



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022년 02월
석사학위 논문

다중 각형 강재 유니트
내진보강시스템에 대한 연구

조선대학교 대학원

건축공학과

이 선 주

다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템에 대한 연구

A Study on the Seismic Strengthening System Using
Multi Steel Tube Unit

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원

건축공학과

이 선 주

다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템에 대한 연구

지도교수 조 창 근

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2021년 10월

조선대학교 대학원

건 축 공 학 과

이 선 주

이선주의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김형기 (인)

위원 조선대학교 교수 최재혁 (인)

위원 조선대학교 교수 조창근 (인)

2021년 12월

조선대학교 대학원

<목 차>

제1장 서론	1
제1절 연구 배경 및 목적	1
제2절 연구 동향	2
제3절 연구내용 및 방법	6
제2장 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템	8
제1절 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템 개요	8
제3장 다중 각형 강재 유니트 실험	11
제1절 실험체 개요	11
1. 개요	11
2. 재료	11
3. 실험 변수 및 실험체 제작	11
4. 가력 상세 및 측정 방법	16
제2절 실험 결과	19
1. 하중 변위 곡선	19
2. 파괴양상	25
3. 강성 및 전단력	33
제3절 소결	36
제4장 2층 다중 각형 강재 유니트 보강골조 실험 및 구조 해석	37
제1절 실험체 개요	37

1. 개요	37
2. 재료	38
3. 실험 변수 및 실험체 제작	42
4. 가력 상세 및 측정 방법	55
제2절 실험 결과	59
1. 하중 변위 곡선	59
2. 균열진전 및 파괴양상	65
3. 강성 및 전단력	87
제3절 해석 결과와 실험 결과 비교 및 평가	90
제4절 소결	95
제5장 다중 각형 강재 유니트 보강골조 성능평가	97
제1절 대상 건축물 계획	97
제2절 비선형 정적해석 통한 내진성능평가	101
1. 성능 곡선 및 성능점	101
2. 밀면전단력	105
3. 소성한지분포	107
4. 층간변위비 및 최대변위	112
제3절 소결	116
제6장 결론	118
참고문헌	120

<표 목차>

[표 1.1] 연구 내용 및 방법	7
[표 2.1] 접합부 시공 과정	10
[표 3.1] 사용된 강재들의 역학적 특성	11
[표 3.2] 각 변수별 주요 상세	12
[표 3.3] 가력 상세	18
[표 3.4] 실험체별 초기강성, 하중, 변위	22
[표 4.1] 실험체 제작을 위한 콘크리트 배합표	38
[표 4.2] 사용된 철근들의 역학적 특성	40
[표 4.3] 사용된 강재들의 역학적 특성	41
[표 4.4] 각 변수별 주요 상세	42
[표 4.5] 가력 상세	58
[표 4.6] 실험체별 초기강성, 하중, 변위	62
[표 4.7] 실험체 NR-1에 대한 실험체별 초기강성, 하중, 변위	64
[표 4.8] 해석 결과와 실험 결과 비교 요약	92
[표 5.1] 5층 골조 모델 개요	100
[표 5.2] 설계 및 하중 개요	100
[표 5.3] 5층 골조 모델에 대한 성능점 요약(코어부 보강)	101
[표 5.4] 5층 골조 모델에 대한 성능점 요약(외측부 보강)	103
[표 5.5] 5층 골조 모델에 대한 소성힌지분포 요약(코어부 보강)	109
[표 5.6] 5층 골조 모델에 대한 소성힌지분포 요약(외측부 보강)	111

<그림 목차>

[그림 2.1] 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템 형상	8
[그림 2.2] 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템 구성	9
[그림 3.1] 다중 각형 강재 유니트 실험체의 제작 순서	15
[그림 3.2] 다중 각형 강재 유니트 실험 전경	16
[그림 3.3] 가력 및 측정 셋팅 상세	17
[그림 3.4] 가력 곡선	18
[그림 3.5] 횡하중-횡변위 관계 Case 1_Tube	20
[그림 3.6] 횡하중-횡변위 관계 Case 2_Tube	20
[그림 3.7] 횡하중-횡변위 관계 Case 1_Plate	21
[그림 3.8] 횡하중-횡변위 관계 Case 2_Plate	21
[그림 3.9] 횡하중-횡변위 관계 Case 1_Tube, Case 2_Tube의 비교	23
[그림 3.10] 횡하중-횡변위 관계 Case 1_Plate, Case 2_Plate의 비교	23
[그림 3.11] 횡하중-횡변위 관계 Case 1_Tube, Case 1_Plate의 비교	24
[그림 3.12] 횡하중-횡변위 관계 Case 2_Tube, Case 2_Plate의 비교	24
[그림 3.13] 실험체 Case 1_Tube 형상	25
[그림 3.14] 실험체 Case 1_Tube 파괴양상	26
[그림 3.15] 실험체 Case 2_Tube 형상	27
[그림 3.16] 실험체 Case 2_Tube 파괴양상	28
[그림 3.17] 실험체 Case 1_Plate 형상	29
[그림 3.18] 실험체 Case 1_Plate 파괴양상	30
[그림 3.19] 실험체 Case 2_Plate 형상	31
[그림 3.20] 실험체 Case 2_Plate 파괴양상	32
[그림 3.21] 실험체별 초기강성 및 강성저하	34
[그림 3.22] 실험체별 16cycle 및 최대내력 시점의 전단력	35
[그림 4.1] 콘크리트의 응력-변형을 관계	39
[그림 4.2] 철근의 응력-변형을 관계	40
[그림 4.3] 실험체 NR-1 도면	44
[그림 4.4] 실험체 NR-1 형상	46
[그림 4.5] 실험체 TR-1 도면	47
[그림 4.6] 실험체 TR-1 형상	48
[그림 4.7] 실험체 TR-2 도면	49
[그림 4.8] 실험체 TR-2 형상	50

[그림 4.9] 실험체 TR-3 도면	51
[그림 4.10] 실험체 TR-3 형상	52
[그림 4.11] 비내진 상세를 갖는 실험체의 제작 순서	53
[그림 4.12] 다중 각형 강재 유니트로 보강된 실험체의 제작 순서	54
[그림 4.13] 2층 다중 각형 강재 유니트 보강골조 실험 전경	56
[그림 4.14] 가력 및 측정 셋팅 상세	56
[그림 4.15] 가력 곡선	58
[그림 4.16] 횡하중-횡변위 관계 NR-1	61
[그림 4.17] 횡하중-횡변위 관계 TR-1	61
[그림 4.18] 횡하중-횡변위 관계 TR-2	61
[그림 4.19] 횡하중-횡변위 관계 TR-3	62
[그림 4.20] 횡하중-횡변위 관계 NR-1, TR-1의 비교	63
[그림 4.21] 횡하중-횡변위 관계 NR-1, TR-2의 비교	63
[그림 4.22] 횡하중-횡변위 관계 NR-1, TR-3의 비교	64
[그림 4.23] 실험체 NR-1 형상 및 최종파괴 형상	65
[그림 4.24] 실험체 NR-1 파괴양상	66
[그림 4.25] 실험체 TR-1 형상 및 최종파괴 형상	67
[그림 4.26] 실험체 TR-1 파괴양상	68
[그림 4.27] 실험체 TR-2 형상 및 최종파괴 형상	73
[그림 4.28] 실험체 TR-2 파괴양상	74
[그림 4.29] 실험체 TR-3 형상 및 최종파괴 형상	80
[그림 4.30] 실험체 TR-3 파괴양상	81
[그림 4.31] 실험체별 초기강성 및 강성저하	88
[그림 4.32] 실험체별 항복상태 및 최대내력 시점의 전단력	89
[그림 4.33] 구조해석 결과 그래프	91
[그림 4.34] 실험 결과 그래프	91
[그림 4.35] 해석 결과와 실험 결과 비교 그래프	93
[그림 5.1] 5층 골조 모델 형상(코어부 보강)	97
[그림 5.2] 5층 골조 모델 평면도 및 보강 위치(코어부 보강)	98
[그림 5.3] 5층 골조 모델 형상(외측부 보강)	98
[그림 5.4] 5층 골조 모델 평면도 및 보강 위치(외측부 보강)	99
[그림 5.5] 5층 골조 모델 입면	99
[그림 5.6] 5층 골조 모델에 대한 성능곡선 및 성능점(코어부 보강)	102
[그림 5.7] 5층 골조 모델에 대한 성능곡선 비교(코어부 보강)	102

[그림 5.8] 5층 골조 모델에 대한 성능곡선 및 성능점(외측부 보강)	104
[그림 5.9] 5층 골조 모델에 대한 성능곡선 비교(외측부 보강)	104
[그림 5.10] 5층 골조 모델에 대한 밀면전단력(코어부 보강)	105
[그림 5.11] 5층 골조 모델에 대한 밀면전단력(외측부 보강)	106
[그림 5.12] 5층 골조 모델에 대한 소성한지분포(코어부 보강)	108
[그림 5.13] 5층 골조 모델에 대한 소성한지분포(외측부 보강)	110
[그림 5.14] 5층 골조 모델에 대한 층간변위 그래프(코어부 보강)	112
[그림 5.15] 5층 골조 모델에 대한 층간변위비 그래프(코어부 보강)	113
[그림 5.16] 5층 골조 모델에 대한 최대변위 그래프(코어부 보강)	113
[그림 5.17] 5층 골조 모델에 대한 층간변위 그래프(외측부 보강)	114
[그림 5.18] 5층 골조 모델에 대한 층간변위비 그래프(외측부 보강)	115
[그림 5.19] 5층 골조 모델에 대한 최대변위 그래프(외측부 보강)	115

ABSTRACT

A Study on the Seismic Strengthening System Using Multi Steel Tube Unit

Lee Sun Ju

Advisor : Prof. Cho Chang-Geun, Ph.D.

Department of Architectural Engineering,

Graduate School of Chosun University

In this study, A seismic strengthening system using multi steel tube unit was developed. This system applied the stiffness and strength enhancement method, which is an effective seismic reinforcement technique for the existing non-seismic buildings of middle and low-rise buildings. It was intended to compensate for the shortcomings of the existing seismic strengthening systems. It is designed to improve constructability through factory production and to allow for variability.

In order to adopt an effective layout and bonding method with the existing structure, multi steel tube unit experiments were conducted. It was divided into two classifications according to the layout and two classifications according to the bonding method with the existing structure. As a result, the joining method using a square steel tube was more effective than the joining method using an steel plate at the point of lowering rigidity or maximum bearing capacity. In the joint method using steel plates, force transmission to the seismic reinforcement system was not performed well due to the destruction and separation of the welds at the corners.

In order to verify whether effective seismic design and seismic strengthening are possible, a quasi-dynamic experiment was conducted on a

specimen with non-seismic details of a two-story scale reinforced with a multi steel tube unit seismic strengthening system. After that, the results were compared through structural analysis. As a result, the specimen strengthened with the multi steel tube unit seismic strengthening system improved the stiffness and shear strength by 2.1-4.4 times and 2.1-2.8 times, respectively, compared to the specimen with non-seismic details. In addition, it was confirmed that the analysis results were more conservative than the experimental results. Therefore, it is judged that effective seismic design and seismic strengthening by applying the multi steel tube unit seismic strengthening system is possible.

The purpose of this study was to prove the effective reinforcing effect of the seismic strengthening system for multi steel tube unit. Therefore, seismic performance evaluation was performed through a nonlinear static analysis of a frame model with a scale of five stories above the ground. As a result, the initial stiffness, strength, and ductility of the strengthened model were all increased, and the load resistance performance was improved. In addition, the effective reinforcement effect was demonstrated in accordance with the seismic performance standards.

제1장 서론

제1절 연구 배경 및 목적

2017년에 발생한 포항지진, 경주지진 및 최근에 발생하는 지진들에 따른 자연 재해 및 대지진 위험성의 증가가 대두되고 있다. 2020년 4월 26일 이후 해남군 지역에서는 규모 1.8에서 규모 3.1의 지진까지 총 76회의 지진이 잇달아 발생하였다. 규모 2.0 이상의 지진이 발생하지 않은 지역에서 연속지진이 발생하는 것은 이례적인 일이다. 또한, 2011년 일본 대지진 이후 한반도 내륙이 3 cm 가량 늘어나게 되면서 지각 변동에 의해 한국에서 예년의 지진 발생빈도에 비해서 2배 넘게 증가하는 일들이 관측되었다. 경주, 포항 및 울산 앞바다에서 발생한 대지진 등의 발생 원동력으로 작용하는 것이 확인되고 있다. 이를 근거로 한반도의 대지진 위험을 배제할 수 없다.⁽¹⁾

지진이 빈번하게 발생하는 일본의 경우 내진설계기준이 강화된 1981년 이전에 지어진 건축물이라고 할지라도 건축물에 내진보강을 실시한 경우 보다 건축물이 안전하게 유지되는 것을 확인하였다. 따라서, 지진의 위험성에 대비하여 내진보강을 통한 내진확보가 필요하다. 행정안전부에서는 낮은 내진율로 인해 공공시설물의 내진보강을 통한 내진확보를 위하여 2011년부터 5년마다 내진보강 기본계획을 수립하여 내진율을 향상시키고 있다.⁽²⁾ 현재 기존 철근콘크리트골조의 비내진 건축물의 내진보강공법으로 강도증진공법, 연성능력 향상법, 에너지 소산능력 향상을 통한 제진공법 및 면진공법 등 많은 공법들이 제안되어 있다.⁽³⁾⁻⁽⁷⁾ 하지만 국내 비내진상세를 가지는 6층 미만의 중·저층 철근콘크리트 건축물은 전단파괴의 위험성이 매우 높아 연성능력을 개선시키는 보강법은 비효율적이기 때문에 전단파괴를 방지하기 위하여 강도증진을 통한 내진안정성 확보가 더 효율적인 내진보강법이다.⁽⁸⁾ 이에 따라 내진율을 높이기 위한 내진보강에 대한 연구와 효과적인 내진보강공법의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 중·저층의 학교, 공공 및 민간 건축물의 낮은 내진율로 인한 구조안정성 문제를 해결하기 위해 구조 안정성 확보의 일환으로 강성 및 강도 증진법을 이용하여 자연재해로부터 노후화 및 내진성능이 취약한 건축물의 지진 재해 저감을 위한 구조성능개선 기술 및 사업화 활용 공법 개발로서, 내진 재해 저감 성능이 탁월하면서 구조안전성 확보가 우수하고 동시에 디자인 및 개방성이 우수한 내진보강기술을 개발하고자 한다.

제2절 연구 동향

최근에 자연재해와 대지진의 위험성 증가로 인하여 기존 내진보강되지 않은 건축물의 내진보강 필요성과 내진보강공법에 대한 연구는 많은 연구자에 의해 진행되어 왔으며, 대표적인 연구사례 및 적용사례를 조사하였다.

정주성 (2015)⁽⁹⁾은 재래적인 내진보강법이 기초보강이 필요하거나 보강 작업시의 공간 확보가 어려워서 이용공간이 제한되어 효율성이 떨어지고 기존 골조와 접합부의 시공 정확성이 요구된다는 단점을 보완하기 위해 외부접합형 내진보강공법(Reinforced Concrete Steel Frame)의 공법을 제안하였으며, 전형적인 강도증진형 내진보강공법으로 전단파괴가 지배적인 비내진상세를 가진 국내 중·저층 철근콘크리트 건물에는 내력확보가 용이한 내진보강법이라고 사료되며, 그 유효성이 유사동적실험 및 비선형해석에 의해서 검증하였다.

이강석 외 2인(2015)⁽¹⁰⁾은 기후변화에 따른 지진발생 빈도가 전세계적으로 증가함에 따라 국내 비내진상세를 가지는 전단파괴형 중·저층 RC 건축물에 대해 효율적이면서 경제적인 내진보강 실시를 위해 기존 내부접합형 내진보강법의 단점을 보완하고 극복할 수 있는 새로운 개념의 내진보강법인 SRCF(Steel Reinforced Concrete Frame) 외부접합형 내진보강공법을 제안하였다. 이를 검증할 목적으로 기존 비내진상세를 가지는 중·저층 RC 학교건물의 골조를 대상으로 유사동적실험을 실시하였다. 유사동적실험을 실시한 결과 비내진 상세를 가지는 국내 중·저층 RC 건축물에는 내력확보가 용이한 내진보강공법이라고 사료되며, 그 유효성을 검증하였다.

김미연 (2015)⁽¹¹⁾은 내진설계 기준 제정 이전 건설된 비내진 상세의 건축물에 대하여 내진보강을 위한 끼움벽 보강골조에서 횡력 저항성능을 개선하기 위하여 콘크리트에 섬유를 혼입한 고인성 섬유보강 시멘트 복합체(High-performance fiber-reinforced cement composites, HPFRCC)로 제작된 끼움벽을 제안하였다. 이후 골조에 적용하여 반복하중실험을 수행한 결과, 끼움벽으로 보강된 실험체는 기존의 비내진 상세 골조에 비하여 약 3.5배 높은 강도를 확보할 수 있었으며, 특히 HPFRCC 끼움벽으로 보강된 실험체는 5.5배 큰 강도를 나타내어 높은 내진보강효과가 있음을 확인하였다.

도천기 (2017)⁽¹²⁾은 내진설계 도입 이전에 지어진 건물이나 현행 내진규준에 미달하는 중·저층의 노후구조물에 있어서는 지진발생 시 막대한 인명 및 물적 피해가 발생할 수 있다고 보았다. 따라서, 내진보강 미적용 중·저층 노후구조물의 내진성능 향상을 위해 시공성, 경제성, 미관 등을 고려하고 적절한 수준의 강성을 부가하면서 효과적인 감쇠성능을 발휘할 수 있는 강재 플레이트 댐퍼를 제안하였다. 기존 노후 건축물의 개구부 주위 즉, 문, 창문 등의 상·하단 및 측면에 설치할 수 있는 강재 플레이트 댐퍼들을 계획하고 실험을 수행하였다. 강재 플레이트 댐퍼를 적용한 구조체 실험을 통하여 댐퍼가 적용된 경우 내력이 상승됨을 확인하였으나, 구조체 내부 프레임 접합부에 응력집중으로 휨 변형, 국부 좌굴 등이 발생하는 문제가 있어, 댐퍼와 지지프레임의 강성, 부착방법 등의 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

하현준 외 2인 (2018)⁽¹³⁾은 현재 특정 내진 보강공법에 관한 구체적인 설계 절차 및 설계 방법이 제시되어 있지 않아 기존 건축물의 목표 성능수준을 만족시키기 위한 설계과정이 복잡하게 이루어져 있다고 보았다. 이에 대하여 경주 지진 피해 사례를 토대로 기존 철근콘크리트 건축물에 강성 보강을 통해 층간변위를 제어하여 균열을 억제할 수 있는 가새 보강공법에 관한 실험연구를 수행하였다. 실험 결과, 무보강 실험체보다 가새로 보강한 실험체의 강성이 2~3배 높은 결과를 보인 것으로 나타났다.

이복기 외 4인 (2019)⁽¹⁴⁾은 강도를 증진시키는 재래적인 내진보강법은 이용공간이 제한되어 효율성이 떨어지고, 기존 골조와 접합부의 시공 정확성이 요구되며, 공사기간이 장기화되는 단점을 보완하고 극복할 수 있는 새로운 강도증진형 외부접합형 내진보강법에 대한 개발 연구를 수행하였다. 기존 비내진상세를 가지는 R/C 학교건물을 바탕으로 한 실물 2층 골조 실험체를 대상으로 유사동적 실험을 실시하여 본 연구에서 개발한 HSWF 공법의 내진보강 전과 후의 내력 및 변형 능력을 검토함과 동시에 시간-변위이력 등 지진응답특성을 검토 및 분석하고, HSWF 보강공법으로 내진보강 한 R/C 건축물 전체를 대상으로 비선형동적해석을 실시하여 내진보강 전과 후의 내진성능을 검증하였고, 내진보강법의 유효성을 정밀하게 검토하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

정희창(2019)⁽¹⁵⁾은 기존 철골 브레이스 보강공법의 단점이었던 접합부의 연성능력 부족으로 인한 보강재와 기존 부재의 지진하중 전달 차단을 방지할 수 있는 ISF 내진 보강공법을 제안하였다. 이를 적용하여 내진보강한 RC 건축물에 대한 구조 실험 및 비선형해석을 수행하여 용접 접합으로 기존 골조와 보강재의 일체성을 확보하였으며, 조립식 공법으로 시공성 및 경제성이 우수하고, 내진보강 전과 후의 내력비, 변위비, 변위제어능력을 검토하여 내진보강의 유효성을 검증하였다.

성조성(2021)⁽¹⁶⁾은 기존의 내진보강법은 내부접합공법이 주류로써 건물의 중량을 증가시켜 기초보강이 필요하거나, 보강작업 시의 공간 확보가 어려워 이용공간이 제한되는 등 단점을 가진다고 보았다. 이러한 단점을 보완하고 극복하기 위해 외측 프레임을 적용한 외부접합공법 등을 포함한 외부접합형 NSF(Novel Steel Frame) 내진보강공법을 제안하였다. 비내진 상세를 가지는 2층 규모의 실험체에 제안한 내진보강공법을 적용하여 유사동적실험을 수행하였고, 이를 토대로 비내진상세를 갖는 대상 RC건물에 적용하여 비선형 동적해석을 수행하여 그 결과로 무보강 실험체 대비 지진응답 내력이 증가하여, 지진에너지를 흡수하는 능력이 증가되었다는 것을 검증하였고, 국내에서 발생할 수 있는 지진에 대해 보강효과가 우수한 것을 검증하였다.

김규익(2021)⁽¹⁷⁾은 최근 국내에서 발생한 지진으로 인해 건물에 지진피해가 발생하였고 이에 따라 기존 내진 보강공법의 단점을 보완하는 새로운 내진 보강공법 개발이 시급한 설정임을 발견하였고, 수직 응답 마찰 댐퍼를 이용한 내진 보강공법을 제안하였다. 실험체로는, 1980년대 국내 비내진 상세를 가지는 중/저층 대표적인 학교건물의 실물 골조를 선택하였고, 1스팬-2층을 제작하여 유사동적실험을 수행하였다. 실험을 통하여 나온 결과값으로 하중-변위 상관관계, 시간이력곡선, 에너지소산량 및 등가감쇠비 등을 비교 및 분석하였고 유사동적실험 결과값의 신뢰성을 얻기 위해 비선형 동적해석을 실시하여, 서로 비교 분석을 통해 내진 성능을 검증하였다. 이를 통해 철근 콘크리트 골조와 보강체가 일체거동 하도록 강체로 링크한 모델링 방법은 합당하다고 판단했으며, 이를 이용한 VRFD 내진 보강공법은 기존 R/C 건축물에 효과적으로 적용 가능함을 입증하였다.

김민지 (2021)⁽¹⁸⁾은 건축물의 내부 공간이 자연스럽고 유선형으로 이루어지도록 주요 구조부재의 형태 및 최적화 대한 관심이 높아짐에 따라 비정형 구조부재기술 발전 가능성에 대한 기초자료 확보를 위해 철근콘크리트 전단벽체 구조부재의 단면 내 응력 흐름을 바탕으로 스트럿-타이 개념을 적용하여 트러스 시스템 부재를 제안하였다. 스트럿-타이 방법을 적용한 설계와 건축구조 기준에서 제안하는 전단벽체 설계 결과를 비교하였으며, 스트럿-타이 모델을 근거로 트러스 시스템의 형상을 제안 및 성능 평가 해석을 진행한 결과 철근 콘크리트 트러스 시스템을 구성하는 부재 수가 적게 고려될수록 단면 절감 대비 연성이 우수하였고, 높은 압축강도를 갖는 고강도 콘크리트를 적용함으로써 새롭게 제안된 절감된 단면을 갖는 부재가 기존의 철근콘크리트 부재인 전단벽체와 비슷한 수준의 성능이 확보되는 것을 확인하였다. 또한, 내진성능을 분석한 결과 모든 부재는 일반 전단벽체와 동등 이상의 강도와 연성을 확보할 수 있는 것으로 나타났지만, 세장한 부재 단면으로 인해 단부에서 파단이 유발될 수 있음을 확인하였다.

상기의 연구동향 및 결과를 보았을 때 기존 비내진 건축물과 중·저층의 노후 구조물 등의 내진성능을 향상시키기 위한 다양한 내진보강공법들이 제안되었다. 하지만, 이용공간의 효율성과 기존 골조와 접합부의 시공 정확성 등의 재래적인 내진보강법에 대한 단점들이 발생하였다. 또한, 중·저층의 비내진 건축물은 전단파괴가 지배적이기 때문에 연성능력의 향상보다는 전단내력의 증진을 고려해야한다. 이에 따라 중·저층의 비내진 건축물의 내진성능을 높이기 위한 내진보강공법의 개발에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있지만, 전단내력을 증진시켜줄 수 있는 강도증진법을 활용한 효과적인 내진보강공법에 대한 연구가 아직 미흡하여 강성과 강도 측면에서 우수하며, 효율적인 부착방식을 가진 내진보강공법에 대한 연구가 필요하다.

제3절 연구 내용 및 방법

최근에 발생하는 지진들에 따른 자연재해와 대지진 위험성의 증가로 인해 내진 설계 및 내진보강공법에 대한 연구가 활발히 진행되었다.⁽³⁾⁻⁽⁷⁾ 기존 비내진 건축물들에 적용된 내진보강공법은 대부분 철근, 강판 등의 보강재를 이용한 방법과 구조체의 단면증설 및 벽체 신설법, 철골 브레이스 보강공법 등이 사용되고 있으며, 이 공법들은 내진 보강 시 전체 건축물의 중량이 증가되어 새로운 기초보강을 해야 하는 단점들과 같은 구조적 및 환경적 문제점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위한 방안으로 탄소섬유, 아라미드섬유, 유리섬유 등의 섬유를 기존 구조체에 부착하여 성능을 향상시키는 내진보강공법들이 개발되었지만 소재 사용으로 인한 경제성 문제들이 발생하였다.⁽⁹⁾ 또한, 현재 비내진 건축물의 변형능력을 높여주는 제진장치를 활용한 공법들이 개발되고 있다. 하지만, 기존 중·저층의 비내진 건축물은 기둥의 전단파괴로 인해 변형능력을 높여주는 것보다 강도 및 강성을 높여주는 방법이 더 효과적이다.⁽⁸⁾ 하지만 강도 증진형 내진보강공법에 대한 연구가 미흡한 실정으로 경량의 구조 재료를 이용한 내진보강공법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 동등한 중량의 구조물에 비해 강성이 우수한 트러스 기법을 사용하여 다중 각형 강재 유니트를 활용한 내진보강공법으로 기존 중·저층의 비내진 건축물들의 효과적인 내진보강기법인 강성 및 강도증진형의 내진보강을 통한 내진 성능 및 구조적 안정성 확보와 효율적인 다중 각형 강재 유니트의 레이아웃을 평가하고자 한다. 또한, 기존 내진보강공법들과는 달리 창호 설치가 가능하여 채광 효율성을 높이고, 공장 제작으로 시공성을 향상시키며, 보강 구조체에 따른 가변성 있는 내진보강공법을 개발하고자 한다.

다중 각형 강재 유니트의 효율적인 레이아웃 및 접합방식의 설정과 구조적 안정성을 파악하기 위하여 다중 각형 강재 유니트의 반복가력실험을 수행하였으며, 구조해석 프로그램을 통한 다중 각형 강재 유니트의 구조 해석을 실시하여 비교검증을 하였다. 다중 각형 강재 유니트 실험을 통해 레이아웃과 접합방식을 결정하여 비내진 상세를 갖는 2층 규모의 다중 각형 강재 유니트 보강골조의 유사동적 실험을 수행하였으며, 구조해석 프로그램을 통한 2층 다중 각형 강재 유니트 보강골조의 구조해석을 실시하여 비교검증을 하였다. 비내진 건축물에 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강하여 비선형 정적해석을 수행하였고, 내진성능평가를

통해 내진성능 확보 및 구조적 안정성을 검토하였다.

[표 1.1] 연구 내용 및 방법

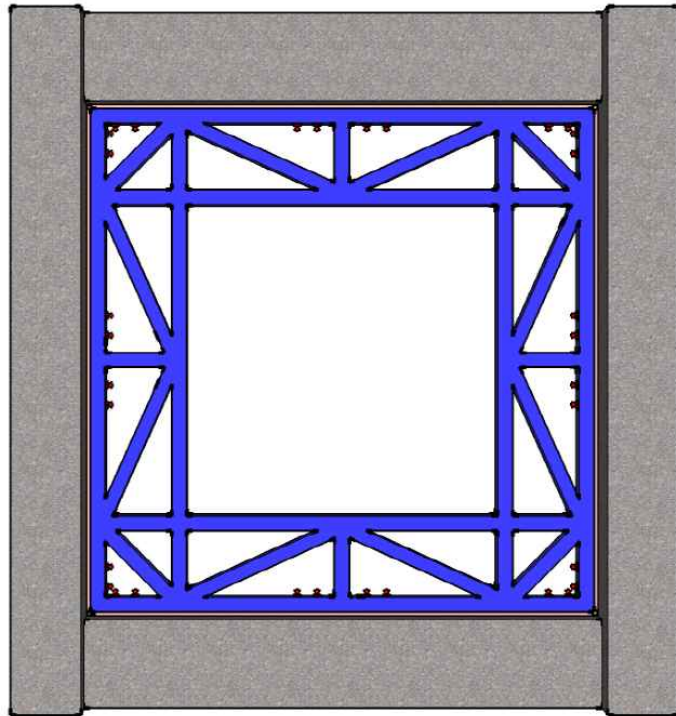
<p>1. 연구목표</p>	<ul style="list-style-type: none"> □ 강도증진법을 활용한 중·저층 건축물의 구조 안정성 확보 □ 다중 각형 강재 유닛을 활용한 효율적인 레이아웃과 기존 구조체와의 접합방식 설정 □ 창호 설치 및 공장 제작을 통한 채광 효율성과 시공성 향상
<p>2. 연구내용 및 방법</p>	<ul style="list-style-type: none"> □ 다중 각형 강재 유닛 실험 다중 각형 강재 유닛 계획 및 실험 □ 2층 다중 각형 강재 유닛 보강골조 실험 2층 다중 각형 강재 유닛 보강골조 계획 및 실험 □ 2층 다중 각형 강재 유닛 보강골조 구조해석 2층 다중 각형 강재 유닛 보강골조 구조해석 및 평가 □ 비내진 건축물 내진성능평가 비선형 정적해석 및 내진성능평가

제2장 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템

제1절 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템 개요

기존 비내진 건축물의 내진보강공법으로 전단벽 신설법, K형, V형 등의 철골브레이스를 활용한 보강법, 연성 향상을 위한 제진장치 적용 보강법 등을 일반적으로 사용한다.⁽³⁾⁻⁽⁷⁾⁽¹⁷⁾ 이와 같은 내진보강공법은 내부접합형으로 설치 시 창호의 설치가 제한되며, 외부접합형으로 설치하여도 보강재가 창호를 가려 채광 효율성이 낮고 조망권을 해친다. 또한, 연성 향상을 위한 보강법은 고층의 건축물에는 효과적이지만 기둥의 전단파괴가 일어나는 중·저층의 건축물의 경우 비효율적이다.

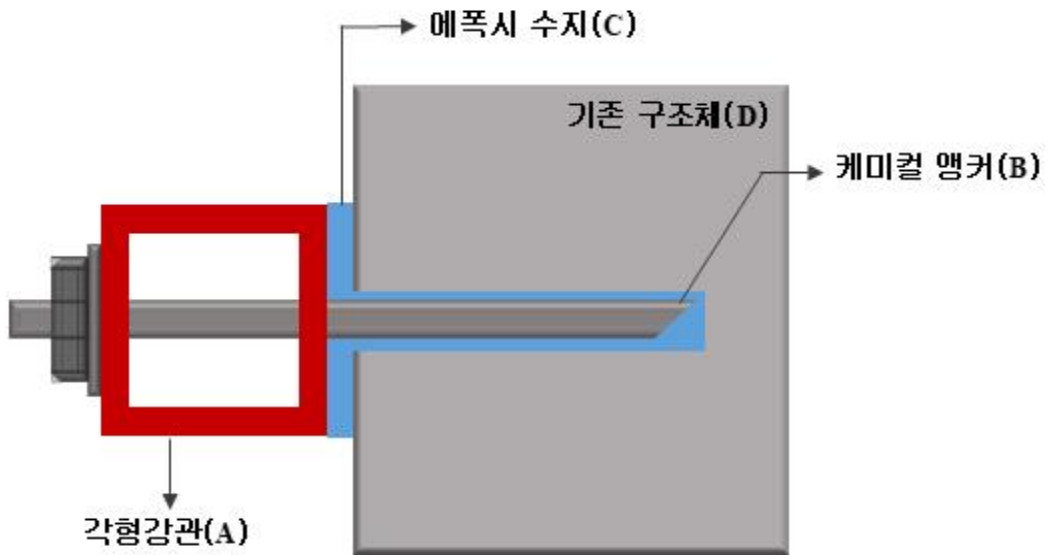
본 연구에서는 제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템은 각형 강재 유니트 즉 구성하는 다양한 강재의 조합을 통해 만든 내진보강시스템으로 강성 효율이 좋은 트러스 구조를 활용하여 설치 시에도 창호의 설치가 가능하고, 채광 효율성이 높으며, 강도 증진형 보강공법 중 한 종류로 기둥의 전단파괴가 일어나는 중·저층의 건축물에 효과적인 보강공법으로 형상은 [그림 2.1]에 나타냈다.



[그림 2.1] 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템 형상

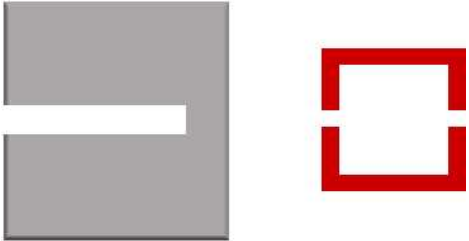
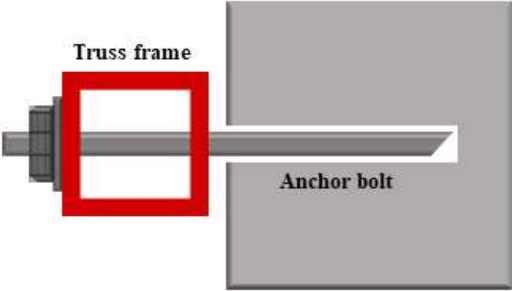
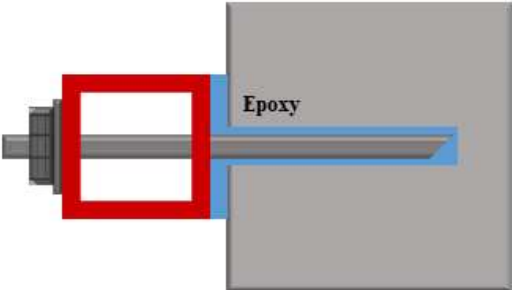
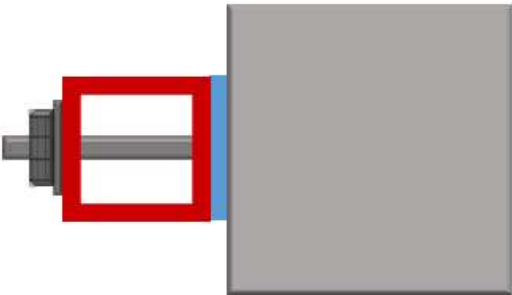
다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템은 [그림 2.2]에 나타난 것처럼 내진보강용 다중 각형 강재 유니트의 각형강관(A), 케미컬앵커(B), 에폭시 수지(C), 기존 구조체(D)로 구성되어 있으며, 용접접합된 다중 각형 강재 유니트의 각형강관(A)과 기존 구조체(D)를 케미컬앵커(B)를 통하여 접합하고 에폭시 수지를 이용하여 일체화시키는 것이 주요 특징이다. 접합부 시공 과정은 [표 2.1]에 나타난 것과 같은 순서로 진행된다. 이때 사용되는 각형강관의 강재는 SRT 275이다.

