

반복하중을 받는 비보강 확장 단부판 접합부의 해석 및 실험적 연구

김희동¹ · 양재근^{2*} · 배다솔³

¹부교수, 인하공업전문대학, 건축과, ²교수, 인하대학교, 건축공학과, ³석사과정, 인하대학교, 건축공학과

Analytical and Experimental Study of an Unstiffened Extended End-Plate Connection

Kim, Hee Dong¹, Yang, Jae Guen^{2*}, Pae, Da Sol³

¹Associate Professor, Department of Architecture, Inha Technical College, Incheon, 22212, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

³Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

Abstract - Extended end-plate connections(EEPC) are a type of connection applied in Pre-Engineered Building structures comprising beam-column connections of steel structures or tapered members. Extended end-plate connections(EEPC) show different behavioral characteristics owing to the influence of plate thickness, gauge distance of high strength bolt, diameter of high strength bolt frame, and the number of high strength bolts. In the USA and Europe, extended end-plate connections(EEPC) are applied in beam-column connections of steel structures in various forms; however, these are not widely applied in structures in Korea. This can be attributed to the fact that the proposal of design strength types for extended end-plate connections(EEPC), proposal of connection specifications, evaluation of seismic performance, and are not being performed appropriately. Therefore, the purpose of this study is to provide basic data for the domestic application of Unstiffened extended endplate connections. To realize this, nonlinear finite element analysis was conducted on a 12-mm thick Unstiffened extended endplate connections.

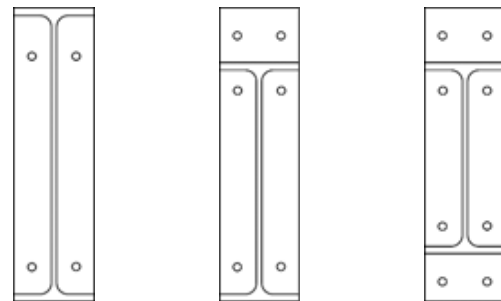
Keywords - Unstiffened extended end-plate connection, Energy dissipation capacity, Beam-to-column moment connection, Finite element analysis, Moment-rotation hysteresis curve, Yield lines

1. 서론

확장단부판 접합부는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 다양한 기하학적 형상으로 강구조물의 보-기둥 접합부 및 변단면 부재로 구성된 PEB 구조 시스템(Pre-Engineering Building System)에 널리 적용되고 있다.

미국 AISC 강구조 설계지침서(Steel Design Guide)의 4권, 16권, 25권은^{[1],[2],[3]} 단부판 접합부와 단부판 접합부를 적용

한 PEB 구조시스템에 대한 설계식, 접합부상세, 설계절차, 제작 및 시공지침서 등을 제공하고 있다. 유럽 ECCS CECM EKS 109권^[4] 및 영국 BCSC SCI 강구조 설계지침서^[5]는 단부판 접합부에 발생 가능한 다양한 소성힌지항복선을 제시



(a) Flush end-plate type (b) Four-bolt one-side extended end-plate type (c) Four-bolt two-sides extended end-plate type

Fig. 1. Unstiffened end-plate connection types

Note.-Discussion open until June 30, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 23, 2016; revised October 28, 2016; approved on October 28, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-10-4327-3627 Fax. +82-32-866-4624

E-mail. jyang@inha.ac.kr

하고 설계휨강도, 설계절차 등을 제공하고 있다.

확장단부판 접합부는 단부판의 두께, 고장력볼트의 게이지 거리, 고장력볼트 축부의 직경, 고장력볼트의 개수 등의 영향으로 상이한 거동특성, 접합부 강도, 에너지소산능력을 나타낸다. 확장단부판 접합부의 한계상태로는 인장 축 단부판의 휨항복, 지레작용력의 영향에 의한 인장 축 고장력볼트의 파단, 기동 플랜지에 체결된 고장력볼트의 전단파단, 단부판의 전단항복, 단부판의 전단파단, 보 부재의 인장플랜지-단부판 용접부 파단 등이 있다^{[6],[7]}. 충분한 강도를 갖는 확장단부판 접합부의 설계를 위하여 Srouji, Kukreti, Murray^[8] 등은 Kennedy, Vinnakota, Sherbourne^[9] 등이 제안한 고장력볼트의 지레작용효과도 포함된 소성힌지항복선 이론을 적용하여 확장단부판 접합부의 설계휨강도 식을 제안하였다.

FEMA 350^[10]은 단부판 접합부가 충분한 내진성능을 발현하도록 고장력볼트로 체결된 비보강 단부판 접합부와 고장력볼트로 체결된 보강된 단부판 접합부에 대한 설계강도식, 접합부상세, 설계 및 시공 지침 등을 제안하고 있다. 충분한 에너지소산능력을 갖는 확장단부판 접합부의 설계를 위하여 Murray, Shoemake^[11] 등은 단부판 접합부의 접합부 형상변화에 따른 에너지소산능력을 평가하여 확장단부판 접합부의 에너지소산능력 평가 모델을 제안하였다.

그러나 우리나라의 경우 아직 확장단부판 접합부는 강구조물 보-기둥 접합부에 적극적으로 적용되고 있지 않다. 따라서 확장단부판 접합부의 국내 적용을 위해서는 설계강도식, 접합부상세, 설계 및 시공 지침서 등의 제안이 절실히 필요한 상황이다. 그러므로 이 연구는 비보강 확장단부판 접합부 설계에 필수적인 기초자료를 제공하기 위하여 진행하였다. 이를 위하

여 단부판 휨항복 타입인 두께 12mm의 확장단부판의 유한요소해석모델과 실제 실험모델의 비교로 연구를 수행하였다.

