Composites Research

Vol. 39, No. 5, 600-607 (2026)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2026.39.5.600
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

프레스 포밍 공정 기반 열가소성 복합재 제작 시 발생하는 공정유도변형의 열-기계적 유한요소 해석

이중원* · 이우주* · 곽병수* · 지성하*,** · 주현우** · 임형준*†

Thermo-mechanical Finite Element Analysis of Process-induced Deformation during Press Forming of Thermoplastic Composites

Joongwon Lee*, Woo-Ju Lee*, Byeong-Su Kwak*, Sung-Ha Ji*,**, Hyun-Woo Ju**, Hyoung Jun Lim*†

ABSTRACT: In this study, a crystallization-coupled thermo-mechanical finite element model was developed to predict process-induced deformation, namely spring-in, during the press forming of thermoplastic composites. The novelty of the model is that PPS crystallization kinetics, crystallization heat generation, crystallinity-dependent matrix properties, temperature-dependent thermal expansion, and homogenized composite properties are linked in a single process-analysis flow. An aircraft rib structure was analyzed, and the predicted deformation was used to design a compensated mold by inverse deformation. The compensated mold was manufactured and evaluated using 3D scan measurements; the average angular difference between the simulation and fabricated product was 0.56°. These results show that the proposed approach can predict process-induced deformation before mold fabrication and reduce trial-and-error mold correction for thermoplastic composite parts.

초 록: 본 연구에서는 프레스 포밍 공정 중 열가소성 복합재에 발생하는 spring-in을 예측하기 위해 결정화 연계 열-기계적 유한요소 해석 모델을 구축하였다. 본 모델의 차별성은 PPS 수지의 결정화 동역학, 결정화 발열, 결정화도 의존 수지 물성, 온도 의존 열팽창, 기하학적 균질화 기반 복합재 물성 갱신을 하나의 공정 해석 흐름으로 연계한 점에 있다. 항공기용 리브 형상을 대상으로 성형 및 냉각 거동과 탈형 후 변형을 예측하였으며, 해석 결과를 이용하여 역변형이 적용된 보정 몰드를 설계·제작하였다. 제작품의 3D scan 측정값과 해석값을 비교한 결과 평균 각도 오차는 0.56°로 나타났다. 따라서 제안한 해석 절차는 열가소성 복합재 프레스 포밍 부품의 공정유도변형을 사전에 예측하고 반복적인 몰드 수정 과정을 줄이는 데 활용될 수 있다.

Key Words: 열가소성 복합재(Thermoplastic composite), 프레스 포밍(Press forming), 공정유도변형(Process-induced deformation), 유한요소 해석(Finite element analysis)

1. 서 론

복합재는 높은 비강성을 갖기 때문에 항공우주산업을 비롯한 다양한 첨단산업 분야에서 널리 활용되고 있다[1-4]. 그중 열가소성 복합재는 열경화성 복합재와 달리 재사용이 가능하여 친환경적이며, 성형 후에도 후가공이 가능하

Received 3 July 2026, received in revised form 25 July 2026, accepted 26 October 2026

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Jinju
**Korea Aerospace Industries, Ltd.
†Corresponding author (E-mail: hj.lim@gnu.ac.kr)

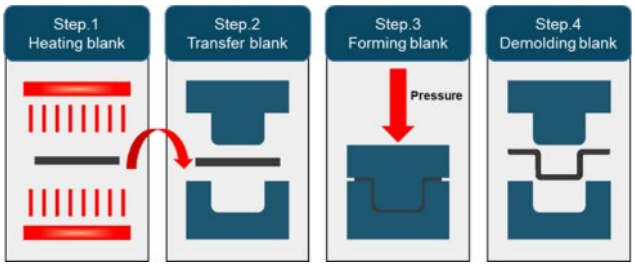


Fig. 1. Overview of the Press Forming Process

다는 장점을 가진다[5,6]. 또한 유도 용접 등의 접합 공정을 적용할 수 있어 구조물의 경량화에 유리하며, 볼트 체결을 위한 홀 가공이 요구되지 않아 응력 집중에 의한 파손 가능성을 줄일 수 있다.

복합재는 AFP, 오토클레이브, RTM 등 다양한 공정을 통해 제작될 수 있으나, 최근에는 대량생산성과 비용 절감 측면에서 프레스 포밍 공정이 주목받고 있다[7-10]. 본 연구에서 고려한 프레스 포밍 공정의 개요는 Fig. 1에 나타내었다.

프레스 포밍 공정은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 먼저 IR 히터를 이용하여 블랭크를 목표 온도까지 가열하는 단계로 시작된다. 이때 블랭크는 수지의 용융 온도 이상으로 가열되며, 수지는 액체와 유사한 거동을 보이게 된다. 이후 가열된 블랭크를 몰드로 이송한 뒤, 상·하부 몰드를 이동시켜 제품 형상으로 성형한다. 성형 과정에서는 상부 몰드를 통해 압력을 가한 상태에서 냉각이 진행되며, 블랭크의 고화가 진행된다. 이후 목표 온도까지 냉각이 완료되면 몰드와 압력을 제거하고 탈형을 수행한다.

