

## 論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.5.421

## 접힌자국이 있는 멤브레인에서 두께에 따른 주름거동의 변화

우경식\*

## Thickness Effect on Wrinkle-Crease Interaction for Thin Membrane

Kyeongsik Woo\*

## ABSTRACT

In this paper, the thickness effect on the wrinkle-crease interaction behavior of corner-loaded creased square membranes was studied using geometrically nonlinear post-buckling analysis. The membranes were modeled using shell elements, and the meshes were seeded with semi-random geometrical imperfection to instigate the buckling deformation. Results indicated that the wrinkle-crease interaction behavior was significantly dependent on the membrane thickness. Both the global and local wrinkles developed earlier as the thickness decreased. It was also found that the wrinkling behavior depended on the initial deployment angle in which the local wrinkle initiation occurred earlier, while the global wrinkle formation was delayed as the angle increased.

## 초 록

본 논문에서는 코너에서 대각선방향으로 인장하중을 받고 있는 접힌자국이 있는 사각형 멤브레인에서 두께가 주름 거동에 미치는 영향을 기하학적 비선형 후좌굴 유한요소해석을 통하여 연구하였다. 멤브레인은 쉘 요소로 모델링 하였고 좌굴을 발생시키기 위하여 면외방향으로 미소의 무작위성 기하학적 결함을 메쉬에 가하였다. 해석은 접히지 않은 원 멤브레인과 수직방향으로 접힌 멤브레인에 대해 수행하였고 그 결과를 비교하였다. 해석 결과 멤브레인의 두께가 감소함에 따라 주름의 발생과 성장을 크게 촉진함을 알 수 있었다. 또한 접힌 자국의 초기 전개각이 증가할수록 국부주름의 낮은 하중에서 발생하였으나 전역주름으로의 성장은 지연되는 경향을 보였다.

**Key Words** : Membrane thickness(막재의 두께), Wrinkle(주름), Crease(접힌 자국), Post-buckling analysis(후좌굴해석), Minor principle stress(부응력)

## 1. 서 론

최근 우주구조물에 멤브레인을 사용하려는 시도가 활발히 진행되고 있다. 멤브레인으로 된 우주구조물들은 일반적으로 얇은 멤브레인과 이를 지지하는 복합재로 이루어져 있는데, 지상에서

제작하여 우주로 보내 전개하는 구조로 되어 있다. 멤브레인 우주구조물은 무게가 가벼울 뿐만 아니라 작은 부피로 패키징 하여 발사체에 탑재하기가 매우 용이한 장점을 가지고 있어 큰 주목을 받고 있다. 그러나 멤브레인은 굽힘강성이 거의 없으므로 압축응력이 가해지면 즉시 좌굴이 발생하는데 이를 주름(wrinkle)이라고 한다.

멤브레인 구조를 우주로 보내기 위해 일정한 패턴으로 접어 패키징하게 되는데 이 과정에서 접힌 자국(crease)이 발생하게 된다[1-2]. 접힌 자

† 2010년 1월 9일 접수 ~ 2010년 4월 7일 심사완료

\* 정회원, 충북대학교 토목공학부

교신저자, E-mail : kw3235@chungbuk.ac.kr

충북 청주시 흥덕구 개신동 12

국은 주름의 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한 패키징된 멤브레인 구조물은 우주공간에서 운용형상으로 전개하게 되는데 이때 접힌 멤브레인의 펼침전개시 접힌자국과 주름의 상호작용에 대한 연구가 필수적이다.

