

텐서그리티 구조 시스템의 이해

Understanding Tensegrity Structures



이수현*
Lee, Su-Hyun



이재홍**
Lee, Jae-Hong

1. 서론

텐서그리티에 대한 정확한 정의와 원리를 성립하기 위하여 지난 20년 동안 여러 전문가들을 통해 수많은 연구가 진행되어왔다. 일반적으로 텐서그리티 구조에 대한 정의란 인장력을 받는 연속된 그물 형식의 인장 요소와 그 내부에 서로 격리되어 있는 압축력을 받은 압축 요소들이 함께 이루어진 구조물을 뜻한다. 이러한 정의를 토대로 케이블 돔, 타워, 조각품 및 가구 등 다양한 분야에서 널리 적용되고 있는 텐서그리티는 특히 경량의 대공간 구획에 매우 효과적인 시스템이다. 하지만 아직까지 텐서그리티의 정의에 대하여 각 전문가마다 의견 차이를 보이며 이로 인해 동일한 구조물에 대해서도 텐서그리티 진위 여부에 대하여 많은 논의가 이루어지고 있다. 특히 케이블 돔의 경우 텐서그리티 적용 여부에 관하여 다른 사례에 비해 보다 많은 논쟁의 소지를 가지고 있다.

또한 텐서그리티 구조에 대한 연구가 진행 될수록 구조 시스템의 기본적인 정의 및 원리에 관한 문제 이외에도 실제 구조물에 대한 적용 가능성 문제가 대두

되고 있다. 따라서 현재 국외를 비롯하여 국내에서도 텐서그리티 구조를 실제 건물에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 중에서도 텐서그리티의 실용화와 그에 따른 경제적 효과, 시공성 및 안전성에 관한 문제가 가장 활발하게 연구되고 있다.

2. 텐서그리티 정의와 특징

위에서도 언급한바와 같이 텐서그리티 구조의 일반적으로 알려져 있는 정의는 인장력을 받는 연속된 그물 형식의 인장 요소와 그 내부에 서로 격리되어 있는 압축력을 받은 압축 요소들이 함께 이루어진 구조물을 뜻한다. 하지만 텐서그리티 구조를 연구하고 있는 많은 전문가들은 이에 대해 저마다 다른 의견을 가지고 있으며 현재 어떠한 정의가 정확하다고 할 수 없다. 따라서 텐서그리티 구조분야의 전문가들이 주장하고 있는 각자의 정의들을 제시하고 이를 통해 기존의 건물의 텐서그리티 적용 여부에 대해서 논의해보겠다.

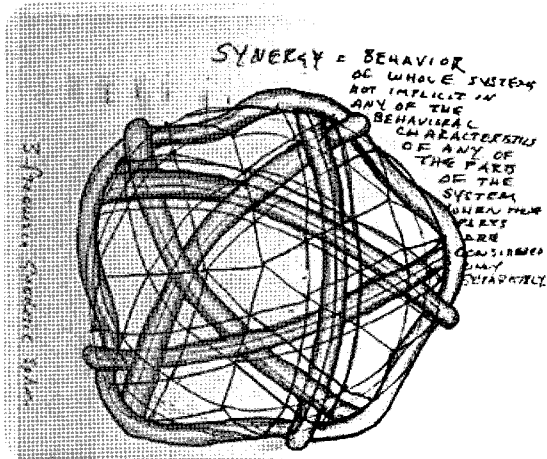
2.1 텐서그리티 정의

텐서그리티 구조 분야의 선구자이자 최초 개발자

* 학생회원 · 세종대학교 건축공학과 석사과정
** 정회원 · 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사

인 Buckminster Fuller(1961)는 텐서그리티 구조에 대한 원리와 다양한 개념을 제시하였으며 현재까지 텐서그리티 구조 연구의 기본이 되고 있다.

하지만 Fuller 또한 정확한 정의를 제시하지 못하였으며 현재까지도 많은 연구자들을 통해 텐서그리티의 정의에 대해 논의되고 있으나 어느 것도 명확한 정의라고 할 수 없다.



〈그림 1〉 Fuller의 텐서그리티 설계안

Fuller는 텐서그리티 구조를 “인장의 바다에 있는 작은 압축 부재의 섬” 및 “삼각형을 이루고 있는 연속된 인장 부재에 비연속적인 3개의 압축부재가 연결되어 있는 형태” 라고 표현하였다.

