

論文

주름이 있는 막재료의 정적 및 동적 해석

우경식*

Static and Dynamic Analysis of Wrinkled Membranes

Kyeongsik Woo*

ABSTRACT

In this paper, the static and dynamic behavior of partly wrinkled membrane was studied. Membrane finite elements were used in the analysis and the wrinkling in the element was accounted for by a penalty-parameter material modeling which was implemented as a user subroutine to ABAQUS. The wrinkle algorithm was applied to a corner-loaded square membrane to investigate the effect of wrinkling on the static and dynamic behavior.

초 록

본 논문에서는 멤브레인 요소를 사용하여 주름이 있는 멤브레인의 정적 및 동적거동을 연구하였다. 해석은 상용유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며 멤브레인 요소에서 주름은 벌칙매개변수에 의한 물성치 수정 방법을 사용자 부프로그램으로 구현하여 고려하였다. 해석과정은 먼저 이론해가 멤브레인 문제에 적용하여 타당성을 검증하였고, 모서리에서 하중이 가해진 사각형 멤브레인에 대한 해석을 수행하여 주름이 정적 및 동적 거동에 미치는 영향을 조사하였다.

Key Words : Membrane(멤브레인), Wrinkle(주름), Penalty-parameter(벌칙 매개변수), Solar sail(솔라세일)

1. 서 론

최근 우주구조물의 재료로서 멤브레인을 사용하려는 시도가 활발히 전개되고 있다. 이는 멤브레인 구조가 지구에서 제작 후 패키징하여 우주 공간으로 보내어 전개하기가 용이하며, 극단적인 경량화를 달성할 수 있기 때문이다[1]. 여기에는 일반적으로 매우 얇은 멤브레인이 사용되고 있는데 일반적으로 그 두께가 수 마이크로미터에 이르고 있으며 심지어 그 이하의 경우도 고려되고 있다[2-3].

그러나 이와 같이 두께가 매우 얇아지는 경우에는 굽힘강성이 감소하여 거의 존재하지 않는 수준에 도달하게 되며, 여기에 아주 작은 압축응력이 가해지면 즉시 좌굴이 발생하게 되는데 이를 주름(wrinkle) 이라고 한다. 세일 멤브레인에 주름이 발생하면 하중경로가 바뀌고 또한 세일의 모양이 변하여 추력성능에도 영향을 미치게 된다[4-5]. 어느 정도의 주름을 방지하기 위하여 세일의 가장자리를 안쪽으로 곡선이 되도록 (scallop) 설계하거나 세일 멤브레인에 전단력이 전달되지 않도록 경계를 설계하는 방법 (shear compliant border), 그리고 세일에 약간의 초기인장응력을 가하는 방법[5] 등이 있으나 솔라세일을 아주 두껍게 하지 않는 한 극한의 우주환경의 운용 범위에서 주름을 완전히 제거하기는 어렵다.

유한요소해석에 멤브레인 주름 알고리즘을 적

† 2005년 5월 27일 접수 ~ 2005년 10월 6일 심사완료

* 정희원, 충북대학교 구조시스템공학과
연락처자, E-mail: kw3235@chungbuk.ac.kr
충북 청주시 흥덕구 개신동 12번지

용한 연구는 1980년대부터 나타나기 시작하였는데 여기에는 크게 변형률을 수정하는 방법[6-12]과 물성치 매트릭스를 수정하는 방법[13-18]으로 분류할 수 있다. Roddeman 등[6-8]은 tension field 이론에 따라 변형률 텐서를 수정하는 방법으로 멤브레인 주름 해석 모델링을 제시하고 예계산을 통하여 성능을 확인하였다. 이후 여러 연구자들이 Roddeman의 모델을 이용하여 멤브레인 구조에 대해 유한요소해석을 수행하였는데 (eg, [9-12]), Kang 등[11]은 주름의 방향을 탐색하는 새로운 방법을 고안하였다. 또한 Lu 등[12]은 주름의 방향과 주름발생 정도의 변화를 고려하는 접선강성행렬을 직접 유도하였다. 그러나 이 방법은 항별 계산과정이 복잡하고 또한 계산을 매번 수행해야 하는 계산상의 번거로움이 있다.

멤브레인의 물성치를 수정하는 방법에 의한 유한요소 주름해석은 1985년에 Miller 등[13]에 의해 처음 시도되었는데, 이 연구에서는 주름 발생시 일축인장응력상태를 모사하기 위하여 포아송비를 수정하는 방법을 사용하였고, 유한요소해석 결과를 기존의 이론해와 비교하였다. Miyazaki 등[14]은 연성행렬을 수정하는 방법으로, 그리고 Liu 와 Jenkins 등[15-16]은 강성행렬을 수정하는 방법을 사용하여 주름해석을 수행하였으며, 또한 Adler 등[17]은 Stein-Hedgepeth 이론에 따라서 압축응력이 모두 제거될 때까지 멤브레인의 물성치를 반복적으로 수정하는 IMP 방법을 제시하였다. Nakashino 등[18]은 Roddeman의 모델에서 출발하여 물성치를 수정하는 방법에도달하여 위 두 방법이 근본적으로 같음을 보였다.

