

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(12), 940-949(2013)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.12.940>

삼각형 태양돛의 주름저감 설계방안

배홍수*, 우경식**

Wrinkle Reduction Design Method of Triangular Solar Sail

Hongsu Bae* and Kyeongsik Woo**

Department of Civil Systems Engineering*

Chungbuk National University**

ABSTRACT

In this paper, wrinkle reduction design was studied for triangular sail. Wrinkles in the solar sail membrane can change the load path and surface topology which may have an adverse effect on propulsion performance and controllability. In this study, wrinkle reduction strategies of adjusting cable angle, catenary and catenary-wire schemes were considered and the design parameters for wrinkle reduction were systematically investigated.

초 록

본 논문에서는 삼각형 태양돛의 주름저감설계 방안에 대한 연구를 수행하였다. 태양돛 멤브레인에 부분적으로 발생하는 주름으로 인하여 구조물의 추력성과 제어성에 영향을 받을 수 있으므로 멤브레인에 발생하는 주름을 감소시키거나 제거하는 것은 매우 중요하다. 주름을 저감하는 방법으로 태양돛 멤브레인과 붐을 연결하는 케이블의 하중의 각도를 조정하는 방식, 현수선 방식 및 현수선-와이어 방식을 고려하였으며 매개변수 연구를 통하여 주름저감효과에 대해 체계적으로 조사하였다.

Key Words : Solar sail(태양돛), Wrinkle(주름), Cable angle(케이블 각도), Catenary(현수선), Catenary-wire(현수선-와이어)

1. 서 론

차세대 우주선으로 각광을 받고 있는 태양돛은 태양에서 방사되는 빛을 반사하여 추력을 얻는 방식으로 운용된다. 태양돛은 지상에서 제작 및 패키징되어 우주공간으로 발사된 후 전개되므로 패키징 및 전개가 용이하여야 한다.

태양돛은 두께가 매우 얇은 멤브레인으로 되어 있는데, 이는 멤브레인 구조가 가벼우며 작은 크기로의 효과적인 패키징이 가능하기 때문이다. 그러나 멤브레인은 두께가 얇으므로 굽힘 강성이

극단적으로 감소하게 되어, 아주 작은 압축응력이 가해지면 즉시 좌굴이 발생하는데 이를 주름(wrinkle)이라고 한다[1].

태양돛 멤브레인에 주름이 발생하면 하중경로가 바뀌게 되고 태양돛의 모양에도 변화를 일으켜 추력성과 제어성에 부정적인 영향을 미치게 될 뿐만 아니라 열점(hot spot)을 형성하여 세일에 열적 문제를 야기할 수도 있다. 따라서 세일의 설계시 멤브레인에 발생하는 주름을 최소화할 수 있는 연구가 필요하다[2~3].

멤브레인에 발생하는 주름의 저감을 위한 연

† Received: June 25, 2013 Accepted: November 19, 2013

** Corresponding author, E-mail : kw3235@chungbuk.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

구는 다양한 방법으로 연구되고 있다. 태양돛 멤브레인에 발생하는 주름을 방지하기 위하여 태양돛에 초기인장응력을 가하는 방법[2], 태양돛과 붐을 연결하는 케이블에 각도를 조정하는 방법[4], 태양돛의 가장자리를 안쪽으로 곡선이 되도록 설계하는 현수선(catenary) 방법[5], 현수선 방식에 다시 태양돛의 가장자리를 긴장시켜주는 테이프 혹은 와이어를 부착하는 현수선-와이어(catenary-wire)방법[6], 그리고 태양돛 멤브레인에 전단력이 전달되지 않도록 전단경계(shear compliant border)를 설치하는 방법[7] 등이 연구되어 왔다.

본 논문에서는 멤브레인의 여러 주름 저감 방법 중 케이블 각도에 따른 주름저감 방법, 현수선 방법 및 현수선-와이어 방법에 대해 연구하였다. 삼각형 태양돛 형상에 대해 주름알고리즘을 채용한 멤브레인 요소법에 의한 주름해석을 수행하고 각 주름저감 방식에 대해 매개변수가 주름 발생에 미치는 영향에 대해 체계적으로 조사하였다.

II. 해 석

2.1 주름해석에 대한 기존 연구 방법

유한요소법에 의한 주름해석방법은 크게 멤브레인 요소와 셸 요소를 사용하는 방법으로 나눌 수 있다. 멤브레인 요소법에서는 주름 형상을 외연적으로 나타내는 대신 등가적인 응력거동과 평균변형면을 예측하게 되는데, 여기에는 변형 구배(deformation gradient)를 수정하는 방법[1,8~11]과 물성치 행렬을 수정하는 방법[12~16]이 있다.

1980년대 Roddeman 등[1,8~9]은 텐션필드(tension field) 이론에 따라 변형률 텐서를 수정하는 방법으로 멤브레인 주름 해석 모델링을 제시하고 예계산을 통하여 성능을 확인하였다. 이후 여러 연구자들이 Roddeman의 모델을 이용하여 멤브레인 구조에 대해 유한요소해석을 수행하였는데, Kang 등[10]은 주름의 방향을 탐색하는 새로운 방법을 고안하였다. 또한, Lu 등[11]은 주름의 방향과 주름의 정도의 변화를 고려하는 접선강성행렬을 직접 유도하였다.

멤브레인의 물성치 행렬을 수정하는 방법에 의한 유한 요소 주름해석은 1985년에 Miller 등[12]에 의해 처음 시도되었는데, 이 연구에서는 주름 발생시 일축인장응력상태를 모사하기 위하여 푸아송비를 수정하는 방법을 사용하였고, 유

한요소 해석 결과를 기존의 이론해와 비교하였다. 이와 유사하게 Miyazaki 등[13]은 연성행렬을 수정하는 방법을 제안하였으며, Liu 등[14]과 Woo 등[15]은 벌칙 매개변수(penalty parameter)를 사용하여 강성행렬을 수정하는 방법을 제안하여 주름해석을 수행하였다. 또한 Ding 등[16]은 단성계수와 포아송 비를 수정하여 삼각형 및 사각형 멤브레인의 주름 패턴을 조사하였다.

