

## 論文

## VARTM공정에서의 거시적 수지 유동의 Dual-Scale 분석

박윤희\*, 강문구\*\*, 이우일\*\*

## A Dual-Scale Analysis of Macroscopic Resin Flow in Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process

Yun-Hee Park\*, Moon Koo Kang\*\*, Woo Il Lee\*\*

## ABSTRACT

In VARTM process where a sacrificial medium is used to facilitate the resin flow, the velocity of resin varies drastically between the sacrificial medium and the fiber preform. Although the thickness-to-length ratio of a VARTM product is usually small, a 3-D analysis is prerequisite to analyze the lead-lag flow in the two different media. The problem associated with the full 3-D analysis is the CPU time. A full 3-D numerical mesh comprising large number of nodes requires an impractical CPU time on average computer platforms. In this study, a dual-scale analysis technique was developed. The flow analysis for the entire calculation domain was conducted in 2.5-D, and the 3-D analysis was performed for a small area of special concern. In some numerical examples, the local 3-D analysis could discover an eccentric flow pattern as well as the lead-lag flow that will inevitably be neglected in 2.5-D simulations. The global-local analysis technique practiced in this study can be used to analyze the intricate flow of resin through non-uniform media in affordable CPU times.

## 초 록

VARTM공정에서는 수지유동을 빠르게 하기 위해 투과촉진층이 사용되는데 투과촉진층과 섬유층 사이의 수지 속도차가 크다. VARTM제품은 길이에 비해서 두께가 얇으나 두 가지 다른 유동 매질 사이에 발생하는 lead-lag 유동을 관찰하기 위해서는 두께 방향을 고려한 3차원해석이 요구된다. 그런데 3차원해석에 있어서 계산 시간이 문제가 된다. 일반 PC로 절점수가 많은 3차원 문제를 해석하려면 오랜 시간이 소요되므로 비실용적이다. 그래서 본 연구에서는 dual-scale 기법을 도입하여 전체 영역은 2.5차원으로 해석하고 주요한 관심 영역만을 3차원으로 해석하였다. 2.5차원 시뮬레이션만으로 예측하기 어려운 lead-lag 유동과 같은 특이한 유동 경향을 국부적인 3차원 해석을 통해서 발견할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 global-local 해석기술은 일반 PC에서 적당한 계산 시간 내에 균일하지 않은 유동 매질 사이를 지나가는 유동흐름의 특성 분석에 효과적으로 사용될 수 있다.

## 1. 서론

복잡한 형상의 대형 복합재료 제품 생산 공정에 있어서 가격이 저렴하고 공정 시간이 짧은 VARTM이 새로운 대안책으로 주목 받고 있다. 윗면의 금형을 진공 덮개 역할

을 하는 유연한 membrane로 대체하면 보강 섬유들의 균일한 압착이 가능하고 금형가격이 줄어든다. Fig. 1에서 보듯이 VARTM은 개방 금형의 일종으로 윗면이 유연한 막으로 밀봉된 구조물 내에서 제품을 성형한다. 수지 주입시 주입구의 압력은 대기압으로 유지되며 최대 압력차가 1기

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 전기컴퓨터공학부

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

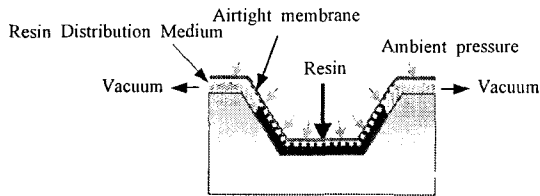


Fig. 1 Vacuum Bag Resin Transfer Molding Process(VARTM).

압으로 한정되어 있으므로 함침 속도는 매우 느리다. 더 빠른 함침을 유도하여 충전 시간을 줄이기 위해 보강 섬유층위에 높은 투과성 계수를 가지는 유동 매질을 적층한다.

