

論文

VARTM 공정에서의 금형 충전 및 기공 형성에 관한 3차원 수치해석

강문구*, 배준호**, 이우일***

Three-Dimensional Numerical Simulation of Mold-Filling and Void Formation During Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding

Moon Koo Kang*, Junho Bae**, Woo Il Lee***

ABSTRACT

In the vacuum assisted RTM (VARTM) process that has become the center of attention for manufacturing massive composite structures, a good evacuation of air in the fiber preform is recognized as the prime factor. The macrovoids, or the dry spots, are formed as a result of improper gate/vent locations and the mold geometry. The non-uniform resin velocity at the flow front leads to the formation of microvoids in the fibers, whereas the air in the microvoids can migrate along with the resin flow during mold filling. The residual air in the internal voids of a composite structure may cause a degradation of the mechanical properties as well as the structural failure. In this study, a unified macro- and micro analysis methods were developed to investigate the formation and transport of air in resin during VARTM process. A numerical simulation program was developed to analyze the three-dimensional flow pattern as well as the macro- and microscopic distribution of air in a composite part fabricated by VARTM process.

초 록

최근 대형 복합재료 구조물 성형에 적합한 공정으로 주목 받는 vacuum assisted RTM (VARTM) 공정에 있어, 보강섬유의 조직 내부에 잔류하는 공기를 제거하여 기공함유율을 낮추는 기술의 중요성이 인식되고 있다. 거대기공 혹은 불완전 함침영역은 부적절한 주입구 및 공기배출구의 위치, 혹은 금형의 형상에 의해 발생한다. 미세기공은 불균일한 수지 유동 선단의 속도로 인해 유동선단 부분에서 집중적으로 형성되며, 금형충전 공정 도중 수지와 함께 이동한다. 성형이 완료된 제품내의 잔류 기공들은 완성품의 물리적 성질을 저하 및 제품의 파손을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 VARTM 공정에서의 기공의 형성 및 이동을 해석할 수 있는 통합된 거시적/미시적 해석 방법을 개발하였다. 수치해석 프로그램을 개발하여 VARTM 공정에서의 3차원 수지 유동을 해석하였으며, 그에 따른 거대기공 및 미세기공의 분포를 예측하였다.

Key Words : 진공수지이송성형법(VARTM), 거대기공(Macroscopic voids), 미세기공(Microscopic voids)

1. 서 론

RTM (resin transfer molding) 공정은 부피가 크고 형상이 복잡한 복합재료 제품의 성형에 적합한 공정이다. 최근에는

금형 제작 비용을 절감하고 성형성을 향상시키기 위해 금형의 일부를 진공막으로 대체하여 보다 손쉽게 대형 제품을 생산할 수 있도록 개선한 VARTM (vacuum-assisted RTM) 공정이 주목 받고 있다. VARTM공정은 진공압력을 이용하여 수

* 서울대학교 전기컴퓨터공학부

** 서울대학교 기계공학부

*** 서울대학교 기계항공공학부, 교신저자(E-mail:wilee@snu.ac.kr)

지를 보강섬유 속으로 함침시키는 공정으로서, 기존의 가압에 의한 수지주입과 비교하여 금형에 가해지는 힘의 크기가 작고 복잡한 형상을 손쉽게 성형할 수 있는 등의 장점을 가지고 있다. 그러나 VARTM 공정에서는 수지를 함침시키기 위해 필요한 주입구와 유동선단사이의 유효압력차가 최대 1기압으로 제한되므로 신속한 유동을 얻기 어려우며, 이에 따라 대형의 제품을 성형하기 위해서는 매우 긴 금형충전시간이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 보강섬유의 윗면에 투과도가 매우 높은 HPL (high permeability layer)를 적층하여 평면방향의 유효투과도를 향상시킴으로서 보다 신속한 금형충전을 달성하도록 하는 방법이 사용된다. HPL 내부에서는 빠른 속도의 수지유동이 발생하여 먼저 평면방향으로의 충전이 이루어지며, HPL에 함침된 수지는 다시 두께방향으로 보강섬유에 스며들어 함침 과정이 완료된다. 이때 HPL 및 보강섬유 내부에서는 복잡한 3차원 형태의 수지 유동이 발생하므로, 금형충전 과정에서의 수지의 유동을 예측하는 데는 3차원적인 유동 해석이 필요하다.

