

# 텐세그리티 구조의 외력에 대한 적정 프리스트레스 결정

## Optimal prestress of Tensegrity Structures for External Load

안 정 태\*  
Ahn, Jung-Tae

이 재 홍\*\*  
Lee, Jae-Hong

### Abstract

This paper presents a new numerical method to analyse tensegrity structures by using singular value decomposition and force method. The tensegrity system consisting of compressive and tensile elements are pin-jointed system. Tensegrity structures, unlike the general structure should be preceded by form-finding. Tensegrity structures form-finding of the self-equilibrium stress stability, seeking to have the process. In this study, tensegrity structures when subjected to external loads, find the optimal pre-stress values was studied.

*Keywords* : Force Method, Tensegrity, Singular Value Decomposition, Pre-stress

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경

텐세그리티(Tensegrity) 시스템은 Tensile과 Integrity의 합성어로 인장력을 받는 인장부재(케이블)과 그 내부에 연속적이지 않은 압축력을 받는 압축부재(스트럿)으로 이루어진 장력 안정 구조 시스템이다.<sup>1,2)</sup>

텐세그리티는 Buckminster Fuller(1961)에 의해 최초로 제안된 구조 시스템으로써 압축재의 수를 감소시켜 상대적인 중량을 작게 하여 경량화 및 합리화를 확보할 수 있는 구조 시스템이다. 1962년 미국에 특허로 등록된 이후 이에 대한 많은 연구가 이루어졌으며 케이블 돔, 타워, 조각품 및 가구 등 다양한 분야에서 널리 적용되고 있다.<sup>3)</sup>

텐세그리티 구조물은 부재가 인장과 압축요소만으로 이루어져 모멘트가 발생하지 않기 때문에, 부재의 단면적과 질량을 최소화 할 수 있고, 공간을 효율적으로 이용할 수 있다.

텐세그리티 시스템은 최소의 재료로 경량 구조물을 구축할 수 있다는 장점 때문에 케이블 돔과 같은 대공간 구조물의 지붕 구조물 주로 적용되고 있다.<sup>5)</sup> 또한 압축부재의 길이가 짧아 좌굴이나 비틀림의 영향을 거의 받지 않으며 인장력이 가해질 경우 최적의 위치에 힘을 전달하여 시스템이 보다 효과적으로 지지될 수 있도록 한다.

그러나 강도가 낮기 때문에 진동(Vibration)에 약하며 구성요소중 하나의 부재가 파괴되면 전체 구조물의 피해로 이어질 수 있다.<sup>6)</sup> 또한 압축부재가 서로 겹쳐지지 않아야 하기 때문에 부재간의 충돌에 주의하여 설계하여야 한다.<sup>7)</sup> 이 때문에 다양한 형상의 구현하기 어려움이 있으며, 현재 국내·외 텐세그리티 시스템에 대한 설계 및 해석의 기술 부족으로 디자인, 구조 해석의 방법에 한계가 있다.<sup>8,9,10)</sup>

텐세그리티 구조 시스템은 형태 및 구조의 안정성 확보를 위해 초기응력을 도입하여 자기평형상태를 유지하여야 한다. 이 때 구조물의 부재에 도입하

\* 학생회원, 세종대학교 석사과정  
Department of Architectural Engineering, Sejong University

\*\* 정회원, 세종대학교 건축공학과 교수, Free form 건축연구소 공학박사  
Department of Architectural Engineering, Sejong University  
E-mail : jhlee@sejong.ac.kr

는 초기응력의 크기는 형상탐색(Form Finding)에 의해 결정되어진다. 따라서 텐세그러티 구조물은 일반구조물과는 달리 형상 탐색의 과정이 반드시 선행되어야 한다. 이러한 텐세그러티 시스템에 관한 연구는 자기평형상태를 유지하기 위한 형상탐색 과정은 상당부분이 연구되어지고 있지만 구조해석에 관한 연구는 미비한 실정이다. 해석 결과를 부재요소에 대입하여 해석하는 과정은 텐세그러티 구조물의 해석이나 이해에 있어서 반드시 필요한 연구 분야라고 할 수 있다.

구조물의 디자인에 있어서 텐세그러티 시스템이 일부 적용이 된다면 건물의 외형이나 내부구성에 있어서 더욱 다양하고 흥미로운 접근을 유도할 수 있어 구조디자인의 미래가 더욱 밝아질 것으로 생각된다. 이러한 연구의 필요성을 바탕으로 본 연구에서는 형상탐색이 수행된 텐세그러티 구조물의 거동과 외력에 대한 최적의 프리스트레스를 찾는 연구를 진행하였다.

