論文

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.5.423

얇은 막재에서 컷의 진전방향에 주름이 미치는 영향

김영아*, 우경식**

Prediction of Cut Propagation Direction of Wrinkled Thin Membrane

Young-Ah Kim* and Kyeongsik Woo**

ABSTRACT

In this paper, the effect of wrinkling on the cut propagation direction of thin membrane was studied using geometrically nonlinear shell element post-buckling analysis. In the analysis, rectangular tensile membrane configuration with a slanted center cut was considered. The cut propagation direction was predicted by maximum energy release rate method, K_{II}-zero method, and maximum tangential stress method. The cut propagation angle and the J-integral values were calculated for the wrinkled and unwrinkled cases and the results were compared. Various initial cut orientation angles were considered and the effect on the propagation direction was studied. The cut propagation paths were also predicted by virtual cut extension approach.

초 록

본 논문에서는 기하학적 비선형 후좌굴 유한요소 해석을 통하여 얇은 멤브레인에서 주름 발생이 컷의 진전방향에 미치는 영향을 연구하였다. 해석에는 양단에 인장을 받고 있고 중앙에 기울어진 컷을 가진 직사각형 멤브레인을 고려하였다. 주름이 발생한 경우와 주름이 발생하지 않은 경우에 대해 각각 해석을 수행하여 컷의 진전각도 및 J-적분값을 비교하였다. 컷의 진전각도는 에너지 방출률이 최대인 방향, K_{II}의 값이 0이 되는 방향을 구하는 방법 및 접선응력이 최대인 방향을 구하는 방법을 사용하여 계산하였다. 또한 다양한 컷의 초기방향각을 고려하여 각도에 따른 주름의 영향을 조사하였으며 가상의 미소크기의 컷을 반복적으로 진전시켜 컷이 전파되는 경향도 알아보았다.

Key Words : Membrane(멤브레인), Wrinkle(주름), Cut(컷), Cut Propagation Angle(컷의 진전각도), J-integral(J-적분)

Ⅰ. 서 론

멤브레인은 솔라세일(solar sail), 우주안테나(reflector antenna)등 많은 가서머(gossamer) 우주구조물에 사용되고 있다. 이는 멤브레인이 가벼울 뿐만 아니라 패키징하여 발사체에 탑재가 유리한 장점이 있기 때문이다. 그러나 멤브레인은 두께가 매우 얇아 주름(wrinkle)이 쉽게 발생하는 특징을 가지고 있다. 멤브레인에 주름이 발생하면 하중경로가 바뀌고 멤브레인의 형상에도 영향을 미치게 된다[1, 2]. 주름을 방지하기 위한 여러 방법들이 있으나 멤브레인을 아주 두껍게 하지 않는 한 주름을 완전히 제거하기는

† 2012년 3월 5일 접수 ~ 2012년 4월 20일 심사완료
* 정회원, 충북대학교 대학원 구조시스템공학과
** 정회원, 충북대학교 토목공학부
교신저자, E-mail: kw3235@chungbuk.ac.kr
361-763 충북 청주시 흥덕구 내수동로 52

어렵다. 한편 멤브레인은 다양한 우주환경에서 파손을 일으킬 수 있는 요소에 노출되어 있다. 현재까지 멤브레인의 파손에 대한 연구는 일부 수행된 적이 있지만[3] 주름과 컷의 진전방향의 상호작용에 대한 연구는 거의 전무한 상태이다.

일반적인 구조재료의 균열전파 방향은 전통적인 선형파괴역학(linear elastic fracture mechanics) [4-6]을 통하여 예측할 수 있다. 균열의 진전방향에 대해서 Goldstein 과 Salganik은 응력확대계수를 이용하여[4], Nuismer는 에너지 방출률이 최대인 방향을 구하는 방법으로[5], 그리고 Shin과 Asaro가 접선응력이 최대인 방향을 구하는 방법으로[6] 균열의 진전방향을 예측한 바 있다.

본 논문에서는 얇은 멤브레인에서 주름이 컷의 진전방향에 미치는 영향을 연구하였다. 해석형상은 인장하중을 받고 중앙에 기울어진 컷을 가진 직사각형 멤브레인 시편을 고려하였으며, 주름발생이 허용된 경우와 억제된 경우에 대해 해석을 수행하였다. 주름해석은 기하학적 비선형 후좌굴 유한요소해석을 통하여 수행하였으며 컷의 진전방향은 최대 에너지 방출률이 나타나는 방향을 구하는 방법(maximum energy release rate, *MERR*), 컷의 진전에 따라 K_{II}가 0이 되는 방향을 구하는 방법(K_{II} = 0, *KII0*) 및 접선응력이 최대가 되는 방향을 구하는 방법(maximum tangential stress, *MTS*)으로 예측하였다. 또한 다양한 컷의 초기방향각을 고려하여 각도에 따른 주름의 영향을 조사하였으며 작은 크기의 진전길이(Δa)만큼 컷을 반복적으로 진전시켜 컷이 전파되는 경로도 예측하였다.

