

조립식 좌굴방지가새형 이력댐퍼의 초기형상설계에 따른 구조성능시험

Structural Performance Test according to Initial shape design of PF-BRB

김 유 성*
Kim, Yu-Seong

이 준 호**
Lee, Joon-Ho

Abstract

In this study, a prefabricated buckling brace (PF-BRB) was proposed, and a test specimen was manufactured based on the design formula for the initial shape and structural performance tests were performed. As a result of the experiment, all standard performance requirements presented by KDS 41 17 00 and MOE 2021 were satisfied before and after replacement of the reinforcement module, and no fracture of the joint module occurred. As a result of the incremental load test, the physical properties showed a significant difference in the stiffness ratio after yielding under the compressive load of the envelope according to the experimental results. It is judged necessary to further analyze the physical properties according to the experimental results through finite element analysis in the future.

Keywords : *Buckling restrained Brace, Seismic reinforcement, Engineering plastics, Cycling loading test, Damper*

1. 서론

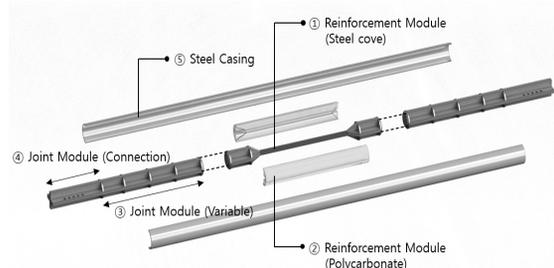
대다수의 내진보강현장에서 실 적용되고 있는 좌굴방지가새의 보강재는 모르타르를 타설하는 습식공정으로 시공성 및 제작효율 저하로 인해 오차발생의 확률이 증가하는 문제점이 발생¹⁾하게 된다. 또한 비탄성 변형을 하는 심재에 극한하중이 작용할 경우 영구변형이 생기게 되며 손상된 심재만 교체가 불가하므로 가새골조 전체를 철거하여 보수해야 한다. 이러한 단점을 보완하여 이미 국내외적으로 건식공정의 좌굴방지가새에 대한 연구를 수행되고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 좌굴방지가새의 조립식 공정의 적용과 심재의 모듈화를 통해 건식으로 제작이 가능한 조립식 좌굴가새(PF-BRB, Prefabricated Buckling Restrained Brace)를 제안하였다. PF-BRB는 일체형으로 되어있는 기존의 비좌굴가새와 달리 강재 이력

댐퍼로서의 역할을 할 수 있는 보강모듈과 기존골조와 접합이 되는 접합모듈을 분리한 형태이며 보강재로 엔지니어링 플라스틱(Engineering Plastics)을 사용하여 건식제작이 가능하도록 하였다. 이에 본 연구를 통해 PF-BRB의 초기형상에 대한 설계식을 기반으로 실험체를 제작하여 구조성능시험을 수행하였으며, 내진성능 및 물리적특성을 분석하였다.

2. 조립식 좌굴방지가새

2.1 조립식 좌굴방지가새 구성

PF-BRB의 구성을 <Fig. 1>과 같이 나타내었다.



<Fig. 1> Composition of PF-BRB

* 주저자, (주)플러스구조 과장, 박사수료
Plus Structural Engineers & Associates Manager
** 교신저자, 정희원, 서일대학교 건축학부 조교수, 공학박사
School of Architecture, Seoil University
Tel: 02-490-7427 Fax: 02-490-7808
E-mail: 2019022@seoil.ac.kr

PF-BRB는 비탄성 변형에 의해 에너지소산역할을 하는 보강모듈과 보강모듈내 심재가 충분한 변형을 할 수 있도록 탄성지지되는 접합모듈로 구성되어있으며, 각 모듈이 분리되어 볼트접합을 통해 결합 및 재보수가 가능하도록 고안하였다. 이러한 좌굴방지개사의 모듈화를 통해서 가새부재의 길이가 긴 경우를 대비하여 제작성을 높이고 지진피해 후 심재가 영구변형을 하였을 때 보강모듈만 교체할 수 있도록 하여 재공사비의 절감을 가능하다.

