

Component method를 이용한 철골 보-기둥 조인트의 강성평가

Stiffness Evaluation of Steel Beam-to-Column Joints Using Component method

양철민* 조지은** 김영문***
Yang, Cheol-Min Cho, Ji-Eun Kim, Young-Moon

Abstract

This paper reports on the evaluation of the initial stiffness of steel joints using component method as well as experimental tests. The so-called component method corresponds precisely to a simplified mechanical model composed of extensional springs and rigid links, whereby the joint is simulated by an appropriate choice of rigid and flexible components. An application to a cantilever beam-to-column steel joint is presented and compared to the experimental results obtained under cyclic loading condition. Comparison between numerical and experimental results allows to conclude that the numerical model is able to simulate, with a good level of accuracy for initial stiffness, the behaviour of beam-to-column joints.

Keywords : Component Method, Moment-Rotation, Beam-to-Column joint, Initial Stiffness, Secant Stiffness

1. 서 론

철골구조물은 보와 기둥의 접합에 의해 구성되는 구조이다. 이런 보와 기둥은 면내에 작용하는 모멘트에 의해서 회전변형을 일으키게 된다. 면내 휨모멘트와 보-기둥의 상대회전각으로부터 보-기둥 조인트의 회전강성을 계산할 수 있다.¹⁾ 보-기둥 조인트에 대한 회전강성을 구하기 위해서 실제 거동과 유사한 모멘트-회전각 곡선을 찾는 데 많은 연구가 행해지고 있다.

보-기둥 조인트에 대한 회전강성을 계산하는 데는 실험에 의한 방법이 가장 적절하다고 할 수 있겠으나 많은 비용이 소요되는 것을 감수해야 한다. 이런 문제를 해결하기 위해서 많은 연구자들은 수치적인 접근으로 보-기둥 조인트에 대한 연구를 행하였다. 이런 근사적인 방법으로 Curve-fitting 상수를 갖는 다항함수 모델 (Frye and Morris, 1975), 지수모델 (Chen and Kishi, 1986), 멱급수 모델 (Chen and Kishi, 1987) 등이 등장하기도 하였고 매개변수를 이용한 모델 (Colson, 1980), 유한요소 모델 (Patel and Chen, 1984) 등이 제안되기도 하였다. 국내에서도 문태섭 교수 등이 2-Parameter log model을 제안하기도 하였다. 그러나 제안된 모델들은 대부분이 기둥의 변형 등을 무시하고 접합부분에 초점을 맞추어서 해석되었다. 또한 계산된 곡선의 형태를 좌우하는 형태매개변수에 매우 민감함을 알 수 있다. 모멘트-회전각 곡선을 구하는 이런 모델들의 수치적인 계산은 접근하기에 난해한 점이 있다. 특히 접합부를 구성

* 정회원, 전북대학교 공과대학 건축공학과 박사수료

** 정회원, 전북대학교 공과대학 건축공학과 박사수료

*** 정회원, 전북대학교 공과대학 건축공학과 교수, 공학연구원 공업기술연구센터.

하는 요소들이 많아진다면 수치계산은 더욱 어렵게 된다.

위에서 언급된 수치적인 모델들과는 달리 Eurocode 3 (CEN, 1997)에서 제안하고 있는 Component method는 조인트의 강도와 변형에 대한 기초 자료를 알 수 있는 어떤 복잡한 조인트에도 적용될 수 있다.⁽²⁾ 본 논문에서는 보와 기둥의 접합부분을 완전히 용접시킨 강접 접합부와 모든 부분을 고력볼트에 의해 접합시킨 반강접 접합부를 갖는 모델을 대상으로 실제 실험체를 만들어 반복재하 실험을 실시하여 모멘트-회전각 곡선으로부터 보-기둥 조인트의 회전강성을 구하고 동일한 모델들에 대해서 Component method를 이용한 수치계산을 실시하여 철골 접합부의 회전강성을 구하는데 Component method의 효용성을 평가하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험체의 형태

