

주요부재 손상방지를 위한 엔드플레이트형 무용접 보강 접합부의 내진성능 평가

박수민¹ · 오상훈^{2*}

¹석사과정, 부산대학교, 건축공학과, ²교수, 부산대학교, 건축공학과

Seismic Performance Evaluation of End-Plate Type Non-Welded Reinforced Joints for Major Member Damage Prevention

Park, Su Min¹, Oh, Sang Hoon^{2*}

¹Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Abstract - This study addresses a reinforcement method for beam-column connections using Energy Absorption Stiffeners (EAS) to prevent damage to principal structural members such as beams and columns. To facilitate the application of joint reinforcement in existing structures, a non-welded and non-drilled connection detail considering field conditions is proposed. A quasi-static cyclic loading test was conducted to evaluate the damage mitigation effect on principal members, and finite element analysis(FEA) was performed to enhance the performance of the EAS. Through parametric analysis of stiffener thickness, a key influencing factor, the optimal yield strength ratio of the EAS to the beam was determined. The results indicate that beam damage was mitigated when the yield strength ratio was approximately 0.34 or lower.

Keywords - Reinforced joints, Non-welded connection, Non-drilled connection, Energy absorption, Damage prevention, Strength ratio, End-plate type

1. 서론

대지진 시 철골 구조물의 내진성능 확보를 위해서는 접합부 강도 확보 및 취성파단 방지가 중요시되며, 접합부 보강에 관해서는 현치 보강, RBS(Reduced Beam Section) 보강, 수평스티프너 보강 등 다수의 선행연구가 이루어져 왔다. 이러한 보강 방법들은 공통적으로 접합부에 발생하는 소성힌지 위치를 의도적으로 조절하여 접합부의 취성파단을 방지하기 위함이며, 내진성능 향상 효과 및 시공이 간편하다는 장점이 있다. 일반적으로 가장 많이 수행하는 접합부 보강 방식은 용접을 통한 현치 보강 방법으로, Uang and Bondad^[1]의 관련 연구에서 현치 용접 보강 시 변형능력 및 에너지 소산

능력 향상을 기대할 수 있었으나 현치가 접합된 주요부재의 국부좌굴 및 취성파단이 발생하였다. Oh and Kim^[2]의 연구에서 RBS 보강 시 보의 파단을 지연시킨 했으나 인위적인 보 단면 감소는 보 플랜지 파단으로 이어졌으며 접합부 변형능력을 크게 향상시키지는 못하였다. Oh and Park^[3]의 연구에서 보 단부 하부 플랜지의 응력 완화를 위해 보 플랜지에 수평스티프너를 용접하여 소성힌지 발생위치를 접합부 열영향부에서 보 내부로 이동시켰으나, 수평스티프너 용접 시 플랜지 단면의 급격한 변화는 수평스티프너와 접합된 보의 응력집중으로 인한 취성파단을 발생시켰다.

현치, knee brace 보강공법은 내진성능 향상 및 시공성 측면에서 보편적으로 많이 적용되는 접합부 보강방법이다. 구조물 보강에서 내진성능을 향상시키는 것이 주요 관심사이긴 하나 주요부재의 손상을 방지하는 것 또한 간과해서는 안된다. 구조물에서 슬래브는 다이아프램 역할로서 전단력을 구조물 전체로 분산시키지만 파이프랙과 같이 슬래브가 없는 경우 구조부재 손상 시 강역으로서의 역할을 제대로 수행하지 못한다. 특히 보

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 18, 2024; revised November 18, 2024; approved on November 19, 2024. Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-7608 Fax. +82-51-514-2230

E-mail. osh@pusan.ac.kr

부재 손상 시 구조물 전체에 대한 손상이 크게 증가하기 때문에 보의 손상을 방지하는 것이 무엇보다도 중요시된다. 또한 대지진 발생 시 구조부재 손상으로 인한 수리 및 교체가 필요하며, 이때 발생하는 비용 및 사용자의 활동 중단으로 인한 기회비용 등 경제적 비용이 막대할 것이다. 따라서 입력된 에너지를 보강체에서 흡수하여 주요부재로의 응력집중을 감소시킬 수 있는 보강법이 필요하며 그 방안으로 노치형 스티프너 형상을 적용하고자 한다.

기존 건축물에 대한 내진보강 시 접합부 보강 공법을 적용하기 위해서는 현장에서 용접 접합 또는 볼트접합을 수행하여야 한다. 이에 따라 보강 작업 진행 시 실제 현장상황에 대한 고려가 필요하며 이는 현실적인 제약을 수반한다. 화재에 약한 철골 구조물의 경우 용접 시 고온, 인화성 물질로 인한 화재 발생 위험이 증가하므로 무용접 보강법을 실시해야 한다. 무용접을 위해서는 모든 접합에 대하여 볼트접합으로 수행해야 하며 이때 주요부재의 볼트 홀 천공은 불가피하다. 주요부재에 볼트 홀을 천공하는 경우 주요부재 및 매설된 배선 손상과 더불어, 구조물이 복잡하고 여유 공간을 충분치 않을 시 현장 작업에 어려움을 겪을 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 시공과정에서 공장 제작된 보강 스티프너 간의 볼트접합으로 현장 작업을 최소화하는 것이 가능하다. 또한 보강체 간 볼트접합 시 보강체 접합부는 힌지로 작용하며 볼트 슬립 발생 가능성이 증가한다. 볼트 슬립을 방지하기 위해 추가 부품을 접합하는 다소 복잡한 형상을 적용하더라도 엔드플레이트 볼트구멍과 같은 기존 구조물의 볼트구멍을 활용하여 기존의 부재에 보강 스티프너를 결속할 필요가 있다.

본 연구에서는 주요부재의 손상 방지를 위한 에너지 흡수형 보강 형상에 대하여 무용접·무천공 접합을 적용한 보강 접합부의 내진성능을 평가하고자 한다.

2. 실험체 상세 및 실험계획

2.1 실험체 상세

접합부 보강상세에 따른 내진성능 평가를 위해 반복 가력 정적실험을 진행하였으며 실험체는 Table 1 및 Fig. 1과 같이 보강 유무에 따라 총 4가지로 선정하였

다. 기본 엔드플레이트형 접합부에 대하여 주요부재에 직접 볼트 홀을 천공한 후 볼트접합한 접합부 보강법과 주요부재에 볼트 홀 생성 또는 용접을 진행하지 않고 보강 스티프너 간의 볼트접합만으로 보강한 경우로 하였다. 실험체 NDC는 더블 C형강을 연결재를 통해 접합한 knee brace 형태로 우수한 내진성능 향상 효과가 기대된다. Oh and Ryu^[4]의 선행연구에 따라 실험체 DE, NDE는 접합부 보강 리브 중앙부에 생성된 노치가 댐퍼 역할을 함으로써 보강체 끝단부 주요부재로의 응력집중을 방지하고자 하였다.

