

<연구논문>

샌드위치 사출성형의 충전 공정 해석에 대한 수치모사 연구

송효준 · 이승종

서울대학교 공과대학 응용화학부, 화학공정신기술연구소
(1999년 5월 4일)

A Numerical Study of Sandwich Injection Mold Filling Process

Hyo Jun Song and Seung Jong Lee

School of Chemical Engineering and Institute of Chemical Processes, Seoul National University
(Received May 4, 1999)

요 약

샌드위치 사출성형 공정은 기존의 사출성형 공정이 가지지 못하는 여러 장점들로 인해 최근 산업적으로 주목 받고 있는 고분자 가공 공정이다. 이 공정의 해석적인 접근은 거의 불가능하므로, 본 연구에서는 수치모사를 통해서 샌드위치 사출성형의 충전 공정을 연구하였다. 수치모사는 기본적으로 유한요소법을 사용하였고 Flow Analysis Network(FAN)/관할체적(Control Volume)법 등을 함께 이용하였다. 그리고 skin polymer의 선단을 확인할 수 있는 기존의 충전을 변수와 함께 skin polymer와 core polymer의 경계를 표시하는 새로운 충전을 변수를 도입하였고 이것을 이용하여 core polymer의 선단을 추적하였다. 새로운 충전을 변수는 두께 방향으로 온도장을 풀기 위해 나눈 각 층에서 정의되었다. 수치모사에 사용된 skin polymer와 core polymer로는 물성이 다른 두 고분자 물질을 주입시켜서 나타나는 충전 형태를 비교했다. 즉, 점도 상수, power-law 지수 등과 같은 유변 물성이 다른 두 고분자 물질을 충전시키기 위해 공정상 필요한 입구에서의 압력 등을 계산했으며 나중에 들어가게 되는 core polymer의 충전 완료 후 금형 내에서의 두께 방향과 흐름 방향으로의 분포 등을 구하였다. 또한 실제 공정 상에서 가공조건에 해당되는 switch-over time과 벽 온도 등의 조건을 바꿔가면서 수치모사를 진행하였다. 사례 연구를 통하여 얻어진 물성과 가공 조건에 따른 core polymer의 충전 형태와 입구에서의 압력 등은 샌드위치 사출성형의 산업적 이용에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

Abstract—Sandwich injection molding is one of the remarkable polymer processes recently developed from conventional injection molding. But it is almost impossible to do theoretical investigation that we've researched it through numerical simulation. In this paper, numerical simulation on the study of sandwich injection molding is based on Finite Element Method and FAN/Control Volume method. In addition to conventional filling parameter that can confirm skin polymer melt front, new filling parameters have been introduced to confirm core polymer melt front advancement. These filling parameters are defined in each layer which is divided to solve temperature field along the thickness direction. One can notice different filling patterns resulted from the variation of material properties such as viscosities and power-law indexes, and processing conditions such as switch-over times and wall temperatures. It gives us a better understanding of the sandwich injection molding process. And we can recognize that it's the core polymer spatial distribution after the completion of filling that is the most important key point to use this process for industrial molding process.

Keywords : Sandwich injection molding, Skin polymer, Core polymer, Switch-over time, Core polymer distribution

1. 서 론

고분자 가공공정 중의 하나인 사출성형 공정은 복잡한 형상의 제품을 높은 생산성을 유지하면서 가공해 낼 수 있는 장점 등으로 인해 다양한 고분자 제품의 생산에 널리 쓰이고 있는 가공 방법이다. 최근에는 여러 가지 혁신적인 사출성형 공정 등이 개발되어서 기존의 사출성형 공정에서 단점으로 지적되던 것들을 보완할 수 있게 되었고 이로 인해 생산해낼 수 있는 고분자 제품들의 수와 형태도 다양해질 수 있게 되었다. 이와 같은 혁신적인 사출성형 공정의 대표적인 예가 샌드위치 사출성형 공정이다. 샌드위치 사출성형 공정은 co-injection molding, 혹은 multi-

layer injection molding이라고도 불리는데 기존의 사출성형 공정이 금형 내에 한가지 고분자 용융액을 충전시켜서 제품을 생산해 내는 방법과는 달리 두 가지의 서로 다른 고분자 용융액을 순차적으로 혹은 동시에 금형 내에 주입시킴으로써 금형의 바깥쪽을 둘러싸는 고분자 용융액(skin polymer)의 고화된 층 안에 또 다른 고분자 용융액(core polymer)이 둘러싸이게 되는 샌드위치 형태의 성형품을 만들어내는 가공 공정이다. 이러한 샌드위치 사출성형 가공 방법을 사용하여 얻을 수 있는 장점들을 나열해 보면, 첫째, 가공에 사용되는 원료비를 줄일 수 있게 된다. 값비싼 고분자를 사용해서 외관이 중요한 제품을 생산할 때 굳이 비싼 고분자를 불필요한 내부 부분에까지 사용할 필요는

없다. 둘째, 표면의 고화된 고분자 용융액 층 안에 발포성의 고분자를 채움으로써 성형품의 무게를 감소시키고 잔류응력도 줄이는 효과를 거둘 수 있게 된다. 셋째, 샌드위치 형태의 가운데에 채우게 될 고분자 용융액의 성질에 따라서 사출 시 필요한 주입 압력이나 금형이 열리는 것을 막아주고 있는 체결 장치에 필요한 힘(clamp force)을 감소시킬 수 있다.

