

하중증폭계수를 적용한 비가새 골조 2차 해석 평가

Evaluation of the Second Order Analysis of Unbraced Frame by using load amplification factor

김 희 동¹⁾ · 이 명 재²⁾
Kim, Hee Dong · Lee, Myung Jae

요약 : 본 연구는 강구조 설계기준에서 제시하고 있는 하중증폭계수를 적용한 2차 해석법의 타당성을 해석적 방법을 통해 평가하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 KBC 2005에서 제안하고 있는 B1 및 B2 계수를 적용한 2차 해석과 KBC 2009(안)에서 제안하고 있는 하중증폭계수를 적용한 직접해석을 3층 1스팬 및 5층 3스팬 비가새 강구조 골조에 대해 실시하고, 그 해석 결과를 2차 비선형 해석 결과와 비교하여 기준에서 제안된 2차 해석법들을 평가하였다. 해석의 주요 변수로는 골조의 규모, 기둥의 축력비, 해석방법 등이 적용되었다. 연구 결과 고축력 조건시 KBC 2005에서 제안된 하중증폭계수를 적용한 2차 해석은 2차 효과의 영향을 적절하게 고려하지 못하나 KBC 2009(안)에서 제안된 직접해석법의 경우 적절한 수준에서 2차 효과를 고려하고 있는 것으로 나타났다.

ABSTRACT : The purpose of this study was to evaluate the validity of the second-order analysis using the load amplification factor suggested by design codes. For this purpose, the first-order analysis with the B1 and B2 factors suggested by KBC 2005 and the direct analysis with the load amplification factor suggested by KBC 2009 (draft) were performed for three-story -one-bay and five-story-three-bay unbraced steel frames. The results of the analyses were compared with the results of the second-order inelastic analysis to evaluate the validity of the suggested methods. The main parameters of the analysis were the scale of the frame, the axial load ratio of the column, and the methods of analysis. The research results showed that the method suggested by KBC 2005 does not properly consider the second-order effect under the high axial load ratio, but the direct analysis method suggested by KBC 2009 (draft) properly estimates the second-order effect without any serious problem.

핵심용어 : 하중증폭계수, 비가새 골조, 2차 해석, 직접해석법, B2 계수

KEYWORDS : load amplification factor, unbraced frame, second order analysis, direct analysis method, factor B2

1. 서론

설계 대상 건축물의 구조적 안정성을 확보할 수 있도록 적절하게 구조 설계를 수행하는 것은 구조물의 안전에 있어 매우 중요한 부분을 차지하며, 특히 대상 구조물이 별도의 횡력 저항 시스템 없이 기둥과 보 및 접합부의 강성만으로 횡력에 저항하는 비가새 골조일 경우 그 중요성은 더욱 증가한다 (Galambos, 1968; 1998, Kim, 2002; 2009). 이러한 맥락에서 각국의 구조설계기준에서는 골조의 안정성을 해석적으로 평가하고 이를 적절히 설계에 반영할 수 있는 다양한 해석 및 설계법들을 제시하고 있다.

이들 설계기준에는 구조물에서 발생하는 P- Δ 및 P- δ 와 같은 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치는 2차 효과를 간단한 1차 탄성해석의 결과를 이용하여 고려할 수 있는 하중증폭계수법(load amplification factor method)이 2차 해석법의 하나로 제안되고 있다.

현재 국내 구조설계기준인 건축구조설계기준(이하 KBC 2005(대한건축학회, 2005))의 강구조 설계편에도 구조물의 2차해석법의 하나로 하중증폭계수인 B1 및 B2 계수와 1차 탄성해석결과를 이용한 2차 해석법을 제안하고 있다. 그리고 개정 진행 중인 건축구조설계기준(안)(이하 KBC 2009(안)(대한건축학회, 2009))에서는 다양한 형태의 하중증폭계수

1) 교신저자. 현대제철 과장, 공학박사, 건축구조기술사
(Tel. 02-772-2233, Fax. 02-772-2240, E-mail drkimhd@hanafos.com)
2) 중앙대학교 건축학과 교수, 공학박사(mjlee@cau.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

를 적용한 2차 해석법들을 제안하고 있다.

저자 일동은 중저층 철골조 비가새 골조의 하중증폭계수 (B2 계수) 특성에 대한 해석 및 실험적 연구(Kim, 2002 ; 2009)를 수행한 바 있다.

이에 금번 연구에서는 LeMessurier(LeMessurier, 1972) 및 Yura (Yura, 1971)등에 의해 제안되어진 KBC 2005의 하중증폭계수를 이용한 2차 해석과 Surovek-Maleck 및 White (Surovek-Maleck, 2004 ; 2005 ; White, 2006) 등에 의해 제안되어진 KBC 2009(안)의 하중증폭계수를 이용한 직접해석법(Direct Analysis Method)의 결과를 2차 비선형 해석법인 수정소성힌지법을 적용한 해석 결과와 비교하여 국내 강구조설계기준에서 제안하고 있는 하중증폭계수를 적용한 2차 해석법의 타당성을 평가하고, 이를 추후 비가새 골조의 설계시 기초자료로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

2. 하중증폭계수를 적용한 2차 해석

본 연구의 고찰대상인 KBC 2005에서 제안하고 있는 하중증폭계수를 적용한 2차 해석법(이하 탄성해석법)과 KBC 2009(안)에서 제안하고 있는 2차 해석법 중 하나인 하중증폭계수를 적용한 직접해석법(이하 직접해석법)을 간략히 요약하면 다음과 같다.

2.1 탄성해석법

KBC 2005에서는 골조의 안정성과 관련하여 아래의 사항을 명기하고 있다.

- (1) 골조의 설계시 구조물 전체의 안정성을 확보하기 위하여 골조에 작용하는 연직하중 및 횡변위에 의한 2차 (P-Δ)효과를 고려하여야 한다.
- (2) 골조는 계수하중에 대하여 좌굴이 발생하지 않고 횡적 안정을 유지해야 한다.
- (3) 안정성 해석에서는 모든 압축재의 축방향 변형을 포함해야 한다.

이 중 (1) 항과 관련하여 계수하중을 적용한 2차 탄성해석 또는 아래와 같은 1차 탄성해석과 하중증폭계수를 적용한 탄성 2차 해석을 허용하고 있다.

$$M_u = B_1 M_{u1} + B_2 M_{u2} \tag{1}$$

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - P_u/P_{e1}} \geq 1 \tag{2}$$

$$P_{e1} = F_y A_g / \lambda_c^2 \tag{3}$$

$$C_m = 0.6 - 0.4 (M_1/M_2) \tag{4}$$

$$B_2 = 1 / \left\{ 1 - \left[\frac{\sum P_u}{\sum H} \right] \left[\frac{\Delta_{oh}}{L} \right] \right\} \tag{5}$$

$$= 1 / \left\{ 1 - \frac{\sum P_u}{\sum P_{e2}} \right\} \tag{6}$$

KBC 2005에서는 2차 효과에 의한 하중증폭효과를 식(1)과 같이 모멘트에서만 고려하고 있다. 따라서 2차 효과에 따른 축방향 소요강도 변화는 직접 고려하지 않는다. 그리고 식(2)는 부재차원의 2차효과인 P-δ 효과를 고려하기 위한 하중증폭계수이며, 식(5)와 (6)은 골조 차원의 2차 효과인 P-Δ효과를 고려하기 위한 하중증폭계수이다.

