



상·하부 T-stub 접합부의 초기회전강성 평가

김희동^{1*} · 양재근² · 이재윤³ · 이형동⁴

¹조교수, 인하공업전문대학, 건축과 ²교수, 인하대학교, 건축공학과 ³석사과정, 인하대학교, 건축공학과 ⁴석사과정, 인하대학교, 건축공학과

Evaluation of the Initial Rotational Stiffness of a Double Split Tee Connection

Kim, Hee Dong^{1*}, Yang, Jae Guen², Lee, Jae Yun³, Lee, Hyung Dong⁴

¹Assistant Professor, Department of Architecture, Inha Technical College, Incheon, 402-752, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

³Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

⁴Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

Abstract - Double split tee connection is a full strength-partial restrained connection that suitable for ordinary moment frame and special moment frame which demonstrates behavior characteristics depending on the stiffness ratio of columns and beams, changes in the geometric shape of the T-stub, number of fasteners and effect of panel zone. For the double split tee connection to ensure structurally safe behavior, it needs to exhibit sufficient strength, stiffness and ductile capacity. This study sought to investigate the effects of the moment-rotation angle relationship of the double split tee connection and to evaluate the initial rotational stiffness of the double split tee connection depending on changes in the geometric shape of the T-stub. To this end, two different double split tee connection specimens are experimented which designed to change geometric parameter values (α) of the T-stub, and a three-dimensional finite element analysis was performed.

Keywords - Double Split Tee Connection, Initial Rotational Stiffness, T-stub, Plastic Hinge, Finite Element Analysis

1. 서론

상·하부 T-stub 접합부는 접합부를 구성하는 보와 기둥의 강성비, T-stub의 기하학적 형상, 긴결재의 개수, 패널 존 효과 등에 따라서 거동이 좌우된다. 선행된 연구에 따르면 이러한 상·하부 T-stub 접합부의 한계상태는 보의 휨항복, T-stub 플랜지 혹은 스템의 휨항복, 기둥 패널존의 전단항복, 보 플랜지 혹은 T-stub 스템의 순단면 인장파단, T-stub 플랜지 혹은 스템에 체결된 고장력볼트의 인장파단 혹은 전단파단 등이다^{[1],[2],[3],[4],[5],[6],[7]}.

상·하부 T-stub 접합부의 초기회전강성은 다양한 변수 중 특히 T-stub의 기하학적 형상변화에 따라서 영향을 받는다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 T-stub의 기하학적 형상변화에 따른 상·하부 T-stub 접합부의 한계상태는 T-stub 플랜지의 휨항복, T-stub 플랜지 혹은 스템에 체결된 고장력볼트의 인장파단 혹은 전단파단, T-stub 스템의 순단면 인장파단 등이다^{[8],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[16],[17]}.

따라서 본 연구는 T-stub의 기하학적 형상변화가 상·하부 T-stub 접합부의 휨모멘트-회전각 관계에 미치는 영향을 파악하고, 이에 따른 상·하부 T-stub 접합부의 초기회전강성을 평가하는 것을 목표로 진행하였다.

이를 위하여 상·하부 T-stub 접합부는 T-stub의 기하학적 형상변화가 주요 원인이 되어 파괴되도록 실험체 및 해석모델을 계획하였다. 즉, 상·하부 T-stub 접합부는 T-stub 이외에 기둥 패널존(panel zone)의 전단항복 및 기둥 플랜지의 국부좌굴 등의 한계상태에 의하여 파괴가 발생하지 않도록 패널존에 복플레이트(doubler plate) 및 연

Note.-Discussion open until October 31, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 12, 2014; revised April 7, 2014; approved on April 10, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-32-870-2251 Fax. +82-32-870-2512

E-mail. drkimhd@inhac.ac.kr

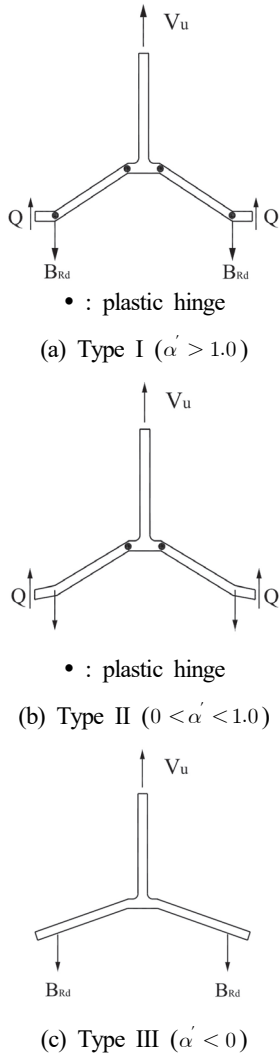


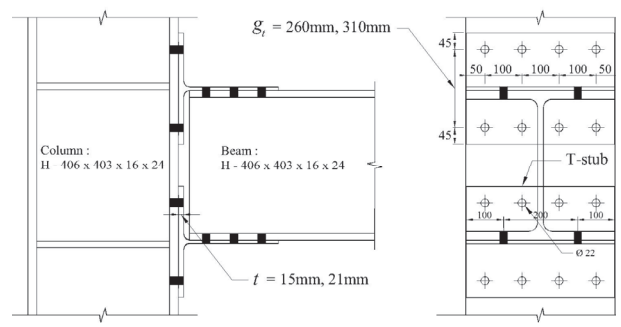
Fig. 1. Failure modes of the T-stub

속플레이트(continuity plate)로 보강하였다. 또한, 상·하부 T-stub 접합부와 연결된 보 플랜지 순단면 파단 및 보 플랜지 블록전단파단 등의 한계상태에 의하여 파괴가 발생하지 않도록 하기 위해 보 단면의 산정시 보 플랜지의 두께가 상대적으로 큰 부재를 선택하였다.

