

반강접 접합부를 갖는 평면 강골조의 거동에 관한 해석적 연구

Analytical Study on Behaviour of Plane Steel Frame with Semi-Rigid Beam-to-Column Connection

김 종 성¹⁾

Kim, Jong Sung

요 약 : 소성영역에서 부재의 강성감소, 휨효과 및 잔류응력의 영향을 고려하면서 극한 한계상태에서 강골조의 거동을 평가하기 위해 개선 소성 힌지법을 이용하여 평면강골조의 비선형해석을 실시하고, 강접 및 반강접 평면강골조의 다양한 모델에 대한 수치해석을 통하여 거동을 평가 하는데 목적이 있다. 그리고 상용프로그램을 이용한 해석결과를 이용하여 반강접율의 변화에 따른 골조의 거동을 분석한다.

ABSTRACT : In this study, nonlinear analysis of steel plane frame was performed using the refined plastic hinge method of advanced analysis techniques. In deterioration of stiffness in plastic zone, influences by flexural bending, residual stress, geometrical non-linearity, and semi-rigid connection are considered. And also, further reduced tangent modulus was used for geometrical non-linearity, top and seat angle were chosen for semi-rigid connection. Furthermore, 3 parameter power model was used for moment-rotation behaviour of beam to column connection. The loading conditions are combined with axial and lateral force and the inverse triangle distribution of lateral and eight type of analytical models were used in analysis. The results of analyses were compared with semi-rigid and rigid connection on behaviour of numerical analysis models. And also, the behaviors of frame with changes of semi-rigidity were analyzed by using the results obtained from MIIDAS-GENw.

핵심용어 : 개선 소성힌지법, 반강접골조, 비선형 해석, 강골조의 내력, 단면여력

KEYWORD : refined plastic hinge method, semi-rigid frame, Inelastic analysis, strength of steel plane frame, load-carry capacity

1. 개 요

1.1 연구배경 및 목적

강구조물의 일반적인 해석과 설계에서 보는 완전한 강접이나 마찰이 없는 핀으로 기둥에 접합되는 것으로 가정하고 있다. 그러나 실제 사용되는 접합에서의 강성은 강접합과 핀접합의 사이의 값을 갖고 있는 것으로 알려졌고, 이러한 반강접 접합부가 골조시스템에 사용될 때, 완전 강접으로 가정된 경우와는 다른 거동을 보일 것으로 예측된다.

반강접 접합부의 거동상태와 접합부 유연성(flexibility)의 효과를 고려한 강골조의 거동특성을 평가하기 위하여 1970년대부터 많은 연구들이 행하여져 왔고, 설계방법에 대한 연구도

보고되고 있지만 국내에서는 아직 미흡한 실정이다(W.F.Chen (1996), 장준호(1998)).

미국의 ASD(1986), LRFD(1994)에서는 접합부의 강성을 고려한 설계지침이 제시되어 있지 않고, 현행의 KBC 2005에서도 축력과 양단 모멘트를 받는 강골조의 경우, 선형해석에 바탕을 두어 부재의 비탄성 거동의 영향을 고려하므로, 선형해석에서 가정된 바와 실제 비선형 거동이 일치하지 않게 되어 구조물 전체의 붕괴하중, 소성힌지발생순서, 단면여력(load carry capacity)을 정확히 예측하지 못한다.

그러므로 강골조 구조물의 개별 부재 뿐 만아니라 접합부의 강성을 고려한 전체 시스템의 거동 및 안정을 합리적으로 반영할 수 있는 해석·설계 방법이 필요하다 하겠다.

이 연구에서는 접합부의 강성을 고려하여 강 골조를 모델화

1) 경일대학교 건축학부 교수, 공학박사
(Tel. 053-850-7243, Fax. 053-850-7607, E-mail : jsk@kiu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

하고, 2차 비선형해석법(2nd-order Inelastic Analysis) (S.E, Kim(1991), Abdel-Ghaff(1993) 등)중에서, 개선 소성힌지법 (W.F.Chen(1996))을 이용해서, 반강접 접합에 의한 소성영역에서 강성감소, 휨 효과 및 잔류응력의 영향을 고려한 평면강골조의 수치해석을 통하여 거동(내력)을 평가 하는데 목적이 있다. 그리고 상용프로그램을 이용한 해석결과를 이용하여 반강접을의 변화에 따른 골조의 거동을 분석한다.

1.2 연구동향

구조물의 실제거동에 관한 내력 및 변위를 구하기 위해서는 접합부의 비선형성을 강골조 구조물 해석에 적용하는 것이 필요하다. 1970년대 중반이후, 반강접 접합부의 거동을 비선형으로 고려하여 구조해석을 수행하는데 관심이 모여졌다. Frye-Morris(1976)는 반강접 접합부를 비선형 다항식 $M - \theta$ 모델로 고려하여 비선형 뼈대 구조해석을 수행했고, Goto와 Chen(1987)은 반강접접합부를 고려한 2차 탄성해석 프로그램을 제시하였으며, Wu(1988)는 반강접 골조의 근사 2차 해석법을 발표하였다.

최근에 Abdel-Ghaff(1993), Kim과 Chen(1991)등에 의해 기존의 탄소성 힌지 모델을 근간으로 하는 개선된 비탄성 해석법이 제안되었다. 이 연구들에서는, 부재축방향의 소성영역확산에 의한 골조의 강성저하부분을 등가강성계수로 평가하여, 탄소성좌굴해석 뿐 아니라 일정 축력하에 집중수평력을 가하여 골조전체의 극한내력을 구하였고, '재료 및 기하학적 비선형을 고려한 반강접 뼈대구조물의 최적설계'에 대해 발표되었다(장준호(1998)).

2. 개선 소성힌지해석법

2.1 해석상의 가정

- (1) 구조요소는 직선이고 변형후에도 평면으로 보존된다.
- (2) 요소의 강성은 축력과 휨모멘트로 인한 변형을 고려한 기존의 보-기둥의 안정함수를 이용하여 유도하고, 전단 변형과 요소의 휨효과는 무시한다.
- (3) 요소의 단부에서만 소성힌지가 형성된다.
- (4) 소성힌지는 비탄성 회전만 하고, 변형경화는 무시한다.
- (5) 접합부의 모멘트-회전 거동은 요소의 단부에 붙어있는 비선형 회전스프링에 의해 모델링한다.

2.2 2차 효과를 고려한 안정함수

그림 1(a)에서와 같이 보-기둥 부재의 양 끝단에 모멘트와 축력이 동시에 작용할 때, 그림 1(b)와 같은 자유물체도로부터 평형방정식을 세우면 다음과 같다.

