

부재 비선형과 접합부의 회전강성을 고려한 골조의 해석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Plane Framework Considering Nonlinearity of Member and Rotational Stiffness of Connections Joining the Beams to the Columns

김 경 수* 윤 성 기**
Kim, Kyoung-Soo Yoon, Sung-Kee

요 지

본 연구에서는 골조의 안정과 구조적인 거동에 영향을 미치는 2차 효과에 의한 기하학적 비선형 문제, 세장 비가 작은 부재 단면의 소성, 보-기둥 접합부의 상태, 그리고 부재 내부에 발생되어 있는 기하학적 초기결함을 고려한 복합적인 비선형 해석프로그램을 개발하여, 철골조 구조물의 거동을 근사적으로 예측하고자 한다. 그리고, 각 비선형 해석의 신뢰성을 검증하고, 상호관계를 파악하기 위해서 각 해석에 따른 좌굴하중과 거동을 비교 검토한다.

핵심용어 : 보-기둥 접합부, 기하학적 비선형, 2차 효과, 재료의 항복, 보-기둥 강도법, 초기 결함

Abstract

The stability and structural behavior of frameworks are affected by geometrical nonlinear problems, plasticity in members, the condition of the beams to the columns joint, and geometric imperfection. Therefore, geometric nonlinearity with second order effect caused by heavy axial forces, lateral loads, and end moments and the yielding of material using the beam-column strength method must be considered to analyze the behavior of steel frameworks. A program including three types of nonlinearities such as geometric nonlinearity, material nonlinearity, and joint flexibility and geometric imperfection is developed.

Keywords : Beams to columns joint, Geometric nonlinearity, Second order effect, Yielding of material, Beam-column strength method, Geometric imperfection.

1. 서 론

철골조 구조물의 해석과 설계에서 축력에 의한 2차 효과, 재료적인 비선형, 보-기둥 접합부의 회전강

성, 그리고 초기결합의 영향 등은 구조물의 안정과 구조적인 거동에 매우 중요한 영향을 미친다^{1),2),3)}.

일반적으로 사용되는 구조 시스템인 평면골조는 고층화됨에 따라 축하중의 영향을 크게 받게 된다.

* 학생회원 · 부산대학교 대학원, 공학석사

** 정회원 · 부산대학교 건축공학과, 교수

• 이 논문에 대한 토론을 1999년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

이러한 구조물은 축하중의 증가로 인하여 골조의 변위가 커지게 되므로, 기하학적 비선형에 의한 영향을 받게 된다. 기하학적 비선형은 각 부재의 강성과 전반적인 구조체의 강성을 저감할 뿐만 아니라, 부재와 골조의 안정에 영향을 미친다.

또한, 새장비가 작은 부재는 단면이 소성화되어 골조의 거동에 영향을 미치므로, 재료의 내부에 발생하는 비탄성을 고려하여야 한다^{3),4)}.

일반적인 구조물의 해석과 설계시에 보-기둥 접합부를 강접합과 핀접합으로 이상화한다. 그러나, 강접합과 핀접합은 회전에 대해 어느 정도의 유연성과 구속력을 갖게 된다. 실제로 접합부는 고강도 강재의 발달로 인하여 고력볼트 접합인 반강접 접합의 특성을 나타낸다. 따라서, 골조를 해석과 설계할 때, 반강접 접합부의 회전강성을 고려하여야 한다²⁾.

더불어, 초기에 발생되어 있는 초기결합은 구조물의 거동에 영향을 미치므로 고려하여야 할 인자이다¹⁾.

본 연구에서는 골조 구조물의 거동에 영향을 미치는 부재의 비선형인 기하학적 비선형과 재료 비선형, 접합부의 회전강성, 그리고 초기결합등의 영향을 고려하기 위하여 포트란 언어로 복합적인 비선형 해석프로그램을 작성, 실행하여 실제 철골조 구조물의 거동을 예측하고자 한다. 구조물의 컴퓨터 해석 시간은 골조에 따라 차이가 있으나 대략 1~2 분 정도 소요된다.

또한, 개발한 각 비선형 프로그램의 신뢰성을 검증하고, 상호관계를 파악하기 위해서 각 해석에 따른 좌굴하중과 거동을 비교 검토한다.

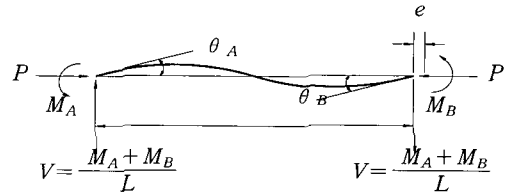
2. 보-기둥 부재의 비선형에 관한 이론

2.1 기하학적 비선형

골조 시스템에서 축방향의 부재력에 의해 부재력과 변위가 부가적으로 증가하는 2차 거동이 발생한다. 골조 구조물에서 각 부재길이에 따른 횡처짐과 부재 단부에서의 상대적인 층간변위, 그리고 축력에 의한 부가적인 휨모멘트에 의해 비선형 거동을 일으키게 된다. 그러므로, 골조 구조물을 해석할 때, 기하학적 비선형에 의한 영향을 고려하여야 한다.



(a) 절점 자유도



(b) 단부의 부재력

그림 1 보-기둥 요소의 절점 자유도와 부재력

그림 1에서의 평형과 변형관계로부터 계산과정을 거쳐서 식(1)과 같은 보-기둥 부재의 선형 탄성강성행렬과 2차 효과를 고려한 기하강성행렬을 산정한다⁶⁾.

$$[K] = [K_L] + [K_G] \quad (1)$$

여기서, $[K_L]$ 은 선형 탄성강성행렬, $[K_G]$ 는 축방향력에 의한 골조의 추가적인 휨의 영향을 고려한 기하강성행렬이다.

