

보-기둥 접합부 설치용 헌치형 에너지 소산장치의 구조특성에 관한 연구

설영훈¹ · 오상훈^{2*}

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

A Study on the Structural Characteristics of Haunch-type Energy Dissipation Device for Installation of Beam-Column Connections

Seol, Young Hun¹, 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 - Existing seismic design methods have limitations in that members cannot be reused due to plastic deformation. This is judged not to be an optimal seismic design method. Therefore, this study aims to present an energy dissipation device that can be re-used at the component level. An energy dissipation device was installed at the end of the beam of the unit connection to conduct a real-scale experiment. As a result of the experiment, the elastic behavior of the column and beam members was confirmed as a result of reviewing the strain and deformation by element. The rotational capacity and strength showed seismic performance above the level suggested by the domestic code. In addition, the prediction equation presented for the design of the test specimen showed an error of up to 10 %. Therefore, it is thought that the main members can be reused according to the design intention when applying the target device.

Keywords - Steel structure, Beam-to-column connection, Damage-control, Energy dissipation device, Re-use

1. 서론

1995년 고베 지진과 같은 대지진을 통하여 강구조 보-기둥 접합부의 보 부재 플랜지에서 조기 취성파단이 발생함에 따라 접합부의 치명적인 약점이 노출되었다^[1]. 이를 계기로 지진에 취약한 국가들을 중심으로 내진설계용 접합 상세가 활발히 개발되었다^{[2][4]}. 그러나 이러한 내진설계용 접합 상세 중 용접공법을 사용하는 접합 상세는 용접 품질과 시공성의 문제로 현장 보급에 한계가 있다. 또한, RBS 접합부^[5]와 헌치 보의 경우 구조물의 항복 메커니즘을 변화시킬 수 있으며, 국부좌굴과 같은 부재의 소성화가 불가피하여 지진 피해 후 보수 및 보강 과정에서 막대한 사회적 비용이 발생할 우

려가 있다.

접합부의 연성능력을 증진시킨 상기의 내진 공법들은 대규모 지진 발생 시 우려되는 보 단부의 취성파단 방지에는 효과적일 수 있으나 상기의 단점으로 인하여 지진 저항 시스템으로써 최적의 내진설계용 접합 상세라 볼 수 없다. 따라서 최적의 내진설계용 접합 상세는 구조적 안정성과 더불어 사용성, 기능성, 경제성 등을 종합적으로 고려하여 설계하여야 한다.

이에 따라 외력에 의한 손상을 특정 위치 혹은 장치로 유도하여 주 부재의 손상을 방지하고, 볼트 접합을 적용하여 간편한 해체가 가능한 구조 시스템이 국내외 연구진에 의하여 개발되었다^{[6]-[8]}. 우수한 시공성을 바탕으로 골조의 부재 수준의 재사용이 가능한 구조시스템으로 경제적인 설계라 볼 수 있다. Oh *et al.*^[6]은 헌치 접합부의 과도한 강도 증가로 인하여 발생하는 주요 구조체의 손상을 방지하기 위하여 스티프너가 부착된 앵글을 이용한 접합 상세를 제안하였다. 앵글 사이의 스티프너가 에너지를 소산 할 수 있는 형상으로 그 성능을 실험형 접합부의 정적 반복가력 실험을 통하여 검증

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 6, 2024; revised November 19, 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

하였다. 제안한 접합 상세를 가지는 접합부가 종국 상황에 이르기까지 소성변형은 에너지 흡수부에서 집중하고 기둥과 보 부재는 모두 탄성에 머무르는 결과를 보였다. 이에 본 연구에서는 해당 연구의 형상에 착안하여 보와 기둥 플랜지 사이에 볼트 접합을 통하여 설치할 수 있는 현치형 에너지 소산장치를 제안하고, 대상 장치의 구조 특성을 분석하여 부재의 재사용을 통하여 경제적인 내진설계가 가능한 에너지 소산장치를 제시하고자 한다.

2. 에너지 소산장치 형상 및 구조특성

본 연구에서 제시하는 에너지 소산장치는 다음과 같은 특성을 가진다.

① 교체 용이성 및 유지관리: 에너지 소산장치는 손상 후 교체가 용이해야 하며, 특별한 유지관리 없이 항상 그 성능을 발휘할 수 있어야 한다.

② 에너지 소산능력 및 주요 부재 보호: 지진 하중 하에서 장치가 반복적인 소성 거동을 하여, 에너지를 소산함으로써 주요 부재에 심각한 손상이 발생하지 않도록 해야 한다.

상기 목표의 달성을 위한 대상 장치의 형상은 Fig. 1과 같다. 에너지 소산장치는 보와 기둥 부재의 사이에 위치하며 볼트 체결을 통하여 연결된다. 용접부가 없으므로 지진 발생 후 손상이 발생한 장치만을 교체함으로써 구조물의 보수가 용이할 것으로 판단된다.

2.1 에너지 소산장치 형상 및 거동 양상

시스템의 보와 기둥 부재 배제 시, 에너지 소산장치는 크게 상부 접합물과 하부 접합물의 2가지 구성 요소로 구분할 수 있다.

