HWAHAK KONGHAK Vol. 41, No. 5, October, 2003, pp. 577-584

CAE를 이용한 사출성형의 최적화

김범호* · 장우진 · 김정훈 · 조정환 · 박영훈** · 최순자†

인하대학교 화학공학과, 고분자공학연구소
402-751 인천시 남구 용현동 253
*현대 플라스틱 엔지니어링
343-856 충남 당진군 석문면 통정리 1233
**순천대학교 고분자공학과
540-742 전남 순천시 매곡동 315
(2001년 9월 7일 접수, 2003년 8월 4일 채택)

Application of CAE in Injection Molding Process

Beomho Kim*, Woojin Jang, Junghoon Kim, Junghwan Cho, Yung-Hoon Park and Soonja Choe†**

Department of Chemical Engineering, Institute of Polymer Science and Engineering, Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea
**Hyundai Engineering Plastics Co., Ltd., 1233 Tongjung-li, Seokmun-myun, Tangjin-gun, Chungnam 343-856, Korea*
***Dept. of Polymer Science and Technology, Sunchon National University, 315 Maegok-dong, Sunchon, Chonnam 540-742, Korea*
(Received 7 September 2001; accepted 4 August 2003)

요 약

사출성형 공정조건에 따른 다양한 형태의 열과 변형 이력으로 최종 성형품의 기계적 물성이 현저히 달라지므로, A사의 29" TV backcover를 대상으로 제품의 디자인 과정에서 수지의 충전에 영향이 큰 제품의 두께를 부분적으로 조절하고 Mold Flow사의 CAE software(S/W)를 이용하여 유동현상을 해석하였다. 또한 실제로 측정한 점도와 전단속도 값(local database)과 표준 실험 장치에서 얻어낸 값(standard database)에 의한 해석결과를 비교 검토하였다. 그 결과 29" TV backcover 성형과정에서 수지의 유동 불균형을 해소하기 위하여, 유동에 정체가 발생하는 부분의 두께는 두껍게 하고 유동이 빠른 부분의 두께는 얇게하여 이상적인 수지의 유동패턴을 구현하였다. 실측한 local database와 기존의 standard database에 의한 해석 결과를 비교하여, 실측 점도가 다소 높고, 온도 분포의 편차가 조금 넓었음에도 불구하고, 두 가지 database에 의한 해석 결과는 비슷 하였다.

Abstract – Injection molding process is influenced by the injection conditions such as various thermal history and deformation processes that affect mechanical properties of the fabricated product. The design of the 29-inch TV backcover modified with the alteration of the thickness of special parts. Then the flow analysis was performed using the CAE S/W of the Mold Flow Company. In addition, the analysis was performed using the measured viscosity(local database) at various shear rates and the results were compared with those using the standard database. In order to reduce the unbalanced flow of the molten resin, the thickness of the part, where the flow speed was slow, increased, while that of the part, where the flow speed was fast, reduced. As a result, the optimum condition based on the above modification of the special part of TV backcover is selected in terms of idealized flow pattern. In addition, the analyses based on the local database and the standard database showed no distinctive difference, although the measured viscosity was slightly higher and the temperature distribution was broader than by the standard database.

Keywords: Injection Molding, CAE (Computer Aided Engineering), Filling Phase Analysis, Packing Phase Analysis

1. 서 론

사출성형은 열가소성 수지의 가공법들 중에서 정밀도나 고품질의 제품을 효과적으로 생산하는 데에 널리 이용되는, 플라스틱 산업의 가장 일반적인 공정으로 고분자 용융체를 금형의 캐비티에 높은 압력으로 채워 넣음으로써 캐비티 형상과 같은 제품을 생산하는 공정이다. 사출성형은 1872년에 Hyatt 형제가 가소물인 celluloid를 개발한 이래, 1923년에는 Eichengrun가 Eckert 등과 함께 기계식 사출성형기를 개발하였으며, 1950년대 초 Willert에 의해 왕복 스크루식 사출성형기가 개발 되면서 급격한 진전을 보았다. 이전의 사출성형은 체계적이고 과학적인 이해 부족으로 인하여 주로 생산하면서 얻어진 경험과 시행착오에 의존하여 수정하여 왔으므로 다양한 플라스틱 재료의 성질, 복잡한 성형품

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: sjchoe@inha.ac.kr

의 형상 및 성형조건의 변화 등에 대한 능동적 대처가 부족했다. 그러나 현대 산업사회가 요구하는 고도의 정밀도, 기계적 강도, 원가절감 및 납기 단축을 통한 생산성 향상은 사출성형 공정 중에 일어나는 물리적 현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 이론적 해석으로 해결하게 되었다. 이 해석기법이 CAE (computer aided engineering)인데, 사출성형의 각 단계에 대한 시뮬레이션을 통하여 생산성을 극대화 시키는데 그 목적이 있다.