일반적으로 복합재료성형제품은 길이에 비해 두께가 얇으므로 전체 영역을 2.5차원으로 가정 할 수 있다. 수지가 충전되는 동안 두 유동 매질의 투과율 차이로 인해서 보강 섬유층의 단면에서 lead-lag 현상이 발견되며 기공과 dry spot이 생겨 보강 섬유층이 불완전하게 함침된다[1,2]. 이런 결함의 예측에 3차원 수치 해석 기법이 사용될 수 있다. 평면과 두께 방향의 유동 패턴을 정확하게 예측하기 위해서는 3차원 유동 해석이 필요하므로 각각의 유동 매질당 수많은 요소들로 이루어진 여러층의 격자계가 필요하다. 따라서 전체 절점수는 실용적으로 계산 가능한 범위를 초과하게 된다. 본 논문에서는 3차원 수치 유동을 시뮬레이션하기 위해 dual-scale 해석 기술이 도입되었다.

global 해석은 평면방향으로의 수지 유동 전진을 예측하기 위해 수행되었고 global 해석 결과에 근거하여 3차원 유동해석이 요구되는 부분에 local 해석 기법을 이용하여 높은 정밀도의 부분 해석이 이루어졌다.

## 2. Dual-Scale Flow Model

### 2.1 Governing Equations

VARTM공정은 진공하에서 수지를 섬유층속으로 주입하여 이루어진다. 성형 공정에서의 제품은 고체 벽면에 의해 형상이 고정되며 대기압에 노출된 유연한 진공막에 의해 균일하게 압착된다. 수지와 변형 가능한 보강 섬유의 질량 및 운동량 보존 법칙은 다음과 같다[3-5].

$$v_i^r = -\frac{K_{ij}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$-\frac{1}{V_f} \frac{\partial V_f}{\partial t} - \frac{1}{V_f} \frac{\partial V_f}{\partial x_i} v_i^r = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{K_{ij}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$v_i^r$ 는 보강 섬유에 대한 수지의 상대 속도이고,  $V_f$ 는 섬유 충전률,  $v_i^f$ 는 보강 섬유의 속도,  $p$ 는 수지의 압력,  $\mu_r$ 은 수지점도,  $K$ 는 이방성의 보강 섬유층 또는 투과 축진층의 투과성 계수이다. 첨자  $i, j$ 는 방향을 표시한다. 평면 방향으로는 수지 속도가 느려서 보강 섬유의 변형이 무시되므로 평면 방향의 보강 섬유 속도는 무시할 수 있다.

$$v_x^f = v_y^f = v_z^f = 0 \quad (3)$$

위의 가정을 적용하면 식(2)가 다음과 같이 단순화된다.

$$-\frac{1}{V_f} \frac{\partial V_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{K_{ij}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

진공막이 유연하므로 수지의 압력과 보강 섬유 변형 응력의 합이 대기압과 평형을 이룬다[6-7]. 즉, 보강 섬유의 압착력이 대기압과 평형을 이룬다.

$$p + \sigma = p_{amb} \quad (5)$$

$\sigma$ 는 보강 섬유의 압착력을,  $p_{amb}$ 는 대기압을 의미한다.

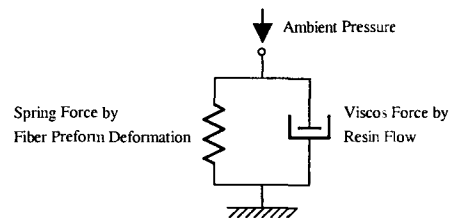


Fig. 2 Load sharing of the ambient pressure.

두께 방향의 수지 압력차로 인하여 보강 섬유 부피 분율이 일정하지 않다. 임의의 섬유 부피 분율에 대한 투과율을 구하기 위해 Carman-Kozeny 방정식이 사용되었다[8].

$$K_{ij} = \frac{d_f^2}{16k_{ij}} \frac{(1-V_f)^3}{V_f^2} \quad (6)$$

$d_f$ 는 섬유 가닥의 지름,  $k_{ij}$ 는 투과율의 방향 변화를 나타내는 model 상수이다. 섬유 압착력과 섬유 부피 분율 사이의 관계는 다음과 같다[5].  $V_{f0}$ 는 압착력이 0일때의 섬유 부피 분율을 의미하고  $A$ 와  $\lambda$ 는 model 상수이다.

$$\sigma = A \left[ \exp\left(\lambda \frac{V_f}{V_{f,0}}\right) - \exp(\lambda) \right] \quad (7)$$

경계 조건은 다음과 같다.

