

---

# 텐서그러티 기본유형 분류 및 응용

## Classification and applications of tensegrities

최 선 영\*      박 선 우\*\*      박 찬 수\*\*\*  
Choi, Sun Young    Park, Sun Woo    Park, Chan Soo

---

### Abstract

Tensegrity is a relatively new structural system (about more than 50 years old) based on the use of continuous tension-discontinuous compression. In spite of the controversial principles to define these systems, several examples of tensegrity prototypes constructed in IESD(Institute of Environment Structure Design) are presented illustrating the feasibility of tensegrity as a lightweight structure. Of course, a much more detailed structural investigation would be necessary, but at least in order to achieve the intended purpose, it is essential to understand the structural principles and the fundamental forces of tensegrity. Once this point is established, the characteristics of these structures are described, as well as applying them to architecture.

Consequently, in this work, the patterns of basic module as well as fundamental definition are introduced. Then, the application of tensegrity to architecture has also been mentioned.

*Keywords : Modeules or Prototypes of Tensegrity, Elementary Equilibrium, Applications of Tensegrity*

## 1. 서 론

상대적으로 새로운 유형의 구조시스템에 대한 지식을 습득하기 위해서는 그에 대한 정확한 정의가 필요하고, 그 정의에 따라 구조시스템의 옳고 그름이 판명되기 때문에 상당히 중요하다. 이것은 텐서그러티 시스템에 대해서도 예외가 아니고, 상당한 전문가들이 모든 과학적 커뮤니티에서 받아들여지는 확실하고 규정적인 정의를 찾기 위해 노력하여 왔다.

현재까지도 관련자 및 전문가들 사이에 이 시스템의 범주에 대한 이견이 존재하기는 하지만, 풀러(B. Fuller)가 그의 특허와 시너지틱(Synergetics)에서 텐서그러티에 대해 설명한 이후, 스넬슨(K. Snelson), 퍼그(A. Pugh), 왕(B. Wang), 하나오(A. Hanaor), 모트로(R. Motro) 등이 묘사하고, 정리한 개념들에 따라 보편적으로 받아들여지는 텐서그러

티의 규정이 가능하게 되었다.

모트로의 확장된 정의에 따르면 텐서그러티 시스템은 “인장구성요소의 연속체 내에서 압축구성요소의 불연속세트를 포함하는 안정된 자체-평형상태에서의 시스템이다.”

본 논고에서는 텐서그러티 시스템에 대한 이런 확장된 규정에 토대하여 그 특성과 개념을 정리하고, 가장 기본적인 요소형태를 분석·파악하며, 이로부터 전개된 몇 개 범주의 텐서그러티 기본유형(모듈)을 보여준다. 그리고 이 유형들로부터 응용될 수 있는 범주와 그 예들을 통해 텐서그러티 시스템의 적용성과 그 가능성을 살펴본다.

## 2. 텐서그러티 시스템

### 2.1 일반특성

텐서그러티 구조물의 부재들은 항상 인장 또는 압축으로 그 내부에 하중이 분배되는 방식에 의해

---

\* 충북대학교 건축공학과 박사과정

\*\* 한국예술종합학교 건축과 교수

\*\*\* 충북대학교 건축공학과 교수

뚜렷이 구분된다.

인장부재들은 연속네트워크를 형성하고, 인장하중은 구조물 전체를 통하여 전달되는 반면, 압축부재들은 불연속이고, 따라서 압축하중은 매우 국부적으로 작용한다. 이 때문에 압축하중은 장스팬을 거쳐 전달되지 않으므로 압축부재는 더 세장해질 수 있다. 또한 텐서그리더 시스템은 교란 후 그 평형상태를 재구축(자체-평형)할 수 있기 때문에 안정이다.

무엇보다 일반적인 강성구조물에서는 압축이 하중지지의 기본이지만, 텐서그리더에서는 인장이 이 역할을 한다. 그것은 "자중과 지주(기둥)" 대신에, "균형 잡힌 전방향 응력의 구조물"로써 구성된다.