또 다른 텐서그리티 구조 전문가이자 Needle Tower의 작가인 Kenneth Snelson(1990) 텐서그리티를 “압축부재가 공중에 떠있는 ‘구조’ 라고 명명하였으며 “텐서그리티는 인장을 받는 인장 요소로 이루어진 그물 안에 3개 또는 그 이상의 긴 압축부재가 한 쌍으로 이루어진 구조물로서 압축부재는 서로 연결되지 않으며 인장부재가 받는 외력에 저항하여 서로를 지지하는 구조” 라고 설명하였다.

또한 Anthony Pugh(1976)는 “텐서그리티 시스템은 한 쌍의 비연속적인 압축 요소와 한쌍의 연속적인 인장 요소가 서로 교차하여 공간 내에서 안정적인 상태를 찾아갈 때 형성되는 것” 이라고 설명하였다.

90년대 이후 Bin-Bing Wang(1998)은 “텐서그리티는 자기응력에 의하여 고정되고 구조체 스스로 지지할 수 있는 능력을 가지는 것” 이라고 정의하였다.

Kanchanasaratool와 Williamson(2002)는 “텐서그리티 구조는 축 하중을 받는 부재를 안정적으로 연결하여 이루어지며, 하나의 압축부재는 하나의 노드(node)를 만들게 된다.”

Ariel Hanaor(1987)은 “텐서그리티는 내부에 압축을 받은 막대기에 저항하여 프리스텐딩 핀 조인트인 그물망 형식의 케이블과 같은 인장 요소로 이루어진 것” 이라고 묘사하였다.

반면에 Miura 와 Pellegrino(2000)는 “텐서그리티 구조는 구조물의 안정성을 목적으로 부재에 프리스트레스를 가하여 모든 케이블에 인장력을 고루 전달하는 구조물”을 일컬어 텐서그리티라고 주장하였다.

마지막으로 Rene Motro(2003)는 “텐서그리티 내부의 연속된 한 쌍과 그 안에 포함된 압축 부재를 뜻하며, 이 시스템은 자기 평형 상태를 가진다.” 라고 정의하였다.

텐서그리티에 대한 전문가들의 정의는 일반적으로 알려진 텐서그리티의 정의에 기본하여 저마다의 차이를 가지고 있으며, 이러한 차이로 인해 기존의 사례 중 일부에 대하여 텐서그리티 구조의 진위 여부가 논의되어 지고 있다.

2.2 일반적인 특징

텐서그리티의 정의 중 마지막인 Rene Motro(2003)의 정의를 통해 각각의 특징을 비교하여 보면 실제 적용된 사례에 대하여 실제 텐서그리티 여부를 논의해 볼 수 있다. 일반적으로 텐서그리티의 특징은 6가지 정도로 구분되며 각각의 특징은 다음과 같다.

- 시스템(System)

텐서그리티 구조는 2가지 종류 즉, 압축과 인장 요소로 이루어져 있으며 두 부재는 서로 다른 특징을 가지고 있고 두 요소는 서로 연결되어 있으며 3차원의 형태를 지니고 있어야 한다.

- 자기평형상태(Stable self-equilibrated state)

텐서그리티 구조는 매우 안정적인 상태로써 외력 및 중력의 영향을 받지 않으며 외력을 받은 후에도 자기 평형 상태를 유지해야 한다.

- 성분(Components)

인장 요소와 압축 요소(element)와 달리 성분은 케이블, 스티드, 막 및 공기 등과 같이 다양한 것이 될 수 있다.

- 압축 또는 인장 요소(Compressed or tensioned components)

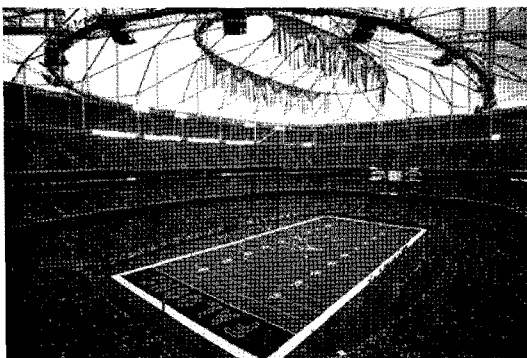
각각의 종류에 따라 압축 또는 인장을 가지는 것으로 텐서그리터 구조를 결정 짓는다.

