

〈論 文〉

가상 반사압력을 이용한 사출성형의 준3차원 유동해석

이호상* · 신호철**

(1992년 3월 3일 접수)

The Quasi 3-D Flow Simulation in Injection Molding Using Virtual Pressure Reflection

Ho-Sang Lee and Hyo-Chol Sin

Key Words : Melt Front(유동선단), Weldline(웰드라인), Clamp Force(체결력)

Abstract

In order to determine the design parameters and processing conditions in injection molding, it is very important to establish the theoretical model with scientific base. In this study, a two dimensional model has been developed for the purpose and flow simulations of filling process are carried out. The moving boundary transient flow problem along the flat plane is solved efficiently by the Iterative Boundary Pressure Reflection Method which rearranges the impinged melt front along the physical boundary in scientific manner. The two dimensional modeling of filling process is applied to two examples : a three dimensional cover with two screw holes and a two-gated flat cavity with unbalanced runners. The numerical results show good agreement with experimental short shots, especially for the weldline locations and the pressure traces at various locations. They also provide the temperature, clamp force, and velocity field in the mold at different times during filling of cavity.

기 호 설 명

A : 점성계수에 관련된 상수

b : 두께의 반

C_p : 비열

k : 열전도계수

n : power law 지수

n : 법선방향 단위 벡터

p, P : 압력

R_i : 절점 i 에서의 Reflection

t : 시간

T : 온도

T_a : 점성계수에 관련된 상수

T_o : 고분자물질의 사출온도

T_w : 금형벽면의 온도

u, v : x 및 y 방향으로의 속도성분

η : 점성계수

ρ : 밀도

Ψ : 형상함수

Ω : 유동영역

1. 서 론

*정회원, 금성사 생산기술연구소

**정회원, 서울대학교 기계설계학과

플라스틱은 세계적으로 가장 급증하고 있는 산업의 하나로 그중의 약 32%가 사출성형법에 의해 생

산되고 있다. 사출성형법은 단일공정만으로 높은 정밀도의 제품을 얻을 수 있고 생산속도가 빠른 반면 금형이나 성형기의 가격이 비싸고 공정자체가 매우 복잡하다. 최근들어 가볍고 강도가 높은 고분자 재료의 개발과 함께 전기전자 제품은 물론 자동차, 항공기의 생산에 이르기까지 사출성형법의 중요성은 더욱 가속화 되고 있다. 특히 오늘날 급증하고 있는 고도의 정밀도 및 기계적인 강도에 대한 요구를 충족시키고 원가절감을 통한 생산성을 향상시키기 위하여는 각종 설계조건이나 성형조건 등에 따라 수반되는 복잡한 제현상을 예측하고 해석할 수 있는 정확한 수학적 모델링 및 그 해석기법이 필요하다. 이러한 모델을 통해서 재질 및 성형 조건과 성형품의 기계적인 성능사이의 복잡한 상관관계를 이해하여 금형제작 이전에 최적의 설계변수 및 성형조건을 결정할 수 있는 것이다.

수년간 고분자물질의 유동해석은 사출성형공정에서 특히 중요한 과제가 되어왔으며 각종성형조건에 대한 실험적인 관찰을 통해 충전과정이 성형품의 최종적인 기계적 성능에 매우 큰 영향을 미치고 있음이 잘 알려져 있다.^(1,2) 뿐만아니라 충전과정해석은 계속되는 압입과정(packing stage)의 초기조건이 되기 때문에 사출성형의 전과정을 이해하는데 매우 중요하다. 충전과정에 관해서는 Spencer와 Gilmore⁽³⁾의 실험적 연구를 시작으로 평면에서의 유동에 관한 거시적인 연구가 상당히 진행되었으며, 특히 유동 진행 과정에 대한 실험적인 관찰이 Han,⁽⁴⁾ Kamal^(5,6)에 의하여 행해졌다.

Ballman⁽⁷⁾은 power law모델을 사용하여 사각형 캐비티에서의 1차원 유동해석을 하였으며, 그후 Harry와 Parrot⁽⁸⁾는 1차원 준정상상태식에 열팽창식을 도입하여 사각형 캐비티에서의 유동해석에 큰 진전을 가져왔다. Load와 Williams⁽⁹⁾, Tadmor와 Gogos⁽¹⁰⁾는 1차원 비등온상태를 지닌 런너에서의 온도, 압력 및 속도분포를 해석하였다. Kamal과 Kenig^(5,6)는 power law모델을 사용하여 두께가 얇은 반원형 캐비티에서의 유동을 해석하였으며 그들의 실험결과와 잘 일치하였다. Berger와 Gogos⁽¹¹⁾는 원형 캐비티 유동 해석을 통해 동일 입구압력의 경우 비등온과정과 등온과정에서의 충전시간이 거의 일치함을 보였으나 이론적인 설명은 하지 못하였다. White⁽¹²⁾는 2차원 유동장에서 점성열발생을 무시한 윤활이론을 사용하여 해석적인 해를 구하였다. Kamal, Kuo와 Doan^(13,14)은 사각형 캐비티에

서의 2차원 유동해석을 하였으며 Hele-Shaw Flow 모델을 사용하여 게이트의 폭에 따라 진전하는 선단의 모양을 예측하고 그것이 고분자물질의 성질에는 거의 변화가 없음을 보였다. Ryan과 Chung⁽¹⁵⁾은 사각형 캐비티에서 진전하는 선단의 모양 및 압력분포를 구하기 위해 사상(mapping)법을 도입하였으며 그 결과는 Kuo 및 Kamal⁽¹⁴⁾의 것과 거의 차이가 없었다. 이와같은 방법들은 1개의 게이트를 갖는 원형이나 사각형과 같은 매우 단순한 모양의 캐비티에 국한된 것이었다.

일반적인 3차원형상을 갖는 캐비티에서의 유동해석을 위한 연구도 최근까지 상당히 진행되어 왔다. Osswald와 Tucker⁽¹⁶⁾은 금형내 유동해석을 위해 경계요소법(boundary element method)을 이용하여 짧은 계산시간으로 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 이 방법은 뉴우튼유체이고 두께가 일정한 경우로 제한되며 열전달을 고려할 수 없다는 한계가 있다. Agassant⁽¹⁷⁾은 일반적인 형상의 캐비티내 유동을 관유동(plaque flow), 방사유동(radial flow) 및 관유동(tube flow) 등 3종류의 조합으로 생각하여 해석하였다. Hieber, Shen 그리고 Wang^(18,19,20)은 유한요소법/유한차분법을 활용하여 Hele-Shaw Flow모델에서의 유동해석을 하였다. 이 모델에 대한 수리적인 설명은 Richardson⁽²¹⁾에 의해 이루어졌다. 그러나 그들은 매순간 경계면을 만족하도록 예측된 선단을 재배열하기 위해 사용자의 수작업(manual arrangement)을 이용했다. 이때 2가지 조건을 근거로 하였는데 그것은 질량 보존(mass conservation)과 경계면에서의 직교성(orthogonality)이다. 이러한 2조건을 근거로 하여 경계면을 침투한 절점에 대해 실제 경계면상에 위치하도록 선단의 위치를 재배열하게 된다. 캐비티 경계면과 선단이 만나서 이루는 동적접촉각(dynamic contact angle)은 유체, 공기 그리고 캐비티면에 관련된 표면에너지(surface energy), 점성력(viscos force) 및 모세관수(capillary number) 등에 따라 다르다. 이러한 동적접촉각에 관해 많은 연구가 진행되었으나 아직 그에 대한 명확한 이론은 없다.⁽²²⁻²⁴⁾ 특히 천이 유동에서 고분자물질과 같이 점성력이 지배적인 경우 접촉각은 미리 결정될 수 없다. 따라서 경계면에서의 직교성은 이론적 근거가 취약하다.

