

샌드위치 사출성형공정에 관한 수치해석

문종신* · 신호철**

(1999년 7월 23일 접수)

Numerical Simulation of the Sandwich Injection Molding Process

Jong-Sin Moon and Hyo-Chol Sin

Key Words : Sandwich Injection Molding(샌드위치 사출성형), Particle Tracing Algorithm(입자 추적 알고리즘), Fountain-Flow Approximation(분수유동 근사화)

Abstract

Recently, the sandwich injection molding has drawn attention because it offers the flexibility of using the optimal properties of two different but compatible polymers and is also one of the most promising methods in connection with recycling of thermoplastics. In this paper, a new particle tracing algorithm is presented in order to describe the advancement of core polymer melt during filling stage. The main advantage of this algorithm is the use of identity field information rather than tracking a set of fluid particles. In addition, to model the process accurately, especially to detect the possible "core surfacing", a simple fountain-flow approximation has been implemented in this study. Using hybrid FEM/FDM/CVM numerical scheme, an analysis program has been developed for the simulation of sandwich injection molding process. Two case studies have been carried out and the results are compared with those by an existing simulation package. It is shown that the predictions by the present analysis agree well with the experimental data.

1. 서론

1.1 연구배경

한가지 수지만을 사출하는 일반적인 사출성형법과는 달리 샌드위치 사출성형은 두 가지의 수지를 연속적으로 혹은 동시에 사출하여 층을 이루는 구조의 사출품을 성형하는 방법이다. 샌드위치 사출성형법은 겉층수지(skin material)와 이와는 다르지만 접합가능한 속층수지(core material)의 동시 혹은 연속적인 사출과정으로 구성되며, 이를 통해 속층수지는 겉층수지의 고화된 층 사이에 위치하게 된다. 연속적인 샌드위치 사출성형 공정을 도식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

샌드위치 사출성형 공정은 영국의 ICI사에 의해 처음 개발되었다. 이 공정은 처음에는 크면서도 중량이 작고 강도가 있는 사출품을 개발하기 위해 고안되었다. 일반 사출성형에서는 제품의 수축을 보상하기 위해 보압과정에서 높은 압력으로 가압을 하는데 반해, 이러한 방법을 사용하면 내부층을 형성하는 수지의 팽창에 의해 제품의 수축이 보상되기 때문에 낮은 압력으로 단단하고, 평평하며, 미려한 표면을 갖는 큰 형상의 제품을 성형할 수 있다.⁽¹⁾ 아울러 두께가 얇은 사출품의 성형에 적용할 경우에는 별도의 보강구조를 설치하지 않은 상태에서 가볍고 강도가 큰 제품을 성형할 수 있으므로 경제적이다.

한편, 샌드위치 사출성형 기술은 Battenfeld사의 two-channel technique를 사용함으로써 얇은 두께의 사출품을 성형하기에 이르렀다. 관련된 기술을 사용하면 얇고 중심에서 벗어난 층(eccentric layer)을 갖는 제품을 성형할 수 있다. 이러한 구조를 갖는 제품들은 내부(core layer)가 전자기적 차폐 기능을

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : hyochol@gong.snu.ac.kr

TEL : (02)880-7140 FAX : (02)883-1513

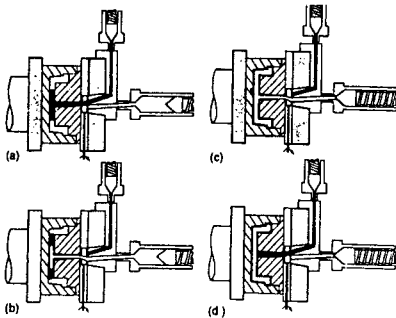


Fig. 1 Sequential sandwich injection molding

갖는 전도성 물질인 경우, 내부에 재활용 수지를 사용하는 경우, 또는 내부에 레이저에 의해 기록 가능한 수지를 사용하는 경우 등에서 그 활용 예를 찾을 수 있다.⁽²⁾

1.2 관련연구

한 가지 성분의 수지를 사출하는 일반적인 사출 성형 공정에 대해서는 지금까지 많은 해석적, 실험적 연구가 진행되어왔다.⁽³⁻⁵⁾ 사실 지난 10년 동안 일반 사출성형의 유동 해석은 기존의 제품을 해석할 뿐만 아니라 새로운 제품을 개발하는 도구로서 인정받고 있다. 그러나 샌드위치 사출성형 공정에 대해서는 최근에 와서야 활발히 연구가 진행되고 있다.

