

고강도 H형강 부재의 좌굴내력과 설계식에의 적용에 관한 연구

The Buckling Strength and the Application of Design Formula of High Strength H-Shaped Section Steel Members

김 진 경¹⁾ · 김 희 동²⁾ · 이 명 재³⁾

Kim, Jin Kyong Kim, Hee Dong Lee, Myung Jae

요약 : 본 연구의 목적은 고강도 H형강 기둥재(beam-column)의 폭두께비에 관한 기준을 조사하고 좌굴내력을 평가하여, 강구조 한계상태설계기준과 허용응력설계기준(안)과 비교함으로써, 고강도강을 사용한 기둥부재 설계시 적용된 기준식의 타당성을 검토하기 위한 것이다. 실험에 사용된 고강도강은 SM520TMC, SM570Q 등을 사용하였고, 강재의 기계적 성질과 단주의 응력-변형도 관계를 파악하기 위하여 인장시험 및 단주압축시험을 실시하였다. 또한 고강도강 기둥재의 좌굴내력을 산정하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 축력-모멘트-곡률 관계는 단주압축실험에서 구해진 응력-변형도 관계를 사용하였다.

ABSTRACT : The objective of this study is to investigate the criteria of the width-to-thickness ratio and to evaluate the buckling strength of high strength steel beam-columns and to compare their buckling strength with design codes, which are the Limit State Design code and the Allowable Stress Design code(drift). SM520TMC and SM570Q class steels are used for high strength steels. The coupon test and the stub column test were carried out to investigate the properties of high strength steels and the stress-strain curves of stub columns. The buckling strength of high strength steel beam-columns are assessed by numerical analysis used axial force, moment and curvature relationships.

핵심 용어 : 고강도강, 폭두께비, 중심압축재, 기둥재

KEYWORDS : High strength steel, Width-to-thickness ratio, Centrally loaded compressive member, Beam-column

1) 중앙대학교 대학원 석사과정
2) 정회원, 중앙대학교 대학원 박사과정
3) 정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2001년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 제재하겠습니다.

1. 서 론

최근 건축물이 고층화되고 대형화되면서 하부층에서의 기둥의 단면적은 고축력에 저항해야 하므로 커지게 되어서 기둥단면의 감소가 요구되고 이에 따라 고강도강이 자연스럽게 필요하게 된다. 이러한 배경하에 SM520TMC, SM570Q와 같은 고강도강을 사용한 강재의 인장시험을 통해 고강도강의 재료역학적 성질을 고찰하고, 각국에서 적용하고 있는 폭두께비의 기준으로 제작한 H형강 단주압축시험을 통해 고강도강의 국부좌굴에 의한 압축기동을 파악하고자 한다. 또한 고강도 강재의 기둥재(beam-column)로서의 좌굴내력을 수치해석을 통하여 산정한다. 그리고 수치해석결과는 각국의 설계기준과 비교되고 그 적용성을 검토하였다.

2. 구조재료실험

2.1 인장시험

시험체 제작에 사용된 고강도강의 재료역학적 성질을 조사하기 위해서 강재의 인장강도시험을 실시하였다. 시험편은 각 강재의 단면형상에 따라 단주의 길이방향으로 웨브면에서 2개씩 규격에 따라 절편하여 제작하였다.

강재의 응력-변형도 관계를 측정하기 위하여 시험편의 중앙부에 와이어 스트레인 게이지(W.S.G)를 양측에 부착하여 변형도를 측정하였다. 가력에는 100tf 용량의 만능시험기(U.T.M.)를 사용하였다.

강재의 인장시험 결과를 표 1에, 그리고 강재의 응력-변형도 관계를 그림 1에 나타내었다. 이상의 시험결과에서 모든 시험편이 기준값(F_y)인 3.6 tf/cm^2 , 4.3 tf/cm^2 를 넘고 있는 것을 볼 수 있으며, 항복비의 경우 SM570Q는 고항복비의 강재가 되어 인성부족 등의 영향이 나타날 수 있음을 볼 수 있다.

표 1. 인장시험 결과

강재	시험 편명	단면적 (cm^2)	항복 응력도 (tf/cm^2)	최대 응력도 (tf/cm^2)	항복비 (%)	연신율 (%)
SM	T - 1	0.75	4.14	5.44	76	38
520	T - 2	0.77	4.07	5.45	74	35
TMC	평균	0.76	4.10	5.45	75	37
SM	T - 3	0.73	7.81	8.24	95	36
570Q	T - 4	0.72	7.81	8.31	94	35
	평균	0.72	7.81	8.27	95	35