주름해석은 셸요소를 사용하고 기하학적 비선형 후좌굴해석 방법으로 접근한 연구도 수행되었다. Wong 등[17]과 Su 등[18]은 사각형 솔라세일에 대하여 셸요소를 사용하여 먼저 좌굴해석을 수행한 후, 좌굴모드를 분석하여 별도의 주름실험 결과에 나타난 형상과 일치하는 좌굴형상을 찾아내어 이를 메쉬에 기하학적 결함(geometric imperfection)으로 가하는 방법으로 주름의 형상을 수치적으로 계산해 내는데 성공하였다. Tessler 등[19]은 좌굴형상이 아닌 무작위 결함(random imperfection)으로도 주름의 형상을 해석적으로 만들어 낼 수 있음을 보였다. 셸요소를 사용하는 이 방법들은 주름의 형상을 외연적으로 예측할 수 있으나 수렴된 결과를 위해 지나치게 큰 계산자원을 지나치게 요구하여 비효율적인 단점이 있다[10].

2.2 벌칙매개변수 주름해석 알고리즘

본 논문에서는 멤브레인의 물성치 행렬을 수정하는 방법으로 주름예측 해석을 수행하였다. 주름해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며 벌칙매개변수법에 의한 주름 해석 알고리즘[15]을 프로그램하여 사용자 서브루틴으로 삽입하여 구현하였다. 본 절에서는 벌칙매개변수에 의한 주름해석 알고리즘에 대해 설명한다.

얇은 멤브레인은 면내인장에 의해서만 하중을 전달한다. 멤브레인에 압축응력이 가해지면 압축응력의 방향으로 즉시 좌굴이 발생하면서 인장에 의한 하중은 계속 전달하는 일축인장응력상태가 된다. 멤브레인에 응력/변형률 상태가 주어졌을 때, 먼저 주름이 발생하였는지 여부를 판단하여야 한다. 주름의 발생은 응력지표, 변형률 지표 및 응력-변형률 혼합지표 등을 사용하여 판단할 수 있는데, 본 연구에서는 응력-변형률 혼합지표[10]를 사용하였다.

- (i) $\sigma_{min} > 0 \rightarrow \text{taut}$
- (ii) $\epsilon_{maj} \leq 0 \rightarrow \text{slack}$
- (iii) $\sigma_{min} \leq 0 \ \& \ \epsilon_{maj} > 0 \rightarrow \text{wrinkled}$

여기서 $(\sigma_{\min}, \sigma_{maj})$ 와 $(\epsilon_{\min}, \epsilon_{maj})$ 는 각각 최소 및 최대 주응력(principal stress)과 주변형률(principal strain)을 나타낸다, 이 지표에 따라서 멤브레인이 팽팽한(taut)한 상태이면 응력-변형률 관계를 수정할 필요가 없으므로 통상적인 해석과정에서와 같이 강성행렬과 응력이 계산되어 주 프로그램으로 귀환하게 되고, 느슨한(slack)한 상태이면 아무런 하중을 받지 못하게 되므로 강성행렬의 모든 요소를 아주 큰 벌칙매개변수(P)로 나누어 0에 가깝게 수정한 후 귀환한다(D_{ij}/P).

요소에서 주름이 발생하면 주응력방향으로 일축인장응력상태가 되므로 인장응력(σ_{maj})을 제외한 모든 응력성분을 제거해 주어야 한다. 주응력좌표계에서는 이미 전단응력의 값은 0이므로 압축응력(σ_{\min})만을 제거해주면 된다. 이를 수치적으로 다음 식과 같이 주응력좌표계에서 연성행렬의 첫 번째 성분에 벌칙을 가하여 모사할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{\min} \\ \epsilon_{maj} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} PS_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{\min} \\ \sigma_{maj} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

위 식을 역변환하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{\min}^* \\ \sigma_{maj}^* \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}^* & D_{12}^* & 0 \\ D_{12}^* & D_{22}^* & 0 \\ 0 & 0 & D_{33}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{\min} \\ \epsilon_{maj} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서 벌칙매개변수 P 는 큰 값을 가지므로

$$\begin{aligned} D_{11}^* &= \frac{S_{22}}{PS_{11}S_{22} - S_{12}^2} \rightarrow 0 \\ D_{12}^* &= \frac{-S_{12}}{PS_{11}S_{22} - S_{12}^2} \rightarrow 0 \\ D_{22}^* &= \frac{PS_{11}}{PS_{11}S_{22} - S_{12}^2} \rightarrow \frac{1}{S_{22}} \end{aligned} \quad (4)$$

가 되고, 따라서 주응력좌표계에서 일축인장상태가 되었음을 알 수 있다. 이를 통하여 수정된 강성행렬과 응력을 요소좌표계로 변환하면 서브루틴이 종료된다. 위 식에서 일축인장상태를 정확히 구현하기 위해서는 큰 값의 벌칙매개변수를 사용하여야 한다. 그러나 지나치게 큰 값을 사용하면 계산의 수렴성에 영향을 미치므로 적당한 값을 주어야 한다. 본 연구에서는 사전 계산을 통하여 $P=10^6$ 으로 결정하여 사용하였다.

2.3 유한요소 모델링

Figure 1은 본 논문에서 고려한 삼각형 태양돛 멤브레인의 기본 형상을 보여주고 있다. 멤브레인은 두께(t_m)가 25 μm 인 캡톤(Kapton)이며 크기는 20 m \times 10 m이다. 멤브레인은 아래 모서리에서는 태양돛의 허브에, 그리고 좌상 및 우상 모서리에서는 붐에 케이블로 연결되고 있으며 케이블과 붐의 연결각도는 θ_c 로 표시되어 있다.

멤브레인과 케이블이 연결되는 부분에는 멤브레인 모서리를 0.2 m의 길이로 자른 후 반지름이 1 mm인 강철 편을 배치하여 케이블에 가해지는 인장하중을 분산 전달되도록 하였다. 강철 편은 양 끝단은 반지름이 1 mm인 케블라(Kevlar) 케이블로 되어 있다. Table 1은 본 연구에서 사용한 재료들의 물성치를 정리한 것이다.

