

막 구조물의 삼각형 Re-mesh 패턴을 적용한 재단도 생성에 관한 연구

A Study on the Cutting Pattern Generation of the Membrane Structures Using Triangular Re-mesh

전진형* 손수덕** 정을석*** 김승덕****
Jeon, Jin-Hyung Shon, Su-Deok Jeong, Eul-Seok Kim, Seung-Deog

요약

연성 구조물은 축강성은 강하고 휨 강성이 매우 작은 재료를 주 구조재로 사용하므로 초기강성에 매우 민감한 구조체이다. 막 구조물을 설계하기 위해서는 우선 초기장력 도입으로 인한 구조물의 형상을 정확히 알아야 한다. 이를 위해서 모델을 통한 모델링이나 컴퓨터를 이용한 형상해석이 요구되며, 초기장력의 도입으로 형성되는 막 구조물의 곡면은 일반적으로 등장력 곡면이다. 따라서 연성 구조물의 해석과 설계는 기존의 강성구조물과는 다른 형상해석, 응력-변형해석, 재단도 작성 및 시공해석의 3단계 해석이 요구되어진다.

본 연구는 재단도 작성 프로그램 NASScut를 이용하여 경계면 곡률의 오차를 최소화 할 수 있는 삼각형 Re-mesh 패턴을 제안하고, 재단도를 작성한다.

Abstract

Flexible structure uses a material with strong axial stiffness and small bending stiffness as its major structural material so it is very sensitive to initial stiffness. Therefore, the self-formation process which accomplishes a form in the natural world is grasped and it is as well investigated and classified the type of modeling techniques which are available to find the shapes of soft structures. Accordingly, for analysis and design of flexible structure, three-step analysis such as shape analysis, stress-deformation analysis, cutting pattern generation and constructional analysis is required unlike the existing stiff structure.

In this study, suggest that minimize the error of side curvatures by the triangle Re-mesh pattern and draw the cutting pattern generation.

키워드 : 막 구조물, 재단도, 평면 가능 Re-mesh 분할, 초기응력

Keywords : Membrane Structures, Cutting Pattern Generation, Flatternable Re-mesh Divide, Initial Stress

1. 서론

막 구조물의 구조설계는 다른 일반적인 구조설계와는 달리 형상해석, 응력변형해석 그리고 재단 및 시공해석 등의 일련의 과정을 필요로 하게 된다. 이는 일반적으로 이용되고 있는 범용 구조해석 프로

그램만으로 막 구조물의 설계하기에는 부족한 면이 많다.

막 구조물은 3차원 공간에서 곡면을 따라 형성되는 구조물이므로 막체의 제작을 위해 곡면을 평면에서 재현하는 재단도 작성과정이 필요하다. 공학적 관점에서 볼 때, 곡면은 전개 가능한 곡면과 전개 불가능한 곡면으로 나뉜다. 초기응력의 도입으로 평형상태에 이르는 막 구조물의 곡면은 일반적으로 전개가 불가능한 곡면이며, 곡면을 평면으로 재단하는 데에는 신축을 동반하는 가공이 필요하다.

형상해석을 통한 초기형상이 결정되면 재단도 작

* 정회원, 세명대학교 건축공학과, 공학석사

** 정회원, 경북대학교 건축공학과, 공학박사

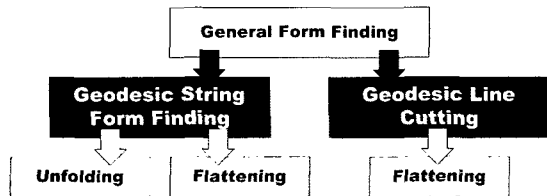
*** 정회원, 세명대학교 건축공학과, 공학석사

**** 정회원, 세명대학교 건축공학과, 부교수

Tel : 043-649-1326 Fax : 043-649-1326

E-mail : sabinus@semyung.ac.kr

성을 하여야 하며, 재단은 막재의 폭이나 재료의 특성을 고려하여 일정한 스트립의 형태로 분할하여 2차원 평면에 전개하는 것이다. 평면에 전개한다는 것은 막재의 재료특성이나 힘의 평형과 같은 역학적 특성이 고려되지 않고 단순히 요소들의 위상에 관한 변환만을 의미한다. 공간상에서 스트립을 결정하여 평면에 전개하는 방법은 크게 두 가지로 연구되어 왔다. 일반적으로 재단도 작성에 관한 대부분의 기법들은 Unfolding 방법이나 Flattening 방법이 주를 이루며, 이를 분류하면 <그림 1>과 같다.

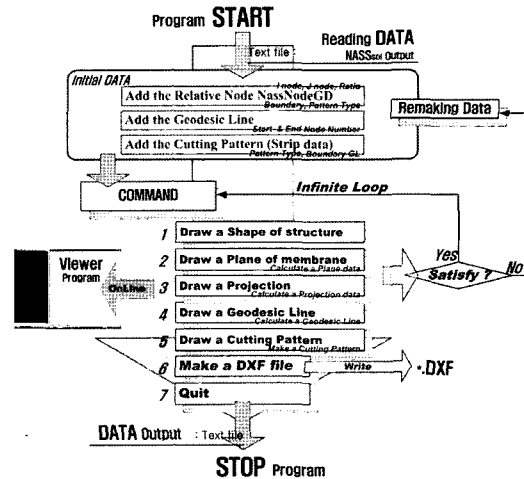


<그림 1> 재단도 작성 과정

공간상에 존재하는 두 점의 최단거리인 측지선은 곡면의 막 구조물을 평면으로 전개하는데 중요한 역할을 한다. 이는 사용 막재가 절약되는 장점이 있으므로 주로 재단도 작성의 기준선이 된다. 여기서 역학적 또는 재료특성을 고려하면 측지선을 이용하여 평면으로 전개 할 경우 전개도의 오차는 다소 발생하며, 신율을 고려하여 작성해야 한다. 또 측지선을 이용하여 리모델링된 구조물의 형상해석을 하고 재단도를 작성하는 경우, 해석상의 절점을 이용하여 3차원 위상좌표를 수학적인 방법에 의해 오차를 최소화시킨 2차원 좌표를 결정하는 방법이 적용될 수 있다. 이와 같은 방법들은 과거의 곡면식 계산을 통한 재단도 작성이나 모형을 통한 재단도 작성에 비해 고난도의 해석 및 설계기술을 요구하는 것이다. 또 곡면식을 구할 수 없거나 곡률이 큰 구조물의 경우 및 모형제작의 신뢰도를 기대할 수 없는 경우는 과거의 재단도 작성 방법을 적용하기에는 무리가 있다.

따라서 본 논문에서는 막 구조물의 형상데이터를 이용한 재단도 작성 프로그램 NASScut를 개발하여 해석결과를 비교, 고찰한다. <그림 2>와 같은 흐름도를 가진 NASScut은 측지선을 이용하여 평면화

하는 방법을 적용하며, 경계면 곡률의 오차를 최소화 할 수 있는 삼각형 Re-mesh 패턴을 제안하여 막 구조물의 시공 가능한 재단도를 작성할 수 있다.

