

스테인리스 각형강관기둥의 최대내력

The Maximum Strength of Stainless Steel Rectangular Hollow Section Columns and Beam-Columns

이 명 재¹⁾

김 희 동²⁾

Lee, Myung Jae

Kim, Hee Dong

요약 : 본 논문은 스테인리스강이 건축구조용으로 이용될 때 중심압축재와 기둥의 최대내력을 수치해석으로 조사한 것이다. STS304의 소재인장시험결과로부터 응력-변형도 관계를 모델화하여 최대내력에 미치는 영향을 조사하였으며 강구조 한계상태설계기준식과의 비교를 시도하였다. 스테인리스강을 건축구조용으로 사용하기 위해서는 별도의 설계기준식이 필요하다는 점이 확인되었다.

ABSTRACT : The objective of this study is to investigate the maximum strength of stainless steel rectangular hollow section columns and beam-columns by using numerical analysis. Stress-strain relationships are modeled based on coupon tests results, and their influences on the maximum strength of columns and beam-columns are discussed. The analysis results are compared with the formula for the limit state design code of steel structures. It is ascertained that the design code for the stainless steel is needed to use stainless steel for the members of architectural structures.

핵심용어 : 스테인리스강, 각형강관, 압축재, 기둥, 한계상태설계기준

KEYWORDS : stainless steel, rectangular hollow section, column, beam-column, limit state design code

1. 서론

1.1 배경 및 목적

스테인리스강은 건축에서 일반적으로 외장재로 사용되어 왔으나, 내구성과 유지관리적인 면의 우수한 점 때문에 구조용으로 사용하는 방법이 꾸준히 개발되고 있다. 일본에서는 1995년에 실험 및 해석결과를 근거로 스테인리스 건축구조설계시공기준(日本ステンレス構造建築協會, 1995)을 제정한 바 있다.

국내에서도 스테인리스강을 구조용으로 사용할 경우에 대하여 적지 않은 연구가 보고되고 있다. 필자는 기계적 성질과 좌굴내력, H형강보의 횡좌굴내력 등에 대해서 연구보고한 바 있다(이명재, 1998; 1990). 또한 임성우 등(임성우, 2003)은 스테인리스304 강재의 국부좌굴에 대해서, 양영성 등(양영성, 2003; 2004)은 스테인리스강관과 일반구조용강관 단주 및 장주의 내력을 비교하거나, 복수강도곡선과의 고찰을 시도하고 있다.

그런데 강구조설계기준으로 한계상태설계기준(대한건축학회, 1998), 허용응력설계기준(한국강구조학회, 2003)이 개정 또는 전면개정되어 있으나 스테인리스강은 대상이 아니어서 구조용 강재로서 사용할 수 없는 실정이다. 이것은 스테인리스강이 구조용 강재로 사용되기 위해서는 더 많은 연구결과가 국내에서 축적되어져 일본과 같이 별도의 구조설계기준이 필요하다는 것을 의미한다.

이러한 배경 아래에서 본 연구의 목적은 스테인리스 각형강관을 대상으로 중심압축재와 기둥(beam-column)의 최대내력을 평가하고 일반 구조용강재를 대상으로 한 한계상태설계기준(대한건축학회, 1998)과의 비교를 통하여 최대내력을 고찰하고자 하는 것이다.

1.2 연구방법

본 연구에서는 스테인리스강 중에서 일반적인 STS304을 대상으로 하여 소재의 인장시험결과를 근거로 재료의 응력-변형도 관계가 각형강관의 모멘트-축력-곡률관계에 미치는 영향

1) 정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수, 공학박사
(Tel : 031-670-3345, Fax : 031-675-1776, E-mail : mjlee@cau.ac.kr)
2) 정회원, 중앙대학교 건축공학과 강사, 공학박사(drkimhd@hanafos.com)

본 논문에 대한 토의를 2005년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

을 고찰한다. 다음으로 중심압축재와 기둥(beam-column)의 최대내력을 수치해석을 통하여 산정하여, 응력-변형도 관계가 중심압축을 받는 각형강관의 최대내력에 미치는 영향을 고찰한다. 그리고 중심압축재와 기둥의 최대내력을 한계상태설계 기준의 설계식과 비교하여 고찰한다.

2. 기계적 성질과 응력-변형도 관계

2.1 기계적 성질

한국산업규격에서 STS304의 항복강도는 206Mpa으로 정해져 있는데 스테인리스강의 응력-변형도 관계는 이미 알려진 바와 같이 소성흐름구간(yield plateau)이 없다. 즉, 일반구조용강재가 냉간가공이나 용접에 의해 잔류응력이 발생하였을 때와 같은 형태로 나타난다. 또한 탄성계수는 일반강재와 비교하면 약간 낮다.

이런 경우 일반강재의 항복강도는 0.2% off set법에 의한 항복강도를 정하고 있다. 스테인리스강에 대해서도 0.2% offset법에 따르면 이 때의 응력-변형도 관계는 접선강성이 초기강성의 1/15정도나 저하하는 것이 문제가 되어 비현실적인 판폭두께비를 부재에 적용하지 않는 한 항복강도에 도달하기 전에 국부좌굴하게 된다.

이런 이유 때문에 일본 스테인리스구조건축협회(日本ステンレス構造建築協會, 1995)에서는 건축구조용 스테인리스강인 PS235-SUS304에 대해서 0.1% off set법에 의한 항복강도를 표 1과 같이 정하고 있다. 그리고 항복비는 응력기울기를 가진 부재의 소성화 영역을 지배하여 부재의 소성변형능력에 영향을 미치는 주요 인자이므로 그 상한을 0.6으로 정해놓고 있다. 표 1에는 일본 스테인리스구조건축협회에서 정한 스테인리스강의 정수를 나타내고 있다.

표 1. 스테인리스강(PS235-SUS304)의 기계적성질

탄성계수(E)	193000MPa
전단탄성계수(G)	74480MPa
포와송비(ν)	0.3
선팅창계수(ρ)	$17.3 \times 10^{-6}(1/^\circ\text{C})$
항복강도(F_y)	235 MPa이상
인장강도(F_u)	519 MPa이상
항복비(Y)	0.6 이하
연신율(elo.)	35% 이상

2.2 응력-변형도 관계 모델화

스테인리스강의 응력-변형도관계는 소성흐름구간이 존재하지 않으므로 항복강도는 일반강재와 달리 외국의 연구결과(日本ステンレス構造建築協會, 1995)에 따라 0.1% off set법으로 할 수 있다고 사료된다. 그런데 스테인리스강이 중심압축재 또는 기둥으로 사용될 때 좌굴에 대해서는 항복강도 뿐만 아니라 응력-변형도 관계도 영향을 미친다.