## 2.2 요소의 평형상태와 T-프리즘

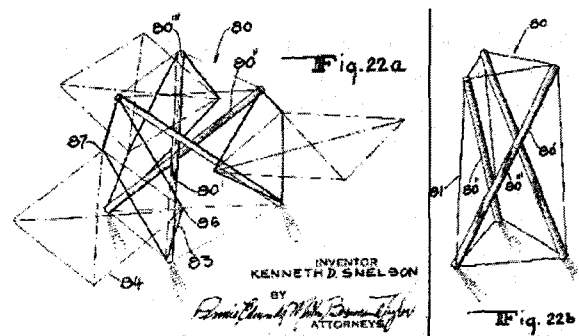
### 2.2.1 요소의 평형상태

가장 오래된 스트레스 구조물로 여겨지는 연은 기본적으로 2차원 구조물이고, 가운데에서 두 압축봉이 서로 접하고 있기 때문에, 텐서그리더로 간

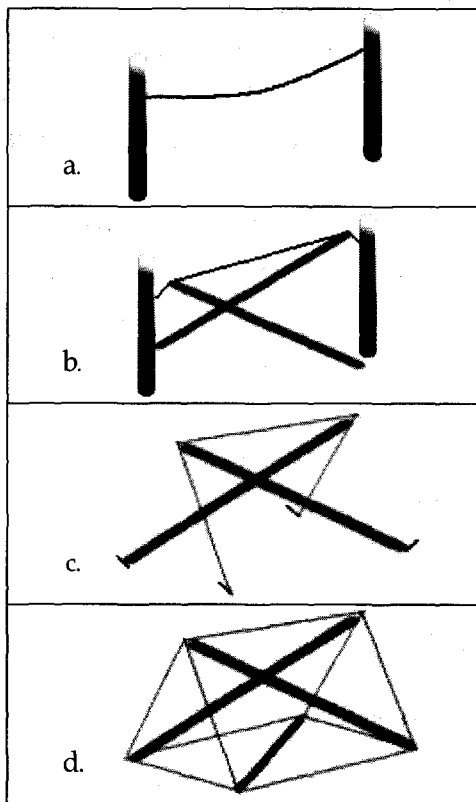
주될 수 없지만, 스넬슨이 이로부터 차용한 X-형태의 모듈은 가장 단순한 텐서그리더 요소의 평형상태를 설명하는데 매우 유용하다<그림 1>.

이 후 케너(H. Kenner)는 두 장대에 정착된 케이블과 가운데서 지지하는 두 압축봉으로 구성된 시스템의 전개방식으로 Simplex를 설명하였다<그림 2>.

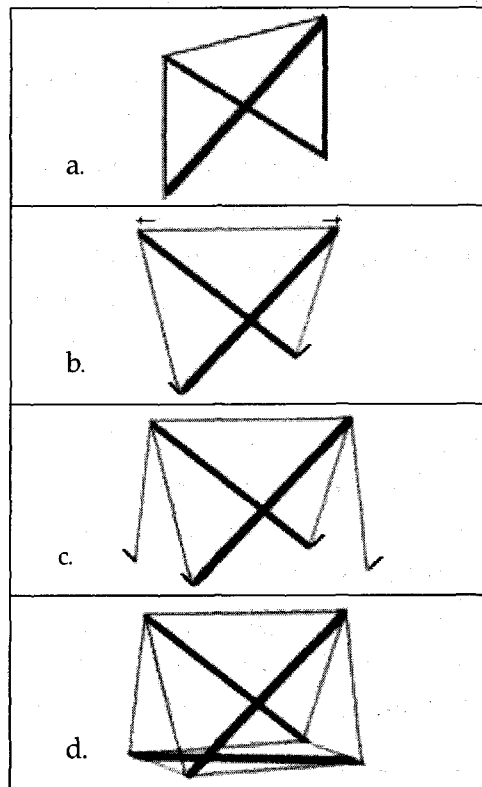
스넬슨과 케너의 묘사 외에 또 다른 모델로 "요소의 평형상태(elementary equilibrium)"를 설명할 경우는 연을 닮은 모듈에서 그림 3과 같은 순서에 따라 안정된 평형상태의 Simplex를 얻을 수 있다.



