볼팅 고정 채널 형강 보강재를 이용한 비좌굴 Knee Bracing System의 내진성능에 대한 실험 연구

Experimental Study on Buckling Restrained Knee Bracing Systems Using Bolted Channel Sections

이 진¹⁾ · 이기학²⁾ · 이성민³⁾ · 신지욱⁴⁾ · 김영민⁵⁾

Lee, Jin · Lee, Kihak · Lee, Sung-Min · Shin, Ji-Wook · Kim, Young-Min

국문 요약 >> 본 연구에서는 1층 1경간 실제크기의 가력 프레임에서 내진보강에 적합한 비좌굴 knee brace을 설치하여 주기하중을 통해 가새의 지진저항능력을 실험하였다. 볼팅 고정 채널이 이용된 비좌굴 knee brace는 지진력에 저항하는 코어와 두 개의 철골 플레이트로 만들어졌고 단면의 형태는 코어의 국부좌굴과 횡좌굴에 저항하도록 하였다. 비좌굴 knee brace는 현장에서 조립이 용이하고, 시공방법 또한 간단하여 공간에 제약이 있는 1층에 필로터를 가진 중저층 RC건물의 내진 보수/보강에 효과적으로 사용할 수 있다. 각 실험체에 대한 변수로 중심코어의 크기와 외부 보강재의 크기, 가이드 플레이트의 유무 등으로 정하였으며, 실험을 통해 얻어진 힘-변위 이력곡선을 통해 중심코어의 크기가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 가이드 플레이트의 유무에 따라 압축강도 수정계수와 파괴형태가 달라지는 것을 알 수 있었다. 각 실험체에 대한 결과는 AISC 2005 Seismic Provisions 규정에서 제시한 누적 연성도와 누적 소산에너지 측면에서도 충분한 효과를 발휘하는 것으로 나타났다.

주요어 비좌굴 knee brace, 채널형강, 에너지 소산, 골조실험

ABSTRACT >> In this study, the seismic performance of the Buckling Restrained Knee Bracing (BRKB) system was evaluated through a pin-connected 1-bay 1-story frame. The BRKB system using a bolted channel section developed was composed of a steel plate as a load-resisting core member and two channel sections as a restraintment of the local and global buckling of the core plate. The main purpose of the BRKB system is to be used as an effective tool to re-strengthen/rehabilitate old low- and mid-rise RC frame buildings, which do not have enough seismic resistance to earthquake loadings. The main variables for the test specimens were the size of the core plates, stiffeners and the use of guide plates. The test results showed that the size of the core plate, which was the main element for the load-resisting member, was the most important parameter to achieve ductile behavior under tension as well as compression, until the maximum displacement exceed twice the design drift limit given by the AISC Seismic Provisions.

Key words Buckling Restrained Knee Brace(BRKB), Channel Sections, Energy Dissipation, Subassemblage Test

1. 서론

1.1 연구 배경

인구의 도시집중화가 1970년대 이후로 심해지게 되었으

며, 이는 도심지의 소규모 대지에 건설되는 중저층 규모의 집합주택의 수를 급증하게 하는 결과를 초래하였다. 하지만 이와 관련하여 우리나라의 건축물 내진설계기준은 1988년에 도입되었고, 당시 6층 이상의 건물에만 내진 설계를 적용하도록 규정하였다.

현재의 내진설계의 적용원칙은 일정규모 이상의 지진이 발생할 경우 구조물의 주요 구조부재에서 변형을 통해 지진 에너지를 소산시키는 것이다. 이는 경제적 설계가 가능하다는 장점을 가지고 있지만 설계지진 수준 이상의 지진이 발생 시 구조물의 주요 부재에 큰 구조적 피해가 발생할 수 있고 이에 따른 보수/보강에 많은 시간과 비용이 소요될 수 있다.

¹⁾ 정회원·세종대학교 건축공학과, 석사과정
(대표지자: wizard8105@naver.com)

²⁾ 정회원·세종대학교 건축공학과, 부교수, 교신저자

³⁾ (재) 한국건설품질연구원 이사, 공학박사

⁴⁾ 정회원·세종대학교 건축공학과, 석사과정

⁵⁾ 세종대학교 건축공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 2. 9 / 수정일 : 2009. 3. 23 / 게재확정일 : 2009. 3. 23)

(a) 우리나라 집합 주택의 예(서울 성북구)

(b) 1층 및 2~5층 평면도 (단위 : mm)

