

주름 효과를 고려한 팽창형 구조물의 대변형 해석 Large Deformation Analysis of Inflatable Structures with Wrinkling Effect

노진호 유은정 한재홍 이인 강왕구* 염찬홍*

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

한국과학기술원 항공우주공학과

* 한국항공우주연구원 비행선그룹

(발표자 연락처 : rjh@asdl.kaist.ac.kr)

ABSTRACT The large deformation of inflatable membrane structure is numerically and experimentally considered in this paper. The numerical algorithm of wrinkling based on Miller-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.

Keyword : Inflatable Membrane Structure, Miller-Hedgepeth membrane theory, Wrinkling, User Material(UMAT) Subroutine

1. 서론

팽창형 구조물은 대부분이 얇은 막 재료로 구성된 매우 가벼운 특별한 구조물로서 우주 구조물에 많이 응용 개발되어지고 있다(그림. 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 가능하고 이것은 결과적으로 발사체의 요구 무게 및 부피를 줄여주어 전체적인 우주 개발 계획 비용을 상당히 줄여줄 수 있는 장점이 있다. 또한 우주구조물 전개(deployment)의 복잡성을 줄여주어 시스템의 신뢰성을 증가시키기 때문에 팽창형 막 구조물은 전통적인 기계적 전개식 구조물을 대체할 무게가 가볍고 가격이 싼 우주구조물로 응용 개발되어질 것이다. 국내에서는 한국항공우주연구원이 지난 2000년부터 성층권 비행선 개발을 수행 중에 있다. 비행선의 주 구조물인 기낭(envelope)은 굽힘 강성이 매우 작은 막재료로 제작되어 있다.

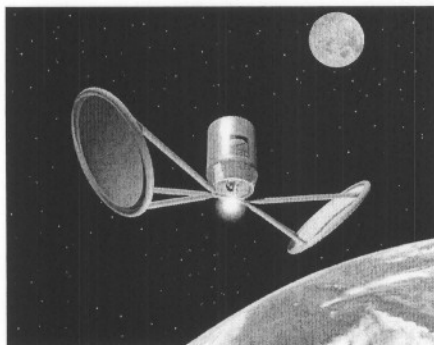


그림 1. Inflatable Structures for Space [1]

매우 얇은 막재료로 구성된 팽창형 구조물은 무게가 가볍다는 장점 대신 기계적인 지지 구조물의 제거로 인한 내압, 복사열, 주름, 두께의 변화 그리고 경계조건의 조그마한 변환에도 쉽게 구조물의 주름(wrinkling) 현상이 나타날 수 있다. 따라서 구조물의 임무 수행동안 표면의 정확한 형상을 유지하는 것은 팽창형 구조물 개발에 있어 매우 중요한 기술이다. 따라서 막재료의 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 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 유한요소해석(FEM)에 적용하여 막재료 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 Miller와 Hedgepeth의 막 이론을 이용하여 주름 해석 알고리즘을 개발하였으며, 개발된 주름 해석 UMAT subroutine을 상용해석 프로그램 ABAQUS와 연계 해석하여 팽창형 막구조물의 주름 영역과 변형된 형상 특성을 살펴보았다.

2. 주름 해석 알고리즘

IMP 방법은 막 구조물에 하중이 가해질 때, 모든 압

축 응력이 제거가 될 때까지 반복적으로 막재료의 물성치를 조절하는 방법이다. Miller 와 Hedgepeth는 막구조물의 주름상태 판단을 위하여 각 요소에서의 변형률을 이용한 기준을 사용하였지만, 막 구조물의 주름 상태를 계산하는 반복 계산 과정에서 안정된 해를 얻기 위해 본 연구에서는 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*
- (1)

여기서, $\sigma_1, \sigma_2, \epsilon_1$, 그리고 ϵ_2 는 각각 주응력과 주변형률을 나타낸다.

Miller-Hedgepeth 이론을 이용하여 막 재료 각각의 상태에 따라서 막요소의 강성(stiffness) 행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

$$K_{Slack} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

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

막재료의 강성 행렬 K는 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 상용프로그램을 이용하여 막구조물을 M3D4 막요소(membrane element)로 수치적인 모델링을 하였고, 주름 효과를 고려한 막재료 구성 방정식을 FORTRAN으로 해석 알고리즘을 만들어 user material(UMAT) subroutine을 구성하여 막구조물의 주름 해석을 수행하였다(그림. 2).

