

구조 유연도를 고려한 메쉬 반사판 안테나의 케이블 네트워크 형상 설계

노진호^{1,†}, 최혜윤², 정화영², 김효태², 윤지현²¹항공우주 및 기계공학부, 한국항공대학교²C41STAR 기계융합연구소, LIG넥스원

Form-finding Analysis of Cable Networks Considering a Flexibility of the Structures for Mesh Reflector Antennas

Jin-Ho Roh^{1,†}, Hye-Yoon Choi², Hwa-Young Jung², Hyo-Tae Kim², and Ji-Hyeon Yun²¹School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University²Mechanical R&D (Space System), LIG Nex1

Abstract

The purpose of this paper was to design the cable networks for mesh reflector antennas, considering the flexibility of structures. An effective form-find methodology is proposed. The whole parts of the cable networks are described by the absolute nodal coordinate formulation. Additionally, nonlinear deformation of the cable can be obtained. The form-finding analysis of the reflector with standard configuration is performed, to validate the proposed methodology. The truss ring structure is numerically modeled using the frame elements. To consider the flexibility of the truss ring as well as the cable net structure, an iteration analysis between the truss ring and the cable net under tensional forces is also performed in the form-finding process. The final configuration of the reflector with tensioned cable networks is demonstrated.

초 록

본 논문에서는 기하학적 특성을 고려한 케이블 네트워크 형상설계 방법론을 제시하고, 트러스 링 그리고 케이블 네트워크의 구조 유연도를 고려한 반사판 안테나의 케이블 네트워크 형상 실효성을 검증한다. 기하학적 비선형성을 고려한 케이블 네트워크의 유한요소 모델을 개발한다. 경계조건인 하중에 따른 형상변형 해석을 통하여, 케이블 네트워크의 형상 설계변수 특성을 제시 한다. 프레임 요소를 이용하여 전개형 트러스 링 구조를 모델링하고 정적 하중 해석을 수행한다. 전개된 링 구조에 가해지는 장력에 의해 케이블 네트워크 반사판은 정확한 형상을 유지하게 된다. 가해지는 장력, 케이블 네트워크 그리고 트러스 링 구조의 유연도를 고려하여, 케이블 네트워크 형상설계에 반영하고 최종 형상을 제시한다.

Key Words : Deployable Reflector Antenna (전개형 반사판 안테나), Truss Ring(트러스 링), Cable Networks (케이블 네트워크), Form-finding(형상설계), Flexibility(유연도), Static Analysis (정적하중 해석)

1. 서 론

미래의 고성능 위성, 통신중계 시스템, 지구 관측 및 심우주 탐사를 위해 대형 우주 안테나 개발 연구는 많은 관심을 받고 있다. 대형 안테나는 발사체 수납공간에 적합하도록 소형으로 수납된 후, 우주 궤도에서 정해진 형상으로 펼쳐질 수 있는 전개형 구조로 개발되

고 있다 [1, 2].

유연한 케이블 네트워크(nets)의 초기 장력을 이용해 안테나 형상을 유지시켜주는 전개형 안테나는 높은 수납성과 구조 경량 특성으로 우주안테나 개발에 많이 응용되고 있다 [3]. 케이블 네트워크로 지지되어 있는 파라볼라(parabolic) 형상의 메쉬(mesh) 반사판과 전개 가능한 트러스 링(ring) 구조물로 구성된 개념은 구조 경량화와 우수한 형상 정확도를 가지고 있다.

폐곡선을 갖는 다각(polygon) 형상의 전개형 트러스 안테나는 구조물의 전개 동기화(synchronization), 우수한 열적 안정성 그리고 높은 전개 신뢰성을 가지고 있어, 우주 안테나 연구에 많은 연구가 수행되어왔다.

Received: Jun. 03, 2022 Revised: Jun. 20, 2022 Accepted: Jun. 26, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-02-300-0289, E-mail: jinhoroh@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering



Fig. 1 Deployable Reflector at the Mir Station

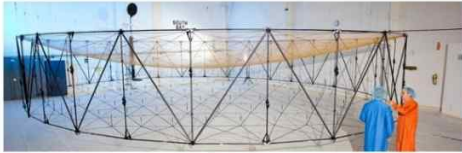


Fig. 2 AstroMesh Deployable Reflector Antenna

1980년대 초기부터 옛 소련(Soviet Union)은 Georgian Technical University (GTU)에 우주프로그램을 신설하여, 팬더그래프(pantograph)를 이용한 우주 전개 구조물 개념 연구를 진행하였고 [4, 5], 1999년 Mir 우주정거장에서 5.5 m 지름의 반사판 안테나 전개시험을 성공했다 (Fig. 1). TRW Astro Aerospace는 현재 최고기술 수준의 대형 전개 반사판 안테나 AstroMesh를 개발하였다 [6]. AstroMesh는 케이블 네트워크(networks)가 전개형 트러스 구조에 부착되어 있는 형태이다 (Fig. 2). 수직 방향의 보조(auxiliary) 케이블의 인장력을 조절하여 파라볼라메쉬 반사판 형상을 유지하게 한다. 6 m 그리고 12 m 지름을 갖는 AstroMesh가 개발되었다.