〈그림 1〉 대표적 집합주택의 예와 각 층별 평면도

또한 1988년 내진 설계의 대상에서 제외되었던 5층 미만의 대부분의 중저층 집합주택은 1층을 필로티를 이용하여 주차장으로 사용하는 경우가 많다. 그림 1은 서울 시내에 위치한 5층 미만의 중저층 집합주택을 보여주고 있다. 이는 상부는 벽식 구조로 이루어져 있고, 하부 필로티 부분은 골조로 이루어져 있으므로 강성과 질량의 불규칙성이 상존하게 되고, 지진 발생 시 동적 특성을 크게 증폭시켜 아래층 골조의 기둥에서 구조물의 손상을 더욱 집중시키는 가능성이 많아서 지진 발생 시 구조물의 안정성을 크게 위협하고 있다.⁽¹⁾

최근에 구조적 손상이 발생하는 부분은 보-기둥 접합부에서 탄성적으로 거동하도록 하고 지진과 같은 횡력은 가새의 소성거동을 통해 에너지를 소산시키는 손상방지 가새골조 시스템(Damage Tolerant Brace System, 이후 DTBS)의 연구가 진행되고 있다.⁽²⁾ 하지만 가새는 압축력에 매우 취약하여 쉽게 좌굴되는 특성이 있으므로, 지진과 같은 극한 하중이 작용하는 경우 좌굴로 인한 불안정한 거동양상을 보이게 된다. 이에 대해 압축력에 대해서도 인장력을 받을 경우와 동일하게 거동하도록 보강된 비좌굴 가새(Buckling Restrained Brace, 이후 BRB)를 사용하여 지진과 같은 횡력에 대해 충분한 에너지를 소산하도록 하고 있다.^{(3),(4)}

1.2 연구 목적 및 방법

본 연구에서는 DTBS에 비좌굴 가새 시스템이 접합된 형

태의 구조 시스템에 대해서 연구를 실시하였다. 이러한 구조 시스템은 5층 미만의 중저층 집합주택의 내진보강에 적용하고자 하였다. 이는 시공성과 경제적 부담, 공간활용 등의 문제를 가지고 있는 전단벽의 증설을 통한 보강이나 FRP보강의 시공방법 보다 더 효율적인 방법이 될 수 있다. 그러나 여러 가지 형태의 가새 시스템(대각 가새, K형 가새, X형 가새)은 1층 필로티를 주차장으로 활용하는 경우가 많은 중저층 집합주택에서 건물의 사용성을 제한하는 단점이 있다.⁽¹⁾

이에 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 knee bracing system을 제시하였다. knee bracing system은 아직 국내에서는 활발히 연구되고 있지는 않지만, 그 사용성이나 부재의 성능면에서 볼 때 내진 보강이 되어있지 않은 건물의 보수, 보강에 효과적인 대안이 될 수 있다. 기존의 여러 가지 형태의 철골 가새 대신에 상부 보-기둥 접합부에 설치되므로 동선을 방해하거나 시야를 가리지 않고, 건축물의 충분한 사용성을 확보할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 knee bracing system에 비좌굴 가새 시스템이 가미된 비좌굴 knee brace(Buckling Restrained Knee Brace, 이후 BRKB)에 대하여 보-기둥 힌지로 이루어진 1층 1경간 골조실험을 통해 그 성능을 확인하였다.^{(5),(6)}

2. 비좌굴 Knee Brace(BRKB)의 실험

2.1 실험체 계획

비좌굴 knee bracing(BRKB) system에 대한 실험을 실시하기 위해서 본 연구에서는 총 5개의 BRKB를 제작하였다. 본 연구에 앞서 1차 연구로 채널형강의 용접을 통한 5개의 BRKB시스템의 연구가 완료되었고 이후 볼팅을 통한 새로운 BRKB시스템이 이번에 설계되어 실험되었다. BRKB의 성능을 실험하기 위해 중심코어의 면적, 외부보강재의 크기, 단부의 형태 및 크기, 외부 보강재의 고정방법 등의 변수를 두었다. 중심코어의 면적은 가새의 항복응력과 항복 후 강성비를 고려한 힘-변위 변형곡선을 Bi-linear형으로 가정하여 최대 단면적을 산정하고 그 값에 따라서 중심코어의 단면의 길이와 장변의 길이를 정하였다. 외부보강재의 크기는 중심코어의 좌굴하중을 고려하여 좌굴을 방지하기 위한 크기의 채널을 사용하여 설계하였다. 또한 단부의 형태 및 크기는 비보강 부분의 좌굴강도가 중심코어의 항복강도에 1.5배 이상되도록 설계하여 그 크기와 형태를 정하였다. 외부 보강재의 고정방법은 용접플레이트를 이용하여 고정하는 방법과 볼트를 이용하여 고정하는 방법의 두 가지로 정

의하였고 본 연구에서 볼트를 이용하여 외부보강재를 고정하는 방법에 대하여 연구를 실시하였다. 실험체에 대한 변수와 도면 및 실험체 각 사진에 대하여 표 1과 그림 2, 그림 3에 나타내었다.

