

탄성계수 불확실성을 고려한 반강접 프레임 구조의 확률적 비선형 거동 해석

김 대 영¹ · 노 혁 천^{1*}

¹세종대학교 건설환경공학과

Probabilistic Nonlinear Analysis of Semi-Rigid Frames Considering Random Elastic Modulus

Dae Young Kim¹ and Hyuk Chun Noh^{1*}

¹Department of Civil&Environmental Engineering, Sejong Univ., Seoul, 143-747, Korea

Abstract

In this paper, the effects of uncertain material constant on the nonlinear behavior of steel frames with semi-rigid joints are examined. As to the probabilistic model, a normal distribution is assumed to simulate the uncertain elastic modulus of steel material. A nonlinear structural analysis program, which can consider both semi-rigidity in joints of the steel frames and uncertainty in the material constant, is developed. Including the geometric, material and connection nonlinearities which are the parameters of nonlinear behavior of steel frames, probabilistic analysis is conducted based on the Monte-Carlo simulation. In the probabilistic analyses, we consider the three different cases for random variables. The deterministic analysis results are shown to be in good agreement with those of the previous research results in the literature. As to the probabilistic analyses, it is observed that the coefficient of variation(COV) of displacements increases as the loading increases, and that the values of COV are dependent on the structural features of the frames.

Keywords : semi-rigid connection, nonlinearities, correlation, Monte Carlo simulation

1. 서 론

과거 프레임의 설계/해석 시 해석시간, 편의 등의 이유로 접합부를 강접합(rigid connection) 혹은 핀접합(pin connection)으로 이상화하여 설계/해석을 수행하였다. 그러나 이는 정확한 설계/해석이라 할 수 없으며, 해석결과 또한 실제 구조물의 거동과 차이가 있다. 현재 컴퓨터의 고성능화와 소프트웨어의 개발, 기술력 향상 등으로 반강접 접합부 해석이 가능하게 되었고, 반강접 접합부의 특성을 이용할 수 있게 되었다(Kang, 1998; Kim, 1997). 반강접 접합부의 특성을 이용하면 구조부재의 강도 및 강성도를 효율적으로 사용할 수 있으며, 골조 자체의 안전성을 확보해 주며 부재조립 방법을 단순화시키고 시공오차에 대한 조정이 용이하다. 또한 접합부의 시공이 간편

하며 품질관리가 용이하고 에너지 흡수 능력이 크며 효율적인 설계가 가능하다(Kang, 1998). 하지만 이러한 반강접 접합부 설계/해석 방법은 실험값에 의한 것이며, 실험식의 종류와 사용된 변수에 따라 결과값이 달라진다. 본 논문에서는 반강접된 프레임의 비선형 해석 프로그램을 개발하고, 여기에 확률적 해석을 더하여, 재료탄성계수의 불확실성을 고려한 확률적 비선형 해석을 수행하였다. 비선형 거동에 대한 확률적 거동은 그 연구 결과가 매우 제한적이며 대부분 몬테카를로 해석을 통한 확률 해석 방식으로 제안되고 있다(Papadopoulos *et al.*, 2013).

2. 철골구조의 비선형성

이 장에서는 반강접 프레임 구조의 해석에 필요한 기하학

* Corresponding author:

Tel: +82-2-3408-3292; E-mail: cpebach@sejong.ac.kr

Received February 6 2013; Revised April 22 2013;

Accepted April 23 2013

©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적 비선형, 재료적 비선형, 접합부의 비선형에 대해 소개하고자 한다.

2.1 기하학적 비선형 고려방법

기하학적 비선형을 고려하기 위하여 안정함수를 사용하였다. 안정함수란 축 방향력에 의하여 휨 강성이 감소하는 영향을 고려하는 함수로써 부재를 하나 혹은 두 개의 요소로 이상화하여 기하학적 비선형을 고려할 수 있다(Kim, 1997).

$$\begin{bmatrix} \Delta M_A \\ \Delta M_B \\ \Delta P \end{bmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & 0 \\ S_2 & S_1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A}{I} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta \theta_B \\ \Delta e \end{Bmatrix} \quad (1)$$

S_1, S_2 는 안정함수(좌굴함수)라 하며, $\Delta M_A, \Delta M_B, \Delta P$ 는 부재 양단 A,B에서의 작용하는 단위(미소) 휨 모멘트, 축력이며 $\Delta \theta_A, \Delta \theta_B, \Delta e$ 는 단위(미소) 회전각 및 축 방향 수축량이다.