CAE에 사용되는 충전 해석은 용융 수지가 사출금형 내에서 유동하는 과정을 해석하는 과정으로써 설계조건과 성형조건, 즉 유동하는 용융수지의 물성 변화를 가져오는 캐비티 내의 압력, 전단응력, 온도 등의 영향을 알아본다. 그리하여 충전시 발생될 수 있는 웰드라인(weld line), 충전부족(short shot), air trap 등의 성형 불량 현상을 미리 예측한다.

Spencer와 Gilmore[1, 2]는 금형내 수지의 유동상태를 실험하여 해석하였으며, Kamal 등[3, 4]은 사각형 캐비티에서의 2차원 유동 해석을 실시하였다. Ballman 등[5]은 점도의 power law 모델을 사용하여 사각형 캐비티에서 1차원적 유동을 해석하였다. Harry와 Parrot[6]는 1차원 준정상 상태식에 열 평형식을 도입하여 사각형 캐비티에서 유동해석을 발전시켰으며, Load와 Williams[7], Tadmor와 Gogos[8]는 런너에서의 온도, 압력 및 속도분포를 1차원 비등온 상태를 가정하여 해석하였다. Kamal 등[9]은 사각형 캐비티에서 2차원 유동현상을, hele-shaw flow 모델로 해석하여 게이트의 폭에 따라 유동 전진하는 흐름 선단의 모양을 예측하였다. Wang 등[10]은 유한 요소법(finite element method)과 유한 차분법(finite difference method)으로 각각 2차원 유동과 두께 방향을 해석하였다. Tadmor 등[11]은 등온의 수지흐름을 가정하고 등가 뉴톤 점도(equivalent Newtonian viscosity)를 사용한 FAN(flow analysis network) 해석 방법을 개발하였으며, Kamal과 Kenig[3, 4]는 보압 과정을 압축성 유체의 비등온 유동으로 가정하고 Powerlaw 모델과 Spencer-Gilmore 상태방정식을 사용하여 캐비티 내의 압력분포로부터 유량과 수지의 평균밀도를 구하였다. 또한 Friedl과 McCaffrey[12]는 충전 해석을 통하여 사출성형 사이의 결정화를 예측하고 결정화가 성형품의 기계적 성질에 미치는 영향을 고찰하였다. Bakerdjian과 Kamal[13], White와 Dee[14]도 여러 성형조건에 대한 실험을 통하여 충전과정이 성형품의 기계적 성질에 매우 커다란 영향을 미치고 있음을 발표하였다. Chiang[15]은 준 3차원에 대한 보압과정 해석을 가능하게 하였고, 보압과정에는 점성 모델과 수지의 압축성이 냉각과정에서는 온도와 냉각률에 따른 수지 물성값이 중요함을 강조하였으며, Sherbelis와 Friedl[16]은 충전과 보압 단계에서 수지 전단율의 온도 의존성을 연구하였다.

Malguarnera 등[17]은 웰드라인의 생성과 성형조건이 기계적 성질에 미치는 영향을 고찰하였고, Chung과 Ryan[18], Sanschagrin[19]은 캐비티 압력의 예측과 공정 제어를 연구하면서 단순화한 모델의 해석이 실제 성형과 일치하도록 시도하였다. Kamal과 Lafluer[20]는 비등온 점탄성 유동에 따른 보압 과정을 해석하였으며, Wang 등[21, 22]은 보압 및 냉각과정 모델을 제시하고 전단율, 온도, 압력이 점성에 미치는 영향을 연구하였으며, 특히 보압 과정에서 압력 구배가 관성력에 미치는 영향을 지적하였다. 위와 같은 연구 결과를 토대로 GIL, ASAHI CHEMICAL, CADMOULD, CINPRESS, MOLDFLOW 등 회사는 해석용 프로그램을 개발하였고, 단순화된 모델을 해석하여 실제 성형공정과 유사한 조건을 부여하여 해석하는 연구를 계속 진행하고 있다.

