

# CRTS 반사판의 구조적 인자가 형상오차에 미치는 영향

## The Influence of the Structural Parameters on the Shape Errors of CRTS Reflector

송 원 근†

Song, Weon-Keun

김 승 덕\*

Kim Seung-Deog

(논문접수일 : 2002년 8월 1일 ; 심사종료일 : 2003년 2월 24일)

### 요 지

연속적으로 이루어지는 제작·조립 단계에서 변위하중을 받는 CRTS 반사판의 초기 정적평형상태를 결정하기 위하여 변위증분법을 사용하여 기하학적 비선형 유한요소 해석기법을 제시하고 반사판의 이상적인 형상과 실 제작 형상과의 차이, 즉 형상오차에 케이블 및 구조적 인자가 미치는 영향에 관한 연구를 수행한다. 본 연구 결과는 Galerkin method와 NASS 98 Program을 사용하여 해석한 결과와 비교·검증하여 그 타당성을 입증한다.

**핵심용어** : CRTS 반사판, 기하학적 비선형, 유한요소법, 변위증분법, 초기 정적평형상태, 형상오차

### Abstract

A geometric non-linear finite element formulation of CRTS reflector subjected to displacement loads, corresponding to the successional assembly steps of the reflector, is presented in order to determine the initial static equilibrium state based on the displacement incremental method. Parametric analyses of the influence of cables and mechanical properties of the reflector on the shape error between reference and equilibrium surfaces have been studied. These results of the present study are compared with the others using Galerkin method and NASS 98 program to demonstrate the feasibility.

**Keywords** : CRTS(Collapsible Rib-Tensioned Surface) reflector, geometric non-linearity, finite element method, displacement incremental method, initial static equilibrium state, shape error

## 1. 서 론

세계 최초의 우주 발사체가 제작되고 우주 정거장이 건설된 이래로 인류에게 있어 우주 공간에서 사용되는 안테나 반사판은 커다란 관심의 대상이 되어왔다. 대형 안테나 반사판은 인공위성의 통신, 우주의 전파측정, 레이더의 추적 등을 위해 사용이 증가되고 있는 추세이고 그 중에서도 새로운 개념의 CRTS(Collapsible Rib-Tensioned Surface) 반사판 형태의 안테나는 매우 중요한 위치를 차지하고 있다.

CRTS 반사판은 그림 2<sup>1)</sup>에서 보여주고 있듯이 지름방향으로 배치된 압축부재(radial curved elastic ribs)와 이와 연결되어 전파를 하나의 초점에 모아 주는 역할을 담

당하는 metallic mesh 그리고 반사판의 기하학적 형상의 정확도 확보를 목적으로 배치된 케이블 등으로 구성되어 있다.

우주 발사체가 우주공간의 본 궤도에 이르면 발사체의 내부에 접혀서 탑재되어 있던 인공위성은 발사체와 분리되고 안테나 반사판은 그 기능을 수행하기 위하여 설계된 형상으로 펼쳐지게 된다. 그림 3<sup>1)</sup>은 이와 같은 작동기저를 나타낸다.

반사판이 기능을 수행하기 위해 펼쳐질 때 내부 고정단에 압축부재가 고정·부착되어 회전함으로써 mesh에 일정한 인장력을 형성시켜준다. 압축부재와 mesh와의 상호작용으로 인해 이웃한 두 압축부재 사이에서 원 둘레 방향과

† 책임저자. 정회원·한국시설안전기술공단 기술개발실 과장  
전화: 031-910-4128; FAX: 031-910-4181  
E-mail : song98@kistec.or.kr

\* 정회원·세명대학교 건축공학과 조교수

• 이 논문에 대한 토론을 2003년 6월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 2003년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.



