

대공간구조물의 형태결정에 관한 이론 및 응용에 관한 연구

A Study on the Theory and Application for the Morphological Aspects of Hybrid Spatial Structures

이 경 수* 이 상 주* 유 용 주* 한 상 을**
Lee, Keyoung-Su Lee, Sang-Ju U, Yong-Joo Han, Sang-Eul

ABSTRACT

The purpose of this study is to show how to gain the morphology of the Hybrid Spatial Structures and to get the geometrical data such as node coordinates, member relationships and graphic images. To form spatial structures, we have developed morphological aspects of general spatial structures, programming process and techniques. Structural design has many processes. Especially, it is very important to consider the determination of structural configuration. Regular Hybrid Spatial Structures have complex configuration, so we need to make use of automated computer process to determine structural shape in Hybrid Spatial Structures. We have applied morphological aspects to double layer plate, single layer dome, double layer dome and tensegrity structure.

1. 서론

대공간 구조물의 형상은 부재들의 연속된 연결에 의해 구성되며, 이러한 부재연결방식은 설계자에 의해 결정된다. 또한 구조적으로나 형태적으로 최적의 형상을 얻기 위해 여러 가지 부재연결방식을 검토하게 된다. 대공간 구조물은 많은 수의 절점과 부재조합에 의해 구성되며, 구조물형상은 구조물을 이루고있는 각 절점과 연결부재에 의해 시각적으로 결정되어진다. 이러한 절점좌표와 부재연결상태에 대한 정보는 구조해석 시 필수적인 데이터로 활용된다. 구조적 거동특성을 파악하기 위해서는 구조물에 대한 입력정보들이 필요하게 되는데, 이러한 정보들은 전처리과정(pre-process)에 의해 처리된다.

본 논문의 목적은 국내적으로 대공간 구조물에 대한 수요가 날로 증가하고 있는 상황에서 구조물 형상결정에 대한 체계적인 이론적 접근방법을 제시하고, 실제 구조물에의 적용성을 검토하는데 있다.

2. 형상결정의 기본원리

2.1 형상결정 방법

특정 좌표공간상의 절점에 이름을 부여하고 절점들을 서로 연결한다면, 연결상태는 무수히 많은

* 인하대학교 건축공학과 석사과정

** 인하대학교 건축공학과 교수

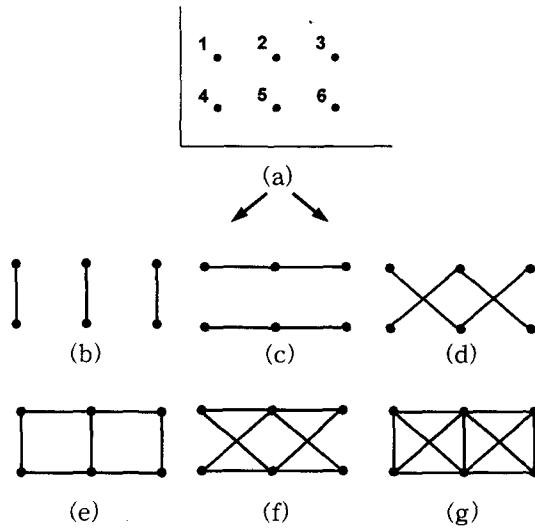


그림 1. 부재연결방법

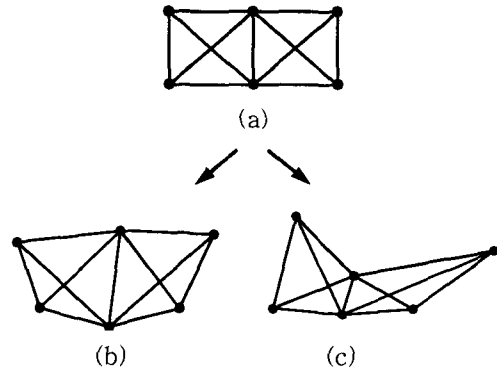


그림 2. 절점 이동

종류가 있게 된다. 각각의 부재연결 방법을 모든 절점을 연결하여 만든 전체부재 연결상태에 대한 부분집합으로 생각할 때, 각각의 부분집합들의 결합에 의해 다양한 구조물형상을 얻을 수 있다. 그림1에서 예시하듯이, (a)는 좌표공간을 나타내고 있다.