본 연구에서 고려한 형상은 좌우 대칭이므로 그림에서 회색으로 보이는 우측 1/2 부분에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구에서 태양돛의 허브와 붐은 모델링하지 않았다. 하부의 태양돛 허브와 연결되는 케이블 끝단은 고정하였으며 상부 모서리에서 붐과 연결되는 케이블의 끝단에서는 θ_c 방향으로 2.5 N의 인장하중을 가하였다. (이와 같은 인장력은 멤브레인의 제작, 패키징 및 전개과정에서 발생하는 구김을 어느 정도 펼치기 위해 필요하다[20].) 또한 중앙부의 수직선을 따라서는 대칭경계조건을 가하였다.

본 연구에서는 주름해석 알고리즘을 채용한 멤브레인 요소법을 사용하였으므로 태양돛 멤브레인은 멤브레인 요소(M3D4/M3D3)를, 강철 편은 빔요소(B31)를, 그리고 케이블은 트러스 요소(T3D2)를 사용하여 모델링하였다. 해석형상에 따

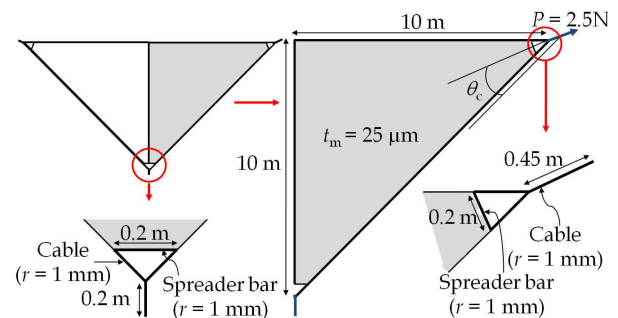


Fig. 1. Sail membrane configuration

Table 1. Material property

	Membrane	Kevlar	Steel
E (GPa)	2.5	127	207
ν	0.34	0.35	0.3
ρ (Kg/m ³)	1420	1450	7830

라서 균일 메쉬(uniform mesh) 또는 비정렬 메쉬(random mesh)를 사용하였다. 각각의 메쉬는 약 2만개의 요소로 되어 있는데 이 메쉬 사이즈는 사전 메쉬 수렴도 연구를 통해 충분히 수렴된 결과를 주는 경우에 대해 결정하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 케이블 각도 조정

먼저 Fig. 1의 삼각형 태양돛의 기본 형상에 대해 케이블 각도(θ_c)를 조정하여 주름을 저감하는 방식에 대해 조사하였다. Fig. 2는 기본 형상을 모델링한 유한요소 메쉬를 보이고 있는데 전체적으로 동일한 크기의 요소를 가지는 균일메쉬로 구성하였다. 이 메쉬를 사용하여 15.4° ~ 28.4° 사이의 케이블 각도에 대해 주름해석을 수행하고 각도에 따른 주름발생 면적에 대해 조사하였다.

Figure 3은 기본 형상의 태양돛 멤브레인에서 케이블 각도(θ_c)에 따른 주름발생 형상을 보이고 있다. 여기서 각 요소들은 적분점에서의 응력상태에 따라 주름의 상태가 분류되었는데, 요소내의 모든 적분점에서 주름이 발생하였으면 'Wrinkled', 일부 적분점에서만 주름이 발생하였으면 'Partly wrinkled', 그리고 모든 적분점에서 주름이 발생하지 않은 경우에는 'Taut'로 표시하였다. 전체적으로 주름은 인장응력이 가해지는 상부 모서리에 삼각형의 중앙부로 방사되는 형태로 광범위하게 발생하였다. 또한 그림에 나타난 바와 같이 주름이 발생한 지역은 케이블의 각도(θ_c)에 따라 변화하고 있음을 볼 수 있다. 케이블의 각도가 18.4° ~ 22.5°의 범위에서는 각도가 증가함에 따라서 중앙부의 주름발생 지역이 수축하면서 점차 감소한다. 그러나 θ_c 가 이보다 더 증