메쉬 반사판 안테나는 다각형 전개 트러스 링 구조, 반사판 표면을 구성하는 메쉬 그리고 파라볼라 형상을 유지시켜주는 케이블 네트워크로 구성되어 있다. 앞면 그리고 뒷면 2개의 대칭 케이블 네트워크 그리고 이들을 이어주는 보조 케이블로 네트워크 구조를 구성한다 (Fig. 3). 전개 완료된 트러스 구조가 케이블 네트워크 초기 장력(tension)을 가해주고 보조 케이블의 인장 조절을 통하여 반사판의 정확한 형상을 유지한다. 메쉬 반사판의 표면은 인장을 받는 케이블로 연결된 여러 삼각 면(facet)으로 이루어져 있다. 반사판 안테나 게인(gain)은 반사면의 형상 오차에 의존하기 때문에, 앞면 케이블 네트워크의 정확한 형상을 찾는 연구는 매우 중요하다. 또한, 케이블 네트워크는 인장력의 조그만 변화에도, 큰 변형 형상을 발생한다.

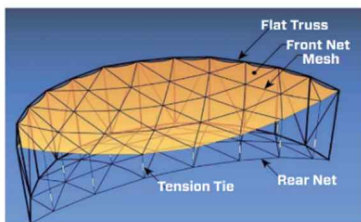


Fig. 3 Components of the Mesh Reflector Antenna

케이블 네트워크로 이루어진 반사판 형상을 찾는 방법은 케이블로 연결된 파라볼라 표면 위, 분포된 노드(nodes)에 균일한 인장력이 동시에 가해지도록 한다. 보편적으로 사용되는 방법은 Force density method(FDM) 방법이며, 케이블의 단위 길이 당 작용하는 힘 비율에 따른 설계 파라미터를 적용한다. 전체 시스템의 선형화된 평형방정식을 구성하여 최종 형상을 찾는 방법이다. 이런 방법은 비교적 간단하고 효과적으로 3 차원 케이블 형상을 찾을 수 있는 장점이 있다. Schek[7]는 FDM을 일반화 하여, 케이블의 길이, 케이블에 작용하는 장력, 경계조건의 위치 그리고 구속조건을 고려한 임의의 형상 케이블 네트워크 설계를 수행하였다. 하지만, 파라볼라 반사판의 경우 결정된 형상 일부에 실효면적의 감소가 발생하고, 이를 보완하기 위해 FDM 기반의 최적설계[8, 9] 및 기하학적 균형기법[10, 11]을 적용한 연구가 수행되었다. 이들은 경계조건에서 최대한 균일한 케이블이 분포되도록 케이블 네트워크 형상을 설계하고 균일한 장력이 케이블 네트워크에 작용됨을 보였다.

우주궤도에서 위성 임무 수행 동안, 안테나 반사판은 위성의 자세제어 기동에 가진(excitation)되지 않도록, 동역학적 강성(stiffness)을 가져야 한다 [12]. 또한, 전개 완료된 트러스 링 구조는 케이블 네트워크에 장력을 가해주어 반사판은 정확한 형상을 유지하게 된다. 따라서, 전개형 트러스 링 구조의 강성, 케이블에 작용하는 장력 및 구조변형을 고려하여 전체적인 케이블 네트워크 형상 설계가 필요하다.

본 논문에서는 반사판의 기하학적 특성을 고려한 케이블 네트워크 형상설계 방법론을 제시하고 설계된 형상의 실효성을 검증한다. 케이블 네트워크는 강성과 초기 장력이 가해지고 있고, 기하학적 비선형성을 고려한 케이블의 유한요소해석 모델을 개발하였다. 케이블에 압축하중이 가해지면, 처짐(slack) 현상이 일어나고 더 이상 구조적인 역할을 하지 못한다. 또한, 하중에 따른 길이 변화와 회전 변형이 크게 발생하는 특성이 있다. 프레임 요소를 이용하여 트러스 링 구조를 모델링한다. 케이블에 가해지는 장력 그리고 케이블 네트워크와 트러스 링 구조의 유연도를 형상설계에 고려하여 케이블 네트워크의 최종 형상을 제시한다.

2. 케이블 네트워크 형상 설계

2.1 Methodology for cable net geometry design

절대좌표계를 이용하여 포물선 형상 케이블 네트워크의 노드 좌표와 각 노드 사이의 연결(connectivity) 벡터를 생성한다 (Fig. 4). 원주 방향으로 세부 분할선을 생성하고 원점을 기준으로 노드를 생성해 간다. Figure 5은 3개의 분할선을 가지고 원주 경계선을 가지는 6각형상의 반사판의 노드 생성을 xy 평면으로 나타낸 것이다. 원점의 노드를 $N_1 = (0, 1)$ 로 정의하면, 원점으로 부터 첫 번째 층(layer)의 노드는 Eq. (1)로 정의된다.

