

강 · 반강 철골 접합부의 분류체계에 관한 연구

Classification system for rigid and semi-rigid connections

장 미¹⁾ · 이 상 섭²⁾ · 문 태 섭³⁾

Jang, Mee Lee, Sang Sup Moon, Tae Sup

요 약 : 골조의 보-기둥 접합부는 보통 강접합과 반강접합 또는 핀접합으로 구성된 분류체계에서 평가되어 진다. 대표적인 분류체계로는 EC3와 Bjorhovede 등에 의한 체계가 있다. 그런데 EC3의 경우 강접합과 반강접합 사이의 경계값은 접합부의 모멘트 강도와 강성 면에서 너무나 높은 제한선을 가지고 있고, Bjorhovede 등의 경우 강접합일 때의 거동을 표현하는데 부족한 강성을 갖을 수 있다는 문제점을 안고 있다. 본 연구에서는 스프링으로 모델링된 접합부를 갖는 비가새 1층 1경간의 골조를 대상으로 기둥에 대한 보의 강성비(ρ)와 보에 대한 접합부의 강성비(k)로 완전 강접 골조의 임계하중과 접합부를 갖는 골조의 임계하중을 비교하여, 수정된 분류체계를 제안한다. 제안된 분류체계가 EC3나 Bjorhovede 등과 비교할 때 실용적이고 실제적임을 실험 데이터를 이용해서 검증하였다.

ABSTRACT : The connections are classified as rigid, semi-rigid, or pinned. There are two classification systems, EC3 and Bjorhovede et al., representatively. The EC3 boundary between rigid and semi-rigid connections is in on the whole restrictive in term of the stiffness as well as the moment capacity of connections. The boundary specified by Bjorhovede et al. may not be sufficient to assure the behavior of rigid frames in some cases. In this study, it is proposed the new classification system for steel connection that depends on the reduction factor(R) of critical buckling load for unbraced semi-rigid frame expressed by the stiffness ratio(ρ) of beam to column and the stiffness ratio(k) of connection to beam. Finally, it is examined by experimental data that new classification criteria provides a practical boundary compared with the existing classifications.

핵 심 용 어 : 접합부의 분류, 강접, 반강접, 강성비, 임계좌굴하중

KEYWORDS : Classification, Rigid, Semi-rigid, Stiffness ratio, critical buckling load

1) 학생회원, 한양대학교 대학원 석사과정
2) 정회원, 한양대학교 대학원 박사과정
3) 정회원, 한양대학교 교수, 공학박사, 포항제철 석좌교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

철골골조의 해석이나 설계에 있어 전통적인 방법은 보와 기둥이 만나서 절점 즉, 접합부를 완전한 강접합 혹은 이상적인 힌지접합이라는 가정을 세우고 출발하였다. 접합부의 거동을 완전 강접합 또는 이상적인 힌지접합으로 가정한다면, 골조의 해석 및 설계는 매우 단순해 질 것이다. 또한, 결국 개발된 접합부를 실용하기 위해 적절한 해석이 이루어져야 하지만, 그 접합부가 속하는 영역을 정확히 결정할 수 없다면 해석에 있어 많은 오류를 발생시킬 것이다. 골조의 적절한 평가와 해석을 하기 위해 먼저 독립된 접합부에 대한 분류 체계를 세울 필요가 있다. 따라서 기존에 세워져 있는 Eurocode 3(이하 EC3)에 의한 분류와 Bjorhovde, Brozzetti와 Colson(이하 Bjorhovde)에 의한 분류에 대해 먼저 살펴보고 비가새 골조에 대한 강접과 반강접의 경계를 새롭게 제안하고자 한다.

2. 접합부의 분류

2.1 기존 접합부의 분류체계

2.1.1 AISC에 의한 분류

▷ ASD 기준(1989)

1) Type 1

· 접합되는 부재사이의 최초의 기하학적 각도가 유지될 만큼 충분한 강성을 보유하는 강접합부.
(완전 용접접합부, 확장 엔드플레이트 접합부)

2) Type 2

· 접합부는 구조물이 수직하중을 받을 때 작은 보나 큰보의 접합부가 휨모멘트를 제외하고 단지 수직 전단력만을 기둥에 전달할 수 있으며, 회전이 자유로운 공칭 핀접합부.
(헤드플레이트 접합부, 싱글웹 접합부, 더블웹 접합부)

3) Type 3

· 접합부는 수직 전단력을 전달할 수 있고, 또

한 약간의 모멘트를 전달할 수 있는 능력을 가진 부분 구속 접합부.

(T-스터브 접합부, 엔드플레이트 접합부, 탑 & 시트앵글 접합부)

▷ LRFD 기준(1981)

1) FR (fully restrained : 완전구속)

· 접합되는 부재 사이의 최초의 각도를 유지할 수 있을 만큼 충분한 강성을 가지고 있는 접합부를 가지는 경우로 강접합 골조라고 한다.

2) PR (partially restrained : 부분구속)

· 접합되는 부재 사이의 최초의 각도를 유지하기에 불충분한 강성을 가지는 접합부를 가진다고 가정한다.