$$S_1 = \begin{cases} \frac{\pi \sqrt{\rho} \sin(\pi \sqrt{\rho}) - \pi^2 \rho \cos(\pi \sqrt{\rho})}{2 - 2\cos(\pi \sqrt{\rho}) - \pi \sqrt{\rho} \sin(\pi \sqrt{\rho})}, & (\text{if } P < 0) \\ \frac{\pi^2 \rho \cosh(\pi \sqrt{\rho}) - \pi \sqrt{\rho} \sinh(\pi \sqrt{\rho})}{2 - 2\cosh(\pi \sqrt{\rho}) + \pi \sqrt{\rho} \sin(\pi \sqrt{\rho})}, & (\text{if } P \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$S_2 = \begin{cases} \frac{\pi^2 \rho - \pi \sqrt{\rho} \sin(\pi \sqrt{\rho})}{2 - 2\cos(\pi \sqrt{\rho}) - \pi \sqrt{\rho} \sin(\pi \sqrt{\rho})}, & (\text{if } P < 0) \\ \frac{\pi \sqrt{\rho} \sinh(\pi \sqrt{\rho}) - \pi^2 \rho}{2 - 2\cosh(\pi \sqrt{\rho}) + \pi \sqrt{\rho} \sin(\pi \sqrt{\rho})}, & (\text{if } P \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $\rho = P/(\pi^2 EI/L^2)$ 이며, $P > 0$ 에서 인장(tension)을 의미하며 P 의 값에 따라 Table 1과 Fig. 1에서와 같은 S_1, S_2 값을 보인다. Table 1에서의 P_e 는 오일러 좌굴하중(Euler

Table 1 Stability Function(at $kL = \sqrt{(P/EI)L}$)
(Chen et al., 1987)

kL	P/P_e	Compression		Tension	
		S_1	S_2	S_1	S_2
0.0	0.0	4.0	2.0	4.0	2.0
1.0	0.1013	3.8649	2.0344	4.1316	1.9677
2.0	0.4053	3.4361	2.1519	4.5076	1.8815
3.0	0.9119	2.6242	2.4115	5.0809	1.7665
4.0	1.6211	1.1731	3.0037	5.7968	1.6476
5.0	2.5330	-1.9087	4.7845	6.6085	1.5406
6.0	3.6476	-20.6379	21.4544	7.4816	1.4518

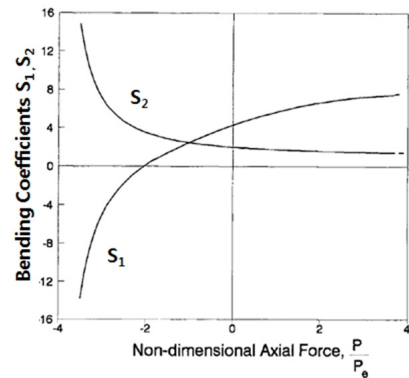


Fig. 1 Variation of bending coefficients against tensile and compressive axial force(Chen et al., 2000)

buckling load)이라 하며 $P_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$ 이다.

2.2 재료적 비선형 고려방법

잔류응력을 가진 부재가 축 방향력에 의하여 점진적으로 항복하는 것을 고려하기 위하여 CRC(Column Research Council) 점선탄성계수를 사용한다. 단면의 탄성감소를 고려하기 위해 단면 2차 모멘트 대신에 탄성계수를 감소시켜, 다음과 같은 축력의 함수로 나타낼 수 있다(Chen et al., 1992).

$$E_t = 1.0E \quad (P/P_y \leq 0.5) \quad (4a)$$

$$E_t = 4 \frac{P}{P_y} \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) \quad (P/P_y > 0.5) \quad (4b)$$

Fig. 2와 식 (4)에서 보듯이 점선탄성계수는 $P/P_y > 0.5$ 에서는 점진적 소성화를 고려할 수 있지만, 축 방향력과 모멘트를 받는 부재의 점진적 소성을 나타내기엔 부적합하다. 따라서 탄성강성에서 완전 소성강성까지의 점진적 변화를 나타내기 위하여 연화소성힌지를 사용한다. 연화소성힌지는

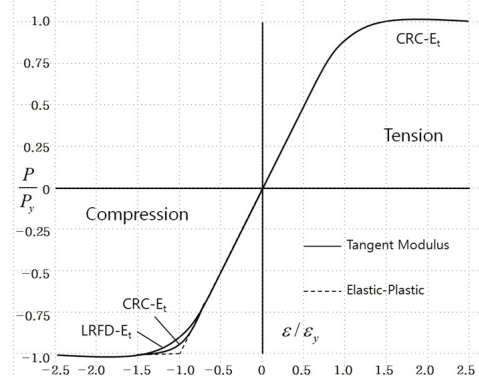


Fig. 2 Normalized axial force-strain relationship
(Chen et al., 1992)

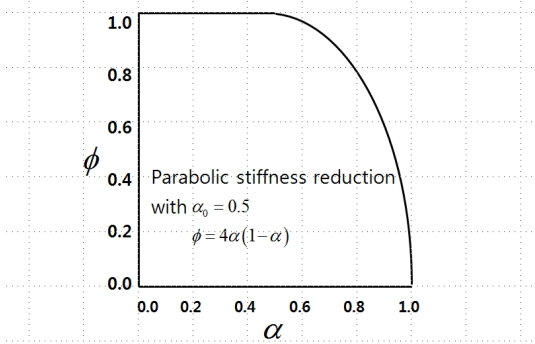


Fig. 3 Element stiffness degradation function (Chen et al., 1992)

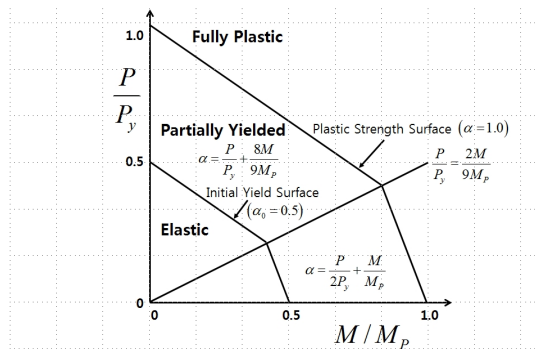


Fig. 4 Two-surface stiffness degradation model for refined plastic-hinge analysis(Chen et al., 1992)

Fig. 3과 같은 포물선 함수식으로 나타낼 수 있다.