실험체는 철골 접합부의 조인트 회전강성 연구에 많이 사용되는 모멘트 저항골조의 외부 보-기둥 조인트 부분을 선택하였다. 그림 1은 본 논문에서 사용된 실험체로 기둥부재의 단부는 변형형상에 따른 경계조건인 힌지로 모델링하였다. 실험체에 대한 접합부의 상세를 보면 접합부 전체를 완전히 용접시킨 강접 조인트 형식 (Fully Welding Joint : FW)과 용접을 전혀 사용하지 않고 앵글과 고력볼트 만을 이

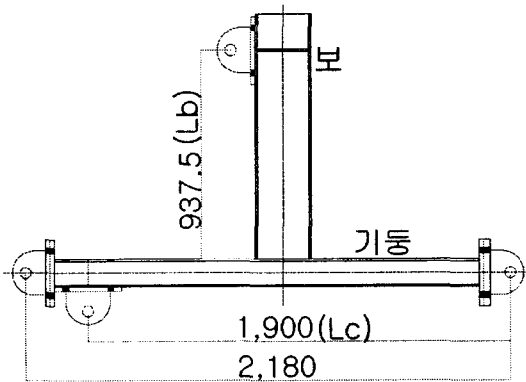


그림 1 실험체 형상 및 크기

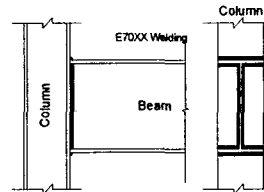


그림 2 FW 상세

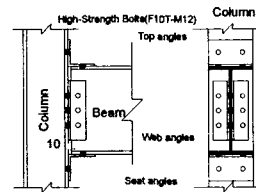


그림 3 TSD 상세

용한 반강접 조인트 형식 (Top and Seat with Double Web angles : TSD)으로 구분할 수 있다. 접합부 상세에 대해서는 그림 2과 3에서 자세히 보여주고 있다.

2.2 재료실험

본 연구에 사용된 보와 기둥 그리고 앵글 부재에 대해 각각 재료실험 (Coupon Test)을 실시하였다. 보와 기둥부재는 각각 H-250x125x6x9와 H-125x125x6.5x9으로 제작하였고 보의 상부와 하부에 부착되는 앵글은 L-75x75x6를 사용하였고 보의 웨브에 부착되는 앵글은 L-50x50x6이 사용되었다. 그림 4에서는 이들의 단면형상을 상세하게 보여주고 있다.

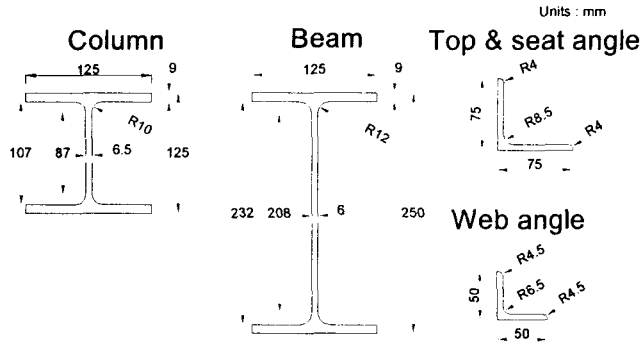


그림 4 사용된 부재의 단면상세

표 1 사용된 강재의 기계적 성질

실험체		항복강도 ($\sigma_y : tf/cm^2$)	인장강도 ($\sigma_u : tf/cm^2$)	항복비	연신율 (%)
보	플랜지	3.28	4.47	0.73	31.25
	웨브	3.22	4.23	0.76	32.50
기둥	플랜지	3.47	4.66	0.74	27.50
	웨브	3.33	4.61	0.72	33.75
상하부 앵글		3.07	4.32	0.72	32.50
웨브 앵글		3.50	4.71	0.74	28.75

재료실험부재의 수는 각 부분에 대해서 각각 3개씩 제작하였다. 결과 값들은 각 부분에 대해서 3개씩 실시한 값을 평균한 값으로 표 1에 나타내었다.

