

# 텐서그러티 모듈의 변형 및 응용에 관한 연구

## A Study on Reformability and Application of Tensegrity Modules

최 선 영\*  
Choi, Sun Young

박 선 우\*\*  
Park, Sun Woo

박 찬 수\*\*\*  
Park, Chan Soo

### 요 약

텐서그러티는 연속인장-불연속압축 구성요소에 기반한 상대적으로 새로운 구조시스템이다. 좀 더 상세한 구조적 고찰이 필요하지만, 연구목적에 접근하기 위해서는 최소한 텐서그러티의 구조원리와 근본적인 역학관계를 파악하는 것이 필수적이다. 일단 이점을 확인하고 난 후에, 이러한 구조물의 특성뿐만 아니라 건축에서의 적용성을 다룬다. 그리고 이런 시스템을 규정하는 정의에 이견이 없지는 않으나, 경량구조물로서 텐서그러티의 가능성을 설명하기 위하여 구조디자인연구소(iESD)에서 제작한 텐서그러티 모듈(기본형)의 몇 가지 예를 제시한다.

따라서, 본 연구에서는 기본 정의(규정)뿐 아니라 기본 모듈의 유형을 소개하고, 건축에서 텐서그러티 모듈의 변형성과 응용성을 탐색한다.

### Abstract

Tensegrity is a relatively new structural system based on the use of continuous tension-discontinuous compression. 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 applications of them to architecture are described, as well as the characteristics of these structures. Then, in spite of the controversial definitions to explain these systems, several examples of tensegrity prototypes or modules constructed in iESD(Institute of Environmental Structure Design) are presented to illustrate the feasibility of tensegrity as a lightweight structure.

In this work, consequently, the reformability and application of tensegrity modules have also been researched in architecture, after the patterns of basic module as well as fundamental definition are introduced.

**키워드 :** 텐서그러티의 평형상태, 모듈, 변형과 응용

**Keywords :** Elementary Equilibrium, Modules or Prototypes, Reformability and Applications of Tensegrity Modules

## 1. 서 론

상대적으로 새로운 유형의 구조시스템은 정의에 따라 대상들을 그 범주에 포함시키거나 제외하기 때문에 그것을 규정하는 것이 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 텐서그러티의 규정이 가능하게 되었다.

모트로의 확장된 정의에 따르면 텐서그러티 시스

\* 정회원, 충북대학교 건축공학과, 부교수  
Tel : 019-334-9776

E-mail : suny\_choi@hotmail.com

\*\* 정회원, 한국예술종합학교 건축과 교수  
E-mail : psw@knu.ac.kr

\*\*\* 충북대학교 건축공학과 교수  
E-mail : cspark@chungbuk.ac.kr

템은 “인장구성요소의 연속체 내에서 압축구성요소의 불연속 세트를 포함하는 안정된 자체-평형상태에서의 시스템이다”.

본 연구에서는 텐서그러티 시스템에 대한 모토로의 확장된 규정을 토대로 그 특성과 개념을 정리하고, 가장 단순한 형태를 이용하여 요소평형상태를 파악하며, 이로부터 전개된 몇 개의 텐서그러티 기본 모듈(유형)을 보여준다. 그리고 이 기본 모듈로부터 변형한 모듈을 제시하고, 그 예들을 통해 텐서그러티 모듈의 응용과 확장 가능성을 살펴보는 동시에 건축에서의 활용 및 적용성을 파악하는 것을 연구의 목적으로 한다.

## 2. 텐서그러티 일반사항

### 2.1 개요 및 특성

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

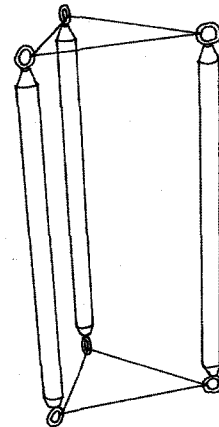
인장부재들은 연속네트워크를 형성하고, 인장하중은 구조물 전체를 통하여 전달되는 반면, 압축부재들은 불연속이고, 따라서 압축하중은 매우 국부적으로 작용한다. 이 때문에 압축하중은 장스팬을 거쳐 전달되지 않으므로 압축부재는 더 세장해질 수 있다. 또한 텐서그러티 시스템은 교란 후 그 평형상태를 재구축(자체-평형)할 수 있기 때문에 스스로 안정상태를 유지한다.

