

복합재료를 이용한 박스빔 형태 금형의 온도상승에 따른 치수 변화 예측에 관한 연구

김호상*[†] · 이찬희* · 이원기*

Study on the Prediction of Dimension Variation due to the Temperature Rises of the Composite Material and Box Beam Type Mold Steel

Ho-Sang Kim*[†], Chan-Hee Lee*, Won-Gi Lee*

ABSTRACT: Composite material and mold steel can be expanded differently with the temperature gradients during the forming process because their coefficients of thermal expansions are not the same. Therefore, in order to manufacture the product with accuracy, it is necessary to verify that the forming pressure on the surface of the composite material is maintained to the required level from the material supplier. In this paper, the pressure between the composite material and mold due to the temperature difference was predicted by finite element analysis and the accuracy of predicted value was verified by measuring the thermal expansions of mold steel by the ruler. The predicted value by finite element analysis is closely in agreement with one by the experiment within the required tolerance value of ± 0.05 mm.

초 록: 복합소재와 금형강 간에는 열팽창계수의 차이로 인하여 성형 과정 중의 온도 구배에 따라 다른 열팽창길이를 갖는다. 따라서 금형 내에 복합소재를 삽입하여 성형을 하는 경우 복합소재의 표면에 작용하는 압력이 소재의 업체에서 추천하는 성형 압력을 유지하는지를 확인할 필요성이 있다. 본 연구에서는 온도의 차이에 따른 복합소재와 금형 사이의 압력을 유한요소해석법을 사용하여 예측하였으며 열팽창에 따른 금형의 길이를 측정함으로써 해석의 정확성을 검증하였다. 각 온도에서의 해석과 실험값의 차이로써 매우 근사한 값을 얻을 수 있었으며, 틈새 예측 값의 목표치인 ± 0.05 mm 안에 들어오는 것을 확인하였다. 이를 통하여 복합소재에 작용하는 압력을 추정할 해석값이 신뢰할 수준임을 알 수 있었다.

Key Words: 복합재료(Composite material), 박스빔(Box beam), 금형(Mold), 온도상승(Temperature rise), 유한요소해석(Finite element analysis), 압력(Pressure)

1. 서 론

최근 들어 전자/기계부품의 제작 및 관련 장비의 경량화 및 동특성 향상에 대한 수요가 증가함에 따라 좀더 정밀하고 다양한 형태의 복합재료 부품의 개발 및 생산이 요구되

고 있다. 특히, 박스빔 형태를 갖는 복합재료 부품 개발의 경우 열팽창을 고려한 금형 치수의 결정 및 유한요소 해석 기법의 개발이 요구되고 있으나 관련 연구의 수행 및 실제 생산현장에서의 적용은 쉽게 이루어지고 있지 못한 현실이다. 이와 같은 박스빔 형태의 전기/기계부품에 복합재료를

Received 18 October 2017, received in revised form 26 December 2017, accepted 6 February 2018

*Institute for Advanced Engineering

*[†]Institute for Advanced Engineering, Corresponding author (E-mail: hoskim@iae.re.kr)

적용한 연구는 다수의 연구가 진행된 바 있다, Choi[1]와 Kim[2] 등은 전자부품의 대형화에 따라 생산장비에 탄소 복합재료를 적용한 기계부품 제작을 수행한 바 있으며 자중으로 인한 지나친 처짐을 방지하고 과도한 진동없이 정확히 반송하는 것을 목적으로 연구를 진행하였다. Oh 등[3]은 역시 산업용 복합재료 적용 부품을 설계, 제작한 바 있으며 관련 정적, 동적 해석 및 제작을 수행하여 알루미늄을 사용한 경우와 비교 해석하였다. 탄소섬유 강화 복합재료의 열변형 예측에 관한 연구들도 다수 진행된 바 있다. de Oliveira 등[4]은 복합재료 제조공정 중 내부 응력 형성에 대한 금형 재질의 영향에 관해 광학섬유 브랙 그레이팅을 사용하여 실험적으로 연구하였다. 또한 Choi[5], Yun[6]과 Barnes 등[7]은 탄소섬유 복합재료 보강재의 성형과정에서 발생하는 열적 특성과 열 변형 해석을 수행하였다. 대체적으로 실제 생산현장에서 사용될 수 있는 실용적인 결과와 제작공정에서의 온도변화에 따른 금형 부위 열팽창 해석에 관한 연구는 다소 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 실제 생산현장에서 많이 사용되는 박스 빔 형태의 복합소재 성형 과정에서 복합소재와 금형 사이에서 발생하는 압력을 유한요소해석을 통하여 예측함으로써 성형 제품의 제작 완성도를 높이고자 한다. 복합소재와 금형간 간에는 열팽창계수의 차이로 인하여 성형 과정 중의 온도 구배에 따라 다른 열팽창길이를 갖는다. 따라서 금형 내에 복합소재를 삽입하여 성형을 하는 경우 복합소재의 표면에 작용하는 압력이 소재의 업체에서 추천하는 성형 압력을 유지하는지를 확인할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 각 온도 구배 조건(온도의 차이)에 따른 복합소재와 금형 사이의 압력을 유한요소해석법을 사용하여 예측하였다. 또한, 이경우의 열팽창에 따른 금형의 폭(길이)를 측정함으로써 해석의 정확성을 검증하였다.

