

케이블-돔 복합구조의 형상해석에 관한 연구

A Study on the Shape Analysis of Cable - Dome Structures

* 권택진 **한상을 ***최옥훈
Kwun, Taek-Jin Han, Sang-Eul Choi, Ok-Hun

ABSTRACT

The basic systems of spatial structures such as shells, membrane, cable-nets and tensegrity structure have been developed to create the large spaces without column. These structures may have large freedom in scale and form, and especially tensegrity structures are received much attention from the view points of their light weight and aesthetics. But There are some difficulties concerning structural stability, surface formation and construction method. One of the way to solve these problems reasonably is a combination of tensile members and rigid members. A structural system based on this concept is referred to as the "HTS (Hybrid Tension Structure)". This is a type of flexible structural system which is unstable initially, because the cable material has little initial rigidity. As cable - dome hybrid structures is a type of HTS, the initial stress for the self - equilibrated system having stable state have to be introduced. To determine initial stress having stable state, the shape finding analysis is required before the stress - deformation analysis.

In this paper, the primary objective is to derive the nonlinear finite element formula of cable and truss members considering geometric nonlinearity for shape finding of cable-dome, and to propose the method to decide the initial stress by the shape analysis of cable-dome hybrid structure with the self-equilibrated state.

1. 서론

장력안정 복합구조물의 일종인 케이블 돔은 대공간 구조물을 위한 신구조 시스템으로 제안되고 있으며, 세계에서 최초로 설계시공된 사례는 서울올림픽 체조경기장이다.

구성부재 중 케이블재의 종류로서는 사용위치에 따라 릿지케이블 (ridge cable), 경사케이블 (diagonal cable), 누름케이블 (valley cable), 인장링 (tenion ring) 케이블 등이 있다. 구조시스템에 따라 누름 케이블은 지붕 마감재인 막에 주어진 장력에 의해 강성을 확보하여 풍하중에 의한 부하중을 지탱할 수도 있다. 그러나 이러한 구조는 구성부재인 케이블이 극단적 유연성을 가지므로, 초기에 불안정형상을 갖는다. 따라서 불안정구조물이 안정상태로 되기 위해서는, 장력도입에 의한 강성이 필요하다.

*성균관대학교수, **인하대학교수, ***안동공업전문대학교수

본 논문에서 적용된 가정과 해석법의 특징은 다음과 같다.

- 1) 직선재인 케이블과 트러스는 핀접합으로 구성되고, 장력으로 안정된 복합구조를 해석대상으로 한다.
- 2) 기하학적 비선형성을 고려한 기초방정식은 각 증분에서 선형화한다.
- 3) 최적한 장력을 초기응력으로 부여하여 안정화된 복합구조물의 형상을 탐색한다.
- 4) 해석은 하중제어에 따른 하중증분법을 사용하고, 하중증분내에서 뉴턴-랩슨법이 용하여 오차(불평형력)의 축적을 최소화한다.

본 연구에서는 케이블의 유연성을 고려할 수 있는 기하학적 비선형항을 포함한 케이블 덤의 형상해석 기초방정식을 정식화하고, 제시된 반복적 수치해석과정을 통해 형상해석을 수행하고 자기평형상태를 갖을 수 있는 초기응력결정법을 제안한다.

2. 케이블 덤의 기초방정식 정식화

케이블 구조는 일반구조에 비해, 변형하기 쉬운 특성을 가진 구조로서, 미소변형이론을 적용하는데 문제점이 있으므로, 대변형과 회전의 효과가 고려될 수 있는 기하학적 비선형성을 포함한 유한변위 이론이 사용된다. 따라서 본 장에서는 증분내에서 유한요소의 모든 변형도는 미소하다고 가정하고, 변형후 기하학적 좌표를 이용하여 평형방정식을 정식화한다.

