

단층 래티스 돔의 좌굴 및 거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Buckling & Behaviour of Single-Layer Latticed Dome

김철환*
Kim, Cheol-Hwan

정환목**
Jung, Hwan-Mok

요약

대공간 구조형식에는 기존의 기둥-보 구조형식에서 벗어나 셸구조형식과 같은 형태저항 구조형식이 가장 유효한 구조형식으로 인식되고 있다. 특히 지간 200m~300m 이상의 대공간구조 형식으로는 중량구조인 연속체의 셸보다는 래티스 돔과 같은 공간 트러스형식 등이 유리하다. 시공, 제작상의 편리성, 구조미 등을 이유로 복층래티스 돔과 더불어 단층의 래티스 돔 형식도 실제 구조물에서 많이 적용되고 있다. 그러나 대공간 단층 래티스 돔의 경우 아직까지 외력의 작용으로 인한 변형과 파괴경로가 명확하게 해명되지 못한 부분이 있다. 본 연구에서는 대공간 구조형식에 적합한 래티스 돔을 대상으로 좌굴의 특성을 규명하여 안정적인 구조 설계의 기초 자료를 제시하기 위하여 실험을 수행하였다. 주된 실험변수는 격자의 간격과 돔의 지붕 강성 유무를 대상으로 하였으며, 격자의 간격은 돔을 4분할, 5분할, 6분할, 7분할로 하여 정하였다. 가력은 돔의 전면에 걸쳐 구심의 등분포하중이 작용하도록 하였다.

Abstract

The form-resistant Systems like a dome and shell are used more widely than post-beam structure system in large space structure. Single layer latticed dome system, one of the form-resistant system, has great merits in manufacturing and constructing but the failure mechanism is not clarified yet. The purpose of this paper is to find out the buckling characteristics of single-layer latticed domes with square network by using the experimental method. Major test parameters are the stiffness of lattice member and space of square lattice. The specimens are applied uniform loading of snow type.

키워드 : 단층 돔, 격자 래티스, 좌굴 특성, 강도, 변위

Keywords : Single layer dome, Square latticed dome, Buckling characteristics, Strength, Displacement

1. 서론

최근 경제의 급격한 성장으로 인해 건축물은 초고층화와 더불어 대공간화가 진행되고 있다. 이러한 시대적 요구에 대응하기 위하여 건축계에서는 신재료의 개발과 새로운 구조형식의 도입이 적극적으로 이루어지고 있으며, 그 대표적인 예가 래티스를 적용한 돔구조 형식이라 할 수 있다. 래티스 돔구조는 프레임 구성 형식에 따라 단층과 복층으로 구분할

수 있으며, 복층의 경우는 구조 안정성 면에서 단층보다 유리한 것으로 알려져 있으며 전 세계적으로 시공 사례가 단층보다 많다. 그러나 근래에는 구조 해석기술의 발전으로 격자 자체의 미관성, 제작의 정확도, 현장에서의 시공성 등을 고려하여 단층 래티스 형식도 많이 적용되고 있다. 한편, 단층 래티스 돔은 격자패턴에 따라 삼각형, 사각형, 육각형 등이 있으며, 삼각형 형식은 그 연구가 많이 진행되고 있으며, 사각형, 육각형 격자패턴에 대한 연구 사례는 많지 않다. 삼각형 래티스 돔은 외력에 대해 안정적으로 저항할 수 있는 구성형태로 이루어져 있으나, 접합점에 구성되는 부재수가 6개로 이루어져 접합점에 4개의 부재가 교차하는 사각형 즉, 2방

* 정회원, 상주대학교 건축공학부 부교수, 공학박사
Tel : 054-530-5374 Fax : 054-530-5379
E-mail : chkim@sangju.ac.kr

** 정회원, 경동대학교 건축토목공학부 교수, 공학박사
Tel : 033-639-0216 Fax : 033-639-0229
E-mail : hmjung@k1.ac.kr

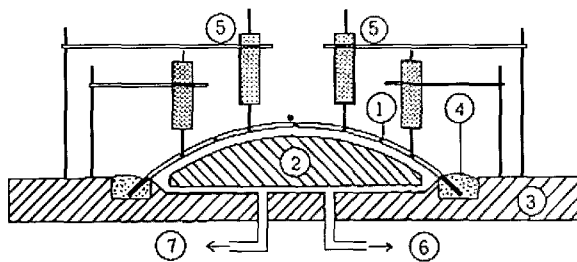
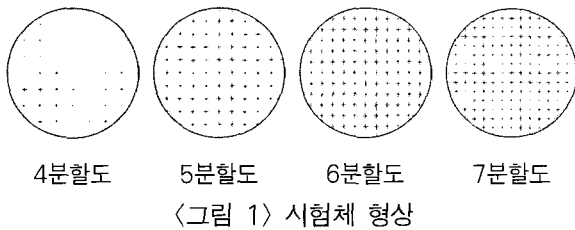
향 grid 격자 패턴에 비해 제작 및 시공의 어려움이 남아 있다.

본 연구에서는 2방향 grid 격자 패턴의 단층 돔을 연구 대상으로 격자의 배치간격에 따른 좌굴 및 역학적 거동을 규명하여 설계시 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 실험

2.1 시험체

시험체의 형상은 <그림 1>에 나타내고 있으며 시



① 시험체 ② 보호덮개 ③ 지지체 ④ 에폭시수지
⑤ 변위측정기 ⑥ 압력변환기 ⑦ 진공탱크

<그림 2> 시험체 set up

험체 일람은 <표 1>에 나타낸다. 그림에서와 같이 시험체의 바닥 저면의 직경이 300mm인 구형으로 제작되었으며, 격자형 프레임은 3mm 두께의 경질 염화비닐로 제작하였다. 또한, 격자형 프레임 위에 지붕재료를 덮어 제작하였으며, 지붕재료는 강성을 전혀 가지지 않는 비강성막(soft membrane; 0.08mm)과 강성을 가지는 강성 막(hard membrane; 0.3mm)의 2종류를 사용하였다.