실험체의 명칭에서 C는 중심코어(Core)의 폭을 나타내는 것이고, R은 외부보강재(Reinforcement)의 웹(Web)의 길이를 나타내는 것이다. 본 연구에서는 두 가지의 서로 다른

중심코어의 크기와 두 가지의 외부보강재를 사용하여 BRKB의 성능을 평가하였다.

본 연구에서는 BRKB의 제작에 사용된 강재의 재료에 대한 특성을 알아보고자 시편테스트를 실시하였다. 시편테스트는 가새의 재료인 SS400의 항복응력, 극한응력, 신장률에 대해 두께가 다른 두 종류의 시편인 중심코어(16mm)와 거셋 플레이트(19mm)에 대해 실시하였다.

〈표 1〉 볼팅 고정 비좌굴 knee brace 실험체 특성

실험체	중심 코어	외부 보강	단부	외부보강재 접합방법 (가이드 플레이트 존재유무)
C42R100-R 단부형태 다름	42	□100	160	볼트사이 간격 : 100 가이드 플레이트 없음
C42R100-1	42	□100	160	볼트사이 간격 : 100 가이드 플레이트 없음
C42R100-2	42	□100	120	볼트사이 간격 : 200 가이드 플레이트 없음
C42R150-R 단부형태 다름	42	□150	160	볼트사이 간격 : 170 가이드 플레이트 있음
C60R150	60	□150	160	볼트사이 간격 : 100 가이드 플레이트 있음

2.2 실험체 설치 및 가력계획

본 연구에서는 그림 4에서 보는 바와 같이 1층 1경간 실제 크기의 가력 프레임(5.87m×2.93m)을 구조실험센터에 제작, 설치하였다. 가력 프레임은 이상적인 핀의 거동을 나타내고 하중이 가해질 때 가력 프레임에 힘이 전달 되지 않고 BRKB와 접합부에서 횡변위를 지지하도록 상하부 부분과 기둥과의 접합부분에 베어링 힌지를 설치하였다. 실제 골조 프레임에 의한 가새 실험은 가새의 축력의 적용뿐만 아니라, 골조의 변형에 따른 힘의 영향도 평가할 수 있으므로 가새와 골조를 연결하는 접합부의 취약점을 분석할 수 있고, 가새의 실제 횡지지 성능을 파악할 수도 있다. 이는 1축에 의한 가새의 성능 실험보다 더 효율적으로 가새의 실

〈그림 2〉 각 실험체의 설계 도면

(a) C42R100-R

(b) C42R100-1

(c) C42R100-2

(d) C42R150-R

(e) C60R150

〈그림 3〉 각 실험체의 제작 사진

(a) 실험체 설치 프레임 도면

(b) C42R100-1

〈그림 4〉 실험체 설치 골조 프레임

Cycle	프레임 횡변위 (mm)	가새 축변위 (mm)	층간변위비 (%)	비고
2@ Δ_{by}	3.31	2.81	0.11	
2@0.5 Δ_{bm}	21.96	6.45	0.75	
2@1.0 Δ_{bm}	43.92	12.89	1.50	
2@1.5 Δ_{bm}	65.88	19.34	2.25	
2@2.0 Δ_{bm}	87.84	25.78	3.00	
4@1.5 Δ_{bm}	65.88	19.34	2.25	
1@2.5 Δ_{bm}	109.8	32.23	3.75	가새의 극한 변형능력 확인
1@3.0 Δ_{bm}	131.76	38.67	4.50	
1@3.5 Δ_{bm}	153.72	45.12	5.25	
1@4.0 Δ_{bm}	175.68	51.56	6.00	

(a) 가력 프로토콜

(b) 가력 프로토콜 그래프

〈그림 5〉 비좌굴 knee brace 실험체의 가력 계획

제거동을 확인할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

실험체의 가력은 AISC 2005(Seismic Provisions for Structural Steel Building)⁽⁷⁾에서 제시한 예를 바탕으로 가력 프로토콜을 작성하여 프레임의 상부 보와 반력벽 사이에 설치된 액추에이터를 통해서 반복하중으로 가력하였다. 먼저 가새의 길이와 강종에 따라 항복변위(Δ_{by})를 산출하고, 그 값에 대해서 골조 프레임의 최대 축방향 변위를 산출한