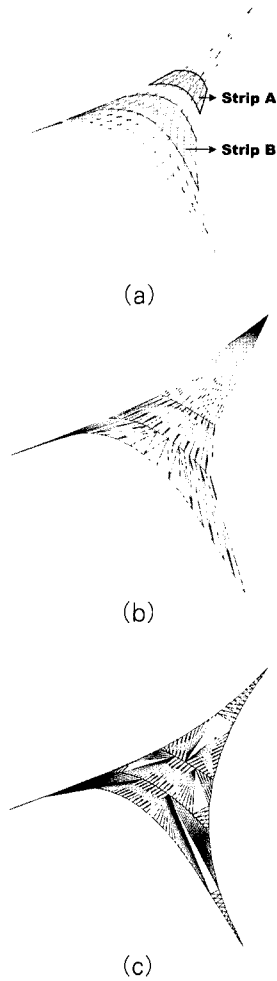


<그림 2> 프로그램 NASScut의 Flow-Chart

2. 삼각형 Re-mesh 패턴

막 구조물의 재단도는 형상해석을 통한 3차원 곡면의 기하학적 데이터를 바탕으로 가공하기에 알맞은 크기로 나눈 뒤, 평면 스트립으로 작성된다. 여기서 3차원의 이중 곡률 곡면은 전개 불가능한 곡면이며, 최소의 오차를 가진 평면으로 구성하여야지만 신율을 동반한 가공을 통해 구조물을 시공할 수 있다. 따라서 최소의 오차를 가진 스트립 평면을 구성하여 경계곡률의 오차를 최소화 하는 것은 측지선을 이용하여 막재의 소비량을 줄이는 방법 못지않게 핵심 되는 기술이다. 곡면의 삼각형 요소를 이용하여 평면 스트립을 형성하는 방법을 살펴보면 다음과 같다.

우선, 형상해석에서 사용된 삼각형 요소만을 이용하여 평면 스트립을 구성하는 방법이다. 이 방법은 Re-mesh 할 필요는 없지만 스트립을 평면화하기에 많은 제약이 따른다. <그림 3(a)>에서 볼 때, 스트립 A와 같이 삼각형 요소들의 조합이 평면을 구성할 조건으로는 각 요소들이 일렬로 배치되어야 한다. 그러나 필요로 하는 스트립의 해석요소의 구성은 해석을 위해 분할되는 방법에 따라서 불가능한 경우가 발생



〈그림 3〉 평면화가 가능한 스트립의 구성방법

하고, 해석의 정밀도를 높이기 위해서 요소를 많이 분할 한 경우는 대부분이 스트립 B와 같이 평면화가 불가능하다. 따라서 재단도 생성에 있어서 축지선이나 해석요소의 경계선으로 분할되는 스트립은 반드시 평면화가 가능한 삼각형 요소로 Re-mesh 하여야 한다. 두 번째로, 축지선이나 요소경계면으로 구성되는 경계선 사이를 Re-mesh하여 삼각형 요소로 구성하는 경우이며, 〈그림 3(b)〉와 같이 작성될 수 있다. 비교적 간단한 방법이나 이중 곡률 곡면이므로 경계선과 직각을 이루는 방향의 곡률이 일정하지 않다. 이것은 평면화된 스트립에서 측면 경계부로 갈수록 오차가 많이 발생하며, 곡률이 비교적 작은 모델에서 사용가능한 방법이다. 여기서 평면화된 스트립의 오차는 구조물의 곡률에 비례하여 증가한다.

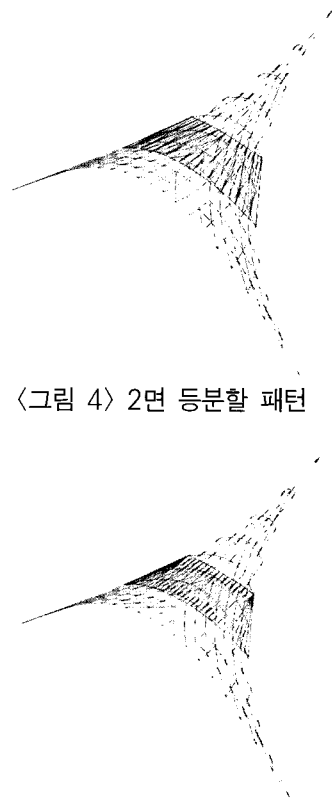
마지막으로, 측면을 보정하여 삼각형 요소를 Re-mesh 하는 방법이다. 〈그림 3(c)〉에서 볼 때, 다른 두 경우보다

곡면의 형성에 가장 근접한다. 그러나 스트립의 평면화 조건을 만족하는 Re-mesh 방법에는 한계가 있으며, 곡률의 크기나 경계선의 복잡한 정도에 따라서 획일화 된 Re-mesh 방법을 고안해 내는 것이 핵심기술이다.

본 논문에서 제안한 Re-mesh 방법은 다음과 같다.

2.1 2면의 경계 스트립의 Re-mesh 방법

2면을 경계로 구성되는 스트립은 상하부의 경계면을 어떻게 나누는가에 따라 재분류된다. 〈그림 4〉는 두 경계면을 절점을 같은 수로 분할 한 뒤 삼각형 요소로 Re-mesh하는 방법을 나타낸 것이고, 〈그림 5〉는 두 경계면을 같은 간격으로 절점을 분할 한 뒤 Re-mesh하는 방법을 나타낸 것이다.



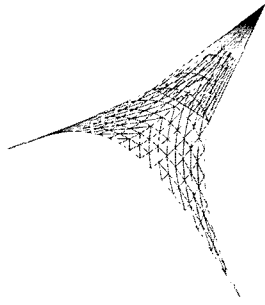
〈그림 4〉 2면 등분할 패턴

〈그림 5〉 2면 등간격 패턴

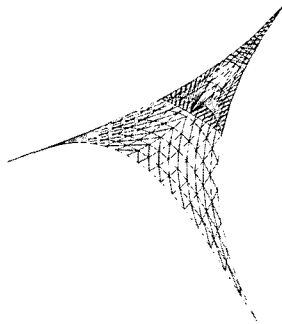
2.2 3면의 경계 스트립의 Re-mesh 방법

3면을 경계로 구성되는 스트립도 두 가지 경우로 재분류할 수 있다. 〈그림 6〉에서 보는 바와 같이 한 점을 기준으로 마주보는 경계면을 Re-mesh하는 방법과 〈그림 7〉과 같이 세변의 중심을 연결하는 삼

각형을 기준으로 Re-mesh 하는 방법이다.



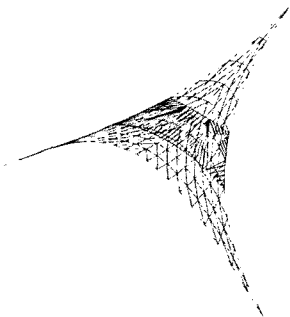
〈그림 6〉 3면 일방향 패턴



〈그림 7〉 3면 삼각형 패턴

2.3 4면의 경계 스트립의 Re-mesh 방법

상부와 하부 및 좌측과 우측의 경계면을 모두 가지는 경우에서 곡률이 큰 구조물은 상, 하부 경계면만으로 Re-mesh 하기에는 오차가 상당히 크다. 이를 교정하기 위해서 측면의 경계면을 동일한 간격으로 절점을 분할하고 각 경계면을 연결하는 삼각형 요소를 재구성하여 Re-mesh 하는 방법으로 <그림 8>과 같다.



