

## 복합격자법을 이용한 수지이동성형의 충전공정에 대한 수치모사

이 성 재

수원대학교 공과대학 고분자공학과  
(1997년 7월 12일 접수)

### Simulation for the Filling Process of Resin Transfer Molding by Incorporating Composite Grids

Seong Jae Lee

Department of Polymer Engineering, The University of Suwon, Suwon 445-743, Korea  
(Received July 12, 1997)

#### 요 약

고분자 복합재료 제조방법의 하나인 수지이동성형의 충전공정을 모사하기 위한 수치모사 코드를 개발하였다. 수지이동성형의 충전공정 문제를 수학적 공식으로 표현하기 위하여 비등방성 다공질체를 통과하는 유동에 대한 이론을 사용하였다. 과도상태로 진행되는 자유표면의 동적 충전거동을 모사하기 위하여 수치격자 생성(numerical grid generation)을 포괄하는 경계적합 좌표계(boundary-fitted coordinate systems)의 계산기법을 적용하였다. 이와 아울러 불규칙적인 구조와 다중으로 연결된 금형면의 충전모사에 적합한 복합격자(composite grids)의 개념을 도입하였다. 복합격자들 간의 가상의 경계에 대해서는 검사체적(control volume) 기법을 이용하여 물질보존을 만족시켜 주었다. 임의의 금형 두께와 투과도를 가지는 다수의 금형면이 결합된 두 개의 입구를 지닌 금형을 대상으로 하여 몇 가지 예를 시험해 보았다. 수치모사의 결과 복합격자의 개념을 도입한 수치모사 코드는 수지이동성형의 복잡한 충전공정을 보다 정교하게 모사하는데 응용될 수 있음을 보여 주었다.

**Abstract**— A numerical code to simulate the filling process of resin transfer molding (RTM) for the manufacturing of polymer composite materials was developed. The theory of flow through anisotropic porous media was used for the mathematical formulation of this problem. To describe the dynamic filling patterns of transient free surface, the computational technique of boundary-fitted coordinate systems encompassing numerical grid generation was applied. Also introduced was the approach of composite grids which was suitable for irregular geometries and multiple domains. Control volume scheme was implemented for the mass conservation along the pseudo-boundaries interfacing composite grids. Some examples were tested for the analysis of doubly-gated mold with multiply-jointed domains including variable gap thickness and permeability. Numerical results showed the applicability of the composite grid approach in achieving accurate modeling of the filling process of resin transfer molding.

**Keywords:** Resin transfer molding (RTM), mold filling process, numerical simulation, boundary-fitted coordinate systems (BFCS), composite grids

#### 1. 서 론

경량화, 고강도, 저비용 등의 요건을 갖춘, 향상된 능력을 갖는 재료에 대한 끊임없는 요구에 발맞추어 지난 70년대 이후로 새로운 가공공정으로 제조한 고분자 복합재료의 사용이 급격히 증가하고 있다[1]. 이러한 고분자 복합재료 제조공정의 하나인 수지이동성형(resin transfer molding; RTM)은 비교적 저렴한 제조단가로 중대형의 제품을 제조하기에 적합한 가공 기술이다. RTM을 산업적 가공기술로 사용한 분야로는 자동차 및 항공기 소재, 일상생활 소비재, 수상보트, 저장용 탱크 등에서 찾아볼 수 있는데 이 공정을 이용할 경우 부가적인 이점은 부분으로 이루어진 복잡한 형상을 비교적 간단하게 단일의 매끈한 제품(net-shape)으로 제조하는데 적합하다는 점이다. 즉, 구조적인 집적을 향상시킬 수 있어 부품을 연결하는데 소요되

는 경비를 줄일 수 있다. 하지만 최근까지 대부분의 RTM 공정 개발은 시행착오적인 실험에 의해 이루어져 가공장비와 공정 조건을 개발하고 최적화하는데 많은 시간과 경비를 필요로 하였다. 따라서 정확한 수학적인 모델에 기초한 공정모사 기법이 절실히 필요한 시점에 이르게 되었다. 그 중에서도 충전공정은 성형제품의 형태학적 구조(morphology), 벤트(vent)의 위치 설정, 웰드라인(weldline)의 형성 등에 직접적인 영향을 미치므로 이 공정에 대한 수치모사 해석은 아주 큰 관심사라 할 수 있을 것이다.

RTM 충전공정에 대한 모델링은 수지와 직조섬유를 다른 물질로 두고서 투과도 계수 등을 결정하는 것과 같이 미시적인 관점에서 해석할 수도 있고 전체 영역을 Darcy의 모델에 기초한 연속체로 취급하여 거시적인 관점에서 해석할 수도 있다. 금형설계와 조업변수를 최적화하기 위해 예측해야 할 금형내

의 전체적인 충전형태를 해석할 목적으로는 다공성 매질을 통과하는 자유표면 유동으로 묘사되는 Darcy 법칙을 사용하는 거시적 방법에 의한 모델링이 일반적이다. 금형충전공정에 대한 초기의 수치모사는 Hele-Shaw 모델에 기초하는 사출성형에 초점이 맞추어졌다[2-4]. 일반적으로 연속적으로 진행되는 유동영역으로 이루어지는 금형충전공정을 수치적으로 해석하는 방법에는 두 가지 접근법이 있다. 하나는 고정격자(fixed mesh)에 의한 방법으로 수지가 충전되기 전에 전체 금형영역에 대해 격자를 미리 생성시켜 해석하는 방법이고, 또 하나는 충전이 진행됨에 따라 계산격자를 구성시키는 동적격자(dynamic mesh) 생성에 의한 방법이다. 공정 수치모사에 역점을 두고서 RTM 모델링에 대해 서술한 총설 논문(review paper)은 Yalvaç 등[5]에서 찾아볼 수 있다.