2.2 재료 비선형

골조 구조물의 부재 소성화를 고려하는 비탄성 해석에서 부재 항복을 묘사할 해석 모델의 선정이 필요하다.

비탄성 해석 모델은 소성한지 모델과 소성역 모델로 대별될 수 있다.

본 연구에서는 골조 구조물에서 보-기둥 부재의 재료적인 비선형을 고려하기 위하여 소성한지 모델을 수정하여 개선한 보-기둥 강도법 (beam-column strength approach)을 도입하였다. 이 방법은 상관 관계식의 압축력과 휨모멘트의 비에 따른 강도 비 γ 를 이용하여 소성을 고려하는 매우 효율적인

방법이다⁴⁾.

재료의 소성을 고려하는 과정은 다음과 같다.

보-기둥 부재가 압축력 P 와 휨 M 을 받을 때, 식(2)와 같은 보-기둥 상관 관계식을 이용한다^{4),8)}.

$$\gamma = \left(\frac{P}{P_n}\right)^\beta + \frac{M}{M_p} \leq 1.0 \quad (2)$$

여기서, P 는 보-기둥 부재에 작용된 축력, P_n 는 기둥 부재의 강도, M 은 작용된 모멘트, M_p 는 단면의 소성모멘트, 그리고 지수 β 는 $1.3 + 0.002(KL/r)_x$ 로써 부재에서 세장비의 영향을 고려한 매개변수이다⁸⁾.

만약, 초기결함(geometric imperfection)이 매우 작거나 거의 없는 부재의 경우는 CRC(Column Research Council)의 강도곡선식(Guide, 1988)¹¹⁾ 식(3)을 이용한다^{4),8)}.

식(2)의 상관 관계식에서 기둥 부재의 강도는 세장 변수(slenderness parameter), λ_c 에 따라 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

λ_c 가 $\sqrt{2}$ 보다 작거나 같으면 식(3a)를 사용하고, $\sqrt{2}$ 보다 크면 식(3b)를 이용한다⁸⁾.

$$\lambda_c \leq \sqrt{2} : P_n = (1 - 0.25 \lambda_c^2) P_y \quad (3a)$$

$$\lambda_c > \sqrt{2} : P_n = P_y / \lambda_c^2 \quad (3b)$$

식(3)의 항복강도 P_y 는 식(4)와 같다.

$$P_y = f_y A \quad (4)$$

세장 변수는 식(5)와 같이 정의된다.

$$\lambda_c = \frac{K_x L}{\pi r_x} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (5)$$

식(2)에서의 부재 모멘트 M 을 산출하는 과정은 단부하중을 받는 보-기둥 부재가 오일러 하중 P_e 보다 작은 축력 P 를 받고 있는 경우에, 모멘트는 부재에 발생한 부재 모멘트 M_A , M_B 중의 최대값 M_{max} 에 압축력에 의한 계수 B_1 을 곱한 값으로 산정한다. 왜냐하면, 세장비가 큰 경우에는 식(2)의

보-기둥 상관 관계식과 기존의 값을 비교하면 큰 차이를 나타내므로, 계수 B_1 을 곱하여 보정하여야 한다.

$$M = B_1 \times M_{max} \quad (6)$$

여기서, 식(6)에 사용된 M_{max} 는 부재에 작용된 모멘트 M_A 와 M_B 중 큰 값이며, 모멘트 확대계수는 식(7)과 같다.

$$B_1 = \frac{C_m}{\left(1 - \frac{P}{P_e}\right)} \geq 1.0 \quad (7)$$

여기서, C_m 은 지점간의 모멘트 변화를 고려한 보정계수로써, AISC의 LRFD 규준(1988)⁷⁾의 표준식인 식(8)을 적용한다.

$$C_m = 0.6 - 0.4(M_1/M_2) \quad (8)$$

여기서, M_1/M_2 항은 부재가 이중곡률을 가질 때 양이고, 단일곡률을 가질 때 음이다. M_1 은 두 개의 모멘트중 절대값이 작은 것이고, M_2 는 절대값이 큰 모멘트이다.

보-기둥 부재가 항복을 초과하게 되면, 재료의 소성을 고려하여야 한다. 소성을 고려하는 강도비 γ 는 식(2)와 같다.

강도비에 따라 소성을 고려하는 매개함수 ρ 는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다⁴⁾.

$$\gamma \leq 0.7 : \rho = 0 \quad (9a)$$

$$\gamma > 0.7 : \rho = \frac{(\gamma - 0.7)}{0.3} \quad (9b)$$

보-기둥 부재의 비탄성을 고려한 행렬항은 식(10)⁴⁾과 같으며, 식(12)에서 적용된다.

$$K'_{33} = \left(K_{33} - K_{36} \frac{K_{63}}{K_{66}} \rho\right) (1 - \rho) \quad (10a)$$

$$K'_{36} = K_{36} (1 - \rho) (1 - \rho) \quad (10b)$$

여기서, 식(10)의 K_{33} 과 K_{36} 은 식(1)의 선형 탄성

강성항과 기하학적 강성항의 합이다.