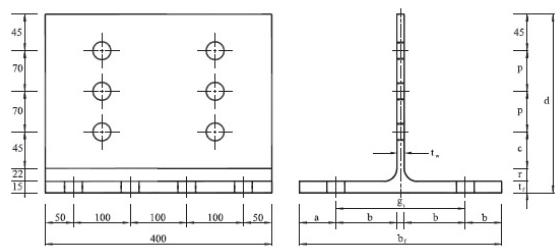
2. 상·하부 T-stub 접합부의 거동특성

2.1 상·하부 T-stub 접합부의 기하학적 형상선택

상·하부 T-stub 접합부의 휨모멘트-회전각 관계와 초기회전강성을 평가하기 위하여 식 (1)로 정의되는 T-stub의 기하학적 형상변수 α' 값이 각각 $\alpha' = 8.13, 8.73$ 인 T-stub



(a) Geometric shape of the connection



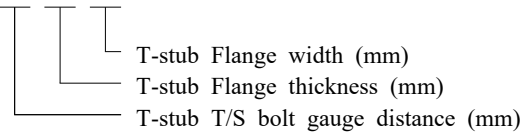
(b) Geometric shape of the T-stub

Fig. 2. Geometric shape parameters of the Double Split Tee Connection

Table 1. Geometric variables of the T-stub with α' (Unit : mm)

Test Specimens	b_f	t_w	t_f	g_t	r	a	b	α'
G260-T15-B350	350	15	15	260	22	45	122.5	8.13
G310-T15-B400	400	15	15	310	22	45	147.5	8.73

G310 - T15 - B400



을 선택하였다. 상·하부 T-stub 접합부의 기하학적 형상은 Fig. 2 및 Table 1에 정리한 것과 같으며^[18] 사용된 강종은 SS400이다. 기둥 및 보 부재는 서론에서 설명한 바와 같이 T-stub의 거동에 초점을 맞춘 실험 조건을 만족시키기 위해 H-406x403x16x24 (강종 : SS400)형강을 선택하였다.

$$\alpha' = \frac{1}{\delta(1+\rho)} \left\{ \left(\frac{t_c}{t_f} \right)^2 - 1 \right\} \quad (1)$$

$$t_c = \sqrt{\frac{8B_0 b'}{pF_y}} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{b'}{a'} \quad (3)$$

$$\delta = 1 - \frac{d'}{p} \quad (4)$$

$$a' = a + \frac{d_{bt}}{2} \quad (5)$$

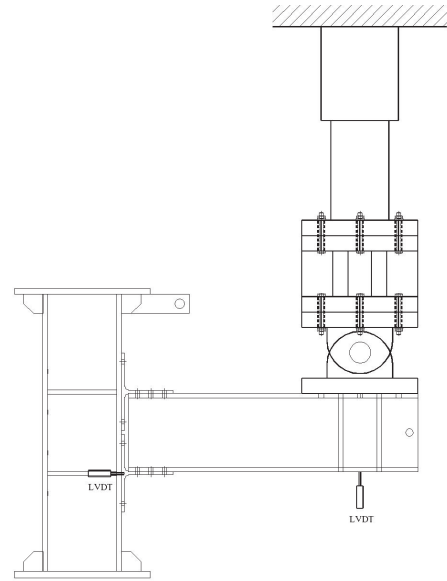
$$b' = b - \frac{d_{bt}}{2} \quad (6)$$

T-stub은 F10T M20 T/S볼트를 사용하여 각각 기둥 및 보 플랜지에 체결하는 것으로 하였다. 이때 T/S볼트는 pintail이 떨어져 나갈 때 체결이 완료된 것으로 간주하였다. 실험결과와 분석 및 3차원 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 T-stub 시험체의 강제 인장강도시험을 수행하였고 실험결과 재료적 물성값은 Table 2와 같이 정리하였다. 접합부 실험은 접합부가 파단이 될 때까지 실험을 진행하였다. 접합부 실험에 있어서 하중작용에 따른 각 실험체에 발생하는 변위 및 변형도는 Fig. 3과 같이 LVDT 설치와 스트레인게이지 부착을 통하여 측정하였다.

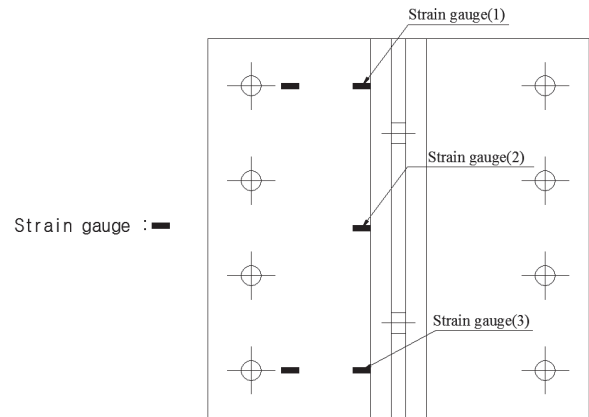
3차원 비선형 유한요소해석 및 접합부 실험을 통하여 얻은 상·하부 T-stub 접합부의 휨모멘트-회전각 관계 곡선은 식 (7)과 같이 정의되는 Richard 해석모델^{[19],[20]}을 적용하여 회귀분석을 수행하였다. Fig. 4에 정의된 것과 같이 전이모멘트 구간 이전의 휨모멘트-회전각 관계 곡선의 기울기는 상·하부 T-stub 접합부의 초기회전강성에 해당한다. 또한, 전이모멘트 구간 이후의 휨모멘트-회전각 관계 곡선의 기울기는 상·하부 T-stub 접합부의 소성회전강성에 해당한다. 일반적으로 회귀분석 결과의 적정성은 결정