접합부 시공 과정은 [표 2.1]에 나타난 것과 같은 순서로 진행되며, 앵커볼트 접합을 위한 천공을 한 후, 기존 구조체와 내진보강시스템의 일체화를 위한 앵커볼트의 체결 및 에폭시를 충전한다.



[그림 2.2] 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템 구성

[표 2.1] 접합부 시공 과정

	시공절차	시공과정
1		<p>기존 구조체 및 다중 각형 강재 유니트 각형강관 앵커 볼트 홀 천공</p>
2		<p>다중 각형 강재 유니트 설치 및 앵커 볼트 체결</p>
3		<p>에폭시 충전</p>
4		<p>시공 완료</p>

제3장 다중 각형 강재 유니트 실험

제1절 실험체 개요

1. 개요

제 3장에서는 본 연구에서 제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템의 효과적인 레이아웃과 접합방식을 검토하기 위하여 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템의 유니트에 대한 반복가력실험을 수행하였다. 실험체는 다중 각형 강재 유니트의 레이아웃에 따른 2가지로 나누었고, 이를 기존 구조체와 접합하는 방식 2가지로 나누어 총 4개의 실험체를 평가하였다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템은 강성 및 강도 증진형 내진보강공법이므로 횡하중-횡변위관계에서 초기강성, 전단력을 중점적으로 평가하였다. 강성은 횡하중-횡변위관계에서 각 이력루프에서 산출하여 사이클에 따라 저하되는 정도를 각 실험체별로 비교하였다. 강도는 횡하중-횡변위관계에서 특정 사이클 및 종료시점의 값을 중점적으로 평가하였다.

2. 재료

사용된 보강재들의 역학적 특성을 [표 3.1]에 나타냈다. 사용된 강재들의 강종으로 규격 75 mm×75 mm×4.5 mm의 각형강관은 SRT 275를 사용하고 규격 250 mm×20 mm의 철판은 SS 275를 사용하였다.

[표 3.1] 사용된 강재들의 역학적 특성

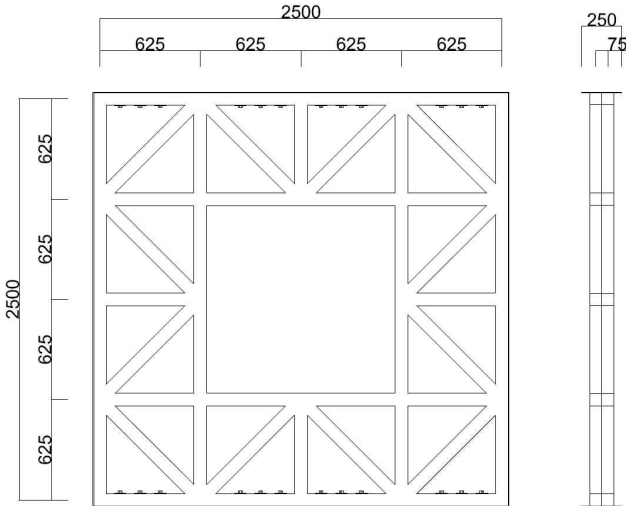
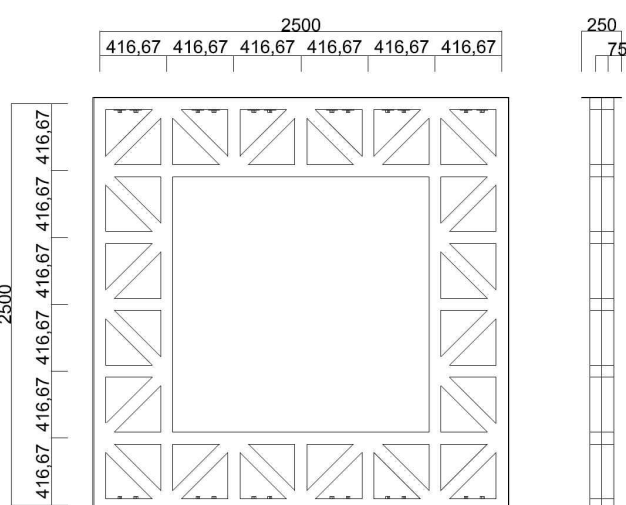
규격	강종	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신률 (%)	탄성계수 (MPa)
75×75×4.5	SRT 275	275	410	18.0	200,000
250×20	SS 275	275	410	18.0	200,000

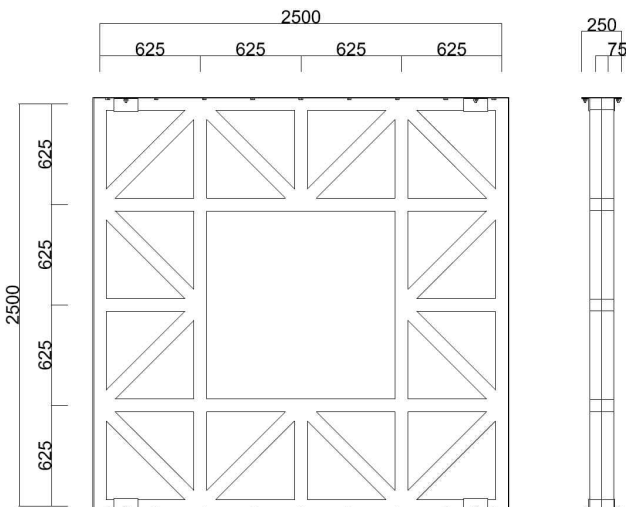
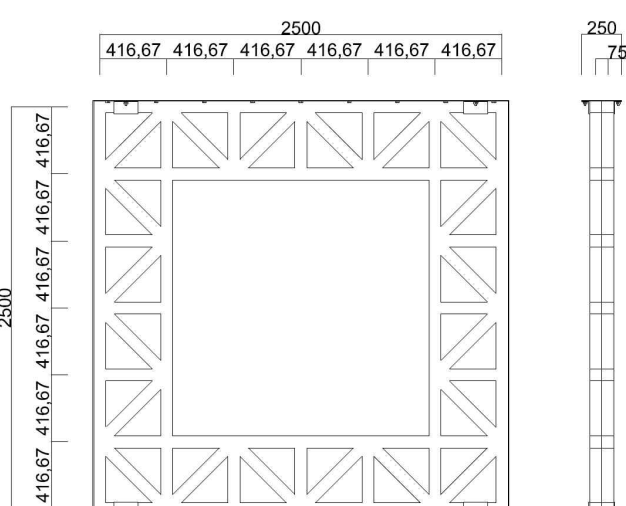
3. 실험 변수 및 실험체 제작

가. 실험 변수

본 연구에서 제작된 다중 각형 강재 유니트의 실험체 변수는 [표 3.2]와 같으며, 주요 변수는 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템의 레이아웃과 기존 구조체와의 접합방식에 따른 형식으로 나누었다.

[표 3.2] 각 변수별 주요 상세

실험체명	보강 형상	보강재 종류
Case 1 _Tube		SRT 275 75 × 75 × 4.5
Case 2 _Tube		SRT 275 75 × 75 × 4.5

<p>Case 1 _Plate</p>		<p> SRT 275 $75 \times 75 \times 4.5$ SS 275 250×20 </p>
<p>Case 2 _Plate</p>		<p> SRT 275 $75 \times 75 \times 4.5$ SS 275 250×20 </p>

다중 각형 강재 유니트 실험에 적용되는 실험체는 높이와 길이를 2,500 mm로 동일하게 하였다. 두께는 각형강관을 두겹으로 겹쳐 150 mm로 하였고, 철판 포함하여 250 mm로 하였다. 레이아웃에 따른 분류는 부재수가 적지만 개구부가 작은 경우와

상대적으로 부재수가 많지만 개구부가 큰 경우로 나누었다. 기존 구조체와의 접합 방식에 따른 분류는 각형강관에 천공을 하여 기존 구조체와 접합하는 방식과 각형강관에 용접된 철판에 천공을 하여 기존 구조체와 접합하는 방식으로 나누었다.

첫 번째 실험체는 부재수가 적지만 개구부가 작은 경우로 하여 각형강관에 천공하여 기존 구조체와 접합하는 방식으로 Case 1_Tube라 칭하며, 규격 75 mm×75 mm×4.5 mm의 일반구조용 각형강관 SRT 275으로 보강 프레임을 사용하였고, 프레임의 사면에 250 mm×20 mm의 일반구조용 강재 SS 275를 사용한 철판을 용접하여 부착하였다. 실험을 위한 구조체와의 접합은 볼트를 접합부 프레임에서 24개를 설치하여 횡하중에 의한 볼트의 전단력과 프레임 홀에서의 지압파괴를 방지하였다.

두 번째 실험체는 부재수가 많지만 개구부가 큰 경우로 하여 각형강관에 천공하여 기존 구조체와 접합하는 방식으로 Case 2_Tube라 칭하며, 규격 75 mm×75 mm×4.5 mm의 일반구조용 각형강관 SRT 275으로 보강 프레임을 사용하였고, 프레임의 사면에 250 mm×20 mm의 일반구조용 강재 SS 275를 사용한 철판을 용접하여 접합하였다. 실험을 위한 구조체와의 접합은 볼트를 접합부 프레임에서 24개를 설치하여 횡하중에 의한 볼트의 전단력과 프레임 홀에서의 지압파괴를 방지하였다.

세 번째 실험체는 부재수가 적지만 개구부가 작은 경우로 하여 철판에 천공하여 기존 구조체와 접합하는 방식으로 Case 1_Plate라 칭하며, 규격 75 mm×75 mm×4.5 mm의 일반구조용 각형강관 SRT 275으로 보강 프레임을 사용하였고, 프레임의 사면에 250 mm×20 mm의 일반구조용 강재 SS 275를 사용한 철판을 용접하여 접합하였다. 또한, 각형강관과 철판의 일체성을 확보하기 위하여 프레임 상하부 단부에 앵글을 설치하였다. 실험을 위한 구조체와의 접합은 볼트를 접합부 철판에서 일체성을 확보하기 위한 앵글에 설치되는 4개가 포함된 22개로 설치하여 횡하중에 의한 볼트의 전단력과 프레임 홀에서의 지압파괴를 방지하였다.

네 번째 실험체는 부재수가 많지만 개구부가 큰 경우로 하여 철판에 천공하여 기존 구조체와 접합하는 방식으로 Case 2_Plate라 칭하며, 규격 75 mm×75 mm×4.5 mm의 일반구조용 각형강관 SRT 275으로 보강 프레임을 사용하였고, 프레임의 사면에 250 mm×20 mm의 일반구조용 강재 SS 275를 사용한 철판을 용접하여 접합하였다. 또한, 각형강관과 철판의 일체성을 확보하기 위하여 프레임 상하부 단부에 앵글을 설치하였다. 실험을 위한 구조체와의 접합은 볼트를 접합부 철판에서 일체성을 확보하기 위한 앵글에 설치되는 4개가 포함된 22개로 설치하여 횡하중에 의한 볼트의 전단력과 프레임 홀에서의 지압파괴를 방지하였다.

나. 실험체 제작

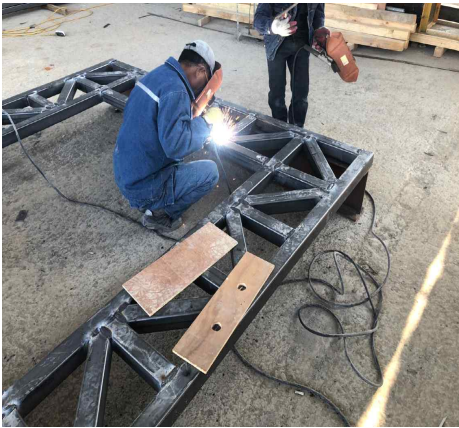
다중 각형 강재 유니트 실험체의 제작은 [그림 3.1]과 같이 자재 가공, 절단, 용접의 순서로 진행하였으며, 부재제작 완료 후에 용접부 검사를 통해 접합상태를 확인하였다.



(a) 자재 가공



(b) 절단



(c) 용접



(d) 시공 완료

[그림 3.1] 다중 각형 강재 유니트 실험체의 제작 순서

4. 가력 상세 및 측정 방법

[그림 3.2~3]은 다중 각형 강재 유니트 실험체의 설치 및 가력방법을 나타낸다. 횡력은 반력벽에 설치되어 있는 500 kN 용량의 액추에이터에 의해 도입되었다. 모든 실험체는 횡력을 다중 각형 강재 유니트에 전달하기 위하여 상부에 빔을 설치하였다. 실험체의 횡 가력은 [표 3.3]과 [그림 3.4]에 나타낸 바와 같이 3 사이클씩 반복하여 변위를 제어하였다. 각 사이클 당 횡 변위의 크기는 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.04 및 0.05의 변위각비를 갖도록 순차적으로 증분하였다. 변위는 액추에이터의 가력시스템을 프로그램화하여 자동제어할 수 있도록 하였다. 실험 시 다중 각형 강재 유니트의 비틀림을 방지하기 위하여 빔을 설치하였다. 실험체는 캔틸레버 거동을 시뮬레이션하기 위해서 기초에 관통된 8개의 구멍과 강재 락볼트를 이용하여 바닥의 반력판에 완전히 고정하였다. 또한, 슬립을 방지하기 위한 구조물을 설치하였다. 횡변위는 횡가력 수평중심선과 동일한 선상에서 설치된 300 mm의 LVDT(linear variable differential transducer)에 의해서 측정하였다.



[그림 3.2] 다중 각형 강재 유니트 실험 전경



(a) 힘력 시스템 설치



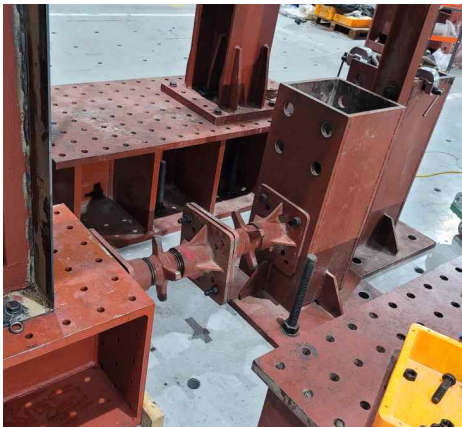
(b) 힘력 전달 빔 설치



(c) 비틀림 방지



(d) 락킹 방지



(e) 슬립 방지



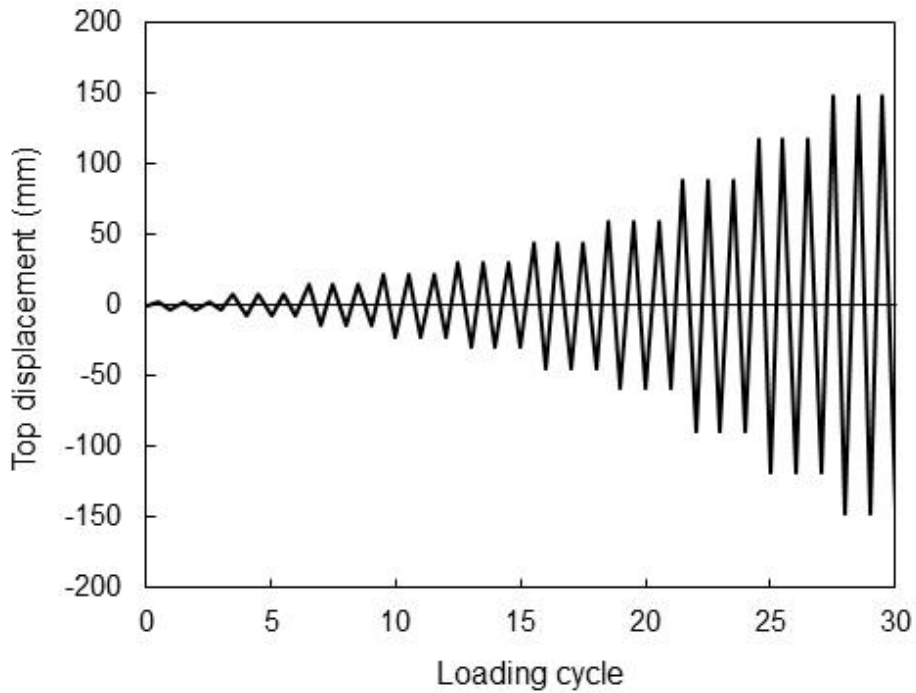
(f) 휨 변위 측정

[그림 3.3] 가력 및 측정 셋팅 상세

[표 3.3] 가력 상세

Step	Cycle	Displacement(mm)	Deformation Angle(rad)
1	3	± 2.95	0.001
2		± 7.38	0.0025
3		± 14.75	0.005
4		± 22.13	0.0075
5		± 29.5	0.01
6		± 44.25	0.015
7		± 59	0.02
8		± 88.5	0.03
9		± 118	0.04
10		± 147.5	0.05

* $H = 2,950 \text{ mm}$



[그림 3.4] 가력 곡선

제2절 실험 결과

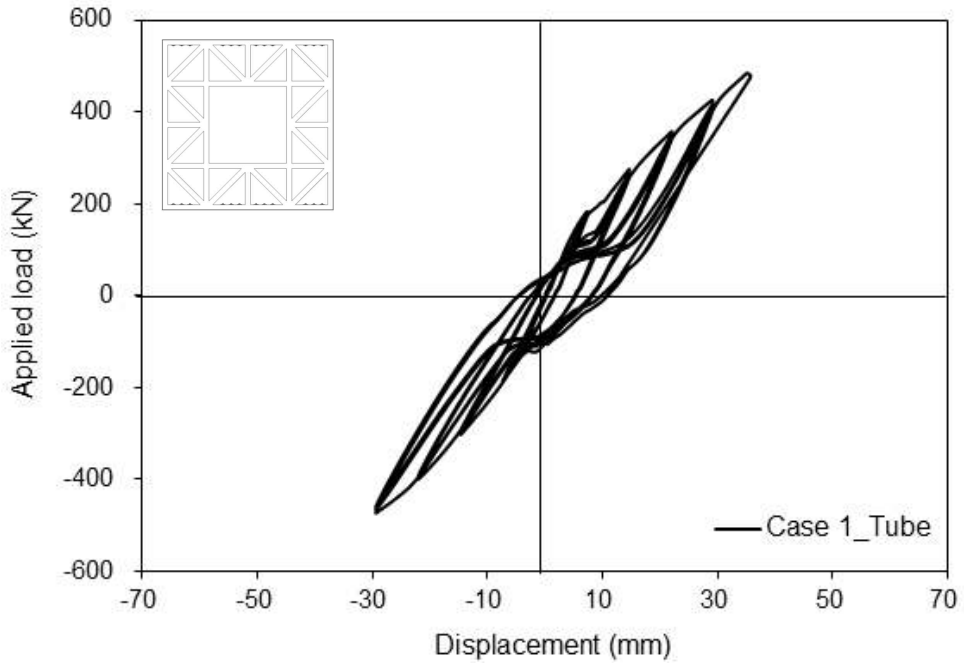
다중 각형 강재 유니트 실험체에 대한 실험 결과를 분석하였다. 모든 실험체는 파괴양상 및 횡하중-횡변위 관계를 측정하였다. 횡하중-횡변위 관계로부터 강성, 최대전단력을 평가하였다. 또한, 이들의 분석 결과를 기반으로 레이아웃과 접합방식에 따른 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템의 보강효과를 검토하였다.

1. 하중 변위 곡선

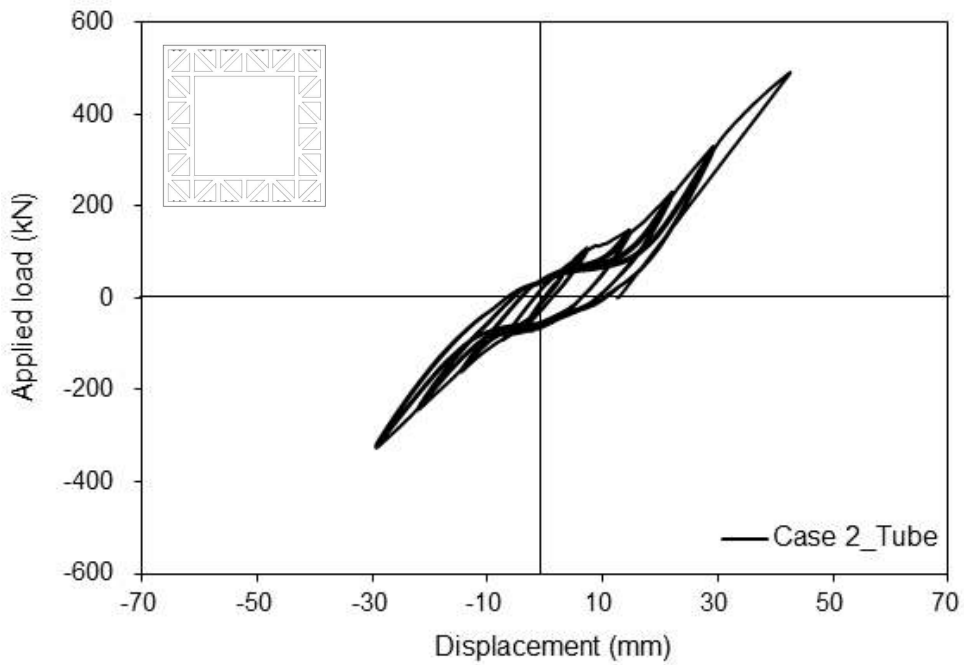
[그림 3.5~8]에는 다중 각형 강재 유니트 실험체의 하중-변위 곡선을 나타냈다. 실험체 Case 1_Tube와 Case 2_Tube는 실험 시작 후 3step($R_{\Delta}=0.2\%$)까지 Step 간의 강성 저하가 커지다가 점차 그 정도가 작아졌다. 16cycle($R_{\Delta}=0.75\%$)에서 횡가력 액추에이터의 가력범위 한계를 벗어나 실험을 종료하였다. 실험체 Case 1_Plate와 Case 2_Plate는 실험 시작 후 강성저하가 급격하다가 점차 그 정도가 작아졌다. 21cycle($R_{\Delta}=2\%$)에서 모서리 부분의 용접부가 완전히 분리되어 다중 각형 강재 유니트에 힘 전달이 안되는 것으로 인해 실험이 종료되었다.

[그림 3.9~10]에는 실험체 Case 1_Tube와 Case 2_Tube, Case 1_Plate와 Case 2_Plate의 하중-변위 곡선을 비교하였고, [그림 3.11~12]에는 실험체 Case 1_Tube와 Case 1_Plate, Case 2_Tube와 Case 2_Plate의 하중-변위 곡선을 비교하였다. [표 3.4]에는 각 실험체에 대한 초기강성, 항복상태의 하중 및 변위와 최대내력 상태의 하중 및 변위를 나타냈다.

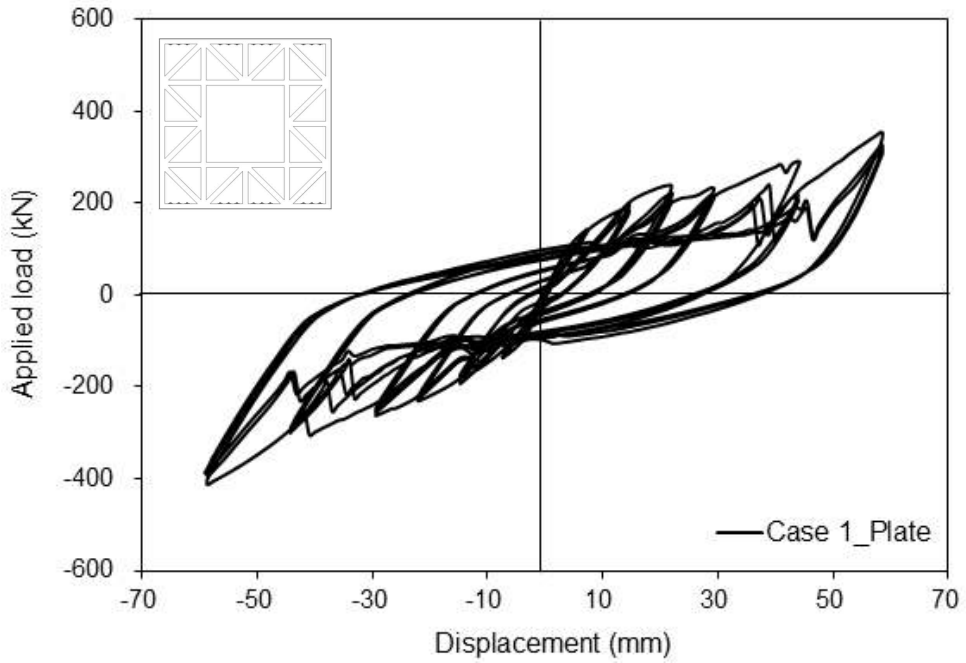
실험체 Case 1_Tube이 실험체 Case 2_Tube보다 초기강성이 더 크고, 강성저하도 더 크지만 최대내력이 약간 낮음을 확인하였다. 실험체 Case 1_Plate이 실험체 Case 2_Plate보다 초기강성이 더 크고, 강성저하도 더 크다. 하지만 그 정도가 작으며, 비슷한 횡하중-횡변위 관계를 가지는 것을 확인하였고, 다중 각형 강재 유니트에 힘 전달이 잘 이루어지지 않는다고 판단하였다. 접합방식에 따른 실험체는 각형강관을 이용하여 접합한 방식과 철판을 이용하여 접합한 방식을 비교하였을 때, Case 1의 레이아웃에서는 각형강관을 이용하여 접합한 방식이 초기강성과 최대내력이 더 큰 것을 확인하였다. 또한, Case 2의 레이아웃에서는 각형강관을 이용하여 접합한 방식이 초기강성은 낮지만 점차 강성이 더 높아지고 최대내력이 더 큰 것을 확인하였다.



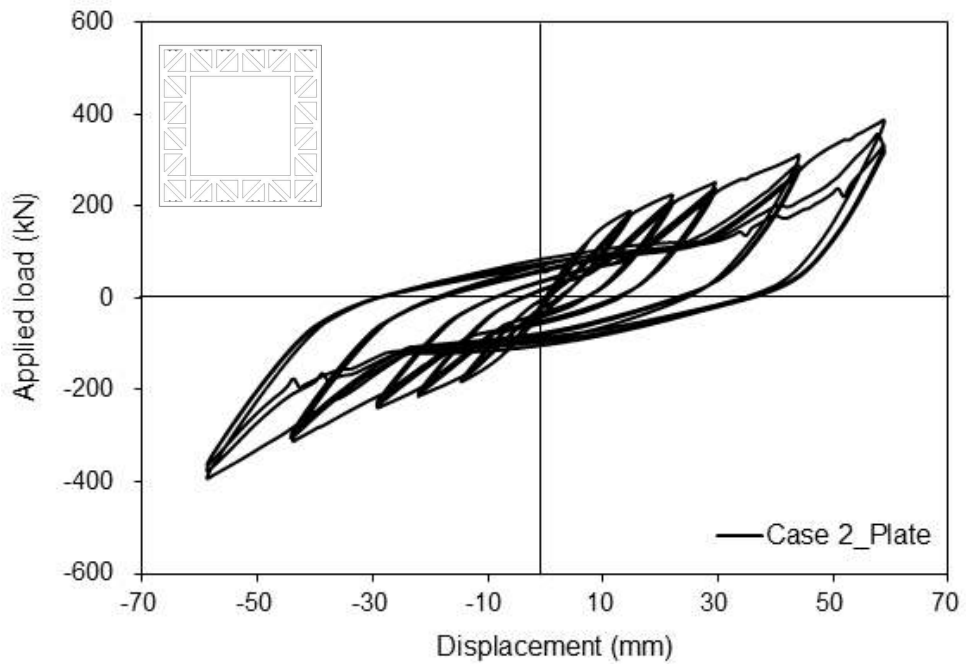
[그림 3.5] 횡하중-횡변위 관계 Case 1_Tube



[그림 3.6] 횡하중-횡변위 관계 Case 2_Tube



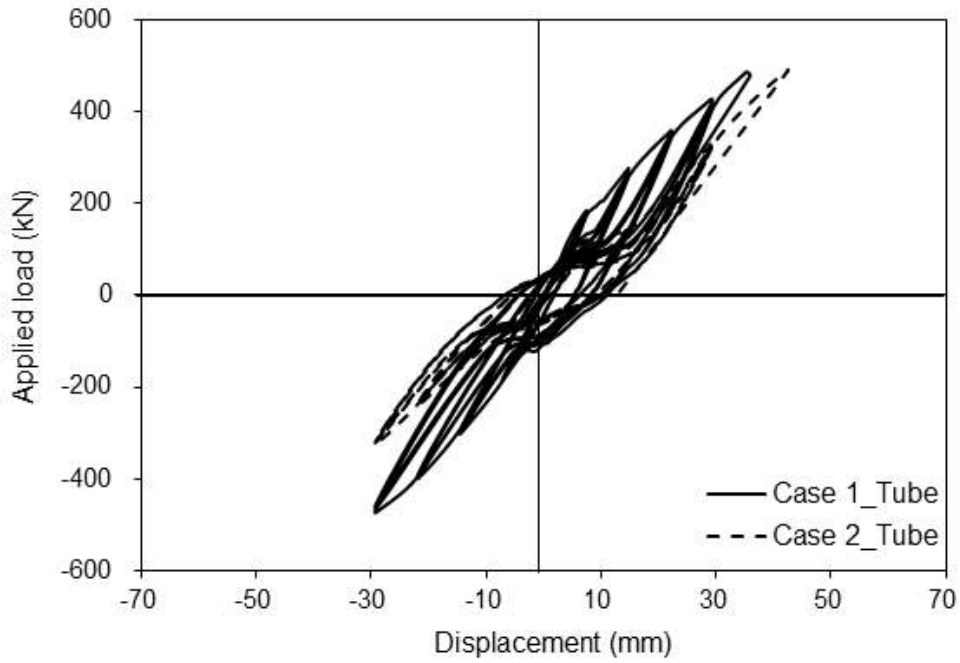
[그림 3.7] 횡하중-횡변위 관계 Case 1_Plate



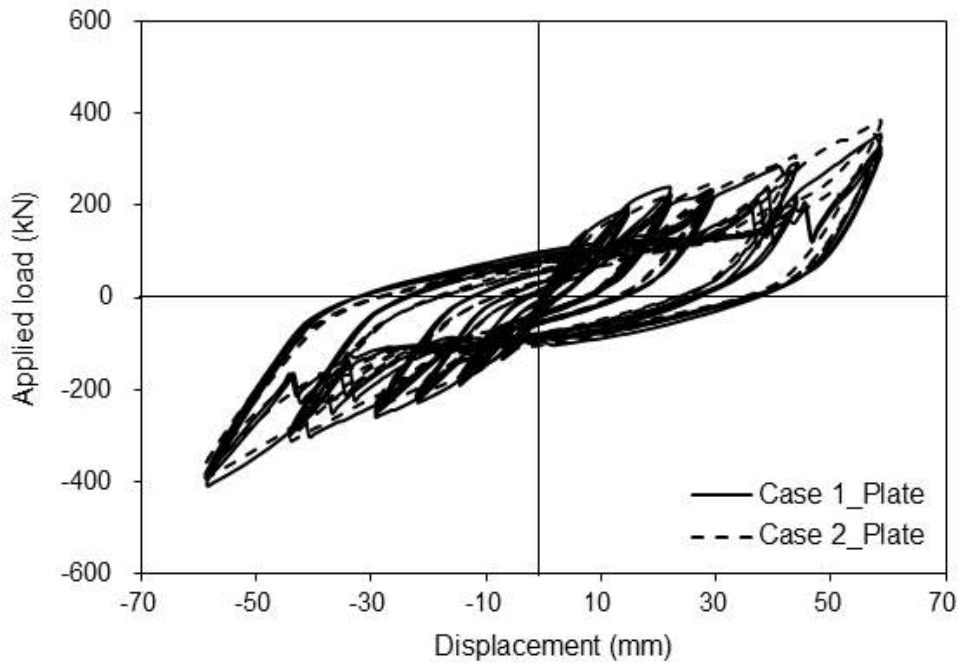
[그림 3.8] 횡하중-횡변위 관계 Case 2_Plate

[표 3.4] 실험체별 초기강성, 하중, 변위

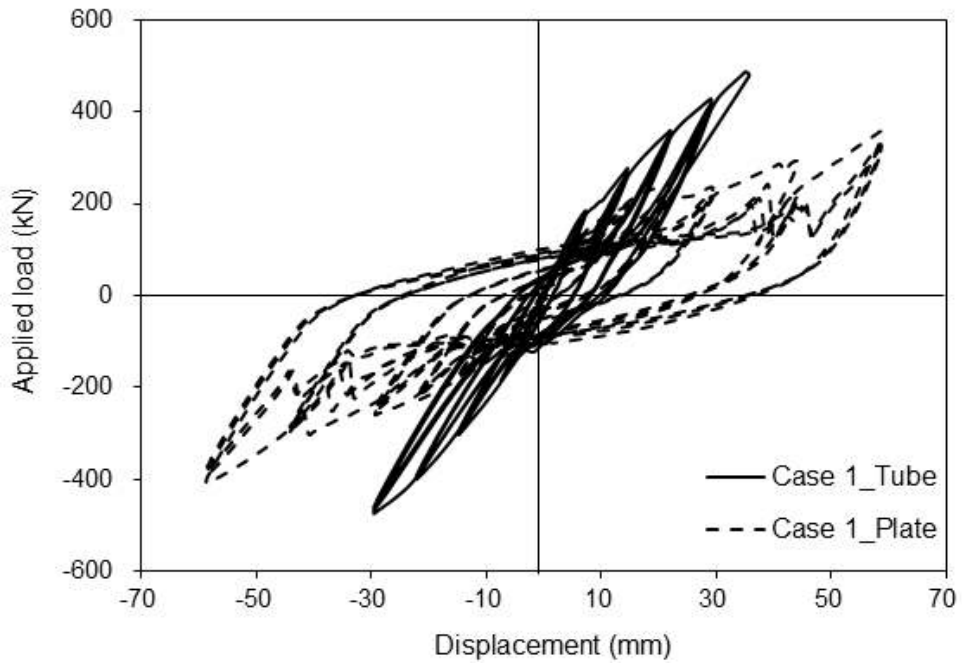
Specimens	K_{in} (kN/mm)	$V_{16cycle}$ (kN)	$\Delta_{16cycle}$ (mm)	V_u (kN)	Δ_u (mm)
Case 1_Tube	28.42	477.1	35.84	477.1	35.84
Case 2_Tube	16.04	490.2	42.64	490.2	42.64
Case 1_Plate	28.11	291.8	43.52	357.1	58.51
Case 2_Plate	20.54	310.8	43.98	386.3	58.77



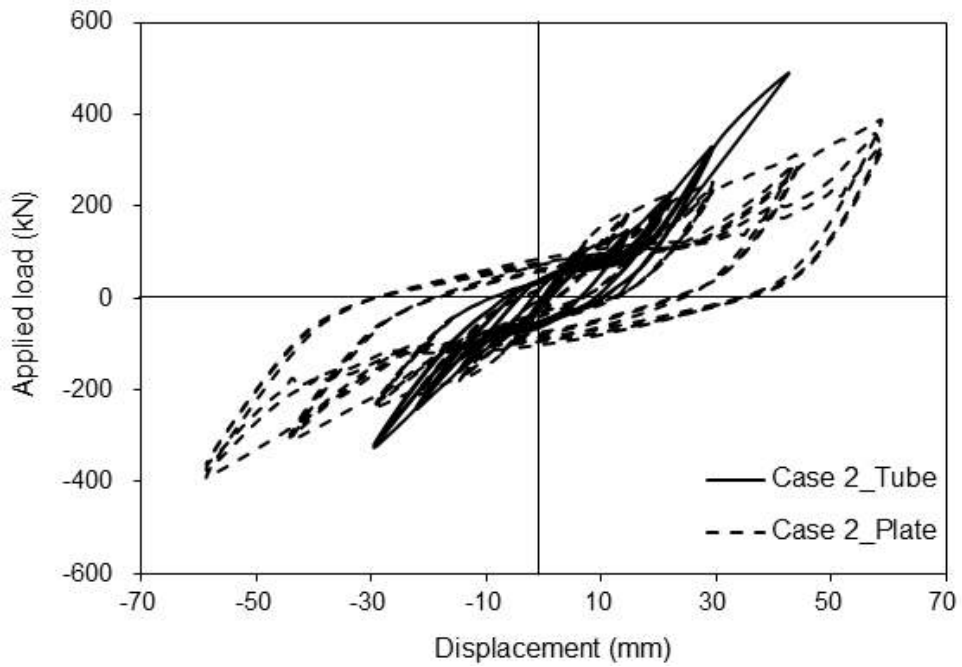
[그림 3.9] 횡하중-횡변위 관계 Case 1_Tube, Case 2_Tube의 비교



[그림 3.10] 횡하중-횡변위 관계 Case 1_Plate, Case 2_Plate의 비교



[그림 3.11] 횡하중-횡변위 관계 Case 1_Tube, Case 1_Plate의 비교



[그림 3.12] 횡하중-횡변위 관계 Case 2_Tube, Case 2_Plate의 비교

2. 파괴양상

가. Case 1_Tube

실험체 Case 1_Tube의 형상과 파괴양상은 [그림 3.13~14]에 나타냈다. 12cycle($R_{\Delta}=0.75\%$)까지는 실험체에 보이는 파괴는 없었다. 13cycle($R_{\Delta}=1\%$)부터 앵커부분의 지압으로 인해 평와서의 휨 현상 발생하였으며, 이후 각형강관의 지압으로 확대되었다. 액츄에이터 하중의 제한으로 인해 유니트의 파괴는 없었다.