이 중 상부 접합물은 기본적으로 T-stub 접합 형태를 기반으로 하고 있다. 상부 접합물은 접합부의 회전 거동 시 회전 힌지 역할을 하며, 외력에 의하여 보 부재에 회전 거동 발생 시 상부 접합물은 회전축으로써 접합부에 발생하는 모멘트를 기둥 부재로 전달하게 된다. 이때 시스템에 탄성 한계 이상의 외력 작용 시 하부 접합물의 소성화가 원활히 진행될 수 있도록 상부 접합물의 강도는 하부 접합물의 강도에 비하여 크게 설계

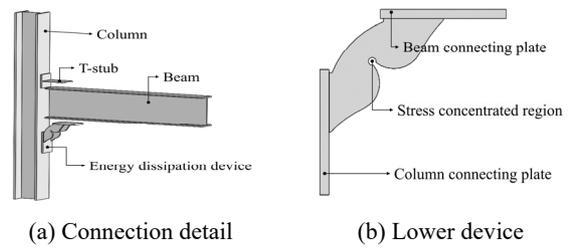


Fig. 1. Design concept

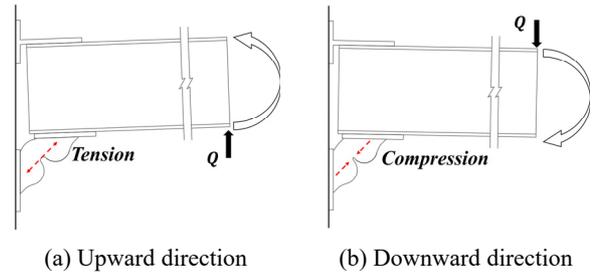


Fig. 2. Rotation behavior of connection

되어야 한다.

하부 접합물은 스티프너가 부착된 판재를 통하여 보와 기둥 부재에 볼트로 체결되어 있다. 지진 하중 하에서 스티프너에 설치되어 있는 개구부에서 소성변형이 집중되며, 반복적인 소성변형이 발생한다. Oh *et al.*^[6]은 이처럼 개구부를 가지는 스티프너 형상을 제시한 바 있다.

대상 장치는 지진에 의하여 접합부의 회전 거동 발생 시 에너지 소산장치의 개구부와 T-stub 회전축이 이루는 단면에 대하여 축 방향 하중을 받으며 Fig. 2와 같이 거동한다.

2.2 스티프너형 에너지 소산장치의 정식화

에너지 소산장치의 설계를 위하여, 에너지 소산장치의 내력 및 강성을 구할 수 있도록 계산식을 작성하였다. 시스템의 역학관계는 Fig. 3에 나타내었으며, 하부 접합물의 스티프너는 Fig. 4와 같이 이상화하였다.

2.2.1 설계 내력

외력에 의해 접합부에 발생하는 모멘트로 인하여, 에너지 소산장치 하부 접합물의 에너지 소산 스티프너에 축력이 발생하게 된다. 에너지 소산 스티프너(EDS, Energy Dissipation Stiffener)는 보 플랜지 하부에 설치되어 보 부재의 회전축에 대하여 수직 방향으로 발생하

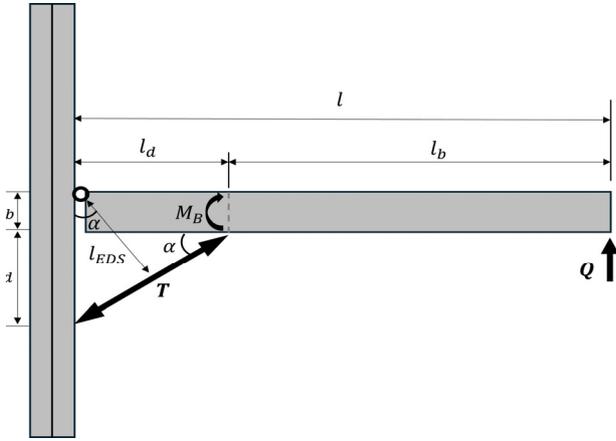


Fig. 3. External force model of connection

는 축력에 저항하게 된다. 이때 장치의 내력이 보 부재에 비하여 강할 경우 보 부재가 선행 항복하며, 보 부재의 손상이 불가피해지게 된다. 또한 장치의 내력이 지나치게 작다면 시스템이 요구되는 강도 조건을 충족시키지 못할 수 있다.

따라서, 장치의 내력에 대한 설계는 대상 접합 시스템 설계의 핵심요소라 할 수 있다. 본 연구에서는 부재들의 내력 관계를 바탕으로 에너지 소산장치에 발생하는 축력(T)을 이용하여 시스템의 내력을 산정하고자 한다.

에너지 소산장치에 설치된 스티프너는 Fig. 4의 흑색 1점 쇄선과 같이 이상화하여 나타낼 수 있다. 스티프너의 축 인장력에 대한 항복 내력은 편심에 의하여 발생하는 부가적인 모멘트를 고려하여 식 (4)와 같이 산출할 수 있다.

설계한 에너지 소산장치와 보의 항복 내력의 비율을 λ 라고 하면 시스템의 항복내력과 최대내력은 식 (5), 식 (6)과 같이 예측하여 나타낼 수 있다. 대상 접합부 시스템의 최대내력은 식 (6)과 같이 에너지 소산장치와 보의 전소성모멘트 중 작은 값을 취하는 것으로 산정할 수 있다. 이때 강재는 일반적으로 공칭인장강도보다 실제 인장강도가 상승하는 것을 고려하여 보의 선행복을 방지하고자 국내 내진설계기준^[9]에서 제시하는 예상인장강도 대 최소인장강도의 비인 R_f 계수를 적용한다.