### 1.2 연구의 목적

텐세그러티 시스템은 Buckminster Fuller에 의해 제안된 후 다양한 연구가 이루어졌다. 특히 1970년대에 들어서는 텐세그러티 시스템이 형상을 유지하며 구조물로서 이를 활용하기 위한 연구가 진행 되고 있으며 또한 지붕 구조물에 효율적이 시스템으로 각종 대공간 구조물 및 교량에 다양한 방식으로 적용 되어졌다.<sup>11)</sup>

국내에서는 이미 세계최초로 텐세그러티 시스템을 응용한 케이블 - 스트럿시스템인 가이저 돔 (Geiger Dome) 지붕구조를 1988년 서울올림픽 체초경기장에 적용한 실적이 있다. 그럼에도 불구하고 이후 국내 기술진에 의해 텐세그러티가 적용이 된거나 응용된 사례를 찾을 수 없다.

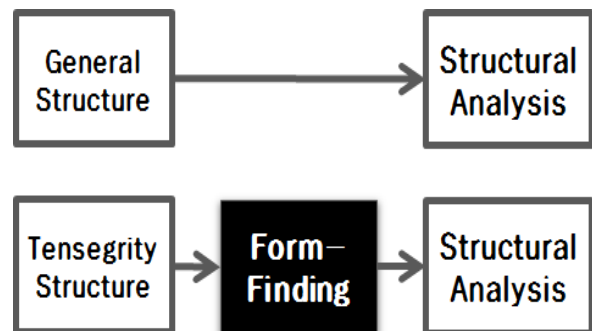
텐세그러티 시스템의 장점과 국내의 적용 실적이 있음에도 불구하고, 현재까지 실제 적용이 미비한 것은 이 시스템 자체에 대한 인식부족과 기존의 강성 및 연성구조와 차별되는 특징, 형태구성 등에 건축가나 엔지니어가 익숙하지 않다는 것 등의 이유를 들 수 있다.

텐세그러티 구조는 초기 장력을 주어야만 형태가 유지되는 일반구조와는 개념이 다른 구조이므로 기존의 구조해석,설계 방법으로는 접근할 수 없는 구조이다. 구조해석에 앞서 형상탐색이라는 과정을 거쳐야하며 이 과정이 매우 복잡하다. 또한 텐세그러티 구조물의 해석 과정역시 많은 어려움이 있다.

텐세그러티의 구조해석을 수행할 경우 부재가 많고 외력에 의해 케이블에 압축력이 발생하여 구조해석을 수행하기가 어렵다. 유한요소 해석을 수행하기 위해서는 지금까지와는 다른 형태의 구조이기 때문에 유한요소법에 대한 많은 이해가 필요하며, 이 방법으로는 초기응력의 고려가 쉽지 않다.

본 연구에서는 기존의 구조 해석법의 문제를 해결하기 위해서 하중법을 기반으로한 해석 방법을 제안하여 이를 해결하고자 하였다. 제안한 방법은 각 부재들의 평형 상태를 이용하여 자기평형 응력의 크기를 결정할 수 있으며 이를 이용하여 텐세그러티 구조물의 구조해석을 수행할 수 있다. 텐세그러티 구조물의 구조해석의 경우 가장 난해한 점은 인장부재인 케이블에 압축력이 발생한다는 것이다.

본 연구에서 제안한 방법으로 구조해석을 하였을 경우 각 부재에 가해지는 힘을 알수 있을뿐만 아니라 외력이 가해졌을 경우 가장 효율적으로 구조물을 유지할 수 있는 최적의 프리스트레스의 값을 알 수 있다.



〈Fig. 1〉 Analysis process of Tensegrity and general structure

### 1.3 연구의 방법 및 절차

본 연구에서는 특이값 분해로 정식화 된 하중법

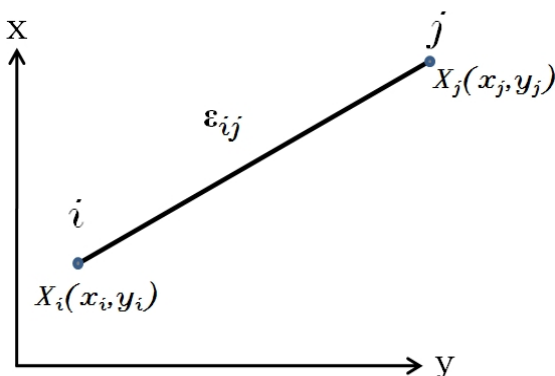
을 이용하여 텐세그러티 구조물의 구조 해석 방법을 제안하고자 한다. 기존의 하중법은 라멘 골조, 핀-조인트구조, 트러스 등과 같은 다양한 종류의 시스템에 적용할 수 있는 이론으로써 트러스 구조 해석에 유리한 방법이다. 그러나 이 방법을 이용하여 구조해석을 수행할 경우 복잡한 수식을 사용하기 때문에 부재의 개수가 많거나, 복잡한 구조물의 경우에 정확한 값을 찾기가 힘들다.

