

論文

비등방성 멤브레인의 주름 거동 해석

우경식*, 남덕현**

Analysis of Wrinkling Behavior for Anisotropic Membrane

Kyeongsik Woo* and Dukhyun Nam**

ABSTRACT

In this paper, wrinkling behavior for anisotropic membrane was studied. The analyses were done by using membrane elements and the wrinkling was accounted for by the penalty parameter modified material modeling which was implemented to ABAQUS as a user subroutine. The wrinkle model was applied to corner-loaded square membranes in which the effect of the diameter of steel pin, edge cut-off length and the magnitude of shear moduli on the wrinkling was investigated.

초 록

본 논문에서는 비등방성 멤브레인의 주름 거동을 조사하였다. 해석시 멤브레인에 발생하는 주름은 벌칙매개변수법을 사용하여 물성치를 수정하는 방법으로 하였으며, ABAQUS 내 사용자 서브루틴으로 구현하였다. 모서리에 인장하중이 걸린 사각형 멤브레인 문제에 적용하여 주름 거동을 해석한 결과, 핀의 지름이 미치는 영향은 매우 작으며, 잘라낸 모서리의 길이와 전단계수의 크기에 상당한 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

Key Words : Membrane(멤브레인), Wrinkle(주름), Anisotropic(비등방성), Penalty parameter(벌칙 매개변수)

1. 서 론

최근 우주 구조물의 재료로써 멤브레인의 적용이 점점 증가하고 있다. 우주구조물의 재료로써 멤브레인을 고려하는 가장 중요한 이유는 멤브레인을 사용하면 구조물의 초경량화가 가능하며, 지상에서 제작 후 패키징을 하여 우주공간으로 보내어 전개하기가 용이하기 때문이다. 멤브레인의 특성을 잘 활용한 예로는 솔라세일(solar sail), 태양차광막(sun shield) 등을 들 수 있는데 [1-2], Fig. 1은 멤브레인을 적용한 대표적인 우주 구조물을 보여주고 있다.

일반적으로 얇은 멤브레인은 굽힘 강성이 상당히 작아 거의 존재하지 않는 수준에 도달하게 된다. 여기에 압축응력이 가해지면 그 즉시 좌굴이 발생하게 되는데, 이를 주름(wrinkle)이라고 한다 [3].

현재 멤브레인의 주름 거동을 유한요소법을 사용하여 수치적으로 해석하기 위한 많은 연구가 수행되고 있는데 여기에는 변형 텐서를 수정하는 방법[3-8]과 물성치 행렬을 수정하는 방법[9-13]이 있다. Roddeman 등[4-5]은 tension field 이론에 따라 변형 텐서를 수정하는 방법으로 멤브레인 주름 해석 모델을 제시하였으며 간단한 예제 계산을 통해 이를 검증하였다. 이 후 많은 연구가들이 Roddeman의 모델을 이용하여 멤브레인 구조에 대한 유한요소 해석을 수행하였는데, Kang 등[6]은 Roddeman의 이론과 일치하는 주름 방향을 예측하는 새로운 방법을 고안했으며, Lu 등

† 2005년 5월 27일 접수 ~ 2005년 7월 4일 심사완료

* 정희원, 충북대학교 구조시스템공학과
연락처, E-mail: kw3235@chungbuk.ac.kr
충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48번지

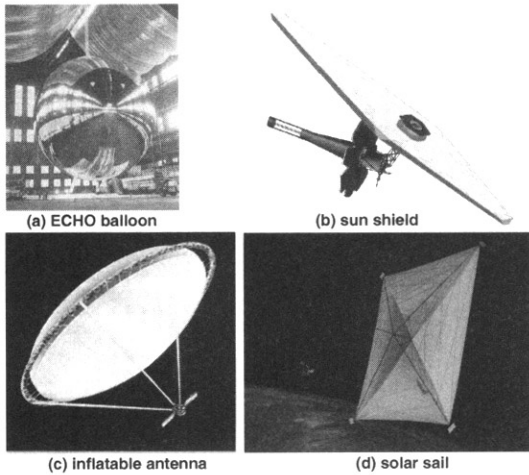


Fig. 1. Typical membrane structures

[7]은 주름의 방향과 정도의 변화를 고려하는 접선 강성 행렬을 유도하였다.

멤브레인의 물성치를 수정하는 방법으로 주름이 발생하였을 때의 일축인장응력을 모사하는 연구도 수행되었는데, Miller 등[9-10]은 일축인장응력상태를 모사하기 위해 포아송비를 수정하는 방법을 사용하였고, 유한요소 해석결과를 기존의 이론해와 비교하였다. Liu 등[11]과 Woo 등[12]은 벌칙 매개변수(penalty parameter)를 사용하여 강성행렬을 수정하는 방법으로 해석을 수행하였으며, Ding 등[13]은 탄성계수와 포아송비를 수정하여 삼각형 및 사각형 멤브레인의 주름 패턴을 조사하였다.

