW 및 HW의 평균 최대강도는 REF와 비교하여 각각 18.41%, 30.06% 및 9.04%가 증가하였다.



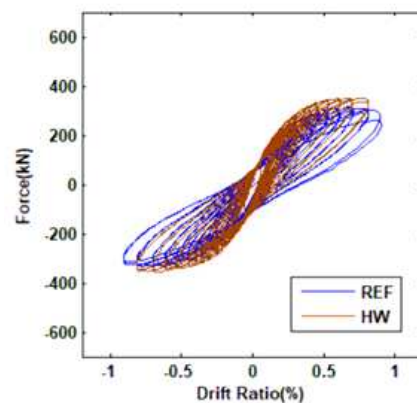
(a) NBW와 REF 비교



(b) REF와 DBW 비교



(c) REF와 SPW 비교



(d) REF와 HW 비교

[그림 2.89] 하중-충간변위비 관계 분석

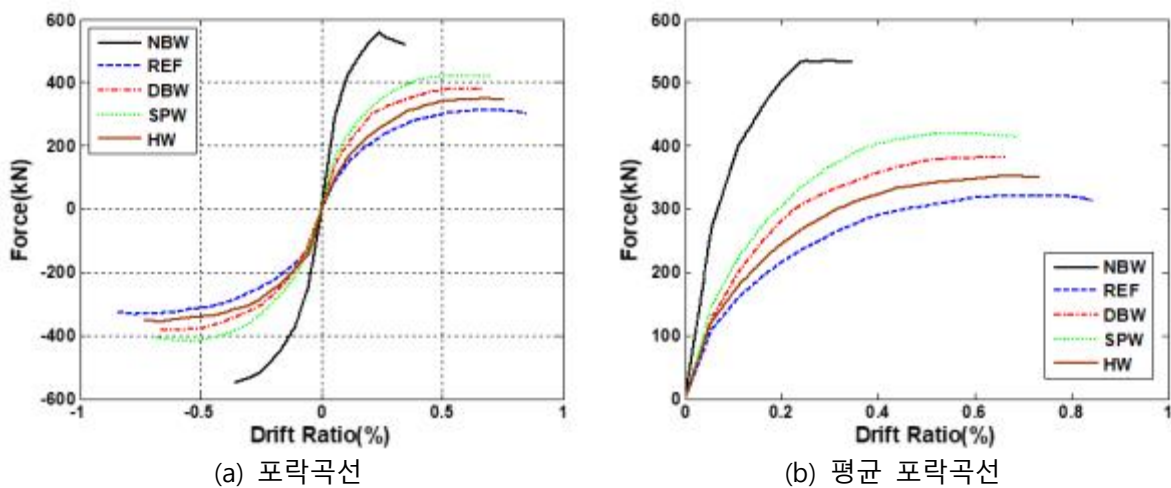
[표 2.25] 실험 결과(초기 강성, 하중, 연성비)

Specimen		Stiffness (kN/mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (%)	P_u (kN)	δ_u (%)	δ_y (%)	μ
NBW	+	273.08	559.59	0.24	522.03	0.35	0.29	1.21
	-		548.49	0.36	548.49			
REF	+	110.33	313.82	0.69	309.57	0.83	0.38	2.18
	-		332.73	0.77	325.22			
DBW	+	128.04	381.85	0.67	381.85	0.67	0.27	2.48
	-		383.75	0.67	383.75			
SPW	+	148.67	423.60	0.70	423.60	0.70	0.30	2.33
	-		417.40	0.53	406.28			
HW	+	125.45	350.63	0.67	349.30	0.75	0.29	2.59
	-		354.38	0.65	353.01			

2.3 연성비(Ductility)

항복변위(δ_y)는 소성헌지 구간에서의 주철근이 처음으로 항복할 때의 변위로 선정하였으며, 극한변위(δ_u)는 모든 실험체가 전단보강이 되지 않은 실험체로서 취성적 거동을 함에 따라 실험체가 파괴될 때의 변위를 이용하였다.

연성비를 분석한 결과, NBW는 매우 취성적인 거동을 나타냄에 따라 연성비는 1.21로 REF와 비교하여 44% 감소하였다. 비내력벽 대체시스템을 적용한 DBW, SPW 및 HW의 연성비는 REF와 비교하여 각각 13.76%, 6.88% 및 18.81% 증가하였으며, 이는 최대강도 및 강성에서의 영향과는 반대로 HW에서의 연성능력이 크게 향상되었다.

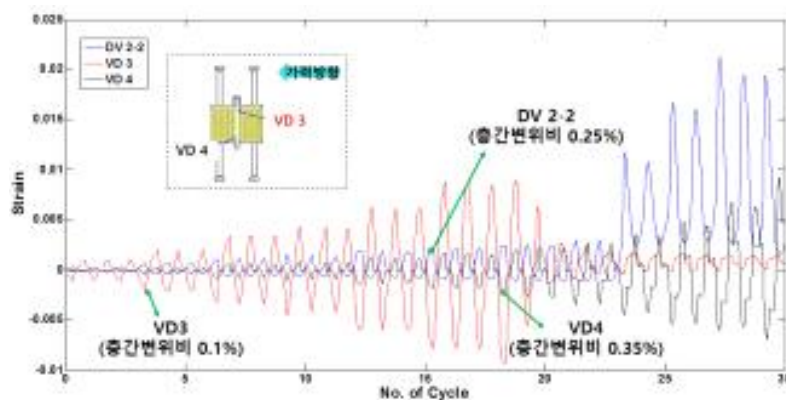


[그림 2.90] 포락곡선(Envelope Curve)

2.4 변형률 분포

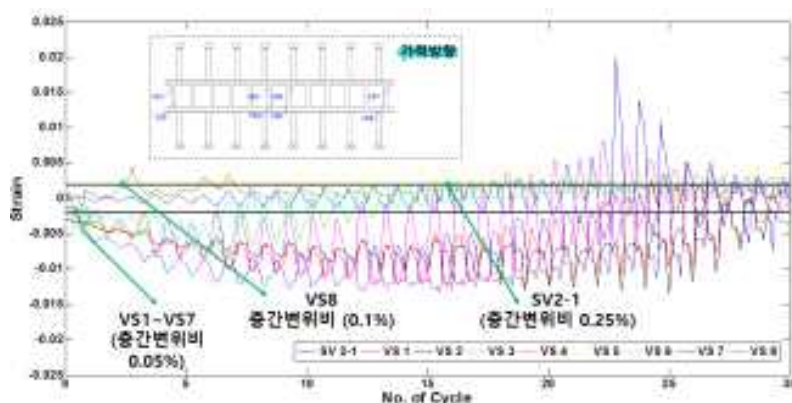
DBW 및 SPW는 횡 방향 하중이 가력 될 때 비내력벽 대체시스템에서 횡력에 저항하다가 비내력벽의 균열 및 손상이 발생하기 전 항복하여 비내력벽의 피해를 최소화 하는 것을 목적으로 한다.

DBW의 변형률 분포는 [그림 2.91]과 같으며, Dowel bar는 가력되는 횡력에 저항하다가 층간변위비 0.1%에서 처음으로 항복하였으며, 이 후 0.25%부터 다른 Dowel bar에서 추가 적으로 항복하였다. 이는, DBW의 철근이 처음 항복했을 때의 변위인 0.27%보다 낮게 나타 났으며, 변형률 분포를 통하여 Dowel bar가 초기 하중에서는 횡력을 부담 후 실험체의 철 근보다 빨리 항복함으로서 비내력벽의 균열을 제어하였다고 판단된다.



[그림 2.91] DBW 변형률 분포

SPW의 변형률 분포는 [그림 2.92]와 같으며, Steep plate는 횡력이 가력되자마자 다수의 지점에서 항복하였다. 따라서, REF와 비교하여 초기 강성이 증가되었다고 판단되며, Steel plate가 항복 이 후 이력댐퍼와 유사한 거동을 나타내고 있다.



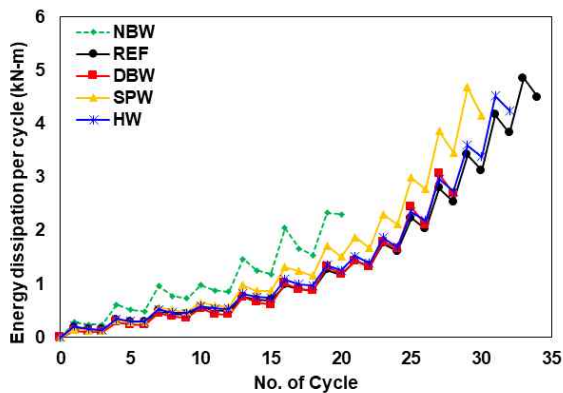
[그림 2.92] SPW 변형률 분포

2.5 에너지소산능력

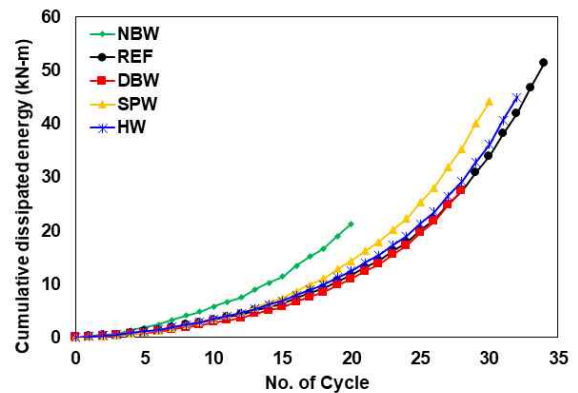
충간변위비 0.05%까지는 모든 실험체의 에너지 소산량 및 누적 에너지 소산량은 비슷하였지만, 이 후 NBW는 높은 초기 강성 및 전단강도의 영향으로 인하여 에너지 소산량 및 누적 에너지 소산량이 크게 증가하였다. 또한, 12 사이클 이 후 부터는 SPW는 Steel plate의 영향으로 REF와 다른 비내력벽 대체시스템과 비교하여 에너지 소산량 및 누적 에너지 소산량이 높게 나타났다. 따라서, DBW, SPW 및 HW의 누적 에너지 소산량은 NBW와 비교하여 각각 29.03%, 107.41% 및 110.82% 증가되었다.

개발된 비내력벽 대체시스템 적용 실험체는 다른 비교 실험체인 REF보다 빨리 파괴가 발생하여 누적 에너지 소산량 측면에서는 낮게 평가되고 있지만, 이는 강성 및 강도, 연성비, 변형률 분포에 대하여 종합적으로 분석할 때 비내력벽 대체시스템에 대한 영향보다는 철근콘크리트와 같이 복합적 재료의 불확실성으로 인한 오류라고 판단된다.

따라서, 같은 사이클에서의 비내력벽 대체시스템은 REF와 비교할 때 한지는 횡력의 저항에 전혀 기여하지 못하고 있으므로 REF와 유사한 거동을 나타내었다. DBW 및 SPW의 강성 및 강도에 기여도가 증가할수록 REF와 비교하여 에너지 소산능력이 증가한다.



(a) 사이클 별 실험체 에너지소산능력



(b) 사이클 별 실험체 누적에너지소산능력

[그림 2.93] 에너지소산능력

■주관연구기관: 미래구조

■연구목표: RC비내력벽을 포함하는 벽식 아파트 구조설계법 제시(PC 등 대안공법 포함)

1. 연구개요

- 비내력벽을 포함하는 벽식아파트와 구조설계 과정(구조계획-구조해석-부재설계-배근상세/접합상세)에 적용할 수 있는 구조설계법에 대하여 연구를 수행하였다

2. 비내력벽을 포함하는 벽식아파트 구조계획 및 구조해석

2.1 실무에서의 비내력벽 구조설계

- 1차년도에 정리한 국내 대형 건설사의 구조설계 Guideline을 요약하면 다음과 같다

1) A사

① 내부벽체의 처리방안: “내력벽은 5-6m 간격으로 배치하고, 이보다 좁은 간격으로 배치될 경우, 사잇벽체는 마감벽체(경량칸막이, 조적, 경량복합판넬 등)로 변경”

② 외부의 전후면에 있는 짧은 벽체의 처리방안: “1m 미만벽체는 횡력저항요소에서 제외하고, 중력하중만 고려하여 배근하되, 가급적 W0으로 배근을 통일”

③ 벽체강성: “벽체의 강성을 무시하기 위하여 Member Properties/Member Stiffness/Bending&Axial, Shear에 각각 0.0001을 입력”

④인방보 처리방안: “코어와 내부벽체 사이 인방보는 배근설계가 가능한 수준까지 강성저감(10% 내외의 강성만 고려)”, “강축방향은 인방보를 배치하지 않는다.”

2) B사

① 짧은벽체 처리방안: “평면상 길이가 500mm이하로 해석에 포함되지 않은 짧은 벽체는”으로 언급: 짧은 벽이 해석에 포함되지 않음을 전제하고 있음

② 외부 전후면의 외벽 처리방안: 아파트의 측벽이 아닌 전면, 후면의 벽체는 내력벽으로 사용하지 않는 경우가 많음

③ 인방보 처리방안: “세대내의 인방보와 발코니의 캔틸레버 보는 삭제하는 것을 원칙으로 한다.”로 하여 구조계획에서 보를 사용하지 않도록 유도

3) C사

① 비내력 벽체의 처리방안: “해석에 고려안된 벽체는 기본배근만 한다.”로 언급하여 해석에 고려하지 않는 벽체를 언급

② 인방보 처리방안: “과도한 응력이 발생하는 경우는 아래와 같이 수정하여 재설계한

다.

- a. 해당 인방보 없이도 건물의 횡변위(전체변위, 층간변위)가 허용치 이내면 해석시 제외
- b. 벽체 해석시 무시되는 보는 최소 철근량으로 배근한다.
- c. 강성을 적절히 저감(NG없이)하여 재설계

2.2 소결

- 벽식구조 공동주택에 있어서, 실의 구획, 입면형상을 유지하기 위하여 설치되는 벽체의 내력벽, 비내력벽 구분은 구조설계 의도에 따라서 구분되고 있음.
- 벽체와 연결되어 시공되는 인방보와 관련해서 내부의 인방보는 삭제하도록 하고 있으며, 전후면 입면에 배치되는 인방보는 구조해석에 반영하지 않는 것으로 고려하는 것이 보통임
- 일부 지침서에서는 [KBC2016 0306.6.5.1 상호작용효과]를 고려하도록하고 있으나, 임의로 저감한 강성을 고려하여 구조해석할 경우에는 이러한 검토가 곤란함
- 2019년3월14일에 개정고시된 건축구조기준에 따르면 모든 비구조벽체는 구조해석 모델에 포함시키거나, 내진슬릿을 이용하여 분리하도록 하고 있어서 기존의 구조설계 Guideline은 개정될 필요가 있는 것으로 나타남

9.8.1 구조해석

- (1) 하중계산을 위한 구조물의 구조해석에서는 콘크리트 부재의 균열강성을 과소평가하지 않아야 한다.
- (2) 비탄성변형율을 계산하기 위한 구조해석에서는 콘크리트 부재의 균열강성을 과대평가하지 않아야 한다
- (3) 구조해석을 위한 콘크리트 부재의 균열강성은 KDS 41 30 00 건축물 콘크리트구조 설계기준의 규정을 따를 수 있다

9.8.2 비구조요소와의 연결

큰 강성을 발휘할 수 있는 비구조요소는 구조부재와 이격하여야 한다. 그렇지 않을 경우에는 비구조요소를 구조요소로 고려하여 구조해석과 설계에 반영해야 한다.

18.3 건축비구조요소

18.3.3 칸막이벽

칸막이벽이 조적조 혹은 비구조 콘크리트벽으로 구성된 경우 다음을 만족하여야 한다.

- (1) 구조설계 시 구조요소로 고려되지 않은 경우 내진슬릿과 같은 적절한 구조상세를 통해 인접한 기둥에 영향을 미치지 않도록 하여야 한다.
- (2) 내진슬릿 없이 기둥과 밀실하게 접촉하도록 시공되는 경우 9.8.2 및 9.8.3의 규정에 따라 반드시 구조요소와의 상호작용을 고려하여 설계되어야 한다.

[그림 2.94] KDS 41 17 00 건축물내진설계기준(2019.3.14.고시) 내용 중 관련조항

- 높은 수벽이나, 길이가 긴 날개벽은 강성이 크므로 당연히 지진력을 받지 않도록 구조 계획 단계에서 정리하여야 함

- 한편, 높이가 낮거나, 길이가 매우 짧은 날개벽의 경우, 업계에서 통용되고있는 강성저감법의 적정성을 검토하고자 하였으나, 개정된 건축구조기준(KDS 41 17 00)에서 콘크리트 벽을 비구조요소로 활용하는 경우 해당 강성을 그대로 반영하거나, 지진력을 받지 않도록 내진슬릿을 두도록 명기하고 있어서 전체의 비구조벽체는 모델링에 포함시키거나, 지진하중을 받지 않도록 상세를 적용하는 것 중 하나만 선택 가능함

3. 비내력벽에 대한 대안공법 검토

- 외부 비내력벽의 대체공법별 특징 비교분석 : 발코니 확장이 합법화된 이후, 발코니라고 하는 완충공간이 없어져서, 벽식 아파트의 외벽은 거주공간을 이루는 부분이라서, 누수, 단열, 결로, 차음 등 거주성능에 매우 밀접한 영향을 주는 요소임. 외벽의 균열은 외부 강우시 누수로 연결되고 단열에도 영향을 주기 때문에 균열이 없도록 하는 것이 무엇보다도 중요하며, 공정계획에도 영향이 최소화되도록 해야함. 이러한 외벽에 대한 필요성능의 관점에서, 대안 공법의 특징을 비교 분석하였다.

3.1 RC비내력벽 + 내진 슬릿(Slit) 공법

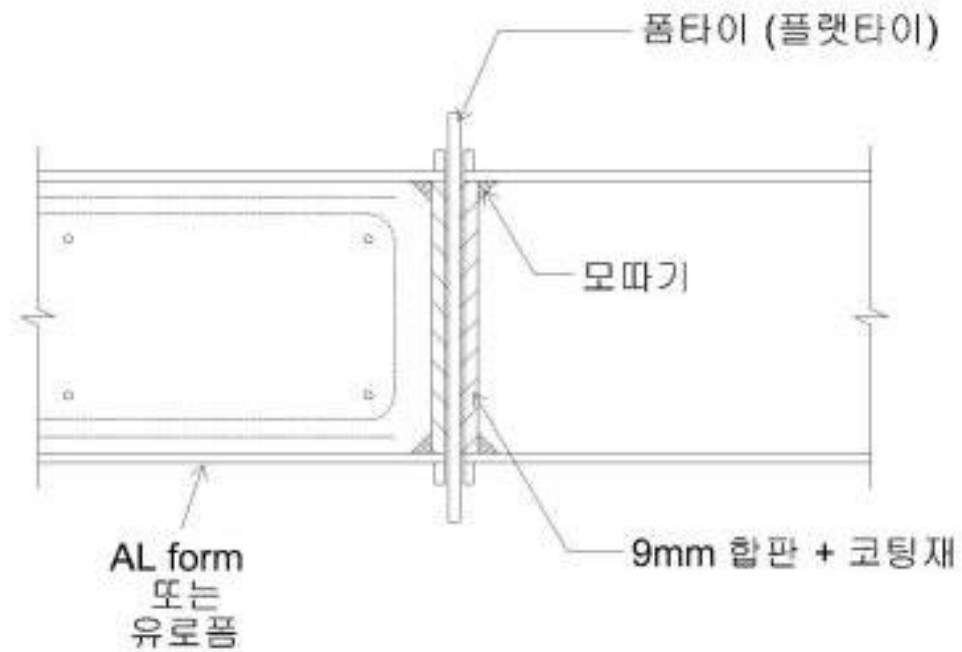
- 벽식 아파트에서 비내력벽에 내진슬릿을 두는 방법이다.

일반적인 벽식 아파트의 층간변위가 0.5%를 넘지 않는 것이 일반적인데, 내진슬릿의 폭은 층고 2850mm(천정고 2300mm 기준 최소층고)의 0.7% 즉, $2850 \times 0.007 = 19.95\text{mm}$ 로 하였다.

- 내진슬릿의 경우, 면내방향으로는 지진력에 저항하지 않으면서도, 면외방향으로는 풍하중이나 지진하중과 같은 외력 그리고 유사활하중(벽면에 기대거나, 벽면을 밀치는 힘)에 저항할 수 있는 정도의 내력이 요구된다. 또, 중력하중이 전달되지 않거나 전달되더라도 최소화할 수 있는 상세가 요구된다 한편, 층간방화, 차음, 누수방지, 결로방지 등의 성능도 필요한데, 일반적인 발코니 창호에 사용되는 공법을 사용하는 것을 가정하였다.

- 개발된 상세는 다음과 같다.

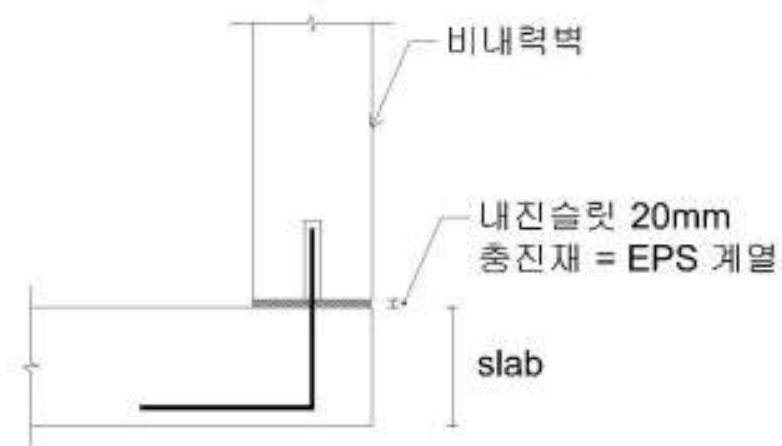
□수직으로 긴 내진슬릿 구현 방안
(높은 턱 발코니 부분)



→ 내진슬릿의 폭은 20mm로 함

[그림 2.95] RC비내력벽 + 내진 슬릿(Slit) 공법 상세 1

□slab 비내력벽 (하부) 접합상세 (접합부 철물은 특허)



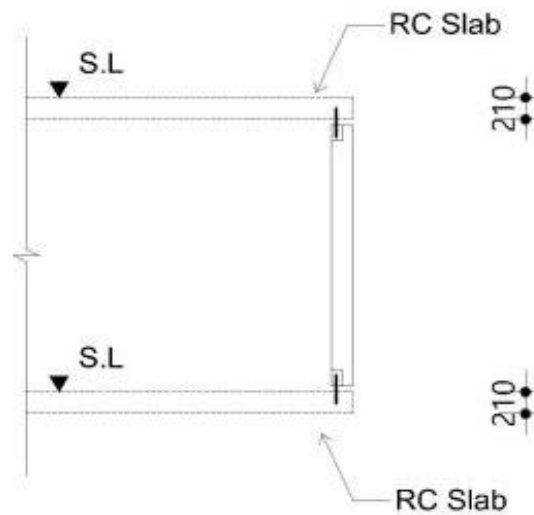
[그림 2.96] RC비내력벽 + 내진 슬릿(Slit) 공법 상세 2

3.2 PC 비내력벽 후시공 공법

- 우리나라의 벽식아파트는 저층부에는 돌붙임 등의 마감이 있지만, 중층 이상은 노출콘크리트에 수성페인트류로 마감하는 것이 일반적이다. 따라서 비내력 벽이라고 하더라도 PC(Precast Concrete)를 사용하는 것이 내구성이나 유지관리면에서 유리할 것으로 판단하였다.
- 구조벽체만 우선 시공하고 비내력벽은 후시공하는 공법이다.

□ PC 후시공 방안

-RC slab 타설이후 PC 비내력벽을 끼워 넣음

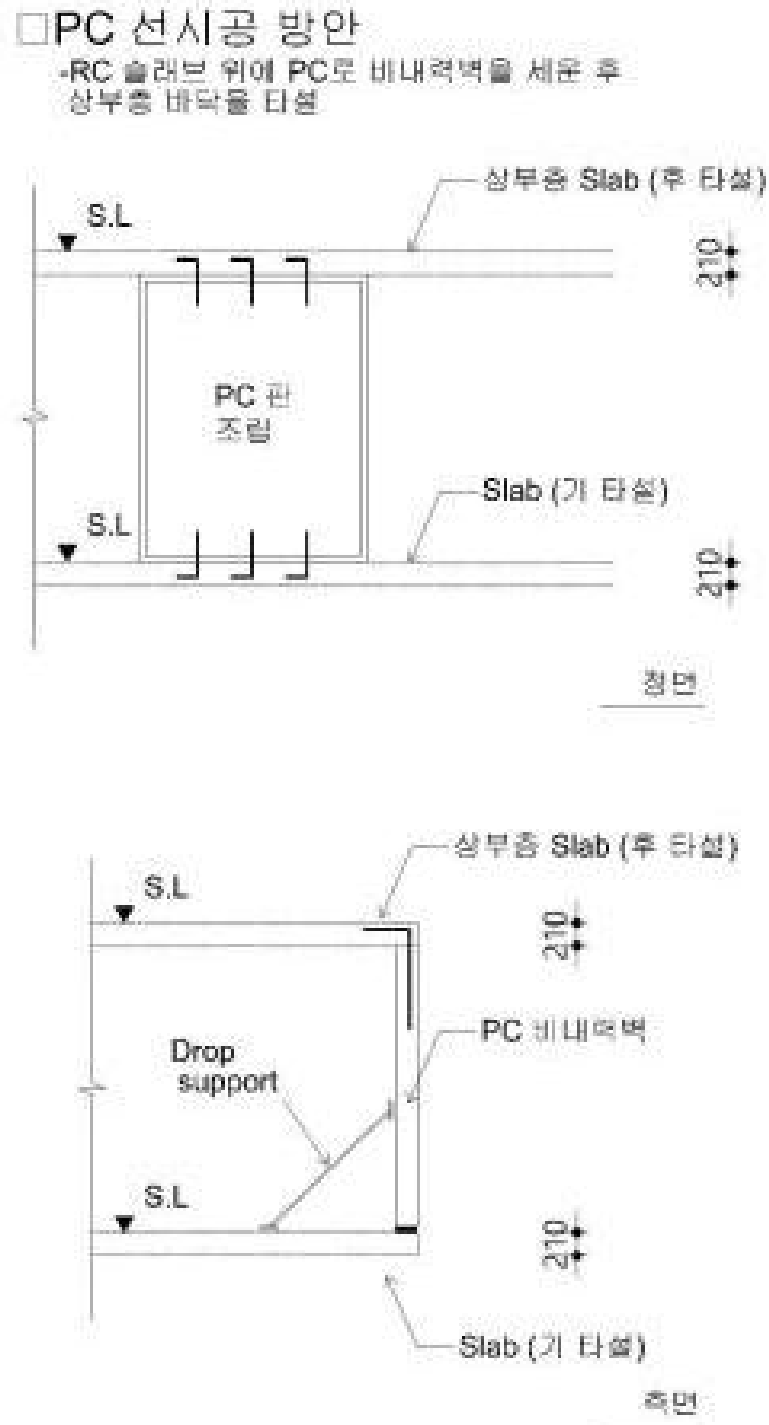


-RC접합은 철물을 용접하거나 Bolting 하여 처리

[그림 2.97] PC 비내력벽 후시공 공법 상세

3.3 PC 비내력벽 전시공 공법

- PC벽체를 후시공하는 것은 양중문제, 접합부 시공의 문제가 있으므로, 해당층 벽체철근 배근시점에 PC벽체를 조립하고, 상층 바닥 슬래브 타설과 함께 구조물을 일체화하는 방법이다



[그림 2.98] PC 비내력벽 전시공 공법 상세

마. 3차 년도 개발 목표 및 결과

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
3차 연도 (2020)	수벽과 날개벽 대체시스 템에 대한 구조설계 가이드라 인 개발	슬롯형 및 PC 형 비내력벽 해석모델링 가이드라인 개발	슬롯형 및 P C형 비내력벽 해석모델링 가이드라인 개발	- 비구조벽 내진설계 시공의 대안으로 제진된 슬롯형 및 형 비내력벽에 대한 상세 구조해석 PC 모델에 대한 가이드라인을 개발 완료함. - 공동연구기관의 실험결과를 바탕으로 해석 모델의 검증에 의해 완성하며 이를 실무엔지니어와 연구자가 참고할 수 있는 가이드라인을 개발 완료함 - 구조시스템과 독립된 비구조벽으로 거동을 하며 피해손상이 슬롯과 접합부에 집중되는 거동 PC 특성을 이상화하여 해석 모델에 반영하는 법을 기술함 - 비내력벽에 대한 내진설계 시공 솔루션 개발로 향후 사회적으로 필요성이 높은 점을 인식하여 이에 대해 충실한 솔루션을 확립 완료함
		슬롯형 및 PC 형 비내력벽 시스템 내진성능평가 가이드라인 개발	슬롯형 및 P C형 비내력벽 시스템 내진성능평가 가이드라인 개발	- 현행 설계기준에 따라 비내력벽시스템 설계 및 평가프로세스에 대한 가이드라인을 개발 완료함 - 개발된 설계시스템에 따라 예상되는 지진위험도에 따라 구조시스템과 비구조시스템의 내진성능을 평가할 수 있는 프로세스를 구조엔지니어가 사용할 수 있도록 제시함 - 이는 예상되는 지진위험도와 주어진 성능목표에 따라 예상되는 지진거동의 시뮬레이션을 통해 예상되는 성능을 평가하고 예측되는 구조시스템 및 비구조시스템의 피해를 예측 평가할 수 있는 이론적 배경과 실무적용시 적용할 수 있는 방법을 자세히 제공함 - 개발된 두 가이드라인을 인의 전문가 자문을 통해 연구성과를 검증 완료함. 특히 질적 성과지표를 설정하여 성과를 검증 받음. (전문가대상설문조사지 참조)
	수벽과 날개벽 대체시스 템 보수· 보강 공법 개발 및 검증	대체시스템 접합부 보수· 보강 공법 개발	손상된 철근콘크리 트 벽체의 구조성능 복원 및 향상을 위한 보수·보강 공법 개발	- 손상된 RC벽체의 구조성능을 회복함과 동시에 연성능력을 향상시키기 위하여 개선된 TRM 공법을 기반으로 한 보수·보강 공법 개발 - TRM 보강의 문제점 중 하나인 박리 방지를 위해 기존의 일반 모르타르가 아닌 접착력을 높여주는 SBR 모르타르를 사용하였으며, 주입식 케미컬 앵커를 활용하여 정착법을 개선

				시킨 보수·보강공법 개발 완료 • 보수·보강의 상세 시공절차, 사용 재료, 수직 부재에 적합한 배합비 등을 작성 • 개발 보수·보강 공법의 성능 비교·분석을 위하여 2차년도에 정적반복가력실험을 수행한 RC벽체 선정 후 개발 보수·보강 공법을 적용하여 정적반복가력실험을 수행 • 실험결과, 손상된 RC벽체의 성능 복구에 효과적이었으며 보강체와 구조체와의 박리가 발생하지 않음을 확인
		실험평가를 통한 보수·보강 공법 검증 및 지침(안) 개발	손상된 철근콘크리트 벽체 적용 보수·보강 공법 검증 및 지침(안) 작성	• 실무에서 손상된 RC벽체의 구조성능 복원을 목적으로 보수·보강을 수행하는 데에 참고할 수 있도록 지침(안) 작성 • 지침(안)에는 개발한 TRM 보수·보강 공법의 상세한 절차, 사용 재료, 주의사항, 일반적인 설계사항 등을 작성 • 또한, 실험평가를 통하여 보수·보강 전·후 비교 분석을 통한 성능 검증을 함께 수록
	비내력벽 설계/시공 최적화를 위한 설계/시공 가이드 작성	비내력벽 설계/시공 최적화를 위한 설계/시공 가이드 작성	현행되는 구조설계 및 시공법에 대한 개정안과 대안공법 상세 3가지를 제안하고 구조설계 예제집 작성	• 현 구조기준에서 규정된 구조설계법을 따라 개정된 구조설계지침서를 제안함 • 비내력벽의 대안공법으로 이격을 위한 내진 슬릿 상세를 3가지 개발하여 개정된 시공지침서를 제안함 • 제안한 구조설계지침 내용을 따른 구조해석 모델링 법을 자세히 정리한 구조설계 예제집을 작성하고 기존 방법과 비교함

바. 3차 년도 연도 연구 결과 내용

■주관연구기관: 세종대학교

■연구목표: 대체시스템에 대한 구조설계 및 성능평가 가이드라인 개발

1. 연구개요

본 연구에서는 비구조요소 중 비구조벽체에 대한 구조설계지침을 제시하는 것을 목표로 하고 있다. 특히 공동주택에서는 횡력저항시스템에 포함되는 RC 내력벽 이외 창호 등의 개구부의 상부와 하부에 설치되는 비구조벽을 대상을 하고 있다. 철근콘크리트 구조를 가지는 공동주택의 벽체를 대상으로 존재하는 비구조벽체에 대한 구조 설계에 대한 지침안을 적용한다. 철근콘크리트로 구성된 비구조벽체에 대한 손상·파괴 수준과 요구되는 성능수준을 확립하기 위한 설계법 제안을 목적으로 한다.

2. 슬롯형 및 PC형 비내력벽 해석모델링 가이드라인 개발

2.1 기존의 비구조요소 설계 현황

개정된 기준인 KDS 41 17: 9.8.2에 따르면 큰 강성을 발휘할 수 있는 비구조요소는 구조부재와 이격하거나, 비구조요소를 구조요소로 고려하도록 명시되어 있다. 후자의 경우에 비구조요소를 구조설계 시 고려하여 해석을 수행하게 되면 비내력벽 요소에 배근설계가 어려우며 부재에 대한 오류가 계속적으로 발생할 수 있기에 실무적으로 적용하기 어려운 부분이 있다. 다음은 개정된 건축구조기준(KDS)에서 비구조요소의 내진설계에 관한 것이다.

[표 2.26] 개정된 KDS 41 17 : 9.8.2

9. 콘크리트구조의 고려사항

9.8.2 비구조요소와의 연결

큰 강성을 발휘할 수 있는 비구조요소는 구조부재와 이격하여야 한다. 그렇지 않을 경우에는 비구조요소를 구조요소로 고려하여 구조해석과 설계에 반영해야한다.

18.3 건축비구조요소

18.3.3 칸막이벽

칸막이벽이 조적조 혹은 비구조 콘크리트벽으로 구성된 경우 다음을반족하여야 한다.

(1) 구조설계 시 구조요소로 고려되지 않은 경우 내진슬릿과 같은 적절한 구조상세를 통해 인접한 기둥에 영향을 미치지 않도록 하여야 한다.

(2) 내진슬릿 없이 기둥과 밀실하게 접촉하도록 시공되는 경우 9.8.2 및 9.8.3의 규정에 따라 반드시 구조요소와의 상호작용을 고려하여 설계되어야 한다.

현재 비구조요소 해석에 관해 실무 현황에서는 자체 구조설계지침서에서 비구조요소에 대한 모델링을 생략 혹은 강성 저감 등의 방법으로 구조 해석에서 제외시키고 있다.

그러나 개정된 기준인 KDS41 17: 9.8.2에 따르면 큰 강성을 발휘할 수 있는 비구조요소는 구조부재와 이격하거나, 비구조요소를 구조요소로 고려하도록 명확하게 요구하고 있다. 후자의 경우에 비구조요소를 구조설계 시 고려하여 해석을 수행하게 되면 비내력벽 요소에 배근설계가 어려우며 부재에 대한 오류가 계속적으로 발생할 수 있기에 실무적으로 적용하기 어려운 부분이 있다. 따라서 본 연구진은 전자의 기준을 따라 아파트 비내력벽을 구조벽에서 이격시켜 고정하고 동시에 균열을 막는 방법에 대한 공학적 설계 가이드라인을 제시한다. 아래 [표 2.27]는 비구조요소 해석에 관한 실무 현황이 나타나 있다.

