

# FRP Sheet와 비좌굴 가새를 적용한 보-기둥 접합부의 횡방향 보강효과에 관한 실험적 연구

## Experimental Investigation of The Lateral Retrofitting Effect of FRP Sheet and Buckling-restrained Braces for Beam-Column Joints

변은혁<sup>1)</sup> · 김민숙<sup>2)</sup> · 이영학<sup>3)</sup> · 김희철<sup>4)</sup>

Byon, Eun Hyuk · Kim, Min Sook · Lee, Young Hak · Kim, Hee Cheul

**국문 요약** >> FRP Sheet와 비좌굴가새를 적용한 보-기둥 접합부의 보강효과를 평가하기 위하여 보-기둥 접합부 실험체에 축력 및 반복 횡가력을 가하여 실험을 수행하였다. 동일한 크기의 6개의 실험체를 제작하였으며 FRP Sheet의 종류 및 비좌굴 가새의 유무를 변수로 하였다. 실험체의 파괴양상 및 최대하중, 연성지수, 에너지소산능력의 측면에서 실험결과를 분석하였다. 실험결과 CFRP Sheet와 비좌굴가새를 혼용한 보강방법이 가장 우수한 성능을 나타냈다.

**주요어** 보-기둥 접합부, 비좌굴 가새, 탄소섬유시트, 아라미드섬유시트

**ABSTRACT** >> The strengthening effect of CFRP sheet and AFRP sheet with buckling-restrained brace for Beam-Column joints under constant axial and cyclic lateral loading is evaluated experimentally in this paper. Six test specimens were constructed. The main test parameters included the FRP Sheet and Buckling-restrained braces. The results of the tests were analyzed by focusing on their mode of failure, maximum load, ductility indexes, and energy dissipation capacity. Test results indicated that CFRP Sheet with the buckling-restrained brace system significantly increased the strength and stiffness of the specimen and that it was the most adequate retrofitting method.

**Key words** Beam-column joint, Buckling-restrained brace, CFRP sheet, AFRP sheet

### 1. 서론

지진이 발생할 경우 구조물에서 가장 취약한 부분은 보-기둥 접합부와 기둥이며 이는 구조물을 지탱하는 가장 중요한 역할을 하므로 이 부분의 손상은 건물 전체의 연쇄붕괴와 같은 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 특히 내진설계가 적용되지 않은 기존 저층 구조물 및 기존 구조물에서 이미 손상을 입었거나 손상이 예상되는 보-기둥 접합부에 대하여 이에 따른 보강이 필요한 실정이다. 따라서 이에 대한 보강 방법이 활발히 연구되고 있다. 이 중 비좌굴 가새를 이용한 방

법은 강성 및 에너지소산능력의 증가에 있어 매우 효과적인 방법으로 알려져 있어 많은 연구자들이 비좌굴 가새의 거동 및 형상에 대한 연구를 수행하고 있다.<sup>(1),(2)</sup> FRP Sheet를 콘크리트 기둥에 감아 보강하는 방법 또한 토목 및 건축분야에서 널리 적용되고 있는 보강법 중 하나이다. FRP Sheet의 보강은 콘크리트를 구속시킴으로써 강도와 연성에 상당한 기여를 하여 휨 파괴가 일어나기 전 전단 파괴의 발생을 상당 부분을 막을 수 있는 효과가 있기 때문에 교각 등 철근콘크리트 기둥에 FRP Sheet를 감아 보강하는 방법은 매우 효과적인 것으로 입증되어 이에 대해 많은 모델을 제안하는 연구가 이루어져왔다.<sup>(3-5)</sup> 본 연구에서는 강성 및 에너지소산능력의 증가에 기여하는 비좌굴 가새와 콘크리트 구속을 통한 전단파괴 감소에 기여하는 FRP Sheet를 혼용한 보강법의 횡력 저항 성능의 기여도를 평가하고자 하였다. 기둥부의 FRP Sheet 보강 및 보-기둥 접합부에 비좌굴 가새를 보강한 실험체에 대하여 반복 횡가력 실험을 수행하여 유효 강성, 에너지소산능력, 연성지수 등의 측면에서 비교 및 분

<sup>1)</sup> 경희대학교 건축공학과 석사과정

<sup>2)</sup> 정희원·경희대학교 건축공학과 대학원 박사과정

<sup>3)</sup> 정희원·경희대학교 건축공학과 조교수

(교신저자: leeyh@khu.ac.kr)

<sup>4)</sup> 정희원·경희대학교 건축공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 1. 5 / 수정일 : 2011. 1. 18 / 게재확정일 : 2011. 1. 18)

석함으로써 기둥 및 보-기둥 접합부 실험체의 거동 평가 및 횡력 저항 성능의 향상 정도를 평가하였다. 이를 통하여 FRP Sheet와 비좌굴 가새를 혼용한 보강법의 실용성을 확인하고자 하였으며 향후 FRP Sheet와 비좌굴 가새를 적용한 보강 설계에 있어 기초자료를 제공하고자 한다.