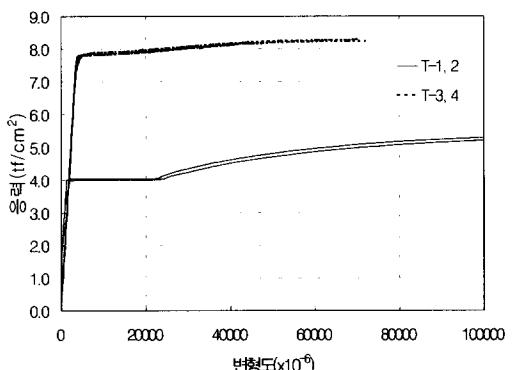


그림 1. 인장시험체의 응력-변형도 관계

응력-변형도 관계에서 SM520TMC, SM570Q 모두 대체적으로 명쾌한 항복현상을 보이고 있는데 이러한 현상은 고강도 후판강재를 절삭가공에 의한 기계제작 방법으로 제작되어 잔류응력이 생기지 않은 인장시험편이기 때문이다. 또한 고강도 강의 연신율이 19%를 건축구조용의 목표로 하고 있는 점과 비교하면 그 목표수준을 만족하고 있다고 할 수 있다.

2.2 단주압축시험

본 시험은 단면의 축압축력에 대한 전체적인 거동을 조사하기 위하여 실시하였다. 단주압축 시험체는 두꺼운 강판에서 H형강을 기계선반으로 절삭하여 정밀가공한 것으로서, 강구조 한계상태설계기준(LSD)⁽¹⁾과 허용응력설계기준(안)(ASD)⁽²⁾의 기준상에서의 콤팩트단면(λ_p)과 비콤팩트단면(λ_c)의 한계값을 적용하여 각각 2개씩 모두

표 2. 시험체의 종류 및 시험편수

적용 기준	폭두께비	시험체명	단면형상(mm)	길이 (mm)	개수 (개)
ASD	콤팩트 단면 (λ_p)	SC520-1	H-85.00×80.00×1.95×4.46×5	255	2
		SC520-2	H-85.25×80.00×1.90×4.43×5		
LSD	λ_r	SC570-1	H-80.00×70.00×1.90×4.24×5	240	2
		SC570-2	H-80.00×70.00×1.90×4.35×5		
ASD	비콤팩트 단면 (λ_r)	SN520-1	H-80.20×80.00×1.90×2.60×5	240	2
		SN520-2	H-80.00×80.00×1.90×2.92×5		
LSD	λ_r	SN570-1	H-75.00×70.00×1.90×2.72×5	225	2
		SN570-2	H-75.00×70.00×1.85×2.87×5		
LSD	λ_r	SN520-3	H-80.25×80.00×1.95×2.07×5	240	2
		SN520-4	H-80.20×80.00×1.90×2.05×5		
LSD	λ_r	SN570-3	H-75.00×70.00×1.95×1.70×5	225	2
		SN570-4	H-75.00×70.00×1.90×1.93×5		

여기서, SC : 단주 Compact section

SN : 단주 Non-compact section

520, 570 : SM520TMC, SM570Q

표 3. SM520TMC의 단주압축시험결과

시험체명	A (cm ²)	P _y (tf)	P _{ym} (tf)	σ_y (tf/cm ²)	σ_{ym} (tf/cm ²)
SC520-1	8.83	34.05	34.13	3.86	3.88
SC520-2	8.75	34.20		3.91	
SN520-1	6.27	24.97	25.09	3.98	3.99
SN520-2	6.30	25.20		4.00	
SN520-3	5.01	19.15	18.13	3.82	3.64
SN520-4	4.94	17.10		3.46	

표 4. SM570Q의 단주압축시험결과

시험체명	A (cm ²)	P _y (tf)	P _{ym} (tf)	σ_y (tf/cm ²)	σ_{ym} (tf/cm ²)
SC570-1	7.51	40.30	40.50	5.34	5.33
SC570-2	7.66	40.65		5.31	
SN570-1	5.34	29.30	28.38	5.49	5.24
SN570-2	5.51	27.45		4.97	
SN570-3	3.99	15.60	16.15	3.91	3.90
SN570-4	4.27	16.60		3.89	

 P_y : 단주의 항복하중, P_{ym} : 평균항복하중 σ_y : 단주의 항복강도, σ_{ym} : 단주의 평균항복강도

12개를 제작하였다. 또한 단주압축 시험체의 길이는 SSRC (Structural Stability Research Council)의 제한치를 기준으로 단면 축의 3배를 한 것으로 하였다. 시험체의 종류 및 시험편수를 표 2에 나타내었으며 플랜지 중앙에 1개씩 2개의 W.S.G를 붙여서 변형도를 측정하고, 동시에 다이얼 게이지를 시험편 단면의 대각선상의 대칭 위

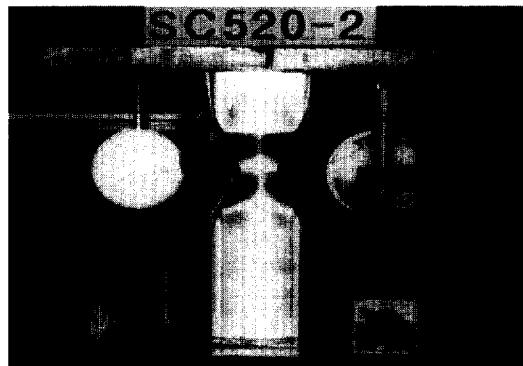


사진 1. 최대내력후의 국부좌굴현상

치에 2개를 설치하여 그 평균을 변위량으로 하였다. 가력에는 인장시험과 동일한 100tf U.T.M을 사용하였다.

