

압축을 받는 강관의 단면보강에 따른 좌굴특성 검토

The Study on the Buckling Characteristics of Partially Increased Sectional Area for Compressed Circular Steel Tube

권영환* 정환목** 박상훈*** 석창목***
Kwon, Young-Hwan Jung, Hwan-Mok Park, Sang-Hoon Suk, Chang-Mok

ABSTRACT

As the slenderness ratio increases, it is necessary to examine the increased sectional area of member by means of increasing buckling strength because the sectional area of compressive member is designed in accordance with buckling. In this reason, to reinforce insufficient strength, it does not have to reinforce the whole sectional area of member. Force of member can be increased in a way to restrict buckling mode by means of the partially increased sectional area of member.

Therefore, in this study, we put emphasis on compressive members among many members that constitute space frame and try to get basic data about the reinforcement of space frame by means of investigating the buckling characteristic according to the size and length of partially increased sectional area of member.

1. 서론

산업발전과 더불어 지구 환경 오염이 가속화되자 '건축=창조'에서 '건축=파괴'로 건축의 개념 자체가 바뀌고 있다. '건축=창조'의 개념을 되살리기 위해 다가오는 21세기의 건축은 '무에서 유를 창조하는 건축'과 더불어 '유에서 유를 창조하는 건축'으로 그 영역을 확장해 나가야 할 것이다. 이제 기존 건축물이 노후화 되면 무조건 헐고 새로운 건축물을 짓기보다는 보수·보강 및 유지관리 등에 의해 건축물 수명 연장에 중점을 두어야 한다는 것은 누구나 공감하고 있다.

3차원 대공간 구조물의 일종인 스페이스 프레임 구조물의 경우도 예외는 아닐 것이다. 스페이스 프레임 구조물이 설계변경, 용도변경, 유지관리부실, 사용재료의 노후화 등에 의해 단면내력이 부족하면 적절한 보강을 하여 구조물 수명을 연장할 필요가 있으며, 그 보강방법에 대해서는 여러 가지 아이디어가 있을 수 있다.

압축재와 인장재만으로 구성되는 복층 핀접합 스페이스 프레임 구조물의 경우 내력이 부족하여 부재단면 보강을 실시할 경우, 인장재는 접합부 및 부재 전단면에 대한 보강을 실시해야 할 것이다. 그러나 압축재

* 경북대학교 건축공학과 교수

** (주)대동엠에스 기술이사, 서울산업대학교 겸임교수·공학

*** 경북대학교 건축공학과 박사과정

는 세장비가 클수록 좌굴에 의해 부재단면이 설계되므로 좌굴하중을 높이는 방법에 의해 단면 보강을 검토할 수 있다. 즉 압축재의 경우, 부족내력의 보강을 위해서 반드시 부재길이 전체에 대해 단면을 보강할 필요가 없고, 부재의 국부보강에 의해 좌굴모드를 구속시키는 방법으로 부재내력을 증가시킬 수 있을 것이다. 그러므로 이 방법은, 부재 전체를 교환해야 하는 번거로움을 가진 인장재 보강의 경우와는 다르게, 부재 교환없이 현장에서 간단한 작업만으로 내력을 증가시킬 수가 있으므로 압축재의 보강부재 단면크기 및 보강길이에 따른 좌굴특성을 검토하는 것은 대단히 의의가 있다.

따라서, 본 논문에서는 스페이스 프레임을 구성하는 부재요소중 압축부재에 중점을 두고 보강부재의 단면크기 및 보강길이에 따른 좌굴특성을 검토하여 스페이스 프레임 보강에 대한 기초 자료를 얻는데 그 목적이 있다.

2. 해석모델 형상 및 제원

본 연구에서 사용하는 해석모델은 스페이스 프레임 구조물을 구성하는 부재중에서 압축부재만을 그 대상으로 한다. 그림1에서 표시하는 바와 같이 보강이 없는 모재는 길이가 300cm인 원형강관을 사용하며, 단면크기는 표1에 나타내는 7종류로 한다. 보강부재는 모재와 마찬가지로 원형강관을 사용하되, 보강부재 길이는 모재길이를 기준한 보강길이의 백분을 즉, $\beta = \frac{l}{L} \times 100\%$ (단, $L = 300\text{cm}$)로 표시하며, 본 연구에서는 $\beta = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100$ 인 11종류로 했다. 보강부재의 직경은 $D + (2\alpha)t$ 이고 단면두께는 αt 이다. 여기서, D 는 모재의 직경, t 는 모재의 단면두께, α 는 보강단면 계수로 본 연구에서는 $\alpha = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ 의 6종류로 한다. 보강방법은 모재의 중앙부를 기점으로 양단부로 보강한다.