시험체의 단부 고정은 <그림 2>에서와 같이 에폭시수지로 고정하였으며, 에폭시수지가 완전히 고착된 후에 실험을 하였다.

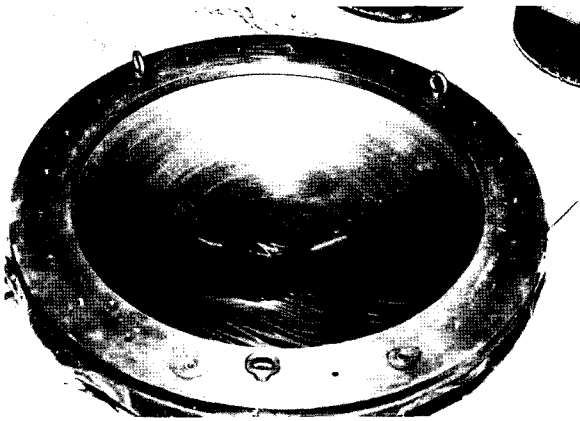
2.2 실험방법 및 측정

<그림 2>에서와 같이 격자형 프레임이 고착된 이후에 프레임 상부에 강성을 가지는 강성막을 씌운 후 좌굴 실험을 실시하였다. 하중의 가력은 <그림 2>의 ⑦으로 내부 공기를 제거하여 외부의 공기압으로 고르게 하중이 작용하도록 하였으며 공기압 컨트롤 밸브는 부재의 좌굴 발생과 동시에 폐쇄된다. 이때 하중의 크기는 ⑥의 압력 변환기로 측정하여 산정하였다. 또한 하중과 더불어 발생하는 변위는 상부에 설치된 변위측정기로 각 절점마다의 변위를 측정하였으며, 변위측정기는 상부에 4개밖에 설치할 수 없으므로 모든 절점의 변위를 측정하기 위하여 동일조건으로 하여 변위측정기의 위치를 바꾸어 가며 반복 실험하였다. 실험에 의한 좌굴 하중값은 하중 변위곡선상의 최대 하중으로 하며 반복

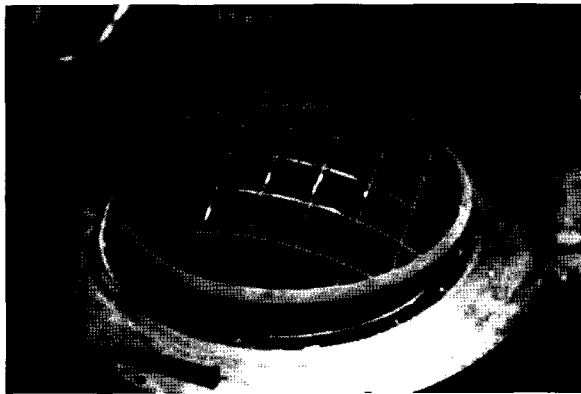
<표 1> 시험체 일람

시험체 명		R (mm)	t (mm)	b (mm)	d (mm)	L (mm)	E (Mpa)	S
4분할	강성막	480	0.30	5.25	3.0	81	3.59	3.6
	비강성막	480	0.08	5.25	3.3	81	3.59	3.8
5분할	강성막	480	0.30	4.20	3.0	65	3.59	2.9
	비강성막	480	0.08	4.20	3.3	65	3.59	3.0
6분할	강성막	480	0.30	3.50	3.0	54	3.59	2.4
	비강성막	480	0.08	3.50	3.3	54	3.59	2.5
7분할	강성막	480	0.30	3.00	3.0	46	3.59	2.1
	비강성막	480	0.08	3.00	3.3	46	3.59	2.1

R: 곡률반경, t: 지붕재료 두께, b: 부재 단면 폭, d: 부재 단면 높이, L: 부재길이, E: 영계수, S: 돔의 형상계수



〈사진 1〉 강성막 성형 사진



〈사진 2〉 4분할 시험체

실험에 의한 좌굴하중의 감소율은 모든 시험체에서 5%이하로 나타났다. 또한, 실험시 좌굴발전의 대 변형에 의한 시험체의 손상을 방지하기 위하여 ②와 같은 보호 덮개를 내부에 설치하였다. 반복실험은 강성막을 먼저 설치하여 실험을 실시한 후 강성막을 제거하고 비강성막을 설치한 후 동일한 방법으로 반복하여 재하하였다.

3. 실험결과 및 고찰

실험결과는 <표 2>에 나타내고 있다. 최대하중에 있어서는 강성막 및 비강성막 모두 분할수가 많을수록 최대하중이 낮게 나타나는 경향은 있으나, 최대하중시의 변위에 있어서는 일률적인 경향은 나타나지 않고 있지만, 분할 수가 많을수록 변위량은 작게 나타나고 있다. 또한 절점의 위치에 따른 변위량은 정점에서 하부로 갈수록 하방향으로의 변위량이 증가하고 있으며, 특히, 비강성막인 경우에는 정점의

〈표 2〉 실험결과

시험체 종류	최대 하중 (KPa)	최대하중시의 변위 (mm)			
		정점	N1-1	N1-2	
4분할	강성막	7.90	+1.05	+1.30	+1.35
	비강성막	1.90	-3.50	-0.75	+2.95
5분할	강성막	8.00	+1.20	+1.05	+1.10
	비강성막	1.95	-4.70	-1.85	+2.30
6분할	강성막	7.10	+0.85	+1.45	+2.00
	비강성막	1.65	-4.90	-3.20	+1.60
7분할	강성막	6.80	+0.90	+0.90	+0.80
	비강성막	1.65	-4.90	-2.05	+0.30

