

# P- $\Delta$ 효과를 고려한 기둥항복형 강구조 골조의 안정성

## Stability of Steel Frames with Weak Column-Strong Beam Considering P- $\Delta$ effect

김 희 동<sup>1)</sup> · 이 명 재<sup>2)</sup>  
*Kim, Hee Dong Lee, Myung Jae*

요 약 : 본 연구의 목적은 실험적 방법을 통하여 P- $\Delta$  효과를 고려한 기둥항복형 강구조 골조의 안정성을 고찰하는데 있다. 이를 위하여 3개의 1층 1스팬 기둥항복형 강구조 비가새 골조에 대한 가력실험을 실시하였다. 실험의 변수로는 기둥의 강성과 축력비를 적용하였다. 실험 결과 기둥의 강성 감소는 P- $\Delta$ 효과를 증가시켜 골조의 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 보항복형 골조와 비교하여 최대내력 도달 이후의 내력저하 현상이 다소 급격하게 나타났다. 이것은 기둥의 강성이 낮은 기둥항복형 골조의 경우 P- $\Delta$ 효과의 영향이 골조의 안정성에 미치는 영향이 증가되어 나타난 현상으로 사료된다.

ABSTRACT : This study aimed to evaluate the stability of steel frames with weak column-strong beam and consider P-effect using the experimental approach. Towards this end, three specimens were tested under monotonic loading condition. Parameters of tests included the stiffness of the column and the axial load ratio. Results showed that reduction in column stiffness promoted P-effect, which considerably influenced the frame's stability.

핵심용어 : P- $\Delta$ 효과, 기둥항복형, 비가새 골조, 기둥, 실험적 연구

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

### 1. 서 론

본 연구는 골조의 안정성(frame stability)에 큰 영향을 미치는 인자 중 하나인 P- $\Delta$ 효과를 실험적으로 고찰하고 이를 구조설계시 효율적으로 고려할 수 있는 방안을 제안하기 위한 연구의 일환으로서 선행되었던 연구에서 연구대상이 되었던 보항복형 골조와는 달리 기둥의 강성이 보의 강성에 비해 작아 기둥에서 먼저 항복이 유발되는 기둥항복형(weak column-strong beam) 골조를 그 대상으로 하여 P- $\Delta$ 효과에 대한 단조가력실험을 수행하고 그 결과를 고찰한 것이다.

이러한 P- $\Delta$ 효과가 강구조 골조의 안정성에 미치는 영향에 관한 연구는 지금까지 대부분 2차해석기법을 사용한 수치해석적 연구 및 모멘트 증폭계수 제안과 관련된 이론적 연구로 진행이 되어왔다. 따라서 P- $\Delta$ 효과에 대한 실험적 연구는 그리 많지 않다. 그러므로 본 연구를 통하여 얻고자 하는 목적은 다음과 같다.

- (1) 축력과 수평하중을 동시에 받는 기둥항복형 비가새 강구조 골조의 거동을 파악한다.
- (2) 기둥항복형 골조의 붕괴기구 형성과정에 대한 구체적인 자료를 확보한다.
- (3) 기둥항복형 비가새 강구조 골조에 대한 P- $\Delta$ 효과를 파악한다.

이상과 같은 연구의 목적을 수행하기 위해 3개의 기둥항복형 실험체에 대한 골조의 단조가력실험을 실시하였다.

### 2. 골조 가력 실험

#### 2.1 소재시험

##### 2.1.1 인장강도시험

실험체 제작에 사용된 강재(SS400)의 기계적인 특성을 파악하기 위하여 인장강도 시험을 실시하였다. 인장시험편은 한

1) 정회원 중앙대학교 건축공학과 강사, 공학박사

(Tel:031.670.4671, Fax:031.675.1776, E-mail : drkimhd@hanafos.com)

2) 정회원 중앙대학교 건축공학과 교수, 공학박사(mjlee@cau.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

국공업규격에 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 50.0mm로 하여 가력하였다. 가력은 100tf 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 축방향변위를 측정하였다. 가력은 200tf 성능의 만능재료시험기를 사용하여 가력하였다.

형강의 단주압축시험결과의 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, 플랜지의 폭-두께비가 다른 형강에 비하여 비교적 큰 H-100×75×3.2×4.5(8.3)와 H-100×100×3.2×4.5(11.1) 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 형

강의 경우 공칭항복강도 이전에는 국부좌굴 등의 영향으로 인한 급격한 내력저하가 없는 것으로 판단된다.

## 2.2 골조 가력실험

### 2.2.1 실험체 계획

축력(P)과 수평하중(H)을 동시에 받는 기둥항복형 비가새 골조의 P-Δ효과를 파악하기 위하여 1층, 1스팬의 기둥항복형 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 down(약 0.5배)하여 설정하였다.

실험체 제작에 사용된 강재는 SS400 강재를 사용하였으며, 사용된 형강은 공칭항복강도까지는 국부좌굴의 영향을 받지 않도록 폭-두께비를 검토하여 형강을 결정하였다.

실험체의 지지 조건은 핀지지로 계획하여 기둥 단부를 고력볼트 1열로 strong frame과 체결하였다. 기둥과 보의 접합은 용접에 의한 완전강점으로 제작하였다. 접합부는 보의 전소성모멘트( $M_{pb} = 336\text{tf} \cdot \text{cm}$ )를 견딜 수 있도록 설계해 부재단부에 소성힌지가 발생하여도 견딜 수 있도록 하였다.

실험체의 변수는 이론적인 연구와 해석적인 연구<sup>7,8)</sup>를 통하여 파악된 P-Δ효과의 영향인자 중 그 효과가 크다고 판단이 되는 기둥과 보의 강성비 및 축력비를 적용하였다(표 3 참조).

