

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(11), 865-873(2013)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.11.865>

얇은 막재료의 주름해석 기법

배홍수*, 우경식**

Analysis Methods of Wrinkle Prediction for Thin Membrane

Hongsu Bae* and Kyeongsik Woo**

Department of Civil Systems Engineering*, Chungbuk National University**

ABSTRACT

In this paper, numerical methods for wrinkle prediction of thin membrane were studied by finite element analysis. Techniques using membrane and shell elements were applied for triangular membrane. In case of membrane element method, the wrinkling was accounted for by the wrinkle algorithm of property modification, which was implemented to ABAQUS as a user subroutine. In case of shell method, geometrically nonlinear post-buckling analysis was performed to obtain the wrinkle deformation explicitly. The wrinkling deformation was induced by seeding the mesh with a random geometric imperfection. The results were investigated focusing on the mesh convergence and the solution accuracy.

초 록

본 논문에서는 유한요소해석에 의한 막재료의 주름 해석 기법에 관하여 연구하였다. 삼각형 세일 형상에 대해 멤브레인 요소와 셸 요소를 사용하여 주름해석을 수행하였다. 멤브레인 요소를 이용한 기법에서는 주름을 벌칙매개변수에 의한 물성치를 수정하는 알고리즘을 상용프로그램 내 사용자 서브루틴을 통하여 구현하였다. 셸 요소에 의한 기하학적 비선형 후좌굴 기법에서는 면외방향의 좌굴을 발생시키기 위하여 모델의 메쉬에 작은 크기의 기하학적 결함을 심는 방법을 사용하였다. 셸 방법에서는 내연 및 외연해석 기법을 고려하였다. 요소수의 증가에 따른 수렴성과 결과의 정확도의 관점에서 멤브레인 요소법과 셸 요소법의 효율성을 비교하였다.

Key Words : Wrinkle(주름), Membrane element(멤브레인 요소), Wrinkle algorithm(주름 알고리즘), Shell element(셸 요소), Geometrically nonlinear post-buckling analysis(기하학적 비선형 후좌굴 해석), Geometrical imperfection(기하학적 결함)

1. 서 론

최근 차세대 우주선 태양돛(solar sail)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 태양돛은 태양에

서 방사되는 빛을 동력으로 이용하는 우주선의 한 종류이다. 태양돛은 지상에서 패키징되어 우주로 보내진 후 우주 공간 상에서 전개하게 된다. 태양돛은 면적대 무게비가 매우 커야하므로

† Received: July 27, 2013 Accepted: October 18, 2013

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

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

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

얇은 막재료(membrane)이 사용된다.

막재료는 두께가 매우 얇아 굽힘강성이 거의 없으므로, 압축응력이 가해지면 즉시 좌굴이 발생하게 되는데 이를 주름(wrinkle)이라고 한다[1]. 막재료에 주름이 발생하면 하중경로가 바뀌게 되고 또한 형상이 변하여 태양돛의 추력성능에도 영향을 미치게 된다. 뿐만 아니라 제어의 관점에서 별도 회전모멘트를 발생시켜 문제를 야기할 수 있다[2]. 따라서 태양돛 연구에서 막재료에 발생하는 주름을 해석하고 예측하는 것은 매우 중요하다[3].

본 논문에서는 막재료의 주름 해석 기법에 대해 연구하였다. 주름해석 방법으로 멤브레인 요소법과 셸 요소법을 고려하였다. 멤브레인 요소법에서 주름거동은 벌칙매개변수법에 의한 주름 알고리즘을 통하여 고려되었는데, 이 주름 알고리즘을 프로그램 하여 ABAQUS에 사용자 부프로그램으로 삽입하여 해석을 수행하였다. 셸 요소법의 경우 막재료를 셸 요소로 모델링하고 기하학적 비선형 후좌굴해석을 통하여 주름변형을 예측하였다. 이 방법에서는 주름변형을 유발하기 위하여 메쉬에 작은 크기의 기하학적 결함(geometrical imperfection)을 가하였으며, 내연 및 외연해석을 수행하여 결과를 비교하였다. 두 방법 모두 메쉬를 세분화하여 요소의 수에 따른 결과 수렴성과 결과의 정확도 측면에서 방법을 비교하였다.

II. 주름해석기법

2.1 멤브레인요소법

현재 얇은 막재료의 주름 거동을 유한요소법을 이용하여 수치적으로 해석하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 주름해석 방법은 요소의 종류에 따라 멤브레인 요소법과 셸 요소법으로 구분할 수 있다.

멤브레인 요소법은 변형률을 수정하는 방법 [1,4~6]과 물성치 행렬을 수정하는 방법 [7~9]으로 나눌 수 있는데, 각각의 방법은 변형경사(deformation gradient) 또는 물성치 행렬(constitutive relation)을 수정하여 주응력과 주변형률의 값에 따라 주름 상태(wrinkled), 팽팽한 상태(taut) 또는 느슨한 상태(slack)로 모사하게 된다. 멤브레인 요소법의 경우 주름발생의 위치와 면적 등을 명확히 예측할 수 있는 장점이 있다.