모재 및 보강부재의 탄성계수 E 는 $2100t/\text{cm}^2$, 프와송비 ν 는 0.3 이며, 모재의 기타 제원은 표1에 나타내는 바와 같다. 모델작성에 있어서 제원 및 부재선택의 기준은 스페이스 프레임 구조물 압축부재에 일반적으로 많이 사용되는 세장비를 기준으로 했으며, 본 모델에서 도입된 모재의 세장비 λ 의 영역은 표1에 나타내는 바와 같이 약 70~210사이에 있다. 표2에 보강부재의 단면크기를 나타낸다.

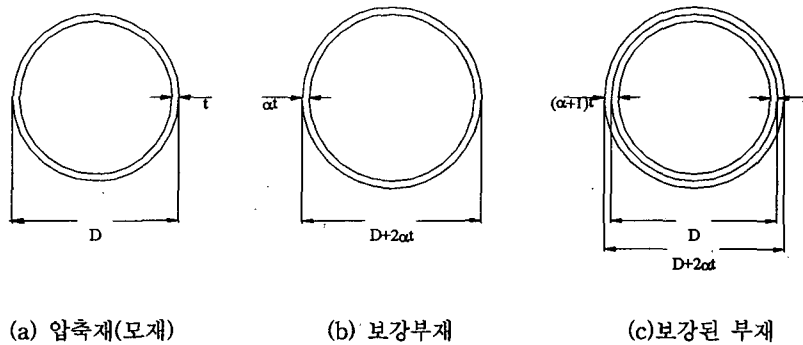


그림 1. 해석모델의 단면형상

3. 해석방법 및 해석상의 제조건

본 연구의 좌굴해석 방법은 보강이 없는 단일봉의 경우 오일러의 좌굴이론식과 유한요소법에 의한 3차원 비선형 좌굴해석 프로그램에 의한 2방법을 도입했으며, 보강된 부재에 대한 좌굴해석은 유한요소법에 의해 행했다. 유한요소해석은 좌굴전 기하학적 비선형을 고려하였으며, 부재 강성 행렬식이 0이 될 때 고유치 해석을 수행하여 좌굴하중과 좌굴모드를 구하였다. 해석조건에 있어서 부재의 양단은 고정으로 가정했으며, 하중은 부재축방향으로 압축력만 재하시켰다.

표 1. 압축재(모재)의 부재제원

모델명	제원	D×t(mm)	A(cm ²)	I(cm ⁴)	i(cm)	λ
M-1		φ-42.7×2.3	2.919	5.97	1.43	209.79
M-2		φ-48.6×3.2	4.564	11.8	1.61	186.34
M-3		φ-60.5×3.2	5.760	23.7	2.03	147.78
M-4		φ-76.3×3.2	7.349	42.9	2.59	115.83
M-5		φ-89.1×4.0	10.69	97.0	3.01	99.67
M-6		φ-101.6×4.0	12.26	146	3.45	86.96
M-7		φ-114.4×4.5	15.52	234	3.89	77.12

D : 강관의 직경 t : 두께 A : 단면적 I : 단면2차모멘트 i : 단면2차반경 λ : 세장비

표 2. 보강부재의 단면치수

$$\phi-(D+2at)\times at$$

α	모델명	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
0.5		45.00×1.15	51.80×1.60	63.70×1.60	79.50×1.60	93.10×2.00	105.60×2.00	118.90×2.25
1.0		47.30×2.30	55.00×3.20	66.90×3.20	82.70×3.20	97.10×4.00	109.60×4.00	123.40×4.50
1.5		49.60×3.45	58.20×4.80	70.10×4.80	85.90×4.80	101.10×6.00	113.60×6.00	127.90×6.75
2.0		51.90×4.60	61.40×6.40	73.30×6.40	89.10×6.40	105.10×8.00	117.60×8.00	132.40×9.00
2.5		54.20×5.75	66.60×9.00	76.50×8.00	92.30×8.00	109.1×10.0	121.6×10.0	136.9×11.25
3.0		56.50×6.90	70.20×10.8	79.70×9.60	95.50×9.60	113.1×12.0	125.6×12.0	141.4×13.50

4. 해석결과

4-1. 유한요소 해석프로그램의 검증

유한요소 해석프로그램의 타당성 검토를 위해 보강을 하지 않은 7종류의 모재($\beta=0$)에 대한 좌굴하중값을 오일러 좌굴이론식에 의한 좌굴하중값과 비교하여 표3에 나타내었다. 표3에서 나타나는 바와 같이 유한요소 해석법에 의한 좌굴하중값은 오일러 좌굴하중값보다 약 0.01%~0.24% 증가하나, 그 이유는 모델당 절점수를 21개로 제한했기 때문으로 판단되며, 그 결과는 매우 만족한 것으로 판단된다.