실험체는 기본적으로 약한기둥-강한보의 개념을 적용하여 제작하였다. 단, 골조 양단의 기둥과 보의 강성비가 달라 한쪽 기둥재만이 기둥항복형이 되는 경우에 골조 거동도 고찰하기 위해 기둥 강성/보 강성 = 0.7이 되는 F2S1실험체를 기본형으로 하고 양쪽 기둥의 강성이 보 강성의 0.7배와 2.6배가 되는 F2S2실험체와 0.5배 2.6배가 되는 F2S3실험체를 제작하여 기둥과 보의 강성차이에 의한 골조의 거동과 안정성

표 1. 강재의 인장강도시험 결과

형강	위치	항복강도 (tf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (tf/cm <sup>2</sup> )	항복비	연신율 (%)
H-150×75×5×7	F	3.45	4.85	0.71	30
	W	3.39	4.81	0.70	29
H-100×75×3.2×4.5	F	3.26	4.63	0.70	29
	W	3.94	4.96	0.79	27
H-100×100×3.2×4.5	F	3.46	4.85	0.71	29
	W	3.52	4.57	0.77	27
H-125×125×6.5×9	F	3.35	4.83	0.69	30
	W	3.29	4.79	0.69	31

※ F : 플랜지, W : 웨브

표 2. 형강의 단주압축시험결과 (평균값)

형강	길이 (cm)	폭두께비	항복강도 (tf/cm <sup>2</sup> )	최대강도 (tf/cm <sup>2</sup> )
H-150×75×5×7	45.0	F: 5.3 W: 24.0	2.91	3.24
H-100×75×3.2×4.5	30.0	F: 8.3 W: 24.7	3.10	3.59
H-100×100×3.2×4.5	30.0	F: 11.1 W: 24.7	2.93	3.22
H-125×125×6.5×9	37.5	F: 6.9 W: 13.4	3.30	3.79

※ F : 플랜지, W : 웨브

을 고찰하고자 한다.

축력비는 실험체의 양쪽 기둥 중 단면이 큰쪽을 기준으로 0.1로 하였다. 하지만 각 실험체에 따라서 가려지는 축력의 절대값이 3.9tf과 10tf으로 달라지게 된다. 또한 좌, 우측 기둥의 크기가 다른 F2S2, F2S3 실험체의 경우 10tf의 축력이 가려져 단면이 작은 쪽 기둥의 경우에는 각각 0.25, 0.3의 축력비가 적용된다. 따라서 동일한 보 단면을 사용한 기둥항복형 골조에서 축력비의 변화가 P-Δ효과에 미치는 영향 또한 파악해 보고자 하였다.

### 2.2.2 가력 및 계측 계획

실험체의 가력을 위해서 100tf 성능의 오일잭 3대가 사용되었다. 골조의 기둥 상부에 각각의 오일잭을 양단 핀 지지로 설치, 축력(P1, P2)을 가력할 수 있도록 하였으며, 우측기둥 상단부 가력점에서 핀 거동을 할 수 있도록 오일잭을 설치하여 수평하중(H)을 가력하였다(그림 1 참조).

가력 순서는 각 기둥 중 단면이 큰 기둥 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 ( $\sigma_y$ )를 사용하였다.

단, 수평하중이 가력되면 수평방향 변위가 발생하여 상부의 축력 (P1, P2)은 정확하게 수직방향으로 가력되지 않는다. 따라서 매 가력 시 수평방향 변위를 측정하여 이에 따른 축력의 수직방향 분력과 수평방향 분력을 계산, 수직방향 분력이 0.1 ·  $P_y$ 로 일정하게 유지되도록 가력하였다.

그리고, 예상 최대수평하중의 60%까지는 수평하중값을 가력의 기준으로 하였으며, 그 이후에는 다이얼 게이지를 통하여 측정되는 골조의 수평변위를 가력의 기준으로 하여 가력종료시까지 가력실험을 수행하였다.

가력종료는 골조의 최대내력이 발생한 후 골조의 불안정

현상이 증가하였다고 판단이 되는 시점(수평변위 100mm 이상 또는 가력이 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 제어 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 각각 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 실험체 지점에서 측정된 기둥재의 변형도를 탄성이론에 근거한 모멘트-곡률관계에 적용하여 산정한 각 실험체의 기둥 지점모멘트와 실험시 계측된 지점변위를 이용해 산정한 지점 회전각 관계를 그림 2에서 그림 4까지 나타내었다. 그림에서 M[L]과 M[R]은 좌우측 기둥의 지점모멘트를 나타낸 것이다.

#### 3.1.1 지점 회전강성

그림에 나타난 바와 같이 모든 실험체에서 가력 초기에는 지점에 회전각이 거의 발생하지 않는 고정단에 가까운 거동을 보이고 있으며, 수평하중의 가력이 진전되면서 회전각의 발생

표 3. 골조 실험체 일람

실험체 명	기둥 길이(cm)	보 길이(cm)	기둥 부재	보 부재	기둥강성/보강성	축력 [축력비] (tf)	$M_{pc} / M_{pb}$
F2S1	150.0	300.0	C	D	0.7	3.9 [0.1]	0.5
F2S2			C		0.7	10.0 [0.25]	0.5
			A(가력방향)		2.6	10.0 [0.1]	1.4
F2S3			B		0.5	10.0 [0.3]	0.4
			A(가력방향)		2.6	10.0 [0.1]	1.4

※ A Type : H-125×125×6.5×9  
 B Type : H-100×75×3.2×4.5  
 C Type : H-100×100×3.2×4.5  
 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

과 더불어 일정값의 모멘트저항능력을 보이고 있다.

이는 실험체 계획시 지점을 핀지지로 가정하였으나 접합부의 회전강성이 예상보다 크게 나타나 발생한 현상으로 판단된다.

하지만 이러한 경우에도 단부에서는 탄성 구간에서부터 회전각이 발생하였으므로 지점의 거동을 완전 고정단이라고 볼 수는 없을 것으로 사료된다.

따라서 본 실험체에 적용된 지점은 핀 지점과 완전 고정단 사이에 해당하는 회전강성을 가진 것으로 사료된다.

### 3.1.2 지점 모멘트

지점의 변형도 변화를 통해 산정된 모멘트를 살펴보면 양단 기둥의 단면이 동일한 실험체(F2S1)에서는 양단 지점의 모멘트가 거의 동일하게 나타나고 있으나 기둥의 단면이 다른 실험체(F2S2, F2S3)에서는 작은쪽 단면(R)이 큰쪽 단면(L)에 비해 모멘트가 크게 나타났다.

