

유한요소해석을 이용한 직조 탄소섬유 발포 고분자 샌드위치 구조의 압축특성

전성식* , 장승환**

FE Analyses of the Compressive Characteristics of Carbon Fabric/Polymeric Foam for Sandwich Structure

Seong Sik Cheon[†], Seung Hwan Chang^{*}

Key Words: Sandwich structure, compressive characteristics, plateau region, densification, crimp angle

ABSTRACT

In this paper, compressive characteristics of carbon fabric skin with polymeric foam core sandwich structure were investigated by FE analyses and compressive tests of polyurethane foam were also conducted with respect to temperature changes, which were determined by curing processes of epoxy or polyester resin to obtain mechanical behaviour of polyurethane foam. FE analyses indicated variation of parameters with respect to manufacturing pressure, which have comparatively massive effect upon mechanical properties of sandwich structures, i.e. wavelength as well as crimp angle of carbon fabric.

1. 서 론

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)가 뛰어서 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 거동을 관찰하였다. Hofstee et al. [6]은 평직 복합재료(plain weave composite)의 열성형 공정중 양(yarn) 구조를 전단 변형과 직조 변형(fabric stretching deformation)의 함수로 표현하였으며, 양의 파장과 진폭을 측정하고 해석해와 비교하였다. McBride et al. [7]은 직조 구조를 표현하기 위한 양의 폭과 간격, 직조의 두께 등의 향으로 구성된 조화함수의 단위체(unit cell)을 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.

본 연구에서는 발포 고분자를 내장재(core)로 삽입하고, 직조 탄소섬유 에폭시 복합재료를 외판재(skin)로 적용한 샌드위치 구조의 열성형에 있어서 토우의 형상에 따라 샌드위치 구조의 평면방향(in-plane) 기계적 성질이 좌우됨에 따라, 직조

[†] 교신저자, 공주대학교 기계자동차공학부(sscheon@kongju.ac.kr) -194-
^{*} 중앙대학교 기계공학부

탄소섬유의 토우형상을 나타내는 파라미터들의 변화를 유한요소해석으로 고찰하였다.

2. 발포 고분자의 압축 시험

발포 고분자중에서 산업적으로 응용이 높은 폴리우레탄 (Polyurethane, $50 \times 50 \times 30 \text{mm}^3$, 상대밀도 약 7%)을 선정하고 이 시편의 압축물성을 측정하기 위해 Instron 4206 과 온도챔버를 이용하여 압축 시험을 수행하였다. 발포 폴리우레탄은 상온에서 가장 많이 사용되지만, 오토클레이브 (Autoclave)에서 폴리에스터 및 에폭시 계열의 수지를 이용하여 샌드위치 구조로 성형할 때는 80°C 와 125°C 를 많이 사용하기 때문에 본 실험에서는 3 가지 온도 조건에 대해, 즉 상온(25°C 기준), 80°C 그리고 125°C 기준으로 시험을 수행하였다. 80°C 와 125°C 기준의 시험에서는 ASTM E21 의 고온시험 규정에 의거하여 시편의 온도를 정상상태가 되도록 시편을 온도챔버 내부에 장착 시키고 20 분이 경과된 후에 시험하였다.

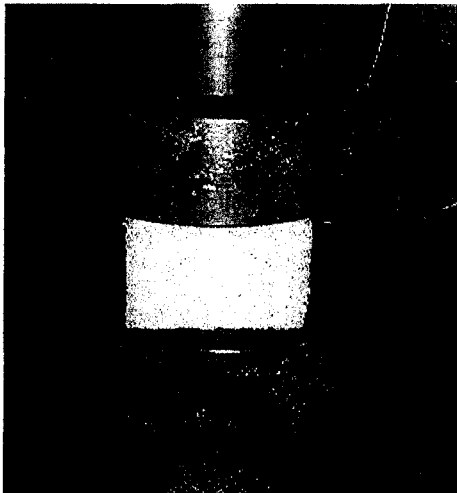


Fig. 1. Polyurethane specimen in heating chamber for compressive test.

