

論文

주름 효과를 고려한 팽창형 막 구조물의 비선형 해석

노진호*, 유은정*, 한재홍*, 이 인*, 강왕구**, 엄찬홍**

Nonlinear Analysis of Inflatable Membrane Structures with Wrinkling Effect

Jin-Ho Roh*, Eun-Jung Yoo*, Jae-Hung Han*, In Lee*, Wang-Gu Kang** and Chan-Hong Yeom**

ABSTRACT

The large deformation of inflatable membrane structure is numerically and experimentally considered in this paper. The numerical algorithm of wrinkling based on Miller and Hedgepeth membrane theory is developed using user material(UMAT) subroutine written by FORTRAN. Wrinkled area and deformed shapes of inflatable membrane structures are investigated by using ABAQUS with UMAT subroutine of wrinkling algorithm.

초 록

본 연구에서는 팽창형 막 구조물의 대변형 특성을 수치적 그리고 실험적으로 살펴보았다. Miller와 Hedgepeth의 막 이론을 이용하여 주름 효과를 고려한 막재료 구성방정식을 FORTRAN으로 해석 알고리즘을 만들어 user material(UMAT) subroutine을 개발하였다. 개발된 주름 해석 UMAT subroutine을 상용 해석 프로그램 ABAQUS와 연계 해석하여 팽창형 막 구조물의 주름 영역과 변형된 형상 특성 연구를 수행하였다.

Key Words : Inflatable Membrane Structure(팽창형 막 구조물), Wrinkling(주름), User Material(UMAT) Subroutine, ABAQUS

1. 서 론

팽창형 구조물은 대부분이 얇은 막 재료로 구성된 매우 가벼운 특별한 구조물로서 우주 구조물에 많이 응용 개발되어지고 있다(Fig. 1). 막재료로 구성된 팽창형 구조물은 전통적인 기계적 시스템에 비하여 매우 저렴한 가격, 적은 무게 그리고 체적 뿐만 아니라 적절한 열팽창 그리고 댐핑(damping) 특성을 가지고 있다. 이런 구조물은 매우 적은 무게와 부피로 패키징(packaging)이 가

능하고 이것은 결과적으로 발사체의 요구 무게 및 부피를 줄여주어 전체적인 우주 개발 계획 비용을 상당히 줄여줄 수 있는 장점이 있다. 또한 우주구조물의 전개(deployment)의 복잡성을 줄여 주어 시스템의 신뢰성을 증가시키기 때문에 팽창형 막 구조물은 전통적인 기계적 전개식 구조물을 대체할 무게가 가볍고 가격이 싼 우주구조물로 응용 개발되어질 것이다.

하지만, 매우 얇은 막재료로 구성된 팽창형 구조물은 무게가 가볍다는 장점대신 기계적인 지지 구조물의 제거로 인한 내압, 복사열, 주름, 두께의 변화 그리고 경계조건의 조그마한 변화에도 쉽게 구조물에 주름(wrinkling) 현상이 나타날 수 있다. 따라서 구조물의 임무 수행동안 표면의 정확한 형상을 유지하는 것은 팽창형 구조물 개발에 있어 매우 중요한 기술이다. 따라서 막재료

† 2005년 7월 29일 접수 ~ 2005년 10월 31일 심사완료

* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

연락처, jaehunghan@kaist.ac.kr,

대전시 유성구 구성동 373-1번지

** 정회원, 한국항공우주연구원 비행선그룹

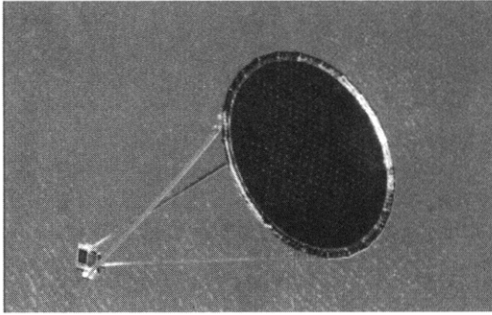


Fig. 1. Inflatable antenna experiment[1]