2. 복합소재 성형 응력 예측을 위한 유한요소 해석

복합재료의 성형은 금형(스틸)과 면재(복합재료)의 열팽창률 차이로 인해 생기는 압력과 높은 온도에 의해 성형이 이루어진다. 구체적으로는, 가열챔버(Heating chamber) 내에 Fig. 1과 같은 형태로 금형과 함께 복합재료를 위치시킨다. 가열챔버의 온도를 성형 사이클에 맞추어서 증가시키면 금형(스틸)과 복합재료의 열팽창률 차이로 인해 온도변화에 따른 변형량이 각각 다르게 나타나고, 이러한 변형량 차이로 압력이 발생한다. 본 연구에서는 복합소재의 성형 과정에서 복합소재와 금형 사이에서 발생하는 압력을 유한요소해석을 통하여 예측함으로써 성형 제품의 제작 완성도를 높이고자 한다. 복합소재와 금형간 간에는 열팽창계수의 차이로 인하여 성형 과정 중의 온도 구배에 따라 다른 열팽창길이를 갖는다. 따라서 금형 내에 복합소재를 삽

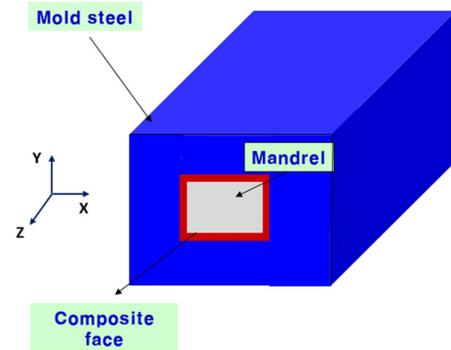


Fig. 1. Schematic diagram of CFRP and core

입하여 성형을 하는 경우 복합소재의 표면에 작용하는 압력이 소재의 업체에서 추천하는 성형압력을 유지하는지를 확인할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 각 온도 구배 조건(온도의 차이)에 따른 복합소재와 금형 사이의 압력을 유한요소해석법을 사용하여 예측하였다. 또한, 열팽창에 따른 금형의 폭(길이)를 측정함으로써 해석의 정확성을 검증하였다.

2.1 유한요소해석 준비

본 연구에서 사용한 유한요소해석 툴(Tool)은 MSC사의 PATRAN으로서 PRE/POST Processor로 사용되었으며 NASTRAN을 Solver로 사용하였다. 또한, 금형강 및 면재의 물성은 Table 1의 물성치를 사용하였다. 제품의 사이즈는 폭 60 mm, 높이 20 mm이며, 길이는 2200 mm이고 이때의 파이프 살 두께는 3 mm이다. 금형의 사이즈는 폭 200 mm, 높이 120 mm이며, 길이는 2400 mm이다. 각각 금형 및 복합소재를 3차원 Element를 사용하여 유한요소해석 툴에 의해 분할하였으며, 요소 당 절점은 8 Nodes를 사용하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 복합소재의 수지와 섬유는 에폭시와 탄소섬유이다.