변형률을 수정하는 방법은 1980년 Roddeman

등[1,4]은 tension field 이론에 따라 변형률 텐서를 수정하는 방법으로 멤브레인 주름 해석 모델링을 제시하고 예제계산을 통하여 성능을 확인하였다. 이후 여러 연구자들이 Roddeman의 모델을 이용하여 막재료 구조에 대해 유한요소해석을 수행하였는데, Kang 등[5]은 주름의 방향을 탐색하는 새로운 방법을 고안하였다. 또한, Lu 등[6]은 주름의 방향과 주름의 정도의 변화를 고려하는 접선강성행렬을 직접 유도하였다. 그러나 이 방법은 항별 계산과정이 복잡하고 또한 계산을 매번 수행해야 하는 계산상의 번거로움이 있다.

막재료의 물성치 행렬을 수정하는 방법에 의한 유한 요소 주름해석은 1985년에 Miller 등[7]에 의해 처음 시도되었는데, 이 연구에서는 주름 발생 시 일축인장응력상태를 모사하기 위하여 포아송비를 수정하는 방법을 사용하였고, 유한요소 해석 결과를 기존의 이론해와 비교하였다. 또한 Miyazaki 등[8]은 연성행렬을 수정하는 방법으로, 그리고 Woo 등[9]과 Liu 등은 벌칙매개변수(penalty parameter)를 사용하여 강성행렬을 수정하는 방법으로 주름해석을 수행하였으며, Ding 등은 탄성계수와 포아송비를 수정하여 삼각형 및 사각형 막재료의 주름 패턴을 조사하였다.

본 연구에서는 멤브레인 요소법의 경우 벌칙매개변수 알고리즘을 구현하여 물성치 행렬을 수정하는 방법을 통하여 주름 해석을 수행하였다.

얇은 막재료는 면내인장에 의해서만 하중을 전달한다. 막재료에 압축응력이 가해지면 압축응력의 방향으로 즉시 좌굴이 발생하면서 인장에 의한 하중은 계속 전달하는 일축인장응력상태가 된다.

막재료의 경우 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 참고문헌[5]을 따라 다음과 같이 응력-변형률 혼합지표를 사용하였다.

$$\begin{aligned} & \text{(i) } \sigma_{\min} > 0 \rightarrow \text{taut} \\ & \text{(ii) } \epsilon_{maj} \leq 0 \rightarrow \text{slack} \\ & \text{(iii) } \sigma_{\min} \leq 0 \ \& \ \epsilon_{maj} > 0 \rightarrow \text{wrinkled} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 (σ_{\min} , σ_{maj})와 (ϵ_{\min} , ϵ_{maj})는 각각 주응력(principal stress)과 주변형률(principal strain)을 나타낸다. 이 지표에 따라서 막재료가 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 일축인장응력(uni-axial stress) 상태가 되므로 인장응력(σ_{maj})을 제외한 모든 응력성분을 제거해 주어야 한다. 주응력 좌표계에서는 이미 전단응력의 값은 0이므로 압축응력(σ_{min})만을 제거해주어야 한다. 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 P 는 큰 값의 벌칙 매개변수이므로

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

가 되고, 따라서 주응력좌표계에서 σ_{maj}^* 만 남아 일축인장상태가 되었음을 알 수 있다. 수정된 연성행렬에 역을 취하면 수정된 강성행렬을 구할 수 있고, 이를 다시 요소좌표계로 역변환하고 요소좌표계에서 수정된 응력을 계산하면 서브루틴이 종료된다.

여기서 상점자(*)는 수정된 강성행렬을 타나내기 위하여 사용되었으며, 벌칙매개변수(P)는 최종 해에 영향을 미치지 않으면서 동시에 조립된 전체 강성행렬에서 수치적인 문제를 야기하지 않을 정도의 값을 사용하여야 한다.

위에서 기술된 주름알고리즘을 프로그램하여 ABAQUS에 사용자 서브루틴으로 삽입하고 해석

을 수행하였다. 사전연구로 참고문헌 [4, 7]에 제시된 형상에 대해 해석을 수행하여 수치오차 범위내에서 동일한 결과를 얻어 주름 알고리즘의 타당성을 확보하였다.

