

섬유다발의 굴곡도에 따른 유연직물복합재료의 등가탄성계수 예측

서영욱*, 김성준**, 안석민***

Prediction of Equivalent Elastic Modulus for Flexible Textile Composites according to Waviness Ratio of Fiber Tows

Young W. Suh*, Sung-Joon Kim**, Seok-Min Ahn***

Abstract

In this study, the equivalent elastic modulus of flexible textile composites was predicted by nonlinear finite element analysis. The analysis was carried out considering the material nonlinearity of fiber tows and the geometrical nonlinearity during large deformation using commercial analysis software, ABAQUS. To account for the geometrical nonlinearity due to the large shear deformation of fiber tows, a user defined material algorithm was developed and inserted in ABAQUS. In results, nonlinear stress-strain curve for the flexible textile composites under uni-axial tension was predicted from which effective elastic modulus was obtained and compared to the test result. The effective elastic moduli were calculated for the various finite element models with different waviness ratio of fiber tow.

초 록

본 연구에서는 비선형 유한요소 해석을 수행하여 굴곡도에 따른 유연직물복합재료의 등가 탄성계수를 예측하였다. 해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 수행되었다. 해석에서는 섬유다발의 재료적 비선형성과 대변형 시 발생하는 기하학적 비선형성이 고려되었으며, 섬유다발의 대 전단 변형으로 발생하는 기하학적 비선형성을 고려하기 위하여 사용자 부프로그램을 작성하여 이를 ABAQUS내에 삽입하였다. 결과에서는 일축하중 상태에 있는 유연직물복합재료의 응력-변형률 거동을 예측하여 이로부터 계산된 등가탄성계수를 시험결과와 비교하였으며, 다양한 섬유 굴곡도를 갖는 유연직물복합재료에 대한 등가탄성계수를 계산하였다.

키워드 : 유연직물복합재료(flexible textile composites), 재료적 비선형성(material nonlinearity), 기하학적 비선형성(geometrical nonlinearity), 대 전단변형(large shear deformation), 등가탄성계수(equivalent elastic modulus)

접수일(2010년 1월 8일), 수정일(1차 : 2010년 4월 12일, 2차 : 2010년 6월 14일, 게재 확정일 : 2010년 10월 1일)

* 공력구조팀/young369@kari.re.kr

** 공력구조팀/yaelin@kari.re.kr

*** 항공기술실/smahn@kari.re.kr

1. 서 론

복합재료란 성분이나 형태가 다른 두 종류 이상의 소재가 거시적으로 조합되어 유효한 기능을 갖는 재료를 일컫는다. 일반적으로 복합재료는 층상복합재료, 입자강화 복합재료, 섬유강화 복합재료로 크게 구분되는데 탄소섬유, 케블라 등의 고강도 섬유로 보강된 섬유강화 복합재료는 높은 비강도/비강성 등의 우수한 성능으로 인하여 항공우주산업을 비롯하여 자동차, 스포츠 용품 및 일반산업 용품에 이르기까지 광범위하게 사용되고 있다[1]. 특히 직조 형태를 갖는 직물복합재료는 일방향 섬유강화 복합재료에 비하여 층간분리와 같은 구조적 파손에 우수하며, 우수한 중량비 등의 장점으로 인하여 항공기 제작에서의 활용도가 점차 증가하고 있으며, 최근에 와서는 팽창식 우주 구조물(Inflatable aerospace structure)을 제작하는데도 크게 활용되고 있다.

팽창식 우주 구조물은 최근 항공우주 산업에서 지속적으로 관심이 증가하고 있는 우주구조물 [2]로, 지상에서 패키징(Packaging)한 상태로 우주공간으로 보내진 후 우주공간에서 전개하는 특징을 갖는다. 따라서 이들 구조물은 전통적으로 항공기 구조물에 사용되어 온 비교적 강성이 강한 직물복합재료가 아닌 유연 수지를 포함하는 유연직물복합재료로 제작되게 된다. 그림 1은 팽창식 우주 구조물의 대표적인 예를 보여주고 있다. Lunar habitat[3]의 경우에는 막 구조물에 평직 유연직물복합재료가, sunshield[4]의 경우에는 boom 구조물에 3축 직조의 유연직물복합재료가 사용되었다. 이러한 팽창식 막 구조물은 경량 구조물이라는 것 외에도 패키징(Packaging)했을 때 매우 작은 부피를 차지하므로 론치(Launch) 비용을 크게 절감할 수 있다는 장점 등으로 인하여 앞으로 다양한 구조물에 적용될 것으로 기대된다.