2.3 실험체 및 계측기 설치

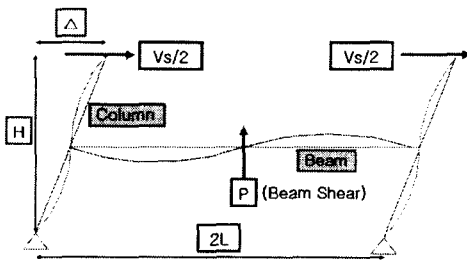


그림 5 횡 하중 작용시 변형형상

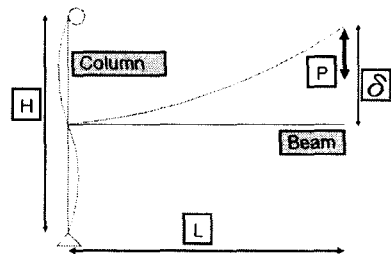


그림 6 단순화된 실험체 형상

실험체는 모멘트 저항골조 중에서 외부 조인트를 모델링한 것으로 그림 5에서 보여주는 것처럼 변형형상과 횡 하중의 작용 상황을 고려하여 그림 6과 같이 단순화된 개념으로 제작하였다.⁽³⁾

그림 7은 그림 6의 단순화된 개념에 따라 설치된 실험체와 계측기기들의 설치 상황을 보여주고 있다. 실험체 설치의 크게 5가지 부분으로 구분될 수 있다. : (1) 하중을 가력하는 부분, (2) 반력벽, (3) 실험체, (4) 가설블럭, (5) 데이터 수집.

본 실험에 사용된 계측기는 하중을 측정하기 위한 로드셀 (Load Cell)과 각 변위를 측정하기 위한 변위계 (LVDT)와 다이얼 게이지 (Dial gage), 극부적인 응력상황을 측정하기 위한 스트레인 게이지 (Strain gage)등을 사용하였다. 각 실험체들은 실험 중 변형을 유관으로 확인하기 위해서 백색 페이트를

칠하였고 모든 페인트가 건조된 것을 확인한 후 실험을 실시하였다.

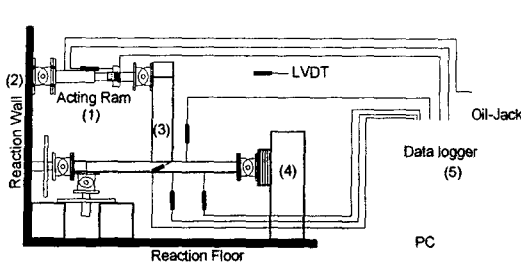


그림 7 실험체와 계측기 설치 상황

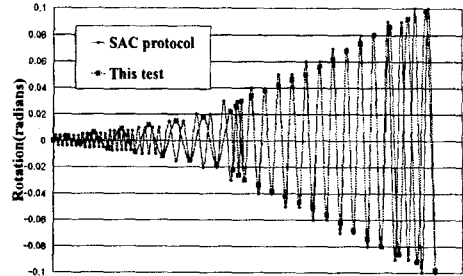


그림 8 Test program

2.4 실험 방법

기둥의 양단을 힌지로 이상화하고 보의 단부에서 유압잭을 이용하여 반복적인 횡 하중을 가력하였다. 본 실험에서는 하중의 재하속도가 느린 유사정적 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 test program은 그림 8에서 볼 수 있듯이 SAC에서 제안한 하중제어와 반복횟수는 다르지만 그 진폭에 대해서는 크게 차이가 없는 것을 알 수 있다. 하중제어에 대한 매개변수는 보와 기둥의 상대적인 회전각 (θ)으로 그림 6에서 보여주는 것처럼 변위 (δ)을 보 길이 (L)로 나눈 것으로 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\delta}{L}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 볼 수 있듯이 결국 제어변수는 변위 (δ)임을 알 수 있다. 실험 초기에는 변위의 간격을 적게 하였고 각 단계마다 변위를 증가하여 실험하였다. 실험은 접합부의 파괴를 확인한 후 종료하였다.

