

# 축력비 및 부재강성에 따른 강구조 대칭형 비가새 골조의 열화특성

## Degradation Characteristics of Symmetric Unbraced Steel Frames According to Variations of Member Stiffness and Axial ratio

이 명 재<sup>1)</sup> · 김 희 동<sup>2)</sup> · 임 유 하<sup>3)</sup>  
*Lee, Myung Jae · Kim, Hee Dong · Lim, Yoo Ha*

**요약** : 본 연구의 목적은 강구조 비가새 골조의 열화특성에 영향을 미치는 구조적 인자들을 해석적인 방법으로 평가하고 설계 초기 단계에서 열화 현상을 근사적으로 평가할 수 있는 방안을 제안하는데 있다. 해석적 연구를 위해 arc length method를 적용한 2차원 2차 수정 소성힌지 해석법을 적용하였으며, 단층 단스팬 골조와 다층 단스팬, 다층 다스팬 골조에 대해 해석을 수행하였다. 해석의 주요 변수로는 축력비와 기둥 보의 강성변화를 적용하였다. 연구 결과 무차원 열화강성은 부재의 강성과 축력비에 모두 영향을 받는 것으로 나타났으나, 축력비가 열화강성에 주는 영향이 더욱 큰 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 축력비를 변수로 한 열화 강성 평가식을 제안하였다.

**ABSTRACT** : This study has two objectives: (1) to evaluate the degradation characteristics of symmetric unbraced steel frames by using analytical approach, and (2) to suggest equation which can approximately estimate the effect of degradation during the schematic design stage. For the analytical approach, the refined plastic hinge method with an arc length algorithm was adopted. The subject of analysis was one story one-bay, multistory one-bay, and multistory three-bay unbraced steel frames. The main parameters of the analytical approach include the stiffness ratio of column to beam and the axial force ratio. The study led to the following conclusions. The normalized stiffness of degradations is affected by both stiffness ratio of column to beam and the axial load ratio; however, the major influence on degradations is the axial force ratio. The equation, which can approximately estimate the effect of degradation, was suggested together with the research results.

**핵심용어** : 열화해석, 무차원 열화강성, 비탄성해석, 축력비

**KEYWORDS** : degradation analysis, normalized stiffness of degradation, inelastic analysis, axial force ratio

### 1. 서론

구조물이 중력하중과 수평하중을 동시에 받게 될 경우 최대 수평하중 이후에는 내력이 감소하면서 변위가 증가하는 거동을 하게 되며, 이러한 현상을 구조물의 열화(Degradation)라고 한다. 이와 같은 열화 현상은 재료적 항복현상과 기하학적 비선형에 의한 추가하중 등으로 설명할 수 있으며, 여러 가지 구조적 변수에 의해 다양한 열화유형을 관찰할 수 있다.

최근에는 건물의 요구 성능수준을 고려한 설계를 해야 하는 필요성이 대두되고 있는데 이러한 측면에서 보면 최대내력 이후의 급격한 구조물 불안정 현상은 적절한 방법을 통하여

방지되어야 할 필요가 있다.

그러므로 강구조 골조 설계 시 최대내력 이후 골조의 급격한 불안정 현상을 적절하게 예측하고 이를 설계에 반영하는 것은 중요한 부분이라고 판단된다.

하지만 최대내력 이후 거동을 해석적으로 파악하기 위해서는 비선형 비탄성 해석과 함께 최대내력 이후 하중 감소 구간의 거동을 파악할 수 있는 해석법을 적용해야 하나 이러한 해석을 구조물의 설계 초기단계에 적용하는 것은 설계 업무의 현실을 고려할 때 쉽지 않다.

이번 연구에서는 최대내력 이후 골조의 거동에 관련된 기존 연구와 다르게 열화에 영향을 미치는 구조적요인을 해석적

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

2) 현대제철 차장, 공학박사, 건축구조기술사(drkimhd@naver.com)

3) 교신저자, 중앙대학교 대학원 석사

(Tel: 02-826-1776, E-mail: dladbkg@naver.com)

본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

방법으로 규명하여, 설계초기단계에 급격한 열화를 방지할 수 있는 기본 자료를 제공하는 데 목적을 두었다.

기본적으로 강구조 비가새 골조는 축력과 수평변위에 큰 영향을 받게 되는데 최근 구조물의 고층화 경향을 고려하면 기둥재에 작용하는 축력과 이에 따른 축력비가 골조의 거동에 주는 영향을 파악해야 할 필요성이 있다. 또한 골조는 수직하중 뿐 아니라 수평하중에 의한 영향도 작용하는데 수평력에 대한 저항은 기둥재와 보부재의 강성에 따라 결정되므로 이번 연구에서는 기둥과 보의 강성과 축력비를 주요 변수로 선정하였다.

## 2. 열화 해석

### 2.1 해석대상 골조

이번 연구에서는 대칭형 2차원 비가새 골조(수평하중에 대한 별도의 저항시스템 없이 기둥과 보의 강성만으로 수평하중에 저항하는 시스템)를 해석 대상 골조로 선정하였다. 그리고 층수에 따라 단층골조와 다층 골조로 분류하였다. 단층골조는 기둥부재, 보부재의 강성에 따라서 기둥항복형 및 보항복형 골조로 분류하였고 다층 골조는 5층과 10층 골조에 대해 스펀수와 축력비, 기둥재의 강성에 따라 골조를 분류 하였다.

