

하중속도가 패널 항복형 확장단부판 접합부의 내진성능에 미치는 영향

설영훈¹ · 오상훈^{2*}

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

Effect of Load Speed on Seismic Performance of Panel Yielding Extended Endplate Connections

Seol, Young-Hun¹, Oh, Sang-Hoon^{2*}

¹Graduate Student (Master Course), Dept. of Architecture Engineering, Pusan University, Busan, 46241, Korea

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

Abstract - The study investigates the impact of loading speeds on steel connections with a weak panel zone. Static and dynamic experiments were conducted on two types of connections. While the elastic region showed similar results in static and dynamic tests, significant differences were observed in the plastic region. Dynamic tests revealed reduced ductility in the panel zone due to high loading rates, resembling weak-beam connections. Additionally, the dynamic tests showed decreased strength and energy dissipation capacity compared to static tests. These findings underscore the critical importance of considering loading rates when designing and analyzing connections for extreme load conditions.

Keywords - Steel Structure, Connection, Loading speed, Yield type of panels, Seismic Performance

1. 서론

일반적으로 건축구조물의 내진성능은 항복 메커니즘에 따라 상이한 것으로 알려져 있다. 기동 항복형 골조에 비해 보 항복형 골조가 내진성능이 우수한 것으로 알려져 있으나 접합부에 위치하고 있는 패널이 선(先)항복하는 패널 항복형의 경우 패널의 복원력 특성이 우수하여 변형능력이 가장 우수한 것으로 인식되어 왔다^{[1]-[3]}. 강구조 접합부는 구조체의 거동 및 응력전달과 같은 구조적인 문제와, 제작 및 설치 등 시공상의 문제에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다. 따라서 항복 메커니즘을 고려한 설계와 보-기동 접합부에 대한 연구는 필수불가결하다, 그러나 대부분의 연구는 정적 실험에 기반하여 수행되어, 지진과 같이 하중속도가 빠

른 동적실험에서의 강구조의 소성변형 및 약패널 접합부의 성능에 대한 평가는 아직 부족한 편이다.

강재의 동적 하중의 영향에 대한 연구는 건축구조물의 동적 응답을 이해하는 데 매우 중요한 역할을 한다. 이에 관한 선행 연구로는 Bomel Limited^[4], 국내에서는 Chang and Jang^[5], Kim and Choi^[6]가 재료의 연성 감소 및 최대 변형률 감소 등을 초래하는 동적 하중의 영향을 밝혀냈다. 이와 더불어, Lee and Oh^[7] 등은 하중속도가 단일 접합부에 미치는 영향을 다루었다. 그럼에도 불구하고, Sabuwala *et al.*^[8]은 비주기적인 극한 하중에 노출되는 철골 접합부의 동적 거동에 대한 충분한 실험 데이터의 부재를 언급한 바 있다. 따라서 재료에 대한 연구와 비교해 보면, 부재나 구조물에 대한 동적 하중 조건의 영향에 대한 연구는 매우 부족한 상태이다.

높은 하중속도 하에서 강재의 응력-변형 특성, 파괴 강도, 탄성 및 소성변형 특성 등은 변화할 수 있고, 이러한 특성의 변화는 접합부의 안전성과 설계에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 연구에서는 동적 하중 조건 하에서 강구조 접합부의 거동을 규명하기 위해 패널 항복형 확장단부판 보-기동 접합부를 대상으로 실험을 수행하였다.

Note.-Discussion open until April 30, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 15, 2023; revised on October 05, 2023; approved on October 05, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. osh@pusan.ac.kr

하중속도가 패널 항복형 확장단부판 접합부의 내진성능에 미치는 영향

이를 위해 FEMA 350^[10]에서 제시하는 반복 하중 절차를 활용한 정적실험과 함께 El Centro NS 지진파를 기반으로 원파의 비율을 변화시켜 동적실험을 수행하였다. 이를 통해 하중속도에 따른 보-기둥 접합부의 파괴 모드와 구조적 성능을 비교하고 분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험체 및 계속 계획

확장단부판 접합부 실험의 모든 부재는 SS275 강재로 제작하였으며, Fig. 1과 같이 보와 엔드플레이트는 필렛 용접으로 접합되었다. 또한, 기둥과 엔드플레이트의 접합에는 F10T-M20 볼트가 사용되었다. 실험체는 모두 패널 항복형 접합부를 구성하기 위하여 Table 1과 같이 부재를 선정하였다. 실험 과정에서 대상 접합부의 형태에 따라 실험체는 Series I과 Series II로 구분되며, 정적실험과 동적실험에서 접합 상세는 동일하게 유지되었다. 기둥의 길이는 정적실험과 동적실험 모두 1,900 mm로 동일하나 설치 등의 문제로 보의 길이는 정적실험과 동적실험 각각 1,700 mm와 1,622 mm로 오차가 있어 보 길이의 차이를 반영한 결과 분석이 요구된다. 4개의 실험체는 각각 ‘Series I-S’, ‘Series I-D’, ‘Series II-S’, ‘Series II-D’로 명명하였다, S와 D는 각각 정적(static)과 동적(dynamic)을 의미한다.

패널 존과 보, 기둥의 강도비를 구하기 위한 식은 다음과 같다. (식 (1)–식 (3)^[9], Fig. 1 참조)

$$Q_{pz} = 0.6F_{yc}d_c t_{pz} \left(1 + \frac{3b_c t_{fc}^2}{d_b d_c t_{pz}} \right) \quad (1)$$

$$M_B = F_{yb} S_x \quad (2)$$

$$M_C = 2F_{yc} S_x \quad (3)$$

여기서, b_c = 기둥 플랜지의 폭,

d_b = 보의 춤,

d_c = 기둥의 춤,

t_{pz} = 패널 존(기둥 웨브)의 두께,

t_{fc} = 기둥 플랜지의 두께,

F_{yc} = 기둥 웨브의 항복강도.

