

18CTAP-
C132889
-02

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 18CTAP-C132889-02

자가복원력을 가진
내진보강시스템 개발
고효율 저비용
최종보고서

2018

국토교통과학기술진흥원

자가복원력을 가진 고효율 저비용 내진보강시스템 개발 최종보고서

2018.12.31.

주관연구기관 / 성균관대학교
협동연구기관 / (주)유경시스템

국토교통부
(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 (국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘자가복원력을 가진 고효율 저비용 내진보강시스템 개발’(연구개발 기간 : 2017. 6. 30 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 1. 31.

주관연구기관명 : 성균관대학교 산학협력단 (추현승)
협동연구기관명 : (주)유경시스템 (이영제)



주관연구기관책임자: 김 진 구
협동연구기관책임자: 황 성 호

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C132889-02	해당 단계 연구 기간	2018.01.01 ~ 2018.12.31	단계구분	2차년도 / 2년
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	자가복원력을 가진 고효율 저비용 내진보강시스템 개발			
	세부과제명	자가복원력을 가진 고효율 저비용 내진보강시스템 개발			
연구책임자	김진구	해당단계 참여 연구원 수	총: 8 명 내부: 8 명 외부: 0 명	해당단계 연구개발비	정부: 182,000천원 기업: 74,333천원 정부 외: 0천원 계: 256,333천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 9 명 내부: 9 명 외부: 0 명	총 연구개발비	정부: 370,000천원 기업: 137,000천원 정부 외: 0천원 계: 507,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	성균관대학교 산학협력단			참여기업명 : (주)유경시스템	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

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											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

보고서 면수

1. 강선과 점성댐퍼를 이용한 보강기법 개발

- 자가복원력을 이용한 내진보강시스템 사례연구
- 외부 스프링이 설치된 점성댐퍼 형상개발
- spring-viscous damper 성능실험
- 텐션과 연결된 스프링-점성댐퍼시스템 해석모델 개발
- cable-damper system의 진동대실험을 통한 성능검증
- 예제건물 해석을 통한 실무 적용성 분석
- Life cycle cost 평가를 통한 개발된 보강기법의 경제성 평가

2. 긴장력이 가해진 PC 골조를 이용한 내진보강기법 개발

- 자가복원력을 이용한 내진보강시스템 사례연구
- prestress의 크기, tendon의 굽기 및 개수에 따른 외부 골조의 강성/강도 평가식 개발
- PS PC 골조를 이용한 내진보강 성능설계기법 개발
- PS PC 골조를 이용한 내진보강 골조실험을 통한 성능평가
- PC 골조 설치용 모서리 마찰댐퍼 성능실험
- 모서리 마찰댐퍼가 설치된 PS PC 해석모델 개발
- 모서리 마찰댐퍼가 설치된 PS PC 골조실험을 통한 성능평가
- 예제건물 해석을 통한 실무 적용성 분석

요약문

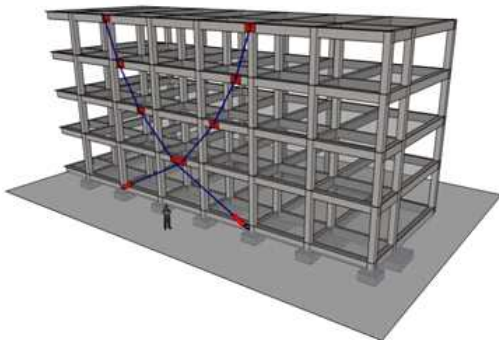
연구의 목적 및 내용	1. 강선과 점성댐퍼를 이용한 보강기법 개발 • 자가복원력을 이용한 내진보강시스템 사례연구 • 외부 스프링이 설치된 점성댐퍼 형상개발 • spring-viscous damper 성능실험 • 텐던과 연결된 스프링-점성댐퍼시스템 해석모델 개발 • cable-damper system의 진동대실험을 통한 성능검증 • 예제건물 해석을 통한 실무 적용성 분석 • Life cycle cost 평가를 통한 개발된 보강기법의 경제성 평가 2. Prestress PC 골조를 이용한 내진보강기법 개발 • 자가복원력을 이용한 내진보강시스템 사례연구 • prestress의 크기, tendon의 굵기 및 개수에 따른 외부 골조의 강성/강도 평가식 개발 • PS PC 골조를 이용한 내진보강 성능설계기법 개발 • PS PC 골조를 이용한 내진보강 골조실험을 통한 성능평가 • PC 골조 설치용 모서리 마찰댐퍼 성능실험 • 모서리 마찰댐퍼가 설치된 PS PC 해석모델 개발 • 모서리 마찰댐퍼가 설치된 PS PC 골조실험을 통한 성능평가 • 예제건물 해석을 통한 실무 적용성 분석				
연구개발성과	■ 논문 • Life-cycle cost evaluation of steel structures retrofitted with steel slit damper and shape memory alloy-based hybrid damper, <i>Advances in Struc.Eng.</i>(2019) 22(1): 3-16 • Optimal distribution of steel plate slit dampers for seismic retrofit of structures, <i>Steel and Composite Structures</i>, Vol. 27, No. 5 (2018) 633-646 • Seismic Performance Evaluation of Steel Diagrid Buildings, <i>International Journal of Steel Structures</i> (2018) 18(3):1035-1047 • Seismic Retrofit of a Framed Structure Using Damped Cable Systems, <i>Steel and Composite Structures</i> (2018) 29(3): 287-299 • Seismic performance evaluation of a spring viscous damper cable system, <i>Engineering structures</i> (2018) 176: 455-467 • Development of box-shaped steel slit dampers for seismic retrofit of building structures, <i>Engineering Structures</i> (2017), Vol. 150, 934-946 • Optimal distribution of steel plate slit dampers for seismic retrofit of structures, <i>Steel and Composite Structures</i> (2017) 25(4): 473-484 ■ 특허 • 출원번호 10-2018-0048732 : 구조물용 내진보강장치 • 출원번호 10-2018-0048731: 구조물용 진동저감장치 • 출원번호 10-2018-0122079 : 슬롯형 모서리 마찰댐퍼 • 출원번호 10-2017-0183616 : 내진용 유체댐퍼 • 출원번호 10-2017-0112866 : 내진보강장치 ■ 프로그램 • 등록번호 C-2017-032219 : 내진보강장치의 최적 설치위치 선정 프로그램				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 저비용 보강기법 적용으로 건축물 내진율의 신속한 향상 • 내진보강기술의 국산화 촉진 • 내진보강 비용절감 • 자연재해에 대한 구조물 안전성 향상 • 내진보강기법의 신뢰성 향상				
국문핵심어 (5개 이내)	내진보강	자가복원력	감쇠장치	성능설계	내진성능
영문핵심어 (5개 이내)	seismic retrofit	self centering	dampers	performance design	seismic performance

< 목 차 >

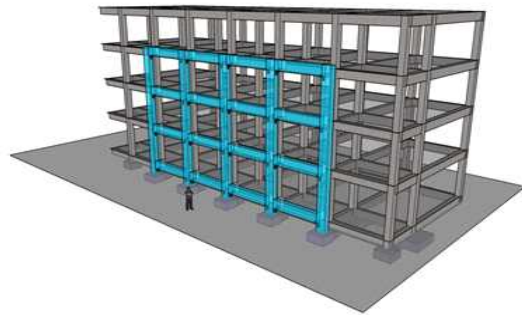
1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구 수행 내용 및 성과	3
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	36
4. 연구개발성과의 활용 계획	38
붙임. 참고 문헌	40

1. 연구개발과제의 개요

- 본 연구에서는 에너지소산 성능과 자가복원력을 결합함으로써 내진보강에 소요되는 공사비 저감이 가능한 내진보강장치의 개발을 목표로 함.
 - 초기 장력이 가해진 강선과 댐퍼를 이용한 내진보강장치
 - 초기 장력이 가해진 PC 골조를 이용한 내진보강장치
 - 개발된 보강장치의 해석모델 개발
 - 개발된 보강장치의 최적화기법 개발
 - 실용적인 생애주기비용 산정기법개발을 통한 보강장치의 경제성 평가
 - 성능표준화 및 설계매뉴얼 개발
 - 접합상세 및 시공매뉴얼 개발
- 1차년도 연구에서는 긴장력이 가해진 강선을 건물의 외부에 교차 설치하여 횡변위가 발생할 때 긴장력의 작용으로 복원력이 발생하여 지진응답을 저감할 수 있는 효과적인 내진보강기법의 설계/시공기법을 개발함.



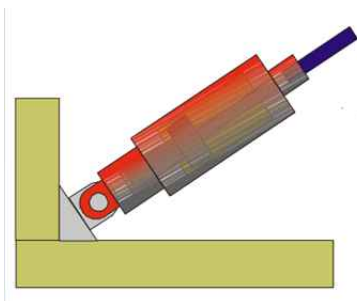
(a) 초기 긴장력이 가해진 강선 보강



(b) 초기 긴장력이 가해진 PC 보강

그림 1.1 긴장력을 이용한 보강 시스템

- 2차년도에는 긴장력이 가해진 PC 골조를 건물의 외부에 접합하여 내진성능을 향상할 수 있는 보강방법에 대한 설계/시공기법을 개발하고, PC 보-기둥 접합부에 설치하여 보강효과를 극대화할 수 있는 감쇠장치를 개발함.



(a) 강선에 댐퍼를 연결



(b) 접합부 댐퍼 설치

그림 1.2 댐퍼를 이용한 보강 시스템

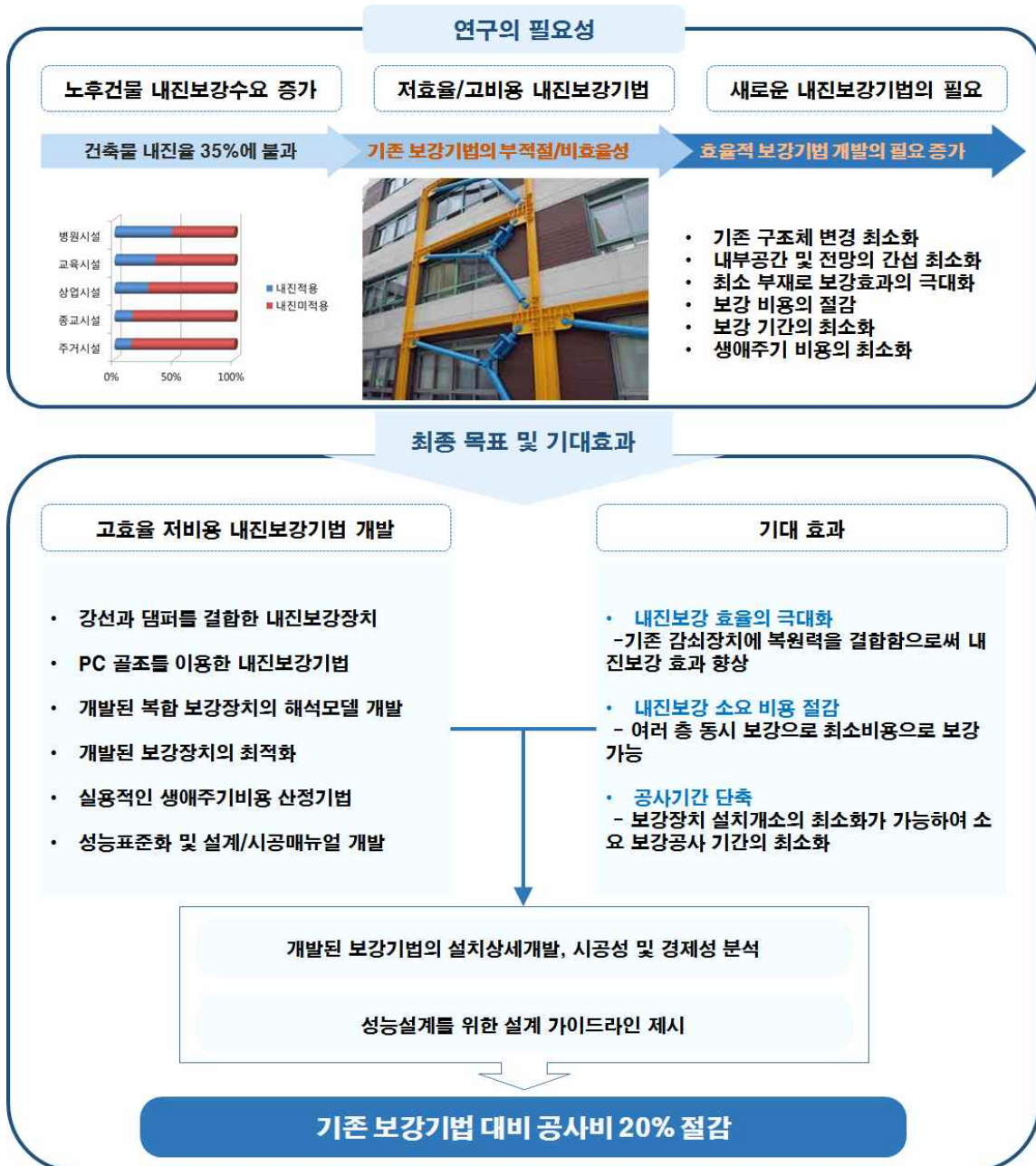


그림 1.3 연구의 필요성 요약

2. 연구 수행 내용 및 성과

2.1 초기 장력이 가해진 강성과 댐퍼를 이용한 내진보강기법 개발

(1) 기술의 개요

- 제안된 기술은 고강도 강선을 이용하여 내부에 스프링이 장착된 점성댐퍼에 초기장력을 가함으로써 점성댐퍼의 에너지소산기능과 강선을 이용한 강성 (stiffness)과 자가복귀 (self centering) 기능을 동시에 부가할 수 있는 효율적인 내진보강기술이다 (그림 2.1). 90년대 미국 SUNY Buffalo대학에서 제안되었으나 실용화 되지 않은 상태이다.

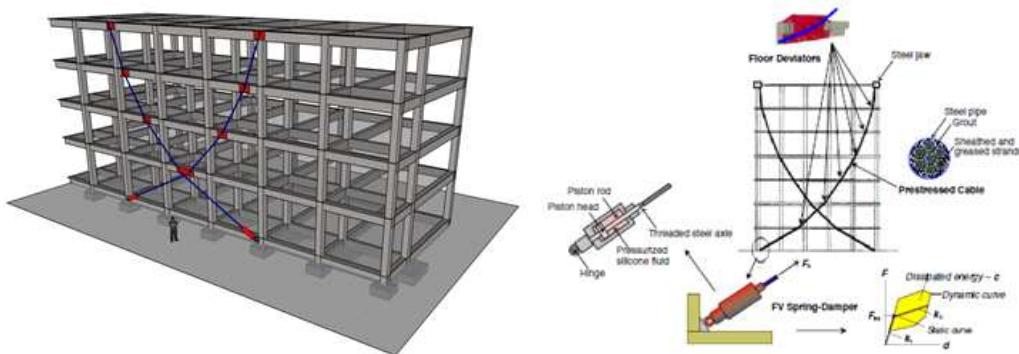


그림 2.1 강선과 댐퍼를 이용한 내진보강기법

- 점성댐퍼가 작동한 후 발생한 변위는 지진이 끝난 후 댐퍼 내부 스프링의 작용으로 원 상태로 복귀할 수 있는 복원력이 발생한다. 강재댐퍼, 마찰댐퍼, 강성보강 등 기존의 보강기법은 국부적 보강기법이며, 결과적으로 많은 수의 댐퍼 개수가 필요하지만, 제안된 시스템은 건물의 전체 높이에 설치되는 광범위한 보강기법이므로, 보강 효율이 높아 장치의 개수를 줄일 수 있다.

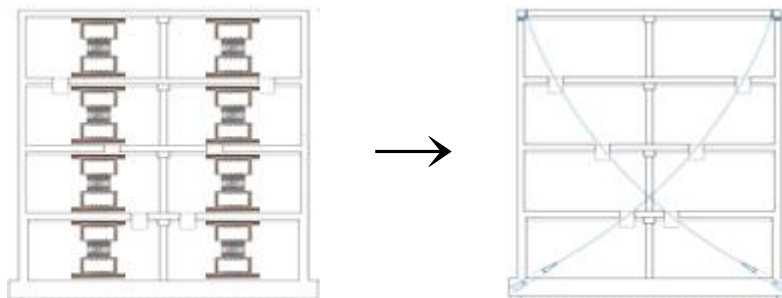


그림 2.2 제안된 보강기법의 효율성

- 자가복귀 (self centering) 기능으로 건물을 원 상태로 복귀하는 것이 가능하여 지진이 발생한 후 보수 비용이 절감되어, 생애주기비용 (Life Cycle Cost) 측면에서 장점이 있다.
- 강선을 이용하므로 철골 가새보강에 비하여 시야를 가리는 단점이 적으며, 건물의 외부에 설치되므로 내부 구조의 변경이 필요 없는 장점이 있다.
- 층간 변위에 비례하여 변형이 발생하고 에너지를 소산하는 기존의 댐퍼에 비하여 제안된 기법은 최대변위에 해당하는 변위가 댐퍼에 발생하기 때문에 에너지소산 효율이 높다. 또한 결과적으로 동일한 성능목표를 만족하기 위하여 기존의 보강시스템 보다 적은 수의 댐퍼가 필요하므로, 공사비 및 공기를 절감할 수 있다.

(2) 해석모델 및 설계절차

- 개발된 시스템의 해석모델은 viscous damper를 나타내는 dashpot과 prestressed cable을 나타내는 multi-linear spring, 댐퍼의 거동 범위를 규정하는 Gap, Hook 요소를 병렬로 결합하여 표현 가능하다.
- 개발된 해석모델은 실험 결과 얻어진 이력곡선을 비교적 정확하게 표현하는 것으로 나타나 SAP 2000, MIDAS 등 범용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 제안된 보강시스템의 해석이 가능하다 (그림 2.30).

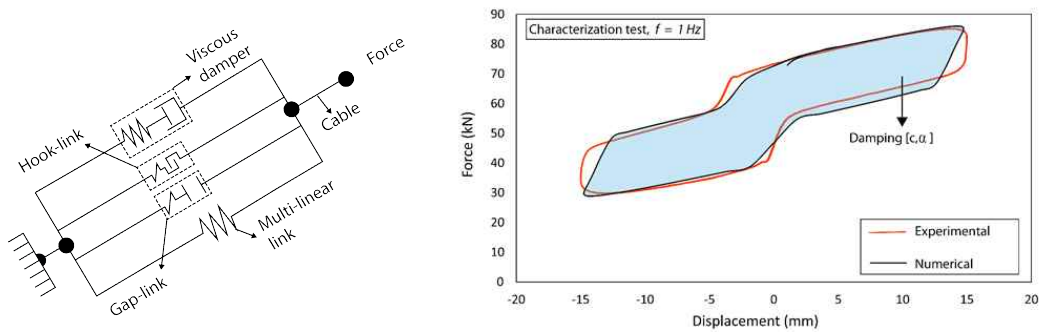


그림 2.30 제안된 보강기법의 해석모델링

- 개발된 보강시스템은 케이블에 의한 강성과 댐퍼에 의한 감쇠력을 이용하여 구조물의 내진 성능을 향상하며, 일반적으로 감쇠의 영향 보다는 추가되는 강성의 영향이 더 크다. 따라서 내진보강을 위하여 필요한 강성을 구하고, 그 값을 이용하여 보강시스템을 설계하는 것이 일반적인 설계방법이다.
- 다음과 같은 ADRS format에서 보강 전 구조물의 보유 성능 및 성능점을 확인하고, 목표 성능 (line 1)을 만족하기 위하여 필요한 보강시스템의 강성 을 구할 수 있다 (line 2)

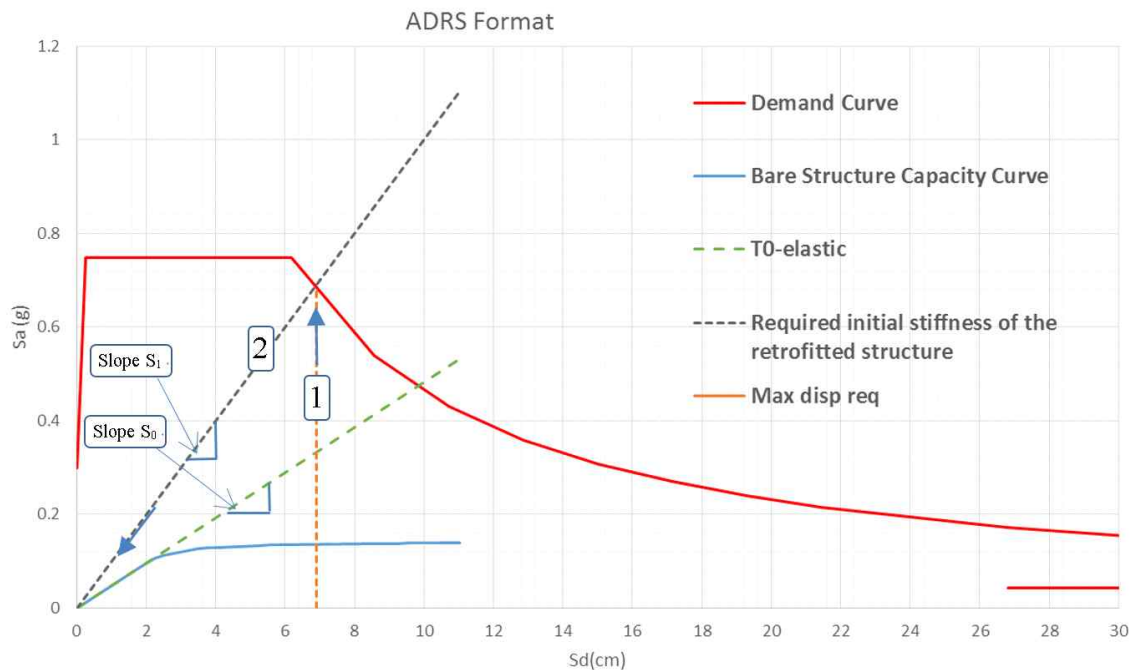


그림 2.31 ADRS format에서 필요한 PC 강성의 결정

- 제안된 내진보강 시스템에 필요한 강성의 수평성분을 $K_{dc}^{t,h}$ 라 하고, 직렬로 연결된 스프링/댐퍼와 강선의 강성을 각각 $K_2^{t,h}$, $K_c^{t,h}$ 라 한다면, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{1}{K_2^{t,h}} + \frac{1}{K_c^{t,h}} = \frac{1}{K_{dc}^{t,h}}$$

- 댐퍼와 강선의 강성비를 가정하고 (1/3~1/5) 윗 식을 이용하여 강선의 단면적, 댐퍼의 스프링강성 등 필요한 설계변수를 결정할 수 있다. 강선의 강성을 댐퍼의 3배로 가정할 경우 강선의 강성을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_c^{t,h} = 4K_{dc}^{t,h}$$

- 이 때 강선의 축강성 및 단면적은 다음과 같이 구할 수 있다. 여기서 L_o 는 강선의 길이, γ 는 강선의 각도이다.

$$K_c^t = 4K_{dc}^{t,h} \frac{1}{L_o} \sum_i \frac{L_{oi}}{\cos \gamma_i} \quad A_c^t = \frac{K_c^t L_o}{E_s}$$

(3) 스프링이 설치된 점성댐퍼 개발 및 성능실험

- 제안된 내진보강 시스템에 적용하기 위하여 외부에 스프링이 설치된 점성댐퍼를 제작하고 (그림 2.4) 성능실험을 수행하였다.