2.2 열적구배

우수한 품질의 성형품을 확보하기 위해 공정에 적용되는 적절한 열적구배는 품질에 결정적 영향을 미친다. 소재

Table 1. Material properties of mold steel and composite faces

	Mold steel	Composite face
Density (kg/m ³)	7890	1600
Modulus of elasticity (GPa)	210	320 (Z-direction)
		56 (X-direction)
		56 (Y-direction)
Coefficient of thermal expansion (μm/m/°C)	12	0 (Z-direction)
		28 (X-direction)
		28 (Y-direction)

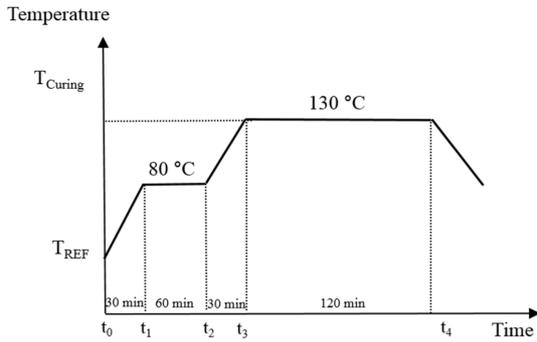


Fig. 2. Temperature cycle of the composite material pressing and curing

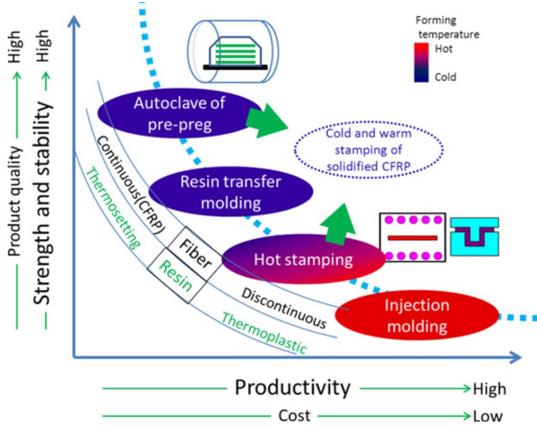
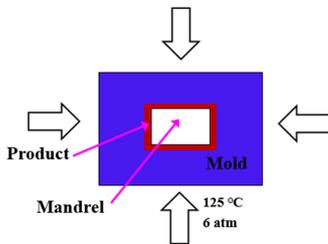


Fig. 3. Common process of the manufacturing CFRP [8]



1. Cutting and lamination of composite prepreps
2. Laminating on the mandrel and inserting in the mold
3. Autoclave molding
4. Demolding and post-treatment (washing)
5. Machining/Assembly

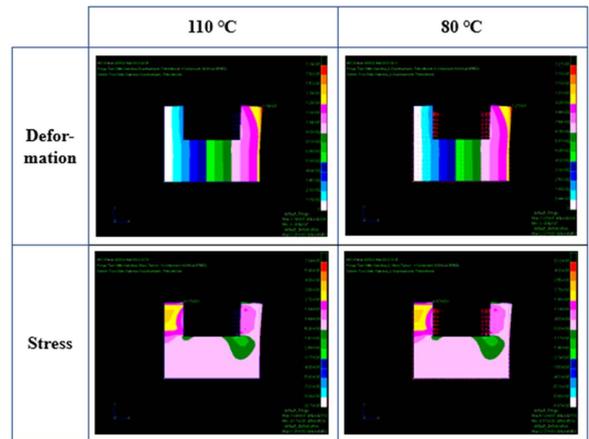
Fig. 4. The core layout and manufacturing process



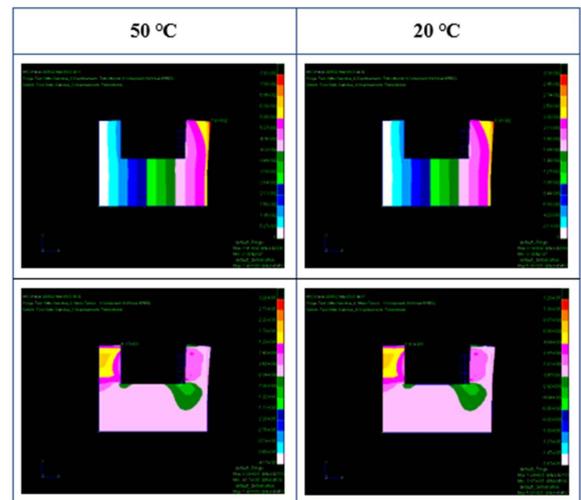
Fig. 5. High pressure heating chamber (Autoclave: 200°C, 10 atm)

업체에서 추천한 성형 조건에 따른 사이클에 따른 온도의 구배는 상온에서 80°C까지 30분 동안 상승하며, 80°C에서 약 1시간을 유지하고, 80°C에서 130°C까지 30분 동안 상승하고, 130°C에서 2시간을 유지하는 것이다. 또한, 성형 중의 압력은 약 6기압의 압력을 유지해 주어야 한다. 본 연구에서 사용한 각 압력 및 온도의 구배를 Fig. 2에 표시하였다.