이상의 모델들에서는 멤브레인 요소를 사용하여 세일 멤브레인의 하중경로와 응력거동을 좌우하는 주름의 방향과 면적을 예측하고 있는데, 최근에 셸요소(shell element)에 의한 주름의 형상을 계산하는 연구가 나타나기 시작하였다. Wong 등[19]과 Su 등[20]은 사각형 솔라세일에 대해 셸요소를 사용하여 먼저 좌굴해석을 수행한 후, 좌굴모드를 분석하여 별도의 실험 결과에 나타난 형상과 일치하는 모드들을 찾아내어 이를 메쉬에 geometric imperfection으로 가하는 방법으로 주름의 상세형상을 계산해 내는데 성공하였다. 또한 Tessler 등[21]은 좌굴형상이 아닌 random imperfection으로도 주름의 형상을 해석적으로 만들어 낼 수 있음을 보였다. 그러나 이 방법들은 계산자원을 지나치게 요구하여 비효율적인 단점이 있다.

본 논문에서는 부분적으로 주름이 발생하는 멤

브레인의 정적 및 동적 거동을 연구하였다. 주름의 해석은 벌칙 매개변수를 사용하여 물성치를 수정하는 방법(penalty-parameter material modeling)을 채택하였고[15-16], 이를 프로그래밍하여 범용 유한요소해석 코드인 ABAQUS에 사용자 서브루틴으로 구현하였다. 구축된 해석 절차는 먼저 기존의 연구결과와 비교하여 타당성을 검증하였고, 이를 끝단에서 인장하중을 받는 사각형 멤브레인에 적용하여 주름 해석을 수행하였다.

II. 주름 모델링

멤브레인에 주름이 발생하면 일축인장응력상태(tension field)가 된다. 본 연구에서는 벌칙 매개변수에 의한 물성 매트릭스를 수정하는 방법으로 멤브레인의 주름을 해석하는 방법을 채택하였다. 벌칙법은 비등방성 멤브레인에 대해서도 적용이 가능하나 본 연구에서는 물성치가 등방성인 경우로 한정한다.

그림 1은 본 연구에서 사용한 주름 모델링 사용자 서브루틴의 흐름도를 나타내고 있다. 유한요소해석에서 멤브레인 요소에 응력/변형률 상태가 주어졌을 때, 먼저 주름이 발생하였는지 여부를 판단하여야 한다. 주름의 발생은 응력지표, 변형률지표 및 응력-변형률 혼합지표 등을 사용하여 판단할 수 있는데, 본 연구에서는 참고문헌[11]의 설명에 따라 다음과 같은 혼합지표를 사용한다.

- (i) $\sigma_{\min} > 0 \rightarrow$ 팽팽한 상태 (taut)
- (ii) $\epsilon_{\max} \leq 0 \rightarrow$ 느슨한 상태 (slack)
- (iii) $\epsilon_{\max} > 0 \sigma_{\max} \leq 0 \rightarrow$ 주름진 상태 (wrinkled)

여기서 $(\sigma_{\min}, \sigma_{\max})$ 와 $(\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max})$ 는 각각 주응력(principal stress)과 주변형률(principal strain)이다.

이 지표에 따라서 멤브레인 요소가 팽팽한(taut) 상태이면 통상적인 해석과정에서와 같이 강성행렬과 응력이 계산되어 주 프로그램으로 귀환하게 되고, 느슨한(slack) 상태이면 해당 요소는 전혀 하중을 받지 못하므로 강성행렬의 모든 성분을 매우 큰 값의 벌칙 매개변수(P)로 나누어 아주 작게 되도록 수정한 후 귀환한다(D_{ij}/P). 요소에서 주름이 발생하면(wrinkled), 주응력 방향으로 일축인장응력상태가 되므로 인장응력(σ_{\max})을 제외한 모든 응력성분을 제거해 주어야 한다. 주응력 좌표계에서는 이미 전단응력의 값은 0이므로 압축응력(σ_{\min})만을 제거해 주면된다.