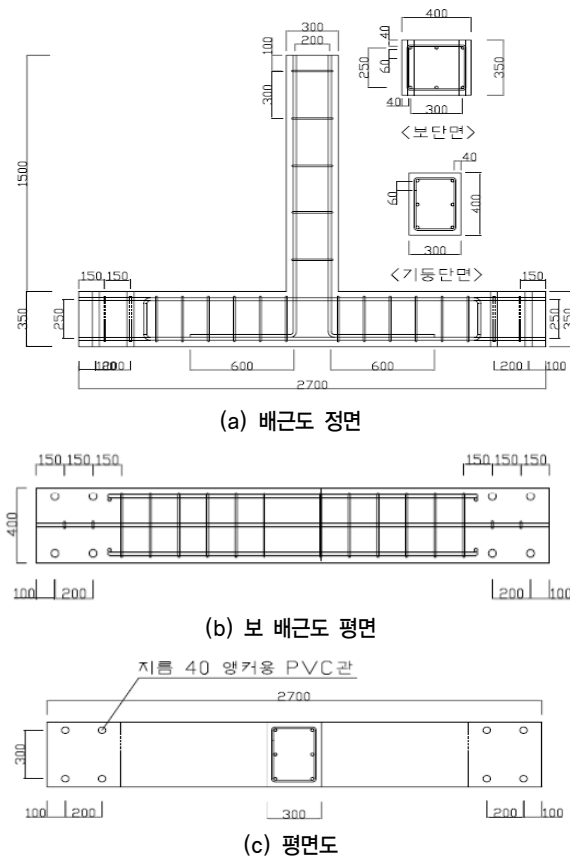
## 2. 실험 계획

### 2.1 실험체 설계

실험변수는 선행연구<sup>(6)</sup>를 더 확장시켜 비좌굴 가새의 유무 및 FRP Sheet의 종류에 따른 횡력저항 성능의 향상정도를 평가하고자 하였으며 그에 따른 변수는 표 1과 같다. 크기와 형상이 동일한 6개의 보-기둥 접합부 실험체를 제작하

〈표 1〉 실험체 종류와 변수

실험체명	FRP Sheet 종류	비좌굴 가새 보강 유무
Proto	-	-
N-BRB	-	Y
CFS-N	CFRP sheet	Y
CFS-BRB	CFRP sheet	N
AFS-N	AFRP sheet	Y
AFS-BRB	AFRP sheet	N



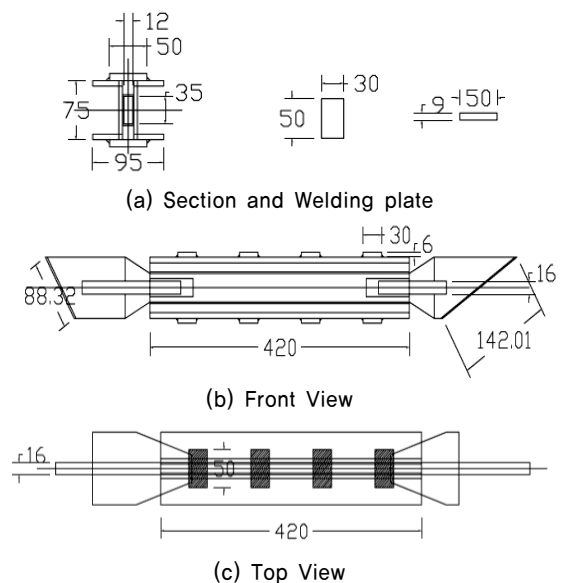
〈그림 1〉 실험체의 단면도 및 배근도

였으며 표본조사를 통하여 필로티 건축물 보-기둥 실험체의 크기를 선정하였다. 실험체는 400mm × 350mm × 2,700mm의 보와 300mm × 400mm × 1,500mm의 기둥으로 연결된 보-기둥 접합부의 형상이며 그림 1과 같다.

### 2.2 사용 재료의 특성

실험체는 설계기준강도 25MPa의 콘크리트를 사용하였다. Ø150mm × 300mm의 공시체를 제작하여 콘크리트의 압축강도실험을 수행하였으며 28일 기준으로 24MPa의 압축강도를 확인하였다. 주철근은 SD400의 D19 이형철근을 사용하였으며 D10 이형철근을 띠철근으로 사용하였다. 또한 실험체의 변수에 따라 CFRP Sheet와 AFRP Sheet를 기둥의 길이방향으로 좌우 60°씩 2장을 wrapping 공법으로 보강하였다.

