

막 구조물의 동적 특성 및 주름 해석

Numerical Analysis of Membrane Structure for the Dynamic and Wrinkling Characteristics

노진호*, 한재홍, 이 인(KAIST), 강왕구, 염찬홍(항공우주연구원)

내었다.



med geometry plate

을 위한 가정 자
 량으로 기하학적
 드 유한 요소를
 형 요소와 달리
 face) 형상을 고
 을 제거하기 위
 쉐리 시켰다. 선
 해석 시에도 잠
 으로 효율적인
 을 바탕으로 하
 가분에 대해서

atic assumed
 hell element,"
 Aechanics and
 57~71

te F., "New
 1-linear shell
 es, Vol. 17,

1. 서 론

Solar sails 그리고 안테나의 반사경(reflector) 등에 적용되는 유연한 우주 구조물로서, 전개형(deployable) 구조물의 개발이 활발해짐에 따라 다양한 크기와 모양을 가지는 막(membrane) 재료를 이용한 우주 구조물 개발이 현재 미국 등 선진국들에서 많은 연구가 수행되어지고 있다. 이런 전개형 막 구조물은 매우 얇은 필름(films)으로 구성되어 있어, 일반적인 우주 구조물에 비해 상당한 무게 또는 부피 절감 등의 경제적 장점을 가지고 있다. Fig. 1은 ILC [1]에서 개발 중인 Sunshields 모형을 보여주고 있다. 이런 막 구조물의 재료는 일반적으로 매우 유연하여 아주 미세한 하중 또는 경계조건의 변화에 의해서도 구조물의 초기 형상을 유지하지 못하기 때문에 설계 단계에서 매우 정확한 해석을 요구한다. 구조적 형상의 정확성뿐만 아니라 자세 제어 시스템과의 상호작용 등 구조물의 성능 향상, 막 재료를 이용한 좀 더 값싼, 가벼운 그리고 신뢰적인 구조물을 설계하기 위해서는 막 재료의 거동에 대한 해석 기법의 개발과 정확한 동적 특성 해석 모델의 정의가 절대적으로 필요하다.

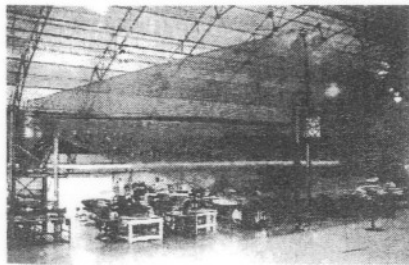


Fig. 1 Sunshields (ILC Dover).

본 연구에서는 ABAQUS를 이용하여 초기 응력이 작용하는 막 구조물의 해석 모델링 기법 및 동적 특성과 주름 현상을 수치적으로 해석하고 한다.

2. 초기 응력이 있는 막재료의 진동 특성

2.1. 이론적 방법

단위 길이 당 균일한 인장 하중 T를 받는 얇은 막 구조의 고유진동 해석을 이론적으로 수행하였다. x, y 좌표계에서 막 구조물의 방정식을 전개하면 다음과 같다 [2].

$$T \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) = M \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서 η 는 막 구조물의 횡방향 변위를 나타낸다. 그리고 T는 단위 길이 당 작용하는 표면 인장력, M은 단위 면적당의 질량을 나타낸다. 정상상태(steady state)의 진동수 u 에서 횡방향 변형은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\eta(x, y, t) = \eta(x, y) \cos ut \quad (2)$$

단순지지(simply supported)의 경계조건을 가지는 사각 막 구조물에서는 모드(mode) 형상을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta(x, y, t) = \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \cos ut \quad (3)$$

식 (3)을 식 (1)에 대입하여 고유진동수, u 를 전개하면 다음과 같다.