이상의 연구에서는 멤브레인 요소를 사용하여 멤브레인의 주름 방향과 면적을 예측하고 있는데, 최근에는 셀요소를 사용한 기하학적 비선형 좌굴 후 거동(post-buckling) 해석을 통해 사각형 멤브레인의 주름의 상세 형상을 예측하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다. Wong 등[14]과 Su 등[15]은 사각형 솔라세일에 대해 평판 요소를 사용하여 먼저 좌굴해석을 수행한 후, 좌굴모드를 분석하여 주름 실험 결과에 나타난 형상과 일치하는 좌굴형상을 찾아내어 이를 geometrical imperfection으로 매쉬에 가하는 방법으로 사각형 멤브레인의 주름 형상을 수치적으로 계산하였고, 또한 Tessler 등[16]은 좌굴형상이 아닌 random imperfection으로도 주름의 형상을 해석적으로 만들어 낼 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 비등방성 멤브레인의 주름 거동을 조사하였다. 주름 해석을 위해서 벌칙매개변수(penalty parameter)를 사용하여 물성치를 수

정하는 방법[11-12]을 채택하여 주름 해석 코드를 개발하였으며, ABAQUS 내 사용자 서브루틴으로 구현되었다. 개발된 해석코드를 모서리에 인장하중이 걸린 사각형 멤브레인 문제에 적용하여 주름 거동을 조사하였으며, 핀의 지름, 잘라낸 모서리의 길이(cut-off length) 및 전단계수의 효과가 주름 거동에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서 고찰하였다.

II. 이론적 배경

Fig. 2는 멤브레인에 주름이 발생한 경우를 개략적으로 나타내고 있다. 그림에서 (x_1, x_2) 와 (ω_1, ω_2) 는 각각 요소좌표계와 주름좌표계를 나타내며, ϕ 는 멤브레인에 발생한 주름 발생 방향을 의미한다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 멤브레인에 주름이 발생하면 w_2 방향으로 일축인장응력(uni-axial stress)상태가 되며, w_1 방향으로 어떠한 응력성분도 존재하지 않게 된다. 따라서 본 논문에서 사용한 벌칙 매개변수법(penalty parameter modified material)의 기본 원리는 멤브레인의 현재 응력 상태에서 주응력(principal stress)을 구한 후 최대주응력을 제외한 최소주응력과 전단응력을 제거하도록 응력-변형을 관계를 수정하여 수치적으로 Fig. 2와 같은 일축인장응력상태를 모사하는 것이다.

멤브레인에 응력 상태가 주어졌을 때 먼저 주름 발생여부를 판단해야한다. 주름 발생 여부는 응력 지표, 변형률 지표, 응력-변형을 혼합지표를 사용하여 판단할 수 있는데 본 논문에서는 참고 문헌[6]의 설명에 따라 다음과 같은 응력-변형률 혼합지표를 사용하였다.

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

여기서 $(\sigma_{\min}, \sigma_{\text{maj}})$ 와 $(\epsilon_{\min}, \epsilon_{\text{maj}})$ 은 각각 최소 및 최대 주응력(principal stress)과 주변형률(principal strain)을 나타낸다. 이 지표에 따라서 멤브레인이 팽팽한(taut) 상태이면 응력-변형률 관계를 수정할 필요가 없으며, 느슨한(slack) 상태이면 아무런 하중을 받지 못하게 되므로 강성행렬의 모든 요소를 아주 큰 벌칙매개변수(P)로 나누어 0에 가깝게 만들어 제거한다($D_{ij}^* = D_{ij}/P$, P : penalty number). 멤브레인이 주름(wrinkled) 상태이면 주응력 방향으로 일축인장응력상태가

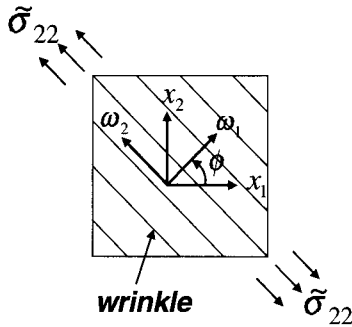


Fig. 2. Schematic of wrinkled membrane element

되므로 인장응력(σ_{maj})을 제외한 모든 응력성분을 제거해주어야 한다.