다. 이 값을 설계 층간 변위비 최대 3%일때의 골조 프레임의 축방향 변위(Δ_{bm})로 가정하고, 그 값을 기준으로 가력 프로토콜을 작성하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 첫 스텝에서는 탄성구간 내에서 2주기 가력하였다. 이는 실험에 대한 결함과 오차를 줄이고, 소성구간으로 넘어가기 전에 가새의 거동을 보기 위한 것이다. 그 후에 층간 변위비 각 0.75%, 1.5%, 2.25%, 3.0%까지 2주기씩 가력하고, 최대

3%까지 도달한 후 2.25%로 4주기로 가력하였다. 이는 AISC 2005에서 BRB의 누적 비탄성 변형률이 항복변위의 200배 이상이 되어야 한다는 것을 따르는 것이다. 여기까지 가력을 하였을 때 가새의 파단이 발생하지 않을 경우 가새의 극한 변형능력을 확인하기 위해 최대 층간변위비의 0.75%씩 증가 시키면서 1주기씩 가력을 하였다.⁽⁷⁾

2.3 실험체 변위 및 변형을 측정 계획

본 연구의 실험에서는 총 2개의 와이어 형태인 LVDT를 설치하여 골조 프레임에 발생하는 횡변위와 BRKB에 발생하는 축방향 변위를 살펴보았다. 이는 실제 골조 프레임에 가력을 하였을 때 골조에 생기는 횡변위와 액츄에이터의 변위를 비교하여 실험시 생길 수 있는 슬립이나 실험적 오차를 줄이기 위한 것이다. 또한 가새의 축변위를 직접 측정함으로써 실제 골조 프레임 실험을 통해 가새의 성능을 평가할 수 있도록 하였다.

또한 가새 플레이트와 외부 보강재의 변형율을 측정하기 위해 본 연구에서는 총 10개의 소성형 스트레인 게이지를 그림 6에서 보는 바와 같이 상·중·하로 3부분에 걸쳐 각각 설치하였다.⁽¹⁾

3. 실험 결과

3.1 실험체의 이력거동 및 파괴형태 비교

본 연구에서는 외부 보강재의 고정 방법 중 볼트에 의한

〈그림 6〉 knee brace 측정 gauge 설치 위치

고정 방법으로 총 5개의 실험체를 제작하여 실험을 실시하였고, 그 결과를 힘-변위 이력 그래프와 실험체의 파괴 형태에 따라 각각 비교하였다.

첫 번째 실험체인 C42R100-R 실험체는 비보강 부분의 보강을 위해 단부 부분이 중심코어 쪽으로 더 깊이 들어간 실험체이다. 처음 탄성구간과 층간 변위비 0.75%까지는 가새의 큰 변화가 관찰되지 않았다. 다만, 볼트 부분의 석고의 균열이 발생되었다. 층간 변위비 1.5%부터 볼트 부분의 석고의 균열이 심화되었고, 외부 보강재의 상하부에 석고의 균열이 진행되었다. 또한 층간 변위비 2.25%와 3.0%에서부터 중심코어가 밀리는 것과 면내 좌굴이 육안으로 확인되었고, 4사이클의 층간 변위비 2.25%에서 더욱 심화되었다. 결국 가새의 극한 변형능력을 확인하기 위해 가력한 층간 변위비 5.25%에서 중심코어의 아랫부분에서 파단되었다.

두 번째 실험체인 C42R100-1 실험체는 본 실험에 대한 총 5개의 실험체에서 가장 기본이 되는 실험체이다. 층간 변위비 0.75%까지 가새의 약간 밀려 들어간 흔적만 있었을 뿐, 가새의 큰 변형 없이 진행되었다. 다음 사이클인 층간 변위비 1.50%에서 밀렸던 중심코어의 영향으로 비부착 물질인 고무가 약간 오른쪽으로 쏠린 현상이 발견되었고, 층간 변위비 2.25%에서 고무의 탈락현상이 발견되었다. 또한 중심코어의 면내 좌굴 현상이 발견되었고, 중심코어에 부착하였던 스트레인 게이지의 이탈이 발생하였다. 설계 층간변위의 2배를 받는 층간 변위비 3.0%에서는 오른쪽 채널의 부 좌굴 현상이 발견되었고, 중심코어의 면내 좌굴이 더욱 심화되었다. 결국 4번째 사이클의 층간 변위비 2.25%에서 중심코어의 파단에 의해 실험이 완료되었다.