따라서 스테인리스강의 응력-변형도 관계를 0.1% off set법에 의한 항복강도와 비례한도를 사용하여 그림 1과 같이 모델화를 시도해 보았다. 응력-변형도곡선은 곡선 a, b, c, d의 4종류이다. 곡선 a는 소재의 실제 응력-변형도관계를 나타낸다. 곡선 b는 그림에서 ㉠-㉡-㉢-㉣-㉤ 선으로 일반강재가 소성가공이나 용접에 의한 잔류응력을 받지 않았을 때, 즉 순수한 강재의 응력-변형도 관계를 의미하고 곡선 c는 ㉠-㉡-㉢-㉣ 선으로 비례한도에서 초기강성이 낮아져서 비탄성화되면서 소성흐름구간이 있는 경우를 의미한다. 그리고 곡선 d는 ㉠-㉡-㉢ 선으로 $f/F_y=1.0$ 인 점에서 바로 변형도 경화상태로 가는 경우이다.

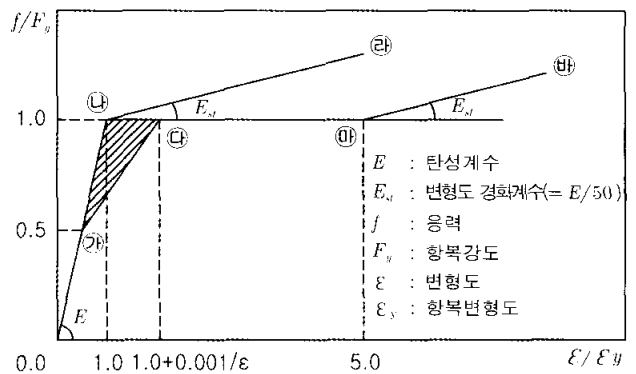


그림 1. 무차원화된 응력-변형도 관계

일반적으로 강재의 좌굴내력을 의미할 때 탄성과 비탄성영역에서의 좌굴이 의미를 가지는 것으로 f/F_y 가 1.0 이상에서 일어나는 소성좌굴 현상을 제외시키면 강재의 좌굴내력은 ㉠-㉡-㉢의 삼각형으로 이루어지는 부분에서 응력-변형도의 변화가 그 좌굴내력에 영향을 주게 된다(李明宰, 1984). 이 삼각형의 형상은 비례한도의 크기(항복강도에 대한 비율)에 따라서 달라지고 이에 따라 ㉠-㉡선의 기울기가 달라지게 된다.

그림 1의 무차원화된 응력-변형도 관계에 실제 소재인장시험 결과를 대비시켜 본다. 소재 인장시험결과는 임성우(임성우, 2003) 등의 연구결과에서 보고된 바 있는 것으로 □-100×100×7과 □-100×100×9에 대하여 0.1% off set법에 의한 항복강도는 각각 314Mpa, 266Mpa이고 인장강도는 각

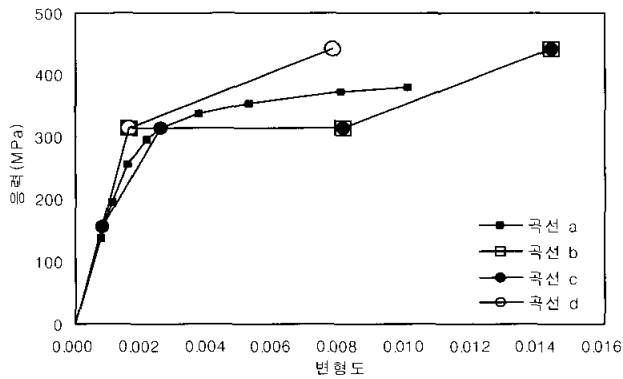


그림 2. □-100×100×7 응력-변형도 관계

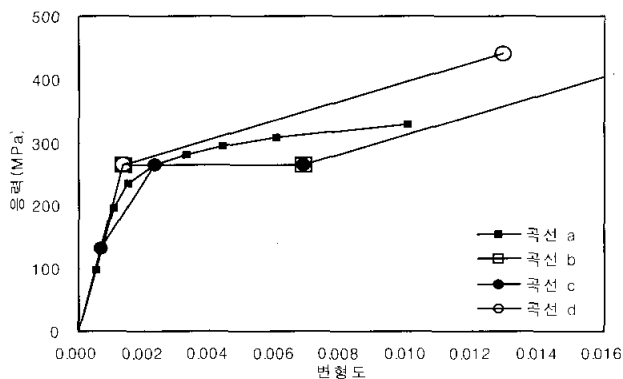


그림 3. □-100×100×9 응력-변형도 관계

각 648Mpa, 672Mpa이다. 이 값은 일본에서 PS235-SUS304 규격으로 정한 항복강도 235Mpa보다 높은 값을 나타내고 있다. 소재인장시험의 응력-변형도 관계(이하 곡선 a)를 곡선 b, c, d와 함께 그림 2, 3에 각각 나타낸다.

이 그림에서 탄성계수는 193000Mpa를 적용하고 있으며 비례한도는 항복강도의 50%이다. 이와 같이 소성흐름구간이 없는 스테인리스강의 응력-변형도관계는 그림 1과 같은 응력-변형도 관계의 모델에 적용될 수 있으며 곡선 a, b, c, d에 따라 부재단면의 저항능력에서 차이가 있게 된다.

2.3 축력-모멘트-곡률 관계

그림 3에 나타난 □-100×100×9의 소재의 응력-변형도관계(곡선 a)에 대하여 축력-모멘트-곡률관계를 구하여 중심압축재 및 기둥의 최대내력을 산정하는 data base로 하기로 한다.

축력-모멘트-곡률관계는 다음과 같은 방법으로 산정하였다 (李明宰, 1984).

- (1) 단면을 n등분하고 최초의 곡률을 정하여 탄성초기강성

으로 시작한다.