이처럼 다양한 분야에서 직물복합재료의 활용이 증가함에 따라 직물복합재료의 기계적 연구도 활발히 진행되어 왔다. 그러나 전통적인 항공기 구조물에 사용되어 왔던 직물복합재료에 대하여서는 기계적 거동이 비교적 잘 알려져 있는 것에

반하여, 유연직물복합재료에 대해서는 기계적 거동 예측에 관한 연구가 미미한 수준이다. 특히 팽창식 구조물에 사용되는 유연직물복합재료의 경우에는 사용되는 수지 재료의 비선형성 뿐만 아니라 내부 미세구조물의 상호 접촉 및 섬유다발의 대 전단 변형(Large shear deformation) 등으로 인한 높은 기하학적 비선형성이 존재하므로 기존의 직물복합재료와는 상당히 다른 거동을 보이게 된다. 한 예로, 참고문헌 [5]에서는 유연수지를 포함하는 일방향 복합재료에 대하여 기계적 거동을 예측하여 그 거동이 비선형이며 매우 낮은 전단강성을 갖는다는 것을 보여주었다.

본 연구에서는 팽창식 구조물에 적용되는 유연직물복합재료에 대하여 섬유다발의 굴곡도에 따른 등가탄성계수를 예측하였다. 해석 대상이 된 유연직물복합재료는 벡트란 섬유와 폴리우레탄 수지를 포함한 것으로 폴리우레탄 수지가 갖는 재료 비선형성과 직물복합재료가 갖는 기하학적 비선형성을 고려하였다. 해석은 상용유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 해석 시 섬유다발의 대 전단 변형을 고려하기 위하여 구조물의 변형에 따라 섬유다발을 구성하는 각 요소의 강성을 정의하고 응력을 계산하는 사용자 부프로그램(User-defined material subroutine, UMAT)[6]을 작성하여 ABAQUS 내에 삽입하였다.

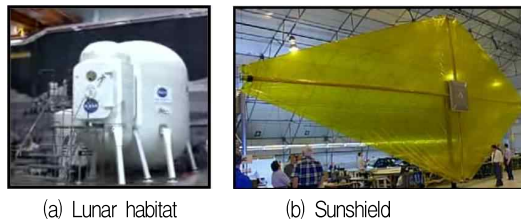


그림 1. 팽창식 구조물의 예

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 2는 본 연구에 사용된 1/4 단위구조에 대한 유한요소 메쉬를 보여주고 있다. 섬유다발의 단면은 볼록렌즈(Lenticular) 형태이며 중심선

은 사인함수를 따르도록 정의하였다. 단위구조를 구성하는 경사에 대한 상단 및 하단의 사인함수 경로를 각각 z_1, z_2 라 하고, 위사에 대한 사인함수를 각각 z_3, z_4 라고 했을 때 이들에 대한 함수식은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{h_L}{4} \left(\cos \frac{\pi x}{L} + 1 \right) & 0 \leq x \leq L \\ z_2 &= \frac{h_L}{4} \left(\cos \frac{\pi x}{L} - 1 \right) & 0 \leq x \leq L \\ z_3 &= -\frac{h_L}{4} \left(\cos \frac{\pi x}{L} + 1 \right) & 0 \leq x \leq w/2 \\ z_4 &= -\frac{h_L}{4} \left(\cos \frac{\pi x}{L} - 1 \right) & L - (w/2 + g) \leq x \leq L \end{aligned} \quad (1)$$

본 연구에서는 섬유다발 굴곡비(Waviness ratio: $h_L/2L$)에 따른 유연직물복합재료의 등가탄성계수의 변화를 보고자 그림 2에 보인 1/5의 굴곡비 모델 외에 1/3, 1/6 및 1/9의 굴곡비를 갖는 유한요소 모델을 정의하였다. 각 모델에 대하여 일정 변형률을 가하는 방법으로 일축인장(Uni-axial) 하중상태를 수치적으로 모사하였으며, 이로부터 응력-변형률 곡선을 예측하고 등가탄성계수를 계산하였다. 일축인장 상태에 대한 주기경계조건은 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} u(0, y, z) &= v(x, 0, z) = w(0, 0, 0) = 0 \\ u(L, y, z) &= \hat{u}_{xx} \\ v(x, L, z) &= constant \end{aligned} \quad (2)$$

