

골조 안정성 평가를 위한 직접해석법의 적용 방법에 따른 영향

The Influence of the Application Methods of Direct Analysis Method for the Evaluation of Frame Stability

김 희 동¹⁾

Kim, Hee Dong

요 약 : 본 연구는 강구조 설계기준(KBC 2009)에서 골조 안정성 평가를 위해 제시한 하중증폭계수를 적용한 직접해석법의 적용 방법에 따른 영향을 해석적 방법을 통해 평가하는데 목적이 있다. 이를 위해 KBC 2009에서 제안하고 있는 가상수평하중 적용 방법, 휨강성 감소 방법, B2 계수 산정 방법 등을 각각 적용한 직접해석을 3층 1스팬 및 5층 3스팬 비가새 강구조 골조에 대해 실시하고, 그 해석 결과를 2차 비탄성 해석 결과와 비교하여 각 적용 방법의 영향을 평가하였다. 직접해석법 적용 방법 이외에 외적 요인의 영향을 고찰하기 위해 골조의 규모, 기둥의 축력비, 축력의 층별분포 등도 변수로 추가하였다. 연구 결과 소요압축강도는 직접해석법 적용 방법에 따른 차이가 크지 않은 것으로 나타났으며, 소요휨강도는 가상수평하중 누계 및 추가 적용, 층강성 개념 B2 계수를 직접해석법에 적용시 적절한 결과를 나타내었다.

ABSTRACT : The purpose of this study was to evaluate the influence of the methods of application of the direct analysis method, using the load amplification factor suggested by the KBC 2009 design code, for the evaluation of frame stability. For this purpose, the direct analysis method was performed for three-story-one-bay and five-story-three-bay unbraced steel frames with various notional loads, bending stiffness reductions, and factor B2s. The results of the analyses were compared with the results of the second-order inelastic analysis to evaluate the influence of the applied methods. The scale of the frame, the axial load ratio, and the axial load distribution pattern were added to the main parameters to investigate the external effects. The research results showed that the influence of the methods of application of the direct analysis method is not significant in the case of the required axial strength and the application of the additional notional loads; and that the application of the factor B2 with the story stiffness concept to the direct analysis method is appropriate for the required flexural strength.

핵심 용 어 : 2차 해석, 직접해석법, 가상수평하중, 휨강성 감소, B2 계수, 비가새 골조

KEYWORDS : second order analysis, direct analysis method, notional lateral load, bending stiffness reduction, factor B2, unbraced frame

1. 서론

별도의 횡력저항 시스템 없이 기둥과 보 및 접합부의 강성만으로 횡력에 저항하는 비가새 골조 설계시 골조 안정성 확보는 중요한 의미를 가지게 된다 (Galambos, 1968 ; 1998, Kim, 2002 ; 2009). 따라서 각국의 구조설계기준에서는 골조 안정성을 적절하게 평가하고 이를 설계에 반영할 수 있는 다양한 해석 및 설계법들을 제시하고 있다.

현재 국내 구조설계기준인 건축구조기준(이하 KBC 2009 (대한건축학회, 2009))의 강구조 설계편에서는 이러한 골조 안정성을 평가하는 방법으로 다양한 2차 해석법들을 제안하

고 있으며, 그 중의 하나로 Surovek-Maleck 및 White (Surovek-Maleck, 2004 ; 2005 ; White, 2006) 등에 의해 고안된 직접해석법(Direct analysis method)을 제안하고 있다.

이에 저자는 선행된 연구를 통하여 대칭 및 비대칭형 중저층 골조를 대상으로 B2 계수를 적용한 직접해석법의 타당성에 대한 해석적 연구를 수행하였으며, 이를 통하여 직접해석법이 기준에 제안된 1차 탄성해석법에 근거한 방식에 비해 실제 구조물의 내력에 근접한 결과를 도출한다는 결론을 얻은바 있다 (김희동, 2009; 2010).

KBC 2009에서 제안된 직접해석법에는 초기변형, 잔류응

1) 교신저자. 현대제철 과장, 공학박사, 건축구조기사
(Tel. 02-772-2233, Fax. 02-772-2240, E-mail drkimhd@naver.com)

본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

력 및 부재의 소성화에 따른 영향 등을 고려하기 위해 가상 수평하중, 부재 휨강성 감소 등을 해석에 적용하고 있으며, 2차 효과를 고려하는 방법으로 B2 계수를 제안하고 있다.

하지만 아직 기준에서 제안된 직접해석법의 적용 방법에 따른 영향에 대한 구체적인 연구가 없어 향후 실무에서 직접해석법을 설계에 도입할 경우 엔지니어들에게 적용 방법 선택과 관련된 기본 정보가 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 KBC 2009에서 제안하고 있는 각각의 직접해석법 적용 및 하중저항계수(B2 계수) 산정 방법에 의한 결과를 산정하고, 이를 2차 비선형 해석법인 수정소성형지법을 적용한 해석 결과와 비교하여 직접해석법 및 B2 계수 적용 방법에 따른 영향을 고찰하고, 추후 비가새 골조의 설계시 기초자료로 활용할 수 있도록 제안 하고자 한다.

2. 직접해석법을 적용한 2차 해석

KBC 2009에서는 모든 조건에서 직접해석법의 적용을 허용하고 있으며, 특히 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 2009에서 제안하고 있는 하중증폭계수를 적용한 직접해석법에서 소요휨강도와 소요압축강도는 아래의 식들을 이용하여 산정한다.

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (1)$$

$$P_r = P_{nt} + B_2 P_{lt} \quad (2)$$

표 1. 직접해석법과 탄성해석법 비교

분류	탄성해석법	직접해석법
관련기준	KBC 2005	KBC 2009
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

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - P_u/P_{e1}} \geq 1 \quad (3)$$

$$B_2 = 1 / \left\{ 1 - \left[\frac{\sum P_u}{\sum H} \right] \left[\frac{\Delta_{oh}}{L \cdot R_H} \right] \right\} \quad (4)$$

$$= 1 / \left\{ 1 - \frac{\sum P_u}{\sum P_{e2}} \right\} \quad (5)$$

직접해석법에서는 상기의 하중증폭계수 이외에 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 다양한 영향을 해석에 반영하고 있다. 먼저 구조물의 기하학적 불완전성과 재료적 비탄성효과를 고려하기 위하여 구조물의 해석 단계에서 식 (6)과 같은 가상 수평하중(N_i)을 횡력저항골조시스템에 적용한다.

$$N_i = 0.002 Y_i \quad (6)$$

단, 1차횡변위에 대한 2차횡변위의 비율이 1.5 이하인 골조인 경우 다른 횡하중의 조합을 배제한 중력하중만의 조합에 대한 최소 횡하중을 가상하중N_i에 적용할 수 있다.