멤브레인의 주름거동에 대한 연구가 많은 연구자들에 의하여 활발히 진행되어온 것에 반하여 접힌 자국이 주름거동에 미치는 영향에 대해서는 아직 연구가 미미한 상태이다. Papa 와 Pellegrino[3]는 일정한 패턴으로 접힌 사각형 멤브레인의 주름 거동을 쉘요소에 의한 후좌굴 해석을 수행하여 연구하였다. Hossain 등[4]은 횡방향의 접힌 자국이 있는 사각형 멤브레인에 대해 멤브레인 요소를 사용하여 해석을 수행하였다. 또한 우[5]는 접힌 자국이 있는 사각형 멤브레인에 대해 쉘요소에 의한 후좌굴해석을 통하여 주름의 성장거동을 연구한 바 있다. 그러나 이상의 연구들은 접힌 자국이 있는 멤브레인의 전개시 발생하는 주름거동해석을 시도한 정도로 주름의 발생과 성장에 영향을 미치는 인자들에 대한 체계적인 연구는 아직 수행되지 않았다.

본 논문에서는 코너하중을 받고 있는 접힌자국이 있는 사각형 멤브레인에서 두께가 주름 거동에 미치는 영향을 기하학적 비선형 후좌굴 유한요소해석을 통하여 연구하였다. 접힌 멤브레인은 먼저 코너에서 동일한 크기의 기준하중을 가하여 전개한 후 한 쪽 대각선 방향의 하중만을 계속적으로 증가시켜가면서 주름의 발생과 성장 거동을 관찰하였다. 본 연구에서는 다양한 초기전개각을 가진 접힌 형상을 고려하였으며 멤브레인 두께의 변화가 주름성장-접힌자국의 상호작용에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 체계적으로 조사하였다.

## II. 본 론

### 2.1 해석

Fig. 1은 코너에서 인장하중을 받고 있는 접힌 사각형 캡톤(Kapton) 멤브레인의 형상을 보이고 있다. 이 형상은 사각형 솔라세일의 원형으로 간주될 수 있는데, 중앙부분에서 수직방향으로 초기전개각(initial deployment angle,  $\theta_0$ )을 가지도록 접혀있으며, 접히지 않은 상태에서의 크기는  $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 이다. 멤브레인의 코너부분은 대각선에 수직인 방향으로 잘라진 후 강철 핀이 부착되어 있다. 여기에 케블라 선을 핀의 중앙에 연결하여 그 끝에서 대각선 방향으로 인장하중을

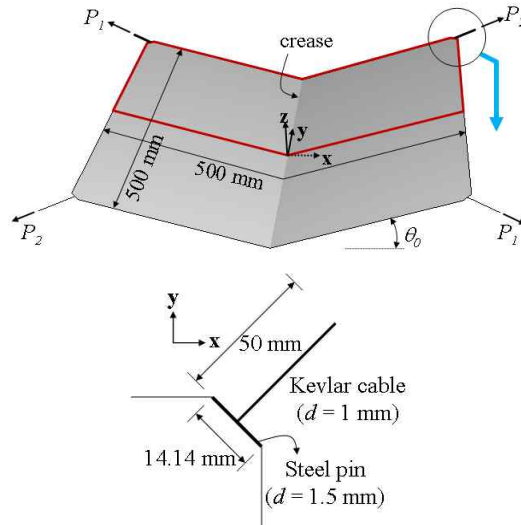


Fig. 1. Corner-loaded creased membrane configuration

가하였다. 본 연구에서 고려한 멤브레인의 두께는  $25\ \mu\text{m}$ ,  $12.5\ \mu\text{m}$  및  $6.25\ \mu\text{m}$ 이다. 핀과 케이블의 치수는 그림에 표시되어 있다.

해석에 사용된 캡톤 멤브레인의 물성치는  $E = 2.5\ \text{GPa}$ ,  $\nu = 0.34$ 이고, 강철 핀 및 케블라 선의 탄성계수는 각각  $210\ \text{GPa}$ 와  $140\ \text{GPa}$ 이다.

