

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(3), 195-203(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.3.195

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

주름이 있는 삼각형 태양돛의 동적해석

배홍수*, 우경식**

Dynamic Response of Triangular Solar Sail with Wrinkles

Hongsu Bae* and Kyeongsik Woo**

Department of Civil Systems Engineering*

Chungbuk National University**

ABSTRACT

In this paper, the dynamic behavior of wrinkled triangular solar sail was studied by finite element analysis. The analysis was proceeded first by performing static wrinkle analysis under tensile corner load on sail membrane, and then performing modal analysis. The membrane element method with wrinkle algorithm and the shell element post-buckling analysis method were used to account for the wrinkle deformation and the results were compared for analysis methods throughly. The comparison was also made to that without wrinkle consideration to investigate the effect of wrinkle deformation on the results. Cases with various loading cable angles were analyzed and the results were systematically examined.

초 록

본 논문에서는 유한요소해석을 통하여 삼각형 태양돛에 대하여 동적거동을 연구하였다. 동적해석은 삼각형 태양돛 멤브레인에 인장하중이 가해졌을 때 발생하는 주름해석을 수행한 후, 이 상태에서 인장하중을 고정하고 모달해석을 수행하였다. 해석에서 주름 알고리즘을 채용한 멤브레인 요소법과 셸 요소법의 두 가지 방법을 사용하였으며, 그 결과들을 수방법론적 관점에서 비교분석하였다. 주름을 고려하지 않은 경우에 대해서도 해석을 수행하여 동적특성 결과를 주름을 고려한 경우와 비교하였으며, 케이블 각도에 따른 영향에 대하여 체계적으로 조사하였다.

Key Words : Solar sail(태양돛), Dynamic analysis(동적해석), Wrinkle(주름), Modal analysis(모달해석), Wrinkle algorithm(주름 알고리즘), Nonlinear post-buckling analysis(비선형 후좌굴 해석)

1. 서 론

태양돛은 아주 얇은 폴리머 필름으로 구성되어 있는 구조물로 태양에서 방사되는 빛을 반사

하여 추력을 얻는 방식으로 운용된다. 이 때문에 태양돛은 아주 넓은 면적의 필름이 필요하며, 그 무게 또한 매우 가벼울 필요가 있다. 실제 우주 임무에 고려되는 태양돛은 길이가 수 백미터에

† Received : October 27, 2014 Revised : January 26, 2015 Accepted : February 6, 2015

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

달하고, 두께는 수 마이크로미터에 불과하다[1].

얇은 필름으로 구성된 태양돛 멤브레인 구조는 면내 강성에 비하여 굽힘강성이 매우 작으므로, 여기에 압축응력이 가해지면 즉시 좌굴이 발생하게 되는데 이를 주름(wrinkle)이라고 한다.

멤브레인에 발생하는 주름에 대해서는 상대적으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 현재 유한요소법을 이용하여 멤브레인에 발생하는 주름을 해석하는 방법은 크게 멤브레인 요소법과 셸 요소법으로 나눌 수 있다. 멤브레인 요소법은 주름 형상을 등가적인 응력거동과 평균변형면을 예측하게 되는데, 여기에는 변형 구배(deformation gradient)를 수정하는 방법[2-5]과 물성치 행렬을 수정하는 방법[6-9]이 있다. 이와는 별도로 셸 요소를 사용하여 주름의 형상을 외연적으로 계산하는 연구도 수행되었는데 주름변형을 유발시키기 위하여 먼저 셸 요소에 의한 좌굴해석을 수행한 후 일부 좌굴모드를 선형 조합한 미소크기의 변형을 메쉬에 가하거나[10-11], 좌굴형상이 아닌 무작위 결함(random imperfection)을 가하는 방법[12], 그리고 미소크기의 면외방향의 하중을 가하는 방법[13] 등이 사용되었다.

태양돛과 같이 현재 고려되고 있는 거대한 멤브레인으로 제작된 초경량 구조물의 경우 효과적인 제어와 임무 수행을 위하여 구조물에 발생할 수 있는 동적 거동을 예측하는 것이 필수적이다[14]. 지금까지 멤브레인에 발생하는 주름에 대한 정적 해석은 많은 연구가 진행되어 왔으나, 멤브레인의 동적거동에 대한 수치해석적 연구는 일부만 진행된 정도이다. Irie 등[15]은 사각형 멤브레인 형상과 삼각형 멤브레인 형상의 동적 거동을 비교하였으며, Evensen 등[16]은 삼각형 멤브레인과 육각형 멤브레인의 동적 거동을 대칭 조건과 군론(group theory)을 이용하여 체계적으로 정리하였다. Sewall 등[17]은 공기와 진공상태의 삼각형 멤브레인에 다양한 인장하중이 가해졌을 경우에 대한 동적거동을 실험과 해석을 통하여 조사하였다. 그러나 이상의 연구에서는 멤브레인에 발생하는 주름의 영향을 반영하지 못하였다.

