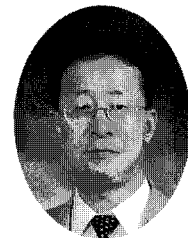


# 막 구조물 시공을 고려한 막재의 재단도해석 기법

- Cutting Pattern Generation for Structural Membrane -



서 삼 열\*  
Sur, Sam-Uel

## 1. 서 론

대공간 구조물은 구조물의 곡률을 이용하여 힘의 흐름을 자연스럽게 하고 휨모멘트의 영향을 가능한 저감시켜 면내력만으로 외부하중에 저항하도록 하는 셸구조의 원리를 기초로 한 형태 저항형 구조이다. 대공간 구조물 중에서도 연성구조물의 일종인 막구조, 케이블구조, 또는 복합구조체로서 막 및 케이블 구조물은 건축적 표현 가능성이 다양하고, 사용되는 막 재료의 투과성으로 인한 밝은 실내공간의 연출, 재료의 경량성으로 인한 자중의 감소, 시공의 간편성 등의 장점이 있다. 따라서 현재 그 사용성은 계속 증가하고 있다. 막 구조물의 일종인 텐트는 약 28,000년의 역사를 갖고 있는 인간이 만든 주거 중 가장 오래된 형태 중의 하나이다. 로마경기장들에서 많이 사용된 차양 구조시스템인 vela는 오늘날 스테디움 구조의 선구자로 여겨질 수 있고, 19세기 서커스 천막은 대규모 집회공간을 위한 최저비용의 이동식 덮개였다. 이런 오랜 역사를 지니고 있는 막 구조는 근래에 이르기까지 유목민의 텐트구조의 이미지를 벗어나지 못한 채, 서커스 텐트와 만국박람회의 전시장과 같이 일정 기간 후에 철거되는 가설구조물의 이미지를 벗어나지 못하고 있었다. 그러나 최근에는 우수한 불연성 막재료의 개발, 막구조 시스템

의 체계화로 인하여 기존의 다른 구조 방식과 비교하여 동등의 내구성과 안정성을 인정받고 있다. 그래서 종래의 가설 구조물이라는 개념에서 영구 구조물로의 개념전환이 이루어지게 되었다. 제2차 세계대전동안에 Bird, W. W.는 비닐코팅막을 사용하여 직경 16m의 군사용 레이다돔을 최초의 공기막구조로 만들었고, 공기막구조의 저렴함과 건설의 용이성은 수영장 덮개, 테니스홀, 창고 및 다른 많은 용도에 사용되어 대중성을 확보하게 되었다. 그리고 막구조의 가능성을 더욱 높게 평가받는 계기가 된 1970년 Osaka박람회에서 Geiger, D.는 스펠에 비하여 높이가 낮은 얇은 케이블 보강 막구조로 되어 있는 미국관을 설계하였다. 이 미국관은 케이블로 보강한 막재료를 이용하여 장방향지름이 142m에 이르고 아주 적은 기압차(수은주 2.3mm)를 이용하여 건설된 구조물로서 경기장 지붕에 대한 새로운 계기가 되었다. 한편 우리나라에 존재하는 막구조물은 Geiger, D.에 의하여 설계된 케이블 및 막을 이용한 1988년 서울올림픽의 체조경기장과 펜싱경기장이 있고, 그 후 규모는 작지만 국내의 기술로 제작된 강촌 휴게소, 칠갑산휴게소, 명지대학교 야외무대, 수원 문화예술회관 야외무대 등이 있고 부산종합운동장, 인천 문학경기장, 서귀포구장, 대구종합경기장과 방패연을 형상화한 상암동 월드컵 주경기장이 막구조물로 채택되어 국민들의 많은 관심과 호응을 받

\* 대림대학 건축설비학과 조교수

고 있어 월드컵을 계기로 막 구조물에 대한 관심이 점차 확대될 전망이다.

이러한 막구조물은 초기장성이 없는 재료로 구성되기 때문에 다른 일반적인 구조물의 해석과는 다르게 다음과 같은 세가지의 과정을 거쳐야 한다.

- (1) 초기응력 도입에 의한 초기 형상을 결정하는 형상해석
- (2) 초기 형상 결정 후, 외부하중에 대한 응력-변형 해석
- (3) 3차원 곡면 실현을 위한 재단도 해석

