

복합재료 수지 전달 공정의 몰드플로우를 이용한 유동과 경화 시뮬레이션

정재성¹ 홍지선¹ 김선경[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과[†]

Flow and Cure Simulation of resin transfer molding process for composites using MoldFlow

Jae-Sung Jung¹ Ji-Seon Hong¹ Sun-Kyoung Kim[†]

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology^{1,†}

(Received June 21, 2021 / Revised June 00, 2021 / Accepted June 00, 2021)

Abstract: In this study, the simulation of the resin transfer molding process method using MoldFlow has been investigated. This work explains the thermoset material model, fabric permeability model, the flow model and the cure model. It has been shown that the simulation result can predict filling and cure performances.

Key Words: composites, cure, MoldFlow, permeability, resin transfer molding

1. 서 론

연속섬유복합재료는 경량화 추세와 비금속계 고강도 구조물의 요구에 의해 그 생산이 크게 늘어났다. 최종적으로 부품을 성형하는 방법으로는 연속섬유복합재료에서도 금형에 수지를 주입하는 몰딩 공정이 여전히 효과적인 방법이 된다. 이 때, 연속섬유는 프리폼이라 불리며 금형안에 수지 주입 전에 고르게 분포되어 있어야 한다. 이 공정은 사출공정과 유사한 방식으로 수지모사가 가능하다^{1,2}. 이 프리폼을 제조하는 것은 역시 중요한 주제이지만, 이 논문에서는 다루지 않는다. 여기서는 프리폼이 금형에 삽입된 상태에서 열경화성 수지를 충전하여 금형에서 경화 후 이형하여 연속섬유복합재료를 성형하는 전통적인 수지전달공정(resin transfer molding, 이하 RTM)에 대해서만 다루기로 한다³. 이 공정의 개략을 Fig. 1에서 확인할 수 있

다.

금형에서 일어나는 모든 공정이 그러하듯이 RTM 공정에서도 완전한 충전(filling)을 이루는 것이 매우 중요하다. 연속섬유복합재료에서는 구조적 강도 강성이 매우 중요한데, 충전 과정에서 기공이나 미성형이 발생하게 되면 수지가 없는 즉, 함침(impregnation)이 되지 않은 영역이 발생하게 된다. 이 영역은 매우 큰 구조적 취약성을 일으키게 되므로 RTM 공정에서는 충전이 매우 중요하게 된다. 또한, 경화가 완료되지 않으면 이형을 할 수 없으므로 경화를 예측하는 것 또한 중요하다.

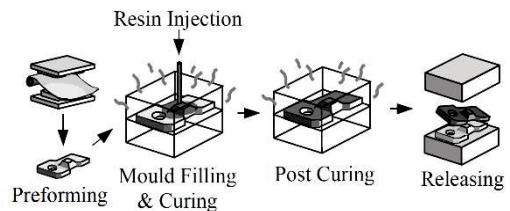


Fig. 1 Outline of resin transfer molding process.

RTM에서 충전과 경화를 예측하는 것은 중요한 과제라 할 수 있다. 이러한 예측은 보통 수지 모사를 통해 이루어지게 되는데, 복합재료부문에서만 사용되는 전용 소프트웨어들이 널리 사용되어 왔

1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
†교신저자: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
E-mail: sunkkim@seoultech.ac.kr

으나, 사출¹⁾에서 사용하는 몰드플로우 (MoldFlow)에서도 충전과 경화를 모사할 수 있다⁶⁾. 이 연구에서는 몰드플로우를 이용하여 이 공정을 모사하는 방법과 그 배경 이론을 설명하고자 한다. 또한 이를 활용하여 충전과 경화 공정에 대응하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 복합재료 RTM 시뮬레이션

2.1. 열경화성 수지 점도 모델

열가소성 수지는 점도가 낮아 섬유사이에 잘 침투하여 함침되므로 복합재료공정에 널리 사용된다. 그러나 경화가 시작되면 점도가 급격히 상승하기 시작하여 충전 공정이 더 이상 진행될 수 없다. 따라서, 공정에 따라 점도를 정확히 예측하는 것은 수치 모사에서 가장 중요한 부분이 된다. 이를 반응성 점도 모델 (reactive viscosity model)이라고 부르며, 아래의 식으로 주어진다.^{4,5)}

$$\eta(\alpha, T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left(\frac{\eta_0(T)\dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha}\right)^{c_1 + c_2\alpha} \quad (1)$$