그러나 대량생산성과 비용 절감 측면에서 장점을 가지는 프레스 포밍 공정은 몇 가지 문제점을 가진다[11,12]. 프레스 포밍 공정은 높은 온도와 압력을 기반으로 수행되기 때문에 성형 및 냉각 과정에서 제품 내부에 잔류응력이 발생하게 된다. 이후 탈형 과정에서 이러한 잔류응력이 해소되면서 spring-in과 같은 공정유도변형이 발생하게 된다. 이는 최종 제품의 치수가 목표 형상과 달라지는 원인이 되며, 치수 안정성 저하와 조립 및 체결 과정에서의 문제를 야기할 수 있다. 또한 기존의 trial and error 기반 제작 방식에서는 목표 치수를 만족하기 위해 몰드의 반복적 수정이 필요하여, 전체 제품 개발 비용과 시간이 증가할 수 있다.

본 연구에서는 프레스 포밍 공정에서 발생하는 공정유도변형을 유한요소 해석을 통해 사전에 예측하고, 해석 결과를 바탕으로 몰드에 역변형을 부여함으로써 목표 치수를 만족하는 부품을 제작하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 결정화도 예측, 결정화 발열, 결정화도 의존 수지 물성, 온도 의존 열팽창 및 5-harness satin 구조의 균질화 물성 갱신을 하나의 열-기계적 해석 절차로 연계하였다. 이러한 통합 모델을 통해 성형, 냉각 및 탈형 단계에서 잔류응력 축적과 해소, spring-in 발생 과정을 순차적으로 계산하고, 예측 변형량을 이용하여 보정 몰드를 설계하였다. 또한 역변형이 적용된 몰드를 제작하고 3D scan 기반 제작 결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다.

본 연구의 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, 열가소성 수지의 결정화, 발열 및 물성 변화를 프레스 포밍 PID 해석에 직접 연계하였다. 둘째, 균질화된 복합재 물성을 공정 중 갱신하여 잔류응력 및 spring-in 예측에 반영하였다. 셋째, 예측 결과를 실제 보정 몰드 설계와 제작품 검증까지 연결하여 평균 0.56° 수준의 각도 오차로 모델의 적용 가능성을 확인하였다. 이를 통해 반복적인 몰드 수정 및 trial and error 기반 설계 과정을 줄이는 데 기여할 수 있다.

2. 복합재 재료 거동

프레스 포밍 공정 중 발생하는 변형을 정확하게 예측하기 위해서는 복합재 재료 물성의 변화를 정밀하게 반영할 필요가 있다. 열가소성 복합재는 냉각 과정에서 결정화 거동을 보이며, 이에 따라 수지의 기계적 물성 변화와 결정화에 의한 내부 발열이 발생한다. 본 연구에서는 이러한 거동을 고려하기 위해 user subroutine을 활용하여 복합재의 결정화 거동, 결정화에 따른 수지의 발열, 수지의 기계적 물성 변화, 그리고 수지 물성 변화에 따른 복합재의 등가 기계적 물성 변화를 해석 모델에 반영하였다.

2.1 결정화도 및 결정화에 따른 재료 거동

열가소성 복합재는 냉각 시 분자 사슬이 정렬되며 재료의 기계적 물성이 증가하는 결정화 거동이 나타난다. 또한, 결정화의 정도를 나타내는 결정화도는 냉각 속도에 따라서 달라지게 되는 특징을 가진다. 본 연구에서는 이러한 결정화도를 고려하기 위해 Velisaris[13]의 연구를 참조하여 핵의 성장과 생성을 동시에 고려한 동역학적 현상학 모델을 적용하였으며 아래의 식 (1), (2)를 통해 결정화도를 모사하였다.

$$X_r = \frac{X(T)}{X_{c\infty}} = w_1 F_{c_1} + w_2 F_{c_2} \tag{1}$$

여기서 X_r은 수지의 상대 결정화도를 나타내며 0~1 사이의 값을 가진다. $X(T)$는 수지의 현재 결정화도를 의미하며, X_{c_∞}는 수지의 완전 결정화 상태의 결정화도를 나타낸다. w_i는 가중치를 나타내며, F_{c_i}는 핵 생성 및 핵 성장의 메커니즘을 나타내며 식 (2)에 의해 도출된다.

$$F_{c_i} = 1 - \exp\left\{-C_{1_i}\int_0^t T \exp\left[\frac{-C_{2_i}}{T-T_g-T_{ci}} - \frac{C_{3_i}}{T\left(T_{m_i}-T\right)^2}\right] n_i \tau^{n_i-1} \mathrm{d}\tau\right\} \tag{2}$$