우선 형상해석은 막 및 케이블 구조물에만 해당하는 것으로, 일반적으로 막구조의 형태는 복잡한 3차원 곡면이고 막재료에 초기장력을 도입함으로써 외력에 저항할 수 있는 안정된 형태가 형성된다. 따라서 일반 구조물의 구조설계방법과는 근본적으로 다르다. 즉, 설계단계에 있어서 복잡한 3차원 곡면형상을 정확하게 지정하기가 어렵고, 지정한다고 하더라도 곡면형상이 역학적인 초기장력의 평형조건을 만족한다고 할 수 없다. 이런 막 구조물 특유의 해석을 형상해석이라 한다. 구조설계에 있어서 초기평형형상을 찾을 때 곡면형상이 설계자가 의도하는 곡면형상에 만족스럽지 못한 경우에는 막응력이나 경계조건을 새로 지정하여 최적형상을 찾기 위한 형상해석을 반복 수행한다. 이런 과정을 통하여 설계자가 의도하는 곡면형상에 가까운 초기 형상을 결정하여야 한다. 초기 평형형상이 결정된 후에 기존의 구조물의 해석과 같은, 여러 가지 외력이 작용하였을 때 응력, 변형 분포 등을 파악하는 응력-변형 해석을 수행한다. 따라서 구조 해석적 관점에서 막 및 케이블 구조물의 해석은 크게 형상해석, 응력-변형 해석으로 분류할 수 있다. 그러나, 시공적 관점에서 막 및 케이블 구조물의 평형형상은 3차원 공간의 형상을 2차원 평면재단 형태를 통하여 실현시켜야 하기 때문에 재단도 해석이 필수적이라 하겠다.

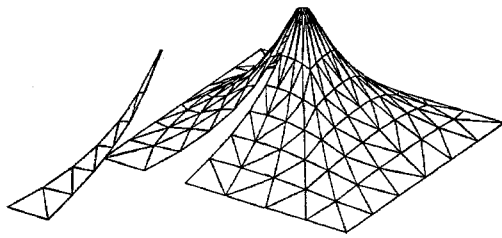
막 및 케이블 구조물의 재단도 해석에 관한 연구는 최근에 이르러 활발하게 연구가 이루어지고 있다. Phelan, D. G., Haber, R. B.는 3차원 좌표계  $x$ 에서의

절점좌표와 초기형상에서의 2차원 좌표계  $X$ 로 대응하는 절점의 좌표와의 관계를 정의하고 3차원 좌표계  $x$ 에서의 절점의 힘의 균형 조건으로부터 조합형상을 결정할 수 있다고 하고 있다. 복잡한 3차원곡면인 설계곡면을 평면 전개도에 분할하는 방법으로써 측지선을 이용하는 방법이 제안되고 있다. 즉, 측지선은 곡면상의 2점을 잇는 최단거리로 정의되고 이것을 평면 전개한 경우에 직선이 되는 성질을 이용하고 곡면의 측지선을 적당한 간격으로 곡면상에서 구하고, 그 측지선 길이와 측지선 간격으로부터 평면 전개도를 얻으려고 하는 것이다. Ishii(石井一夫)는 곡면상의 측지선을 결정하는 방법으로써 곡면의 형상이 함수로 주어질 경우의 측지선 방정식을 이끌고 차분법으로 근사해를 구하는 방법을 제안하였다. 또한 이것을 발전시키고 곡면의 형상이 함수로 주어지지 않는 임의곡면에 대하여 곡면을 삼각형 요소 다면체의 근사 측지선을 구하는 방법 및 단순히 곡면의 좌표치만이 주어지는 경우의 측지선을 구하는 방법을 제안하였다. 또, Ataka(安宅信行) 등은 측지선이 곡면상의 최단거리로 정의되는 성질을 이용하여 이것을 변분 문제로 바꾸고 이산적인 좌표 데이터에 주어진 곡면상의 측지선을 결정하는 방법을 제안하였다. 최근에 막 및 케이블 구조물의 재단도 해석에 관한 실험적 연구에 있어서 막재료의 경우는 2축 인장시험이 이루어지고 있다. 이러한 2축 인장시험은 Day, A. S. 등에 의하여 이루어지고, 2축의 응력비, 재하 횟수, 재하 시간 등을 변수로 한 시험 결과로부터 재단도에 요구되는 늘어난 양의 추정을 행하고 있다. 이와 같이 형상해석 후 전개 불가능한 3차원 곡면을 2차원 평면 형태로 펼쳐야 하는 재단도 해석이 요구된다.

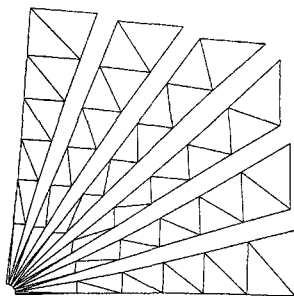
따라서 본 고에서는 막재의 최대폭을 고려하여 공간상에서 몇 개의 큰 조각으로 분할하여 각각의 3차원 공간좌표 데이터를 2차원 평면형상으로 전환하는 재단도 해석기법을 소개하고자 한다. 아울러, 이렇게 구한 평면 2차원 좌표에 초기응력의 도입으로 발생한 막재의 신율(compensation factor), 시공시 인접 막재와의 접착을 고려한 용착두께(welding width), 정착두께(folding width)등에 대해서도 간단히 다루기로 한다.

