

경량형강 시설물의 비선형 구조해석 모델개발(II)

- 반강결 뼈대구조물의 해석에 대하여 -

Development of the Nonlinear Structural Analysis Model for the Light-Weight Framed Structures (II)

- With the Semi-Rigid Connected Framed Structures Analysis -

김 한 중* · 이 정 재**
Kim, Han Joong · Lee, Jeong Jae

Summary

In this study, semi-rigid light-weight framed structures analysis model (SERIFS) was developed by advancing the LEIFS model. This model enables us to analyze simultaneous effects of large deflection and semi-rigid connection by computing unbalanced load occurring in the process of repeated loading through equalization of bending moments and torsion. This model is also able to handle the effect of the semi-rigid connection and large deflection by modifying the elastic stiffness matrix using moment-rotation behavior of connection. Moment-rotation behavior of the semi-rigid connection was adopted from the experimental results of load-vertical displacement of frame element. In conclusion, this model achieves to analyze the nonlinear and large deflection behavior on the semi-rigid and light-weight steel frame connection.

I. 서 론

작용 하중이 작아서 경량구조재로 설계된 농업시설물들은 일반적으로 뼈대 구조의 기본 형태로 이루어 진다. 일반 구조용 강재를 사용하는 뼈대구조물에서와는 달리 경량형강 부

재를 사용하는 구조설계에서는 결합부에서의 휨 모멘트와 비틀림 모멘트에 대한 취약성으로 인하여 부재가 국부좌굴하거나 결합부의 강성을 지속적으로 유지하기가 어려워, 결합부에서의 모멘트-회전 거동이 뚜렷한 비선형성을 나타내는 것을 볼 수 있다.

* 서울대학교 농업개발연구소

** 서울대학교 농업생명과학대학

키워드 : 반강결 뼈대구조, 경량형강

뼈대구조물은 연결부의 형태에 따라 강결 결합(rigid connection)과 회전 결합(hinged connection)으로 구분되고 있으며,^{1,20)} 구조물 설계시에는 가능한 한 안전설계가 되도록 회전 결합으로 설계되는 경향이 있다.¹⁵⁾ 실제 구조물의 거동은 대부분 위의 두가지 연결형태의 사이의 거동의 나타내는 반강결 결합(semi-rigid connection)으로서 비선형적으로 거동하는 것으로 알려져 있으며,^{11,14)} 특히 경량형강을 이용하는 뼈대구조물에서는 결합부가 완전히 강결 결합되기 어려우므로¹⁶⁾ 보-기둥 요소의 해석에서 결합부의 비선형 회전 거동과 대변형(大變形) 효과를 동시에 고려할 필요가 있다.²⁾

뼈대 구조물의 결합부의 반강결 효과는 일찍이 1942년 Johnston과 Mount에 의하여 고정도 계수(γ_1)를 통하여 탄성강도행렬을 수정하는 방식이 시도되었다.^{1,9,13)} 그런데 60년대 중반에 들어서면서 부터 직접강도해석 방법이 알려지고, 컴퓨터가 발달되면서 대량의 계산이 가능해짐에 따라 Monforton과 Wu, Livesly, Gere, Weaver 등이 독자적으로 강도행렬 구성 방법을 연구한 바 있으며, Monforton과 Wu는 고정도계수법이 강도행렬을 구성하는 데 유용한 방법으로 적용될 수 있다고 지적 하였다.²⁾ Nerthercot(1985)와 Ang, Morris(1986) 등이 반강결성과 구조물의 연성 요구도 및 모멘트, 내력의 재분배 효과를 고려한 모형을 이용하거나 탄성안정함수를 이용하여 결합부 회전각의 비선형 거동을 수정처짐각법과 같은 방법으로 모델화를 시도하였다.^{6,11)} 한편 양과 구(1994) 등은 실제 구조물과는 차이가 있지만 보와 기둥의 사이를 완전 힌지로 보고, 보와 기둥 사이에 상대적으로 낮은 강성비를 갖는 부재를 삽입하여, 이 강성체의 응력-변형률(σ - ϵ)관계식으로 부터 결합부의 모멘트-회전 거동 해석방법을 제안하였다.⁴⁾

반강결 결합부에 대한 실험적 연구를 통한

모델 개발의 일환으로 Ang과 Morris, 김^{2,6,9)} 등은 단순뼈대 구조물의 실험이나 모델링을 통하여 구조물 거동에서 나타나는 모멘트-회전 거동과 구조적 성능을 비교 평가하였으며, 반강결성을 고려하는 구조물의 경우 에너지 흡수 성능이 높아져 연성도가 향상되고 횡강성이 저하된다는 사실을 지적하였다. 이러한 사실들로 미루어 보아 구조물의 탄성설계시 강결 결합으로 해석하는 경우에는 횡하중에 대한 연성도가 작게 나타나므로 상대적으로 과다설계가 되거나 불완전한 해석이 될 우려가 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 경량 뼈대구조물 거동의 비선형성과 대변형(大變形) 효과를 고려한 LEIFS모델²⁾을 부재 결합부의 형태에 따라 강결 결합(rigid connection)과 회전 결합(hinged connection), 반강결 결합(semi-rigid connection)으로 구분하여,^{3,20)} 실제 구조물의 연결부 거동을 해석할 수 있는 모델인 SER-IFS(**S**Emi-**R**Igid light- **w**eight **F**ramed **S**tructure analysis model)를 개발하고자 한다.

