

# 개선된 액세스 홀 형상을 갖는 WUF-W접합부의 실험을 통한 내진성능평가

## Experimental Evaluation of the Seismic Performance of WUF-W Moment Connections with a Modified Access Hole

한상환<sup>1)\*</sup> · 정진<sup>1)</sup> · 문기훈<sup>1)</sup> · 김진원<sup>2)</sup>

Han, Sang Whan<sup>1)\*</sup> · Jung, Jin<sup>1)</sup> · Moon, Ki-Hoon<sup>1)</sup> · Kim, Jin Won<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 건축공학과, <sup>2)</sup>포항산업과학연구원 강구조연구소

<sup>1)</sup>Architectural Engineering, Hanyang University, <sup>2)</sup>Steel Structure Research Division, RIST

### / A B S T R A C T /

Welded Unreinforced Flange-Welded Web (WUF-W) connection is one of Special Moment Frame (SMF) specified in ANSI/AISC-358. From the experimental test of WUF-W connection specimens conducted by the previous study, fracture occurred in the beam flange before achieving total inter-story drift angle of 0.04radian required for Special Moment Frames (SMF) system even though the specimens satisfied the design and detailing requirement specified in ANSI/AISC-358. These results are estimated as problem of the access hole geometry. In this study, a full-scale WUF-W connection specimen was made with a modified access hole geometry, and tested with the same test setting and loading as the previous test. From test results, the deformation capacity of the tested WUF-W connection specimen exceeded 4%, which is required for connections in SMF system. Comparing with the WUF-W specimens of the previous study, the strain demand of the beam flange in the tested specimen was decreased and energy dissipation capacity of the specimen was improved.

**Key words:** Steel Moment Frame, Connections, Cyclic Test, Plastic Rotation, Weld Access hole

## 1. 서론

철골 구조 시스템의 가장 일반적인 구조 시스템 중 하나인 철골 모멘트 골조 시스템 (Steel Moment Frame, SMF)은 높은 연성능력과 에너지 소산능력을 보유하고 있어 지진과 같은 횡력에 저항하는 가장 이상적인 시스템으로 알려져 있다. 하지만 1994년 Northridge 지진 발생 시 모멘트 저항 골조 시스템의 접합부에서 예상치 못한 취성 파괴가 발생하였고, 대부분의 접합부 파단은 보 플랜지와 기둥 플랜지 용접 부분에서 발생하였다. (Youssef et al.[1])

이러한 문제를 보완한 새로운 접합부 개발을 위해 SAC Project Phase2에서는 보의 플랜지와 웨브를 모두 기둥 플랜지에 용접하는 방식의 접합부인 Welded Unreinforced Flange- Welded web(WUF-W)모멘트 접합부 연구가 진행되었다. Ricles 등[2]은 WUF-W접합부 실험을 통해 특수 모멘트 골조 접합부의 요구성능인 총 변위각 4%를 크게 상회함을 실험을 통

하여 검증하였다. 또한 Lee 등[3,4]의 연구에서도 WUF-W접합부 실험체에서 총 변위 각이 4%이상의 성능을 보유하고 있는 것으로 보고하였다. 이러한 접합부 실험을 통해 우수한 성능을 검증한 WUF-W접합부는 ANSI/AISC 358-05[5]에서 특수 모멘트 골조(Special Moment Frame, SMF)인 증접합부에 추가적으로 지정하였다. 현재 ANSI/AISC 358-05[5]에서는 WUF-W접합부의 설계와 상세를 준수하여 특수모멘트 골조 시스템의 성능을 만족하도록 제한하고 있다.

이에 선행연구(황성훈 등[6])은 ANSI/AISC-358-05[5]에서 제시하고 있는 설계방법 및 상세를 따라 WUF-W접합부를 대상으로 하여 반복하중 실험을 수행하였다. 실험결과 보 춤이 약 900mm인 실험체에서 특수 모멘트 접합부 인증기준을 만족하지 못하고 파단이 발생하였다. 이러한 결과는 Ricle 등[2]의 유사한 보 춤 약 920mm가진 실험체와 상이한 결과로서, Ricles 등[2]에서는 특수모멘트 골조 인증접합부 성능을 만족하였다. 이러한 두 실험의 상이한 결과의 원인을 분석하기 위해 황성훈 등[6]과 Ricles 등[2]의 실험체를 비교한 결과 액세스 홀의 형상차이를 확인할 수 있었다. Ricles 등[2]은 FEA(Finite Element Analysis)와 실험을 통한 결과로 응력 집중이 작아질 수 있는 액세스 홀 형상을 제안하여 사용하였고, 황성훈 등

\*Corresponding author: Han, Sang Whan

E-mail: swan82@hotmail.com

(Received 28 September 2012; Accepted 16 November 2012)

[6]은 AISC 358-05[5]의 규준에 따라 엑세스 홀 형상을 결정하였다.

Lu 등[7]은 엑세스 홀을 주요 변수로 하여 WUF-W접합부를 대상으로 FEA를 수행한 결과, 엑세스 홀의 형상 및 크기는 보 플랜지의 응력 집중 및 초기 파단에 영향을 끼친다고 밝혔으며, Mao 등[8]은 엑세스 홀 전이 기율이 보 플랜지의 비탄성 변형에 영향을 끼친다고 시사했다.

따라서 본 연구에서는 WUF-W접합부를 대상으로 하여 선행연구(황성훈 등[6])에서 ANSI/AISC 358-05[6]의 접합상세를 따라 제작된 실험체의 엑세스 홀 전이 기율기 21° 대신 Ricles 등[2]이 사용한 엑세스 홀 전이 기율기 13°를 적용한 실험체를 다시 제작하여 실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 ANSI/AISC 358-05[6]접합상세를 만족하는 개선된 엑세스 홀 형상을 갖는 WUF-W접합부가 특수모멘트골조 인증접합부의 요구조건을 만족하는지 평가하였다.