보강모듈의 경우 심재와 횡좌굴방지요소인 공업용 플라스틱 및 외부 케이싱으로 결합되어 있는 구속항복구간으로 기존의 좌굴방지개사에서 심재가 받는 축력을 전달하지 못하도록 비부착물질을 도포하는 것과 달리 공업용 플라스틱의 적은 마찰계수를 이용하여 심재와 보강재 사이에 적정간격으로 이격만 시켜 결합하였다. 보강재에 사용되는 공업용 플라스틱은 폴리카보네이트(Polycarbonate)를 적용하였으며, 좌굴방지개사에 대다수 적용되는 보강재인 모르타르와 비교하였을 때 등등이상의 압축강도를 지니며 연신율이 우수하고 경량인 장점을 가지고 있다.

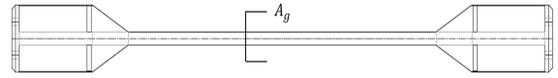
접합모듈은 십자플레이트 형태로 구속 비항복구간, 비구속 비항복구간을 포함하는 접합부분으로 보강이 필요한 스팬과 높이에 따라 길이를 가변하여 설계한다. 접합모듈의 접합플레이트는 보강모듈의 비탄성 변형을 할 수 있도록 탄성구간으로 설계가 되며 보강모듈의 교체 후에도 재사용이 가능하도록 최대내력에 대한 구조적 안정성을 확보하여 설계된다.

2.2 실험체의 형상설계

2.2.1 보강모듈의 설계

PF-BRB의 심재는 <Fig. 2>과 같이 작용하는 전체 축력을 지지할 수 있도록 별도의 이음부 없이 설계하며, 압축/인장 항복강도(P_y)는 식 (1)과 같이 산정한다. 여기서, $F_{y_{sc}}$ ($\phi=0.9$)는 강재코어의 공칭항복 응력 또는 인장시험에 의해 결정된 심재의 실제 항복 응력(MPa)이며, A_g 는 심재의 순단면적(mm²)이다.

$$P_y = \phi F_{y_{sc}} A_g \quad (1)$$



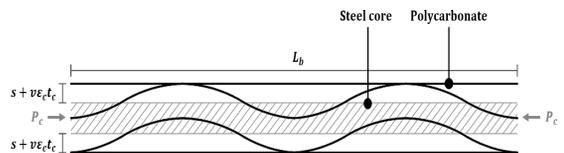
<Fig. 2> Steel Core of Reinforcement Module

보강모듈과 접합모듈을 연결하여 주는 고장력볼트는 인장접합의 안정성을 검토해야한다. 이에 따라, 고장력볼트의 설계인장강도(F_{nt})는 식 (2)를 통해 산정할 수 있으며, 좌굴방지개사의 최대인장내력 이상으로 설계하여야 한다. 여기서, F_u 는 고장력볼트의 공칭인장강도, A_b 는 고장력볼트의 공칭단면적(mm²), N_s 는 고장력볼트 개수(ea), ϕR_n ($\phi=0.75$)는 고장력볼트 최대인장강도, T_{max} 는 좌굴방지개사의 심재가 받을 수 있는 최대인장내력이다.

$$F_{nt} = 0.75 F_u \quad (2)$$

$$\phi R_n = F_{nt} A_b N_s \geq T_{max} \quad (3)$$

보강재의 경우 심재의 비탄성변형 구간에서 좌굴구속력만 받을 수 있도록 설계하여야 한다. 따라서, 심재와 보강재인 폴리카보네이트 사이의 이격공간을 두어야 하며, 압축하중 하에서 심재의 포와송효과에 의한 팽창으로 보강재가 압축력을 받을 수 있기 때문에 심재의 좌굴변형에 의한 구속력만 받을 수 있도록 <Fig. 3>과 같이 적정간격이 필요²⁾하다.



<Fig. 3> Interval between core and Filler

심재와 폴리카보네이트 사이의 적정간격은 식 (4)과 같이 압축하중시 축방향에 변형에 대한 강재의 포와송효과를 고려하여 산정하였다. 여기서, s_1 는 비부착물질층의 두께로 비부착물질이 없는 것을 가정하여 1~2mm로 산정, v 는 강재의 포와송비, ϵ_c 는 최대변위에서 강재의 축방향 변형률, t_c 는 심재의 두께이다.

$$S = s_1 + v\epsilon_c t_c \quad (4)$$

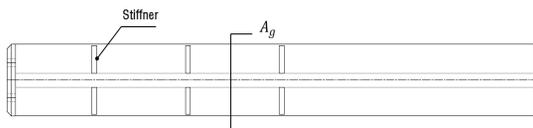
외부케이싱은 Watanabe et al.(1988)³⁾이 제안한 식에 근거하여 식 (5)와 식 (6)과 같이 심재 항복강도에 대한 외부 케이싱의 좌굴강도가 1.5배 이상의 값을 갖도록 안정성을 검토하였다. 여기서, E 는 강재의 탄성계수($2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$) I_t 는 보강재의 단면 2차모멘트, L 는 보강재의 길이이다.

