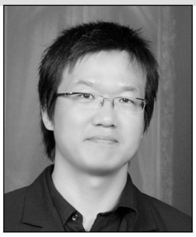
텐세그리티

Tensegrity



이 재 홍*   이 승 혜**

*세종대학교 건축공학과 교수
**세종대학교 건축공학과 박사과정

1. 서 론

텐세그리티(Tensegrity)에 대한 개념을 최초로 제안한 인물에 대해서는 논란이 있지만, 그 어원은 Richard Buckminster Fuller에 의해 명명되었다. 조각가 Kenneth Snelson의 1948년 작품인 ‘X-Piece’(그림 1)를 보고 영감을 얻은 Fuller는 몇 년 후 규모가 큰 텐세그리티 구조물(“Geodesic Tensegrity Dome”, R.B. Fuller, 1853)을 현실화하였으며, 이에 대한 특허권도 갖게 된다. 그 후 Fuller는 ‘tensional’과 ’integrity’의 합성어인 텐세그리티(Tensegrity)라는 용어를 만들고 이러한 개념을 계속 발전시켜 나간다.

텐세그리티의 정의는 여러 연구자들에 의해 내려졌으나, 그 중 간단한 정의를 소개한다. 텐세그리티란 장력을 받는 연속된 망(net) 안에 압축력을 받는 부재가 불연속으로 결합되는 구조 원리를 갖는 것이며, 그림 2는 이러한 텐세그리티의 원리를 잘 보여주고 있다.[1)] 인장력을 받는 부재는 보통 케이블(cable)이나 긴장재(tendon)이며, 압축력을 받는 부재는 보(bar)나 스트럿(strut)으로 서로 간섭되지 않는다. 이러한 특징을 갖는 텐세그리티 구조물은 다음과 같은 기본 양식에 따른다.

그림 1 “X-piece”, Kenneth Snelson, 1948

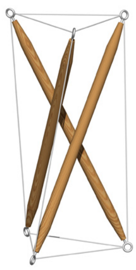


그림 2 간단한 텐세그리티 모듈

- 하중을 받는 부재는 순수 압축상태이거나 순수 인장상태이다.
- 초기 응력(prestress)을 가함으로 케이블을 강체 상태로 만들 수 있다.
- 구조적으로 안정한 상태에는 하중이 증가하여도 압축재는 압축상태로, 인장재는 인장상태로 남는다.

이러한 독특한 형상 및 원리를 갖는 텐세그리티는 구조적 기준의 모호성으로 인해 초반에는 미술작품이나 실물크기 모형(Mock-up) 등의 형태로 제작되었다. 이는 익숙하지 않은 시스템에 대한 안전성을 확인할 수 없기 때문이었다. 텐세그리티를 기반으로 한 여러 미술 작품을 남긴 Snelson 또한 작품을 제작할 때 구조적 혹은 수학적인 접근은 배제한 채 오직 그의 경험과 직관으로 작품을 완성해 왔다.

건축분야에 적용된 텐세그리티의 사례들 또한 주요 구조 시스템으로 사용한 것이 아닌 디자인 요소로써 건물의 외부 및 내부를 구성한 것이 대부분이었다. 경량의 시스템으로 공간을 구성할 수 있다는 강력한 이점이 있음에도 불구하고 여전히 실제 구조물에 텐세그리티를 적용하는 것을 꺼리고 있는 실정이다. 이렇게 텐세그리티는 부재가 순수 압축재와 순수 인장재만으로 구성되고, 그 특성상 부재에 휨 모멘트가 발생하지 않기 때문에 부재의 단면적을 최적화할 수 있으므로 대공간구조물 및 장 스팬 구조물에 효율적으로 이용할 수 있다. 본 기사에서는 텐세그리티의 실제 사례를 소개하여 그 발전 가능성을 논하기로 한다. 또한 설계 및 해석기법 등에 대한 연구들을 소개하여 아직은 익숙지 않은 새로운 시스템에 대한 연구 및 적용이 활성화될 수 있는 기반이 되었으면 한다.