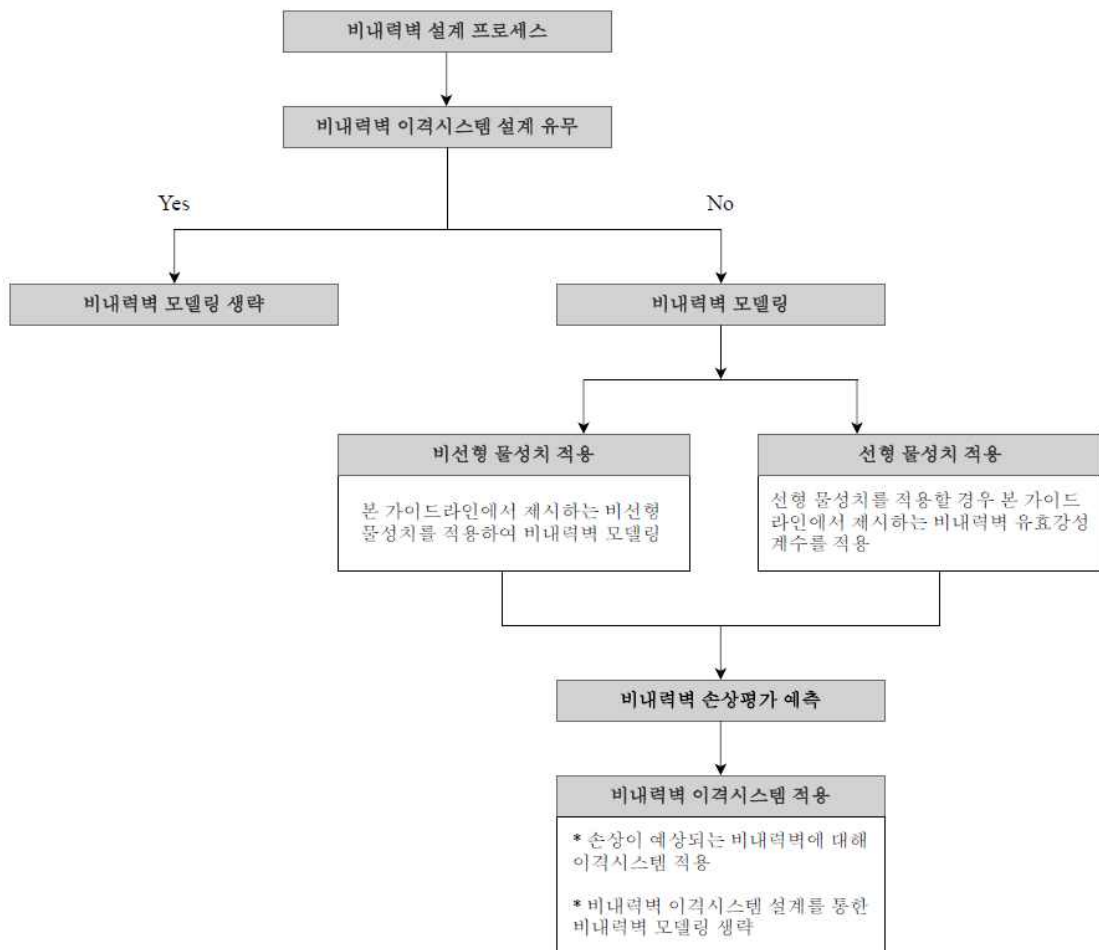
[표 2.27] 비구조요소 해석에 관한 실무 현황

<국내 시공능력 5위 내 건설회사의 엔지니어 회사의 구조설계지침서 본문>	
가) 평면상 길이가 500mm 이하로 해석에 포함되지 않은 짧은 벽체 지상층 창호 고정용 비내력 벽체는 지상 1 층 필로티) 및 지하층에서 삭제한다. 단 지하주차장 APT 경계부 테두리보 지점으로 사용될 경우 테두리보 폭의 1/2 이상 지지되도록 크기를 증가시킨다. - ('S'건설 벽식아파트 구조설계 기준)	
나) RC 벽체 중 두께가 150mm 이상, 길이 500mm 이상인 벽체만 횡력을 저항 할 수 있는 것으로 간주하고 그 외는 하중으로 입력한다. - ('S'건설 벽식아파트 구조설계 기준)	
다) 내력벽은 X, Y방향 5~6m 간격으로 배치하고, 이보다 좁은 간격으로 배치될 경우 사잇벽체는 마감벽체(경량칸막이, 조적, 경향복합판넬 med)fn 변경한다. * 해석에 의한 건물의 고유주기는 층수/10 정도가 바람직하다. - ('D'건설 아파트(벽식), 지하주파장(무량판) 구조설계지침)	
라) 내풍, 내진 해석시 기여도가 낮은 길이 1M 미만인 벽체는 횡력저항요소에서 제외하고 중력하중만 고려하여 배근을 결정하되 가급적 W0로 배근을 통일한다. * ADS : 벽체의 강성을 무시하기 위해 Member Properties/Member Stiffness Factor/Bending&Axial, Shear 에 각각 0.001을 입력한다. - ('D'건설 아파트(벽식), 지하주파장(무량판) 구조설계지침)	
마) 코어와 내부벽체 사이 인방보는 배근설계가 가능한 수준까지 강성을 저감(10% 내외의 강성만 고려)한다. - ('H'건설 아파트(벽식), 지하주파장(무량판) 구조설계지침)	

2.2 비구조요소 설계 지침

2.2.1 비내력벽 설계 흐름도

비내력벽의 설계 흐름도는 아래와 같다. 비내력벽 내진슬릿 설계 유무에 따라 해석 모델링 방법에 있어서 차이를 보이며, 본 연구에서 제시하는 내진슬릿이 비내력벽에 적용되는 경우, 해석 모델링에서 제외하여 구조 해석을 실시한다.



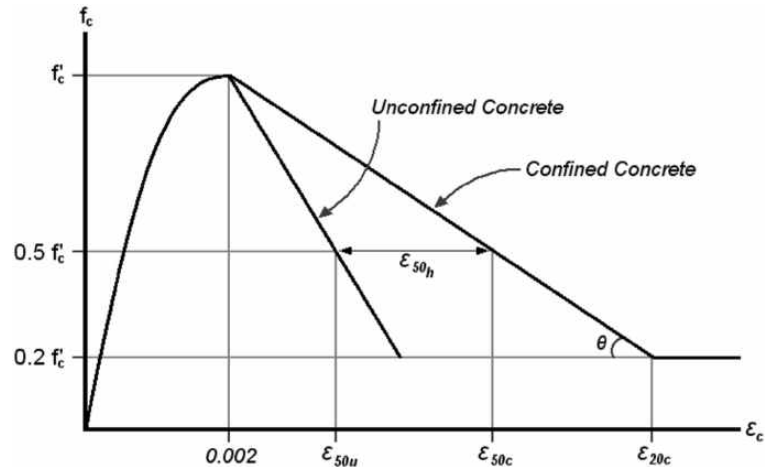
[그림 2.101] 비내력벽 설계 흐름도

2.2.2 비내력벽 모델링 가이드

1) 콘크리트 모델링

비선형 해석을 위한 콘크리트의 압축 응력-변형률 관계는 실험을 통하여 검증된 응력-변형률 관계를 사용할 수 있다. 단, 콘크리트의 인장 응력은 무시한다. 별도의 실험으로 검증하지 않는 한, 횡구속 되지 않은 콘크리트에서 최대응력에 대응하는 압축변형률은 0.002를 사용하고 파괴 시 압축변형률과 잔류응력은 각각 0.003과 최대응력의 10%를 사용한다. 횡철근으로 구속된 콘크리트는 횡구속효과를 고려하여 콘크리트의 재료모델을 정의할 수 있다.

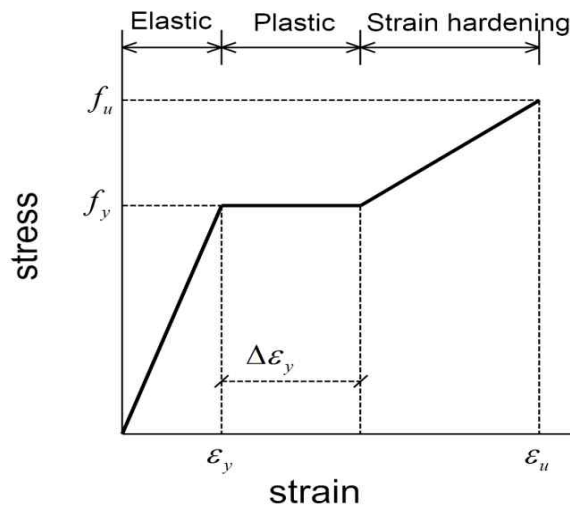
비구조벽체의 균열·손상을 반영하기 위해서는 비선형 구간에 따른 재료의 물성치 적용이 필수적이다. 수정 Kent-Park 콘크리트 모델은 대표적인 콘크리트의 비선형 모델로서 비구조벽체 설계 시 적용에 용이하다.



[그림 2.102] 수정 Kent-Park 모델

2) 철근 모델링

비구조벽체의 철근은 철근을 탄성, 소성 단계를 넘어 변형률 경화의 단계까지 고려하여야 하며 철근이 독립적인 섬유요소로 모델링된 벽체의 경우, 압축을 받는 철근은 좌굴거동에 의한 응력저하를 고려하여야 한다. 공동주택에 사용되는 벽체는 피복두께가 얇아 피복파괴 후 철근의 좌굴이 발생되기 쉽다. 따라서 철근의 좌굴을 고려하는 것이 원칙이다. 해당 지침에서는 철근의 강재 모델링 시 변형률 경화의 단계를 고려할 수 있는 Trilinear stress-strain 모델을 사용할 것을 권장한다.



[그림 2.103] Idealized Trilinear stress-strain

3) 유효강성

‘공동주택 성능기반 내진설계 지침 2019’에 따르면 균열이 있는 경우 벽체의 유효강성은 $0.35Eclg$ 이다. 비구조요소 벽체에 대한 유효강성은 별도로 정해져 있지 않은 상태로 해당 유효강성 계수에 대해 본 연구에서는 [표 2.28]와 같이 제시한다.

[표 2.28] 부재의 유효강성

	휨강성	전단강성	축강성
보 (프리스트레스가 없는 경우)	$0.3E_c I_g$	GAW	-
보 (프리스트레스가 있는 경우)	$E_c I_g$	GAW	-
기둥 (축력비가 0.5이상)	$0.7E_c I_g$	GAW	$E_c A_g$
기둥 (축력비가 0.1이하)	$0.3E_c I_g$	GAW	$E_c A_g$
벽 (균열이 없는 경우)	$0.70E_c I_g$	GAW	$E_c A_g$
벽 (균열이 있는 경우)	$0.35E_c I_g$	$0.5GAW$	$E_c A_g$
연결보	$0.070(l/h)E_c I_g$ $\leq 0.3E_c I_g$	GAW	-
비구조벽체	$0.2E_c I_g$	$0.5GAW$	$E_c A_g$

1) 선형보간하거나 설계에 미치는 영향을 고려하여 보수적인 값을 적용한다. 축력비는 4.1(3)의 예상중력 하중에 의한 값을 적용할 수 있다.

2) l : 연결보의 순경간, h : 연결보의 총

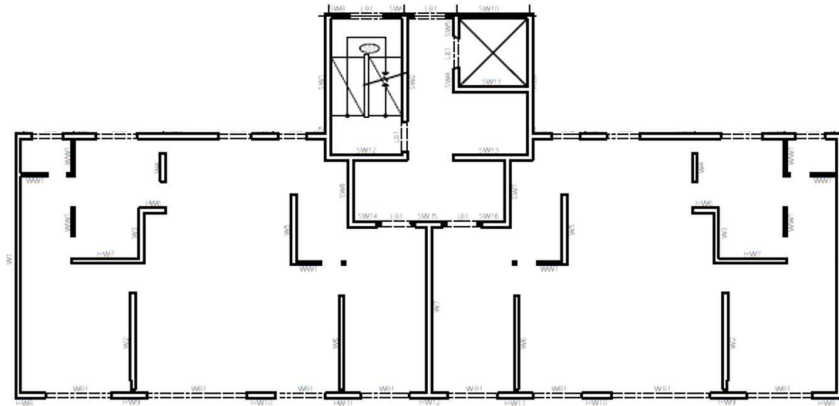
2.3 소결

개정된 기준인 KDS41 17: 9.8.2에 따라 실무에서 개정된 규정을 적용하기 어려운 점에 대하여 해결책을 제시하여 아파트 비내력벽을 구조벽에서 이격시켜 고정하고 동시에 균열을 막는 방법에 대한 공학적 설계 가이드라인을 제시한다. 비내력벽에 대한 콘크리트와 철근의 비선형 모델을 제안하고 균열 및 파괴를 고려한 비내력벽의 유효강성 계수를 제안하였다. 비탄성 구간을 적용할 수 있는 해석 프로그램을 사용하는 경우 콘크리트, 철근에 대한 비탄성 구간을 제시하였고 탄성 구간을 적용할 수 있는 해석 프로그램을 사용하는 경우 비구조 요소에 대한 유효강성 계수를 0.2로 제시하여 모델링에 적용하였다.

3. 슬롯형 및 PC형 비내력벽 시스템 내진성능평가 가이드라인 개발

3.1 예제 건축물 구조해석모델 구축 및 상세 평가

본 연구에서 고려된 해석 모델은 KBC2016 (건축구조기준)에 따라 서울 지역의 S_D 지반에 위치하고 있으며, 5층 이상의 아파트인 점을 고려하여 중요도 1급을 적용하였다. [표 2.29]과 같이 건축물의 중요도에 따른 내진등급과 중요도 계수를 설정해주었다.



[그림 2.104] 해석 모델 대상 건축물

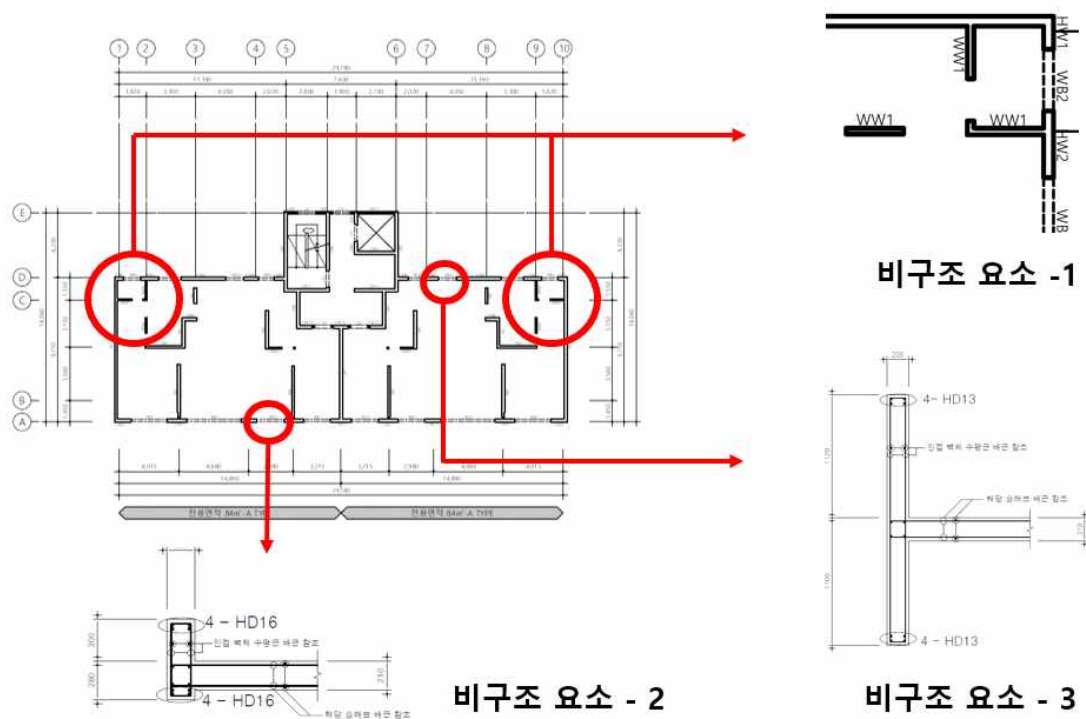
[표 2.29] 건축물 설계 상세 정보

구조형식		철근콘크리트조(RC조)	
횡력(지진력) 저항시스템		1. 내력벽시스템	
		1-b. 철근콘크리트 보통전단벽	
사용재료의 종류 및 설계기준강도			
항목	규격	설계기준강도 (fck)	해당부재
콘크리트	KS F 2405	24MPa	아파트
		24MPa	지하주차장 부속동
철근	KS D 3504 SD400	400MPa	HD 13 이하
	KS D 3504 SD500	500MPa	SHD 16 이상
지진하중 조건			
지역계수(S)		0.176	
지반분류		S2	
중요도계수(IE)		1.2	
내진설계범주		C	

본 연구에서 고려된 예제건축물의 비구조요소는 내부의 비내력벽 벽체와 수벽 & 날개 벽 요소로 구분하여 설계하였다. 현재 KDS 41 17: 18. 3. 3의 기준상으로는 조적벽체 역시 강성을 부여하여 평가하는게 적절하지만 콘크리트 요소의 비내력벽 부분에 대한 집중을 위해 석고 보드로 간주하여 본 예제를 작성하였다. [표 2.30]와 같이 건축물의 1개 층당 비구조 요소의 넓이 비율은 약 16.53%로 계산되었다.

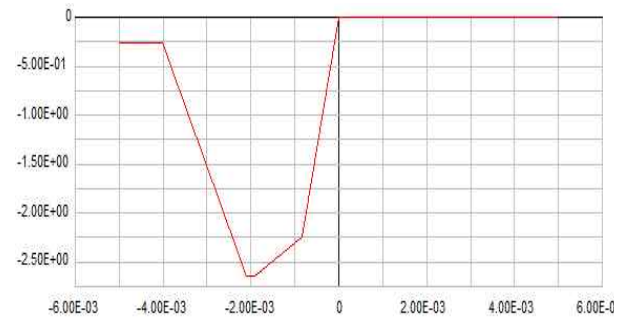
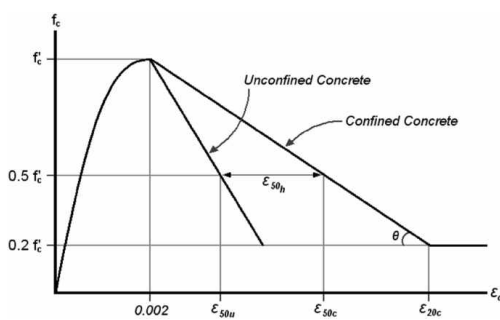
해석 모델 대상 건축물에 대한 모델링은 보편적인 상용 구조해석 프로그램인 Midas GEN 및 Perform 3D 2가지의 구조해석 프로그램으로 비교, 검증을 하였다.

모델링 시 적용된 콘크리트 및 철근의 물성치는 본 지침에서 제안하는 모델을 적용하였다. 콘크리트의 경우 수정 Kent-Park 모델이 적용되었으며, 아래 [그림 2.106]에 나타나 있다, 철근의 경우 Idealized Trilinear stress-strain 모델이 적용되었으며, 아래 [그림 2.107]에 나타나 있다.

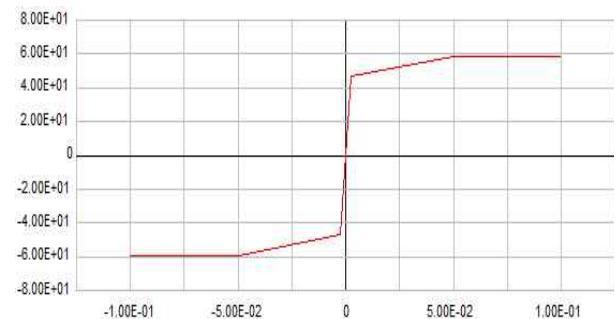
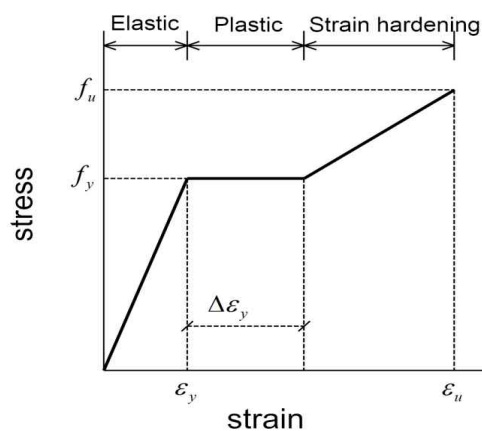


[그림 2.105] 대상 건축물 비구조요소 개요

[표 2.30] 대상 건축물 1개 층당 비구조요소 넓이 비율		
평면 상 전체 벽체 넓이	비구조요소의 넓이	비율 (%)
41.27m ²	6.82m ²	16.53



[그림 2.106] 콘크리트 모델 물성치



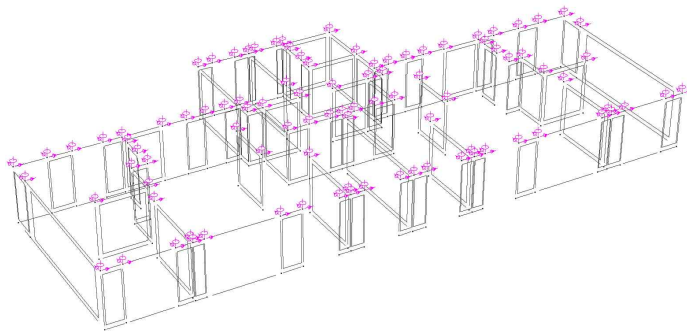
[그림 2.107] 철근 모델 물성치

비선형 해석에서는 구조물 전체의 비선형 거동을 명확하게 고려하기 위해 공칭강도를 대신하여 기대강도를 적용하였다. 본 모델에 적용된 재료강도는 공동주택 성능기반 내진설계 지침(2019)에 명시된 설계기준강도에 기대강도계수를 곱한 기대강도를 적용한다. 콘크리트와 철근의 강도등급별 기대강도계수는 [표 2.31]와 같다.

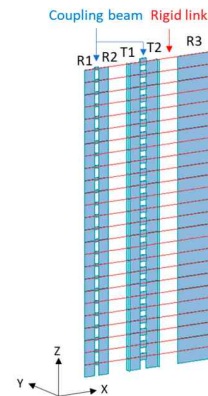
[표 2.31] 재료의 기대강도계수 (공동주택 성능기반 내진설계 지침 2019)

재료특성	공칭강도 (fck or fy)		계수
콘크리트 압축강도	21 MPa 이하		1.2
	21 MPa 초과 ~ 40 MPa 이하		1.1
	40 MPa 초과		1.0
철근의 기대강도계수	일반용	SD400	1.26
		SD500	1.23
		SD600	1.19
	내진용	SD400S	1.28
		SD500S	1.32
		SD600S	1.28

각 층은 Slaving 효과를 주어 슬래브를 모델링하였으며, X 방향으로의 각 벽체의 자유도를 맞추기 위하여 Rigid link를 적용하여 모델을 완성하였다. Rigid link의 경우 두 벽체 요소의 자유도를 일치시키는 효과만 가지며, 적용되는 단면적 및 물성치는 고려되지 않는다.



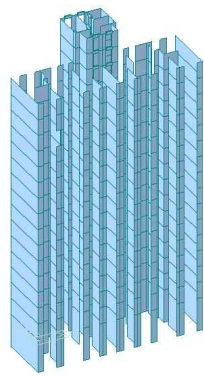
(a) Slaving 효과



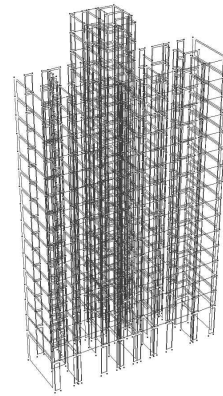
(b) Rigid link의 사용 예

[그림 2.108] 해석 모델링에 적용된 Slaving 및 Rigid link

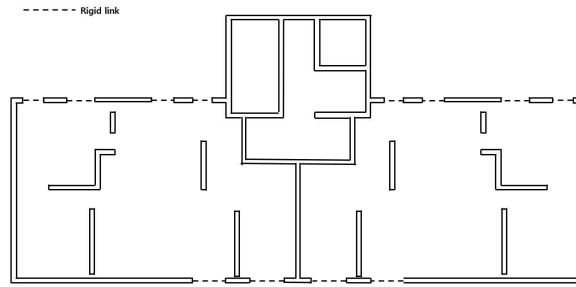
해석 모델 대상 건축물에 대한 모델링의 형상은 아래와 같으며 기존 구조해석 모델과 비구조요소 구조해석 모델을 각각 개발하였다.



(a) Midas

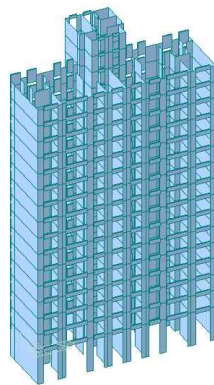


(b) Perform 3D

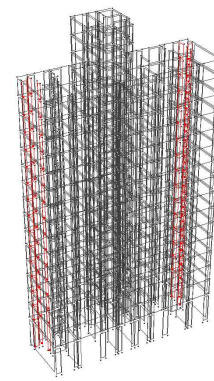


c) 해석모델 단면

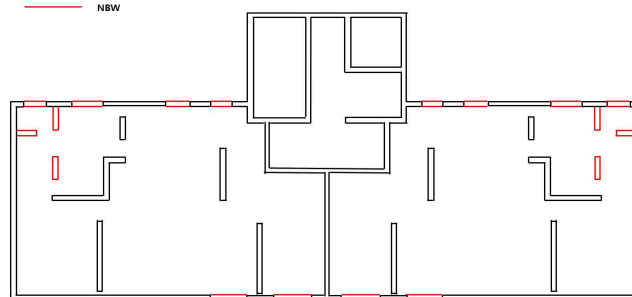
[그림 2.109] 기존 구조해석 모델 (수벽과 비내력벽을 모델링에 고려하지 않음)



(a) Midas



(b) Perform 3D



(c) 해석모델 단면

[그림 2.110] 비구조요소 구조해석 모델 (수벽과 비내력벽을 모델링에 고려함)

3.2 예제 건축물 평가 및 유효강성계수 산출 과정

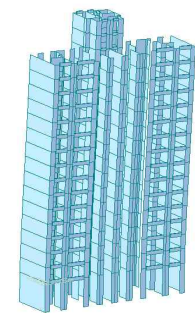
3.2.1 동적 특성 비교

비구조요소를 해석 모델에 포함함으로써 질량의 변화가 생겨 고유주기가 낮아짐을 확인하였다. Midas를 통한 모델링은 50.15% 감소, Perform 3D를 통한 모델링은 30.19% 감소하였다.

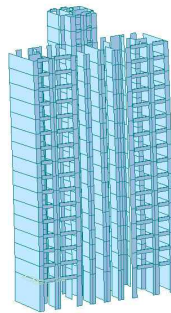
[표 2.32] 통상적 구조해석 모델 Mode period

Model	1st mode	2nd mode	3rd mode
기존 구조해석 모델 (Midas)	1.426	0.866	0.706
기존 구조해석 모델 (Perform 3D)	1.205	0.905	0.710
비구조요소 구조해석 모델 Mode period			
비구조요소 모델 (Midas)	0.833	0.772	0.441
비구조요소 모델 (Perform 3D)	1.015	0.843	0.641
KBC 2016	1.008	-	-

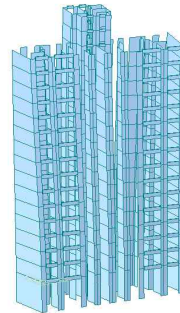
* KBC 2016에 따른 고유주기 $T = C_T \cdot h_n^{3/4} = 0.049 \cdot (56.33)^{3/4} = 1.008$ (sec)



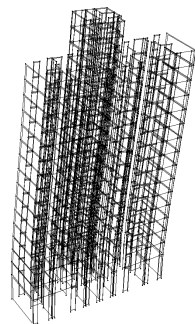
1st mode-Midas



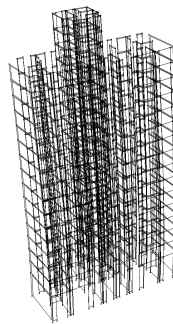
2nd mode-Midas



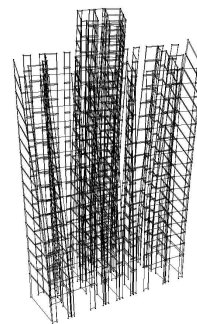
3rd mode-Midas



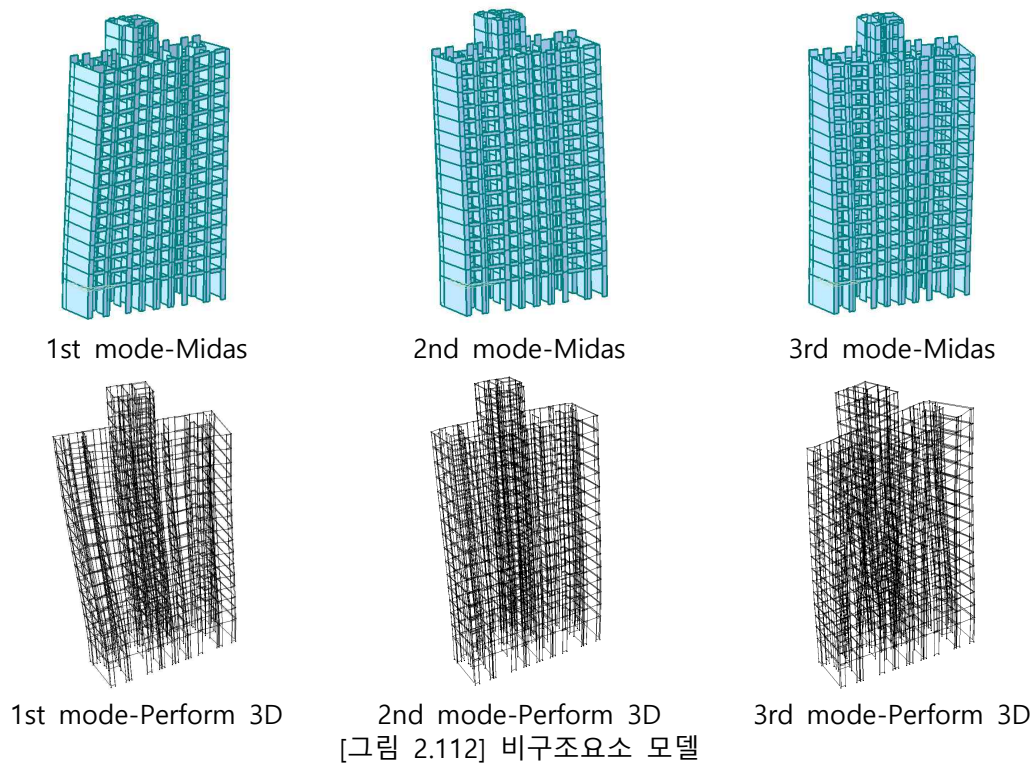
1st mode-Perform 3D



2nd mode-Perform 3D
[그림 2.111] 기존 구조해석 모델



3rd mode-Perform 3D



3.2.2 동적 특성에 따른 구조해석 모델 성능 비교

비선형 정적해석 결과 나타나는 성능곡선 및 요구스펙트럼을 통해 성능점을 도출한 뒤 규정된 목표성능 범위 내에 존재하는 지 여부를 평가함으로써, 기존 구조물이 지니고 있는 내진성능을 평가하였다. 성능곡선은 구조물의 최상층 변위응답과 밀면전단력의 상관곡선의 변환을 통해 요구스펙트럼은 설계응답스펙트럼의 변환을 통해 산정하였으며, 성능점은 성능곡선과 요구스펙트럼의 교차점으로 도출하였다.

검토 결과, X방향에서 성능점은 비구조요소의 유무에 따라 밀면 전단력과 층간변위비에 대해 각각 21.19%, 20.0%의 오차율이 발생되고 Y방향에서는 밀면 전단력과 층간변위비에 대해 각각 2.98%, 25.0%의 오차율을 확인하였다. [표 2.33]와 [표 2.34]은 각각 X와 Y방향에 대한 성능점을 보여주고 있다.

[표 2.33] X-dir Performance point

Model	Base shear (kN)	Reference drift (%)
기존 구조해석 모델		
(Perform 3D)	5705.0	0.15
비구조요소 구조해석 모델		
(Perform 3D)	7239.0	0.12
오차율 (%)	21.19	20.0

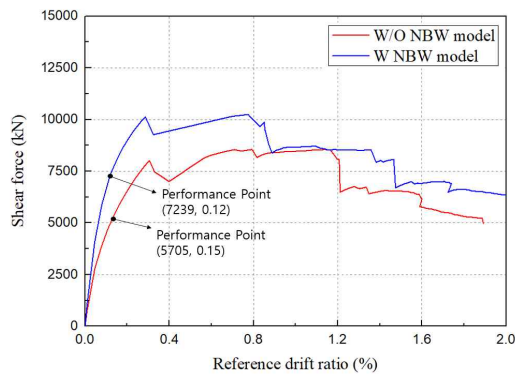
(kN)

[표 2.34] Y-dir Performance point

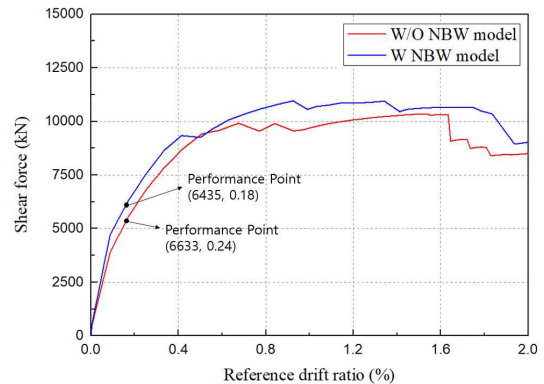
Model	Base shear (kN)	Reference drift (%)
기존 구조해석 모델 (Perform 3D)	6633	0.24
비구조요소 구조해석 모델 (Perform 3D)	6435	0.18
오차율 (%)	2.98	25.0

(kN)

해석 결과에 따른 X 방향에서의 최대 밀면 전단력의 차이는 연결보 및 수벽과 날개벽의 Coupling 효과에 따른 차이 및 비구조요소의 내력 분담으로 인한 밀면 전단력 상승으로 판단된다.



(a) X-dir Pushover curve



(b) Y-dir Pushover curve

[그림 2.113] Pushover curve of Analysis model

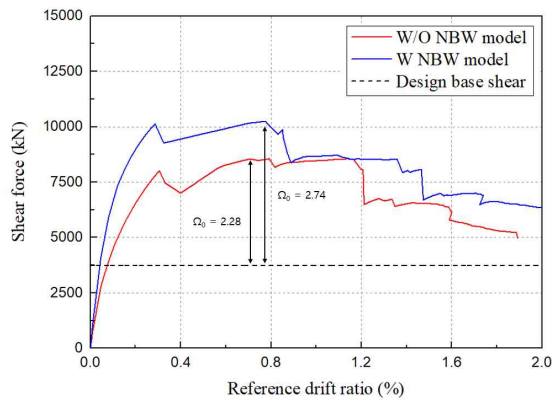
KBC 2016에 따른 설계 밀면 전단력에 대하여 초과강도계수를 구하였다. KBC 2016에 따른 설계 밀면 전단력은 3746.03kN이며, 상세 계산 근거는 아래와 같다. 또한 해당 기준에서 제안하는 철근콘크리트 건축물의 초과강도계수는 2.5이다. [그림 2.113]은 해석모델에 대한 비선형정적해석을 보여주고 있다. 비구조요소를 고려한 해석모델에서 강성과 강도의 증가로 인해 성능곡선의 차이를 보여주고 있다.

$$V = CS \cdot W = 3746.03\text{kN}$$

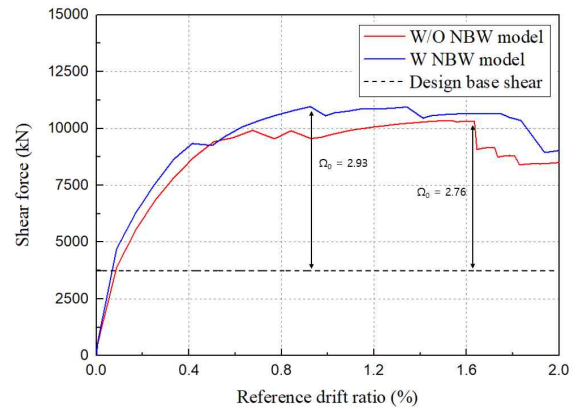
$$* CS = SD1 / [R / IE] \cdot T = 0.05$$

$$* T = CT \cdot hn^{3/4} = 0.049 \cdot (56.33)^{3/4} = 1.0075$$

$$* W = 74920.6\text{kN} \quad (\text{Story weight} = 31160\text{kN}, \text{DL} = 32561.6\text{kN}, \text{LL} = 11199\text{kN})$$



(a) Over Strength Factor of X-dir



(b) Over Strength Factor of Y-dir

[그림 2.114] Over Strength Factor

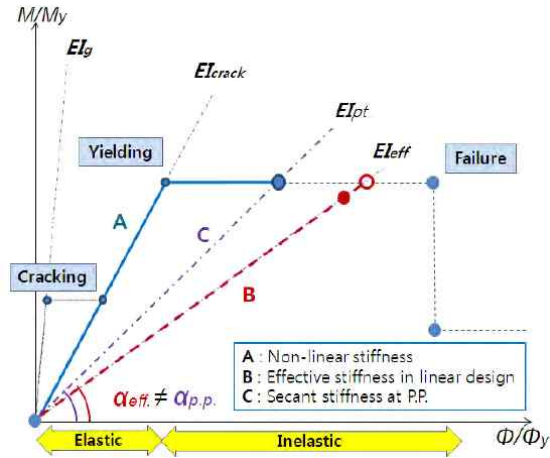
[그림 2.114]에서 나타난 바와 같이 X 방향에서의 기존 구조해석 모델의 시스템 초과강도계수는 2.28이며, 비구조요소 모델의 시스템 초과강도계수는 2.74이다. Y 방향에서의 기존 구조해석 모델의 시스템 초과강도계수는 2.76이며, 비구조요소 모델의 시스템 초과강도계수는 2.93이다.