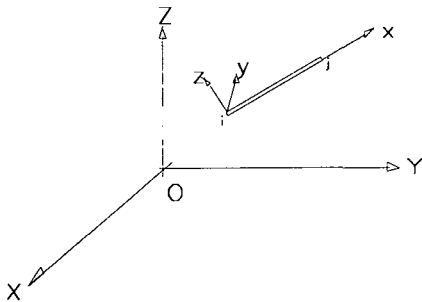


그림 1 전체좌표계 및 국부좌표계

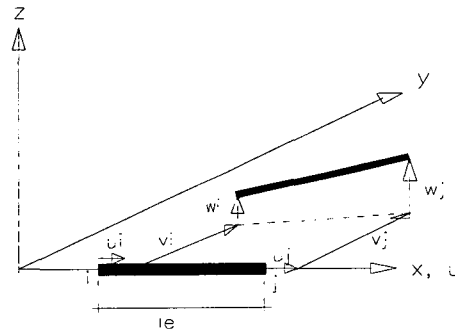


그림 2 부재의 변형 (부재좌표계 x, y, z)

그림 1에서, 전체좌표계가 O - XYZ이고, i점과 j점에 관한 부재절점의 변위가 u_i, v_i, w_i 와 u_j, v_j, w_j , 부재력이 f_{xi}, f_{yi}, f_{zi} 와 f_{xj}, f_{yj}, f_{zj} 라고 할때 이 값들을 벡터로 표기하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{d_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}, \quad \{d_j\} = \begin{Bmatrix} u_j \\ v_j \\ w_j \end{Bmatrix}, \quad \{f_i\} = \begin{Bmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \\ f_{zi} \end{Bmatrix}, \quad \{f_j\} = \begin{Bmatrix} f_{xj} \\ f_{yj} \\ f_{zj} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

본 절에서는 케이블 부재 및 트러스 요소에서의 유한변형을 고려한 점선강성매트릭스와 탄성강성매트릭스를 구한다. 유한변형을 고려한다는 것은 선형이론에서 무시되었던 신장의 고차항과 전단에 대한 회전항을 고려하는 것을 의미하며, 부재좌표 o - xyz 에 관해서, 증분구간에 따른 평형방정식을 유도한다. 절점변위 $\{u_i\}, \{u_j\}$ 에 따른 부재내의 변위를 $u(x), v(x), w(x)$ 라 두고, $x = l_e \xi$, $0 \leq \xi \leq 1$ 에서 주어지는 무차원량 ξ 을 도입하여, 부재내의 변위를 가정하면 다음과 같다.

$$u(\xi) = a_1 + a_2 \xi, \quad v(\xi) = a_3 + a_4 \xi, \quad w(\xi) = a_5 + a_6 \xi \quad (2)$$

그림 2에서, 절점 i 와 절점 j 의 변위는 $\{d_i\}$, $\{d_j\}$ 와 일치하므로, 요소양단 ($\xi=0, 1$) 의 경계조건을 이용하면 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ 를 결정할 수 있고, 그 값들을 식 (2) 에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(\xi) &= u_i + (u_j - u_i)\xi = (1-\xi)u_i + \xi u_j \\ v(\xi) &= v_i + (v_j - v_i)\xi = (1-\xi)v_i + \xi v_j \\ w(\xi) &= w_i + (w_j - w_i)\xi = (1-\xi)w_i + \xi w_j \end{aligned} \quad (3)$$

부재내의 변위의 식(3)은 매트릭스로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} u(\xi) \\ v(\xi) \\ w(\xi) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\xi & 0 & 0 & \xi & 0 & 0 \\ 0 & 1-\xi & 0 & 0 & \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1-\xi & 0 & 0 & \xi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_i \\ d_j \end{Bmatrix} \quad (4)$$

미소변형을 갖는 유향회전에 대한 변형도-변위관계식은 식 (5) 와 같다. 여기에서 u, v, w 는 x, y, z 方向의 변위이다. 앞의 첫 항은 선형성분이고, 나머지 항은 기하학적 비선형성분이다.

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

식(4)를 x 에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dx} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \frac{1}{l_e} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_i \\ d_j \end{Bmatrix} \quad (6)$$

식(6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dx} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \frac{1}{l_e} \begin{Bmatrix} B_u \\ B_v \\ B_w \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} d_i \\ d_j \end{Bmatrix} = \mathbf{B} \mathbf{d} \quad (7)$$

여기서, B_u, B_v, B_w 은 행벡터이고, 식 (6)을 식(5)에 대입하면 다음과 같은 결과식을 구할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{u_j - u_i}{l_e} + \frac{1}{2} \left(\frac{u_j - u_i}{l_e} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{v_j - v_i}{l_e} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{w_j - w_i}{l_e} \right)^2 \quad (8)$$

