

RTM 공정에서의 수지 유동과 기공 생성의 3 차원 수치해석

강문구* · 이도훈* · 이우일* · 엄문광** · 이상관**

Three Dimensional numerical Simulation of Resin Flow and Void Formation in Resin Transfer Molding Process

Moon Koo Kang, Doh Hoon Lee, Woo Il Lee, Moon Kwang Um, Joon Hyung Byun

Key Words : RTM(Resin Transfer Molding), 3 차원 유동 해석, micro void, 수지유동, 기공 생성

ABSTRACT

During resin transfer molding(RTM) process, in case of thick parts, resin flow and void formation should be modeled three dimensionally even though for parts of small thickness, resin flow and void formation can be modeled two dimensionally. In this study, numerical simulations of three dimensional mold filling and void formation during RTM process.

기호설명

- p : Pressure of resin
 p_a : Pressure of air
 V_f : fiber volume fraction
 K : permeability
 μ : viscosity of resin
 μ_a : viscosity of air

1. 서론

RTM(Resin Transfer Molding)은 복잡한 형상의 복합 재료 제품을 빠르게 생산 할 수 있는 비교적 저렴한 생산 공정이다. 이러한 RTM 공정에서 금형 충전과정에서의 수지의 유동은 드라이 스팟(dry spot) 등과 같은 제품의 불량에 영향을 미치므로 그 해석이 중요하다. 또한 물성치의 저하를 초래하는 작은 기공(micro void)역시 해석이 필요한

요소이다. 본 연구에서는 CVFEM(Control Volume Finite Element Method) 방법을 이용하여 RTM 공정에서의 3 차원 금형 충전과정을 해석하고, 금형 내부의 dry spot 과 micro void 의 생성과 이동을 예측하는 수치해석 코드를 개발하였다.

2. 모델링

2.1 거시 유동 해석

거시적인 유동해석에서는 금형내에서의 수지의 유동과 함께 dry spot 의 생성을 예측하기 위한 것으로 수지의 유동 뿐만 아니라 금형내의 공기의 유동도 해석할 필요가 있다. 수지의 유동은 비압축성 유체의 연속방정식과 Darcy's law, 기체의 유동은 여기에 이상기체 방정식을 적용하여 계산된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K_f}{\mu_r} \frac{\partial p}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (1)$$

* 서울대학교 기계항공공학부

** 한국기계연구원 재료기술연구소 복합재료그룹

$$-\frac{1}{V_f} \frac{\partial V_f}{\partial t} + \frac{1-V_f}{p_a} \frac{\partial p_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K_{ij}}{\mu_a} \frac{\partial p_a}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

2.2 미시 유동 해석

2.2.1 micro void의 생성

micro void는 수지가 fiber preform을 통과하는 과정에서, 섬유 다발의 내부와 외부에서의 유동 선단의 속도차로 인해 생성된다. 다음은 유동 선단이 섬유다발 내부와 외부를 통과하는데 걸리는 시간의 비율이다.

$$\frac{\Delta t_{r,T}}{\Delta t_{r,C}} = \frac{F_{K,C} d_C^2}{F_{K,T} d_T^2} \left\{ 1 - \frac{K}{Ca^*} \frac{F_{c,T}}{d_T l_T} \log \left(1 + \frac{Ca^* d_T l_T}{K F_{c,T}} \right) \right\} \quad (3)$$

여기서 Ca^* 는 점성력과 모세압력의 비로 정의되는 무차원수 capillary number이다.

$$Ca^* = \frac{\mu v}{\gamma \cos \theta} \quad (4)$$

이 시간 비에 따라 생성되는 기공의 종류가 다르게 되며, 그 개수도 다르게 된다.

다음은 channel void의 수($N_{v,C}$)와 tow void의 수($N_{v,T}$)를 구하기 위한 식이다.

$$N_{v,C} = \Pi_C \left(\frac{\Delta t_{r,C}}{\Delta t_{r,T}} - 1 \right) N_C, \quad \frac{\Delta t_{r,T}}{\Delta t_{r,C}} < 1 \quad (5)$$

$$N_{v,T} = \Pi_T \left(\frac{\Delta t_{r,T}}{\Delta t_{r,C}} - 1 \right) N_T, \quad \frac{\Delta t_{r,T}}{\Delta t_{r,C}} > 1 \quad (6)$$

2.2.2 micro void의 생성

섬유 다발 사이의 channel에 존재하는 void는 주변 수지의 유동에 따라 이동할 수 있다. 이때의 지배 방정식은 다음과 같다

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi \vec{u}_v) = \dot{S} \quad (7)$$

여기 φ 는 수지와 void의 혼합물에 대한 micro-void의 질량 분율이며, \vec{u}_v 는 void의 속도이며, \dot{S} 는 유동 선단에서 생기는 기공의 생성항이다.