무엇보다 일반적인 강성구조물에서는 압축이 하중지지의 기본이지만, 텐서그러티에서는 인장이 이 역할을 한다. 그것은 “무게와 지주(기둥)” 대신에, “균형잡힌 전방향 응력의 구조물”로써 구성된다.

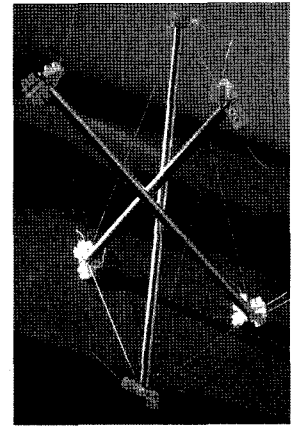
### 2.2 가장 단순한 텐서그러티: T-프리즘

텐서그러티 집단에서 가장 간단하고, 직관적인 모듈의 하나인 T-프리즘은 텐서그러티 시스템의 구성과 평형을 설명하는데 매우 유용하다.

그림 1에 보이는 삼각프리즘의 두 단부(위, 아래면)가 서로에 대해 비틀리면, 직사각면은 두 대각이 각각 둔각과 예각인 비-평면사변형이 되고, 이때, 둔



<그림 1> 삼각프리즘



<그림 2> T-프리즘

각에 상응하는 정점을 케이블(인장줄)로 연결하면 T-프리즘이 완성된다<그림 2>.

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.

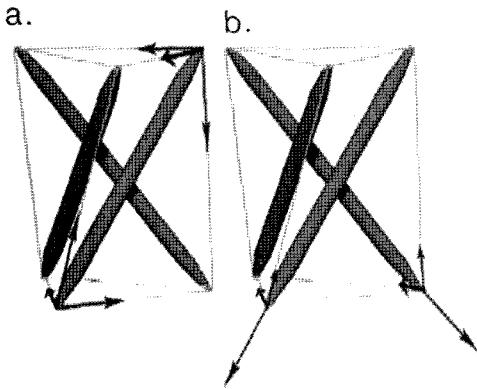
### 2.3 T-프리즘의 평형상태

텐서그러티의 가장 단순한 예인 T-프리즘의 자체-평형상태를 확인하기 위해서는 각 절점에 작용하는 인장과 압축시스템의 평형상태가 이루어져야 한다.

즉, 이것은 3차원시스템이므로 압축재의 각 단부에 부착되는 케이블은 최소 3개가 필요하다.

<그림 3.a>는 이런 유형의 평형상태를 설명한다. 각 절점에서 세 케이블의 (인장)하중 합력은 압축봉의 압축선에 놓여야 한다. 그렇지 않으면 막대는 휨모멘트의 영향을 받을 것이고, 압축과 인장의 3차원 평형상태에 있지 못한다.

케이블의 경우에도 같은 논의가 적용될 수 있고 <그림 3.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.



〈그림 3〉 T- 프리즘의 평형상태

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

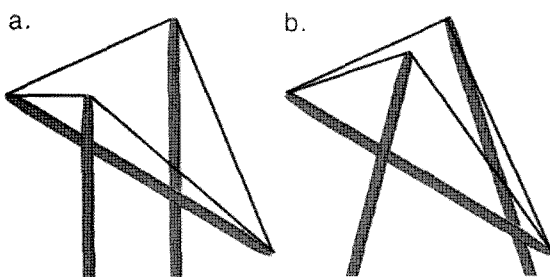
### 3. 기본 모듈의 분류

퍼그(A. Pugh)가 제시한 텐서그러티 시스템의 편람은 거의 배타적으로 다면체에 관계된 것이지만, 그림에도 매우 유용하다. 이 장에서는 보다 분명한 분류를 얻기 위해서 일부 다른 형상과 기하학적 도형들의 고려에 근거한 3개의 기본 모듈인 마름모, Z(지그재그), 순환형을 기술한다.

