

# 개폐식 막 장력을 고려한 스포크-휠 케이블 구조의 설계 형상 조절 기법

## Adjustment of Initial Shape for Spoked Wheel Cable Structures Considering Retractable Membrane's Tension

하 현 주\*  
Ha, Hyeonju

손 수 덕\*\*  
Shon, Sudeok

이 승 재\*\*\*  
Lee, Seungjae

### Abstract

In this paper, the shape adjustment algorithm of the spoked wheel cable structures with retractable membrane system is studied. The initial tension of the membrane or cable is necessary to form the structure and its value is determined by the design shape. However, due to internal and external environmental influences, its shape may be different from the initial designed shape. In the case of the cable structures covered in this study, tension adjustment is necessary to maintain the designed shape because it influences the tension of the cable depending on the state of the retractable membrane. Therefore, we proposed an adjustment algorithm of an initial shape based on the force method. The effectiveness and validity of the methodology were examined through the applicable cable structures. The results of the shape adjustment analysis of the symmetric spoked wheel cable model were reliable and accurate results were obtained.

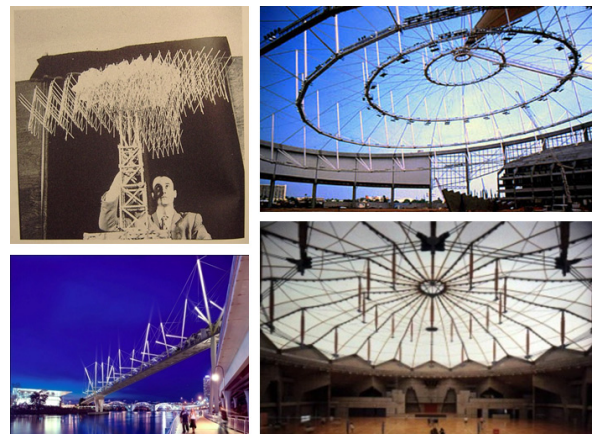
*Keywords : Force method, Deformed shape, Control equation, Spoked wheel cable structures, Retractable membrane*

### 1. 서론

구조 공학 분야의 다양한 구조물은 절점 위치에 의해 형상이 정의되는 경우가 많다. 그 중 <Fig. 1> 과 같은 케이블 구조는 유연하고 넓은 공간을 형성하기 쉬워 다양한 지붕에 적용되지만, 형상은 초기에 주어진 장력에 영향을 받는다. 이 때문에 초기 형상은 주어진 설계 형상에 맞게 결정되고, 외력으로부터의 영향을 고려해 설계된다. 따라서 초기에 설계된 형상을 잘 유지하는 것이 중요하며, 이들을 조절하여 원하는 형상을 유지하는 것도 필요하다. 이러한 기술적 관점에서 볼 때 경기장, 공연장 같은 지붕 구조물에 사용되는 막/케이블 구조물은 초기

장력의 산정에 대해서 필요한 형상을 구하기 위한 조절 또는 제어 단계가 필요하다<sup>1)</sup>.

케이블 구조물의 변위 제어는 형상에 큰 영향을 미치며, 초기 장력을 가지는 핀-절점 구조로 가정해 해석하여도 된다. 제어의 주요 범주는 절점 변위 제어와 부재 내력 제어로 나누어지며, 동시에 제어할 수 있는 방법도 연구되고 있다<sup>2)</sup>. 이를 통해서 형상