시스템 초과강도계수는 비구조요소의 유무에 따라 X 방향 및 Y방향에서 각각 1.20배 및 1.06배의 차이를 보이고 있다. 해당 차이를 통해 비구조요소가 힘의 분배를 받고 있음을 확인하였으며, 이는 포항 지진에서와 같이 비구조요소의 파괴에 따른 위험을 초래할 수 있다.

3.2.3 비구조벽체 유효강성 계수의 설정

포항지진에서 나타난 비구조요소의 균열 및 손상은 건물의 거동 구간 중 비선형 구간에서 발생하였다. 따라서 비구조요소에 대한 비탄성 구간에서의 부재강성을 결정할 필요가 있다. 철근콘크리트 부재는 균열이 발생하기 이전에는 전단면강성을 적용할 수 있지만, 균열 이후 항복까지 강성이 점차적으로 감소하고 항복 이후 강성은 급격히 저하한다. 하지만 선형해석에서는 항복 시 부재강도와 변형을 기준으로 부재강성을 정의함으로, 철근콘크리트 부재의 경우 균열을 고려하는 것이 적절하다.

현재 실무에서는 균열에 의한 강성저감 없이 전단면 강성을 선형해석에 적용하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 비탄성 구간에서의 부재의 균열을 고려한 비구조요소의 유효강성을 제안하고자 한다.



[그림 2.115] Effective stiffness of reinforced concrete member

본 연구에서의 철근콘크리트 벽체의 유효강성 계수는 Damir Vidovic ‘EFFECTIVE STIFFNESS FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF BUILDINGS IN EARTHQUAKE’에서 제시한 식을 따라 비구조요소의 유효강성 계수를 제안하였다. 해당 식은 아래에 나타나 있다.

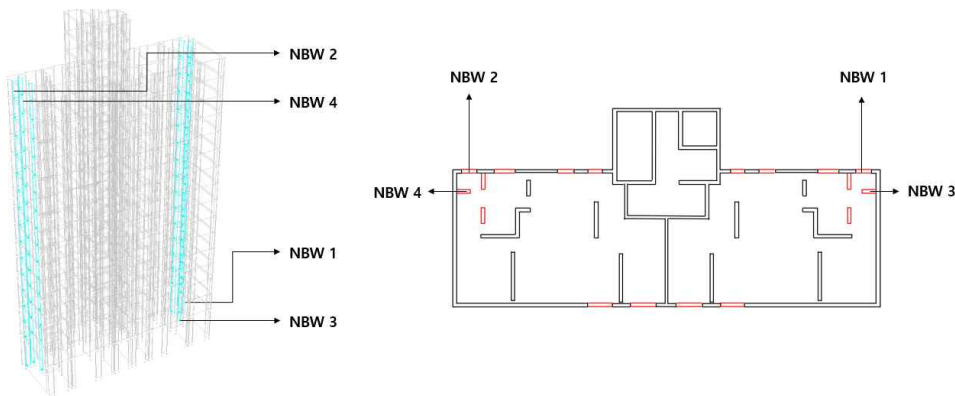
$$(EI)_{eff} = M_y / (1/\gamma) \quad (\text{식1})$$

$$(EI)_{Nonlinear} = M_{Nonlinear} / (1/\gamma) \quad (\text{식2})$$

M_y : 항복 모멘트, $M_{Nonlinear}$: 비선형구간 모멘트

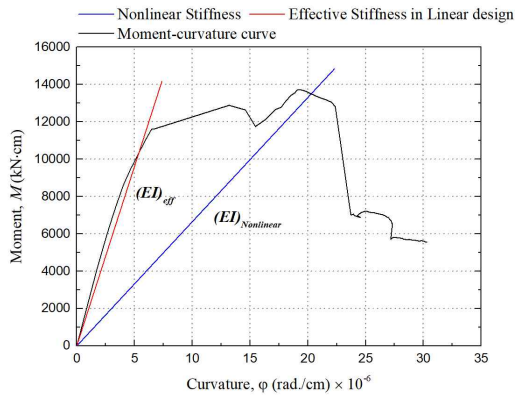
$1/\gamma$: ϕ , 모멘트에 따른 곡률

비구조요소 구조해석 모델 상 X 방향에 대해 가장 취약 부분으로 평가되는 B1층의 NBW 1과 16F의 NBW 2에 대하여 X 방향에 대한 모멘트-곡률 곡선을 구하였다. 비구조 벽체의 경우 앞서 해석 결과에서 나타난 것처럼 비탄성 구간에서 취약한 모습을 보인다. 따라서 비탄성 구간에서의 모멘트 값과 항복 모멘트 값에 따른 유효강성 계수를 구하여 계수를 산정하였다. 이는 기존의 관련연구의 문헌을 통해 적용하였다.

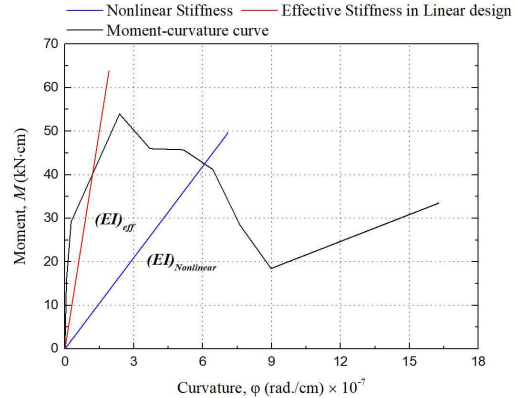


[그림 2.116] 비구조요소 유효강성 평가 대상 벽체

비구조요소 구조해석 모델 상 Y 방향에 대해 가장 취약 부분으로 평가되는 B1층의 NBW 3과 16F의 NBW 4에 대하여 Y 방향에 대한 모멘트-곡률 곡선을 구하였다. 비구조 벽체의 경우 앞서 해석 결과에서 나타난 것처럼 비탄성 구간에서 취약한 모습을 보인다. 따라서 비탄성 구간에서의 모멘트 값과 항복 모멘트 값의 비율에 따른 유효강성 계수를 구하여 계수를 산정하였다.

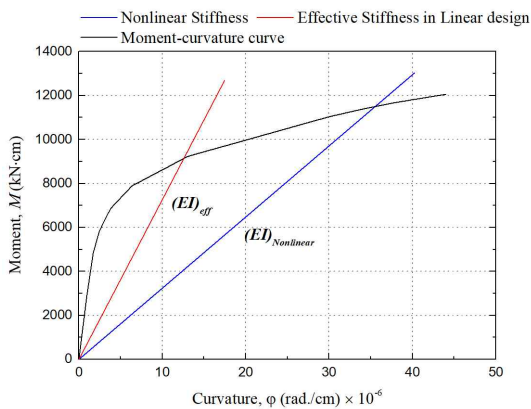


(a) NBW 1 Moment-Curvature

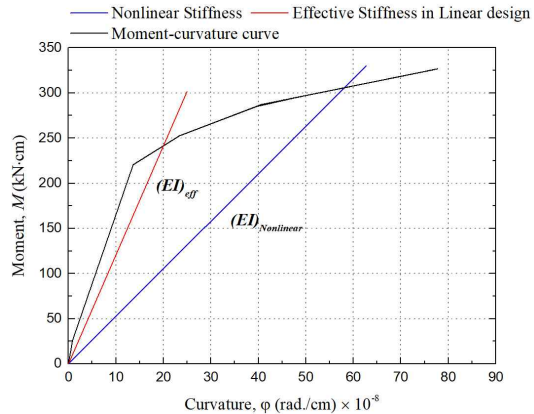


(b) NBW 2 Moment-Curvature

[그림 2.117] Moment-Curvature curve of X-dir



(a) NBW 3 Moment-Curvature



(b) NBW 4 Moment-Curvature

[그림 2.118] Moment-Curvature curve of Y-dir

NBW 1, NBW 2, NBW 3, NBW 4 벽체에서 각각 0.35, 0.20, 0.45, 0.44의 유효강성 계수가 도출되었으며, 본 연구에서는 비구조요소에 대한 보수적 평가를 위해 최소값인 0.20을 비구조요소의 유효강성계수로 제안한다.

[표 2.35] 유효강성 계수

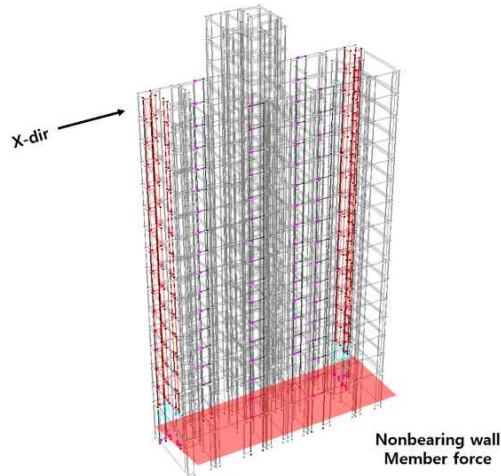
	NBW 1	NBW 2	NBW 3	NBW 4
선형구간 유효강성, $(EI)_{eff}$	66.54×107	69.93×106	32.38×107	52.68×107
비선형구간 유효강성, $(EI)_{Nonlinear}$	192.29×107	333.06×106	72.65×107	120.86×107
유효강성 계수	0.35	0.20	0.45	0.44

비선형 물성치를 적용하여 구한 비내력벽의 유효강성 계수를 마이다스 모델에 적용하였을 때, 비내력벽이 가지는 부재력은 감소한다. 이는 실제 건축물의 거동과 같이 비내력벽의 손상 수준이 반영되어 부재력이 감소함을 나타낸다. 따라서 마이다스와 같은 비선형 구간 물성치를 적용하지 않은 설계를 진행할 시, 비내력벽의 유효강성 계수를 적용하는 것이 적절할 것으로 보인다.



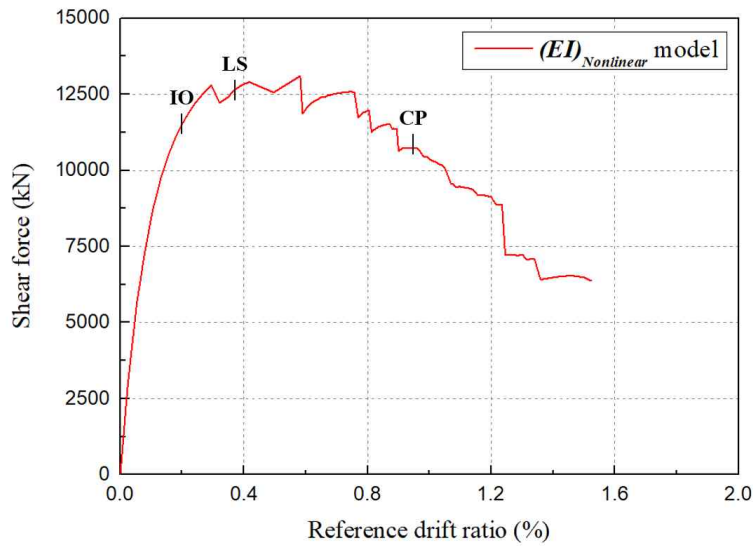
3.2.4 비내력벽의 손상평가 및 내진슬릿 적용

본 연구에서 제안한 비선형 물성치를 적용한 공동주택 해석 모델에 대해 성능평가를 실시하였다. 비구조요소의 성능수준별 허용기준을 제시하고 이때, 인명안전 수준에서의 비내력벽의 손상을 검토하여 대체 시스템 적용 여부를 판단하였다.



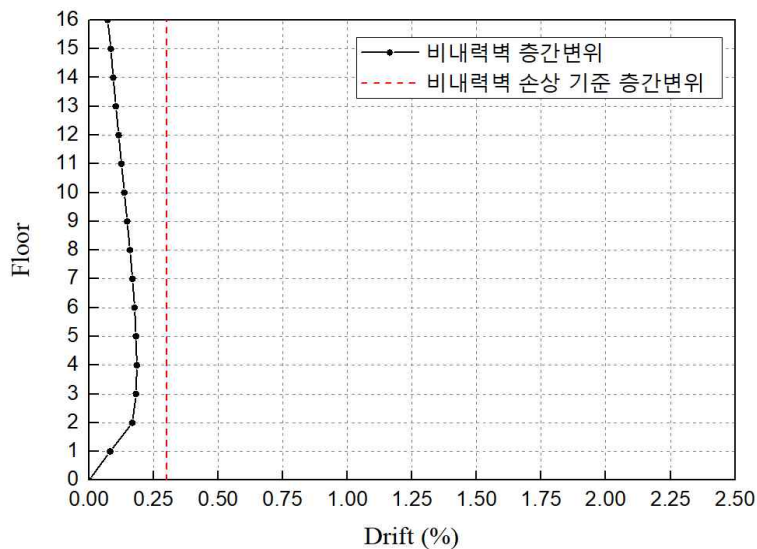
[그림 2.119] 비선형 물성치를 적용한 공동주택 해석 모델

비구조요소의 성능수준별 허용기준은 아래에 나타나 있다.



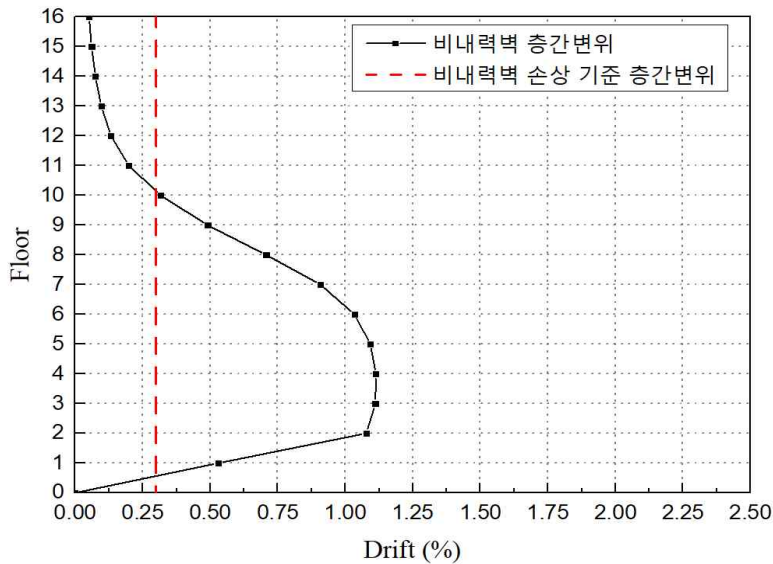
[그림 2.120] 비선형 물성치를 적용한 공동주택 해석 모델의 성능수준별 허용기준

인명안전 수준에서의 비내력벽의 손상수준은 [그림 2.121]에 보여주고 있다. 층간변위 0.25%를 손상 기준으로 적용하였으며, 중저층에서 손상이 가장 크게 나타났고, 이는 포항지진에서의 공동주택의 비내력벽 손상과 유사한 결과를 나타낸다.



[그림 2.121] 성능점에서의 비내력벽의 손상수준

[그림 2.122]는 LS성능에 대해 비내력벽의 손상수준을 보여주고 있다. LS수준에서는 기존 구조체에도 항복과 변형이 발생하기 때문에 비구조체에서도 균열과 손상이 많이 발생하게 되며 본 해석에서의 손상 수준은 이를 뒷받침하고 있다. 해당 LS점에서의 손상이 나타난 비내력벽에 대해서는 수벽과 날개벽 내진슬릿에서 제시하는 내진슬릿을 적용하여 설계함을 권장하며, 내진슬릿을 적용할 시 구조해석 모델링에서 해당 비내력벽은 모델링 시 제외시킨다.



[그림 2.122] LS점에서의 비내력벽의 손상수준

3.3 소결

제안된 물성치 모델 및 유효강성 계수는 예제 건축물을 통하여 검증 및 평가하였다. 예제 건축물은 대표적인 구조해석 소프트웨어인 MIDAS GEN과 PERFORM 3D로 수행하였으며, 예제 건축물에 대해 동적특성 검토 및 비내력벽의 모멘트-곡률 곡선을 도출하여 유효강성을 제안하였다. 제안된 비내력벽의 유효강성 계수는 0.2로서 비내력벽의 균열 및 파괴가 고려된 계수이다.

본 연구에서 제시하는 콘크리트, 철근의 비선형 물성치를 적용하고, 유효강성 계수를 적용하여 비구조벽체를 모델링하였을 때, 인명안전수준에서 수벽과 날개벽이 손상되는 경우 위험한 피해를 초래할 수 있다. 따라서 손상된 수벽과 날개벽에 대해서 별도의 내진슬릿을 제시하였다.

제시된 내진슬릿은 Dowel bar 내진슬릿 시스템으로서 비내력벽을 프리캐스트로 제작하여 끼워 넣음으로써 공기를 단축시키고, PC 비내력벽 양단에 20mm, 상·하부에 30mm 슬릿을 설치하도록 개발하였다. 이를 통해 외력으로 인한 구조부재에 변형 발생 시 힌지 시스템으로 비내력벽에 대한 하중 전달을 완전히 차단하여 균열 및 손상을 제어하는 시스템이다. 또한, PC 비내력벽 하부 슬릿에 매립된 Dowel bar로 지진하중 발생 시 비내력벽에 발생하는 축력을 전달하여 먼저 항복할 수 있도록 유도하여 비내력벽의 균열 및 손상을 제어한다.

예제 건축물에서의 대체 시스템 적용을 통해 공동주택에 대한 대체 시스템의 적용법을 제시하였다. 대체 시스템의 적용 유무에 따른 공동주택 해석 모델을 개발하였으며, 대체 시스템의 공동주택에서의 적용 방법을 제시하였다.

■공동연구기관: 계명대학교

■계명대 연구목표 : 대체시스템 보수·보강 공법 개발 및 검증

1. 대체시스템 보수·보강 공법 개발

1.1 연구개요

공동연구기관인 계명대학교는 비내력벽 대체시스템이 적용된 RC벽체의 보수·보강 공법 개발 및 검증을 3차년도 목표로 하며, 이를 달성하기 위하여 아래와 같이 연구를 수행하였다.

- RC벽체에 적용가능한 보수·보강 공법 개발
- 손상된 비내력벽 대체시스템 적용 RC벽체 실험체 선정
- 개발한 보수 및 TRM 보강 공법 적용
- 일정한 축력하에서 정적반복가력실험 수행
- 보수·보강 전·후 RC벽체의 비교·분석을 통한 개발 보수·보강 공법 성능 검증

1.2 RC벽체 보수·보강을 위한 TRM 공법

2017년 포항지진으로 인하여 벽식아파트 전 층에 걸쳐 벽체에 심각한 피해가 발생하였으며, 이를 전체적으로 복구하기 위하여 많은 시간과 복구비용이 발생하였다. 또한, 1~2차년도의 성과물인 비내력벽 대체시스템을 적용한 RC벽체의 보수·보강 공법 관련 연구 및 기술은 찾아보기 힘들다. 기존 보수·보강공법 중 많이 사용되고 있는 FRP 보강 공법은 일정 온도 이상에서의 에폭시 부착강도 저하, 습윤 환경에서의 사용불가와 같은 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 격자 형태로 제작된 FRP를 에폭시 수지가 아닌 시멘트계 매트릭스 내부에 함입하는 직물 섬유 보강 모르타르(Textile Reinforced Mortar, 이하 TRM) 공법이 연구 및 실무에 많이 적용되고 있다. 또한 TRM은 다양한 환경에서 적용이 가능하며, 넓은 면적의 부재를 보강함에 있어 우수한 시공성을 가지고 있어 본 연구에서 보수·보강하고자 하는 RC벽체 부재에 적합한 보강 공법이다.



[그림 2.123] TRM의 특징

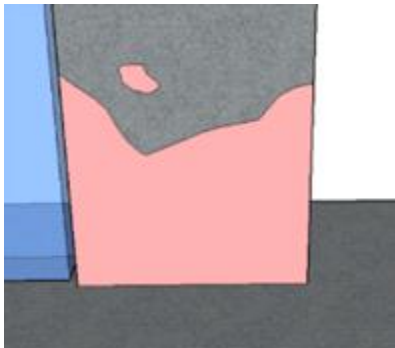
기존 TRM 보강 공법 사용 시 부재와 모르타르 사이, 섬유와 모르타르 사이에서 박리가 발생하여 보강능력이 온전히 발휘되지 않는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 개선하기 위해 주입식 케미컬 앵커를 활용하였으며, 주입식 케미컬 앵커는 보수된 콘크리트부터 TRM 복합체까지 관통하여 설치된다. 따라서, 주입식 케미컬 앵커가 구조체 및 TRM 복합체를 일체화하여 슬립 방생을 최소화시킬 수 있다. 또한, 모르타르의 접착력을 향상시키기 위하여 SBR 라텍스를 혼입하여 사용하였다. 일반 모르타르에 SBR 라텍스 혼입 시 모르타르의 강도, 내구성 및 부착성능을 향상시킬 수 있는 효과도 얻을 수 있다. 보수·보강 전 모르타르 예비 배합을 수차례 걸쳐 수행한 결과, 수직부재 적용을 위한 시공성과 모르타르 강도를 고려하여 적절한 배합비를 산정하였다.

TRM에 사용된 직물섬유는 높은 인장강도, 가벼운 무게, 낮은 열팽창율 등의 우수한 특성을 가진 탄소 기반 직물섬유를 사용하였다. 선정한 탄소 직물섬유는 보강 단면, 인장강도, 탄성계수 등의 기계적 특성을 고려하여 선정하였다. 개발 보수·보강 공법 중 직물섬유의 영향을 검토하기 위하여 보수 시 콘크리트 타설 전 직물섬유를 설치하는 방법이 있다. 이 방법을 고려하기 위하여 타설되는 콘크리트 굵은골재 최대치수보다 큰 그리드 간격을 가지는 탄소 직물섬유를 선정하였다.

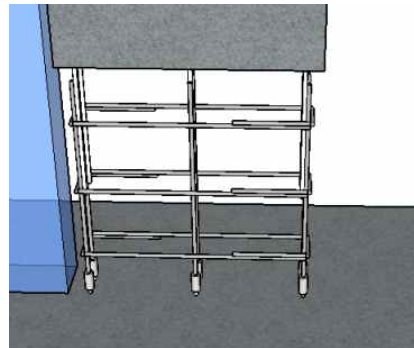
본 연구에서 실험적 성능 검증 시 개발한 보수·보강 공법에서 보강은 모두 동일하게 진행하나, 보수 방법을 두 가지로 나누어 검토하였다. 첫 번째는 보수 콘크리트 타설 후 표면에 TRM 보강을 진행하는 방법이다. 두 번째는 섬유의 영향 및 성능을 검토하기 위하여 보수 콘크리트 타설 전 철근에 탄소 직물섬유를 추가로 설치한 후 콘크리트 타설을 진행하고, 보강은 동일하게 진행하는 방법이다.

개발한 보수·보강의 전체 절차는 [그림 2.124]와 같으며, 절차에 대한 설명은 아래와 같다.

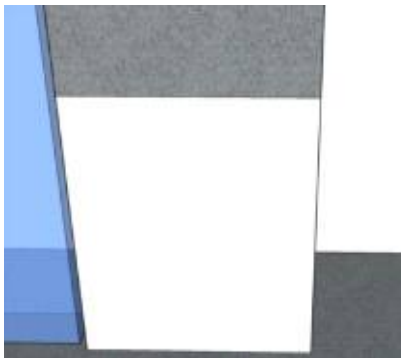
- (a) 손상된 콘크리트를 제거한다.
- (b) 좌굴이 발생한 철근을 제거한다. 주철근의 하단부는 커플러 이음, 상단부는 겹침이음으로 진행한다. 이는 새 철근의 이음이 충분하게 진행될 수 있고, 철근 보수 시 시공성을 높이기 위하여 하단부와 상단부를 상이한 이음으로 진행하는 것이다. 겹침이음 진행 시 KDS 14 20 52. (2016)의 인장철근 정착길이 정밀식에 의하여 산정한 값을 적용한다.
- (c) 콘크리트 타설 및 양생 후 거푸집 탈형한다.
- (d) 보강 시 구조체와 보강체의 박리를 방지하기 위하여 콘크리트 표면에 치핑작업을 진행한다.
- (e) 주입식 케미컬 앵커의 홀 생성 후 앵커볼트를 콘크리트 내에 삽입한다.
- (f) 약 5mm 두께로 모르타르 1차 바름을 진행한다.
- (g) 탄소 직물섬유를 압착한 후 와셔 및 너트로 앵커볼트에 고정한다.
- (h) 약 10mm 두께로 모르타르 2차 바름 후 미장처리를 한다.



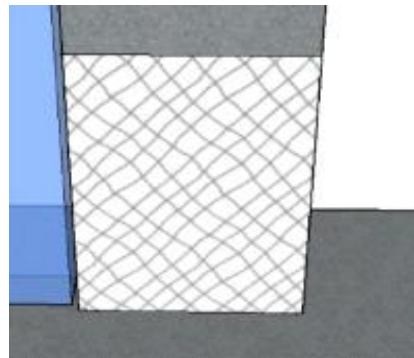
(a) 철근콘크리트 벽체 균열부위 확인



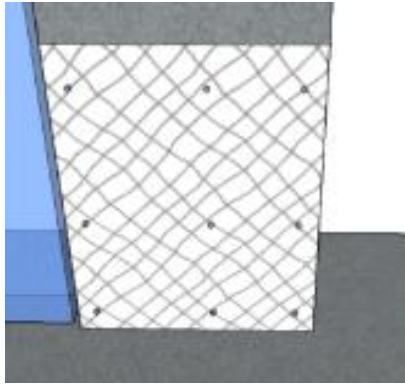
(b) 철근 기계적 이음 보수



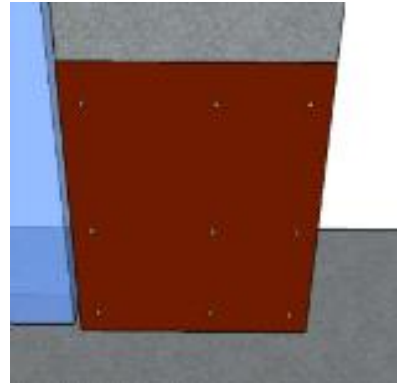
(c) 콘크리트 타설



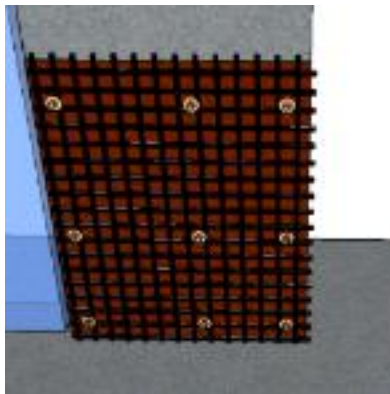
(d) 콘크리트 표면 처리



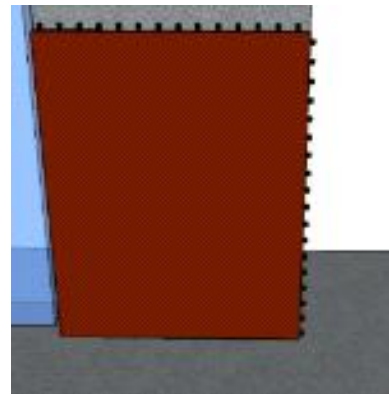
(e) 홀 생성 및 주입식 케미컬 앵커 삽입



(f) 모르타르 1차 바름(5mm)



(g) 섬유 부착 및 고정



(h) 모르타르 2차 바름(10mm)

[그림 2.124] TRM 보수·보강공법 시공 과정

1.3 개발 보수·보강 공법 성능 검증을 위한 손상된 RC벽체 실험체 선정

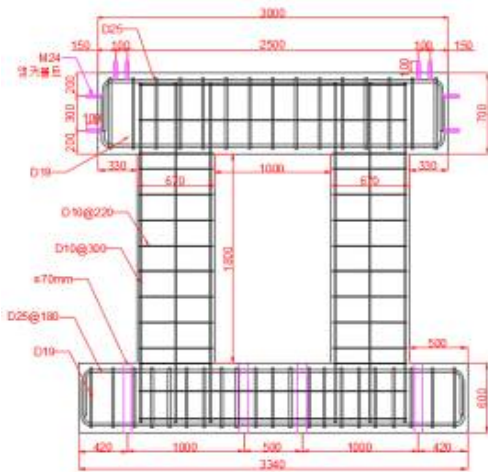
개발 보수·보강 공법의 구조성능 복원 능력을 검증하기 위하여 2차년도에 제작된 RC벽체 실험체의 정적반복가력실험 수행 후 손상된 실험체를 선정하였다. 선정 기준은 5개의 실험체 중 균열 및 손상제어를 위한 내진슬릿(Seismic)이 적용되어 있으며, 비교적 균열 및 손상이 심하지 않은 2개의 실험체를 선정하였다. 실험체는 다월바 시스템이 적용된 DBW 실험체와 PC비내력벽 시스템이 적용된 HW 실험체로 선정하였다. 3차년도에서 다월바 시스템이 적용된 실험체는 WDB, PC비내력벽 시스템이 적용된 실험체는 PCW로 표기하였으며 개발 보수·보강 공법 적용 후 실험체는 각각 WDB_R 및 PCW_R로 표기하였다.

PCW_R 실험체는 실험 전 균열 및 손상이 전혀 발생하지 않은 PC 비내력벽을 제거한 후 실험을 진행하였으며, 이는 비내력벽이 없는 실험체 REF 실험체와 형상이 같다. 따라서, 실험 수행 후 REF 실험체 실험결과와 함께 비교·분석하였으며 3차년도에서 REF 실험체는 RFW로 표기하였다. 각 실험체 변수 및 상세는 [표 2.36] 및 [그림 2.125]과 같다.

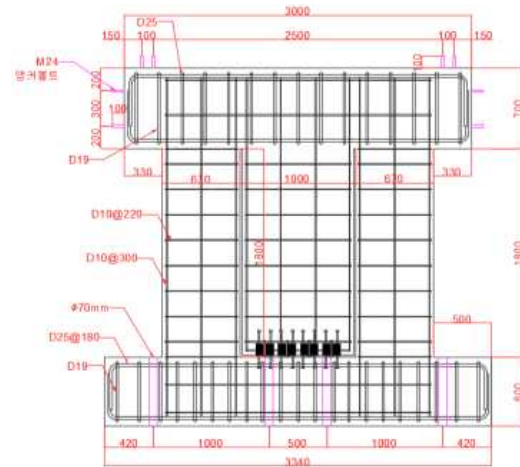
WDB_R 및 PCW_R 실험체 모두 2차년도에 제작 및 실험 수행한 실험체를 선정한 것이기 때문에 실험체 철근비, 형상, 크기는 모두 기준과 동일하다. 개발 보수·보강 공법을 적용한 WDB_R 및 PCW_R 실험체의 양단 내력벽 길이x높이x두께는 670x1800x135mm이며, 내력벽 철근비 또한 수직철근비 0.47% 및 수평철근비 0.29%로 동일하다. 위에서 언급한 바와 같이, PCW_R 실험체는 중앙의 PC 비내력벽을 제거한 후 실험을 수행하였으며, WDB_R 실험체는 비내력벽이 상부 슬래브와 일체화되어있기 때문에 제거하지 않고 실험을 수행하였다.

[표 2.36] 실험체 상세

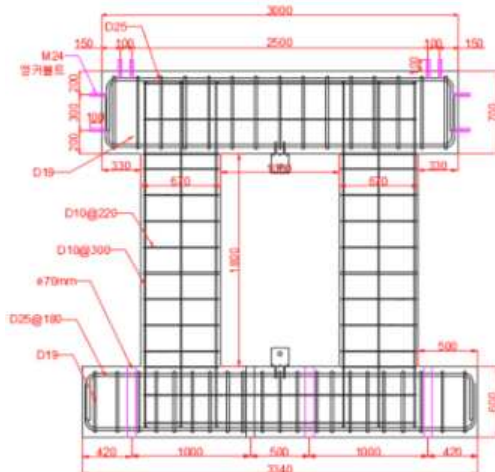
Specimen	Dimension, mm		Rebar ratio, %			
			Longitudinal		Transverse	
	Bearing Wall	Non-Bearing Wall	Bearing Wall	Non-Bearing Wall	Bearing Wall	Non-Bearing Wall
WDB	670 x1800 x135	960x1800 x135	0.47	0.21	0.29	0.29
WDB_R		960x1740 x135				
PCW		-				
PCW_R		-				
RFW		-				



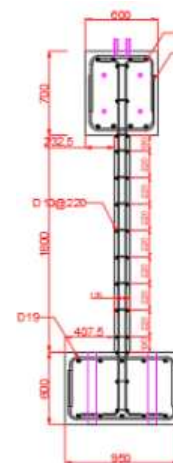
(a) RFW



(b) WDB_R



(c) PCW_R



(d) 내력벽 단면

[그림 2.125] 실험체 상세도면

1.4 개발 보수·보강 공법 사용 재료

보수를 위해 사용된 콘크리트 압축강도는 손상된 RC벽체 실험체에 사용된 콘크리트와 동일하게 설계하였으며, 동일 조건으로 타설하였다. 기존 실험체와 보수·보강 적용 실험체의 콘크리트 압축강도 실험결과는 [표 2.37]와 같으며, 콘크리트 압축강도는 공시체 3개의 평균값으로 산정하였다.

[표 2.37] 콘크리트 압축강도 실험결과

Specimen	Design strength (MPa)	Cylinder test (MPa)
WDB	24	20.4
WDB_R		12.8
RFW		24.8
PCW		23.6
PCW_R		12.8

실험체 보수 시 사용된 철근은 손상된 실험체에 사용한 철근과 동일한 철근인 SD400의 D10 철근을 사용하였다. 보수를 위해 사용한 철근의 인장강도 실험결과는 [표 2.38]과 같으며, 시편 3개의 평균값으로 산정하였다.

[표 2.38] 철근 인장강도 실험결과

Specimen	Rebar	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strain
WDB	D10	452.85	594.74	0.0023
WDB_R		423.03	580.41	0.0021
RFW		452.85	594.74	0.0023
PCW		452.85	594.74	0.0023
PCW_R		423.03	580.41	0.0021

철근 보수 시 하단부 이음에 사용된 커플러는 직접체결식으로 철근을 별도로 가공하지 않고 부품만을 이용하여 진행하였으며, 사용된 커플러의 규격은 [표 2.39]와 같다.

[표 2.39] 커플러 규격

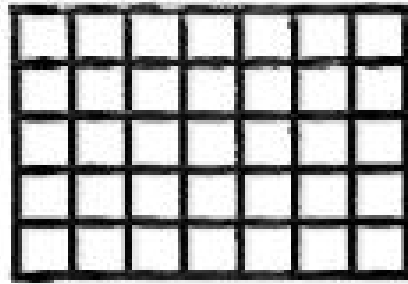
제품명	길이(mm)	외경(mm)
현장체결식 일반형 커플러 D10	54	24

주입식 케미컬 앵커 사용 시 앵커볼트는 M8 규격의 볼트를 사용하였으며, 앵커볼트의 규격은 [표 2.40]와 같다.

[표 2.40] 앵커볼트 규격

앵커볼트	나사산로드의 설치 매개 변수		
	천공직경(mm)	천공깊이(mm)	최소연단거리(mm)
M8	10	60~96	40

보강에 사용된 직물섬유는 그리드 간격 38*38mm 탄소 직물섬유를 사용하였으며, 형태 및 물성치는 [그림 2.126] 및 [표 2.41]과 같다.



[그림 2.126] 탄소 직물섬유 형태

[표 2.41] 탄소 직물섬유 물성치

섬유 종류	그리드 간격 (mm)		보강 단면 (N/mm ²)		인장강도 (MPa)		탄성계수 (GPa)	
	경사	위사	경사	위사	경사	위사	경사	위사
Carbon 38K*38K	38	38	142	142	2,500	2,800	>180	>180

또한, 모르타르의 부착성능을 향상시키기 위하여 사용된 SBR 라텍스는 시멘트 중량 대비 10%를 첨가하였으며, 물성치 및 배합비는 [표 2.42] 및 [표 2.43]과 같다.