Table 2. Material properties of SS400 steel

Thickness (mm)	F_y	F_u	E	ϵ_y	ϵ_u
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)		
24(Flange)	331.13	529.42	198,982	0.00925	0.16526
16(Web)	316.24	496.44	202,163	0.00196	0.16979
15(Flange)	291.66	449.05	193,800	0.00221	0.19911
15(Stem)	281.57	444.14	202,408	0.00186	0.19741



(a) Installation locations of the LVDT



(b) Attachment locations of the strain gauges

Fig. 3. Locations of the strain gauges and LVDTs

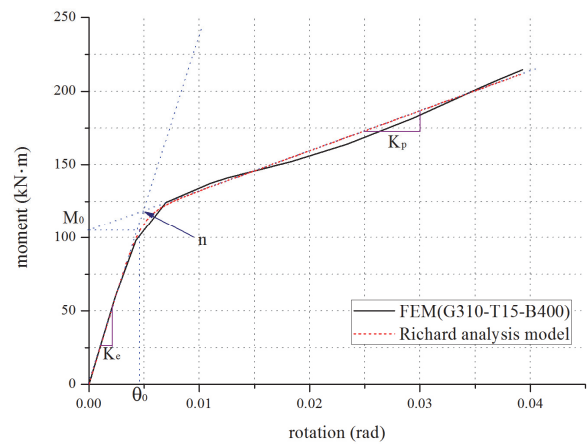


Fig. 4. Richard analysis model

계수(coefficient of determination) R^2 값이 1.0에 근접하면 실제와 동일한 값을 제공하는 것으로 판단할 수 있다^[21].

Richard 해석모델:

$$M(\theta) = \frac{(K_e - K_p) \cdot \theta}{\left(1 + \left| \frac{(K_e - K_p) \cdot \theta}{M_0} \right|^n\right)^{1/n}} + K_p \cdot \theta \quad (7)$$

- 여기서, M : 휨모멘트 (kN·m)
- M_0 : 참조모멘트 (kN·m)
- K_e : 초기회전강성 (kN·m/rad)
- K_p : 소성회전강성 (kN·m/rad)
- θ : 회전각 (rad)
- n : 곡선형태변수

2.2 상·하부 T-stub 접합부의 3차원 비선형 유한요소 해석

상·하부 T-stub 접합부는 상용프로그램인 ABAQUS(ver. 6.10.1) 부재요소 중 C3D8R(eight-node brick element with reduced integration)를 적용하여 모델링하였다.

접합부 모델링에 있어서 각 부재 사이의 접촉 및 지압현상, T/S 볼트의 장력도입 등도 고려하였다. 와셔의 접촉면들은 동일한 거동양상을 나타내도록 CONSTRAINT 명령의 TIE 옵션을 적용하여 모사하였다. T-stub 접촉면과 기둥-T/S 볼트, 보-T/S 볼트 접촉면들은 CONTACT 명령의

FINITE SLIDING 옵션을 적용하여 모사하였다.

또한, 하중 작용에 따른 접촉면 사이의 이격을 예상하여 ALLOW SEPARATION AFTER CONTACT 옵션을 추가하여 모사하였다. T/S 볼트와 너트의 접촉면은 다른 접촉면 사이에 미끄러짐이 거의 발생하지 않으므로 CONTACT 명령의 SMALL SLIDING 옵션을 적용하여 모사하였다. 두 부재 사이의 관입을 방지하기 위하여 CONTACT 명령의 ADJUST ONLY TO REMOVE OVER CLOSURE 옵션을 적용하여 모사하였다. 각 부재 사이의 미끄럼계수는 0.5로 선택하였다. 모델링 시에 적용한 옵션은 Table 3에 정리하였다.

Fig. 5는 유한요소 해석시 최종 하중상태의 각 접합부의 응력분포상태를 나타낸다. Stress contour의 S. mises는 von mises stress(등가응력)을 나타낸다. 축방향 인장력의 영향으로 $\alpha' = 8.13$ 인 접합부의 상부 T-stub은 Fig. 5(a)에 나타난 것과 같이 T-stub 플랜지 필릿부 및 T/S 볼트 체결부에 응력집중에 따른 소성흔지선이 발생하였다^{[12],[22]}.

또한, T-stub 플랜지에 체결된 T/S 볼트 축력은 양재근 등^{[23],[24],[25],[26],[27],[28]}이 기존의 연구를 통해 언급한 것과 같이 중심축으로부터 $0.3d_b$ 만큼 떨어진 응력중심점(centroid of stress concentration zone)으로 이동하였다. 마찬가지로 $\alpha' = 8.73$ 인 접합부의 상부 T-stub은 Fig. 5(b)에 나타난 것과 같이 T-stub 플랜지 필릿부 및 T/S 볼트 체결부에 응력집중에 따른 소성 흔지선이 발생하였다.

각 접합부에 발생한 이러한 응력집중현상에 의하여 최종적으로 Fig. 1(a)에 정리한 것과 같은 α' 의 변화에 따른 파괴양상을 나타내었다.

