

# 파이프랙 확장단부판 접합부의 내진성능에 관한 실험적 연구

강성훈<sup>1</sup> · 우종훈<sup>2</sup> · 이희두<sup>3\*</sup> · 이우근<sup>1</sup> · 신경재<sup>4</sup>

<sup>1</sup>석사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부, <sup>2</sup>박사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부,

<sup>3</sup>전임연구원, 경북대학교, 건설환경에너지공학부, <sup>4</sup>교수, 경북대학교, 건설환경에너지공학부

## An Experimental Study on Seismic Performance of Pipe-Rack Using Extended End-Plate Connection

Kang, Seong Hun<sup>1</sup>, Woo, Jong Hun<sup>2</sup>, Lee, Hee Du<sup>3\*</sup>, Lee, Woo Guen<sup>1</sup>, Shin, Kyung Jae<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student (Master Course), School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

<sup>2</sup>Graduate Student (Doctor Course), School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

<sup>3</sup>Research Fellow, School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

<sup>4</sup>Professor, School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

**Abstract** - Pipe-rack structure is generally designed as a steel structure, but size of each column and beam is small because vertical loads on the structure is relatively low. In addition, due to the surrounding environment, the end plate joint is mainly used as on-site bolting rather than welding. In this paper, seismic performance evaluation of pipe-rack structures was conducted for three types of extended type end plate connection using the panel zone reinforcement and end plate thickness as variables. Connection of the pipe-rack structure which is commonly used is the type of panel zone yielding occurred before other members, and its ductility and energy dissipation capacity was calculated 24.2 % and 19.5 % higher than the type of reinforcing panel zone by plates. As a result of the test, it is judged that yielding of the panel zone in a steel structure such as a pipe-rack structure can be beneficial in the seismic loads.

**Keywords** - Pipe-rack, Extended type, End-plate connection, Seismic performance, Cyclic load, Energy dissipation

### 1. 서론

석유화학단지과 같은 국가산업단지에서 각종 화학물질, 가스 및 원유 등을 운반하는 화학관, 가스관, 원유관 등의 파이프라인은 파이프랙(pipe-rack) 구조물에 의해 지지되고 있다. 파이프랙 구조물에 손상이 발생한다면 구조물의 붕괴뿐만 아니라 운반되는 물질의 누출로 인한 화재·폭발로 인명 및 재산상의 피해와 더불어 산업 전반에 부정적인 파급효과를 가져올 수 있다<sup>[1]</sup>. 강구조물에서 보-기둥 접합부는 구조물에서 발생하는 하중뿐만 아니라 외부

에서 전달되는 외력을 전달하는 중요한 요소이며, 강구조물의 내진성능은 접합부의 상재에 의해 좌우될 수 있다<sup>[2]</sup>. 파이프랙 구조물은 일반적으로 보와 기둥이 H형강으로 이루어진 강구조물로서, 부재 사이의 연결을 위하여 각 부재들을 공장에서 생산·가공하여 현장에서 볼트로 조립하는 형태로 보-기둥(beam-column) 접합부를 형성하게 된다<sup>[3]</sup>.

보와 기둥 모두 H형강으로 구성된 형태의 보-기둥 접합부는 Fig. 1과 같이 약축 방향으로 핀(pin) 접합, 강축 방향으로 고정(fixed) 접합의 형태로 체결되는데, 이때 고정 접합에 주로 사용되는 것이 단부판(end-plate) 접합부이다<sup>[4]</sup>. 일반적으로 단부판 접합부는 Fig. 1에서와 같이 기둥에 패널 존(panel zone)을 형성하게 되는데, 이때 패널 존의 항복 여부에 따라 구조물의 횡방향 변형이 증가하여 파이프라인의 탄성변형 한계를 넘어서는 위험이 발생할 수도 있다.

단부판 접합부는 볼트의 개수 및 체결 형태에 따라 다양한 접합부로 구성 가능하며, 이에 따라 다양한 한계상태에 의한 파괴가 유발될 수 있다. 단부판 접합부는 AISC 강구

Note.-Discussion open until April 30, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 13, 2022; revised on October 04, 2022; approved on October 04, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-53-950-5591 Fax. +82-53-950-6591

E-mail. lhdza@knu.ac.kr

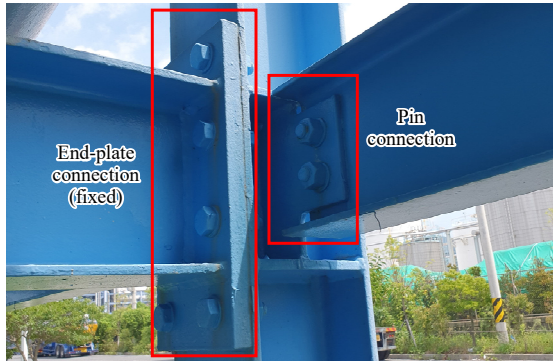


Fig. 1. Pipe-rack connection

조설계지침서(Steel Design Guide)의 4권·16권<sup>[5],[6]</sup>에서 접합부 형태에 따른 설계식 및 파괴유형을 항복선이론을 통해 제시하고 있다. 국내 연구로 Lee *et al.*<sup>[7]</sup>은 단부판 접합부 항복형태에 따른 실험을 수행하여 비탄성 회전능력, 연성 및 접합부 강도를 평가하였다. 또한, 확장형 단부판 접합부를 대상으로 얇은 두께의 단부판을 통해 휨항복을 유도한 접합부의 에너지 소산능력이 증가함을 확인하였다<sup>[8]</sup>. 항복선이론을 통한 단부판 접합부의 강도 예측은 단부판 두께가 두꺼워짐에 따라 점차 차이가 발생하게 되고, 이는 소성힌지선의 불일치로 나타난 것을 확인하였다<sup>[9]</sup>. 이와 같은 단부판 접합부는 강구조물의 보-기둥 접합부 및 변단면 부재로 구성된 PEB 구조 시스템(pre-engineering building system)에 널리 적용되고 있으며, 가스 유출 및 화재 안전이 중요한 파이프라인을 지지하는 파이프랙 구조물에서도 현상용접이 불가능함에 따라 현장 볼트접합이 이루어진다.