한편 Kim⁽²⁵⁾은 실제 경계면에서 가상압력을 생각하여 Boundary Pressure Reflection Method를

제안하였다. 그것은 매순간 사용자의 수작업에 의존하였던 Wang 등^(19,20)의 문제점을 일부 개선하여 충전과정해석을 자동으로 할 수 있도록 한 것이다. 그러나 이때 수식 유도과정에서 경계면에 위치한 절점이 2개 요소를 갖고있는 경우만을 고려하였기 때문에 사용상의 제약이 있다. 특히 캐비티 경계면은 침투한 절점을 포함한 요소에만 영향을 미치고 그외의 선단부분에는 전혀 그 영향이 전달되지 못하게 되어 재배열된 선단의 모양은 부정확할 수밖에 없다.

사출성형 유동해석을 보다 쉽게 수행하려면 문제를 더욱 단순화시켜야 하며 이러한 관점에서 실용화하려는 노력이 상당히 진행되어왔다. 그 하나는 Australia의 Austin에 의해 개발되고, MOLD-FLOW에 적용된 Branching Flow Method이다.⁽²⁹⁾ 이 방법은 유동의 흐름방향을 사용자가 예측하여 요소를 분할한 후, 압력을 계산하고 그로부터 얻어진 속도성분에 따라 유체가 분할된 요소의 방향을 따라 흐르도록 규정하고 있다. 따라서 이 방법은 사용자의 상당한 경험을 요구하며 때로는 그 결과가 실제적이지 못할 수가 있다. 다른 하나는 Wang 등이 CIMP에서 개발한 C-FLOW에 적용한 FAN (Flow Analysis Network) 방법이다.⁽³⁰⁾ 이것은 Gutfinger, Broyer 및 Tadmor가 Hele-Shaw Flow 모델을 이용, 제안한 것에 관제체적(Control Volume) 개념을 도입한 것이다. 여기서는 유량을 이용하여 미리 나뉜 요소가 채워진 정도를 구하고 선단의 위치를 결정하기 때문에 다소 임의적이다. 뿐만아니라 유체가 완전히 채워진 요소에 대해서만 지배방정식을 풀기때문에 선단 근방에서의 유동특성을 파악하기 곤란하고, 특히 캐비티 경계면의 기울기 변화가 심한 부분에서는 해석결과가 부정확하다.

이러한 제반 문제점들을 해결하기 위해 본 연구진에서는 Predictor-Corrector Scheme을 바탕으로 캐비티 경계면을 만족하지 않는 유동선단에 가상 반사압력(virtual pressure reflection)을 적용하여 기하학적 조건을 만족하도록 반복계산하는 IBPR (iterative boundary pressure reflection) 방법을 개발한 바 있다.⁽²⁰⁾ 이를 주입기구가 없는 동일평면상의 캐비티에 대해 적용하였으며 실험과 잘 일치하는 결과를 얻었다. 본 논문에서는 IBPR 방법을 바탕으로 캐비티형상이 동일평면상에 있지 않은 경우에 대한 준3차원 유동해석과 주입기구가 있는 경

우에 대한 유동해석을 별도로 수행하여 실험결과와 비교하였다. 해석결과는 실험과 잘 일치하였으며 그를 통해 앞서 개발한 IBPR방법이 보다 일반적인 경우에서의 캐비티 유동해석으로 확장, 응용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 지배방정식

Fig. 1은 두께가 일정하지 않은 2차원 캐비티 형상을 나타내고 있다. 임의의 순간에 정의된 유동영역은 금형벽면과 유동선단으로 둘러싸인 부분이다. 이러한 유동영역에서의 유동을 기술하는 비탄성, 비뉴우튼 유체에 대한 Hele-Shaw Flow모델의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(b\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(b\bar{v}) = 0 \quad (1)$$

여기서 b 는 두께의 '반(half gap thickness) 이고 \bar{u}, \bar{v} 는 두께방향의 평균속도(gapwise-averaged velocities)이다.

운동방정식

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}(\eta \frac{\partial u}{\partial z}) = 0 \quad (2)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}(\eta \frac{\partial v}{\partial z}) = 0 \quad (3)$$

에너지방정식

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

이때 경계조건은 다음과 같다.

$$\cdot z=b \text{에서 } u=0, v=0, T=T_w \quad (5)$$

$$\cdot z=0 \text{에서 } \frac{\partial u}{\partial z}=0, \frac{\partial v}{\partial z}=0, \frac{\partial T}{\partial z}=0 \quad (6)$$

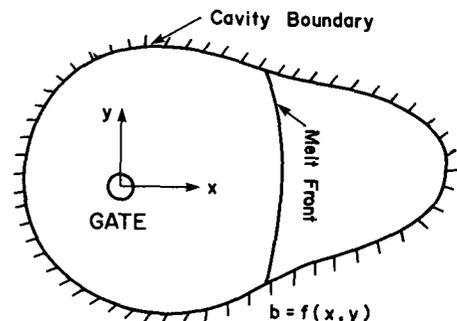


Fig. 1 Flow domain with varying thickness

Power law model을 사용할때

$$\eta = m(T) \dot{\gamma}^{n-1} = m_o g(T) \dot{\gamma}^{n-1} \quad (7)$$

이며, 여기서

$$m_o = A \exp\left(\frac{T_a}{T_o}\right), \quad g(T) = \exp\left(\frac{T_a}{T} - \frac{T_a}{T_o}\right)$$

이다.

3. 유한요소해석

3.1 지배방정식의 유한요소화

식(1)~(3)과 식(5)~(7)로부터 다음식이 유도될 수 있다.

$$\nabla \cdot (S \nabla P) = 0 \quad (8)$$

여기서 S 와 속도는 다음과 같다.

$$S = \int_0^b \frac{z^2}{\eta} dz \quad (9)$$

$$\bar{u} = -\frac{1}{b} \frac{\partial P}{\partial x} S, \quad \bar{v} = -\frac{1}{b} \frac{\partial P}{\partial y} S \quad (10)$$

Fig. 1과 같은 평면을 생각할때 경계조건은 다음과 같다.