식 (1)~식 (6)에서, b 는 스티프너의 유효 폭 길이, t 는 스티프너의 두께를 의미하며, γ 는 스티프너 양 단부의 각도, e 는 편심거리를 의미한다. n 은 스티프너의 개수, σ_y 는 에너지 소산장치의 소재 항복강도, σ_u 는 에너지 소산장치의 소재 인장강도, $M_{y,b}$, $M_{p,b}$ 는 각각 보 부재

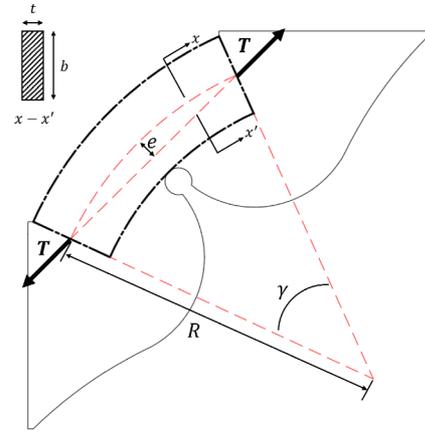


Fig. 4. Idealization of energy dissipating stiffener

의 설계 항복모멘트와 전소성모멘트를 의미한다.

보의 전소성모멘트가 에너지 소산장치보다 작은 경우 보 부재의 손상이 발생할 우려가 있다. 따라서 에너지 소산장치와 보의 내력비율에 대한 제한 범위의 설정이 필요하다.

$$M_B = Ql_b = Tl_{EDS} \quad (1)$$

$$T = \frac{Ql_b}{l_{EDS}} = \frac{Ql_b}{h \cdot \cos \alpha} \quad (2)$$

$$e = R - R \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right) \quad (3)$$

$$T_y = \frac{b^2 \cdot t}{6 \cdot e + b} \cdot \sigma_y \quad (4)$$

$$M_{y,EDS} = \frac{n \cdot b^2 \cdot t}{6 \cdot e + b} \cdot \sigma_y \cdot h \cdot \cos \alpha = \lambda \cdot M_{y,b} \quad (5)$$

$$M_{\max,EDS} = \min \left[R_f \cdot \sigma_u \cdot \frac{n \cdot b^2 \cdot t}{6 \cdot e + b} \cdot h \cdot \cos \alpha, \frac{l_b}{l} \cdot M_{p,b} \right] \quad (6)$$

2.2.2 탄성 강성

철골 모멘트 저항 골조의 접합부는 부재 간 모멘트를 충분히 전달할 수 있어야 하며 일반적으로 강접합에 가까울수록 모멘트 전달 능력이 우수하다. 볼트 접합과 같은 반강접 접합의 경우 용접 접합보다 강성은 작을 수 있으나^[4], T-stub 플랜지의 두께가 충분하고 접합부 볼트 체결이 긴밀하다면 강접합으로 사용가능함이 선행 연구^{[10]-[12]}를 통하여 알려진 바 있다.

또한 목표로 하는 접합 시스템의 이상적인 파괴 메커니즘은 하부 접합물의 에너지 소산 스티프너가 선행 항복함에 따라 에너지 소산 스티프너가 소성변형을 하며

에너지를 소산하는 것이다. 에너지 소산장치의 강성이 지나치게 크다면 구조물이 의도한 메커니즘을 보이지 못하게 될 수 있으며, 이로 인해 기둥, 보와 같은 골조의 주요 부재에 손상이 발생할 수 있다. 이에 대상 접합 시스템은 전용접 접합부 수준 혹은 그 이상의 탄성 강성을 목표로 한다. 보-기둥 접합부의 탄성 강성은 접합부의 내력을 층간변형각으로 나눈 값으로 정의할 수 있으며, 제안 시스템의 회전 변형을 Fig. 5와 같이 이상화하였다. 시스템에서 에너지 소산장치의 변형에 의한 강성(K)은 보 단부 변위와 에너지 소산장치의 변형 사이의 관계로부터 얻을 수 있다. 탄성 강성을 도출하기 위한 식 (7)에서 E_{EDS} 는 에너지 소산장치 부재의 탄성계수, θ 는 보의 회전각을 의미하며, 다른 기호들은 상기의 Fig. 3, 4에 대하여 전술한 바와 동일하다.

$$K = \frac{n \cdot b^3 \cdot t^2 \cdot E_{EDS} \cdot h \cdot \cos \alpha \cdot l_d \cdot \sin \alpha \cdot \theta}{(6 \cdot e + b) \cdot l \cdot l_b} \quad (7)$$

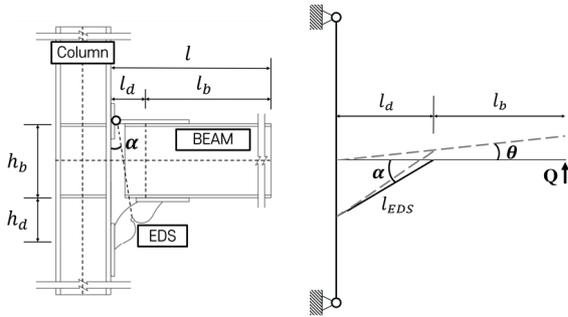


Fig. 5. Connection system deform mechanism

3. 접합 시스템 성능평가 실험

3.1 실험 셋업 및 방법

에너지 소산장치의 구조적 특성을 검토하기 위하여 정적반복가력 실험을 수행하였다. 실험체 계획에 있어 국내에서 철골조에 일반적으로 사용되는 H-형강을 보와 기둥 부재로 사용하였다. 실험체는 강기둥-약보의 메커니즘을 적용하였다.