그리고, 부재의 강성 감소를 고려하기 위해 휨강성이 구조물의 횡방향안정성에 기여한다고 판단되는 모든 부재의 휨강성은 아래의 감소된 휨강성을 사용해야 한다.

$$EI^* = 0.8\tau_b EI \quad (7)$$

$$\tau_b = 1.0 : P_r/P_y \leq 0.5 \text{인 경우} \quad (8)$$

$$= [4 \cdot P_r/P_y (1 - P_r/P_y)]$$

$$: P_r/P_y > 0.5 \text{인 경우}$$

만약 0.001 Y_i의 추가적인 가상하중이 식(6)에서 요구되는 가상하중에 추가될 때, P_r/P_y > 0.5인 경우 τ_b < 1.0인 값을 사용하는 대신 τ_b = 1.0을 모든 부재에 대해 사용할 수 있다. 또한 축방향강성이 구조물의 횡방향안정성에 크게 기여한다고 판단되어지는 부재에 대해서는 아래의 감소된 축방향강성을 사용해야 한다.

$$EA^* = 0.8EA \quad (9)$$

그리고, 직접해석법에서는 부재의 공칭강도 산정시 유효좌굴길이계수 K = 1.0을 사용하여 공칭압축강도 P_n를 산정하도록 제안하고 있다. 따라서 유효좌굴길이계수 산정에 따른 번거로움을 제거할 수 있다.

본 연구에서는 직접해석법에서 설계자의 선택에 따라 적용

이 달라질 수 있는 가상수평하중 적용 방법, 휨강성 감소 적용 방법, B2 계수 산정 방법을 대상으로 각 변수별 적용 방법에 따른 영향을 고찰하였다. 직접해석법과 기존에 1차 탄성해석 결과와 하중증폭계수를 적용한 2차 해석(이하 탄성해석법)의 차이를 표 1에 간단히 정리하였다.

3. 수치해석

3.1 해석 대상 골조

본 연구에서는 3층 1스팬 및 5층 3스팬 중저층 강구조 비가새 골조를 해석대상 골조로 수치해석을 수행하였다.

스팬은 X 방향으로 9,000mm, Y 방향으로 8,000mm를 적용하였다. 층고는 1층의 경우 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 골조를 적용하였다.

부재설계는 서울 소재 일반 사무소 건물을 기준으로 KBC 2009 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)로 선정하였다.

3.2 주요 변수 및 해석 방법

본 연구에서는 비가새 강구조 골조의 안정성 및 τ_b 산정에 영향을 미치는 축력비(P/P_y)를 포함하여 골조의 규모, 층별 축방향 하중 분포 형태, 해석 방법 및 B2 계수 산정방법 등을 주요 해석 변수로 선정하였다. 주요 변수 및 해석방법에 대해 간단히 요약하면 아래와 같다.

표 2. 해석대상 골조 단면

구분	3층 1스팬 골조	5층 3스팬 골조
보부재	H-506×201×11×19 (SHN400)	H-506×201×11×19 (SHN400)
기둥부재	H-304×301×11×17 (SHN490)	H-350×357×19×19 (SHN490)
		H-250×255×14×14 (SHN490)

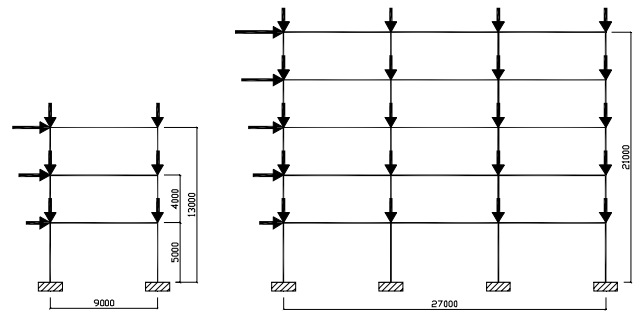


그림 1. 해석 대상 골조 (3층 1스팬, 5층 3스팬, X-Z 입면)

3.2.1 골조의 규모

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

그리고 5층 3스팬 골조와 3층 1스팬 골조는 골조의 변장비 (aspect ratio)가 각 0.78, 1.44가 되어 약 2배 차이가 나도록 층고와 스패를 결정 하였다.

3.2.2 축력비

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) 경우와 축력에 의해 부재 항복이 지배되도록 유도한 고축력(0.6) 경우를 변수로 선정하였다. 이를 통하여 기둥재에 $\tau_b < 1.0$ 인 경우의 발생 여부에 따른 영향도 함께 고찰 할 수 있도록 하였다.

3.2.3 층별 축력의 분포

직접해석법의 가상 수평하중은 해당층의 축방향력의 합에 의해서 결정된다. 따라서 기둥재에 작용하는 축력이 전층에 균등하게 분포한 경우(D)와 균등 분포 대비 각층 축력의 50%씩이 1층에 집중된 경우(C)를 변수로 선정하여 층별 축력분포에 따른 영향을 고찰할 수 있도록 하였다.

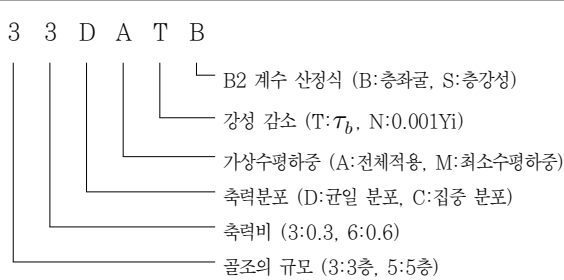
3.2.4 가상수평하중 적용

KBC2009의 직접해석법에서는 $B2 \leq 1.5$ 인 경우 가상 수평하중을 기존 수평하중에 누가(기존 수평하중+가상 수평하중)하지 않고 최소수평하중($\min(\text{기존 수평하중, 가상 수평하중})$)으로 해석에 적용할 수 있도록 허용하고 있다.

