

# 로그 모델을 사용한 반강접 철골 골조의 탄성 해석

## Elastic Analysis of Steel Frame with Semi-rigid Connections using the Log Model

이 상 섭<sup>1)</sup> · 문 태 섭<sup>2)</sup>  
*Lee, Sang Sup Moon, Tae Sup*

**요 약 :** 철골 구조물의 접합부는 전통적으로 강접 혹은 단순 접합으로 이상화하여 설계되어 왔으나 많은 연구를 통해 이러한 모델링이 불합리할 수 있음이 밝혀져 왔다. 골조의 정확한 해석을 위해 부재의 2차효과( $P-\delta$  효과) 및 구조물 전체의 2차효과( $P-\Delta$  효과)의 고려가 필수적이고, 무엇보다도 접합부의 고유한 강성을 부여하는 것이 중요하다. 즉 실험을 통해 얻은 접합부의 모멘트-회전각을 골조 해석시 있는 그대로 반영할 수 있어야 한다. 이르기 위해 모멘트-회전각을 표현할 수 있는 단일 수식의 개발이 필요하며 지금까지 다양한 수식이 개발되어 보고되고 있다. 본 논문은 기하학적효과 및 접합부 강성을 고려할 수 있도록 이론을 통해 유도한 접합부의 강성행렬에 모멘트-회전각 관계를 표현하는 수정지수 함수 모델, 멱함수 모델 그리고 제안한 로그함수 모델을 사용하여 골조 해석을 실시하고, 그 결과를 통해 유도된 강성행렬의 적용가능성을 알아보고, 제안한 로그함수의 유효성을 밝히고자 한다.

**ABSTRACT :** Accurate determination of the relative restraint of beam-to-column connections is important for both the strength and the serviceability of structural frames. But steel frame analysis is carried out under the assumption that the connections are either fixed or pinned. Overestimating the connection restraint can result in underestimating lateral sway and underestimating the connection restraint can lead to underestimating forces developed in the beams and columns. This implies that the exact stiffness of connections as well as the geometric effects should be considered in the frame analysis and the overall behavior of connections could be described adequately. Therefore, the stiffness matrix which is able to consider the moment-rotation of connection was derived previously and the modified exponential model, power model and the proposed log model are adopted for modeling the semi-rigid connections. The main purpose of this study is to examine the feasibility of the derived stiffness matrix and to show the validity of log model proposed.

**핵 심 용 어 :** 반강접 접합부, 모멘트-회전각 관계, 제안 로그 함수 모델

**KEYWORDS :** Semi-rigid Connection, Moment-rotation relationship, Log model proposed

1) 한양대학교 박사과정  
2) 정회원, 한양대학교 교수, 포항제철 석좌교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서론

철골 골조에서 접합부를 단순접합 또는 강접합 이라고 말하기는 매우 어렵다. 즉, 모든 접합부는 단순접합 이상, 강접합 이하의 고유한 구속력을 가지고 있다고 말할 수 있다. 그러므로 정확한 골조 해석을 위해 기하학적 효과(P-Δ, P-δ 효과) 및 접합부의 고유 거동을 포함시켜야 할 것이다.

골조 해석시 접합부의 고유한 강성을 해석에 반영하기 위해 접합부의 모멘트-회전각 관계를 추적할 수 있는 단일 수식이 필요할 것이다. 현재까지 개발된 모델들 가운데는 접합부의 거동을 정확히 표현해 내지만 다소 복잡하거나 미분 불가능한 경우도 있어 행렬식에 직접 사용은 불가능하였다. 결국 이를 골조 해석에 반영하기 위해 보다 정확하면서도 단순한 단일 수식과 강성행렬식이 필요하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 기하학적 효과 및 접합부의 강성을 반영할 수 있는 강성행렬을 이론적으로 유도한 선행연구<sup>(1)</sup>를 바탕으로 반강접합 골조와 강접합 골조의 거동 차이를 살펴보고, 복잡하지만 정확하다고 알려져 있는 수정지수함수 모델과 비교적 단순한 3변수 멱함수 모델, 그리고 새로 개발한 2변수 로그함수 모델을 사용하여 골조해석을 실시하여 그 결과를 비교하고자 한다.