II. 해 석

2.1 해석모델링

Figure 1은 본 연구에서 고려한 직사각형 멤브레인 시편을 나타내고 있다. 시편의 크기는 길이(L)가 125 mm, 넓이(W)는 25 mm, 두께(t)는 0.025 mm이다. 시편은 중앙에 길이가 $2a$이고 초기방향각이 ϕ만큼 기울어진 컷을 가지고 있다. 컷 길이($2a$)는 5 ~ 8 mm이며 초기방향각(ϕ)은 6° ~ 60° 사이의 다양한 각도를 고려하였다. 여기서 컷을 하중에 수직한 방향으로 정사영(orthogonal projection)시킨 길이($2a^*$)를 5.47 mm로 동일하게 유지하였다.

시편은 양단에 y방향으로 인장하중(P)이 작용하고 있는데 여기서 인장하중은 시편의 끝단모서리를 따라 변위를 가하는 방식으로 부가되었다. 또한 그립조건을 모사하기 위해 인장변위 이외의 모든 자유도를 구속하였다. 해석형상은 주기적 대칭성(cyclic symmetry)을 가지므로, 회

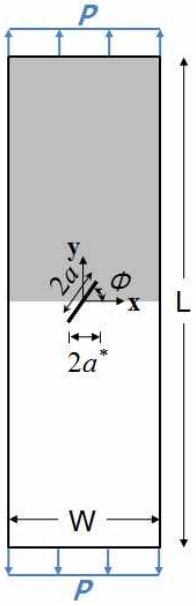


Fig. 1. Center cut rectangular membrane configuration under tension (125×25 mm^2)

색으로 표시한 위쪽 1/2에 대해서만 유한요소 메쉬로 모델링 하였다. 중앙부 수평선(y = 0)에 위치한 각각의 절점에 다음과 같은 다중점 구속조건(multi-point constrains, MPC)을 적용하였다.

$$\begin{aligned} u(x,0) &= -u(-x,0),\ \theta_x(x,0) = -\theta_x(-x,0) \\ v(x,0) &= -v(-x,0),\ \theta_y(x,0) = -\theta_y(-x,0) \\ w(x,0) &= w(-x,0),\ \theta_z(x,0) = \theta_z(-x,0) \end{aligned} \quad (1)$$

해석에 사용된 재료는 마일라(mylar)이며, E = 3.8 GPa, ν = 0.3이다.

Fig. 2는 해석메쉬이다. 해석메쉬는 전체적으로 균일한 크기의 요소를 가지나, 보다 정확한 *J*-적분값을 계산하기 위해 컷의 끝단 주변부는 점차적으로 요소의 크기가 감소하도록 요소망을 구성하였다. 그림에서 컷 주변의 요소망 형상을 자세히 보여주기 위하여 해당 부분을 확대하여 나타내었다.

본 연구에서는 상용 유한요소 해석코드인 ABAQUS를 통하여 해석을 수행하였다. 해석에 사

용된 메쉬는 주름발생이 허용된 경우는 얇은 쉘요소(S4R5/STRI3)를, 그리고 주름발생이 억제된 경우는 평면응력요소(CPS4/CPS3)를 사용하였다. 두 경우 모두 사용한 요소 수는 약 99,000개 이다.

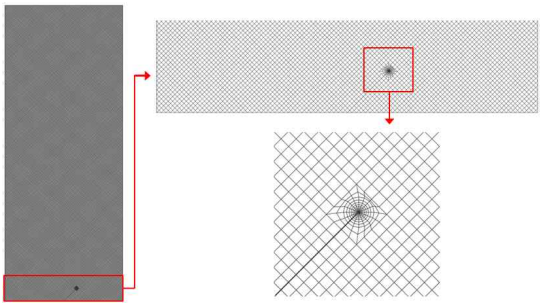


Fig. 2. FE modeling

2.2 주름해석

멤브레인의 주름해석은 크게 멤브레인 요소법과 쉘요소법으로 나눌 수 있다. 멤브레인 요소를 사용하는 방법은 물성치(constitutive relation) 또는 변위구배(deformation gradient)를 수정하여 주응력과 주변형률의 값에 따라 주름상태(wrinkled), 또는 느슨한 슬랙상태(slack)를 모사하게 된다. 반면에 쉘요소를 사용하는 방법은 주름의 형상을 직접적으로 나타내도록 모델링한다. Wong 등[7]은 쉘요소를 사용하여 사각형 솔라세일에 대해 좌굴해석을 수행한 뒤, 좌굴모드를 분석하여 별도의 링클실험 결과에 나타난 형상과 일치하는 좌굴형상을 찾아내어 이를 메쉬에 기하학적 결함(geometrically imperfection)을 심는 방법으로 주름의 형상을 해석하였다. 또한 Tessler 등[8]은 메쉬 내부의 절점들에 대해 무작위 기하하적 결함을 심는 방법으로 주름의 형상을 만들었다. 쉘요소를 사용한 방법은 멤브레인 요소를 사용하는 것보다 단순하며 주름의 형상을 명확하게 보일 수 있다.