주입구 :  $p=p_{amp}$

벽 면 :  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$  (8)

유동 전진면 :  $p=p_{vac}$

식(1)~(8)을 풀면 수치 전진면의 위치와 압력이 시간에 대한 함수로 구해진다. 본 연구에서 상세하게 다루지는 않았지만 수지가 충전되는 동안의 열전달과 경화반응에 관련된 열적 화학적 문제가 상세히 고찰된 바 있다[9,10].

### 2.2 Control Volume Finite Element Method (CVFEM)

고정된 격자계에서 유동 전진면을 추적하기 위해 CVFEM (control volume finite element method) 기법이 사용된다. 계산 영역은 유한개의 요소와 control volume으로 나누어진다[9-14]. Fig. 3에서 보듯이 인접한 요소의 중심과 요소 경계선의 중점들을 연결함으로써 하나의 control volume이 정의된다. 각 control volume의 경계는 해당 control volume의 control surface를 구성한다.

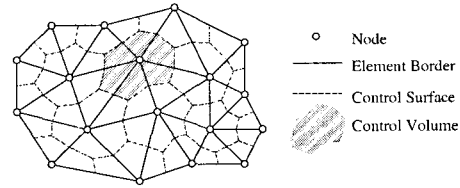
Fig. 4에서 보듯이 각각의 control volume은 수치 충전률,  $f$ 에 따라 3가지 범주로 분류된다. 수치 유동 전진면은 수치로 가득찬 영역( $f=1$ )과 수지가 전혀 들어 있지 않은 공기유동영역( $f=0$ ) 사이에 존재한다. 부분적으로 수지가 충전된 control volume( $0 < f < 1$ ) 내에서 control surface를 지나가는 mass flux를 계산함으로써 유동 전진이 각 단계마다 결정된다. 각 control volume 내에서 식(4)를 적분하면 다음과 같다.

$$-\int_{cv} \frac{1}{V_f} \frac{\partial V_f}{\partial t} d\Omega = \int_{cs} \frac{[K]}{\mu_r} \nabla p \cdot \mathbf{n} ds \quad (9)$$

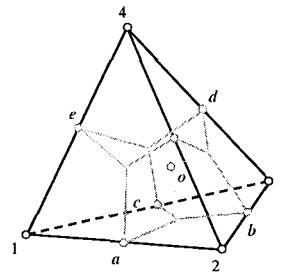
식(9)를 풀면 수치내의 압력 분포를 구할 수 있다. 식(1)로부터 얻은 수치 속도는 다음 time step에서의 새로운 유동 전진면을 결정하는데 사용된다.

### 3. Global-Local Analysis

최근 급속도의 컴퓨터 성능 향상에도 불구하고 일반 PC에서 고해상도 격자계를 사용하여 3차원 금형충전과정을

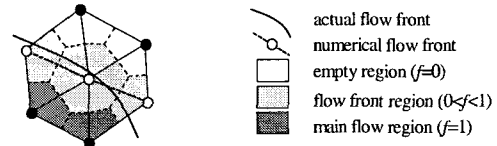


(a) Discretization of 2.5-dimensional calculation domain

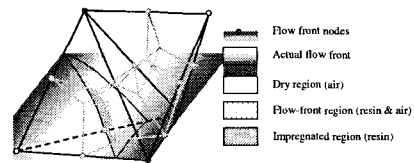


(b) Discretization of 3-dimensional calculation domain

Fig. 3 Discretization of calculation domain into elements and control volumes.



(a) Determination of the flow front in 2.5-D problems



(b) Determination of the flow front in 3-D problems

Fig. 4 Determination of the flow front.

시뮬레이션하기 위해서는 과도한 계산 시간이 요구된다. 계산 용량 및 계산 시간의 측면에서 매우 효율적인 bi-conjugate gradient matrix solver 알고리즘을 사용할 때 행렬을 푸는데 소요되는 계산 시간은 대략  $O(N)$ 에 비례한다[15]. 여기서  $N$ 은 전체 절점수를 의미한다. CVFEM은 각 time step에서 한 개의 control volume이 충전되므로 control volume을 완전히 채우는데 걸리는 총 time step의 수는  $O(N)$ 에 비례한다. 결과적으로 대략  $O(N^2)$ 에 비례한 계산 시간이 요구된다. 따라서 유동 해석에 소요되는 계산 시간은 절점수에 비례해서 증가한다. 수치 속도가 두께 방향으로 급격하게 변하므로 수치 격자는 하나의 유동 매질

당 여러 개의 요소들을 가진 여러 개의 층이 필요하다.