2.2 셸 요소법

멤브레인 요소를 사용하여 주름의 형태와 면적을 예측하는 멤브레인 요소법과는 별도로 셸 요소를 사용하여 주름의 형상을 구체적으로 계산하는 연구도 수행되었다. Wong 등[10]과 Su 등[11]은 사각형 태양돛에 대하여 셸 요소를 사용하여 먼저 좌굴해석을 수행한 후, 좌굴모드를 분석하여 별도의 주름실험 결과에 나타난 형상과 일치하는 좌굴형상을 찾아내어 이를 메쉬에 기하적 결함(geometric imperfection)으로 가하는 방법으로 주름의 형상을 수치적으로 계산해 내는데 성공하였다. Tessler 등[12]은 좌굴형상이 아닌 무작위결함(random imperfection)으로도 주름의 형상을 해석적으로 만들어 낼 수 있음을 보였다. 이렇게 셸 요소법을 이용하는 경우 주름의 형상을 명확하게 예측할 수 있다. 그러나 이 방법들은 계산자원을 지나치게 요구하여 비효율적인 단점이 있다.

본 연구에서는 셸 요소법의 경우 얇은 막재료에 대하여 기하학적 비선형 후 좌굴 유한요소해석(geometrically non-linear post-buckling analysis)을 통하여 주름을 예측하였다. 셸 요소법의 경우 가장 중요한 것은 모델에 주름을 유발시키는 것인데[13], 본 연구에서는 메쉬에 무작위 기하학적 결함을 가하는 방법을 사용하였다. 이를 위해 메쉬 내부에 위치한 절점들에 대하여 면외방향으로 두께의 1~5%크기를 가지는 미소의 무작위 결함을 가하였다. 또한 주름 변형 해석의 안정성을 위하여 결과에 영향을 미치지 않을 작은 크기의 인위적 댄핑(10^{-12})을 가하였다.

2.3 유한요소모델

Figure 1은 본 논문에서 고려한 꼭지점에서 인장하중을 받고 있는 삼각형 막재료의 개략적인 형상을 보여주고 있다. 막재료의 크기는 20 m × 10 m 직각삼각형이고 두께는 25 μm 이다. 막재료와 케이블이 연결되는 부분에는 모서리를 0.2 m의 길이로 자른 후 반지름이 2.8 mm인 강철 핀을 배치하여 케이블에 가해지는 인장하중을 막재료에 분산 전달되도록 하였다. 강철 핀의 양 끝단과 연결되어 있는 케이블은 케블라로 되어 있으며 반지름은 1 mm이다. 케이블의 각도(θ)는 빗변과 케이블사이의 각도로 정의되었으며 본 연

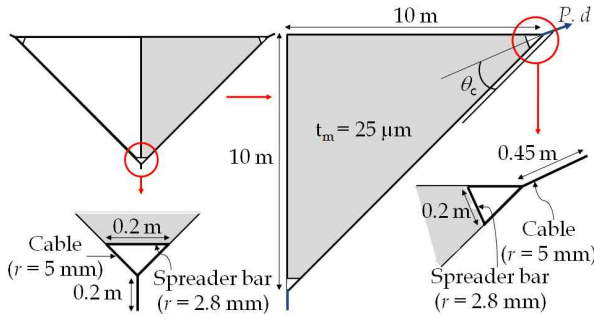


Fig. 1. Membrane configuration

구에서 사용된 값은 18.43° 이다.

본 논문에서 고려한 모델은 Fig. 1에서 나타나듯이 좌우 대칭이므로 삼각형 막재료 모델의 1/2만을 사용하여 중앙부의 수직선을 따라 대칭 경계조건을 가하고 해석을 수행하였다. 하부 케이블 끝단은 고정하였고 우측 상부 케이블의 끝단에서는 케이블 방향으로 변위를 가하여 약 97N의 인장하중이 발생되도록 하였다.

Figure 2는 본 논문에서 사용한 해석 메쉬를 보여준다. 본 논문에서는 멤브레인 요소법의 경우 크기가 동일한 균일메쉬(uniform mesh)를 사용하여 주름 해석을 수행하였고, 셸 요소법의 경우 균일메쉬와 방사메쉬(pan mesh)를 사용하였다.

균일 메쉬는 전체적으로 균일한 크기의 사각형 요소를 사용하였고 빗변과 강철핀 연결부의 일부에서 균일한 삼각형 요소를 사용하였다. 방사메쉬는 막재료 모델에 발생하는 주름이 인장하중이 가해지는 부분에서부터 방사하는 형태로 발생할 것이라 예측하여 그에 맞게 방사형의 배열로 요소 배치하였다. 요소의 수에 따른 결과 수렴성과 정확성을 분석하기 위하여 메쉬를 세분화하였는데 멤브레인 요소법의 경우 5,000 ~ 30,000개 사이의 요소 수로 된 메쉬를 사용하였고, 셸 요소법의 경우 57,000 ~ 500,000개 사이의 요소 수로 된 메쉬를 사용하였다.

본 연구에서는 상용 유한요소 해석코드인 ABAQUS를 통하여 해석을 수행하였다. 해석에서 막재료는 멤브레인 요소법의 경우 멤브레인 요소(M3D4/M3D3)를 사용하여 모델링 하였고 셸 요소법의 경우에는 얇은 셸 요소(S4R5/S3R)를 사용하여 모델링 하였다. 또한 강철 핀은 보요소(B31)를, 그리고 케이블은 트러스 요소(T3D2)를 사용하여 모델링 하였다.