<Fig. 1> Examples of trusses and cable structure in engineering field

\* 학생회원, 한국기술교육대학교 건축공학과, 석사과정

Dept. of Architectural Eng., Koreatech University

\*\* 교신저자, 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과 연구교수, 공학박사

Dept. of Architectural Eng., Koreatech University

Tel: 041-560-1334 Fax: 041-560-1224

E-mail: sdshon@koreatech.ac.kr

\*\*\* 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과 교수, 공학박사

Dept. of Architectural Eng., Koreatech University

의 제어와 효율적 부재를 가름할 수 있으며, 대부분 준-정적 상태의 우주 구조물이나 안테나에 초점이 맞추어졌다. Weeks(1984)<sup>3)</sup>는 처음으로 안테나 구조물의 유한 요소 모델을 통해 형상 제어의 의의를 설명하였다. 이후 Haftka & Adelman(1985)<sup>4)</sup>이 제어 요소의 온도를 이용하여 형상 제어 분석 절차를 연구하였고, Edberg(1987)<sup>5)</sup>에 의해 구조물 부재의 조정에 의한 형상 제어가 연구되었다. Sener, Utku & Wada(1994)<sup>6)</sup>는 부재 내 액추에이터(Actuator)로 형상 제어가 가능하다고 발표한 바 있다. Subramanian & Mohan(1996)<sup>7)</sup>에 의해 형상 제어의 간접적인 방법(Indirect method)이 연구되었으며, 이후 다양한 센서와 압전(Piezoelectric) 액추에이터의 등장으로 정적 형상 제어와 관련된 효과적인 해석 방법이 개발되었다. 특히 Chee, Tong & Steven(2002)<sup>8)</sup>에 의해 새로운 정적 형상 제어 알고리즘이 연구되었고, Irschik & Ziegler(2001)<sup>9)</sup>에 의해 고유 변형(Eigen strain) 작용에 의한 형상 제어가 연구되었다. Shea, Fest & Smith(2002)<sup>10)</sup>도 확률론적 탐색 방법(Search method)을 통해 구조물의 지능형 제어를 제안하였다. 이후 Hadjigeorgiou, Stavroulakis & Massalas(2006)<sup>11)</sup>가 유도 변형 운동 이론(Induced strain actuation theory)에 기초하여 압전 액추에이터와 유전자 알고리즘(Genetic algorithm) 최적화를 통해 형상 제어와 손상 확인 과정을 보여주었다. Korkmaz(2011)<sup>12)</sup>는 형상 제어를 능동(Active) 제어, 적응(Adaptive) 제어, 지능(Intelligent) 제어로 분류하였으며, Du, Zong & Bao(2013)<sup>13)</sup>에 의해 추가적인 연구가 진행되었다. 유한 요소 기법과 달리 하중법(Force method)을 이용한 접근은 연구의 시기가 거의 비슷하지만 핀-접합(Pin-jointed) 구조에 집중되어 있다. Kwan & Pellegrino(1994)<sup>14)</sup>에 의해 제어 방법과 제어 부재의 위치 결정에 대한 문제가 다루어졌고, You(1997)<sup>15)</sup>는 초기 장력을 받는 케이블 구조물에 대하여 연구하였다. 그 뒤, Dong & Yuan(2007)<sup>16)</sup>은 장력을 도입하여 초기 응력 부재를 이용해 목표 값으로 조정이 가능하다는 것을 발표하였다. 이 외에도 케이블 돔의 제어 순서에 대한 연구<sup>1)</sup>와 변위 및 내력을 동시에 제어하는 연구도 진행되었다<sup>2)</sup>. 또한 Saeed &

Kwan(2016)<sup>17)</sup>에 의해 동시 제어와 특수한 형태의 날개 구조에 적용한 연구가 발표되었다.

건축 및 토목 분야에서도 많이 적용되는 형상 제어는 사장교나 현수교와 같은 교량 구조, 케이블 돔 등 초기 장력을 수반하여 형상이 결정되는 구조물에 필요하다. 최근 개폐식 막 구조와 같이 기계공학 적 요소들이 융합된 건축 구조물에서 다양한 하중 상황에 대한 형상의 유지나 이를 초기에 고려하여 장력을 조절하는 방법의 적용이 요구되고 있으며, 시공 중에 원하는 형태를 얻기 위한 절점 변위 제어와 부재 장력의 조절이 매우 중요하다.

따라서 본 논문에서는 개폐 막 시스템이 설치된 스포크-휠 케이블 구조물의 형상 조절 방법에 대하여 연구하였다. 막이나 케이블의 초기 장력은 구조물을 형성하기 위해서 반드시 필요하며, 설계 형상에 의해 그 값이 결정된다. 그러나 내·외부의 환경적 영향으로 인해 형상은 초기 설계 형상과 달라질 수 있다. 스포크-휠 케이블 구조의 경우도 개폐 막 상태에 따라서 케이블의 장력에 영향을 주기 때문에 설계 형상을 유지하기 위해서는 장력의 조절이 필요하다. 본 연구는 이러한 환경에 따른 구조물에 대하여 하중법을 바탕으로 한 설계 형상 조절 기법을 제안하고, 적용 대상 케이블 구조물을 통해서 기법의 유효성과 타당성을 검토하였다.