2. 비보강 확장단부판 접합부에 대한 실험

2.1 비보강 확장단부판 접합부 실험 계획

비보강 확장단부판 접합부는 SS400의 강재를 사용한 확장단부판과 SM490 강재를 사용한 보 부재 및 기동 부재로 각각 2set씩 제작하여 실험을 진행하였다. 확장단부판은 Fig. 2에서 나타난 것과 같이 플랜지 부분은 완전용입용접으로 H-600×200×11×17 보 부재와 접합하고 웹 부분은 필렛용접으로 보부재와 접합하였다. 또한 H-400×408×21×21 기동부재와는 F10T-M20 고장력볼트에 165kN의 초기장력이 발생하도록 식 (1)에 따른 체결토크치로 마찰접합 하였다. 실험체 T12-O70-I50의 기하학적 형상 및 변수는 Table 1, Fig. 4와 같고, 인장시험을 통한 재료적 물성치는 Table 2와 같다. 접합부 실험체에 작용하는 하중은 건축구조기준(2009)에서 제시한 재하조건을 적용하여 보 단부에 연직방향의 반복하중 형태로 가하였다. 하중작용에 따른 접합부 변형과 변위는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 스트레인게이지 부착 및 LVDT 설치를 통하여 얻었다.

$$T = k \times d \times N \quad (1)$$

여기서,

T : 체결토크치(kgf · m), d : 볼트지름(mm)

k : 토크치(kg/m), N : 체결축력(TON)

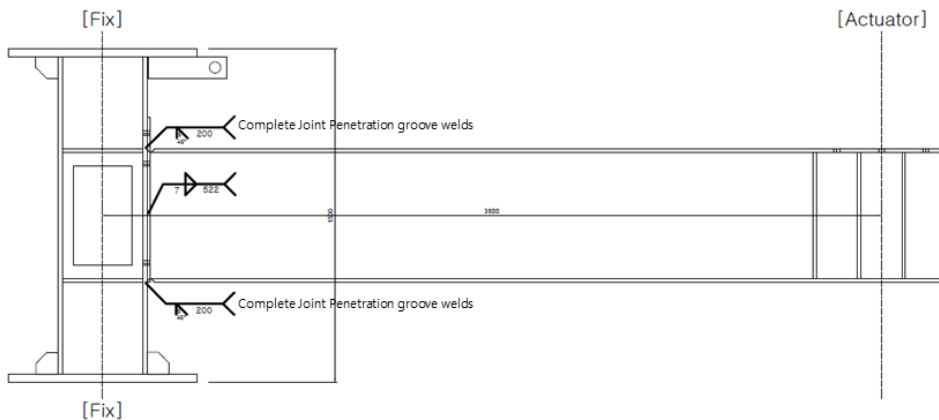


Fig. 2. Geometric shape of unstiffened end-plate connection experimental specimens



(a) Positions of LVDT installed

(b) Positions of strain gauges attached

Fig. 3. Unstiffened end-plate connection experimental model (cycle 0)

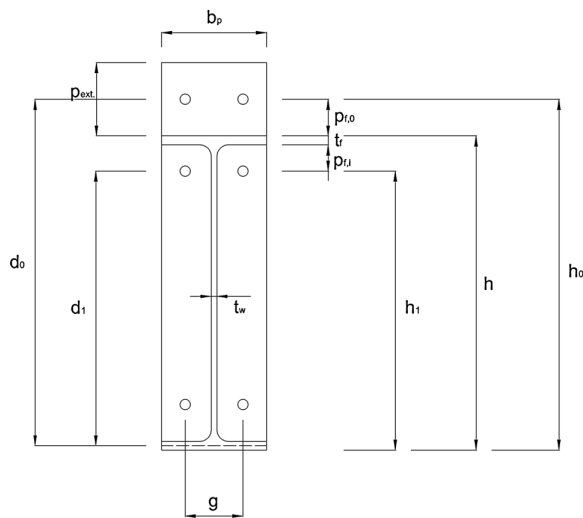


Fig. 4. Geometric shapes of unstiffened extended end-plate connections

Table 1. Geometric variables of the unstiffened extended end-plate connection

(Unit : mm)

| | t_p | b_p | g | d_0 | d_1 | t_w | t_f |
|-------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| T12-O70-I50 | 12 | 200 | 110 | 661.5 | 524.5 | 11 | 17 |

T12-O70-I50

$p_{f,i}$

$p_{f,o}$

Thickness of the end-plate

Table 2. Material properties of steel

| | F_y (MPa) | F_u (MPa) | ϵ_y | ϵ_u | E (MPa) |
|--------|----------------|----------------|--------------|--------------|------------|
| Plate | 308.73 | 423.56 | 0.001543 | 0.12135 | 215,906 |
| Column | 361.24 | 549.58 | 0.002011 | 0.16897 | 179,571 |
| Beam | 360.66 | 548.29 | 0.001830 | 0.16734 | 196,999 |