II. 반강결 경량 뼈대구조 해석 모델

1. 반강결 뼈대구조의 특성

실제 뼈대구조에서는 회전 결합부에서도 약간의 회전 강성(rotational rigidity or rotational stiffness)이 있고, 강결 결합에서도 다소의 유연도(degree of flexibility)가 있음을 관찰할 수 있다.¹⁹⁾ 뼈대구조의 해석모델에서 그동안 주로 적용되어온 여러 가지 결합 형식에 대한 차이와 각국의 설계규준에서 응용되고 있는 반강결 효과 등에 대해서 분석하고, 이들의 영향을 구조해석 모델에 반영하였다.

가. 보-기둥 요소의 결합부 분류

강구조의 보-기둥 결합 형식은 리벳 결합에서 부터 볼트 결합, 고장력 볼트 결합, 용접접

합 등 다양하며, 많은 실험 결과를 바탕으로 결합부 탄소성 해석을 통한 결합 요소의 내력 결정을 비롯하여, 패널의 강성과 기둥의 축력 관계, 보의 상대적 강성 등에 관한 많은 연구가 있어 왔다.

그 동안 지속적이고 광범위한 골조의 거동 실험과 결합부 분류 방식에 대한 연구의 결과로 Eurocode¹⁾에서는 결합부 설계 조건에 대하여 극한강도 한계상태와 사용성 한계상태를 분류하는 적합한 설계 기준이 각 결합부 형식에 따라 강도 및 연성조건을 고려하고, 전체 구조물과도 연관되어 이루어져야 한다고 하였다.

AISC-ASD, LRFD에 의한 결합부 분류는 크게 강결 결합 뼈대구조(full restrained, Type 1)와 회전 결합 뼈대구조(pin restrained, Type 2), 반강결 결합 뼈대구조(partial restrained, Type 3)으로 나누어 지며, 특히 반강결 결합부에서는 발생하는 보-기둥의 상대적인 각 변화에 대한 저항 성능으로 구분하였다.

나. 반강결 결합부의 거동 특성

결합부는 힘과 모멘트를 한 부재에서 다른 부재로 전달하는 역할을 하는데, 대부분의 결합 방식에서는 축방향력과 전단 변형은 회전 변형에 비교해서 작은 량이기 때문에 결합부의 거동 모델링은 작용 모멘트와 회전각과의 관계식을 통해서 나타낼 수 있다. 유연한 결합부의 비선형 거동은 그 동안 사용되어온 여러 함수들 중에서 해석의 정확도와 효율을 높이기 위하여 어떤 임의 순간의 강결도(rigidity)를 결정하여 Ang-Morris⁶⁾가 적용한 바 있는 Ramberg-Osgood 함수형을 써서 모멘트-회전 관계의 비선형성을 묘사하였다.

반강결 결합부가 있는 보-기둥 요소에서는 강결 결합의 모멘트-회전($M-\theta_r$) 관계가 상대 부재간의 연성 거동(flexible behavior)으로 $M-\theta_r$ 의 관계로 변경된다. 이 관계는 Fig.

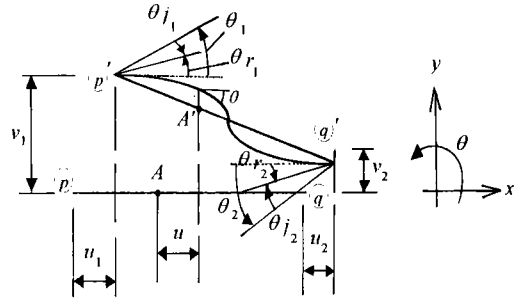


Fig. 1. Behaviour of a beam-column with semi-rigid joint

1에 나타내었으며, 각 변위는 미소 변형가능한 보 요소의 순수 변형거동을 표현하기 위해 사용하였다.

$$\theta_{r1} = \theta_1 - \theta_{j1}, \theta_{r2} = \theta_2 - \theta_{j2} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

θ_{j1}, θ_{j2} : 절점 1, 2에서 발생하는 연성 회전각,

θ_{r1}, θ_{r2} : 절점 1, 2에서의 $M-\theta_r$ 관계에 사용하는 수정된 회전각,

θ_1, θ_2 : 보-기둥이 강결 결합으로 가정된 경우의 회전각

즉, θ_{r1}, θ_{r2} 는 보가 기둥에 대해서 작용하는 모멘트에 대한 상대적 회전각의 크기를 말하는 것으로서 사용되는 반강결 결합부의 성능에 따라서 거동 양상이 다르게 나타난다.