Table 1. Details of specimens

Specimen	Steel grade	Reinforcement		Bolt drilling
		Connection	Panel zone	
N	SS275	X	X	X
DE		EAS	X	O
NDC		CSE	O	X
NDE		EAS	O	X

*NDE
 접합부 보강(N:Non-Reinforced Connection, E:EAS_Energy Absorption Stiffeners, C:CSE_Channel Strength Enhancement)
 보강 시 볼트 천공(D:Drilling, ND:Non-drilling)

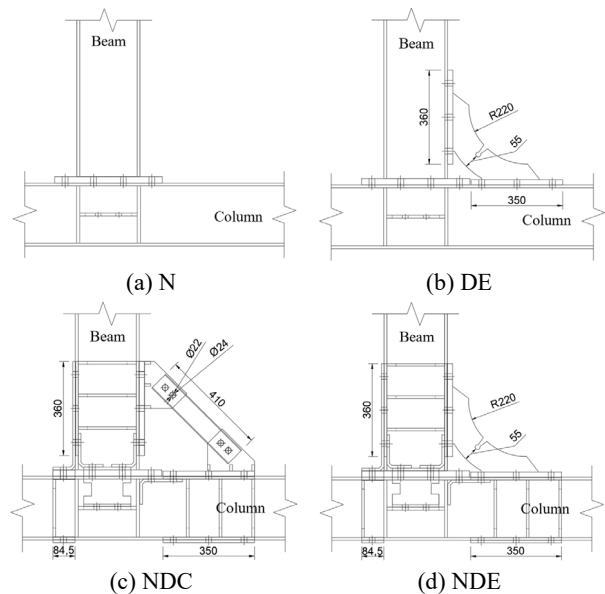


Fig. 1. Details of specimens

실험체 NDC, NDE 설계 시 보, 기둥 부재의 국부좌굴을 방지하기 위해 3단의 스티프너를 플레이트에 용접하여 연결 스티프너를 제작하였으며 이는 보강 스티프너 간 접합이 가능하게 한다. 또한 Fig. 2와 같이 각 부품을 일체화하지 않고 별도의 부품으로 제작하여 동시 체결함으로써 볼트접합 시 부품 간 맞물림이 볼트 슬립을 완화시키고 앵글 형상의 스티프너는 용접부의 취성파단 방지 효과를 준다.

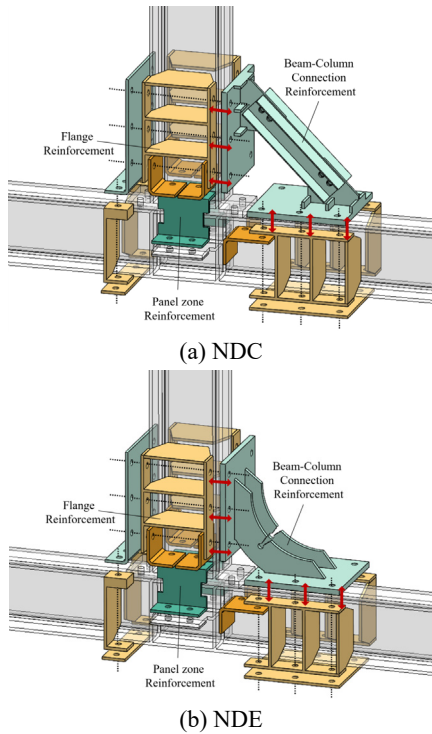


Fig. 2. Bolt assembly details of specimens

실제 현장에서 제안 접합상세를 적용하는 경우, 주변 시설물과의 간섭을 방지하고자 플레이트형 및 앵글형 연결 스티프너를 사용하여 보, 기둥 부재의 부피 증가를 최소화하도록 설계하였다. 또한 부품 간 맞물려 조립되는 형태로 상부에 위치한 보강 플레이트부터 순차적으로 조립하는 경우 부품의 고정이 용이하다.

실험체 조립순서는 Fig. 3에 따르며 이는 주요부재에 볼트 천공을 하지 않는 접합부 보강 시의 부품 조립순서이다.

- (1) 접합부 보강재(CSE, EAS) 위치 고정
- (2) 상부 연결 철물 엔드플레이트와 체결
- (3) 앞·뒷면 총 4 EA의 연결용 앵글을 엔드플레이트

와 체결

- (4) 접합부 보강재(CSE, EAS)와 좌굴 방지 연결 스티프너, 연결용 앵글 동시 체결
- (5) 상부 연결 스티프너를 상부 연결 철물 및 엔드플레이트와 동시 체결
- (6) 앞·뒷면 총 2 EA의 연결용 앵글 배치
- (7) 좌굴 방지 연결 스티프너를 연결용 앵글, 접합부 보강재(CSE, EAS)와 동시 체결

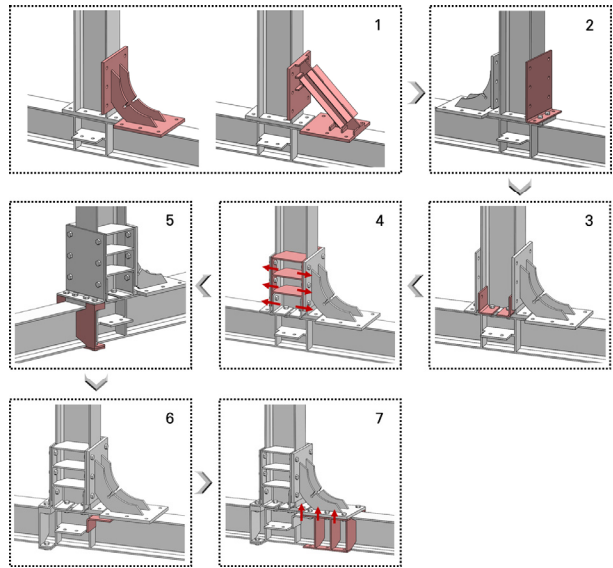


Fig. 3. Assembly sequences of specimens

2.2 실험계획

실험체는 모두 SS275 강재를 사용하였으며 보강 유무를 제외한 모든 조건은 동일하다. H-244×175×7×11로 제작된 보, 기둥 부재의 길이는 각각 2,400 mm, 1,800 mm로 하였다. 실험체 설치 시 보의 횡방향 좌굴을 방지하기 위해 약 2 m인 보 부재의 소성한계 비지지 길이(L_p) 이내에 횡좌굴 방지 지그를 설치하였다. Fig. 4는 실험체 세팅 사진을 나타내며 접합부 절취를 동일하게 구현하기 위해 실험체 하부에 힌지지그를 설치하고 1,000 kN 용량의 3축 회전이 가능한 액추에이터로 가력하였다. 가력 프로토콜은 FEMA 350^[5]의 접합부 반복가력절차를 따랐다.