시험결과로부터 단주의 항복강도는 0.2% offset 법을 이용하여 결정하였고, 각각 2개의 시험체의 시험결과를 평균값과 함께 표 3과 표 4에 나타내었다. 그리고 시험에서 얻어진 다이얼 게이지에 의한 응력-변형도 관계를 그림 2에서 그림 7까지 각각 나타내었다. 그리고 단주압축시험에서 최대내력후의 국부좌굴형상을 사진 1에 나타낸다.

3. 고강도강의 폭두께비의 한계값

3.1 강구조 한계상태설계기준에의 적용

강구조 한계상태설계기준에서 콤팩트단면, 비콤팩트단면의 범위는 플랜지와 웨브의 폭두께비를 다음과 같은 한계값으로 규정하고 있으며 이에 따라 표 2의 시험체의 단면형상을 정하였다.

(1) 콤팩트 단면

$$\text{플랜지} : \lambda_p = 17 / \sqrt{F_y} \quad (3.1)$$

$$\text{웨브} : \lambda_p = 67 / \sqrt{F_y} \quad (3.2)$$

(2) 비콤팩트 단면

$$\text{플랜지} : \lambda_r = 37 / \sqrt{F_y - 0.7} \quad (3.3)$$

$$\text{웨브} : \lambda_r = 67 / \sqrt{F_y} \quad (3.4)$$

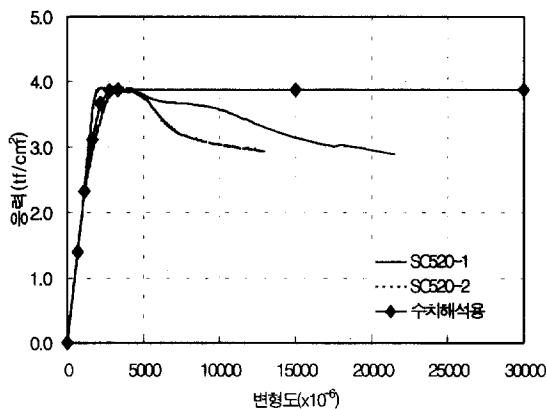


그림 2. SC520-1, SC520-2 시험체의 응력-변형도 관계

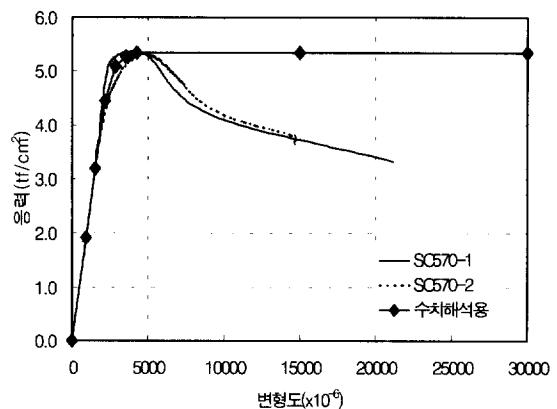


그림 5. SC570-1, SC570-2 시험체의 응력-변형도 관계

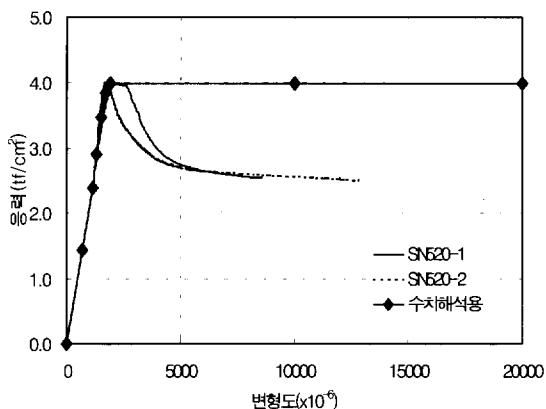


그림 3. SN520-1, SN520-2 시험체의 응력-변형도 관계

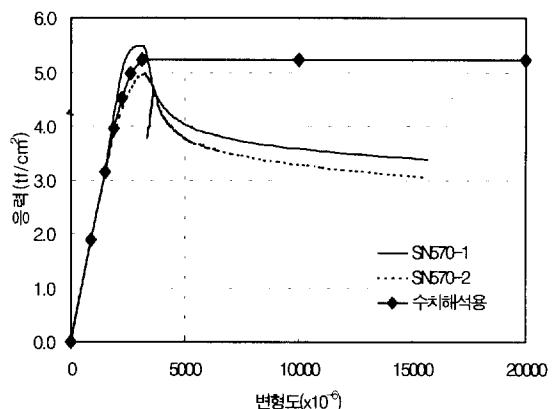


그림 6. SN570-1, SN570-2 시험체의 응력-변형도 관계

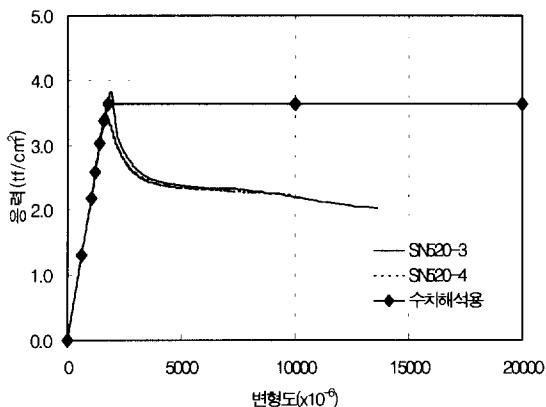


그림 4. SN520-3, SN520-4 시험체의 응력-변형도 관계

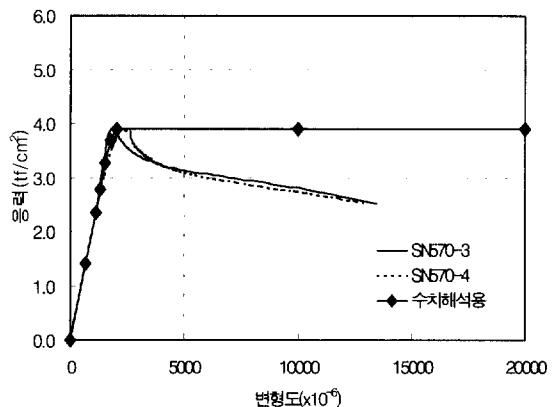


그림 7. SN570-3, SN570-4 시험체의 응력-변형도 관계