최대하중은 반복실험의 평균치

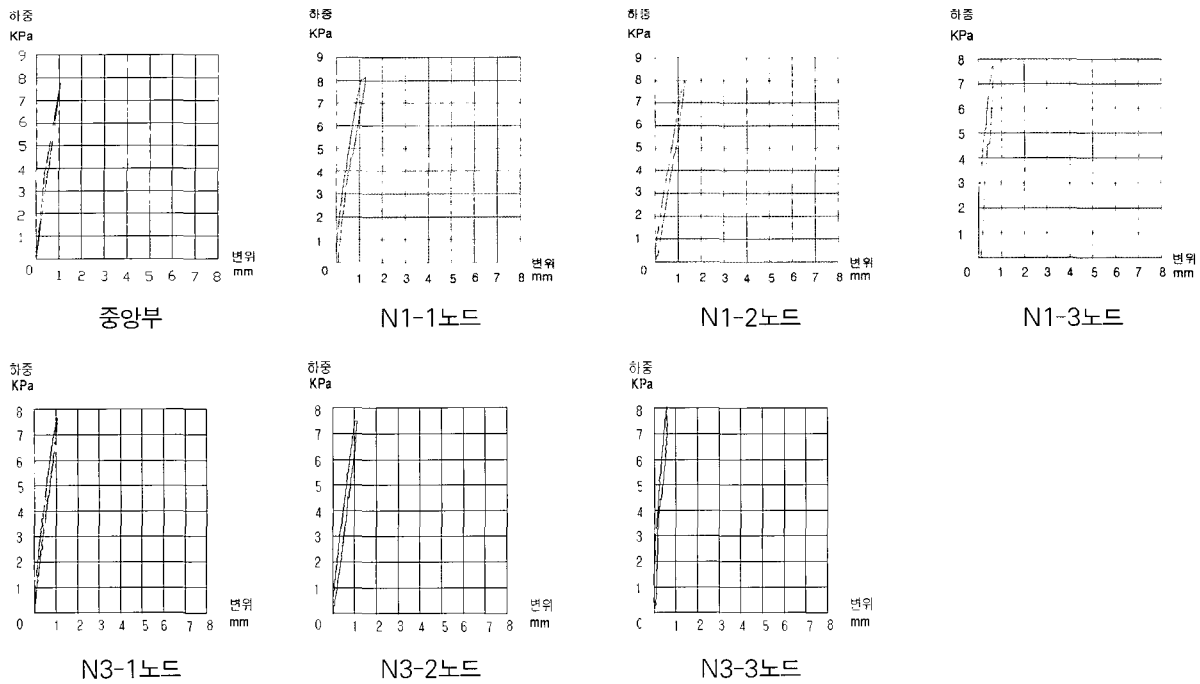
“+” : 하방향 변위, “-” : 상방향 변위

변위가 상방향으로 발생하고 있으나, 강성막인 경우에는 정점에서도 하방향으로 변위가 발생하고 있다.

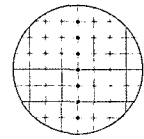
실험에 의한 하중-변위관계곡선은 <그림 3>에서 <그림 10>에 나타내고 있다. 각 그림에서 종축은 하중을, 횡축은 변위를 나타내고 있으며, 횡축의 부호가 “+”인 경우에는 하방향으로, “-”인 경우에는 상방향으로 변위가 발생한 것을 나타내고 있다. 또한, 숫자 4, 5, 6, 7은 각각 격자형 래티스의 분할수를 나타내고 있다. 또한 그림 중의 제1노드, 제2노드, 제3노드란 중앙부에서 단부방향으로의 노드를 나타낸다.

본 실험에서는 좌굴후의 변위로는 좌굴모드를 추적할 수가 없었다. 본 연구에서는 6분할 시험체의 좌굴직전까지의 하중과 변위관계를 중심으로 구조물의 거동을 분석하고자 한다.