세 번째 실험체인 C42R100-2 실험체는 두 번째 실험체인 C42R100-1 실험체에서 단부의 크기만을 변수로 둔 실험체이다. 그림 7의 힘-변위 이력곡선을 비교해 보면 첫 번째 실험체와 거의 비슷한 거동을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 실험체의 변형과정도 거의 비슷한 현상을 보이고 있다. 탄성 부분과 층간변위비 0.75%까지는 약간의 석고의 탈락현상만 발견되었을 뿐 큰 변화는 발견되지 않았고, 층간 변위비 1.50%까지 계속 진행되었다. 층간 변위비 2.25%에서 가새의 하부에서 고무의 밀린 흔적과 중심코어의 밀린 흔적으로 인해 석고의 균열이 발생되었다. 최대 층간 변위인 3.0%에서 첫 번째 실험체와 마찬가지로 중심코어의 면내좌굴이 발생되었다. 또한 층간 변위비 4사이클의 2.25%에서 중심코어의 면내좌굴 현상은 더욱 심화되다가 결국 층간 변위비 3.75%에서 중심코어의 파단으로 실험이 종료되었다.

네 번째 실험체인 C42R150-R 실험체는 단부의 보강과

〈그림 7〉 각 knee brace의 힘-변위 이력곡선 그래프

외부 보강재의 보강, 또한 중심코어의 면내좌굴을 방지하기 위한 가이드 플레이트의 보강이 이루어진 실험체이다. C42R150-R 실험체는 최대 층간 변위비인 3.0%에서 중심 코어의 파단이 발생되었다. 이는 단부 부분의 외부 보강재와 단부의 좌굴을 방지하기 위해 설치한 날개 부분이 접촉하지 않도록 외부 보강재에 파 놓은 부분에서 응력의 집중으로 인해 최대 성능을 발휘하지 못했다. 이에 대한 설계는 차후 더 연구해야 할 부분이다.

가새가 탄성영역에 머무르는 횡하중에서는 가새의 변형이 거의 일어나지 않았다. 층간 변위비 0.75%에서 가새의 하부부분과 상부 중심코어 부분에서 석고의 균열이 발생되었다. 또한 층간 변위비 1.5%에서 육안으로 확인 될 정도로 균열 및 고무탈락 현상이 발생되었다. 이러한 현상은 비탄성 변형이 진행됨에 따라 층간 변위비 2.25%에서 가새의 상부보다 하부부분에서 더 크게 발생되었다. 결국 층간 변위비 3.0%에서 외부 보강재의 단부에 파 놓은 부분에서 응력이 집중되어 파단이 발생되었다.

C60R150 실험체는 외부 보강재 볼트고정 실험체 중에서 마지막 실험체이다. 이는 중심코어의 크기가 60mm이고 외부 보강재의 웹(web)의 크기가 150mm인 실험체이다. 처음 탄성구간에서는 왼쪽 단면에 약간의 석고의 균열이 발견되었고, 층간 변위비 0.75%에서는 가새의 아랫부분 첫 번째 볼트에서 석고의 탈락이 발견되었다. 그러나 거의 대부분의 실험체가 그렇듯이 본 실험체도 층간 변위비 0.75%까지는 약간의 석고의 균열만 발견되었다. 층간 변위비 1.5%에서

가새 하부의 코어부분에서 석고의 균열이 심화되었고, 가새 상부의 코어부분에서 석고의 탈락이 발견되었다. 이러한 현상은 최대 층간 변위비 3.0%를 넘어 4사이클의 2.25%까지 진행되었고, 특별히 큰 변형은 발견되지 않았다. 이는 중심 코어의 크기가 실험 결과에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 가새의 극한 변형능력을 확인하기 위해 가력한 층간 변위비 3.75%에서는 가새의 하부에서 중심코어의 약 1.5cm 정도 늘어난 것이 눈으로 확인되었다. 결국 층간 변위비 4.5%에서 가새의 아랫부분 가새플레이트에서 좌굴이 발생되어 진행되다가 층간 변위비 5.25%에서 중심코어의 파단에 의해 실험이 종료되었다.