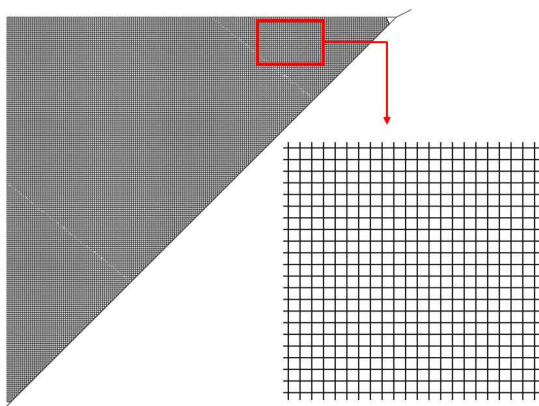


Fig. 2. Finite element mesh for cable angle adjustment model

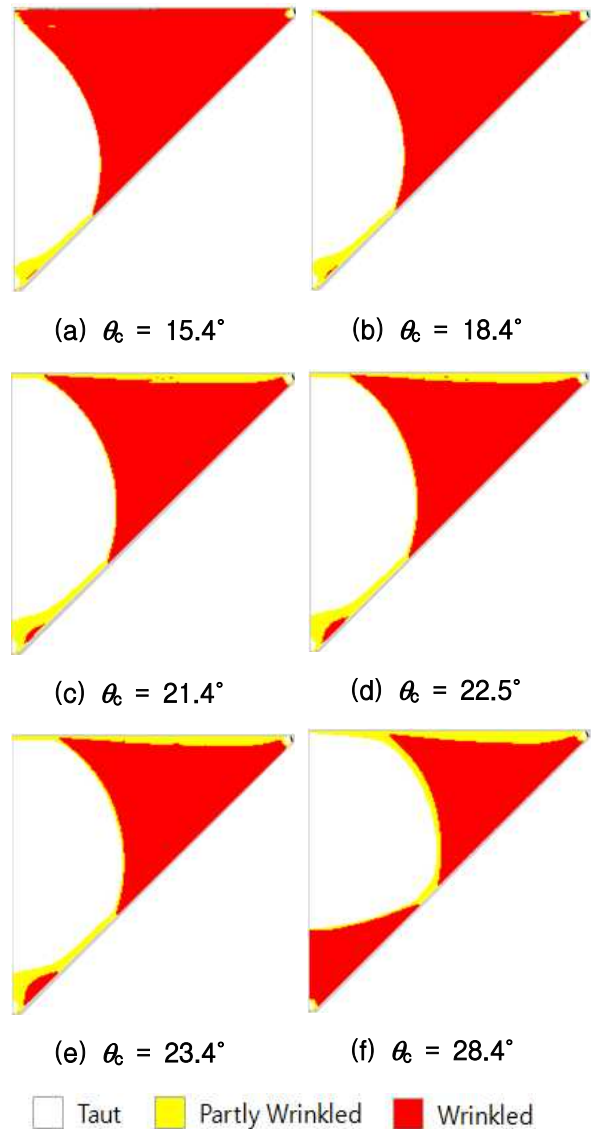


Fig. 3. Wrinkle shapes versus cable angle

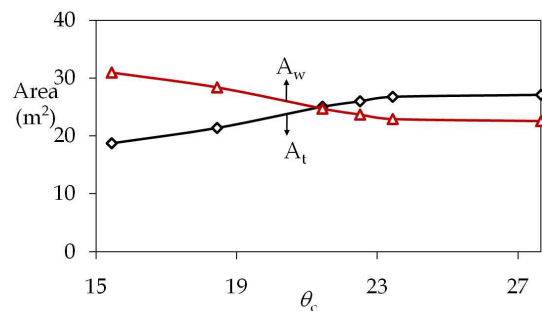


Fig. 4. Variation of wrinkled area versus θ_c

가하면 상부 모서리의 주름지역은 감소하지만 태양돛의 허브와 연결되는 하부 모서리에서 주름이 점차 크게 발생하였다.

Figure 4는 θ_c 에 따라 주름이 발생한 지역의 면적(A_w)과 팽팽한 지역의 면적(A_t)의 변화를 나

타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 주름이 발생한 면적은 θ_c 가 커짐에 따라 감소하다 수렴하는 경향을 보이고 있다.

Figure 5는 삼각형 태양돛 기본 형상에서 인장 하중 $P = 2.5 \text{ N}$ 이 가해졌을 때 미세스 응력 (Mises stress)의 분포를 보이고 있다. 여기서 보인 것을 θ_c 가 18.4° 인 경우이다. 그림에서 나타난 바와 같이 미세스 응력은 삼각형의 모서리 부분에서 큰 값을 보이며 삼각형의 중앙부분으로 이동할수록 점차 감소하는 분포를 보이는데 이는 쉽게 이해될 수 있는 결과이다. 최대 미세스 응력은 상부 모서리의 하중분산 바와 연결된 부분의 끝에서 가장 작은 값을 가지게 되는데 이를 σ_{\max} 로 표시하였다. 또한 중앙부에서 발생하는 최소 미세스 응력을 σ_o 로 정의하였다.

Figure 6은 θ_c 에 따라 태양돛 멤브레인에 발생하는 최대 미세스 응력(σ_{\max})과 중앙부에서 발생하는 최소 미세스 응력(σ_o)의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 중앙부에서 발생하는 응력은 θ_c 가 커짐에 따라 감소하는 경향을 보이고, 최대 응력은 19° 에서 23° 사이에서 가장

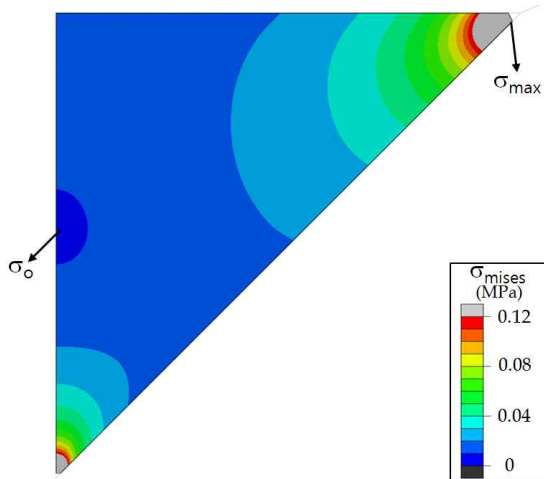


Fig. 5. Distribution of Mises stress ($\theta_c = 18.4^\circ$)

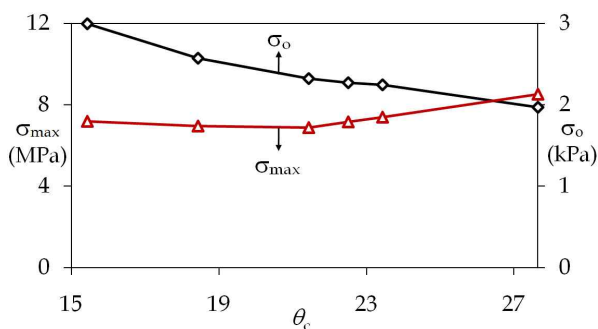


Fig. 6. Variation of σ_{\max} and σ_o versus θ_c

작은 값을 가진다. 최대응력의 값은 작을수록, 그리고 중앙부의 응력의 값은 클수록 유리하므로 응력설계의 관점에서 기본형상의 케이블각도(θ_c)의 값은 19° 근처의 값을 선정하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

3.2 현수선(catenary) 모델

본 논문에서는 현수선 모델을 사용하였을 경우 태양돛 멤브레인의 주름발생 거동에 대해 조사하였다. 현수선 방식은 세일의 가장자리를 안쪽으로 현수선 곡선이 되도록 설계하는 방식으로 Fig. 7에서 개략적인 모습을 나타내고 있다. 현수선 곡선은 밀도가 균일한 케이블의 양끝 부분만이 고정되어 그 자체 무게만으로 처지게 될 때의 곡선으로 정의된다.