- 연속적인 인장과 비연속적인 압축 (Continuous tension and discontinuous compression)

압축 부재는 반드시 서로 연결되어 있지 않아야 하며 압축부재는 연속되어있는 인장의 '바다에 있는 작은 섬과 같아야 한다.

- 내부(Inside)
텐서그리터 구조를 결정짓는 가장 중요한 사항으로 이를 통해 일반적인 구조시스템과 텐서그리터를 구별지을 수 있다. 일반적인 구조 시스템은 압축력을 텐서그리터는 인장력에 의하여 지지된다.

이러한 텐서그리터의 특징 중 '내부'에 관한 특징은 매우 중요한 사항으로 기존에 적용된 텐서그리터 시스템에 관하여 논의하는 데 가장 큰 쟁점이 된다. 일부 학자들의 경우 미국 조지아주의 아틀란타에 위치한 "조지아 돔(Georgia Dome)"의 경우 인장력을 받는 케이블과 스티드 주변에 압축링을 가지고 있으며 이는 "케이블 돔(cable dome)" 형식이지만 "텐서그리터 시스템" 형식이 아니라고 주장한다.



〈그림 2〉 조지아 돔(Georgia Dome)

3. 텐서그리터의 분류

텐서그리터의 분류는 가장 먼저 Fuller(1975)에 의해 수행되었으며 현재까지도 텐서그리터 시스템을 분류하는 데에는 프리스트레스 텐서그리터와 측지선(geodesic) 두 가지 종류로 분류되고 있다. 프리스트레스 방식은 텐서그리터 부재에 가한 프리스트레스를 통해 자기 평형 상태를 유지하는 방식이다.

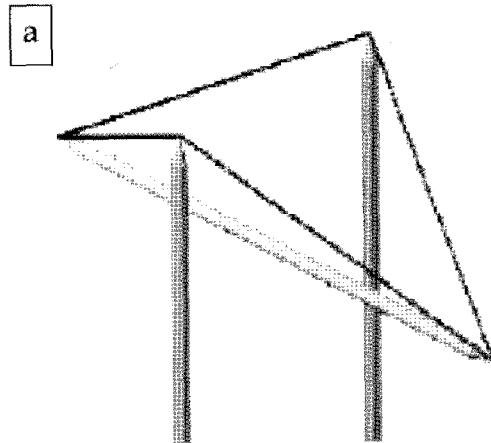
측지선(geodesic) 방식은 구조물의 선 또는 표면을 따라 3각 측량한 결과로써 평형상태를 찾아가는 방식이다.

이러한 원리에 의해 텐서그리터 시스템을 보다 자세히 다음과 같이 분류할 수 있다.

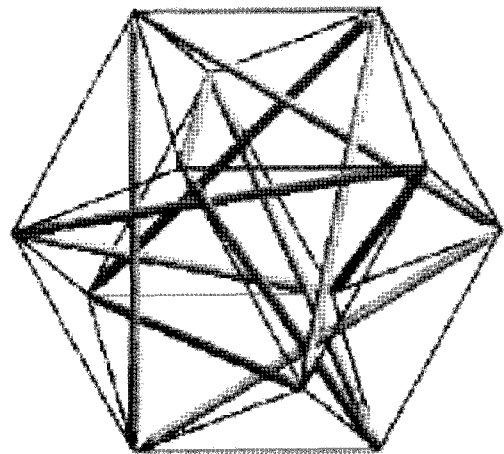
3.1 구형(Spherical) 시스템

이 시스템은 구(sphere)와 매우 유사한 형태의 텐서그리터 시스템으로 케이블로 구성된 그물 망 안에 압축 부재가 서로 교차 없이 이루어져있는 형상이다. 이러한 구형 시스템에는 마름모 형상, 순회(circuit) 형상 및 지그재그 또는 Z 형상이 있다.

마름모 형상에는 Pugh(1976)가 제안한 다이아몬드 패턴이 있으며 다이아몬드 패턴은 4개의 케이블에 의해 형성된 마름모의 대각선에 길이가 긴 스티드를 삽입하여 만든 형상이다.