평형과 변형관계를 이용하여 6자유도 평면 골조 보-기둥 요소의 강성관계를 나타낼 수 있다. 6자유도 보-기둥 요소의 기하학적 비선형과 재료적인 비선형을 고려한 강성행렬은 식(10)을 적용하여 식(11)과 같이 나타낼 수 있다³⁾.

$$[K_{IE}] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & k_{23} & 0 & k_{25} & k_{26} \\ 0 & k_{23} & K_{33} & 0 & -k_{23} & K_{36} \\ \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & k_{25} & k_{26} & 0 & -k_{22} & -k_{26} \\ 0 & k_{26} & K_{63} & 0 & -k_{26} & K_{66} \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(11)에서 사용된 강성항은 식(12)와 같다.

$$k_{22} = [(K_{33} + 2K_{36} + K_{66}) + PL] / L^2 \quad (12a)$$

$$k_{23} = (K_{33} + K_{63}) / L \quad (12b)$$

$$k_{25} = -k_{22} \quad (12c)$$

$$k_{26} = (K_{36} + K_{66}) / L \quad (12d)$$

$$k_{35} = -k_{23} \quad (12e)$$

$$k_{65} = -(K_{33} + K_{66}) / L \quad (12f)$$

2.3 기하학적 초기결합의 고려

기하학적 초기결합은 초기결합을 고려하기 위한 방법중 가장 간단한 방법인 CRC의 접선 강성모델과 결부된 감소 접선계수법(further reduced tangent modulus method)을 적용하여 고려하였다¹⁾.

이 방법은 기하학적 초기결합에 의하여 발생하는 추가적인 강성저감을 고려하기 위해서 식(13)과 같이 E_i 를 더욱 저감시킨다는 개념이다.

$$P > 0.5P_y : E_i = 4 \frac{P}{P_y} (1 - \frac{P}{P_y}) E \xi_i \quad (13a)$$

$$P \leq 0.5P_y : E_i = E \xi_i \quad (13b)$$

여기서, E_i 는 감소된 접선강성, ξ_i 는 기하학적 초기결합에 대한 감소계수로서 0.85이다¹⁾.

초기결합을 갖는 부재에서 CRC의 E_i 에 대한 추가적인 감소 접선계수 곡선은 그림 2와 같다.

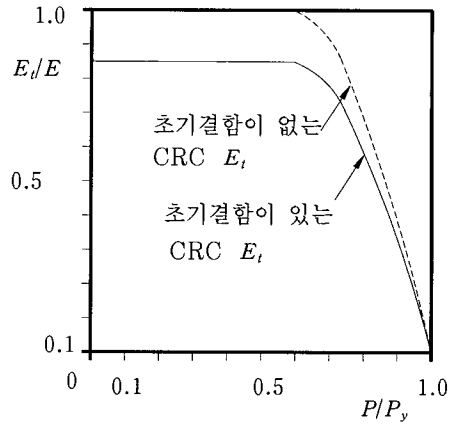


그림 2 감소 접선계수 곡선

3. 반강접 접합부의 비선형에 관한 이론

3.1 반강접 접합부의 예측 모델

접합부의 모멘트-회전거동을 예측하기 위해서 많은 연구자들이 실험한 결과를 곡선추적하여 예측모델식을 제안하였다. 예측모델식으로는 B-Spline, 선형, 다항식, 멱급수, 그리고 지수모델식등이 있다²⁾.

다중매개 지수모델(multi-exponential model)을 이용한 반강접합된 보-기둥 접합부의 모멘트-회전거동을 나타내는 예측모델식은 식(14)와 같다^{1),2)}.

$$M = \sum_{j=1}^n C_j (1 - \exp(-|\theta| / 2j\alpha)) + M_0 + R_M |\theta| \quad (14)$$

여기서, M_0 는 접합부 모멘트 초기값, R_M 는 변형도 경화강성, α 는 수치의 안정을 위한 조정계수, 그리고 C_j 는 곡선추적법으로부터 구해지는 곡선추적함수의 미정상수, j 는 미정상수의 갯수이다.

가력시의 모멘트-회전 관계식을 미분한 회전강성은 식(15)와 같다.

$$R_K = \frac{dM}{d\theta} = \sum_{j=1}^n C_j 2j\alpha \{\exp(-|\theta| / 2j\alpha)\} + R_M \quad (15)$$

하중 제거시의 회전강성은 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{KT} = \frac{dM}{d\theta} \Big|_{\theta=0} = \sum_{j=1}^n C_j 2j\alpha + R_M \quad (16)$$

3.2 접합부의 회전강성을 고려한 강성행렬

반강접합된 보-기둥 부재의 접합부 비선형의 거동을 파악하기 위해서 부재 양단부의 모멘트에 대한 회전성능을 스프링요소로 나타낸다. 부재당 6개의 자유도를 가지는 보-기둥 요소의 강성과 회전 스프링 부재에 대한 회전강성을 조합하여 반강접합된 보-기둥 부재를 모델화한다.

그림 3(a)와 같이 단부에서의 접합부 스프링 요소와 보-기둥 부재요소들의 자유도간의 정역학적 관계와 평형관계식을 이용하여, 그림 3(b)와 같은 부재의 부재력과 변위관계를 산정하면 식(17)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \overline{F}_a \\ \overline{F}_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{u}_a \\ \overline{u}_b \end{Bmatrix} \quad (17)$$

여기서, 그림 3(b) 부재의 강성행렬은 식(18)과 같이 부분행렬로 나타낼 수 있다.

$$K_{aa} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & k_{14} & k_{15} & 0 \\ k_{12} & k_{22} & 0 & k_{24} & k_{25} & 0 \\ 0 & 0 & R_{KA} & 0 & 0 & 0 \\ k_{14} & k_{24} & 0 & k_{44} & k_{45} & 0 \\ k_{15} & k_{25} & 0 & k_{45} & k_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{KB} \end{bmatrix} \quad (18a)$$

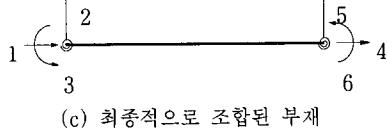
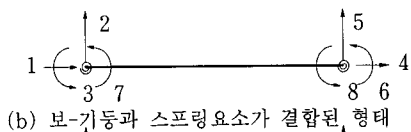
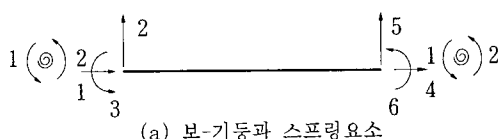