그림1(a)의 좌표공간상에 절점 1, 2, 3, 4, 5, 6 이 있다면, 각 절점들은 서로 다른 특정좌표를 가지고 있다. 이 절점들을 연결한 상태인 (b), (c), (d), (e), (f), (g)등은 모든 연결 가능한 상태의 한 예를 나타내며, 각각의 부재연결상태는 하나의 부재연결집합으로 생각할 수 있다. 그림1과 같이 서로 다른 두 점간의 연결을 하나의 부재라고 생각할 때, 절점연결상태의 조합에 의해 또 다른 하나의 절점연결상태를 만들 수 있다. 부재연결집합 (e)는 집합 (a)와 집합 (b)의 조합이다. 식으로 간단히 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (e) &= (b) + (c) \\ (f) &= (c) + (d) \\ (g) &= (b) + (c) + (d) \end{aligned}$$

여기서, 절점연결상태의 조합이 하나의 구조물로서 그 의미를 갖기 위해서는 다음의 두 가지 조건을 만족해야 한다.

첫째, 부재연결이 중복되어서는 안되며,

둘째, 한 절점은 한 번 이상 부재연결상태를 가져야 한다는 것이다.

그림2는 절점연결상태가 변하지 않는 상태에서 절점의 이동(translation, rotation)만으로 구조물형상이 변하는 것을 보여준다. 즉 부재연결상태집합 (a)를 복사하여 (b), (c)를 만들고 각각의 절점을 어떤 특정 함수에 의해 변화시켜 준다면, (b), (c)는 또 다른 구조물의 형상을 갖게 된다. 이러한 과정을 프로그램화시킬 경우 절점번호와 부재번호의 관계를 합리적으로 정해주어야만 구조해석 시 발생할 수 있는 강성행렬폭의 대각행렬폭(bandwidth)의 증가를 막을 수 있다. 따라서 구조해석상의 효율성의 문제와 연관되는 절점번호의 결정은 중요한 고려사항이 된다.

2.2 기본원리에 의한 구조물형상결정의 적용 예

2.2.1 복층평판(double layer plate)의 형상변화

그림3의 모든 구조물들은 같은 연결상태를 가지고 있다. 다만 각 절점들이 각각의 절점좌표함수에 의해 변하고 있을 뿐이다. 부재연결관계가 변하지 않고 절점의 이동만으로 구조물의 형상을 만들 수 있는 예는 복층평판에만 국한되는 것은 아니다. 이러한 관계를 다른 부재연결상태에 적용한다면, 자신이 원하는 구조물의 형상을 다양하게 얻을 수 있다.