2. 사례

텐세그리티의 개념이 생긴 이후, 텐세그리티의 필수 구성 조건 혹은 정의에 따라 순수 텐세그리티 구조물을 새롭게 분류하는 것에 대해 여러 이견이 있었다. 2000년대 이후에도 일부 보수주의자들은 텐세그리티를 일종의 핀 접합 구조물(pin-connected structure)로 분류하기도 하였다. 이는 텐세그리티의 구성 부재 중 케이블은 인장력을, 보 부재는 압축력만 받는 특징을 갖기 때문이었다. 텐세그리티의 원리를 적용한 실제 구조물을 살펴보기에 앞서, “False tensegrity”와 “Pure tensegrity”에 대해 먼저 인식해야 한다.

그림 3을 살펴보면 압축력을 받는 스트럿 부재가 구조물의 경계(boundary)에 자리잡고 있다. 이러한 구조물은 “False tensegrity”로 구분된다. 이와는 반대로 그림 4에 보이는 바와 같이 인장력을 받는 케이블 부분이 구조물의 경계에 자리 잡고 있는 것을 “Pure tensegrity”로 구분한다. 이러한 구분법을 주장하는 연구자들은 “False tensegrity”를 텐세그리티 구조물로 인정하지 않는다. 하지만 이 또한 여러 의견으로 나뉘고 있다.

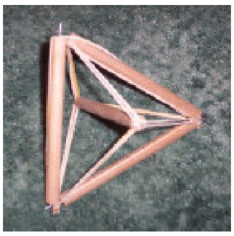


그림 3 False Tensegrity, Valentín[1], 2010

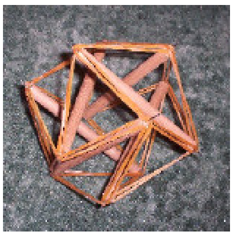


그림 4 Pure Tensegrity, Valentín[1], 2010

이러한 논란을 뒤로한 채 단순히 텐세그리티의 기본 개념(Snelson의 1965년에 등록한 특허명이기도 함)인 “continuous tension - discontinuous compression”을 도입한 구조물의 원형은 케이블 돔(Cable-Dome)에서 찾아 볼 수 있다.

그림 5는 1971년에 개장한 폴란드의 Spodek 경기장이며, 그림 6은 경기장의 케이블 돔 시스템을 보여주고 있다. 앞에서 설명한 구분법에 따르면 이러한 케이블 돔 시스템은 “False tensegrity”로 구분되지만, 텐세그리티의 기본 개념을 실제 대공간 구조물에 적용한 최초의 사례로 볼 수 있다. 이러한 케이블 돔의 사례는 우리나라에서도 살펴볼 수 있다.

1988년도 서울 올림픽을 위해 지어진 체조경기장은 지붕 구조물에 케이블 돔 시스템을 적용하였다. 상대적으로 길이가 짧은 스트럿을 수직으로 배치하고, 연속된 케이블을 긴장시켜 연결한 본 구조물은 텐세그리티의 개념을 국내에 적용한 최초의 사례라 할 수 있다(그림 7, 그림 8).