$$N_2 = (1, 1), N_3 = (1, 2), \dots, N_{n+1} = (1, n) \quad (1)$$

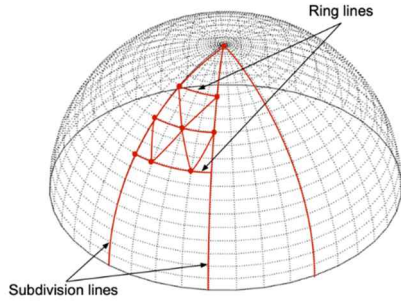


Fig. 4 Cable Net Geometry Generation

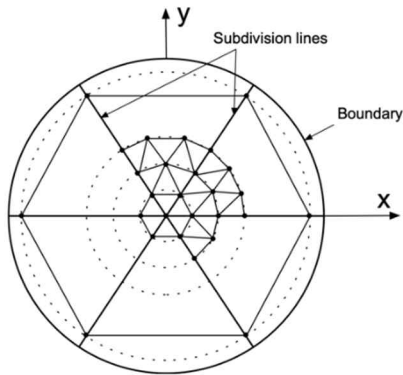
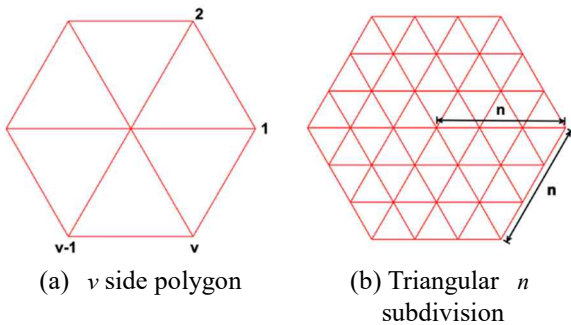


Fig. 5 Node Generation on xy Plane

여기서, n_s 는 원주 방향의 노드 개수를 나타낸다. Equation (2)는 일반화된 n_r 번째 층에서의 노드를 나타낸다.

$$N_{l+1} = (n_r, 1), N_{l+2} = (n_r, 2), \dots, N_{l+n_r} = (n_r, n_r n_s) \quad (2)$$



(c) Parabolic surface mapping with $n=12$
Fig. 6 Generation of Cable Net

여기서, n_r 은 반경 방향의 노드 개수, n_s 는 전체 노드 개수 그리고 $l = n_r - n_r n_s$ 이다. 노드 배열을 이용하여 케이블 부재(member)들의 연결 벡터를 구성할 수 있다 (Eq. 3).

$$C_k = \{N_i, N_j\} \quad (3)$$

여기서, k 는 케이블 부재 개수 그리고 N_i 와 N_j 는 부재에 연결된 노드 순서를 나타낸다. 정의된 연결 벡터를 이용하면, 표면에 정의된 노드 좌표를 기반으로 각각의 케이블 부재들을 연결시킨다. 반지름과 다각면을 균일하게 n 등분하면 삼각형상으로 세분화 시킬 수 있다 (Fig.6). Figure 6(c)는 $n=12$ 인 경우, 파라볼라 반사관 표면으로 형성된 케이블 네트의 모습을 보여주고 있다. 이후, 형성된 케이블 네트는 Fig. 5에서 정의된 경계(boundary)에 연결되어진다. Figure 7은 보조케이블 생성을 통하여 12개의 경계점에 케이블 네트를 고정시킨 3차원 파라볼라 형상의 케이블 네트를 보여주고 있다.

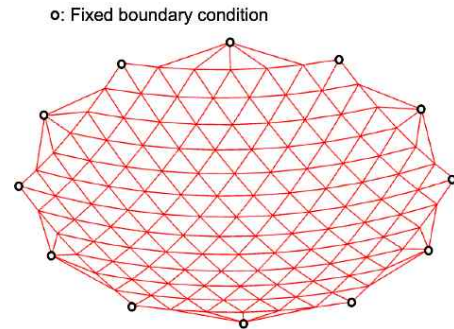


Fig. 7 Cable Network Formatting Connected with the Boundary Layer

2.2 Cable model with geometric nonlinearity

케이블은 인장 하중만을 견딜 수 있는 부재이며, 압축 하중을 받게 되면 처짐 현상이 일어나고 더 이상 구조적인 역할을 하지 못한다. 또한, 하중에 따른 길이 변화와 회전 변형이 크게 일어난다. 기하학적 비선형성을 고려하여 케이블 요소의 유효요소 정식화를 수행하였다[13, 14]. 절대좌표 (x, y, z) 에서 케이블 길이(L_o)를 구할 수 있다 (Eq. (4)).

$$L_o = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2} \quad (4)$$

Equation (5)는 절대좌표계와 국부좌표계(p, q, r)의 방향 코사인벡터(T)를 이용한 케이블 요소의 변형(u, v, w)을 나타내고 있다 (Fig. 8).

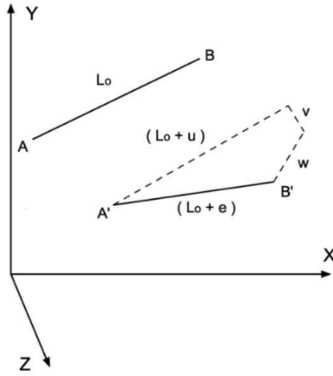


Fig. 8 Global Displacement at the Ends of Element A-B

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_p & -m_p & -n_p & l_p & m_p & n_p \\ -l_q & -m_q & -n_q & l_q & m_q & n_q \\ -l_r & -m_r & -n_r & l_r & m_r & n_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \\ x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (5a)$$

또는, $[U] = [T][X]$ (5b)

동일한 코사인 벡터를 이용하여, 케이블에 작용하는 국부 하중, $[R]$ 을 절대 좌표의 하중 $[L]$ 으로 표현할 수 있다 (Eq. 6).