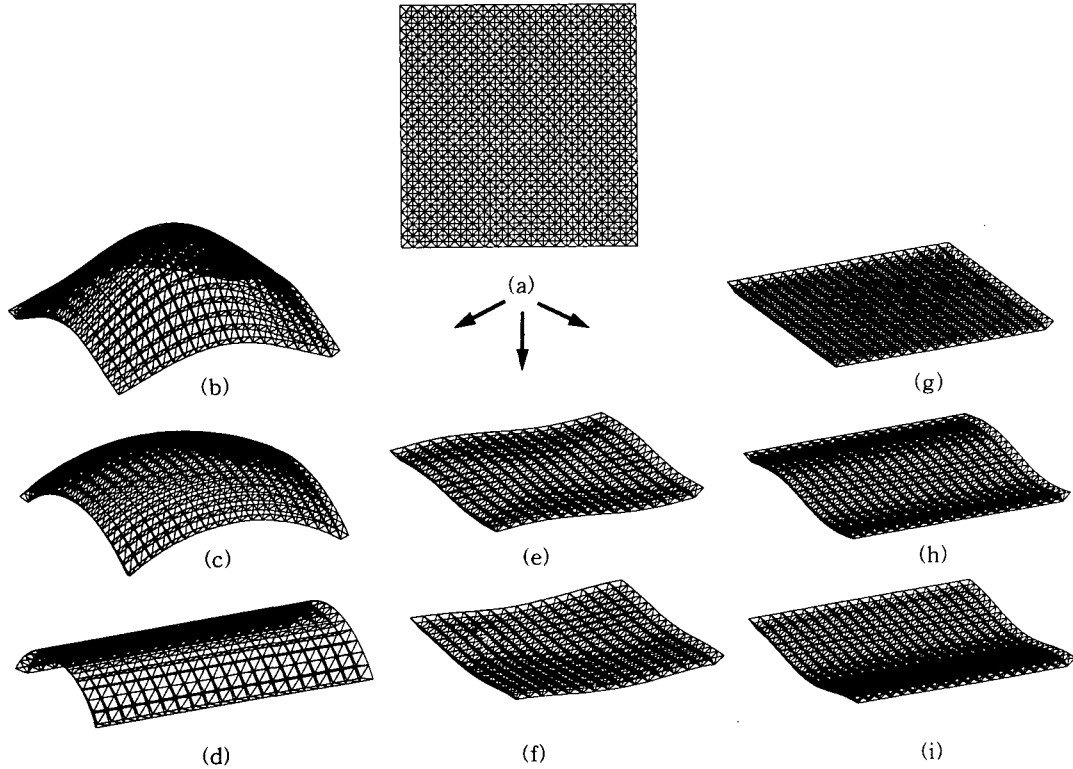


그림 3. 복층평판의 형상변화

그림3(a)는 복층평판의 평면이고 (g)는 (a)의 아이소메트릭이다. (d)는 볼트(vault)의 형상을 보여주고 있는데, 볼트도 역시 복층평판과 같은 부재연결상태에서 출발한다. (b)와 (c)는 2방향 돔(2-way grid dome)의 형상이다. 이러한 형상도 마찬가지로 복층평판을 이용하여 만들 수 있다. (e), (f), (h), (i)는 복층평판에 이중 곡률을 주었을 때의 형상이다. 위의 형상은 좌표공간을 직교좌표계로 보았을 때, x축과 y축의 반복회수에 의해 결정된다. 예를 들면 x축으로의 반복회수

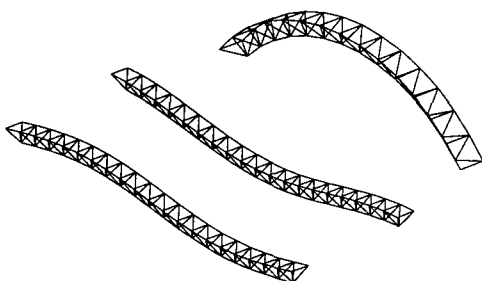


그림 4. 복층구조물의 단위모델

(number of x-axis frequency, NFX)를 20, Y축으로의 반복회수(number of y-axis frequency, NFY)를 1로 주면 아래의 그림4와 같은 형상을 얻을 수 있다. 절점의 위치를 결정하는 함수는 각각의 모델마다 다르므로 자신이 원하는 모델을 얻기 위해서는 각 모델에 대한 기하학적 변수를 지정해 주어야 한다. 복층평판의 경우, 단위요소의 x축, y축의 거리와 두께를 지정하여 주면 되고, 원주좌표계를 따르는 볼트, 돔의 경우는 반개각(half open angle)과 곡률반경(radius)의 지정에 의해 그 형상이 결정된다.

2.2.2 돔의 형상결정

돔은 그 형상이 반지름방향(radius-direction)반복회수, NFRAD 과 원주방향(θ -direction)반복회수, NFTHETA 에 의해 결정된다. 아래 그림5는 가장 일반적인 돔의 형상을 보여 준다. 여기에서 화살표 방향은 돔형상의 변형과정을 나타낸다. 스웨들러돔(schwedler dome)(그림5(b))은 리브돔(rib dome)의 형상에서 발전되는데, 리브돔에서 절점의 이동이나 증가 없이 가세(brace)만 더해지면 스웨들러돔형상이 된다. 마찬가지로 네트워크돔(network dome)(그림5(d))은 라멜라돔(lamella dome)에서부터 발전되는데, 네트워크돔의 경우는 라멜라돔에서 원주방향으로 부재를 추가하여 얻을 수 있다. 그림5의 돔은 그 형상이 간단하여 기본적인 돔의 형상으로 인식된다. 따라서 복잡한 돔으로 발전할 경우 이러한 형상이 기본적인 형상으로 사용된다.