## 2. 재단도 해석을 위한 정식화

형상해석에서 만족한 형태를 찾았으면 유한 요소에 기초를 둔 재단도 해석을 하여야 한다. 막 및 케이블 구조물은 크기, 곡률, 재료 강성 등이 크게 변하고 재단도 해석은 이러한 각각의 요인에 밀접한 관계가 있다. 이때 오차를 가능한 한 최소화하기 위하여 재단도 해석이 필수적이다. 일반적으로, 재단도 해석은 <그림 1>과 <그림 2>에서 보는 바와 같이 2 단계를 거친다. 첫 번째는, 막 및 케이블 구조물의 전체 곡면을 막재의 최대폭을 고려하여 여러 조각으로 분할하는 것이다. 두 번째는, 선택된 각각의 3차원 데이터를 알맞은 평면 형태로 바꾸는 것이다. 이렇게 하기 위하여, 길이의 변화를 최소화하기 위한 수치해석 기법으로 식(1)과 같은 최소자승법이 사용된다.



<그림 1> 막 추출 예

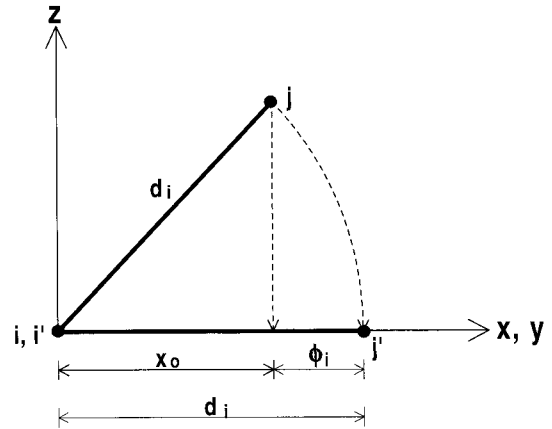


<그림 2> 재단도 해석 예

<그림 3>에서 보는 바와 같이 3차원 공간상의 길이  $d_i$ (식(3))를 일단 평면에 정사영시킨 길이  $x_0$ 와 의 길이 차이를  $\phi_i$ (식(2))라 두고 이것의 제곱을  $S(x)$ 라 둔 식이 식(1)과 같다

$$S(x) = \sum_{i=1}^m \phi_i^2(x) \quad (1)$$

여기서,  $m$  : 한 조각에 있는 모든 요소의 수  
 $x$  : 결정될 2차원 평면좌표 벡터



<그림 3> 최소자승법을 이용한 2차원 평면좌표 결정

$$\phi_i(x) = \sqrt{(x_{i,1} - x_{i,2})^2 + (y_{i,1} - y_{i,2})^2} - d_i \quad (2)$$

여기서,  $(x_{i,1}, y_{i,1}), (x_{i,2}, y_{i,2})$  :  $i$ 번째 요소에 대한 평면에서의 미지 좌표

$$d_i = \sqrt{(X_{i,1} - X_{i,2})^2 + (Y_{i,1} - Y_{i,2})^2 + (Z_{i,1} - Z_{i,2})^2} \quad (3)$$

여기서,  $d_i$  : 형상 탐색 과정에서 결정된 삼차원 노드좌표  $(X_{i,1}, Y_{i,1}, Z_{i,1})$ 와  $(X_{i,2}, Y_{i,2}, Z_{i,2})$ 를 가진  $i$ 번째 요소의 실제 길이 각각의 조각이 바닥에 평평하게 펼쳐진 후에도 인접 조각과의 적합 조건을 만족하게 하기 위하여, 모든 접합부 경계 길이는 변하지 않는다는 가정이 필수적이다. 경계 요소에 대응하는  $\phi_i$ 에 더 큰 '가중치'를 준 식은 식(4)와 같다.

$$S(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i \phi_i^2(x) \quad (4)$$

여기서,  $\omega_i (> 0, i = 1, 2, \dots, m)$  : 다른 요소의 '가중치'를 결정하는 인자  $\phi_i$ 가 비선형 함수임에 주목하여, 수치 해석을 수행하기 위하여  $\phi_i$ 를 선형화하는 것이 필수적이다. 초기 가정해  $x_0$ 를 가정하여, Taylor series로  $\phi_i$ 를 확장하여 선형항만 취하면

식(5)를 얻을 수 있다.

$$\phi_i(x) = \phi_i(x_0) + \frac{\partial \phi_i(x_0)}{\partial x} (x - x_0) \quad (5)$$

식(4)에 식(5)를 대입하면,

$$S(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i \left[ \phi_i(x_0) + \frac{\partial \phi_i(x_0)}{\partial x} (x - x_0) \right]^2 \quad (6)$$

x에 관한 식(6)의 최소값에 대한 필요조건은,

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 2 \sum_{i=1}^m \omega_i \left[ \phi_i(x_0) + \frac{\partial \phi_i(x_0)}{\partial x} (x - x_0) \right] \frac{\partial \phi_i(x_0)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