- (2) 단면 최외연의 변형도를 계산한다.
- (3) 최외연의 변형도가 비례한도의 변형도보다 작을 때는 탄성초기강성을 만족하지만, 곡률이 증가하면 비례한도의 변형도보다 작을 때는 탄성초기강성을 만족하지만 곡률이 증가하면 비례한도의 변형도를 벗어나므로 가정된 초기강성이 수렴할 때까지 반복계산 한다.

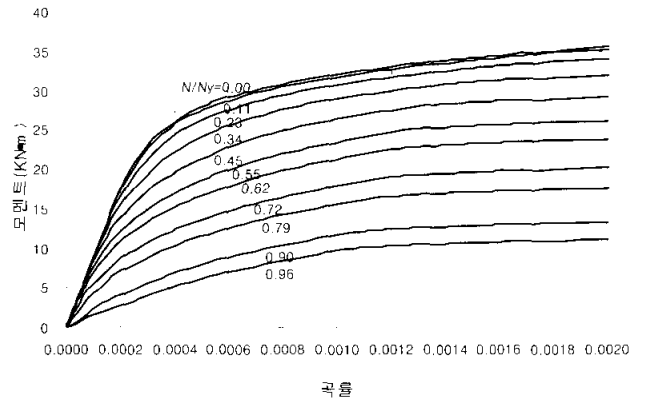


그림 4. 축력-모멘트-곡률관계 (곡선 a)

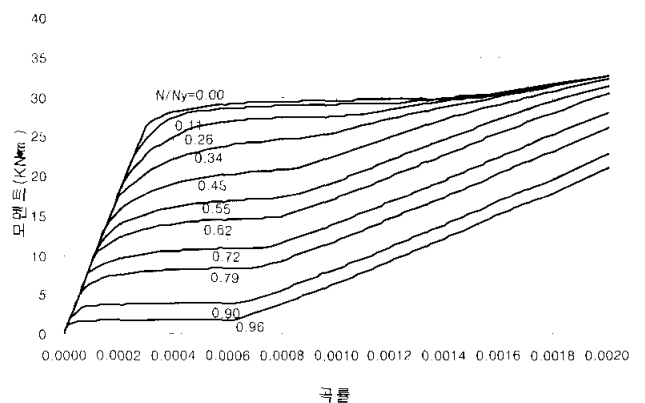


그림 5. 축력-모멘트-곡률관계 (곡선 b)

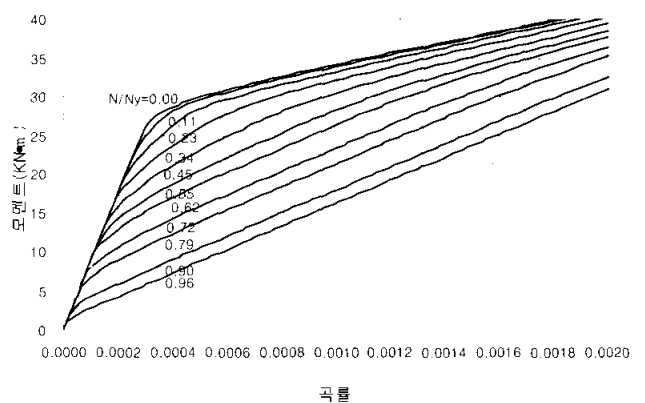


그림 6. 축력-모멘트-곡률관계 (곡선 c)

- (4) 수렴한 초기강성을 가지고 주어진 축력(P)에 대한 모멘트(M)를 구할 수 있다.
- (5) 곡률을 증가시켜서 같은 방법으로 진행하면 1개의 축력에 대한 모멘트-곡률관계를 구할 수 있다.
- (6) 다른 축력(P)에 대하여 앞의 과정을 반복하면 n 개의 축력에 대한 모멘트-곡률관계를 구할 수 있다.

이상과 같은 방법으로 그림 3의 곡선 a인 □-100×100×9의 응력-변형도관계를 사용하여 축력-모멘트-곡률관계를 나타내면 그림 4와 같이 된다.

그림 3에서의 곡선 b와 곡선 d의 응력-변형도 관계를 사용하여 □-100×100×9에 대한 축력-모멘트-곡률관계를 나타내면 각각 그림 5, 6과 같이 된다. 곡선 b에서는 소성흐름 구간이 있어서 축력-모멘트-곡률관계에서도 응력-변형도 관계와 같은 현상으로 모멘트 증가보다 곡률의 증가가 현저한 부분이 나타나고 있다. 곡선 d에서는 소성흐름구간이 없는데 이러한 영향이 축력-모멘트-곡률관계(그림 6)에서도 잘 보여지고 있다.

3. 중심압축재의 최대내력

3.1 수치해석 방법

최대내력은 초기변형이 있는 것을 전제조건으로 하며 beam-column이론에 근거하여 단면의 축력-모멘트-곡률관계를 이용 그림 7과 같이 구한다.

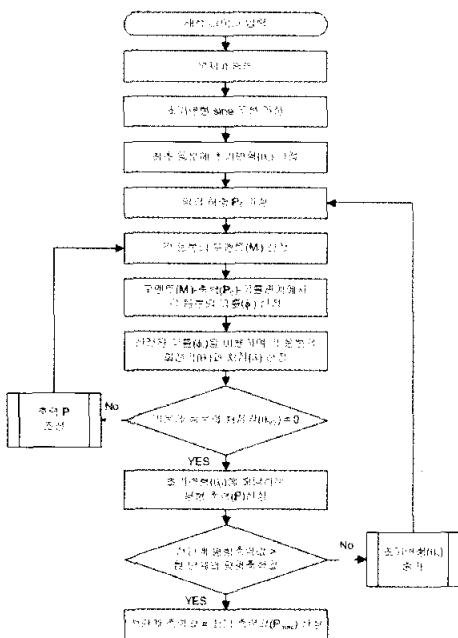


그림 7. 중심압축재 수치해석방법

3.2 수치해석 결과

이상과 같은 수치해석방법으로 중심압축재의 최대내력을 각형강관 □-100×100×7(단면적 2,604mm²)과 □-100×100×9(단면적 3,276mm²)에 대하여 구한 결과가 각각 표 2, 표 3과 같다. 중심압축재는 불가피하게 초기변형을 가지고 있고 초기변형의 크기에 따라 최대내력은 영향을 받는다. 강재의 부재는 일반적으로 약 1/2000 전후의 초기변형을 가지고 있는 것으로 알려져 있으므로 수치해석에서는 1/2000의 초기변형을 적용하였다.