본 연구에서 고려한 삼각형 막재료 구조는 캡톤 멤브레인과 강철 및 케블라 케이블로 구성되어 있는데, Table 1은 이 재료들의 물성치를 정리하고 있다.

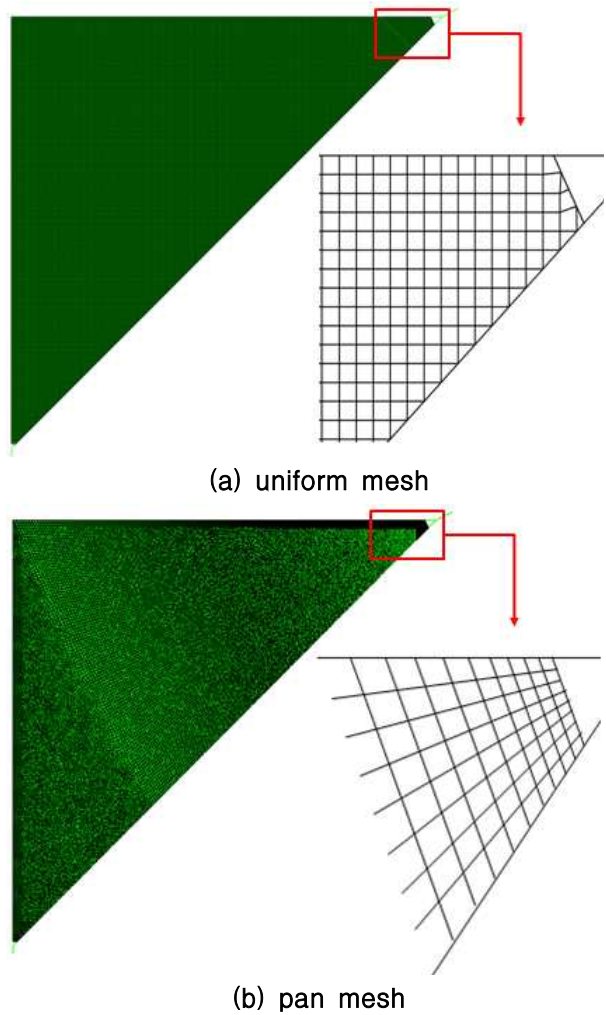


Fig. 2. FE meshes

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

III. 결과 및 검토

3.1 멤브레인 요소법의 해석결과

Figure 3은 삼각형 막재료 형상에 대해 벌칙매개변수 주름 알고리즘에 의한 멤브레인 요소법을 사용하여 주름해석을 수행한 결과인 주름형상을 보여주고 있다. 해석은 요소 수가 5,000 ~ 30,000 개인 메쉬를 사용하여 수행되었으나 여기서는 요소 수가 5,000개와 30,000개의 메쉬에 대한 주름 발생 결과를 보이고 있다. 각 멤브레인 요소들은 적분 점에서의 응력상태에 따라 주름의 상태가

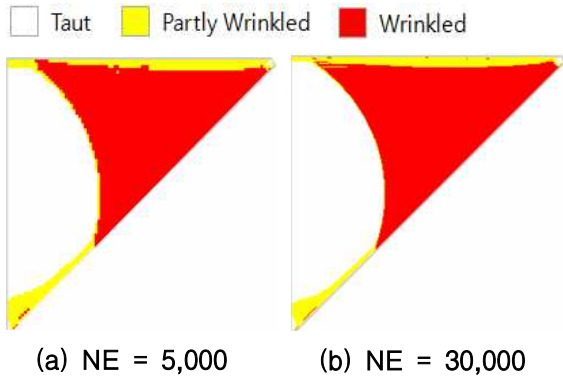


Fig. 3. Wrinkle shape predicted by membrane element method with PPMM

분류되었는데, 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. 그림에 나타난 바와 같이 삼각형 막재료에 하중이 가해지는 우상부 모서리 부근의 광범위한 지역에서 주름이 발생하고 있으며 삼각형의 도심부에는 팽팽한 상태를 보이고 있다. 또한 요소 수가 5,000개 및 30,000개로 된 결과는 거의 차이를 보이지 않고 있음을 볼 수 있다.

Figure 4는 요소 수에 따른 주름발생면적과 팽팽한 면적의 변화를 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 벌칙매개변수 주름알고리즘을 사용한 멤브레인 요소법에 의해 예측된 주름발생면적은 5,000 ~ 30,000개의 요소 수의 범위 내에서 거의 변화 없이 동일한 결과를 보이고 있다. 또한 Fig. 5은 요소 수에 따른 우상부 꼭지점에서 부가한 변위에 대한 반력의 변화를 나타낸 것인데, 요소 수의 증가에 따라 반력이 2%이내의 변화에 그치고 있어서 주름 알고리즘이 매우 우수한 메쉬수렴도를 보임을 알 수 있다.