다. 반강결 결합부의 모멘트-회전 관계의 모델화

본 연구에서는 실제 결합부의 모델링을 위하여 부재를 선재로 이상화하고, 결합부가 연결되는 두 부재와 비교해서 부피를 고려할 필요가 없고, 유한요소 모델링에서 추가적인 자유도 증가가 없는 semi-rigid joint 모델을 선정하였다.

2. 반강결 뼈대구조 요소의 해석모델

반강결 결합부의 모멘트-회전 거동을 묘사하기 위해서 뼈대구조의 탄성 강도행렬³⁾을 수정해야 한다. 1942년 Mount는 $\theta = M\lambda$ 라는 관계를 이용하여 결합부의 모멘트-회전 관계를 정의할 수 있다고 제안한 바 있는데⁶⁾, 여기서 λ 는 탄성 거동을 하는 반강결 보-기둥 요소에서 모멘트-회전 곡선의 초기 기울기로 부터 구할 수 있다고 하였다. 또한 Nethercot et al.(1987) 등도 $M_i = C_i \theta_i$ 로서 C_i 를 하중 재하 초기의 결합부 강성도로 사용하여 반강결 결합부를 가진 부재 단부에서 힘과 변위사이의 관계를 유도하고 탄성 강도행렬의 수정을 시도하였다.

Fig. 1에서 (x-y)평면에서 뼈대구조의 보-기둥 요소에 작용하는 힘과 발생하는 변위의 관계는 반강결 결합부를 갖는 보의 양단에서의 2차적 회전 변위 θ_p^b, θ_q^q 로 나타낼 수 있는데, 이 두 변위는 강결 결합부의 보 요소에서 유도된 관계로부터 추가적인 변위가 발생하여 나타난 보와 기둥의 절점 회전 변위의 차이를 의미한다. 반강결 뼈대구조 요소에서 나타나는 변위모드 관계를 기존의 형상함수의 수정을 통하여 적용할 수 있게 된다¹⁸⁾.

Fig. 2에서 부재의 힘-변위 관계와 공액보의 전단력 관계는 Nethercot 등이 제안한 $M_i = C_i \theta_i$ 의 관계식으로부터 $\theta_i^b = \frac{1}{C_i^b} M_3^b, \theta_i^q = \frac{1}{C_i^q} M_3^q$ 를 이용하여 나타내면 식 (2)와 같게 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{M_3^b}{L} \left(L + \frac{3EI_3}{C_i^b} \right) \\ &= \left[3EI_3 \frac{\omega_3^b - R}{L} \right] + \left[\frac{M_3^b}{2} \right] - \left[\frac{3Ab}{L_2} \right] \\ & \frac{M_3^q}{L} \left(L + \frac{3EI_3}{C_i^q} \right) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

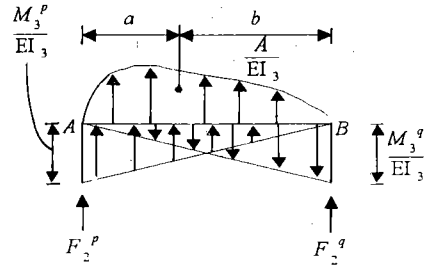
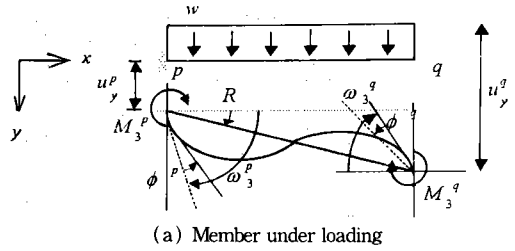


Fig. 2. Conjugate beam for semi-rigid connection

$$= \left[3EI_3 \frac{\omega_3^q - R}{L} \right] + \left[\frac{M_3^b}{2} \right] - \left[\frac{3Aa}{L_2} \right]$$

여기서, A : Conjugate load
a, b : 지점으로부터 A의 도심까지의 거리

$\omega_3^{b,q}$: 단부 b, q의 회전각

식 (2)를 단순화하기 위하여 각 절점의 회전 강성도를 고정도로 계수에 관한 식 (3)의 관계를 이용한다.

$$\frac{L}{L + \frac{3EI_3}{C_i^b}} = \gamma_i^b, \quad \frac{L}{L + \frac{3EI_3}{C_i^q}} = \gamma_i^q \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

γ_i^b : b절점의 i번째 하중 단계의 무차원 고정도 계수,

γ_i^q : q절점의 i번째 하중 단계의 무차원 고정도 계수,

C_i^b, C_i^q : b, q절점의 회전 강성도(rotational rigidity), 작용 모멘트와 회전

각의 관계 $\left(\frac{\Delta M_i}{\Delta \theta_i} \right)$ 로 정의,

$\gamma_i^{pq}=1\sim 0$: (0 : 완전 회전 결합,

1 : 완전 강결 결합)

