

보강복형 비가새 골조의 $P-\Delta$ 영향에 관한 실험적 연구

The Experimental Study on the $P-\Delta$ Influence of Weak Beam Unbraced Frames

김 회 동¹⁾ · 박 상 철²⁾ · 이 명 재³⁾
Kim, Hee Dong · Park, Sang Chul · Lee, Myung Jae

요 약 : 본 연구의 목적은 보강복형 비가새 골조의 $P-\Delta$ 영향을 실험적 방법을 통하여 조사하는데 있다. 이를 위하여 4개의 1층 1스팬의 보강복형 비가새 골조에 대한 가력실험을 실시하였다. 실험의 변수로는 기둥의 강성과 축력비를 적용하였다. 실험결과 저축력 상태의 보강복형 비가새 골조에서는 축력의 정량적인 크기가 $P-\Delta$ 효과로서 골조의 안정성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 최대수평하중은 기둥의 강성과 지점 회전강성에 비례하여 증가하며 저축력상태의 보강복형 비가새 골조는 붕괴기구 형성이 비교적 안정적인 상태에서 이루어짐을 알 수 있었다. 그리고 한계상태설계기준의 B_2 계수는 골조의 비탄성거동시 $P-\Delta$ 효과를 적절히 고려하지 못하는 것으로 판단된다.

ABSTRACT : The objective of this study is to evaluate the $P-\Delta$ effect in the case of weak beam unbraced frames by experimental approach. To evaluate $P-\Delta$ effect, four specimens were tested under monotonic loading condition. The parameters of tests are the stiffness of column and the axial load ratio. The results show that the value of axial load affects frame stability because $P-\Delta$ effects promote the yielding of beam. The maximum lateral load increases in proportion to the increment of column stiffness and rotational stiffness of supports. The collapse mechanism of weak beam unbraced frames is stably formed in the condition of low axial load ratio. The B_2 factor of limit state design code does not properly consider the $P-\Delta$ effect in inelastic region.

핵심용어 : $P-\Delta$ 효과, 보강복형, 비가새 골조, 기둥재

KEYWORDS : $P-\Delta$ effect, strong column-weak beam, unbraced frames, beam-column

1) 정회원, 중앙대학교 대학원 박사과정
2) (주) 삼호, 건축기술팀, 공학석사
3) 정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

본 연구는 골조의 안정성(frame stability)에 큰 영향을 미치는 인자 중 하나인 P - Δ 효과를 고찰하고 이를 구조설계시 효율적으로 고려할 수 있는 방안을 제안하기 위한 연구의 일환으로 축력(P)과 수평하중(H)을 동시에 받는 2차원 보강복형 골조의 단조가력실험을 수행하고 그 결과를 고찰한 것이다.

본 연구를 통하여 얻고자 하는 목적은 다음과 같다.

- 1) 축력과 수평하중을 동시에 받는 보강복형 비가새 강구조 골조의 거동을 파악한다.
- 2) 보강복형 골조의 붕괴기구 형성과정에 대한 구체적인 자료를 확보한다.
- 3) 저축력($P = 0.1 \cdot P_y$)을 받는 보강복형 비가새 강구조 골조에 대한 P - Δ 효과를 파악한다.

이상과 같은 연구의 목적을 수행하기 위해 4개의 실험체에 대한 골조의 단조가력실험 및 소재 실험을 실시하였다.

2. 골조 가력 실험

2.1 소재시험

2.1.1 인장강도시험

실험체 제작에 사용된 강재(SS400)의 기계적

인 특성을 파악하기 위하여 인장강도 시험을 실시하였다. 인장시험편은 한국공업규격에 제시되어 있는 금속재료 인장시험편 B 0801에 제시된 시험편 중 5호 시험편을 사용하였으며, 각 단면별로 플랜지 및 웨브에서 각각 1개씩 총 8개의 인장시험편을 절취하여 제작하였다.

강재의 응력-변형도 관계를 파악하기 위하여 시험편 중앙부 양측에 와이어 스트레인 게이지를 각각 부착하였으며, 연신율을 측정하기 위해서 표점거리를 50.0 mm로 하여 가력하였다. 가력은 100 tf 성능의 만능재료시험기를 사용하였다. 강재의 인장시험의 각 형강별 결과를 표 1에 나타내었다.

실험체 제작에 사용된 강재는 모두 SS400 강재의 공칭항복강도 $F_y = 2.4 \text{ tf/cm}^2$ 을 만족하고 있으며 구조용 강재에서 요구되는 적절한 항복비와 연신율을 나타내고 있다.

2.1.2 단주압축시험

실험체 제작에 사용된 형강의 단면내력특성을 파악하기 위하여 단주압축시험을 실시하였다. 단주압축시험체의 길이는 부재차원의 좌굴문제를 배제하고 순수한 단면특성만을 파악하기 위해 단면 높이의 3배 ($3H$)로 하였다.