## 2. 보-기둥(Beam-Column) 요소

Green의 변형도 텐서로부터 평면구조물의 축방향 변형도 요소를 유도하고, 그림1과 같은 자유도 및 부호규약을 가지고 등분포 하중  $w$ 가 작용하는 보-기둥 부재에 대해 강성행렬을 구하기 위해 변분을 통해 평형방정식과 경계조건을 유도하였다.<sup>(3)(4)(5)</sup>

### 평형방정식

$$N' = 0 \quad (1)$$

$$(Nv_o' + M')' + w = 0 \quad (2)$$

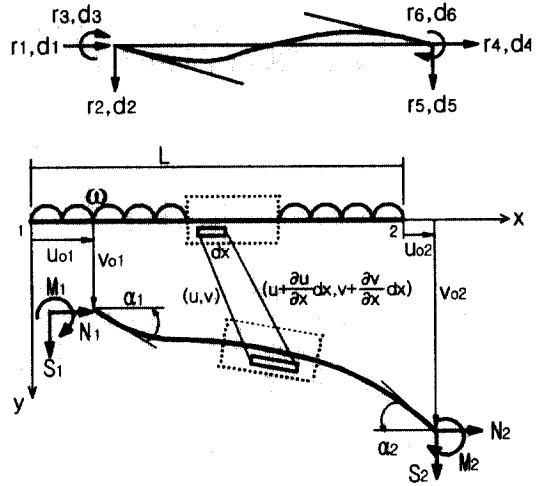


그림 1. 보-기둥 부재의 좌표 체계

### 경계조건

$$N = n_x N_i \quad (u_o = u_{oi}) \quad (3)$$

$$Nv_o' + M' = n_x S_i \quad (v_o = v_{oi}) \quad (4)$$

$$M = -n_x M_i \quad (v_o' = \alpha_i) \quad (5)$$

여기서,  $\alpha_i$  : 절점의 회전각

부재의 강성방정식을 얻기 위해  $x$ 축을 부재 도심축과 일치시키고, 평형방정식에서 각 변형에 대해 풀어야 한다. 식(1)에서 축력  $N$ 은 상수가 되고, 식(2)는  $v_o$ 에 대해 독립적으로 풀 수 있다.

$N > 0$  일 때

$$\frac{d^4 v_o}{dx^4} + k^2 \frac{d^2 v_o}{dx^2} - \frac{w}{EI} = 0 \quad (k^2 = \frac{N}{EI})$$

$$v_o(x) = v_{o1} + \frac{\alpha_1 \sin kx}{k} + \frac{S_1(kx - \sin kx)}{k^3 EI} + \frac{M_1(\cos kx - 1)}{k^2 EI} + \frac{w}{2k^2 EI} + \frac{w(\cos kx - 1)}{k^4 EI} \quad (6)$$

$N < 0$  일 때

$$\frac{d^4 v_o}{dx^4} + k^2 \frac{d^2 v_o}{dx^2} - \frac{w}{EI} = 0 \quad (k^2 = -\frac{N}{EI})$$

$$v_o(x) = v_{o1} + \frac{\alpha_1 \sinh kx}{k} + \frac{S_1 (\sinh kx - kx)}{k^3 EI} + \frac{M_1 (1 - \cosh kx)}{k^2 EI} + \frac{w}{2k^2 EI} + \frac{w(1 - \cosh kx)}{k^4 EI} \quad (7)$$

$u_o$ 에 대해서는 휨에 의한 축변형효과(bowing effect)의 포함 여부에 따라 차이를 보인다.

$$u_o(x) = u_{o1} + \frac{N}{EA} x \quad (\text{선형}) \quad (8)$$

$$u_o(x) = u_{o1} + \frac{N}{EA} x - \frac{1}{2} \int_0^x v_o'^2 dx \quad (\text{비선형}) \quad (9)$$

끝으로  $v_o' = \alpha_i$ 라는 조건식과 함께 각 절점에서 축력, 전단력, 휨모멘트(N, S, M)를 양 절점에서의 변형으로 나타내면 강성행렬이 완성된다. 이때 식(8)을 이용하면 보통 우리가 사용하는 P- $\delta$ 와 P- $\Delta$ 효과를 포함하는 강성행렬을 구할 수 있고, 식(9)를 이용하면 휨에 의한 축변형효과를 고려한 비선형 강성행렬을 구할 수 있어 구조물의 극한하중상태에서의 거동, 분기점에서의 거동을 표현할 수 있다. 여기서는 선형강성 행렬에 대해서만 제시하고자 한다.