2.2 비보강 확장단부판 접합부 실험 결과

비보강 확장단부판 접합부 실험체는 각각 30사이클과 31 사이클의 가력 시, Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 보 플랜지 상부 및 고장력볼트가 체결된 플랜지 내측부분의 단부판에 휨항복 후 파단이 일어났다. Fig. 7의 모멘트 회전각 이력곡선을 보면 0.04rad의 회전각과 400kN·m의 휨모멘트 저항 성능을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 확장이 되어있지 않은 단부판 하단에 인장력이 작용할 때 볼트의 슬립(slippage)에 의한 불안정 거동을 하며 이후 볼트구멍과 축의 영구변형이 일어나 Fig. 7과 같은 그래프 개형을 나타낸다^[12]. Fig. 6의 Richard 곡선 예시^[13]와 Fig. 7의 모멘트-회전각 이력곡선을 보면, 하중이 작용하기 시작하면 모멘트-회전각 관계는 선형적으로 증가하며, 하중이 참조모멘트에 상응하는 참조하중에 이르면 변형률 값은 급속하게 증가하고 모멘트-회전각 관계는 급격히 감소한다. 비보강 확장형단부판의 회전강성은 모멘트-회전각 관계 이력곡선 각 사이클의 최대 모멘트-회전각 이력곡선에 해당하는 포락선에 대한 회귀분석을 수행하여 얻었다. 회귀분석은 식 (2)로 정의되는 Richard 해석 모델을 적용하였다. 회귀분석을 통하여 얻은 새로운 포락선은 점선의 형태로 Fig. 8에 나타내었다.

$$M(\theta) = \frac{(K_e - K_p) \cdot \theta}{\left(1 + \left| \frac{(K_e - K_p) \cdot \theta^n}{M_0} \right| \right)^{1/n}} + K_p \cdot \theta \quad (2)$$

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

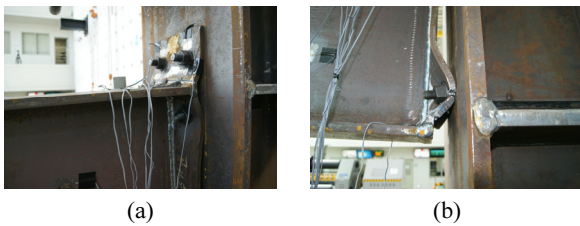


Fig. 5. Unstiffened end-plate connection experimental model (cycle 31)

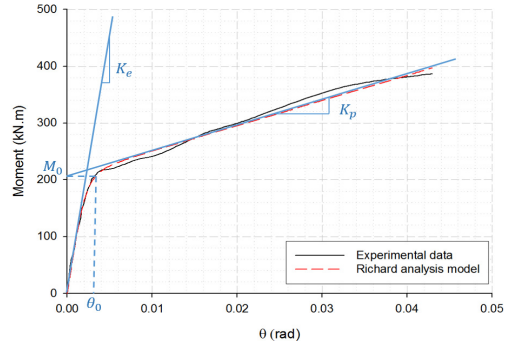


Fig. 6. Richard analysis curve

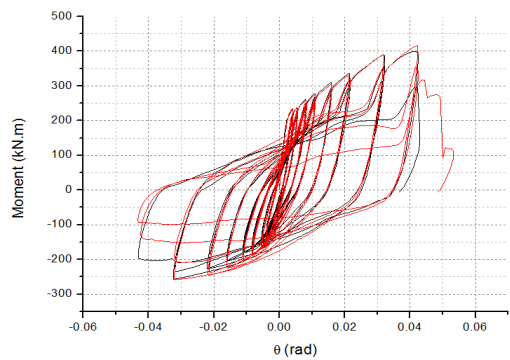
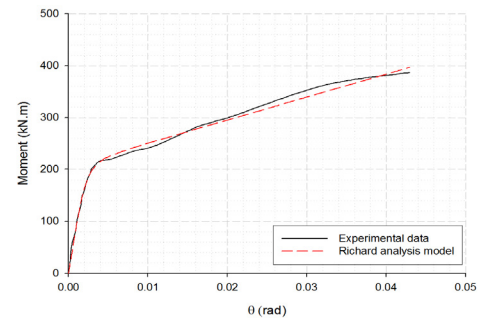
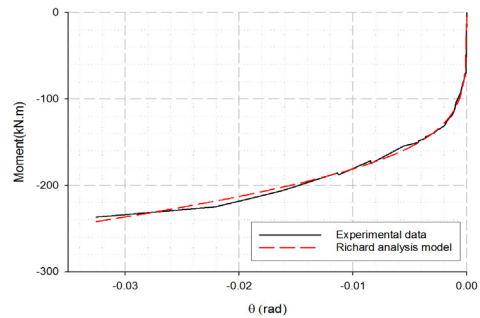


Fig. 7. Moment-rotation curve of the experimental model



(a)



(b)

Fig. 8. Initial rotational stiffness of experimental data

Table 3. The energy dissipation capacities of UEEPC (experimental specimens)

(Unit : kN · m)

| Cycle | E_d | E_{so} | ξ_{eq} |
|-------|------------|------------|------------|
| 1~5 | 2134.9969 | 3468.3170 | 0.2514 |
| 6~10 | 3112.9205 | 4664.4291 | 0.2717 |
| 11~15 | 5879.0944 | 6666.1309 | 0.3499 |
| 16~20 | 9581.2644 | 9318.5357 | 0.4141 |
| 21~25 | 24088.8474 | 17668.4143 | 0.5351 |
| 26 | 7843.5751 | 5445.6090 | 0.1176 |
| 27 | 16271.5853 | 9721.7464 | 0.138206 |
| 28 | 13399.6983 | 8680.3566 | 0.127900 |
| 29 | 20172.4477 | 11473.9960 | 0.152471 |
| 30 | 7303.6808 | - | 0.091796 |
| total | 109788.1 | 77107.535 | 2.450169 |

비보강 확장단부판 접합부의 모멘트-회전각 관계 이력곡선의 내부면적에 해당하는 에너지소산능력은 식 (3)과 같은 등가점성감쇠계수를 사용하여 무차원화 하였다. 비보강 확장단부판 접합부 실험체의 에너지소산능력은 Table 3과 같이 정리할 수 있다.