$$\begin{bmatrix} F_{x_a} \\ F_{y_a} \\ F_{z_a} \\ F_{x_b} \\ F_{y_b} \\ F_{z_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_p & -l_q & -l_r \\ -m_p & -m_q & -m_r \\ -n_p & -n_q & -n_r \\ l_p & l_q & l_r \\ m_p & m_q & m_r \\ n_p & n_q & n_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix} \quad (6a)$$

또는, $[L] = [T]^T [R]$ (6b)

Equation (4)를 바탕으로 케이블의 축방향 신장량(e) 과 인장력(P)을 구하면 각각, Eq. 7 그리고 8과 같다.

$$e = \sqrt{(L_0 + u)^2 + v^2 + w^2} - L_0 \quad (7)$$

$$P = P_0 + (EA)/L_0 \times e \quad (8)$$

여기서, P_0 , E 그리고 A 는 케이블에 가해지는 인장력, 탄성계수 그리고 단면적을 각각 나타낸다. 기하학적 비선형성이 고려된 케이블의 힘과 변위 관계식에

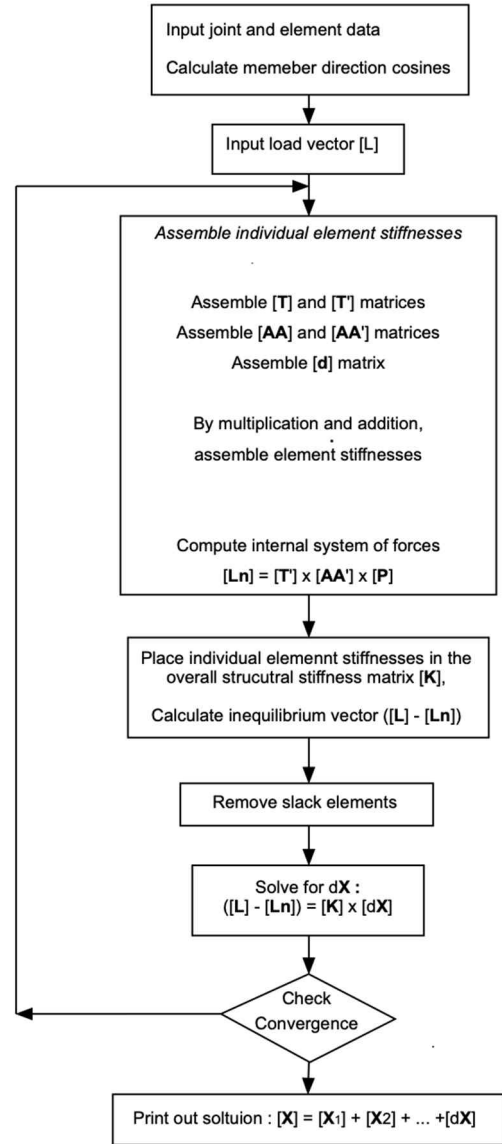


Fig. 9 Flowchart of Cable Structure Analysis

서 선형화된 관계식을 찾기 위해, 신장량 그리고 케이블에 작용하는 힘에 대한 변분(variation)을 구하면 각각 Eq. (9) 그리고 Eq. (10)과 같이 표현된다.

$$[\delta e] = [AA] \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta v \\ \delta w \end{bmatrix} \quad (9a)$$

$$[AA] = \begin{bmatrix} L_0 + u & v & w \\ L_0 + e & L_0 + e & L_0 + e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta v \\ \delta w \end{bmatrix} \quad (9b)$$

$$[\delta R] = \{ [AA]^T (EA/L_0) [AA] + [d] \} [\delta U] \quad (10a)$$

$$[\mathbf{d}] = \begin{bmatrix} \frac{P(v^2 + w^2)}{(L_o + e)^3} & \frac{-Pv(L_o + u)}{(L_o + e)^3} & \frac{-Pw(L_o + u)}{(L_o + e)^3} \\ \frac{-Pv(L_o + u)}{(L_o + e)^3} & \frac{P((L_o + u)^2 + w^2)}{(L_o + e)^3} & \frac{-Pvw}{(L_o + e)^3} \\ \frac{-Pw(L_o + u)}{(L_o + e)^3} & \frac{-Pvw}{(L_o + e)^3} & \frac{P((L_o + u)^2 + v^2)}{(L_o + e)^3} \end{bmatrix} \quad (10.b)$$

Equations (9)과 (10) 그리고 방향 코사인 벡터를 이용하면, 절대좌표의 케이블 증분(incremental) 강성 행렬을 얻을 수 있다. Equation (11)은 증분 형태의 힘과 변위의 관계식을 나타내고 Eq. (12)는 케이블 요소의 강성행렬을 나타낸다.

$$[\delta \mathbf{L}] = [\mathbf{K}][\delta \mathbf{X}] \quad (11)$$

$$[\mathbf{K}] = [\mathbf{T}]' \left\{ [\mathbf{A}\mathbf{A}]' (EA/L_o) [\mathbf{A}\mathbf{A}] + [\mathbf{d}] \right\} [\mathbf{T}] \quad (12)$$

증분 형태의 힘-변위 관계식에서 Newton-Raphson 방법을 적용하여 비선형 케이블 방정식의 해를 구할 수 있다. Figure 9는 비선형 케이블 방정식의 해석 순서도를 보여주고 있다. 선형화된 강성행렬을 이용하여 내력과 외력의 차이를 구하고, 케이블이 압축 하중을 받게 되면 처짐으로 판단하고 요소의 강성을 제거한다.