본 연구에서는 텐세그러티 구조물의 구조 해석에 앞서 형상탐색의 과정을 먼저 설명하고, 구조 해석의 순서는 <Fig. 1>과 같이 진행하였다. 앞서 설명하였듯이 텐세그러티 시스템은 형상탐색의 과정이 선행되어 이 과정에서 구조물에 가해지는 초기응력을 구할 수 있다.

기존의 트러스 구조물의 경우에는  $f = f_p + f_0$ 의 식을 이용하여 부재력을 구할 수 있다. 하지만 s(Statical indeterminacy)와 m(Kinematical Indeterminacy)의 크기가 0보다 큰 텐세그러티 구조물 같은 경우 추가적으로  $f_h$ (Homogeneous Solution)이 고려되어야 한다. 본 연구에서 제안한 방법을 설명하고 결과를 증명하기 위해서 제약조건이 고려된 텐세그러티 구조물을 예제로 선정하고 구조해석을 수행하였다. 본 연구에서는 구조 해석을 수행하기 위해 Microsoft Visual Studio 2010 을 사용하였다.

## 2. 텐세그러티의 형상탐색과 해석

### 2.1 하중법을 이용한 형상탐색



<Fig. 2> Two node truss element

텐세그러티 시스템은 초기 강성이 약한 구조물로서 외력을 고려한 구조 해석을 수행하기 전에 자기 평형 응력 상태를 만족하기 위하여 각 부재에 초기 응력 값이 반드시 들어가야 한다. 본 연구에서는 위상 하중법 (Topological force method)를 이용하여 형상 탐색을 수행하고자 하였다. 위상 하중법은 Henderson J.C와 Maunder.E.W.A에 의해 제안되었으며 위상법(Topological Method)<sup>12,13,14</sup>을 기반으로 한 이론으로 평면 트러스, 입체 트러스와 같이 모든 골조 시스템에 대한 해석을 수행할 수 있는 매우 효율적인 이론이다.<sup>15</sup>

그러나 하중법을 이용하여 해석을 수행할 경우 많은 수식을 사용하므로 수치상의 오류가 발생하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 특이값 분해를 이용하여 수식을 정리함으로써 하중법의 단점을 해결하고자하였다.

$$r = B_0 p + B_1 q \quad (1)$$

위상 하중법에 근거한 식 (1)에서  $B_0$ 는  $M \times N$  크기를 갖는 장방형 행렬로  $M$ 은 총 부재의 수이며  $N$ 은 구성요소의 총 자유도수이다.  $B_1$ 은 가상의 내부하중  $q$ 에 대한 자기평형상태를 만족하는  $M \times N_{SI}$  크기의 장방형 행렬로  $M$ 은 요소의 개수를  $N_{SI}$ 은 트러스 및 핀-조인트 구조물의 부정정 차수를 나타낸다. 식 (1)에서 외부하중  $p$ 가 0이면 텐세그러티 구조물의 형상 탐색을 수행할 수 있고 프리스트레스의 결과 값을 얻을 수 있으며 외부하중  $p$ 의 크기가 0보다 크면 트러스 구조물의 구조해석을 수행하여 부재력 및 반력의 크기를 도출해 낼 수 있다.

본 장에서는 하중법을 이용하여 텐세그러티 구조 해석의 첫 번째 과정인 형상 탐색을 수행할 수 있는 방법을 먼저 설명하고자한다.

#### 2.1.1 형상 탐색을 위한 하중법의 정식화

하중법을 이용하여 형상 탐색 즉, 자기 평형 응력 모드 해석을 수행하기 위하여 2개의 절점  $i$ 와  $j$ 를

갖는 3차원 2절점 텐세그리디 요소를 그림 5 에 나타내었다.

$$\mathbf{X}_i = [x_i, y_i, z_i] \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_j = [x_j, y_j, z_j] \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \quad (4)$$