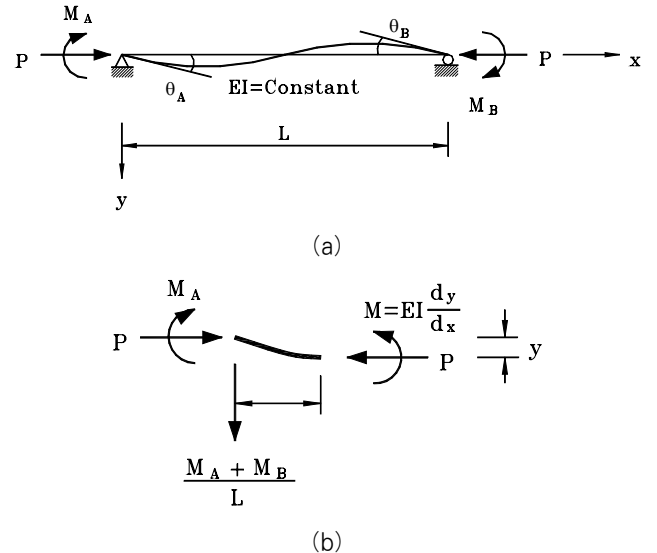


그림 1. 양 단끝에 모멘트와 축력이 작용하는 보-기둥 부재

$$EIy'' + Py = \frac{M_A + M_B}{L}x - M_A \tag{1}$$

여기서,

- E : 탄성계수
- I : 단면 2차 모멘트
- L : 부재의 변형되지 않은 길이
- P : 부재에 작용하는 축력

미분방정식의 일반해를 구하면 식(2)와 같다.

$$y = A \sin(\rho x) + B \cos(\rho x) + \frac{M_A + M_B}{LE\rho^2}x - \frac{M_A}{E\rho^2} \tag{2}$$

여기서,

$$\rho^2 = \frac{P}{EI}$$

경계조건($y(0) = 0, y(L) = 0$)을 대입하여 임의의 거리 x 에 대한 처짐 y , 기울기 y' 를 구하면, 다음과 같다.

$$y = -\frac{M_A \cos(\rho L) + M_B}{E\rho^2 \sin(\rho L)} \sin(\rho x) + \frac{M_A}{E\rho^2} \cos(\rho x) + \frac{M_A + M_B}{LE\rho^2}x - \frac{M_A}{E\rho^2} \tag{3}$$

$$y' = -\frac{M_A \cos(\rho L) + M_B}{EI \rho \sin(\rho L)} \cos(\rho x) + \frac{M_A}{EI \rho} \sin(\rho x) + \frac{M_A + M_B}{LEI \rho} \quad (4)$$

A점의 회전각 θ_A ($y'(0)=0$)와 B점의 회전각 θ_B ($y'(L)=0$)를 구해서 매트릭스형태로 나타내어 정리하면,

$$\begin{bmatrix} M_A \\ M_B \end{bmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_A \\ \theta_B \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 s_{11} 및 s_{12} 는 안정함수로서 다음과 같다.

$$s_{11} = s_{22} = \frac{\rho L \sin(\rho L) - (\rho L)^2 \cos(\rho L)}{2 - 2 \cos(\rho L) - \rho L \sin(\rho L)} \quad (6)$$

$$s_{12} = s_{21} = \frac{(\rho L)^2 - \rho L \sin(\rho L)}{2 - 2 \cos(\rho L) - \rho L \sin(\rho L)} \quad (7)$$

부재의 변형곡선에 대한 길이방향 감소를 무시하면, 축력과 변형의 관계는 다음식과 같다.

$$P = \frac{EA}{L} e \quad (8)$$

여기서

- A : 부재의 유효단면적
- e : 부재의 축방향 변형
- E : 탄성계수
- L : 부재의 변형되지 않은 길이

식(5)~식(8)을 하나의 매트릭스 형태로 나타내고, 그 증분 형태로 나타내면, 골조의 힘-변위관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \\ \dot{P} \end{bmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & 0 \\ s_2 & s_1 & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \\ \dot{e} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 \dot{M}_A , \dot{M}_B , $\dot{\theta}_A$, $\dot{\theta}_B$ 는 각각 요소의 A, B점에서의 증분된 단부 모멘트와 절점 회전각을 나타내고, \dot{P} 와 \dot{e} 는 각 요소의 길이 방향의 증분된 축력과 변위를 나타낸다.

식(9)를 간단한 식으로 표현하면

$$\dot{f}_c = k_c \dot{d}_c \quad (10)$$

여기서

- \dot{f}_c : 요소의 증분된 단부력 벡터
- \dot{d}_c : 요소의 증분된 변위 벡터
- k_c : 요소의 강성 매트릭스

2.3 힘에 의한 강성감소

강재에서 응력-변형률관계가 탄성-완전소성이라 가정해도, 항복응력에 해당하는 단면이 점차적으로 항복을 하므로 단면의 점진적 항복은 휨부재에 소성힌지를 형성하게 한다. 이를 고려하기 위해 강성매트릭스의 변형이 필요하다.

$$\begin{bmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \end{bmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$a_{11} = n_A \left[s_1 - \frac{s_2^2}{s_1} (1 - n_B) \right]$$

$$a_{12} = n_A n_B s_2$$

$$a_{21} = n_A n_B s_2$$

$$a_{22} = n_B \left[s_1 - \frac{s_2^2}{s_1} (1 - n_A) \right]$$

식(11)은 강성매트릭스의 감소를 위해 식(9)를 변형한 것이다. n_A 와 n_B 는 한 요소의 양 끝단 A, B점의 점진적 소성을 고려하기 위한 변수로, 그 값이 1이면 완전탄성, 0과 1사이의 값이면, 부분적인 소성, 0이면 완전소성으로서 소성힌지가 발생함을 나타낸다.

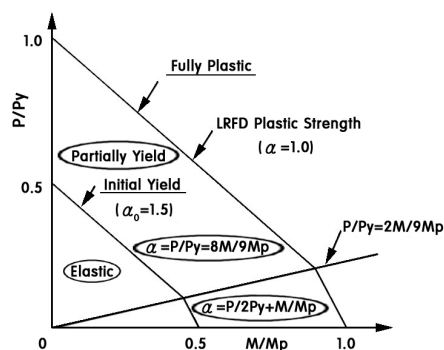


그림 2. 축력-모멘트 상관도를 이용한 점진적인 강성감소

부재의 탄소성 변화를 고려하기 위해 그림 2를 사용하고 있다. 초기 항복은 항복표면과 같은 형태의 모형으로 가정하여, $\alpha_0=0.5$ 일 때 발생되고, 강성의 감소는 발생하지 않는다. 그러나 초기 항복면을 넘어서면서부터 부재의 강성은 감소되기 시작해 $\alpha_0=1$ 이 되면 부재에 소성힌지가 발생함을 나타낸다.