3. 팽창형 원통 빔 구조물 해석

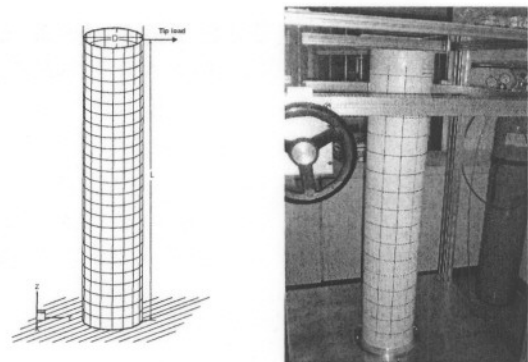


그림. 2 Numerical algorithm of wrinkling

주름 효과를 고려한 팽창형 막 구조물의 비선형 특성을 살펴보기 위하여 그림. 3과 같은 팽창형 원통 빔 구조물의 하중에 따른 구조물의 변형 특성을 살펴보았다. 그림. 3(a)는 660개의 막요소인 M3D4를 이용한 수치 모델을 보여주고 있으며, 그림. 3(b) white type Tedlar 필름으로 제작한 실험 모델을 보여주고 있다. Tedlar 필름의 물성치[6]와 구조물의 기하학적 데이터는 Table 1과 같다.

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

그림. 3 Inflatable cylindrical beam structure

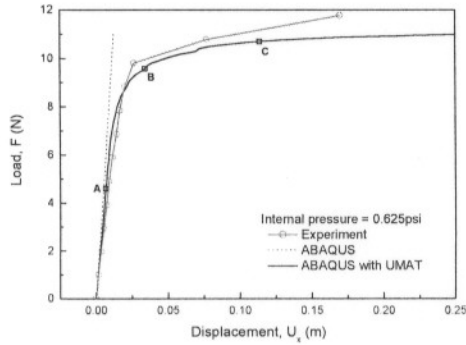


그림. 4 Load-displacement curves

그림. 4는 구조물에 가해주는 팀(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. point A일 때 구조물의 밑단 쪽에서 주름이 일어나기 시작하고, 하중이 증가 할수록 주름 영역이 밑단 side 방향으로 발전하는 모습을 살펴볼 수 있다. Point C에서는 밑단 주름에 의한 구조물의 역할을 상실한 영역으로서 주름에 의하여 밑단 부분의 요소가 완전히 접혀져 있는 것을 확인할 수 있다 (그림. 5).

4. 성층권 비행선 해석

팽창형 막 구조물의 좀 더 복잡한 해석 예제로서, 한국항공우주연구원에서 개발 중인 성층권 비행선의 기낭

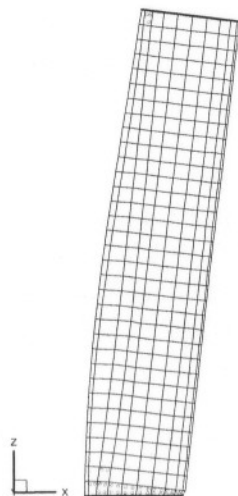


그림. 5 Deformed shape and wrinkled area at point C (O: wrinkled state)

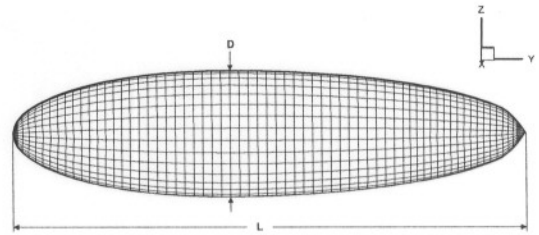


그림. 6 Numerical model of stratospheric airship envelop

모델을 수치적으로 해석하였다. 그림. 6은 성층권 비행선 기낭의 수치적 모델을 보여주고 있다. 여기서 $L=50m$, $D=12.5m$ 이고 막재료는 Table 1의 Tedlar 필름을 적용하였다. 2208개의 막요소 M3D4를 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. 그림. 7은 주름 효과를 고려한 온도에 의한 비행선 기낭의 응력 분포를 나타내 주고 있다. 또한 그림. 8은 비행선 기낭의 변형된 형상과 주름 영역을 여주고 있다. 그림. 7에서 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 구조물의 공기역학적 특성을 저하시킬 수 있다. 따라서 주름 효과를 고려한 구조물 해석은 비행선 기낭 개발을 위해 선행되어야 할 매우 중요한 연구라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 주름 해석 알고리즘을 FORTRAN을 이용하여 user material(UMAT) subroutine을 개발하였