이 중 식(5)는 LeMessurier (LeMessurier, 1972)에 의해서 제안된 층강성(story stiffness) 개념에 의한 하중증폭계수이며, 식(6)은 Yura (Yura, 1971)에 의해서 제안된 층좌굴(story buckling) 개념에 의한 하중증폭계수이다.

2.2 직접해석법

KBC 2009(안)에서는 골조의 안정해석과 관련하여 “구조물설계 시 구조물 전체 또는 일부의 안정성을 확보하여야 한다. 구조물전체 또는 일부의 안정성에 가해지는 2차효과 (P-Δ, P-δ 효과), 휨, 전단, 축방향 변형, 기하학적 불완전성, 잔류응력에 의해 발생하는 부재강도감소 등을 고려해야 한다. 직접해석법은 이러한 요구조건을 만족해야한다. 횡방향변위를 일으키는 모든 구성요소와 접합부변형은 안정해석에 포함한다.”라고 비교적 상세하게 명기하고 있다.

또한 이를 위한 몇가지 구체적인 2차 해석 방법도 제시하고 있다. 그리고 기하학적 비선형 거동의 영향이 골조의 거동에 미치는 영향이 큰 경우(2차 횡변위 대 1차 횡변위의 비(또는 B2 계수)가 1.5를 초과할 때)의 소요강도는 직접해석법만을 적용하여 산정하도록 규정 하고 있다.

KBC 2009(안)에서 제안하고 있는 하중증폭계수를 적용한 직접해석법에서 소요2차휨강도와 축강도는 아래의 식들을 이용하여 산정한다.

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \tag{7}$$

$$P_r = P_{nt} + B_2 P_{lt} \tag{8}$$

$$B_2 = 1 / \left\{ 1 - \left[\frac{\sum P_u}{\sum H} \right] \left[\frac{\Delta_{oh}}{L \cdot R_H} \right] \right\} \tag{9}$$

$$= 1 / \left\{ 1 - \frac{\sum P_u}{\sum P_{e2}} \right\} \tag{10}$$

상기 식 중 B1 계수는 식(2)와 동일하며, B2 계수의 경우 층좌굴 개념에 의한 식은 식(6)과 동일하나 층강성 개념을 적용한 식은 식(5)와 달리 R_H 가 추가되어 구조 시스템에 따라 상수를 달리 적용하고 있다.

직접해석법에서는 상기의 하중증폭계수 이외에 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 다양한 구조적 요인을 해석에 반영하고 있다. 먼저 구조물의 기하학적 불완전성과 재료적 비탄성효과를 고려하기 위하여 구조물의 해석 단계에서 식(11)과 같은 가상 수평하중(N_i)을 횡력저항골조시스템에 적용한다.

$$N_i = 0.002 Y_i \quad (11)$$

단, 1차횡변위에 대한 2차횡변위의 비율이 1.5 이하인 골조인 경우 다른 횡하중의 조합을 배제한 중력하중 만의 조합에 대한 최소 횡하중을 가상하중 N_i 에 적용할 수 있다. 그리고, 부재의 강성 감소를 고려하기 위해 휨강성이 구조물의 횡방향안정성에 기여한다고 판단되는 모든 부재의 휨강성은 아래의 감소된 휨강성을 사용해야 한다.

$$EI^* = 0.8\tau_b EI \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tau_b &= 1.0 : \alpha P_r / P_y \leq 0.5 \text{인 경우} \\ &= [\alpha P_r / P_y (1 - \alpha P_r / P_y)] : \alpha P_r / P_y > 0.5 \text{인 경우} \end{aligned} \quad (13)$$

만약 $0.001 Y_i$ 의 추가적인 가상하중이 식(11)에서 요구되는 가상하중에 추가될 때, $\alpha P_r / P_y > 0.5$ 인 경우 $\tau_b < 1.0$ 인 값을 사용하는 대신 $\tau_b = 1.0$ 을 모든 부재에 대해 사용할

표 1. 하중증폭계수 이용 2차 해석법 비교

분류	탄성해석법	직접해석법
관련기준	KBC 2005	KBC 2009(안)
기하학적 불완전성	외부 모델링을 통해 고려	가상하중을 통해 고려
비탄성 효과	고려 불가	가상하중 및 강성 감소를 통해 고려
P-δ 효과	B1 계수 적용	B1 계수 적용
P-Δ 효과	B2 계수 적용 ($R_H = 1.0$)	B2 계수 적용 ($R_H = 1.0 / 0.85$)
적용 대상	구체적 구분 없음	B2 > 1.5 인 경우 의무적 적용
증폭 하중	모멘트에 한정	축력 / 모멘트 동시 증폭
P_n 산정	K 값 산정	K=1.0 적용

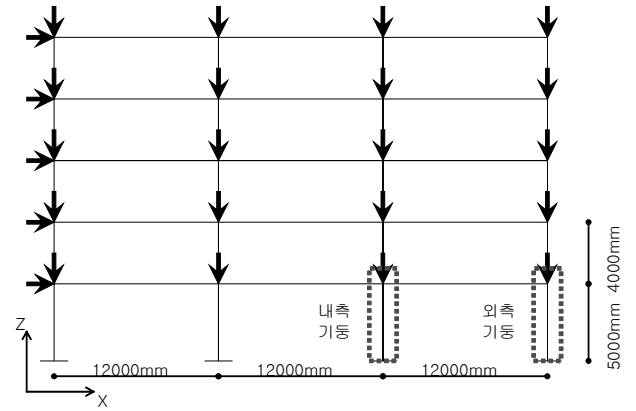


그림 1. 해석 대상 골조 (5층 3스팬, X-Z 입면)

수 있다. 또한 축방향강성이 구조물의 횡방향안정성에 크게 기여한다고 판단되어지는 부재에 대해서는 아래의 감소된 축방향강성을 사용해야 한다.

$$EA^* = 0.8EA \quad (14)$$

상기에서 언급된 부재의 소요강도 산정을 위한 해석적 고려 사항 이외에도 직접해석법에서는 부재의 공칭강도 산정시 유효좌굴길이계수 $K = 1.0$ 을 사용하여 공칭압축강도 P_n 를 산정하도록 제안하고 있다. 따라서 유효좌굴길이계수 산정에 따른 번거로움을 제거할 수 있다. 상기의 두 해석 방법의 차이점을 표 1에 간단히 정리하였다.