다음 식은 강성감소를 위한 그림 2의 축력-모멘트 상관도의 영향을 고려하기 위한 것으로, 비탄성 보-기둥의 속성을 만족시키고 있다.

$$n = 1 \quad \text{for } \alpha \leq 0.5$$

$$n = 4\alpha(1 - \alpha) \quad \text{for } \alpha > 0.5 \quad (12)$$

2.4 잔류응력에 의한 강성감소

단면의 항복은 잔류응력에 의해 점진적으로 진행되므로, 이와 같은 강성감소효과를 고려하기 위해서 매번 변화하는 새로운 단면 2차모멘트를 구하는 것 보다는 탄성계수를 감소시켜 단면의 탄성구간의 감소를 추적하는 것이 더 쉽기 때문에 사용한다. 기둥의 유효강성의 모델링에는, 인장력을 받는 부재에서는 부재의 강성감소가 잔류응력 효과에 의해서만 나타나고, E_t 만으로는 구조물의 정확한 초기 불완전성을 계산할 수 없기 때문에, CRC(Column Research Committee) E_t 를 채택되, 초기 불완전성에 대해서는 E_t 는 다음 식과 같이 표현하고 있다.

$$E_t = 1.0E \quad \text{for } P \leq 0.5P_y \quad (13)$$

$$E_t = 4 \frac{P}{P_y} E \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) \quad \text{for } P > 0.5P_y$$

2.5 기하학적 불완전성에 의한 강성감소

재료의 기하학적 비선형성을 고려하는 방법 중에, 감소 접선 탄성계수법(Further reduced tangent modulus method)에서는, 횡방향 변위의 방지유무와 상관없이 CRC E_t 값에 0.85를 곱한 값을 사용하여 구조물을 설계한다. 이 방법은 기하학적 불완전성으로 인한 강성감소를 감소접선계수 E_t 를 사용하여 동등한 부재강성을 감소시킴으로서 같은 효과를 내도록 한 것이다.

2.6 반강접 접합에 의한 강성감소

휨모멘트, 전단력, 축력, 비틀림 등의 영향을 고려한 반강접 접합부의 강성감소는, 복잡한 계산이나 실험을 통해서, 그 거동 파악을 파악하거나, 반강접 접합부의 모델에 대해서 모멘트-회전의 거동을 해석적으로 조사하기도 한다.

평면골조에서는, 비틀림의 영향은 무시하며, 축방향 변형과 전단변형은 회전변형에 비해 작으므로, 접합부의 회전변형만 고려하면 모멘트의 함수로 표현된다. 접합부의 모멘트-회전 거동의 주요 모델에는, Frye-Morris 다항식 모델, 멱급수 모형, 지수모형, 고정계수를 이용하는 모형, 3-parameter power model 등이 있다. 여기서는 Chen과 Kim(1996)의 3-parameter power model을 사용하여, 접합부의 비선형해석을 실시한다. 이용하는 매개변수는, 초기강성(R_{ki}), 극한강도(M_u), 형상계수(n) 등이다.

Power Model의 일반식은 다음과 같다.

$$m = \frac{\theta}{(1 + \theta^n)^{1/n}} \quad \text{for } \theta > 0 \text{ and } m > 0$$

또는 (14)

$$\theta = \frac{m}{(1 - m^n)^{1/n}} \quad \text{for } \theta > 0 \text{ and } m > 0$$

- 여기서, $m = M/M_u$
 M = 접합부 모멘트
 M_u = 접합부의 극한 모멘트
 n = 형상계수
 R_{ki} = 초기 접합부 강성
 $\theta = \theta_r / \theta_o$
 θ_r = 보와 기둥사이의 상대회전각
 θ_o = 소성 회전각 (M_u / R_{ki})

이 모델은, 초기강성(R_{ki}), 극한강도(M_u), 형상계수(n)를 이용하여 설계자가 빠르고 정확하게 반강접 접합부의 비선형 해석을 실행할 수 있게 해주며, 그림 3은 앞에서 유도한 안정함수를 이용한 반강접 접합부를 고려한 모델이다.

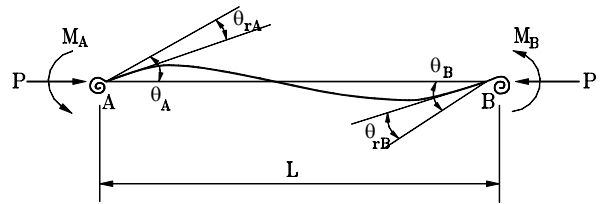


그림 3. 보-기둥 부재의 반강접 모델링

따라서 식(2.9)의 양단에서의 모멘트를, 증분회전각과 상관되어 나타내면

$$\dot{M}_A = \frac{E_t I}{L} [s_1(\theta_A - \theta_{rA}^-) + s_2(\theta_B - \theta_{rB}^-)] \quad (15)$$

$$\dot{M}_B = \frac{E_t I}{L} [s_2(\theta_A - \theta_{rA}^-) + s_1(\theta_B - \theta_{rB}^-)] \quad (16)$$

$$\theta_{rA}^- = \frac{\dot{M}_A}{R_{ktA}} \quad (17)$$

$$\theta_{rB}^- = \frac{\dot{M}_B}{R_{ktB}} \quad (18)$$

- 여기서, θ_{rA}^- : A점에서의 증분회전각
 θ_{rB}^- : B점에서의 증분회전각
 R_{ktA} : A점에서의 접합부 접선강도
 R_{ktB} : B점에서의 접합부 접선강도

R_{kt} 는 접합부의 초기강성(R_{ki})로부터 접합부의 형상에 따라 실험데이터에 기초하여 유도된 식이다. 따라서 반강접을 고려한 부재의 강성매트릭스는 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_A \\ \bar{M}_B \\ \bar{P} \end{bmatrix} = \frac{E_t I}{L} \begin{bmatrix} s_{ii}^* & s_{ij}^* & 0 \\ s_{ij}^* & s_{jj}^* & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_A \\ \theta_B \\ e \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서

$$s_{ii}^* = \frac{s_{ii} + \frac{E_t I s_{ij} s_{jj}}{LR_{ktB}} - \frac{E_t I s_{ij}^2}{LR_{ktB}}}{R^*}$$

$$s_{jj}^* = \frac{s_{jj} + \frac{E_t I s_{ij} s_{ii}}{LR_{ktA}} - \frac{E_t I s_{ij}^2}{LR_{ktA}}}{R^*}$$

$$s_{ij}^* = \frac{s_{ij}}{R^*}$$

$$R^* = \left(1 + \frac{E_t I s_{ii}}{LR_{ktA}}\right) \left(1 + \frac{E_t I s_{jj}}{LR_{ktB}}\right) - \left(\frac{E_t I}{L}\right)^2 \left(\frac{s_{ij}^2}{R_{ktA} R_{ktB}}\right)$$

평면 강구조 골조의 해석 및 설계를 위한, 이 방법은 기존의 소성힌지법을 안정함수를 사용하여 기하학적 비선형효과를 고려하고, 접선계수(E_t) 개념을 도입하여 잔류응력에 따른 점진적인 항복도 고려하였다. 또한 축력-휨모멘트 상관관계를 이용하여 휨을 받는 단면의 점진적 소성화현상과 3-parameter power model을 이용하여 기둥-보 접합부의 반강접의 영향을 고려하였다. 이 방법은 개재(個材)의 능력에 대한 별도의 검토 없이 구조 전체시스템의 거동을 예측할 수 있는 특징이 있는 방법이다.