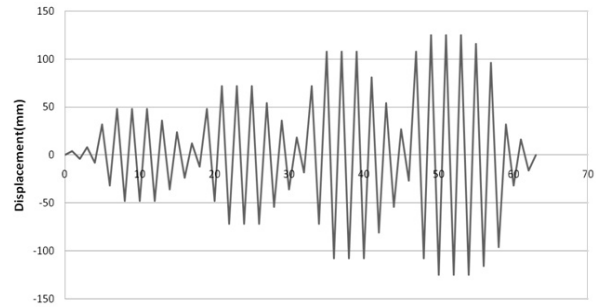
실험에 사용된 비좌굴 가새는 그림 2와 같으며 SS400의 재료를 사용하여 12mm × 35mm 크기의 중심코어 양면에 ‘ㄷ’형 채널 2개를 부착하는 형태로 제작하였다. 비좌굴 가새의 성능을 극대화하기위해 코어와 ‘ㄷ’형 채널 사이에 윤활유를 도포한 고무 시트를 부착하였으며 하중 가력 시 코어 철물과 채널이 별도로 거동하도록 설계되었으며 본 연구에서 적용한 비좌굴 가새는 기존 연구를 통해 그 성능이 검증되었다.<sup>(7)</sup> 비좌굴 가새는 총 6개를 제작하여 변수에 따라 실험체의 기둥 양쪽에 설치하였고 최소 10cm 이상의 삽입 길이를 가지는 24개의 앵커를 이용하여 실험체에 부착하였다. 실험체의 형상은 그림 3과 같으며 사용한 재료 물성치는 표 2, 표 3, 표 4와 같다.



〈그림 2〉 비좌굴 가새 설계 도면



〈그림 3〉 FRP Sheet와 BRB가 모두 적용된 실험체



〈그림 4〉 가력패턴

〈표 2〉 콘크리트 배합비

굵은골재 (mm)	슬럼프 (mm)	공칭강도 (MPa)	시멘트 종류
25	120	25	보통

〈표 3〉 비좌굴 가새 상세

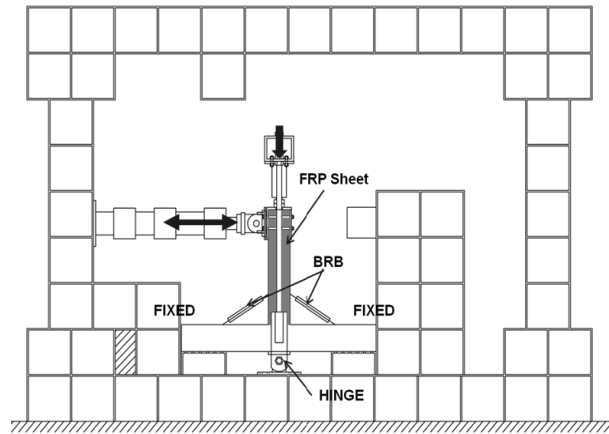
가새 실험체 (mm)	중심 코어 (mm)	외부 보강재 (mm)	단부 (mm)	외부 보강재 접합 방법
C35R75	35×12	□75×40	75×16	8개의 플레이트 용접 용접 간격 : 100mm

〈표 4〉 FRP sheet의 특성

	탄성계수 (MPa)	인장강도 (MPa)	두께 (mm)
CFRP Sheet	2.35 × 105	3,550	0.167
AFRP Sheet	1.2 × 105	2,880	0.194

## 2.3 가력 및 계측 계획

기둥은 축 하중과 수평 하중을 동시에 받는 부재이기 때문에 실험 시, 축 하중과 횡 하중을 동시에 가력하였다. 축 하중은 500kN 용량의 정적 가력기를 이용하여 400kN 크기의 지속하중으로 재하하였다. 횡 하중은 1,000kN 용량의 동적 Actuator를 이용하여 변위제어의 방법으로 초당 2mm의 속도로 반복 횡 하중을 가하였으며 48mm, 72mm, 108mm, 125mm의 비교구간을 적용하여 각 변수에 따른 실험체의 강도와 강성의 변화를 비교하였다. 가력패턴은 그림 4와 같이 각 변위별로 3 cycle로 이루어져있으며 각 변위에서 하중변화 및 강도 감소가 최대하중의 60% 이하로 저하될 때 실험을 종료하였다. 실험체의 변위측정을 위하여 300mm 길이의 변위계(Linear Variable Differential Transducer)를 설치하였으며 로드셀(Load cell)을 이용하여 하중을 계측하였다. 실험체의 세팅 형상은 그림 5와 같다.



〈그림 5〉 실험체 세팅

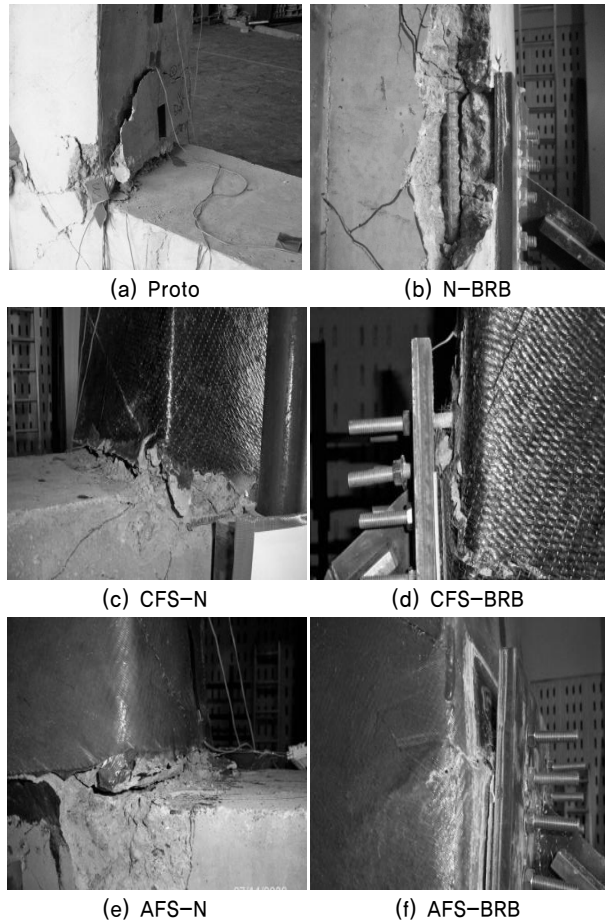
## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 실험체의 거동