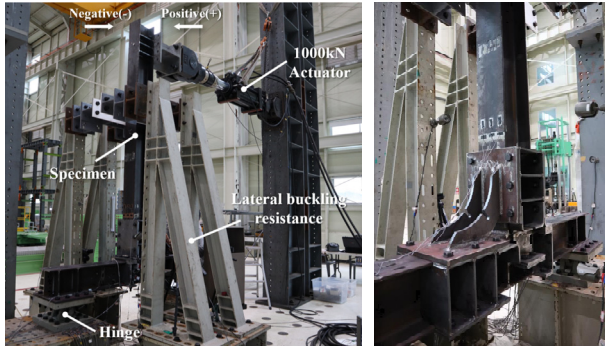


Fig. 4. Specimen setup

3. 실험 결과

3.1 재료인장시험 결과

실험체에 사용된 강재는 모두 SS275로 설계하였으며 강재 재료 특성을 파악하기 위해 재료인장시험을 실시하였다. 실험체에 사용된 강재의 두께별로 각 3개소 절취하여 인장시험편을 제작하였다. 재료인장시험 결과 시편 모두 KS D 3503 일반 구조용 압연 강재^[6]에서 제시하는 기준을 만족하였으며 실험결과는 Table 2에 요약하였다.

3.2 실험체 손상상태

각 실험체에 대한 손상상태 및 모멘트-변형각 관계를 Figs. 5-6에 나타내었다. 비보강 실험체인 N의 경우 0.03 rad 이후 기둥 플랜지 국부좌굴이 심화되어 0.08 rad에서 용접부 부근 기둥 플랜지에서 파단이 발생하였다. 0.1 rad에서 엔드플레이트 파단으로 실험을 종료하였다. 주요부재에 직접 볼트구멍을 천공하여 EAS를 볼트접합한 실험체 DE의 경우 0.04 rad에서 EAS에 생성된 노치에서 균열이 발생하였고 기둥 플랜지가 변형하기 시작했다. 0.05 rad에서 EAS 파단이 발생한 이후

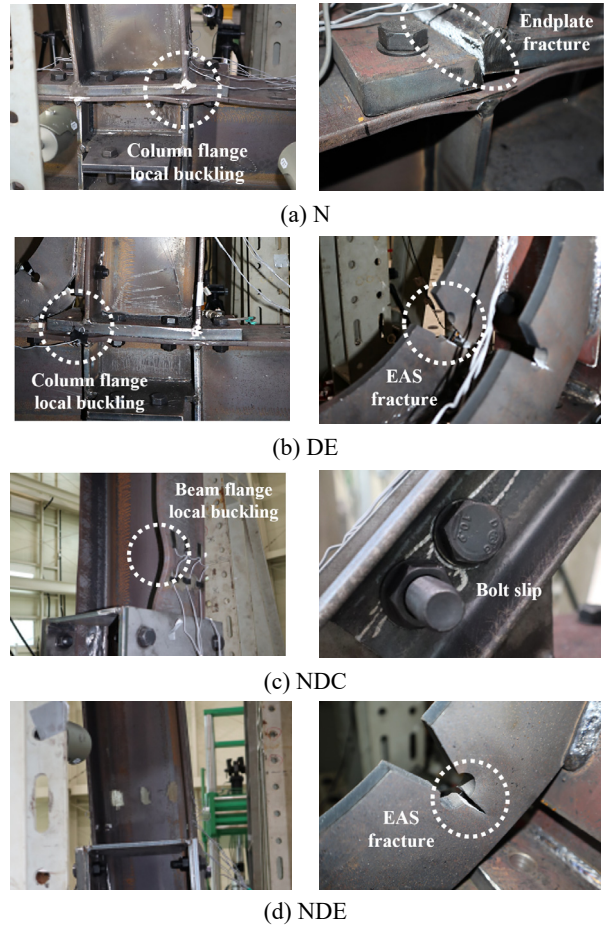


Fig. 5. Fracture results of specimens

0.06 rad 정방향(+) 가력 시 EAS의 완전 파단으로 내력이 급격히 감소하여 실험을 종료하였다. EAS 접합부 보강 시 보강 스티프너에 생성된 노치로의 응력집중이 기둥 플랜지 국부좌굴을 감소시켰으나, EAS 파단 이후 접합부 시스템의 전체 성능 또한 급격히 감소하였다. 접합부 보강안 CSE를 브레이스 형태로 보강체 간 볼트 접합한 실험체 NDC는 충분한 변형능력 확보 및 내력 상승효과를 보였으나 중국 시 보의 국부좌굴을 초래하였다. CSE 보강체에서 볼트슬립 이외엔 특별한 손상은 발생하지 않았다. 실험체 NDC와 동일하게 보강체 간

Table 2. Results of material test

Specimens		Steel grade	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E (MPa)	Y.R (%)	Elo.(%)
Beam/Column	web(7t)	SS275	343.33	474.85	206718.50	72.30	26.84
	flange(11t)		312.88	456.87	202595.88	68.48	27.33
Stiffener of EAS(15t)			322.51	470.27	209876.67	68.58	28.11

* σ_y = yielding stress; σ_u = tensile strength; E = elastic modulus; Y.R = yield ratio(σ_y/σ_u); Elo. = elongation