[그림 3.13] 실험체 Case 1_Tube 형상



(a) 5step



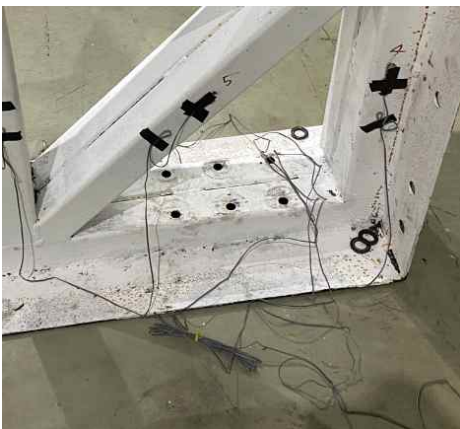
(b) 5step



(c) 6step



(d) 6step



(e) 6step



(f) 6step

[그림 3.14] 실험체 Case 1_Tube 파괴양상

나. Case 2_Tube

실험체 Case 2_Tube의 형상과 파괴양상은 [그림 3.15~16]에 나타났다. 6cycle($R_{\Delta}=0.25\%$)까지는 실험체에 보이는 파괴는 없었다. 7cycle($R_{\Delta}=0.5\%$)부터 앵커부분의 지압으로 인해 평와셔의 휨 현상 발생하였으며, 이후 각형강관의 지압으로 확대되었다. 11cycle($R_{\Delta}=0.75\%$)부터 하단부 모서리 부분의 이격 현상이 발생하였다. 엑츄에이터 하중의 제한으로 인해 유니트의 파괴는 없었다.



[그림 3.15] 실험체 Case 2_Tube 형상



(a) 3step



(b) 4step



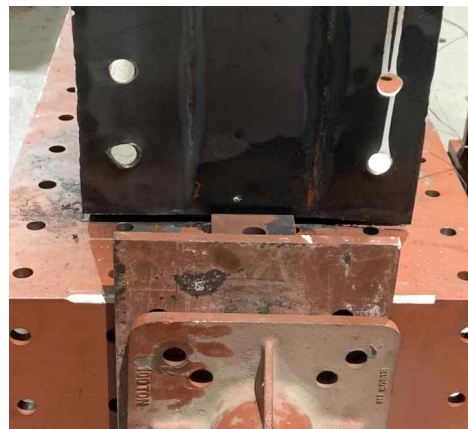
(c) 4step



(d) 5step



(e) 5step



(f) 5step

[그림 3.16] 실험체 Case 2_Tube 파괴양상

다. Case 1_Plate

실험체 Case 1_Plate의 형상과 파괴양상은 [그림 3.17~18]에 나타났다. 12cycle($R_{\Delta}=0.75\%$)까지는 실험체에 보이는 파괴는 없었다. 13cycle($R_{\Delta}=1\%$)부터 하단부 모서리 부분의 이격 현상 발생하였으며, 모서리 부분의 용접부 파괴가 발생하였다. 또한, 일체성을 위해 설치한 모서리 부분의 보강재에 휨 현상이 발생하였으며, 이후 점차 그 정도가 커졌다. 19cycle($R_{\Delta}=2\%$)에서 모서리 부분의 용접부가 분리되었다. 각형강관부분에는 손상이 없었다.



[그림 3.17] 실험체 Case 1_Plate 형상



(a) 5step



(b) 5step



(c) 6step



(d) 6step



(e) 7step



(f) 7step

[그림 3.18] 실험체 Case 1_Plate 파괴양상

라. Case 2_Plate

실험체 Case 2_Plate의 형상과 파괴양상은 [그림 3.19~20]에 나타났다. 12cycle($R_{\Delta}=0.75\%$)까지는 실험체에 보이는 파괴는 없었다. 13cycle($R_{\Delta}=1\%$)부터 하단부 모서리 부분의 이격 현상 발생하였으며, 모서리 부분의 용접부 파괴가 발생하였다. 또한, 일체성을 위해 설치한 모서리 부분의 보강재에 휨 현상이 발생하였으며, 이후 점차 그 정도가 커졌다. 19cycle($R_{\Delta}=2\%$)에서 모서리 부분의 용접부가 분리되었다. 각형강관부분에는 손상이 없었다.



[그림 3.19] 실험체 Case 2_Plate 형상



(a) 5step



(b) 5step



(c) 6step



(d) 6step



(e) 7step



(f) 7step

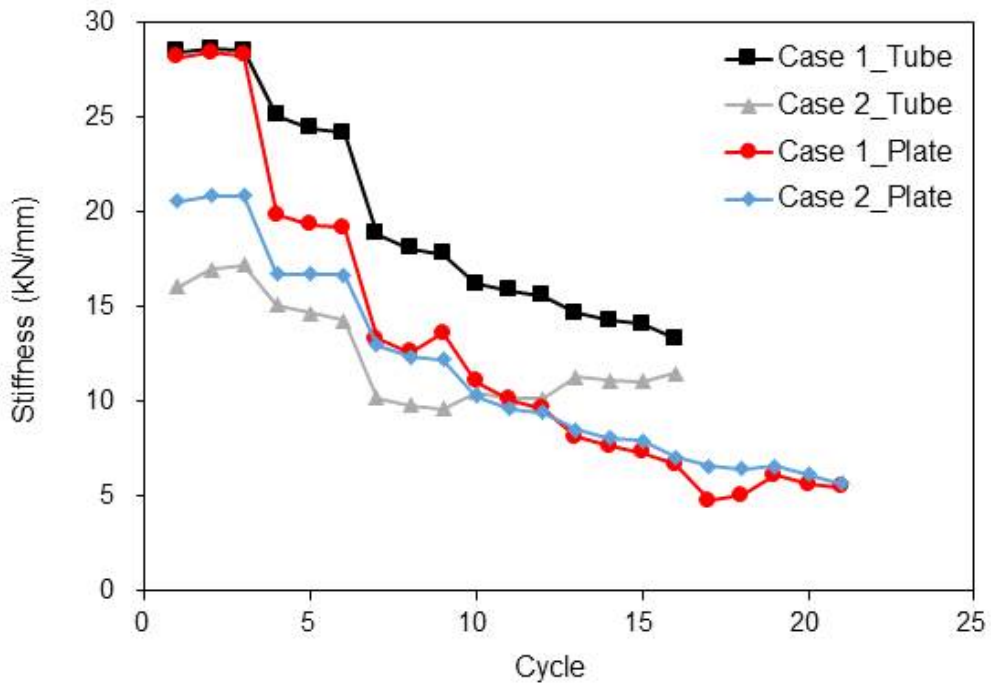
[그림 3.20] 실험체 Case 2_Plate 파괴양상

3. 강성 및 전단력

가. 강성

[그림 3.21]에는 다중 각형 강재 유니트 실험체 Case 1_Tube, Case 2_Tube, Case 1_Plate, Case 2_Plate의 초기강성 및 강성저하를 나타냈다. 실험체 Case 1_Tube는 초기강성(1cycle)이 28.42 kN/mm이며, 실험 종료 시점(16cycle) 강성이 13.31 kN/mm로 총 15.11 kN/mm 저하되었다. 액츄에이터의 한계로 인해 실험이 종료되어 실험 종료 시점과 최대하중 시점에서의 강성은 동일하다. 1step부터 3step 시작까지 점차 강성저하가 커졌다가 이후로 강성저하가 작아졌다. 실험체 Case 2_Tube는 초기강성(1cycle)이 16.04 kN/mm이며, 실험 종료 시점(16cycle) 강성이 11.50 kN/mm로 총 4.54 kN/mm 저하되었다. 액츄에이터의 한계로 인해 실험이 종료되어 실험 종료 시점과 최대하중 시점에서의 강성은 동일하다. 1step부터 3step 시작까지 점차 강성저하가 커졌다가 이후로 강성저하가 작아졌고 강성이 더 커졌다. 실험체 Case 1_Plate는 초기강성(1cycle)이 28.11 kN/mm이며, 실험 종료 시점(21cycle) 강성이 5.49 kN/mm로 총 22.62 kN/mm 저하되었다. 최대하중 시점(19cycle)에서의 강성은 6.10 kN/mm이다. 강성저하는 급격하다가 점차 작아졌다. 실험체 Case 2_Plate는 초기강성(1cycle)이 20.54 kN/mm이며, 실험 종료 시점(21cycle) 강성이 5.66 kN/mm로 총 14.88 kN/mm 저하되었다. 최대하중 시점(19cycle)에서의 강성은 6.57 kN/mm 이다. 강성저하는 급격하다가 점차 작아졌다.

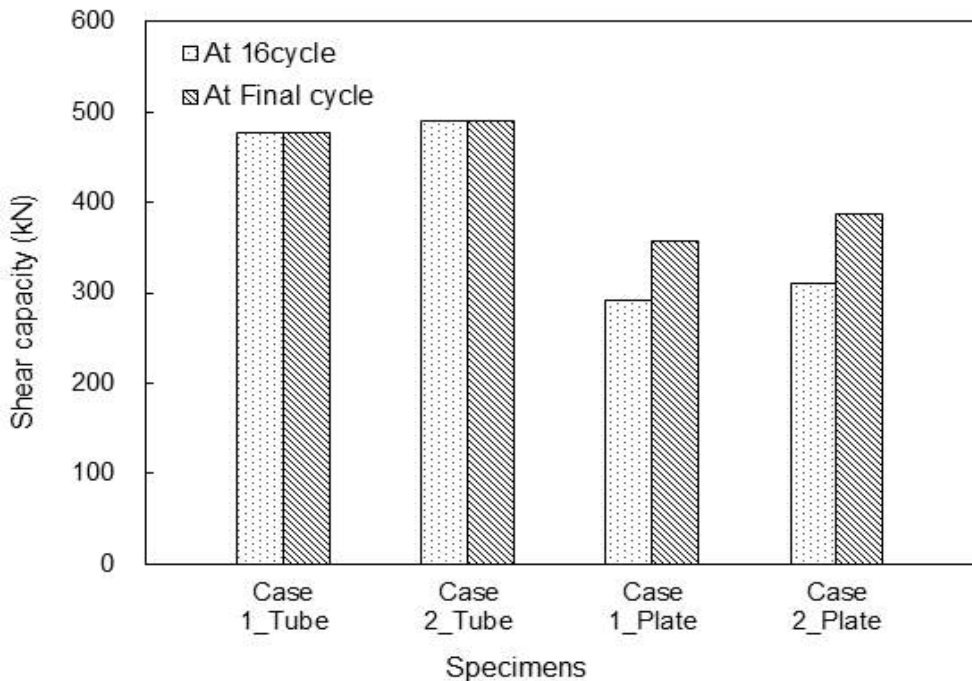
레이아웃에 따른 실험체는 Case 1이 Case2보다 초기강성이 더 크고, 강성저하도 더 크다는 것을 확인하였다. 접합방식에 따른 실험체는 각형강관을 이용하여 부착한 방식과 철판을 이용하여 접합한 방식을 비교하였을 때, 초기강성은 유사하지만 각형강관을 이용하여 접합한 방식의 강성저하가 더 작다는 것을 확인하였다.



[그림 3.21] 실험체별 초기강성 및 강성저하

나. 전단력

[그림 3.22]에는 다중 각형 강재 유닛 실험체의 16cycle에서의 하중 및 최대 내력의 하중을 나타냈다. 실험체 Case 1_Tube의 전단력은 실험 종료 시점인 16cycle과 최대내력 시점에서 동일한 477.1 kN이다. 실험체 Case 2_Tube의 전단력은 실험 종료 시점인 16cycle과 최대내력 시점에서 동일한 490.2 kN이다. 실험체는 Case 1에 비해 Case 2가 1.03배 높다. 실험체 Case 1_Plate의 전단력은 16cycle과 최대내력 시점에서 각각 291.8 kN, 357.1 kN이다. 실험체 Case 2_Plate의 전단력은 16cycle과 최대내력 시점에서 각각 310.8 kN, 386.3 kN이다. 철판을 이용하여 접합한 실험체는 Case 1에 비해 Case 2가 각각 1.07배, 1.08배 높다. 레이아웃에 따른 실험체는 철판을 이용하여 접합한 방식에 비해 각형강관을 이용하여 접합한 방식이 Case 1에서는 각각 1.64배, 1.34배 높으며, Case 2에서는 각각 1.58배, 1.27배 높다. 이와 같이 레이아웃에 따른 실험체에서는 Case 2에서의 전단력이 더 높고, 접합방식에 따른 실험체에서는 각형강관에 접합한 방식에서의 전단력이 더 높다는 것을 확인하였다.



[그림 3.22] 실험체별 16cycle 및 최대내력 시점의 전단력

제3절 소결

제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템의 효과적인 레이아웃과 접합방식을 검토하기 위하여 유니트에 대한 반복가력실험을 수행하였다. 실험은 레이아웃 및 접합형식에 따른 변수로 이루어졌으며, 실험을 통하여 다중 각형 강재 유니트 실험체에 대한 파괴양상 및 횡하중-횡변위 관계를 측정 및 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 횡하중-횡변위 관계를 보았을 때, 레이아웃에 따른 변수에서는 Case 1이 Case 2보다 초기강성과 강성저하가 크지만 Case 2의 최대내력이 각형강관을 사용한 접합방식은 1.03배 높고, 철판을 사용한 접합방식은 16cycle에서의 내력과 최대내력에서 각각 1.07배, 1.08배 높음을 확인하였다.
- 2) 접합방식에 따른 변수에서 Case 1의 경우 각형강관을 이용한 접합방식의 초기강성이 크고 강성저하가 작으며, 16cycle과 최대내력 시점에서 최대내력이 각각 1.64배, 1.34배 높음을 확인하였다. Case 2의 경우 각형강관을 이용한 접합방식의 초기강성과 강성저하가 작으며, 16cycle과 최대내력 시점에서 최대내력이 1.58배, 1.27배 높다는 것을 확인하였다.
- 3) 파괴양상을 보았을 때, 레이아웃에 따른 변수에서는 유사하였고, 접합형식에 따른 변수에서 각형강관을 이용한 접합방식은 앵커부분의 지압으로 인해 평와셔의 휨 현상과 각형강관의 지압이 발생하였으며, 철판을 이용한 접합방식은 철판의 모서리 부분의 용접부가 파괴되어 분리되는 현상이 발생하였다.
- 4) 파괴양상과 횡하중-횡변위 관계를 보았을 때, 철판을 이용한 접합방식의 경우 다중 각형 강재 유니트에 힘 전달이 잘 이루어지지 않는다고 판단하였다. 또한, 횡하중 가력 액츄에이터의 한계로 인해 실험이 종료된 각형강관을 이용한 접합방식의 경우 추후 추가적인 실험이 필요할 것으로 사료된다.

제4장 2층 다중 각형 강재 유니트 보강골조 실험 및 구조해석

제1절 실험체 개요

1. 개요

제 4장에서는 본 연구에서 제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템의 성능을 확인하기 위하여 건축물의 비선형지진응답 평가에 사용되는 유사동적실험을 수행하였다. 유사동적실험은 준정적 실험 및 진동대 실험의 장점을 결합시켜 개발한 기법으로 실험과 수치적동적해석이 서로 혼합되어 내진실험이 수행되는 복합 실험방법이다.⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ 실험체는 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 비내진 상세를 갖는 RC 구조물의 내진성능을 실험하기 위해서 일정한 축력하중과 반복 횡하중을 받는 4개의 2층 규모 RC 실험체에 대한 구조실험을 수행하였다. 비내진 상세를 갖는 RC 구조물은 컨트롤 실험체 1개와 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템에서 레이아웃 및 구성에 따른 3개의 실험체를 평가하였다. 특히 2층 규모의 RC 구조물에 보강된 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템의 상세는 실제 구조물에서 보강되는 상세와 동일하다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템은 균열진전 및 파괴양상을 분석하고, 강성 및 강도 증진형 내진보강공법이므로 횡하중-횡변위 관계에서 초기강성, 전단력을 중점적으로 평가하였다. 강성은 횡하중-횡변위 관계에서 각 이력루프에서 산출하여 사이클에 따라 저하되는 정도를 비내진상세를 갖는 RC 구조물과 비교하였다. 강도는 횡하중-횡변위 관계에서 항복상태와 최대내력상태의 값을 중점적으로 평가하였으며, 보강효과를 검증하기 위해서 비내진상세를 갖는 RC 구조물과 비교하였다.

2. 재료

가. 콘크리트

실험체 제작을 위한 콘크리트를 제조하기 위해 사용된 굵은 골재 및 잔골재는 보통 중량 콘크리트에서 일반적으로 사용하는 화강석과 천연모래를 이용하였다. 굵은 골재 및 잔골재의 최대 골재치수는 각각 4 mm와 25 mm 이하이며, 이때의 비중이 각각 2.66과 2.55이다. 사용된 골재들은 KS 표준입도 분포곡선을 만족하였으며, 이들의 조립률은 각각 2.4와 6.5이다. 2층 규모의 RC 구조물의 실험체 제작을 위한 목표 콘크리트 압축강도는 [표 4.1]에 나타난 바와 같은 21 MPa로 설정하였다. 이는 1980년대 비내진 상세를 갖는 RC 구조물에서 제시하고 있는 강도를 기준으로 하였다. 콘크리트의 배합은 물-시멘트비(W/C)와 잔골재율(S/a)이 각각 65%와 46%로 설정하였으며, 단위 시멘트량은 272 kg/m^3 이다. 배합 및 타설은 레미콘 업체에서 수행되었다. 콘크리트의 압축강도는 $100 \times 200 \text{ mm}$ 의 실린더 몰드를 이용하여 모든 실험체와 동일한 환경에서 양생하였다. 실린더 몰드는 콘크리트의 압축강도 뿐만 아니라 구조실험 가력 직전에 ASTM C 39(2014)의 기준에 준하여 압축응력-변형을 관계를 측정하였다. 이 압축응력-변형을 관계로부터 탄성계수도 ASTM C 469(2010)에 의해서 산정하였다. 측정된 콘크리트의 압축응력-변형을 관계는 [그림 4.1]에서 나타냈다. 콘크리트의 압축강도는 20.2 MPa~22.3 MPa에 있었으며, 이들 공시체들의 평균은 21.2 MPa이다. 콘크리트의 평균 탄성계수는 29.12 MPa으로 KCI 2017에서 제시한 값과 비슷한 수준에 있음을 확인하였다.

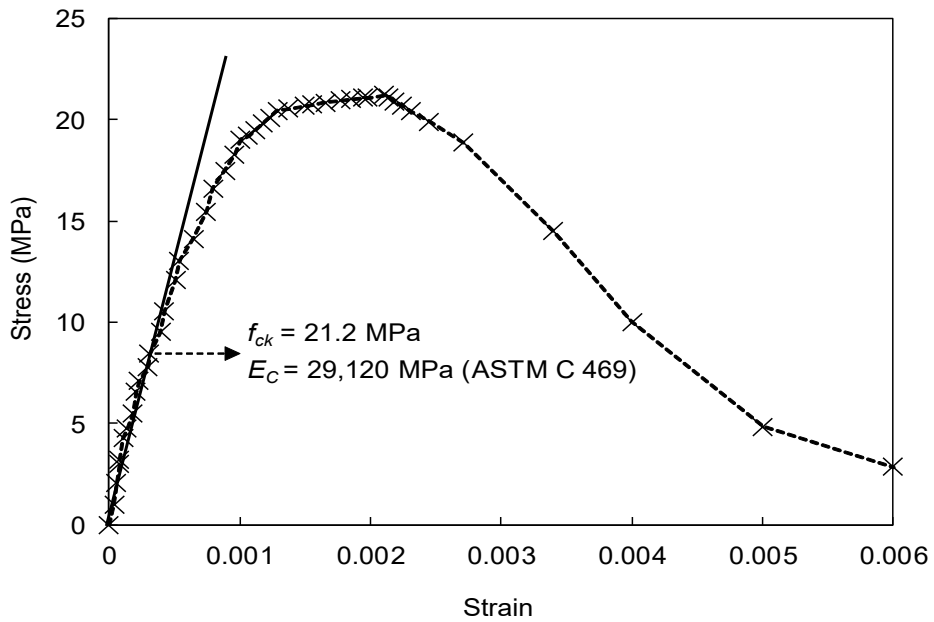
[표 4.1] 실험체 제작을 위한 콘크리트 배합표

f_{cd} (MPa)	G_{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m^3)			
				W	C	FA	GA
21	25	65	46	177	272	839	943

f_{cd} = 목표 압축강도, G_{max} = 최대골재치수, W/C = 물-시멘트비, S/a = 잔골재율,
 W = 물, C = 시멘트, FA = 잔골재, GA = 굵은골재



(a) 셋팅 상세



(b) 실험 결과

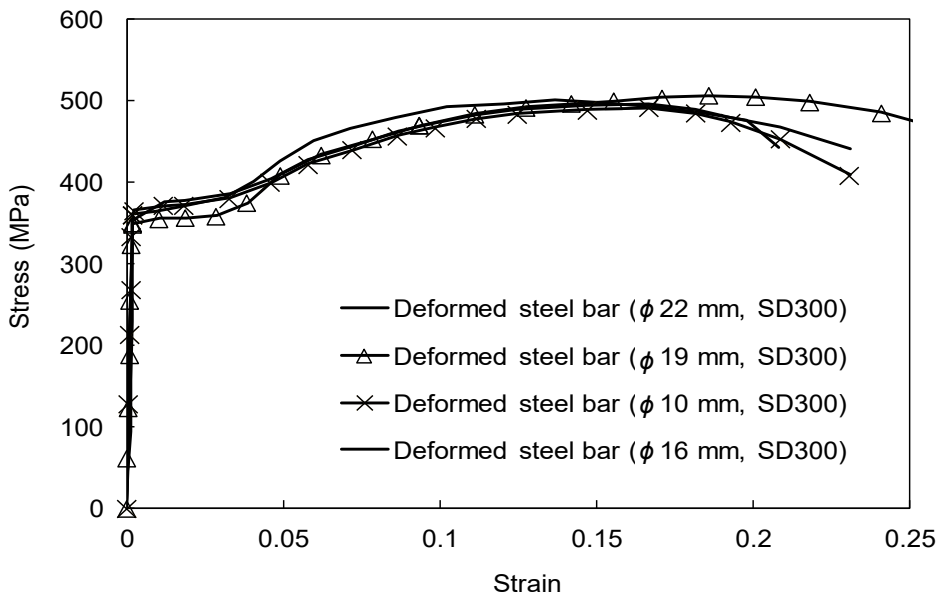
[그림 4.1] 콘크리트의 응력-변형을 관계

나. 철근

사용된 강재의 역학적 특성 및 응력-변형률 관계를 각각 [표 4.2]와 [그림 4.2]에 나타냈다. 기둥 내 주철근은 기존 비내진 건축물의 신축년도에 주로 사용된 SD 300을 사용하였다.

[표 4.2] 사용된 철근들의 역학적 특성

철근 종류	단면적 (mm ²)	항복강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	항복변형률
22	387.1	352	204,100	0.0016
19	286.5	348	201,500	0.0017
16	198.6	352	212,300	0.0018
10	71.3	360	201,200	0.0018



[그림 4.2] 철근의 응력-변형률 관계

다. 보강재

사용된 보강재들의 역학적 특성을 [표 4.3]에 나타냈다. 사용된 강재들의 강종으로 규격 75 mm×75 mm×4.5 mm의 각형강관은 SRT 275를 사용하고 규격 100 mm×100 mm×10 mm의 ㄱ앵글은 SS 275를 사용하였다.

[표 4.3] 사용된 강재들의 역학적 특성

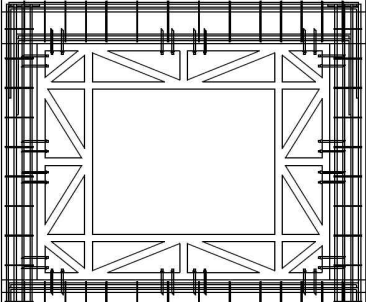
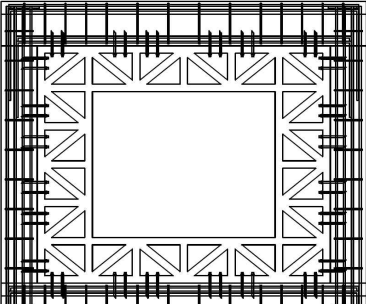
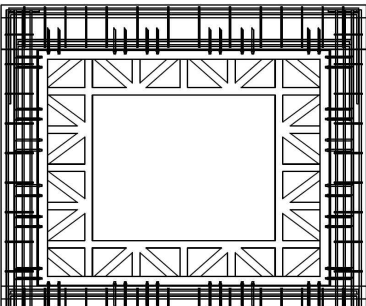
규격	강종	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신률 (%)	탄성계수 (MPa)
75×75×4.5	SRT 275	275	410	18.0	200,000
100×100×10	SS 275	275	410	18.0	200,000

3. 실험 변수 및 실험체 제작

가. 실험변수

본 연구에서 주요변수는 2층 규모의 RC 구조물에 부착되는 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템의 레이아웃과 구성에 따른 형식으로 [표 4.4]에 나타냈다.

[표 4.4] 각 변수별 주요상세

구분	보강 형상	보강재 종류	기둥		보	
			ρ_s	ρ_v	ρ_s	ρ_v
NR-1	-	-	1.71	0.14	2.2	0.11
TR-1		□-75×75×4.5	1.71	0.14	2.2	0.11
TR-2		□-75×75×4.5	1.71	0.14	2.2	0.11
TR-3		□-75×75×4.5 └-100×100×10	1.71	0.14	2.2	0.11

내진보강 효과를 검증하기 위해서 비내진 상세를 갖는 2층 규모의 RC 구조물을 컨트롤 실험체로 설정하였다. 컨트롤 실험체인 비내진상세를 갖는 2층 규모의 RC 구조물은 1980년대 국내 기존 철근콘크리트 학교건물의 표준도를 이용하여 결정된 이강석 등의 연구자에 의해 선정된 상세를 그대로 이용하였으며, 본 연구에서는 NR-1이라 칭하며, [그림 4.3~4]에 나타났다.⁽⁸⁾ 비내진상세를 갖는 학교 건물의 층고는 일반적으로 3,300 mm이다. 실험체는 1스팬 2층의 실제크기이며, 이때 슬래브의 협력폭을 고려하여 제작하였다. 기둥의 단면은 가로(B_w)와 세로(D_w) 350 mm×500 mm인 장방향이며, 기둥의 순 길이는 2,850 mm이다. 기둥의 주철근은 2개의 이형철근 직경 16 mm와 8개의 이형철근 직경 19 mm로 주철근비가 1.71%이다. 띠철근은 이형철근 D10으로 300 mm 간격으로 배근하였는데, 전단철근비가 0.136%이다. 보의 단면은 폭(b_w)과 높이(h) 350 mm×600 mm이며, 보의 경간은 3,200 mm이며, 순 길이는 2,850 mm이다. 보의 주철근은 6개의 이형철근 직경 22 mm를 배근하였으며, 이때의 주철근비는 2.2%이다. 늑근은 기둥의 전단철근과 마찬가지로 이형철근 D10으로 300 mm 간격으로 배근하였다. 이때 전단철근비는 0.11%이다.

첫 번째 실험체는 트러스 형태의 레이아웃에 부재 수를 줄이고 2겹으로 겹친 프레임으로 보강한 실험체로 TR-1이라 칭하며, [그림 4.5~6]에 나타났다. 기존 구조물의 기둥과 보의 면내에 부착하는 타입으로써 규격 75 mm×75 mm×4.5 mm의 일반구조용 각형강관 SRT 275로 보강 프레임을 사용하였다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템 프레임과 RC 구조물의 접합은 케미컬 앵커볼트로 시공하였다. 앵커볼트는 접합부 프레임에서 16개를 설치하여 횡하중에 의한 볼트의 전단력과 프레임 흠에서의 지압파괴를 방지하였다. 앵커볼트의 삽입깊이는 각 프레임과 접하는 보에서 150 mm 이상이다. 프레임의 설치 후 프레임과 RC 구조물의 기둥과 보 사이의 공간을 에폭시로 주입하였다. 모든 층에서 동일한 상세를 갖는 2겹의 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강하였다.

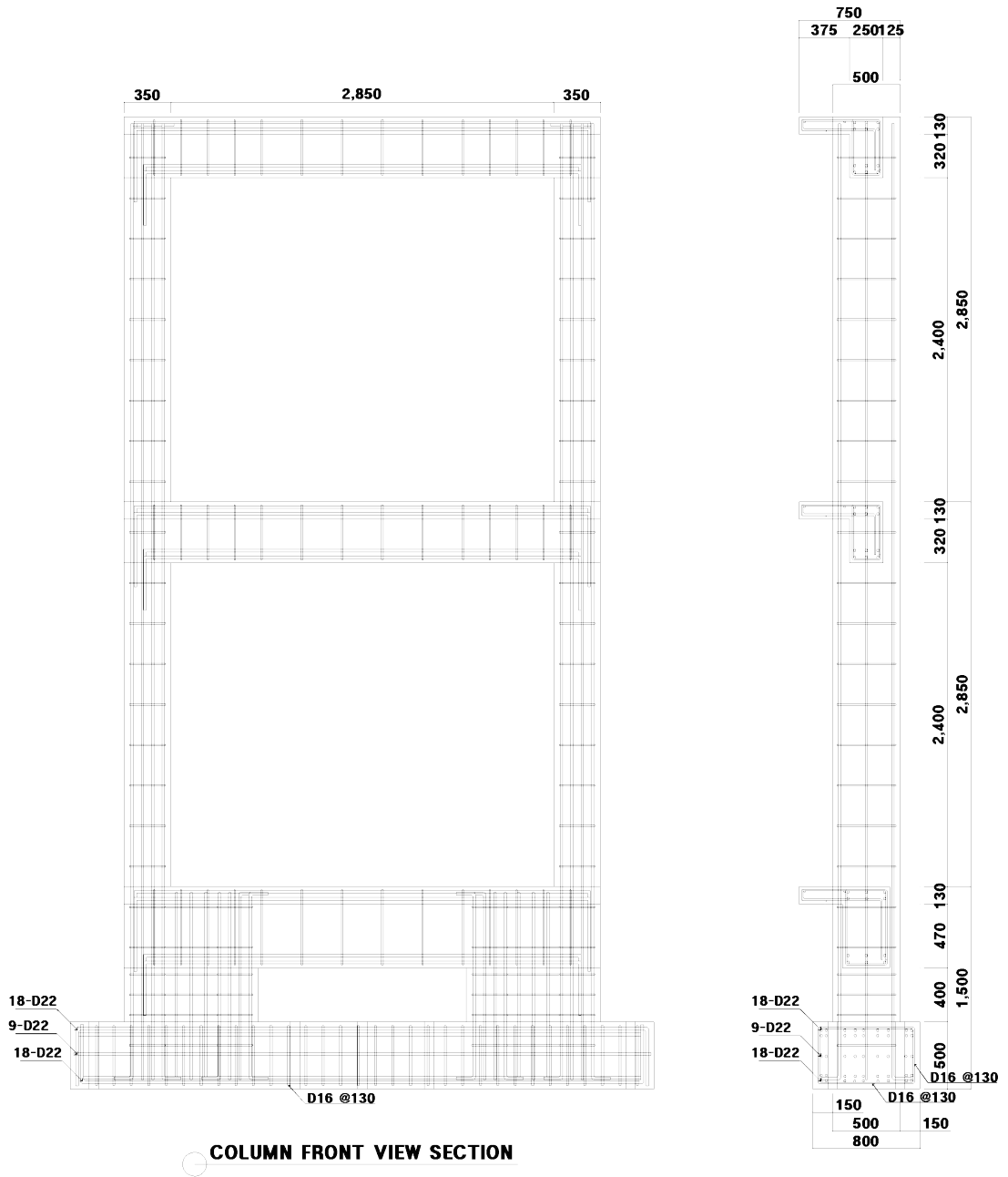
두 번째 실험체는 트러스 형태의 실험체 TR-1보다는 부재 수가 많은 레이아웃을 가진 1겹의 프레임으로 보강한 실험체로 TR-2라 칭하며, [그림 4.7~8]에 나타났다. 기존 구조물의 기둥과 보의 면내에 부착하는 타입으로써 규격 75 mm×75 mm×4.5 mm의 일반구조용 각형강관 SRT 275로 보강 프레임을 사용하였다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템 프레임과 RC 구조물의 접합은 케미컬 앵커볼트로 시공하였다. 앵커볼트는 접합부 프레임에서 12개를 설치하여 횡하중에 의한 볼트의 전단력과 프레임 흠에서의 지압파괴를 방지하였다. 앵커볼트의 삽입깊이는 각 프레임과

접하는 보에서 150 mm 이상이다. 프레임의 설치 후 프레임과 RC 구조물의 기둥과 보 사이의 공간을 에폭시로 주입하였다. 모든 층에서 동일한 상세를 갖는 1겹의 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강하였다.