과도적으로 변화해 가는 유동영역을 구성할 격자를 생성시키는데 드는 노력을 줄이기 위해 Wang 등[6]은 충전할 전체 영역에 대해 하나의 고정격자를 구성시키고 Tadmor[7]에 의해 제안된 Flow Analysis Network(FAN) 방법에 기초한 검사체적(control volume)의 방법을 도입했다. 이 방법은 각 검사체적의 경계에서 플럭스를 계산하고 격자의 충전분율을 확인하여 자유표면의 위치를 추적하는 방법이다. 이러한 고정격자에 의한 방법은 격자를 재구성해야 하는 수고는 들이지 않아도 되지만 유동선단의 형상이 미리 지정한 격자의 크기 및 위치에 의존하게 되어 움직이는 유동선단을 추적하는데 상당한 내삽(interpolation)을 요하게 되므로 정확도에 한계가 있다 하겠다. 이 점을 보완하기 위하여 유동선단 주위의 영역을 부분적으로 재구성시킨 격자를 사용하여 유동선단의 정밀도를 향상시키는 방법을 쓰기도 한다.

동적격자에 의한 방법은 과도적으로 변화해 가는 유동선단의 형상을 비교적 정확히 추적할 수 있고 속도, 압력 등 유동장의 해에 있어서도 매우 높은 정확도를 유지시킬 수 있다. Trafford[8]는 동적격자법에 의한 해의 정확성을 인지하고 수치격자 생성을 손쉽게 할 수 있는 경계적합 좌표계(boundary-fitted coordinate systems: BFCS)를 사출성형의 충전공정의 수치모사에 처음으로 도입하였고, 그 후 Coulter와 Güçeri[9]는 RTM 충전공정의 수치모사에 이와 같은 동적격자법을 이용하였다. 하지만 동적격자에 의한 수치모사 방법은 매 시간간격에 대해 격자를 재구성해야 하는 어려움을 내포하고 있으므로 복잡한 형상을 지니거나 여러 면이 접합된 금형의 충전에 대해서는 적용하는데 한계가 있다. 접합면을 갖는 금형의 충전 모사에 동적격자를 이용하는 방법을 적용시키기 위해 Friedrichs[10], Lee와 Güçeri[11]는 복합격자의 개념을 도입하여 해석하였다.

본 연구에서는 복합격자의 개념을 확장시켜 다수의 금형입구를 통해 수지를 충전시키는 경우를 해석하고자 하며 이 경우 필수적으로 따르는 웰드라인의 형성 위치와 금형의 최종 충전 위치를 예측해 보고자 한다. 이때 온도에 따른 점도변화, 고화(solidification) 등은 고려하지 않는 등온상태 하의 충전현상에 한정하기로 하는데 보다 실제적인 문제를 해석하려면 에너지 수치식도 고려하여야 할 것이다. 이와 동시에 실제의

RTM 제조상황처럼 모사하기 위하여 금형내 직조섬유의 투과도와 금형간격을 변화시키고 두 금형입구에서의 유량을 달리 하며 충전공정을 수치모사해 보고자 한다.

## 2. 수학적 모델링

### 2.1. RTM 충전 유동에 대한 지배방정식

접합면(stiffener)과 두 개의 금형입구(inlet gate)를 갖는 복잡한 형태의 금형에 대한 예를 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. 섬유직조(preform)가 들어 있는 금형 캐비티(cavity)는 비등방적인 다공성 매질로 둘 수 있으며 평면의 두 방향에 비해 무시할 수 있을 정도의 아주 얇은 두께를 가진 것으로 가정하여 RTM 충전공정을 이차원 유동으로 가정한다. 전체 금형구조는 삼차원 좌표계인  $x, y, z$ 로 표시되지만 네 개의 유동영역이 복합격자로 구성되어 있으므로 각 영역은 국부적인 이차원 좌표계인  $x', y'$ 로 표시되어 계산이 이차원적으로 이루어진다. 국부 좌표계에서의 계산은 이차원적으로 이루어지지만 간격방향으로의 평균속도를 사용하여 금형 캐비티의 두께 변화를 고려해 줄 수 있다.

레이놀즈 수가 매우 작고 충전속도가 느리므로 모멘텀식에서 관성력을 무시할 수 있고 의사 정상상태 가정(quasi-steady state assumption)을 해 줄 수 있다. 또한 중력의 효과는 다음의 무차원 수로 평가할 수 있다.

$$\Psi = \frac{K_c \rho g \cos \theta}{v_c \eta} \tag{1}$$

여기서  $g, \rho, \eta, K_c, v_c$ 는 각각 중력가속도, 수지의 밀도와 점도, 섬유직조의 특성 투과도와 수지의 특성 함침속도를 나타내며,  $\theta$ 는 중력방향과 금형면 사이의 경사각을 나타낸다. 실제 RTM 공정의 경우 이 값이 1보다 훨씬 작으므로 중력에 의한 영향은 무시할 수 있으며 이것은 금형을 공간적으로 어느 방향으로 위치시켜도 상관없음을 말해 주는 것이다. 그러면 RTM 충전 유동에 대한 지배방정식을 설정할 수 있다.

변화하는 금형간격  $h$ 를 고려하는 연속방정식(continuity e-

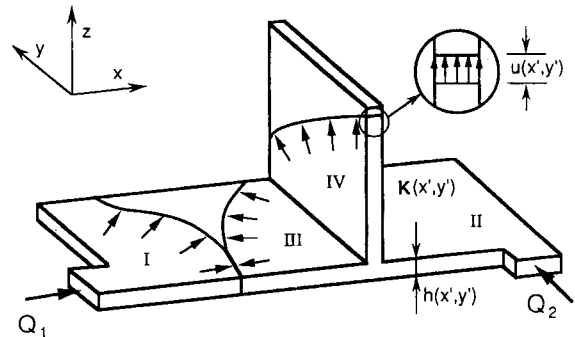


Fig. 1. Schematic description of a mold cavity with a stiffener and double gates, where  $x, y, z$  are global three-dimensional, and  $x', y'$  are local two-dimensional coordinates. Composite grids are represented by domains I-IV.

quation)은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (h \mathbf{v}) = 0 \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{v}$ 는 두께 방향을 따라 평균한 평균 속도벡터이다. 앞에서 설정한 가정을 적용하면 결과적으로 표현되는 속도는 다음의 Darcy의 법칙으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{v} = -\frac{1}{\eta}(\mathbf{K} \cdot \nabla p) \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{K}$ 는 투과도 텐서를  $p$ 는 압력을 나타낸다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 압력으로 표현되는 단일한 형태의 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \left( \frac{h}{\eta}(\mathbf{K} \cdot \nabla p) \right) = 0 \quad (4)$$

이차원 좌표계에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{hK_{xx}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{hK_{xy}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{hK_{yx}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{hK_{yy}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (5)$$

여기서  $\mu$ 는 뉴턴유체의 점도이며  $K_{ij}$ 와  $h$ 는 금형 내에서 위치에 따라 변할 수 있다.