시험체는 각 단면의 형상에 따라 2개씩 제작하였으며, 시험체의 중앙부에 와이어 스트레인 게이지를 2개씩 부착하여 변형도를 측정하였고, 대칭형으로 다이얼 게이지를 2개씩 배치하여 측방향

표 1. 강재의 인장강도시험 결과

형강	위치	항복강도 (tf/cm ²)	인장강도 (tf/cm ²)	항복비	연신율 (%)
H-150×75×5×7	F	3.45	4.85	0.71	30
	W	3.39	4.81	0.70	29
H-100×100×6×8	F	3.35	4.81	0.70	29
	W	3.38	4.84	0.70	29
H-125×125×6.5×9	F	3.35	4.83	0.69	30
	W	3.29	4.79	0.70	31
H-150×150×7×10	F	3.22	4.78	0.67	29
	W	3.32	4.83	0.69	30

* F : flange, W : web

표 2. 형강의 단주압축실험결과 (평균값)

형강	길이 (cm)	폭두께비	항복강도 (tf/cm ²)	최대강도 (tf/cm ²)
H-150×75×5×7	45.0	F: 5.4	2.91	3.24
		W: 26.8		
H-100×100×6×8	30.0	F: 6.3	3.31	4.24
		W: 13.3		
H-125×125×6.5×9	37.5	F: 6.9	3.28	3.84
		W: 16.2		
H-150×150×7×10	45.0	F: 7.5	3.21	3.72
		W: 18.3		

* F : flange, W : web

변위를 측정하였다. 가력은 200 tf 성능의 만능 재료시험기를 사용하여 가력하였다.

형강의 단주압축실험결과의 각 형강별 평균값을 표 2에 나타내었다. 실험체 제작에 사용된 형강의 항복강도는 모두 강재의 공칭항복강도($F_y = 2.4 \text{ tf/cm}^2$)를 넘고 있다.

그러나, 웹의 폭-두께비가 다른 형강에 비하여 비교적 큰 H-150×75×5×7(26.8) 형강의 경우 최대내력 도달이후(공칭항복강도 초과) 국부좌굴의 영향으로 인하여 내력이 다소 급하게 감소하는 현상이 나타났다. 하지만 다른 형강의 경우에는 강재의 인장강도시험결과와 거의 유사한 거동을 보였다. 따라서 사용된 형강의 경우 공칭항복강도 이전에는 국부좌굴등의 영향으로 인한 급격한 내력저하가 없는 것으로 판단된다.

2.2 골조 가력실험

2.2.1 실험체 계획

축력(P)과 수평하중(H)을 동시에 받는 보항복형 비가새 골조의 P - Δ 효과를 파악하기 위하여 2차원의 1층, 1스팬의 보항복형 비가새 골조 실험체를 계획하였다. 실험체의 치수 및 사용 형강의 단면은 중층규모의 모멘트저항골조 최하층부의 치수와 단면을 가력조건(가력기기 및 장치의 성능 및 치수)에 맞추어 scale down하여 설정하였다.

실험체 제작에 사용된 강재는 SS400 강재를

사용하였으며, 사용된 형강은 골조붕괴 시 국부좌굴의 영향을 받지 않도록 폭-두께비가 낮은 형강을 사용하였다.

실험체의 지지 조건은 핀지지로 계획하여 기둥 단부를 고력볼트 1열로 strong frame과 체결하였다.

기둥과 보의 접합은 용접에 의한 완전강접으로 제작하였다. 접합부는 보의 전소성모멘트($M_{pb} = 336 \text{ tf} \cdot \text{cm}$)를 견딜 수 있도록 설계해 보에 소성힌지가 발생하여도 견딜 수 있도록 하였다.

실험체의 변수는 이론적인 연구와 해석적인 연구를 통하여 파악된 P - Δ 효과의 영향인자 중 그 효과가 크다고 판단이 되는 기둥과 보의 강성비 및 축력비를 적용하였다(표 3 참조).

실험체는 기본적으로 강한기둥-약한보(strong column-weak beam)의 개념을 적용하여 제작하였다. 기둥 강성/보 강성 = 2.6이 되는 F1S1 실험체를 기본형으로 하고 기둥의 강성이 보 강성의 5.0 배가 되는 F1S2실험체와 1.1배가 되는 F1S3실험체 그리고 좌, 우측 기둥재의 강성이 다른 F1S4실험체를 제작하여 기둥과 보의 강성차이에 의한 골조의 거동과 안정성을 고찰하고자 한다.

축력비는 F1S4실험체를 제외하고는 0.1로 고정하였다. 하지만 각 실험체에 따라서 가력되는 축력의 절대값이 7tf에서 13tf으로 달라지게 된다. 또한 좌, 우측 기둥재의 크기가 다른 F1S4

표 3. 골조 실험체 일람

실험체 명	기둥 길이 (cm)	보 길이 (cm)	기둥 부재	보 부재	기둥강성/보강성	축력 [축력비] (tf)	M_{pc} / M_{pb}
F1S1	150.0	300.0	A	D	2.6	10.0 [0.1]	1.4
F1S2			B		5.0	13.0 [0.1]	2.2
F1S3			C		1.1	7.0 [0.1]	0.8
F1S4			A		2.6	13.0 [0.13]	1.4
	B(가력방향)	5.0	13.0 [0.1]	2.2			

※ A Type : H-125×125×6.5×9

B Type : H-150×150×7×10

C Type : H-100×100×6×8

D Type : H-150×75×5×7

(기둥 부재 : Standard)

(기둥 부재)

(기둥 부재)

(보 부재 : Standard)

· M_{pc} : 기둥의 전소성모멘트

· M_{pb} : 보의 전소성모멘트

실험체의 경우 13tf의 축력이 가력되어 각각 0.13, 0.1의 축력비가 적용되었다. 따라서 동일한 보 단면을 사용한 보항복형 골조에서 축력비의 변화가 P - Δ 효과에 미치는 영향 또한 파악해 보고자 하였다.