〈그림 3〉 다이아몬드 패턴

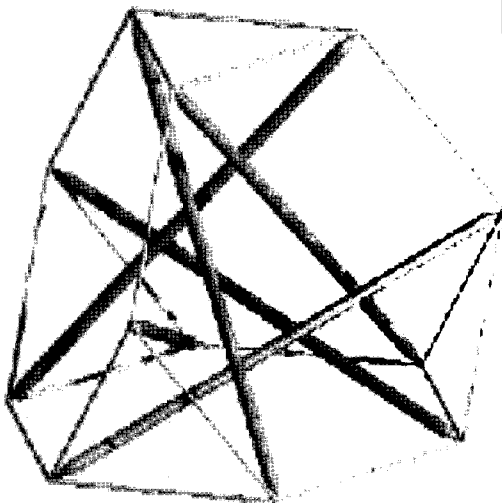


〈그림 4〉 순회(circuit) 시스템 형상

순환(circuit) 형상은 마름모 형상의 텐서그리드의 케이블과 스티드를 이용하면서 스티드를 사용하여 주변을 둘러 감아 형성하는 방식이다. 여러 다각형의 텐서그리드 형상도 순환 형상을 활용하여 제작할 수 있다.

마지막으로 지그재그 형상은 마름모 형상을 기본으로 케이블의 위치가 Z형상으로 바꾸어 제작할 수 있다.

하지만 Motro(1987)는 이러한 형상은 스티드의 위치가 텐서그리드 표면의 한 점에 모두 모이므로 하여 모든 다면체에 대하여 균형을 유지 하지 않으나 기존의 형상에 케이블을 추가한다면 완벽한 형상을 얻을 수 있다고 주장하였다.



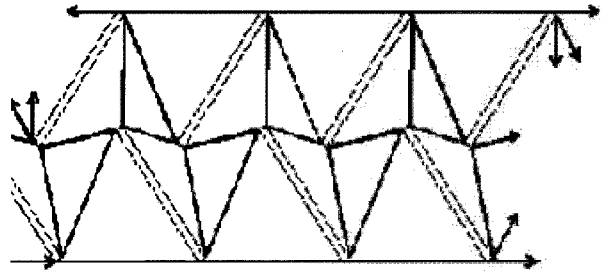
〈그림 5〉 지그재그 시스템 형상

3.2 구형 시스템 이외 형상

대부분의 텐서그리드 형상은 마름모 형상을 토대로 부재의 위치 등을 변형하여 제작할 수 있다. 구형 시스템을 바탕으로 개발된 형상 중 별(star) 형상 시스템과 원통형(cylindrical) 시스템이 있다.

별(star)형상 시스템은 마름모 형상을 기반으로 발전된 시스템으로 중앙에 스티드 대신에 구형의 작은 점을 삽입하여 제작할 수 있다.

원통형 시스템도 마름모 형상에서 파생된 형태로 마름모 형상에 기존의 층 이외에 다른 층의 스티드를 추가하여 제작할 수 있다.



〈그림 6〉 원통형 시스템 형상

3.3 불규칙적(irregular)시스템

앞서 설명한 형상과는 달리 마름모 형상에서 착안하여 구성된 형상이 아닌 Kenneth Snelson(1965)에 의해 제안된 형상 시스템이다. 불규칙적 시스템은 기존의 텐서그리드에 관한 연구 및 정의에 따르지 않는 시스템이다.

4. 텐서그리드 장점 및 단점

텐서그리드 시스템을 효과적으로 적용하기 위하여 텐서그리드의 특징을 적절히 활용하여야 한다. 텐서그리드 구조는 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 철근 콘크리트 구조와는 매우 다른 원리를 가진 구조 시스템으로 현재까지 연구 상황으로는 철근 콘크리트 구조만큼의 효율적인 구조 시스템이 될 수 없다. 그럼에도 텐서그리드 구조에 대한 관심이 끊이지 않고 있다.

4.1 텐서그리드 장점

텐서그리드 구조는 동일한 양의 재료를 사용하였을 경우의 다른 시스템에 비해 더 많은 하중을 지지할 수 있을 뿐만 아니라 매우 높은 탄성을 가지고 있어서 경제적으로 유리한 시스템이다.

또한 텐서그리드 구조는 다른 구조시스템에 비해 압축부재의 길이가 짧아 비틀림, 좌굴 등에 영향을 받지 않는다.