2.1.2 EC3에 의한 분류법

유럽의 철골 구조물 설계 기준인 EC3(1990)에서는 접합부의 분류를 강성과 강도를 기준으로 각각 3가지로 규정하고 있다.

▷ 강성에 의한 분류

- 1) 공칭 핀접합부(nominally pinned connections)
- 2) 강접합부(rigid connections)
- 3) 반강접합부(semi-rigid connections)

▷ 강도에 의한 분류

- 1) 공칭핀접합부(nominally pinned connections)
- 2) 전강도접합부(full-strength connections)
- 3) 부분강도접합부(partial-strength connections)

EC3은 가새 골조와 비가새 골조에서 접합부에 대한 성능 요구값이 다르다. EC3에서는 접합부의 분류를 위해 $\bar{\theta} = \theta / \theta_p$, $\bar{m} = M / M_p$ 인 무차원 변수를 이용한다. 여기서 θ_p 는 $M_p / (EI_b / L_b)$ 로 정의되었고, I_b 와 L_b 는 각각 보의 단면 2차 모멘트와 길이를 의미하며 M_p 는 보의 전소성모멘트이다.

강성에 의한 분류

비가새 골조에 대해 강접과 반강접의 경계

$$\bar{m} \leq \frac{2}{3} \Rightarrow \bar{m} = 25\bar{\theta} \quad (1a)$$

$$\frac{2}{3} < \bar{m} \leq 1.0 \Rightarrow \bar{m} = \frac{25\bar{\theta} + 4}{7} \quad (1b)$$

가새 골조에 대해 강접과 반강접의 경계

$$\bar{m} \leq \frac{2}{3} \Rightarrow \bar{m} = 8\bar{\theta} \quad (2a)$$

$$\frac{2}{3} < \bar{m} \leq 1.0 \Rightarrow \bar{m} = \frac{20\bar{\theta} + 3}{7} \quad (2b)$$

공칭 편접합의 범위

$$k_i \leq \frac{EI_b}{2L_b} \quad (3)$$

강도에 의한 분류

보-기둥 접합부는 모멘트 저항에 관해는 공칭 편, 전강도, 부분강도로 분류되어질 수 있다.

$$M \leq \frac{M_p}{4} \Rightarrow \text{공칭편접합} \quad (4a)$$

$$M > M_p \Rightarrow \text{전강도접합} \quad (4b)$$

$$M_p/4 < M \leq M_p \Rightarrow \text{부분강도접합} \quad (4c)$$

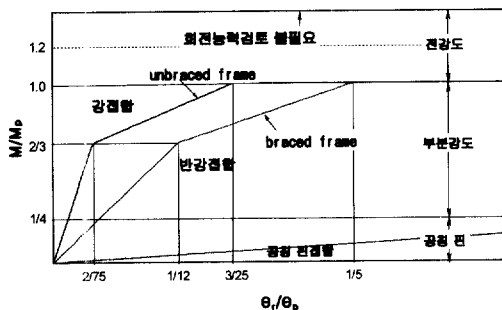


그림 1. EC3에 의한 접합부의 분류 방법

2.1.3 Bjorhovde에 의한 분류법

Bjorhovde는 접합부의 분류를 보 성분에 대한 어떤 기준길이(reference length)에 기초하여 다양한 접합부 실험을 통해 얻어진 데이터베이스를 이용하여 실용적인 측면에서 접합부 분류 체계를 세우고 있다.

기준길이 개념은 접합부의 회전, 보의 곡률, 모멘트-회전각 곡선의 초기 기울기와 보 강성을 상관시키는데 기초를 두고 있기 때문에 사용한계상태에 관해서 의미를 갖는다. 보의 길이는 보의 초기강성이 접합부의 초기강성에 일치하거나, k_{bi} (EI_b/L_b)가 접합부의 초기강성(k_i)와 일치할 수 있도록 선택한다. 그런데 접합부 강성은 다양하기 때문에 다른 접합부 거동에 대해서 다른 기준길이를 사용하는 것이 필요할 것이지만, 분류 체계를 먼저 세우기 위해 보의 길이를 기준으로 접합부를 분류하게 되었다. 이것을 그림 2에 나타내었다. 여기서 3개의 보 선도는 세 개의 형태의 보 초기강성과 상호 관련이 있고 각각 대응하는 보의 길이를 보의 춤(d_b)으로 함께 표시하였다.