서로 다른 두 가지 고분자 용융액을 금형 내에 순차적으로 주입시킬 때, 어떤 형태로 샌드위치 사출성형 공정이 이루어지는지 간단하게 살펴보면 다음과 같다[1]. 먼저 skin polymer가 솟샷(shot shot)의 형태로 금형 내에 주입되게 된다. 이때, 너무 적은 양이 주입되면 다음에 주입되는 core polymer에 의한 터짐 현상(blow through)이 발생해서 core polymer가 밖으로 나오게 되는(core surfacing) 문제가 있을 수 있고, 너무 많은 양이 주입될 경우에는 샌드위치 사출성형의 장점이 감소될 수 있으므로 적당한 양을 주입시켜야만 한다. 한편, 이렇게 주입된 skin polymer는 금형 벽면의 낮은 온도에 의해서 고화가 일어나게 된다. 이런 상태에서 두 번째 고분자 용융액인 core polymer가 주입되게 되면 core polymer는 skin polymer의 고화된 층 안으로 들어가게 된다. 두 번째로 주입된 core polymer는 아직 고화되지 않고 남아 있는 내부의 skin polymer를 밀고 들어가면서 금형 안을 채우게 된다. 한편, 앞에서 금형을 채워 나가고 있는 skin polymer는 분수 유동(fountain flow)에 의해 가운데 부분의 polymer가 금형 벽쪽으로 향하게 되고, 이에 따라 고화된 벽면의 skin polymer와 나중에 들어온 core polymer 사이에 skin polymer 용융액 층이 존재하게 된다. 이 과정은 용융액들이 금형을 다 채울 때 까지 계속된다. 금형 충전이 완료되고 나면, 다시 처음에 넣었던 skin polymer를 조금 주입하게 되는데 이는 주입구 주변에 남아 있을 core polymer가 밖으로 나타나지 않도록 함으로써 샌드위치 사출 성형을 마무리하는 작업이 된다.

기존의 일반적인 사출성형 공정에 대해서는 이미 많은 실험과 수치모사를 통하여 많은 연구가 행해져 왔다. 특히 Hieber와 Shen[2] 등의 연구에 의하여 일반적인 2차원 형상의 사출성형 공정의 해석이 가능해진 후로 많은 연구자들이 사출성형 공정을 수치모사 하는 것에 관심을 가지고 연구를 진행하였다. 이에 반해서 샌드위치 사출성형 공정에 대한 연구는 1970년대 후반에 몇몇의 연구자들[3-5]에 의해서 작은 규모의 실험 이외에는 최근에까지 알려진 것이 거의 없었다. 그러던 것이 1990년대에 이르러 본격적인 연구가 시작되었는데, 이 공정을 연구함에 있어서 해석적인 해를 구한다는 것은 거의 불가능한 것이었다. 그러므로, 연구자들은 수치해석을 통해서 이 공정을 해석하는데 관심을 기울였고, 이를 통하여 공정상에서 나타나는 거시적인 현상들, 즉 충전이 끝났을 때 금형 내의 skin polymer와

core polymer의 경계 위치, 또는 두께 방향으로의 두 용융액의 분포 등을 구하는 것이 가능하게 되었다[1,6-9]. 한편, 기존의 연구는 “잔류시간(residence time)” 개념을 사용하여 수치모사를 진행하였지만[1,6-8] 그 구체적인 내용이나 방법 등은 잘 알려져 있지 않다. 그래서, 이와는 다른 방법으로 샌드위치 사출성형 공정을 수치모사 할 수 있는 연구들이 다양하게 진행되어 오고 있다[9-11].

기존의 샌드위치 사출성형 공정 수치모사는 기본적으로 유한요소법을 사용하고 선단의 추적이나 금형 내의 skin polymer와 core polymer의 분포 등과 같은 샌드위치 사출성형만의 특징적인 현상의 모사는 잔류시간(residence time) 개념과 입자추적(particle tracing) 알고리즘을 사용하여 구현하고 있다고 알려져 있다. 그러나, 본 연구에서는 기본적으로는 유한요소법을 사용하고, 선단의 추적은 기존의 샌드위치 사출성형 공정의 수치모사 연구에서와 달리 FAN 방법에 관할체적법을 추가하여 사용하였다. 그리고, 무엇보다도 핵심적인 core polymer의 위치, 두께 방향으로의 skin polymer와 core polymer의 분포 등은 온도장의 계산을 위해 두께 방향으로 나뉘어진 각 층에서 서로 다른 속도를 가지고 전진하는 core polymer 선단의 추적을 통해 알아낼 수 있도록 하였다. 앞에서 언급된 방법들을 사용하여 공정의 수치모사를 정확하게 함으로써 샌드위치 사출성형 공정의 충전 과정을 이해하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 이 론

2.1. 지배방정식과 모델링

일반적으로 얇은 3차원 평판에서의 유체의 충전 과정을 해석하는 데는 Hele-Shaw 유동을 이용하는데, 이를 통해서 유체가 차 들어가고 있는 금형 내에서의 압력장을 다음 식으로부터 구할 수 있게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

윗 식은 일반적인 사출성형에서의 지배방정식과 동일한 형태이지만, 흐름도(Fluidity, S)를 계산하는 부분은 차이가 있다. 즉, 흐름도를 계산할 때 한가지 종류의 용융액이 들어가게 되는 기존의 사출성형 공정에서는 면찰속도와 온도 그리고 두께 방향으로의 위치 등의 함수였다면, 두 가지 이상의 서로 다른 고분자 용융액이 들어가게 되는 샌드위치 사출성형 공정에서는 고분자 용융액의 종류도 함께 고려해야 하므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S = S(\eta_i(\dot{\gamma}, T), z) \quad (2)$$

(단, η_i 는 고분자 용융액 i 의 점도)

즉, Fig. 1에서와 같이 두께방향으로 b_1 까지 core polymer

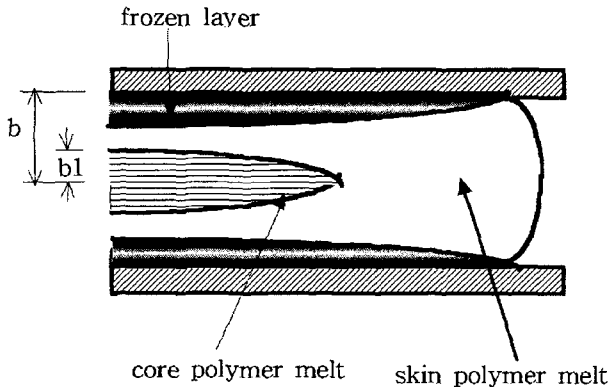


Fig. 1. Cross sectional view of sandwich injection mold filling process.

가 차 들어가 있다면 이때 두 용융액의 접도가 흐름도에 미치는 영향을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \int_0^{b1} \frac{z^2}{\eta_{core}} dz + \int_{b1}^b \frac{z^2}{\eta_{skin}} dz \quad (3)$$

만약 skin polymer만 들어가 있는 부분(예, skin polymer의 선단 근처)이라면 b_1 이 0이 되어서 오른쪽 첫번째 항이 없어지게 되고, 식 (3)은 결국 일반 사출성형의 흐름도를 구하는 식과 동일한 형태로 바뀌게 된다. 한편 식 (1)을 본 수치모사에서 적용할 때 skin polymer와 core polymer는 두께방향으로 서로 penetration이 없다는 가정하에서 사용하게 된다. 따라서 skin polymer와 core polymer의 각각의 mass conservation은 각각의 melt가 진행되어 나가는 층에서 고려되어 진다.