$$P_e = \frac{\pi^2 EI_t}{L^2} \quad (5)$$

$$P_e/P_y \geq 1.5 \quad (6)$$

2.2.2 접합모듈의 설계

접합모듈은 <Fig. 4>과 같이 십자형태의 플레이트로 형상적인 특성으로 인해 발생하는 휨-비틀림 국부좌굴을 방지하기 위해 스티프너를 결합하였다. 접합플레이트는 심재의 비탄성변형시 압축 및 인장하중하에서 변형 혹은 파단이 없어야 하며, 보강모듈 교체 후에도 이전과 같은 내력을 가지도록 설계하였다.



<Fig. 4> Connection Plate of Joint Module

(1) 인장하중의 안정성 검토

인장하중에 대한 안전성은 식 (7) ~ 식 (9)과 같이 총단면의 항복강도(P_{n1}), 유효순단면의 파단강도(P_{n2}), 블록전단파단강도(P_{n3})중 최솟값이 PF-BRB가 받는 최대 인장내력이상이 되도록 설계하여야 한다. 여기서, F_y 는 항복강도(MPa), F_u 는 인장강도(MPa), A_e 는 유효순단면적(mm^2), A_g 는 총단면적(mm^2), A_{gv} 는 전단저항 총단면적(mm^2), A_{nv} 는 전단저항 순단면적(mm^2), A_{nt} 는 인장저항 순단면적(mm^2)이다.

$$\text{Min}(P_{n1}, P_{n2}, P_{n3}) \geq T_{\max} \quad (7)$$

Case 1) 총단면 항복

$$P_{n1} = \phi F_y A_g \quad (\phi=0.90) \quad (8)$$

Case 2) 유효순단면파단

$$P_{n2} = \phi F_u A_e \quad (\phi=0.75) \quad (9)$$

Case 3) 블록전단파단

$$P_{n3} = [0.6F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt}] \leq [0.6F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt}] \quad (10)$$

(2) 압축하중의 안정성 검토

압축하중 하에서 접합모듈의 접합플레이트가 보강모듈 교체 전/후의 반복하중 하에서 좌굴되지 않도록 설계강도는 압축항복강도(R_{n1})와 탄성좌굴강도(R_{n2})중 최솟값으로 검토하여야 하며 PF-BRB의 압축하중 하에서 받는 극한내력보다 크게 설계되어야 한다. 여기서, F_y 는 항복강도(MPa), A_g 는 총단면적(mm^2), F_{cr} 는 탄성좌굴강도이다.

$$\text{Min}(R_{n1}, R_{n2}) \geq P_{\max} \quad (11)$$

Case 1) 총단면 항복

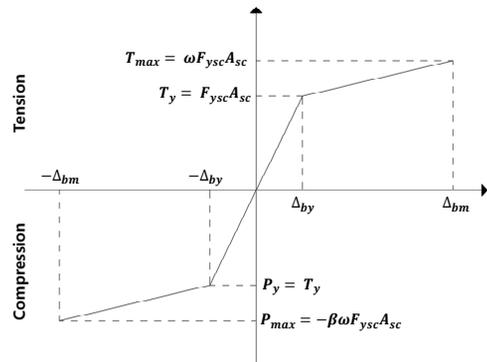
$$R_{n1} = \phi F_y A_g \quad (\phi=0.90) \quad (12)$$

Case 2) 휨좌굴에 의한 압축강도

$$R_{n1} = \phi F_{cr} A_g \quad (\phi=0.90) \quad (13)$$

2.3 이론적 포락선

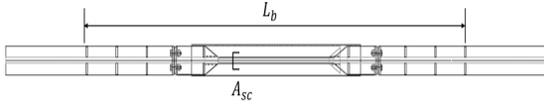
PF-BRB의 이론식에 의한 비선형 이력곡선은 <Fig. 5>과 같이 이선형곡선(Bilinear Curve)으로 가정하여 나타내었다.



<Fig. 5> Bilinear Curve of PF-BRB

(1) 초기강성, 항복변형 산정

PF-BRB의 초기강성과 항복변위는 축력을 받는 압축재의 역학적특성에 따라 식(14)과 식(15)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, u_{by} =항복변위, L_b =가새전체길이, σ_y =가새항복응력, E_b =탄성계수이다.