이는 단면이 작은 기둥재에서 수평하중에 의한 모멘트가 단부의 항복에 미치는 현상이 크게 나타나 발생한 결과로 사료된다.

그리고, 모멘트가 일정치 이상으로 증가하게 되면 단면이 작은 쪽 기둥(R)과는 달리 단면이 큰쪽 기둥(L)에서는 모멘트가 감소하는 현상이 발생하였으며 이렇게 모멘트가 감소하는 기둥은 접합된 보 단부에서 항복이 발생하여 이러한 현상이 나타난 것으로 판단된다(그림 8, 9 참조).

그림에서 M[R]의 경우 모멘트의 기울기 증가가 나타나는

데 이는 단면의 초기 항복 이후 변형도 값을 탄성 이론에 근거한 모멘트-곡률관계에 적용하여 나타난 오차이며, 이러한 영향은 지점의 회전강성 및 지점의 모멘트 변화의 경향을 고찰하는데는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

### 3.2 수평하중-수평변위 관계

각 실험체의 수평하중(H)과 기둥 좌측 상단부 수평변위( $\Delta$ ) 관계를 그림 5에 나타내었다. 그리고, 수평하중(H)을 무차원화하기 위하여 실험체와 동일한 골조에 수평하중만이 작용하였다고 가정할 때 기둥재의 기둥 축력( $0.1P_y$ )에 영향을 고려한 전소성모멘트(최대모멘트 내력,  $M_{pca}$ )를 발생시키는 순수 수평하중( $H_p$ )을 사용하고, 수평변위( $\Delta$ )는  $H_p$  작용시 기둥에 발생하는 수평변위( $\Delta_p$ )를 사용해 무차원화한 결과를 그림 6에 나타내었다. 단, 이때 전소성모멘트 산정을 위해서는 인장강도 시험 결과를 적용하였다.

#### 3.2.1 최대수평하중

각 실험결과에서 최대 수평하중은 실험체의 기둥 단면2차 모멘트에 비례하였다(그림 5 참조). 즉 기둥의 단면2차모멘트가 가장 큰 F2S2실험체 ( $I_x$  평균값 =  $536\text{cm}^4$ )의 경우 3.9tf로 가장 높은 최대수평하중을 나타내고 있으며, 기둥의 단면2차모멘트가 가장 작은 F2S1실험체 ( $I_x$  평균값 =  $225\text{cm}^4$ )에서는 2.9tf로서 가장 낮은 최대수평하중값을 나타내고 있다.