식 (2)의  $\mathbf{X}_i$ 는 절점  $i$ 의 좌표를  $\mathbf{X}_j$ 는 절점  $j$ 의 좌표에 대한 각각의 행벡터로 표현되며 전체 좌표계  $x, y, z$ 에 대한 변위  $\mathbf{u}$ 는 식 (4)와 같이 열벡터 형태로 표현된다.<sup>16)</sup>

$$l = [(\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i)(\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i)^T]^{1/2} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_x \gamma_y \gamma_z] = \frac{1}{l}(\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i) \quad (6)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji}) \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\gamma} \mathbf{u} \quad (8)$$

식 (5)의  $l$ 은 절점  $i$ 의 좌표  $(x_i, y_i, z_i)$ 와 절점  $j$ 의 좌표  $(x_j, y_j, z_j)$ 에 대한 행벡터  $\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j$ 를 통해 얻은 부재의 길이이며 식 (6)의 벡터  $\boldsymbol{\gamma}$ 는 행벡터로 각 좌표 축의 양의 방향과 이루는 방향각의 값인 방향여현 벡터이다. 요소의 변위  $\mathbf{u}$ 와 변형률  $\epsilon_{ij}$ 의 관계는 일반적으로 다음과 같은 식 (7)과 같이 표현된다. 트러스 요소의 축 변형률  $\epsilon$ 는 방향여현 벡터  $\boldsymbol{\gamma}$ 을 이용하여 식 (8)로 표현된다.

모든 부재에 대해 식 (8)과 관련된 모든 식을 모으면 전체 해석 모델에 대한 변형률을 구할 수 있으며 이는 다음 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (9)$$

식 (9)의  $\mathbf{B}$ 행렬은  $M \times N$ 의 크기를 갖는 장방형 행렬로  $M$ 은 총 부재의 수이며  $N$ 은 구성요소의 총 자유도수이다. 또한  $\mathbf{u}$ 와  $\boldsymbol{\epsilon}$ 은  $N \times 1$ 과  $M \times 1$ 의 크기

를 갖는 열벡터이다. 전체 해석 모델에 대한 변형률을 얻으면 이를 이용하여 방향 여현벡터와 외력을 통해 전체 해석 모델에 대한 부재력을 얻을 수 있는 식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \cdots & \mathbf{C}_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_{M1} & \cdots & \mathbf{C}_{NM} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{n}_M \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_N \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{C} \mathbf{n} = \mathbf{P} \quad (11)$$

( 단,  $\mathbf{C} = \mathbf{B}^T$  )

절점에서의 방향 여현벡터와 부재력 및 외력의 관계를 통해 얻은 전체 해석 모델에 대한 부재력은 식 (10)과 같다. 여기서,  $\mathbf{C}$ 는 식 (9)의  $\mathbf{B}$ 의 전치행렬로  $N \times M$  크기를 갖는 장방형 행렬이며  $\mathbf{n}$ 과  $\mathbf{P}$ 는 각각  $M \times 1$ 과  $N \times 1$ 의 크기를 갖는 열벡터이다. 텐세그리디 구조물의 프리스트레스의 크기를 결정하기 위해서는 외부 절점력이 존재하지 않은 상태에서 평형 방정식이 성립되어야 한다. 즉 외부 하중  $\mathbf{P}$ 가 0 이어야 하므로  $\mathbf{P} = \mathbf{0}$ 일 때 평형 방정식 식 (12)를 만족하여야 한다.

$$\mathbf{C} \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (12)$$

여기서  $\mathbf{C}$ 는 식 (9)의  $\mathbf{B}$ 행렬의 전치행렬로써  $N \times M$  크기를 갖는 장방형 행렬이며  $\mathbf{n}$ 과  $M \times 1$ 의 크기를 갖는 열벡터이다.

이 평형 방정식을 통해 제약 조건이 고려되지 않은 평형 및 입체 텐세그리디 구조물에 대한 각 절점에서 힘의 평형을 만족하는 초기 응력의 값을 얻을 수 있으며 이 때 얻은 초기 응력의 크기를  $f_0$ 로 나타낸다. 초기 응력  $f_0$ 의 크기는 비율로 구해지며 초기 응력의 크기는 각 부재의 항복 응력 내에서 설계자가 결정할 수 있다.

## 2.2 하중법을 이용한 구조해석

텐세그리디 구조물의 구조 해석에 앞서 구조물의

안전성 확보를 위해 각 부재에 도입 되어야하는 초기 응력( $f_0$ )을 계산하였다. 초기 응력을 계산하기 위하여 구조물의 각 절점의 방향 여현 벡터를 이용하여  $C$  행렬을 구성하였으며  $C$  행렬을 이용하여 구조 해석 시 필요한  $A$ 행렬을 만든다.

