

단층 및 복층 원통형 스페이스 프레임의 좌굴특성에 관한 비교연구

A Comparative Study on the Buckling Characteristics of Single-layer and Double-layer Cylindrical Space Frame

강민화* 정환목** 권영환***
Kang, Min Hwa Jung, Hwan Mok Kwon, Young Hwan

ABSTRACT

Cylindrical space frame which have a mechanic property, a functional property, a aesthetic property and so on, occupies one part of space structures and after this, the using parts will be extended. But because this structure is made of network by combination of line elements there are many nodes therefore, the structural behavior is very complicated and there can be a overall collapse of structure by buckling phenomenon if the external force reaches a limitation.

In design for this structure, we must determinate layer by considering above mentioned property first of all. Therefore this study aimed at the comparison and the investigation of mechanical characteristics of single-layer and double-layer cylindrical space frame on views of behavior and buckling by use of rise ratio.

1. 서론

오늘날 거대공간에 대한 사회적 요구도와 더불어 등장한 스페이스 프레임구조물은 세계도처에서 많은 연구자 및 설계자들의 주목을 받고 있다. 이중 곡면형대상 '+'의 가우스곡률과 '0'의 가우스곡률로 구성된 원통형 스페이스 프레임은 실내경기장, 수영장, 공장 등의 지붕구조형식중의 하나로 각광을 받고 있다.

이 구조물의 대표적인 구조적 특성은 경량이면서도 높은 강성을 갖는 것이다^[2]. 그러나 사용재료의 경량화와 단면의 최소화 지향에 의해 외력이 어느 한계에 도달하면 좌굴에 의한 구조물 전체의 불안정현상이 발생할 수 있다. 이들 좌굴현상에 대한 연구^[1-9]는 현재도 많은 연구자들에 의해 활발히 진행되고 있으며, 향후 더욱더 연구의 관심분야로 부각될 것이다.

스페이스 프레임을 레이어(layer)의 수에 따라 분류하게 될 때, 단층과 복층 및 다층으로 나눌 수 있다^[2].
1. 복층 및 다층은 가구 자체가 큰 휨에 저항할 수 있으므로 곡률을 갖지 않는 평면지붕으로도 충분히 설계가 가능하지만, 단층의 경우는 평면지붕으로는 거의 설계가 불가능할 것이며, 가능한 한 곡률이 큰 지붕형일

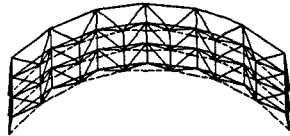
* 경북대학교 건축공학과 석사과정
** (주)대동기술연구소 책임연구원
*** 경북대학교 건축공학과 교수

수록 역학적으로 유리할 것이다.

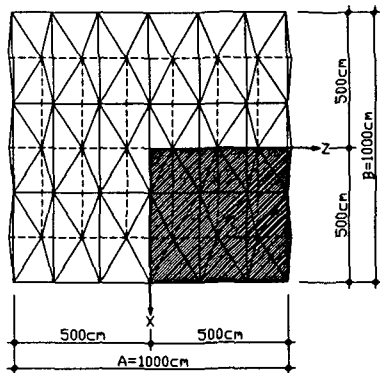
한편 원통형 스페이스 프레임으로 구조물을 설계할 경우 레이어수는 경제성, 시공성, 역학적, 기능성, 심미성 등을 종합적으로 고려하여 선택되어야 할 것이다. 그러나 아직 역학적 관점에서 레이어의 영향을 명확하게 검토하고 있는 연구는 국내·외적으로 많지 않다.

본 연구의 목적은 단층 및 복층 원통형 스페이스 프레임의 거동 및 좌굴특성을 라이즈비^[15]에 따라 상호 비교·검토하는 것이다.