Figure 7에서 기본 삼각형 태양돛 멤브레인의 원래 면적을 A_0 , 현수선 곡선에 의해 줄어드는 면적을 A_R 이라고 하면 기본 태양돛 형상의 원래 면적에 대한 현수선 태양돛의 면적감소비(α)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha = \frac{A_R}{A_0} \tag{5}$$

본 논문에서는 인장케이블의 각도(θ_c)가 18.4° 와 22.5° 일 경우인 현수선 모델을 고려하였다. 또한 α 값이 2.5%, 5%, 7.5%일 경우에 대해 주름해석을 수행하여 그에 따른 주름저감효과에 대하여 연구하였다. Fig. 8은 $\theta_c = 18.4^\circ$ 이고 $\alpha = 7.5\%$ 인 경우의 현수선 모델의 유한요소 메쉬이다. 현수선 모델의 경우 경계가 곡선이므로 크기와 배열이 일정하지 않은 비정렬 메쉬를 사용하였다.

Figure 9는 $\theta_c = 18.4^\circ$ 일 때 면적감소비(α)에 따른 주름이 발생한 모습을 나타내고 있다. 그림

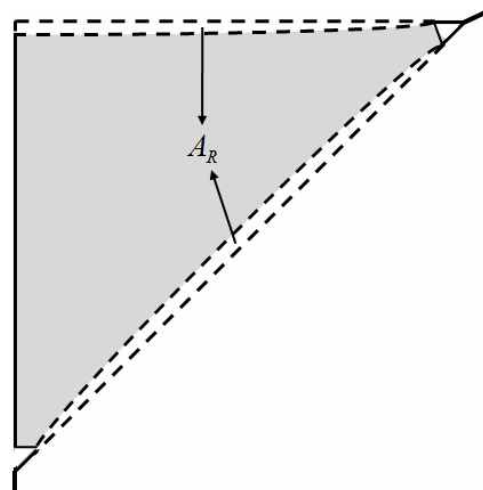


Fig. 7. Schematic of catenary model

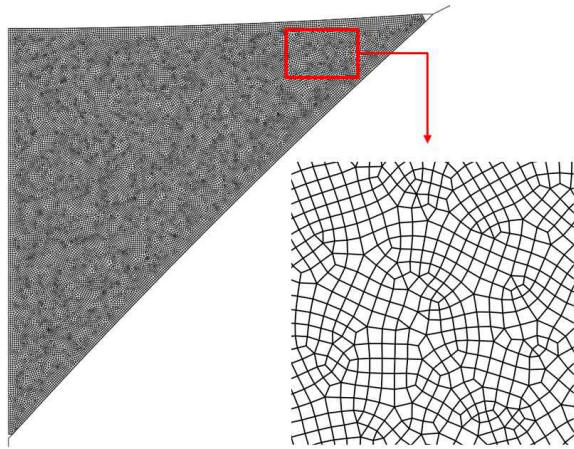


Fig. 8. Finite element mesh for catenary model

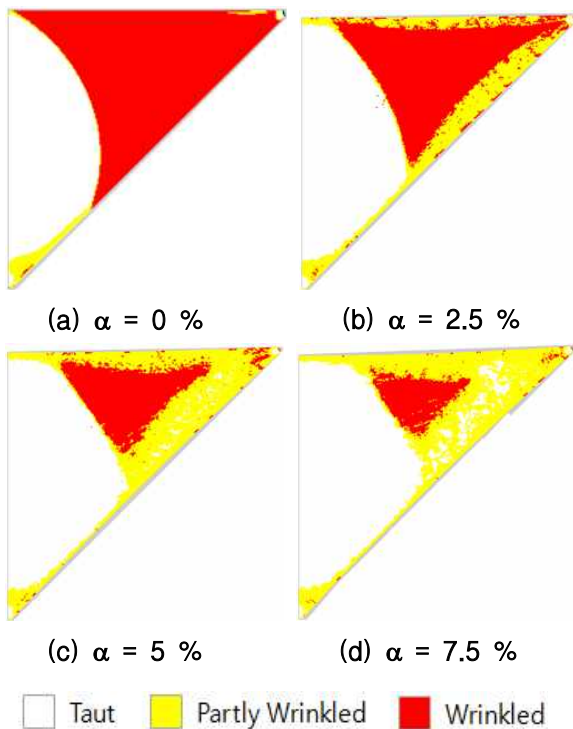


Fig. 9. Variation of wrinkle shape of catenary model

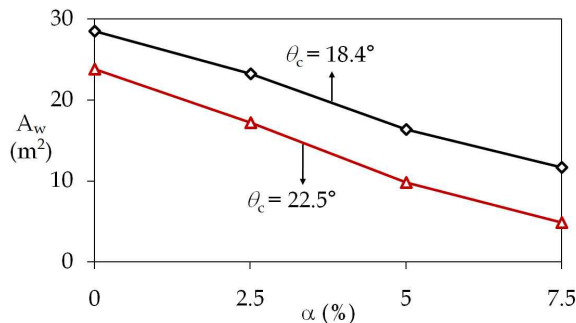


Fig. 10. Variation of wrinkled area versus α of catenary model

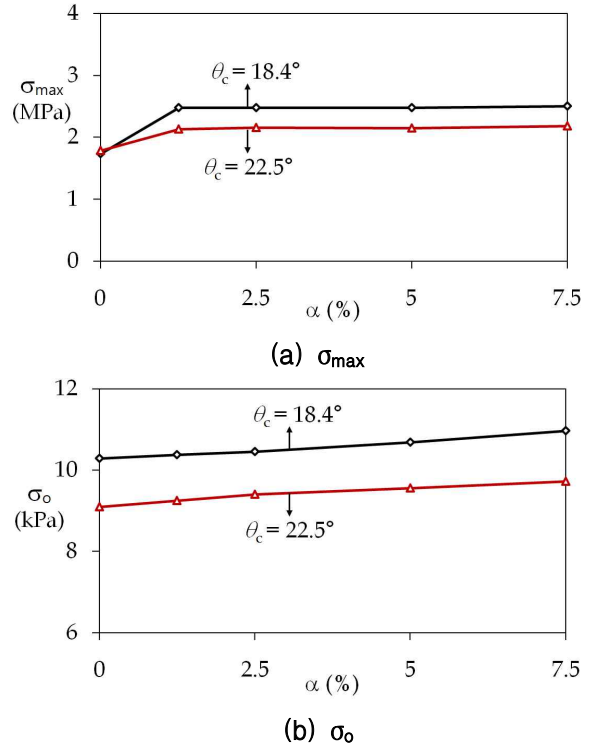


Fig. 11. Variation of maximum and minimum stresses of catenary model

에서 보는 바와 같이 현수선 모델의 경우 면적감소비가 증가함에 따라서 주름발생면적은 현저히 감소함을 알 수 있다. Fig. 10은 θ_c 가 18.4° 와 22.5° 일 때 면적감소비(α)에 따른 주름발생면적의 변화를 나타내고 있는데 α 값이 증가함에 따라 주름이 발생하는 면적이 확연하게 감소하고 있음을 볼 수 있다.