따라서 전체 절점수는 과도하게 커진다. 기공의 생성과 같은 국부적 결함을 예측하기 위해서 평면방향으로의 분석도 중요하다. 한 예로 300mm×300mm의 작은 사각 평판에 생긴 지름이 3~4mm인 기공을 예측하기 위해서는 최소한 평면 방향으로 약 10,000개의 절점이 필요하다. 유동 매질당 유한 요소의 층수를 곱하면 총 절점수는 실용적인 범위를 크게 초과한다. 10,000개의 절점을 가진 격자계의 금형 충전 해석 시 일반 PC에서 몇 시간이 소요됨을 고려할 때 50,000~100,000개의 절점을 가진 거대한 격자계로 구성되어 있는 전체 영역을 3차원으로 해석을 한다면 과도한 시간이 소요됨을 예측할 수 있다. 아래의 Table 1은 VARTM의 3차원 시뮬레이션시 격자의 개수가 증가함에 따라 요구되는 계산 시간을 추정한 것이다.

3차원의 현실적인 대안책으로 계산 시간이 적게 소요되는 global-local 분석 방법이 사용될 수 있다. 전체 영역은 2.5차원으로 시뮬레이션하고 3차원 해석이 꼭 필요한 국적인 영역만 3차원으로 해석하는 것이 훨씬 효율적이다. global-local 해석 기법을 이용하여 (주)대우 자동차에서 출시된 99년형 마티즈 승용차의 engine hood의 해석을 수행하였다.

Fig. 5a는 복합 재료로 제조한 hood panel의 형상인데 강성을 증가시키기 위해 보강 섬유층 사이에 form core를 삽입하였다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 위한 hood panel의 형상만을 취하였으며 제품 제작은 이루어지지 않았다. Skin panel에서 복합재료 panel의 두께는 3.5mm이고 stiffener의 두께는 1.5mm이다. Stiffener의 평균 두께는 약 25mm이고 투과축진층의 두께는 0.5mm이다. 섬유층의 투과성 계수는  $7.0 \times 10^{-11} \text{m}^2$ 이고 투과축진층의 투과성 계수는  $3.6 \times 10^{-6} \text{m}^2$ 이다. 식(10)은 유효 투과성 계수를 구하는 식으로  $K_{eff}$ 는 유효투과성 계수,  $K_f$ 는 섬유층의 투과성 계수,  $K_s$ 는 투과축진층의 투과성 계수,  $h_f$ 는 섬유층 두께,  $h_s$ 는 투과축진층의 두께를 의미한다.

$$K_{eff} = \frac{K_f h_f + K_s h_s}{h_f + h_s} \quad (10)$$

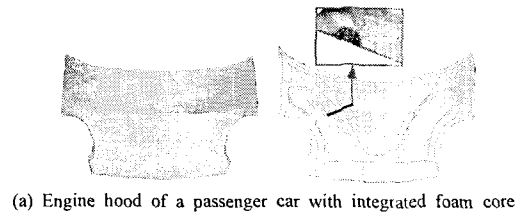
위의 식을 사용해서 구한 섬유층과 투과축진층의 유효 투과성 계수는 복합재료 panel에서  $4.5 \times 10^{-9} \text{m}^2$ , stiffener에서  $9 \times 10^{-9} \text{m}^2$ 이다. Fig. 5b는 global 2.5차원해석에 필요한 수치 격자를 나타낸다. 수치는 2,000Pa의 진공 압력하에서 침투된다. Fig. 5c는 금형 충전 과정이 끝난 후의 압력 분포를 시뮬레이션 한 것이다.