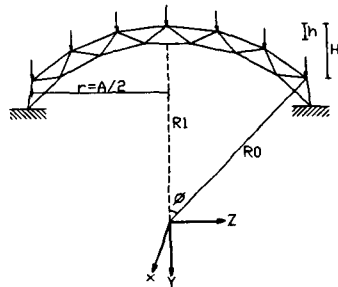
2. 해석 모델 및 제원



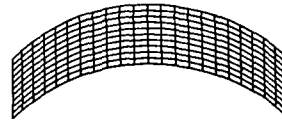
(a) 복층의 3차원 형상



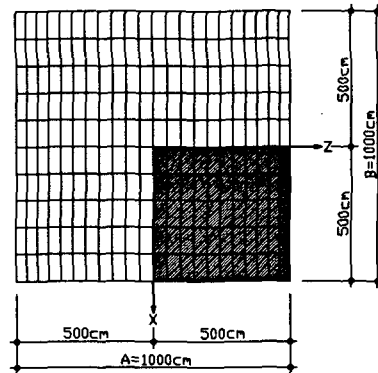
(b) 복층의 평면형상 및 해석영역



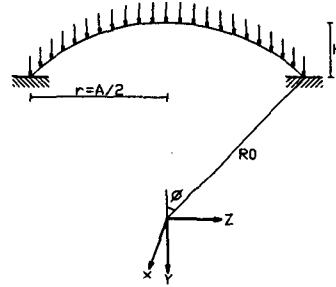
(c) 복층의 단면형상 및 하중조건



(a) 단층의 3차원 형상



(b) 단층의 평면형상 및 해석영역



(c) 단층의 단면형상 및 하중조건

그림1. 복층 모델의 형상(라이즈비 : $H/A=0.2$)

그림2. 단층 모델의 형상(라이즈비 : $H/A=0.2$)

그림 1은 복층 원통형 스페이스 프레임의 형상으로 R_0 은 상현재의 곡률반경, R_1 은 하현재의 곡률반경, $r(=A/2)$ 은 상현재의 저면반경, H 는 보울트의 높이, A 는 평면상의 가로치수, B 는 평면상의 세로치수 그리고 h 는 상현재와 하현재의 구심방향 층간거리이다. 또, 그림 2는 단층 원통형 스페이스 프레임의 형상으로 이는 복층 모델에서 사용한 부재량과 동일한 부재량을 사용하여 네트워크를 구성하고 있다. 단, 단층과 복층에서 사용한 총부재량은 5%이내의 오차를 갖고 있으며, 단층 모델의 곡률반경은 편의상 복층 모델의 상현재를 기준하여 정하고 있다. 특히 단층모델은 복층모델과 비교를 위한 관계로 실제구조물의 경우보다 역학적

으로 약간 불리한 부재배치가 되었을 가능성이 있다.

3. 해석방법 및 해석상의 제조건

해석은 기하학적 비선형성을 고려하는 유한요소법^[1]을 적용하였다. 또한, 계산기의 용량 및 연산시간과 해석상의 정밀도를 고려하여 원통형 스페이스 프레임의 1/4 영역을 해석대상으로 하고 있다. 해석조건으로 는 단층의 경우는 예비계산에 의해 부재좌굴에 우선해 전체좌굴이 발생하는 것을 확인하였으므로 중간절점을 고려하지 않아도 해석정도에 큰 영향이 없다고 판단하여 1부재 1요소로 하였고, 복층의 경우는 스페이스 프레임 고유의 부재좌굴 검토와 해석의 정밀도를 위하여 중간절점을 고려한 1부재 2요소로 해석했다.

분할된 네트워크의 부재길이는 일정하지 않다. 즉, 복층에서 사용된 부재는 가로방향 및 세로방향 상현재, 가로방향 및 세로방향 하현재 그리고 사재의 5가지 종류별로 각각 다른 길이를 갖는다. 단층에서는 가로재와 세로재의 2종류의 부재길이를 갖는다. 사용 부재는 강관으로 그 단면크기는 $\phi-76.3 \times 3.2$, $\phi-139.8 \times 4.0$, $\phi-216.3 \times 4.5$, $\phi-267.4 \times 6.0$ 의 4종류이며 탄성계수 E 는 $2100t/cm^2$, 프와송비 ν 는 0.3이다. 하중조건은 연직하중으로 면적비례에 의해 각 절점에만 작용하는 것으로 한다. 단, 복층의 경우 상부절점에만 하중이 작용하는 것으로 한다

표1은 $\phi-76.3 \times 3.2$ 를 사용한 경우 해석에 도입된 부재제원을 나타내는 것으로, 여기서 모델명에 사용된 기호중 첫번째 기호 'S'는 단층모델, 'D'는 복층모델, 마지막 '1, 2'등은 라이즈비를 표시한다.