$$N_1 = \frac{EA}{L} (u_{o1} - u_{o2}) \quad (\text{인장: +, 압축: -}) \quad (10)$$

$$S_1 = \frac{EI}{L^3} \left[ \frac{(kL)^3 \sin kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] v_{o1} \quad (11)$$

$$- \frac{EI}{L^2} \left[ \frac{(kL)^2 - (kL)^2 \cos kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] \alpha_1$$

$$- \frac{EI}{L^3} \left[ \frac{(kL)^3 \sin kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] v_{o2}$$

$$- \frac{EI}{L^2} \left[ \frac{(kL)^2 - (kL)^2 \cos kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] \alpha_2 - \frac{wL}{2}$$

$$M_1 = -\frac{EI}{L^2} \left[ \frac{(kL)^2 - \cos kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] v_{o1}$$

$$+ \frac{EI}{L} \left[ \frac{kL \sin kL - (kL)^2 \cos kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] \alpha_1$$

$$+ \frac{EI}{L^2} \left[ \frac{(kL)^2 - \cos kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] v_{o2}$$

$$+ \frac{EI}{L} \left[ \frac{(kL)^2 - (kL)^2 \sin kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] \alpha_2$$

$$- \frac{wL^3}{2EI} \left[ \frac{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL}{(kL)^2 - (kL)^2 \cos kL} \right] \quad (12)$$

$$N_2 = \frac{EA}{L} (u_{o2} - u_{o1}) \quad (13)$$

$$S_2 = -\frac{EI}{L^3} \left[ \frac{(kL)^3 \sin kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] v_{o1} \quad (14)$$

$$+ \frac{EI}{L^2} \left[ \frac{(kL)^2 - (kL)^2 \cos kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] \alpha_1$$

$$+ \frac{EI}{L^3} \left[ \frac{(kL)^3 \sin kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] v_{o2}$$

$$+ \frac{EI}{L^2} \left[ \frac{(kL)^2 - (kL)^2 \cos kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] \alpha_2 - \frac{wL}{2}$$

$$M_2 = -\frac{EI}{L^2} \left[ \frac{(kL)^2 - (kL)^2 \cos kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] v_{o1}$$

$$+ \frac{EI}{L} \left[ \frac{(kL)^2 - (kL)^2 \sin kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] \alpha_1$$

$$+ \frac{EI}{L^2} \left[ \frac{(kL)^2 - (kL)^2 \cos kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] v_{o2}$$

$$+ \frac{EI}{L} \left[ \frac{kL \sin kL - (kL)^2 \cos kL}{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL} \right] \alpha_2$$

$$+ \frac{wL^3}{2EI} \left[ \frac{2 - 2 \cos kL - kL \sin kL}{(kL)^2 - (kL)^2 \cos kL} \right] \quad (15)$$

### 3. 스프링 강성을 갖는 접합부

반강접 접합부를 갖는 보-기둥 요소의 강성행렬

은 부재단의 회전변형( $\alpha_1, \alpha_2$ )을 접합부의 강성을 따르는 회전변형( $\alpha_{c1}, \alpha_{c2}$ )으로 대체시키면 될 것이다. 이 때 고려해야 하는 것이 기둥과 보의 상대회전각( $\theta_{ri}$ )으로 이 세 회전각은 다음과 같은 관계가 성립한다<sup>[3]</sup>.

$$\theta_{ri} = \alpha_{ci} - \alpha_i \quad (i=1,2) \quad (16)$$

$$\alpha_i = \alpha_{ci} - \theta_{ri} = \alpha_{ci} - M_i / k_{ci} \quad (17)$$

이 때 사용한  $k_{ci}$ 는 접합부의 강성으로서 각 접합부의 형상과 변수에 따라 결정되는 값으로 만약 접합부의 거동을 정확히 표현할 수 있는 단일 수식이 있다면 해석은 보다 정확하고 쉬워질 것이다.