## 2. WUF-W접합부 상세

WUF-W접합부는 Fig. 1(a)과 같이 보 플랜지와 웹가 기둥 플랜지에 용접되는 완전용입용접 모멘트 접합부이다. 1994년 Northridge 지진 이후 개발된 접합부 중 WUF-W접합부는 보-기둥 접합부에서 접합부의 기둥면 근처 보에서 소성힌지가 발생하도록 유도된 접합부이다. 또한 보와 기둥에 많은 용접량으로 다른 접합부에 비해 접합부에서 상호 영향이 크며, 특수 모멘트 골조 시스템의 인증접합부로서 높은 연성능력을 보유하고 있다. 이와 같은 특수 모멘트 골조 성능 만족을 위해 현재 ANSI/AISC-358-05[6]에서는 WUF-W접합부의 제작 및 부착상세를 제한하고 있다. Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)는 ANSI/AISC-358-05[6]에서 제시하고 있는 전단접합상세와 ANSI/AISC-358-05[6]에서 채택하고 있는 AWS D1.8/ D1.8M[9]에서 제시하고 있는 엑세스 홀 상세이다.

## 3. 실험체 계획

본 연구에서는 황성훈 등[6]에서 ANSI/AISC 358-05[6]의 접합상세에 따른 실험체의 엑세스 홀 전이 기율기 21°대신 Ricles 등[2]이 사용한 전이 기율기 13°를 적용하여 내진성능평가를 수행하였다. 실험체의 전반적인 계획은 황성훈 등[6] 연구와 엑세스 홀 형상 차이에 따른 내진성능을 비교하기 위하여, 황성훈 등[6]의 연구에서 실험하였던 실험체를 기준으로 하여 동일한 용접재료, 접합상세 및 강종, 보축, 패널존 강도비를 사용하여 계획하였다.

실험체는 ANSI/AISC 341-05[10]에서 제시하고 있는 특수 모멘트 골조 시스템의 세장비를 만족하도록 제작하였으며, 강기둥-약보 제한사항인 (1)을 만족하도록 제작하였다. Table 1에는 보 부재의 세장비 및 실험체 설계시 고려된 설계사항을 정리하여 나타내었다.

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} \tag{1}$$

여기서,  $\Sigma M_{pc}^*$ 는 보와 기둥 중심선 교차점에서 기둥 모멘트 내력 합,  $\Sigma M_{pb}^*$ 는 보와 기둥 중심선 교차점에서 보 모멘트 내력합을 의미한다. 또한 실험체의 패널존 강도비( $\phi R_u/R_u$ )는 패널존 설계 전단강도 식 (2)와 패널존 요구강도 식 (3)의 비가 1보다 크도록 설계하여 모든 소성변형이 주로 보에서 발생하는 강 패널존으로 계획하였다.

$$R_u = \frac{M_f}{d_b} - V_c \tag{2}$$

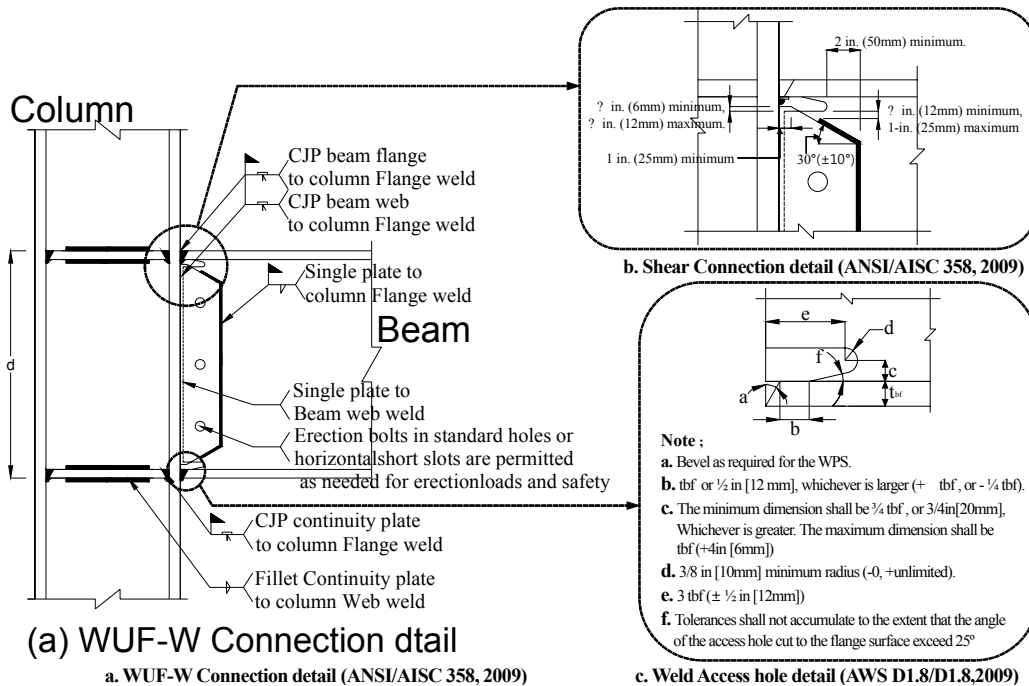


Fig. 1. Details of Welded Unreinforced Flange with Welded Web (WUF-W) connections[4,8]

**Table 1.** Design details of WUF-W specimens

Specimen	Slenderness Ratios				Panel zone strength ratio	Strong Column/Weak Beam		
	$FLB$ ( $b_f/2$ )	Limiting Value	$WLB$ ( $h/t_w$ )	Limiting Value	$LTB$ ( $I_y/r_y$ )	Limiting Value	$\Phi R_v/R_u$	$\Sigma M_{pc}^*/\Sigma M_{pb}^*$
D900-S	6.50	8.88	52.50	72.54	51.70	75.39	1.26	1.52
D900-S-A								