샌드위치 사출성형에 대한 실험적인 연구는 1970년대 Donovan, White, Young⁽⁶⁻⁸⁾ 등에 의해 시작되었다. 이들의 연구는 여러 가지 기하학적 형상에 대해 공정 조건과 수지의 종류를 변화시키면서 수행되었다. 그 후 샌드위치 사출성형에 대한 이론적인 연구는 거의 중단되었다가 1990년대 초에 잔류시간 개념(residence time approach)을 사용한 수치 해석 프로그램이 Turng^(9,10)에 의해 개발되었다. Power-Law 유동 모델과 잔류 시간 개념을 사용하여 표면을 형성하는 수치(skin melt)의 분수유동 영역에서의 입자추적방법(Particle Tracing Method)에 대해서는 자세히 설명하고 있으나 해석에 있어 중요한 겉층/속층 수치 경계의 위치 및 내부를 형성하는 속층수지의 입자추적방법에 대해서는 기술하고 있지 않다. 또한 복잡한 형상에 대한 잔류시간 분포의 해석에 대해서는 아직까지 연구가 진행 중에 있다.

Chen⁽¹¹⁾은 일반사출성형의 유동해석에서 사용하는 검사체적을 두께방향으로 등분하여 생성한 부검사체적(Sub Control Volume)에서 표면을 구성하는 수지와 내부를 구성하는 수지가 차지하고 있는 비율을 계산함으로써 내부를 구성하는 수지의 진전을 계산하였다. 한편 Schlatter⁽¹²⁾는 비압축성 방정식에 유체의 경계에서 두 유체가 서로 섞이지 않는다는 조건(Non Mixing Condition)을 부가하여 얻은 이동 방정식(Transport Equation)과 수정된 검사체적을 사용하여 두 수지의 경계 위치를 계산하였다. 그러나 Chen과 Schlatter가 도입한 수지의 진전 모델은 분수유동 영역에서는 적용할 수 없기 때문에 표면을 구성하는 수지가 부족하여 내부를 형성하는 속층수지가 표면을 형성하는 겉층수지의 선단을 뚫고 제품의 표면으로 나오는 현상(Core Surfacing)을 예측할 수 없다.⁽¹³⁾

Manogg⁽¹⁴⁾는 축대칭 형상에 대하여 샌드위치 사출성형의 수치 해석을 수행하였다. Turng을 비롯하여 Chen, Schlatter가 Hele-Shaw 모델을 사용한다. 반해 Manogg는 두께가 심하게 변하는 축대칭 형상의 캐비티에서 유체의 자유 표면을 계산하였다.

본 연구에서는 앞선 이전의 연구에서처럼 충전 과정에서 3차원의 얇은 캐비티 내부에서의 속층수지의 분포를 예측하고자 하였다. 이를 위해 먼저 게이트를 통과하는 속층수지 입자에 전환 시각(switch-over time) 이후 경과된 시간을 부여하였다. 그리고 전달방정식을 사용하여, 압력장을 계산하기 위해 생성한 유한요소의 절점에서 유체 입자에 부여된 시간의 고유치장(identity field)을 계산함으로써 입자를 추적하였다. 아울러 적절한 유동선단 모델을 도입하여 속층수지의 분출 현상의 예측을 가능하도록 하였다.

2. 유동해석을 위한 수학적 모델링

2.1 지배방정식

일반적으로 Hele-Shaw 유동 모델은 두께가 얇은 3차원 캐비티내에서의 수지의 유동을 잘 기술하고 있다고 알려져 있다. 결과적으로 비등온(non-isothermal) 조건하에서의 비탄성(inelastic), 비뉴턴(non-newtonian) 유체에 대한 기본 가점과 관련된 지배방정식은 샌드위치 사출성형에서도 유사하게 적용할 수 있다.