그림 3 보 부재의 양단부에 스프링 요소를 가진 형태

$$K_{ab} = \begin{bmatrix} k_{13} & k_{16} \\ k_{23} & k_{26} \\ -R_{KA} & 0 \\ k_{34} & k_{46} \\ k_{35} & k_{56} \\ 0 & -R_{KB} \end{bmatrix} \quad (18b)$$

$$K_{ba} = \begin{bmatrix} k_{13} & k_{23} & -R_{KA} & k_{34} & k_{35} & 0 \\ k_{16} & k_{26} & 0 & k_{46} & k_{56} & -R_{KB} \end{bmatrix} \quad (18c)$$

$$K_{bb} = \begin{bmatrix} R_{KA} + k_{33} & k_{36} \\ k_{36} & R_{KB} + k_{66} \end{bmatrix} \quad (18d)$$

그림 3(b)에서 부재의 자유도 7과 8은 물리적으로 의미가 없으므로, 식(17)에서 부재력 7과 8은 0이 되어 식(19)와 같이 된다.

$$\overline{u}_b = -K_{bb}^{-1} K_{ba} \overline{u}_a \quad (19)$$

식(19)의 \overline{u}_b 를 식(17)의 \overline{F}_a 에 대입하여 최종적으로 반강접합된 보-기둥 부재의 강성행렬을 구하면 식(20)과 같다²⁾.

$$\begin{aligned} \overline{F}_a &= K_{aa} \overline{u}_a + K_{ab} \overline{u}_b \\ &= (K_{aa} - K_{ab} \cdot K_{bb}^{-1} \cdot K_{ba}) \overline{u}_a \end{aligned} \quad (20)$$

식(20)을 최종적으로 반강접합된 보-기둥 부재의 힘-변위 관계식으로 나타내면 식(21)과 같다.

$$\{F_s\} = [K_s] \{u_s\} \quad (21)$$

여기서, $\{F_s\}$ 는 보 부재의 양단부가 반강접합된 경우의 최종적인 부재력, $[K_s]$ 는 강성행렬, $\{u_s\}$ 는 변위이다.

보 부재의 오른쪽과 왼쪽에 스프링이 있는 경우도 위와 같은 과정을 통해서, 최종적으로 보 부재의 오른쪽과 왼쪽 단부에 스프링이 존재하는 반강접합된 부재의 힘-변위관계를 구한다.

4. 유한요소법에 의한 골조의 비선형 해석

4.1 프로그램의 구성도

비선형 해석의 수렴방법은 수정된 뉴턴-랩슨법과 하중증가반복법을 적용하였다. 개발된 비선형 해석 프로그램의 구성도는 그림 4와 같다. 프로그램에서 데이터를 입력받아 초기회전강성을 산정하고 강성을 조합하여 경계조건에 따라 가우스 소거법을 이용하여 변위를 구하였다. 그리고 부재력을 먼저 구하고 좌표변환에 의해 반력을 산출한다. 전체작용하중에서 반력을 뺀 값의 제공에 대한 반력의 제공에 100을 곱한 값이 허용오차 이내면 수렴하고 그렇지 않으면 여분력을 반복계산시 하중으로 작용시킨다. 반복계산시 그전 단계에서 발생된 회전변위를 가지고 그 상태에서의 회전강성을 산정한다. 이하 계산과정은 앞의 절차와 동일하게 산출하였다.

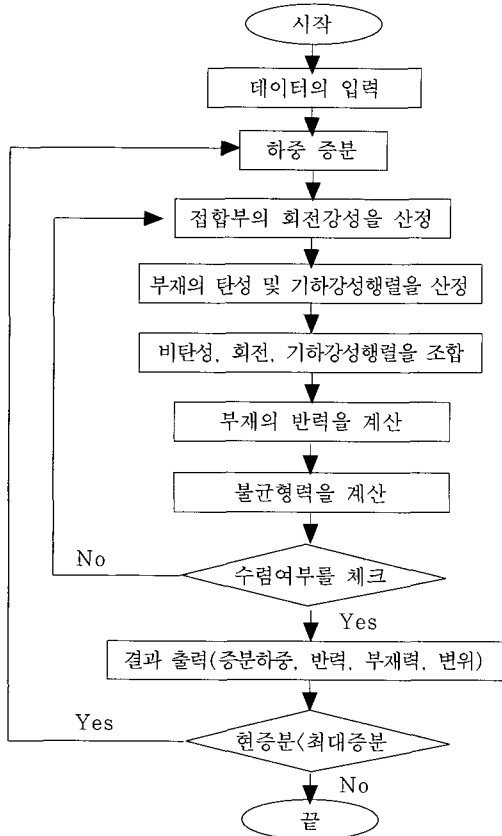


그림 4 프로그램의 구성 흐름도

표 1 다중지수모델의 매개변수들 (단위 : kips, in)

| 매개변수 | SWA | T&SD | FEP | EFP |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| M_0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| R_{kj} | 0.471×10^2 | 0.432×10^3 | 0.964×10^3 | 0.412×10^3 |
| α | 0.512×10^{-3} | 0.342×10^{-3} | 0.318×10^{-3} | 0.671×10^{-3} |
| C_1 | -0.433×10^2 | -0.345×10^3 | -0.250×10^3 | -0.678×10^3 |
| C_2 | 0.121×10^4 | 0.523×10^4 | 0.507×10^4 | 0.271×10^4 |
| C_3 | -0.586×10^4 | -0.268×10^5 | -0.304×10^5 | -0.214×10^5 |
| C_4 | 0.130×10^5 | 0.619×10^5 | 0.753×10^5 | 0.786×10^5 |
| C_5 | -0.134×10^5 | -0.651×10^5 | -0.829×10^5 | -0.997×10^5 |
| C_6 | 0.522×10^4 | 0.2550×10^5 | 0.339×10^5 | 0.430×10^5 |
| R_{kt} | 0.480×10^5 | 0.952×10^5 | 0.110×10^6 | 0.308×10^6 |