사용된 2.5차원 코드에서는 열 전달 및 수지의 경화 반응이 예측 가능하지만 본 논문에서는 등온으로 온도를 일

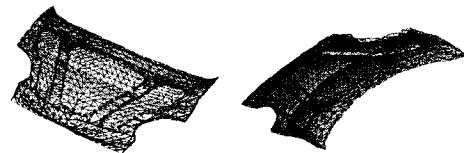
Table 1 CPU time for 3-D VARTM simulation with increasing number of nodes

Number of nodes	3,266	10,877	21,214	50,000	100,000
CPU time	0.23 hrs	3.05 hrs	14.9 hrs	~ 95 hrs (예상)	~ 820 hrs (예상)

\*Intel PentiumIV® 1.6GHz로 측정된 데이터



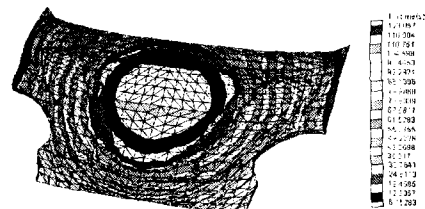
(a) Engine hood of a passenger car with integrated foam core



Total number of nodes: 1,032  
Total number of elements: 2,110  
(b) 2.5-D mesh



(c) Pressure



(d) Resin Flow Pattern

Fig. 5 2.5-D Global Analysis of VARTM Process.

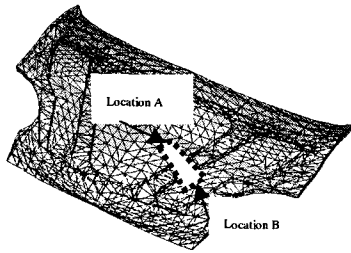
정하게 유지하고 경화를 무시한 상태에서 수지의 전진만을 다루었다. 2.5차원 해석이 완료된 후 시뮬레이션 결과는 국부적인 3차원 해석의 입력자료로 사용된다. 3차원 해석이 요구되는 부분은 stiffener의 단면인데 측면을 통한 수지 유

입이 발생하지 않도록 국소 영역을 정하였다. 2.5차원 해석 단계에서 3차원 시뮬레이션의 국소 입, 출구에 해당하는 위치의 압력데이터 기록된다. 3차원에서 기록된 압력 데이터는 식(11)에 있는 시간의 다항식 함수의 형태로 curve fit된다. 첨자  $i$ 는 국소 입구를,  $o$ 는 국소 출구를 의미한다.  $t_{i,0}$ 와  $t_{o,0}$ 는 각각 수치 유동이 국소 입, 출구에 도달하는 시간이다.

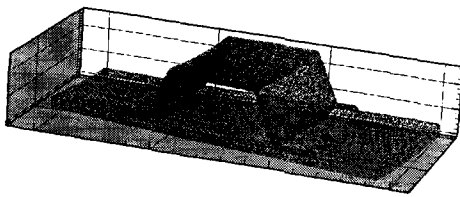
$$p_i(t) = \begin{cases} A_i(t-t_{i,0})^3 + B_i(t-t_{i,0})^2 + C_i(t-t_{i,0}) + D_i & t \geq t_{i,0} \\ p_{\text{vacuum}} & t < t_{i,0} \end{cases}$$

$$p_o(t) = \begin{cases} A_o(t-t_{o,0})^3 + B_o(t-t_{o,0})^2 + C_o(t-t_{o,0}) + D_o & t \geq t_{o,0} \\ p_{\text{vacuum}} & t < t_{o,0} \end{cases} \quad (11)$$

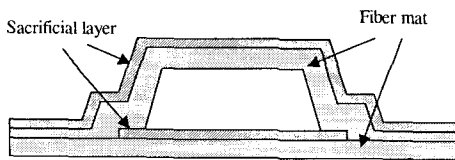
Fig. 6은 국소 해석이 이루어진 영역과 수치 격자, 섬유층, 투과 촉진 매개층을 나타낸다. 국부적인 3차원 해석에서 압력 데이터는 입구(Fig. 6a, 위치 A)와 출구(Fig. 6a, 위치 B)에 해당하는 경계 조건으로 사용된다. 2.5차원 해석에서



(a) 2.5-D mesh for the global analysis



Total number of nodes: 4,536  
Total number of elements: 18,090  
(b) 3-D mesh for the local analysis



(c) Stacking of fiber/sacrificial layer at the section of local analysis

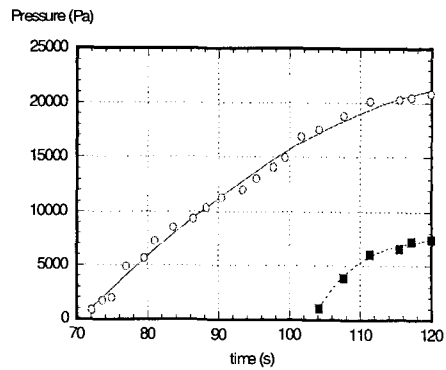
Fig. 6 Numerical Mesh for Global-Local Analysis.