3. 수치해석

2장에서 언급된 하중증폭계수를 이용한 2차 해석법을 평가하기 위해 아래와 같은 조건으로 수치해석을 수행하였다.

3.1 해석 대상 골조

하중증폭계수를 적용한 2차 해석법의 타당성 평가를 위하여 3층 1스팬 및 5층 3스팬 중저층 강구조 비가새 골조를 대상으로 수치해석을 수행하였다.

스팬은 X 방향으로 12,000mm를 적용하였으며, Y 방향으로 8,000mm를 적용하였다. 그리고 1층 층고는 5,000mm를 적용하였고 이외 층의 층고는 4,000mm를 적용하였다(그림 1 참조). 적용된 골조의 기둥-보 접합부는 모두 강접으로 가정하였으며, 지점 조건은 고정단으로 하였다.

X 방향의 횡력저항 시스템으로 비가새 골조 (모멘트 골조)를 적용하였으며, Y 방향의 경우 가새 / 비가새 골조를 공히 적용하여 공칭압축강도 산정시 Y 방향의 유효좌굴길이 계수

표 2. 해석대상 골조 단면

구분	3층 1스팬 골조	5층 3스팬 골조
보부재	H-606×201×13×23 (SS400)	H-612×202×13×23 (SS400)
기둥부재	H-350×350×12×19 (SHN490)	H-350×350×12×19 (SHN490) H-300×300×10×15 (SHN490)

(K_y)의 변화에 따른 영향을 평가할 수 있도록 하였다. 부재설계는 서울 소재 일반 사무소 건물을 기준으로 한 KBC 2005 하중 조건에 근거하여 수행하였다. 적용된 부재 단면은 표 2와 같다. 해석 대상 골조에 적용되는 하중은 모두 절점하중(nodal load)으로 고려하였고, 이에 따라 부재에 발생하는 모멘트는 수평하중에 의해 좌우된다.

본 연구의 구체적 고찰 대상은 기하학적 비선형의 영향이 가장 크게 나타나는 1층 기둥재 (Kim, 2002 ; 2009) 중 수평하중 가력에 따른 압축력의 영향을 받게 되는 위치의 기둥재를 주요 고찰 대상 부재로 선정하였다(그림 1의 내측 및 외측 기둥재).

3.2 주요 변수 및 해석 방법

본 연구에서는 비가새 강구조 골조의 안정성에 미치는 영향 인자들에 대한 선행 연구(Kim, 2002 ; 2009)를 통하여 파악된 주요 인자인 축력비를 포함하여 구조물의 규모, 기둥재의 축방향 하중 분포형태, 기둥재 위치, 해석 방법 및 B2 계수 산정방법 등을 주요 해석 변수로 선정하였다.

구조물의 규모는 3.1절에서 언급한 바와 같이 3층 1스팬 및 5층 3스팬 중저층 비가새 골조를 그 대상으로 하였다. 기하학적 비선형의 영향에 심각성은 일반적으로 고층 건축물에서 증가하나 비가새 골조 시스템이 주로 적용되는 대상을 고려할 때 중저층 구조물이 현실적이라 판단하였으며 중저층 건축물이라 하더라도 경우에 따라서 기하학적 비선형 거동이 구조물의 안전에 큰 영향을 미칠 수 있으므로(Kim, 2009) 중저층 비가새 골조를 연구 대상 골조로 선정하였다.

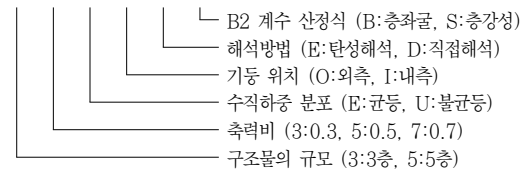
그리고 본 연구에서 적용된 축력비는 동일 기둥열에 작용하는 모든 축방향 절점하중의 단순합에 의한 최하층 기둥재의 축력비를 의미하며, 휨모멘트에 의해 부재 항복이 지배되도록 유도한 저축력(0.3) 경우부터 축력에 의해 부재 항복이 지배되도록 유도한 고축력(0.7) 경우까지를 변수로 선정하였다.

또한 외측기둥과 내측기둥의 수직하중이 동일한 균등의 경우와 부담면적 차이에 따른 영향을 고려한 불균등의 경우(외측 × 2 = 내측)를 변수로 선정하였으며, 고찰의 주요 대상

표 3. 해석대상 변수

CASE	규모	축력비	수직하중 분포
33E	3층1스팬	0.3	균등
35E	3층1스팬	0.5	균등
37E	3층1스팬	0.7	균등
53E	5층3스팬	0.3	균등
55E	5층3스팬	0.5	균등
57E	5층3스팬	0.7	균등
53U	5층3스팬	0.3	불균등
55U	5층3스팬	0.5	불균등
57U	5층3스팬	0.7	불균등

표기에 3 3 E O E B
:



이 되는 최하층 기둥재의 위치에 따른 변화를 파악하기 위해 기둥의 수평적 위치도 변수로 추가하였다.

KBC 2005 및 KBC 2009(안)에서 각각 제안하고 있는 하중증폭계수를 적용한 2차 해석법에 따른 변화 및 하중증폭 계수인 B2 계수의 산정방식(층강성 및 층좌굴 개념)에 따른 차이를 고찰하기 위해 해석 방법 및 하중증폭계수 산정 방법 또한 고찰 변수로 선정하였다. 연구에 적용된 구체적인 변수 및 변수명 표기 방법은 표 3에 나타내었다.

KBC 2005 및 KBC 2009(안) 모두 부재 차원에서의 2차 효과(P-δ)를 고려하기 위해 식(2) (B1 계수)를 제안하고 있다. 하지만 본 연구에 적용된 해석 대상 골조의 경우 모든 하중이 절점에 적용되고 있고 대칭 형태를 띄고 있으므로, 수평 변위가 제한된 상태에서 부재에 발생하는 모멘트의 영향이 크지 않다. 따라서 본 연구에서는 B1계수의 적용은 고려하지 않았다.

그리고, 해석 방법 중 KBC 2009(안)에서 제안하고 있는 직접해석법의 경우 하중증폭계수 산정시 식 (12), (13) 및 (14)를 적용하여 휨 및 축방향 강성 감소를 고려해야 한다. 본 연구에서는 이들 강성감소 식들을 아래와 같은 절차를 통하여 수치해석에 반영하였다.

- (1) τ_b : τ_b 를 고려한 B2 계수 산정을 위해서는 1차 해석 수행 후 각 기둥재에 발생하는 축력을 모두 검토한 후, τ_b 를 산정, 이를 반영한 재해석을 수행하여야 한다. 하지만 이는 매우 번거롭고 시간을 요하는 작업이 되므로 본 연구에서는 τ_b 의 적용 대신에 기준에서 제안하고 있

는 수평하중에 가상하중 $0.001 Y_i$ 를 추가하는 방법을 통하여 τ_b 의 효과를 고려하였다.