여기에서, l_e 는 변형전의 길이이다. 식(7)을 이용하여, 식(8)을 매트릭스로 나타내면 다음과 같다.

$$\epsilon_x = \mathbf{B}_u \mathbf{d} + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B} \mathbf{d} \quad (9)$$

여기서,

$$\mathbf{d}^T = [u_i \quad v_i \quad w_i \quad u_j \quad v_j \quad w_j]$$

$$\mathbf{B}_u = \frac{1}{l_e} [-1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{l_e} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

재료가 선형탄성의 범위내에 있다는 가정에 의해, 증분구간에서의 응력-변형도관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_x = \mathbf{E} \epsilon_x \quad (10)$$

여기서, σ_x 는 증분구간에서의 응력도, \mathbf{E} 는 탄성계수, ϵ_x 는 증분구간에서의 변형후 기하학적 형상조건이 포함된 변형도이다. 가상일의 원리를 이용하면, 증분구간에 대한 트러스 및 케이블의 변형도에너지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int \int \int_V [(\sigma_x^{(0)} + \sigma_x) \delta \epsilon_x] dV = \{ \mathbf{f}^{(0)} + \mathbf{f} \}^T \delta \mathbf{d} \quad (11)$$

이 식에서, $\sigma_x^{(0)}$, σ_x 는 기준상태로부터의 초기응력과 현재상태에서의 응력이고, $\mathbf{f}^{(0)}$, \mathbf{f} 는 기준상태로부터의 초기절점하중과 현재상태에서의 절점하중이다. 식(9)에서, $\delta \epsilon_x$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\delta \epsilon_x = (\mathbf{B}_u + \mathbf{d}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}) \delta \mathbf{d} \quad (12)$$

식(10)과 식(12)을 식(11)에 대입하면, 임의의 증분에서의 평형방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} (\mathbf{f}^{(0)} + \mathbf{f}) = \int \int \int_V [\sigma^{(0)} \mathbf{B}_u^T + (\sigma^{(0)} \mathbf{B}^T \mathbf{B} + E \mathbf{B}_u^T \mathbf{B}_u) \mathbf{d} \\ + \frac{E}{2} (\mathbf{B}^T \mathbf{B} \mathbf{d} \mathbf{d}^T + \mathbf{B}^T \mathbf{B}) \mathbf{d}] dV \end{aligned} \quad (13)$$

초기상태에서, $\mathbf{f}^{(0)}$ 인 초기절점하중과 $\sigma^{(0)}$ 인 초기응력은 평형이다. 그러나 증분구간에서 해석시 고차항의 생략과 수치해석의 오차에 따른 불평형력이 발생한다. 불평형력을 \mathbf{r} 이라고 하면 다음과 같다.

$$\{\mathbf{r}\} = \int \int \int_V \sigma^{(0)} \mathbf{B}_u^T dV - \{\mathbf{f}^{(0)}\} \quad (14)$$

식(14)를 식(11)에 대입하여, 변위의 고차항을 생략하고, 부재의 길이 l 가 L 이라고 두면 체적적분이 AL 로 됨을 이용하여 증분방정식이 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{\mathbf{f}\} - \{\mathbf{r}\} = AL (\sigma^{(0)} \mathbf{B}^T \mathbf{B} + E \mathbf{B}_u^T \mathbf{B}_u) \{\mathbf{d}\} \quad (15)$$

식(15)의 성분으로 나타내면 다음과 같다.

$$\{\mathbf{f}\} - \{\mathbf{r}\} = \frac{N^{(0)}}{L} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \{\mathbf{d}\} + \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 & -\mathbf{I}_1 \\ -\mathbf{I}_1 & \mathbf{I}_1 \end{bmatrix} \{\mathbf{d}\} \quad (16)$$

여기서,

$$N^{(0)} = A \sigma^{(0)}, \quad [\mathbf{I}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{I}_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

식(16)에서 우변의 첫째항인 기하학적 강성매트릭스를 \mathbf{k}_G , 둘째항인 탄성강성매트릭스를 \mathbf{k}_E 이라 두면 증분방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\mathbf{f} - \mathbf{r} = \mathbf{k}_E \mathbf{d} + \mathbf{k}_G \mathbf{d} \quad (18)$$

전체좌표계 X, Y, Z 축에 대한 x 축의 방향여현을 l, m, n 이라 하면, 좌표변환매트릭스는 다음과 같다.