[표 2.42] SBR Latex 특성

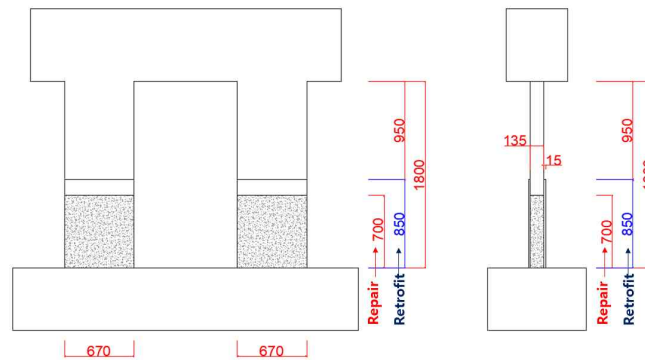
Type	PH (25℃)	Surface tension (dyne/cm)	Viscosity at 25℃	Solid content (%)
SBR 라텍스	9.7	39	130	48.5

[표 2.43] SBR 모르타르의 배합비

모르타르 종류	배합비			
	시멘트	모래	물	SBR
폴리머 시멘트 모르타르	1	2.45	0.5	0.1

1.5 선정된 RC벽체의 보수·보강 적용 상세

실험체 보수는 균열 및 손상이 크게 나타나고 계측된 철근의 변형이 크게 발생한 벽체 높이 700mm까지 수행하였으며, TRM 보강은 기존 콘크리트와 새로 타설한 콘크리트 간 이격을 방지하고자 벽체 높이 850mm까지 진행하였다. 벽체 보수 및 보강 범위는 [그림 2.127]와 같다.



[그림 2.127] 실험체의 보수 및 보강 범위

‘1.2 철근콘크리트 벽체 보수·보강 공법 개발’에서 언급한 바와 같이, WDB_R 및 PCW_R 실험체의 전체 보수·보강 절차는 동일하게 진행하였으나, 사용된 직물섬유의 영향 및 성능을 비교·분석하기 위하여 아래 (c)절차와 같이 PCW_R 실험체 보수 시 콘크리트 타설하기 전에 보수된 횡철근에 탄소 직물섬유를 고정시킨 후 콘크리트를 타설하였다.

손상된 실험체의 개발 보수·보강 상세 과정은 [그림 2.127]과 같으며, 각 시공 과정에 따른 상세한 설명은 아래와 같다.

- 보수 범위(높이 700mm) 확인 후 손상된 기존 콘크리트 및 좌굴이 발생한 철근 제거
- 주철근의 경우 하단부는 커플러 이음을 진행하였으며, 상단부는 KDS 14 20 52. (2016)의 인장철근 정착길이 정밀식에 의하여 산정한 330mm를 적용하여 겹침이음을 진행함
- 소성힌지구간을 포함한 벽체 높이 500mm까지 띠철근에 결속선을 이용하여 타설 시 섬유가 움직이지 않도록 고정, 이는 취성파괴를 방지하고 연성거동을 할 수 있게 함.
- 거푸집 설치 및 콘크리트 타설
- 보강을 진행 할 부분의 콘크리트 표면은 박리현상을 방지하기 위하여 그라인더를 이용하여 2~3mm 깊이의 격자형 그리드를 형성하였으며, 주입식 케미컬 앵커를 이용하여 앵커볼트를 콘크리트 내에 삽입함
- 콘크리트 표면에 물 뿌림 작업을 진행한 후 5mm 두께로 모르타르 1차 바름 진행
- 직물섬유 그리드 간격 사이에 모르타르가 천공할 수 있도록 압착 및 정착을 하였으며, 탄소섬유 그리드 가장자리에 맞닿아 있는 앵커볼트에 너트를 이용하여 섬유 고

정

(h) 직물섬유 및 앵커볼트가 덮일 정도로 모르타르 2차 바름(약 10mm) 후 마감



(a) 콘크리트 및 좌굴된 철근 제거



(b) 철근 기계적 이음



(c) 띠철근에 섬유 부착



(d) 거푸집 설치 후 콘크리트 타설



(e) 표면 처리 및 앵커볼트 삽입



(f) 모르타르 1차 바름



(g) 직물섬유 압착 및 정착



(h) 모르타르 2차 바름 후 마감



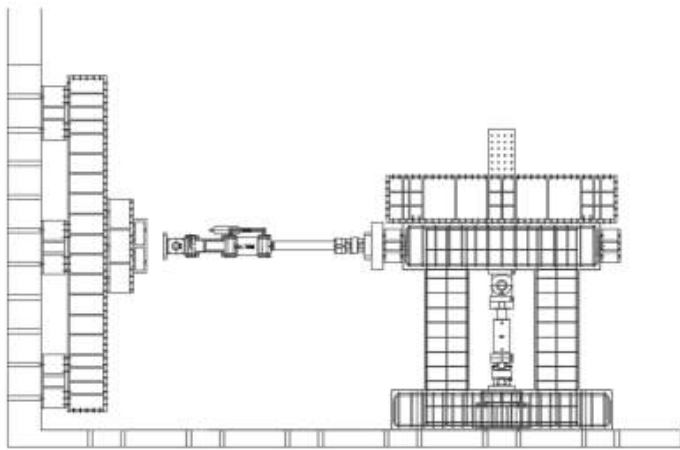
(i) 보수·보강 완료

[그림 2.128] 보수 및 개발 TRM 보강 과정

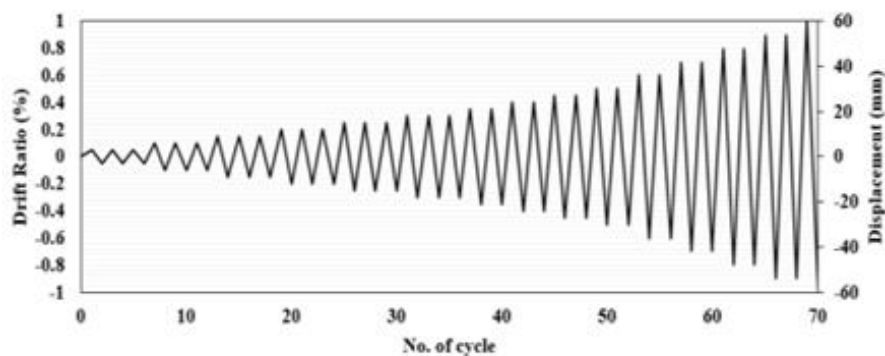
1.6 계측장비 및 가력 계획 수립

비내력벽 대체시스템 보수·보강 공법 개발 및 검증을 위하여 정적반복가력 실험을 수행하였다. 정적반복가력 실험을 수행하기 위하여 [그림 2.129]과 같이 실험체를 세팅하였으며, 일정한 축력 하에서 정적반복가력 실험을 수행하기 위하여 2개의 가력장치를 사용하였다. 모든 실험체의 축력은 벽체 압축 용량의 10%($0.1f_{ck}A_g$, 758kN)로 적용하였으며, 2,000kN 용

량의 가력장치를 사용하여 일정하게 가력하였다. 축력은 국부적으로 가력하게 되면 상부 기초에 손상 및 변형이 발생하게 될 수 있다. 따라서, 축하중 가력 시 등분포로 상부기초에 전달될 수 있도록 높은 강성 및 면적을 가지는 프레임을 설치하였다. 횡력은 정가력 방향으로 2,000kN 및 부가력 방향으로 1,300kN의 용량을 가지는 액추에이터를 이용하여 횡 하중 계획을 기반으로 변위 제어 방식으로 가력하였다. 횡력이 작용할 때 실험체가 면외 방향으로 전도 및 비틀림이 발생하는 것을 방지하기 위하여 상부 양단에 강봉과 M24앵커볼트를 이용하여 가이드를 설치하였다. 횡 하중 계획은 [그림 2.130]과 같이 변위를 기반으로 점진적 증가 및 감소하며, 반복되는 하중에서 강성 저감을 분석하기 위하여 층간변위비 0.3%까지는 3 사이클, 이후에는 2 사이클 반복 가력하였다.

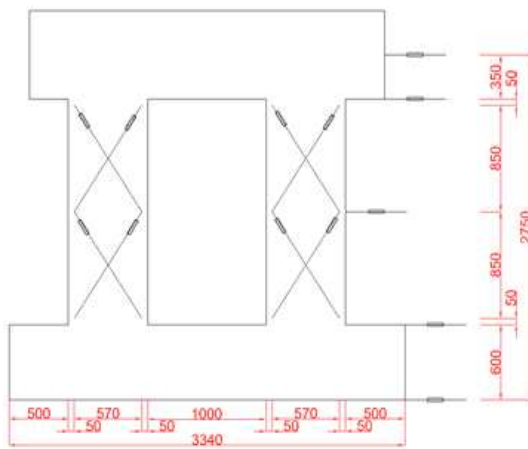


[그림 2.129] 실험체 세팅



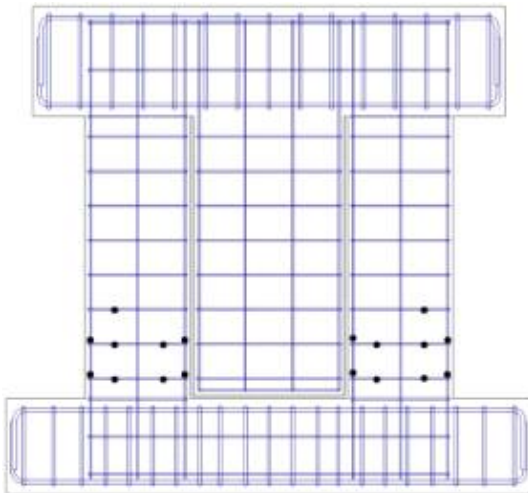
[그림 2.130] 횡 방향 가력 패턴

모든 실험체에서 상부 기초에 횡력이 작용 할 때의 변위를 측정하기 위하여 상부 기초에 2개 및 벽체 중앙부에 1개의 LVDT를 각각 설치하였으며, 하부 기초에는 횡력으로 인한 슬라이딩 및 회전을 고려하여 상·하부에 각 1개씩 LVDT를 설치하였다. 또한, [그림 2.131]과 같이 횡력에 따른 RC벽체의 전단변형을 측정하기 위하여 면내 방향에 대하여 'X' 형상으로 LVDT를 설치하였다.

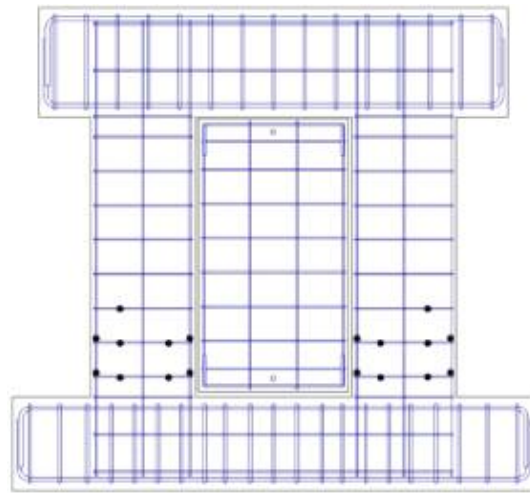


[그림 2.131] LVDT 위치 및 설치 상황

보수·보강된 실험체에서 철근에 대한 변형률을 분석하기 위하여 [그림 2.132]과 같이 변형률 게이지를 부착하였으며, 이를 이용하여 각 실험체의 항복점을 찾고 실험체의 거동에 미치는 영향을 분석하였다.



(a) WDB_R 실험체



(b) PCW_R 실험체

[그림 2.132] 변형률 게이지 부착 위치

1.7 실험 결과

1.7.1 균열 및 파괴양상

WDB_R 실험체의 층간변위비에 따른 균열 및 파괴 양상은 [그림 2.133]과 같다. WDB_R 실험체는 층간변위비 0.1%에 도달할 때 벽체의 측면에 초기균열이 발생하였고, 균열들은 0.35%까지 층간변위비가 증가함에 따라 점차 상·하부로 확장되었다. 층간변위비 0.4%에서부터는 보강된 TRM의 모르타르 표면에서 다수의 균열이 발생하기 시작하였으며, 층간변위비 0.8%까지는 벽체 상단부에 다수의 균열이 발생하였다. 층간변위비 1.0%의 부가력 방향에서 실험체의 하부가 파괴됨에 따라 실험을 종료하였다. WDB_R 실험체는 파괴

시 면의 방향으로 파괴가 일어났으며, 내력벽 하단 철근의 심각한 좌굴 현상이 발생하였다. 또한, 실험 종료 시 까지 부착파괴는 발생하지 않았으며 최대하중 이후 섬유가닥이 끊어지는 소리가 발생하였다.

실험 종료 후 파괴된 콘크리트를 제거하여 확인해본 결과, 섬유가 면의 방향으로 부풀어져 있었으며 일부 가닥이 끊어져 있었다. 이는 최대하중 이후 TRM의 보강성능이 온전히 발휘된 것으로 판단된다.



(a) 층간변위비 0.1%



(b) 층간변위비 0.15%~0.25%



(c) 층간변위비 0.3% ~ 0.35%



(d) 층간변위비 0.4% ~ 0.8%



(e) 층간변위비 0.9%



(f) 층간변위비 1.0%

[그림 2.133] DBW_R의 균열 및 파괴 양상

PCW_R 실험체의 층간변위비에 따른 균열 및 파괴 양상은 [그림 2.134]와 같다. PCW_R 실험체는 층간변위비 0.05%에 도달할 때 벽체의 측면 및 하단부에 초기균열이 발생하였고, 층간변위비가 증가함에 따라 점차 상부로 확장되었다. 층간변위비 0.5%에서부터는 보강된 TRM의 모르타르 표면에서 다수의 균열이 발생하기 시작하였으며, 층간변위비 0.8%에서 벽체 하단부에 콘크리트 박리가 발생하였다. 층간변위비 1.1%의 부가력 방향에서 실험체의 하부가 파괴됨에 따라 실험을 종료하였다. PCW_R 실험체는 파괴 시 벽체면의 압축파괴가 발생했으며, 하부 단면 부분 철근의 심각한 좌굴이 발생하였다. 또한, WDB_R 실험체와 마찬가지로 실험 종료 시 까지 부착파괴는 발생하지 않았으며 최대하중 이후 섬유가닥이 끊어지는 소리가 발생하였다.

실험 종료 후 파괴된 콘크리트를 제거하여 확인해본 결과, 섬유가 면의 방향으로 부풀어

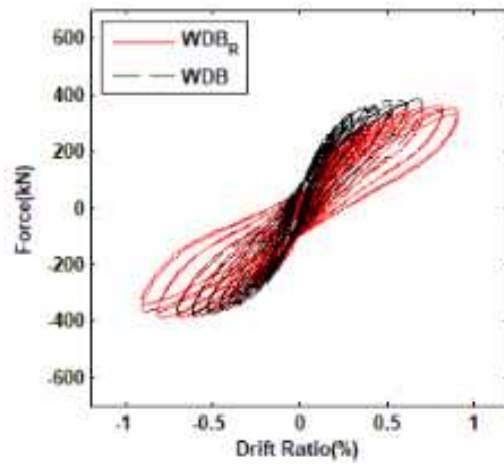
져 있었으며 WDB_R 실험체에 비해 많은 섬유가 끊어져 있었다. 결과적으로, 최대하중 이후 TRM의 보강성능이 온전히 발휘된 것으로 판단된다.



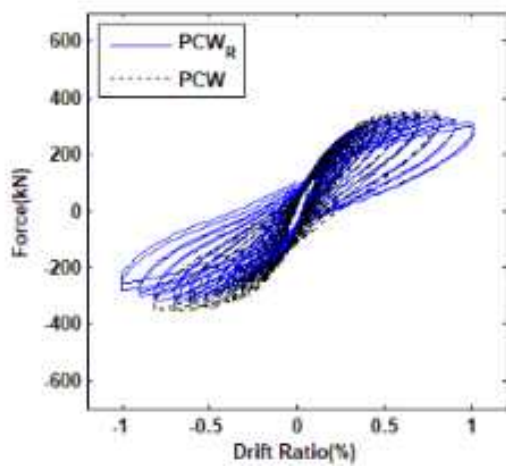
[그림 2.134] PCW_R의 균열 및 파괴 양상

1.7.2 하중-층간변위비 관계

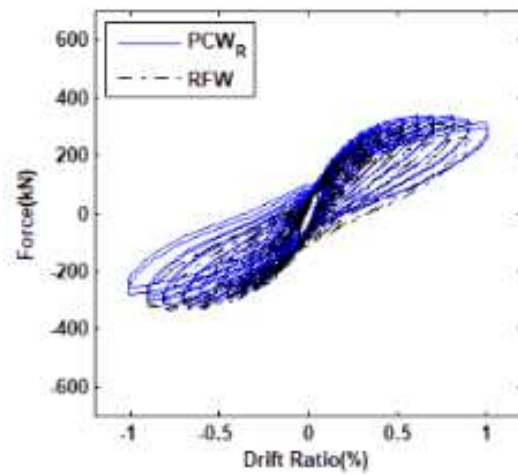
보수·보강 전·후 실험체의 하중-층간변위비 관계 비교는 [그림 2.135]과 같으며, 각 실험체의 실험결과는 [표 2.44]에 요약되어있다. 보수·보강 적용 실험체인 WDB_R은 평균 최대강도 및 초기강성은 375kN 및 87.18kN/mm로 기준 실험체 WDB의 평균 최대강도 및 초기강성 382.8kN 및 128.04kN/mm보다 2.04% 및 31.91% 낮게 나타났다. PCW_R 실험체는 평균 최대강도 및 초기강성은 329.32kN 및 114.35kN/mm로 PCW 실험체의 평균 최대강도 및 초기강성 352.51kN 및 129.46kN/mm 보다 7.04% 및 13.21% 낮게 나타났다. 이는 보수 시 사용된 콘크리트의 실제 압축강도가 설계 압축강도보다 낮은 강도를 발현했기 때문이다. RFW 실험체는 평균 최대강도 및 초기강성은 323.28kN 및 110.33kN/mm로 PCW_R 실험체에 비해 1.83% 및 3.52% 높게 나타났다. PCW 실험체보다 RFW 실험체의 결과와 비슷한 이유는 실험 수행 전 PCW_R 실험체에 비내력벽을 제거하였기 때문이다.



(a) WDB_R과 WDB 비교



(b) PCW_R과 PCW 비교



(c) PCW_R과 RFW 비교

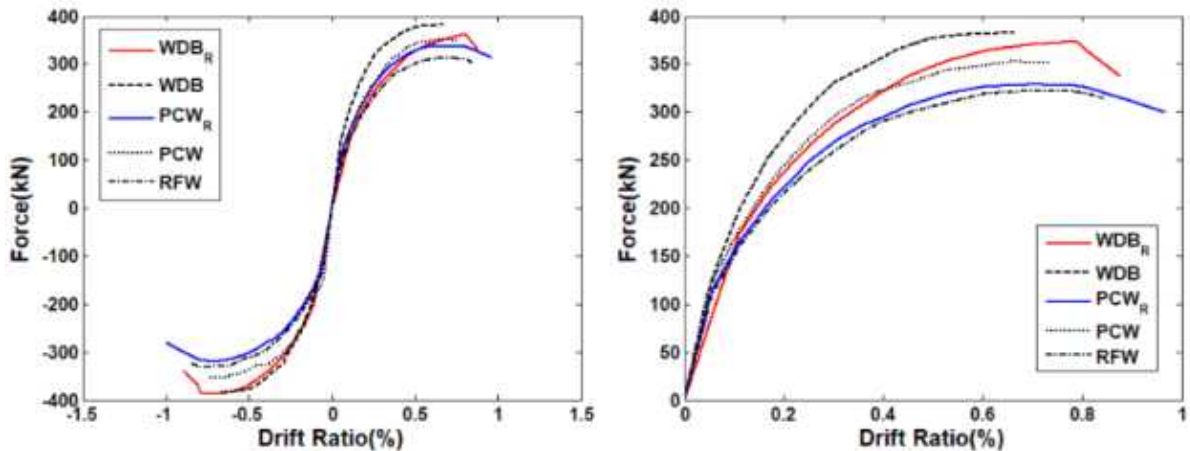
[그림 2.135] 하중-층간변위비 관계 비교

[표 2.44] 실험 결과(초기 강성, 하중, 연성비)

Specimen		Stiffness (kN/mm)	V_{max} (kN)	δ_u (mm)	δ_u (%)	δ_y (mm)	δ_y (%)	μ
WDB	+	128.04	381.85	12.04	0.67	4.79	0.27	1.21
	-		383.31					
WDB_R	+	87.18	362.30	16.24	0.90	6.87	0.38	2.18
	-		387.71					
PCW	+	129.46	350.63	13.43	0.75	5.29	0.29	2.48
	-		354.38					
RFW	+	110.33	309.57	14.89	0.83	6.76	0.38	2.33
	-		325.22					
PCW_R	+	114.35	338.10	15.84	0.88	6.12	0.34	2.59
	-		320.50					

1.7.3 연성비(Ductility)

연성비(μ)는 항복변위(δ_y)에 대한 극한변위(δ_u)의 비로 정의했다. 항복 변위는 실험체의 소성힌지구간의 철근 중 가장 먼저 항복한 시점의 평균 변위로 정의하였으며, 극한변위는 최대 하중 이후 실험체 파괴가 시작되는 변위로 정의하였다. 각 실험체의 연성비는 [표 2.44]와 같다. WDB_R 및 WDB 실험체의 연성비는 2.51 및 2.37로 분석되었다. 보강한 실험체의 경우 극한변위는 25.86% 증가하였지만, 항복이 늦게 발생하여 보강을 하지 않은 실험체에 비해 연성비가 낮게 나타났다. 항복이 늦게 발생한 이유는 최하단부 위치의 철근에 커플러가 철근의 변형을 제한하였기 때문이다. PCW_R, PCW 및 RFW 실험체의 연성비는 각각 2.59, 2.54, 2.20으로 분석되었다. PCW_R 실험체의 경우 극한변위는 PCW 실험체와 비교하여 18.3% 증가하였지만, 항복이 늦게 발생했기 때문에 연성비는 크게 증진되지 않았다. 이는 좌굴에 가장 취약한 최하단부 위치의 철근에 커플러 이음을 진행함으로써 커플러가 철근의 변형을 제한하여 항복이 비교적 늦게 발생했기 때문이다.



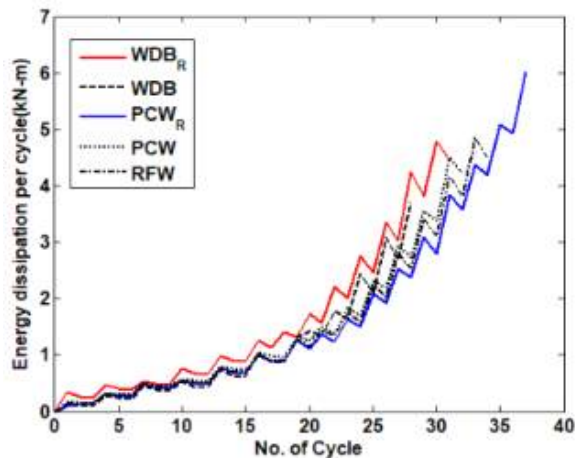
(a) 포락곡선

(b) 평균 포락곡선

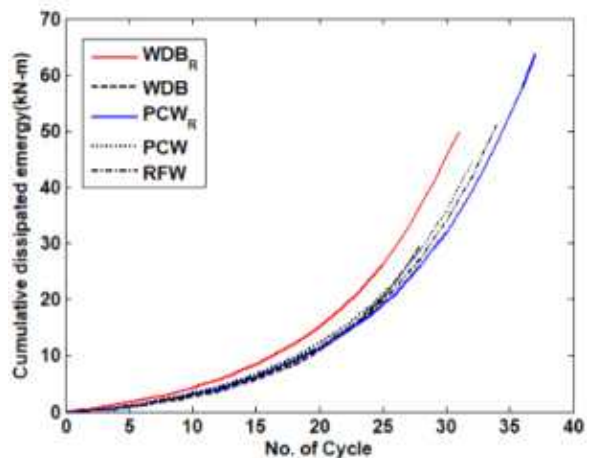
[그림 2.136] 포락곡선(Envelope curve) 및 평균 포락곡선(Average envelope curve)

1.7.4 에너지소산능력

각 실험체에서 사이클 단계별 에너지와 이를 합산한 누적 에너지소산은 [그림 2.137]와 같다. 전체 구간에서의 에너지소산능력은 WDB_R 실험체의 경우 WDB 실험체에 비해 40.13% 높게 나타났다. PCW 실험체가 파괴될 때의 사이클에서는 RFW 및 PCW_R 실험체와 비교하여 누적 에너지소산능력이 가장 높게 나타났다. 하지만 전체 구간에서의 누적 에너지소산능력을 비교할 때, PCW_R 실험체의 누적 에너지소산능력이 PCW 및 RFW 실험체와 비교하여 30.17% 및 19.79% 증가하였다. 이는 보수·보강을 진행한 실험체가 TRM의 영향으로 기준 실험체보다 높은 층간변위비에서 실험이 종료되었기 때문이다. 따라서, 보수 및 TRM 보강법은 손상된 구조물의 에너지소산능력을 기존보다 향상 시킬 수 있다.



(a) 사이클 단계별 에너지소산 곡선



(b) 누적 에너지소산 곡선

[그림 2.137] 에너지소산능력

2. 실험평가를 통한 보수·보강 공법 검증 및 지침(안) 개발

철근콘크리트 벽체에 제한하여 보수·보강 공법 지침(안)을 개발하였다. 현재 RC벽체의 보수·보강 관련 지침(안)은 국내·외에서 미미한 실정으로, 본 연구에서 개발된 지침(안)을 통해 관련 연구 및 실무에서 활용 가능할 것으로 판단된다. 보수·보강 관련 지침(안)은 보수·보강 공법의 배경부터 사용재료, 보수·보강 공사, 설계 등 비전문가도 쉽게 활용할 수 있도록 상세히 작성되었으며, 신뢰성을 높이기 위하여 실제 손상된 RC벽체에 개발 보수·보강 공법 적용 전·후의 성능 비교분석 부분도 함께 작성하였다. 또한, 작성된 지침(안)은 전문가 검증을 통해 신뢰성 및 적합성을 높였으며, ‘[부록2] 직물 보강 모르타르를 이용한 철근콘크리트 벽체의 보수·보강 지침·매뉴얼(안)’으로 첨부하였다.

직물 보강 모르타르를 이용한 철근콘크리트 벽체의 보수·보강 지침·매뉴얼(안) 2020. 12. 계명대학교	목 차 제 1 장 총칙 3 1.1 소거 3 1.2 적용범위 5 1.3 용어의 정의 5 1.4 기호 7 제 2 장 배경 9 2.1 TRM 보강의 배경 9 2.2 TRM 보강의 특징 13 제 3 장 기존의 보수·보강공법 14 제 4 장 사용재료 16 4.1 콘크리트 16 4.2 철근 17 4.3 기포모래 18 4.4 주입식 제자갈 평가 20 4.5 목질섬유 20 4.6 폴리머, 시멘트, 모래시멘트 22 제 5 장 사용재료의 반입, 보관 및 취급 24 5.1 반입 및 보관 24 5.2 취급 24 제 6 장 보수·보강 공사 25 6.1 절단 처리 25 6.2 시공 순서 25 6.3 기층표의 세척 27 6.4 콘크리트 치밀성 27 6.5 확인시험 결과 28 6.6 보수·보강 결과 28	제 7 장 TRM 보강 철근콘크리트 벽체 설계 29 7.1 TRM 보강 철근콘크리트 벽체 안전 설계 29 7.2 TRM 보강 철근콘크리트 벽체 상세 안전 설계 30 제 8 장 도면, 시방서 및 제출물 31 8.1 엔지니어링 요구 사항 31 8.2 도면 및 시방서 31 8.3 제출물 31 제 9 장 참고문헌 33 부록 A. TRM을 이용하여 보수·보강된 철근콘크리트 벽체의 실험 36
---	--	---

[그림 2.138] 직물 보강 모르타르를 이용한 철근콘크리트 벽체의 보수·보강 지침·매뉴얼(안)

■공동연구기관: 미래구조

■미래구조 연구목표 : 비내력벽 설계/시공 최적화를 위한 설계/시공 가이드 작성

1. 대안공별별 시공매뉴얼

1.1 구조설계지침 개정안

- 본 구조설계지침 개정안은 전반적으로 현재 많은 건설사들이 사용하는 구조설계지침을 기반으로 하되, 신구조기준에 따라 개정이 필요한 부분을 추가 및 보완하였다.

1.1.1 설계개요

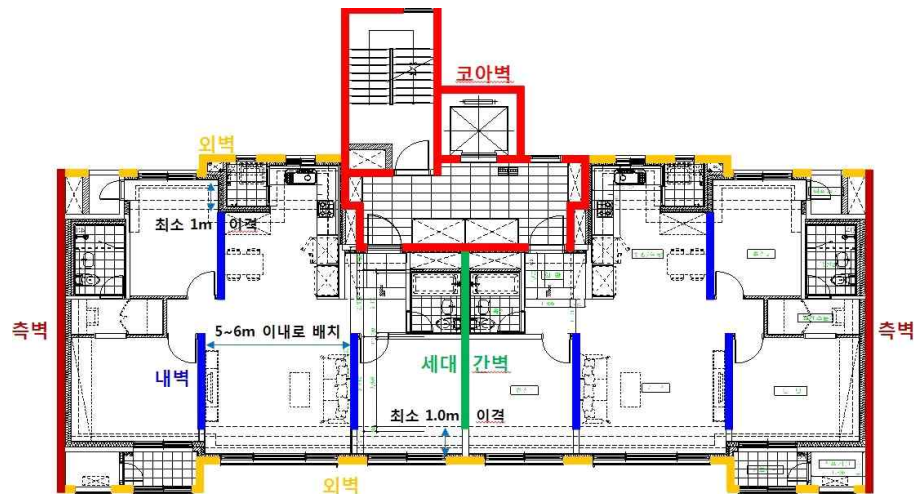
“① 적용기준 및 공법, ② 구조재료 및 기준강도, ③ 허용지내력(말뚝내력), ④ 설계지하수위”으로 구성 되며, 본 연구 결과에 따른 영향이 없으므로 생략한다.

1.1.2 구조계획

① 평면계획

1) 내벽은5~6m 전후로 배치하며 세대간벽을 포함한 모든 내벽은 외벽과 최소1m 이상 이격 한다.(단열성능 및 작업통로 확보)

2) 가로벽 등 구조해석상 사용성을 만족하는데 불필요한 벽체는 조적 or 건식벽을 적용한다.

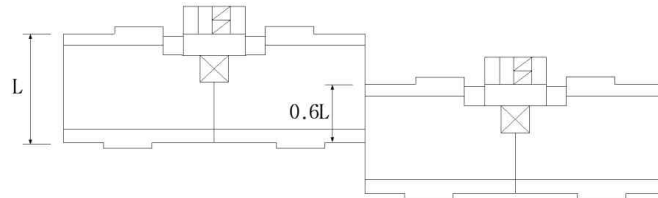


[그림 2.139] 벽체 배치 기준

3) 세대내의 인방보와 발코니의 캔틸레버보는 삭제하는 것을 원칙으로 한다(환기배관 간섭)

4) 엘리베이터 샤프트는 침실에 인접하지 않도록 유도하며 불가피 할 경우에는 벽체두께를 상향 적용한다.(250mm 이상, 소음민원)

5) 격막요소(Diaphragm)로 사용되는 슬래브는 원칙적으로 평면내에서 60% 이상 연속 되도록 계획하며 불가피 할 경우에는 구조해석을 통해 보강안을 작성한다.(균열발생 사례)



[그림 2.140] 평면조합시 최소연결 길이

② 단면계획 ‘내용 생략’

③ 슬래브 계획

두께 실별	120mm	150mm	180mm	210mm	비 고
옥탑지붕		○			기계실 Deck 적용원칙 (Elev Shaft 상부)
옥탑1층		○			
지붕층				○	안방 및 거실 30 Down
기준층/1층				○	
욕 실			○		
계단실/홀/복도		○			
아파트 지하층		○			

[그림 2.141] 실별 슬래브 두께

④ 벽체 계획

1) 규모에 따른 벽체 최소두께는 다음을 기준으로 하되 구조해석을 통해 최종 확인한다.

- 84타입 기준(26m/s, 노풍도B)

[표 2.45] 규모에 따른 벽체 최소두께

규 모	측 벽	코아벽	세대간벽	**내 벽	외 벽
*31 ~ 34층	250	250	210	200	200
26 ~ 30층	200	200		200	200
21 ~ 25층	200	200		180	180(200)
16 ~ 20층	180(200)	180(200)		180	180(200)
15층 이하	180	180		150(180)	180

* 세대간벽250mm 적용시 측벽은200mm 적용을 검토(31~34층)

** 내벽은 반드시 세장비, 축력 및 철근비(최대1.5%이내) 등을 상세히 검토 후 적용
... 중략 ..

5) 지하층 벽체는 다음을 기준으로 하되 내력상 필요한 경우에 한해 두께를 증가시킨다.

[표 2.46] 지하층 벽체 두께

내 벽(순높이)		외부옹벽(층)		비고
5.50m 이하	220mm	B1F	350mm	토압/수압 과다시 두께증가 고려
6.25m 이하	250mm	B2F	400mm	

6) 평면상 길이가 500mm 이하로 해석에 포함되지 않은 짧은 벽체(지상층 창호 고정용 비내력 벽체)는 지상1층(필로티) 및 지하층에서 삭제한다. 단, 지하주차장/APT 경계부 테두리보 지점으로 사용될 경우 테두리보 폭의1/2 이상 지지되도록 크기를 증가시킨다.

→ “평면상 길이가 500mm 이하로 해석에 포함시키지 않은 벽체는 건식벽체로 하거나 내진슬릿을 적용하여 횡력을 부담하지 않도록 한다.”

7) 발코니 입면변화가 적용된 현장의 외벽을 내력벽으로 사용한 경우 하중전달 경로 확보에 유의한다.

1.1.3 설계하중

“3.1 바닥하중, 3.2 벽체하중, 3.3 풍하중, 3.4 지진하중”으로 구성되며, 본 연구 결과에 따른 영향이 없으므로 생략한다.

1.1.4 구조해석

① 판해석

- 1) 해석시 Mesh 간격은 결과를 확인하기 쉽도록 설정한다.
- 2) 인방보 등은 횡력해석시 인위적으로 강성을 저감한 모델이 아닌 실제 단면을 고려한다.

② 골조해석

0) 유효강성

- 기둥, 벽체, 바닥판의 상대적인 휨강성과 비틀림 강성을 구할 때, 어떠한 합리적인 가정도 사용할 수 있다. 다만, 채택한 가정은 해석과정을 통하여 일관성이 있어야 한다.(KBC2016 0503.4.5.)

- 풍하중에 대한 해석을 할 경우에는 부재의 전체강성 I_g 를 사용하거나 지진에 대한 유효강성의 1.43배를 적용할 수 있다.(KBC 0503.4.6 유효강성)

- 지진하중과 같은 계수하중에 대한 해석을 할 경우에는 다음과 같은 강성저감을 고려한다.(KBC2016 0506.4 (2))

[표 2.47] 유효강성

부재	휨강성	전단강성****	축강성
기둥*	$0.7EcI_g$	GAw	$EcAg$
비균열벽체**	$0.7EcI_g$	GAw	$EcAg$
균열벽체	$0.35EcI_g$	$0.5GAw$	$EcAg$
보	$0.35EcI_g$	GAw	$EcAg$
플랫플레이트 및 플랫슬래브	$0.25EcI_g$	GAw	$EcAg$
연결보***	$0.07(l/h)EcI_g \leq 0.3EcI_g$	GAw	$EcAg$
비내력벽****	$0.2EcI_g$		

* 축력비가 0.1이하인 경우에는 휨강성을 $0.3EcI_g$ 로 적용한다.