## 2. 하중법과 변위 제어

하중법은 변위법(Displacement method)과 달리 변위 벡터와 외력 벡터의 관계식에 간단하게 접근할 수 있다. 하중법의 기본 방정식은 내력과 외력에 대한 평형(Equilibrium) 방정식, 변위와 변형에 대한 적합(Compatibility) 방정식 그리고 변형과 내력과의 유연도(Flexibility) 행렬을 이용한 방정식으로 설명한다.

평형 방정식은 외력 벡터  $p$ 와 부재의 내력 벡터  $t$ 와의 평형을 이룬다.

$$At = p \tag{1}$$

식 (1) 행렬  $A$ 에서 행의 수는 전체 자유도 수에서

경계 조건의 수를 고려한 나머지 자유도의 수  $n$ 이고, 열의 수는 부재의 수  $m$ 과 같다. 즉 행렬  $A$ 는  $n \times m$  크기의 사각행렬이다.

적합 방정식은 변위 벡터  $d$ 와 부재 신장 (Elongation) 벡터  $e$ 와의 관계로 다음과 같이 정의된다. 이때 행렬  $B$ 는 행렬  $A$ 의 전치행렬이다.

$$Bd = e \quad (2)$$

마지막으로 유연도 행렬에 대한 관계식은 평형 방정식과 적합 방정식을 만족하는 구조물의 각 부재 유연도 행렬  $F$ 로 정의된다.  $t$ 와  $e$ 와는 동일한 공간이므로 정방행렬이다.

$$Ft = e \quad (3)$$

평형 방정식을 만족하는 일반해( $t$ )는 비제차 방정식을 만족하는 특수해  $t_p$ 와 제차 방정식에 대한 일반해  $t_h$ 로 구성된다. 이때  $t_p$ 는 다음과 같이 의사역행렬(Pseudo-inverse matrix)  $A^+$ 을 이용하여 구한다.

$$t_p = A^+ p \quad (4)$$

$t_h$ 는 식 (1)에서  $p = 0$ 인 상태의 해이다. 따라서  $t$ 는  $A$ 의 영(Null)공간  $S$ 와 조합 계수  $\alpha$ 로 나타난다.

$$t = t_p + S\alpha \quad (5)$$

초기 신장 벡터를  $e_0$ 라 정의하고 식 (5)를 식 (3)에 대입하면 식 (6)과 같이 부재의 신장량에 대한 관계식이 얻어진다.

$$e = e_0 + F(t_p + S\alpha) \quad (6)$$

$A = B^T$ 이므로  $A$ 의 좌-영공간(Left-nullspace)은  $B$ 의 영공간과 같고,  $S$ 의 적합 조건은  $S^T e = 0$ 이다. 따라서 이 조건을 식 (6)에 대입하고  $\alpha$ 에 관한 방정식으로 정리하면 식 (7)과 같다.

$$-\alpha = (S^T F S)^{-1} (S^T e_0 + S^T F t_p) \quad (7)$$

식 (7)은  $S^T e_0$ 항과 외력에 대한 영향인  $S^T F t_p$ 로 구성된다. 변위 제어 방정식을 구성하기 위해 식 (7)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같은  $e$ 를 얻을 수 있다.

$$e = e_0 + F \left\{ t_p - S(S^T F S)^{-1} \times (S^T e_0 + S^T F t_p) \right\} \quad (8)$$

위 식을 식 (2)에 대입하고, 의사역행렬  $B^+$ 을 이용해 변위 벡터를 구하여  $e_0$ 와  $t_p$ 항으로 나누어 나타내면 다음과 같다.

$$d = \left\{ B^+ - B^+ F S (S^T F S)^{-1} S^T \right\} e_0 + \left\{ B^+ F - B^+ F S (S^T F S)^{-1} S^T F \right\} t_p \quad (9)$$

식 (9)를 간단하게 정리하기 위해  $e_0$ 항의 계수를 행렬  $Y$ 로 두고 정리하도록 한다. 두 번째 항은 외력에 의한 변위 벡터이므로  $d_p$ 라 한다.

$$d = Y e_0 + d_p \quad (10)$$

식 (10)에서 초기 장력을 고려한 케이블 구조물에 적용하기 위해서 초기 부정(Imperfection) 신장 벡터  $e_{imp}$ 와 제어(Adjusted) 신장 벡터  $e_{adj}$ 의 합으로 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$d = Y \{ e_{imp} + e_{adj} \} + d_p \quad (11)$$