### 2.2. 계산영역의 경계조건

식 (5)로 표현된 지배방정식은 타원방정식 형태의 편미분 방정식(elliptic type PDE)이므로 각 계산영역의 모든 경계를 따라 조건이 부과되어야 한다. 유동선단에서는 압력이 0이므로

$$p = 0 \quad (6)$$

이고, 금형벽을 가로질러서는 어떠한 유동도 일어날 수 없으므로 금형벽을 따라서는

$$(h \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (7)$$

의 조건이 부과되는데 여기서  $\mathbf{n}$ 은 금형벽 바깥쪽으로 향하는 단위 법선벡터이다. 금형입구에서는 다음과 같이 압력을 부과시킬 수도 있고 유량을 부과시킬 수도 있을 것이다.

$$p = p_0 \quad (8)$$

또는

$$(h \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} = Q/(W \cdot (1 - vf)) \quad (9)$$

여기서  $Q$ 는 유량이고  $W$ 는 금형입구의 폭이며  $vf$ 는 금형 캐비티에 섬유직조가 차지하는 부피분율이다. 특수한 경우로 충전 영역이 웰드라인을 이루거나 접합면을 이루는 경계에서는  $i, j$  양쪽의 유동영역에 대해 같은 압력이 얻어질 때까지 경계의 양쪽 격자 사이에 구성된 검사체적에 대해 반복적 방법을 통해 해를 수렴시킨다.

$$P_i = P_j \quad (10)$$

### 3. 수치모사 기법

금형충전공정을 수치모사하는 기법으로 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM) 등의 다양한 계산기법이 개발되어 쓰이고 있다. 적절한 수치모사 기법의 선정은 지배방정식의 수식화시의 난이도와 수치모사할 형상의 불규칙한 정도에 따라 결정해야 한다. 경계적합 좌표계(BFCS)는 FEM의 장점인 불규칙한 형상에 적용할 수 있는 형상 유연성과 FDM의 장점인 수식화시의 단순성을 함께 지닌 것으로, 불규칙한 실제 영역을 규칙적인 계산 영역으로 사상(mapping)시키고 지배방정식을 계산 좌표계로 변환시켜 계산 영역에서 계산하여 계산 결과를 다시 실제 좌표계로 환원시켜 해를 구하는 방법으로 일종의 전통적인 FDM이 확장된 형태의 계산 기법이다. 금형충전공정에 이 기법이 사용된 예는 Güçeri[12], Subbiah 등 [13]에서 찾아 볼 수 있다.

#### 3.1. 수치격자 생성

충전공정이 진행됨에 따라 임의로 진행되는 유동선단과 점차 확장되고 변형되는 유동영역을 동적격자의 방법으로 모사하기 위해서는 매 계산에 앞서 새로운 계산 영역이 생성되어야 하는데 이러한 목적으로 가장 널리 쓰이는 방법 중의 하나가 수치격자 생성에 의한 방법이다. 금형충전 수치모사에 대해서는 영역을 둘러싸는 모든 경계에 대해 타원방정식 형태의 격자 생성(elliptic grid generation)을 적용시켜 실제의  $x, y$  좌표계와 계산의  $\xi, \eta$  좌표계 간에 일대일 변환이 이루어지도록 한다. 일반적인 Poisson 형태의 이차원 격자 생성계에서의 격자간의 변환은 다음과 같다.

$$\nabla^2 \xi = g^{11} P_1, \quad \nabla^2 \eta = g^{22} P_2 \quad (11)$$

여기서  $P_1, P_2$ 는 특정한 점이나 선에 대해 격자가 지우치는 것을 조절할 목적으로 사용하는 격자조절함수(grid control function)이다. 변환에 사용되는 매트릭 텐서의 성분(components of metric tensor)과 변환의 Jacobian은 다음처럼 표현된다.

$$\begin{aligned} g_{11} &= g g^{22} = x_\xi^2 + y_\xi^2 \\ g_{22} &= g g^{11} = x_\eta^2 + y_\eta^2 \\ g_{12} &= -g g^{12} = x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta \\ g &= J^2 \quad \text{and} \quad J = x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta \end{aligned} \quad (12)$$

수치격자 생성에 의한 계는 독립변수와 종속변수를 상호 교환하여 표현되어야 하므로 이차원 형태에서는 역변환을 하면 다음의 꼴이 된다.

$$g_{22}(x_{\xi\xi} + P_1 x_\xi) + g_{11}(x_{\eta\eta} + P_2 x_\eta) - 2g_{12} x_{\xi\eta} = 0 \quad (13)$$

격자조절함수가 없는 경우 격자를 구성하는 좌표선은 일반적으로 Fig. 2(a)에서와 같이 경계에서 등간격으로 위치하려는

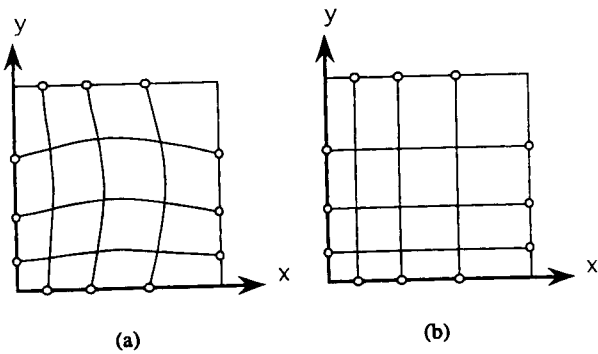


Fig. 2. Numerical grid generation of elliptic systems: (a) grid without control functions, (b) grid with control functions.

경향이 있는데 이는 elliptic 계의 Laplacian operator의 고유한 성질로 점이나 선을 영역 내에 골고루 분산시키려 하기 때문이다. 따라서 물리량의 기울기가 크거나 격자 절점(node)이 부족한 곳에는 격자조절함수를 이용하는 것이 보다 안정한 해를 얻을 수 있게 해 준다. 격자조절함수를 부과시킨 경우의 예가 Fig. 2(b)에 나타나 있다. 이렇게 구성된 수치격자 생성계는 영역의 전체 경계를 따라 경계조건을 부과해 풀어 물리영역에서 계산영역으로 또는 그 반대로 변환이 이루어지게 된다.