본 연구에서 사용한 해석방법은 비선형 후좌굴 유한요소해석으로 참고문헌[5-6]에서 사용한 것과 동일하다. 이 방법에 따라 멤브레인 메시의 내부에 위치하는 절점에 두께의 0.1~1% 크기의 무작위성 기하학적 결함을 가하여 면외방향의 좌굴변형을 유발하였다. 해석은 ABAQUS를 사용하여 수행되었는데 멤브레인은 얇은 쉘 요소(S4R5/S3R)로, 강철 핀은 보 요소(B31)로, 그리고 케블라 선은 막대 요소(T3D2)로 모델링 하였다. 멤브레인 해석에서 미세한 주름패턴을 상세히 보여주기 위해서는 매우 많은 수의 요소를 사용하여야 한다. 본 연구에서는 메시 수렴연구를 수행하여 요소수를 결정 하였다. 표 1은 해석에 사용된 요소의 수를 보이고 있다. 멤브레인은 전체적으로 균일한 크기의 쉘 요소를 사용하여 모델링 하였으나 접힌자국 주변에서는 요소의 크기를 자국선에 접근할수록 감소시켰다. 또한 이 지역에서는 일반 쉘 요소(S4)를 사용하였다.

해석에서 사용한 구속조건은 다음과 같다. 멤브레인의 중앙 지점에서는 면내 변위( $u, v$ )와 모든 회전 자유도( $\phi_x, \phi_y, \phi_z$ )를 구속하고, 케블라 선의 끝에서는 면외 방향의 변위자유도( $w$ )만을 구속하

Table 1. Number of elements used

Thickness ( $\mu\text{m}$ )	S4R5/S3R	S4	B31	T3D2
25	79,952	2,000	16	2
12.5	178,668	3,000	24	2
6.25	243,418	2,500	28	2

였다. 또한 Fig. 1에 보인 바와 같이 멤브레인 형상은 주기적 대칭성을 가지므로 해석은 그림에서 굵은 선으로 표시된 윗부분에 대해서만 모델링하고 수평선( $y = 0$ )을 따라서 다음과 같은 주기대칭조건을 가한 후 수행하였다.

$$\begin{aligned}
 u(x,0,z) &= -u(-x,0,z) \\
 v(x,0,z) &= -v(-x,0,z) \\
 z(x,0,z) &= z(-x,0,z) \\
 \phi_x(x,0,z) &= -\phi_x(-x,0,z) \\
 \phi_y(x,0,z) &= -\phi_y(-x,0,z) \\
 \phi_z(x,0,z) &= \phi_z(-x,0,z)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

하중은 케블라 선의 끝에서 대각선 방향으로 가하였다. 하중은 2단계로 가하게 되는데 먼저 균일한 하중을 가하여 접힌 멤브레인을 어느 정도 펼친다. 그 다음 좌상귀의 하중  $P_1$ 은 직전 단계에서 가한 값으로 고정된 채 우상귀의 하중  $P_2$ 를 계속적으로 증가시킨다. 여기서, 멤브레인의 전개형상을 얻기 위해 가해진 균일하중 값을 기준하중( $P_0$ )으로, 그리고 제 2 단계에서 대각선 방향으로 가해진 인장 하중의 비율( $P_2/P_0$ )을 하중비(load ratio,  $LR$ )로 정의하였다.

본 연구에서 고려한 하중의 값은 표 2에서 정리하였다. 이들은 모두 두께비 동일한 값으로서 접히지 않은 원 멤브레인(pristine membrane)에서 주름이 발생하기 이전에는 동일한 면내 거동을 보이도록 하였다. 여기서 두께가  $25 \mu\text{m}$ 인 경우 기준하중을  $0.1 \text{ N}$ 으로 하였는데 이는 접히지 않은 원 멤브레인의 중앙부에서 대략  $10 \text{ kPa}$ 의 응력값을 주도도록 선택한 것이다[7]. 본 연구에서 고려한 최대 하중비( $LR$ )는 4이다.