<Fig. 6> Plan of PF-BRB

$$K_{int} = \frac{EA_{sc}}{L_b} \quad (14)$$

$$u_{by} = \frac{L_b \times \sigma_{by}}{E_b} \quad (15)$$

(2) 압축/인장 최대강도 산정

PF-BRB의 압축/인장 최대강도(P_{max} , T_{max})는 조정가새강도(Adjusted brace strength)에 의해 산정되며, 압축강도 조정계수(β)와 인장강도 조정계수(ω)를 심재의 항복강도($F_{y_{sc}}$)에 곱하여 식(16), 식(17)과 같이 산정한다. 압축강도 조정계수(β)와 인장강도 조정계수(ω)는 Seismic Provisions(AISC, 2016)⁴)에서 제시한 가력조건에 따라 증분가력실험 결과를 기반으로 식 (18)과 식 (19)과 같이 정의한다. 여기서 A_{sc} 는 구속 항복구간 코어 심재의 단면적, T_{max} 는 인증실험결과로부터 설계증간변위의 2.0배에 상당한 최대 인장력(N), P_{max} 는 인증실험결과로부터 측정된 최대 압축력(N), A_{sc} 는 구속 항복구간 심재의 단면적, $F_{y_{sc}}$ 는 측정된 심재의 항복강도(MPa)이다.

$$C_{max} = \beta \omega F_{y_{sc}} \quad (16)$$

$$T_{max} = \omega F_{y_{sc}} \quad (17)$$

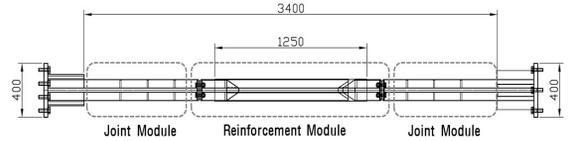
$$\beta = \frac{\beta \omega F_{y_{sc}} A_{sc}}{\omega F_{y_{sc}} A_{sc}} = \frac{P_{max}}{T_{max}} \quad (18)$$

$$\omega = \frac{\omega F_{y_{sc}} A_{sc}}{F_{y_{sc}} A_{sc}} = \frac{T_{max}}{F_{y_{sc}} A_{sc}} \quad (19)$$

3. 구조성능실험

3.1 실험체계획

PF-BRB의 보강모듈 교체 전/후 표준요구성능 만족여부를 분석하기 위해 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)⁵) 및 학교시설 내진성능평가 및 보강매뉴얼(MOE 2021)⁶)에 따른 반복재하실험을 수행하였으며, PF-BRB의 물리적특성을 분석하기 위해 증분가력실험을 수행하였다. 실험체의 도면은 <Fig. 7>과 같으며 초기실험 종료 후 보강모듈을 교체할 수 있도록 접합모듈과 분리하여 볼트로 접합하였다.



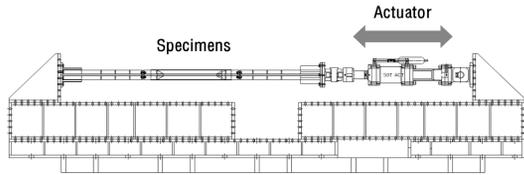
<Fig. 7> Detail of Specimen

실험체는 SM275 강재를 사용하였으며, 보강재는 폴리카보네이트를 심재주위로 보강하고 외부케이싱을 결합하였다. 보강모듈과 접합모듈의 접합간 플레이트는 고정력볼트로 체결하였으며 액츄에이터의 용량을 고려하여 F10T($F_y = 900MPa$), M16(표준 볼트구멍 직경 : 18mm)의 고정력볼트 4개를 체결하여 인장강도 약 452kN으로 설계하였다. 심재의 크기는 30mm X 20mm의 직사각형 형태로 계획하였다. 접합 플레이트는 PF-BRB의 최대내력 500kN을 가정하여 2장에서의 설계식을 바탕으로 설계단면이 압축/인장강도 이상으로 내력을 가질 수 있게 설계하였다. 반복재하 실험체는 <Table 1>과 같이 각 가력방법에 따라 초기 실험체인 PF-TRI-I, PF-QUA-I로 계획하였고 초기 실험 후 변형된 보강모듈만 교체한 PF-TRI-R, PF-QUA-R으로 동일한 가력조건으로 재실험하였다.