기본 골조의 스펀은 X방향으로 12,000mm를 적용하였으며, Y방향으로는 4,000mm를 적용하였다. 지점조건은 고정 단으로 하였고 기둥-보 접합방식은 강점으로 하였다. 해석 대상 골조의 모든 부재는 강축으로 힘을 받는 것을 기본으로 하였다. 하중은 수평하중과 수직하중이 각 절점에 작용하는 절점하중으로 고려하였다.

해석에 적용된 부재 단면은 해석 결과의 상호 비교를 위해 가능한 동일 단면이 적용될 수 있도록 하였다. 다만, 층수에 따라 전달되는 하중에 무리가 없도록 단면을 조정하였다. 이번 연구에 적용된 부재 단면은 표 1과 같다.

표 1. 해석대상 골조 단면

구분	보부재 (SHN400)	기둥부재 (SHN490)
단층 단스팬	H-446×199×8×12	H-350×350×12×19
5층 1스팬	1-3층 H-594×302×14×23	1-3층 H-400×408×21×21
	4-5층 H-600×200×11×17	4-5층 H-350×350×12×19
5층 3스팬	1-3층 H-594×302×14×23	1-3층 H-400×408×21×21
	4-5층 H-606×201×12×10	4-5층 H-350×350×12×19
10층 1스팬	1-3층 H-808×302×16×30	1-3층 H-458×417×30×50
	4-6층 H-708×302×15×28	4-6층 H-428×407×20×35
10층 3스팬	7-9층 H-594×302×14×23	7-9층 H-400×408×21×21

단, 이번 연구에서는 선정된 변수들의 영향을 명확히 파악하기 위해 타 요소의 영향을 배제하였으며 이러한 측면에서 단면이 전소성 상태에 도달할 때 까지 판 요소의 국부좌굴이 발생하지 않는 것을 가정하여 해석적 연구를 수행하였다.

### 2.2 해석방법 및 주요변수

구조물의 비탄성, 비선형 거동 고려 및 최대내력 이후의 거동 파악이 가능하도록 arc length method(Crisfield, 1983)를 적용한 2차원 2차 수정소성힌지해석법(second order refined plastic hinge method : Kim, 1998)을 사용하였다. 본 연구에 적용된 해석 프로그램은 선행된 연구를 통하여 실험 및 해석적 결과와 비교, 그 타당성이 검증되었다(Kim, 2009).

표 2. 단층 골조 해석대상 변수

CASE	기둥 길이 (mm)	보 길이 (mm)	축력비	$\Sigma \frac{(I_c/L_c)}{(I_b/L_b)}$	
Case 1	101	4000	0.35	0.35	
	102			2000	0.70
	103			3000	1.05
	104			4000	1.40
	105			5000	1.76
	106			6000	2.11
	107			7000	2.46
	108			8000	2.81
	109			9000	3.16
	110			10000	3.51
	111			11000	3.86
	112			12000	4.21
Case 2	201	12000	0.35	16.85	
	202			1000	8.43
	203			2000	5.62
	204			3000	4.21
	205			4000	3.37
	206			5000	2.81
	207			6000	2.41
	208			7000	2.11
	209			8000	1.87
	210			9000	1.69
	211			10000	1.53
	212			11000	1.40

표기예 : 2 0 1  
 기둥 또는 보길이  
 case별 분류 번호

### 2.2.1 단층 골조

단층 골조의 주요 변수는 부재 강성 변화를 적용하였다. 부재 강성을 변수로 두는 여러 가지 방법 중 실무 엔지니어들에게 설계 초기 단계에 활용 가능한 정보 제공을 목적으로 하는 본 연구는 실무자 입장에서 직관적으로 받아들이기 쉬운 부재 길이를 변수로 두었다.

단층 골조의 해석대상 변수는 표 2와 같다.

기둥 길이를 동일하게 하고 보 길이를 변화 시키는 방법으로 기둥재 강성을 변수로 둔 Case1, 보 길이를 동일하게 하고 기둥 길이 변화에 의해 기둥재 강성을 변수로 둔 경우를 Case2로 하였다. 축력비는 모든 변수에 일정하게 0.35로 하였다.

표 3. 5층 골조 해석대상 변수

CASE	축력비	기둥 길이 (mm)	보 길이 (mm)	$\Sigma \frac{(I_c/L_c)}{(I_b/L_b)}$
5134	0.3	4000	12000	1.55
5135		5000		1.24
5136		6000		1.03
5144	0.4	4000		1.55
5145		5000		1.24
5146		6000		1.03
5154	0.5	4000		1.55
5155		5000		1.24
5156		6000		1.03
5164	0.6	4000		1.55
5165		5000		1.24
5166		6000		1.03
5334	0.3	4000	12000	1.55
5335		5000		1.24
5336		6000		1.03
5344	0.4	4000		1.55
5345		5000		1.24
5346		6000		1.03
5354	0.5	4000		1.55
5355		5000		1.24
5356		6000		1.03
5364	0.6	4000		1.55
5365		5000		1.24
5366		6000		1.03

표기에 : 5 1 3 4  
 기둥길이 (4000: 4 ~ 6000: 6)  
 축력비 (0.3: 3 ~ 0.6: 6)  
 다층골조 스패수 (단스팬: 1, 3스팬: 3)  
 다층골조 층수 (5층: 5, 10층: 10)

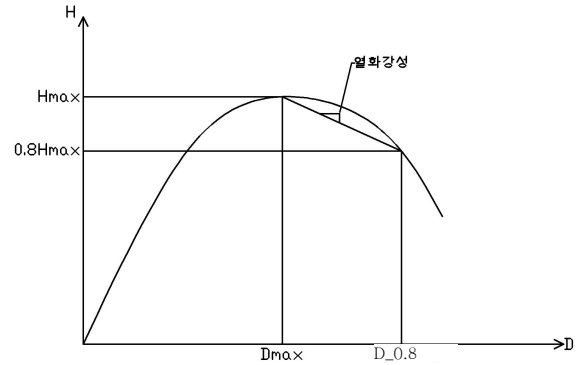


그림 1. 열화강성 개념도

1층 골조의 변수명 중 첫 자리 숫자는 case별 분류번호이고 뒷자리 숫자는 기둥 또는 보 길이를 나타낸다. 예를들어 101은 Case1의 보 길이 1,000mm를 뜻하며 201은 Case2의 기둥 길이 1,000mm를 뜻한다.