의 주름 등 비선형 특성을 해석하기 위해 많은 연구들이 수행되어지고 있다. 막재료는 인장 하중을 지지하는 데는 매우 적절하지만, 면내 방향으로 압축 하중이 가해지게 되면 국부적 또는 전체적인 구조물의 불안정성을 유발한다. 이런 불안정한 현상의 예로 주름(wrinkle) 현상이 있다. 이런 막재료의 비선형 특성을 해석하기 위해서 굽힘(bending) 효과를 제거하는 Tension Field (TF) 이론을 사용한다[2~4]. 각각의 변형률과 응력 상태에 따라 수정된 구성방정식을 이용하여 압축(compression) 하중을 제거함으로써 TF 이론은 막재료의 주름 상태와 방향을 판별할 수 있게 된다. Miller 와 Hedgepeth[2]는 TF 이론을 보완하여, Iterative Membrane Properties(IMP)라는 반복적인 구조물 강성의 조절을 통하여 유한요소 해석(FEM)에 적용하여 평면상의 막재료 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 Miller와 Hedgepeth의 막 이론을 이용하여 주름 해석 알고리즘을 개발하였으며, 개발된 주름 해석 UMAT subroutine을 상용 해석 프로그램 ABAQUS와 연계 해석하여 내압을 받는 막재료 원통형 빔 구조물의 주름 영역과 변형된 형상 특성을 살펴보았다.

II. 본 론

2.1 주름 효과를 고려한 막재료 구성 방정식

IMP 방법은 막 구조물에 하중이 가해질 때, 모든 압축 응력이 제거 될 때까지 반복적으로 막재료의 물성치를 조절하는 방법이다. Miller 와 Hedgepeth는 막 구조물의 주름상태 판단을 위하여 각 요소에서의 변형률을 이용한 기준을 사용하였지만, 막 구조물의 주름 상태를 계산하는 반복 계산 과정에서 안정된 해를 얻기 위해 본 연

구에서는 다음과 같은 stress-strain criteria를 사용하였다[5].

- i) $\sigma_2 > 0$: *taut*
- ii) $\epsilon_1 \leq 0$: *slack*
- iii) $\epsilon_1 > 0$ and $\sigma_2 \leq 0$: *wrinkled*

여기서, σ_2, ϵ_1 , 그리고 ϵ_2 는 각각 major 주응력, major 주변형률, 그리고 minor 주변형률을 나타낸다. 또한, *taut*는 양 주축(principal axis) 방향으로 인장, *slack*은 양 주축 방향으로 압축, 그리고 *wrinkled*는 한쪽 주축 방향으로만 인장을 받는 경우가 된다.

Miller-Hedgepeth 이론을 이용하여 막 재료 각각의 상태에 따라서 막요소의 탄성계수 행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_n = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix}$$

$$C_{wrinkled} = \frac{E}{4} \begin{pmatrix} 2(1+P) & 0 & Q \\ 0 & 2(1+P) & Q \\ Q & Q & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$C_{slack} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

여기서, $P = \cos(\alpha)$, $Q = \sin(\alpha)$, 그리고 α 는 주응력각도(principal stress angle)이다.

2.2 주름 해석 알고리즘 검증

막재료의 탄성계수 행렬 C는 각각의 막요소 위치에서의 국부적인 응력과 변형률 상태에 따라 막재료의 상태가 결정 된다. 따라서 이런 비선형 응력-변형률 거동을 해석하기 위해서는 반복적인 계산 방법이 요구되어진다. 본 연구에서는 ABAQUS 상용 프로그램을 이용하여 막 구조물을 4절점 사각요소인 M3D4 막요소(membrane element)로 수치적인 모델링을 하였고, 주름 효과를 고려한 막재료 구성방정식을 FORTRAN으로 해석 알고리즘을 만들어 user material(UMAT) subroutine을 구성하여 막 구조물의 주름 해석을 수행하였다(Fig. 2).

본 연구에서 개발된 주름 해석 알고리즘을 검증하기 위하여 막 구조물 주름 해석의 대표적인 예인 Rectangular membrane in bending 문제를 수치적인 해와 비교검증 하였다.