그러므로, 가중치를 곱한 최소자승법은 매트릭스 형태로 쓰여진 식(8)과 같은 선형 방정식으로 나타난다.

$$\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A} \Delta x = -\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{C} \quad (8)$$

여기서,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \phi_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial \phi_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \phi_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial \phi_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \phi_m}{\partial x_1} & \frac{\partial \phi_m}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial \phi_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{x_0}$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \omega_m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_m]_{x_0}^T, \quad \Delta x = x - x_0$$

식(8)은 유한 요소 방정식과 비슷하게 다음 형태로 쓸 수 있다.

$$\mathbf{K} \Delta x = \mathbf{R} \quad (9)$$

여기서,

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A} \quad (10)$$

$$\mathbf{R} = -\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{C} \quad (11)$$

하나의 요소는 트러스 요소와 상당히 비슷하다. 다음을 계산함으로써 각각의 요소를 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i &= \begin{bmatrix} \partial \phi_i / \partial x_{i,1} & \partial \phi_i / \partial y_{i,1} \\ \partial \phi_i / \partial x_{i,2} & \partial \phi_i / \partial y_{i,2} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (x_{i,1} - x_{i,2})/l & (y_{i,1} - y_{i,2})/l \\ (x_{i,2} - x_{i,1})/l & (y_{i,2} - y_{i,1})/l \end{bmatrix} \\ l &= \sqrt{(x_{i,1} - x_{i,2})^2 + (y_{i,1} - y_{i,2})^2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{K}_i = \omega_i \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i$$

$$\mathbf{R}_i = -\omega_i \phi_i \mathbf{A}_i^T \quad (13)$$

이때 전체 매트릭스  $\mathbf{K}$ 와  $\mathbf{R}$ 은 모든 요소 매트릭스를 조합함으로써 얻을 수 있고 식(9)의 수렴해를 얻기 위하여 Newton-Raphson 반복법이 사용된다.

지금까지의 해석 순서를 다시 요약하면 다음과 같다.

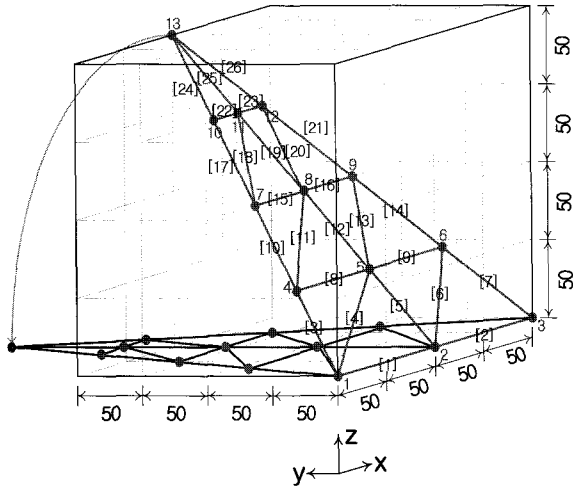
- (1) 각각의 조각의 X-Y 평면 위에 투영시킨 초기해  $x_0$ 가정
  - (2)  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{R}$ 을 구하고  $\Delta x$ 를 계산
  - (3)  $x_1 = x_0 + \Delta x$
  - (4) 최신험  $x_1$  사용.  $\frac{|\Delta x|_2}{|x|_2} \leq \epsilon$  일때까지 (2), (3) 단계 반복
- $\epsilon$ 은 작은 수렴 허용 오차값. 예를 들어  $10^{-6}$ .

### 3. 막구조물의 재단도 해석

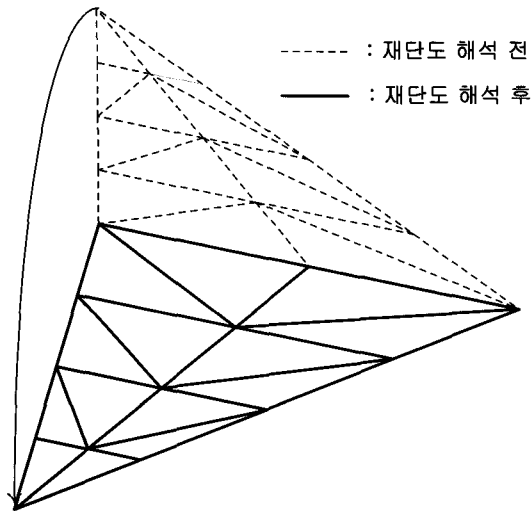
#### 3.1 직선부재로 이루어진 케이블 구조물 (예제 1)

간단한 케이블 구조물에 대하여 3차원 공간상에 임의로 좌표를 잡고 이것을 형상해석 결과라고 가정하고, 수학적 계산을 통한 정해와 재단도 프로그램을 이용한 결과를 비교·검토한다. 재단도 해석을

위하여 <그림 4>와 같은 26개의 부재와 13개의 절점으로 이루어진 해석모델을 선택한다. 재단도 해석 시 절점 1, 2, 3은 고정, 부재 26개는 평면에 펼쳐진 후에도 길이의 변화가 없다는 2가지 경계조건을 이용한다. <그림 5>는 재단도 프로그램을 사용하여 해석한 결과이다.