2.3 상·하부 T-stub 접합부의 접합부 실험

상·하부 T-stub 접합부는 보 단부에 연결된 2,000kN급의 액추에이터를 통하여 0.4mm/s의 속도로 가력을 하였다. 상·하부 T-stub 접합부에 하중이 작용하면 기둥 플랜지에 연결된 상부 T-stub은 하부 T-stub의 임의의 점을 중심으로 회전운동 하는 형상으로 이격하기 시작한다. 작용하중이 더욱 증가하면 T/S 볼트머리 부분과 상부 T-stub 플랜지가 맞닿는 부분 및 T-stub 플랜지 필릿부는 응력집중현상 때문에 항복하기 시작한다. 이때 하부 T-stub 스템 부도 응력집중현상이 발생하고 이로 인하여 항복하기 시작한다. Fig. 6은 상부 T-stub 플랜지 필릿부 및 T/S 볼트머리 부분에 부착한 스트레인게이지로부터 얻은 휨모멘트-

Table 3. ABAQUS options for the Finite Element Analysis

Contact surface	Command	Option		
Washer contact surface	Constraint	Tie		
T-stub - Column	Contact	Finite sliding	Allow separation after contact	Adjust only to remove over closure
T-stub - Beam				
T-stub - High-strength bolt				
Column - High-strength bolt				
Beam - High-strength bolt				
Nuts - High-strength bolt		Small sliding		

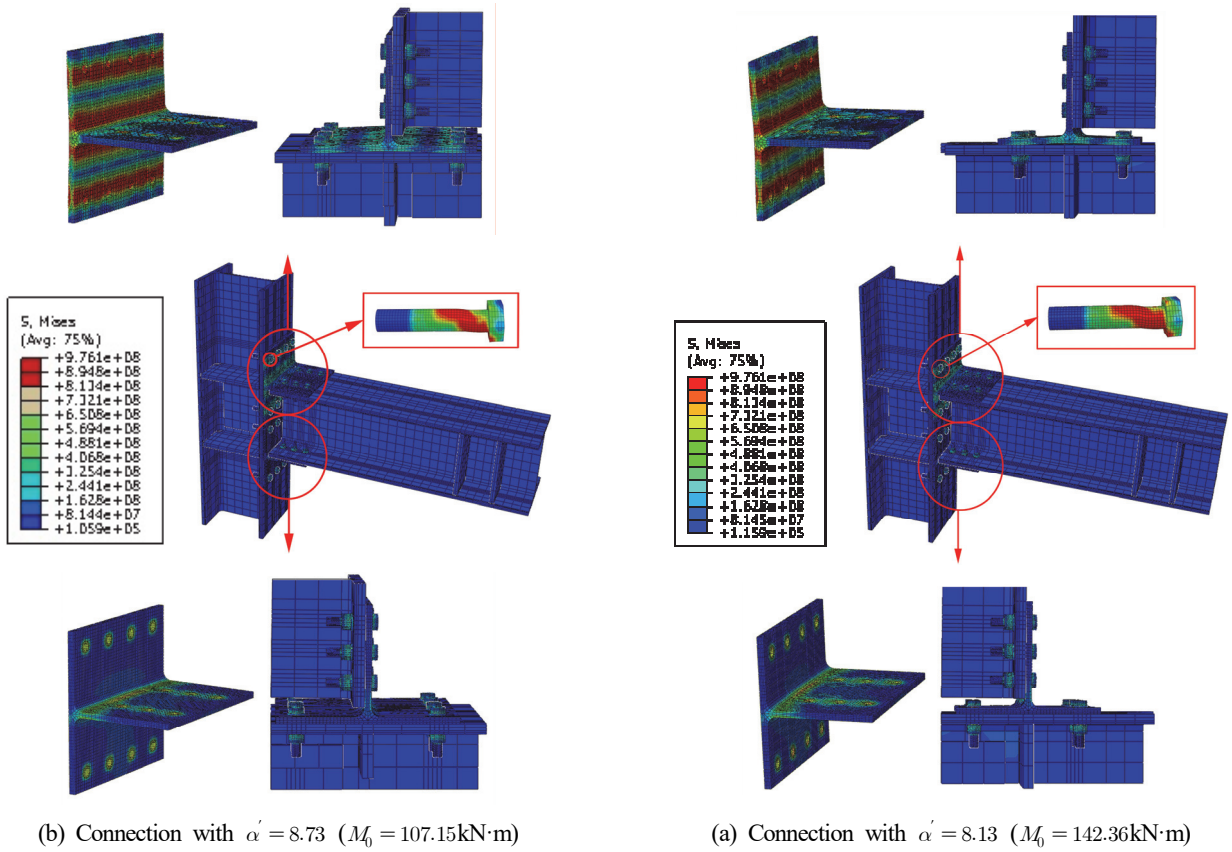


Fig. 5. Each connection's stress distribution according to α'