2.2.2 가력 및 계측 계획

실험체의 가력을 위해서 100 tf 성능의 오일잭 3대가 사용되었다. 골조의 기둥 상부에 각각의 오일잭을 양단 핀 지지로 설치, 축력(P_1 , P_2)을 가력할 수 있도록 하였으며, 우측기둥 상단부 가력점에서 핀 거동을 할 수 있도록 오일잭을 설치하여 수평하중(H)을 가력하였다 (그림 1 참조).

가력 순서는 먼저 각 기둥의 단면종류에 따라 단면의 축방향 내력 ($P_y = A_s \cdot \sigma_y$)의 10%를 축력으로 가력하고, 이를 유지하면서 수평하중을 점진적으로 가력하였다. 단면의 축방향 내력의 산정에 사용된 강재의 항복강도는 소재 실험을 통하여 얻은 결과(σ_y)를 사용하였다.

단, 수평하중이 가력되면 수평방향 변위가 발생하여 상부의 축력 (P_1 , P_2)은 정확하게 수직방향으로 가력되지 않는다. 따라서 매 가력 시 수평방향 변위를 측정하여 이에따른 축력의 수직방향 분력과 수평방향 분력을 계산, 수직방향 분력이 $0.1 \cdot P_y$ 로 일정하게 유지되도록 가력하였다. 가력종료는 골조의 최대내력이 발생한 후 골조의 불안정 현상이 증가하였다고 판단이 되는 시점

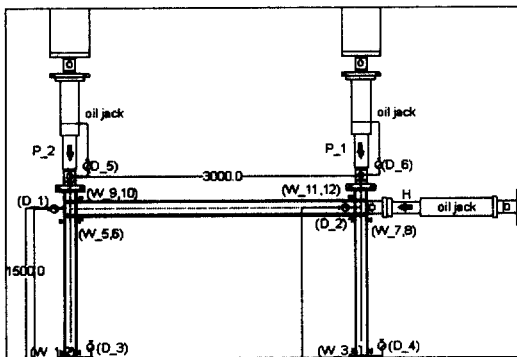


그림 1. 골조 실험체의 가력 및 계측 상황도

(수평변위 100mm 이상 또는 가력시 급격한 불안정 현상 발생 시점)을 골조의 붕괴로 보고 가력을 종료하였다.

가력된 하중은 각 오일잭에 부착된 로드셀을 통하여 측정이 되었으며, 각 기둥의 상부 축력은 좌, 우측이 별도 제어가 가능하도록 하였다.

계측은 6개의 다이얼게이지와 12개의 와이어 스트레인 게이지를 사용하여 변위와 변형도를 측정하였다(그림 1 참조).

다이얼게이지 1, 2번은 각 기둥의 상부에서 수평변위를 측정하기 위해서 사용되었으며, 3, 4번은 지점의 회전각을 측정하기 위해서 사용되었다. 5, 6번은 축력의 수직분력 계산을 위하여 필요한 오일잭의 스트로크를 측정하는데 사용되었다.

와이어 스트레인 게이지는 각각의 기둥 및 보의 단부 양쪽 플랜지에 설치하여 가력에 따른 부재 단부의 소성화 여부를 판단할 수 있도록 하였다.

3. 골조실험 결과

3.1 지점모멘트-회전각 관계

각 실험체의 기둥재 지점모멘트와 지점 회전각 관계를 모멘트-곡률관계를 이용하여 그림 2에 나타내었다.

그림에 나타난 바와 같이 모든 실험체에서 초기 가력시에는 거의 고정단에 가까운 지점 거동을

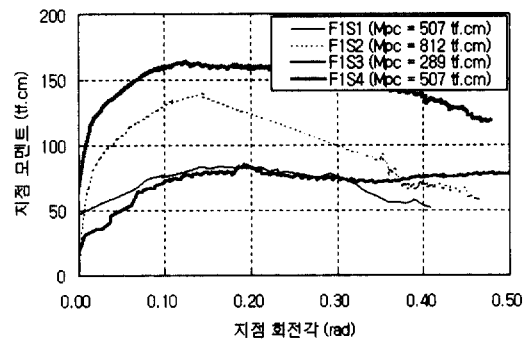


그림 2. 각 실험체의 지점 모멘트-지점 회전각 관계

보이고 있으며, 수평하중의 가력이 진행되면서 일정량의 모멘트저항능력을 보이고 있다.

처음 실험체 계획시 단부 핀지지를 가정하고 실험체를 제작하였으나 지점의 회전저항으로 인하여 모멘트가 발생하였다. 비록 모멘트의 양은 기둥재의 전소성모멘트에 비해 매우 낮은 수준이나 실험체의 초기강성에 미치는 영향은 무시할 수 없다고 판단된다. 따라서 골조의 거동은 이론적 완전 핀고정 상태가 아니고 지점이 부분고정상태의 거동을 하였다고 판단된다.