- 유동선단에서 압력 $P=0$
- 캐비티 경계면을 유체가 침해할 수 없으므로 $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$
- 입구에서 유량은 정해진 값 Q 를 만족해야 한다.

즉,

$$Q = \int_c (-S \frac{\partial P}{\partial n}) ds$$

식(8)에 가중잔류치법(WRM)을 적용하면 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned} \int_o \Psi_i \nabla \cdot (S \nabla P) d\Omega &= \\ - \int_o \nabla \Psi_i \cdot (S \nabla P) d\Omega &+ \int_c (\Psi_i \cdot S \frac{\partial P}{\partial n}) ds = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

압력 P 를 식(12)와 같이 형상함수를 이용하여 근사화하면

$$P = \sum_{j=1}^m \Psi_j P_j \quad (12)$$

이며, 결국 식(11)은 식(13)과 같이 표현된다.

$$A_{ij} P_j = R_i \quad (13)$$

여기서 A_{ij} 와 R_i 는 아래와 같다.

$$A_{ij} = \int_o S \Psi_{j,x} \Psi_{i,x} d\Omega + \int_o S \Psi_{j,y} \Psi_{i,y} d\Omega \quad (14)$$

$$R_i = \int_c \Psi_i S \frac{\partial P}{\partial n} ds \quad (15)$$

식(13)은 비선형방정식 이므로 Newton-Raphson방법을 적용하면

$$A_{ij} \delta P_j = R_i - A_{ij} P_j^I \quad (16)$$

$$P_j^{I+1} = P_j^I + \delta P_j \quad (17)$$

이며, 여기서 I 는 반복계산 횟수이다.

정의된 유동영역에서 식(16), (17)을 풀면 압력을 구할 수 있고 식(10)으로부터 속도를 구하고 이의 결과를 이용하여 식(4)를 유한차분법으로 풀면 온도분포를 알 수 있으며 이는 다음 시간단계에서의 데이터로 활용된다.

3.2 이동경계문제

전방경계면에 대한 아무런 고려없이 Predictor-Corrector Scheme을 이용하여 진전된 선단의 모양이 Fig. 2에서 보여지고 있다. 편의상 절점 q 와 r 에 대해서만 다음에 기술하면 진전된 절점 q' 와 r' 은 각각 절점 q 와 r 으로 부터 진전된 것으로 캐비티 경계면을 침투하고 있다. 이때 반사속도(Reflected Velocity) 벡터는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{v}_q = \frac{q\vec{q}''}{\Delta t} = \bar{u}_q \mathbf{i} + \bar{v}_q \mathbf{j} \quad (18)$$

$$\bar{v}_r = \frac{r\vec{r}''}{\Delta t} = \bar{u}_r \mathbf{i} + \bar{v}_r \mathbf{j} \quad (19)$$

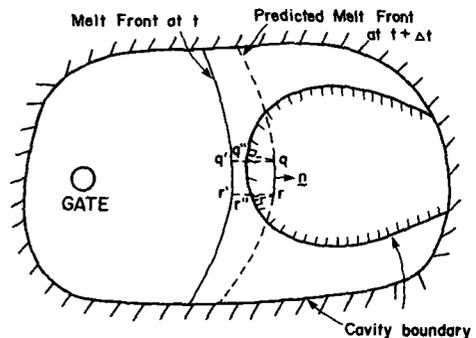


Fig. 2 Impinging shape

속도와 압력구배사이의 관계식은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$A_x = -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} A_y \quad (20)$$

$$A_y = -\frac{\partial P}{\partial y} = \left[\frac{\Phi_1}{\Phi_2} \left(1 + \left(\frac{\Phi_1}{\Phi_2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] L \quad (21)$$

여기서, 각 기호는 아래와 같다.

$$\Phi_1 = m_o \frac{1}{n} \frac{b\bar{u}}{S}, \quad \Phi_2 = m_o \frac{1}{n} \frac{b\bar{v}}{S}$$

$$L = \frac{1-n}{2n}$$

$$\bar{S} = \int_0^b z \left(\frac{z}{g} \right)^{\frac{1}{n}} dz$$

한편 법선압력구배 (Normal Pressure Gradient)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial P}{\partial n} = (-A_x e_x - A_y e_y) \cdot \mathbf{n} \quad (22)$$

여기서 e_x, e_y 는 각각 x, y 방향으로의 기저벡터 (base vector)이고 \mathbf{n} 은 반사(reflection)될 선요소 (line element)에서 바깥방향으로의 단위법선벡터이다. 식(20), (21)을 식(22)에 대입하면 절점 q 와 r 에서 요구되는 법선압력구배 (normal pressure gradient)는 각각 주어진 절점에서의 반사속도 (reflected velocity)성분을 활용하여 쉽게 결정될 수 있다. 한편 식(9)는 다음으로 표현될 수 있다.

$$S = \frac{1}{A} \left(\frac{A}{m_o} \right)^{\frac{1}{n}} \bar{S} \quad (23)$$

여기서 $A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$ 이다.

식(18)~(21)과 식(23)을 이용하면 절점 q 와 r 에서의 S 값을 각각 구할 수 있다. 따라서 선요소 qr 에서의 $S(\partial P/\partial n)$ 는 다음과 같이 근사화된 식으로 나타낼 수 있다.

$$S \frac{\partial P}{\partial n} = \left(S \frac{\partial P}{\partial n} \right)_q h_q + \left(S \frac{\partial P}{\partial n} \right)_r h_r \quad (24)$$

여기서 h_q, h_r 는 보간함수이다.

결국 절점 q 및 r 에서 캐비티 경계면을 만족하도록 작용될 절점 경계반사압력 (nodal boundary pressure reflection)은 다음과 같다.

$$R_q = \int_{s_q}^{s_r} \Psi_q S \frac{\partial P}{\partial n} ds \quad (25)$$

$$R_r = \int_{s_q}^{s_r} \Psi_r S \frac{\partial P}{\partial n} ds \quad (26)$$

마찬가지 방법으로 캐비티 경계면을 침투한 모든 절점에 대해 작용될 절점 경계반사압력 (nodal boundary pressure reflection)은 반사속도 (reflection velocity) 벡터를 이용하여 결정될 수 있다. 식(25), (26)을 고려하여 방정식 (16), (17)을 다시 풀면 새로운 속도가 계산되고 그것을 이용하여 선단의 위치가 재배열된다. 그러나 캐비티 경계면을 만족하도록 작용될 절점반사 (nodal reflection)는 그것이 해당되는 선요소에서의 반사속도 (reflection velocity)만을 고려하여 재분배되므로 지배방정식을 만족하도록 계산된 속도에 의해서 정확히 경계면을 만족시킬 수 없게 되어 반복계산이 요구된다. 이와같은 방법에 대한 수렴성 테스트 결과와 동일 평면상의 캐비티에 대한 유동해석 결과는 선행된 연구논문에 잘 나타나 있다. ⁽²⁶⁾