세 번째 실험체는 트러스 형태의 실험체 TR-2와 같은 레이아웃을 가지고 기존 구조물과의 접합부를 Γ 형강을 이용한 구성이 다른 1겹의 프레임으로 보강한 실험체로 TR-3이라 칭하며, [그림 4.9~ 10]에 나타냈다. 기존 구조물의 기둥과 보의 면 내에 부착하는 타입으로써 내부 프레임은 규격 75 mm×75 mm×4.5 mm의 일반구조용 각형강관 SRT 275로 보강 프레임을 사용하며, 접합부를 규격 100 mm×100 mm×10 mm의 Γ 형강 SS 275로 사용하였다. 다중 각형 강재 유니트 보강공법 프레임과 RC 구조물의 연결은 케미컬 앵커볼트로 시공하였다. 앵커볼트는 접합부 Γ 형강에서 24개를 설치하여 횡하중에 의한 볼트의 전단력과 프레임 흠에서의 지압파괴를 방지하였다. 앵커볼트의 삽입깊이는 각 프레임과 접하는 보에서 150 mm 이상이다. 프레임의 설치 후 프레임과 RC 구조물의 기둥과 보 사이의 공간을 에폭시로 주입하였다. 모든 층에서 동일한 상세를 갖는 Γ 형강의 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강하였다.



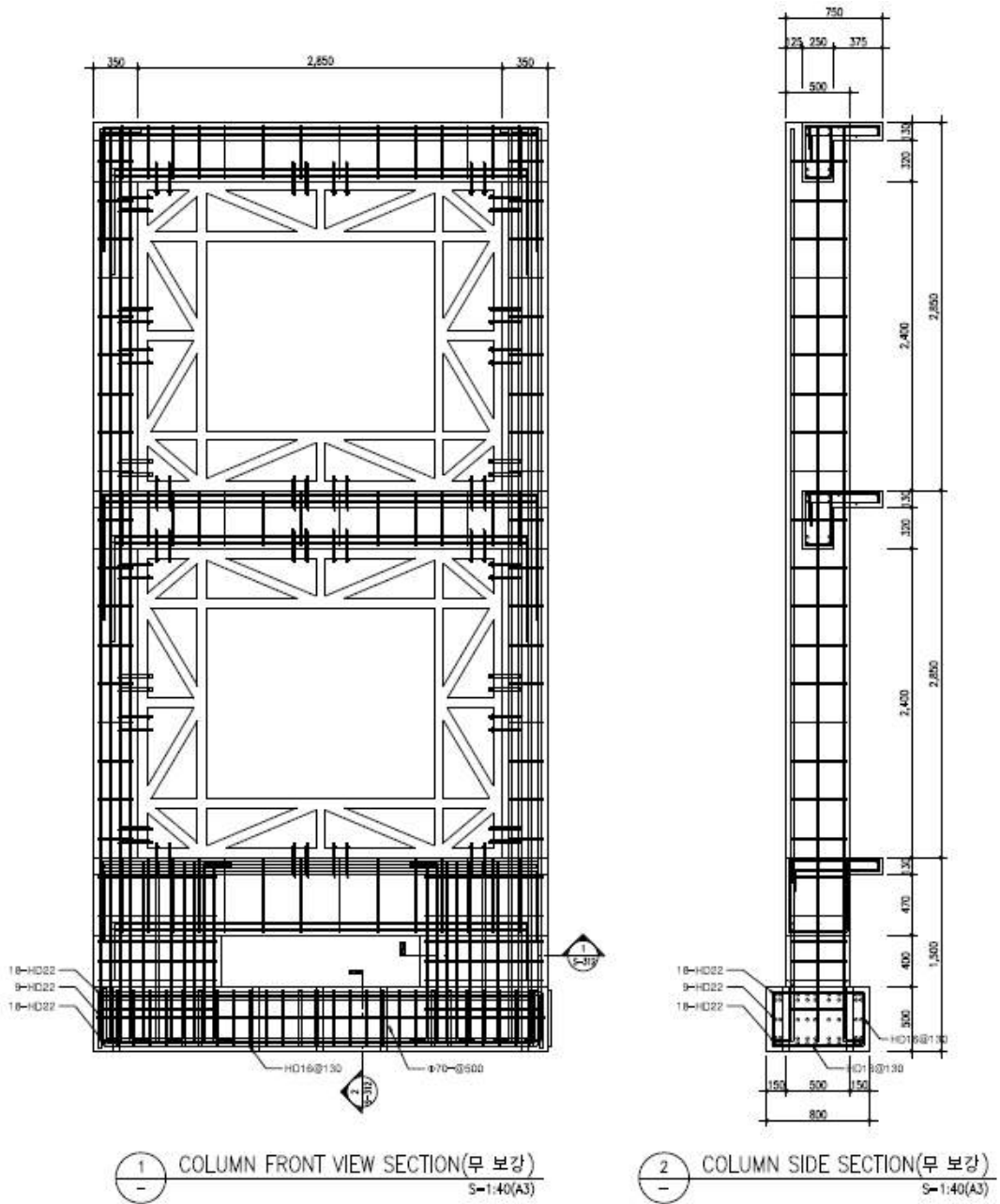
[그림 4.3] 실험체 NR-1 도면(계속)



[그림 4.3] 실험체 NR-1 도면



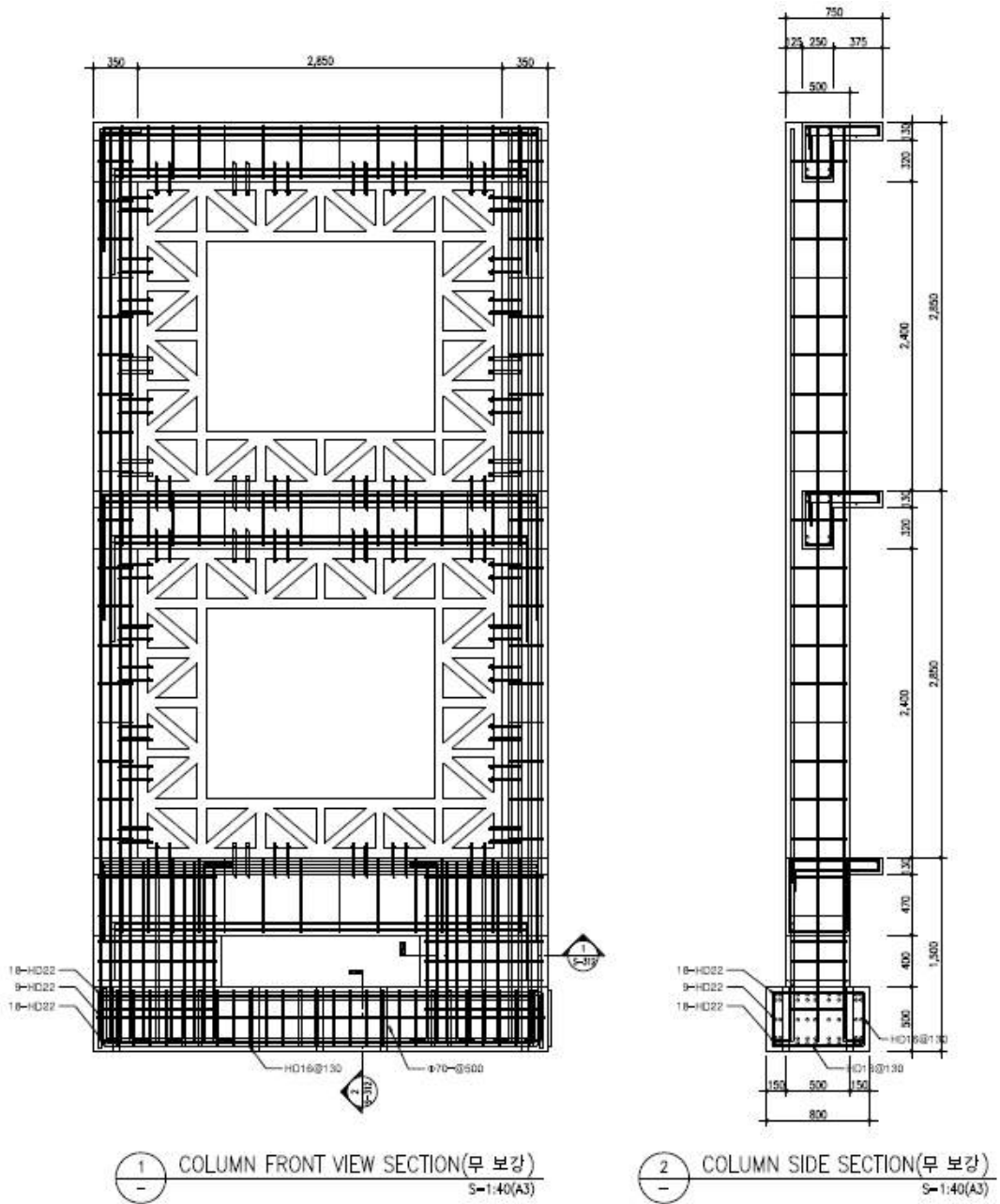
[그림 4.4] 실험체 NR-1 형상



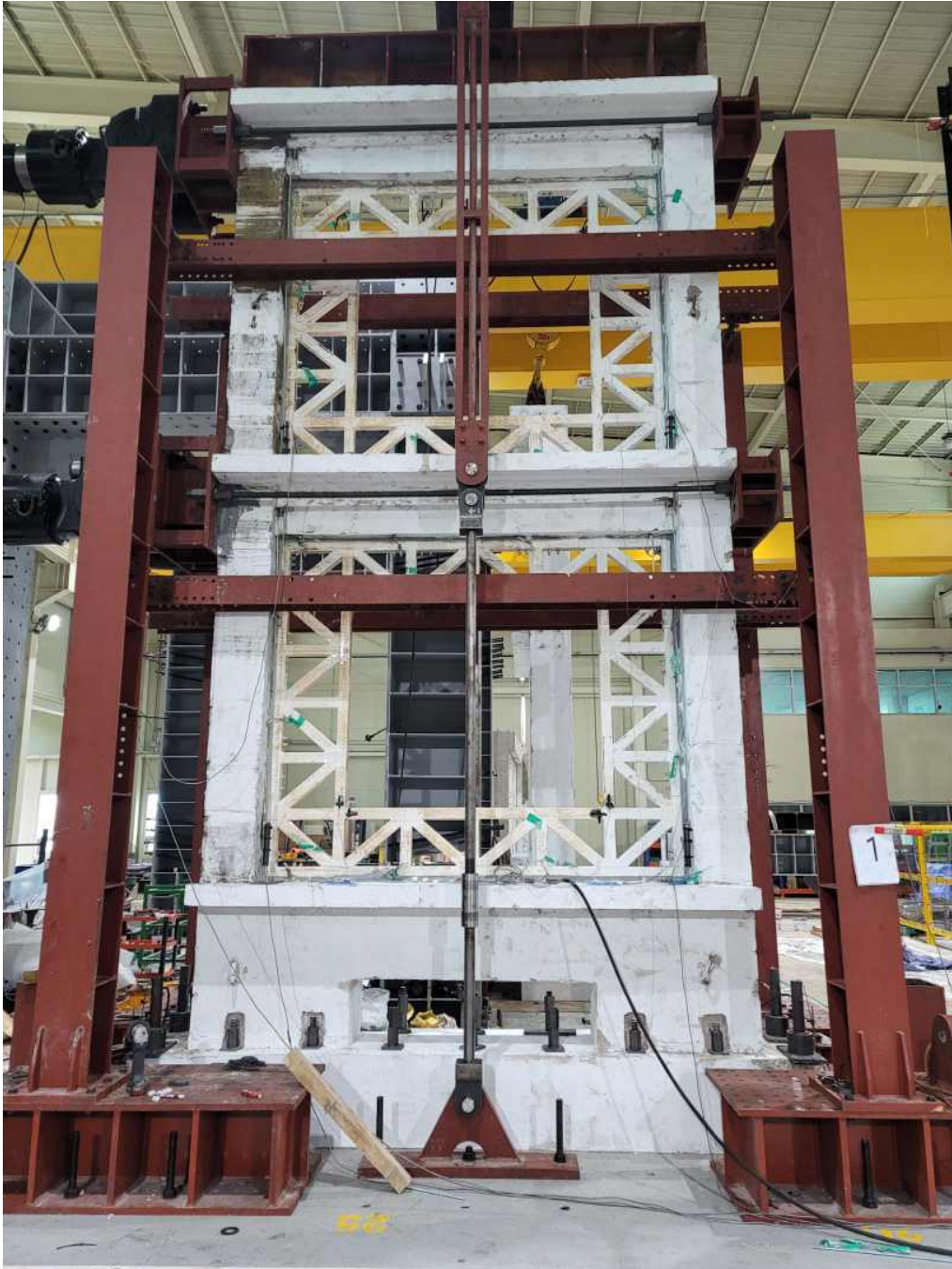
[그림 4.5] 실험체 TR-1 도면



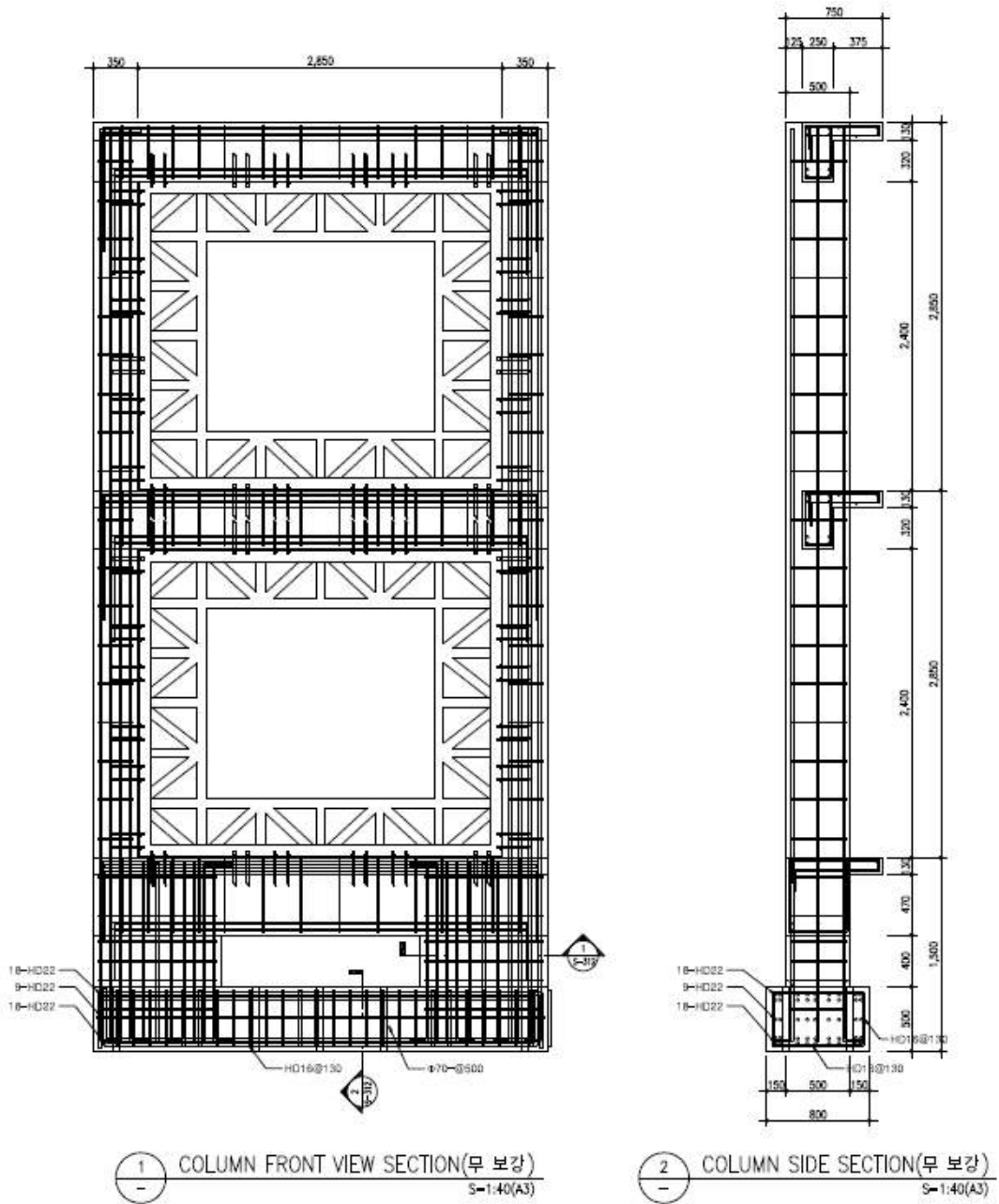
[그림 4.6] 실험체 TR-1 형상



[그림 4.7] 실험체 TR-2 도면



[그림 4.8] 실험체 TR-2 형상



[그림 4.9] 실험체 TR-3 도면



[그림 4.10] 실험체 TR-3 형상

나. 실험체 제작

비내진 상세를 갖는 실험체의 제작은 철근 조립, 거푸집 제작, 콘크리트 타설, 양생, 거푸집 탈형의 순서로 진행하며, [그림 4.11]에 나타냈다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체의 제작은 비내진 상세를 갖는 실험체의 제작 후 각형강관의 용접을 통한 다중 각형 강재 유니트 제작, 앵커볼트 홀 천공, RC 구조물과 다중 각형 강재 유니트의 앵커볼트 체결, RC 구조물 및 다중 각형 강재 유니트 내 에폭시 주입, 양생의 순서로 진행하며, [그림 4.12]에 나타냈다. 다중 각형 강재 유니트의 제작은 용접의 품질을 향상시키기 위하여 공장에서 제작하여 운반 후 현장 시공하였다.



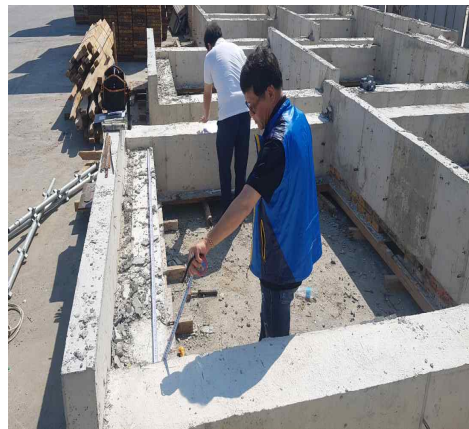
(a) 철근 조립



(b) 거푸집 제작

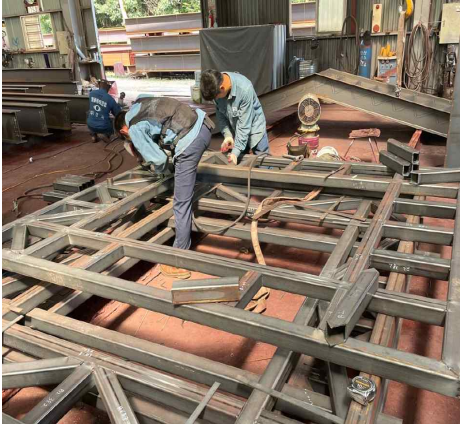


(c) 콘크리트 타설 및 양생



(d) 거푸집 탈형 및 시험체 검수

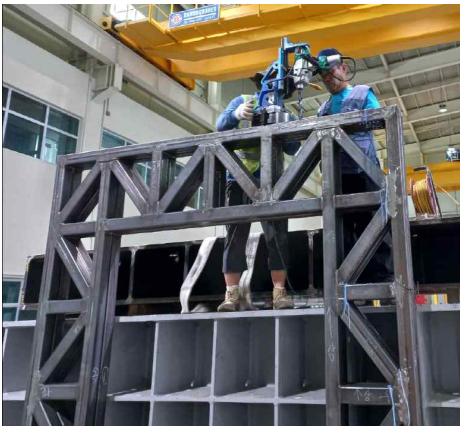
[그림 4.11] 비내진 상세를 갖는 실험체의 제작 순서



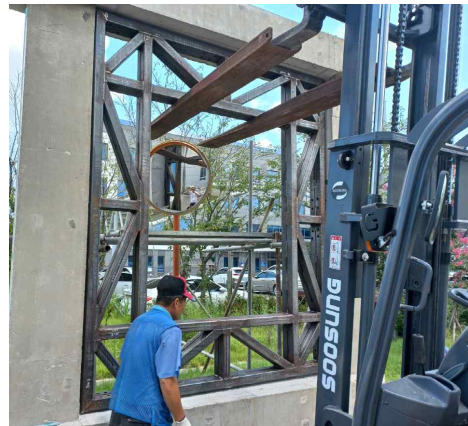
(a) 다중 각형 강재 유니트 제작



(b) RC 구조물 앵커볼트 홀 천공



(c) 다중 각형 강재 유니트 앵커볼트 홀 천공



(d) 다중 각형 강재 유니트 운반



(e) 앵커볼트 체결



(f) 에폭시 주입 및 양생

[그림 4.12] 다중 각형 강재 유니트로 보강된 실험체의 제작 순서

4. 가력 상세 및 측정 방법

[그림 4.13 ~ 14]는 2층 다중 각형 강재 유니트 보강골조 실험체의 설치 및 가력방법을 나타낸다. 횡력은 반력벽에 설치되어 있는 2,000 kN 용량의 액츄에이터에 의해 도입되었다. 모든 실험체는 반복 횡력에 의한 지압파괴를 방지하기 위해서 액츄에이터와 연결되는 상부 보의 측면에 240 mm 두께의 블록을 설치하였다. 실험체의 횡 가력은 [표 4.5]와 [그림 4.15]에 나타낸 바와 같이 3사이클씩 반복하여 2층에서 변위를 제어하였다. 각 사이클 당 횡 변위의 크기는 2층에서 0.001, 0.0015, 0.002, 0.0035, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.014, 0.0175 및 0.022의 변위각비를 갖도록 순차적으로 증분하였다. 1층의 가력은 변위각비에 의해 발휘된 2층 하중의 1.6 배로 도입하여 지진하중을 모사하였다. 2층의 변위 및 1층의 하중은 액츄에이터의 가력시스템을 프로그램화하여 자동제어 할 수 있도록 하였다. 축력은 실험체 상부에 놓여있는 반력 빔에 연결된 1,000 kN 용량의 유압잭과 인장강도 1,000 MPa인 턴버클 형식의 직경 65 mm의 강봉에 의해서 도입되었으며, 유압잭에 하중변환센서를 설치하여 축력을 모니터링 하였다. 강봉의 양 끝부분에는 힌지를 설치하여 정 및 부 방향으로 변위가 변화될 때에 발생할 수 있는 편심을 최소화하였다. 횡하중 실험 도중 작용 축력비($N/A_g f_{ck}$)는 모든 실험체에서 0.1로 일정하게 유지하였다. 실험체는 캔틸레버 거동을 시뮬레이션하기 위해서 기초에 관통된 10개의 구멍과 1,200 mm 길이의 강재 락볼트를 이용하여 바닥의 반력판에 완전히 고정하였다. 1층 및 2층의 횡 변위는 각 층의 횡가력 수평중심선과 동일한 선상에서 설치된 300 mm 및 500 mm의 LVDT(linear variable differential transducer)에 의해서 측정하였다. 1층 및 2층 내 전단변위는 각각 2개의 100 mm의 LVDT를 설치하여 측정하였다. 또한, 기초와 RC 프레임의 슬림변위는 기초 단면의 중앙부에 50 mm의 LVDT를 설치하여 측정하였으며, 기초와 RC 프레임의 락킹변위는 기초 측면의 상단부에 50 mm의 LVDT를 설치하여 측정하였다.



[그림 4.13] 2층 다중 각형 강재 유니트 보강골조 실험 전경



(a) 횡력 시스템 설치



(b) 축력 시스템 설치(반력빔)

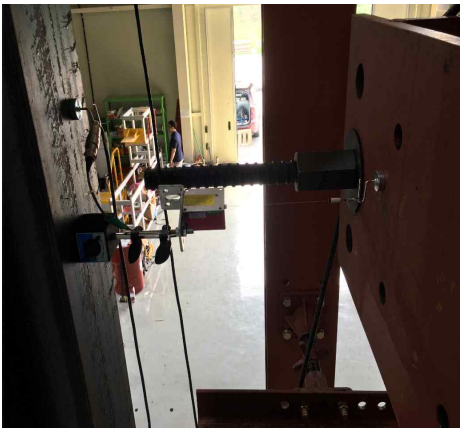
[그림 4.14] 가력 및 측정 셋팅 상세(계속)



(c) 축력 시스템 설치(유압기)



(d) 강재 락볼트 설치



(e) 횡변위 측정



(f) 전단 변위 측정



(g) 슬립 측정



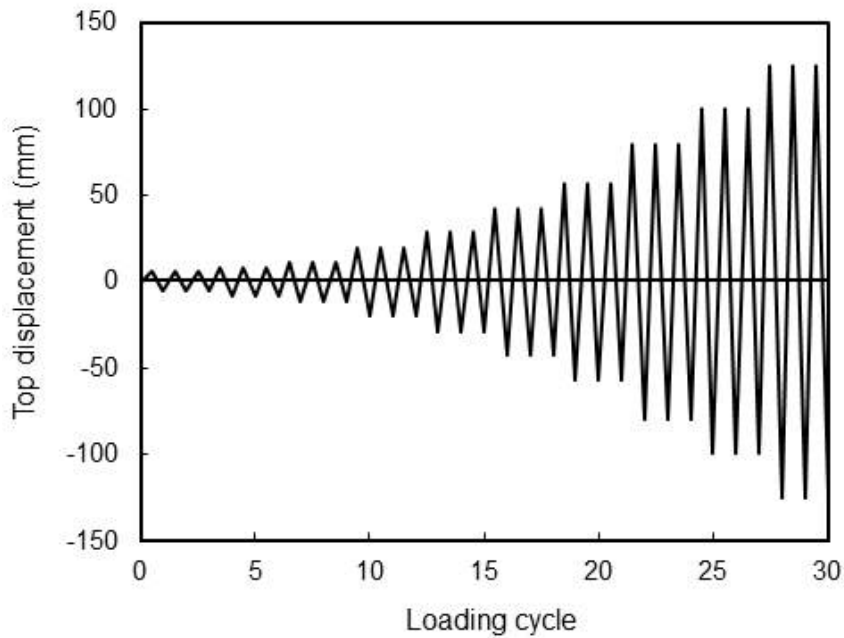
(h) 락킹 측정

[그림 4.14] 가력 및 측정 셋팅 상세

[표 4.5] 가력 상세

Step	Cycle	Displacement(mm)	Deformation Angle(rad)
1	3	± 5.7	0.001
2		± 8.55	0.0015
3		± 11.4	0.002
4		± 19.95	0.0035
5		± 28.5	0.005
6		± 42.75	0.0075
7		± 57	0.01
8		± 79.8	0.014
9		± 99.75	0.0175
10		± 125.4	0.022

* $H = 2,850 + 2,850 = 5,700\text{ mm}$



[그림 4.15] 가력 곡선

제2절 실험 결과

비내진 상세를 갖는 실험체 및 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체에 대한 실험 결과를 분석하였다. 모든 실험체는 균열진전, 파괴양상 및 횡하중-횡변위 관계를 측정하였다. 횡하중-횡변위 관계로부터 강성, 전단력을 평가하였다. 또한, 이들의 분석결과를 기반으로 비내진상세를 갖는 구조물 대비 보강된 구조물에서 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템의 보강효과를 검토하였다.

1. 하중 변위 곡선

[그림 4.16]에는 실험체 NR-1의 전체 하중-변위 곡선 및 각 층의 하중-변위 곡선을 나타냈고, [그림 4.17 ~ 19]에는 실험체 TR-1, TR-2, TR-3의 전체 하중-변위 곡선 및 각 층의 하중-변위 곡선을 나타냈다. [그림 4.20 ~ 22]에는 실험체 NR-1과 실험체 TR-1, TR-2, TR-3의 전체 하중-변위 곡선을 비교하였고, [표 4.6]에는 각 실험체에 대한 초기강성, 항복상태의 하중 및 변위와 최대내력 상태의 하중 및 변위를 나타냈고, [표 4.7]에는 실험체 NR-1과 실험체 TR-1, TR-2, TR-3에 대한 초기강성, 항복상태의 하중 및 변위와 최대 내력 상태의 하중 및 변위를 비교하였다.

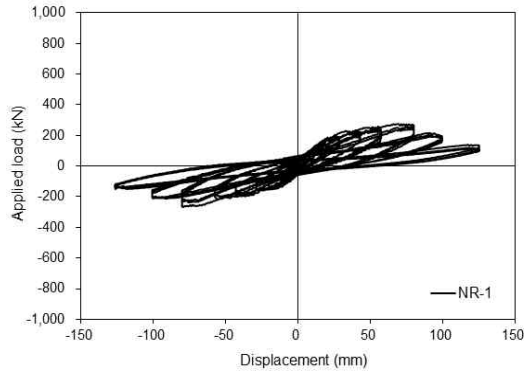
실험체 NR-1은 초기균열 발생 이후 강성이 다소 저하되었다. 이후 최대하중 도달 이전까지 강성은 지속적으로 저하되었다. 최대하중은 22cycle($R_{\Delta}=1.4\%$)에서 발생하였는데, 특히 최대하중 이후 하중이 최대하중의 75%로 급격히 감소하였다. 2층 및 1층의 초기강성은 초기균열 발생 전까지 비슷하였지만 발생 이후 강성이 1층보다 2층에서 더 높았고, 그 높음의 정도는 점차 작아졌다. 최대하중의 발생시점은 1층과 2층에서 모두 22cycle이었는데, 이때의 층간 변위각비는 각각 2% 및 1.23%이다. 따라서, 비내진 상세를 갖는 실험체 NR-1은 취성적인 거동을 보임에 따라 지진 저항성이 매우 취약하다.

실험체 TR-1은 실험체 NR-1 보다 넓은 이력루프를 보였다. 초기균열 발생 이전의 강성은 실험체 NR-1보다 약 2.14배 높았으며, 그 강성의 차이는 하중에 점차 증가함에 따라 점점 감소하였다. 초기 균열 발생 이후 강성이 다소 저하되었으며, 이후 강성은 지속적으로 저하되었는데, 그 저하의 정도는 실험체 NR-1보다 높다. 최대하중은 22cycle($R_{\Delta}=1.4\%$)에서 발생하였는데, 실험체 NR-1과 동일하다. 2층 및 1층의 횡하중-횡변위 관계도 실험체 NR-1보다 넓은 이력루프를 보였다. 2층 및 1층의 초기강성은 초기균열 발생 이전까지 비슷하였지만 발생 이후 강성이 1층보다 2

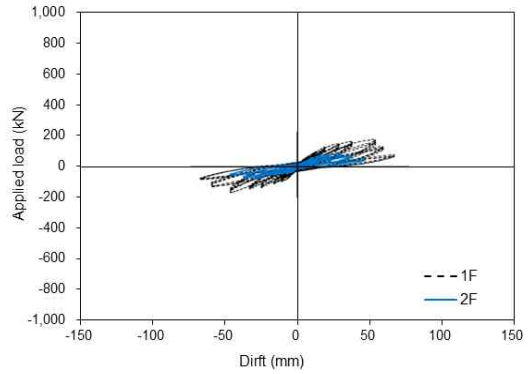
층에서 더 높았고, 그 높음의 정도는 점차 커졌다. 최대하중의 발생시점은 1층과 2층에서 모두 22cycle이었는데, 이때의 층간 변위각비는 각각 2% 및 0.79%이다. 결과적으로 실험체 TR-1은 실험체 NR-1보다 초기강성을 2.11배 증가시킬 뿐만 아니라 최대내력을 2.79배 향상시키는 결과를 보여 개발된 강재 유니트 내진보강공법이 내진보강에 효과적인 것으로 사료된다.

실험체 TR-2은 실험체 NR-1 보다 넓은 이력루프를 보였다. 초기균열 발생 이전의 강성은 실험체 NR-1보다 약 2.32배 높았으며, 그 강성의 차이는 하중에 점차 증가함에 따라 점점 감소하였다. 초기 균열 발생 이후 강성이 다소 저하되었으며, 이후 강성은 지속적으로 저하되었는데, 그 저하의 정도는 실험체 NR-1보다 높다. 최대하중은 22cycle($R_{\Delta}=1.4\%$)에서 발생하였는데, 실험체 NR-1과 동일하다. 최대하중 이후 하중이 최대하중의 75%로 실험체 NR-1과 강도저하의 정도가 동일하다. 2층 및 1층의 횡하중-횡변위 관계도 실험체 NR-1보다 넓은 이력루프를 보였다. 2층 및 1층의 초기강성은 초기균열 발생 이전까지 비슷하였지만 발생 이후 강성이 1층보다 2층에서 더 높았고, 그 높음의 정도는 점차 커졌다. 최대하중의 발생시점은 1층과 2층에서 모두 22cycle이었는데, 이때의 층간 변위각비는 각각 2.10% 및 0.61%이다. 결과적으로 실험체 TR-2은 실험체 NR-1보다 초기강성을 2.32배 증가시킬 뿐만 아니라 최대내력을 2.28배 향상시키는 결과를 보여 개발된 강재 유니트 내진보강공법이 내진보강에 효과적인 것으로 사료된다.