<그림 1> Simplex의 전개 (스넬슨, 1965)



<그림 2> 케너에 의한 Simplex 유도

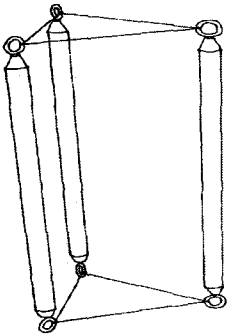


<그림 3> 연을 이용한 Simplex 유도

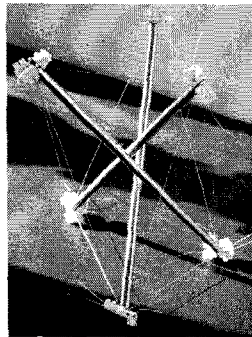
## 2.2.2 T-프리즘

텐서그리티 시스템의 평형을 설명하기 위해 이용된 Simplex는 텐서그리티 집단에서 가장 간단하고 가장 직관적인 모듈의 하나인 T-프리즘으로 정리될 수 있다.

<그림 4>에 보이는 삼각프리즘의 두 단부(위, 아래면)가 서로에 대해 비틀리면, 직사각면은 두 대각이 각각 둔각과 예각인 비-평면사변형이 되고, 이때, 둔각에 상응하는 정점을 케이블(인장줄)로 연결하면 T-프리즘이 완성된다<그림 5>.



<그림4>삼각프리즘



<그림 5> T-프리즘

T-프리즘은 비틀리면서 두 대각에 상응하는 정점이 서로 가까워지고, 계속해서 비틀림에 따라 다시 멀어지기 시작하는 지점에 달하게 되는데, 만일 측면 케이블이 이 지점에 이르는 길이(최소길이)에 상응하면, 구조물은 이 두 점 사이의 거리를 늘이지 않고는 그 형상에서 벗어날 수 없으므로 안정되어 평형상태에 이른다.

이것은 모든 텐서그리티 평형상태의 기초가 되는 사항이다.

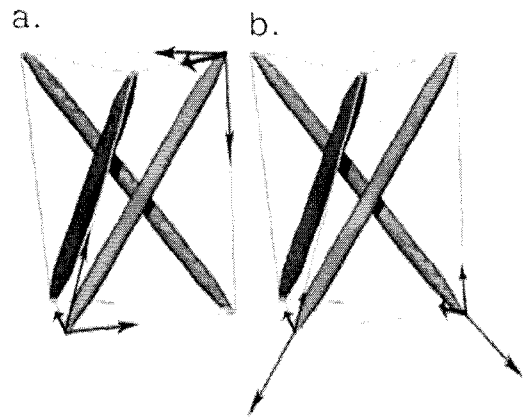
## 2.2.3 T-프리즘의 평형상태

텐서그리티의 가장 단순한 예인 T-프리즘의 자체-균형거동을 얻기 위해서는 각 절점에 작용하는 인장과 압축시스템의 평형상태가 이루어져야 한다. 즉, 이것은 3차원시스템이므로 압축재의 각 단부에 부착되는 케이블은 최소 3개가 필요하다.

<그림 6.a>는 이런 유형의 평형상태를 설명한다. 각 절점에서 세 케이블의 (인장)하중 합력은 압축봉

의 압축선에 놓여야 한다. 그렇지 않으면 막대는 휨모멘트의 영향을 받을 것이고, 압축과 인장의 3차원 평형상태에 있지 못한다.

케이블의 경우에도 같은 논의가 적용될 수 있고 <그림 6. b>, 이것은 두 압축봉의 단부에 부착되며, 각 절점에서 최소한 다른 두 케이블에 의해 영향을 받는다. 결과적으로 각 케이블은 특수한 인장을 받으면 평형상태에 놓이게 되고, 이것은 일반적으로 프리스트레스하중이다.



<그림6> 프리즘의 평형상태

이 경우에서 보이듯이 텐서그리티 구조물은 평형상태에서 그것에 작용하는 하중이 명백하다. 다시 말하면, 압축과 인장, 두 유형의 하중은 본질적이고 완벽하게 분리되어 있다.

## 3. 텐서그리티의 기본 유형(모듈)

퍼그(A. Pugh)가 제시한 텐서그리티 시스템의 편람은 거의 배타적으로 다면체에 관계된 것이지만, 그럼에도 매우 유용하다. 이 장에서는 보다 분명한 분류를 얻기 위해서 일부 다른 형상과 기하학적 도형들의 고려)에 근거한 세 개의 기본유형(모듈)을 기술될 수 있다: 마름모, 순환, 지그 재그형.