본 연구에서 제안한 하중을 고려한 텐세그러티 구조물의 구조 해석에 관한 식은 간략하게 다음 식 (13)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Af = P \quad (13)$$

식 (13)의  $A$  행렬은 텐세그러티 요소의 축 변형률과 방향 여현 벡터를 이용하여 구성된  $M \times (N-n)$ 의 크기를 갖는 장방형 행렬이며  $M$ 은 부재의 수  $N$ 은 총 자유도의 수를 나타내며  $n$ 은 제약조건이 고려된 절점의 자유도 수이다.  $f$  와  $P$  는 각각 부재력과 외력을 나타내며 부재력  $f$  는 다음 식과 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$f = f_p + f_h + f_0 \quad (14)$$

여기서,

$$f_p = A_{rec}^{-1}P \quad (15)$$

$$f_h = B_1q \quad (16)$$

$$f_0 = Initial\ stress$$

식의  $f_p$ 는 Particular Solution을 식 의  $f_h$ 는 Homogeneous Solution을 각각 나타내며  $f_0$ 는 텐세그러티 구조물에 하중을 고려하지 않았을 때의 결과 값인 초기 강성의 크기를 나타낸다. 일반적인 트러스 구조물의 구조 해석을 수행할 경우  $s$  (Statical indeterminacy)의 크기가 0과 같으므로  $f_h$ 은 고려하지 않는다. 그러나 텐세그러티와 같은 경우  $s$ 의 크기가 항상 0보다 크므로  $f_h$ 을 추가적으로 고려해야 한다.

식 의 크기는 아래의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$B_1 = [s_1 \dots s_r]^T \quad (17)$$

$$q = -(B_1^T G B_1)^{-1} (B_1^T G B_0) P \quad (18)$$

식 (19)은 본 연구에서 제안한 방법인 식 (13)에 대한 행렬  $A$ 를 특이값 분해로 정식화한 것이다. 이때  $U$ 는  $(N-n) \times (N-n)$  크기를 가지는 직교 행렬,  $V$ 는  $(N-n) \times m$  크기를 가지는 대각행렬이며  $W$ 는  $M \times M$  크기를 갖는 행렬이다. 이때  $W$  행렬과 flexibility matrix인  $G$  행렬은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$A_{svd} = UVW \quad (19)$$

$$W = [w_1 w_2 \dots w_{(m-r)} s_1 \dots s_r] \quad (20)$$

$$G = diag \left( \frac{l_i}{e_i a_i} \right) \quad (21)$$

여기서,

$$r = m - rank(A)$$

$m$ : 부재의 수

$l$ : 부재의 길이

$e$ : 탄성 계수

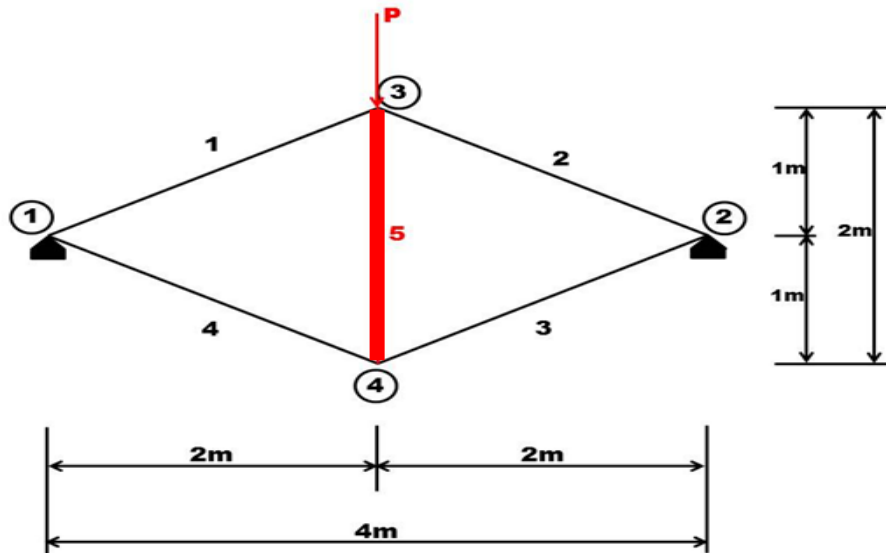
$a$ : 면적

본 연구에서는 텐세그러티 구조물의 구조 해석에 관한 새로운 방법을 제시하였다. 텐세그러티 구조물은 케이블 부재수가 많고 구조 해석 전에 초기 응력을 도입해야하기 때문에 강성법과 유한요소법을 이용하여 구조 해석을 수행하기가 쉽지 않다. 또한 하중으로 인해 케이블 부재에 압축력이 발생하기가 쉬워 구조 해석의 어려움이 많았다. 텐세그러티 구조물의 초기 응력과 절점을 찾는 형상 탐색의 경우 국내외에서 연구가 진행되고 있지만 텐세그러티 구조 해석과 같은 경우 여러 가지 어려움 때문에 이 분야에 관한 연구는 거의 진행이 되지 않고 있다.