그림 9는 호주의 브리즈번 강을 가로지르는 Kurilpa Bridge

그림 5 “Spodek area” in Katowice, Poland

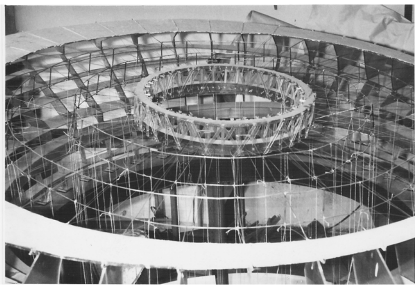


그림 6 Spodek의 텐세그리티 지붕 시스템

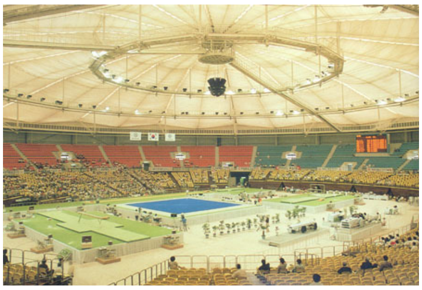


그림 7 “Olympic Gymnastics Arena” in Seoul, KOREA

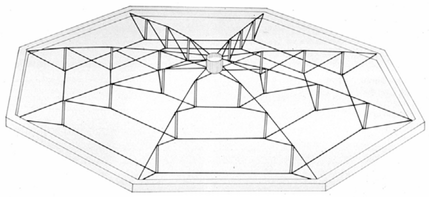


그림 8 올림픽 체조경기장의 지붕구조 시스템

그림 9 "Kurilpa Bridge" in Queensland, Australia

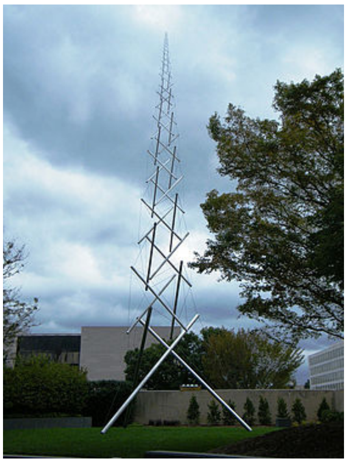


그림 10 "Needle Tower", Kenneth Snelson, 1968

의 사진을 보여주고 있다. 일명 Tank Street Bridge로 알려진 본 교량은 보도와 자전거 도로 용도로 2009년 완공되었으며, 현수부분에 텐세그리티 시스템을 적용하였다. 본 프로젝트는 텐세그리티 시스템을 적용함으로써 미적 요소를 높임과 동시에 경량의 부재로 매우 견고한 구조물을 완성했다는 점에서 의미가 있으며, 특히 2009년 당시 현존 최대의 텐세그리티 구조물로 주목을 받았다.

미술작품 중 텐세그리티를 적용한 가장 유명한 작품은 Kenneth Snelson의 Needle Tower라 할 수 있다. 1968년에 완성한 본 작품은 그 높이가 18m이며, Snelson이 2004년에 완성한 Needle Tower II 작품은 그 높이가 무려 30m에 달한다. Snelson은 1960년대 초부터 근 40년 동안 작은 작품부터 Needle Tower와 같은 대규모 타워에 이르는 여러 텐세그리티 작품을 완성해 왔다.

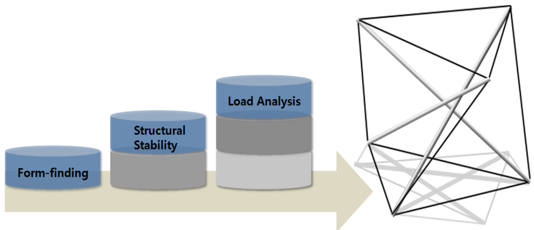


그림 11 텐세그리티 시스템의 설계 및 해석단계

3. 설계 및 해석

텐세그리티는 일반 구조물과는 완전히 다른 개념의 시스템이다. 텐세그리티는 무게(weigh)와 지점(support)의 개념을 배제한 자기응력 평형상태(state of self-stressed equilibrium)로 이루어진 구조시스템이다. 이러한 자기응력 평형상태는 텐세그리티의 형태 안정성 유지를 위해 인장부재에 적절한 초기 인장력을 가하여 압축부재와의 상호 평형상태를 이룰 때 완성된다.

텐세그리티 시스템의 설계 및 해석은 크게 세 단계로 구분된다(그림 11). 첫째로 자기응력 평형상태를 이룬 형상을 결정하는 형상탐색(form-finding)과정을 수행해야 한다. 하지만 이런 평형상태의 형상이 결정된다 하더라도 그 시스템이 안정하다는 것을 의미하지 않기 때문에 다음단계에서 구조 안정성(structural stability)을 검토하고 그 결과를 반영해야 한다. 마지막으로 이렇게 완성된 텐세그리티 시스템이 외부하중을 받았을 때의 거동을 해석하고 추가 응력에 대한 안정성을 확인하는 해석단계(load analysis)를 수행해야 한다. 하지만 이 세 과정들은 순차적이지 않으며, 동시에 수반하거나 한 과정에서 나온 결과가 그 전단계로 피드백되는 경우도 있다.