여기서 C_{1_i}는 결정화 속도의 온도, C_{2_i}는 결정성장의 온도 의

Table 1. Optimized parameters using the matlab fmincon function

Parameter	Mechanism (i=1)	Mechanism (i=2)
w_i	1.0003	0.0071
n_i	5.2262	1.1268
C_{1_i}	1.3476×10^{-7}	5.0926
C_{2_i}	7139.85	1.85×10^{4}
C_{3_i}	1.55×10^{7}	79.2

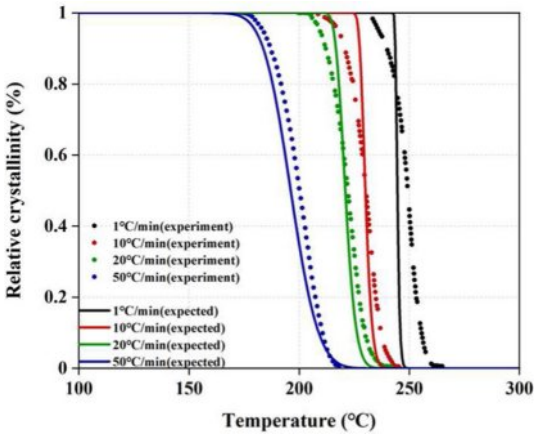


Fig. 2. Ste-Marie's test data and the MATLAB-optimized relative crystallinity curve used in this study

존, C_{3_i}는 각 메커니즘별 핵 성장을 나타낸다. T, T_g, T_{m_i}, T_{c_i}는 각각 현재 온도, 수지의 유리전이 온도, 수지의 용융 온도 및 확산항을 제어하는 경험적으로 결정된 계수를 의미한다. 또한 n_i는 실험적으로 특성화된 avrami 계수를 의미한다.

본 연구에서는 Ste-Marie[14]가 제시한 PPS 수지의 냉각 속도별 상대 결정화도 실험 데이터를 기반으로 MATLAB의 fmincon 함수를 이용한 최적화를 수행하여 현상학적 모델의 파라미터를 도출하였으며 이를 Table 1에 나타내었다.

또한 Ste-Marie[14]의 실험 결과와 본 연구에서 도출한 모델을 통해 계산된 상대 결정화도 변화를 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 식 (1), (2) 및 최적화 파라미터를 user subroutine USDFLD를 통하여 해석에 고려하였다.

또한 열가소성 복합재는 결정화가 일어나는 과정에서 발열이 발생하게 된다. PPS 소재의 내부 발열을 모사하기 위해서 Barocio[15]의 연구를 참조하여 내부 발열을 모사하였으며 이를 식 (3)에 나타내었다.

$$\dot{q} = \rho H^* \frac{dx(T)}{dt} \tag{3}$$

여기서 H^* 결정화에 의해 발생하는 단위 질량당 결정화 열을 의미하며 문헌[14]의 값을 참고하여 150.4 J/g을 적용하였다. $\dot{q}$은 체적 열 발생량을 의미한다.

수지의 기계적 물성 역시 결정화가 진행됨에 따라 변화한다. Brauner[16]는 실험을 통해 상대 결정화도가 50%에 도달하는 시점이 수지의 점성이 급격히 증가하는 지점과 일치함을 확인하였다. 이를 바탕으로 상대 결정화도에 따른 수지의 기계적 물성 변화를 모사하였으며, 해당 관계를 식 (4)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} E_m &= E_{m(\theta=0)} \qquad 0 \le X_r \le 0.5 \\ E_m &= E_{m(\theta=1)} \times (2X_r - 1) \quad 0.5 < X_r \le 1 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $E_{m(\theta=0)}$는 액체 상태의 수지의 탄성계수이며 $E_{m(\theta=1)}$은 고화가 완료된 후의 수지의 탄성계수를 의미한다. 또한 액체 상태 수지의 탄성계수는 문헌[17,18]의 가정을 참고하여 $E_{m(\theta=1)}$의 1/1000으로 가정하였다. 수지는 등방성 물성을 가진다고 가정하였으며 이를 바탕으로 수지의 탄성계수를 식 (5)를 통하여 모사하였다.

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} \tag{5}$$

앞서 제시한 수식을 바탕으로 열가소성 수지의 결정화 과정에서 발생하는 내부 발열은 subroutine HETVAL을 통해 해석 모델에 반영하였다. 결정화도에 따른 수지의 기계적 물성 변화는 subroutine UMAT을 통해 고려하였다. 또한 온도에 따른 열팽창 계수의 변화는 subroutine UEXPAN을 통해 고려하였다.