3. 수치해석

3.1 CVFEM

고정된 격자계에서 유동 전진면을 추적하기 위해 CVFEM(control volume finite element method) 기법이 사용된다. 계산 영역은 유한개의 요소와 control volume으로 나누어진다. 다음 그림 1에서 보듯이 인접한 요소의 중심과 요소 경계선의 중점들을 연결함으로써 하나의 control volume이 정의된다. 각 control volume의 경계는 해당 control

volume의 control surface를 구성한다. 그림 2에서 보듯이 각각의 control volume은 수치 충전률, f 에 따라 3가지 범주로 분류된다. 수치 유동 전진면은 수치로 가득찬 영역($f=1$)과 수치가 전혀 들어 있지 않은 공기유동영역($f=0$) 사이에 존재한다. 부분적으로 수치가 충전된 control volume($0 < f < 1$) 내에서 control surface를 지나가는 mass flux를 계산함으로써 유동 전진이 각 단계마다 결정된다.

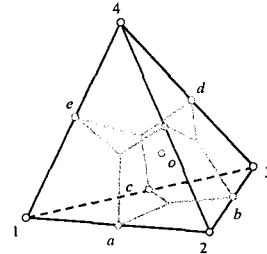


그림 1 Discretization of 3D calculation domain

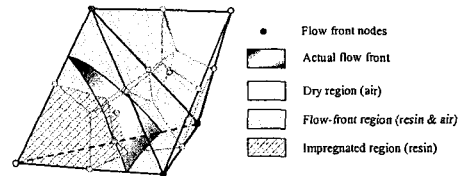


그림 2 Determination of the flow front

3.2 해석

본 연구에서 작성된 수치해석 코드는 압력분포로부터 압력구배, 속도 분포 등이 계산되며, 그로부터 micro void의 생성과 이동이 계산된다. 이의 간단한 순서도는 다음과 같다.

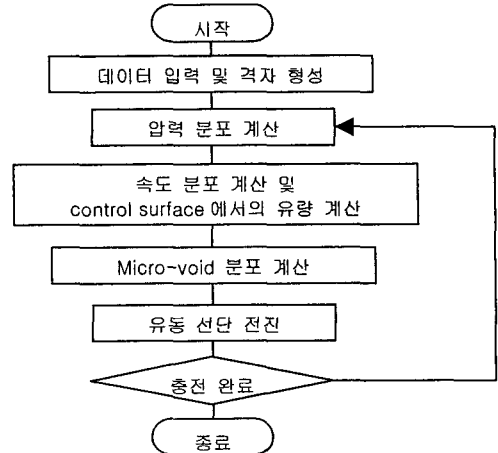


그림 3 flow chart of simulation

4. 결과

3.1 수지 유동 해석

본 연구에서는 다음과 같은 러더 형상의 금형에 대한 RTM 공정을 해석하였다.

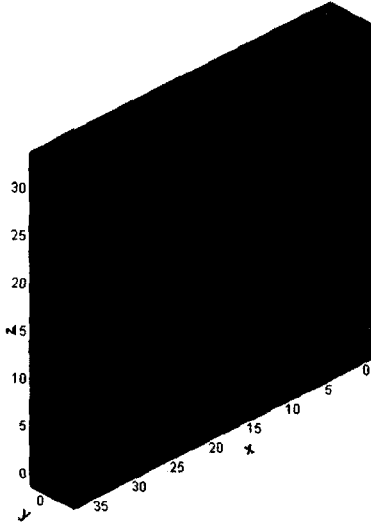
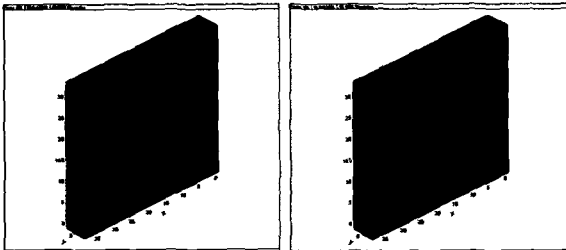
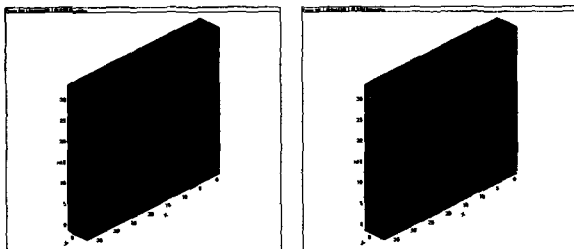