### 2.2.2 다층 골조

다층 골조는 축력비와 기둥재의 강성을 주요 변수로 선정하였다. 단층 골조와 다른 점은 스패수의 변화가 골조의 거동에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 단스팬과 3스팬 골조로 나누어 연구를 진행하였다. 5층 골조의 해석대상 변수는 표 3과 같으며 10층 골조의 모든 변수는 5층 골조와 동일하다.

적용된 축력비는 동일 기둥열에 작용하는 모든 축방향 절점 하중의 단순합에 의한 최하층 기둥재의 축력비를 의미하며, 저축력 0.3에서 고축력 0.6까지 4개의 축력비 경우를 변수로 선정하였다.

그리고 기둥재 강성은 단층골조 해석결과를 바탕으로 최하층 기둥 길이를 1,000mm 단위로 변화시키는 방법으로 각 축력별로 보-기둥 강성비( $\Sigma \frac{(I_c/L_c)}{(I_b/L_b)}$ ; 보의 강성에 대한 기둥의 강성비) 1.55에서 1.03까지 3가지 경우를 변수로 선정하였다.

고층 골조의 변수명은 층수-스팬수-축력비-기둥길이 순이다. 예를 들어 5134는 5층 1스팬 축력비 0.3, 기둥 길이가 4,000mm인 골조이다.

### 2.2.3 해석 시 적용가정

비가새 골조의 열화유형을 고찰하기 위해 수행된 해석에 적용된 가정들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 골조는 2차원 골조를 그 대상으로 하였으며, 골조의 거동 역시 2차원 거동을 가정하였다. 따라서 면외변형(국부좌굴, 횡좌굴등)의 영향은 없는 것으로 하였다.
- (2) 강재의 응력-변형도 거동에서 변형도 경화(strain

표 4. 단층 골조 해석결과

CASE	$H_{max}$ (kN)	$D_{max}$ (mm)	초기강성 (N/mm)	열화강성 (N/mm)	
Case 1	101	417.9	33.7	21073	792
	102	408.4	42.0	21413	825
	103	403.0	43.9	19818	809
	104	403.2	44.7	18344	825
	105	402.2	45.1	17082	825
	106	400.9	46.0	16053	820
	107	401.6	45.7	15198	823
	108	397.8	51.3	14478	828
	109	396.0	50.3	13863	804
	110	393.8	51.1	13331	791
	111	392.1	52.4	12869	789
112	389.9	54.4	12461	787	
Case 2	201	1594.8	15.9	345842	3502
	202	825.1	28.9	77314	1638
	203	537.7	41.3	27189	1077
	204	389.9	54.4	12463	787
	205	295.6	68.3	6664	578
	206	232.5	82.4	3929	448
	207	186.1	97.6	2466	352
	208	151.0	112.2	1620	286
	209	121.7	142.2	1095	188
	210	98.2	148.4	756	150
	211	80.0	217.2	526	197
212	67.0	209.1	366	146	

hardening)에 의한 영향은 고려하지 않았다. 따라서 소성힌지(plastic hinge)의 발생 이후에 단면은 일정한 모멘트값을 가지는 것으로 하였다.

- (3) 단면의 항복 산정 시 전단력의 영향은 없는 것으로 하였다. 따라서 부재의 항복에 영향을 미치는 요인은 축력과 모멘트로 한정하였다.

### 3. 해석 결과 고찰

#### 3.1 단층 골조

단층골조의 해석결과는 표 4에 열화강성과 부재강성 관계는 그림2와 그림3에 정리하였다.

주요 해석결과로 최대수평하중과 최대수평하중 시의 수평변위, 초기강성, 열화강성을 고찰하였다.

이를 위해 수평하중-수평변위 관계에서 최대수평하중 ( $H_{max}$ )을 파악하였으며, 최대수평하중 시의 수평변위를 최대

수평변위( $D_{max}$ )로 하였다.

초기강성은 하중이 선형으로 증가하는 초기 가력구간 중 하중이 선형 이탈하는 구간과 원점 사이의 2/3 지점 구간을 산정하여 하중 증가값과 변위 증가값의 비를 이용하여 산정하였다.

열화강성이란 최대하중 이후 부분의 하중감소율로서 최대하중 도달 이후 내력이 감소하는 구간에서 최대하중의

80%까지 내력 저하가 일어날 때를 기준으로 하중의 감소값과 변위의 증가값의 비를 나타낸 것이다(그림1 참조).

$$\text{열화강성} = \left| \frac{H_{max} - 0.8H_{max}}{D_{0.8} - D_{max}} \right| \quad (1)$$

$0.8H_{max}$  : 최대수평하중의 80% 하중

$D_{0.8}$  :  $0.8H_{max}$  일 때의 수평변위

즉 열화강성의 증가는 최대하중 이후에 내력이 급격히 감소함을 뜻하게 된다.