지점단부에 발생하는 모멘트 크기는 기둥부재의 단면크기 증가와 비례하는 경향을 나타내고 있다. 이는 지점의 고정방법에 따른 영향으로 형강의 크기(단면의 춤)가 클수록 회전에 대한 저항이 증가하게 되어 나타난 결과라 사료된다.

3.2 수평하중-수평변위 관계

각 실험체의 수평하중(H)과 기둥 좌측 상단부 수평변위(Δ) 관계를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 H_{max} 는 최대수평하중을 나타낸 것이다.

각 실험결과에서 최대 수평하중은 실험체의 기둥재 단면의 크기에 비례하였다. 즉, 기둥재의 단면이 가장 큰 F1S2실험체의 경우 6.8tf으로 가장 높은 최대수평하중을 나타내고 있으며, 기둥재의 단면이 가장 작은 F1S3실험체에서는 4.3tf으로서 가장 낮은 최대수평하중값을 나타내고 있다.

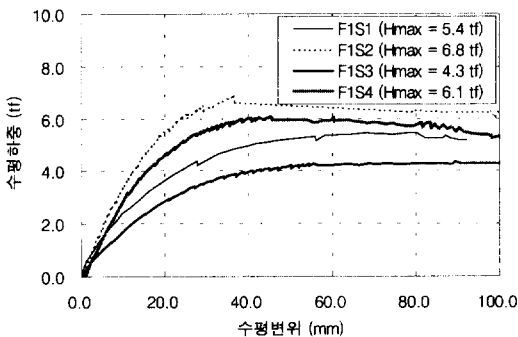


그림 3. 각 실험체의 수평하중-수평변위 관계

이론적으로 완전 핀지지를 가진 보항복형 골조의 경우 보 단부의 항복이 골조의 붕괴하중에 미치는 영향이 비교적 작은 편이다. 하지만 본 실험의 경우 지점이 완전핀 거동을 한 것이 아니라 약간의 회전저항을 가지고 있었다. 따라서 보 항복 이후 거동은 기둥재와 지점의 회전강성에 의해서 좌우되므로 최대수평하중에 기둥재 단면의 크기가 영향을 미친 것으로 판단된다.

최대내력 도달 이후의 거동을 살펴보면, 축력의 절대값이 비교적 작은 경우인 F1S1실험체(10tf)와 F1S3실험체(7tf)의 경우 최대수평하중 도달 이후에도 급격한 수평하중의 저하를 보이고 있지 않으나 축력의 절대값이 13tf으로서 비교적 큰 F1S2, F1S4실험체의 경우 최대수평하중 도달 이후 수평하중의 감소가 다소 급하게 나타나고 있다.

이는 보의 항복이 골조의 안정성에 큰 영향을 미치는 보항복형 비가새 골조의 경우 기둥재가 받게 되는 축력의 절대값이 $P-\Delta$ 효과에 의한 2차 모멘트로서 보의 항복에 영향을 미치게 되어 나타난 결과라 판단된다. 따라서 전 실험체에 동일한 보 단면을 사용한 본 실험의 경우 축력의 절대값이 증가하게 되면 이는 골조의 안정성에도 그 영향이 나타나고 있다고 판단된다.

3.3 수평하중-보 단부 변형도 관계

각 실험의 수평하중(H)과 보 우측 하단부의 변형도 관계를 그림 4에 나타내었다.

그림에서 강재의 항복변형도(≈ 0.0015)를 점선으로 표현하였다. 전 실험체에서 보의 연단이 항복함과 동시에 수평하중의 증가없이 최대내력에 도달하였다. 따라서 보의 단부 초기 항복현상이 골조의 최대내력을 결정하는데 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

비교적 축력의 절대값이 큰 F1S2, F1S4실험체의 경우 보 단부의 항복이 상당히 진전된 것을

볼 수 있다. 이는 축력의 절대값이 $P-\Delta$ 효과에 의한 2차 모멘트로서 보 단부의 항복현상에 영향을 미친 것을 나타내는 것이라 사료된다.

3.4 수평하중-기둥상부 변형도 관계

각 실험의 수평하중(H)과 기둥 상부 변형도 관계를 그림 5에 나타내었다.

본 실험의 실험체는 모두 보항복형을 기본으로 제작되었다. 단, F1S3실험체의 경우 기둥과 보의 강성(I_x/L)비는 1.1로서 기둥의 강성이 높으나 단면의 전소성 모멘트의 경우 보가 큰 경우이다. 나머지 실험체는 모두 기둥과 보의 강성비 및 단면의 전소성모멘트 비교에서 모두 기둥쪽이 큰 경우이다.

실험결과에서는 보의 전소성 모멘트가 기둥보다 큰 F1S3실험체는 기둥 상부의 변형도가 강재의 항복변형도를 넘어서고 있는 것을 볼 수 있다. 기둥과 보의 강성비가 2.6이며, 기둥과 보의 전소성모멘트의 비가 1.4인 F1S1실험체에서는 기둥상단부의 변형도가 다른 경우에 비해 비교적 진전된 것을 볼 수 있다. 이는 축력에 의한 부재의 강성저하로 인한 현상으로 사료된다.