본 연구에서 기존의 문제점을 해결할 새로운 해석 방법을 제안하였으며 본 연구에서 제안한 방법을 사용하여 텐세그러티 구조 해석을 수행할 경우 구조물에 가할 수 있는 최대 하중을 항복 응력 내에서 산정할 수 있으며 실제 설계 시 최대 하중에 따른 부재력을 산정할 수 있다.

### 3. 해석 예제

#### 3.1 1스트럿 텐세그리티 구조물의 구조해석



<Fig. 3> A two-dimensional one-strut Tensegrity

실제 구조물의 설계에 적용하기 위해 경계조건이 고려된 2차원 1스트럿 텐세그리티 구조물을 예로 들어 본 연구의 제시방법을 검증하였다. 해석 모델의 형상은 그림과 같으며, 절점의 수는 4개 부재의 수는 5개이다. 요소 1, 2, 3, 4는 인장을 받는 케이블이며, 요소 5는 압축력을 받는 스트럿이다. 구조물의 해석을 위해서 절점 3번에 1kN의 외력을 가하였고, 경계조건은 <Fig. 3> 과 같이 1, 2번에 고정단을 적용하였다. 케이블 부재의 탄성계수와 단면적의 곱의 크기는 5000kN 이며, 스트럿 부재의 탄성계수와 단면적의 곱의 크기는 56000kN 이다.

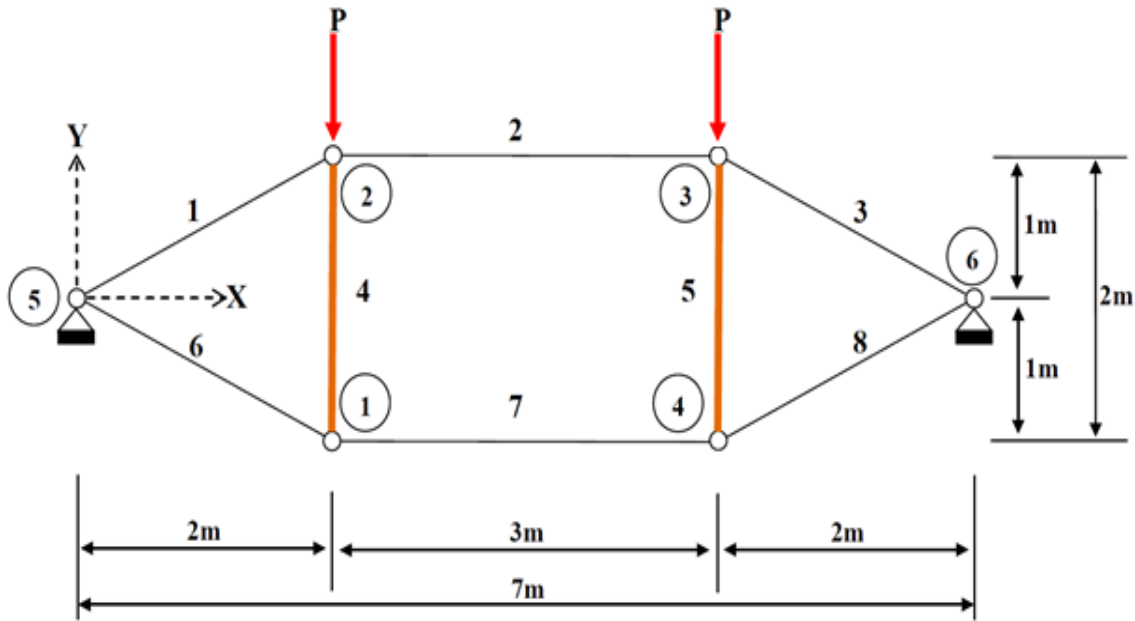
Node	Coordinates		Element	connectivity	
	x	y			
1	0	1	1	1	3
2	4	1	2	2	3
3	2	2	3	2	4
4	2	0	4	1	4
			5	3	4

<Table 1> Coordinates and connectivity of two-dimensional one-strut Tensegrity

Element No.	$f_h + f_p$	$f_0$
1	-0.599P	0.300 $\alpha$
2	-0.599P	0.300 $\alpha$
3	0.519P	0.300 $\alpha$
4	0.519P	0.300 $\alpha$
5	-0.464P	-0.270 $\alpha$