정적·동적 실험에서의 계속 계획은 동일하며, 변위계는 보 단부의 연직변위와 기둥의 변위, 그리고 패널 존의 변위를 측정하였다. 변형률 게이지는 보의 최대 응력 예상지점인 플랜지 상·하단 각 5개소, 웨브 5개소, 패널에 3축 방향으로 9개소까지 총 24개소에 부착하였다(Fig. 2 참조).

Table 1. Test subject

Specimen		Column (mm)	Beam (mm)	Endplate (mm)	M_C (kN·m)	M_{PZ} (kN·m)	M_B (kN·m)	$M_{PZ} : M_B : M_C$
Series I	S	H-200×200×8×12	H-244×175×7×11	410×200×25	304.70	95.15	162.04	0.59 : 1 : 1.88
	D							
Series II	S	H-250×250×9×14	H-250×250×9×14	430×250×30	558.52	127.41	279.26	0.46 : 1 : 2
	D							

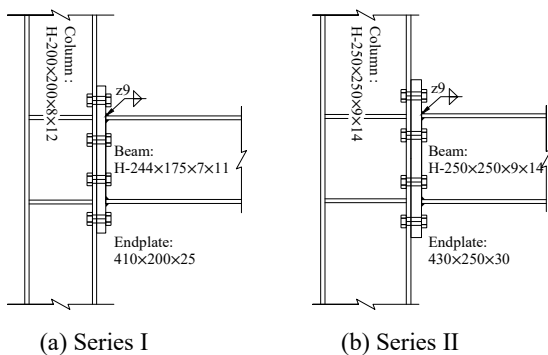


Fig. 1. Details of connections

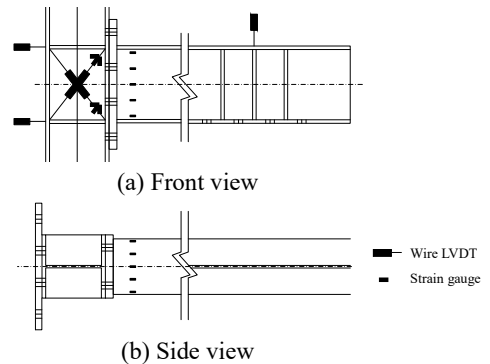


Fig. 2. Instrument installation diagram

2.2 실험계획 및 방법

2.2.1 정적실험

Fig. 3는 정적실험의 설치도로 실험체는 기동 양단에 1축 회전을 허용하는 지그(zig)를 이용하여 반력 바닥에 볼트로 고정하며, 보 가력부에 3축 회전을 허용하는 500 kN 용량의 액추에이터를 설치한다. 가력 방법으로는 Fig. 4와 같이 FEMA 350^[10]에서 제시하는 반복 재하 절차를 사용하여 가력한다. 정적실험에서 가력 속도는 1 mm/s로 설정하여 변위를 조절한다. 시험체가 파괴되지 않을 경우 액추에이터의 용량 한도까지 최대한 하중을 가하여 시험체의 종국상태를 관찰한다. 실험 중 보 부재의 횡방향 좌굴 방지를 위해 횡좌굴 방지 지그를 액추에이터 근처에 설치한다.

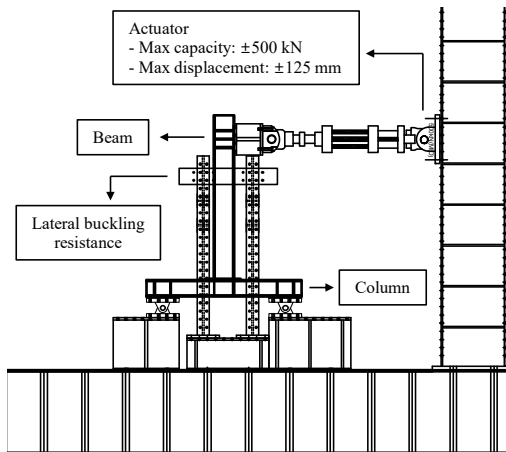


Fig. 3. Static test setup

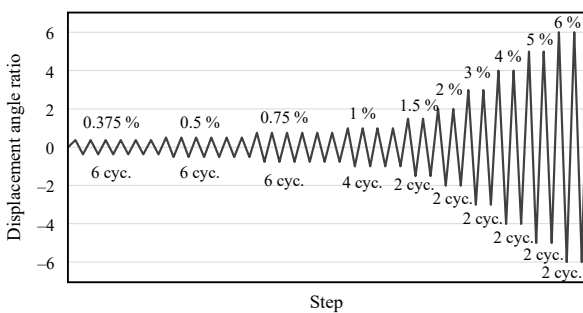


Fig. 4. Static test protocol

2.2.2 동적실험

Fig. 5는 진동대를 이용해 기존의 정적실험과 유사한 조건에서 동적 하중을 재하하기 위한 동적실험의 설치도로, Oh^[11], Matsumoto^[12] 등의 연구에 사용된 실험방

법을 참고하여 설계한다. 진동대 실험의 공간적 제약에 따라 두 개의 진동대를 사용하며, 실험체는 정적실험과 동일하게 실험체 기동 양단에 1축 회전을 허용하는 지그를 이용하여 진동대 바닥에 볼트로 고정하였다. 진동대 바닥과 동적가력을 위한 질량체 사이에는 적층 고무를 이용하여 제작한 면진장치 및 1축 방향으로의 거동을 보조하기 위한 LM 가이드를 각각 4개씩 볼트로 설치한다. 이때 질량체의 질량은 약 30 ton이며, 면진장치의 수평강성은 260 N/mm이다. ‘1축 회전지그-로드셀-1축 회전지그’로 구성된 ‘연결체’ 설치를 위하여, 진동대 A에 설치된 실험체와 진동대 B에 설치된 질량체 사이를 볼트로 접합한다. 실험 시 보의 횡좌굴 방지를 위하여 횡좌굴 방지 지그를 설치하는 것이 권장되나, 계측 및 설치 과정에서의 공간적 제약을 고려하여 연결체에 설치하는 것으로 대체한다.