한편 Jenkins 등[18]은 주름이 발생하는 멤브레인 세일에 대하여 실험과 수치해석을 통하여 동적 거동을 조사하였으며, Hossain 등[19]은 주름이 발생하는 멤브레인과 주름이 발생하지 않은 멤브레인에 대하여 실험과 수치해석을 통하여 동적 거동을 비교하였다. 또한, Sleight 등[20]은 20 m 급 태양돛 지상시험을 수행하여 운용시 발생할 수 있는 모드 형상과 고유 진동수 등의 동적 거동을 예측할 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 삼각형 태양돛 멤브레인 축소모델에 대하여 동적거동을 연구하였다. 주름 알고리즘을 채용한 멤브레인 요소법과 셸 요소법에 의한 후좌굴 해석으로 정적 주름해석을 수행한 후 동적 해석을 수행하였으며, 그 결과를 해석방법에 따른 수렴성과 정확성의 관점에서 비교하였다. 또한, 멤브레인에 발생하는 주름을 고려하였을 경우와 고려하지 않았을 경우를 모드형상과 진동수 관점에서 비교해 보았으며, 케이블 각도에 따른 동적 거동영향에 대하여 체계적으로 조사하였다. 해석은 상용유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 멤브레인 요소법을 채택하였을 경우 주름 알고리즘을 프로그램하여 사용자 부프로그램으로 삽입하여 계산을 수행하였다.

II. 해 석

2.1 유한요소 모델링

Figure 1은 본 논문에서 고려한 삼각형 태양돛 멤브레인 축소모델의 기본 형상을 보여주고 있다. 멤브레인의 크기는 $1 \times 0.5 \text{ m}^2$ 이며 두께(t_m)가 $12.7 \mu\text{m}$ 인 캡톤(Kapton)으로 되어있다. 멤브레인은 중앙 모서리에서는 태양돛의 허브에, 그리고 좌상 및 우상 모서리에서는 봄에 케이블로 연결되고 있으며 케이블과 봄의 연결각도는 θ 로 표시되어 있다.

멤브레인과 케이블이 연결되는 부분에는 멤브레인 모서리를 0.02 m의 길이로 자른 후 반지름이 1 mm인 강철 핀을 배치하여 케이블에 가해지는 인장하중을 분산 전달되도록 하였다. 강철 핀의 양 끝단은 반지름이 1 mm 인 케블라(Kevlar) 케이블로 봄으로 연결되어 있다. Table 1에서 본 연구에서 사용한 재료들의 물성치를 정리 하였다.

본 연구에서 태양돛의 허브와 봄은 모델링하지 않았다. 하부의 태양돛 허브와 연결되는 케이

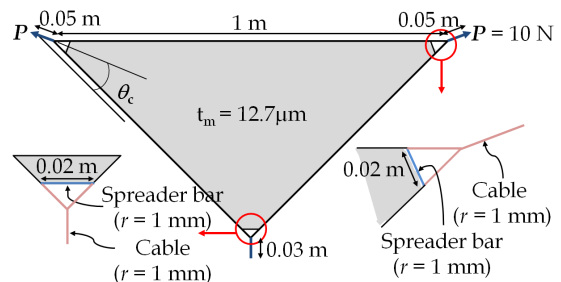


Fig. 1. Sail membrane configuration

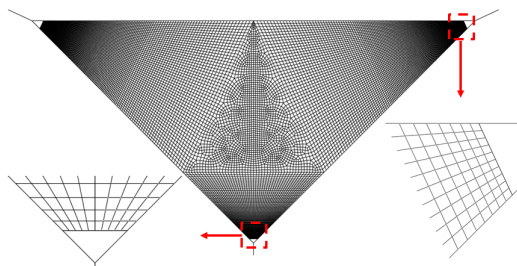
Table 1. Material property

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

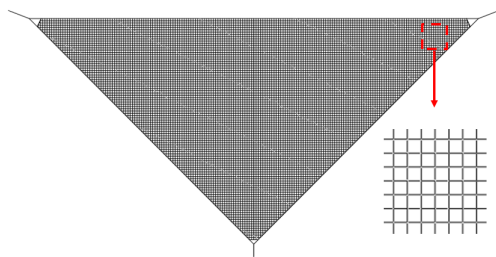
블 끝단은 단순지지로 가정하였으며 상부 모서리에서 붐과 연결되는 케이블의 끝단에서는 θ 방향으로 적절한 주름이 발생할 수 있는 약 10 N의 인장하중을 가하였다.(이와 같은 인장력은 멤브레인의 제작, 패키징 및 전개과정에서 발생하는 구김을 펼치기 위해 필요하며, 이로 인하여 멤브레인에 어느 정도의 주름이 발생한다[21]).