** 1차 해석결과 균열이 발생하는 것으로 확인된 벽체는 균열벽체로 판단하고 $0.35I_g$ 를 적용한다.

*** l : 연결보의 순경간, h : 연결보의 총

**** 전단강성은 $0.4Ec$ 로 적용할 수 있다.

***** 벽식 아파트 모델의 비선형 해석과 선형 해석결과를 분석하여 도출하였다.(1.3절 참조)

R6.6.3 Section properties R6.6.3.1 Factored load analysis—For lateral load analysis, either the stiffnesses presented in 6.6.3.1.1 or 6.6.3.1.2 can be used. These provisions both use values that approximate the stiffness for reinforced concrete building systems loaded to near or beyond the yield level, and have been shown to produce reasonable correlation with both experimental and detailed analytical results (Moehle 1992; Lepage 1998). For earthquake-induced loading, the use of 6.6.3.1.1 or 6.6.3.1.2 may require a deflection amplification factor to account for inelastic deformations. In general, for effective section properties, E_c may be defined as in 19.2.2, A as in Table 6.6.3.1.1(a), and the shear modulus may be taken as $0.4E_c$.	횡방향 계수하중에 대한 해석에는 저감된 유효강성을 적용한다. 이 조항은 구조물이 항복점 근처 또는 항복점 이상으로 재하되는 것을 감안한 것이다.
---	---

- 내진슬릿을 적용하지 않은 벽체는 구조해석에 반영하여야 하고, 이러한 벽체(비내력 벽)의 해석 및 설계에는 다음과 항목을 검토하여야 한다.

(1) 비내력벽체는 최소배근(온도배근)이상 배근이 되도록 한다.

(2) 해석결과 층간변위가 0.3% ¹⁾를 초과하는 경우에는 반드시 내진슬릿을 두어야 한다.

(3) 층간변위가 0.3% 이내에 있는 경우에는 균열벽체 강성²⁾을 적용하되, 강성을 줄였는데도 부재력이 크게 나오는 경우에는 내진슬릿을 두거나, 내력벽으로 전환하여 적절한 보강을 추가하여야 한다.

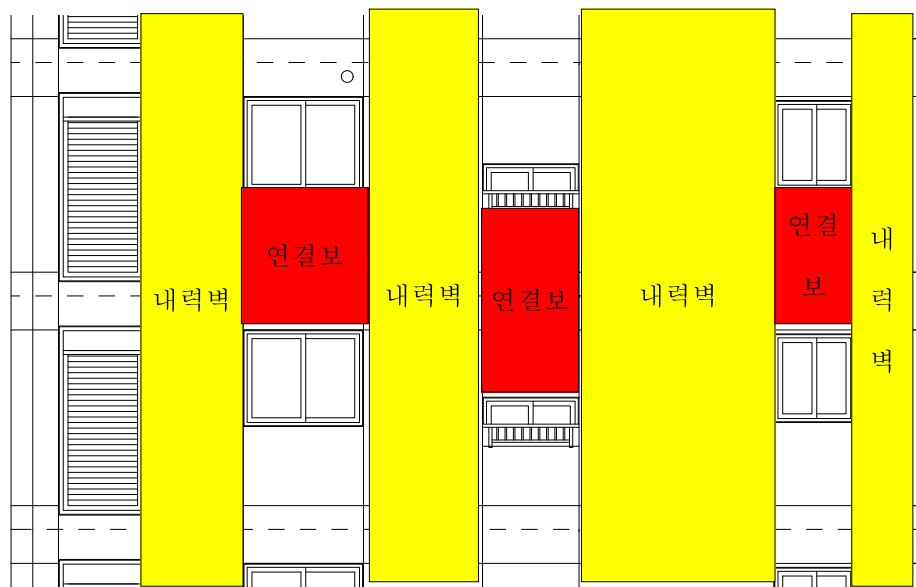
- 주방 외벽의 경우, 전체높이에 비하여 개구부가 작으므로 비내력벽으로 모델링하지 않

1) 본 연구에서 수행한 최소배근(온도배근)만 배치한 길이 1000mm의 비내력벽 실험에서 층간변위 0.35% 에서 심각한 균열(포함

지진에 의한 피해와 유사한)이 발생한 결과를 근거로 제한값을 0.3% 로 함.

2) 같은 실험에서 균열의 발생시점은 층간변위 0.2% 임.

고, 구조벽체와 연결보로 고려한다.



[그림 2.142] (예시)벽식 아파트 입면

1) 3D 해석은 Midas ADS, GEN 등 슬래브 강성을 고려할 수 있는 프로그램을 사용한다.

- 슬래브 강성은 수직하중 배근 외 가급적 추가 배근이 없는 범위로 조정(10~15%)

2) RC 벽체 중 두께가 150mm 이상, 길이 500mm 이상인 벽체만 횡력을 저항할 수 있는 것으로 간주하고 그 외는 하중으로 입력한다.

→ RC 벽체 중 두께가 150mm 이상, 길이 500mm 이상인 벽체만 횡력을 저항할 수 있는 것으로 간주하고 그 외는 하중으로 입력한다. 이 때 해석에 반영하지 않은 벽체에는 내진슬릿을 적용한다.

3) 인방보는 코아측만 고려하되 4-D16(상하)/D10@100으로 설계가 되도록 강성을 조절한다.

→ 배근량이 4-D16(상하)/D10@100보다 크게 배근되는 인방보에는 내진슬릿을 둔다.

4) 지하층을 포함하여 해석할 경우 지하주차장의 횡구속 효과를 고려한다.

- 지상1층 횡구속 : 일반적인 경우로 G.L과 일치시켜 반영(오류방지)

- 지하1층 “ : 편측도압 또는 데크층 형성으로 도압이 비대칭인 경우

5) 주동의 형태가 탑상형(L, Y자형 등)으로 비대칭인 경우 주축을 찾아 지진하중을 적용한다.

6) 풍/지진하중에 대한 사용성 검토는 다음을 기준으로 한다.

풍 변위 : $H/400 \sim H/500$ (H: 건물높이)

층간변위: $0.015h$ (h: 층고)

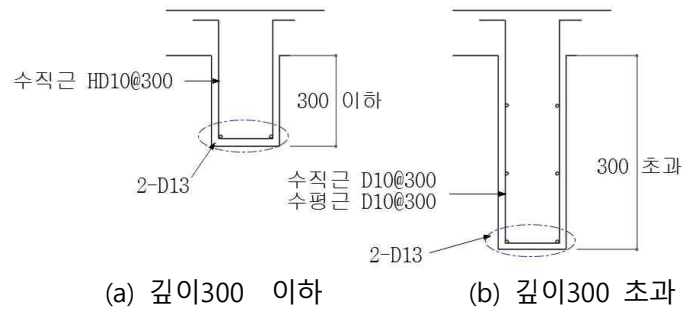
→ 이 때, 해석에는 유효강성을 반영한다.(풍하중은 사용하중, 지진하중은 계수하중으로 고려)

1.1.5 부재설계

① 슬래브설계

② 보(BEAM & GIRDER) 설계

- 1) 횡력에 기여하는 보는 4-D16(상하)/D10@100(폐쇄형)를 기본으로 한다.
- 2) 해석시 고려하지 않은 보에 아래와 같이 헛보 배근을 적용한다.



(a) 깊이 300 이하 (b) 깊이 300 초과
[그림 2.143] 헛보 배근

→ 해석에 반영하지 않은 보에는 내진슬릿을 둔다.

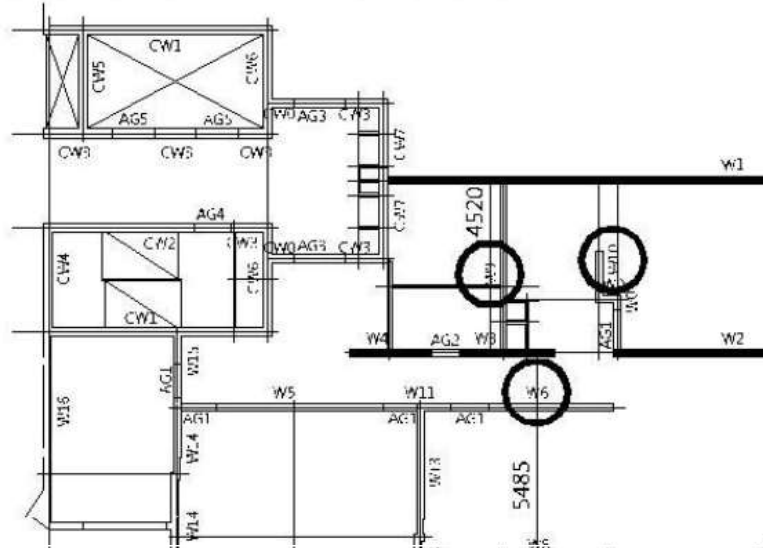
1.2 주요 시공사 구조설계지침 개정

1.2.1 주요 시공사 구조설계지침의 기존 안과 개정 안

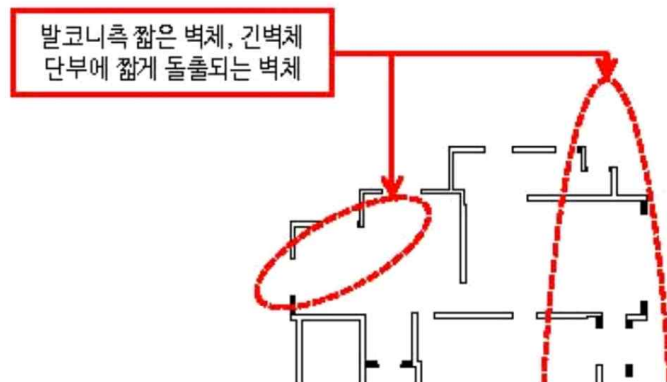
① A사

기존 안	개정 안
내력벽은 5-6m 간격으로 배치하고, 이보다 좁은 간격으로 배치될 경우, 사잇벽체는 마감벽체(경량칸막이, 조적, 경량복합판넬 등)로 변경	내부벽체의 처리방법은 적절함
"1m 미만벽체는 횡력저항요소에서 제외하고, 중력하중만 고려하여 배근하되, 가급적 W0으로 배근을 통일"	: 외부의 전후면에 있는 짧은 벽체 처리방안 "1m 미만벽체는 내진슬릿을 적용하여 중력/면내방향 횡력을 부담하지 않도록 하되, 풍하중 등 면외방향 하중에 저항하도록 검토한다 건물의 층간변위비가 0.3%이내인 경우, 내진슬릿을 적용하지 않을 수 있지만, 구조해석 모델에 포함하고 필요한 강성저감을 적용한다.
"벽체의 강성을 무시하기 위하여 Member Properties/Member Stiffness/Bending&Axial, Shear에 각각 0.0001을 입력"	비내력벽은 구조해석모델에서 제외한다. 내력벽에 대한 해석결과 균열벽체는 비균열벽체 강성의 50%만 받도록 조정한다(0.35Eclg)
"코어와 내부벽체 사이 인방보는 배근설계가 가능한 수준까지 강성저감(10% 내외의 강성만 고려)" "강축방향은 인방보를 배치하지 않는다"	"인방보는 코어측만 고려하고, 설계가 가능한 수준까지 강성을 저감한다. 이때에 충분한 연성을 발휘할 수 있도록 배근한다.

※ W6, W9, W10 : 내력벽 → 마감벽으로 변경



[그림 2.144] 내부 벽체의 내력-비내력 구분 및 처리방안



[그림 2.145] A사 구조설계지침 중 비내력벽체 관련사항

② B사

기존 안	개정 안
“평면상 길이가 500mm이하로 해석에 포함되지 않은 짧은 벽체는”으로 언급: 짧은 벽이 해석에 포함되지 않음을 전제하고 있음	“평면상 길이가 500mm이하로 해석에 포함되지 않은 짧은 벽체는 건식벽체로 하거나 내진슬릿을 적용하여 횡력을 부담하지 않도록 한다”
“발코니 입면변화가 적용된 현장의 외벽을 내력벽으로 사용한 경우”를 언급하고 있음: 아파트의 측벽이 아닌 전면, 후면의 벽체는 내력벽으로 사용하지 않는 경우가 많다는 것을 보여줌	: 외부의 전후면에 있는 짧은 벽체 처리방안 “1m 미만벽체는 내진슬릿을 적용하여 중력/면내방향 횡력을 부담하지 않도록 하되, 풍하중 등 면외방향 하중에 저항하도록 검토한다”
“세대내의 인방보와 발코니의 캔틸레버 보는 삭제하는 것을 원칙으로 한다”	“인방보는 코어측만 고려하고, 설계가 가능한 수준까지 강성을 저감한다. 이때에 충분한 연성을 발휘할 수 있도록 배근한다.

③ C사

기존 안	개정 안
“해석에 고려안된 벽체는 기본배근만 한다”로 언급하여 해석에 고려하지 않는 벽체를 언급	“해석에 고려안된 벽체는 건식벽체로 하거나 내진슬릿을 적용하여 횡력을 부담하지 않도록 한다”
인방보에 관하여, “과도한 응력이 발생하는 경우는 아래와 같이 수정하여 재설계한다” “a. 해당 인방보 없이도 건물의 횡변위(전체변위, 층간변위)가 허용치 이내면 해석시 제외” “b. 벽체 해석시 무시되는 보는 최소 철근량으로 배근한다” “c. 강성을 적절히 저감(NG없이)하여 재설계”	“인방보는 코어측만 고려하고, 설계가 가능한 수준까지 강성을 저감한다. 이때에 충분한 연성을 발휘할 수 있도록 배근한다.

1.2.1 소결

- 벽식구조 공동주택에 있어서, 실의 구획, 입면형상을 유지하기 위하여 설치되는 벽체의 내력벽, 비내력벽 구분은 구조설계 의도에 따라서 구분되고 있다.
- 벽체와 연결되어 시공되는 인방보와 관련해서 내부의 인방보는 삭제하도록 하고 있으며, 전후면 입면에 배치되는 인방보는 구조해석에 반영하지 않는 것으로 고려하는 것이 보통이다.
- 일부 지침서에서는 [KBC2016 0306.6.5.1 상호작용효과]를 고려하도록 하고 있으나, 임의로 저감한 강성을 고려하여 구조해석 할 경우에는 이러한 검토가 곤란하다.
- 세대내부의 칸막이용 비내력벽은 철근콘크리트 대신 경량칸막이를 사용하는 것이 효과적이다.
- 세대 외측면을 구성하는 비내력벽은 철근콘크리트 대신 커튼월 등의 별도 구조를 적용하는 것이 바람직하지만, 철근콘크리트를 적용해야하는 경우라면 내진슬릿을 적용하여야 한다. 이때 풍하중이나, 외부의 비바람에 의하여 외벽이 성능을 유지할 수 있도록 적절한 상세를 적용하여야 한다.
- 전단벽 사이의 연결보(Coupling beam ; 개구부의 위쪽에 위치하고 있어서 인방보로 불리는 경우가 많음)의 경우, 횡력에 의하여 매우 큰 힘을 받게되는 경우가 많아서, 유사시 균열은 물론, 부재의 파손가능성이 많은 부재이다. 전반적으로 볼 때, 이 부재의 강성을 무시하면 각 전단벽이 강성대로 횡력을 부담하게 되므로 구조물의 안전에는 문제가 없지만, 해당 부재가 파손되어 보수를 해야하는 상황이 될 수 있다. 따라서, 연결보는 세대 내부에는 두지 않고, 계단실과 같은 공용부위에만 사용하고, 설계가 가능한 수준으로 강성을 저감하되, 최대한 연성적으로 거동할 수 있도록 하여야 한다.(“KBC2016 0520.3.3.1 설계전단강도의 산정” 참고)
- 전단벽 사이의 연결보는 횡변위를 줄이는데 매우 효과적이어서, 풍하중 해석에서 중요하게 고려되는 경우가 있다. 앞에서도 지적한 바와 같이 풍해석에서는 부재의 강성을 대부분 그대로 적용하고, 여기서 나온 부재력은 저항할 수 있도록 설계하는 것이 좋을 것으로

판단된다. 지진에 대해서는 부재력이 너무 크게 나오는 경우가 많은데, 커플링빔의 강성을 줄이면 벽체에서 힘을 더 많이 부담하게 되어, 전반적으로 건물의 안정성을 확보하는데 문제가 없으므로 내진설계에 있어서는 강성을 저감하는 방법이 최선인 것으로 판단된다.

- 일반적인 비내력벽이 층간변위비 0.3% 수준까지는 큰 손상이 없었으므로, 지진하중에 의한 층간변위비가 0.3%미만일 경우, 내진슬릿 없이 비내력벽처리(강성은 50%만 적용)할 수 있다. 다만, 비내력벽체의 강성은 구조해석에 반영해야한다.

1.3 비내력벽 유효강성 정의

앞서 부재의 유효강성 중 ‘비내력벽’의 유효강성을 0.2EI로 제시하였다. 이는 벽식 아파트 모델의 비선형 해석 결과와 선형 해석 결과를 비교, 분석하여 도출한 값이다. 본 절에서 비내력벽의 강성을 도출하는 과정을 상세하게 소개하고자 한다.

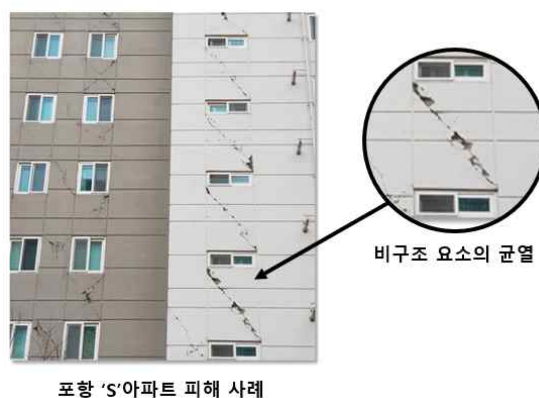
1.3.1 예제 건축물을 통한 비구조 벽체 유무에 따른 동적특성 비교

① 예제 건축물 개요

- 본문의 예제 건축물은 [그림 2.146]과 같이 2017년 포항지진에 의해 비구조 벽체에 전단 균열이 발생한 포항 ‘S’아파트이다.

- 구조설계에 있어서 비구조벽체는 하중을 부담하지 않는 것으로 보고, 구조해석할 때는 아예 없는 것으로 간주하고, 구조해석에 반영하지 않은 비구조벽체에는 최소한의 온도배근만을 하는 것이 일반적인 우리나라의 설계관행이었다. 그러나 실제 시공현장에서는 수벽이나 날개벽과 같은 비구조벽체에도 사용되는 콘크리트나, 내력벽의 콘크리트는 동일한 것을 사용하고 있어서 설계 의도와 달리 강성에 따라 지진하중을 분담하게 되고, 내력이 부족한 비구조벽체에 큰 균열손상이 발생하게 된 것이다.

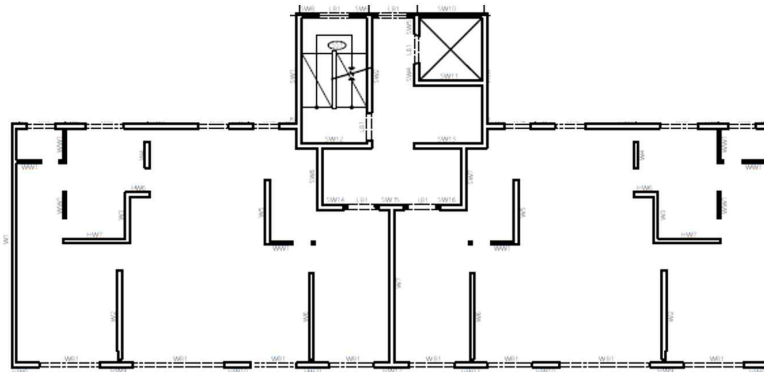
- 가장 좋은 방법은 KDS 41 17 00에서도 언급하고 있는 것처럼, 구조해석에 반영하지 않은 비내력벽은 내진슬릿을 두어, 지진이 오더라도 힘을 부담하지 않도록 하는 것이지만, 오랜 설계/시공 관행을 한 번에 고치기 어렵다는 점을 감안하여 비내력벽을 다루는 방법을 제시하고자 하였다.



[그림 2.146] 포항 ‘S’ 아파트

- [그림 2.147]와 같이 해석을 위한 예제 건축물은 KBC2016 (건축구조기준)에 따라 서울 지역의 SD 지반에 위치하고 있으며, 5층 이상의 아파트인 점을 고려하여 중요도 1급을 적용하였다. [표 2.48]과 같이 건축물의 중요도에 따른 내진등급과 중요도 계수를 설정하였다.

- 예제 건축물의 비구조 요소는 내부의 비구조 벽체와 수벽 & 날개벽 요소로 구분하여 설계하였다. 현재 KDS 41 17: 18. 3. 3의 기준상으로는 조적벽체 역시 강성을 부여하여 평가하여야하지만 콘크리트 요소의 비구조 벽체 부분에 대한 집중을 위해 석고 보드로 간주하여 본 예제를 작성하였다.



[그림 2.147] 해석 모델 대상 건축물 평면도

[표 2.48] 해석 모델 대상 건축물 개요

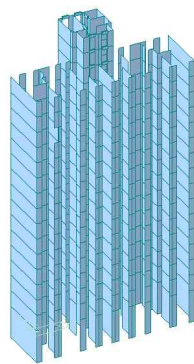
건물개요			
구조형식		철근콘크리트조(RC조)	
횡력(지진력) 저항시스템		내력벽시스템 1-b. 철근콘크리트 보통전단벽	
사용재료의 종류 및 설계기준강도			
항목	규격	설계기준강도 (fck)	해당부재
콘크리트	KS F 2405	24MPa	아파트
		24MPa	지하주차장 부속동
철근	KS D 3504 SD400	400MPa	HD 13 이하
	KS D 3504 SD500	500MPa	SHD 16 이상
지진하중 조건			
지역계수(S)		0.176	
지반분류		S2	
중요도계수(IE)		1.2	
내진설계범주		C	

② 비구조 벽체 유무에 따른 동적특성 비교

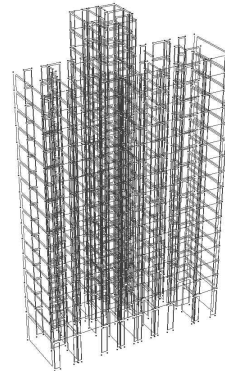
- 해석 모델 대상 건축물에 대한 모델링은 보편적인 상용 구조해석 프로그램임 MIDAS Gen과 Perform 3D를 활용하여 비교하였다.

- 비선형 해석 거동을 확인하기 위해 공칭강도 대신 기대강도를 적용하기 위해 재료강도는 공동주택 성능기반 내진설계 지침(2019)에 명시된 설계기준강도에 기대강도계수를 곱

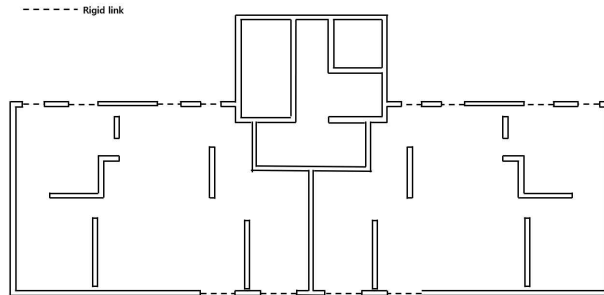
한 기대강도를 적용하였다.



(a) Midas

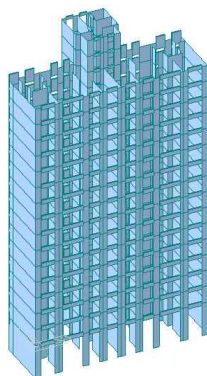


(b) Perform 3D

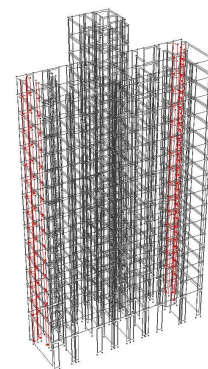


(c) 해석모델 단면

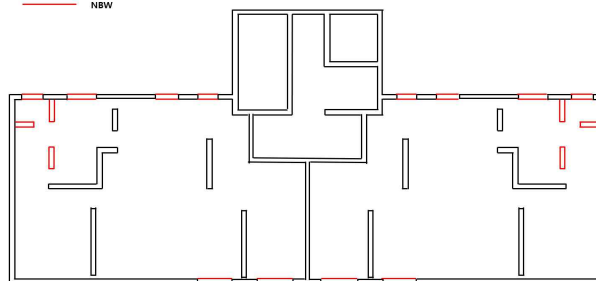
[그림 2.148] 기존 구조해석 모델 (수벽과 비내력벽을 모델링에 고려하지 않음)



(a) Midas



(b) Perform 3D



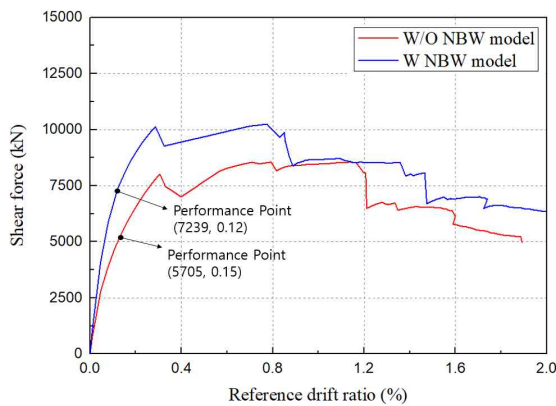
(c) 해석모델 단면

[그림 2.149] 비구조 요소 구조해석 모델 (수벽과 비내력벽을 모델링에 고려함)

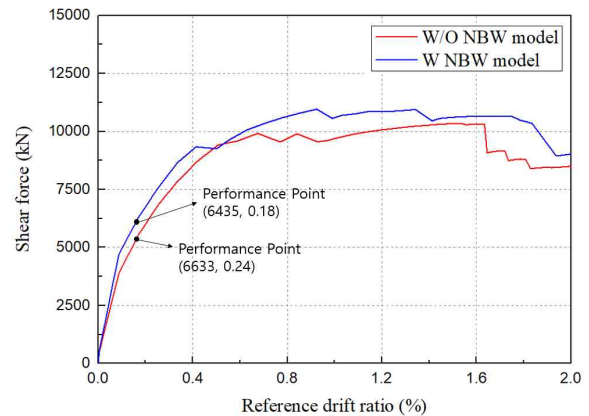
- ‘Perform 3D’를 활용한 X방향과 Y방향에서 밀면 전단력과 층간변위비는 [표 2.49], [그림 2.150] 와 같으며, X방향에서 비구조 요소 유무에 따라 밀면전단력과 층간변위비는 21.2%, 20.0%의 오차율을 보이고 Y방향에서 2.98%, 25.0%의 오차율을 보였다.

[표 2.49] Performance point

Model	X-dir		Y-dir	
	Base shear (kN)	Reference drift (%)	Base shear (kN)	Reference drift (%)
기존 구조해석 모델 (Perform 3D)	5705	0.15	6633	0.24
비구조 요소 구조해석 모델 (Perform 3D)	7239	0.12	6435	0.18
오차율 (%)	21.2	20.0	2.98	25.0



(a) X-dir Pushover curve



(b) Y-dir Pushover curve

[그림 2.150] Pushover curve of Analysis model

- ‘MIDAS Gen’과 식(3.1)과 같은 KBC 2016을 따른 설계 밀면 전단력은 3746kN이다. 또한 해당 기준에서 제안하는 철근콘크리트 초과강도계수는 2.5이다.

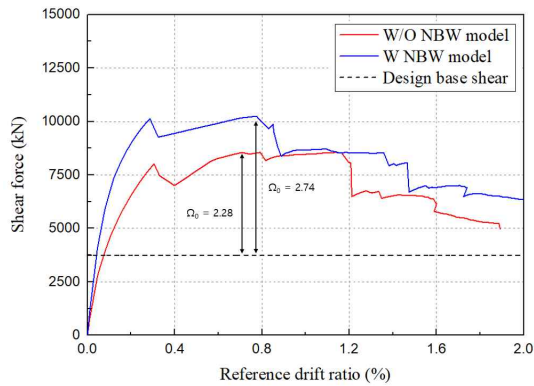
$$V = CS \cdot W = 3746.03\text{kN}$$

식(3.1)

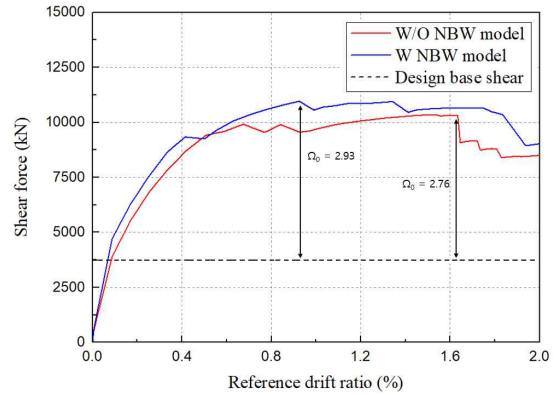
$$\text{여기서, } CS = SD1 / [R / IE] \cdot T = 0.05$$

$$T = CT \cdot hn^{3/4} = 0.049 \cdot (56.33)^{3/4} = 1.0075$$

$$W = 74920.6\text{kN} \quad (\text{Story weight} = 31160\text{kN}, \text{DL} = 32561.6\text{kN}, \text{LL} = 11199\text{kN})$$



(a) X-dir



(b) Y-dir

[그림 2.151] Over Strength Factor

- X 방향에서의 관행적 구조해석 모델의 시스템 초과강도계수는 2.28이며, 비구조 요소 모델의 시스템 초과강도계수는 2.74이다. Y 방향에서의 관행적 구조해석 모델의 시스템 초과강도계수는 2.76이며, 비구조 요소 모델의 시스템 초과강도계수는 2.93이다.

- 시스템 초과강도계수는 비구조요소의 유무에 따라 X 방향 및 Y방향에서 각각 1.20배 및 1.06배의 차이를 보이고 있다. 해당 차이를 통해 비구조요소가 힘의 분배를 받고 있음을 확인하였으며, 이는 포항 지진에서와 같이 비구조요소의 파괴에 따른 위험을 초래할 수 있다.

1.3.2 예제 건축물 비구조 벽체 유효강성 계수 산정

- 포항지진에 따른 비구조 요소의 균열 및 손상은 비선형 거동 구간에서 발생하였고, 이에 따라 비구조 요소에 대한 비탄성 구간에서의 부재강성을 결정해야한다.

- 철근콘크리트 부재는 균열이 발생하기 이전에는 전단면 강성을 적용할 수 있지만, 균열 이후 항복까지 강성이 점차적으로 감소하고 항복 이후 강성은 급격히 저하한다.

- 하지만, 선형해석에서는 항복 시 부재강도와 변형을 기준으로 부재강성을 정의함으로 철근콘크리트 부재의 경우 균열을 고려하는 것이 적절하다.

- 현재 실무에서는 균열에 의한 강성저감 없이 전단면 강성을 선형해석에 적용하는 경우가 많기 때문에 본 연구에서는 비탄성 구간에서의 부재 균열을 고려한 비구조 요소의 유효강성을 제안하고자 한다.

- 본 연구에서는 철근콘크리트 벽체의 유효강성 계수는 Damir Vidovic 'EFFECTIVE STIFFNESS FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF BUILDINGS IN EARTHQUAKE'에서 제시한 식(3.2)과 식(3.3)을 활용하여 비구조 요소의 유효강성 계수를 제안하였다.

$$(EI)_{eff} = M_y / (1/\gamma) \quad \text{식(3.2)}$$

$$(EI)_{Nonlinear} = M_{Nonlinear} / (1/\gamma) \quad \text{식(3.3)}$$

여기서, M_y : 항복 모멘트

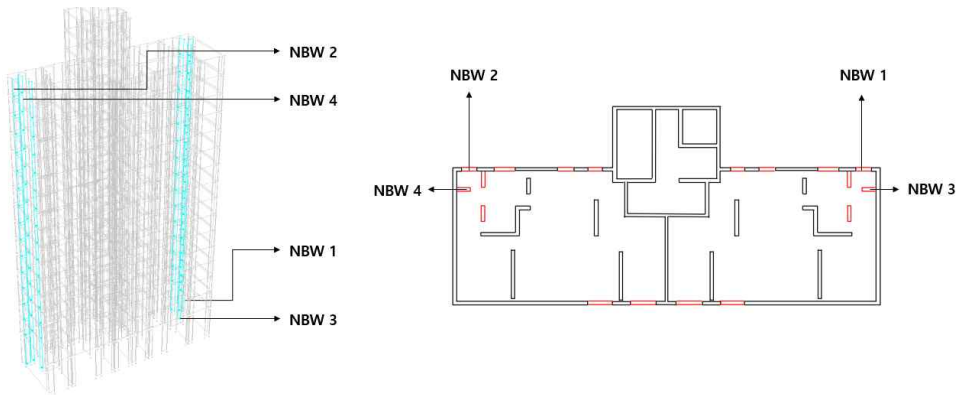
$M_{Nonlinear}$: 비선형구간 모멘트

$1/\gamma$: ϕ , 모멘트에 따른 곡률

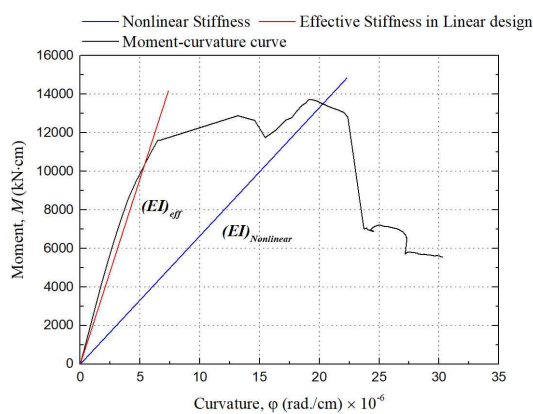
- [그림 2.152]과 같이 구조해석 모델 상 X, Y방향에 대해 가장 취약 부분으로 평가되는 비구조 요소의 모멘트-곡률 곡선을 구하였다.

- [그림 2.153]과 같이 X방향에서는 B1층의 NBW 1과 16층의 NBW 2의 모멘트-곡률을 구하고, [그림 2.154]와 같이 Y방향에서는 B1층의 NBW 3과 16층의 NBW 4의 모멘트-곡률 곡선을 구하였다.

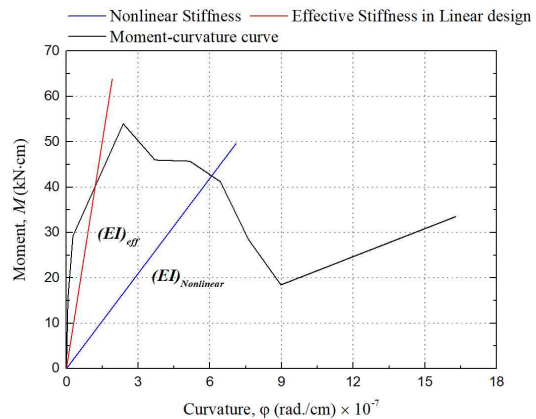
- 비구조 벽체의 경우 비탄성 구간에서 취약한 모습을 보였기에 비탄성 구간에서의 모멘트 값과 항복 모멘트 값에 따른 유효강성 계수를 산정하였다.



[그림 2.152] 비구조 요소 유효강성 평가 대상 벽체

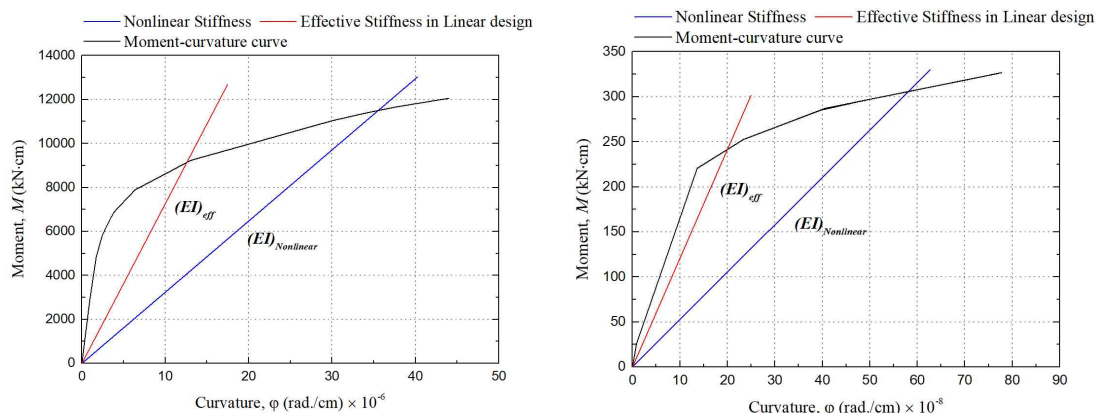


(a) NBW 1 Moment-Curvature



(b) NBW 2 Moment-Curvature

[그림 2.153] Moment-Curvature curve of X-dir



(a) NBW 3 Moment-Curvature

(b) NBW 4 Moment-Curvature

[그림 2.154] Moment-Curvature curve of Y-dir

- NBW 1, NBW 2, NBW 3, NBW 4 벽체에서 [표 2.50]과 같이 각각 0.35, 0.20, 0.45, 0.44의 유효강성 계수가 도출되었으며, 본 연구에서는 비구조 요소에 대한 보수적 평가를 위해 최소값인 0.20를 비구조 요소의 유효강성 계수로 제안한다.