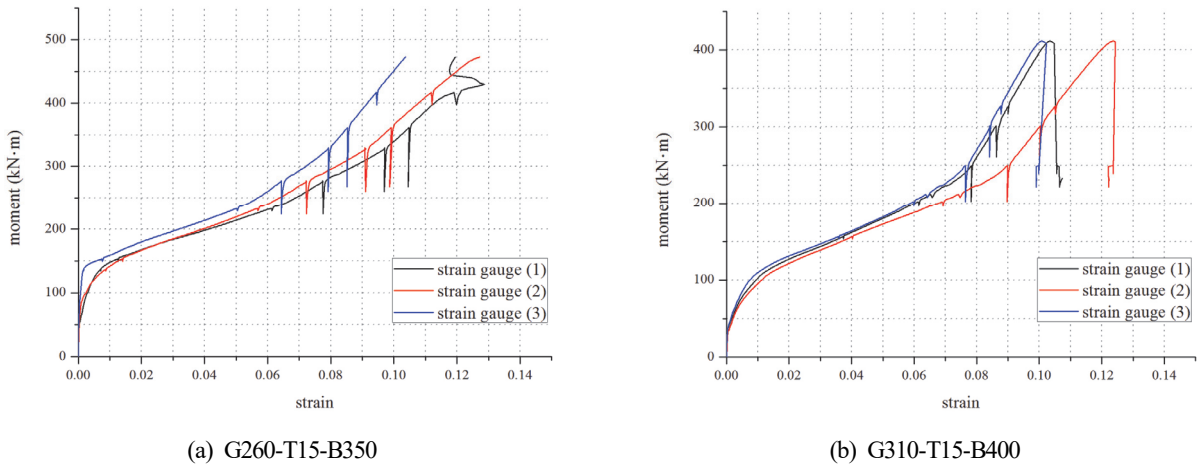


Fig. 6. Moment-Strain curve of the Double Split Tee connections

변형도 관계 곡선을 나타낸다. 하중작용 초기에는 T-stub 플랜지 필릿부의 변형도가 선형적으로 증가하다가 응력집중에 따른 항복을 나타내기 시작하면 급격히 변형도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 T-stub 플랜지의 휨항복 후 소성변형의 영향으로 최종적으로 Fig. 7(a), Fig. 8(a)에

나타난 것과 같이 상·하부 T-stub 접합부는 파괴하였다. 이때 각 접합부에 체결된 T/S 볼트는 응력집중에 따른 나사부의 인장파단 및 전단파단 양상 및 지압파단 양상은 나타나지는 않았다. Fig. 7(b), Fig. 8(b)는 하중작용에 따른 각 접합부의 최종 변형된 양상을 나타낸다. 접합부 실험을



(a) Deformation of the G260-T15-B350



(b) Deformation of the G260-T15-B350 (Bottom T-stub)

Fig. 7. Deformation of the G260-T15-B400



(a) Deformation of the G310-T15-B400



(b) Deformation of the G310-T15-B400 (Bottom T-stub)

Fig. 8. Deformation of the G310-T15-B400

통하여 얻은 각 접합부의 변형양상은 Fig. 5의 3차원 비선형 유한요소해석을 통하여 얻은 변형양상과 거의 일치된 변형양상을 나타내는 것으로 판단할 수 있다.

3. 상·하부 T-stub 접합부의 초기회전강성

Fig. 9는 상·하부 T-stub 접합부의 기하학적 형상변수 α' 값 변화에 따른 휨모멘트-회전각 관계 곡선을 나타낸다. Fig. 9에 나타난 것과 같이 휨모멘트-회전각 관계 곡선은 초기에는 곡선의 기울기가 급격하나 전이모멘트 구간을 지나면서 기울기가 감소한다. 또한, 예측한 것과 같이 각 휨모멘트-회전각 관계 곡선의 초기 기울기는 α' 값이 증가할 때 감소하였다. 접합부 실험과 유한요소해석을 통하여 얻은 휨모멘트-회전각 관계 곡선은 식 (7)의 Richard 해석모델을 적용하여 회귀분석을 수행하여 Table 4에 정리하였다.

Table 4에 나타난 것과 같이 유한요소해석을 통하여 얻

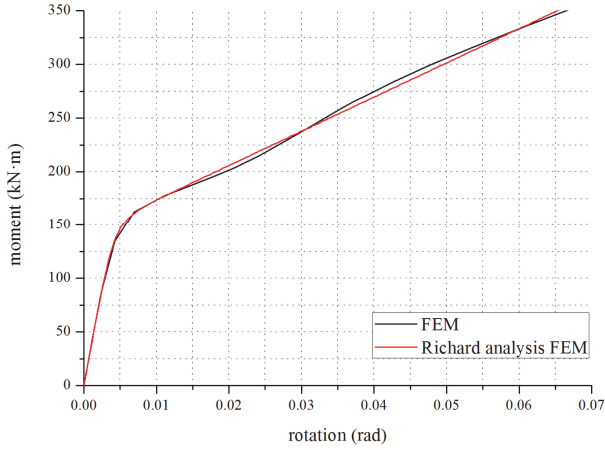
은 초기회전강성값은 접합부 실험을 통하여 얻은 초기회전강성 값과 최대 4.23%의 오차만을 나타내고 있고, 결정계수의 값이 0.99이므로 회귀분석 결과도 적합한 것으로 판단할 수 있다.

Table 4에 나타난 것과 같이 기하학적 형상변수 α' 값이 $\alpha' = 8.13$ 인 G260-T15-B350 실험체의 초기회전강성 값은 $\alpha' = 8.73$ 인 G310-T15-B400 실험체보다 약 31.47% 증가하였다.

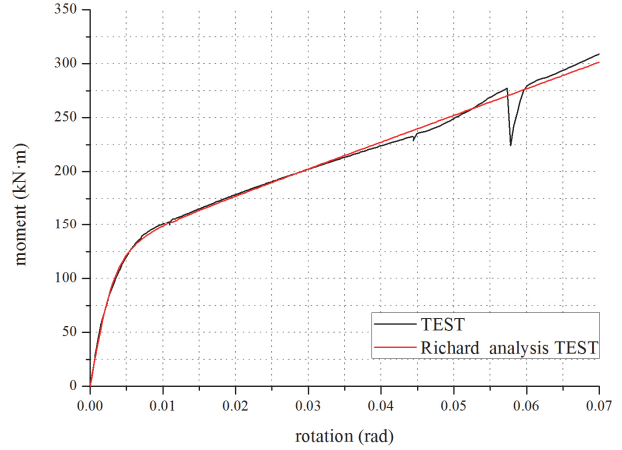
각각의 접합부가 충분한 휨모멘트강도를 발현하는 가는 FEMA350^[1] 및 FEMA 355D^[2]에서 제시한 아래의 식 (8)과 식 (11)의 휨모멘트 설계강도식을 적용하여 판단하였다.