위 식의 변위 벡터  $d$ 는 기존의 변위 벡터가 아니라 제어를 위한 변위 벡터이므로  $d_{ctrl}$ 로 정의하고, 식 (12)와 같이 제어 신장 벡터에 관한 식으로 나타낸다.

$$Y e_{adj} = d_{ctrl} - \{ Y e_{imp} + d_p \} \quad (12)$$

위의 우변 두 번째 중괄호 안의 항을 예상되는 변위 벡터의 합  $d_e$ 라 하고, 첫 번째 항과의 차이만큼 조정하기 위한 변화량을 구하면 된다. 여기서 행렬

$Y$ 는 더 이상 정방행렬이 아니고, 성분이 모두 독립인 상태의 계수행렬(Full rank matrix)일 필요는 없다. 따라서 의사역행렬  $Y^+$ 를 이용하여 제어 신장량 벡터를 구하면 다음과 같다.

$$e_{adj} = Y^+ \{d_{ctrl} - d_e\} \quad (13)$$

위의 방정식을 이용해 구조물의 초기 제어 신장 벡터를 구하여 구조물의 변위를 제어하도록 한다.

### 3. 수치 해석 모델

초기에 평형하지 않은 상태의 막 또는 케이블 구조는 초기 장력을 도입함으로써 강성을 가지게 된다. 이러한 구조물의 형상은 장력의 상태에 따라 달라지며, 장력의 조절을 통한 변위 제어로 구조물의 형상을 원하는 방향으로 조정할 수 있다. 이러한 변위 제어는 부재나 절점에서 작동하는 액추에이터를 이용한다. 본 장에서는 초기 장력을 받는 구조물의 형상 조절에 대한 수치 해석 모델을 대상으로 2장에서 유도한 제어 방정식을 이용하여 초기 장력을 조절해 보도록 한다. 해석 대상 모델인 스포크-휠 케이블 구조는 개폐식 막 구조에 적용되는 케이블 시스템의 한 종류로 경기장이나 공연장의 지붕에서 많이 볼 수 있다. 개폐식 막은 설계와 시공이 일반적인 구조물과는 다르기 때문에 다양한 고려가 필요하다. 또한 시공 단계에서 설계 형상을 실현하기 위해서는 시공 단계별 해석 과정이 필요하다. 스포크-휠 케이블 구조 기반의 연성 막 개폐식 구조물은 막의 여단힘에 따라 구조 시스템의 강성과 형상이 변하기 때문에 초기에 이를 고려하거나 조절이 가능하도록 설계하는 것도 필요하다. 초기에 설정된 구조물의 장력이 설계자가 의도한 형상을 유지하는데 중요한 역할을 하기 때문에 이에 필요한 장력의 패턴과 초기 설계를 유지하기 위한 조절 방법을 제어 방정식을 이용하여 구해 보기로 한다. 따

라서 본 장에서는 개폐 막의 초기 장력에 의해 변형된 스포크-휠 케이블 구조 형상을 초기 설계에서 계획된 원래의 형상으로 복원할 수 있는 방법을 다룬다.

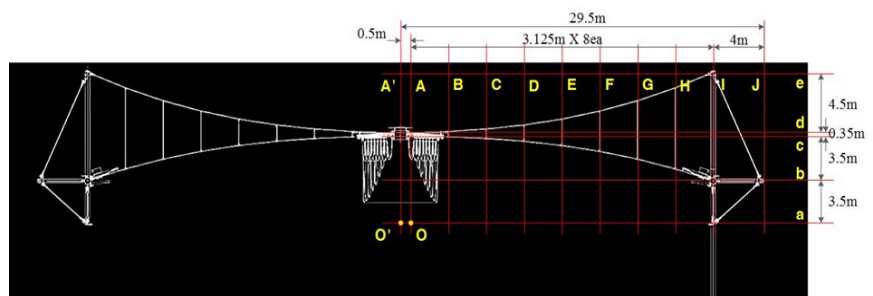
#### 3.1 스포크-휠 케이블 구조 모델

<Fig. 2>는 오스트리아 쿠프슈타인(Kufstain)의 역사적인 요새에 위치하고 있는 대상 예제의 실제 전경이다. 약 2,000m<sup>2</sup>의 면적을 덮기 위해 설계된 스포크-휠 케이블 구조물은 모두 16개로 구획되어 있다. <Fig. 3>와 같이 두 구획이 한 쌍으로 설계되며, 본 논문에서는 해석의 편의를 위해 하나의 구획에서 개폐 막과 연관된 구간만을 해석 대상으로 고려하였다.