에너지 소산장치의 거동을 명확히 하기 위하여 기둥 부재의 영향을 최대한 배제하도록 설계하였으며, 이를 위하여 기둥의 항복모멘트를 보의 전소성모멘트의 1.6배 이상이 되도록 단면을 설계하였다. 이때 기둥의 항복모멘트는 보의 항복모멘트의 1.79배이며, 전소성모멘트는 1.82배이다. 이에 따른 실험체의 일람은 Table 1과 같다.

실험체는 기둥 부재와 단부가 일부 절삭된 보 부재가 에너지 소산장치를 통하여 연결되어 있는 구조로 부재 간 연결에는 볼트 접합이 이용된다. Fig. 6는 실험체의 설치도와 설치상세를 나타낸다. 실험체의 경계 조건은 기둥의 상·하단 단부를 회전 지그와 볼트 체결하여 핀 접합으로 구현하였으며, 보 부재의 자유단에 1000 kN 용량의 Actuator를 설치하였다.

가력 시 FEMA 350에서 제시하는 반복 재하 프로토콜^[13]을 이용하여 반복가력을 계획하였다. 보 부재의 횡 좌굴을 방지하기 위하여 Fig. 6(a)에 나타낸 바와 같이 가력 지점에서 소성한계 비지지길이 ($L_p = 1.76r_y \sqrt{E/F_y}$) 이하가 되는 지점에 횡 좌굴 방지지그를 설치하였다. 또한 면외 방향 변형을 최대한 억제하고자 설치 여건을 고려하여 Actuator에 가장 근접한 지점에 횡 좌굴 방지지그를 추가로 설치하였다.

Table 1. Detail of test specimen

EDS		Beam (H-588×300×12×20)				Column (H-428×407×20×35)				Ratio	
Steel Type	$b \times t \times n$ (mm)	Steel Type	Length (mm)	Yield moment (M_{yb} , kN·m)	Full plastic moment (M_{pb} , kN·m)	Steel Type	Length (mm)	Yield moment (M_{yc} , kN·m)	Full plastic moment (M_{pc} , kN·m)	M_{yc}/M_{yb}	M_{pc}/M_{pb}
SS275	79×40×2	SS275	3,033	1105.5	1234.75	SM355	3,700	1977.35	2243.6	1.817	1.789

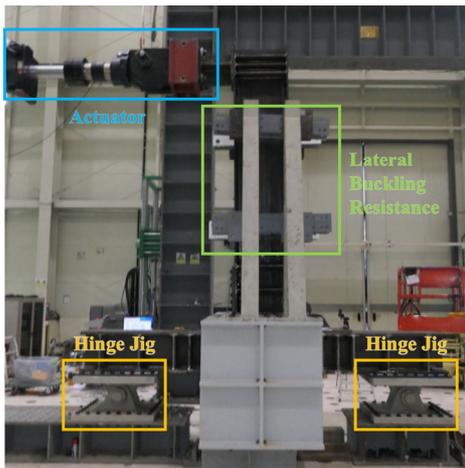
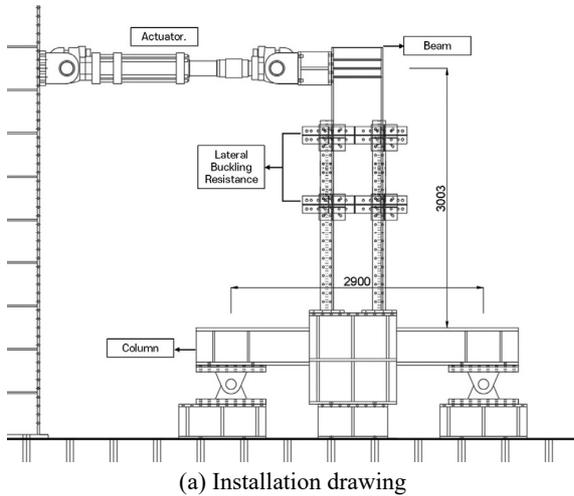


Fig. 6. Test installation diagram

Fig. 7은 계측장치 설치도를 나타낸다. 변위 측정을 위하여 보 부재 가력 지점의 반대편 보 플랜지 지점 1개소와 패널존 및 기둥 변위 측정을 위하여 4개소, 에너지 소산장치의 변위 측정을 위한 1개소로서 총 6개소에 변위계를 설치하였다.

부재별 변형을 검토하기 위하여 기본적으로 보 상·하부 플랜지에 등 간격으로 3개소, 웨브에 3개소, 패널존에 3개소로 총 12개의 게이지를 설치하였다. 에너지 소산장치가 설치된 실험체의 경우 에너지 소산장치의 변형을 확인하기 위하여 추가적으로 에너지 소산 장치 내 최대 변형 발생 예상 지점인 하부 연결물 스티프너의 개구부에 게이지를 3개소 설치하였다(Fig. 7 참조).