강접합과 반강접합의 경계와 반강접합과 힌지접합 사이의 경계를 나타내기 위해 각각 $2d_b$ 와 $10d_b$ 의 기준길이를 제안하였다

-강접합 :

$$\text{강도측면에서, } \bar{m} \geq 0.7 \quad (5a)$$

$$\text{강성측면에서, } \bar{m} \geq 2.5\bar{\theta} \quad (5b)$$

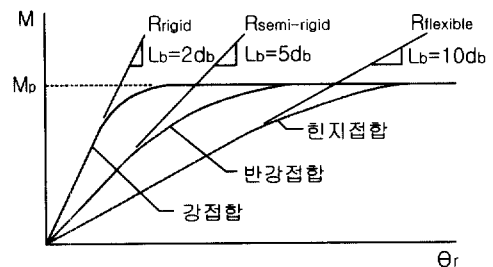


그림 2. 기준길이에 따른 접합부 거동

-반강접합 :

$$\text{강도측면에서, } 0.7 > \bar{m} > 0.2 \quad (6a)$$

$$\text{강성측면에서, } 2.5\bar{\theta} > \bar{m} > 0.5\bar{\theta} \quad (6b)$$

-힌지접합 :

$$\text{강도측면에, } \bar{m} < 0.2 \quad (7a)$$

$$\text{강성측면에서, } \bar{m} \leq 0.5\bar{\theta} \quad (7b)$$

$$\text{여기서 } \bar{m} = \frac{M}{M_p}, \bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_p}$$

$$\theta_p = M_p / (EI_b / 5d_b)$$

-회전능력 :

$$\bar{m} = \frac{5.4 - 2\bar{\theta}}{3} \quad (8)$$

2.2 기존의 분류방법체계의 검토

접합부 분류의 기본이 되는 항목은 초기강성이며, 두 분류법에서 채택하고 있는 반강접합과 강접합의 경계의 초기강성을 식(1)와 식(6)과 같이 보의 강성으로 표현하고 있다. 초기강성은 사용한 계상태(serviceability limit state)에서 골조의 거동에 큰 영향을 미치므로 그 경계를 이루는 적절한 초기강성은 부재 및 접합부가 탄성 거동이 보장되는 매우 작은 하중 범위 내에서 접합부의

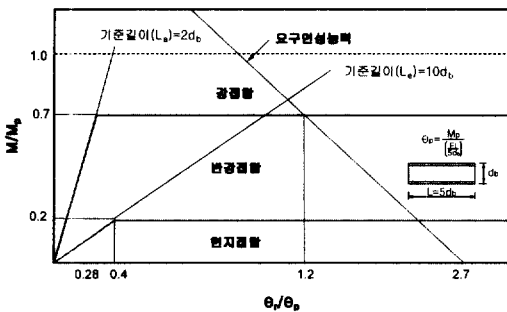


그림 3. Bjorhovde에 의한 접합부의 분류 방법

거동을 정확히 반영하여 해석을 실시하면 얻을 수 있을 것이다.

Bjorhovde가 제안한 초기강성 경계는 몇몇 경우에 강접합 골조의 거동을 확신하기에는 불충분하다고 보고되고 있다.

EC3의 경우 반(半)실험적 분류법인 Bjorhovde보다도 해석적인 결과를 이용한 분류를 제시하고 있어 강접과 반강접의 경계를 이루는 초기강성 값이 너무 엄격하여 전통적으로 강접으로 분류되어 온 대다수 접합부 형식도 반강접 영역에 속하게 된다는 결과를 보이고 있다.

강접함으로 분류되기 위한 접합부의 최대 모멘트로 Bjorhovde는 접합된 보의 전소성모멘트의 70%를 요구하고 있다. 70%로 감소된 모멘트 능력에 기인하여 Bjorhovde가 제안한 경계는 경우에 따라 강접합 골조로 보기 어렵다는 지적이 또한 되고 있다.

EC3의 경우 극한한계상태(ultimate limit state)에서 강접함으로 분류되기 위해 접합부의 모멘트는 접합된 보의 전소성모멘트의 100%이상을 상회하도록 규정하고 있다. 즉 보의 전소성모멘트에 비해 접합부의 최대 모멘트가 더 크다면 골조의 전체 거동은 완전 강접인 경우의 거동을 보이게 된다는 의미이다.

강도와 강성 외에 접합부는 충분한 회전능력(rotational capacity)에 대해서도 검토되어야 한다. 소요회전능력은 반강접합 골조가 최대내력에 이를 때까지 진행된 접합부의 회전변형으로 정의된다. 그러므로 접합부 종류마다 소요회전능력이 달라지며 임의의 접합부에 대해 결정하는 일은 매우 어려운 일이 될 것이다. 보-기둥 접합부의 모멘트가 보의 전소성모멘트보다 1.2배 큰 경우에 소성힌지가 보에서 형성될 가능성이 있어 EC3에서는 변형능력을 검토할 필요는 없다고 규정하고 있지만 소성힌지가 접합부에 형성되는 경우 모멘트 재분배가 구조물의 전체적인 분석에서 고려되는지 검토할 필요가 있다.

이상과 같이 지적한 문제점을 바탕으로 본 연구

에서는 접합부 분류방법을 새롭게 제시해 보고자 한다. 우선 초기강성에 대한 연구로 강성행렬을 이용하여 골조의 탄성해석을 통해 반강접합과 강접합을 구분 짓는 경계값을 제안하고자 한다.

3. 강·반강접 경계의 제안

3.1 수치해석을 통한 수평변위의 평가

접합부 분류방법을 새롭게 제시하기 위해 1층 1경간골조를 대상으로 접합부를 완전 강접합과 반강접합으로 가정하여 해석을 한다.