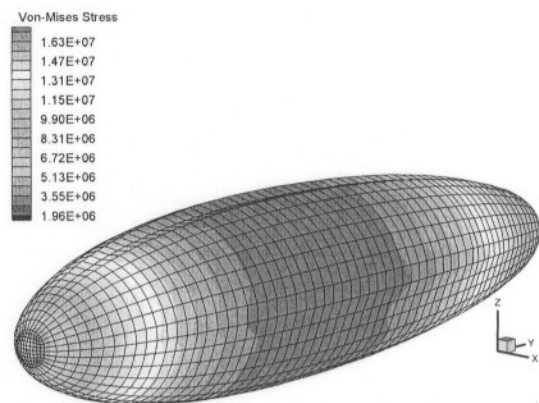
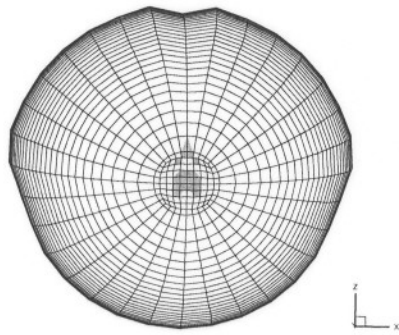
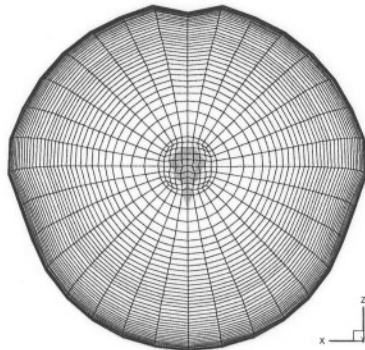


그림. 7 Stress distribution



(a) Front view



(b) Back view

그림. 8 Deformed shape with wrinkled area

고 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.

후기

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

참고문헌

[1] <http://www.nasa.gov/centers/glenn/news/pressrel/>

</2001/01-062addm.html/>

[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/>

● 주름 효과를 고려한 팽창형 구조물의 대변형 해석	113
노진호, 유은정, 한재홍, 이 인(KAIST), 강왕구, 염찬홍(항우연)	
● 형상적응날개의 비선형 해석	114
나영호, 박재상, 김지환(서울대)	
● 전기체 구조시험 장비의 교정 확인 방법 소개	114
채동철, 황귀철, 김성찬, 심재열(항우연)	
● 복합재 구조물의 점진적 파손해석	115
염기선, 박관진(국과연), 이강우[프리즘(주)]	

유체공학 부문

● 타원형 날개꼴의 동적실속 특성	119
이기영, 손명환, 정형석(공군사관학교)	
● 겹침 격자 기법을 이용한 복잡한 물체의 공력 최적 설계	119
이병준, 김종암, 김규홍(서울대)	
● 스테레오 카메라에 의한 위치 추적과 3차원 데이터 후처리 프로그램의 연동	120
김병수, 서진원, 김위준, 이봉주, 이훈주(충남대)	
● 2차원 비정렬 중첩격자계를 이용한 교차되는 물체간의 상대운동 해석기법 개발	120
안상준, 정문승, 권오준(KAIST)	
● 움직이는 격자계를 이용한 유도탄의 비정상 분리 유동해석	121
강경태, 이복직, 안창수(국과연)	
● 병렬 환경에서의 외부장착물 분리해석	121
이승수(인하대)	
● 미사일 단분리 유동특성의 수치해석	122
윤용현, 권기범(공군사관학교), 홍승규, 허기훈(국과연)	
● 3차원 초음속 제트의 유동 및 소음 해석	122
이인철, 이덕주(KAIST)	
● NACA23012익형에서 synthetic jet를 이용한 유동 제어	123
김상훈, 김종암, 김규홍(서울대)	

2005년

종합학술대회 논문초록집

The Korea Institute of Military Science and Technology

일시 : 2005년 8월 30일(화)

장소 : 서울대학교 신공학관



사단법인 한국군사과학기술학회

