

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.11.1005>

얇은 막재에서 주름이 파괴거동에 미치는 영향

김영아*, 우경식**

Effect of Wrinkling on Failure Behavior of Thin Membranes

Young-Ah Kim* and Kyeongsik Woo**

ABSTRACT

In this paper, the effect of wrinkling on the failure behavior of thin membrane was studied using geometrically nonlinear shell element post-buckling analysis with global-local analysis strategy. In the analysis, double-edge notched and single-edge notched tensile specimen configurations were considered. The analyses were performed for both cases with allowing and suppressing the wrinkling deformation. The results were investigated focusing on the effect of wrinkle development on the variation of J -integral values at the cut tip. The effect of cut lengths and the specimen lengths were also systematically studied.

초 록

본 연구에서는 기하학적 비선형 후좌굴해석 및 전역-국지해석을 통하여 얇은 막재에서 주름이 파괴거동에 미치는 영향을 연구하였다. 해석에서 양단노치 및 일단노치를 가지는 사각형 인장시험 시편형상을 고려하였으며 주름이 발생한 경우와 억제된 경우에 대해 각각 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 해석결과의 분석을 통하여 주름의 발달에 따라 J -적분값의 변화에 미치는 영향을 조사하였고, 컷 길이에 따른 영향 및 시편형상의 길이 효과에 대해 체계적으로 연구하였다.

Key Words : Gossamer Flexible Structure(가서머 유연구조), Membrane(멤브레인), Wrinkle(주름), Failure(파손), J -integral(J -적분), DENT(양단노치인장), SENT(일단 노치인장)

1. 서 론

최근 멤브레인으로 된 가서머(gossamer) 유연 구조물의 개발이 본격화 되고 있다[1]. 가서머 구조물은 주로 얇은 멤브레인과 이를 지지하는 복합재 빔 또는 트러스로 이루어져 있는데, 일반적으로 구조물의 일부 또는 전체를 제작하여 패키징한 후 운용장소로 보내 최종 형상으로 전개하

게 된다. 이들은 경량화와 요구강도를 동시에 만족시킬 수 있어서 페이로드 중량 및 부피를 최소화하여 발사비용을 줄여야 하는 우주구조물 등에 매우 적합하다.

멤브레인으로 된 유연구조물의 가장 두드러진 특징은 두께가 매우 얇아서 주름이 쉽게 발생한다는 것이다. 또한 패키징 및 전개(또는 접힘 및 펼침) 과정에서 접힌 자국이 발생하게 된다. 멤브레인의 주름거동은 비교적 잘 연구되어 있으나 패키징을 위한 접힘이나 우주에서의 전개시의 펼침 거동에 대한 연구는 최근에서야 일부 수행되고 있는 정도이다[2-3]. 한편 멤브레인 우주구조물은 다양한 운용 환경에서 파손을 일으키는 많은 요소에 노출되어 있다. 현재까지 판재의 좌굴

† 2011년 9월 2일 접수 ~ 2011년 10월 25일 심사완료

* 정회원, 충북대학교 대학원 구조시스템공학과

** 정회원, 충북대학교 토목공학부

교신저자, E-mail: kw3235@chungbuk.ac.kr

361-763 충북 청주시 흥덕구 내수동로 52

및 파손에 대한 연구는 일부 수행된 적이 있으나 [4-5] 두께가 매우 얇은 멤브레인의 주름과 파손 거동의 상호작용에 대한 연구는 거의 전무한 상태이다. 폴리머 멤브레인의 파괴인성치는 필수파괴에너지(essential work of fracture) 시험을 통하여 구하게 된다[6-7]. 그러나 기존의 시험에서 주름의 발생이 파괴인성치 시험결과에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 전혀 언급된 바 없으므로 시험결과의 타당성 확보를 위해 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기하학적 비선형 후좌굴 유한요소해석을 통하여 컷이 있는 얇은 멤브레인에서 주름의 발생이 J 적분값에 미치는 영향을 연구하였다. 해석에서는 측면에 컷을 가지고 있는 사각형 양단노치인장(Double Edge Notched Tension, DENT) 및 일단노치인장(Single Edge Notched Tension, SENT) 시편 형상을 고려하였으며, 주름발생이 허용된 경우와 억제된 경우에 대해 해석을 수행하여 그 결과를 비교함으로써 주름이 얇은 막재의 파손성장에 미치는 영향을 조사하였다.