등방성 멤브레인의 경우 주응력 좌표계에서는 이미 전단응력의 값은 0이므로 연성행렬의 $S_{11} \rightarrow PS_{11}$ 으로 벌칙을 가하여 압축응력(σ_{min})만 제거해주면 된다. 그러나 비등방성 멤브레인의 경우 주름은 반드시 주응력 방향에서 발생하지 않는다. 주름이 요소좌표계(x_1, x_2)에서 ϕ 만큼 회전된 주름좌표계(ω_1, ω_2)의 ω_2 으로 발생하였다고 가정하였을 때, 주름 좌표계에서 연성행렬의 S_{11} 성분에 벌칙을 가해 수정된 응력-변형률 관계식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \tilde{\epsilon}_{11} \\ \tilde{\epsilon}_{22} \\ \tilde{\gamma}_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} P\tilde{S}_{11} & \tilde{S}_{12} & \tilde{S}_{13} \\ \tilde{S}_{12} & \tilde{S}_{22} & \tilde{S}_{23} \\ \tilde{S}_{13} & \tilde{S}_{32} & \tilde{S}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\sigma}_{11}^* \\ \tilde{\sigma}_{22}^* \\ \tilde{\sigma}_{12}^* \end{Bmatrix} \quad (2)$$

위 식을 역변환하면

$$\begin{Bmatrix} \tilde{\sigma}_{11}^* \\ \tilde{\sigma}_{22}^* \\ \tilde{\sigma}_{12}^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{0} & \tilde{0} & \tilde{0} \\ \tilde{0} & \tilde{D}_{22}^* & \tilde{D}_{23}^* \\ \tilde{0} & \tilde{D}_{23}^* & \tilde{D}_{33}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\epsilon}_{11} \\ \tilde{\epsilon}_{22} \\ \tilde{\gamma}_{12} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서 위첨자 별표(*)는 벌칙에 의해 수정된 것임을 의미하며, 틸드(~)는 요소좌표계에서 ϕ 만큼 주름좌표계로 회전되었음을 나타낸다.

식(2)에서 볼 수 있는 것처럼 연성행렬의 모든 요소가 존재하기 때문에 식(3)에서 압축응력($\tilde{\sigma}_{11}^*$)이 벌칙에 의해 제거되었다 하더라도 전단응력($\tilde{\sigma}_{12}^*$)이 반드시 0의 값을 가지지 않아 일축인장응력상태가 되지 못한다. 이는 현재 가정된 ϕ 가 올바른 주름 발생 방향이 아니기 때문으로 올바른 주름 발생 방향은 다음의 과정을 통해서 구할 수 있다.

Step 1 : 좌표변환을 통해 $\{\tilde{\epsilon}(\phi)\}$ 과 $[\tilde{S}(\phi)]$ 을 구한다.

Step 2 : $\tilde{S}_{11} \rightarrow P\tilde{S}_{11}$ 으로 벌칙을 가한 후 $[\tilde{D}^*(\phi, P)]$ 와 $\{\tilde{\sigma}^*(\phi, P)\}$ 을 구한다.

Step 3 : 다음의 식을 동시에 만족시키는지 확인한다.

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{12}^*(\phi, P) &= \tilde{D}_{23}^*(\phi, P)\tilde{\epsilon}_{22}^*(\phi, P) \\ &+ \tilde{D}_{33}^*(\phi, P)\tilde{\gamma}_{12}^*(\phi, P) = 0 \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{22}^*(\phi, P) &= \tilde{D}_{22}^*(\phi, P)\tilde{\epsilon}_{22}^*(\phi, P) \\ &+ \tilde{D}_{23}^*(\phi, P)\tilde{\gamma}_{12}^*(\phi, P) > 0 \end{aligned} \quad (4b)$$

위의 과정은 주름의 방향각 ϕ 에 대한 비선형방정식의 근을 구하는 것으로 일반적인 비선형방정식의 수치해법을 적용하여 구하게 된다.

여기서, 벌칙매개변수(P)의 값은 슬랙발생시 강성을 0으로 하도록, 그리고 주름발생시 주름방향으로 일축인장응력상태가 되도록 하기 위하여 일반적으로 큰 값을 사용하여야 한다. 만일 작은 값을 사용하면 일축인장응력상태에서 벗어나 주름방향을 정확하게 예측하지 못하게 되고, 또한 지나치게 큰 값을 사용하면 어느 절점을 공유하는 모든 요소들에서 슬랙이 발생하였을 때 수치문제를 야기하게 된다. 본 연구에서는 $P=10^6$ 의 값을 사용하였는데, 사전 계산 결과 이 값은 수치적으로 안정하며 동시에 타당한 정확도를 가지는 결과를 주는 것으로 나타났다.

III. 계산 결과 및 고찰

3.1 사각형 멤브레인

Fig. 3은 모서리에 인장하중이 가해진 재료축 (1-2)이 요소축(x-y)에 대해 θ 만큼 회전된 얇은 사각형 멤브레인의 형상을 보여주고 있다. 멤브레인의 크기는 500mm×500mm, 그리고 두께는 10 μ m이며, 물성치는 다음과 같다.

$$E_{11}=3.5\text{GPa}, E_{22}=2.333\text{GPa}, G_{12}=1.346\text{GPa}, \nu_{12}=0.3 \quad (5)$$