파이프랙 구조물은 일반적으로 강구조물로 설계되지만 공작물과 같은 형태로 구조물에 작용하는 하중이 비교적 낮기 때문에 각 기둥과 보의 크기가 작은 것이 일반적이며, 이에 따라 단부판 접합부에서 단부판과 보, 기둥의 한계 상태를 검토하는 것이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 파이프랙 보-기둥 단부판 접합부와 보 및 단부판 파괴형 총 3개의 실험을 수행하여 각 실험체의 내력, 파괴형상 및 내진성능을 평가하고자 하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험체 계획 및 형상

본 연구에서는 파이프랙을 구성하는 확장단부판 접합부의 형태에 따른 파이프랙 구조물의 내진성능을 비교하고

자 한다. Fig. 2와 같이 보와 기둥을 모두 H-244×175×7×11 부재로 하는 column tree 형태의 보-기둥 접합부를 형성하고 엔드플레이트 두께와 패널 존의 보강 유무를 변수로 하여 Table 1과 같이 실험체를 선정하였다. PY실험체를 기본형으로 하여 BY실험체는 Fig. 3와 같이 패널 존을 보강하였고, EY실험체는 Figs. 3-4와 같이 패널 존의 보강과 함께 엔드플레이트의 두께를 10 mm로 변경하였다. 엔드플레이트의 접합에는 F10T(M20) 볼트가 사용되었다.

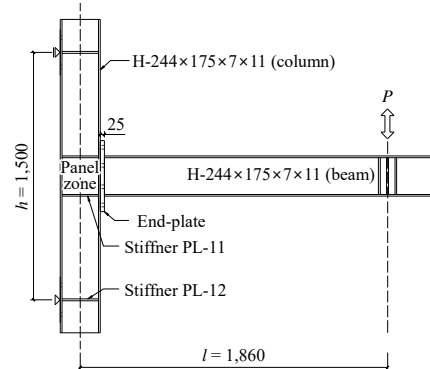


Fig. 2. Test set-up

Table 1. Test specimens

No.	Specimens	End plate thickness (mm)	Panel zone thickness (mm)
1	PY	25	7
2	BY	25	23
3	EY	10	23

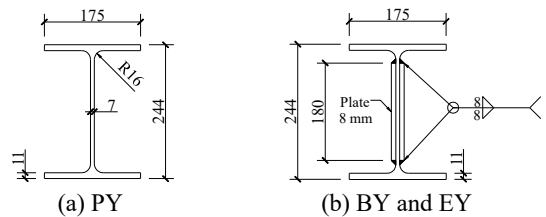


Fig. 3. Details of panel zone

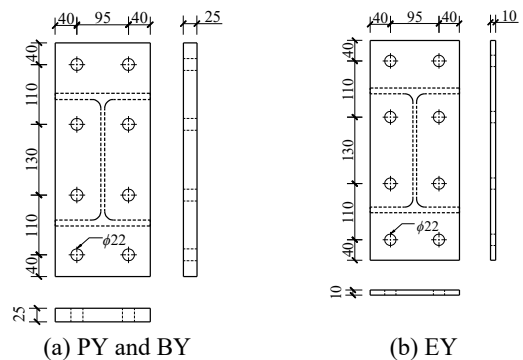


Fig. 4. Details of end-plate

엔드플레이트 접합부의 파괴 유형에 따른 파이프랙 구조물의 내진성능을 평가하기 위하여 실험체별 접합부의 형태에 따라 파괴가 발생할 수 있는 유형을 Table 2와 같이 보 부재의 강도( $M_b$ ), 기둥 부재의 강도( $M_c$ ), 기둥 패널 존의 강도( $M_{pz}$ ), 엔드플레이트의 강도( $M_{pl}$ ), 기둥 플랜지의 강도( $M_{cf}$ ) 등 5가지로 분류하였으며, 각 파괴 형태에 따른 실험체의 설계 강도는 앞서 언급한 AISC 강구조 설계지침서(Steel Design Guide) 4권<sup>[5]</sup>을 참고하여 식 (1) - 식 (11)에 따라 계산하였다. 이때 이론 계산에 사용된 강재의 강도는 SS275의 공칭강도를 사용하였다. Table 3는 각 실험체의 5가지 파괴 형태에 따른 강도를 정리한 표이다. PY실험체의 경우  $M_{pz} < M_{cf} < M_b < M_{pl} < M_c$ , BY실험체의 경우  $M_{cf} < M_b < M_{pl} < M_{pz} < M_c$ , EY실험체의 경우  $M_{pl} < M_{cf} < M_b < M_{pz} < M_c$  순으로 강도가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