#### 1) 최대수평하중, 최대수평변위

Case 1은 보 길이의 증가에 따라 부재 강성의 변화가 발생한 경우이다. 상기의 조건하에서 동일한 축력비 아래에서 보의 길이가 증가할수록 최대수평하중은 감소하고 최대수평하중시 수평변위는 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 보 강성 변화에 따른 101변수와 112변수 사이의 최대수평하중과 수평변위의 결과값의 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다.

반면 Case 2에서는 기둥 길이의 증가에 따라 부재 강성의 변화가 발생한 경우이다. 이번 경우 기둥 길이가 증가할수록 최대수평하중은 감소하고 최대수평변위는 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 Case 2의 201변수와 212변수 사이의 차이가 최대수평하중은 약 24배, 최대수평변위는 약 13배의 차이를 보이고 있어 보 길이를 변화시킨 Case 1에 비해 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다(표 4 참조). 이러한 차이는 각 부재 길이 변화에 따른 전체 골조의 강성 변화 차이에 의한 것으로 사료된다. 표 4를 참조하면 Case 1의 경우 부재 강성비 변화가 최대 4.21에서 최소 0.35로 나타났으나, Case 2에서는 최대 16.85, 최소 1.41로 나타났다. 따라서 동일한 길이 변화라 하더라도 기둥재 길이의 변화가 골조 전체의 강성 변화에 미치는 영향이 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이러한 현상은 장스팬 골조는 횡하중 보다 중력하중의 영향이 크며 기둥의 길이가 긴 골조나 고층 건물은 상대적으로 중력하중보다 횡하중에 의한 영향이 크기 때문에 기둥의 길이를 변화시킨 Case 2에서 횡하중에 의한 추가변형이 생겨서 나타난 결과라 사료된다.

표 5. 5층 골조 해석결과

CASE	$H_{max}$ (kN)	$D_{max}$ (mm)	초기강성 (N/mm)	열화강성 (N/mm)	무차원 열화강성
5134	188.3	297.2	1004	69	0.070
5135	163.9	301.0	883	80	0.093
5136	140.3	276.5	760	90	0.119
5144	171.8	247.6	985	119	0.123
5145	144.9	229.8	864	136	0.160
5146	118.4	212.1	740	151	0.206
5154	153.4	204.9	965	179	0.183
5155	123.7	186.5	845	249	0.279
5156	96.0	186.3	720	248	0.348
5164	133.7	186.7	942	345	0.350
5165	96.0	161.1	816	396	0.369
5166	71.3	139.7	695	272	0.485
5334	459.1	277.7	2600	231	0.069
5335	372.1	238.0	2261	427	0.092
5336	298.9	230.5	1915	354	0.163
5344	394.7	233.6	2561	596	0.233
5345	310.6	189.5	2222	606	0.273
5346	242.4	191.0	1874	497	0.275
5354	329.1	176.5	2522	1034	0.410
5355	247.3	151.1	2182	723	0.432
5356	188.7	151.6	1833	583	0.458
5364	254.8	138.9	2470	1195	0.484
5365	187.1	119.3	2125	846	0.498
5366	138.8	118.4	1769	676	0.502

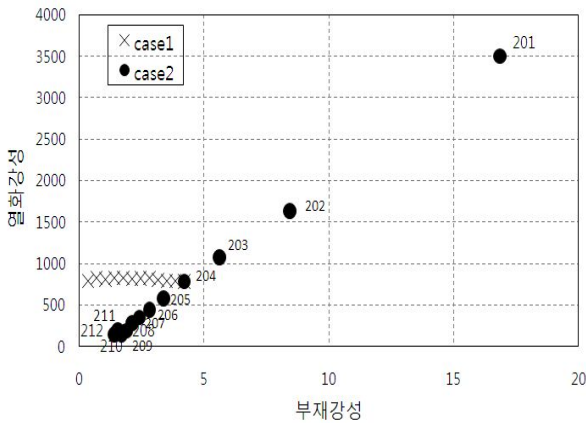


그림 2. 단층 골조의 부재강성-열화강성

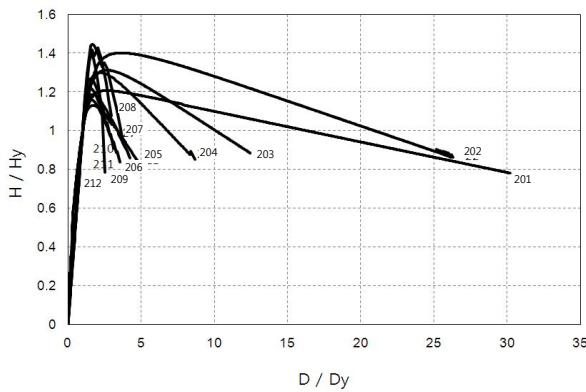


그림 3. 단층골조 Case2의 수평하중-수평변위

2) 초기강성, 열화강성

Case 1의 경우 초기강성은 부재 강성 감소에 따라 감소하지만 열화강성은 큰 변화를 보이지 않는다(표 4, 그림 2 참조). 이는 1)의 결과 고찰에서도 보여지듯 보 길이 변화에 따른 영향은 골조의 강성에 미치는 영향이 기동재 변화에 비해 크지 않아 나타난 현상이라 판단된다.