기준 실험체인 Proto 실험체의 경우 기둥과 보에서 모두 균열이 발생하였다. 기둥 하부의 양 측면에서 초기 균열이 발생하였으며 보-기둥 접합부에서 균열 증가에 따른 콘크리트의 박리로 인하여 기둥의 철근이 노출되었다. 또한 강도와 강성, 에너지 소산능력의 측면에서 실험체 중 가장 작은 값이 측정되었다.

비좌굴 가새만으로 보강된 N-BRB 실험체는 모든 실험체 중 가장 취성적인 파괴를 보였다. 비좌굴 가새의 영향으로 기준 실험체에 비해 높은 강도와 강성을 나타냈지만 최대하중 이후, 72mm 두 번째 사이클 진행 중에 비좌굴 가새와 기둥의 연결부분의 균열에 의한 콘크리트의 박리가 발생하였으며 이후 급격한 하중의 저하가 나타났다.

CFRP Sheet와 AFRP Sheet로 보강된 CFS-N 실험체와 AFS-N 실험체는 유사한 파괴양상을 보여 FRP Sheet의 재료 특성에 따른 거동의 차이는 확인할 수 없었다. 두 실험체 모두 기둥 하부의 보-기둥 접합부에서 초기 균열이 발생하였으며 이후 균열이 증가함에 따라 하중이 저하되었다.



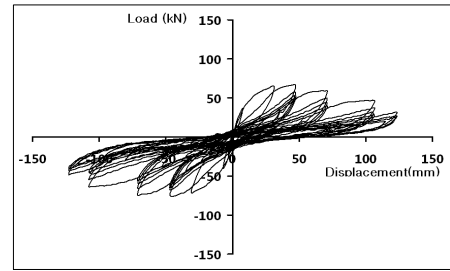
〈그림 6〉 최종 파괴된 실험체 형상

CFS-N 실험체와 AFS-N 실험체 모두 FRP Sheet의 구속효과에 의하여 기존 실험체에 비하여 기둥에서의 균열발생에 따른 콘크리트 박리 및 파괴는 나타나지 않았다.

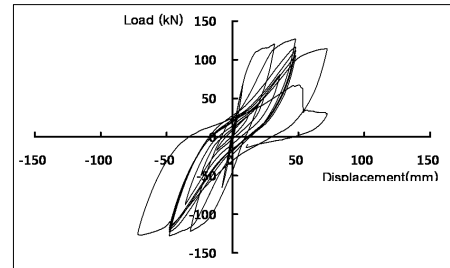
FRP Sheet와 비좌굴 가새를 함께 보강한 CFS-BRB 실험체와 AFS-BRB 실험체는 모두 비좌굴 가새와 기둥의 연결부분에서 파괴가 발생하였다. 비좌굴 가새와 기둥 연결부의 불규칙적인 균열과 함께 FRP Sheet의 파단이 발생하였으며 실험체와 비좌굴 가새의 부착을 위해 삽입된 앵커의 뽑힘 현상이 발생하였다. 두 실험체 모두 보-기둥의 접합부에서는 균열 및 파괴는 관찰되지 않았다. 각 변수에 따른 실험체의 파괴 양상은 그림 6과 같다.

### 3.2 하중-변위 이력곡선

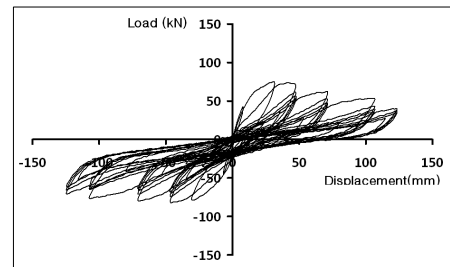
실험체의 하중-변위 이력곡선과 포락선은 그림 7, 그림 8과 같으며 FRP Sheet와 비좌굴 가새가 모두 적용되었을 때 실험체의 강도와 강성이 현저하게 증대한다는 것을 확인할 수 있다. Proto 실험체는 67.20kN의 최대하중을 나타내며 모든 실험체 중에서 가장 작은 값을 나타냈다. CFS-N 실험체와 AFS-N 실험체는 Proto 실험체와 유사한 그래프의 형