그림 1 CRTS reflector antenna for a satellite<sup>1)</sup>

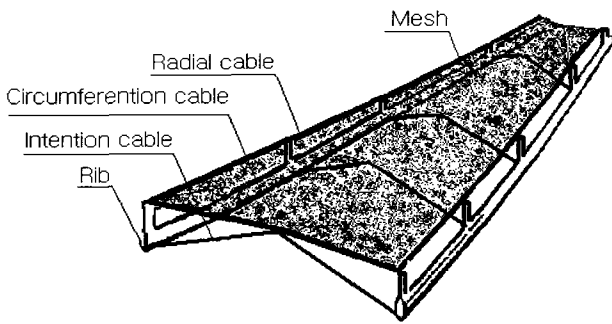


그림 2 A sector of the CRTS reflector

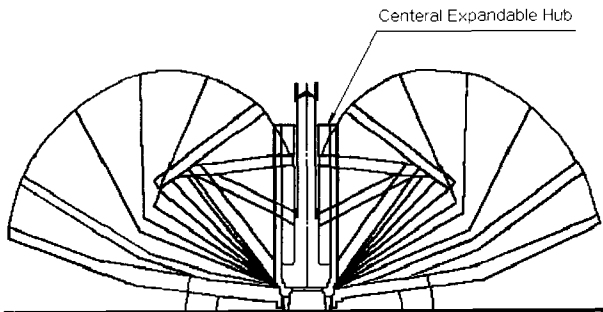


그림 3 Deployable & folding mechanism of CRTS reflector

지름방향으로 곡면이 형성되고 이때 반사판의 이상적인 기하학적 형상(reference surface)과 제작시 형성되는 기하학적 형상(equilibrium surface) 사이에 형상오차가 발생한다. 이렇게 발생된 형상오차는 안테나 송·수신시 radiation pattern의 왜곡(distortion)현상과 phase error를 발생시켜 안테나의 기능에 중요한 문제를 야기 시킨다. 따라서 안테나 반사판의 형상오차를 최소화하는 것은 대단히 중요한 문제이다. 안테나가 우주공간에서 상용될 때 태양풍, 태양 복사에너지 등 다양한 외적요인으로 인해 2차 변형이 발생되므로 이를 정확히 예측하기 위해서 초기 정적평형상태를 결정하는 문제는 중요한 의미를 지니며 설계를 위한 예비 단계에서도 매우 의미 있는 작업이다.

Lai<sup>2)</sup> 등은 케이블 요소와 압축부재의 변형효과를 배제한 안테나 반사판에 대해 초기 정적평형상태 결정을 위한 수치해석을 수행하였으며 서삼열<sup>3)</sup>은 변위증분법을 막구조에 적용하였고 한상울과 이경수<sup>4)</sup>는 내력밀도법을 사용하여 막구조의 초기 정적평형상태를 결정하였다. Schek<sup>5)</sup>은 내력밀도법을 케이블 구조에 적용하였으며 김문영<sup>6)</sup>등과 Papadrakakis<sup>7)</sup>는 탄성현수선 케이블 요소를 사용하여 케이블의 초기형상을 결정하기 위해서 dynamic relaxation 방법을 활용하였다. 또한 김문영과 김남일<sup>8)</sup> 그리고 Chang<sup>9)</sup> 등은 등매개 다절점 곡선케이블 요소를 사용하여 케이블 네트워크 수치해석을 수행하였으며 변위증분법의 일반구조에 대한 적용 scheme을 제시하였다. 그밖에 Peyrot와 Goulois,<sup>10)</sup> Judd와 Wheen,<sup>11)</sup> Argyris와 Scharpf<sup>12)</sup>은 케이블 구조에 대해 초기 정적평형상태 결정을 다양한 방법으로 수행하였다. 그리고 Schrefler<sup>13)</sup>등은 Total Lagrangian formulation을 사용하여 보와 케이블의 혼합구조를 Haber와 Abel<sup>14)</sup>은 케이블로 강화된 막구조에 대해서 기하학적 비선형 수치해석을 수행하였다. Tomoshi<sup>15)</sup>는 직교 이방성 membrane의 2차원 면내 torsion에 의해 발생하는 주름과 응력 분포와의 관련성 및 주름의 형태를 결정하는 수치해석적 방법을 제시하였다. 그러나 현재까지 안테나 반사판의 초기형상 탐색에 관해 이루어진 연구 내용은 각각의 요소부재에 대해 개별적으로 이루어지거나 케이블 효과가 고려되지 않은 형상의 수치해석적 연구가 진행되었다. 따라서 본 연구는 등방성 metallic mesh와 지름케이블(radial cable), 바깥원둘레케이블(circumferential cable) 그리고 이면케이블(intention cable)의 변형효과를 포함하는 CRTS 반사판에 대해 metallic mesh와 케이블의 재료적 선형과 기하학적 비선형 이론을 근거로 초기 정적평형상태 결정을 위한 유한요소 수치해석을 수행하였다. 이를 토대로 반사판의 주요 구조적 인자가 초기 정적평형상태 형상오차에 미치는 영향과 3가지 형태의 케이블을 동시에 사용할 경우 안테나 반사판의 형상오차 변동 추이를 살펴보았다. 이때 사용된 유한요소는 3절점과 절점당 3자유도를 갖는 3차원 삼각형 막요소와 2절점과 절점당 3자유도를 갖는 3차원 케이블 요소이다. 수치해석 결과는 Galerkin method와 NASS 98 프로그램을 이용하여 얻어진 결과와 비교·검증함으로써 제시된 이론 및 방법의 타당성을 입증하였다.

## 2. 이론적 고찰

CRTS 반사판의 유연구조물에 한해 비선형 유한요소해석을 수행하기 위한 방법<sup>16)</sup>으로 Total Lagrangian formulation에 의한 3차원 평형방정식을 부재좌표계에 대해서 식(1) 같이 정의할 수 있다.

$$\{\Psi(q)\} = \int \{\delta \varepsilon^*\}^T \cdot \{\sigma\} d^n V - \{R\} \quad (1)$$

여기서  $\{\sigma\}$ 는 2nd Piola-Kirchhoff stress,  $\{\delta \varepsilon^*\}$ 는 Green-Lagrange strain,  $\{R\}$ 은 자중 및 외력 그리고 반력의 합을 성분으로 하고 이들의 상대적인 비를 나타내는 절점력 벡터를 의미한다. 식(1)에서 응력과 변형도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{\sigma\} = [D] \cdot (\{\varepsilon^*\} - \{\varepsilon_n\}) + \{N_n^*\} \quad (2)$$

$$\{\varepsilon^*\} = \{\varepsilon_n\} + \{\varepsilon_L\} \quad (3)$$

여기서  $[D]$ 는 재료정수 행렬을  $\{\varepsilon_n\}$ 과  $\{N_n^*\}$ 는 각각 초기 변형률과 초기 응력값을 나타내며 케이블의 경우 재료정수 행렬은 탄성계수  $E_C$ 로 대치된다. 변형도는 식(4a) 그리고 (4b)와 같이 선형과 비선형을 나타내는 2차항의 합으로 표현되고 케이블 요소의 경우 1축을 부재좌표축으로 정의하면 2축에 관련된 항은 제거된다.