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi \times E_{so}} \quad (3)$$

여기서,

E_D : 하중-변위 관계 곡선의 내부 면적에 해당하는 특정 사이클의 소산된 에너지

E_{SO} : 특정 사이클의 최대 변형에너지

3. 비보강 확장단부판 접합부에 대한 3차원 비선형 유한요소해석

3.1 비보강 확장단부판 접합부 3차원 비선형 유한요소해석 모델링

고장력볼트로 체결된 비보강 확장단부판 접합부의 3차원 비선형 유한요소해석은 상용프로그램인 ABAQUS(Ver. 6.14)을 사용하여 해석하였다. 비보강 확장단부판 접합부 해석모델은 ABAQUS 부재요소 중 C3D8R 부재요소를 적용하여 실험과 동일하게 SS400 강재의 단부판, SM490 강재의 H-600×200×11×17 보 부재 및 H-400×408×21×21 기둥 부재,

Table 4. ABAQUS options for finite element analysis

| Contact surface | Command | Option | | |
|-----------------|------------|----------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Washer surface | Constraint | Tie | | |
| Beam - Welding | | | | |
| Welding - plate | | | | |
| Beam - Plate | Contact | Finite sliding | Allow separation after contact | Adjust only to remove over closure |
| Plate - Column | | | | |
| Plate - HSB | | | | |
| Column - HSB | | | | |
| Nuts - HSB | | | | |

F10T-M20 고장력볼트 세트 등을 모델링하였다. 접합부 해석에 있어서 각 부재 사이에 발생하는 접촉과 지압, 고장력볼트의 초기장력 도입 등의 영향도 고려하였다. 각 부재 사이의 미끄럼계수는 블라스트 후 도장이 안 된 표면으로 가정하여 0.5로 선택하였다. F10T-M20 고장력볼트는 bolt load 옵션을 이용하여 165kN의 초기장력이 발생하도록 체결하였다. Table 4는 비보강 확장 단부판의 유한요소해석에 있어서 적용한 ABAQUS 옵션을 나타낸다. 용접접합 부분은 Tie 옵션을 사용하고 나머지 contact의 경우 마찰계수를 주어 모델링하였다.

3차원 비선형 유한요소해석에 있어서 고려한 비보강 확장 단부판 접합부의 기하학적 형상 및 재료물성은 앞의 실험과 동일하다. Table 1과 Fig. 4에 나타난 것과 같이 단부판의 두께는 아래의 식 (4)을 적용하여 구한 최대 단부판 두께보다 작은 단부판 두께를 선택하였다. 식 (4)의 적용에 있어서 소요휨강도, M_u 는 보 부재의 공칭전소성휨강도, M_p 의 0.8 배에 해당하는 값이 최대 소요휨강도 값이 되도록 선택하였다. 또한, γ_r 은 단부판 접합부의 회전각이 단순보 단부 회전

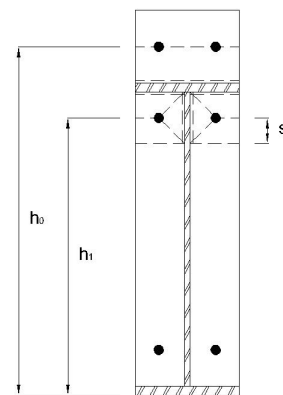


Fig. 9. Plastic hinge yield-lines of unstiffened extended end-plate connections

각의 10%에 상응하도록 소요계수모멘트 값을 상향 조정할 때 적용하는 계수 값이다. 확장단부판 접합부의 경우에 γ_r 값은 1.0을 적용한다. 한편, Y 는 Fig. 9에 나타난 소성힌지항복선 길이의 합을 의미한다. 상부 보 플랜지와 내·외측 고장력볼트 사이의 간격인 $p_{f,i}$ 및 $p_{f,o}$ 는 각각 50mm 및 70mm로 선택하였다. 또한, 고장력볼트 게이지 거리, g 는 110mm, 단부판의 폭, b_p 는 200mm로 선택하였다.

$$t_{p,req'd} = \sqrt{\frac{\gamma_r M_u}{\phi_b F_{py} Y}}, \quad \phi_b = 0.9 \quad (4)$$

여기서,

$$M_u = 0.8 M_{n,beam} = 0.8 \times (F_y Z_x) \quad (5)$$

$$Y = \frac{b_p}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{p_{f,i}} + \frac{1}{s} \right) + h_0 \left(\frac{1}{p_{f,o}} \right) - \frac{1}{2} \right] + \frac{2}{g} [h_1(p_{f,i} + s)] \quad (6)$$

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} \quad (7)$$

$$p_{f,i} = s, \text{ if } p_{f,i} > s \quad (8)$$

3.2 비보강 확장단부판 접합부 3차원 비선형 유한요소 해석 결과

실험 시의 하중재하 조건과 같이 FEMA 350을 기준으로 증분(Amplitude) 값을 주었다. 3차원 비선형 유한요소해석을 통하여 얻은 비보강 확장단부판 접합부의 Von mises 응력분포 및 변형양상은 Fig. 10과 같다. Fig. 10에 나타난 것과 같이 단부판 두께가 얇은(Large bolt thin plate) 본 연구의 모델 T12-O70-I50의 응력집중 현상은 보 상부 플랜지와 단부판이 용접된 부분 및 보 상부 플랜지와 내측 고장력볼트가 체결된 부분에 발생하였다.