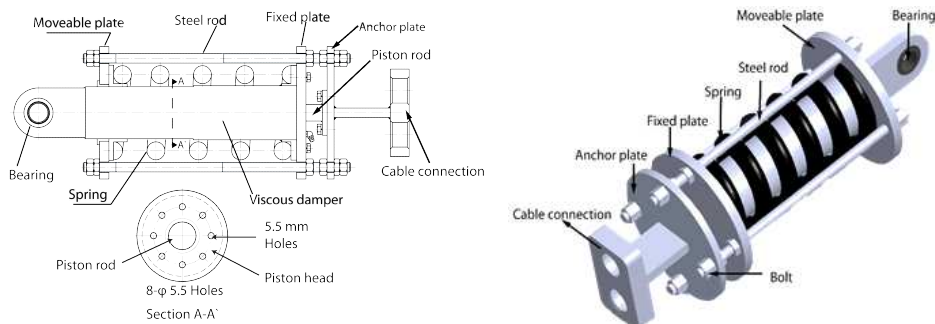


그림 2.4 본 연구에서 개발된 외부 스프링이 설치된 점성댐퍼

- 개발된 댐퍼는 젤(gel) 형태의 실리콘 유체가 채워진 내부에 피스톤 헤드, 피스톤 Rod로 구성된 강재 실린더와 외부 압축스프링으로 구성되어 있다 (그림 2.4).
- 실린더 외부 압축스프링은 초기 긴장력이 가해진 케이블과 연결하여 점성댐퍼에 복원력을 추가하는 역할을 한다.
- 성능실험에 적용된 댐퍼는 최대 변위 ± 50 mm, 강성 1.2 kN/mm을 가지도록 제작하였으며, 60 kN의 초기 장력을 가하였다.
- 그림 2.5는 외부 스프링이 설치된 점성댐퍼 실험체 형상 및 실험 setup을 나타낸다. 개발된 댐퍼의 성능실험은 한국기계연구원에서 수행하였다.



그림 2.5 Test setup

- 그림 2.6과 표 2.1은 댐퍼의 강성을 구하기 위하여 정적실험을 수행한 결과를 나타내며, 압축과 인장 영역의 강성이 다소 다르게 나타난 것을 알 수 있다.

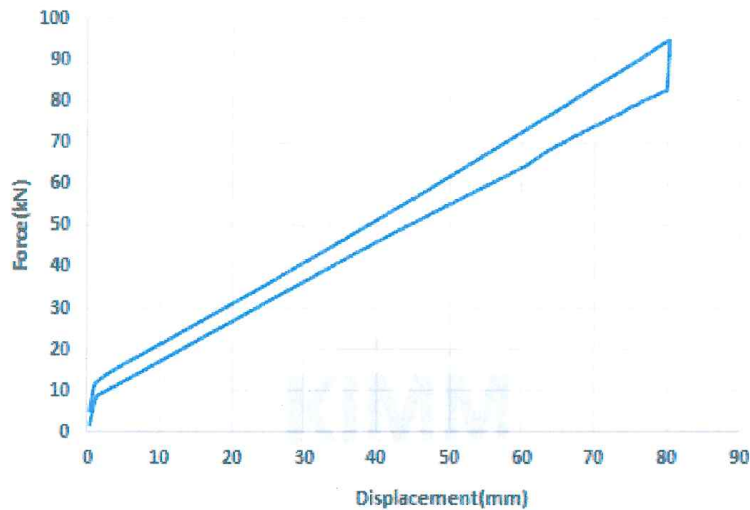


그림 2.6 정적실험 결과

표 2.1 정적실험 결과

Unit : [N/mm]

Specimen	Seismic Damper	
Spring constant K	Compression	1028.01
	Tension	937.72

- 점성댐퍼의 감쇠계수 및 속도 지수 (velocity exponent)를 구하기 위한 동적실험은 세 단계의 진동수와 6 단계의 변위로 수행하였다. 자가복원력이 발생할 수 있도록 스프링이 50 mm 압축된 상태를 원점으로 실험을 수행하였다.

표 2.2 동적실험에 적용된 frequency 및 변위

Frequency [Hz]	Displacement [mm]					
0.5	± 2.5	± 5.0	± 7.5	± 10.0	± 12.5	± 15.0
1.0	± 5.0	± 10.0	± 15.0	± 20.0	± 25.0	—
2.5	± 2.5	± 5.0	± 7.5	± 10.0	± 12.5	± 15.0

* Excitation velocity : less than 150mm/sec

- 그림 2.7은 1 Hz 및 2.5 Hz의 진동수 및 다양한 변위로 수행된 동적실험 결과로 얻어진 하중-변위 이력곡선을 나타낸다. 스프링에 가해진 초기변위의 영향으로 self-centering system의 특징인 Flag type 이력곡선을 보이는 것으로 나타났다. 그림 2.8은 가력속도에 따른 감쇠력의 변화를 나타내며, 속도가 증가할수록 감쇠력 증가 비율은 작아지는 것을 알 수 있다.

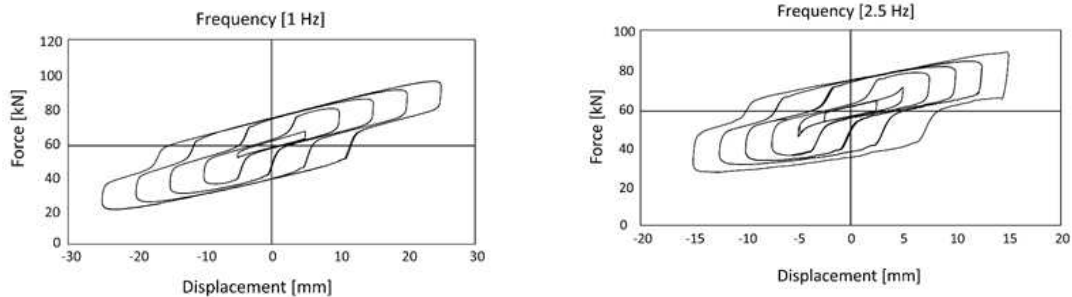


그림 2.7 동적실험에 따른 이력곡선

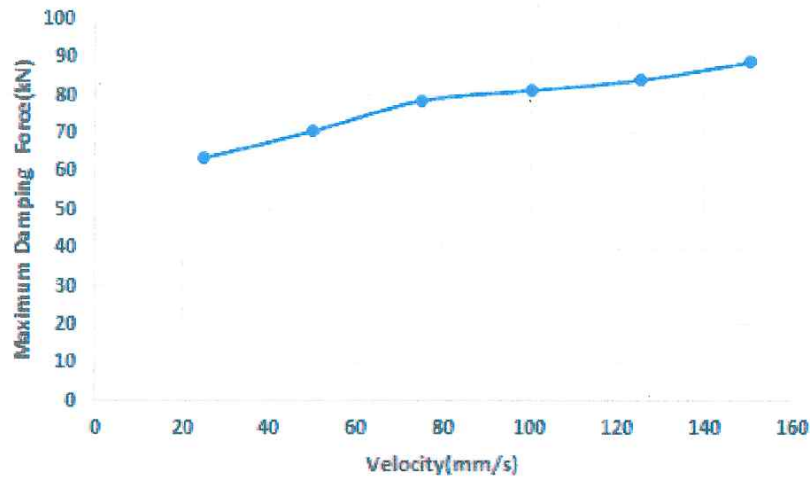
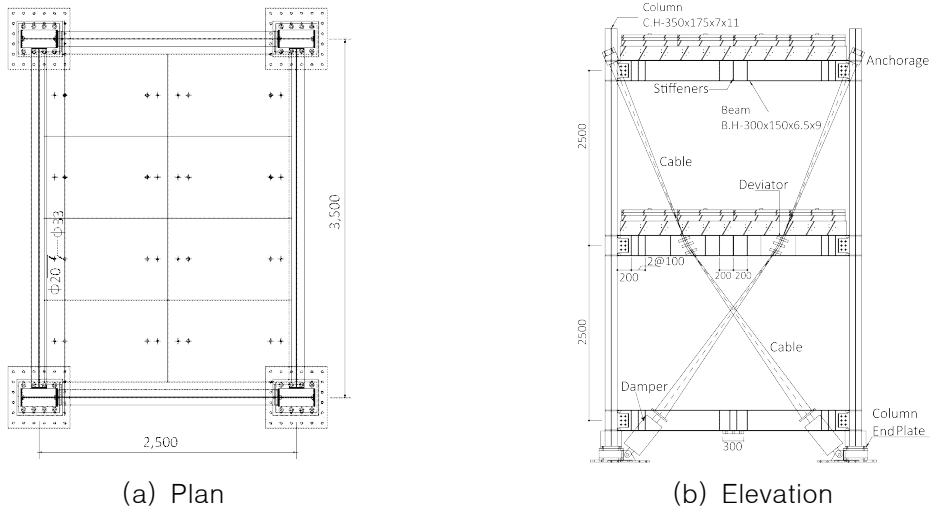


그림 2.8 가력속도에 따른 감쇠력의 변화 (2.5 Hz)

(4) 진동대 실험을 통한 성능검증

- 개발된 시스템의 성능을 검증하기 위하여 2쌍의 cable-damper 시스템을 2층 철골 프레임 양면에 설치하고 진동대실험을 시행하였다. 실험은 부산대학교 지진방재센터의 3자유도 진동대를 이용하여 수행하였다. 그림 2.9는 실험체의 평면 및 입면 형상을 나타낸다.



(a) Plan

(b) Elevation

그림 2.9 Detailed drawing of the test structure

- 댐퍼의 한쪽은 1층 바닥에 고정하고, 반대쪽은 케이블에 연결하였으며, 실험체에 자가복원 능력을 부가하기 위하여 케이블에 60 kN의 초기장력을 가하고 실험을 수행하였다. 케이블이 2층 바닥 슬래브와 만나는 지점에는 deviator를 설치하여 케이블 장력의 수평성분이 2층 바닥 슬래브의 거동을 효과적으로 제어할 수 있도록 설계하였다 (그림 2.10).



(a) Spring viscous damper



(b) Deviator

그림 2.10 SVDC system installation details



그림 2.11 실험체 형상 및 계측기 설치 위치

- 지반진동은 모델의 동적특성을 파악하기 위한 두 개의 white noise 신호와 서울지역의 DBE (Design Basis Earthq.) 및 MCE (Maximum Considered Earthq.)에 보정된 5개의 지반진동을 사용하여 수행하였다. 그림 2.12는 사용된 지진의 응답스펙트럼과 설계스펙트럼을 나타낸 것이다.

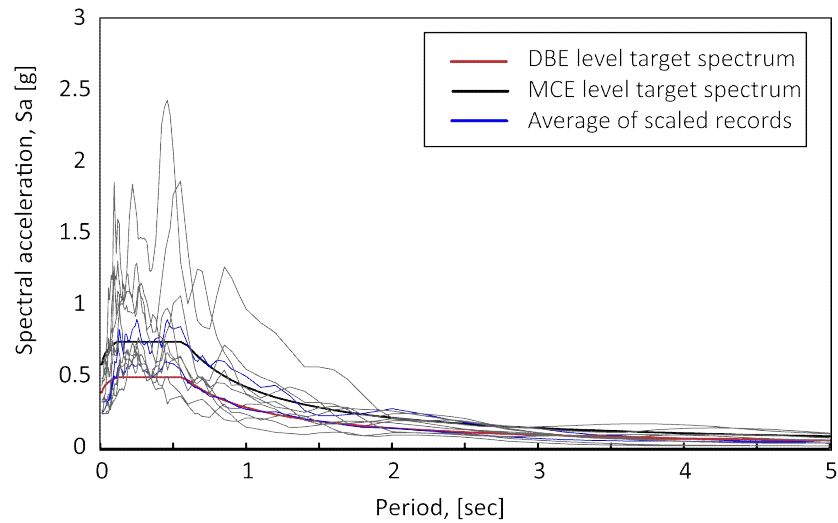


그림 2.12 Response spectra of the selected ground motions and the target spectra

- 그림 2.13은 보강시스템 설치 전후의 white noise 실험 결과를 나타내며, 보강 후 고유진동수가 2.9 Hz에서 4.6 Hz로 증가하는 것을 알 수 있다.

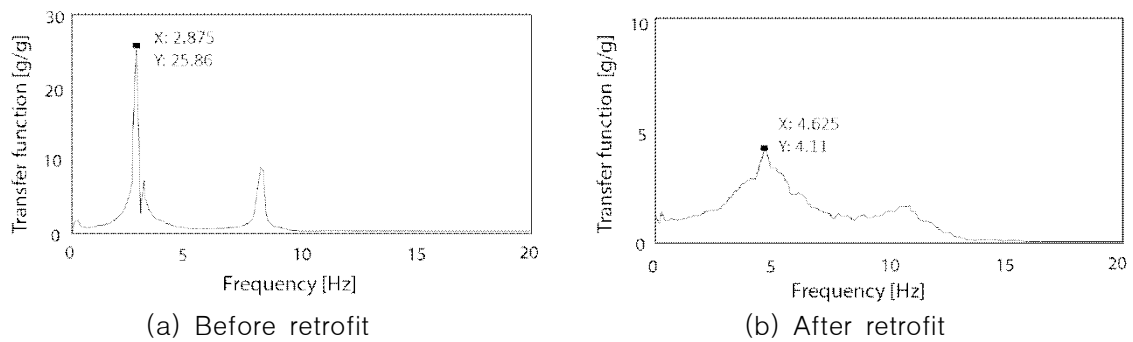
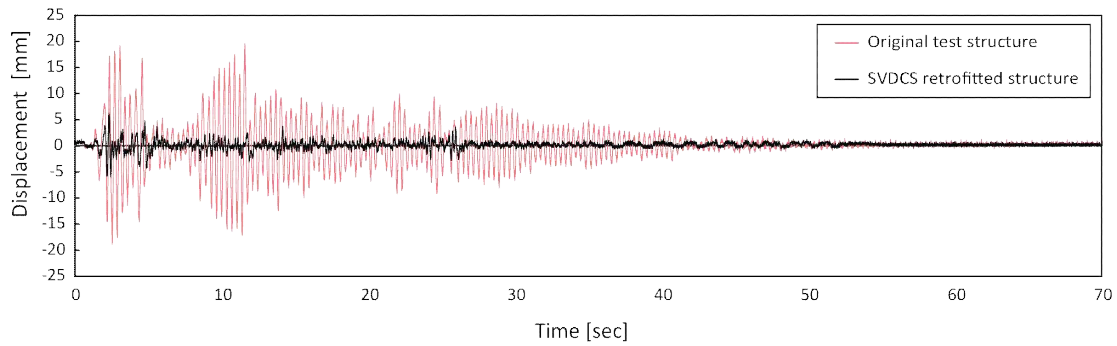
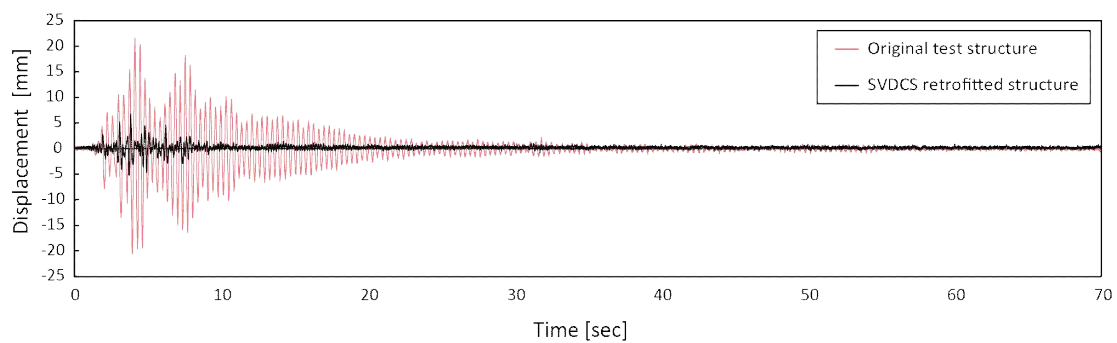


그림 2.13 Transfer functions of the test model before and after seismic retrofit

- 그림 2.14는 MCE 수준의 El Centro (1940) 및 San Fernando 지진에 대한 보강 전후 지붕층 변위 시간이력을 비교한 것으로, 보강 후 최대변위가 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다.



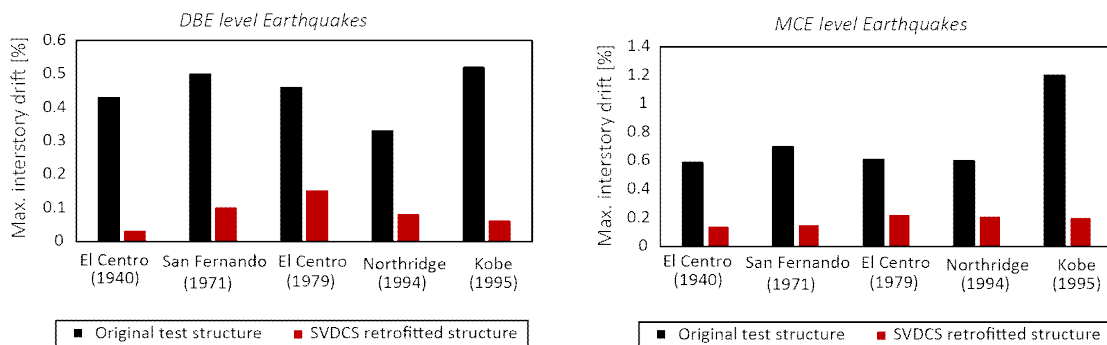
(a) El Centro earthquake (1940)



(b) San Fernando earthquake (1971)

그림 2.14 보강 전후 지붕층 변위 시간이력

- 그림 2.15는 5개 지진에 대한 보강 전후 최대 층간변위를 비교한 것으로, 보강 후 모든 지진에 대하여 최대 층간변위가 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) DBE level earthquakes

(b) MCE level earthquakes

그림 2.15 보강 전후 최대 층간변위를 비교

- 그림 2.16은 DBE 수준의 El Centro (1979) 지진에 대한 보강 전 실험체의 지붕층 변위 시간이력의 진동대 실험 결과와 SAP 2000 해석결과를 비교한 것으로, 해석 모델이 실험 결과를 비교적 근접하게 모사하는 것을 알 수 있다.

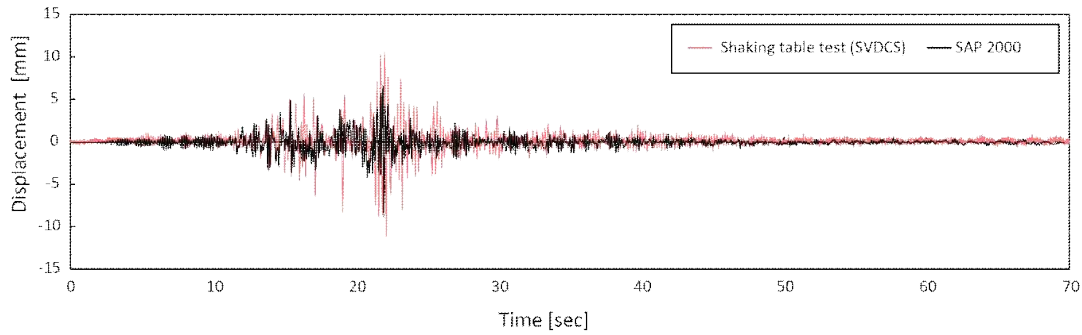
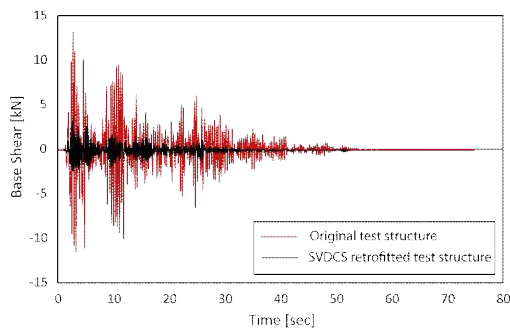
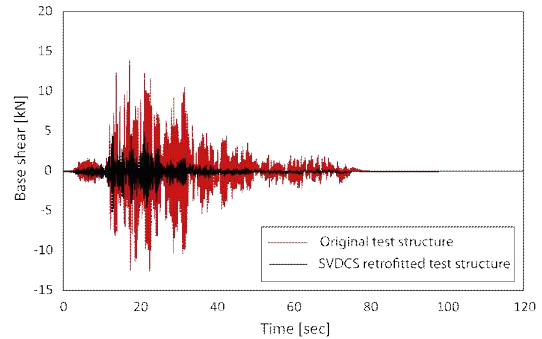


그림 2.16 지붕층 변위 시간이력의 진동대 실험 결과와 SAP 2000 해석결과의 비교

- 그림 2.17은 보강 전후 기둥의 전단력 및 축력의 시간이력을 나타낸 것으로, 기둥의 전단력은 큰 폭으로 감소하나 축력은 소폭 감소하는 것으로 나타났다.



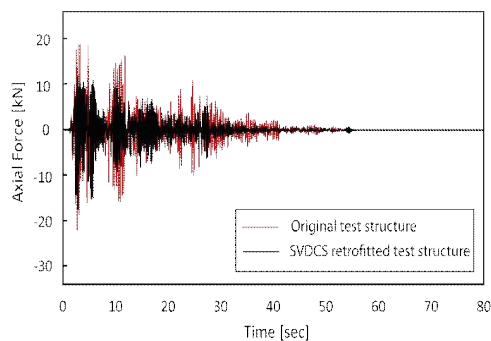
(a) El Centro (1940)



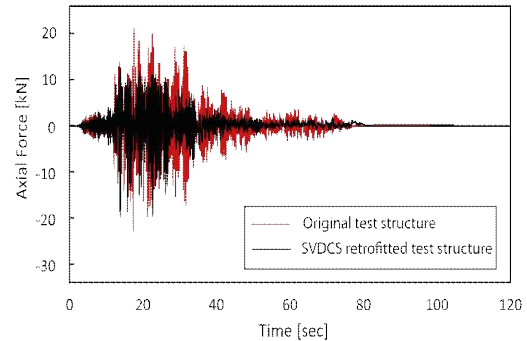
(b) El Centro (1979)

그림 2.17 Time history of the column shear force of the test structure without and with the retrofit

- 그림 2.18은 MCE 수준의 Kobe 지진에 대한 보강 전후 실험체의 에너지 시간이력을 나타낸 것으로, 보강 후 댐퍼가 큰 에너지 소산량을 보이는 것으로 나타나 댐퍼의 에너지 소산 효과를 입증한다.