표1. 해석에 도입된 부재제원($\phi-76.3 \times 3.2$)

모델명	라이즈비 (H/A)	ϕ (°)	곡률반경(cm)		부재길이(cm)				
			R0	R1	상현가로	상현세로	하현가로	하현세로	사재
S1	0.1	22.6	1300.0	-	46.7	100.0	-	-	-
D1	0.1	22.6	1300.0	1240.0	85.5	166.7	81.5	166.7	97.9
S2	0.2	43.6	725.0	-	50.1	100.0	-	-	-
D2	0.2	43.6	725.0	665.0	91.7	166.7	84.1	166.7	98.9
S3	0.3	61.9	566.7	-	56.7	100.0	-	-	-
D3	0.3	61.9	566.7	506.7	101.5	166.7	90.8	166.7	100.8
S4	0.4	77.3	512.5	-	62.8	100.0	-	-	-
D4	0.4	77.3	512.5	452.5	114.3	166.7	100.9	166.7	103.7
S5	0.5	90.0	500.0	-	71.3	46.7	-	-	-
D5	0.5	90.0	500.0	440.0	129.4	85.5	113.9	166.7	107.7

해석 영역을 1/4로 함으로 인하여 원래의 원통형 스페이스 프레임이 가지는 변형모드 및 좌굴모드가 구속되어질 수 있으며 따라서, 좌굴내력에도 약간의 영향은 줄 수 있을 것이다. 좌굴하중의 크기 즉, 좌굴내력 면에서는 대표적 모델에 대한 예비해석결과와는 약 5%이내의 오차가 있었다. 스페이스 프레임의 좌굴내력에 미치는 해석영역의 영향에 대해서는 참고문헌^[4]에 잘 언급되어있다. 각 모델의 절점조건은 강접합으로 하며, 경계는 이동 및 회전을 완전히 구속한다.

4. 해석결과 및 고찰

4-1. 좌굴내력

표2에 부재단면 및 라이즈비에 따른 좌굴내력 및 단층과 복층의 좌굴내력 크기비를 나타낸다 표2에서 'qs'는 단층의 좌굴내력, 'qd'는 복층의 좌굴내력, 'a'는 좌굴내력비로 'qd/qs'를 나타낸다.

표2. 단층과 복층의 좌굴내력 및 좌굴내력비

qd, qs 단위 : (t/m²)

사용부재 라이즈비(H/A)	φ-76.3 × 3.2			φ-139.8 × 4.0			φ-216.3 × 4.5			φ-267.4 × 6.0		
	qs	qd	α	qs	qd	α	qs	qd	α	qs	qd	α
0.1	0.87	4.01	4.59	6.32	23.88	3.78	22.56	53.98	2.39	48.94	97.78	1.20
0.2	1.31	5.30	4.06	10.27	35.82	3.49	42.13	92.89	2.21	101.61	179.67	1.77
0.3	1.38	4.78	3.46	10.56	31.01	2.94	44.47	89.32	2.01	109.82	183.66	1.67
0.4	1.17	3.39	2.89	9.35	22.22	2.38	39.65	67.37	1.70	98.92	149.74	1.51
0.5	0.96	2.20	2.28	7.74	12.48	1.61	32.77	46.56	1.42	82.16	112.97	1.38

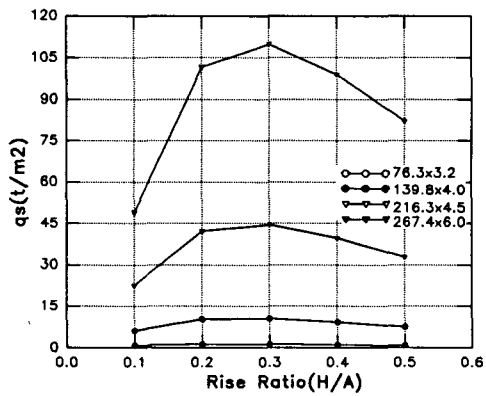


그림3(a). 라이즈비에 따른 좌굴내력(단층)

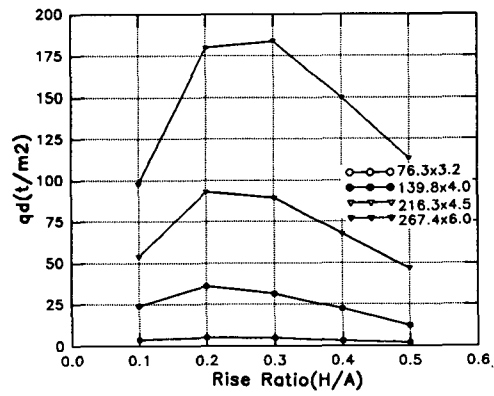


그림3(b). 라이즈비에 따른 좌굴내력(복층)