텐세그리티의 개념이 생긴 이후 이러한 형상탐색 및 구조 안정성 문제에 다양한 기법들을 적용한 연구들이 진행되어 왔다. 1970년대부터 1980년대에는 주로 텐세그리티의 선형・비선형, 정역학・동역학 및 실험적 해석 측면의 연구가 기반을 다져왔으며, 이러한 것을 바탕으로 1990년대 이후로 현재까지 다양한 분야에서 비약적인 발전을 이뤘다.[2)]

3.1 형상탐색

Tibert와 Pellegrino[3)]는 2003년 논문에서 텐세그리티 시스템의 형상탐색기법(form-finding method)에 대한 기존 연구

표 1 형상탐색에 사용된 기법

<table>
<tr><th colspan="3">Form-finding</th></tr>
<tr><th>Kinematic form-finding methods</th><th>Static form-finding methods</th><th>Topologic</th></tr>
<tr><td>· Analytical solutions
· Non-linear programming
· Dynamic relaxation</td><td>· Analytical solutions
· Reduced coordinates
· Force density method
· Energy method
· Affine transformation
· Differential equations
· Algebraic method</td><td rowspan="2">· Genetic algorithm</td></tr>
<tr><td colspan="2">· Successive approximation
· Sequential quadratic programming
· Numerical method</td></tr>
</table>

들을 조사하였으며, 이전 연구들을 두 가지 범주, kinematical method와 statical method로 분류하였다. kinematical method는 케이블의 길이를 고정한 채 압축재의 길이를 계속 늘려가면서 평형상태를 찾는 기법(혹은 그 반대의 경우)으로, 텐세그리티를 실제 건축물에 적용할 시 상황에 맞게 부재 사이즈를 선정해 나갈 수 있다. statical method는 시스템의 평형 형상(equilibrium configuration)과 부재력 사이의 관계식을 이용하는 기법이다. 텐세그리티의 형상탐색에 대한 기존의 연구들은 대부분 각각의 방법으로 분류할 수 있지만 간혹 두 가지를 복합적으로 사용한 연구도 찾아 볼 수 있다.

표 1은 형상탐색을 위해 적용된 다양한 기법들을 나열하였다. 단순히 기법의 수만 비교하면 kinematical method 분야보다 statical method 부분의 연구가 더 강세를 보이는 것 같지만, 최근에는 두 가지 기법을 접목하거나 혹은 수정기법들을 적용한 다양한 연구들을 찾아 볼 수 있다. kinematical method의 "Analytical solutions"은 다각 형태를 이루는 상·하부 케이블 부재의 회전 관계식을 이용한 기법으로 간단한 기본형 텐세그리티의 형상탐색에 적용할 수 있다. "Non-linear programming"은 텐세그리티 구조식을 "constrained minimisation method"로 변경하여 문제를 해결하며, "Dynamic relaxation"은 텐세그리티의 초기형태를 가정하고 동하중을 가하여 해석하는 방법으로 이 두 가지 방법 또한 절점수가 증가할수록 효과적이지 않다.

statical method 부분의 연구들은 형상탐색과 그에 따른 부재력의 관계식을 이용하는 것이 특징이다. 이 중 "Force density method"는 절점에서의 비선형 평형방정식을 간단한 수학적 기교를 사용하여 문제를 해결하는 방법으로, 케이블 구조 및 막 구조물에 효과적으로 적용할 수 있다. 또한 부재 길이의 초기설정이 필요하지 않아 형상탐색에 적절한 기법이다. 이 방법은 실제 텐세그리티 구조물의 적용에는 한계가 있으나 적절한 제약조건을 추가한다면 발전 가능성이 있다.

요즘 새롭게 부각되고 있는 방법은 "Affine transformation"이다. 이 방법을 사용하면 임의의 직선위에 있던 절점들을 변환 후 직선의 동일선상으로 이동시킬 수 있으므로, 만약 기하학 적으로 안정한 시스템이 있다면 이 기법을 사용하여 새로운 시스템으로 변환시킬 수 있다. 이 기법을 통해서 텐세그리티 시스템의 정적 평형상태를 알 수 있어 평형을 이루는 형상을 찾아가는데 효과적이다.