Wrinkled region

$$\frac{b}{h} = \begin{cases} 0 & ; \frac{M}{Ph} < \frac{1}{6} \quad (\pi) \\ \frac{3M}{Ph} - \frac{1}{2} & ; \frac{1}{6} \leq \frac{M}{Ph} < \frac{1}{2} \quad (partly\ wrinkled) \end{cases} \quad (3.1)$$

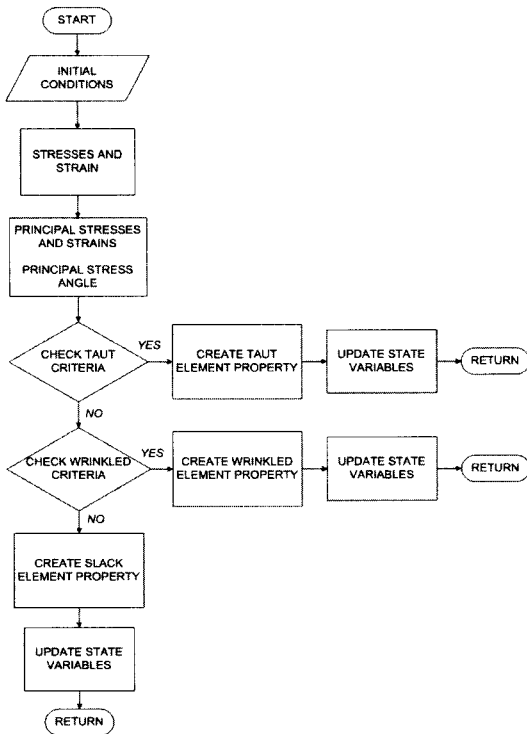


Fig. 2. Numerical algorithm of wrinkling

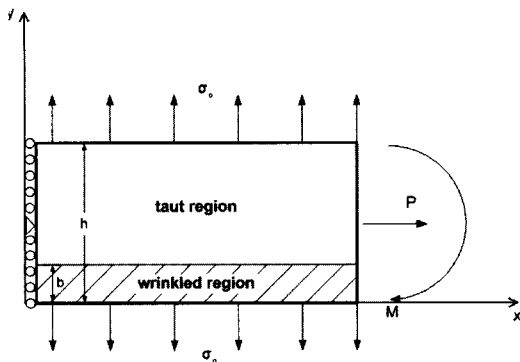


Fig. 3. Flat stretched membrane subjected to pure bending moment

Stress within the membrane

$$\frac{\sigma_{xx}}{\sigma_o} = \begin{cases} 2\left(\frac{y}{h} - \frac{b}{h}\right) / \left(1 - \frac{b}{h}\right)^2, & \frac{b}{h} < \frac{y}{h} \leq 1 \\ 0, & 0 \leq \frac{y}{h} \leq \frac{b}{h} \end{cases} \quad (3.2)$$

Fig. 3은 해석 모델을 보여주고 있으며, M은 모멘트, P는 X축의 인장하중, 그리고 h는 막재료 폭 길이를 나타낸다. 해석적인 식은 식 (3.1~2)와

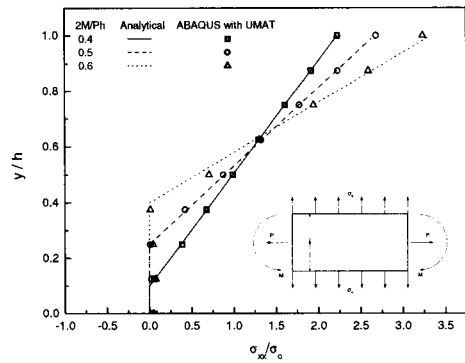


Fig. 4. Normal stress vs. vertical position for pure bending

같다[2]. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 개발된 주름해석 알고리즘 결과와 해석적인 해와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 2M/Ph가 증가 할 수록 막 구조물에 생기는 주름 영역이 확대되는 것을 알 수 있으며, 2M/Ph=0.6 인 경우 막 구조물의 40%가 주름 영역임을 알 수 있다.