Figure 11은 현수선 모델의 멤브레인에서 최대 미체스 응력(σ_{max}) 및 중앙부의 최소 미체스 응력(σ_0)의 변화를 보여주고 있다. 최대응력은 현수선 방식으로 면적을 감소하는 즉시 순간적으로 증가하지만 이후 면적감소비(α)의 증가에 따라서는 크게 변화하지 않았다. 또한 중앙부의 응력 σ_0 는 거의 변화를 보이지 않아 α 에 민감하지 않음을 알 수 있다.

3.3 현수선-와이어(catenary-wire) 모델

현수선-와이어 모델은 현수선 모델의 곡선경계에 와이어를 설치하여 긴장시킴으로서 멤브레인에 전달되는 전단력을 감소시켜 주름을 저감하는 방법이다. Figure 12는 현수선-와이어 모델을 개략적으로 나타낸 것으로 여기서 r_w 는 연결되는 와이어의 반지름을 표시하고 있다. 유한요소 메쉬는 현수선 방식과 동일하게 제작되었으며 와이어에 대해 추가적으로 트러스 요소(T3D2)를 사

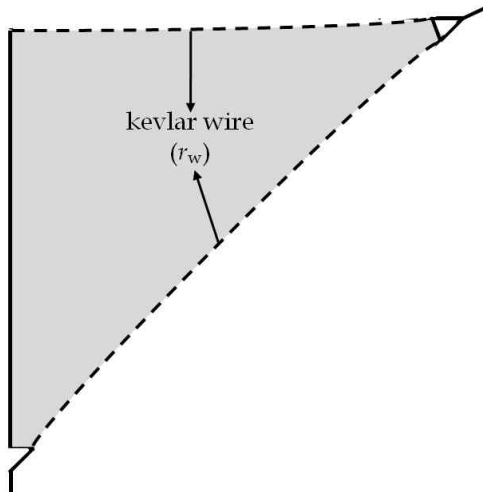


Fig. 12. Catenary-wire model

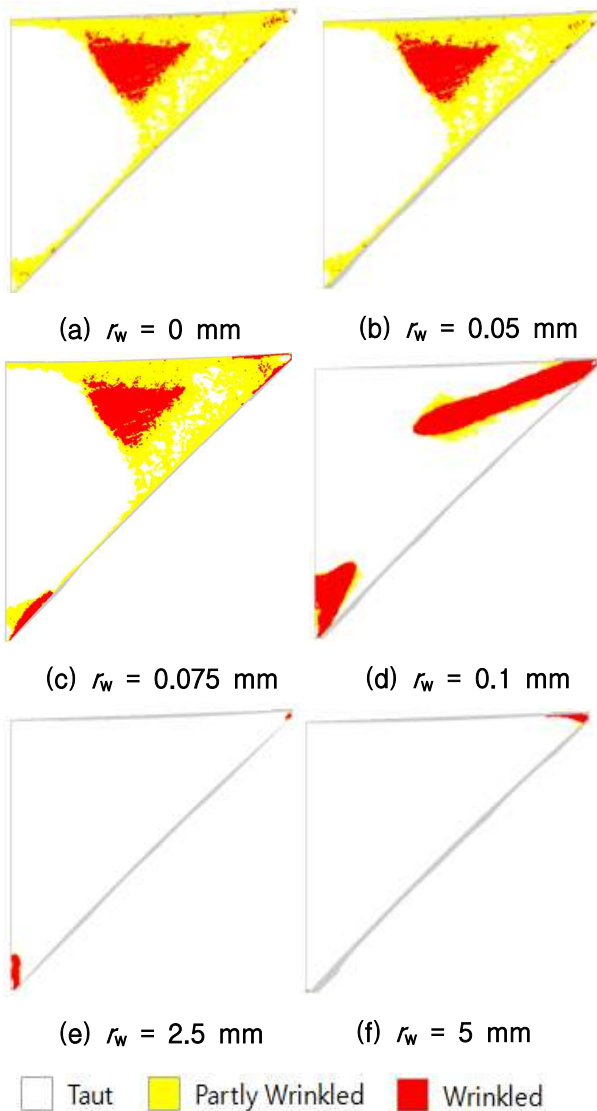


Fig. 13. Wrinkle shape variation versus r_w in catenary-wire model

용하여 모델링하였다.

본 논문에서는 θ_c 값이 18.4° 와 22.5° 이고 α 값이 2.5%, 5% 및 7.5%인 경우에 대하여 카테나리-와이어 모델에 대해 주름해석을 수행하였다. 또한 와이어의 반지름(r_w)에 따른 주름저감 효과를 조사하였다.

Figure 13은 $\theta_c = 18.4^\circ$ 이고 $\alpha = 7.5\%$ 인 경우에서 와이어의 반지름에 따른 주름발생 지역의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 와이어의 반지름이 증가할수록 발생하는 주름의 면적이 크게 감소하고 있음을 볼 수 있다. 특히 반지름이 2.5 mm 보다 큰 와이어를 연결하는 경우 주름이 거의 발생하지 않음을 보여 충분한 크기의 반지름을 가지는 와이어를 연결한다면 주름을 완전히 제거할 수 있을 것이라고 판단된다.