3. 수치해석 및 고찰

앞 절에서의 개선 소성힌지법에 의한 프로그램(PAAP, W.F.Chen, S.E.Kim.(1996))을 사용하여 다양한 해석모델에 대해서 수치해석을 실시한다. 해석모델(그림 4)은, 주각은 모두 고정이고, 기둥-보 접합부는 강접과 반강접인 경우(Top and Seat Angle Model, 그림 5)로 나누며, 각 모델에서 반강접의 위치는 기둥-보 접합부의 양쪽 보단부에 설치하는 것으로 했다. 하중조건은 수평하중(Q)만 받는 경우와 수평력(Q)과 축력(P)을 동시에 받는 경우를 대상으로 하며, 축력(연직하중)은 각 절점에 작용하는 것으로 하고, 수평하중은 역삼각형 분포로 작용하는 것으로 한다.

그리고 수치해석에 의해 반강접율의 비율에 따른 골조의 거동을 비교 검토하기 위해서, 기존의 범용구조해석 프로그램인 MIDAS GENw(Ver.4.1.3)을 사용하여, 그림 4의 해석모델에 대해서 해석을 수행한다.

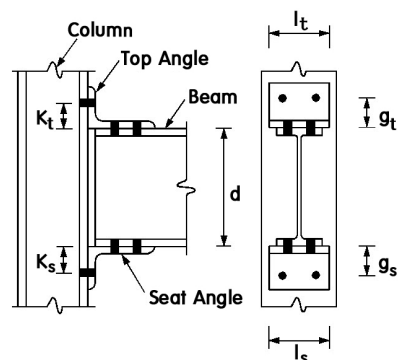


그림 5. 상하부 L형강 접합부 상세

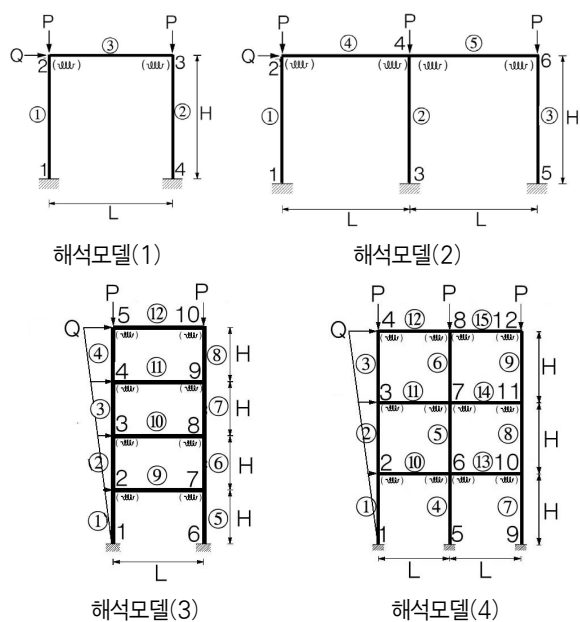


그림 4. 해석모델(강접 및 반강접)

3.1 부재의 종류와 기계적 성질

표 1. 부재의 성질

	단면형	A(cm ²)	I(cm ⁴)	Z(cm ³)	P _y (kN)
모델(1)	H-250×250×9×14	92.2	10800	8670	222
모델(2)	H-125×125×6.5×9	30.3	847	136	727
모델(3)	H-450×200×9×14	96.8	33500	1490	2323
모델(4)	H-450×200×9×14	96.8	33500	1490	2323

보와 기둥은 동일 부재로 선택하고, 모델(1)은 H-250×250×9×14, 모델(2)는 H-125×125×6.5×9, 모델(3) 및 모델(4)는 H-450×200×9×14를 채택했으며, SS400 강재, E를 206kN/cm²를 사용했다. 그리고 부재의 길이는 모델(1)은 L=H=300cm, 모델(2)는 L=140cm, H=90cm, 모델(3)은 L=600cm, H=350cm,

모델(4)에서는 L=H=400cm로 했다. 특히 모델(1)에서는 강비 $K_b(0.5, 1.0, 2.0)$ 를 변화시키기 위해 부재를 바꾸지 않고 경간 길이를 조정했다.

그런데, 해석프로그램 PAAP을 이용하여, 반강접 접합부의 영향을 고려하기 위해서는 별도로 3 PAR.EXE를 실행하여 PAAP에 필요한 입력data를 먼저 얻어야 한다. 반강접 접합부(그림 5)의 경우는 L-150×100×9 과 M20볼트를 사용하고, 보와의 접합길이는 20cm로 했다. 그리고 반강접 접합부의 해석을 위한 입력 data와 해석결과 얻어진 3 Parameter에 관한 값은 표 2와 같다.

표 2. 반강접 접합부용 입력 data

	l_t	t_t	k_t	g_t	w	d	R_{kt}	M_u	n
모델(1)	20	0.9	2.2	6.3	3.2	25	64627.6	273.1	1.315
모델(2)	10	0.9	2.2	6.3	3.2	12.5	8649.6	79.2	1.99
모델(3)	18	0.9	2.2	6.3	3.2	45	182678.1	410.94	0.766
모델(4)	18	0.9	2.2	6.3	3.2	45	182678.1	410.94	0.766

l_t : 접합되는 앵글길이(cm), t_t : 앵글두께(cm)

k_t : 앵글 뒷 축에서 필렛선단까지의 거리(cm)

g_t : 볼트중심에서 모서리까지의 거리(cm),

w : 너트의 직경(cm), d : 보의 높이(cm)

R_{kt} : 접합부 초기강성, M_u : 접합부의 극한모멘트(kN·cm)

n : 형상계수

3.2. 해석결과

3.2.1. 해석결과

골조시스템의 거동을 검토함에 있어 축력과 수평력을 동시에 받는 경우와 수평력만 받는 경우의 재하패턴에 대해서, 강접 접합부와 반강접 접합부의 강성의 변화, 소성힌지의 발생위치와 순서, 단면여력(첫 번째 소성힌지 발생 때의 재하 하중/사용하중)에 관심을 두고 해석을 수행했다.

각 모델 모두, 해석시의 부재의 성질과 반강접용 입력 값은 표 1, 표 2와 같다.

모델(1)은, 골조의 내력에 미치는 강비(기둥에 대한 보의 강도의 비) $K_b(0.5, 1.0, 2.0)$ 를 변화시키면서, 해석을 실시했고, 수평력(Q)과 축력(P)을 받는 경우, 그 결과는 표 3과 같다. 표 4는 각 모델에 축력과 수평력이 $P=Q=0.2P_y$ 작용한 경우의 해석결과이며, 모델(2)의 (2667)은 반강접일 때의 모멘트 값이다. 표 5는 수평력만 $Q=0.2P_y$ 작용하는 경우의 각 모델의 해석결과이다.