표 3. 해석 변수

변수명	규모	축력비	축력 분포
33D	3층 1 스패	0.3	균등
33C	3층 1 스패	0.3	집중
36D	3층 1 스패	0.6	균등
36C	3층 1 스패	0.6	집중
53D	5층 3스패	0.3	균등
53C	5층 3스패	0.3	집중
56D	5층 3스패	0.6	균등
56C	5층 3스패	0.6	집중

표기에
:



따라서 본 연구에서는 가상 수평하중을 기존의 수평하중에 단순 누계한 경우(A)와 최소수평하중 개념으로 적용한 경우(M)에 대해서 각각 해석을 수행하여 그 영향을 고찰하였다.

3.2.5 휨강성 감소 방법

직접해석법에서는 휨강성 감소를 위해서 각 기둥재의 축력비에 따라 τ_b 값을 산정하여 강성감소를 하는 방법(T)과 $\tau_b = 1.0$ 을 적용하는 대신에 가상수평하중인 $0.001Y_i$ 를 수평하중에 누계(N)하는 두 가지 방법을 제안하고 있다. 본 연구

에서는 각각 경우를 변수로 적용하여 그 차이를 고찰하였다.

3.2.6 B2 계수 산정 방법

KBC 2009에서는 하중증폭계수인 B2 계수의 산정방법으로 유효좌굴길이계수 K의 산정이 필요한 방법(층좌굴 개념 : B)과 K의 산정이 필요하지 않은 방법(층강성 개념 : S) 두 가지를 제안하고 있다. 이에 하중증폭계수 산정 방법을 변수로 선정하여 그 영향을 고찰하였다.

상기에 언급된 각 변수 및 변수명 표기 방법은 표 3에 나타내었다.

단, 본 연구에서는 적용된 해석 대상 골조의 경우 모든 하중이 절점에 적용되고 있고 대칭 형태를 띄고 있으므로, 수평변위가 제한된 상태에서 부재에 발생하는 모멘트의 영향이 미미하다. 따라서 본 연구에서는 B1계수의 적용은 고려하지 않았다. 또한 본 연구에 적용된 수평하중 저항 시스템은 기둥 및 보의 휨강성으로 수평하중에 저항하는 모멘트 골조 방식이므로 축방향 강성이 골조의 휨강성에 미치는 영향이 미미하다. 따라서 직접해석법에서 언급한 축방향 강성 감소는 고려하지 않았다.

상기에 제안된 조건하에서 직접해석법을 각각의 변수에 대해 시행하였다. 직접해석법을 적용한 수치해석은 선형탄성해석 프로그램(MIDAS MODS)을 적용하여 수행하였으며, 수행된 직접해석법의 타당성을 평가하기 위해 동일한 구조조건 하에서 Chen 및 Kim 등에 의해 제안(Chen, 1995 ; Kim, 1998)된 수정소성힌지법(refined plastic hinge

표 4. 골조 최하층 우측 기둥재 소요압축강도 및 소요휨강도

		ANB	ANS	MNB	MNS	ATB	ATS	MTB	MTS	RPHM
축력 (kN)	33D	-1,459	-1,449	-1,454	-1,445	-1,456	-1,447	-1,452	-1,443	-1,440
	33C	-1,457	-1,447	-1,454	-1,445	-1,455	-1,446	-1,452	-1,443	-1,437
	36D	-2,656	-2,652	-2,646	-2,644	-2,652	-2,648	-2,641	-2,639	-2,646
	36C	-2,651	-2,648	-2,646	-2,643	-2,648	-2,645	-2,642	-2,640	-2,643
	53D	-1,227	-1,217	-1,222	-1,213	-1,225	-1,215	-1,220	-1,210	-1,207
	53C	-1,221	-1,211	-1,218	-1,208	-1,219	-1,209	-1,216	-1,206	-1,197
	56D	-1,943	-1,940	-1,932	-1,929	-1,938	-1,935	-1,927	-1,924	-1,934
	56C	-1,929	-1,926	-1,923	-1,920	-1,926	-1,923	-1,920	-1,917	-1,921
모멘트 (kN.m)	33D	281,396	263,390	272,147	254,761	276,745	259,047	267,496	250,417	247,400
	33C	280,954	262,872	271,988	254,576	276,481	258,734	267,496	250,417	246,514
	36D	57,647	48,964	37,367	31,680	46,940	39,005	26,098	21,847	35,780
	36C	56,554	47,513	44,347	37,196	45,952	38,193	33,643	27,920	34,964
	53D	427,481	412,254	418,459	403,568	422,970	407,910	413,948	399,225	393,939
	53C	426,788	411,520	418,256	403,353	422,522	407,436	413,990	399,271	392,868
	56D	80,345	74,107	60,040	55,477	70,720	65,206	50,245	46,456	62,287
	56C	78,740	72,326	66,871	61,456	69,674	64,030	57,706	53,082	61,410

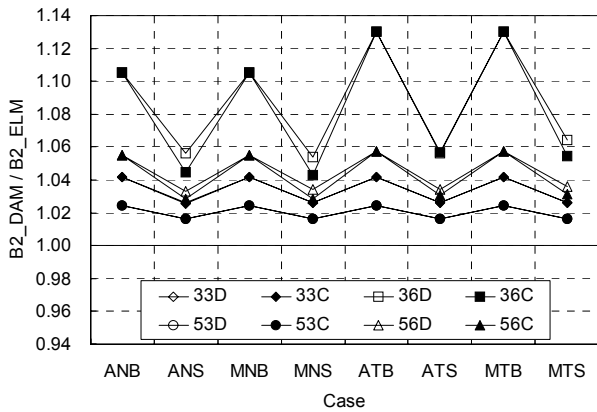


그림 2. 직접해석법과 탄성해석법에 의한 B2 계수비

method)를 적용한 2차원 2차 비탄성 해석(이하 비탄성해석 : RPHM)을 수행하였다. 단, 해석시 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 최우측 기둥재에 소요압축강도(3F : P2 / 5F : P4) 및 하단부 소요휨강도(3F : M2 / 5F : M4)를 표4에 나타내었다.

4. 해석 결과 고찰

4.1 하중증폭계수 평가

각 변수별 직접해석법(DAM)과 1차 탄성해석(이하 탄성해석법 : ELM)에 의한 B2 계수 비를 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서 보면 모든 경우에서 1차 탄성해석 결과를 이용한 산정한 B2 계수에 비해 직접해석법 결과를 이용하여 산정한 B2 계수가 큰 것으로 나타났다.

