

직조 탄소섬유 발포 고분자 샌드위치 구조의 굽힘특성

장승환* · 장태성** · 최진호*** · 전성식†

Bending Characteristics of Carbon Fabric/Polymeric Foam for Sandwich Structures

Seung Hwan Chang*, Tae Seong Jang**, Jin Ho Choi***, Seong Sik Cheon†

Key Words: RUV (Representative unit volume) model, sandwich structure, thermoforming

ABSTRACT

In this paper, a representative unit volume (RUV) model was employed to simulate thermoforming process of carbon fabric-polymeric foam sandwich structures. Thermoforming simulations, which capture crimp angles and amplitude changes of carbon fabric with respect to different types of foams under the operating pressure were conducted with the help of RUV model. Changed shapes of tow structure after thermoforming were reflected in the two dimensional model to determine mechanical properties of skin parts, i.e. carbon fabric composites after thermoforming. Bending simulations with respect to different foam systems as well as different moduli of carbon fabric composites were successfully carried out by using properties obtained from two-dimensional analyses.

1. 서론

섬유강화 복합재료는 우수한 비강성과 비강도 특성에 기인하여 자동차나 비행기 산업 등 많은 분야에 폭넓게 사용되어져 왔다. 특히 수지이송법 (resin transfer moulding)이나, 압축성형 (compression moulding) 등을 포함한 대량생산을 위한 제조법이 다양화 됨에 따라 복합재료는 레저 및 스포츠 용품까지 확대되어 응용되고 있는 추세이다 [1]. 특히 직조 복합재료 (fabric composite)는 제조시 유연성 (flexibility)이 우수하고 성형성 (formability)이 뛰어나서 수지이송법이나 열성형 등의 방법으로 상대적으로 복잡한 형상의 제품을 성형할 수 있다 [2]. 또한 샌드위치 구조는 경량이고 강도 및 강성이 높아서 건축, 기계 등 다양한 산업에 응용되고 있다 [3].

장승환 [4,5]은 직조 복합재료를 이용하여 제조한 헬멧 구조의 여러 부위에서 추출한 시편을 이용하여 각 부위별 토우의 미세구조 변화를 측정하고, 건직물을 이용한 사진틀 실험을 통해 각 하중 조건에 따른 토우의 미세 기동을 관찰하였다. Hofstee et al. [6]은 평직 복합재료 (plain weave composite)의 열성형 공정중 안 (yam) 구조를 전단 변형과 직조 변형 (fabric stretching deformation)의 함수로 표현하였으며, 안의 과장과 진폭을 측정하고 해석해와 비교하였다. McBride et al. [7]은 직조 구조를 표현하기 위한 안의 폭과 간격, 직조의 두께 등의 항으로 구성된 조화함수의 단위체 (unit cell)를 제시하고, 새틴 직조(satin weave)에서 발생하는 토우 형상의 변화를 일방향 편향 인장시험 (bias extension test), 이축 인장시험과 같은 하중조건을 겪은 시편을 현미경으로 관찰하였다. 그 결과, 재료 내부에 발생하는 힘의 변화는 서로 다른 인장시험시 토우들의 재배열에 영향을 미칠 수 있으며, 결국 전체적으로 재료의 거동에 영향을 미치게 되는 것을 규명하였다. 전성식 등 [8]은 발포

* 중앙대학교 기계공학부

** 인공위성연구소, 구조 및 열제어 팀

*** 경상대학교 기계장공공학부

† 교신저자, 공주대학교 기계자동차공공학부(sscheon@kongju.ac.kr)

고분자 샌드위치 구조의 열성형시 압축특성에 관한 유한요소해석을 수행하였다.

본 연구에서는 발포 고분자를 내장재 (core)로 삽입하고, 직조 탄소섬유 에폭시 복합재료를 외장재 (skin)로 적용한 샌드위치 구조의 굽힘 특성을 파악하였다. 발포 고분자는 산업용으로 많이 쓰이고 있는 PVC 와 폴리우레탄을 사용하였다. 직조 탄소섬유-발포고분자 샌드위치 구조의 열성형 과정을 해석하기 위하여 RUV (Representative unit volume) 모델이 제안되었다. 이 해석을 통하여 성형이 끝난 후 직조 탄소섬유의 크립 각과 진폭의 변화를 결정하고 이를 이차원 모델에 적용하여 직조 탄소섬유 복합재료의 평면방향 (In-plane) 물성치를 알아낸 후 이 값을 스킨 부분에 적용하여 샌드위치 구조의 굽힘 특성을 파악하였다.