압력장을 구하기 위해서는 경계 조건이 주어져야 하는데, 본 연구에서는 일정 유량 공정이라는 가정하에서 수치모사를 진행하였기 때문에 충전이 진행되는 각 시간에 일정 유량을 주입시키기 위해 필요한 입구에서의 압력을 계산해서 그 값을 입구에서의 조건으로 주어야 한다. Skin polymer의 선단에서는 압력이 대기압과 같다는 조건을 주고, 가운데 경계를 이루며 들어오고 있는 core polymer의 선단에서는 특별한 경계조건을 줄 필요가 없다. 다만 core polymer와 skin polymer의 경계를 시간에 따라 정확하게 추적하는 것이 샌드위치 사출성형 수치모사에서는 중요한 요소가 된다. 한편, 금형 벽에서나 충전물의 경계에서는 일반적으로 안미끄러짐(no-slip) 조건을 주게 되는데, 본 연구와 같이 FAN 방법에 관할체적법을 사용해서 수치모사 할 경우에는 이런 부분에서 특별한 경계 조건을 줄 필요가 없다. 본 연구에서는, 우선, 유한요소법을 사용해서 식 (1)을 처리한 다음 이를 통하여 전체 영역 내에서의 압력장을 구하게 된다. 이 내용은 이미 Hieber와 Shen [2] 등에 의해서 자세히 다루어져 있으므로 여기서는 생략하기로 한다. 또한 본 연구에서는, 세 점 가우시안 적분점들을 이용한 선형의 삼각형 요소들을 사용하였다. 온도장을 풀기 위한 에

너지 방정식은 두께 방향을 몇 개의 층으로 나눈 다음 각 요소의 가운데 점에서 유한차분법을 이용해서 계산하였다. 반면, Hieber와 Shen [2]을 비롯한 다수의 연구자들은 요소의 절점에서 온도장을 계산하기도 했다. 대류 항이나 점성소산 항은 이전 계산시간에서 나온 값을 사용하였고, 전도 항이나 시간 의존 항은 후진차분(backward difference)법을 이용하여 아래의 에너지 방정식을 전개하였다.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (4)$$

2.2. 선단 추적과 두께분포

사출성형 공정의 충전 과정을 수치모사 할 때는 금형 내를 전진하는 선단을 추적하고, 다음 계산 시간으로 선단을 정확하게 전진시키는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 연구에서는 Tadmor [12]에 의하여 유동장 해석을 위해 처음으로 도입된 충전을 변수(fill factor; F)를 사용하여 선단을 전진시켰다. 충전을 변수는 각 절점에서의 검사 체적에서 실제 용융액이 채워져 있는 부피의 비율을 말한다.

$$F = \frac{\text{용융액으로 찬 부피}}{\text{검사체적의 부피}} \quad (5)$$

즉, 유동이 진행중인 상황에서 이미 선단이 지나간 내부의 절점들에서는 충전율이 1이고, 아직 선단이 미치지 못한 검사 체적 부분에서는 충전율은 0이 된다. 그리고 선단이 걸쳐 있는 부분에서는 충전율이 0과 1사이의 값을 가지게 된다. 이렇게 정의된 검사 체적과 충전율을 이용해서 본 연구에서는 압력장 계산에서 경계 조건을 줄 때 충전율이 0.5 이상이 된 절점을 계산 영역에 포함시켰다. 이 방법은 압력장을 계산한 후 나오는 각 절점 사이의 플럭스양을 이용하면 유동이 진행해 나가는 선단의 절점에서의 검사 체적으로 유입되는 플럭스양을 계산할 수 있게 되고, 이때 그 절점에서의 충전율로서 선단의 위치를 파악하는 방법이다. 이 방법을 사용하면 선단이 벽면과 만나는 지점에서도 문제가 발생하지 않는 장점이 있다.

Fig. 1은 두께방향으로 샌드위치 사출성형의 전형적인 충전 모습인데 먼저 들어간 skin polymer와 나중에 들어간 core polymer 사이에 계면이 존재하고 있음을 볼 수 있다. 그러므로, 그 경계 부분을 따라서는 면찰응력과 열 홀릭스가 연속이어야 된다. 즉, 다음과 같은 조건이 성립한다.

$$\left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{skin} = \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{core} \quad (6)$$

$$\left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{skin} = \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{core} \quad (7)$$

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{skin} = \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{core} \quad (8)$$

샌드위치 사출성형 공정에서는 core polymer의 선단 위

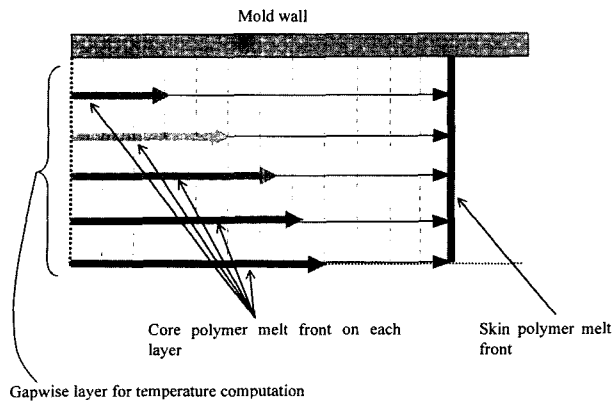


Fig. 2. Gapwise layers in the cavity used for melt front advancement and core melt distribution.