직접해석법 적용에 따른 B2 계수의 증가 경향은 3층 골조가 5층 골조보다 평균 2.7% 크게 나타났다. 그리고 축력비가 큰 경우에 평균 3.6%, 직접해석법이 B2 계수를 높게 평가했다. 층별 축력분포에 따른 영향은 1% 미만의 차이를 나타내고 있어 타 변수들에 비해 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

직접해석법의 적용방식에 따른 차이를 살펴보면, 가상수평

표 5. 직접해석법과 비탄성 해석 결과 비 (DAM / RPHM)

		ANB	ANS	MNB	MNS	ATB	ATS	MTB	MTS									
		ANB	ANS	MNB	MNS	ATB	ATS	MTB	MTS	ANB	ANS	MNB	MNS	ATB	ATS	MTB	MTS	
33D	P_1	0.986	0.994	0.989	0.997	0.988	0.995	0.991	0.999	M_1	1.135	1.063	1.098	1.028	1.117	1.045	1.079	1.010
		0.985	0.992	0.987	0.995	0.986	0.993	0.988	0.996		1.138	1.065	1.101	1.031	1.120	1.048	1.083	1.014
		0.996	0.998	1.000	1.001	0.998	0.999	1.002	1.003		1.608	1.366	1.042	0.884	1.309	1.088	0.729	0.611
		0.997	0.998	0.999	1.000	0.998	0.999	1.000	1.001		1.616	1.360	1.268	1.065	1.318	1.096	0.943	0.784
33D	P_2	1.013	1.006	1.010	1.003	1.011	1.005	1.008	1.002	M_2	1.137	1.065	1.100	1.030	1.119	1.047	1.081	1.012
		1.014	1.007	1.012	1.006	1.013	1.007	1.011	1.005		1.140	1.066	1.103	1.033	1.122	1.050	1.085	1.016
		1.004	1.002	1.000	0.999	1.002	1.001	0.998	0.997		1.611	1.368	1.044	0.885	1.312	1.090	0.729	0.611
		1.003	1.002	1.001	1.000	1.002	1.001	1.000	0.999		1.617	1.359	1.268	1.064	1.314	1.092	0.962	0.799
53D	P_1	0.971	0.985	0.978	0.992	0.975	0.989	0.982	0.996	M_1	1.077	1.039	1.054	1.017	1.066	1.028	1.043	1.006
		0.966	0.980	0.970	0.984	0.968	0.982	0.972	0.986		1.080	1.042	1.057	1.020	1.069	1.031	1.046	1.009
		0.993	0.995	0.999	1.000	0.996	0.998	1.002	1.003		1.332	1.224	0.972	0.893	1.158	1.063	0.795	0.729
		0.994	0.996	0.997	0.999	0.996	0.998	0.999	1.001		1.345	1.234	1.128	1.034	1.172	1.073	0.953	0.872
53D	P_2	1.005	1.003	1.004	1.003	1.004	1.003	1.004	1.003	M_2	1.080	1.041	1.057	1.019	1.068	1.030	1.045	1.008
		1.005	1.004	1.005	1.003	1.005	1.004	1.004	1.003		1.083	1.044	1.061	1.023	1.072	1.034	1.050	1.013
		1.001	1.001	1.001	1.000	1.001	1.001	1.000	1.000		1.351	1.242	0.990	0.910	1.162	1.066	0.803	0.737
		1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.000	1.000		1.353	1.240	1.137	1.041	1.170	1.071	0.955	0.873
53D	P_3	0.998	0.999	0.998	1.000	0.998	0.999	0.999	1.000	M_3	1.078	1.040	1.056	1.018	1.067	1.029	1.044	1.007
		0.997	0.998	0.997	0.999	0.997	0.998	0.997	0.999		1.081	1.043	1.060	1.022	1.070	1.032	1.049	1.012
		1.000	1.000	1.001	1.001	1.000	1.000	1.001	1.001		1.316	1.214	0.982	0.907	1.143	1.053	0.810	0.748
		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.311	1.205	1.112	1.022	1.146	1.053	0.948	0.872
53D	P_4	1.017	1.008	1.013	1.004	1.015	1.006	1.010	1.002	M_4	1.085	1.046	1.062	1.024	1.074	1.035	1.051	1.013
		1.020	1.012	1.018	1.009	1.019	1.011	1.016	1.008		1.086	1.047	1.065	1.027	1.075	1.037	1.054	1.016
		1.005	1.003	0.999	0.997	1.002	1.000	0.996	0.995		1.290	1.190	0.964	0.891	1.135	1.047	0.807	0.746
		1.004	1.002	1.001	1.000	1.003	1.001	1.000	0.998		1.282	1.178	1.089	1.001	1.135	1.043	0.940	0.864

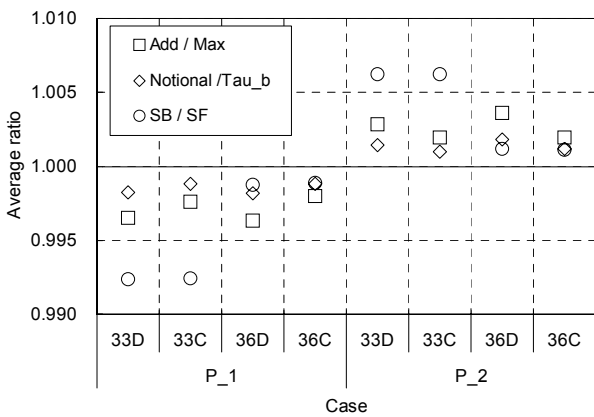


그림 3. 해석 방법에 따른 소요압축강도 변화 (3층 경우)

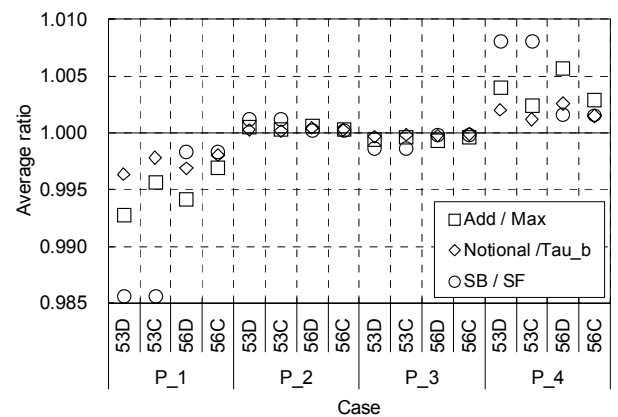


그림 4. 해석 방법에 따른 소요압축강도 변화 (5층 경우)

하중 적용 방식에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났으며, 휨강성 감소 방법에 따른 차이는 추가 가상수평하중인 0.001Yi를 적용한 경우(N)보다 τ_b 를 적용한 경우(T)가 평균 0.47% B2 계수의 증가가 크게 나타났다.