단주압축시험체의 항복강도와 각 기준의 항복강도를 표 5에 비교하여 표현하였다. SM520TMC의 경우는 콤팩트단면, 비콤팩트단면의 구분없이 제안된 항복강도 (F_y)를 만족시키고 있으므로 국부좌굴의 영향을 배제할 수 있다고 생각된다. 그러나 SM570Q의 경우는 약 9%정도의 내력이 더 낮은 것으로 나타났는데, 이것은 가력초기 편심하중에 의해 다소 낮게 나타난 것으로 판단되며, 시험체수가 적어서 추가적인 실험이 필요한 사안이라 사료된다.

단주의 역학적 거동은 SM520TMC 콤팩트단면의 경우 최대내력 도달이후에도 내력의 급격한 저하가 발생하지 않으나, SM520TMC 비콤팩트단면과, SM570Q의 콤팩트단면, 비콤팩트단면의 경우는 최대내력 도달이후 국부좌굴 등의 영향으로 내력의 급격한 저하가 발생하는 것으로 나타났다.

표 5. 단주압축시험체의 항복강도와 각 기준에서 정한 항복강도와의 비교

적용 기준	폭두께비	시험체명	단주의 항복강도 (tf/cm ²)	F_y 값 (tf/cm ²)	항복강도/ F_y
LSD	콤팩트 단면 (λ_p)	SC520-1	3.88	3.60	1.08
		SC520-2			
	비콤팩트 단면 (λ_r)	SC570-1	5.33	4.30	1.24
		SC570-2			
ASD	비콤팩트 단면 (λ_r)	SN520-3	3.64	3.60	1.01
		SN520-4			
	비콤팩트 단면 (λ_r)	SN570-3	3.90	4.30	0.91
		SN570-4			
	비콤팩트 단면 (λ_p)	SC520-1	3.88	3.60	1.08
		SC520-2			
	비콤팩트 단면 (λ_r)	SC570-1	5.33	4.30	1.24
		SC570-2			
	비콤팩트 단면 (λ_r)	SN520-1	3.99	3.60	1.11
		SN520-2			
	비콤팩트 단면 (λ_r)	SN570-1	5.24	4.30	1.22
		SN570-2			

3.2 허용응력설계기준(안)의 적용

강구조 허용응력설계기준(안)⁽²⁾에서는 콤팩트단면, 비콤팩트단면의 범위는 플랜지와 웨브의 폭두께비를 다음과 같은 한계값으로 규정하고 있으며 이에 따라 표 2의 시험체의 단면형상을 정하였다. 그리고 이 규정은 AISC의 허용응력도설계법과 동일하다.