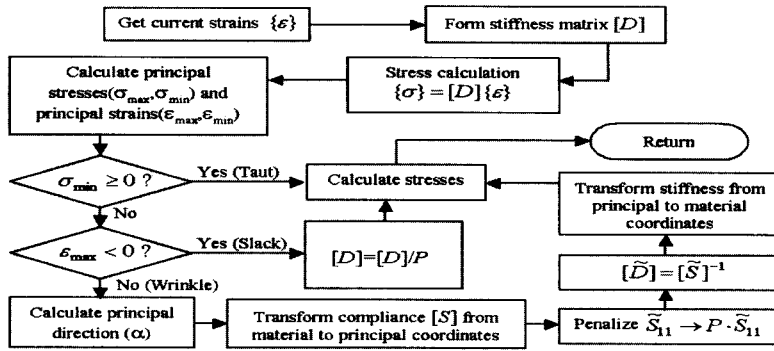


Fig. 1. Flow chart of the wrinkle user subroutine

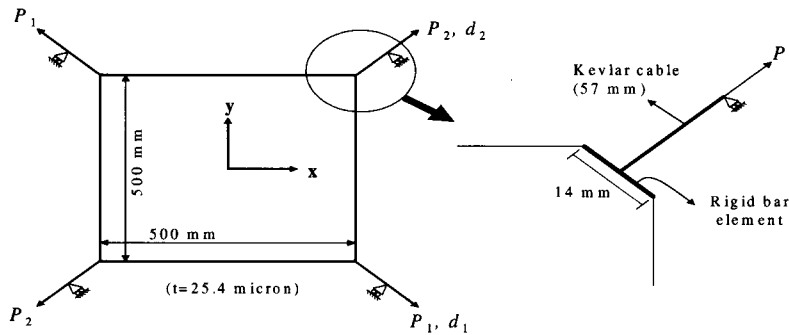


Fig. 2. Corner loaded square membrane configuration

등방성 멤브레인의 경우 재료의 강성/연성행렬은 인장과 전단계수가 서로 독립이고 또한 좌표축의 회전에 따라 변하지 않으므로, 주름이 발생한 요소에서 일축인장응력상태는 수치적으로 다음 식과 같이 주응력좌표계에서 연성행렬의 첫 번째 성분에 벌칙을 가하여 모사할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{\min} \\ \varepsilon_{\max} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} PS_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{\min} \\ \sigma_{\max} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

위 식을 역변환하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{\min}^* \\ \sigma_{\max}^* \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}^* & D_{12}^* & 0 \\ D_{12}^* & D_{22}^* & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{\min} \\ \varepsilon_{\max} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 P는 큰 값은 가지는 벌칙 매개변수이므로

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

이 되고, 따라서 주응력좌표계에서 일축인장상태가 되었음을 알 수 있다. 여기서 상첨자 (*)는 수정된 강성행렬을 나타내기 위하여 사용되었다. 수정된 강성행렬과 응력을 요소좌표계로 변환하면 서브루틴이 종료된다.

한편 벌칙 매개변수 P는 최종 해에 영향을 미치지 않으면서 동시에 조합된 전체 강성행렬에서 수치적으로 문제를 야기하지 않도록 적절한 범위 내의 값을 사용하여야 한다.

III. 계산 결과 및 고찰

본 논문에서는 먼저 구축된 해석방법의 타당성을 확보하기 위하여 Mikulas[22]에 의해 이론해가 제시된 환형 멤브레인 문제를 해석하였다. 그 결과 본 연구에서 사용한 벌칙 매개변수에 의한 물성치 수정모델링은 주름이 있는 멤브레인의 거동을 매우 정확히 예측할 수 있음을 확인 하였다 [23]. 다음으로 인장하중이 걸린 사각형 멤브레인 문제에 적용하여 주름의 정적 및 동적 거동을 연구하였다.

그림 2는 모서리에서 인장하중이 걸린 두께가

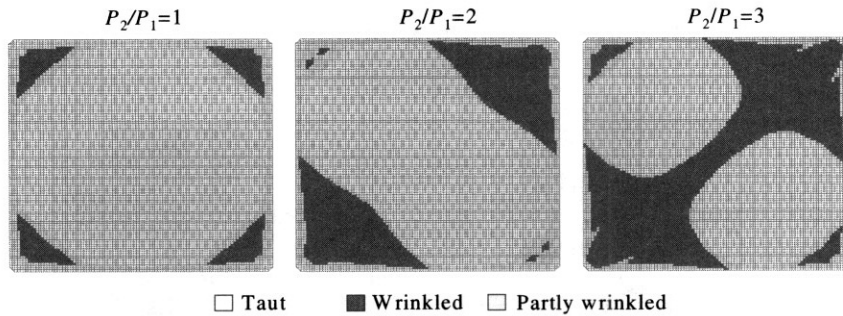


Fig. 3. Variation of wrinkled shapes versus load ratio

매우 얇은 사각형 멤브레인의 형상을 보여주고 있다. 이 멤브레인은 사각형 솔라세일의 원형으로 간주될 수 있는데, 멤브레인은 Kapton ($E=2.59 \text{ GPa}$, $\nu=0.3$, $\rho=1500 \text{ kg/m}^3$)으로 되어 있고 넓이는 $500 \times 500 \text{ mm}^2$, 두께는 $25.4 \mu\text{m}$ 이다. 각 모서리에는 하중을 가하기 위하여 14.14 mm 길이로 자른 후 강체요소를 배치하였고, 다시 이의 중간점에서 대각선 방향으로 길이가 50 mm 인 Kevlar ($E=141 \text{ GPa}$, $d=0.92 \text{ mm}$, $\rho=1450 \text{ kg/m}^3$) 케이블을 연결한 후, 그 끝에서 대각선 방향으로 하중을 가하였다. 가해진 하중은 $P_1=0.49 \text{ N}$, $P_2=0.49 \sim 1.96 \text{ N}$ 의 값을 고려하였다.