치 뿐만 아니라 두께 방향으로 core polymer의 분포를 아는 것이 중요하다. Core polymer가 충전되기 시작하면 먼저 충전되어 앞에서 나가고 있는 skin polymer의 선단을 표시하는 기존의 충전을 변수와 함께 core polymer의 선단(skin polymer와 core polymer의 경계)을 표시하는 새로운 충전을 변수가 필요하게 된다. Fig. 2를 보면 알 수 있듯이, 이때 새로운 충전을 변수는 두께 방향으로 온도장을 풀기 위해 나눈 각 층에서 정의된다. Skin polymer의 선단에서는, 선단 근처 유동이 분수 유동이라는 가정을 하면, 빠른 속도를 가진 가운데 부분이 먼저 선단으로 나가게 되지만 결국은 분수유동에 의해 벽쪽으로 붙게 되기 때문에 결국은 평균속력으로 나가는 편평한 선단을 가정할 수 있어서 두께 방향으로 하나의 충전변수 만을 사용하여 선단을 추적할 수 있다. 그러나, core polymer의 선단 위치에서의 유동을 생각해 보면, 가운데 부분이 벽쪽 부분보다 빠른 속도를 가지게 되어 더 빨리 전진하게 되는 것이다. 따라서, 두께 방향으로 각 층마다 충전변수를 다르게 사용하는 것이 바람직하다. 그러면, 일정 시간 후에 충전 용융액의 두께 방향 분포를 파악할 수 있게 되고, 나아가 식 (3)에서의 흐름도를 정확하게 계산할 수 있게 되며, 압력장도 정확히 계산할 수 있게 되는 것이다. 그리고, 온도장을 계산할 때의 Δt 는 절점을 하나씩 충전시킬 수 있는 시간 이하의 값을 가져야 한다. 그래야만 선단의 위치를 정확히

확인할 수 있게 되는 것이다. 따라서, 각 층마다 다른 충전을 변수를 가지고 전진하고 있는 본 연구에서와 같은 경우는 skin polymer만 충전시킬 때의 Δt 보다 작은 값을 사용하여야 한다.

$$\Delta t_{\text{core_inlet}} \leq \frac{\Delta t_{\text{skin_inlet}}}{\text{No. of layers}} \quad (9)$$

3. 사례연구(Case Study)

3.1. 수치모사 과정

수치모사에 사용된 격자체는 고정격자계이며, 압력장은 Galerkin 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 온도장을 풀기 위해서 두께방향을 8개의 층으로 나누었으며, 각 요소의 가운데 점에서의 점도 값과 점성소산 항, 대류 항 등을 이용해 유한차분법으로 온도장을 계산하였다. 입력장과 온도장을 계산할 때 모두 relaxation factor를 사용하였다. 요소의 가운데 점에서 온도장을 계산할 때, 선단 요소에서의 온도조건을 어떤 형태로 부과하느냐에 따라서 온도장의 형태가 다르게 나오게 되는데, 본 연구에서는 선단의 요소가 공유하고 있으면서 유체가 통과하고 온 절점, 즉, 유체가 차 있는 절점의 평균값을 대입하는 것으로 선단의 요소에서의 온도 의존 항들의 물성을 정의하고, 이를 이용해서 압력장과 온도장을 계산하였다. 그리고 core polymer가 들어가기 시작하면 게이트에서는 두께방향으로 모든 부분에 core polymer가 차 있는 것으로 가정하였다. 충전 과정의 수치모사는 일정유량($Q=10 \text{ cm}^3/\text{sec}$)의 조건으로 진행하였고, 금형의 부피가 20 cm^3 이므로 충전에 걸리는 총 시간은 2초이다.

3.2. 금형과 격자

수치모사를 위해 사용된 금형의 모양은 Fig. 3과 같이 가로가 100 mm, 세로가 50 mm, 두께가 4 mm로 부피가 20 cm^3 인 단순한 직사각형 모양의 금형을 사용하였다. 유한요소법으로 압력장을 구하기 위해 사용된 요소의 수는 366개, 절점의 수는 203개인 Fig. 4와 같은 모양의 격자를 사용하였다. 한편, 입구주변에서는 격자를 잘게 나눔으로써 고분자 용융액이 들어가는 지점에서의 압력과 온도 등

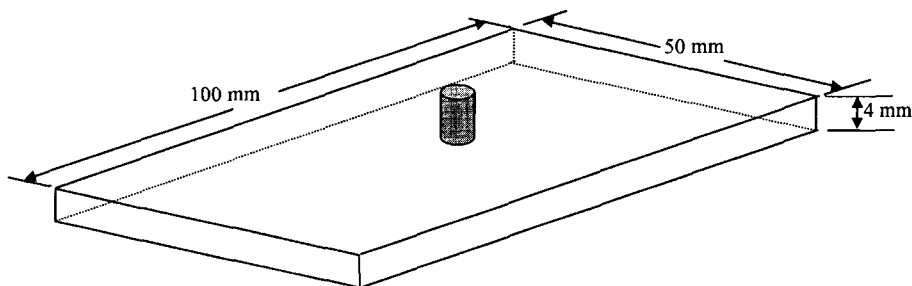


Fig. 3. Rectangular cavity with a single gate.

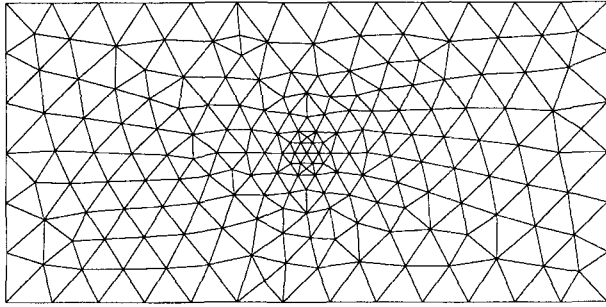


Fig. 4. Finite element mesh for the rectangular cavity of uniform thickness.

의 계산에 정확성을 향상시키고자 하였다.

3.3. 점도 모델식과 기타 물성

온도장을 풀기 위해서 온도와 면찰속도의 함수인 점도 모델식을 사용하여야 한다. 본 연구에서 사용하는 고분자 용융액의 점도 모델로는 Power-law 점도식을 이용하였고, 온도 의존성도 아래와 같은 형식으로 표현되는 식을 사용하였다. 그 밖의 물성치들은 모두 Hieber와 Shen [2]의 데이터들을 사용하여 수치모사를 행하였다.

$$\eta = m(T)\dot{\gamma}^{n-1} \tag{10}$$

$$m(T) = m_0 \exp[-\alpha(T - T_0)] \tag{11}$$

$$T_0 = 533\text{K}, \alpha = 0.0052\text{K}^{-1} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \rho &= 7.7 \times 10^{-4} \text{kg/cm}^3, \\ C_p &= 3.06 \times 10^7 \text{cm}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K}, \\ k &= 15.1 \text{kg} \cdot \text{cm}/\text{s}^3 \cdot \text{K} \end{aligned} \tag{13}$$