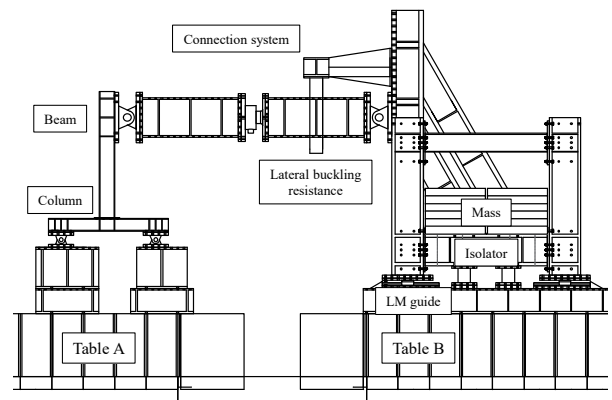


Fig. 5. Dynamic test setup

입력지진파는 해석 등에 자주 사용되는 대표적인 지진파들 중 하나인 El Centro NS 지진파(Fig. 6 참조)를 선정하였으며, 실험 시 가진단계별 원파에 대한 가속도 스케일 비율을 조절하여 총 9스텝 가진한다. 실험 단계별 가진패턴은 Table 2와 같다.

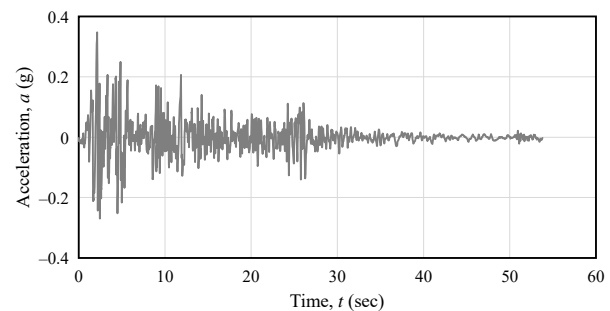


Fig. 6. El Centro NS

Table 2. Seismic excitation patterns by step

Step	Ratio to the original wave (%)	Peak ground acceleration (g)
1	10	0.0348
2	20	0.0697
3	30	0.1045
4	50	0.1742
5	70	0.2439
6	100	0.3485
7	130	0.4530
8	150	0.5227
9	170	0.5924

2.3 재료인장시험

Table 3에 ‘KS B 0801 금속재료 인장시험편’에 따라 1A호 인장시험결과로 얻은 강재특성을 나타냈다^{[13],[14]}. 총 24개 인장시험편의 재료인장시험결과에 따른 사용 강재의 기계적 성질 값을 산정한 결과, ‘KS D 3503 일반 구조용 압연 강재’^[15]에서 제시하고 있는 SS275 강재의 기계적 성질의 기준값을 만족하였으며 기준값은 Table 3에 적시하였다.

Table 3. Result of material tensile test

<i>t</i> (mm)	Modulus of elasticity <i>E</i>	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	Yield strength ratio σ_y/σ_u	Elongation
≤ 16	-	$275 \leq$	410–550	-	$0.18 \leq$
$16 < t \leq 40$		$265 \leq$			$0.21 \leq$
7	203,054	324.7	453.1	0.72	0.27
8	213,201	326.4	464.9	0.70	0.24
9	203,808	310.8	460.8	0.67	0.27
11	201,074	322.8	451.2	0.72	0.26
12	205,765	334.5	470.6	0.71	0.29
14	201,393	322.1	460.8	0.70	0.27
25	209,462	276.6	436.9	0.63	0.24
30	198,492	272.2	435.3	0.63	0.24

3. 실험결과

실험 중 볼트 풀림이 발생한 경우 재(再)체결 후 계속

진행한다. 실험의 결과데이터를 통해 도출한 모멘트-회전각 관계는 반복이력곡선의 형태를 띠고 있으므로, 실험체별 구조성능을 파악하기 위하여 일방향 단조가력곡선을 도출할 필요가 있다(Fig. 7 참조). 이때 이력곡선 분해를 통해 도출하는 골격곡선은 접합부 단조가력 실험결과에 따른 이력곡선과 거의 일치함이 Kato *et al.*^[16] 등 기존 연구를 통해 증명된 바 있다. 골격곡선 분석은 general yield point method(Fig. 8 참조)를 이용한다. 항복 하중은 하중-변위 관계에서 탄성 강성 기울기 직선과 탄성 강성의 1/3 기울기의 직선의 교점에 해당하는 하중을 항복 하중으로 정의하였다.

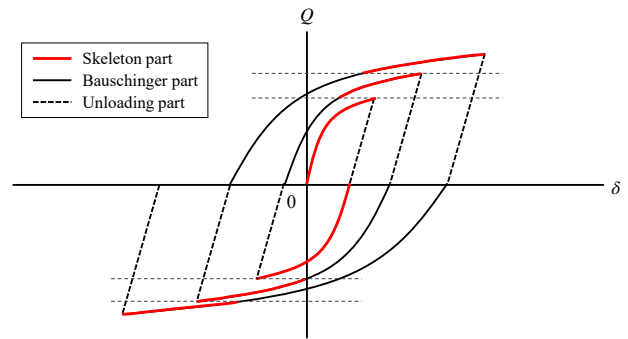


Fig. 7. Hysteresis curve decomposition method

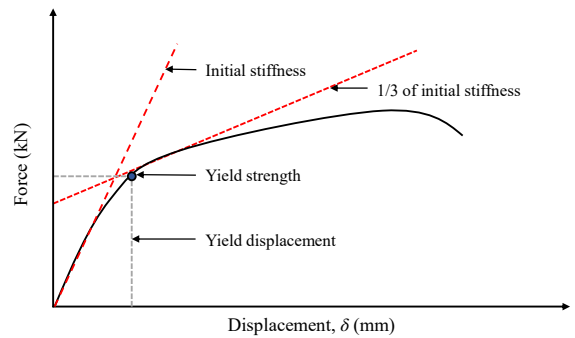


Fig. 8. General yield point method

실험결과를 통해 나타난 각각의 실험체에 대한 초기 강성, 항복 하중 및 최대 하중 등의 구조 성능에 대해 Table 4에 정리하였다.