표에서는 소재의 인장시험결과로부터 구한 응력-변형도 관계(곡선 a)를 이용한 결과 외에도 곡선 b, 곡선 c, 곡선 d의 응력-변형도 관계를 이용한 결과도 함께 나타나 있다. 표에서는 최대내력(σ_c)과 세장비(λ)가 소재의 항복강도(σ_y)와 세장변수($\lambda_c = KL/r\pi\sqrt{F_y/E}$)로 무차원화되어 있다.

그림 8, 9는 수치해석결과를 무차원화한 최대내력과 세장비와의 관계를 보여주고 있다. 이 그림에서 재료의 응력-변형도 관계가 최대내력에 매우 밀접하게 관계한다는 것을 알 수 있다. 즉, 곡선 a, b, c를 이용한 수치해석결과를 비교하면 항복강도까지 탄성계수를 유지한 곡선 b의 경우가 세장비 전체 영역에서 최대내력이 가장 높게 나타나고 있다. 또한 곡선 c와 같이 비례한도가 항복강도의 50%가 되는 경우 세장비의 일부 영역 $0.4 < \lambda/\lambda_c < 0.6$ 에서 곡선 c가 곡선 a의 경우보다 최대내력이 높게 나타나는 것은 그림 1, 2, 3의 응력-변형도관계에서 설명될 수 있다. 곡선 c는 비례한도인 ㉠점에서 0.1% off set법의 항복강도인 ㉡점까지 접선기울기가 일정한 값을 가지지만 곡선 a의 경우는 ㉠점에서 ㉡점에 이를 때까지 접선기울기가 변해서 항복강도 부근에서의 접선기울기는 곡선 c의 일정한 접선기울기보다 낮아지게 된다. 중심압축재의 비탄성 최대내력은 접선계수이론(tangent modulus theory)에 따라 접선기울기에 따라 정해지므로(Shanley, 1947) 이러한 점이 그림 8, 그림 9에 곡선 a와 곡선 c의 경우 $0.4 < \lambda/\lambda_c < 0.6$ 부분에서 잘 나타나고 있다.

3.3 한계상태설계기준과의 비교

강구조의 한계상태설계기준은 일반강재를 대상으로 한 것으로 스테인리스강은 적용시킬 수 없다. 그렇지만 스테인리스강에 관한 설계기준이 없는 실정이므로 스테인리스강에 대하여 일반강재의 설계기준과 비교하는 것은 의미가 있다고 본다.

한계상태설계기준에서는 일반강의 압축재에 대하여 $\phi_c P_n$ 는 다음과 같이 적용하도록 하고 있다.

표 2. 중심압축재 최대내력 (□-100×100×7)

σ-ε 관계	세장비	λ/λ_{cr}	σ/σ_y	σ (MPa)	Pcr (kN)	
곡선 a	30	0.385	0.985	309	805	
	40	0.513	0.911	286	744	
	50	0.641	0.840	264	686	
	60	0.770	0.759	238	621	
	70	0.898	0.479	150	391	
	80	1.026	0.597	187	488	
	90	1.155	0.522	164	426	
	100	1.283	0.457	143	373	
	110	1.411	0.397	125	325	
	120	1.539	0.347	109	283	
	130	1.668	0.304	95	249	
	140	1.796	0.268	84	220	
	150	1.924	0.236	75	193	
	곡선 b	30	0.385	0.991	311	810
		40	0.513	0.990	311	809
50		0.641	0.946	297	773	
60		0.770	0.900	282	736	
70		0.898	0.856	269	699	
80		1.026	0.757	237	619	
90		1.155	0.652	205	533	
100		1.283	0.553	174	453	
110		1.411	0.469	147	383	
120		1.539	0.397	125	325	
130		1.668	0.342	108	280	
140		1.796	0.297	93	242	
150		1.924	0.260	81	212	
곡선 c		30	0.385	0.991	311	810
		40	0.513	0.938	294	767
	50	0.641	0.857	269	700	
	60	0.770	0.718	226	586	
	70	0.898	0.624	196	510	
	80	1.026	0.541	170	442	
	90	1.155	0.468	147	383	
	100	1.283	0.416	130	340	
	110	1.411	0.381	120	312	
	120	1.539	0.334	108	281	
	130	1.668	0.303	95	247	
	140	1.796	0.270	85	221	
	150	1.924	0.243	76	199	
	곡선 d	30	0.385	0.991	311	810
		40	0.513	0.990	311	809
50		0.641	0.946	297	773	
60		0.770	0.900	282	736	
70		0.898	0.856	269	699	
80		1.026	0.757	237	619	
90		1.155	0.652	205	533	
100		1.283	0.553	174	452	
110		1.411	0.469	147	383	
120		1.539	0.397	125	325	
130		1.668	0.342	108	280	
140		1.796	0.297	93	242	
150		1.924	0.260	81	212	

표 3. 중심압축재 최대내력 (□-100×100×9)

σ-ε 관계	세장비	λ/λ_{cr}	σ/σ_y	σ (MPa)	Pcr (kN)	
곡선 a	30	0.354	0.972	258	846	
	40	0.472	0.902	239	786	
	50	0.590	0.845	225	737	
	60	0.708	0.791	210	688	
	70	0.826	0.740	202	644	
	80	0.944	0.682	181	593	
	90	1.063	0.622	166	542	
	100	1.181	0.557	148	485	
	110	1.299	0.489	130	426	
	120	1.417	0.430	114	374	
	130	1.535	0.375	100	327	
	140	1.653	0.331	88	288	
	150	1.771	0.291	77	254	
	곡선 b	30	0.354	0.988	263	860
		40	0.472	0.972	259	846
50		0.590	0.955	254	832	
60		0.708	0.923	245	803	
70		0.826	0.879	233	765	
80		0.944	0.810	216	705	
90		1.063	0.731	195	637	
100		1.181	0.630	168	548	
110		1.299	0.539	143	470	
120		1.417	0.462	123	402	
130		1.535	0.398	106	346	
140		1.653	0.347	92	302	
150		1.771	0.304	80	265	
곡선 c		30	0.354	0.979	260	853
		40	0.472	0.945	251	823
	50	0.590	0.874	232	761	
	60	0.708	0.744	198	648	
	70	0.826	0.654	174	569	
	80	0.944	0.576	153	501	
	90	1.063	0.504	134	438	
	100	1.181	0.443	118	385	
	110	1.299	0.405	108	353	
	120	1.417	0.374	99	326	
	130	1.535	0.344	91	300	
	140	1.653	0.306	81	267	
	150	1.771	0.273	73	238	
	곡선 d	30	0.354	0.991	264	863
		40	0.472	0.975	259	850
50		0.590	0.958	255	835	
60		0.708	0.927	246	807	
70		0.826	0.883	234	769	
80		0.944	0.813	216	708	
90		1.063	0.732	195	637	
100		1.181	0.630	168	548	
110		1.299	0.540	143	470	
120		1.417	0.462	123	402	
130		1.535	0.398	106	346	
140		1.653	0.347	92	302	
150		1.771	0.304	80	265	