**Table 2.** List of WUF-W specimens

Specimen	Angle of Access hole	Beam Size	Column Size	Doubler plate thickness (mm)	Continuity plate thickness (mm)
D900-S	21°	H890x299x15x23	H458x417x30x50	10	23
D900-S-A	13°				

**Table 3.** Weld access hole geometry

Specimen							
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	
D900-S	23.0	69.0	23.0	23.0	10.0	33.0	
D900-S-A	18.0	74.0	23.0	20.0	10.0	30.0	

$$\Phi_v R_v = \Phi_v 0.85 F_{yc} d_c t_p \left( 1 + \frac{3b_{cf} t_{cf}^2}{d_y d_c t_p} \right) \quad (3)$$

여기서,  $M_f$ 는 기둥면에서의 최대예상모멘트,  $d_b$ 는 보 춤,  $V_c$ 는 기둥 전단력,  $F_{yc}$ 는 기둥강재의 항복강도,  $d_c$ 는 기둥 춤,  $t_p$ 는 덧판두께를 포함한 패널존의 두께,  $b_{cf}$ 는 기둥 플랜지 폭,  $t_{cf}$ 는 기둥 플랜지 두께를 뜻하며  $\Phi_v$ 는 강도저감계수로 특수모멘트골조에서는 1.0을 사용하였다.

실험체는 ANSI/AISC358-05[5], ANSI/AISC341-05[10], AISC Specifications[11]에서 제시하고 있는 설계방법 및 상세를 만족하도록 제작되었으며 실험체의 개요는 Table 2와 같다. Table 2에서 D900-S 실험체는 황성훈 등[6]에 의하여 실험된 실험체로서 엑세스 홀 전이 기울기 21°로 제작된 실험체이며, D900-S-A 실험체는 본 연구에서 수행한 엑세스 홀 전이 기울기 13°로 한 실험체이다. 엑세스 홀의 형상과 치수는 Table 3에 정리되어 있다. 보 부재의 강재는 SS400 단면치수는 H890×299×15×23이며, 기둥부재 강재는 SM490 단면치수는 H458×417×30×50이다. 또한 패널존의 보강을 위해 패널존에 기둥부재와 동일한 강재인 SM490를 사용한 10mm의 덧판을 추가하였으며, 기둥 이음판은 보 플랜지와 동일한 두께인 23mm 사용하였다.

#### 4. 재료실험 및 실험체 제작

강구조 내진설계 기준(ANSI/AISC 341-05[10])에서는 구조부재 재료 특성 중 비선형 구조 부재인 경우 강재의 설계 최소항복강도 값이 345Mpa

넘지 않는 강재를 사용하도록 제한하고 있고, 345Mpa 이상 설계 최소항복 강도를 갖는 강재에 대해서는 실험을 통한 안정성 검증은 하도록 제한하고 있다. 이에 본 연구에서는 설계 항복강도 235Mpa를 가지는 강재 SS400와 설계 항복강도 325Mpa를 가지는 강재 SM490 강재를 각각 보와 기둥에 적용하여 사용하였다.

또한 본 연구에서는 WUF-W 접합부 실험체의 강재가 가지고 있는 재료적인 특성을 파악하기 위해 인장실험을 실시하였다. 시험편은 KS B 0801에서 제시하는 판형 시험편인 1A호와 봉형 시험편인 4호 형태로서, SS400을 적용한 보 부재와 SM490를 적용한 기둥 부재의 웹브와 플랜지에서 각각 1개의 시험편을 채취하여 제작하였다. 제작된 시험편은 실험실로 반입하여 KS B 0802를 따라 인장시험을 수행하였다.

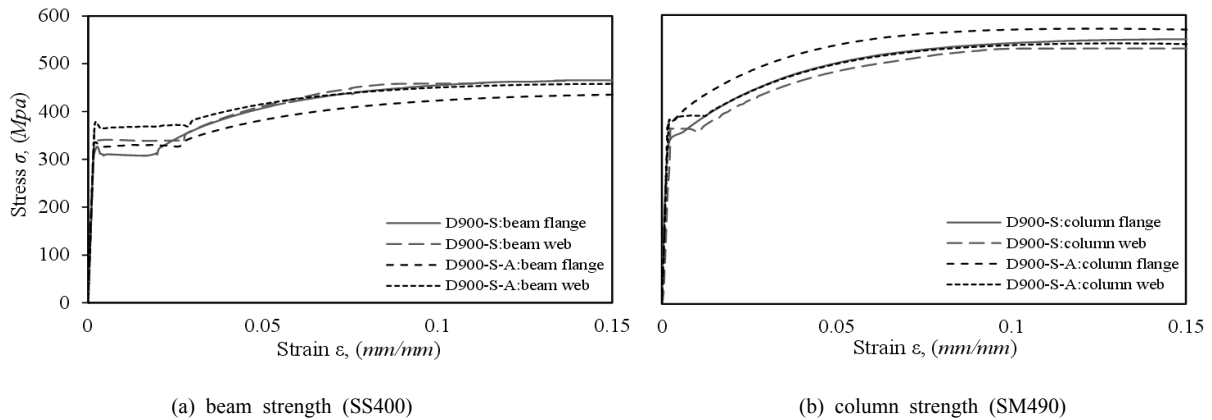
수행된 실험 결과는 재료의 항복강도, 인장강도 및 항복비와 연신율을 정리하여 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 D900-S는 이전실험(황성훈 등[6])의 수행된 인장실험 결과로서 강재의 재료적인 성질을 비교하기 위해 나타내었다.