3.3 준 3차원 유동해석

3차원 성형품에 대한 유동해석의 경우 CIMP⁽²⁰⁾에서 개발한 Lay Flat Process를 이용하여 2차원 유동해석에서의 IBPR방법이 그대로 적용될 수 있다. Fig. 3과 같은 3차원 물체는 두께가 작으므로 그 방향으로의 속도를 무시하고 아울러 압력이 일정한 것으로 가정할 수 있다. 따라서 Lay Flat Process를 적용하여 펼치면 Fig. 4와 같이 동일 평면상에 놓인 2차원으로 모델링할 수 있다. 그러나 Fig. 4에서 가령 \overline{ab} 와 \overline{cb} 는 3차원 형상에서 같은

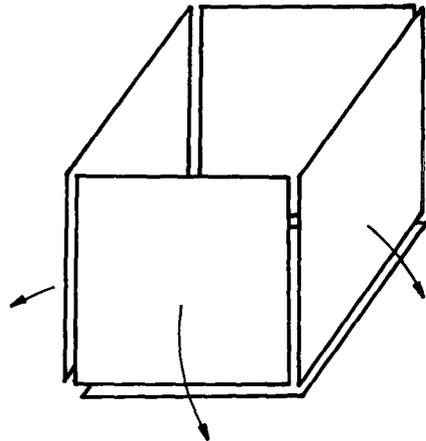


Fig. 3 Original 3-D object

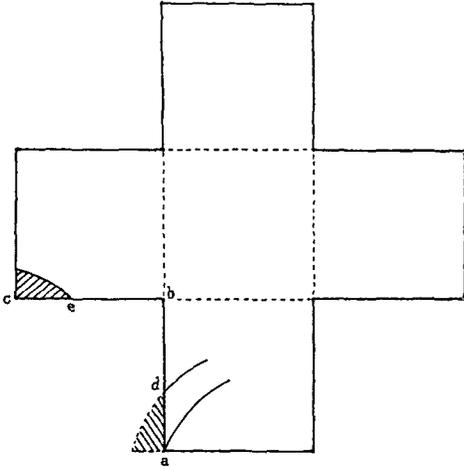


Fig. 4 2-D flattened object

모서리이므로 유체가 침투할 수 없는 벽과는 구별되어야 한다. 즉 \overline{ab} 를 통해나간 유체는 같은양 만큼 곧바로 \overline{cb} 를 통해 들어가게 되어 $\overline{ad} = \overline{ce}$ 이 성립된다. 이때 \overline{ad} 와 \overline{ce} 의 모든 절점은 다음과 같은 경계조건을 만족해야 한다.

$$P^+ = P^- \quad (27)$$

$$\bar{V}_n^+ = -\bar{V}_n^- \quad (28)$$

여기서 +, -는 각각 \overline{ad} 와 \overline{ce} 를 나타내고 \bar{V}_n^+ , \bar{V}_n^- 는 각각 \overline{ad} 와 \overline{ce} 상에서 밖으로 향하는 법선방향 속도성분을 나타낸다.

이와같이 2차원상에 정의된 형상에 대해 유동해석이 수행되며 특히 동일 모서리에 도달한 유동영역에 대해서는 미리 정의된 해당 선분에 대해 질량 보존 법칙에 따른 유동영역이 정의되어야 한다. 뿐만 아니라 주어진 유동장에서 지배방정식을 풀기 위해서는 이 모서리위에서 식 (27), (28)이 추가적으로 만족되어야 한다. 이와같이 계산된 속도성분을 사용하여 IBPR 방법을 적용하면 진전된 유동선단을 구할 수 있다.

4. 결과 및 검토

4.1 준 3차원 유동해석

(1) 유동해석

본 연구에서 3차원 모델로 선정된 Fig. 5는 두개의 나사구멍을 갖고 있는 덮개이며 두께는 0.318 cm로 일정하다. 계산 및 실험에 사용된 재질은 비

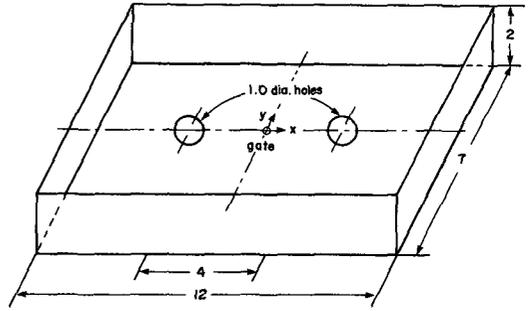


Fig. 5 Cover with two screw holes : Indicated dimensions are units of cm.

결정성이면서 산업용으로 널리 사용되고 있는 폴리스티렌으로 한남화학에서 생산된 GP-125이다. 계산을 위해 유변학적 물성치는 참고문헌 (27)에 있는 측정 데이터를 온도가 고려된 Power law 모델에 Linear Least-Squares 방법으로 처리하여 구하였으며 열적 물성치는 참고문헌 (14), (15), (19), (20)에 있는 값을 택하였다. 본 계산에 사용된 물질상수 및 성형조건이 Table 1과 Table 2에 각각 나타나 있다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 핀포인트 게이트가 원점에 위치하고 있으며 x축과 y축에 관해 대칭이므로 1/4부분만 해석할 수 있다. 이때 Lay Flat

Table 1 Material properties (PS and PP)

Property	PS	PP
n	0.364	0.323
$T_a (^{\circ}\text{K})$	2110	1470
$A (\frac{\text{kg}}{\text{ms}} (\frac{1}{\text{s}})^{1-n})$	107.9	540
$\rho (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$	1050	770
$C_p (\frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{K}})$	2000	3060
$k (\frac{\text{J}}{\text{ms}^{\circ}\text{K}})$	0.120	0.151

Table 2 Processing conditions for the simulation

Material	Q (cm ³ /s)	$T_o (^{\circ}\text{K})$	$T_w (^{\circ}\text{K})$
PS	16.4	473	323
PP	110	533	300

Process에 의해 동일 평면상으로 펼쳐진 상태가 Fig. 6에 나타나 있다. 이와같은 3차원 형상은 여러가지 형태로 펼쳐질 수 있으나 동일 모서리에서 질량보존법칙이 만족되도록 하고 식 (27), (28)의 경계조건을 부여하면 해석결과는 영향을 받지 않는다. Fig. 7(a)와 같은 초기형상을 가정하고 2차원 유동해석을 통해 매순간 자동적으로 생성된 메쉬가 Fig. 7(b)~(d)에서 보여진다. 이러한 계산과정을 통해 매순간 예측된 선단의 위치 및 형상이 Fig. 8