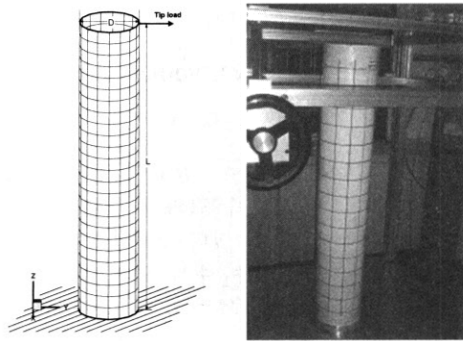
3. 팽창형 원통 빔 구조물 해석

주름 효과를 고려한 팽창형 막 구조물의 비선형 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 5와 같은 팽창형 원통 빔 구조물의 하중에 따른 구조물의 변형 특성을 살펴보았다. Fig. 5(a)는 660개의 막요소인 M3D4를 이용한 수치 모델을 보여주고 있으며, Fig. 5(b) white type Tedlar 필름으로 제작한 실험 모델을 보여주고 있다. Tedlar 필름의 물성치[6]와 구조물의 기하학적 데이터는 Table 1과 같다.

Fig. 6은 구조물에 가해주는 팁(tip) 하중에 따른 변형 선도를 보여준다. 주름 해석 알고리즘(UMAT)을 이용한 ABAQUS 해석이 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 주름 효과를 고려하지 않은 ABAQUS 결과는 구조적인 비선형 효과를 고려하더라도 팽창형 막 구조물의 비선형 특성을 예측할 수 없음을 알 수 있다. Fig. 7은 각각의 하중에 따른 팽창형 구조물의 변형된 형상과 주름 영역을 나타내주고 있다. Fig. 6에서 position A일 때 구조물의 밑단 쪽에서 주름이 일어나기 시작하고, 하중이 증가 할수록(position B) 주름 영역이 밑단 side 방향으로 발전하는 모습을 살펴볼 수 있다(Fig.7(b)). Position C에서는 밑단 주름에 의한 구조물의 역할을 상실한 영역으로서 주름에 의하여 밑단 부분의 요소가 완전히 접혀져 있는 것을 확인할 수 있다. Position C에서 팁 하중이 가해지는 반대편 구조

Table 1. Material and geometric data

Modulus (E)	2103 MPa
Poisson's ratio (ν)	0.34
Coefficient of Expansion ($\mu/^\circ C$)	15.5
Thickness (m)	38×10^{-6}
Length (m)	0.95
Diameter (m)	0.19



(a) Numerical model (b) Experimental model

Fig. 5. Inflatible cylindrical beam structure

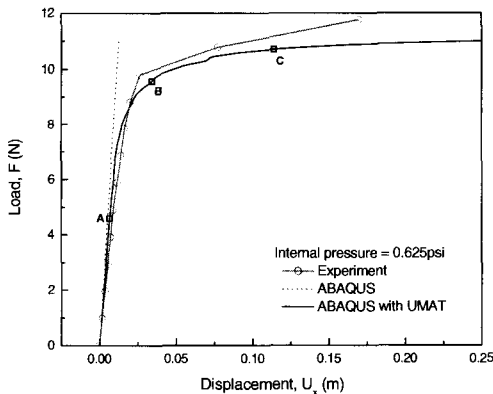
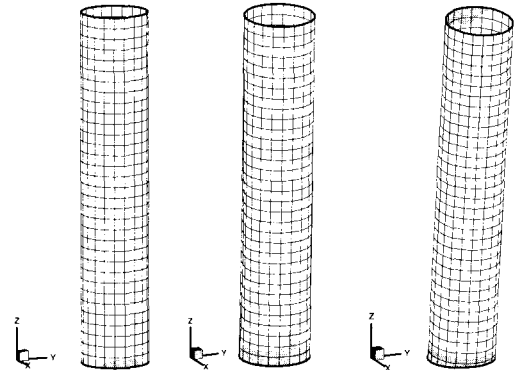


Fig. 6. Load-displacement curves

물 윗부분에서 주름 영역이 생기는 것을 볼 수 있는데 이것은 구조물의 변형 후에도 하중이 항상 X축에 평행하게 작용하도록 되어있어 구조물의 굽힘과 팁 하중에 따른 압축하중이 가해졌기 때문이라 판단된다.