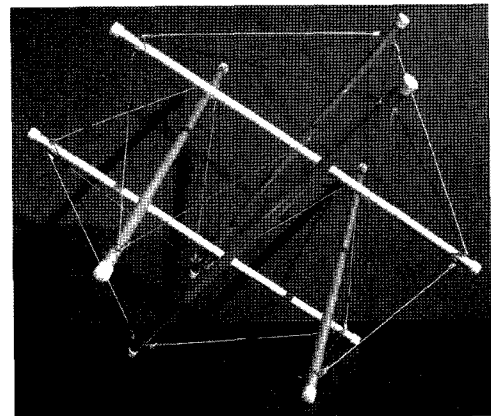
#### 3.1 마름모(Rhombic)형

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

마름모형 시스템의 잘 알려진 또 다른 예가 풀러(1949, 블랙마운틴대학)가 최초로 제시한 "20면체



〈그림 4〉 마름모형 모듈



〈그림 5〉 T-4면체

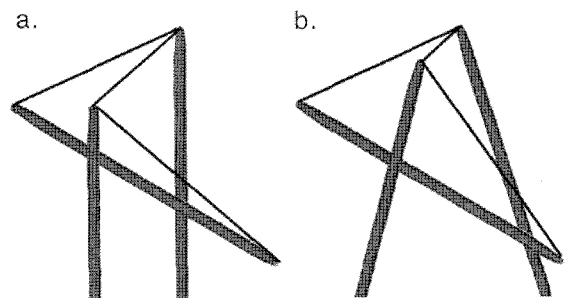
텐서그러티(T-20면체, 그림 5)"이다. 이것은 두 개씩 나란한 세 쌍의 압축봉으로 인해 매우 강한 대칭구성요소를 가진 전형적인 복층 텐서그러티 시스템이고, "Z(지그-재그)형 T-4면체"와 좋은 대조를 이룬다.

#### 3.2 Z(지그-재그)형

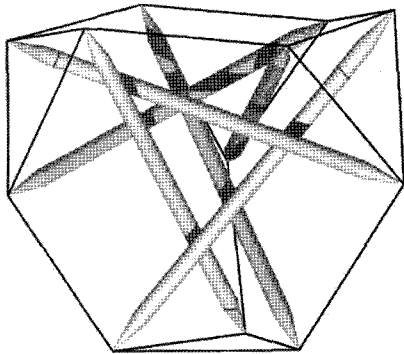
마름모형에서 케이블이 'Z'를 이루는 형태로 변경되면 "Z(지그-재그)형" 모듈이 구성된다<그림 6>.

대표적인 Z형으로 알려진 T-4면체<그림 7; F. Della Sala, 1952, 미시간대>는 마름모형 T-20면체의 지그재그 대응이다. 두 구조물 모두 6개 압축봉을 가지고 있지만, T-4면체는 케이블(인장줄)로 이루어지는 삼각형 면이 4개, T-20면체는 8개이다.

모트호가 언급한 것처럼, 이 유형은 항상 균형잡힌 기하학적 형태를 얻는 것은 불가능하고, 따라서 때로는 문제의 다면체를 완벽하게 정의할 수 없는 경우가 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 6〉 Z(지그재그)형 모듈

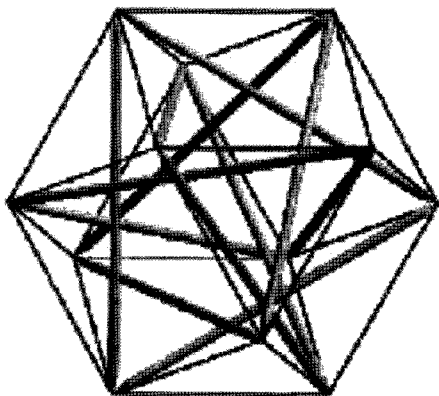


〈그림 7〉 T-4면체

### 3.2 순환(Circuit)형

이 형태는 마름모형에서 압축봉이 접속, 순환하여 이루어지며, 몇 개의 규칙 또는 비-규칙적 다면체, 예를 들어 cuboctahedron, icosidodecahedron, snub cube, snub icosahedron 등을 만들 수 있다. 〈그림 6〉의 cuboctahedron은 3개 압축봉이 4차례 순환하여 구성되고(모든 순환은 각기 다른 것과 뒤섞이면서), 케이블은 다면체의 테두리를 규정하고 있다. 이 모듈형은 모트로의 확장된 정의에 따라 텐서그러티 범주의 모듈로 받아들여진다.