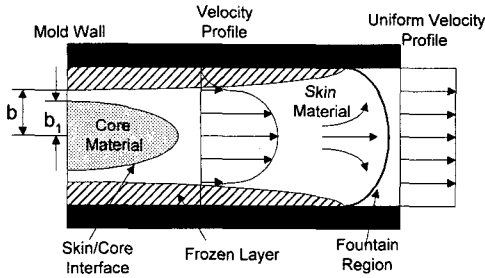


Fig. 2 Schematic of skin and core melt front as well as a skin-core interface in the cross-sectional view

연속방정식/ 운동방정식

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (b \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (b \bar{v}) = 0 \quad (3)$$

에너지 방정식

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

여기서 p, T, u, v 는 압력, 온도 및 평면 방향 x, y 로의 속도를 나타낸다. 그리고 b 는 두께의 절반을, “(-)” 는 두께 방향 z 로의 평균을 취한 것을 나타낸다. 또한 $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률속도를 나타내며, η, C_p, k 는 이들 수식이 적용되는 영역에서 표면 혹은 내부를 형성하는 수지의 점성, 열용량 계수 및 열전도 계수를 나타낸다. 한편 스프루와 러너와 같은 원통형상의 주입부에 대한 지배방정식도 위의 식들과 유사하게 유도될 수 있다.

이전의 샌드위치 사출성형에 대한 실험적 연구에 따르면 Fig. 2에 나타난 바와 같이 두 수지의 경계에서는 날카로운 경계(sharp interface)를 형성한다. 이러한 현상은 거시적인 관점에서 볼 때 경계에서 두 수지가 서로 섞이지 않는다는 것이다. 즉 경계에서 두 수지의 전단응력과 열유량(heat flux)은 일정해야 한다.

겉층/속층 경계

$$\left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{skin} = \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{core} \quad (5)$$

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

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

식 (1)과 (2)를 식 (3)에 대입하여 적분하면 다음과 같은 압력장에 대한 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (8)$$

여기서 S 는 유동계수(fluidity)이며 다음과 같이 주어진다.

$$S = \int_0^{b_1} \frac{z^2}{\eta_{core}} dz + \int_{b_1}^b \frac{z^2}{\eta_{skin}} dz \quad (9)$$

여기서 b_1 은 두께 방향으로의 내부를 형성하는 속층수지의 두께 절반을 나타내며, η_{core} 와 η_{skin} 은 각각 속층수지와 겉층수지의 점성을 나타낸다. 표면을 형성하는 겉층수지만 존재하는 영역에서는 $b_1 = 0$ 이다.

2.2 점성 모델

Power-Law 모델은 ABS, PP의 경우처럼 뉴턴 점성이 매우 작은 전단변형률로 제한되는 수치에만 적합하다. 한편 폴리카보네이트(Polycarbonate) 수치처럼 광범위한 영역에서 전단박화(shear-thinning) 경향을 나타내지 않는 수지의 경우에는 좀더 일반화된 점성 모델이 필요하다. 그래서 본 연구에서는 수정된 Cross 모델⁽¹⁵⁾을 사용하였다.

$$\eta(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{\eta_o(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_o \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (10)$$

여기서 n 은 Power-Law 지수, τ^* 는 zero-shear-rate 점성(η_o)과 전단 박화 영역 사이의 전이를 나타내는 응력의 크기이다. 식 (10)에서 η_o 는 η 의 온도와 압력의 변화에 따른 영향을 포함하고 있으며 η_o 을 WLF형의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\eta_o = \begin{cases} D_1 \exp \left[-\frac{A_1(T-T^*)}{A_2+(T-T^*)} \right] & T > T^* \\ \infty & T \leq T^* \end{cases} \quad (11)$$

$$T^*(P) = D_2 + D_3P, \quad A_2 = \bar{A}_2 + D_3P \quad (12)$$

여기서 $A_1, A_2, \bar{A}_2, D_1, D_2, D_3$ 는 점도에 관련된 물성상수이며, T^* 는 전이 온도를 나타낸다.

2.3 선단 영역에서의 분수 유동 묘사

진전하는 유동 선단 부근에서는 분수 유동 (fountain flow)이라고 알려진 복잡한 유동장이 존재한다. 그리고 이러한 유동은 온도장 및 속층수지의 분포에 커다란 영향을 미친다. 또한 샌드위치 사출 성형 중에 발생할 수 있는 속층수지의 분출 현상을 예측하기 위해서도 이러한 분수 유동을 기술하여야만 한다. 그런데 선단 영역에서의 유동장은 3차원이며 이를 정확히 기술하기는 매우 어렵다. 따라서 분수 유동 효과를 묘사하기 위한 단순화된 모델들이 제안되고 있다.^(16, 17)

본 연구에서는 속층수지의 분포를 구하고 속층수지의 분출 현상을 예측하기 위하여 Fig. 3에 나타난 유동 선단 모델을 사용하였다. 제시된 모델에서 보면 유체의 자유 표면에서는 선단에서 순간적으로 상승하는 입자(upstream node)의 중심부(centerline)에서의 계산값이 균일하게 분포한다.