2. 열성형 해석

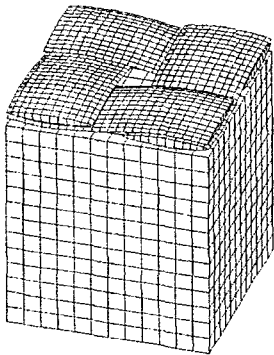


Fig. 1. The representative unit volume model.

샌드위치 구조는 직조 탄소섬유 에폭시 복합재료를 외장재로 하여 압력과 온도를 가하여 열 성형하게 되며, 이 과정에서 직조 탄소섬유의 크립 각이나 진폭 등이 변하게 되며, 이를 해석하기 위하여 Fig. 1 과 같이 RUV 모델을 제안하여 사용하였다. RUV 모델은 Hypermesh (Altair Engineering)를 사용, plain-weave 의 직조 탄소섬유를 고려하여 최소 반복단위만 모델링 하였으며, 대칭을 고려하여 내장재 두께의 반 (5mm)을 모델링 하였다. Fig. 2 는 직조 탄소섬유를 모델링하기 위한 기본적인 파라미터를 나타내고 있는데, 초기 하중이 가해지지 않은 상태에서 토우의 너비와 높이는 각각 2mm, 0.2mm 로, 크립 각과 진폭의 peak-to-peak 값은 각각 8.7°, 0.28mm 로 하였다.

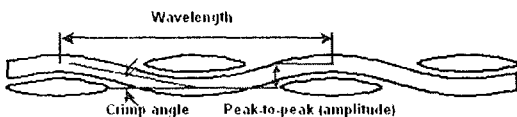


Fig. 2. Major tow parameters of plain weave fabric.

직조탄소섬유의 영률은 SK Chemical 에서 제공한 70GPa 을 사용하였다. Table 1 에서는 해석에 사용된 발포고분자 (Divinycell HT grade, Diab Group) 인 폴리우레탄과 PVC 의 물성치를 보여준다.

Table 1. Material properties of various foams

Foam	Density (kg/m ³)	Modulus (MPa)
Polyurethane	80	21
HT50	54	30
HT70	70	44
HT90	95	65
HT110	115	78

열성형에 사용되는 125°C 조건으로 발포 고분자에 대해 Instron4206 에서 압축시험을 수행하였다. 발포 고분자는 변형률 속도에 상대적으로 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있기 때문에[9], 오토클레이브에서의 성형과정을 고려하여 압축속력은 분당 2 mm 로 정하였다. Fig. 3 에서 발포 고분자의 응력-변형률 곡선을 보여준다.

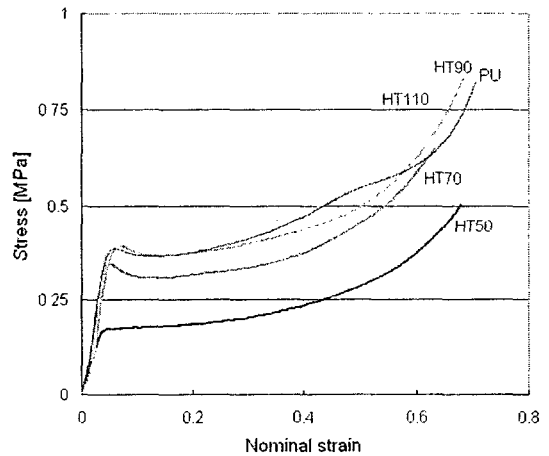


Fig. 3. Stress-strain curves of polymeric foam at 125°C.

Fig. 3 의 결과를 발포고분자 내장재의 물성으로 입력하여, LS-DYNA (Livermore Software Technology Corporation) 를 이용하여 열성형 해석을 수행하였다.

Table 2. Parametre changes of carbon fabric by thermoforming analyses

	PU	HT50	HT70	HT90	HT110
평균 크립프각(°)	6.01	5.85	6.26	6.03	5.79
진폭(mm)	203.8	202.3	204.5	203.6	203.4

해석조건은 절대 3 기압에서 폴리우레탄 재질과 4

개의 밀도가 다른 PVC, 모두 5 개에 대해 수행하였다. 해석결과, 파라미터 변화는 Table 2 에 나타나 있다. 토우의 파장변화는 전체에 대해 1% 미만이어서 무시할만 한 것으로 사료되었다.

3. 외장재 물성치

열성형을 한 샌드위치 구조에 있어서 외장재의 평면방향 강성을 구하기 위하여, 2 차원 유한요소 모델로 인장 및 압축 해석을 수행하였다. Fig. 4 는 plain-weave 로 직조된 탄소섬유 에폭시 복합재료 외장재의 단면을 형상화한 2 차원 모델을 나타낸다.