[표 2.50] 비내력벽 유효강성 계수

	NBW 1	NBW 2	NBW 3	NBW 4
선형구간 유효강성, $(EI)_{eff}$	66.54×10^7	69.93×10^6	32.38×10^7	52.68×10^7
비선형구간 유효강성, $(EI)_{Nonlinear}$	192.3×10^7	333.1×10^6	72.65×10^7	120.9×10^7
유효강성 계수	0.35	0.20	0.45	0.44

1.4 벽식 아파트 시공 대안공법

- 건설현장의 구인난으로 인력수요가 많은 공법이 점차 다른 공법으로 바뀌고 있는데, 기존에 조적벽으로 설계된 내부 비내력벽도 시공단계에서 철근콘크리트로 바뀌는 경우가 발생하고 있다.

- 이 때, 비내력 철근콘크리트 벽체가 설계의도와 같이 거동하도록 하기 위해서는 적절한 상세가 적용되어야 함에도 불구하고, 아직까지 특별한 상세 없이 구조체와 동일한 절차와 방법으로 시공되고 있다.

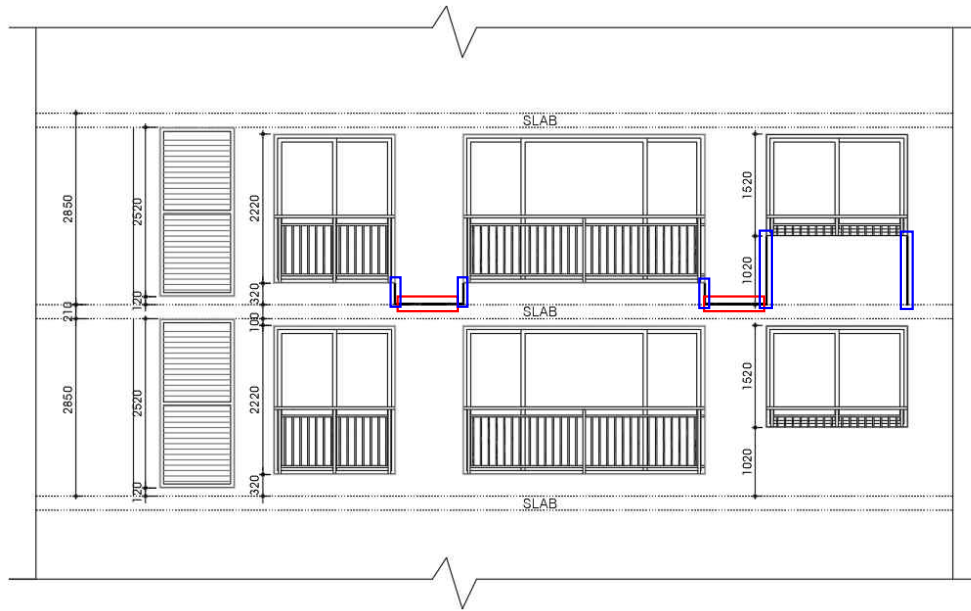
- 이를 위하여 주요부위에 슬릿을 두는 상세를 도출하였으며, 이에 대한 시공법을 다음과 같이 정리하였다.

- 또한 발코니 확장이 합법화된 이후, 발코니라고 하는 완충공간이 없어져서 벽식 아파트 외벽은 거주공간이 되어 외벽의 균열은 누수와 단열에 영향을 준다. 따라서 균열이 없도록 하는 것이 가장 중요하고 공정계획에도 영향이 최소화되도록 해야 한다.

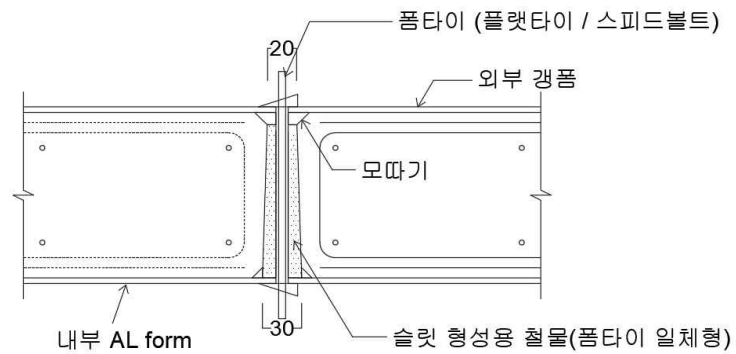
- 이러한 외부 비내력 벽체에 대한 필요성능 관점에서 대안공법으로 다음과 같은 상세 3가지를 제안하고 공법의 특징을 비교 분석하였다.

1.4.1 RC 비내력벽+내진슬릿 공법

- 비내력벽에 내진슬릿을 두어야 하는 위치는 일반적으로 [그림 2.155]과 같다.
- 벽식 아파트에서 현장타설 시 비내력벽에 내진슬릿을 두는 방법으로 [그림 2.156]과 같다.
 - [그림 2.156](a)는 [그림 2.155]에서 수평으로 연결되는 벽체사이에 슬릿을 두는 수직 내진슬릿 상세이다. 내진슬릿을 만들 때, 외측폭 20mm, 내측폭 30mm로 만들어 형틀을 쉽게 뺄 수 있도록 설계하였다. 모따기 길이는 15mm가 일반적이므로 모따기 철물은 갱폼 쪽에 용접해두고, 슬릿 형성용 철물과 맞닿도록 조치하였다.
 - [그림 2.156](a)의 콘크리트 타설 시 수직 내진슬릿형성을 위한 철물이 콘크리트의 이동을 제한하게 되므로 인접한 비내력벽 벽체쪽으로 콘크리트가 흘러들어가지 못하게 된다. 따라서 높은 턱 발코니의 경우, 형틀의 위쪽을 콘크리트가 밀려오는 것을 육안으로 확인하고, 부족할 경우 인력으로 콘크리트를 추가하여 타설을 진행한다. 갱폼 제작 시 별도의 콘크리트 슈트를 만들어 갱폼의 바깥쪽에 매달아 콘크리트 타설이 가능하도록 해주면 시공성을 높일 수 있다.
 - 타설 후 [그림 2.156](b)와 같이 백업재와 실란트를 통해 슬릿을 채워준다.
 - [그림 2.156](c), (d)는 [그림 2.155]에서 수직으로 연결되는 하부 슬래브와 비내력벽체사이에 슬릿을 두는 수평 내진슬릿 상세이다. 상부 슬래브에 슬릿을 두는 방법도 있지만 이는 비내력 벽체의 콘크리트 타설에 어려움이 있어 하부에 슬릿을 두는 것이 시공성이 좋다. 슬릿을 두는 곳에 스티로폼과 같은 자재를 통해 공간을 생성 후 [그림 2.156](c)와 같은 강봉($\phi 10@400, SS275$)이나 [그림 2.156](d)와 같은 플레이트($PL-80 \times 140 \times 1T@400, SS275$)를 두어 풍하중에 의한 변형을 제어하면서 시공한다. [그림 2.156](c), (d) 두 가지 상세 모두 Dowel은 축력에 대하여 Sliding되도록 하고 Dowel의 거동은 풍하중에 대해 탄성, 지진하중에 비탄성 거동을 한다.
 - 일반적인 벽식 아파트의 층간변위비는 0.5%를 넘지 않는 것이 일반적인데, 내진슬릿의 폭은 표준 층고(2850mm)의 0.7%인 19.95mm로 적용하였다.
 - 내진슬릿의 요구 성능은 다음과 같다.
 - ① 면내방향 하중에 대해서는 저항하지 않아야 한다.
 - ② 면외방향 횡력(풍, 지진하중에 의한 전도 등)에 저항할 수 있는 내력이 요구된다.
 - ③ 중력하중은 전달하지 않거나 전달되더라도 최소화할 수 있는 상세가 요구된다.
 - ④ 층간 방화, 차음, 누수방지, 결로방지 등의 성능이 요구된다.
 - 내진슬릿의 유지관리(누수방지, 결로방지, 차음 등)는 기존의 창호 주변에 사용하는 것과 동일한 자재 및 시공법을 활용한다. 여기서, 실란트는 콘크리트용 실리콘 실란트('D'사, 'K'사, 'S'사 제품)를 사용하면 된다.

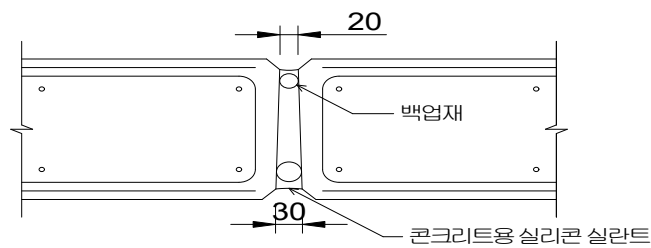


: 수직 내진슬릿 위치 : 수평 내진슬릿 위치
 [그림 2.155] 내진슬릿 위치



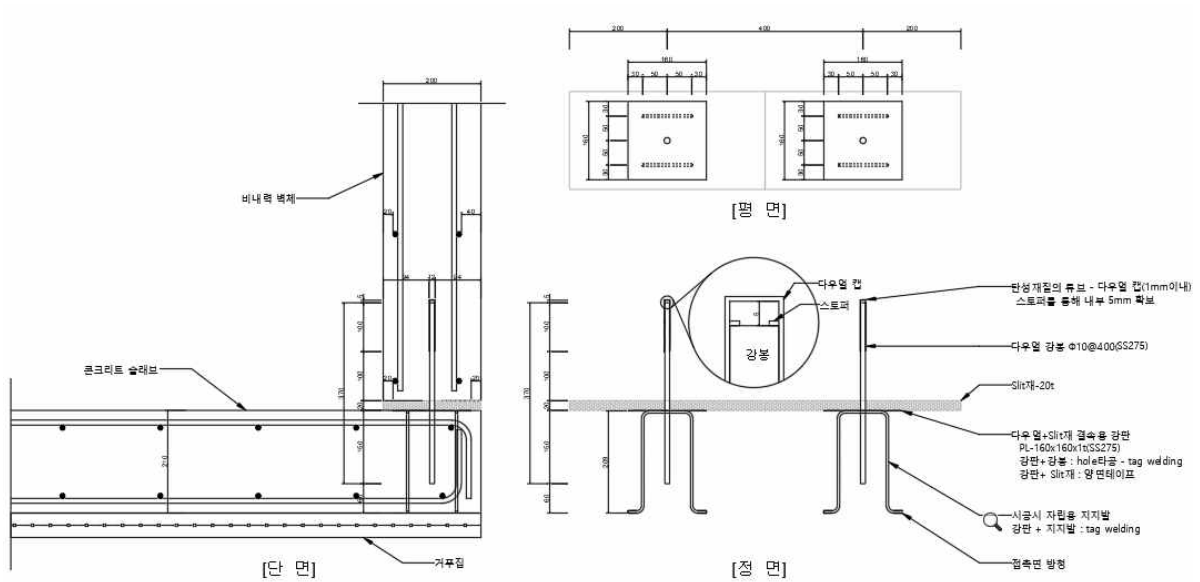
→ 내진슬릿의 폭 : 외부20, 내부30mm(탈형 고려)

(a) 수직으로 긴 내진슬릿 구현방안(평면)

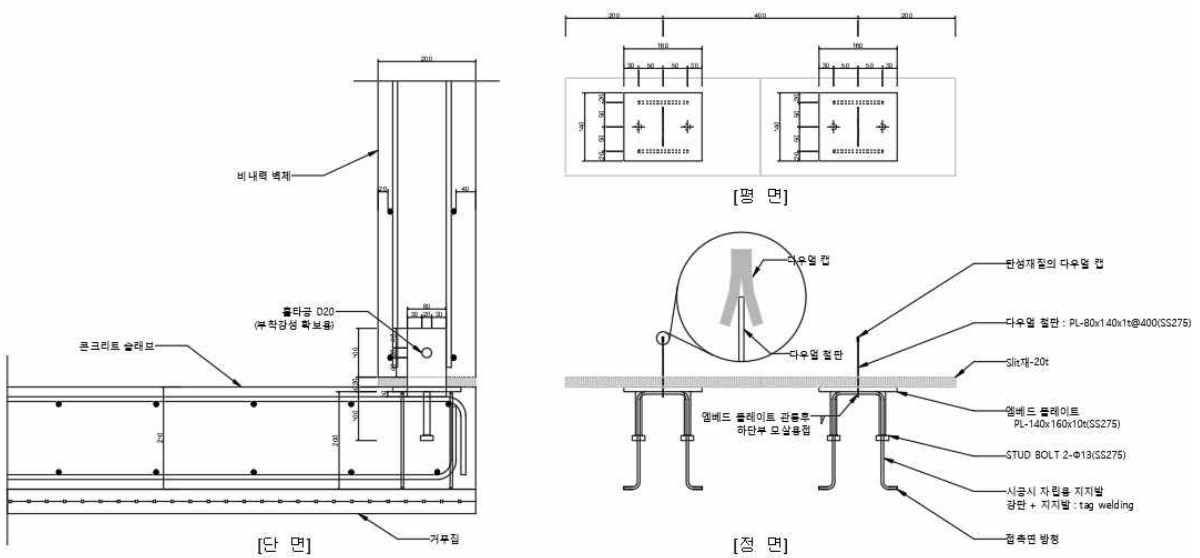


→ 내진슬릿의 폭 : 외부20, 내부30mm(탈형 고려)

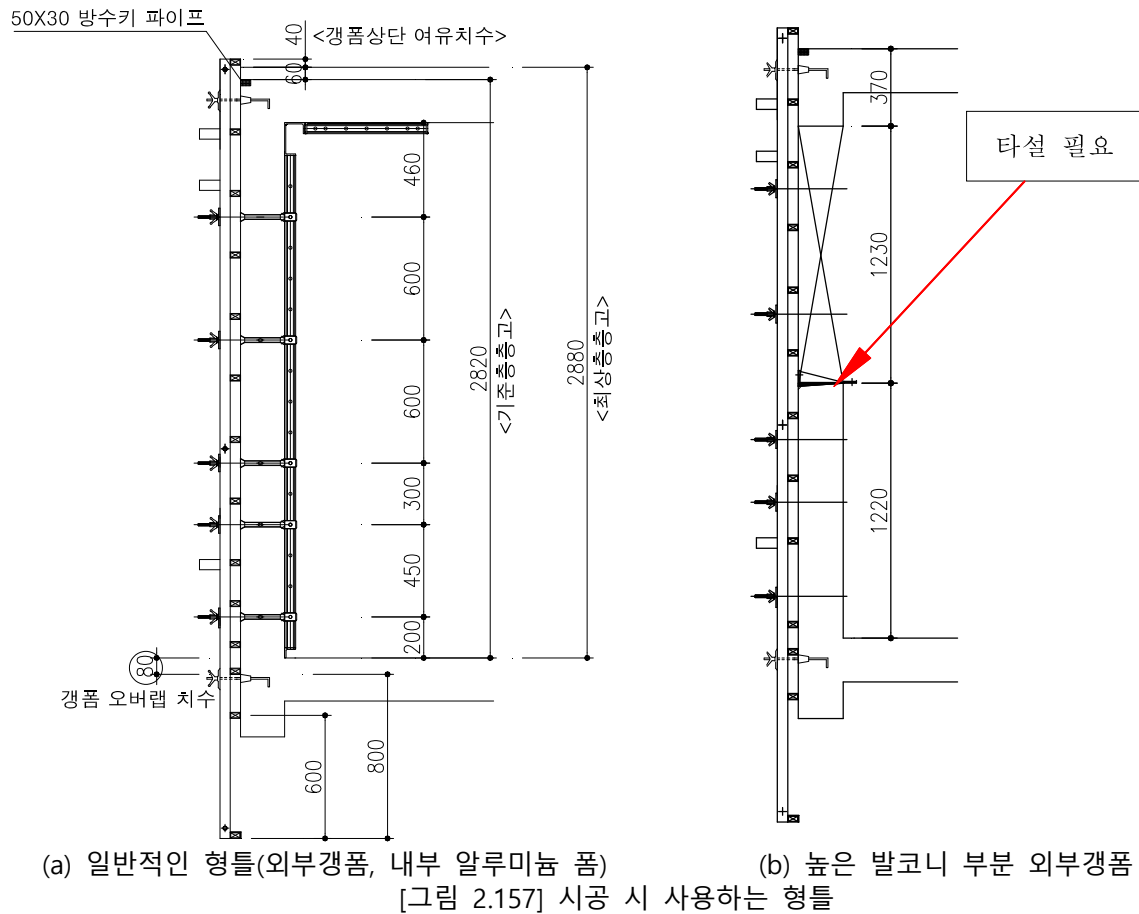
(b) 수직으로 긴 내진슬릿 구현방안(평면)-백업재 및 실란트 채움



(c) Slab 비내력벽(하부) 접합상세 – Dowel bar안

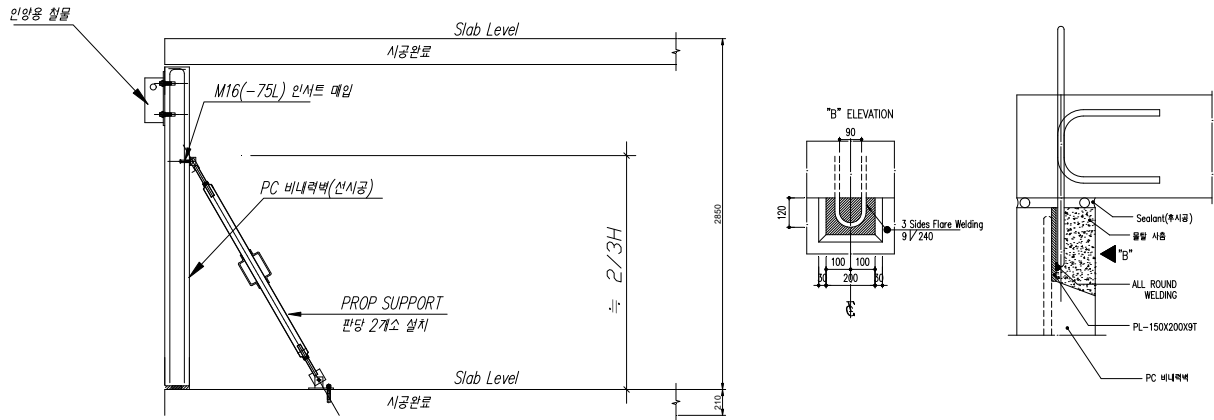


(d) Slab 비내력벽(하부) 접합상세 – Steel Plate안
[그림 2.156] RC비내력벽+내진슬릿 공법 상세



1.4.2 PC 비내력벽 후시공 공법

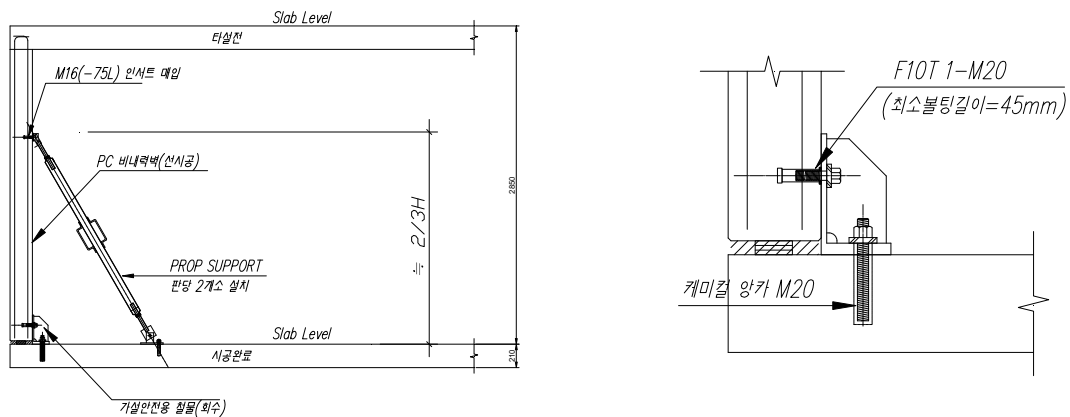
- 구조벽체만 우선 시공하고 비내력벽을 PC로 후시공하는 방법으로 [그림 2.158]과 같다.
- 우리나라의 벽식 아파트는 저층부에는 돌붙임 등의 마감이 있지만, 중층 이상은 노출 콘크리트에 수성 페인트류로 마감하는 것이 일반적므로, PC면이 최종 마감면이 된다.
- PC 비내력벽은 내구성이 좋기 때문에 유지관리 면에서 장점이 있다.
- 후시공 벽체는 마감면에서 양중이 필요하기 때문에 양중을 위한 별도철물이 필요하며, 공사중 안전을 위한 가설철물도 필요하다.



(a) 단면도 (b) 가설철물 상세
[그림 2.158] PC 비내력벽 후시공 공법 상세

1.4.3 PC 비내력벽 선시공 공법

- 비내력벽을 선시공하는 방법으로 [그림 2.159]와 같다.
- PC벽체를 후시공하는 것은 양중문제, 접합부 시공의 문제가 있으므로, 해당층 벽체철근 배근시점에 PC벽체를 조립하고, 상층 바닥 슬래브 타설과 함께 구조물을 일체화 하는 공법이다.
- 가설 시에는 베어링플레이트를 사용하여 거치하고, 하부의 가설철물과, Prop Support를 활용하여 가설 중 안전을 확보한다.
- PC 비내력벽에서 이음용 철근을 내밀어두었다가, 바닥판 타설시 일체화한다.



(a) 단면도 (b) 가설철물 상세
[그림 2.159] PC 비내력벽 선시공 공법 상세

2. 구조설계 예제집

2.1 개요

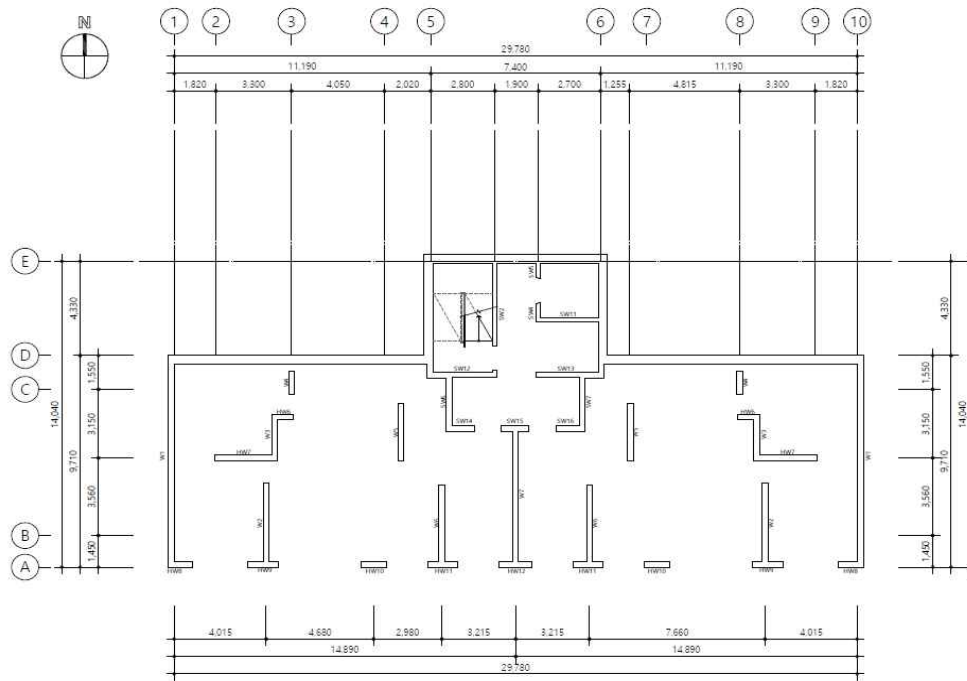
- 본 장에서는 연구결과를 실제 프로젝트에 적용하는 과정을 보이고, 기존의 구조설계 및 해석과 달라지는 점을 확인하고자 한다.

2.1.1 구조개요

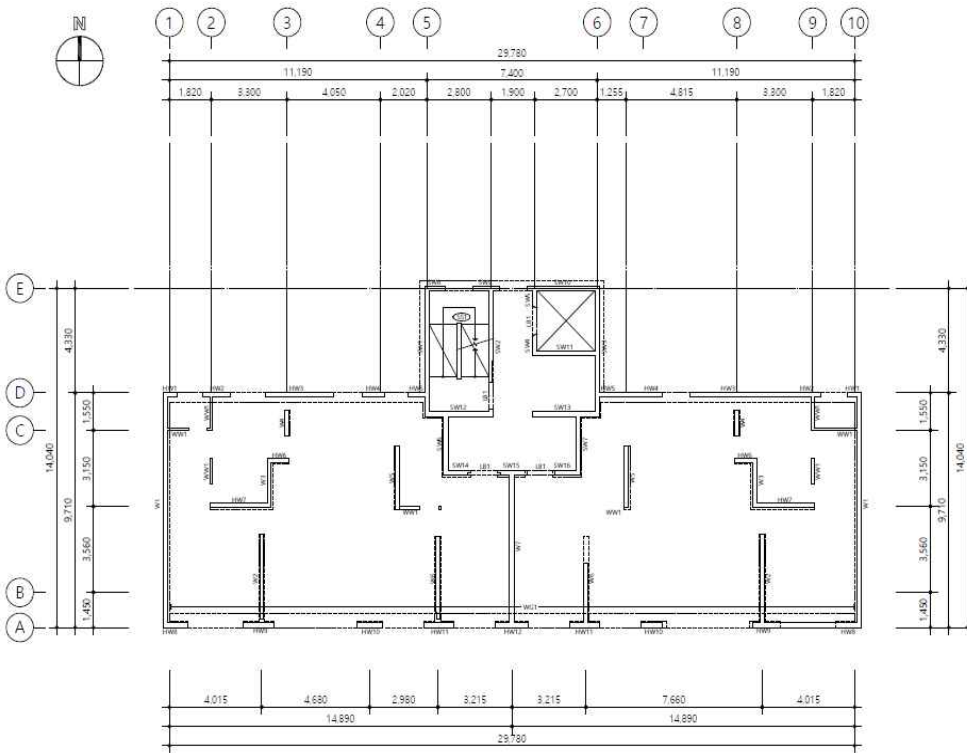
항목	내용
건물위치	00시
건물용도	공동주택
건물규모	지하1층, 지상 15층
건축물 높이	50.25m
건축물 폭	$B_x=29.780\text{m}$, $B_y=14.040\text{m}$
구조형식	철근콘크리트(RC)조
구조시스템	내력벽 시스템

2.1.2 구조 평면도 및 입, 단면도

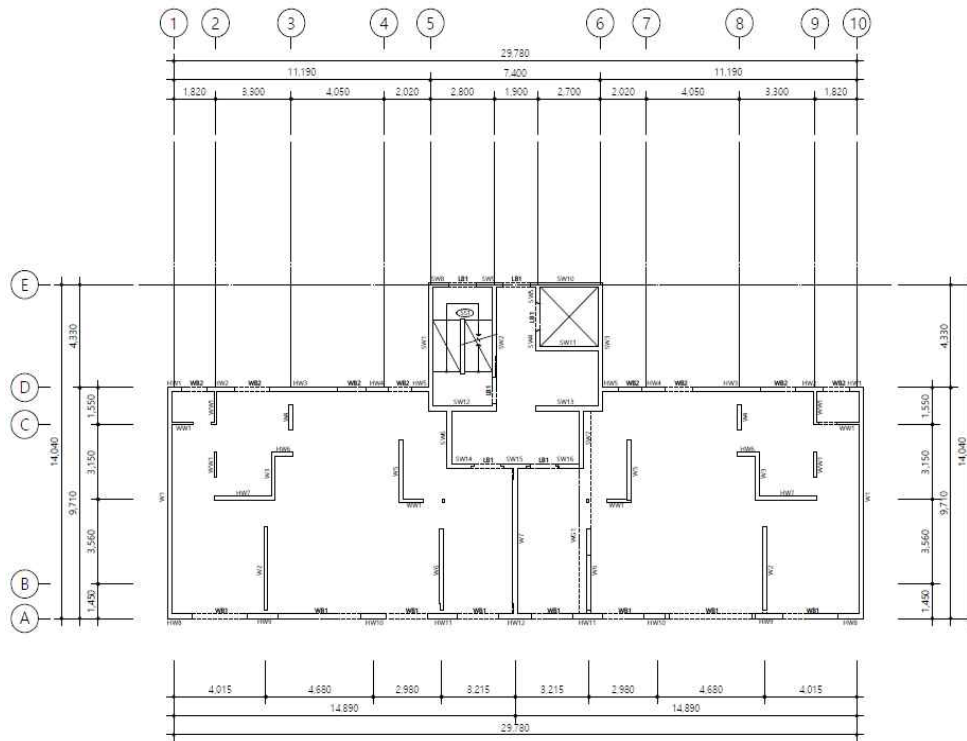
- 전형적인 84m² Type의 2세대 조합평면을 대상으로 하였다. 실제 프로젝트에서는 1층이나 지하층에서 Core로 진입하기 위한 공간이 필요하기 때문에 Transfer 부재 등을 배치하게 되는데, 본 예제에서는 벽체설계에 집중할 수 있도록 하기 위해 Transfer가 없는 평면을 활용하였다.