$$[\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} l & m & n \\ -\frac{l}{\sqrt{l^2+m^2}} & \frac{m}{\sqrt{l^2+m^2}} & 0 \\ -\frac{ln}{\sqrt{l^2+m^2}} & \frac{-mn}{\sqrt{l^2+m^2}} & \sqrt{l^2+m^2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

윗 식에서 l, m, n 은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} l \\ m \\ n \end{Bmatrix} = \frac{\{X_j - X_i\}}{L}, \quad L = \sqrt{\{X_j - X_i\}^T \{X_j - X_i\}} \quad (20)$$

그림 1의 전체좌표계에서, i 점 및 j 점에 관한 부재절점의 변위가 $\mathbf{D}_i, \mathbf{D}_j$ 이고, 절점력이

F_i, F_j 이며 불평형력을 R_i, R_j 라고 두면, 이 값들은 다음과 같다.

$$\{D\} = \begin{Bmatrix} D_i \\ D_j \end{Bmatrix}, \quad \{D_i\} = \begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{Bmatrix}, \quad \{D_j\} = \begin{Bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{Bmatrix} \quad (21)$$

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \end{Bmatrix}, \quad \{F_i\} = \begin{Bmatrix} F_{x_i} \\ F_{y_i} \\ F_{z_i} \end{Bmatrix}, \quad \{F_j\} = \begin{Bmatrix} F_{x_j} \\ F_{y_j} \\ F_{z_j} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

$$\{R\} = \begin{Bmatrix} R_i \\ R_j \end{Bmatrix}, \quad \{R_i\} = \begin{Bmatrix} R_{x_i} \\ R_{y_i} \\ R_{z_i} \end{Bmatrix}, \quad \{R_j\} = \begin{Bmatrix} R_{x_j} \\ R_{y_j} \\ R_{z_j} \end{Bmatrix} \quad (23)$$

식(19)의 변환매트릭스를 이용하여, 요소좌표계에 대한 케이블 및 트러스의 절점력, 불평형력, 절점변위를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} d_i \\ d_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_i \\ D_j \end{Bmatrix} \quad (24)$$

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} f_i \\ f_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \end{Bmatrix} \quad (25)$$

$$\{r\} = \begin{Bmatrix} r_i \\ r_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R_i \\ R_j \end{Bmatrix} \quad (26)$$

식(24), 식(25), 식(26)을 식(18)에 대입하여, 전체좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} R_i \\ R_j \end{Bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} K_E & -K_E \\ -K_E & K_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_G & -K_G \\ -K_G & K_G \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} D_i \\ D_j \end{Bmatrix} \quad (27)$$

여기서,

$$K_E = T^T k_E T, \quad K_G = T^T k_G T \quad (28)$$

K_E 는 선형해석에 이용되는 탄성강성매트릭스이고, K_G 는 증분구간의 시점에서 변위를 포함하기 때문에 초기응력매트릭스 또는 기하강성매트릭스라 한다.

형상해석은 설계형상인 목적형상에 가장 근접한 초기평형형상을 구하는 해석이다. 장력안정 복합구조의 초기평형형상이라 함은 하중조건이 없는 상황에서 각 케이블의 장력(초기장력)에 의해 구조물 자체가 전체적으로 평형상태를 만족하는 형상을 뜻한다. 따라서 장력상태에 있는 케이블 부재를 갖는 복합구조물의 설계에서는 다른 구조형식의 설계와는 달리 목적형상(설계형상)을 설정해야 한다. 따라서 장력상태에 놓여 있는 케이블 부재가 갖는 복합구조의 설계에서는, 평형상태를 갖는 형상을 위한 초기장력이 결정되어야 한다.

장력안정 복합구조의 형상해석을 수행할 때, 구조물의 장력강성을 부여하는 초기장력결정은 식(29)와 식(30) 같은 목적함수에 의해 수행된다.

$$\sum_{i=1}^n \{D^p - D^{(i)}\} \rightarrow \text{최소화} \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^n \{P^{(i)} - N_0^{(i)}\} \rightarrow \text{최소화} \quad (30)$$

윗 식에서,

D^p : 목적형상(설계형상)

$D^{(i)}$: i 번째 형상해석에 따른 초기형상

$P^{(i)}$: i 번째 형상해석에 따른 초기응력

$N_0^{(i)}$: i 번째 형상해석에 따른 초기부재응력

식 (29) 는 설계자에 의해 요구되는 설계형상에 가장 근접한 최종형상을 위한 기하학적 조건식이고, 식 (30)은 구조물의 응력변형해석시에 도입되는 초기응력이 구조물의 장력강성으로 작용되기 위한 조건식이다.