주름의 발생은 분기(bifurcation) 좌굴문제이므로 어떠한 모드로도 나타날 수 있다. Fig. 2는 두께가  $25 \mu\text{m}$ 인 접히지 않은 원 멤브레인에서 하중비가 4일 때 주름형상을 보이고 있는데 아래

Table 2. Applied tensile loads

Thickness ( $\mu\text{m}$ )	$P_0 = P_1 \text{ (N)}$	$P_2 \text{ (N)}$
25	0.1	0.4
12.5	0.05	0.2
6.25	0.025	0.1

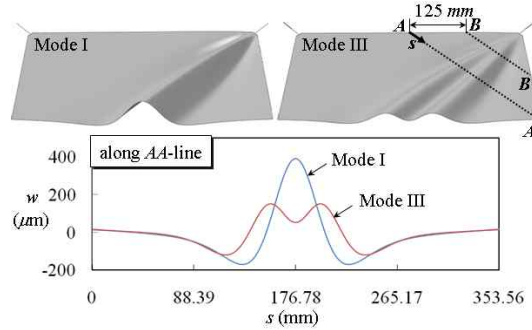


Fig. 2. Example wrinkle mode shapes for pristine membrane( $t = 25 \mu\text{m}$ ,  $LR = 4$ )

그림은 AA-선을 따라 그린  $w$ -변형의 분포이다. 이 그림에서는 대각선 대칭 제 1 모드와 제 3 모드의 주름을 예로 나타내고 있다. 식(1)의 주기적 대칭조건을 주기적 비대칭 조건으로 수정하면 비대칭 모드도 가능하지만 본 연구에서는 가장 단순한 대각선 대칭 제 1 모드만을 고려하였다.

### 2.2 계산결과 및 검토

Fig. 3은 하중비( $LR$ )의 증가에 따른 부응력(minor principal stress)의 분포를 멤브레인의 두께가  $25 \mu\text{m}$  및  $6.25 \mu\text{m}$ 일 때에 대해 각각 보이고 있다. 그림에서 부응력은 멤브레인의 윗면(SPOS)에 대해 도시되었으므로 양의 값이 주름의 산을, 그리고 음의 값이 골을 나타낸다. 해석에서 좌상귀 하중( $P_1$ )은 기준하중의 값으로 고정된 채 우상귀 하중( $P_2$ )을 계속적으로 증가시켰으므로 주름은 우상귀에서 국부적으로 발생하고 하중비가 증가함에 따라 점차 발달하여 멤브레인의 중앙지역을 관통하는 전역주름으로 성장하게 된다. 그림에서 멤브레인의 두께가 감소함에 따라 휨강성이 저하되기 때문에 국부주름의 발생과 전역주름으로의 성장이 상대적으로 낮은 하중비에서 일어나고 있음을 볼 수 있다.

접힌 멤브레인과 원 멤브레인을 비교하면 초기 전개각이 증가할수록 국부주름이 낮은 하중비에서 발생하였음을 알 수 있는데 이는 접힌자국에 의해 유발된 비등방성에 기인하는 것으로 생각된다. 그러나 전역주름으로의 성장은 이와 반대로 원 멤브레인이 접힌 멤브레인 보다, 그리고 전개각이 감소할수록 낮은 하중비에서 일어남을 보였다. Fig. 3(a)에서 원 멤브레인의 경우 국부주름은  $LR = 3.0 \sim 3.5$  사이에서 비교적 늦게 발생하였으나 하중비가 증가함에 따라 곧바로 전역주름으로 성장하였다. 반면에 접힌 멤브레인은 국