기둥과 보의 강성비가 5.0, 단면의 전소성모멘트의 비가 2.2인 F1S2, F1S4실험체의 경우 기둥 상부의 변형도가 항복변형도의 0.54% 정도로 나타났다.

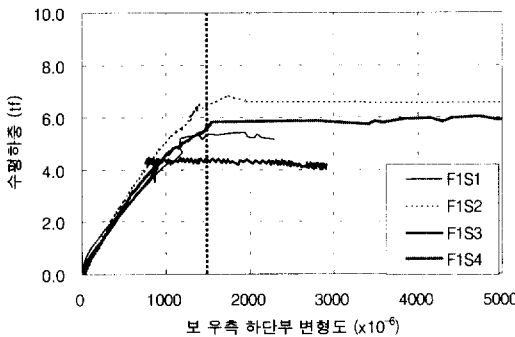


그림 4. 각 실험체의 수평하중-보 우측하단부 변형도 관계

따라서 보항복형 골조 설계시 기둥재 및 보 부재의 강성비교 뿐만 아니라 단면의 전소성모멘트의 비교도 필요할 것으로 판단이 되며, 특히 기둥재의 경우 축력에 의한 강성저하도 고려되어야 할 것으로 사료된다.

3.5 $P-\Delta$ 효과 분석

각 실험의 좌측 기둥재 상부의 1차 모멘트($M_f = (H \times h)/2$)와 $P-\Delta$ 효과에 의한 2차 모멘트($M_s = (H \times h)/2 + (P \times \Delta)$)를 그림 6에서 그림 9까지 나타내었다.

그리고 수평변위 100mm시에 1차 모멘트와 2차 모멘트의 차이와 각 실험체 별 기둥재(M_{pc})와 보 부재(M_{pb})의 전소성모멘트도 함께 나타내었다.

모든 실험체에서 1차 모멘트와 2차 모멘트의 차이는 수평변위가 증가할수록 점차 더 커지고 있다. 그리고 가력된 축력의 절대값이 증가 할수록 1차 모멘트와 2차 모멘트의 차이($M_{max} = M_s - M_f$)는 커지는 것으로 나타났다. 따라서 보항복형 비가새 골조에 있어서 $P-\Delta$ 효과는 부재의 강성도 영향을 미치고 있지만 가력된 축력의 절대값 역시 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단이 된다.

1차 모멘트의 경우 최대내력에 도달 이후 감소하고 있는 경향을 나타낸다. 하지만 2차 모멘트의 경우에는 그 경향이 감소하지 않고 일정한 수

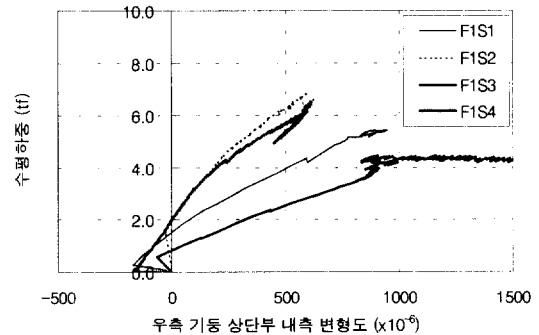


그림 5. 각 실험체의 수평하중-기둥 상단부 변형도 관계

준을 유지하거나(F1S1, F1S2, F1S4) 지속적으로 증가(F1S3)하고 있는 경향을 나타내고 있다. 따라서 외력으로서 수평하중이 최대하중에 도달 이후 감소하고 있다 하더라도 부재 내부의 응력상태는 축력에 의한 2차 모멘트의 영향이 점점 증가하고 있으므로 일정한 수준을 유지하거나 오히려 증가하고 있는 것으로 판단이 된다.

따라서 이러한 $P-\Delta$ 효과를 명확하게 평가하는 것이 실제 골조 내부의 응력상태 및 안정성을 파악하는데 있어서 매우 중요한 요인이 될 수 있다고 사료된다.

모든 실험체에서 기둥 상단부의 모멘트는 보 부재의 전소성모멘트 이상의 모멘트를 받고 있는 것으로 나타났다. 따라서 보의 전소성 모멘트 이후의 거동은 기둥재의 강성과 지점의 회전강성에 의해 골조의 안정성이 유지되고 있는 것으로 판단이 된다. 물론 이론적으로 단부 핀지지의 골조의 경우 보 단부에 소성힌지가 발생하게 되면 붕괴되는 것으로 보고 있으나 본 실험체의 경우 3.1에서 기술한 바와 같이 지점부분에 일정한 모멘트 저항능력이 있으므로 보 단부에 소성힌지 발생이후에도 기둥재에 의해 수평하중에 저항하는 것으로 판단이 된다.

대부분의 경우 수평변위 5mm 이하에서는 $P-\Delta$ 효과가 거의 나타나지 않고 있다. 본 실험체의 형상과 치수를 고려할 때 $\Delta/h = 0.003$ 이하의 경우에는 $P-\Delta$ 효과가 거의 나타나지 않고 있는 것으로 판단이 된다.