II. 해 석

2.1 해석형상

그림 1은 본 연구에서 해석이 수행된 양단노치인장(DENT) 및 일단노치인장(SENT) 시험 시편의 형상을 보이고 있다. 본 연구에서 고려한 형상은 길이와 넓이($L \times W$)가 $125 \times 25 \text{ mm}^2$ 이고 두께는 0.025 mm 이다. 컷의 진전에 따른 변화를 알아보기 위하여 다양한 컷 길이(a)를 고려하였다. 또한 $L \times W = 62.5 \times 25 \text{ mm}^2$ 및 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 의 크기를 가지는 형상에 대해서도 해석을 수행하여 시편의 길이에 따른 영향도 조사하였다. 해석에 사용된 멤브레인의 물성치는 $E = 3.8 \text{ GPa}$,

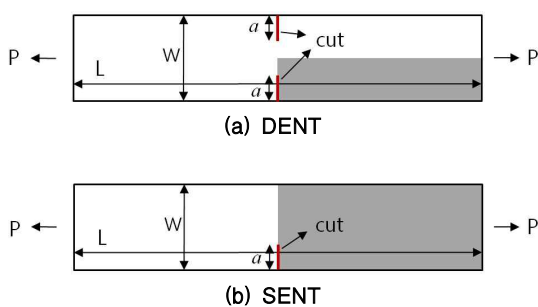


그림 1. Analysis configurations ($125 \times 25 \text{ mm}^2$)

$\nu = 0.3$ 이다.

DENT의 경우에는 길이 및 넓이방향으로 대칭이고 SENT의 경우에는 길이방향으로 대칭성을 가지므로 각각 1/4부분과 1/2부분에 대해 대칭 구속조건을 가하고 해석을 수행하였는데 이는 그림 1에서 진하게 나타난 부분에 해당한다. 인장하중(P)은 시편의 끝단 모서리를 따라 변위를 가하는 방식으로 부가되었는데 이 부분에서는 실제 실험시의 그림조건을 모사하기 위하여 인장변위 이외의 모든 자유도를 구속하였다.

2.2 주름해석

주름거동을 해석하기 위한 수치적 방법은 크게 멤브레인이소법과 셸요소법으로 나눌 수 있다 [8]. 셸요소법에서는 주름의 형상을 직접적으로 나타내도록 모델링하는데 반하여 멤브레인이소법은 물성치 또는 변위구배(deformation gradient)를 수정하여 주름 또는 슬랙(slack) 상태를 모사하게 된다.

본 연구에서는 셸 요소에 의한 기하학적 비선형 후좌굴해석(geometrically nonlinear post-buckling analysis)을 통하여 주름의 발생 및 성장거동을 모사하였다. 셸 요소법에서 가장 중요한 것은 주름을 유발시키는 것인데 본 연구에서는 참고문헌[2, 8]에서 사용된 메쉬에 기하학적 결함(geometric imperfection)을 심는 방법을 사용하였다. 이를 위하여 메쉬 내부에 위치한 절점들에 대해 면외방향으로 멤브레인 두께의 $0.1 \sim 1\%$ 이내의 크기를 가지는 미소의 무작위성 기하학적 결함을 가하였다. 또한 최종해에 거의 영향을 주지 않는 작은 크기의 인위적 댐핑(*STATIC, STABILIZE)을 가하여 좌굴발생 이후의 계산과정을 안정화 하였다.

2.3 전역-국지해석

본 연구에서는 효율적인 해석을 위하여 전역-국지해석(global-local analysis) 전략을 사용하였다. 전역-국지해석은 먼저 전역해석을 수행하고 일부 관심지역에 대해 별도의 상세메쉬를 사용하여 국지해석을 수행하는 다단계 해석 전략으로 대형이거나 복잡한 구조해석에서 흔히 사용되는 해석방법의 하나이다[9-10].

그림 2는 전역-국지해석의 개략도를 나타내고 있다. 먼저 전체 모델에 대하여 Global Analysis를 수행하여 주름형상을 예측한다. 다음으로 컷 끝단 주변지역을 국지메쉬로 상세 모델링한 후 그 경계에 전역해석으로 구한 변위를 경계조건으

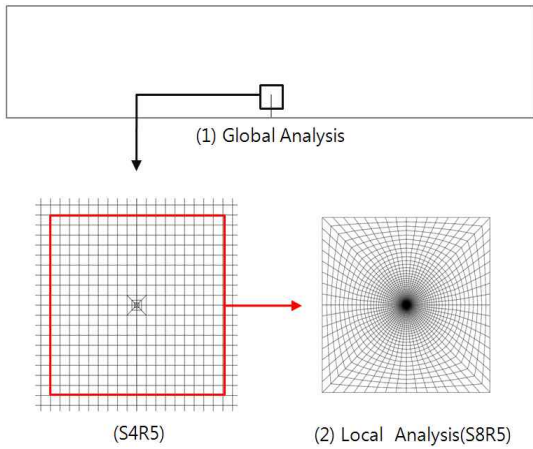


그림 2. Schematic of global-local analysis

로 가하고 국지해석을 수행하여 J -적분을 계산하게 된다.