α 는 부재력의 함수로서 Fig. 4와 같이 나타나며 AISC-LRFD에 규정식된 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{P}{P_y} + \frac{8M}{9M_p} \quad \text{for } \frac{P}{P_y} \geq \frac{2M}{9M_p} \quad (5a)$$

$$\alpha = \frac{P}{2P_y} + \frac{M}{M_p} \quad \text{for } \frac{P}{P_y} < \frac{2M}{9M_p} \quad (5b)$$

여기서, ϕ 는 AISC-LRFD 보-기둥에서의 저항 계수(Resistance Factor), P_y 는 항복상태에서의 축력, M_p 는 소성 굽힘 모멘트를 의미하며, 전술된 내용을 종합하면, 식 (6)과 같은 비선형 비탄성을 고려하는 힘-변위 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta M_A \\ \Delta M_B \\ \Delta P \end{Bmatrix} = \frac{E_s I}{L} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_A \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \phi_B) \right] & \phi_A \phi_B S_2 & 0 \\ \phi_A \phi_B S_2 & \phi_B \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \phi_A) \right] & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A}{I} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta \theta_B \\ \Delta e \end{Bmatrix}$$

2.3 접합부의 비선형 고려방법

반강접 접합부는 많은 실험 자료들이 있으며, 본 논문에서는 Kishi와 Chen이 제안한 “Three Parameter Power Model”을 사용하였다. 세 가지 인자(three parameter)는 접합부의 초기강성(R_{ki} , initial connection stiffness), 극한강도(M_u , ultimate moment), 형상계수(n , shape parameter) 등이다.

Power Model의 일반식은 다음과 같다(Kishi et al., 1990).

$$M = \frac{R_{ki} \theta_r}{\{1 + (\theta_r / \theta_0)^n\}^{1/n}} \quad (7)$$

식 (7)에서, $\theta = \theta_r / \theta_0$, $\theta_0 = M_u / R_{ki}$ (소성회전 기준 각), θ_r 은 임의의 회전각을 나타낸다.

Fig. 5에서 접합부에 하중이 재하되면 임의의 회전각 θ_r 에서 접합부의 접선강성 R_{kt} 를 식 (8a)로 구할 수 있다.

$$R_{kt} = \frac{dM}{d|\theta_r|_{\theta_r = \theta_r}} = \frac{M_u}{\theta_0 (1 + \theta^n)^{(1+1/n)}} \quad (8a)$$

접합부에 하중이 제거되면 접선강성은 식 (8b)와 같이 되며, 이는 초기강성과 일치한다.

$$R_{kt} = \frac{dM}{d|\theta_r|_{\theta_r = 0}} = \frac{M_u}{\theta_0} = R_{ki} \quad (8b)$$

Fig. 6과 같이 회전스프링으로 인한 증분 회전각 $\Delta \theta_{rA}$, $\Delta \theta_{rB}$ 는 다음과 같다.

$$\Delta \theta_{rA} = \frac{\Delta M_A}{R_{ktA}}, \quad \Delta \theta_{rB} = \frac{\Delta M_B}{R_{ktB}} \quad (9a, 9b)$$

Elastic-Plastic 힌지의 경우 $S_{ii} = S_{jj} = S_1, S_{ij} = S_{ji} = S_2$

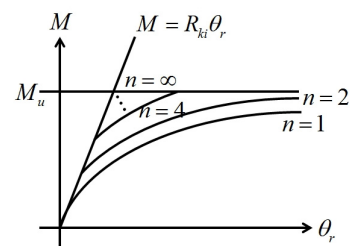


Fig. 5 Moment-Rotation behavior of connections

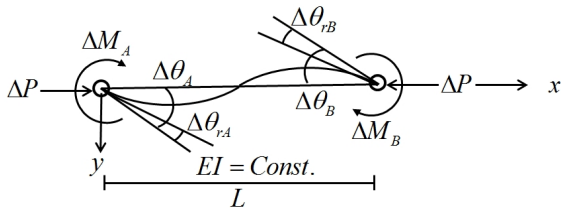


Fig. 6 Frame element with end connections (Chen et al., 1992)

이고, 요소에서의 소성효과 때문에 점진적 강성저하는

$$S_{ii} = \phi_A \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \phi_B) \right] \quad (10)$$

$$S_{jj} = \phi_B \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \phi_A) \right] \quad (11)$$

$$S_{ij} = \phi_A \phi_B S_2 \quad (12)$$

로 고려되어 진다. 식 (6)에 식 (9)를 추가하면 $\Delta M_A, \Delta M_B$ 는 다음과 같다(Chen, et al., 1995).