위의 수식에서 α 는 경화도이며, α_g 는 수지가 겔 (gell)이 되는 시점에서의 경화도이다. 또한, $\dot{\gamma}$ 는 전단율(shear rate)이고, c_1, c_2, τ^* 와 n 은 점도 모델의 계수들이다. 여기서, 온도 T 에 따른 영점도(zero shear viscosity)는 온도의 함수이며

$$\eta_0(T) = B \exp(T_b / T) \quad (2)$$

로 주어지게 된다. 이 때, T_b 와 B 는 실험적으로 결정되는 계수이다. 이러한 방법으로 수치계산 중에 온도, 경화도, 전단율에 따라 수치 충전 공정 중의 점도를 구할 수 있다.

2.2. 유동 모델

섬유강화복합재료는 매우 밀집된 구조로 수지가 쉽게 통과하지 못하며 침투하는 형태로 프리폼을 함침시키게 된다. 이 때 일어나는 유동을 Darcy 유동이라고 부른다. 이 유동은 압력에 의해 구동되며, 투과성계수에 비례하고 점도에 반비례하는 특성을 갖게 된다. 속도장은 다음의 형태로 기술된다⁶⁾.

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\eta} \nabla P \quad (3)$$

여기서 \mathbf{K} 는 투과성계수 텐서이고, P 는 압력이다.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, x, y, z 좌표 변수는 실제 물리계의 좌표 변수들이다. 이 식에서 알 수 있듯이 이 텐서는 3차원적 실험으로부터 구해져야 한다. 직교성으로부터 주축을 결정하고 실험하게 되면 비대각 구성원들의 값들은 0이 되므로 비교적 쉽게 값들을 설정할 수 있다. 즉, 섬유강화재료의 주축방향에서 구한 투과성계수 텐서를 좌표변환하여 Eq. (4)의 구성요소들을 구해 낼 수 있다.

유동은 연속 방정식인 아래의 연속방정식을 만족해야 한다.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (5)$$

이 때 Eq. (5)에 Eq. (4)를 대입하여 다음과 같은 압력장에 대한 방정식을 얻게 된다⁶⁾.

$$\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{K}}{\eta} \nabla P \right) = 0 \quad (6)$$

이 방정식은 상수인 투과성계수와 점도에 대해서는 라플라스 방정식의 형태를 갖게 되므로 나비에 스토크스(Navier-Stokes)방정식을 푸는 것과 비교하면 용이하게 풀이할 수 있으나 \mathbf{K} 의 이방성과 η 의 속도 의존성으로 인해 비선형성이 있으므로 실제의 풀이 과정에서는 반복계산이 필요하다.

2.3. 투과성계수 모델

투과성계수는 텐서의 형태를 갖고 있는데, 복합재료 프리폼 제작과정 중에 변형되는 것으로 매우 결정하기 어려운 값이 된다. 또한, 이 물성을 관리하는 것은 공정의 성패를 가르는 매우 중요한 과제가 된다⁷⁾. 그런데, 기준점에서 다공률을 알고 있다면 두께 변화에 따른 투과성계수를 용이하게 근사할 수 있다. 이러한 모델을 사용할 수 있도록 몰드플로우(MoldFlow)는 제공하고 있다. 즉, 기준다공률과 기준두께를 알고 있으면 두께 변화에 따라 다공률을 아래의 식으로 구하게 된다.

$$\phi = 1 - \frac{b_r}{b} (1 - \phi_r) \quad (7)$$

여기서 b_r 은 기준두께 이고 ϕ_r 은 그 두께에서의 다공률이다. 계산지점의 두께 b 는 실제의 형상 모델로부터 산정된다.

이 다공률을 이용하여 투과성계수를 보정할 수 있다. 코제니카르만(Kozeny-Carman) 방정식으로 부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{K} = \left(\frac{\phi}{\phi_r} \right)^3 \left(\frac{1 - \phi_r}{1 - \phi} \right)^2 \mathbf{K}_r \quad (8)$$

여기서 \mathbf{K}_r 은 기준두께에서의 투과성계수 텐서이며, 주축(principal axis)에서 다음과 같이 정의 된다⁸⁾.

$$\mathbf{K}_r = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

몰드플로우를 이용한 시뮬레이션에서는 2.5차원 모사를 수행하게 되므로 평면 투과성 계수를 사용하게 되며 두께 방향으로의 투과성계수는 실제 계산에 사용되지 않는다. 특히, 등방한 프리폼에 대해서는 Eq. (9)의 텐서는 하나의 실수 상수로 축약된다. 랜덤 매트 혹은 직조된 프리폼을 방향성을 고려하여 적층하여 등방성을 확보한 경우 등방한 프리폼으로 볼 수 있다.