국내의 강구조 설계기준⁹⁾에서는 모멘트연성골조를 보통, 중간, 특수모멘트골조와 같이 3가지로 분류하고 있다. 대상 시스템이 보유한 내진성능을 객관적으로 판

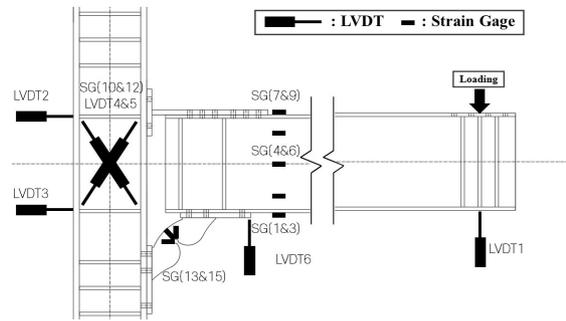


Fig. 7. Measuring instrument installation diagram

단하기 위하여 구조시스템이 적절한 연성능력 및 소성회전능력을 충분히 확보할 수 있는지에 대한 여부를 검토하여야 한다. 이에 본 연구에서는 대상 시스템이 특수모멘트골조의 요구성능을 충족시킬 수 있는지 여부를 검증하고자 한다. 특수모멘트골조의 보-기둥 접합부가 보유하여야 하는 요구성능은 다음과 같다.

- ① 0.04 rad의 층간변형각 수용 능력
- ② 0.04 rad 도달 시 보 전소성모멘트($M_{p,b}$)의 80 % 이상의 강도 유지

3.2 실험 결과

재료인장시험을 통하여 실험체 제작에 사용된 재료 특성치의 평균값을 Table 2에 나타내었다. 평균적으로 항복강도의 경우 SM355 강재는 361 MPa, SS275 강재는 291 MPa로 공칭강도의 1.03배 정도로 나타났다. 탄성계수의 경우 일반적인 강재의 영계수와 유사한 수치를 나타내었으며 인장강도, 항복비, 연신율 등도 규정^{[14],[15]}에서 제시하는 기계적 성질 값을 충족시키는 것으로 확인되었다.

실험 결과에 따른 모멘트-회전각 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 그래프상의 수평, 수직 파선은 각각 보 부재의 전소성모멘트의 80 % 지점과 특수모멘트골조에서 접합부에 요구되는 회전성능인 0.04 rad를 표시한 것이다. 실험 결과 정방향 2155 kN·m, 부 방향 1302 kN·m의 최대내력을 보였다. 에너지 소산장치의 개구부가 인장력을 받는 부 방향에서 목표 최대내력인 보 부재의 전소성모멘트의 80 % ($0.8 M_{p,b} = 1,114.42 \text{ kN}\cdot\text{m}$)를 17 % 가량 상회하였다. 실험 중 6 Step (목표회전각 : 0.02 rad) 가력 부터 볼트의 슬립에 의한 순간적인 내력 저하

Table 2. Steel material characteristics

Specimen	Thickness (mm)	Yield Strength σ_y (MPa)		Young's Modulus E (MPa)	Tensile Strength σ_u (MPa)		Yield Ratio σ_y/σ_u (%)	Elongation (%)						
		KS*	Test result		KS*	Test result		KS*	Test result					
SM355	Flange	35	345	366.01	207,932	490-630	536.56	68	19	30				
	Web	20		355.58						208,455	506.85	70	28	
SS275	Flange	20	265	303.54	210,929	410-550	458.25	66	21	30				
	Web	12	275	297.53						211,891	457.74	65	18	29
	Plate	40	265	272.43						208,840	465.89	58	21	34

*Minimum requirements according to KS D 3503(SS275)^[14] and KS D 3515(SM355)^[15]

Table 3. Test result

Loading direction	Initial Stiffness (kN/mm)	Yield rotation angle (rad)	Yield Moment (kN·m)	Maximum Moment (kN·m)
+	10.9	0.009	883	2,155
-	10.6	0.008	806	1,302

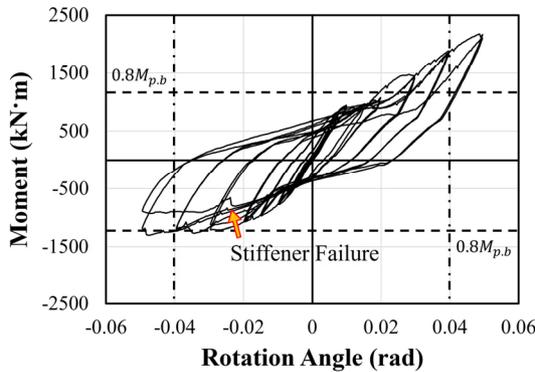
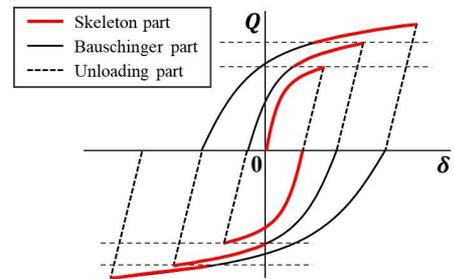
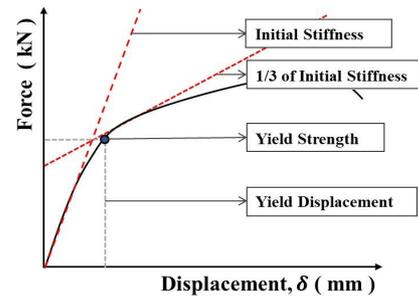