$$\begin{Bmatrix} \Delta M_A \\ \Delta M_B \\ \Delta P \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} S_{ii}^* & S_{ij}^* & 0 \\ S_{ij}^* & S_{jj}^* & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A}{I} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta \theta_B \\ \Delta \epsilon \end{Bmatrix} \quad (13)$$

여기서,

$$S_{ii}^* = \left(S_{ii} + \frac{E_t I S_{ii} S_{jj}}{L R_{ktB}} - \frac{E_t I S_{ij}^2}{L R_{ktB}} \right) / R^* \quad (14)$$

$$S_{jj}^* = \left(S_{jj} + \frac{E_t I S_{ii} S_{jj}}{L R_{ktA}} - \frac{E_t I S_{ij}^2}{L R_{ktA}} \right) / R^* \quad (15)$$

$$S_{ij}^* = S_{ij} / R^* \quad (16)$$

$$R^* = \left(1 + \frac{E_t I S_{ii}}{L R_{ktA}} \right) \left(1 + \frac{E_t I S_{jj}}{L R_{ktB}} \right) - \left(\frac{E_t I}{L} \right)^2 \frac{S_{ij}^2}{R_{ktA} R_{ktB}} \quad (17)$$

3. 확률론적 비선형해석

3.1 해석방법

본 연구에서는 재료, 기하 및 반강접에 의한 비선형성을 고려한 철골조에 대한 확률론적 비선형 해석을 위하여 Monte Carlo simulation을 이용하였다. 이를 위하여 불확실 인수인 재료탄성계수에 대한 난수(random number)를 생성해야 하며, 생성된 난수를 비선형해석 프로그램에 적용하여 해석을 수행한다.

재료탄성계수에 대한 확률변수의 확률밀도는 정규분포로

가정하였고, 변동계수(Coefficient of Variation: COV)는 0.1로 가정하였다. 일반적으로 재료탄성계수는 Log-Normal 분포하는 것으로 나타나고 있으나, 변동계수가 0.1정도의 낮은 수준인 경우 정규분포로 가정할 수 있다(Noh et al., 2011). 확률변수의 통계적 특성치는 앙상블의 개념에 의해 정의되며, 따라서 확률변수의 평균(0)과 표준편차(0.1)은 개별 구조계 내에서의 통계치를 의미하는 것은 아니다.

3.2 확률변수의 생성

재료탄성계수에 대한 확률변수는 모두 세 가지의 형태로 생성하고 해석에 적용하였다. 경우 1: 구조내의 재료탄성계수가 위치좌표와 무관하게 동일한 값을 가지는 경우, 경우 2: 재료탄성계수가 공간상의 위치좌표별로 독립적 정규분포로 모델링되는 경우, 경우 3: 재료탄성계수가 구조 내 특정 두 점에서 상호 상관관계를 가지는 정규분포로 모델링되는 경우 등이다. 공간적 불확실성을 가지는 재료탄성계수는 $E(x) = \bar{E}(1 + f(x))$ 로 표현할 수 있으며, 여기서 추계장함수 $f(x)$ 를 평균 0, 표준편차 0.1인 난수로 생성하게 된다. 경우 1은 'f(x)=상수'인 상태이며, 경우 2와 3은 f가 위치좌표 x의 함수 f(x)로 생성된다. 특히, 경우 3은 $x_i \neq x_j$ 인 두 점 i, j에서의 두 값이 상관관계를 가지는 경우를 의미한다. 경우 3에 대한 난수발생은 통계학적 전처리 기법을 이용하였다(Yamazaki et al., 1990). 각 경우에서 사용한 표본의 수는 각 경우에 대하여 $N, N \times N_e$, 그리고 $4 \times N_f \times N_e$ 이다. 여기서, N은 경우 1에서의 표본 수로서 2층 1격간 구조에는 1,800개, 4층 2격간 구조에 대해서는 3,600개를 사용하였다. N_e 는 모델내의 요소 수, N_f 는 통계학적 전처리 기법이 요구하는 상수로 5를 사용하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 생성한 난수가 이론적 정규분포와 잘 일치함을 보여주고 있다. CDF는 누적분포함수(Cumulative Distribution Function)을 의미한다.

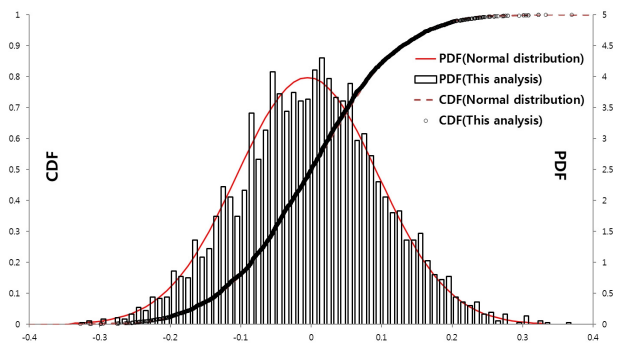


Fig. 7 PDF-CDF Graph

4. 해석결과 및 검증

4.1 예제 및 해석과정

4.1.1 예제

Fig. 8, 9와 같이 100kips, 10kips의 집중하중을 받는 2층 1격간 프레임과 0.9kips/ft(3.5kips), 1.8kips/ft(7.0kips)의 등분포하중(수평하중)을 받는 4층 2격간 프레임을 예제로 선정하였다. 부재는 A36의 W-Section 재원을 이용하였다(Kim *et al.*, 2001).