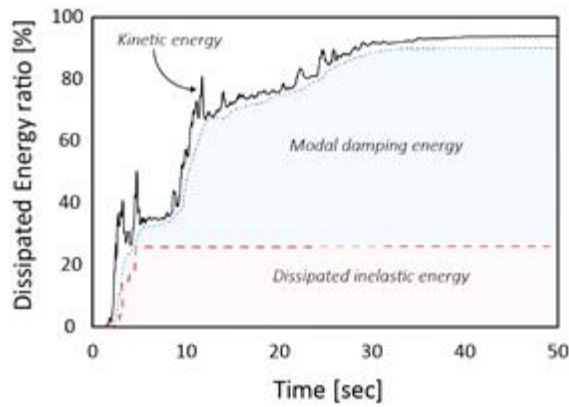


(a) El Centro (1940)

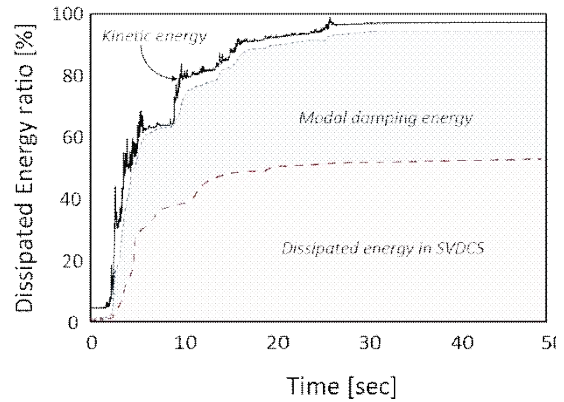


(b) El Centro (1979)

그림 2.18 Time history of the column axial force of the test structure without and with SVDCS



(a) Original test structure



(b) Retrofitted structure

그림 2.19 Dissipated energy time history for Kobe earthquake

(5) 예제모델 해석을 통한 실무적용 타당성 분석

- 개발된 시스템을 그림 2.20과 같은 4층 편복도식 골조건물의 장변방향으로 한 면에 두 set 설치하고 비선형 동적해석을 통하여 내진성능을 평가하였다. 해석모델의 부재 크기 및 배근상세는 다음 표와 같고, 비선형 동적해석을 위하여 7개 지진기록을 국내 MCE 스펙트럼에 스케일링하여 적용하였다.

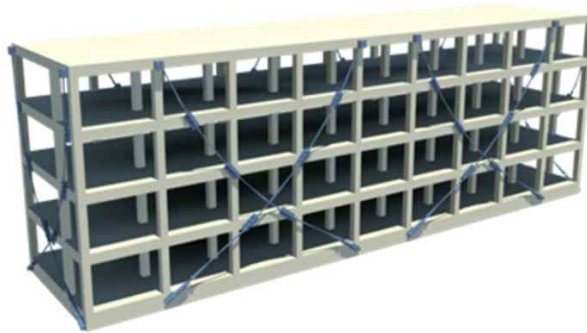


그림 2.20 4층 9경간 해석모델

표 2.3 해석모델의 부재 크기 및 배근 상세

(a) Beams				
Designation	Dimensions(mm)	Longitudinal Reinforcement		Transverse
		Top	Bottom	
B1	550 x 250	3 D19	3 D19	D10, 2legs@200mm
B2	500 x 350	6 D19	6 D19	D10, 2legs@200mm
B3	500 x 350	4 D19	4 D19	D10, 2legs@200mm

(b) Columns			
Designation	Dimensions(mm)	Longitudinal Reinforcement	Transverse
C1	450 x 450	8 D19	D10, 2legs@200mm
C2	400 x 425	8 D19	D10, 2legs@200mm

- 장변방향으로 해석모델의 강성이 비대칭이므로 강성이 작은 위치에는 단면적이 $A_c=2700 \text{ mm}^2$ 인 케이블을 설치하고, 강성이 큰 위치에는 단면적 $A_c=2400 \text{ mm}^2$ 인 케이블을 설치하였다. 복원력을 발생시키기 위한 케이블의 초기 장력은 300 kN 이다.
- 개발된 댐퍼-케이블 시스템과 비교하기 위하여 $c=290 \text{ kN (s/m)}\alpha$ 의 점성댐퍼를 다음 그림과 같이 한 면에 12개씩 설치하고 내진성능을 비교하였다.

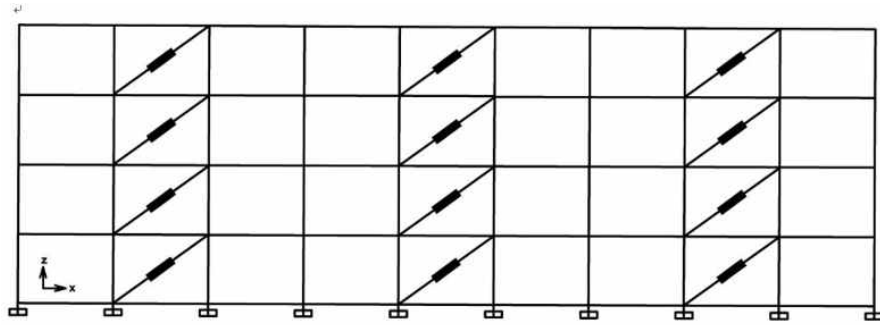
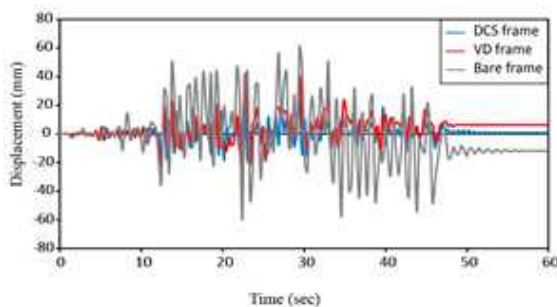
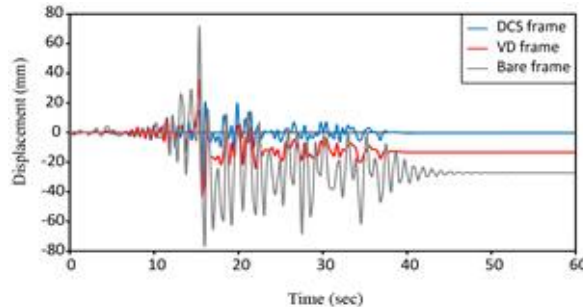


그림 2.21 점성댐퍼 설치형상

- 보강 전 예제모델 (Bare frame)과 Damper-Cable System (DCS) 및 Viscous Damper (VD)로 보강된 모델의 비선형 시간이력 해석을 통하여 최상층 변위의 시간이력을 구하고 다음 그림에 나타내었다. 보강 후 변위가 전반적으로 감소하는 것을 알 수 있고, 지진이 끝난 후 댐퍼-케이블 시스템으로 보강한 경우에는 잔류변위가 발생하지 않는 것으로 나타났다.



(a) Imperial Valley



(b) Taiwan smart

그림 2.22 해석모델의 보강 전후 지붕층 변위의 시간이력

- 다음 그림은 보강 전후 최대층간변위의 평균값을 나타낸 것으로, 두 보강방법 모두 보강 후 층간변위가 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

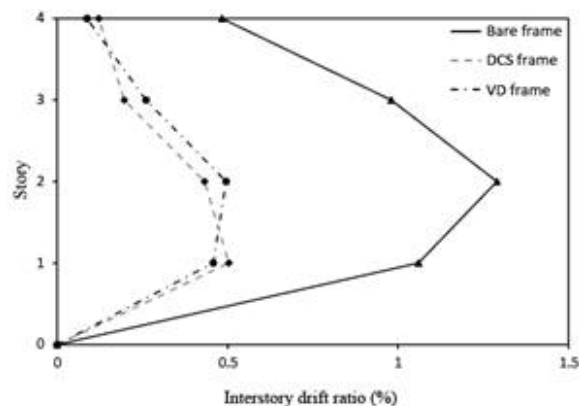


그림 2.23 해석모델의 보강 전후 최대 층간변위

- 다음 그림은 보강 전후 7개 지진에 대한 잔류변위의 평균값을 나타낸 것으로, 제안된 보강 방법으로 보강된 모델의 잔류변위가 가장 많이 감소하는 것으로 나타났다.

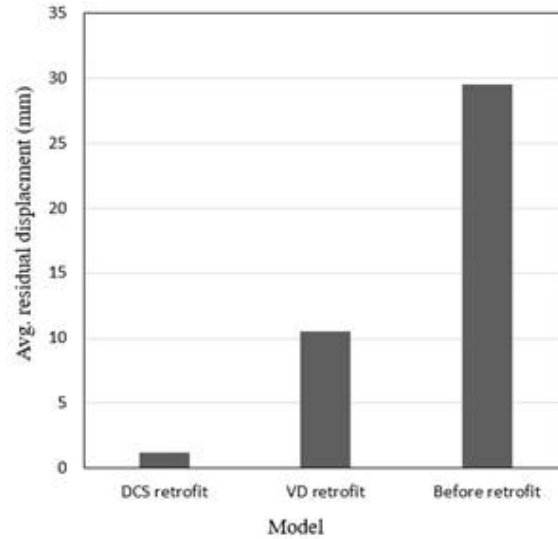
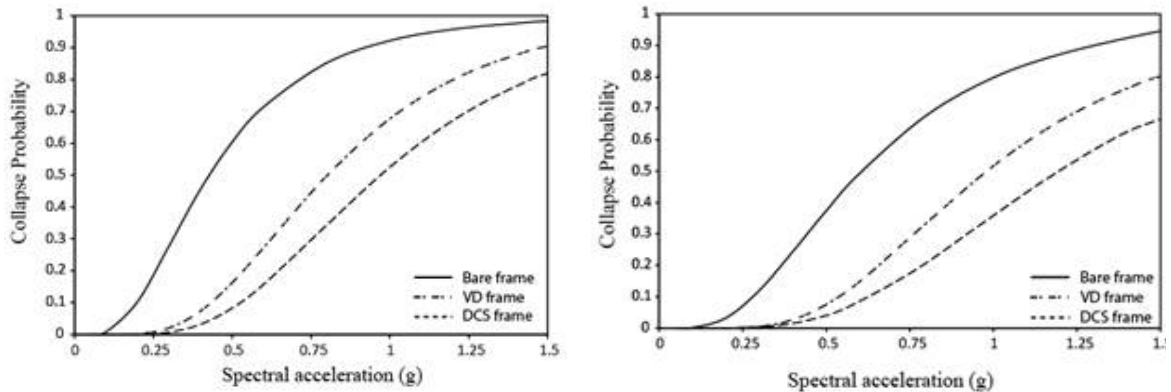


그림 2.24 보강 전후 잔류변위의 평균값

- 다음 그림은 보강 전후 지진의 강도가 특정한 수준에 도달할 때 구조물의 응답이 인명안전 및 붕괴방지수준의 한계상태에 도달할 확률을 나타낸 것으로, 44개 지진을 이용한 incremental dynamic analysis 결과로 산정한 fragility curve이다. 점성댐퍼로 보강한 경우에 비하여 제안된 DCS 기법을 적용한 경우 동일한 강도의 지진에 대하여 한계상태에 도달할 확률이 더 작은 것으로 나타났다.



(a) Life safety

(b) Collapse prevention

그림 2.25 해석모델의 취약도 곡선

- 해석모델의 생애주기비용 (life cycle cost)은 건물의 초기비용 (C_0)에 예상 수명 동안의 보수비용을 더한 것으로, 예상되는 보수비용은 건물의 잔존 수명 (L), 연간 손상비용 ($E(C_{SD})$), 감가상각비 (λ) 등을 이용하여 다음 식으로 구할 수 있다 (Wen & Kang, 2001):

$$E[C_{LC}] = C_0 + \int_0^L E[C_{SD}] \left(\frac{1}{1+\lambda} \right)^t dt = C_0 + \alpha \leq [C_{SD}]$$

- 다음 그림은 해석모델의 기대 수명을 60년으로 가정하고 산정한 생애주기비용 (life cycle cost)을 타나낸 것으로, 제안된 DCS 시스템으로 보강한 경우 생애주기비용이 가장 작게 산정된 것을 알 수 있다.

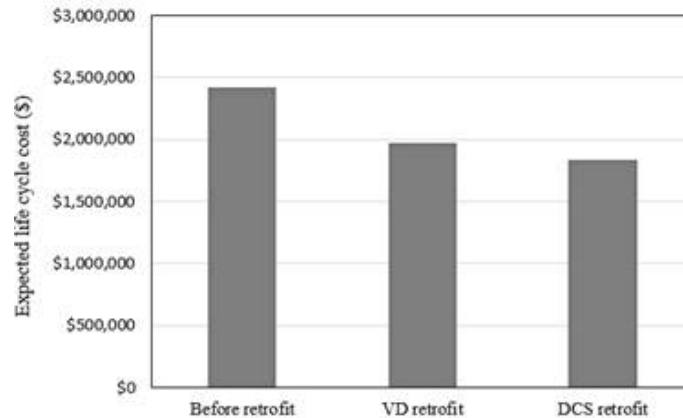


그림 2.26 해석모델의 예상되는 life cycle cost

2.2 PS PC를 이용한 기존건물의 내진보강기법 개발

(1) 기술의 개요

- 기존 건물의 외부에 PC PS 골조를 부착하여 강성 및 강도를 증가시키고 내진성능을 향상하는 보강기법이다. PS 강선을 이용하여 구조물의 내진성능을 향상하는 기법은 RC 골조뿐 아니라 RC 전단벽이나 강구조에도 적용 가능하며, PS 강선을 통한 초기하중은 보와 기둥 모두 가력이 가능하나 주로 보에 설치한 강선을 통하여 가한다.
- 지진력이 작용하여 PC 외부 골조에 횡변위가 발생하면 보 내부에 설치된 PS 강선에 인장력이 작용하고, 작용하는 인장력이 초기 긴장력을 초과하면 보와 기둥이 벌어지며 강선의 길이가 증가하여 탄성 복원력이 발생한다 (그림 2.27(a)).
- 외부 골조는 기존 골조와 PS bar나 PC 슬래브를 이용하여 결합되며 (그림 2.27(b)), 외부 골조는 기존 구조의 기둥 위에 설치하거나 기존 기초를 확장하여 설치할 수 있다.

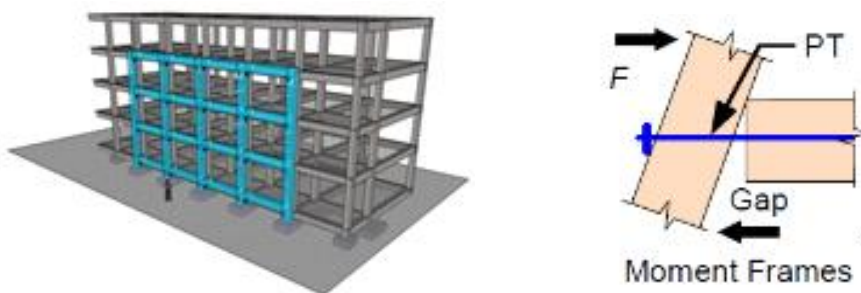


그림 2.27(a) PS PC를 이용한 내진보강

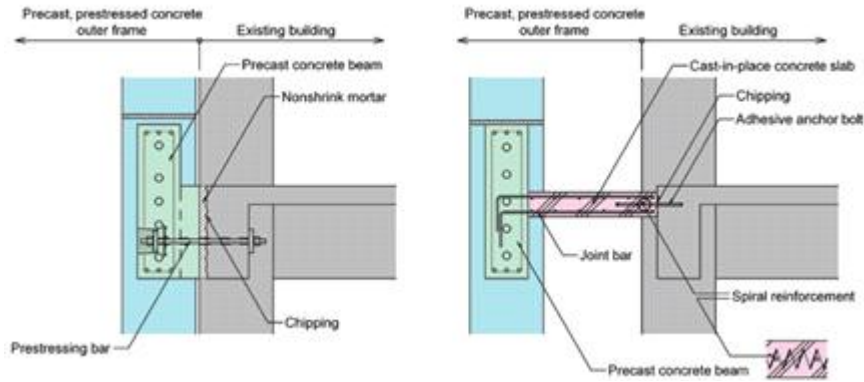


그림 2.27(b) PS PC와 기존 구조의 연결방법

- PC를 공장에서 제작하여 현장에서 조립하는 방법이므로 공사 기간이 단축되며, 수많은 앵커볼트를 이용하여 접합하는 외부 철골접합공법에 비하여 시공이 간편하다.
- Prestress의 크기, Tendon의 굵기 및 개수를 조정하여 외부 골조의 강성이나 강도를 쉽게 조정할 수 있으며, 자가복귀 (self centering) 기능으로 건물을 원 상태로 복귀하는 것이 가능하여 지진이 발생한 후 보수 비용이 절감된다.
- 기존 건물의 내진보강을 위한 PC 골조를 설계하기 위하여 먼저 기존 건물의 pushover 해석을 수행하여 보유 강성 및 강도를 파악하고, 기존 건물이 목표 성능 (최대 층간변위)을 만족하지 못하는 경우, 이를 만족하기 위하여 필요한 PC 골조의 강성을 ADRS format을 이용하여 근사적으로 구할 수 있다.

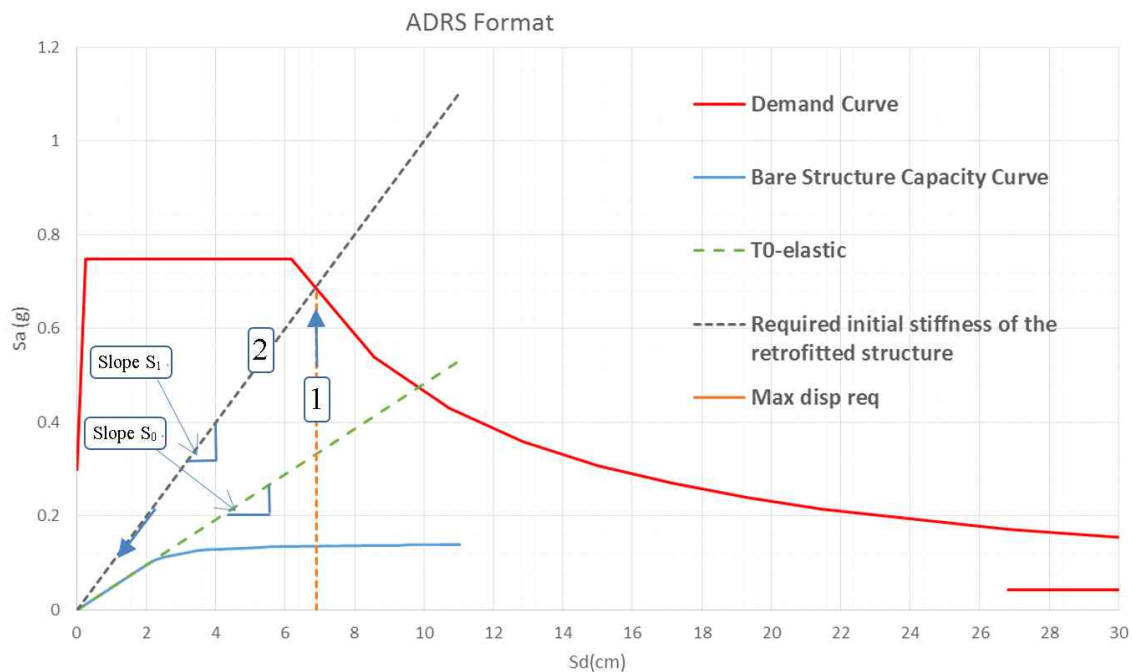


그림 2.28 ADRS format에서 필요한 PC 강성의 결정

(2) 예제 건물 case study : 2D frame

- 제안된 내진보강시스템의 적용성을 검증하기 위하여 다음 그림과 같은 2차원 평면골조의 내진보강 설계에 적용하였다. 해석모델의 보의 단면 크기는 250mm x 500mm, 기둥은 400 mm x 450 mm이며, 고정하중 7.0 kN/m², 활하중 2.0kN/m²으로 설계되었다.

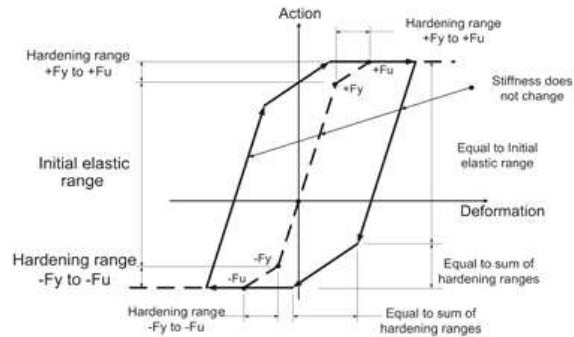
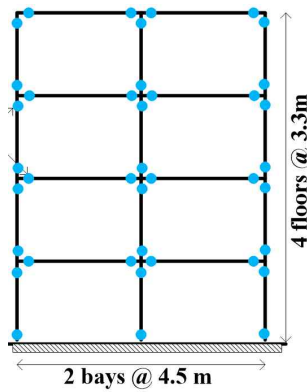


그림 2.29 예제 구조물 해석모델

- 2D 모델의 내진보강을 위하여 동일한 규모의 PC 골조를 각 절점에 연결하는 것으로 가정하고 비선형해석을 수행하였다. 직경 0.5 in 강선 세 개가 보를 관통하여 기둥에 연결된 것으로 모델링하였다. 강선의 항복강도는 1,757 MPa, 초기 응력은 820 MPa로 가정하였다. 다음 그림은 PC 보-기둥 접합부 상세와 해석모델을 나타낸다.

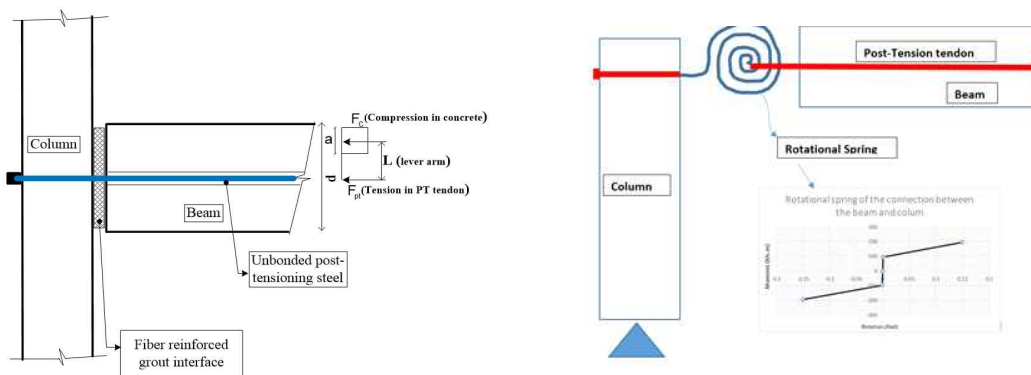


그림 2.30 PS PC 해석모델

- 다음 그림 2.31은 비선형 동적해석에 사용된 지진 (Kern County, Tabas, Cape Mendocino, Landers)의 응답스펙트럼을 나타내며, 해석모델의 1차 주기에서 지진의 응답스펙트럼값이 MCE 설계스펙트럼에 일치하도록 scaling하여 적용하였다.

