

# 원형 개구부를 갖는 철골 대형 보-기둥 접합부의 내진거동

오근영<sup>1</sup> · 김선훈<sup>2</sup> · 강창훈<sup>3</sup> · 박관식<sup>4</sup> · 이강민<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>전임연구원, 한국건설기술연구원, <sup>2</sup>석사과정, 충남대학교, 건축공학과, <sup>3</sup>팀장, 현대엔지니어링(주), 기술연구소, <sup>4</sup>대표, 두웰엔지니어링, <sup>5</sup>교수, 충남대학교, 건축공학과

## Seismic Behavior of Steel Deep Beam-to-Column Connection with Circular Web Opening

Oh, Keunyeong<sup>1</sup>, Kim, Sun-Hoon<sup>2</sup>, Kang, Chang-Hoon<sup>3</sup>, Park, Kwan-Sik<sup>4</sup>, Lee, Kangmin<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Research Specialist, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea  
<sup>2</sup>Graduate Student (Master Course), Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea  
<sup>3</sup>Team Leader, Technical Research & Development Center, Hyundai Engineering Co., Ltd., Seoul, 03058, Korea  
<sup>4</sup>President, Dowell Eng., Busan, 48547, Korea  
<sup>5</sup>Professor, Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

**Abstract** - In this study, a circular web opening was installed to evaluate the seismic performance of a 900 mm deep beam-to-column connection with a non-scallop method applied as a special moment frame (SMF). As the specimens, a specimen without an opening, a specimen with a circular opening, and a specimen with circular and rectangular opening were fabricated. As a result of testing, all specimens showed ductile behavior without brittle fracture of the beam-to-column connections up to 6 % story drift ratio, and satisfied the requirements of the SMF. As the circular opening was present, the plastic hinge was expressed near the circular opening, and it is considered that brittle fracture of the beam end could be prevented.

**Keywords** - Deep beam-to-column connection, Web opening, Circular opening, Seismic performance, Special moment frame

### 1. 서론

최근 건축물의 고층화, 대형화, 장스팬화함에 따라 보의 높이가 큰 대형 보의 수요 및 적용빈도가 증가하고 있는 추세이다. 그러나 국내 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)<sup>[1]</sup>에서는 일반적으로 H형강 보-기둥 접합부 상세에서 보플랜지는 완전용입용접하고 웹은 용접 또는 고장력볼트 접합한 경우 보의 춤이 750mm를 초과하지 않으면 중간모멘트골조의 접합부로서 인정하고 있다. 이는 보의 높이가 750mm를 초과하는 보-기둥 접합부의 경우 보통모멘트골조로만 사

용하도록 규정하고 있는 것이며, 중간모멘트골조 또는 특수모멘트골조의 접합부로 사용하기 위해서는 별도의 실험적 검증이 필요하다는 것을 의미한다. 이는 대형 보-기둥 접합부의 경우 초기에 높은 휨내력과 강성을 확보할 수 있으나, 보의 상하부 플랜지에 응력집중으로 인한 열영향부의 취성적 파괴와 보 플랜지의 국부좌굴에 의하여 보-기둥 접합부의 소성변형능력을 저하시키기 때문이다<sup>[2]</sup>. 동일한 이유로 미국 FEMA-350<sup>[3]</sup>에서도 실험적으로 검증된 인증접합부를 제안하고 있으며, 인증접합부에 대한 보의 춤과 두께, 압연형강의 사이즈 또한 준용하도록 제한하고 있다.

그러나 대형 보에 대한 수요가 급증하면서 국내에서는 750mm 초과 대형 보-기둥 접합부가 중간모멘트골조 및 특수모멘트골조의 요구사항을 만족시키도록 하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. Lee *et al.*<sup>[4]</sup>은 SHN 강재를 사용한 보 춤이 900mm인 대형 보를 대상으로 논스캘롭(non-scallop) 공법과 수평 보강판을 적용하여 중간모멘트골조의 요구 성능을 만족하였다. 또한, 최근 Ryu *et al.*<sup>[5]</sup>은 보 춤 1,000mm

Note.-Discussion open until February 28, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 13, 2021; revised on July 07, 2021; approved on July 07, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-42-821-5625 Fax. +82-42-823-9467

E-mail. leekm@cnu.ac.kr

인 대형 보에 논스캘럽 공법과 개량형 수평 스티프너를 적용한 대형 보-기둥 접합부에 대한 내진성능평가를 통하여 특수모멘트골조의 요구성능을 만족하여 이에 대한 기술인증을 취득하였다.

그러나 보강판에 의한 접합부 보강은 추가적인 용접이 수행되기 때문에 제작비 상승 및 접합부의 취성적 파괴의 요인이 될 수 있다. 따라서 이에 대한 대안으로 RBS(reduction beam section) 접합부와 같이 보 플랜지의 일부를 절취함에 따라 소성힌지의 발생을 유도하는 방안은 FEMA의 인중접합부로 채택된 상태이다. 이와 유사하게 보 플랜지 대신 웹의 개구부를 이용하여 소성힌지의 발생을 유도함으로써 내진성능을 향상시키려는 방안에 대한 연구가 진행되고 있다. 보 웹에 개구부를 형성하면 Fig. 1에서와 같이 600 mm - 750 mm의 춤을 갖는 보를 사용하고 보 하단부에 덕트(duct)를 설치하는 일반적인 시공관행 대신, 보 웹의 개구부를 설비 및 배관을 위한 덕트로 활용하면 보 춤을 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

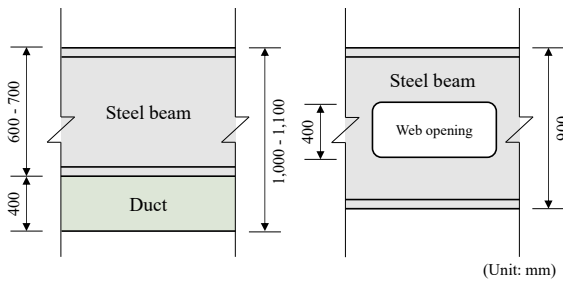


Fig. 1. The effect of openings in deep beams

국외에서는 보 웹의 개구부를 활용한 다양한 연구가 수행되었고 연구결과를 바탕으로 미국강구조학회에서는 웹 개구부에 대한 설계 가이드를 제공하고 있다<sup>[6]</sup>. 설계 가이드에서는 개구부에서의 설계 모멘트 및 전단력은 작용 하중에 의한 모멘트 및 전단력보다 높도록 설계를 권장하고 있다.

국내의 Park *et al.*<sup>[7]</sup>은 보 춤 800 mm의 크기를 갖는 보-기둥 접합부에 원형 또는 사각 개구부를 활용하여 내진성능평가를 수행하였다. 이때 보-기둥 접합부는 WUF-B 접합부를 사용하였으며 개구부에서 소성힌지의 발생을 유도할 수 있도록 설계하였다. 이때, 일부 실험체를 제외하고 모든 실험체는 층간변위 4% 이상의 총 회전각을 발휘한 것으로 보고하였으며, 그중에서도 원형 개구부를 갖는 실험체는 5%의 총 회전각을 발휘하였다.