금형 충전 과정에서 수지(resin)가 금형에 완전히 충전되지 못하고 기공(air void)이 남는 경우 불량 요인이 된다. 기공은 일반적으로 그 크기에 따라 거대기공(macrovoid)과 미세기공(microvoid)으로 분류될 수 있다. 육안으로 식별이 가능하고 보강섬유 다발의 직경보다 큰 유효직경을 가지는 경우 거대기공으로 분류되며, 보강섬유의 다발의 직경보다 작고 육안으로 쉽게 관찰되지 않는 작은 기공들은 미세기공으로 분류할 수 있다. 거대기공의 형성은 주로 주입구와 벤트(vent)의 위치, HPL과 fiber preform의 장착정밀도, 진공압력(vacuum pressure)의 크기, preform의 물리적 성질, 주입된 수지 내의 휘발성 첨가물의 존재, 경화과정에서의 수지의 수축성 등과 같은 다양한 요소의 영향을 받는다. 미세기공은 수지가 보강섬유를 함침하는 과정에서 보강섬유 preform의 불균일한 미세구조로 인하여 유동선단 부분에 집중적으로 형성된다[1-4]. Micro-void는 완성된 제품의 품질 및 기계적 강도의 현저한 저하를 초래할 수 있다[5-13].

미세기공은 preform을 구성하는 섬유다발의 내부와 외부의 투과성계수(permeability)와 모세압력(capillary pressure)의 영향에 따라 유동 선단(flow front)에서 밀집되는 경향을 보인다. 미세기공은 거대기공과 서로 영향을 주고받는다. 거대기공의 내부압력에 의해 거대기공의 경계면에 형성되는 미세기공들의 초기 압력이 결정된다. 또한 미세기공들이 수지와 함께 이동하다가 거대기공의 경계면을 통해 수지함침영역 밖으로 배출될 경우, 거대기공 내부의 공기의 질량은 새로이 함유한 미세기공의 질량만큼 증가하여 결과적으로 거대기공의 부피 및 압력이 상승하게 된다. 이와 같이 함침영역 내부의 수지유동 및 미세기공과 거대기공을 정확하게 예측하기 위해서는 금형내부의 수지 및 공기의 유동과 미세, 거대기공의 형성 및 상호작용의 메카니즘을 적절히 모델링하여 해석에 반영하여야 한다.

본 연구에서는 미세기공과 거대기공을 고려한 수지유동 모델을 제시하고, CVFEM(control-volume finite element method) 기법을 이용하여 VARTM 공정에서의 금형 충전 과정을 3차원적으로 해석하였다.

2. 수학적 모델링

2.1 Macrovoid model

거대기공의 형성 및 이동을 예측하기 위해서는 수지 및 공기의 유동에 대한 거시적 해석이 필요하다. 수지의 유동 방정식은 비압축성 유체의 연속 방정식과 Darcy's law로부터 다음과 같이 서술될 수 있다.

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

여기서 μ_r 는 투과율계수이며, p 는 압력이다. 공기의 유동은 압축성 유체의 연속 방정식과 Darcy's law, 이상기체의 상태 방정식으로부터 다음과 같이 서술될 수 있다[14].

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

2.2 Microvoid model

2.2.1 Formation of microvoid

섬유 다발(tow)의 미세 구조로 이루어진 보강섬유 preform을 수지가 통과할 때, 섬유 다발의 내부와 외부에서의 유동 선단의 속도 차이로 인하여 미세기공이 형성된다. 섬유의 미세조직에 따라 섬유 내부와 외부의 유동속도는 크게 달라진다. 섬유 미세조직의 복잡한 형태는 적절한 형상계수를 사용하여 표현할 수 있다[14]. 보강섬유 내부를 흐르는 수지의 유속은 섬유다발의 내부와 외부에서 서로 다르게 나타나며, 그 속도는 다음 식에 의해 표현될 수 있다.

$$u_c = -F_{k,c}(\phi) \frac{d_c^2}{\mu} \frac{dp}{dn} \quad (3)$$

$$u_r = \frac{dl}{dt} = -F_{k,r}(\phi) \frac{d_r^2}{\mu} \left(\frac{dp}{dn} - \frac{P_{c,r}}{l} \right) \quad (4)$$

여기서 u_c 는 섬유다발 외부의 관로에서의 수지의 유동 속도, u_r 는 섬유다발 내부의 수지의 유동 속도를 의미한다.