본 연구에서는 쉘요소법에 의한 기하학적 비선형 후좌굴 유한요소해석(geometrically non-linear post-buckling analysis)을 통하여 주름의 발생 및 성장 거동을 모사하였다. 쉘 요소법에서 가장 중요한 것은 주름을 유발 시키는 것인데[9], 본 연구에서는 메쉬에 기하학적 결함을 심는 방법을 사용하였다. 이를 위해 메쉬 내부에 위치한 절점들에 대해 면외방향으로 두께의 1% 이내의 크기를 가지는 미소의 무작위 기하학적 결함을 가하였다. 또한 주름변형해석 과정의 안정화를 위하여 최종결과에 영향을 미치지 않을 정도의 작은 값의 댐핑(10^{-12})을 가하였다.

2.3 J-적분 계산

J-적분은 식(3)과 같이 정의된다[10].

$$J=\int_{\Gamma}(W_{n_1}-\frac{\partial u_i}{\partial x_1}\sigma_{ij}n_j)ds \qquad (2)$$

여기서 Γ 는 폐곡선을, W_{n_1} 는 단위체적당 변형에너지를 의미하며, u_i는 변위를 σ_{ij}는 응력텐서, n_j는 폐곡선의 외향법선벡터를 나타낸다.

본 연구에서 J-적분은 균열의 끝단을 둘러싸고 있는 요소들로 구성된 폐곡선으로부터 계산하였다. 이론적으로 J-적분은 폐곡선의 선택과는 무관하다고 되어 있으나 본 연구에서는 3 ~ 5번째 폐곡선에 의해 계산된 값을 평균하여 사용하였다.

2.4 컷의 진전각도 예측

본 연구에서는 에너지 방출률(energy release rate)이 최대인 방향을 구하는 방법(*MERR*)[3], 컷의 진전에 따라 K_{II}의 값이 0이 나타내는 방향을 구하는 방법(*KII0*)[2], 그리고 접선응력(tangential stress)이 최대인 방향을 구하는 방법(*MTS*)[4]을 사용하여 컷의 진전각도를 예측하였다.

이 방법들은 재료가 선형탄성이며 등방성일 경우 균열의 진전방향을 예측하는데 많이 사용되는 방법이다. 예로써 *MTS*에 의한 균열의 진전방향 θ_c는 컷의 초기방향각을 기준으로 식 2와 같이 정의되어지며 Fig. 3에 나타내었다[11].

$$\theta_c=\cos^{-1}\left(\frac{3K_{II}^{\,2}+\sqrt{K_I^{\,4}+8K_I^{\,2}K_{II}^{\,2}}}{K_I^{\,2}+9K_{II}^{\,2}}\right) \qquad (3)$$

여기서 K_I은 Mode I(opening mode)의 K_{II}는 Mode II(sliding mode)의 응력확대계수(stress intensity factor)를 나타낸다.

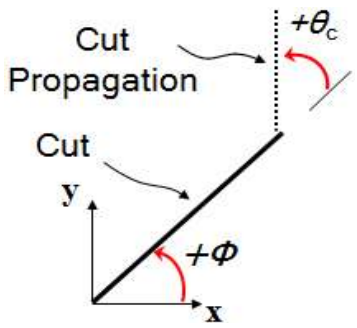


Fig. 3. Cut propagation angle

Ⅲ. 계산결과 및 검토

3.1 컷의진전각도 및 J-적분값의 변화

Figure 4는 초기방향각(ϕ)이 45° 이고 $2a^*$ = 5.47 mm ($2a$ = 6.3 mm)일 때 주름이 발생한 경우, 하중의 변화에 따른 주름형상 및 Von Mises응력의 분포를 보이고 있다. 해석은 형상의 1/2만 수행하였으나 그림에서는 전체형상을 보이기 위해 180° 회전하여 나타내었다. 또한 주름의 형상을 명확히 보이기 위해 면외방향의 변형을 40배 확대하였다. 여기서 σ_n은 가해진 인장하중을 그립단면적으로 나눈 명목응력을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 먼저 컷의 끝단 주변부에서 국부주름이 먼저 발생하게 되고 이후 하중이 증가함에 따라, 국부주름은 전역주름으로 성장하게 된다. 주름밴드를 따라 Von Mises 응력분포가 크게 나타나고 있어서 하중은 이 성장된 주름지역을 통하여 주로 전달되는 것으로 보인다.