한편, 사례연구 1에서는 Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이 core polymer의 점도상수(m_0) 값을 변화 시켜가면서 충전 형태를 비교하였다. 즉, 먼저 들어가는 skin polymer로 사용된 고분자의 점도상수 값은 $8.5 \text{ KPa} \cdot \text{s} \cdot (1/\text{s})^{0.677}$ 으로 동일한데 반하여, core polymer의 물성 중 점도상수 값을 변화 시킴으로써 충전 형태가 어떻게 바뀌는가를 살펴보는 것이다. 이때 사용된 skin polymer와 core polymer의 n 값은 0.323, 금형 벽의 온도는 300 K이다. 사례연구 2에서는 core polymer의 점도상수 값의 계수는 8.5로 고정시킨 뒤 core polymer의 n 값을 Table 2와 같이 변화 시켜가면서 충전 형태를 비교하였다. 세 경우 모두 skin polymer의 n 값은 0.323으로 동일하고 벽면의 온도도 300 K이다. 사례연구 1과 2에서는 switch-over time이

Table 1. Viscosity constants of core polymer used in the case study 1

	(a)	(b)	(c)
Constant value (m_0)	$8.5 \div 2$	8.5	8.5×2
	$\text{KPa} \cdot \text{s} \cdot (1/\text{s})^{0.677}$	$\text{KPa} \cdot \text{s} \cdot (1/\text{s})^{0.677}$	$\text{KPa} \cdot \text{s} \cdot (1/\text{s})^{0.677}$

Table 2. Power-law indexes of core polymer used in the case study 2

	(a)	(b)	(c)
Power-law Index (n)	0.323	0.323×1.5	0.323×2

Table 3. Switch-over times used in the case study 3

	(a)	(b)	(c)
Switch-over Time	0.8 sec	1.0 sec	1.2 sec

Table 4. Wall temperatures used in the case study 4

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Wall temperatures	280 K	300 K	310 K	320 K

1초였는데, 사례연구 3에서는 switch-over time을 Table 3과 같이 바꿔가면서 수치모사를 수행하였다. 이때 사용된 나머지 물성은 skin polymer의 점도상수 값은 $8.5 \text{ KPa} \cdot \text{s} \cdot (1/\text{s})^{0.677}$, n 은 0.323, 그리고 core polymer의 m_0 은 $8.5 \text{ KPa} \cdot \text{s} \cdot (1/\text{s})^{0.354}$, n 은 0.323×2 , 벽면의 온도는 300 K이다. 마지막으로 사례연구 4에서는 m_0 , n 의 조건은 사례연구 3과 동일하고, switch-over time은 1초이며, 금형 벽면의 온도를 Table 4와 같이 변화 시킴으로써 벽면의 온도가 core polymer의 충전형태에 미치는 영향을 살펴보았다.

3.4. 순서도

수치모사 과정의 전체 순서도가 Fig. 5에 주어져 있는데,

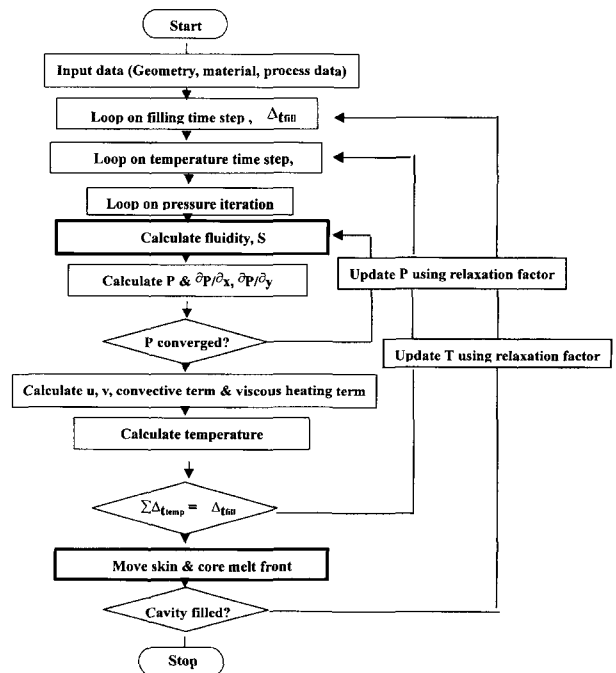


Fig. 5. Flow chart used in the numerical simulation.

앞에서도 언급되었지만, 일반적인 사출성형에서와 비교하여 크게 달라지는 부분은 Fig. 5에서 진하게 나타난 부분, 즉, 흐름도를 계산하는 부분과 압력과 온도장을 수립시키고 선단을 전진시킬 때 skin polymer와 core polymer를 각각 전진시켜 주어야 한다는 점이다.

4. 수치 모사 결과

Fig. 6은 사례연구 1에서 조건 (b)인 경우에 시간에 따른 skin polymer 선단의 모양을 나타낸 것이다. 입구가 가운데 있으므로 그려진 그래프의 상하 혹은 좌우 대칭이 되는 가를 통해서 선단의 추적 및 전진이 적절하게 진행되고 있는 것을 확인한 것이다. 물론 Fig. 4의 격자계를 보면 정확하게 대칭성을 유지하고 있는 것은 아니기 때문에 격자의 영향으로 인한 약간의 비대칭성은 고려되어야만 한다. Fig. 7은 사례연구 1의 결과로서 입구에서의 일정 유량 공정을 진행하기 위해 필요한 압력을 나타내었다. Switch-over time인 1초가 지나면, core polymer의 점도상

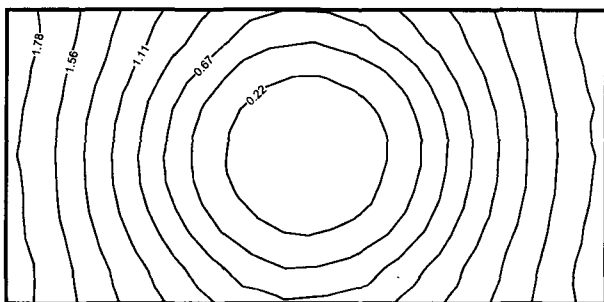


Fig. 6. Predicted melt front advancement of skin polymer in the case study 1(b). Numbers represent the time (in second) when the melt front of skin polymer reaches the location.