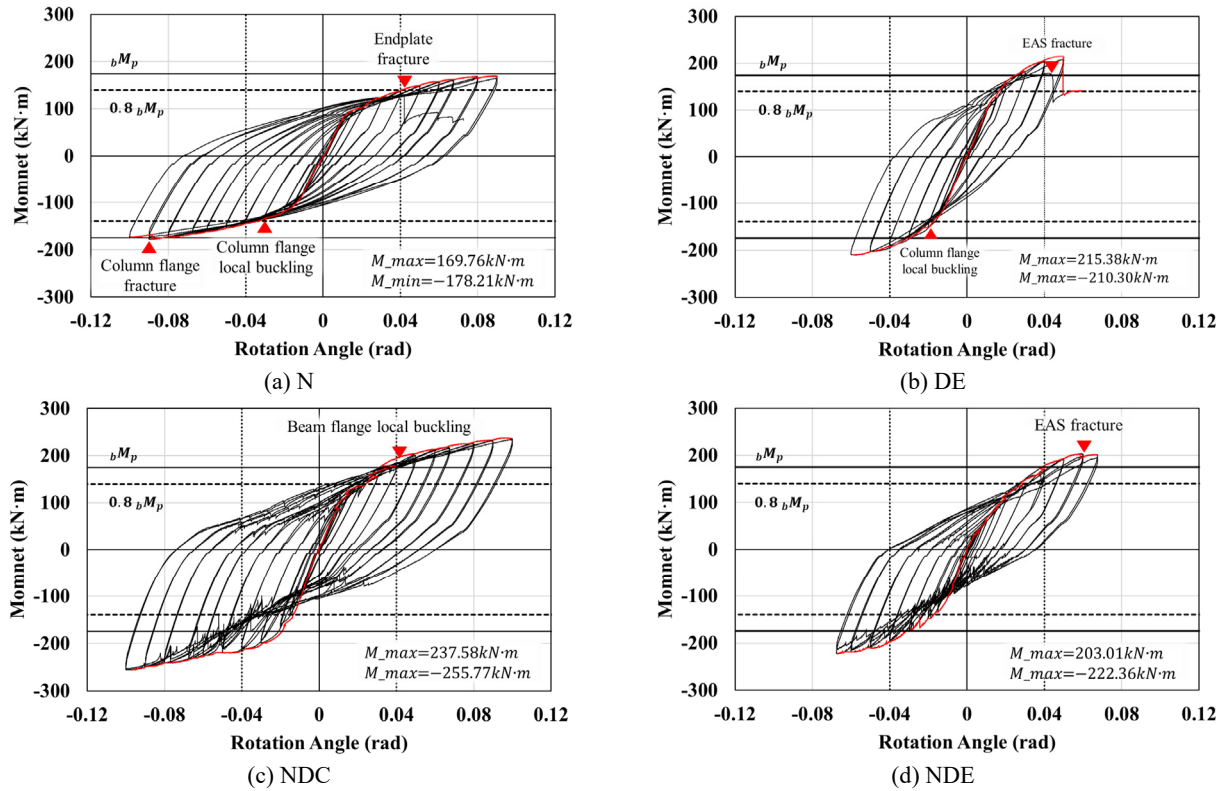


Fig. 6. Moment-rotation angle results of specimens

Table 3. Summary of experiment results

Specimens		k (kN/mm)	θ_y (rad)	M_y (kN·m)	M_u (kN·m)	θ_u/θ_y	M_u/bM_p
N	(+)	1.51	0.0101	80.14	137.13	3.97	0.97
	(-)	1.47	-0.0132	-102.43	-144.26	3.03	1.02
DE	(+)	1.79	0.0151	130.17	204.40	2.65	1.23
	(-)	1.80	-0.0138	-127.56	-192.98	2.89	1.20
NDC	(+)	1.67	0.0101	97.56	178.42	3.94	1.36
	(-)	2.10	-0.0124	-150.78	-211.46	3.22	1.46
NDE	(+)	1.11	0.0170	108.88	171.69	2.35	1.16
	(-)	1.77	-0.0122	-124.69	-196.84	3.27	1.27

* k = initial elastic stiffness; θ_y = yield rotation angle of specimen; M_y = yield moment of specimen; $\theta_u = 0.04$ rad; M_u = maximum moment of specimen at 0.04 rad; θ_u/θ_y = ductility; bM_p = plastic moment of beam

볼트접합으로 접합부 보강안 EAS를 적용한 실험체 NDE의 경우 0.04 rad에서 EAS 노치의 균열 발생 이후 균열폭의 증가로 0.06 rad에서 파단되었고, 파단에 의한 내력저하로 0.07 rad에서 실험을 종료하였다. EAS 로의 응력집중에 따라 실험체 NDC 대비 보 플랜지의 국부좌굴이 감소한 것으로 나타났다. 또한 보강체를 직접 보, 기둥에 접합한 실험체 DE와 비교 시 추가 스티프너를 사용하여 보강체 간 접합을 수행하는 경우 댄퍼

파단을 지연시키며 추가 변형능력을 확보하였다. 이는 비보강 실험체인 N과 비교하였을 때 보강을 수행하는 경우 주요부재의 국부좌굴 및 취성파단을 방지하고 내력상승의 측면에서 긍정적이다.

실험결과 값을 Table 3에 요약하였으며 실험체는 모두 0.04 rad 이상의 충분한 소성거동으로 특수모멘트골조의 접합부 기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 그러나 비보강 실험체 N의 경우 부(-)방향에서는 0.04 rad

에서 보의 전소성모멘트의 80 %에 해당하는 값인 139.67 kN·m를 소폭 상회하였으나 정(+)-방향에서는 2 %가량 부족한 성능을 보였다. 보강을 수행하는 경우 모든 보강 실험체에서 내력상승 효과가 있었으며 접합부 보강안에 따른 내력상승률 비교 시 실험체 NDC가 실험체 NDE에 비해 약 1.08~1.16배 우수한 성능을 나타냈다. 또한, 보강 실험체에서 정·부방향의 실험결과 차이는 보강체로의 응력집중을 유도하기 위해 보강체와 인접한 엔드플레이트 최외각 볼트 미체결에 따른 결과로 판단된다.

3.3 부재별 변형률

보강 유무에 따라 보강체가 기둥, 보 부재 손상에 미치는 영향을 파악하기 위해 부재별 변형률 및 항복시점을 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 비보강 접합부에서는 보 단부가, 보강 접합부에서는 보강체 끝단부 보 부재가 취약부로 작용한다. 앞서 실험 손상상태에서 엔드플레이트와 접합된 부분의 기둥 플랜지의 국부좌굴 및 취성파단이 발생한바, 두 가지 실험체 N, DE에 대해서는 응력집중이 예상되는 해당부분의 변형률도 함께 비교하였다. 변형률 게이지 탈락으로 인한 급격한 변형률

저하 발생 시점 이전까지, EAS 보강 시 응력집중이 예상되는 EAS 노치 부근의 변형률은 실험체 DE에서 약 5 %, 실험체 NDE에서 약 10 %까지 증가하였다. EAS를 천공 접합한 실험체 DE의 경우 EAS로의 변형률 집중으로 실험체 N 대비 보 부재의 항복시점이 지연되고 엔드플레이트와 접합된 기둥 플랜지의 변형률 또한 감소시켰다. 실험체 NDC에서는 CSE 보강체가 실험 종료 시까지 탄성상태를 유지하여 보 부재로의 변형률이 집중되었으나, 실험체 NDE에서는 EAS에 변형률이 집중됨에 따라 보 부재의 항복이 가장 늦게 발생하였고 변형률 또한 가장 낮게 측정되었다. 한편, 모든 실험체에서 보강체 끝단부 기둥 부재 변형률은 탄성범위에 머물렀다.