식 (2)서 강체 회전량(R)은 처짐 변위의 기하학적 관계식, $R = \frac{u_y^q - u_y^p}{L}$ 을 대입하고, 각 모멘트 관계식의 우변에 있는 마지막 항은 외력의 고정단 모멘트로만 사용하므로, $\omega_3^p, \omega_3^q, u_y^q, u_y^p$ 에 대해서 M_3^p, M_3^q 와 단부의 전단력을 나타낸다. 이 과정을 ($x-z$) 평면에 대하여 같은 원리를 적용할 수 있으며 축방향 및 비틀림에 대해서는 단부 회전각에 대한 영향이 미소하므로 탄성강도행렬³⁾의 결과를 그대로 적용할 수 있다. 이 결과를 요약하여 Table 1에 표시하였다.

반강결 뼈대구조의 보-기둥 요소 해석에서 는 외부 작용 하중에 대하여 등가절점력으로 적용할 때에 반복해서 가하는 고정단부의 작용 모멘트를 다음 식 (4)와 같이 수정하여야 한다.

$$\begin{aligned}
 M_3^p &= \frac{wL^2}{12} \cdot \left[3\gamma_i^p \frac{2-\gamma_i^q}{4-\gamma_i^p\gamma_i^q} \right] \\
 M_3^q &= \frac{wL^2}{12} \cdot \left[3\gamma_i^q \frac{2-\gamma_i^p}{4-\gamma_i^p\gamma_i^q} \right] \dots\dots\dots (4) \\
 M_{\frac{1}{2}}^p &= \frac{wL^2}{12} \cdot \left[3\gamma_i^p \frac{2-\gamma_i^q}{4-\gamma_i^p\gamma_i^q} \right] \\
 M_{\frac{1}{2}}^q &= \frac{wL^2}{12} \cdot \left[3\gamma_i^q \frac{2-\gamma_i^p}{4-\gamma_i^p\gamma_i^q} \right]
 \end{aligned}$$

Table 1. Updated frame element stiffness matrix with semi-rigidity factor

$\frac{AE}{L}$	$\frac{12EI_3}{L^3} \frac{a}{h}$	$\frac{6EI_3}{L^2} \frac{b}{h}$	$\frac{12EI_3}{L^3} \frac{a}{h}$	$\frac{6EI_3}{L^2} \frac{g}{h}$
	$\frac{12EI_2}{L^3} \frac{a'}{h'}$	$\frac{6EI_2}{L^2} \frac{b'}{h'}$	$\frac{12EI_2}{L^3} \frac{a'}{h'}$	$\frac{6EI_2}{L^2} \frac{g'}{h'}$
	$\frac{GJ}{L}$	$\frac{4EI_2}{L} \frac{c'}{h'}$	$\frac{6EI_2}{L^2} \frac{b'}{h'}$	$\frac{2EI_3}{L} \frac{f}{g}$
		$\frac{4EI_3}{L} \frac{c}{h}$	$\frac{6EI_3}{L^2} \frac{b}{h}$	$\frac{2EI_2}{L} \frac{f}{h}$
		$\frac{AE}{L}$	$\frac{12EI_3}{L^3} \frac{a}{h}$	$\frac{6EI_3}{L^2} \frac{g}{h}$
			$\frac{12EI_2}{L^3} \frac{a'}{h'}$	$\frac{6EI_2}{L^2} \frac{g'}{h'}$
			$\frac{GJ}{L}$	$\frac{4EI_2}{L} \frac{d'}{h'}$
				$\frac{4EI_3}{L} \frac{d}{h}$

- 1) $a = \gamma_i^p + \gamma_i^q + \gamma_i^p\gamma_i^q, b = \gamma_i^p(2 + \gamma_i^q), c = 3\gamma_i^p, d = 3\gamma_i^q, f = 3\gamma_i^p\gamma_i^q, g = \gamma_i^q(2 + \gamma_i^p), h = 4 - \gamma_i^p\gamma_i^q$
 $\gamma_i^p = \frac{L}{L + 3EI_3/C_i^p}, \gamma_i^q = \frac{L}{L + 3EI_3/C_i^q}, i$ 는 load step
- 2) $a', b', c', d', f', g', h'$ 이 있는 값은 I_3 을 I_2 로 바꾸어준다.
- 3) p, q 는 절점 번호
- 4) $C_i^p, C_i^q : C_i^p = \frac{\Delta M_i^p}{\Delta \theta_i^p}, C_i^q = \frac{\Delta M_i^q}{\Delta \theta_i^q}$