(1lb=0.4536kgf, 1 in=25.4mm, 이하 단위 병기 생략)

4.2 접합부의 모멘트-회전 거동의 예측

접합부의 모멘트-회전 거동은 식(14)의 다중 지수모델식을 적용하여 그림 5와 같이 나타내었다. 예측모델식에 사용된 매개변수는 기존의 데이터인 SCDB(Steel Connection Data Bank)¹⁰⁾를 이용하여 표 1과 같이 산출하였다. 표 1에서 SWA 모델은 단일 웨브앵글 접합, T&SD 모델은 양면 웨브앵글을 가진 상하 앵글접합, FEP 모델은 비돌출된 엔드플레이트 접합, EEP 모델은 돌출된 엔드플레이트 접합이다.¹⁰⁾

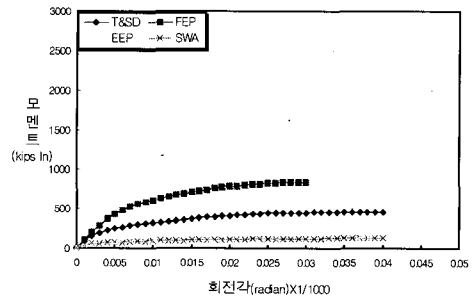


그림 5 접합부의 모멘트-회전각 거동

4.3 골조의 기하학적 비선형 해석

철골 골조의 기하학적 비선형 해석을 검증하기 위해서 수직력과 수평력을 받는 다섯 개의 요소를 가지는 그림 6의 기존의 연구에서 사용한 문형 골조⁹⁾를 해석모델로 제시한다. 기동은 하나의 요소,

보는 3개의 요소로 모델링한다. 구조체의 주각부 경계조건은 핀지지된 상태이고, 하중조건은 수직력이 매 하중 증분마다 증분되고, 수평력은 수직력의 0.1~0.5배로 고정된 상태와 동시에 수평력과 수직력이 증분하는 경우이다. 해석 결과의 비선형 거동은 그림 7과 같다. 표 2는 기하학적 비선형을 고려한 절점 2에서의 횡변위를 나타낸 것이다.

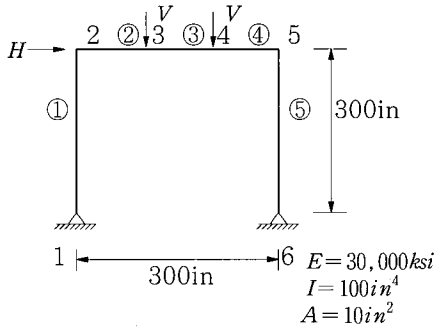


그림 6 문형 골조모델

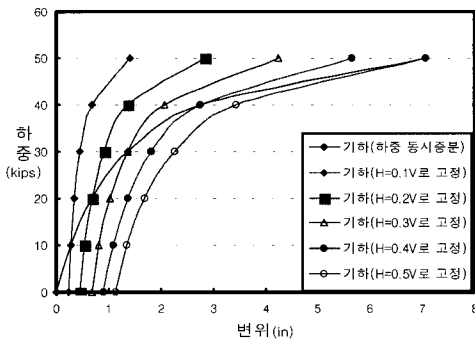


그림 7 하중조건에 따른 최상층 수평변위

표 2에서 보는 바와 같이 오일러 좌표계에 의한 Cao의 연구 결과⁹⁾와 라그랑지 좌표계에 의한 본 연구의 비선형 거동 결과가 유사하게 나타나므로, 기하학적 비선형 프로그램의 신뢰성을 입증하였다.

부재의 축방향력에 의한 추가적인 처짐이 발생하는 골조에서는 2차 효과를 포함한 기하학적 비선형의 영향을 고려하여 해석을 수행하여야 한다.

4.4 골조의 기하학과 접합부 비선형 해석

주각부가 핀과 고정지지를 갖는 골조에서 접합부의 회전강성과 2차 효과를 고려한 탄성 좌굴하중을 구하기 위해서 그림 8과 같은 1경간 2층 골조모델을 해석하였다. 부재의 단면특성은 표 3과 같고, 골조의 기하학적 비선형과 접합부 비선형을 고려한 해석결과는 그림 9와 표 4~표 5와 같다. Chen의 연구⁵⁾의 좌굴하중과 본 연구의 결과를 비교하여 신뢰성을 증명하였다.

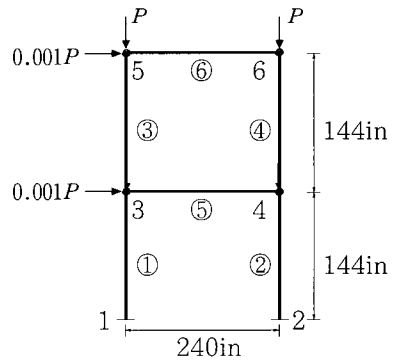
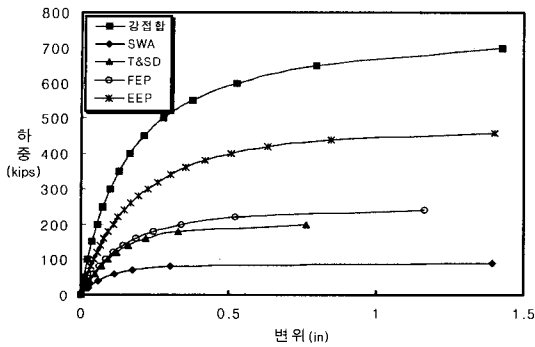