<Table 1> Plan of Specimen

Specimen	Test	Load Protocol
PF-TRI-I	Initial Test(Cycling Load)	KDS 41 17 00
PF-TRI-R	Re-Test(Cycling Load)	KDS 41 17 00
PF-QUA-I	Initial Test(Cycling Load)	MOE 2021
PF-QUA-R	Re-Test(Cycling Load)	MOE 2021
PF-AINC	Initial Test	AISC 2016

가력방법은 500kN 용량의 유압 서브 액츄에이터를 사용하여 수평방향으로 변위제어를 통한 일축가력실험으로 (Fig. 8)과 같이 수행하였다. 또한, 면외좌굴을 방지하기 위해 중심코어 양옆에 가이드 플레이트를 설치하였다.



(a) Loading Test Setup

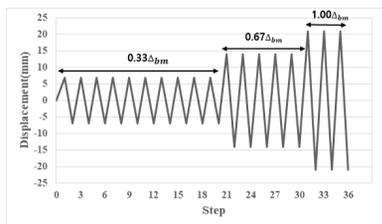


(b) Picture of Loading Test Setup
<Fig. 8> Loading Test Setting

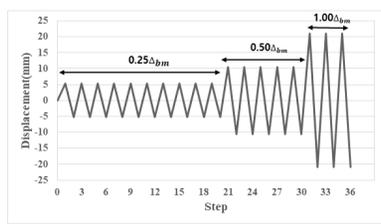
3.2 표준요구성능

반복재하실험의 표준요구성능은 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00) 및 학교시설 내진성능평가 및 보강매뉴얼(MOE 2021)에서 제시하는 표준 가력프로토콜에 따라 가력하여 각각의 요구성능에 대한 만족여부를 분석하도록 명시되어있다.

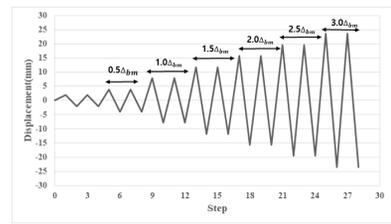
각 재하실험별 하중프로토콜은 (Fig. 9)과 같이 나타내었다. 반복재하실험(KDS 41 17 00)의 하중프로토콜은 목표변위(Δ_m) 20mm의 0.33배를 10회, 0.67배를 5회, 1.0배를 3회로 설정하여 실험을 수행하였으며 반복재하실험(MOE 2021)의 하중프로토콜은 목표변위(Δ_m) 20mm의 0.25배를 10회, 0.5배를 5회, 1.0배를 3회로 설정하였다. 증분가력실험의 가력조건은



(a) KDS 41 17 00



(b) MOE 2021



(c) AISC 2016

<Fig. 9> Load Protocol for Loading Test

“Seismic Provisions for Structural Steel Building(AISC, 2016)”⁴⁾내 “Prequalification And Cyclic Qualification Testing Provisions”에 근거하여 실험체가 최소 항복변위(D_{by})의 200배 이상 누적 축변형을 받도록 목표변위(D_{bm})에서 증분시켜 가력하였다. 반복재하실험의 표준요구성능은 KDS 41 17 00 및 MOE 2021에서 제시하는 하중프로토콜에 따라 반복재하실험을 수행하여 다음의 표준요구성능을 만족하여야 한다.

(1) KDS 41 17 00

- 임의 회차의 반복재하 시 방향별 최대 장치변위에서의 하중이 모든 반복재하로부터 산정된 평균치의 15% 이내
- 임의 회차의 반복재하 시 감쇠장치의 이력곡선 면적이 모든 반복재하로부터 산정된 평균치의 15% 이내

(2) MOE 2021

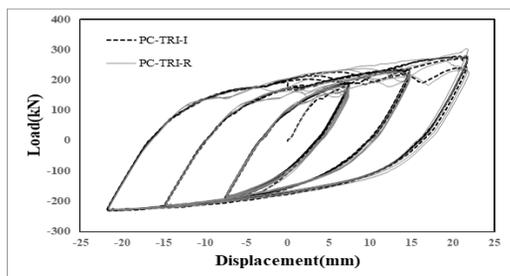
- 임의의 한 사이클에 대한 시제품 장치의 유효강성 k_{eff} 이 실험의 모든 사이클로부터 계산되는 평균 유효강성과 $\pm 15\%$ 이내
- 임의의 한 사이클 내 시제품 장치의 이력곡선의 면적이 실험의 모든 사이클로부터 계산되는 이력곡선의 평균면적과 $\pm 15\%$ 이내