Fig. 5는 하중증가에 따른 컷 진전각도의 변화를 나타내고 있다. 여기서 컷의 진전각도(θ_c)는 초기방향각(ϕ)을 기준으로 정의된다.(Fig. 3 참조) 주름이 발생한 경우를 실선으로 억제된 경우를 점선으로 나타내었다. 국부주름은 공칭응력이 1.12 MPa일 때 발생하였다. 그림에서 볼

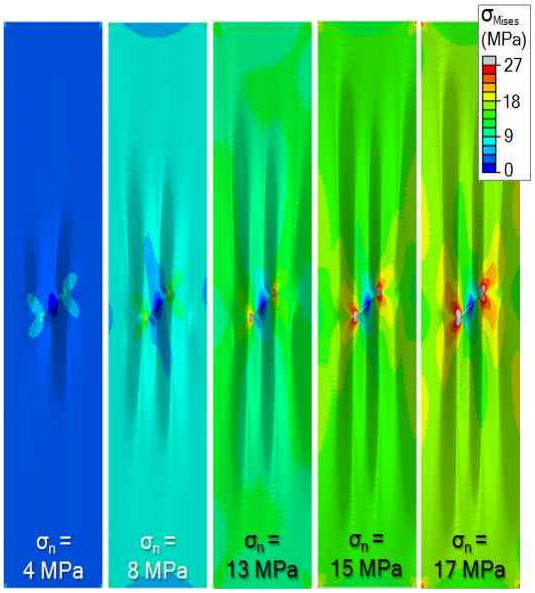


Fig. 4. Distribution of Von Mises stress versus applied nominal stress for ϕ = 45° and $2a^*$ = 5.47 mm (deformation scale factor = 40)

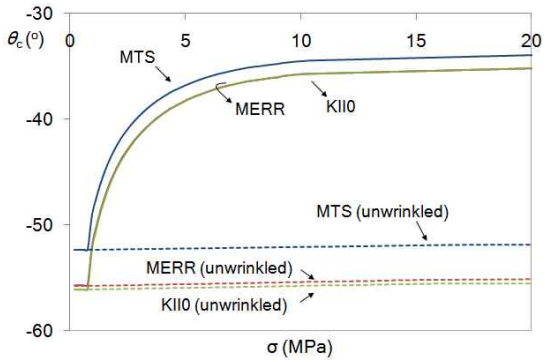
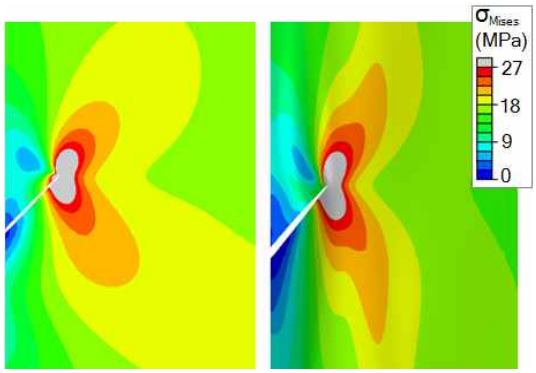


Fig. 5. Variation of predicted cut propagation angle for center cut rectangular tensile membrane configuration (ϕ = 45°)

수 있듯이 *MERR*과 *KII0*에 의한 값은 거의 동일하고 *MTS*의 경우 나머지 두 값보다 약간 크게 나타났다. 주름발생이 억제된 경우, 컷의 진전각도는 하중 변화에 거의 무관하게 나타나는 것을 볼 수 있다. (아주 미세한 변화는 비선형 해석을 수행하였기 때문으로 근본적으론 하중의 변화에 거의 무관하게 나타나고 있다.) 반면에 주름이 발생한 경우에는 주름발생을 기점으로 컷의 진전각도가 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 주름에 의해 하중 경로 및 컷 끝단 주변의 응력분포가 변경되기 때문으로 생각된다.

Fig. 6은 주름발생이 억제된 경우와 허용된 경우의 컷의 끝단 주변부의 Von Mises 응력의 분포이다. 주름발생이 억제된 경우에는 컷 끝단 주변에서의 땅콩모양의 응력집중 지역이 아래로 향하고 있는 반면에 주름이 발생한 경우에는 컷



(a) Unwrinkled (b) Wrinkled

Fig. 6. Distribution of Von Mises stress around tip (ϕ = 45°, $2a^*$ = 5.47 mm, σ_n = 16 MPa)

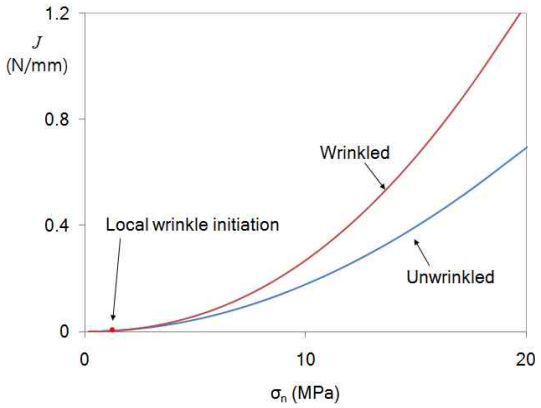


Fig. 7. Variation of J-integral versus applied nominal stress for center cut rectangular tensile membrane configuration (ϕ = 45°)

의 끝단을 중심으로 상·하가 거의 대칭인 응력분포를 형성하고 있다. 즉 주름이 발생하여 성장하면서 아래로 향해있던 땅콩모양의 응력분포를 보다 수평에 가깝게 변화시키게 되고 컷의 진전방향도 이에 따라 변화하게 되는 것으로 판단된다.