표 3. EULER 좌굴하중(P_{cr})과의 비교

(P_{cr} , q_{cr-0} 단위 : t)

	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
P_{cr}	5.5039	10.886	21.846	45.303	89.372	134.752	215.846
q_{cr-0} ($\beta=0$)	5.5170	10.895	21.855	45.320	89.380	134.790	215.904
$\frac{q_{cr-0}}{P_{cr}} \times 100\%$	0.24	0.08	0.04	0.04	0.01	0.03	0.03

q_{cr-0} : 모재길이에 대한 보강길이의 비 즉, $\beta=0$ 인 경우의 좌굴하중

4-2. 보강길이에 따른 좌굴하중 검토

표4는 보강단면의 계수(α)가 1일 때, 보강길이 비(β)에 따른 좌굴하중(Q_{cr}) 및 좌굴하중비(Q_{cr}/Q_{cr-0})를 나타낸다. 여기서, Q_{cr-0} 는 $\beta=0$ 인 모델의 좌굴하중이다. 그림2는 표4의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림2에서 알 수 있는 바와 같이 보강길이비 즉 β 와 비례하여 좌굴하중이 증가하는 것을 알 수 있으며 그 증가 경향은 비선형의 성격을 가지고 있다. 그리고, 부재종류에 따른 좌굴하중 증가비의 변화는 매우 작은 것을 알 수 있다. 보강길이비 β 에 따른 좌굴하중값은 부재 종류에 관계없이 $\beta=50\sim 70$ 의 구간에서는 거의 완만한 곡선을 보이고 있으며, $\beta=0$ 의 좌굴하중에 비해 약 56~67% 하중증가를 나타낸다.

표 4. 해석모델의 보강길이비에 따른 좌굴하중 및 좌굴하중비($\alpha=1$) (단위 : t)

β (%)	M-1		M-2		M-3		M-4		M-5		M-6		M-7	
	Q_{cr}	Q_{cr}/Q_{cr-0}	Q_{cr}	Q_{cr}/Q_{cr-0}	Q_{cr}	Q_{cr}/Q_{cr-0}	Q_{cr}	Q_{cr}/Q_{cr-0}	Q_{cr}	Q_{cr}/Q_{cr-0}	Q_{cr}	Q_{cr}/Q_{cr-0}	Q_{cr}	Q_{cr}/Q_{cr-0}
0	5.517	1	10.895	1	21.855	1	45.320	1	89.380	1	134.790	1	215.904	1
10	6.212	1.126	12.318	1.131	24.602	1.126	50.850	1.122	100.389	1.123	151.054	1.121	241.951	1.121
20	6.989	1.267	13.946	1.280	27.717	1.268	57.080	1.260	112.850	1.263	169.395	1.257	271.384	1.257
30	7.815	1.417	15.668	1.438	30.982	1.418	63.410	1.399	125.434	1.403	187.961	1.395	301.094	1.395
40	8.492	1.539	17.135	1.573	33.610	1.538	68.493	1.511	135.800	1.519	202.894	1.505	324.963	1.505
50	8.850	1.604	17.901	1.643	35.026	1.603	71.092	1.569	140.946	1.577	210.296	1.560	336.916	1.561
60	8.905	1.614	18.082	1.660	35.305	1.615	71.466	1.577	141.858	1.587	211.581	1.570	338.832	1.569
70	8.968	1.626	18.141	1.670	35.439	1.622	71.901	1.587	142.685	1.596	212.670	1.578	340.720	1.578
80	9.326	1.690	18.880	1.733	36.851	1.686	74.796	1.650	148.419	1.661	221.301	1.642	354.475	1.642
90	10.455	1.895	21.243	1.950	41.381	1.893	83.585	1.844	166.022	1.858	247.100	1.833	395.820	1.833
100	13.131	2.380	27.087	2.486	51.856	2.373	103.629	2.287	206.444	2.310	305.474	2.266	489.320	2.266