$$\{\varepsilon_n\} = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_1 + \gamma_2\}^T \quad (4a)$$

$$\{\varepsilon_L\} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{2}(\varepsilon_1^2 + \gamma_1^2 + \theta_1^2) \\ \frac{1}{2}(\varepsilon_2^2 + \gamma_2^2 + \theta_2^2) \\ \varepsilon_1 \cdot \gamma_2 + \varepsilon_2 \cdot \gamma_1 + \theta_1 \cdot \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (4b)$$

여기서 막요소와 케이블요소에 대해 Lagrangian 다항식을 형상함수로 사용하여 요소내 임의의 변위를 정의하고 이를 식(2)와 (3)에 대입하면 최종적으로 식(1)의 평형방정식으로부터 고차항을 생략하고 부재좌표계에서 탄성 강도행렬  $[k_E]_F$  및 응력의 함수인 기하학적 강도행렬  $[k_N]_F$ 을 얻을 수 있으며 식(1)을 미분하여 부재좌표계로부터 접선강도행렬을  $[k_T]_F$ 를 구한 후 축 회전시켜 전체좌표계에서 식(1)의 함수값과 접선강도행렬  $[K_T]_F$ 을 식(5a)와 같이 정의한다. 이때 유연구조체는 매우 경량으로 자중을 무시할 수 있으며 CRTS 반사판 제작시 형상을 변위하중으로 제어하므로 절점력 벡터  $R$ 값에서 외력 하중벡터 값을 뺀다.

$$[K_T]_F = [K_E]_F + [K_N]_F + [K_L]_F \quad (5a)$$

여기서,

$$[K_E]_F = [T^T]_M \cdot [k_E]_M \cdot [T]_M + [T^T]_C \cdot [k_E]_C \cdot [T]_C \quad (5b)$$

$$[K_N]_F = [T^T]_M \cdot [k_N]_M \cdot [T]_M + [T^T]_C \cdot [k_N]_C \cdot [T]_C \quad (5c)$$

$$[K_L]_F = [T^T]_M \cdot [k_L]_M \cdot [T]_M + [T^T]_C \cdot [k_L]_C \cdot [T]_C \quad (5d)$$

소문자  $\{k\}$ 와 대문자  $\{K\}$ 는 각각 부재좌표계와 전체좌표계의 강도행렬을 의미하며 행렬  $[T]$ 는 부재좌표계에서 전체좌표계로의 좌표변환 행렬을 나타낸다. 그리고 아래첨자 'E', 'N' 및 'L'은 탄성 강도행렬과 각각 응력 및 변위의 함수인 기하학적 강도행렬을 의미하며 아래첨자 'F', 'M' 그리고 'C'는 차례대로 유연구조부재, membrane 그리고 케이블을 가리킨다.

### 3. CRTS 반사판의 초기 정적평형상태 결정

#### 3.1 변위증분법

기하학적 비선형 유한요소해석을 수행하는 경우에 변위증분법<sup>16)</sup>은 변위를 유한한 개수의 변위증분 단계로 분할하고 각 변위증분 단계마다 비선형 연립방정식의 해법으로 Newton-Raphson 반복법을 적용하여 형상의 평형상태를 찾는다. 하중증분과라미터( $\Delta \lambda$ )를 산정하기 위한 증분평형방정식(6)은 다음과 같다.

$$[K_T]_F^i \cdot \{\Delta q\} = \Delta \lambda^{i-1} \cdot R + \Delta B^i \quad (6)$$

여기서, 윗첨자 'i'와 'i+1'은 각각 'i'와 'i+1'번째 증분단계를 나타내며  $\{\Delta q\}$ 는 절점증분변위벡터를  $\Delta B^i$ 는 i번째 증분단계의 내력과 외력 사이의 불평형력을 의미한다. 이때 절점증분변위벡터  $\{\Delta q\}$ 의 k번째 요소 크기가 증분단계의 반복계산 횟수를 고려하여 일정한 크기를 갖도록 결정하면 식(7)로부터 i+1 단계의 k번째 증분하중과라미터 값을 다음의 구속 조건식으로부터 구할 수 있다.

$$\Delta \lambda_k^{i+1} = \frac{([K_T]_F^i \cdot \{\Delta q\}^{i+1})_k - \Delta B_k^i}{R_k} \quad (7)$$

이로부터 절점변위벡터 식(8)과 절점력벡터 식(9)를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\{q^{i+1}\} = \{q^i\} + \{\Delta q^{i+1}\} \quad (8)$$

$$\{R^{i+1}\} = \{R^i\} + \Delta \lambda^{i+1} \cdot R \quad (9)$$

여기서,  $R$ 은 비례하중모드를 의미한다.

