

**삼각형 네트워크를 갖는 단층 및 복층 구형  
스페이스 프레임 구조물의 좌굴특성에 관한 비교연구**

**A Comparative Study on the Buckling Characteristics of  
Single-layer and Double-layer Spherical Space Frame Structure  
with Triangular Network Pattern**

이 호 상\*  
Lee, Ho-Sang

정 환 목\*\*  
Jung, Hwan-Mok

권 영 환\*\*\*  
Kwon, Young-Hwan

---

**ABSTRACT**

Spherical space frame structure with triangular network pattern, which has the various characteristics for the mechanic property, a funtional property, an aesthetic property and so on, has often been used as one of the most efficient space structures. It is expected that this type will be used widely in large-span structural roofs.

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 an overall collapse of structure by buckling phenomenon if the external force reaches a limitation.

This kind of buckling phenomenon is due to geometric shape, network pattern, the number of layer and so on, of structure. Therefore spherical space frame with triangle network pattern have attracted many designers and researchers attention all over the world. The number of layer of space frame is divided into the single, double, multi layer. That is important element which is considered deeply in the beginning of structural design.

The buckling characteristics of single-layer model and double-layer model for the spherical space frame structure with triangular network pattern are evaluated and the buckling loads of these types are compared with investigation their structural efficiency in this study.

---

**1. 서 론**

2002년 월드컵의 한국 유치에 즈음하여 스페이스 프레임과 같은 3차원 초대형구조시스템의 필요성이 증대되고 있다.

스페이스프레임은 선형의 부재를 조립해 힘이 입체적으로 전달되는 구조시스템으로 대공간 구조물로서의 기능적 장점을 살릴 수 있을 뿐 아니라 사용재료의 경량화에 따른 가공성, 시공성, 경제성과 구조물 자체의 역학적 합리성 등의 면에서 많은 관심을 모으고 있다.

---

\* 대산건축구조연구소 연구원, 공학석사

\*\* 대산건축구조연구소 소장, 서울산업대 겸임교수, 공학박사

\*\*\*경북대학교 건축공학과 교수, 공학박사

스페이스 프레임을 층(layer)수로 분류해 보면 단층, 복층, 다층으로 나눌수 있다.

이 구조시스템이 평면으로 계획되면 반드시 복층 및 다층으로 설계되어야 할 것이나 곡면으로 시스템이 계획된다면 단층으로의 설계도 가능하다. 특히 곡면일 경우 곡률에 따라 힘의 흐름이 다르게 작용 할 것이다.

그러므로, 구형 스페이스 프레임의 실제 설계에 있어서 좌굴특성 및 기능성, 공법성등을 종합적으로 고려하여 layer수가 선택되어야 한다.

본 연구는 구형 스페이스 프레임을 대상으로 단, 복층 공히 동일한 부재량을 기준으로 했을 경우의 좌굴특성의 관점에서 단층과 복층의 상관관계를 검토함을 그 목적으로 한다.

## 2. 해석 모델

### 2.1. 해석모델의 형상

본 연구의 해석모델은 원주방향으로 5분할된 삼각형 네트워크를 가진 복층 구형 스페이스 프레임(Double-Layer Spherical Space Frame)과 이 모델의 하현재와 동일한 곡률반경과 부재로 이루어진 단층 모델에 국한한다. 특히, 단층 모델은 복층 모델과의 비교를 위한 관계로 역학적으로 약간 불리한 배치가 되었을 가능성도 있다.

본 연구에서 이러한 모델을 도입한 이유는 동일한 부재로 동일한 공간을 형성하는 단층과 복층의 구형 스페이스 프레임의 좌굴특성을 파악하기 위함이다. 그리고, 부재는 좌굴내력비/ 부재밀도비의 영향을 고찰하기 위해 형상계수별로 여섯 종류를 선정하여 사용한다.

그림1은 논문에서 사용된 단층 및 복층 구형 스페이스 프레임의 형상으로,  $R_0$ 는 하현재의 곡률반경,  $R_1$ 는 상현재의 곡률반경,  $r(A/2)$ 은 하현재의 저면반경,  $H$ 는 단층 구형 스페이스 프레임의 높이, 그리고 상현과 하현의  $y$ 방향 층간거리는 그 모델의 대표부재 길이의 20%로 산정하였다.