본 연구에서 전역-국지해석이 특별히 더 매력적인 이유는 국지해석에서는 전역해석과 달리 주름을 유발시키기 위한 복잡한 해석절차를 거치지 않아도 된다는 것이다. 따라서 국지해석 메쉬는 J -적분을 계산하기에 적당한 요소와 메쉬를 자유롭게 선택할 수 있다는 이점이 있다. 또한 전역해석에서 구한 주름변형을 국지해석에서 경계조건으로 사용하게 되므로 면외변형을 가지는 단순한 기하학적 비선형 문제가 되어 해석의 수렴 등 계산상의 문제가 전혀 발생하지 않게 된다.

2.4 유한요소모델링

본 연구에서는 ABAQUS를 통하여 해석을 수행하였다. 먼저 전역해석에서는 주름해석에서 가장 효율적인 것으로 알려진 얇은 4절점 쉘요소(S4R5)로 모델링하였다. 국지해석에서는 컷 끝단을 중심으로 가로×세로가 $0.8 \times 1.67 \text{ mm}^2$ 의 지역에 대해 8절점 쉘요소(S8R5)로 모델링하였다. 국지요소망은 보다 정확한 J -적분을 계산하기 위하여 컷 끝단의 지역에서 점차 요소의 크기가 감소 되도록 구성하였다. 또한 응력의 특이점(stress singularity)을 반영하도록 컷 끝단에 인접한 S8R5요소의 중앙절점을 컷 끝단방향으로 1/4 만큼 이동하여 모델링 하였다. 한편 주름이 발생하지 않은 경우와 비교를 위하여 별도의 해석이 수행되었는데 이때 해석메쉬는 평면응력요소(CPS4)를 사용하였다. 전역 및 국지해석에서 사용한 요소수는 각각 14,460개와 1,904개 이다.

III. 계산결과 및 검토

3.1 주름의 발달 및 J -적분값의 변화

그림 3은 길이×넓이가 $125 \times 25 \text{ mm}^2$, 두께가 0.025 mm , 컷(a)의 길이가 6.25 mm 인 DENT 시편 형상에 대해 하중의 증가에 따라 주름변형 및 Mises 응력의 분포를 보이고 있다. 주름의 형상을 명확히 보이기 위해 면외방향의 변위를 20배 확대하였고, 1/4 모델에 대해 해석을 수행하였으나 전체모습을 보이기 위하여 이미지를 상하좌우로 미러링시켜 나타내었다. 여기서 σ 는 명목응력을 나타내고 있는데 가해진 인장하중(T)을 그림단면적으로 나눈 값이다. 그림에서 보는 바와 같이 주름은 먼저 컷의 끝단에서 국부적으로 발생하게 된다. 이 국부주름은 하중이 증가함에 따라 계속적으로 성장하여 마침내 그림과 그림을 연결하는 전역주름을 형성한다. 응력은 컷의 끝단 주변부에 집중되어 나타나지만, 주름이 발생한 밴드를 따라서 더 높은 분포를 보이고 있어서 주름이 발생한 지역으로 보다 많은 하중이 전달되고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 컷이 그림 3의 DENT 형상에 대해 하중증가에 따른 J -적분값의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 J -적분은 다음식으로 구해진다.

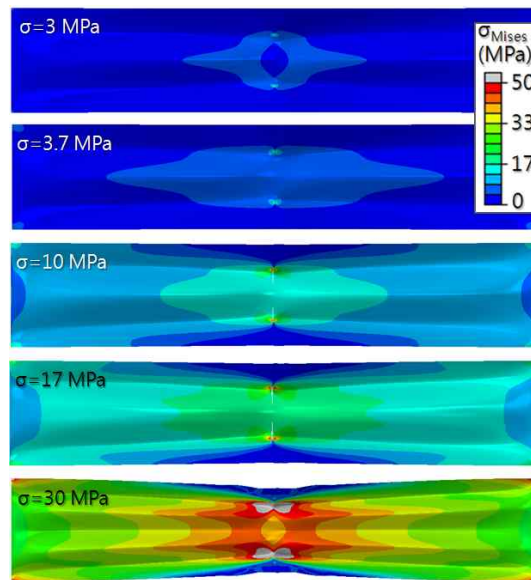


그림 3. Distribution of Mises stress for DENT configuration ($a = 6.25 \text{ mm}$, deformation scale factor = 20)

$$J = \int_{\Gamma} \left(W_{n_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \sigma_{ij} n_j \right) ds \quad (1)$$