본 연구에서는 상용유한요소 해석코드인 ABAQUS를 통하여 해석을 수행하였다. 태양돛 세일 멤브레인에 대하여 셸 요소법을 채용한 경우에는 얇은 셸 요소(S4R5/S3R)를 사용하였고, 멤브레인 요소법의 경우 멤브레인 요소(M3D4/M3D3)를 사용하여 모델링하였다. 강철 핀은 보 요소(B31)를, 그리고 케이블은 트러스 요소(T3D2)를 사용하여 모델링하였다.

Figure 2는 본 연구에서 사용한 해석 메쉬를 나타내고 있다. 본 연구에서는 사전연구를 통하여 각각의 방법에 따라 적절한 메쉬를 선정하여 사용하였다. 셸 요소법의 경우 멤브레인 모서리 부분에서 발생하는 주름을 고려하기 위하여 방사



(a) pan mesh



(b) uniform mesh

Fig. 2. FE meshes

메쉬(pan mesh)를 사용하여 해석을 수행하였고, 멤브레인 요소법의 경우 크기가 동일한 균일메쉬(uniform mesh)를 사용하였다. 사용된 요소의 수는 사전 메쉬 수렴도 연구를 통하여 결정하였으며, 셸 요소법의 경우 93,076 개의 요소를, 멤브레인 요소법의 경우 10,096 개의 요소를 사용하였다.

2.2 정적 및 동적 해석

본 연구에서 해석은 먼저 태양돛 멤브레인 전개를 위해 작용되는 인장하중에 대한 정적 주름 해석을 수행한 후, 인장하중을 고정된 상태로 동적 모달해석(modal analysis)을 수행하였다. 주름 해석은 멤브레인 요소법과 셸요소법을 사용하였는데, 멤브레인 요소법에서는 벌칙매개변수법(PPMM)[8-9]에 의한 주름 알고리즘을 프로그래밍하여 사용자 부프로그램으로 삽입하여 팽팽한 상태(taut), 주름 상태(wrinkled) 및 느슨한 상태(slack) 등 멤브레인의 주름거동을 모사하였다. 셸요소법은 메쉬에 미소 크기의 무작위 결함을 심어 주름 변형을 발생시키고 이를 성장시키는 기하학적 비선형 후 좌굴 유한요소해석을 통하여 수행하였다[12]. 본 연구에서 메쉬 내부에 위치한 절점들에 대하여 면외 방향으로 약 두께의 1~5% 크기를 가지는 미소의 무작위 결함을 가하였으며, 해석의 안정성을 위하여 결과에 영향을 미치지 않을 크기의 인위적인 댐핑(10^{-12})을 가하였다.

동적해석은 삼각형 태양돛 멤브레인에 대해 주름해석을 수행한 후 가해진 인장하중을 고정된 상태에서 모달해석을 수행하였다. 본 연구에서는 특성방정식을 풀기 위한 고유치 알고리즘로 란초스(Lanczos) 알고리즘을 이용하였으며, 고유모드와 고유 진동수를 조사하여 태양돛 멤브레인의 동적 거동을 연구하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 삼각형 세일의 주름거동

Figure 3는 케이블 각도가 $\theta = 26^\circ$ 인 삼각형 세일 멤브레인에 대하여 셸 요소법을 사용하여 주름 해석을 수행한 결과를 부응력(minor principal stress)의 분포로 나타내고 있다. 부응력은 주름발생 지표의 주요인자로, 부응력의 값이 음인 지역이 주름이 발생한 지역을 표시한다. 그림에서 보는 바와 같이 주로 좌,우상부에서 양의 값과 음의 값이 반복되는 부응력의 분포는 주름이 발생한 지역 및 좁고 긴 주름의 형상을 나

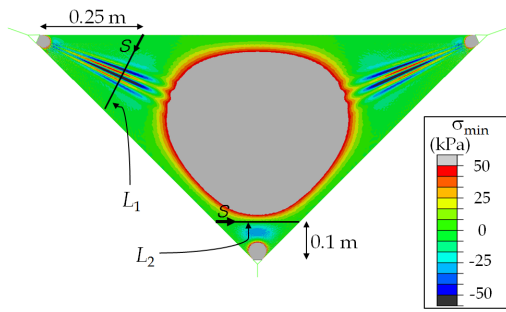


Fig. 3. Variation of minor in-plane principal stress distribution by shell element method ($q_c = 26^\circ$)

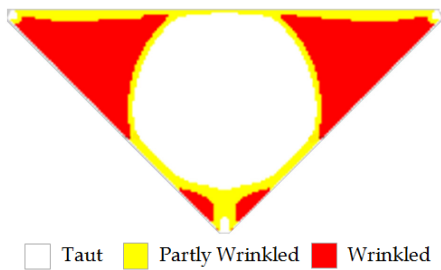


Fig. 4. Wrinkle shape predicted by membrane element method ($q_c = 26^\circ$)

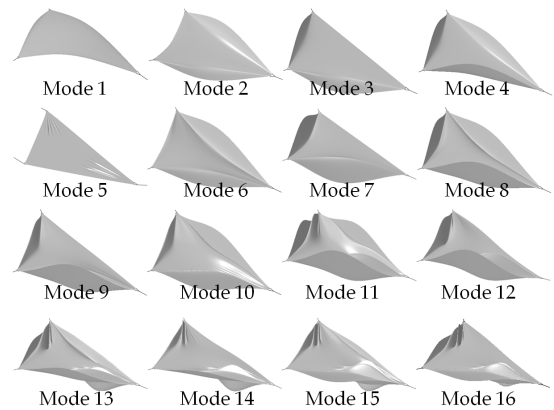
타내고 있다. 또한, 쉘 요소법의 경우 주름이 발생한 지역에서 주름의 상세한 형상을 면외 방향의 변위를 통하여 조사할 수 있다.