4. 유한요소해석

4.1 보강 접합부 내력 관계

앞서 3장에서 수행한 실험결과에서 에너지 흡수장치인 EAS로의 응력집중을 확인하였으나 동시에 보 부재 또한 항복하며 기존에 의도했던 보 부재의 손상방지라

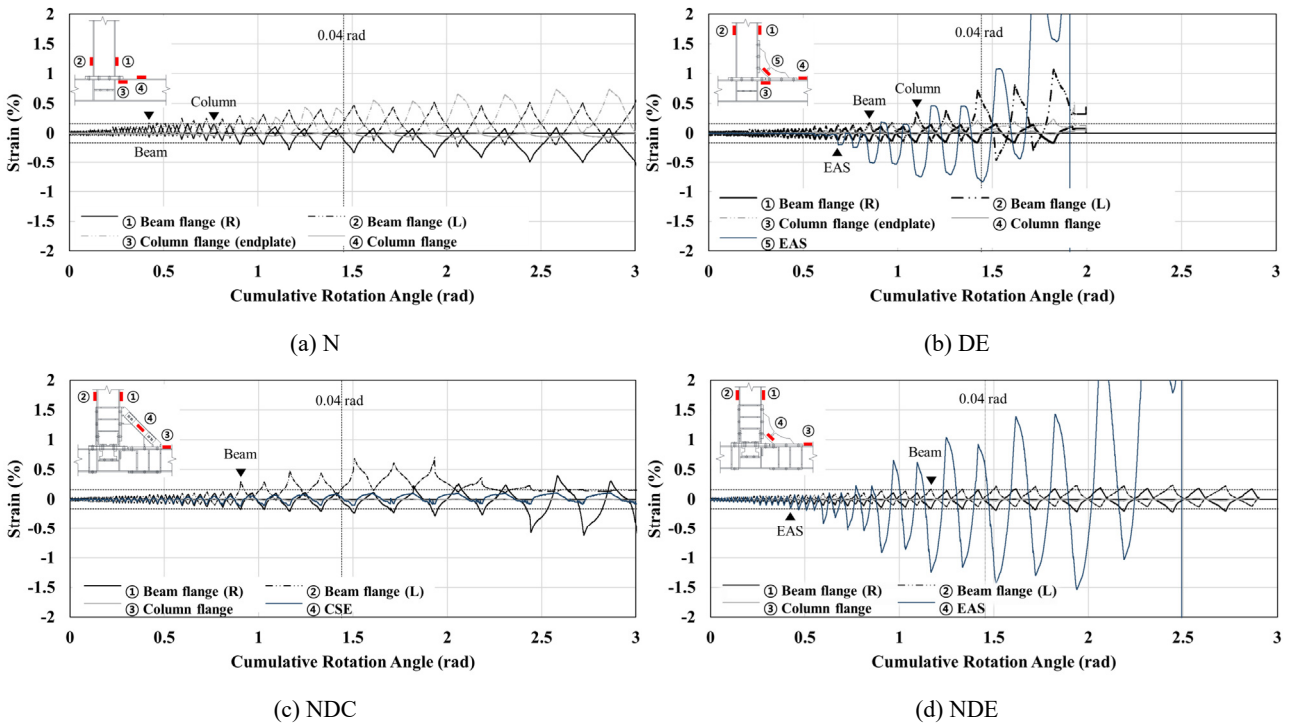


Fig. 7. Strain results of specimens

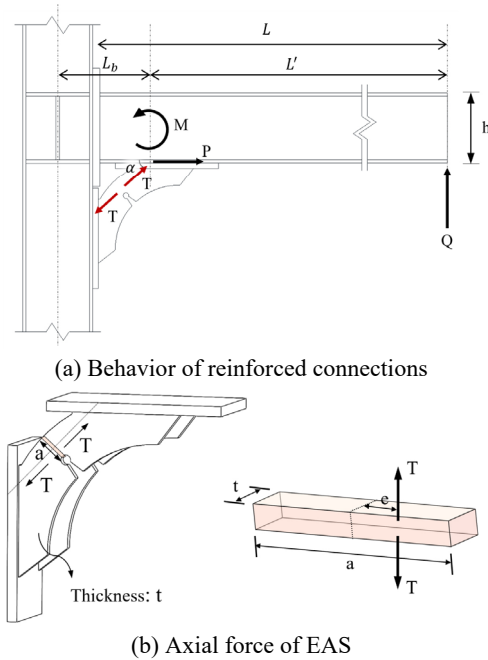


Fig. 8. External force behavior

는 소정의 목표를 달성하지 못하였다. 또한 EAS 파단에 따른 전체 접합부의 급격한 내력 저하 및 미미한 수준의 내력상승 효과는 EAS 설계 과정에서 적정 내력 산정을 통해 개선되어야 할 것으로 생각된다. 따라서 적정 내력 산정을 위해 보강 접합부의 전체 시스템에서 부재별 모멘트 관계를 Fig. 8에 도식화하였다^{[8]-[11]}. 스티프너를 항복시키는 힘은 작용하중(Q)의 보강재 끝단까지의 거리에 대한 전도모멘트이며, 이때 스티프너에 인장·압축력 작용 시 발생하는 모멘트가 이에 저항한다. 스티프너의 저항모멘트는 스티프너에 작용하는 축력(T)을 해당 하중이 이루는 각도(α)로 치환하고, 기둥 중심축에서 최대모멘트 발생 지점까지의 수평거리를 곱하여 산정하며 이는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이때, 보강 접합부 전체 시스템에서 최대모멘트 발생 지점은 보강체와 보 부재가 맞닿는 지점이다, 스티프너 유효단면에 편심하중으로 작용하는 축력은 식 (2)와 같이 유효단면의 응력분포로 도출할 수 있다. 스티프너의 항복내력(T_y)은 최대 인장응력이 발생하는 노치 부근 항복 시 작용축력이며 이는 식 (3)을 따른다. 식 (4)를 통해 보 부재의 항복모멘트와 EAS의 항복내력의 비율인 항복내력비(λ)를 선정하였다.