실험체 TR-3은 실험체 NR-1 보다 넓은 이력루프를 보였다. 초기균열 발생 이전의 강성은 실험체 NR-1보다 약 4.56배 높았으며, 그 강성의 차이는 하중에 점차 증가함에 따라 점점 감소하였다. 초기 균열 발생 이후 강성이 점차 저하되었으며, 이후 강성은 지속적으로 저하되었는데, 그 저하의 정도는 실험체 NR-1보다 높다. 최대하중은 19cycle($R_{\Delta}=1\%$)에서 발생하였는데, 실험체 NR-1보다 3cycle 빠르다. 최대하중 이후 하중이 최대하중의 91%로 실험체 NR-1보다 1.21배로 높아 강도저하의 정도가 감소하였다. 2층 및 1층의 횡하중-횡변위 관계도 실험체 NR-1보다 넓은 이력루프를 보였다. 2층 및 1층의 초기강성은 초기균열 발생 이전까지 비슷하였지만 발생 이후 강성이 1층보다 2층에서 더 높았고, 그 높음의 정도는 점차 커졌다. 최대하중의 발생시점은 1층과 2층에서 모두 19cycle이었는데, 이때의 층간 변위각비는 각각 1.52% 및 0.47%이다. 결과적으로 실험체 TR-1은 실험체 NR-1보다 초기강성을 4.47배 증가시킬 뿐만 아니라 최대내력을 2.65배 향상시키는 결과를 보여 개발된 강재 유니트 내진보강공법이 내진보강에 효과적인 것으로 사료된다.

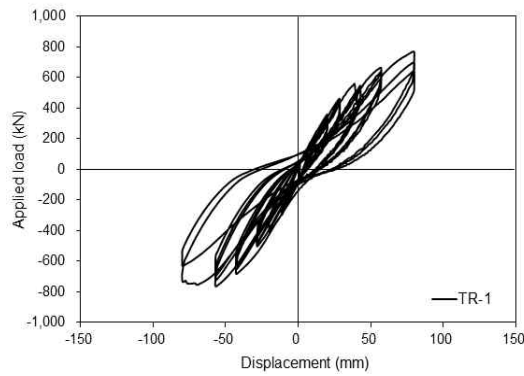


(a) 전체 하중-변위 관계

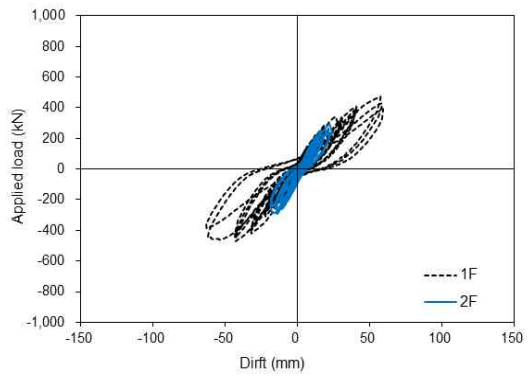


(b) 각 층의 하중-변위 관계

[그림 4.16] 횡하중-횡변위 관계 NR-1

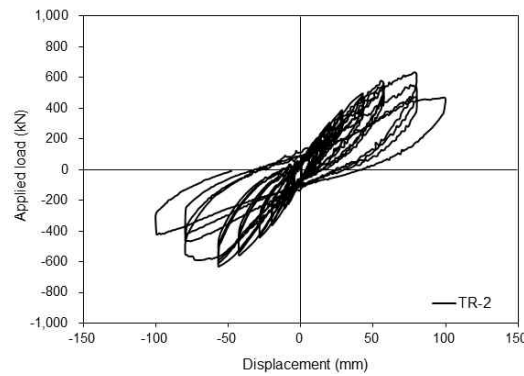


(a) 전체 하중-변위 관계

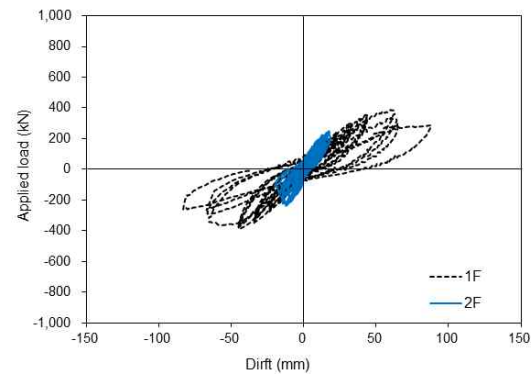


(b) 각 층의 하중-변위 관계

[그림 4.17] 횡하중-횡변위 관계 TR-1

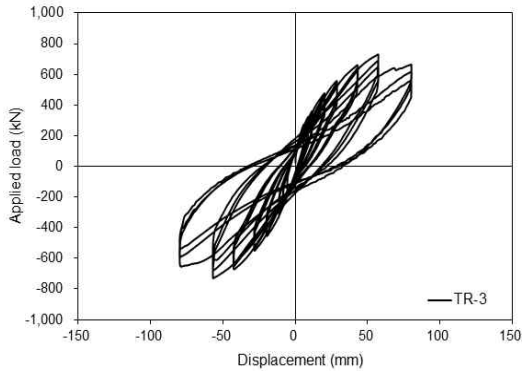


(a) 전체 하중-변위 관계

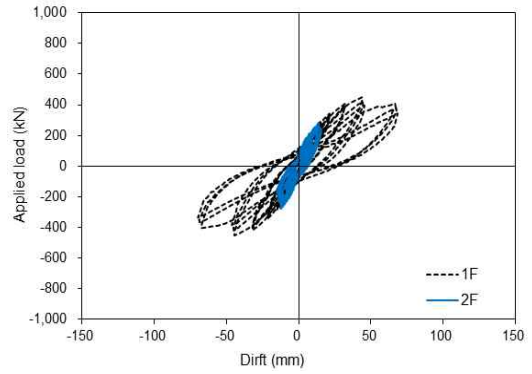


(b) 각 층의 하중-변위 관계

[그림 4.18] 횡하중-횡변위 관계 TR-2



(a) 전체 하중-변위 관계

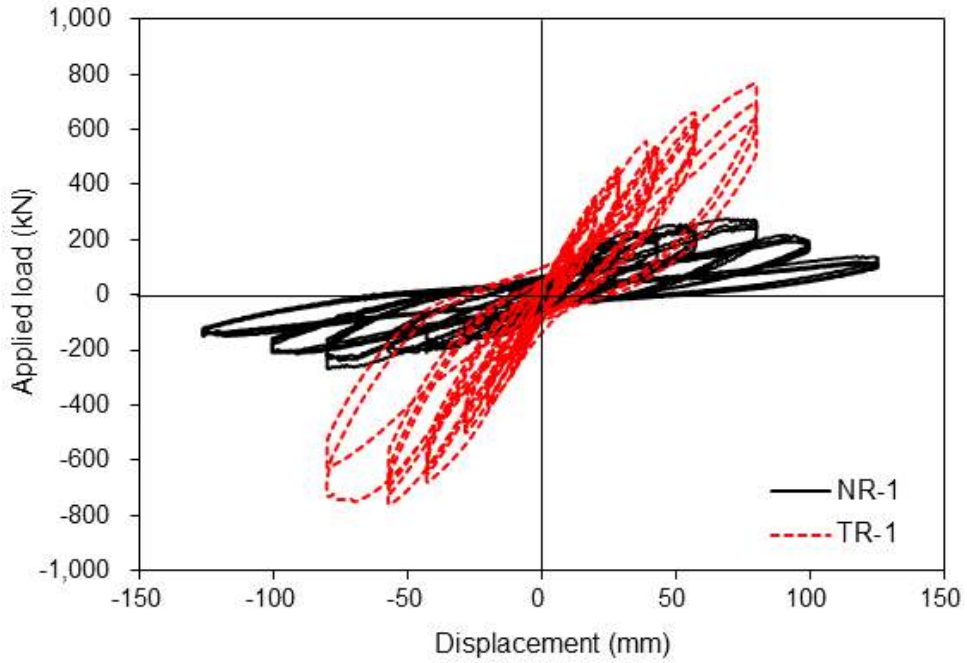


(b) 각 층의 하중-변위 관계

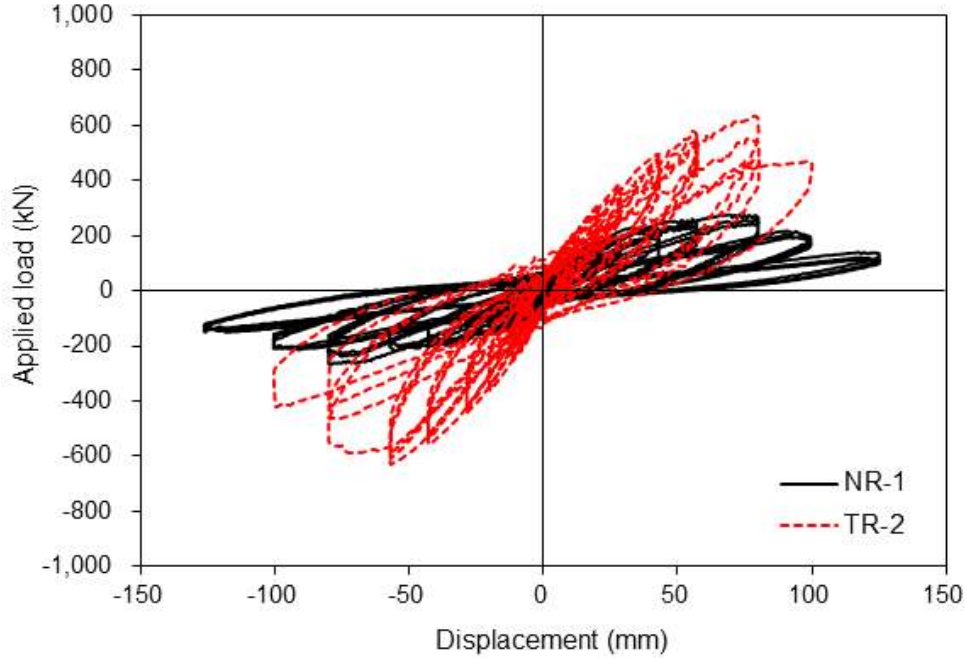
[그림 4.19] 횡하중-횡변위 관계 TR-3

[표 4.6] 실험체별 초기강성, 하중, 변위

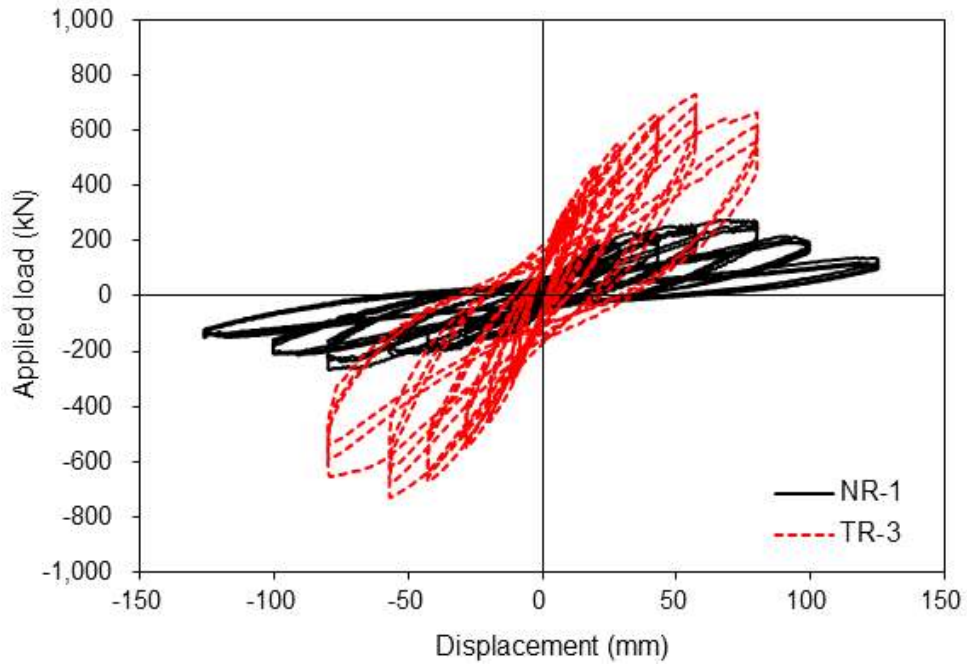
Specimens	K_{in} (kN/mm)	V_y (kN)	Δ_y (mm)	V_u (kN)	Δ_u (mm)
NR-1	10.81	228.2	42.20	275.5	68.56
TR-1	22.76	545.5	42.97	767.3	79.33
TR-2	24.64	481.5	42.56	632.8	78.17
TR-3	48.34	659.3	42.34	729.8	57.10



[그림 4.20] 횡하중-횡변위 관계 NR-1, TR-1의 비교



[그림 4.21] 횡하중-횡변위 관계 NR-1, TR-2의 비교



[그림 4.22] 횡하중-횡변위 관계 NR-1, TR-3의 비교

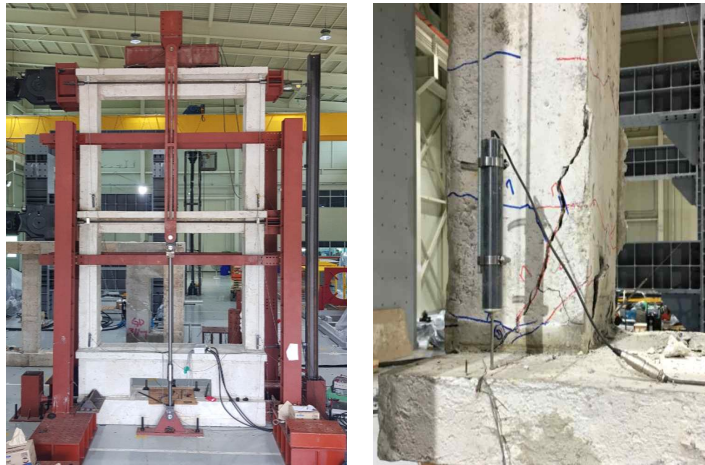
[표 4.7] 실험체 NR-1에 대한 실험체별 초기강성, 하중, 변위

Specimens	$\frac{K_{in}}{K_{in(c)}}$	$\frac{V_y}{V_{y(c)}}$	$\frac{\Delta_y}{\Delta_{y(c)}}$	$\frac{V_u}{V_{u(c)}}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_{u(c)}}$
TR-1	2.11	2.39	1.02	2.79	1.16
TR-2	2.28	2.11	1.01	2.30	1.14
TR-3	4.47	2.89	1.00	2.65	0.83

2. 균열진전 및 파괴양상

가. 비내진 상세를 갖는 실험체 NR-1

비내진 상세를 갖는 실험체 NR-1의 형상과 파괴양상은 [그림 4.23~24]에 나타났다. 초기균열은 정가력 4cycle($R_{\Delta}=0.15\%$)에서 1층의 좌우측 기둥의 상부 및 하부에 발생하였으며, 이 균열은 점차 기둥 중앙부로 확대되었다. 전단균열은 7cycle($R_{\Delta}=0.2\%$) ~ 9cycle($R_{\Delta}=0.2\%$)에서 기둥의 하부 중앙에 집중적으로 발생하였다. 이때 1층 기둥 상부에서도 전단균열이 발생하기 시작하였다. 이후 사이클에서는 전단균열이 점차 커지면서, 일부 균열폭들이 크게 발생하였다. 13cycle($R_{\Delta}=0.5\%$)에서는 기둥 중앙부에 전단균열의 폭이 매우 커지면서 콘크리트 피복이 일부 박리되었다. 25cycle ($R_{\Delta}=1.75\%$)에서는 양기둥의 상부의 전단균열이 급격히 확장되었으며 하중이 급격히 감소하기 시작하여 실험을 종료하였다.



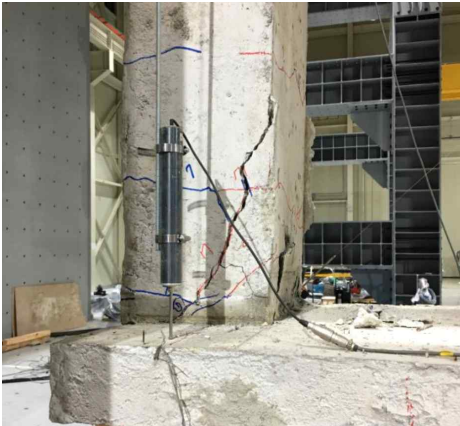
[그림 4.23] 실험체 NR-1 형상 및 최종파괴 형상



(a) 최종 파괴 양상



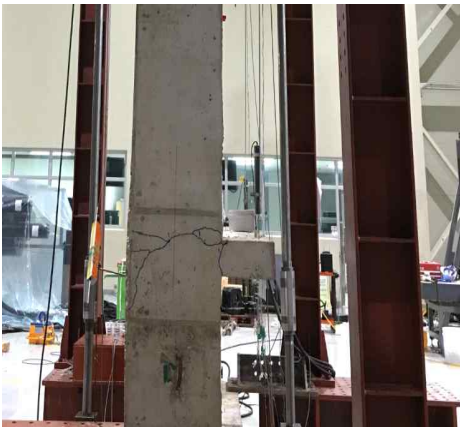
(b) 최종 파괴 양상



(c) 최종 파괴 양상



(d) 최종 파괴 양상



(e) 최종 파괴 양상



(f) 최종 파괴 양상

[그림 4.24] 실험체 NR-1 파괴양상

나. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-1

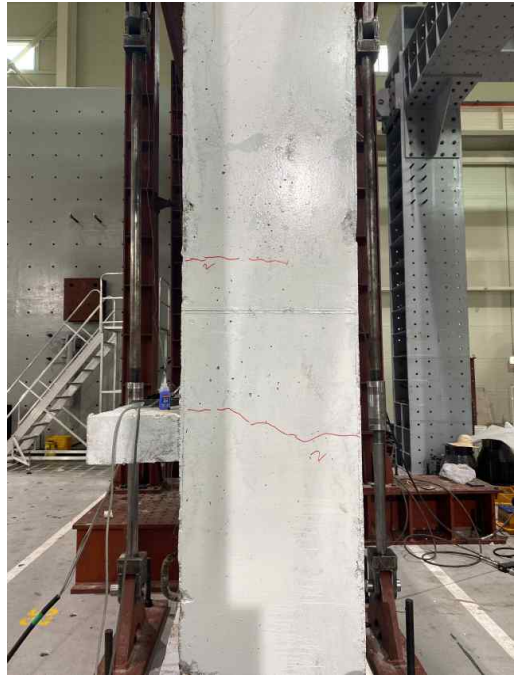
다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-1의 형상과 파괴 양상은 [그림 4.25~26]에 나타났다. 초기균열은 6cycle($R_{\Delta}=0.15\%$)에서 기둥 하단부에 발생하여 실험체 NR-1보다 2사이클이 지연되었다. 15cycle($R_{\Delta}=0.5\%$)에서는 접합부의 에폭시 부분에 균열이 발생하였다. 이후 균열이 점차 증가하여 박리현상이 발생하였다. 18cycle($R_{\Delta}=0.75\%$)에서는 에폭시 부분의 균열과 에폭시와 구조체의 하단 접합부의 균열로 인해 하중이 감소하였으며, 기둥의 하단부에 전단균열이 발생하였다. 이후 균열은 점차 증가하여 기둥의 하단부로 확장되었다. 24cycle($R_{\Delta}=1.4\%$) 정방향에서 1층 기둥 하단부의 전단파괴로 인해 실험을 종료하였다. 보강재의 항복이나 파괴 없이 기둥이 파괴된 것으로 보았을 때 과설계가 우려된다.



[그림 4.25] 실험체 TR-1 형상 및 최종파괴 형상



(a) 2step



(b) 2step



(c) 3step

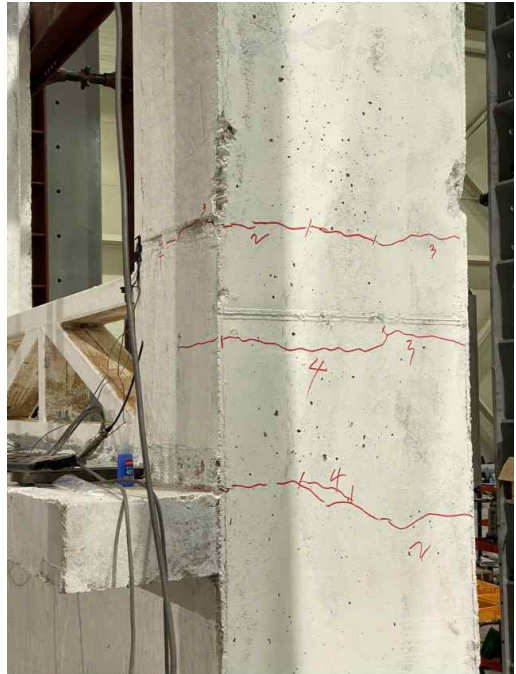


(d) 3step

[그림 4.26] 실험체 TR-1 파괴양상(계속)



(e) 4step



(f) 4step



(g) 5step

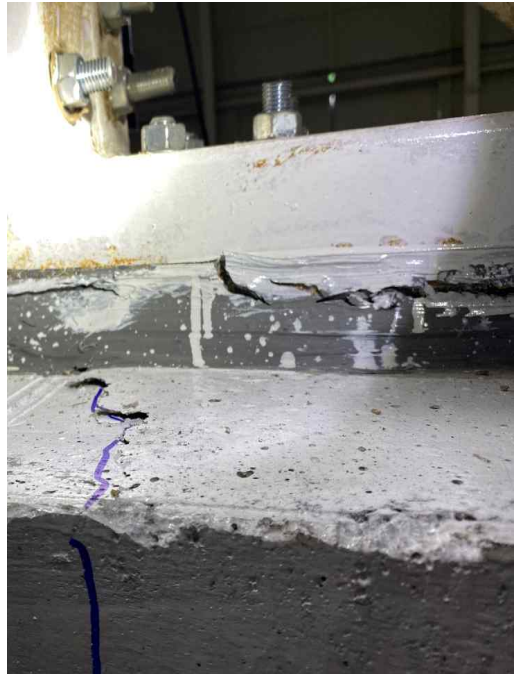


(h) 5step

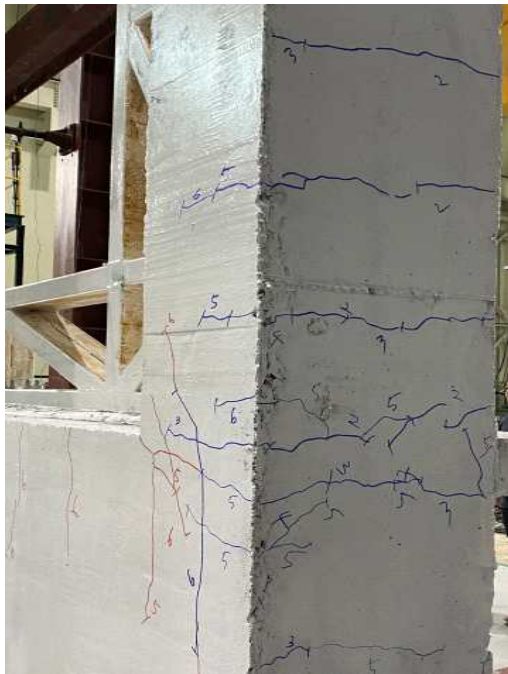
[그림 4.26] 실험체 TR-1 파괴양상(계속)



(i) 6step



(j) 6step



(k) 6step



(l) 6step

[그림 4.26] 실험체 TR-1 파괴양상(계속)



(m) 7step



(n) 7step



(o) 8step



(p) 8step

[그림 4.26] 실험체 TR-1 파괴양상(계속)



(q) 최종 파괴 양상



(r) 최종 파괴 양상



(s) 최종 파괴 양상



(t) 최종 파괴 양상



(u) 최종 파괴 양상

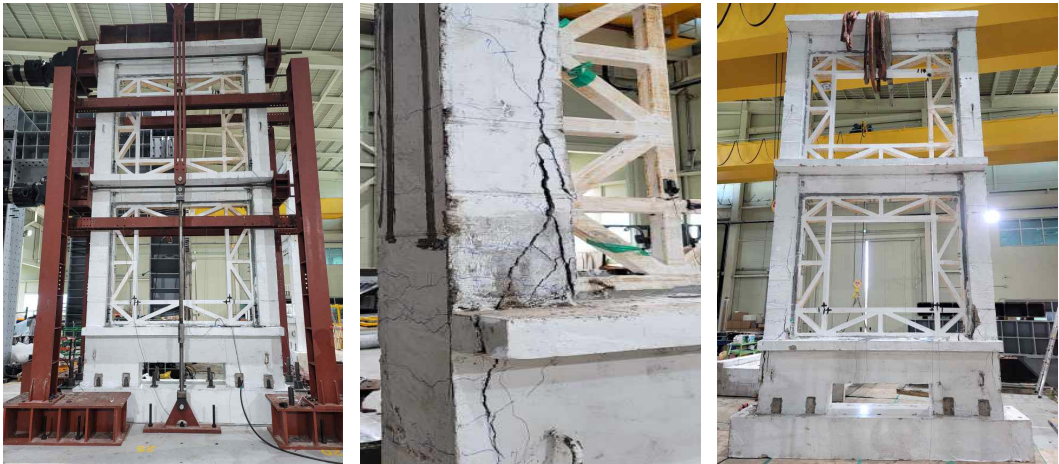


(v) 최종 파괴 양상

[그림 4.26] 실험체 TR-1 파괴양상

다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-2

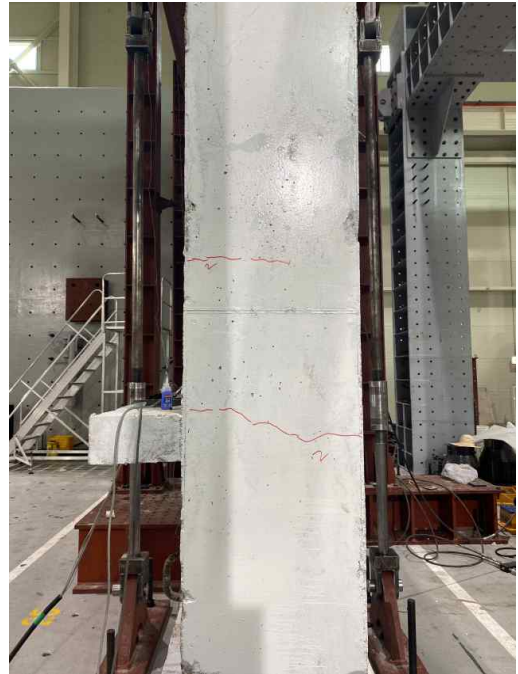
다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-2의 형상과 파괴 양상은 [그림 4.27~28]에 나타냈다. 초기균열은 6cycle($R_{\Delta}=0.15\%$)에서 기둥 하단부에 발생하여 실험체 NR-1보다 2사이클이 지연되었다. 18cycle($R_{\Delta}=0.15\%$)에서는 전단균열이 발생하였다. 이후 균열은 점차 증가하여 기둥의 하단부로 확장되었다. 21cycle($R_{\Delta}=1\%$)이후부터는 앵커볼트 부분의 각형강관에 변형이 일어나고 앵커볼트가 뽑히기 시작하였다. 22cycle($R_{\Delta}=1.4\%$)이후부터는 다중 각형 강재 유니트의 응력집중 부위에 변형 및 균열이 발생하였다. 이후 균열이 점차 증가하여 찢어졌다. 25cycle($R_{\Delta}=1.75\%$)에서는 목표 내력에 도달 후 1층 우측 기둥의 파괴로 실험을 종료하였다. 전반적으로 실험체 TR-1과 비슷하였지만, 실험체 TR-1은 보강재의 변형이 발생한 후 보강재가 더 이상 힘을 받지 못한 후 기둥의 전단파괴가 발생하였다.



[그림 4.27] 실험체 TR-2 형상 및 최종파괴 형상



(a) 2step



(b) 2step



(c) 3step

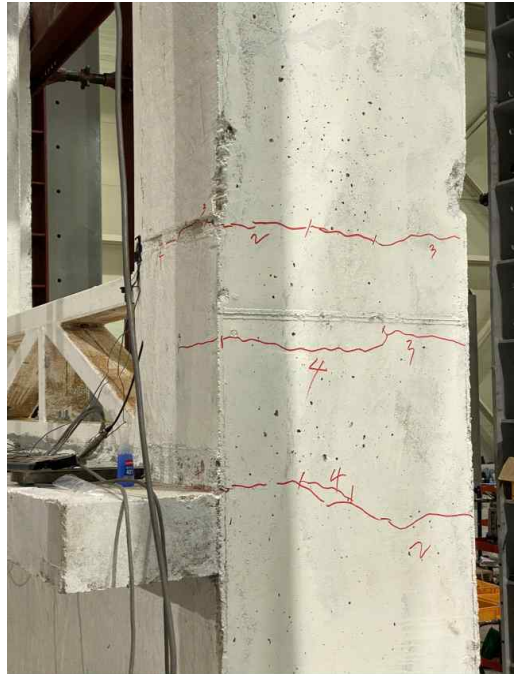


(d) 3step

[그림 4.28] 실험체 TR-2 파괴양상(계속)



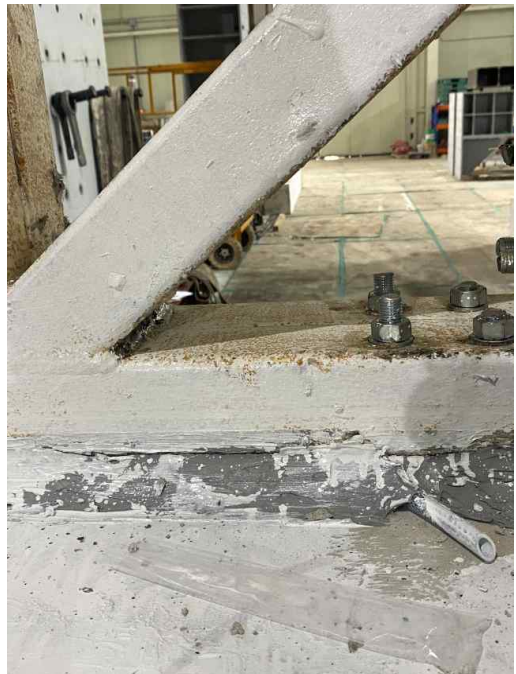
(e) 4step



(f) 4step



(g) 5step

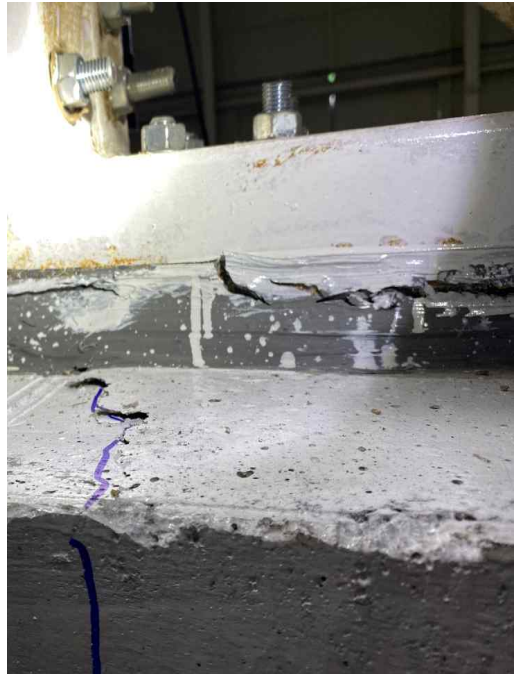


(h) 5step

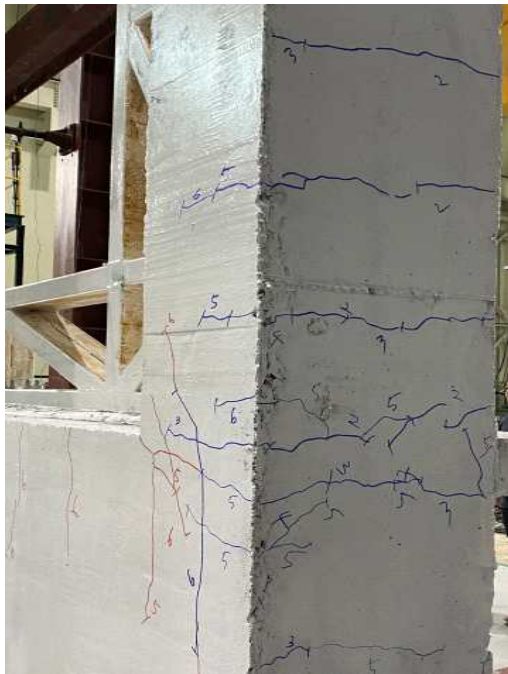
[그림 4.28] 실험체 TR-2 파괴양상(계속)



(i) 6step



(j) 6step

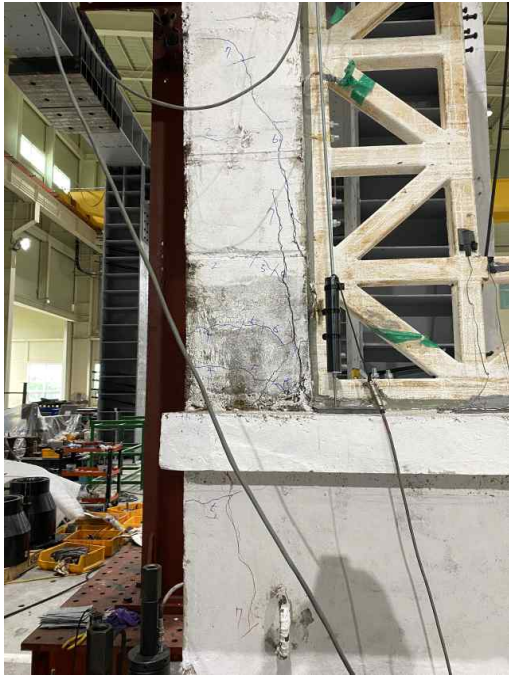


(k) 6step



(l) 6step

[그림 4.28] 실험체 TR-2 파괴양상(계속)



(m) 7step



(n) 7step

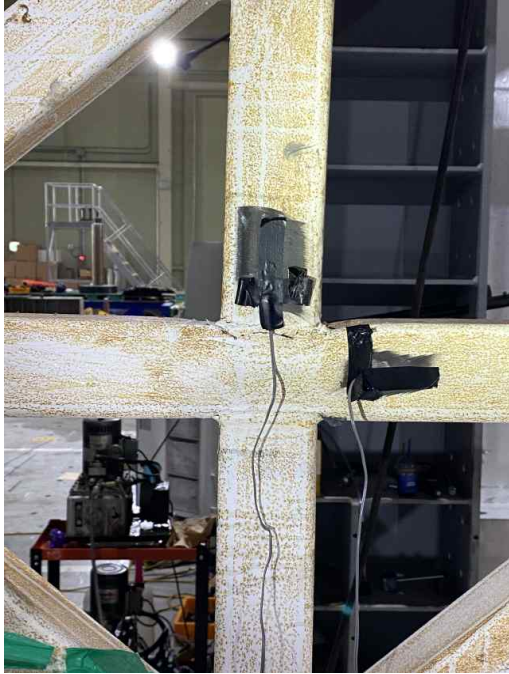


(o) 7step

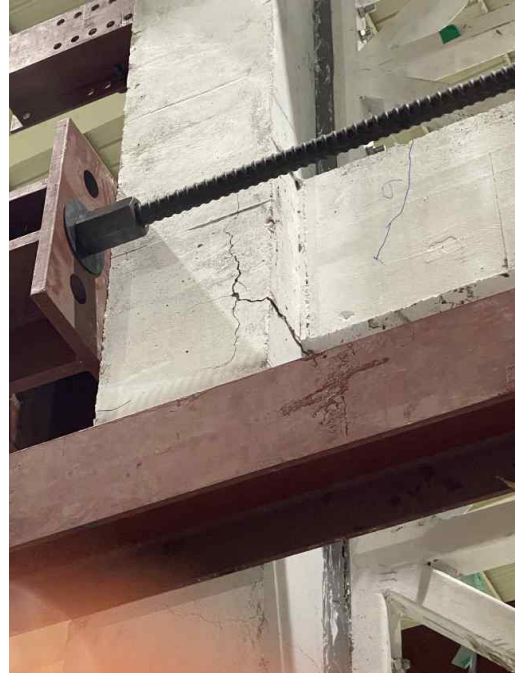


(p) 7step

[그림 4.28] 실험체 TR-2 파괴양상(계속)



(q) 8step



(r) 8step



(s) 9step



(t) 9step

[그림 4.28] 실험체 TR-2 파괴양상(계속)



(u) 최종 파괴 양상



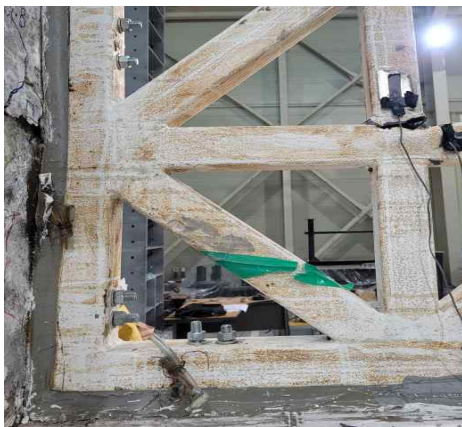
(v) 최종 파괴 양상



(w) 최종 파괴 양상



(x) 최종 파괴 양상



(y) 최종 파괴 양상

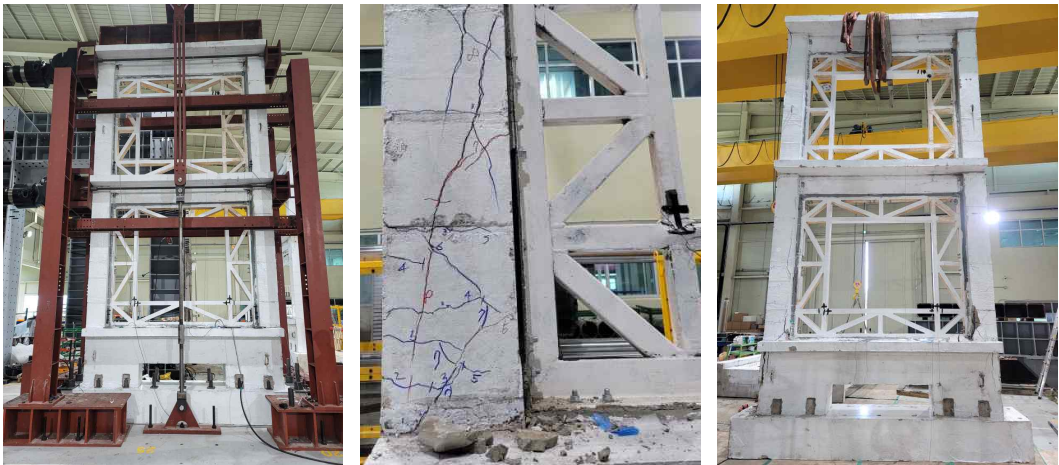


(z) 최종 파괴 양상

[그림 4.28] 실험체 TR-2 파괴양상

라. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-3

다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-3의 형상과 파괴 양상은 [그림 4.29~30]에 나타났다. 초기균열은 6cycle($R_{\Delta}=0.15\%$)에서 기둥 하단부에 발생하여 실험체 NR-1보다 2사이클이 지연되었다. 16cycle($R_{\Delta}=0.14\%$)에서는 실험체 하단부 강재부분에서 균열이 발생하였다. 이후 균열이 점차 증가하여 박리 현상이 발생하였다. 18cycle($R_{\Delta}=0.14\%$)에서는 접합부의 에폭시 부분에 균열이 발생하였다. 이후 균열이 점차 증가하여 박리현상이 발생하였다. 19cycle($R_{\Delta}=1\%$)이후부터는 다중 각형 강재 유니트의 응력집중 부위에 변형 및 균열이 발생하였고, 이후 균열이 점차 증가하여 찢어졌다. 21cycle($R_{\Delta}=1\%$)에서는 전단균열이 발생하였다. 이후 균열은 점차 증가하여 기둥의 상하단부로 확장되었다. 다른 보강 실험체들에 비해 전단균열 발생이 3사이클이 지연되었다. 24cycle($R_{\Delta}=1.75\%$)에서는 목표 내력에 도달 후 기둥의 전단파괴 위험으로 실험을 종료하였다. 전반적으로 실험체 TR-3의 균열진전은 실험체 TR-2와 비슷하였지만, 전단균열 발생이 지연되었다.