그림 3은 하중비(P_2/P_1)에 따른 주름형상의 변화를 보여주고 있다. 해석은 하중비의 증가에 따라 3 STEP 으로 나누어 수행되었는데, 첫 번째 STEP에서는 $P_1=0.49 \text{ N}$ 의 하중을 가하였고, 이후 두 번째 및 세 번째 STEP에서는 P_1 의 값은 고정 한채 P_2 의 값을 계속적으로 1.96 N 까지 증가시키는 방식으로 가하였다. 그림 5에서 각 요소들은 적분점에서의 응력/변형률에 따라서 주름의 상태를 분류 되었다. 즉, 요소내의 모든 적분점에서 주름이 발생하였으면 'Wrinkled'로, 일부 적분점에서만 주름이 발생하였으면 'Partly wrinkled'로, 그리고 모든 적분점에서 주름이 발생하지 않은 경우에는 'Taut'로 표시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 사각형 멤브레인은 모서리의 하중비에 따라서 주름의 형상이 크게 좌우됨을 알 수 있다. 하중비가 1인 경우에는 하중이 가해진 모서리 근처에서 국지적으로 주름이 발생하였고 점차 하중비가 증가함에 따라서 큰 하중이 가해진 모서리 부분에서 주름의 면적이 증가하였다. 이후 하중비가 계속 증가하면 대각선 방향에서 성장해온 주름지역이 합쳐지면서 전역주름을 이루게 된다. 이와 같은 주름의 융합은 본 사각형 멤브레인 문제의 경우 하중비가 약 2.7의 값에서 발생하였는데, 그림 3에서 하중비가

3일 때 전역주름이 발생하였음을 확연히 볼 수 있다.

그림 4는 하중비에 따른 모서리에서 변위의 변화를 보여주고 있다. 여기서 d_1 과 d_2 는 그림 2에 표시한 바와 같이 각각 하중 P_1 과 P_2 가 가해진 지점에서의 변위를 나타낸다. 그림에서 처음에는 하중 P_1 과 P_2 가 동일하게 0.49 N 까지 증가시켰으므로 d_1 과 d_2 가 동일한 값을 가지며 증가함을 볼 수 있다. 그러나 이 후에는 P_1 은 0.49 N 으로 고정한 채, P_2 만을 계속적으로 증가시키게 되므로 P_2 가 가해지는 지점의 변위 d_2 는 계속적으로 증가하는 반면 하중이 고정된 지점의 d_1 은 감소를 보이고 있는데 이는 쉽게 예상할 수 있는 결과이다. 그러나 하중비가 2.7에서, 즉 $P_1=0.49 \text{ N}$, $P_2=1.323 \text{ N}$ 이 가해지는 시점에서 변위의 변화의 경향이 달라짐을 볼 수 있는데 이는 이전에서 설명한 바와 같이 이 시점에서 전역주름이 발생하였기 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.

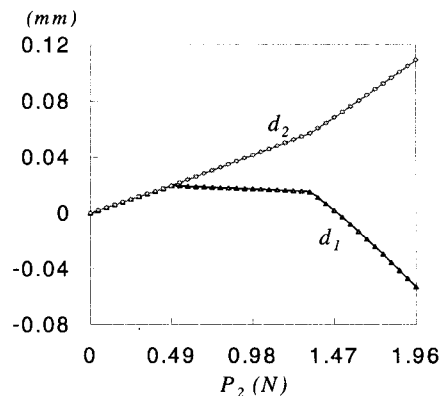


Fig. 4. Variation of tip displacement versus load ratio

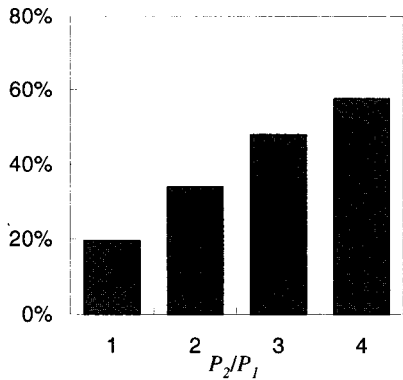


Fig. 5. Variation of percent wrinkled area versus load ratio

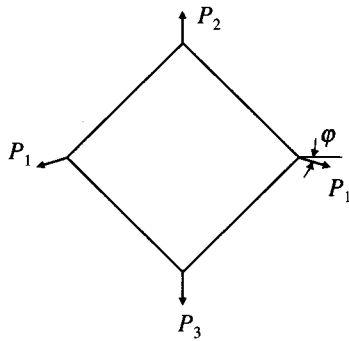


Fig. 6. Square membrane configuration with load misalignment

그림 5는 하중비에 따른 주름발생면적을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 하중비가 1일 때 주름은 전체면적의 약 18% 정도에서 발생하였으나, 하중비에 따라서 주름면적도 증가하여 하중비가 3일 때는 약 47%에 달하는 지역에서 주름이 발생하고 있음을 볼 수 있다.