2.5 실험 결과

그림 9과 10에서는 용접 접합부 (FW)와 고력 볼트 접합부 (TSD)에 대해서 측정된 모멘트 (M)와 접합부의 회전각 (θ)에 대한 이력곡선과 그 이력곡선의 최고 값만을 연결한 skeleton 곡선을 보여주고 있다.

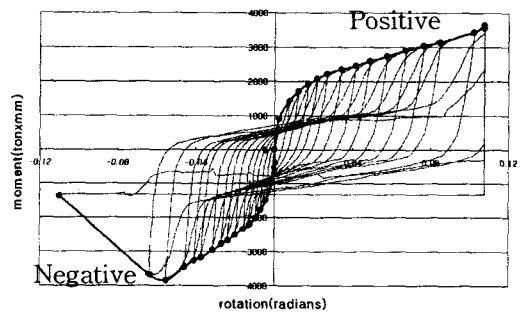
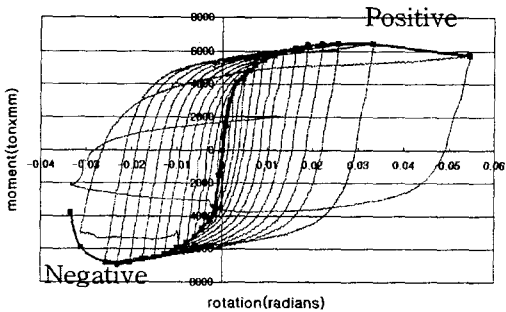


그림 9 용접 접합부 (FW)의 $M-\theta$ 곡선 그림 10 고력볼트 접합부 (TSD)의 $M-\theta$ 곡선

Wakabayashi (1986)에 의하면 이 skeleton 곡선은 많은 경우에서 단조하중 재하곡선과 일치한다고 한다.⁽⁴⁾ 또한 Luca & Zandonini (1991)의 실험과 Elnashai et al (1998)의 실험결과를 보면 단조하중 곡선과 반복재하 곡선의 skeleton 곡선이 유사하다는 것을 알 수가 있다.⁽⁵⁾

실험에서 얻은 접합부의 모멘트 회전각 곡선에서 초기강성은 항복점과 직접 연결한 시컨트 (Secant)

강성으로 구하였다. 시퀀트 강성값은 Positive와 Negative에서 얻은 강성값의 평균으로 구하였다. 이 값을 요약하면 표 2에서 보는 바와 같다.

표 2 초기강성에 대한 실험값

실험값	용접 접합부(FW)	고력볼트접합부(TSD)
초기강성($K_{\theta,exp}$) (ton · mm/rad)	1304134	181870

3. Component method에 의한 해석

3.1 용접 접합부 (FW)

Component method는 조인트를 구성하고 있는 구성요소들을 확인하고 이들의 하중과 변위에 의해 강성을 계산하고 이들을 조합하여 조인트의 초기강성을 계산하게 된다. 본 대상 조인트 모델에 대한 고려요소들을 보면 용접 접합부 (FW)에 대해서는 그림 12에서 잘 보여주고 있다.

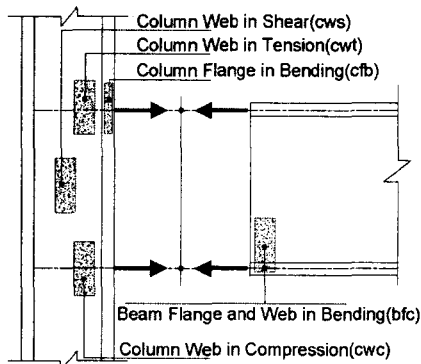


그림 12 용접 접합부 (FW)의 힘 강성 구성요소들

그림 12에서 전단에서 기둥웹 (cws), 인장에서 기둥웹 (cwt)와 압축에서 기둥웹 (cwc)는 하중과 변위 곡선에서 탄-소성 거동요소로 고려하고 휨에서 기둥플랜지 (cfb)와 휨에서 보 플랜지와 웹 (bfc)는 완전 소성요소로 고려한다. 따라서 조인트의 강성은 식 (2)에 의해서 구해질 수 있다.