- 보(beam)

$$M_b = F_{yb}Z \tag{1}$$

- 기둥(column)

$$M_c = 2 \times M_b \tag{2}$$

- 패널 존(panel zone)

$$P_u = \frac{P}{2} \quad (P_u \leq 0.4P_y) \tag{3}$$

$$0.6F_{ycw}d_c t_{cw} \left( 1 + \frac{3b_{cf}t_{cf}^2}{d_b d_c t_{cw}} \right) = \frac{Pl}{d_b - t_{bf}} - \frac{Pl}{h} \tag{4}$$

$$\rightarrow M_{pz} = Pl$$

- 엔드플레이트(end-plate)

$$M_{pl} = F_{yp}t_p^2 Y_p \tag{5}$$

$$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[ h_1 \left( \frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s} \right) + h_0 \left( \frac{1}{p_{fo}} \right) - \frac{1}{2} \right] + \frac{2}{g} [h_1(p_{fi} + s)] \tag{6}$$

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} \tag{7}$$

$$\text{Bolt rupture: } M_{np} = 2P_i(h_0 + h_1) \tag{8}$$

- 보강 기둥플랜지(stiffened column flange)

$$M_{cf} = F_{ycf}t_{cf}^2 Y_c \tag{9}$$

$$Y_c = \frac{b_{fc}}{2} \left[ h_1 \left( \frac{1}{p_{si}} + \frac{1}{s} \right) + h_0 \left( \frac{1}{p_{so}} + \frac{1}{s} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_1(p_{si} + s) + h_0(p_{so} + s)] \tag{10}$$

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} \tag{11}$$

여기서,  $M_b$ : 보의 소성모멘트,

$F_{yb}$ : 보의 항복강도,

$Z$ : 소성단면계수,

$M_c$ : 기둥의 소성모멘트,

$P_u$ : 소요하중,

$P_y$ : 기둥의 항복강도,

$F_{ycw}$ : 기둥 웨브의 항복강도,

$d_c$ : 기둥축,

$t_{cw}$ : 기둥 웨브 두께,

Table 2. Specimens design

Four bolt extended unstiffened end-plate design strength		Four bolt extended column flange strength
End-plate geometry and yield line pattern	Bolt force model	Stiffened column flange geometry and yield line pattern

- $d_b$ : 보춤,
- $t_{bf}$ : 보 플랜지 두께,
- $M_{pz}$ : 패널 존 항복모멘트,
- $M_{pl}$ : 엔드플레이트 항복모멘트,
- $F_{yp}$ : 엔드플레이트 항복강도,
- $t_p$ : 엔드플레이트 두께,
- $Y_p$ : 엔드플레이트의 항복선,
- $M_{np}$ : 볼트에 작용하는 모멘트(지레작용 없음),
- $P_i$ : 볼트인장강도,
- $M_{cf}$ : 기둥플랜지의 국부 휨항복모멘트,
- $F_{ycf}$ : 기둥플랜지 항복강도,
- $t_{cf}$ : 기둥플랜지 두께,
- $Y_c$ : 기둥플랜지의 항복선.

**Table 3.** Theoretical value of specimens design (Unit: kN·m)

Specimens	$M_b$	$M_c$	$M_{pz}$	$M_{pl}$	$M_{cf}$
PY	153.5	306.9	77.7	249.4	86.9
BY	153.5	306.9	255.4	249.4	86.9
EY	153.5	306.9	255.4	39.9	86.9

보 파괴형으로 설계한 BY실험체의 이론 검토 과정에서 기둥 플랜지의 강도가 보의 강도보다 낮은 것으로 산정되었다. 하지만 패널 존의 보강 여부와 엔드플레이트 두께만을 변수로 하여 실험을 수행하기 위하여 BY실험체를 보 파괴형이 아닌 기둥 플랜지 파괴형으로 판단하였다. 따라서 패널 존의 파괴형, 기둥 플랜지의 파괴형, 엔드플레이트의 파괴형으로 3가지의 파괴형태에 대하여 반복가력실험을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

### 2.2 재료시험

본 실험에 앞서 실험에 사용된 강재의 재료시험을 실시하였다. 실험체 제작에 사용된 강재는 모두 SS275로, H형강의 웨브에 사용된 7 mm, 플랜지에 사용된 11 mm, 엔드플레이트에 사용된 10 mm, 25 mm의 두께에 대하여 재료시험을 실시하였다. 재료시험편의 제작은 금속 재료 인장시험편(KS B 0801)<sup>[10]</sup>을 참고하여 7 mm, 10 mm, 11 mm의 시험편은 인장시험편 5호로, 25 mm의 시험편은 인장시험편 1A호로 제작하였다. 재료시험은 KOLAS 인증기관을 통하여 진행되었으며, 인장시험편 5개의 평균값을 통하여 인장시험편의 강도를 산정하였다. Table 4는 재료시험의 결과

를 정리한 표이다. 인장시험편의 항복강도는 0.2 % offset 법을 통하여 산정하였다.