본 연구에서는 하중비 뿐만 아니라 하중의 비정렬 효과도 조사하였다. 그림 6은 사각형 멤브레인에서 모서리에 동일한 하중이 가해지지만 수평 대각선 방향의 하중이 대칭적으로 비정렬 되었을 때의 형상을 보여주고 있다. 여기서 $P_1=P_2=0.49N$ 으로 고정하였고, P_3 는 비정렬 각도(ϕ)에 따라서 평형을 만족하도록 계산되었다. 비정렬 각도는 $0^\circ \sim 15^\circ$ 사이의 값을 고려하였다.

그림 7은 비정렬각에 따른 주름형상의 변화를 보여주고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 하중이 대각선 방향으로 정렬되었을 때에는 ($\phi=0^\circ$) 가해진 하중비(P_2/P_1)가 1이므로 각 모서리에서 주름이 균등하게 발생하지만, 비정렬각이 증가함에 따라서 주름은 점차 비정렬에 의해 하중의 크기

가 낮아지는 하단의 P_3 모서리에 집중되고 이의 대각선인 상단의 P_2 모서리에서는 완화되는 현상을 보인다. 이는 비정렬각이 증가하면서 상단의 모서리에 발생하는 주름을 퍼도록 좌우의 P_1 하중의 방향이 변하기 때문으로 생각된다.

비정렬각은 주름이 발생하는 지역의 이동뿐만 아니라 주름발생 면적의 양에도 영향을 미치게 된다. 즉, 비정렬각이 증가함에 따라서 주름이 발생한 면적이 증가하게 되는데, 비정렬각이 계속적으로 증가하면 하변에서 주름의 상태가 더욱 악화되어 마침내 아무런 하중을 받지 않는 느슨한(slack) 응력상태가 되는 지역이 발생하게 된다. 일단 슬랙지역이 발생하게 되면 계산에서 수치적 문제를 야기하는데, 슬랙으로 판정된 적분점에서의 강성행렬의 값은 거의 0의 값을 가지도록 벌칙이 가해지므로 만일 하나의 절점을 공유하는 주변의 요소들의 모든 적분점에서 슬랙이

Table 1. Comparison of natural frequencies (Hz) with and without considering wrinkling

(a) $P_2/P_1=1$

Mode	Without wrinkle	With wrinkle	Difference (%)
1	5.59	5.59	-0.05
2	7.12	7.15	0.42
3	7.12	7.15	0.42
4	7.14	7.17	0.43
5	7.18	7.21	0.43
6	7.93	7.94	0.17
7	7.93	7.94	0.17
8	8.12	8.14	0.22
9	8.39	8.41	0.25
10	9.26	9.27	0.15
11	9.26	9.27	0.15
12	9.84	9.84	0.18

(b) $P_2/P_1=3$

Mode	Without wrinkle	With wrinkle	Difference (%)
1	7.08	7.75	8.70
2	7.48	7.96	5.89
3	7.75	8.54	9.29
4	8.62	8.55	-0.78
5	9.21	8.61	-6.98
6	9.22	8.62	-6.93
7	9.24	9.83	6.04
8	9.30	9.86	5.74
9	9.93	9.88	-0.52
10	9.93	10.04	1.02
11	10.15	10.62	4.37
12	10.50	11.57	9.21

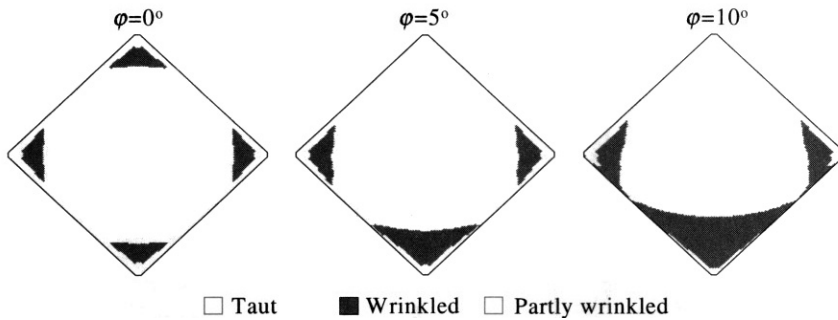
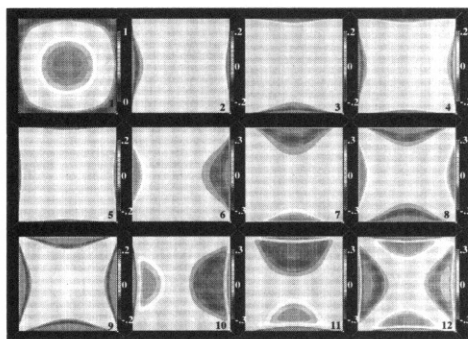
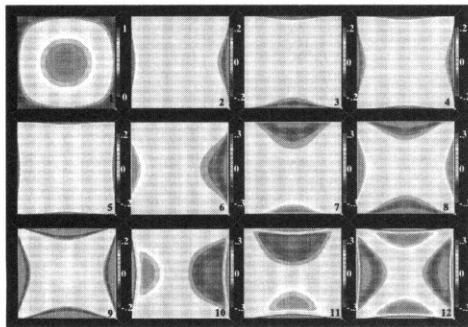