2.4 입자 추적 알고리즘

샌드위치 사출성형 공정해석에서 가장 중요한 것은 사출품내에서의 속층수지의 공간적 분포를 예측하는 것이다. 이러한 분포를 예측하기 위해서는 겉층수지와 속층수지의 경계의 위치를 찾아야만 한다.

일반적으로 서로 섞이지 않는 두 유체의 경계를 찾기 위해서 식 (13)과 같이 주어진 pseudo concentration Method가 사용되어왔다.⁽¹⁸⁾

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial M_i}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

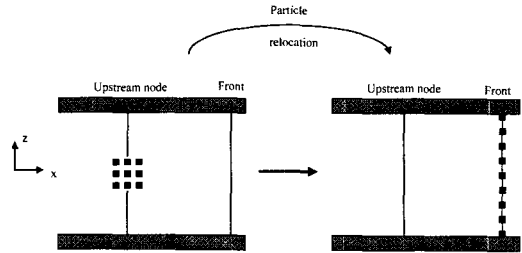


Fig. 3 Schematic representation of the fountain flow approximation

샌드위치 사출성형의 경우에는, 예를 들어 겉층수지에 $M=0$, 속층수지에 $M=1$ 을 부여하여 두 수지의 경계를 예측할 수 있다. 그런데 본 연구에서는 시간에 따른 속층수지의 분포를 예측하기 위하여 M 에 겉층수지에서 속층수지로 전환된 이후의 경과된 시간을 부여하였다. 즉 M 은 전환시간 이후에 게이트를 통과하는 유체입자의 경과된 시간 정보를 갖는 고유치로 사용하였다.

일반적으로 사출성형 공정 중, 3차원의 얇은 캐비티내에서, 유동선단을 제외한 곳에서 유체는 층류 유동을 하므로 각 층별로 식 (13)을 계산하여 시간에 따른 속층수지의 분포를 예측할 수 있다. 한편, 이 경우에는 입자 추적 문제는 각시간에서 별도의 물질입자(material marker)를 추적하는 문제에서 유한 요소상의 질점(node)에서 고유치장(Identity Field)을 계산하는 문제로 전환된다. 이렇게 구해진 층별의 속층수지의 분포를 통하여 사출품 전체에서 속층수지가 차지하고 있는 공간적 분포를 예측하게 된다.

3. 적용례

본 연구에서는 2장에서 제시한 지배방정식과 분수유동 모델 및 속층수지의 진전을 기술하기 위한 전달방정식을 유한 요소/ 유한 차분/ 검사 체적 정식화 과정을 통하여 샌드위치 사출성형 공정상의 유동 해석을 수행할 수 있는 프로그램을 구성하였다. 그리고 구성된 프로그램을 사용하여 두 가지 모델에 적용하였다. 여기서 선정된 두 가지 모델의 해석을 통하여 유동 과정이 끝났을 시점의 압력, 평균 온도, 유동 형태 및 속층수지 분포 등과 같은 결과를 도출하였고 아울러 실제 공정 상에서 발생할 수 있는 속층수지의 분출현상을 현상을 예측하

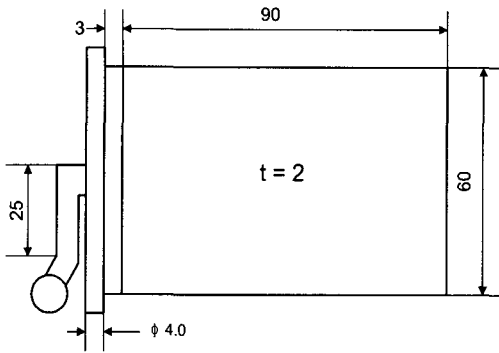


Fig. 4 Geometry of the cavity with cylindrical part

Table 1 Skin and core material (Model 1)

Skin Material	PS (CHI MEI / PG 33)
Core Material	PS (CHI MEI / PG 33)

였다.

본 연구에서 적용한 두 가지 모델은 다음과 같다.