2.4. 경화 모델

보통 수지 전달 공정에서는 열경화성(thermoset) 수지를 사용하는데, 이 경우 경화를 달성하는 것이 공정의 중요한 목표가 된다. 또한, 앞의 Eq. (1)에서 점도를 계산할 때 경화도가 필요하다.

경화 모델은 아래의 수식으로 주어진다. 발열량 이력을 추적하여 다음의 식으로 경화도의 시간 t 에 따른 변화율이 계산되며, 이를 적분하여 경화도를 구하게 된다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2 \alpha^m) (1 - \alpha)^n \quad (10)$$

위의 식에서 m 과 n 은 실험을 통해 결정해야 하는 상수들이다. K_1 과 K_2 는 온도의 함수로 다음의 수식으로 주어진다.

$$K_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{T}\right) \quad (11)$$

$$K_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{T}\right) \quad (12)$$

여기서, A_1, E_1, A_2, E_2 는 모두 DSC 시험 결과를 이용하여 결정되는 상수값들이다. 이 DSC 시험은 실제로는 쉽게 수행되지 않으며, 시험 전에 재료를 철저히 관리하여 시험 전에 경화가 일어나지 않게 하는 것이 중요 하다. 이 시험을 통해 경화 과정 중에 발생할 수 있는 총발열량을 구해야 한다는 것 역시 유의해야 한다. 이 총발열량과 적분된 발열량의 비를 이용하여 아래의 식과 같이 경화도를 계산할 수 있다.

$$\alpha = \frac{Q}{Q_T} \quad (13)$$

여기서 Q 는 경화도가 계산되는 시점까지의 발열량이며 Q_T 는 경화가 완료된 시점 까지의 총 발열량이다. 이 총 발열량은 속경화 (rapid cure) 수지의 경우에는 실험적으로 산정하는데 있어 불확실성이 크므로 실험 과정을 매우 정교하게 처리해야 한다. 시간 t 에서의 발열량은

$$Q = \int_0^t \dot{Q} dt \quad (14)$$

으로 계산된다. 여기서 \dot{Q} 는 경화에 따른 열발생율이다. 이때, Eq.(13)을 시간에 대해 미분하게 되면,

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\dot{Q}}{Q_T} \quad (15)$$

이 얻어지게 된다. 실험 결과로부터 Eq. (10)의 좌변을 Eq. (15)로부터 구하게 되고, 우변의 α 는 Eq.(13)으로부터 구하게 된다. 이로부터 Eqs. (10-12)의 계수들을 모두 최소오차자승법으로 구하게 된다.

2.5. 열전달 모델

앞에서 기술된 Eq.(1)과 Eqs.(11-12)에서 알 수 있듯이 온도를 구하는 것이 모델을 정확히 적용하는 것에 매우 중요함을 알 수 있다. 모델 계수 결정 과정에서는 Eq.(15)가 경화도의 시간변화율을 산정하는데 사용되지만, 온도장 계산 과정에서는 이 식은 아래와 같이 변형된다.

$$\dot{Q} = Q_T \frac{d\alpha}{dt} \quad (16)$$

위의 식은 열발생율을 계산하는 용도로 사용된다. 이 열발생율을 고려하여 온도는 다음의 식으로 계산된다⁹⁻¹⁰⁾.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T + \rho \dot{Q} \quad (17)$$

여기서 ρ 는 밀도이고, C_p 는 비열, k 는 열전도계수이다. 이때, 벽면에서는 아래의 경계조건이 적용된다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T - T_w) \quad (18)$$

위의 식에서 n 은 벽면에 수직한 방향으로의 좌표 변수이고, T_w 은 벽면의 온도이고, h_c 는 열저항의 역수의 의미를 갖는 열투과계수 (thermal conductance)이다. 이 값은 몰드플로우에서 기본값이 충전 중에는 $2500\text{W/m}^2\text{K}$ 로 설정되어 있다.