비선형 케이블 변형 해석식을 살펴보았다. 케이블은 초기 장력을 받고 있고 평평한 상태에서 횡방향(transverse) 집중 하중을 받고 있다. 케이블 비선형 방정식은 참고문헌 [15]에 잘 정리되어져 있고, Eq. (13)과 같다.

$$\mathbf{w} = \frac{1}{(1+\mathbf{h})} \left\{ (1-\mathbf{x}_1)\mathbf{x} - \frac{\mathbf{h}}{2\mathbf{P}}\mathbf{x}(1-\mathbf{x}) \right\}, \text{ for } 0 \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_1 \quad (13a)$$

$$\mathbf{w} = \frac{1}{(1+\mathbf{h})} \left\{ \mathbf{x}_1(1-\mathbf{x}) - \frac{\mathbf{h}}{2\mathbf{P}}\mathbf{x}(1-\mathbf{x}) \right\}, \text{ for } \mathbf{x}_1 \leq \mathbf{x} \leq 1 \quad (13b)$$

여기서, $\mathbf{w} = w/(P_z l/H)$, $\mathbf{h} = h/H$ 그리고 $\mathbf{x} = x/l$ 는 무차원 상수이고, w 는 케이블의 횡방향 변형, P_z 는 횡방향 집중하중, mg 는 단위 길이당 케이블의 무게, l 은 케이블의 길이, H 는 케이블에 작용하는 초기 장력 그리고 x 는 케이블 길이방향 위치를 나타낸다. 상수 \mathbf{x}_1 은 하중이 가해지는 무차원 위치 그리고 \mathbf{h} 는 Eq. (14)와 같이 표현된다.

$$\mathbf{h} = (A^{1/3} - 1/3)^2 / A^{1/3} \quad (14a)$$

$$A = -q/2 + (q^2/4 + p^3/27)^{1/2} \quad (14b)$$

여기서, $p = -1/3$, $q = -2/27 - \lambda^2 \mathbf{x}_1(1-\mathbf{x}_1)\mathbf{P}^2/2$,

$\lambda^2 = (mgl/H)^2 / (H/EA)$, $\mathbf{P} = P_z/mgl$, E 는 케이블의 탄성계수 그리고 A 는 케이블의 단면적이다.

Figure 10은 집중하중을 받는 케이블의 변형을 해석해와 본 연구에서 개발한 유한요소해석 결과 비교를 보여주고 있다. 케이블의 단위 길이 당 무게, $mg = 1 \text{ N/m}$, 초기 장력 $H = 30 \text{ N}$, 케이블 길이, $l = 1 \text{ m}$, 케이블의 탄성계수, $E = 70 \text{ GPa}$ 그리고 단면적 $A = 7.85 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 를 사용하였다. 횡방향 하중에 따른 케이블의 비선형 거동 특성이 잘 예측됨을 알 수 있다. 초기 장력(H)의 변화에 따른 케이블의 변형 형상을 Fig. 11에서 보여주고 있다. 횡방향 집중하중, $P_z = 5 \text{ N}$ 이 무차원 위치, $\mathbf{x}_1 = 0.5$ 에 가해질 때, 초기 장력을 20 N , 60 N 그리고 120 N 으로 변화시켰다. 장력이 증가함에 따라 케이블의 강성이 증가하는 것을 알 수 있다.

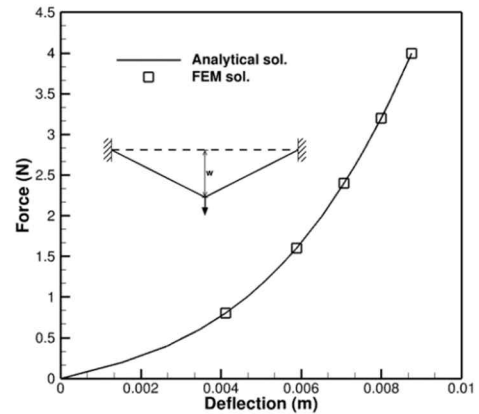


Fig. 10 Nonlinear Deformation of the Cable

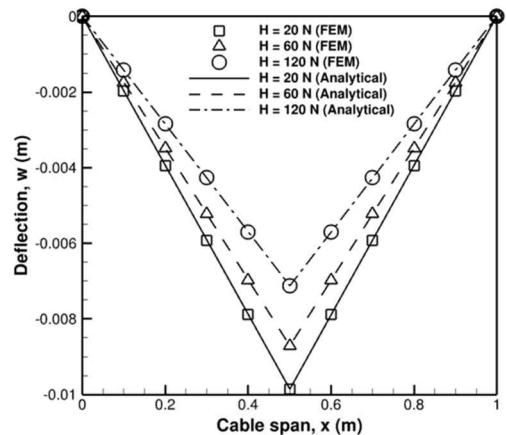


Fig. 11 Cable Deflections with Various Tensions

3. 구조 유연도를 고려한 케이블 네트워크 설계

3.1 Ring Truss Model

다각형 전개 구조물의 효과적인 강성 설계를 위하여, 3차원 공간의 변위(u, v, w)와 회전(θ, ϕ, ψ)을 고려할 수 있는 프레임(frame) 요소를 이용하여 유한요소 설계를 진행하였다. 2개의 노드(node)와 12개의 자유도를 가지는 요소를 사용하였고, Eq. (15)는 요소가 가지는 자유도를 나타낸다.