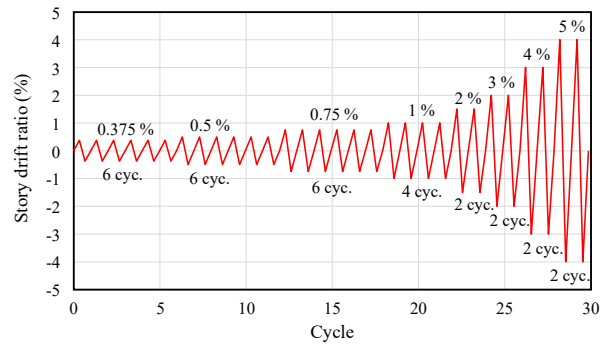
**Table 4.** Result of material test

Type	$t$ (mm)	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)	Elongation (%)
SS275	7	318	470	25
	10	440	575	22
	11	307	465	25
	25	408	540	21

$t$ : thickness of coupons,  $F_y$ : yield strength of steel,  $F_u$ : tensile strength of steel

### 2.3 실험체 설치 및 반복가력 프로토콜(protocol)

본 실험에서 사용된 가력프로토콜은 FEMA 350(2000)<sup>[11]</sup>을 참고하여 Fig. 5와 같은 형태로 입력하였다. 실험체의 설치 형상은 Fig. 6와 같으며 500 mm, 250 kN 용량의 액추에이터(actuator)를 사용하여 실시하였다.



**Fig. 5.** Cyclic load protocol



**Fig. 6.** Set-up for specimen PY

### 3. 실험결과

#### 3.1 모멘트-회전각 관계

Fig. 7은 PY실험체의 모멘트-회전각 곡선을 나타낸다. 이때 모멘트는 절점모멘트를, 회전각은 절점에 대한 회전각을 나타낸다. PY실험체의 경우 회전각 0.06 rad까지 실험이 진행되면서 0.051 rad에서 178.2 kN·m의 최대 강도가 나타났으며, 회전각 0.058 rad에서 최대 강도의 85.1 % 수준인 156.7 kN·m로 강도 저하가 발생하였다. 반복가력 초기의 강성 감소 발생 시 패널 존의 변형이 육안으로도 확인될 정도로 명확하게 나타났으며, 이후 기둥 플랜지의 소성변형이 발생하면서 강도가 확연히 감소하며 실험이 종료되었다. Fig. 8은 PY실험체의 실험 종료 후 접합부의 모습을 나타내며, 기둥 플랜지의 소성변형이 크게 나타난 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9은 BY실험체의 모멘트-회전각 곡선을 나타낸다. BY실험체는 회전각 0.05 rad까지 실험이 진행되었으며, 최대 강도는 0.05 rad에서 186.9 kN·m로 나타났다. BY실험체의 경우 회전각 0.05 rad의 반복가력 cycle이 진행되면서 강도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 더불어 초기 강성 감

소 발생 시 기둥 플랜지의 변형이 크게 나타났으며, 회전각이 0.051 rad에서 기둥 플랜지의 변형과 함께 보 부재의 횡좌굴이 발생하며 최대 강도 대비 76.2 %인 142.4 kN·m로 강도가 저감되어 실험을 종료하였다. Fig. 10은 BY실험체의 실험 종료 후 접합부의 모습을 나타내며, 기둥의 플랜지의 소성변형이 크게 나타난 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 EY실험체의 모멘트-회전각 곡선을 나타낸다. EY실험체는 회전각 0.07 rad의 첫 번째 cycle까지 실험이 진행되었으며, 최대 강도는 141.4 kN·m로 나타났다. 회전각 0.065 rad에서 일부 강도가 감소하였으며, 0.077 rad에서 최대 강도 대비 65.3 %인 92.3 kN·m로 강도가 감소함과 동시에 엔드플레이트의 파단이 발생하여 실험을 종료하였다. Fig. 12는 EY실험체의 실험 종료 후 접합부의 모습을 나타내며, 엔드플레이트의 파단이 발생한 것을 확인할 수 있다.

#### 3.2 데이터 분석

Fig. 13은 각 실험체의 포락곡선을 그린 것이다. 실험체들의 항복점은 Fig. 14과 같이 등가에너지 방법을 사용하여 A 영역과 B 영역의 면적이 같을 때의 모멘트를 실험체

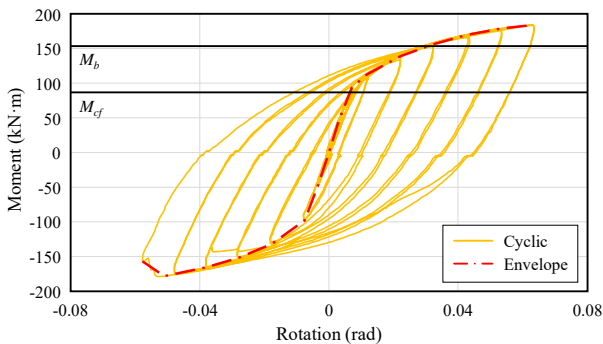


Fig. 7. Moment-rotation curve (PY)

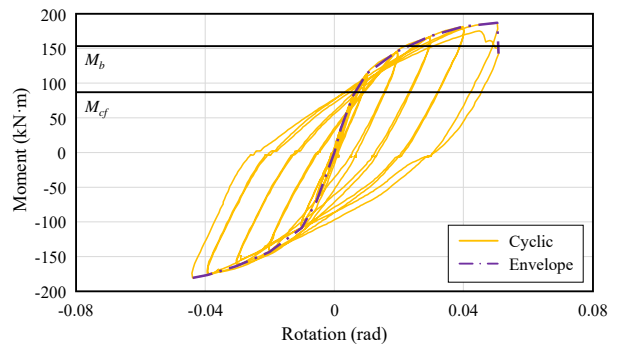


Fig. 9. Moment-rotation curve (BY)