- (2) 휨강성 감소 : 직접해석법에서는 수평하중 저항에 기여하는 부재의 휨강성 감소를 해석에 고려하도록 제안하고 있으며, 이는 결국 하중증폭계수인 B2 계수 산정에 영향을 미치게 된다. 이들 식 중 축방향 강성을 이용한 식 (5)와 (9)의 산정시, 탄성해석의 경우 하중과 변위가 선형비례하므로 부재 휨강성의 감소(0.8EI) 후 재해석을 수행하는 대신 1차 해석 결과에 의한 수평변위를

1.25배 ($\Delta_H \times 1.25$) 하여 B2계수를 산정하였으며, 층좌굴 개념을 이용한 식(6)과 (10)은 EI 대신에 0.8EI를 직접 적용하여 B2 계수를 산정하였다.

- (3) 축강성 감소 : 본 연구에 적용된 수평하중 저항 시스템은 기둥 및 보의 휨강성으로 수평하중에 저항하는 모멘트 골조 방식이므로 축방향 강성이 골조의 휨강성에 미치는 영향이 미미하다. 따라서 식 (14)에서 제안하고 있는 축방향 강성 감소는 고려하지 않았다.

표 4. 수치해석 결과 (축력 : kN)

변수명	E ₋	DB	DS	2차해석
33EO	1,837	1,863	1,856	1,855
35EO	2,888	2,917	2,910	2,906
37EO	3,946	3,958	3,959	3,957
53EO	1,881	1,910	1,903	1,894
55EO	2,925	2,959	2,951	2,941
57EO	3,949	3,962	3,964	3,961
53UO	1,071	1,096	1,090	1,081
55UO	1,531	1,557	1,552	1,544
57UO	2,011	2,028	2,027	2,022
53EI	1,641	1,634	1,636	1,640
55EI	2,785	2,778	2,780	2,783
57EI	3,935	3,932	3,931	3,932
53UI	1,626	1,620	1,621	1,625
55UI	2,771	2,762	2,763	2,768
57UI	3,910	3,901	3,901	3,907

상기에 언급된 적용방법들은 실무자 입장에서 가능한 불필요한 계산 과정을 배제하면서 제안된 직접해석법을 적용하기 위해 선행된 연구에서 제안된 방법이다 (Carter, 2006).

상기에 제안된 하중증폭계수를 적용한 2차 해석의 타당성을 평가하기 위해 Chen 및 Kim 등에 의해 제안(Chen, 1995 ; Kim, 1998)된 수정소성힌지법(refined plastic hinge method)를 적용한 2차원 2차 비탄성 해석(이하 2차 해석)을 수행하였다. 본 해석에 사용된 프로그램은 선행된 P-Δ 효과 관련 연구를 위해 개발된 프로그램(Kim, 2002)으로 해석의 타당성이 검증된 프로그램이다.

본 연구에서는 초기 변형의 영향을 고려하기 위해 구조 해석 모델링시 층별로 L/500의 초기 변형을 절점 변위의 형태로 해석 모델링에 직접 반영하였다. 적용된 초기변형 값은 직접해석법에서 적용된 가상 수평하중값 산정에 적용된 값과 동일한 값이다.

상기의 각 해석방법들을 적용한 수치해석의 결과 중 최하층 기둥재의 축력 및 휨모멘트를 표4 및 표 5에 나타내었다.

표 5. 수치해석 결과 (휨모멘트 : kN·mm)

변수명	EB	ES	DB	DS	2차해석
33EO	467,652	446,260	483,962	464,376	484,168
35EO	259,995	239,200	288,467	267,529	273,076
37EO	30,264	29,481	56,921	59,939	58,811
53EO	398,032	383,689	409,711	397,510	385,282
55EO	246,720	231,055	269,913	255,306	241,672
57EO	22,419	22,280	47,776	51,108	44,904
53UO	436,049	424,526	445,306	435,705	425,264
55UO	230,533	220,011	246,188	236,863	228,278
57UO	43,120	41,491	57,073	56,503	60,502
53EI	445,639	429,581	458,716	445,055	437,886
55EI	276,225	258,687	302,167	285,815	275,063
57EI	25,099	24,943	53,341	57,060	50,741
53UI	487,807	474,916	498,163	487,422	479,559
55UI	257,424	245,675	274,898	264,485	256,513
57UI	47,266	45,481	62,760	62,134	61,023

4. 해석 결과 고찰

4.1 하중증폭계수 평가

각 변수별 탄성해석법과 직접해석법에 적용된 하중증폭계수(B2 계수, 식 5, 6, 9, 10)를 그림 2 및 그림 3에 나타내었다. 그림 2 및 그림 3에서 B2 계수의 분포를 살펴보면 탄성 해석법에 적용된 B2 계수(E)에 비하여 직접해석법에 적용된 B2 계수(D)가 최소 2%(5_U_EB)에서 최대 20%(3_E_ES) 더 큰 것으로 나타났다. 이는 직접해석법의 경우 구조물의 비탄성 거동과 초기변형의 영향을 직, 간접적인 방법을 통하여 B2계수 산정시 고려하게 되므로(가상하중에 따른 변위 증가, 강성감소 등) 이에 의해 B2 값이 증가하여 나타난 결과라 사료된다. 이는 직접해석법을 대상으로 강성감소 적용 전, 후의 B2 계수 증가 비율(그림 4 참조)를 통해서도 확인할 수 있다.

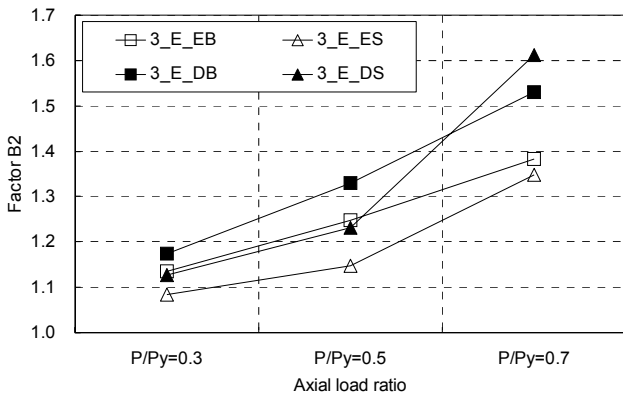


그림 2. B2 계수 변화 (3층 경우)

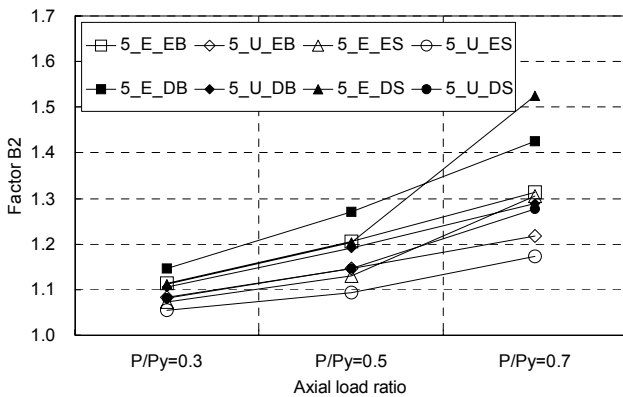


그림 3. B2 계수 변화 (5층 경우)