<그림 4> 직선부재로만 이루어진 케이블 구조

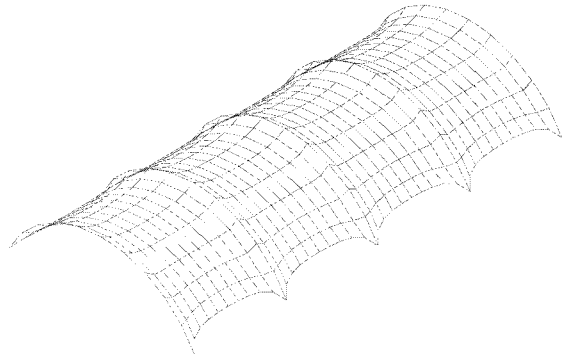


<그림 5> 예제 I의 재단도 해석 결과

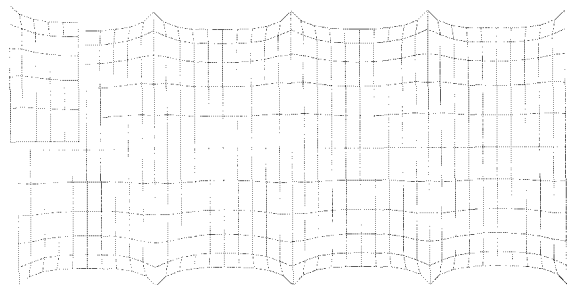
### 3.2 아치로 지지된 케이블 보강 막구조물 (예제 II)

본절에서는 곡면이 들어가 있는 구조물의 예로써 <그림 6>과 같이 아치로 지지된 케이블 보강 막구조물을 대상으로 재단도 해석을 수행하였다. 제한한

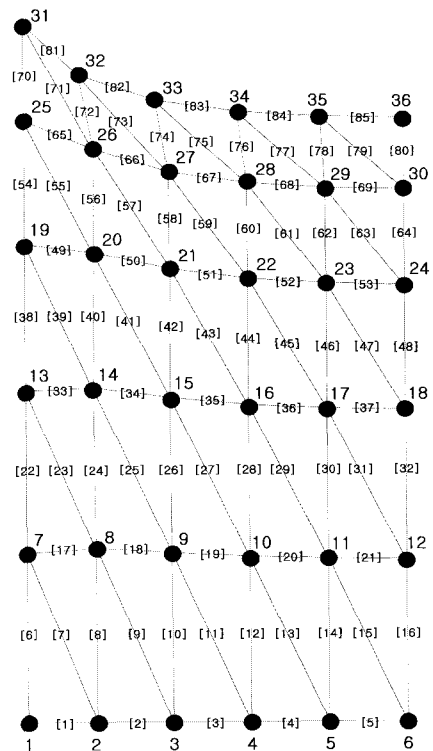
방법에 의한 해석 방법 및 결과를 <그림 7> ~ <그림 11>에 나타낸다.