그림2는 단층과 복층의 조감도를 나타낸다.

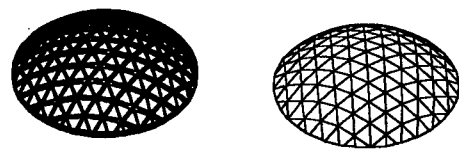
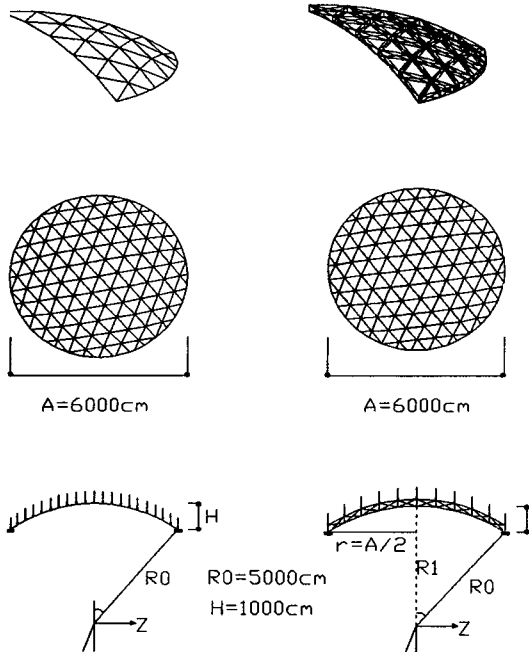


그림 2. 단층과 복층 모델의 조감도

그림1. 단층 및 복층 구형스페이스 프레임의 형상

## 2.2. 부재 제원

본 연구에서 사용된 모델에 있어서, 분할된 네트워크의 부재길이는 반드시 일정하지 않다. 그 대표적인 부재길이는 주부재상의 임의의 한 부재길이(L)로 한다. 부재길이(L)는 다음식으로 구해질 수 있다.

$$L = 2R \cdot \sin \frac{\phi}{2N}$$

본 연구에서 도입되는 부재의 탄성계수 E는 2100 t/cm<sup>2</sup>, 프와송비  $\nu$ 는 0.3인 강관이며, 단층 및 복층에 사용된 부재의 제원은 형상계수에 따라 표1과 같다. 본 항에서는 세장비  $\lambda$ 와 돔의 형상계수 S를 기준으로 계산하며 그단면의 크기는 형상계수2.7을 기준으로 거의 46cm<sup>2</sup>이다.

표1. 형상계수와 부재 제원

형상 계수(S)	I (cm <sup>4</sup> )	i <sub>e</sub> (cm)	$\lambda$	$\lambda / S$
1.9	20527.2	23.7	30.46	16.03
2.3	9720.6	14.4	44.79	19.47
2.7	5530.0	10.8	59.66	22.10
2.9	3424.7	8.7	74.57	25.71
3.5	1534.0	6.1	105.48	30.14
4.3	729.9	4.0	161.53	37.57

## 3. 해석 방법

### 3.1. 해석 방법 및 범위

현재 스페이스 프레임 구조물의 해석방법은 크게 구조물을 연속체셀로서 해석하는 연속체치환법과 부재 각각의 거동에 중점을 두고 해석하는 이산화해석법으로 크게 구분할 수 있다.

본 연구의 이론해석법은 유한요소법을 적용한 이산화해석법을 이용한다.

연구범위는 단층 및 복층 구형 스페이스 프레임을 연구대상으로 하여 저면반경 방향으로 5분할된 삼각형 네트워크에 국한한다. 해석모델은 돔의 형상계수 6개에 대해 layer수에 따라 2종류, 중간절점 유무에 따라 2종류, 총 24개로 나누어진다.