4. 해석결과

해석모델은 그림 3과 같은 케이블 돔이고, 표1 에서 부재의 제원과 장력으로 도입되는 형상 초기응력은 표1과 같다.

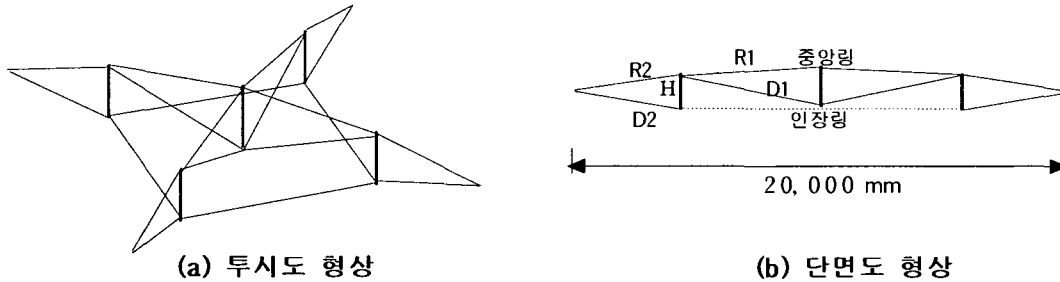


그림 3 해석모델

표 1 부재제원 및 형상초기응력

부재	A (cm ²)	E (KN/mm ²)	형상 초기응력	
인장재	D 1	17.34	186.3	0.4900E+04
	D 2	8.67	186.3	0.5040E+04
	R 1	14.94	127.5	0.5810E+03
	R 2	10.60	127.5	0.6440E+04
	인장링	11.86	127.5	0.2485E+05
	중앙링	10000	205.9	-
압축재	H	30.87	2.059	-

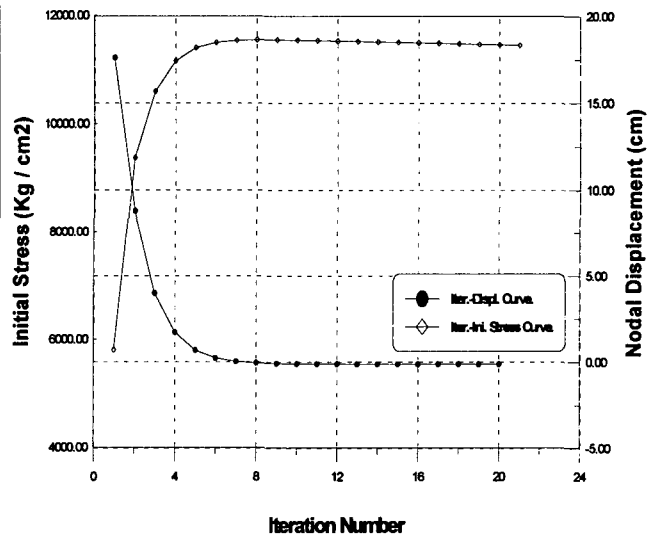
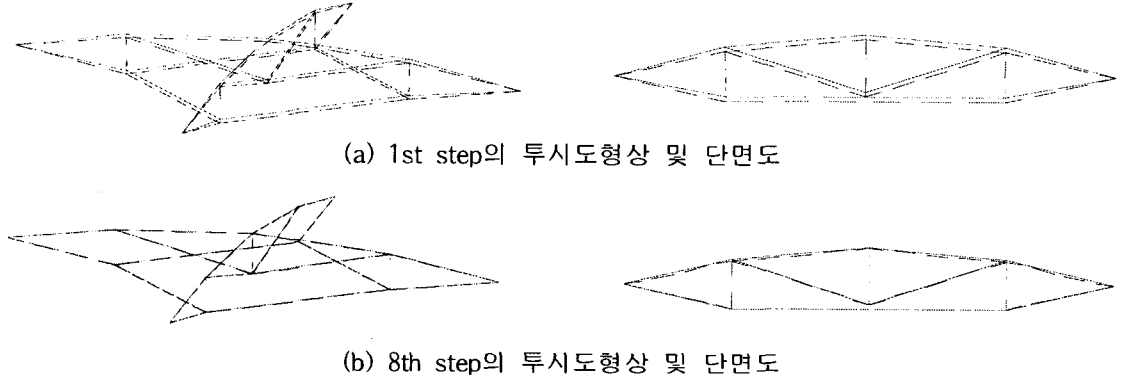