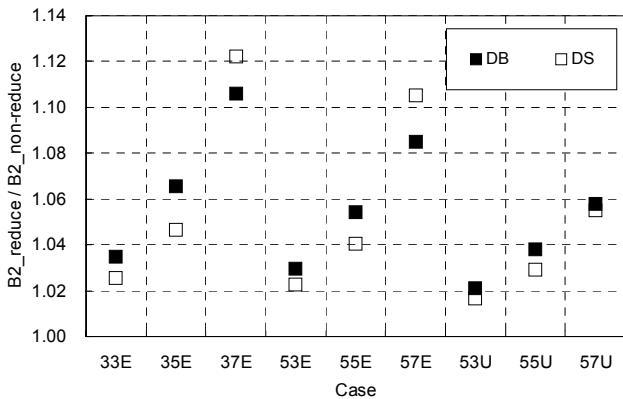


그림 4. 강성 감소에 따른 B2 계수 변화비 (직접해석법 경우)

그림 4에서 보면 모든 경우에 있어 강성 감소 적용 이후 B2 계수의 증가가 발생함을 볼 수 있다. 특히 고축력 상태 (0.7)로 갈수록 B2 계수의 증가 폭이 커지고 있으며 층강성 개념 적용의 경우(DS)에 이러한 현상이 더 커짐을 볼 수 있다. 그러나 모든 경우에 있어 강성 감소 이전의 최대 B2 계수값은 1.44 (37E_DS)로서 1.5 이하의 결과를 나타내어 직접해석법의 필수 적용 대상에는 포함되지 않는 것으로 나

타났다.

각 해석법 별 차이를 살펴보면 탄성해석에 적용된 B2 계수의 경우 층좌굴 개념을 적용한 경우(EB)가 층강성 개념을 적용한 경우(ES)에 비해 최대 9% 큰 값(35E_EB)을 나타내고 있다. 하지만 직접해석법의 경우 축력이 증가함에 따라 층강성 개념을 적용한 경우(DS)의 결과가 층좌굴 개념을 적용한 경우(DB)에 비해 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 상기의 강성 감소 적용에 따른 B2 계수 증가에서도 나타났듯이 층강성 개념을 적용한 경우 고축력 상태로 갈수록 강성 감소 적용에 따른 B2 계수 증가 영향이 크게 나타나 발생하는 현상으로 사료된다.

축하중의 분포에 따른 영향을 살펴보면 축방향 하중이 균등 적용된 경우(E)에서 최대 20% 큰 B2 계수값이 산정(57E_DS) 되었다. 이는 균등의 경우가 불균등 경우(U)에 비해 동일 층에 적용하는 축력값이 커져 B2 계수 증가가 더 크게 나타난 것으로 사료된다 (그림 4의 E series와 U series 비교).

4.2 소요강도 평가

4.2.1 소요압축강도

각 해석 방법별 1층 기둥재의 소요압축강도를 평가하기 위하여 축력비 0.3과 0.7의 경우에 대해서 동일한 조건으로 수행된 탄성해석(기호 : E)과 직접해석(기호 : D)의 결과를 각 변수별 수정소성인지법을 적용한 2차 해석(기호 : RPH) 결과로 무차원화하여 그림 5에 나타내었다. 또한 각 해석결과별 차이를 정량적으로 평가하기 위해 각 변수별 2차 해석과의 표준편차(%)를 그림 6에 나타내었다.

그림 5의 결과에서 보면 비가새 골조 최하층 기둥재의 축력의 경우 별도의 하중증폭효과를 고려하지 않는 탄성해석법과 2차효과에 의한 축력의 증폭효과를 고려하는 직접해석법의 결과가 오차 범위 ± 2% 이내에서 2차 해석에 의한 결과와 일치하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 적용된 대칭형 중저층 비가새 골조의 경우 2차 효과에 의한 최하층 기둥재의 축력 변화는 크지 않은 것으로 사료된다.

단, 본 연구 결과에서는 축력비가 증가할 수 록 2차 해석의 결과와 하중증폭계수를 적용한 결과 간에 차이가 줄어드는 것으로 나타났다. 특히 축력비 0.7인 층강성 개념을 적용한 직접해석법 (기호 : DS)의 경우 2차 해석 결과와 최대 오차 0.6% 이내에서 거의 일치하는 것으로 나타났다(그림 5 참조).

각 변수별 2차해석과의 편차를 살펴보면 층강성 개념의 B2 계수를 적용한 직접해석법(DS)이 최대표준편차 0.24%로 가장 낮게 나타났으며, 층좌굴 개념을 적용한 경우는 하중증폭

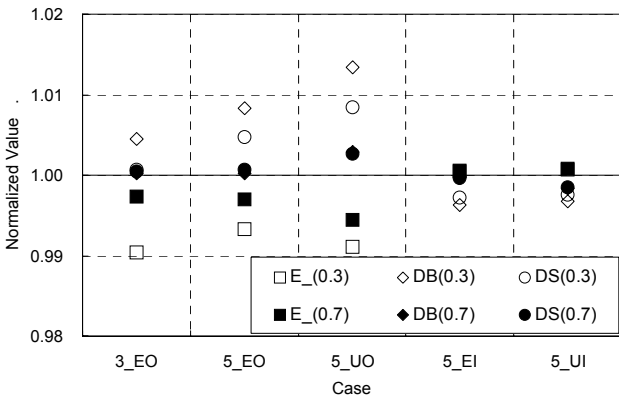


그림 5. 해석 결과 축력값 무차원화 (축력비 0.3 / 0.7 경우)

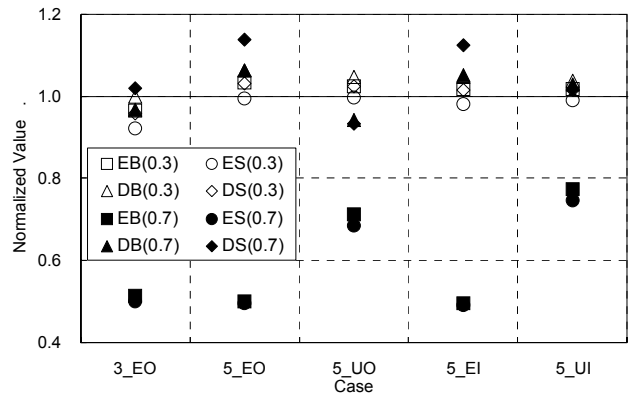


그림 7. 해석 결과 휨모멘트값 무차원화 (축력비 0.3 / 0.7 경우)