3차원 비선형 유한요소해석을 통하여 얻은 비보강 확장단부판 접합부의 모멘트-회전각 관계 이력곡선은 Fig. 11과 같다. 모멘트-회전각 관계 이력곡선의 내부면적에 해당하는 에너지소산능력, $E_{D, total}$ 은 Table 5에 정리하였다.

회귀분석을 통하여 얻은 새로운 포락선^[13]은 점선의 형태로 Fig. 12에 나타내었다.

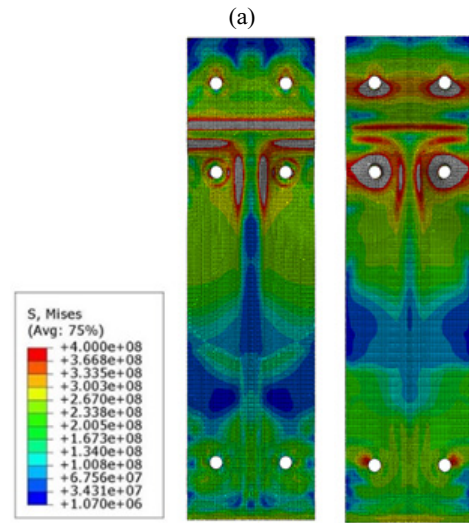
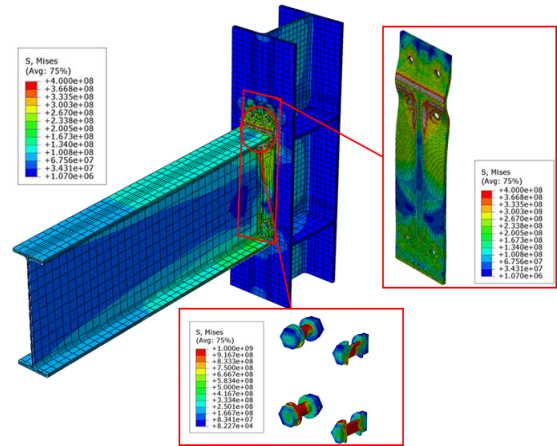


Fig. 10. Stress distribution and deformation aspect of the analysis model

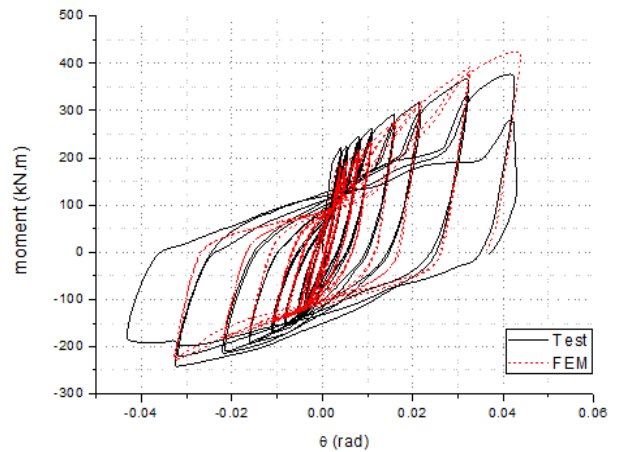


Fig. 11. Moment-rotation curve of the analysis model and experimental model

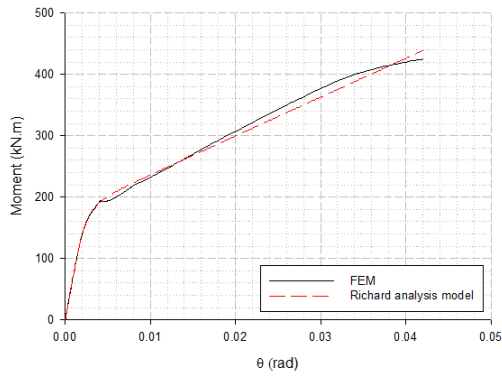


Fig. 12. Initial rotational stiffness of analysis data

Table 5. The energy dissipation capacities of UEEPC (FEM) (Unit : kN·m)

| Cycle | E_d | E_{so} | ξ_{eq} |
|-------|----------|----------|------------|
| 1~5 | 1543.289 | 1811.131 | 0.340184 |
| 6~10 | 2736.772 | 2241.967 | 0.474777 |
| 11~15 | 6011.12 | 3639.714 | 0.631655 |
| 16~20 | 10488.46 | 5180.822 | 0.801404 |
| 21~25 | 22424.15 | 10491.94 | 0.857612 |
| 26 | 8218.196 | 3499.28 | 0.186891 |
| 27 | 12250.77 | 6456.867 | 0.150984 |
| 28 | 13576.48 | 6216.644 | 0.173789 |
| 29 | 15538.66 | 9259.565 | 0.13354 |
| 30 | 15538.66 | 9259.565 | 0.13354 |
| total | 108326.5 | 58057.49 | 3.884376 |