3.2. 지배방정식의 변환

불규칙적인 형상을 지닌 영역에 대해 BFCS를 사용하기 위해서는 지배방정식과 Neumann 형태의 경계조건은 규칙적인 형상으로 구성되는 계산 영역으로 먼저 변환이 될 필요가 있다. RTM 충전공정의 경우 금형 캐비티에 위치한 섬유직조의 특성이 급격히 변하는 곳에서는 투과도의 차이가 일어나게 되는데, 적용하는 수치기법에 따라 아주 큰 기울기를 갖는 곳에서는 수렴된 해를 얻지 못하거나 부정확한 해를 얻을 수도 있다. 이럴 경우 지배방정식을 보존적 형태(conservative form)로 변환시키는 것이 상대적으로 안정하고 정확한 해를 보장해 준다. Navier-Stokes 방정식에 BFCS를 적용할 경우 보존적 형태에 대한 일반적인 고찰은 Warsi[14]에서 찾아 볼 수 있다. Friedrichs는[10]은 아주 전단박화(shear thinning)가 심한 유체의 유동에 대해 보존적 형태로 수식화시켜 해를 구했는데 전통적 방법인 비보존적 수식화(non-conservative formulation)에 비해 보다 정확한 결과를 얻었다. 여기서도 보다 안정된 해를 얻을 수 있도록 지배방정식을 보존적 형태로 수식화시켰다.

이차원의 실제영역에 있는 임의의 함수 f에 대한 계산영역으로의 일계 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f_x &= \frac{1}{J} [(fy_\eta)_\xi - (fy_\xi)_\eta] \\
 f_y &= \frac{1}{J} [(fx_\xi)_\eta - (fx_\eta)_\xi]
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

이차원 좌표계에서 이계 미분의 형태는 일계 미분 형태에 미분조작을 한번 더 적용해 주어 얻을 수 있는데 기하학적으로

보존적 변환(geometrically conservative transformation)을 유지하는 이계 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 (gf_x)_x &= \frac{1}{J} [(gf_x y_\eta)_\xi - (gf_x y_\xi)_\eta] \\
 (gf_x)_y &= \frac{1}{J} [(gf_x x_\xi)_\eta - (gf_x x_\eta)_\xi] \\
 (gf_y)_x &= \frac{1}{J} [(gf_y y_\eta)_\xi - (gf_y y_\xi)_\eta] \\
 (gf_y)_y &= \frac{1}{J} [(gf_y x_\xi)_\eta - (gf_y x_\eta)_\xi]
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

이렇게 표현된 이계 미분을 RTM 충전공정의 지배방정식에 대응시킬 경우, 임의의 함수 f는 압력 p에 해당하고  $g = \frac{hK_{x,x}}{\mu}$ 에 해당된다.

3.3. 복합격자법

많은 경우에 있어서 실제의 물리적인 영역에 대해 하나의 계산영역으로 생성된 격자는 만족스러운 결과를 얻기 힘들다. 이러한 경우 물리적인 영역은 독립적으로 생성시킨 격자 블록으로 이루어진 몇 개의 소영역으로 분해시키는 것이 편리하다. 이렇게 이루어진 격자 블록을 복합격자(composite grid 또는 composite mesh)라고 한다. 연속된 복합격자로 이루어질 때 일어나는 필수적인 현상은 블록 사이의 경계선을 어떻게 처리해 주는냐는 것이다. 이러한 문제에 대해서는 Thompson[15]에 의해 잘 다루어져 있다. 격자 블록이 만나는 경계선은 만나는 양쪽의 선과 기울기 및 모든 물리량이 연속인 경우(complete continuity), 선과 기울기만 연속인 경우(continuous lines and slopes only), 선은 연속이지만 기울기는 불연속인 경우(continuous lines with discontinuous slopes), 선과 기울기 모두 불연속인 경우(discontinuity in both lines and slopes)로 이루어질 수 있겠는데, 본 연구에서는 격자 블록경계에서 선은 연속이지만 기울기는 불연속인 경우로 이루어지는 것으로 취급하였다.

본 연구에서 다루는 금형구조는 전체적인 면으로 보아 접합면이 붙어있는 삼차원이므로 방향에 의존하는 데이터(direction-dependent data)의 전체 좌표계와 국부 좌표계간의 변환이라는 추가적인 작업이 필요한데, 좌표계간의 변환에 대해서는 일반적인 공업수학 책에서 찾아 볼 수 있다[16].

접합면이 만나는 경계선이나 두 유동이 만나는 웰드라인에서의 압력을 계산하기 위하여 경계선 양쪽의 물질 보존을 검사하게 된다. 이 목적으로 경계선 양쪽의 격자 절점에 대해 검사체적을 설정하는데 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 설정한 검사체적의 경계를 따라서는 다음의 물질보존식이 만족되어야 한다.

$$\sum_{CV \text{ boundaries}} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) = 0
 \tag{16}$$

그러면 격자 블록의 경계선을 따라 존재하는 각 절점에서 압력에 대한 대수 방정식이 구성되므로 압력을 구할 수 있다. 이

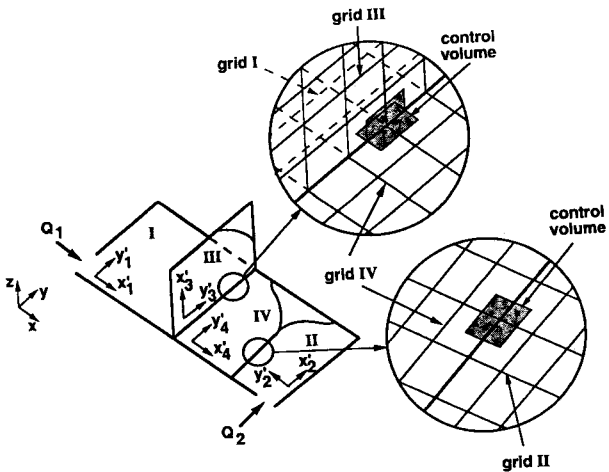


Fig. 3. Local coordinate systems and control volumes for base of stiffener and weldline.