$$K_{\theta} = \frac{h_t^2}{\frac{1}{K_{cws}} + \frac{1}{K_{cwc}} + \frac{1}{K_{cut}}} \quad (2)$$

Eurocode 3에서는 전단에서 기둥웹의 회전강성에 대해서 Krawinkler의 제안과는 약간 다르게 제안하고 있어 (식 (3)) 축 강성 K_{cws} 는 다음 식 (4)와 같다.

$$K_{cws} h_t^2 = \frac{E}{2(1+\nu)} \times \frac{A_{wc} h_t}{\beta} \quad (3)$$

$$K_{cws} = 0.38 \frac{EA_{vc}}{\beta h_t} \quad (4)$$

여기서, $A_{vc} = A_c - 2b_{fc}t_{fc} + (t_{wc} + 2r_c)t_{fc}$ (그림 13 참조) $A_c =$ 기둥의 전 단면적,

$\nu =$ 프와송 비 (=0.3), $\beta = 1 - \frac{h_t}{L_c}$, $L_c =$ 기둥의 길이

$b_{eff.cwc} =$ 압축에서 기둥웹의 유효나비 (그림 14참조), $a_c =$ 기둥의 용접 목두께

$k = t_{fc} + r_c$; rolled beam

$= t_{fc} + \sqrt{2}a_c$; welded beam

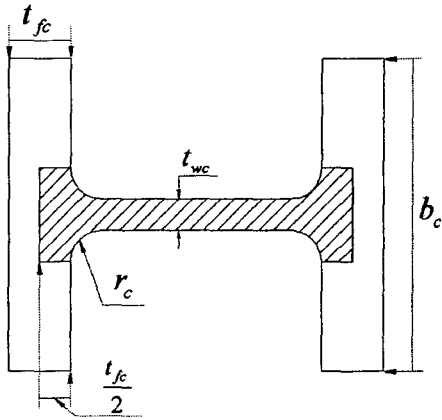


그림 13 전단에서 기둥웹의 유효면적

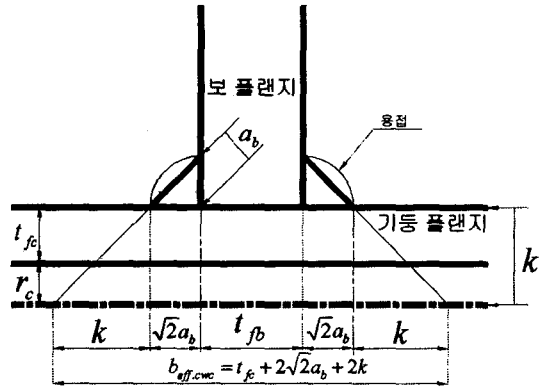


그림 14 압축에서 기둥웹의 유효나비

압축에서 기둥웹의 축강성은 식 (5)에 의해 계산될 수 있다. 식 (5)는 보 압축플랜지에 의해 전달되는 힘의 45도 전개를 고려하여 계산된 유효나비를 갖는다. 압축에서 기둥웹의 유효나비는 식 (6)에 의해 주어진다. (Falla, 1995)

$$K_{cwc} = E \frac{b_{eff.cwc} t_{wc}}{d_{wc}} \quad (5) \quad b_{eff.cwc} = t_{fb} + 1\sqrt{2}a_b + 2k \quad (6)$$

인장에서 기둥웹의 축강성 (K_{cut})은 압축에서 기둥웹의 축강성 (K_{cwc})과 동일하게 식(5)에 의해 계산될 수 있다. 따라서 용접 접합부 (FW)의 초기 회전강성은 식 (2)에 의해서 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$K_{\theta} = \frac{241^2}{\frac{1}{36} + \frac{1}{100.37} + \frac{1}{100.37}} \approx 1217528 \text{ ton} \cdot \text{mm/rad}$$

3.2 고력 볼트 접합부 (TSD)

고력 볼트 접합부 (TSD)는 용접 접합부 (FW)에 비해서 상당히 복잡한 형태를 가지고 있고 조인트 거동에 참여하는 구성요소들도 비교적 많은 편이다. 고력 볼트 접합부 (TSD)의 회전강성 계산을 위해 그림 4에 있는 접합부 상세를 고려하여 각 구성요소들을 확인해보면 표 3과 같다.