Tibert와 Pellegrino[3]의 분류 법 이외에도 표 1과 같이 위상 기하학(topology)적인 기법을 적용한 연구(표 1의 유전 알고리즘(Genetic algorithm)의 경우)도 점차 확산되고 있다. 대부분의 형상탐색 기법들은 엔지니어가 초기에 가정한 형태(부재의 길이, 형상 등)를 대입하고 그것을 바탕으로 제약조건 등에 맞추어 적절한 형태를 찾아가는 것이 특징이라면, 유전 알고리즘 기법을 도입한 이 방법은 이러한 가정없이 안정한 텐세그리티 시스템의 최적화 과정을 수행한다. 기존의 기법들은 안정한 텐세그리티 시스템을 얻기 위해 모든 해석과정을 계속 반복하는 과정이라면, 유전 알고리즘을 사용한 기법은 제약조건에 맞는 목적함수의 값을 이용하여 최적 해를 탐색하므로 해석시간을 단축할 수 있어 효율적이다.

kinematical method와 statical method를 복합적으로 도입한 기법은 Masic *et al.*[4]의 연구에서 찾아 볼 수 있다. "Sequential quadratic programming" 기법을 도입한 본 연구에서는 강도(strength) 및 좌굴(buckling), 형태 제약조건(shape constraint) 등을 고려한 텐세그리티 구조물에 외부하중을 가한 후의 최적형태를 찾는 법에 대해 논하였다. 이처럼 초기의 형상탐색 과정은 외력(external force)과 제약조건(constraint)등을 고려하지 않는 기법이 대부분이었으나, 점차 기법들이 다양화되면서 실제 텐세그리티 건축물에 적용이 가능한 방법으로 도약하기 위해 여러 기법들이 시도되고 있다.

표 2 구조 안정성에 사용된 기법

	Methods	Equations
Structural Stability	Maxwell's rule	· $3j-b-c=m-s$
	Linear structural analysis	· $f=At$ · $e=Cd$ · $t=Ge$
	Non-linear/prestressed FEA	· K_t
	Rigidity Theory	· $\Omega+R(p)^T DR(p)=S$

3.2 구조 안정성

표 2는 텐세그리티 시스템의 안정성 여부를 검토하는데 적용된 다양한 기법들을 소개하고 있으며, 크게 4가지 기법(Maxwell’s rule, Linear structural analysis, Non-linear/prestressed FEA, Rigidity Theory)으로 분류할 수 있다. 텐세그리티는 핀 접합 부재로 구성되는 시스템의 안정성 문제이기 때문에 각각의 해법들은 모두 이러한 핀 접합 부재의 안정성 문제부터 시작한다. 각각의 기법들은 부재의 개수, 기하학(geometry) 및 위상 기하학, 부재의 특성(element properties)과 내력(internal forces) 등을 고려하여 안정성 여부를 검토한다. 시스템 안정성 여부는 4가지 범주를 기반으로 각 문제를 해결하기 위한 식을 추가로 요하며, 정형화된 것은 아니다. 아래 소개되는 식들 또한 그 표기법(natation) 및 방정식이 정형화된 것은 아니며, 각 연구마다 다른 형태를 갖는다.

1864년 James Clerk Maxwell은 b개수의 보 부재와 j개수의 절점을 갖는 핀 접합 구조물에 대한 대수 법칙을 제안하였다. 그 후 Calladine[5]은 이러한 Maxwell’s rule을 확장시켜 텐세그리티 구조물의 자기응력 평형상태를 설명하는 매커니즘에 적용시켰으며, 식 (1)과 같다. 이러한 Maxwell’s rule은 부재의 개수만을 고려하여 안정성 여부를 검토한다.

$$3j-b-c=m-s \tag{1}$$

식 (1)의 c는 kinematic constraint이며, m과 s는 각각 매커니즘과 자기응력 상태를 나타낸다.

Linear structural analysis는 부재의 개수 뿐 아니라 구조물의 기하학 및 위상 기하학을 고려하여 적용한다. Pellegrino와 Calladine는 텐세그리티 연구[6]에서 평형방정식을 제시하는데 이러한 기법을 사용해 왔다. 기존의 Linear structural analysis도 내력과 외력, 내적 변형과 외적 변형, 내력과 연신율의 관계식을 필요로 하지만 핀 접합 부재에 대한 관계식으로 표현해 보면 다음과 같다(식 (2)~식 (4)).

$$f=At \tag{2}$$

$$e=Cd \tag{3}$$

$$t=Ge \tag{4}$$

이 때 A는 equilibrium matrix, C는 compatibility matrix, G는 부재의 강성을 내제하는 diagonal matix를 뜻한다.