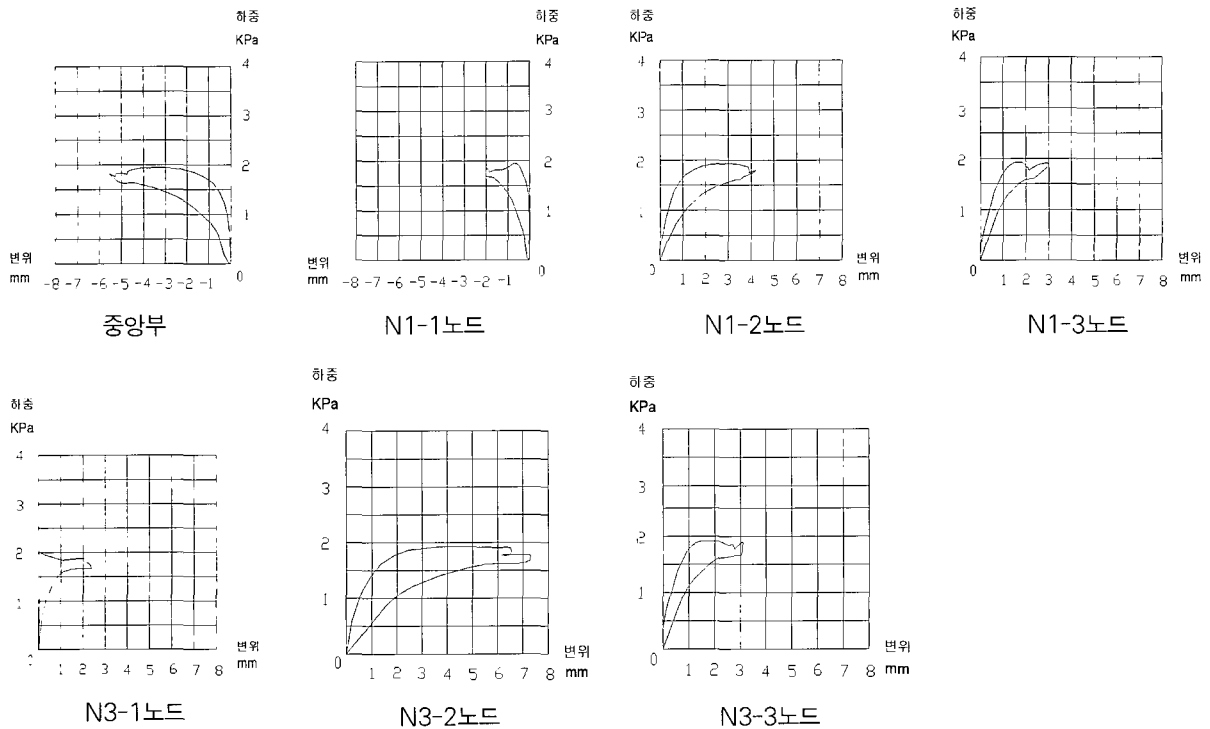
<그림 7>에서 보는 바와 같이 6분할 강성막 시험체의 좌굴은 각 노드 공히 7.1KPa의 공기압에서 좌굴한 것을 알 수 있으며, 그림에서 나타나는 것처럼 노드에 따라 좌굴하중이 미세한 차이를 보이고 있는데 이것은 반복실험에 의한 강성저하 또는 좌굴 시기의 순간적인 차이에 의한 현상으로 판단되나, 그 값의 차는 5% 이내로 미미함을 알 수 있다. 강성막의 경우 중앙부 변위가 좌굴직전까지 거의 기하학적 선형성을 유지하면서 좌굴직전까지 1mm 정도의 연직하방향 변위를 나타내고 있다. 그러나 그림8에 나타나는 비강성막의 경우는 강성막의 경우와는 달리 중앙부 변위가 약1.7KPa의 좌굴하중값



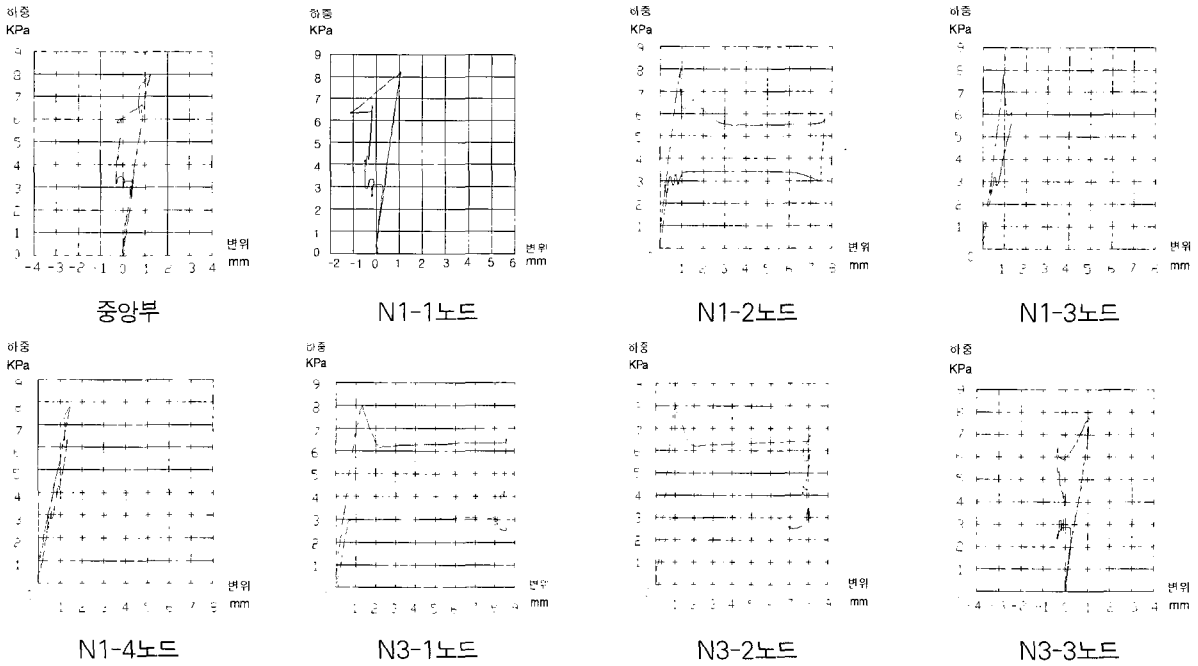
〈그림 3〉 하중-변위관계 (4분할 강성막)



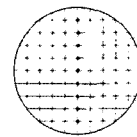
변위위치도 (4분할)