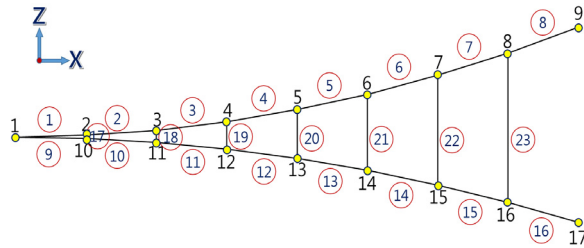


<Fig. 2> Spoked-wheel cable-membrane roof in the Kufstein Fortress

<Fig. 3>에서 보는 바와 같이 한 쌍의 스포크-휠 케이블 모델에서 한 쪽의 A~I 구간만을 모델링하며, 중앙부 막의 파킹(Parking) 부분과 기둥에 연결된 케이블은 해석 대상에서 제외하기로 한다.



<Fig. 3> Modeling of the spoked wheel cable structures



<Fig. 4> Node numbers of target model

해석 대상인 A-I 구간의 모델은 <Fig. 4>와 같고, 식 (14)와 같은 이차 포물선으로 모델링하였다. 모두 8개의 상현 케이블(1~8번 요소)과 8개의 하현 케이블(9~16번 요소), 7개의 수직재인 스트럿(17~23번 요소)으로 구성된다. 케이블을 연결하는 절점 번호는 <Fig. 4>와 같으며, 이때의 좌표와 경계 조건은 <Table 1>과 같다. 이차 포물선으로 가정된 절점은 등분포 하중  $w$ 가 있을 때 케이블의 형상  $y$ 의 함수이며,  $L$ 은 전체 길이,  $H$ 는 지지 반력을 의미한다. 형상은 케이블 뒀의 저면 반지름이 25m, 높이가 3.5m이며 중앙부를 중심으로 모델링되었다. 스포크-휠 케이블 구조의 경계 조건에 대해서 9번과 17번 절점을 고정 절점으로 가정하고, 중앙부는 대칭성을 고려하여 수직 방향으로 자유도가 있다.

<Table 1> Nodal coordinate & boundary condition (m)

Strut	Node	Nodal coordinate		Boundary condition	
		X-Dir.	Z-Dir.	X-Dir.	Z-Dir.
A	1	0	0.000	1	0
B	2	3.125	0.070	0	0
C	3	6.25	0.281	0	0
D	4	9.375	0.632	0	0
E	5	12.5	1.125	0	0
F	6	15.625	1.757	0	0
G	7	18.75	2.531	0	0
H	8	21.875	3.445	0	0
I	9	25	4.500	1	1
B	10	3.125	-0.054	0	0
C	11	6.25	-0.218	0	0
D	12	9.375	-0.492	0	0
E	13	12.5	-0.875	0	0
F	14	15.625	-1.367	0	0
G	15	18.75	-1.968	0	0
H	16	21.875	-2.679	0	0
I	17	25	-3.500	1	1

이를 바탕으로 개폐식 막의 초기 장력을 계산한 결과와 요소의 절점 연결 및 각 부재의 길이를 <Table 2>에 나타내었다.

$$y = \frac{wL}{2H} \left\{ \frac{x}{L} - \left( \frac{x}{L} \right)^2 \right\} \quad (14)$$

$$H = \frac{wL^2}{8y_0} \quad (15)$$

<Table 2> Cable length and initial tension of cable structures (m, kN)

Elem.	Connecting node		Length	Initial tension
	I-node	J-node		
1	1	2	3.125	69.462
2	2	3	3.132	69.602
3	3	4	3.144	69.882
4	4	5	3.163	70.300
5	5	6	3.188	70.853
6	6	7	3.219	71.539
7	7	8	3.255	72.354
8	8	9	3.298	73.292
9	1	10	3.125	89.299
10	10	11	3.129	89.408
11	11	12	3.136	89.626
12	12	13	3.148	89.953
13	13	14	3.163	90.386
14	14	15	3.182	90.924
15	15	16	3.204	91.567
16	16	17	3.230	92.310
17	2	10	0.125	3.1250
18	3	11	0.500	3.1250
19	4	12	1.125	3.1250
20	5	13	2.000	3.1250
21	6	14	3.125	3.1250
22	7	15	4.500	3.1250
23	8	16	6.125	3.1250