렇게 구한 압력을 접합면의 경계선이나 웰드라인의 압력으로 부과한다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 실험과의 비교

수치모사의 정확도를 확인하기 위하여 Aoyagi[17,18]가 수행한 RTM 충전실험의 결과와 비교하였다. 실험에 사용한 수지는 corn syrup(power-law index,  $n=0.89$ )을 물에 용해시킨 용액으로 실온에서 이 용액은 뉴턴유체로 들 수 있으며 섬유직조는 유리섬유로 이루어져 있다. 금형의 형상과 치수는 Fig. 4(a)에 주어지 있는데 금형 캐비티의 두께는 0.3 cm이다. 주요한 물질 데이터는 다음과 같다.

- 등방성 섬유직조의 파괴분율,  $\nu_f = 0.066$
- 섬유직조의 투과도,  $K = 3.23 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
- 수지의 점도,  $\mu = 0.69 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

금형입구에서는 수지를  $Q = 4.1881 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 일정한 유량으로 부과하였다. 계산에서 사용한 시간증분량의 최대치는 유동선단의 진행속도가 금형 캐비티 두께의 1/2 거리를 통과하는데 걸리는 시간으로 제한하였다. 결과적으로 금형 형상의 복잡한 정도에 따라 시간증분량이 달라졌는데 대략 0.1에서 1.5 sec 사이에 분포하였다. 실험결과와 수치모사한 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었는데 충전시간을 1% 이내의 오차로 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 유동선단의 형상도 전체적으로 보아 실험결과와 비슷한데 이는 수치모사 프로그램이 실제의 금형 충전현상을 비교적 정확히 예측하고 있음을 말해주는 것이다.

##### 4.2. 두 개의 금형입구를 지닌 금형

두 개의 금형입구에서 유량을 달리하며 충전시킬 경우 형성되는 웰드라인을 예측하기 위하여 간단한 사각금형을 사용하

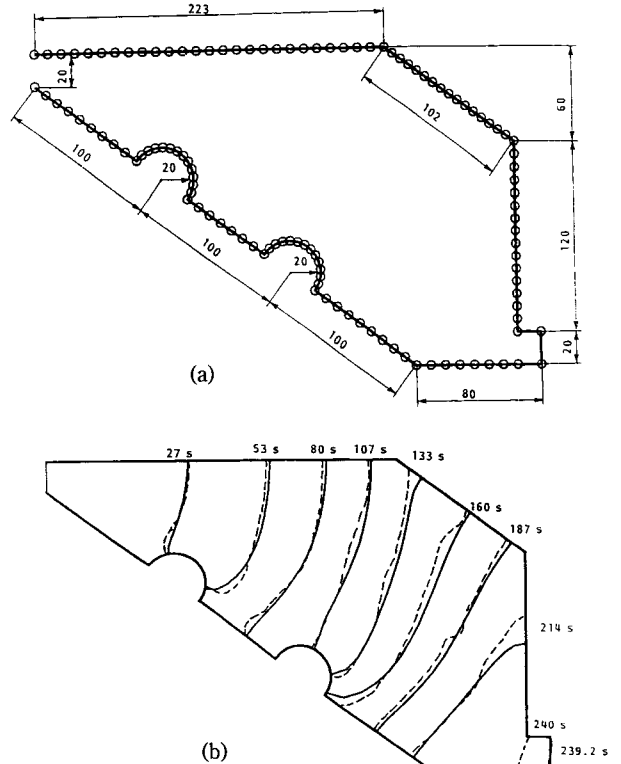


Fig. 4. (a) Geometry of mold cavity used for comparison with experimental results performed by Aoyagi[17] (units: mm). (b) Experimental and predicted flow-front locations at selected times (solid lines: predicted results, dashed lines: experimental results).

였는데 금형의 형상과 치수가 Fig. 5에 주어지 있다. 금형내부의 작은 영역은 금형 두께와 투과도를 달리하는 영역으로 설정하여 보다 실제적인 예가 되도록 하였다. 두 금형입구의 폭은 모두 0.5 cm로 두어 수평방향의 양측면에 위치시켰는데 금

#### Rectangular Mold

(units: [cm])

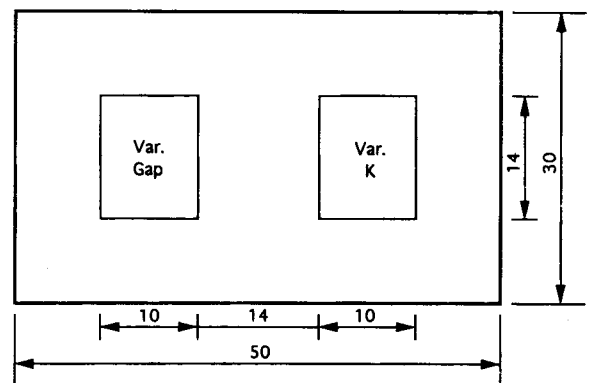


Fig. 5. Geometries of rectangular mold cavity. Subregions are used only for calculations of variable gapwidth and permeability examples.

형의 치수와 비교해 볼 때 point gate로 볼 수 있다.

먼저 일정한 금형간격과 투과도를 갖는 경우에 대한 유동선단의 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 그 중에서 Fig. 6(a)는 두 입구 유량이 동등한 경우 ( $Q_1 = Q_2$ )의 결과를 나타내고 Fig. 6(b)는 왼쪽의 입구 유량이 오른쪽에 비해 두 배 큰 경우( $Q_1 = 2Q_2$ )에 대한 결과이다. 양쪽의 유동선단이 만나는 일련의 교차점이 웰드라인이 형성되는 곳으로 웰드라인에는 불안정한 결합, V-notch와 같은 흠집이 생기기 때문에 성형품에서 강도가 현격하게 떨어지게 된다[19,20]. 결과에서 보듯이 최종적으로 충전이 이루어지는 곳 뿐만 아니라 웰드라인이 형성되는 위치를 잘 예측하고 있다.