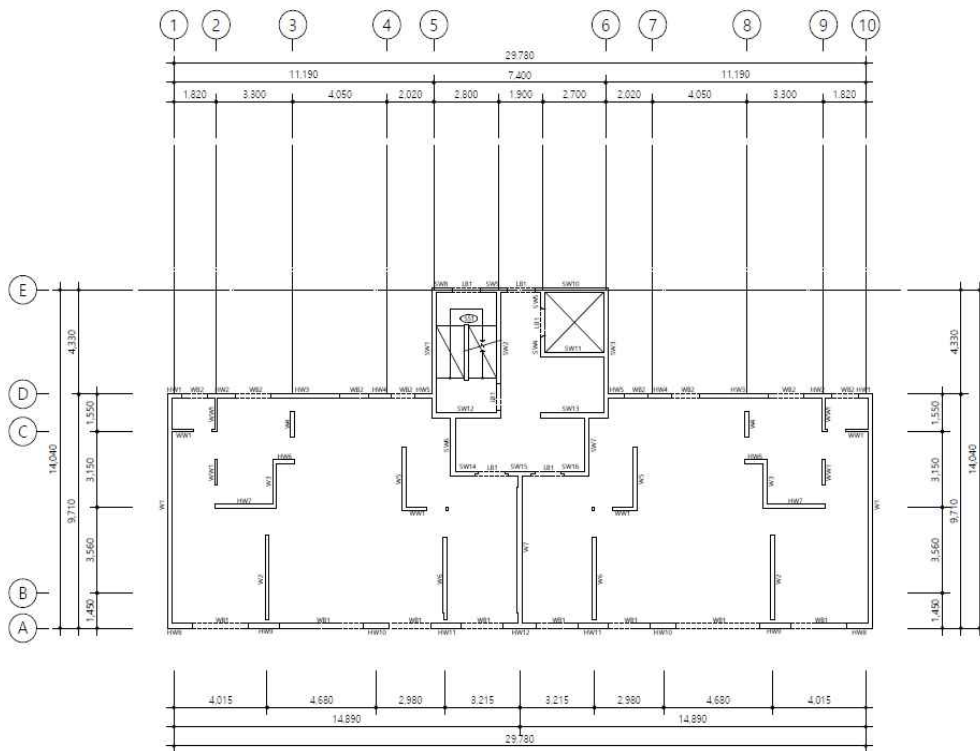
(a) 지하1층 구조도



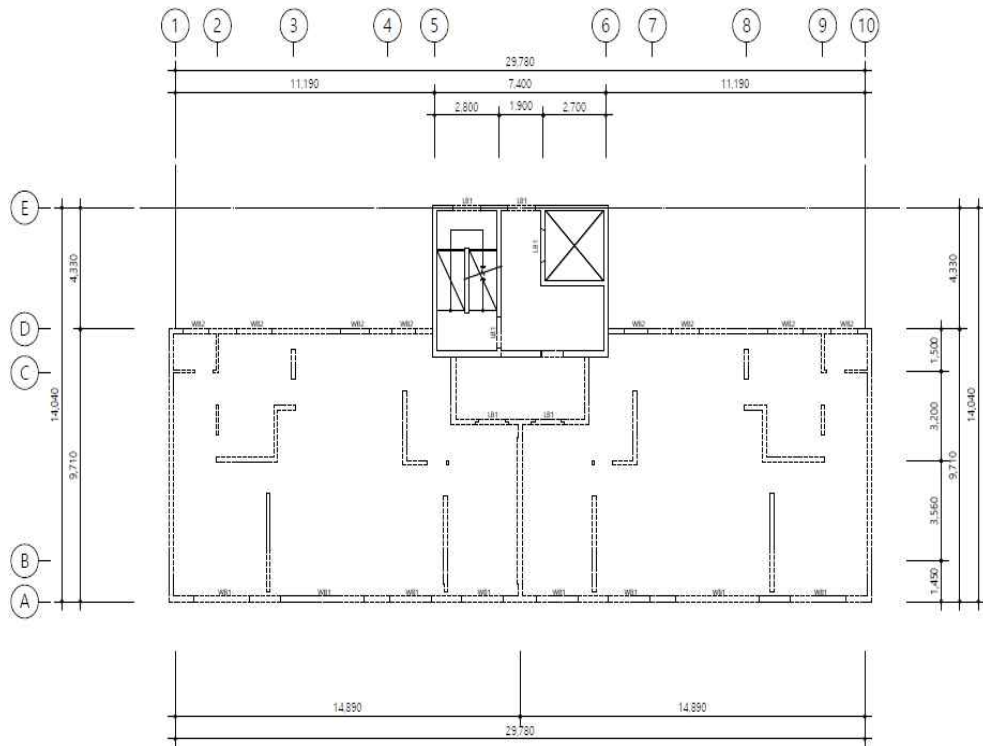
(b) 1층 구조도



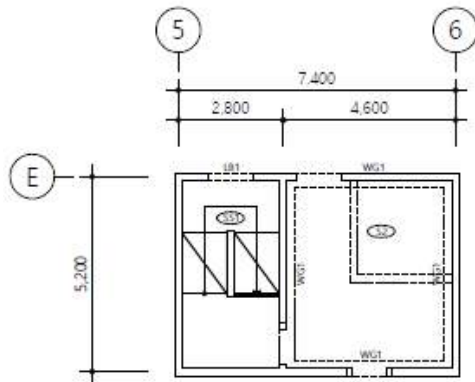
(c) 2층 구조도



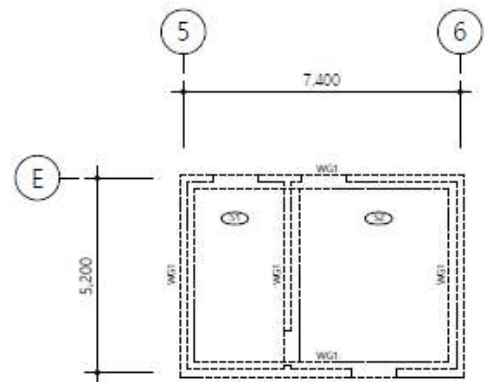
(d) 3~15층 구조도



(e) 지붕 구조도

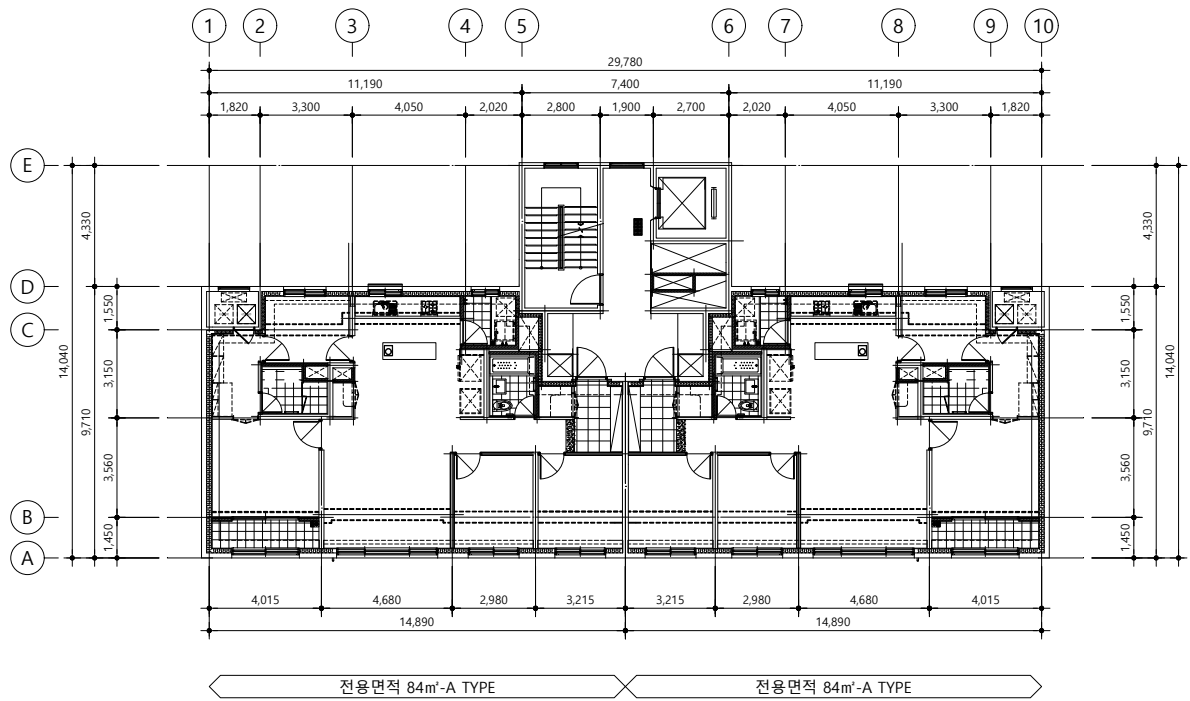


(f) 옥탑 구조도

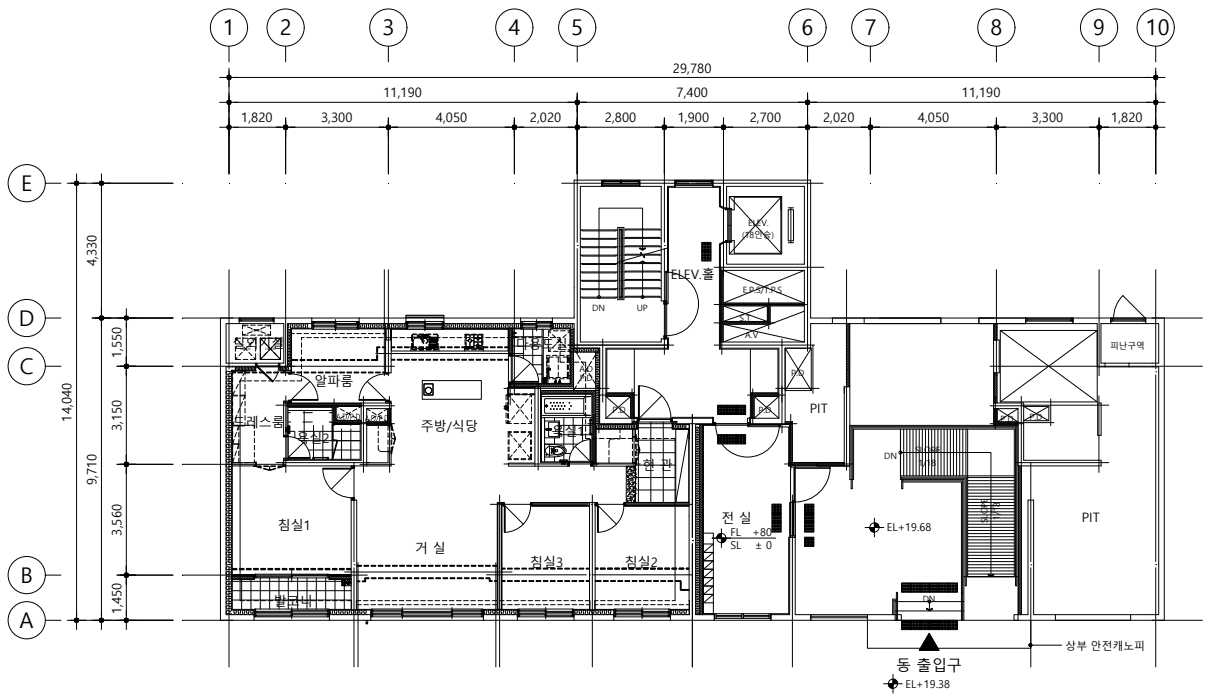


(g) 옥탑지붕 구조도

[그림 2.160] 해석대상 건축물 구조 평면도



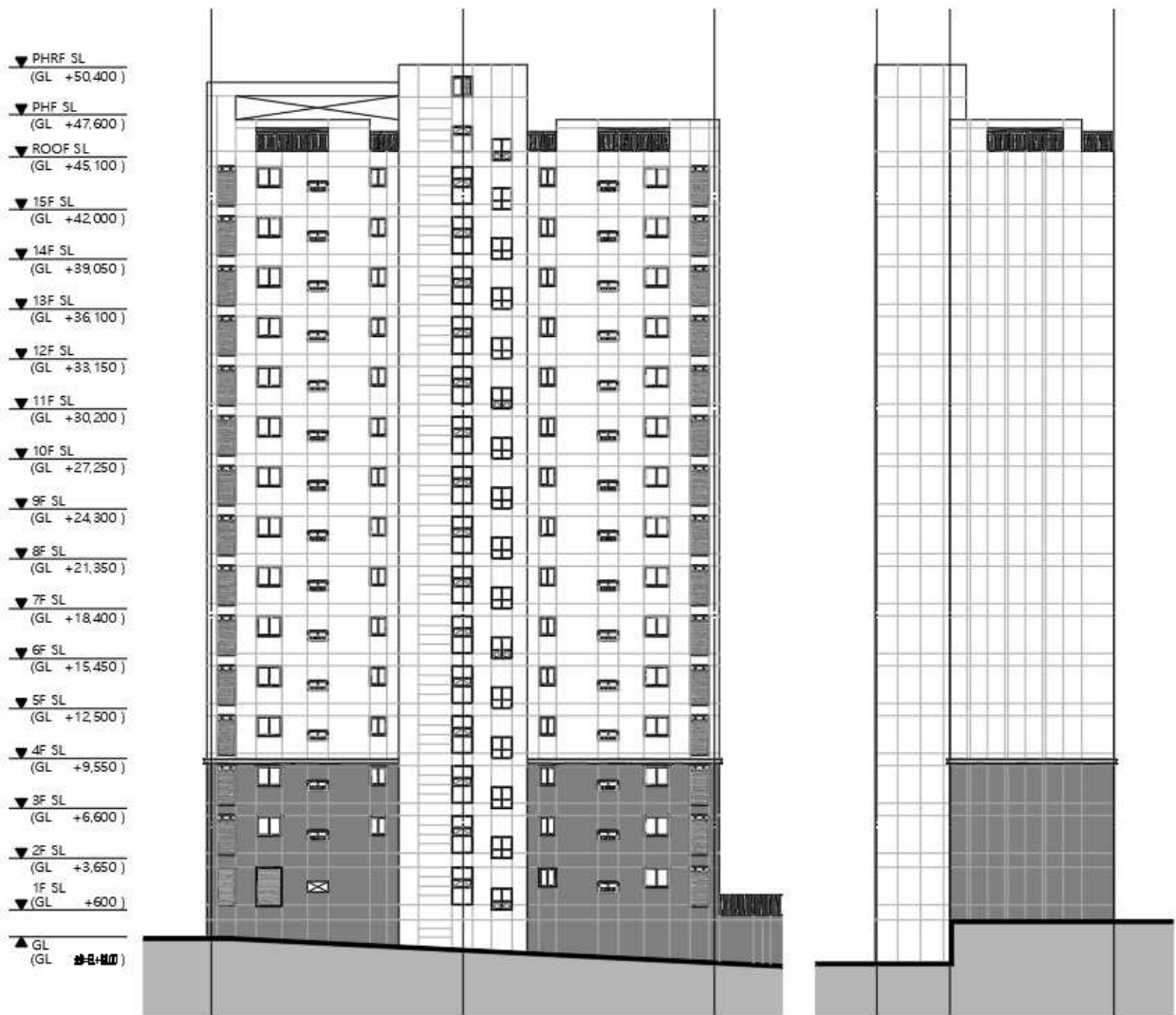
(a) 기준 층(3~15F)



(b) 1층

[그림 2.161] 해석 대상 건축물 평면도





[그림 2.162] 해석대상 건축물 입면도

2.1.3 적용기준

항목	내용
설계방법	극한강도설계법(RC조)
적용법령	건축법 / 건축법시행령
적용규칙	건축법시행규칙 / 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙
적용기준	건축구조기준(KBC 2016, KDS 41)
	건축물내진설계기준(KDS 41 17 00)
	콘크리트구조설계기준(KCI-USD2012,2017)

2.1.4 재료강도

항목	규격	설계기준강도	해당층/해당부재	해당부재
콘크리트	KS F 2405 (재령 28일 압축강도)	$f_{ck} = 24MPa$	전층	아파트
철근	KS D 3504 SD 400	$f_y = 400MPa$	슬래브, 전단벽	D13이하
	KS D 3504 SD 400S	$f_y = 400MPa$	중간보멘트골조의 보, 기둥	
	KS D 3504 SD 500	$f_y = 500MPa$	슬래브, 전단벽, 기초	D16 이상
	KS D 3504 SD 500S	$f_y = 500MPa$	중간보멘트골조의 보, 기둥	

2.1.5 적용하중

① 중력하중

항목	실용도	하중
고정하중	골조하중 및 영구설비와 건축마감 등을 고려하여 산정	
활하중	침실, 거실, 주방	$2.0kN/m^2$
	발코니	$3.0kN/m^2$
	계단실	$5.0kN/m^2$

② 풍하중

항목	내용
설계 기본 풍속(V_0)	26m/sec
지표면조도	C
중요도계수(I_w)	1.0
풍속할증계수(K_{zt})	1.0

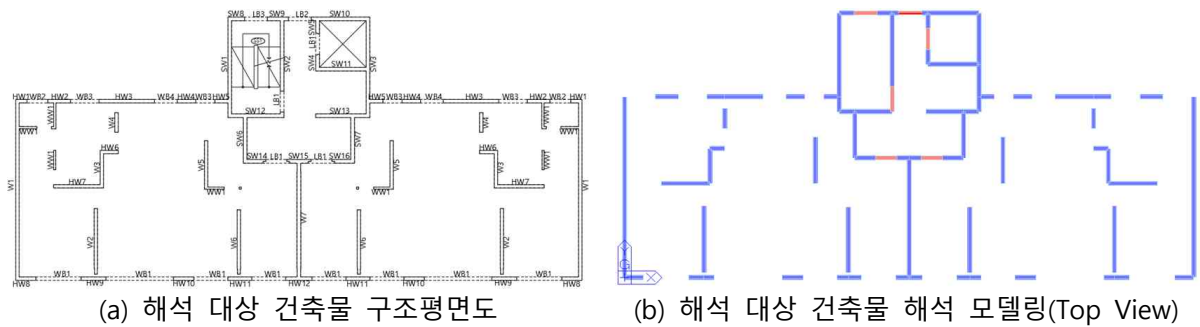
③ 지진하중

항목		내용
지진지역		1
지역계수(S)		0.176
지반등급		S_2
내진설계범주		C
중요도 계수(I_E)		1.2
지진력 저항 시스템 계수 (내력벽 시스템)	반응수정계수(R)	4.0
	시스템초과강도계수(Ω_0)	2.5
	변위증폭계수(C_d)	4.0

2.2 벽식 아파트 구조해석 모델링

2.2.1 기존 방식에 따른 벽식 아파트 모델링

- 대부분의 건설사 구조설계 지침에 의하면 벽식 아파트의 구조설계 단계에서 대상 건축물을 모델링 할 때, [그림 2.164]-(a)와 같은 구조평면도에 명시된 부재들과 달리 [그림 2.164]-(b)와 같이 코어벽체를 연결하는 연결보를 제외한 비내력벽, 짧은 벽체과 같은 요소들을 해석 모델에 반영하지 않는다.



(a) 해석 대상 건축물 구조평면도

(b) 해석 대상 건축물 해석 모델링(Top View)

[그림 2.164] 해석 대상 건축물 평면

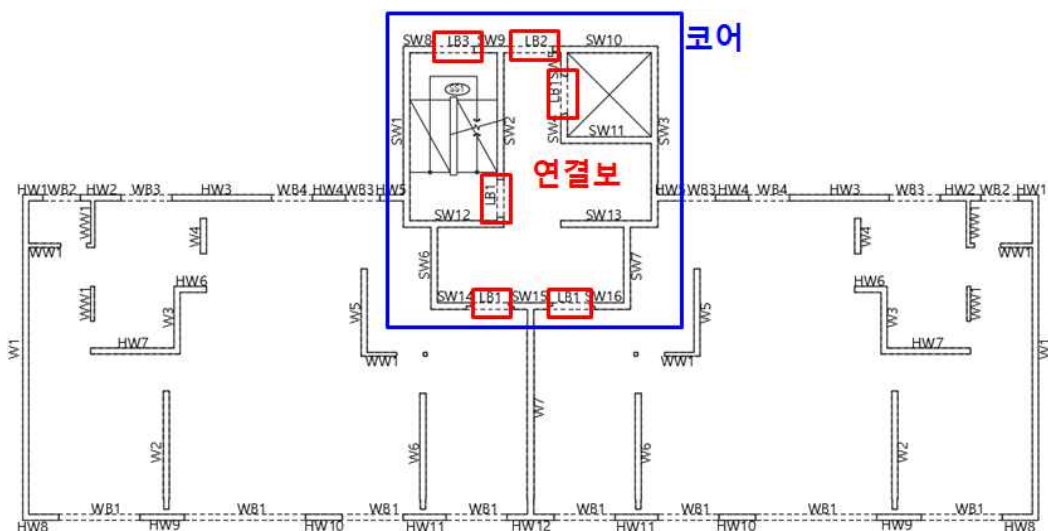
- 기존의 구조기준에서는 비내력벽에 대한 구조해석 포함여부를 명확히 규정하지 않고 있었으며, 짧은 벽체를 포함할 경우, 부재가 설계되지 않는 부재력이 발생하여 구조설계(배근설계)가 어려웠기 때문이다. 특히 짧은 벽체는 없는 것으로 하더라도, 전체 건물의 안전에는 문제가 없기 때문에 초기부터 벽체를 구조해석 모델에서 제외하도록 한 것이다. 여기서 짧은 벽체로 분류된 벽체는 나중에 비내력벽으로 분류되고, 최소한의 온도배근만을 배근하게 된다.

2.2.2 신구조기준에 따른 벽식 아파트 모델링

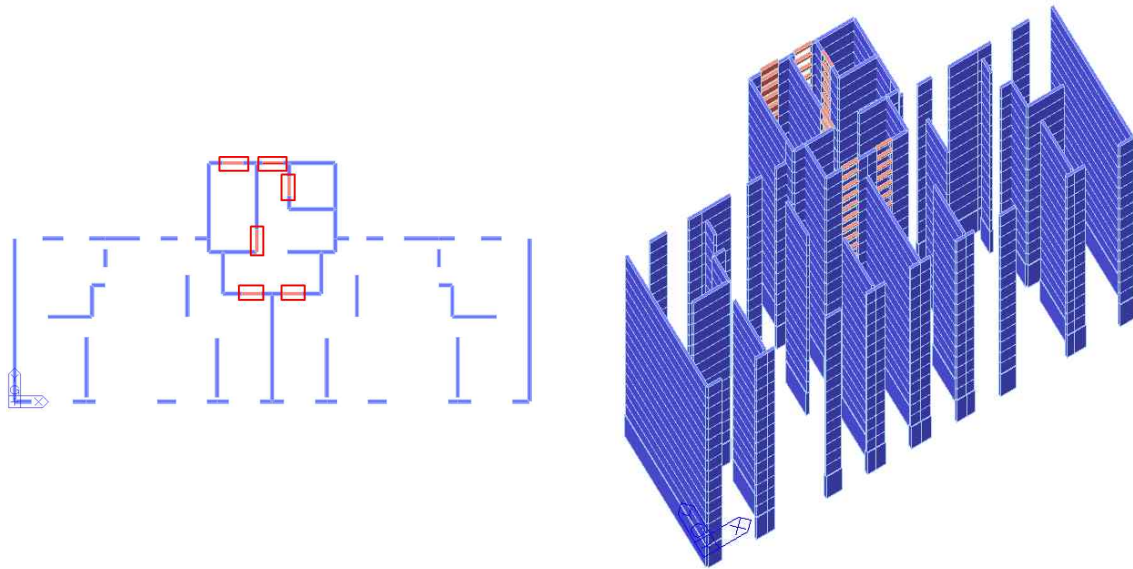
① 코어 벽체 연결보 모델링

- [그림 2.165]와 같이 표시된 벽식 아파트의 코어 측에 있는 내력벽을 연결하는 연결보는[그림 2.166]과 같이 모델링을 해야 한다.
- 연결보의 크기는 [그림 2.167]와 같이 개구부를 제외한 크기로 모델링 하고 본 예제에서 연결보의 크기는 [표 2.51]과 같다.

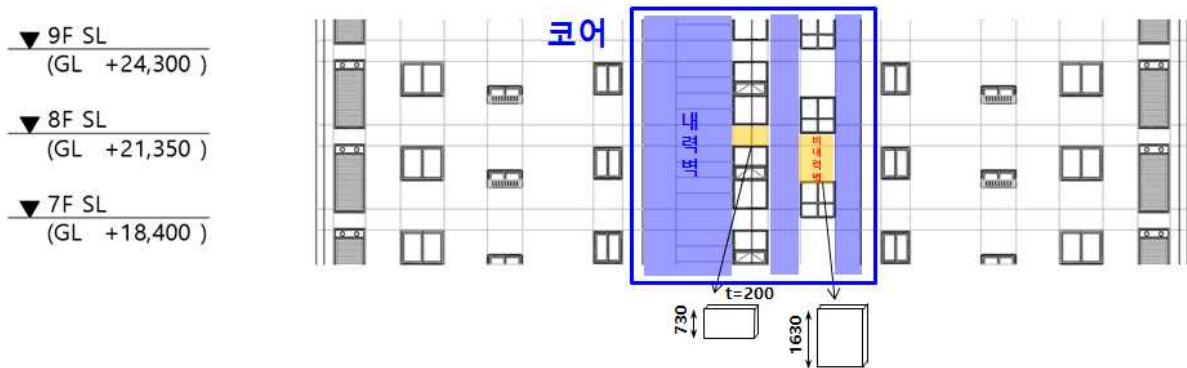
관련기준 : KDS 41 00 "건축물 내진설계 기준"
9.8 기타요구사항
9.8.1 구조해석
하중계산을 위한 구조물의 구조해석에서는 콘크리트 부재의 균열강성을 과소평가하지 않아야 한다. 비탄성변형을 계산하기 위한 구조해석에서는 콘크리트부재의 균열강성을 과대평가하지 않아야 한다. 구조해석을 위한 콘크리트 부재의 균열강성은 KDS 41 30 00 건축물 콘크리트구조설계기준의 규정을 따를 수 있다.
9.8.2 비구조요소와의 연결
큰 강성을 발휘할 수 있는 비구조요소는 구조부재와 이격하여야 한다. 그렇지 않을 경우에는 비구조요소를 구조요소로 고려하여 구조해석과 설계에 반영해야한다.
① 인방보(Coupling Beam) 적용방안
→ 인방보는 코어측만 고려하되 건축구조기준에 따라 강성을 저감한다. 이때 충분한 연성을 발휘할 수 있도록 배근한다.



[그림 2.165] 해석 대상 건축물 평면도-코어 연결보 위치



(a) Top View (b) Iso View
[그림 2.166] 해석 대상 건축물 MIDAS 모델 - 코어 연결보 모델링



[그림 2.167] 대상 건축물 입면도(배면도) 코어 측 일부

[표 2.51] 코어 연결보 정보

구분	부재명	단면치수(mm)
코어 연결보	LB1	500 x 200
	LB2	730 x 200
	LB3	1630 x 200

② 비내력벽(인방보) 모델링

- [그림 2.168]와 같이 표시된 비내력벽은 [그림 2.169]과 같이 모델링 해야 한다.
- 내력벽 사이를 연결하는 비내력벽을 모델링할 때 벽(Wall)의 형태로 모델링하지 않고 보(Element-beam)의 형태로 모델링 한다. 이는 벽의 형태로 모델링할 경우 노드가 많아져서 모델링에 어려움이 많기 때문이다.
- 비내력벽(인방보)의 크기는 [그림 2.170]과 같이 개구부를 제외한 크기로 모델링 하고 본 예제에서 비내력벽(인방보)의 크기는 [표 2.52]와 같다.

관련기준 : KDS 41 00 "건축물 내진설계 기준"

9.8 기타요구사항

9.8.1 구조해석

하중계산을 위한 구조물의 구조해석에서는 콘크리트 부재의 균열강성을 과소평가하지 않아야 한다.
비탄성변형을 계산하기 위한 구조해석에서는 콘크리트부재의 균열강성을 과대평가하지 않아야 한다.

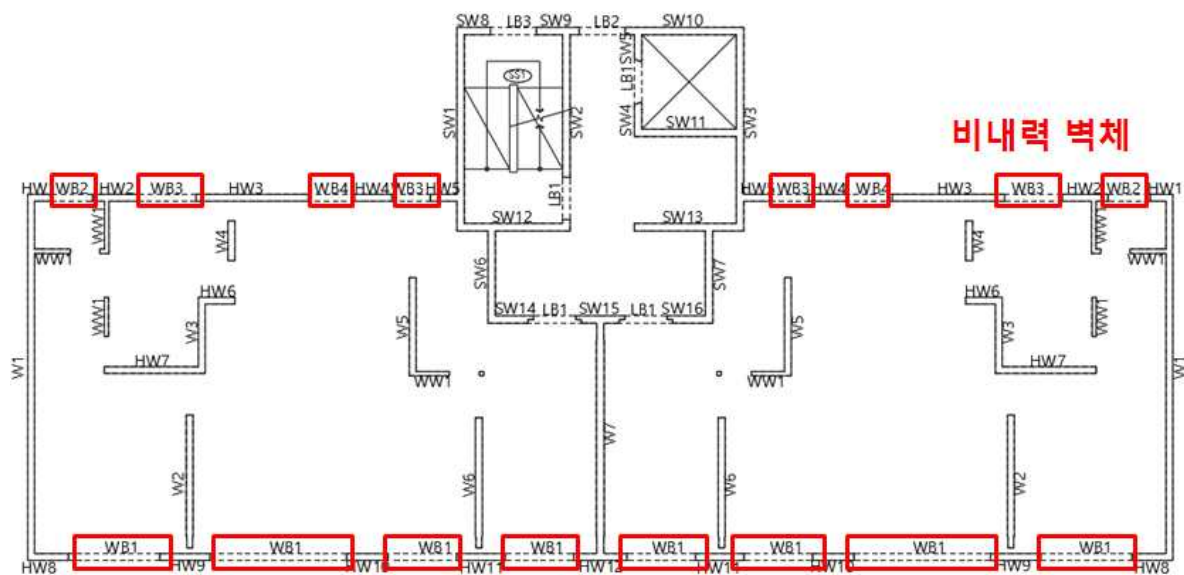
구조해석을 위한 콘크리트 부재의 균열강성은 KDS 41 30 00 건축물 콘크리트구조설계기준의 규정을 따를 수 있다.

9.8.2 비구조요소와의 연결

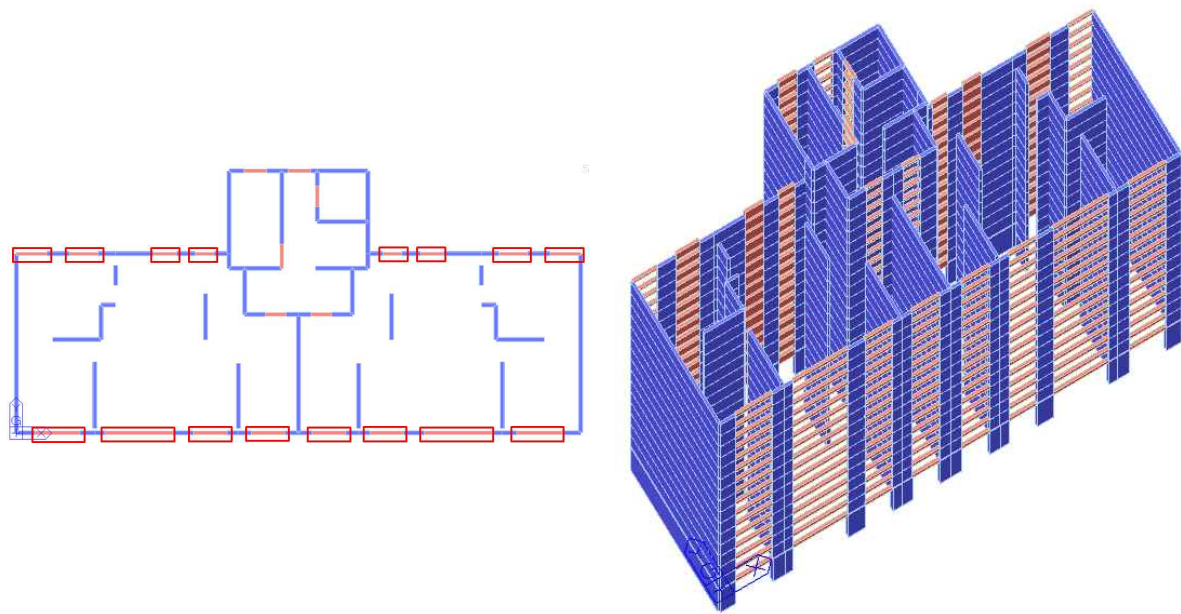
큰 강성을 발휘할 수 있는 비구조요소는 구조부재와 이격하여야 한다. 그렇지 않을 경우에는 비구조요소를 구조요소로 고려하여 구조해석과 설계에 반영해야한다.

② 외부 비내력벽체 구조해석 모델링 방안

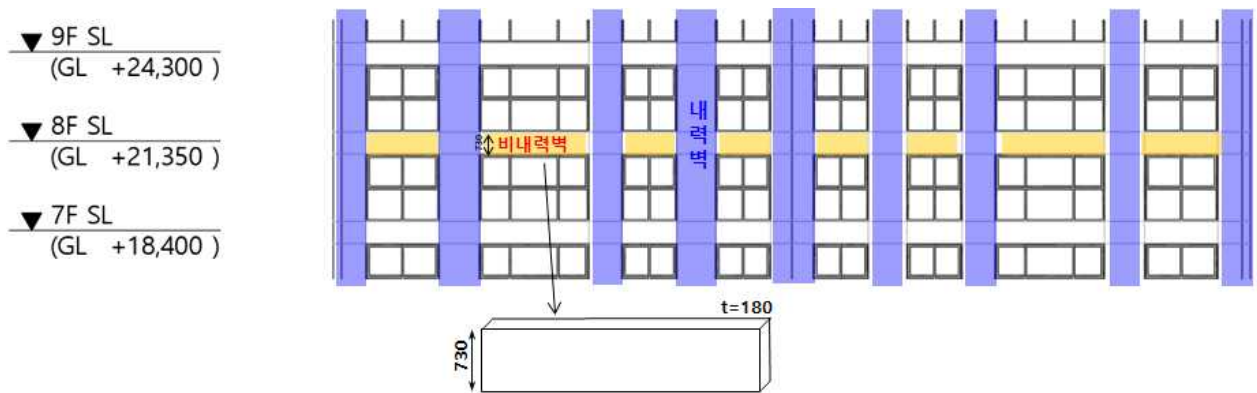
→ 내진슬릿을 두지 않는다면 구조해석 모델에 반영하여 구조해석 및 설계하여야 한다.



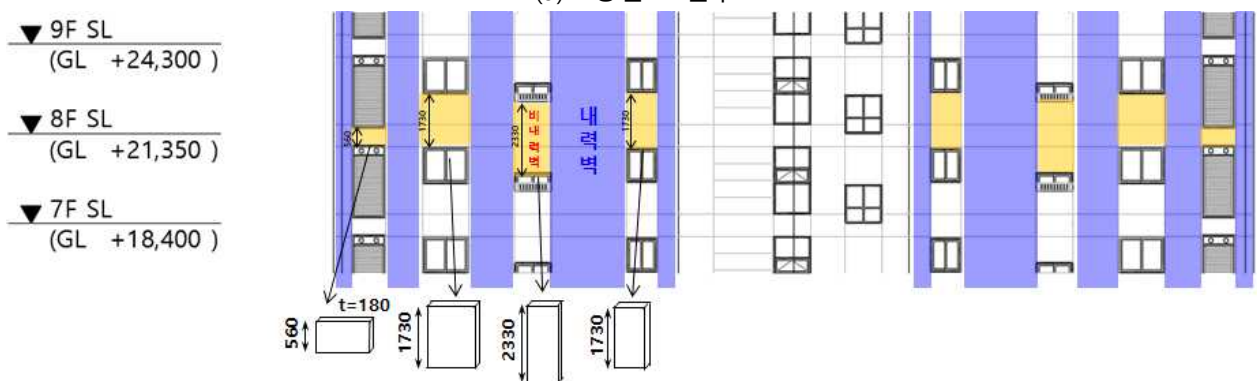
[그림 2.168] 해석 대상 건축물 평면도-비내력벽 위치



(a) Top View (b) Iso View
[그림 2.169] 해석 대상 건축물 MIDAS 모델 - 비내력벽 모델링



(a) 정면도 일부



(b) 배면도 일부

[그림 2.170] 대상 건축물 입면도 일부

[표 2.52] 비내력벽 정보

구분	부재명	단면치수(mm)
비내력벽 (인방보)	WB1	730 x 180
	WB2	560 x 180
	WB3	1730 x 180
	WB4	2330 x 180

③ 짧은 벽 모델링

- [그림 2.171]과 같이 표시된 짧고 얇은 비내력벽은 [그림 2.172]와 같이 모델링 해야 한다.

- 짧고 얇은 비내력벽의 경우 하중에 대해 저항하지 못하고 설계가 까다롭기 때문에 일반적으로 제외하지만 이것을 모델링에 반영하여 해석을 수행해야 한다.

관련기준 : KDS 41 00 "건축물 내진설계 기준"

9.8.3 조적채움벽과 허리벽의 고려사항

조적채움벽이 모멘트골조로부터 이격되지 않아서 구조요소로 역할을 할 경우에는 채움벽의 영향을 구조해석에서 고려하여야 한다. 조적채움벽은 조적구조기준에 따라서 설계하여야 하며, 콘크리트 기둥과 보에는 조적채움벽으로부터 전달되는 추가하중에 대하여 설계하여야 한다.

조적허리벽 또는 콘크리트 허리벽이 모멘트골조로부터 이격되지 않은 경우에는 허리벽에 의한 기둥 길이의 감소효과를 구조해석과 설계에 반영해야한다.

...

18.3.3 칸막이벽

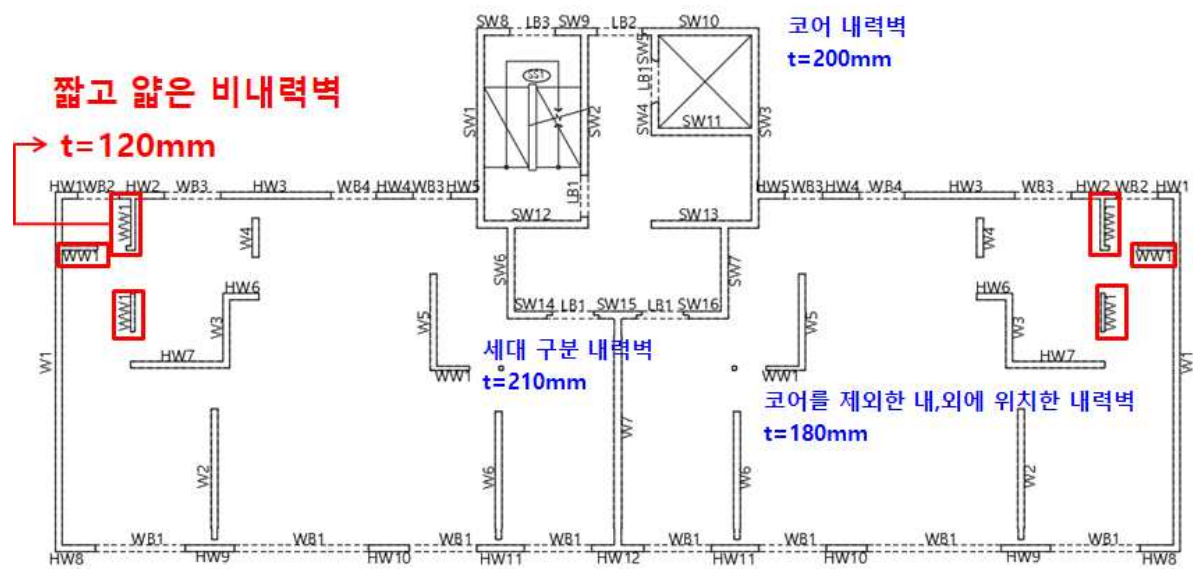
칸막이벽이 조적조 혹은 비구조 콘크리트벽으로 구성된 경우 다음을 만족하여야 한다.

구조설계시 구조요소로 고려되지 않은 경우 내진슬릿과 같은 적절한 구조상세를 통해 인접한 기둥에 영향을 미치지 않도록 하여야 한다.

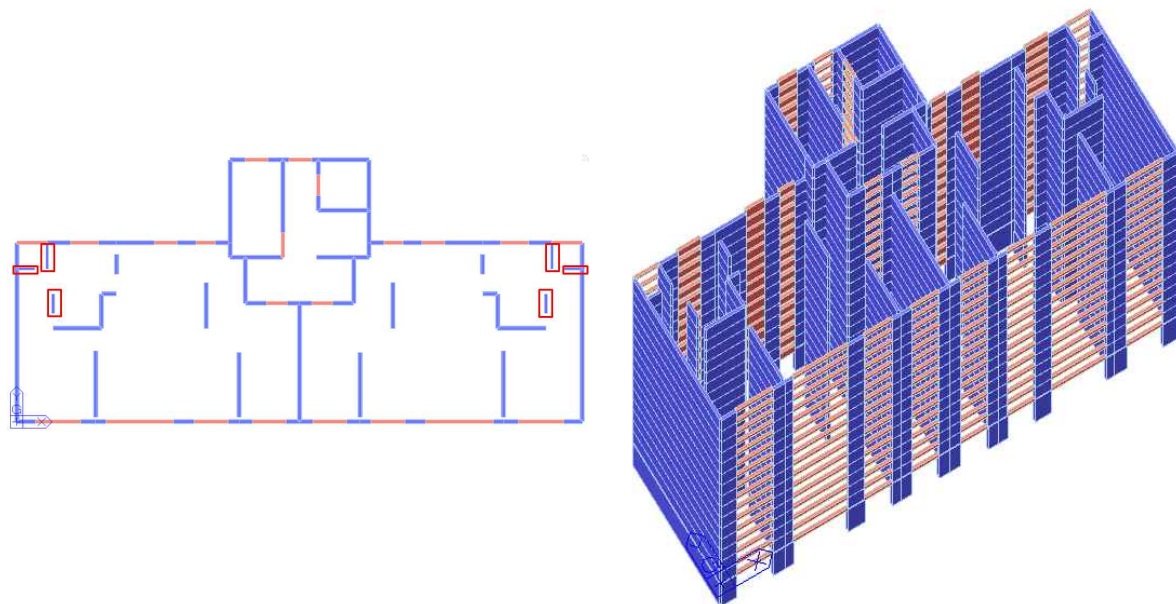
내진슬릿없이 기둥과 밀실하게 접촉하도록 시공되는 경우 9.8.2 및 9.8.3의 규정에 따라 반드시 구조요소와의 상호작용을 고려하여 설계되어야 한다.

③ 짧은 벽체 구조해석 모델링 방안

→ 내진슬릿을 두지 않는다면 구조해석 모델에 반영하여 구조해석 및 설계하여야 한다.



[그림 2.171] 해석 대상 건축물 평면도-짧은 벽 위치



(a) Top View

(b) Iso View

[그림 2.172] 해석 대상 건축물 MIDAS 모델 - 짧은 벽 모델링

[표 2.53] 짧은 벽 정보

구분	부재명	두께(mm)
짧은 벽	WW1	120
	WW2	120
	WW3	120

2.3 벽식 아파트 부재 강성

2.3.1 기존 방식에 따른 벽식 아파트 강성

- 기존의 벽식 아파트는 내력벽과 코어 측에 내력벽을 연결하는 연결보만 모델링하여 해석을 수행하였다.
- 기존의 해석모델의 내력벽과 연결보의 강성을 저감없이 1.0EI로 해석 후, 설계가 되지 않을 경우 임의로 강성을 조정하였다.