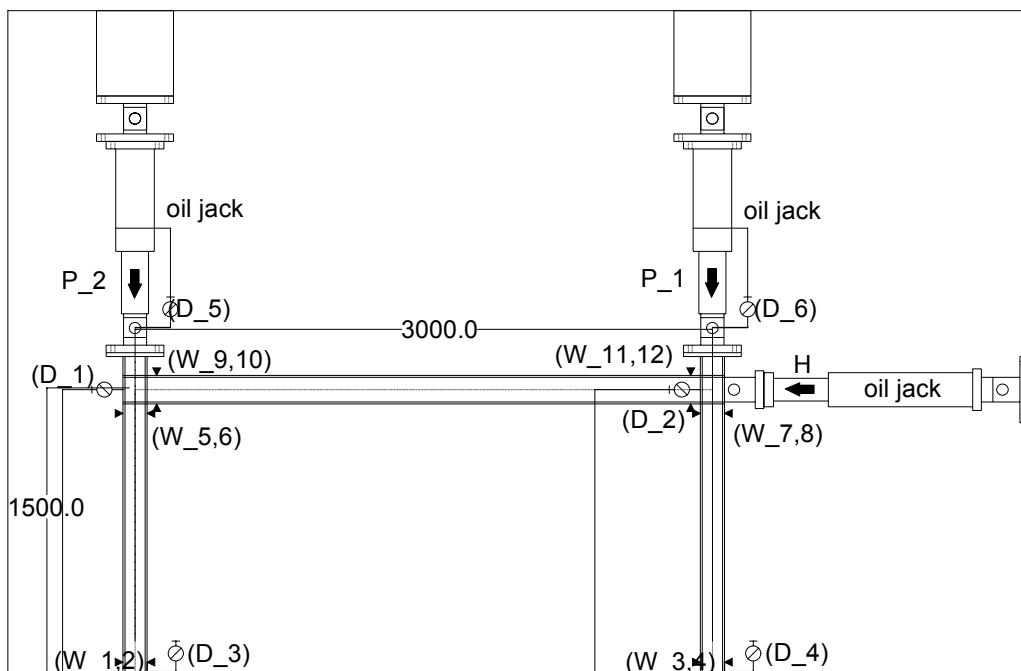


그림 1. 골조 실험체의 가력 및 계측 상황도

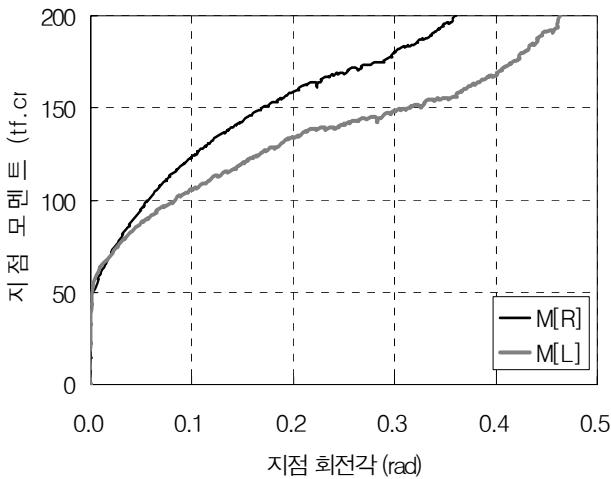


그림 2. F2S1 실험체의 지점모멘트-회전각 관계

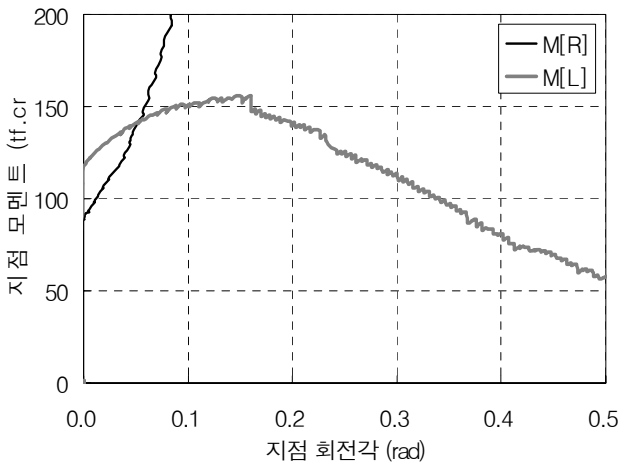


그림 3. F2S2 실험체의 지점모멘트-회전각 관계

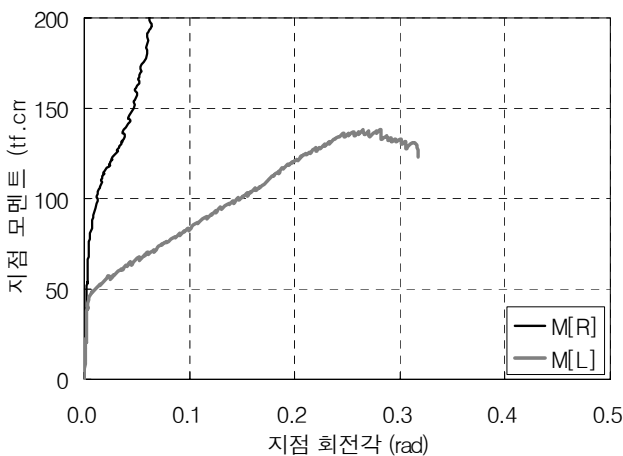


그림 4. F2S3 실험체의 지점모멘트-회전각 관계

그러나  $H_p$  및  $\Delta_p$ 로 무차원화 한 경우에는 오히려 기둥의 강성이 가장 낮은 F2S1 실험체에서 수평하중의 비가 가장

크게 나타났다 (그림 6 참조).

이것은 골조의 거동에 미치는 P-Δ효과의 영향으로 나타난 결과라 사료된다. 즉, 기둥에 가력된 축력이 3.9tf으로 작은 F2S1 실험체에서는 P-Δ효과가 크지 않아 골조의 붕괴기구에 수평하중의 영향이 많이 작용한 것으로 판단된다. 그러나 축력이 10tf으로 큰 나머지 실험체에서는 골조의 붕괴기구에 P-Δ효과의 영향이 크게 작용하여 수평하중비가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

그러므로 축력비에 따른 P-Δ효과에 의해 골조의 붕괴기구 형성에 수평하중이 기여하는 비율은 달라진다고 사료된다.

### 3.2.2 최대내력 이후 골조의 거동

최대내력 도달 이후의 거동을 살펴보면, 기둥에 가력된 축력의 절대값이 작은 F2S1실험체(3.9tf)에서는 최대수평하중 도달 이후 수평하중의 저하율이 약 0.5%로 매우 낮게 나타났으나 축력의 절대치가 10tf인 F2S2, F2S3 실험체에서는 최대수평하중 도달 이후 수평하중의 저하율이 최대 1.6%로서 F2S1의 결과에 비해 약 3배 정도 크게 나타나고 있다(그림 5 참조).

이러한 현상은 P-Δ효과가 최대수평하중 도달 이후 골조의 안정성에 영향을 미친 결과라고 사료되며, 유사한 조건의 보항복형 골조의 결과와 비교하여 내력의 감소가 다소 급격하게 나타났다.

이것은 동일한 수평변위가 발생한 경우라 하더라도 가력된 축력이 크고 기둥의 강성이 작은 경우 P-Δ효과에 의한 모멘트증폭 현상은 크게 나타나므로 기둥에 가력된 축력이 큰 실험체에서는 최대내력 도달 이후 P-Δ효과에 의한 모멘트증폭 현상이 크게 발생하여 골조의 불안정 현상에 영향을 미친 것으로 판단된다.

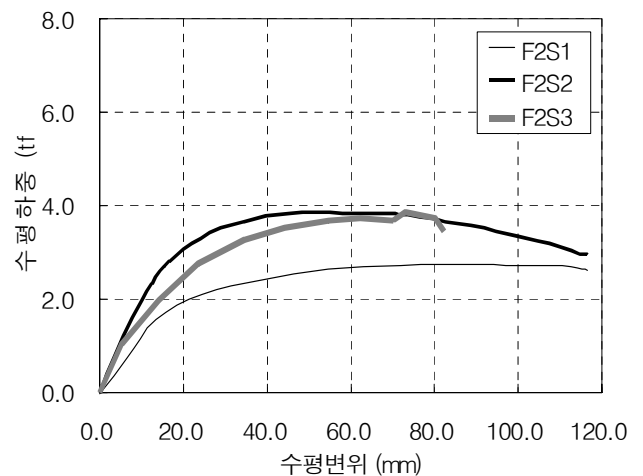


그림 5. 실험체의 수평하중-수평변위 관계

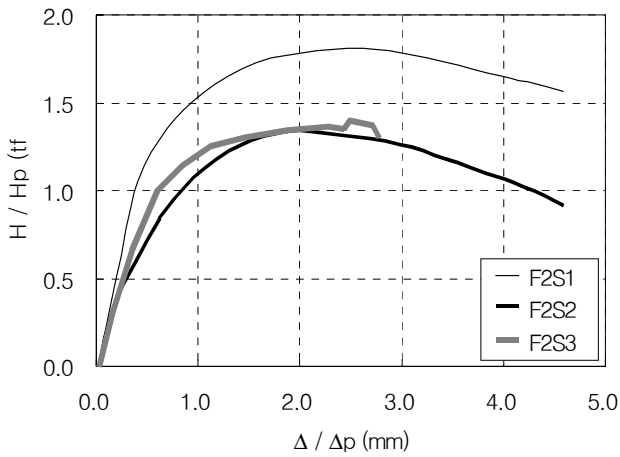


그림 6. 실험체의 H/Hp-Δ/Δp 관계



사진 1. F2S3 실험체의 기동재 좌굴

### 3.2.3 최대수평하중 시 수평변위

각 실험체 중 F2S3 실험체는 최대내력 이후 H-100×75×32×4.5 기둥에서 약축방향으로 좌굴이 발생하여 더 이상 가력이 진전되지 못하였다(사진 1 참조). 이를 제외한 다른 실험체에서는 가력종료시까지 면외좌굴의 영향은 관찰되지 않았다.