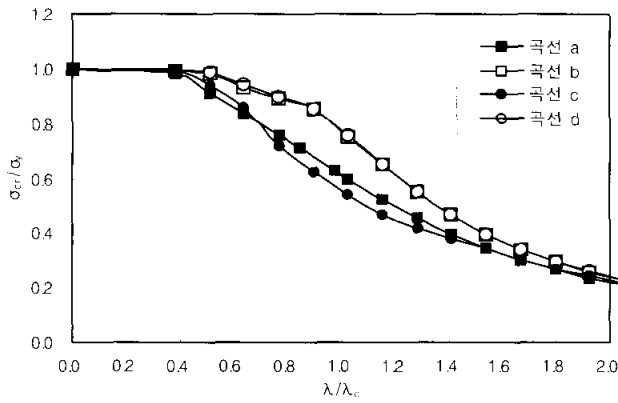


그림 8. 최대내력과 세장비와의 관계 (□-100×100×7)

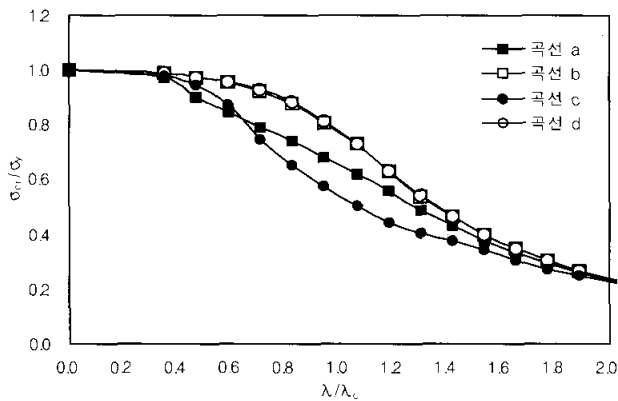


그림 9. 최대내력과 세장비와의 관계 (□-100×100×9)

$$\phi_c = 0.85 \quad (1)$$

$$P_n = A_g F_{cr} \quad (2)$$

(1) $\lambda_c \leq 1.5$ 인 경우

$$F_{cr} = (0.658 \lambda_c^2) F_y \quad (3)$$

(2) $\lambda_c > 1.5$ 인 경우

$$F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y \quad (4)$$

여기서, λ_c : 세장변수 $(= \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}})$

A_g : 부재의 총단면적

F_y : 강재의 항복강도

E : 강재의 탄성계수

K : 유효길이계수

L : 부재의 비지지길이

r : 단면2차반경

그림 10은 □-100×100×7, □-100×100×9의 각각에 대하여 소재 인장시험결과로부터 얻어진 응력-변형도관계(곡선 c)를 이용하여 최대내력을 구한 결과를 한계상태설계기준과 비교한 것이다. 그림에서 실선은 저항계수를 배제한 것으로 공칭압축강도(P_n)를 나타내고 점선은 저항계수를 고려한 것으로 설계압축강도($\phi_c P_n$)를 나타내고 있다.

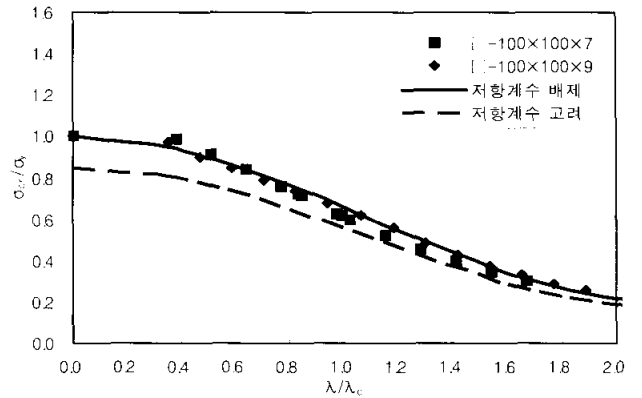


그림 10. 한계상태설계기준과의 비교 ($\sigma_v=314\text{Mpa}$, 266Mpa)