Point C에서의 주름에 따른 변형된 형상을 보다 자세히 살펴보았다(Fig. 8). 그림에서 볼 수 있듯이 팁 하중에 따른 주름 영향에 의해서 구조물의 밑단 부분이 완전히 접히는 것을 확인할 수 있으며 또한 오른쪽 side 면이 끝은 선을 유지한



(a) Position A (b) Position B (c) Position C

Fig. 7. Deformed shapes with wrinkled area

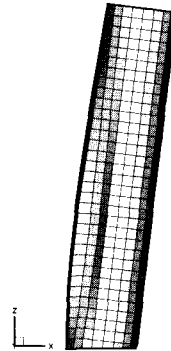


Fig. 8. Deformed shape at position C

다는 것을 알 수 있다. 이것은 주름 효과에 의해 밑단 부분이 완전히 붕괴되어 더 이상 팁 하중에 저항을 하지 못하기 때문이라 판단된다. 또한 구조물의 중간 부분은 완전한 원통 모양을 유지하지 못한 변형된 형태를 관찰할 수 있다.

다음은 내압에 따른 구조물의 비선형 특성을 살펴보았다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 내압이 증가 할수록 팁 하중에 따른 구조물의 굽힘 강성이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 주름 해석 알고리즘을 이용한 ABAQUS 해석과 실험 결과가 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

4. 성층권 비행선 기낭 해석

팽창형 막 구조물의 좀 더 복잡한 해석 예제로서, 한국항공우주연구원에서 개발 중인 성층권 비행선의 기낭 모델을 수치적으로 해석하였다. Fig. 10은 성층권 비행선 기낭의 수치적 모델을 보여주고 있다. 여기서 막재료는 Table 1의 Tedlar 필름을 적용하였고, 구조적 형상 및 하중조건은

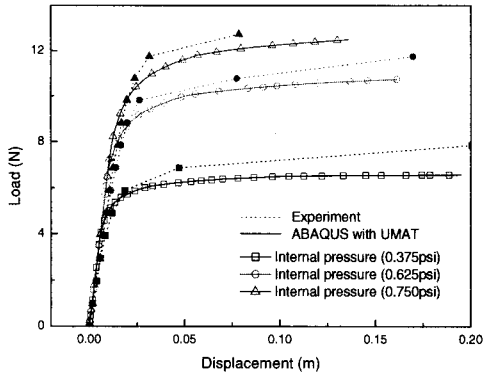


Fig. 9. Load-displacement curves with different internal pressures

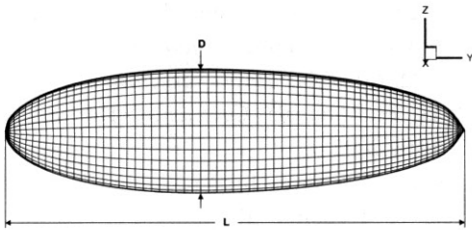


Fig. 10. Numerical model of stratospheric airship envelop

Table 2. Geometric data and boundary conditions

Length (m)	50
Diameter (m)	12.5
Internal pressure (Pa)	130
Environment temperature ($^{\circ}C$)	-60
Top surface temperature ($^{\circ}C$)	100

Table 2에 나타내었다. 2208개의 막요소M3D4를 이용하여 모델링하였다. 기낭 내부에 가해지는 내압, $P=130Pa$ 을 가해주었으며, 성층권 비행선이 임무를 수행하기 위해서는 고도 20Km 상공 환경에 있기 때문에 주위 온도는 $-60^{\circ}C$ 그리고 비행선 윗부분은 태양의 복사열에 의해 $100^{\circ}C$ 가 된다고 가정하였다.

Fig. 11은 주름 효과를 고려한 온도에 의한 비행선 기낭의 응력 분포를 나타내 주고 있다. 또한 Fig. 12는 비행선 기낭의 변형된 형상과 주름 영역을 여주고 있다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 비행선의 앞부분과 뒷부분의 가운데 지점에서 주름이 발생하는 것을 알 수 있으며, 온도 차이에 의한 변형된 형상을 확인할 수 있다. 비행선 기낭의 주름 영역의 발전은 구조물의 불안정한 현상을 유발할 수 있으며 또한 변형된 형상은 공기역학적 특성을 저하시킬 수 있다. 따라서 주름 효과를 고려한 구조물 해석은 비행선 기낭 개발을 위해 선행되어야할 매우 중요한 연구라 할 수 있다.