(1) 콤팩트 단면

$$\text{플랜지} : \lambda_p = 17 / \sqrt{F_y} \quad (3.5)$$

$$\text{웨브} : \lambda_p = 67 / \sqrt{F_y} \quad (3.6)$$

(2) 비콤팩트 단면

$$\text{플랜지} : \lambda_r = 25 / \sqrt{F_y} \quad (3.7)$$

$$\text{웨브} : \lambda_r = 67 / \sqrt{F_y} \quad (3.8)$$

SM520TMC, SM570Q 모두 ASD 기준을 적용할 때 기준에서 정한 항복강도 (F_y)를 만족시키고 있으며, 콤팩트단면, 비콤팩트단면 모두 국부좌굴의 영향을 배제할 수 있다고 판단된다. 또한 단주의 역학적 거동은 LSD에서 정한 단면의 거동과 같은 성향을 나타내었다.

4. 기둥재의 좌굴내력

4.1 수치해석에 의한 좌굴내력

기둥재(beam-column)부재의 좌굴에는 개단면인 경우 비틀림을 동반하지 않는 휨좌굴과 비틀림을 동반하는 휨비틀림 좌굴이 있다. 그런데 건축 구조용 H형강에서는 일반적으로 비틀림을 동반하는 경우는 극히 드물기 때문에 여기서는 비틀림 좌굴을 배제하였다. 그리고 작용하는 외력으로서는 그림 8과 같이 모멘트 기울기를 가지고 있는 경우도 대상으로 하였다. 또한 단면의 약축 주위

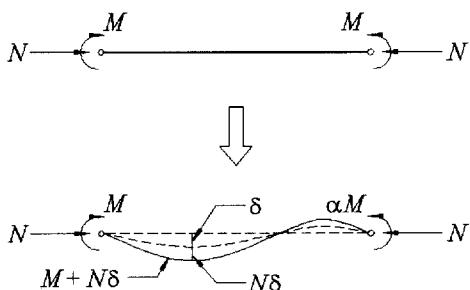


그림 8. 기둥재의 변형

의 좌굴은 발생하지 않도록 구속되어져서 강축 주 위의 좌굴만이 발생하는 것으로 하였다. 이와 같은 외력으로 기둥재는 변형하게 되고 그림 8과 같이 축력에 의한 부가모멘트 ($N \times \delta$)의 영향으로 좌굴내력이 저하되는 것이 일반적이다.

수치해석적 방법으로서는 기둥재에 일정한 축력을 가한 후에 저항 모멘트의 최대값을 좌굴내력으로 정하는 방법과 저항암축력의 최대값을 좌굴내력으로 하는 방법의 2가지가 있으나, 여기서는 전자의 방법^{(3), (4)}을 택하였다.

4.2 고강도강의 좌굴내력 및 설계기준식에의 적용

4.2.1 각국의 설계기준식에의 적용

현행 설계기준식은 고강도강을 적용할 수 있도록 되어 있지만 일반 구조용 강재를 위주로 만들어진 식이다. 이러한 배경하에 SM520TMC 및 SM570 Q와 같은 고강도 강재를 사용한 기둥재의 좌굴내력에 대해 수치해석결과를 현행 한국의 허용응력설계기준(ASD)과 한계상태설계기준(LSD)에 적용해 보기로 한다.

수치해석결과는 단주압축시험에서 구해진 항복강도를 사용하여 무차원화시켜 표현하였다. 표 6

에 강축으로 휨모멘트를 받고 세장비 (λ)가 50일 때의 콤팩트단면과 비콤팩트단면의 수치해석결과를 함께 나타내었다. 이하에서 각 설계기준식과의 비교에서는 각 설계기준식이 고강도강의 좌굴내력을 적절히 평가하고 있는지를 조사하기 위하여 각 설계기준식의 안전율과 저항계수는 배제시켰다.

4.2.2 SM520TMC 강재의 경우

콤팩트 단면과 비콤팩트 단면에 대하여 수치해석한 결과를 그림 9에서 그림 12까지 각각 나타낸다.

그림 9는 각 기준에서 제시한 콤팩트단면에 대하여 기둥재의 수치해석결과를 각 설계기준(안전율, 저항계수 배제)과 비교한 것으로서 세장비 (λ)는 50이며, 균등휨모멘트를 받고 있는 경우이다. 그림 10은 그림 9와 같은 단면형상, 세장비에 대해서 모멘트 역기울기가 있는 경우에 대한 것이다.

이상과 같이 각 설계기준식은 고강도강 기둥재의 좌굴내력을 적절히 평가하고 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 각 설계기준에 안전율 또는 저항계수를 적용하면 각 설계기준식에 SM520TMC를 안전하게 적용시킬 수 있음을 알 수 있다.