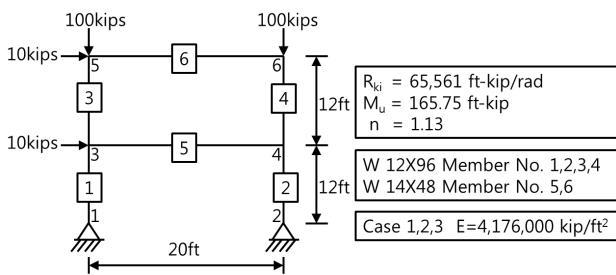


Fig. 8 A Two-Story and One-Bay Frame

$R_{ki} = 65,561 \text{ ft-kip/rad}$, $M_u = 765.75 \text{ ft-kip}$, $n = 1.13$
W 12X76 Member No. 1,2,3,5,8,11 W 12X65 Member No. 4,6,7,9,10,12 W 12X40 Member No. 13,14,15,16,17,18,19,20
Case 1,2,3 E=4,176,000 kip/ft ²

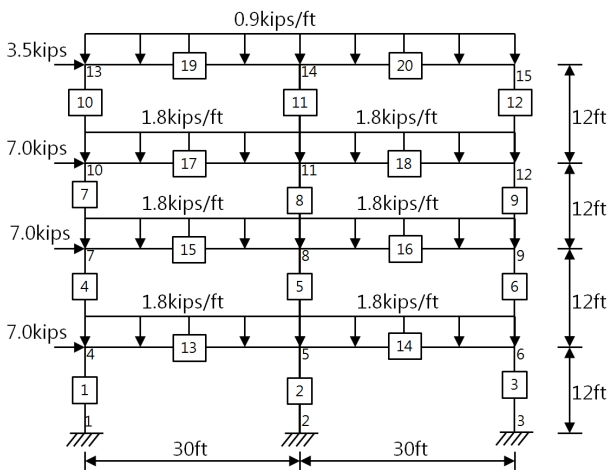


Fig. 9 A Four-Story and Two-Bay Frame

4.1.2 해석과정

개발된 프로그램의 흐름도는 Fig. 10과 같으며 2층 1격간 프레임과 4층 2격간 프레임에 대하여 3.2절에서 기술한 세 경우에 대한 해석을 수행하였다.

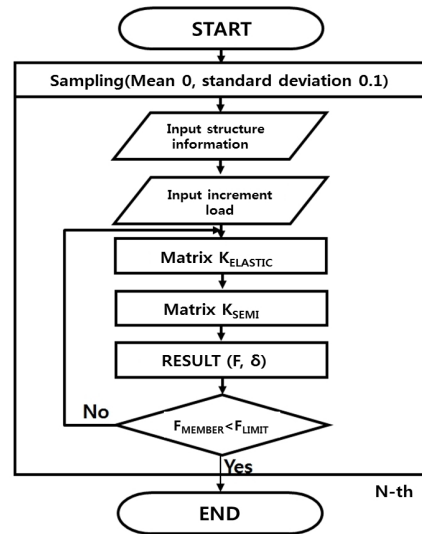


Fig. 10 Flow diagram

4.2 검증

개발된 비선형 해석프로그램으로 반강점을 고려한 프레임 구조에 대한 확정론적 해석을 수행하고 그 결과를 다른 연구 결과와 비교하여 Table 2, 3에 나타내었다. Table에서 보는 바와 같이 본 연구의 결과는 기존의 연구결과와 유사한 결과를 주고 있으며, 반강점에 의한 결과는 강점에 비해 횡 변위가 매우 크음을 알 수 있다.

Table 2 lateral displacements of A Two-Story and One-Bay Frame at nodal

Joint	Rigid (in)	Semi-Rigid(in)			
		B1 Factor Method	King & Chen	An other program	This analysis
3	1.011	2.02	1.85	1.877	1.88
5	1.509	3.26	2.95	3.038	3.04

Table 3 lateral displacements of A Four-Story and Two-Bay Frame at nodal

Joint	Rigid (in)	Semi-Rigid(in)			
		B1 Factor Method	King & Chen	An other program	This analysis
4	0.26	0.40	0.30	0.31	0.36
7	0.63	1.07	0.77	0.78	0.93
10	0.90	1.61	1.12	1.26	1.32
13	1.04	1.95	1.33	1.34	1.51