실험체 제작은 ANSI/AISC358-05[5]를 따라서 제작되었다. 이를 요약하면 다음과 같다.

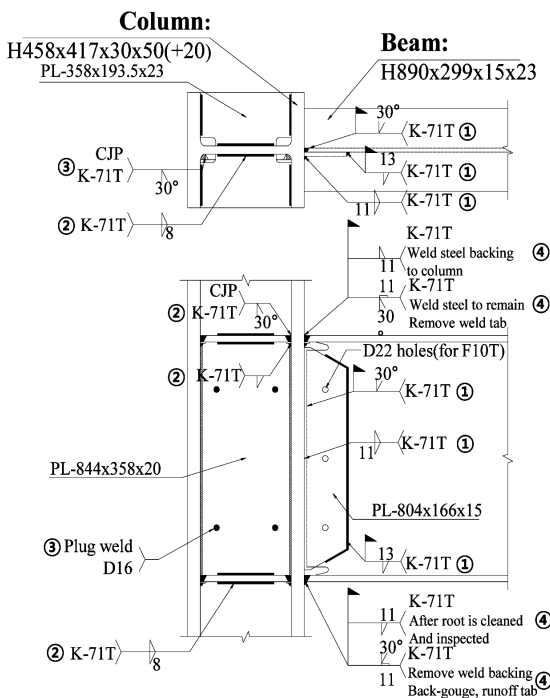
- ① 실험체는 보 웹브와 기둥 플랜지는 완전용입용접 하였으며 추가적으로 쉬어텡 주변을 모살 용접하였다.
- ② 수평 스티프너는 보 플랜지와 같은 두께를 사용 기둥 플랜지와 완전용입 용접 후 뒷면에 추가로 보강 모살 용접하였다.
- ③ 패널존에 부착되는 덧판은 덧판에 원형으로 구멍을 천공한 뒤 패널존과 일체성을 확보하기 위해 플러그 용접하였다.

**Table 4.** Material properties of test specimens

Specimen	Location	material	Yield strength (Mpa)	Tensile Strength (Mpa)	Yield Ratio (%)	Elongation (%)
D900-S	Beam Web	SS400	340.1	481.5	0.71	22.8
	Beam Flange	SS400	312.2	467.5	0.67	23.1
	Column Web	SM490	364.2	534.7	0.68	21.2
	Column Flange	SM490	346.5	550.4	0.63	27.0
D900-S-A	Beam Web	SS400	366.6	458.3	0.79	25.2
	Beam Flange	SS400	326.7	436.9	0.75	31.5
	Column Web	SM490	378.5	541.3	0.70	24.6
	Column Flange	SM490	385.7	571.9	0.67	33.2



**Fig. 2.** Measured stress-strain curve



**Fig. 3.** Details of specimens; D900-S-A, D900-S

④ 보의 상부 플랜지에는 강재 뒷담재로 완전용입 용접 하였고, 하부 플랜지는 세라믹 뒷담재로 완전용입 용접 후 세라믹 뒷담재는 제거하고 그

라인딩 후 보강 모 살용접을 하였다.

- ⑤ 접합부의 용접은 Charpy V-Notch(CVN)값은 -29°C (-20°F)에서 최소 27J(20ft-lb)만족하는 용접재를 사용 하였고,
- ⑥ 용접후 결함을 검사하기 위해 용접부에 초음파 탐상 검사(UT)를 실시하였으며, 결함은 관찰되지 않았다.
- ⑦ 접합부의 전반적인 용접상태는 Fig. 3으로 나타내었다.

### 5. WUF-W접합부 실험

현재 강구조 시스템 내진설계 기준(ANSI/AISC 341- 05[10])는 내진 횡력 저항 시스템에 사용되는 접합부의 최소 회전능을 시스템에 따라 제시하고 있다. 내진 횡력 저항 시스템의 접합부로 사용하기 위해서 아래와 같은 ANSI/AI SC 341-05[10], Appendix S에서 제시하고 있는 접합부 실험 방법을 통해 접합부의 내진성능을 만족해야 한다. 실험체의 설치는 Fig. 4와 같이 반력벽 위에 설치되었고 기둥은 층 높이의 1/2 지점을 절취한 형태로 양 단을 핀 접합으로 연결하였다. 또한 보의 단부로부터 1/3 지점에 보의 횡 좌굴 방지를 위한 지지대가 설치 되었다. 가력장치는 최대용량 3000kN, 최대스트로크 ±300mm 액츄에이터를 사용하였다. 실험체 접합부 주위는 소성화 진행 관찰을 용이하게 할 수 있도록 백회로 도색 (white washing)을 하였다. 또한 부재의 변형 및 변위를 측정하기 위한 1축, 3축 스트레인 게이지 및 변위계(LVDT)는 SAC Joint Venture[2] 4장 2절 Fig. 4.20에 따라 설치 되었