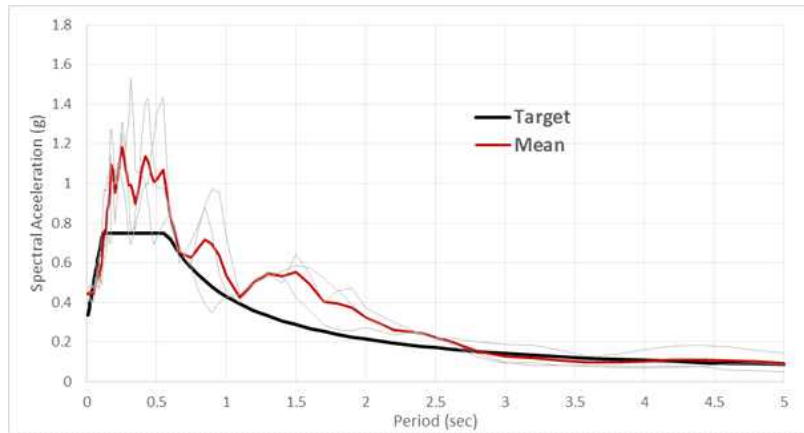


그림 2.31 설계스펙트럼 및 적용된 지진의 응답스펙트럼

- 그림 2.32는 네 개의 지진기록을 이용하여 해석모델의 비선형 동적해석을 수행하여 최대변위의 시간이력을 표시한 것으로, 보강 후 최대변위 및 잔류변위가 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

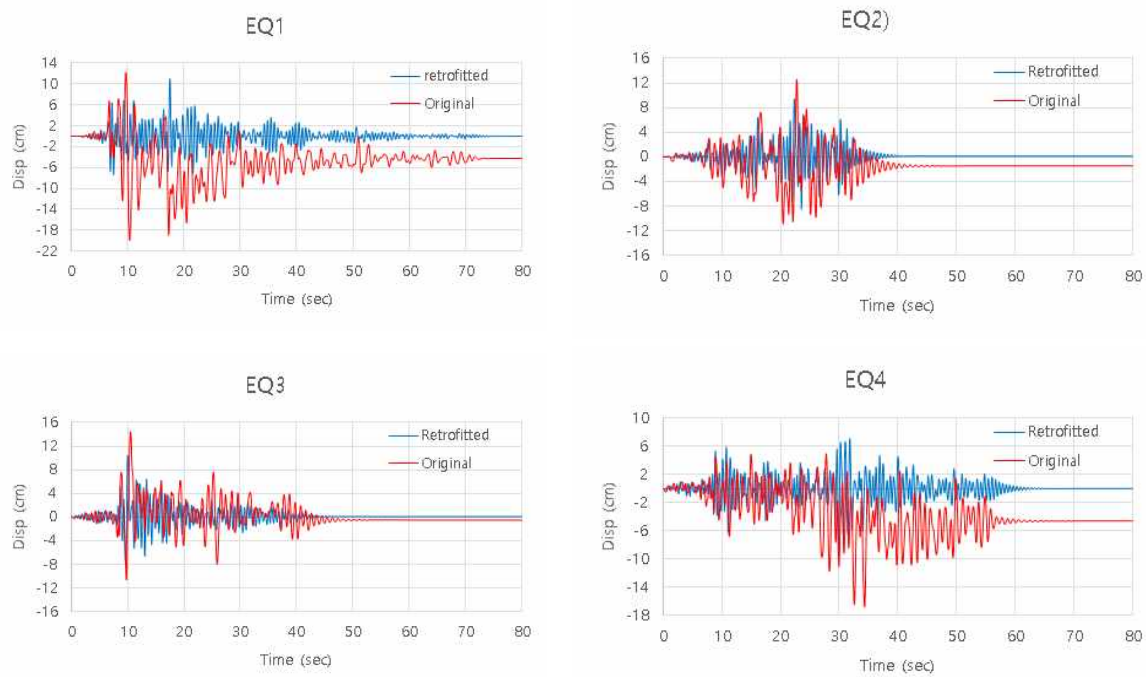


그림 2.32 네 개 지진의 비선형 동적해석결과 : 최대변위의 시간이력

표 2.4 보강 전후 네 개의 지진에 대한 변위응답

(a) Bare Frame Model			
Earthquake records	Max. Disp. (mm)	Residual Disp. (mm)	층간변위 (%)
Kern County	200	131	1.8
Tabas	125	15	1.45
Cape Mendocino	150	5	1.45
Landers	175	50	.175

(b) Retrofitted Frame			
Earthquake records	Max. Disp. (mm)	Residual Disp. (mm)	층간변위 (%)
Kern County	200	131	1.8
Tabas	125	15	1.45
Cape Mendocino	150	5	1.45
Landers	175	50	.175

- 그림 2.33은 해석모델의 네 개 지진에 대한 비선형 동적해석을 수행하여 구한 최대 층간변위를 나타낸 것으로, 보강 후 최대층간변위가 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

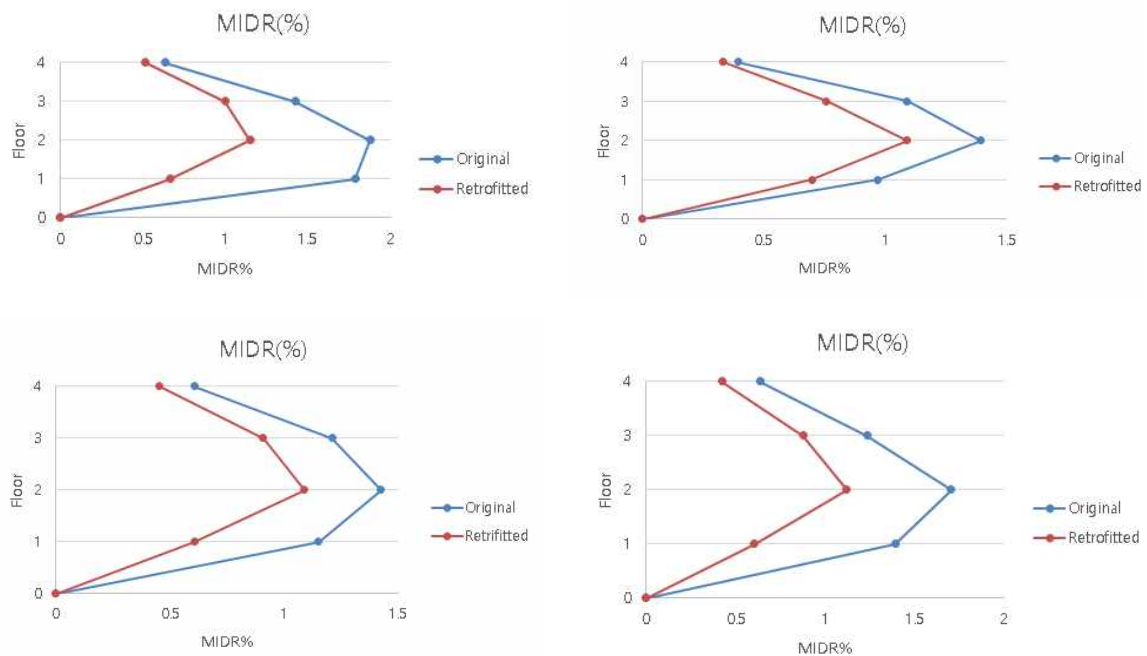


그림 2.33 모델의 네 개 지진에 대한 최대 층간변위

(3) 예제 건물 case study (2) : 3D frame

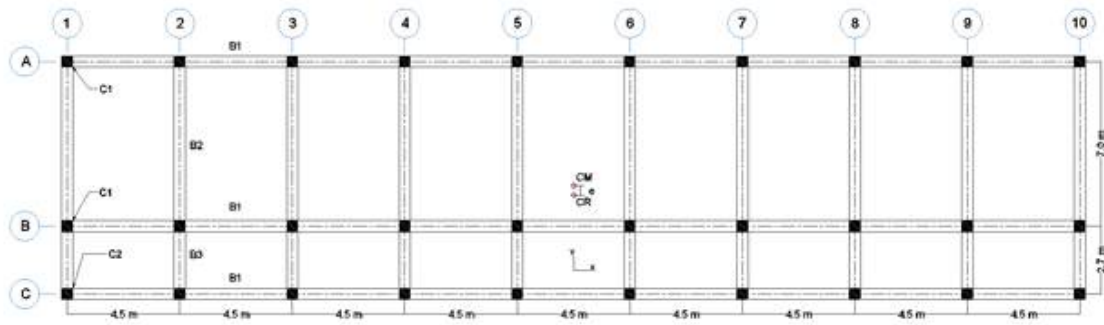


그림 2.34 설계스펙트럼 및 적용된 지진의 응답스펙트럼

- 제안된 보강기법의 내진보강 타당성을 검증하기 위하여 위 그림과 같은 4층 9경간 모멘트 골조에 적용하고, 보강 전후 지진응답을 비교하였다.
- 해석모델의 내진보강을 위하여 PC 골조를 해석 모델의 장변방향으로 3, 6, 9경간에 설치하고, 비선형 동적해석을 위하여 PEER NGA Database에서 Landers (EQ1), Kocaeli-1 (EQ2), Kocaeli-2 (EQ3) 등 세 개의 지진기록을 선택하여 사용하였다.
- 다음 그림은 장변방향으로 6개의 경간에 PC 골조로 보강하고, 보강 전후의 지붕층 변위의 시간이력을 나타낸 것으로, 보강 후 최대변위 및 잔류변위가 크게 감소하는 것으로 나타났다.

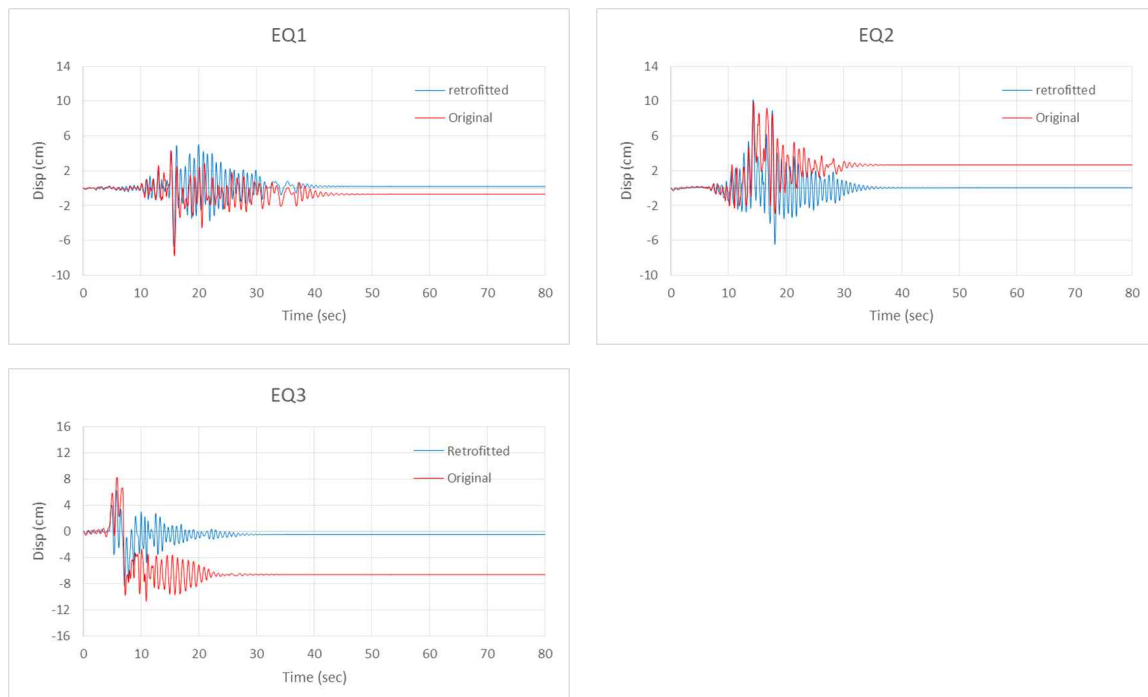


그림 2.35 네 개 지진의 비선형 동적해석결과 : 최대변위의 시간이력

- 다음 그림은 보강 전 해석모델과 PC를 3, 6, 9경간 보강한 모델의 세 개 지진을 이용한 비선형 동적해석 결과 얻어진 층간변위를 나타낸다.

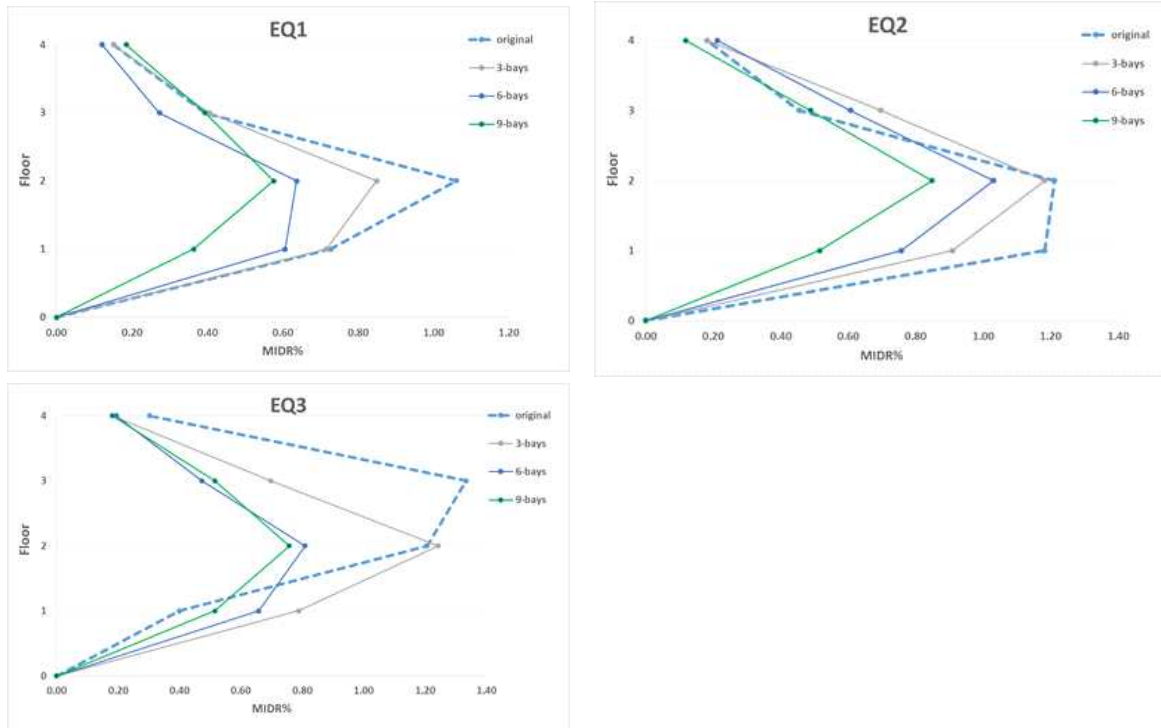


그림 2.36. 보강전후 최대 층간변위

- 표 2.5는 해석결과로 구해진 최대변위, 최대 층간변위비, 잔류변위를 나타낸 것으로, 보강 후 최대변위 및 최대 층간변위도 감소하지만, 잔류변위의 감소량이 두드러지는 것을 알 수 있다.

표 2.5 보강 전후 비선형동적해석 결과

Bay with PC	Max. Disp. (mm)	Residual Disp.	Inter-story drift (%)
None	95	33.2	1.2
3	96.7	0.6	1.2
6	84.7	1.5	1.0

(4) 예제 건물 case study (3) : 2D 2-bay 3층, 5층, 8층 frame 취약도 해석

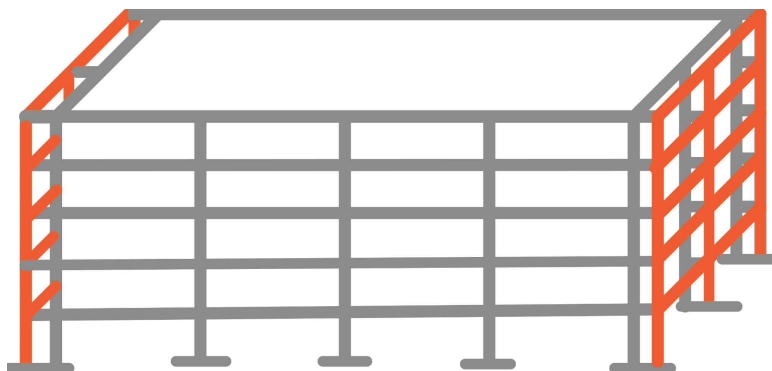


그림 2.39 5층 2 경간 해석모델

- PC를 이용한 내진보강 효과의 44개 지진에 대한 확률적 해석을 수행하기 위하여 위 그림과 같은 3층, 5층, 8층 모델을 설계하고, 단변방향 2경간 골조의 보강 전후의 내진성능을 평가하였다. 해석모델의 보의 단면 크기는 250mm x 400mm, 기둥은 3층 모델은 300 mm x 300 mm, 5층 모델은 400 mm x 400 mm, 8층 모델은 450 mm x 450 mm이며, 고정하중 4.1 kN/m², 활하중 2.5KN/m²으로 설계되었다.
- 다음 그림은 각 모델의 두 개 지진에 대한 보강 전후 최상층 변위의 시간이력해석결과를 나타낸다. 보강된 모델의 최대변위 및 잔류변위가 감소하는 것을 알 수 있다.

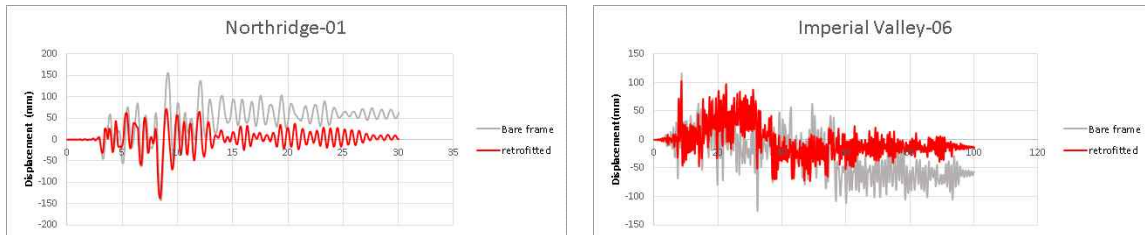


그림 2.40(a) 3층 모델

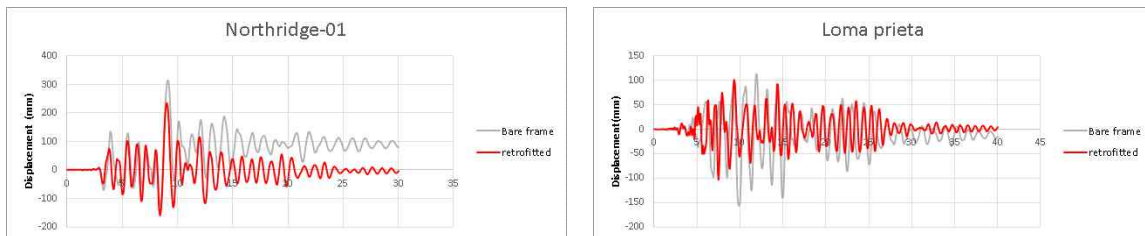


그림 2.40(b) 5층 모델

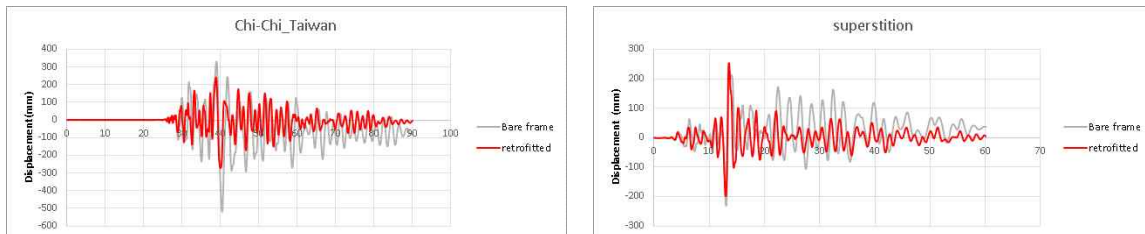


그림 2.40(c) 8층 모델

- 다음 그림은 보강 전후 각 해석모델의 44개 지진에 대한 증분동적해석 결과를 나타낸다. 이것은 각 지진의 크기를 점차 증가시키며 spectral acceleration과 최대층간변위를 표시한 것으로, 이를 바탕으로 응답의 확률분포를 구하여 각 지진의 크기에 대한 취약도를 구한다.