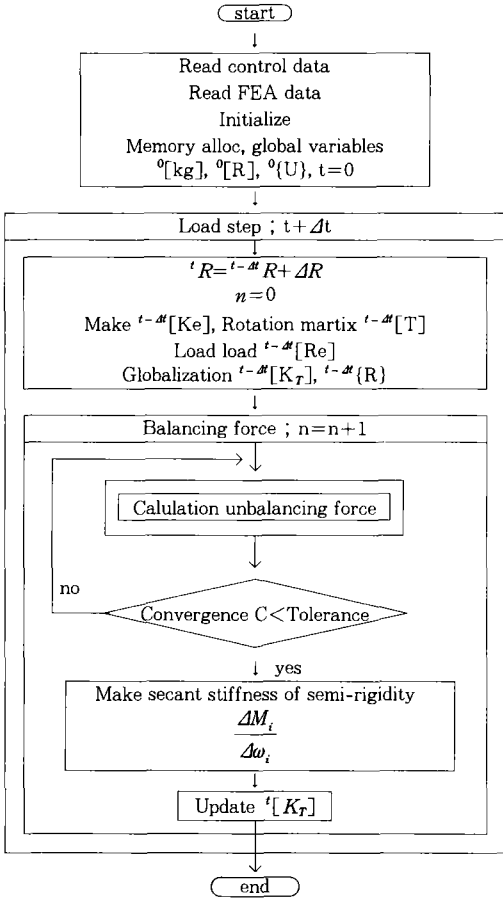


Fig. 3. Flowchart for modified SERIFS

시간 t 에서 계산된 결과를 이용하여 모멘트와 회전각으로부터 회전강성도 C_i 를 구하고, 이로부터 고정도계수 γ_i 를 계산한다. 이 결과를 이용하여 강도행렬을 다시 수정하는 방법으로 Fig. 3과 같은 구조해석 모델을 개발하였다.

III. 모델의 적용 및 고찰

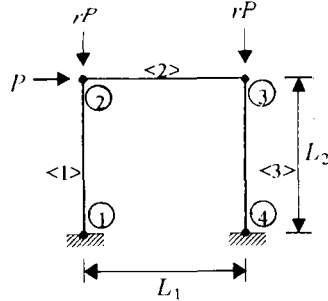
1. 모델의 검증

SERIFS는 LEIFS 모델을 기초로하여 대변형에 반강결 효과를 추가한 모델으로 그 적용성의 검증은 대변형 및 반강결 거동에 대하여

시행하였다.

단층 단순 뼈대구조물의 보-기둥 결합부에 대하여 반강결 효과를 분석한 실험 결과로부터 도출된 관계식²⁾을 뼈대구조의 결합부 반강결 거동을 묘사하는데 이용하였다. 사용된 결합체의 규격 및 작용 하중은 Fig. 4와 같다. 횡하중(P)으로 6tf에 대하여 대변형 효과가 쉽게 나타날 수 있도록 하기 위하여 수직하중은 하중비 $r(10\%)$ 를 사용하여 rP 만큼 가하였다.

반강결 보를 사용하여 설계한 구조물에 축하중과 횡하중이 복합적으로 작용하는 경우, 반강결 결합부인 3번 절점에서의 모멘트 전달능력을 검토하였다. Schilling¹⁶⁾의 실험치와



$E : 1,000\text{tf/cm}^2, I_3 : 3.6\text{cm}^4, A : 480\text{cm}^2$
 $F_u : 1,000\text{tf}, M_u : 120,000\text{tf}, P_{\text{max}} : 6\text{tf}$

Fig. 4. Combined loading on the simple portal frame

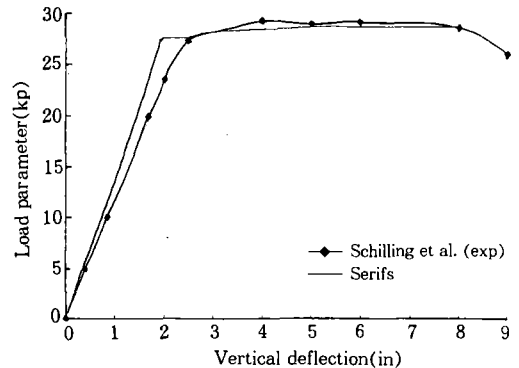


Fig. 5. Comparison of vertical displacement between Schilling's and SERIFS

SERIFS 모형에 의한 해석 결과를 비교해 보면 Fig. 5와 같이 항복하중과 항복하는 과정에 대해서 탄성-완전소성으로 거동하는 재료에 대해서 좋은 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

2. 적용 및 고찰

SERIFS 모형을 이용하여 반강결 결합 상태인 1경간 3층 구조물에 대하여 구조물의 2차 탄성해석을 실시한 결과와 대변형 및 반강결 효과를 동시에 고려한 해석 결과를 비교하였다. 반강결 결합부를 T-stub을 사용하여 보와 기둥을 결합시키는 모델인 SR-TT(T-stub angle connection type) 형식과 보의 상부와 하부를 기둥과 결합시키기 위해서 앵글을 사용하는 SR-TS(top and seat angle connection type) 모델로 설계한 결과를 해석하였다. 본 연구의 결과는 Dhillon의 탄성 및 기하학적