주름이 J-적분값에 미치는 영향은 Fig. 7에 나타내었다. 주름이 발생한 경우의 J-적분값은 하중이 증가하면서 주름이 억제된 경우에 비하여 훨씬 큰 분포를 보인다. 이는 주름의 발생으로 하중이 주로 주름이 발생한 밴드부분으로 전달되어 컷의 끝단 주변부에 응력집중을 심화시켜 더 높은 J-적분값을 나타내는 것으로 판단된다.

3.2 초기방향각에 따른 컷의 진전각도

본 연구에서는 6° ~ 60° 사이의 다양한 초기방향각에 따른 컷의 진전각도를 조사하였다. 전술한 바와 같이 $2a^*$를 5.47 mm로 동일하게 하였는데 이는 초기방향각에 따라 실제 컷의 길이($2a$)가 5 ~ 8 mm에 해당된다. 해석에서 J_c = 1.87 N/mm 로 가정하였으며 계산된 J-적분값이 J_c와 동일하게 될 때의 진전각도 θ_c를 선택하였다. 주름의 형태가 컷의 진전각도에 큰 영향을 미치므로 고려한 해석형상 모두 저차모드로 주름이 발생하도록 조절하였다.

Fig. 8은 다양한 초기 방향각에 따른 컷의 진전각도를 나타낸다. 여기서 주름이 발생한 경우를 실선으로 주름발생이 억제된 경우를 점선으로 나타내었다. Fig. 8 (a)는 초기방향각을 기준으로 컷의 진전각도(θ_c)를 나타낸 것이다. 계

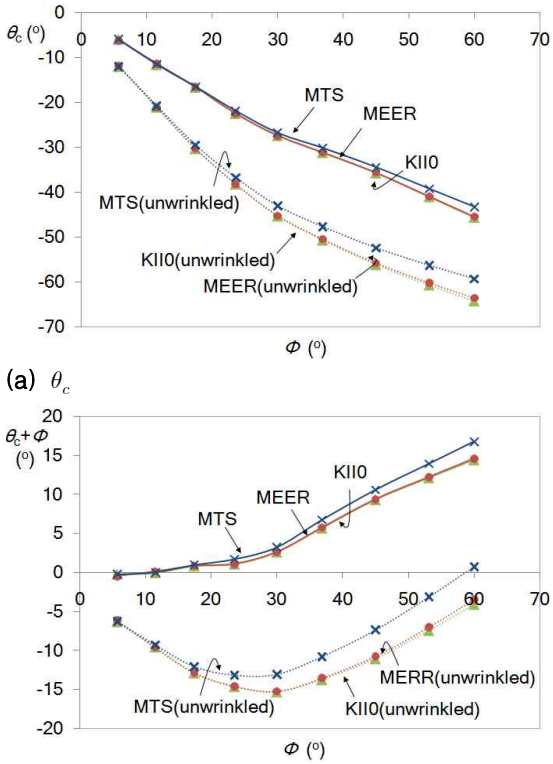
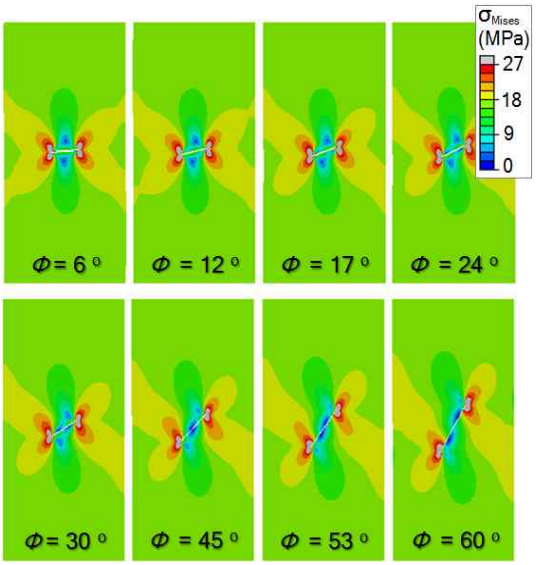


Fig. 8. Variation of predicted cut propagation angel versus cut orientation angle