금형간격과 투과도를 달리하는 경우에 대한 수치모사 결과는 Fig. 7에 나타나 있다. 금형간격과 투과도가 다른 부분은 Fig. 5에 금형내부의 작은 영역에 표시되어 있는데 왼쪽 영역은 금형간격이 다른 부분이고 오른쪽 영역은 투과도가 다른 부분이다. 금형간격과 투과도를 다른 부분에 비해 두 배씩 크게 두고 충전 모사한 결과인 Fig. 7(a)를 보면 투과도가 큰 부분에서 유동선단이 빨리 진행되고 있음을 알 수 있고 금형간격이 큰 부분은 충전공간이 커지므로 느리게 충전됨을 알 수 있다. 이와 반대로 금형간격과 투과도를 1/2배로 하였을 경우인 Fig. 7(b)는 투과도가 작은 부분에서 유동선단이 느리게 진행되고 금형간격이 작은 영역이 빠르게 충전됨을 보여주고 있다. 하지만, 금형간격의 변화에 의한 유동선단 형상의 변화는 거의 없는데 이는 Fig. 1의 금형간격을 통한 속도장을 보면 알 수 있듯이 금형 위와 아래 벽에서 부과한 full slip 경계조건 때문이다.

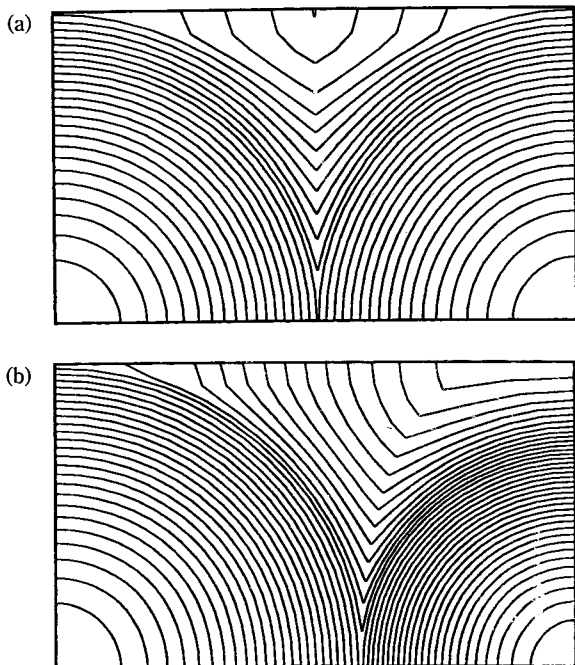


Fig. 6. Predicted flow-front locations through two horizontal side gates at mold cavity with constant  $h$  and  $K$ : (a) same flow rates ( $Q_1 = Q_2$ ), (b) different flow rates ( $Q_1 = 2Q_2$ ).

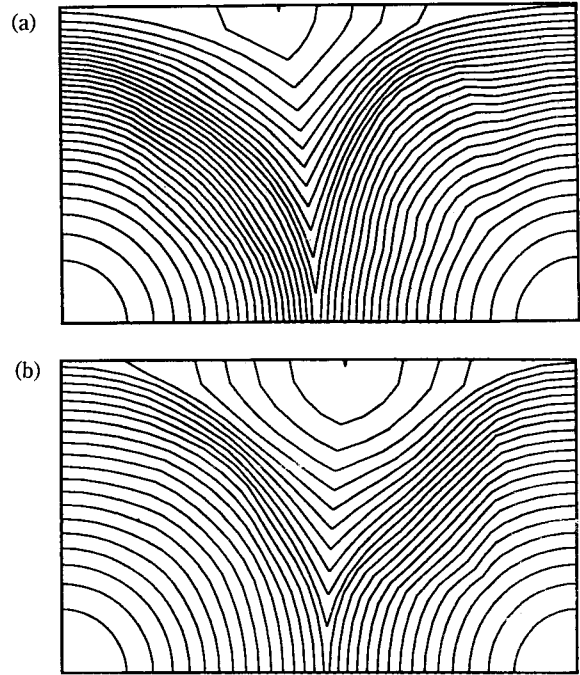


Fig. 7. Predicted flow-front locations through two horizontal side gates with same flow rates to both inlet gates: (a) double values of  $h$  and  $K$  for subregions, (b) half values of  $h$  and  $K$  for subregions.

Hele-Shaw 유동으로 묘사되는 사출금형 충전공정의 경우에는 금형 위와 아래벽에서 no-slip 경계조건을 사용하므로 뉴턴성 유체인 경우 결과적인 압력강하는  $1/h^2$ 에 비례하게 되어 금형 두께가 얇은 부분에서 유동선단의 형상이 훨씬 느리게 진행되는 것이다[21]. 하지만 RTM 공정의 경우 금형두께를 따라 속도구배가 선형이므로 압력강하는 금형간격에 무관하게 되고 그 결과로 Fig. 7에서 보듯이 유동선단의 형상은 달라지지 않으며 단지 충전 속도만 전체적으로 느리게 되는 것이다.

### 4.3. 두 개의 금형입구와 접합면을 지닌 복잡한 금형

실제로 사용하는 금형은 아주 불규칙한 형상을 지니고 있으며 다수의 금형입구와 접합면을 가질 수도 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 수치모사 프로그램의 응용성을 증명하기 위해 급격한 팽창과 수축을 갖는 부분, 두 개의 입구, 두 개의 접합면을 갖는 복잡한 형상의 금형을 대상으로 하여 수치모사하였는데 사용한 금형의 형상과 치수가 Fig. 8에 주어져 있다. 두 개의 접합면이 주된 금형면에 수직으로 연결된 구조로 되어 있는데 그림에서 점선으로 표시된 부분이 접합면의 경계선을 나타내는 것이다. 금형간격은 모든 금형 부분에 대해 0.5 cm로 일정하게 유지시켰다. 금형내 섬유직조의 파괴분율  $v_f$ 를 0.3으로 두었고 이것을 기초로 금형내 공체적(void volume)을 계산하면 공체적  $V$ 는  $3.233 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 였다. 수치모사에 사용된 섬유직조의 투과도  $K$ 는  $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 으로, 수지의 점도  $\mu$ 는 0.65 Pa · s로 고정시켰다. 모든 계산은 SOR(successive over-relaxation) 기법을 이용