최대수평하중 시 수평변위를 살펴보면 이는 기둥의 강성과 축력에 영향을 받고 있는 것으로 사료된다. 각 실험체의 최대수평하중 시 수평변위값을 살펴보면 가력된 축력이 10.0tf인 F2S2, F2S3 실험체에서는 약 60mm, 축력이 3.9tf인 F2S1 실험체는 약 80mm 정도의 수평변위를 나타내고 있다.

따라서 가력된 축력이 클수록 최대수평하중 도달시 수평변위값은 작아지고 있다는 것을 알 수 있다. 이 역시 앞에서 설명한 것처럼 가력된 축력이 클수록 P-Δ 효과의 영향이 증가

하여 골조의 불안정 현상을 촉진하여 나타난 현상으로 사료된다.

### 3.3 수평하중-보 단부 변형도 관계

각 실험의 수평하중과 보 단부의 변형도 관계를 그림 7에서 그림 9까지 나타내었다. 그림에서 강재의 항복변형도(=0.0015)를 점선으로 표현하였다.

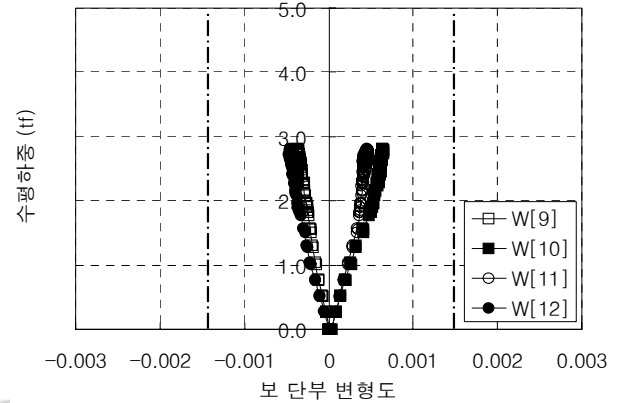


그림 7. F2S1 실험체의 수평하중-보 단부 변형도 관계

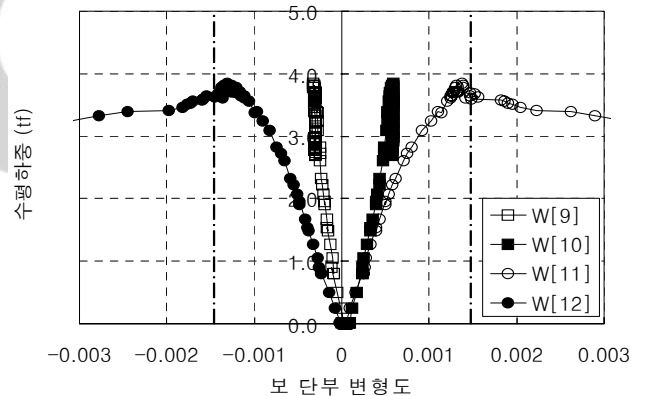


그림 8. F2S2 실험체의 수평하중-보 단부 변형도 관계

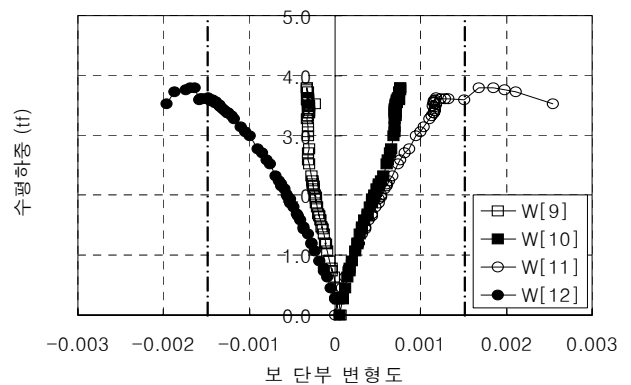


그림 9. F2S3 실험체의 수평하중-보 단부 변형도 관계

### 3.3.1 기둥 강성이 보 강성보다 모두 작은 경우

양단의 기둥 크기가 동일한 F2S1 실험체에서는 최대내력 도달 시점까지 보단부에서는 전혀 항복현상이 발생하지 않고 있다. 이것은 기둥의 강성이 보의 강성에 비해 현저하게 작은 경우이므로 기둥 단부의 항복으로 골조의 최대내력이 결정된 것으로 판단된다.

### 3.3.2 기둥 강성이 보 강성보다 일부 큰 경우

양단의 기둥의 단면이 다른 F2S2, F2S3 실험체는 보의 강성보다 낮은 강성을 가지는 작은 쪽 단면(R)의 기둥과 접한 보단부(gauge 9, 10)는 골조의 가력종료시까지 탄성구간에 머무르고 있지만 보의 강성보다 높은 강성을 가지는 큰쪽 단면(L)과 접한 보단부(gauge 11, 12)에서는 최대내력발생 시점에서부터 보단부의 항복이 시작되고 있다.

그리고, 보의 항복현상이 발생한 F2S2, F2S3 실험체의 경우 보의 항복현상이 발생한 시점이 골조의 최대내력 발생 시점과 거의 일치하고 있다. 따라서 보 단부의 항복현상은 1층 1스팬 단순지지된 비가새 골조의 최대내력 및 안정성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

### 3.4 수평하중-기둥상부 변형도 관계

각 실험의 수평하중과 기둥 상부 변형도 관계를 그림 10에서 그림 12까지 나타내었다. 그림의 점선은 강재의 항복변형도를 나타낸다.

#### 3.4.1 양단 기둥이 동일한 경우

양쪽의 기둥 단면이 동일하며 보 강성에 비해 작은 F2S1 실험체는 양쪽 기둥의 압축을 받는 부위에서 항복현상을 나타내고 있다.