3.1 Series I

Fig. 9은 Series I-S 실험체의 모멘트-회전각 관계로 6 %rad까지 강도 저감이 발생하지 않았고, 정방향(압축 방향)에서 최대 157.53 kN·m, 부방향(인장 방향)에서 155.29 kN·m의 값을 보였다. 5 step(1.5 %rad) 가력

중에 기둥 패널 존과 플랜지에서 국부적인 좌굴이 발생하였다.

Fig. 10은 Series I-D 실험체의 파단이 발생한 9스텝의 모멘트-회전각 관계로 4 step(50 %)부터 패널 존과 기둥 플랜지의 국부 좌굴이 관찰되었다. 8 step(150 %)에서 기둥 플랜지에 균열이 발생했으며, 9 step(170 %)에서는 보의 용접부에서 파단이 발생하였고 보 웨브에 면의 방향으로 국부 좌굴이 발생하였다. 파단이 발생한 9 step에서는 정방향에서 최대 146.88 kN·m, 부방향에서 134.98 kN·m의 값을 보였다.

3.2 Series II

Fig. 11은 Series II-S 실험체의 모멘트-회전각 관계로 실험체는 4 step(1 %rad)부터는 기둥 패널 존과 플랜지에서 좌굴이 관찰되었으며 10 step(6 %rad)까지 강도의 저감이 없었으나, 액추에이터의 최대 허용용량인 120 mm 가력 시 2 cycle에서 내력이 약 10 % 저감되는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 Series II-D 실험체의 파단이 포함된 9 step의 모멘트-회전각 관계로 3 step(30 %)에서 패널 존과

Table 4. Results of test

Specimen		K_i (kN/mm)	M_y (kN·m)	θ_y (rad)	M_u (kN·m)	θ_u (rad)	μ (θ_u/θ_y)	W_p (kN·m)	$M_y \cdot \theta_y$ (kN·m)	η ($W_p/M_y \cdot \theta_y$)
Series I	S	3.27	101.5	0.0095	157.53	0.0658	6.92	29.49	0.97	30.41
	D	3.23	108.9	0.011	146.88	0.054	4.91	26.02	1.19	21.85
	D/S	0.98	1.07	1.1	0.94	0.94	0.82	0.88	1.23	0.72
Series II	S	3.84	125.7	0.010	231.34	0.06	6.40	63.37	1.37	46.20
	D	3.80	130.7	0.010	202.88	0.055	5.50	29.61	1.84	16.14
	D/S	0.99	1.04	1.01	0.88	0.85	0.86	0.47	1.34	0.35