2.2 균질화 및 복합재 기계적 물성 평균화

수지의 기계적 물성은 결정화도에 따라 공정 중 지속적으로 변화하며, 이에 따라 복합재의 기계적 물성 또한 함께 변화하게 된다. 본 연구에서는 이러한 거동을 해석 모델에 반영하기 위해 기하학적 균질화 기법을 적용하였으며, 수지의 물성 변화에 따른 복합재의 등가 기계적 물성 변화를 고려하였다. 기하학적 균질화 기법은 문헌[19]을 참조하여 적용하였으며, 이를 통해 수지의 물성 변화에 따른 복합재의 등가 기계적 물성을 산출하였다. 기하학적 균질화의 기본 개념을 Fig. 3에 나타내었으며, 기하학적 균질화를 위한 5-하네스 사틴(5-harness satin) 구조의 기본 구조를 Fig. 4에 나타내었다. 또한 본 연구에서 사용한 기하학적 균질화 관계식은 식 (6)-(14)에 나타내었다.

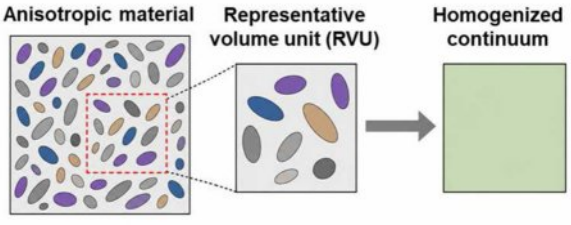


Fig. 3. Basic Concepts of Mechanical Property Homogenization

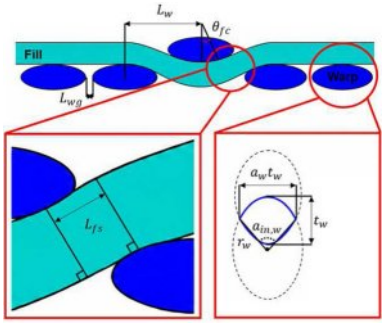


Fig. 4. Structure of 5-harness satin for geometric homogenization

$$r_w = \frac{t_w}{4}(1 + a_w^2);\ a_{w,in} = 2\sin^{-1}\left(\frac{2a_w}{a_w^2+1}\right) \tag{6}$$

여기서 r_w는 원사 반지름, $a_{w,in}$는 내각을 의미하며, a_w는 단면 계수, t_w는 원사의 두께를 각각 의미한다. 또한 a_w 및 t_w는 단면 관찰 시험 결과를 바탕으로 본 수식에 대입하였다.

$$A_w = r_w^2(a_{w,in} - \sin a_{w,in}) \tag{7}$$

A_w는 단면적을 의미하며 위의 기하학적 수식을 통해 도출된다.

$$L_{fs} = \sqrt{(L_w)^2 - 2t_w(2r_w + t_f) + t_w^2} \tag{8}$$

L_{fs}는 크림프 각도에 의해 형성되는 사선부의 길이를 의미하며, 일정한 경사를 갖는 직선 형태의 특징을 가진다.

$$L_w = a_w t_w + L_{wg};\ L_{w_{total}} = 5L_w;\ L_{w,str} = 4L_w \tag{9}$$

L_w는 섬유 중심 사이 거리, $L_{w_{total}}$는 섬유 전체의 길이, $L_{w,str}$는 글로벌 좌표계와 평행한 섬유 방향을 가지는 섬유 직선부의 길이를 의미한다.

$$\theta_{fc} = sin^{-1}\left(\frac{2r_w+t_f}{\sqrt{(L_w)^2-(2r_w+t_f-t_w)^2}}\right) - tan^{-1}\left(\frac{2r_w+t_f-t_w}{\sqrt{L_w}}\right) \tag{10}$$

θ_{fc}는 크림프 각도를 의미하며, 섬유가 글로벌 좌표계 방향에서 벗어나 사선부 및 곡선 형태를 형성할 때 발생하는 기울기 각도로 정의된다. 해당 각도는 섬유의 굴곡 정도를 나타내며, 크림프 형상에 따른 섬유 경로와 전체 길이 산정 및 최종 복합재 기계적 물성에 영향을 미친다.

$$v_w = 4A_w[(2r_f + t_w)\theta_{fc} + L_{ws}] \tag{11}$$

v_w는 유닛셀 내의 Warp 섬유의 부피를 의미한다.

$$v_u = 4(t_w + t_f)L_w L_f;\ V_f = \left(\frac{v_w+v_f}{v_u}\right)k \tag{12}$$

v_u는 유닛셀의 부피, V_f는 섬유의 부피분율을 의미한다.

$$S_w = T_w^T S_c T_w;\ S_w^{ec} = \frac{1}{\theta_{wc}}\int_0^{\theta_{wc}} S_w d\theta \tag{13}$$

S_w^{ec}는 크림프부 강성 행렬, T_w는 전치 행렬, S_c는 로컬 좌표계의 강성 행렬, S_w는 글로벌 좌표계의 강성 행렬을 의미한다. 로컬 좌표계에서 정의되는 크림프부 및 사선부의 강성 행렬을 전치 행렬 및 크림프 각도를 바탕으로 글로벌 좌표계의 강성 행렬로 변환할 수 있다.