그림 8 1경간 2층 골조모델

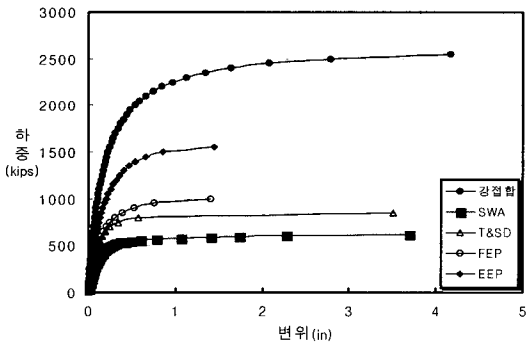
표 2 왼쪽 상단에서의 수평 처짐

(단위 : kips, in)

| 하중 (V) | 동시증분 | | H=0.1V | | H=0.2V | | H=0.3V | | H=0.4V | | H=0.5V | |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Cao의 결과 | 본 연구 결과 | Cao의 결과 | 본 연구 결과 | Cao의 결과 | 본 연구 결과 | Cao의 결과 | 본 연구 결과 | Cao의 결과 | 본 연구 결과 | Cao의 결과 | 본 연구 결과 |
| 0.0 | 0.000 | 0.000 | 0.225 | 0.225 | 0.451 | 0.450 | 0.676 | 0.676 | 0.901 | 0.901 | 1.126 | 1.126 |
| 10.0 | 0.279 | 0.270 | 0.279 | 0.271 | 0.548 | 0.542 | 0.815 | 0.812 | 1.083 | 1.083 | 1.351 | 1.353 |
| 20.0 | 0.707 | 0.676 | 0.376 | 0.340 | 0.707 | 0.679 | 1.039 | 1.018 | 1.370 | 1.356 | 1.702 | 1.695 |
| 30.0 | 1.409 | 1.358 | 0.536 | 0.455 | 0.973 | 0.909 | 1.409 | 1.362 | 1.846 | 1.816 | 2.282 | 2.269 |
| 40.0 | 2.761 | 2.742 | 0.824 | 0.689 | 1.470 | 1.375 | 2.116 | 2.061 | 2.761 | 2.747 | 3.409 | 3.434 |
| 50.0 | 6.681 | 7.063 | 1.565 | 1.416 | 2.842 | 2.829 | 4.115 | 4.243 | 5.403 | 5.656 | 6.681 | 7.070 |



(a) 주각부 핀지지



(b) 주각부 고정지지

그림 9 1경간 2층 골조의 최상층 수평변위

표 3 부재의 단면 특성 (단위 : kips, in)

| 부재 번호 | 부재 치수 | 탄성 계수 | 단면 2차모멘트 | 단면적 |
|------------|--------|--------|----------|-------|
| 1, 2, 3, 4 | W12×96 | 30,000 | 833 | 28.20 |
| 5, 6 | W14×48 | 30,000 | 485 | 14.10 |

표 4 탄성 임계 좌굴하중 (단위 : kips)

| 접합부 종류 | 주각부 핀지지 | | 주각부 고정지지 | |
|--------|----------|---------|----------|---------|
| | Chen의 연구 | 본 연구 결과 | Chen의 연구 | 본 연구 결과 |
| SWA | 90 | 90 | 630 | 630 |
| T&SD | 205 | 200 | 860 | 850 |
| FEP | 242 | 240 | 1030 | 1000 |
| EEP | 475 | 460 | 1625 | 1550 |
| 강접합 | 725 | 700 | 2530 | 2550 |

표 5 강접합에 대한 반강접합의 좌굴하중의 비

| 접합부 종류 | 주각부 핀지지 | | 주각부 고정지지 | |
|--------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|
| | Chen ⁵⁾ 의 연구 | 본 연구 결과 | Chen ⁵⁾ 의 연구 | 본 연구 결과 |
| SWA | 0.124 | 0.129 | 0.29 | 0.247 |
| T&SD | 0.283 | 0.286 | 0.340 | 0.333 |
| FEP | 0.334 | 0.343 | 0.407 | 0.392 |
| EEP | 0.655 | 0.657 | 0.642 | 0.608 |
| 강접합 | 1 | 1 | 1 | 1 |

표 6 각 비선형 해석에 대한 좌굴하중(단위 : kips)

| 해석 종류 | 기하 비선형 | 기하+ 접합부 비선형 | 기하+ 재료+ 접합부 비선형 (본연구) | Yau와 Chan ³⁾ 의 연구 | 기하+ 재료+ 접합부 비선형+ 초기결합 |
|-------|--------|-------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|
| 좌굴 하중 | 700 | 460 | 380 | 376.43 | 300 |

4.5 골조의 기하, 재료, 접합부 비선형 해석

골조 구조물의 근사적인 거동을 예측하기 위해서 2차 효과, 재료의 비탄성, 그리고 접합부의 절점 회전강성을 고려한 복합적인 비선형 해석과 초기결합을 고려한 해석은 다음과 같다.

표 6은 각각의 비선형 해석에 대한 좌굴하중을 비교한 것이며, 그림 10은 해석의 신뢰성을 검증하고 각각의 해석결과의 거동을 나타낸 것이다. 기하학적 비선형과 두 개의 스프링 모델을 이용하여 재료 비선형과 접합부 비선형을 고려한 Yau와 Chan (1995)의 연구³⁾에서는 EEP 접합부의 회전강성을 고려하여 복합적인 비선형 해석을 수행하였다. 본 연구와 비교한 결과, 본 연구의 반강접합된 골조의 기하학적 비선형과 재료 비탄성을 고려한 비탄성 좌굴하중은 380 kips, 참고문헌³⁾은 376.43kips로 오차가 0.94%로, 신뢰성이 입증되었다. 그리고, 초기결합에 대한 영향을 고려하여 해석한 결과, 그림 10에서 초기결합을 고려하지 않은 본 연구의 EEP모델의 결과는 380kips였으나, 초기결합을 고려한 해석에서는 300kips로 매우 저감됨을 알 수 있었다. 초기결합 여부에 따라 구조물의 거동에 상당한 차이가 나타나므로, 근사적인 거동을 예측하기 위해서는 초기결합을 해석과 설계에 고려하여야 한다.