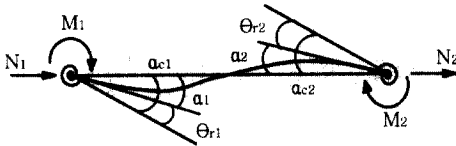


그림 2. 반강접 접합부의 상대회전각

식(17)를 식(10)~식(15)에 대입하여 다시 정리하면, 일반적인 보-기둥 요소의 강성행렬 ( $\mathbf{k}_{ij}$ )에서 반강접 접합부를 갖는 보-기둥 요소의 강성행렬 ( $\mathbf{k}_{ij}^s$ )을 유도해 낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} N_1 \\ S_1 \\ M_1 \\ N_2 \\ S_2 \\ M_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & 0 & 0 & k_{14} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & k_{23} & 0 & k_{25} & k_{26} \\ 0 & k_{32} & k_{33} & 0 & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 \\ 0 & k_{52} & k_{53} & 0 & k_{55} & k_{56} \\ 0 & k_{62} & k_{63} & 0 & k_{65} & k_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{o1} \\ v_{o1} \\ \alpha_{c1} - M_1/k_{c1} \\ u_{o2} \\ v_{o2} \\ \alpha_{c2} - M_2/k_{c2} \end{pmatrix} + w \begin{pmatrix} 0 \\ p_2 \\ p_3 \\ 0 \\ p_5 \\ p_6 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$k_{11}^s = k_{44}^s = k_{11} (= EA/L)$$

$$k_{22}^s = k_{22} - k_{23}(k_{c2}k_{32} + k_{32}k_{66} - k_{62}k_{36})/T - k_{26}(k_{c1}k_{62} + k_{62}k_{33} - k_{32}k_{63})/T$$

$$k_{23}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{23} + k_{c1}k_{23}k_{66} - k_{c1}k_{26}k_{63})/T$$

$$k_{25}^s = k_{25} - k_{23}(k_{c2}k_{35} + k_{35}k_{66} - k_{36}k_{65})/T - k_{26}(k_{c1}k_{65} + k_{33}k_{65} - k_{63}k_{35})/T$$

$$k_{26}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{26} + k_{c2}k_{26}k_{33} - k_{c2}k_{23}k_{36})/T$$

$$k_{32}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{32} + k_{c1}k_{32}k_{66} - k_{c1}k_{62}k_{36})/T$$

$$k_{33}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{33} + k_{c1}k_{33}k_{66} - k_{63}k_{36})/T$$

$$k_{35}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{35} + k_{c1}k_{35}k_{66} - k_{c1}k_{36}k_{65})/T$$

$$k_{36}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{36})/T$$

$$k_{41}^s = k_{41}^s = k_{41} (= -EA/L)$$

$$k_{52}^s = k_{52} - k_{53}(k_{c2}k_{32} + k_{32}k_{66} - k_{36}k_{62})/T - k_{26}(k_{c1}k_{65} + k_{33}k_{65} - k_{63}k_{35})/T$$

$$k_{53}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{53} + k_{c1}k_{53}k_{66} - k_{c1}k_{56}k_{63})/T$$

$$k_{55}^s = k_{25} - k_{53}(k_{c2}k_{35} + k_{35}k_{66} - k_{36}k_{65})/T - k_{56}(k_{c1}k_{65} + k_{33}k_{65} - k_{63}k_{35})/T$$

$$k_{56}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{56} + k_{c1}k_{56}k_{33} - k_{c2}k_{53}k_{36})/T$$

$$k_{62}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{62} + k_{c2}k_{62}k_{33} - k_{c2}k_{63}k_{32})/T$$

$$k_{63}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{63})/T$$

$$k_{65}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{65} + k_{c1}k_{65}k_{33} - k_{c2}k_{63}k_{35})/T$$

$$k_{66}^s = (k_{c1}k_{c2}k_{66} + k_{c2}k_{66}k_{33} - k_{c2}k_{63}k_{36})/T$$

$$p_2^s = w[p_2 - k_{23}\{p_3(k_{c2} + k_{66}) - p_6k_{36}\}/T - k_{26}\{p_6(k_{c1} + k_{33}) - p_3k_{63}\}/T]$$

$$p_3^s = wk_{c1}\{p_3(k_{c2} + k_{66}) - p_6k_{36}\}/T$$

$$p_5^s = w[p_5 - k_{53}\{p_3(k_{c2} + k_{66}) - p_6k_{36}\}/T - k_{56}\{p_6(k_{c1} + k_{33}) - p_3k_{63}\}/T]$$

$$p_6^s = wk_{c2}\{p_6(k_{c1} + k_{33}) - p_3k_{63}\}/T$$

$$T = k_{c1}k_{c2} + k_{c1}k_{66} + k_{c2}k_{33} + k_{33}k_{66} - k_{36}k_{63}$$

## 4. 비교·분석

### 4.1 접합부 모델링 함수

위와 같은 강성행렬을 이용하기 위해 접합부의 모멘트-회전각을 정확히 표현할 수 있는 단일 수식이 필요하다. 지금까지 다수의 모델이 발표되었으나, 특정 접합부에 한정되는 경우가 많았다. 그 가운데 식(18)과 같은 Kishi-Chen의 수정지수 모델(modified exponential model)이 복잡하지만 가장 정확히 접합부의 모멘트-회전각을 표현해 낼 수 있다고 알려져 있다<sup>(4)</sup>.