Figure 4는 삼각형 세일 멤브레인에 대하여 주름 알고리즘을 채용한 멤브레인 요소법을 통하여 해석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 여기서 각 요소들은 적분점에서의 응력상태에 따라 주름의 상태가 분류되는데[22], 요소내의 모든 적분 점에서 주름이 발생하였으면 'Wrinkled', 일부 적분 점에서만 주름이 발생하였으면 'Partly wrinkled'으로 표시하였다. 그리고 모든 적분 점에서 주름이 발생하지 않은 경우에는 'Taut'로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 쉘 요소법의 해석결과와 같이 하중이 가해지는 좌, 우 상부 모서리 부근의 광범위한 지역에서 주름이 발생하며, 도심부에는 팽팽한 상태를 보이고 있다. 또한, 멤브레인 요소법은 태양돛 멤브레인에 발생하는 주요 주름만을 나타낼 수 있는 쉘 요소법에 비하여 멤브레인 내에 발생하는 주름의 전체적인 위치와 면적 등을 비교적 명확히 예측할 수 있다.

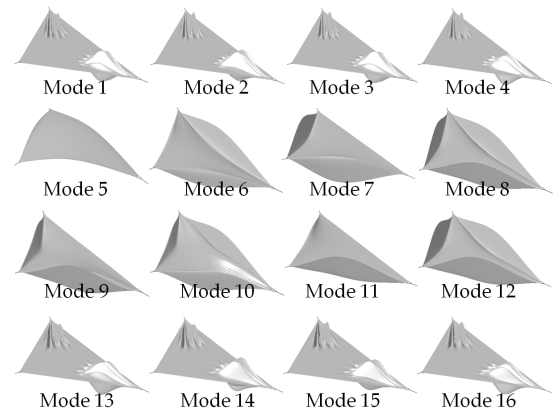
3.2 삼각형 세일의 동적거동

Figure 5는 케이블 각도가 $\alpha = 26^\circ$ 인 주름이

발생한 삼각형 태양돛 멤브레인에 대하여 쉘 요소법을 채용하여 모달해석을 수행한 결과를 나타내고 있다. 쉘 요소법에 의한 모달해석은 주름변형을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 수행되었는데, Fig. 5에서 (a)는 주름해석을 고려한 모달해석의 경우이고, (b)는 케이블에 하중이 재하된 태양돛 멤브레인의 주름해석을 고려하지 않은 모달해석의 결과를 보이고 있다. 그림에서 보인 바와 같이 두 가지 경우 처차모드부터 다른 모드 형상이 발생하였다. 모드형상의 발생가능성을 생각해 보았을 때, 주름해석을 고려하지 않은 모달해석의 경우 첫 번째 모드에서 네 번째 모드까지 현실적이 않은 형태의 모드 형상이 나타나는데 이는 주름을 고려한 경우에는 발생하지 않는다. 또한, 이후 발생한 모드형상들은 주름을 고려한 모달해석의 모드형상과 차이를 보이고 있으며, 비교적 유사한 형상을 보이는 것도 존재한다. 이는 얇은 태양돛 멤브레인의 경우 굽힘강성



(a) wrinkle considered



(b) wrinkle not considered

Fig. 5. Mode shapes by shell analysis

이 매우 작아 면외방향으로의 거동이 매우 민감하게 나타나기 때문에 생각된다. 즉, 멤브레인 요소법에서 주름 알고리즘을 사용하거나 셸 요소법에서 주름발생을 위한 여러기법을 사용하여 좌굴이 자연스럽게 발생하도록 고려하면 좌굴(주름)의 형상이 비교적 정확하게 나타나게 되나 그렇지 않은 경우 주름 또는 느슨(slack)한 상태가 될 가능성이 있는 지역에서 수치적 민감도에 의한 오차에 기인하는 것으로 판단된다.