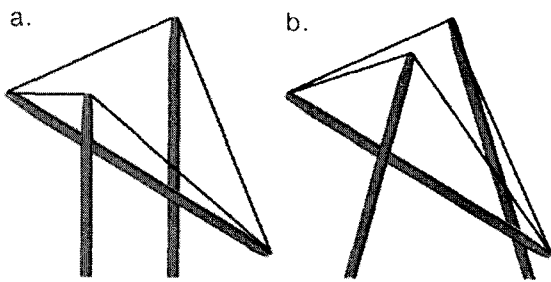
### 3.1 마름모(rhombic)형

- 1) Motro, "Tensegrity, Structural Systems for the Future", 4장, 2003

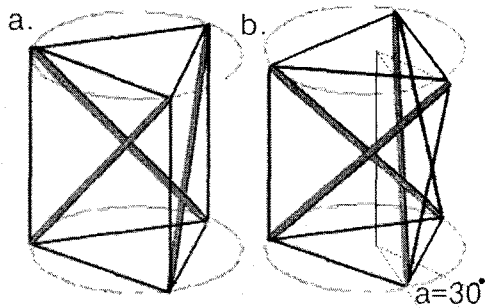
마름모형<그림 7> 시스템의 각 압축봉은 4개의 다른 케이블로 이루어진 마름모의 대각선을 따라 접을 수 있고, T-프리즘이 이 유형에 포함된다.

만일 그림 8의 T-프리즘 회전에서 보이는 것과 같이 다각형 프리즘의 위, 아래 면에 대한 상대회전으로 텐서그러티 프리즘(그림 9.b)이 얻어진다면, "회전각 또는 비틀림각( $\alpha$ )"은 압축봉의 수에 좌우)되고, 다음 식)으로 얻을 수 있다.

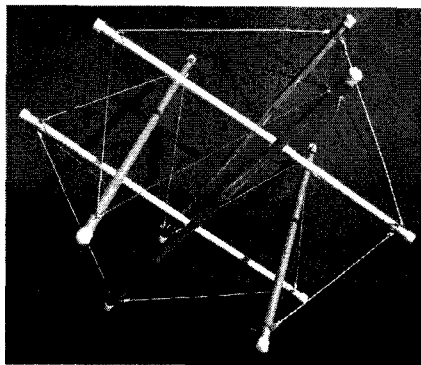
$$\alpha = 90^\circ - 180^\circ/n$$



<그림 7> 마름모형 텐서그러티 개념



<그림 8> T-프리즘 회전



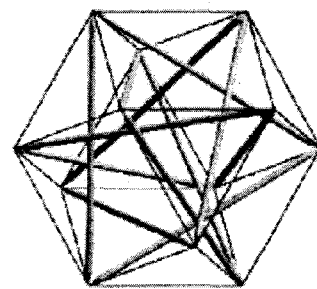
<그림 9> T-20면체

마름모형 시스템의 잘 알려진 또 다른 예가 소위 "20면체 텐서그러티 (T-20면체, 그림 9)"이다. 이것은 플러(1949, 블랙마운틴대학)에 의해 최초로 제시되었고, 대칭인 몇 개 텐서그러티 중 하나로 만일 압축봉이 자리한 비평면 사변형이 정사각형으로 바뀌면, 연속인장네트워크는 입방팔면체를 나타내게 된다. 이것은 두 개씩 나란한 세 쌍의 압축봉으로 인해 매우 강한 대칭구성요소를 가진 전형적인 2층 텐서그러티 시스템이고, "Z(지그-재그)형 T-4면체"와 좋은 대조를 이룬다.

### 3.2 순환(Circuit)형

이 형태는 마름모형에서 압축봉이 접속, 순환하여 이루어지며<그림 10>, 몇 개의 규칙, 비-규칙적 다면체, 예를 들어 cuboctahedron, icosidodecahedron, snub cube, snub icosahedron 등이 만들어질 수 있다. 그림 10의 cuboctahedron은 3개 압축봉이 4차례 순환하여 구성되고(모든 순환은 각기 다른 것과 뒤섞이면서), 케이블은 다면체의 테두리를 규정하고 있다.

순환시스템은 지오데식 텐서그러티 구 또는 돔을 전개할 수 있고, 같은 수의 압축봉을 가진 마름모형보다 더 강하다.