B2 계수 산정방식에 따른 차이를 보면 층좌굴 계념을 적용한 경우(B)가 평균 9.7% B2 계수 증가가 큰 것으로 나타났다.

따라서 B2 계수 변화에 큰 영향을 미치는 요소는 축력비와 B2 계수 산정 방식으로 나타났으며 구조물의 설계시 이에 대한 적절한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

4.2 소요강도 평가

4.2.1 소요압축강도

각 변수별 1층 기둥재의 소요압축강도 변화를 살펴보기 위해 직접해석법과 비탄성해석 결과의 비(이하 두 해석 결과의 비)를 표 5에 나타내었으며, 직접해석법과 비탄성해석 결과 비의 분포를 나타내는 Diagram을 표 6에 나타내었다.

표 5의 결과에서 보면 소요압축강도는 두 해석 결과의 비가 +2.0~3.4% 범위에서 미소한 차이를 나타내고 있다. 또한 표 6에서도 확인할 수 있듯이 직접해석법에 의한 소요

표 6. 직접해석법과 비탄성해석 결과 비의 분포

		ANB	ANS	MNB	MNS	ATB	ATS	MTB	MTS		ANB	ANS	MNB	MNS	ATB	ATS	MTB	MTS	
33D	P_1	○	○	○	○	○	○	○	○	M_1	○		○		○				
33C		○	○	○	○	○	○	○	○		○		○		○				
36D		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	●	○			●	●
36C		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○			○	●
33D	P_2									M_2	○		○		○				
33C											○		○		○				
36D					○			○	○		○	○	○	○	●	○		●	●
36C								○	○		○	○	○	○	○			○	●
53D	P_1	○	○	○	○	○	○	○	○	M_1									
53C		○	○	○	○	○	○	○	○		○								
56D		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○		○	○
56C		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○		○	○
53D	P_2									M_2									
53C											○		○		○				
56D											○	○	○	○	○			○	○
56C											○	○	○	○	○			○	○
53D	P_3	○	○	○	○	○	○	○	○	M_3									
53C		○	○	○	○	○	○	○	○		○								
56D		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○		○	○
56C		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○		○	○
53D	P_4									M_4									
53C											○		○		○				
56D				○	○			○	○		○	○	○	○	○			○	○
56C					○			○	○		○	○	○	○	○			○	○

※ ○ : 비율 1.1 이상, ◐ : 비율 1.0미만, 0.9 이상, ● : 비율 0.9 이하

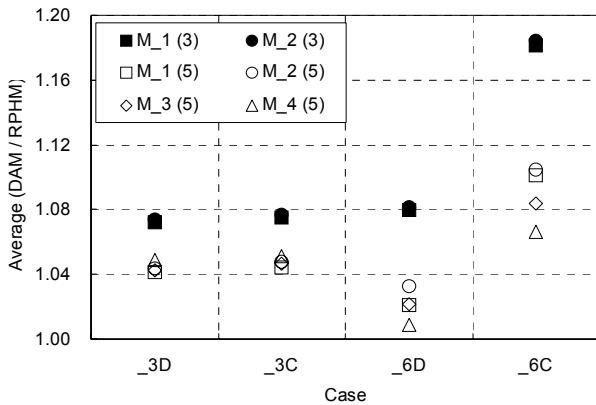


그림 5. 두 해석 결과의 소요휨강도 비율

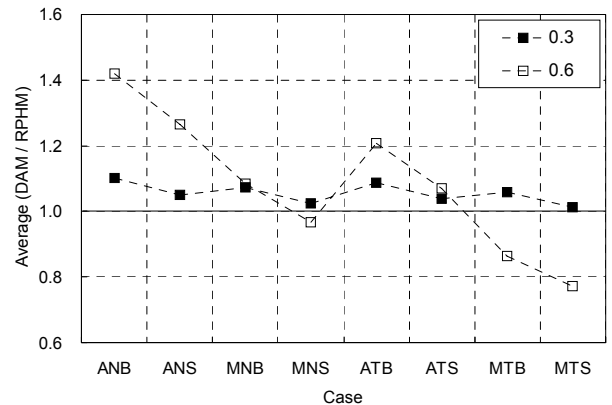


그림 7. 해석법에 따른 소요휨강도 비율의 축력비별 평균값

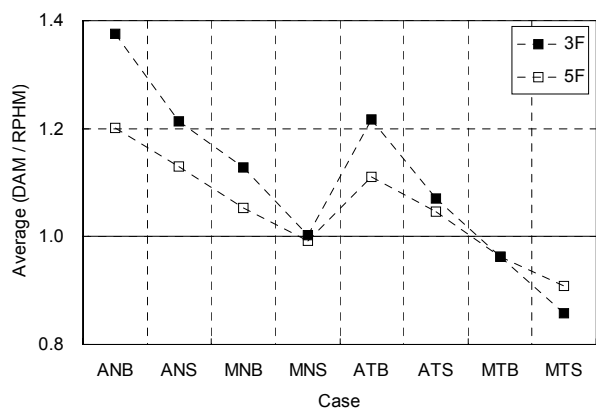


그림 6. 해석법에 따른 소요휨강도 비율의 골조 규모별 평균값

압축강도가 비탄성해석에 의한 결과보다 낮은 값을 나타내는 경우도 대부분 수평하중 가력에 의해 축압축력이 감소하는 위치의 기둥재(그림 1에서 좌측 기둥재)에서 발생하고 있어 설계시 큰 문제가 되지 않는다. 따라서 직접해석법이 소요압축강도를 적절한 범위에서 산정하고 있다고 판단이 되며, 이는 선행된 연구(김희동, 2009)와 동일한 결과이다.

각 변수별 영향요인을 살펴보면, 다음과 같다.

1) 외적 요인에 의한 영향

변장비가 높은 3층 골조의 경우 두 해석 결과의 비에서 차이가 +1.4%~-1.6% 발생하나 5층 골조의 경우 +2.0%~-3.4%로 다소 증가하는 것으로 나타났다.