d_T 는 섬유 다발과 다발 사이의 평균 거리이며, d_c 는 섬유 가닥과 가닥 사이의 평균 거리이다. $F_{K,C}$ 는 섬유다발 외부의 관로에 대한 형상계수, $F_{K,T}$ 는 섬유다발 내부의 형상계수를 의미한다. 이 두 속도를 사용하여 수지의 유동선단이 섬유 다발의 내부와 외부에서 섬유다발의 단면 길이에 해당하는 동일한 거리를 이동하는데 소요되는 시간을 예측할 수 있다. 선단이 섬유 다발 내부(tow)와 외부(channel)를 통과하는 데 걸리는 시간의 비율은 다음과 같다[14].

$$\frac{\Delta t_{r,T}}{\Delta t_{r,C}} = \frac{F_{K,C} d_c^2}{F_{K,T} d_T^2} \left\{ 1 - \frac{K}{Ca^*} \frac{F_{c,T}}{d_T l_T} \log \left(1 + \frac{Ca^* d_T l_T}{K F_{c,T}} \right) \right\} \quad (5)$$

여기서 l_T 는 섬유 다발의 평균 단면 거리이다. $\Delta t_{r,T}$ 와 $\Delta t_{r,C}$ 는 각각 tow와 channel에서 유동 선단이 섬유 다발의 평균 단면 거리, l_T 를 통과하는 데 걸리는 시간을 뜻한다. 이 시간비는 점성력(viscous force)과 모세압력(capillary force)의 비로 정의되는 무차원 수, capillary number에 의해 결정된다[15].

$$Ca^* = \frac{\mu v}{\gamma \cos \theta} \quad (6)$$

여기서 γ 는 수지의 표면장력(surface tension), θ 는 접촉각(contact angle)이고, v 는 수지의 거시적 속도(macroscopic resin velocity)이다.

2.2.2 Transport of microvoids

섬유 다발 사이의 channel에 존재하는 미세기공은 주변의 수지의 유동을 따라 이동할 수 있다. 수치 안에 분포된 미세기공을 연속체(continuum)로 가정하고 수치/void 혼합물에 대한 공기의 질량 분율(mass fraction)을 정의하면, 수지의 유동에 따라 함께 이동하는 channel 미세기공의 공기의 질량분율에 관한 유동 방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

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

식 (6)에서 ϕ 는 수치와 미세기공의 혼합물에 대한 공기의 질량분율이며, \vec{u}_v 는 미세기공의 속도이다. 미세기공의 이동 속도는 수지의 속도에 의해 달라지므로, 미세기공의 속도는 인접한 수지의 거시적속도의 함수로 나타내어진다. Channel의 기공은 주변의 수지의 속도가 특정한 임계속도보다 클 때 수치 유동에선 수치보다 빠르게 움직이고, 주변 수지의 속도가 임계속도보다 작을 때는 수치보다 느리

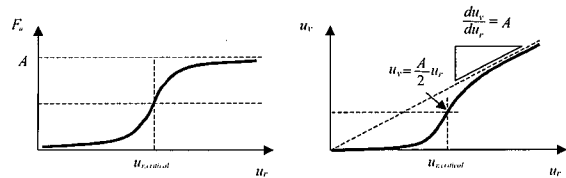
게 움직이는 것이 관찰되었다[14].

$$\vec{u}_v = F_u(u_r) \cdot \vec{u}_r \quad (8)$$

F_u 는 수치 속도에 대한 미세기공 속도의 비율을 나타내는 계수이며, 이는 수지의 속도에 따라 달라지는 함수 형태로 가정된다.

본 연구에서는 여러 유속에 대하여 실험적으로 측정된 수치와 미세기공의 속도비율을 잘 표현할 수 있는 함수 형태 가운데 가장 간단한 것으로 다음과 같은 지수함수 형태의 속도계수를 제안하였다.

$$F_u = \begin{cases} A \left(1 - \frac{1}{2} e^{-k(u_{r,crit} - u_r)} \right) & u_r \geq u_{r,crit} \\ \frac{A}{2} e^{k(u_{r,crit} - u_r)} & u_r < u_{r,crit} \end{cases} \quad (9)$$



식 (9)와 같은 함수형태의 속도계수를 사용하여 임의의 수치 속도에 대응하는 미세기공의 속도를 표현할 수 있다.