<Table 2> Structural analysis of two dimensional one-strut Tensegrity

위의 표는 본 연구에서 제시한 방법으로 구조물을 해석한 결과이다.  $f_h + f_p$  은 각각의 부재의 Particular solution과 Homogeneous solution을 합한 값이며  $f_0$  는 각 부재의 자기평형응력을 나타낸다. 위의 표에서 보면 알 수 있듯이 5번 부재를 제외한 나머지 부재는 모두 인장력을 받는 케이블이다. 케이블은 인장력을 받기 때문에  $f_h + f_p$  과  $f_0$  의 합이 항상 0보다 커야한다. 따라서 다음과 같은 식이 성립할 수 있다.



<Fig. 4> A two-dimensional two-strut Tensegrity

$$-0.599P + 0.300\alpha > 0 \quad (22)$$

$$\alpha > 1.999P \quad (23)$$

위의 식(23)에서 보면 알 수 있듯이 외력의 크기가 1 일 때 프리스트레스의 비인  $\alpha$ 는 항상 1.999보다 커야한다.

### 3.2 2스트럿 텐세그리티 구조물의 구조해석

<Fig. 4> 은 2차원 2스트럿 텐세그리티 구조물로써 본 연구에서 제안한 방법으로 구조 해석을 수행하였다. 해석 예제의 절점의 개수는 6개이며, 부재의 수는 8개이다. 요소번호 1~3번, 6~8번은 인장력을 받는 케이블이며, 4, 5번은 압축에 저항하는 스트럿 부재이다. 구조물의 해석을 수행하기 위해서 절점 2, 3번에 각각 1kN의 외력을 가하였고, 경계조건은 그림과 같이 5번, 6번에 고정단을 적용하였다. 케이블 부재의 탄성계수와 단면적의 곱의 크기는 5000kN 이며, 스트럿 부재의 탄성계수와 단면적의 곱의 크기는 56000kN 이다.

Node	coordinates		Element	Connectivity	
	x	y			
1	2	0	1	2	5
2	2	2	2	2	3
3	5	2	3	3	6
4	5	0	4	1	2
5	0	1	5	3	4
6	7	1	6	1	5
			7	1	4
			8	4	6

<Table 3> Coordinates and connectivity of two-dimensional two-strut Tensegrity

<Table 4>는 본 연구에서 제시한 방법으로 구조물을 해석한 결과이다.  $f_h + f_p$ 은 각각의 부재의 Particular solution과 Homogeneous solution을 합한 값이며 Sol.2는 각 부재의 자기평형응력을 나타낸다.  $f_0$  에서 보면 알 수 있듯이 요소 4, 5를 제외한 나머지 부재는 인장력을 받는 케이블 부재라는 것을 알 수 있다. 케이블 부재는 항상 인장력을 받는 부재이기 때문에 Sol.1 과 Sol.2 의 합이 항상 0보다 커야한다. 따라서 다음과 같은 식이 성립될 수 있다.

Element No.	$f_h + f_p$	$f_0$
1	-1.150P	0.280 $\alpha$
2	-1.030P	0.250 $\alpha$
3	-1.150P	0.280 $\alpha$
4	-0.484P	-0.130 $\alpha$
5	-0.484P	-0.130 $\alpha$
6	1.080P	0.280 $\alpha$
7	0.968P	0.250 $\alpha$
8	1.080P	0.280 $\alpha$

〈Table 4〉 Structural analysis of two dimensional two-strut Tensegrity

$$-1.150P + 0.28\alpha > 0 \quad (24)$$

$$\alpha > 4.107P \quad (25)$$

위의 식(25)에서 보듯이 자기 평형 응력  $f_0$ 은 작용하는 외력의 크기에 비례하는 것을 알 수 있다. 따라서 텐세그리티 구조물의 외력의 크기에 따른 최적의 프리스트레스를 결정 할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 트러스와 같은 골조 시스템의 구조 해석에 주로 사용되었던 하중법 이론을 이용하여 텐세그리티 구조에 대한 구조 해석 방법에 대해서 제시하였고 그 타당성을 검증하였다.