### 3.2 제작·조립단계 및 수치해석 알고리즘

초기 정적평형상태를 결정하기 위한 수치해석은 안테나 반사판의 제작·조립과정을 고려하여 수행해야 한다. 따라서 CRTS 반사판의 제작·조립과정을 크게 4단계로 요약하고 이에 상응하는 수치해석 알고리즘을 3.1절의 변위증분법을 사용함으로써 다음과 같이 제시한다.

- 1) Initial stage : 2차원 평면상태에서 변위하중의 재하 시 탄성 강도행렬만을 사용하여 유연부재의 절점변위벡터를 결정 한 후 이로부터 면내력을 정의하고 추가적으로 응력의 함수인 기하학적 강도행렬을 고려하여 구조물을 3차원으로 전이시켜 선형단계에서 초기 정적평형상태를 찾는다. 그리고 초기 정적평형상태를 형성한 반사판에서 선형방정식으로부터 하중 모드 R 벡터값을 결정한다.
- 2) First stage : 구조물을 안정화시키기 위해 매우 중요한 단계로서 지름케이블과 바깥원둘레케이블을 갖는 2차원 평면 metallic mesh의 바깥 원둘레를 따라 압축부재가 배치될 포인트에 일정한 크기의 수평지름방향 변위하중을 재하하여 metallic mesh에 면내력을 부여한다. 그 후 2차원 평면상태에서 변형의 형태를 유지하기 위해 원형의 일시 고정잠금장치(temporary round fixing frame)를 이용하여 바깥 원둘레의 정의된 포인트와 이에 대응되는 수평지름방향의 임의의 지점들을 일정한 간격으로 고정시켜 metallic mesh와 압축부재의 상호작용으로 인해 발생할 반력이 바깥 원둘레에 집중되는 현상을 방지하고 이를 압축부재의 길이를 따라 적절히 분산시켜 압축부재의 최소변형을 유도할 수 있도록 한다. 이를 위해 2차원 평면상태의 유연구조부재에 대해 변위증분 과정을  $n$  회 반복하여 절점변위벡터 및 절점력벡터를 결정한다.
- 3) Second stage : 2차원 평면 변형상태의 metallic mesh에 이면케이블을 추가로 설치하고 압축부재의 길이를 따라 반사판에 수직변위하중을 재하한다. 이를 위해 3차원 상태의 유연구조부재에 대해 변위증분 과정을  $n$  회 반복하여 재차 절점변위벡터 및 절점력벡터를 결정한다.
- 4) Third stage : first stage와 second stage에서 metallic mesh와 케이블이 압축부재와의 상호작용으로 인해 반력을 발생시키고 이는 압축부재의 변형을 유도하여 최종 초기정적평형상태를 유발시킨다. 이를 고려하기 위해서는 second stage 이후에 얻어진 절점력벡터의 반력을 역방향으로 압축부재에 재하시킨다. 이 과정에서

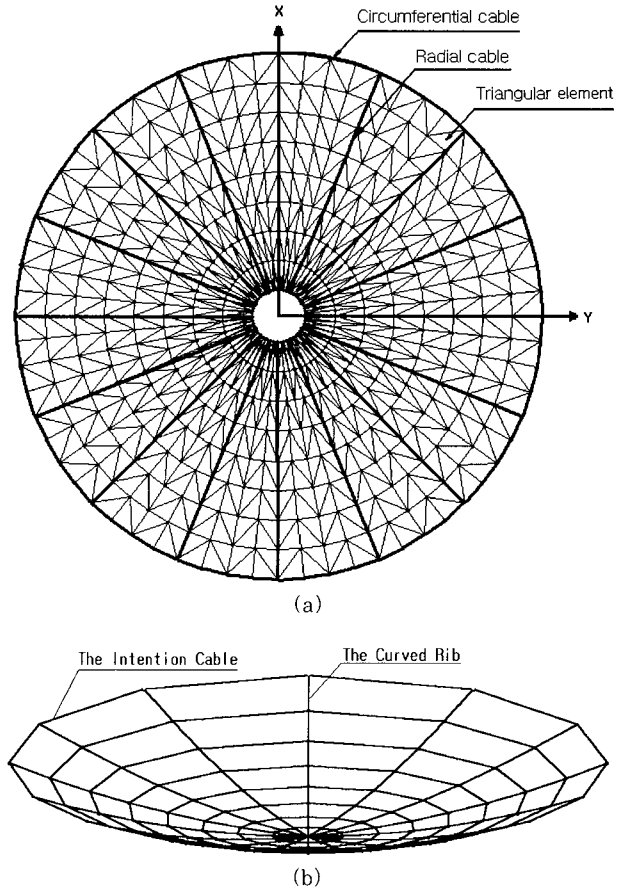


그림 4 FE model of CRTS reflector

변형된 압축부재의 기하학적 형태에 의해 최종적으로 유연부재의 초기 정적평형상태가 결정된다. 이는 first stage, second stage 및 third stage를  $n$  회 반복함으로써 얻어진다. 이때 압축부재가 유연부재에 비해 상대적으로 매우 큰 강성을 갖고 있어 압축부재의 변위가 유연부재의 그것에 비해 상대적으로 매우 작은 경우 이를 생략할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 압축부재의 변위해석은 제외한다.