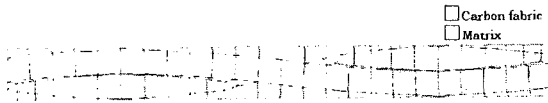


Fig. 4. Two-dimensional FE model.

4 절점 Belytschko-Tsay 셸 요소를 이용하여 섬유와 기지를 모델링 하였고 Fig. 5 에서 보이는 바와 같이 인장강성이 압축강성에 비해 약 5% 정도 높게 나타났다. 이는 탄소섬유 파형이 굴곡이 있으므로 압축시에는 좌굴이 쉽게 일어나기 때문인 것으로 사료된다. 인장강성은 내장재에 상관없이 상대적으로 일정하나 HT 110 에서 확인한 차이를 보여주고 있다. 이는 Table 2 에서 평균 크립프각이 가장 작기 때문에 탄소섬유의 굴곡이 줄어들어 기인한 것으로 사료된다.

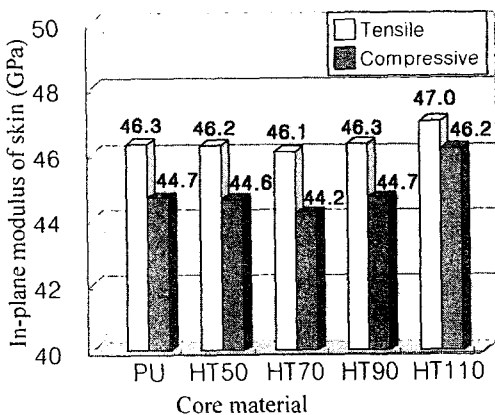


Fig. 5. Variation of in-plane moduli of carbon fabric w.r.t. the core material system.

4. 샌드위치 구조의 굽힘특성

2 차원 유한요소해석 결과를 통해 구해진 인장,

압축 강성을 고려하여, 샌드위치 구조를 유한요소화 하고 굽힘해석을 수행하였다. 외장재와 내장재의 접합은 완전하다고 가정하고, Belytschko-Wong-Chiang 셸로 외장재를 모델링하고, 내장재는 solid 요소를 사용하였다.

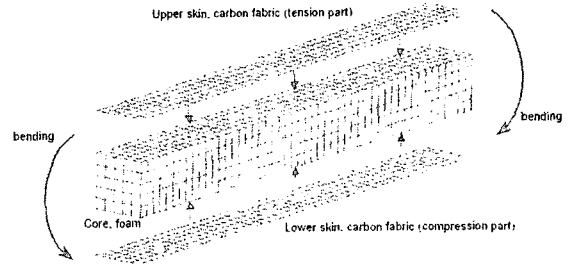


Fig. 6. FE model of sandwich structure.

샌드위치 구조의 오른쪽은 클램프 되었고, 왼쪽편은 0.1m/s 의 등속도로 아래방향으로 변형한다고 가정하였다. 여기서 변형속도는 수치결과와 정확도를 해치지 않는 범위에서 계산시간을 효과적으로 줄이는 방향으로 선정되었다.

Fig. 7 은 HT110 의 내장재를 사용하고 외장재의 강성이 다를 때의 샌드위치 구조의 굽힘 특성에 관해 보여주고 있다. 외장재의 강성이 높을수록 샌드위치 구조의 강성은 높아지지만, 내장재가 팽복하고 나면, 충격에너지 흡수를 높이기 위한 관점에서 볼 때, 높은 강성의 외장재를 사용하는 대장점이 많지는 않은 것으로 사료된다.

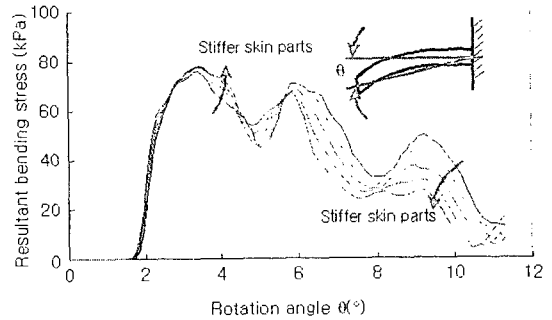


Fig. 7. Bending behaviour of HT110 core-sandwich structures w.r.t. different moduli of skin parts.

Fig. 8 에서는 125°C, 절대 3 기압에서 열성형된 샌드위치 구조가 내장재에 따라 굽힘특성이 어떻게 변화되는지 보여주고 있다. 합성 굽힘응력은 샌드위치 구조가 클램프된 부분에서 계산되었다. HT50, HT70 과 같은 낮은 밀도의 발포 PVC 의 경우 굽힘응력이 샌드위치 구조가 고정벽을 기준으로 반대로 나타났는데, 이는 굽힘하중이 샌드위치

구조의 인장면에 순간적으로 작용하기 때문인 것으로 나타났다. 다시 말하면, 인장하중이 작용하는 샌드위치 구조의 윗 외장재에 항복하중이 시작되어 전파되는 순간, 압축하중이 형성되기 때문이다. 그러나 HT90, HT110 및 폴리우레탄의 경우, 같은 굽힘각에 대해 인장면에 압축하중이 발생하지 않았다.