Fig. 8. Moment-rotation angle curve

가 지속적으로 발생하였다. 7 Step(목표회전각 : 0.03 rad)에서 보 부재의 비틀림이 발생하기 시작하였으며, 8 Step(목표회전각 : 0.04 rad) 1 Cycle에서 에너지 소산 장치의 개구부에 균열이 발생하였다. 9 Step 2 Cycle(목표회전각 : 0.05 rad)에서 Actuator의 가력 축 비틀림이 심화되어 실험이 종료되었다. 실험 결과 도출된 모멘트-회전각 관계는 반복이력곡선의 형태로 실험체의 초기 강성 및 항복지점을 명확히 하기 위하여 일 방향 단조 가력 곡선으로 추출해야 할 필요가 있다. 이를 위하여 Fig. 9과 같은 방법으로 이력곡선을 추출하였고, 일 방



(a) Hysteresis curve extraction method



(b) General yield point method

Fig. 9. Structural performance analysis method

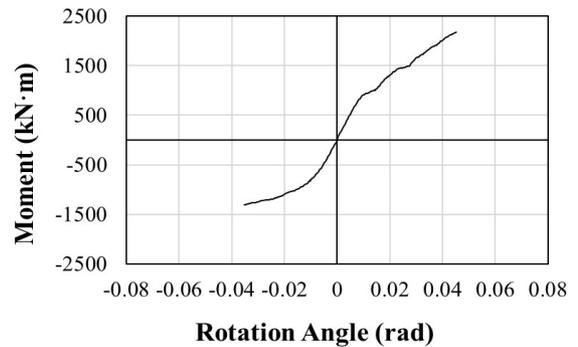


Fig. 10. Skeleton curve

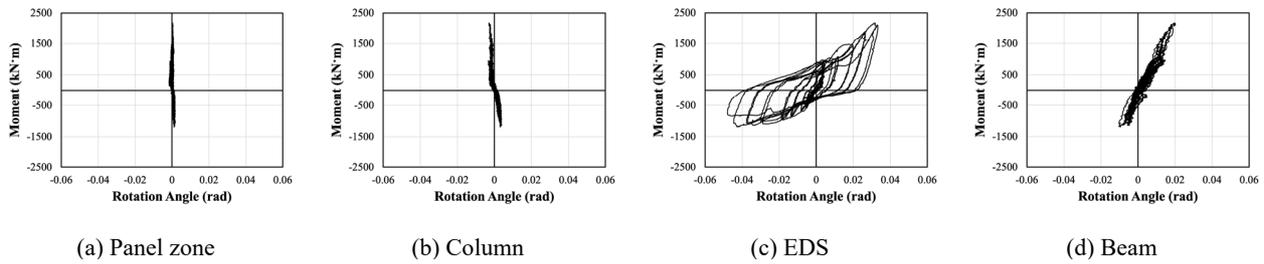


Fig. 11. Moment-rotation angle curve by element

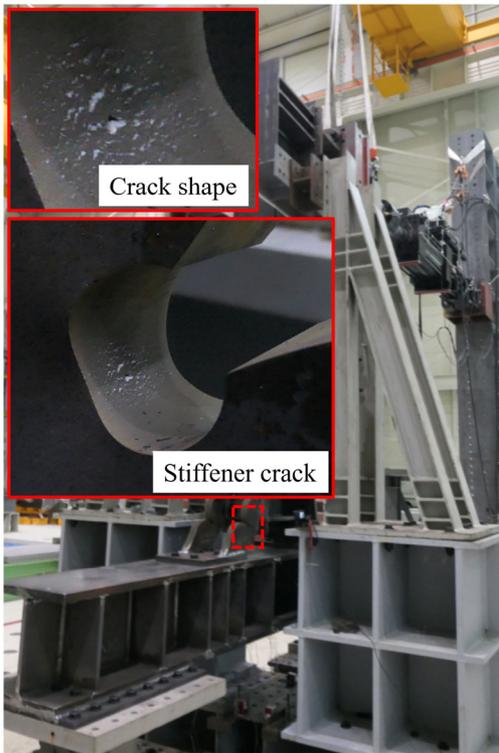


Fig. 12. Failure mode

항 단조 가력에 의한 하중-변형의 이력 곡선과 골격곡선 부가 거의 일치함이 선행 연구^{[16],[17]}를 통하여 증명된 바 있다. Fig. 9에 나타난 이력 곡선의 분해 방법을 적용하여 항복점 산정 시에는 General Yield Point Method^[18]를 이용하였다. 실험체의 골격 곡선을 Fig. 10에 나타내며 이에 따른 주요 구조 성능을 Table 3에 나타내었다.