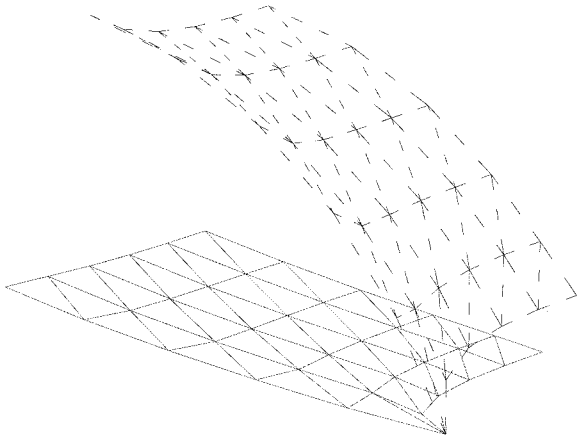
<그림 6> 아치로 지지된 케이블 보강 막구조물



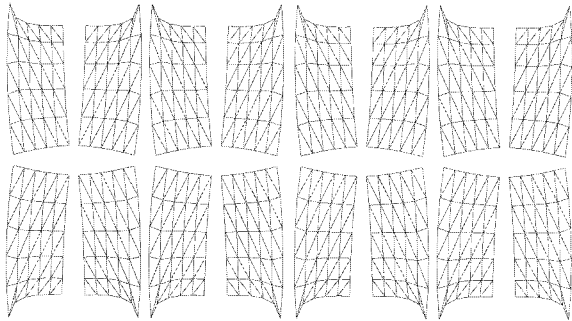
<그림 7> 아치로 지지된 케이블 보강 막구조물의 막 추출



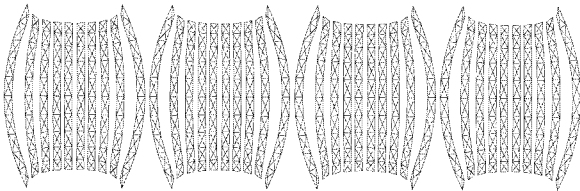
<그림 8> 추출된 부분의 절점번호 및 부재번호



〈그림 9〉 추출된 부분의 재단도 해석 결과



〈그림 10〉 아치로 지지된 케이블 보강 막구조물의 최종 재단도 1



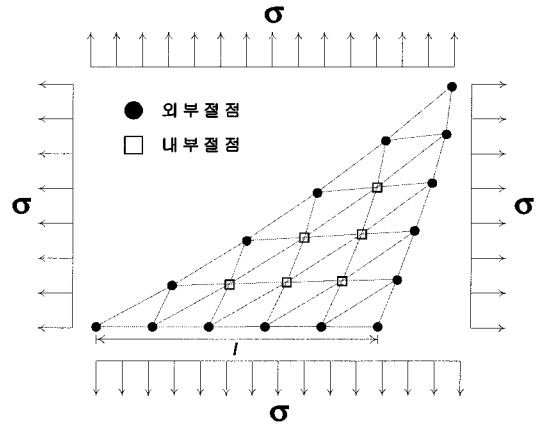
〈그림 11〉 아치로 지지된 케이블 보강 막구조물의 최종 재단도 2

#### 4. 신울에 관한 해석 및 고찰

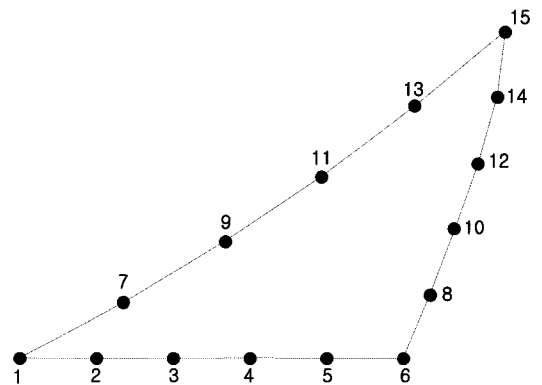
일반적으로 재단도 해석은 형상해석에 의해 정해진 3차원 좌표를 이용하여 2차원 재단도 좌표를 도출한다. 여기에서, 2차원 재단도 좌표는 응력이 도입된 상태의 3차원 좌표를 입력 데이터로 사용하였으므로 2차원 재단도 좌표 역시 응력이 도입된 상태이다. 반면, 우리가 재단할 막재는 무응력상태이기 때문에 초기응력으로 인하여 늘어난 양만큼을 공제하여야 한다. 실제 시공되고 있는 대부분의 구조물에서의 신울(compensation factor) 고려는 횡사 방향(fill-direction)은 2%, 종사 방향

(warp-direction)은 1%정도 확일적으로 외각선을 축소시키는 방법을 사용하고 있다. 그러나, 실제에 가까운 막구조물 실현을 위해서는 새로운 방법이 모색되어야 한다. 따라서 본 고에서는 막재에 걸리는 응력과 막 종류에 따른 재료 특성을 고려한 기법을 제안하고자 한다.

우선, 2차원 재단도를 얻었을 경우 막에 걸리는 응력은 각 요소마다 일정하다고 가정한다<그림 12>. 여기서, 절점을 외부절점과 내부절점으로 분류하고 신울을 고려할 경우는 내부절점은 고정절점이고 외부절점만 응력과 탄성계수에 따라 축소시키는 방법을 제안한다. 신울을 고려하는 절점만 표시하면 <그림 13>과 같다.



〈그림 12〉 각 요소에 걸리는 응력 및 절점 분류

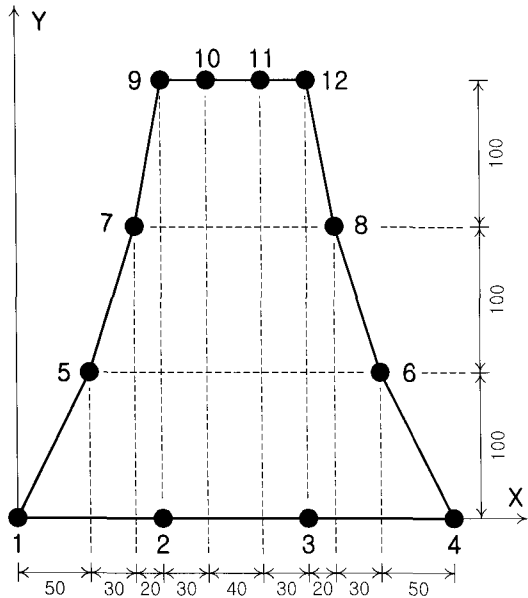


〈그림 13〉 신울에서 고려되는 절점

<그림 12>에서 맨 끝 두 점 사이의 길이  $l$ 은 신울을 고려하면  $l'$ 가 된다고 가정하면 다음과 같은 식이 성립된다.