4.3 해석결과

4.3.1 2층 1격간 프레임

2층 1격간 프레임의 해석결과 하중증가에 따른 평균 변위

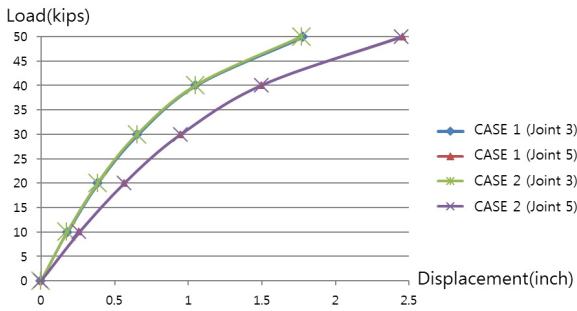


Fig. 11 A Two-Story and One-Bay Frame Load-Average displacement relation(at case 1, 2)

Table 4 COV in the nodal displacement for case 1, 2 with respect to increase of loads

Load (kips)	CASE 1 COV(%)		CASE 2 COV(%)	
	Joint 3	Joint 5	Joint 3	Joint 5
10	6.71	6.68	3.88	3.96
20	6.96	6.97	4.08	4.14
30	7.48	7.37	4.46	4.47
40	8.55	8.32	5.22	5.13
50	11.20	10.60	7.01	6.68

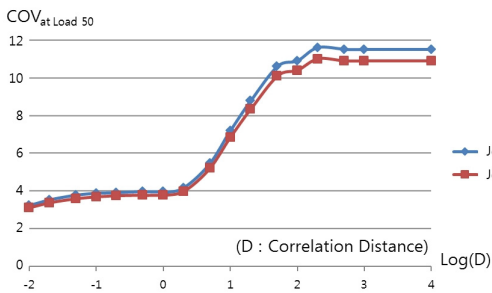


Fig. 12 Coefficient of variation according to correlation distance(at load 50kips)

와 변동계수를 Fig. 11 및 Table 4에 나타내었다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 경우 1과 경우 2의 절점 별 평균 변위는 일치하는데 반해 변동계수는 각 경우별로 절점에 관계없이 상호 근사한 것으로 나타났다. 또한 Table 4에서 보듯 하중에 따른 변동계수는 비선형으로 증가하는 경향을 보였고, 경우 1이 경우 2보다 약 60~70% 크게 나타났다. 경우 3에서는 Fig. 12에 보인 바와 같이 상관거리(Correlation Distance) D의 증가에 따라 변동계수가 S형태로 증가하는 경향을 나타내었고, 최대치는 $D \rightarrow \infty$ 에서 11% 정도로 나타났다. Fig. 12는 하중 50kips에서의 결과이다.

4.3.2 4층 2격간 프레임

4층 2격간 프레임의 해석결과 하중증가에 따른 평균 변위와 변동계수를 Fig. 13과 Table 5에 나타내었다. 2층 1격간 프레임과 마찬가지로 절점 별 평균 변위 값은 일치하는데 반

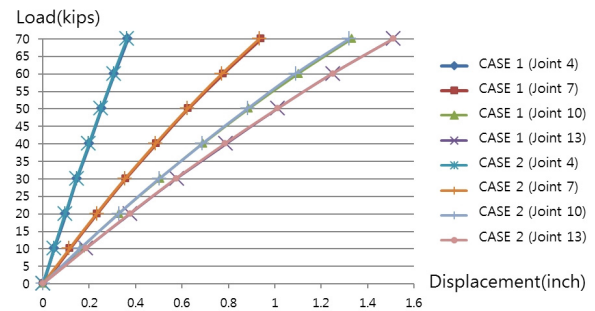


Fig. 13 A Four-Story and Two-Bay Frame Load-Average displacement relation(at case 1, 2)

Table 5 COV in the nodal displacement for case 1, 2 with respect to increase of loads

Load (kips)	CASE 1 COV(%)		CASE 2 COV(%)	
	Joint 10	Joint 13	Joint 10	Joint 13
10	7.04	7.09	2.01	1.94
20	7.10	7.13	2.02	1.96
30	7.16	7.20	2.04	1.98
40	7.25	7.28	2.07	2.00
50	7.36	7.38	2.10	2.03
60	7.50	7.51	2.13	2.07
70	7.68	7.68	2.18	2.11

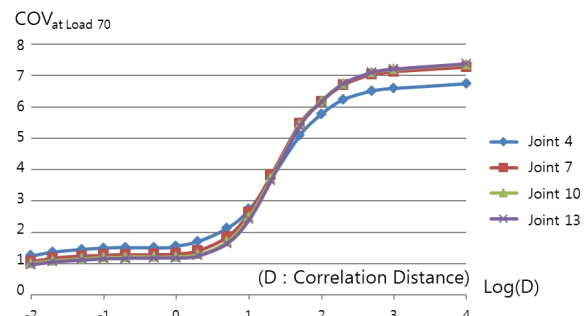


Fig. 14 Coefficient of variation according to correlation distance(at load 70kips)

해 변동계수는 각 경우별로 절점에 관계없이 상호 근사한 것으로 나타났다. 경우 1이 경우 2보다 약 350% 높게 나타났으며 하중에 따른 변동계수의 변화는 비선형적 증가를 보이지만 2층 1격간 구조에 비하여 비선형성은 적게 나타났다. 경우 3에서는 Fig. 14에 보인 바와 같이 상관거리(Correlation Distance)의 증가에 따라 변동계수가 S형태로 증가하는 경향을 나타내었고, 최대치는 $D \rightarrow \infty$ 에서 약 7%정도로 나타났다. Fig. 14는 하중 70kips에서의 결과이다.