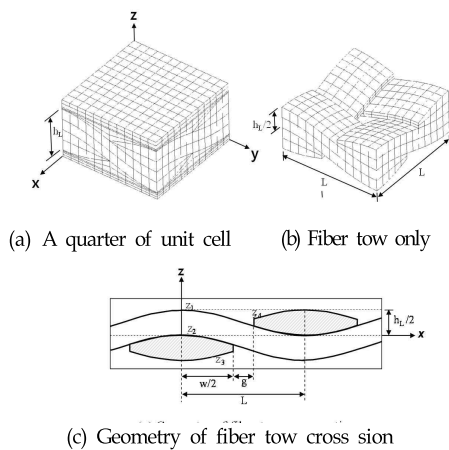


그림 2. 유한요소 메쉬

2.2 해석 방법

2.2.1 고 직교이방성 재료의 거동 예측을 위한 UMAT

유연직물복합재료가 갖는 특징 중의 하나는 유연직물복합재료를 구성하는 섬유다발이 고 직교이방성(Highly orthotropic) 재료($E_{11} \gg E_{22}$)로 E_{11}/E_{22} 의 비가 매우 크며 매우 낮은 전단강성을 갖는다는 점이다. 이러한 특징은 직물복합재료가 비교적 작은 하중 상태에 놓여 있을 때에도 섬유다발의 매우 큰 회전을 유발하게 된다. 그리고 이러한 거동에 대하여 상용유한요소 해석 프로그램은 그 거동을 정확히 예측하는데 한계를 보이고 있다. 한 예로, 그림 3은 일반적인 직교이방성 재료(General orthotropic material)와 고 직교이방성 재료(Highly orthotropic material)로 정의된 섬유다발 모델에 대하여 축방향으로 하중을 가했을 때 그 거동을 ABAQUS를 사용하여 예측한 것이다. 섬유다발에 x-축 방향으로 하중을 가하여 어느 정도 이상의 변형률에 이르게 되면 이론적으로는 그림 3(a)에 보인바와 같이 섬유다발의 중심선은 x-축 방향과 평행을 유지하며 변형이 발생해야만 한다. 그러나 고 직교이방성 재료의 경우에는 그림 3(b)에서 보인 바와 같이 실제와는 매우 다른 거동이 예측되었다. 이러한 결과는 ABAQUS를 이용한 해석과정에서 유연복합재료와 같은 고직교 이방성 재료에 대하여 재료축 변화를 정확하게 정의하지 못한다는 것을 의미한다.

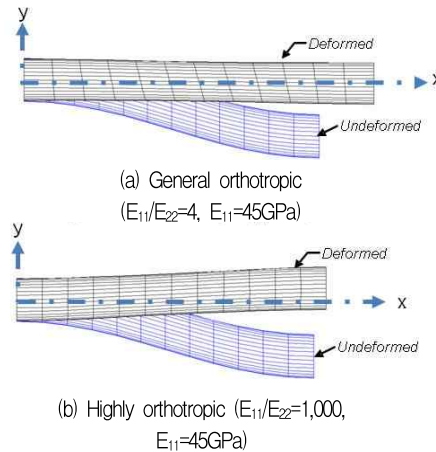


그림 3. ABAQUS를 이용한 이방성재료의 거동 예측

ABAQUS와 같은 일반적인 상용유한요소 해석 프로그램의 경우 대부분이 다음의 식을 사용해 탄성 대변형 문제를 해석한다.

$$\sigma^{\nabla} = C : D \quad (3)$$

여기서 σ^{∇} 는 Cauchy 응력의 시간에 대한 미분항을, C는 탄성텐서를, D를 변형률 증가율을 의미한다. 일반적으로 응력항이 정의되면, 직교좌표계로 정의된 재료축의 회전을 이용하여 전역축에 대한 응력을 정의하게 되는데, ABAQUS의 경우 재료좌표계의 회전은 재료의 강체 회전변형의 평균(average rigid body spin of material)으로 정의된다[6].

이 방법은 일반적인 재료에 대하여는 비교적 정확한 결과를 제공하지만, $E_{22} \gg E_{11}$ 인 재료에 대하여는 부정확한 결과를 초래하여 섬유회전이 크게 발생했을 때 섬유 재료의 직교이방성 성질이 유지되지 않는 결과를 가져온다[7].