그림 4는 1,024개의 삼각형 막요소, 128개의 지름케이블 요소, 64개의 바깥원둘레케이블 요소 및 256개의 이면케이블 요소로 이루어진 CRTS 반사판의 FE 모델을 보여주고 있다.

### 3.3 Galerkin method

케이블이 배제되고 압축부재의 변형이 고려되지 않는 단순한 형태의 CRTS 반사판의 초기정적평형상태에 대해 Galerkin method를 사용하여 얻어진 membrane의 수직방향 변위  $W^{(17)}$ 는 식(10)과 같이 정의된다.

$$W = r^2 \frac{H_o}{R_a^2} - H_o \left( \frac{R_i}{R_a} \right)^2 + r^2 \sum B_m \cdot \sin \left( \frac{m \cdot \pi \cdot \beta}{\varphi} \right),$$

$$m = 1, 3, 5, 7 \quad (10)$$

$\frac{T_1}{T_2} = k$ 로 가정하고  $T_1$  및  $T_2$ 를 각각 2차원 평면에서 membrane의 수평지름방향과 이와 수직한 방향의 내면력으로 정의하면 CRTS 반사판의 deflection amplitude  $B_m$ 은 식(11)과 같이 표현할 수 있다.

$$B_m = \frac{8 \left( \frac{H_o}{R_a^2} \right) (k+1)}{m \cdot \pi \left\{ \left( \frac{m \cdot \pi}{\varphi} \right)^2 - 2(k+1) \right\}} \quad (11)$$

식(10)에서 첫 번째 및 두 번째 항은 변형이 발생하지 않는다고 가정한 압축부재들의 기하학적 형상을 나타내며 마지막 항은 이웃하는 압축부재 사이에서 membrane의 기하학적 형상을 반영하고 있다. 여기서,  $r$ 은 반사막의 내부 중심으로부터 지름방향 임의의 지점을  $R_a$ 는 변형 후 반사판의 반지름을  $R_i$ 는 반사판의 내부 고정단 반지름을  $H_o$ 는 내부고정단 밑면으로부터 반사판의 높이를  $\varphi$ 는 이웃하는 압축부재의 사이각을  $\beta$ 는 압축부재와 정의된 원둘레방향 단면과의 사이각을 의미한다.

#### 4. 해석 결과

그림 5는 케이블이 장착되지 않은 반사판의 유한요소 해석으로부터 얻은 선형 및 비선형 수치해석 결과와 Galerkin method의 해를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 CRTS 반사판의 형상은 내부 고정단 부근에서 서로 일치하고 있으며 Galerkin method로부터 얻은 결과는 비선형 수치해석 결과 대비 수직방향 최대 상대 오차율이 8.5% 이내이다. 또한 선형 수치해석과 비선형 수치해

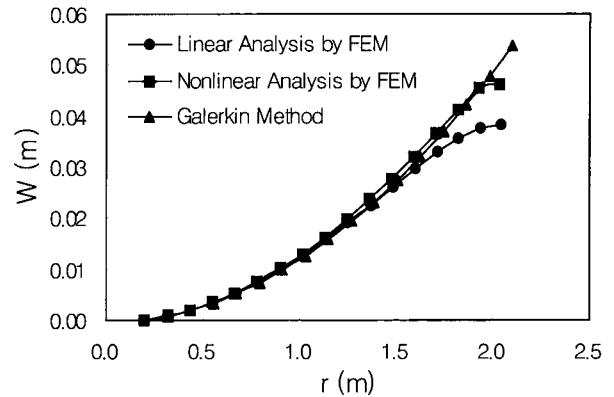


그림 5 Curvatures in radial direction of the reflector with  $\varphi = \frac{\pi}{8}$  at section  $\beta = \frac{\pi}{16}$

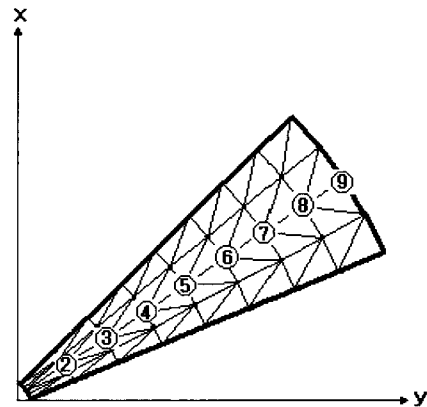


그림 6 Circumferential section numbers for a sector of the reflector

석시 형상오차는 바깥 원둘레에 가까워질수록 비교적 크게 발생하고 있다. 비선형 수치해석 결과 대비 선형 수치해석의 수평지름방향 최대 상대 오차율이 0.4%, 수직방향 최대 상대 오차율이 19.5% 이내로 나타났다.