일반적인 탄소섬유 강화 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)의 성형 과정은 Fig. 3과 같으며, 금형과 그 금형을 사용한 제품의 제조 과정은 Fig. 4와 같다. 박스빔 형태의 금형(Mold)를 제작하고 성형하고자 하는 제품(Product)을 Fig. 4와 같이 복합재료 프리프레그(Composite Prepreg)를 이용하여 맨드릴(Mandrel)에 적층 및 배치한다. 이후 Fig. 5의 오토클레이브(Autoclave)를 이용하여 성형을 수행하며 탈형 및 후처리(세정)을 거쳐 가공 및 조립을 통해 최종 제품의 제작을 수행하게 된다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 금형은 폐곡선과 같은 형상으로 제품의 표면 품질은



(a) Temperature difference 110°C and 80°C



(b) Temperature difference: 50°C and 20°C

Fig. 6. The contour plot of deformation and stress with finite element analysis

Table 2. Deformation and thermal stresses with various molding temperatures

Temperature difference (°C)	110	80	50	20
Deformation (mm)	0.17	0.13	0.08	0.03
Thermal stress (atm)	5.54	4.03	2.52	1.01

금형 내부의 온도와 그 표면의 작용 압력에 따라 결정된다.

2.3 유한요소해석 결과

금형 및 복합소재 각각의 유한요소 모델링은 3차원 요소를 사용하여 모델링을 수행하였으며, 4각형 박스빔 금형 단면 형상에 맞춰 3차원 유한요소 모델링을 수행하였다. 전술한 바와 같이 두 이종 재료 간의 열팽창계수의 차이는 복합소재와 금형 간의 응력을 유발한다. 이와 같은 열팽창계수의 차이로 인한 응력의 발생량을 이용하는 금형을 제작하여 성형 공정을 수행하게 된다. 특히 길이 방향으로 두 소재 간의 탈형을 위한 이형 제의 사용으로 열 응력이 발생하지 않으며, 폭 및 길이 방향으로만 열 응력이 발생하게 된다.

금형의 측면을 따라서 열 응력 및 길이 변화의 발생량을 확인할 수 있으며, 이에 대한 구배 곡선을 나타내면 온도 차이 110°C와 80°C인 경우는 Fig. 6(a), 온도 차이 50°C와 20°C 인 경우는 Fig. 6(b)와 같다.

Table 2는 성형온도에 따라 발생하는 금형의 측면에 발생하는 열응력 및 변형량을 나타낸다. 온도차 110°C일 때 길이 변화의 발생량은 약 0.17 mm, 이때 열응력은 약 5.54 기압으로 발생하는 것으로 예측되었다. 대체로 온도차가 작아짐에 따라 변형량과 열응력이 작아졌으며 재료업체의 요구 압력을 만족할 수 있는 온도차이를 결정할 수 있는 기본 데이터를 확보하였다.

2.4 유한요소해석 결과 고찰

전술한 바와 같이 일반적인 온도의 사이클은 상온 20°C에서 시작하여 성형의 완결 온도인 130°C까지 온도의 이력을 가진다. 따라서, 온도의 변화량에 따라 이종 재료인 복합소재와 금형 간의 열팽창계수의 차이로 인한 변형 및 응력이 발생하게 된다. 본 연구에서는 두 이종 재료의 열팽창계수의 차이에 의한 기계적인 응력의 발생량이 복합소재의 성형 추천 압밀압력(6기압)을 만족하는 가를 판단하기 위하여, 두 재료 간의 압력을 측정해야 하나, 성형 중의 제품 내부의 압력을 측정하는 것이 용이하지 않기 때문에 성형 전후의 온도에서의 금형의 폭을 측정하여 해석의 정확성을 판단하였다. 참고로 금형내부의 발생 열응력은 이종 재료 간에 서로 다른 열팽창률에 의해 서로 압축되는 경우, 금형 폭 변형량, 단면적, 두 재료의 강성 및 열팽창 계수를 포함하는 물성 등의 형상과 관련이 있으며[9] 본 연구의 해석결과를 검증하기 위해 금형의 폭에 대해 해석 변형량과

실험 변형량을 비교하였다.