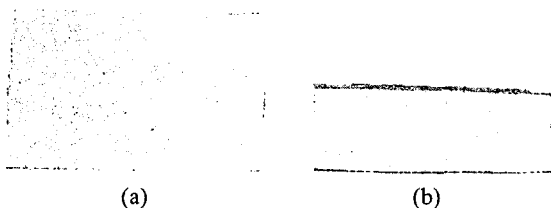


Fig. 2. Polyurethane specimens: (a) Before test and (b) after test at 80°C.

Fig. 1 에서는 온도 챔버 내의 압축시험용 지

그에 장착된 발포 폴리우레탄 시편을 보여준다. Fig. 2 에서는 발포 폴리우레탄 시편의 시험전과 시험후 영구 변형이 생긴 모습을 보여준다.

발포 고분자는 변형을 속도에 상대적으로 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있기 때문에 [8], 오토클레이브에서의 성형과정을 고려하여 압축속력은 분당 2 mm 로 정하였다.

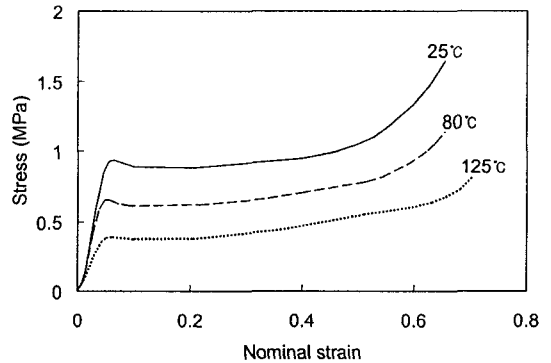


Fig. 3. Stress-strain curves of polyurethane foam with respect to temperature.

Fig. 3 에 시험결과로 나온 온도에 따른 발포 폴리우레탄의 응력-변형률 선도를 보여준다. 발포 폴리우레탄은 에너지 흡수 (crashworthiness) 부재의 특성상 선형 탄성구간, 플랫토 (plateau) 구간 및 덴시피케이션 (densification) 구간이 잘 나타나 있는 것을 볼 수 있다.

3. 성형공정의 유한요소해석

3.1 샌드위치구조 모델링

Fig. 4 에 나타난 바와 같이 직조 탄소섬유는 샌드위치 구조의 외판을 형성하고 발포 폴리우레탄은 내장재가 된다.

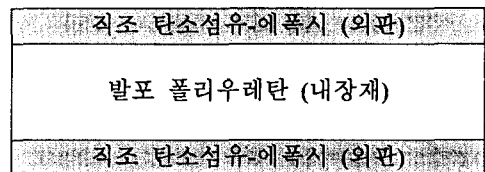


Fig. 4. Schematic diagram for carbon fabric-polyurethane foam sandwich structure.

오토클레이브 진공백 성형 공정을 해석하기 위하여 외판의 직조 탄소섬유를 발포 폴리우레탄과 접착하는 역할을 하는 수지는 성형시 액체상태가 되어 응력을 전달하지 못하는 것으로 가정하였다.

또한 성형과정서 제품의 면이 평면이 될 수 있도록 알루미늄 평판이 샌드위치 구조의 윗면과 아랫면에 위치한다. 따라서 기지 부분을 제외하고 직조 탄소섬유, 발포고분자 및 압축을 가하는 평판의 3가지에 대하여 유한요소모델링을 수행하였다. 발포 고분자의 물성은 오토클레이브에서 에폭시 수지를 경화시키기 위해 125°C로 성형을 하기 때문에 125°C에서 압축한 시험결과를 사용하였다. 또한, 성형압력을 절대기압으로 1기압에서 7기압까지 1기압씩 증가시키면서 해석하였다.

압축시험에서 해석에 사용된 재질의 물성치는 다음과 같다.

Table 1. Material properties

	Carbon Fabric	Polyurethane foam	Rigid platen
Modulus	70 GPa	21 MPa	210 GPa
Density	1,800 kg/m ³	80 kg/m ³	7,800 kg/m ³
Yield stress	N.A.	0.4 MPa	N.A.