본 연구에서는 최근 대형 보에 대한 수요가 급증함에 따라 보 춤 900 mm를 갖는 대형 보-기둥 접합부에 대한 내진

성능을 평가하였다. 대형 보-기둥 접합부는 논스캘럽 공법을 활용하고, 수평 보강판 대신 원형 개구부에서 소성힌지 발현을 유도함으로써, 특수모멘트골조(SMF)의 적용 가능성을 검토하였다. 이때, 예비 유한요소해석을 통해 최적의 원형 개구부의 크기 및 위치를 도출하였다. 또한, 원형 개구부와 사각 개구부를 동시에 갖는 대형 보-기둥 접합부의 내진성능 또한 평가하여 설비 및 배관을 위한 덕트의 활용성을 높이고자 하였다.

## 2. 대형 보-기둥 접합부 설계

본 연구에서는 원형 개구부를 갖는 보 춤 900 mm인 대형 보-기둥 접합부의 내진성능평가를 위하여 유한요소해석연구와 실험연구 이전에 특수모멘트골조(SMF)의 요구사항을 만족하기 위한 설계를 선행하였다.

### 2.1 대형 보-기둥 접합부 설계 개요

본 연구에서 수행할 대형 보-기둥 접합부 내진성능평가 대상은 개구부가 없는 기본 실험체(B), 원형 개구부가 존재하는 실험체(C), 그리고 원형 및 사각 개구부가 존재하는 실험체(CR) 총 3개의 실험체들을 대상으로 설정하였다. 본 연구에서 사용된 보 부재는 H-900×300×16×28(SHN275,  $L_b = 5.0$ m), 기둥 부재는 H-428×407×20×35(SHN355,  $L_c = 3.3$ m)를 사용하였다. ANSI/AISC 358-16<sup>[8]</sup>에서는 경간이 짧은 보의 소성힌지 영역의 감소와 이에 따른 소성힌지 지점에서의 변형 증가를 우려하여 7 이상의 순경간-춤 비를 만족하도록 요구하고 있으며, 보 부재의 순경간-춤 비는 약 10.7로 나타났다. 이때 보 부재의 소성한계 비지지길이( $L_p$ )는 약 3.1 m로 소성한계 비지지길이 이내에 횡지지를 설치하는 것으로 계획하였다. 부재 단면의 폭두께비는 모두 내진조밀단면인 것으로 판정되었으며, 보와 기둥의 접합은 논스캘럽 공법을 적용한 것으로 가정하였다.

국내 건축물 강구조설계기준(KDS 41 31 00)<sup>[9]</sup>이 제시하는 특수모멘트골조 접합부를 만족하기 위한 기둥-보 모멘트의 비는 약 1.28인 것으로 나타났다. 또한, 접합부 내에서 패널존의 전단강도가 보의 전단강도보다 낮을 경우, 패널존에서 소성힌지가 발현될 수 있기 때문에 모든 실험체에 패널존 보강판(doubler plate)을 사용하여 보 변형경화시 패널존이 항복하는 것으로 설계하였다. Table 1에는 본 연구에서 사용된 대형 보-기둥 접합부의 제원에 대하여 정리하였다.

**Table 1.** Check of members in deep beam-to-column connection

Member	Size	Width-thickness ratio	Unbraced length* $L_p$ (mm)	SC/WB ratio ( $\sum M_{pc}/\sum M_{pb}$ )	Shear strength ratio** ( $R_n/(M_{pb}/d_b)$ )
Beam	H-900×300×16×28 (SHN275)	Seismic compact	3,110	1.28 $\sum M_{pc} = 4,480.10 \text{ kN}\cdot\text{m}$ $\sum M_{pb} = 3,493.88 \text{ kN}\cdot\text{m}$	0.64 (1.18)
Column	H-428×407×20×35 (SHN355)	Seismic compact	4,460		

\* $L_p$  means the limiting laterally unbraced length for the limit state of yielding.

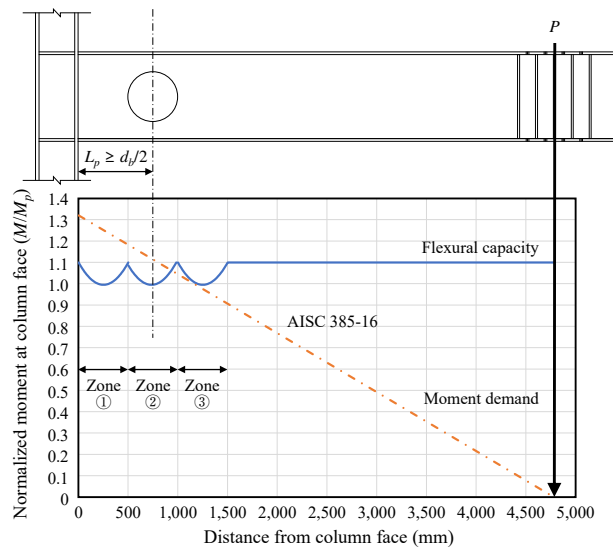
\*\*The value in parentheses was the shear strength ratio when two 10 mm doubler plates were applied.

## 2.2 원형 및 사각 개구부 설계

### 2.2.1 원형 개구부 설계

보 춤 900 mm 대형 보-기둥 접합부 내 원형 개구부에서 소성힌지 발현을 유도하기 위해서는 원형 개구부의 크기 및 위치 설계가 중요한 요소이다. 따라서 원형 개구부는 보의 다른 부분보다 먼저 항복이 선행되어야 하기 때문에 원형 개구부에서의 보유내력은 발생모멘트보다 낮도록 설계되어야 한다.

Fig. 2에 원형 개구부 위치에 따른 대형 보의 모멘트도를 나타내었다. 국내 건축물 강구조설계기준(KDS 41 31 00)<sup>[9]</sup>에서는 부재의 보유내력을 재료의 불확실성을 고려하여 예상항복강도( $R_y F_y$ )를 기준으로 산정한다. 또한, 미국강구조학회의 ANSI/AISC 358-16<sup>[8]</sup>에서는 식 (1)에서와 같이 예상항복강도에 재료의 변형도 경화, 국부저항, 추가적인 보강조건, 그리고 접합부 상태 등을 고려한 접합부 최대강도 산정계수( $C_{pr}$ )를 추가적으로 고려하고 있다.



**Fig. 2.** The moment diagram for opening design

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1.2 \quad (1)$$

산정된 부재의 모멘트도에서 원형 개구부의 위치에 따라 보 부재의 보유내력과 소요강도의 차이가 발생된다. 원형 개구부를 위치시킬 수 있는 부분을 3부분으로 구분하였을 때 원형 개구부의 위치가 Fig. 2 내 Zone ①(0 mm - 500 mm)에 위치할 경우, 부재의 보유내력과 소요강도의 큰 차이로 보-기둥 접합부에서 소성힌지 발현 없이 파단이 될 것으로 판단된다. 또한, Zone ③(1,000 mm - 1,500 mm)에 원형 개구부를 설치할 경우에는 원형 개구부에서의 보유내력이 소요강도보다 높아 소성힌지 유도가 발현되지 않을 것으로 판단된다. 따라서 Zone ②(500 mm - 1,000 mm)에 원형 개구부를 위치시켰을 경우에는 접합부의 취성적 파단 없이 원형 개구부에서 소성힌지 발현 유도가 원활할 것으로 예상된다. 또한 해당 위치는 미국강구조학회<sup>[8]</sup>에서 소성힌지 발현 지점을 보 춤의 절반 이상 떨어진 곳( $L_p \geq d_b/2$ )으로 권장하고 있어 본 연구에서는 원형 개구부의 위치를 Zone ②에 형성하는 것으로 설계를 진행하였다.