모델 1 : 원통부를 포함하는 평판 캐비티

모델 2 : 균일한 두께를 갖는 사각 평판 캐비티

3.1 원통부를 포함하는 평판 캐비티 해석

원통부를 포함하는 평판 캐비티는 Chen이 개발한 샌드위치 사출성형 프로그램의 해석 결과와 실험과의 비교를 위해 선정된 모델이다. 본 연구에서도 개발된 프로그램의 유효성을 검증하기 위해 Chen의 경우와 동일한 조건을 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 4는 선정된 모델의 기하학적 형상을 나타내고 있으며 해석과 실험에 사용된 수지의 종류, 물성치 및 공정 조건은 Table 1, Table 2 및 Table 3에 나타나 있다. Fig. 5는 유동이 끝났을 때의 압력의 분포를 도시하고 있으며, Fig. 6과 Fig. 7은 각각 유동 선단 분포와 평균 온도 분포를 나타내고 있다.

한편 Fig. 8은 두께 중심에서 평면 방향으로의 속충수지 분포를 나타내고 있다. 아울러 Fig. 8에서는 본 연구에서 얻어진 해석 결과뿐만 아니라

Table 2 Material properties (Model 1)

n	0.27468
τ^* (Pa)	20015
D_1 (Pa.s)	2.68×10^{11}
D_2 (K)	373.15
D_3 (K/Pa)	0.000
A_1	25.878
\bar{A}_2 (K)	51.6
ρ (g/cm ³)	0.94
C_p (J/Kg-C)	2100
k (W/m-C)	0.18

Table 3 Processing condition (Model 1)

Total injection time	1.52 sec
Switch-over time from skin to core	0.67 sec
Duration of core injection	0.85 sec
Volume fraction of skin material	55.9 %
Volume fraction of core material	44.1 %
Initial melt temperature	220 °C
Mold-wall temperature	35 °C

Chen의 실험 결과와 해석결과 그리고 C-MOLD의 해석 결과를 함께 도시하였다.

Chen의 해석 결과와 C-MOLD의 해석결과에서는 속충수지가 윗면과 밑면까지 도달하는 것으로 해석된 반면 본 연구의 해석 결과는 실험치와 상당히 근사한 결과를 나타내고 있다. 그런데 본 연구의 해석 결과에서 속충수지가 원통부와 평판부가 만나는 모서리 부근에서는 다소 실험치와 다른 결과를 나타내고 있는데 이것은 Fig. 7의 평균 온도 분포에서 나타난 것처럼 이 영역에서의 평균 온도가 캐비티 평판부의 다른 부분 보다 큰 온도강화가 발생하여 이 영역에서 속충수지의 유입이 잘 이루어지지 않는 것으로 생각된다.