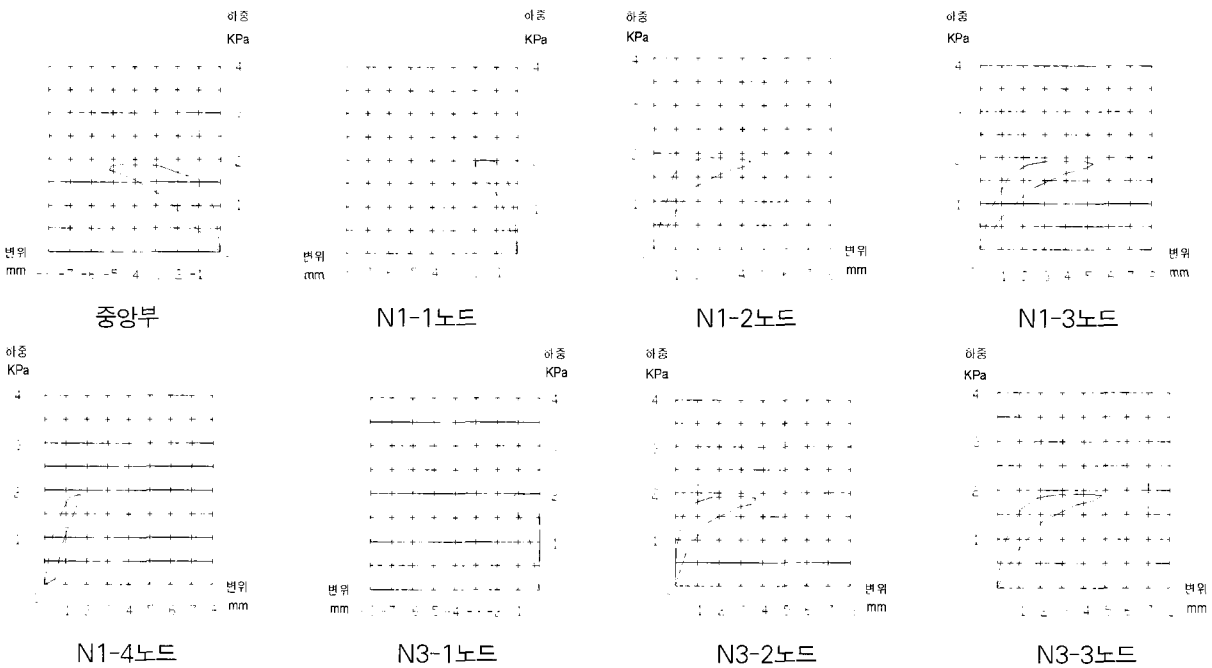
〈그림 4〉 하중-변위관계 (4분할 비강성막)



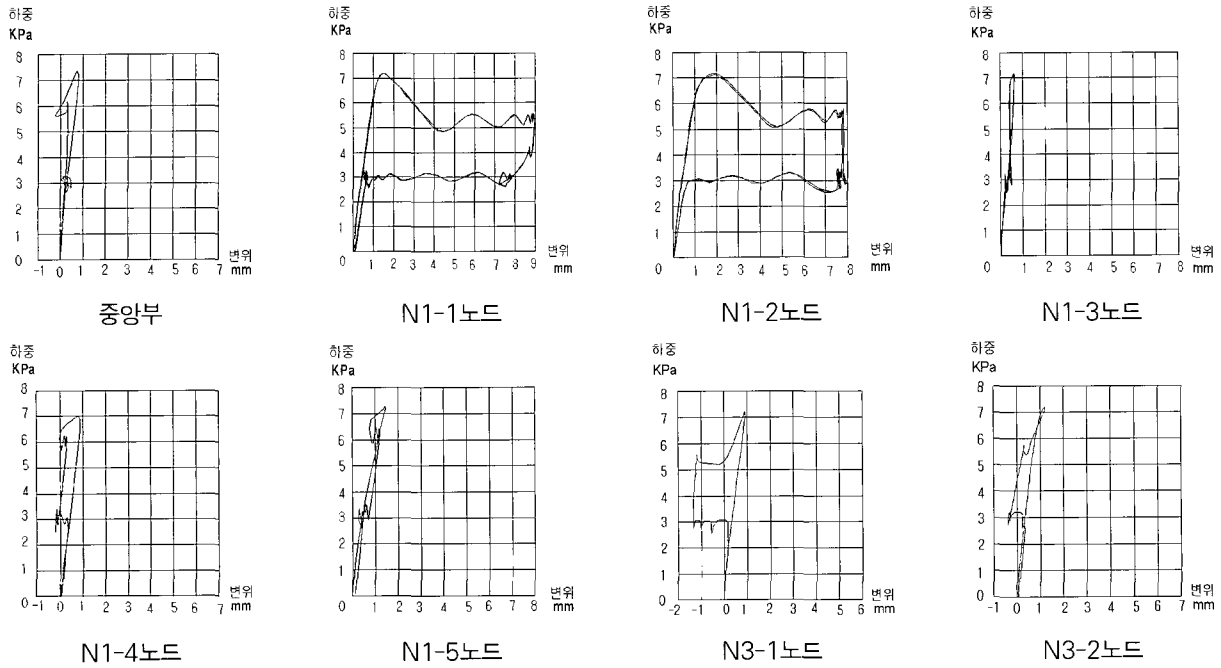
〈그림 5〉 하중-변위관계 (5분할 강성막)



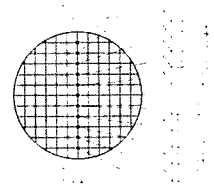
변위위치도 (5분할)