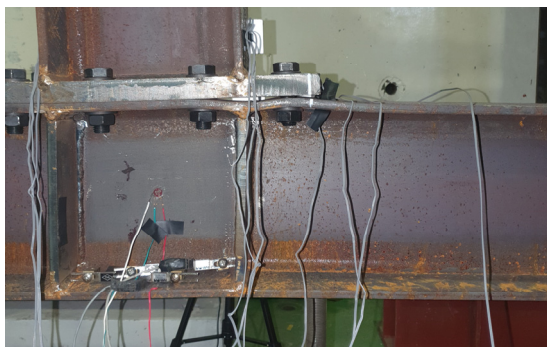


Fig. 8. Specimen PY after test

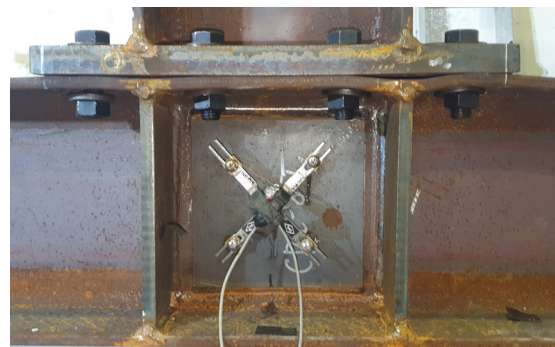


Fig. 10. Specimen BY after test

의 항복모멘트( $M_y$ )로 산정하였으며, 이에 따른 데이터를 Table 5에 정리하였다. 초기 강성( $K_\epsilon$ )은 모멘트-회전각 곡선에서 초기 항복점까지의 기울기로 산정하였다. 등가에너지법에 따른 항복모멘트는 PY실험체 154.5 kN·m, BY 실험체 157.4 kN·m, EY실험체 120.6 kN·m로 산정되었다. 각 실험체의 연성도는 초기 항복점에서의 회전각( $\theta_y$ )과 최대 회전각( $\theta_u$ )의 비율인  $\mu (= \theta_y / \theta_u)$ 를 통하여 비교하였다. PY실험체의 경우 6.27, BY실험체는 5.65, EY실험체는 8.67로 BY < PY < EY 순으로 연성능력이 좋은 것으로 판단된다. 초기 강성은 BY실험체가 PY실험체보다 14.0 %, EY실험체보다 28.7 % 높게 측정되어 EY < PY < BY 순으로 나타났으며, 반복가력 초기 탄성 거동을 보이는 구간에서 EY실험체의 경우 엔드플레이트의 탄성변형이, PY실험체의 경우 패널 존의 탄성변형의 참여로 인하여 이러한 강성의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

재료시험을 통하여 산정된 보 부재의 강도( $F_{yb}$ )를 사용하여 보의 소성모멘트( $M_{f_{yb}} = F_{yb}Z$ )는 174.4 kN·m로 산정되었으며, 보의 소성모멘트 대비 PY실험체의 항복모멘트는 88.6 %, BY실험체는 90.3 %, EY실험체는 69.2 % 수준인 것으로 확인된다. 따라서 파이프랙 구조물과 같이 기둥과 보의 크기가 작고 연직하중의 영향이 적은 공작물 형태의 강구조물에서 접합부에 형성되는 패널 존의 전단 강도가 보 부재의 소성모멘트의 일정 수준에서 확보가 된다면 내진성능이 오히려 좋을 수도 있다고 판단된다.

본 연구에서는 접합부의 패널 존, 보, 엔드플레이트, 기둥 플랜지의 항복여부를 파악하기 위하여 Fig. 15과 같이

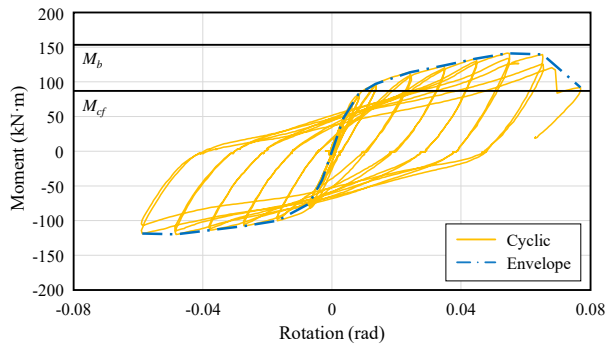


Fig. 11. Moment-rotation curve (EY)