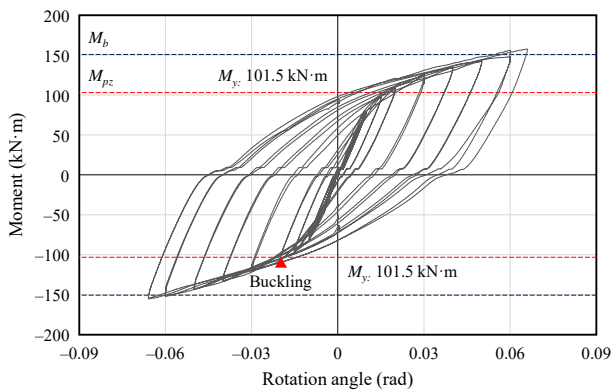


Fig. 9. Moment-rotation angle of Series I-S

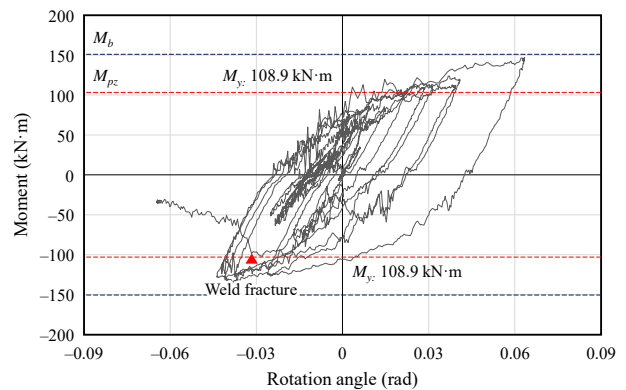


Fig. 10. Moment-rotation angle of Series I-D

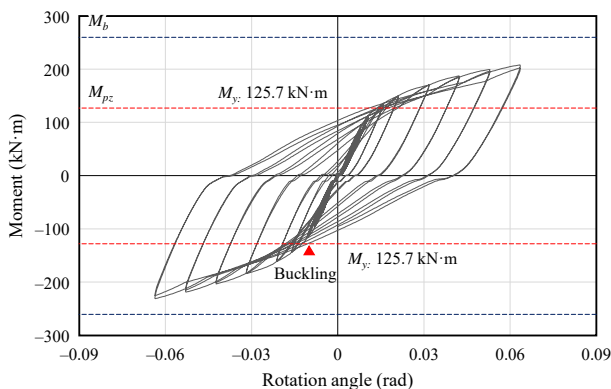


Fig. 11. Moment-rotation angle of Series II-S

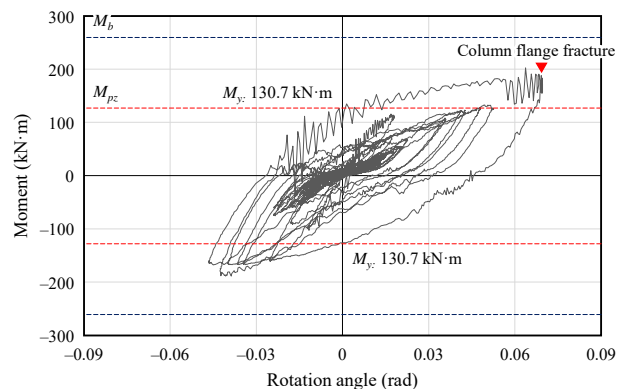


Fig. 12. Moment-rotation angle of Series II-D

보 플랜지에 밀스케일이, 5 step(70 %)에서 패널 존과 기둥 플랜지의 국부 좌굴이 관측되었다. 7 step(130 %)에서는 기둥 패널 존의 스티프너 용접부에 미세한 균열이 관측되었다. 8 step(150 %) 이후에는 기둥 플랜지에 균열이 발생하였고, 9 step(170 %)에서는 기둥 플랜지에 파단이 발생하였다.

4. 하중속도에 따른 실험결과 분석

4.1 초기강성 및 내력

접합부의 탄성 강성은 구조물이 탄성 범위 내에서 지진하중에 따른 층간 변위를 최소화하기 위해 중요한 요소로, Table 4에 나타난 바와 같이 각 시험체의 하중-변위 관계 곡선에서 동적실험이 정적실험 대비 98 %~99 %로 탄성 강성이 유사하게 나타났다.

각 실험에 따른 이력특성의 변화를 비교한 결과는 Figs. 13~14와 같다. 항복내력과 항복변형각의 경우 동적실험이 정적실험 대비 최대 약 1.1배 정도 크게 나타

났다. 최대 내력의 경우 동적실험이 정적실험 대비 약 0.88배로 작게 나타났으며, 정적실험의 최대 내력에 미치지 못하고 파단이 발생하는 양상을 보였다.

최대 모멘트에서 변형각은 동적실험이 정적실험 대비 약 0.9배로 작게 나타났다. 실험 결과 동적실험에서 정적실험 대비 최대 내력이 감소하여 변형능력이 저하되는 이력특성이 나타났다. 이는 기존의 재료에 대한 연구들로 밝혀진 빠른 하중속도에 의해 항복내력과 최대 내력이 증가하며, 최대 변형률이 감소한다^{[4]-[6]}는 연구결과와 상이하며, 부재나 구조물에 대한 동적 하중 조건의 영향에 대한 연구의 필요성을 야기한다.

4.2 파괴 모드

각 실험체의 종국상태 사진은 Figs. 15~16과 같다. 정적실험의 경우 Series I, II 실험체 패널 존과 기둥 플랜지의 소성변형으로 인한 국부좌굴이 발생했다(Fig. 14 참조). Series I-D 실험체의 경우 9 step에서 보 용접부에서 취성 파단이 발생했고, Series II-D 실험체의 경우 9 step에서 기둥 플랜지에 파단이 발생하였다(Fig. 15 참조). 각 실험체 별 파괴 모드는 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Failure mode comparison

Specimen		Failure mode
Series I	S	Panel zone, column flange local buckling
	D	Beam flange weld fracture, web local buckling
Series II	S	Panel zone, column flange local buckling
	D	Column flange fracture

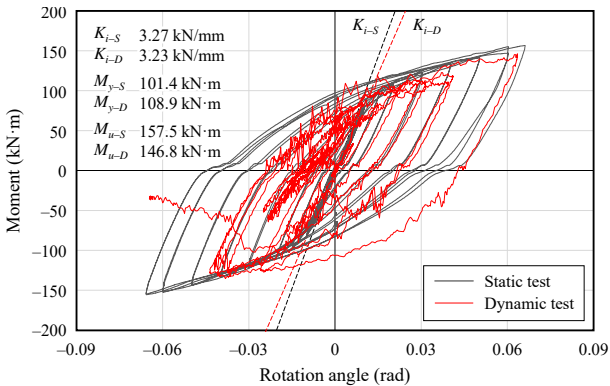


Fig. 13. Moment-rotation angle of Series I

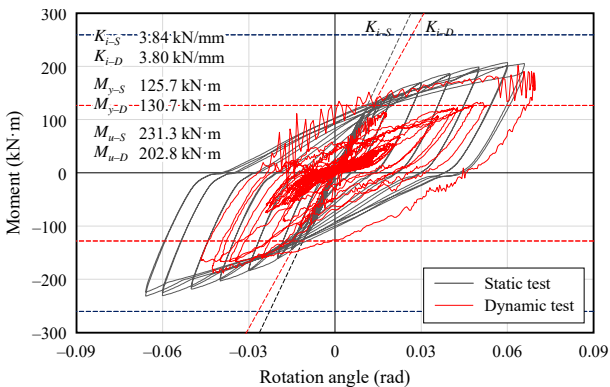
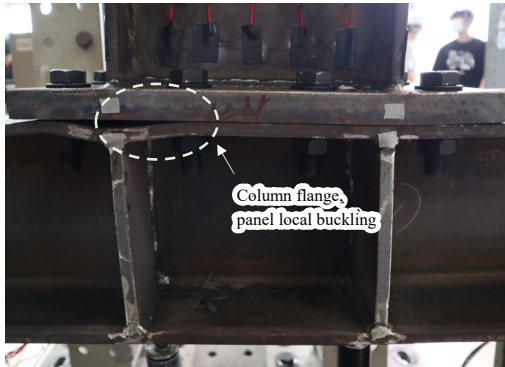