- 1) T-stub 플랜지의 휨항복 후 소성변형 시의 기둥 플랜지 면에 발생하는 모멘트, $M_{fail,1}$:

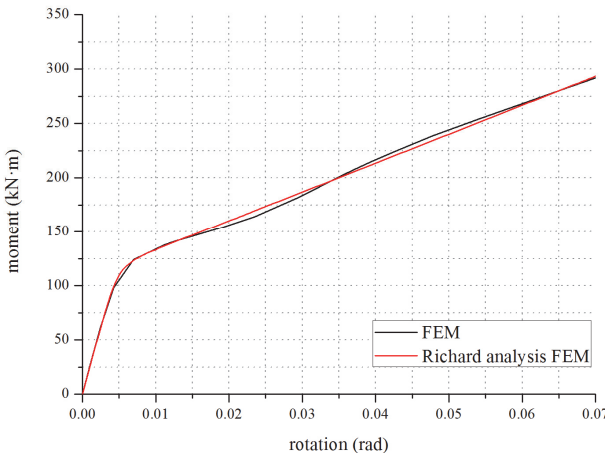
$$M_{fail,1} = \frac{2 \left(2a' - \frac{d_{bt}}{4} \right) w F_{yT} t_f^2 (d - t_{stem})}{4a'b' - d_{bt}(b' + a')} \quad (8)$$



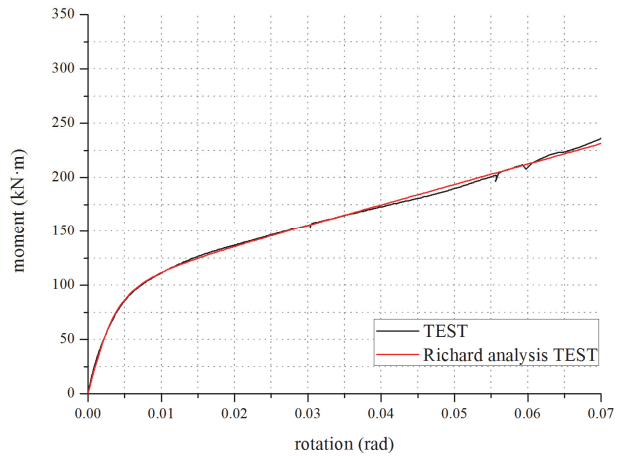
(a) Regression analysis curve obtained from the FEM analysis when $\alpha' = 8.13$



(b) Regression analysis curve obtained from the experimental test analysis when $\alpha' = 8.13$



(c) Regression analysis curve obtained from the FEM analysis when $\alpha' = 8.73$



(d) Regression analysis curve obtained from the experimental test analysis when $\alpha' = 8.73$

Fig. 9. Moment-Rotation Relation curves of the Double Split Tee connections

Table 4. Initial Rotational Stiffness of each specimen's regression analysis according to α'

Specimen	FEM-Richard (G260-T15-B350)	TEST _{EXP} -Richard (G260-T15-B350)	FEM-Richard (G310-T15-B400)	TEST _{EXP} -Richard (G310-T15-B400)
K_e (kN·m/rad)	36,461	37,709	24,791	25,841
error*(%)		3.42		4.23
K_p (kN·m/rad)	3,181	2,467	2,661	1,873
error*(%)		22.45		29.62
M_0 (kN·m)	142.36	128.88	107.15	100.34
error*(%)		9.47		6.35
R^2	0.99	0.99	0.99	0.99

$$*\text{Error}(\%) = \left| \frac{\text{FEM} - \text{TEST}_{\text{EXP}}}{\text{FEM}} \right| \times 100$$

$$a' = a + \frac{d_{bt}}{2} \quad (9)$$

$$b' = b - \frac{d_{bt}}{2} \quad (10)$$

여기서, d_{bt} : 긴결재의 공칭직경(mm)

d_b : 보의 춤(mm)

w : T-stub 플랜지의 길이와 첫 번째 긴결재 중심선에서 T-stub 플랜지의 길이 중 작은 값(mm)

2) 보 플랜지에 체결된 긴결재의 전단파괴 시의 기둥 플랜지 면에 발생하는 모멘트, $M_{fail,2}$:

$$M_{fail,2} = 2NA_b(F_{V,bolt})d \cdot L_{TF1} \quad (11)$$

여기서, N : T-stub stem에 체결하는 고력볼트 열 당 고력 볼트 개수

A_b : 고력볼트의 공칭단면적(mm²)

$F_{V,bolt}$: 고력볼트의 공칭전단강도(N/mm²)

d : 보의 depth(mm)

$$L_{TF1} = \frac{L - d_c}{L - d_c - (2S_1 + S_3)} \quad (12)$$

여기서, L : 보의 길이(mm)

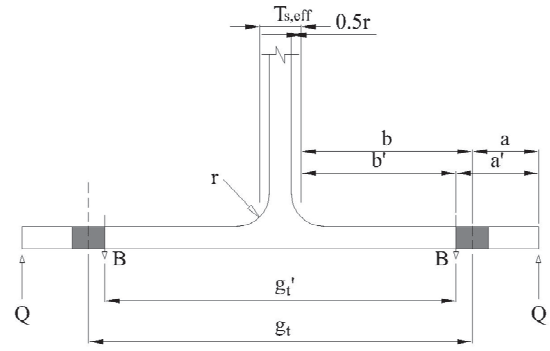
d_c : 기둥의 춤(mm)

S_1 : 기둥 외주면에서 T-stub stem의 첫 번째 고장력볼트 열까지의 거리(mm)

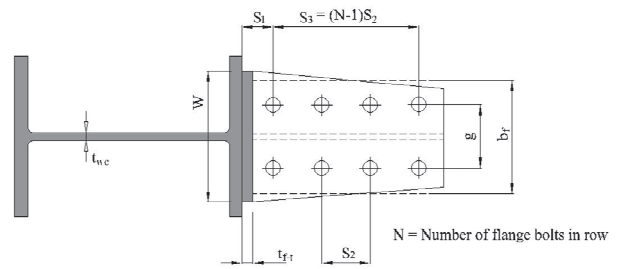
S_3 : $(N-1)S_2$ (mm)

상기의 수식과 관련한 접합부의 기하학적 변수는 Fig. 10에 나타내었다.