식(19)는 Kishi-Chen이 제안한 3개의 변수만을 가지고 모멘트-회전각을 표현해 낼 수 있는 멱함수 모델로 단순하다는 장점이 있지만 다소 정확성에서 떨어진다는 문제점이 있다<sup>(4)</sup>.

그래서 식(20)과 같이 비교적 단순하면서도 정확성을 유지하는 2변수 로그함수 모델을 고안하였다. 이 모델의 일반성을 알아보기 위해 7종류 접합부의 132개의 실험데이터에 대응시켜 보았고 좋은 결과를 얻었다. 이 모델에 대한 자세한 특성은 문헌<sup>(2)</sup>에 제시하였다.

$$M = M_o + \sum_{j=1}^m C_j \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{|\theta_j|}{2j\alpha}\right) \right\} + \sum_{k=1}^n D_k (|\theta_j| - |\theta_k|) H[|\theta_j| - |\theta_k|] \quad (18)$$

$M_o$  : 초기 접합부 모멘트,  $\alpha$  : 스케일 계수

$C_j, D_k$  : 곡선 근사 변수,  $\theta_k$  : k번째 선형 시작 회전각,  $H[\theta]$  : Heaviside 단계함수

$$M = \frac{R_{ki} \theta_r}{\left\{ 1 + \left(\frac{\theta_r}{\theta_o}\right)^n \right\}^{1/n}} \quad (19)$$

$R_{ki}$  : 초기강성,  $\theta_o$  : 상대 소성회전각 ( $M_u/R_{ki}$ )

$M_u$  : 최대 모멘트,  $n$  : 형상계수

$$M = \alpha [\ln(n10^3 \theta_r + 1)]^n \quad (20)$$

$\alpha, n$  : 형상계수

### 4.2 해석 대상 골조

앞서 유도한 반강접 접합부를 갖는 골조의 강성행렬식의 유효성 및 골조의 거동에 대해 알아보기 위해 그림3과 같은 접합부강성을 가지는 그림4와 같은 1경간, 2층 골조를 대상으로 해석을 실시하여 Chen의 해석결과<sup>(6)</sup>와 비교하고자 한다. Chen의 경우 접합부의 거동을 수정지수함수로 모델링하였다. 강성행렬식의 유효성 비교를 위해 같은 모델링 방법을 사용할 것이고 아울러 멱급수 모델 및 제안한 로그함수 모델을 사용해 적용함수의 정확성의 영향을 파악하고자 한다.

가정한 접합부는 Top & Seat angle with double web angle 접합부로 A.Azizinamini가 실험한 것으로 전통적으로 반강접합부로 취급받고 있다. 그 형상은 그림3에 나타내었고 모멘트-회전각 관계는 그림4에 나타내었다.

해석에 사용한 골조의 형상 및 하중 조건은 모두 Chen이 해석한 조건과 동일하게 하였으며, 골조에 사용한 각 부재의 역학적 특성은 표1에 정리하였다.