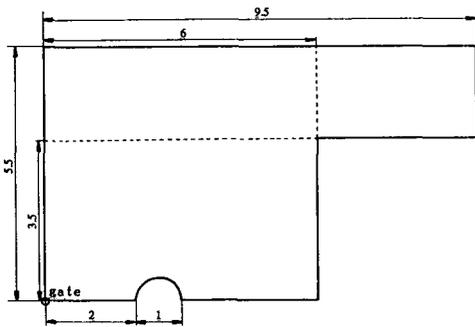
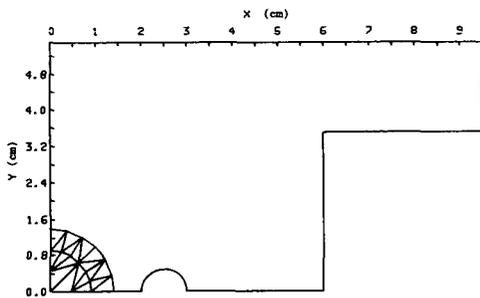


Fig. 6 A quarter flattened cover

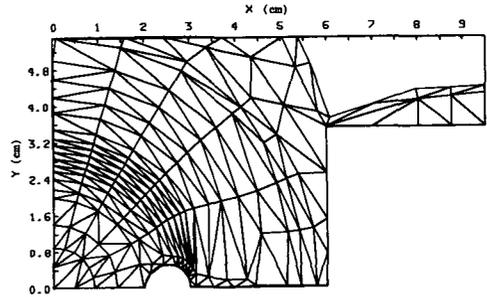
에 도시되고 있으며 뿐만 아니라 웰드라인의 길이 및 에어트랩(air trapping) 위치가 예측되고 있다. 표시된 3지점은 시간에 따른 압력변화를 예측하기 위해 선정된 결점을 나타낸다. Fig. 9는 Fig. 8에서 표시된 세 점에서의 시간에 따른 압력변화로 1지점에서의 압력은 게이트압력을 나타낸다. 계산된 압력분포를 이용하면 분할면(parting plane)에 수직하게 작용하는 힘, 즉 금형을 지지하기 위해 요구되는 체결력(clamp force)이 시간의 함수로 Fig. 10과 같이 정해질 수 있다.^{4,6)}

(2) 실험 및 검토

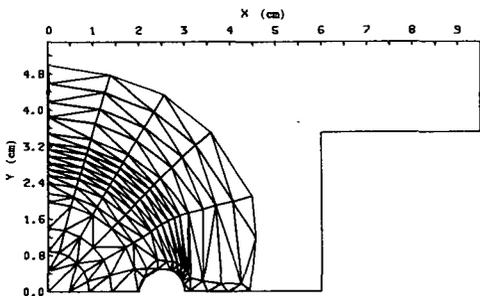
3차원 형상의 모델에 대한 유동해석 결과를 검토하기 위하여 다음과 같이 정성적인 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 사출용량 5.7 oz. 체결력 100 ton인 왕복스크류형 사출성형기(DJ-110T)를 사용하였다. 금형은 재질 SM55C로 가공하였으며 성형 중 온도변화는 열전대(thermocouple)와 디지털 온도계(digital thermometer)를 이용하여 측정하였다. 충전 완료전까지 매순간 진전하는 유동선단의 모양을 관찰하기 위하여 Table 2와 동일한 성형 조건을 유지한 상태에서 성형기의 스크류 회전수를 조절하면서 미성형(short-shorts) 실험을 수행하였



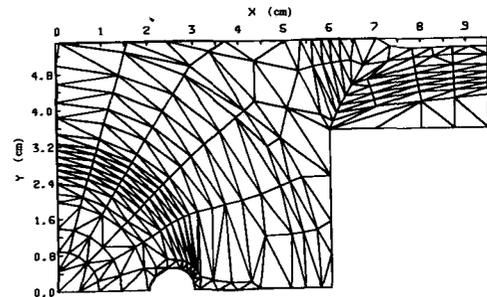
(a) Filling Time=0.119 sec



(c) Filling Time=2.850 sec



(b) Filling Time=1.50 sec



(d) Filling Time=3.220 sec

Fig. 7 Mesh configuration during the filling simulation : cover with two screw holes

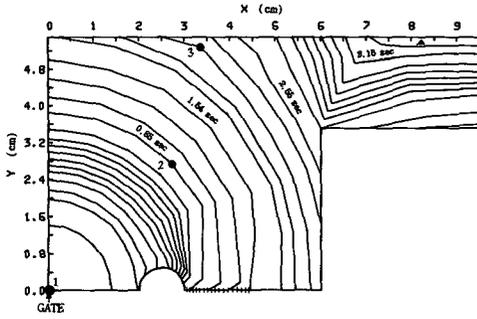


Fig. 8 Predicted melt fronts at $t=0.119, 0.227, 0.277, 0.337, 0.387, 0.427, 0.47, 0.52, 0.57, 0.62, 0.70, 0.85, 1.02, 1.24, 1.54, 1.83, 2.0, 2.2, 2.4, 2.55, 2.75, 2.85, 2.92, 2.98, 3.04, 3.10, 3.16, 3.22$ sec, respectively : Weldline demoted by*****. Air-trapping denoted by ▲. The 3 points are for the pressure traces in Fig. 9.

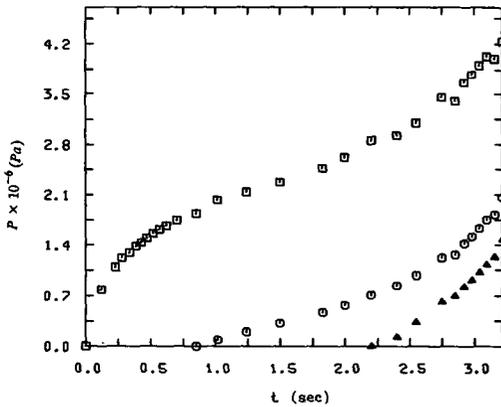


Fig. 9 Predicted pressure traces at gate(□), point 2(○) and 3(▲) in Fig. 8

다. Fig. 11은 동일 평면으로 펼쳐진 상태에서 계산과 실험의 결과를 비교하고 있는 것이다. 여기서 인서트를 돌아 서로 다른 유체가 만나서 웰드라인을 형성하고 있음과 우측상단부가 가장 늦게 채워지고 있음을 관찰할 수 있다. 특히 진전하는 선단의 모양에 대한 계산결과가 실험과 매우 유사하고 충전완료 직전의 모양이 잘 일치하고 있다.