엔드플레이트 접합부는 모멘트 접합이 필요할 때 보와 기둥을 접합하는 가장 널리 사용되는 형식이다. 확장엔드플레이트 접합부는 AISC-LRFD 규준에서 Type PR보다는 Type FR로 고려한다고 했다(ASCE, 1993). 그래서 확장엔드플레이트 접합부는 보의 단부에서 기둥으로 모멘트를 전달하는 곳에 널리 이용된다.

해석에 사용된 확장엔드플레이트 접합부의 데이터는 Kishi와 Chen에 의해 수집·정리되었고, 최근에 Hasan에 의해 보완된 것이다. 해석에 사용된 접합부는 60개이며, 인용한 데이터에 대한 사항은 참조 [5]에 자세히 기술되어있다.

사용된 접합부의 모멘트-상대회전각관계를 정확하게 해석에 반영하기 위해 다소 복잡하지만, 가장 정확히 접합부의 모멘트-회전각을 표현 할 수 있는 Kishi와 Chen에 의해 제안된 수정지수모델(modified exponential model)을 해석에 사용하였다. 모델은 다음과 같다.

$$M = M_0 + \sum_{j=1}^m A_j \left[1 - \exp\left(-\frac{|\theta_j|}{2j\alpha}\right) \right] + \sum_{k=1}^n R_k (|\theta_j| - |\theta_k|) H[|\theta_j| - |\theta_k|] \quad (9)$$

M_0 : 초기 접합부 모멘트, α : 스케일 계수

C_j, D_k : 곡선 근사 변수

θ_k : k번째 선형 시작 회전각

$H[\theta]$: Heaviside 단계함수

해석에 사용된 데이터의 초기강성과 변위값은 데이터 각각을 확인하여, 직접 계산하는 방법을 채택하였다.

해석 대상골조

EC3의 접합부 분류와 비교를 하기 위해 EC3에서 사용된 1층 1경간 골조의 단순한 골조를 선택하였다. 이 골조는 Miyashita와 Goto이 EC3의 타당성을 검증하기 위해 발표한 논문에 사용된 것 중에서 선택했다.

EC3에서는 가새골조와 비가새골조를 둘 다 비교하였으나, 가새골조는 보통 강도면에서 평가가 이루어지며, 또한 대부분 이루어지는 접합부의 실험이 비가새골조로 이루어지기 때문에 비가새골조만을 선택했다.

반강접합 골조에서 절점의 변위는 비선형강성을 갖는 스프링으로 모델링된 접합부를 사용하여 해석되어진다. 반면에 강접합골조의 모멘트와 변위를 계산할 때는 스프링 대신 완전 강접합부로 모델링한다. 해석을 통해서 얻어진 반강접합골조의 변위를 강접합골조의 변위로 나누어 표준화한다.

표준화 변위

$$D_{nr} = \frac{\text{확장엔드플레이트접합부에 대한 변위}}{\text{완전강접합부에 대한 변위}}$$

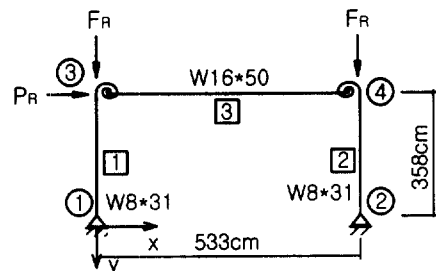


그림 4. 해석 대상골조

표 1. 부재의 구조적 특성

종류	항복강도	탄성계수	단면적	단면2차모멘트	단면계수
	f_y (tf/cm ²)	E (tf/cm ²)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	S (cm ³)
W16×50	2.4	2100	94.84	27430	1327.35
W8×31	2.4	2100	59.30	4578	450.64

표 2. 가정 하중의 크기

종류 위치	수직하중(kgf)	수평하중(kgf)
	지붕	85392

해석 결과

아래 그림 5에서 알 수 있듯이 초기강성이 증가할수록 표준화 변위는 1에 수렴하듯이 수평이 된다. 수평이 시작되는 부분이 D_{nr} 이 1.0보다는 크고 1.1아래의 범위에서 시작된다.

확장엔드플레이트 접합부를 사용한 골조의 변위는 강접합골조로 평가받기 위해서는 변위 차이가 최대 10%까지 허용할 수 있다는 것이다.

3.2 단순 골조의 수평 강성도

앞서 해석적 방법으로 찾아낸 강접합과 반강접합의 횡변위에 대한 차이로 제시한 10%를 이론적 방법을 통해 확인해 보고자 한다. 이를 위해 스프링으로 모델링된 접합부를 갖는 그림 6에 나타난 비가새 1경간 1층의 골조를 대상으로 하였다. 골조의 형태는 대칭으로 절반만 고려하기로 하고 보와 접합부의 강성을 고려하여 그림 6(c)와 같이 기둥의 상층 지지부를 보와 접합부의 회전 강성이 조합된 새로운 스프링으로 탄성 지지된 형태로 다시 단순화시킬 수 있다.