그림 7은 케이블을 사용하지 않았을 경우에 비해 바깥원둘레케이블이 수평지름방향 상대 오차를 34.2%까지 감소

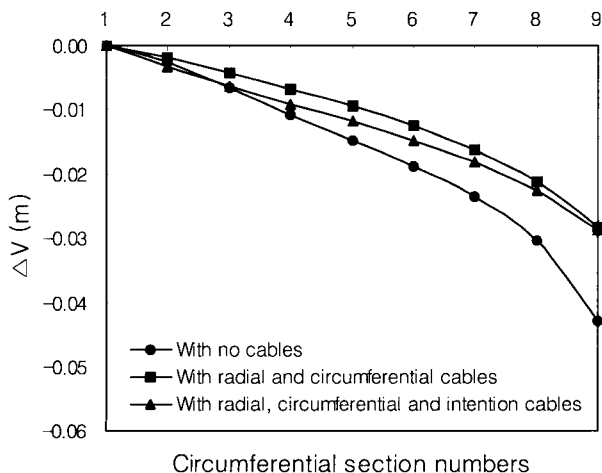
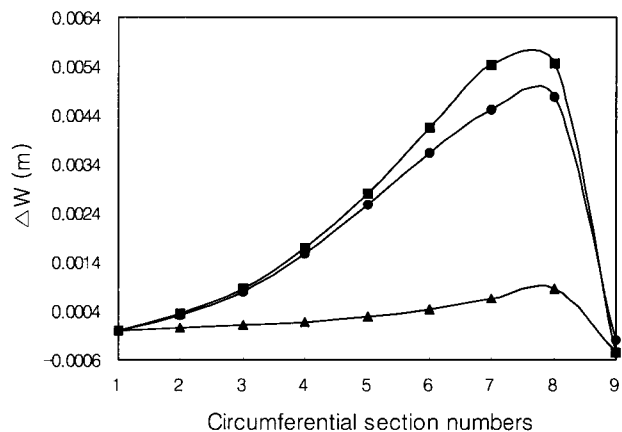


그림 7 Influence of cables on the shape errors of the reflector



시켰으며 바깥원둘레케이블을 사용할 경우 바깥 원둘레 부근에서 수직방향 형상오차가 증가하나 이면케이블을 추가할 경우 수직방향 상대 오차율이 84.3%까지 감소한다는 사실을 보여주고 있다. 그러나 바깥 원둘레 부근에서 계속적으로 발생되고 있는 수직방향 형상오차를 효과적으로 제어하기 위해서는 내부 고정단에 비해 바깥 원둘레 부근에서 상대적으로 큰 강성을 갖는 이면케이블을 사용해야 할 것으로 판단된다.

지름케이블, 바깥원둘레케이블 그리고 이면케이블의 효과를 고려한 안테나 반사판의 수치해석시 본 연구와 NASS 98 program을 사용한 수치해석치를 비교·분석한 결과 본

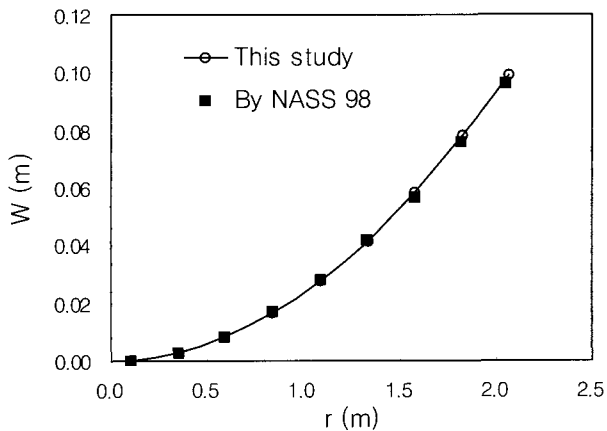


그림 8 Comparison of the solutions of this study with the solutions using NASS 98

연구결과 대비 수평지름방향 최대 상대 오차율이 0.94%, 수직방향 최대 상대 오차율이 4.1%로 나타나 비교적 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

표 1에 안테나 반사판의 구조적 변수들의 값을 4배 증가시켰을 경우 형상오차에 미치는 영향에 대해 평균 민감도가 큰 순서를 내림차순으로 정리하였으며 구조물의 형상제원과 사용된 재료물성치 등도 함께 제시하였다. (+)는 형상오차의 증가를 (-)는 형상오차의 감소를 의미한다.

1) 수평지름방향 형상오차의 경우 :

수평지름방향변위(+) → 압축부재 사이각(+) → 반사판 프아송비(+) → 수직방향변위(+) → 이면케이블 강성(+) → 반사판의 강성(+) → 지름케이블 강성(+) → 내부고정단 반지름(-) → 바깥원둘레케이블 강성(-) 순으로 나타났다.

2) 수직방향 형상오차의 경우 :

압축부재 사이각(+) → 수직방향변위(+) → 반사판의 강성(+) → 내부고정단 반지름(+) → 수평지름방향변위(+) → 반사판 프아송비(+) → 지름케이블 강성(+) → 바깥원둘레케이블 강성(-) → 이면케이블 강성(-) 순이다.