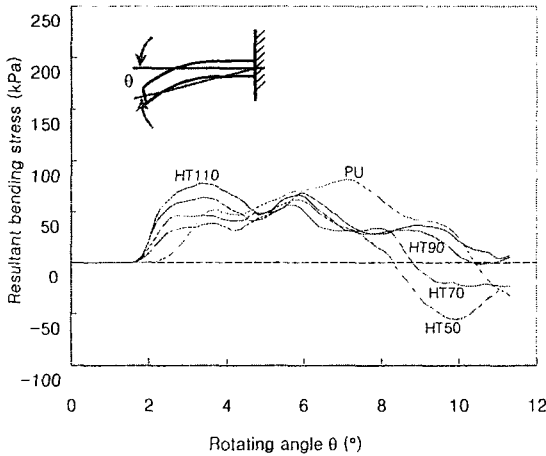


Fig. 8. Bending behaviour of different foam core.

5. 결론

본 연구에서는 직조 탄소섬유 에폭시 복합재료와 발포 고분자로 이루어진 샌드위치 구조의 성형 해석을 위해 RUV 모델이 사용되었고, 토우 파라미터들이 성형해석을 통해 결정되어서 이를 반영한 2 차원 유한요소해석을 통해 외장재의 평면방향 인장 및 압축강성을 구하였다. 또한 구해진 인장 및 압축 강성을 이용하여 샌드위치 구조의 굽힘특성을 파악하였다. 외장재의 강성이 높을수록 샌드위치구조의 강성은 높아지지만, 내장재가 항복하고 나면, 충격에너지 흡수를 높이기 위한 관점에서 볼 때, 높은 강성의 외장재를 사용하는 데 높은 장점이 있지는 않은 것으로 사료된다. 또한, HT50, HT70 과 같은 낮은 밀도의 발포 PVC 의 경우 굽힘응력이 샌드위치 구조가 고정된 벽면을 기준으로 반대로 나타났는데, 이는 굽힘하중이 샌드위치 구조의 인장면에 순간적으로 작용하기 때문인 것으로 나타났다. 다시 말하면, 인장하중이 작용하는 샌드위치 구조의 윗 외장재에 항복하중이 시작되어 전파되는 순간, 압축하중이 형성되기 때문이다. 그러나 HT90, HT110 및 폴리우레탄의 경우, 같은 굽힘각에 대해 인장면에 압축하중이 발생하지 않았다.

후 기

본 연구는 과학기술부 (MOST, Ministry of Science & Technology) 에서 지원받아 수행 됨 (과제번호 M102 DB 010002-04D0201-00213).

참고문헌

- (1) Lee, D.G., Kim, H.S., Kim, J.W. and Kim, J.K., "Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft," *Composite Structures*, Vol. 63, 2004, pp. 87-99.
- (2) 장승환, 전성식, "탄소섬유 건직물의 일방향 편향 인장실험과 이축 인장실험," 한국복합재료학회 추계학술대회 논문집, 2003, pp. 99-102.
- (3) Cheon, S.S. and Meguid, S.A., "Crush behavior of metallic foams for passenger car design," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 5, 2004, pp. 47-53.
- (4) 장승환, "직물 복합재료의 드레이핑 헬멧의 미소 변형 관찰," 한국복합재료학회지 Vol. 16, 2003, pp. 29-35.
- (5) 장승환, "직물 복합재료의 드레이핑 미소 거동 관찰: 일방향 편향 인장실험과 이축 인장실험," 한국복합재료학회지 Vol. 17, 2004, pp. 38-46.
- (6) Hofstee, J., de Boer, H. and van Keulen, F., "Elastic stiffness analysis of a thermo-formed plain-weave fabric composite - Part I: geometry observation," *Composite Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 1041-1053.
- (7) McBride, T.T. and Chen, J., "Unit-cell geometry in plain-weave fabrics during shear deformation," *Composite Science and Technology*, Vol. 57, 1997, pp. 345-351.
- (8) 전성식, 장승환, "유한요소해석을 이용한 직조 탄소섬유 발포 고분자 샌드위치 구조의 압축특성," 한국복합재료학회 춘계 학술대회 논문집, 2004, pp. 194-197.
- (9) Meguid, S.A, *Crashworthiness of hydroformed composite structures*, Confidential report, General Motors of Canada, Limited, 1999.