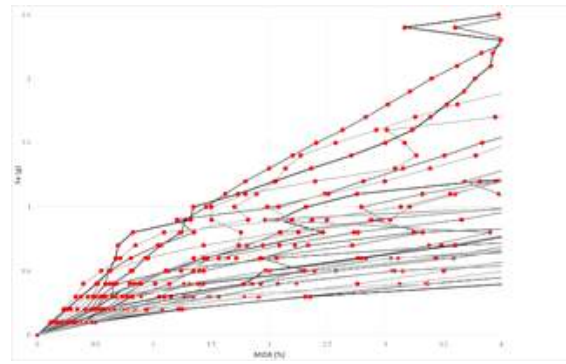
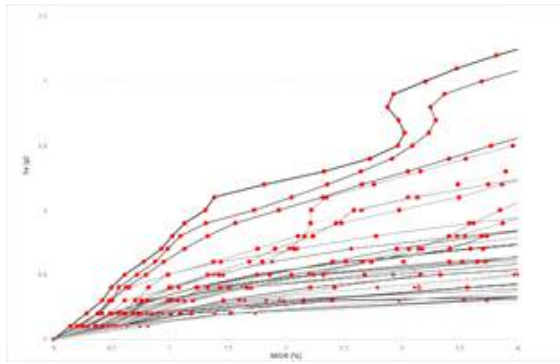


그림 2.41(a) 3층 모델

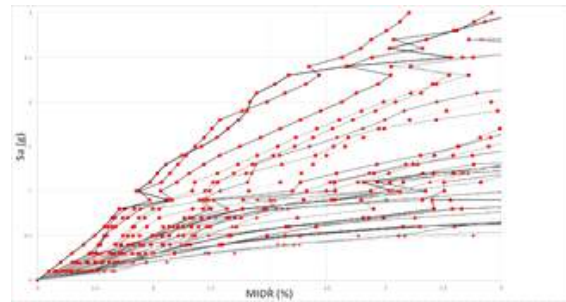
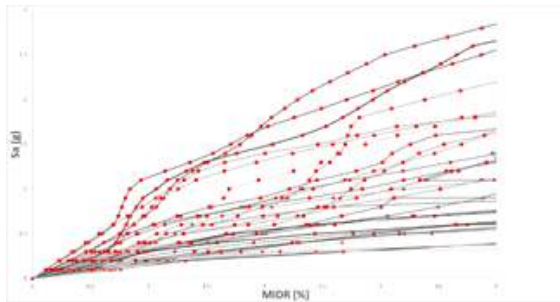


그림 2.41(b) 5층 모델

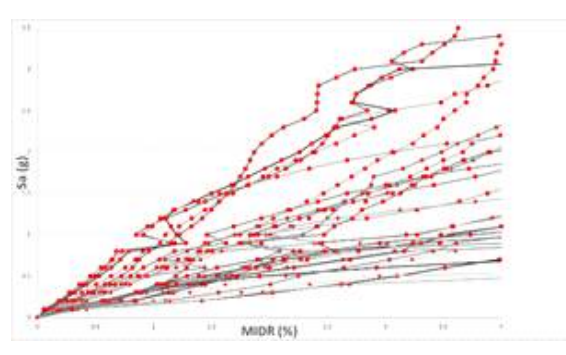
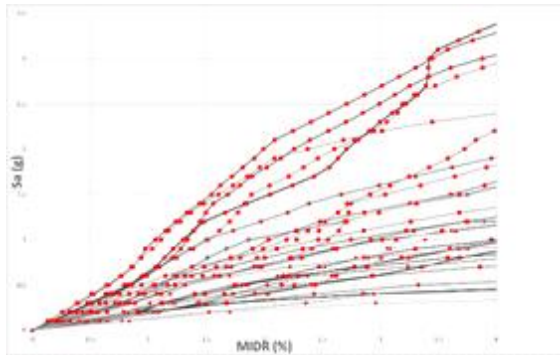
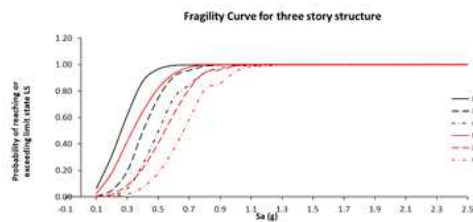
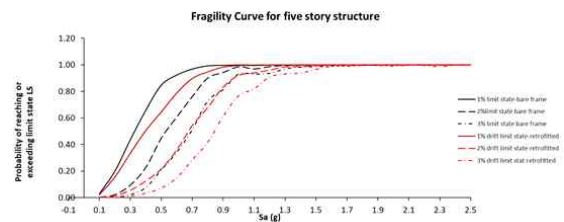


그림 2.41(c) 8층 모델

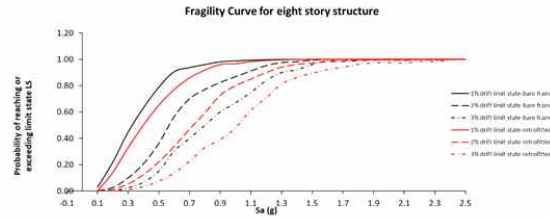
- 다음 그림은 보강 전후 각 해석모델의 취약도를 나타낸다. 이것은 지진의 각 크기에 대하여 최대 층간변위각이 1%, 2%, 3%에 도달할 확률을 표시한 것으로, 보강 후 각 변위에 도달할 확률이 낮아지는 것으로 나타났다.



(a) 3층 모델



(b) 5층 모델



(c) 8층 모델

그림 2.42. 해석모델의 취약도곡선

(5) 반복가력실험을 통한 성능검증

- 제안된 PC 보강기법의 성능을 평가하기 위하여 무보강 RC 실험체 및 보강된 실험체에 대한 반복가력실험을 수행하였다. 실험은 대우 기술연구소에서 수행하였다.
- 실험체 기둥의 크기는 300x300mm, 보는 300x350mm 이며, 기둥의 주근은 12D22, 보는 8D22이다. 기둥의 수평근은 D10@200, 보의 늑근은 D10@150을 사용하였다.
- 세 개의 공시체 및 시편 실험을 통하여 구한 무보강 RC 실험체의 압축강도는 15.7 MPa이며, 무보강 RC 실험체 철근의 인장강도는 577.0 MPa로 나타났다.
- 무보강실험체의 크기 및 형상은 다음 그림과 같다.

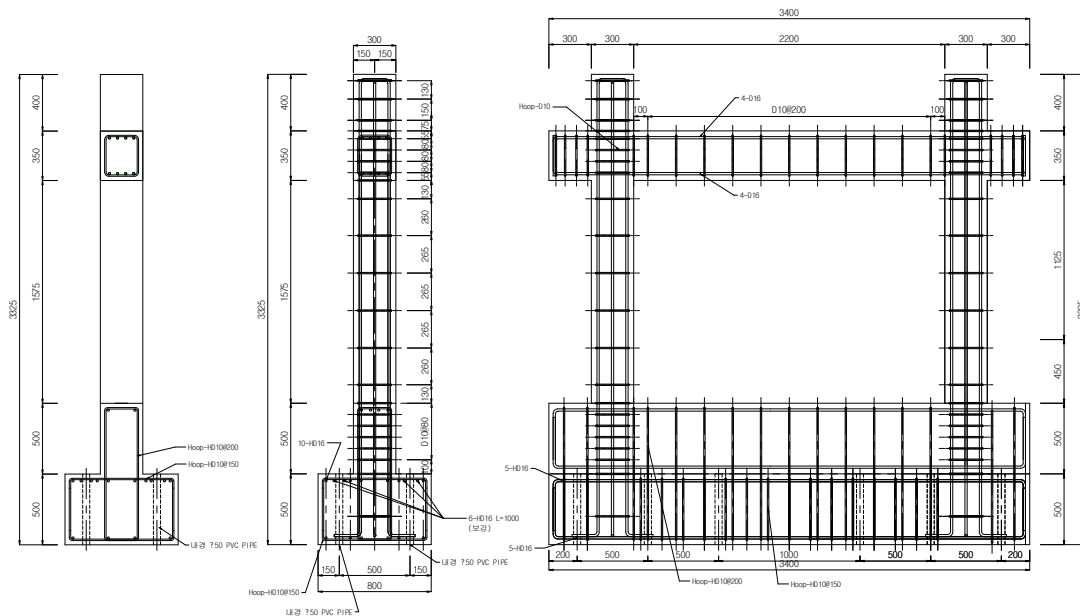


그림 2.43 무보강 RC 실험체

- PC 실험체 기둥의 크기는 300x300mm, 보는 300x350mm 이며, 기둥의 주근은 12D22, 보는 6D22이다. 기둥의 수평근은 D10@200, 보의 늑근은 D10@150을 사용하였다. ϕ 15.2 강선의 항복강도는 1,600 MPa이며, 146 kN의 초기 장력을 가하였다.
- 세 개의 공시체 및 시편 실험을 통하여 구한 PC 실험체의 압축강도는 40 MPa 이며, PC 보강골조에 사용된 철근의 인장강도는 700.2 MPa로 나타났다.

- PC로 보강된 실험체의 크기 및 형상과 반복가력실험을 위한 실험체와 가력기의 배치는 다음 그림과 같다.

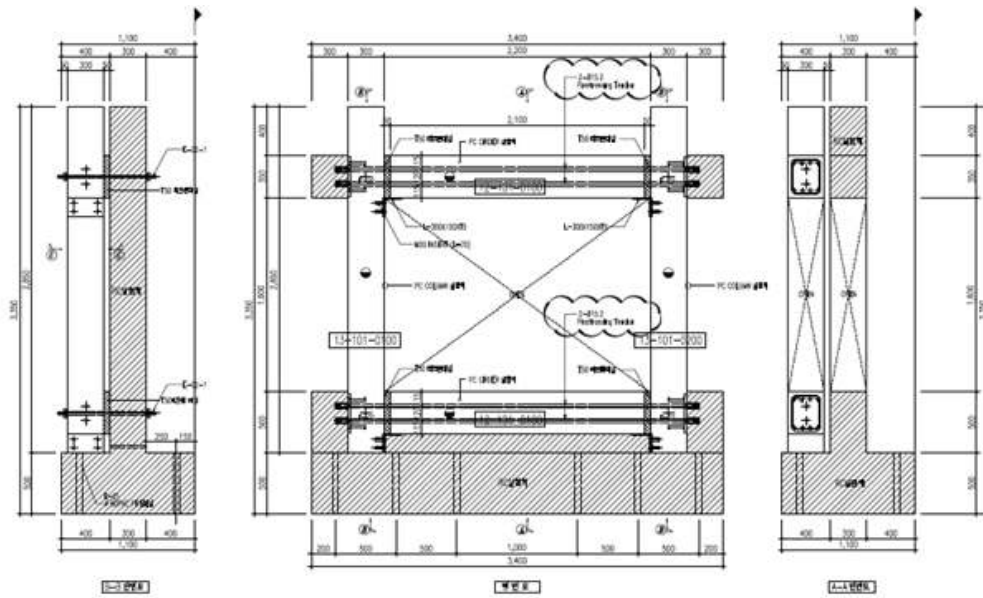


그림 2.44 PC로 보강된 실험체

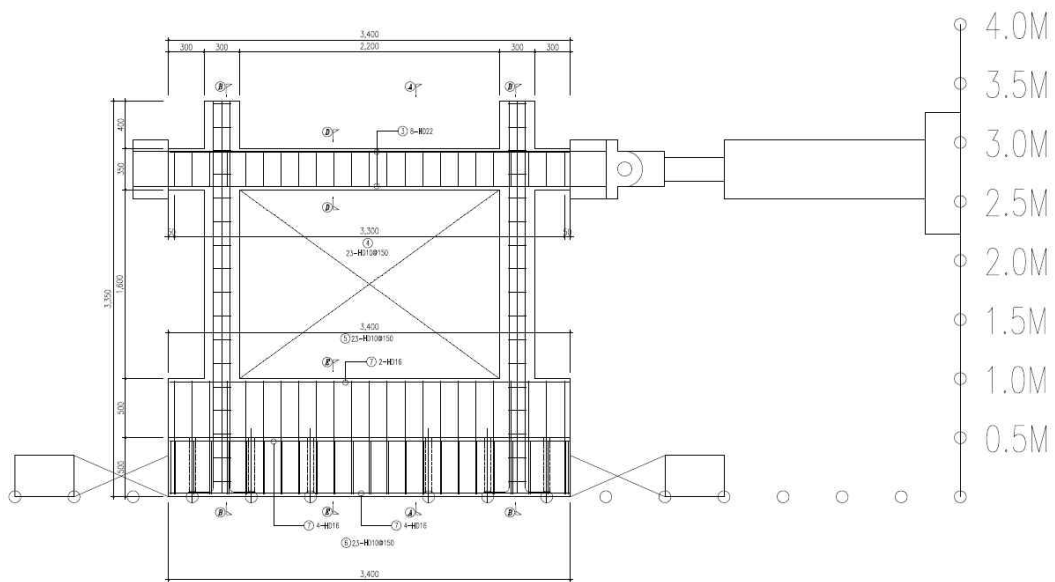


그림 2.45 (a) Test setup 형상



그림 2.45 (b) Test setup 사진

○ 실험에 사용된 loading protocol은 ACI 374.2r-13을 사용하였으며 다음 표와 같다.

표 2.6 가력 단계별 변위

Step	Drift (%)	수평변위 (mm)
1	0.15	3.04
2	0.25	5.06
3	0.3	6.08
4	0.35	7.09
5	0.5	10.13
6	0.75	15.19
7	1	20.25
8	1.5	30.38
9	2	40.50
10	2.5	50.62
11	3	60.75
12	3.5	70.88
13	4	81.00
14	5	101.25
15	6	121.50
16	7	141.75

○ 다음 그림은 보강 전 RC 골조의 반복가력실험 결과를 비교한 것이다. 최대 강도는 300 kN 을 약간 초과하며, 층간변위 약 1.6%를 기점으로 강도가 감소하는 것으로 나타났다.

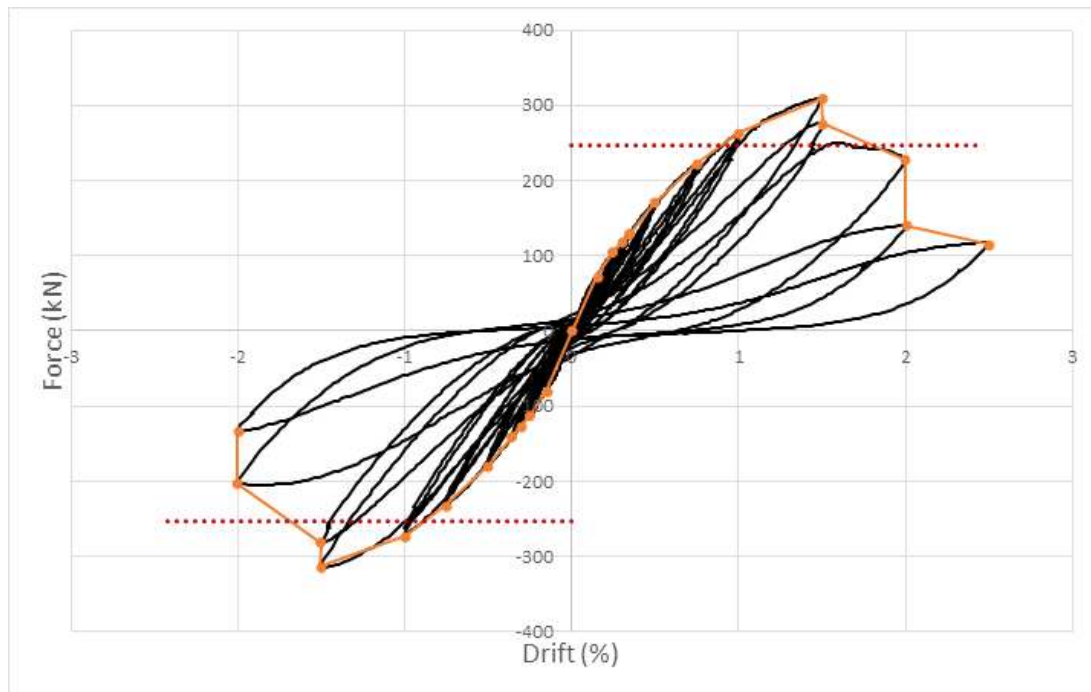


그림 2.46 보강 전 실험체의 반복가력실험 결과

- 다음 그림은 보강 전후 반복가력실험 결과를 비교한 것이다. 보강 후 최대 내력이 430 kN으로 증가하고, 파괴 시 연성도가 증가한 것으로 나타났다.

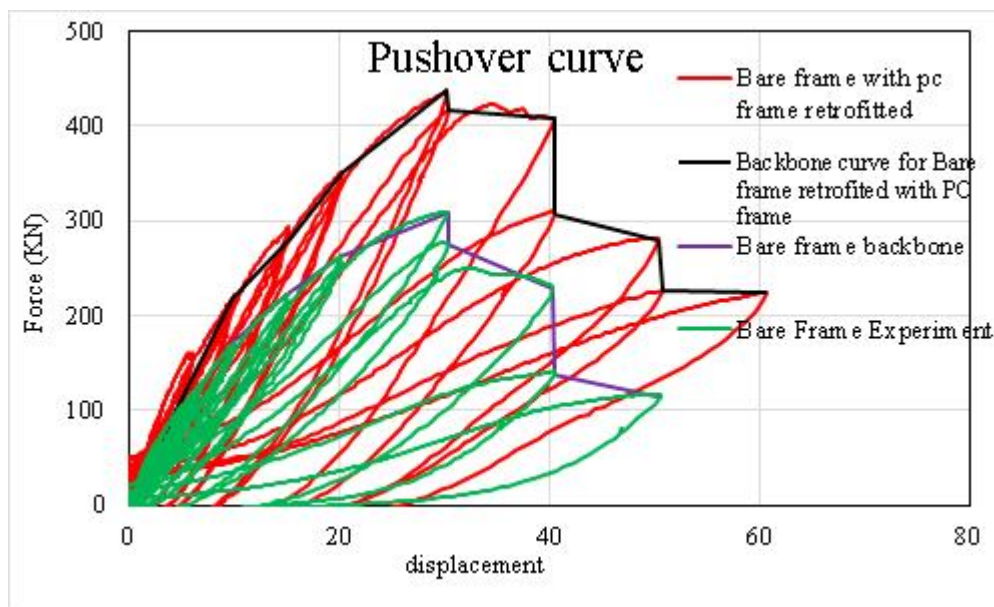


그림 2.47 보강 전후 반복가력실험 결과의 비교

- 다음 그림은 보강 전 실험체의 파괴양상을 나타낸 것으로, 가력변위가 증가할수록 기둥에서 전단균열이 발생하여 파괴되는 것으로 나타났다.



그림 2.48 보강 전 실험체의 파괴양상

- 실험결과의 검증을 위하여 보강 전 RC 골조의 비선형거동을 유한요소 해석을 이용하여 구하였다. 균열이 발생하기 전에 기둥 상·하 단부에 전단 및 휨 응력이 분포되는 것을 확인할 수 있으며, 최종 파손형상은 응력이 집중되는 부분에 대각선 방향 전단균열이 발생하는 것으로 나타났다.

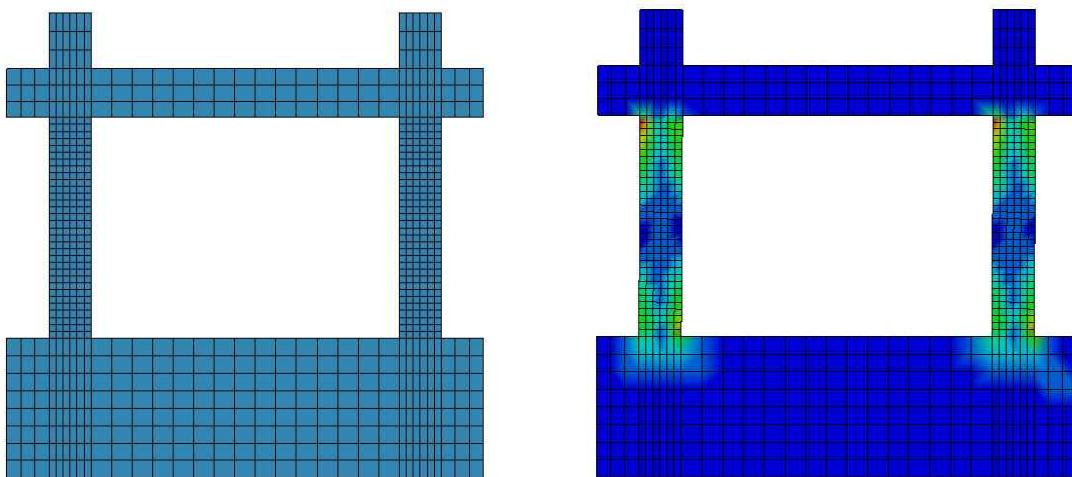


그림 2.49 보강전 실험체의 유한요소 해석결과

- 다음 그림은 반복가력실험 및 유한요소해석을 통하여 구한 실험체의 이력거동을 비교한 것으로 실험 및 유한요소 해석결과가 비교적 일치하는 것을 알 수 있다.

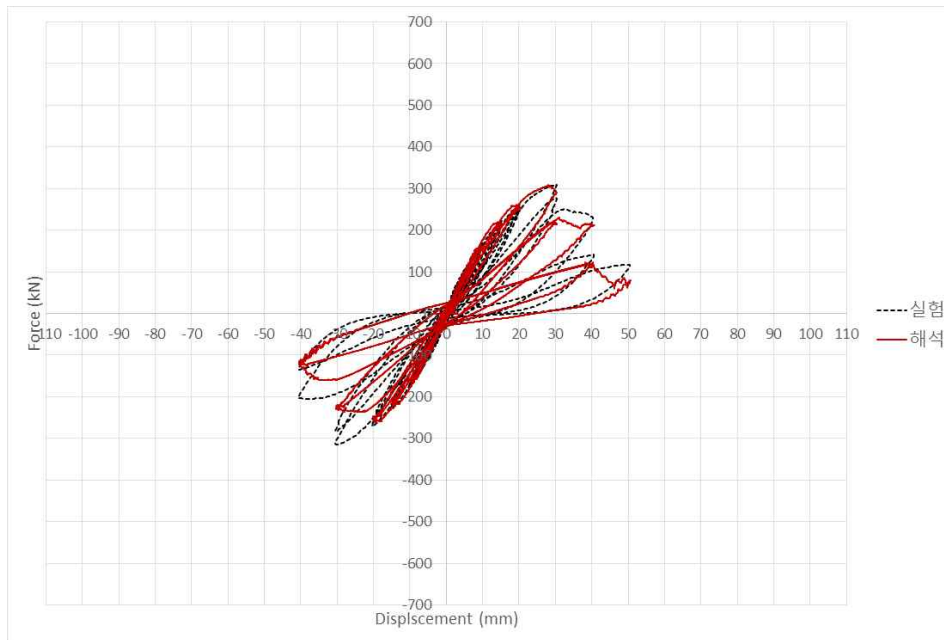


그림 2.50 보강전 실험체의 실험 및 유한요소 해석결과 비교

- 실험결과를 바탕으로 해석모델 개발을 위하여 보강 전 RC 골조를 SAP2000을 이용하여 모델링하였다. 다음 그림은 골조 및 부재 단부 비선형모델을 나타낸다.

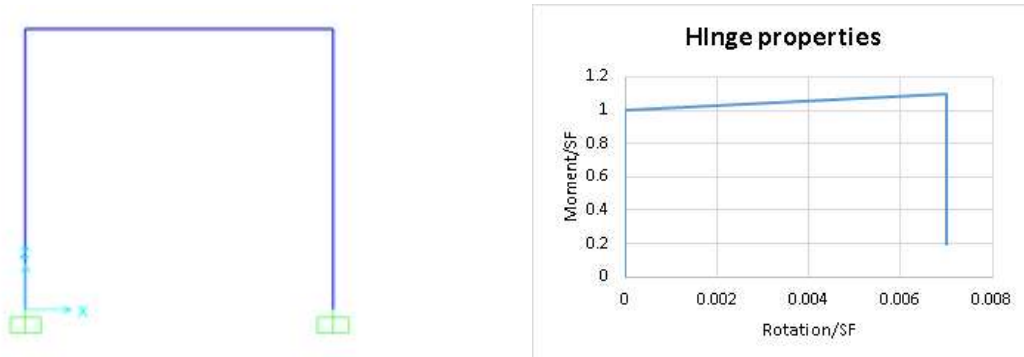


그림 2.51 실험체의 SAP2000 해석모델

- PC에 의한 내진보강 효과는 다음 그림과 같이 PC 보와 기둥이 벌어지면서 발생하는 강선의 인장 복원력에 의하여 발생한다. 복원력의 크기는 횡변위의 크기 및 PC 보 기둥 변형 형상을 바탕으로 구할 수 있다.