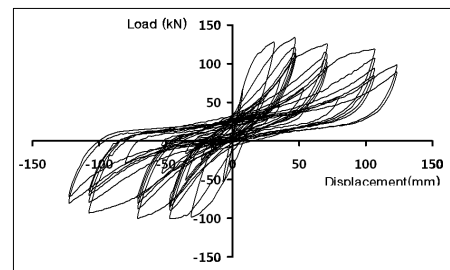
(a) Proto



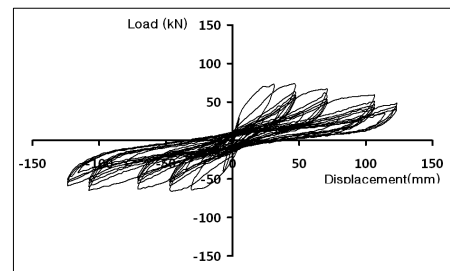
(b) N-BRB



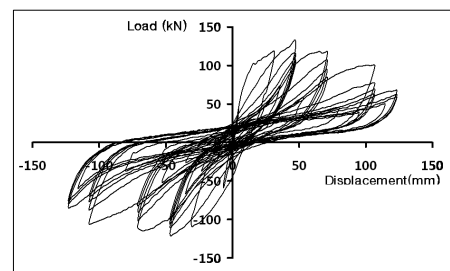
(c) CFS-N



(d) CFS-BRB

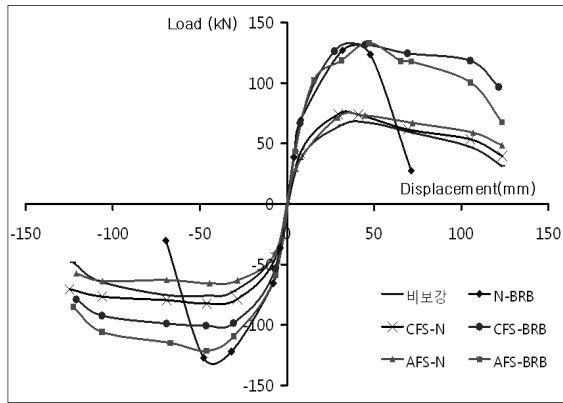


(e) AFS-N



(f) AFS-BRB

〈그림 7〉 실험체의 하중-변위 이력곡선



〈그림 8〉 포락곡선 비교

〈표 5〉 실험체에 따른 최대하중 비교

실험체명	최대하중 (kN)	125mm에서의 최대하중 (kN)	Ratio*
Proto	67.20	32.0	1.00
N-BRB	126.96	-	1.85
CFS-N	74.17	40.0	1.08
CFS-BRB	131.56	100.2	1.92
AFS-N	73.15	49.4	1.09
AFS-BRB	133.15	69.0	1.98

Ratio\* : 기준실험체의 하중에 대한 하중 비

태를 보였으며 최대 하중 이후 완만한 하중의 감소를 나타냈다.

N-BRB 실험체는 126.96kN의 최대하중을 나타내며 Proto 실험체보다 약 85% 증가한 값을 나타냈다. 하지만 기둥과 비좌굴 가새의 연결부에서 콘크리트의 파괴가 발생하였으며, 이후 급격한 하중의 감소를 보였다.

FRP Sheet와 비좌굴 가새를 모두 보강한 CFS-BRB 실험체와 AFS-BRB 실험체에서는 Proto 실험체와 FRP Sheet만 보강한 실험체에 비하여 그래프의 기울기 즉, 강성의 증가가 확연하게 나타났다. 또한 Proto 실험체에 비하여 CFS-BRB 실험체와 AFS-BRB 실험체가 각각 92%, 98% 증가한 최대하중을 보였다. 각 실험체에 따른 최대하중의 비교는 표 5와 같다.

### 3.3 강성

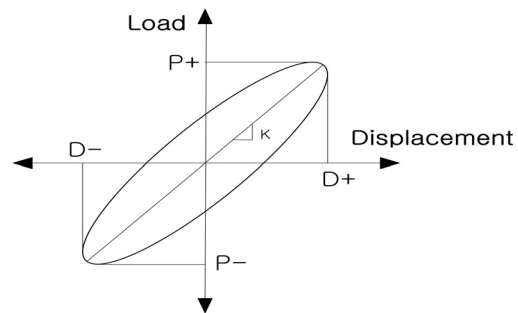
초기강성은 하중-변위 이력곡선의 초기 기울기로 정의하며 극한강성은 최대하중에서의 하중과 변위의 기울기로 정의한다. 표 6과 같이 기준실험체에 대한 초기강성과 극한강성의 비는 N-BRB 실험체가 1.77과 2.78로 가장 크게 나타났으며 AFS-N 실험체는 1.10과 1.14로 가장 작게 나타났다. CFS-BRB 실험체와 AFS-BRB 실험체는 초기강성과

〈표 6〉 초기강성과 극한강성

실험체명	초기강성 (kN/mm)	Ratio*	극한강성 (kN/mm)	Ratio**
Proto	5.38	1.00	1.44	1.00
N-BRB	9.53	1.77	3.99	2.78
CFS-N	7.02	1.30	1.80	1.25
CFS-BRB	8.37	1.56	2.94	2.05
AFS-N	5.91	1.10	1.64	1.14
AFS-BRB	8.92	1.66	2.84	1.98

Ratio\* : Proto 실험체의 초기강성에 대한 강성 비

Ratio\*\* : Proto 실험체의 극한강성에 대한 강성 비



〈그림 9〉 유효강성 산출

극한강성에서 모두 높은 값을 나타냈으며 이를 통하여 FRP Sheet와 비좌굴 가새를 모두 보강하는 방법이 콘크리트를 구속시키는 동시에 전단 및 휨 파괴를 지연시킬 수 있는 가장 효과적인 방법임을 확인하였다.