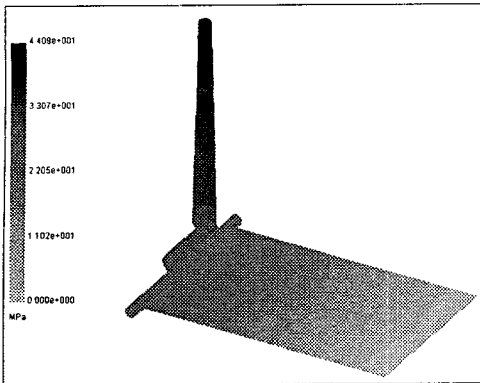


Fig. 5 Pressure distribution at the end of filling

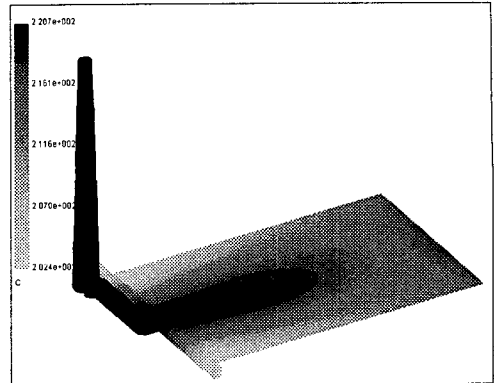


Fig. 7 Bulk temperature distribution

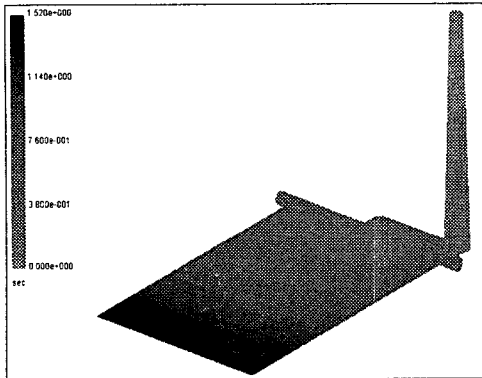


Fig. 6 Skin melt front advancement

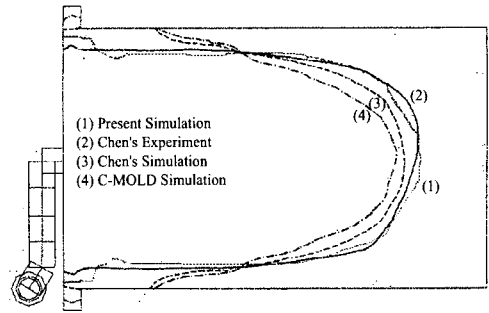


Fig. 8 Comparison of simulated predictions and experimental result on the final core material distribution

4.2 사각 평판 캐비티 해석

두께가 2 mm로 균일한 사각 평판 캐비티에 대해 처음에는 걸층수지 / 속층수지의 체적비가 75% / 25%로 사출을 하였고 이 후 속층수지의 양을 증가시키면서 평판 중심부(AA')의 단면에서 속층수지의 분포를 관찰하였다. 해석에 사용된 수지와 각 수지의 물성치는 Table 4, Table 5에 나타나 있으며, 게이트는 직접 게이트로 가정하였다. 캐비티의 주요 치수 및 기하학적 형상은 Fig. 9에 나타나 있다.

Fig. 10은 속층수지가 차지하는 체적이 전체의 25%가 될 때의 속층수지의 평면 방향 분포이다. 한편 Fig. 11은 속층수지가 차지하는 부피를 전체의 25%부터 70%까지 증가시킬 때 평판 중심부(AA')의 단면에서 두께 방향으로의 속층수지의

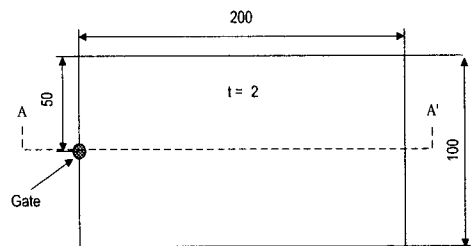


Fig. 9 Geometry of rectangular strip

Table 4 Skin and core material (Model 2)

Skin Material	DOW CHEMICAL / ABS MAGNUM 4420
Core Material	DSM / ABS Ronfalin Fx 50

Table 5 Material properties (Model 2)

	Skin Material	Core Material
n	0.28157	0.30879
τ^* (Pa)	52880	61456
D_1 (Pa.s)	2.0×10^9	2.13×10^{11}
D_2 (K)	373.15	373.15
D_3 (K/Pa)	0.00	0.00
A_1	19.256	26.163
\bar{A}_2 (K)	51.6	51.6
ρ (g/cm ³)	1.158	0.915
C_p (J/Kg-C)	1800.0	2400.0
k (W/m-C)	0.18	0.19

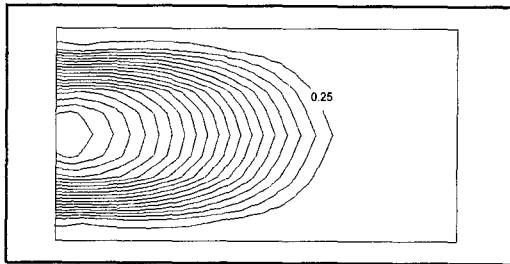


Fig. 10 Core material distribution (skin/core = 75/25)

시간에 따른 분포이다. 각각의 결과에서 겉층수지와 속층수지의 경계에 나타난 숫자는 전환 시각 직후에 노즐을 통하여 캐비티로 유입된 속층수지가 캐비티 내에서 잔류한 시간을 나타낸다. 한편, Fig. 11에서 나타난 결과들을 보면 대략 속층수지의 체적이 45%가 될 때, 게이트가 위치한 면의 반대쪽 면 부근에서부터 속층수지의 분출 현상이 일어남을 알 수 있다. 또한 속층수지의 체적 비율이 45% 보다 더 증가하면서 처음으로 속층수지의 분출 현상이 발생하는 위치는 게이트 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 아울러 해석 결과에서 나타난 두께 방향으로의 속층수지의 분포는 일반적인 사출성형에서의 분수 유동에 관한 이전의 연구 결과들과도 근사한 결과를 보여주고 있다.