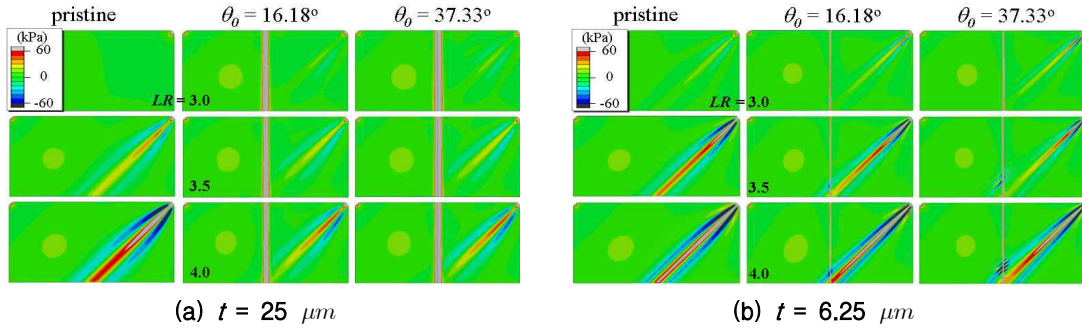


Fig. 3. Distribution of minor in-plane stress

부주름은  $LR = 3.0$  이전에 이미 발생하고 있지만 하중비가  $LR = 4$ 에 이르기까지 전역주름으로의 성장은 이루어지지 않았다. 이것은 멤브레인의 중앙부분에서 접힌자국이 일종의 스티프너와 같이 휨강성을 증가시키는 역할을 하였기 때문으로, 국부주름이 성장하여 중앙부로 접근할 때 이를 저지하는 것으로 보인다. 접힌 멤브레인의 초기 전개각이 클수록 퍼지지 않고 남아있는 자국의 깊이가 크므로 더 큰 휨강성을 가지게 되고 따라서 전역주름은 더 지연되어 나타났다. 그러나 두께가 감소하면 접힌자국이 더 쉽게 퍼지고 자국의 깊이도 얕아지게 되므로 전역주름을 지연시키는 효과도 따라서 감소하게 된다.  $LR = 4$  일 때 두께가  $25 \mu\text{m}$ 인 경우에는 원 멤브레인에서 전역주름이 발생하였으나 두께가  $6.25 \mu\text{m}$ 인 경우에는  $16.18^\circ$  및  $37.33^\circ$ 인 멤브레인 모두에서 전역주름이 발생하였음을 볼 수 있다.

Fig. 4는 하중비가 4일 때  $BB$ -선을 따라서 주름의 형상을 보이고 있는데 ( $BB$ -선의 정의는 Fig. 2 참조), 본 연구에서 고려한 하중 레벨에서 전역주름의 형성은 멤브레인의 두께에 직접적으로 영향을 받고 있음을 확연히 관찰할 수 있다. 그

에서 원 멤브레인은  $LR = 4$ 일 때 모든 두께에서 전역주름이 형성되었음을 볼 수 있다. 접힌 멤브레인에서는 두께가 얇은  $6.25 \mu\text{m}$ 일 때는 모두 전역주름이 형성되었으나 두께가  $12.5 \mu\text{m}$ 일 때는 초기 전개각이  $16.18^\circ$ 인 경우에만 형성되었고 두께가  $25 \mu\text{m}$ 일 때는 형성되지 않았다. 한편 Fig. 5에서 두께가 감소함에 따라서 주름의 파장은 짧아지나 전역주름이 형성된 경우 파고는 거의 일정하게 유지되고 있음을 보인다. 또한 원 멤브레인이나 접힌 멤브레인의 전역주름의 형상이 크게 차이가 나지 않음을 볼 수 있다.

Fig. 4(c)에서 초기 전개각이  $37.33^\circ$ 이고 두께가  $6.25 \mu\text{m}$ 일 때 전역주름의 파고와 파장이 타 모델보다 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이것은 주름이 멤브레인의 중앙부를 통과하면서 접힌 자국선 근처에서 새로운 국부주름의 발생에 의한 것이다. 이 모델의 경우  $LR = 3.5$  근처에서 전역주름이 형성되는데 Fig. 5에 보인 부응력의 분포 및  $x = 6.67 \text{ mm}$ 인 수직선을 따라 주름의 형상을 보면  $y = 50 \sim 100 \text{ mm}$  지역에서 세밀하게 굴곡진 모습을 보여 이 부분에 새로운 국부주름이 형성되었음을 볼 수 있다. 이 주름은 접힌자국에 의