미국강구조학회에서 발행한 개구부 설계 가이드<sup>[6]</sup>에서는 원형 개구부의 크기를 전체 보 춤의 70 % 이내로 제한하고 있다. 따라서 보 춤 900 mm 보에서는 원형 개구부의 크기가 약 600 mm까지 가능하다. 그러나 원형 개구부 크기에 대한 최솟값은 제안하고 있지 않아, 최적의 원형 개구부 크기를 결정하기 위하여 예비 유한요소해석연구를 수행하였다. 원형 개구부의 크기의 최솟값은 보의 전소성모멘트( $M_p$ )의 약 95 % 수준인 원형 개구부의 지름 350 mm부터 최댓값 지름 600 mm까지 지름 50 mm 단위로 설정하여, Table 2에서와 같이 개구부 크기에 따른 소성단면계수 비율에 따라 총 6개의 유한요소해석 모델에 대하여 소성힌지 발현 여부를 통해 최적의 원형 개구부의 크기를 3절에서 도출하고자 한다.

**Table 2.** Plastic section modulus ratio according to the dimension of the circular web opening

Dimension of circular opening $D$ (mm)	Ratio of opening to beam depth $D/d_b$ (%) <sup>*</sup>	Plastic section modulus at opening $Z_D$ ( $\times 10^6$ mm <sup>3</sup> )	$Z/Z_D$ <sup>**</sup>
-	-	10.50	1.00
350	38.9	10.01	0.95
400	44.4	9.86	0.94
450	50.0	9.69	0.92
500	55.6	9.50	0.90
550	61.1	9.29	0.88
600	66.7	9.06	0.86

<sup>\*</sup> $d_b$  means the depth of the beam, and it is 900 mm.

<sup>\*\*</sup> $Z$  was the plastic section modulus of the deep beam( $= 1.05 \times 10^7$  mm<sup>3</sup>).

### 2.2.2 사각 개구부 설계

원형 및 사각 개구부를 동시에 갖는 실험체(CR)를 위하여 사각 개구부를 설계하였으며, 이때 사각 개구부의 설계는 미국강구조학회의 개구부 설계 가이드<sup>[6]</sup>에 준하여 설계를 수행하였다. 그러나 예비 유한요소해석 단계에서는 원형 개구부의 최적 크기를 도출하기 위하여 사각 개구부를 갖는 유한요소해석은 진행되지 않았다.

미국강구조학회의 개구부 설계 가이드에서는 비렌달(Vierendeel) 거동을 고려하여 식 (2)에서와 같이 개구부에서 발생되는 설계강도와 소요강도의 관계로 설계될 수 있다. 모멘트와 전단강도의 비가 이루는 관계의 반지름이 1.0보다 클 경우, 수평 보강판을 활용하여 반지름 1.0 이하로 설계하며, 보강판 설계 시 보의 전소성모멘트( $M_p$ )만큼 보강된다.

$$\left(\frac{V_u}{\phi V_m}\right)^3 + \left(\frac{M_u}{\phi M_m}\right)^3 = R^3 \quad (R \leq 1.0) \quad (2)$$

여기서,  $M_u$ : 소요 휨 강도(kN·m)

$V_u$ : 소요 전단강도(kN)

$\phi M_m$ : 개구부 설계 휨 강도(kN·m)

$\phi V_m$ : 개구부 설계 전단강도(kN).

본 연구에서는 사각 개구부의 크기를 400 mm × 800 mm로 설정하였으며, 식 (2)에서  $R$ 의 값이 1보다 커 수평보강판을 설치하는 것으로 설계하였다. 수평보강판의 보강량( $A_r$ )은 1,600 mm<sup>2</sup>가 필요하였으며, 개구부의 위치는 기둥 플랜

지 면에서 2,000 mm 떨어진 곳에 설치하여야 식 (2)를 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 사각 개구부에서는 수평보강판뿐만 아니라, 개구부로 인한 처짐 등을 고려하여 수직 스티프너 또한 설치하는 것으로 설계하였다.

### 2.2.3 원형 및 사각 개구부 간격 설계

개구부가 보 내부에서 연속적으로 존재할 경우, 미국강구조학회의 설계 가이드<sup>[6]</sup>에서는 식 (3)에서와 같이 개구부 사이의 순간격의 최솟값을 지정하고 있다. 그러나 설계 가이드에서는 각각의 개구부들만 존재할 경우의 순간격들만 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서의 원형 및 사각 개구부를 동시에 갖는 실험체(CR)에서는 원형 개구부와 사각 개구부가 동시에 존재하기 때문에 식 (3)의 모든 조건을 만족하도록 순간격을 설계하였다.

(1) 사각 개구부의 순간격:

$$S \geq h_0$$

$$S \geq a_0 \left( \frac{V_u/\phi V_p}{1 - V_u/\phi V_p} \right) \quad (3a)$$

(2) 원형 개구부의 순간격:

$$S \geq 1.5D_0$$

$$S \geq D_0 \left( \frac{V_u/\phi V_p}{1 - V_u/\phi V_p} \right) \quad (3b)$$

여기서,  $S$ : 개구부 사이의 순간격(mm)

$h_0$ : 사각 개구부의 높이(mm)

$a_0$ : 사각 개구부의 길이(mm)

$V_u$ : 소요 전단강도(kN)

$\phi V_p$ : 보의 소성전단강도(kN)

$D_0$ : 원형 개구부의 반지름(mm).

식 (3)에서의 순간격 조건들을 모두 만족하도록 검토한 결과, 원형 개구부의 크기에 따라 원형 개구부와 사각 개구부의 순간격은 900 mm - 1,150 mm인 것으로 나타났다.

## 3. 예비 유한요소해석 연구

### 3.1 해석개요

앞서 2.2.2절에서 언급한 바와 같이 최적의 원형 개구부 크기를 결정하기 위하여 유한요소해석연구를 수행하였다.

원형 개구부는 대형 보에서 설비 및 배관을 위한 덕트의 역할을 수행할 뿐만 아니라 소성힌지 발현을 유도하여 대형 보-기둥 접합부의 내진성능을 향상하고자 한다.

예비 유한요소해석연구에서는 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 예정 실험체와 동일하게 모델링되었다. 모델링에 사용된 유한요소는 3차원 SOLID 요소 중 C3D8R 요소이며, 재료모델은 강재의 공칭 항복 및 인장강도를 적용하였다. 경계조건으로는 기둥의 경우 양단 핀을 구현하기 위하여 기둥 양단 각 단면에 참고점을 생성하고, 참고점과 각 단면을 rigid body로 구속하여 핀 고정을 적용하였으며, 동일한 방법으로 가력부와 보를 구속하였다. 또한, 보의 횡좌굴을 방지하기 위하여 가이드프레임을 설치할 예정이며, 가이드프레임과 보가 접하는 면적만큼 구속조건을 지정하였다. 이때, 보의 횡지지길이는 Table 1에서 검토된 3.1 m 이내로 가이드프레임을 설치하였다.

본 예비해석에서는 긴 시간이력에 따른 변형을 확인할 수 있고, 대 변위에 따른 좌굴을 확인할 수 있는 Dynamic/Implicit 옵션을 사용하였으며, 가력조건은 층간변위 별로 1 cycle씩 층간변위 5.0%까지 가력하였다. Fig. 3에 예비 유한요소해석모델과 각 조건들을 나타내었다.