그리고, 축력비의 경우 축력비 0.3일 때 두 해석 결과의 비에 차이는 +2.0% ~ -3.4% 이나 축력비 0.6일 때는 +0.4% ~ -0.7%로 나타나 축력비가 높을수록 두 해석법간의 차이가 감소하는 것으로 나타났다.

층별 축력분포의 영향은 3층 골조에서는 거의 나타나지 않으나, 5층 골조의 경우에는 축력 분포에 따라 미소하게나마 그 차이가 변화(0.5%)한 것으로 나타났다. 하지만 다른 변수들에 비해 그 차이는 미미하다.

2) 직접해석법 적용 방법에 따른 영향

3.2절에서 언급한 직접해석법의 적용 방법 간에 결과비를 그림 3 및 그림 4에 나타내었다. 상기의 결과에서 보면 소요압축강도의 경우 직접해석법의 적용 방법에 따른 결과차이가 대부분 ±1.0% 이내에서 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 사실상 소요압축강도 산정 측면에서는 직접해석법에서 제안된 적용 방법간에 차이가 거의 없다고 판단된다.

다만, 그림에서도 나타났듯이 본 연구에서 적용된 직접해석 적용 방법 중에서는 B2 계수 적용 방식 간에 차이(SB / SF)가 비교적 다른 변수에 비해 크게 나타났으며, 내부 기둥재 보다는 외측에 위치한 기둥재에서 적용 방법별 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 모든 경우에서 수평하중에 의해 압축력이 부가되는 기둥재의 경우 층좌굴 개념의 B2 계수(B)를 적용한 경우가 높은 소요압축강도를 나타냈다.

4.2.2 소요 휨강도

각 변수별 1층 기둥재의 하단부 소요휨강도 변화를 살펴보기 위해 두 해석 결과의 비를 표 5에 나타내었으며, 두 해석 결과 비의 분포를 나타내는 Diagram을 표 6에 나타내었다.

또한 각 변수별 영향을 고찰하기 위해 골조의 규모, 축력비, 축방향 하중 분포 등과 같은 외적 요인과 3.2절에서 언급한 직접해석법의 적용 방법에 따른 두 해석 결과의 비에 각 변수별 평균값을 그림 5에 나타내었다.

표 및 그림에 나타난 결과들을 보면 소요휨강도의 경우 각 외적 요인 및 직접해석법 적용 방법에 따라 두 해석 결과의 비에 차이가 최대 +61.7%~-38.9% 까지 발생하는 것으로 나타났다.

각 외적 요인 및 직접해석법 적용 방법에 따른 영향을 구체적으로 분석해보면 다음과 같다.

1) 골조 규모

해석 대상 골조의 규모에 따른 영향을 평가하기 위해 두 해석 결과의 소요휨강도비에 골조 규모별 평균값을 그림 6에 나타내었다.

표5, 표6 및 그림6에서 보면 3층 골조의 경우 두 해석 결과비의 소요휨강도 평균값은 1.103이며, 5층 골조의 평균값은 1.05로서 3층 골조에서 직접해석법에 의한 결과값의 증가 경향이 커지는 것으로 나타났다. 또한, 구조물의 설계시 심각한 문제를 초래할 수 있는 소요휨강도의 과소평가(DAM < RPHM) 경우는 5층 골조에서 증가하였다(MNB 에서 1.0 미만 결과 추가). 따라서 골조의 변장비가 증가하면 직접해석법이 소요휨강도를 높게 평가한다고 판단된다.

그리고, 3층 골조의 경우 기둥재 위치에 따른 차이는 거의 나타나지 않고 있으나 5층 골조의 경우 기둥재 위치에 따른 차이가 나타나고 있다(그림 5 참조).

2) 축력비

축력비 변화가 직접해석법 결과에 미치는 영향을 평가하기 위해 각 해석법별 직접해석법과 비탄성해석 결과 비의 축력비별 평균값을 그림 7에 나타내었다.

그림 5와 그림 7에서 보면 축력비가 증가할 수록 직접해석법과 비탄성해석의 결과 차이가 증가하는 것을 볼 수 있다. 평균적으로 축력비 0.3의 경우 두 해석결과비의 차이는 -1.1~+10.0 사이의 결과를 나타내나, 축력비 0.6의 경우에는 차이가 -22.9~+41.9 사이의 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 표 6에서도 확인할 수 있다.

특히 축력비 0.6일 경우에는 부재의 소요휨강도를 과소평가하는 경우가 증가하는 것으로 나타나, 설계시 이에 대한 적절한 고려가 필요할 것으로 생각된다.

직접해석법 적용 방법에 따른 차이를 살펴보면, 축력비 0.3의 경우에는 각 방법에 따른 차이가 그리 크지 않고 모든 경우에서 안전측(직접해석법 > 비탄성 해석)의 결과를 나타내나 축력비 0.6의 경우에는 직접해석 적용 방법에 따른 차이도 클 뿐만 아니라 일부 가상하중이 최소수평하중으로 적용된 경우(M)에는 직접해석법의 결과가 비탄성 해석 결과 보다 작은 경우도 다수 발생하고 있다. 따라서 축력비 변화는 직접해석법의 유효성에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.

3) 층별 축력의 분포

3.2절에서 언급했듯이 각 층별 축방향 하중 분포는 가상수평하중(0.002Yi / 0.001Yi)의 산정과 직접적인 관련이 있다. 따라서 축방향 하중 분포의 영향을 고찰하기 위해 직접해석법과 비탄성해석 결과비의 축력분포 형태에 따른 평균값

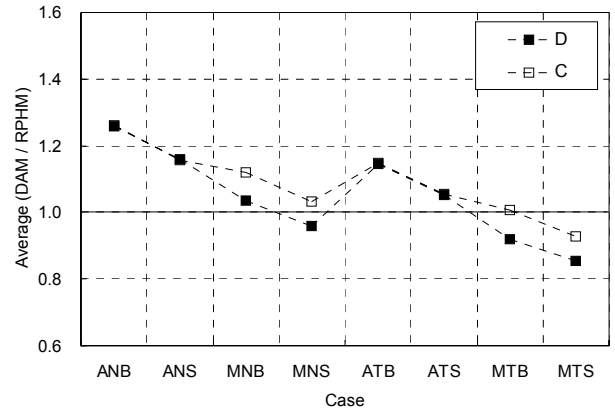


그림 8. 해석법에 따른 소요휨강도 비율의 축력 분포별 평균값

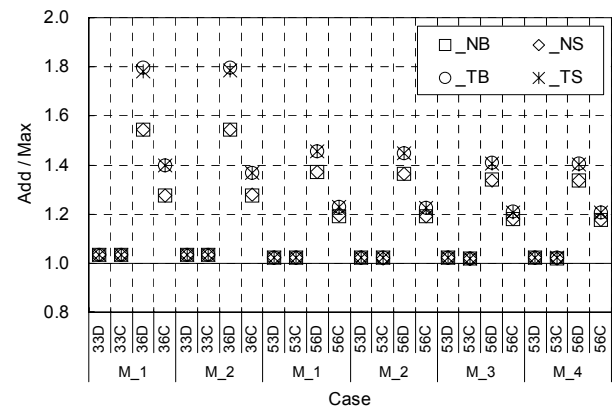


그림 9. 가상수평하중 적용 방식에 따른 결과비

을 그림 8에 나타내었다.