본 연구에서는 변형 후 업데이트 된 섬유다발의 기하학적 형상에 대한 정보를 이용하여 재료축을 정의하는 알고리즘을 개발하여 이러한 문제를 해결하였다. 개발된 알고리즘에서는 변형된 섬유다발의 굴곡각을 계산하여 재료축을 정의하게 된다. 알고리즘은 포트란으로 코딩되어 사용자 부프로그램으로 삽입되었다. 그림 4는 본 연구에서 작성된 UMAT 사용자 코드에 대한 순서도를 보여주고 있다. 먼저, 서브루틴 INITNODE, ELEMCON 및 PROP를 호출하여 초기 절점 및 재료물성에 대한 정보를 기억해 둔다. 하중이 가해져 변형이 생기면 URDFIL을 호출하여 변형 후 재정의 된 각 절점에 대한 좌표 정보를 이용하여 섬유다발의 굴곡각을 계산하고 각 요소에 대하여 재료축을 정의한다. 이때 섬유다발의 굴곡각은 전역 좌표계의 x- 및 y- 축에 대한 각 요소의 회전각으로 계산된다. 재료축이 정의되면 이를 TRANS에서 전체 좌표축에 대한 재료축의 방향코사인을 계산하여 전체좌표계에 대한 각 요

소의 강성행렬을 구성하고, 이를 이용해 응력을 계산하게 된다.

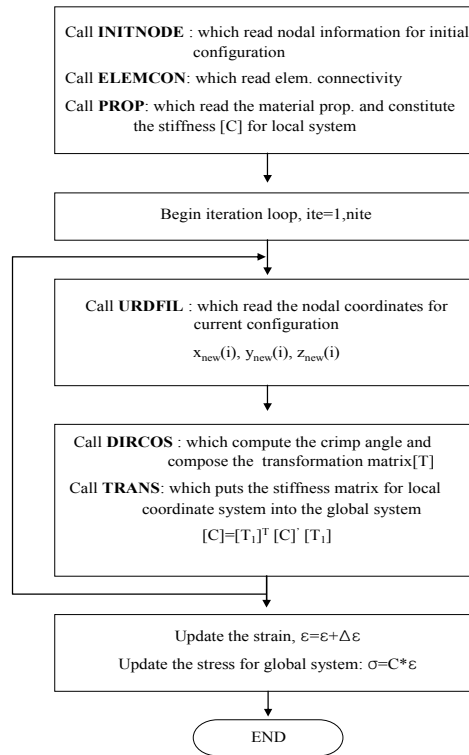


그림 4. UMAT 사용자 코드 순서도

2.2.2 Hourglass 모드에 대한 제어

섬유 축방향 탄성계수에 비하여 횡방향 탄성계수의 값이 매우 작고, 전단강성이 매우 작은 재료의 경우 강성 매트릭스의 몇몇 항이 거의 영(Zero)에 가까운 값을 갖기 때문에 이는 수치적 불안정성(Numerical instability)을 유발하게 된다.

뿐만 아니라 수치재료가 갖는 비압축성 재료에 대하여 전체적분(Full integration)을 적용하면 적분점에서 가압축응력(Spurious pressure stress)이 발생하고 이는 변형에 대해 너무 스티프(Stiff)한 거동을 유발하여 결국 Hourglass 모드를 유발하게 된

다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 섬유다발과 수지 지역에 대하여 감차적분(Reduced integration)을 적용하여 해석을 수행하였다.

2.3 재료 물성

본 연구에 사용된 백트란 섬유는 65GPa의 탄성계수를 갖는다. 수지로 사용된 폴리우레탄 재료는 Mooney-Rivlin 변형률 에너지 함수로 정의하였으며, 이때 필요한 매개변수는 참고문헌 [8]의 일축인장 시험결과를 이용하여 계산하였다.

3. 결 과

3.1 UMAT의 검증

그림 5는 개발된 UMAT을 이용하여 그림 3(b)에 보인 고 직교이방성 재료로 정의된 섬유다발에 대한 거동을 예측하고 변형률에 따른 E_{11}^* 의 변화를 보인 것이다.