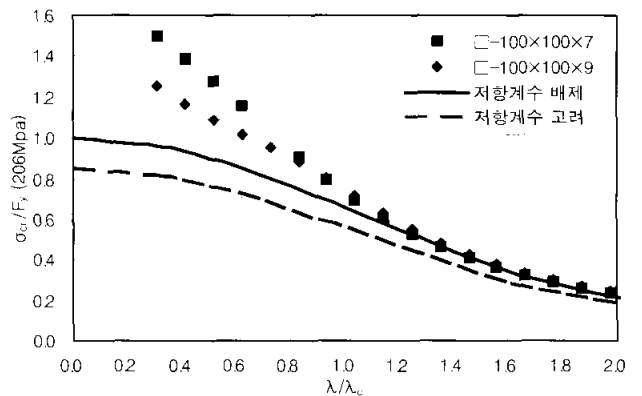


그림 11. $F_v=206\text{Mpa}$ 을 적용한 경우

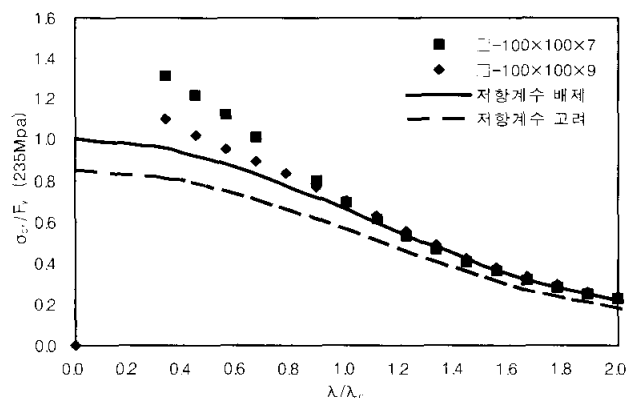


그림 12. $F_v=235\text{Mpa}$ 을 적용한 경우

그림에 스테인리스강의 최대내력은 일반강재의 최대내력으로 정하고 있는 실선에 미치지 못하는 경우가 있음을 보여주고 있다. 이 경우 항복강도(σ_y)로서 소재인장시험결과로부터 얻어진 실제의 항복강도 314Mpa, 266Mpa 을 각각 적용하고 있는 것으로 0.1%off set법에 의해서 얻어진 것이다. 그런데 STS304 스테인리스강의 공칭항복강도(F_y)는 한국산업규격에서 206Mpa 로 규정하고 있다. 그래서 206Mpa 을 항복강도로 하여 무차원화해 보면 그림 11과 같이 된다. 그림 10과 달리 공칭항복강도(F_y)를 적용하면 스테인리스강의 중심압축재에 한계상태설계기준식을 적용하여 안전한 결과를 얻고 있음을 알 수 있다.

일반강재의 기본이 되는 것은 SS400으로 F_y 가 235Mpa로 되어 있다. 일본에서 STS304와 다르게 규정하고 있는 PS235-SUS304의 F_y 는 235Mpa 이다. □-100×100×7, □-100×100×9의 실제 항복강도 (0.1% off set법)도 각각 314Mpa, 266Mpa 로 235Mpa 보다 높은 값을 나타내고 있다. 그래서 STS304에 F_y 로서 235Mpa을 적용하여 보면 그림 12와 같다. λ/λ_c 가 1.2를 넘어서는 범위에서는 한계상태설계기준식을 약간 만족시키지 못하고 있으나 저항계수를 고려하면 안전측의 결과를 나타내고 있다고 볼 수 있다.

4. 기둥(beam-column)의 최대내력

4.1 수치해석방법

기둥의 최대내력 산정방법은 중심압축재의 경우와 같이 단면의 축력-모멘트-곡률관계를 이용하는 점은 동일하나 구체적인 산정방법은 그림 13과 같다(김희동, 1996).

4.2 수치해석 결과

□-100×100×7, □-100×100×9의 각각에 대하여 양단 단순지지상태에서 일정축력과 균등휨모멘트가 작용할 때에 최대 휨모멘트를 수치해석으로 구한 결과가 표 4, 5이다.

세장비로서는 탄성역에서 최대내력이 결정 될 것으로 예상되는 세장비 100과 비탄성역에서 최대내력이 결정 될 것으로 예상되는 세장비 60을 선택하였다. 또한 표에는 소재의 인장시험으로부터 얻어진 응력-변형도 관계(곡선 a)를 이용한 결과뿐만 아니라 그림 1의 곡선 b, c, d 의 응력-변형도 관계를 이용한 결과도 나타내고 있다.

그림 14, 15는 세장비 60에 대하여 각 응력-변형도 관계

에 대한 최대내력을 나타낸 것이다.

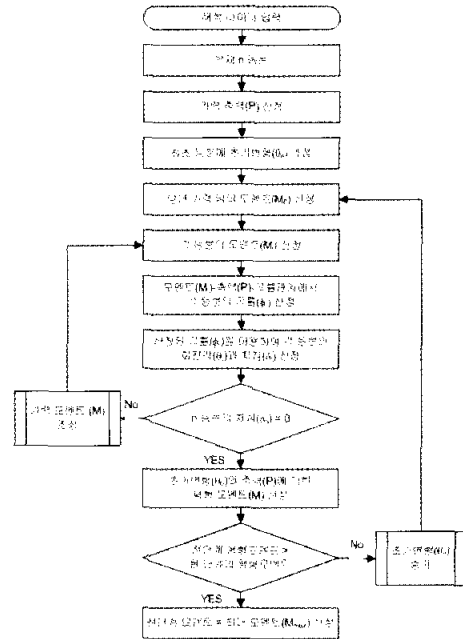


그림 13. 기둥 수치해석방법

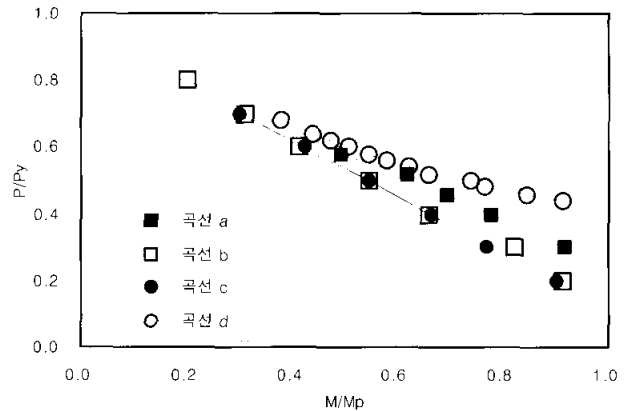


그림 14. 기둥의 최대내력 (□-100×100×7)

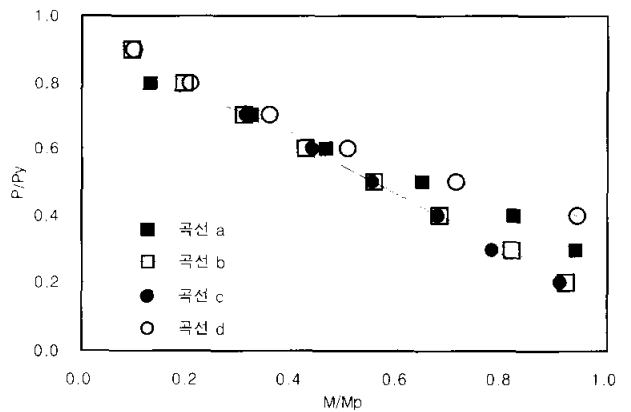


그림 15. 기둥의 최대내력 (□-100×100×9)

표 4. 기둥의 최대내력 (□-100×100×7)