Figure 6은 모달해석의 수행 결과에 대하여 Modal Assurance Criteria(MAC)를 통하여 주름 해석을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 모드 상관관계를 보이고 있다. MAC은 모드들 사이의 형상적 상관관계를 0과 1사이의 값으로 나타낼 수 있으며, 그 값이 1에 가까울수록 두 모드 사이의 형상적 유사성이 높음을 의미한다. 여기서 MAC은 아래의 식으로 정의된다.

$$MAC(i,j) = \frac{(\{v_i\}^T \{v_j\})^2}{(\{v_i\}^T \{v_i\})(\{v_j\}^T \{v_j\})} \quad (1)$$

($\{v_i\} = i^{th}$ eigenvector)

본 연구에서는 저차모드 순으로 20개의 모드들에 대한 모달해석을 수행하여 MAC을 수행하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 주름해석을 고려한 경우와 고려하지 않은 몇몇의 경우에서 높은 MAC 값이 나타나고 있다. 주름해석을 고려한 경우의 1~4번 모드가 주름해석을 고려하지 않은 경우의 5~8번 모드와 높은 유사성을 보이고, 주름해석을 고려한 6~12번 모드는 주름해석을 고려하지 않은 10~12번 모드와 17~20번 모드와 대응된다. 이는 주름해석을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 동적거동의 상관관계가 멤브레인

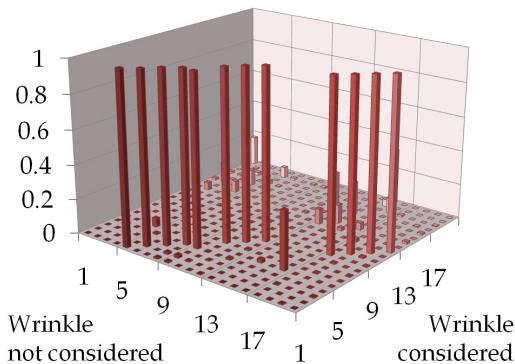


Fig. 6. MAC graph between mode shapes with and without wrinkle consideration

세일에 발생한 주름에 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 특히 주름해석을 고려하지 않은 경우의 모달해석에서 비현실적인 모드형상들이 나타나는데, 이는 주름해석을 고려한 경우에는 나타나지 않는다.

Table 2는 셸 요소법에 의한 모달해석을 통하여 주름해석을 고려하였을 경우와 고려하지 않았을 경우에 대하여 고유진동수를 저차모드 순으로 20개씩 비교하여 나타낸 것이다. Table 2에서 Difference(%)는 MAC을 통하여 대응되는 주름을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 모드형상들 사이의 차이를 의미한다. 표에서 볼 수 있듯이 주름해석을 고려하였을 경우와 고려하지 않았을 경우의 고유진동수의 유사성이 나타나지 않는다. 그러나, MAC의 결과를 통하여 높은 유사성을 보인 모드 형상들 사이에서는 거의 동일한 고유진동수를 보이는데, 이는 MAC의 결과와 상당히 유사하다.

모달해석은 주름 알고리즘을 채용한 멤브레인 법으로도 수행되었는데, Fig. 7은 케이블 각도가 $\theta_c = 26^\circ$ 인 삼각형 태양돛 멤브레인에 대한 결과를 나타내고 있다. 해석은 주름해석을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해서도 수행

Table 2. Comparison of natural frequencies (Hz) with and without wrinkle consideration

Mode	With Wrinkle	Without Wrinkle	Difference (%)
1	23.27	1.27	-0.02% (1,5)
2	28.46	1.27	0.01% (2,6)
3	29.06	1.27	0.18% (3,7)
4	30.21	1.27	0.20% (4,8)
5	30.28	23.27	-38.08% (5,16)
6	34.24	28.46	0.08% (6,10)
7	35.34	29.11	0.41% (7,11)
8	38.62	30.27	0.25% (8,12)
9	43.97	30.28	0.21% (9,17)
10	44.25	34.27	-0.06% (10,18)
11	49.57	35.49	-0.00% (11,19)
12	50.63	38.72	0.04% (12,20)
13	54.11	41.81	-
14	54.32	41.81	-
15	55.24	41.81	-
16	55.43	41.81	-
17	56.94	44.06	-
18	57.47	44.22	-
19	57.75	49.57	-
20	58.73	50.65	-

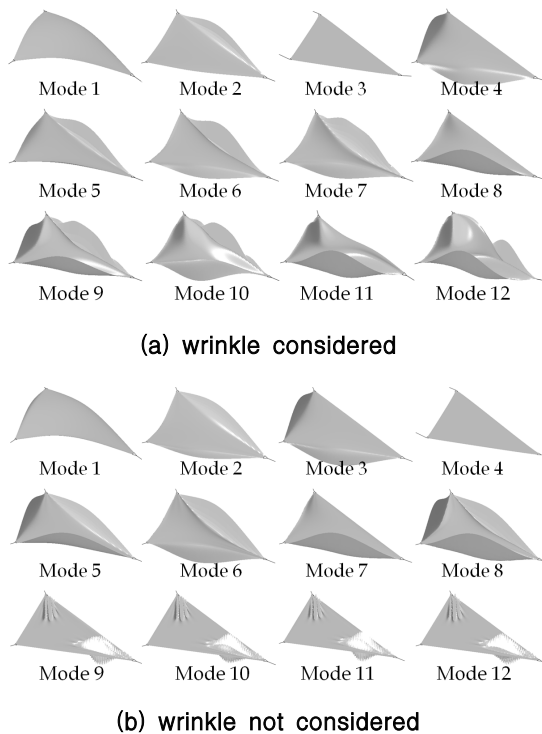


Fig. 7. Mode shapes by membrane element method with and without wrinkle algorithm