4. 결론

샌드위치 사출성형에 관한 지금까지의 연구들은 사출품의 내부를 형성하는 속층수지의 진전에 초점을 맞추어 진행되어 왔지만 그 분포에 대한 예측에 있어 아직은 실제의 경우와 다소 차이를 보이는 해석 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서는 지금까지의 연구들에서 사용한 속층수지의 진전 알고리즘의 문제점을 해결하기 위한 새로운 알고리즘을 개발하고 이를 적용하여 좀 더 정확한 해석 결과를 얻고자 시도하였다.

본 연구의 내용과 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 샌드위치 사출성형의 유동해석을 위한 유한요소법 / 유한 차분법 / 검사 체적법을 사용하였다. 특히 속층수지의 분포를 예측하기 위하여 속층수지의 유체 입자가 캐비티 내부로 들어온 시각 정보를 각는 특성치를 도입하였고, 이 특성치의 보존식을 이용하여 전달 방정식을 도출하고 입자 추적의 문제를 특성장의 해석 문제로 전환하였다.

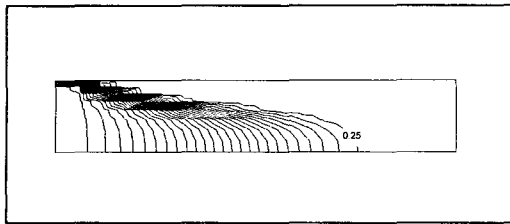
(2) 부적절한 겉층 / 속층 수지의 체적 비율로 인해 발생하는 속층수지의 분출 현상을 예측하기 위해 수지의 선단의 분수 유동을 묘사할 수 있는 분수 유동 모델을 도입하였다.

(3) 원통부를 포함하는 캐비티의 해석을 통해 본 연구에서 개발된 프로그램의 유용성을 검증하였다. 두께 중심부(Mid-Surface)에서의 속층수지의 분포에 대해 Chen 연구 결과와 상용화된 C-MOLD의 해석 결과 등과 비교하였다. 다른 해석 결과들과의 비교를 통해 본 연구에서 개발된 해석 프로그램의 결과가 Chen의 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

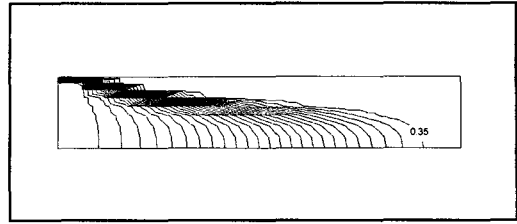
(4) 본 연구에서 도입한 단순화된 분수 유동 모델의 타당성을 검증하기 위하여 두께가 균일한 사각 평판 캐비티의 해석을 통해 속층수지가 겉층수지를 뚫고 나오는 속층수지의 분출 현상을 관찰하였다. 속층수지의 분포는 일반적인 사출성형의 분수 유동에 관한 기존의 연구 결과들과도 근사한 결과를 나타내고 있다.

참고문헌

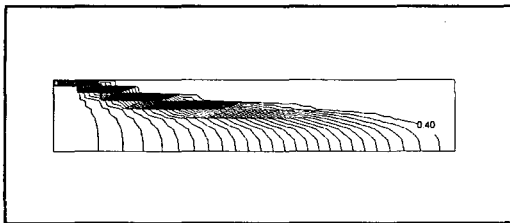
- (1) Lanvers, A., and Michaeli, W., 1992, "CAE for Coinjection and Gas-Assisted Injection Molding,"