인장력이 가해질 경우 그 힘에 대해 보다 잘 저항할 수 있는 최적의 위치에 힘을 전달하여 시스템이 효과적으로 지지할 수 있도록 한다.

텐서그리드 구조는 다른 구조에 비해 쉽게 진동하게 되며 이를 통해 하중을 빠르게 이동시킬 수 있다. 따라서 하중이 어느 한 부분에 밀집되지 않아 충격 및

지진에 의한 진동에 매우 효과적으로 사용될 수 있으며 지진 문제가 심각한 곳에 효과적이다.

4.2 텐서그리티 단점

텐서그리티 구조는 압축 부재가 서로 겹치지 않아야 하기 때문에 압축 부재 간 충돌에 유의하여야 한다. 그러나 이러한 설계안에는 한계가 있으므로 다양한 형상을 구현하기가 어렵다.

일반적인 구조시스템에 비해 적은 양의 재료를 사용하는 경제적인 시스템이기는 하나 상대적으로 매우 큰 힘이 생겨 텐서그리티 시스템 적용에 있어서 효율성을 고려해보아야 한다.

텐서그리티 구조의 특성 상 압축 부재가 공중에 떠 있게 되는 데 이러한 특성으로 인해 시공이 복잡하다.

현재 텐서그리티 구조의 설계 및 구조적 해석 기술의 부족으로 인해 디자인 방법에 한계가 있으며 이와 가장 유사한 구조 시스템으로 셸 구조의 해석 방법을 사용할 수 있으나 텐서그리티와 셸 구조의 원리가 정확히 일치하지 않으므로 이러한 방법에도 한계가 있다.

이러한 해석상의 어려움을 해결하기 위하여 프랑스 몽펠리에 Motro(2003) 연구실에서는 텐서그리티 구조시스템을 보다 정확히 설계하고 해석하기 위한 새로운 프로그램인 "Tensegrite 2000"을 개발하였다.



〈그림 7〉 텐서그리티 구조 시공

5. 결론

이상으로 텐서그리티 구조의 정의와 특징 및 장·단점을 알아보았다. 텐서그리티 구조의 정의 자체가 시대의 흐름에 따라 계속해서 변화 발전되는 양상이

며 이를 통해 텐서그리티 구조에 관한 연구가 많이 발전되고 있음을 알 수 있다.

이와 반면에 국내에서는 아직 텐서그리티에 대한 연구가 매우 초보적 상태를 벗어나지 못하고 있는 실정이다.

텐서그리티 구조의 무궁무진한 잠재력에 비추어 다양한 건축 영역에서 활용될 것을 기대할 수 있으며 이를 위한 국내 텐서그리티 구조에 관한 연구가 더욱 활발히 진행될 것을 기대해본다.

References

1. Fuller,R.B. (1961) "Tensegrity", Portfolio and Art News Annual, No.4. PP.112-127,144,148
2. Fuller,R.B.(1975) Synergetics : Explorations in the Geometry of Thinking, New York : MacMillan Publishing Co., Inc.
3. Fuller,R.B.(1981) "Tensegrity", Creative science and technology, February 1981.
4. Pugh,A.(1976) An Introduction to Tensegrity, Berkeley, California : University of California Press.
5. Wang,B.B.(1998) "Cable-strut systems :Part •∞-Tensegrity" , Journal of Constructional Steel Research, Vol.45(1998), No.3, pp.281-289.
6. Kanchanasaratool,N. and Williamson,D. (2002), "Modelling and control of class NSP tensegrity structures" , International Journal of Control, Vol.75,No.2, 20 January 2002,pp.123-139.
7. Hanaor, A.(1987) "Preliminary Investigation of Double-Layer Tensegrities", in H.V.Topping, ed., Proceedings of International Conference on the Design and Construction of Non-conventional Structures (Vol.2), Edinbrugh, Scotland:Civil-Comp Press.
8. Pellegrino, S(2000) "Iutam Iass Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications"
9. Motro,R.(1987) "Tensegrity Systems for Double-Layer Space Structures", in H.V.Topping, ed., Proceedings of International Conference on the Design and Construction of Non-conventional Structures (Vol.2), Edinbrugh, Scotland:Civil-Comp Press.
10. Motro,R.(2003) Tensegrity : Structural Systems for the Future, London : kogan Page Science.