Fig. 7. Variation of wrinkled area versus load misalignment angle

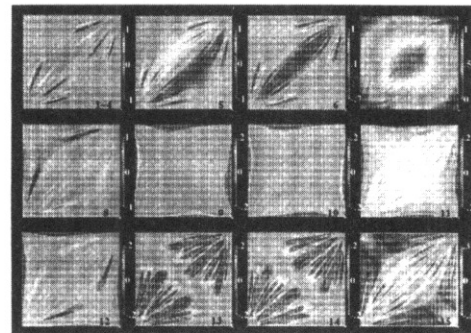


(a) Without wrinkle consideration

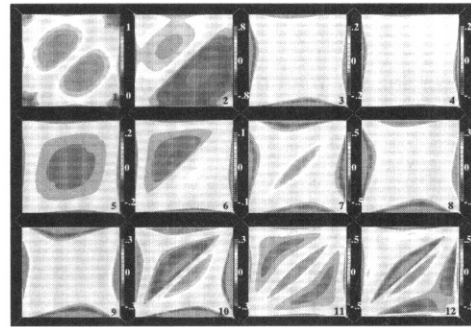


(b) With wrinkle consideration

Fig. 8. Comparison of mode shapes of a corner loaded membrane when $P_2/P_1=1$



(a) Without wrinkle consideration



(b) With wrinkle consideration

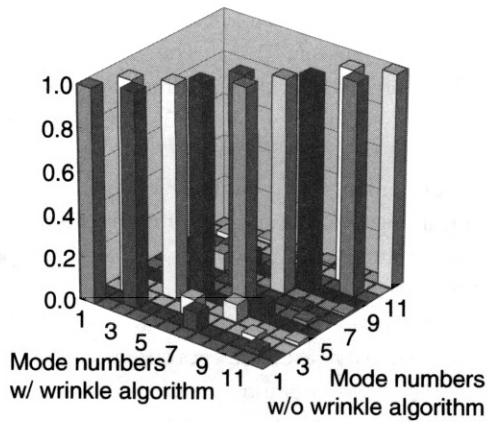
Fig. 9. Comparison of mode shapes of a corner loaded membrane when $P_2/P_1=3$

발생하면 그 절점의 전체 강성행렬의 대각항이 매우 작은 수가 되어 버리기 때문이다. 이런 경우 계산은 수렴하기까지 매우 많은 반복계산을 요구하거나 심지어 수렴하지 않게 된다.

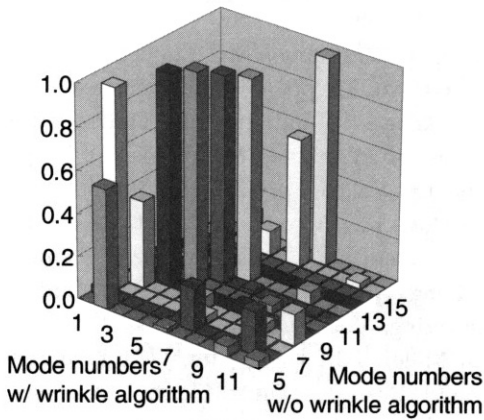
멤브레인으로 된 초경량 우주구조물에서 면외방향의 진동은 많은 관심의 대상이 되어 왔는데, 1983년도에 NASA에서 수행된 연구[24]가 그 대표적인 예이다. 이 연구에서는 삼각형 세일의 동적거동을 해석하고 실험하였는데, 해석에서 주름의 발생에 의

한 영향은 고려하지 못하였다.

본 연구에서는 주름의 발생이 멤브레인의 동적 거동에 어떠한 영향을 미치는지 고유진동수 및 진동모드의 변화의 관점에서 조사하였다. 고유진동수해석은 기본적으로 선형해석이므로, 여기서는 먼저 주름을 고려하여 비선형 정적해석을 수행하고, 그 다음에 정하중을 고정한 채 진동해석을 수행하는 방법을 사용하였다. 이는 주름을 고려한 경우 그림 3의 주름형상을 가지는 변형상태에서 선형진동해석을 수행



(a) $P_2/P_1=1$



(b) $P_2/P_1=3$

Fig. 10. MAC graphs between mode shapes with and without considering wrinkling

한 것을 의미한다.