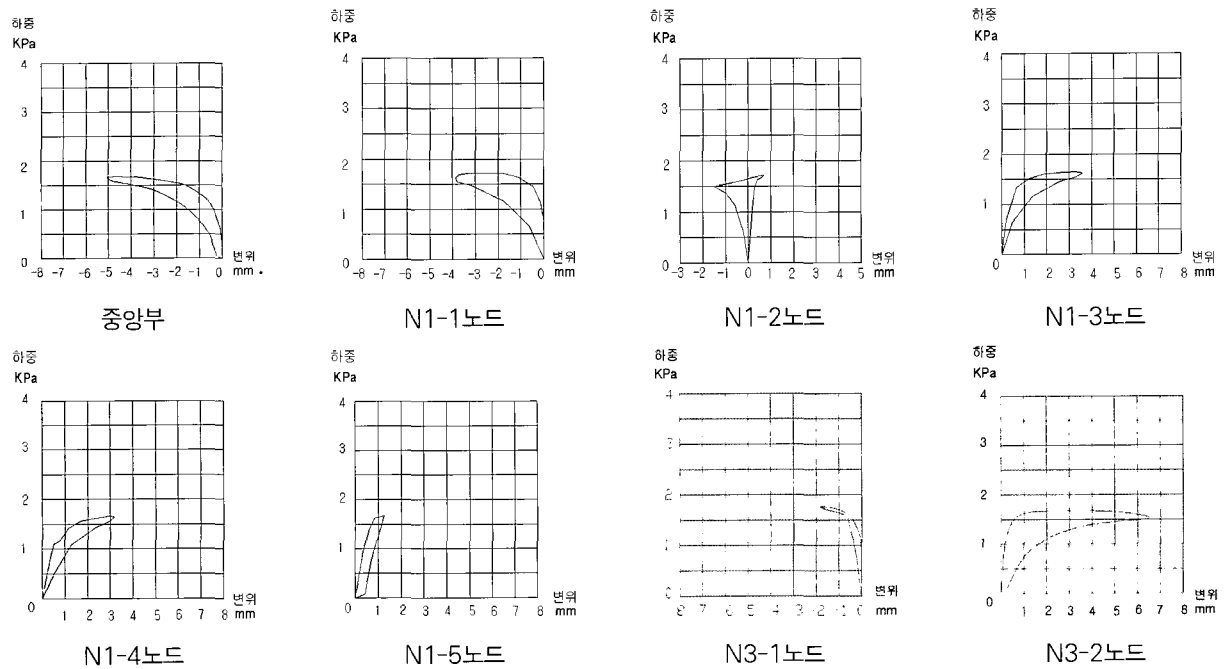
〈그림 6〉 하중-변위관계 (5분할 비강성막)



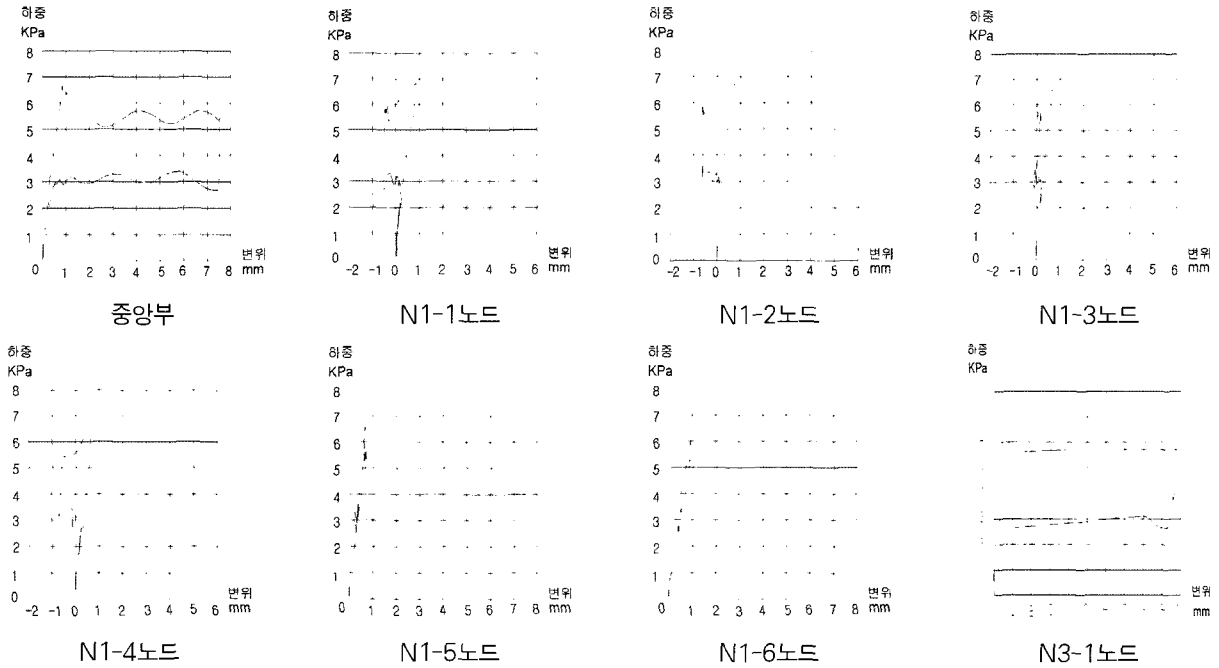
〈그림 7〉 하중-변위관계 (6분할 강성막)



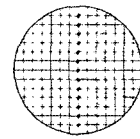
변위위치도 (6분할)



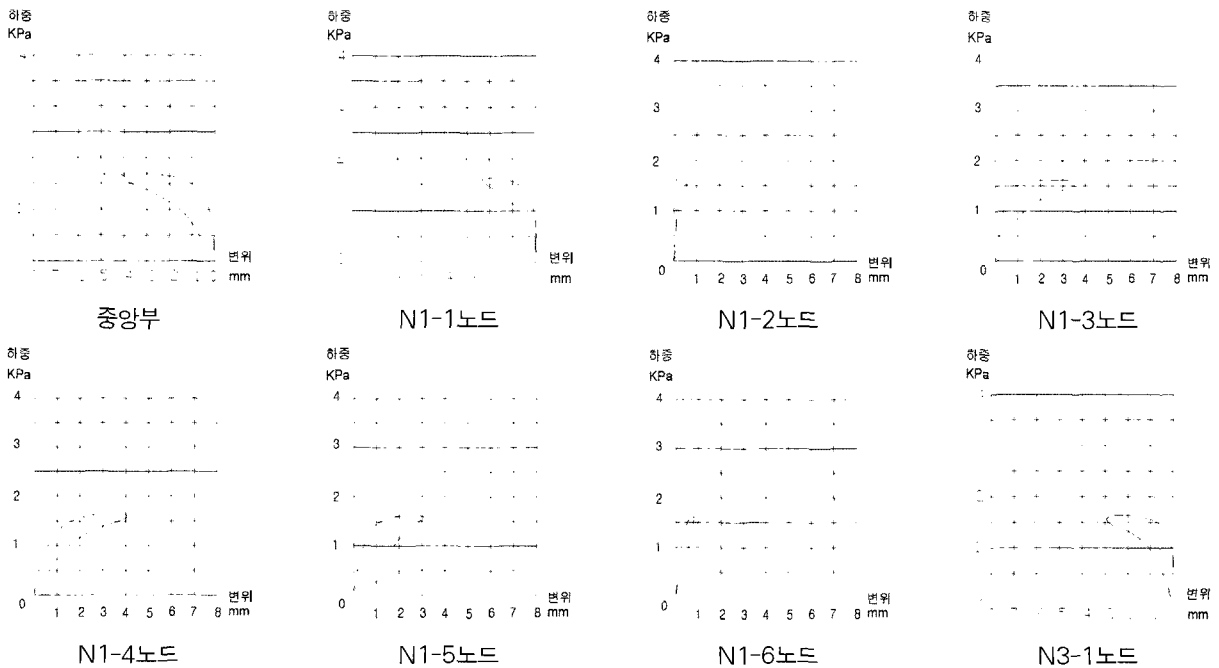
〈그림 8〉 하중-변위관계 (6분할 비강성막)