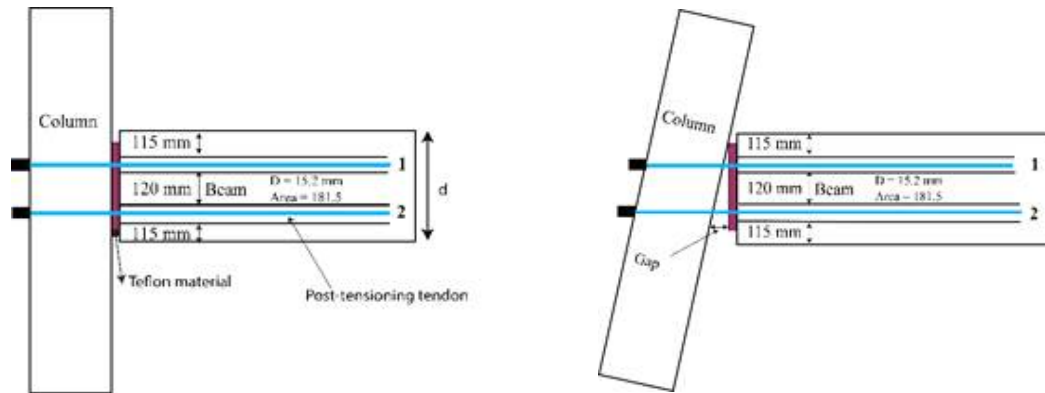


그림 2.52 강선에 의한 복원력 작용 기구

- 다음 그림은 보강 후 실험체의 반복가력실험결과와 SAP 2000을 이용한 pushover 해석결과를 비교한 것으로, 해석에 의한 항복강도가 실험결과 보다 다소 크게 나타났으나, 최대강도를 비롯하여 전반적인 비선형거동을 비교적 유사하게 묘사하는 것을 알 수 있다.

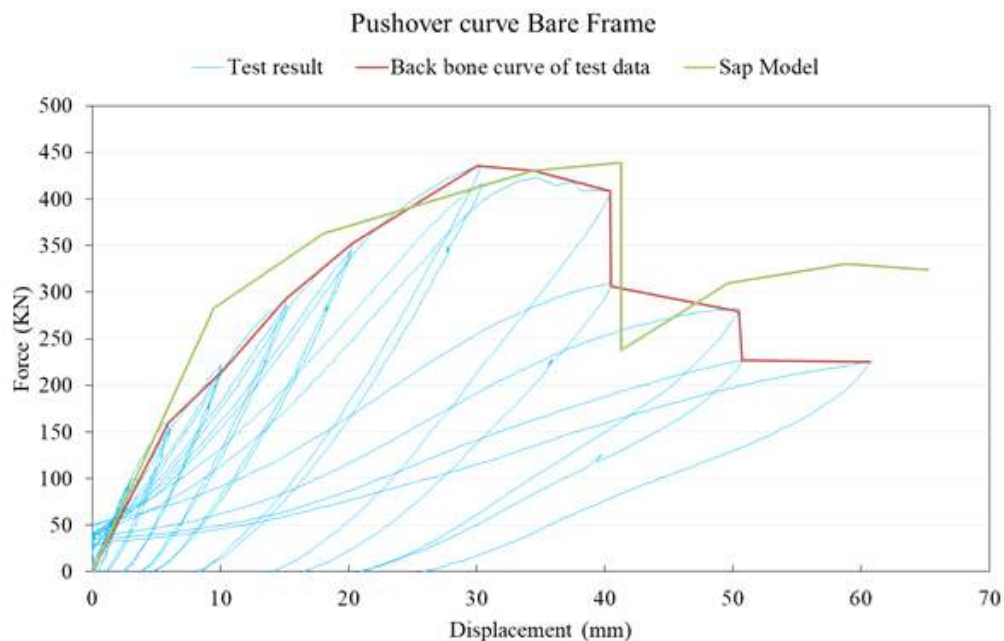


그림 2.53 반복가력실험결과와 SAP 2000해석결과의 비교

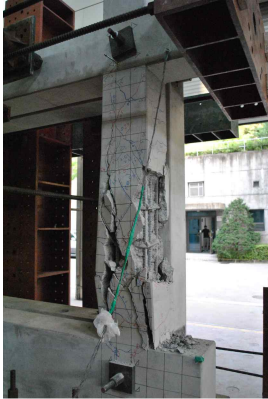
- 그림 2.54에는 보강 후 실험체의 반복가력 실험 초기 설치 상세와 최종 파괴양상을 나타내었다. 초기 변형구간에서는 기둥 상·하부에서 전단균열이 발생하였으며 가력 변위가 커질수록 점차 기둥의 중앙부로 확장되는 것으로 나타났다. 보강 PC 프레임에는 손상이 발생하지 않은 것으로 나타났다.



(a) 초기 실험 세팅상태



(b) 접합부 시공 상세



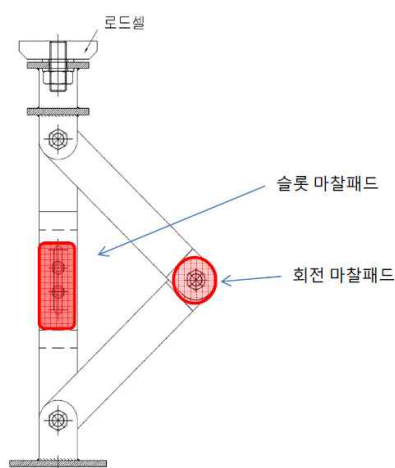
(c) 좌측기둥 최종파괴 양상

(d) 우측기둥 최종파괴 양상

그림 2.54 PC보강 실험체의 설치 및 최종 손상상태

(6) PC 보강용 마찰댐퍼의 성능실험

- 그림 2.55는 PC용 모서리 마찰댐퍼의 형상 및 한국 기계연구원에서 수행한 반복가력실험을 나타낸다. 마찰댐퍼는 슬롯이 형성된 직선형 마찰댐퍼와 회전형 마찰댐퍼가 결합된 형태이며, 실험결과를 나타낸 표 3.7에 따르면, 항복 마찰력 50.9 kN 중에서 회전형 마찰댐퍼가 2.6 kN, 직선형이 48.3 kN를 나타내어 대부분의 마찰력은 직선형 마찰댐퍼에서 발생하는 것으로 나타났다.



Hysteresis curve

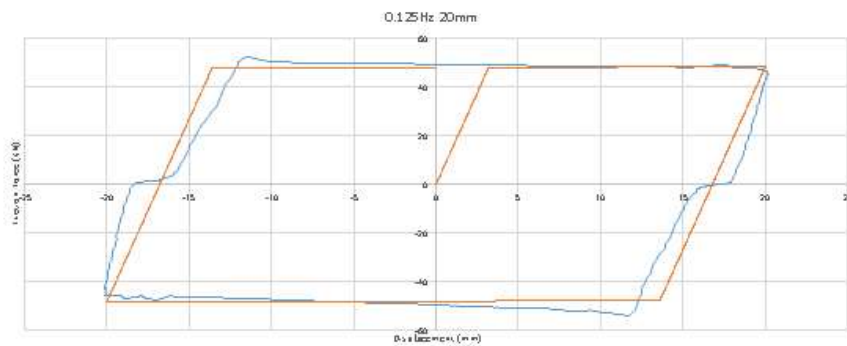


그림 2.55 PC용 모서리 마찰댐퍼의 반복가력실험결과

표 2.7 PC용 모서리 마찰댐퍼의 반복가력실험결과

	1점 회절	슬롯
Torque(N.m)	600	450
Clamping Force(kN)	135	100
예비실험 Friction Force(kN)	2.638	48.229
	50.867	

(7) PC+마찰댐퍼로 보강된 건물의 내진성능평가

- 다음 그림은 단변방향의 두 외벽에 PC와 모서리 마찰댐퍼로 보강된 5층 모멘트골조의 형상을 나타낸다. 마찰댐퍼의 수평 항복 마찰력은 10 kN으로 가정하였다.

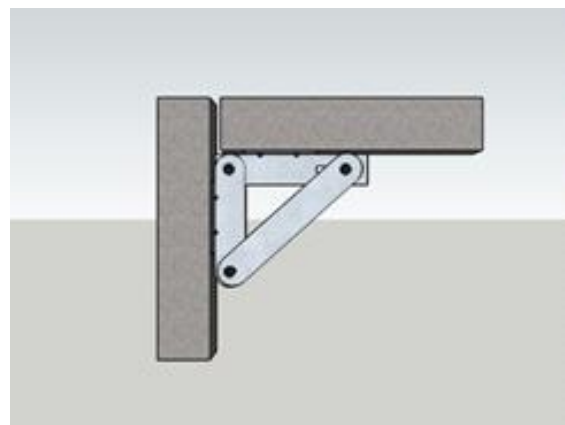
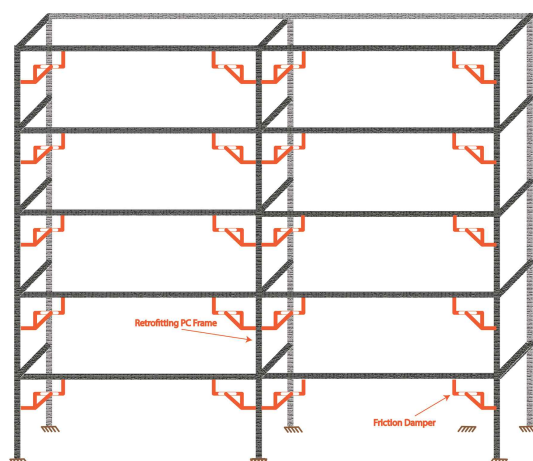
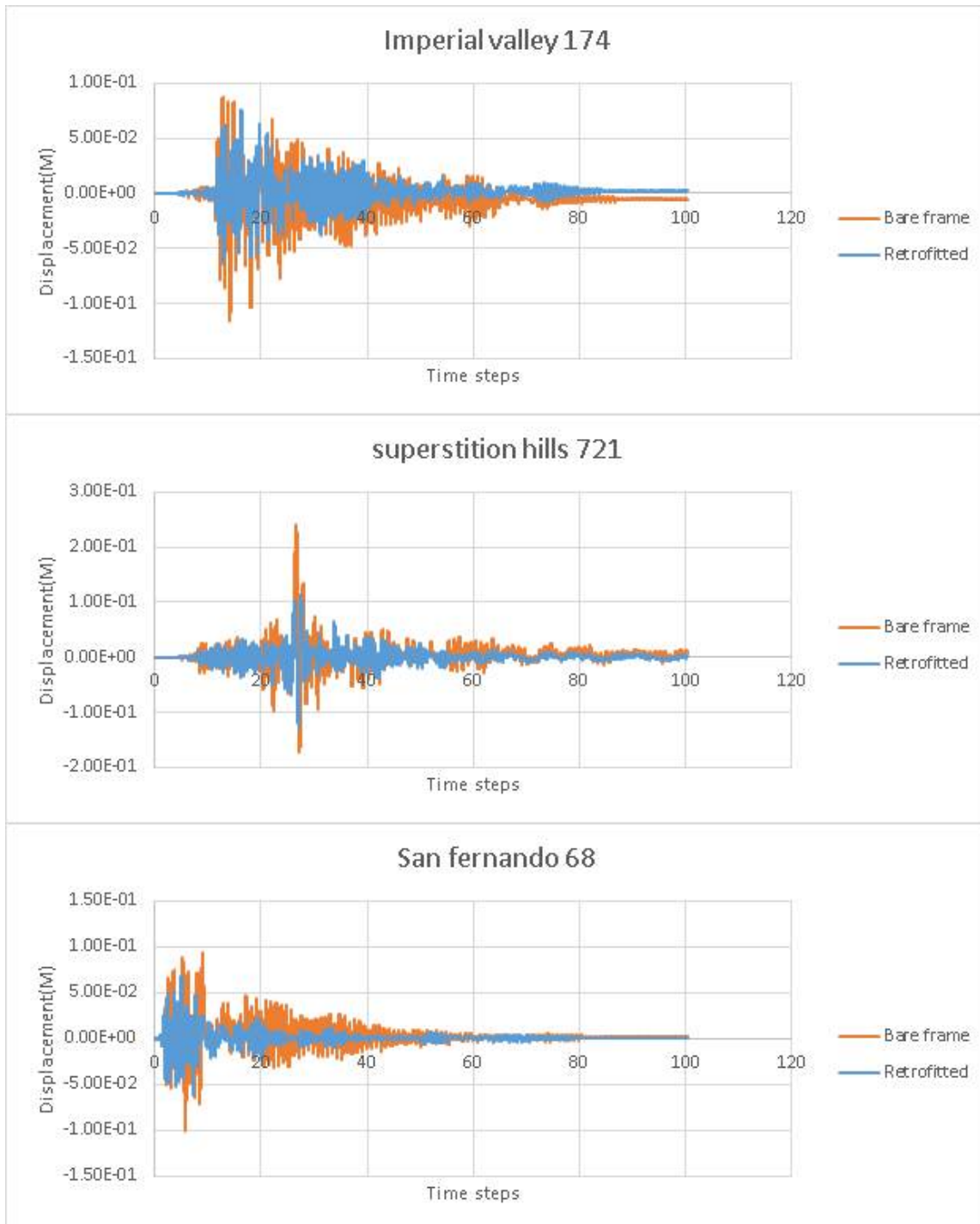


그림 2.56 PC+모서리 마찰댐퍼로 보강된 5층 해석모델

- 설계지진으로 scaling된 지진을 이용하여 해석모델의 비선형 동적해석을 수행하였으며, 다음 그림은 보강 전후최대변위의 시간이력을 나타낸다. 해석결과에 따르면 보강 후 최대변위 및 잔류변위가 상당부분 감소하는 것으로 나타났다. 그림 2.57은 보강전후 최대층간변위비를 나타내며, 보강 후 모든 지진에 대하여 층간변위가 감소하는 것으로 나타났다.



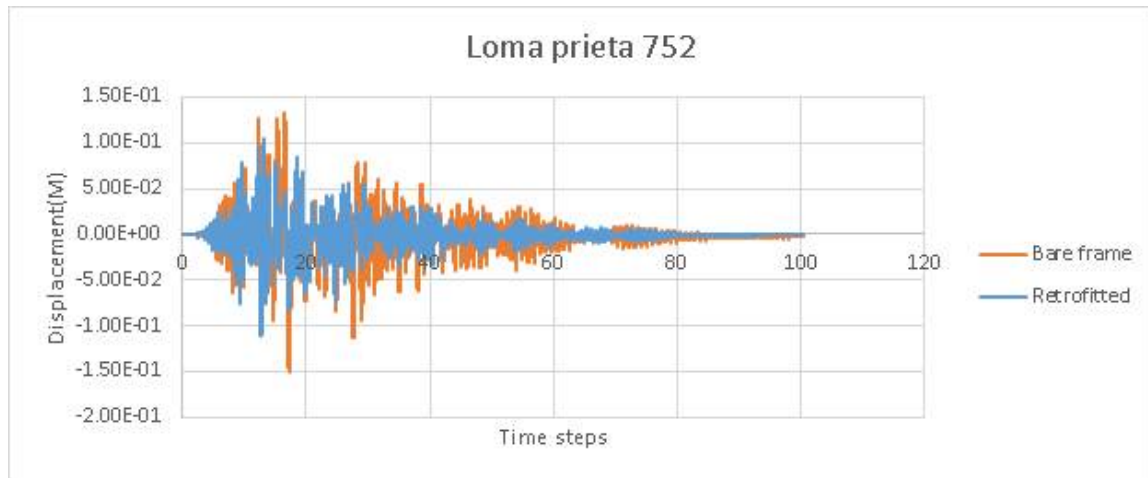
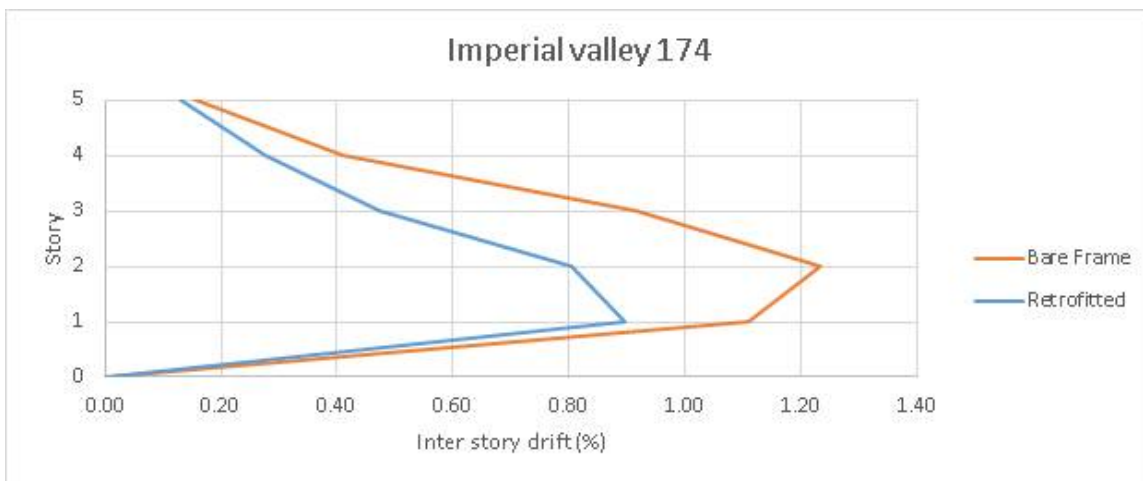


그림 3.56 PC+모서리 마찰댐퍼로 보강된 5층 해석모델의 변위 시간이력



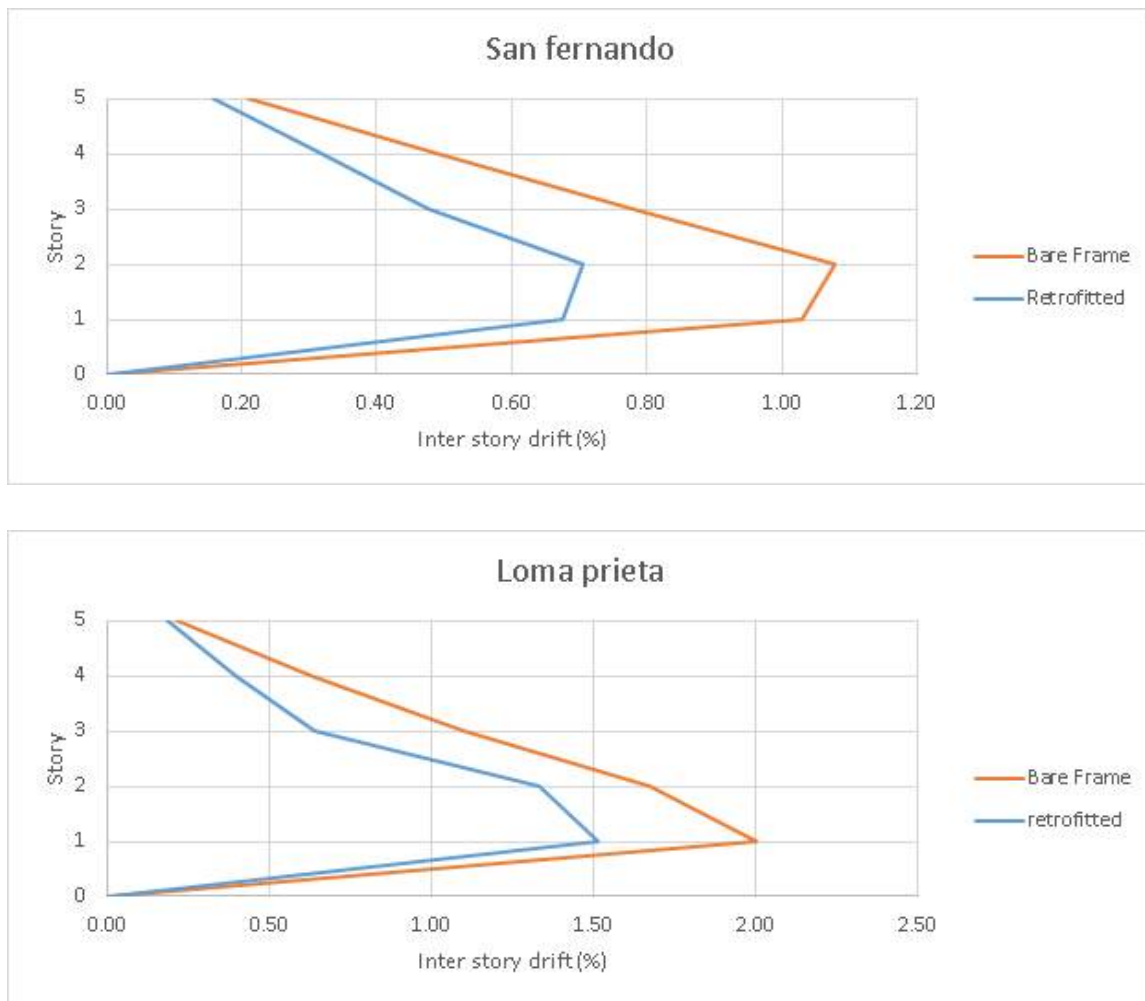
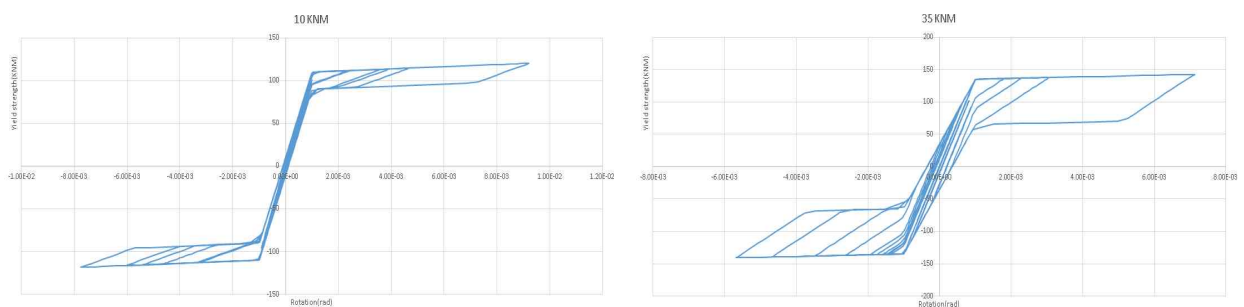


그림 2.57 PC+모서리 마찰댐퍼로 보강된 5층 해석모델의 최대 층간변위



Fy=10 kN Fy=35 kN
그림 2.58 Loma Prieta 지진에 대한 마찰댐퍼의 이력곡선

- 위의 그림은 Loma Prieta 지진에 대하여 2층에 설치된 마찰댐퍼의 모멘트-회전각 관계를 나타낸 것으로, 초기 긴장력이 가해진 강선의 복원력의 영향으로 깃발형상의 이력곡선을 나타낸다. 댐퍼의 항복강도가 10 kN에서 35 kN으로 증가할 때 이력곡선의 면적이 증가하고, 따라서 에너지 소산량이 증가하는 것으로 나타났다.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1 목표 달성도