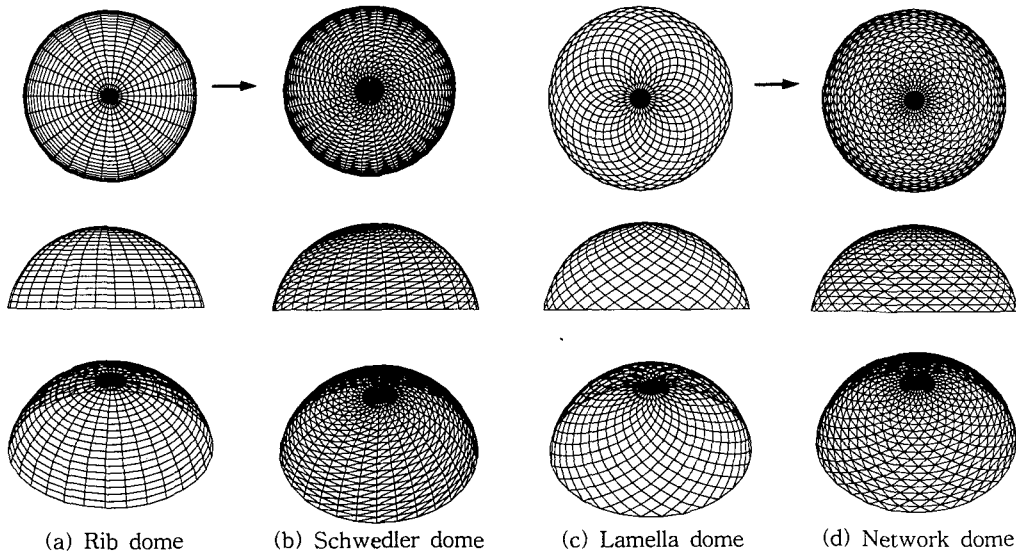


그림 5. 돔의 기본형상

2.2.3 삼각형 단위요소를 갖는 돔의 형상결정

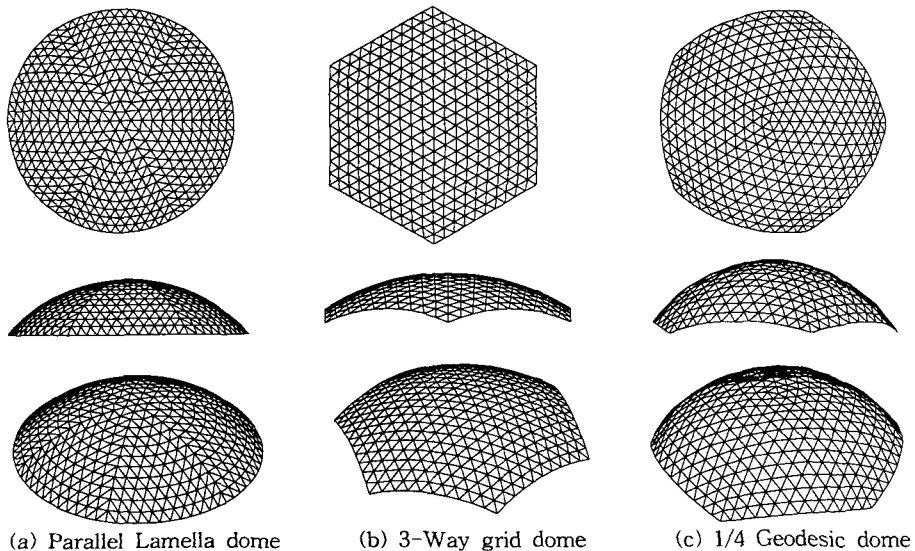


그림 6. 삼각형돔의 형태

그림6은 기하학적으로 복잡한 형상을 가진 구형돔의 표면을 삼각형 형태로 나눈 형상을 보여주고 있다. 비록 네트워크돔도 삼각형 요소로 이루어졌지만, 그림5(d)에서와 같이 네트워크돔의 중앙부는 부재가 밀집되어 있다는 점이 그림6의 돔과 상이한 점이다. 그림6의 3가지 돔은 같은 부재 연결방식을 가지고 있다. 비록 그림6(c)의 1/4 지오데식돔(geodesic dome)은 중심부가 5분할 되어있지만, 기본적 연결방법은 동일하다. 그림6(a)의 파라렐 라멜라돔(parallel lamella dome)은 중심을 6분할한 형상이고, 그림6(b)는 3방향 그리드돔(3-Way grid dome)의 형상인데, 경계부분을 원형으로 처리하기 위한 부재를 더해줌으로써 일본의 나고야돔(그림7)과 같은 형상을 얻을 수 있다.