3.2 압축강도 수정계수 및 연성능력 비교

AISC 2005 Seismic Provisions에서는 BRB의 성능을 규정하는 값으로써 가새의 최대 압축강도와 최대 인장강도의 비율로 나타낸 압축강도 수정계수를 정의하고 있다. 이는 역 V형(chvron type)으로 설치된 가새에서 인장과 압축강도의 비가 커지게 되면 인장 가새가 항복한 이후에 불균형력(unbalanced force)이 수직 방향으로 작용하여 연결된 보가 파괴될 수 있기 때문이다. 그림 8에서 점선이 나타내는 1.3의 값을 기준으로 초과하지 못하도록 하고 있다.⁽⁷⁾

이와 같은 목적으로 본 연구에서도 BRKB에 대해 압축강도 수정계수에 대해 비교해 보았다. 외부 보강재의 크기가 100mm인 실험체의 경우 인장강도의 값이 약 10%정도 높게 나타나고 있다. 이는 실험체에 인장력이 가해질 때는

(a) 가새의 축변형에 따른 압축강도 수정계수(외부 보강 : 100mm)

(b) 가새의 축변형에 따른 압축강도 수정계수(외부 보강 : 150mm)

〈그림 8〉 외부 보강재에 따른 압축강도 수정계수

(a) C42R100-R

(b) C42R100-1

(c) C42R100-2

(d) C42R150-R

(e) C60R150

〈그림 9〉 각 실험체의 거동 및 파괴모드

충분한 힘을 받을 수 있지만, 압축력이 가해지면 인장력의 90% 정도의 힘을 받을 수 있다는 것을 알 수 있다. 이에 반해, 외부 보강재의 크기가 150mm인 실험체의 경우, 압축강도의 값이 오히려 10% ~ 15% 정도 높게 나타나고 있다. 이 결과는 두 실험체 군의 서로 다른 변수에서 찾을 수 있는데, 이는 면내 좌굴 방지를 위한 가이드 플레이트의 유무라고 할 수 있다. 그림 9에서 (a),(c)를 보면 외부 보강재의 크기가 100mm인 실험체의 경우 대부분의 파괴형태가 중심코어의 면내 좌굴에 의한 것이었다. 이는 압축력에 충분한 힘을 발휘하지 못함을 알 수 있다. 반면에, 외부 보강재의 크기가 150mm인 실험체의 경우, 파괴형태가 중심코어의 단부의

면의 좌굴에 의한 파단이나, 극한 변형능력을 가력하였을 때 그림 8의 (e)에서 가이드 플레이트의 파단에 의한 것이었다.

3.3 실험체의 연성능력 비교

본 연구에서는 BRKB의 성능을 확인하기 위해 각 가력 사이클마다 인장 최대변위(u_{pi}^{max})에서 압축 최대변위(u_{pi}^{min})의 차이를 구하고, 이를 항복변위로 나누어 연성도를 구한 후, 이들의 합을 통해 누적연성도(Cumulative Plastic Deformation, CPD)를 산정하였다.⁽⁸⁾ AISC 2005에서는 BRB의 성능에 대해서 누적 연성도의 값이 200이상의 값을 갖도록

권고하고 있다. 이는 BRB 시스템의 성능을 조사하기 위해 수행된 비선형 동적 해석에 근거를 두고 있다. 그러나 규정된 값은 BRB의 부재실험에 요구되는 값으로, 골조실험에서는 설계 변위의 2배까지 힘을 가했을 때, 가새의 국부좌굴이나 전체 좌굴이 발생되지 않아야 한다는 권고사항만 있을 뿐 누적연성도의 값에 대해서는 적용되지 않는 것으로 명시되어 있다.

그림 10에 외부 보강재의 크기에 따라 누적연성도의 값을 분류하여 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 외부 보강재의 크기가 100mm인 실험체의 경우, 거의 비슷한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 두 번째 실험체인 C42R100-1 실험체는 중간 변위비 3.00%에서 파단이 발생되어 그 이후의 값을 확인할 수는 없지만, 초기에는 다른 실험체와 유사한 값을 나타내고 있다. 그 외의 다른 두 실험체는 AISC 2005에서 BRB의 요구성능 값으로 제시한 200 보다 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

외부 보강재의 크기가 150mm인 실험체의 경우, 초기에는 유사한 값을 나타내고 있다. 그러나 중심코어의 크기가 작은 C42R150-R 실험체의 경우, 외부 보강재와 단부의 날개 부분이 접촉하지 않도록 파 놓은 부분에서 응력의 집중

으로 인한 조기파단으로 충분한 누적 연성도 값을 갖지 못하는 것으로 나타났다. 반면에 중심코어의 크기가 60mm인 실험체의 경우, 비탄성 변형의 증가에도 불구하고 충분한 저항력을 보여주었고, 이는 260의 값을 보여주었다.