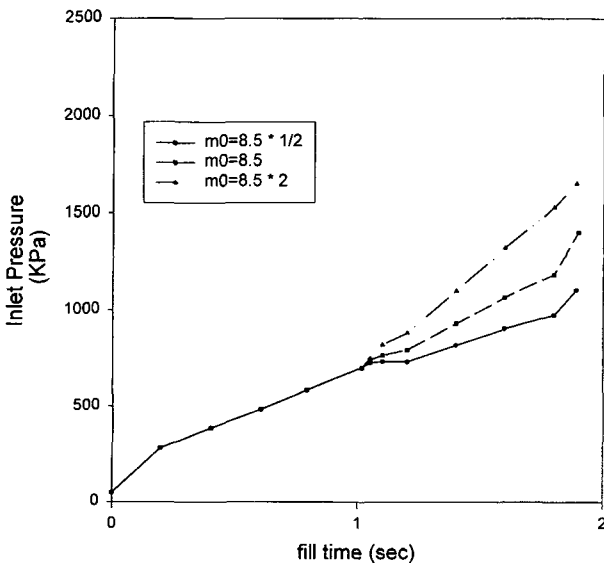
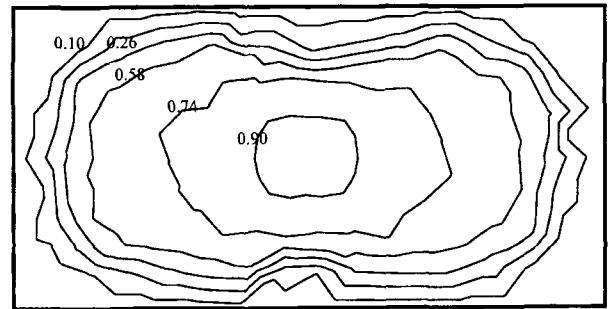
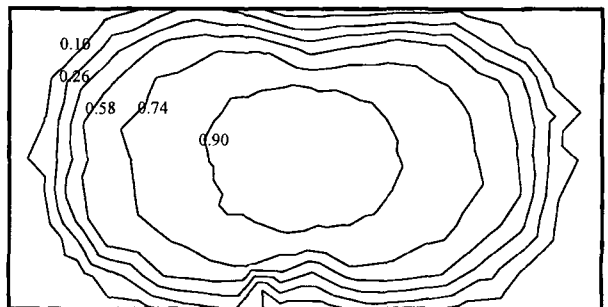


Fig. 7. Predicted inlet pressure versus time in the case study 1.

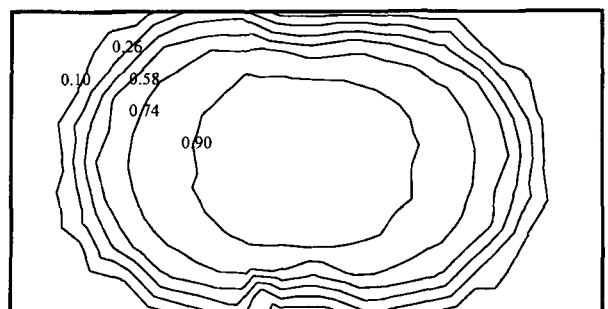
수(m_0) 값에 따라 필요한 입구에서의 압력이 다른 양상을 나타내게 된다. 즉, core polymer의 점도상수 값이 skin polymer보다 작으면 압력이 일정 시간동안 감소했다가 증가하는 형태를 보이게 된다. 또한 core polymer의 점도상수 값이 skin polymer보다 크면 갑자기 기울기가 커지는 양상을 보인다. 이는 입구에서 필요한 압력은 입구 주변의 고분자 물성에 따라 좌우되며 특히 점도가 작은 core polymer를 사용하면 더 작은 압력으로도 충전이 가능함을 보이고 있다. Fig. 8은 사례연구 1에서 충전 완료 후의 금형 내에서의 core polymer의 충전 형태의 결과이다. 즉, core polymer가 충전 완료 후 어느 위치에서 두께 방향으로 몇 퍼센트를 차지하고 있는 지를 알 수 있다. 이 결과를 보면, core polymer의 점도상수 값이 skin polymer의 점도상수 값에 비해 작을수록 나중에 들어간 core polymer가 흐름 방향으로는 많이, 두께 방향으로는 얇게 들어



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Predicted contour plot of the thickness fraction of the core polymer in the case study 1 when the filling is completed.

가게 되고 반대로 core polymer의 점도상수 값이 클수록 흐름 방향으로는 적게, 두께 방향으로 두껍게 들어가게 된다는 것을 알 수 있다. 이는 옆에서, 즉 두께 방향으로 표현된 Fig. 9을 통해서 보다 확실히 확인할 수 있다.

Fig. 10와 Fig. 11은 사례연구 2의 결과이다. Core polymer의 면찰담화 현상이 클수록 입구에서 필요한 압력은 줄어들게 되고, 또한, core polymer가 흐름 방향으로 많이, 두께 방향으로 얇게 충전된다는 것을 확인할 수 있다.

사례연구 3의 결과인 Fig. 12에서는 core polymer가 들어가게 되는 시간인 switch-over time을 바꾸면서 수치 모사한 결과인데, 당연히 점도가 큰 물질을 더 빨리 넣을수록 입구에서 필요한 압력이 크게 나타난다. 사례연구 3의 결과로 알 수 있는 사실은 두께 방향으로 본 core polymer의 분포인 Fig. 13에서 볼 수 있듯이 충전이 완료되었을 때 core polymer의 충전 형태인데 switch-over time이 0.8초 때는 너무 빨라서 흐름방향으로 볼 때 늦게 들어간 core polymer의 선단부분이 먼저 들어간 skin polymer의

선단부분을 따라 잡아서 결국 밖으로 나오게 되는 터짐 현상이 발생할 뻔 했다. 그리고, 1.2초 때는 core polymer가 너무 늦게 들어간 관계로 1.0초에 비하면 비효율적이라고 할 수 있다. 즉, 적당한 switch-over time을 결정하는 것이

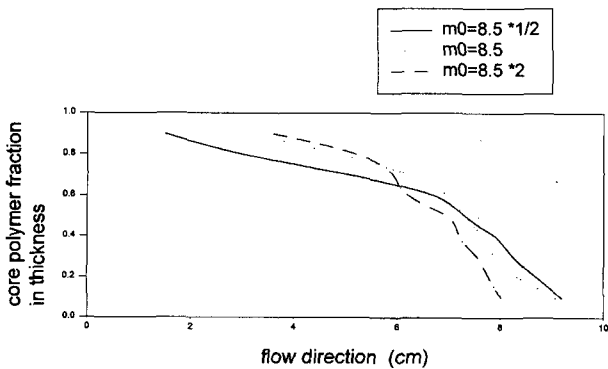


Fig. 9. Predicted thickness fraction of the core polymer in the case study 1 when the filling is completed.