(1) 초기 긴장력이 가해진 강선과 댐퍼를 이용한 보강기법의 개발

달성도 (%)	주요 연구 활동	세부 연구내용
100	복합기능 내진보강 시스템 형상 개발	- 댐퍼와 연결된 PS 강선을 이용한 보강장치 해석모델 개발 - 감쇠력, 강성 (강선 단면적), 복원력 (초기장력)의 기여도 분석, 지진해석을 통한 성능평가
	실험을 통한 개발된 보강장치의 내진성능 평가	- 개발된 댐퍼 + PS 강선 유닛의 성능실험 - 개발된 시스템이 설치된 비보강 RC 골조의 내진보강 성능실험을 통한 성능평가 및 시공성 검증

(2) 자가복원 시스템 설치용 감쇠장치 개발

달성도 (%)	주요 연구활동	세부 연구내용
100	감쇠장치 선정 및 설치상세 개발	- 감쇠특성, 제작단가, 설치형상 등을 고려한 댐퍼의 선정 - 골조실험체 크기 및 강성을 고려한 형상 설계 - 댐퍼 유닛 해석모델 개발
	개발된 감쇠장치의 성능평가	- 골조실험체 및 강선의 강성을 고려한 적정 용량 결정 - 실험결과를 바탕으로 해석모델 검증

(3) 개발된 시스템의 설치상세 및 시공기법 개발

달성도 (%)	주요 연구활동	세부 연구내용
80	- 실험체 및 예제모델 설계 - 개발된 장치의 설치 상세 개발	- 국내/해외 설계 기준 및 유사 시스템 시공 사례 조사 - 비내진상세를 적용한 실험체 및 예제모델 설계 - 기존 설계 프로세스 및 업계 동향 조사

(4) 초기 긴장력이 가해진 PC를 이용한 보강기법의 성능평가 및 설계법 개발

달성도 (%)	주요 연구 활동	세부 연구내용
90	복합기능 내진보강 시스템 형상 개발	- 긴장력이 가해진 PC를 이용한 보강장치 해석모델 개발 - 감쇠력, 강성 (강선 단면적), 복원력 (초기장력)의 기여도 분석, 지진해석을 통한 성능평가
	실험을 통한 개발된 보강장치의 설계 및 내진성능 평가	- 개발된 댐퍼 + PC 골조의 내진보강설계기법 개발 - 개발된 시스템이 설치된 비보강 RC 골조의 내진보강 성능실험을 통한 성능평가 및 시공성 검증

(5) 자가복원 시스템 설치용 감쇠장치 개발

달성도 (%)	주요 연구활동	세부 연구내용
100	감쇠장치 선정 및 설치상세 개발	- 감쇠특성, 제작단가, 설치형상 등을 고려한 댐퍼의 선정 - 골조실험체 크기 및 강성을 고려한 형상 설계 - 댐퍼 유닛 해석모델 개발
	개발된 감쇠장치의 성능평가	- 골조실험체 및 강선의 강성을 고려한 적정 용량 결정 - 댐퍼 유닛 성능실험 및 실험결과를 바탕으로 해석모델 검증

(6) 개발된 시스템의 설치상세 및 시공매뉴얼 개발

달성도 (%)	주요 연구활동	세부 연구내용
80	- 실험체 및 예제모델 설계 - 개발된 장치의 설치 상세 개발	- 국내/해외 설계 기준 및 유사 시스템 시공 사례 조사 - 성능실험을 위한 PC 골조설계 - 기존 설계 프로세스 및 업계 동향 조사

3-2 관련분야 기여도

연구/기술개발 내용	기술적 성과 및 기여도
댐퍼와 강선을 결합한 내진보강시스템 개발 및 실험	실험보고서 1건 특허 1건
댐퍼와 강선을 결합한 내진보강시스템 해석/설계기술 개발	논문 2건
PC와 강선을 이용한 내진보강시스템 개발 및 실험	실험보고서 1건 특허 1건
PC와 강선을 이용한 내진보강시스템 해석모델 개발	논문 1건
개발된 내진보강장치에 적절한 감쇠장치개발 및 실험	보고서 1건
감쇠장치의 내진보강 효과 분석	논문 2건

4. 연구개발성과의 활용계획

4.1 노후 구조물의 저비용 고효율 내진보강

- 강성보강이나 제진장치 보강 등 기존의 내진보강기법들은 소요되는 비용에 비하여 보강 효율이 낮아 구조기술자들에게 충분한 신뢰감을 주지 못하는 것이 현실임.
- 본 연구를 통하여 개발될 내진보강장치는 강성증가, 감쇠력, 복원력 등 세 가지 보강 요소를 동시에 적용함으로써 내진보강 효과를 극대화하고, 소요 비용을 최소화할 수 있음.
- 층별로 보강이 이루어지는 기존의 내진보강기법들에 비하여 본 연구에서 개발되는 보강기법은 하나의 보강유닛으로 여러 층에 걸쳐 보강하므로, 설치 개소를 최소화하여 재료비 및 공사비를 최소화할 수 있음.
- 특히 대상 구조물 및 지진의 동적 특성에 따라 각 보강요소의 상대적 크기를 효율적으로 결정함으로써, 발생하는 지진의 크기에 관계없이 다단계 성능목표를 모두 만족하는 것이 중요한 반도체공장 등 정밀가공시설이나 중요도 특에 해당하는 주요건물의 생애주기비용 측면에서 내진보강 효과를 극대화함.

4.2 내진보강장치의 최적화

- 본 연구를 통하여 개발될 내진보강 시스템은 강성, 감쇠력, 복원력 등 다양한 보강요소가 유기적으로 결합되어 있으며, 최소의 비용으로 목표 성능수준을 확보하기 위해서는 각 보강 요소의 조합, 대상 구조물의 동적인 특성, 목표성능 등 다양한 설계변수를 고려한 합리적 설계가 필수적임.
- 이러한 다양한 변수를 동시에 고려하여 보강장치의 최적의 조합을 도출하기 위해서는 체계적인 접근 방법이 필요하며, 유전자알고리즘을 적용하여 주어진 성능목표를 만족하면서도 개발된 제품의 제작 및 설치비용을 최소화할 수 있는 최적화기술을 개발할 수 있음.
- 개발된 최적화기술은 내진보강설계 실무자가 쉽게 사용할 수 있도록 윈도우 환경에서 MIDAS GEN이나 PERFORM 3D와 같은 범용 프로그램과 연동하여 구동 가능한 프로그램으로 개발함.

4.3 생애주기비용에 근거한 경제성 평가

- 지진에 의한 생애주기 보수비용을 산정하기 위해서는 구조물의 지진 취약도 (fragility) 및 위험도 (risk) 해석결과가 필요하며, 이를 위하여 많은 지진에 대한 비선형 동적해석을 수행하고 그 결과를 통계적으로 처리하여야함.
 - 이러한 해석절차는 실무자들이 쉽게 사용하기 어려우므로, 본 연구에서는 해석모델의 단순화, 취약도 함수의 단순화 등 LCC와 관련된 다양한 요소의 단순화 기법을 개발하고, 개발된 내진보강장치가 설치된 건물의 생애주기비용을 손쉽게 평가할 수 있는 해석기술을 개발함.
 - 개발된 단순화된 생애주기비용 산정기법을 이용하여 내진보강 설계 실무자들이 다양한 내진보강기법에 대한 생애주기비용을 손쉽게 비교평가할 수 있도록 함으로써, 가장 적절한 내진보강기법 선정에 위한 기초자료를 제시함.
-

4.4 노후구조물 내진을 향상

- 현재 국내 구조물의 내진설계 적용 비율은 구조물 종류에 따라 25 ~ 50 % 정도로 매우 미흡한 상태이며 특히 건축물의 내진율이 매우 낮은 상태임. 하지만 현행 건축물 내진보강 관련 기술의 수준은 단기간에 내진율을 크게 높이기에는 기술적 비용적 측면에서 매우 부족한 상태임.
- 본 연구를 통하여 개발 예정인 고효율 저비용 내진보강기법을 적용하여 노후 건물에 대한 내진보강을 수행함으로써 내진율을 획기적으로 개선함.

4.5 수입 감쇠장치의 대체효과

- 최근 몇 년간 고속철도 교량의 내진보강을 위한 점성댐퍼의 수입액이 연간 2천억 이상 되는 것으로 알려져 있으며, 건물의 내진보강 분야에서도 점탄성댐퍼 등 보강 효과가 우수한 수입 제품들이 많이 적용되고 있음.
- 본 연구를 통하여 개발되는 고성능 감쇠장치는 기존 수입 보강장치들에 비하여 동일한 성능에 저비용 생산이 가능하므로 수입 대체효과가 기대됨.

4.6 자연재해에 대한 대비

- 본 연구에서 개발 예정인 내진보강기법은 층과 층 사이가 아니라 전체 구조물에 설치되므로, 건물의 전면적 붕괴를 방지하기 위한 목적으로 효과적으로 적용 가능함.
 - 최근 우면산 산사태로 인근 주택 및 아파트가 손상된 사건을 계기로 산사태나 홍수 등 기후변화에 따른 자연재해에 대한 관심이 높아지고 있으며, 본 연구를 통하여 개발될 보강장치를 이용하여 자연재해가 우려되는 지역의 구조물 안전성을 향상할 수 있을 것으로 기대됨.
-

붙임. 참고 문헌

- ACI 374.2R-13: Guide for testing reinforced concrete structure elements under slowly applied simulated seismic loads, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute. (2013)
 - ASCE. (2010). Minimum design loads for buildings and other structures. Reston: ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers.
 - ASCE/SEI 59-11 (2011), Blast protection of buildings, American Society of Civil Engineers.
 - ASCE 41-13 (2013), Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers
 - ATC. (2009). Quantification of building seismic performance factors. Redwood City: ATC-63, Applied Technology Council.
 - FEMA 356 (2000) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
 - Korea Building Code, Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea, 2009.
 - Lee J and Kim J (2015) Seismic performance evaluation of moment frames with slit-friction hybrid dampers. Earthquakes and Structures 9(6): 1291-1311.
 - MCEER, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
 - MIDAS, G. (2007). General structure design system for windows. Bundang-gu: MIDAS Information Technology Co Ltd.
 - PEER, NGA Database. (2006). Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. <http://peer.berkeley.edu/nga>.
 - PERFORM-3D. (2006). Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures-user guide. Berkeley: Computers and Structures.
 - SAP (2010). Analysis Reference Manual. Computer and Structures, Berkeley
 - Wen YK, Kang YJ (2001) Minimum building life cycle cost design criteria I: Methodology. Journal of Structural Engineering (ASCE); 127(3): 330-337.
-

부 록

- 부록 1. DCS 내진보강시스템 특기시방서
- 부록 2. 내진보강공사 특허 공법 비교표
- 부록 3. 기계연구원 댐퍼실험 보고서
- 부록 4. 부산대 지진방재센터 진동대시험 보고서

Preload DCS 내진보강 시스템

- 특기사항 -

2019. 01.

Preload DCS 내진보강 시스템 설치공사

1. 일반사항

1.1 개 요

본 시방서는 Preload DCS 내진보강시스템 장치 및 연결부재의 설치와 시공에 대하여 적용한다.

본 시방서에서 정하지 않은 사항은 건축관계 법령 및 국토해양부 건축공사 표준시방서에 따른다. 또한 특별한 조사, 연구 등에 따라 이 시방서의 전부 또는 일부를 적용하지 않을 경우에는 감독자의 승인을 받아 시행하여야 한다.

1.2 적용기준

다음 기준은 이시방서에 명시되어 있는 범위 내에서 이 시방서의 일부를 구성하는 것으로 본다.

1) 한국산업규격(K.S.)

- KS B 1010 마찰접합용 고장력 6각 볼트, 6각 너트, 평와셔 세트
- KS D 3503 일반 구조용 압연강재
- KS D 3566 일반구조용 탄소강관
- KS D 3568 일반구조용 각형강관
- KS D 7002 PS 강선 및 PS 강연선

2) 건축공사 표준시방서(국토해양부)

3) 콘크리트 표준시방서(국토해양부)

4) 건축구조설계기준(국토해양부)

1.3 시공업체의 선정

Prestressing을 위한 시공업체는 자재, 엔지니어링, 시공 등의 품질저하를 방지하기 위해 포스트텐션에 대한 충분한 Know-how 가 있어야 한다. 이에 아래와 같은 조건을 확인토록 한다.

1) 시공에 필요한 엔지니어링이 가능한 업체

2) Prestressing를 재하하기 위한 특수장비를 보유한 업체

2. 시스템 구성도

2.1 구성 개념도

Preload DCS 내진보강시스템은 [그림1]와 같이 구조형식이 이루어지며 각 구성요소부재는 [그림2]와 같이 제작 설치된다.



학교 내진보강 개념도



창고 등 생산시설 내진보강 개념도

[그림 1] Preload DCS 내진보강시스템 전체 구성도

3. 자재 및 장치

3.1 DCS댐퍼

DCS댐퍼에 사용되는 각종 철판, 환봉은 1.2절에 규정한 재료 이상의 품질을 갖는 가재를 사용하여야 하며, 표면은 녹 방지를 위하여 도장을 한다. [표 1]은 구조용 가재의 재료강도를 나타내고, [표 2]는 스프링의 재료강도를 나타낸다. [표 3]은 내부 오일의 사양을 나타낸다.

[표 1] 구조용 강재의 재료강도

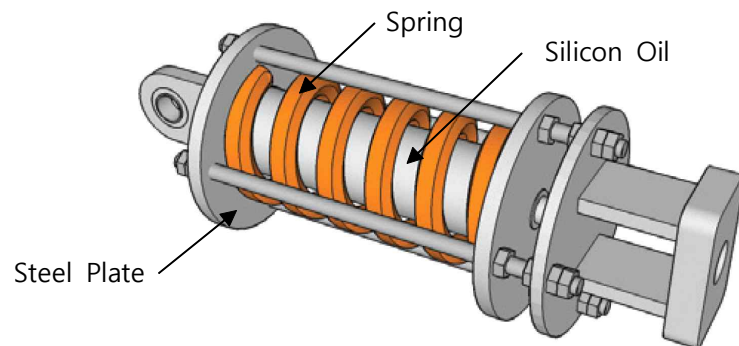
강도	강재종별		SS400	STK400 SPSR400	STK490 SPSR490
	판두께				
Fy [MPa]	두께 40mm 이하 두께 40mm 초과 100mm 이하		235 215	235 판두께 (2.3 ~ 22mm)	325 판두께 (2.3 ~ 22mm)
Fu [MPa]	두께 100mm 이하		400	400	490

[표 2] 스프링의 재료강도

재질	G 계수	E 계수	비중(ρ)
SWP,SW	1.0이하: 8200	21000	7.85
	2.0-5.5: 8200		
	5.5이상: 8000		
SWOSC-V	1.0이하: 7980		
	2.0-5.5: 7790		
	5.5이상: 7600		
SUS 3 계열	7000	19000	7.90
SUS 6 계열		20000	
황 동	4000	10000	8.60
양 백		11000	9.00
인청동	4300	10000	8.10

[표 3] 오일의 사양

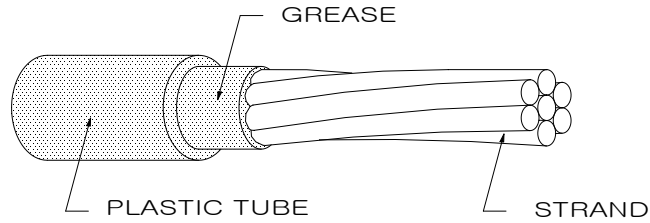
재질	사양
Silicon	100만Cst



3.2 PS강연선

Post-tensioning에 사용되는 강연선은 1860Mp Low Relaxation 제품을 사용한다. 해당 현장에 따라 비부착식 강연선을 사용할때는 외측에 PE 피복이 씌워져 있으며, 부식방지를 위해 그리스가 충전 되어있어야 한다.

- 공칭직경 : $D=15.2\text{mm}$ (PE 피복 포함 $D=15.2\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$)
- 공칭단면적 : 138.7mm^2
- 공칭단위중량 : 1.2kg/m (PE 피복 포함)
- 절단하중 : 26.1kN
- 항복하중 : 22.2kN



3.3 Anchor plate

1) 1) 사용하는 구조용 강재는 아래 표에 명시한 KS 규격품으로 하고, 그 종류는 공사시방서에 따른다.

명 칭	재질	사 용 규 격
2) ANCHOR PLATE	PLATE 9T	용접구조용 압연강재 (SM355)

3)

4) 2) 정착장치(정착구)는 구조물에 긴장력을 정확히 도입 할 수 있는 견고한 제품 이어야하며, 내부의 설치된 강연선을 쐐기(Wedge) 방식에 의해 유지하여야 한다. 특히 정착 쐐기(Wedge)는 Unbonded system 비부착식 정착자재의 특성에 따라 피로 및 정적 동적 하중에 견딜 수 있도록 충분한 성능을 가져야 한다. 특히 피로에 대한 성능을 위해 3Pieces 방식의 쐐기를 권장하다.

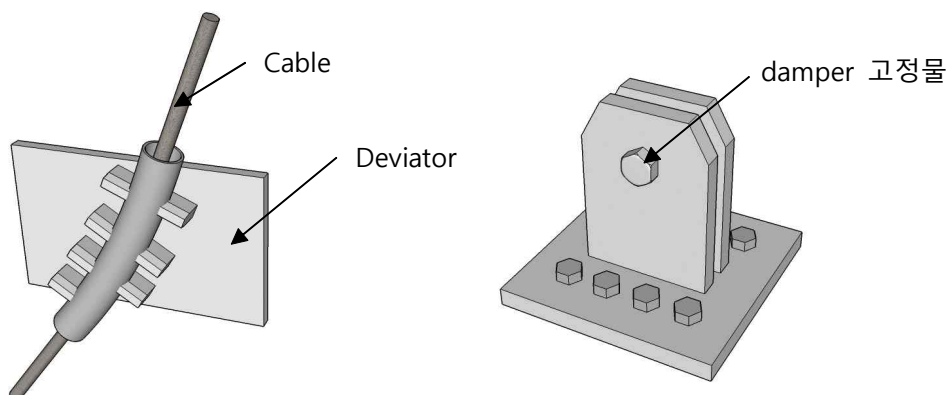
5)

3.4 Deviator & Damper 고정물

Deviator 및 Anchorage에 사용되는 각종 철판, 환봉은 1.2절에 규정한 재료 이상의 품질을 갖는 가재를 사용하여야 하며, 표면은 녹 방지를 위하여 도장을 한다. [표 1]은 구조용 가재의 재료강도를 나타낸다.

[표 1] 구조용 강재의 재료강도

강도	강재종별 판두께	SS400	STK400 SPSR400	STK490 SPSR490
Fy [MPa]	두께 40mm 이하 두께 40mm 초과 100mm 이하	235 215	235 판두께 (2.3 ~ 22mm)	325 판두께 (2.3 ~ 22mm)
Fu [MPa]	두께 100mm 이하	400	400	490



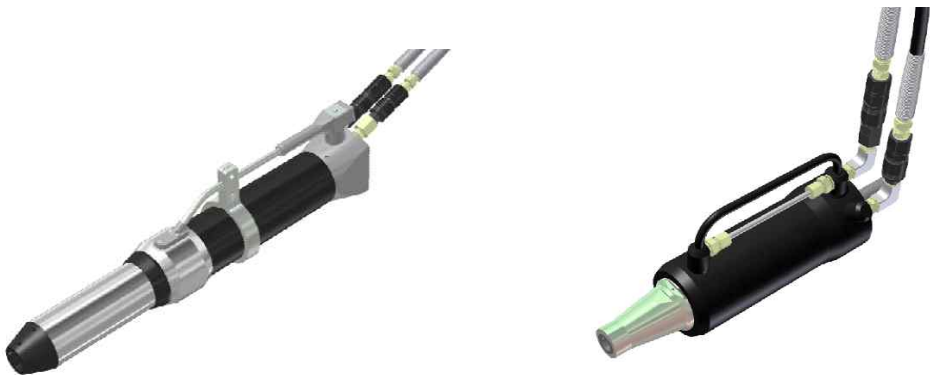
3.5 에폭시 주입재

6) DE-1000은 저점도 고접착 에폭시 주입재로서 보강용 강판의 주입접착용이며 강판과 대상콘크리트 구조물을 접착 일체화하는 주입 충전 용도에 적용한다.

시험항목	시험치	시험방법
인장강도 (kgf/cm ²)	400 이상	KS F 3211 KS M 3015
압축강도 (kgf/cm ²)	850 이상	
굴곡강도 (kgf/cm ²)	500 이상	
인장전단접착강도 (kgf/cm ²)	100 이상	

3.6 PS긴장 JACK

1) 긴장력 도입 방식에 따라 크게 Mono type 과 Multi type 으로 분류되어진다. 모든 유압잭은 Wedge draw-in를 최소화 하기 위해 유압에 의한 Lock off (웨찌박음) 기능이 있어야 한다. 이로써 손실율을 최소화 해야한다.