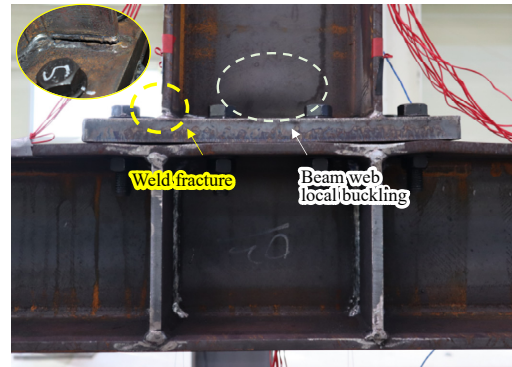
Fig. 14. Moment-rotation angle of Series II

4.3 변형률 분포에 의한 거동 분석

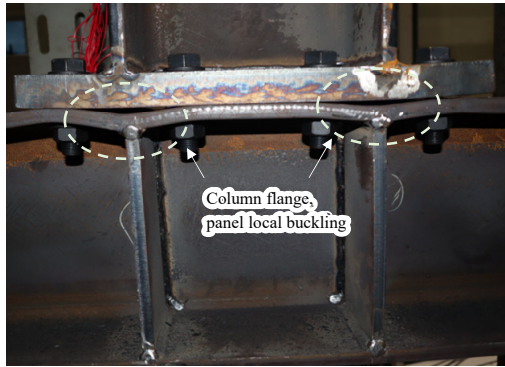
Figs. 17~18은 각 실험체별 보의 최대 응력지점과 패널 존의 최대 응력지점에서의 변형률 분포로 그래프상의 적색 파선은 재료인장시험을 통해 얻은 재료의 항복 변형률이다. 정적실험에서는 각각 6 step, 4 step에서 패널이 소성변형을 한 것으로 판단되며, 이때 보는 탄성거동 중에 있다. 동적실험에서는 정적실험과 달리 보와 패널이 동시에 소성거동에 관여하는 것으로 나



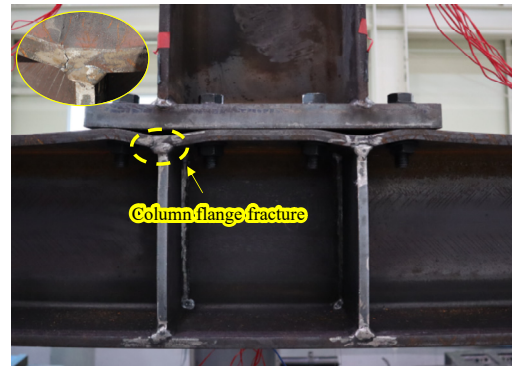
(a) Series I-S



(a) Series I-D



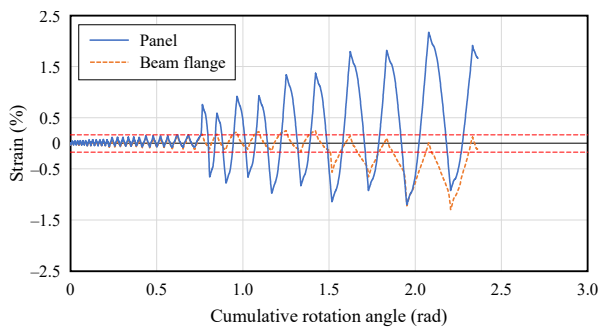
(b) Series II-S



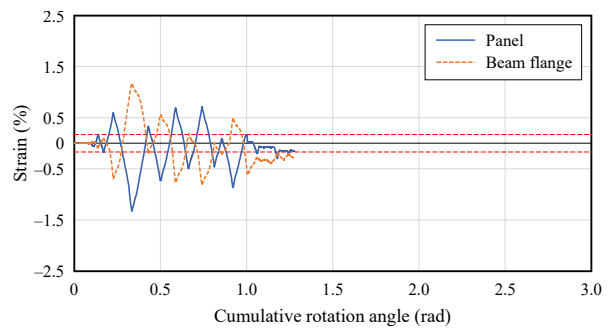
(b) Series II-D

Fig. 15. Failure mode of static test

Fig. 16. Failure mode of dynamic test

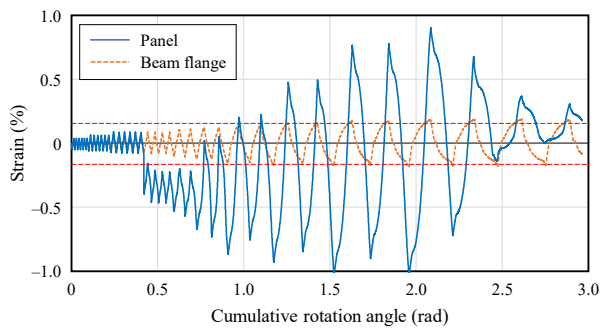


(a) Static test

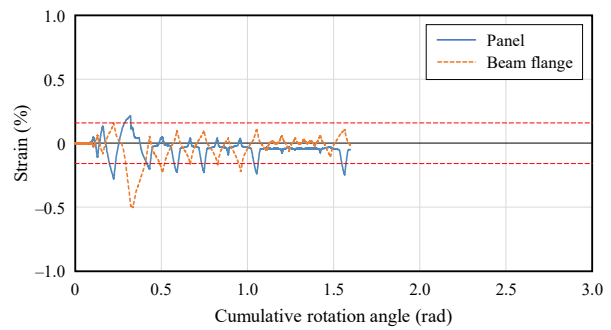


(b) Dynamic test

Fig. 17. Strain data of Series I



(a) Static test



(b) Dynamic test

Fig. 18. Strain data of Series II

하중속도가 패널 항복형 확장단부판 접합부의 내진성능에 미치는 영향

타난다. 이는 동적실험에서 높은 하중속도에 의해 정적 실험과 달리 패널 존에서 충분한 소성변형을 하지 못하고 보에서도 항복이 진행된 것으로 판단된다.