그림 4 Mold shape

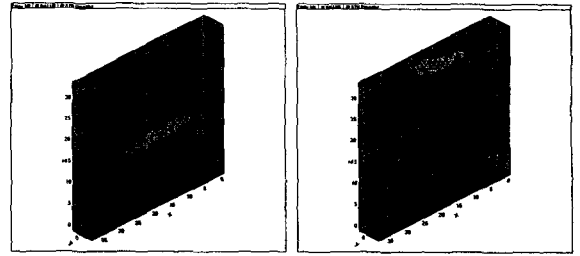
다음은 위의 형상에 대한 RTM 해석의 결과로 금형이 충전되어 나감에 따라서의 fill fraction 과 압력의 분포를 나타낸 것이다.



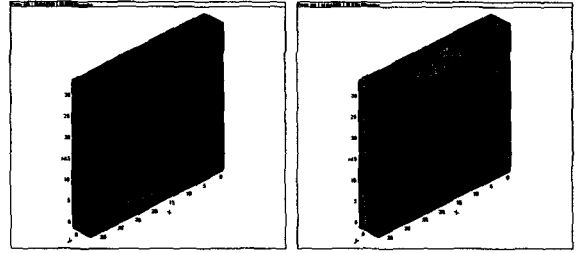
Fill Fraction Pressure
(a) 0.0876% Filling



Fill Fraction Pressure
(b) 37.917% Filling



Fill Fraction Pressure
(c) 72.390% Filling

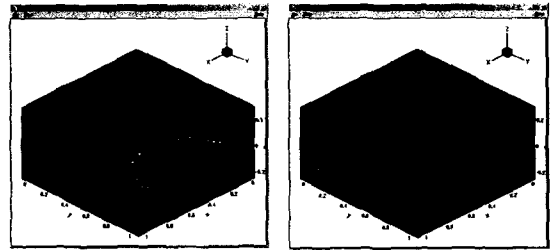


Fill Fraction Pressure
(d) 98.954% Filling

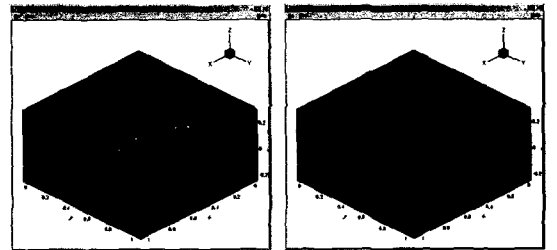
그림 5 Mold filling process

3.1 기공 해석

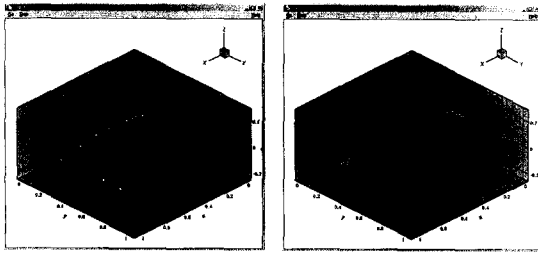
다음은 얇은 정사각형 금형에서의 RTM 공정에서의 유동선단과 생성된 channel void 의 질량 분율을 나타낸 것이다.