본 실험에 국한되어 평가된 상기의 수치가 절대적인 의미를 가지기는 어려우나 현재 국내의 경우 $P-\Delta$ 효과를 고려해야 하는 경우에 대한 구체적인 지침이 없는 실정이므로(단순히 가새골조의 경우라고만 언급하고 있음) 차후 다양한 연구를 통하여 $P-\Delta$ 효과와 경향을 충분히 파악하여 구체적인 지침의 제시가 필요하다고 생각된다.

실험의 결과에서 기둥 또는 보의 전소성 모멘트를 초과하는 경우가 나타나고 있으나 이는 강재의 변형도 경화현상으로 인한 영향으로 판단이 된다.

3.6 층강성(story stiffness)의 변화

각 실험의 수평하중과 그에 따른 수평변위관계 및 $P-\Delta$ 효과의 영향을 고려하여 산정한 층강성과 수평변위비를 그림 10에 나타내었다.

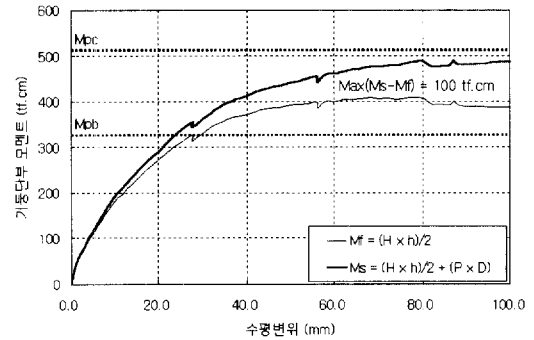


그림 6. F1S1실험체의 $P-\Delta$ 효과

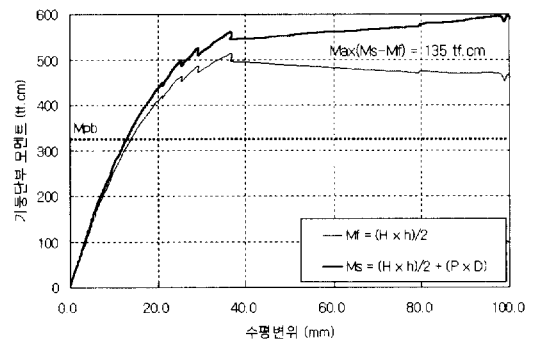


그림 7. F1S2실험체의 $P-\Delta$ 효과

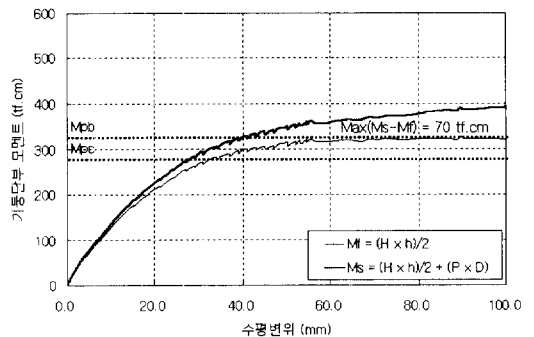


그림 8. F1S3실험체의 $P-\Delta$ 효과

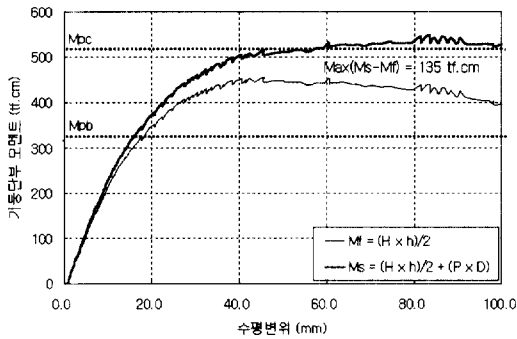


그림 9. F1S4실험체의 P-Δ효과

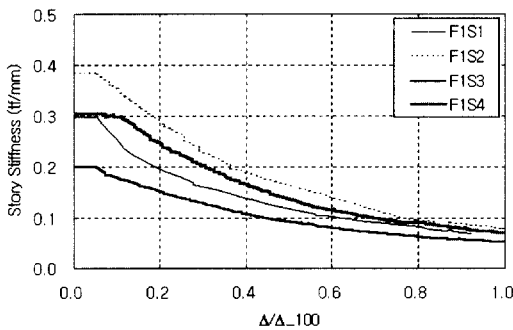


그림 10. 각 실험체의 층강성 비교

본 연구에 적용된 층강성은 다음과 같다.

$$\text{층강성} = \frac{\sum H + \frac{\sum P \cdot \Delta}{L}}{\Delta} \quad (1)$$

각 실험체별 층강성은 기둥재의 단면성능에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 가력초기에 상대적으로 크게 나타나고 있다. 가력이 진행되면서는 각 실험체 간의 층강성의 차이도 감소하고 있음을 볼 수 있다.

이는 P-Δ효과의 영향과 더불어 기둥재의 지점에서 발생한 회전저항으로 인한 영향으로 사료된다. 특히 회전저항의 경우 초기 가력단계에서는 거의 고정단과 유사한 거동을 하였으므로 이 영향이 나타난 것으로 보인다.