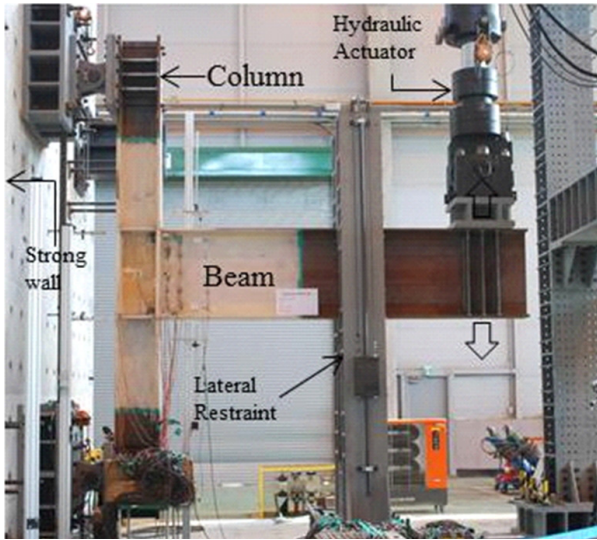


Fig. 4. Test setup

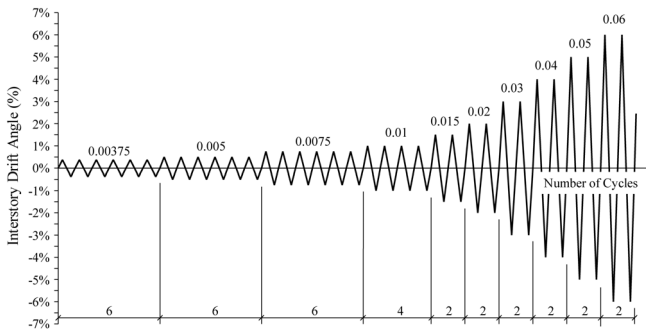


Fig. 5. SAC Loading Protocol (Krawinkler et al.2000)

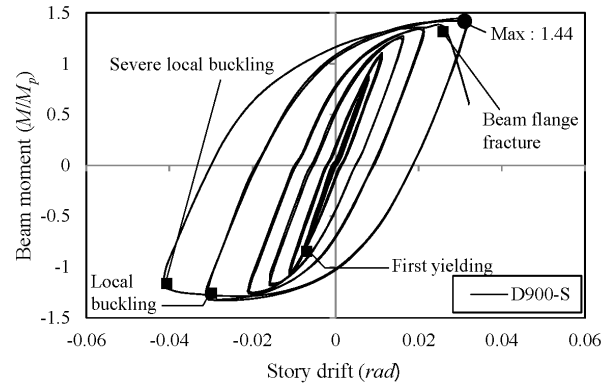
다. 가력은 Fig. 5와 같이 SAC Loading Protocol (Krawinkler et al., 2000[11])에서 제시하는 하중 이력에 따라 가력하였다.

## 6. 실험결과

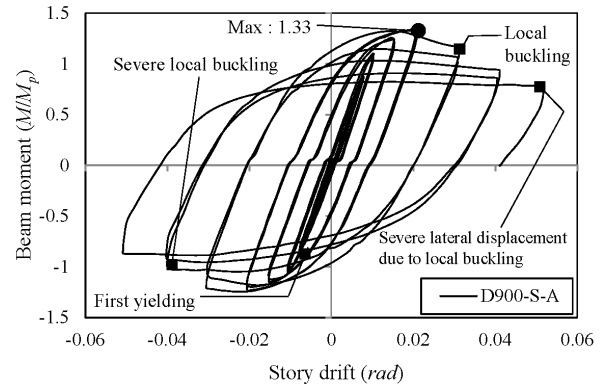
### 6.1 반복이력거동

Fig. 6은 WUF-W접합부 실험체의 반복하중 이력거동 결과로써 (a)는 황성훈 등[6]에서 수행한 WUF-W 접합부 실험결과이며, (b)는 액세스 홀이 개선된 WUF-W 접합부 실험결과이다. Fig. 6에서 가로축은 접합부의 총 층간 변위각  $\theta$ , 세로축은 기둥 면에서 보에 작용하는 모멘트 값  $M$ 을 보 소성모멘트 값  $M_p$ 로 나누어 정규화한 결과이다. 각 실험체의 총 층간 변위각, 총 소성회전각, 보, 기둥, 패널존의 회전각, 최대 내력은 Table 5에 정리되어 있다.

D900-S 실험체의 실험 결과는 0.5% 가력단계에서 기둥 면 부근 보 플랜지에서 최초로 항복이 관찰되었다(Fig. 7(a)). 3% 가력단계에서 보 플랜지에 국부좌굴이 발생하기 시작 하였지만(Fig. 7(b)), D900-S-A와 달리 강도 저감이 발생 하지는 않았다. 4% 가력단계의 첫번째 사이클 음가력 시 보 하부 플랜지에서 현저한 국부좌굴이 발생하여 접합부 모멘트 강도 내



(a)



(b)

Fig. 6. Hysteresis curve of connection specimens; (a)D900-S; (b)D900-S-A

Table 5. Summary of test result

Specimen	D900-S	D900-S-A
Total story drift (rad)	0.030	0.051
Total plastic rotation (rad)	0.019	0.045
Panel zone maximum plastic rotation (rad)	0.004	0.002
Beam maximum plastic rotation (rad)	0.016	0.048
Column maximum plastic rotation (rad)	0.001	0.001
$M_f/M_p$	1.44	1.34
Location of fracture	Beam toe of access hole bottom flange	None

력이 감소하였으며(Fig. 7(c)), 반대쪽 양방향으로 가력 하는 도중 보 하부 플랜지 액세스 홀 단부 지점에서 파단이 발생하였다(Fig. 7(d)).