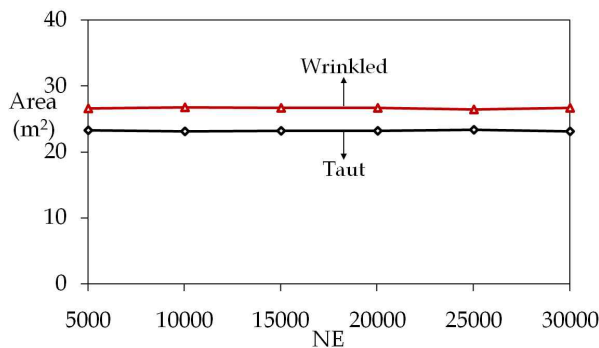


Fig. 4. Variation of wrinkled and taut areas versus number of elements

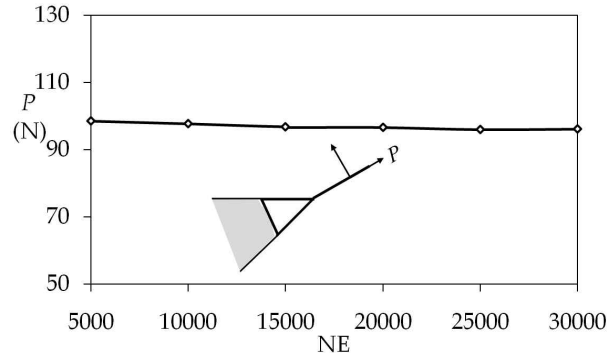
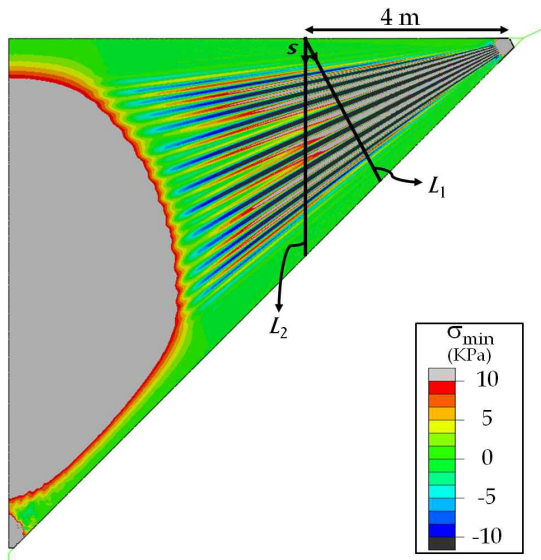


Fig. 5. Variation of reaction force versus number of elements

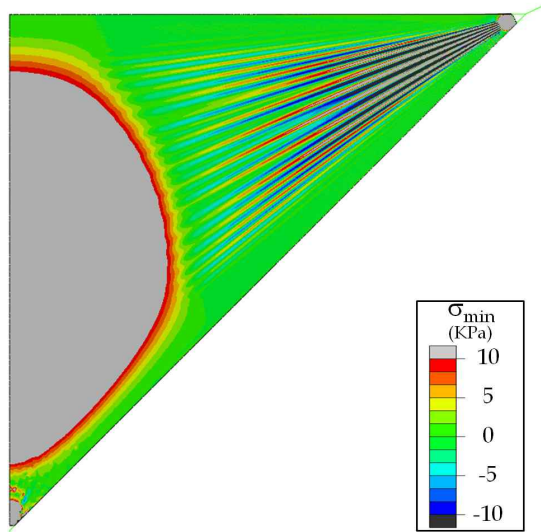
멤브레인 요소법에서 사용한 최소 요소 수인 5,000개는 꼭지점 부분의 하중분산을 위해 배치한 강철 핀을 1개의 요소로, 그리고 여기에 연결된 막재료를 1개의 멤브레인요소가 되도록 모델링한 것으로 균일메쉬의 경우 가능한 최소 요소 수라고 할 수 있다. 그림 3~5의 수렴 결과로부터 본 연구에서 고려한 삼각형 막재료 형상에 대해 멤브레인 요소법을 사용하여 주름해석을 수행하는 경우 이보다 더 작은 수의 요소를 사용하여 해석을 수행하여도 정확성에 큰 문제가 없는 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