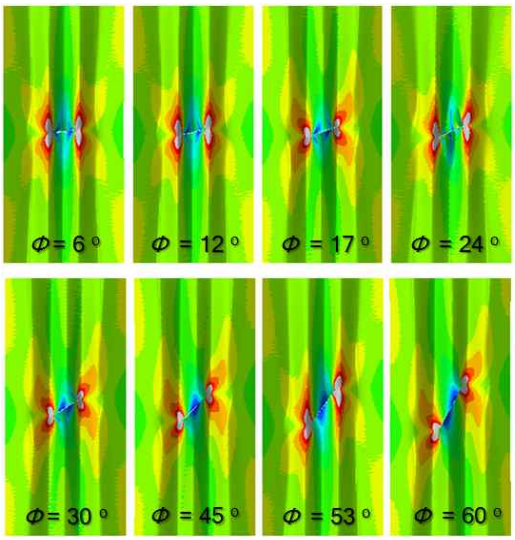
산결과 주름이 발생한 경우와 억제된 경우 모두 컷의 초기방향각이 증가할수록 큰 진전각도의 변화를 보였다. 주름이 발생한 경우가 더 작은 진전각도를 나타내 주름이 발생한 경우가 억제된 경우보다 더욱 수평에 가까운 방향으로 진전하려는 경향을 가지는 것으로 보인다.

Fig. 8 (b)는 수평을 기준으로 컷의 진전각도를 나타낸 것 이다. 그래프에서 수직축은 진전각도와 초기방향각의 합으로서, 수평을 기준으로 한 진전각도로 정의된다. 주름발생이 억제된 경우에는 거의 모든 초기방향각에서 음의 각도를 가졌으며 그래프가 포물선의 형태를 띠고 있다. 반면에 주름이 발생한 경우에는 거의 모든 각도에서 양의 각도를 가졌으며, 컷의 초기방향각이 증가할수록 컷의 진전각도 또한 증가하였다. 전술한 바와 같이 *KII0* 지표에 의한 컷 진전각도는 K_{II}값이 0인 각도로 예측된다. 경사진 컷의 경우 K_{II}는 다음 식 (4)와 같은 형태를 가진다.

$$K_{II} = \sigma_0 \sin\phi \cos\phi \sqrt{\pi a} \qquad (4)$$



(a) Unwrinkled



(b) Wrinkled

Fig. 9. Distribution of Von Mises stress for various cut orientation angles (σ_n = 16 MPa, $2a^*$ = 5.47 mm, deformation scale factor = 40)

여기서, σ_0는 작용하는 하중을 ϕ는 초기방향각을 a는 컷 길이($2a$)를 나타낸다. 위 식에서 볼 수 있듯이 주름발생이 억제된 경우에는 컷의 진전각도가 sin과 cos의 곱의 영향으로 그래프가 초기방향각에 대해 포물선의 형태를 보이지만, 주름이 발생한 경우에는 주름에 의해 컷의 끝단 주변의 응력 분포가 변경되어 이러한 형태를 띠지 않는 것으로 보인다. 대체적으로 주름

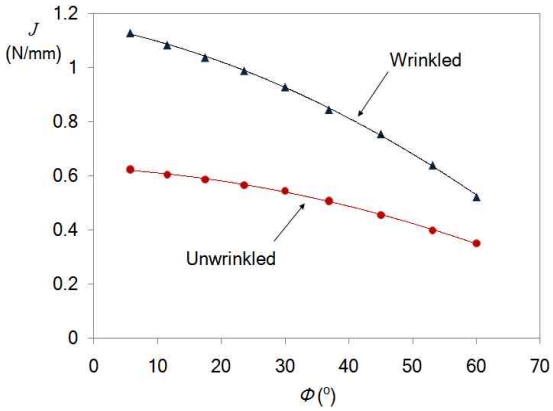


Fig. 10. Variation of J-integral versus various cut orientation angle (σ_n = 16 MPa)

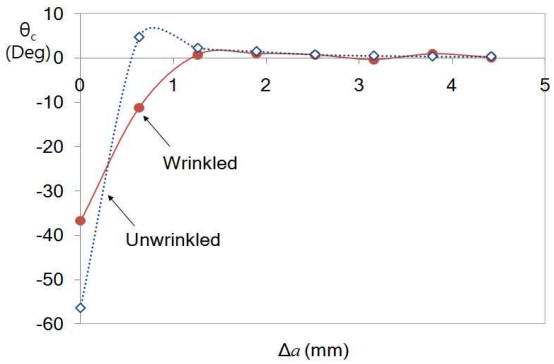
이 발생한 것이 억제된 것 보다 수평에 가까운 방향으로 진전하려는 경향이 큰 것으로 나타나고 있는데, 이는 컷이 음의 각도로 진전하려는 것을 주름이 각도를 증가시켜 나타나는 현상으로 판단된다. 초기방향각이 53° 이상일 때 주름발생이 억제된 경우가 수평에 가까운 방향으로 진전하려는 경향이 더 크게 나타났는데, 이는 초기방향각 자체가 크기 때문이다.