Table 2. Mechanical properties after complete crystallization calculated using the homogenization formula

Properties		Unit	Value
Elastic modulus	E_1	GPa	62.191
	E_2		62.191
	E_3		10.948
Shear modulus	G_{12}	GPa	8.185
	G_{13}		6.204
	G_{23}		6.204
Poisson's ratio	ν_{12}	-	0.046
	ν_{13}		0.368
	ν_{23}		0.368

Table 3. Pseudo-code for the process-induced deformation (PID) analysis flow

Algorithm 1: PID analysis flow with equation references

Data: geometry, lay-up, T(t), p(t), material and process constants

Result: residual stress, PID/spring-in, and compensated mold angle

Initialize FE model, boundary conditions, and state variables;
Set Step 1: molding/cooling under pressure;
for each time increment do
  Read element temperature and cooling rate;
  Update relative crystallinity using Eqs. (1) and (2);
  Calculate crystallization heat generation using Eq. (3);
  Update PPS mechanical properties using Eqs. (4) and (5);
  Update temperature-dependent CTE and material state;
  Update composite properties using Eqs. (6)-(14);
  Compute thermal/crystallization shrinkage and residual stress;
  Solve thermo-mechanical equilibrium and store states;
end
Set Step 2: demolding and release;
for each release increment do
  Release pressure and selected constraints;
  Redistribute residual stress after constraint release;
  Evaluate displacement field and spring-in angle;
end
Apply inverse deformation to the compensated mold design.

$$S_w^e = \lambda_{wc} S_w^{ec} + (1-\lambda_{wc}) S_w;\ \lambda_{wc} = \left(\frac{2r_f + t_w}{L_w}\right) \sin\theta_{wc} \quad (14)$$

λ_{wc}는 길이 분율, S_w^e는 사선부, 크림프부 및 직선부의 길이 분율을 바탕으로 균질화된 대표 체적 요소의 강성 행렬을 각각 의미한다. 본 수식 및 단면 관찰을 통해 얻어진 기본 매개변수 $a_w t_w$ 810.676μm t_w 80.734μm를 대입하여 물성의 균질화를 수행하였으며, 도출된 결정화가 완료된 후의 기계적 물성을 Table 2에 나타내었다.

위의 균질화 수식은 해석 모델에 반영하였으며, 온도 이력에 따른 결정화도 갱신, 결정화 발열 및 물성 갱신, 열수축과 잔류응력 계산, 탈형 후 spring-in 예측으로 이어지는 공정유도변형(PID) 해석 흐름을 Table 3에 나타내었다.

Table 4. Mechanical properties of the T300 material used in this study

Properties		Unit	Value
Elastic modulus	E_1	GPa	230
	E_2		15
	E_3		15
Shear modulus	G_{12}	GPa	15
	G_{13}		15
	G_{23}		7
Poisson's ratio	ν_{12}	-	0.26
	ν_{13}		0.26
	ν_{23}		0.3
Density	ρ	Kg/m^3	1,760

Table 5. Mechanical properties of the PPS material used in this study

Properties		Unit	Value
Elastic modulus	E	GPa	3.8
Shear modulus	G	GPa	1.397
Poisson's ratio	ν	-	0.36
Density	ρ	Kg/m^3	1,350

Table 6. Thermal properties of the TC1100 material used in this study

Properties		Unit	Value
Thermal conductivity	k_1	W/m·K	2.963
	k_2		2.963
	k_3		0.362
Coefficient of Thermal expansion	CTE_1	μm/m·K	6.25
	CTE_2		7.15
	CTE_3		137.9 (330~90?)
			57.6(90~20°C)
Specific heat	C_p	J/kg·K	1320 (310°C)
			483 (23°C)
Density	ρ	Kg/m^3	1,550
Fiber volume fraction	V_f	-	0.5

2.3 재료 물성

본 연구에서는 Toray사의 TC1100 T300/PPS를 해석 및 제작 대상 소재로 사용였다. 시뮬레이션에 필요한 재료 물성은 문헌조사[14,20-23]를 통해 도출하였으며, T300 섬유의 기계적 물성을 Table 4에, PPS 수지의 물성을 Table 5에, TC1100 복합재의 열적 물성을 Table 6에 각각 나타내었다.