3.3 반복재하실험

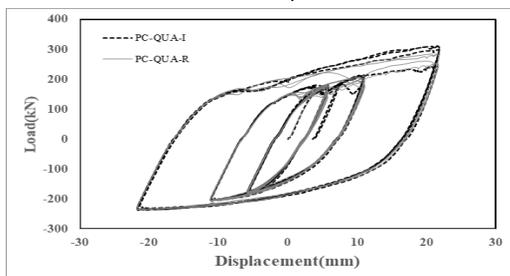
3.3.1 하중-변위곡선

<Fig. 10>은 KDS 41 17 00와 MOE 2021의 가력조건에 따른 반복재하실험 결과 하중-변위곡선을 나타

낸 그래프이며, <Table 2>은 가력주기별 최대변위에서의 압축/인장강도를 나타낸 표이다.



(a) PF-TRI Specimen



(b) PF-QUA Specimen

<Fig. 10> Load-Displacement Curve

<Table 2>에서 나타낸바와 같이 PF-TRI-I와 PF-TRI-R 실험체의 압축하중 가력시 사이클별 평균 최대내력 비교결과 1Cycle에서는 PC-TRI-I의 최대

내력이 PC-TRI-R에 비해 약 8.1% 낮게 나타났으며, 2Cycle에서는 약 4.1%, 3Cycle에서 약 8.2%로 심재 교체전에 비해 미소하게 내력이 감소하였으나 이는 보강모듈의 재조립 과정에서 폴리카보네이트와 심재의 비구속 항복구간 사이에 조립간격의 차이로 인해 미소하게 차이가 난 것으로 판단된다. 실험종료 후 폴리카보네이트와 외부케이싱에서 파단은 발생하지 않았고 접합모듈의 접합부 상태와 주기별 인장하중 하에서 내력이 유사하게 나타난 것으로 보아 접합모듈의 접합부는 보강모듈의 교체 후에도 보강재와 접합부는 충분히 안정성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

(1) 가력주기별 강도 적합성

KDS 41 17 00의 금속항복형 감쇠장치의 적합성 요구조건에 따르면 임의 회차의 반복재하 시 방향별 최대 장치변위에서의 하중이 모든 반복재하로부터 산정된 각각 평균치의 15% 이내로 만족하여야 한다. 이는 감쇠장치의 급격한 내력저하를 방지하기 위한 요구조건으로 <Table 2>에서 나타낸 바와 같이 PF-TRI-I와 PF-TRI-R 실험체 모두 급격한 내력저하 없이 압축 및 인장하중 하에서 받는 주기별 내력은 평균치의 ±15% 이내로 요구성능을 만족하였다.

<Table 2> Load by Cycle in Cycling Loading Test

Cycle	PF-TRI-I (KDS 41 17 00)			PF-TRI-R (KDS 41 17 00)		
	Max Dis. Strength	Average	Criteria (Avg±15%)	Max Dis. Strength	Average	Criteria (Avg±15%)
1	Comp Max (Min)	191.08 (180.38)	216.37 ≥	184.49 (162.79)	172.94	198.88 ≥
	Ten Max (Min)	195.87 (185.69)	≥ 159.92	193.45 (183.56)	188.56	Range ≥ 146.99
			219.85 ≥			216.84 ≥
2	Comp Max (Min)	235.45 (219.17)	Range ≥ 162.49	238.16 (203.89)	221.05	254.21 ≥
	Ten Max (Min)	216.15 (219.33)	≥ 195.77	216.12 (211.21)	214.42	Range ≥ 187.89
			250.42 ≥			246.58 ≥
3	Comp Max (Min)	277.58 (245.53)	Range ≥ 185.09	282.38 (240.67)	262.32	301.67 ≥
	Ten Max (Min)	231.61 (228.48)	≥ 225.41	231.07 (229.19)	229.96	Range ≥ 222.97
			264.85 ≥			264.46 ≥
		Range ≥ 195.76			Range ≥ 195.47	

(2) 가력주기별 유효강성

〈Table 3〉은 가력주기별 유효강성을 나타낸 표이다. MOE 2021에 따르면 임의의 한 사이클에 대한 시제품 장치의 유효강성 k_{eff} 이 실험의 모든 사이클로부터 계산되는 평균 유효강성의 $\pm 15\%$ 이내로 확보하여야 하며, 가력주기별 유효강성은 식 (20)과 같이 산정하였다. 여기서 F^{\pm} 는 사이클 별 최대변위에서의 압축강도 및 인장강도, Δ^{\pm} 는 사이클 별 최대변위이다.