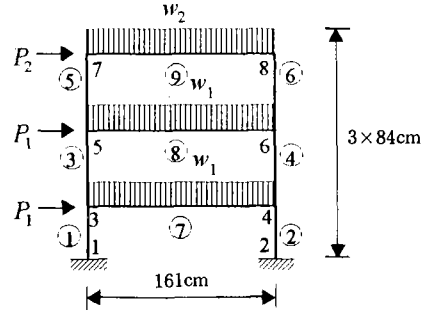


Fig. 6. Semi-rigid framed one bay three stories structure

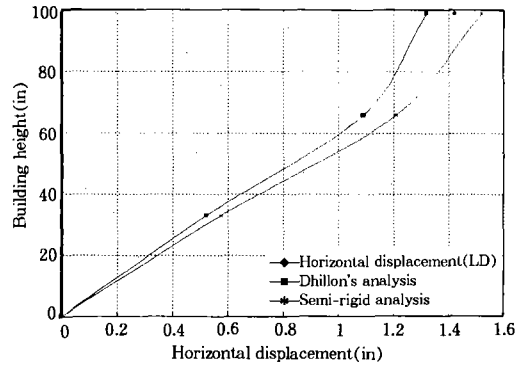


Fig. 7. Horizontal displacement at node 7 by SERIFS

Table 2. Specification of semi-rigid connector and beam-column

(단위 : cm)

Model	Group	Beam depth	Connector thickness	Fastener diameter	Angle length
Top-seat angle connection	1	20.66	1.185	0.875	7.25
	2	20.66	0.995	0.875	7.25
	3	13.84	0.995	0.875	7.25
Angle type : L-3×3×1/2					
T-stub angle connection	1	20.66	1.685		7.25
	2	20.66	1.495		7.25
	3	13.84	1.495		7.25
T-stub type : W-4×4×5/16					

Table 3. Properties of the structural member

Type	<1>	<2>	<3>	<4>
Element no.	1,2	3,4,5,6	7,8	9
A(cm ²)	90.97	66.45	83.87	57.10
E(kgf/cm ²)	2.06×10 ⁶	2.06×10 ⁶	2.06×10 ⁶	2.06×10 ⁶
I(cm ⁴)	7,660	5,290	35,100	12,110
Section(AISC)	W8×48	W8×35	W21×44	W14×30

비선형 효과를 해석 결과와 비교하기 위하여 결합부 모델은 실험을 통하여 얻은 모멘트-회전 관계식²⁾을 이용하였다. Table 2는 구조해석에서 사용한 요소별 부재규격이며, 보와 기둥의 재료상수에 대한 세부내역은 Table 3에 제시하였다.

최대 변위가 예상되는 Fig. 6의 7번 절점의 수평방향 변위를 SERIFS로 해석한 결과 탄성 범위에서는 Dhillon의 결과와 거의 같았으나 비선형 해석 방법의 차이로 약간의 상이한 경향을 보이는 것으로 판단되었다. 이 결과를 하중-변위 관계로 도시하면 Fig. 7과 같다.

실제 반강결 결합부를 설계하는 경우, 연결체의 매개변수²⁾는 결합부 형식별로 표준화계수를 결정하는 실험식에 따라서 달라진다. 따

라서 각 매개변수의 크기에 따라서 횡변위 및 수평변위 크기가 달라질 것으로 판단되며, 초기 결합부 강성지수가 더 큰 SR-TT형의 결합부²⁾가 일반적인 반강결 결합부 모델로서 적합할 것으로 보인다. SR-TS²⁾형 결합은 큰 회전 변위가 허용되는 구조물의 설계에 적합할 것으로 사료된다.

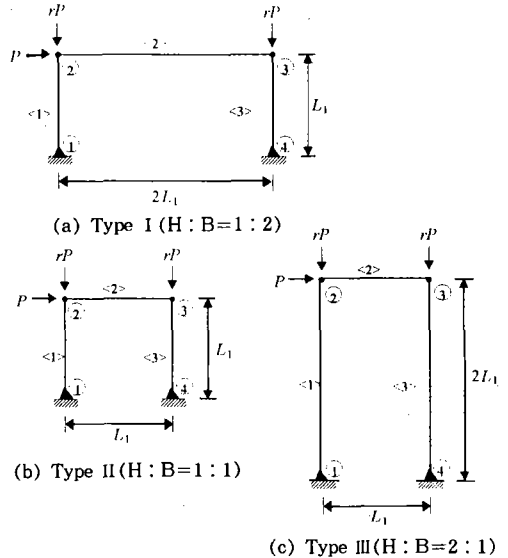
3. 보와 기둥 길이 비가 반강결 결합 구조에 미치는 영향

반강결 결합부를 갖는 뼈대구조물 설계의 응용성을 높이기 위해서는 하중-변위의 관계를 통하여 같은 종류의 결합부라 할지라도 매개변수의 변동성이 구조물의 거동에 끼치는 영향을 분석하여 표준화하여야 한다. 설계형식 및 구조물의 응용문제를 계획하는 단계에서 반강결 결합된 뼈대구조물의 성능을 평가하는 기본적인 방법으로 기둥과 보의 길이 비(H/B)를 이용할 수 있는데 이를 위하여 본 연구에서는 대변형 효과와 반강결 효과를 동시에 고려하는 해석 결과와 2차 탄성해석을 실시한 결과로부터 뼈대구조물의 거동 특성을 검토하였다.