곡선	λ	P (kN)	P/Py	M (kN·cm)	M/Mp
a	100 Py=817kN Mp=2860kN·cm	123	0.15	2740	0.96
		164	0.2	2490	0.87
		204	0.25	2260	0.79
		245	0.3	2010	0.70
		311	0.38	1530	0.54
b	100	82	0.1	2710	0.95
		164	0.2	2440	0.86
		245	0.3	1980	0.69
		327	0.4	1660	0.58
		409	0.5	1340	0.47
c	100	82	0.1	2680	0.94
		164	0.2	2310	0.81
		245	0.3	2020	0.71
		327	0.4	780	0.27
		368	0.45	140	0.05
d	100	164	0.2	2790	0.98
		245	0.3	2210	0.77
		327	0.4	1690	0.59
		409	0.5	1350	0.47
		474	0.58	1060	0.37
곡선	λ	P (kN)	P/Py	M (kN·cm)	M/Mp
a	60 Py=817kN Mp=2860kN·cm	245	0.3	2620	0.92
		327	0.4	2220	0.78
		376	0.46	1980	0.69
		424	0.52	1760	0.62
		474	0.58	1410	0.49
b	60	164	0.2	2610	0.91
		327	0.4	1880	0.66
		490	0.6	1180	0.41
		572	0.7	890	0.31
		654	0.8	580	0.20
c	60	164	0.2	2570	0.90
		245	0.3	2200	0.77
		409	0.5	1550	0.54
		490	0.6	1220	0.43
		572	0.7	860	0.30
d	60	356	0.44	2610	0.91
		392	0.48	2180	0.76
		441	0.54	1770	0.62
		490	0.6	1450	0.51
		556	0.68	1080	0.38

표 5. 기둥의 최대내력 (□-100×100×9)

곡선	λ	P (kN)	P/Py	M (kN·cm)	M/Mp
a	100 Py=871kN Mp=2980kN·cm	174	0.2	2690	0.90
		261	0.3	2210	0.74
		348	0.4	1560	0.5
		435	0.5	1050	0.35
		522	0.6	440	0.15
b	100	87	0.1	2840	0.95
		174	0.2	2580	0.87
		261	0.3	2120	0.71
		348	0.4	1730	0.58
		435	0.5	1390	0.47
c	100	87	0.1	2810	0.94
		174	0.2	2440	0.82
		261	0.3	2140	0.72
		348	0.4	1790	0.60
		417	0.48	130	0.04
d	100	174	0.2	2880	0.97
		261	0.3	2320	0.78
		348	0.4	1810	0.61
		435	0.5	1490	0.50
		503	0.6	1100	0.37
곡선	λ	P (kN)	P/Py	M (kN·cm)	M/Mp
a	60 Py=871kN Mp=2980kN·cm	261.2	0.3	2790	0.94
		348.2	0.4	2450	0.82
		435.3	0.5	1930	0.65
		522.4	0.6	1380	0.47
		696.5	0.8	390	0.13
b	60	174.2	0.2	2740	0.92
		261.2	0.3	2440	0.82
		348.2	0.4	2030	0.68
		609.5	0.7	920	0.31
		783.6	0.9	290	0.10
c	60	174.2	0.2	2710	0.91
		261.2	0.3	2320	0.78
		348.2	0.4	2010	0.68
		435.3	0.5	1650	0.55
		609.5	0.7	930	0.31
d	60	348.2	0.4	2820	0.94
		435.3	0.5	2120	0.71
		522.4	0.6	1510	0.51
		609.5	0.7	1060	0.36
		783.6	0.9	290	0.10

기둥의 경우도 중심압축재와 동일한 경향이 나타나고 있다. 즉 응력-변형도 관계의 곡선 d가 가장 높은 내력을 나타내고 곡선 c가 곡선 d와 관계에서 중심압축재에서 나타나는 접선기울기의 영향은 기둥의 최대내력에서는 그 영향이 뚜렷하게 보이지 않고 있다. 이것은 기둥의 최대내력에 미치는 영향으로서 강재의 응력-변형도 관계뿐만 아니라 축력(P)과 휨모멘트에 의한 처짐(δ)과의 부가모멘트(P-δ효과)의 영향도 매우 중요한 인자가 되기 때문이다.

4.3 한계상태 설계기준과의 비교

강구조 한계상태설계기준에서 각형강관 기둥이 균등 1축 휨을 받는 경우 식은 다음과 같이 규정되어 있다.

(1) $P_u / \phi P_n \geq 0.2$ 인 경우

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} \leq 1.0 \quad (5)$$

(2) $P_u / \phi P_n < 0.2$ 인 경우

$$\frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} \leq 1.0 \quad (6)$$

- 여기서, P_u : 소요압축강도
- ϕ_c : 압축저항계수(0.85)
- P_n : 공칭압축강도
- M_u : 2차효과를 포함한 소요휨강도
- ϕ_b : 휨저항계수(0.9)
- M_n : 공칭휨강도

□-100×100×7, □-100×100×9의 각각에 대해서 세장비 60인 경우에 대해서 해석결과를 한계상태설계기준의 기둥 내력식과 함께 나타낸 것이 그림 16, 17이다. 횡축과 종축의 전소성모멘트(M_p)와 항복축력(P_y)은 소재의 인장시험결과로부터 얻은 항복강도를 이용하여 산정한 것이다. 그림에서 비록 강구조 한계상태설계기준의 기둥 내력식이 스테인리스강을 대상으로 한 것이 아니지만 스테인리스강에 적용하여도 안전측으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한 STS304의 한국산업규격에서의 공칭항복강도는 206Mpa로 규정하고 있다. 206Mpa를 공칭항복강도로 하여 기둥 내력식에 적용하여 보면 □-100×100×7, □-100×100×9의 세장비 60의 경우 그림 18, 19와 같이 더욱 안전측의 결과로 나타나고 있다.