사용된 ρ 는 기둥에 대한 보의 강성비를 K 는 보에 대한 접합부의 강성비를 의미한다.

$$\rho = \frac{EI_b I_c}{EI_c I_b} \quad K = \frac{k_{co} L_b}{EI_b} \quad (10)$$

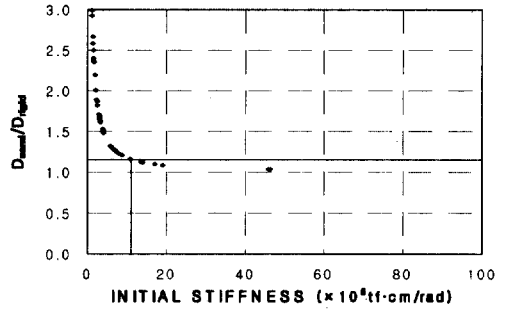


그림 5. 초기강성-표준화 변위 관계

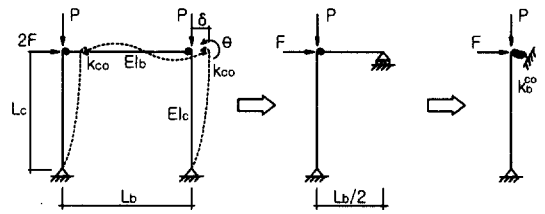


그림 6. 1경간 1층 골조의 치환

- 여기서 k_{co} : 접합부의 회전강성
- EI_b/L_b : 보의 휨강성
- EI_c/L_c : 기둥의 휨강성

이 때 보와 접합부의 조합 강성인 K_b^∞ 는 단순화된 기둥 상단에 단위 모멘트를 가했을 때 발생하는 회전각의 역수로 식(11)같이 계산된다.

$$K_b^\infty = \frac{6EI_b}{L_b} \frac{K}{K+6} = \frac{6EI_b^\infty}{L_b} \quad (11)$$

여기서, $I_b^\infty = I_b \frac{K}{K+6}$

이 단순화된 기둥에 대해 상층 지지부의 θ 와 δ 에 대한 강성도 행렬을 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$K_{11} = \frac{3EI_c}{L_c} + K_b^{\infty}$$

여기서 $K_{12} = K_{21} = -\frac{3EI_c}{L_c^2}$

$$K_{22} = \frac{3EI_c}{L_c^3}$$

계산의 편의를 위해 반강접합부의 회전강성을 흡수한 보의 강성을 기둥의 강성으로 나누어 무차원화한 ρ^{∞} 와 회전각 θ 와 변위 δ 도 다음과 같이 각각 무차원화하여 위의 행렬을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 3+6\rho^{\infty} & -3 \\ -3 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta^{\infty} \\ \delta^{\infty} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 $\rho^{\infty} = \frac{EI_b^{\infty}/L_b}{EI_c/L_c} = \rho \frac{K}{K+6}$

$$\theta^{\infty} = \theta \frac{EI_c}{FL_c^2}, \quad \delta^{\infty} = \delta \frac{EI_c}{FL_c^3}$$

F/δ 로 정의되는 골조의 수평강성을 K_{lat} 라 하면 반강접 골조의 경우 아래와 같이 평가할 수 있을 것이다.

$$K_{lat}^s = \frac{3EI_c}{L_c^3} \frac{2\rho K}{2\rho K + K + 6} \quad (14)$$

강접합 골조의 경우 $K \rightarrow \infty$ 이면, 얻을 수 있으므로

$$K_{lat}^r = \frac{3EI_c}{L_c^3} \frac{2\rho}{2\rho + 1} \quad (15)$$

이 두 경우의 골조의 수평강성을 비교하기 위해 강접합인 경우로 반강접인 경우를 나누어 ρ 와 K 의 영향을 살펴보고자 한다.

$$K_{lat}^s / K_{lat}^r = \frac{K(2\rho + 1) + 6}{K(2\rho + 1)} \quad (16)$$

EC3에서 광범위한 검토를 하기 위해 보에 대한 접합부의 회전강성비인 K 를 25로 두고, 기둥에 대한 보의 휨강성비인 ρ 를 0.1에서 10까지 변화시키면, 수평강성비는 1.11에서 1.01까지 변화한다. 그런데 ρ 가 0.1인 경우는 비현실적인 값으로 EC3에서도 ρ 값을 1.4이상인 범위에서만 분류체계가 타당성을 설명하고 있다.

만약 K 값이 15인 경우 ρ 의 동일 범위에서 수평강성비는 1.19에서 1.02까지 분포하게 된다. 즉 K 를 15까지 낮추게된다면 반강접합 골조는 강접합 골조에 비해 수평변위가 19%정도 차이를 보이게 된다는 의미이다. 그러나 EC3에서 ρ 에 대한 현실성을 부여하였듯이 본 연구에서도 ρ 의 값을 1이상인 범위에 대해서만 고려하면 수평강성 즉 수평변위가 2%에서 13%정도의 차이를 보이게 된다.

$K=15$, $\rho > 1.0$ 이라면 결국 해석 평가에서 얻은 비가새 골조에서 강접과 반강접의 초기강성 경계를 얻을 수 있는 수평변위 차이가 10%이내 이어야 한다는 결과와 같아진다.