여기서 W_{n_i} 는 변형률에너지, u_i 는 변위 벡터, 그리고 $\sigma_{ij}n_j$ 는 폐곡선(contour)에 수직인 traction 벡터이다. 전술한 바와 같이 J -적분은 전역-국지 해석 전략에 따라 국지해석으로부터 구하게 되는데 국지해석 메쉬의 컷 끝단을 둘러싸고 있는 요소들로 구성된 폐곡선으로부터 계산하였다. 이론적으로 J -적분은 폐곡선의 선택에 무관하다고 되어 있으나 본 연구에서는 컷 끝단의 절점을 둘러싸는 요소들로 구성된 폐곡선의 3~5번째 적분값을 평균하여 사용하였다. 그림에서 실선으로 표시된 것이 주름변형이 발생한 경우의 J -적분값의 분포이고 점선으로 표시된 것이 비교를 위하여 계산된 주름변형이 없는 경우의 분포이다. 국부 주름은 명목응력이 3.3 MPa 일때 발생하였다. 그림에서 주름변형이 고려된 경우의 J -적분값은 주름변형이 억제된 경우에 비해 훨씬 더 큰 분포를 보이고 있는데, 이는 그림 3에서 설명한 바와 같이 주름이 발생하게 되면 주름의 산과 골을 이루는 좁은 지역으로 하중이 주로 전달되어 결과적으로 컷 끝단에서의 응력집중을 심화시키게 되어 더 높은 J -적분값을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 이러한 응력집중에 의한 J -적분값의 증가 현상은 국부주름이 발생한 시점보다는 국부주름이 성장하여 그림과 그림을 연결하는 전역주름이 발생한 이후에 두드러지게 나타나게 된다.

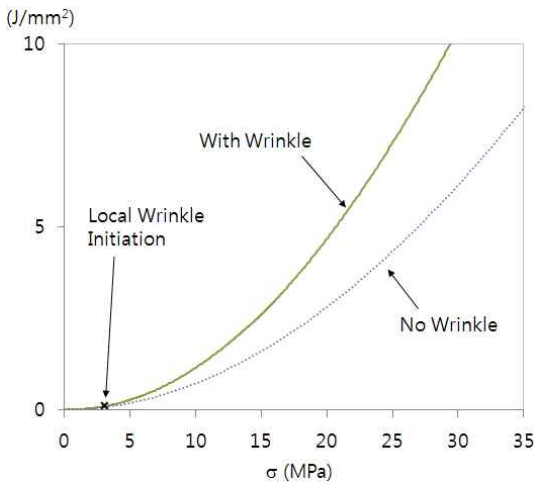


그림 4. Variation of J -integral versus applied nominal stress for DENT configuration ($a = 6.25\text{mm}$)

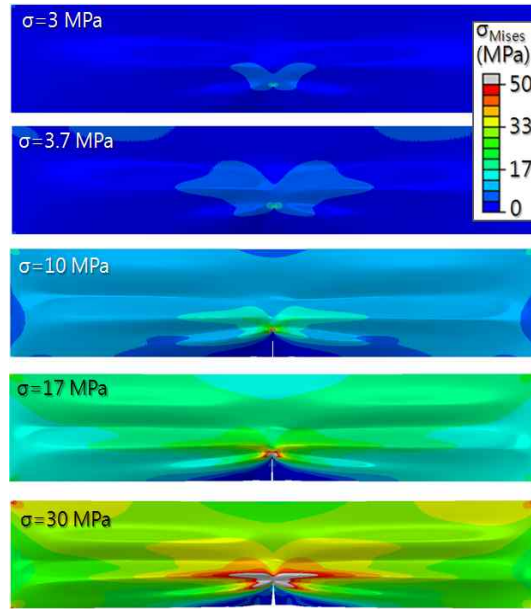


그림 5. Distribution of Mises stress for SENT configuration ($a = 6.25 \text{ mm}$, deformation scale factor = 20)