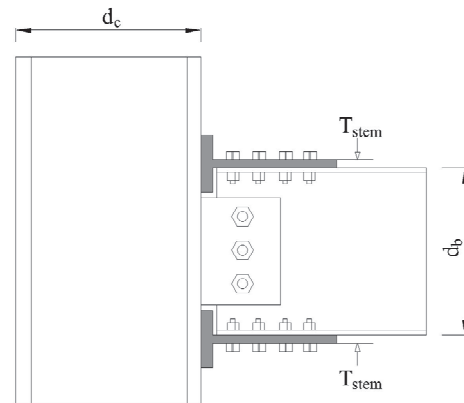
Table 5에 나타난 것과 같이 각각의 접합부의 실험치 최대모멘트($M_{fail,EXP}$)는 식 (8)과 식 (11)중 작은 값으로 결정된 설계휨강도($M_{fail,1}$)보다 높은 휨모멘트강도를 갖고 있다. 따라서 각각의 접합부는 충분한 휨강도를 발휘하는 것으로 판단된다.



(a) Prying action and Flexure deformation parameters of the T-stub flange



(b) Position parameters of High strength bolts on the T-sub stem



(c) Parameters of the T-stub stem and the Column-Beam

Fig. 10. Geometric shape parameters of the Double Split Tee Connection

Table 5. Design flexure strength of each specimen

Test specimens	$M_{fail,1}$ (kN·m)	$M_{fail,2}$ (kN·m)	$M_{fail,EXP}$ (kN·m)
G260-T15-B350	112.26	482.46	486.39
G310-T15-B400	89.06	482.46	411.67

4. 결론

이 연구는 T-stub의 기하학적 형상변화가 상·하부 T-stub 접합부의 모멘트-회전각 관계에 미치는 영향을 파악하고, 이에 따른 상·하부 T-stub 접합부의 초기회전강성을 평가하기 위해 진행하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 상·하부 T-stub 접합부는 T-stub 플랜지의 휨항복 후 소성변형의 영향으로 최종적으로 파괴하였다. 이때 각 접합부에 체결된 T/S 볼트는 응력집중에 따른 나사부의 전단파단 양상 및 지압파단 양상은 나타내지는 않았다.
- (2) FEMA 설계식에 기초한 모멘트저항성능평가 결과 FEMA 설계식의 모멘트저항성능($M_{fail,1}$)보다 실험치 최대모멘트($M_{fail,EXP}$)가 더 높은 휨모멘트강도를 갖고 있는 것으로 보아 접합부는 충분한 휨강도를 발휘하는 것으로 판단된다.
- (3) 예측한 것과 같이 상·하부 T-stub 접합부의 초기회전강성 값은 T-stub의 기하학적 형상변수 α' 값이 감소할 때 증가하였다. 즉, α' 값이 $\alpha' = 8.73$ 에서 $\alpha' = 8.13$ 로 감소할 때 초기회전강성 값은 31.47%로 증가하였다.
- (4) 제안한 3차원 비선형 유한요소해석모델은 수행한 접합부 실험결과와 매우 유사한 접합부 거동특성과 회귀분석 값을 제공하므로 이를 활용하여 접합부 예비설계에 적용하는 것은 적절하다고 판단한다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단(과제번호:2012R1A1A2042351)의 지원에 의하여 수행된 과제 of 일부이다. 이에 논문의 저자들은 감사의 말씀을 전한다.

참고문헌(References)

- [1] SAC Joint Venture (2000) *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings: Program to Reduce the Earthquake Hazards of Steel Moment Frame Structures* (FEMA-350), Federal Emergency Management Agency, USA.
- [2] Federal Emergency Management Agency (2000) *State of the Art Report on Connection Performance*, FEMA-355D, FEMA, USA.
- [3] Swanson, J.A. (1999) *Characterization of the Strength, Stiffness, and Ductility Behavior of T-Stub Connections*, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, USA.
- [4] Swanson, J.A., and Leon, R.T. (2000) Bolted Steel Connections: Tests on T-Stub Components, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.126, No.1, pp.50-56.
- [5] Swanson, J.A., and Leon, R.T. (2001) Stiffness Modeling of Bolted T-Stub Connection Components, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.5, pp.498-505.
- [6] Swanson, J.A. (2002) Ultimate Strength Prying Models for Bolted T-Stub Connections, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.39, No.3, pp.136-147.
- [7] Swanson, J.A., Kokan, D.S., and Leon, R.T. (2002) Advanced Finite Element Modeling of Bolted T-Stub Connection Components, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.58, No.5, pp.1015-1031.
- [8] Astaneh, A. (1985) Procedure for a Design and Analysis of Hanger-Type Connections, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.22, No.2, pp.63-66.
- [9] Kulak, G.L., Fisher, J.W., and Struik, J.H.A. (2001) *Guide To the Design Criteria for Bolted and Riveted Joints* (2nd Ed.), American Institute of Steel Construction, USA.
- [10] Thornton, W.A. (1985) Prying Action: A General Treatment, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.22, No.2, pp.67-75.
- [11] Yang, J.-G., Park, J.-H., Choi J.-H., and Kim, S.-M. (2011) Characteristic Behavior of a T-Stub Connection Under Shear, Including the Effects of Prying Action and Bolt Pretension, *Proceedings of the 6th International Symposium on Steel Structures*, KSSC, pp.1086-1092.
- [12] Yang, J.-G., Park, J.-H., Kim, H.-K., and Back, M.-C. (2013) A Prying Action Force and Contact Force Estimation Model for a T-Stub Connection with High-Strength Bolts, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Taylor & Francis, Vol.12, No.2, pp.309-316.
- [13] Faella, C., Piluso, V., and Rizzano, G. (2000) *Structural Steel Semirigid Connections: Theory, Design, and Software*, CRC Press, USA.
- [14] Piluso, V., Faella, C., and Rizzano, G. (2001) Ultimate Behavior of Bolted T-Stubs. I: Theoretical Model, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.6, pp.686-693.
- [15] Piluso, V., Faella, C., and Rizzano, G. (2001) Ultimate Be-