각 모서리에 하중을 가하기 위해서 모서리를 14.14mm로 잘라낸 후 핀(steel pin)을 배치하고, 핀의 중간 지점에서 대각선 방향으로 길이 49.5mm인 케블라 케이블($E=131\text{GPa}$, $\nu=0.3$, $d=1\text{mm}$)을 연결하여 그 끝에서 대각선 방향으로 하중을 가하였다. 하중의 범위는 $T_1=1\text{N}$, $T_2=1\text{N}\sim 4\text{N}$

하였다. 하중의 범위는 $T_1=1N$, $T_2=1N\sim 4N$ ($T_2/T_1=1\sim 4$)으로 첫 번째 단계에서 $T_1=T_2=1N$ 을 대칭으로 가하였고, 두 번째 단계부터는 $T_1=1N$ 으로 유지하면서 $T_2=2N\sim 4N$ 까지 순차적으로 증가시키면서 하중을 가하였다.

유한요소해석을 위해서 멤브레인은 멤브레인 요소(M3D4/M3D3)를 사용하였고, steel pin은 빔(B31), 그리고 케이블은 막대요소(T3D2)를 사용하여 모델링 하였다.

3.2 멤브레인의 주름 형상

Fig. 4(a)는 재료방향각 $\theta=0^\circ$ 일 때 하중비에 대한 멤브레인의 주름형상을 보여주고 있다. 여기서 각 요소들은 적분점에서의 응력상태에 따라 주름의 상태가 분류되었는데, 요소내의 모든 적분점에서 주름이 발생하였으면 'Wrinkled'로, 일부 적분점에서만 주름이 발생하였으면 'Partly wrinkled'로 표시하였으며, 'Slack'과 'Partly slack' 역시 위와 유사한 방법으로 표시하였다. 그리고 모든 적분점에서 주름이 발생하지 않은 경우에는 'Taut'로 나타내었다. 그림에서 하중비가 1이었을 때 모서리 근처에서 국부적으로 발생한 주름이 하중비가 증가함에 따라 점차 멤브레인 전체로 확대되어 전역 주름이 형성되는 것을 볼 수 있다. 특히 하중비가 4인 경우 심지어 아무런 하중도 받지 못하는 느슨한 상태인 슬랙이

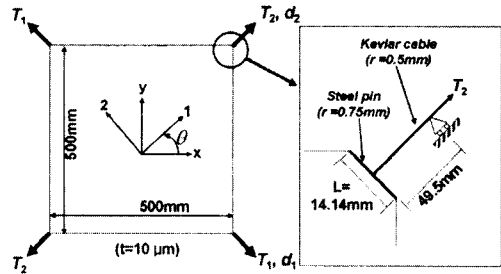


Fig. 3. Configuration of square membrane

발생하고 있음을 확인할 수 있다(그림에서 화살표가 가리키는 부분이 슬랙이 발생한 지역이다). Fig. 4(b)는 압축응력(σ_{min})의 분포를 나타내고 있다. 여기서 응력값은 0~100Pa로써 거의 수치적으로 0이 되는 범위이다(참고로 멤브레인의 정중앙지점에서 주응력의 값은 $\sigma_{min}=229,266Pa$, $\sigma_{maj}=246,853Pa$ 이다). 그림에서 넓게 분포한 부분이 응력값이 100을 넘는 지역으로 팽팽한(taut) 영역이고 이 부분을 제외한 모든 영역이 주름이 발생한 지역이라고 간주할 수 있다. Fig. 4(a)의 멤브레인 주름 형상과 비교를 하면 팽팽한(taut) 영역 및 주름(wrinkled) 발생 지역이 상당히 잘 일치함을 확인할 수 있다.