Table 1. Mylar polyester film properties

| | |
|--------------------------------------|--------|
| Thickness, h(mm) | 0.0762 |
| Elastic modulus, E(MPa) | 3790 |
| Poission's ratio, ν | 0.38 |
| Density, ρ (kg/m ³) | 1380 |

$$u_{mn} = \pi c \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \quad (4)$$

여기서 c 는 막 재료에서의 전파속도 (wave propagation velocity)를 나타낸다.

$$c = \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (5)$$

2.2. 막요소를 이용한 유한요소 해석

복잡한 형상(geometry)을 가지는 구조물의 해석적 해를 구하는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 유한요소방법 (FEM)을 이용하여 구조물의 진동 특성을 해석한다. ABAQUS의 M3D4 막요소 (membrane element)를 이용하여 막 구조물의 동적 해석을 수행하였다. 초기응력 (prestress)에 의한 구조적인 비선형을 고려하기 위하여 Lagrangian 응력-변형률 식을 이용하였다. 우선, 막요소 M3D4의 수치적인 정확성을 검증하기 위하여 Table 1의 막 재료를 이용하여 식 (4)의 이론적 결과와 비교하였다. Table 2에서 볼 수 있듯이 ABAQUS의 막요소를 이용

Table 2. Fundamental natural frequency of square membrane

| Prestress (N/m) | Analytical (Hz) | FE Membrane (Hz) |
|-----------------|-----------------|------------------|
| 10 | 26.285 | 26.204 |
| 20 | 37.172 | 37.058 |
| 30 | 45.527 | 45.387 |
| 40 | 52.570 | 52.408 |
| 50 | 58.775 | 58.594 |

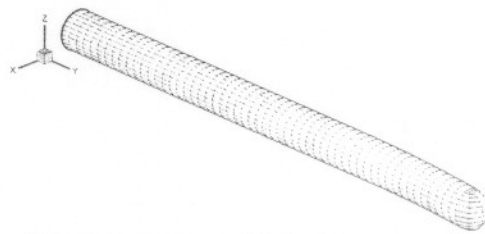


Fig. 2 Geometry of inflatable structure.

한 결과와 이론적 해가 비교적 잘 일치하였다.

3. 팽창형 구조물의 진동 특성

막 재료로 만들어진 팽창형 (inflatable) 우주 구조물은 초대형 팽창형 안테나 또는 우주 거주지 (human-rated habitat) 구조물 등에 적용되어 개발되고 있다. 이런 팽창형 구조물은 내압 또는 막 재료의 두께 (thickness) 변화에 의해서 구조물의 동적 특성이 결정된다. 따라서 우주 공간상에서 적절한 구조적 역할을 수행하도록 설계하기 위해서 팽창형 구조물의 동적 해석을 수행하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

Table 1의 막 재료를 이용하여 재료의 두께 또는 내압에 따른 구조물의 동적 해석을 Fig. 2와 같은 원주 (column) 모델 (model)을 이용하

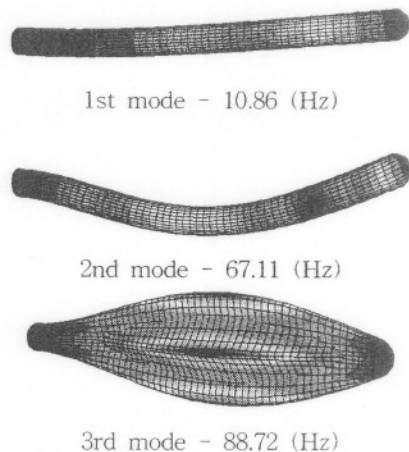


Fig. 3 Eigenvalue analysis of inflatable column structure.

여 수행하였 (0.15m)의 기호 소 (membrane) 해석을 수행하였의 고유치 (eigenvalue)를 보여주고 있다. 모드(mode)까지 같은 특성을 보이며 breathing breathing 모드를 유발시킬 수 있다. 따라서 초기 설계

4. 막 재료의

막 구조물의 와 Canfield [3] 변위가 발생할 Tension Field였다. 또한, Stein-Hedgepe 따라 막 요소의 Iterative Mem 통하여 막 구조 하지만, 위 방식이 가해지는 경우 위치 및 조건만 형상을 표현한 Pellegrino는 A 이용하여 3차원 수치적으로 해석된 원적 주름 현상 S4R5 셸 요소가 같이 3단계로 나

i) 초기 조건 주름 해석을 일한 초기응력이다. 이 단계는로서, 셸 (shell) 초기응력을 가하여 안정화 (stabilization) 초기응력을 적절히 의 좌굴(buckle)라서 잘못된 주