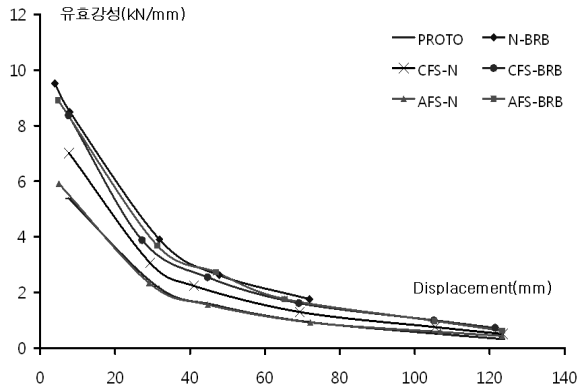
유효강성은 그림 9와 같이 각 사이클의 양의 방향 최대하중과 변위 지점, 음의 방향의 최대하중과 변위 지점을 연결한 직선의 기울기로 정의하며 식 (1)을 통해 산정할 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$K = \frac{(P^+ - P^-)}{(D^+ - D^-)} \quad (1)$$

P<sup>+</sup> : 양의 방향 최대하중 P<sup>-</sup> : 음의 방향 최대하중D<sup>+</sup> : 양의 방향 최대변위 D<sup>-</sup> : 음의 방향 최대변위

그림 10과 같이 48mm에서의 유효강성은 AFS-BRB 실험체가 2.73으로 가장 큰 값을 보였으며 CFS-BRB, N-BRB의 순으로 나타났다. 이를 통하여 FRP Sheet를 보강하는 방법과 비교하여 비좌굴 가새를 적용하는 것이 강성 증가에 더 크게 기여함을 확인하였다.

초기강성, 극한강성, 유효강성을 비교한 결과, 보강 방법에 따라 기준실험체에 비하여 강성의 증가율에 차이가 있었으나 FRP Sheet와 비좌굴 가새를 모두 보강하였을 때 뛰어난 강성 증가의 효과를 나타냈으며, AFRP Sheet와 비좌굴 가새를 보강하는 방법에서 가장 우수한 효과를 확인하였다.



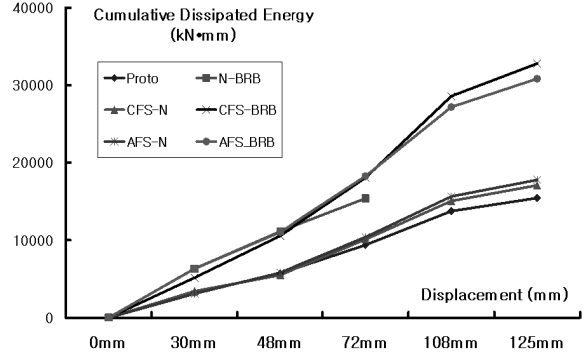
〈그림 10〉 유효강성 비교

〈표 7〉 각 변위에 따른 유효강성

실험체명	변 위(mm)			
	48	72	108	125
Proto	1.54	0.94	0.52	0.32
N-BRB	2.62	1.76	-	-
CFS-N	2.23	1.29	0.75	0.51
CFS-BRB	2.55	1.62	1.00	0.72
AFS-N	1.56	0.92	0.58	0.43
AFS-BRB	2.73	1.76	0.98	0.62

### 3.4 에너지 소산능력

에너지 소산량은 하중-변위 이력곡선의 내부면적으로 정의되며 누적 에너지 소산량은 이력곡선 각 사이클 내부면적의 합으로 계산된다. 에너지 소산능력은 각 첫 번째 사이클의 에너지 소산량을 기준으로 최대하중의 60%까지 저하된 내력 사이클의 누적 에너지 소산량으로 평가하였다. 그림 11은 변위에 따른 실험체의 누적 에너지 소산능력을 나타낸 것으로 해당 변위에서 이력곡선 각 사이클 내부면적의 합을 그래프로 표현하였다. 비좌굴 가새의 유무에 따라 실험체의 누적 에너지 소산능력은 다른 양상을 나타냈다. Proto 실험체는 실험체 중 가장 작은 에너지 소산능력을 나타냈으며 AFS-N 실험체와 CFS-N 실험체는 이보다 11%와 15% 증가한 값을 나타냈다. N-BRB 실험체는 초기에 CFS-BRB 실험체, AFS-BRB 실험체와 유사한 에너지 소산능력을 나타냈으나 72mm 두 번째 사이클에서 기동과 비좌굴 가새 연결부의 파단에 의하여 실험을 중지한 결과, 최종 에너지 소산능력은 Proto 실험체와 동일하였다. FRP Sheet와 비좌굴 가새를 함께 보강한 CFS-BRB 실험체와 AFS-BRB 실험체는 비좌굴 가새로 인한 에너지 소산능력의 향상과 FRP Sheet의 기동 구속효과로 인하여 Proto 실험체보다 두 배 이상 우수한 에너지 소산능력을 나타냈으며 CFS-BRB 실