그림 4 안정화된 장력반복에 따른 변위

그림 4에서는, 반복되는 형상해석의 결과에 따른 변위이동과 초기응력의 변화를 보여주고 있으며, 초기장력의 변화가 8번째 반복이후 거의 일정함을 보여주고 있고 이 때의 값이 최적 목적형상에 가장 가까운 초기장력이고, 형상변화의 값도 0에 수렴한다. 즉 이 값이 초기에 제안된 설계형상에 가장 근접한 최적값이고, 또한 그 이후의 초기응력도는 변위가 0인 수평축과 거의 평행을 이루므로 장력강성에 부여되는 초기응력으로서, 최적조건식 (29) 및 (30)에 가장 합당한 최적치가 된다. 그림 5에서는 형상해석의 결과에 따른 투시도 및 단면형상을, 그림 6에서는 구조물의 초기상태에서 최종 평형상태를 찾아가는 경로를 보여주고 있다. 평형상태의 반복횟수는 8회까지 보여주고 있고, 하중의 최대치 결과는 평형상태의 전 과정에서 비선형성 흐름을 나타내고 있다.

그림 7은 반복된 최적형상해석이 목적형상에 수렴해 가는 하중과 변위관계를 보여주고 있다. 스텝에서 변위는 0에 수렴하고, 구조물의 안정상태를 탐색하는 형상해석에 따른 각 경우에는는 하중변화에 따른 변위가 거의 Y축과 일치하면서 0에 수렴함을 나타내고 있다. 따라서 설계형상에 가장 적절한 초기장력은 형상해석에 의해 탐색된 최종 안정상태조건에 의한 부재응력으로 설정될 수 있다. 표 2에서는 리지케이블과 외부경사케이블은 증가하고 초기응력이 초기치보다 증가하고 내부경사케이블과 인장링의 케이블에서는 감소함을 보여주었다. 이러한 현상은 초기치에 의해 아래로 처진 형상이 원래 설계형상으로 근접하면서 평형상태가 달라지고 있음을 보여주는 것이라 사료된다. 특히 외부R2와 D2의 초기응력의 증가가 형상흐름의 상승효과로 작용하고 있다.



(a) 1st step의 투시도형상 및 단면도

(b) 8th step의 투시도형상 및 단면도

그림 5 초기응력 반복에 따른 형상해석 결과 비교

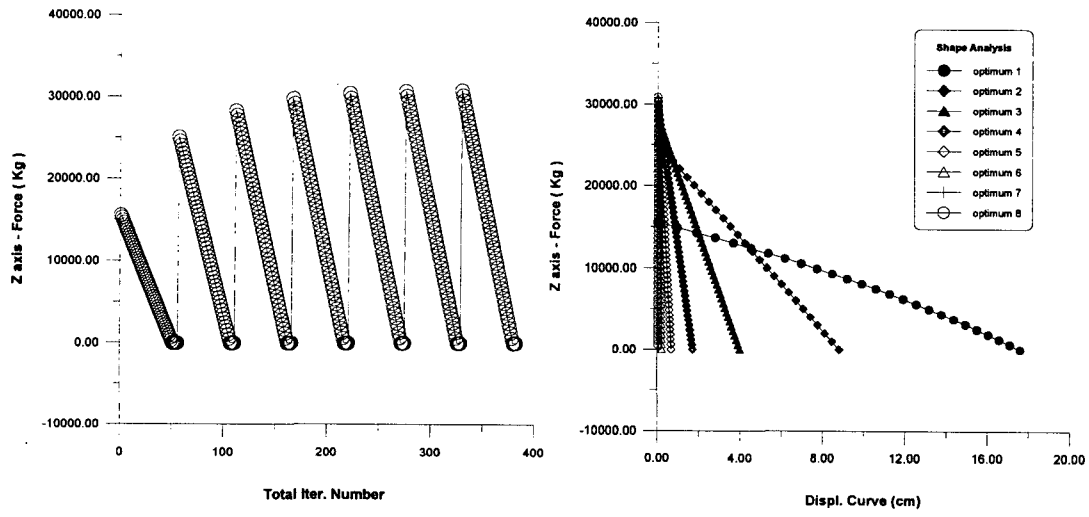


그림 6 평형상태 경로

그림 7 최적해석의 반복에 따른 힘과 변위흐름

표 2 최적한 초기응력 (8 회째 형상해석)