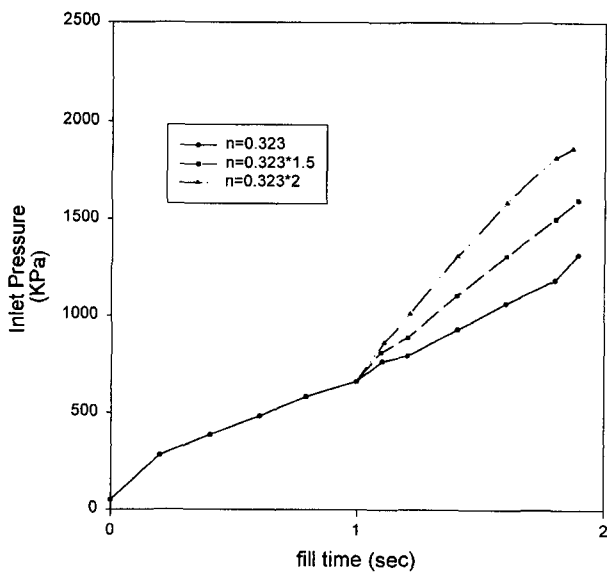


Fig. 10. Predicted inlet pressure versus time in the case study 2.

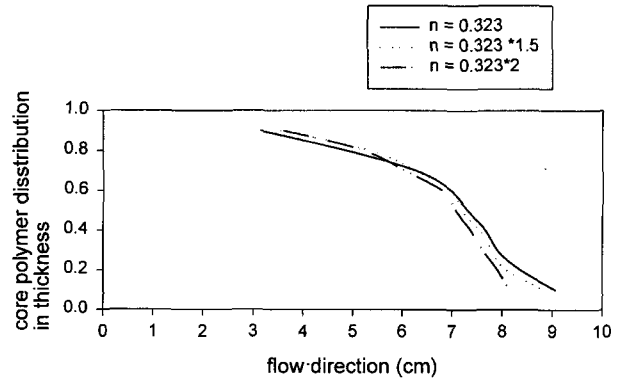


Fig. 11. Predicted thickness fraction of the core polymer in the case study 2 when the filling is completed.

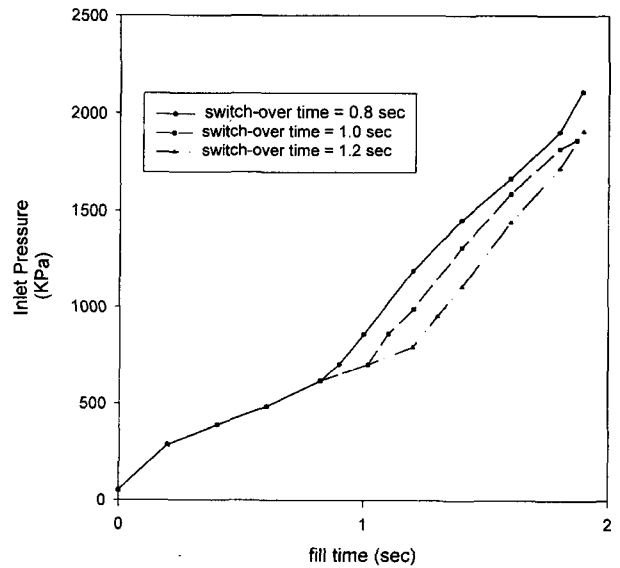


Fig. 12. Predicted inlet pressure versus time in the case study 3.

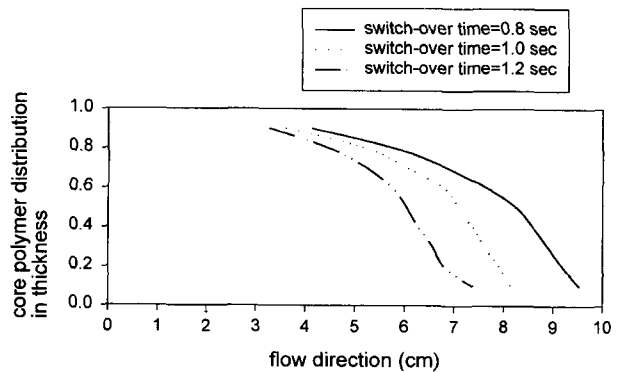


Fig. 13. Predicted thickness fraction of the core polymer in the case study 3 when the filling is completed.

중요하다.

마지막으로 사례연구 4에서는 실제 공정 상에서 금형 벽면의 온도를 조절하게 되면 이것이 core polymer의 충전 형태에 어떻게 영향을 미치는가를 살펴보았다. 금형 온도를 280 K에서 320 K까지 40 K 정도를 변화 시켜 보았는데, Fig. 14 와 Fig. 15의 압력과 두께 방향으로의 core polymer 분포 그림을 보면 큰 차이를 발견할 수 없었다. 이는 금형의 온도가 낮으면 고화층이 빨리 생성되고 이는 입구에서 압력을 증가 시키게 되고 또한 core polymer의 분포도 변화 시킬 것이라는 예상과는 다른 결과였다. 그러나, 이런 결과가 나온 이유는 본 수치모사에 사용된 점도 모델식에서 온도 의존성을 나타내는 상수(α)가 0.0052로 너무 작은 값을 가져서 온도 변화 효과를 크게 나타낼 수 없었기 때문으로 해석된다.