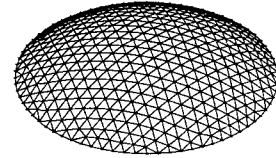


그림 7. 나고야돔형상

3. 형태조합에 의한 지붕형상 결정

그림8과 그림9는 특정형태의 조합에 의한 구조물 생성 예를 보여준다. 부재연결방식이 결정된 상태에서 절점의 이동만으로 구조물을 변화시키거나, 절점이 고정된 상태에서 부재연결방식을 변화

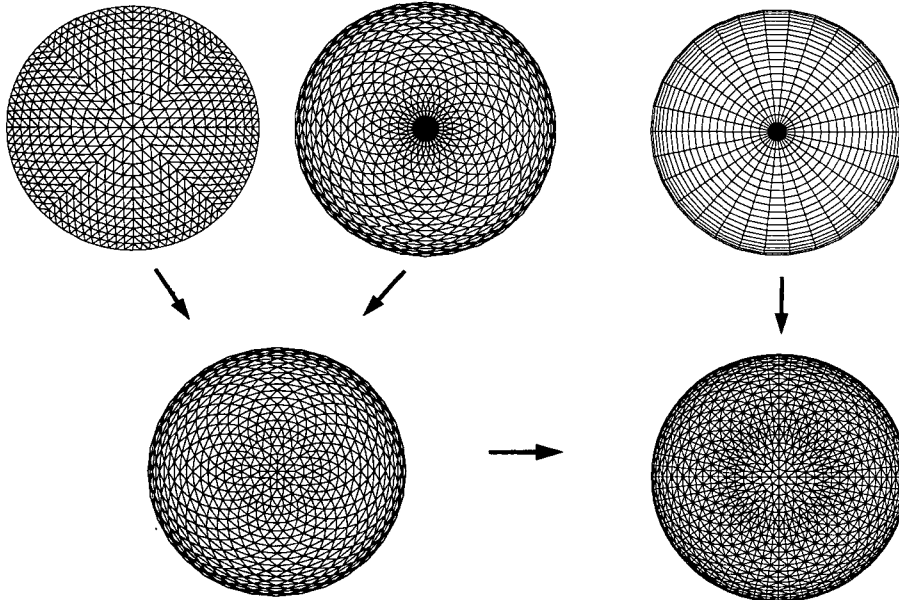


그림 8. 형상조합에 의한 돔형상

시킴으로써 구조물형상을 결정해 주었던 앞의 예와는 달리, 그림8과 그림9는 절점과 부재연결방식이 모두 변화하고 있다. 따라서 위와 같은 구조물의 형상결정프로그램을 작성할 때에는

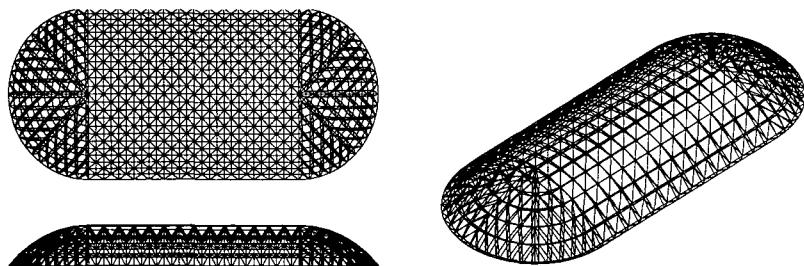


그림 9. 형상조합에 의한 지붕형상

절점과 부재연결방식의 변화를 모두 고려해야만 한다. 그러나 위와 같은 지붕형식도 앞에서 설명한 기본적 지붕형식의 조합이므로, 형상결정 프로그램 작성이 가능하다. 여기서도 물론 강성매트릭스의 대각행렬폭을 고려한 절점 번호가 중요한 관심사항이다. 그림8(a)의 지붕형식은 일본의 오사카돔의 지붕형식과 같다.

4. 복층 파라렐 라멜라돔(Parallel Lamella Dome)의 형상결정

파라렐 라멜라돔은 형태적으로 가장 합리적인 돔이라고 볼 수 있다. 물론 구의 형태를 갖는 구조물을 만들 때에는 지오데식돔이 가장 합리적이다. 모든 단층돔은 복층돔의 형태로 변환 가능하다.