D900-S-A 실험체의 실험 결과 0.75% 가력단계에서 기둥면 부근 보 상부 플랜지에서 최초로 항복이 발생하기 시작하였으며(Fig. 7(e)), 1.5% 가력단계에서 보 웨브에 항복이 관찰되었다. 3% 가력단계에서는 보 상하부 및 웨브에서 국부좌굴이 발생하였으며(Fig. 7(f)), 반복가력 동안 모멘트 강도가 저감되기 시작하였다. 4% 가력단계에서는 보 플랜지와 웨브에서 발생한 국부 좌굴이 현저히 증가하여 심각하게 발생하였으며(Fig. 7(g)), 접합부 모멘트 강도 내력은  $0.87 M_p$ 까지 감소하였다. 5% 가력단계

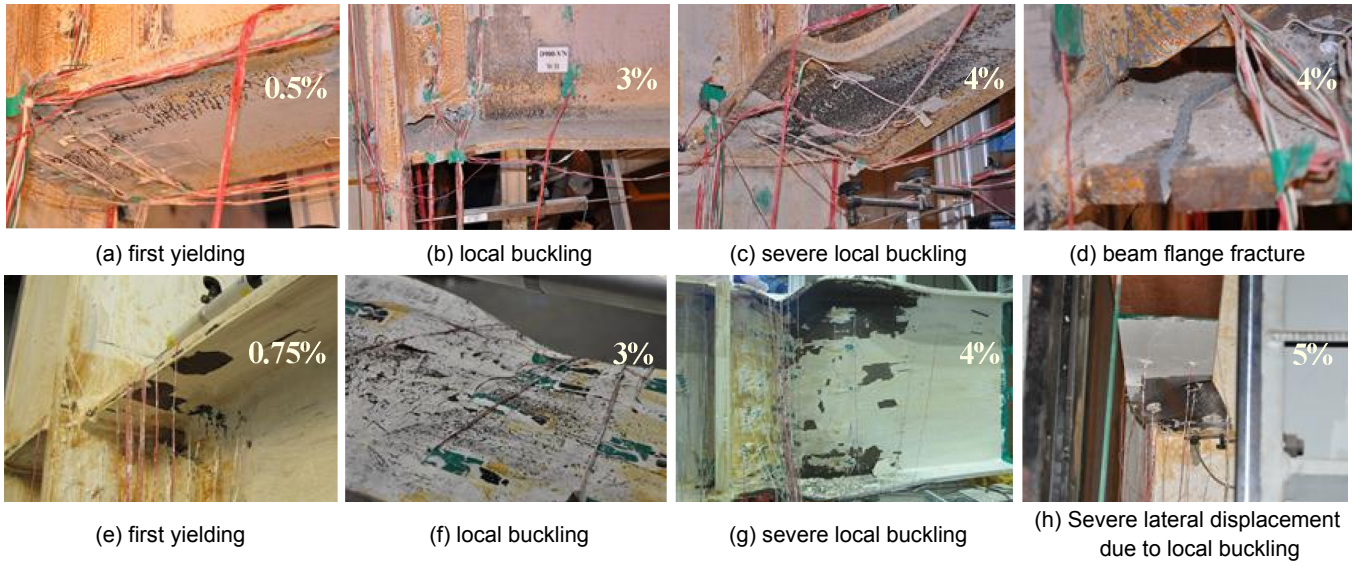


Fig. 7. Fracture of specimens; (a-d)D900-S;(e-h)D900-S-A

첫번째 사이클 음 가력시 접합부 모멘트 강도 내력이  $0.64M_p$  까지 감소하였으며, 보 웨브의 과도한 국부좌굴로 인한 횡 지지대 안전성 문제로 인해 실험이 종료되었다(Fig. 7(h)).

### 6.2 액세스 홀 전이기울기 영향

현행기준 ANSI/AISC-358-05[5]에서 제시하는 액세스 홀 규준에 따라 액세스 홀 전이 기울기  $21^\circ$ 로 제작된 D900-S 실험체 경우 총 층간 변위각  $0.03\text{rad}$ , 총 소성 층간변위각  $0.019\text{rad}$ 로써 특수모멘트 골조 시스템의 요구조건을 만족하지 못하였다. 반면, Ricles 등[2]에서 수행한 WUF-W 접합부 실험체의 액세스 홀 전이 기울기와 동일하게  $13^\circ$ 로 개선한 D900-S-A 실험체의 경우 총 층간 변위각이  $0.05\text{rad}$ , 총 소성 층간변위각  $0.045\text{rad}$ 을 보였으며, 총 층간 변위각이  $0.04\text{rad}$  때  $0.8M_p$  이상의 접합부 모멘트 내력을 보유하고 있어 특수모멘트 골조 시스템의 요구조건을 만족하였다. 이와 같이 두 WUF-W 접합부 실험체의 회전 성능 차이는 접합부 파단 발생 유무에 의해 발생한 것으로 액세스 홀 전이 기울기에 따라 보 플랜지에 작용하는 비탄성 변형량이 다르기 때문이다.

본 연구에서는 수행된 실험결과로부터 액세스 홀 전이 기울기가 보 플랜지 비탄성 변형 크기에 미치는 영향을 비교 분석해 보았다. 액세스 홀 전이 기울기 차이에 따른 두 실험체의 보 플랜지 변형률 요구값을 비교하기 위해 3% 가력단계에서 기동면으로부터 50mm 떨어진 보 상부 플랜지의 변형률을 비교하였다. 비교결과는 Fig. 8과 같으며 액세스 홀 전이 기울기를  $21^\circ$ 에서  $13^\circ$ 로 완화할 경우 보 플랜지 변형률이 중앙부에서는 0.028에서 0.026로 약 6% 감소하였으며, 좌측 외 단부에서는 0.028에서 0.024로 약 14% 감소하였다.

이와 같이 액세스 홀 전이 기울기가 커질수록 보 단부 플랜지에 응력 집중으로 인한 비탄성 변형 크기가 증가하기 때문에 초기 파단이 발생 가능성이 높아질 수 있음을 실험결과로부터 확인할 수 있었다.