3.3 수평강성을 통한 골조의 임계하중 평가

그림 6(c)의 기둥의 임계하중은 이차효과 등을

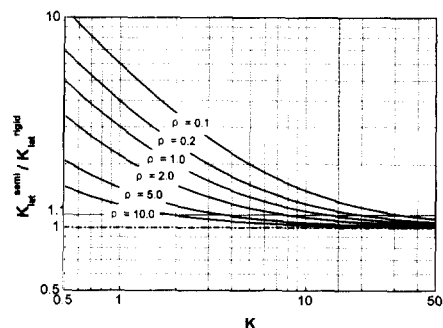


그림 7. 반강접합부를 고려한 골조의 수평강성비

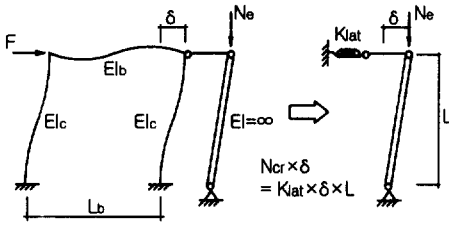


그림 8. Shanley의 모델을 이용한 기둥의 임계하중

고려하여 계산하는 것이 원칙이나 계산의 편의상 수평강성만을 이용하여 간단히 얻을 수 있는 그림 8과 같은 Shanley의 모델을 이용하여 구할 수 있을 것이다.

일반적으로 수평변위와 수평강성을 이용하여 끝조의 임계하중은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N_e = \beta \frac{F}{\delta} L \quad (17)$$

Stevens(1967)와 Horne(1975)는 β 를 $\pi^2/12$ 나 0.9로 가정하였는데 0.9를 사용하면 다소 과소평가가 될 가능성이 있음을 밝히 있다. 본 연구에서는 $\pi^2/12$ 를 선택하였다.

따라서 힌지로 지지된 1경간 1층 끝조에서 기둥의 좌굴하중은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N_e = \beta \frac{EI_c}{L_c^2} \frac{1}{\delta^{\infty}} = \frac{\pi^2}{12} \frac{EI_c}{L_c^2} \frac{6\rho^{\infty}}{1+2\rho^{\infty}} \quad (18)$$

식(18)을 이용하여 강접합일 경우와 반강접합일 경우에 대해 각각 나누어 쓰면 식(19a)와 식(19b)과 같다.

$$N_e^s = \frac{\pi^2}{12} \frac{EI_c}{L_c^2} \frac{6\rho^{\infty}}{1+2\rho^{\infty}} \quad (19a)$$

$$N_e^r = \frac{\pi^2}{12} \frac{EI_c}{L_c^2} \frac{6\rho}{1+2\rho} \quad (19b)$$

EC3에서는 강접과 반강접의 좌굴하중의 차이가 5%이고 K 는 25라는 가정하에 끝조의 임계하중이 Merchant-Rankine 공식을 이용하여 계산하면 역시 그 차이가 5% 이내가 됨을 보이고 있다. 본 연구에서는 좌굴하중의 차이를 10%까지 확대시키고 K 를 15로 낮추어 똑같이 계산하여 보고자 한다.

먼저 Merchant-Rankine 공식에 대입하기 위해 좌굴하중과 소성붕괴하중을 다음과 같이 가정한다. 여기서 N_{pl} 은 소성붕괴하중을 의미하며 X 는 상수이다.

$$N_e^s = 0.90N_e^r \quad (20a)$$

$$N_e^r = XN_{pl} \quad (20b)$$

따라서 강접합과 반강접합 끝조의 임계하중은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N_{cr}^r = \left(\frac{1}{N_{pl}} + \frac{1}{N_e^r} \right)^{-1} = \frac{X}{X+1} N_{pl} \quad (21)$$

$$N_{cr}^s = \left(\frac{1}{N_{pl}} + \frac{1}{0.90XN_{pl}} \right)^{-1} = \frac{0.90X}{0.90X+1} N_{pl} \quad (22)$$

결국 강접과 반강접 끝조의 임계하중의 차이를 μ 라 하면

$$\mu = \frac{N_{cr}^r - N_{cr}^s}{N_{cr}^r} \cdot 100 (\%) \quad (23)$$

기둥의 좌굴하중과 끝조의 소성붕괴하중이 같은 경우인 $X=1$ 일 때 μ 는 5.26%이며, $X=2$ 가 되면 μ 는 3.57%으로 떨어지게 된다. 즉 보-기둥접합부의 반강접의 영향 때문에 감소한 파괴하중을 고려하더라도 EC3에서 제안한 $K=25$ 는 너무 엄격한 초기강성 경계값임을 알 수 있다.

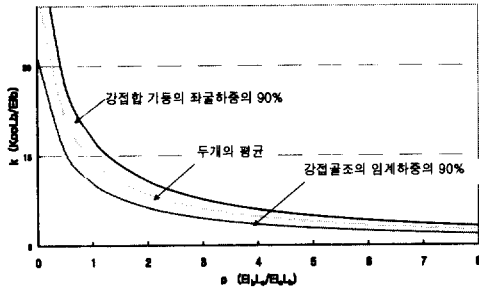


그림 9. 보-기둥 강성비(ρ)와 보-접합부 강성비(K)의 관계

식(19a)와 (19b)의 기둥의 좌굴하중 차이를 10%, 식(23)에서 강접골조의 임계하중의 차이를 10%로 각각 확대 해석하여, ρ 와 K 의 관계를 그림 9에 나타내었다.