3. 수치 해석 방법

본 연구에서 제작된 시뮬레이션 프로그램은 격자(mesh)를 생성하기 쉽고, 계산 시간이 빠른 장점을 가진 고정 격자계(fixed grid method)를 사용했다. 수치와 공기의 경계를 추적하고 유체의 영역을 정의하기 위하여 CVFEM(control-volume finite element method)을 사용했다. 각 control volume의 함침면적비율에 따라 수치 혹은 공기에 대한 지배 방정식이 선택적으로 적용되며, 이에 따라 전체 영역의 수치와 공기의 압력 분포가 계산된다. 압력 분포로부터 압력 구배, 속도 분포 등이 계산되며, 그로부터 micro-void의 생성과 이동이 계산된다. 시뮬레이션 프로그램의 순서도는 다음과 같다.

4. 거대기공 내부 공기의 압축성 효과

4.1 Packing and bleeding

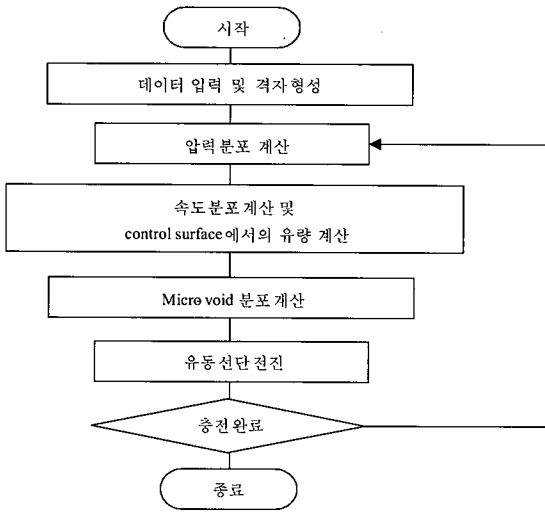


Fig. 1 Flow chart of simulation program.

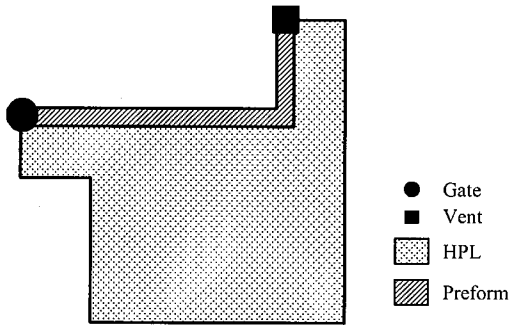
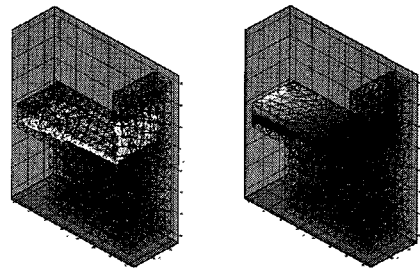


Fig. 2 Configuration of the fiber/HPL stack.

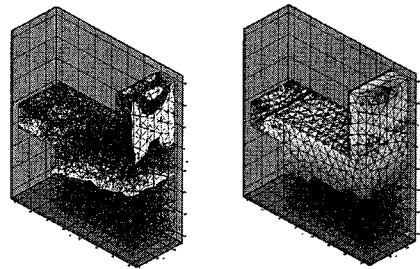
VARTM 공정에서의 공기의 팽창에 따른 압력변화 및 불규칙한 유동선단 전진의 효과를 고려하기 위해 다음 그림과 같은 형상을 고려하였다. 낮은 투과성계수(permeability)를 가진 uniform한 preform 위에 HPL 한 층이 깔려 있으며, 주입구는 HPL의 왼쪽 끝 부분에 존재하며, 벤트는 위쪽 끝에 위치해 있다.

HPL과 preform을 통과하는 수지의 속도 차이에 의해 모서리부분에 거대기공이 형성된다. 거대기공 내부의 공기는 수지의 충전이 진행됨에 따라 압축되며, 거대기공 내부의 압력이 인접한 부분의 수지 압력 이상으로 증가할 경우 기공내의 공기가 분출되는 현상이 발생한다. 수 차례의 연속적인 압축/배출(packing and bleeding) 과정을 거쳐 거대기공 내부의 공기가 공기배출구를 통해 배출되며, 급형 내부는 수지로 충전된다.