되었으며, 결과에서 주름변형의 고려 여부에 따라 모드 형상이 다르게 나타남을 보이고 있다. 주름해석을 고려한 경우의 1~2번과 5~8번 모드는 고려하지 않은 경우의 각각의 모드형상과 대응된다. 또한, 주름해석을 고려한 경우의 3~4번 모드는 고려하지 않은 4, 5번 모드와 유사한 형상을 보이고 있다. 그러나, 주름해석을 고려하지 않은 경우에는 9번 모드부터 셸 요소법을 통한 모달해석에서 나타난 비현실적인 모드형상이 나타났다.

Table 3은 해석기법에 따른 고유진동수를 비교하여 나타낸 것이다. 본 연구에서는 각각의 해석기법에 따른 특성을 반영하기 위하여 셸 요소법과 주름 알고리즘을 채용한 멤브레인 요소법에 의한 모달해석을 각각 방사형과 균일 메쉬를 사용하였다. 이에 두 해석기법에 따른 해석결과를 MAC을 통하여 비교가 가능하지 않으므로 고유진동수를 통하여 비교하였다. 표에서 볼 수 있듯이 두 해석기법에 따른 각각의 모드형상의 고유진동수는 전체적으로 유사한 값과 상관관계를 보이고 있으며, 특히 저차모드의 고유진동수에서 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 또한, Fig. 5와

Table 3. Comparison of natural frequencies (Hz) on analysis method

Mode	Shell Method	Membrane Method	Difference (%)
1	23.27	23.14	-0.60
2	28.46	28.37	-0.32
3	29.06	29.92	2.98
4	30.21	29.97	-0.78
5	30.28	30.38	0.34
6	34.24	32.80	-4.21
7	35.34	37.88	7.19
8	38.62	39.39	1.97
9	43.97	43.86	-0.25
10	44.25	49.77	12.48
11	49.58	49.92	0.69
12	50.63	55.88	10.38
13	54.11	56.02	3.53
14	54.32	56.19	3.43
15	55.24	57.94	4.90
16	55.43	60.42	9.00
17	56.94	61.62	8.23
18	57.47	63.05	9.70
19	57.75	63.38	9.77
20	58.73	65.99	12.38

Fig. 7에서 주름해석을 고려한 모달해석 결과에서 볼 수 있듯이 두 해석기법에 따른 모드형상은 고유진동수로 나타나는 수렴성과 같이 상당히 밀접한 형태를 보이고 있다. 셸 요소법 및 멤브레인 요소법의 차이는 얇은 멤브레인 필름의 경우 크기는 작으나 굽힘 강성이 존재하는데, 이를 고려하지 않는 멤브레인 요소법과 이를 실제 보다 크게 고려하는 셸 요소법의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 또한, 셸 요소법의 경우 해석의 결과는 요소망의 밀도에 영향을 받게 되는데, 이는 실제 발생하는 고차 모드의 동적 거동을 예측하기에는 다소 무리가 있는 것으로 판단된다. 그러나 이상의 결과로부터 그 차이는 크지 않으므로, 동적거동 예측에서 계산 자원을 더 적게 필요로 하는 주름 알고리즘을 채용한 멤브레인 요소법이 셸 요소법에 비해 경제적인 방법이라 생각된다.

3.3 케이블 각도에 따른 동적거동

본 연구에서는 삼각형 세일 멤브레인에 가해지는 인장력이 전달되는 케이블의 각도에 따른 동적거동의 영향에 대하여 조사해보았다. Fig. 8은 멤브레인 요소법을 이용하여 주름해석을 수행한 결과를 케이블 각도에 따른 전체 멤브레인 면

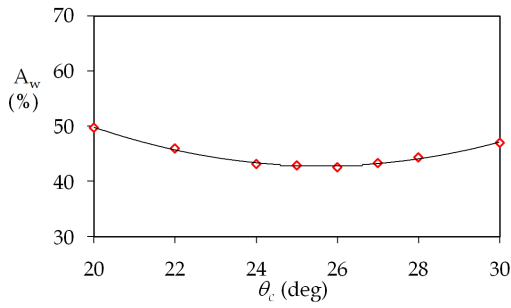
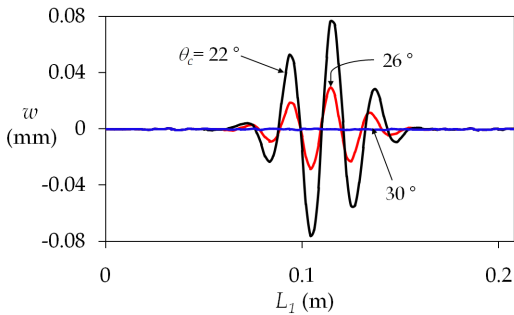
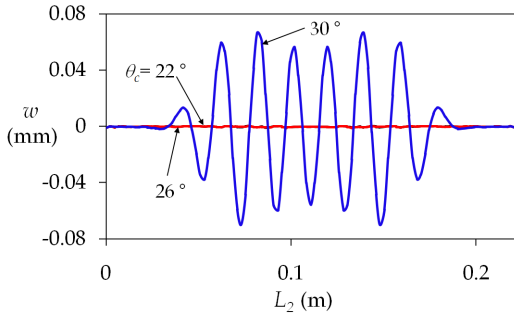