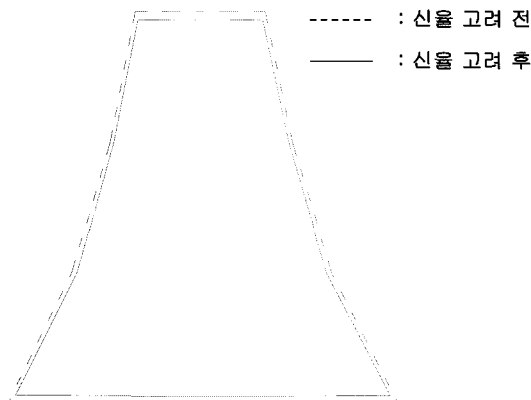
$$\sigma = E\epsilon, \epsilon = \frac{l-l'}{l}, l' = l \left( 1 - \frac{\sigma}{E} \right) \quad (14)$$

이렇게 하여 외부절점의 두 끝점 사이의 길이를 보정하는 방법을 채택한다. 먼저, <그림 14>와 같은 간단한 예를 들어 보기로 하자.



<그림 14> 신율을 고려하기 전 재단도 형상

1~4번, 5~6번, 7~8번, 9~12번, 1~9번, 2~10번, 3~11번, 4~12번 절점 길이 각각을 식(14)과 같이 고려하여 신율 해석을 수행하면 <그림 15>와 같은 결과를 얻을 수 있다. 해석 수행시,  $E = 2500 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma = 100 \text{ kg/cm}^2$ 으로 가정하였다(실제값 아님).



<그림 15> 신율을 고려한 후 재단도 형상

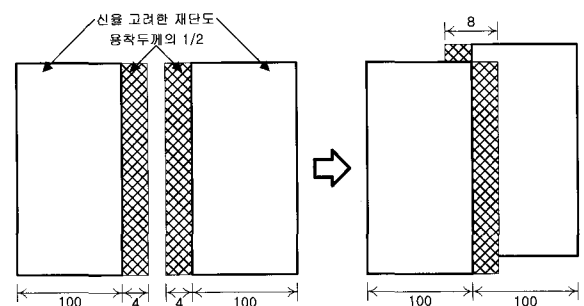
실제 시공시에 있어서, 재단도 결과가 나오면 인접막과 붙이기 전에 각 조각에 장력을 가력하여 어느 정도 막이 늘어난 상태에서 시공을 하기 때문에

실제 신율의 50%정도만 고려하는 방법이 통용되고 있다. 이와 같이 우려하는 만큼의 신율은 생기지 않지만, 보다 더 정확한 시공을 위하여 신율의 고려는 필수적이라 하겠다.

### 5. 용착 두께 및 정착 두께에 관한 해석 및 고찰

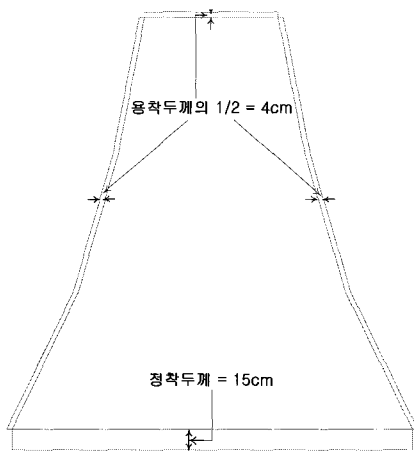
전절까지는 형상해석에서 도출된 3차원 좌표를 갖고 막재폭을 고려하여 2차원 재단도 좌표를 구하고 신율까지 고려하였다. 그러나, 시공적 관점에서만 보면 아무리 정확하게 재단도를 구하였다고 하더라도 실제 지어지는데 필요한 인접막과의 용착두께(welding width) 및 지면과 닿는 부분의 정착두께(folding width)를 고려하지 않으면 시공을 할 수 없게 된다.

실제 시공되고 있는 대부분의 막구조물의 용착두께는 보통 5~8cm이다. 본 논문에서 용착두께의 고려는 용착두께를 프로그램에 입력하면 두께 1/2씩을 막조각 외각선에서 후퇴시키는 방법을 도입하였고, 정착두께는 구조물마다 다르기 때문에 설계자가 원하는 두께를 프로그램에 입력하면 그 두께만큼 외각선을 후퇴시키는 방법을 사용하였다. 만약 용착두께가 8cm라면 1/2씩 후퇴시키는 방법을 설명한 그림은 <그림 16>과 같다.