3. 수치 모사와 및 분석

3.1 수치모사 설정

기본적으로 열가소성수지의 사출공정에서 요구되는 설정을 수행하면 된다. 다만, 경화성수지 모델에 대한 설정들이 필요하게 되고 프리폼에 대한 값들을 입력해야 한다. 이 때 Fig.2에 보인 것과 같이 RTM/SRIM 설정을 활용하면 된다. 기본적으로 RTM과 SRIM은 역학적으로 동일한 모델에 의해 모사가 가능하다. 그러나 실무적으로 RTM은 섬유 체적분율(fiber volume fraction)이 50%이상으로 높은 저속 저압 공정을 의미하게 되고 SRIM (structural reaction injection molding)은 섬유체적분율이 30% 수준으로 낮지만 사출기를 이용하여 고속으로 주입하여 열가소성수지 수준의 생산성을 달성하는 것을 말한다.

격자계 생성에서 주지하여야 할 점은 RTM 모사는 3차원으로는 수행되지 않으며 Midplane 또는 Dual domain으로 설정해야 한다는 것이다. 실제 모델이 Fig.3과 같이 주어지는 경우, 두께의 변화가 심한 3차원 구조이므로, Dual domain이 유리할 것으로 판단된다. Dual domain 격자계를 프리폼 면에 대해서 생성해야 하고, 그 결과 Fig.4와 같이 격자계가 생성된다. 이 격자계는 프리폼 표면에 20006개의 삼각형 요소로 구성된다.

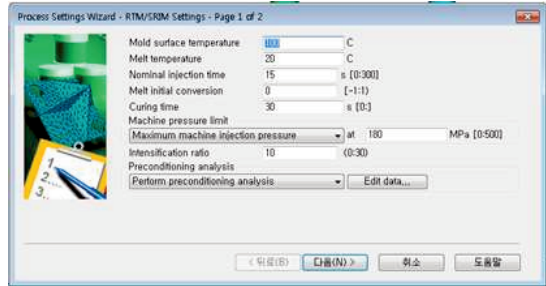


Fig. 2 Simulation setup for RTM/SRIM



Fig. 3 Geometric model for simulation

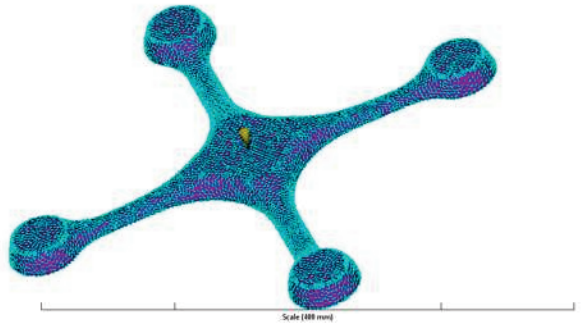


Fig. 4 Mesh generation for RTM simulation

3.2 충전 공정

충전 공정에서는 유변학적 물성이 중요하게 되는데 이 물성은 Eq. (1)과 연관된 모든 계수를 사전에 결정해야 한다. 주어진 모델을 이용하여 RTM 공정을 예측하기 위해서는 공정에 사용하는 수지의 물성을 측정하거나 데이터베이스에 있는 수지를 사용해야 한다. 유변학적 물성의 측정과정

에서 Eq. (1)의 c_1, c_2 을 결정하는 것은 특히 어려운 과제가 된다. 이와 같이 점도를 경화에 따라 측정하는 것은 반응유변학 (chemo-rheology)의 영역에서 다루게 된다. 이러한 어려움을 고려해서 몰드플로우 데이터베이스에 있는 불포화 폴리에스테르 수지인 Arotran Q6055 (Ashland Chemical)로 정하였다. 또한, 등방 프리폼을 고려하여 투과성계수는 기존 두께, b_f 에 대해서 $K_{11} = K_{22} = 2.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 으로 기체 유동법으로 측정하였다^{6,7)}.

충전은 비교적 쉽게 Fig.5 에 보인바와 같이 모사 된다. 시간의 흐름에 따라 게이트로부터 유동이 전파되는 모습은 보통의 열가소성 수지 사출의 경우와 크게 다르지 않다. 그러나, 충전시간은 캐비티의 두께를 고려했을 때 매우 길며 사이클 타임이 길어지는 것을 알 수 있다. 특히, 여기서 유의할 점은 점도와 투과성계수가 정확히 구해지지 않으면 이 결과들을 신뢰하기 어렵다는 점이다.