4. 비보강 확장 단부판 접합부의 해석결과와 실험결과 비교

4.1 설계 휨강도와 휨모멘트 저항성능

단부판의 두께가 상대적으로 얇은 비보강 확장단부판 접합부(Large bolt thin plate)의 설계휨강도는 단부판의 휨항복 후 소성변형 한계상태에 의하여 좌우된다. 반면에 단부판의 두께가 상대적으로 두꺼운 비보강 확장단부판 접합부(Small bolt thick plate)의 설계휨강도는 인장 축 고장력볼트의 인장파단 한계상태에 의하여 좌우된다^[14]. 따라서 이 연구에서 고려한 비보강 확장단부판 접합부 해석모델의 설계휨강도는 식 (9), 식 (10), 식 (12)을 적용하여 Table 6과 같이 정리하였다. Fig. 13에 정리한 것과 같이 비보강 확장단부판 접합부 해석모델의 설계휨강도는 각 비보강 확장단

Table 6. Design strength of UEEPC

| T12-O70-150 | ϕM_n (kN·m) |
|-------------------------------|-------------------|
| End-plate Yield | 118.63 |
| Bolt Rupture w/Prying Action | 545.81 |
| Bolt Rupture No prying Action | 558.89 |
| ϕM_n | 118.63 |

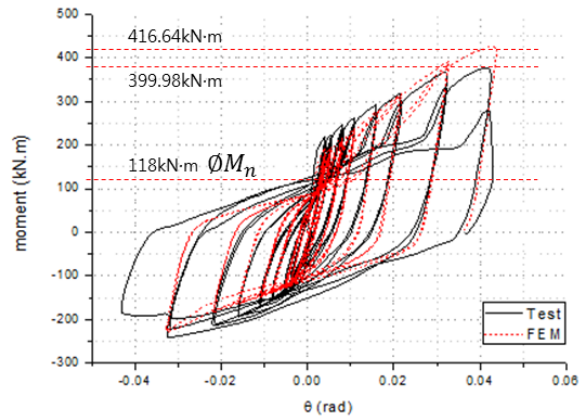


Fig. 13. Moment-rotation curve of the analysis model and experimental model

부판 접합부의 휨모멘트-회전각 관계 이력곡선의 안쪽에 위치한다. 따라서 각 비보강 확장단부판 접합부는 충분한 휨강도 지지능력을 갖고 있는 것으로 판단할 수 있다.

▷ 단부판의 휨항복 후 소성변형 한계상태:

$$\phi M_n = \phi_b M_{pl} = \phi_b F_{py} t_p^2 Y \quad (9)$$

▷ 지레작용 효과를 고려한 인장 축 고장력볼트의 인장파단 한계상태:

$$\phi M_n = \phi M_q = \max \left\{ \begin{aligned} &\Phi [2(P_t - Q_{\max,0})d_0 + 2(P_t - Q_{\max,i})d_1] \\ &\Phi [2(P_t - Q_{\max,0})d_0 + 2(T_b)(d_1)] \\ &\Phi [2(P_t - Q_{\max,i})d_1 + 2(T_b)(d_0)] \\ &\Phi [2(T_b)(d_0 + d_1)] \end{aligned} \right\}, \phi = 0.75 \quad (10)$$

여기서,

$$P_t = A_b F_t = \frac{\pi d_b^2}{4} F_t \quad (11)$$

▷ 지레작용 효과를 고려하지 않은 인장 축 고장력볼트의 인장파단 한계상태:

$$\phi M_n = \phi M_{np} = \phi [2(P_t)(d_0 + d_1)], \phi = 0.75 \quad (12)$$

4.2 초기 회전강성

비보강 확장 단부판 접합부의 초기 회전강성은 반복가력의 모멘트-회전각 이력곡선의 포락선을 이용하여 구하였다. 포락선을 Richard 식에 따라 회귀분석을 진행한 그래프는 Fig. 14에 나타냈다. 이러한 Richard 회귀분석결과 Table 7 과 같은 초기 회전강성값을 얻었다. Table 7, Fig. 14와 같이 해석 값에 비해 실험값의 초기회전강성이 18% 정도 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 동일하게 제작 된 두 실험체 모두 비슷하게 높은 초기강성을 나타냈으며 이와 같은 결과는 다른 두께의 단부판 접합부 실험 결과와 비교하였을 때^{[15],[16]}, 실험체 제작 오차(용접) 의한 것으로 추측된다. 이를 증명하기 위해 추후 단부판의 두께와 볼트게이지거리 등을 변수로 하는 실험

Table 7. Regression analysis of the UEEPC

| | K_e (kN·m/rad) | K_p (kN·m/rad) | M_0 (kN·m) | n | Rsqr |
|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----|------|
| Experimental model | 94531.6 | 4429.5 | 206.9 | 3.2 | 0.99 |
| Analysis model | 77516.8 | 6315.4 | 173.3 | 3.4 | 0.99 |

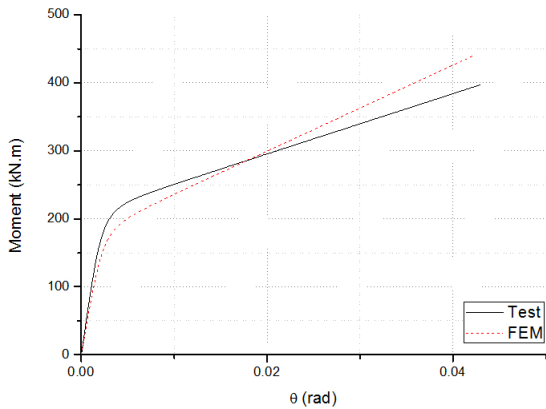


Fig. 14. Initial rotational stiffness of experimental data and analysis data

체를 통한 심화 연구가 필요할 것으로 보인다.