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



〈그림 8〉 Cuboctahedron

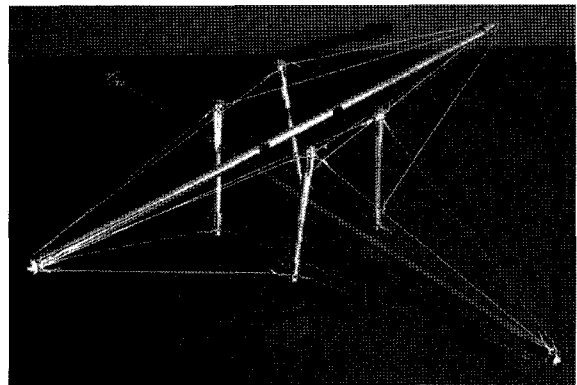
## 4. 텐서그러티 모듈의 변형 및 응용

### 4.1 기본 모듈의 조합 및 응용

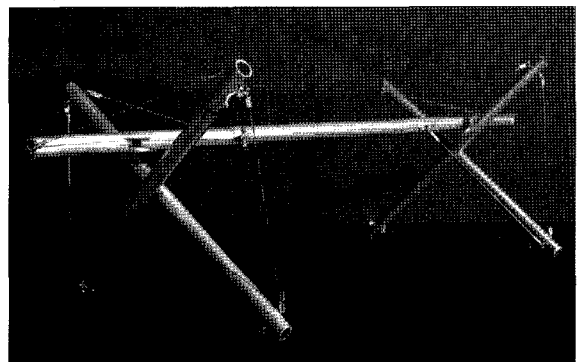
앞 장에서 제시된 텐서그러티 기본 모듈 3가지는

개별적 또는 서로 유기적으로 조합되어 보다 확장된 모듈로 변형할 수 있으며, 이를 통하여 개별 모듈의 단순 연결이나 조합 시에 얻을 수 없는 조형성과 더불어 성능 개선효과를 기대할 수 있다.

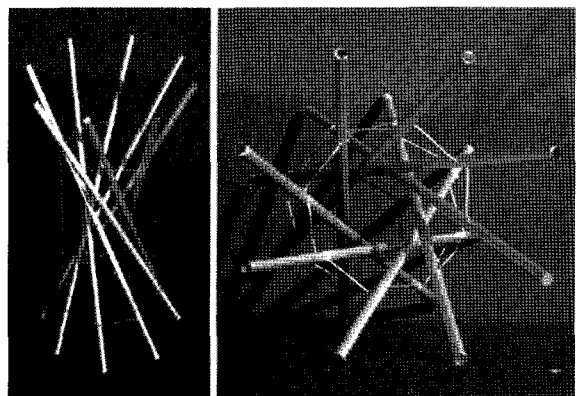
여기서는 상기 내용을 보여주기 위하여 iESD (Institute of Environmental Structure Design)에서 제작한 모델들 중 일부〈그림 9~12〉를 제시하였다.