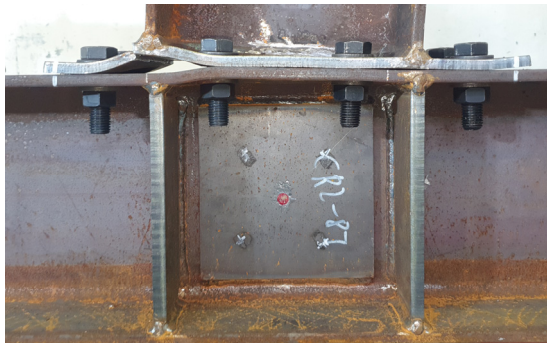


Fig. 12. Specimen EY after test

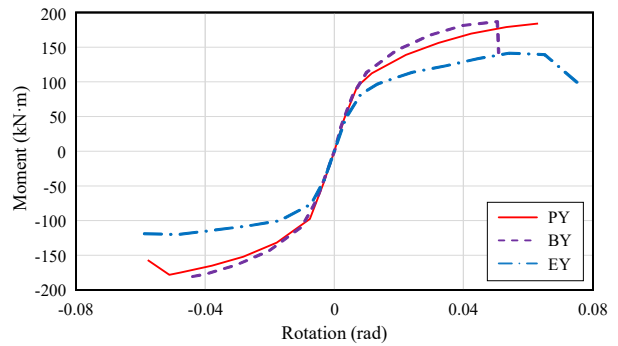


Fig. 13. Envelope curve of specimens

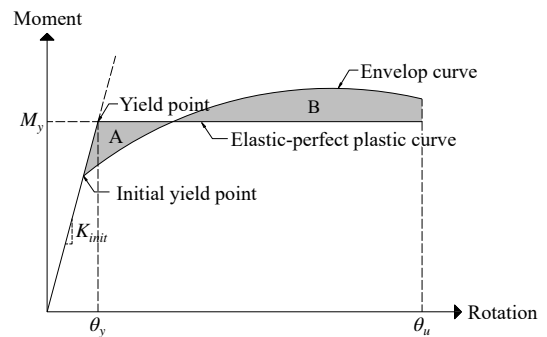


Fig. 14. Concept of equivalent energy method

Table 5. Result of test

Specimens	$M_b$ (kN·m)	$M_{f_{yb}}$ (kN·m)	$M_y$ (kN·m)	$\theta_y$ (rad)	$\theta_u$ (rad)	$K_\epsilon$ (kN·m)	$\mu$
PY	153.5	174.4	154.5	0.0101	0.0631	15,362	6.27
BY	153.5	174.4	157.4	0.0090	0.0508	17,512	5.65
EY	153.5	174.4	120.6	0.0089	0.0769	13,600	8.67

$M_b$ : beam plastic bending moment,  $M_{f_{yb}}$ : beam plastic bending moment using yield strength from coupon test,  $M_y$ : yield moment of specimens,  $\theta_y$ : rotation value of initial yield point,  $\theta_u$ : rotation value of the point where strength is reduced,  $K_\epsilon$ : Initial stiffness of specimens,  $\mu$ : ratio of  $\theta_y$  and  $\theta_u$ (= $\theta_y/\theta_u$ )

각 부재에 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하였다. 패널 존의 양면 중심에는 로젯 게이지(Rosette gauge)를 2개 부착하여 패널 존의 전단변형률을 측정하였다. 보의 단부에는 플랜지의 외면으로 각각 3개씩 6개의 스트레인 게이지를 부착하였으며, 엔드플레이트에는 양단에 2개씩 4개를, 엔드플레이트의 정반대에 해당하는 기둥 플랜지의 내면에 4개를 부착하였다.

각 위치에 설치된 스트레인 게이지의 평균값을 통하여 반복가력이 진행됨에 따라 변위에 대한 스트레인 게이지의 값을 Figs. 16-18에 정리하였다. 여기서  $\epsilon_y$ 는 재료시험 결과를 통하여 산정된 보 부재의 항복변형률이다. PY실험체의 경우 엔드플레이트의 변형은 거의 발생하지 않았으며, 패널 존의 변형이 거동에 크게 관여하는 것을 확인할 수 있다. 이때 보와 기둥 플랜지 또한 소성변형 또한 발생된 것으로 판단된다. BY실험체는 일부 패널 존의 탄성변형과 함께 보와 기둥 플랜지의 소성변형이 크게 발생한 것으로 판단된다. EY실험체는 패널 존과 엔드플레이트의 탄성변형과 함께 보의 소성변형이 크게 발생한 것으로 나타난다. 다만 EY실험체의 경우 항복선에 의해 엔드플레이트가 파괴되며 Fig. 12와 같은 파괴형상을 나타내는데 스트레인 게이지의 부착 위치가 파단선에 부착되어 있었다면 엔드플레이트에 부착된 게이지의 값이 크게 증가했을 것으로 판단된다.

### 3.3 에너지 소산능력

실험체들의 에너지 소산능력을 비교하기 위하여 Fig. 19의 하중-변위 곡선 아래 면적의 합을 구하였으며, Fig. 20은 반복가력 cycle이 진행될수록 증가하는 변위에 따라 각 실험체들의 누적 에너지 소산능력을 나타낸 곡선이다. 접합부의 강도 감소가 발생할 때까지 반복가력이 진행되면서 PY실험체는 114.7 kN·m, BY실험체는 57.3 N·m, EY 실험체는 74.9 kN·m의 누적 에너지 소산능력을 보여주는 것으로 산정되었다. 실험체 사이의 에너지 소산능력을 비교하기 위하여 BY실험체의 최대 변위인 94.5 mm에서의 에너지 소산을 비교해보면 PY실험체가 68.5 kN·m, BY실험체가 57.3 kN·m, EY실험체가 40 kN·m로 산정되었다.