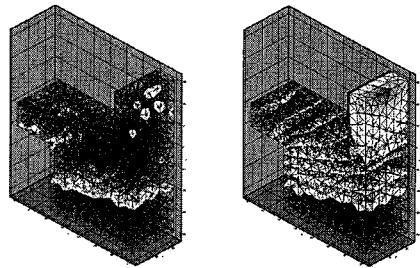
Flow front shape Pressure

(a) $t=2.4$ sec



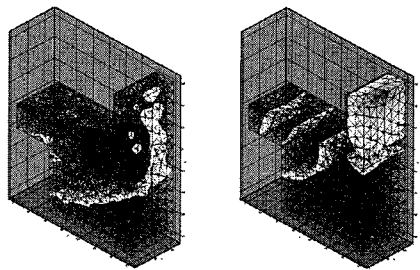
Flow front shape Pressure

(b) $t=23.3$ sec



Flow front shape Pressure

(c) $t=128$ sec



Flow front shape Pressure

(d) $t=1,550$ sec

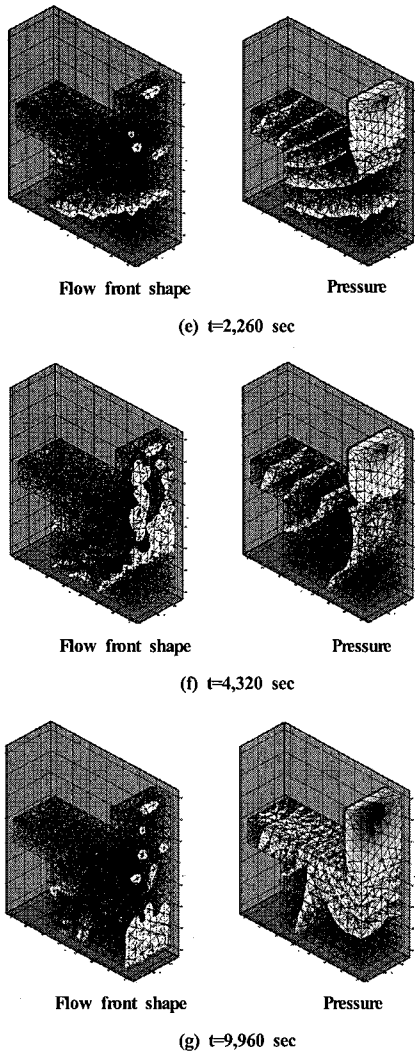


Fig. 3 Simulation of resin flow considering the compression of air in the dry spots.

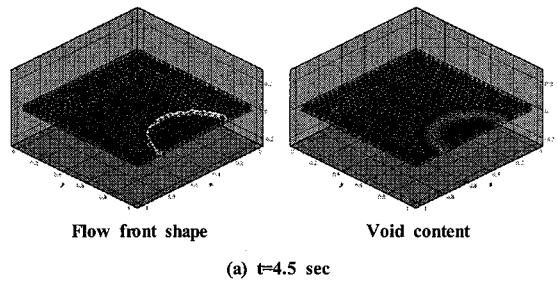
Fig. 3의 각 그림에서 좌측 열은 유동선단을 나타내고, 우측 열의 곡면들은 수지 내부의 등압곡면을 투시한 그림을 나타낸다. 주입구의 압력은 대기압과 동일한 1atm, 진공 압력은 0.5atm으로 하였다. (a)에서 보는 바와 같이 수지는 보다 높은 투과성계수를 갖는 HPL을 통해 빠르게 흘러 금형내부로 유입되며, (b), (c)에서 공기가 갇힌 다음 거대기공 내의 공기가 압축되어 공기의 압력이 상승하는 현상을 관찰할 수 있다. 거대기공 내의 공기는 (d)에서 최초의 bleeding 현상을 보여주며, (e)에서는 재압축에 의한 packing 현상, 그리고 (e), (f)에서 다시 bleeding되는 과정을 보여준

다. 금형충전은 (g)에서 종료된다. 거대기공의 공기가 완전히 배출되는 데 소요되는 시간은 기공의 압축배출 사이클에 의해 크게 지연되며, 주어진 형상의 경우 공기배출구에 수지의 유동선단이 도달한 시간과 비교하여 약 50배의 시간이 경과한 후 완전한 배출이 이루어지는 것으로 예측되었다.