여 수행하였다. 여기서, 길이 (2m), 지름 (0.15m)의 기하학적 형상을 그리고 M3D4 막요소 (membrane element)를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 3은 내압이 600Pa 일 때의 고유치 (eigenvalue) 해석을 수행한 결과를 보여주고 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 2차 모드(mode)까지는 일반적인 빔(beam) 구조물과 같은 특성을 보여주고 있다. 하지만 3차 모드에서 breathing mode를 보여주고 있다. 이런 breathing mode는 구조물의 불안정한 특성을 유발시킬 수 있기 때문에 구조물의 운행 조건에 따라 초기 설계 단계에서 제거되어야 한다.

4. 막 재료의 주름 해석

막 구조물의 주름 연구 사례를 살펴보면, Wu와 Canfield [3]는 경계조건에서 응력을 받거나 변위가 발생할 때의 주름 현상이나 응력 상태를 Tension Field (TF) Theory를 이용하여 해석하였다. 또한, Miller와 Hedgepeth [4]는 Stein-Hedgepeth 이론을 이용하여 하중 조건에 따라 막 요소의 물성치를 반복적으로 보완하는 Iterative Membrane Properties (IMP) 방법을 통하여 막 구조물의 주름 해석을 수행하였다. 하지만, 위 방법들은 2차원적인 단순한 하중이 가해지는 경우에만 용이하고 단지 주름의 생성 위치 및 조건만을 판별할 뿐 3차원적인 주름의 형상을 표현하지는 못하고 있다. Wong과 Pellegrino는 ABAQUS 쉘 (shell) 요소, S9R5를 이용하여 3차원적인 막 구조물의 주름 현상을 수치적으로 해석하였다 [5]. 본 연구에서는 3차원적 주름 현상을 살펴보기 위해, ABAQUS의 S4R5 쉘 요소를 이용하여 주름 해석을 다음과 같이 3단계로 나누어 수행하였다.

i) 초기 조건

주름 해석을 수행하기 위해서 막 구조물에 균일한 초기응력 (prestress)을 가해 주는 단계이다. 이 단계는 주름 해석에서 가장 중요한 단계로서, 쉘 (shell) 요소가 매우 얇기 때문에 이런 초기응력을 가해줌으로서 매우 얇은 막 구조물을 안정화 (stabilized) 시켜준다. 만약 이런 초기응력을 적절하지 못하게 가해주면 막 구조물의 좌굴(buckled) 모드가 잘못 나오게 되고 따라서 잘못된 주름 현상을 얻게 된다.

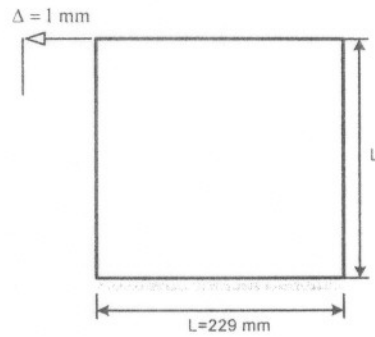
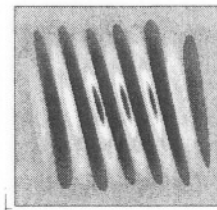


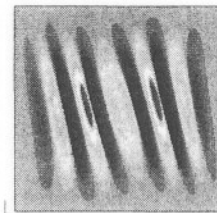
Fig. 4 Membrane clamped along bottom edge and subjected to prescribed displacement along top edge.