[그림 4.29] 실험체 TR-3 형상 및 최종파괴 형상



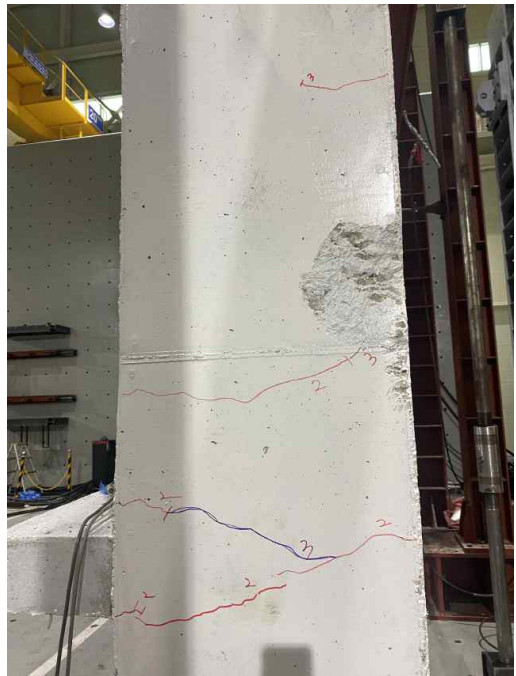
(a) 2step



(b) 2step



(c) 3step



(d) 3step

[그림 4.30] 실험체 TR-3 파괴양상(계속)



(e) 4step



(f) 4step



(g) 5step

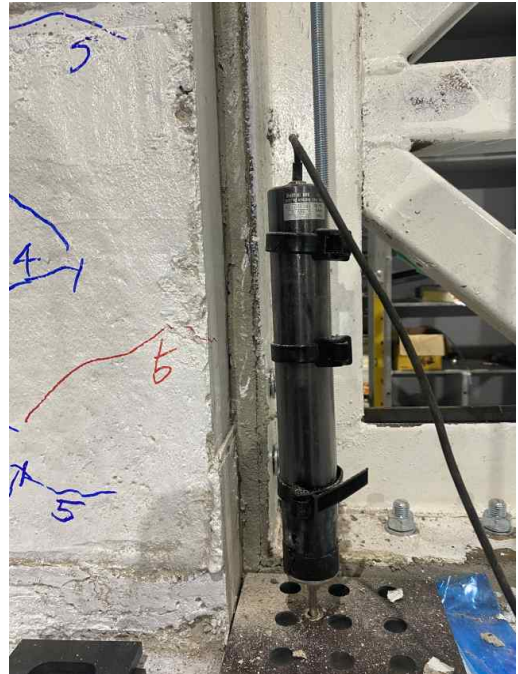


(h) 5step

[그림 4.30] 실험체 TR-3 파괴양상(계속)



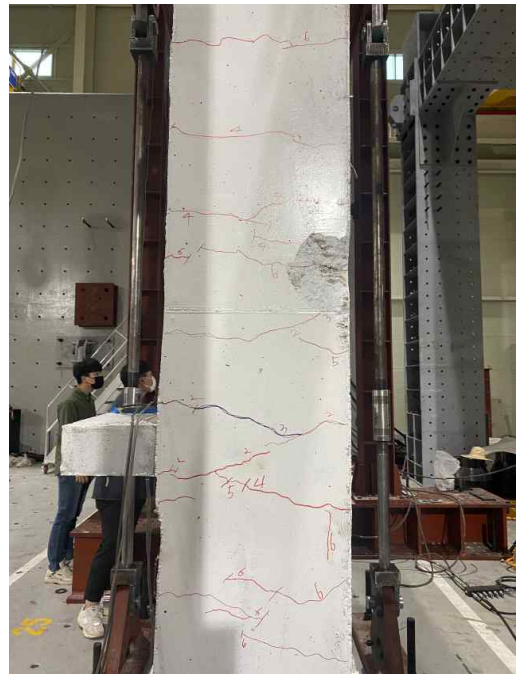
(i) 6step



(j) 6step



(k) 6step



(l) 6step

[그림 4.30] 실험체 TR-3 파괴양상(계속)



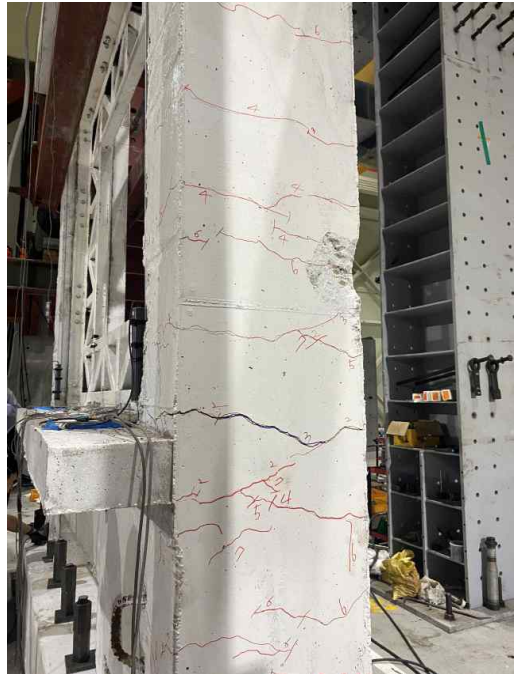
(m) 7step



(n) 7step

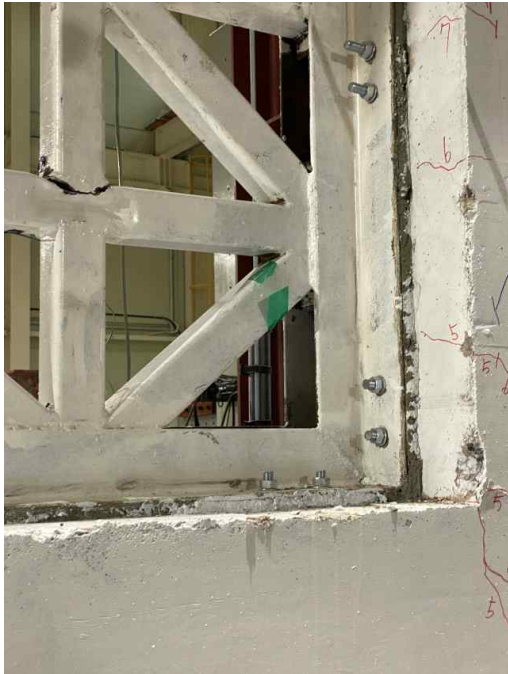


(o) 7step

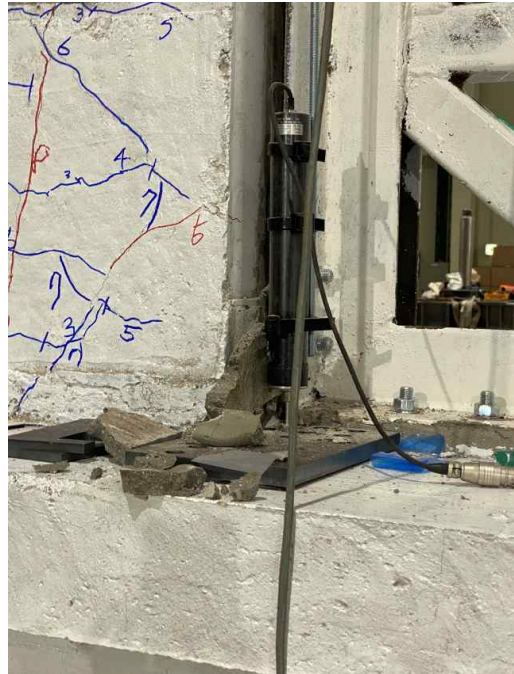


(p) 7step

[그림 4.30] 실험체 TR-3 파괴양상(계속)



(q) 8step



(r) 8step



(s) 8step



(t) 8step

[그림 4.30] 실험체 TR-3 파괴양상(계속)



(u) 최종 파괴 양상



(v) 최종 파괴 양상



(w) 최종 파괴 양상



(x) 최종 파괴 양상



(y) 최종 파괴 양상



(z) 최종 파괴 양상

[그림 4.30] 실험체 TR-3 파괴양상

3. 강성 저하 및 전단력

가. 강성 저하

[그림 4.31]에는 비내진 상세를 갖는 실험체 NR-1과 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-1, TR-2, TR-3의 초기강성 및 강성 저하를 나타냈다.

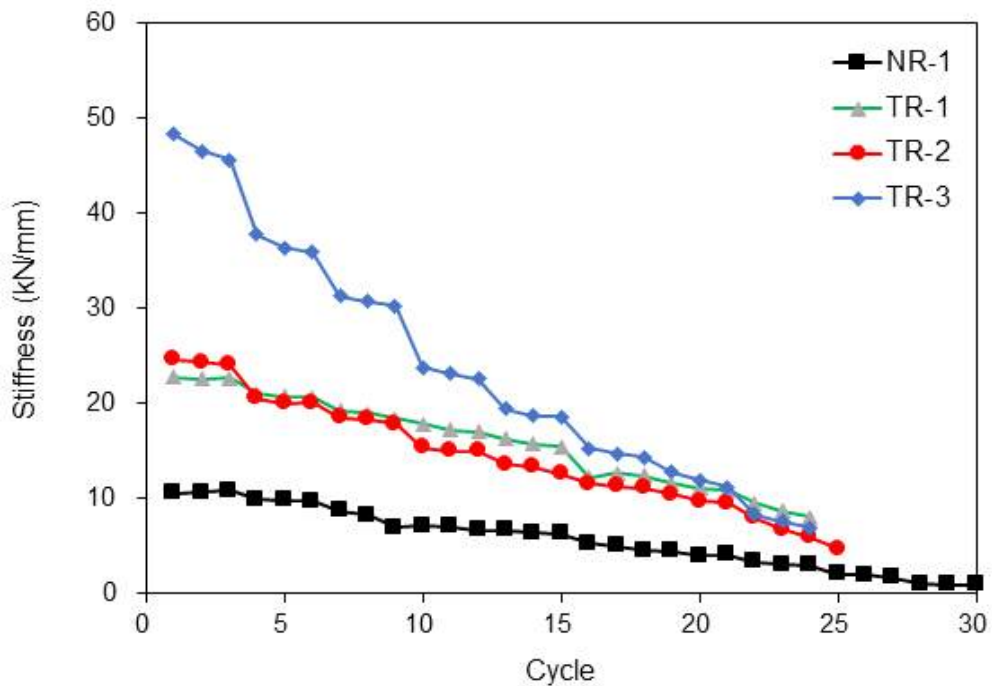
비내진 상세를 갖는 실험체 NR-1은 비내진 상세를 갖는 실험체 NR-1은 초기강성(1cycle)이 10.61 kN/mm이며, 실험 종료 시점(30cycle) 강성이 0.91 kN/mm로 총 9.7 kN/mm 저하되었다. 최대하중 시점(22cycle)에서의 강성은 3.3 kN/mm이며, 최대하중 이후의 25cycle에서의 강성은 2.0 kN/mm로서 약 40% 감소하였다. 2층 및 1층의 강성저하는 초기균열 발생 이전까지는 비슷하지만 균열 발생 이후 1층이 2층보다 강성저하가 급격하였다. 1층과 2층의 강성차이는 최대내력 도달 전까지 점진적으로 커졌다. 최대내력 시점에서의 1층의 강성은 2.7 kN/mm이며, 2층의 강성은 3.1 kN/mm임을 확인하였다.

다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-1은 초기강성(1cycle)이 22.76 kN/mm이며, 실험 종료 시점(24cycle) 강성이 8.05 kN/mm로 총 14.71 kN/mm 저하되었다. 항복하중 이전까지 그 강성의 저하가 다소 작아지지만 항복하중에서 급격히 저하되었다가 최대하중부터 높아졌다. 전반적으로 사이클 증가에 따른 강성저하의 정도는 실험체 NR-1보다 높지만 강성값은 높다. 최대하중 시점(22cycle)에서의 강성은 9.54 kN/mm이다. 2층 및 1층의 강성저하는 초기균열 발생 이전까지는 비슷하지만 균열 발생 이후 1층이 2층보다 강성저하가 급격하였다. 최대내력 시점에서의 1층의 강성은 8.29 kN/mm이며, 2층의 강성은 13.10 kN/mm이다. 또한, 실험체 NR-1의 1층과 2층의 강성보다 각각 3.07배, 4.23배 높으며, 모든 사이클에서 실험체 NR-1보다 강성이 높음을 확인하였다.

다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-2은 초기강성(1cycle)이 24.64 kN/mm이며, 실험 종료 시점(25cycle) 강성이 4.72 kN/mm로 총 19.92 kN/mm 저하되었다. 최대하중 이전까지 강성의 저하가 작아지다가 최대하중부터 높아졌다. 전반적으로 사이클 증가에 따른 강성저하의 정도는 실험체 NR-1보다 높지만 강성값은 높다. 최대하중 시점(22cycle)에서의 강성은 7.97 kN/mm이다. 2층 및 1층의 강성저하는 초기균열 발생 이전까지는 비슷하지만, 균열 발생 이후 1층이 2층보다 강성저하가 급격하였다. 최대내력 시점에서의 1층의 강성은 6.47 kN/mm이

며, 2층의 강성은 14.21 kN/mm이다. 또한, 실험체 NR-1의 1층과 2층의 강성보다 각각 2.40배, 4.58배 높으며, 모든 사이클에서 실험체 NR-1보다 강성이 높음을 확인하였다.

다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-3은 초기강성(1cycle)이 48.34 kN/mm이며, 실험 종료 시점(25cycle) 강성이 6.98 kN/mm로 총 41.35 kN/mm 저하되었다. 최대하중 이전까지 강성의 저하가 작아지다가 최대하중부터 높아졌다. 전반적으로 사이클 증가에 따른 강성저하의 정도는 실험체 NR-1보다 높지만 강성값은 높다. 최대하중 시점(22cycle)에서의 강성은 12.78 kN/mm 이다. 2층 및 1층의 강성저하는 초기균열 발생 이전까지는 비슷하지만, 균열 발생 이후 1층이 2층보다 강성저하가 급격하였다. 최대내력 시점에서의 1층의 강성은 10.41 kN/mm이며, 2층의 강성은 20.77 kN/mm이다. 또한, 실험체 NR-1의 1층과 2층의 강성보다 각각 3.86배, 6.70배 높으며, 모든 사이클에서 실험체 NR-1보다 강성이 높음을 확인하였다.

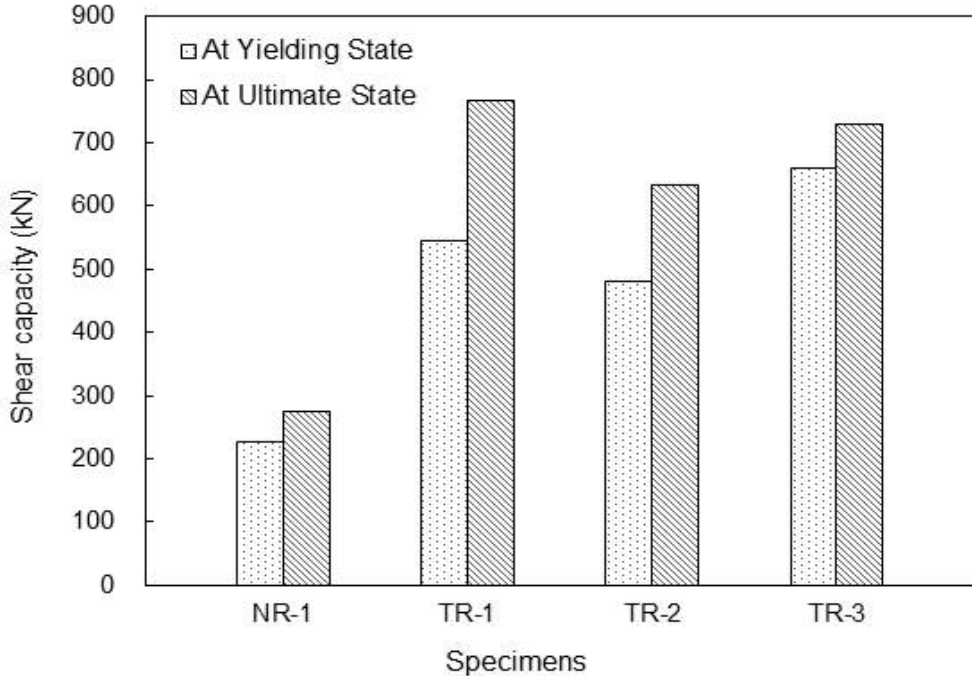


[그림 4.31] 실험체별 초기강성 및 강성저하

나. 전단력

[그림 4.32]에는 비내진 상세를 갖는 실험체 NR-1과 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-1, TR-2, TR-3의 항복상태의 전단력 및 하중내력의 전단력을 나타냈다.

비내진 상세를 갖는 실험체 NR-1의 전단력은 항복시점과 최대하중 시점에서 각각 228.2 kN, 275.5 kN이다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-1의 전단력은 항복시점과 최대하중 시점에서 각각 545.5 kN, 767.3 kN이며, 실험체 NR-1보다 각각 2.39배, 2.79배 높다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-2의 전단력은 항복시점과 최대하중 시점에서 각각 481.5 kN, 632.8 kN이며, 실험체 NR-1보다 각각 2.11배, 2.30배 높다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체 TR-3의 전단력은 항복시점과 최대하중 시점에서 각각 659.3 kN, 729.8 kN이며, 실험체 NR-1보다 각각 2.89배, 2.65배 높다. 이와 같이 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체는 비내진 상세를 갖는 실험체의 전단강도를 약 2.1~2.8배 이상의 수준으로 향상시키는 효과를 확인하였다.



[그림 4.32] 실험체별 항복상태 및 최대내력 시점의 전단력

제3절 해석 결과와 실험 결과 비교 및 평가

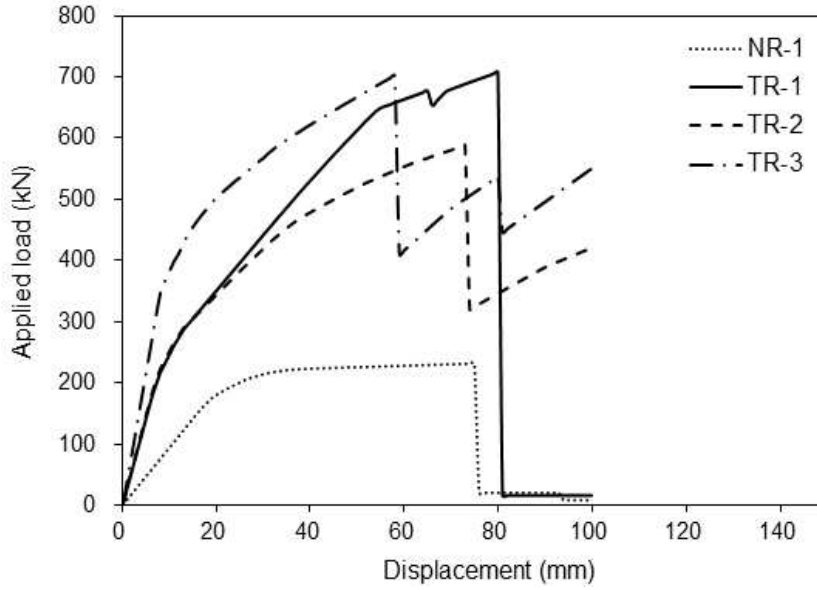
본 논문에서 제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템을 적용하여 기존 비내진 건축물의 내진보강을 하기 위해 범용 구조해석 프로그램 MIDAS GEN을 통한 구조해석을 수행하여 도출된 결과와 수행된 유사동적실험 결과를 바탕으로 비교 및 평가하였다. 해석을 수행한 하중-변위 그래프는 [그림 4.33]에 나타냈다. 실험 결과와 비교하기 위하여 단조가력으로 환산한 그래프는 [그림 4.34]에 나타냈다. [표 4.8]에는 해석 결과와 실험 결과의 초기강성과 최대내력을 나타냈다. 각 실험체에 대한 해석 결과와 실험 결과 비교 그래프는 [그림 4.35]에 나타냈다.

실험체 NR-1은 초기 강성이 9.40 kN/mm이며, 최대하중이 230.8 kN이고, 이때의 변위는 75 mm이다. 전체적인 그래프의 양상은 유사하지만 초기 균열을 고려하지 않아 실험 결과와의 그래프 양상 차이가 발생한 것으로 보인다. 실험 결과와 비교하였을 때, 초기 강성은 13.0% 정도 감소하였으며, 최대하중은 16.2% 감소하였고, 변위는 9.4% 증가하였다.

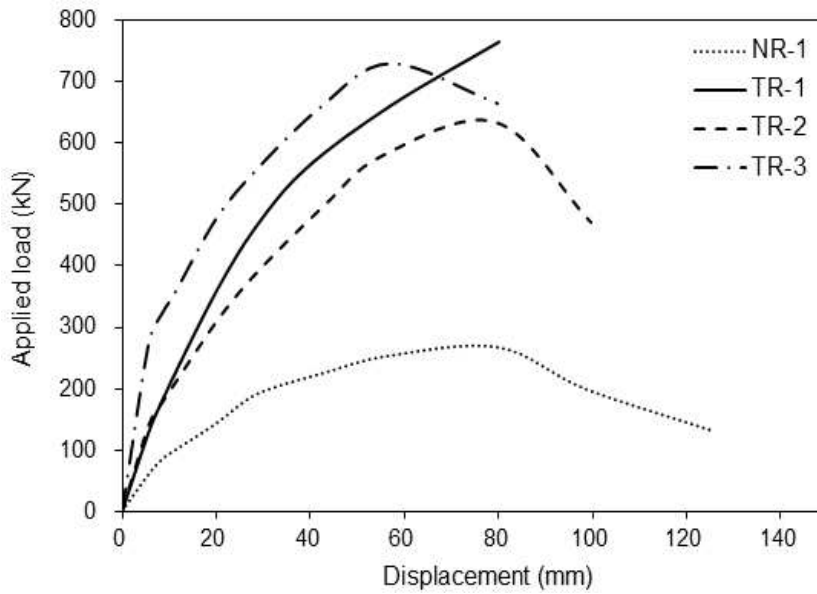
실험체 TR-1은 초기 강성이 28.30 kN/mm이며, 최대하중이 706.5 kN이고, 이때의 변위는 80 mm이다. 전체적인 그래프의 양상은 유사하지만 초기 균열을 고려하지 않아 실험 결과와의 그래프 양상 차이가 발생한 것으로 보인다. 실험 결과와 비교했을 때, 초기 강성은 24.3% 증가하였으며, 최대하중은 7.9% 감소하였고, 변위는 0.8% 증가하였다.

실험체 TR-2은 초기 강성이 29.40 kN/mm이며, 최대하중이 588.0 kN이고, 이때의 변위는 73 mm이다. 전체적인 그래프의 양상은 유사하지만 초기 균열을 고려하지 않아 실험 결과와의 그래프 양상 차이가 발생한 것으로 보인다. 실험 결과와 비교했을 때, 초기 강성은 19.3% 증가하였으며, 최대하중은 7.1% 감소하였고, 변위는 6.6% 감소하였다.

실험체 TR-3은 초기 강성이 43.70 kN/mm이며, 최대하중이 703.2 kN이고, 이때의 변위는 58 mm이다. 전체적인 그래프의 양상은 유사하지만 초기 균열을 고려하지 않아 실험 결과와의 그래프 양상 차이가 발생한 것으로 보인다. 실험 결과와 비교했을 때, 초기 강성은 9.6% 감소하였으며, 최대하중은 3.6% 감소하였고, 변위는 1.6% 증가하였다.



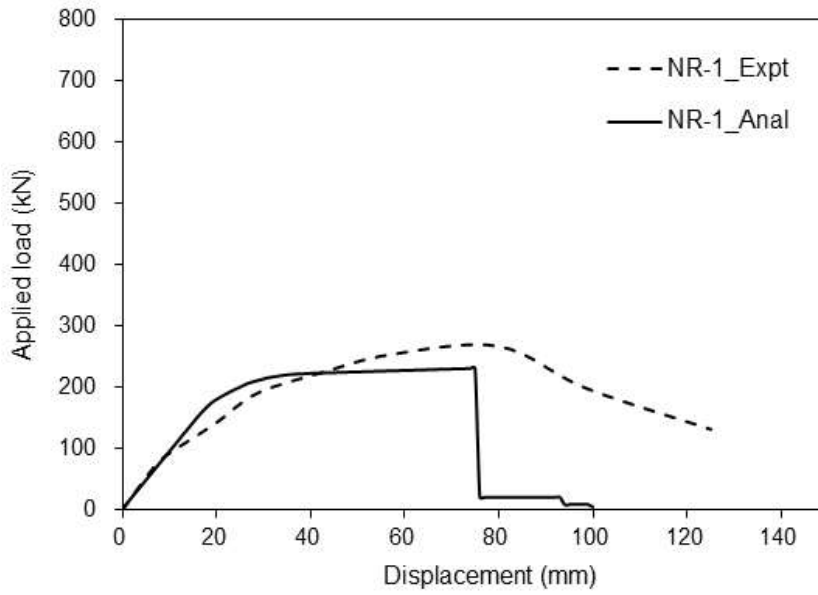
[그림 4.33] 구조해석 결과 그래프



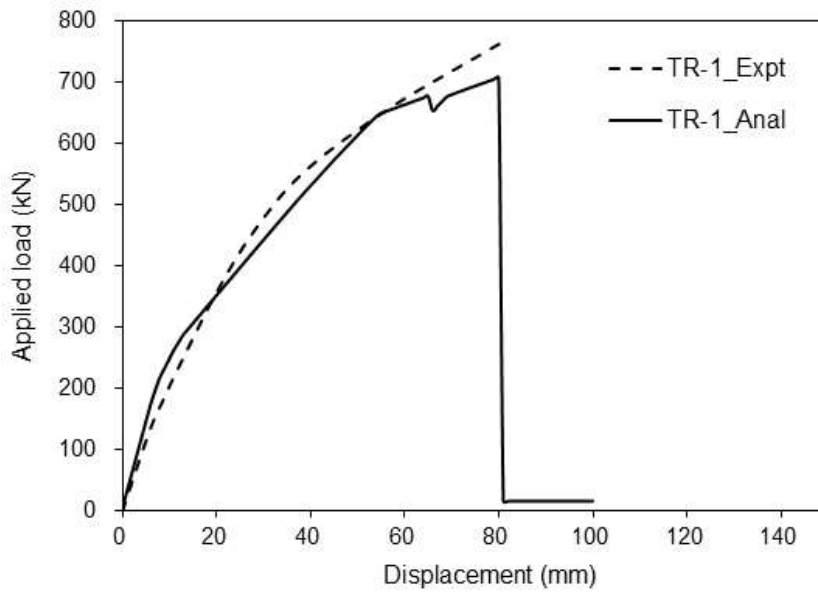
[그림 4.34] 실험 결과 그래프

[표 4.8] 해석 결과와 실험 결과 비교 요약

Specimens	Analysis			Experiment		
	K_{in} (kN/mm)	V_u (kN)	Δ_u (mm)	K_{in} (kN/mm)	V_u (kN)	Δ_u (mm)
NR-1	9.40	230.8	75	10.81	275.5	68.56
TR-1	28.30	706.5	80	22.76	767.3	79.33
TR-2	29.40	588.0	73	24.64	632.8	78.17
TR-3	43.70	703.2	58	48.34	729.8	57.10

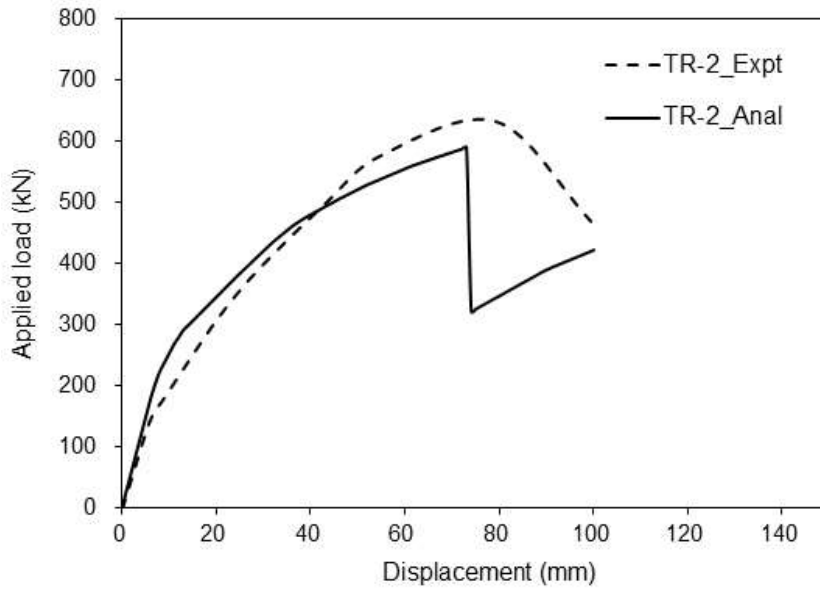


(a) 실험체 NR-1

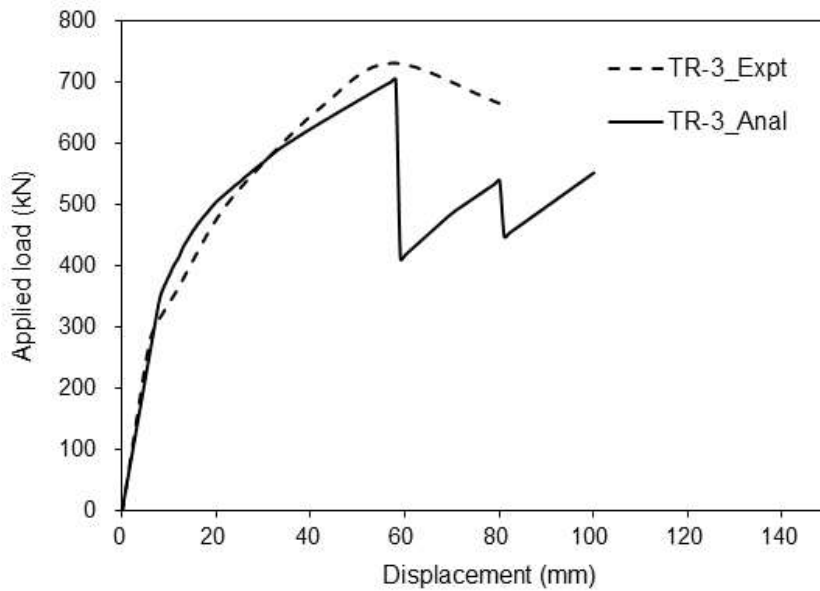


(b) 실험체 TR-1

[그림 4.35] 해석 결과와 실험 결과 비교 그래프(계속)



(c) 실험체 TR-2



(d) 실험체 TR-3

[그림 4.35] 해석 결과와 실험 결과 비교 그래프

제4절 소결

제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템의 성능을 확인하기 위하여 건축물의 비선형지진응답 평가에 사용되는 유사동적실험을 수행하였다. 실험체는 비내진상세를 갖는 RC 구조물 컨트를 실험체 1개와 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템에서 레이아웃 및 구성에 따른 3개의 실험체로 이루어졌으며, 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템은 균열진전 및 파괴양상을 분석하고, 강성 및 강도 증진형 내진보강공법이므로 횡하중-횡변위관계에서 초기강성, 전단력을 중점적으로 평가하였다. 또한, 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템을 적용하여 기존 비내진 건축물의 내진보강을 하기 위해 범용 구조해석 프로그램을 통한 구조해석을 수행하여 도출된 결과와 수행된 유사동적실험 결과를 바탕으로 비교 및 평가한 결과는 다음과 같다.