### 3.1. 해석상의 제조건

본 연구에 있어서 해석상의 가정은 좌굴전 변형의 비선형성을 고려하며, 1부재를 2요소로 모델화하여 그 중간절점의 좌표는 직선재상에 있다고 보고, 해석영역은 돔전체의 1/6로 한다. 그리고, 하중은 면적비례에 의하여 절점에만 작용하는 것으로 한다.

상기 가정 중에서 계산기의 용량 및 연산시간등의 이유로 해석영역을 1/6로 함으로 인하여 원래의 돔이 가지는 변형모드 및 좌굴모드가 구속되어 질 수 있으며 그로 인하여 좌굴내력에도 영향을 줄 수 있을 것이다.

그러나 본 연구에서 도입하고 있는 삼각형 네트워크 돔의 경우 등가강성이 거의 등방균질이므로 1/6 해석영역이 좌굴특성에 미치는 영향은 그다지 크지않다고 사료된다. 또한 대칭영역의 경계상의 절점변위는 대칭조건

을 만족하도록 구속하며, 원주방향 경계는 절점변위를 완전히 구속한다. 하중은 연직으로만 작용하며, 거의 3 절점으로 둘러싸이는 삼각형의 면적을 각 절점에 동일하게 배분하여 각 절점에 작용하는 것으로 한다. 복층의 경우 단층과의 동일한 하중조건을 만족 시키기위해 상부의 각 절점에만 하중이 작용하는 것으로 한다.

접합부 조건은 강접합으로 하며, 아래의 접합부 휨강성식을 사용하여  $K_\theta = 10^5$ 의 강성계수를 사용한다.

$$K_\theta \times \frac{6EI}{L_i}$$

그리고, 접합부 휨강성은 부재축방향응력에는 관계가 없다고 가정하며 경계상의 변위는 완전히 구속한다. 그림3은 복층모델의 절점번호 및 요소번호를 나타낸다. 단층의 경우는 복층의 상현재와 동일하다.