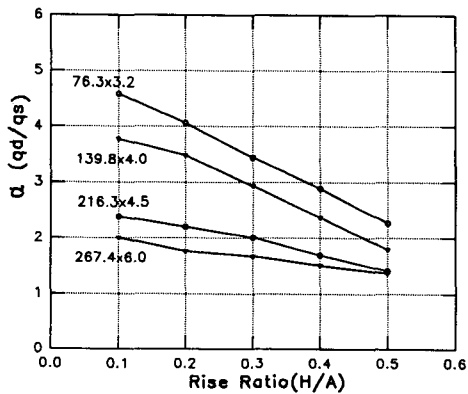


그림4. 단층과 복층의 좌굴내력비

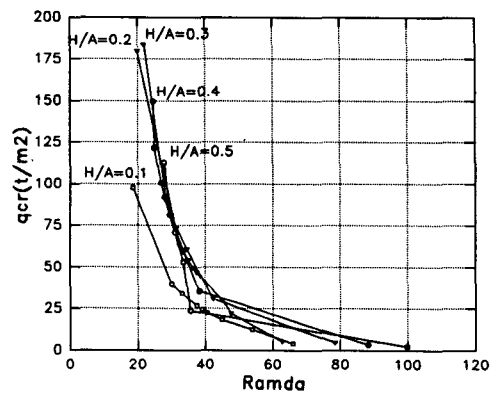


그림5. 세장비에 따른 좌굴내력(복층)

표2의 결과로부터 좌굴내력과 라이즈비의 관계그래프를 나타내면 그림3과 같다. 그림3으로부터 알수있는 바와 같이 단층의 경우 라이즈비에 따른 좌굴내력의 크기는 부재단면 크기에 관계없이 0.3>0.2>0.4>0.5>0.1의 순서로 큰값을 나타내고 있으며, 복층의 경우 작은 단면일때는 라이즈비에 따른 좌굴내력의 크기순은 0.2>0.3>0.1>0.4>0.5이며 단면이 큰 모델일 수록 그값의 차가 점점 좁혀져 0.3>0.2>0.4>0.5>0.1로 바뀌어져 간다. 위의 결과등으로부터 단,복층에 관계없이 좌굴내력의 관점에서 보면 최적 라이즈비는 0.2와 0.4의 범 위내에 있다는 것을 알 수 있으며, 또한 복층의 경우는 단층보다도 지붕면 곡률의 영향을 약간 적게 받고 있

음을 알 수 있다.

그림4는 라이즈비에 따른 단층과 복층의 좌굴내력비를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 사용부재의 단면이 작을수록 단층과 복층의 좌굴내력차가 커지며, 라이즈비가 클수록 그 차는 작아짐을 알 수 있다. 라이즈비에 따른 좌굴내력비의 경향은 일반적으로도 충분히 이해할 수 있는 결과이며, 이는 라이즈비가 클수록 단층으로 설계하는 것이 유리하고, 라이즈비가 작을수록 복층이 유리하다는 것을 나타낸다.

특히 정량적인 크기가 제시됨으로 인하여 설계자들에게 레이어의 선택을 가능하게 할 수 있다. 그림5는 복층의 경우 본 연구에 도입된 부재이외에 사용된 다수의 부재단면에 의해 새장비를 구하고 이 새장비에 따른 좌굴내력의 크기를 나타낸 것이다.

4-2. 변형모드 및 좌굴모드

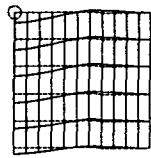
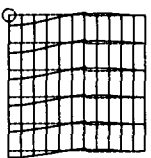
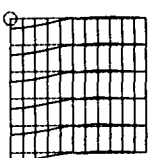
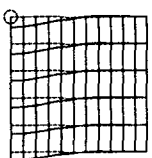
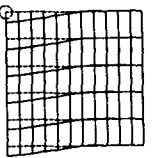
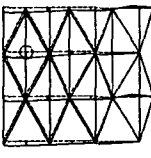
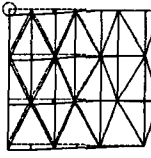
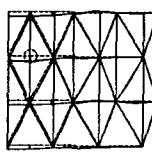
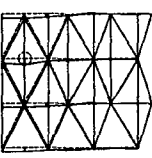
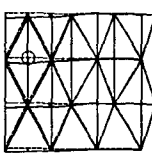
라이즈비 layer	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
단층	 Vm=112.03mm	 Vm=332.07mm	 Vm=702.02mm	 Vm=1289.76mm	 Vm=1899.26mm
복층	 Vm=156.20mm	 Vm=77.56mm	 Vm=192.01mm	 Vm=209.61mm	 Vm=239.27mm