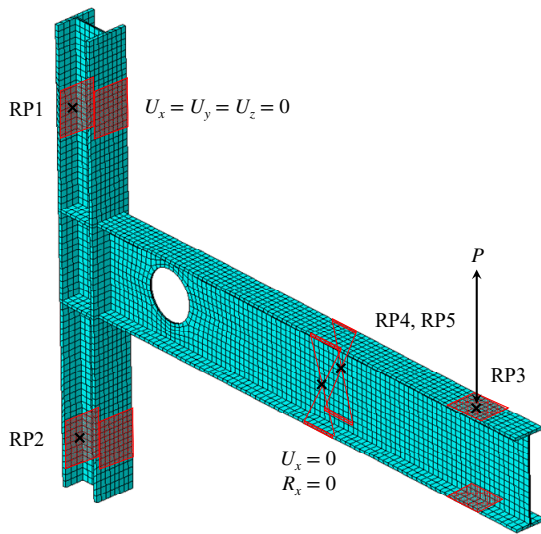


Fig. 3. The moment diagram for opening design

### 3.2 예비 유한요소해석 결과

Table 3와 Fig. 4에서는 원형 개구부가 없는 기본 모델을 포함한 원형 개구부의 크기에 따른 유한요소해석 결과를 나타내었고, Fig. 5에는 층간변위 5%에서의 von-Mises 응력 분포를 나타내었다. 예비 유한요소해석 결과, 기본 모델과

C350 모델부터 C450 모델까지는 구조성능이 거의 유사하게 나타났다. C500 모델부터는 층간변위 3%에서 좌굴이 관찰되었고, 층간변위 5%에서는 하중 감소가 눈에 띄게 나타났다. 기본 모델과 유사하게 나온 C350 - C450 모델에서는 보 플랜지에 응력 집중이 나타나 소성힌지 발현 유도가 어려울 것이라 판단되고, C550 모델과 C600 모델의 경우에는 보 플랜지 좌굴로 인한 하중 저하가 급격하여 대형 보-기둥 접합부의 회전능력을 저하시킬 것으로 판단된다.

Table 3. Preliminary FEA results

Model		Maximum load-displacement		Normalized $M-\theta$	
		Load (kN)	Dis. (mm)	$M/M_p^*$	$\theta$ (rad)
BASE	+	872.03	249.99	1.11	0.050
	-	881.82	248.42	1.12	0.050
C350	+	864.99	250.78	1.17	0.050
	-	874.67	249.21	1.19	0.050
C400	+	857.78	250.78	1.18	0.050
	-	867.21	249.21	1.19	0.050
C450	+	841.66	247.64	1.17	0.050
	-	848.17	249.21	1.18	0.050
C500	+	810.92	150.47	1.14	0.030
	-	813.33	149.69	1.14	0.030
C550	+	773.71	120.84	1.10	0.025
	-	776.02	121.47	1.11	0.024
C600	+	728.26	87.46	1.06	0.017
	-	728.63	85.89	1.06	0.017

\* $M_p$  was the plastic moment at plastic hinge location.

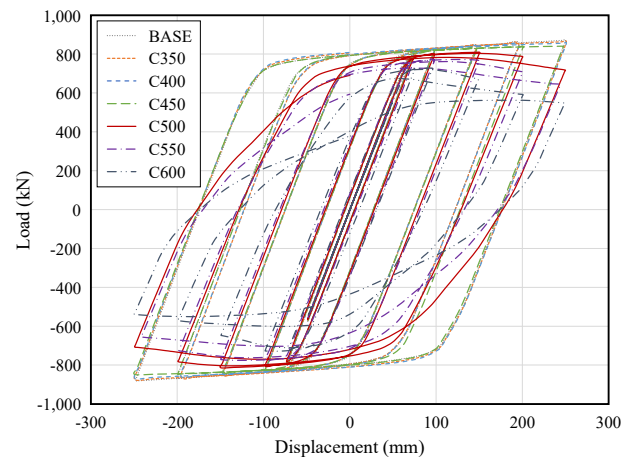


Fig. 4. Load-displacement curve of FEA

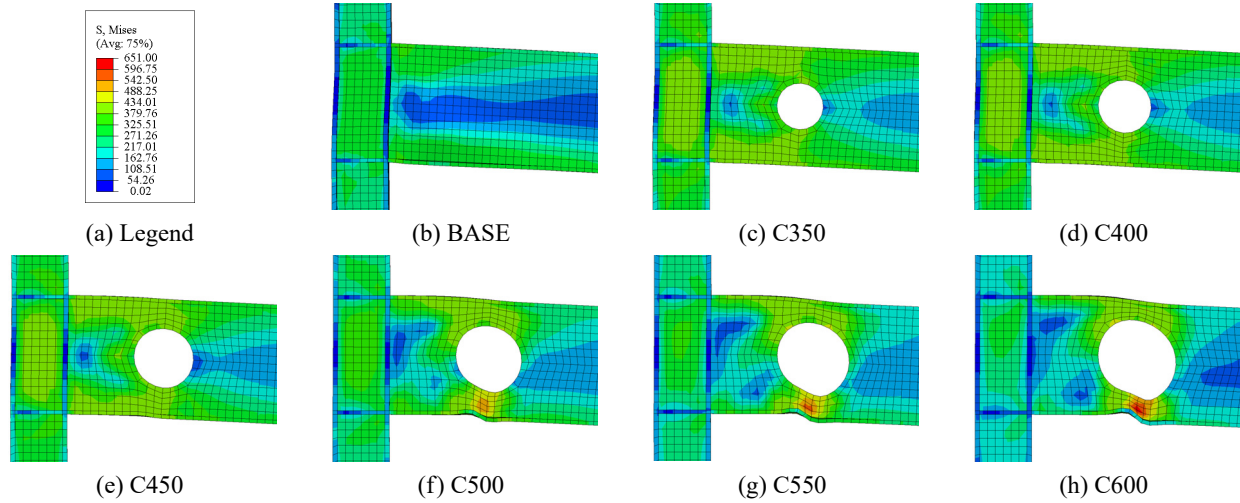


Fig. 5. von-Mises stress distribution at 5 % story drift ratio

Park *et al.*<sup>[7]</sup>이 수행한 보 춤 800 mm의 크기를 갖는 보-기둥 접합부에서도 보의 전소성모멘트( $M_p$ )의 90% 정도 천공된 원형 개구부를 갖는 접합부에서 우수한 연성능력을 보여주었으며, Lee *et al.*<sup>[10]</sup> 및 Lee and Kim<sup>[11]</sup>이 수행한 RBS 접합부에서도 보 플랜지 절삭 폭이 보 전소성모멘트( $M_p$ )의 90% 정도에서 유의미한 결과를 도출하였다. 따라서 보 춤이 900 mm급인 대형 보-기둥 접합부에서 소성힌지 발현 유도를 위한 원형 개구부의 크기는 C500 모델이 적합한 것으로 판단되며, 내진성능평가에서 원형 개구부의 크기를 지름 500 mm로 천공하는 것으로 설계하였다.