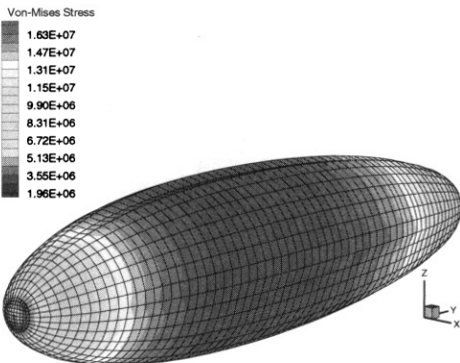
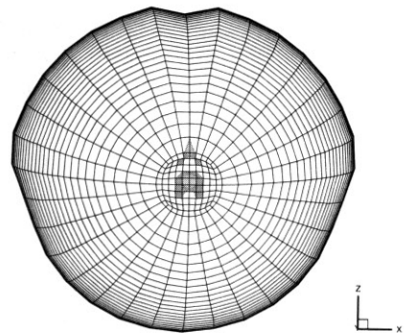
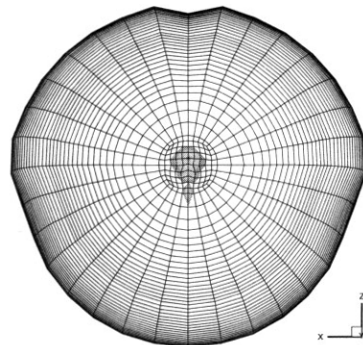


Fig. 11. Stress distribution



(a) Front view



(b) Back view

Fig. 12. Deformed shape with wrinkled area

III. 결 론

본 연구에서는 주름 해석 알고리즘을 FORTRAN을 이용하여 user material(UMAT) subroutine을 개발하였고 ABAQUS를 이용하여 막구조물의 비선형 특성을 살펴보았다.

팽창형 원통형 빔 구조물을 제작하여 대변형 실험을 수행하였고 주름 효과를 고려한 해석 결과가 실험 결과를 잘 예측하고 있음을 보여주었다. 또한 주름 영역이 원통형 빔 구조물의 밑부분 side 방향으로 확장되어 구조물이 하중을 견디지 못하고 붕괴되는 현상을 관찰할 수 있었다. 성층권 비행선 기낭 해석에서는 온도 차이에 의한 기낭의 변형 특성을 살펴보았으며 주름 영역 및 변형된 형상은 비행선 기낭 구조물의 공기역학적 또는 구조적 특성을 저하시킬 수 있기 때문에 주름을 고려한 팽창형 막 구조물의 해석은 성공적인 비행선 개발을 위해 선행되어야 할 매우 중요한 연구라 할 수 있다.

후 기

이 논문은 산업자원부 지원으로 수행하는 다목적 성층권 장기체공 무인비행선 개발 2단계 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) <http://www.lgard.com/>
- 2) Miller, R. K., and Hedgepeth, J. H., "An Algorithm for Finite Element Analysis of Partly Wrinkled Membranes", *AIAA Journal*, Vol.20, No. 12, 1982, pp. 1761~1763.
- 3) Miller, R. K., Hedgepeth, J. H., Weingarten, V. I., Das, P., and Kahyai, S., "Finite Element Analysis of Partly Wrinkled Membranes", *Computers & Structures*, Vol. 20, No. 1-3, 1985, pp. 631~639.
- 4) Blandino, J. R., Johnston, J. D., Miles, J. J., and Dharamsi, U. K., "The Effect of Asymmetric Mechanical and Thermal Loading on Membrane Wrinkling", *Proceeding of the 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, Denver, Co, 22-25 April 2002.
- 5) Kang, S., and Im, S., "Finite Element Analysis of Dynamic Responses of Wrinkling Membranes", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 173, 1999, pp. 227~240.
- 6) <http://www.dupont.com/tedlar/>