그림6. 대표모델의 변형모드(ϕ -76.3 \times 3.2)

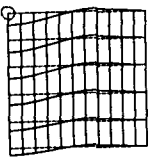
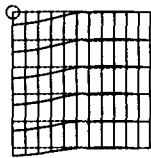
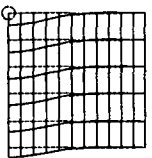
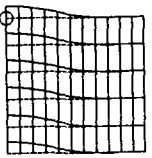
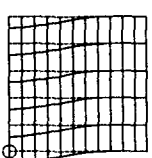
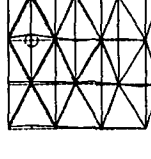
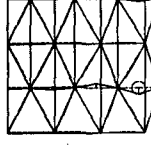
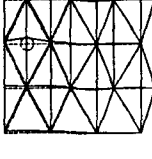
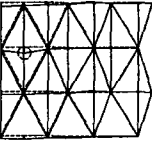
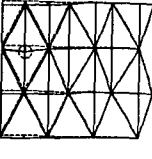
라이즈비 layer	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
단층	 Vm=112.03mm	 Vm=332.07mm	 Vm=702.02mm	 Vm=1289.76mm	 Vm=1899.26mm
복층	 Vm=156.20mm	 Vm=77.56mm	 Vm=192.01mm	 Vm=209.61mm	 Vm=239.27mm

그림7. 대표모델의 좌굴모드(ϕ -76.3 \times 3.2)

그림6은 대표모델인 ϕ -76.3 \times 3.2의 라이즈비에 따른 단층 및 복층의 좌굴직진 연직방향 변형분포를 나타

낸다. 그림6의 변형모드에서 알 수 있는 바와 같이 단층모델의 경우 구조물의 중앙부에서 연직방향으로 최대변위가 생기며, 저면방향(그림으로 보아 수평방향)으로 라이즈비에 관계없이 1.5파의 규칙적인 좌굴모드를 나타내고 있다.

한편 복층모델의 경우 최대변위는 라이즈비가 0.2의 모델을 제외하고는 부재의 중간절점에서 최대변위가 발생하고 있으며, 그 발생위치는 단층모델의 최대변위점에서 약간 벗어난 지점이다. 그러나 거시적인 관점에서 구조물의 변형모드를 보면 단층과 복층은 거의 유사한 변형모드를 가지고 있음을 알 수 있다.

그림7은 대표모델인 ϕ -76.3 \times 3.2의 라이즈비에 따른 단층 및 복층의 좌굴직전 연직방향의 좌굴모드를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 복층모델은 라이즈비(H/A)=0.2일 경우를 제외하고는 동일절점에서 부재좌굴이 발생하고 있다. 사용부재의 세장비는 전체좌굴 및 부재좌굴의 발생조건과 밀접한 관계가 있으며, 구형 단층 스페이스 프레임의 경우는 형상계수^[145]로써 좌굴모드를 정의하고 있는데 반해 원통형 스페이스 프레임의 경우는 아직 형상계수에 대한 연구가 거의 전무한 상태이다.

본 연구에서는 case by case로 세장비와 좌굴형태와의 관계를 검토한다. 그림8은 세장비와 라이즈비에 따른 좌굴발생영역을 나타낸다.

사용부재에 따른 좌굴형상을 검토해보면 ϕ -76.3 \times 3.2의 경우 라이즈비에 관계없이 전 모델이 부재좌굴형이며, ϕ -139.8 \times 4.0의 경우 라이즈비가 0.1은 전체좌굴형이고 라이즈비가 0.2~0.5는 부재좌굴형이며, ϕ -216.3 \times 4.5의 경우 라이즈비가 0.1~0.3은 전체좌굴형이고 0.4~0.5는 부재좌굴형이며, ϕ -267.4 \times 6.0의 경우 전모델이 전체좌굴형이다. 즉, 동일단면 사용시 라이즈비가 높을수록 부재좌굴의 가능성이 큰데 이는 라이즈비가 높을수록 부재길이 길어짐에 기인한다고 사료된다.