〈그림 8〉 4면의 삼각형 패턴

3. 재단도 작성 단계

재단도 작성 과정을 설명하기 위해 HP형 막 구조

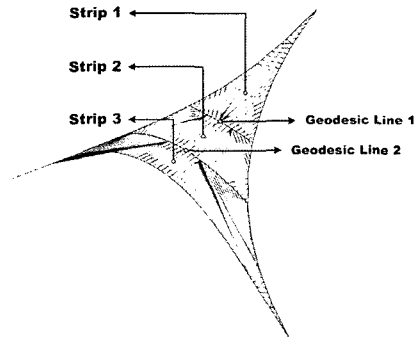
〈표 1〉 초기입력데이터

Thickness	t = 0.1cm
Young's Modulus - Membrane	E•t = 800kg/cm
Young's Modulus - Cable	E•A = 16,000kg
Poisson's Ratio	$\nu_{xy} = \nu_{yz} = 0.7$

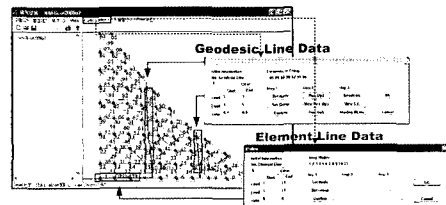
물을 선정하며, 형상해석 결과를 이용하여 재단도 작성을 한다. 형상해석을 위한 초기 모델링의 절점은 모두 121개이며 200개의 막 요소와 20개의 케이블 요소로 이루어진다. 케이블은 막의 외부경계면에 위치하며, 초기장력의 값은 막재의 경우 3kgf/cm, 케이블은 3000kgf/cm²이고, 대각방향 경계절점의 고저차는 500cm로 비교적 곡률이 큰 HP형 곡면이다.

재단도 작성의 단계를 설명하기 위해 <그림 9>와 같이 3개의 스트립으로 분할하여 재단하며, 스트립의 경계선은 측지선으로 구성된다. 결정형상을 이용한 재단도 작성에 대해서 단계별로 나타내면 다음과 같다.

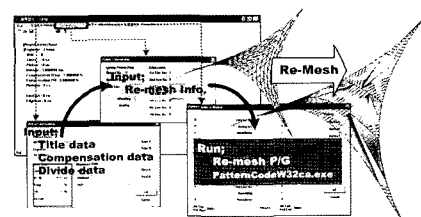
- ◆ Step 1 : 요소집합을 이용한 측지선 탐색



〈그림 9〉 재단도 작성을 위한 스트립 분할



〈그림 10〉 NASScut을 이용한 측지선 탐색



〈그림 11〉 삼각형 Re-mesh 분할 형상

- ◆ Step 2 : 측지선을 이용한 분할과 Re-mesh
- ◆ Step 3 : 신률을 적용한 평면 재단도 작성

4. 적용 예제

막 구조물의 재단도 작성은 일반 구조물의 시공에서는 찾아볼 수 없는 과정이다. 3차원 곡면을 2차원 평면재료로 가공한다는 것은 사실상 불가능한 일이나 막재의 재료적 성질을 이용하여 신축을 동반한 가공을 현장에서 함으로서 가능하게 된다. 막 구조물의 재단도 작성에서 가장 중요한 핵심기술은 측지선을 이용하여 재단손실률을 낮추는 것과 최소의 오차를 가진 정밀한 재단도를 작성하여 경계곡률의 오차를 최소화 하는 것이다.

해석 모델의 형상해석 후 최종 기하학적 데이터를 이용하여 프로그램 NASSwin으로 재단도 작성을 한다.

4.1 강성지지 현수막 구조물의 측지선을 이용한 재단도 작성

강성지지 현수막 구조물은 3개의 패널로 구성되며, 각각의 패널에 대해 <그림 12>와 같이 스트립을 분할하여 재단도 작성을 한다. 여기서 스트립과 스

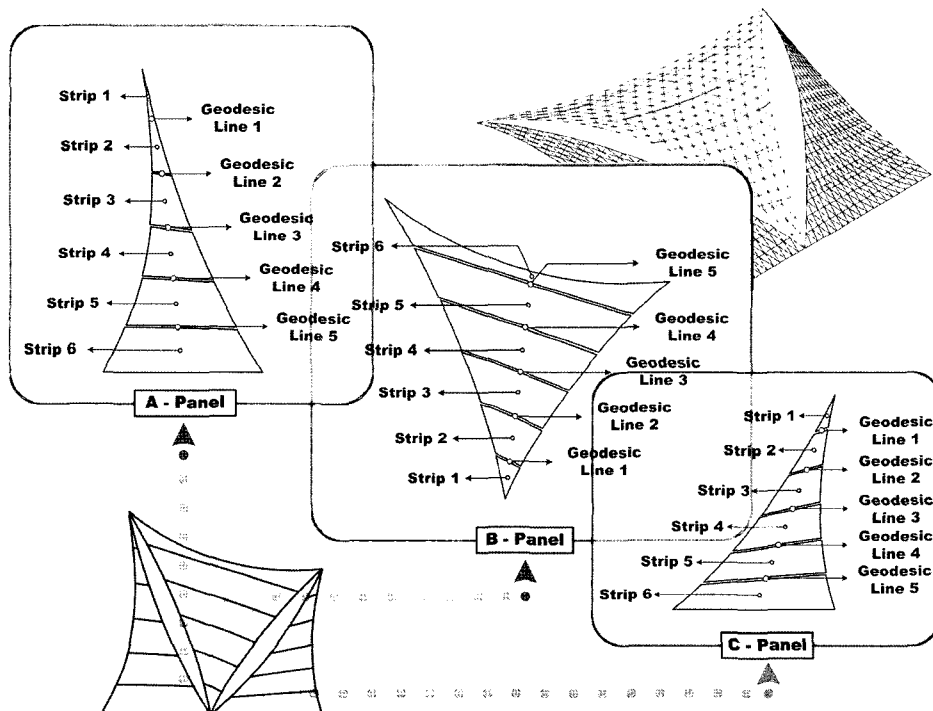
트립 사이의 경계면은 측지선을 이용하여 분할하며, 각 패널당 여섯 개의 스트립으로 구성한다. 또 여섯 개의 패널에 대한 간격은 측면 경계선을 따라 일정한 간격으로 분할한다. 이때, 형상의 기하학적 정보에 의해 분할되어진 스트립을 NASSwin 패키지 프로그램 중에서 측지선 탐색을 위한 NASScut 및 경계곡률의 오차를 최소화 방안을 적용한 Re-mesh 프로그램을 이용하여 재단도 작성을 하였다. 각각의 그림에서 (a)는 신율이 적용되지 않은 평면재단도이고, (b)는 신율을 Warp방향 0.9%, Fill방향 3%를 각각 적용하여 계산한 결과이다.