〈그림 9〉 하중-변위관계 (7분할 강성막)



변위위치도(7분할)



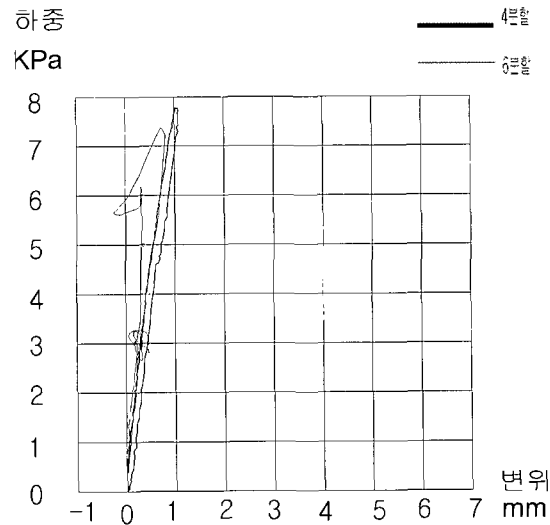
〈그림 10〉 하중-변위관계 (7분할 비강성막)

직전까지 기하학적 비선형성을 나타내면서 좌굴직 전까지 5mm 정도의 대변형을 일으키며 연직상방향(“-”방향)의 변위를 나타내고 있다.

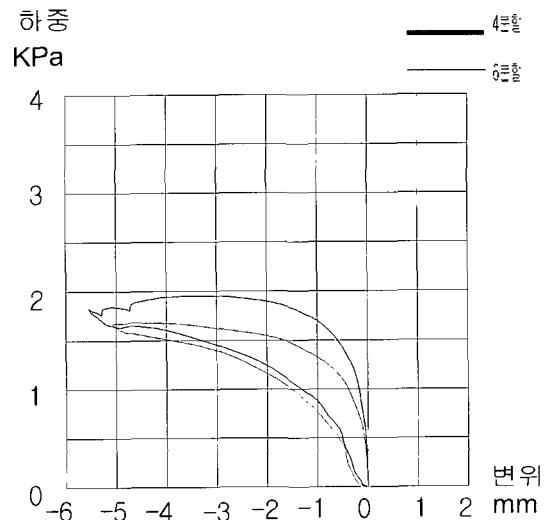
이와 같이 강성막의 경우 구심 등분포하중에 의한 연직하방향의 변위는 일반적인 구조물의 변형과 그 성상이 유사하나 비강성막 모델의 경우 일반적인 상식을 벗어나는 구심 등분포하중에 의한 연직상방향의 변위가 나타났다. 그 이유는 2-way grid 구형 래티스돔의 경우, 그리드 특성상 원주방향으로 각 부재의 강성차가 심하여 이러한 현상이 발생한다고 판단된다. 그러나 강성막의 경우 이 지붕재료의 강성으로 인해 부재의 강성차가 줄어들게 됨으로 구형셸과 같은 거동을 하게 되는 것이다. 따라서 지붕재료의 강성을 크게 할수록 원주방향의 강성차는 줄어들게 될 것이다. 그러나 현실적으로는 지붕의 강성을 높이는 것은 셸구조물과 같은 구조형식을 취하게 됨으로 래티스 돔 본연의 구조적 특성을 상실할 우려가 있으므로 프레임강성에 비하여 지붕강성을 높일 수 없는 경우가 많다. 그러나 본 실험에서 알 수 있는 것처럼 지붕재료의 두께를 프레임 두께의 10% 정도로 현실성 있는 지붕강성을 고려했음에도 불구하고 각 모델 공히 좌굴내력은 약3~4배 이상 커짐을 알 수 있었으며, 이 결과는 실무차원에서는 대단히 만족스런 결과로 판단되어진다. 왜냐하면 실무에서는 구조물 건립시 당연하게 사용하는 지붕재를 통해 구조물을 구성하는 본체 프레임의 물량을 대폭 줄일 수 있다는 것은 경제적이고 실용적이기 때문이다.

또한 <그림 11>, <그림 12>는 각각 강성막, 비강성막의 경우 대표적 분할수에 따른 하중-변위곡선 관계의 일예를 나타낸다. 강성막인 경우에는 중앙부 절점(정점)의 변위가 하방향으로 발생함에 반해 비강성막인 경우에는 정점 주변의 프레임이 하방향으로 변위가 발생함에 따라 중앙부 정점은 도리어 상방향으로 변형이 발생하고 있음을 잘 알 수 있다.