<그림 10> Cuboctahedron

### 3.3 Z(지그-재그)형

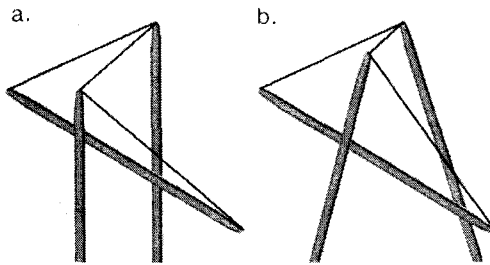
마름모형의 케이블이 'Z'를 이루는 형태로 변경되면, "Z(지그-재그)형"이 얻어진다<그림 11>. 이 형태에서 시스템의 안정성을 확보하기 위해서는 케이블들의 치환이 일관되어야 한다.

Z형으로 알려진 T-4면체(F. Della Sala, 1952, 미

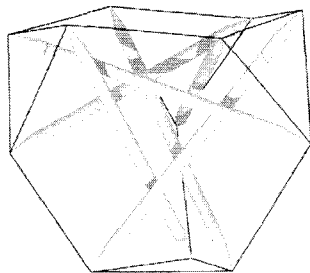
1) Kenner, 1976  
2) Roger S. Tobie, 1967

시간대)는 마름모형 T-20면체의 지그재그 대응이다. 두 구조물 모두 6개 압축봉을 가지고 있지만, T-4면체는 4개 케이블 삼각형, T-20면체는 8개를 가진다.

모트로가 언급한 것처럼, 이 유형은 항상 균형잡힌 기하학적 형태를 얻는 것은 불가능하고, 따라서 때로는 문제의 다면체를 완벽하게 정의할 수 없는 형태가 있다. 각 면에 수렴하는 압축봉의 방위에 의해, 어떤 정다각형의 뒤틀림이 생기는 것을 식별할 수 있다. 또한 일반적으로 마름모형보다 더 적은 케이블을 사용하기 때문에 더 단순하지만 덜 강하다.



<그림 11> Z형 텐서그리터 개념



<그림 12> T-4면체

## 4. 텐서그리터 모듈의 확장 및 응용

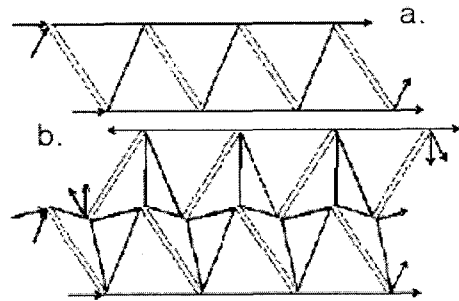
### 4.1 그리드

두 방향으로 텐서그리터 기본유형들을 조합하여, 1차원 구조물에 비하여 더 나은 성능을 가진 면구조물을 만들 수 있고, 이 작업의 결과는 모듈들이 조합되는 방식에 크게 좌우된다.

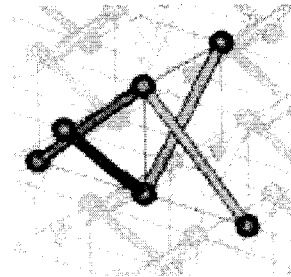
예를 들어, <그림 13.a>와 같이 마름모형을 변형하여 셀(cell)을 구성, <그림 13.b>와 같은 형식으로 행을 추가하고, 이어서 그 자체 둘레를 다시 마감하

는 형식으로 1차원에서 2차원으로 확장된 실린더형 그리드(확장모듈)를 얻을 수 있다.

1998년 이래, 모트로와 그 조력자들은 T-프리즘의 단순응집 강성부족을 피하도록 몇 개의 그리드를 만들어 왔다. V. Raducanu와 함께 개발한 "V-expander" <그림 14>는 다른 기하형태들에 적용되었고, 이 모듈의 철골구조물이  $160\text{daN/m}^2$  외부 하중에 대해 Eurocode3 BS에 따라 시공되어 이런 유형의 그리드가 놀라운 강도를 가질 수 있는 가능성을 증명한 바 있다(Raducanu & Motro 특허, 2001).