4.4 결과검토

Table 4와 Fig. 12, 그리고 Table 5와 Fig. 14를 비교하여 관찰하면 적용한 확률변수의 형태(경우 1, 2, 3)에 따

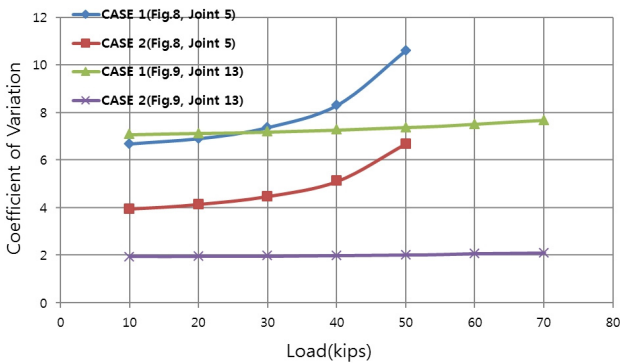


Fig. 15 COV in increase of load on A Two-Story One-Bay Frame and A Four-Story and Two-Bay Frame

른 결과를 비교할 수 있다. Fig. 12와 14는 각각 2층 1격간 프레임과 4층 2격간 프레임에 대한 해석결과로 각각 Table 4와 5에 제시된 최대하중(50kips와 70kips)에서의 결과를 나타내고 있다. 먼저 2층 1격간 프레임에서는 경우 1과 상응하는 경우 3의 변동계수 값은 상관거리 $D = \infty$ 에 해당하며 그 값은 약 11%이다. 경우 2에 대해서는 경우 2의 약 7%에 해당하는 변동계수는 경우 3에서는 $D \approx 10$ 에서 나타나고 있다. 이는 구조부재별로 독립적으로 생성된 N_c 개로 구성되는 추계장이 상관거리 $D \approx 10$ 의 경우에 해당함을 말해주고 있다. 이러한 결과는 4층 2격간 프레임에 대해서도 동일하게 나타나고 있다. 즉, 경우 1에서 $P = 70$ kips에서의 변동계수는 $COV \approx 7.7\%$ 이며 이는 경우 3에서 $D \rightarrow \infty$ 에 해당하며, 동일 하중에서 경우 2에서의 변동계수는 경우 3에서의 $D \approx 10$ 에서의 값과 유사하다.

Fig. 15는 두 예제에서 하중증가에 따른 절점별 변동계수의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 하중과 변동계수의 관계는 비선형적 증가 경향을 보인다. 그러나 2층 1격간 프레임이 증가율이 더 큰 것을 볼 수 있다.

이렇게 두 예제에서 경향이 다른 이유는 Fig. 11과 13의 비교를 통하여 설명할 수 있다. 2층 1격간 프레임의 경우 경계가 힌지로 지지되어 있어, 고정 지지된 4층 2격간 프레임에 비하여 비선형 거동이 큰 것을 알 수 있다. 그런데 확률론적 선형해석에 따르면 하중의 크기는 변위의 분산계수에 영향을 미치지 않는다. 즉, 하중의 절대적 크기와 관계없이 선형거동에서는 변위의 분산이 재료상수의 임의성에 의해서만 영향을 받게 되는 것이다. 따라서 Fig. 13의 4층 2격간 프레임의 경우 그 거동이 2층 1격간 프레임에 비하여 선형에 매우 가깝기 때문에 변위의 분산에 대한 하중의 영향이 상대적으로 적게 나타나는 것으로 판단된다.

또 하나 고찰할 수 있는 것은 확률변수의 상관거리 $D \rightarrow \infty$ 인 경우이다. 이 상태에서의 추계장 특성은 진술한 바와 같

이 “ $f(x) = \text{상수}$ ”라는 것이다. 즉, 경우 3에서 $D = \infty$ 인 상태는 경우 1과 동일하며, 이러한 특성은 Table 4와 Fig. 12, 그리고 Table 5와 Fig. 14의 비교를 통해서 확인할 수 있다. 특기할 점은 이러한 상태에서 두 예제의 변위의 변동계수가 다르다는 것이다. 즉 2층 1격간 프레임은 $D \rightarrow \infty$ 에서의 분산계수가 추계장의 분산계수인 10%를 다소 초과하고 있으나, 4층 2격간 프레임의 경우 그에 미치지 못하는, 약 7%의 값으로 산정되고 있다. 이러한 결과는 $D \rightarrow \infty$ 인 상태에서 구조와 관계없이 동일한 변동계수를 나타내는 확률론적 선형해석(최창근 등, 1995)과 달리 비선형 거동에 대한 확률론적 해석은 구조의 특성별로 그 변동계수가 다를 수 있음을, 즉 단순예측이 불가능함을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 강재 탄성계수의 불확실성이 반강점을 고려한 프레임 구조의 비선형 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 강재 탄성계수의 불확실성은 정규분포로 모델링하였으며, 이러한 확률적 물성치를 반강점 프레임의 비선형 거동에 적용할 수 있는 해석프로그램을 개발하였다. 해석에서는 프레임의 거동과 강도에 영향을 미치는 기하학적 비선형, 재료적 비선형, 반강점을 고려한 접합부의 비선형 효과를 고려하였다. 확률론적 해석은 Monte Carlo Simulation을 이용하였고, 구조계를 구성하는 각 부재 물성치의 불확실성을 독립적으로 고려한 해석과 부재간의 상관관계를 고려한 해석을 수행하였다.