5. 결 론

본 논문에서는 지름케이블, 바깥원둘레케이블, 이면케이

표 1 안테나 반사판의 형상오차에 미치는 구조적 변수의 민감도

변수명(단위)	변수크기의 변화(기준변수)	변수 크기를 4배 증가시킬 때 최초 형상오차의 크기 1을 기준으로 한 상대 형상오차										민감도순
			2단면	3단면	4단면	5단면	6단면	7단면	8단면	9단면	Av.	
지름케이블 탄성계수×단면적(N)	2.5~10 (5)	ΔV	0.91	0.94	0.98	1.04	1.11	1.18	1.21	1.16	1.07	⑦
		ΔW	1.00	1.00	1.01	1.06	1.16	1.31	1.50	0.82	1.11	(7)
바깥원둘레케이블 탄성계수×단면적(N)	25~100 (100)	ΔV	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.78	0.74	0.81	⑨
		ΔW	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.94	0.87	0.87	0.96	(8)
이면케이블 탄성계수×단면적(N)	25~100 (100)	ΔV	1.43	1.31	1.23	1.17	1.12	1.08	1.05	1.01	1.18	⑤
		ΔW	0.77	0.62	0.50	0.42	0.38	0.37	0.40	0.88	0.54	(9)
반사판 탄성계수×두께(N/m)	100~400 (100)	ΔV	0.90	1.00	1.06	1.10	1.12	1.12	1.15	1.26	1.09	⑥
		ΔW	1.29	1.62	1.99	2.30	2.43	2.36	2.17	1.30	1.93	(3)
압축부재 사이각(rad)	0.196~0.784 (0.392)	ΔV	1.18	1.32	1.48	1.66	1.83	1.91	1.76	1.30	1.56	②
		ΔW	2.05	3.76	6.94	11.83	17.05	17.05	7.55	21.60	10.98	(1)
반사판 프아송비	0.1~0.4 (0.2)	ΔV	1.17	1.20	1.23	1.26	1.28	1.31	1.34	1.36	1.27	③
		ΔW	1.04	1.10	1.19	1.27	1.32	1.31	1.20	1.50	1.24	(6)
내부고정단 반지름(m)	0.05~0.2 (0.1)	ΔV	0.69	0.79	0.87	0.92	0.97	1.01	1.04	1.04	0.92	⑧
		ΔW	3.36	2.78	2.19	1.71	1.38	1.15	0.99	1.26	1.85	(4)
수평지름방향변위(m)	0.05~0.2 (0.1)	ΔV	5.48	4.92	4.49	4.16	3.89	3.70	3.57	3.42	4.20	①
		ΔW	3.22	2.66	2.07	1.60	1.28	1.12	1.09	1.15	1.77	(5)
수직방향변위(m)	0.05~0.2 (0.1)	ΔV	1.18	1.22	1.26	1.29	1.30	1.29	1.22	1.11	1.23	④
		ΔW	4.02	4.19	4.58	5.12	5.59	5.52	4.49	5.64	4.89	(2)

블 및 압축부재를 갖는 CRTS 반사판의 제작·조립 단계를 고려한 정적·기하학적 비선형 유한요소 해석을 수행하여 초기 정적평형상태를 결정하고 케이블 및 구조적 인자들이 반사판의 형상오차에 미치는 영향을 살펴보았다.

- 1) CRTS 반사판의 초기 정적평형상태를 3절점과 절점당 3개의 자유도를 갖는 3차원 삼각형 막요소와 2절점과 절점당 2자유도를 갖는 등매개 케이블요소를 사용하여 변위증분법으로 해석한 결과 매우 안정적인 수렴성을 보였다.
- 2) 본 논문에서는 압축부재의 강성이 membrane과 케이블에 비해  $10^3$ 배 이상 큰 값을 사용하였기 때문에 CRTS 반사판의 선형 수치해석시 압축부재 변형이 반사판의 형상오차에 미치는 영향은 상대적으로 다른 구조적 변수에 비해 매우 작게 나타나고 있으며 membrane과 지름케이블은 내부방향과 상향으로 바깥원둘레케이블과 이면케이블은 이와 반대방향으로 압축부재의 변형을 발생시키므로 각각의 개별 유연부재들을 적절히 사용할 경우 압축부재의 변형을 크게 감소시켜 압축부재의 이상적 형상을 유지할 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 비선형 수치해석시 압축부재의 변형효과는 고려하지 않았다.
- 3) 케이블이 장착되지 않은 CRTS 반사판에 대해 Galerkin method에 의해 얻어진 형상과 비선형 유한요소법에 의해서 얻어진 형상은 비교적 일치하고 있으며 비선형 수치해석 결과 대비 수직방향 최대 상대 오차율은 8.5%로 나타났다. 또한 선형 수치해석과 비선형 수치해석시 수직변위의 상대오차는 바깥 원둘레에 가까워질수록 비교적 크게 발생하고 있으며 비선형 수치해석 결과 대비 선형 수치해석 결과는 수평지름방향 최대 상대 오차율은 0.4%이나 수직방향 최대 상대 오차율이 19.5%로 나타나 바깥 원둘레 부근에서 정확한 수직방향변위를 추적하기 위해서는 비선형 수치해석을 수행해야 한다는 사실을 알 수 있었다.
- 4) 지름케이블, 바깥원둘레케이블 그리고 이면케이블의 효과를 고려한 CRTS 반사판의 수치해석시 본 연구와 NASS 98 program을 사용한 수치해석치를 비교·분석한 결과 본 연구결과 대비 수평지름방향 최대 상대 오차율과 수직방향 최대 상대 오차율은 각각 0.94% 및 4.1%로 나타나 본 연구의 타당성을 입증하였다.
- 5) CRTS 반사판에 케이블을 사용하지 않았을 경우에 비해 바깥원둘레케이블을 장착하면 수평지름방향 상대 오차율이 34.2%까지 감소되었으나 바깥 원둘레 부