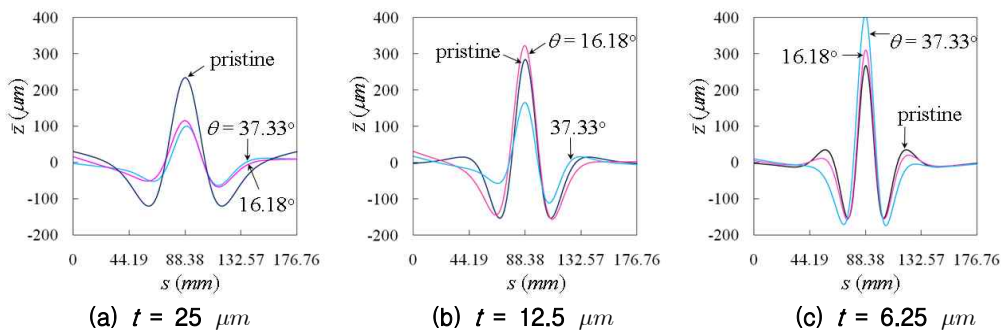


Fig. 4. Wrinkle shape along L1-line at  $LR = 4$

해 자국선을 따라 증가된 휨강성과 주변 멤브레인의 휨강성과의 차이에 의해 발생한 것으로 하중비를 계속적으로 증가시키면 결국 퍼지게 되지만 전역주름의 발달과 간섭하여 Fig. 4(c)에서의 차이를 유발하는 것으로 생각된다.

주름의 발생 시점은 특정지점에서 면외방향의 변위를 추적하여 정확히 결정할 수 있다. Fig. 6

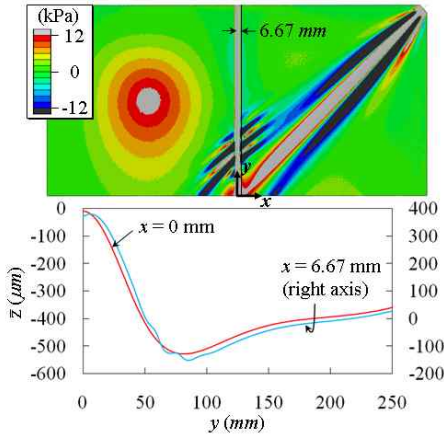


Fig. 5. Minor in-plane principal stress and wrinkle shape distribution near the crease line at LR = 3.5

은 멤브레인 중앙( $x = y = 0$ )에서 하중증가에 따른 하중면과 변형된  $z$ -좌표사이의 거리( $\psi$ )의 변화를 보이고 있다.  $\psi$ 는 주름발생이전에 원 멤브레인에서는 접힌자국이 없으므로 0의 값을, 그리고 접힌 멤브레인의 경우에는 접힌자국의 깊이에 해당하는 값을 가진다. 그림에서  $\psi$ 는 하중비의 증가에 따라 원 멤브레인은 전역주름이 발생하는 시점에서 순간적으로 상승하지만 접힌 멤브레인은 점진적으로 변화하다가 전역주름 발생시점 부근에 이르러 빠르게 상승하는 거동을 보인다.

Fig. 7은  $\psi$ 의 하중비에 대한 변화율을 나타내고 있다. 그림에서 극한값을 가지는 시점에서 주름이 형성되는 것으로 정의되는데 극한 값은 국부주름 발생시와 전역주름 형성시의 2차례에 걸쳐 발생하게 된다. Fig. 7(a)에서 원 멤브레인의 경우 국부주름과 전역주름은 각각  $LR = 3.16$  및  $3.25$ 에서 발생하였는데 순간적이고 광범위한 국부주름의 발생으로 극한값이 매우 크게 나타났다. Fig. 7(b)에서 원 멤브레인은  $LR = 2.63$ 에서의 작은 극한값이 국부주름의 발생을, 그리고  $LR = 2.99$ 에서의 극한값이 전역주름의 형성을 나타낸다. 두께가 더 감소하거나 접힌 멤브레인의 경우에 국부주름을 나타내는 극한값은 매우 작게 나타나지만 이 경우에도 축의 스케일을 조정하면 국부주름의 발생시점을 정확히 알아낼 수 있다.