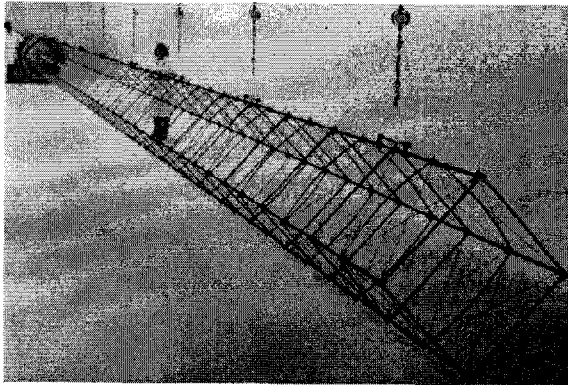
<그림 13> 확장모듈: 실린더형



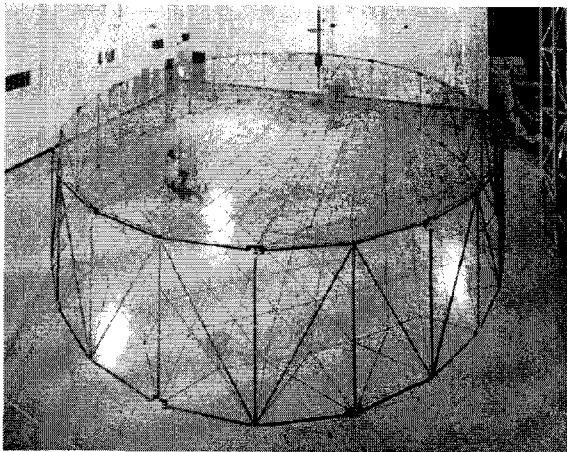
<그림 14> V-expander

### 4.2 전개형 구조물(deployable structures)

실제로, 전개 가능형 텐서그리터의 장점, 가능성, 잠재성을 설명하는 것은 보다 깊은 논의를 필요로 하지만, 텐서그리터 기본유형을 전개 가능한 구조물에 응용하는 연구 분야는 지난 10여년 간 눈에 띄게 확장되고 있고, <그림 15>과 <그림 16>에서 보듯이 우주항공, 통신 등 분야의 구조물에 응용이 두드러지고 있다.



<그림 15> FAST mast for the ISS (Courtesy of AEC-Able Engineering Company, Inc.)



<그림 16> The AstroMesh deployable reflector antenna (Courtesy of M. W. Thomson and TRW Astro Aerospace)

## 5. 결론

본 논고에서는 상대적으로 새로운 구조시스템인 텐서그러티의 기본원리 및 기본유형을 살펴보고, 이를 통해 시스템이 확장되고, 응용될 수 있는 가능성을 알아보았다.

텐서그러티 시스템은 전체로 응답하는 능력이 있고, 따라서 국부응력들은 균등하게 전달, 구조물 전체를 통해서 흡수된다. 그것들은 어떤 유형의 토크나 비틀림을 받지 않고, 좌굴은 그 압축요소가 매우 작기 때문에 매우 드물다.

게다가 자체적으로 안정한 개별 텐서그러티 모듈의 공간적 정의는 그것들을 함께 연결하여 시스템을 만드는 이례적으로 뛰어난 능력을 준다.

이 개념은 특정 패턴의 조합을 확장할 수 있는 옵션을 함축한다고 할 수 있다. 이것으로 인해 텐서그러티는 다양한 응용모듈(광의적 의미의 그리드)의 개발이 가능하고, 건축의 경우는 그들 기능에 적합한 모듈을 찾는 움직임이 점차로 활발해지고 있다.

## 참고 문헌

1. Pugh A. 1976, An introduction to tensegrity, University of California Press, Berkely, 1976
2. Calladine, C. R. Buckminster Fuller's "tensegrity" structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames. International Journal of Solids and Structures 14, 2, 1978
3. Motro, R. Forms and forces in tensegrity systems. In Third International Conference on Space Structures, Guildford, 1984
4. Furuya, H. Concept of deployable tensegrity structures in space application. International Journal of Space Structures 7, 2 1992
5. Motro, R. Tensegrity systems: the state of the art. International Journal of Space Structures 7, 2, 1992
6. Hanaor, A. Geometrically rigid double-layer tensegrity grids. International Journal of Space Structures 9, 4 1994
7. Motro, R. and Raducanu, V., Tensegrity systems and tensile structures, IASS Symposium on Theory, Design and Realization of Shell and Spatial Structures, Nagoya., 2001
8. Gunnar Tibert, Deployable Tensegrity Structures for Space Applications, Royal Institute of Technology Department of Mechanics, Doctoral Thesis, Stockholm, 2002