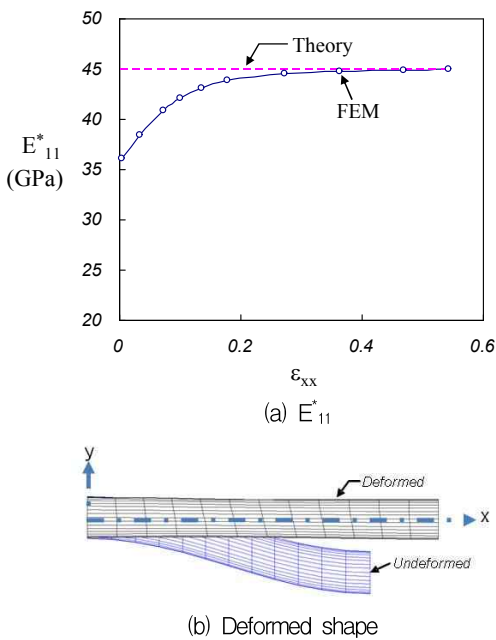


그림 5. UMAT을 이용한 고 직교이방성 재료의 등가탄성계수 예측

계산된 등가 탄성계수(E_{11}^*)는 약 $\epsilon_{xx} = 0.3$ 에서 섬유다발이 완전히 퍼졌을 때의 이론 값인 45GPa의 값을 보여주어 본 연구에서 작성된 UMAT이 타당한 거동을 예측한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이 시점에서 섬유다발은 x-축과 평행을 이루며 변형되는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 유연 직물복합재료의 등가 탄성계수 예측

그림 6은 그림 2에 정의된 유연직물복합재료 모델에 대한 응력-변형률 선도와 변형률에 따른 등가탄성계수의 변화를 보인 것이다.

이때 등가탄성계수는 응력-변형률 선도의 기울기로 계산되었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 본 연구를 통해 예측된 유연직물복합재료의 탄성계수는 시험결과와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 특징을 보면, 초기에는 2.5GPa 정도의 낮은 탄성계수를 보였으나, 변형률이 증가함에 따라 증가하는 현상을 보였고 1.5% 변형률을 지나면서 급격히 증가하여 비선형성이 두드러지게 나타났다. 그러나 약 3% 변형률에서는 일정한 값으로 수렴하는 현상을 보여주었으며 이때 등가탄성계수는 약 9.4GPa 정도의 값을 나타냈다. 이와 같이 하중이 가해지는 초기에 비선형 구간이 두드러지게 나타나는 것은 유연직물복합재료를 구성하는 섬유다발의 기하학적 형상에서 그 원인을 찾을 수 있다. 직물복합재료를 구성하는 섬유다발은 경사와 위사가 서로 교차하여 꼬여져 있는 구조물이다. 따라서 경사 방향으로 인장하중을 가하게 되면 경사는 점차 퍼지려고 하는데, 하중이 가해진 초기에는 섬유다발의 굴곡도가 크므로 섬유다발의 변형은 비교적 쉽게 발생하게 된다. 이 과정에서 섬유다발의 낮은 전단강성은 섬유다발의 변형을 가속화하여 하중이 가해진 초기에는 굴곡도의 감소가 빠르게 진행된다. 그러나 변형이 어느 정도 발생하여 섬유다발의 굴곡도가 거의 없는 상태가 되면 섬유다발은 인장변형에 대해 저항하게 되므로 전체 구조물의 강성

은 크게 증가하고 응력-변형률 거동은 선형 구간으로 접어들게 되어 일정한 값의 탄성계수를 보이게 되는 것이다.

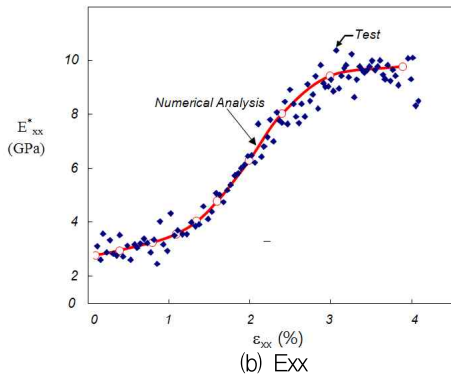
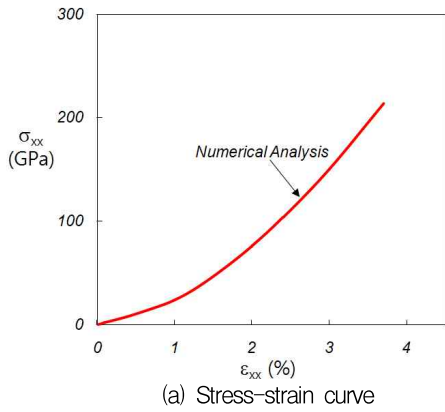