3. 유한요소 시뮬레이션 모델

3.1 시뮬레이션 형상 및 모델

시뮬레이션은 상용 유한 요소 해석 소프트웨어인 Abaqus를 사용하여 수행하였다. 해석은 총 2개의 step으로 구성하였다. Step 1에서는 프레스 포밍 공정 중 molding 과정을 모사하였으며, Step 2에서는 탈형 이후 잔류응력에 의해 발생하는 변형을 모사하였다. 전체 시뮬레이션 개요 및 구속 조건, 하중 조건을 Fig. 5에 나타내었다.

Step 1에서는 복합재의 하부 표면을 구속한 상태에서 3620초 동안 상부 표면에 0.97 MPa의 압력을 부여하였다. Step 2에서는 300초 동안 복합재 하부 표면의 4개 지점을 구속한 상태에서 압력 조건을 해제하여, 잔류응력 해소에 따른 변형이 발생하도록 하였다.

복합재에 부여된 온도 및 공정 조건은 실제 제작 공정을 기반으로 설정하였다. 먼저 복합재의 초기 온도는 310℃로 부여하였다. 이후 복합재 표면에 온도 프로파일을 적용하여 공정 중 발생하는 온도 변화를 모사하였으며, 적용된 온도 프로파일은 Table 7에 나타내었다.

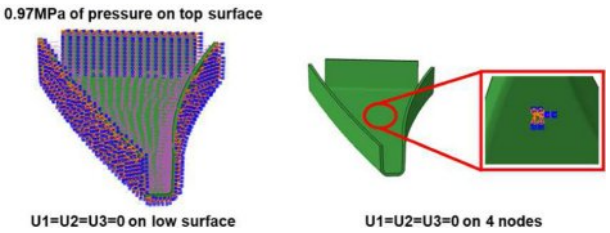


Fig. 5. Overview of the overall simulation, constraints, and load conditions

Table 7. Composite surface temperature profile

	Temperature	Step time
Translation (Initial condition)	330°C ~ 310°C	-
Mold contact (Step 1)	310°C ~ 180°C	20 Sec
Cooling (Step 1)	180°C ~ 120°C	3600 Sec
Demolding (Step 2)	120°C ~ 20°C	300 Sec

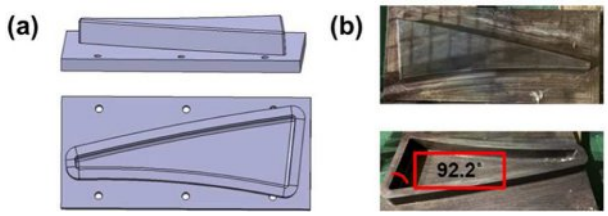


Fig. 6. (a) Design mold (b) actual mold

3.2 몰드 역변형 설계

90°로 설계된 복합재 립(Rib) 형상에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과, 약 2.2°의 spring-in이 발생하는 것으로 예측되었다. 이를 바탕으로 90° 몰드 형상에 2.2°의 역변형을 부여하여, 최종적으로 92.2°의 곡률 각도를 갖는 보정 몰드를 설계하였다. 설계된 몰드 형상은 Fig. 6에 나타내었다.

4. 시뮬레이션 결과 및 모델 검증

4.1 시뮬레이션 결과 및 분석

역변형이 적용된 복합재 립(Rib) 형상을 시뮬레이션 모델에 반영하여 해석을 수행하였다. 해석의 주요 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

해석 결과, 평균 약 1.836°의 spring-in 변형이 발생하는 것으로 예측되었다. 기존 90° 기준 몰드에서는 약 2.2° 수준의 spring-in 변형이 나타났으나, 역설계가 적용된 몰드의 경우 곡률부 각도 및 형상 조건이 변화함에 따라 spring-in 변형량 역시 달라진 것으로 판단된다. 또한 최대 변위는 1.65 mm, 최대 strain은 0.00219로 나타났다.

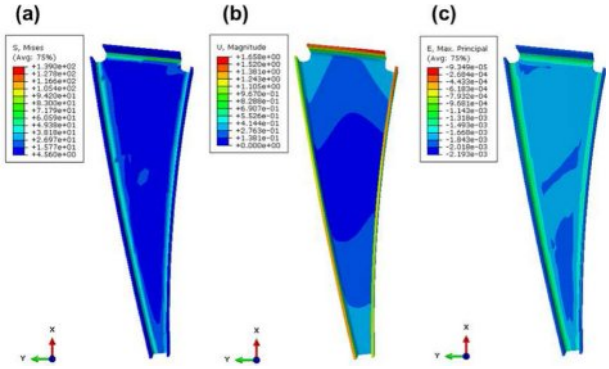


Fig. 7. Simulation results: (a) stress distribution (b) strain distribution (c) displacement of the final part