## 4. 실험연구

### 4.1 실험개요

본 연구에서는 개구부를 갖는 보 춤 900 mm급 대형 보-기둥 접합부의 내진성능평가를 통하여 원형 개구부에서 소성힌지 발현을 유도하여 특수모멘트골조의 접합부로 활용하고자 한다. 본 실험연구에서는 Table 4에서와 같이 개구부가 없는 기본 실험체(B), 원형 개구부가 존재하는 실험체(C), 그리고 원형 및 사각 개구부가 존재하는 실험체(CR) 총 3개의 실험체들을 제작하여 실험대 실험을 진행하였다. 실험수행 방법 및 절차는 국내 건축물 강구조설계기준(KDS 41 31 00)<sup>[9]</sup>에 준하여 실시되었다.

보 춤 900 mm인 대형 보-기둥 접합부 실험체 제작을 위하여 기존 연구<sup>[4]</sup>에서와 같이 논스칼립 방식을 채택하였다. 기둥-보 상하 플랜지는 완전용입용접(CJP), 웨브는 필릿용접

을 수행하였고, 사각 개구부와 수평 보강판의 접합은 용입량 70% 이상의 개선용접을 수행하였다. 용접부는 건축물 강구조설계기준(KDS 41 31 00)<sup>[9]</sup>에서 요구하는 특수모멘트골조 접합부로 사용 가능한 -30 °C에서 28 J 이상의 샤르피 흡수 에너지(CVN) 인성값을 갖는 용접재(SM-70 용접재)를 사용하였다. Table 4에는 실험체 일람을 나타내었으며, Fig. 6 및 Fig. 7에는 논스칼립 방식의 용접접합 상세 및 실험체 상세를 나타내었다.

Table 4. Specimen list

Specimen*	Web opening	Opening size
B	-	-
C	Circular	D500
CR	Circular + rectangular	D500 + □400×800

\*B: base specimen; C: circular opening specimen; CR: circular and rectangular opening specimen

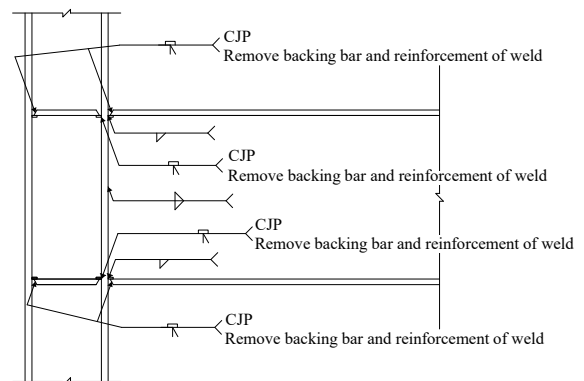
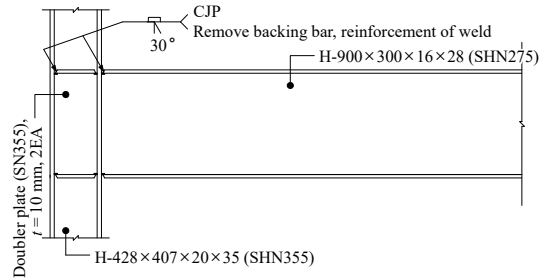
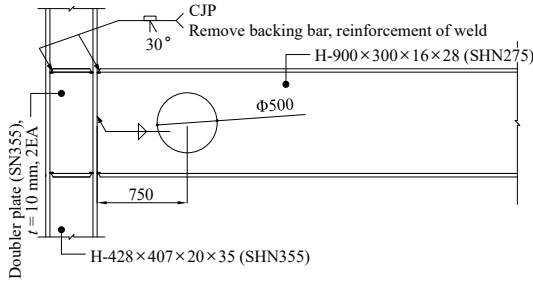


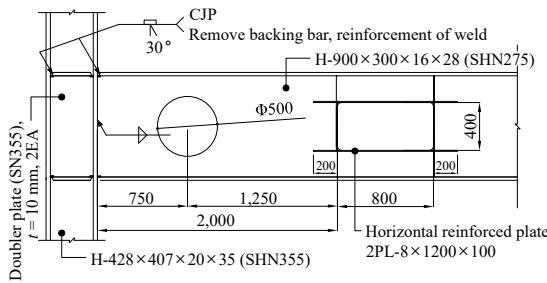
Fig. 6. Non-scallop welding method



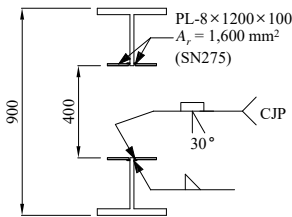
(a) Specimen B



(b) Specimen C



(c) Specimen CR



(d) Rectangular opening details

Fig. 7. Details of specimen

## 4.2 재료시험 및 결과

금속재료 인장시험은 한국산업규격(KS) KS B 0801<sup>[12]</sup>에서 1A호 시험편 규격에 따라 두께별로 3개씩 제작하여 수행하였다. 금속재료 인장시험 결과, 보·기둥의 플랜지 및 웨브의 각각의 시편 3개에서 재료시험값은 건축구조용 열간 압연형강(KSD 3866)<sup>[13]</sup>에서 제시하는 기계적 성질(항복강도, 인장강도, 항복비 그리고 연신율 등)을 만족하였다. Table 5에는 두께별로 시편 3개에 대한 평균값과 KSD 3866<sup>[13]</sup>에서 제시된 열간 압연형강의 기준값을 비교하여 나타내었다.

## 4.3 가력계획 및 실험체 셋업

개구부를 갖는 보 춤 900 mm급 대형 보·기둥 접합부의 내진성능평가를 위한 가력계획은 건축물 강구조설계기준(KDS 41 31 00)<sup>[9]</sup>의 재하이력에 준하여 Fig. 8과 같이 가력하였으며, 액추에이터(actuator)의 용량을 고려하여 층간변위 6%까지 계획하였다.

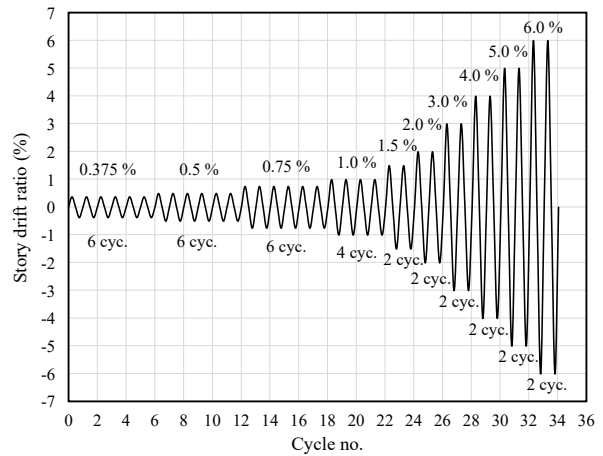


Fig. 8. Loading protocol

Table 5. Coupon test results

Steel	Specimen	Young's modulus $E$ (GPa)	Yield strength $F_y$ (MPa)	Tensile strength $F_u$ (MPa)	Elongation (%)	Yield ratio $F_y/F_u$
SHN275	16T (web)	216.97	370.80	479.78	27.94	77.26
	28T (flange)	207.90	303.20	462.15	31.73	65.61
KS D 3866		-	275 - 395	410 - 520	21 or more	85 or less
SHN355	20T (web)	213.43	419.84	570.54	22.19	73.57
	35T (flange)	212.53	374.30	564.12	25.74	66.35
KS D 3866		-	355 - 475	490 - 610	21 or more	85 or less

The result values of all coupon test were the average value of three specimens.