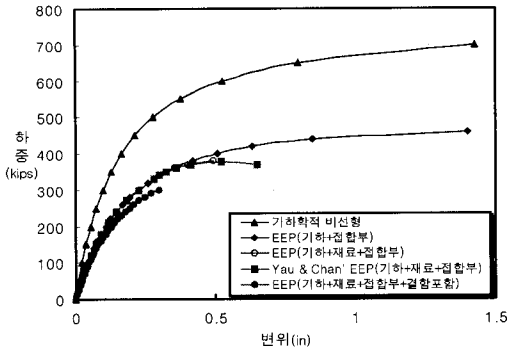


그림 10 EEP 모델의 각 비선형에 대한 비교

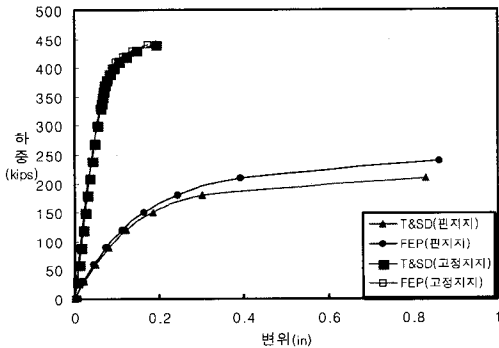


그림 11 주각부 지지조건에 따른 비선형 해석

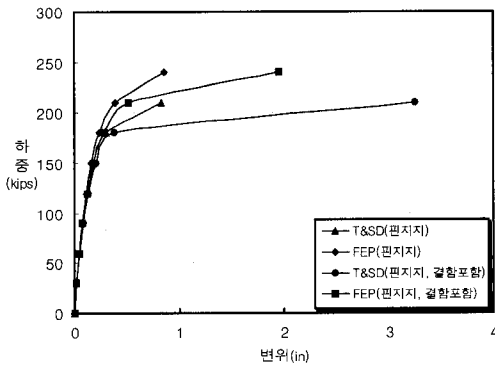
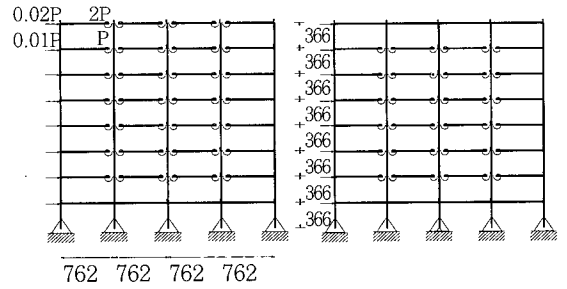


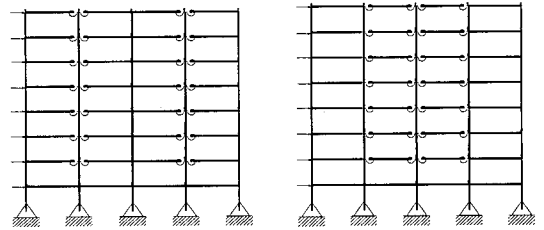
그림 12 초기결합 여부에 따른 비선형 해석

그림 11과 그림 12는 주각부의 경계조건이 두가지 지지조건, 핀과 고정지지에 대한 해석과 초기결합여부에 따른 해석결과의 비선형 거동을 나타낸 것이다.



(a) 모델 1

(b) 모델 2



(c) 모델 3

(d) 모델 4

그림 13 4경간 8층 골조모델 (단위:cm)

4.6 적용 예제

반강접 접합부를 가진 저층 골조 구조물에서는 횡변위가 작게 발생하므로 반강접합이 널리 사용되나, 고층 골조에서는 과도한 횡변위로 인하여 사용이 곤란하다. 본 연구에서 제시한 해석 방법을 가지고 적절한 반강접 접합부 위치를 선정할 수 있음을 보이고자, 제원이 기둥 1~3층은 W14×90, 4~6층은 W12×65, 7~8층 기둥 W10×33, 보 1~7층은 W12×57, 8층은 W14×30으로 이루어진 고층골조에 강접합과 반강접합을 혼용한 그림 13과 같은 골조모델 형태를 제시하여 해석을 수행하였다. 그림 14와 그림 15는 4가지 골조모델에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림 15로부터 모델 1, 2의 최상층 강접합은 구조물 전체의 강성 분배에 효과가 별로 없음을 알 수 있다. 모델 3, 4는 같은 수의 반강접합이 사용되지만, 모델 4의 조합이 더 작은 횡변위를 나타내므로 더 효율적이다. 첫 번째 경간과 4번째 경간의 안쪽보다 바깥쪽을 강접합하여 횡변위를 더 구속할 수 있다. 이상과 같이 본 연구에서 제시한 해석 방법을 이용하여 적절한 반강접 접합부의 위치를 정하는 자료로 사용할 수 있다.