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (20)$$

PF-QUA-I 실험체와 PF-QUA-R 실험체의 각 사이클별 유효강성은 평균 유효강성의 $\pm 15\%$ 이내로 요구성능을 만족하였으며, PF-QUA-I 실험체와 PF-QUA-R 실험체의 가력주기별 평균유효강성을 비교하여 보았을 때 최대 약 1.05배 이내로 유사하게 나타났다.

〈Table 3〉 Effective Stiffness of Specimen

Cycle	PF-QUA-I (MOE 2021)		PF-QUA-R (MOE 2021)		
	Effective Stiffness	Criteria (Avg $\pm 15\%$)	Effective Stiffness	Criteria (Avg $\pm 15\%$)	
1	Max	31.29	34.88	11.78	34.30
	Min	29.71	25.78	11.54	25.35
2	Max	18.89	21.19	18.46	20.27
	Min	17.04	15.67	16.87	14.98
3	Max	12.30	13.54	11.68	12.88
	Min	10.85	10.00	10.91	9.52

(3) 가력주기별 에너지소산량

〈Table 4〉은 가력 주기별 에너지소산량을 나타낸 표

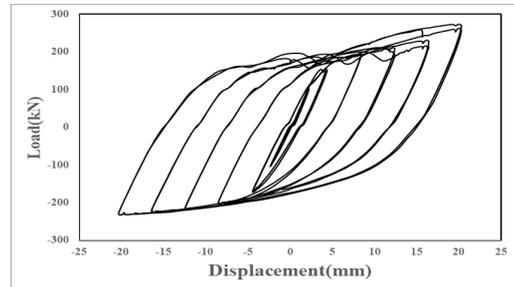
〈Table 4〉 Energy Dissipation of Specimens

Cycle	PF-TRI-I (KDS 41 17 00)		PF-TRI-R (KDS 41 17 00)		PF-QUA-I (MOE 2021)		PF-QUA-R (MOE 2021)		
	Eloop area (kN·mm)	Criteria (Avg $\pm 15\%$)	Eloop area (kN·mm)	Criteria (Avg $\pm 15\%$)	Eloop area (kN·mm)	Criteria (Avg $\pm 15\%$)	Eloop area (kN·mm)	Criteria (Avg $\pm 15\%$)	
1	Max	1554.13	1670.63	1597.72	1773.97	922.80	987.11	855.00	901.17
	Min	1408.11	1234.82	1484.71	1311.20	818.45	729.61	743.30	666.08
2	Max	6389.52	6422.06	5587.54	6372.76	3521.81	3984.89	3409.69	3855.29
	Min	5339.96	4764.74	5406.65	4710.29	3340.89	2945.36	3282.97	2849.57
3	Max	10233.27	11667.98	10656.23	11883.98	10931.57	12391.80	10701.66	12194.84
	Min	10062.91	8624.16	10109.87	8783.81	10481.15	9159.16	10434.81	9013.58

이다. 보강모듈의 교체 전/후의 반복재하실험체 모두 가력주기별 에너지소산량은 평균치의 $\pm 15\%$ 이내로 요구성능을 만족하였다. 반복재하실험체(PC-TRI)의 가력주기별 에너지소산량의 평균을 비교하여 보았을 때 PF-TRI-I 실험체가 PF-TRI-R 실험체에 비해 최대 1.06배, PF-QUA-I 실험체가 PF-QUA-R 실험체에 비해 최대 1.09배 차이로 유사하게 나타났다.

3.4 증분가력실험

증분가력실험 결과 하중-변위 그래프를 〈Fig. 6〉과 같이 나타내었으며, 물리적특성과 이선형곡선으로 이상화하여 〈Table 5〉과 〈Fig. 11〉과 같이 나타내었다.