Fig.9에서와 같이 기둥의 상하부를 회전지그와 볼트체결하여 핀접합을 구현하였으며, 보 부재 자유단에 액추에이터를 설치하였고, 보의 횡좌굴을 방지하기 위하여 기둥면에서 약 3.0 m 지점에 가이드프레임을 설치하였다. 또한, 상하부 웹 및 플랜지 단부, 원형개구부 상하부 플랜지면에 게이지를 부착하여 변형률 분포를 확인하였다.

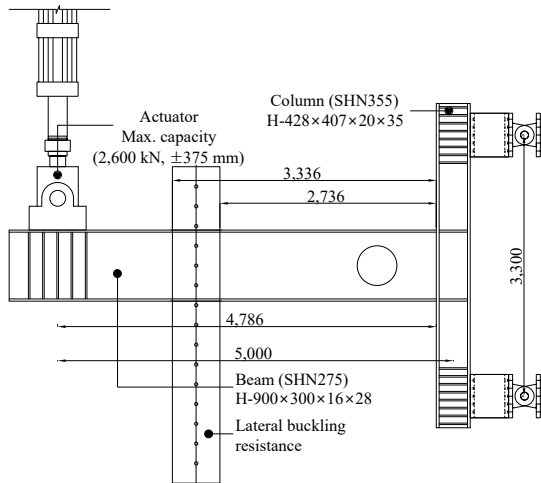
#### 4.4 실험결과 및 분석

##### 4.4.1 B 실험체

모든 실험체는 층간변위 6%까지 가력되었으나, 실험여건 및 실험체의 횡좌굴 등을 고려하여 1 cycle까지만 가력되었고, 실험결과를 Table 6에 정리하였다.

개구부가 없으며 논스캘럽 공법을 적용한 기본 실험체는

가력되는 동안 보-기둥 접합부의 파단은 발생하지 않았다. B 실험체는 층간변위 1.5%에서 보 상·하부 플랜지에서 초기 항복이 관찰되었으며, 3.0%에서는 보 웹에서도 항복이 관찰되었다. 층간변위 4.0%에서는 보 플랜지에서 좌굴이 발생하였고, 이후에는 웹 좌굴과 횡비틀림이 발생되면서 하중이 급격히 감소하였다. 좌굴은 기둥 면에서 약 750 mm 떨어진 곳에서 발생하였으며, Fig. 2에서의 모멘트 구배도에서 발생모멘트와 보유내력이 만나는 지점과 거의 유사하였다. Figs. 10-11에서는 층간변위 6.0%에서의 좌굴상태와 무차원화된(normalized) 모멘트와 층간변위 곡선을 나타내었다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 원형 개구부를 적용하지 않은 대형 보-기둥 접합부 실험체는 층간변위 4.0%에서 보 전소성모멘트( $M_p$ )의 80% 이상 유지하고 있어 특수모멘트골조의 요구사항을 만족하는 것으로 나타났다.



(a) Elevation view



(b) Actual view (specimen CR)

Fig. 9. Test set-up

Table 6. Test results

Specimen	Initial stiffness (kN/mm)*	Yield point		Maximum point		Max. plastic rotation angle (rad)	Failure mode***
		Moment** (kN·m)	Rotation angle (rad)	Moment** (kN·m)	Rotation angle (rad)		
B	9.31	3,648(1.16)	0.0205	3,991(1.27)	0.0371	0.0466	LB LTB
		3,855(1.23)	0.0219	4,352(1.38)	0.0402	0.0435	
C	9.88	3,550(1.25)	0.0176	3,899(1.37)	0.0359	0.0488	LB LTB
		3,595(1.26)	0.0176	4,101(1.44)	0.0338	0.0473	
CR	9.65	3,666(1.29)	0.0188	4,072(1.43)	0.0362	0.0464	LB LTB
		3,584(1.26)	0.0182	4,211(1.48)	0.0370	0.0370	

\*The initial stiffness was obtained from through the first cycle of 0.375 % story drift ratio.

\*\*The value in parentheses is the value obtained by dividing the moment at column face by the  $M_p$  at the plastic hinge.

\*\*\*LB and LTB mean local buckling and lateral torsional buckling, respectively.



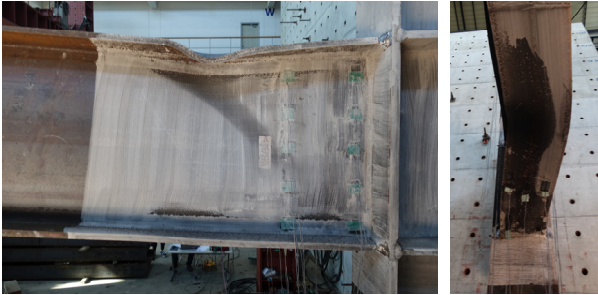


Fig. 10. LB and LTB at 6% story drift

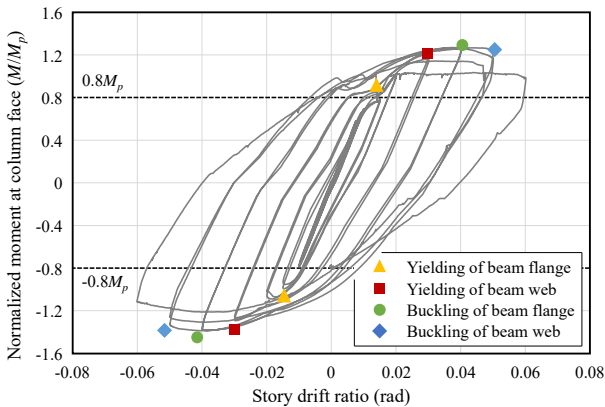


Fig. 11. Moment-rotation curve of specimen B

#### 4.4.2 C 실험체

C 실험체는 기본 실험체인 B 실험체에서 기둥 면에서 750 mm 떨어진 지점에 원형 개구부(지름 500 mm)를 가지며, 원형 개구부에서 소성힌지를 유도하고자 설계되었다.

C 실험체의 이력거동은 B 실험체와 거의 유사하게 나타났으며, 층간변위 약 1.5%에서 보 상하부 플랜지에서 초기 항복이 관찰되었다. 층간변위 3.0%에서는 보 웨브 내의 원형 개구부 주위에서 항복이 관찰되었고, 층간변위 4.0%에서는 원형 개구부 상하부 플랜지에서 좌굴이 발생되었다. 이후 웨브의 좌굴과 함께 보의 횡비틀림 좌굴이 동반하였고, 층간변위 5.0% - 6.0%에서는 좌굴과 횡비틀림 좌굴로 인하여 하중이 서서히 감소하는 경향을 보여주었다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 원형 개구부에서 소성힌지가 발현됨을 확인할 수 있었으며, C 실험체 또한 보-기둥 접합부에서의 용접부 파괴는 관찰되지 않았다.

Fig. 13은 C 실험체의 무차원화된 모멘트-층간변위 곡선을 나타낸 것이며, Fig. 13과 Table 6의 실험결과값을 분석하였을 때, C 실험체는 B 실험체에 비하여 기둥 면에서 측정된 모멘트값은 낮게 측정되었지만, 소성힌지 발현 지점에서의 소성모멘트( $M_p$ )로 무차원화하였을 경우에는 약 5.0% 정도

더 높게 평가되었다. C 실험체 또한 건축구조기준에서 제시하는 특수모멘트골조의 요구조건을 상회하는 결과를 보여주었고, B 실험체에 비해서는 소성힌지의 위치가 보 단부에서 보 내부로 유도되어 보-기둥 접합부에서의 취성적인 파단을 방지하였다.