그림10은 단층 파라렐 라멜라돔을 3가지 형식의 복층 파라렐 라멜라돔으로 형상결정 한 것을 보여주고 있으며, 이와 같은 복층돔 형식은 그 응용 분야가 많을 것으로 사료된다(그림14). 그림10(a)는 평면에서는 단층돔 같이 보이지만, 절점과 부재를 적당히 조합하여 만든 복층돔 형상이다. 실제로 부산 아시안게임이 열릴 부산종합운동장의 지붕형상(그림12)은 그림10(a)의 모델을 8등분한 후 중심부를 제거하여 얻을 수 있는 케이블돔(cable dome)형식의 돔이다.

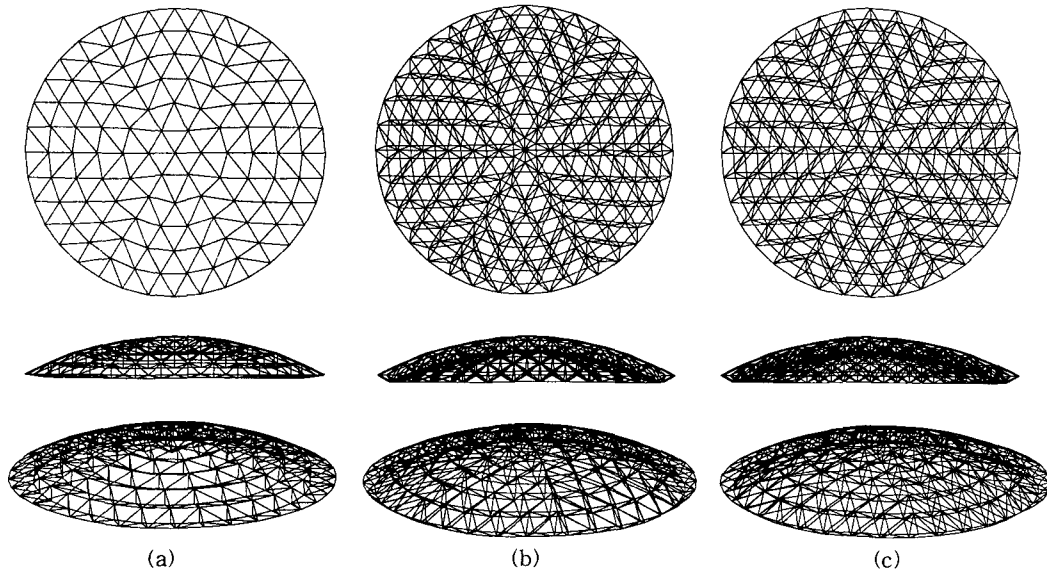


그림 10. 복층 파라렐 라멜라돔형상

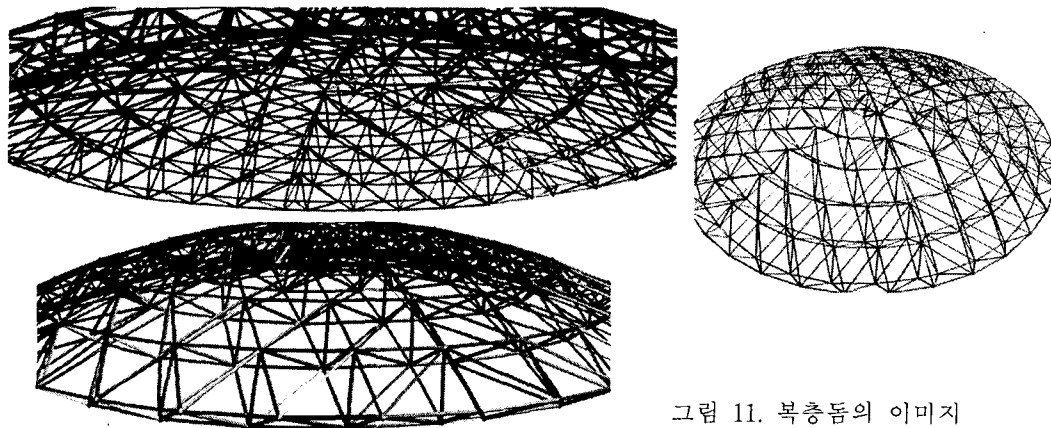


그림 11. 복층돔의 이미지

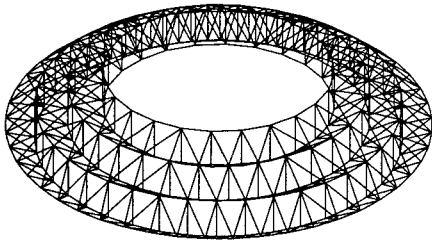


그림 12. 부산돔형상

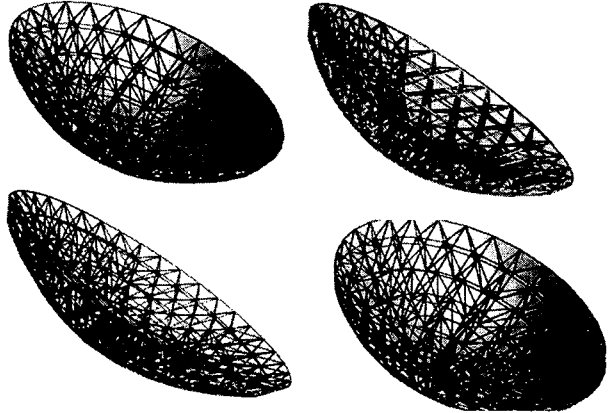


그림 13. 그림10 (b)모델을 응용한 위성수신안테나형상

5. Tensegrity system의 형상결정

“Tensile Integrity”의 합성어인 Tensegrity는 R. Buckminster Fuller에 의해 만들어진 용어이다. Tensegrity 구조시스템은 힘의 흐름을 인장력으로 자연스럽게 흐르도록 하기 위한 구조적 대안이다. 따라서 압축부재는 연속적인 인장케이블에 의해 다음 압축부재와 연결된다. Tensegrity는 압축부재끼리의 연결을 가능한 줄이면서, 이러한 연결흐름을 인장케이블에 의해 실현시키려는 목적을 가지고 있다. 따라서 인장케이블에 압축력이 발생하는 불안정상태를 방지하기 위한 구조적 메카니즘이 선행되어야 한다.