실험 결과 3.1절에서 전술한 요구 성능을 충족하는 결과를 확인하였다. 다만 실험체의 모멘트-회전각 관계에서 볼 수 있듯이 에너지 소산 스티프너의 개구부가 압축하중을 받는 정방향 가력 시 국부적인 좌굴에 의하여 내력 저하 이후 다시 내력이 상승하는 핀칭 현상이 발생하였다. 핀칭 현상의 발생 및 에너지 소산 스티프

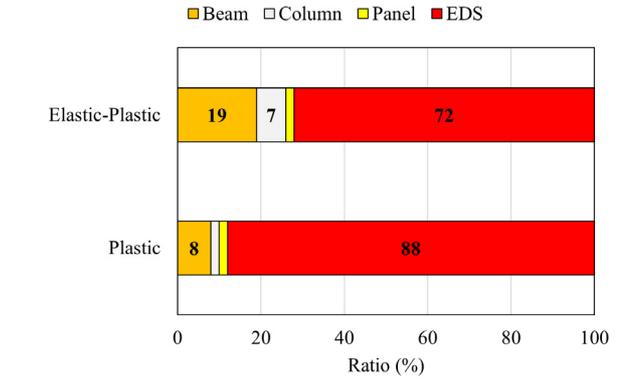


Fig. 13. Energy distribution ratio by member

너의 압축거동으로 인한 전단좌굴을 억제하기 위하여 판폭 두께비 등에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 정·부 방향의 내력 차가 발생하였으며, 이는 상부 접합물과 하부 접합물의 거동 차이로 인한 비대칭에서 비롯된 것으로 사료된다. 이에 따라 향후 안정적인 이력루프를 확보하기 위한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

실험 결과에 따른 접합부의 하중-변위 관계는 보, 기둥 부재 및 에너지 소산장치 각 부재의 변형을 포괄적으로 나타낸다. 계측 결과를 이용하여 변형 요소별 하중-변위 관계로 추출하였으며, 요소별 수직 변형을 Fig. 11에 나타내었다. 탄소성 변형 대부분이 에너지 소산장치에 집중되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 12는 균열이 발생한 에너지 소산 스티프너와 균열 형태를 확대하여 나타낸다.

실험체가 소산한 전체 에너지를 부재 요소별 에너지 분담비로 표현하면 Fig. 13과 같다. 그래프 상단의 Elastic-Plastic은 탄소성영역 전체의 에너지에 대한 요소별 에너지 분담비를 나타낸다. 특히, 그래프 하단의 Plastic은 소성영역만을 고려한 변형에너지 비율로 소산장치의 분담에너지가 보부재의 분담에너지보다 11배

Table 4. Error in the predictive formula

Yield Moment (kN·m)			Initial Stiffness (kN/mm)		
Predict formula	Test Result	Error (%)	Predict formula	Test Result	Error (%)
844	806	4.82	11.6	10.6	8.76

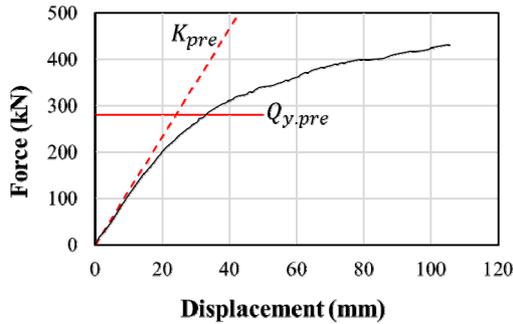


Fig. 14. Comparison of predictive formula, test result

가량 높은 것으로 나타났다. 이를 통해 소성 에너지의 대부분을 에너지 소산장치에서 부담하는 것을 확인할 수 있다.

Table 4, Fig. 14은 2장에서 제시한 식 (1)–식 (7)을 통해 계산된 값과 실험 결과를 나타낸다. Fig. 14의 K_{pre} 는 예측 식으로 산출한 탄성강성을 의미하며 $Q_{y.pre}$ 는 예측 식으로 산출한 항복강도를 의미한다. 예측식과 실험 결과의 비교 시 에너지 소산 스티프너가 인장 하중을 받는 방향 거동에 대하여 항복 내력과 초기 탄성 강성의 오차는 각각 5%, 9% 이내의 수준으로 나타났으며, 본 논문에서 제안한 예측식을 활용하여 접합부의 구조성능을 확인할 수 있음을 확인하였다.

그러나, 예측식의 산출 과정에서 상부 접합물의 강성은 없는 것으로 가정한 결과, 실제 T-stub가 보유한 강성에 의하여 중립축이 접합부의 하방으로 이동하게 된다. 이러한 중립축의 이동에 의하여 접합부 회전 거동 시 회전 축과 에너지 소산장치 스티프너의 간극거리는 작아지게 되고 기둥 플랜지와 에너지 소산장치가 이루는 각은 커지게 되어, 에너지 소산장치가 받는 축력은 예측식 보다 커지게 된다. 이로 인하여 예측식과 실험 결과의 차이가 발생하였을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 내진설계에 적용 가능한 에너지 소산장치의 형상 및 구조특성 예측식을 제안하고 실험을 통하여 에너지 소산장치의 구조특성을 평가하였다.