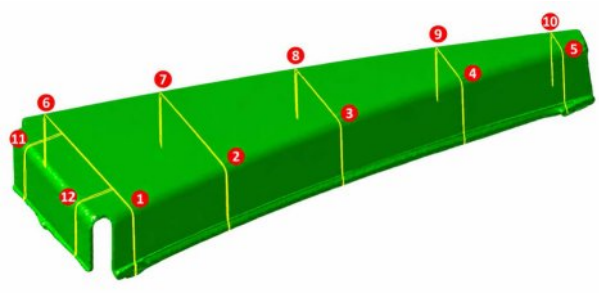


Fig. 8. Final product 3D scan location

Table 8. Comparison of Simulation and Production Results

Measurement point	3D scan result	Simulation result	Error
Point (1)	89.899°	90.335°	0.435°
Point (2)	89.908°	90.465°	0.557°
Point (3)	89.917°	90.453°	0.536°
Point (4)	90.062°	90.393°	0.331°
Point (5)	90.081°	90.366°	0.285°
Point (6)	89.641°	90.361°	0.72°
Point (7)	89.533°	90.309°	0.776°
Point (8)	89.678°	90.351°	0.673°
Point (9)	89.670°	90.336°	0.666°
Point (10)	89.527°	90.308°	0.781°
Point (11)	89.949°	90.368°	0.419°
Point (12)	89.842°	90.320°	0.478°
Average	89.809°	90.364°	0.555°

해석 결과를 검증하기 위해 실제 제작을 수행하였으며, 제작품의 최종 각도는 3D scan을 통해 측정하였다. 또한, 최종 제작품의 3D scan 측정 위치를 Fig. 8에 나타내었다.

총 12개 지점에 대하여 3D scan 값과 해석값을 비교하였으며, 그 결과를 Table 8에 나타내었다.

해석 결과와 제작 결과를 비교한 결과, 평균 오차는 약 0.56°로 나타났으며, 이를 통해 본 해석 모델이 제작품의 spring-in 변형을 비교적 신뢰성 있게 예측할 수 있음을 확인하였다. 다만 본 해석에서는 균일한 압력 조건과 온도 프로파일을 적용하였기 때문에 실제 성형 공정에서 발생하는 몰드와 복합재 간의 접촉 상태 변화, 국부 압력 집중, 공기 대류에 의한 냉각 효과 등을 충분히 반영하지 못한 한계가 있으며 이로 인하여 spring-in에 일부 오차가 나타나며 실측값과 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 향후에는 몰드를 포함한 해석 모델을 구축하고, 공기 대류 조건을 함께 고려함으로써 해석 모델의 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 프레스 포밍 공정 중 발생하는 공정유도 변형을 예측하기 위해 결정화 연계 열-기계적 유한요소 모델을 구축하였다. 제안 모델은 PPS 결정화 동역학, 결정화 발열, 결정화도 의존 수지 물성 변화, 온도 의존 열팽창 및

기하학적 균질화 기반 복합재 물성 갱신을 통합하여 성형, 냉각 및 탈형 단계의 잔류응력과 spring-in 변형을 계산하도록 구성하였다.

해석 결과를 바탕으로 90° 리브 형상에 대해 2.2°의 역변형을 적용한 92.2° 보정 몰드를 설계·제작하였다. 제작품의 12개 지점 3D scan 측정값과 해석 결과를 비교한 결과 평균 각도 오차는 약 0.56°로 나타났으며, 이는 제안 모델이 프레스 포밍 공정에서 발생하는 공정유도변형을 실용적으로 예측할 수 있음을 보여준다.