표 6. 기둥재(beam-column) 수치해석결과

M/M_{px}	시험체명	α	N/N_y									비고
			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
SM 520 TMC	SC 520-1.2	-1.0	0.85	0.70	0.56	0.43	0.31	0.21	0.12	0	-	$N_y = 34.14\text{tf}$ $M_{px} = 125.30\text{tf.cm}$
		1.0	0.97	0.88	0.78	0.67	0.56	0.45	0.33	0.22	0	
	SN 520-1.2	-1.0	0.87	0.71	0.57	0.45	0.34	0.25	0.17	0.10	0	$N_y = 25.07\text{tf}$ $M_{px} = 85.10\text{tf.cm}$
		1.0	0.98	0.91	0.80	0.69	0.57	0.46	0.34	0.23	0.11	
	SN 520-3,4	-1.0	0.88	0.73	0.59	0.46	0.36	0.26	0.18	0.10	0	$N_y = 18.12\text{tf}$ $M_{px} = 59.65\text{tf.cm}$
		1.0	0.98	0.93	0.83	0.71	0.60	0.48	0.36	0.24	0.12	
	SN 570-1,2	-1.0	0.83	0.66	0.51	0.38	0.26	0.17	0.09	0	-	$N_y = 40.48\text{tf}$ $M_{px} = 214.30\text{tf.cm}$
		1.0	0.97	0.89	0.78	0.67	0.56	0.45	0.33	0.20	0	
	SN 570-1,2	-1.0	0.84	0.67	0.52	0.39	0.28	0.19	0.11	0.04	0	$N_y = 28.37\text{tf}$ $M_{px} = 140.91\text{tf.cm}$
		1.0	0.98	0.91	0.81	0.69	0.58	0.46	0.34	0.22	0	
	SN 570-3,4	-1.0	0.88	0.73	0.58	0.45	0.34	0.25	0.17	0.09	0	$N_y = 16.11\text{tf}$ $M_{px} = 102.52\text{tf.cm}$
		1.0	0.99	0.93	0.85	0.73	0.61	0.49	0.37	0.24	0.12	

N_y : 항복하중, M_{px} : 전소성모멘트

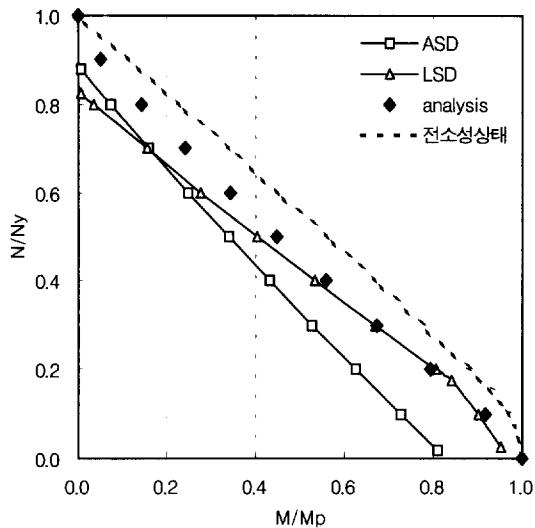


그림 9. 균등휨 모멘트(SM520TMC, $\lambda=50$, 콤팩트단면, 안전율, 저항계수 배제)

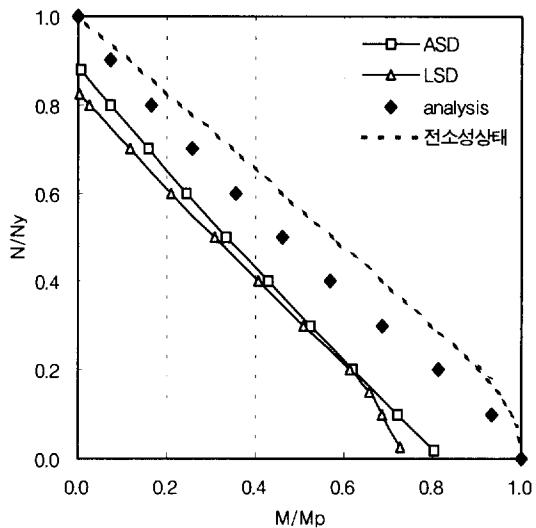


그림 11. 균등휨 모멘트(SM520TMC, $\lambda=50$, 비콤팩트단면, 안전율, 저항계수 배제)