#### 3.4.2 양단 기둥이 다를 경우

양쪽의 기둥 단면이 다른 F2S2, F2S3 실험체에서는 기둥의 단면이 작은 쪽(gauge 5, 6)에서 항복현상이 진전되었으며, 다른 실험체와는 다르게 전체골조의 최대수평하중 도달 이전에 단면이 작은 쪽 기둥의 변형도가 항복변형도를 초과하고 있다.

이러한 현상은 동일 골조내에서도 각기 기둥의 강성과 보의 강성비에 따라서 항복현상의 발생이 다르게 일어날 수 있음을 나타내고 있으며, 기둥항복형 골조라 하더라도 기둥의 단면이 다른 경우 단면이 작은 쪽 기둥의 항복현상이 바로 골조의 항복현상과 일치하지 않는 것을 알 수 있다.

그러므로 기둥의 항복현상은 보와 기둥의 강성비 및 전소

성 모멘트비에 따라서 골조의 거동 및 안정성에 미치는 영향이 달라진다고 사료된다.

### 3.5 P-Δ 효과 분석

각 실험의 수평하중에 의한 1차 모멘트(Mf)와 P-Δ효과를 고려한 2차 모멘트(Ms)를 그림 13에서 그림 15까지 나타내었다. 그리고 수평변위 80mm시에 1차 모멘트와 2차 모멘트의 차이를 그림에 표시하였다.

본 논문에서는 실험에서 적용된 1차 모멘트와 2차모멘트를 다음과 같이 정의 하였다.

$$1차 모멘트 : M_f = (H \times L)/2 \quad (1)$$

$$2차 모멘트 : M_s = (H \times L)/2 + (P \times \Delta) \quad (2)$$

- 여기서, H = 수평하중 (tf)
- L = 기둥재 길이 (cm)
- P = 축력 (tf)
- Δ = 수평변위 (cm)

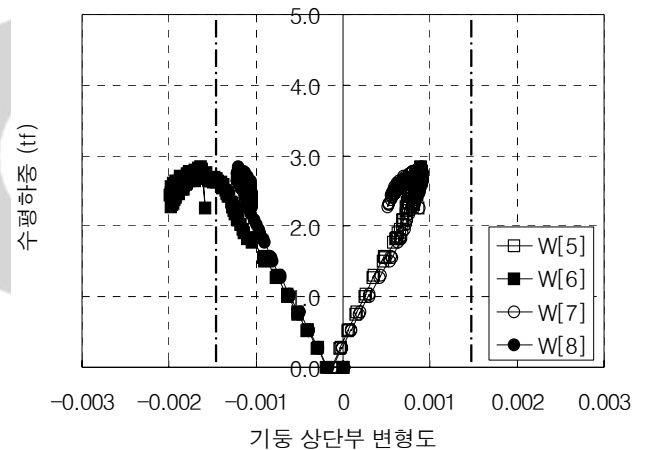


그림 10. F2S1 실험체의 수평하중-기둥단부 변형도 관계

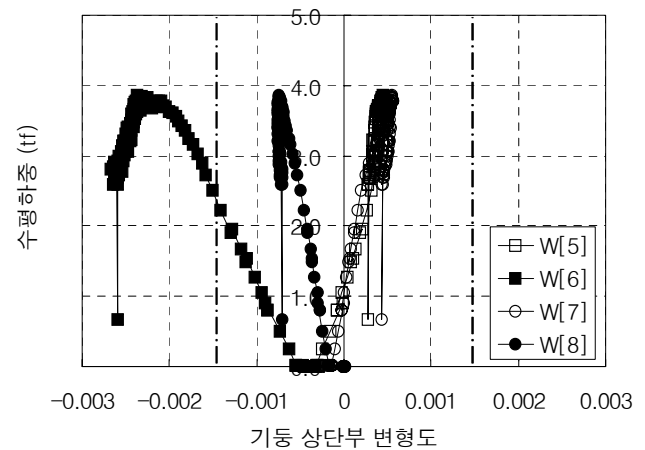


그림 11. F2S2 실험체의 수평하중-기둥단부 변형도 관계

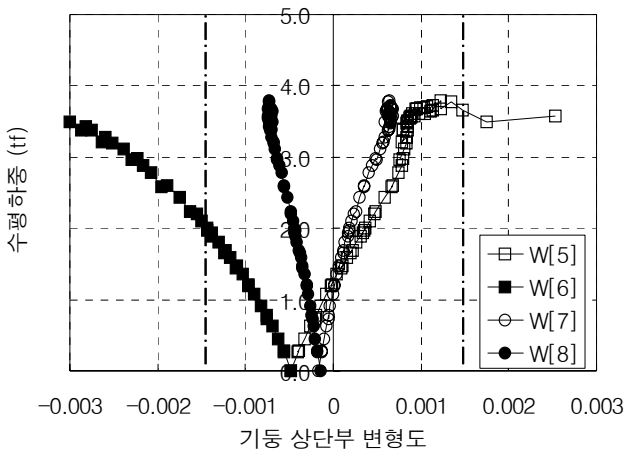


그림 12. F2S3 실험체의 수평하중-기둥상단부 변형도 관계

본 실험체에 축력(P)만 가려졌을 경우 2차효과를 고려하지 않으면 골조에 모멘트가 발생하지 않는다. 따라서 이런 경우 모멘트는 전적으로 수평하중(H)에 의해서 발생하게 되며 이를 양쪽 기둥이 균등하게 부담한다고 가정하여 1차 모멘트를 식(1)과 같이 정의하였다. 2차 모멘트는 1차 모멘트에 P- $\Delta$ 효과에 의한 추가 모멘트를 합산하여 결정하였다.

그리고 P- $\Delta$  모멘트를 작은쪽 기둥재 축력( $0.1P_y$ )의 영향을 고려한 기둥재의 최대모멘트 내력( $M_{pca}$ )으로, 수평변위( $\Delta$ )를  $H_p$  작용시 기둥에 발생하는 수평변위( $\Delta_p$ )로 무차원화하여 그림 16에 나타내었다.

### 3.5.1 P- $\Delta$ 모멘트

모든 실험체에서 1차 모멘트와 2차 모멘트의 차이, 즉 P- $\Delta$  모멘트( $M_s - M_f$ )는 수평변위가 증가할수록 점차 커지고 있다(그림 13에서 15 참조). 그리고 가려진 축력의 절대값이 클수록 P- $\Delta$  모멘트는 커지는 것으로 나타났다.