$$\{\mathbf{d}^e\} = \{u_1 \ v_1 \ w_1 \ \theta_1 \ \phi_1 \ \psi_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ \theta_2 \ \phi_2 \ \psi_2\}^T \quad (15)$$

유한요소 정식화는 참고문헌[13]에서 자세히 유도되어져 있고, 요소의 강성 행렬은 Eqs. (16)와 (17)로 표시된다.

$$[\mathbf{K}^e] = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11}^e & \mathbf{K}_{12}^e \\ \mathbf{K}_{21}^e & \mathbf{K}_{22}^e \end{bmatrix} \quad (16a)$$

$$[\mathbf{K}_{11}^e] = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & c_1 & 0 & -c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & 0 & 2c_3 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 2b_3 \end{bmatrix} \quad (16b)$$

$$[\mathbf{K}_{12}^e] = [\mathbf{K}_{21}^e]^T = \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b_1 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & -c_1 & 0 & -c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_2 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & -b_2 & 0 & 0 & 0 & b_3 \end{bmatrix} \quad (16c)$$

$$[\mathbf{K}_{22}^e] = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & -b_2 \\ 0 & 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_2 & 0 & 2c_3 & 0 \\ 0 & -b_2 & 0 & 0 & 0 & 2b_3 \end{bmatrix} \quad (16d)$$

$$a_1 = \frac{EA}{l}, \quad a_2 = \frac{GJ}{l}, \quad b_1 = \frac{12EI_z}{l^3}, \quad b_2 = \frac{6EI_z}{l^2}, \quad b_3 = \frac{2EI_z}{l},$$

$$c_1 = \frac{12EI_y}{l^3}, \quad c_2 = \frac{6EI_y}{l^2}, \quad c_3 = \frac{2EI_y}{l} \quad (17)$$

여기서, l , A , E , G 그리고 J 는 요소의 길이, 단면적, 탄성계수, 전단계수 그리고 극관성모멘트를 각각 나타낸다. I_x , I_y 그리고 I_z 는 각각 x, y, z축에 대한 관성모멘트이다.

12 각형의 폐곡선을 갖는 지름 8 m 반사판 링 트러스 구조를 모델링하였다. Figure 12는 전개된 반사판 링 구조의 1차 고유모드와 고유진동수를 보여주고 있다. 전개구조 중 1 개의 수직 부재만을 고정시킨 경계 조건을 사용하였다. Z축 회전 비틀림과 굽힘이 결합된 모드형상을 보여주고 있고, 상용프로그램 ABAQUS 해석 결과와 유사함을 알 수 있다.

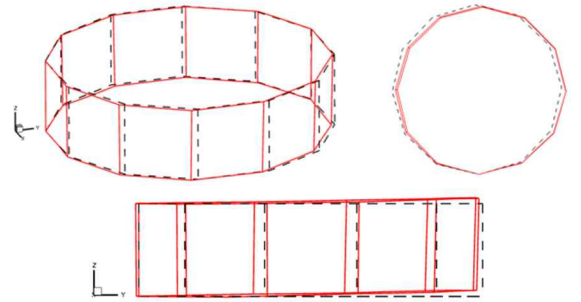


Fig. 12 Fundamental Mode Shape of Deployed Ring Structure
($f_1=0.82$ Hz [present], $f_1=0.85$ Hz [ABAQUS])

3.2 Form-finding Analysis of the Cable Networks

트러스 링 구조 그리고 케이블 네트워크의 유연도를 고려하여 케이블 네트워크 형상 설계 해석을 진행하였다. 전개 완료된 트러스 링 구조는 케이블 네트워크에 장력을 가해주어 반사판은 정확한 형상을 유지하게 된다.

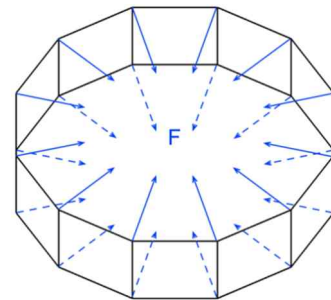


Fig. 13 Ring Truss subjected to Compression

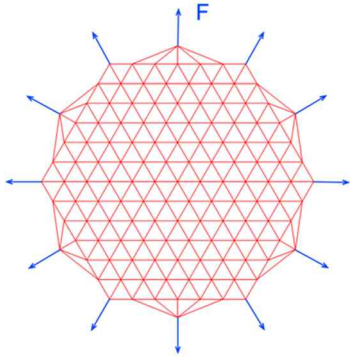


Fig. 14 Cable Net subjected to Tension

전개가 완료된 상황에서는 트러스 링 구조는 반사판 중심의 반경 방향의 힘을 받게 되고 (Fig. 13), 앞면 그리고 뒷면의 케이블 네트는 Fig. 14와 같은 인장력을 받게 된다. 힘, $F=100\text{ N}$ 이 각각 트러스 링 구조 그리고 케이블 네트에 작용 했을 때, 정적 해석을 진행하였다. Figure 15는 지름 8 m 트러스 링 구조의 변형 형상을 보여주고 있다. 경계조건은 Fig. 12와 동일하게 전개구조 중 1 개의 수직 부재만을 고정시켰다. 하중은 대칭적으로 가해지지만, 정해진 경계조건이 전역(global) 좌표계를 기준으로 대칭에 위치하지 않아 비틀림이 발생하고 링 구조 반경 방향으로 변형이 발생함을 알 수 있다.