4.2 런너가 있는 경우의 유동해석

런너가 있는 경우에는 기존 실험결과와의 비교를 위해 참고문헌(18, 28)에 나타나 있는 모델을 유동해석 대상으로 선정하였으며 그 형상 및 설정된 초기영역은 Fig. 12(a)와 같다. 이 경우 런너의 단면은 사다리꼴이며 두 게이트를 통해 동시에 주입되

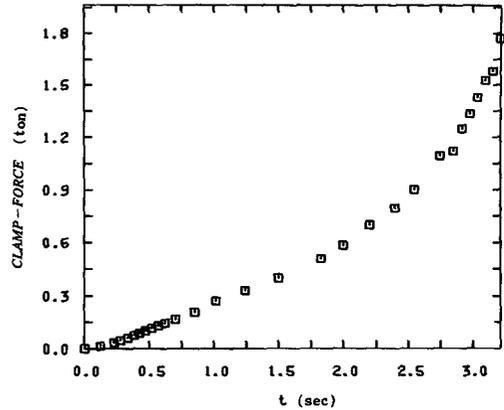


Fig. 10 The required clamp-force versus time

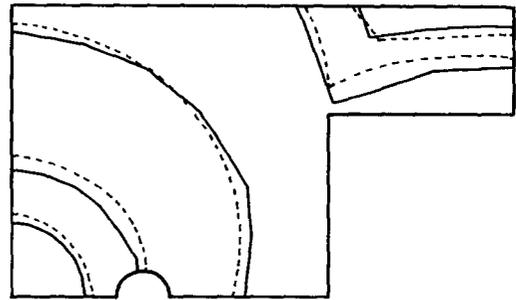


Fig. 11 Comparison of experimental short shots (dashed) and calculated melt fronts (solid)

도록 런너의 길이가 결정되어 있다. 본 모델에서는 런너의 유효반경 및 길이는 왼쪽의 경우 $a_1=0.813$ cm(0.320 in), $L_1=25.4$ cm(10.00 in)이고 오른쪽의 경우 $a_2=0.478$ cm(0.188 in), $L_2=14.3$ cm(5.630 in)이며 사각형 캐비티는 가로 74.3 cm, 세로 11.1 cm이고 두께는 0.318 cm로 일정하다. 사용된 폴리프로필렌의 재질 및 유동조건은 각각 Table 1, Table 2에 나타나 있다. 초기($t=0.08$ sec)에 양쪽에서의 런너 및 반원 유동영역을 통한 전 압력강하는 등온유동을 가정할 때 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta P = (\beta_j L_j + \bar{\beta} r_j^{1-n}) Q_j^n, \quad j=1, 2 \quad (29)$$

여기서

$$\beta_j = 2 \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \frac{m_o}{a_j (\pi a_j^3)^n}$$

$$\bar{\beta} = \frac{1}{1-n} \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{m_o}{b (2\pi b^2)^n}$$

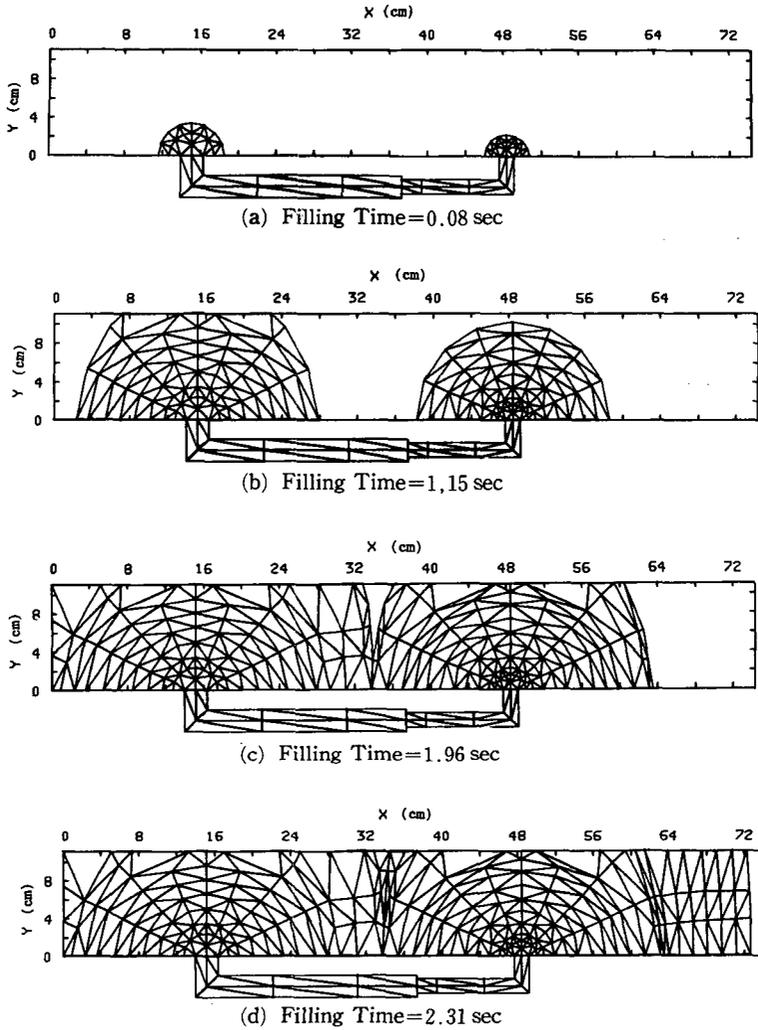


Fig. 12 Mesh configuration during the filling simulation : two-gated rectangular cavity with unbalanced runners

$$Q_j = (\pi r_j) (2b) \frac{dr_j}{dt}, \quad m_o = A \exp(T_a/T_o)$$

이다. 한편 스프루에서 양쪽선단까지의 압력강하는 같고 전유량 Q 는 미리 주어진다. 따라서,

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 \quad (30)$$

$$Q_1 + Q_2 = Q \quad (31)$$

이다. $t=0$ 에서 $r=0$ 을 이용하여 식(30), (31)을 풀면 $t=0.08$ sec에서 $r_1=3.49$ cm, $r_2=2.31$ cm이 계산된다. 결국 앞에서 본 Fig. 12(a)와 같은 초기 영역이 정해질 수 있다. 또한 두 런너에서의 압력 강하를 고려하기 위해서는 다음과 같이 상사

(mapping) 방법을 이용할 수 있다. 식(29)의 첫째 항을 다시 쓰면

$$Q = \frac{\pi a^3}{\frac{1}{n} + 3} \left(\frac{\Delta P a}{2 m_o L} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (32)$$

한편 두께 $2b$ 가 얇고 길이 L 에 비해 폭 W 가 작은 1차원 평판유동에서의 유량은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = \frac{2 W b^2}{\frac{1}{n} + 2} \left(\frac{\Delta P b}{m_o L} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (33)$$