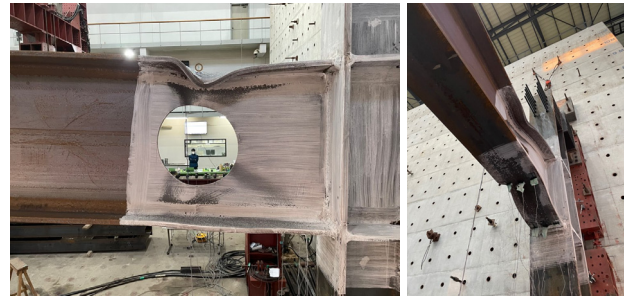


Fig. 12. LB and LTB at 6% story drift ratio

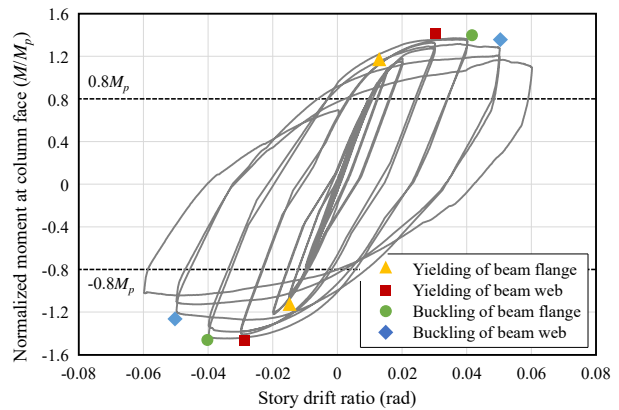


Fig. 13. Moment-rotation curve of specimen C

#### 4.4.3 CR 실험체

CR 실험체는 C 실험체와 동일한 원형 개구부를 가지면서 덕트의 활용성을 높이고자 사각 개구부를 동시에 설치한 실험체이다. 사각 개구부의 크기는 400 mm × 800 mm이며, 사각 개구부 상하부에 수평보강판이 설치되었고, 보강 양( $A_s$ )은 절삭된 보의 소성단면계수( $Z_b$ ) 만큼 보강되도록 설계되었다. 따라서 사각 개구부에서는 보의 전소성모멘트( $M_p$ )만큼의 내력을 갖도록 설계되었기 때문에 C 실험체와 동등 이상의 성능이 발휘될 것으로 예상하였다.

내진성능평가 결과, CR 실험체는 C 실험체와 유사한 실험체 거동을 보여주었다. 층간변위 1.5%에서 보 플랜지 초기 항복이 발생하였으며, 2.0%에서는 원형 개구부 주변 보 웨브에서 초기 항복이 발생하였다. 층간변위 4.0%에서는 보 플랜지 좌굴이 선행되었으며, 5.0%에서 보 웨브의 좌굴이

발생함과 동시에 횡비틀림좌굴이 발생되었다. 그 이후에는 C 실험체와 동일하게 대형 보-기둥 접합부의 파단 없이 완만하게 하중이 저하되어 국내 건축물내진설계기준(KDS 41 17 00)<sup>[1]</sup>에서 제시하는 특수모멘트골조(SMF)의 요구성능을 상회하고 있음을 확인할 수 있었다.

CR 실험체의 항복점과 최대내력은 C 실험체와 거의 유사하게 나타나, 계획했던 바와 같이 사각 개구부의 존재는 보 부재의 휨 성능에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 확인하였고, 따라서 계획상의 사용성에 대한 장점을 충분히 발휘할 것으로 예상된다. Fig. 14에서는 CR 실험체의 종국상황을 나타내었으며, Fig. 15에서는 무차원화된 모멘트-층간변위 곡선을 나타내었다.



Fig. 14. LB and LTB at 6 % story drift ratio

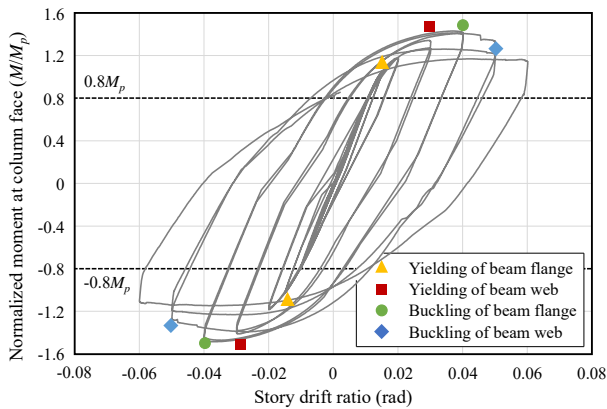
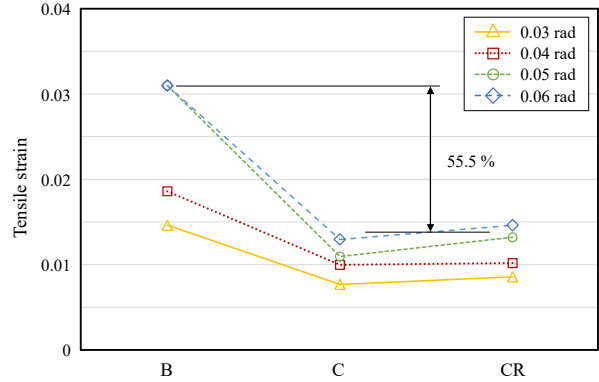


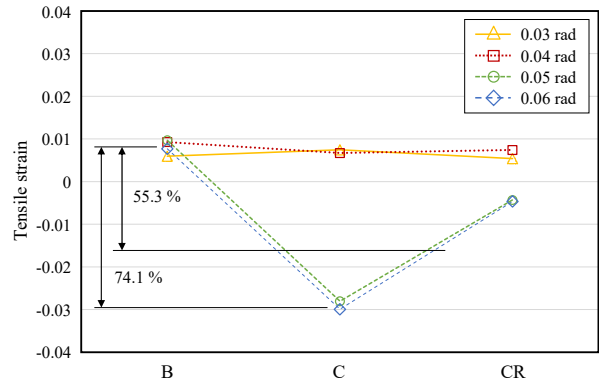
Fig. 15. Moment-rotation curve of specimen CR

#### 4.4.4 인장변형도 분포

Fig. 16은 층간변위 3.0% - 6.0%까지 보 단부에서의 최대 인장변형도와 원형 개구부가 위치하는 기둥 플랜지 면에서 750 mm 떨어진 지점에서의 최대인장변형도를 나타내었다.



(a) Maximum strain at beam end



(b) Maximum strain at circular web opening

Fig. 16. Comparison of maximum tensile strain

Fig. 16(a)와 같이 보 단부에서의 최대인장변형도를 분석한 결과, B 실험체의 인장변형도는 원형 개구부가 존재하는 C 실험체 및 CR 실험체에 비하여 매우 높은 것으로 나타났다. 원형 개구부가 존재함에 따라 보 단부 변형도를 약 55% 가량 감소시킬 수 있음에 따라 단부의 취성적 파단 예방에 유효한 것으로 판단된다.