5. Micro-void의 형성과 이동

사각평판형태의 preform을 함침시키는 경우에서의 micro-void의 분포를 해석하여 함침영역 내부의 미세기공 형성 및 이동을 예측하였다. 금형의 한쪽 변의 중점에 수지주입구가 존재하며, 공기배출구는 반대쪽 변의 양 끝에 위치한다. 주어진 형상에 대한 수지유동을 해석하여 미세기공이 유동 선단에서 생성되어 수지의 흐름을 따라 이동하는 현상을 예측하였다.

각 그림에서 좌측 열에 도시된 경계면은 유동 선단을 나타내며, 우측 열의 그림은 수지/미세기공 혼합물에 대한 공기의 질량분율을 나타낸다. 우측 열 그림의 어두운 색상은 기공함유율이 낮은 부분을 의미하며, 밝은 색상은 기공함유율이 높은 부분을 의미한다. 최대기공함유율은 부피비율로 환산하여 4.7%의 기공함유율이 예측되었다. 미세기공의 질량분율은 주입구 근처에서 낮게 나타나며 유동선단에 가까워질수록 높게 나타난다. 미세기공은 먼저 수지의 유동선단에서 형성된다. 수지유속이 임계속도보다 낮을 경우 미세기공의 속도는 수지유속보다 느리므로 함침영역 내부에 잔류하게 된다. 잔류하는 미세기공은 완전히 정지한 상태가 아니라 수지유동과 함께 이동하고 있으므로, 시간이 지남에 따라 주입구 근처의 함침영역은 미세기공의 질량분율이 점차 낮아지게 된다. 흘러간 미세기공은 수지의 유동방향을 따라 유동선단과 인접한 영역에 점차 축적되므로 유동선단 근처의 기공율은 점차 상승하게 된다. 수지의 속도가 임계속도보다 높을 경우는 수지의 유속보다 기공의 유속이 더욱 빨라질 수 있으며, 그러한 경우 유동선단을 통해 기공이 배출되는 현상이 발생할 수 있다.



(a) t=4.5 sec

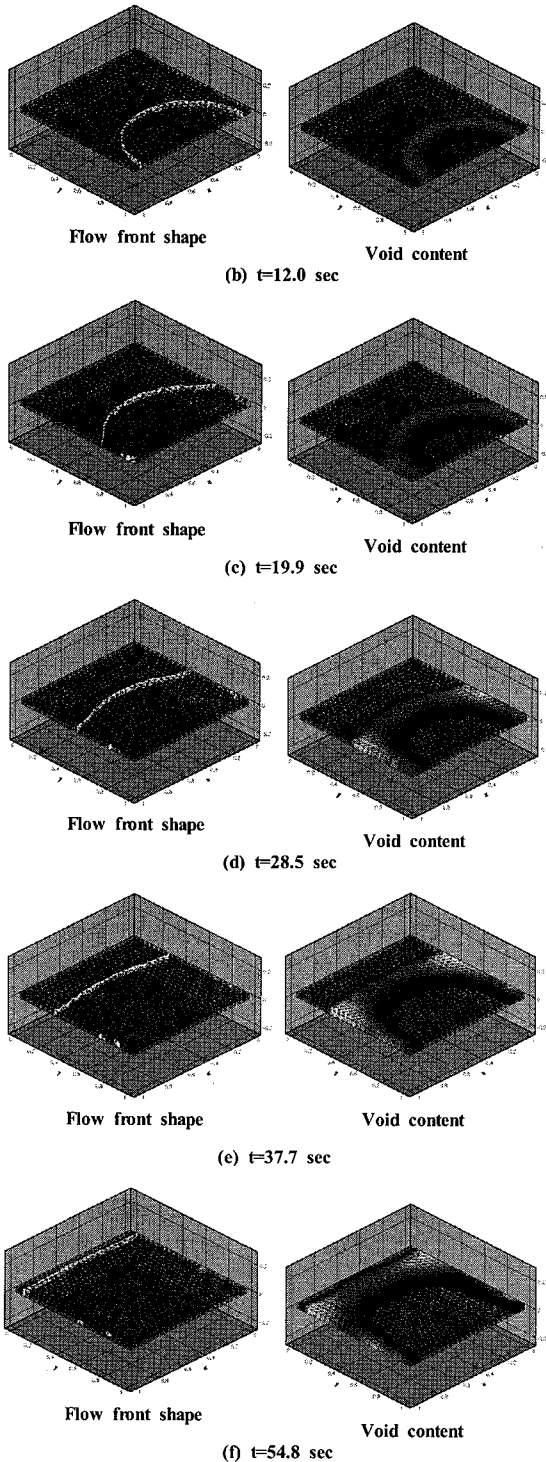


Fig. 4 Mass fraction of micro-void during impregnation.