〈그림 11〉 누적 에너지 소산능력 비교

〈표 8〉 각 변위에 따른 누적 에너지 소산량 (kN·m)

실험체명	변 위(mm)					Ratio*
	30	48	72	108	125	
Proto	3211	5698	9376	13740	15449	100
N-BRB	6335	11141	15395	-	-	100
CFS-N	3410	5496	10091	15056	17080	111
CFS-BRB	5161	10570	18066	28584	32802	212
AFS-N	3086	5802	10405	15646	17781	115
AFS-BRB	6310	11044	18259	27185	30835	200

Ratio\* : Proto 실험체의 누적 에너지 소산량에 대한 에너지 소산량 비

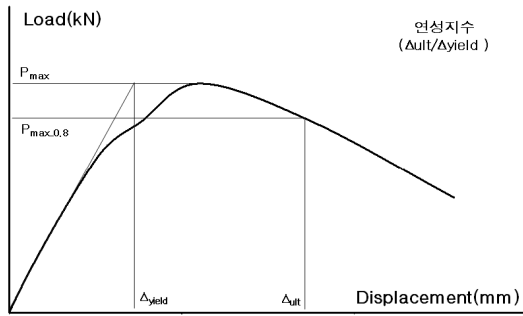
험체는 Proto 실험체보다 112% 증가한 값을 나타내며 에너지 소산능력이 가장 우수한 것을 확인하였다. 각 변위에 따른 각 실험체의 누적 에너지 소산량은 표 8과 같다.

### 3.5 연성지수

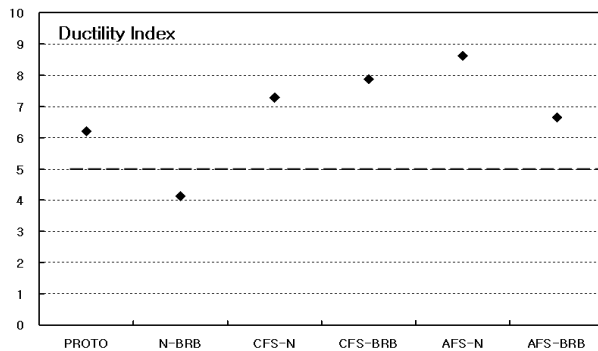
연성은 재료와 단면, 부재의 성질에 따라 구조물이 비탄성 변형에 저항하는 성질을 나타내는 것이다. 연성지수 (Ductility Index)는 이러한 연성을 나타내는 지표로써, 최대하중 이후 실험체의 연성거동을 평가하기 위해 사용하며 식 (2)와 같이 표현된다.<sup>(9)</sup>

$$D = \frac{\delta_{\max-0.8}}{\delta_y} \tag{2}$$

여기에서  $\delta_{\max-0.8}$ 는 최대 하중 이후 하중이 최대하중의 80% 까지 저하된 시점의 변위이며  $\delta_y$ 는 실험체가 항복 했을 때의 변위이다. 그러나 하중-변위 관계에서 정확한 항복변위를 산정하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 그림 12와 같이 Sheikh 등이 제안한 방법을 사용하였다.<sup>(10)</sup> Sheikh 등은 초기강성을 유지하며 최대하중에 도달하였을 때의 변위를 항복변위로 정의하였고 최대하중을 지나 하중이 최대하중의



〈그림 12〉 연성지수 산출



〈그림 13〉 연성지수 비교

〈표 9〉 연성지수

	항복변위 $\Delta_{yield}$ (mm)	극한변위 $\Delta_{ult}$ (mm)	연성지수 $\Delta_{ult}/\Delta_{yield}$	Ratio*
Proto	13.88	86.20	6.21	1.00
N-BRB	12.89	53.10	4.12	0.66
CFS-N	10.86	79.12	7.29	1.17
CFS-BRB	14.38	113.32	7.88	1.27
AFS-N	12.60	108.50	8.61	1.39
AFS-BRB	14.62	97.30	6.66	1.07

Ratio\* : Proto 실험체의 연성지수에 대한 비

80%에 도달하였을 때의 변위를 극한변위로 정의하였다. 따라서 연성지수 D는 각 실험체에서 최대하중 이후 하중이 최대하중의 80%까지 저하된 시점의 변위에 대한 항복하중의 변위 비를 나타낸다.

각 실험체의 연성지수를 비교하면 그림 13과 같다. 비좌굴 가새만으로 보강된 N-BRB 실험체를 제외한 5개의 실험체가 모두 기준실험체보다 우수한 연성지수를 나타냈다. N-BRB 실험체의 경우, 최대하중 이후 단주효과에 의한 기둥의 전단파괴가 발생하여 급격하게 하중이 감소하였으며 이에 따라 기준실험체보다 약 34% 감소된 4.12의 연성지수를 나타내었다. FRP Sheet로 보강된 실험체는 FRP의 종류에 따라 다른 양상을 보였다.