4.3 소성힌지선과 에너지 소산면적

Fig. 5와 Fig. 10에 나타난 것처럼 실험과 해석에 의한 12mm 확장단부판의 소성힌지선 및 응력집중은 일치 한다. 또한, 유한요소해석 결과와 기존의 소성힌지선을 겹쳐 표시한 Fig. 15에서 보여지 듯 해석에 의한 소성힌지선과 이전에 강구조 설계지침서에서^[3] 제시된 소성힌지선도 상당부분 일치한다.

비보강 확장단부판 접합부의 휨모멘트-회전각 관계 이력곡선의 내부면적에 해당하는 에너지소산능력은 식 (2)와 같은 등가점성감쇠계수(equivalent viscous damping factor)를 적용하여 무차원화 하였다^[17].

또한, Table 3, Table 5에서 보이듯 실험과 해석의 에너지소산면적의 값 차이는 크지 않으나(1.3%) 실험값의 초기강성이 높게 나와 소산면적의 분포는 차이가 있다. 또한 무차원화를 위한 등가점성계수도 일관성이 있다고 보기 어려워 이에 대한 고찰이 필요하다.

단부판의 두께가 두꺼워지게 되면 에너지 소산 능력이 줄어들고 지레작용력 효과 또한 줄어들어 소성이 되는 부분의 위치가 변하므로 내측 볼트 부분 등의 소성힌지선이 일치하지 않을 것으로 추측되어 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다^[18].

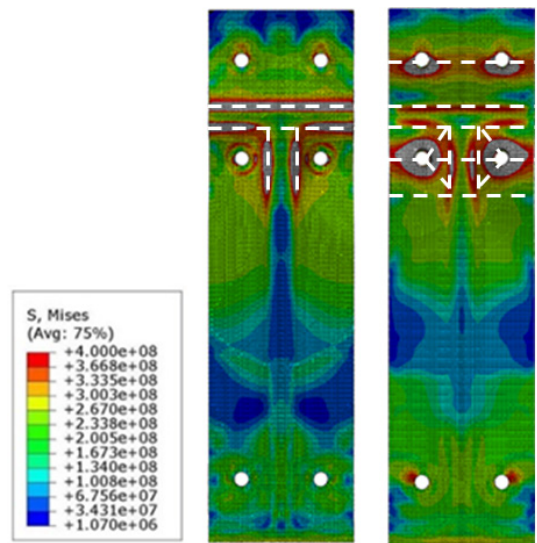


Fig. 15. Plastic hinge yield-lines of unstiffened extended end-plate connections

5. 결론

이 연구는 비보강 확장단부판 접합부의 국내 적용을 위한 기초자료를 제공하기 위하여 진행하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 실험과 해석결과, 모두 하중이 증가함에 따라서 비보강 확장단부판 접합부의 인장측 고장력볼트와 단부판이 만나는 부분은 응력집중 현상이 심화 되었고, 최종적으로 비보강 단부판 접합부는 휨항복 후 소성변형에 의해 파괴되었다.
- (2) 실험과 해석의 최대 휨모멘트값은 $16\text{kN}\cdot\text{m}$ 정도의(약 4%) 오차를 보였으며, 비보강 확장단부판의 설계 휨강도의 계산에 따라 충분한 휨강도 지지능력을 갖고 있다고 판단할 수 있었다.
- (3) 유한요소해석값에 비해 실험에서의 초기회전강성값이 크게 나왔다. 이는 실험체 제작 시 용접에 의한 것으로 추측된다. 두께 및 게이지거리에 따른 실험체에 대한 추가 연구가 필요하다.
- (4) 실험에서의 에너지 총소산면적과 유한요소해석의 에너지 총소산면적 계산 값이 약 1.3%의 오차로 큰 차이를 보이지 않았다.
- (5) 실험과 해석에서의 두께가 얇은 본 연구의 12mm 확장단부판은 기존에 제시된 소성한지선과 상당부분 일치하나, 두께가 두꺼워진 단부판의 경우 그 형상이 상이할 것으로 판단된다. 이에 대한 추가적 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 지원(과제번호 : NRF- 2012R-1A1A2042351)에 의하여 수행된 과제의 일부입니다. 이 논문의 저자들은 이에 깊은 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌(References)