Case 2는 기동재 강성 감소에 따라 초기강성과 열화강성 모두 감소하는 경향을 보이고 있다(표 4, 그림 2 참조). 하지만 표 4의 열화강성의 값은 각 변수별 수평하중-수평변위 관계에 의한 절대적인 수치이므로 변수에 따른 열화강성의 상대적인 경향을 알아보기 위해 Case 2의 수평변위와 수평하중을 항복하중과 항복하중시의 수평변위로 무차원화 시켜 보았다(그림 3 참조).

그림 3의 결과를 살펴보면 초기강성을 동일하게 표현하였을 때 열화강성은 기동 길이가 증가할수록 커지는 것으로 나타났다. 동일 조건하에서 기동 길이의 증가는 초기강성의 감소를 의미하며 이는 초기강성이 낮을 경우 열화강성이 더욱 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

3.2 다층 골조

3.2.1 5층 골조

5층 골조에 대한 해석 수행 결과를 표 5에 정리하였고 5층 1스팬과 3스팬 골조의 축력비에 따른 변수별 무차원열화강성 관계를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림에서 1s-0.3은 단스팬 축력비 0.3인 경우, 3s-0.3은 3스팬 축력비 0.3을 의미한다.

1) 최대수평하중

해석결과를 분석해 보면 동일한 축력 하에서는 기동재 강성이 클수록 최대수평하중이 증가하며, 동일 기동강성에서는 축력비가 클수록 최대수평하중은 감소하는 경향을 보인다. 이는 축력비의 증가로 인해 축력에 영향을 받게 되는 P-Δ효과가 증가되고 이러한 P-Δ효과의 증가는 기동재의 강성이 낮은 경우 골조의 안정성에 더 큰 영향을 미치게 되어 최대수평하중이 감소하는 것으로 사료된다.

5134와 5334부터 5166와 5366까지를 비교한 결과 동일한 축력과 강성조건하에서는 3스팬의 경우가 단스팬의 경우

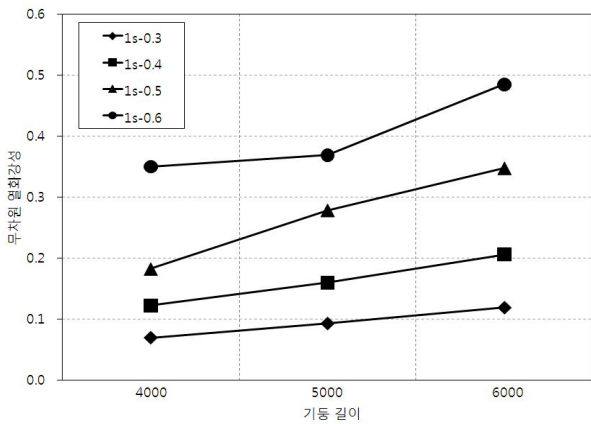


그림 4. 5층1스팬 축력별 기둥길이-열화강성

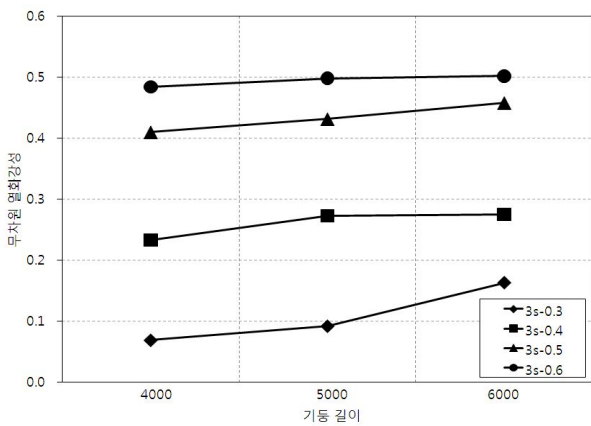


그림 5. 5층3스팬 축력별 기둥길이-열화강성

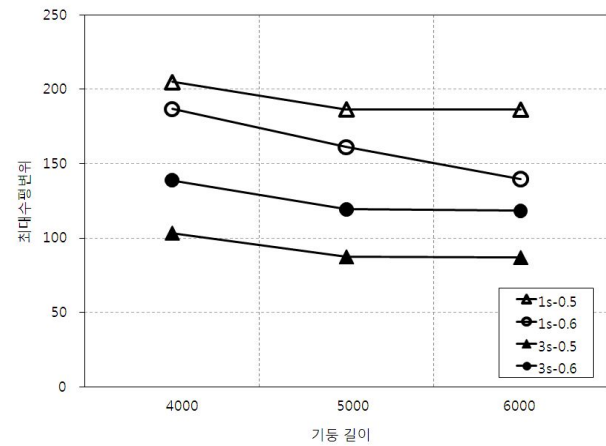


그림 6. 고축력에 따른 기둥길이-최대수평변위

보다 최대수평하중 결과값이 평균 2배 큰 값을 갖는 것으로 나타났다(표 5 참조). 이는 스패 증가로 인해 골조의 평강성이 증가하여 나타난 현상이라 판단된다.

최대수평하중과 열화강성의 관계를 살펴보면 서로 반비례하는 것을 확인할 수 있다(표 5 참조). 즉 동일 축력비하에서는 기둥재의 강성이 증가할수록 열화강성은 감소하며 동일 강성하에서는 축력비가 증가할수록 열화강성도 증가하는 경향을

보인다. 즉 낮은 기둥 강성과 높은 축력비가 골조의 안정성에 영향을 미쳐 급격한 열화가 진행됨을 확인 할 수 있다.