Figure 14는 현수선-와이어 모델에서 와이어 반지름의 크기에 따른 주름의 발생 면적의 비율 $P_w (= A_w/A_s, A_s$: 태양돛의 면적, A_w : 주름발생 면적)를 나타낸 것이다. 그림에서 보인 바와 같이 현수선-와이어 모델의 경우 케이블의 각도가 클수록, 줄어드는 면적의 비율이 클수록, 그리고 와이어 반지름이 클수록 주름이 발생하는 면적의 비율이 작아짐을 알 수 있다.

Figure 15는 와이어 반지름에 따른 태양돛의

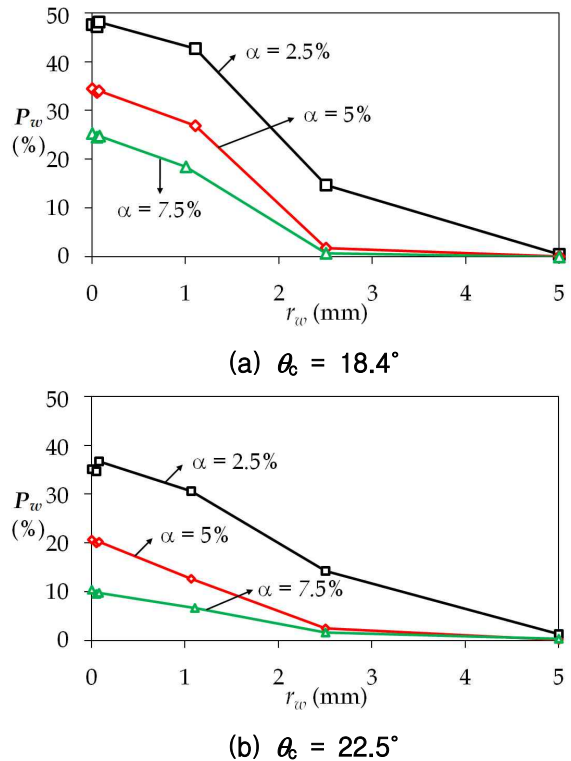


Fig. 14. Variation of wrinkled area versus r_w in catenary-wire model

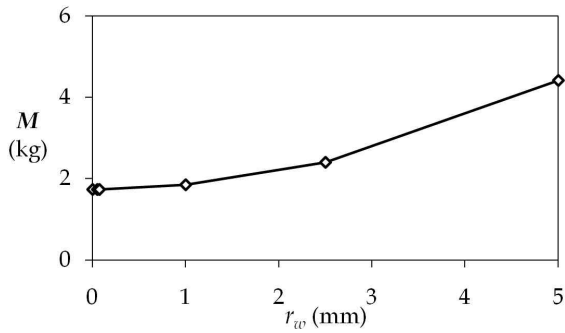
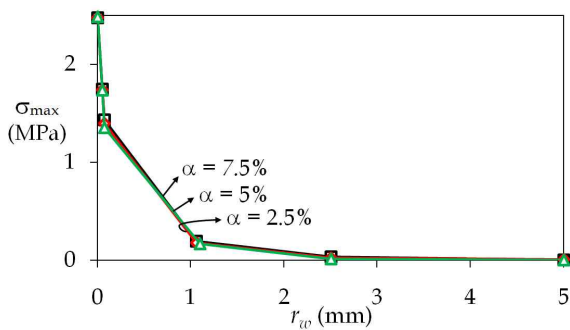


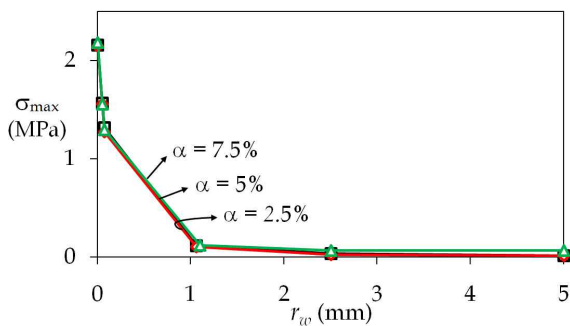
Fig. 15. Catenary-wire model mass versus r_w

질량(M)의 변화를 나타낸 것이다. 와이어 반지름이 아주 작을 경우에는 와이어 자체의 질량 작아 태양돛 전체 질량의 큰 변화를 보이지 않으나 와이어의 반지름이 약 1 mm 이상의 값을 가지는 구간부터 조금씩 질량의 증가를 보이고 있다. 태양돛은 효과적인 추력을 얻기 위해서 질량을 최소화 하는 것이 유리하므로 주름발생면적과 질량을 동시에 최소화 할 수 있는 와이어 반지름의 선택이 필요한 것으로 생각된다.

Figure 16~17은 각각 현수선-와이어 모델에서 멤브레인에서 최대 미체스 응력과 중앙부의 최소 미체스 응력의 변화를 나타내고 있다. 최대 응력은 와이어 반지름의 크기가 증가함에 따라서 급