본 연구의 기여는 공정 중 재료 상태 변화와 몰드 역변형 설계를 하나의 해석 절차로 연결하고, 이를 실제 제작품과 비교하여 검증한 데 있다. 제안 모델은 열가소성 복합재 부품의 치수 안정성 향상과 반복적인 몰드 수정 감소에 활용될 수 있으며, 향후 국부 접촉 조건, 압력 분포 및 공기 대류 냉각 효과를 반영하면 예측 정확도를 추가로 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2024-00397400)이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Bai, Q., Hao, Q., Dai, H., Chen, Y., and Dai, N., "A Review on Integrated Design and Manufacturing Technologies for Continuous Fiber-reinforced Polymer Composite Lightweight Structures in Aerospace," *Thin-Walled Structures*, Vol. 217, 2025, pp. 113750.
2. Zhang, J., Lin, G., Vaidya, U., and Wang, H., "Past, Present and Future Prospective of Global Carbon Fibre Composite Developments and Applications," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 250, 2023, pp. 110463.
3. Xu, X., Peng, G., Zhang, B., Shi, F., Gao, L., and Gao, J., "Material Performance, Manufacturing Methods, and Engineering Applications in Aviation of Carbon Fiber Reinforced Polymers: A Comprehensive Review," *Thin-Walled Structures*, Vol. 209, 2025, pp. 112899.
4. Liu, J., Quan, D., Scarselli, G., Alderliesten, R., Wang, H., and Zhao, G., "Developments and Future Prospects of Welding Technology for Carbon Fiber Thermoplastic Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 297, 2025, pp. 112314.
5. Xing, M., Fu, S., Shembekar, A.P., and Ray, D., "Recycling of Carbon Fibre/PEKK Laminates via Glass Transition Assisted Mechanical Delamination," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 310, 2026, pp. 113155.
6. Özbek, Y., Al-Nadhari, A., Eskizeybek, V., Yıldız, M., and Şaş, H.S., "Influence of Strand Size and Morphology on the Mechanical Performance of Recycled CF/PEKK Composites: Harnessing Waste for Aerospace Secondary Load-bearing Applications," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 296, 2025, pp. 112232.
7. Brooks, R.A., Wang, H., Ding, Z., Xu, J., Song, Q., Liu, H., Dear, J.P., and Li, N., "A Review on Stamp Forming of Continuous Fibre-reinforced Thermoplastics," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 5, No. 3, 2022, pp. 411-430.
8. Wang, H.H., Huo, S., Chevali, V., Hall, W., Offringa, A., Song, P., and Wang, H., "Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics: From Materials to Manufacturing and Applications," Advanced Materials, Vol. 37, No. 27, 2025, pp. 2418709.
9. Kim, S., Kim, D.H., Kim, S.W., and Lee, S.Y., "Trends in Predicting Thermoforming-induced Deformation of Thermoplastic Composites: A Review," *Composites Research*, Vol. 37, No. 4, 2024, pp. 275-285.
10. Kim, S., Kim, D.H., Kim, S.W., and Lee, S.Y., "Prediction of Process-induced Deformation in CFRTP Thermoforming Using Finite Element Analysis and Parametric Study of Key Process Parameters," *Composites Research*, Vol. 38, No. 4, 2025, pp. 468-478.
11. Carosella, S., Hügle, S., Helber, F., and Middendorf, P., "A Short Review on Recent Advances in Automated Fiber Placement and Filament Winding Technologies," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 287, 2024, pp. 111843.
12. Ekuase, O.A., Anjum, N., Eze, V.O., and Okoli, O.I., "A Review on the Out-of-autoclave Process for Composite Manufacturing," *Journal of Composites Science*, Vol. 6, No. 6, 2022, pp. 172.
13. Velisaris, C.N., and Seferis, J.C., "Crystallization Kinetics of Polyetheretherketone (PEEK) Matrices," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 26, No. 22, 1986, pp. 1574-1581.
14. Ste-Marie, S., Thermostamping of Long-fiber Thermoplastic Composites: Consideration of Wrinkles, Distortions, and Cost, M.A.Sc. Thesis, Concordia University, Canada, 2018.
15. Barocio, E., Hicks, J., Kim, G., Favaloro, A., Ghosh, G., Goodsell, J., and Pipes, R.B., "Validation of Shape Change Predictions for Stamp Forming of Carbon Fiber Thermoplastic Composite Laminates," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 275, 2024, pp. 111325.
16. Brauner, C., Peters, C., Brandwein, F., and Herrmann, A.S., "Analysis of Process-induced Deformations in Thermoplastic Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 48, No. 22, 2014, pp. 2779-2791.
17. Bogetti, T.A., and Gillespie Jr., J.W., "Process-induced Stress and Deformation in Thick-section Thermoset Composite Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 5, 1992, pp. 626-660.
18. Svanberg, J.M., Predictions of Manufacturing Induced Shape Distortions: High Performance Thermoset Composites, Ph.D Thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 2002.
19. Kim, D.H., Kim, S.W., and Lee, I., "Evaluation of Curing Process-induced Deformation in Plain Woven Composite Structures Based on Cure Kinetics Considering Various Fabric Parameters," *Composite Structures*, Vol. 287, 2022, pp. 115379.
20. Toray Advanced Composites, Toray Cetex® TC1100 PPS Product Data Sheet, Toray Advanced Composites, Nijverdal, Neth-

erlands, 2024.
21. Saleem, A.T., Petrović, V., Grbović, A., Lozanović-Šajić, J., and Balać, I., "Numerical Evaluation of the Elastic Properties of Carbon Fiber Reinforced Composite Material at Elevated and Lowered Temperatures," *Science of Sintering*, Vol. 53, No. 1, 2021, pp. 127-136.
22. Kwok, K., and Pellegrino, S., "Micromechanics Models for Viscoelastic Plain-weave Composite Tape Springs," *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 1, 2017, pp. 309-321.
23. Daggumati, S., De Baere, I., Van Paepegem, W., Degrieck, J., Xu, J., Lomov, S.V., and Verpoest, I., "Meso-scale Modeling in Thermoplastic 5-harness Satin Weave Composite," *Proceeding of the 17th International Conference on Composite Materials (ICCM-17),* Edinburgh, UK, July 2009.