우수한 물성을 갖는 성형품은 열과 변형이력에 연관된 미세구조의 변화와 잔류 응력을 최소화하기 위하여, 수지의 과충전이나 미성형 등을 예방하는 유동해석, 제품 전체의 균일한 냉각을 실현시켜 냉각속도의 차이에 의한 잔류응력을 예방하는 냉각해석, 제품 냉각시 금형 안에서 수지의 수축에 의한 제품 변형을 방지하고 사출 불량 요인을 줄이는 보압해석 등이 있다. 위의 해석을 통하여 나타난 결과를 입력 값으로 사용하여 변형해석을 하면 취출 후 사출 성형품의 변형량과 형태를 예측할 수 있다.

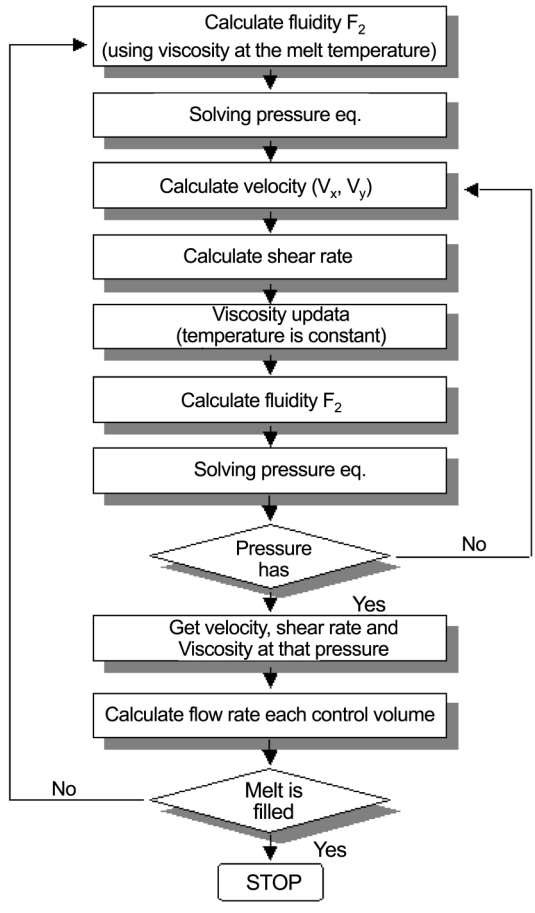


Fig. 1. Flow charts for computation of filling phase analysis.

본 연구에서는 A사의 29" TV backcover 설계도면을 사용하여 게이트의 위치와 수, 사출시간, 금형의 온도 등 사출성형에 영향을 미치는 변수들을 고정하고, 모델의 부분적인 두께 변화에 의한 수지의 유동을 변수로 설정하고 최적의 사출조건을 찾았다. 이를 위한 해석에는 MOLDFLOW사의 CAE S/W를 사용하였으며, 기본 설계를 수정하는 방법을 모색하였다. 또한 실제로 전단속도에 따라 측정된 점도(local database)와 수지업체에서 특정수지에 부여한 점도값(standard database)에 의한 해석을 비교 검토하였다. MOLDFLOW software는 Fig. 1의 유동해석과 Fig. 2의 보압해석 flow chart에 근간을 두었다.

2. 해석 이론

2-1. 열적 특성

CAE 입력 데이터는 고분자의 열적 특성인데, 열전도도, 비열, 용융밀도, 흐름 정지 온도, 취출 온도 등이다. 본 연구에서 사용된 프로그램인 MOLDFLOW에서는 고분자 용융체의 사출 성형 공정에서 열전달과 관련된 기본적인 열 분산식을 열전도도, 비열, 용융 밀도를 통하여 구하는데, 일반적인 고분자 용융체의 열확산계수는 10^{-7} m^2/sec 정도이다.

용융수지는 위소성 유동(pseudoplastic flow)체이며, 유동해석을 위하여 점도는 온도와 전단율 함수로 표시하였다. 또한 사출 성형에 이용되고 있는 점도의 함수에는 Powerlaw model, Carreau model, Cross model, Ellis model 그리고 Second order model[16, 23] 등을 사용하였다. 고분자 재료의 밀도 변화는 충전 단계 이후의 유동에 큰 영향을 미치게 되는데, 밀도 변화를 계산할 때는 액상과 고상에 모두 적용할 수 있는 Tait