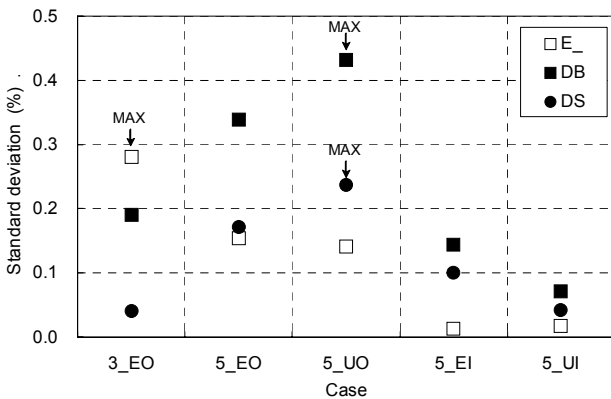


그림 6. 해석 변수별 축력값 표준편차

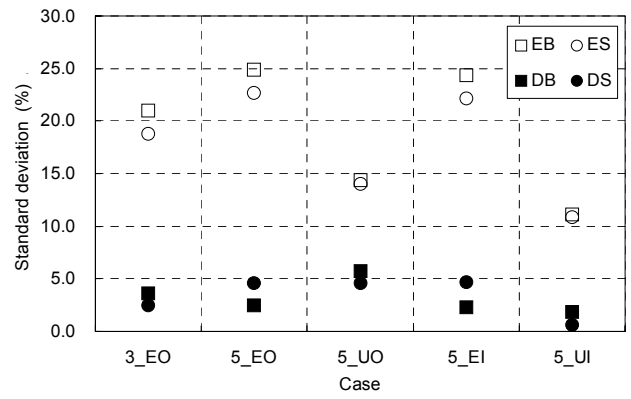


그림 8. 해석 변수별 휨모멘트값 표준편차

효과를 고려하지 않은 경우보다 더 큰 표준편차 (0.43%) 를 나타냈다. 따라서 하중증폭계수 산정식에 따라 2차 효과를 고려하는데 차이가 발생할 수 있는 것으로 사료되며, 본 해석 결과에서는 2차 해석과의 오차 및 표준편차 평가에서 모두 증강성 개념을 적용한 직접해석법(DS)의 경우가 2차 해석에 근접한 결과는 나타내었다.

4.2.2 소요 휨강도

각 해석 방법별 1층 기둥재의 소요 휨강도를 평가하기 위해 축력비 0.3과 0.7의 경우에 대해서 동일한 조건으로 수행된 탄성 1차 해석과 직접해석의 결과를 각 변수별 2차해석 결과로 무차원화하여 그림 7에 나타내었다. 또한 각 해석결과별 차이를 정량적으로 평가하기 위해 각 변수별 2차 해석과의 표준편차(%)를 그림 8에 나타내었다.

그림 7의 결과에서 보면 4.2.1절의 소요압축강도 경우(그림 5 참조)와는 달리 해석 방법 및 축력비에 따라 차이가 크게 나타나고 있다. 본 연구 결과에서 보면 저축력비(그림 7의 0.3) 상태에서는 탄성해석결과와 직접해석법의 결과 차이가 크지 않고 2차해석 결과와 오차범위 $\pm 8\%$ 이내의 근사한 결

과값을 나타내고 있으나, 고축력비(그림 7의 0.7)인 경우에는 해석 방법간에 차이가 크게 나타나고 있으며, 탄성해석법의 경우 축력비에 따라서 2차해석 대비 $\Delta 50\%$ 의 휨모멘트 결과값을 나타내는 경우도 발생하였다. 따라서 탄성해석법의 경우 고축력 조건하에서는 2차 효과에 의한 모멘트 증폭현상을 적절히 반영하지 못하는 것으로 사료되며, 이는 부재의 항복현상을 고려하는 직접해석법과는 달리 탄성거동에 기반한 탄성해석법이 비탄성 거동에 의한 2차 효과 증폭을 적절히 고려하지 못해 나타난 결과라 판단된다. 다만, 직접해석법의 경우에서도 각 층의 수직하중에 합이 비교적 작은 Case (3_EO, 5_UO)의 경우에는 소요휨강도를 최대 7% 정도 낮게 평가하는 것으로 나타났다 (그림 7 참조).

그리고 기둥재의 수평적 위치 차이에 따른 영향보다는 축방향 하중 분포에 따른 층의 축력차이로 인한 영향이 더 크게 나타났다. 그림 7에서 내외 기둥재간의 편차를 살펴보면 균등하중의 경우(5_EO와 5_EI) 내외 기둥재의 모멘트 증폭효과가 유사하나 불균등하중(5_UO와 5_UI)의 경우에는 차이가 나타났다. 이는 축력분포 변화로 인한 축력값의 변화에 영향으로 사료되며, 동일 층에 위치한 기둥재라 하더라도 축력

표 6. 변수 및 해석방법별 공칭압축강도

구분		3_EO	5_EO	5_EI
탄성해석법 (약축 가새골조, K 계산)	Pn (kN)	4765.7	4786.7	4947.8
	지배축	rx	rx	rx
	KL/r	49.34	48.68	43.42
탄성해석법 (약축 가새골조, K=1.0)	Pn (kN)	4523.3	4523.3	4523.3
	지배축	ry	ry	ry
	KL/r	56.56	56.56	56.56
탄성해석법 (약축 비가새골조, K 계산)	Pn (kN)	4000.4	4044	4044
	지배축	ry	ry	ry
	KL/r	70.7	69.57	69.57
직접해석법 (K=1.0)	Pn (kN)	4523.3	4523.3	4523.3
	지배축	ry	ry	ry
	KL/r	56.56	56.56	56.56

비에 따라서 그 거동이 달라질 수 있음을 나타내고 있다.

각 해석법의 고찰 변수간 2차해석결과와의 오차 분포를 나타낸 표준편차값(그림 8)을 살펴보면, 탄성해석법의 경우가 직접해석법의 경우에 비해 최대 9.9배 이상 편차가 크게 나타났다. 이는 탄성해석법의 경우 축력의 변화 및 기타골조의 거동에 영향을 미치는 인자들의 변화를 적절히 고려하지 못해 나타난 결과로 사료된다.

물론 설계법 상에서 공칭강도 산정 방법이 다르므로 최종 축력-모멘트 상관관계 산정시에는 결과가 달라질 수 있으나, 소요 강도 평가의 측면에서 탄성해석법에 따른 2차 효과 평가는 그 적용에 상당한 한계가 있는 것으로 판단되며, 경우에 따라서는 KBC 2009(안)에서 직접해석법의 필수 적용 대상이 아닌 $B2 \leq 1.5$ 경우 (본 연구에 적용된 모든 경우는 $B2 \leq 1.5$)에서도 상당한 오차를 발생할 수 있는 여지가 있다고 판단된다. 이에 반해 직접해석법의 경우 비교적 적절하게 소요강도를 평가하고 있는 것으로 사료된다.