대공간 지붕구조 및 다양한 구조물에 적용되는 텐세그리티 구조 시스템의 적용을 하기 위해서는 구조 해석이 반드시 필요하다. 그러나 하중이 고려된 텐세그리티 구조물의 구조해석을 수행할 경우 기존의 구조 해석 방법은 매우 까다롭기 때문에 여러 가지 문제가 발생한다. 또한 구조 해석이 난해한 부정정 텐세그리티 구조물의 경우 정확한 부재력을 파악하기가 어려우며, 인장력을 받는 케이블 부재에 압축력이 발생하기 때문에 기존의 구조 해석방법으로 해석하기 쉽지 않다.

이에 본 연구에서는 기존의 구조 해석법의 문제점을

해결하기 위해서 하중법을 기반으로한 구조 해석방법을 제안하였으며 이 방법을 통해 텐세그리티 구조 시스템의 해석을 수행하였다. 제안한 방법으로는 텐세그리티의 형태가 유지되는 각 부재의 프리스트레스값을 구할 수 있으며 부재력 또한 구할 수 있다. 또한 가장 큰 문제점이었던 케이블에 압축력이 걸리는 문제를 해결하였고, 외력이 가해졌을 때 형태와 안정성이 유지되는 최적의 프리스트레스 값  $\alpha$  ( $\alpha > xP$ )도 찾을 수 있다.

## 감사의글

This research was supported by Basic Research Laboratory Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology through NRF2011-0027949 and 2012R1A2A1A01007405, and by the Ministry of Knowledge Economy (MKE), Korea, under the Convergence Information Technology Research Center (Convergence-ITRC) support program (NIPA-2011-C6150-1101-0003) supervised by the National IT Industry Promotion Agency (NIPA). The support is gratefully acknowledged.

## 참고문헌

1. Lee, S.H, "Pin-joint Structural Analysis using Force Method based on Singular Value Decomposition", Master, Department of Architectural Engineering, Sejong University, 2010
2. Jung M.R., Kim D.H., T.C Hoang, Lee Jaehong, "Self-equilibrium Stress Mode Analysis of Tensegrity Structures based on Eigenvalue Formulation", Conf. KSSC, pp.59-60,2009.
3. Ingber, D.E., "The Architecture of Life", Scientific American Magazine, January,



- 1998.
4. Kebiche K, Kazi-Aoual MN, Motro R. Geometrical nonlinear analysis of tensegrity system. Eng Struct, Vol. 21, No.9, pp.864-876, 1999
  5. Jung, M.R., Lee J.H., "Form-finding of Tensegrity Structures based on Eigenvalue Formulation", Journal of the Korean association for spatial structures / v.10 no.2, 2010년, pp.87-94
  6. Hanaor, A., "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, 1987.
  7. Pugh,A., "An Introduction to Tensegrity, Berkeley", California : University of California Press, 1976.
  8. Burkhardt, R.W., "A practical guide to tensegrity design", Cambridge(USA), on-line, Accessed December 2003-August 2004.
  9. Kenner. H., "Geodesic Math and How to Use It", Berkeley, California : University of California Press, 1976.
  10. Tanaka, H. and Hangai, Y., "Rigid body displacement and stabilization condition of unstable structures", Proceedings of IASS Symposium, 1976.
  11. Hangai, Y. and Kawaguchi, K., "General inverse and its application to shape finding analysis", Baifukan, 1991.
  12. Shenk, M., "Statically balanced tensegrity mechanisms", Department of Biomechanical Engineering, 2005.
  13. Jung Miroo, Lee Jaehong, "Self-Equilibrium Stress Mode Analysis of cable dome Structures by Eigenvalue Analysis", Journal of the architectural institute of Korea : Structure & construction, Vol. 25, No 4, pp.101-108, 2009.
  14. Kaveh. A., "Application of topology and matroid theory to the analysis of structures", Ph.D. thesis, London University, Imperial College, 1974.
  15. Kaveh. A., "Improved cycle bases for the flexibility analysis of planar trusses", Comput. Meths. Appl. Mech. Engng., Vol. 9, pp.267-272, 1979.
  16. Kaveh. A., "An efficient program for generating subminimal cycle bases for the flexibility analysis of structures", Communs. Numer. Meths. Engng., Vol.2, pp.339-344, 1986.
  17. S. Pellegrino., "Structural computations with the singular value decomposition of the equilibrium matrix", International Jouenal of Solids and Structures, Vol. 30, Issue 21, pp. 3025-3035, 1993.
  18. Chung, W.S., Lee, J.H., Kang, J.W., "Form-finding of Tensegrity Structures with constraints by using Force Method", Journal of the Korean association for spatial structures. v.11 no.4, 2011, pp.49-59

(접 수 일 자 : 2012년 09월 11일)

(심사완료일자 : 2013년 01월 22일)

(게재확정일자 : 2013년 02월 28일)