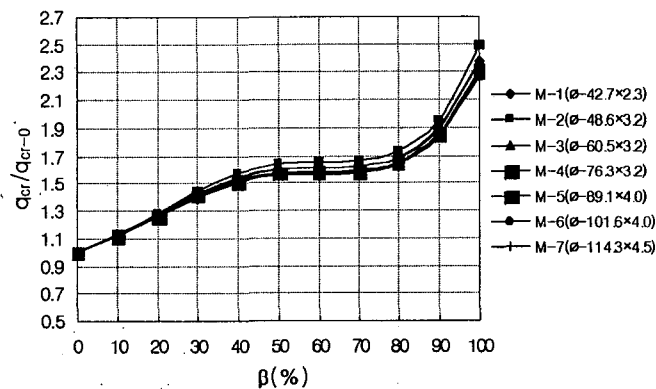


그림 2. 해석모델의 보강길이비 β 에 따른 좌굴하중비($\alpha=1$)

그리고, 보강길이비 β 에 따른 하중 증가의 경향을 표4 및 그림2의 결과를 기초로 하여 보강길이비를 변수로 한 좌굴하중의 일반식을 유도하면 식(1)과 같다.

$$q_{cr} = q_{cr-0}(1 + \kappa) \quad (1)$$

단, $\kappa = A\beta^4 + B\beta^3 + C\beta^2 + D\beta + E$

표 5. 좌굴하중 증가 곡선식의 계수값(κ)

모재 \ 계수값	A	B	C	D	E
M-1	1E-07	-2E-05	0.0007	0.0047	0.0066
M-2	1E-07	-2E-05	0.0008	0.0037	0.0085
M-3	1E-07	-2E-05	0.0007	0.0049	0.0062
M-4	9E-08	-1E-05	0.0006	0.0058	0.0046
M-5	1E-07	-2E-05	0.0006	0.0056	0.0050
M-6	9E-08	-1E-05	0.0006	0.0059	0.0043
M-7	9E-08	-1E-05	0.0006	0.0059	0.0043

4-3. 보강단면 크기에 따른 좌굴하중 검토

표6은 대표부재(ϕ -76.3×3.2)의 각 보강단면 계수(α)에 대하여 모재길이를 기준한 보강길이의 백분율(β)에 따른 좌굴하중과 좌굴하중비이다. 표6에서 보여지듯이 각 보강단면에 대해서 해석한 결과 보강단면 계수(α)가 커질수록 더 큰 β 값에서 좌굴하중비의 미소한 증가 구간이 나타난다. 이를 그래프로 나타낸 것이 그림3이다. 그리고, 그림4는 각각의 β 에 대하여 보강단면 계수(α)에 따른 좌굴하중을 나타낸 것이다. α 가 증가할수록 각각의 β 에 대해서 좌굴하중이 선형적으로 변화는 경향을 보이고 있으며, 좌굴하중은 β 가 커질수록 보강단면 계수(α)에 더 큰 영향을 받는다.

표 6. 대표부재(ϕ -76.3×3.2)의 보강단면 계수(α)에 따른 좌굴하중 및 좌굴하중비
(q_{cr} 단위 : t)

ϕ -(D×2at)×at	β (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		q_{cr}	45.32	48.871	52.571	55.593	57.539	58.154	58.238	58.738	60.712	65.205
0.5	$q_{cr}/q_{cr}(\beta=0/50)$	1	1.078354	1.158892	1.226677	1.269616	1.283186	1.28504	1.296072	1.339629	1.438769	1.60417
	q_{cr}	45.32	50.850	57.080	63.410	68.493	71.092	71.466	71.901	74.796	83.585	103.629
1.0	$q_{cr}/q_{cr}(\beta=0/50)$	1	1.122021	1.259488	1.399162	1.511320	1.568667	1.576920	1.586518	1.650397	1.844329	2.286606
	q_{cr}	45.32	52.071	60.138	69.255	78.040	83.782	85.488	85.653	88.738	101.046	138.282
1.5	$q_{cr}/q_{cr}(\beta=0/50)$	1	1.148963	1.326964	1.528133	1.721977	1.848676	1.886320	1.889960	1.958032	2.229612	3.051236
	q_{cr}	45.32	52.898	62.294	73.660	85.997	95.993	100.082	100.474	103.300	118.117	177.067
2.0	$q_{cr}/q_{cr}(\beta=0/50)$	1	1.167211	1.374537	1.625331	1.897551	2.118116	2.208341	2.216990	2.279347	2.606289	3.907039
	q_{cr}	45.32	53.456	63.856	76.971	92.564	107.422	115.311	116.422	118.714	135.358	220.324
2.5	$q_{cr}/q_{cr}(\beta=0/50)$	1	1.179523	1.409003	1.698389	2.042454	2.370300	2.544373	2.568888	2.619462	2.986717	4.861518
	q_{cr}	45.32	53.891	65.079	79.550	97.893	117.631	130.78	133.501	135.300	152.837	268.174
3.0	$q_{cr}/q_{cr}(\beta=0/50)$	1	1.189122	1.435989	1.755296	2.16004	2.595565	2.885702	2.945741	2.985437	3.372396	5.917343