그림 5는 길이×넓이가 125×25 mm², 두께가 0.025 mm, 컷의 길이가 6.25 mm인 SENT 시편 형상에 대해 주름변형 및 Mises응력의 분포이다. DENT 형상과 마찬가지로 주름은 컷의 끝단에서 먼저 국부적으로 발생하였으며 하중이 증가함에 따라 전역주름으로 발달하였다. DENT와 SENT 형상 모두 하중이 증가하면서 지속적으로 기존의 주름의 높이는 증가하고 넓이는 감소하다가 어느 시점에 이르러서는 다시 새로운 주름 밴드가 나타나는 복잡한 주름 발달거동을 보였다. 또한 SENT 형상에서도 형성된 주름 밴드를 따라 주변보다 큰 응력 분포를 보여 주름지역으로 하중이 더 많이 전달되고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 그림 5의 SENT 시편형상에 대해 하중증가에 따른 J -적분값의 변화를 보이고 있다. 국부주름은 DENT 시편형상보다 낮은 0.95 MPa에서 발생하였다. DENT의 경우와 마찬가지로 낮은 하중에서는 주름이 발생한 것과 발생하지 않은 것이 거의 동일한 J -적분값을 보이다가 주름이 발생한 이후의 시점에서 주름이 발생한 것이 더 높은 J -적분값을 가짐을 볼 수 있다. 하지만 SENT의 경우 국부주름이 발생한 이후에 하중이 상당히 증가하여 전역주름이 완전히 발달한 이후에 비로소 본격적인 J -적분값의 차이를 가지게 됨을 보였다.

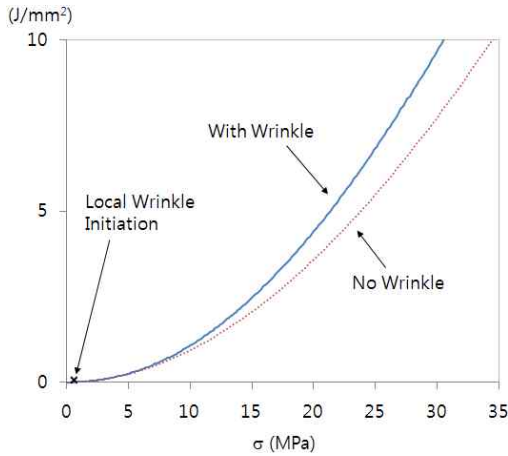
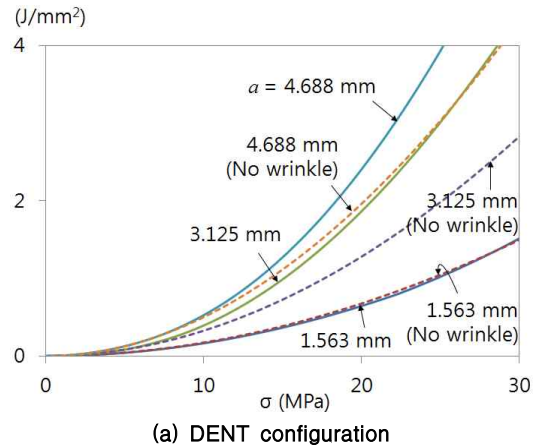


그림 6. Variation of J -integral versus applied nominal stress for SENT configuration ($a = 6.25$ mm)

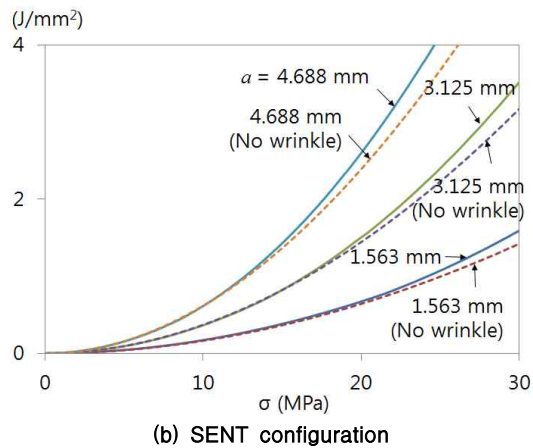
3.2 컷 길이에 따른 영향

본 연구에서는 다양한 컷의 길이에 대해 주름의 효과를 조사하였다. 그림 7은 컷의 길이(a)가 각각 1.563 mm, 3.125 mm 및 4.688 mm 일 때 가해진 명목응력에 따른 DENT와 SENT 시편형상의 J -적분값의 변화이다. 전체적으로 DENT와 SENT 모두 주름이 발생한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 증가된 J -적분값을 가짐을 볼 수 있다. 그림에서 SENT의 경우에는 그림 7의 컷 길이의 범위에서 J -적분값이 컷의 길이의 증가에 따라 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났는데 이는 파괴역학 이론($J \sim \sigma^2 \pi a$)에 따라 쉽게 이해될 수 있다. 그러나 DENT의 경우에는 주름이 발생한 경우의 J -적분값의 증가는 컷의 길이에 반도시 비례하여 나타나지는 않았다. 이것은 J -적분값을 증가시키는 응력집중의 심화 정도는 주름발생 뿐만 아니라 주름의 모드형상에도 의존하기 때문인 것으로 판단된다.