수평변위 80mm 일 때 P- $\Delta$  모멘트( $M_s - M_f$ )<sub>80</sub>를 살펴보면 가려진 축력이 3.9tf인 F2S1 실험체의 경우 수평변위 80mm 일 때 31tf·cm를 나타내나 가려진 축력이 10tf로서 동일한 F2S2 실험체와 F2S3 실험체의 결과는 약 80tf·cm를 나타내고 있다. 따라서 가려진 축력에 따라서 P- $\Delta$  모멘트가 영향을 받고 있음을 알 수 있다

그러므로 비가새 골조에 있어서 P- $\Delta$ 효과는 부재의 강성 및 수평변위도 영향을 미치고 있지만 가려진 축력의 절대값 역시 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

그리고 P- $\Delta$  모멘트가 80tf·cm로 동일하게 나타났던 F2S2 실험체와 F2S3 실험체의 경우 P- $\Delta$  모멘트가 골조의 거동에 미치는 영향은 기둥의 강성이 낮은 F2S3 실험체에서 크게 나타났다(그림 16 참조). 따라서 동일한 P- $\Delta$  모멘트라 하더라도 기둥의 강성이 다를 경우 골조의 거동에 미치는 영

향은 달라지는 것으로 판단된다.

### 3.5.2 최대내력 이후 모멘트의 변화

1차 모멘트의 경우 최대내력에 도달 이후 감소하고 있는 경향을 나타낸다. 하지만 2차 모멘트의 경우에는 그 경향이 감소하지 않고 일정한 수준을 유지하거나 지속적으로 증가하고 있는 경향을 나타내고 있다.

그러므로 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 판단된다. 이러한 부재 내부의 응력상태는 골조의 붕괴기구와 관련된 소성힌지의 발생과 직결되어 있으므로 P- $\Delta$ 효과를 명확하게 평가하여 부재의 소성화 현상을 정확히 파악하는 것이 실제 골조의 안정성과 붕괴기구를 파악하는데 있어서 매우 중요한 요인이 될 수 있다고 사료된다.

### 3.5.3 P- $\Delta$ 효과와 수평변위 관계

수평변위와 P- $\Delta$ 효과의 관계를 살펴보면 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 있다.

본 실험에 국한되어 평가된 상기의 수치가 절대적인 의미를 가지기는 어려우나 일정 크기 이하의 수평변위 발생시에는 이러한 수평변위가 P- $\Delta$ 효과에 미치는 영향은 매우 미미하다는 것을 알 수 있다.

현재 국내의 설계기준에서는 일본의 LSD와 Eurocode에서와 같은 P- $\Delta$ 효과를 고려해야 하는 경우에 대한 구체적인 지침이 없는 실정이므로(단순히 가새골조의 경우라고만 언급하고 있음) 이러한 수평변위와 P- $\Delta$ 효과의 관계에 대한 구체적인 지침의 제시가 필요하다고 생각된다.