4.3 공칭강도 평가

탄성해석법 및 직접해석법에서는 각 설계 개념에 따른 소요 강도 및 부재 공칭강도 산정법을 제안하고 있다. 공칭 휨강도의 경우 두 해석법 모두 2차 해석에 따른 별도의 공칭강도 산정 조건이 없으므로 기준의 휨내력 산정식을 그대로 적용할 수 있어 해석법에 따른 차이가 없다. 하지만 공칭압축강도의 경우 표 1에서 밝힌 바와 같이 압축재의 유효좌굴길이 계수 K의 산정 방식이 해석법에 따라 달라지므로 이에 따른 영향을 평가하기 위해 아래의 조건에 대하여 기둥재의 축방향 내력을 산정하였으며, 그 결과를 표 6에 나타내었다.

표 7. 축력 - 휨모멘트 상관관계

	EB_BK	EB_B1	EB_UK	DB_1	ES_BK	ES_B1	ES_UK	DS_1
33EO	0.91	0.93	0.99	0.96	0.89	0.91	0.96	0.93
35EO	0.90	0.93	1.01	0.97	0.88	0.91	0.99	0.94
37EO	0.86	0.91	1.02	0.94	0.86	0.91	1.02	0.94
53EO	0.84	0.86	0.91	0.88	0.83	0.85	0.90	0.87
55EO	0.89	0.92	1.00	0.96	0.87	0.91	0.98	0.94
57EO	0.85	0.90	1.00	0.93	0.85	0.90	1.00	0.93
53UO	0.72	0.73	0.76	0.74	0.70	0.72	0.74	0.73
55UO	0.58	0.60	0.64	0.62	0.57	0.59	0.63	0.61
57UO	0.47	0.49	0.55	0.51	0.47	0.49	0.54	0.51
53EI	0.83	0.86	0.91	0.88	0.82	0.85	0.89	0.86
55EI	0.87	0.93	1.00	0.95	0.85	0.91	0.98	0.94
57EI	0.82	0.90	1.00	0.93	0.82	0.90	1.00	0.93
53UI	0.88	0.91	0.95	0.92	0.86	0.89	0.94	0.91
55UI	0.85	0.90	0.98	0.92	0.84	0.89	0.96	0.91
57UI	0.84	0.92	1.02	0.93	0.84	0.92	1.02	0.93

표기에 : B K
 ↳ K 값 산정 방식 (K : 산정, 1 : 1.0 적용)
 ↳ 시스템 종류 (B : 가새, U 비가새)

- Y축 방향 가새골조 가정 :
 K=1.0 적용 (탄성, 직접) /
 alignment chart 적용 K 산정 (탄성)
- Y축 방향 비가새 골조 가정 :
 K=1.0 적용 (직접) /
 alignment chart 적용 K 산정 (탄성)

표 6의 결과를 보면, Y축방향을 가새 골조로 가정하고 alignment chart를 적용하여 K 값을 산정한 경우를 제외하고는 모두 Y축 방향에 의해서 공칭압축강도가 결정되었다. 현재 KBC 2005 및 KBC 2009(안) 모두 가새 골조의 경우 K=1.0을 적용하도록 권장하고 있으나, 계산에 의해 1 이하의 값도 적용 가능 하도록 하고 있으므로, K 산정 방식에 따라 기둥재의 공칭압축강도를 지배하는 축이 변경될 수 있다. 그리고 Y축을 비가새 골조로 가정할 경우 공칭압축강도는 K=1의 경우에 비해 약 88% 수준으로 현저하게 저하되는 것으로 나타났다.

하지만, K값을 산정해야 하는 탄성해석법과는 달리 직접해석법의 경우 압축재의 유효좌굴길이계수 K를 1.0으로 지정하고 있으므로 복잡한 K 값 산정 절차가 상당히 간소화 되는 장점이 있다. 그리고 기준에 명시되지는 않았지만 묵시적으로 이러한 K=1.0을 적용하는 방식은 약축에도 적용을 허용하고 있다 (White, 2006). 하지만 이럴 경우 Y 방향 구조 시

시스템에 따른 기동계의 내력 및 거동 변화를 고려하지 못하므로, 2차원 해석에 의한 설계시에 적절한 공칭강도 평가를 할 수 있을지에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다고 사료되며, 약축의 유효좌굴길이계수 산정 관련 사항은 기준에서 명확하게 그 적용 방법 및 범위를 명기하여 실무자들의 혼선을 막을 필요가 있다고 판단된다.

4.4 축력-휨모멘트 상관관계식

각 해석법별로 4.2절에서 산정된 소요강도와 4.3절에서 산정된 공칭강도를 기동계의 축력-휨모멘트 상관관계식에 적용하여 그 결과를 표 7에 나타내었다. 적용된 축력-휨모멘트 상관관계식은 KBC 2005 및 KBC 2009(안)에서 공통으로 제안하고 있는 조합력을 받는 부재 내력평가식에서 저항계수를 제외한 식 (15) 및 (16)을 적용하였다. 그리고 각 적용 결과 중 5층 외측기동계의 결과를 대상으로 탄성해석법과 직접해석법 결과의 비를 그림 9에 나타내었다.

$$\cdot \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \text{인 경우}$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (15)$$

$$\cdot \frac{P_r}{P_c} < 0.2 \text{인 경우}$$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (16)$$

표 7의 결과를 살펴보면 탄성해석의 경우 기동계의 약축방향 거동을 고려하는 방법에 따라서 P-M 상관식의 결과에도 차이가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 그리고 이러한 차이는 약축방향을 가새 골조로 가정하고 유효좌굴길이 계수를 1.0으로 적용한 경우와 alignment chart 를 적용하여 유효좌굴길이 계수를 산정한 결과 상에도 나타나고 있다 (그림 9 EB_BK 및 EB_B1 비교).

그리고, 그림 9의 결과에서 보면 약축이 비가새 골조일 경우에는 탄성해석 결과가 직접해석법의 결과에 비해 부재내력을 보수적으로 평가하고 있다. 따라서 상기에 언급한 바와 같이 직접해석법의 경우에는 약축방향을의 구조 시스템이나 부재간의 강성차이에 관계 없이 K=1.0을 적용할 수 있으나 약축방향을의 구조 시스템이 비가새 골조일 경우 이에 따른 내력 감소 효과를 적절히 고려할 수 있는가에 대해서는 추가적인 연구가 필요하리라 생각된다.