$$M = (T \times \sin \theta) \times L_b = Q \times L' \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{T}{A} + \frac{T_e}{I_y} x \quad (2)$$

$$T_y = \frac{\sigma_y}{\frac{1}{A} + \frac{e}{I_y} x} \times n = \left(\frac{a^2 \times t}{a + 6e} \times \sigma_y \right) \times n \quad (3)$$

$$M_y = (T_y \times \sin \theta) \times L_b = \lambda \times \left(\frac{L'}{L} \times {}_bM_y \right) \quad (4)$$

$$M_{\max} = \min \left[(T_u \times \sin \theta) \times L_b, \frac{L'}{L} {}_bM_p \right] \quad (5)$$

여기서, $E F_y$: EAS 소재항복강도
 $E F_u$: EAS 소재인장강도
 A_E : EAS 유효단면적
 ${}_bM_y$: 보 항복모멘트
 ${}_bM_p$: 보 전소성모멘트
 α : EAS 축력과 보 부재가 이루는 각도
a: 유효폭 n: 스티프너 개수
t: 두께 c: 축력 편심거리

4.2 해석계획 및 방법

항복내력비에 따른 거동특성을 파악하기 위해 ABAQUS 유한요소해석을 수행하였다. 해석 시 목표 변위까지의 변위제어로 EAS 인장방향인 정(+)방향 단조가력을 실시하였다. 해석모델은 3차원의 8개의 절점을 지니는 솔리드요소(C3D8R)로 모델링 하였으며, 주요 영향인자인 EAS의 스티프너 두께를 변수로 실제 실험을 수행한 15 mm를 기준으로 6 mm(E6)부터 18 mm(E18)까지 2 mm 간격으로 변화시킨 총 8가지이다. 실험과 동일한 H-244×175×7×11의 기둥, 보 부재에 대하여 스티프너의 두께를 제외한 나머지 요소는 모두 동일하게 설계하였다. 실험과 동일한 경계조건을 구현하기 위해 기둥 양단부는 핀으로 고정하였으며, 보의 면외방향 좌굴을 방지하기 위해 실험 시와 동일한 위치에서 가력방향과 면외방향인 Z축에 대한 변위를 구속하고 나머지 X, Y축에 대한 회전자유도를 제한하였다. 모델링 상세는 Fig. 9과 같다. 물성치는 재료인장시험 결과값 진응력-진변형률로 치환하여 반영하였다. 볼트 모델링 시 가력 스텝 이전에 스텝을 추가하고 해당 스텝에서 Bolt load를 적용하여 볼트 원통부(Shank) 중심 단면에 프리텐션을 가했으며, 볼트 축력값은 KS B

주요부재 손상방지를 위한 엔드플레이트형 무용접 보강 접합부의 내진성능 평가

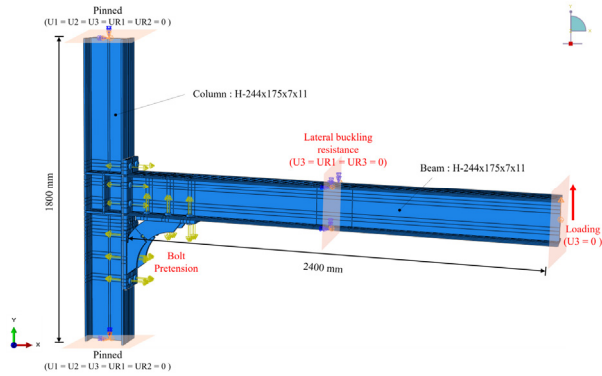


Fig. 9. Modeling details of the FEA model

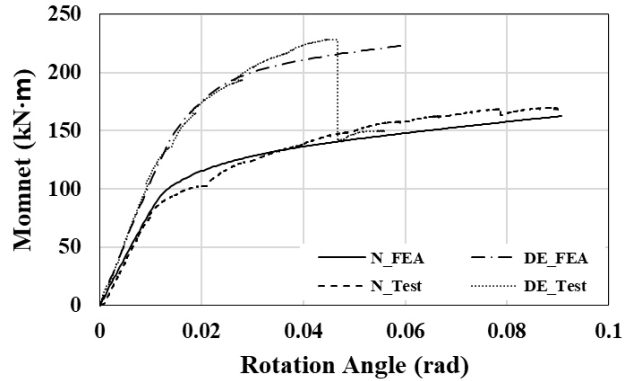


Fig. 10. Comparison of specimen

1010^[7]의 M20(F10T) 고장력볼트에 해당하는 축력값을 따랐다.

4.3 해석결과

해석결과에 대한 신뢰성 검증을 위해 실험체 N, DE와 동일한 모델링에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석을 통해 도출한 모멘트-변형각 그래프를 실제 실험결과와 비교하였을 때 Fig. 10과 같이 유사한 거동을 나타내며 모델링에 대한 해석 신뢰성을 검증하였다. Fig. 11은 0.04 rad에서 해석모델에 대한 Von-Mises 응력분포를 나타내며 회색으로 표시된 부분이 항복에 도달한 부분이다. 접합부에서 보강체가 접합된 상·하부 보 플랜지에 응력이 가장 집중되었으며, 스티프너의 두께가 증가할수록 EAS의 손상은 감소하였으나 보가 부담하는 응력 및 보 플랜지의 국부좌굴이 심화되는 것을 확인할 수 있다. 두께 12 mm 이하의 E6-E12 모델에서는 EAS에 생성된 노치를 중심으로 EAS 유효인장단면이 모두 항복함에 따라 보강체와 접합된 보 부재의 손상이 현저하게 감소하여 보 플랜지의 항복은 발생하지 않았다.