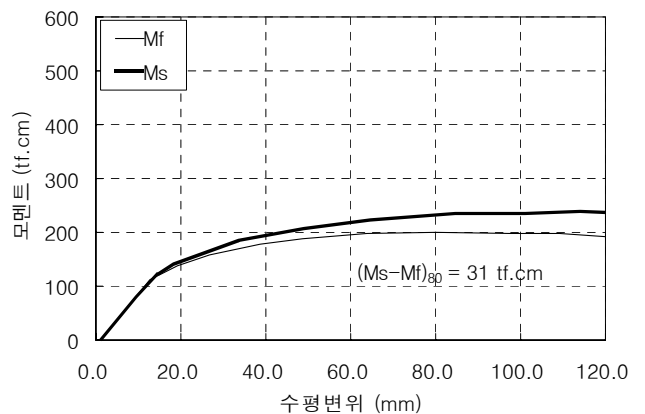


그림 13. F2S1 실험체의 P- $\Delta$  효과



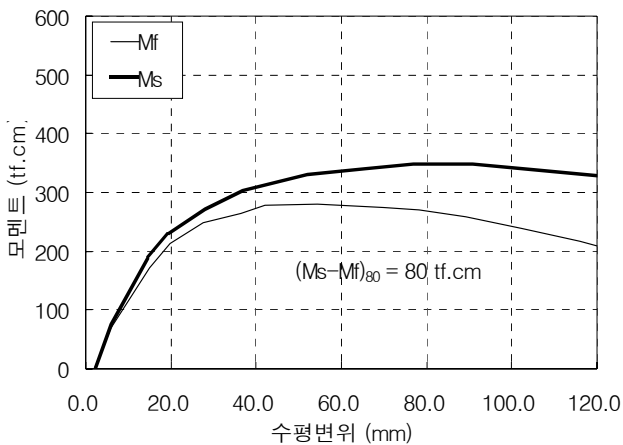


그림 14. F2S2 실험체의 P-Δ 효과

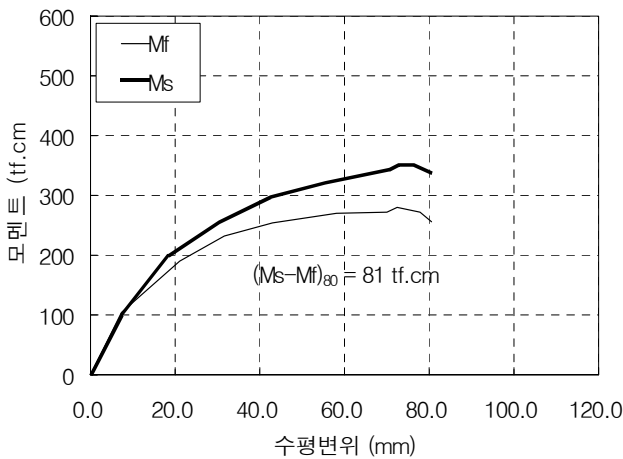


그림 15. F2S3 실험체의 P-Δ 효과

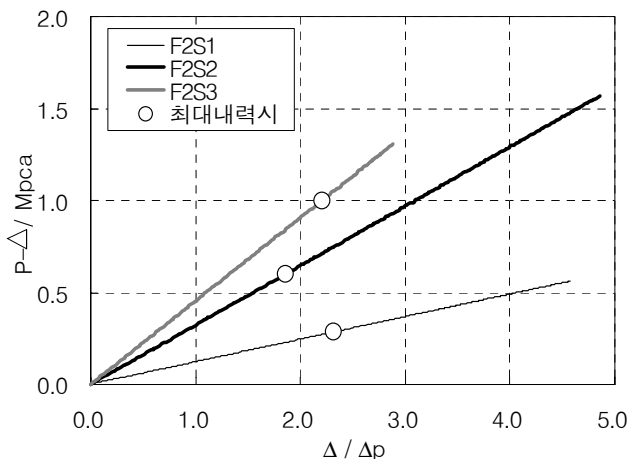


그림 16. 기둥에 미치는 P-Δ효과 비교

### 3.6 층강성(story stiffness)의 변화

각 실험의 수평하중과 그에 따른 수평변위관계 및 P-Δ효과

의 영향을 고려하여 산정한 층강성(story stiffness)과 수평 변위비를 그림 17에 나타내었다. 본 연구에 적용된 층강성은 수평하중에 대한 층(story)의 저항능력을 나타내는 지수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\text{층강성} = \frac{\sum H + \frac{\sum P \cdot \Delta}{L}}{\Delta} \quad (3)$$

#### 3.6.1 최대 층강성

각 실험체별 최대 층강성은 양쪽 기둥 단면강성의 평균값에 비례하여 증가하였다. 즉 단면의 기둥 강성의 평균값이 가장 큰 F2S2 실험체에서 0.173으로 최대 층강성이 가장 크게 나타나고 있으며, 기둥 강성의 평균값이 가장 작은 F2S1 실험체에서 0.113으로 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 따라서 본 실험에 적용된 실험체와 같이 지점이 고정단이 아닌 비가새 골조의 경우 수평하중에 저항하는 능력은 기둥 강성의 평균값에 따라서 달라지는 것으로 판단된다.

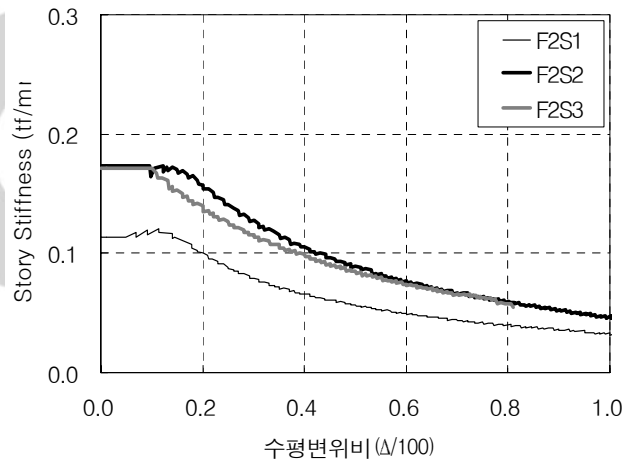


그림 17. 실험체의 층강성

#### 3.6.2 층강성의 변화

모든 경우에서 골조의 거동이 탄성 구간일 경우에는 층강성이 거의 일정한 값을 유지하나 골조의 거동이 비탄성역에 들어서면서 층강성이 저하되었다. 이러한 골조의 비탄성 거동에 의한 층강성의 저하 현상은 초기 탄성구간의 층강성이 높은 실험체일수록 급격하게 발생하고 있다. 이것은 P-Δ효과의 영향으로 나타난 결과라 사료되며, 최대수평하중 도달 이후의 골조에 거동과 매우 유사한 결과를 나타내고 있다.

따라서 층강성은 골조의 소성화가 진행되어 각 부재의 강성이 낮아지면 함께 저하되는 것으로 사료된다. 이러한 골조의 비탄성 거동에 의한 층강성 저하현상은 층강성 개념을 적용하여 제안된 모멘트중폭계수(부재의 내력[M]과 변위[Δ]는

직선적으로 비례 $[M=ST \cdot \Delta]$ 한다. 즉 내력과 변위관계를 정의하는 강성 $[ST]$ 은 하나의 상수로서 존재한다)에 반하는 결과로서 부재의 내력과 변위가 일정한 상수가 아니라 변화하게 되는 골조의 비탄성 거동시에는 제안된 모멘트중폭계수의 적용에 타당성을 가지기 어렵다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이상의 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실험결과 수평하중이 비가새 골조의 거동에 미치는 효과는 P- $\Delta$ 효과에 영향을 받는다.
- (2) 축력의 절대값이 큰 실험체에서 최대수평하중 도달시 수평변위값은 작아지며, 이후 수평하중의 감소는 보강복형 골조에 비해 다소 급격하게 나타난다.
- (3) 실험결과 기동향복형 비가새 골조의 거동 및 붕괴기구 형성에 P- $\Delta$  모멘트가 미치는 영향 및 1차 모멘트와 2차 모멘트의 차이( $M_s - M_f$ )는 가력된 축력의 절대값이 클수록 커지며, 동일한 P- $\Delta$  모멘트라 하더라도 골조의 강성에 따라 그 영향은 달라진다.
- (4) 골조의 거동이 비탄성역에 들어서면 층강성은 일정상수 값을 유지하지 못하고 저하되게 되므로 국내 설계식에 세 제안된 모멘트중폭계수의 경우 비탄성 거동을 반영하기 어렵다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002학년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

#### 참고문헌

김희동, 이명재, “보강복형 비가새 골조의 P- $\Delta$  영향에 관한 실험적 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제13권 제4호, 2001. 8. pp. 363-372

대한건축학회, 강구조한계상태설계 기준 및 해설, 대한건축학회, 1997.

C.G.Salmon, J.E.Johnson, Steel Structures, Harper Collins College Publishers, 1996.

T.G.Galambus, Structural Members and Frames, Prentice hall, 1968

W.F.Chen, E.M.Lui, Stability Design of Steel Frames, CRC press, 1991.

W.F.Chen, E.M.Lui, Structural Stability, ELSEVIER, 1987

(접수일자 : 2003. 4. 1 / 심사일 2003. 5. 1 / 심사완료일 2003. 7. 18)