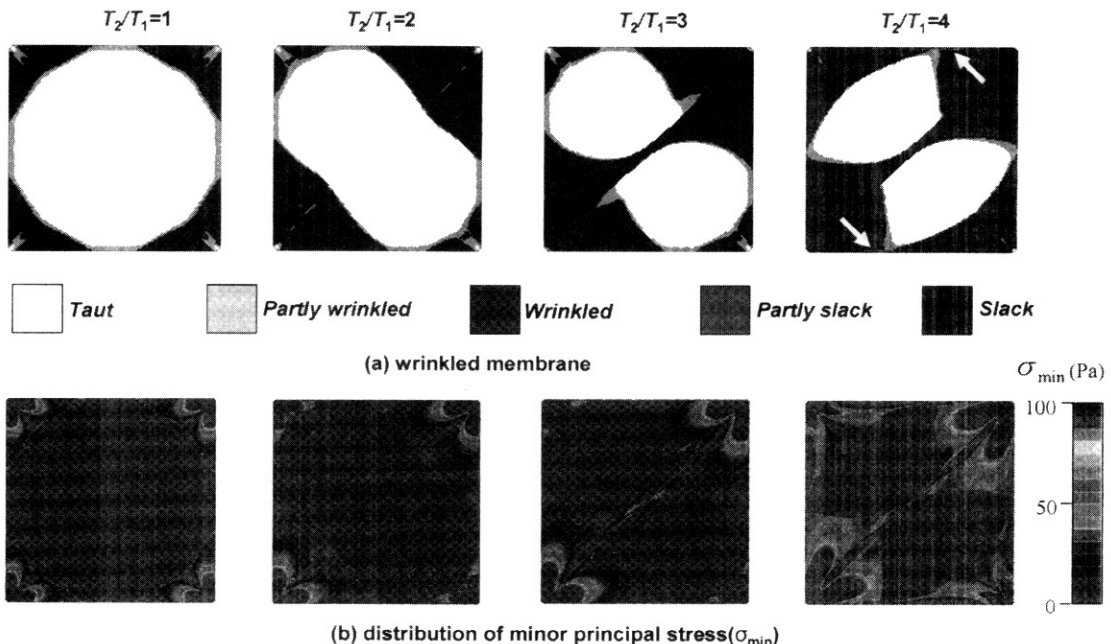


Fig. 4. Comparison of wrinkled shapes for $\theta = 0^\circ$

3.3 핀의 지름과 잘라낸 모서리 길이 (cut-off length) 효과

본 논문에서는 핀의 지름 변화가 주름 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 핀의 지름을 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 5는 핀의 직경 변화와 재료방향각에 따른 주름 형상을 보여주고 있다. 여기서 고려한 핀의 지름(d)은 0.1mm,

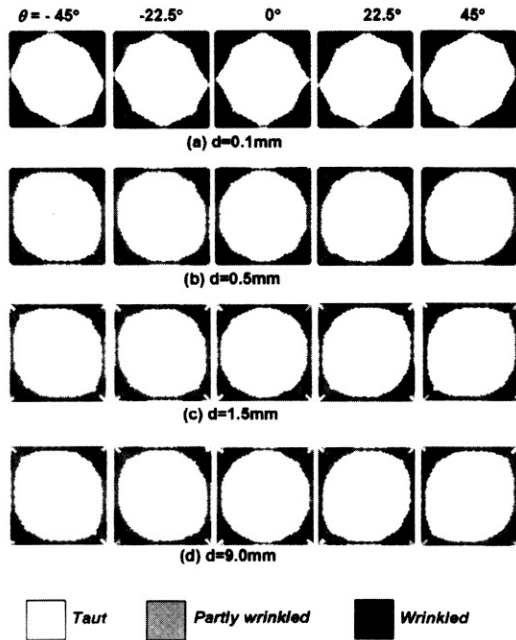


Fig. 5. Comparison of wrinkled shapes for $T_2/T_1=1$

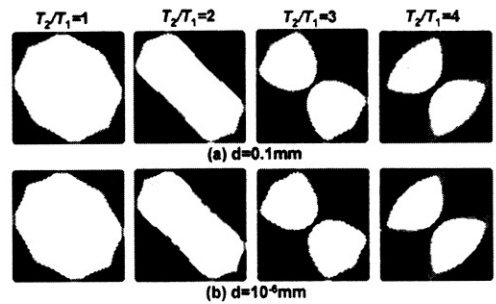


Fig. 6. Wrinkled shape vs. load ratio for $\theta = -45^\circ$

0.5mm, 1.5mm, 9mm이며, 핀을 사용하지 않은 경우를 모델링하기 위해서 핀의 지름이 10^{-6} mm인 경우도 고려하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 핀의 지름이 0.5mm 이상인 경우 지름에 관계없이 거의 유사한 주름 형상을 보이는 반면 0.5mm이하인 경우에는 주름 형상이 변하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 핀의 지름이 무한히 작아지더라도 주름 형상은 큰 차이가 없다.

Fig. 7은 재료방향각에 대한 주름 발생 면적의 변화를 나타내고 있는데 비등방성 재료의 경우 주름 발생 면적이 재료방향각에 따라 크게 변화함을 볼 수 있다. 또한 이 그림에서도 $d=0.5$ mm 이상인 경우에는 핀의 지름에 관계없이 주름 발생 면적이 거의 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 즉, 직경이 아주 작아지지 않는 한 주름 발생 면적은 핀의 지름에 좌우되지 않는다.