〈그림 9〉 마름모형 모듈의 조합-1



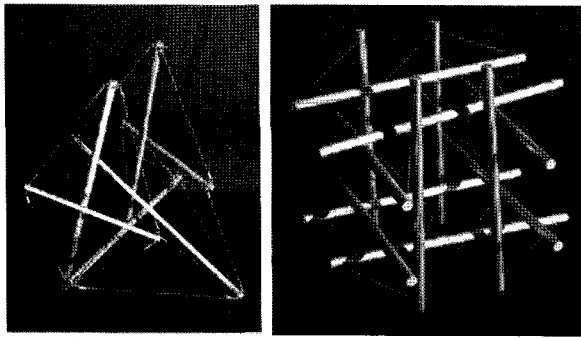
〈그림 10〉 마름모형 모듈의 조합-2



(a) 측면

(b) 조감

〈그림 11〉 T-프리즘의 확장



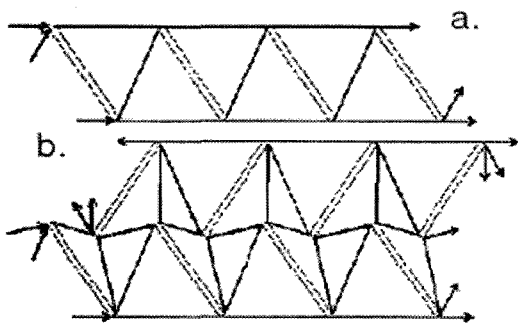
(a) 압축제 삭제 (b) 압축제 추가

<그림 12> T-20면체의 응용

### 4.2 면내 모듈에서 면외 모듈로 확장

다방향으로 텐서그리디 기본유형들을 조합하여 1차원 구조물에 비하여 더 나은 성능을 가진 면구조물로 변형할 수 있고, 이 작업의 결과는 모듈들이 조합되는 방식에 크게 좌우된다.

예를 들어, <그림 13.a>와 같이 텐서그리디 기본 모듈인 마름모형을 변형한 셀(cell)을 구성, <그림 13.b>와 같은 형식으로 행을 추가하고, 이어서 그 자체 둘레를 다시 마감하는 형식으로 1차원에서 2차원으로, 다시 3차원으로 확장된 실린더형 그리드(확장모듈)를 얻을 수 있다.



<그림 13> 확장모듈: 실린더형

### 4.3 응용 및 활용방향

건축분야에서 텐서그리디 시스템을 적용하기 위한 노력에 비해 결과물이 많지 않은 것이 현실이지만, 텐서그리디의 모듈이 갖는 뛰어난 적용성 측면이 부각되면서 현재 많은 연구자들에 의해 다방면으로 활용방안이 고안되고 있다. 여기서는 텐서그리디의 활용빈도가 높고 장래 적용성도 높이가 평가 받는 부분만을 다룬다.

#### 4.3.1 돔·지붕시스템

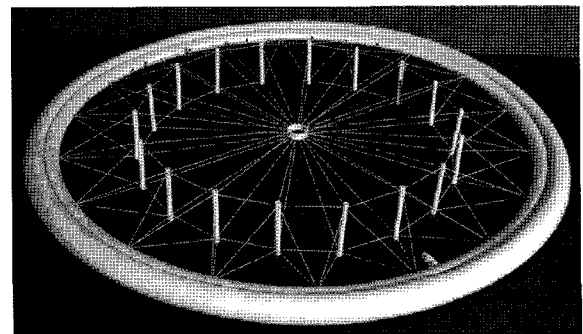
돔이나 지붕에 적용하기 위하여 텐서그리디 모듈을 변형하거나 확장하는 방법은 매우 다양하다.

이 경우, 텐서그리디 모듈 하나가 전체 지붕시스템 등을 이루는 개별 부재(트러스 응용부재 등)의 역할을 하거나 지붕 전체가 하나의 텐서그리디 시스템(순환시스템 응용)으로 기능할 수도 있다. 이와 더불어 레이어를 다양하게 조절하는 방법으로 보다 다양한 모듈을 활용할 수 있다.

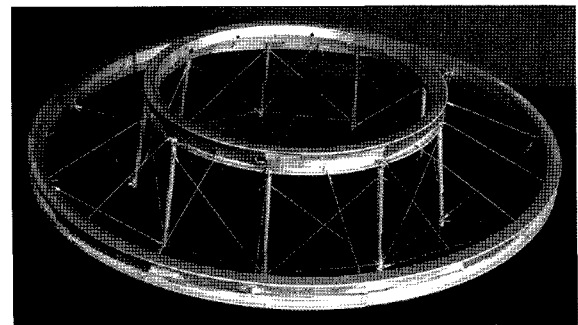
여기 제시한 사진들 역시 iESD (Institute of Environmental Structure Design)에서 제작한 모델들 중 일부<그림 14~18>이다.