표 3 휨 강성 구성요소들

탄-소성 요소들	압축	기둥웨브(K_{cwc})
	인장	기둥플랜지 (K_{cut}), 볼트(K_b)
	휨	기둥플랜지(K_{cfb}), 상부앵글(K_{ta}), 웨브앵글(K_{wa}),
	전단	기둥웨브 (K_{cws}), 상부앵글볼트($K_{bs.ta}$), 하부앵글볼트($K_{bs.sa}$), 웨브앵글볼트($K_{bs.wa}$)
	지압	상부앵글(K_{tab}), 하부앵글(K_{sab}), 웨브앵글($K_{wa.b}$), 보 플랜지(K_{bfb}) 보 웨브(K_{bwb})

위 구성요소들은 탄-소성요소들로 휨 강성 계산에 참여하지만 인장에서 보 웨브와 상부앵글, 압축에서 보 플랜지, 웨브 그리고 하부앵글은 완전 소성요소로 고려되어 초기 휨 강성 계산에 고려되지 않는다. 위 구성요소들 중에 K_{cwc} , K_{cws} , K_{bs} , 그리고 K_{sab} 는 볼트 옆에 무관하지만 나머지는 볼트 옆을 고려하여 계산되어야만 한다. 다음으로 위에서 확인된 구성요소들에 대해서 각 볼트 옆에 대한 등가강성을 계산한다.

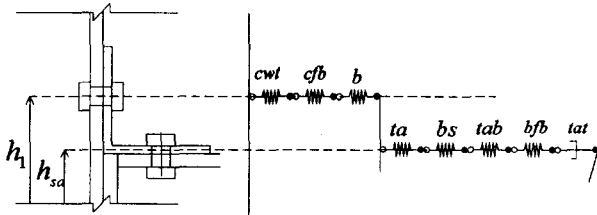


그림 15 상부앵글의 구성요소들

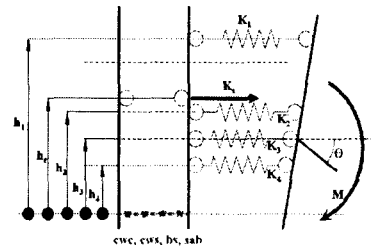


그림 16 전체 강성조합

첫 번째 볼트옆의 강성은 그림 15에서 볼 수 있듯이 보 회전중심으로부터 첫 번째 볼트 옆까지 거리와 회전중심에서 보 플랜지에 붙은 앵글 leg에 분포한 스프링까지 거리가 다르므로 위치의 요소들인 ta , bs , tat , bfb 를 첫 번째 볼트 옆 위치 으로 이동시켜야 한다. 이것의 이동은 식 (7)에 의해 이동시킬 수 있다.

$$K = K' \left(\frac{h_{sa}}{h_1} \right)^2 \quad (7)$$

여기서, K =이동 후 강성, K' =이동 전 강성, h_{sa} =압축 중심에서 이동 전 까지 거리

그림 16은 이동 후의 각 볼트 옆에서 강성과 이 볼트 옆들의 강성을 조합한 K_t 와 강성조합 K_t 가 위치한 위치인 h_t 를 보여주고 있다. 그림 16에서 K_i 는 i 번째 볼트옆의 강성으로 i 는 볼트의 옆을 나타낸다. 여기서 볼트 옆들의 강성조합인 K_t 와 이 강성조합과 압축 중심까지의 거리인 h_t 는 식 (8)과 (9)를 이용하여 각각 구할 수 있다.

$$K_t = \frac{\sum_{i=1}^4 K_i h_i}{h_t} \quad (8)$$

$$h_t = \frac{\sum_{i=1}^4 K_i h_i^2}{\sum_{i=1}^4 K_i h_i} \quad (9)$$

다음으로 식 (8)에서 구한 볼트 옆의 강성조합인 K_t 와 볼트 옆과 무관한 K_{cwc} , K_{cws} , K_{bs} , 그리고

고 K_{sab} 와의 조합으로 식 (10)에 의해서 최종 조인트의 회전강성을 구할 수 있다.