Fig. 8. Variation of wrinkled area versus cable angle (q_c)



(a) Along line 1

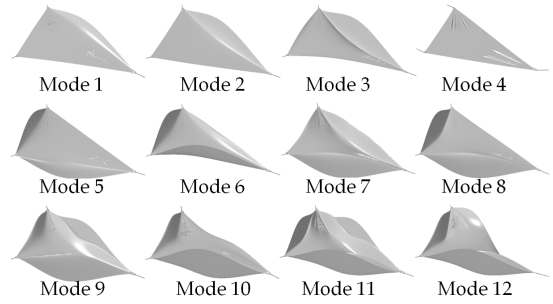


(b) Along line 2

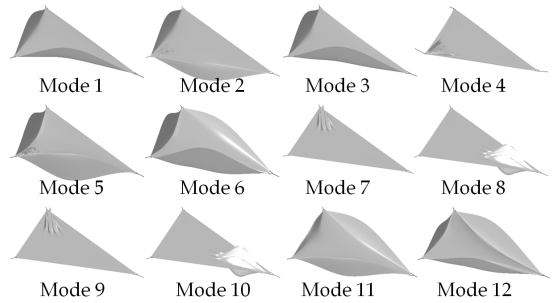
Fig. 9. Distribution of wrinkle deformation

적에서 주름이 발생한 지역의 면적비(A_w)를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 멤브레인 세일에 발생하는 주름의 면적은 케이블 각도에 따라 변화를 보이고 있으며, 약 26°의 케이블 각도를 기준으로 각도가 증가 또는 감소함에 따라 주름 지역의 면적비는 증가하는 경향을 보이고 있다[23].

Figure 9는 삼각형 세일 멤브레인에서 경로 L_1 과 L_2 를 따라 면외방향의 변위의 크기를 보이고 있다. (여기서 경로 L_1 과 L_2 는 Fig. 3에서 정의되었다.) 그림에서 볼 수 있듯이 케이블 각도에 따



(a) $q_c = 22^\circ$



(b) $q_c = 30^\circ$

Fig. 10. Mode shape variation versus cable angle(q_c)

라 세일 멤브레인에 발생하는 주름의 위치가 다를 뿐만 아니라 그 형태도 상이하게 나타나고 있다. 주름의 산과 골의 형상은 각각의 케이블 각도에 따라 다르게 나타나고 있다. $\theta_c = 22^\circ$ 와 $\theta_c = 26^\circ$ 의 경우 주름이 경로 L_1 를 따라 주름이 형성되었으며, 경로 L_2 에서는 주름이 형성 되지 않았다. $\theta_c = 30^\circ$ 일 경우 주름이 경로 L_2 에서 주름이 발생하였으며 산과 골의 개수도 경로 L_1 에서 발생한 그것에 비해 많은 수로 형성되었다. 또한, 주름의 변위크기도 각도에 따라 차이를 보이고 있다. 주름의 발생면적이 가장 작은 약 26°에 비하여 발생면적이 큰 케이블 각도에서는 변위의 크기가 확연히 크게 발생하였음을 그림에서 볼 수 있다.

Figure 10은 케이블 각도에 따라 발생한 주름의 특성이 다른 삼각형 세일 멤브레인에 대하여 모달해석을 수행하여 구한 모드형상을 저차모드 순으로 나타내고 있다. Fig. 7 (a)와 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 케이블 각도에 따라 저차모드의 형상일지라도 전체적으로 다른 모드 형상이 나타나고 있다. 발생한 주름의 면적이 가장 작은 $\theta_c = 26^\circ$ 의 경우 역학적으로 가장 기본이 되는 브리딩 모드(breathing mode)가 발생한 반면 다른 케이

블 각도에서는 이러한 기본적인 모드형상이 나타나지 않았으며, 몇몇 현실적이지 않은 형상이 저차모드에서도 나타나고 있다. 이는 역학적으로 하중이 균일하게 전달되지 않기 때문에 가장 기본이 되는 브리딩 모드가 아닌 2차 또는 그 이상의 고차 진동모드들이 발생하는 것으로 보여진다. 따라서 균일한 하중의 전달이 가능할 뿐더러 주름의 발생면적이 가장 작은 케이블 각도에서 동적 거동을 예측하고 영향을 최소화 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 주름이 있는 삼각형 태양돛 멤브레인의 동적거동을 유한요소해석을 통하여 연구하였다. 해석은 삼각형 태양돛 멤브레인에 인장하중이 가해졌을 때 발생하는 정적 주름해석을 수행한 후, 인장하중을 고정한 상태로 동적 모달 해석을 수행하였다. 주름해석은 쉘 요소법과 멤브레인 요소법을 사용하였으며, 동적해석은 란초스 알고리즘을 이용하여 동적특성을 조사하였다.