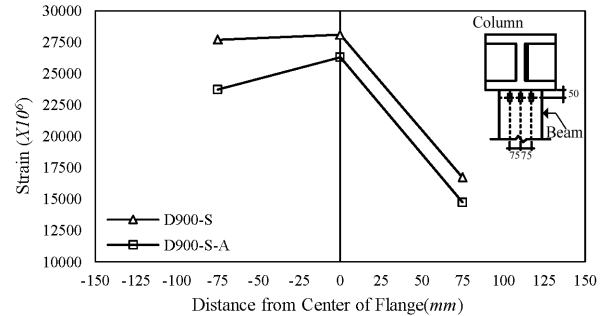


Fig. 8. Strain demand on the beam flanges at 3% drift loading cycle

### 6.3 포락선

D900-S와 D900-S-A 두 실험체의 이력거동에 대한 포락선을 비교 분석하였다. 포락선은 Fig. 9와 같이 총 층간변위각에 대한 기동 면 보 단부 모멘트 값을 사용하여 비교하였다. D900-S 실험체와 동일한 용접재료, 접합상세 및 강종, 보 춤, 패널존 강도비를 따라 제작된 D900-S-A 실험체의 이력거동은 탄성구간에서 유사한 기울기 및 강도 증가를 보였다. 이는 본 연구의 실험과 이전실험(황성훈 등[6])이 동일하게 수행되었음을 보여준다. 음 방향 가력에서 두 접합부 실험체 모두  $0.01\text{rad}$  이후 포락선 기울기가 감소하고 있지만, D900-S 실험체의 후탄성 기울기가 D900-S-A 실험체의 후탄성 기울기보다 큰 값을 보이며 감소하였다. 이는 Fig. 2의 강재 강도의 응력-변형 곡선에서 보는 바와 같이 D900-S 실험체에 사용된 SS400 강재의 항복 후 후탄성 기울기가 D900-S-A 실험체에 사용된 SS400 강재보다 크기 때문에, 접합부 전체 이력거동 포락선에서도 후탄성 기울기가 더 큰 값을 보이고 있다. D900-S-A 실험체는 가력단계  $0.02\text{rad}$ 까지 내력이 증가하였으며, D900-S 실험체는 가력단계  $0.03\text{rad}$ 까지 내력이 증가하였다. 강재의 후탄성 기울기 차이로 인하여 D900-S-A는 최대 내력이  $3630\text{kN}\cdot\text{m}$  ( $1.34M_p$ )까지 증가하였고, D900-S는 최대 내력이  $3930\text{kN}\cdot\text{m}$  ( $1.44M_p$ )까지 증가하였다. 이후 D900-S 실험체는 접합부 파단이 발생하였으며,

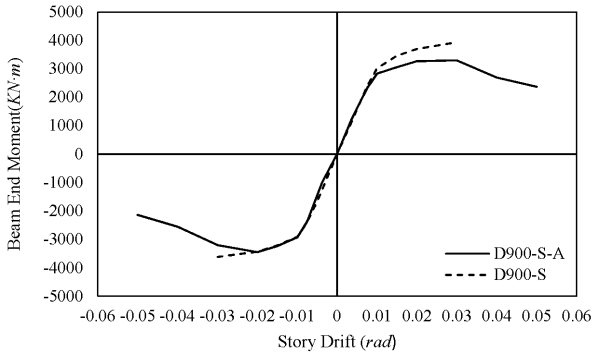


Fig. 9. Envelop curves for connection specimens

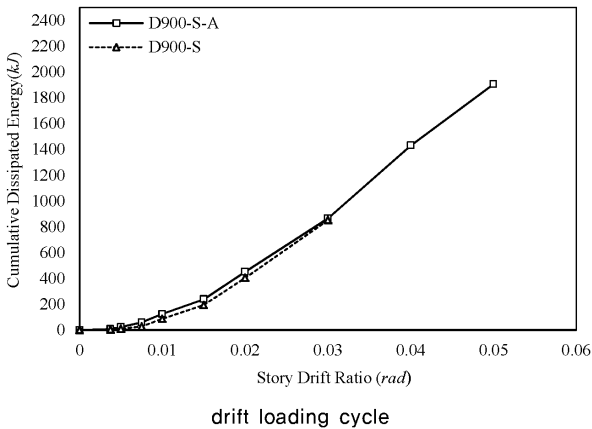


Fig. 10. Cumulative energy dissipated by specimens at each drift loading cycle

D900-S-A 실험체는 0.05rad까지 점진적으로 내력이 저감하였다. 양방향 가력방향에서는 0.02가력단계까지 두 접합부의 이력 포락선이 동일하게 거동하였으며, D900-S-A 실험체는 0.02rad 이후 0.03rad 가력단계부터 내력이 감소하였으며, D900-S 실험체 경우 0.03rad 가력단계부터 내력이 감소하였다. 두 실험체 모두 부 방향 모멘트 강도는 정 방향 모멘트 보다 낮은 값을 보였다.

### 6.4 소산에너지

두 실험체의 소산 에너지는 보 단부부터 중심선까지 고려한 보 모멘트와 층간 변위각의 그래프 내부 면적으로 구하였다. Fig. 10은 각 가력 단계 별 두 실험체의 에너지 소산 능력을 비교한 결과이다. 동일한 가력단계 0.03rad에서 비교한 경우 D900-S-A 실험체와 D900-S 실험체의 에너지 소산량이 거의 동일하였다. 총 소산 에너지를 비교해 보았을 때 Fig. 10에서 보는 바와 같이 D900-S-A 실험체가 더 많은 가력단계를 수행하였기 때문에 에너지 소산능력이 1900kJ로 접합부 파단이 발생한 D900-S 실험체의 에너지 소산 능력인 900kJ 보다 우수한 에너지 소산능력을 보였다. 이로부터 접합부 파단 없이 연성적으로 거동할 경우 에너지 소산능력이 약 2배 이상 높아져 엑세스 홀 기술기 개선의 중요성을 알 수 있다.