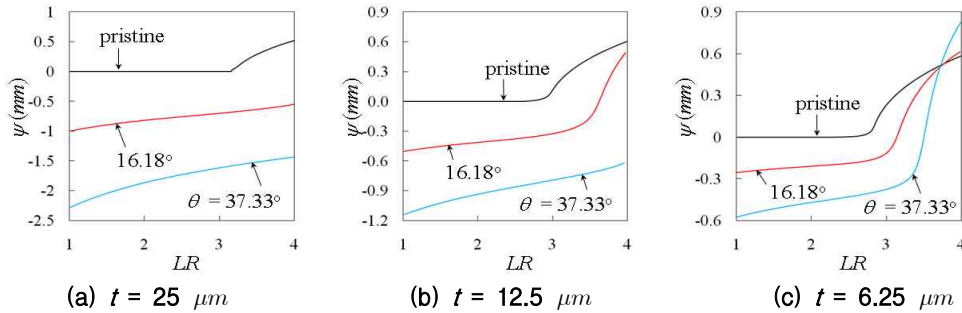


Fig. 6. Variation of  $\psi$  at the center versus load ratio

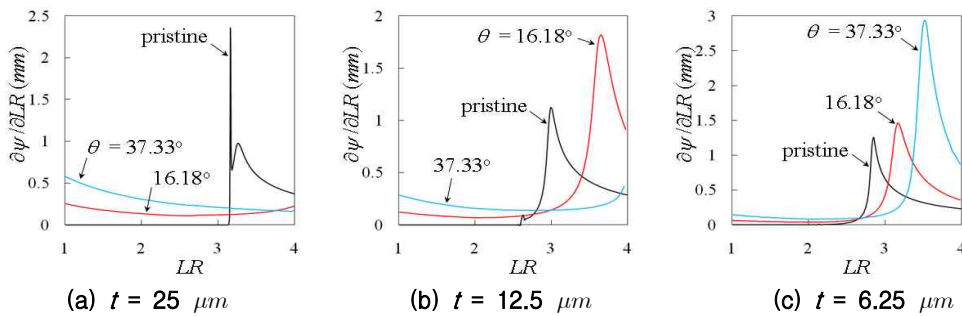


Fig. 7. Variation of  $\partial\psi/\partial(LR)$  versus load ratio



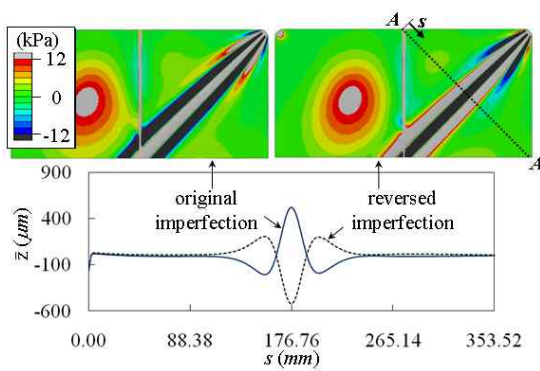


Fig. 8. Wrinkle orientation of creased thin membrane( $t = 6.25 \mu\text{m}$ ,  $\theta_0 = 16.18^\circ$ ,  $LR = 4$ )