항복내력비(λ)는 해석모델의 두께 변수에 따라 앞서 보강 접합부의 모멘트 내력 관계를 기반으로 식 (1)-식 (4)에 적용하여 0.17~0.51의 범위로 산정하였다. Table 4의 해석결과에 따르면 해석모델의 초기강성 및 항복 모멘트는 항복내력비에 비례하여 증가하였으며, 비보강 접합부인 해석모델 N 대비 보강 접합부 해석모델은 전체 성능이 향상되었다. Fig. 12에서 0.06 rad까지의 모멘트-변형각 관계를 비교한 결과, 보강 접합부의 전

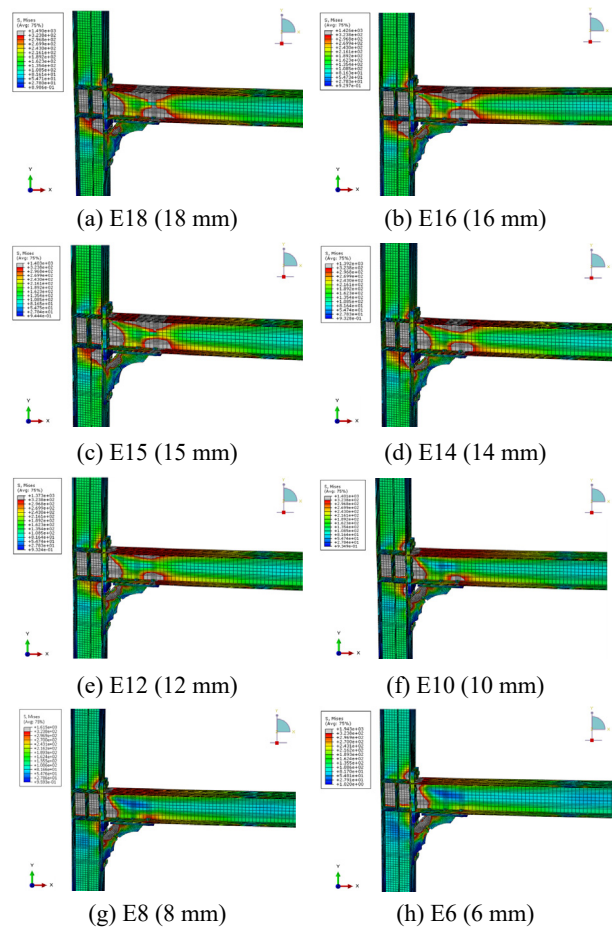


Fig. 11. Von-Mises contour (0.04 rad)

체 내력은 항복내력비에 비례하여 증가하였다. 그러나 내력이 보의 항복모멘트 이상 도달하는 경우 항복내력비 증가에 따른 구조적 특성 및 내력 상승폭이 감소하며, 이는 보 부재의 항복이 전체 접합부 시스템의 내력 저하에 영향을 미친 것으로 생각된다.

Table 4. Summary of FEA results

FEA Models	λ	k (kN/mm)	θ_y (rad)	M_y (kN·m)	M_u (kN·m)	θ_u/θ_y	M_u/bM_p
E18	0.51	1.84	0.0144	153.26	210.75	2.77	1.13
E16	0.45	1.82	0.0144	150.94	208.10	2.77	1.12
E15	0.42	1.80	0.0142	147.19	207.50	2.77	1.12
E14	0.40	1.79	0.0139	143.88	204.06	2.82	1.10
E12	0.34	1.78	0.0134	137.69	197.59	2.87	1.06
E10	0.28	1.76	0.0129	130.63	187.07	2.93	1.01
E8	0.23	1.72	0.0117	116.02	172.36	3.41	0.93
E6	0.17	1.68	0.0101	98.33	154.70	3.95	0.83
N	-	1.44	0.0117	96.96	136.58	3.42	0.74

* λ = yield strength ratio; k = initial elastic stiffness; θ_y = yield rotation angle; M_y = yield moment; $\theta_u = 0.04$ rad; M_u = maximum moment of model at 0.04 rad; θ_u/θ_y = ductility; bM_p = plastic moment of beam

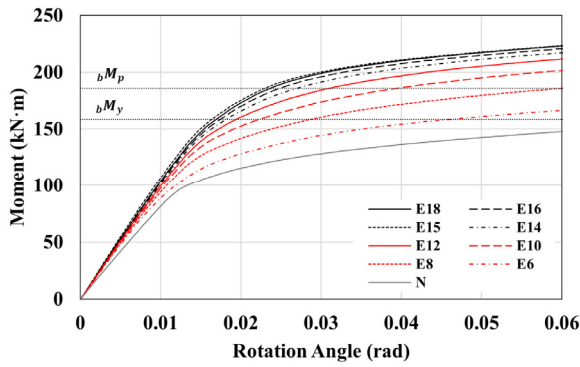


Fig. 12. Behavior characteristics of FEA models

4.4 변형률 분포

EAS가 보 부재 손상에 미치는 영향을 파악하기 위해 부재별 변형률을 도출하였다. 변형이 집중될 것으로 예상되는 EAS의 노치 부분과 보강체 접합부의 보 플랜지의 변형률을 측정하였으며, Fig. 13에서 적색 점선은 항복변형률을 나타낸다. EAS는 조기 항복 및 변형률 집중 양상을 보였고, 스티프너 두께가 감소함에 따라 EAS 항복은 더욱 이른 시점에 발생하였으며 보의 변형률은 감소하는 경향이 나타났다. 12 mm 이하 두께의 EAS로 설계된 E6-E12 해석모델은 0.02 rad까지 보 부재가 탄성상태를 유지하여 일반적인 구조물 수준에서는 안정성을 확보할 수 있다. 따라서 보 부재의 손상을 방지하기 위한 적정 항복내력비는 약 0.34 이하로 추정된다.