한편, Fig. 9, 11, 13, 15에서 게이트 부근에서는 core polymer가 두께 방향에서 차지하는 비가 나타나 있지 않

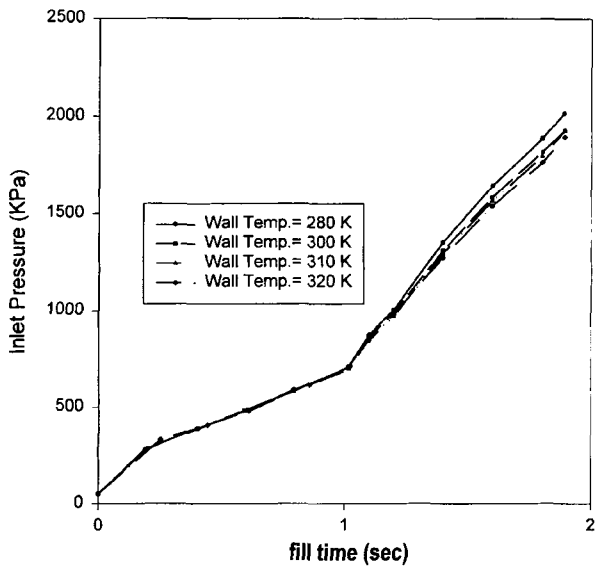


Fig. 14. Predicted inlet pressure versus time in the case study 4.

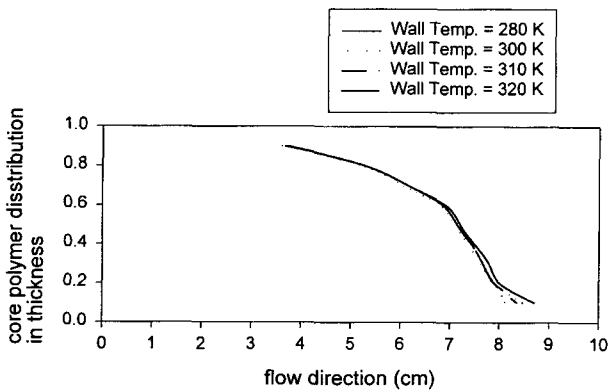


Fig. 15. Predicted thickness fraction of the core polymer in the case study 4 when the filling is completed.

은데 이것은 온도장이나 core polymer의 선단 진행에 사용하기 위해 나눈 층의 수를 더 늘리거나 게이트에서 가정한 core polymer의 두께비인 값 1과 외삽을 통해서 얻을 수 있다.

5. 결 론

샌드위치 사출성형의 충전 공정을 FAN 방법과 관할체 적법을 이용한 유한요소법으로 수치 모사하였다. 특히 충전 공정이 진행되는 동안 두 번째로 충전되는 core polymer의 물성의 차이로 인해서 일어나는 입구에서 필요한 압력의 변화나 충전이 끝난 후 core polymer의 위치와 두께 분포 등을 알아낼 수 있었다. Core polymer로 점도가 낮은 고분자 용융액을 사용한다면, 점도가 높은 한 가지 고분자 용융액을 계속 주입시키는 기존의 사출성형 공정보다 필요한 압력이 감소함을 볼 수 있다. 그리고, core polymer가 들어가는 순간부터 압력의 변화가 갑자기 크게 일어나는 것은 용융액을 금형에 충전시킬 때 충전 입구 주변의 유체를 밀어내는데 가장 큰 압력이 필요하므로 다른 점도의 core polymer 주입에 따른 압력 변화가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. Core polymer의 분포를 살펴보면 core polymer로 점도상수 값이 더 큰 물질, power-law 지수가 더 큰 물질을 주입하게 되면 두께 방향으로 더 굵게 파고 들어가는 반면에 흐름 방향으로는 더 적게 파고 들어가는 것을 알 수 있다. 반대로 core polymer로 점도상수 값이 낮은 물질, power-law 지수가 더 작은 물질을 사용해서 사출성형의 주입압력을 낮출 목적이었다면, core polymer는 두께 방향으로 가늘지만 더 깊게 파고 들어가서 core polymer의 선단과의 거리를 더 좁히게 된다. 만약, 이런 조건에서 core polymer를 너무 일찍 주입시켰다면, core polymer의 선단이 skin polymer의 선단을 따라잡게 되어서 터짐 현상이 일어나게 된다. 본 연구에서는 터짐 현상이 일어난 이후의 상황은 수치 모사할 수 없는 한계가 있었다.

사용기호

- b Half thickness of the cavity in the gapwise direction
- b₁ Half thickness of the core melt in the gapwise direction
- C_p Specific heat
- F Fill factor
- k Thermal conductivity
- m₀ A material constant in the viscosity equation (11)
- n Power-law index
- P Pressure

S	Fluidity, flow conductance	ρ	density
T	Temperature		
T_0	Inlet melt temperature		
T_w	Wall temperature		
Δt_{fill}	Time step used for node filling		
Δt_{temp}	Time step used for temperature calculation		
Δt_{skin_inlet}	Time step used for node filling when only skin polymer enters the cavity		
Δt_{core_inlet}	Time step used for node filling when core polymer as well as skin polymer enters the cavity		
u	Melt velocity in the x direction		
v	Melt velocity in the y direction		

Greek Letters

α	A material constant in the viscosity equation (11)
$\dot{\gamma}$	Shear rate
η	Viscosity
η_i	Viscosity of material i
η_{skin}	Viscosity of skin polymer melt
η_{core}	Viscosity of core polymer melt

참고문헌

1. L. S. Turng, V. W. Wang and K. K. Wang, *J. Eng. Mater. Tech.*, **115**, 48 (1993).
2. C. A. Hieber and S. F. Shen, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **7**, 1 (1980).
3. S. S. Young, J. White, E. S. Clark and Y. Oyangagi, *Polym. Eng. Sci.*, **20**, 798 (1980).
4. R. C. Donovan, K. S. Rabe, W. K. Mammel and H. A. Load, *Polym. Eng. Sci.*, **15**, 774 (1975).
5. J. White and B. L. Lee, *Polym. Eng. Sci.*, **15**, 481 (1975).
6. L. S. Turng and V. W. Wang, *SPE Tech. Papers*, **37**, 297 (1991).
7. A. Lanvers and W. Michaeli, *SPE Tech. Papers*, **38**, 1796 (1992).
8. S. C. Chen, K. F. Hsu and K. S. Hsu, *SPE Tech. Papers*, **39**, 82 (1993).
9. S. C. Chen and K. F. Hsu, *Num. Heat Transfer*, **28**, 503 (1995).
10. G. J. Manogg, P. Townsend and M. F. Webster, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **68**, 153 (1997).
11. G. W. M. Peters, P. J. L. van der Velden, and H.E. H. Meijer, *Int. Polym. Proc.*, **IX**, 258 (1994).
12. Z. Tadmor, E. Broyer and C. Gutfinger, *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 660 (1974).