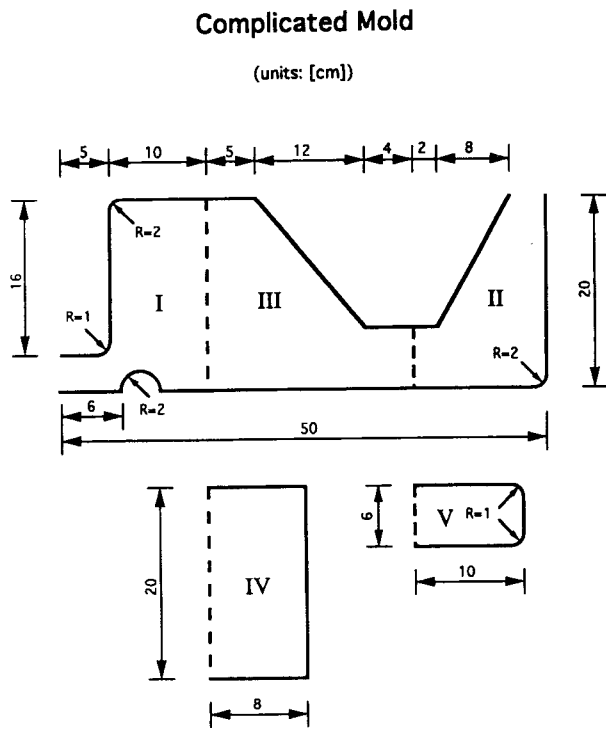


Fig. 8. Geometries of complicated mold cavity. Larger stiffener (section IV) is perpendicularly attached between sections I and III. Smaller stiffener (section V) is between sections II and III.

하여 해를 수렴시켰는데 한계 허용오차를  $10^{-5}$ 로 두었다.

양쪽의 입구유량을  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 동등하게 부과시켜 임의의 충전시간에서의 격자들의 진행상태를 Fig. 9에 나타내었다. 충전이 진행됨에 따른 유동선단의 형상을 알 수 있으며 접합면으로 충전되어 가는 모양과 양쪽에서 채워지는 수지가 만나 웰드라인을 형성하는 모양을 시간에 따라 추적하고 있다. 격자생성을 매 시간간격마다 동적인 방법으로 생성시켰으므로, 고정격자에 의한 방법 사용시 보다 정확한 유동선단 형상

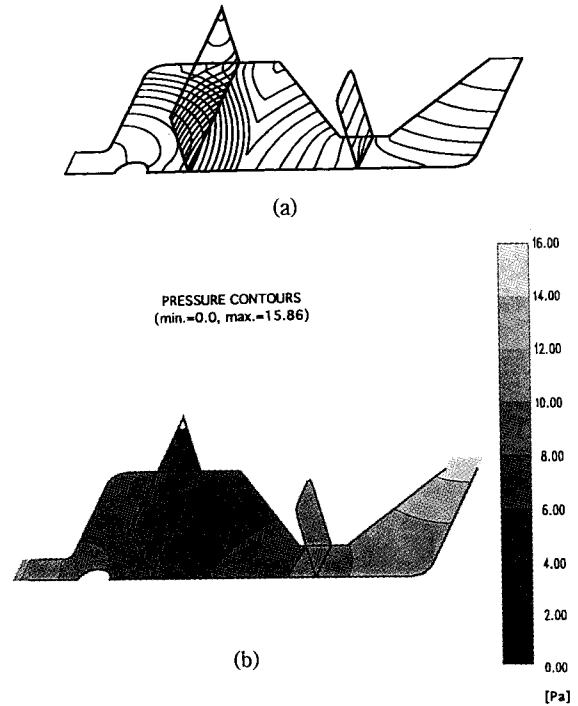


Fig. 10. (a) Predicted flow-front locations. (b) Pressure contours at end of filling.

을 구하기 위해 요구되는 어떠한 추가적인 내삽기법도 필요치 않았다. 충전이 종료된 시점에서 금형은 전부 6개의 복합격자로 이루어져 복잡하고 처리가 힘든 부분을 별개의 영역으로 상대적으로 간편하게 계산하고 있음을 알 수 있다. 유동선단의 진행 형상과 충전 종료시 압력 등고선(contour)을 Fig. 10에 나타내었는데 각 유동선단은 시간간격 10 sec씩 진행시켰을 때의 형상이다. 수치모사에서 걸린 충전시간은 163.28 sec였는데 이는 이론상 충전시간인 161.65 sec와 비교하면 대략 1% 정도의 오차를 보이고 있는데 이는 수치모사 알고리즘이 타당하다는 것을 말해주는 것이다. 최종적으로 생성된 격자와 유동선단의 형상에서 알 수 있듯이 금형에서 충전이 마지막으로 이루어

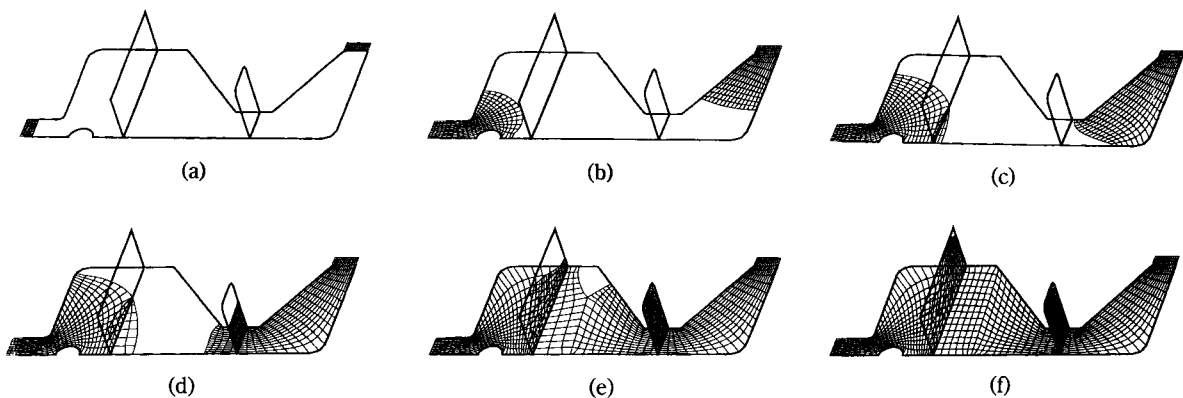


Fig. 9. Examples of moving meshes at specified times in case of specifying same flow rates to both inlet gates: (a) initial mesh ( $t=0 \text{ sec}$ ), (b) intermediate mesh ( $t=30 \text{ sec}$ ), (c) intermediate mesh ( $t=60 \text{ sec}$ ), (d) intermediate mesh ( $t=90 \text{ sec}$ ), (e) intermediate mesh ( $t=150 \text{ sec}$ ), (f) final mesh at end of filling ( $t=163.28 \text{ sec}$ ).