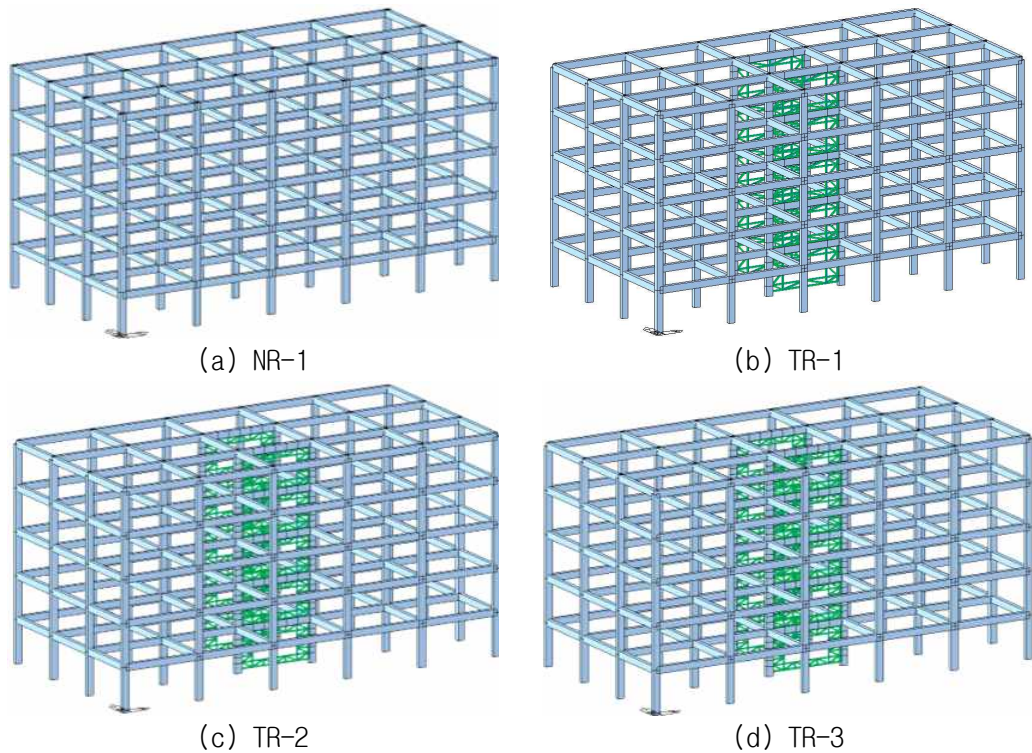
- 1) 실험체 NR-1은 4cycle($R_{\Delta}=0.15\%$)에서 초기균열이 발생하였으며, 이후 전단 균열 발생과 콘크리트 박리현상으로 인해 하중이 급격히 감소하여 25cycle($R_{\Delta}=1.75\%$)에서 실험을 종료하였다. 초기강성은 10.61 kN/mm이고 최대내력은 275.5 kN이다. 해석 결과와 실험 결과를 비교하였을 때, 해석 결과가 초기 강성은 13.0% 정도 감소하였으며, 최대하중은 16.2% 감소하였고, 변위는 9.4% 증가하였다.
- 2) 실험체 TR-1은 6cycle($R_{\Delta}=0.15\%$)에서 초기균열이 발생하였으며, 이후 균열 증가, 박리현상 발생 및 기둥의 하단부의 전단파괴로 인해 24cycle($R_{\Delta}=1.4\%$)에서 실험을 종료하였다. 보강재의 항복이나 파괴 없이 기둥이 파괴된 것으로 보았을 때 과설계가 우려된다. 횡하중-횡변위 관계에서 실험체 NR-1보다 넓은 이력루프를 보였다. 초기강성은 22.76 kN/mm이고 최대내력은 767.3 kN이며, 실험체 NR-1보다 초기강성을 2.11배 증가시킬 뿐만 아니라 최대내력을 2.79배 향상시켰다. 해석 결과와 실험 결과를 비교하였을 때, 해석 결과의 초기 강성은 24.3% 증가하였으며, 최대하중은 7.9% 감소하였고, 변위는 0.8% 증가하였다.

- 3) TR-2는 6cycle($R_{\Delta}=0.15\%$)에서에서 초기균열이 발생하였으며, 이후 균열 증가, 보강재의 변형 발생 및 우측 기둥의 전단파괴로 인해 25cycle($R_{\Delta}=1.75\%$)에서 실험을 종료하였다. 보강재의 변형과 파괴 발생 후 기둥의 전단파괴가 발생하여 이상적이라고 판단하였다. 횡하중-횡변위 관계에서 실험체 NR-1보다 넓은 이력루프를 보였다. 초기강성은 24.64 kN/mm이고 최대내력은 632.8 kN이며, 실험체 NR-1보다 초기강성을 2.28배 증가시킬 뿐만 아니라 최대내력을 2.30배 향상시켰다. 해석 결과와 실험 결과를 비교하였을 때, 해석 결과의 초기 강성은 19.3% 증가하였으며, 최대하중은 7.1% 감소하였고, 변위는 6.6% 감소하였다.
- 4) 실험체 TR-3은 6cycle($R_{\Delta}=0.15\%$)에서 초기균열이 발생하였으며, 이후 균열 증가, 보강재의 변형 발생 및 기둥의 전단파괴로 인해 24cycle($R_{\Delta}=1.75\%$)에서 실험을 종료하였다. 보강재의 변형과 파괴 발생 후 기둥의 전단파괴가 발생하여 이상적이라고 판단하였다. 전반적으로 실험체 TR-2와 비슷하였지만, 전단균열 발생이 지연되었다. 횡하중-횡변위 관계에서 실험체 NR-1보다 넓은 이력루프를 보였다. 초기강성은 48.34 kN/mm이고 최대내력은 729.8 kN이며, 실험체 NR-1보다 초기강성을 4.47배 증가시킬 뿐만 아니라 최대내력을 2.65배 향상시켰다. 해석 결과와 실험 결과를 비교하였을 때, 해석 결과의 초기 강성은 9.6% 감소하였으며, 최대하중은 3.6% 감소하였고, 변위는 1.6% 증가하였다.
- 5) 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 실험체는 비내진 상세를 갖는 실험체의 강성을 약 2.1~4.4배 향상시킬 수 있으며, 전단강도를 약 2.1~2.8배 향상시켰다. 또한, 실험 결과보다 해석 결과가 더 보수적으로 나온다는 것을 확인하였고, 범용 구조해석 프로그램 MIDAS GEN을 사용하여 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템을 적용한 효과적인 내진설계 및 내진보강이 가능하다는 것을 확인하였다.

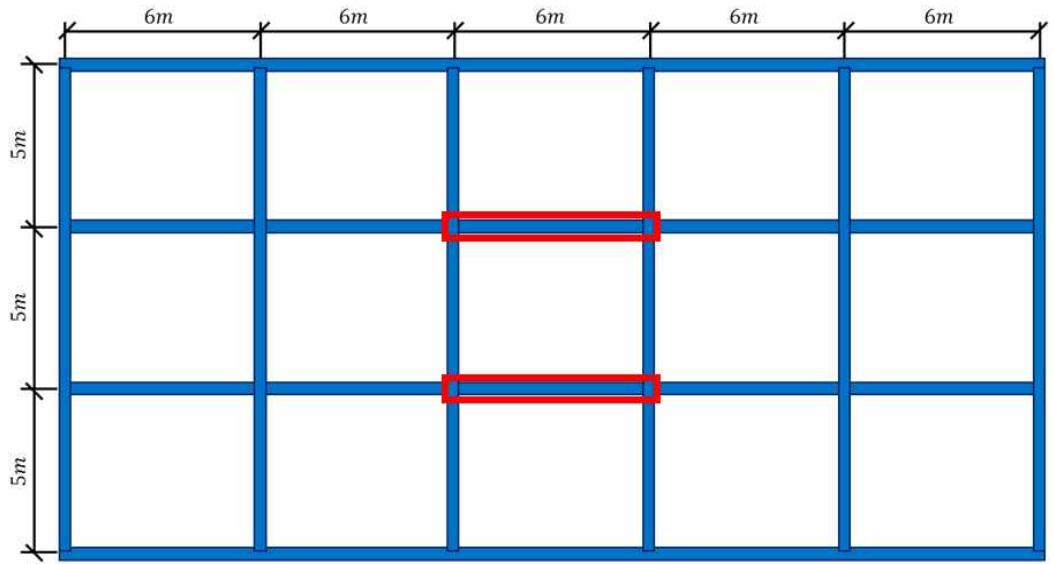
제5장 다중 각형 강재 유니트 보강골조 성능평가

제1절 대상 건축물 개요

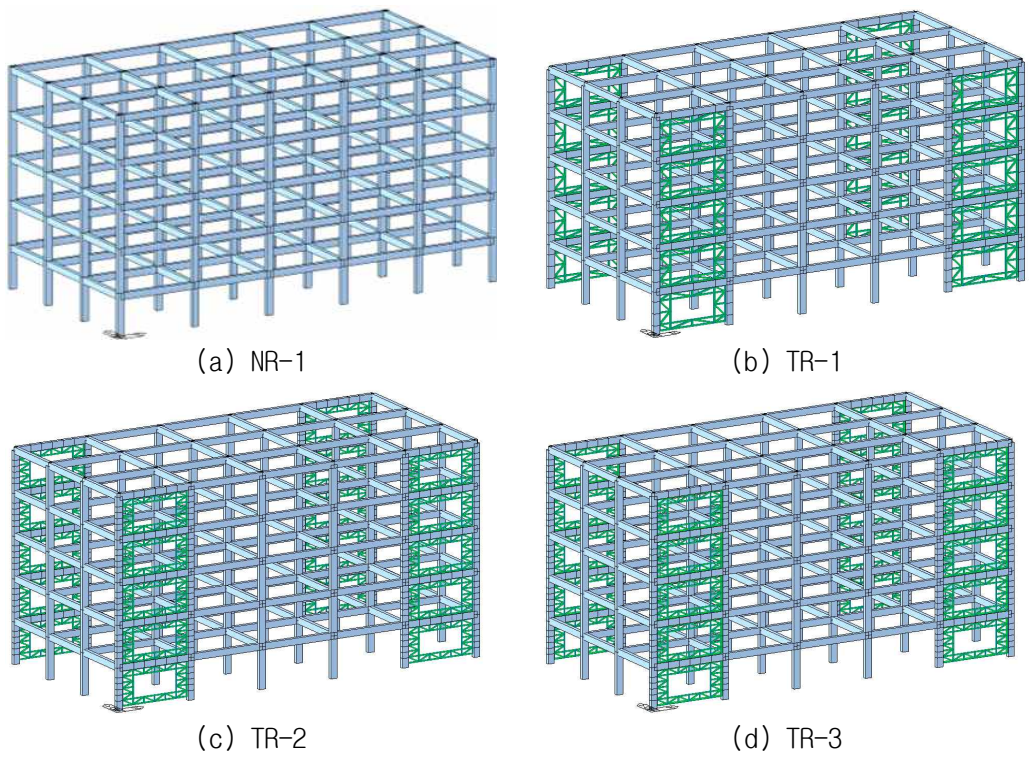
본 연구에서 제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조에 대한 성능평가를 통한 적용성 및 유효성을 확인하기 위하여 16m(층고 3.2m) 높이를 갖는 지상 5층 규모의 골조 모델을 계획하여 코어부 보강과 외측부 보강으로 나누어 수행하였다. 코어부 보강 모델은 [그림 5.1~2]와 같이 계획하였고, 외측부 보강 모델은 [그림 5.3~4]와 같이 계획하였다. X 방향의 경간은 6m, Y 방향의 경간은 5m로 설정하였다. 또한, 지상 5층 규모의 골조 모델에 대한 입면은 [그림 5.5]에 나타냈다. 골조 모델에 대한 개요는 [표 5.1]에 나타냈으며, 설계 개요 및 하중 개요는 [표 5.2]에 나타냈다. 적용한 콘크리트 강도 f_{ck} 는 24 MPa, 철근의 항복 강도 f_y 는 300 MPa을 사용하였으며, 제안한 다중 각형 강재 유니트에 사용된 각형강관은 SRT 275, ㄱ형강은 SS 275를 사용하였다.



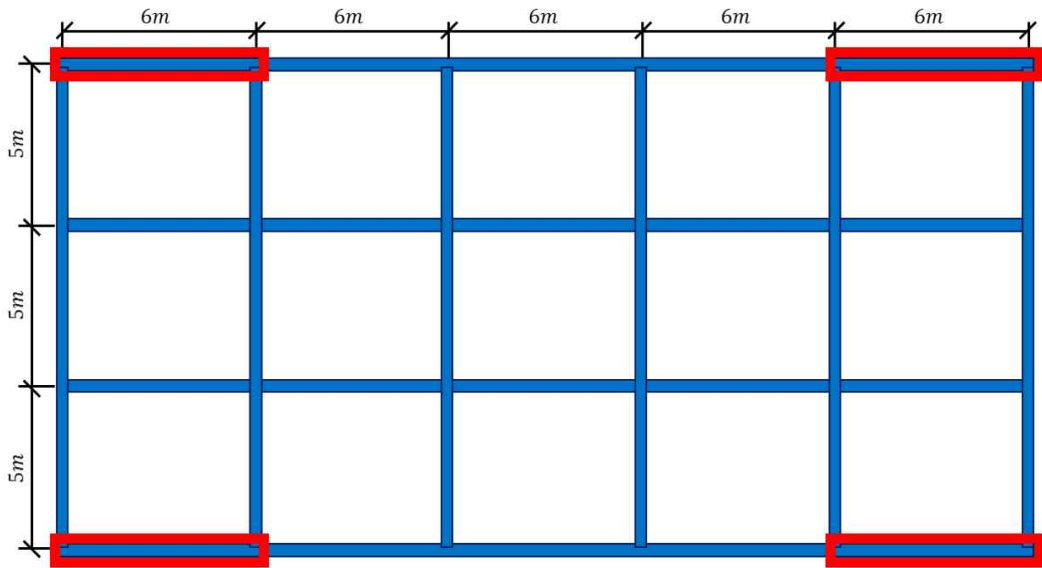
[그림 5.1] 5층 골조 모델 형상(코어부 보강)



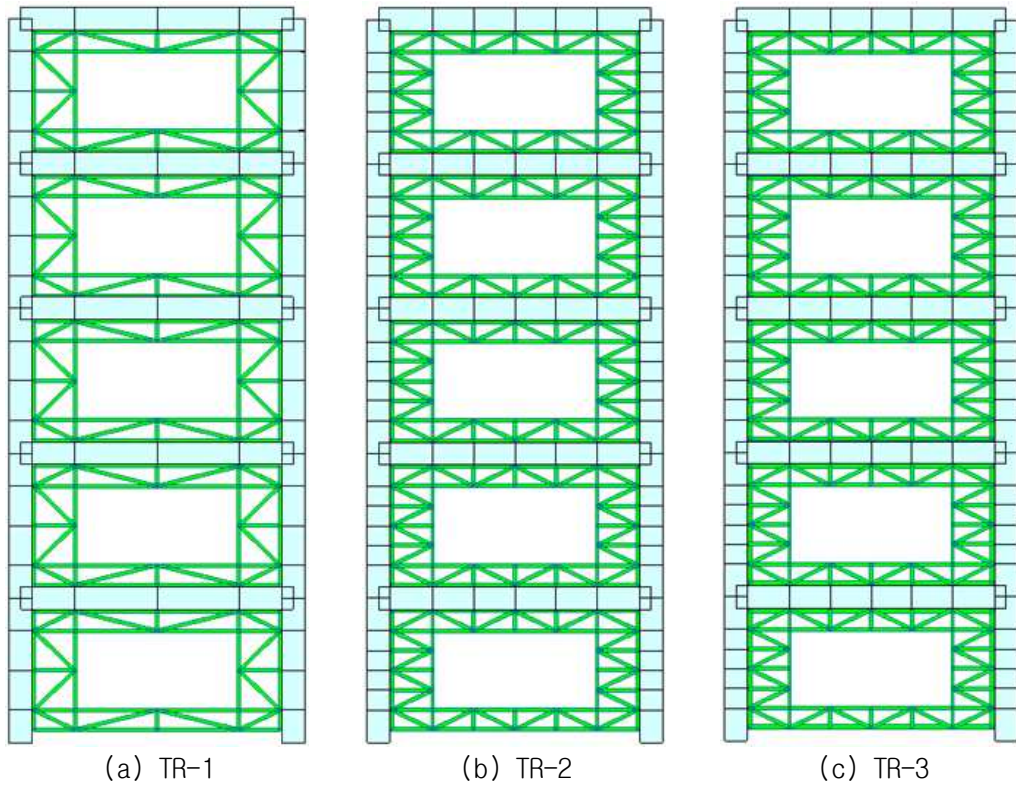
[그림 5.2] 5층 골조 모델 평면도 및 보강 위치(코어부 보강)



[그림 5.3] 5층 골조 모델 형상(외측부 보강)

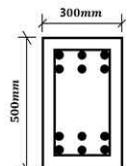
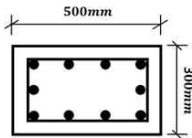
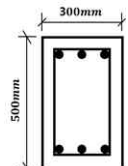


[그림 5.4] 5층 골조 모델 평면도 및 보강 위치(외측부 보강)



[그림 5.5] 5층 골조 모델 입면

[표 5.1] 5층 골조 모델 개요

	기둥 크기 (mm)	보 크기 (mm)	설계 압축강도 (MPa)	층고 (m)	비고
NR-1		- End(I, J) 		3.2	기본 골조
TR-1		Top:6-D22 Bottom:6-D22 Stirrup:2-D10@130	<기둥, 보> C24 SD300		다중 각형 강재 유니트 제안 1 적용
TR-2	Main:10-4-D22 Hoop:2-D10@190	- Center 	<다중 각형 강재 유니트> SRT275 SS275		다중 각형 강재 유니트 제안 2 적용
TR-3		Top:6-D22 Bottom:6-D22 Stirrup:2-D10@180			다중 각형 강재 유니트 제안 3 적용

[표 5.2] 설계 및 하중 개요

건물 위치	서울	지진 구역	I
규모	지상 5층 (16 m)	용도	상가건물
지반 종류	S ₄ (깊고 단단한 지반)	내진등급	I
지역 계수	0.14		
	고정하중 (kN/m ²)		활하중 (kN/m ²)
기준층	6.4		2.0
지붕층	5.5		2.0

제2절 비선형 정적해석을 통한 내진성능평가

본 절에서는 대상 건축물인 지상 5층 규모의 일반 골조 모델과 제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델에 대한 비선형 정적해석을 통한 내진성능평가를 수행하였다. 비선형 정적해석은 범용 구조해석 프로그램 MIDAS GEN을 사용하였으며, 내진성능을 확인하기 위하여 성능 곡선 및 성능점, 소성힌지분포, 층간변위비와 최대변위를 비교하였다.

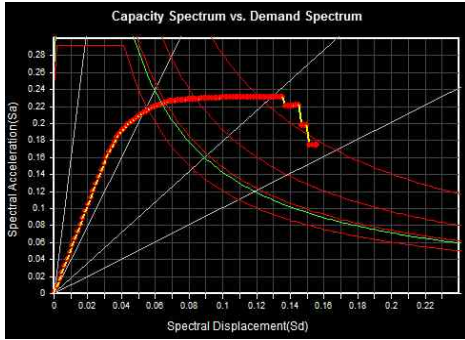
1. 성능 곡선 및 성능점

가. 코어부 보강

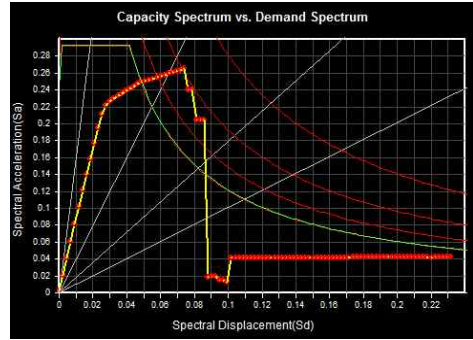
비선형 정적해석을 통한 결과로 일반 골조 모델과 코어부에 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델에 대한 성능 곡선과 성능점을 [그림 5.6]에 나타냈으며, [표 5.3]을 통해 성능 곡선과 요구 곡선의 교차점인 성능점에 대한 값을 나타냈다. 또한, [그림 5.7]에서 지상 5층 규모의 골조 모델에 대한 성능 곡선을 비교하기 위해 그래프로 나타냈다. 성능 곡선을 비교하였을 때, 초기강성과 강도가 증가되었지만 연성이 감소하는 것을 확인하였고, 하중 저항 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델을 비교하였을 때 TR-1이 가장 먼저 하중이 떨어지는 것을 보아 과설계로 인한 기존 구조체의 파괴가 발생한다고 판단하였다.

[표 5.3] 5층 골조 모델에 대한 성능점 요약(코어부 보강)

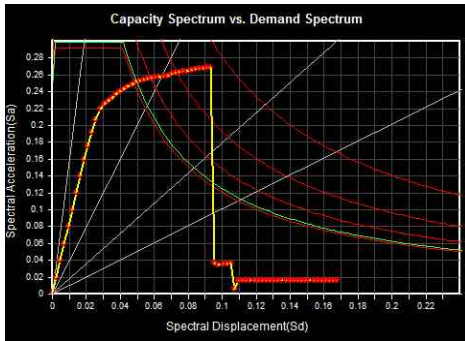
Specimens	성능점		변위 (mm)	밀면전단력 (kN)	유효감쇠 D_{eff}	비탄성유효주기 T_{eff}
	S_d (mm)	S_a (g)				
NR-1	0.2447	0.0568	72.82	4,107	0.9668	16.53
TR-1	0.2494	0.0488	63.22	4,245	0.8877	19.83
TR-2	0.2514	0.0497	63.94	4,275	0.8916	19.12
TR-3	0.2500	0.0490	63.14	4,244	0.8882	19.66



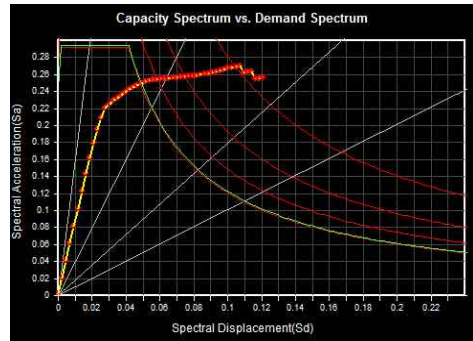
(a) NR-1



(b) TR-1

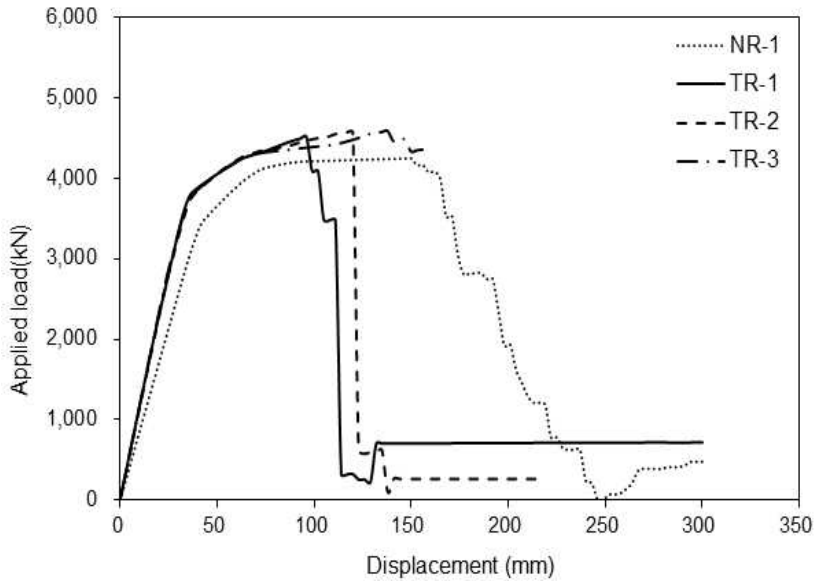


(c) TR-2



(d) TR-3

[그림 5.6] 5층 골조 모델에 대한 성능곡선 및 성능점(코어부 보강)



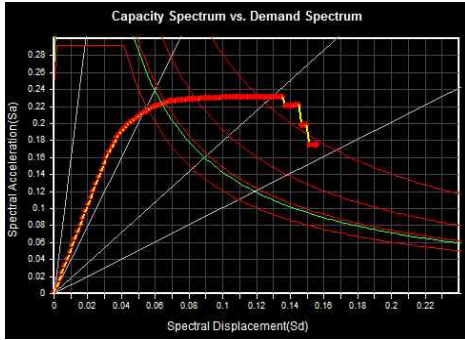
[그림 5.7] 5층 골조 모델에 대한 성능곡선 비교(코어부 보강)

나. 외측부 보강

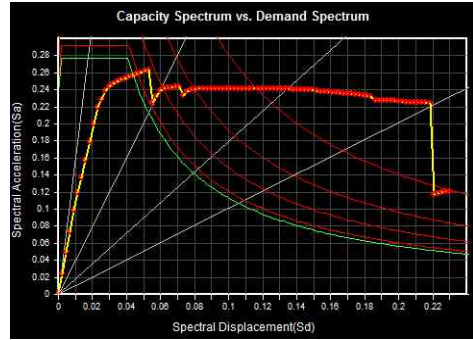
비선형 정적해석을 통한 결과로 일반 골조 모델과 외측부에 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델에 대한 성능 곡선과 성능점을 [그림 5.8]에 나타냈으며, [표 5.4]을 통해 성능 곡선과 요구 곡선의 교차점인 성능점에 대한 값을 나타냈다. 또한, [그림 5.9]에서 지상 5층 규모의 골조 모델에 대한 성능 곡선을 비교하기 위해 그래프로 나타냈다. 성능 곡선을 비교하였을 때, 초기강성과 강도가 증가되었지만 연성이 감소하는 것을 확인하였고, 하중 저항 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델을 비교하였을 때 TR-1이 가장 먼저 하중이 떨어지는 것을 보아 과설계로 인한 기존 구조체의 파괴가 발생한다고 판단하였다.

[표 5.4] 5층 골조 모델에 대한 성능점 요약(외측부 보강)

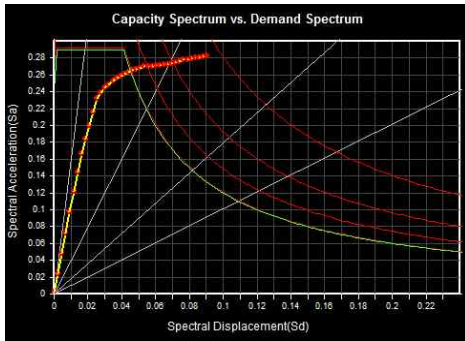
Specimens	성능점		변위 (mm)	밀면전단력 (kN)	유효감쇠 D_{eff}	비탄성유효주기 T_{eff}
	S_d (mm)	S_a (g)				
NR-1	0.2447	0.0568	72.82	4,107	0.9668	16.53
TR-1	0.2571	0.0440	57.43	4,403	0.8299	21.82
TR-2	0.2645	0.0453	58.62	4,512	0.8304	20.24
TR-3	0.2616	0.0433	56.18	4,462	0.8166	21.75



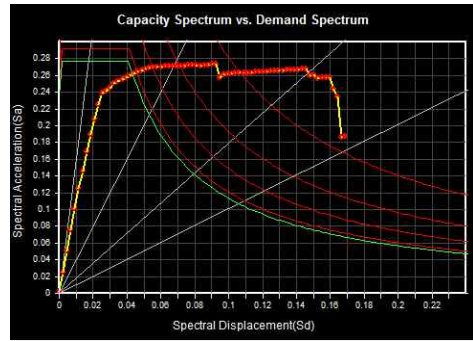
(a) NR-1



(b) TR-1

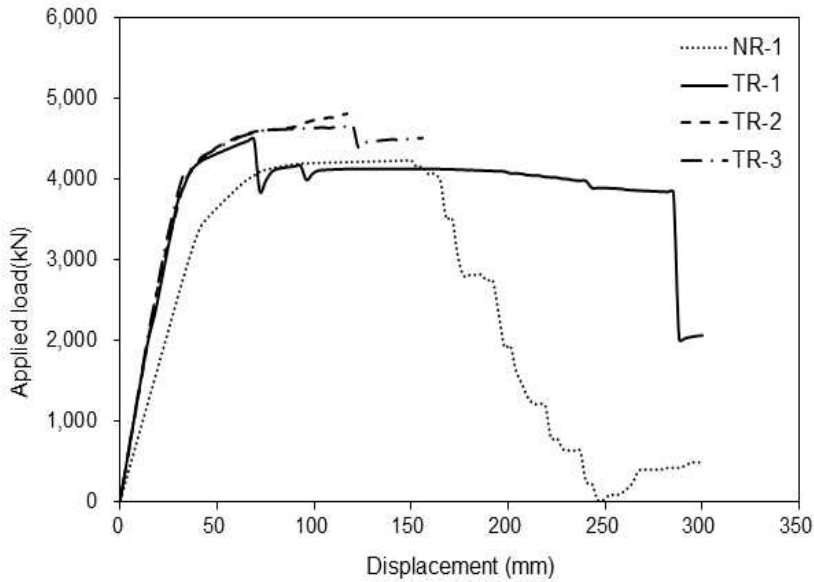


(c) TR-2



(d) TR-3

[그림 5.8] 5층 골조 모델에 대한 성능곡선 및 성능점(외측부 보강)

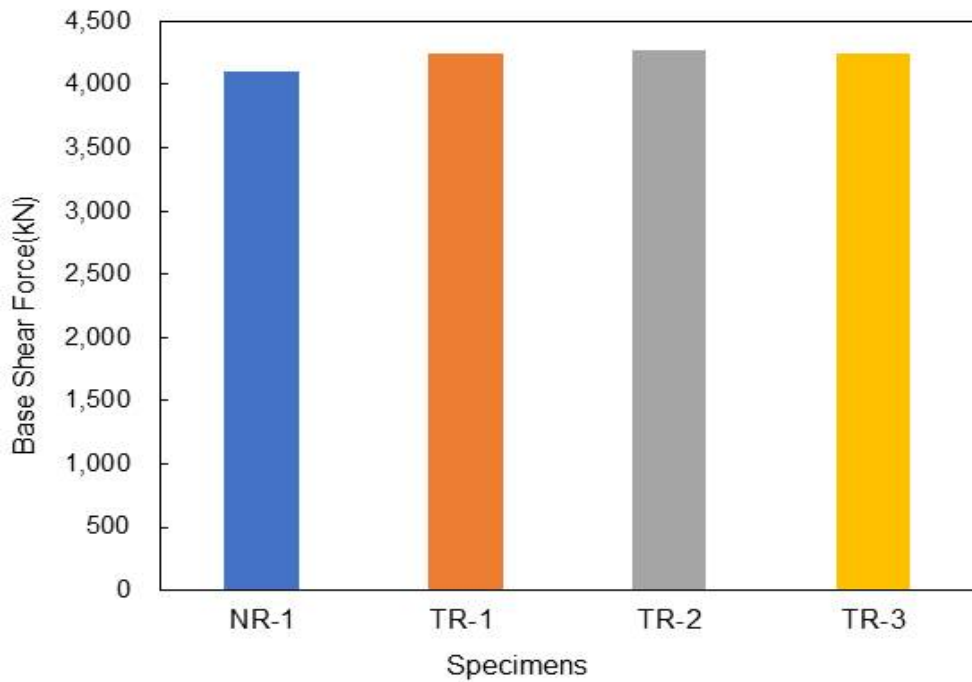


[그림 5.9] 5층 골조 모델에 대한 성능곡선 비교(외측부 보강)

2. 밀면 전단력

가. 코어부 보강

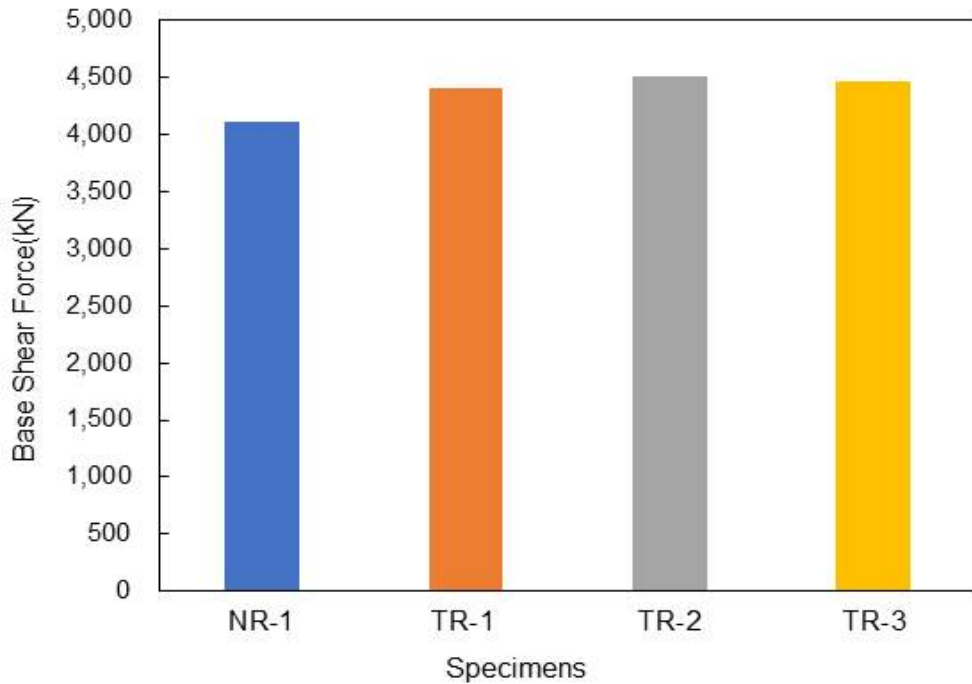
비선형 정적해석을 통한 결과로 일반 골조 모델의 성능점에 대한 밀면전단력을 [그림 5.10]에 나타냈다. 일반 골조 모델인 NR-1의 밀면전단력은 4,107 kN이다. 코어부에 다중 각형 강재 유닛 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델인 TR-1, TR-2, TR-3의 밀면전단력은 각각 4,245 kN, 4,275 kN, 4,244 kN이며, 일반 골조 모델인 NR-1보다 각각 3.3%, 3.9%, 3.2% 증가하였다.