표 6. 10층 골조 해석결과

CASE	$H_{max}$ (kN)	$D_{max}$ (mm)	초기강성 (N/mm)	열화강성 (N/mm)	무차원 열화강성
10134	502.2	147.3	456	43	0.094
10135	457.7	136.9	430	45	0.103
10136	426.5	124.7	401	41	0.104
10144	429.3	138.6	446	71	0.159
10145	406.4	127.3	420	69	0.165
10146	367.1	112.9	390	65	0.167
10154	383.5	129.5	436	96	0.220
10155	372.6	118.0	411	127	0.310
10156	326.9	101.5	381	135	0.354
10164	341.9	118.0	424	94	0.222
10165	321.9	103.9	398	139	0.351
10166	287.5	83.4	368	217	0.590
10334	516.0	407.6	1226	133	0.108
10335	457.6	366.7	1152	167	0.145
10336	398.2	313.6	1065	263	0.247
10344	462.4	365.9	1206	107	0.119
10345	386.3	323.6	1132	231	0.204
10346	323.5	262.3	1045	459	0.440
10354	357.7	308.3	1186	151	0.127
10355	310.4	267.3	1113	293	0.263
10356	258.8	211.3	1026	598	0.583
10364	141.6	161.7	1159	243	0.210
10365	248.6	207.8	1085	296	0.273
10366	200.7	159.8	997	375	0.376

2) 최대수평변위

최대하중 시 최대수평변위는 축력비가 증가 할수록 감소하고 동일 축력하에서는 기둥재의 강성이 감소할수록 감소하는 것으로 나타났다(표 5 참조). 이러한 현상은 P-Δ효과의 증가로 인하여 기둥재의 강성이 낮은 경우에는 최대수평하중 도달시까지 충분한 변형을 하지 못하고 갑자기 최대하중에 도달하게 되기 때문이며, 기둥재의 강성이 높아 고축력 상태에서도 P-Δ효과에 의한 영향을 수용할 수 있는 경우에는 최대수평하중 도달시까지 기둥재의 강성이 낮은 경우에 비해 비교적 큰 수평변위값을 나타낼수 있기 때문으로 판단된다(그림 6 참조).

최대하중 시 수평변위와 열화강성의 관계를 살펴보면 수평변위가 감소할수록 열화강성은 증가하는 것을 확인할 수 있다(표 5 참조). 수평변위가 감소한다는 것은 대상골조가 높은 축력비를 받을 경우, 기둥재의 강성이 낮은 경우 충분한 수평변위값을 갖기 전에 골조의 안정성에 영향을 주어 열화의 진행이 가속화되는 것을 의미한다.



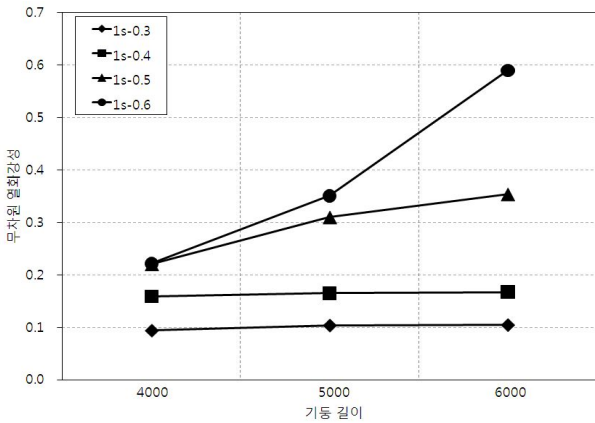


그림 7. 10층 1스팬 축력별 기둥 길이-열화강성

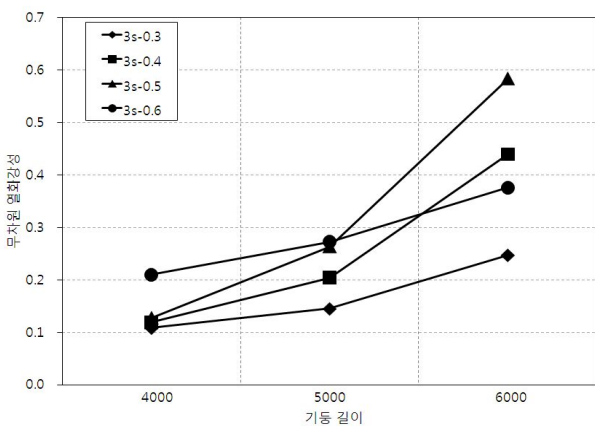


그림 8. 10층 3스팬 축력별 기둥 길이-열화강성

3) 초기강성, 열화강성

초기강성은 동일한 축력 하에서는 기둥강성이 클수록 증가하며, 동일한 강성에서는 축력비가 클수록 감소한다. 또한 3스팬이 단스팬에 비해 약 2.5배 더 높은 경향을 보인다(표 5 참조).

각 변수별 열화강성의 변화 경향을 파악하기 위해 수평하중-수평변위 관계를 그림 3과 같은 방법으로 무차원화하여 무차원화된 열화강성을 표 5에 나타내었다.

무차원 열화강성은 동일한 축력 하에서는 기둥강성이 감소할수록 증가하며, 동일 강성일 경우는 축력비가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다(표 5 참조).

그림 4와 그림 5를 보면 저축력보다 고축력에서 열화강성이 크게 나타나고 있으며 이는 최대내력 이후 골조의 급격한 붕괴를 의미하게 된다. 이러한 현상은 축력이 큰 경우 최대내력 도달 이후 골조의 수평저항강성이 감소하게 되면 골조의 안정성에 미치는 P-Δ효과의 영향이 매우 커지게 되고 이때 축력이 큰 쪽이 더 큰 P-Δ효과에 의한 영향을 받게 되어 나타난 결과라 사료된다.