본 성형공정의 해석에 있어서 하중은 정적 상태에 가까우나, 접촉이 많이 일어나는 구조이기 때문에 상용 외연적 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 해석을 수행하였다. 직조 탄소섬유는 성형도중 외부 압력에 의해 항복이 발생하지 않기 때문에 탄성구간만 존재하는 3차원 솔리드 요소로 모델링 하였으며, 발포 폴리우레탄은 상대적으로 대변형을 할 수 있도록 벌집(honeycomb)물성을 갖는[8] 3차원 솔리드 요소를 사용하였다. 하중을 가하는 평판은 강체 물성을 갖는 Belytschko-Tsay 셸요소로 모델링 하였다. 또한 직조 탄소섬유는 평직(plain-weave)으로 가장 단순한 기본 단위를 모델링 하였으며 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 대칭성을 고려하여 샌드위치 구조의 위쪽방향으로 반을 유한요소 모델링 하였다.

3.2 해석결과 고찰

성형압력이 4기압 미만일 경우 발포 폴리우레탄은 선형 탄성 구간에 속하게 되어 상대적으로 직조 탄소섬유 에폭시 복합재료는 압축을 받는 상태가 된다. 반대로 성형압력이 4기압 이상, 6기압 미만일 경우 발포 폴리우레탄은 항복점을 거쳐, 플래토 구간에 속하게 되어 직조 탄소섬유는 상대적으로 압축이 완화된 상태가 된다. 성형압력이 6기압 이상에 되게 되면, 발포 폴리우레탄은 덴시피케이션 구간에 들어가는 것으로 사료되며 이에 따라 직조 탄소섬유는 다시 압축을 받게 된다.

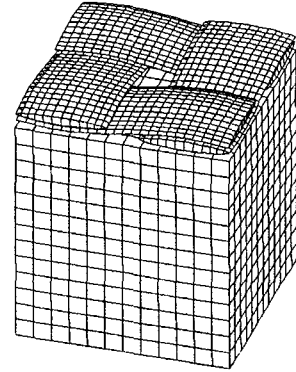


Fig. 5. FE modelling of sandwich structure.

성형압력에 따른 변형량은 Fig. 6에 나타나 있다.

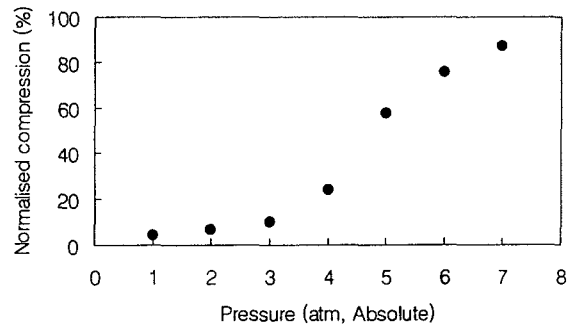


Fig. 6. Deformation with respect to pressure.

7기압으로 성형시, 알루미늄 평판은 초기 발포 폴리우레탄의 두께(50mm) 기준으로 약 87% 정도를 압축하는 것으로 나타났다. 2기압 미만으로 성형하게 되면, 해석결과로는 직조 탄소섬유를 충분히 압축되지 않아서 샌드위치 구조의 외판과 내장재사이에서 기공이 생길 수 있을 확률이 크다.

크림프 각(Crimp angle)은 직조 탄소섬유가 구조적으로 얼마만큼 굽어져 있는 지를 판단할 수 있는 기준이 된다. 직조 탄소섬유는 성형시 알루미늄 평판에 의해 날줄(warp yarn)위에 위치한 씨줄(weft yarn)은 좀더 편평해지고 날줄 아래에 위치한 씨줄은 상대적으로 더 굽어져 있다. 날줄을 기준으로도 마찬가지이다. 따라서 두개 중 어느 하나도 대표될 수 없기 때문에 두개의 평균으로 크림프 각을 구하였다. 해석결과 날줄 밑에 위치한 씨줄은 날줄위에 위치한 씨줄의 경우에 비해 크림프 각이 10배 이상 큰 것으로 나타났다. 성형전 직조 탄소섬유의 초기 크림프 각은 약 8.7°이고 Fig. 7은 초기 크림프 각에 대한 상대적인 크림프 각의 변화를 성형압력에 따라 나타내었다.