그림 5와 그림8에서 보면 축력비 0.3일 경우에는 축력분포에 따른 영향이 크지 않으나 축력비 0.6일 경우에는 차이가 증가(3층 골조의 경우 1.08 → 1.18)하는 것으로 나타났으며, 표 6에서 보면 설계시 문제를 유발할 수 있는 과소평가의 경우는 균등분포의 경우에서 더 많이 발생하였다.

그리고 직접해석법의 적용 방식에 따른 차이를 살펴보면 가상수평하중이 최소수평하중으로 적용된 경우(M series)에서 그 차이가 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 직접해석법의 적용시 기둥재의 하중 조건이 고축력이고 각 층별 축방향 하중 분포가 다르다면 직접해석법 적용 방법을 적절히 고려하여 설계를 해야 할 것으로 판단된다.

4) 가상수평하중 적용

직접해석법에서 가상수평하중 (0.002Yi) 적용 방식에 따른 영향을 평가하기 위해 가상수평하중을 기존 수평하중에 누계한 경우(A)와 최소수평하중으로 적용한 경우(M)의 비를 그림 9에 나타내었다.

본 연구에 적용된 모든 해석변수들은 1차 탄성해석 결과에

다른 B2 계수 산정시 최대 B2계수가 1.38로 가상 수평하중의 최소수평하중 적용 가능 대상이 된다. 이러한 조건하에서 각 적용 방식에 따른 결과를 살펴보면, 축력비가 0.3일 경우에는 두 해석 결과간 비의 차이가 3.5% 이하로 나타났으나 축력비가 0.6으로 증가하게 되면 그 차이가 최대 79.5% 까지 나타났다. 물론 축력비가 증가하게 되면 기둥재 최대내력 결정에서 모멘트가 차지하는 비중이 줄어들게 되고, 이럴 경우 정량적으로 소량의 모멘트 차이가 비율상으로는 큰 차이를 만들 수 있다. 하지만 결국 종국 상태 내력을 초과하는 결과를 가져오므로 이러한 변화의 경향에 대한 충분한 고려가 필요하다고 판단된다.

그리고 변장비가 큰 3층 골조에서 두 해석법 간의 차이가 더 크게 나타났으며, 휨강성 감소 방법으로 τ_b 를 적용한 경우에서 그 차이가 증가하는 것으로 나타났다.

직접해석법의 결과가 소요휨강도를 과소평가하는 경우는 가상수평하중을 최소수평하중으로 적용(M series)한 경우 중 고축력인 경우에서 발생하였다. 따라서 축력비가 높을 경우라 하더라도 B2 계수가 작을 수 있으므로($B2 < 1.5$) 이러한 경우에 가상수평하중을 최소수평하중으로 적용하는 것은 신중한 검토가 필요하리라 생각된다.

5) 휨강성 감소 방법

직접해석법에서는 횡력에 저항하는 모든 부재에 강성을 식(7)을 이용 감소하여 해석에 적용하도록 하고 있다. 식(7)중 축력비의 영향을 고려한 τ_b 의 경우 그 적용을 위해서는 모든 기둥재의 소요압축강도에 대한 검토가 필요하게 되며, 수렴치를 얻기 위한 반복계산이 필요할 수 있다. 따라서 KBC 2009에서는 이러한 번거로움을 줄이기 위해 추가적인 가상수평하중(0.001Yi)을 적용할 경우 $\tau_b = 1.0$ 을 적용할 수 있도록 하고 있다.

본 연구에서 적용된 모든 변수들에 대해 각층의 기둥재 축력을 검토해본 결과 축력비 0.6일 때 3층 1스팬 골조의 최하층 기둥재 및 5층 3스팬 골조의 최하층 중앙부 기둥재에서 $\tau_b < 1.0$ 인 경우가 발생하였다. (3F : $\tau_b=0.960$, 5F : $\tau_b=0.986$).

이러한 조건하에서 직접해석법의 휨강성 감소 방법에 따른 차이를 고찰하기 위해 0.001Yi의 추가 가상하중을 적용한 경우(N)와 τ_b 를 적용한 경우(T)의 결과비를 그림 10에 나타내었다.

그림 10에서 보면 가상 수평하중 적용시와 유사하게 축력비가 0.3일 경우 두 해석법간의 비율이 3.5% 이하로 근접한 결과를 나타내지만 축력비가 증가하게 될 경우 차이가 최대 45%로 나타났다.

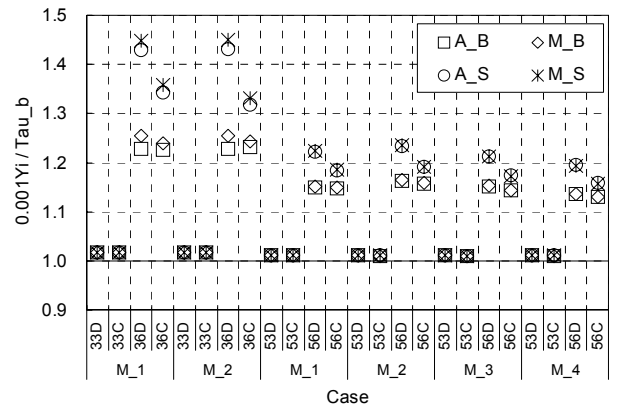


그림 10. 휨강성 감소 방법에 따른 결과비

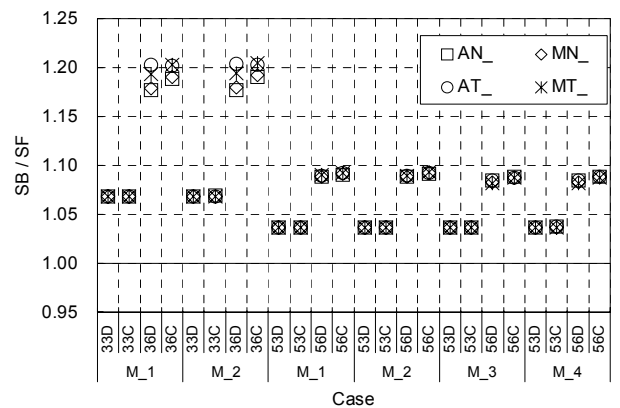


그림 11. B2 계수 산정방식에 따른 결과비

이러한 차이는 변장비가 큰 3층 골조에서 더욱 명확하게 나타나고 있으며, 층강성 개념을 적용한 B2 계수(S)를 적용한 경우에서 차이가 증가하는 것으로 나타났다.