하지만 약축방향을 가새골조로 가정했을 경우에는 탄성해석

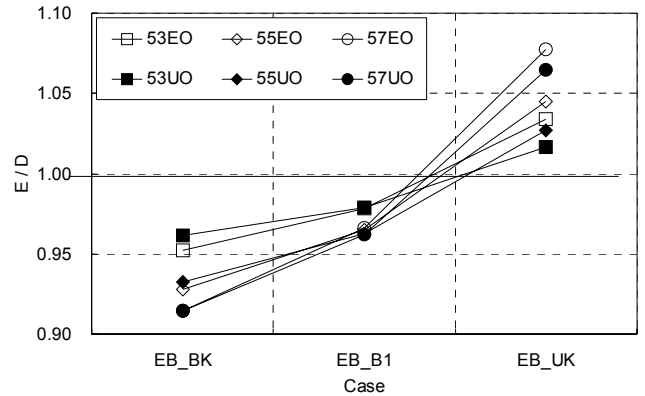


그림 9. 탄성해석과 직접해석 결과 비교 (5층 외측 기동 경우)

법을 적용한 결과가 직접해석법의 결과에 비해 부재의 내력 상태를 낮게 평가하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 K=1.0을 적용하여 두 해석법 간 공칭강도 산정에 차이가 없는 경우 (그림 9의 EB_B1 case)에도 동일하게 나타나고 있다. 이는 공칭강도의 차이보다 소요강도 산정시 발생한 차이가 더 커 발생한 현상으로 사료된다.

따라서 소요강도 산정 뿐만 아니라 모멘트-축력상관관계식에도 탄성해석을 적용한 경우 2차 효과에 의해 부재에 발생하는 효과를 적절히 반영하지 못할 수 있으며, 이러한 경향은 축력비가 증가할 수록 커지는 것으로 나타났다.

그리고 고축력 조건 하에서는 B2 계수 산정 방식차이에 따른 영향이 축소되는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 강구조설계기준인 KBC 2005 및 KBC 2009(안)에서 제안하고 있는 하중증폭계수를 이용한 2차 해석법의 타당성을 수치해석적 방법으로 고찰하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) B2 계수 비교 결과 탄성해석법에 비하여 직접해석법에 적용된 B2 계수가 더 크게 나타났으며, 계수의 증감에 가장 큰 영향을 미치는 것은 축력인 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구에 적용된 대칭형 중저층 비가새 골조의 경우 2차 효과에 의한 축력 변화는 크지 않은 것으로 나타났으나, 휨모멘트의 변화는 해석 방법간 차이가 크게 나타났으며 고축력비 일수록 차이는 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 탄성해석법은 고축력 조건하에서는 2차 효과에 의한 모멘트 증폭현상을 적절히 반영하지 못하는 것으로 나타났으며, 소요 강도 평가 측면에서 그 적용에 상당한 한계가 있다.

- (4) 2차 해석과의 오차 및 표준편차 평가에서 층강성 개념에 근거한 하중중폭계수를 적용한 직접해석법이 2차 해석에 근접한 결과는 나타내었다.
- (5) 직접해석법의 경우 압축재의 유효좌굴길이계수 K를 1.0으로 지정하고 있으나, 현 기준에서 약축의 유효좌굴길이계수 산정에 대한 명확한 언급이 없으므로 그 적용 범위를 명확히 할 필요가 있다.
- (6) 축력-휨모멘트 관계에서 약축방향 구조시스템이 동일할 경우 탄성해석법을 적용한 결과가 직접해석법의 결과에 비해 하중 상태를 낮게 평가하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 탄성해석의 경우 KBC 2009(안)에서 직접해석법의 필수 적용 대상이 아닌 $B2 \leq 1.5$ 경우에서도 축력비가 증가할 경우 2차 효과에 의한 영향을 적절히 반영하지 못하는 경우가 있다.

참 고 문 헌

대한건축학회 (2005) 건설교통부고시 건축구조설계기준, 대한건축학회

대한건축학회 (2009) 건축구조설계기준(안), 대한건축학회

Carter, C. J. and Geschwindner, L. F. (2006) *A comparison of frame stability analysis methods in ANSI/AISC 360-05*, ASCE.

Chen, W. F. and Sohal, I. (1995), *Plastic Design and Second-order Analysis of Steel Frames*, Springer-Verlag, USA.

Galambos, T. V. (1968), *Structural Members and Frames*, PrenticeHall, USA.

Galambos, T. V. (1998), *Guide to the Stability Design Criteria for Metal Structures, 5th Edition*, John Wiley & Sons, Inc., USA.

Kim, H. D. and Lee, M. J. (2002), The Influence of the P-Δ Effects on the Behavior of Unbraced Frames, *Proc. International Symposium on of Steel Structures*, KSSC, Korea, pp.333-344.

Kim, H. D. and Lee, M. J. (2009). Experimental Investigation of the P-Δ Effect and Factor B2 of Low-rise Unbraced Steel Frames, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 9, No. 2, pp.131-141.

Kim, S. E. and Chen, W. F. (1998). *LRFD Steel Design Using Advanced Analysis*, CRC Press, USA.

LeMessurier, W. J. (1972). A Practical Method of Second-order Analysis (Part 2: Rigid Frames). *Engineering Journal*, AISC, Vol. 14, No. 2, pp.89-96.

Surovek-Maleck, A. E. and White, D. W. (2004) Alternative approaches for elastic analysis and design of steel

frames. I: Overview, *Journal of structural engineering*, ASCE, pp.1186-1196.

Surovek-Maleck, A. E. and White, D. W., (2004) Alternative approaches for elastic analysis and design of steel frames. II: Verification studies, *Journal of structural engineering*, ASCE, pp.1197-1205

Surovek-Maleck, A. E. and Ziemian, R. D. (2005) The direct analysis method : Bridging the gap from linear elastic analysis to advanced analysis in steel frame design, ASCE

White, D. W., Surovek-Maleck, A. E., Alemдар, B. N., Chang, C. J., Kim, Y. D. and Kuchenbecker, G. H. (2006) Stability analysis and design of steel building frames using the 2005 AISC specification, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 5, No. 2, pp.71-91.

Yura, J. A. (1971). The Effective Length of Columns in Unbraced Frames. *Engineering Journal, AISC*, Vol. 8, No. 2, pp.37-42.

부 록. SYMBOLS

- L : 층고
- M_r : 소요휨강도
- M_c : 설계휨강도
- M_{u1} : 골조의 횡변위가 없다고 가정한 부재의 소요휨강도
- M_{u2} : 골조의 횡변위만에 의한 부재의 소요휨강도
- N_i : i 층에 적용된 가상횡하중
- P_r : 소요압축강도
- P_c : 설계압축강도
- $P_y : AF_y$
- R_H : 1.0 가새골조, 0.85 모멘트골조
- x : 강축휨을 나타내는 아래첨자
- y : 약축휨을 나타내는 아래첨자
- Y_i : i 층에 적용된 하중조합에 의한 중력하중
- $\alpha : 1.0$
- Δ_{oh} : 임의의 층에서의 층간 횡방향변위
- $\sum H$: Δ_{oh} 를 유발하는 층의 총수평력의 합
- $\sum P_{e2}$: 어느 한 층의 모든 기둥의 P_e 의 합
- $\sum P_u$: 어느 한 층의 모든 기둥의 소요축하중

(접수일자 : 2009. 9. 7 / 심사일 2009. 9. 14 / 게재확정일 2009. 10. 14)