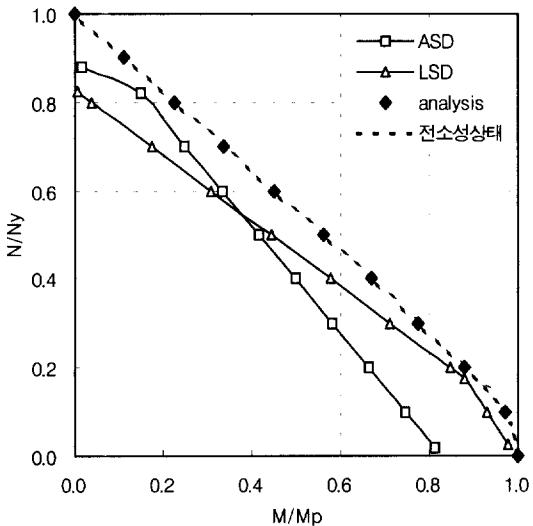


그림 10. 모멘트 역기울기(SM520TMC, $\lambda=50$, 콤팩트단면, 안전율, 저항계수 배제)

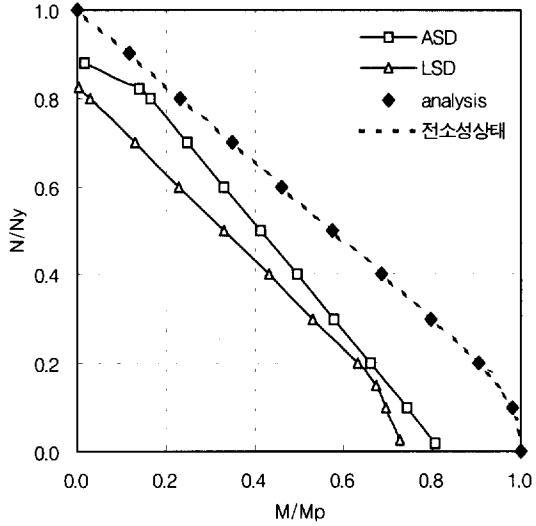


그림 12. 모멘트 역기울기(SM520TMC, $\lambda=50$, 비콤팩트단면, 안전율, 저항계수 배제)

4.2.3 SM570Q 강재의 경우

콤팩트 단면과 비콤팩트 단면에 대하여 수치해석한 결과를 그림 13에서 그림 16까지 각각 나타낸다.

그림 13은 각 기준에서 제시한 콤팩트단면에 대하여 기동재의 수치해석결과를 각 설계기준(안전율, 저항계수 배제)과 비교한 것으로서 세장비 (λ)는 50이며, 균등휨모멘트를 받고 있는 경우이다.

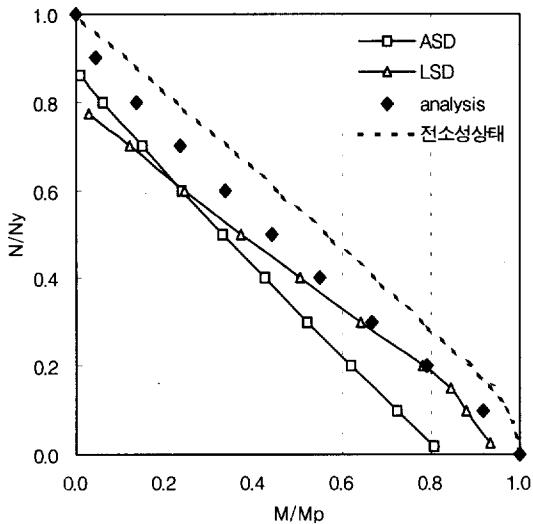


그림 13. 균등휨 모멘트(SM570Q, $\lambda = 50$, 콤팩트단면, 안전율, 저항계수 배제)

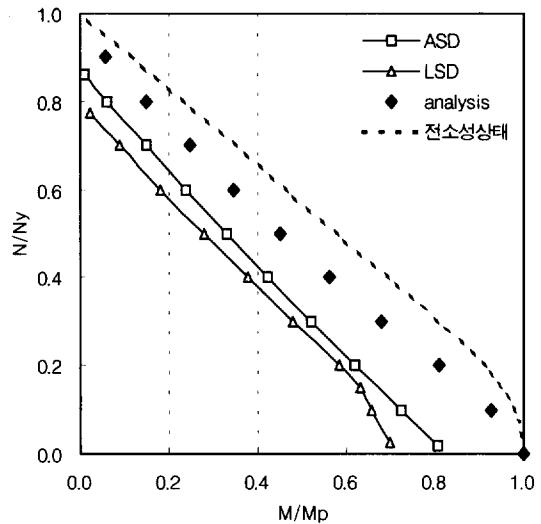


그림 15. 균등휨 모멘트(SM570Q, $\lambda = 50$, 비콤팩트단면, 안전율, 저항계수 배제)