Figure 7에서 제시한 형상 설계 방법을 이용하여, 지름 8 m 반사판의 케이블 네트를 설계하였다. Figure 16은 장력, $F=100\text{ N}$ 이 가해질 때, 케이블의 분할 개수 (n)에 따른 케이블의 변형 형상을 보여주고 있다. 케이블 탄성계, $E=20\text{ GPa}$ 그리고 단면적, $A=1\text{ mm}^2$ 을 사용하였다. 분할 개수 (n)가 6 그리고 12인 경우 케이블 네트의 구조 강성이 증가되어 하중이 가해지는 경계지역에서만 케이블 변형이 발생하고 반사판 대부분을 이루고 있는 지역에서는 미세한 변형이 발생함을 관찰할 수 있다.

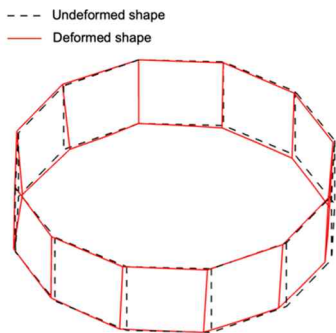
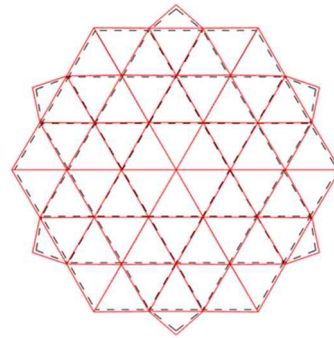


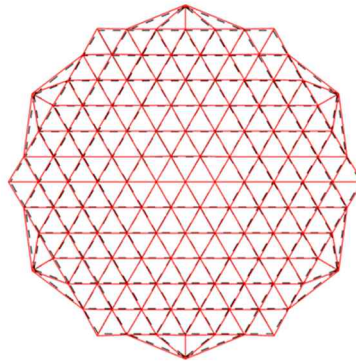
Fig. 15 Deformed Configuration of the Ring Truss

--- Undeformed shape
— Deformed shape



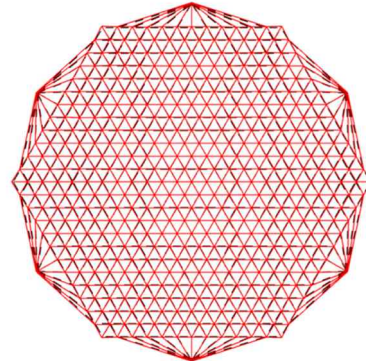
(a) In case of subdivision number, $n = 3$

--- Undeformed shape
— Deformed shape



(b) In case of subdivision number, $n = 6$

--- Undeformed shape
— Deformed shape



(c) In case of subdivision number, $n = 12$

Fig. 16 Deformed Shape with respect to Subdivision Numbers

트러스 링 구조 모델 그리고 케이블 네트 모델을 연계하여 정적 구조해석을 진행하였다. 가해지는 하중, $F=100\text{ N}$ 은 고정시키고, 케이블의 늘어난 길이 (d_c) 그리고 트러스 링 구조가 반경방향으로 줄어든 길이

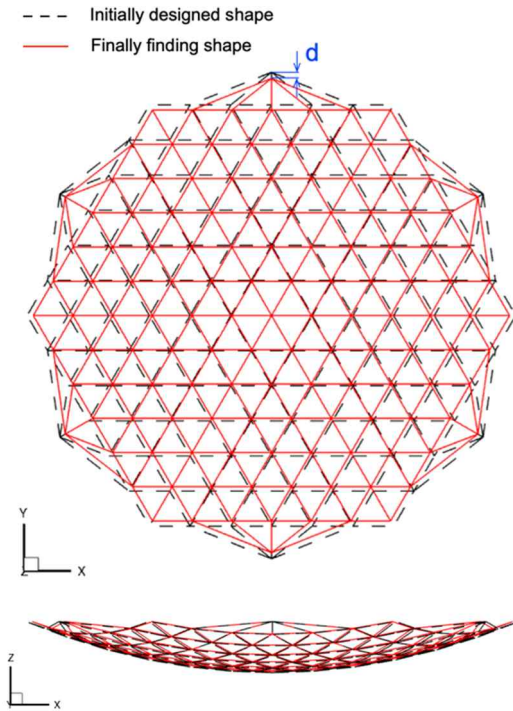


Fig. 17 Comparison of Form-finding Results

(d_r)를 바탕으로, 반복 계산을 통한 수렴된 설계 변수 ($d = d_c - d_r$)를 고려하여 케이블 네트워크 설계를 진행하였다. 케이블 분할 개수, $n=3$ 인 경우는 케이블의 큰 변형이 일어나고 $n=12$ 인 경우는 케이블 부재의 증가로 시스템이 복잡해지는 단점이 있어, 분할 개수, $n=6$ 을 선택했다.