표 3. 축력(P)+수평력(Q) 경우 하중(kN), 모델 (1)

강비	사용하중	1st 소성힌지	2nd 소성힌지	단면여력(a)
$K_b=0.5$	$0.2P_y$	1022 (78580)	1083 (67430)	2.30
	$0.4P_y$	1019	1090	1.15
	$0.6P_y$	1019	1085	0.77
$K_b=1.0$	$0.2P_y$	845 (61300)	871 (54970)	1.90
	$0.4P_y$	845	871	0.95
	$0.6P_y$	845	871	0.63
$K_b=2.0$	$0.2P_y$	628 (45510)	644 (36770)	1.41
	$0.4P_y$	628	646	0.71
	$0.6P_y$	628	649	0.47

() 안의 값은 각 경우의 휨모멘트의 값(kN·cm)

표 4. 축력(P)+수평력(Q) 받는 경우, 강접 / 반강접의 하중 비,

		1st 소성힌지 하중	휨모멘트	단면여력
모델(1)	0.5	0.99	0.86	0.99
	1.0	0.91	0.91	0.91
	2.0	0.89	0.96(45510)	0.88
모델(2)		1.16 (149)	0.94 (2502)	1.15 (1.02)
모델(3)		1.40 (94.8)	0.59 (1833)	1.33 (0.20)
모델(4)		1.28 (185)	0.85 (2690)	1.29 (0.40)

()값은 강접합 때 재하하중(kN), 모멘트(kN·cm)이다.

표 5. 수평력(Q)만 받는 경우, 강접 / 반강접의 하중 비,

		1st 소성힌지 하중	휨모멘트	단면여력
모델(1)	0.5	1.13	0.81	1.13
	1.0	1.01	0.90	1.01
	2.0	0.93	1.18	0.93
모델(2)		1.17 (175)	0.99 (2875)	1.18 (1.20)
모델(3)		1.39 (96)	0.97 (2957)	1.40 (0.21)
모델(4)		1.33 (194)	0.97 (2942)	1.35 (0.41)

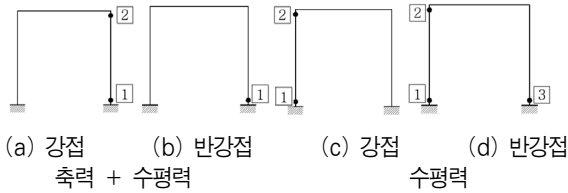
()값은 강접합 때 재하하중(kN), 모멘트(kN·cm)

3.2.2. 소성힌지의 발생과 내력

(1) 1층1스팬 골조(모델 (1))

모델(1)은 지점은 고정이고 기둥-보 접합부는 강접, 반강접으로 나누어, 집중하중이 절점에 축력과 수평력을 작용시켜 해석한 것이다. 하중은 축력, 수평력 모두 항복하중(P_y)의 20%, 40%, 60%인 경우에 대해 각각 해석을 했고, 수평력만 받는 경우에 대해서는, 20%인 경우인 $Q=0.2P_y$ 에 대해서만 해석을 했다. 하중 증분에 의한 구조해석을 위해 Scale Factor는 20으로 했으며, 모델(1)의 경우, 수직 및 수평하중의 증분치는, $0.2P_y$ 경우는, 22.2kN 이 된다.

이 모델은, 강비 $K_b(0.5, 1.0, 2.0)$ 가 골조내력에 미치는 영향에 대해 조사한 것으로서, 표 3에서 보면, 강비가 커질수록 더 낮은 하중에서 소성힌지가 발생하고, 그 때의 휨모멘트도 작아진다. 또한 축력비(0.2, 0.4, 0.6)와는 거의 관계없이 내력이 결정된다. 소성힌지발생 순서와 위치는 그림 6과 같다.



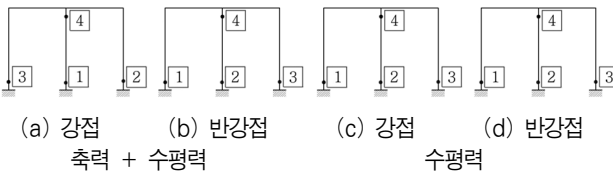
(a) 강접 축력 + 수평력 (b) 반강접 수평력 (c) 강접 수평력 (d) 반강접 수평력

그림 6. 소성힌지 생성순서

(2) 1층 2스팬 골조(모델(2))

모델(2)도 모델(1)과 같은 경계조건이며, 하중은 10kN씩 증분작용시켰고, 축력 및 수평력을 0.2 P_y 작용시켜, 강접, 반강접 접합부를 대상으로 해석을 실시했다. 표 4의 () 값은 강접합의 경우, 첫 번째 소성힌지(149) 및 그 때의 휨모멘트(2502)를 의미하며, 표 3의 모델(1)에 비해 내력이 작다.

소성힌지발생 순서와 위치는 그림 7과 같다. (a)는 축력과 수평력을 받는 경우, 기둥-보 강접합의 결과이고, 반강접의 경우는 (b)와 같다. 또한 수평력만 받는 경우, 강접, 반강접 각각 (c),(d)와 같고, (b)와도 같다. 이는 반강접의 경우는 연속 보로서의 역할이 강접의 경우보다 떨어지므로 수평력에 대한 저항능력이 약했던 것으로 보인다.



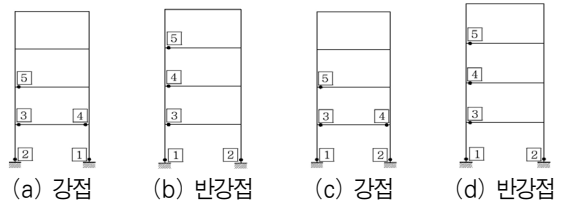
(a) 강접 축력 + 수평력 (b) 반강접 수평력 (c) 강접 수평력 (d) 반강접 수평력

그림 7. 소성힌지 생성순서

(3) 4층 1스팬 골조(모델(3))

축력(연직하중) 0.2 P_y 를 주두에 작용시키고, 수평력은 최상층에서부터 0.2 P_y , 0.15 P_y , 0.1 P_y , 0.05 P_y 의 역삼각형 분포로 왼쪽에서 오른쪽방향으로 작용시켰다. 소성힌지발생 순서와 위치는 그림 8과 같다.

수평력과 축력이 작용하는 경우, 반강접의 경우는 왼쪽기둥(①번 부재)하단, 강접의 경우는 오른쪽 기둥(⑤번 부재)하단부에서 소성힌지가 먼저 발생했다. 이것은, 4층 1스팬 골조의 경우, 수평력이 작용하면 좌측의 기둥들은 휨모멘트와 인장을 받게 되고, 우측의 기둥들은 휨모멘트와 압축을 받게 되므로 골조의 형상과 재하하중의 패턴분포에 따라 좌우됨을 알 수 있다.