4.4 패널 존의 소성변형량 및 에너지소산능력

설계하중 이상의 지진 시, 비탄성영역에서 취성파괴에 의한 구조물의 조기 붕괴를 방지하기 위해 항복 후의 에너지흡수능력 및 소성변형능력이 확보되어야 지진에 대한 안정성을 얻을 수 있다.

본 연구에서 에너지흡수능력은 정적실험의 경우 역추에이터의 최대 허용용량까지의 각 사이클별 누적에너지의 총합이며, 동적실험의 경우 파단단계에서의 누적에너지 총합이다. 본 연구에서 H형강 기둥-보 접합부 이력거동에 따른 각 시험체 패널 존의 전단변형은 Fig. 19, 식 (4)의 방식으로 구했다.

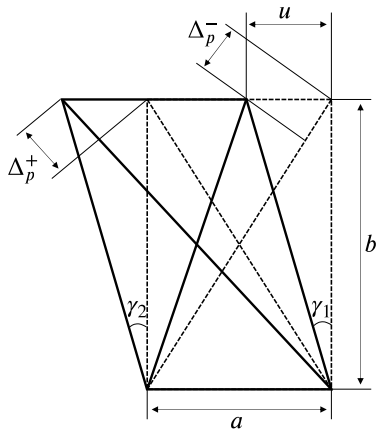
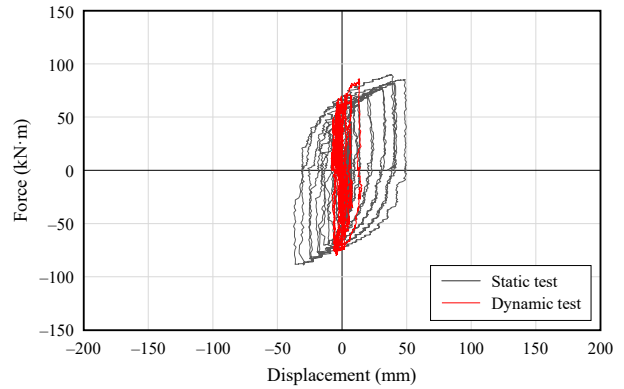


Fig. 19. Panel zone diagram

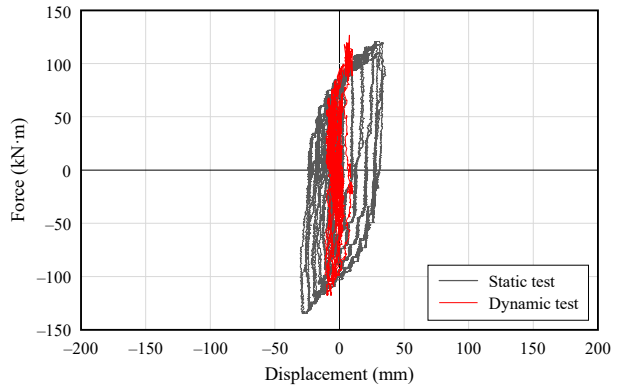
$$\delta_{panel} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} L = \frac{\Delta_p^+ - \Delta_p^-}{2} \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{ab} L \quad (4)$$

Fig. 20는 각 실험체별 패널 존의 하중-변위 관계를 비교한 것으로, 그래프상의 흑색 파선은 정적실험, 적색 실선은 동적실험의 하중-변위 관계이다. 동적실험에서 패널 존의 변형량은 정적실험 최대 변형량의 0.3 배에 미치지 못하는 모습을 확인하였다.

실험결과에 따른 이력곡선을 바우싱거부와 골격곡선부로 분해한 결과를 Figs. 21–22에 나타냈다. Series I, Series II가 각각 전체이력곡선에서 소성변형에너지는 정적실험에 비해 동적실험이 약 0.88, 0.47배로 나타났으나, 골격곡선부의 경우 약 0.5배로 나타났다.