해석 결과, 세일 멤브레인에 발생하는 주름을 고려하였을 경우와 고려하지 않았을 경우 발생하는 동적특성은 큰 차이를 보였다. 주름을 고려하지 않았을 경우에는 주름을 고려하였을 경우와 차이를 보이는 모드형상과 고유진동수들이 나타났는데, 특히 몇몇 모드형상에서는 비현실적인 형태의 형상들이 발생하여 실제 발생가능한 동적 특성에 영향을 미친다. 따라서 실제 운용되는 태양돛 멤브레인은 주름이 발생된 상태이기 때문에 동적거동을 예측할 경우 주름해석이 필요한 것으로 판단된다. 쉘 요소법과 주름 알고리즘을 채용한 멤브레인 요소법에 따른 동적거동을 비교해본 결과, 모드형상과 고유진동수가 몇몇의 고차모드를 제외한 나머지는 높은 수렴성을 띄는 것으로 나타났다. 따라서 두 해석기법에 따른 결과의 차이는 거의 없으므로 주름 알고리즘을 채용한 멤브레인 요소법이 주어진 계산 자원을 이용하여 해석을 수행하는데 유리한 것으로 보여진다. 태양돛 멤브레인의 케이블 각도에 따라 주름이 발생하는 위치와 면적이 다르게 나타나며, 이에 따라 세일 멤브레인에 발생하는 동적거동이 다르게 나타났다. 주름발생의 면적이 가장 작은 케이블 각도에서 주름에 따른 동적 거동의 영향을 최소화 할 수 있기 때문에 실제 상황에서 발생 가능한 동적 거동을 예측하고, 영향을 분석하는데 유리할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 우주핵심기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. (NRF-2012M1A3A3A02033484)

References

- 1) Friedman, L., "Starsailing : Solar Sails and Interstellar Travel", *John Wiley & Sons*, 1988.
- 2) Roddeman, D.G., "Finite-Element Analysis of Wrinkling Membranes", *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 7, 1991, pp. 299~307.
- 3) 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.
- 4) Kang, S. and Im, S., "Finite Element Analysis of Wrinkling Membranes", *J. Applied Mechanics*, Vol.64, 1997, pp. 263~269.
- 5) Lu, K., Accorsi, M. and Leonard, J., , "Finite Element Analysis of Membrane Wrinkling", *J. Numerical Methods in Engineering*, Vol. 50, 2001, pp. 1017~1038.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.

11) 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.

12) 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.

13) Wang, C.G., Tan, H.F., Du, X.W., and Wan, Z.M, "Wrinkling Prediction of Rectangular Shell-membrane under Transverse In-plane Displacement," Int. J. Solids and Structures, Vol. 44, Iss. 20, 2007, pp. 6507-6516.

14) Jenkins, C. H., "Gossamer Spacecraft: Membrane and Inflatable Structures Technology for Space Applications", 11th AIAA Progress in Aeronautics and Astronautics, Feb. 2001.

15) Irie, T., Yamada, G., and Umesato, K., "Free Vibration of Regular polygonal plates with Simply Supported Edges", J. Acoust. Soc. Am, Vol. 69, May 1981, pp.1330-1336.

16) Evensen, D., A., "Vibration Analysis of Multi Symmetric Structures", J.AIAA, Vol. 69, May 1975, pp. 446~453.

17) Sewall, J., L., Miserentino, R., Pappa, R.,

S., "Vibration Studies of A Lightweight Three-sided Membrane Suitable for Space Applications", NASA Technical Paper, 1983.

18) Jenkins, C. H., and Korde, U., A., "Membrane Vibration Experiments: An Historical Review and Recent Results" J. Sound and Vibration, Vol. 295, 2006, pp.602-613.

19) Hossain, N. M. A., Jenkins, C. H., Woo, K., and Igawa, H., "Transverse Vibration Analysis for Partly Wrinkled Membranes", J. AIAA, Vol. 43, 2006, pp.626-647.

20) Sleight, D., Mann, T., Lichodziejewski, D., and Derbes, B., "Structural Analysis and Test Comparison of a 20 meter Inflation Deployed Solar Sail", 47th AIAA/SDM conf., 2006.

21) 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.

22) Bae, H., Woo, K., " Analysis Methods of Wrinkle Prediction for Thin Membran" Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 41, No. 11, 2013, pp. 865-873.

23) Bae, H., Woo, K., " Wrinkle Reduction Design Method of Triangular Solar Sail" Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 41, No. 12, 2013, pp. 940-949.