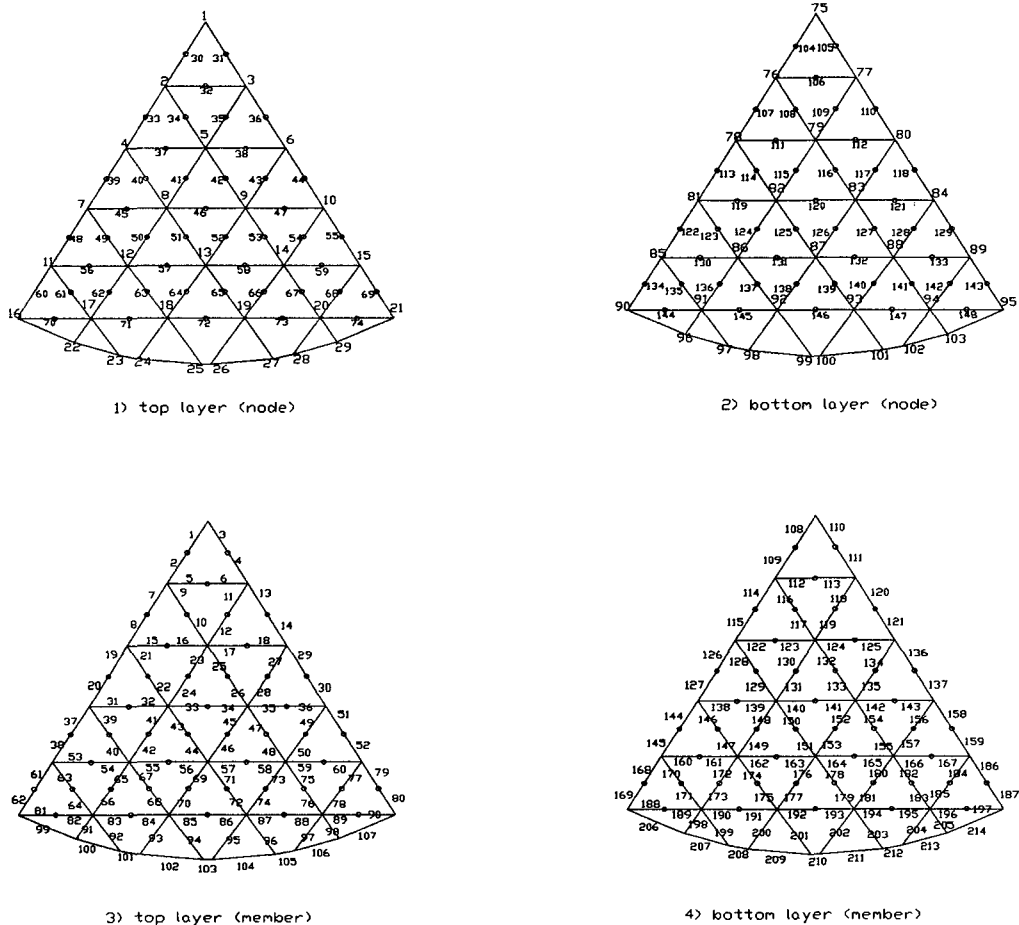


그림3. 복층의 절점 및 부재번호

#### 4. 해석 결과 및 고찰

##### 4.1. 좌굴내력 및 좌굴내력비

표2. 단층과 복층의 좌굴내력비 (중간절점 有)

형상 계수	세장비 $\lambda$	$q_s$ (t/m <sup>2</sup> )	$q_d$ (t/m <sup>2</sup> )	$\beta$	$\bar{A}$	$\beta / \bar{A}$
1.9	30.46	5.949	36.656	6.162	4.555	1.353
2.3	44.79	4.127	31.399	7.608	4.555	1.670
2.7	59.66	2.942	20.404	6.935	4.555	1.523
2.9	74.57	2.345	13.347	5.692	4.555	1.250
3.5	105.48	1.203	6.544	5.440	4.555	1.194
4.3	161.53	0.706	3.625	5.135	4.555	1.127

표2는 형상계수에 따른 좌굴내력을 나타낸다. 표에서 'qs'는 단층의 좌굴내력, 'qd'는 복층의 좌굴내력을 나타내고,  $\beta$ 는 단층에 대한 복층의 좌굴내력비 즉,  $q_d / q_s$  를 나타낸다. 그리고,  $\bar{A}$ 는 단층의 부재량에 대한 복층의 부재량비를 나타낸다.

그림4는 본 연구의 핵심인 (좌굴내력비 \ 부재밀도비)와 형상계수와의 상관관계를 그림으로 도식화한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 중간절점이 없는 모델의 경우 S=2.7에서, 중간절점이 있는 모델의 경우 형상계수 2.3에서 단층과 복층의 좌굴내력비  $\beta / \bar{A}$  값이 가장 큰 것을 알 수 있다.

그리고, 형상계수에 따른 좌굴내력비는 중간절점의 유무에 따라 약간의 차이를 나타내고 있으나 그 경향은 유사한 것을 나타내고 있다. 그러나 해석모델에서 중간절점을 두지 않으면 부재좌굴을 검토할 수 없으므로 부

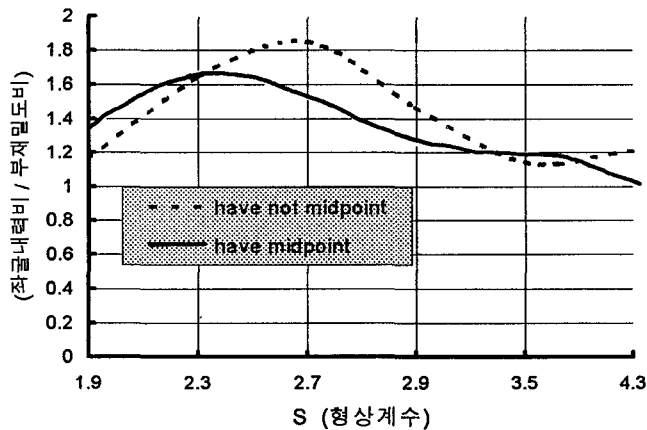


그림4. 형상계수와 (좌굴내력비 / 부재밀도비)와의 상관관계

재좌굴의 검토를 위해서는 반드시 중간절점을 고려하여야 할 것이다. 중간절점을 고려할 경우 세장비의 관점에서 좌굴내력비를 검토해보면 S=2.3 즉,  $\lambda=45$ 인 경우가 좌굴내력비가 가장 크며 이보다 세장비가 작아지거나 커짐에 따라 좌굴내력이 점점 줄어드는 것을 알 수 있다.