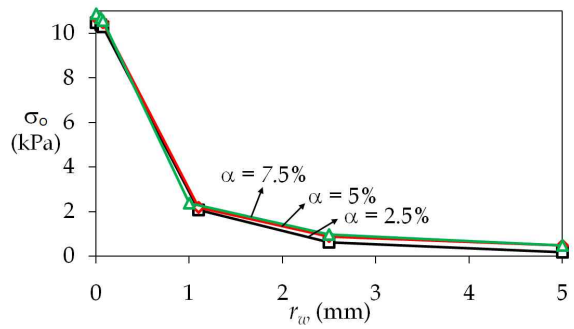


(a) $\theta_c = 18.4^\circ$

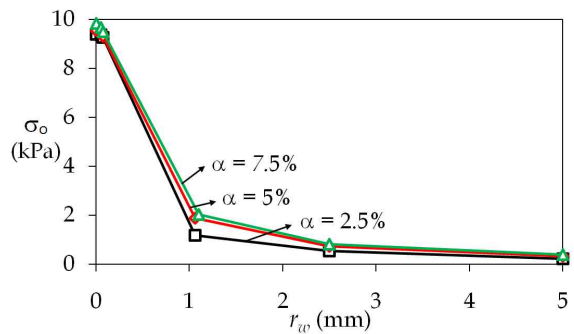


(b) $\theta_c = 22.5^\circ$

Fig. 16. Variation of σ_{max} versus r_w in catenary-wire model



(a) $\theta_c = 18.4^\circ$



(b) $\theta_c = 22.5^\circ$

Fig. 17. Variation of σ_0 versus r_w in catenary-wire model

격하게 감소하는 경향을 보이며 줄어든 면적의 비에는 큰 영향을 받지 않는다. 또한 중앙부의 응력의 경우에는 와이어 반지름의 크기와 줄어든 면적의 비에 영향을 받으나 줄어든 면적비에 따른 응력에 차이는 크지 않아 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 삼각형 태양돛의 주름저감설계방안에 대한 연구를 수행하였다. 주름저감을 위해 태양돛 멤브레인의 연결 케이블 각도를 조정하는 방식, 현수선 방식과 현수선-와이어 방식을 고려하였으며 감소되는 면적 및 와이어의 반지름의 변화에 따른 주름거동의 변화를 조사하였다. 해석에서 멤브레인에 발생하는 주름은 별칙매개 변수에 의한 물성치를 수정하는 주름 알고리즘을 사용자 부프로그램으로 상용 유한요소해석 코드에 삽입하여 구현되었다.

연구 결과, 케이블의 각도를 조정하는 방식, 현수선 방식, 현수선-와이어 방식 모두 주름을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 케이블의 각도를 조정하는 방식의 경우에는 각도가 커질수록 주름이 발생하는 면적이 감소하였으며, 현수선

방식의 경우 줄어드는 면적이 클수록 주름의 발생이 현저히 감소하였다. 고려된 방식 중 주름감소에 가장 효과적인 현수선-와이어 방식은 와이어 반지름에 따라 태양돛 멤브레인에 발생하는 주름을 완전히 제거할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 와이어 반지름을 증가할수록 구조물의 질량이 증가되므로 적절한 값을 사용하여야 된다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 우주핵심기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) Roddeman, D.G., "Finite-Element Analysis of Wrinkling Membranes", *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 7, 1991, pp. 299~307.
- 2) Murphey, T., Murphy, D.M., Mikulas, M.M. and Adler, A., "A Method to Quantify the Thrust Degradation Effects of Structural Wrinkles in Solar Sails", 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., April 2002.
- 3) Mikulas, M.M. and Adler, A., "Rapid Structural Assessment Approach for Square Solar Sails Including Edge Support Cords", 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., April 2003.
- 4) Woo, K., and Nam, D., "Analysis of Wrinkling Behavior for Triangular Sail", KSAS05-2422, 2005, pp. 537~540.
- 5) Fang, H., Lou, M., Hsia, L.M. and Leung, P., "Catenary Systems for Membrane Structures", 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., April, 2001.
- 6) Sakamoto, H., Park, K.C. and Miyazaki, Y., "Dynamic Wrinkle Reduction Strategies for Cable Suspended Membrane Structure", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 42, No. 2005, pp. 850~858.
- 7) Leifer, J., Jonathan, B., Belvin, K.W., Vaughn, B., "Evaluation of Shear Compliant Borders for wrinkle reduction in thin film membrane structures", 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., April, 2003.
- 8) Roddeman, D.G., Drukker, J., Oomens, C.W.J. and Janssen, J.D., "The Wrinkling of Thin Membranes: Part I - Theory", *J. Applied Mechanics*, Vol. 54, 1987, pp. 884~887.
- 9) Roddeman, D.G., Drukker, J., Oomens, C.W.J. and Janssen, J.D., "The Wrinkling of Thin Membranes: Part II - Numerical Analysis", *J. Applied Mechanics*, Vol. 54, 1987, pp. 888~892.
- 10) Kang, S. and Im, S., "Finite Element Analysis of Wrinkling Membranes", *J. Applied Mechanics*, Vol.64, 1997, pp. 263~269.
- 11) Lu, K., Accorsi, M. and Leonard, J., "Finite Element Analysis of Membrane Wrinkling", *J. Numerical Methods in Engineering*, Vol. 50, 2001, pp. 1017~1038.
- 12) Miller, R.K., and Hedgepeth, J.M., "Algorithm for Finite Element Analysis of Partly Wrinkled Membranes", *AIAA Journal*, Vol. 12, No. 2001, pp. 1761~1763.
- 13) Miyazaki, Y. and Nakamura, Y., "Dynamic Analysis of Deployable Cable-Membrane Structures with Slackening Membrane", *Proc. 21st Int. Symp. on Space Technology and Science*, 1988.
- 14) Liu, X., Jenkins, C.H., and Schur, W.W., "Large Deflection Analysis of Pneumatic Envelopes Using a Penalty Parameter Modified Material Model", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 37, 2001, pp. 233~251.
- 15) Woo, K., Igawa, H., and Jenkins, C.H., "Analysis of Wrinkling Behavior of Anisotropic Membrane", *Computer Modeling in Engineering and Science*, Vol. 6, No. 2004, pp. 397~408.
- 16) Ding, H. and Yang, B., "The Modeling and Numerical Analysis of Wrinkled Membranes", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 58, 2003, pp. 1785~1801.
- 17) Wong, Y.W., Pellegrino, S., and Park, K.C., "Prediction of Wrinkle Amplitudes in Solar Sails", 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS SDM Conf., April 2003.
- 18) Su, X., Abdi, F., Taleghani, B., and Blandino, J.R., "Wrinkling Analysis of A Kapton Square Membrane under Tensile

Loading", 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS SDM *Conf.*, April 2003.

19) Tessler, A., Sleight, D.W., and Wang, J.T., "Nonlinear Shell Model of Thin Membranes with Emphasis on Structural Wrinkling", 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS

SDM *Conf.*, April 2003.

20) Murphy, D., Trautt, T., McEachen, M., and Messner, D., "Progress and Plans for System Demonstration of a Scalable Square Solar Sail", 14th AAS/AIAA Space Flight Mechanics *Conf.*, Feb. 2004.