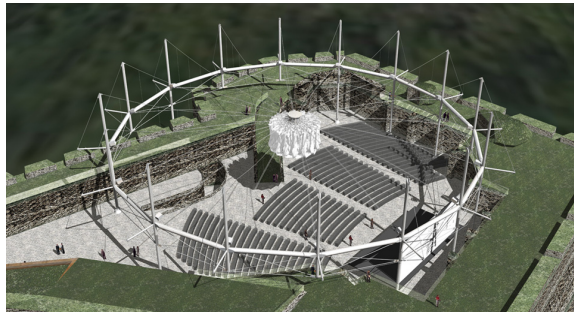
<Table 1>에 제시된 절점 좌표와 경계 조건은 초기 장력에 의해 그 형상이 유지된다. <Table 2>에서는 식 (14)의 형상을 위해서 필요한 케이블의 초기 장력을 계산하였으며, 케이블의 초기 길이와 함께 나타내었다. 여기에 제시된 값으로 설계하는 것이 일반적이지만 개폐식 막을 고려할 경우 그 형상은 바뀔 수 있다. 일반적으로 케이블과 막이 동시에 모델링되지만, 이 경우 케이블 또는 막의 정확한 위치에 해당되는 값을 얻는 것이 힘들다. 이러한 까닭에



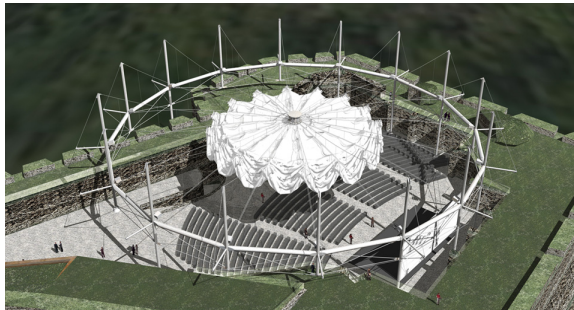
케이블 형상은 막 장력으로 인한 영향을 고려해서 보정되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 막 장력으로 인해 발생하는 힘에 대해서 케이블 형상이 유지 되도록 하는 길이 변형량  $e_{adj}$ 를 구하여 제어한다.

### 3.2 개폐식 막 장력을 고려한 케이블 조정 장력

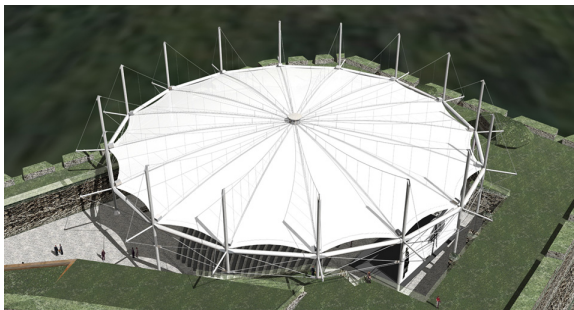
개폐식 막 구조의 개폐 절차는 <Fig. 5>와 같이 열린 막 상태, 구동 상태, 닫힌 막 상태로 나뉜다. 닫힌 막의 경우가 아니라면 장력이 필요하지 않으며 자중이 케이블에 영향을 준다. 반면 닫힌 상태에서는 막 구조의 장력과 자중이 케이블 구조에 영향을 주며, 주행 중에 미치는 영향과는 다르다.



(a) Parking (Open)



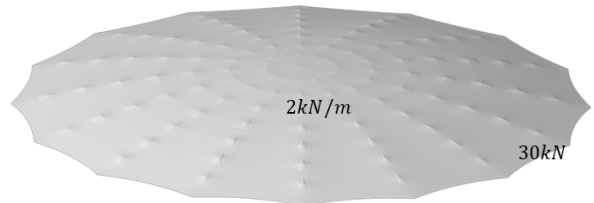
(b) Driving



(c) Closed roof

<Fig. 5> Retractable membrane system

본 연구에서는 개폐식 막이 케이블 형상 변형에 가장 많은 영향을 미치는 닫힌 상태의 장력을 고려하도록 한다. 설계 조건에서 <Table 2>에 나타난 장력만 있는 경우는 변위가 발생하지 않는 경우이다. 그러나 닫힌 상태의 막 장력은 초기 설계 형상에 변형을 준다.