SENT 시편형상의 경우 컷의 길이가 증가하면 주름의 모드형상에 따라 컷 끝단에서의 응력집중을 오히려 완화시키기도 하는데 이것은 그림 8~9를 통하여 설명할 수 있다. 그림 8은 SENT 시편형상에서 상대적으로 컷의 길이가 큰 12.5 mm와 15.63 mm일 때의 J -적분값의 변화를 나타내고 있는데 주름이 발생한 경우가 주름이 억제된 경우보다 더 낮은 J -적분값을 보였다. 이렇게 주름이 허용된 경우가 더 낮은 값을 가지는 이유는 컷 끝단을 통과하지 않는 주름밴드가 하중의 주 전달 경로가 되도록 모드형상이 발생하였기 때문이다. 그림 9(a)의 컷의 길이가 12.5 mm 일 때의



(a) DENT configuration



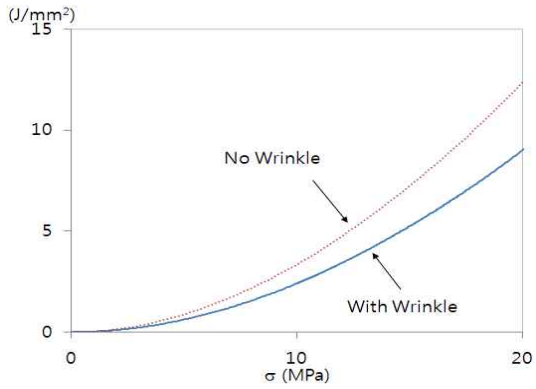
(b) SENT configuration

그림 7. Variation of J -integral versus applied nominal stress for various cut lengths

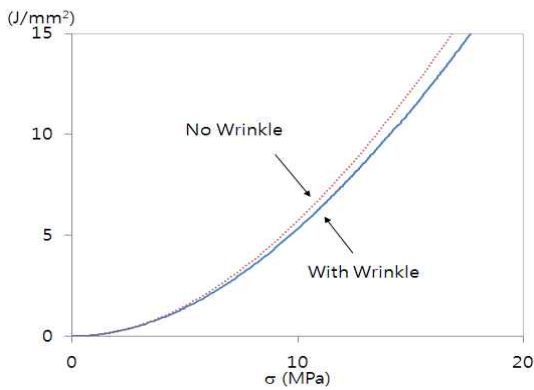
응력분포를 살펴보면 컷 끝단 윗 부분의 주름 밴드가 더 큰 응력값을 가지고 있어 이 주름밴드를 통하여 더 많은 하중이 전달되고 있음을 볼 수 있고 따라서 컷 끝단의 응력집중이 완화되었음을 확인할 수 있다. 또한 그림 9(b)의 컷의 길이가 15.63 mm 일 때에는 컷 끝단부분을 통과하는 주름밴드와 그 위쪽의 주름밴드가 거의 동일한 하중을 전달하여 주름의 발생이 컷 끝단의 응력집중을 더 심화시키지는 않는 것으로 나타났다.

3.3 시편의 길이 효과

본 연구에서는 시편형상의 길이(L)에 따른 영향도 조사하였다. 그림 10은 길이가 62.5 mm 및 25 mm 일 때의 해석결과를 보이고 있다. 길이가 62.5 mm 일 때 전체적으로 주름이 허용된 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 더 큰 J -적분값의

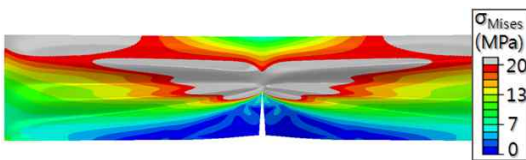


(a) $a = 12.5$ mm

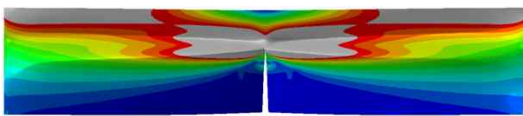


(b) $a = 15.63$ mm

그림 8. Variation of J -integral versus applied nominal stress for SENT configuration with large cut lengths