초기응력 위치	내부 R1	외부 R2	내부 D1	외부 D2	인장링
초기치	0.5810E+04	0.6440E+04	0.4900E+03	0.5040E+04	0.2485E+05
최적 초기응력	0.6461E+04	0.6858E+04	0.1492E+04	0.7471E+04	0.2253E+05

5. 결 론

본 연구에서는 복합구조물의 평형상태를 갖기 위한 최적 초기응력을 얻기 위하여 기하학적 비선형항을 포함한 케이블 돔의 형상해석 기초방정식을 정식화하고, 수정하중법과 뉴턴랩슨법을 이용하였다. 대변형과 회전의 효과가 고려될 수 있는 기하학적 비선형성을 포함한 유한변위 이론이 적용된 반복적 수치해석과정에 의해, 단계별 평형상태에 따른 형상탐색을 수행하고, 평형상태를 찾아가는 경로와 특징, 반복적으로 목적형상에 수렴해 가는 하중과 변위관계 등을 비교 및 검토하여 최적한 자기평형상태를 갖는 초기응력에 관한 선정방법을 제안하였다.

제안된 초기응력결정법에 의한 결과, 평형상태의 조건식에 적합한 변위는 0에 수렴하고, 구조물의 안정상태를 탐색하는 평형상태에 따른 각 경우에는 하중변화에 따른 변위거의 Y축과 일치하면서 0에 수렴함을 나타내고 있다. 따라서 설계형상에 가장 적절한 초기장력은 형상해석에 의해 탐색된 최종 안정상태조건에 의한 부재응력으로 설정된다.

리지케이블과 외부경사 케이블의 초기응력은 초기치보다 증가하고 내부경사케이블과 인장링의 케이블에서는 감소한다. 이러한 현상은 초기치에 의해 아래로 처진 형상이 원래 설계형상으로 근접하면서 평형상태가 달라지는 원인이 되고, 특히 외부 리지케이블과 경사케이블의 초기응력의 증가가 형상흐름의 상승효과로 작용하는 것이라고 사료된다.

이상의 결과에 의해, 본 논문에서 전개된 장력안정 복합구조물의 반복적 최적형상해석법은 초기장력에 따른 구조안정문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 설계형상에 근접한 초기형상을 결정할 수 있는 유용한 방법이라고 사료된다.

감 사 의 글

본 연구는 초대형구조시스템연구센터(STRESS)의 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Fuller, R. B. and Marks, R., *The Dymaxion World of Buckminster Fuller*, Doubleday Anchor Press, 1970.
2. Pugh, A., *An Introduction to Tensegrity*, University of California Press, 1976.
3. Vilnay, O., "Structures Made of Infinite Regular Tensegric Nets," IASS Bulletin No. 63, Vol.XVIII, Apr., 1977, pp.51 - 57.
4. Calladine, C. R., "Buckminster Fuller's Tensegrity Structures and Clerk Maxwell's Rules for the Constructions of Stiff Frames," *Int. Jour. Solids Structures*, 1978.
5. 日本鋼構造協會, 建築構造 ケーブル設計施工指針, 1983.
6. Emmerich, D. G., *Exercices de Geometrie Constructive Travaux d'etudiants*, Ecole Nationale Supérieure des Beaux Arts, Paris, Architectures, 1984, pp.744-749
7. Geiger, D. H., "Membrane Structures," *Encyclopedia of Architecture, Design, Engineering, and Construction Vol. 3*, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
8. 권택진, 한상울, 김충한, 최옥훈, "장력안정트러스 구조물의 안정화 기법에 관한 연구," 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제9권 제2집, 1996
9. 권택진, 한상울, 최옥훈, "장력안정화 트러스의 단위구조 안정화기법에 관한 연구," 한국건축학회지, 제13권 제7호, pp. 155 - 162, 1997