3.2 셸 요소법의 해석결과

Figure 6은 삼각형 막재료에 대해 셸 요소를 사용하여 해석을 수행한 결과에 대한 부응력 (minor in-plane principal stress)의 분포를 보이고 있다. 두께가 매우 얇은 막재료에서는 많은 수의 주름이 발생할 수 있으므로 셸 요소를 사용하여 경우 매우 많은 수의 요소를 사용하여 해석을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 57,000 ~ 500,000개의 셸 요소를 사용하여 해석을 수행하였는데, Fig. 6는 대표적으로 120,000개와 320,000개의 요소로 된 메쉬에 의한 결과를 보이고 있다. 식 (1)의 지표에 따라 부응력의 부호가 주름 발생이 판정될 수 있으므로 그림의 우상부에서 양의 값과 음의 값이 반복되는 부응력의 분포는 주름이 발생한 지역 및 좁고 긴 주름의 형상을 나타내고 있는데, 이는 Fig. 3의 멤브레인 요소법으로 예측된 주름발생 지역과 유사한 결과를 보이고 있다. 두 그림에서 전체적인 주름 발생지역과 응력분포 등 전역해는 요소 수의 증가에 따라서 크게 변하지 않음을 볼 수 있으나 큰 요소수를 가진 메쉬를 사용한 해석결과에서 더 많고 세분화된 주름형상을 나타냄을 알 수 있다.



(a) NE = 120,000



(b) NE = 320,000

Fig. 6. Variation of minor in-plane principal stress distribution by shell element method

Figure 7은 보다 상세한 주름의 형상을 조사하기 위해 L_1 선을 따라 면의 방향의 변위(w)를 도시한 것이다. (여기서 L_1 선은 Fig. 6에서 정의되었다.) 그림에서 보는 바와 같이 삼각형의 양변에서 면의방향의 변위는 발생하지 않았으나 내부에서는 큰 주름변위가 발생하고 있음을 볼 수 있다. 주름의 산과 골의 변위차로 정의되는 주름의 깊이는 약 2 mm 정도인데 이는 막재료 두께의 약 80배에 해당하는 크기이다. 한편 요소 수의 증가에 따라 주름의 개수는 증가하고 주름의 깊이는 감소하는 경향을 보인다. 그러나 요소 수가 460,000개에 이르러도 주름의 크기 및 형상이 계속적으로 변하고 있어서 아직도 결과가 완전히 수렴하지 않은 것을 알 수 있는데, 이는 얇은 막재료의 주름해석에서 셸 요소법의 사용할 경우 얼마나 많은 요소가 필요한지를 알려주고 있다.

본 연구에서는 두 방법의 전역해석결과의 수렴에 대해서도 조사하였다. Fig. 8은 멤브레인 요소법과 셸 요소법으로 구한 삼각형 막재료 우측 상부 케이블 끝단에서의 하중-변위($P-d$) 선도를 그린 것이다. 멤브레인 요소법의 경우 요소 수가 5,000개와 30,000개일 경우에 대해, 그리고 셸 요소법의 경우 120,000개와 320,000개에 대해 나타내었다. 그림에서 변위의 크기가 증가함에 따라 모두 비슷한 기울기로 반력이 증가함을 볼 수 있는데 요소 수가 30,000개 이상인 경우 선도들은 거의 차이를 보이지 않았다. 또한 Fig. 9는 멤브레인 요소법과 셸 요소법으로 해석을 수행한 미세스 응력 분포도를 나타내고 있다. 멤브레인 요소법의 경우 5,000개의 요소수를 사용한 결과를 나타내고 있으며 셸 요소법은 125,000개의 요소수를 사용한 응력의 분포도이다. 그림에서 보이는 바와 같이 삼각형 멤브레인에 발생하는 응력의 크기와 분포가 거의 동일하게 나타내고 있다. Fig. 8~9의 결과에서 삼각형 막재료 형상에 대해

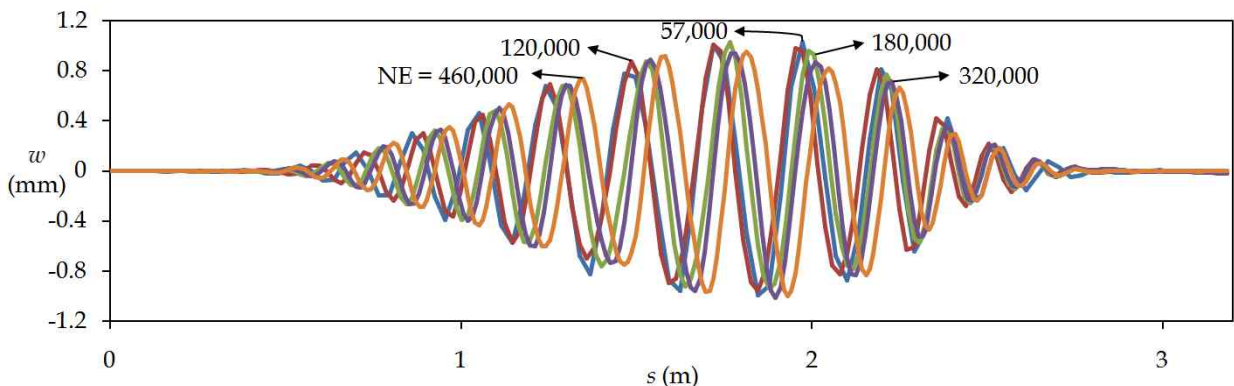


Fig. 7. Wrinkle deformation along L_1

멤브레인 요소법과 셸 요소법으로 주름해석을 수행한 결과 수치적 오차범위 내에서 동일한 전역해를 가짐을 알 수 있다.