또한 기둥재 강성을 변수로 둔 5134와 5136의 차이보다 축력비를 변수로 둔 5134와 5164의 차이가 더 급격한 것을 확인할 수 있다(표 5 참조). 이는 최대내력 이후 거동은 기둥재의 강성 보다는 가력된 축력과 축력비의 영향이 더 크게 작용하고 있음을 보여주는 결과이다.

3.2.2 10층 골조

10층 골조에 대한 해석 수행 결과를 표 6에 정리하였다. 각 결과에 대한 고찰은 아래와 같다.

1) 최대수평하중, 최대수평변위

10층 골조의 해석결과 최대수평하중은 동일 축력비의 경우 기둥재의 강성이 감소할수록 감소하고, 동일 강성하에서는 축력비가 증가 할수록 감소하는 경향을 보인다. 최대수평변위는 축력비가 증가 할수록, 기둥재 강성이 감소할수록 감소하는 경향을 보인다(표 6 참조). 5층 골조와 비교해 보면 축력비와 강성비에 따른 경향은 비슷하다.

또한 최대수평하중, 최대수평변위에 의한 열화강성 변화관계도 5층 골조와 비슷한 경향을 보이며 동일변수하에서 5층과 10층을 비교하면 10층 골조에서 더 높은 무차원 열화강성 값을 보인다(표 5, 표 6 참조). 이는 축력비와 기둥재의 강성 뿐 아니라 층수에 따른 변화, 즉 1층 기둥을 대상으로 계산한 축력의 단순합도 골조의 열화에 영향을 주는 요인임을 확인할 수 있다.

5134 변수와 10134 변수를 비교하면 동일 변수일 경우 10층 골조에서 최대수평변위가 더 작은 값을 보인다. 이는 골조가 적절한 수평변위를 보이기 이전에 최대하중에 도달하여 나타난 결과로 축력비와 함께 1층 기둥에 전달되는 축력의 절대값도 골조의 거동에 영향을 주는 중요 요소임을 확인할 수 있다.

2) 초기강성, 열화강성

그림 7과 그림 8을 통해 초기강성과 열화강성 또한 5층 골조와 동일한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그림 7과 그림 8의 1s-0.3은 단스팬 축력비 0.3인 경우, 3s-0.3은 3스팬 축력비 0.3을 의미한다.

초기강성은 기둥재의 강성이 감소할수록, 축력비가 증가할수록 작은 값을 보이며 무차원화된 열화강성은 기둥재 강성이 감소할수록, 축력비가 증가할수록 증가한다.

동일 조건하의 5층 골조와 10층 골조의 무차원 열화강성을 비교하면 10층 골조에서 더 높은 값을 나타내고 있다. 이를 통해 축력비 뿐만 아니라 골조의 층수 또한 열화현상에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다(표 5, 표 6 참조).

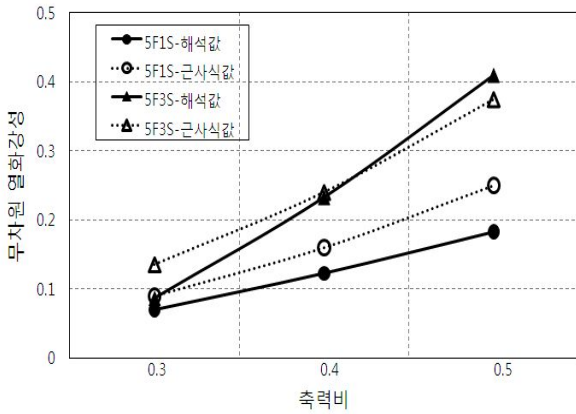


그림 9. 5층 해석값-근사식 비교

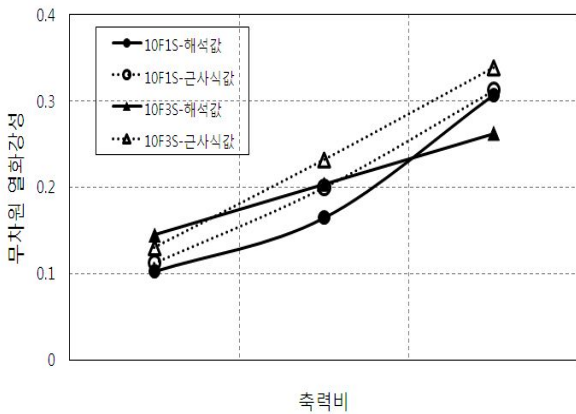


그림 10. 10층 해석값-근사식 비교

10층 골조의 무차원화된 열화강성의 변화율 또한 강성변화의 경우보다 축력비 변화의 경우가 더 큰 것을 확인할 수 있다(표 6 참조). 따라서 최대내력 이후 거동에 영향을 주는 주요한 인자는 축력비임을 확인할 수 있다.

#### 4. 열화강성 평가 근사식 제안

해석수행 결과 분석을 통하여 최대내력 이후 열화 거동에는 축력비가 가장 큰 영향을 주는 요소임이 파악되었다. 이를 바탕으로 초기 설계단계에서 축력비를 통하여 최대내력 이후의 열화 거동을 예측할 수 있는 근사식을 제안하였다.

이번 연구의 근사식 제안의 목적은 실무에서 설계초기 단계에 활용할 수 있는 지표를 제공하는 것에 있기에 제안식의 축력비 범위는 일반적인 설계조건에서 발생하는 0.3~0.5로 한정하였다.