Fig. 8과 같은 세가지 전형적인 뼈대구조물에 대하여 대변형 효과가 잘 나타날 수 있도록

Table 5. Example of semi-rigid connector and beam-column (unit : cm)

Model	Beam depth	Connector thickness	Fastener diameter	Angle length
Top-and-seat angle connection	10.0	1.5	1.4	10.0
Type : L 3×3×1/2				



E=2,000,000(kgf/cm²) G=500,000(kgf/cm²), γ=0.1, I_{x1}=10.0, I_{y1}=1000.0, I_{z1}=1000.0, J=50.0, P_{max}=120,00kgf

Fig. 8. Three types of simple portal frame with difference column-beam length ratio(H/B)

Table 4. Comparison of displacement for the typical semi-rigid fixed foundation structures (Displacement unit : cm)

Displacement	Analysis	Type I	Type II	Type III
		(H/B=0.5)	(H/B=1.0)	(H/B=2.0)
Horizontal	Elastic-geometric	0.92910	0.77550	5.43300
	Large displacement	0.93340	0.77820	6.03000
Vertical	Elastic-geometric	0.01034	0.01888	0.07299
	Large displacement	0.07707	0.06659	0.08982

Table 6. Comparison of displacement for the semi-rigid structures with hinged foundations (Displacement unit : cm)

Displacement	Analysis	Type I	Type II	Type III
		(H/B=0.5)	(H/B=1.0)	(H/B=2.0)
Horizontal	Elastic-geometric	0.43000	0.30000	2.21700
	Large displacement	0.43300	0.32940	2.23700
Vertical	Elastic-geometric	0.00216	0.00396	0.01512
	Large displacement	0.01720	0.01285	0.19790

록 횡하중과 수직하중을 재하 하였다. 기둥과 보 길이 비(H/B)의 영향과 반강결 결합 구조물에 대변형을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우를 분석하였다. 고정지점을 갖는 구조물에 대한 결과는 Table 4와 같다.

반강결 결합부의 보는 다음과 같은 결합체를 이용하였다.

Fig. 8의 (a), (b), (c) 각각에 대하여 대변형을 고려한 ③번 절점의 수직처짐을 관찰하였다. (a)와 (b)의 경우, 같은 하중조건에 대하여 유사한 하중-변위 관계가 유지된다. 하중 증가 단계에 따라 (a)의 경우가 (b)의 경우보다 수직변위 증가 폭이 더 커지는 경향을 보이고 있으나 그 차이가 미소하였으며, 실제 농업 시설물의 경우처럼 넓은 공간이 필요한 구조물의 경우에도 저층의 H/B의 비가 작은 경우에도 효율적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

2차 탄성해석을 실시한 경우와 대변형을 동시에 고려하는 경우의 해석 결과에서는 (a)가 (b)에 비해서 횡변위가 16% 정도 증가하며, 수직변위는 감소하는 경향을 보이고 있다. (c)에서는 수평변위는 10% 정도 증가되었으나, 수직변위는 23% 정도 증가를 보이고 있다.

Fig. 8에서 적용한 재료 상수와 동일한 구조물을 기초부가 회전 결합인 경우의 보-기둥 결합부의 반강결 결합에 따른 거동을 2차 탄성해석과 대변형을 고려한 경우로 해석하였으며, 결과는 Table 6과 같다.

뼈대구조의 보-기둥 설계 문제에서 수평변위와 수직변위의 제어는 중요한 설계 요소이며, 이 특성은 반강결 결합의 보-기둥을 설계하는 경우에는 특히 관심을 기울여야 한다. 반강결 구조물의 설계는 사용 성능이 제한적으로밖에 알려진 바가 별로 없으나, 저층의 넓은 구조물(H/B가 작은 구조물)에서는 상당히 이용 가치가 높을 것으로 사료되며, 부재 경간별 반강결 효과로 인하여 부재강도가 완전 강결로 가정하는 경우보다 최대 모멘트가

보다 작아지므로 경제적이며, 효율적인 설계가 가능할 것으로 본다.

IV. 결 론

넓은 공간 확보가 필요한 구조물과 시설경비의 절감 및 안정성의 향상을 위하여 농업구조물 등에서 널리 이용될 것으로 기대되는 경량 형강재를 이용하는 반강결 뼈대구조물의 설계를 지원하기 위하여, 뼈대구조해석 모델에서 결합부 반강결 효과를 모사하도록 하고, 경량 뼈대구조의 대변형 효과 및 반강결 효과를 고려하는 모델인 SERIFS를 개발하고, 적용성을 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 반강결 결합요소로 설계한 경량 뼈대구조물에 대하여 구조해석을 실시한 결과, 초기 결합부 강성지수가 크게 나온 SR-TT형의 결합부가 일반적인 반강결 결합부 모델로서 적합할 것으로 보인다. SR-TS형 결합부의 경우는 큰 회전 변위를 허용할 수 있는 구조물의 설계에 적합할 것으로 사료된다.