<Fig. 6> Shape analysis of a retractable membrane structures

<Table 3> External force considering initial membrane's tension (kN)

Layer	Node	$F_x$ (X-Dir.)	$F_z$ (Z-Dir.)
A	1	0.000	-0.174
B	10	-0.008	-0.372
C	11	-0.029	-0.726
D	12	-0.061	-1.071
E	13	-0.104	-1.399
F	14	-0.152	-1.690
G	15	-0.197	-1.904
H	16	-0.213	-1.963

우선 막 구조의 형상 해석을 수행하여 닫힌 막에서 발생하는 힘을 알 수 있다. 본 절에서는 <Fig. 6>과 같이 막은 2kN/m의 초기 장력, 막의 가장자리 경계부에는 케이블이 30kN의 초기 장력으로 연결되어 형상이 유지되도록 가정하였다. 스포크-휠 케이블 구조와 연결되는 경계 절점은 고정된 것으로 가정하여 해석을 수행한다. 형상 해석에서 얻은 막과 케이블의 경계 절점에서 발생하는 힘이 케이블에 전달되어 형상에 영향을 미친다. 다음으로 막 자중은 케이블에 직접적으로 전달되므로 형상의 추가 변형이 예상된다. 따라서 두 힘이 케이블 구조의 초기 형상에 영향을 주는 것을 예상할 수 있다. 힘의 크기는 <Table 3>에서 보는 바와 같다. 즉, 형상 해석에서 케이블 경계 절점의 반력과 막 자중이 고려되어 더해진 값이다. 이와 같은 조건에서 초기에 설

계된 케이블의 장력은 어떠한 값으로 조정되어야지만 설계 형상을 유지할 수 있는지 즉, 구조물의 변형이 일어나지 않는가를 식 (13)을 이용하여 구하고자 한다.

<Table 4> Adjusted tension of spoked-wheel cable structures (kN)

No. of Elem.	Adjustment	Adjusted tension
1	16.757	86.219
2	16.792	86.394
3	16.871	86.754
4	17.004	87.305
5	17.197	88.051
6	17.452	88.992
7	17.768	90.122
8	18.126	91.419
9	-13.784	75.515
10	-13.793	75.616
11	-13.807	75.819
12	-13.821	76.132
13	-13.828	76.559
14	-13.824	77.101
15	-13.809	77.759
16	-13.797	78.513
17	0.322	3.447
18	0.500	3.625
19	0.677	3.802
20	0.848	3.973
21	1.004	4.129
22	1.125	4.250
23	1.166	4.291

달린 상태의 막 장력과 자중을 고려하는 조건에 대해 스포크-휠 케이블의 초기 형상 조절을 위한 장력 제어 해석 결과는 <Table 4>와 같다. 개폐식 막의 장력은 <Table 3>과 같이 중력 방향의 힘이 발생하고 있으며 힘에 대한 구조물 장력을 조정된 결과, 상현재의 장력과 스트럿 케이블의 장력이 모두 높아진다. 반면 하현 케이블의 장력은 초기 계산된 장력에 비해 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 구조물에 작용하는 하중에 대한 적합한 결과임을 예시하고 있다. 즉, 아래로 당기는 힘에 대하여 상현 케이블과 수직 케이블은 더 당겨져야 하지만, 하현

케이블은 장력이 줄어들어서 형상이 조정되는 결과를 얻은 것이다. 이러한 결과로 볼 때 구해진 제어 장력은 개폐식 막이 닫혀 장력이 가해짐에 따라 케이블 구조물을 아래로 당기게 되고, 이를 제어하고 형상을 유지하기 위해서는 상현 케이블과 수직 케이블이 더 위로 당겨져야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 초기 장력을 받는 개폐식 막 구조의 지지 구조인 스포크-휠 케이블 구조에 대한 형상 제어를 다루었으며, 하중법을 바탕으로 한 초기 장력 제어 방법에 대해서 연구하였다. 쿠프슈타인 지붕의 케이블 구조를 대상으로 막의 개폐 상태에 대한 형상 해석을 통해 구조물의 영향을 계산하고 이를 제어함으로써 케이블 구조의 초기 제어 장력을 구하여 형상을 유지하는 것을 설명하였다.