단, 양쪽 기둥재의 단면이 다른 F1S4 실험체

의 경우 수평하중-수평변위 관계에서와는 달리 초기 층강성은 단면이 작은쪽 기둥재와 동일한 기둥재를 사용한 F1S1과 거의 같으나 수평변위가 증가하면서 F1S1에 비해 비교적 높은 층강성을 보이고 있다. 이는 P-Δ효과의 영향이 고려된 층강성의 경우 가력된 축력의 절대값의 차이가 골조의 강성에 미치는 영향과 기둥재의 강성차이에 따른 현상이라 판단이 된다.

모든 실험체에서 가력이 진행됨에 따른 급격한 층강성의 변화는 관찰되지 않았으며, 비교적 완만한 강성의 감소를 나타내고 있다.

수평변위 100mm 시의 층강성은 각 실험체에 관계없이 거의 동일한 결과는 나타내고 있다. 따라서 보의 소성화가 골조의 붕괴에 미치는 영향이 매우 큰 보향복형 골조에서 본 실험과 같이 동일한 보 부재를 사용할 경우 골조 최대내력 도달 이후의 거동은 기둥재의 단면성능에 관계없이 거의 동일한 층강성을 가지고 있음을 알 수 있다.

3.7 모멘트 증폭효과와 B₂계수의 비교

3.5절에서 기술한 P-Δ효과에 의한 2차 모멘트를 1차 모멘트로 나눈 모멘트증폭비(M_s/M)를 강구조 한계상태설계기준(LSD)의 B₂계수와 비교해 그림 11에서 14까지 나타내었다.

본 연구에서 수행한 실험은 가력이 절점에 국한되었기 때문에 수평변위 및 수평하중을 제어할 경우(nonsway case) 골조 내부에는 모멘트가 발생하지 않는다. 따라서 이러한 경우 LSD에서는 모멘트증폭효과를 B₂계수에 의해서 평가하고 있다. 그러므로 LSD의 B₂계수를 실험결과에서 얻은 모멘트증폭비와 비교해 봄으로써 LSD에서 제안하고 있는 B₂계수의 효용성을 확인해 보고자 한다.

LSD에서는 P-Δ효과를 고려할 수 있는 B₂계수를 2가지 제안하고 있다. 이 중 층강성 개념(story stiffness concept)을 사용한 B₂계수는 1차 수평변위가 필요하게 되는데 본 연구의 경우

실험에 의해 얻어진 2차 수평변위만 산정 가능하므로 적용이 어렵다. 따라서 복수기둥 개념(multiple column concept)을 사용한 경우를 이용하여 B_2 계수를 산정하였다. 본 연구에 적용한 B_2 계수는 다음과 같다. 다만 식(2)의 P_e 산정시 유효좌굴길이 계수는 참고문헌 1)의 유효좌굴길이계수 산정 계산도표를 이용하여 산정하였으며, 이 때 지점은 다소간의 회전강성을 가지고 있으나 강접합이라고 볼 수 없으므로 핀지지($G = 10$)로 하였다.

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\sum P}{\sum P_e}} \quad (2)$$

그림에 나타난 바와 같이 식 (2)의 경우 본 실험과 같이 가력된 축력의 합($\sum P$)이 일정할 때에는 수평하중의 변화와 관계없이 동일한 B_2 계수 값을 나타낸다. 하지만 실험에서는 수평하중이 증가할 수록 수평변위도 함께 증가되어 수평하중의 증가에 따라 모멘트증폭비도 함께 증가하는 경향을 나타내고 있다.

두 결과를 비교해 보면 실험체에 따라서 수평변위 10mm - 30mm 이하에서는 B_2 계수가 $P-\Delta$ 효과에 의한 모멘트증폭효과를 다소 안전측으로 평가하고 있는 것을 볼 수 있다.

그림 6에서 그림 9까지의 결과와 비교하여 보면 $P-\Delta$ 효과를 안전측으로 평가하는 B_2 계수와 실험

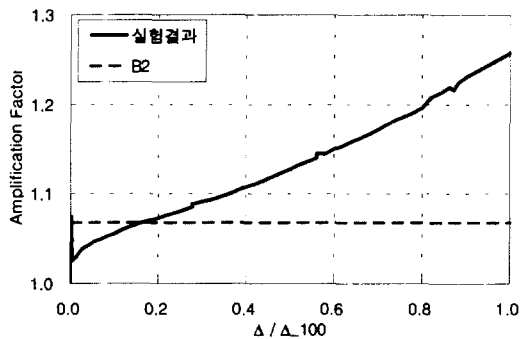


그림 11. 모멘트증폭비와 B_2 계수의 비교 (F1S1)

험에 의한 모멘트증폭비가 일치하는 지점은 기둥재의 모멘트가 보 부재의 전소성모멘트 발생지점과 거의 일치한다. 이를 초과할 경우 실험에서는 모멘트 증폭효과는 지속적으로 증가하고 있지만 B_2 계수의 경우 동일한 값을 유지하고 있다.