이 결과는 부재밀도를 기준하여 볼 때 복층이 단층보다 좌굴내력면에서는 약간 유리한 것을 나타내고 있으나 그 차이가 2배 이하임을 고려할 때 매우 의미 있는 결과로 보여진다.

#### 4.2. 좌굴 모드

그림5는 형상계수에 따른 단층 및 복층의 좌굴직진 연직방향 좌굴모드를 나타낸다. 점선은 재하전 돔의 형상을 나타내며, 좌굴모드에서 ○표한 부분은 좌굴점을 나타낸다. 그림4의 좌굴모드에서 알 수 있는 바와 같이 단층모델에서는 형상계수 1.9, 2.3, 2.7, 2.9의 경우 구조물의 중앙부, 즉 질점번호 1 에서 전체좌굴을 보이며, 형상계수 3.5, 4.3 모델에서는 부재좌굴이 전체좌굴에 우선하여 발생하였음을 알 수 있다.

한편, 복층모델의 경우는 형상계수와 무관하게 전 모델에서 부재좌굴이 일어났음을 알 수 있다. 그리고 형상계수 1.9에서 2.9까지는 부재좌굴 위치가 거의 일치하나 3.5, 4.3 모델의 경우는 불규칙적인 좌굴을 보인다.

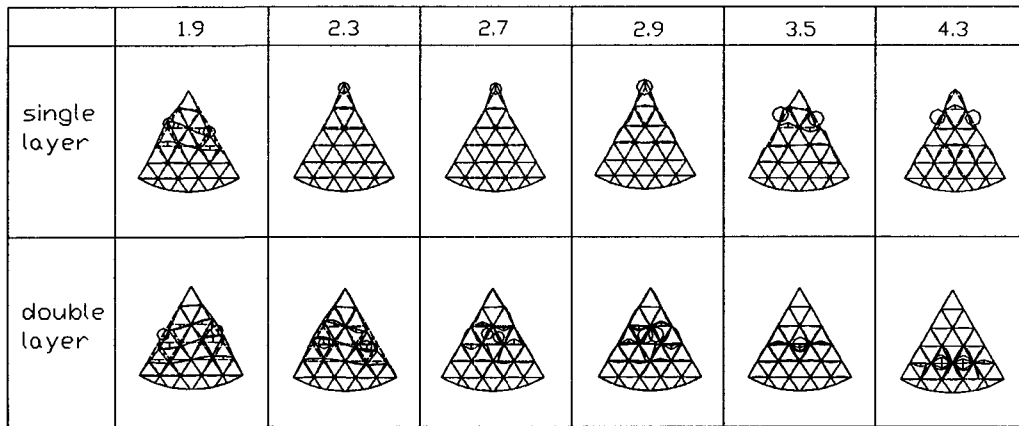


그림5. 좌굴 모드

#### 4.3. 부재축력 검토

단층의 경우 선행연구 자료를 이용해 연구결과를 비교 할 수 있으나 복층의 경우 비교할 자료가 부족한 이유로 Euler 좌굴 하중과 복층의 부재좌굴하중을 비교하여 해석결과를 검토한다.

표3은 Euler 좌굴하중과 부재축력과의 상관관계를 나타낸다. 강점의 경우 Euler 좌굴하중식의 유효길이를 0.5L 과 1.0L 사이에 두고, 해석상의 축력과 비교해본 결과 전 모델이 양단 핀일 경우와 양단고정일 경우의 가정상의 범주를 벗어나지 않음을 알 수 있다.