또한, Fig. 16(b)은 기둥 면에서 750 mm 떨어진 지점에서 측정된 최대인장변형도를 나타낸 것이며, 음의 부호(-)가 나타난 것은 원형 개구부 플랜지 부분의 좌굴로 인한 것으로 판단된다. 원형 개구부에서 소성힌지가 발현됨에 따라 C 실험체와 CR 실험체의 변형도가 월등히 큰 것으로 나타났으며, 이를 통해 원형 개구부에서 소성힌지 발현을 유도하여 연성적인 거동을 의도한 설계법이 효과적으로 반영되었음을 확인할 수 있다.

본 연구에서 제시하는 논스캘럽 공법 및 원형 개구부를 활용한 보 춤 900 mm 대형 보-기둥 접합부 내진성능평가에서 원형 개구부는 설비 및 배관 등의 덕트로 활용할 수 있는 사용성 측면과 보 단부의 변형을 감소시켜 보-기둥 접합부의 취성적 파단을 예방할 수 있는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 특수모멘트골조(SMF)의 요구사항을 모두 만족하므로 내진성능에 우수한 접합부라 판단된다.

#### 4.4.5 에너지소산능력 비교

Fig. 17에서는 층간변위 6.0% 1 cycle까지 가력된 모든 실험체의 누적된 에너지소산량을 나타내었다. 에너지소산량은 하중-변위 곡선에서 각 cycle의 면적을 누적하였으며, 이때 실험체별로 소성한지 발현 위치가 다르기 때문에 소성한지 발현 위치에서의 전소성모멘트( $M_p$ )로 무차원화하였다.

무차원화된 누적 에너지소산능력을 비교하였을 때, CR 실험체가 가장 많은 에너지를 소산하였고, 기본 실험체인 B 실험체는 CR 실험체에 비하여 약 7% 정도 적게 에너지를 소산하였다. 이를 통해 원형 개구부에서 소성한지를 발현을 유도함으로써 원형 개구부가 없는 대형 보-기둥 접합부 실험체에 비하여 접합부의 연성능력을 더 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다.

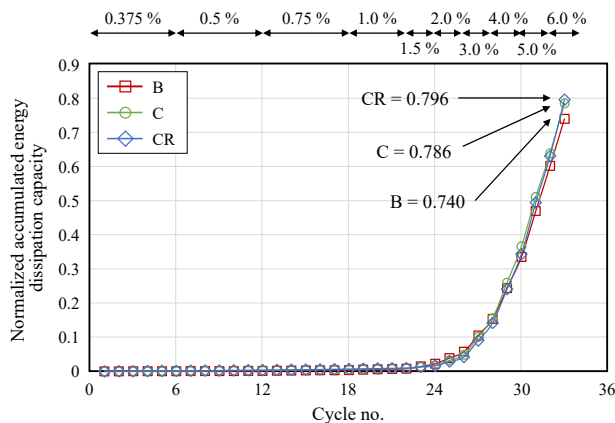


Fig. 17. Comparison of normalized accumulated energy dissipation capacity

## 5. 결론

본 연구에서는 보 춤 900 mm 대형 보-기둥 접합부를 특수 모멘트골조의 접합부로 활용하고자 원형 개구부를 도입하여 내진성능평가를 수행하였으며, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 적정 원형 개구부 크기 산정을 위한 예비 유한요소해석연구에서 도출된 보 전소성모멘트( $M_p$ )의 90% 절삭하는 것이 원형 개구부에서 소성한지 발현을 효과적으로 유도되었으며, 추후 보 춤 크기에 따른 적정 원형 개구부의 크기 도출을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (2) 논스캘럽 공법과 원형 개구부가 적용된 보 춤 900 mm 대형 보-기둥 접합부는 층간변위 6.0%까지 접합부의 취성적 파단 없이 연성적인 거동을 보여주었으며, 특수모멘트골조의 접합부로 활용 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 원형 개구부가 적용된 실험체는 기본 실험체에 비하여 최대내력은 감소하였지만, 무차원화된 모멘트는 6% - 10% 정도 높게 평가되었고 원형 개구부 실험체 모두 4% 이상의 우수한 소성회전각을 발휘하였다.
- (4) 보 단부에서의 최대인장변형도를 분석하였을 때, 소성한지의 위치를 원형 개구부로 이동함에 따라 보 단부의 변형도를 약 50% 이상 완화시킬 수 있으며 취성적 파단을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 원형 개구부만 존재하는 실험체(C)와 원형 및 사각 개구부 모두 존재하는 실험체(CR)를 비교하였을 때, 두 실험체의 성능 차이는 크지 않았지만, 설비 및 배관 등을 위한 덕트 활용성 측면에서 원형 및 사각 개구부 모두 설치하는 것이 사용성 면에서 큰 장점이 있는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. NRF-2018R1D1A1B0704821114).

## 참고문헌(References)

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Seismic Design Standard for Buildings* (KDS 41 17 00: 2019), Korea (in Korean).
- [2] Shim, H.-J., Lee, H.-W., and Cho, B.-S. (2020) Qualified Connections of Deep H-Beam for Seismic Applications, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.5, pp.16-19 (in Korean).

- [3] SAC Joint Venture (2000) *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings* (FEMA-350), Federal Emergency Management Agency, USA.
- [4] Lee, M.-J., Yang, J.-K., Kim, J.-W., Oh, S.-H., Cho, H.-S., and Kim, S.-S. (2014) An Experimental Study on Performance Evaluation and Development of Seismic Connection Details with SHN Steel of Deep H Type Beam, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.30, No.3, pp.29-37 (in Korean).
- [5] Ryu, H.-S., Kim, Y.-H., Oh, S.-H., and Chae, H.-S. (2020) Special Moment Frames Using Pos-H with Beam Height 1,000mm, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.5, pp. 7-15 (in Korean).
- [6] Darwin, D. (1990) *Design of Steel and Composite Beams with Web Openings (Steel Design Guide Series 2)*, American Institute of Steel Construction, USA.
- [7] Park, J.W., Kang, S.M., Hwang, I.K., Kang, T.K., and Kwon, K.J. (2001) Behavior of Reduced Beam Section Connections with Web Openings, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.13, No.4, pp.395-405 (in Korean).
- [8] American Institute of Steel Construction (2016) *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications* (ANSI/AISC 358-16), USA.
- [9] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Steel Structures Design Standard* (KDS 41 31 00: 2019), Korea (in Korean).
- [10] 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).
- [11] Lee, C.H., and Kim, S.Y. (2017) Seismic Retrofit of Welded Steel Moment Connections Considering the Presence of Composite Floor Slabs, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.1, pp.25-36 (in Korean).
- [12] Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [13] Korean Agency for Technology and Standards (2019) *Hot Rolled Steel Sections for Building Structure* (KS D 3866: 2019), Korea (in Korean).

---

**요약**: 본 연구에서는 논스캐립 공법이 적용된 보-기둥 접합부를 특수모멘트골조 접합부로 활용하고자 원형 개구부를 설치하여 내진성능평가가 수행되었다. 이때 실험체로는 개구부가 없는 실험체와 원형 개구부만 존재하는 실험체, 그리고 원형 및 사각 개구부가 존재하는 실험체를 제작하였다. 내진성능평가 결과, 모든 실험체는 층간변위 6%까지 접합부의 파단 없이 연성적인 거동을 보여주었고, 특수모멘트골조의 요구사항을 만족하였다. 원형 개구부가 존재함에 따라 소성힌지가 원형 개구부에서 발생되었고 이에 따라 보 단부의 취성적인 파단을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어**: 대형 보-기둥 접합부, 웹 개구부, 원형 개구부, 내진성능, 특수모멘트골조

---