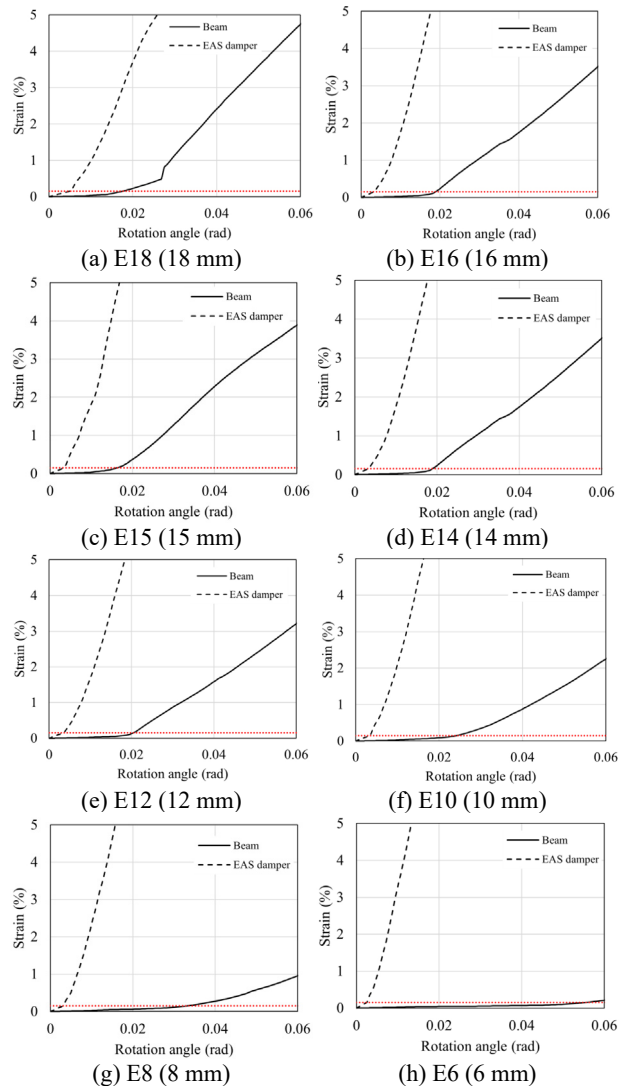


Fig. 13. Strain results of beam and EAS

5. 결론

본 연구에서는 주요부재의 손상을 방지하기 위해 에너지 흡수형 스티프너를 적용한 무용접·무천공 접합상세를 제안하였으며 해당 보강법에 대한 실험 및 유한요소해석 결과를 다음과 같이 종합하였다.

- (1) 구조물에서 내진성능 향상을 위해 기존에 사용되는 접합부 보강법은 내력상승의 측면에서는 우수한 성능을 보였으나, 보의 국부좌굴 및 취성파단 등의 손상을 유발하였다. 따라서 접합부 보강 시 성능향상과 더불어 주요부재의 손상방지를 주요 목표로 에너지 흡수형 스티프너를 적용하였다.
- (2) 기존 구조물에 대한 접합부 보강 시 실제 현장에서 용접 작업 및 주요부재에 대한 천공 작업은 현실적으로 많은 제약이 수반되며 현장작업 최소화를 위해 보강체 간 볼트접합을 적용한 무용접·무천공 접합상세를 제안하였다.
- (3) 제안 접합상세에 대하여 CSE, EAS 접합부 보강안 적용 시의 정적반복가력실험 결과 실험체 NDC에서 실험체 NDE에 비해 우수한 내력상승률을 지녔으며 실험체 NDE는 EAS 파단 이후 급격한 내력저하로 전체 변형능력이 감소되었다. 그러나 기존 비보강 접합부에서 기둥, 보 플랜지의 국부좌굴 및 취성파단이 발생한 것에 비해 실험체 NDE에서 주요부재의 손상이 감소하였다.
- (4) 제안 상세를 적용한 보강 접합부의 내진성능향상 및 보 부재의 손상 저감을 위해 FEA 해석을 통한 EAS와 보 부재의 적정 항복내력비 선정하고자 하였다. EAS의 스티프너 두께에 대한 변수해석 결과 접합부 전체 내력은 보 부재 항복 이전까지 스티프너 두께에 비례하며 항복내력비 0.34 이하의 E6-E12 해석모델에서 보 부재 변형률이 0.02 rad 이후까지 탄성범위를 유지하였다.

감사의 글

본 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원으로 수행되었습니다(20017750).

참고문헌(References)

- [1] Uang, C.-M., Bondad, D., and Lee, C.-H. (1998) Cyclic Performance of Haunch Repaired Steel Moment Connections: Experimental Testing and Analytical Modeling, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.20, No.4-6, pp.552-561.
- [2] Oh, S.-H., Kim, Y.-J., and Moon, T.-S. (2007) Cyclic Performance of Existing Moment Connections in Steel Retrofitted with a Reduced Beam Section and Bottom Flange Reinforcements, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Canadian Science Publishing, Vol.34, No.2, pp.199-209.
- [3] Oh, S.H., and Park, H.Y. (2014) Seismic Performance of High Strength Steel(HSA800) Beam-to-Column Connections with Improved Horizontal Stiffener, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.4, pp.361-373 (in Korean).
- [4] Oh, S.-H., Ryu, H.-S., Kang, C.-H., and Lee, S.-M. (2004) Hysteretic Behavior of Connections with Energy Absorption Stiffener, *Proceedings of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, Vol.24, No.2, pp.51-54 (in Korean).
- [5] SAC Joint Venture (2000) *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*, FEMA-350, Federal Emergency Management Agency, USA.
- [6] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Rolled Steels for General Structure*, KS D 3503:2018, KATS (in Korean).
- [7] Korean Agency for Technology and Standards (2022) *Set of High Strength Hexagon Bolt, Hexagon Nut and Plain Washers for Friction Grip Joints*, KS B 1010:2022, KATS (in Korean).
- [8] Seol, Y.-H. (2024) *Evaluation of Seismic Performance of Steel Structural Connections with Stiffner-Type Energy Absorbition Devices for Beam-Ends*, Master's Thesis, Pusan National University (in Korean).
- [9] Oh, S.H., and Park, H.Y. (2013) A Study on Beam-to-Column Connections with Plate Type Energy Absorption System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.1, pp.103-114 (in Korean).
- [10] Oh, S.-H., and Park, H.-Y. (2017) Evaluation of Strength and Stiffness of the Damper Installed at Beam End for

Damage-Controlled Structures, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, Vol.33, No.2, pp.27-36 (in Korean).
[11] Benavent Climent, A., Oh, S.-H., and Akiyama, H.

(1998) Ultimate Energy Absorption Capacity of Slit-Type Steel Plates Subjected to Shear Deformations, *Journal of Structural and Construction Engineering*, Architectural Institute of Japan, No.503, pp.139-147.

요 약: 본 연구는 주요부재의 손상방지를 위해 보-기둥 접합부에서 에너지 흡수형 스티프너를 통한 보강 공법을 다루며, 기존 구조물에서의 접합부 보강안 적용이 용이하도록 현장상황을 고려한 무용접·무천공 접합상세를 제안하였다. 제안 상세에 대한 정적반복가력실험을 수행하고 주요부재의 손상저감 효과를 기술하였으며, EAS 에너지 흡수장치의 성능개선을 위해 유한요소해석을 수행하였다. EAS와 보의 항복강도에 대한 적정내력비 산정을 위해 스티프너의 주요영향인자인 두께에 대한 변수해석 결과, 항복내력비 약 0.34 이하에서 보의 손상이 저감된 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 보강 접합부, 무용접 접합, 무천공 접합, 에너지 흡수형, 손상방지, 내력비, 엔드플레이트형