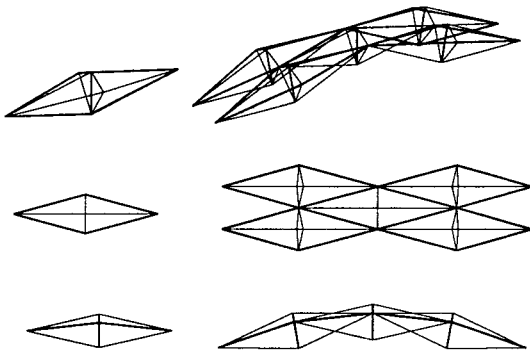


그림 14. 단위 Tensegrity

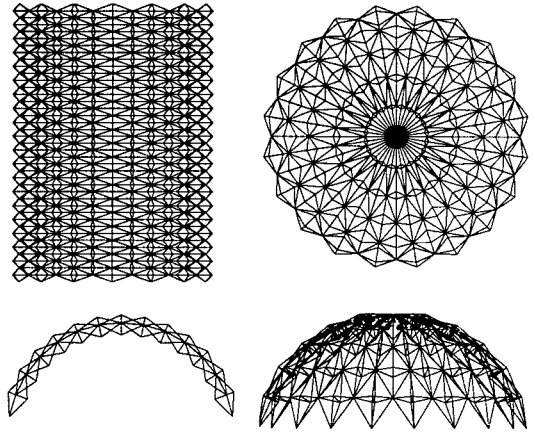


그림 15. 단위조합에 의한 볼트와 돔

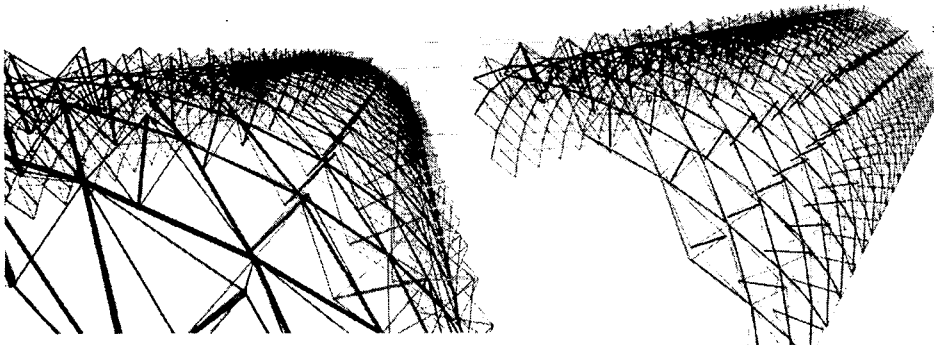


그림 16. Tensegrity볼트의 이미지

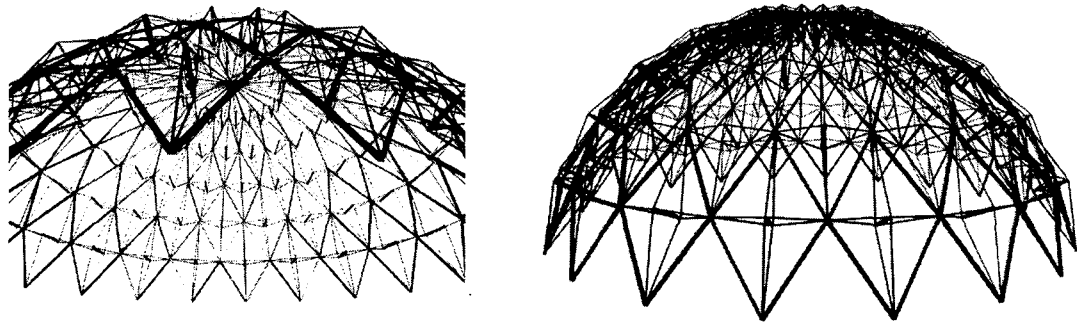


그림 17. Tensegrity돔의 이미지

그림14는 단위 Tensegrity를 보여주고 있다. 각 단위는 그 자체적으로 안정화 되도록 형상이 미리 결정되어야 하며, 하나의 단위형상이 결정되면, 이 단위형상을 전체구조물로 확장을 시킬 수 있다. 그 후에 전체구조물에 대한 구조해석을 실행하여 그 거동특성을 파악하게 된다.

6. 결론

지금까지 구조적 형상결정방법을 형태학(morphology)적인 측면에서 고찰하였다. 비록 지면관계상 자세한 프로그래밍기법을 소개하지는 못하였지만, 형태결정방법에 대한 하나의 가능성을 제시하였다. 구조물 형태결정의 방향은 보다 높은 구조적 효율성과 안정성, 그리고 형태적 아름다움을 얻고자 하는데 있다. 설계자의 의도에 맞는 아름다운 형태가 결정되었다고 해서, 구조적 문제까지 모두 해결되는 것은 아니며, 특히 대공간 구조물은 구조적 안정성을 확보해야만 한다.

본 논문은 구조물형태결정에 대한 기본적 연구를 통하여, 실제 구조물설계 시 적용 가능한 방법과 프로그램을 통한 구조물 형태결정 및 data 처리기법을 제시하였으며, 대공간 구조물형태결정에 대한 기초적 방법을 제시하였다.

참고문헌