ii) 고유치 좌굴 해석

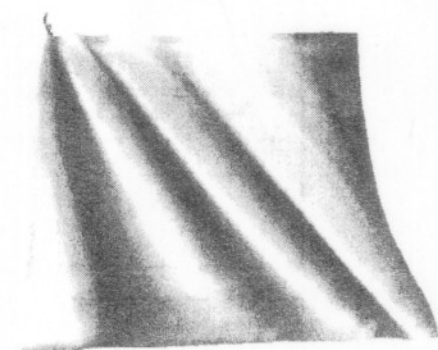
주름 해석의 두 번째 단계로, 막 구조물의 주름 모드형상을 얻기 위해서 고유치 좌굴해석을 수행한다. 작용하는 힘과 경계조건은 후좌굴 (postbuckling) 해석에서도 적용이 되며, 여기서 얻어진 막구조물의 모드 형상은 후좌굴 해석 단계에서 기하학적 임퍼펙션 (imperfection)으로 사용한다.



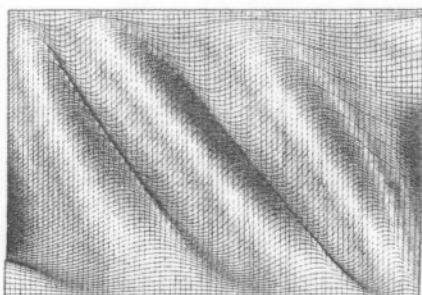
1st mode (eigenvalue: 0.40779)



2nd mode (eigenvalue: 0.4109)
Fig. 5 Eigenmodes of the membrane.



Experiment (Photogrammetry) [6]



FEM (ABAQUS)

Fig. 6 Wrinkling deformations of membrane.

iii) 후좌굴 해석

주름 해석의 마지막 단계로, 비선형 평형식을 이용하여 고유치 좌굴 해석에 사용된 하중 그리고 경계조건을 이용하여 비선형 해석을 수행하여 막 재료의 최종적인 주름 현상을 파악한다.

전단 (shear)력을 받는 막 구조물 모델 (Fig. 4)을 이용하여 주름 현상의 수치적 해석을 수행하였다. S4R5 요소를 이용한 50×50 mesh로 유한요소 모델링 하였으며, 총 13005개의 자유도를 사용하였다. Table 1의 막 재료의 물성치를 사용하여 실험적 결과 [6]와 비교하였다. Fig. 5는 고유치 좌굴해석에서 얻어진 좌굴 모드들을 보여주고 있으며, 이 모드들로 후좌굴 해석을 통하여 막 구조의 주름 현상을 수치적으로 해석하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 실험적 결과와 S4R5 요소를 이용한 수치적인 해석 결

과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 막 재료의 동적 특성 및 주름 현상을 ABAQUS를 이용하여 수치적으로 해석하였다. 비선형성이 매우 큰 두께가 얇은 막 구조물 특성 해석의 수치적 방법을 정립하였으며 수치적 결과를 이론적 그리고 실험 결과와 비교 검증하였다.

후 기

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

참고문헌

1. <http://www.ilcdover.com>
2. Graff, K. F. *Wave Motion in Elastic Solids*, Clarendon Press, Oxford, 1975.
3. Wu, C. H., and Canfield, T. R., Wrinkling of Pressurized Membranes, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 56, 624-628, 1989.
4. Miller, R. K., and Hedgepeht, J. M. An Algorithm for Finite Element Analysis of Partly Wrinkled Membranes, *AIAA Journal*, 20, 1761-1763, 1982.
5. Wong, Y. W., and Pellegrino, S., Computation of Wrinkle Amplitudes in Thin Membranes, *43rd AIAA/ASEM/ASCE/AHS/ASC Structures, Structures Dynamics, and Material Conference*, Denver, April 2003.
6. Leifer, J., Black, J. T., Belvin, W. K., and Behun, V., Evaluation of Shear Compliant Boarder for Wrinkle Reduction in Thin Film Membrane Structures, *44th AIAA/ASEM/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Norfolk, VA, April 2003.