2.3.2 신구조기준에 따른 벽식 아파트 강성

- 벽식 아파트의 강성은 [표 2.54]과 같은 강성을 적용하도록 한다.
- 내력벽의 경우 비균열벽체 강성 0.7EI로 모델링을 수행한다.

[표 2.54] 부재별 강성

부재	휨강성	전단강성****	축강성
기둥*	$0.7Eclg$	GAw	EcAg
비균열벽체**	$0.7Eclg$	GAw	EcAg
균열벽체	$0.35Eclg$	$0.5GAw$	EcAg
보	$0.35Eclg$	GAw	EcAg
플랫플레이트 및 플랫슬래브	$0.25Eclg$	GAw	EcAg
연결보***	$0.07(l/h)Eclg \leq 0.3Eclg$	GAw	EcAg
비내력벽*****	$0.2Eclg$		

* 축력비가 0.1이하인 경우에는 휨강성을 $0.3Eclg$ 로 적용한다.

** 1차 해석결과 균열이 발생하는 것으로 확인된 벽체는 균열벽체로 판단하고 $0.35Ig$ 를 적용한다.

*** l : 연결보의 순경간, h : 연결보의 총

**** 전단강성은 $0.4Ec$ 로 적용할 수 있다.

***** 벽식 아파트 모델의 비선형 해석과 선형 해석결과를 분석하여 도출

① 코어 벽체 연결보 강성

- 코어 벽체를 연결하는 연결보의 강성은 [표 2.54]에서 ‘연결보’부재의 유효강성을 적용

한다.

- 연결보의 유효강성은 $0.07(1/h)EcIg$ 이며 $0.3EcIg$ 보다 작은 값을 취하도록 하고 이 보다 큰 값이 도출될 경우 $0.3EcIg$ 을 사용한다.
- 여기서 I 는 연결보의 순경간을, h 는 연결보의 춤으로 입력한다.
- 코어 연결부의 순경간과 춤을 고려하여 본 예제에서 코어 연결보의 유효강성은 [표 2.55]와 같다.

[표 2.55] 코어 연결보 강성

구분	부재명	강성(EI)
코어 연결보	LB1	0.157
	LB2	0.117
	LB3	0.052

② 비내력벽(인방보) 강성

- 비내력벽의 강성은 [표 2.54]에서 ‘비내력벽’부재의 유효강성을 적용한다.
- 비내력벽의 유효강성은 $0.2EI$ 로 벽식 아파트 모델의 비선형 해석과 선형 해석결과를 비교, 분석하여 도출한 값이다.
- 본 예제에서 비내력벽의 유효강성은 [표 2.56]과 같다.

[표 2.56] 비내력벽 강성

구분	부재명	강성(EI)
비내력벽 (인방보)	WB1	0.2
	WB2	0.2
	WB3	0.2
	WB4	0.2

③ 짧은 벽 강성

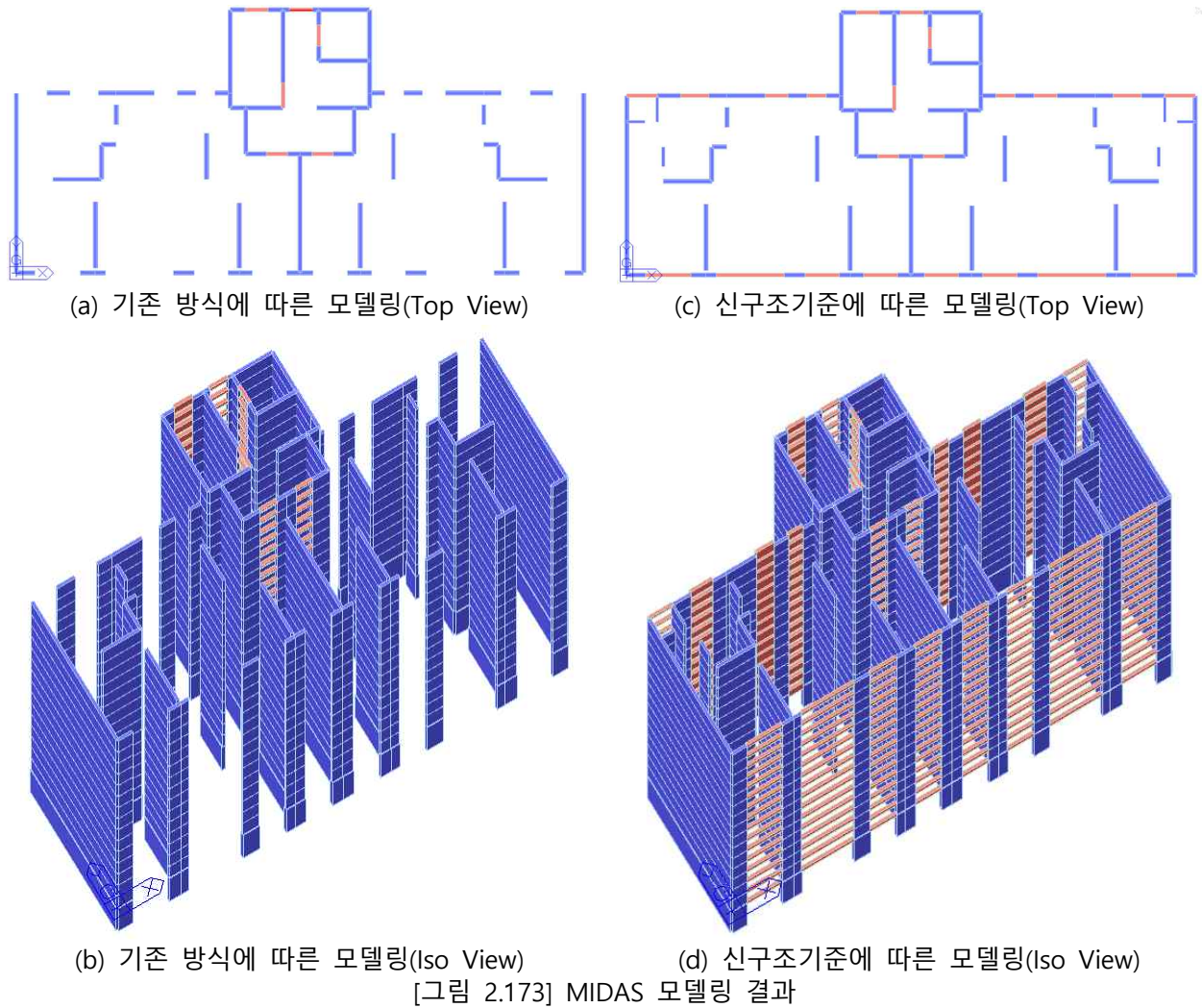
- 짧은 벽의 강성은 [표 2.54]에서 ‘비내력벽’부재의 유효강성을 적용한다.
- 본 예제에서 짧은 벽의 유효강성은 [표 2.57]와 같다.

[표 2.57] 짧은 벽 강성

구분	부재명	강성(EI)
짧은 벽	WW1	0.2
	WW2	0.2
	WW3	0.2

2.4 기존 방식과 신구조기준에 따른 방식의 구조설계 결과 비교

- 기존방식과 신구조기준을 적용한 방식으로 MIDAS 모델링은 [그림 2.173]과 같다.
- 두 가지 방식으로 벽식 아파트를 모델링한 후 강성을 조정하여 벽체를 설계하였다.
- 두 가지 방식에 대해 모델링 부재요소, 강성, 주기, 변위를 도출하였고 그 결과는 [표 2.58]과 같다.



[표 2.58] 기존 방식과 신구조기준 적용 방식 결과 비교

		구분	기존 방식				신구조기준 방식			
설계	벽체설계(자동)		최초모델		최종모델		최초모델		최종모델	
모델링	코어 연결보		o		o		o		o	
	비내력벽(인방보)		x		x		o		o	
	짧은 벽		x		x		o		o	
	내력벽		o		o		o		o	
강성 (EI)	코어 연결보 [0.07(l/h)Ecl g≤0.3Eclg]	LB1	1.0		0.05**		0.157		0.157	
		LB2	1.0		0.05**		0.117		0.117	
		LB3	1.0		1.0		0.052		0.052	
	비내력벽(인방보)		-		-		0.2		0.2	
	짧은 벽		-		-		0.2		0.2	
	내력벽		1.0		1.0(0.8,0.5)***		0.7		0.7	
주기 (sec)	약산식 주기		0.93		0.93		0.93		0.93	
	1차 Mode		1.68		2.31		1.06		1.06	
	2차 Mode		0.87		1.02		1.01		1.01	
	3차 Mode		0.71		0.88		0.64		0.64	
변위 검토	지진하중 최대		Xdir	Ydir	Xdir	Ydir	Xdir	Ydir	Xdir	Ydir
	층간변위비(%) (허용:1.5)		0.29	0.14	0.41	0.18	0.16	0.16	0.16	0.16
	풍하중*		Xdir	Ydir	Xdir	Ydir	Xdir	Ydir	Xdir	Ydir
	최대변위(mm) (허용:100.5)		15.69	59.54	15.69	59.54	4.157	10.16	4.157	10.16

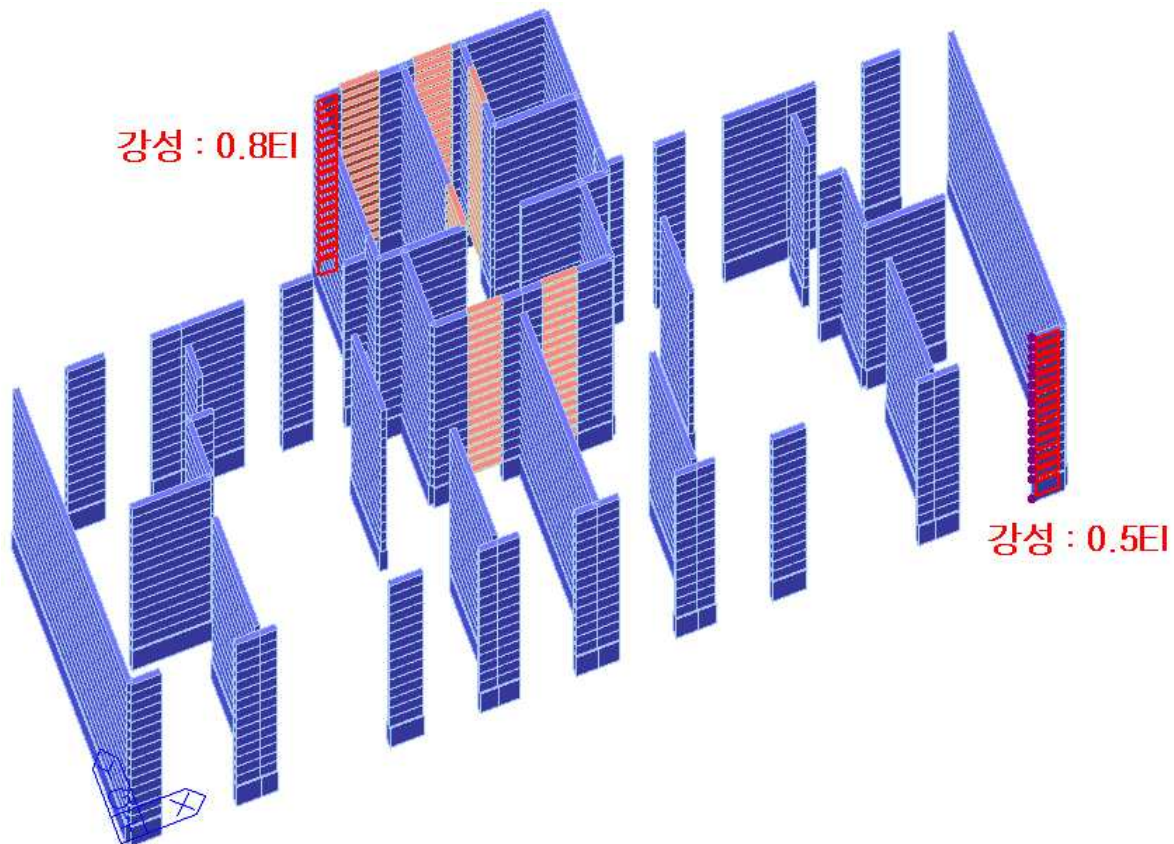
* 풍하중에 의한 최대변위는 신구조기준 방식에서도 강성을 조정하지 않고 1.0EI를 적용하고 결과를 확인해야한다.(KBC 0503.4.6. 유효강성)

** 연결보가 설계가능한 수준으로 강성을 임의로 저감한 것으로 구조기준에는 맞지 않다.

*** 부재력이 너무 커서 설계가 불가능한 일부 벽체는 0.8, 0.5 등의 임의값으로 강성을 저감한 것으로 구조기준에는 맞지 않다.

- 기존 방식의 경우 [그림 2.174]에서 붉은 색으로 강조된 비교적 짧은 내력벽에서 설계가 수행되지 않아, 이 내력벽의 강성을 1.0EI에서 각각 0.8EI, 0.5EI로 임의로 저감하였다.
- 신구조기준 방식의 경우 특정하게 강성 조정 없이 설계가 수행되었다.

- 주기의 경우 벽체 ‘최종모델’ 값을 기준으로 2.31sec에서 1.06sec으로 나타났다. 이는 약산식으로 도출한 0.93sec와 비교하면 신구조기준 방식을 적용한 모델링이 더욱 유사하다는 것을 알 수 있다.
- 최종모델에서 지진하중에 의한 최대 층간변위비 검토결과 X방향은 0.41에서 0.16로 약 61% 감소하였고, Y방향은 0.18에서 0.16로 약 11% 감소하였다.
- 풍하중에 의한 최대변위 검토 결과 X방향은 15.7mm에서 4.16mm로 약 73.5% 감소하였고, Y방향은 59.54mm에서 10.2mm로 약 82.9% 감소하였다.



[그림 2.174] 기존 방식에 따른 설계 시 강성 조정한 벽체부분

- 본 예제는 층이 높지 않아서, 임의로 강성을 조정하는 경우가 적었지만, 고층아파트의 경우, 관행적으로 강성을 조절하는 사례가 적지 않았다. 고층아파트의 설계에 대해서는 본 연구결과 및 새로운 내진설계기준에 따라 추가로 적용방안을 검토해야 할 것이다.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

- 그동안 인지하지 못했던 구조설계 및 시공 관행에 의하여 설계/시공된 벽식 아파트의 수벽과 날개벽에 포항지진(규모 5.4, 2017)으로 인해 균열과 탈락 등 심각한 손상이 발생함. 이를 해결하기 위해 1) 비내력벽 해석모델 및 해석 가이드라인 개발, 2) 비내력벽 상세 개발 및 실험적 성능평가, 3) 구조설계법 및 시공상세 개발을 통한 비내력벽 내진 설계/시공 Solution 개발을 목표로 함

나. 목표 달성여부

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행내용	연구 달성도	기여도 작성
1차 년도 (2018)	슬롯형과 PC형 비내력벽 시스템해석 및 평가모델 개발	공동주택 포항지진피해 사례 조사 및 비내력벽의 요구 내진성능제시	벽식 아파트 포항지진피해 사례 조사 및 비내력벽의 요구 내진성능 제시	• 벽식 아파트 포항지진피해 사례 조사 및 비내력벽의 요구 내진성능 제시하여 100% 연구 목표 달성	• 벽식 의 정밀해석모델을 통해 해당 대지에 위치한 공동주택에서 단지별 모델링을 통 APT 해 특정 몇 동에 집중된 피해 사례를 묘사할 수 있도록 해석모델을 검증
		공동주택 구조해석모델 구축 및 정밀내진상세평가	벽식 아파트 구조해석모델 구축 및 정밀 내진상세평가	• 벽식 아파트 구조해석모델 구축 및 정밀 내진상세 평가를 통해 100% 연구 목표 달성	• 횡력저항을 담당하는 구조시스템뿐만 아니라 비내력벽부재에 포함되는 수벽과 날개벽의 모델링을 통해 벽식 구조해석 모델을 개발함 • 전체 구조해석모델의 반영은 벽식 시스템의 지

					진운동 발생 시 동적거동 특성을 명확히 반영할 APT 수 있는 도구를 제시
벽식 아파트의 슬롯형과 PC형 비내력벽 시스템 상세개발 및 실험적 손상제어성능 평가	RC벽체 지진 피해 사례 및 설계 현황 조사	국내·외 RC벽체 지진 피해 사례 조사 및 국내·외 RC벽체 설계기준 비교 분석	RC벽체 피해 사례 조사 및 설계 기준 비교·분석을 통해 100% 연구목표 달성	RC벽체 지진 피해 사례 및 설계 현황 조사를 통해 비내력벽의 균열하자 및 탈락 원인 분석	
	PC형 비내력벽 시스템 모듈 및 상세 개발	힌지형 및 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템 모듈 상세 개발	힌지형 및 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템 개발 및 특허 출원을 완료하여 100% 연구 목표 달성	비내력벽 인접 구조 부재의 거동에 영향을 미치지 않으며, 비내력벽의 손상을 제어하기 위한 비내력벽 시스템 특허 출원	
	PC형 비내력벽 시스템과 구조부재와의 접합상세 개발	힌지형 및 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템과 인접 구조부재와의 접합상세 개발	힌지형 및 슬라이딩형 PC 비내력벽 시스템의 접합상세(안) 개발을 통해 100% 연구 목표 달성	국내 벽식아파트 실정을 반영한 비내력벽 손상제어에 최적화된 접합상세 마련	
비내력벽 손상 최소화를 위한 구조설계법 개발 및 시공상세 개발	현행 RC 비내력벽에 대한 설계관행 및 RC 비내력벽 적용 사례 조사 분석	건설사별 공동주택 구조설계지침서 및 구조평면도 분석	국내 건설사별 공동주택 구조설계지침서 및 구조평면도 분석을 통해 100% 연구 목표 달성	국내 건설사별 공동주택 구조설계지침 및 구조평면도를 분석하여 현행되는 지침과 건축구조기준을 비교하여 개정부분 파악	
2차	슬롯형과 PC형	슬롯형 및 PC형	슬롯형 및 PC형	개발된 해	실험결과 기

년도 (2019)	비내력벽 시스템해석 및 평가모델 개발	비내력벽에 대한 실험결과 기반 상세 평가모델 개발	비내력벽 시스템 에 대한 실험결 과 기반 상세 평 가모델 개발	석모델에 대해 비구 조벽 내진 설계 시공 의 대안으 로 제신된 슬롯형 및 PC형 비내 력벽에 대 한 상세 구 조해석 모 델을 개발 을 통해 10 0% 연구목 표 달성	반 이력모델 의 비선형 유 한요소 해석 모델을 개발 을 통해 하중 별 독립된 비 내력벽이 슬 롯과 연결부 에서 변형에 대한 요구 값 을 계산할 수 있는 tool 확 보
		슬롯형 및 PC형 비내력벽시스 템 설계 및 평가 프로세스 개발	현행 설계 기준 에 따라 슬롯형 및 PC형 비내력 벽 시스템 설계 및 평가프로세스 개발	• 현행 설계 기준에 따 라 비내력 벽시스템 설계 및 평 가프로세 스를 개발 을 통해 10 0% 연구목 표 달성	• 개발된 설계 시스템에 따 라 예상되는 지진위험도 에 따라 구조 시스템과 비 구조시스템 의 내진성능 을 평가할 수 있는 프로세 스를 개발
	벽식 아파트의 슬롯형과 PC형 비내력벽 시스템 상세개발 및 실험적 손상제어성능 평가	실험방법 설정 및 실험체 설계	실험적 내진성능평가를 위한 실험체 설계, 하중 가력 및 계측장비 계획	• 실험적 내 진성능평 가를 위한 실험체 설 계, 하중가 력, LVDT 및 변형률 게이지 부 착을 통해 100% 연구 목표 달성	• 하중 가력 및 계측장비를 통해 개발한 비내력벽 시 스템이 적용 된 실험체의 거동에 미치 는 영향을 분 석
		슬롯형 및 PC형 비내력벽 시스템의 실험적 내진성능평가	비교 및 비내력벽 대체시스템 적용 실험체의 정적반복가력 실험을 통한 내진성능평가	• 정적반복 가력실험 및 성능평 가 결과 분 석을 통해 100% 연구 목표 달성	• 정적반복가 력실험을 통 해 개발한 비 내력벽 시스 템의 손상제 어성능 검증 하여 신뢰도 를 확보함
	비내력벽 손상	RC비내력벽을	비내력벽의	• 비내력벽	• 비내력벽의

	최소화를 위한 구조설계법 개발 및 시공상세 개발	포함하는 벽식 아파트 구조설계법 제시(PC 등 대안공법 포함)	포함여부에 따른 구조해석결과 검토	의 포함여 부에 따른 구조해석 결과 검토 를 통해 10 0% 연구목 표 달성	포함여부에 따른 구조해 석결과 검토 를 통해 현행 되는 방법과 구조기준에 따른 방법을 비교, 분석
3차 년도 (2020)	슬롯형과 PC형 비내력벽 시스템해석 및 평가모델 개발	슬롯형 및 PC형 비내력벽 해석모델링 가이드라인 개발	슬롯형 및 PC형 비내력벽 해석모델링 가이드라인 개발	슬롯형 및 PC형 비내력벽 해석 모델링 가이드라인 개발을 통해 100% 연구 목표 달성	- 실험결과를 바탕으로 해석모델의 검증을 통해 완성하여 이를 실무엔지니어와 연구자가 참고할 수 있는 가이드라인을 개발함 - 구조시스템과 독립된 비구조벽으로 거동을 하며 피해손상이 슬롯과 PC접합부에 집중되는 거동 특성을 이상화하여 해석 모델에 반영하는 법을 기술
		슬롯형 및 PC형 비내력벽 시스템 내진성능평가 가이드라인 개발	슬롯형 및 PC형 비내력벽 시스템 내진성능평가 가이드라인 개발	슬롯형 및 PC형 비내력벽 시스템 내진성능평가 가이드라인 개발을 통해 100% 연구 목표 달성	개발된 설계 시스템에 따라 예상되는 지진위험도에 따라 구조시스템과 비구조시스템의 내진성능을 평가할 수 있는 프로세스를 구조엔지니어가 사용할 수 있도록 제시
	벽식 아파트의	대체시스템	손상된	대체시스	기존 보수·보

슬롯형과 PC형 비내력벽 시스템 상세개발 및 실험적 손상제어성능 평가	접합부 보수· 보강 공법 개발	철근콘크리트 벽체의 구조성능 복원을 위한 보수 및 TRM 보강 공법 개발	템 적용 R C벽체 보 수·보강 공 법 개발 및 개발 공법 적용 정적 반복가력 실험을 통 해 100% 연구목표 달성	강 공법의 문 제점 조사를 통한 개선 및 대체시스템 적용 RC벽체 에 적합한 보 수·보강 공법 개발 • 손상된 RC벽 체 실험체 선 정 및 개발 보수·보강 공 법 적용 후 정적반복가 력실험을 통 하여 보수·보 강 공법의 성 능 검증
	실험평가를 통한 보수·보강 공법 검증 및 지침(안) 개발	손상된 철근콘크리트 벽체 보수·보강 공법 검증 및 지침(안) 작성	• 실험평가 를 바탕으 로 지침 (안) 작성 및 전문가 검증을 통 해 100% 연구목표 달성	• 개발된 지침 (안)을 통해 실무에서 활 용 가능한 R C벽체 보수· 보강 공법의 구조성능 복 원 기술 보급 가능 • 실험평가 및 전문가 검증 을 통해 활용 성 및 신뢰도 를 확보함
	비내력벽 손상 최소화를 위한 구조설계법 개발 및 시공상세 개발	비내력벽 설계/ 시공 최적화를 위한 설계/시공 가이드 작성	• 대안공법별 시 공매뉴얼 및 구조설계 예제 집 작성	• 대안공법 별 시공매 뉴얼과 구 조설계 예 제집 작성 을 통해 10 0% 연구목 표 달성 • 대안공법별 상세 개발 및 특허 출원 예 제집을 통한 현 실무자들 의 구조설계 개정안에 대 한 이해를 도 움

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

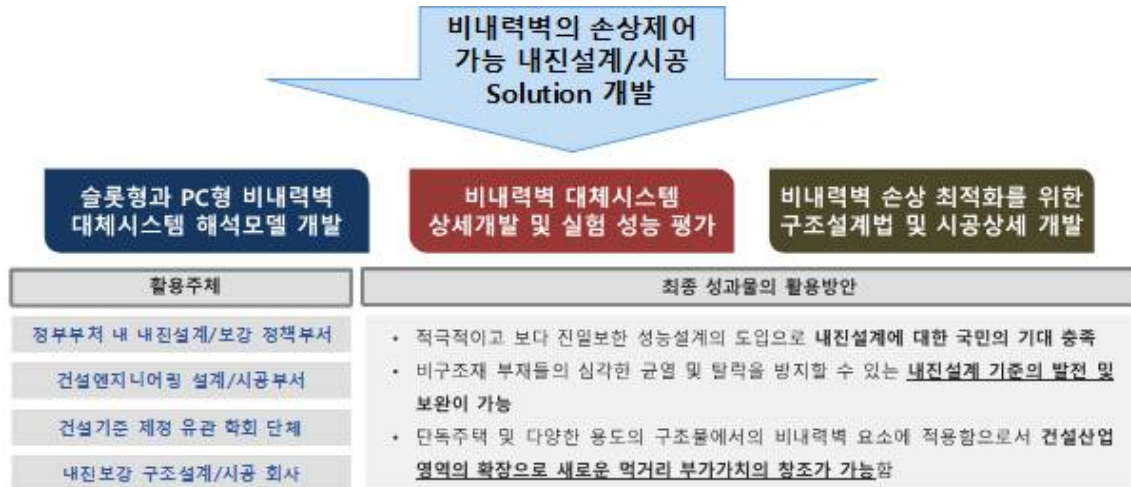
- 해당 없음(목표 모두 달성 완료)

- 본 연구에서 개발한 비내력벽 대체시스템에는 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)에 규정되어있는 바와 같이 비내력벽과 내력벽 사이에 내진슬릿이 설치되어 있다. 벽체 간 내진슬릿은 구조물 시공 후 단열 패널, 스프레이 및 폼 형태의 단열재 등의 방법으로 공간을 채워 넣게 된다. 추후 구조성능에 영향을 미치지 않고 단열/결로 및 소음/진동 등 건축환경 분야를 고려할 수 있는 효율적인 방안을 마련하고, 내진성능을 평가할 수 있도록 지속적인 연구가 필요하다.
- 비내력벽의 균열하자 등의 방지를 위하여 개발한 비내력벽 시스템은 철근콘크리트 벽식 아파트를 대상으로 개발하여 다양한 구조물에 개발 시스템을 적용하기에 한계가 있다. 따라서, 향후 지속적인 연구를 통하여 다양한 구조물의 비내력벽 형상 및 크기, 가해지는 하중, 위치, 시공방법 등에 따라 고려하여 적용할 수 있도록 비내력벽 시스템의 상황별 정량화 및 추가적인 시스템 개발 연구가 필요하다.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구개발성과의 활용방안

- 비내력벽 대체시스템의 내진설계/시공기술 solution개발은 향후 발생할 수 있는 지진재해에 대해 적극적이고 보다 진일보한 성능설계의 도입으로 설계와 시공기술의 영역을 확장할 수 있으며 보다 더 큰 건설시장을 개척할 수 있음
- 기존 기술의 문제점을 해결하고, 순수 국내 독자기술로 개발하며, 실험에 의한 데이터를 바탕으로 최적설계를 하여 내진성능을 확보를 하며 이를 통해 국내·외 유일 기술로서 기술수출의 발판을 마련
- 본 연구에서 개발되어진 수벽 및 날개벽 대체시스템의 데이터는 향후 설계기준의 기초자료로 활용 및 반영을 통하여 구조물의 안전성을 충분히 보장할 뿐 아니라 예상되는 지진재해에 대해서 예상치 못한 비구조재 부재들의 심각한 균열 및 탈락을 방지할 수 있는 내진설계 기준의 발전 및 보완이 가능할 것으로 예상됨
- 후에 본 기술의 확장을 통하여 아파트에 대한 비내력벽 요소 뿐만 아니라, 단독주택 및 다양한 용도의 구조물에서의 비내력벽 요소에 적용함으로써 건설산업 영역의 확장으로 새로운 건설시장 외연규모 확대의 부가가치 창조가 가능함



[그림 4.1] 연구개발성과의 활용 방안

나. 기대효과

(1) 기술적 측면

- 기존 RC벽체에 대한 내진설계기술이 집중되어 있는 상황에서 비내력벽의 손상제어 기술과 관련된 PC기술의 발전은 관련기술의 선진화가 가능하며, 국내의 새로운 건설시장의 창출 가능
- 지진과 같은 자연재해로 인한 비구조벽에 대한 하자균열을 방지함으로써 보수/보강비용을 획기적으로 저감
- 비내력벽에 대한 기술은 세계적으로 전무한 상황임. 본 연구개발을 통하여 비내력벽 부재의 내진성능 및 손상제어 확보 기술은 세계시장의 기술선점이 가능
- 내진성능 확보 관련하여 RC벽체에서 국내외적으로 전단벽에 대해서만 기술이 개발되고 있는 실정임에 따라 성능확보의 한계가 있음. 하지만 비내력벽에서도 내진성능을 확보를 통하여 기술의 선진화가 가능하며, 국내의 독자적인 기술 확보가 가능함

(2) 경제적 측면

- 아파트에서의 비내력벽(수벽 및 날개벽)의 내진성능 확보를 통하여 지진과 같은 자연재해로 인한 구조물의 손상 및 피해를 저감하고, 비구조체의 하자균열을 방지함으로써 보수·보강 비용을 획기적으로 저감할 수 있음
- 기존의 보강재로 제작하여 날개벽의 추가 설치를 통해 보강하는 공법과 달리 처음 시공 시부터 내진성능 확보가 된 수벽 및 날개벽이 도입됨으로서 후에 추가적인 보강 비용이 저감되며, 내진설계/시공 Solution으로 인하여 공사비의 증대를 방지할 수 있음
- 국내·외적으로 RC전단벽체에 대한 연구 및 개발은 많이 되었지만, 비내력벽(수벽 및 날개벽)에 대한 기술은 전무한 상황임. 따라서, 본 연구개발을 통하여 비내력벽 요소의 내진성능 확보 기술은 세계시장 독점이 가능함

(3) 사회적 측면

- 최근 경주 및 포항지진 발생에 의한 구조물의 피해로 인하여 내진설계를 강화 및 지원하려는 정부정책에 부합
- 최근 잦은 지진과 같은 자연재해 발생 및 구조물의 피해로 인하여 사회적으로 안전 불감증이 급증하고 있으며, 이러한 상황에서 시민들의 절반 이상이 거주하는 공동주택에 대한 내·외부적 지진에 저항함으로써 시민들의 삶의 질 및 국가적 이미지 제고 가능



[그림 4.2] 본 연구의 기술적 및 경제/사회적 측면 기대효과

붙임. 참고문헌

- [1] Lee, H.H., Chun, Y.S., Seo, S.Y., Lee, Y.T., Lee, L.H. (2004). Flexural Strengthening Capacity Evaluation of Damaged Walls Reinforced by Fiber Reinforced Polymer and Reinforcement. Journal of the architectural institute of Korea structure&construction, 20(8), pp.51~58
- [2] Lee, Y.G., Kim, S.H., Lee, K.Y., Yoon, S.J. (2013). The Flexural Strengthening Effect of I-Shape PFRP Member Using Carbon Fiber Sheet. J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc. Vol, 4(2), 1-7.
- [3] Lombard, J., Lau, D.T., Humar, J.L., Foo, S., Cheung, M.S. (2000). Seismic strengthening and repair of reinforced concrete shear walls. In Proc., 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- [4] Sugiyama, T., Uemura, M., Fukuyama, H., Nakano, K., Matsuzaki, Y. (2000). Experimental study on the performance of the RC frame infilled cast-in-place non-structural RC walls retrofitted by using carbon fiber sheets. In Proc., Twelfth World Conf. on Earthquake Engineering, Silverstream, New Zealand (No. 2153).
- [5] Koutas, L.N., Bournas, D.A. (2017). Flexural strengthening of two-way RC slabs with textile-reinforced mortar: experimental investigation and design equations. Journal of Composites for Construction, 21(1), 04016065.
- [6] Park, S.H. (2018). Seismic Performance of Reinforced Concrete Columns Retrofitted by Textile-Reinforced Mortar with Lap-spliced Fiber Meshes [master's thesis]. Soongsil University, Korea.
- [7] Bournas, D.A., Lontou, P.V., Papanicolaou, C.G., Triantafillou, T.C. (2007). Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus FRP Confinement in Reinforced Concrete Columns. ACI Structural Journal, 104(6), pp.740~748.
- [8] Tetta, Z. C., Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2015). Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams. Composites Part B: Engineering, 77, 338-348.
- [9] Escrig, C., Gil, L., Bernat-Maso, E., Puigvert, F. (2015). Experimental and analytical study of reinforced concrete beams shear strengthened with different types of textile-reinforced mortar. Construction and building materials, 83, pp.248~260.
- [10] Lefas, I.D., Kotsovos, M.D. (1990). Strength and deformation characteristics of reinforced concrete walls under load reversals. Structural Journal, 87(6), 716-726.
- [11] Antoniadis, K.K., Salonikios, T.N., & Kappos, A.J. (2003). Cyclic tests on seismically damaged reinforced concrete walls strengthened using fiber-reinforced polymer reinforcement. ACI Structural Journal, 100(4), 510-518.
- [12] Moon, K.Y. (2020). Experimental Performance Evaluation of Non-bearing wall System to Mitigate Earthquake Damage of Reinforced Concrete Wall Type Apartment [master's thesis]. Keimyung University, Korea.
- [13] Hwang, E.H., Hwang, T.S., and Ohama, Y. (1994). The Strength and Durability of Polymer-Cement Mortars. Journal of the Korean Industrial and Engineering Chemistry, pp.786~794.
- [14] Jo, Y.K. (2019). A Study on the Improvement of Adhesion in Tension and Flexure of

- Polymer Cement Mortar Depending on Various Test Methods. Journal of the Korea Institute of Building Construction, 19(1), pp.47~57.
- [15] KDS 14 20 52. (2016). Design specifications of developments and lap splices in concrete structures. Korean Design Standards, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- [16] KBC2016, 한국건축구조기준, (한국 국토교통부, 2016)
- [17] 공동주택 성능기반 내진설계 기준, (대한건축학회, 2019)
- [18] 건축물 내진설계기준 및 해석, (대한건축학회, 2019)
- [19] 전성하, 박지훈, Seismic Fragility of Ordinary Reinforced Concrete Shear Walls with Coupling Beams Designed Using a Performance-Based Procedure, Dec 2020
- [20] 김윤곤, 휨강도와 전단강도의 확률분포를 고려한 연결보의 성능기반설계, 2019
- [21] Damir Vidovic 'EFFECTIVE STIFFNESS FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF BUILDINGS IN EARTHQUAKE
- [22] 윤성준, 이기학, 천영수, 김태완, “특수 및 준특수 상재에 따른 철근콘크리트 전단벽의 비선형 내진거동 해석”, 한국지진공학회 논문집, 제17권 제1호(통권 제89호), 2013
- [23] Computers and Structures, Inc, “PERFORM Components and Elements for PERFORM 3D and PERFORM-Collapse ver 4”, CSI, Berkerly, CA, 2006
- [24] 윤성준, 이기학, “붕괴성능 평가를 통한 철근콘크리트 특수 및 준특수 전단벽의 내진성능평가”, 세종대학교, 2012
- [25] MIDAS GEN Users Manual. ver 785. MIDAS IT; c2010.
- [26] 유창환, 김태완, “소규모 철근콘크리트 건축물을 위한 비선형해석 프로그램 비교 I”, 한국지진공학회 논문집, 제19권 5호(통권 제105호), 2015
- [27] CSI. Perform-3D, Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures, user guide version 4. Berkeley, CA: Computers and Structures Inc.; c2006. 336p.
- [28] 박경훈, 김태진, “기존건축물의 내진성능평가를 위한 비선형 S/W 실무적용성 검증”, 한국구조물진단유지관리공학회 봄 학술발표회 논문집, 제20권 1호(통권 37권) 301p-302p, 2016
- [29] 송민아, 이시철, 이기학, “구조물 내진보강법에 따른 저층 건축물의 내진성능평가”, 한국지진공학회 논문집, 경주 지진 특집호 논문, 20권 7호(통권 제113호), 2016
- [30] 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령 및 향상요령, 국토해양부 한국시설안전공단, 2011

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.