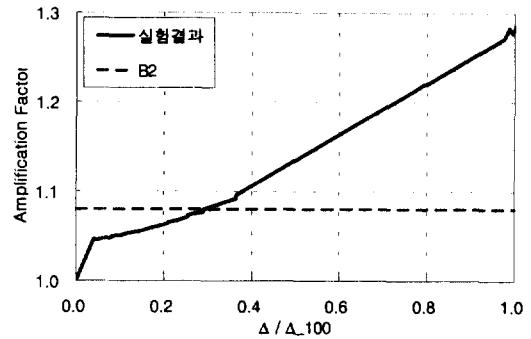


그림 12. 모멘트증폭비와 B_2 계수의 비교 (F1S2)

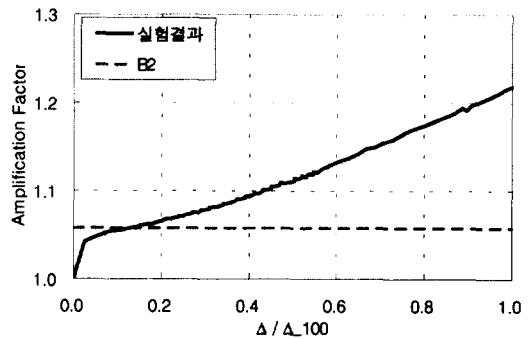


그림 13. 모멘트증폭비와 B_2 계수의 비교 (F1S3)

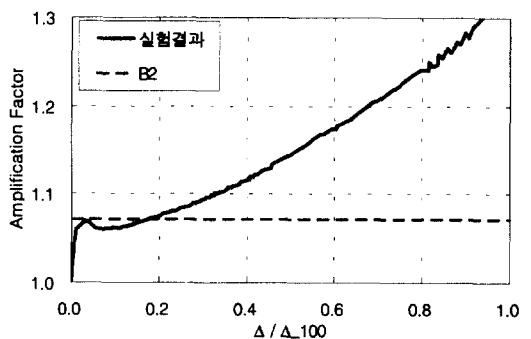


그림 14. 모멘트증폭비와 B_2 계수의 비교 (F1S4)

따라서 보항복형 골조의 경우 골조의 탄성거동 시에는 LSD에서 제안한 B_2 계수의 경우 $P-\Delta$ 효과에 의한 모멘트증폭효과를 다소 안전측으로 평가하고 있으나, 수평하중의 증가로 인한 골조의 소성화가 진행됨에 따라서 이러한 $P-\Delta$ 효과를 적절하게 평가하지 못하는 것으로 판단된다.

4. 실험결과 요약

이상의 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 축력비가 낮은 보항복형 골조에서 지점에 다소의 회전강성이 있는 경우 $P-\Delta$ 효과에 의한 골조의 불안정현상은 급격하게 나타나지 않으며 보의 단부의 소성화에 의해서 점진적으로 붕괴 메카니즘이 형성된다.
- (2) 보항복형 골조에서 기둥재의 강성이 수평변위 및 최대수평하중에 미치는 영향은 지점의 회전강성에 비례한다.
- (3) 보 부재가 동일한 보항복형 골조에서는 축력의 절대값이 클수록 $P-\Delta$ 효과의 영향이 커지게 되고 이는 골조의 안정성에 영향을 미치는 것으로 사료된다.
- (4) $P-\Delta$ 효과는 동일 축력상태일 때 수평하중의 증가로 인한 수평변위가 커질수록 그 효과도 증가한다.
- (5) 본 실험에서는 수평변위비(Δ/h)가 0.003 이하인 경우 $P-\Delta$ 효과는 거의 나타나지 않았다.
- (6) 단부 핀 고정 볼트 접합의 경우 사용되는 기둥재의 강성과 크기, 하중 조건 등에 따라서 회전에 대한 구속의 정도가 달라지나,

전 하중단계를 걸쳐 다소의 모멘트를 받고 있는 것으로 판단이 된다.

- (7) 층강성은 가력초기에는 기둥재의 강성 및 지점 회전강성에 따른 영향을 받으나 최대 내력 도달 이후에는 거의 동일한 결과를 나타냈다.
- (8) LSD의 B_2 계수와 실험결과의 비교에서 골조의 탄성거동시 B_2 계수는 $P-\Delta$ 효과를 안전측으로 평가하고 있으나 골조의 소성거동이 시작되면서 $P-\Delta$ 효과를 적절히 평가하지 못하는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 대한건축학회, 강구조한계상태설계 기준 및 해설, 대한건축학회, 1997.
2. W.F.Chen, E.M.Lui, Structural Stability, ELSEVIER, 1987
3. T.G.Galambus, Structural members and frames, Prentice hall, 1968
4. Francois Cheong-Siat-Moy, Consideration of secondary effects in frame design, J. of Stu. Div., ASCE, Vol. 103, No. ST10, 1972
5. C.G.Salmon & J.E.Johnson, Steel Structures, Harper Collins College Publishers, 1996.
6. 김희동, 이명재, 강구조한계상태설계법 기둥재 설계식에서의 B_2 계수의 영향, 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, 2000. 4.
7. 김희동, 이명재, 강구조한계상태설계법 기둥재 설계식의 B_2 계수의 평가, 한국강구조학회 학술발표대회논문집, 2000. 6.

(접수일자 : 2001년 5월 17일)