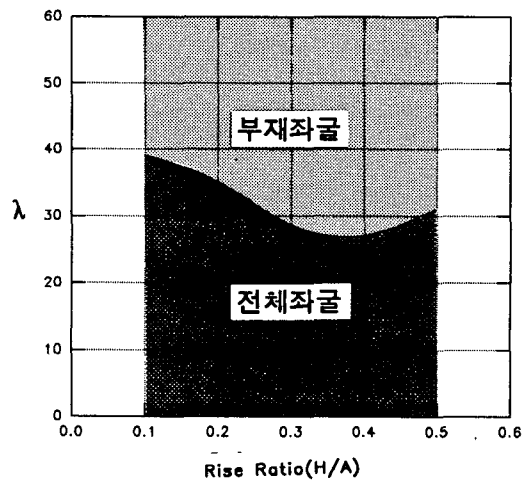


그림8. 전체좌굴과 부재좌굴 발생영역

4-3. 부재축용력

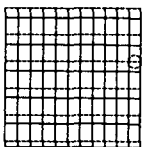
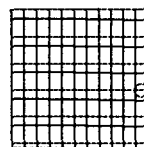
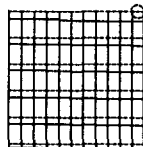
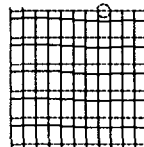
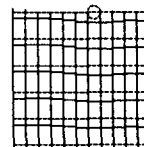
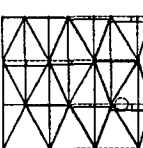
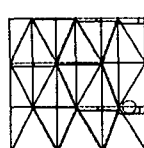
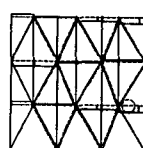
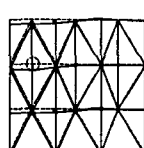
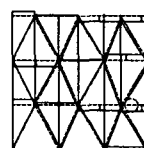
라이즈비 layer	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
단층	 Fm=12.80t	 Fm=11.10t	 Fm=8.83t	 Fm=6.55t	 Fm=5.13t
복층	 Fm=111.57t	 Fm=107.13t	 Fm=86.02t	 Fm=64.92t	 Fm=47.88t

그림9. 대표모델의 축력분포(ϕ -76.3 \times 3.2)

그림 9에서 대표모델인 $\phi-76.3 \times 3.2$ 의 단층과 복층모델의 축력 크기를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 라이즈비가 낮은 모델에서는 단층모델의 경우 최대축력이 경계부에 집중되어 있고 복층의 경우 상현재는 중심에 하현재는 경계부에 집중되어 있다. 그러나, 라이즈비가 높아질수록 단층모델의 경우 최대축력이 경계부에서 중심부로 이동하는 경향을 띠고 있으며, 복층의 경우 하현중심부와 상현경계부의 인장력이 커지고, 이와는 반대로 상현 중심부재와 하현경계부의 압축력은 감소되어 최대축력이 압축력에서 인장력으로 바뀌는 현상이 일어난다.

4-4. 하중-변위관계곡선

그림10(a), 10(b)에서 알 수 있듯이, 단층과 복층 모두 단면에 관계없이 라이즈비가 클수록 좌굴전 비선형성이 현저하게 발생하고 있다. 실제 설계에 있어서는 좌굴하중에 기준을 두기보다는 변위제한에 의해 부재의 단면설계가 되어야 할 것이다.

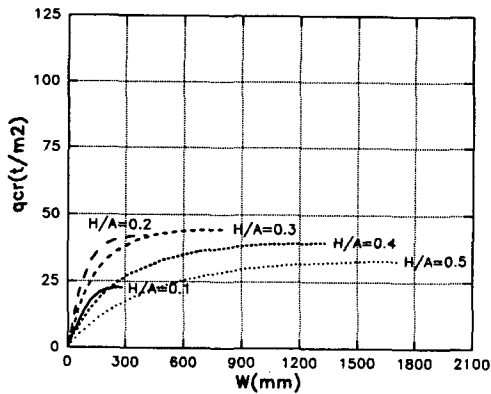


그림10(a). 하중-변위관계곡선(단층모델)