어지는 지점은 큰 접합면(Fig. 8의 IV부분)에 위치한 모서리 지점임을 알 수 있다. 여기서 사용한 금형 형상을 실제 금형 제작시 사용한다면 크고 작은 두 개의 접합면에서 각각 충전이 완료되는 지점과 웰드라인이 최종적으로 형성되는 지점에 벤트를 두어야 할 것이다. 따라서 금형설계시 본 연구에서 사용한 조건으로 충전공정을 수행한다면 벤트의 위치는 수치모사에서 예측한 이 세 지점 근처에 두어야 할 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

수지이동성형(RTM)의 충전공정을 모사하기 위한 다양한 수치기법중에서 동적격자 생성에 용이한 경계적합 좌표계(BFCS)를 사용하였다. 이 방법은 지배방정식을 수식화하기 용이하고 복잡한 구조의 금형을 비교적 간편하게 취급할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 접합면이 결합된 금형이나 웰드라인을 형성하는 복잡한 유동영역을 복합격자의 개념을 도입하여 몇 개의 간단한 영역으로 나누어 격자를 생성시키는 방법으로 복잡한 충전현상을 모사할 수 있었다. 해의 정확도와 안정성을 증진시키기 위해 기하학적으로 보존적 방법에 기초하여 지배방정식을 변환시키고 수식화했다. 수치모사 결과를 실험과 비교하여 수치기법의 타당성을 확인한 후, 금형간격과 섬유직조의 투과도를 달리하는 금형을 대상으로 고찰하였다. 주된 계산은 접합면을 가지고 두 개의 금형입구를 가지는 복잡한 형상의 금형을 대상으로 수치모사하여 복합격자법의 응용성을 보였다. 본 수치모사 프로그램으로 두 유동선단이 만나 웰드라인이 형성되는 위치를 알 수 있으므로 제품의 물성이 취약한 부분을 예측하는데 이용될 수 있을 것이다. 또한 금형에서 최종적으로 충전되는 위치를 알 수 있으므로 금형설계시 벤트의 위치를 설정하는데 이용될 수 있을 것이다. 앞으로 본 연구에서 응용한 수치기법을 일반화시키기 위해서 금형 내부에 방해물(insert)이 존재하는 경우에 대해서도 다룰 수 있도록 확장해야 할 것이다.

## 기 호

$f, g$	: general functions
$g$	: coefficient of gravitational acceleration [ $m/s^2$ ], or $g = J^2$
$g_{ij}$	: metric components of transformation
$h$	: gapwidth of mold cavity [m]
$J$	: Jacobian of transformation
$\mathbf{K}$	: permeability tensor [ $m^2$ ]
$K_c$	: characteristic permeability [ $m^2$ ]
$\mathbf{n}$	: outward normal vector
$P_1, P_2$	: control functions
$p$	: pressure [Pa]
$p_0$	: pressure specified on inlet gate [Pa]
$Q_1, Q_2$	: flow rates of inlet gate 1 or 2 [ $m^3/s$ ]
$\mathbf{v}$	: average velocity vector [m/s]

$v_c$	: characteristic velocity [m/s]
$v_f$	: volume fraction of preform
$W$	: width of inlet gate [m]
$x, y, z$	: global three-dimensional coordinates [m]
$x', y'$	: local two-dimensional coordinates [m]

## Greek Letters

$\eta$	: viscosity of fluid [ $Pa \cdot s$ ]
$\mu$	: Newtonian viscosity of fluid [ $Pa \cdot s$ ]
$\theta$	: angle between vertical direction and local plane of flow
$\rho$	: density of fluid [ $kg/m^3$ ]
$\xi, \eta$	: two-dimensional computational coordinates
$\Psi$	: dimensionless group representing the effect of gravitational force

## 참고문헌

1. M.F. Ashby, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., Series A*, **322**, 393 (1987).
2. S. Richardson, *J. Fluid Mech.*, **56**, 609 (1972).
3. J.L. White, *Polym. Eng. Sci.*, **15**, 44 (1975).
4. C.A. Hieber and S.F. Shen, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **7**, 1 (1980).
5. S. Yalvaç, A. Cohen and M. Pollard, Proc. 1st Intern. Conference on Transport Phenomena in Processing, Honolulu, HI (1992).
6. V.W. Wang, C.A. Hieber and K.K. Wang, *J. Polym. Eng.*, **7**, 21 (1986).
7. Z. Tadmor, E. Broyer and C. Gutfinger, *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 660 (1974).
8. D.L. Trafford, MS thesis, Univ. of Delaware, Newark, DE, 1987.
9. J.P. Coulter and S.I. Güçeri, *ASTM STP1044*, 14 (1989).
10. B. Friedrichs, Ph. D. Thesis, Univ. of Delaware, Newark, DE, 1993.
11. S.J. Lee and S.I. Güçeri, Proc. 11th Conference of Polymer Processing Society, 151, Seoul, Korea (1995).
12. S.I. Güçeri, "Fundamentals of Computer Modeling for Polymer Processing", ed. by C.L. Tucker, Hanser Publishers, Munich, 1989, ch. 5.
13. S. Subbiah, D.L. Trafford and S.I. Güçeri, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **32**, 415(1989).
14. Z.U.A. Warsi, *AIAA J.*, **19**, 240 (1981).
15. J.F. Thompson, "Numerical Grid Generation in Computational Fluid Dynamics", ed. by J. Häuser and C. Taylor, Pineridge, Swansea, 1986, p. 271.
16. M.D. Greenberg, "Advanced Engineering Mathematics", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1988, p. 56.
17. H. Aoyagi, Center for Composite Materials Report, CCM 92-26, Univ. of Delaware, Newark, DE, 1992.
18. H. Aoyagi, M. Uenoyama and S.I. Güçeri, *International Polymer Processing*, **7**(1), 71 (1992).
19. B. Fisa and M. Rahmani, *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 1330 (1991).
20. H. Mavridis, A.N. Hrymak and J. Vlachopoulos, *AIChE J.*, **34**, 403 (1988).
21. H.S. Lee, H.C. Sin and S.G. Kim, *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 1513 (1990).