1. 한상을, "Lattice돔의 기하학적 비선형 좌굴거동에 관한 연구", 초대형구조시스템 연구센터 (STRESS) 보고서, 1995.
2. 한상을 외. "SPACE FRAME 구조물의 구조해석, 설계 및 시공", 전산구조공학회 기술강습회 교재 12-1, 1995.
3. 김진기, "모드중첩법에 의한 단층래티스 돔의 기하학적 비선형좌굴거동에 관한 연구", 인하대학교 건축공학과 석사학위논문, 1998년
4. Gabriel J. Francois, "Beyond the Cube", the architecture of space frames & polyhedra, John Wiley & Sons, Inc. 1997.
5. Wolfgang Schueller, "The Design of Building Structures", Prentice Hall, 1996.
6. Tony Robbin, "Engineerign a new Architecture", Yale University Press. 1996.
7. Hoshyar Nooshin. "Formex Configuration Processing in Structural Engineering", Elsevier Applied Science Publishers LTD, 1984
8. Kawaguchi K, Oda K, Hangai Y, "Experiments and Construction of Truss Structures Stabilised by Cable Tension" ,IASS Internaional Symposium 97, Singapore, pp.421-429

감사의 글 : 본 연구를 지원해 주신 초대형 구조시스템 연구센터에 감사를 표한다.