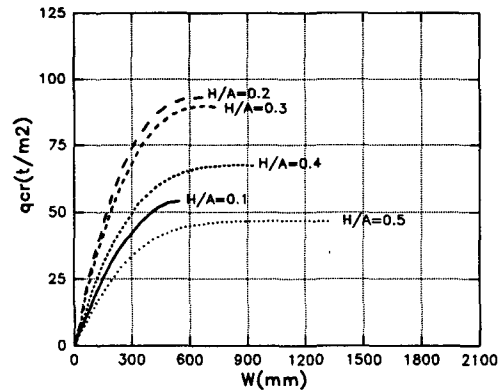


그림10(b). 하중-변위관계곡선(복층모델)

5. 결론

이상 단층과 복층 원통형 스페이스 프레임의 좌굴특성을 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 사용부재의 크기에 관계없이 라이즈비가 클수록 단층과 복층의 좌굴내력차가 작다.
- 2) 사용부재단면이 클수록 라이즈비에 따른 단층과 복층의 좌굴내력차가 적다.
- 3) 동일부재량을 사용한 경우, 복층의 좌굴내력은 단층보다 최저 1.4배에서 최고 4.6배의 크기를 나타내고 있다.

한편, 실제 구조물의 건립에 즈음하여서는 단층과 복층의 역학적 특성을 포함하여 시공성, 기능성, 미관성 등을 고려하여 그 형태가 결정되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 權寧煥, 鄭煥穆, 李昇宰, 單層라티스돔의 座屈特性에 관한 研究 -라이즈비의 影響-, 韓國電算構造工學會 學術發表會 論文集, 1992, 가을.
2. 坪井善勝, 스페스프레임(立體格子構造)의設計·解析·施工, 1982年度文部省科學研究費補助金, 總合研究(B)研究報告書, 1983, pp.1-13.
3. 半谷裕彦, 單層 라티스돔의安定解析 -その現狀と問題點-, 2章, 單層ラチストームの座屈荷重評價, 日本建築學會シェル空間構造運營委員會, 스페스프레임小委員會, 8.1989, pp.25-70.

4. 山田大彦, 石川智章, 単層剛接ラチスシエルの座屈に関するフレーム解析とシエル解析の対応性に関する研究, 日本建築學會學術講演便覧集B, 構造1, 8.1986, pp.269-270.
5. 山田大彦, 王麗, 単層ラチスドームの座屈特性に及ぼすライズ比の影響に関する研究, 日本建築學會學術講演便覧集, 10. 1990
6. 加藤史郎, 単層ラチスドームの安定解析 -その現状と問題点-, 3章, ビン接合単層トラスドームの座屈解析, 日本建築學會シエル空間構造運営委員会, スペースフレーム小委會, 8.1989, pp.71-190.
7. R.J.Qian and Z.Y.Shen, Analysis and Design of a Double layer Barrel Vault with a Large Span, Edited by John F.Abel, John W.Leonard, and Celina U.Penalba, Spatial, Lattice and Tension Structures, Volumn 1, Session R1S1, Lattice Structures:Case Studies, 1994, pp394-401
8. S.Yamada and T.Taguchi, Nonlinear Buckling Response of Single Layer Latticed Barrel Vaults, Edited by John F.Abel, John W.Leonard, and Celina U.Penalba, Spatial, Lattice and Tension Structures, Volumn 1, Session T3S3, Lattice Structures:Analysis and Experiments II, 1994, pp510-519
9. 日置興一郎, ラチスドームの不安定現象の概説, 単層ラチスドームの安定解析-その現象と問題点-, 日本建築學會シエル空間構造運営委員会, スペースフレ小委員会, 8.1989, pp.1-23
10. L. Euler, Sur la force de colonnes, Mémoires de l'Académie de Berlin, 1759.
11. 日本剛構造協會 編, スペース・ストラクチャー-, 鹿島出版會, 5.1971.
12. Jozef Surnec, Regular Lattice Plates and Shells, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHING COMPANY, Bratislava, 1990, pp1-16
13. M. Yamada, Wang Li, A. Yamamoto, Buckling of Single-Layer Latticed Domes with Triangular Network, Proceedings of the IASS Symposium on Shell and Space Structures, Taegu, Korea, August, 1990
14. Don O. Brush and Bo O. Almroth, Buckling of Bars, Plates, and Shells, McGRAW-HILL, 1975.