표 1은 모서리에서 인장하중이 가해진 사각형 멤브레인에서 하중비가 1과 3일 때, 주름을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 고유진동수를, 그리고 그림 8~9는 각 경우에 대해 진동모드를 비교하고 있다. 표 1에서 % Difference는 주름을 고려한 경우의 진동수가 그렇지 않은 경우에 대한 변화율을 나타낸 것이다. 표에 나타난 바와 같이 낮은 하중비를 가지는 사각형 멤브레인에서 주름은 저차 진동수에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 하중비가 1일 때 주름을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 고유진동수는 거의 차이를 보이지 않았다. 또한 그림 8에 나타난 바와 같이 하중비가 1일 때 주름을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 진동모드는 거의 동일하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그러나 하중비가 3일

때 주름을 고려한 진동수는 보다 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 현재 모서리에서 인장하중이 가해진 상태로 저차 모드가 하중비가 1일 때는 주름이 하중이 가해진 모서리 주변에 국부적으로 발생하여 진동 거동에 큰 영향을 주지 않았으나, 하중비가 3일 때는 전역주름이 발생하여 보다 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 특히 하중비가 3인 경우 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 주름을 고려하지 않은 해석결과와는 비현실적인 진동모드가 나타나고 있지만, 주름을 고려한 해석은 타당한 진동모드를 주고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 하중비가 1과 3일 때 주름을 고려한 여부에 대한 Modal Assurance Criteria (MAC)를 나타내고 있다. 여기서 MAC은 다음 식으로 정의된다 [25].

$$MAC(i, j) = \frac{(\{v_i\}^T \{v_j\})^2}{(\{v_i\}^T \{v_i\})(\{v_j\}^T \{v_j\})} \quad (5)$$

$(\{v_i\}) = i^{th} \text{ eigenvector}$

그림 10(a)에서 보는 바와 같이 하중비가 1일 때에는 주름을 고려한 진동모드는 그렇지 않은 경우와의 MAC값들이 주로 대각의 위치에서 1의 값을 가지고 있어서 매우 큰 상관관계를 보이고 있다. 그림에서 모드번호 2-3, 6-7, 10-11에서 진동모드의 순서가 바뀌는 것으로 나타나고 있지만, 표 1(a)와 그림 8(a)-(b)에서 보는 바와 같이 이들은 진동수가 같고 또 진동모드가 서로 동일한 것으로 간주될 수 있는 진동모드들이다. 그러나 하중비가 3인 그림 10(b)의 경우, MAC 값의 분포는 대각에서 크게 벗어나 분포하고 있다. 예를 들어 주름을 고려한 해석의 1번 진동모드는 주름을 고려하지 않은 7번 진동모드와의 사이에서 큰 MAC 값을 가지는 것으로 나타나 있는데, 그림 9(a)의 7번과 그림 9(b)의 1번 모드형상이 가장 상관관계 높다는 것을 의미한다. 또한 주름을 고려한 3~6번 진동모드는 그렇지 않은 10~13번 진동모드와의 사이에서 큰 MAC 값을 가지고 있고, 주름을 고려한 2번 진동모드는 그렇지 않은 5번 및 8번이 조합된 상관관계를 가지는 등 순서 뿐만 아니라 상관관계의 정도에 있어서도 매우 불규칙한 결과를 보여주고 있어서 하중비가 3일 때 발생한 전역주름은 멤브레인의 진동거동에 큰 영향을 줄 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 부분적으로 주름이 발생한 멤브레인의 정적 및 동적 거동을 연구하였다. 해석에는 멤브레인 요소가 사용되었고 주름은 요소에

서 재료의 물성치를 벌칙 매개변수를 통하여 수정하는 방법으로 고려되었다. 주름해석 알고리즘은 상용유한요소 프로그램인 ABAQUS에 사용자 서브루틴으로 구현하였으며 이론해가 알려진 멤브레인 문제에 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 모서리에 인장하중이 걸린 부분적으로 주름이 발생하는 사각형 멤브레인 문제에 적용하여 해석한 결과 하중비와 하중의 비정렬각은 사각형 멤브레인의 주름의 형상과 발생하는 면적에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 또한 고유진동수와 진동모드의 경우 하중비가 작은 범위에서는 주름을 고려하지 않은 결과와 큰 차이가 없었으나 하중비가 증가하여 전역주름이 발생하면서 결과에 큰 차이를 나타냈다.