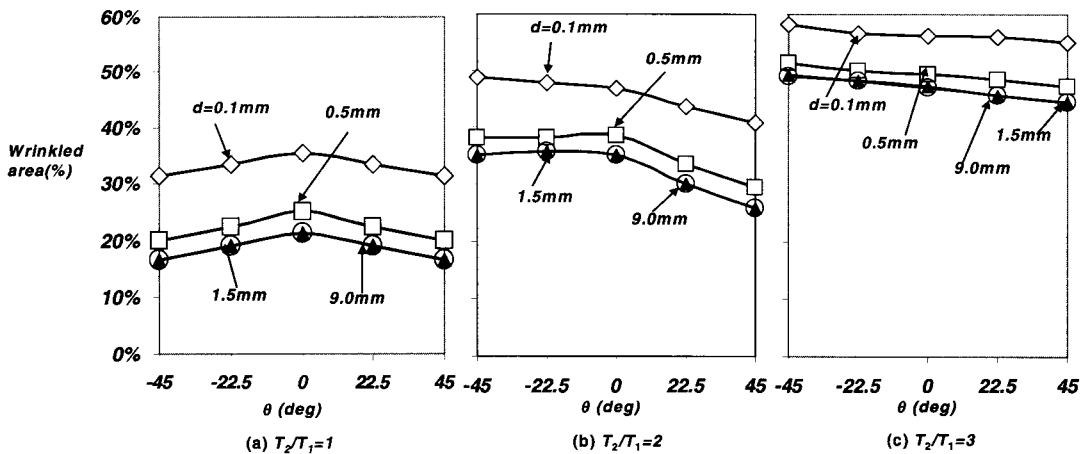


Fig. 7. Variation of wrinkled area as diameter of steel pin
(a) $T_2/T_1=1$, (b) $T_2/T_1=2$, (c) $T_2/T_1=3$

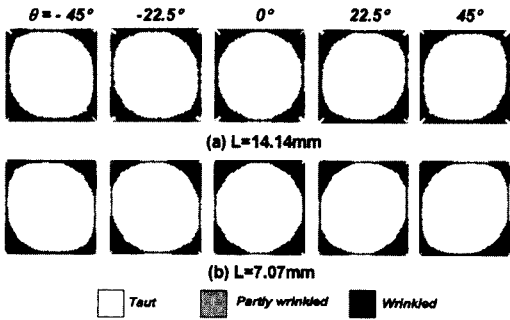


Fig. 8. Comparison of wrinkled shapes vs. orientation angle for 2 cut-off lengths ($T_2/T_1=1$)

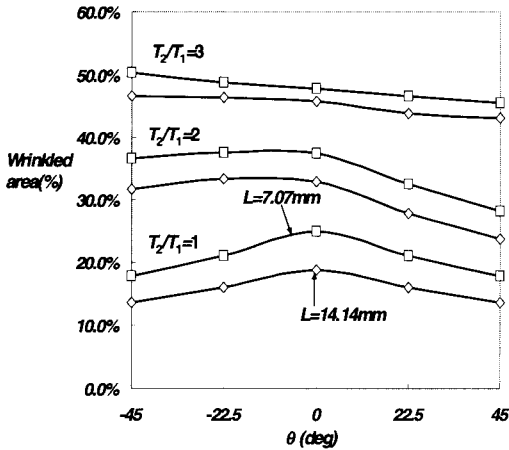


Fig. 9. Variation of percent wrinkled area vs. orientation angle 2 cut-off lengths

Fig. 8은 하중비가 1인 경우에 대한 잘라낸 모서리의 길이(cut-off length, L)가 주름 거동에 미치는 영향을 보여 주고 있다. 실제 사각형 솔라 세일의 경우 케이블에서 가해진 인장하중은 모서리에 배치된 핀을 통해 분포 하중의 형태로 멤브레인에 전달된다. 하지만 핀이 배치된 모서리의 길이가 작아짐에 따라 분포가 아닌 점점 집중하중의 형태에 가까워져 전달되게 된다. 따라서 본 논문에서는 핀의 지름 $d=1.5\text{mm}$ 로 유지하고 모서리의 길이를 14.14mm에서 7.07mm로 감소시켜 해석을 수행하여 그 효과를 알아보았다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 모서리의 길이를 1/2로 줄였을 경우 주름 발생 면적이 증가하였다.

Fig. 9는 잘라낸 모서리의 길이와 재료방향각에 대한 주름 발생 면적의 변화를 나타내고 있다.

그림에서 모서리의 길이가 감소했을 때 주름

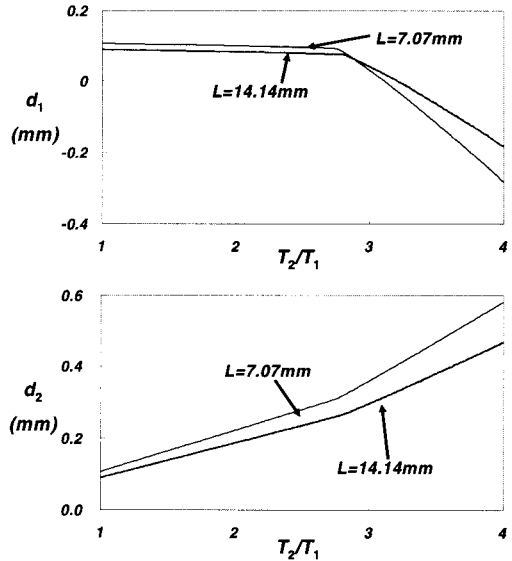


Fig. 10. Variation of tip displacement

발생 면적이 증가한 것을 볼 수 있다. 잘라낸 모서리의 길이가 감소할수록 핀의 지름이 작아질 때와 마찬가지로 하중이 집중적으로 전달되게 되어 주름 발생이 증가하는 것으로 판단된다.