4.1.1 a-패널의 측지선 재단도

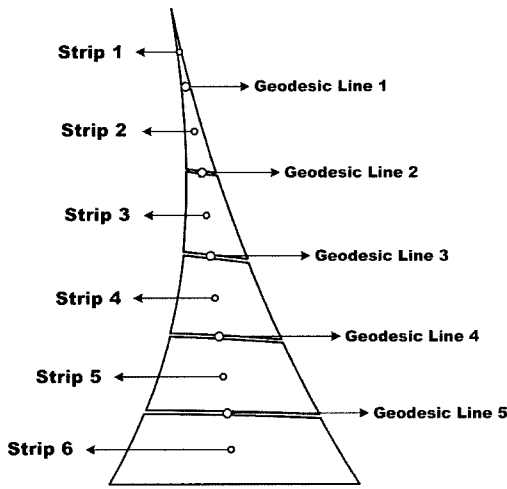
세 개의 패널 중 가장 오른쪽에 위치한 a-Panel의 형상은 <그림 13>과 같으며, 재단도 작성 결과를 <그림 14>~<그림 19>에 나타내었다.

4.1.2 b-패널의 측지선 재단도

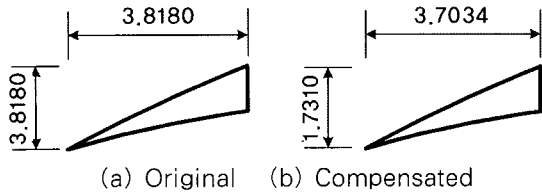
세 개의 패널 중 가운데에 위치한 b-Panel의 형상은 <그림 20>과 같으며, 재단도 작성 결과를 <그림 21>~<그림 26>에 나타내었다.



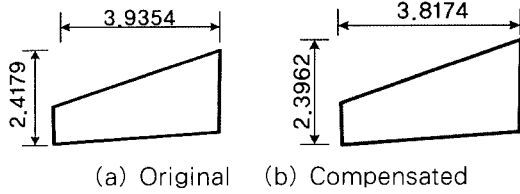
<그림 12> 모델의 재단도 작성을 위한 분할 및 측지선 정보



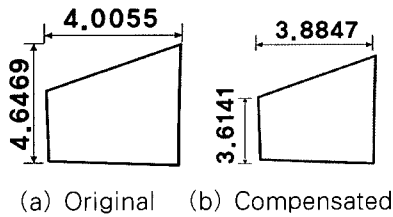
〈그림 13〉 a-Panel 형상 및 재단도 작성을 위한 분할과 측지선 정보



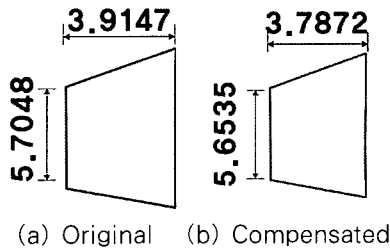
〈그림 14〉 a-Panel의 Strip 1 재단도 작성 결과



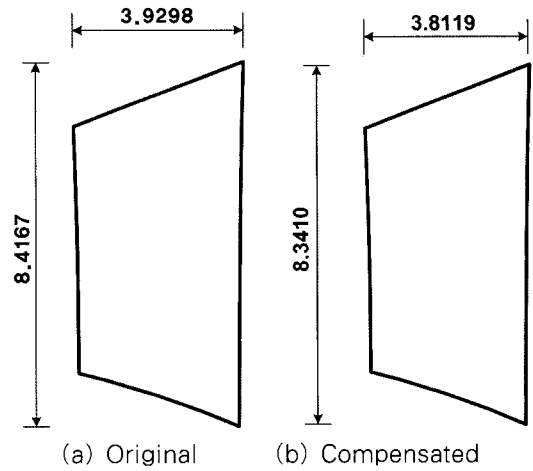
〈그림 15〉 a-Panel의 Strip 2 재단도 작성 결과



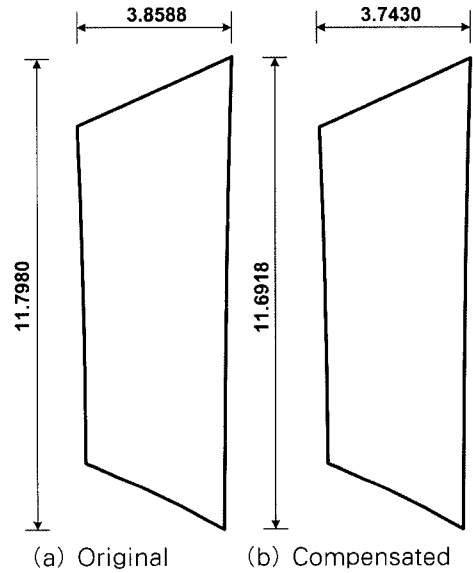
〈그림 16〉 a-Panel의 Strip 3 재단도 작성 결과



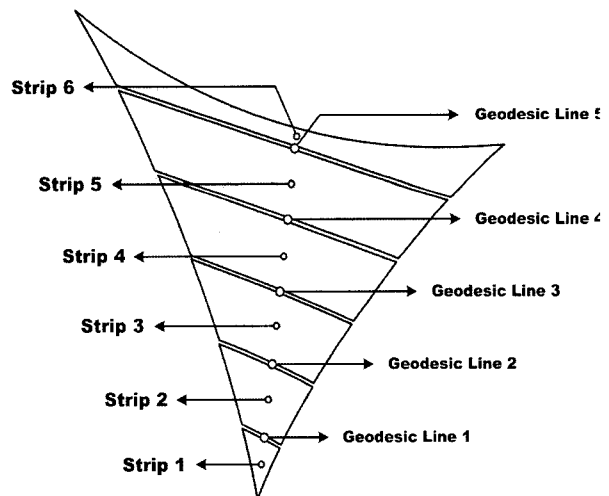
〈그림 17〉 a-Panel의 Strip 4 재단도 작성 결과



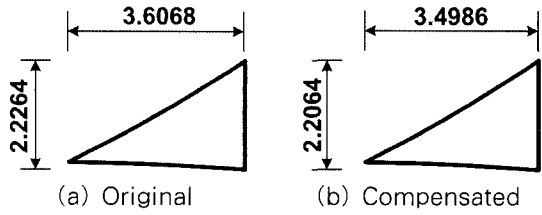
〈그림 18〉 a-Panel의 Strip 5 재단도 작성 결과



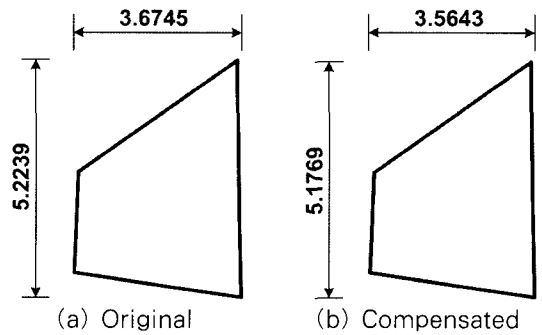
〈그림 19〉 a-Panel의 Strip 6 재단도 작성 결과



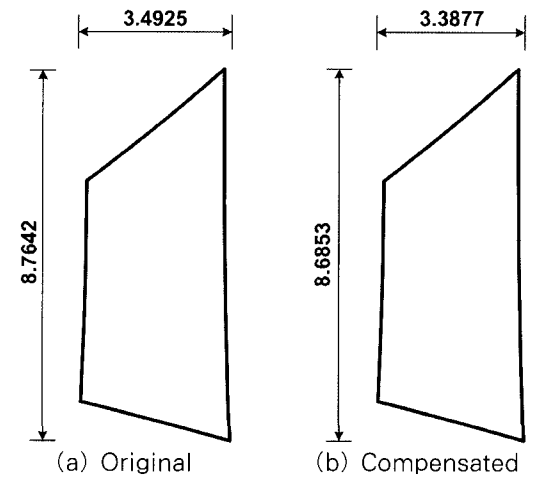
〈그림 20〉 b-Panel 형상 및 재단도 작성을 위한 분할과 측지선 정보