Krawinkler and Mohasseb<sup>[12]</sup>의 연구결과를 보 부재가 탄성 구간에 있을 때 패널 존의 전단 항복이 발생하여 지진 발생 시 에너지 소산에 참여하도록 설계하는 것이 바람직할 수 있다고 서술하고 있다. 본 연구에서도 보 부재



Fig. 15. Detail of attaching strain gauge

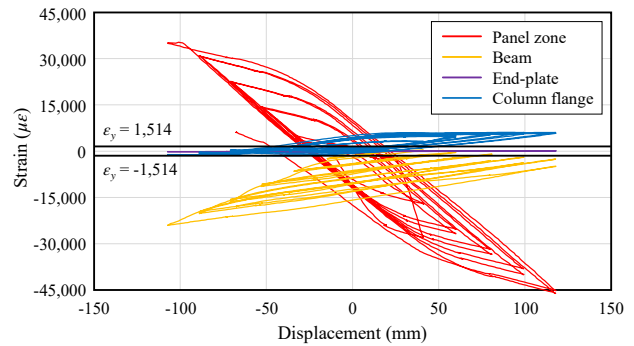


Fig. 16. Strain data of specimen PY

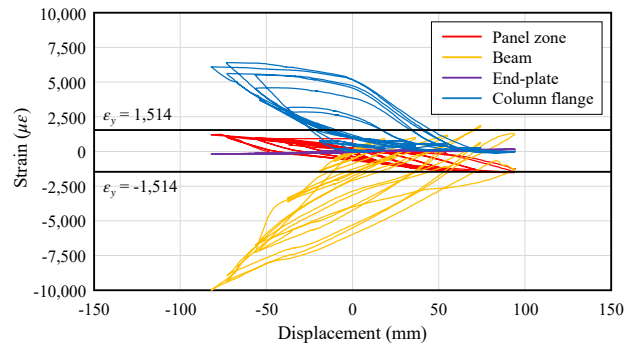


Fig. 17. Strain data of specimen BY

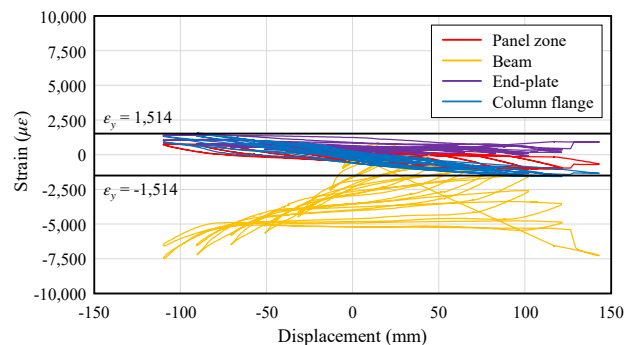


Fig. 18. Strain data of specimen EY

의 항복 이전에 패널 존의 항복이 진행되는 PY실험체의 경우 반복가력의 동일 변위에서 에너지 소산량이 BY실험체 대비 19.5 %, EY실험체 대비 71.3 % 높게 산정되었다. 따라서 패널 존의 항복이 먼저 발생하는 일반적인 접합부의 형태를 가지는 파이프랙 구조물이 지진하중에 있어서 유리할 수 있다고 판단된다.

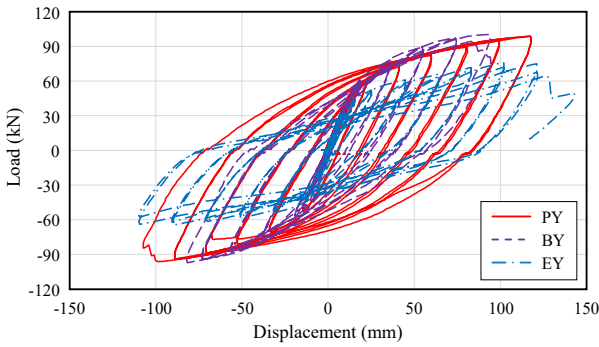


Fig. 19. Load-displacement curve of specimens

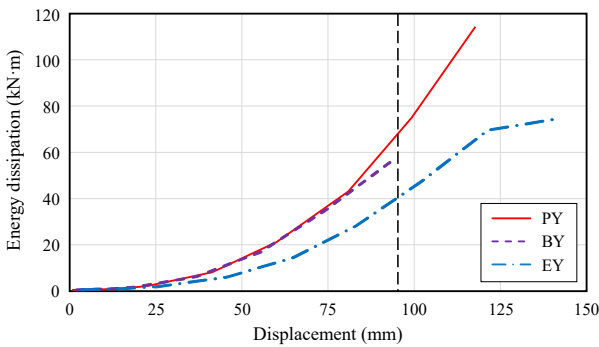


Fig. 20. Energy dissipation

#### 4. 결론

본 연구는 파이프랙을 구성하는 엔드플레이트 접합부의 패널 존 보강 여부와 엔드플레이트의 두께를 변수로 하여, 이에 따른 접합부의 항복 형태에 따라 구조물의 내력과 파괴형상, 내진성능을 반복가력 실험을 통하여 비교하였다.

- (1) 실험체들의 최대 강도를 비교하면 BY실험체의 최대 강도가 186.9 kN·m로 PY실험체보다 4.9 %, EY 실험체보다 32 % 높은 것으로 산정되었다. BY실험체와 PY실험체의 전체적인 이력 거동은 비슷하게 나타났으며, 이는 BY실험체의 초기 거동을 결정하는 기둥 플랜지의 강도와 PY실험체의 초기 거동을 결정하는 패널 존의 전단강도의 차이가 크지 않고 두 실험체 모두 최종적인 파괴형상이 기둥의 플

랜지에 의해 나타나기 때문인 것으로 판단된다. EY 실험체의 경우 엔드플레이트의 초기 항복과 함께 최종적인 파괴형상 또한 엔드플레이트에 의하여 결정되기 때문에 다른 실험체들과 대비하여 최대 강도가 다소 낮게 측정되는 것으로 판단된다.