재료탄성계수의 확률변수를 3가지 경우로 고려하여 2층 1격간 프레임과 4층 2격간 프레임에 대하여 해석을 수행하였다.

결정론적 해석의 결과는 강점 프레임 대비 반강점 프레임의 변위가 크게 발생하였고, 이는 기존의 연구결과들과 동일한 값을 나타내었다. 확률론적 해석의 결과, 경계조건 및 구조의 규모 등 구조의 특성별로 상이한 결과를 고찰하였다. 특히 비선형 거동이 크게 나타난 예제 1의 경우에는 하중 증가에 따라 변위의 분산계수도 함께 증가하는 결과를 보였으나, 비선형 거동이 크게 나타나지 않은 예제 2에서는 하중단계별 분산계수의 변동은 상대적으로 작게 나타났다. 경우 2와 3의 해석 비교를 통해, 경우 2에 대한 확률변수와 등가인 상관거리는 예제 1과 2에서 공히 $D \approx 10$ 로 나타났다.

본 연구는 강재 프레임의 실제적 거동 모사를 위한 반강점 특성을 고려한 비선형 거동에 대한 확률적 해석을 제시하였으며, 거동의 분산이 구조의 특성은 물론 하중단계별로 특징적인 결과를 나타냄을 보인 바, 추후 강재 프레임구조의 설계에 참고가 되리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124030200050)입니다.

참 고 문 헌

- Kang, S.B.** (1998) Semi-Rigid Connection in Steel Framed Structure, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 42, pp.40~44.
- Kim, S.I., Yoon, C.Y.** (2001) A Simplified Nonlinear Analysis of Semi-Rigid Connections in Frames Based on Load Increments, *Korean Society of Civil Engineers*, 21(2), pp.217~223.
- Kim, S.E.** (1997) Direct Design of Semi-Rigid Frame, *Korean Society of Civil Engineers*, 17(1~6), pp.909~916.
- Choi, C.K., Noh, H.C.** (1995) Stochastic FE Analysis of Plate Structure, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 8(1), pp.127~136.
- Chen, S.L., Chui, P.P.T.** (2000) Non-Linear static and Cyclic Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connection, Elsevier, Oxford, p.355.
- Chen, W.F., Lui, E.M.** (1987) *Structural Stability*, Elsevier, NewYork, pp.185~187.
- Chen, W.F., Lui, E.M.** (1992) *Stability Design of Steel Frames*, CRC Press, Florida, p.380.
- Chen, W.F., Sohal, I.** (1995) *Plastic Design and Second-Order Analysis of Steel Frames*, Springer-Verlag New York, p.509.
- Chen, W.F., Toma, S.** (1992) *Advanced Analysis of Steel Frames*, CRC Press, Florida, p.195.
- Kishi, N., Chen, W.F.** (1990) Moment-Rotation Relations of Semi-Rigid Connection with Angle, *J. Struct. Eng.*, 116(7), pp.1813~1834.
- Noh, H.C., Park, T.** (2011) Response Variability of Laminate Composite Plates Due to Spatially Random Material Parameter, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200, pp.2397~2406.
- Papadopoulos V., Soimiris G., Papadrakakis M.** (2013) Buckling Analysis of I-section Portal Frames with Stochastic Imperfections, *Engineering Structures*, 47, pp.54~66.
- Yamazaki, F., Shinozuka, M.** (1990) Simulation of Stochastic Fields by Statistical Preconditioning, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 116(2), pp.268~287.

요 지

본 논문에서는 반강접을 고려한 프레임 구조에서 강제 탄성계수의 불확실성이 프레임 구조의 비선형거동에 미치는 영향을 분석하였다. 강제 탄성계수의 불확실성의 확률분포는 정규분포로 모델링 하였으며, 이러한 확률적 물성치를 반강접 프레임의 비선형 거동에 적용할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였다. 프레임의 비선형 거동 인수인 기하학적 비선형, 재료적 비선형, 그리고 접합부의 반강접에 의한 비선형 효과를 고려하여, Monte Carlo Simulation에 기반한 확률론적 해석을 수행하였다. 확률론적 해석을 위해 확률변수를 세 종류로 생성하여 사용하였다. 확정론적 해석의 결과는 기존의 연구 결과와 잘 일치하는 결과를 보였다. 확률론적 해석의 경우, 변위의 분산계수는 구조에 작용하는 하중이 증가함에 따라 증가하는 결과를 나타냈으며, 그 값은 프레임구조의 구조적 특성에 영향을 받는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 반강접 접합부, 비선형성, 상관관계, Monte-Carlo simulation