Flow Front Void Fraction
(a) 8.9 sec



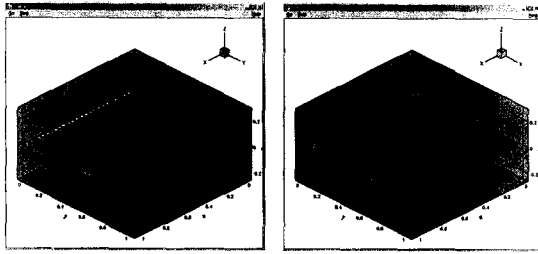
Flow Front Void Fraction
(b) 22.1 sec



Flow Front

Void Fraction

(c) 37.0 sec



Flow Front

Void Fraction

(d) 57.0 sec

그림 6 Mass Fraction of micro void

이 결과는 channel void가 유동 선단에서 생성되어 수지의 흐름을 따라 이동하는 과정을 보여준다

5. 결론

RTM 공정 중에 생기는 수지 유동과 기공 형성을 해석하기 위해 금형 내부의 공기의 지배 방정식과, micro-void의 생성과 이동에 관한 수학적 모델이 제시되었다. 이를 바탕으로 RTM 공정의 금형 충전 과정과 금형 충전 과정에서 내부의 압력 분포와 micro-void의 분포를 예측하는 통합된 수치 해석 코드가 개발되었다. 이 해석은 특정한 공정에서의 수지 유동과 기공의 거동 해석과 결과 예측 뿐 아니라, 금형 설계와 공정 변수의 최적화에 이용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 차세대소재성형기술개발사업의 위탁 과제로 과학 기술부 21세기 프론티어 연구개발사업의 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

(1) Patel, N., V. Rohatgi and L.J. Lee, 1993, "Influence of Processing and Material Variables on Resin-Fiber Interface in Liquid Composite Molding," *Polymer*

Composites, Vol.14, No.2, pp161-172
 (2) Chan, A.W., and R.J. Morgan, April 1992, "Modeling Preform Impregnation and Void Formation in Resin Transfer Molding of Unidirectional Composites," *SAMPE Quarterly*, pp48-52
 (3) Chen, Y.T., H.T. Davis and C.W. Macosko, 1995, "Wetting of Fiber Mats for Composites Manufacturing: II. Air Entrapment Model," *AIChE Journal*, Vol.41, No.10, pp2274-2281
 (4) Mahale, A.D., R.K. Prud'homme, and L. Rebenfeld, 1992, "Quantitative Measurement of Voids Formed During Liquid Impregnation of Nonwoven Multifilament Glass Networks Using an Optical Visualization Technique," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 32, pp319-326
 (5) Chen, Y.T., H.T. Davis and C.W. Macosko, 1995, "Wetting of Fiber Mats for Composites Manufacturing: I. Visualization Experiments," *AIChE Journal*, Vol.41, No.10, pp2261-2273
 (6) Rohatgi, V., N. Patel and L.J. Lee, 1996, "Experimental Investigation of Flow Induced Microvoids During Impregnation of Unidirectional Stitched Fiberglass Mat," *Polymer Composites*, Vol.17, No.2, pp161-170
 (7) Greszczuk, L.B., 1967, "Effect of Voids on Strength Properties of Filamentary Composites," *Proceedings of 22nd Annual Meeting of the Reinforced Plastics Division of The Society of the Plastics Industry*, 20-A.1 to 20-A.10
 (8) Hancox, N.L., 1977, "The Effect of Flaws and Voids on the Shear Properties of CFRP," *J. Mater. Sci.*, 12, 884-892
 (9) Judd, N.C.W. and W.W. Wright, 1978, "Voids and Their Effects on the Mechanical Properties of Composites - An Appraisal," *SAMPE Journal*, 14, 10-14
 (10) Yosida, H.T., T. Ogasa and R. Hayashi, 1986, "Statistical Approach to the Relationship between ILSS and Void Content of CFRP," *Composites Science and Technology*, Vol. 25, 3-18
 (11) Harper, B.D., G.H. Staab and R.S. Chen, 1987, "A Note on the Effects of Voids Upon the Hygral and Mechanical Properties of AS4/3502 Graphite/Epoxy," *J. of Composite Materials*, Vol. 21, 280-289
 (12) Feldgoise, S., M.F. Foley, D. Martin, and J. Bohan, October 1991, "The Effect of Microvoid Content on Composite Shear Strength," *23rd International SAMPE Technical Conference*, 259-273
 (13) K.J. Bowles and S. Frimpong, 1992, "Void Effects on the Interlaminar Shear Strength of Unidirectional Graphite-Fiber-Reinforced Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 26, No. 10, 1487-1509
 (14) M.K. Kang, W.I. Lee and H.T. Hahn, 2000, "Formation of Microvoids during Resin Transfer Molding Process", *Composite Science and Technology*, Vol.60, pp2427-2434
 (15) Dullien, F.A.L., *Porous Media - Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, New York, 1979.