$$K_{\theta} = \frac{h_t^2}{\frac{1}{K_{cwc}} + \frac{1}{K_{cws}} + \frac{1}{K_{bs.sa}} + \frac{1}{K_{sab}} + \frac{1}{K_t}} \quad (10)$$

따라서 고려 볼트 접합부 (TSD)의 초기 회전강성은 식 (10)에 의해서 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$K_{\theta} = \frac{185^2}{\frac{1}{86.45} + \frac{1}{36} + \frac{1}{23} + \frac{1}{11.07} + \frac{1}{35.8}} \approx 170064 \text{ ton} \cdot \text{mm/rad}$$

4. 결 론

본 연구는 보-기둥 조인트에 대한 초기강성을 평가하는데 Component method를 적용하여 그 효용성을 평가 하였다. 이를 위하여 비교적 단순한 형태인 용접 접합부 (FW)와 그 형태가 비교적 복잡한 고력 볼트 접합부 (TSD)를 모델링하여 Component method를 적용해서 그 초기강성을 평가해보고 이의 신뢰성을 위해서 같은 접합부 상세를 갖는 실험체를 제작하여 얻은 실험값과 비교하여보았다. 실험값은 단계별 모멘트-회전각 곡선에서 최대지점을 연결한 Skeleton 곡선을 사용하였다. 이렇게 구한 곡선의 항복 지점을 직접 연결한 시컨트 (Secant) 강성으로 초기강성을 구하였다. 실험값과 해석값의 오차는 두 모델에서 약 7%정도의 오차가 있는 것으로 확인되었다. 따라서 대체적으로 Component method에 의해 계산된 해석값과 실험에 의해 얻은 값이 일치하고 있음을 알 수가 있다. 위 비교 결과를 보면 Eurocode 3 (CEN, 1997)에서 제안하고 있는 Component method를 보-기둥 조인트의 초기강성 계산에 적용해보면 복잡한 조인트 형태에 대해서도 구성요소들의 조합으로 그 초기강성을 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Romstad, K. M. and Subramanian, C., V., "Analysis of Frames with Partial Connection Rigidity", *J. of the Structural Division, ASCE*, Vol. 96, No. ST11, 1970, pp.2283 ~ 2300
2. Silva, L. S. Santiago, A. and Real, P. V., "Post-Limit Stiffness and Ductility of End-Plate Beam-to-Column Steel Joints", *Computers & Structures*, Vol. 80, 2002, pp.515 ~ 531
3. 이철호, "반복재하 시험을 통한 철골 모멘트 접합부의 내진거동 연구", 한국과학기술연구원, KOSEF, 과제번호:971-1209-032-1, 1998
4. Wakabayashi, M., *Design of Earthquake-Resistant Buildings*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1986, pp.73
5. Elnashai, A. S. Elghazouli, A. Y. and Denesh-Ashtiani, F. A., "Response of Semirigid Steel Frames to Cyclic and Earthquake Loads", *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 8, 1998, pp.857 ~ 867
6. Jaspart, J. P., "Design of Structural Joints in Building Frames", *Prog. Struct. Engng Mater.* Vol. 4, 2002, pp.18 ~ 34
7. Faella, C. Piluso, V. and Rizzano, G., *Structural Steel Semirigid Connections-Theory, Design and Software*, CRC Press LLC, New York, 2000, pp.84 ~ 287
8. 김영문, 양철민, "반복하중을 받는 볼트 접합된 외부 보-기둥 접합부의 성능", 대한건축학회 춘계학술발표대회, 2003, pp.38 ~ 42
9. 김영문, 김동환, 양철민, "볼트 접합된 반강접 보-기둥 조인트에 대한 Component Method의 적용", 대한건축학회 추계학술발표대회, 2003, pp.317 ~ 320