각각의 경우는 이차효과 등을 고려하지 못한 결과이지만 두 경우의 평균을 계산한다면 $\rho=1$ 일 때 K 는 15가 됨을 알 수 있다. 즉 비가새 골조에서 보-기둥 접합부의 회전강성이 $K=15$ 라도 강접으로 고려하기에 충분하다는 의미이다.

3.4 골조의 임계하중의 감소계수(R) 평가

접합부의 모든 관계는 강접에 대해, 접합부의 상대회전강성(K)로 나타내어지는 감소계수(R)를 곱함으로써 나타낼 수 있다

모든 경우 R 은 K 값이 변함에 따라 0에서 1까지 변한다. K 가 ∞ 이면, R 은 1이 되어서 강접임을 의미한다. 보와 기둥의 강성비와 접합부의 상대회전각에 의한 관계에서 R 을 구할 수 있다.

EC3에서 평가된 단순골조를 (힌지로 지지된 1층 1경간) 모델로 해서, 접합부의 강성을 평가하기 위해 R 을 구하여, 표 3에 나타내었다.

$$P = R \frac{\pi^2 EI_c}{4 L_c^2} \quad (24)$$

$$R = \frac{1}{1 + \frac{I_c L_b \pi^2}{I_b L_c 24} \frac{K+6}{K}} \quad (25)$$

표 3. 단순골조의 감소 계수

K	25	24	23	22	21	20	19	18	15
$1/\rho$									
0.1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98
0.5	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94
0.7	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92
1	0.93	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.91	0.90
1.5	0.92	0.91	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.87
10	0.84	0.83	0.83	0.82	0.81	0.81	0.80	0.79	0.76

K 는 25라는 가정하에서, EC3에서는 ρ 가 1.4 이상인 범위에서, 감소계수 R 은 0.95이다.

즉, 강접과 반강접의 좌굴하중의 차이가 5%임을 의미한다.

임계하중의 범위를 10%정도까지 확대 해석하여, ρ 가 1이상에서 감소계수가 0.90이상일 때, K 는 15임을 알 수 있다.

즉 앞에서 살펴본 결과와 동일하게 임계하중을 10%로 확대하면, 접합부의 상대회전각(K)가 15임을 알 수 있다.

따라서, 비가새골조에서 강접합과 반강접합의 새로운 경계를 다음과 같이 제안한다.

$$\bar{m} = K\bar{\theta}, \quad \bar{\theta} \leq \frac{2}{3K} \quad (26)$$

$$\bar{m} = \frac{32\bar{\theta} + 3}{7}, \quad \frac{2}{3K} \leq \bar{\theta} \leq 0.12 \quad (27)$$

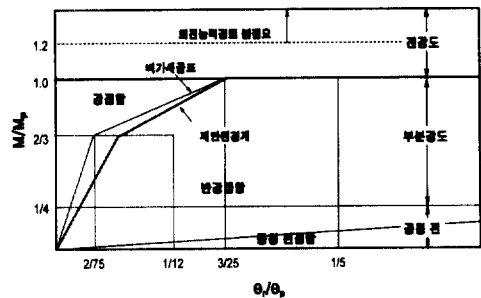


그림 10. 제안된 분류방법

4. 제안 분류체계에 실험결과와의 적용

실험체는 길이변수를 지닌 수직스티프너와 수평스티프너로 구성된 T-스티프너 보강 접합부이다. T-스티프너는 보플랜지에 연결되는 수평스티프너와 기둥플랜지에 연결되는 수직스티프너를 맞댐용 접을 하고 보플랜지를 기둥플랜지에 용접한 후, 수평스티프너를 보플랜지와 K형 개선 후 맞댐용 접하였다.

본 실험체는 이미 1차 실험이 진행되었고, 접합부의 이력거동을 확인·분석결과 강점에 매우 가까운 접합부로 판명되어 보고되었다.

하지만 EC3의 분류체계를 적용하게 되면 반강접합부 영역에 속하게 되는 결과를 보이게 된다.

비교 결과 T형 스티프너 보강 접합부는 제안 분류체계에 의해 6개의 실험체 가운데 5개 실험체가 강접합 영역에 속하는 결과를 보였다.