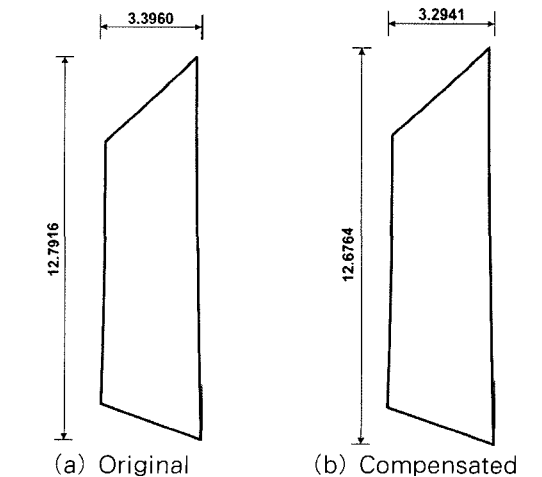
<그림 21> b-Panel의 Strip 1 재단도 작성 결과



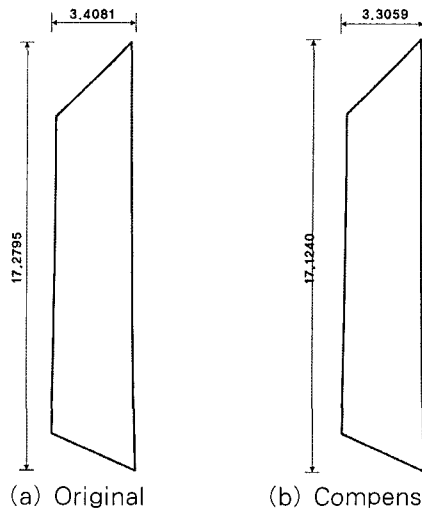
<그림 22> b-Panel의 Strip 2 재단도 작성 결과



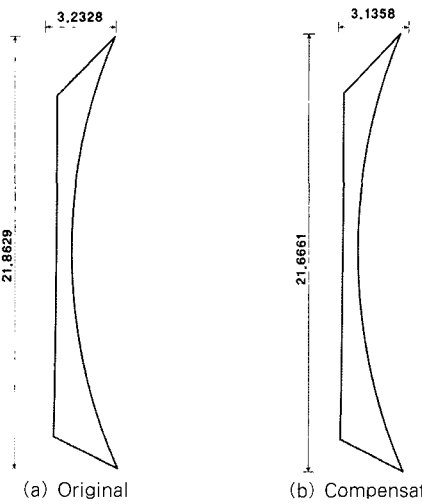
<그림 23> b-Panel의 Strip 3 재단도 작성 결과



<그림 24> b-Panel의 Strip 4 재단도 작성 결과



<그림 25> b-Panel의 Strip 5 재단도 작성 결과



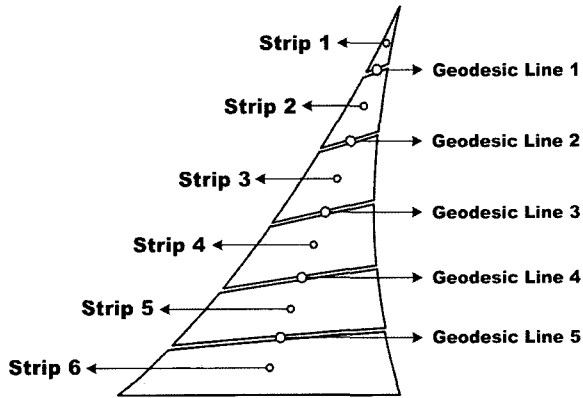
<그림 26> b-Panel의 Strip 6 재단도 작성 결과

4.1.3 c-패널의 측지선 재단도

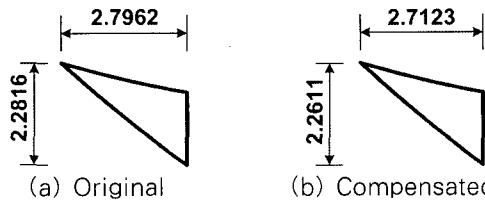
세 개의 패널 중 가장 왼쪽에 위치한 c-Panel의 형상은 <그림 27>과 같으며, 재단도 작성 결과를 <그림 28>~<그림 33>에 나타내었다

4.2 달림형 하이브리드 막 구조물의 측지선을 이용한 재단도 작성

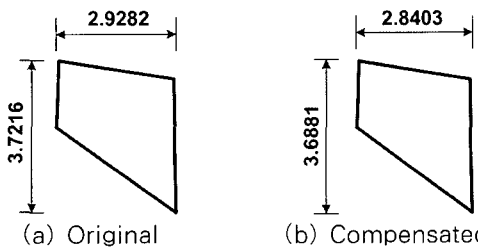
달림형 하이브리드 막 구조물은 1개의 고점을 철골타워를 세워 고정시켜서 형성되는 곡면은 케이블 라인을 따라 측지선이 형성된다. 카테나리 곡면은 경선방향의 측지선 재단도의 경우 별도로 측지선을 구할 필요가 없었다. 이는 곧 경선방향의 요소분할선이 곧 측지선이 되기 때문이다. 따라서 본 모델에



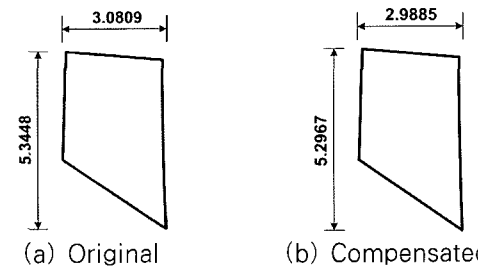
〈그림 27〉 c-Panel 형상 및 재단도 작성을 위한 분할과 측지선 정보



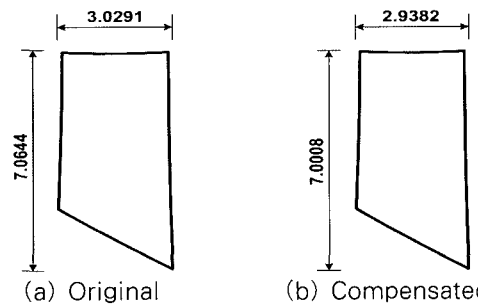
(a) Original (b) Compensated
〈그림 28〉 c-Panel의 Strip 1 재단도 작성 결과



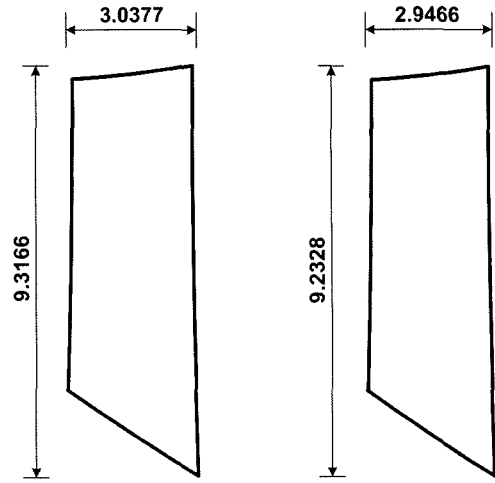
(a) Original (b) Compensated
〈그림 29〉 c-Panel의 Strip 2 재단도 작성 결과