결국 원통형 런너를 캐비티와 같이 두께가 얇은 평판으로 상사시키기 위하여는 식(32), (33)에서 Q 와 ΔP 가 같도록 해야한다. 따라서 $b \ll W \ll L$ 을 만족하도록 b 와 W 를 정하면 $L_1=25.4$ cm인 런너에서 $b_1=0.455$ cm, $W_1=2.40$ cm이고 $L_2=14.3$ cm인 런너에서 $b_2=0.262$ cm, $W_2=1.56$ cm이다. 본 연구에서 계산된 시간에 따른 선단의 위치와 자동적으로 생성된 메쉬가 Fig. 12(a)~(d)에 나타나 있다. Fig. 13은 예측된 매순간 자유표면의 형상 및 웰드라인을 도시한 것으로 참고문헌(18, 28)에 의한 실험결과와 매우 유사한 모양을 볼 수 있었으며 특히 웰드라인의 위치와 형상이 잘 일치하였다. Fig. 14는 충전완료 직전의 등압선을 표시한 것으로

오른쪽에 비해 왼쪽에서는 간격이 큰 것으로 미루어 속도가 매우 작음을 알 수 있다. Fig. 13에서 표시한 1~4지점에서의 시간에 따른 압력변화를 참고문헌(18, 28)에 의해 측정된 결과와 함께 도시한 Fig. 15 및 Fig. 16을 통해서 비교적 실험결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 계산결과에 따르면 왼쪽 게이트가 왼쪽 벽면을 채웠을때 ($t=1.38 \sim 1.7$ sec) 약간의 압력상승이 나타나고 있다. 특히 1.96 sec와 2.01 sec사이에서 급격한 압력상승을 보이고 있는데 이것은 웰드라인이 상부벽면에 닿으면서 왼쪽 게이트로부터의 유동을 갑자기 저해하기 때문이다. 이 현상이 실험에서는 2.05 sec에서 나타나는데 이때 $x=71$ cm까지 채워진 상태임을 감안하면

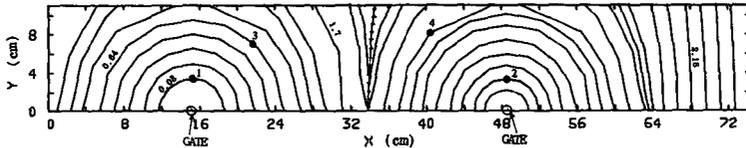


Fig. 13 Calculated melt fronts at each time step: Weldline denoted by****.

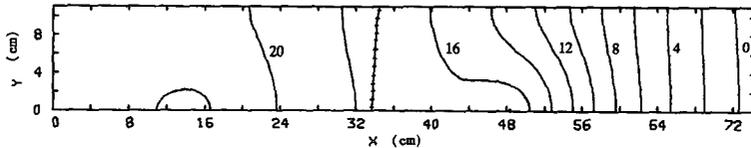


Fig. 14 Predicted constant pressure contours at time of fill (contour interval=2 MPa), together with corresponding predicted weldline

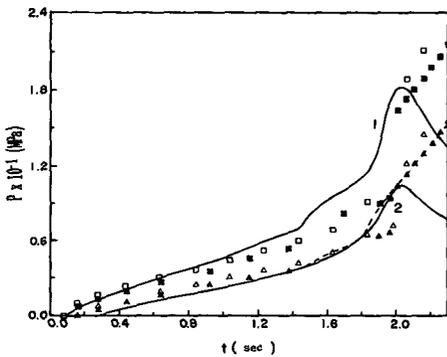


Fig. 15 Comparison with experimental pressure at transducer 1(1 curve) and 2(2 curve) by ref. (18, 28), predicted pressures(□ and △) by ref. (18, 28) and predicted pressures by this study (■ and ▲) : The dashed curve is experimental pressure trace for transducer 2 from a full-short run by ref.(18, 28).

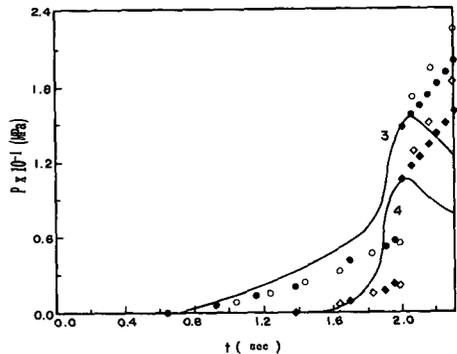


Fig. 16 Comparison with experimental pressure at transducers 3(3 curve) and 4(4 curve) by ref. (18,28), predicted pressures(○ and ◇) by ref. (18,28) and predicted pressures by this study (● and ◆)

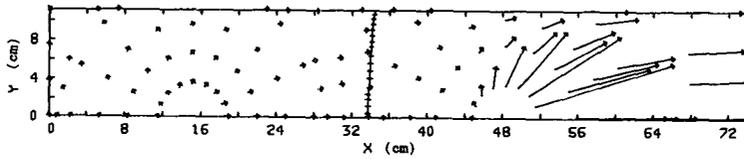


Fig. 17 Predicted velocity vector fields at time of fill, together with corresponding predicted weldline

실제 평균유량은 $122 \text{ cm}^3/\text{sec} (=71 \times 11.1 \times 0.318 / 2.05)$ 로 주입되었음을 알 수 있으며 이것은 계산결과와 약간의 시간차이를 내는 것이다. 또한 실험에서는 $t > 2.05 \text{ sec}$ 에서 압력이 계속 떨어지고 있음을 볼 수 있는데 이때부터 실험에서는 정해진 유량을 만족하도록 제어되지 못하고 그보다 훨씬 적은 유량인 $32.4 \text{ cm}^3/\text{sec} (= (74.3 \sim 71) \times 11.1 \times 0.318 / (2.41 \sim 2.05))$ 로 유입되었기 때문이다. 또한 Fig. 15에서 점선으로 표시된 것은 유량을 $110 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 에 맞게 조절해서 실험한 경우^(18,28), 2번 지점에서 측정된 압력을 나타낸 것으로 본 연구에서 계산된 결과와 잘 일치하고 있다. Fig. 17은 완전히 충전되기 직전의 속도벡터를 도시한 것으로 왼쪽 게이트에서 유입된 적은 양의 유체가 오른쪽으로 이동하고 있음을 잘 보여주고 있다.

5. 결론

자유표면을 갖는 이동 경계문제가 사출성형의 유동해석에서 매우 중요한 문제가 되어 왔다. 이의 해결을 위해 Hele-Shaw Flow모델에 유동선단에서의 가상 반사압력(virtual reflection pressure)을 도입한 IBPR방법을 개발하였으며 이를 보다 일반적인 경우에까지 확장, 응용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 성형품의 형상이 3차원 평면으로 구성되는 경우에 대해서 Lay Flat Process를 바탕으로 IBPR 방법을 적용할 수 있도록 하였다. 이를 이용하여 2개의 나사구멍을 갖고 있는 덮개에 대한 유동해석을 수행한 결과 매순간 진전하는 선단의 위치, 압력분포 뿐만 아니라 금형을 지지하기 위해 요구되는 체결력 등을 예측할 수 있었다. 아울러 동일한 조건하에서 실제 사출실험을 수행한 결과 매순간 진전하는 선단의 모양이 계산결과와 매우 유사함을 알 수 있었다.