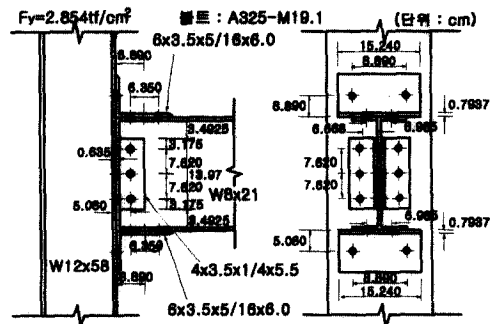


그림 3. 가정 접합부의 형상

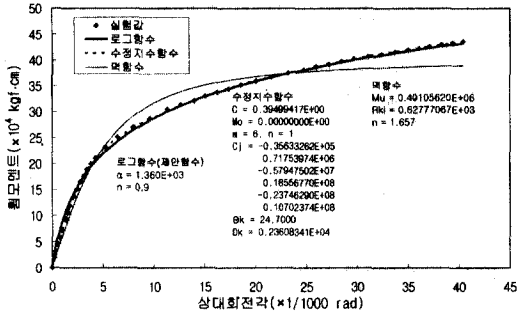


그림 4. 해석 대상 골조의 접합부 모멘트-회전각 관계

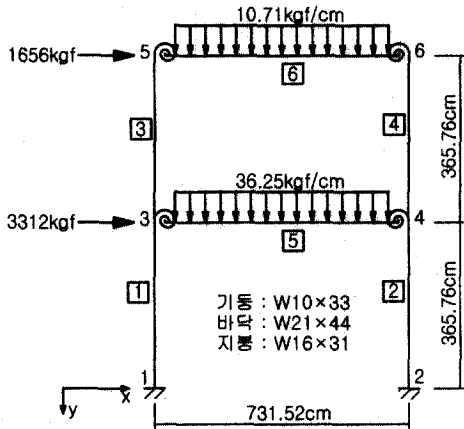


그림 5. 해석 대상 골조

표 1. 가정 부재의 역학적 특성

부재 종류	A (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	E (tf/cm <sup>2</sup> )
W10×33	62.65	7076	2039
W21×44	83.87	35088	2039
W16×31	58.84	15609	2039

A : 단면적 I : 단면이차모멘트 E : 탄성계수

### 4.3 해석 결과

해석 프로그램은 문헌<sup>(7)</sup>에 제시되어 있는 평면골조 해석 프로그램을 양단에 접합부를 갖는 부재의 경우 강성행렬이 식(18)이 될 수 있도록 수정하여 사용하였다. 또한 접합부에서 제하(除荷)가 발생할 때에는 초기강성을 따르는 것으로 가정하였다.

#### 4.3.1 강성행렬의 유효성

골조의 강성행렬이 부재의 소성화를 고려하지 못한다는 한계 때문에 기둥 및 보 부재는 탄성거동을 하며 단지 접합부만이 비선형 거동을 하는 탄성해석을 실시하여, 표2에 각 절점의 변위값을 Chen의 해석결과와 비교해 놓았다.

표 2. 해석 결과 비교

절점	수평(mm)		수직(mm)		회전(rad)	
	해석	Chen	해석	Chen	해석	Chen
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000
3	23.95	24.00	0.45	0.55	0.0093	0.0093
4	23.89	23.83	0.52	0.62	0.0087	0.0087
5	56.55	56.54	0.55	0.79	0.0077	0.0077
6	56.49	56.44	0.65	0.89	0.0071	0.0071

표2에서 해석결과는 Chen의 결과와 좋은 대응을 보이고 있어 앞서 구한 강성행렬이 유효함을 알 수 있었다.

#### 4.3.2 접합부 모델링 함수의 정확성의 영향

접합부의 모멘트-회전각을 근사화하기 위해 사용한 모델의 영향을 비교하기 위해 해석 대상 골조에 사용한 접합부의 실험 결과와의 오차로써 근사오차라는 개념을 사용하였다.

근사오차는 데이터 각 점에서 대응하는 적용함수 값을 뺀 나머지를 나타내는 식(21)에서 출발한다. 세 가지 함수는 모멘트를 회전각에 의해 표현했기 때문에 모멘트의 나머지를 사용하는 것이 바람직할 것이다.

$$S_r = \sum_{i=1}^n (M_i - M_{ai})^2 \quad (21)$$

여기서  $M_i$  : 실험값,  $M_{ai}$  : 근사함수의 계산값

식(20)에서 팔호항의 제곱은 실험값과 근사함수 사이의 수직거리를 나타내며 근사오차는 식(22)와 같이 정의된다.

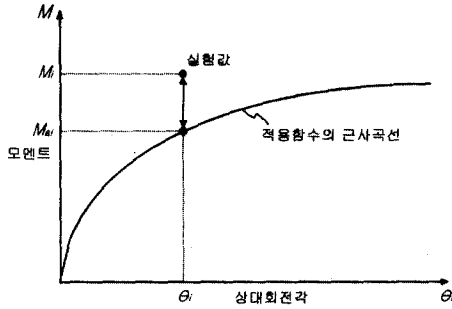


그림 6. 근사오차 계산을 위한 모멘트 나머지

$$S_{M/\theta} = \sqrt{\frac{S_r}{n}} \quad (22)$$

여기서  $S_{M/\theta}$  : 근사오차,  $n$  : 데이터의 수

계산한 결과 수정지수함수의 근사오차는 0.15, 제안한 로그함수는 0.71, 그리고 멱함수의 경우는 2.12로 계산되었다. 근사오차는 0에 가까운 값이 나올수록 실험값에 보다 근접한다는 뜻이며, 경험상 근사오차가 1이하인 경우 적용함수는 실험값에 매우 근사하게 된다는 사실을 밝혀둔다.