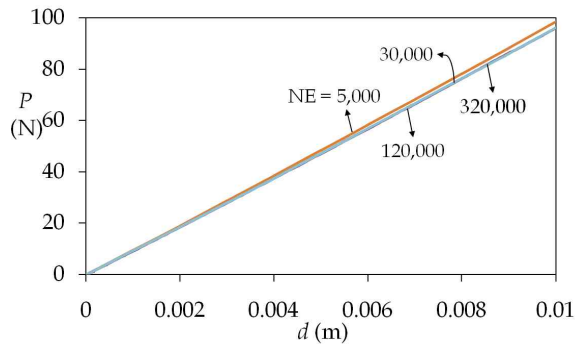
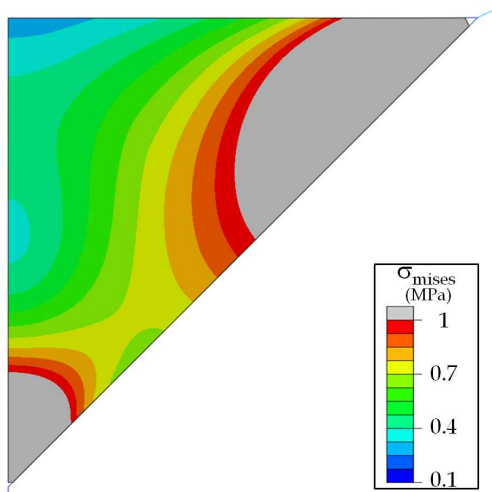
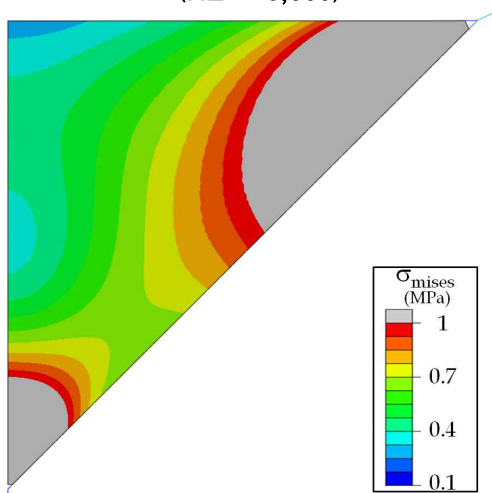


Fig. 8. Variation of reaction force versus displacement



(a) Membrane Element Method (NE = 5,000)

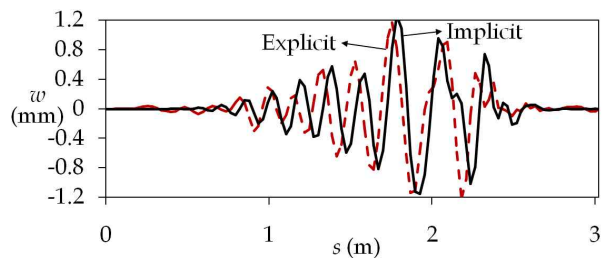


(b) Shell Element Method (NE = 125,000)

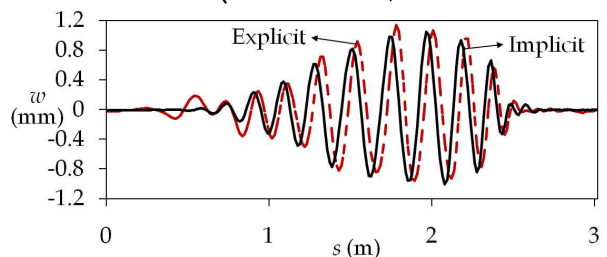
Fig. 9. Variation of mises stress distribution by analysis method

셸 요소법을 사용한 비선형 후좌굴 해석에 의한 주름해석은 후좌굴 해석의 특성상 계산의 안정성 측면에도 큰 문제점을 가지게 된다. 본 연구에서는 계산의 수렴을 위해 최종해의 정확도에 영향을 미치지 않을 정도의 작은 크기의 댄핑을 인위적으로 가하였고, 또한 하중을 여러 스텝으로 나누어 부가하는 등 다양한 안정화 전략을 사용하였다.