그림 6. 유연직물복합재료의 응력-변형률 거동과 등가탄성계수

그림 7은 섬유다발의 굴곡도에 따른 유연직물 복합재료의 응력-변형률의 거동을 보인 것이다. 굴곡비가 다른 모든 경우에 대하여 비선형 거동이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 굴곡비가 작아질수록 비선형에서 선형으로 전환되는 시점이 빨라지는 것을 확인할 수 있었다. 응력-변형률 곡선에서 선형 구간은 섬유다발이 거의 다 퍼진 상태에 이르렀을 때 나타나는데, 섬유다발의 굴곡도가 큰 모델일수록 섬유다발이 퍼지는데 더 많은 하중이 요구되므로 그만큼 선형구간이 늦게 나타나게 되

는 것이다. 각각의 모델에 대하여 0.02%와 3%의 변형률 지점에서의 등가탄성계수를 표 1에 나타내었다. 굴곡도가 1/3인 모델을 제외하고는 3% 변형률 지역에서의 등가탄성계수는 0.02% 지점에서의 E_{xx} 값에 비하여 약 4배 정도 증가한 것으로 나타났다. 굴곡도가 1/3인 모델이 비교적 적은 증가율을 보인 것은 다른 모델이 약 3%의 변형률 지점에서는 선형 거동에 다다른 것에 비하여 약 5%의 변형률에 대해서도 선형 구간이 이르지 못했기 때문에 나타나는 결과로 보인다.

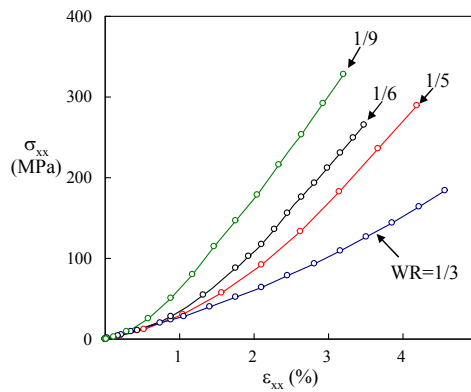


그림 7. 섬유다발의 굴곡도에 따른 유연직물복합재료의 응력-변형률 거동

표 1. 섬유다발의 굴곡도에 따른 등가탄성계수

Waviness ratio	Effective elastic modulus(GPa)	
	0.02% strain region	3.00% strain region
1/3	2.4	5.7
1/5	2.5	9.4
1/6	2.6	10.6
1/9	3.2	12.9

4. 결 론

본 연구에서는 최근 팽창식 구조물에 많이 사용되고 있는 유연직물복합재료에 대하여 섬유다발의 굴곡도에 따른 등기 탄성계수를 예측하였다. 해석은 3-D 비선형 유한요소 해석을 통해 이루어졌고, 상용해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 유연직물복합재료를 구성하는 섬유다발의 고 직교이방성으로 야기되는 섬유다발의 대전단변형을 정확하게 구현하기 위하여 유연직물복합재료의 변형에 따른 섬유다발의 굴곡각을 정의하고 이를 이용해 강성행렬을 구성하는 연산과정을 코딩하여 ABAQUS의 사용자 코드 부분에 부프로그램으로 삽입하였다. 또한 해석 시 발생하는 Hourglass 모드는 감차적분요소를 사용하여 해결하였다.

후 기

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 항공안전기술개발사업으로 수행된 연구임.

참 고 문 헌

1. Ronard F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, Inc. 1994.
2. W. Keith Belvin, "Opportunities for Gossamer Structures in NASA's Exploration Program", *48th SDM Conference, 8th AIAA Gossamer Spacecraft Forum*, 23-24, April, 2007.
3. Cadogan, D., J. Stein and M. Grahne, "Inflatable Composite Habitat Structures for Lunar and Mars Exploration", *Proceedings of 49th International Astronautical Congress*, Melbourne, Australia, Sept 29-Oct 2, 1998.
4. Sandy, C. R., "Next Generation Space Telescope Inflatable Sunshield Development", *2000 IEEE Aerospace Conference*, March 2000.
5. 서영욱, 우경식, "유연수지를 기지재료로 하는 복합재료의 비선형거동 예측", 한국항공우주학회지, 제34권, 제10호, 2006, pp.24-20
6. ABAQUS Analysis User's Manual.
7. Boisse, P., B. Zouari and J. L. Daniel, "Importance of In-plane Shear Rigidity in Finite Element Analyses of Woven Fabric Composite Preforming", *Composites. Part A*, Vol. 37, pp. 2201 - 2212, 2006.
8. Huang, Z. M., Ramakrishna, S., Dionner, H. P. and Tay, A. A. O., "Characterization of A Knitted Fabric Reinforced Elastomer Composite." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 18, No. 2. 1999, pp. 118-137.