(2) 두개의 게이트를 갖는 두께가 얇은 사각형 캐

비티에 대한 유동해석에서는 원통형 런너를 두께가 얇은 평판으로 상사시켜 문제를 단순화하였으며 예측된 웰드라인의 위치와 형상 그리고 압력 등이 실험과 잘 일치하는 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

(3) IBPR방법은 캐비티 경계면의 영향을 고려하여 유동선단에서의 거동을 정확하게 해석할 수 있으며 이동경계문제를 포함한 일반적인 고분자공정 해석에도 응용이 가능하다. 이를 위하여는 반복 계산으로 인한 컴퓨터 수행시간의 단축 및 수렴성 향상 등에 관한 연구가 보다 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Bakerdjian, Z. and Kamal, M.R., 1977, "Distribution of Some Physical Properties in Injection-Molded Thermoplastic Parts," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 17, pp. 96~100.
- (2) White, J.L. and Dee, H.B., 1974, "Flow Visualization for Injecting Molding of Polyethylene and Polystyrene Melts," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 14, pp. 212~222.
- (3) Spencer, R.S. and Gilmore, G.D., 1950, "Equation of State for High Polymers," *Journal of Applied Physics*, Vol. 21, pp. 523~526.
- (4) Han, C.D., 1976, "Rheology in Polymer Processing," Academic Press.
- (5) Kamal, M.R. and Kenig, S., 1972, "The Injection Molding of Thermoplastics Part 2: Experimental Test of the Model," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 12, pp. 300~308.
- (6) Kamal, M.R. and Kenig, S., 1972, "The Injection Molding of Thermoplastics Part 1: Theoretical Model," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 12, pp. 294~301.
- (7) Ballman, R.L., Shusman, T. and Toor, H.L.,

- 1959, "Injection Molding Flow of a Molten Polymer into a Cold Cavity," *Ind. Eng. Chem.*, Vol.51, pp. 847~850.
- (8) Harry, D.H. and Parrot, R.G., 1970, "Numerical Simulation of Injection Mold Filling," *Polymer Engineering and Science*, Vol.10, pp. 209~214.
- (9) Lord, H.A. and Williams, G., 1975, "Mold-Filling Studies for the Injection Molding of Thermoplastic Materials Part 2 : The Transient Flow of Plastic Materials in the Cavities of Injection-Molding Dies," *Polymer Engineering and Science*, Vol.15, pp. 569~582.
- (10) Tadmor, Z. and Gogos, C.G., 1979, "Principles of Polymer Processing," John Wiley & Sons.
- (11) Berger, J.L. and Gogos, C.G., 1973, "A Numerical Simulation of the Filling Process with PVC in Injection Molding," *Polymer Engineering and Science*, Vol.13, pp. 102~112.
- (12) White, J.L., 1975, "Fluid Mechanical Analysis of the Injection Mold Filling," *Polymer Engineering and Science*, Vol.15, pp. 44~50.
- (13) Kamal, M.R., Kuo, Y. and Doan, P.H., 1975, "The Injection Molding Behavior of Thermoplastics in Thin Rectangular Cavities," *Polymer Engineering and Science*, Vol.15, pp. 863~868.
- (14) Kuo, Y. and Kamal, M.R., 1976, "The Fluid Mechanics and Heat Transfer of Injection Mold Filling of Thermoplastic Materials," *AIChE J.*, Vol.22, pp. 661~669.
- (15) Ryan, M.E. and Chung, T.S., 1980, "Conformal Mapping Analysis of Injection Mold Filling," *Polymer Engineering and Science*, Vol.20, pp. 642~651.
- (16) Osswald, T.A. and Tucker, C.L., 1988, "A Boundary Element Simulation of Compression Mold Filling," *Polymer Engineering and Science*, Vol.28, pp. 413~420.
- (17) Agassant, J.F., Alles, H., Philipon, S. and Vincent, M., 1988, "Experimental and Theoretical Study of the Injection Molding of Thermoplastic Materials," *Polymer Engineering and Science*, Vol.28, pp. 460~468.
- (18) Hieber, C.A. and Shen, S.F., 1980, "A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of the Injection-Molding Filling Process," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol.7, pp. 1~32.
- (19) Wang, K.K., Shen, S.F., Cohen, C., Hieber, C. A. and Isayev, A.I., 1981, "Computer-Aided Injection Molding System," College of Engineering, Cornell University, Progress Report #8.
- (20) Wang, K.K., Shen, S.F., Hieber, C.A. and Isayev, A.I., 1984, "Computer-Aided Injection Molding System," College of Engineering, Cornell University, Progress Report #10.
- (21) Richardson, S., 1981, "Some Hele Shaw Flows with Time Dependent Free Boundaries," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 102, pp. 263~278.
- (22) Elizabeth, B., Dussan, V. and Stephen, D.H., 1974, "On the Motion of a Fluid-Fluid Interface along a Solid Surface," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.65, pp. 71~95.
- (23) Hoffman, R.L., 1975, "A Study of the Advancing Interface, 1. Interface Shape in Liquid-Gas Systems," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol.50, pp. 228~241.
- (24) Wilson, S.D.R., 1975, "A Note on the Measurement of Dynamic Contact Angle," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol.51, pp. 532~534.
- (25) Kim, S.G., 1985, "Knowledge-Based Synthesis System for Injection Molding," Ph.D. Thesis, MIT.
- (26) Lee, H.S., Sin, H.C. and Kim, S.G., 1990, "Iterative Boundary Pressure Reflection Method for the Simulation of Injection Mold Filling," *Polymer Engineering and Science*, Vol.30, pp. 1513~1522.
- (27) 황의정, 김광웅, 1986, "용융 폴리스티렌의 유성학적 특성 측정", *폴리머*, Vol.10, pp. 27~37.
- (28) Wang, K.K., Shen, S.F., Cohen, C., Hieber, C. A., Isayev, A.I., Jahanmir, S. and Tayler, A., 1979, "Computer-Aided Injection Molding System," College of Engineering, Cornell University, Progress Report #6.
- (29) Bernhardt, E.C., 1983, "CAE for Injection Molding," Hanser Publishers, New York.

- (30) Wang, K.K., Shen, S.F., Cohen, C., Hieber, C. A., Kwon, T.H. and Ricketson, R.C., 1985, "Computer-Aided Design and Fabrication of Molds and Computer Control of Injection Molding," College of Engineering, Cornell University, Progress Report #11.
- (31) Gutfinger, C., Broyer, E. and Tadmor, Z. 1975, "Melt Solidification in Polymeric Science," Polymer Engineering and Science, Vol. 15, pp 515~524.