Fig. 9는 다양한 초기방향각에 따른 Von Mises응력의 분포를 나타내고 있다. 자세한 Von Mises 응력의 분포를 보이기 위해 전체 길이의 1/3만을 나타내었다. 주름발생이 억제된 경우에 낮은 초기방향각에서는 컷의 끝단을 중심으로 상·하가 거의 대칭인 형상으로 응력분포를 보이지만 초기방향각이 증가할수록 한쪽으로 치우치도록 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면에 주름이 발생한 경우, 모든 초기방향각에서 컷의 끝단을 중심으로 상·하가 거의 대칭인 하중 경로가 형성되며 하중은 주름을 따라 주로 전달되는 것을 볼 수 있다.

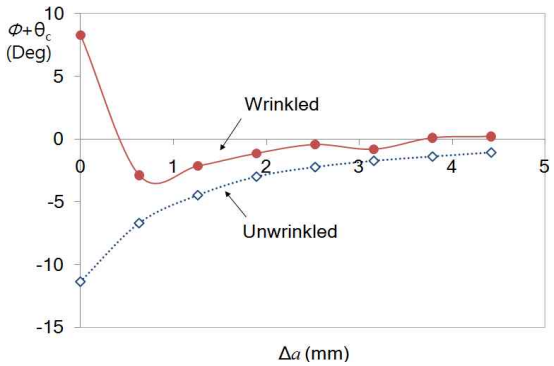
Fig. 10는 다양한 초기방향각에 따른 J-적분값의 변화를 보이고 있다. 주름이 발생한 것이 더 높은 J-적분값을 나타냈으며, 주름이 발생한 것과 발생하지 않은 것 모두 낮은 초기방향각에서, 즉 컷이 인장하중과 수직한 방향으로 가까이 갈수록 높은 J-적분값을 보였다. 또한 초기방향각이 증가할수록 주름이 발생한 것과 발생하지 않은 것의 J-적분값의 차이는 줄어들었다.

3.3 컷 진전경로

본 연구에서는 J_c를 1.87 N/mm로 가정하여 작은 크기의 가상의 컷 길이(Δa)만큼 반복적으로 진전시키는 방식으로 컷의 전파경로를 예측



(a) θ_c

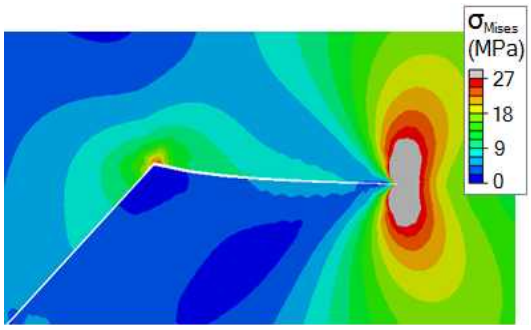


(b) θ_c + ϕ

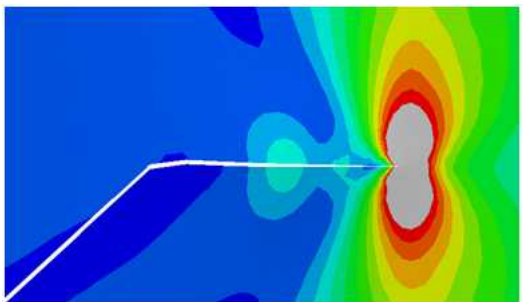
Fig. 11. Predicted tear propagation direction Versus virtual cut(Δa) for center cut rectangular tensile membrane configuration (ϕ = 45°)

하였다. 고려한 초기방향각은 45° 이며 Δa를 0.631 mm로 설정하였고, 총 4.42 mm($\Sigma\Delta a$ = 4.42 mm)를 진전시켰다.

Fig. 11은 Δa만큼씩 컷을 진전시켰을 때 진전각도(θ_c)를 나타낸다. Fig.11 (a)의 Θ_{cn}은 Θ_{cn-1}을 기준으로 정의 (단, Θ_{c1} 은 초기방향각을 기준으로 정의(ϕ)) 된다. 주름발생이 억제된 경우는 -56.38° (수평기준은 -11.38°)에서, 주름발생이 허용된 경우에는 -36.72° (수평기준은 8.28°)에서 컷이 진전하기 시작했다. 이후 컷 길이가 증가함에 따라 주름발생이 억제된 경우와 허용된 경우가 거의 동일한 값을 가짐을 볼 수 있다. 주름이 진전되는 경향은 다음 그래프를 통해 더욱 자세히 알 수 있다. Fig.10 (b)는 수평을 기준으로 Δa에 따른 컷의 진전각도를 나타낸다. 본 그래프를 통해 주름이 발생한 것과 억제된 것의 컷의 초기 진전방향에 큰 차이가 있으나 점차 컷이 진전함 에 따라 그 차이는 사라짐을 알 수 있다. 주름발생이 억제된 경우에는 음의 각도



(a) Unwrinkled



(b) Wrinkled

Fig. 12. Von Mises stress distribution and predicted tear propagation for center cut rectangular tensile membrane configuration (ϕ = 45°)

에서 컷이 진전하기 시작하여 서서히 수평으로 가는 반면에 주름이 발생한 경우에는 양의 각도에서 컷이 진전하기 시작하여 급격하게 떨어졌다가 수평으로 가는 것을 볼 수 있다. 또한 주름이 발생한 것이 억제된 것보다 보다 수평으로 진전하려는 경향이 더 큼을 알 수 있다.