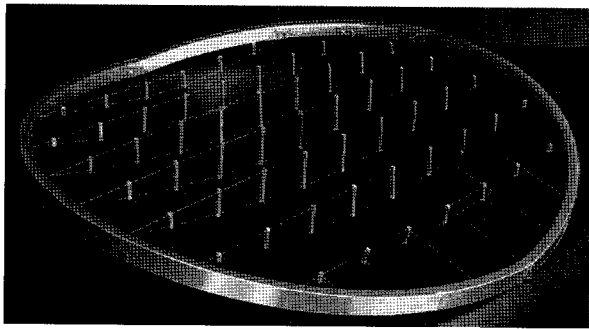
<그림 14> 텐서그리디 모듈을 응용한 지붕시스템 모델 제작 모습



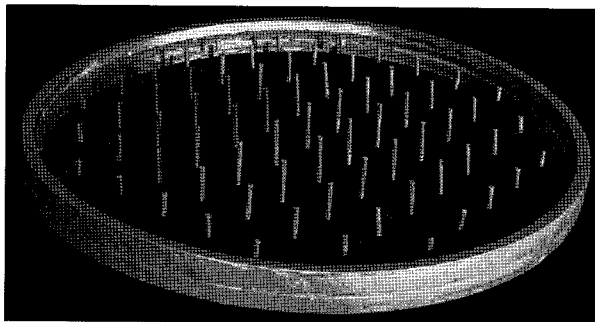
<그림 15> 지붕시스템에 응용한 텐서그리디 모듈-1



<그림 16> 지붕시스템에 응용한 텐서그리디 모듈-2



〈그림 17〉 지붕시스템에 응용한 텐서그러티 모듈-3

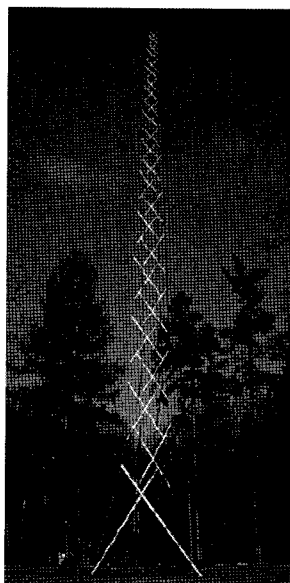


〈그림 18〉 지붕시스템에 응용한 텐서그러티 모듈-4

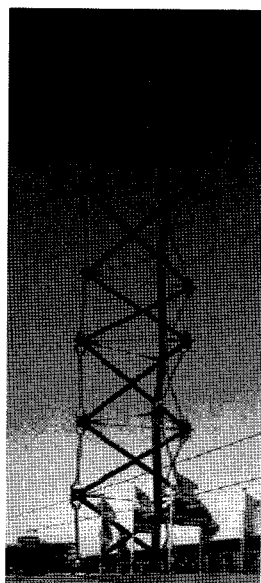
#### 4.3.2 조형물 · 타워

조형물과 타워(그림 19, 20)는 텐서그러티가 가장 초기부터 적용되어 온 분야이고, 현재도 텐서그러티의 활용이 두드러지는 분야이다.

타워 등에 적용하기 위해 변형한 모듈은 건축물에서 수평적 적용 가능성에 대하여 연구되고 있다.