적용함수의 정확성의 차이점이 해석에는 어떤 영향이 있지를 알아보기 위해 각 부재의 부재력에 대해 수정지수함수를 사용한 해석결과를 제안한 로그함수와 멱함수를 사용한 해석결과로 각각 나누어 표3(a)(b)에 나타내었다.

멱함수를 사용한 경우인 표3(b)에서 부재 5,6은 양단에 접합부가 있는 부재로 이 부재의 휨모멘트는 약5~20%정도 차이가 보이고 있다. 탄성 해석이었다는 점을 감안한다면 허용할 수 있는 오차가 될 수도 있지만 문제는 부재3과 부재4의 부재력에 매우 차이가 있다는 점이다. 비록 작은 값의 휨모멘트가 작용하게 되는 부재3의 A단은 그 차이가 대단히 크게 나타나고 있어 접합부 거동의 영향이 크다는 사실을 나타내고 있다.

하지만 제안한 로그함수모델을 사용한 경우인 표3(a)에서 이러한 차이는 거의 해소되어 부재

5,6에서 휨모멘트 차이는 약1~7% 정도로 감소하였고, 부재 3과 4의 부재력의 차이도 크게 개선되었다는 사실로부터 모멘트-회전각 모델링이 매우 중요함을 알 수 있다.

표 3. 접합부 모델링에 따른 해석의 정확성 비교

(a) 수정지수함수해석결과/로그함수해석결과

부재	A단			B단		
	축력	전단력	휨모멘트	축력	전단력	휨모멘트
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
2	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	0.99
3	1.00	0.97	0.89	1.00	0.97	0.99
4	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01
5	1.00	1.00	0.93	1.00	1.00	1.00
6	1.01	1.00	0.99	1.01	1.00	1.01

(b) 수정지수함수해석결과/멱함수해석결과

부재	A단			B단		
	축력	전단력	휨모멘트	축력	전단력	휨모멘트
1	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01	1.00
2	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.94
3	1.00	1.24	7.16	1.00	1.24	1.10
4	1.00	0.94	0.95	1.00	0.94	0.93
5	1.05	1.00	1.21	1.05	1.00	0.95
6	0.94	1.00	1.10	0.94	1.00	0.93

표 4. 절점 변위 비교

절점	수평(mm)		수직(mm)		회전(rad)	
	강접	반강접	강접	반강접	강접	반강접
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00000	0.00000
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00000	0.00000
3	8.97	23.79	0.43	0.45	0.00400	0.00926
4	8.92	23.73	0.55	0.52	-0.00205	0.00867
5	14.38	56.07	0.53	0.55	0.00165	0.00768
6	14.18	56.00	0.67	0.65	-0.00034	0.00702

표 5. 절점력 비교(절대값)

부재	축력(tf)		전단력(tf)		휨모멘트(tf·cm)	
	강접	반강접	강접	반강접	강접	반강접
1	15.184	15.970	0.543	2.313	262.18	802.86
2	19.169	18.383	4.425	2.655	897.57	844.68
3	3.466	3.3119	1.748	0.432	411.20	146.68
4	4.369	4.5226	3.404	1.223	690.65	296.14
5	1.021	1.4312	14.799	13.859	1588.20	336.07
6	3.404	1.2239	4.369	4.522	556.63	295.90

### 4.3.3 반강접합 골조와 강접합 골조의 거동

이번에는 반강접합부를 갖는 골조의 거동을 알아보기 위해 절점 3,4,5,6의 접합부가 강접합이 되도록 회전스프링강성  $k_{\alpha}$ 를  $\infty$ 로 가정한 해석 결과와 제안 로그모델을 사용한 결과를 표4와 표5에 정리하였다.

강접에 비해 반강접 골조에서는 보 재단모멘트는 줄어들고 보의 스펠 모멘트는 커지는 결과를 가져오며, 휨력에 대한 강성이 작아져 최하층 기둥의 하부 모멘트가 커지며, 이런 이유로 휨변위가 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 또한, 부재 3,4에서는 기둥에 전달되는 보 재단 모멘트의 감소로 기둥의 부담이 적어짐을 알 수 있다.

이와 같은 결과를 정량화하기 위해 각 부재마다 강구조한계상태설계기준<sup>(8)</sup>의 축력-휨모멘트 상관식에 대입하였다. 이렇게 얻은 수치가 1보다 크다면 사용한 부재는 부적절하므로 치수를 큰 것으로 바꿀 필요가 있다는 의미이고, 0.9미만이라면 단면을 감소시킬 수 있는 여지가 있음을 의미하는 것이다.