Fig. 12의 (a)는 주름발생이 억제된 경우, (b)는 주름이 발생한 경우 컷을 진전시킨 멤브레인의 형상에서의 Von Mises응력의 분포로 컷의 진전 경로를 보여주고 있다. 주름발생이 억제된 경우에는 음의 각도로 컷이 진전되기 시작하여 컷의 길이가 증가할수록 수평방향으로 접근하도록 진전하였다. 반면에 주름이 발생한 경우에는 양의 각도로 컷이 진전되기 시작하나 컷 길이가 증가함에 따라 거의 수평으로 진전되는 것으로 나타났다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 중앙에 기울어진 컷을 가진 직사각형 멤브레인이 양단에 인장하중을 받고

있을 때 주름발생이 컷의 진전방향에 미치는 영향을 연구하였다. 주름해석은 쉘요소법에 의한 기하하적 비선형 후좌굴 유한요소해석을 통하여 수행하였고 컷의 진전각도는 에너지 방출률이 최대인 방향을 구하는 방법, K_{II}=0을 나타내는 방향을 구하는 방법 및 접선응력이 최대인 방향을 구하는 방법 을 사용하여 컷의 진전방향을 예측하였다.

계산결과 주름발생이 억제된 경우에는 컷의 진전각도에 거의 변화가 없었으나 주름발생이 허용된 경우에는 주름발생을 기점으로 컷의 진전각도가 급격하게 변화하였다. 주름이 발생한 것이 주름발생을 억제시킨 경우보다 낮은 진전각도를 보였으며 주름은 컷의 진전각도를 증가시키는 것으로 판단되었다. 6° ~ 60° 사이의 다양한 초기방향각을 고려해본 결과, 주름발생이 억제된 것은 컷의 진전각도의 변화가 아래로 볼록한 포물선의 형태를 띠었지만 주름이 발생한 것은 초기방향각이 증가 할수록 컷의 진전 각도 또한 증가하였다. 또한 미소크기를 가지는 가상의 컷 길이를 반복적으로 증가시켜 본 결과, 주름이 억제된 것은 음의 각도에서, 그리고 주름이 허용된 것은 양의 각도에서 컷이 전파하기 시작하였지만 컷 전파가 진전 될수록 두 경우 모두 수평방향으로 진전되는 경향을 보였다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0026874).

참고문헌

1) Murphey, T., Murphy, D.M, Mikulas, M.M, and Adler, A., "A Method to Qiantify the Thrust Degradation Effects of Structural Wrinkles in Solar Sails", *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf.*, *AIAA 2002-1560*, April 22-25, 2002.

2) 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.*, *AIAA 2003-1447*, April 7-10, 2003.

3) B. R. Seshadri and J. C. Newman, "Analyses of Buckling and Stable Tearing in Thin-Sheet Materials", *NASA TM-1998 -208428*, 1998

4) Goldstein, R. V. and Salganik, R. L., "Brittle Fracture of Solids with Arbitrary Cracks", *Int J Fracture*, Vol. 10, 1974, pp. 507-527

5) Nuismer, R., "An Energy Release Rate Criterion for Mixed Mode Fracture", *Int J Fracture*, Vol. 11, 1975, pp.245-250

6) Sih, G., "Strain-Energy-Density Factor Applied to Mixed-mode Crack Problems", *Int J Fracture*, Vol. 10, 1974, pp.305-321

7) Wong, T., W., Pellegrino, S. and Park, K., C, "Prediction of Wrinkle Amplitudes in Square Solar Sails", *Proceedings of 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS SDM Conf.*, April 7-10, 2003. also *AIAA* Paper 2003-1982

8) Tessler, A., Sleight, D. W., and Wang, J. T., "Effective Modeling and Nonlinear Shell Analysis of Thin Membranes Exhibiting of Thin Membranes Exhibiting Structural Wrinkling", *AIAA J of spacecraft and Rockets*, Vol. 42, No 2, pp. 287-298. 2005

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

10) Rice, J. R. "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", *ASME J of Applied Mechanics*, Vol 35, pp.379-386, 1968

11) Shih, C. and Asaro, R. "Elastic-Plastic Analysis of Cracks on Bimaterial Interfaces: Part I - Small Scale Yielding", *J of Applied Mechanics*, Vol.55, pp.299-316, 1988