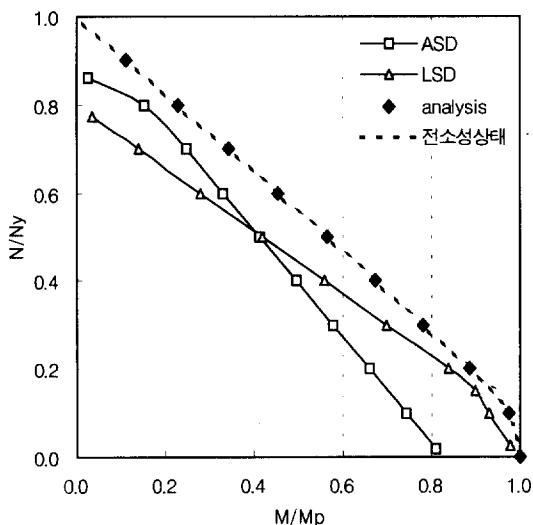


그림 14. 모멘트 역기울기(SM570Q, $\lambda = 50$, 콤팩트단면, 안전율, 저항계수 배제)

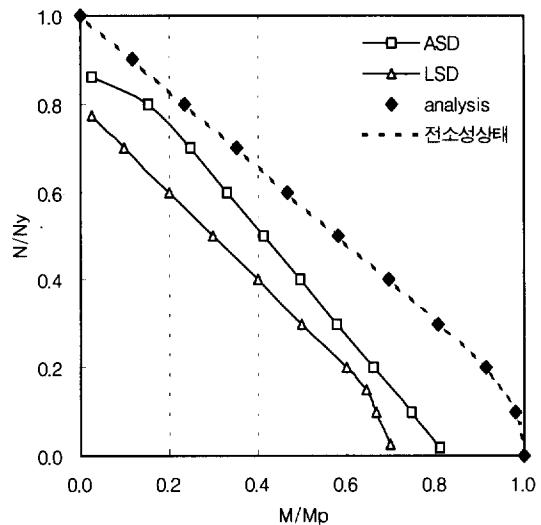


그림 16. 모멘트 역기울기(SM570Q, $\lambda = 50$, 비콤팩트단면, 안전율, 저항계수 배제)

그림 14는 그림 13과 같은 단면형상, 세장비에 대해서 모멘트 역기울기가 있는 경우에 대한 것이다.

이상과 같이 SM570Q의 경우에도 각 설계기준식은 SM520TMC와 같이 기둥재의 좌굴내력을

적절히 평가하고 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 각 설계기준식에 안전율 또는 저항계수를 적용하면 각 설계기준식에 SM570Q를 안전하게 적용시킬 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

SM520TMC, SM570Q의 고강도 H형강에 대하여 인장시험과 단주압축시험을 통한 폭두께비 조사와 기동재의 좌굴내력을 수치해석적으로 산정하여, 각 설계기준에의 적용에 대하여 고찰한 결과 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 각 기준에 따라 제작한 인장시험결과 각 기준에서 정한 공칭항복강도를 넘고 있는 것을 확인하였고, 각 기준에서 정한 폭두께비의 한계값은 고강도강에도 적용가능한 것으로 판단된다.
- (2) 수치해석에 의한 좌굴내력을 강구조 한계상태설계기준, 강구조 허용응력설계기준(안)에서 저항계수 및 안전율을 배제시켜 비교하면 각 설계기준은 고강도강의 좌굴내력을 과소 평가하거나 적절히 평가하고 있음을 확인하였다.
- (3) 따라서 설계시에는 강구조 한계상태설계기준, 허용응력설계기준(안)에 저항계수 또는 안전율이 포함되어 있으므로 고강도강 기동재를 각 설계기준식으로 설계시에는 충분한 안전성을 가지고 사용할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 포항제철(주)의 대학연구비 지원에 의해 수행되었다.

본 실험에 사용된 SM570Q 강재는 포항산업과학원(RIST)의 강구조연구소로부터 제공받았다. 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 대한건축학회, 강구조 한계상태설계기준 및 해설, 1997
2. 대한건축학회, 강구조 허용응력설계기준(안), 2000
3. 김희동, 모멘트 구배가 있는 충전콘크리트 각형강관 Beam-column의 최대내력, 중앙대학교 대학원 석사학위논문, 1997
4. 이명재, 콘크리트 충전 각형강관 기동재의 최대내력, 한국강구조학회논문집, 9권 3호, p391 ~p400, 1997년 9월
5. 일본건축학회, 강구조 한계상태설계규준 및 동해설, 1990
6. AISC, Allowable Stress Design, 1989
7. 대한건축학회, 강구조 계산기준 및 해설, 1983
8. 한국강구조학회, 건축구조용 TMCP 강재의 구조설계기준강도에 관한 연구보고서, 1999
9. T.V. Galambos, Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 4th Edition, John Wiley & Sons, 1988
10. T.V. Galambos, Structural Members And Frames, Prentice-Hall, 1968
11. C.G Salmon & J.E. Johnson, Steel Structure, 4th Edition, 1996

(접수일자 : 2001년 1월 17일)