- havior of Bolted T-Stubs. II: Model Validation, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.6, pp.694-704.
- [16] Piluso, V., Rizzano, G., and Sabatino, R. (2008) Prediction of Ultimate Behaviour of Bolted T-Stubs: Influence of Bolt Preloading, *Proceedings of EUROSTEEL 2008*, Graz University of Technology/University of Ljubljana/Vienna University of Technology, Austria, pp.513-518.
- [17] Piluso, V., Rizzano, G., and Sabatino, R. (2009) Influence of Bolt Preloading and Flexural Effects on the Ultimate Behaviour of Bolted T-Stubs, *Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS 2009)*, Hong Kong Institute of Steel Construction, Hong Kong, pp.9-16.
- [18] 양재근, 김윤, 박재호(2012) 상·하부 스플릿 T 접합부의 초기회전강성 예측모델, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제3호, pp.279-287.
- 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).
- [19] Richard, R.M., and Abbott, B.J. (1975) Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.101, No.4, pp.511-515.
- [20] Richard, R.M., Hsia, W.-K., and Chmielowiec, M. (1988) Derived Moment Rotation Curves for Double-Framing Angles, *Computers & Structures*, Elsevier, Vol.3, pp.485-494.
- [21] Jaspert, J.-P., and Maquoi, R. (1991) Plastic Capacity of End-Plate and Flange Cleated Connections: Prediction and Design Rules, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Connections in Steel Structures*, American Institute of Steel Construction, USA, pp.343-352.
- [22] 양재근, 김주우, 김윤(2012) 상·하부 스플릿 T 접합부의 휨 강도 설계식, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제5호, pp.511-520.
- Yang, J.G., Kim, J.W., and Kim, Y. (2012) Design Formula for the Flexural Strength of a Double Split Tee Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.5, pp.511-520 (in Korean).
- [23] 양재근, 백민창(2013) 고력볼트로 체결된 T-Stub의 지레 작용력 및 부재 접촉력 예측모델, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.409-419.
- Yang, J.G., and Baek, M.C. (2013) Prediction Models for the Prying Action Force and Contact Force of a T-Stub Fastened by High-Strength Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25 No.4, pp.409-419 (in Korean).
- [24] Coelho, A.M.G, da Silva, L.S., and Bijlaard, F.S.K. (2004) Characterization of the Nonlinear Behavior of Single Bolted T-Stub Connections, *Proceedings of Connections in Steel Structures V (the 5th International Workshop on Connections in Structures)*, Delft University of Technology, Netherlands, pp.53-64.
- [25] Coelho, A.M.G., da Silva, L.S., and Bijlaard, F.S.K. (2006) Finite-Element Modeling of the Nonlinear Behavior of Bolted T-Stub Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.132, No. 6, pp.918-928.
- [26] Lemonis, M.E., and Gantes, C.J. (2006) Incremental Modeling of T-Stub Connections, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Mathematical Sciences Publishers, Vol.1, No.7, pp.1135-1159.
- [27] Reinoso, J.M., Loureiro, A., Gutierrez, R., and Moreno, A. (2008) Nonlinear Elastic-Plastic 3D Finite Element Modeling: Top and Seat Angle Connection with Double Web Angle, *Proceedings of EUROSTEEL 2008*, Graz University of Technology/University of Ljubljana/Vienna University of Technology, Austria, pp.501- 506.
- [28] Stankiewicz, B. (2002) Experimental Tests of T-Stub Joints and Refined Finite Element Method Computer Model, *Proceedings of EUROSTEEL 2002*, Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista/Universidade de Coimbra, Portugal, pp.927-936.

요 약 : 상·하부 T-stub 접합부는 보와 기둥의 강성비, T-stub의 기하학적 형상변화, 긴결재의 개수, 패널존 효과 등의 영향에 따라서 보통모멘트골조 및 특수모멘트골조에 적합한 거동특성을 나타내는 완전강도 부분강접 접합부(full strength partial restrained connection)이다. 이러한 상·하부 T-stub 접합부가 구조적으로 안전하게 거동하기 위해서는 충분한 강도, 강성, 연성능력을 나타내어야 한다. 이 연구는 T-stub의 기하학적 형상변화가 상·하부 T-stub 접합부의 모멘트-회전각 관계에 미치는 영향을 파악하고, 이에 따른 상·하부 T-stub 접합부의 초기회전강성을 평가하기 위해 진행하였다. 이를 위하여 T-stub의 기하학적 형상변수 α 값을 변화시킨 2개의 상·하부 T-stub 접합부 실험체를 제작하여 접합부 실험을 수행하였고, 3차원 비선형 유한요소해석도 수행하였다.

핵심용어 : 상·하부 T-stub 접합부, 초기회전강성, T-stub, 소성힌지, 유한요소해석