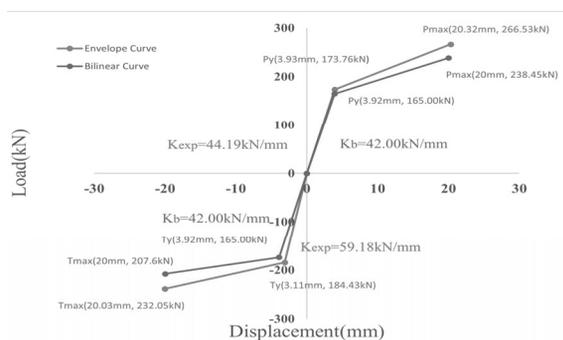
〈Fig. 11〉 Load-Displacement Curve(PF-AINC)

실험결과에 의한 포락선과 이선형곡선을 통한 이론적 포락선의 초기강성과 항복강도는 각각 4.95%와 5.04% 차이로 비교적 유사하게 나타났으나, 압축하중 하에서 항복후 강성비가 다소 높게 나타났다. 이는 보강모듈과 접합모듈간의 재축방향 단면적이 일정하지 않은 것으로 인한 축강성의 차이로 높게 나타난 것으로 판단되며 유한요소해석모델을 통해 추가적으로 비

교분석 하여 이력특성을 정의할 필요가 있다고 판단 된다.

〈Table 5〉 PF-BRB Properties)

Properties	Exp. (Comp)	Exp. (Ten)	Bi-linear (Comp)	Bi-linear (Ten)
Yield Strength(kN)	173.76	184.43	165	165
Yield Disp(mm)	3.93	3.11	3.92	3.92
Initial Stiff(kN/mm)	44.19	59.18	42.00	42.00
Post-Yield Stiff (kN/mm)	5.65	2.81	4.57	2.06
Post-Yield Stiff Ratio(β)	0.12	0.04	0.10	0.05
Max Strength(kN)	266.53	232.05	238.45	207.60
Max Disp(mm)	20.32	20.03	20	20



〈Fig. 12〉 Comparison with Bilinear Curve

5. 결론

본 연구에서는 모듈화를 통한 조립식 좌굴방지가새를 제안하여 초기형상설계안을 제안하였으며, 구조성능실험을 통해 보강모듈 교체 전/후의 금속이력형 락 파괴로서의 표준요구성능 만족여부와 물리적특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 반복가력실험 결과 보강모듈의 교체 전/후 실험체의 가력주기별 강도, 유효강성 및 에너지소산량이 평균치의 $\pm 15\%$ 이내로 KDS 41 17 00와 MOE 2021에서 제시하는 표준요구성능을 모두 만족하였다.

2) 보강모듈이 교체된 실험체에서 미소하게 내력이 감소하는 구간은 보강모듈의 재조립 과정에서 폴리카보네이트와 심재의 비구속 항복구간 사이에 조립간격의 차이로 인해 미소하게 차이가 난 것으로 판단된다.

3) 보강모듈의 교체 전/후 실험체 모두 이력거동이 안정적이었으며, 실험종료 후 접합모듈의 접합부에 파

단이 발생하지 않는 것으로 보아 보강모듈의 교체 후에도 보강재와 접합부는 충분히 안정성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

4) 증분가력실험 결과에 따른 물리적특성을 설계식에 의한 이선형곡선과 실험결과에 의한 포락선과 비교하여 볼 때 초기강성과 항복강도는 유사하게 나타났으나, 압축하중 하에서 항복 후 강성비가 차이가 크게 나타났다.

추후 유한요소해석을 통해 실험결과에 따른 이력특성을 추가적으로 분석할 필요가 있으며 보강모듈의 교체과정에서 조립오차를 개선한 연구를 진행할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 신진연구자 지원 사업 과제(NRF-2020R1C1C1005779)에 의해 수행되었습니다.

References

- Shin, S. H., & Oh, S. H., "Hysteresis Characteristics of Buckling Restrained Brace with Precast RC Restraining Elements", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.20, No.1, pp.72~84, 2016
DOI:<https://doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.1.072>
- Kwon, S. H., "Experimental Study on the Component Capacity of Buckling-Restrained Braces", M.S, Dept. of Architectural Engineering Graduate School of Korea University, pp.30~31, 2005
- Watanabe et al., "Properties of Brace Envised in Buckling-Restraining Concrete and Steel Tube", Proceedings of the 9th world Conference on Earthquake Engineering, pp.719~724, 1988
- AISC, "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", pp.401~403, 2016

5. Architectural Institute of Korea, "Seismic Building Design Code and Commentary : KDS 41 17 00", pp.136~139, 2019
 6. Ministry of Education, "Seismic Performance Evaluation and Reinforcement Manual for School Facilities", pp.97, 2021
- Received : October 13, 2023
 - Revised : November 21, 2023
 - Accepted : November 21, 2023