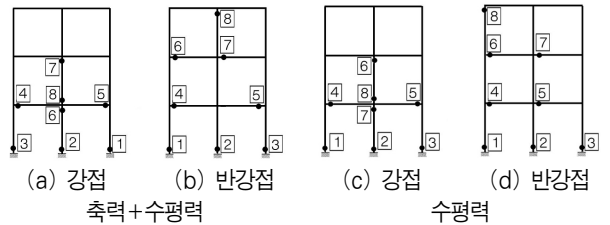


(a) 강접 축력+수평력 (b) 반강접 수평력 (c) 강접 수평력 (d) 반강접 수평력

그림 8. 소성힌지 생성순서

(4) 3층 2스팬 골조(모델(4))

축력(P)은 각 주두에 0.2 P_y 를 작용시키고, 수평력은 0.2 P_y , 0.14 P_y , 0.07 P_y 의 역삼각형 분포하중을 작용시켜, 강접, 반강접 접합부에 대해서 해석을 실시했다. 해석결과 소성힌지의 생성순서는 그림 9와 같다.



(a) 강접 축력+수평력 (b) 반강접 수평력 (c) 강접 수평력 (d) 반강접 수평력

그림 9. 소성힌지 생성순서

그림 6 ~그림 9에서, 각 모델의 소성힌지 발생순서 및 붕괴 매카니즘을 알 수 있어서 골조의 형상과 재하패턴에 따른 거동 특성을 알 수 있다.

3.2.3. 반강접 골조에 대한 강접골조의 내력

표 4는 축력과 수평력 모두 0.2 P_y 를 받는 경우, 각 모델에 대해, 기둥-보 반강접 접합부에 대한 강접의 내력비율을 비교한 것이다. 모델(1)은 반강접의 경우가 강접에 비해 첫 번째 소성힌지 발생하중 및 그 때의 휨모멘트가 1.0이하로 작고, 모델(2)의 경우 소성힌지발생하중은 1.16으로 강접 골조가 반강접골조보다 힌지가 나중에 발생하지만, 휨모멘트는 0.94로 반대이다. 이는 모델(2)의 경우는, 반강접골조는 첫 번째힌지가 발생했을 때는 아직 최대 내력에 이르지 않았음을 의미한다. 모델(3), 모델(4)도 모델(2)와 같은 경향이지만, 휨모멘트 값은 모델(1), 모델(2)에 비해 상당히 작은 것은, 모델(3), 모델(4)는 기둥-보가 강접합일 때는, 내력이 현저히 낮아짐을 의미한다.

표 5는 수평력(Q) 만 $Q=0.2P_y$ 를 받는 경우, 각 모델에 대해, 기둥-보 반강접 접합부에 대한 강접의 내력을 비교한 것이다. 축력과 수평력을 같이 받는 표 4와 거의 비슷한 경향이다. 이는 기둥-보 접합부의 강성은 재하패턴과는 상관없이 골조의 형상과 관련이 많음을 의미한다.

3.3 해석결과에 따른 고찰

개선소성힌지법에 의한 프로그램을 이용하여 다양한 해석모델에 대한, 내력, 단면여력, 소성힌지의 발생위치 및 그 때의 하중, 휨모멘트, 단면여력 및 힌지발생 순서에 대해서 검토를 한다.

3.3.1 강비와 골조의 내력(모델 (1))

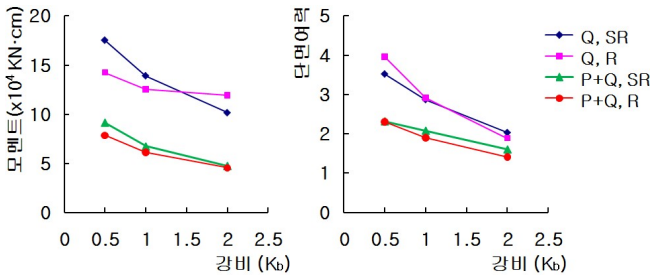


그림 10. 1st 소성힌지 모멘트

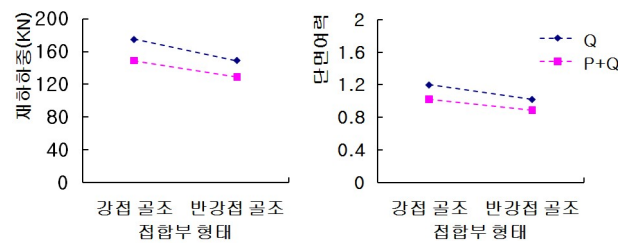
그림 11. 단면여력(모델 1)

그림 10은 모델(1)에서 첫 번째 소성힌지가 생길 때의 휨모멘트와 강비(K_b)의 관계를 보인 것으로, 축력(P)+수평력(Q), 수평력(Q)만 받는 경우 반강접골조(SR)가 강접골조(R)보다 내력이 약간 크며, 수평력만 받는 경우가 축력을 같이 받을 때보다 내력이 크다. 이것은 하중조건이 더 가혹하거나 기둥-보 접합부의 강성이 작을수록 소성힌지가 먼저 형성이 되기 때문이다. 반면에, 수평력(Q)만 받는 경우, K_b 가 2.0인 경우는 강접(R) 반강접(SR)보다 내력이 크다.

단면여력은, 소성힌지법에서의 특징 중 하나이며, 사용하중(해석시 입력하중)에 대한 첫 번째 소성힌지 발생시의 하중에 대한 비율(α)을 평가한 것으로, $\alpha \geq 1.0$ 이면 단면의 크기를 줄여도 되며, $\alpha \leq 1.0$ 이면 골조의 형상이나 단면크기가 사용하중에 대해 불안정하므로 단면을 재선정해야 함을 의미한다.

그림 11에서 부재의 단면여력은 기둥에 비해 보의 강성(K_b)가 커질수록 작아지고, 강접(R)이 반강접(SR)보다 크며, P+Q의 경우가 Q보다 크다. 즉, 강비가 커질수록, 또 기둥-보가 반강접이 될 수록 단면의 크기가 부족하여 단면을 재선정해야 한다.

3.3.2 접합부 강성에 따른 골조의 내력(모델(2))

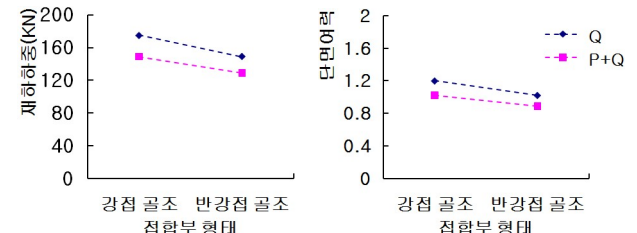


(a) 1st 소성힌지 발생시 하중

(b) 단면여력

그림 12. 접합부 강성과 골조의 내력(모델 2)

모델(2)는 모델(1)의 단순골조가 병렬로 강접합되어 있는 복합골조로서, 일반적으로 복합골조의 기둥은 수직방향의 휨은 작고 수평하중의 흡수능력은 커지며 보는 연속보의 거동과 비슷하다. 그림 12에서, 첫 소성힌지 발생시의 재하하중이나 단면여력이 반강접 골조(SR)가 강접(R)보다 작다. 이는 강접골조의 경우는 연속보의 효과로 기둥의 휨내력이 증가하기 때문이라 생각된다. 또 수평력만 받는 골조가 조합력을 받는 골조보다 내력이 크다.