한편 Fig. 10은 잘라낸 모서리의 길이에 따른 하중단 변위(tip displacement)의 비교를 보여주고 있다. 각각 하중 T_1 과 T_2 가 작용하는 곳의 변위 d_1 , d_2 모두 하중비가 증가함에 따라 초기에는 선형적으로 변하지만 어느 시점에 이르러서 갑자기 변하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향을 보이는 것은 이 시점에서 모서리 근처에서 발생한 지역 주름이 점차 성장하여 마침내 전역 주름이 형성되었기 때문이다. 또한 d_1 의 기울기의 변화가 d_2 보다 크게 나타나 전역주름의 발생으로 주름에 수직인 방향으로의 변위(d_1)가 더 민감한 영향을 받음을 알 수 있다. 모서리의 길이가 14.14mm와 7.07mm 일 때 각각 하중비가 2.82와 2.76에서 전역주름이 형성되었다.

3.4 전단계수의 효과

Fig. 7에서 최대 주름 면적은 $\theta = 0^\circ$ 에서 발생함을 볼 수 있었다. 이 결과는 참고문헌[12]의 $\theta = 0^\circ$ 에서 최소 면적을 가지게 되는 것과 배치하고 있다. 따라서 본 논문에서는 식(5)의 물성치에 더하여 다음과 같이 참고문헌[12]에서 사용된 물성치 세트를 고려하여 계산을 수행하였다.

$$E_{11}=2.59\text{GPa}, E_{22}=1.727\text{GPa}, G_{12}=0.704\text{GPa}, \nu_{12}=0.34 \quad (6)$$

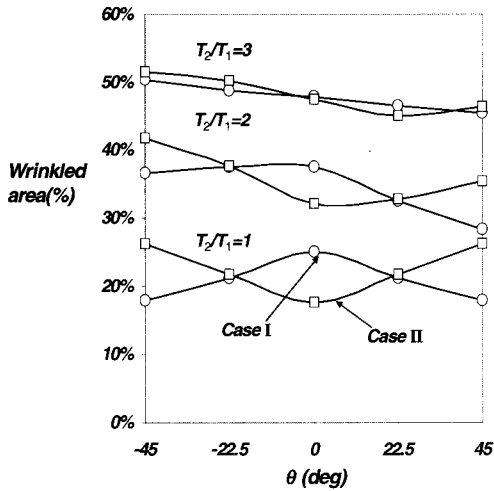


Fig. 11. Variation of percent wrinkled area for 2 material property sets

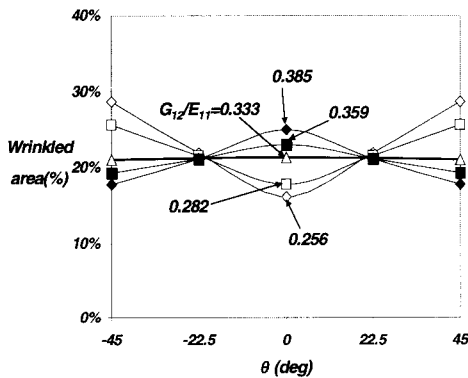


Fig. 12. Variation of percent wrinkled area vs. orientation angle for different moduli ($T_2/T_1=1$)

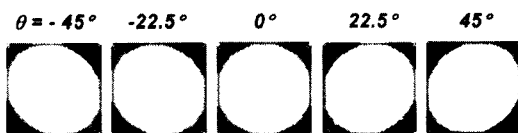


Fig. 13. Wrinkled shape when $G_{12}/E_{11}=0.333$ for $T_2/T_1=1$

여기서 식(5)의 물성치를 Case I으로, 식(6)의 물성치를 Case II로 하여 사용하기로 한다. 두 경우에 대한 탄성계수의 비(E_{22}/E_{11})는 0.67로 동일하지만, 탄성계수에 대한 전단계수의 비(G_{12}/E_{11})는 각각 0.385, 0.277이다.