<그림 11>에서 나타나는 바와 같이 최대하중점에 도달하기까지 강성의 저하가 거의 발생하지 않고 있으며, 분할수에 관계없이 거의 동등한 값을 나타내고 있다. 또한, 최대하중점의 내력은 4분할인 경우에 7.8Kpa 전후로 6분할의 7.1Kpa 보다 조금 높



<그림 11> 돔 중앙절점에서의 하중-변위 관계곡선 비교예 (강성막)



<그림 12> 돔 중앙절점에서의 하중-변위 관계곡선 비교예 (비강성막)

게 나타나고 있으나, 그 차이는 10% 미만으로서는 의미있는 차이라 할 수 없다.

한편 비강성막의 경우에 대한 하중-변위관계는 <그림 12>에 나타나고 있다. 그림에서와 같이 비강성막의 경우에는 하중의 증가와 함께 강성의 저하가 점진적으로 발생하고 있으며, 큰 변형이 발생한 후에 최대내력점에 도달하고 있으며, 최대내력은 4분할인 경우가 6분할인 경우에 비해 조금 높게 나타나고 있으나, 공기압에 의하여 최대하중점에 도달할 때까지의 거동은 거의 동일한 형태를 나타내고 있다. 이러한 현상은 각 모델 공히 유사하며, 래티



〈사진 3〉 실험종료후의 변형상태

스 돔의 경우 돔의 분할수에 따른 거동의 차이보다 돔의 막재로 사용하는 재료의 특성 즉, 지붕재료 강성의 차이 등이 구조체의 거동에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

실험 종료 후의 시험체 변형형상은 <사진 3>에 나타낸다. 사진은 공기압에 의해 지붕재인 막이 먼저 변형 및 좌굴한 현상과 프레임이 변형한 현상을 나타내고 있다. 시험체의 하부에 실험의 반복을 위해 좌굴방지용 보호도개를 설치하였기 때문에 프레임의 부재좌굴 또는 구조물 전체의 좌굴현상은 실험 시 관찰할 수 없었다.

5. 결 론

본 연구에서는 격자형 래티스 돔의 격자 분할에 따른 거동 및 좌굴 특성을 규명하기 위하여 실험을 수행하였으며, 얻어진 결론은 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. 돔의 프레임 분할수에 의한 내력 및 강성의 차이는 크게 발생하지 않으며, 막재의 재료적 특성에 의해 구조체의 최대하중 및 강성이 결정되고 있다.
2. 돔의 프레임 분할모델에 관계없이 프레임두께의 0.1배에 상당하는 강성 막의 효과에 의해 좌굴하중이 약 3배~4배 정도 증가하는 것을 알 수 있었다.
3. 시험체 모델에 관계없이 지붕재료의 강성효과에 의해 정점부근의 상방향 변위를 제어할 수 있었으며, 이 실험 결과는 2-way grid 단층 래티스 돔의 실현 가능성을 높여 주는 중요한 결

과로 판단되어 진다.

참고문헌

1. 日本建築學會, 單層ラチスドームの安定 解析-その現狀と問題點, 日本建築學會シェル空間構造委員會, 스페이스프레임小委員會, 日置興一郎編集, 1988.8.2
2. 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. Shell, Membrane and Space Frames, IASS Symposium, Osaka, 1986, Vol. 3, Elsevier Science Publishers, pp.113-121.
3. Yamada M. An Approximation on the Buckling Analysis of Orthogonally Stiffened and Framed Spherical Shell. Shell and Spatial Structure Engineering, IASS Symposium, Rio de Janerio, Pentech Press, 1988, pp. 177-193.
4. Uchiyama, K., and Yamada, M Buckling Orthogonally Stiffened and Framed Spherical Shells under External Pressure. op.cit.,pp 220-239.
5. Heki K.,Examples of Equivalent Rigidity of Latticed Plates. Analysis, Design and Realization of Space Frames, IASS Bulletin. n84/85, 1984,pp96-106.
6. 山田大彦, 山本博志, 鄭煥穆, 王麗 “雪荷重を受ける單層剛接合ラチスドームの座屈特性, その2、ネットワークパタンの影響,” 第5回 雪工學シンポジウム論文集, 1989. pp. 123-126.
7. Don O. Brush and Bo O. Almroth, Buckling of Bars, Plates, and Shells, McGRAW-HILL, 1975.
8. 齊藤公男, 스페이스프레임(立體格子構造)의設計·解析·施工, 昭和57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.26-44.
9. 川井忠彦, 藤谷義信, 座屈問題解析, 培風館,

- 1991.
10. 半谷裕彦, 單層 ラチスドームの安定解析 -その現狀と問題點-, 2章, 單層ラチスド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.
 11. Forman, S. E. and Hutchinson, J. W. : Buckling of Reticulated Shell Structures, Int.J.Solids Structures, Vol.6, pp.904-932.
 12. 半谷裕彦, 스페스프레임(立體格子構造)의設計·解析·施工, 昭和57年度文部性科學研究費補助金, 總合研究(B)研究報告書, 1983, pp.137-164.
 13. 鈴木敏郎, 元結正次郎, 一樣外壓を受ける周邊固定部分球形シェルの挫屈舉動に關する-考察, 非偏平部分球形シェルを含む, 日本建築學會構造系論文報告集, No. 361, 3.1986, pp.95-103.
 14. 山田大彦, 石川智章, 單層剛接ラチスシェルの座屈に關するフレーム解析とシェル解析の對應性に關する研究, 日本建築學會學術講演便概集B, 構造1, 8.1986, pp.269-270.
 15. 山田大彦, 單層 ラチスドームの座屈耐力評價法, 第2回, シェルと空間構造に關する日·韓コロキウム, 同論文集, 東京, 8.1987, pp.43-150