2. 대변형 효과와 반강결 결합 효과를 동시에 고려하는 경우에는, 대변형을 고려하지 않는 해석 결과보다 약 10% 정도의 더 큰 변형을 보이기 때문에 대변형을 받기 쉬운 경량형 강 뼈대구조물에 대하여 횡방향 변위와 기둥과 보의 길이 비(H/B)로부터 반강결 결합부를 이용하는 설계 방법을 검토할 필요가 있다.

3. 반강결 효과를 모사하는 모멘트-회전 관계에 대한 거동 모델과 대변형 효과를 고려한 해석 모델의 효과적인 결합을 시도한 뼈대구조물의 구조해석 방법을 정립하였다.

앞으로 경량 뼈대구조물에 적합한 보-기둥 요소의 새로운 결합 방식을 통하여, SERIFS의 반강결 요소를 보완하면 경량 뼈대구조물의 해석에 유용한 도구로서 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 김옥선, 이장춘, 박순규, 이종석, 권영봉, 1996, 각형강관기둥-H형강보 접합부의 항복하중 예측모델에 관한 연구, 대한건축학회지, Vol.10(6), pp. 133-140.
2. 김한중, 1997, 반강결 경량형강 뼈대구조물의 비선형 구조해석 모델개발, 서울대학교 박사학 위논문.
3. 김한중, 이정재, 1997, 경량형강 농업시설물의 비선형 구조해석 모델개발 (I), 한국농공학회지, Vol.39(6).
4. 신경재, 1995, 반강결골조의 비선형 지진 해석에 관한 연구, 대한건축학회지, Vol. 11(10), pp. 255-264.
5. Abu-Yasein-O, A, G. R. Frederick, 1994, Analysis of Frames with Semi-Rigid Joints, Vol.52(6), Comp. & Struc., pp. 1161-1168.
6. Ang, K. M., G. A. Morris, 1983, Analysis of 3Dimensional Frames with Flexible Beam- Columns Connections, J. Can. Civ. Eng., pp. 245-254.
7. Atorod Azzinzmini, James B. Radziminski, 1989, Static and Cyclic Performance of Semi-rigid Steel Beam-Column connections, J. Str.Eng. Vol.115 (12), ASCE, pp. 2979-2999.
8. Ben Kato, William McGuire, 1973, Analysis of T-Stub Flange-to-Column Connections, J. Str. Eng., Vol.99(5), ASCE, pp. 865-888.
9. Frye, M. J., G. A. Morris, 1975, Analysis of Flexibly Connected Steel Frames, Can. J. Civ. Eng., Vol.2(3), pp. 280-291.
10. Radziminski, J. B., Atorod Azizinamin, 1989, Prediction of Moment-Rotation Behavior of Semi-Rigid Beam-to-Column Connect., Semi-Rigid Frame Connect., ASCE, pp. 33-40.
11. Jones, S. W., P. A. Kirby and D. A. Nethercot, 1983, The Analysis of Frames with Semi-Rigid Connections, Vol.3(2), J. Const. Steel Res.
12. Kim, Moon-young, 1994, Spatial Stability and Free Vibration of Shear Flexible Thin- Walled Beam I, II, Int. Num. Meth. Vol.37, pp. 4097-4140.
13. Kishi, N., W. F. Chen, K. G. Matsuoka, S. G. Nomachi, 1989, Moment-Rotation Relation of Top and Seat angle with Double Web-Angle Connection, Semi-Rigid Frame Connect., pp. 121-134.
14. Lee, Shyi-Lin, 1990, Limit Strength of Semi-Rigid Frames, Dissert of the Vanderbilt.
15. Simites, G. J., A. S. Vlahinos, 1982, Stability Analysis of a Semi-Rigidly Connected Simple Frame, J. Const. Steel Res., Vol.2(3), pp. 19-32.
16. Ioannidesm, Socrates A., 1991, Frame Analysis including Semi-Rigid Connections and P-Delta Effects, Semi-Rigid Frame Connection, pp. 214-221.
17. Wen, R. K., 1983, Nonlinear Elastic Frame Analysis by Finite Element, J. Str. Eng., ASCE, pp. 1952-1971.
18. Yang, Yeong-Bin, William McGuire, 1986, Joint Rotation and Geometric Nonlinear Analysis, J. Str. Eng., Vol.112 (4), ASCE, pp. 879-905.
19. Yu, C. H., N. E. Shanmugam, 1988, Stability of Semi-Rigid Space frames, Comp. & Struc., Vol.28(1), pp. 85-91.
20. Yvan Galea, 1991, Non-Linear Analysis of Plane Frame Structures with Semi-Rigid Connections, Semi-Rigid Frame Connect., pp. 222-230.