Fig. 11은 2가지 물성치 세트에 대한 재료방향

각에 따른 주름 발생 면적의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Case I의 경우 $\theta = 0^\circ$ 에서 최대 주름 면적을 갖는 반면 Case II의 경우 최소 주름 면적을 가지는 것을 볼 수 있는데, 이는 전단계수의 크기가 주름 발생에 큰 영향을 미치기 때문이다. 한편 $T_2/T_1=3$ 인 경우 최소 주름 면적이 하중 T_2 가 걸린 방향($\theta = 45^\circ$)에서 발생하였는데 하중비가 증가함에 따라 전단계수의 영향이 감소하는 경향을 보여 전역주름이 발생하면 전단계수의 크기가 미치는 영향이 줄어든다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과에서 주름 발생 면적은 전단계수에 크게 의존하고 있음을 알 수 있는데 이를 보다 명확히 이해하기 위하여 전단계수를 변화시켜 가면서 해석을 수행하여 보았다. Fig. 12는 하중비가 1인 경우 전단계수의 변화와 재료방향각에 대한 주름 발생 면적의 변화를 보여주고 있다. 여기서 고려한 전단계수의 범위는 0.8974GPa~1.346GPa이고, 전단계수를 제외한 나머지 물성치는 $E_{11}=3.5\text{GPa}$, $E_{22}=2.333\text{GPa}$, $\nu_{12}=0.3$ 이다. 그림에 표기된 수치는 G_{12}/E_{11} 이며, 이 비율이 증가함에 따라 $\theta = 0^\circ$ 에서 주름 발생 면적 역시 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 $G_{12}/E_{11}=0.333$ 인 경우는 실제로는 비등방성 재료이지만 등방성 재료의 결과처럼 θ 에 관계없이 주름 발생 면적이 거의 유사하게 발생하나, Fig. 13의 주름 형상을 보면 등방성 재료와는 달리 주름 형상이 θ 에 따라 변화하고 있음을 볼 수 있다. 또 이때의 G_{12}/E_{11} 비율을 기준으로 주름 발생 면적 변화 경향이 달라지는 것을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 벌칙 매개변수에 의한 물성치 수정방법을 기반으로 하는 주름 해석 알고리즘을 사용하여 비등방성 멤브레인의 주름 거동을 조사하였다. 모서리에 인장하중이 가해진 사각형 멤브레인 문제에 적용하여 주름 거동을 해석한 결과 핀의 지름이 주름 발생 면적에 미치는 영향은 거의 없으며, 잘라낸 모서리의 길이는 주름 발생 면적에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전단계수의 크기가 주름 발생 면적에 미치는 영향은 상당히 지배적임을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) Jenkins, C. H., "Gossamer Space Craft : Membrane and Inflatable Structures Technology for Space Applications", AIAA, Inc. Restonn, VA, 2001.
- 2) Friedman, L., "Starsailing : Solar Sails and Interstellar Travel", John Wiley & Sons, 1998.
- 3) Roddeman, D. G., "Finite-Element Analysis of Wrinkling Membranes", *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 7, 1991, pp. 299~307.
- 4) Roddeman, D. G., Drukker, J., Oomens, C. W. J., and Janssen, J. D., "The Wrinkling of Thin Membranes : Part I - Theory", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 54, Dec. 1987, pp. 884~887.
- 5) Roddeman, D. G., Drukker, J., Oomens, C. W. J., and Janssen, J. D., "The Wrinkling of Thin Membranes : Part II - Numerical Analysis", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 54, Dec. 1987, pp. 888~892.
- 6) Kang, S., and Im, S., "Finite Element Analysis of Wrinkling Membranes", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 64, Jun. 1997, pp. 263~269.
- 7) Lu, K., Accorsi, M., and Leonard, J., "Finite Element Analysis of Membrane Wrinkling", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 50, 2001, pp. 1017~1038.
- 8) Jeong, D. G., and Kwak, B. M., "Complementarity Problem Formulation for The Wrinkled Membrane and Numerical Implementation", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 12, No. 2, 1992, pp. 91~104.
- 9) Miller, R. K., and Hedgepeth, J. M., "An Algorithm for Finite Element Analysis of Partly Wrinkled Membranes", *AIAA Journal*, Vol.20, No.12, 1982, pp. 1761-1763.
- 10) Miller, R. K., Hedgepeth, J. M., Weingarten, V. I., Das, P., and Kahyai, S., "Finite Element Analysis of Partly Wrinkled Membranes", *Computers and Structures*, Vol. 20, No.1-3, 1985, pp. 631~639.
- 11) 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.
- 12) Woo, K., Igawa, H., and Jenkins, C. H., "Analysis of Wrinkling Behavior of Anisotropic Membrane", *Computer Modeling in Engineering and Science*, Vol. 6, No. 4, 2004, pp. 397~408.
- 13) 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.
- 14) Wong, Y. W., Pellegrino, S., and Park, K. C., "Prediction of Wrinkle Amplitudes in Solar Sails", *Proc. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS SDM Conf.*, AIAA 2003-1981, Norfolk, Virginia.
- 15) Su, X., Abdi, F., Taleghani, B., and Blandino, J. R., "Wrinkling Analysis of A Kapton Square Membrane under Tensile Loading", *Proc. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS SDM Conf.*, AIAA 2003-1981, Norfolk, Virginia.
- 16) Tessler, A., Sleight, D. W., and Wang, J. T., "Nonlinear Shell Model of Thin Membranes with Emphasis on Structural Wrinkling", *Proc. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS SDM Conf.*, AIAA 2003-1981, Norfolk, Virginia.