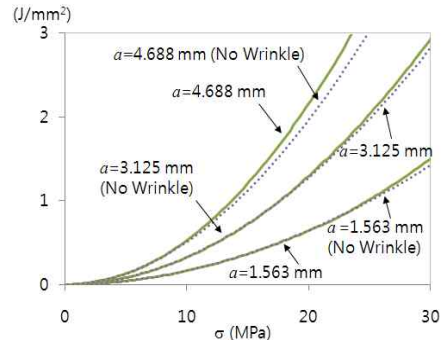
(a) $a = 12.5$ mm ($\sigma = 14$ MPa)



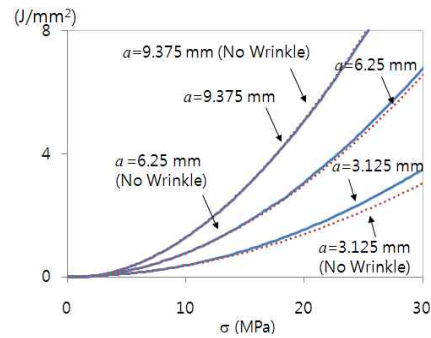
(b) $a = 15.63$ mm ($\sigma = 10.6$ MPa)

그림 9. Distribution of Mises stress of SENT configuration

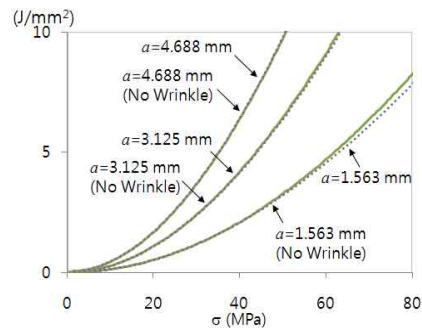
분포를 보였으나 그 차이는 앞에서 설명한 바와 같은 이유로 다소 일관적이지는 않았다. 그러나 주름이 허용된 모델과 억제된 모델사이의 J -적분값의 차이는 길이가 125 mm 인 경우와 비교하



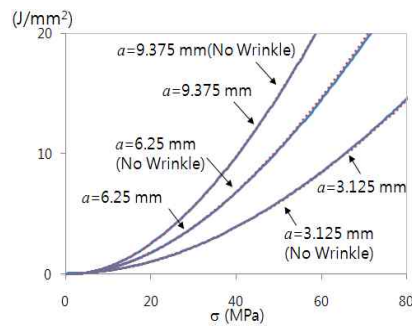
(a) $L = 62.5$ mm (DENT)



(b) $L = 62.5$ mm (SENT)



(c) $L = 25$ mm (DENT)



(d) $L = 25$ mm (SENT)

그림 10. Variation of J -integral for cases when the specimen sizes were 62.5×25 mm² and 25×25 mm² ($t = 0.025$ mm)

였을 때 아주 작게 나타났다. 시편형상의 길이가 25 mm로 넓이와 동일할 때, 컷의 길이가 1.563 mm 인 DENT 형상에서 주름이 발생한 것이 미세하게 높은 J -적분값을 보였지만, 이 경우를 제외하곤 DENT 와 SENT 형상 모두 주름이 발생한 것과 발생하지 않은 것이 거의 동일한 J -적분값의 분포를 보였다.

이와 같이 길이가 짧아지면서 주름의 영향이 감소하는 이유는 주름이 자유롭게 발달할 공간이 충분치 않기 때문이다. 그림 11은 길이가 25 mm 일 때 DENT와 SENT 형상에서 주름이 발생한 것과 발생하지 않은 것의 주름의 형상 및 미세스 응력의 분포를 비교하고 있다. 여기서 주름의 형상을 보다 명확하게 보여주기 위하여 면외방향의 변형을 DENT는 20배 확대, 그리고 SENT는 100 배 확대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 주름이 발생한 것과 발생하지 않은 것의 응력분포는 거의 유사하게 나타나 하중 전달의 경로가 주름에 의해 크게 변화하지 않음을 알 수 있었다. 이는 시편의 길이가 작아짐에 따라 그림에서의 고정지지조건에 때문에 국부 주름의 발생뿐만 아니라 전역주름으로의 발달이 지연되기 때문으로 보인다. 또한 전역주름이 형성되었다 하더라도 컷 끝단에서의 응력집중을 심화시키기 위해서는 주름밴드 지역이 좁아져야 하는데 전체적으로 그림간의 거리가 가깝기 때문에 현재 고려된 하중범위 내에서 이와 같은 변형거동을 보이지 않았다.