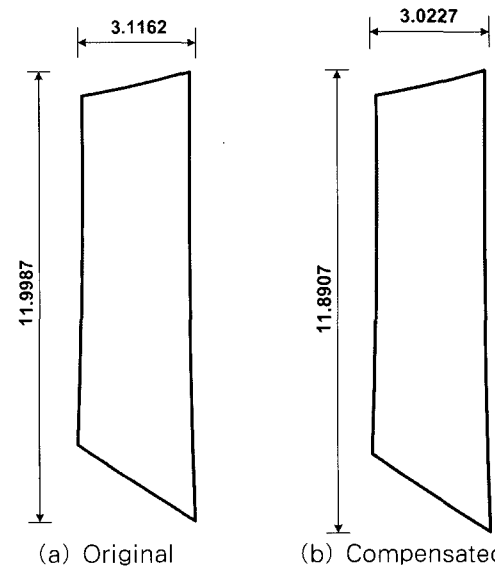
(a) Original (b) Compensated
〈그림 30〉 Rc-Panel의 Strip 3 재단도 작성 결과



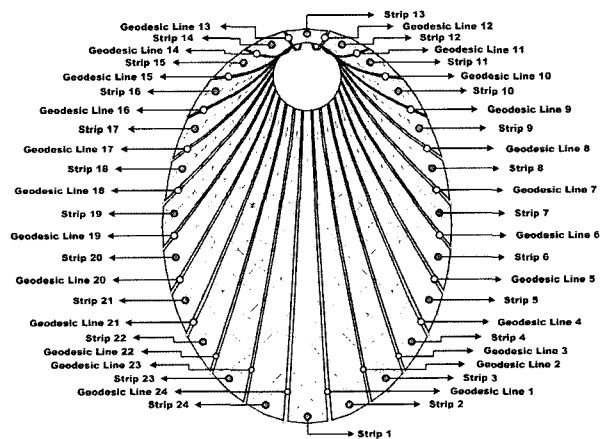
(a) Original (b) Compensated
〈그림 31〉 c-Panel의 Strip 4 재단도 작성 결과



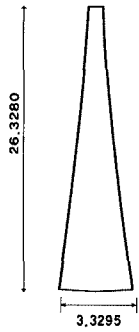
(a) Original (b) Compensated
〈그림 32〉 c-Panel의 Strip 5 재단도 작성 결과



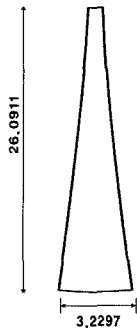
(a) Original (b) Compensated
〈그림 33〉 c-Panel의 Strip 6 재단도 작성 결과