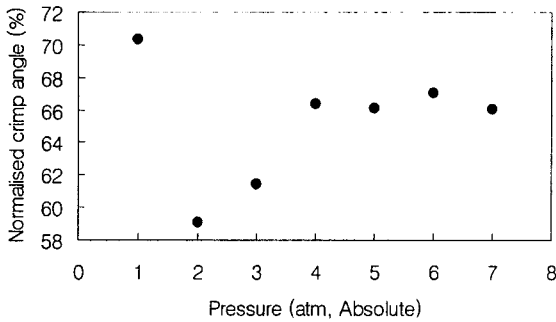


Fig. 7. Deformation with respect to pressure.

성형압력이 1 기압일 경우 직조 탄소섬유가 충분히 압축을 받지 못하여 초기 상태와 거의 유사하게 유지된다. 그러나 2 기압에서는 크림프 각은 상대적으로 크게 줄어들게 되고 4 기압까지는 증가하는 추세를 보이다가 5 기압 이상부터 거의 비슷한 값을 유지하는 경향을 나타내고 있다. 이는 발포 폴리우레탄이 선형탄성구간, 플레토 구간 및 덴시피케이션 구간에 따른 특성으로 볼 수 있다.

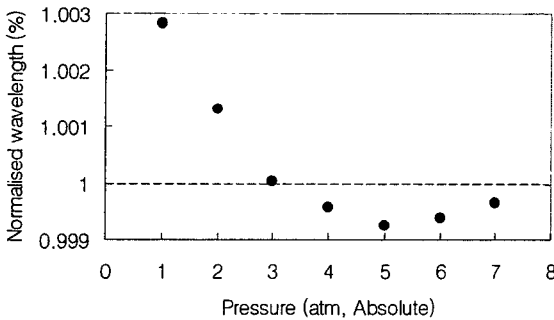


Fig. 8. Wavelength with respect to pressure.

직조 탄소섬유의 파장 (wavelength)의 성형압력에 대한 변화가 Fig. 8 에 나타나 있다. 파장의 경우 성형압력에 거의 영향을 받지 않는 근소한 차이를 나타내었으나, 5 기압을 기준으로 감소하다가 증가하는 경향을 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 직조 탄소섬유 에폭시 복합재료와 발포 폴리우레탄으로 이루어진 샌드위치 구조의 오토클레이브 성형시 압력에 따른 직조 탄소섬유의 토우형상을 나타내는 파라미터들의 변화를 유한요소해석으로 고찰하였다. 이를 위하여 발포 폴리우레탄의 온도에 따른 압축 시험을 수행하였고 성형해석에서는 에폭시 수지의 경화조건에 의

거하여 125°C 기준으로 성형압력이 1 기압에서 7 기압까지 1 기압씩 변화를 주면서 해석을 수행하였다. 토우형상 파라미터 중 샌드위치 구조의 평면방향 기계적 성질에 많은 영향을 미칠 수 있는 것으로 평가되는 크림프 각과 파장에 관해 살펴보았고, 크림프 각의 경우 성형압력이 4 기압을 기준으로 증가하다가 5 기압 이상에서는 거의 비슷한 값을 나타내었다. 파장의 경우 전 구간에 걸쳐서 거의 비슷한 것으로 나타났으나, 5 기압을 기준으로 감소하다가 증가하는 경향을 나타내는 것을 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 KISTEP (Korea Institute of Science and Technology Evaluation and Planning)에서 지원 받아 수행되었음 (과제번호 M102 DB 010002-03D0201-00213).

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) Meguid, S.A., "Crashworthiness of hydroformed composite structures," Confidential report, General Motors of Canada Limited, 1999.