3.4 실험체의 누적 소산에너지 비교

본 연구에서는 각 실험체의 에너지 소산능력을 비교하기 위해 각 실험체의 힘-변위 이력곡선에서 각 사이클마다 이력곡선으로 둘러싸인 부분의 면적을 구하여 이들의 합을 통해 실험체의 누적 소산에너지를 산정하였다. 이는 부재의 성능을 파악할 때, 가장 중요한 값으로 BRKB 시스템이 지진력에 저항할 수 있는 능력을 확인하기 위한 값이다. 그림

〈표 2〉 각 실험체의 누적이력에너지

실험체	누적이력에너지 (kN·mm)
C42R100-R	27154.2
C42R100-1	17379.8
C42R150-2	32216.8
C42R150-R	19295.4
C60R150	57658.6

(a) 가새의 축변형에 따른 누적 연성도(외부 보강 : 100mm)

(b) 가새의 축변형에 따른 누적 연성도(외부 보강 : 150mm)

〈그림 10〉 외부 보강재에 따른 누적 연성도(D_{bm} : 축방향 변위)

(a) 가새의 축변형에 따른 누적이력에너지(중심코어 : 42mm)

(b) 가새의 축변형에 따른 누적이력에너지(중심코어 : 60mm)

〈그림 11〉 중심코어에 따른 누적이력에너지(D_{bm} : 축방향 변위)

11은 누적연성도와 마찬가지로 외부 보강재의 크기에 따라 분류하여 나타내었다. 외부 보강재의 크기가 100mm인 실험체의 경우, 초기 층간 변위비가 1.5%까지는 거의 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그 이후에 첫 번째 실험체인 C42R100-R 실험체가 다른 실험체에 비해 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 골조 실험시 골조 내의 슬립에 의해 힙-변위 이력곡선의 형태가 다른 실험체에 비해 작은 값을 나타내었다고 사료된다. 또한 두 번째 실험체인 C42R100-1 실험체의 경우, 실험체의 초기 파단에 의해 충분한 힘을 받지 못하여 세 번째 실험체인 C42R100-2 실험체 보다 낮은 값을 나타내는 것으로 사료된다.

외부 보강재의 크기가 150mm인 실험체의 경우, 외부 보강재와 가이드 플레이트의 면내 좌굴 구속효과로 인해 외부 보강재의 크기가 100mm인 실험체에 비해 각 층간 변위비에서 더 큰 누적 이력에너지 값을 갖는 것을 알 수 있다. 두 실험체 모두 초기에는 거의 비슷한 값을 나타내고 있지만, 단부에서 응력의 집중으로 인해 초기 파단된 C42R150-R 실험체는 C60R150 실험체에 비해 낮은 값을 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 채널 형강을 이용하여 중심코어의 좌굴을 방지한 BRB 시스템에 중저층 집합주택의 내진 보강에 적합한 knee brace 시스템을 접목시킨 BRKB에 대하여 총 5개의 실험체를 제작하였다. BRKB는 대각 형태의 BRB나 K형 가새에 비해 그 성능은 떨어지나 필로티 층을 가진 중저층 집합주택에 대해 공간활용과 사용성, 시야의 확보, 재료의 활용성 측면에서 내진 보강재로서 그 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 외부 보강재의 고정 방법으로 선행 연구된 용접 고정방법 외에 다른 방법인 볼팅 고정방법을 선택하였고 중심코어의 크기와 외부 보강재의 크기, 단부의 크기와 가이드 플레이트의 유무를 변수로 두어 그 성능을 확인하였다. 또한 1층 1경간의 실제 골조에 실험체를 설치하여 반복하중을 가력함으로써 부재에 대한 성능을 확인하였다. 실험에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 실험체의 여러 가지 변수를 두어 실험을 실시한 결과 중심코어의 크기가 클수록 BRKB의 강도가 더 크게 나타났고, 외부 보강재의 크기가 클수록 중심코어의 구속효과에 의해 누적연성도와 에너지 소산능력이 더 크게 나타났다.
2. 실험체의 파괴 형태를 살펴볼 때, 가이드 플레이트의 유

무에 따라 형태가 달리 나타나는 것을 알 수 있다. 외부 보강재의 크기가 100mm인 실험체의 경우, 가이드 플레이트가 설치되지 않아 중심코어의 면내좌굴이 발생되었다. 이는 압축강도 수정계수 값에도 영향을 끼쳐서 가새의 압축력이 인장력에 비해 10%정도 작게 나타났다. 그러나 외부 보강재의 크기가 150mm인 실험체의 경우, 가이드 플레이트가 설치되어 실험체는 단부나 가새 플레이트에서 파단되었다. 이는 가새의 압축력이 인장력에 비해 10% ~ 15%정도 더 큰 힘을 받는 것으로 나타났다.