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2, \quad Q = \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_u}{\phi_b M_n} \leq 1 \quad (23a)$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2, \quad Q = \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_u}{\phi_b M_n} \leq 1 \quad (23b)$$

사용 강재를 SS400으로 가정하였고, 기타 다른 사항은 강구조 계상태설계기준에 준하였다. 표6은 이와 같이 계산한 결과를 나타낸 것이다.

부재 가정이 설계를 목표로 한 것이 아니기 때문에 두 골조 모두 개선의 여지를 보이고 있으나,

표 6. 휨모멘트-축력 관계식 비

부재	$\phi_c P_n$	$\phi_b M_n$	강접(Q)	반강접(Q)
1	127.80	1373.37	0.250	0.647
2	127.80	1373.37	0.729	0.687
3	127.80	1373.37	0.313	0.120
4	127.80	1373.37	0.520	0.233
5	171.10	3376.78	0.473	0.104
6	120.03	1911.39	0.305	0.106

기둥인 부재 3,4와 보 부재인 5, 6에서 단면 개선의 여지는 반강접 골조가 더 크다는 사실을 알 수 있다. 강접합부로 만들기 위한 설계 및 시공상의 어려움과 경제적인 면을 고려한다면 다층 골조로 갈수록 반강접 골조로 설계하는 것이 오히려 유리하다고 판단할 수 있다. 단 이 같은 사실은 골조의 횡변위 및 층간 변위를 만족하고, 스펠 모멘트 증가에 따라 커질 보의 수직처짐도 허용범위 안쪽일 때 의미를 갖는다. 해석 대상 골조의 경우, 최대허용횡변위를 층고의 0.015배로 규정한 설계기준을 참고로 계산한다면 109.72mm로, 반강접 접합부라도 허용값에 절반정도의 수준에 머무르고 있다. 따라서 골조 설계시 미리 설정된 최대 횡변위에 근거하여 접합부의 형태를 선정한다면 보다 경제적인 설계를 유도해 낼 수 있을 것이다.

## 5. 결론

각 접합부의 고유한 강성은 구조물의 힘의 분포에 영향을 미쳐 완전강접 상태일 때와는 거동의 차이를 발생시키므로 이를 구조 해석시 반영하기 위해 본 논문에서는 기하학적효과와 접합부의 고유 강성을 반영할 수 있는 강성행렬에 대해 정리하였고 이를 이용한 반강접 골조의 해석결과를 기존의 해석결과와 비교하여 골조의 탄성해석시 적용가능함을 확인하였고, 제안한 로그 모델을 사용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반강접 골조해석에서 접합부 모델링을 위한 보다 간편하면서 정확한 모델로서 2변수 로그 함수를 제안한다.

$$M = a[\ln(n10^3 \theta_r + 1)]^n$$

- 2) 반강접 골조의 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해 실제 접합부의 모멘트-회전각 관계를 모델링하는 함수의 근사오차는 1이하를 유지해야 한다.
- 3) 구조물의 횡변위와 접합부의 강성을 적절히 조절하거나 가새로 횡변위를 조절한다면, 반



강접 접합부를 사용하여 보다 경제적인 골조 시스템으로 설계가 가능할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 포항제철(주)의 석좌교수기금과 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터(STRESS)의 지원으로 수행한 연구입니다.

### 참고 문헌

1. 류홍식, 이상섭, 문태섭(2000), "반강접합부를 갖는 철골 골조의 탄성해석", 대한건축학회, 16권 1호.
2. 류홍식, 이상섭, 문태섭(2000), "반강접합부에 대한 모멘트-회전각 모델", 한국강구조학회, 학술발표대회논문집.
3. W. F. Chen and E. M. Lui(1987), "Structural Stability (theory and implementation)", Elsevier.
4. W. F. Chen, Y. Goto, and J. Y. Richard Liew(1996), "Stability Design of Semi-Rigid Frame", John Wiley & Sons.
5. Theodore R. Tauchert(1974), "Energy Principles in Structural Mechanics", McGraw-Hill.
6. Balaur S. Dhillon and James W. O'Malley(1999), "Interactive Design of Semi-rigid Steel Frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No 5.
7. 문태섭, 이명재, 오영석, 전대한(1999), "매트릭스 구조해석", 기문당.
8. 강구조한계상태 설계기준 및 해설(1998), 대한건축학회, 기문당.

(접수일자 : 2000년 4월 28일)