이번 연구에서 제안한 근사식은 축력비에 따른 무차원 열화강성 관계식으로 동일한 기둥강성에 대하여 축력비와 층수, 경간수를 변수로 하였다. 프로그램 해석 결과 무차원 열화강성은 축력비, 층수에 비례한다.

$$\eta_d = k \cdot S \cdot \frac{P \cdot n}{A_s \cdot F_y} \tag{2}$$

여기서  $\eta_d$  : 무차원 열화강성

$P$  : 1층 기둥재에 작용하는 축력

$k$  : 축력비

$n$  : 층 수

$A_s$  : 1층 기둥재의 단면적

$S$  : 경간상수

단경간 = 1

다경간 =  $n / 2$

상기의 제안식은 이번 연구에서 수행된 해석 결과를 바탕으로 제안된 식으므로 그 적용의 한계는 이번 연구에 적용된 해석 변수 범위로 한정된다.

제안된 식의 타당성을 평가하기 위해 5층은 기둥 길이 4,000mm에 보 길이 12,000mm 기둥강성 1.55 골조를, 10층은 기둥 길이 5,000mm에 보 길이 12,000mm 기둥강성 1.24골조를 대상으로 축력비 변화에 따른 해석을 수행하였으며, 프로그램 해석결과와 식(2)를 적용한 결과를 비교하여 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 그림9에서 5F1S은 5층 1스팬, 5F3S은 5층 3스팬의 경우를 의미하며 그림 10의 10F1S은 10층 1스팬, 10F3S은 10층 3스팬을 의미한다.

5층과 10층 골조는 평균적으로 해석결과와 제안식의 차이가 0.05 정도를 나타내었으며 대부분 근사식을 적용한 결과가 해석결과보다 큰 값을 보였다. 5354의 경우는 근사식 적용 결과가 더 작은 값을 보이지만 0.03의 근소한 오차를 보이기 때문에 설계 초기 단계에서 열화거동을 예측하기에는 무리가 없다고 판단된다.

그림 9와 그림 10에서 제안식에 의한 결과가 해석결과에 비해 대부분 높은 열화강성을 나타내어 보수적인 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

본 제안식을 설계 초기 단계에 적용할 경우 구조물의 초기 하중 조건을 이용하여 최대내력 이후 열화 현상의 경향을 예측할 수 있으며, 이를 통하여 적절한 설계 방향을 설계할 수 있을 것으로 기대된다. 추후 추가적인 연구를 통하여 다양한 변수들의 영향을 종합적으로 고찰할 수 있는 제안식을 도출할 계획이다.

#### 5. 결론

강구조 비가새 골조의 열화 경향을 파악하기 위해서 수행된 해석적 연구를 통하여 얻어진 결과를 간단히 요약하면 다음과 같다.



- (1) 단층 단스팬 골조의 경우 기둥재의 강성변화가 열화강성에 영향을 미치는 주요인자임을 확인하였다.
- (2) 5층과 10층 골조는 최하층 기둥재의 강성보다 축력비가 열화강성에 미치는 영향이 더욱 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 최대수평하중 도달 이후 P- $\Delta$ 효과가 골조의 안정성에 미치는 영향이 증가하여 나타난 결과라고 판단하였다.
- (3) 5층과 10층 골조의 동일 축력비 변수 비교 결과 10층 골조에서 최대수평변위가 더 작은 값을 보이고 무차원화 열화강성은 더 큰 경향을 보인다. 따라서 축력비와 함께 1층 기둥에 전달되는 축력의 절대값도 골조의 거동에 영향을 주는 중요 요소임을 확인하였다.
- (4) 열화강성은 최대수평하중과 최대수평변위가 감소할수록 증가하며 축력비가 높을수록, 기둥재강성이 감소할수록 열화강성은 증가한다.
- (5) 열화강성에 가장 큰 영향을 미치는 축력비를 이용한 열화강성 평가식을 제안하였으며, 구조물에 발생하는 열화현상을 적절히 평가하고 있음을 확인 하였다.

### 참 고 문 헌

김희동(2001) 강구조 비가새 골조의 P- $\Delta$ 효과에 관한 연구, 박사학위 논문, 중앙대학교, pp.185-190.  
 김희동, 이명재(2003) P- $\Delta$  효과를 고려한 기둥항복형 강구조 골조의 안정성, 강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제4호, pp.460-463.

김희동, 이명재(2009) 하중증폭계수를 적용한 비가새 골조 2차 해석 평가, 강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제6호, pp.627-634.  
 김희동, 이명재(2010) 하중증폭계수를 적용한 비대칭 비가새 골조 2차 해석 평가, 강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제1호, pp.87-96.  
 Chen, W.F. and Atsuta, T. (1976) Theory of beam-column, volumn 1 in-plane behavior and design. McGraw-Hill, p.732.  
 Chen, W.F. and Kim, S.E. (1997) LRFD Steel design using advanced analysis, CRC, Boca Raton, pp.15-18.  
 Crisfield, M.A. (1983) An Arc Length Method that Includes Line Searches and Accelerations. International, *Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 19, USA.  
 Deierlein, G.G. and White, D.W. (1998) Frame Stability, Chapter. 16, Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures.  
 Galambos, T.V. (1968) Structural members and frames.  
 Kim, H.D. and Lee, M.J. (2009) Experimental Investigation of the P-  $\Delta$  Effect of Low Rise Unbraced Steel Frames, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 9, No. 2, pp.131-139.

(접수일자 : 2010. 10. 14 / 심사일 2010. 10. 19 /  
 심사완료일 2011. 6. 14)