- (2) 세 실험체 모두 층간 변위비 4 % 이상의 충분한 연성능력을 발휘하는 것으로 판단된다. 강도 감소 발생 여부에 따라 실험체들의 연성능력을 비교하면 엔드플레이트 항복형인 EY실험체가 가장 높은 연성능력을 보이는 것으로 판단된다. PY실험체와 BY 실험체 사이의 연성능력을 비교하였을 때 패널 존의 강도가 보의 강도보다 낮은 PY실험체가 연성능력이 약 24.2 % 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.
- (3) 연성과 더불어 에너지 소산능력에서도 패널 존의 항복 여부가 영향을 미치는 것으로 판단되는데, 동일 변위에서 PY실험체의 경우 에너지 소산량이 68.5 kN·m로 BY실험체 대비 19.5 %, EY실험체 대비 71.3 % 높게 산정되었다. PY실험체와 BY실험체의 최대 강도는 약 4.9 % 차이가 발생하는 반면에 연성능력과 에너지 소산능력에서는 각각 24.2 %, 19.5 % 정도로 높게 산정되며 파이프랙과 같은 구조물에서도 선행연구<sup>[12]</sup>와 마찬가지로 패널 존의 항복 발생이 지진하중에 유리할 것으로 판단된다.
- (4) 초기 강성은 BY실험체에서 가장 크게 나타났으며, 이는 엔드플레이트 두께는 유지하되 패널 존을 보강하여 패널 존과 엔드플레이트의 탄성 거동이 다른 실험체보다 작게 나타났기 때문으로 판단된다.
- (5) 최대 강도와 에너지 소산능력을 고려하였을 때 엔드플레이트의 최소 두께가 확보되어야 하며, 파이프랙과 같은 기둥과 보의 크기가 작은 부재를 사용하는 경우 패널 존의 항복 여부와 함께 기둥 플랜지의 항복 여부를 검토하는 것이 중요하다고 판단된다. 기둥 플랜지의 스티프너 보강이나 접합부의 브라켓 보강 등이 패널 존의 거동에 미치는 영향에 대해 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

#### 감사의 글

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



## 참고문헌(References)

- [1] Lee, J.-K. (2018) Experimental Study on Improvement of Pipe-Rack Joint, *Journal of the Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.22, No.4, pp.1-9 (in Korean).
- [2] Oh, S.H., Kim, Y.H., Kim, Y.J., Ryu, H.S., and Park, H.Y. (2020) An Analytical Study on the Deep H-Shaped Beam-to-Column Connections with Double Slit Damper Type Energy Absorption System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.1, pp.11-22 (in Korean).
- [3] Solhmirzaei, A., Roudsari, T.R., and Hashemic, B.H. (2021) A New Detail for the Panel Zone of Beam-to-Wide Flange Column Connections with Endplate, *Structures*, Elsevier, Vol.34, pp.1108-1123.
- [4] Lee, K., Jin, J., Shin, J., Seo, H., and Park, K. (2021) Experimental Evaluation of Square Tubular Section Column to H-Shaped Beam Moment Connections with Slotted Diaphragm, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.6, pp.403-411 (in Korean).
- [5] Murray, T.M., and Sumner, E.A. (2003) *Design Guide 4: Extended End-Plate Moment Connections Seismic and Wind Applications* (2nd Ed.), American Institute of Steel Construction, USA.
- [6] Murray, T.M., and Shoemaker, W.L. (2002) *Design Guide 16: Flush and Extended Multiple-Row Moment End-Plate Connections*, American Institute of Steel Construction, USA.
- [7] Lee, S.H., Lee, S.J., Yang, I.S., Kim, J.H., and Choi, S.M. (2009) An Experimental Study on Structural Characteristics of Beam-to-Column Connections with Plastic Deformation in the End-Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.6, pp.585-596 (in Korean).
- [8] Lee, S.K., and Yang, J.G. (2015) Evaluation of the Energy Dissipation Capacity of an Unstiffened Extended End-plate Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.2, pp.243-250 (in Korean).
- [9] Kim, H.D., Yang, J.G., and Pae, D.S. (2016) Analytical and Experimental Study of an Unstiffened Extended End-Plate Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.6, pp.439-448 (in Korean).
- [10] Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [11] SAC Joint Venture (2000) *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings* (FEMA-350), Federal Emergency Management Agency, USA.
- [12] 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.

---

**요약**: 파이프랙 구조물은 일반적으로 강구조물로 설계되지만 공작물과 같은 형태로 구조물에 작용하는 하중이 비교적 낮기 때문에 각 기둥과 보의 크기가 작은 것이 일반적이며, 이에 따라 단부판 접합부에서 단부판과 보, 기둥의 한계상태에 대한 검토가 필요하다. 본 논문에서는 확장단부판 접합부의 패널 존 보강 여부와 엔드플레이트 두께를 변수로 하여 3가지의 확장단부판 접합부에 대하여 파이프랙 구조물의 내력과 파괴형상, 내진성능을 비교하였다. 일반적으로 많이 사용되는 파이프랙 구조물의 접합부는 패널 존의 항복이 다른 부재들보다 먼저 발생하였으며, 패널 존이 보강된 경우보다 연성능력과 에너지 소산능력이 각각 24.2%, 19.5% 높게 산정되었다. 따라서 파이프랙 구조물과 같은 강구조물에서 패널 존의 항복 발생이 지진하중에 유리하게 작용할 수 있다고 판단된다.

**핵심용어**: 파이프랙, 확장형, 단부판 접합부, 내진성능, 반복하중, 에너지 소산

---