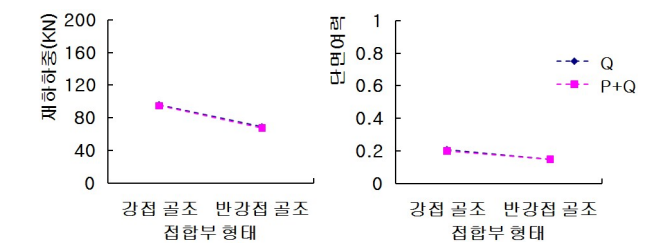


(a) 1st 소성힌지 발생시 하중

(b) 단면여력

그림 13. 접합부 강성과 골조의 내력(모델 2)

3.3.3 접합부 강성에 따른 다층골조의 내력(모델(3))



(a) 1st 소성힌지 발생시 하중

(b) 단면여력

그림 14. 다층골조의 내력(모델 3)

모델(3)과 같은 단일스팬의 다층골조가 수평하중을 받는 경우, 캔틸레버의 비렌들 트러스의 거동과 비슷하여, 바람이 부는 쪽 기둥은 인장과 휨을 받고, 반대편 기둥은 압축과 휨을 받는다. 보는 전단을 인장부재에서 압축부재로 전달하는 역할을 하며 기초의 반력방향은 서로 반대가 된다.

그림 14에서 소성힌지 발생시의 하중은 재하형태의 차이가 거의 없는 것이 흥미로우며, 단면여력은 모델(1), 모델(2)에 비해 상당히 낮고, 반강접(SR)의 경우가 강접(R)보다 작아서 단면 재선정이 필요한 것으로 보인다. 모델(3)과 같은 단일스팬의 다층골조는 골조의 형태가 세장하고 모델(2)와 같은 연속보의 효과도 없고, 연직하중을 최상층의 절점에만 준 관계로 조합력(P+Q)이나 수평력(Q)만 받는 경우의 차이가 거의 없었으며, 반강접(SR)골조가 강접(R)보다 수평력에 대한 저항력이 떨어져서 단면여력도 작아진 것 같다.

3.3.4 접합부 강성변화에 따른 내력(모델 4)

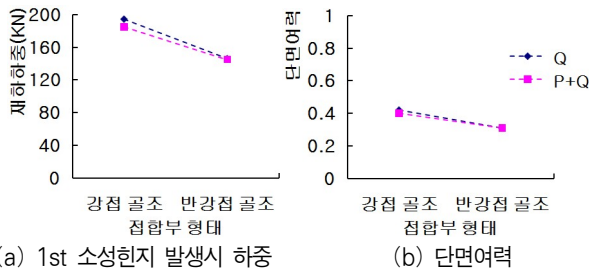


그림 15. 접합부 강성변화에 따른 내력(모델(4))

모델(4)는 다층다스팬 골조의 성질을 갖고 있는 일반적인 형태의 골조로서, 하중패턴의 차이에 따라 소성힌지의 발생순서가 상이함을 알 수가 있다.

그림 15에서는 반강접(SR) 골조의 경우가 강접(R)골조보다 재하하중이나 단면모멘트가 낮은 것은 모델(3)의 경우와 같은 경향이다.

3.3.5 골조의 종류에 따른 단면모멘트

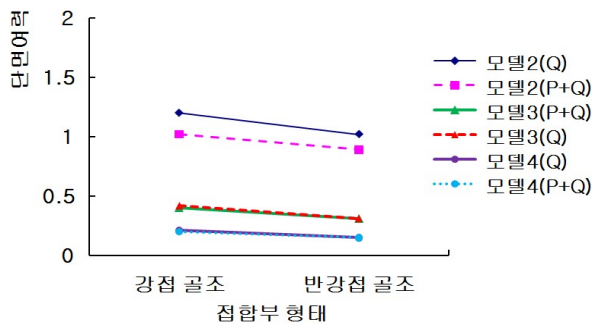


그림 16. 하중패턴에 따른 단면모멘트

그림 16는 사용하중이 $0.2P_y$ 일 때 골조의 종류에 따른 단면모멘트를 비교한 것이다. 하중이 같더라도 4층 골조(모델3)는 0.2이하, 3층 골조(모델4)는 0.4이하 1층 골조(모델2)는 1.3이하로 골조의 형상과 층수에 따라서 단면모멘트에 차이가 크다.

모델(2), 모델(3), 모델(4)에서는 그 값이 1.0이상으로, 강접

합의 경우가 반강접보다 내력이 더 크다. 그러나 모멘트 값은 1.0이하로서, 이 값은 첫번째 소성힌지가 발생하는 점에서의 휨모멘트이기 때문이며, 이것은 반강접합의 경우, 소성힌지법에 의한 해석에서는 강접합의 경우와 달리, 첫번째 소성힌지 하중보다도 더 큰 하중에서 붕괴메카니즘이 형성될 수 있음을 의미한다.

4. 상용프로그램에 의한 골조의 거동

4.1 상용프로그램에 의한 해석

여기서는 상용 구조해석프로그램인 MIDAS-GENw를 이용하여, 3절에서의 해석모델에 대해서 탄성해석을 실시하여, 골조의 기하학적 형태와 반강접 비율에 따른 골조의 거동에 대해서 축력과 수평력을 동시에 받는 경우에만 검토한다.

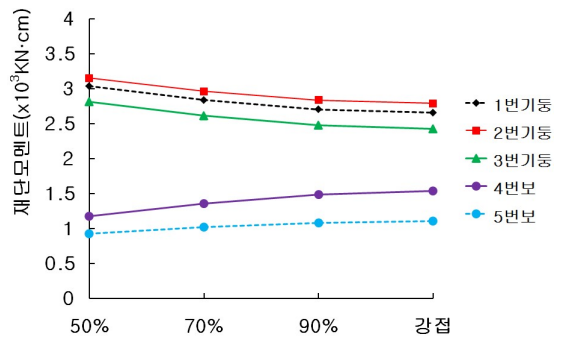


그림 17. 반강접률에 따른 부재단부의 휨내력(모델(2))

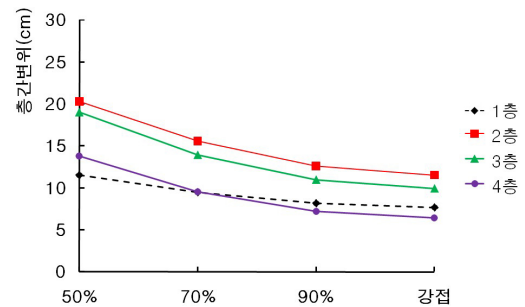


그림 18. 반강접률에 따른 층간변위(모델(3))