2) 유압펌프 (Manual type & Solenoid type)

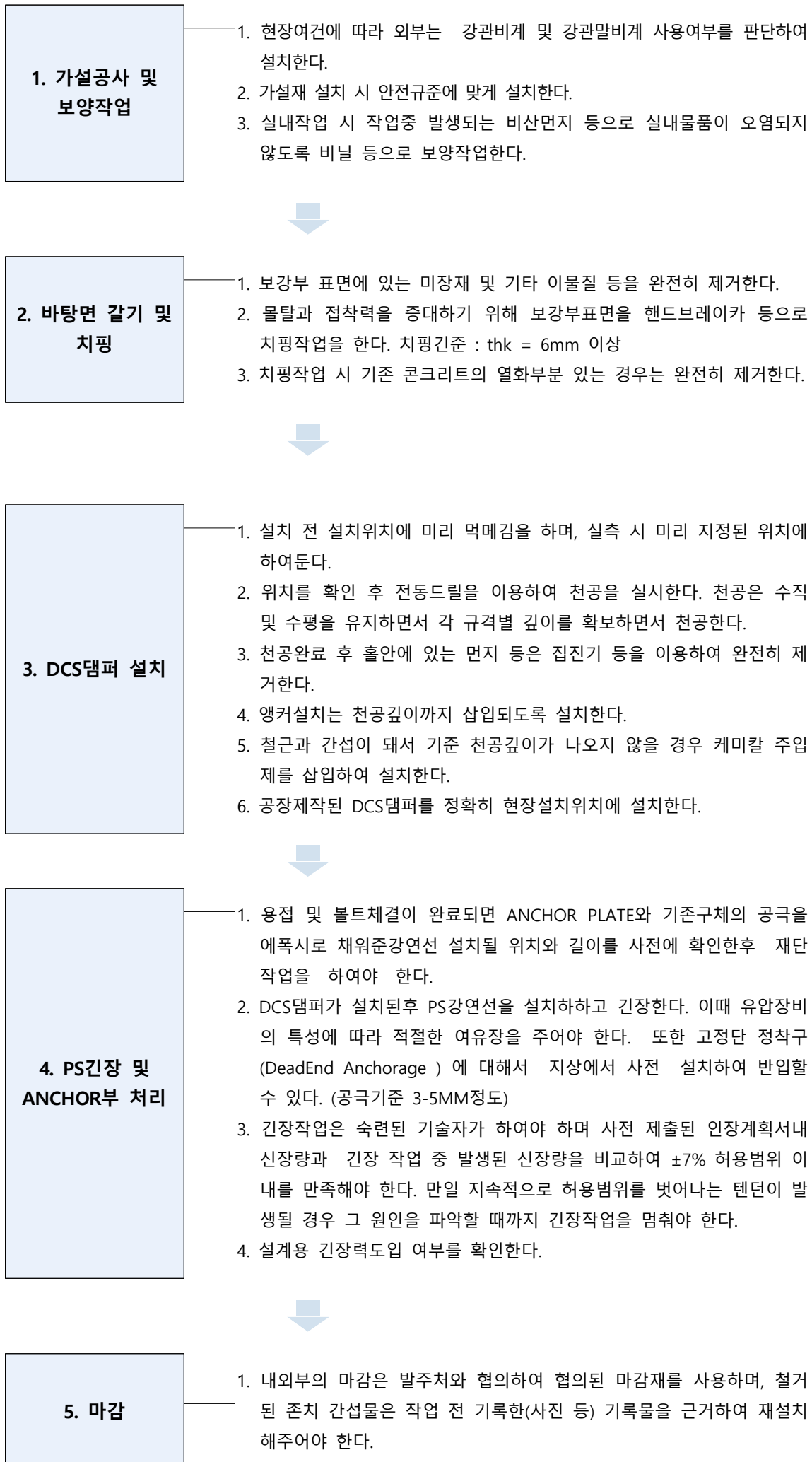
- ① 가용 압력 : 0~700bar
- ② 일정 압력이상의 설정을 위한 Relief Valve 와 안전을 Soft Valve, Overflow valve 가 있어야 한다.

3) 검교정 (Calibration)

대상 : Master Gage, Jack
유효기간 : 검교정후 1년 이내
잭손실율 : 2% 이내 (이론값 과 검교정성적서)

4) 운영 : 유압장비의 운영은 숙련된 기술자가 조작하여야 한다. 이때 엔지니어 및 숙련공은 사전에 장비의 도면 과 각각의 제원 및 검교정 성적서를 숙지하여 사전 매뉴얼에 따라 조작하여야 한다. 또한 도입되는 압력 과 그에 따른 긴장력에 대하여 반드시 이중으로 확인을 하여야 한다. 인장작업간 강연선 파단 및 유압장비의 손상등 위험요소에 대해 사전에 주의하여야 하며 별도의 안전조치와 교육을 취해야 한다.

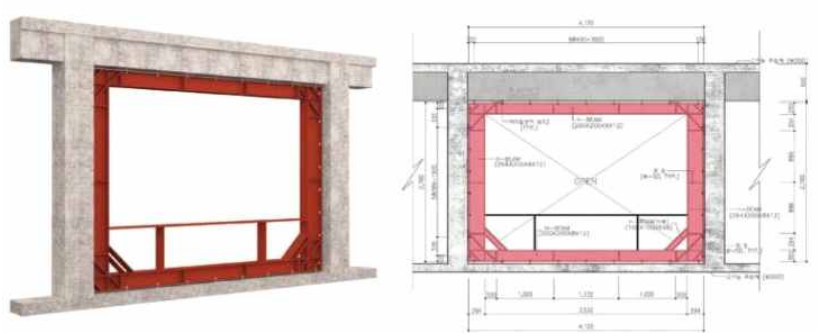
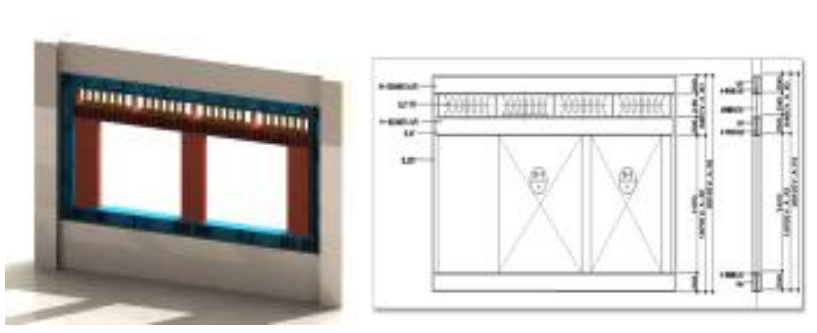
4. 시공순서 및 방법

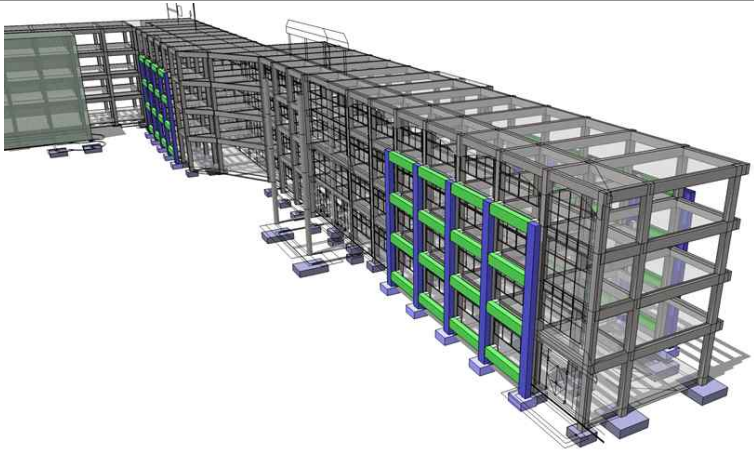
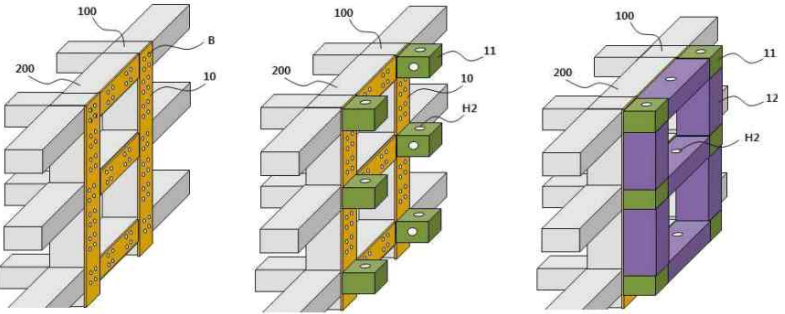


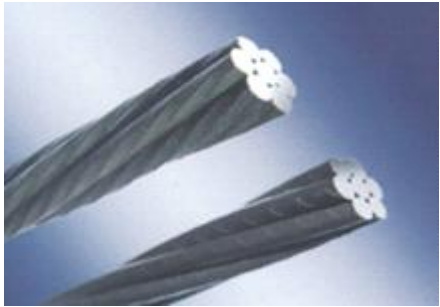
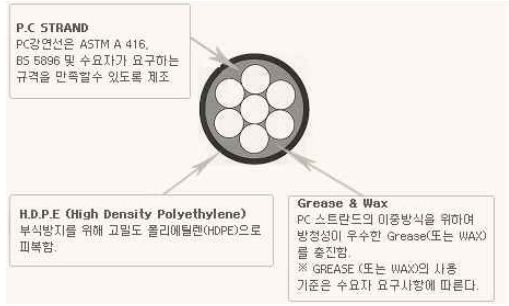
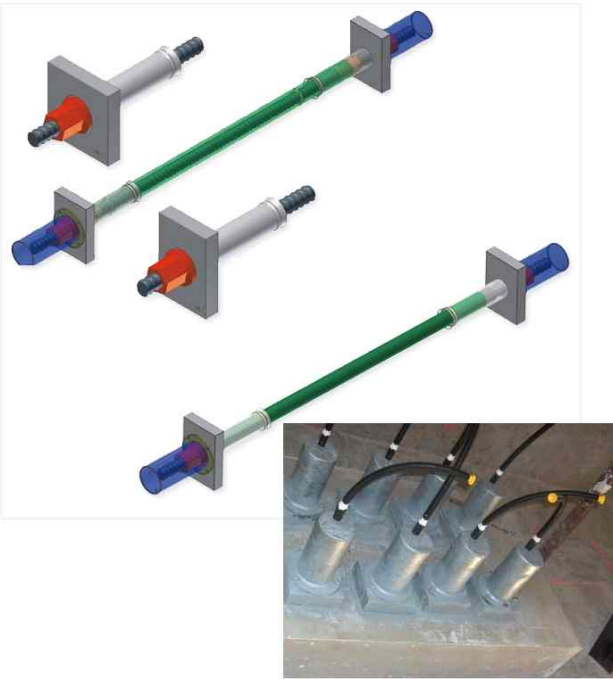
5. 청소

- 1) 시공중 소음, 먼지비산 민원 발생을 미연에 방지하여야 하며, 특히 낙하물 등에 의한 안전관리에 유의하여야 한다.
- 2) 시공 중 발생한 일반폐기물 및 산업폐기물 등은 산업폐기물 전문 처리업체에 위탁하여 적법 절차에 의하여 처리한다.

부록 2. 내진보강공사 특허 공법 비교표

구분	제1안	제2안	제3안																																																															
공법명	DCS(Damped Cable Spring) System	H형강 창호 프레임	창호형 감쇠장치																																																															
형상																																																																		
공법개요	- 복원력을 가진 댐퍼와 층간변위 억제용 케이블로 구성된 내진 보강 시스템	- 보와 기둥으로 이루어진 기존 입면의 면 내에 프레임으로 끼워지는 강도 및 강성 증진형 보강기술	- 수평 및 수직부재와 강재댐퍼를 결합한 구조																																																															
장단점	<장점> - 공사 기간 중 내부 공간 운영 가능 - 학교의 경우 방학기간 외에도 항시 공사 가능 - 보강장치 설치 위치 최소화 - 지진 발생 후 건물에 변형이 생기지 않는 자가 복원(Self-centering) 기능 보유 <단점> - 케이블이 창호의 일부를 가릴 수 있음.	<장점> - 전통적인 H형강 프레임 구조로 신뢰성 확보 <단점> - H형강 창호 프레임 적용 시 기초에 부담이 됨. - 습식공법으로 건식공법 대비 공기가 길어짐.	<장점> - 강도보강과 연성보강 효과가 있음 <단점> - 창호 감쇠장치를 적용 시 기초에 부담이 됨. - 습식공법으로 건식공법 대비 공기가 길어짐.																																																															
경제성	<table><tr><th>단계별 공정</th><th>재료</th><th>시공비 (천원)</th></tr><tr><td>비계 설치 및 바탕면 처리</td><td>가설 재료</td><td>인건비 : 3,000 재료비 : 2,000</td></tr><tr><td>내진보강장치 설치 및 마감처리</td><td>Anchorage, Deviator, Cable, Damper, Anchor</td><td>인건비 : 10,200 재료비 : 39,500 장비비 : 1,300</td></tr><tr><td>Cable pretension</td><td>-</td><td>인건비 : 3,000 장비비 : 1,000</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>1개소당 시공비용</td><td></td><td>60,000</td></tr><tr><td>1동당 시공비용(6개소 적용)</td><td></td><td>360,000</td></tr></table>	단계별 공정	재료	시공비 (천원)	비계 설치 및 바탕면 처리	가설 재료	인건비 : 3,000 재료비 : 2,000	내진보강장치 설치 및 마감처리	Anchorage, Deviator, Cable, Damper, Anchor	인건비 : 10,200 재료비 : 39,500 장비비 : 1,300	Cable pretension	-	인건비 : 3,000 장비비 : 1,000				1개소당 시공비용		60,000	1동당 시공비용(6개소 적용)		360,000	<table><tr><th>단계별 공정</th><th>재료</th><th>시공비 (천원)</th></tr><tr><td>벽체 및 창호철거</td><td></td><td>인건비 : 1,440 장비비 : 1,000</td></tr><tr><td>크레인 인양 및 H형강 프레임 설치</td><td>창호형프레임, 앵커링, 에폭시</td><td>인건비 : 2,400 재료비 : 11,000 장비비 : 1,000</td></tr><tr><td>허리벽 시공</td><td>조적벽돌,</td><td>인건비 : 960 재료비 : 1,000</td></tr><tr><td>내부마감</td><td>마감재</td><td>인건비 : 960 재료비 : 3,000</td></tr><tr><td>1개소당 시공비용</td><td></td><td>22,760</td></tr><tr><td>1동당 시공비용(18개소 적용)</td><td></td><td>409,680</td></tr></table>	단계별 공정	재료	시공비 (천원)	벽체 및 창호철거		인건비 : 1,440 장비비 : 1,000	크레인 인양 및 H형강 프레임 설치	창호형프레임, 앵커링, 에폭시	인건비 : 2,400 재료비 : 11,000 장비비 : 1,000	허리벽 시공	조적벽돌,	인건비 : 960 재료비 : 1,000	내부마감	마감재	인건비 : 960 재료비 : 3,000	1개소당 시공비용		22,760	1동당 시공비용(18개소 적용)		409,680	<table><tr><th>단계별 공정</th><th>재료</th><th>시공비 (천원)</th></tr><tr><td>창호철거, 조적벽 철거 및 RC벽체 설치</td><td>철근 및 콘크리트</td><td>인건비 : 2,160 재료비 : 1,000 장비비 : 1,000</td></tr><tr><td>크레인 인양 및 창호형 감쇠장치 설치</td><td>감쇠장치, 앵커링</td><td>인건비 : 960 재료비 : 13,500 장비비 : 1,000</td></tr><tr><td>씰링 및 에폭시 주입</td><td>에폭시, 씰링재</td><td>인건비 : 480 재료비 : 1,500</td></tr><tr><td>창호형 감쇠장치 설치 완료 및 마감공사</td><td>마감재</td><td>인건비 : 960 재료비 : 2,000</td></tr><tr><td>1개소당 시공비용</td><td></td><td>24,560</td></tr><tr><td>1동당 시공비용(18개소 적용)</td><td></td><td>442,080</td></tr></table>	단계별 공정	재료	시공비 (천원)	창호철거, 조적벽 철거 및 RC벽체 설치	철근 및 콘크리트	인건비 : 2,160 재료비 : 1,000 장비비 : 1,000	크레인 인양 및 창호형 감쇠장치 설치	감쇠장치, 앵커링	인건비 : 960 재료비 : 13,500 장비비 : 1,000	씰링 및 에폭시 주입	에폭시, 씰링재	인건비 : 480 재료비 : 1,500	창호형 감쇠장치 설치 완료 및 마감공사	마감재	인건비 : 960 재료비 : 2,000	1개소당 시공비용		24,560	1동당 시공비용(18개소 적용)		442,080
	단계별 공정	재료	시공비 (천원)																																																															
	비계 설치 및 바탕면 처리	가설 재료	인건비 : 3,000 재료비 : 2,000																																																															
	내진보강장치 설치 및 마감처리	Anchorage, Deviator, Cable, Damper, Anchor	인건비 : 10,200 재료비 : 39,500 장비비 : 1,300																																																															
	Cable pretension	-	인건비 : 3,000 장비비 : 1,000																																																															
	1개소당 시공비용		60,000																																																															
1동당 시공비용(6개소 적용)		360,000																																																																
단계별 공정	재료	시공비 (천원)																																																																
벽체 및 창호철거		인건비 : 1,440 장비비 : 1,000																																																																
크레인 인양 및 H형강 프레임 설치	창호형프레임, 앵커링, 에폭시	인건비 : 2,400 재료비 : 11,000 장비비 : 1,000																																																																
허리벽 시공	조적벽돌,	인건비 : 960 재료비 : 1,000																																																																
내부마감	마감재	인건비 : 960 재료비 : 3,000																																																																
1개소당 시공비용		22,760																																																																
1동당 시공비용(18개소 적용)		409,680																																																																
단계별 공정	재료	시공비 (천원)																																																																
창호철거, 조적벽 철거 및 RC벽체 설치	철근 및 콘크리트	인건비 : 2,160 재료비 : 1,000 장비비 : 1,000																																																																
크레인 인양 및 창호형 감쇠장치 설치	감쇠장치, 앵커링	인건비 : 960 재료비 : 13,500 장비비 : 1,000																																																																
씰링 및 에폭시 주입	에폭시, 씰링재	인건비 : 480 재료비 : 1,500																																																																
창호형 감쇠장치 설치 완료 및 마감공사	마감재	인건비 : 960 재료비 : 2,000																																																																
1개소당 시공비용		24,560																																																																
1동당 시공비용(18개소 적용)		442,080																																																																
- 1동당 시공비용 평균 내진보강 개소 반영 - 시공 비용은 현장조건에 따라 다소 변경될 수 있음			- 1동당 시공비용 평균 내진보강 개소 반영 - 시공 비용은 현장조건에 따라 다소 변경될 수 있음 - 양생기간 고려 시 공기는 상기 일정보다 늘어남	- 1동당 시공비용 평균 내진보강 개소 반영 - 시공 비용은 현장조건에 따라 다소 변경될 수 있음 - 양생기간 고려 시 공기는 상기 일정보다 늘어남																																																														

구분	제1안	제2안																														
공법명	Preloaded PC frame 내진보강공법	CFT 프레임 내진보강공법																														
사용 재료	Precast concrete, friction damper	구조용 강재(강판재), 양카, 고성능물탈(무수축물탈), 용접봉, 에폭시 수지, 녹막이 페인트																														
																																
공법 개요	- 기존 건물의 외부에 PC PS 골조를 부착하여 강성 및 강도를 증가시키고 내진성능을 향상하는 보강공법	- 기존의 철근콘크리트 부재표면에 CFT 접합장치를 설치하고, CFT 기둥을 접합장치에 용접하여 일체화한 후 고성능물탈(무수축물탈)을 주입하여 기존 철근콘크리트의 내진성능을 향상시키는 공법																														
장점	- 공사 기간 중 내부 공간 운영 가능 - 학교의 경우 방학기간 외에도 항시 공사 가능 - 지진 발생 후 건물에 변형이 생기지 않는 자가복원(Self-centering)이 가능하여 보수 비용이 절감됨 - 건식공법으로 공기가 짧고 시공이 간편함. - PC를 공장에서 사전 제작하여 현장에서 조립하는 방법으로 공사 기간이 단축됨 - Prestress의 크기, Tendon의 굵기 및 개수를 조정하여 외부 골조의 강성이나 강도를 쉽게 조정 가능	- 사용 재료에 대한 신뢰성이 있음. - 용도에 따라 현장 적용성이 높음. - 조망 및 채광이 유리함. - 다양한 마감(도장, 조적, 복합패널 등)이 가능함.																														
단점	- 기초에 부담을 줄 수 있음. - 기존 골조 상태에 따라 설치 시 체결부 상세설계가 필요함.	- 철골 부분은 사전제작 기간이 필요함. - 강관 내부 충전될 콘크리트를 적절하게 배합하는 설계법 확립이 필요하며 효율적으로 완벽하게 충전되는지 확인이 어려움. - 보와 기둥의 연속접합 시공이 곤란함. - 시공 시 중장비가 필요함. - 현장에서 용접작업이 필요함. - 습식공법으로 양생 등 공사기간이 많이 소요됨. - 강관 내부 습기에 의해 겨울철 동결 및 화재 시 폭열 가능성. - 강관기둥 내 타설 시 바이브레이터 사용이 곤란함. - 강관 강성이 커 외부 진동방지 효과의 기대가 곤란함. - 타설속도가 빠르면 강관 내 에어포켓이 발생할 수 있음. - 건식공법에 비해 시공이 난해하며, 추가적인 기초 보강이 필요																														
	<table><tr><td rowspan="4">개소당 공사비용 (평균) 단위: 천원</td><td>철거</td><td>-</td></tr><tr><td>마감</td><td>2,000</td></tr><tr><td>마찰댐퍼</td><td>20,000</td></tr><tr><td>내진보강공사</td><td>36,000</td></tr><tr><td colspan="2">1개소당 시공비용</td><td>58,000</td></tr><tr><td colspan="2">1동당 시공비용(4경간 6개소 적용)</td><td>348,000</td></tr></table>	개소당 공사비용 (평균) 단위: 천원	철거	-	마감	2,000	마찰댐퍼	20,000	내진보강공사	36,000	1개소당 시공비용		58,000	1동당 시공비용(4경간 6개소 적용)		348,000	<table><tr><td rowspan="4">개소당 공사비용 (평균) 단위: 천원</td><td>철거</td><td>1,800</td></tr><tr><td>마감</td><td>1,800</td></tr><tr><td>마찰댐퍼</td><td>-</td></tr><tr><td>내진보강공사</td><td>20,150</td></tr><tr><td colspan="2">1개소당 시공비용</td><td>23,750</td></tr><tr><td colspan="2">1동당 시공비용(1경간 16개소 적용)</td><td>380,000</td></tr></table>	개소당 공사비용 (평균) 단위: 천원	철거	1,800	마감	1,800	마찰댐퍼	-	내진보강공사	20,150	1개소당 시공비용		23,750	1동당 시공비용(1경간 16개소 적용)		380,000
개소당 공사비용 (평균) 단위: 천원	철거		-																													
	마감		2,000																													
	마찰댐퍼		20,000																													
	내진보강공사	36,000																														
1개소당 시공비용		58,000																														
1동당 시공비용(4경간 6개소 적용)		348,000																														
개소당 공사비용 (평균) 단위: 천원	철거	1,800																														
	마감	1,800																														
	마찰댐퍼	-																														
	내진보강공사	20,150																														
1개소당 시공비용		23,750																														
1동당 시공비용(1경간 16개소 적용)		380,000																														

보완 사항	기존 내용	변경 내용
- DCS 시스템 케이블 부식 방지 방안	- 현재 DCS 시스템에 적용된 케이블은 피복되어 있지 않고, 외부에 노출되어 있는 상태 	- DCS 시스템 케이블의 부식방지를 위해 케이블 외측에 연질 고무피복 후 나일론 피복.  - DCS 시스템 케이블의 부식방지를 위해 케이블 외측에 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)으로 피복하며 케이블과 폴리에틸렌 사이에 방청성이 우수한 Grease(또는 wax)를 충전. 
- PC 보강에서 PC와 기존 구조체를 연결하는 강봉의 부식 방지 방안	- 현재 PC 보강에서 PC와 기존 구조체를 연결하는 강봉은 피복되어 있지 않고, 외부에 노출되어 있는 상태 	- 강봉의 부식방지를 위해 외측에 연질 고무피복 - 강봉의 부식방지를 위해 강봉에 방청 윤활제를 바르고 내부 및 외부에 관을 삽입 

보완 사항	기존 내용	변경 내용
	- PC 보강체의 콘크리트가 외부에 노출되어 있는 상태	- PC 보강체를 도장 하거나 마감용 Panel을 부착하여 부식을 최소화 함 

9. 뒷면지

주 의

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