3. 실험체의 연성도는 외부 보강재의 크기가 100mm인 실험체의 경우, 초기 파단된 C42R100-1 실험체를 제외하고 200이상의 값을 가지며, 외부 보강재의 크기가 150mm인 실험체의 경우, 마찬가지로 초기 파단된 C42R150-R 실험체를 제외하고 200이상의 값을 나타냈다.
4. 본 실험을 통하여 BRKB의 제작시 중요한 변수로 외부 보강재의 단부에 대한 설계도 고려해야 하는 것으로 연구되었다. 가새의 외부 보강재와 단부의 좌굴을 방지하기 위해 설치한 날개가 닿지 않도록 외부 보강재의 단부에 파놓은 부분의 길이에 대해 사전 검토가 필요하다. 이는 본 실험에서 네 번째로 실시한 C42R150-R 실험체에서 볼 수 있듯이 그 해당 부분의 길이가 길수록 관련된 부분에 응력이 집중되어 초기파단이 발생할 수 있기 때문이다. 차후 이에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.
5. 전체적인 BRKB의 결과인 연성도와 에너지 소산능력을 통해 볼 때, 외부 보강재의 크기가 100mm인 실험체의 경우, C42R100-2 실험체와 외부 보강재의 크기가 150mm인 실험체의 경우, C60R150 실험체가 실적용에 가장 적합한 것으로 사료된다. 이는 차후에 내진 보강이 되어 있지 않은 중저층 집합주택에 내진 보강재로 적절한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 특정기초연구사업(R01-2007-000-20765-0)과 국토해양부 건설핵심기술연구개발사업(#06건설핵심B03)의 지원에 의해 수행된 것으로 이에 대해 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이진, 이기학, 정미루, “내진성능에 대한 채널 형강으로 보강된 비좌굴 Knee Bracing System의 내진성능에 대한 실험적 평가”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, Vol. 28, No. 1, 2008, pp. 285-288.
2. 김진구, 서영일, “손상방지 가새골조 시스템의 내진 설계”, 대

- 한건축학회 논문집, Vol. 19, No. 6, 2003, pp. 53-60
3. 김진구, 박준희, 이기학, 이진, “철판과 ㄷ-형강을 이용한 좌굴 구속가새의 내진성능”, 대한건축학회 논문집, Vol. 23, No. 10, 2007, pp. 19-26.
 4. 성우기, 김도현, 김영주, 주영규, 김명환, 김상대, “H형강을 이용한 비좌굴가새 부분골조 실험”, 대한건축학회 논문집, Vol. 24, No. 5, 2008, pp. 67-74.
 5. 김진구, 서영일, “비좌굴 knee brace가 설치된 철골조 건물의 내진설계”, 대한건축학회 논문집, Vol 19, No. 2, 2003, pp. 57-65.
 6. Suita K., Inoue K., Takeuchi I., and Uno N., “Mechanical Behavior of Bolted Beam-to-Column Connections with Hysteretic Damper”, *The 3th Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures*, Taipei, Taiwan, 2001.
 7. AISC. “Seismic Provision for Structural Steel Building”, *American Inst. of Steel construction, Inc.*, Chicago, 2005, pp.204-211.
 8. Black C, Makris N, Aiken I., “Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained braces” *Final report to Nippon Steel Corporation*, 2001.
 9. AISC-SEAOC. “Recommended Provisions for Buckling -Restrained Braced Framed”, *American Inst. of Steel construction, Inc.*, Chicago, 2001.
 10. Tremblay R, Degrange D, Blouin J., “Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system” *Proceeding of the 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, 1999.
 11. Yoshino, T., and Karino, Y., “Experimental study on shear wall with braces”, *Part 2. Summaries of technical papers of annual meeting, Structural Engineering Section*, Architectural Institute of Japan, Vol. 11, 1971.
 12. Watanabe, A., Hitomoi, Y., Sacki, E., Wada, A., and Fujimoto, M., “Properties of braced encased in buckling-restrained concrete and steel tube”, *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol IV, 1988.
 13. Horie, T., Yabe, Y., et al. “Elasto-Plastic behavior of steel brace with restraint system for post buckling”, *Annual Technical Papers of Steel Structures*, in Japan, Vol. 1, 1993.
 14. Tsai, K.C., Lai, J.W., Hwang, Y.C., Lin, S.L., and Weng, C.H., “Research and application on double-core buckling restrained braces in Taiwan”, *Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2179*, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
 15. Merritt, S., Uang, C.M., and Benzoni, G., “Subassemblage testing of corebrace buckling-restrained braces”, *Report to CoreBrace, LLC, Dept. of Structural Engineering*, University of California, San Diego, 2003.