Fig. 6과 Table 2에서 보는 바와 같이 실제 온도 사이클인 130-20°C의 온도 차인 110°C의 경우에 금형 및 복합소재의 면에 작용하는 압력이 5.54기압(상대압력 6.54기압)으로 소재 업체의 추천 압력인 6기압을 상회하는 값을 확인할 수 있다. 따라서 금형과 복합소재간에 간격을 거의 '0'의 수준으로 딱딱하게 삽입하는 것이 추천 압력을 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 초기 금형 인입 온도는 20°C를 유지하는 것이 유리하다.

3. 실험적인 검증

전 절에서 상술한 바와 같이 금형 내부의 압력을 측정하는 것이 용이하지 않으므로 각 온도에서의 금형 폭을 측정함으로써 금형 내부의 발생 열응력을 역으로 추정할 수 있다. Table 3는 각 온도에서의 해석과 실험값의 차이로써 매우 근사한 값을 얻을 수 있었으며, 틈새 예측 값의 목표치인 ± 0.05 mm 안에 들어오는 것을 확인하였다. 이를 통하여 복합 소재에 작용하는 압력을 추정해 해석값이 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 본 연구 결과를 이용하여 제작한 박스빔 형태의 복합소재 제품의 그림을 나타낸다.

Table 3. Comparison of the mold widths estimated by finite element analysis and measured in the autoclave mold experiment in cases of before and after molding

Temperature difference 110 °C	Before molding	After molding
Mold width by finite element analysis (mm)	60	60.17
Mold width in autoclave mold experiment (mm)	60	60.15

**Fig. 7.** The CFRP product manufactured by box beam type mold

4. 결 론

본 연구에서는 온도의 차이에 따른 박스빔 형태의 금형과 복합소재 사이의 압력을 유한요소해석법을 사용하여 예측하였으며 열팽창에 따른 금형의 길이를 측정함으로써 해석의 정확성을 검증하였다. 각 온도에서의 해석과 실험값의 차이로써 매우 근사한 값을 얻을 수 있었으며, 틈새 예측 값의 목표치인 ± 0.05 mm 안에 들어오는 것을 확인하였다. 이를 통하여 복합소재에 작용하는 압력을 추정할 수 있었으며 향후 우수한 품질의 성형품의 생산에 기여할 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 민·군기술협력사업(Civil-Military Technology Cooperation Program)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Choi G.H., Han C.W., and Lee S.R., "The Study on the Development of Composite Robot Hand for TFT-LCD Glass Transport," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 26, No. 7, 2002, pp. 1357-1365.
2. Kim D.I., and Chang, S.H., "Parametric Study on the Design of Sandwich Beams and Plates for Machine Tool Structures," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 15, No. 1, 2006, pp. 39-48.
3. Oh, J.H., Lee, D.G., and Kim, H.S., "Composite Robot end Effector for Manipulating Large LCD Glass Panels," *Composite Structures*, Vol. 47, Issues 1-4, 1999, pp. 497-506.
4. de Oliveira R., Lavanchy, S., Chatton, R., Costantini, D., Michaud, V., Salathe, R., and Manson J.-A.E., "Experimental Investigation of the Effect of the Mold Thermal Expansion on the Development of Internal Stresses during Carbon Fiber Composite Processing," *Composites: Part A*, Vol. 39, Issue 7, 2008, pp. 1083-1090.
5. Choi, S.K., and Park, S.M., "A Study on Thermal Property of Carbon-epoxy Composites," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 29, No. 5, 2001, pp. 58-66.
6. Yun, K.J., Kim, P.J., Kim, T.W., and Jeon, E.J., "Analysis of Thermal Deformation in Forming Process of Carbon Fiber Composite Stiffener," *Proceedings of 1994 Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, Korea, April 1994, pp. 194-198.
7. Barnes, J.A., Byerly, M.C., LeBouton, M.C., and Zahlan, N., "Dimensional Stability Effects in Thermoplastic Composites - Towards a Predictive Capability," *Composites Manufacturing*, Vol. 2, No. 3-4, 1991, pp. 171-178.
8. Yanagimoto, J., and Ikeuchi, K., "Sheet Forming Process of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Lightweight Parts," *CIRP Annals*, Vol. 61, Issue 1, 2012, pp. 247-250.
9. James M. Gere, *Mechanics of Materials*, Sixth Edition, Thomson Learning, Inc., 2004.