- (1) 제안한 에너지 소산장치의 경우 다른 부재와의 연결 방식에 용접부를 두지 않고 볼트 접합하여 시공이 용이하고 지진에 따른 손상 발생 후 손상이 발생한 에너지 소산장치만을 교체함으로써 보수가 용이할 것으로 판단된다.
- (2) 실험 결과 대부분의 소성 에너지를 장치에서 소산하여 다른 부재의 탄성 거동을 유도하였으며, 이는 주요 부재의 재사용 가능성을 시사한다 판단된다.
- (3) 대상 장치가 설치된 보-기둥 접합부는 특수모멘트골조가 요구하는 내진성능을 충족하였고, 이에 따라 내진 성능을 요구하는 골조에도 대상 장치를 적용가능할 것으로 판단된다. 단, 안정적인 이력루프를 확보하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- (4) 구조 특성 예측식과 실험 결과의 비교 결과 내력의 경우 5%, 강성의 경우 10% 이내의 오차가 발생하여, 본 논문에서 제시한 예측식을 활용하여 에너지 소산장치를 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구 결과 보-기둥 접합부에 대상 접합 시스템 적용을 통하여 부재 수준의 재사용이 가능한 경제적인 내진설계가 가능한 것으로 판단되며 보다 안정적인 이력 거동을 위하여 교체 용이한 최적의 상·하부 접합물의 형상 개발에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌(References)

- [1] Seol, Y.-H., and Oh, S.-H. (2023) Effect of Load Speed on Seismic Performance of Panel Yielding Extended Endplate Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.5, pp.283–292 (in Korean).
- [2] SAC Joint Venture (2000) *Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings*, FEMA-351, Federal Emergency Management Agency, USA.
- [3] SAC Joint Venture (2000) *State of the Art Report on Connection Performance*, FEMA-355D, Federal Emergency Management Agency, USA.
- [4] Takeuchi, T., Tsumagari, K., Suzuki, K., Saeki, E., Yamada, S., and Wada, A. (2004) Design and Performance of Passively Controlled Building with Elasto-Plastic Damper at Beam Ends, *AIJ Journal of Technology and Design*, Architectural Institute of Japan, Vol.10, No.20, pp.125–130 (in Japanese).
- [5] Lee, C.H., Kim, J.H., Jeon, S.W., and Kim, J.H. (2006) A Balanced Panel Zone Strength Criterion for Reduced Beam Section Steel Moment Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.1, pp.59–69 (in Korean).
- [6] 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 AIK*, Architectural Institute of Korea, Vol.24, No.2, pp.51–54 (in Korean).
- [7] Kishiki, S., Yamada, S., Takeuchi, T., Suzuki, K., Saeki, E., and Wada, A. (2004) A Study on Passive Response-Controlled-Structures with Hysteretic Dampers at the Bottom Flange of Beam-Ends, *Proceedings of Passive Control Symposium 2004*, Tokyo Institute of Technology, Japan (in Japanese).
- [8] Oh, S.H., and Ryu, H.S. (2007) Sustainable Structural System Using Passive Energy Absorption Devices, *Proceedings of the 9th China-Korea-Japan Symposium on Structural Steel Construction*, KSSC, pp.38–48.
- [9] Korean Society of Steel Construction (2024) *Seismic Design Standard for Steel Structure*, KDS 14 31 60 : 2024, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- [10] Lee, M.J. (2006) Initial Stiffness Evaluation of T-Stub Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.6, pp.805–813 (in Korean).
- [11] Yang, J.G., Kim, Y., and Park, J.H. (2012) Prediction Model for the Initial Rotational Stiffness of a Double Split T Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.3, pp.279–287 (in Korean).
- [12] Kim, H.J., Choi, J.Y., Lee, J.H., and Yang, J.G. (2022) A Proposal of Initial Stiffness Prediction Model for Geometric Parameters of T-Stub Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.6, pp.353–361 (in Korean).
- [13] SAC Joint Venture (2000) *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*, FEMA-350, Federal Emergency Management Agency, USA.
- [14] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Rolled Steels for General Structure*, KS D 3503:2018, KATS (in Korean).
- [15] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Rolled Steels for Welded Structures*, KS D 3515:2018, KATS (in Korean).
- [16] Kato, B., Akiyama, H., and Yamanouchi, Y. (1973) Predictable Properties of Material under Incremental Cyclic Loading, *Proceedings of IABSE Symposiums*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Portugal, pp.119–124.
- [17] Matsumoto, Y. (1999) *A Study on Beam-End Failure and Ultimate Seismic Performance in Rigid Steel Frames*, Ph.D. Dissertation, University of Tokyo, Japan (in Japanese).
- [18] Jo, H.-K., and Choi, C.-S. (2015) Structural Performance of Y Type Plate Connection between Circular CFT Column and H Shape Steel Beam, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.19, No.6, pp.112–118 (in Korean).

요 약: 기존의 내진 설계 방법은 소성 변형으로 인해 부재를 재사용할 수 없다는 한계가 있다. 이는 최적의 내진 설계 방법이 아닌 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 부재 수준에서 재사용할 수 있는 에너지 소산 장치를 제시하고자 한다. 에너지 소산장치는 보-기동 접합부에 설치하여 실제 규모의 실험을 수행하였다. 실험 결과 보와 기동의 부재별 변형률 및 변형을 검토한 결과 모두 탄성 거동한 것을 확인하였다. 회전 능력과 강도는 국내 설계기준에서 제시한 수준 이상의 내진 성능을 확보한 것을 확인하였다. 또한 실험체 설계를 위하여 제시한 예측식은 최대 10%의 오차가 발생한 것으로 나타났다. 따라서 대상 장치를 적용할 경우 설계 의도에 따라 주요 부재를 재사용할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어: 강구조, 보-기동 접합부, 손상제어, 에너지 소산장치, 재사용