[그림 5.10] 5층 골조 모델에 대한 밀면전단력(코어부 보강)

나. 외측부 보강

비선형 정적해석을 통한 결과로 일반 골조 모델의 성능점에 대한 밀면전단력을 [그림 5.11]에 나타냈다. 일반 골조 모델인 NR-1의 밀면전단력은 4,107 kN이다. 외측부에 다중 각형 강재 유닛 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델인 TR-1, TR-2, TR-3의 밀면전단력은 각각 4,403 kN, 4,512 kN, 4,462 kN이며, 일반 골조 모델인 NR-1보다 각각 6.7%, 9.0%, 8.0% 증가하였다.



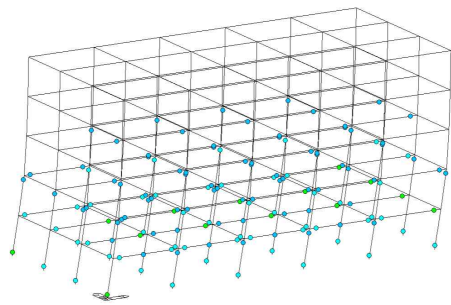
[그림 5.11] 5층 골조 모델에 대한 밀면전단력(외측부 보강)

3. 소성한지분포

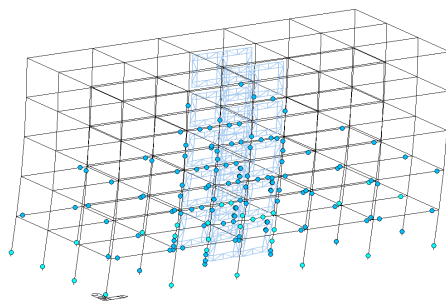
건축물 내진설계기준 내진설계 일반(KDS 17 10 00)⁽¹⁹⁾에 따르면 내진등급 Ⅰ의 건축물은 재현주기 2400년 기준을 고려하였을 때 최소 붕괴방지(CP; Collapse Prevention) 성능 목표를 만족해야 한다. 소성한지분포는 각 Pushover Curve의 성능점에서 확인하였으며, 요구 성능 수준의 분포 정도를 비교 분석하였다.

가. 코어부 보강

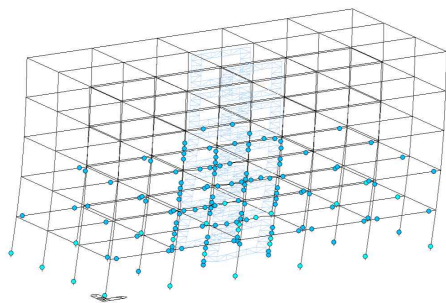
일반 골조 모델과 코어부에 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델에 대한 소성한지 분포 결과를 [그림 5.12], [표 5.5]에 나타냈다. 일반 골조 모델 NR-1의 경우 인명안전(LS; Life Safety) 수준의 힌지가 1.0% 발생, 즉시 거주(I0; Immediate Occupancy) 수준의 힌지가 3.7% 발생하였다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델 TR-1, TR-2, TR-3은 모두 인명안전 수준의 힌지가 발생하지 않았으며, 즉시거주 수준의 힌지는 TR-1 적용 골조에서 0.7%, TR-2 적용 골조에서 0.8%, TR-3 적용 골조에서 1.0%가 발생하였다. TR-1이 TR-2, TR-3에 비해 주변 부재 소성한지 발생이 많은 것을 확인하였다. 다중 각형 강재 유니트 적용 시 붕괴방지 성능 목표를 모두 만족하는 것을 확인하였다. 또한, 제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템을 사용 시 일반 골조에 비해 건축물의 성능수준이 향상된 것을 알 수 있으며, 전체적인 힌지 발생률을 감소시킨다는 것을 확인하였다.



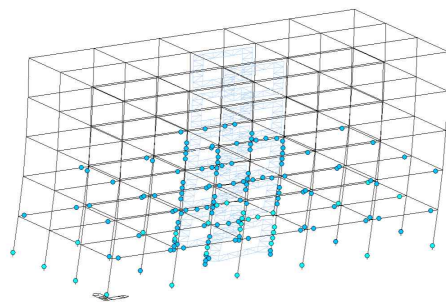
(a) NR-1



(b) TR-1



(c) TR-2



(d) TR-3

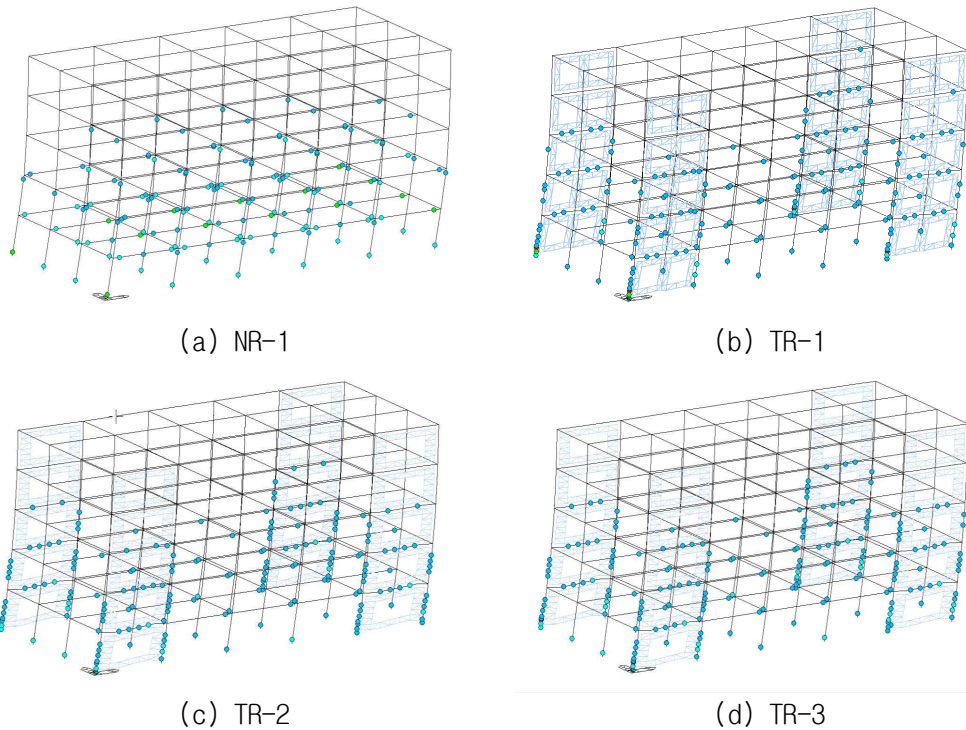
[그림 5.12] 5층 골조 모델에 대한 소성힌지분포(코어부 보강)

[표 5.5] 5층 골조 모델에 대한 소성힌지분포 요약(코어부 보강)

Specimens	성능수준	X 방향[%]
NR-1	B	5.2
	I0	3.7
	LS	1.0
	CP	0
	C	0
	D	0
	E	0
TR-1	B	3.2
	I0	0.7
	LS	0
	CP	0
	C	0
	D	0
	E	0
TR-2	B	4.1
	I0	0.8
	LS	0
	CP	0
	C	0
	D	0
	E	0
TR-3	B	4.2
	I0	1.0
	LS	0
	CP	0
	C	0
	D	0
	E	0

나. 외측부 보강

일반 골조 모델과 외측부에 다중 각형 강재 유닛 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델에 대한 소성힌지 분포 결과를 [그림 5.13], [표 5.6]에 나타냈다. 일반 골조 모델 NR-1의 경우 인명안전(LS; Life Safety) 수준의 힌지가 1.0% 발생, 즉시거주(LO; Immediate Occupancy) 수준의 힌지가 3.7% 발생하였다. 다중 각형 강재 유닛 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델 TR-1, TR-2, TR-3은 모두 인명안전 수준의 힌지가 발생하지 않았으며, 즉시거주 수준의 힌지는 TR-1 적용 골조에서 0.2%, TR-2 적용 골조에서 0.4%, TR-3 적용 골조에서 0.5%가 발생하였다. 다중 각형 강재 유닛 적용 시 붕괴방지 성능 목표를 모두 만족하는 것을 확인하였다. 또한, 제안한 다중 각형 강재 유닛 내진보강시스템을 사용 시 일반 골조에 비해 건축물의 성능수준이 향상된 것을 알 수 있으며, 전체적인 힌지 발생률을 감소시킨다는 것을 확인하였다.



[그림 5.13] 5층 골조 모델에 대한 소성힌지분포(외측부 보강)

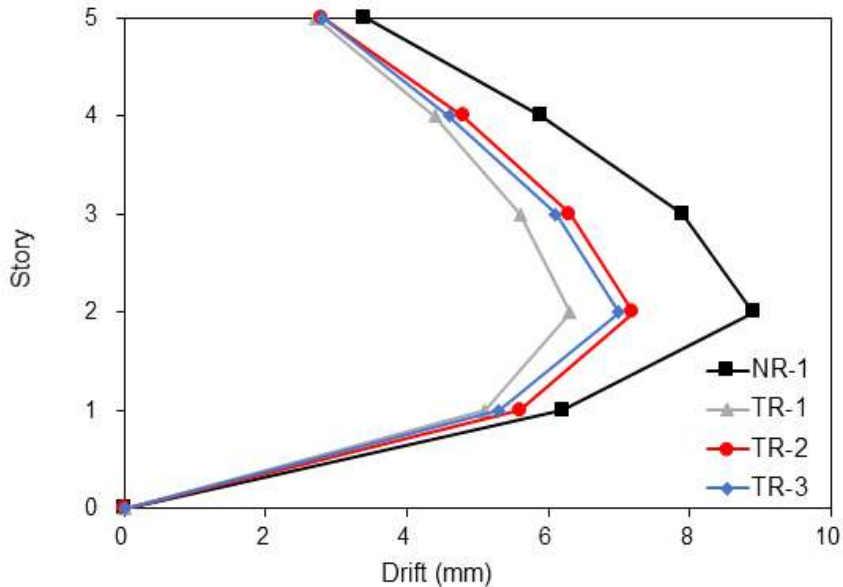
[표 5.6] 5층 골조 모델에 대한 소성힌지분포 요약(외측부 보강)

Specimens	성능수준	X 방향[%]
NR-1	B	5.2
	I0	3.7
	LS	1.0
	CP	0
	C	0
	D	0
	E	0
TR-1	B	2.4
	I0	0.2
	LS	0
	CP	0
	C	0
	D	0
	E	0.1
TR-2	B	3.5
	I0	0.4
	LS	0
	CP	0
	C	0
	D	0
	E	0
TR-3	B	3.6
	I0	0.5
	LS	0
	CP	0
	C	0
	D	0
	E	0

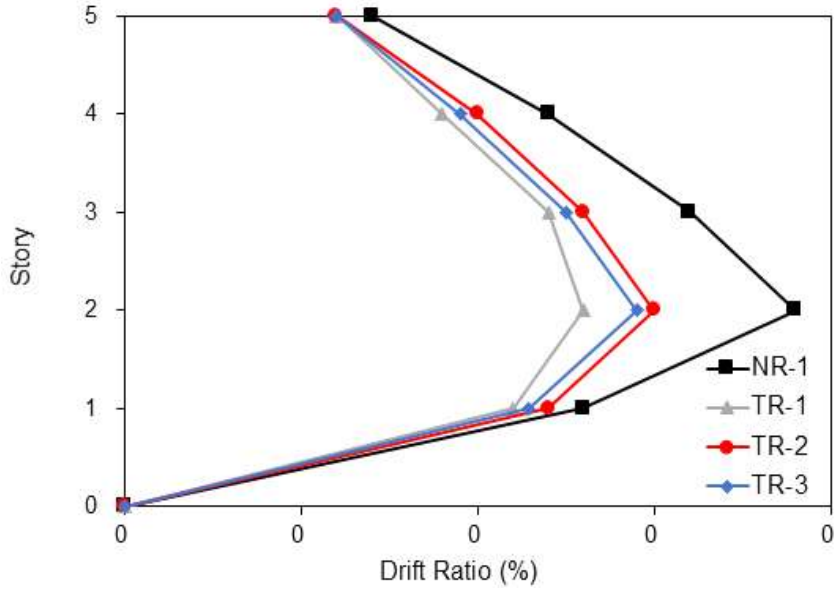
4. 층간 변위비 및 최대 변위

가. 코어부 보강

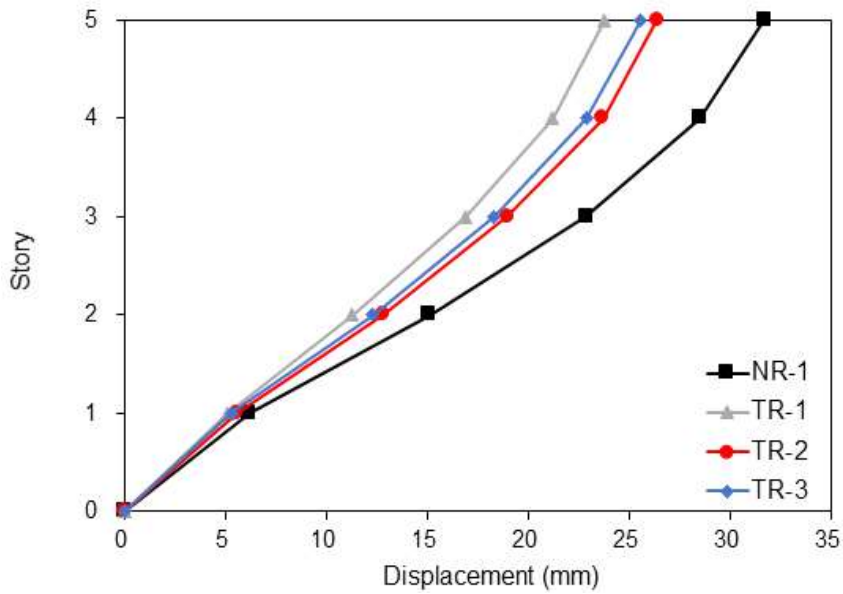
일반 골조 모델과 코어부에 다중 각형 강재 유닛 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델의 층간변위, 층간변위비 및 최대변위에 대해 [그림 5.14~16]와 같이 나타냈으며 일반 골조 모델 NR-1과 다중 각형 강재 유닛 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델 TR-1, TR-2, TR-3 을 비교하였다. 일반 골조 모델 NR-1에서의 최대 층간변위는 8.9mm이며, 다중 각형 강재 유닛 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델 TR-1, TR-2, TR-3는 각각 6.3mm, 7.2mm, 7.0mm가 발생하였고, 최대 층간변위와 층간변위비가 각각 29%, 19%, 21% 정도 감소하였다. 일반 골조 모델 NR-1에서의 최대변위는 31.7mm이며, 다중 각형 강재 유닛 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델 TR-1, TR-2, TR-3는 각각 23.8mm, 26.4mm, 25.6mm가 발생하였고, 최대변위가 각각 25%, 17%, 19% 정도 감소하였다. 따라서, 일반 골조 모델 NR-1보다 다중 각형 강재 유닛 내진보강시스템 적용 시 층간변위, 층간변위비 및 최대변위가 감소하였으며, 보강 효과가 나타는 것을 확인하였다. 또한, 구조기준에서 요구하는 성능인 층간변위비 제한값 1.5%를 모두 만족하였다.



[그림 5.14] 5층 골조 모델에 대한 층간변위 그래프(코어부 보강)



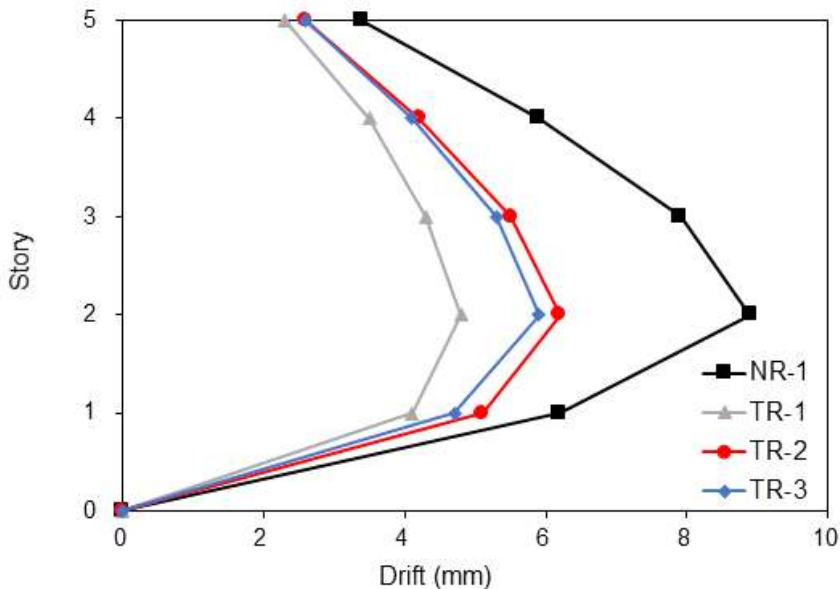
[그림 5.15] 5층 골조 모델에 대한 층간변위비 그래프(코어부 보강)



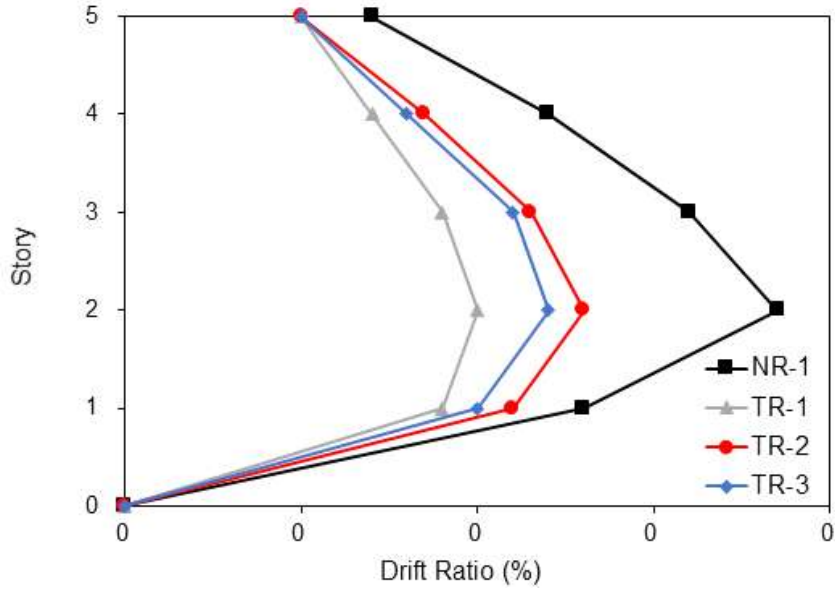
[그림 5.16] 5층 골조 모델에 대한 최대변위 그래프(코어부 보강)

나. 외측부 보강

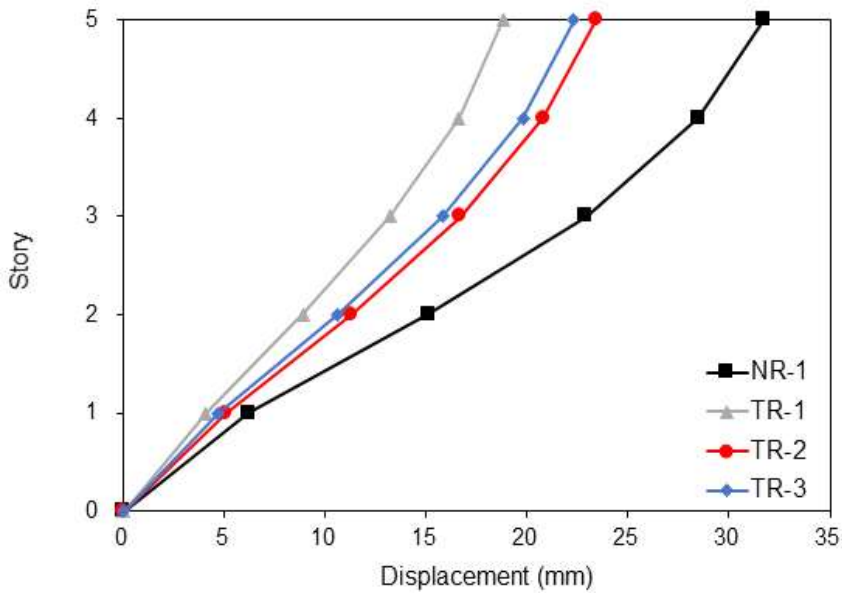
일반 골조 모델과 외측부에 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델의 층간변위, 층간변위비 및 최대변위에 대해 [그림 5.17~19]와 같이 나타냈으며 일반 골조 모델 NR-1과 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델 TR-1, TR-2, TR-3 을 비교하였다. 일반 골조 모델 NR-1에서의 최대 층간변위는 8.9mm이며, 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델 TR-1, TR-2, TR-3는 각각 4.8mm, 6.2mm, 5.9mm가 발생하였고, 최대 층간변위와 층간변위비가 각각 46.1%, 30.3%, 33.7% 정도 감소하였다. 일반 골조 모델 NR-1에서의 최대변위는 31.7mm이며, 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델 TR-1, TR-2, TR-3는 각각 18.8mm, 23.4mm, 22.3mm가 발생하였고, 최대 변위가 각각 40.7%, 26.2%, 29.7% 정도 감소하였다. 따라서, 일반 골조 모델 NR-1 보다 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템 적용 시 층간변위, 층간변위비 및 최대변위가 감소하였으며, 보강 효과가 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 구조기준에서 요구하는 성능인 층간변위비 제한값 1.5%를 모두 만족하였다.



[그림 5.17] 5층 골조 모델에 대한 층간변위 그래프(외측부 보강)



[그림 5.18] 5층 골조 모델에 대한 층간변위비 그래프(외측부 보강)



[그림 5.19] 5층 골조 모델에 대한 최대변위 그래프(외측부 보강)

제3절 소결

대상 건축물인 지상 5층 규모의 일반 골조 모델과 코어부와 외측부에 제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델에 대한 비선형 정적 해석을 통한 내진성능평가를 수행하였다. 내진성능을 확인하기 위하여 성능 곡선 및 성능점, 소성한지분포, 층간변위비와 최대변위를 비교하였다.

- 1) 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델이 일반 골조 모델과 성능 곡선을 비교하였을 때, 초기 강성과 강도가 증가된 것을 확인하였고, 하중 저항 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 일반 골조 모델인 NR-1의 밀면전단력은 4,107 kN이다. 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델인 TR-1, TR-2, TR-3의 밀면전단력은 코어부에서는 각각 4,245 kN, 4,275 kN, 4,244 kN이며, 외측부에서는 4,403 kN, 4,512 kN, 4,462 kN이다. 일반 골조 모델인 NR-1보다 코어부에서는 약 3~4% 증가하였고, 외측부에서는 약 6~9% 증가하였다.
- 2) 소성한지분포를 보았을 때, 다중 각형 강재 유니트 적용 시 붕괴방지 성능 목표를 모두 만족하는 것을 확인하였다. 또한, 소성한지분포를 비교하였을 때, 제안한 내진보강시스템을 사용 시 일반 골조에 비해 건축물의 성능수준이 향상된 것을 알 수 있으며, 전체적인 힌지 발생률을 감소시킨다는 것을 확인하였다.
- 3) 모델 NR-1에서의 최대 층간변위는 8.9mm이며, 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델 TR-1, TR-2, TR-3는 코어부에서 각각 6.3 mm, 7.2 mm, 7.0 mm가 발생하였고, 외측부에서 각각 4.8 mm, 6.2 mm, 5.9 mm가 발생하였다. 최대 층간변위와 층간변위비가 코어부에서 각각 29%, 19%, 21% 정도 감소하였고, 외측부에서 각각 46.1%, 30.3%, 33.7% 정도 감소하였다.
- 4) 모델 NR-1에서의 최대변위는 31.7mm이며, 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템으로 보강된 골조 모델 TR-1, TR-2, TR-3는 코어부에서는 각각 23.8 mm, 26.4 mm, 25.6 mm가 발생하였고, 외측부에서는 각각 18.8 mm, 23.4 mm,

22.3 mm가 발생하였다. 최대변위는 코어부에서 각각 25%, 17%, 19% 정도 감소하였고, 외측부에서 각각 40.7%, 26.2%, 29.7% 정도 감소하였다.

- 5) 모델 NR-1보다 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템 적용 시 층간변위, 층간변위비 및 최대변위가 감소하였으며, 보강 효과가 나타는 것을 확인하였다. 또한, 구조기준에서 요구하는 성능인 층간변위비 제한값 1.5%를 모두 만족하였다.

제6장 결론

본 연구에서는 기존 중·저층의 비내진 건축물들의 효과적인 내진보강기법인 강성 및 강도 증진형의 내진보강을 적용한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템을 개발하였다. 효과적인 레이아웃과 기존 구조체와의 접합방식을 채택하기 위하여 다중 각형 강재 유니트 실험을 수행하였으며, 이를 통해 실험변수를 계획하고 2층 규모의 비내진 상세를 갖는 실험체에 적용하여 유사동적실험을 통한 실험 결과 및 구조해석 결과를 비교하였다. 또한, 보강효과를 검증하기 위하여 지상 5층 규모의 골조 모델의 비선형 정적해석을 통한 내진성능평가를 하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 제안한 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템은 강성 및 강도 증진에 효과적이었고 개구부가 있어 창호 설치가 가능하여 채광 효율성이 높고, 공장 제작으로 시공성을 향상시키며, 보강 구조체에 따른 가변성이 있는 내진보강공법이라고 판단된다.
- 2) 다중 각형 강재 유니트 실험 결과, 철판을 이용한 접합방식의 경우 모서리 부분의 용접부 파괴 및 분리현상으로 인해 다중 각형 강재 유니트에 힘 전달이 잘 이루어지지 않는다고 판단하였고, 각형강관을 이용한 접합방식이 강성 저하나 최대 내력 시점에서 효과적임을 확인하였다. 하지만 횡하중 가력 액츄에이터의 한계로 인해 실험이 종료되어 추후 추가적인 실험이 필요할 것으로 사료된다.
- 3) 2층 규모의 다중 각형 강재 유니트 보강골조 실험 및 구조해석을 비교한 결과, 다중 각형 강재 유니트 보강 실험체는 비내진상세를 갖는 실험체의 강성과 전단강도를 각각 2.1~4.4배, 2.1~2.8배 향상됨에 따라 기존 중·저층의 비내진 건축물의 효과적인 강성 및 강도 증진형의 내진보강시스템이라고 사료된다. 또한, 실험 결과보다 해석 결과가 더 보수적으로 나오는 것을 확인하여 다중 각형 강재 유니트 내진보강시스템을 적용한 효과적인 내진설계 및 내진보강이 가능하다고 판단된다.

4) 지상 5층 규모의 골조 모델에 대한 비선형 정적해석을 통하여 보강된 골조 모델의 초기강성, 강도측면에서 모두 증가하여 하중 저항 성능이 향상되었다. 적용 시 구조기준에서 층간변위비 제한값 1.5%를 만족하였고, 전체적인 힌지 발생률이 감소함을 확인하였으며, 효과적인 보강효과를 입증하였다고 사료된다.

참고문헌

1. 기상청, “지진연보”, 2020
2. 행정안전부, “전국 공공시설물 내진율 70.2% 달성 2025년까지 81% 목표”, 보도자료, 2021
3. 교육부(MOE), “학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼”, 2021
4. Federal Emergency Management Agency (FEMA), “FEMA 310 : Handbook for Seismic Evaluation of Buildings - A Prestandard”, Washington D.C, pp.400, 1998
5. Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA), “Standard for Evaluation of Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings”, Tokyo, Japan, pp.300, 2003
6. Seismic Strengthening Research Group (SSRG), “Seismic Strengthening of R/C Buildings”, Ohmsha Press, Tokyo, Japan, pp.230, 2008
7. Cho, C. G., Moon, H. J., Kim, H. Y., Lee, K. S., “Seismic-improved reinforced-concrete composite column using a high-ductile fiber cementitious composite precast box”, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 18(2), pp.128-138(11), 2019
8. 이강석, 위정두, 김용인, 이현호, “1980년대 국내 철근콘크리트 학교건물의 내진 안전성 평가에 관한 연구”, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.13(5), pp.149-158(10), 2009
9. 정주성, “RCSF 내진보강 된 중저층 RC 건물의 보강효과에 관한 연구”, 석사논문, 전남대학교, 2015
10. 이강석, 정주성, 이종권, “중·저층 철근콘크리트 건물의 SRCF 외부접합 내진 보강공법의 내진성능 평가”, 콘크리트학회 논문집, Vol.27(2), 147-155(9), 2015
11. 김미연, “프리캐스트 콘크리트 끼움벽으로 보강된 철근콘크리트 골조의 비선형해석”, 석사논문, 서울시립대학교, 2015
12. 도전기, “내진보강 플레이트댐퍼의 구조성능에 관한 연구”, 박사논문, 경북대학교, 2017
13. 하현준, 오근영, 이강민, “역V형 가새로 보강된 RC골조의 내진성능평가”, 한

- 국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.22(1), pp13~22(10), 2018
14. 이복기, 황대성, 최윤철, 김유석, 이강석, “유사동적실험에 의한 HSWF 외부접합공법으로 내진보강된 실물 2층 철근콘크리트 골조의 내진성능 평가”, 콘크리트학회 논문집, Vol.31(1), 89-97(9), 2019
 15. 정희창, “내부형 스틸 프레임 공법으로 보강한 R/C 건물의 내진성능 평가”, 석사논문, 한양대학교, 2019
 16. 성조성, “Novel Steel Frame 외부접합공법으로 보강한 2층 RC 실물골조의 내진보강효과에 관한 연구”, 석사논문, 한양대학교, 2021
 17. 김규익, “유사동적실험에 의한 수직응답마찰댐퍼로 보강된 실물 2층 R/C골조 내진보강효과”, 석사논문, 한양대학교, 2021
 18. 김민지, “일반 및 고강도 콘크리트 트러스 시스템으로 보강된 골조의 내진성능”, 석사논문, 조선대학교, 2021
 19. 국토교통부, “내진설계 일반”, KDS 17 10 00, 2018
 20. 국토교통부, “건축물 내진설계기준”, KDS 41 17 00, 2019
 21. 국토교통부, “건축구조기준 설계하중”, KDS 41 10 15, 2019
 22. 국토교통부, “건축구조기준 총칙”, KDS 41 10 05, 2019
 23. 국토교통부, “콘크리트용 앵커 설계 기준”, KDS 14 20 54, 2021
 24. Hilti, “HIT-HY 200 주입식 앵커 매뉴얼”, 2018
 25. 정지훈, “기존 건축물의 내진보강공법 선정을 위한 평가요소 및 객관적 절차에 대한 연구”, 석사논문, 한양대학교, 2020
 26. 김고은, “기존 공공건축물 내진성능평가 및 보강 현황 분석”, 석사논문, 고려대학교, 2020
 27. 우미소, 이동운, 윤정배, 문일권, “DT 스틸 프레임 내진보강공법에 관한 실험적 연구”, 한국건축시공학회 학술발표대회 논문집, Vol.20(1), pp.4-5(2), 2020
 28. Cho, C. G., Cheong, S. H., Moon, H. J., Kim, H. Y., & Lee, K. S., “Experimental study on seismic capacity of reinforced concrete composite columns based on a high-ductile fiber cementitious composite”, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.13(1), pp.1-10(10), 2019
 29. 조창근, 김민지, “철근콘크리트 전단벽의 변위기반에 의한 내진성능설계”,

- 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, Vol.31(2), pp.159-160(2), 2019
30. 문형주, “합성섬유 보강된 고성능 시멘트복합체를 사용한 구조부재의 성능평가”, 박사논문, 조선대학교, 2019
 31. Ha, G. J., Cho, C. G., Kang, H. W., Feo, L., “Seismic improvement of RC beam-column joints using hexagonal CFRP bars combined with CFRP sheets”, Composite Structures, Vol.95, pp.464-470, 2013
 32. 황현중, 엄태성, 박홍근, 이창남, 김형섭, “PSRC 합성기둥의 반복가력 실험”, 한국강구조학회 논문집, Vol.25(6), pp.635-647(13), 2013
 33. 조창근, “하중기반 유한요소모델에 의한 FRP 보강 철근콘크리트 기둥의 비선형 해석”, 콘크리트학회 논문집, Vol.25(5), pp.529-537(9), 2013
 34. Cho, C. G., & Kwon, M., “Nonlinear failure prediction of concrete composite columns by a mixed finite element formulation”, Engineering Failure Analysis, Vol.18(7), pp.1723-1734, 2011
 35. 임현진, 조창근, “철근콘크리트 보-기둥 부재 휨강도 특성 평가”, 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, pp.215-216(2), 2011
 36. 정인규, 조창근, 박순응, "변위기반 설계법에 의한 RC 기둥의 Steel Jacket 보강 내진성능개선 설계법", 한국공간구조학회지, Vol.10(4), pp.49-57(9), 2010
 37. 황윤성, “후설치 앵커볼트의 파괴저항 특성에 관한 연구”, 석사논문, 서울과학기술대학교, 2010
 38. 조창근, “직접변위기반설계법에 의한 철근콘크리트 기둥의 FRP 피복보강내진 성능설계법의 개발”, 한국지진공학회논문집, Vol.11(2), pp.105-113(9), 2007
 39. 김영민, 문정호, “Pushover 해석의 전반적인 개념에 대한 이해”, 전산구조공학, Vol.20(4), pp.69-76(7), 2007
 40. 이원호, 임재형, “탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 전단 보강 효과에 대한 실험연구”, 대한건축학회 논문집-구조계, Vol.20(11), pp51-58(8), 2004
 41. Takanashi, K., Udagawa, K., Tanaka, H., “Pseudo-dynamic tests on a 2-story steel frame by a computer-load test apparatus hybrid system”, proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, Vol.7, pp.225-232, 1980