표3. Euler 좌굴하중과의 비교

S (형상 계수)	I (cm)	$\lambda$	$P_e(t)$ 유효길이 1.0L	$P_{cr}(t)$ 해석결과 의 최대축력	$P_e(t)$ 유효길이 0.5L
1.9	23.7	31	979.28	1387.80	3917.04
2.3	14.4	45	430.32	876.89	1721.28
2.7	10.8	60	263.79	581.92	1055.15
2.9	8.7	75	163.36	351.03	653.44
3.5	6.1	106	73.18	173.52	292.72
4.3	4.0	162	34.82	65.75	139.28

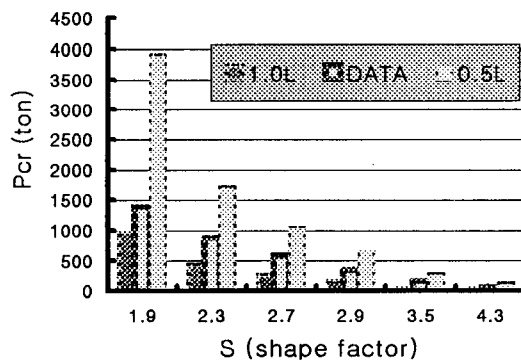


그림6. Euler 좌굴 하중과의 비교

## 5. 결론 및 제언

본 연구는 대공간 구조물의 설계에 있어서 초기에 layer수를 결정하는데 참고자료가 될 수 있는 단층과 복층의 (좌굴내력비 / 부재밀도비)를 이용해 형상계수에 따른 6개의 모델을 선정하여 비교·검토하였다. 이상 단층과 복층 구형 스페이스 프레임의 좌굴특성을 비교·검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 단층과 복층의 (좌굴내력비 / 부재밀도비)가 모델에 따라 최저 1.13배에서 최고 1.67배로 높게 나타났다.
- 2) 좌굴모드면에서 비교해볼 때 복층의 경우는 공히 부재좌굴이 발생했으며, 단층의 경우는 세장비  $\lambda \leq 75$ 인 경우는 전체좌굴,  $\lambda \geq 106$ 인 경우는 부재좌굴이 발생하였다.

앞으로 초대형 구조물의 합리적인 설계를 위한 좌굴내력과 부재밀도와의 관계식이 철실히 요구되며, 여기에 본 연구에서 제안한 (좌굴내력비 / 부재밀도비)가 참고자료로 이용될 것으로 기대된다. 따라서 보다 많은 형상계수에 대한 (좌굴내력비 / 부재밀도비)의 연구와 라이즈비나 형상초기부정 등에 따른 단층과 복층의 좌굴특성에 대한 연구가 요망되어진다.

### 감사의 글

마지막으로 본연구를 수행하는데 있어서 연구비를 지원해주신 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 (stress)관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 坪井善勝, 스페이스프레임(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,
2. 日本剛構造協會 編, 스페이스·스트락처, 鹿島出版會, 1971,5
3. 半谷裕彦, 스페이스프레임(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,
4. VEDA, Regular Lattice Plates and Shells, Publishing House of the Slovak Academy of Science, Bratislava,
5. 李昇宰, 鄭煥穆, 權寧煥, 單層래티스들의 挫屈特性에 關한 研究 -라이즈비의 影響-, 韓國電算構造工學會 學術發表會 論文集, 1992.5
6. Yamada, M., Uchiyama, K., Yamada, S., and Ishikawa, T., "Theoretical and Experimental Study on the Buckling of Rigidly Jointed Single Layer Latticed Spherical Shells under External Pressure," Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka, September, 1986.vol.3, SHELLS, MEMBRANES & SPACE STRUCTURES, Elsevier, Tokyo, Japan, 1986,
7. 김상식 外 2名, 구조설계에서의 좌굴문제, 제 3회 전산구조공학회 기술강습회, 1991,2.
8. 權宅鎮 外 4名, SPACE FRAME 구조물의 구조해석, 설계 및 시공, 제12회 전산구조공학회 기술강습회, 1995,7.
9. 權寧煥, 三角形 네트워크를 갖는 單層래티스들의 挫屈特性에 關한 研究, 釜山大學校 工學博士學位論文, 1993. 8.
10. 日置興一郎, ラチスド-ムの不安定現象の概説, 單層ラチスド-ムの安定解析-その現象と問題点-, 日本建築學會シェル空間構造運營委員會, 스페이스프레임小委員會, 8.1989,