Non-linear FEA기법은 핀 접합 구조물의 기하학, 위상 기하학, 부재 개수, 부재 특성, 초기 인장력을 모두 고려하는 것이 특징이다. 본 비선형 기법의 핵심은 tangent stiffness matrix (K_t)이며, 이러한 tangent stiffness matrix의 변형식 혹은 관계식을 사용하여 구조물의 안정성을 평가하는 연구가 여러 연구자들에 의해 진행되어 왔다.

앞서 논한 방법들이 물리적인 관계식으로 표현하고 안정성을 평가하였다면, Rigidity Theory는 수학적인 관점으로 관계식을 구성한다. Rigidity Theory는 부재의 개수, 기하학, 위상 기하학, 내력을 고려하는 방법으로, 응력 에너지(stress energy)와 강성 에너지(stiffness energy)의 합으로 표현되는 포텐셜 에너지(potential energy) 헤시안 행렬식(Hessian)을 사용한다(식 (5)).

$$\Omega+R(p)^T DR(p)=S \tag{5}$$

여기서, Ω는 stress matrix, D는 부재를 표현하는 diagonal matrix, S는 포텐셜 에너지의 헤시안 행렬식이며, $R(p)$은 ridigy matrix로 compatibility matrix(C)에 대응할 수 있다.

이처럼 다양한 물리적·수학적 방법들이 텐세그리티의 구조 안정성 평가에 사용되어 왔으며, 이러한 연구 주제가 아직도 다양하게 전개될 가능성이 있다는 점은 상당히 고무적이다.

4. 결론

텐세그리티 구조물은 순수 압축과 순수 인장을 지지하는 요소로 구성되어 자기평형 상태를 유지한다는 독특한 특성

으로 인해 시스템에 대한 안정성을 확인하기 어렵고, 이에 따라 실제 구조물에 적용한 사례가 적은 것이 현실이다. 아직도 텐세그리티에 대한 정확한 인식 또한 부족하여 대부분의 사례 또한 건물의 주요 부재가 아닌 미술 작품 혹은 미적인 요소가 필요한 곳에 도입되었다.

본 기사는 텐세그리티의 기본개념 및 몇 가지 사례들을 소개하여 그 발전 가능성에 대해 논하였다. 또한 텐세그리티의 설계를 위해 선행되어야 할 형상탐색 및 구조 안정성 해석에 도입된 다양한 기법들을 소개하였다. 이러한 기법들을 살펴보면 그 연구주제 및 발전 가능성이 무한하여, 지금도 새로운 기법을 도입하는 연구들이 계속 진행되고 있다. 국내에서도 텐세그리티 구조물의 인식이 확산되고, 설계 및 해석기법에 대한 연구가 확산되길 희망한다.

참 고 문 헌

1. Valentín Gómez Jáuregui, “Tensegrity Structures and their Application to Architecture”, Ediciones de la Universidad de Cantabria, 2010
2. C. Sultan, “Tensegrity: 60 Years of Art, Sciences, and Engineering”, Advanced in Applied Mechanics 43, pp.69-145, 2009
3. A. Tibert, S. Pellegrino, “Review of form-finding methods for tensegrity structures”, International Journal Space Structures 18(4), pp.209-223, 2003
4. M. Masic, R. Skelton, P. Gill, “Optimization of tensegrity structures”, International Journal Solids and Structures 43, pp.4687-4703, 2006
5. C.R. Calladine, “Buckminster fuller’s ‘tensegrity’ structures and clerk maxwell’s rule for the construction of stiff frames”, International Journal of Solid and Structures 14, pp.161-172, 1978
6. S. Pellegrino and C.R. Calladine, “Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks”, International Journal of Solids and Structures 22 (4), pp.409-428, 1986
7. Sergi Hernàndez Juan, Josep M. Mirats Tur, “Tensegrity framworks: Static analysis review”, J Mechanism and Machine Theory 43, pp.859-881, 2008
8. Mark Schenk, “Statically balanced tensegrity mechanisms_A literature review”, Delft University of Technology, 2005
9. http://en.wikipedia.org/wiki/Tensegrity
10. http://en.wikipedia.org/wiki/Spodek
11. http://en.wikipedia.org/wiki/Kurilpa_Bridge
12. http://en.wikipedia.org/wiki/Needle_Tower

[담당 : 강현구 편집위원]