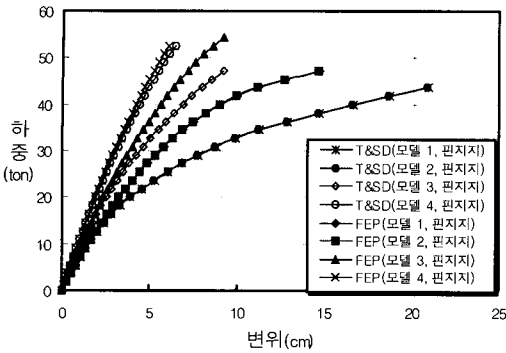


그림 14 T&SD와 FEP 접합 골조모델 해석의 비교

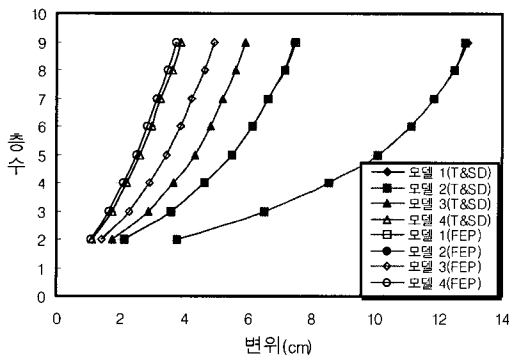


그림 15 각 골조모델에 대한 층과 횡변위 (T&SD와 FEP)

5. 결 론

기존의 연구들은 비선형 이론들을 독립적으로 적용하여 신뢰성을 얻은 데 반해, 본 연구에서는 기존의 각각의 비선형 이론보다 간략하면서도 정확한 해를 산출하는 이론을 적용하였고 각 비선형 이론을 프로그래밍하여 신뢰성을 입증하고 이를 바탕으로 복합적인 구조적 거동을 알아보기 위한 프로그램을 개발하였다. 각각의 비선형 이론 중 기하학적 비선형은 라그랑지 좌표계를 이용하여 기하학적 강성을 산출하여 축력을 매 반복시 작용시키므로 해석방법을 간략히 적용하였다. 재료비선형은 소성의 점진적인 영향을 고려하는 소성역 모델에 근사한 결과값을 나타내면서도 방법이 간단한 소성인지 이론을 수정한 보-기둥 강도법을 적용하였다. 접합부 비선형은 다중지수모델을 이용하였다.

골조의 축력에 의한 기하학적 비선형, 부재 단면의 소성에 따른 재료 비선형, 반강접 접합부의 회전강성을 고려한 비선형을 복합적으로 고려하여 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법을 비선형 유한요소 해석프로그램으로 작성하여 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 반강접 접합부를 다중 지수모델식으로 회전강성을 예측하여 적용하고, 라그란지 좌표계를 이용한 골조의 기하학적 비선형의 해석 결과를 오일러 좌표계를 이용한 기존의 연구와 비교하여 반강접합된 골조 해석의 신뢰성을 입증하였다.

2) 돌출된 엔드플레이트(EFP) 반강접 접합부의 회전강성을 고려한 골조의 비탄성 좌굴하중을 구하기 위하여 기하학적 비선형과 재료 비선형을 복합적으로 해석한 결과, 본 연구와 참고문헌⁹⁾의 비탄성 좌굴하중의 차이가 1.0%이내로 나타났으므로, 본 연구의 신뢰성을 입증하였다.

3) 각각의 비선형 해석에 대한 상호 관계를 파악하기 위해서 각 비선형 해석에 대한 좌굴하중을 검토한 결과에서 구조 거동이 큰 차이를 나타내었다. 그러므로, 실제적인 철골조 구조물의 거동을 예측하기 위해서는 기하학적 비선형, 재료 비선형, 접합부 비선형을 복합적으로 고려하여 해석해야 함을 알았다.

4) 반강접합과 강접합이 혼합된 4가지 골조모델에 대한 해석결과에서 최상층 강접합은 구조물 전체의 횡변위를 억제하지 못하여 강성 분배에 효과가 별로 없었다. 그리고, 같은 수의 반강접합이 사용될지라도 골조의 경간 안쪽보다 바깥쪽을 강접합하여 횡변위를 더 구속할 수 있었다.

5) 본 연구의 적용성을 제시하기 위하여 고층 골조 모델을 대상으로 반강접 접합부의 위치를 변화시키며 적용하여 보았다. 그 결과를 이용하여 적절한 반강접 접합부의 위치를 구조 설계에 적용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 "부산대학교 기성회 재원 학술연구비의 지원"으로 이루어진 것으로 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Chen, W. F. and Kim, S. E., *LRFD Steel Design using Advanced Analysis*, CRC Press, 1997, p.441
2. Chen, W. F. and Lui, E. M., *Stability Design of Steel Frames*, CRC Press, 1991, p.380
3. Yau, C. Y. and Chan, S. L., "Inelastic and Stability Analysis of Flexibly Connected Steel Frames by Springs-In-Series Model", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 120, Oct., 1994, pp.2803~2819
4. King, W. S., White, D. W., and Chen, W. F., "Second order Inelastic Analysis Methods For Steel-Frame Design", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 2, Feb., 1992, pp.408~428
5. Lui, E. M. and Chen, W. F., "Behavior of Braced and Unbraced Semi-rigid Frames", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 24, No. 9, 1988, pp.893~913
6. Chen, W. F. and Lui, E. M., *Structural Stability*, Elsevier, 1987, p.490
7. AISC, *Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design*, American Institute of Steel Construction, Inc., 1986
8. Chen, W. F. and Lian Duan, "Design Interaction Equation For Steel Beam-Columns", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 5, May, 1989, pp.1225~1243
9. Jianhua Cao, "Second-Order Elastic Plane-Frame Analysis Using Finite Element Method", *Journal of the Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 9, Sept., 1997, pp.1125~1235
10. Chen, W. F. and Kishi, N., *Database of Steel Beam-to-Column Connections*, Vol. I and II, Structural Engineering Report No. CE-STR-86-26, School of Civil Engineering, Purdue Univ., West Lafayette, Aug., 1986
11. Galambos, T. V., *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, Wiley Interscience, 1988
12. 김경수, "접합부의 회전강성을 고려한 골조의 비선형 해석에 관한 연구", 석사학위 논문, 부산대학교, 1999.2

(접수일자 : 1999. 1. 29)