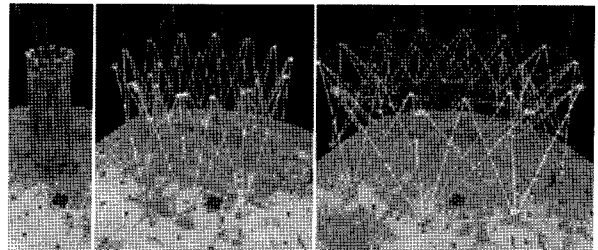
〈그림 19〉 Needle Tower  
(by K. Snelson)



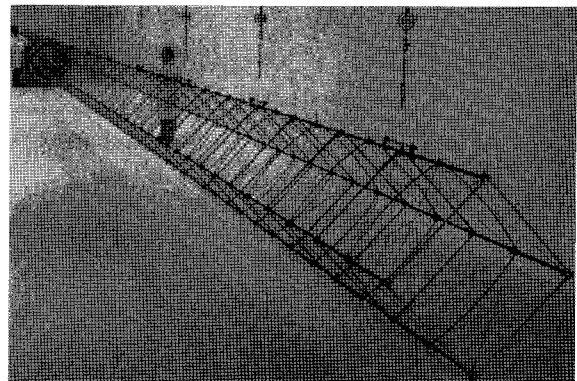
〈그림 20〉 Tensegrity Tower  
(by M. Schlaich)

#### 4.3.3 전개형 구조물(Deployable structures)

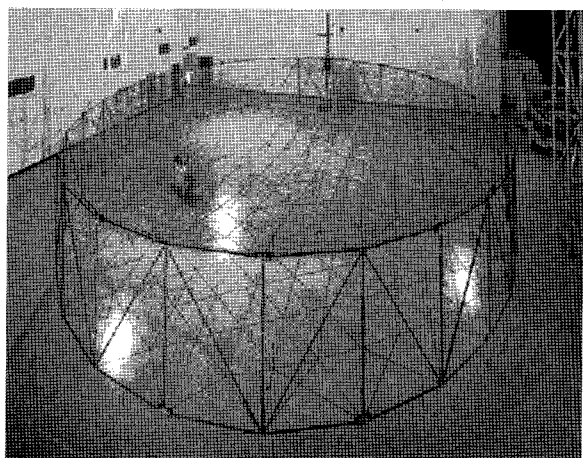
전개형 텐서그러티(그림 21)의 장점, 가능성(잠재성) 등을 설명하는 것은 보다 깊은 논의를 필요로 하지만, 텐서그러티 기본유형을 전개 가능한 구조물에 응용하는 연구는 지난 10여 년 동안 눈에 띄게 발전하고 있고, 특히 〈그림 22〉와 〈그림 23〉에서 보이듯이 우주항공, 통신 등 분야의 구조물에서는 이미 그 응용이 두드러지고 있다.



〈그림 21〉 전개형 텐서그러티



〈그림 22〉 FAST mast for the ISS (Courtesy of AEC-Able Engineering Company, Inc.)



〈그림 23〉 The AstroMesh deployable reflector antenna (Courtesy of M. W. Thomson and TRW Astro Aerospace)

## 5. 결론

본 연구에서는 텐서그리티 시스템의 기본원리 및 기본 모듈을 살펴보고, 이를 통해 시스템이 변형 및 확장되고, 응용될 수 있는 가능성을 알아보았다.

텐서그리티 시스템은 전체로 응답하는 능력이 있고, 따라서 국부응력들은 균등하게 전달되고 구조물 전체를 통해서 흡수된다. 그것들은 어떤 유형의 토크나 비틀림을 받지 않고, 좌굴은 그 압축요소가 매우 작기 때문에 매우 드물다. 게다가 자체적으로 안정한 개별 텐서그리티 모듈의 공간적 정의는 그것들을 함께 연결하여 시스템을 만드는 이례적으로 뛰어난 능력을 준다.

상기 개념은 특정 패턴의 조합을 확장할 수 있는 옵션을 함축한다고 할 수 있다. 이것으로 인해 텐서그리티는 다양한 응용모듈(광의적 의미의 그리드)의 개발이 가능하고, 이것은 바로 다양한 분야로의 활용 가능성을 의미한다.

건축의 경우는 그 용도(기능)과 목적에 적합한 모듈을 찾고, 실제 활용성을 높이기 위한 움직임이 점차로 활발해지고 있고, 본 연구에서는 모델을 통해 그 가능성을 탐색하였다.

### 참고문헌

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

1. Pugh A. 1976, An introduction to tensegrity,