구한 관심의 대상이 되는 국소 영역의 압력 데이터는 실제 3차원 입, 출구의 압력 데이터와 약간의 차이는 있으나 3차원 입, 출구 압력데이터의 양상면에서는 큰 차이가 없으므로 2.5차원에서 구한 압력 데이터를 3차원 입, 출구의 압력 데이터로 사용하였다.

Fig. 7은 다항식 형태로 curve fit된 압력데이터를 나타낸다. Fig. 8은 3차원 시뮬레이션 결과로 수치 압력과 충전 형상을 보여준다. 섬유층의 투과율은  $7.0 \times 10^{-11} \text{m}^2$ 이고 투과 촉진층의 투과율은  $3.6 \times 10^{-8} \text{m}^2$ 이다. 대기압은  $1 \times 10^5 \text{Pa}$ 이고 진공압은  $2 \times 10^3 \text{Pa}$ 으로 하였다. 투과 촉진 매개층에서는 수치 유동이 빠르고 섬유층에서는 속도가 느리므로 섬유내에서 기공이 형성됨이 예측되었다. 충전 형상의 그림에서 섬유층 표면에서 기공이 간히는 모습을 관찰 할 수 있다. 보강 섬유내에서 생긴 많은 기공들이 수치 유동에 의해 쓸려 빠져 나가는 현상이 존재하나, 본 연구에서는 기공 이동을 다루지 않았다. 4,536개의 절점과 18,090개의 요소를 가진 형상의 유동 해석에 1.12시간이 소요되었다.

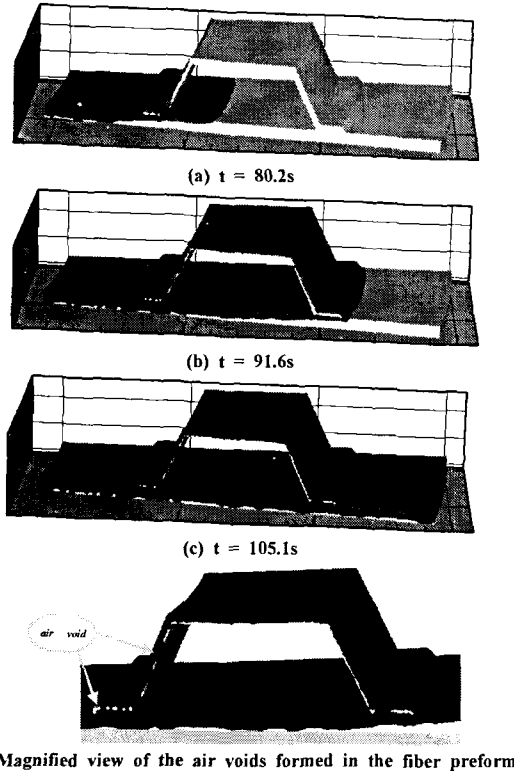
#### 4. 결론

VARTM공정에서의 투과 촉진층과 보강 섬유층을 통한 수지의 lead-lag 유동 및 그 결과로 발생하는 기공의 형성을 시뮬레이션 하기 위해 global-local 해석 기법이 개발되었다. 2.5차원으로 전체 영역을 해석하였고 관심의 대상이



Location A	Location B
$P_i = A_i t^3 + B_i t^2 + C_i t + D_i$	$P_o = A_o t^3 + B_o t^2 + C_o t + D_o$
$A_i : -0.022615$	$A_o : -0.022615$
$B_i : 1.3647$	$B_o : 1.3647$
$C_i : 797.3$	$C_o : 797.3$
$D_i : -55074$	$D_o : -55074$

Fig. 7 Inlet and Outlet Pressure for Local 3-D Analysis.



(d) Magnified view of the air voids formed in the fiber preform  
 Fig. 8 Simulation result of flow-front location from local 3-D analysis.