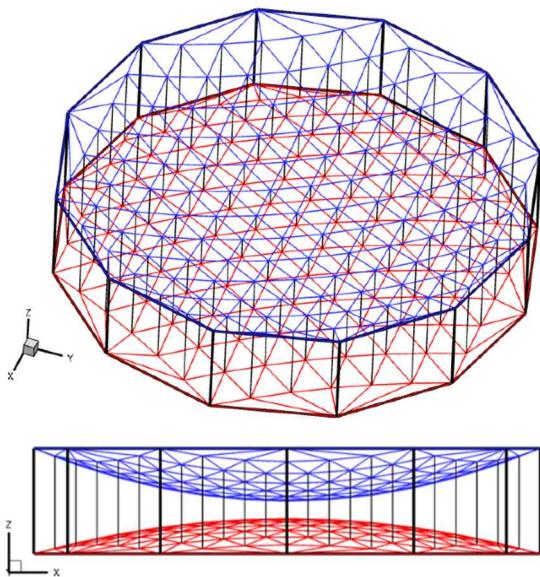


Fig. 18 Finally Designed Cable Networks

트러스 링 구조와 케이블 네트워크의 반복적인 변형 해석을 통하여 주어진 장력에 따른 수렴된 케이블 네트워크 변형 형상을 구할 수 있다. 수렴된 변형 형상을 고려하여 케이블 네트워크의 형상설계를 수행하였다 (Fig. 17). 전개된 반사판에 가해지는 장력, 케이블 네트워크 그리고 트러스 링 구조의 유연도를 고려하면 초기 파라볼라 반사판 형상에서 수렴된 설계변수(d)가 고려되어야 정확한 반사판 안테나 형상이 결정됨을 알 수 있다. Figure 18은 장력에 의한 트러스 링 그리고 케이블 네트워크의 구조 유연도를 고려한 메쉬 반사판 안테나의 케이블 네트워크 최종 형상을 보여주고 있다.

4. 결론

반사판의 기하학적 특성을 고려한 케이블 네트워크 형상 설계 방법론을 제시하고 설계된 형상의 실효성을 검증하였다. 케이블 네트워크는 강성과 초기 장력이 가해지고 있고, 기하학적 비선형성을 고려한 케이블의 유한요소 해석 모델을 개발하였다. 케이블에 압축 하중이 가해지면, 처짐 현상이 일어나고 더 이상 구조적인 역할을 하지 못한다. 트러스 링과 케이블 네트워크에 가해지는 장력, 케이블 네트워크 그리고 링 구조의 유연도를 고려하여, 케이블 네트워크의 최종 형상을 제시하였다.

케이블의 분할 개수가 증가함에 따라, 케이블 네트워크의 구조 강성이 증가한다. 하지만, 케이블 부재의 증가에 따른 구조 시스템의 복잡성이 존재한다. 케이블 네트워크에 가해지는 초기 장력에 의해 정확한 파라볼라 반사판 형상이 유지된다. 케이블에 작용하는 장력, 트러스 링 그리고 케이블 네트워크 구조의 유연도를 고려하여, 파라볼라 반사판 안테나의 케이블 네트워크를 설계할 필요성이 있다.

후 기

이 연구는 LIG NEX1 산학협력과제 지원으로 연구되었음

References

- [1] A.G. Tiber, "Deployable tensegrity structures for space applications," *Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology*, Department of Mechanics, Stockholm, Sweden, 2002.
- [2] C.J. Magenot, J. Saniago-Prowald, and K. Klooster, "Large reflector antenna working group final report," *ESA Technical Note*, TEC-EEA, 2010.
- [3] K. Miura and Y. Miyazaki, "Concept of the tension truss

- antenna,” *AIAA Journal*, vol. 28, no. 6, pp. 1098-1104, 1990.
- [4] L. Datashvili, “Review and evaluation of the existing designs/technologies for space large deployable apertures,” *International Scientific Conference on Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas*, Tbilisi, Georgia, 2009.
- [5] A. Robederer, *Historical overview of the development of space antennas*, *Space Antenna Handbook*, Wiley, New York, pp. 250-307. 2012.
- [6] Astro Aerospace, AstroMesh™ deployable reflector data sheet DS-409 07/04, Northrop Grumman Space Technology, 2004.
- [7] H.-J. Schek, “The force density method for form finding and computation of general networks,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, pp. 115-134, 1974.
- [8] L. Tuanjie, J. Jie, D. Hanqing, L. Zhanchao, and W. Zuowei, “Form-finding method for deployable mesh reflector antennas,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 26, no. 5, pp. 1276-1282, 2013
- [9] P. Li, C. Liu, Q. Tian, H. Hu, and Y. Song, “Dynamics of a deployable mesh reflector of satellite antenna: from-finding and modal analysis,” *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, vol. 11, 041017, 2016
- [10] B. Yang, H. Shi, M. Thomson, and H. Fang, “Optimal design of initial surface profile of deployable mesh reflector via static modeling and quadratic programming,” *50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, May 2009, AIAA 2009-2173.
- [11] H. Shi, S. Yuan and B. Yang, “New methodology of surface mesh geometry design for deployable mesh reflector,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 55, no. 2, pp. 266-281, 2018.
- [12] P. Fanning and L. Hollaway, “The deployment analysis of a large space antenna,” *International Journal of Space Structures*, vol. 8, no. 3, 1993.
- [13] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, 1982.
- [14] A. Jennings, “Frame analysis including change of geometry,” *Journal of the Structural Division*, vol. 94, no. 3, pp. 627-644, 1968.
- [15] M. M. Irvine, *Cable structures*, MIT Press, pp. 47-57, 1981.