〈그림 34〉 모델의 재단도 작성을 위한 분할 및 측지선 정보

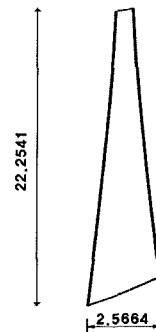


(a) Original

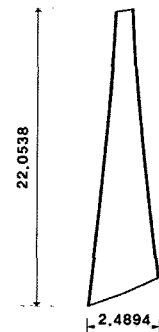


(b) Compensated

〈그림 35〉 Strip 1 재단도 작성 결과

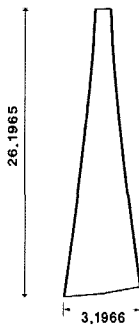


(a) Original

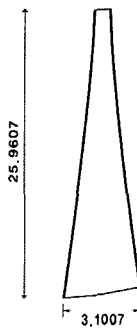


(b) Compensated

〈그림 39〉 Strip 5 재단도 작성 결과

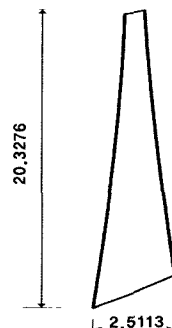


(a) Original

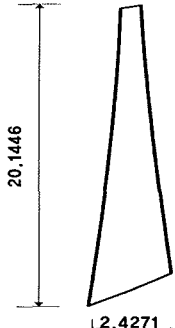


(b) Compensated

〈그림 36〉 Strip 2 재단도 작성 결과

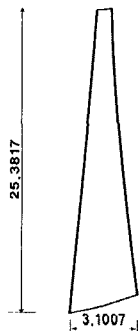


(a) Original

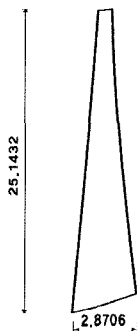


(b) Compensated

〈그림 40〉 Strip 6 재단도 작성 결과

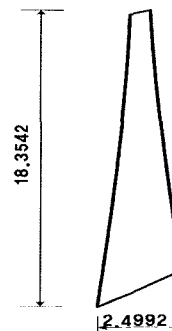


(a) Original

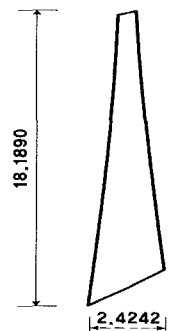


(b) Compensated

〈그림 37〉 Strip 3 재단도 작성 결과

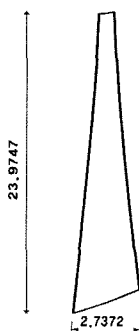


(a) Original

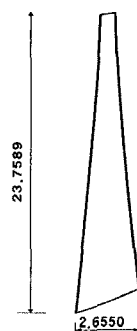


(b) Compensated

〈그림 41〉 RStrip 7 재단도 작성 결과

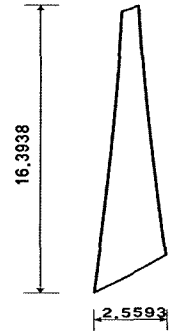


(a) Original

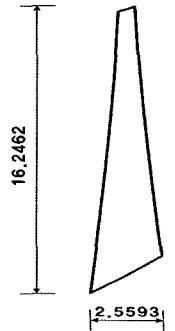


(b) Compensated

〈그림 38〉 Strip 4 재단도 작성 결과

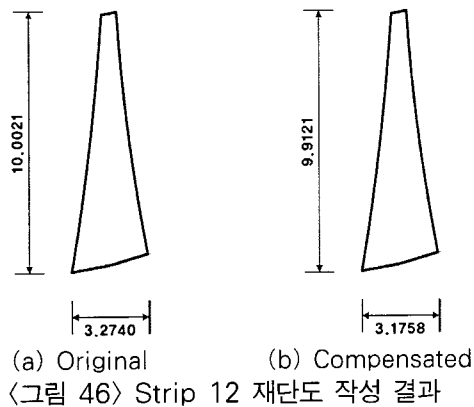
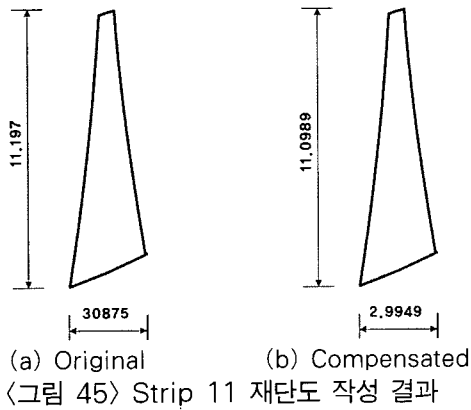
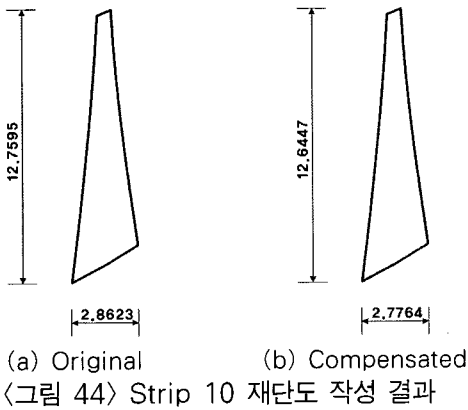
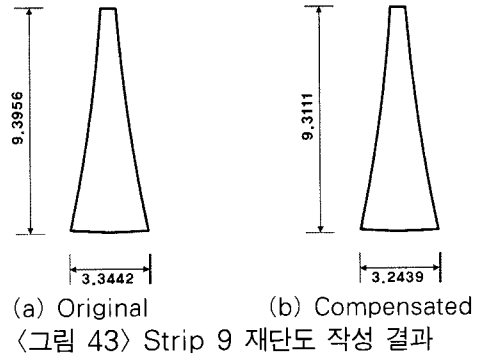
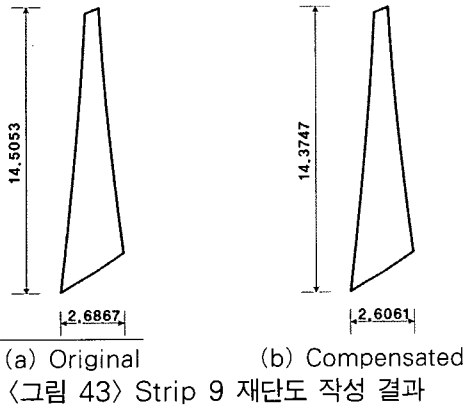


(a) Original



(b) Compensated

〈그림 42〉 Strip 8 재단도 작성 결과



서도 케이블을 경계면으로 이용하여 스트립을 분할하도록 한다. 케이블을 경계면으로 분할하는 것은 곧 축지선을 이용하여 분할하는 결과가 된다.

축지선으로 분할되는 스트립은 <그림 34>와 같이 총 24개이며 여기서 11개의 스트립은 좌우 대칭이다.

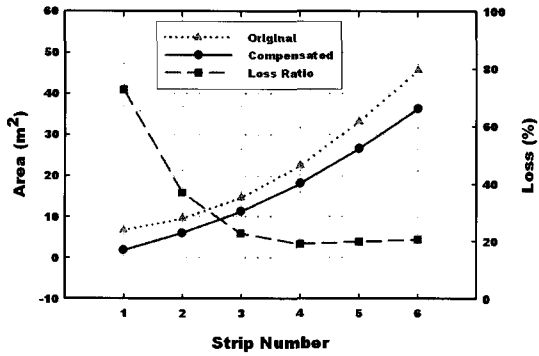
신율을 적용한 평면재단도의 경우도 RS-06 모델과 마찬가지로 Warp방향 0.9%, Fill방향 3%를 적용하였으며, 신율의 적용 전과 후의 스트립 재단도를 <그림 35>~<그림 47>에 나타내었다. 여기서 스트립 14번부터 스트립 24번까지는 좌우 대칭이므로 생략하였다.

4.3 재단도 막재 소비량의 분석 및 신율을 고려한 설계도면 작성

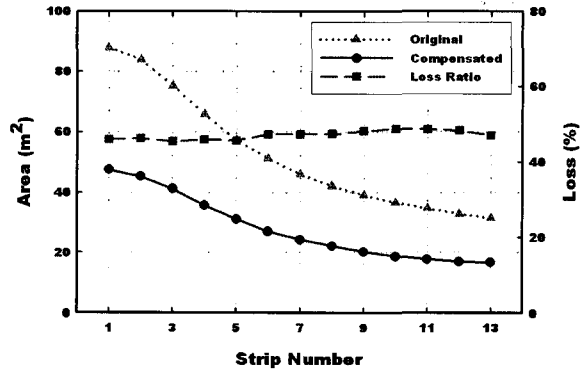
강성지지 현수막 구조물 및 달림형 하이브리드 막 구조물의 재단도 작성결과에 대한 막재 손실량과 신율이 고려된 재단도의 시공 도면에 대해 살펴본다.

강성지지 현수막 구조물 a-Panel의 재단도 작성에 대한 결과 비교는 <그림 48>과 같다. a-Panel에서 최대 면적을 가진 스트립은 6번 스트립에서 36.2 m²으로 나타났고, 최대 손실률은 1번 스트립에서 72.59%의 값을 나타냈다. 손실률의 변화그림에서 살펴볼 때 스트립 번호의 증가에 따라 손실률은 감소했으며, 이는 막 재단도의 형태가 직사각형과 유사해 질수록 감소한다.

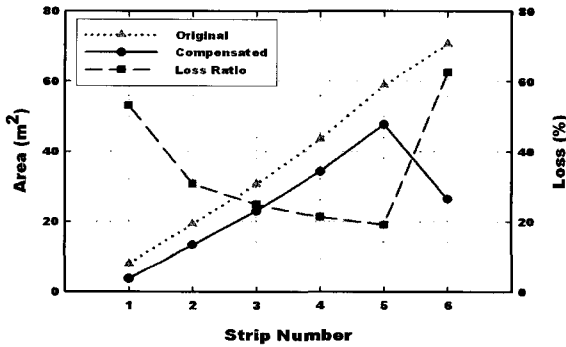
강성지지 현수막 구조물 b-Panel의 재단도에서도 a-Panel과 마찬가지로의 결과를 보이지만 6번 스트립의 경계가 a-Panel과는 다르게 케이블에 의해 형성된다. 재단도 작성에 대한 결과 비교는 <그림 49>와 같고, a-Panel에서 최대 면적을 가진 스트립



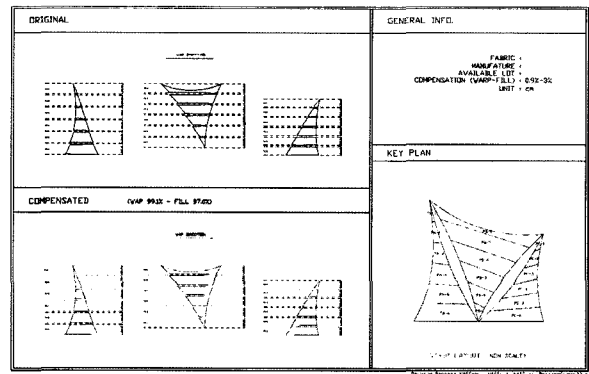
〈그림 48〉 강성지지 현수막 구조물 a-Panel의 Strip 별 막 재료면적 및 손실률의 변화