<그림 16> 용착두께 산정 방법(단위 : cm)

먼저 간단한 예로 <그림 16>의 신율을 고려한 모델을 가지고 용착두께 8cm, 정착두께 15cm를 해석하여 보자. 해석시 용착두께 및 정착두께는 각 절점에서 해당 길이만큼 후퇴하고 절점사이에는 직선보간한다. 해석 결과는 <그림 17>과 같다.



〈그림 17〉 용착두께 및 정착두께 해석 결과

시공적 관점에서 필수적인 인접막과의 용착두께 및 지면과 닿는 부분의 정착두께를 간단한 예를 들어 살펴보았다.

본 논문에서 제시한 방법으로 용착두께와 정착두께를 고려하면 어떤 모양의 구조물이라도 해석이 가능하고, 인접막과의 용착시 용착두께의 반씩을 고려하여 주기 때문에 만약 용착부분에 케이블이 지나갈 경우 용착두께의 중심부를 지나가기 때문에 깔끔한 시공이 될 수 있다.

## 5. 결 론

막구조물은 일반 구조물과는 다른 해석과정을 거친다. 막구조물의 해석은 크게 형상해석, 응력-변형 해석, 재단도 해석의 3가지로 구분할 수 있다. 막구조물의 초기 평형형상을 결정하는 형상해석 후에 일반 구조물의 해석과 동일한 응력-변형해석을 수행하고, 형상해석 후의 결과를 이용하여 재단도 해석을 수행하게 된다. 본 고에서는 형상해석과 이 결과를 이용한 재단도 해석에 관한 내용이다. 또한 형상해석 시 초기장력이 도입되기 때문에 재단도 해석 후 결과는 초기장력만큼 막재가 늘어난 상태이나 시공할 막재는 무응력 상태이기 때문에 초기 장력만큼 재단도 해석 결과에서 제거하여야 한다. 그러므로, 재단도 해석 후 신율에 관한 해석과 용착두께(welding width), 정착두께(folding width)에 관한 내용을 첨가하였다. 이상을 배경으로 본 고에서 소개한 해석 방법 및 해석 결과에 대한 고찰은 다음과 같다.

1) 재단도 정식화는 3차원 공간상의 각 절점사이

의 길이를 구하고 이 길이를 평면상에 변함없이 펼치는 방법이므로 다른 어떤 재단도 정식화보다 정확한 해를 얻을 수 있다.

- 2) 신율 해석에서는 초기 장력량과 막재의 탄성계수를 고려한 해석을 수행하였기 때문에 현재 사용되고 있는 종사 방향(warp-direction)은 1%, 횡사 방향(fill-direction)은 2%정도 획일적으로 외각선을 축소시키는 방법보다 실제에 가까운 해석이 된다.
- 3) 시공을 위한 최종 고려로써, 용착두께와 정착두께를 원하는 방향으로, 원하는 두께만큼 해석이 가능하도록 프로그램화하였기 때문에 모든 막구조물에 적용할 수 있다.
- 4) 인접막과의 용착시 용착두께의 반씩을 고려하여 주기 때문에 만약 용착부분에 케이블이 지나갈 경우 용착두께의 중앙부를 지나가기 때문에 깔끔한 시공이 된다.

이상 본 고에서는 재단도 해석, 신율해석, 용착두께 및 정착두께 해석을 수행하였다. 제시한 방법들은 막구조물의 단순한 해석적 관점 보다는 실제 시공시 필수적인 해석을 수행함으로써 막구조물의 합리적인 해석 및 시공에 도움이 되리라 사료된다.

## 6. 참고문헌

- [1] Tabarrok, B. and Qin, Z., "Form Finding and Cutting Pattern Generation for Fabric Tension Structures," *Microcomputers in Civil Engineering* 8, 1993, pp. 377-384.
- [2] 坪田張二, 膜構造の竣工釣り合状態と最適裁斷圖の決定法, 博士學位論文, 京都大學校, 1991.
- [3] 최 호, 이장복, 김재열, 서삼열, 권택진, "막구조물에 관한 형상탐색과 재단도 결정법," *한국전산구조공학회 춘계학술발표대회 논문집*, 제11권, 제1집, 통권 제20호, 1998, 4, pp. 175-182.
- [4] 최 호, 이장복, 김재열, 서삼열, 권택진, "케이블 보강 막구조물의 재단 패턴 결정에 관한 연구," *대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집*, 제18권, 제1호, 통권 제35집, 1998, 4, pp. 849-854.
- [5] 최 호, 이장복, 김재열, 서삼열, 권택진, "막구조물의 재단 패턴 결정에 관한 연구," *한국전산구조공학회 춘계학술발표대회 논문집*, 제11권, 제2집, 통권 제21호, 1998, 10, pp. 266-273.