1. 서론

유체를 전송 이프 내부 유- 받아 유동특성 은 파이프의 특성을 다시 경우에 따라서 수 있다. 내부 진동과 유체의 기 위해서는 (coupling)이 학(pipe-dynar 내부유동에 처음으로 다룬다. 그 이후로 지 문헌에 발 이프의 구조진 연성된 내부유 동강성법(d 되는 동강성 방정식을 만드 여 유도되기 나의 유한요소 FFT(fast I 성법을 특별 tral element 동강성행렬을 화하여 전체 줄일 수 있는 하여 주파수 하고 효율적 따라서 본

* 책임저자, E

| | |
|---------|--|
| ... 382 | • 헬리콥터 테일팬 시스템의 성능측정 461 김준호*, 송근웅, 이 욱, 심정욱(KARI) |
| ... 386 | • 무인헬기용 로터 시스템 지상시험장치개발 465 이 욱*, 송근웅, 김준호(KARI) |
| ... 390 | • 중첩이음 구조의 프레팅 접촉응력 해석 469 조원웅*, 황경정, 권정호(울산대), 박병훈, 유홍주(ADD) |
| ... 394 | • 가상모드합성법을 이용한 다목적 실용위성 2호의 충격분리 응답해석 473 우성현*, 김홍배, 문상무, 김영기(KARI) |
| ... 399 | • 헬리콥터 비행조건의 변화에 따른 조종 및 진동특성에 관한 연구 478 신승주*, 임인규, 이 인(KAIST), 김도형(KARI) |
| ... 403 | • T-50 고등훈련기 지상진동시험을 위한 공압 현가장치 482 이철호*, 한지훈, 조대현(KAI) |
| ... 407 | • 구속감쇠처리된 복합재 무한지 로터 플렉서의 진동저감 486 고은희*, 김도형, 주 진(KARI), 황호연(세종대) |
| ... 411 | • 압전센서 및 작동기를 사용한 박벽보의 진동억제 491 최승찬*, 김지환(서울대) |
| ... 417 | • 기하학적 비선형 해석을 위한 가정 자연 변형도 2차 곡면 삼각형 솔리드-셸 요소 495 김창호*(KARI), K. Y. Sze(홍콩대), 김용협(서울대) |
| ... 421 | • 막 구조물의 동적 특성 및 주름 해석 499 노진호*, 한재홍, 이 인(KAIST), 강왕구, 염찬홍(KARI) |
| ... 425 | • 파이프의 내부유동 유발진동에 대한 스펙트럴요소해석 503 박종환*, 권경수, 이우식(인하대) |
| ... 429 | • 무요소 관련 구조해석기법에서의 수정된 가중함수를 이용한 변위 경계조건 부가 507 안재모*(KARI), 송유미, 조진연(인하대) |
| ... 434 | • 유전자 알고리즘을 적용한 다층형 전자파 흡수 구조의 최적설계 512 이상희*, 강지호, 김천곤(KAIST) |
| ... 438 | • 압전 작동기 LIPCA를 이용한 플랩핑 장치의 설계 및 구현 516 이승엽*, 모하메드 사이푸딘, 이상기, 박훈철, 구남서, 윤광준(건국대) |
| ... 442 | • 소형 형상가변익형 날개의 설계와 구현 520 유디 허와환*, 박훈철, 구남서, 윤광준, 변영환(건국대) |
| ... 447 | • 1kW급 소형 풍력발전 시스템용 출력 제어장치 설계에 관한 연구 524 공창덕, 방조혁, 박종하*(조선대) |

구조역학 및 응용(II)

| | |
|---------|---|
| ... 453 | • 인공위성 구조제작을 위한 직조 탄소섬유-발포 고분자/금속 샌드위치 구조의 굽힘특성 528 장태성, 이상현, 차원호, 서정기, 남명용, 임종태(KAIST), 전성식*(공주대) |
|---------|---|



2004

추계학술발표회 논문집 (I)

Proceedings of the 2004 KSAS Fall Conference

인공위성 체계
유도 제어
구조역학및응용

일시 : 2004년 11월18일(목)~19일(금)

장소 : 서울교육문화회관

주최 : 한국항공우주학회

후원 : 한국과학기술단체총연합회
(주)인텔코리아