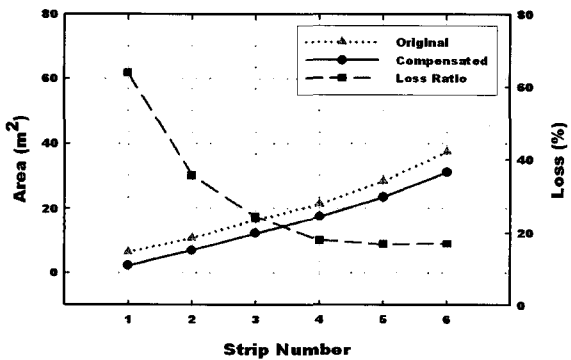
〈그림 51〉 달림형 하이브리드 막 구조물의 Strip별 막 재료면적 및 손실률의 변화



〈그림 49〉 강성지지 현수막 구조물 b-Panel의 Strip 별 막 재료면적 및 손실률의 변화



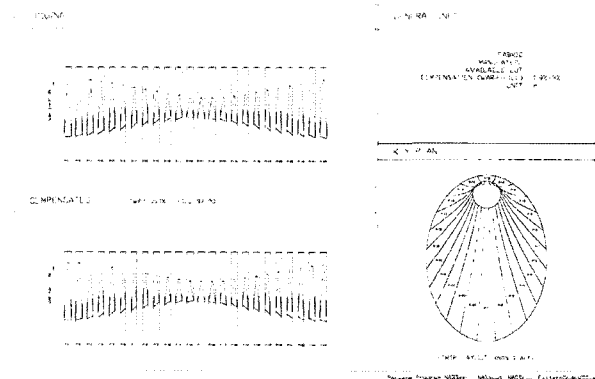
〈그림 52〉 강성지지 현수막 구조물의 재단도 시공도면



〈그림 50〉 강성지지 현수막 구조물 c-Panel의 Strip 별 막 재료면적 및 손실률의 변화

은 5번 스트립에서 47.69m²으로 나타났고, 최대 손실률은 6번 스트립에서 62.59%의 값을 나타냈다. 손실률의 변화그림에서 살펴볼 때 스트립 번호의 증가에 따라 손실률은 감소하지만 6번 스트립의 케이블 경계로 인한 경계부 곡률의 증가는 막재의 손실률을 높이는 역할을 한다.

강성지지 현수막 구조물 c-Panel의 재단도 작성 결



〈그림 53〉 달림형 하이브리드 막 구조물의 재단도 시공도면

과는 a-Panel과 흡사하며 <그림 50>과 같다. 패널의 형태가 유사하며 구조물 곡면의 곡률이 비슷한 두 패널은 결과에서도 동일한 양상의 변화를 보인다. b-Panel에서 최대 면적을 가진 스트립은 6번 스트립에서 31.04m²으로 나타났고, 최대 손실률은 1번 스트립에서 63.82%의 값을 나타냈다. 손실률의 변화그림에서 살펴볼 때 스트립 번호의 증가에 따라 손실률은

감소한다.

달림형 하이브리드 막 구조물 재단도 작성에 대한 결과 비교는 <그림 51>에서 보는 바와 같다. 최대 스트립 면적은 1번 스트립에서 47.406㎡으로 나타났고, 최대 손실률은 10번 스트립에서 48.77%의 값을 나타냈다. 손실률의 변화그림에서 살펴볼 때 스트립 번호의 증가에 따라 손실률은 감소하지만 감소곡선의 형태는 지수감소곡선의 형태가 아니라 시그모이드형태의 감소곡선으로 나타났다.

최종형상의 기하학적 정보를 이용하여 3차원 전개에 대한 최소의 오차를 가진 2차원 평면의 재단도를 작성하고, 재단도의 신축에 관한 신율을 Warp 방향에서는 0.9%, Fill방향에서는 3%로 적용하여 축소량을 계산한 결과를 도면으로 나타내면 <그림 52>와 <그림 53>과 같다. 도면을 바탕으로 스트립을 구성하여 현장에서 장력을 도입함으로써 형상해석을 통해 구한 3차원 곡면을 구성하는 막 구조물로 시공된다.

5. 결 론

막 구조물의 재단도 작성을 위한 프로그램 NASScut은 하부평면전개를 통한 측지선탐색방법과 삼각형 Re-mesh 패턴을 이용하여 경계곡률을 최소화 하는 평면전개방식을 적용하여 개발하였으며 결론은 다음과 같다.

- 1) 개발된 프로그램을 이용하여 다양한 형태의 막 구조물에 적용한 결과 만족할 만한 재단도 시공도면을 작도할 수 있었으며, 측지선을 이용한 결과의 손실률은 대상 예제에서 볼 때, 강성지지 현수막 구조물의 경우는 평균 약 27%, 달림형 하이브리드 막 구조물의 경우는 평균 약 47%로 나타났다.
- 2) 재단도의 경계면을 따라 형성되는 절점을 이용하여 삼각형 Re-mesh 패턴을 적용하는 방식은 곡면이 평면으로 전개 가능한 상태를 유지할 뿐만 아니라 경계면의 곡률을 비교적 잘 표현하는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서 개발된 프로그램 NASScut은 실무에

적용 가능한 재단도 작성을 목표로 둔 것으로서, 적용대상 예제에서 볼 때 만족할 만한 결과를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Tunner. M J., Dill, E. H., Martin, H. C. & Melosh, R. J., "Large deflection of structures subject to heating and external load", J. Aero Sic., 27, pp97-106, 1960
2. Argyris, J. H., "Recent Advances in Matrix Methods of structural Analysis", Pergamon Press, 1960
3. Oden, J. T., "Numerical formulation of non-linear elasticity problems", Proc. ASCE, J. of Struc. Div., 93, ST3, paper 5290, 1967
4. Oden, J. T., "Finite element applications in non-linear structural analysis", Proc. conf. on Finite element Meth., Vanderbilt University Tennessee, 1969
5. Shanno, D. F., "Conjugate-Gradient Methods with inexact searches", Math. of O. R., 13, No.3, pp244-255, 1978
6. Buckley, A. G., A "Combined Conjugate-Gradient Quasi-Newton Minimisation Algorithm", Math. Program, 15, 1978, pp200-210.
7. Crisfield, M. A., "Non-linear finite element analysis of solids and structures", Vol.1, Chap.2, 9., John Wiley & sons., 1991
8. Peter Broughton & Paul Ndumbaro, The analysis of Cabel & Catenary Structures, Thomas Telford, 1994.
9. 권택진, 김승덕, 항가이 야스히코, 서삼열, 최현식, "기하학적 비선형을 고려한 막형 케이블네트 구조

- 물의 최적형상 및 응력-변형해석에 관한 연구,” 대한건축학회논문집, 제11권 1호, 1995.1.
10. 최현식, 김승덕, 이형훈, “케이블 구조물의 기하학적 비선형을 고려한 최적 형상해석,” 한국강구조학회논문집, 제8권 1호, 1996.3.
 11. 김승덕, 손수덕, 조병욱, 손승철, “비선형 해석 프로그램 NASS-98을 이용한 연성 막구조물의 구조설계에 관한 연구,” 대한건축학회 학술발표논문집, 제18권 2호, pp.27-32, 1998
 12. 김승덕, 송호산, “기하학적 비선형을 고려한 연성 구조물의 형상탐색에 관한 연구,” 대한건축학회 학술발표논문집, 제22권 2호, 2002, 10, pp.11-14
 13. 김승덕, 손수덕, 정을석, “단일공기막 구조물의 설계하중에 따른 비선형 응력-변형 해석 및 설계에 관한 연구,” 한국셀공간구조학회 논문집, 제5권