표 6. 축력과 수평력을 받는 경우의 최대 휨내력 (상용프로그램에 의한 경우)

골조의 유형	강접					최소소성힌지 발생위치	반강접(70%)					최소소성힌지 발생위치
	최대 휨 내력 (kN·cm)						최대 휨 내력 (kN·cm)					
	보		기둥				보		기둥			
모델 1	27838.8 (③좌단)		39000.4 (①하단)	38681.4 (② 하단)		② 하단	25336.8 (③좌단)		41634.6 (①하단)	41231.5 (②하단)		② 하단
모델 2	1537.5 (④ 좌단)	-1415.4 (⑤ 우단)	2789.1 (② 하단)	2656.5 (① 하단)	2425.4 (③ 하단)	② 하단	1355.7 (④좌단)	-1259.1 (⑤ 우단)	2965.4 (②하단)	2837.8 (③ 하단)	2612.5 (③ 하단)	① 하단
모델 3	14911.9 (⑨좌단)		14879.9 (①하단)	14847.1 (⑤하단)		⑤ 하단	14110.7 (⑨ 좌단)		16995.9 (①하단)	16935.7 (⑤하단)		① 하단
모델 4	79976.5 (⑩좌단)	-79572.6 (⑬ 우단)	85339.8 (④하단)	76277.9 (①하단)	75752.7 (⑦하단)	⑦ 하단	73185.5 (⑩ 좌단)	-72159.1 (⑬우단)	93322.0 (④하단)	83622.5 (①하단)	82974.1 (⑦하단)	① 하단

그림 17을 참고하면 기둥-보 접합부의 반강접율이 커질수록, 기둥은 휨내력이 저하되고 보는 증가하는 경향에 있고, 또한 층간변위는 작아진다(그림 18).

4.2 상용프로그램과 개선 소성힌지법에 의한 거동비교

4.2.1 소성힌지의 발생 순서

각 해석모델(그림 4)에 대한 첫 번째 소성힌지 발생위치에 관심을 갖고, 개선소성힌지법에 의한 해석결과와 Midas에 의한 결과(표 6)를 비교해보면, 각 모델별로 거의 발생위치나 순서가 일치한다. 예를 들어, 모델(3)의 경우, 소성힌지법에 의한 발생순서는, 그림 7(a) 강접의 경우는, 오른쪽기둥(⑤번 부재 하단)→왼쪽기둥(①번부재 하단)→보(⑨번부재 좌단)의 순서이며, Midas에 의한 표 6의 모델(3)을 보면 일치함을 알 수가 있다. 이는 전체적인 면에서 양쪽의 방법이 골조의 거동을 평가할 수 있을 정도(精度)로 좋은 해석결과를 보여주고 있음을 의미한다. 이는 Midas에 의하면 각 골조의 붕괴메카니즘을 포함한 일반적인 거동조사를 할 수 있음을 보여준다.

4.2.2 소성힌지발생 하중과 휨모멘트

소성해석법에 의한 결과는, 첫 번째 소성힌지가 발생한 부재만의 내력(힌지발생 하중, 휨모멘트)을 구하였지만, Midas에 의한 결과는 각 부재에서의 힌지발생점 내력 중 최대치를 휨내력으로 하여 구할 수 있어서, 해석치와 표 6의 직접비교는 다소 다르지만, 대략적인 거동비교는 할 수 있다.

예를 들어, 모델(2)의 경우, Midas 값(표 6)에 대한 소성힌지해석법의 결과(표 4)를 비교하면, 강접합 $2502/2789=0.897$, 반강접 경우는, $2667/2838=0.94$ 로 상용 설계프로그램인 Midas가 내력을 다소 크게 평가하고 있다.

이상에서, 강골조의 내력은 강접, 반강접의 영향과 재하조건, 강비(K_b)에 따라 복합적으로 결정되는 사항이므로 좀더 다양한 수치해석의 결과를 토대로 평가되어야 함을 알 수가 있다.

5. 결론

이 연구에서는 개선된 소성힌지법을 이용하여 강접 및 반강접 강골조 구조물의 해석을 실시하였다. 수치해석은 다양한 형태의 해석모델에 대해서, 축력과 수평력을 동시에 받는 경우와 수평력만 받는 경우에 대해서 실시했으며, 소성힌지의 발생 위치와 순서, 내력, 단면여력 등에 관심을 갖고 해석했고, 상용프

로그램 Midas Gen에 의한 해석결과와 정도 및 거동특성비교를 통해 검토한 결과는 다음과 같다.

- (1) 개선된 소성힌지해석법을 이용하여 소성힌지의 발생위치와 생성하중 및 내력을 알 수 있고, 단면여력을 알 수 있어서, 골조의 거동을 분석하고, 적정단면의 선정에 응용할 수가 있다.
- (2) 상용프로그램 Midas Gen과 개선 소성힌지법에 의한 각 모델의 소성힌지발생 위치와 순서는 거의 일치하였으며, 내력도 비교적 잘 평가하고 있다.
- (3) 모델(1)의 경우, K_b 가 클수록 적은 하중에서 소성힌지가 생기고 단면여력도 적어진다.
- (4) 모델(2), 모델(3), 모델(4)골조에서, 축력과 수평력을 받는 경우, 수평력만 받는 경우보다 더 작은 하중에서 소성힌지가 생성되어 내력이 더 작아진다.
- (5) 표 4와 표 5는 비슷한 경향을 보이며, 기둥-보 접합부의 강접, 반강접의 거동은 재하패턴에는 큰 영향이 적고, 골조의 형태에 민감하여 다층골조가 단층골조보다 단면여력이 부족하므로 다층골조 설계시 주의가 필요하다.

참 고 문 헌

- KBCS(2005) 건축구조설계기준, 대한건축학회
 박준우(1998) 안정함수를 이용한 공간강뼈대 구조물의 비선형 해석 포물레이션, 석사학위논문, 경북대학교 대학원
 장준호(1998) 재료 및 기하학적 비선형을 고려한 반강접뼈대 구조물의 최적설계 프로그램의 개발, 박사학위논문, 경북대학교 대학원,
 W.F.Chen and S.E,Kim(1996) LRFD steel design using advanced analysis, *purdue univ., Press*
 S.E,Kim and W.F.Chen(1991) practical advanced analysis for unbraced steel frame design, *Journal of structural Engineering, ASCE, VOL.118 PP.408-428*
 Abdel-Ghaffar,M.,White.D.W,W.F.Chen(1993) An error estimate and step size control method for nonlinear solution technique, *Journal offinite element in analysis and design, Vol.13, pp.137-428*
 W.F.Chen and I.Sohal(1995) Plastic design and second-order analysis of steel frame, *spring-verlag,*
 (접수일자 : 2009. 9. 15 / 심사일 2009. 9. 17 / 게재확정일 2009. 9. 10)