한편 주름해석은 계산 자체의 수렴에는 문제가 없는 준정적 외연해석(quasi-static explicit analysis)을 통해서도 수행할 수 있다. Fig. 10은 L_2 선을 따라서 준정적 외연해석으로 구한 주름변위를 내연해석의 결과와 비교하고 있다. (L_2 선은 Fig. 6 참조) 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 요소 수가 큰 경우 보다 더 부드럽고 수렴된 주름변위를 가짐을 알 수 있다. 동일한 요소수를 사용한 경우 내연해석의 결과와 준정적 외연해석의 결과는 약간의 차이를 보이지만 전체적인 형상은 거의 유사하게 나타났다. 외연 해석기법에 의한 준정적 해석을 실제 물리적 시간에 대해 수행하면 비효율적으로 매우 큰 계산 시간을 요구하게 된다. 하중속도(loading rate)을 조절하거나 질량 스케일링(mass scaling) 등의 방법을 사용하여 계산시간을 어느 정도 감소시킬 수 있으나 본 논문에서 이에 대한 연구는 수행되지 않았다. 본 연구에서 고려한 삼각형 막재료 형상의 주름해석에서 계산의 안정성에 결정적인 문제가 없다면 외연해석은 내연해석에 비해 이점이 없는 것으로 판단되었다.



(a) NE = 125,000



(b) NE = 500,000

Fig. 10. Comparison of wrinkle deformation by implicit and explicit analyses along L_2

Table 2. Comparison of CPU time

(a) Membrane Element Method

	Membrane Element Method					
NE	5,000	10,000	15,000	20,000	25,000	30,000
Normalized CPU Time	0.01	0.02	0.04	0.06	0.07	0.08

(b) Shell Element Method

	Shell Element Method				
NE	57,000	120,000	180,000	320,000	460,000
Normalized CPU Time	1	2.16	4.34	5.15	6.03

멤브레인 요소법과 셸 요소법으로 주름해석을 수행하는데 소요된 계산시간을 Table 2에서 비교하였다. 여기서 계산시간은 내연해석에 의한 것으로 요소 수가 57,000개인 셸 요소법의 계산시간을 기준으로 정규화 하여 정리한 것이다. 이 표에서 보인 바와 같이 멤브레인 요소법을 사용하였을 경우 셸 요소법에 비하여 현저히 작은 계산시간이 요구되었다. 셸 요소법의 경우에도 보다 정확한 주름의 형상을 나타내기 위해서는 많은 요소 수를 사용하여야 하는데 이때 계산시간은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 외연해석의 경우 준정적 조건을 만족시키기 위하여 내연해석과는 비교할 수 없을 정도로 매우 큰 계산시간을 필요로 하여 여기서는 별도로 비교하지 않았다.

IV. 결 론

본 논문에서는 얇은 막재료 모델의 주름해석 기법에 대하여 연구 하였다. 해석 기법은 요소의 종류를 나눔으로써 주름알고리즘을 적용한 멤브레인 요소법과 셸 요소에 의한 기하학적 비선형 후좌굴 해석법으로 구분하였다. 두 기법을 꼭지점에서 인장하중을 받고 있는 삼각형 막재료형상에 적용하여 주름해석을 수행하였다. 메쉬를 세분화 하여 요소 수에 따른 주름해석 결과의 수렴성과 정확도에 대한 연구를 수행하였으며, 셸 요소법의 경우 내연 및 준정적 외연해석을 수행하여 결과를 비교하였다.

해석결과 두 기법에서 예측한 주름의 거동은 전역해석 결과인 측면에서 거의 일치하였다. 멤브레인 요소법의 경우 주름이 발생하는 위치와 면적을 명확히 예측하였으며, 작은 요소수를 사용하여도 해석결과의 수렴성과 정확도가 뛰어나

다. 셸 요소법의 경우 발생하는 주름의 형상을 명확히 예측할 수 있었으나, 어느 정도 수렴된 주름의 형상을 구하기 위해 많은 수의 요소의 사용이 필요한 것으로 나타났다. 셸 요소를 사용한 준정적 외연해석을 수행한 결과 동일한 요소수를 사용한 내연해석의 경우와 유사한 주름의 형상을 주는 것을 알 수 있었다. 외연해석의 경우 내연해석에 비하여 상대적으로 큰 계산시간을 필요로 하여 계산시간을 감소시키는 전략의 개발이 절실한 것으로 나타났다.

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) Wie, B., "Solar Sail Attitude Control and Dynamic:Part I", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 27, 2004, pp.526-535.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Kang, S. and Im, S., "Finite Element Analysis of Wrinkling Membranes", *J. Applied Mechanics*, Vol. 64, 1997, pp.263~269.
- 6) Lu, K., Accorsi, M. and Leonard, J., , "Finite Element Analysis of Membrane Wrinkling", *J. Numerical Methods in Engineering*, Vol. 50, 2001, pp.1017~1038.
- 7) Miller, R. K., and Hedgepeth, J. M., Weingarten, V. I. and Das, P., "Finite Element Analysis of Partly Wrinkled Membranes", *Computers and Structures*, Vol. 20, No. 2001, pp.1761~1763.

- 8) 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.
- 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) Jenkins, C. H., Hossain, N. M. A., Woo, K., Igawa, H., Wang, J. T., Sleight, D., and Tessler, A., "Membrane Wrinkling" *Recent Advances in Gossamer Spacecraft*, AIAA *Journal*, 2006.