접힌 멤브레인에서 접힌 자국의 방향과 전역 주름의 방향과의 관계에도 두께가 영향을 주는 것으로 나타났다. Fig. 8은 두께가  $6.25 \mu\text{m}$ 이고 초기 전개각이  $16.18^\circ$ 인 경우  $LR = 4$ 에서 부응력의 분포를 보이고 있다. 2장에서 설명한 바와 같이 주름은 메쉬에 미소크기의 무작위성 기하학적 결함을 가하여 발생시키게 되는데 우측의 그림은 좌측의 주름을 발생시킨 결함의 방향을 단순히 반대로 바꾼 후 해석을 수행하여 얻은 결과이다. AA-선을 따라 그린 면외방향의 변형 형상에서 접힌자국 부근을 제외하고 주름의 모습은 거의 대칭의 분포를 보인다. 이와 같은 전역주름 방향의 무작위성은 두께가  $6.25 \mu\text{m}$ 일 때만 나타났다. 이보다 두꺼운 멤브레인에서는 기하학적 결함의 방향에 관계없이 항상 접힌자국과 전역주름의 피크가 반대로 나타나 멤브레인의 두께가 두꺼운 경우 접힌자국이 전역주름의 방향을 결정하는 것으로 판단되었다.

### III. 결 론

본 논문에서는 코너에서 대각선방향으로 인장 하중을 받고 있는 접힌자국이 있는 사각형 멤브레인에서 두께가 주름 거동에 미치는 영향을 연구하였다. 멤브레인은 쉘 요소로 모델링 하였고 면외방향으로 미소의 무작위성 기하학적 결함을 메쉬에 가한 후 기하학적 비선형 후좌굴 유한요소 해석을 수행하였다. 해석결과 멤브레인의 두께가 감소함에 따라 낮은 하중비에서 주름이 발생하고 성장함을 알 수 있었다. 접힌 멤브레인의 경우 초기 전개각이 증가할수록 국부주름은 낮은

하중에서 발생하였으나 전역주름으로의 성장은 지연되는 것으로 나타났다. 또한 두께가 감소할수록 주름의 파장도 감소하였으나 일단 전역주름이 잘 발달한 후에 파고는 거의 유사한 값을 가짐을 알 수 있었다. 한편 접힌 멤브레인에서 주름의 방향에도 두께가 영향을 미치는 것으로 나타났다는데 본 연구에서는 두께가  $6.25 \mu\text{m}$ 인 경우에서만 기하학적 결함에 따라 주름의 방향이 달라지는 결과를 얻었다.

### 후 기

이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구지원비에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- 1) Miura, K., "Method of Packaging and Deployment of Large Membranes in Space", *International Astronautical Federation, Paper IAF-80-A31*, Tokyo, Japan, 1980.
- 2) Horner, G. G. and Elliot, M. D., "A Fabrication and Development Approach for a Miura-Ori Solar Sail Model", *Proc. 43rd SDM Conference, AIAA-2002-1702*, Denver, CO, April 22-25, 2002.
- 3) Papa, A. and Pellegrino, S., "Systematically Creased Thin-Film Membrane Structures", *J. Spacecrafts and Rockets*, Vol. 45, pp. 10-18, 2008.
- 4) Hossain, N.M.A., Woo, K. and Jenkins, C.H., "Nonlinear Material Response of Systematically Creased Membranes", *Proc. of 47th SDM Conference, AIAA-2006-1801*, 1-4 May 2006, Newport, RI.
- 5) 우경식, "접힌자국이 있는 멤브레인의 주름 거동 연구", *한국항공우주학회지*, 제 36 권 제 9 호, 2008, pp. 851-858.
- 6) Tessler, A., Sleight, D. and Wang, J.T., "Effective Modeling and Nonlinear Shell Analysis of Thin Membranes Exhibiting Structural Wrinkling", *J. Spacecrafts and Rockets*, Vol. 42, pp. 287-298, 2005.
- 7) Mukulas, M. M. and Adler, A., "Rapid Structural Assessment Approach for Square Solar Sails Including Edge Support Cords", *Proc. 44th SDM Conf., AIAA 2003-1447*, Norfolk, VA, April 7-10, 2003.