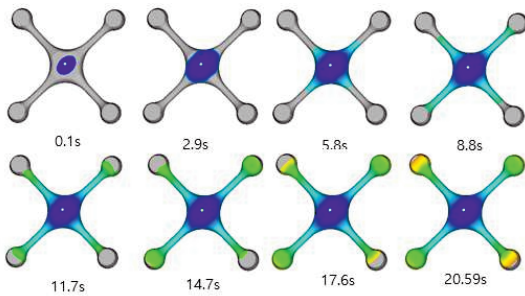


Fig. 5 Filling and fill time during RTM simulation

4. 결론

이 연구에서는 몰드플로우를 이용하여 RTM공정을 모사할 수 있음을 보였다. 이 연구에서는 충전과 경화도를 산정하기 위한 모델을 설명하였다. 이 모델에서 두께변화와 프리폼의 방향에 따라 투과성계수가 어떻게 기술되는 지를 제시하였다. 또한, 경화도, 온도, 전단율에 따라 변화하는 점도 모델이 필요함을 설명하였다.

이를 활용하면 충전에 요구되는 시간을 예측할 수 있으며, RTM 공정에서 미성형과 함침불량을 미리 방지할 수 있다. 또한, 공정에 소요되는 시간을 예측하여 생산성을 확인하고 공정개선에 활용할 수 있게 된다.

후기

이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2018R1A5A1024127, 2020R111A2065650).

참고문헌

- 1) Kim, S.K., Choi, S.J., Lee, K.H., Kim, D.J., Yoo, Y.E., Observation of instabilities in flow front during micro injection molding process, *Polymer Engineering & Science* Vol. 50, No.7, pp. 1377-1381, 2010.
- 2) Suh, J.W., Yoo, Y.E., Kim, S. K., (2020). Flow characteristic during injection molding of PC/MWNT nanocomposites, *Korea-Australia Rheology Journal* 32 (4), 261-269.
- 3) Potter, K. (1997) *Resin Transfer Moulding*, Springer.
- 4) *MoldFlow Insight 2010, User guide.*
- 5) Kim, S.K., Flow-rate based method for velocity of fully developed laminar flow in tubes, *Journal of Rheology*, Vol. 62, No.6, pp.1397-1407, 2018
- 6) Kim, S.K., Opperer, J.G., Daniel, I.M., Gas flow method for detecting local preform defects by inverse estimation of space-varying permeability, *Journal of composite materials* Vol. 37, No.15, 1367-1383, 2003.
- 7) Daniel, I.M., Kim, S.K., Opperer, J.G., Gas flow method for detection of local preform defects based on statistical analysis US Patent 6,853,925, 2005
- 8) Kim, S.K., Daniel, I.M., Gradient method for inverse heat conduction problem in nanoscale, *International journal for numerical methods in engineering*, Vol.60, No.13, pp.2165-2181, 2004
- 9) Kim, H.J., Kim, S.K., Lee, W.I., Flow and heat transfer analysis during tape layup process of APC-2 prepregs, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol.17, No.1, pp.5-12
- 10) Kim, S.K., Kim, D.H., Daniel, I.M., Optimal control of accelerator concentration for resin transfer molding process, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.46, No.20, pp.3747-3754, 2003.

저자 소개

정 재 성(Jae-Sung Jung)



- 2013년 2월 서울과학기술대학교
제품설계계급공학파(공학석사)
- 2016년 6월~2022년 7월 LS오도모티브 금
형립 산업연구원
- 2022년 8월~현재 LG화학주
CS캠퍼스 책임연구원

< 관심분야 >

시출성형 및 금형, 성형해석

홍 지 선(Ji-Seon Hong)



- 2015년 8월 서울과학기술대학교
제품설계계급공학파(공학석사)
- 2015년 11월~현재 오스텍카디오텍주 스
템트연구소, 산업연구원

< 관심분야 >

시출성형 및 금형, 제품설계

김 선 경(Sun Kyoung Kim) [정회원]



- 2000년 2월 서울대학교
기계공학과(공학박사)
- 2000년 11월~2003년 11월 노스웨스턴대
학교 연구원
- 2004년 2월~현재 서울과학기술대학교 기계
시스템디자인공학과 교수

< 관심분야 >

열공정 복합재료