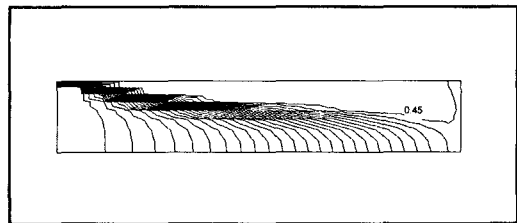
(a) Core material volume fraction 25%



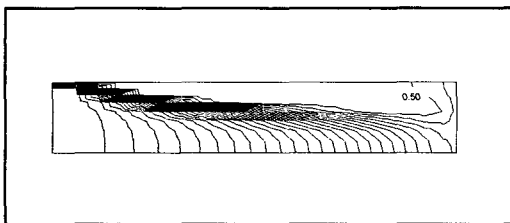
(b) Core material volume fraction 35%



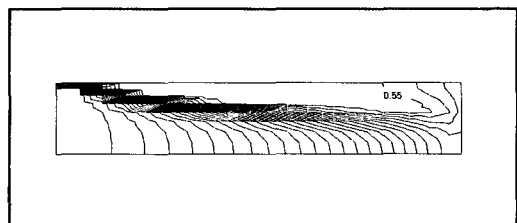
(c) Core material volume fraction 40%



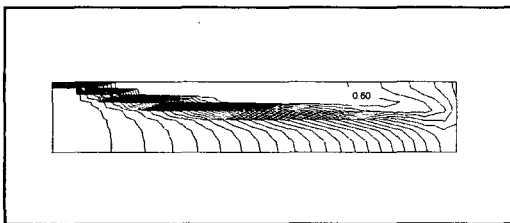
(d) Core material volume fraction 45%



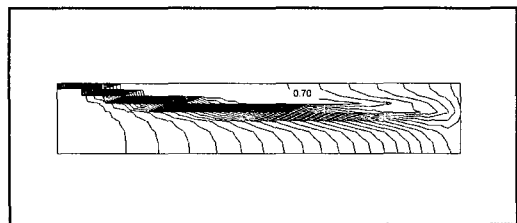
(e) Core material volume fraction 50%



(f) Core material volume fraction 55%



(g) Core material volume fraction 60%



(h) Core material volume fraction 70%

Fig. 11 Core material distribution across the gapwidth in section AA' of the rectangular strip

SPE ANTEC Technical Paper, pp.1796~1799.

(2) Seldon, R., 1997, "Sandwich Injection Molding of Thermoplastics - A Literature Survey," *J. of Injection Molding Technology*, Vol. 1, No. 4, pp. 189~203.

(3) Isayev, A. I., 1987, *Injection and Compression Molding Fundamentals*, Marcel Dekker Inc., New York.

(4) Bernhardt, E. C., 1983, *Computer Aided Engineering for Injection Molding*, Hanser

- Publishers, Munich Vienna New York.
- (5) Middleman, S., *Fundamentals of Polymer Processing*, McGraw-Hill, Inc.
- (6) Donovan, R. C. et al., 1975, "Recycling Plastics by Two-shot Molding," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 15, No. 11, pp. 774~780.
- (7) White, J., and Lee, B. L., 1975, "An Experimental Study of Sandwich Injection Molding of Two Polymer Melts Using Simultaneous Injection," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 15, No. 7, pp. 481~485.
- (8) Young, S. S. et al., 1980, "A Basic Experimental Study of Sandwich Injection Molding with Sequential Injection," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 20, No. 12, pp. 798~804.
- (9) Turng, L. S., Wang, V. W., and Wang, K. K., 1993, "Numerical Simulation of the Coinjection Molding Process," *J. of Eng. Mat. Techn.*, Vol. 115, pp. 48~53.
- (10) Turng, L. S., and Wang, V. W., 1991, "Simulation of Co-Injection and Gas-Assisted Injection Molding," *SPE ANTEC Technical Paper*, pp. 297~300.
- (11) Chen, S. C. and Hsu, K. F., 1995, "Numerical Simulation and Experimental Verification of Melt Front Advancements in Coinjection Molding Process," *Numer. Heat Transfer A*, Vol. 28, pp. 503~513.
- (12) Schlatter, G. et al., 1995, "Numerical Simulation of the Sandwich Injection Moulding Process," *SPE ANTEC Technical Paper*, pp. 456~460.
- (13) Hsu, K. F., 1994, "Numerical Simulation of Multi-Component Injection Molding Process," Master's thesis, Chung Yuan University, Taiwan.
- (14) Manogg, G. J., Townsend, P. and Webster, M. F., 1997, "Numerical Simulation of Multilayer Injection Moulding," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* Vol. 68, pp. 153~167.
- (15) Wang, K. K., et al., 1984, "Computer-Aided Design and Fabrication of Molds and Computer Control of Injection Molding," *Progress Report No. 10, Cornell Injection Molding Program*, Cornell Univ.
- (16) Manas-Zloczower, I., Blake, J. W., and Macosko, C. W., 1987, "Space-Time Distribution in Filling A Mold," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 27. No. 16, pp. 1229~1235.
- (17) Dupret, F., and Vanderschuren, L., 1988, "Calculation of the Temperature Field in Injection Molding," *AICHE J.*, Vol. 34. No. 12, pp. 1959~1972.
- (18) Tompson, E., 1986, "Use of Pseudo-Concentrations to follow creeping Viscous Flows during Transien Analysis," *Int. J. Numer. Meth. Fluids.* Vol. 6, pp. 749~761.