CFS-N 실험체는 7.29의 연성지수를 나타내었으며 CFS-BRB

실험체는 7.88의 연성지수를 나타내며 기준 실험체보다 약 27% 향상된 연성능력을 확인하였다. 또한 AFRP Sheet의 경우 비좌굴 가새를 보강하지 않은 AFS-N 실험체와 AFRP Sheet와 비좌굴 가새를 모두 보강한 AFS-BRB 실험체가 각각 1.39, 1.07의 연성지수를 나타내었다.

비좌굴 가새만을 보강할 경우 단주효과에 의하여 기둥의 연성이 저하되는 것을 확인하였으며 FRP Sheet와 비좌굴 가새를 함께 보강할 경우 더 우수한 연성능력을 발휘할 수 있음을 알 수 있었다. 각 실험체의 연성지수는 표 9와 같다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 FRP Sheet 및 비좌굴 가새를 보강한 보-기둥 접합부 실험체에 대하여 반복 횡가력 실험을 수행함으로써 기둥 및 보-기둥 접합부 실험체의 거동 및 횡력 저항 성능의 향상 정도를 평가하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. FRP Sheet만을 보강하였을 경우, 최대하중 및 유효강성의 측면에서 AFRP Sheet 보다 CFRP Sheet의 보강 효과가 더 우수한 것으로 나타났다. 이는 CFRP Sheet의 높은 탄성계수와 인장강도로 인하여 기둥의 구속효과가 더 뛰어나기 때문인 것으로 판단된다.
2. FRP Sheet만을 보강한 경우보다 비좌굴 가새를 보강한 경우 최대하중의 증가가 더 크게 나타났으며 FRP Sheet와 비좌굴 가새를 혼용하였을 때 더 큰 하중 증가의 효과를 발휘하였다. 이는 FRP Sheet의 기둥 구속 효과와 비좌굴 가새에 의한 에너지 소산 능력의 향상에 의한 것으로 판단된다.
3. 비좌굴 가새만을 보강한 실험체 보다 FRP Sheet를 함께 보강한 실험체에서 더 큰 연성지수 및 에너지소산량을 나타내는 것으로 보아 비좌굴 가새만을 보강하는 방법보다 FRP Sheet를 혼용하는 것이 더 효과적인 보강방법이라 판단된다.
4. AFRP Sheet와 비좌굴 가새 혼용한 AFS-BRB 실험체가 최대하중과 초기강성 측면에서 다소 우수한 성능을 나타냈으며 유효강성, 에너지 소산능력 및 연성의 측면을 고려하였을 경우 CFRP Sheet와 비좌굴 가새를 혼용한 CFS-BRB 실험체가 더 우수한 성능을 보였다. 그러나 보-기둥 접합부의 횡력저항 성능 향상이라는 측면에서 CFRP Sheet와 비좌굴 가새를 혼용하는 보강방법이 더 효과적이라고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원 (과제번호#06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. Black, C.J., Makris, N., and Aiken, I.D., "Component Testing, Seismic Evaluation and Characterization of Buckling-restrained Braces," *J. Struct. Eng.*, Vol.130, No.6, pp.880-894, 2004.
2. Lopez, W.A., Gwie, D.S., Lauck, T. W., and Saunders, C.W., "Structural Design and Experimental Verification of a Buckling Restrained Braced Frame System," *Eng. J.*, Vol.4, 177-186, 2004.
3. ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP system for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2002.
4. CSA-S806-02, Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers, Canadian Standard Association, Rexdale, Toronto, ON, Canada, 2002.
5. Wang, Y., C., and Restrepo, J. I., "Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with GFRP jackets," *ACI structural Journal*, Vol.98, No.3, 377-385, 2001.
6. 서상훈, 유연중, 이영학, 김희철, 이기학, 이한선, "탄소섬유시트와 비좌굴 가새를 이용한 저층 필로티 구조물의 보-기둥 연결부의 횡방향 보강효과에 관한 실험적 연구," 한국지진공학회, 제 13권, 1호, 69-77, 2009.
7. 이 진, 이기학, 정미루, "내진성능에 대한 채널형강으로 보강된 비좌굴 knee bracing system의 실험적 평가," 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 대한건축학회, 제28권 1호, 285-288, 2008.
8. A.G. Tsonos, "Lateral Load Response of Strengthened Reinforced Concrete Beam-to-Column Joints," *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.11, pp.46-56, 1999.
9. Bernardo, L.F.A., Lopes, S.M.R., "Neutral Axis Depth versus Flexural Ductility in High-Strength Concrete Beams," *Journal of Structural Engineering*, Vol.130, No.3, 452-459, 2004.
10. Sheikh, S.A., Khoury, S.S., "A Performance-Based Approach for the Design of Confining in Tie Columns," *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.4, 421-431, 1997.