- [1] Kaehler, R.C., White, D.W., and Kim, Y.D. (2011) *Frame Design Using Web-Tapered Members AISC Design Guide 25*, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [2] Murray, T.M. (1990) *Extended End-Plate Moment Connections AISC Design Guide 4*, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [3] Thomas Murray and Lee Shoemaker (2010) *Flush and Extended Multiple-Row Moment End-Plate Connections, Steel Design Guide 16.*, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [4] ECCS CECM EKS (1992) *Design of Composite Joints for Buildings* 109, ECCS.
- [5] The British Constructional Steelwork Association and The Steel Construction Institute (1995) *Joints in Steel Construction, Moment Connections*. BCSA/SCI Publication P207. London, Ascot, SCI.
- [6] 대한건축학회(2009) 건축구조기준(KBC 2009), 제7장 강구조, 기문당.
Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Codes*, AIK (in Korean).
- [7] AISC (2010) *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, 14th Ed., American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [8] Srouji, R., Kukreti, A.R., and Murray, T.M. (1983) *Yield-Line Analysis of End-Plate Connections with Bolt Force Predictions*, Research Report FSEL/MBMA 83-05, Fears Structural Engineering Laboratory, University of Oklahoma, Norman, OK.
- [9] Kennedy, N.A., Vinnakota, S., and Sherbourne, A.N. (1981) The Split-Tee Analogy in Bolted Splices and Beam-Column Connections, *Proceedings of the International Conference on Joints in Structural Steelwork*, pp.2138-2157.
- [10] FEMA (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, Washington, D.C.
- [11] Murray, T.M. and Shoemaker, W.L. (2002) *Flush and Extended Multiple-Row Moment End-Plate Connections, AISC Design Guide No.16*, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [12] Mazzolani, F.M. and Piluso, V. (1996) *Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames*, E&FN SPON, pp.254-260.
- [13] Richard et al. (1988) *Derived moment-rotation curve for double-framing angles, Comput & Struct*, Elsevier Science Ltd., Vol.30, No.3, pp.485-494.
- [14] 김희동, 양재근, 이재운, 이형동(2014) 상·하부 T-stub 접합부의 초기회전강성 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제2호, pp.133-142.
Kim, H.D., Yang, J.G., Lee, J.Y., and Lee, H.D. (2014) Evaluation of the Initial Rotational Stiffness of a Double

Split Tee Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.2, pp.133-142 (in Korean).

[15] Hendrick, D., Kukreti, A.R., and Murray, T.M. (1984) *Analytical and Experimental Investigation of Stiffened Flush End-Plate Connections with Four Bolts at the Tension Flange*. University of Oklahoma, Norman.

[16] Meng, Ronald L. (2006) *Design of Moment End-Plate Connections for Seismic Loading*, Virginia Tech.

[17] 양재근, 백민창, 이재윤, 이형동(2014) SMA 강봉으로 체결된 T-stub의 에너지 소산능력, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제3호, pp.231-240.
Yang, J.G., Baek, M.C., Lee, J.Y., and Lee, H.D. (2012) Energy Dissipation Capacity of the T-stub Fastened by SMA bars, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.231-240 (in Korean).

[18] 양재근, 백민창(2013) 고력볼트로 체결된 T-stub의 지레작용력 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).

기 호(Notation)

| | |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| A_b | : 고장력볼트의 단면적 |
| E_D | : 하중-변위 관계 곡선의 내부 면적에 해당하는 특정 사이클의 소산된 에너지 |
| E_{so} | : 특정 사이클의 최대 변형에너지 |
| F_t | : 고장력볼트의 공칭인장강도 |
| T_b | : 고장력볼트의 도입장력 |
| a | : 단부판(end-plate) 단부로부터 고장력볼트의 중심축까지의 거리 |
| b_p | : 단부판(end-plate)의 폭 |
| d_b | : 고장력볼트의 축부 직경 |
| d_0 | : 보 하부 플랜지 중심점에서 인장축 상부 고장력볼트 중심축까지의 거리 |
| d_1 | : 보 하부 플랜지 중심점에서 인장축 하부 고장력볼트 중심축까지의 거리 |
| t_p | : 단부판(end-plate)의 두께 |
| δ | : 단부판(end-plate) 순단면적 대 총단면적의 비 |
| γ_r | : 소요계수모멘트 보정계수(확장단부판(unstiffened extended end-plate)인 경우, $\gamma_r = 1.0$ 적용) |

요 약: 확장단부판 접합부는 강구조물의 보-기둥 접합부 혹은 변단면 부재로 구성된 PEB 구조시스템에 적용되는 접합부의 한 형태이다. 확장단부판 접합부는 접합부를 구성하는 단부판의 두께, 고장력볼트의 게이지 거리, 고장력볼트 축부의 직경, 고장력볼트의 개수 등의 영향으로 상이한 거동특성을 나타낸다. 확장단부판 접합부는 미국 및 유럽 등지에서는 다양한 형태로 강구조물의 기둥-보 접합부에 적용되고 있으나 우리나라에서는 널리 적용되고 있지 않다. 이러한 이유로는 확장단부판 접합부에 대한 설계강도식 제안, 접합부상세 제안, 내진성능 평가, 제작 및 시공지침서 개발 등이 적절히 이루어지지 못하고 있기 때문이다. 따라서 이 연구는 비보강 확장단부판 접합부의 국내 적용을 위한 기초자료를 제공하기 위하여 진행하였다. 이를 위하여 두께 12mm의 비보강 확장단부판에 대한 비선형 유한요소해석 및 실험을 수행하였다.

핵심용어: 강비보강확장단부판 접합부, 에너지소산면적, 보-기둥 모멘트 접합부, 유한요소해석, 모멘트 회전각 이력곡선, 소성힌지선