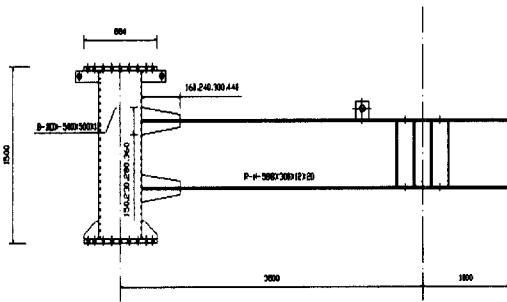
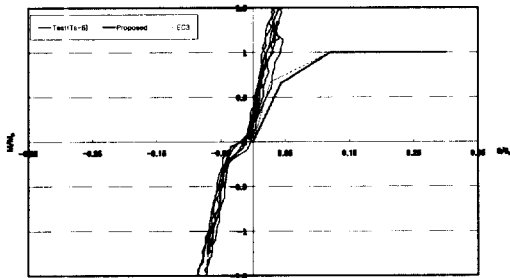
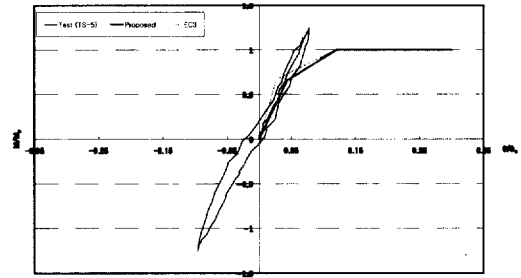


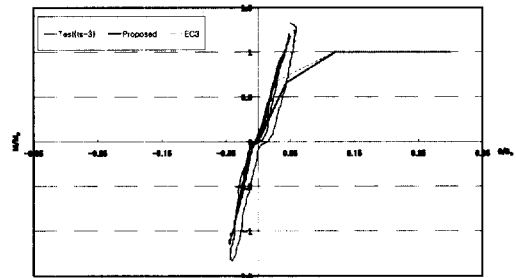
그림 11. T-스티프너 보강 접합부 실험체의 형상 및 치수



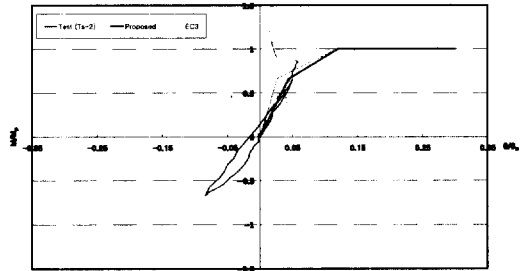
Ts-6. T-스티프너 보강 접합부에 제안 분류체계의 적용



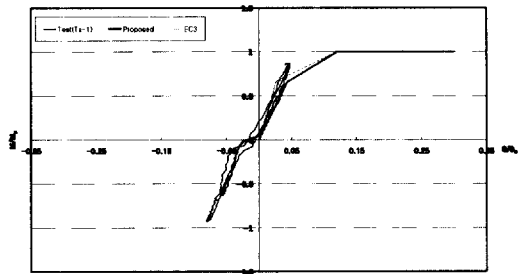
Ts-5. T-스티프너 보강 접합부에 제안 분류체계의 적용



Ts-3. T-스티프너 보강 접합부에 제안 분류체계의 적용



Ts-2. T-스티프너 보강 접합부에 제안 분류체계의 적용



Ts-1. T-스티프너 보강 접합부에 제안 분류체계의 적용

5. 결 론

반강접합부의 사용한계상태를 고려해서 강접과 반강접의 경계를 제안하는 이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 골조의 탄성해석과 이론적 접근법을 통해 초기강성 부분이 강접합으로 분류되기 위해 탄성 거동의 차이가 10%이내, 골조의 임계하중 역시 10%까지 허용해도 좋을 것이다.
- (2) 반강접골조의 임계하중을 10%까지 확대한다면 보에 대한 접합부의 회전강성비(K)를 15까지 낮출 수 있다.
- (3) 다음과 같은 새로운 강접합의 반강접의 경계를 제안한다.

$$\bar{m} = K \bar{\theta} \quad \bar{\theta} \leq \frac{2}{3K}$$

$$\bar{m} = \frac{32 \bar{\theta} + 3}{7} \quad \frac{2}{3K} \leq \bar{\theta} \leq 0.12$$

여기서, $\bar{m} = M/M_p$, $\bar{\theta} = \theta_r/\theta_p$
 $\theta_p = M_p/(EI_b/L_b)$

감사의 글

본 연구는 한양대학교 교내연구비와 한양대학교 초대형 연구센터(STRESS) 및 포항제철(주)의 석좌교수 기금으로 지원으로 수행한 것임.

참 고 문 헌

1. C.Faella, V.Piluso, G.Rizzano Structural Steel Semirigid Connections Theory, Design and Software
2. Eurocode 3: Design of steel structures part 1.1 General rules for buildings, DD ENV 1993-1-1: 1992
3. Edited R. Narayanan, Structural Connections Stability and Strength, Elsevier Applied Science London and New York
4. European Steel Design Education Programme ESDEP Structural Systems: Building III Group 14 Volume 22
5. W.F.Chen, Yoshiaki Goto, J.Y Richard Liew Stability Design of Semi-Rigid Frames
6. W.F.Chen, E.M.Lui. Structural Stability Theory and Implementation. Elsevier
7. 이진우, T-스티프너 보강 CFT 기둥-H형강 보 실대형 접합부 이력 거동, 2001년 춘계 학술발표대회 논문집, 대한건축학회

(접수일자 : 2001년 5월 17일)