IV. 결 론

본 논문에서는 두께가 얇은 사각형 멤브레인 SENT 및 DENT 형상이 축방향 인장하중을 받고 있을 때 주름이 J -적분값이 미치는 영향을 연구하였다. 주름해석은 셀요소에 의한 기하학적 비선형 후좌굴 유한요소해석을 통하여 수행하였고, 전역-국지해석전략을 사용하여 효율적으로 컷 끝단 주변지역에 대해 상세해석을 수행하여 J -적분값을 계산하였다.

해석결과 전체적으로 주름발생이 허용된 경우가 주름발생이 억제된 경우보다 큰 J -적분값의 분포를 보였다. 이는 주름이 발생하면서 하중은 주로 주름밴드를 따라 전달되는데, 컷 끝단으로 주름밴드가 통과하면서 컷 끝단에서의 응력집중이 심화되었기 때문으로 판단된다. 그러나 컷의 길이에 따라 주름이 허용된 경우와 억제된 경우 사이의 J -적분값의 차이에 큰 일관성을 보이지는

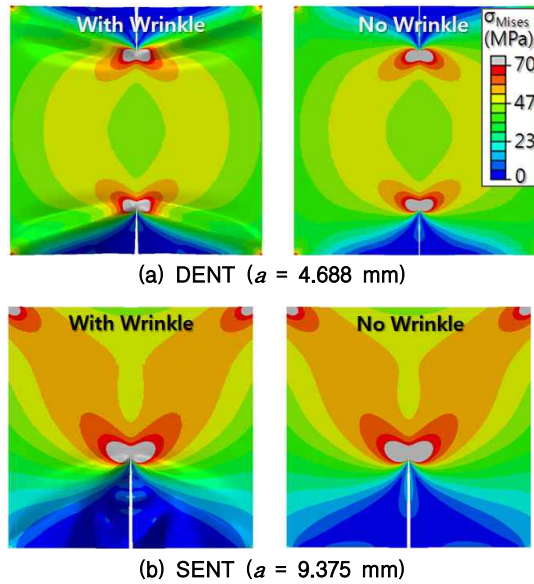


그림 11. Distribution of Mises stress for DENT and SENT configurations with $L = 25$ mm ($\sigma = 40$ MPa, deformation scale factor = 20)

않았는데, 이는 컷의 길이에 따라 주름의 모드형상이 달라지게 되고, 따라서 하중전달 경로도 변화하여 응력집중의 심화 정도가 변하기 때문으로 생각된다. 한편 시편의 길이가 감소함에 따라 주름의 효과 또한 감소하였는데 이는 그림에서의 고정지지조건이 주름의 성장을 크게 억제하고 있기 때문으로 판단되었다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0023614).

참고문헌

- 1) Jenkins, C. H. (Ed.), Recent Advances in Gossamer Spacecraft, *AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics Series*, Vol. 212, 2006.
- 2) Papa, A. and Pellegrino, S., "Mechanics of Systematically Creased Thin-Film Membrane Structures," *J. of Spacecraft and Rockets*, Vol. 48,

No. 1, 2008, pp. 10-18.

3) Woo, K., Nandurkar, K. and Jenkins, C.H., "Effective Modulus of Creased Thin Membranes," *J. of Spacecraft and Rockets*, Vol. 45, No.1, 2008, pp. 19-26.

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

5) Brighenti, R., "Buckling of Cracked Thin-Plates under Tension or Compression," *Thin-Walled Structures*, Vol. 43, 2005, pp. 209-224.

6) Atkins, A.G., Chen, Z., and Cotterell, G., "The Essential Work of Fracture and J_R Curves for the Double Cantilever Beam Specimen: An Examination of Elastoplastic Crack Propagation," *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 454, 1998, pp. 815-833.

7) Wong, J.S.S., Ferrer-Balas, D., Li, R.K.Y.,

Mai, Y.-W., Maspooh, M.L. and Sue, H.-J., "On Tearing of Ductile Polymer Films using the Essential Work of Fracture (EWF) Method," *Acta Materialia*, Vol. 51, Issue 16, 2003, pp. 4929-4938.

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

9) Woo, K. and Whitcomb, J.D., "Global/Local Finite Element Analysis for Textile Composites," *J. Composite Materials*, Vol. 28, No. 14, 1994, pp. 1305-1321.

10) Voleti, S.R., Chandra, N., and Miller, J.R., "Global-Local Analysis of Large-Scale Composite Structures using Finite Element Method," *Computers & Structures*, Vol. 58, No. 3, 1996, pp. 453-464.