후 기

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) Jenkins, C.H., Gossamer Space Craft: Membrane and Inflatable Structures Technology for Space Applications, AIAA, Inc., Reston, VA, 2001.
- 2) Friedman, L., Starsailing: Solar Sails and Interstellar Travel, John Wiley & Sons, 1988.
- 3) Write, J.L., Space Sailing, Gordon and Breach Science Publishers, 1992.
- 4) 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, Proc. 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., AIAA 2002-1560, Denver, Colorado, April 22-25, 2002.
- 5) Mikulas, M.M. and Adler, A., Rapid Structural Assessment Approach for Square Solar Sails Including Edge Support Cords, Proc. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., AIAA 2003-1447, Norfolk, Virginia, April 7-10, 2003.
- 6) 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, pp. 884-887, 1987.
- 7) Roddeman, D.G., Drukker, J. Oomens, C.W.J. and Janssen, J.D., The Wrinkling of Thin Membranes: Part II - Numerical Analysis, J. Applied Mechanics, Vol. 54, pp. 888-892, 1987.
- 8) Roddeman, D.G., Finite-Element Analysis of Wrinkling Membranes, Communications in Applied Numerical Methods, Vol. 7, pp. 299-307, 1991.
- 9) Jeong, D.G. and Kwak, B.M., Complementarity Problem Formulation for the Wrinkling Membrane and Numerical Implementation, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 12, pp. 91-104, 1992.
- 10) Muttin, F., Finite Element for Wrinkled Curved Elastic Membranes and its Application to Sail, Communications in Applied Numerical Methods, No. 12, pp. 775-785, 1996.
- 11) Kang, S. and Im, S., Finite Element Analysis of Wrinkling Membranes, J. Applied Mechanics, Vol. 64, pp. 263-269, 1997.
- 12) Lu, K., Accorsi, M. and Leonard, J., Finite Element Analysis of Membrane Wrinkling, Int. J. Numerical Methods in Engineering, Vol. 50, pp.1017-1038, 2001.
- 13) Miller, R.K, Hedgepeth, J.M., Weingarten, V.I. and Das, P., Finite Element Analysis of Partly Wrinkled Membranes, Computers and Structures, Vol. 20, No. 1-3, pp. 631-639, 1985.
- 14) Miyazaki, Y. and Nakamura, Y., Dynamic Analysis of Deployable Cable-Membrane Structures with Slackening Membrane, Proc. 21st Int. Symp. on Space Technology and Science, Omiya, Japan, 1998.
- 15) Liu, X., Jenkins, C.H. and Shur, W.W., Large Deflection Analysis of Pneumatic Envelopes using a Penalty Parameter Modified Material Model, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 37, pp. 223-251, 2001.
- 16) Liu, X., Jenkins, C.H. and Shur, W.W., Fine Scale Analysis of Wrinkled Membranes, Int. J. Computational Science, Vol. 1, No. 2, pp. 281-298, 2000.
- 17) Adler, A., Mikulas, M.M. and Hedgepeth, J.M., Static and Dynamic Analysis of Partially Wrinkled Membrane Structures, Proc. 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., AIAA 2000-1810., Atlanta, GA, April 3-6, 2000.

- 18) Nakashino, K. and Natori, M.C., Efficient Modification Scheme of Stress-Strain Tensor for Finite Element Analysis of Wrinkled Membranes, Proc. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., AIAA 2003-1981, Norfolk, Virginia, April 7-10, 2003.
- 19) Wong, Y.W., Pellegrino, S. and Park, K.C., Prediction of Wrinkle Amplitudes in Square Solar Sails, Proc. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., AIAA 2003-1982, Norfolk, Virginia, April 7-10, 2003.
- 20) Su, X., Abdi, F., Taleghani, B. and Blandino, J., Wrinkling Analysis of A Kapton Square Membrane under Tensile Loading, Proc. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., AIAA 2003-1985, Norfolk, Virginia, April 7-10, 2003.
- 21) Tessler, A., Sleight, D.W. and Wang, J.T., Nonlinear Shell Modeling of Thin Membranes with Emphasis on Structural Wrinkling, Proc. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conf., AIAA 2003-1931, Norfolk, Virginia, April 7-10, 2003.
- 22) Mikulas, M.M., Behavior of a Flat Stretched Membrane Wrinkled by the Rotation of an Attached Hub, NASA TN D-2456, 1964.
- 23) Jenkins, C.H., Hossain, A., Woo, K., Igawa, H., Wang, J., Sleight, D., and Tessler, A., Membrane Wrinkling, in Recent Advances in Gossamer Spacecraft, AIAA Progress in Aeronautics and Astronautics Series (in press).
- 24) Sewall, J.I., Miserentino, R. and Pappa, R.S., Vibration Studies of a Lightweight Three-sided Membrane Suitable for Space Application, NASA Technical Paper 2095, 1983.
- 25) Ewins, D.J., Model Testing: Theory, Practice and Application, 2nd ed., Research Studies Press Inc., Hertfordshire, England, 2000, pp. 422-425.