(a) Series I



(b) Series II

Fig. 20. Shear deformation capacity of panel zone

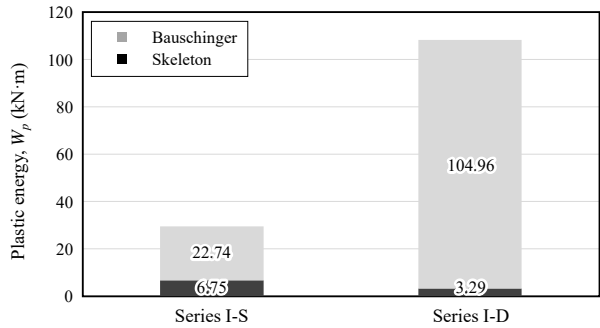


Fig. 21. Comparison of plastic energy of Series I

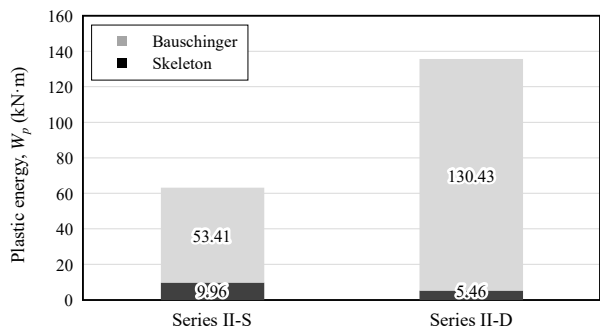


Fig. 22. Comparison of plastic energy of Series II

4.1-4.4의 정적·동적 실험에서 구조성능, 파괴 모드, 에너지소산능력 등에서의 차이는 빠른 하중속도에 의해 동적실험에서 정적실험과 달리 패널 존이 충분한 소성변형을 하지 못해, 약(弱) 패널 존 접합부의 복원력을 발휘하지 못하고 용접부를 따라 응력집중현상이 발생하여 취성파단한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 하중속도가 약패널형 확장단부판 보-기둥 접합부의 소성변형능력 및 구조성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 액추에이터를 이용한 반복가력 실험과 진동대 실험을 실시하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 확장단부판 접합부 실험체는 모두 층간 변위비 4 % 이상의 충분한 연성능력을 보였으며 정적 실험의 경우 6 %까지 파단이 발생하지 않는 우수한 연성능력을 보여주었다.
- (2) 동적실험은 정적실험 대비 초기 강성, 항복내력, 항복변위각의 경우 최소 1.01배, 최대 1.1배로 유사하거나 다소 큰 값을 보인 반면 최대 내력, 최대 내력 시 변위각, 연성율의 경우 정적실험 대비 저감된 성능을 보였다.
- (3) 정적 및 동적 실험에서 서로 다른 파괴 모드가 관측되었다. 정적 실험에서 파단 없이 패널 존의 소성변형을 통해 안정적인 에너지소산능력을 보인 것에 반해, 동적실험에서는 작은 변위각에서 용접부를 따라 파단이 발생하였다.
- (4) 동적실험에서 정적실험 대비 현저히 작은 패널의 소성변형량을 확인하였고, 소성변형에너지의 경우 가진패턴을 작은 스케일 배수부터 점증 반복하는 실험방법에 영향을 받았을 것으로 사료되며, 낮은 내력에서의 반복거동을 최소화하기 위한 가력패턴에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

이상에서와 같이 동일한 상세를 갖는 보-기둥 접합부에서 정적실험과 동적실험의 내진성능이 일치하지 않는 것으로 나타나고 있으므로, 향후 하중속도에 따른

추가적인 연구를 통하여 동적 하중조건에서의 접합부의 거동에 대한 명확한 규명이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20017750).

참고문헌(References)

- [1] Krawinkler, H., and Mohasseb, S. (1987) Effects of Panel Zone Deformations on Seismic Response, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.8, pp.233-250.
- [2] El-Tawil, S., Vidarsson, E., Mikesell, T., and Kunnath, S.K. (1999) Inelastic Behavior and Design of Steel Panel Zones, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.125, No.2, pp.183-193.
- [3] Krawinkler, H. (1978) Shear in Beam-Column Joints in Seismic Design of Steel Frames, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.15, No.3, pp.82-91.
- [4] Bomel Limited (1999) *The Behaviour of Carbon Steels at High Strain Rates and Strain Limits* (Off-shore Technology Report - OTO 1999/018), Health & Safety Executive, UK.
- [5] Chang, K.-H., and Jang, G.-C. (2011) An Analytical Study on the Moment Response of Welded Steel Pipe for loading Rate, *Journal of the Korea Spatial Structure Association*, KASSS, Vol.11, No.4, pp.37-47 (in Korean).
- [6] Kim, J.W., and Choi, M.R. (2015) Effect of Loading Rate on Deformation Behavior of SA508 Gr.1a Low Alloy Steel Pipes and TP316 Stainless Steel Pipes at RT and 316°C, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, KSME, Vol.39, No.4, pp. 383-390 (in Korean).
- [7] Lee, K.-W., & Oh, S.-H. (2022) Effect of Load Velocity on Seismic Performance of Steel Beam-Column Connection, *Journal of the Korea Society of Structural Maintenance Inspection*, KSMI, Vol.26, No.6, pp.182-192 (in Korean).

- [8] Sabuwala, T., Linzell, D., and Krauthammer, T. (2005) Finite Element Analysis of Steel Beam to Column Connections Subjected to Blast Oads, *International Journal of Impact Engineering*, Elsevier, Vol.31, No.7, pp.861-876.
- [9] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.
- [10] SAC Joint Venture (2000) *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings* (FEMA-350), Chapter 3: Connection Qualification, Federal Emergency Management Agency, USA.
- [11] Oh, S.-H. (1998) *Seismic Design of Energy-Dissipating Multi-Story Structures Consisting of Flexible and Rigid Joints*, Ph.D. Dissertation, The University of Tokyo, Japan (in Japanese).
- [12] Matsumoto, Y. (1999) *Study on Beam-End Failure and Ultimate Seismic Performance of Steel Structure*, Ph.D. Dissertation, The University of Tokyo, Japan (in Japanese).
- [13] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Steel Structures Design Standard for Building Structure* (KDS 41 31 00: 2019), Korea (in Korean).
- [14] Korean Agency for Technology and Standards (2022) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [15] Korean Agency for Technology and Standards (2023) *Rolled Steels for General Structure* (KS D 3503: 2018), Korea (in Korean).
- [16] Kato, B., Akiyama, H., and Yamanouchi, Y. (1973) Predictable Properties of Material Under Incremental Cyclic Loading, *Proceedings of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Portugal, pp.119-124.
- [17] Jo, H.-K., and Choi, C.-H. (2015) Structural Performance of Y Type Plate Connection Between Circular CFT Column and H Shape Steel Beam, *Journal of the Korea Society of Structural Maintenance Inspection*, KSMI, Vol.19, No.6, pp.112-118 (in Korean).

요 약: 본 연구에서는 하중속도가 패널 항복형 보-기둥 접합부에 미치는 영향을 조사하였다. 정적 및 동적 실험은 각각 두 종류의 접합부에 대해 수행되었다. 정적 및 동적 실험의 탄성역에서 유사한 결과를 보인 반면 비탄성역에서는 유의한 차이가 관찰되었다. 동적실험에서는 높은 하중속도로 인해 패널 존에서 연성이 감소된 것으로 나타나 약보 접합부와 유사함을 보였다. 또한 동적실험에서는 정적실험에 비해 강도 및 에너지소산능력이 감소된 것으로 나타났다. 따라서 극한하중 조건에 대한 접합부 설계를 위해 하중속도의 고려가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어: 강구조, 접합부, 하중속도, 패널 항복형, 내진성능