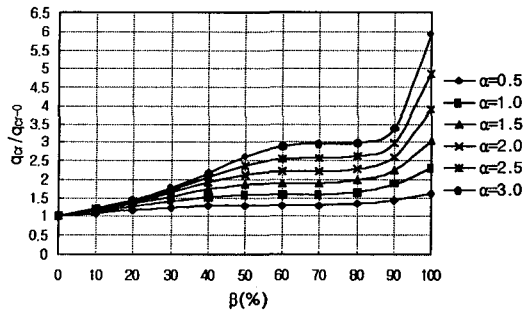


그림 3. 보강길이비 β 에 따른 좌굴하중비

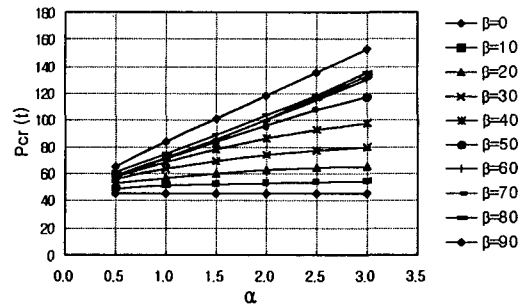


그림 4. 보강단면 계수(α)에 따른 좌굴하중

4-4. 보강길이-좌굴모드 검토

그림5는 보강단면의 계수(α)=3.0일때, 대표부재(ϕ -76.3×3.2)의 모재길이를 기준한 보강길이의 백분율(β)에 따른 1차~4차까지의 좌굴모드이며 그림 안의 숫자는 좌굴점을 나타낸다. 그림5에서 보여지듯이 β 에 따른 좌굴모드의 파형 및 파수는 1차에서 고차모드까지 보강전의 좌굴모드의 파형 및 파수와 거의 유사한 결과를 얻었다. 그리고, 1차모드의 경우, β 가 10~50에서는 좌굴점을 기준으로 보강된 부분이 평탄한 곡선을 이루고, 그 이후의 β 에는 보강을 하지 않은 즉, $\beta=0$ 인 경우와 같은 형태로 변한다. 2~4차 좌굴모드의 경우는 좌굴점의 이동을 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 압축을 받는 강관의 단면을 보강할 경우 그 보강길이와 단면크기에 따른 좌굴특성을 검토하였다. 이상 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 보강길이에 따른 좌굴하중비는 부재 종류와 관계없이 보강길이의 크기에 비례하여 비선형적으로 증가한다.
- 2) 보강부재의 단면 크기에 따라 좌굴하중의 크기는 선형적으로 증가하였다.
- 3) 보강에 따른 좌굴모드의 유형은 보강전의 좌굴모드의 유형과 큰 변화가 없었다.

감사의 글

본 연구는 한양대 초대형구조시스템 연구센터(STRESS)의 협조를 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. 川井忠彦, 藤谷義信, 座屈問題解析, 培風館, 1991.
2. 김규석 외 1인 共譯, 구조안정론, 도서출판 사론
3. W.F.Chen 外 1人, STRUCTURAL STABILITY, ELSEVIER
4. 鷲津久一郎 外 4 人, 有限要素法ハンドブック I基礎編, 培風館, 1988.
5. T.Y.YANG, Finite Element Structural Analysis, Prentice Hall
6. M. A. Crisfield, Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Volumel, WILEY
7. IMSL LIBRARY, User's Manual, IMSL Inc. 1982

$\beta(\%)$	1차좌굴모드	2차좌굴모드	3차좌굴모드	4차좌굴모드
0	 11	 7 15	 5 17	 4 18
20	 11	 7 15	 5 17	 4 18
40	 11	 6 16	 5 17	 4 18
60	 11	 5 17	 5 17	 4 18
80	 11	 6 16	 5 17	 3 19

그림 5. 대표부재(ϕ -76.3×3.2)의 보강길이비 β 에 따른 좌굴모드($\alpha=3$) (그림 안의 숫자:좌굴점)