또한 표 6에서 보면 τ_b 를 적용한 경우에서 기둥재의 소요휨강도를 가상수평하중 추가의 경우에 비해 다소 낮게 평가하는 것으로 나타났다. 하지만 가상수평하중을 누계방식(A)으로 적용하고, τ_b 및 층강성 개념의 B2 계수를 적용한 경우(ATN)는 비탄성 해석과 매우 근접한 결과(차이 10% 미만)를 나타냈다.

6) B2 계수 산정 방법

KBC 2009에서 제안된 B2 계수 산정방식에 따른 차이를 고찰하기 위해 층좌굴개념(B)이 적용된 경우와 층강성 개념이 적용된 경우(S)의 비를 그림 11에 나타내었다. 그림에서 보면 전반적으로 층좌굴 개념의 B2 계수가 적용된 경우가 층강성 개념이 적용된 경우에 비해 높은 결과값을 나타내고 있으며, 이러한 경향은 축력비가 높을수록 증가하는 것으로 나타났다. 특히 골조의 변장비가 큰 3층 골조의 경우 그 차이가 증가하는 것으로 나타났다.

참고 문헌

그러나 직접해석법은 설계적용시 부재의 내력 산정을 위해 $K=1.0$ 을 적용할 수 있다. 따라서 K 값 산정을 위한 복잡한 절차를 생략할 수 있어 매우 큰 장점이 된다. 하지만 층좌굴 개념을 적용하게 되면 B2 계수 산정을 위해서 K 값을 산정해야 하므로 사실상 직접해석법의 큰 장점이 사라지게 된다.

따라서 B2 계수 산정을 위한 방법으로 층좌굴 개념(B)의 B2 계수 적용이 안전측 결과를 나타내나 층강성 개념(S)의 B2 계수를 적용하고 부재의 소요강도를 과소평가하는 부분이 없도록 유도하는 것이 좋으리라 생각된다.

5. 결론

본 연구에서 파악된 직접해석법의 적용 방법에 따른 영향을 요약하면 다음과 같다.

- (1) B2 계수는 직접해석법 결과를 이용하여 산정할 경우 증가하며, 증가비율은 축력비와 B2 계수 산정 방식에 영향을 받는다.
- (2) 소요압축강도는 직접해석법의 적용 방법에 관계없이 적절한 범위에서 산정된다.
- (3) 소요 휨강도 산정시 골조의 변장비가 크면 직접해석법 결과가 높게 나타나며, 축력비가 큰 경우 직접해석 적용 방법에 따른 차이가 증가한다. 또한 기둥재가 고축력일 경우 층별 축방향 하중 분포 변화에 따른 영향이 증가 한다.
- (4) 가상수평하중을 최소수평하중으로 적용할 경우 비탄성 해석결과와 차이가 증가하며, 고축력시 소요휨강도를 과소평가하는 경우도 다수 발생한다. 또한 τ_b 를 적용한 경우와 층강성 개념의 B2 계수가 적용된 경우가 소요 휨강도를 낮게 평가한다.
- (5) 연구 결과에 따르면 직접해석법 적용 방법으로 가상수평하중을 기존에 수평하중에 누가(A)하고 휨강성감소를 위해 τ_b 를 적용(T)하며, B2 계수 산정을 위해서는 층강성 개념(S)을 적용한 경우가 비탄성 해석 결과에 가장 근접한 결과를 나타냈다. 하지만 τ_b 산정을 위한 과정이 실무에서 적용하기 쉽지 않으므로 적용의 편의성을 고려하면, τ_b 대신에 추가적인 가상수평하중을 적용(N)하는 방법을 적용하는 것도 해석의 용이성을 유지 하면서 설계에 문제를 발생시킬 수 있는 내력 과소평가를 방지할 수 있는 방안이라 판단된다.

- 김희동, 이명재(2009) 하중증폭계수를 적용한 비가새 골조 2차 해석 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제6호, pp.627-636.
- 김희동(2010) 하중증폭계수를 적용한 비대칭 비가새 골조 2차 해석 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제1호, pp.87-97.
- 대한건축학회(2009) 국토해양부 고시 건축구조기준, 대한건축학회.
- 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 of Steel Structures*, 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.
- Surovek-Maleck, A.E. and White, D.W. (2004a) 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. (2004b) Alternative approaches for elastic analysis and design of steel frames, II: Verification studies, *Journal of structural engineering*, 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., Alemdar, 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*, pp.71-91.

부록. SYMBOLS

L : 층고
 M_r : 소요휨강도
 M_{nt} : 골조의 횡변위가 없다고 가정한 부재의 소요휨강도
 M_{lt} : 골조의 횡변위만에 의한 부재의 소요휨강도
 N_i : i 층에 적용된 가상횡하중
 P_{nt} : 골조의 횡변위가 없다고 가정한 부재의 소요압축강도
 P_{lt} : 골조의 횡변위만에 의한 부재의 소요압축강도
 P_r : 소요압축강도

P_y : AF_y
 R_H : 1.0 가새골조, 0.85 모멘트골조
 Y_i : i 층에 적용된 하중조합에 의한 중력하중
 Δ_{oh} : 임의의 층에서의 층간 횡방향변위
 ΣH : Δ_{oh} 를 유발하는 층의 총수평력의 합
 ΣP_{e2} : 어느 한 층의 모든 기둥의 P_e 의 합
 ΣP_u : 어느 한 층의 모든 기둥의 소요축하중

(접수일자 : 2010. 4. 21 / 심사일 2010. 4. 26 /

게재확정일 2010. 7. 28)