6. 결론

VARTM 공정 중에 발생하는 기공의 형성 및 이동을 해석하기 위해 금형 내부의 수지 및 공기의 유동에 관한 수학적 모델을 제시하였다. 제시된 모델에 따라 수치해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 모델 및 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 VARTM 공정에서의 수지유동 및 기공형성과 이동을 예측할 수 있으며, 금형의 최적설계에 이용될 수 있다.

Acknowledgment

본 연구는 Lockheed Martin Inc., U.S의 재정적 지원과 과학기술부 21세기 프론티어 연구 개발사업의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌

- 1) Patel, N., V. Rohatgi and L.J. Lee, "Influence of Processing and Material Variables on Resin-Fiber Interface in Liquid Composite Molding," *Polymer Composites*, Vol. 14, No. 2, 1993, pp. 161-172.
- 2) Chan, A.W., and R.J. Morgan, "Modeling Preform Impregnation and Void Formation in Resin Transfer Molding of Unidirectional Composites," *SAMPE Quarterly*, April 1992, pp. 48-52.
- 3) Chen, Y.T., H.T. Davis and C.W. Macosko, "Wetting of Fiber Mats for Composites Manufacturing: II. Air Entrapment Model," *AIChE Journal*, Vol. 41, No. 10, 1995, pp. 2274-2281.
- 4) Mahale, A.D., R.K. Prud'homme, and L. Rebenfeld, "Quantitative Measurement of Voids Formed During Liquid Impregnation of Nonwoven Multifilament Glass Networks Using an Optical Visualization Technique," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 32, 1992, pp. 319-326.
- 5) Chen, Y.T., H.T. Davis and C.W. Macosko, "Wetting of Fiber Mats for Composites Manufacturing: I. Visualization Experiments," *AIChE Journal*, Vol. 41, No. 10, 1995, pp. 2261-2273.
- 6) Rohatgi, V., N. Patel and L.J. Lee, "Experimental Investigation of Flow Induced Microvoids During Impregnation of Unidirectional Stitched Fiberglass Mat," *Polymer Composites*, Vol. 17, No. 2, 1996, pp. 161-170.
- 7) Greszczuk, L.B., "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, 1967.
- 8) Hancox, N.L., "The Effect of Flaws and Voids on the Shear Properties of CFRP," *J. Mater. Sci.*, Vol. 12, 1977, pp. 884-892.
 - 9) Judd, N.C.W. and W.W. Wright, "Voids and Their Effects on the Mechanical Properties of Composites - An Appraisal," *SAMPE Journal*, Vol. 14, 1978, pp. 10-14.
 - 10) Yosida, H.T., T. Ogasa and R. Hayashi, "Statistical Approach to the Relationship between ILSS and Void Content of CFRP," *Composites Science and Technology*, Vol. 25, 1986, pp. 3-18
 - 11) Harper, B.D., G.H. Staab and R.S. Chen, "A Note on the Effects of Voids Upon the Hygral and Mechanical Properties of AS4/3502 Graphite/Epoxy," *J. of Composite Materials*, Vol. 21, 1987, pp. 280-289.
 - 12) Feldgoise, S., M.F. Foley, D. Martin, and J. Bohan, "The Effect of Microvoid Content on Composite Shear Strength," *23rd International SAMPE Technical Conference*, October 1991, pp. 259-273.
 - 13) K.J. Bowles and S. Frimpong, "Void Effects on the Interlaminar Shear Strength of Unidirectional Graphite-Fiber-Reinforced Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 26, No. 10, 1992, pp. 1487-1509.
 - 14) M.K. Kang, W.I. Lee and H.T. Hahn, "Formation of Microvoids during Resin Transfer Molding Process", *Composite Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 2427-2434.
 - 15) Dullien, F.A.L., *Porous Media - Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, New York, 1979.