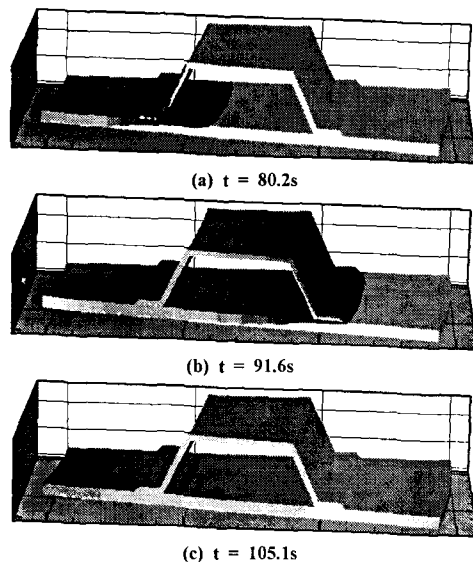


Fig. 9 Simulation result of pressure from local 3-D analysis.

되는 국소 영역을 3차원으로 해석하였다. 2차원해석에서는 미리 선택된 몇 개의 점에서의 압력을 기록하고 그 값은 국소적 3차원 해석 시 경계 조건으로 사용하였다. 2.5차원 시뮬레이션에서 예측 할 수 없었던 작은 기공의 형성은 3차원 local 해석을 통해 관찰할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 dual-scale해석 기법은 수지의 전체적인 충전 형상과 복잡한 유동 현상이 발생하는 특정 영역의 국소 유동의 예측에 효과적으로 사용되었다.

### 참고문헌

- 1) M. Tari, J.P. Imbert, M.Y. Lin, A.S. Lavine, and H.T. Hahn, "Analysis of Resin Transfer Molding With High Permeability Layers," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, 1998, pp. 609-616.
- 2) S.T. Lim and W.I. Lee, "Analysis of Three Dimensional Resin Transfer Mold Filling Process," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 961-975.
- 3) E.A. Kempner, *Process Simulation for Manufacturing of Thick Composites*, Ph.D. Thesis, Univ. of California, Los Angeles, 1997.
- 4) M.K. Kang and H.T. Hahn, "Resin Transfer Molding for Naval Structures," *US-Pacific Rim Workshop on Composite Materials for Ships and Offshore Structures*, April 6-11, 1998.
- 5) M.K. Kang and H.T. Hahn, "Analysis of Vacuum Bag Resin Transfer Molding Process," *Composites Part A*, Vol. 32, 2001, pp. 1553-1560.
- 6) T.G. Gutowski, "A Resin Flow/Fiber Deformation Model for Composites," *SAMPE Quarterly*, Vol. 16, No. 4, 1985, pp. 58-64.
- 7) C.D. Williams, S.M. Groove and J. Summerscales, "The compression response of fibre-reinforced plastic plates during manufacture by resin infusion under flexible tooling method," *Composites Part A*, Vol. 29, 1998, pp. 111-114.
- 8) F.A.L. Dullien, *Porous Media - Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, New York, 1979
- 9) R. Lin, L.J. Lee and M. Liou, "Non-isothermal Mold Filling and Curing Simulation in Thin Cavities with Preplaced Fiber Mats," *Intern. Polymer Processing*, Vol. 6, No. 4, 1991, pp. 356-369.
- 10) L.J. Lee, W.B. Young and R.J. Lin, "Mold Filling and Cure Modeling of RTM and SRIM processes," *Composite Structures*, Vol. 27, Elsevier Science Publishers, 1994, pp. 109-120.
- 11) M.V. Brusckhe, and Advani,S.G., "A Finite Element/

- Control Volume Approach to Mold Filling in Anisotropic Porous Media," *Polymer Composites*, Vol. 11, 1990, pp. 398-405.
- 12) C.A. Fracchia, J. Castro and C.L. Tucker, "A Finite Element/Control Volume Simulation of Resin Transfer Mold Filling," *Proceedings of the American Society for Composites*, 4th Technical Conference, 1989, pp. 157-166.
  - 13) S.G. Advani, *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing*, Composite Materials Series 10, 1994
  - 14) M.K. Kang, and W.I. Lee, "A Flow Front Refinement Technique for the Numerical Simulation of Resin Transfer Molding Process," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, 1999, pp. 1663-1674.
  - 15) W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery, *Numerical Recipes in C - The Art of Scientific Computing*, 2nd Ed., Cambridge University Press, 1992.