해석 방법으로 직접법을 사용하여 매우 직관적인 결과를 얻을 수 있었다. 스포크-휠 케이블 구조 모델의 막 형상 해석과 케이블 제어 장력 해석은 신뢰할 만한 제어 결과를 보였다. 특히 직접적인 제어 방정식의 이용은 유전자 알고리즘과 같이 간접적으로 제어하는 방법에 비해 계산량이 간단할 것으로 사료된다. 제어를 위한 스포크-휠 케이블 모델은 주로 막과 케이블이 함께 모델링되기 때문에 정확한 형상을 각각 설계하기 어렵지만, 본 연구의 방법을 적용하면 정확한 초기 형상 설계를 손쉽게 할 수 있다.

이상으로 초기 인장력을 받는 케이블 구조의 형상 제어를 살펴보았다. 이를 통해 케이블 구조 제어에 관한 일련의 과정을 보았으며, 비선형성의 고려에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1D1A1B03031451)이며, 또한 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(19AUDP-B100343-05)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Shon, S. D., Kwan, A. S. K., & Lee, S. J., "Shape control of cable structures considering concurrent/sequence control", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.52, No.5, pp.919~935, 2014
  2. Saeed, N. M., & Kwan, A. S. K., "Simultaneous Displacement and Internal Force Prescription in Shape Control of Pin-Jointed Assemblies", *AIAA Journal*, Vol.54, No.8, pp.2499~2506, 2016
  3. Weeks, C. J., "Static shape determination and control of large space structures: I. The flexible beam", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.106, No.4, pp.261~266, 1984
  4. Haftka, R. T., & Adelman, H. M., "An analytical investigation of shape control of large space structures by applied temperatures", *AIAA Journal*, Vol.23, No.3, pp.450~457, 1985
  5. Edberg, D. L., "Control of flexible structures by applied thermal gradients", *AIAA Journal*, Vol.25, No.6, pp.877~883, 1987
  6. Sener, M., Utku, S., & Wada, B. K., "Geometry control in prestressed adaptive space trusses", *Smart Materials and Structures*, Vol.3, No.2, pp.219, 1994
  7. Subramanian, G., & Mohan, P., "A fast algorithm for the static shape control of flexible structures", *Computers & Structures*, Vol.59, No.3, pp.485~488, 1996
  8. Chee, C. Y. K., Tong, L., & Steven, G. P., "Static shape control of composite plates using a slope-displacement-based algorithm", *AIAA Journal*, Vol.40, No.8, pp.1611~1618, 2002
  9. Irschik, H., & Ziegler, F., "Eigenstrain Without Stress and Static Shape Control of Structures", *AIAA*, Vol.39, No.10, pp.1985~1990, 2001
  10. Shea, K., Fest, E., & Smith, I. F. C., "Developing intelligent tensegrity structures with stochastic search", *Advanced Engineering Informatics*, Vol.16, No.1, pp.21~40, 2002
  11. Hadjigeorgiou, E. P., Stavroulakis, G. E., & Massalas, C. V., "Shape control and damage identification of beams using piezoelectric actuation and genetic optimization", *International Journal of Engineering Science*, Vol.44, No.7, pp.409~421, 2006
  12. Korkmaz, S., "A review of active structural control: challenges for engineering informatics", *Computers & Structures*, Vol.89, No.23-24, pp.2113~2132, 2011
  13. Du, J., Zong, Y., & Bao, H., "Shape adjustment of cable mesh antennas using sequential quadratic programming", *Aerospace Science and Technology*, Vol.30, No.1, pp.26~32, 2013
  14. Kwan, A. S. K., & Pellegrino, S., "Matrix formulation of macro-elements for deployable structures", *Computers & Structures*, Vol.50, No.2, pp.237~254, 1994
  15. You, Z., "Displacement control of prestressed structures", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.144, No.1-2, pp.51~59, 1997
  16. Dong, S., & Yuan, X., "Pretension process analysis of prestressed space grid structures", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.63, No.3, pp.406~411, 2007
  17. Saeed, N. M., & Kwan, A. S. K., "Displacement and force control of complex element structures by Matrix Condensation", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.59, No.6, pp.973~992, 2016
- Received : December 05, 2018
  - Revised : February 12, 2019
  - Accepted : February 18, 2019