## 7. 결론

본 연구에서는 ANSI/AISC-358-05[5] 제시하는 WUF-W접합부 상세를 따라 개선된 엑세스 홀 형상으로 제작된 WUF-W접합부 실험체의 반복하중 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ANSI/AISC-358-05[5]에서 제시하는 엑세스 홀 규준을 따라 엑세스 홀 전이 기울기 21°로 제작된 D900-S 실험체 경우 총 층간변위각이 소성회전각이 0.03rad, 0.019rad으로 특수모멘트골조 인증접합부 요구 사항을 만족하지 못하였고, 엑세스 홀 전이 기울기를 13°로 개선한 D900-S-A 실험체 경우 총 층간변위각 0.05rad, 0.044rad으로 특수모멘트 골조 요구조건을 만족하였다.
2. 엑세스 홀 형상차이에 따른 보 플랜지 비탄성 변형량을 비교한 결과 엑세스 홀 전이 기울기 21°를 13°로 개선할 경우 최대 14%까지 보 단부에서 요구되는 변형량이 감소하였다.
3. 실험체의 이력거동에 따른 포락선을 분석한 결과, 동일한 단면으로 제작된 두 실험체의 이력거동은 유사하였다. 보 최대내력은 D900-S 실험체는 3930KN·m, D900-S-A 실험체는 3630KN·m으로 나타났다. D900-S 실험체 경우 파단직전까지 내력이 증가한 반면 D900-S-A 실험체 경우 2% 가력 단계 이후 보 내력이 감소하였다. 동일한 단면으로 설계된 두 실험체의 내력이 차이를 보이는 이유는 강재의 후탄성 기울기의 차이에 의한 영향으로 판단된다. 두 실험체 모두 부 방향 모멘트가 정 방향 모멘트보다 낮은 값을 보였다.
4. 두 실험체의 가력단계 별 에너지 소산능력을 비교한 결과, 동일가력단계인 3%에서는 두 실험체의 에너지 소산능력은 동일하였다. 하지만 총 소산 에너지를 비교해 보았을 때 더 많은 가력단계를 완료한 D900-S-A 실험체에서 약 2배 이상 많은 에너지 소산능력을 보였다.
5. 위와 같이 도출된 결과를 볼 때 보 플랜지 비탄성 변형률 감소, 에너지 소산능력의 향상 및 특수모멘트 인증접합부로서 충분한 소성회전 능력을 만족하기 위해 현재 ANSI/AISC-358-05[5]에서 제시하고 있는 엑세스 홀 전이 기울기를 개선할 필요성이 있다고 판단된다. 또한 적합한 WUF-W접합부의 엑세스 홀 형상 결정을 위해서 실험 및 해석적 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### / 감사의 글 /

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2012R1A2A2A06045129)과 2011년도 (재)포항산업과학연구원 연구비 지원(과제번호: 201100000002310)로 수행된 것으로 이에 감사를 드립니다.

### / REFERENCES /

1. Youssef NFG, Bonowitz D, Gross JL, A survey of steel moment resisting frame buildings affected by the 1994 Northridge earthquake, National Institute of Standard and Technology, 1995;

Rep. No. NISTIR 5625.

2. Ricles JM, Mao C, Lu LW, Fisher JW. Development and evaluation of improved ductile welded unreinforced flange connections. SAC Joint Venture, Sacramento, Calif. 2000;Rep. No. SAC/BD-00/24.
3. Lee D, Cotton SC, Hajjar JF, Dexter RJ, Yee. Cyclic connections Reinforced by Alternative Column Stiffner Details I., Panel Zone Behavior and Doubler Plate Detailing. Engineering Journal. 2005a;42(4):189-214.
4. Lee D, Cotton SC, Hajjar JF, Dexter RJ, Yee. Cyclic connections Reinforced by Alternative Column Stiffner Details II., Panel Zone Behavior and Doubler Plate Detailing. Engineering Journal. 2005b; 42(4):215-238.
5. AISC. Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications. ANSI/AISC 358-05. American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill, 2005.
6. Hwang SH, Moon KH, Han SW, Lee JY. Inelastic Cyclec Loading Test on Welded Unreinforced Flange-Welded Web(WUF-W) Moment Connections. Journal of Architectural Institute of Korea. 2010; 26(10):61-68.
7. Lu LW, Ricles JM, Fisher JW. Critical issues in achieving ductile behaviour of welded moment connections. Journal of Constructional Steel Research. 2000;55:325-341.
8. Mao C, Ricles J, Lu LW, Fisher J. Effect of local details on ductility of welded momnet connections. Journal of Structural Engineering. 2001;127(9):1036-1044.
9. AWS. Structural Welding Code-Seismic Supplement. AWS D1.8/D1.8M, American Welding Society. Miami, FL. 2009.
10. AISC. Seismic provisions for structural steel buildings. ANSI/AISC 341-05. American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill, 2005.
11. AISC. Specification for Structural Steel Buildings. ANSI /AISC 360-05. American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill, 2005.
12. Krawinkler H, Gupta A, Medina R, Luco N. Loading histories for seismic performance testing of SMRF components and assemblies. SAC Joint Venture, Sacramento, Calif. 2000;Report No. SAC/BD-00/10.
13. Ricles JM, Mao C, Lu LW, Fisher JW. Inelastic Cyclic Testing of Welded Unreinforced Moment Connections. Journal of Structural Engineering. 2002;128(4):429-440.
14. El-Tawil S, Mikesell T, Vidarsson E, Kunnath SK. Strength and Ductility of FR Welded-Bolted Connections. SAC Joint Venture, 1998;Report No. SAC/BD-98/01.
15. Han SW, Kwon, Moon KH. Cyclic behaviour of post-Northrdge WUF-B connections. Journal of Constructional Steel Research. 2000;63(3):365-374.
16. Ricles JM, Fisher JW, Lu LW, Kaufmann EJ. Development of improved welded moment connections for earthquake-resistant design. Journal of Structural Engineering. 2000; 58(19):565-604.