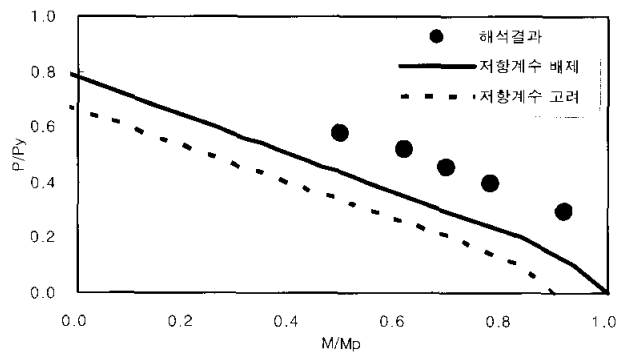


그림 16. 기둥 내력식과의 비교 (□-100×100×7, λ=60)

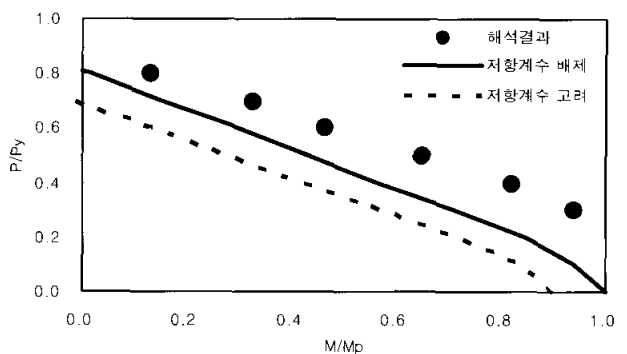


그림 17. 기둥 내력식과의 비교 (□-100×100×9, λ=60)

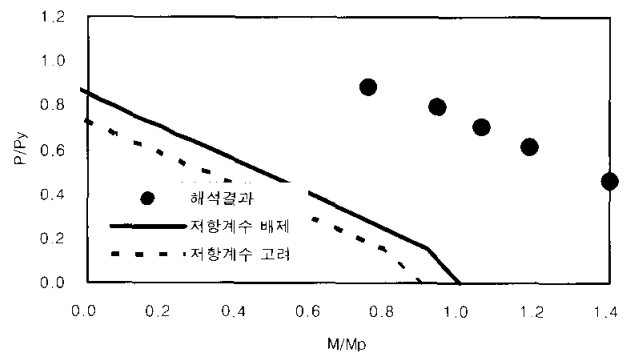


그림 18. 항복강도를 206Mpa로 한 경우 (□-100×100×7, λ=60)

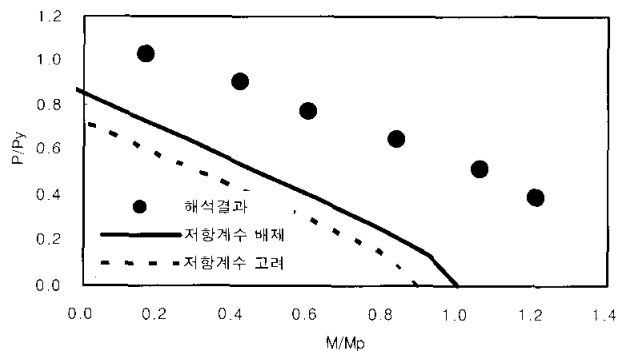


그림 19. 항복강도를 206Mpa로 한 경우 (□-100×100×9, λ=60)

이와 같이 스테인리스강을 일반강의 기둥내력식에 적용하여도 그 내력의 안전성은 확보되지만 탄성계수, 항복강도 등 재료의 기계적 성질에서 상당히 많은 이질요소를 가지고 있으므로 단순히 내력의 안전성이 확보되었다고 일반강재 설계기준을 따라도 좋다고 진단하는 것은 무리가 있다고 사료된다.

5. 결론

스테인리스 각형강관의 중심압축재와 기둥의 내력에 대해서 소재의 인장시험결과와 응력-변형도관계의 모델화를 이용하여 최대내력을 수치해석한 결과를 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 스테인리스강의 항복강도 설정은 접선강성이 항복강도 도달시에 너무 낮아 일반강재의 방법과 다르게 설정되어야 함을 알 수 있다.
- (2) 항복 흐름구간이 없는 스테인리스강의 응력-변형도 관계는 그림1의 관계로 모델화될 수 있다.
- (3) 중심 압축재의 최대내력은 한계상태설계기준의 내력식과 비교하면 만족시키지 못하는 부분이 있으나 공칭항복강도를 사용하면 안전측의 결과를 얻게 된다.
- (4) 기둥의 최대내력은 한계상태설계기준의 내력식과 비교하면 안전측의 결과를 얻게 되고 또한 공칭항복강도를 사용하면 더욱 안전측으로 평가된다.
- (5) 이상과 같이 스테인리스강을 일반강재의 중심압축재와 기둥의 내력식에 공칭항복강도를 적용하면 안전측의 결과로 나타나지만 재료의 기계적 성질에서 일반강재와 상당한 차이가 있으므로 단순히 내력의 안전성이 확보되었다고 일반강재의 설계기준식을 따르기에는 무리가 있다고 판단된다. 따라서 일반강재와는 별도의 설계기준식이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

이 연구는 중앙대학교 2003학년도 교내학술연구비의 지원으로 이루어졌다. 소재의 인장시험결과는 포항산업과학연구원 강구조연구소의 임성우박사의 제공에 의한 것으로 감사드린다.

참고 문헌

日本ステンレス構造建築協會(1995) ステンレス建築構造 設計 施工基準・同解説

이명재(1998.12) Stainless Steel의 기계적 성질 및 좌굴내력에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 5권 6호, pp.319-326

이명재(1990.12) Stainless Steel H형 단면보의 횡좌굴내력에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 6권 6호, pp.271-277

장인화·임성우(2003.2) 스테인리스 304 강재의 국부좌굴에 관한연구, 한국강구조학회논문집, 제15권 1호, pp.51~57

양영성 외 2인(2003.10) 스테인리스강관과 일반구조용강관 단주내력비교에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 제 15권 5호, pp.561~570

양영성 외 2인(2003.10) 스테인리스강관과 일반구조용강관 단주내력비교에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 제15 권 5호, pp.561~570

양영성 외 1인(2003.6) 스테인리스 강관 기둥의 내력에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계 19권 6호, pp.93~102

양영성 외 2인(2004년6월) 스테인리스 원형강관과 일반구조 용 원형강관 기둥의 내력비교에 관한 실험적 연구, 대한 건축학회 구조계 20권 6호, pp.51~57

대한건축학회(1998) 강구조한계상태 설계기준 및 해설

한국강구조학회(2003) 허용응력설계법에 의한 강구조설계기 준

李明宰(1984) 角形及び円形鋼管柱の最大耐力にする研究, 東京 大學修士學位論文

김희동(1996) 모멘트 구배가 있는 충전콘크리트 각형강관 Beam-Column의 최대내력, 중앙대학교 대학원 석사학 위논문

F..R. Shanley(1947) Inelastic Column Theory, *Journal of the Aeronautical Sciences*, No.5, May, 1947

(접수일자 : 2005. 1. 15 / 심사일 2005. 1. 24/
심사완료일 2005. 2. 10)