근에서 수직방향 형상오차는 증가하였다. 그러나 이에 이면케이블을 추가할 경우 수직방향 상대 오차율이 84.3%까지 감소하였다. 따라서 이면케이블은 수직방향 형상오차를 제어하는데 매우 필수적이지만 바깥 원둘레 부근에서 계속적으로 남아 있는 수직방향 형상오차를 효과적으로 제어하기 위해서는 내부 고정단에 비해 바깥 원둘레 부근에서 상대적으로 큰 강성을 갖는 이면케이블을 사용해야 할 것으로 판단된다.

- 6) CRTS 반사판에 3가지 종류의 케이블을 모두 장착한 경우 수평지름방향 형상오차는 바깥원둘레케이블의 강성을 4배 증가시켰을 때 상대 오차율이 평균적으로 19%까지 감소하고 수평지름방향변위를 4배 증가시켰을 때 상대 오차율이 평균적으로 320%까지 증가하는 것으로 나타났다. 수직방향 상대 오차율은 이면케이블의 강성을 4배 증가시켰을 때 46%까지 감소하고 압축부재의 사이각을 4배 증가시켰을 때 998%까지 증가하는 것으로 밝혀져 이 변수들이 반사판의 형상오차에 비교적 큰 영향을 미치는 구조적 인자들임을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. H. Kellermeier, H. Vorbrugg, K. Pontoppidan, and D. C. G. Eaton, "The ESA//MBB Mesh Antenna Development for Mobile Services", *Acta Astronautica(Germany, Denmark, Netherlands)*, Vol 19, No. 1, 1988. pp.47~56
2. C. Y. Lai, Z. You, and S. Pellegrino, "Shape of Deployable Membrane Reflectors", *J. Aererospace Eng.*, Vol. 11, No. 3, July, 1998, ASCE, pp.73~80
3. 서삼열, "변위증분법에 의한 막구조의 등장력곡선 형태 해석에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제10권, 제9호, 통권 제71호, 1994. 9, pp.113~119
4. 한상을, 이경수, "내력밀도법에 의한 막구조물의 초기형상결정", 대한건축학회논문집 구조계, 제15권, 제2호, 통권제124호, 1999. 2, pp.73~80
5. Schek, H. J., "The Force Density Method for Form Finding and Computation of General Networks", *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, Vol. 3, 1974, pp.115~134
6. 김문영, 김남일, 안상섭, "3차원 케이블망의 초기평형상태 결정 및 정적 비선형 유한요소해석", 전산구조공학,

- 제11권, 제1호, 1998. 3, pp.179~189
7. Papadrakakis, M., "A Method for Automatic Evaluation of the Dynamic Relaxation Parameters", *Comp. Meth in Appl. Mech and Eng.*, Vol 25, 1981, pp.35~48
  8. 김문영, 김남일, "등매개 케이블 요소를 이용한 케이블 망의 정적 및 동적 비선형 해석", *전산구조공학회*, 제 11권, 제2호, 1998. 3, pp.305~316
  9. Chang, S. P. , and Kim, M. Y., and Park, S. Y., "Geometric Nonlinear Analysis of Shell Structures using Automatic Load/Displacement Incremental Algorithm", *한국강구조학회*, 제4권, 제4호, 1992. 12, pp.139~148
  10. Peyrot, A. H., and Goulois, A. M., "Analysis of Cable Structures", *Comput. Struct.*, 10, 1979, pp.805~813
  11. Judd, B. J., and Wheen, R. J., "Nonlinear Cable Behavior", *J. Struct. Div.*, ASCE 104, 1978, pp. 567~575
  12. Argyris, J. H., and Scharpf, D. W., "Large Deflection Analysis of Prestressed Networks", *J. Struct. Div.*, ASCE 98, 1972, pp.633~654
  13. Schrefler, B. A., Odorezzi, and Wood, R. D., "A Total Lagrangian Geometrically Nonlinear Analysis of Combined Beam and Cable Structures", *Comput. Struct.*, 17, 1983, pp.115~127
  14. Haber, R. B., and Abel, J. F., "Initial Equilibrium Solution Method for Cable Reinforced Membranes Part I-Formulations", *Comp. Meth in Appl. Mech and Eng.*, Vol. 30, 1982, pp.264~284
  15. Tomoshi Miyamura, "Winkling on Stretched Circular Membrane under In-plane Torsion : Bifurcation Analyses and Experiments", *Eng. Struct.*, 23, 2000, pp.1407~1425
  16. 김문영, 유순재, 정성엽, 노범준, 공간 강 뼈대 구조물의 대변형 및 탄·소성 유한요소해석법, *성균관대 토목공학과 응용역학연구실 내부보고서 9502-1*, 1995년 2월, p.209
  17. V. I. Usukin, A. N. Cdobnikov, Song, W. K., "Large deformation of the fabric deployable space antenna", *16th International Conference of the Theory for Plates and Shells*, N. Novogorad, Russia, 1994, pp.96~97