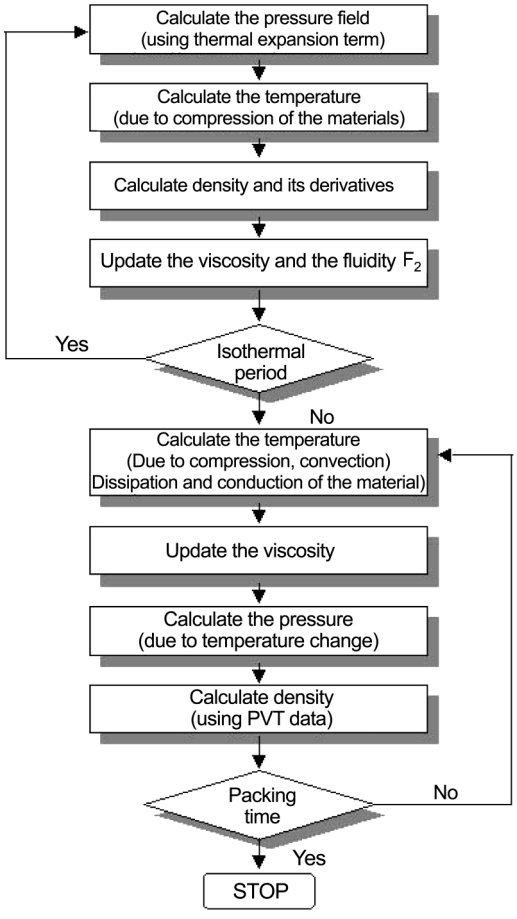


Fig. 2. Flow charts for computation of packing phase analysis.

상태 방정식 (1)을 이용하였다.

$$v(T,p) = v_0(T)\left\{1 - C\ln\left(1+\frac{p}{B(T)}\right)\right\} \quad (1)$$

C는 0.0894이고, $v_0(T)$는 압력이 0일 때 비체적이다. 액상과 고상에 대한 표현은 다음과 같이 주어진다.

$$v_0(T) = b_{1,1} + b_{2,1}\bar{T} \quad \text{if, } T>T_t \quad (2)$$
$$v_0(T) = b_{1,s} + b_{2,s}\bar{T} \quad \text{if, } T<T_t \quad (3)$$
$$B(T) = b_{3,1}\exp(-b_{4,1}\bar{T}) \quad \text{if, } T>T_t \quad (4)$$
$$B(T) = b_{3,s}\exp(-b_{4,s}\bar{T}) \quad \text{if, } T<T_t \quad (5)$$
$$v(T,p) = 0 \quad \text{if, } T>T_t \quad (6)$$
$$v(T,p) = b_7\exp(b_8 - \bar{T}b_9p) \quad \text{if, } T<T_t \quad (7)$$

임의의 전이온도 T_t가 압력의 일차 선형함수라고 가정하면 다음 식 (8)과 같다.

$$T_t(p) = b_5 + b_6p \quad (8)$$

2-2. 보압과정 지배방정식

충전과정(filling phase)과 보압과정(packing phase)에서는 수지의 금형 내 거동과 온도 변화에 의한 체적 수축을 고려한다. 첫 번째 충전단계에서는 금형의 캐비티 안으로 수지를 사출하고, 두 번째 보압단계에서는 수축에 의한 체적 감소를 보상하기 위하여 압력을 가하며, 세 번째 냉각단계에서는 용융수지로부터 금형으로 열을 방출함으로써 용융상태의 수지를 고화시킨다. 점탄성체인 수지의 경우 충전 단계에서 비압축성, 비등온유동을 하는 비뉴토니안(non-newtonian) 유체의 특성을 가지며, 보압과 냉각단계에서는 비정상 상태의 압축성, 비등온 유동을 하며 액체에서 고체로 상이 변화한다.

이 때 사용되는 지배 방정식[24]은 다음과 같다.

$$\text{Equation of Continuity: } \frac{\partial\rho}{\partial t} + (\nabla\cdot\rho\vec{v}) = 0 \quad (9)$$

$$\text{Equation of Momentum: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) = \rho\vec{g} + [\nabla\cdot\tau] - [\nabla\cdot\rho\vec{v}\vec{v}] \quad (10)$$

Equation of Energy:

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v}\cdot\nabla T\right) = \beta T\left(\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{v}\cdot\nabla P\right) + \eta\dot{\gamma}^2 + \kappa\nabla^2 T \quad (11)$$

그리고, 이 해석에 이용된 기본 가정은 다음과 같다.

- incompressible fluid: $\nabla\cdot\vec{v}=0$ (12)
- generalized Newtonian fluid: $\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$ (13)
- constant thermal conductivity: κ (14)

이 식에서 ρ는 용융밀도, $\vec{v}$는 비체적, $\vec{g}$는 중력가속도, τ는 전단응력, P는 pressure, C_p는 비열, β는 재료의 확장계수, κ는 열전도도, η는 겉보기 점도, $\dot{\gamma}$는 전단율이고, $\tau=\eta\dot{\gamma}$이다.

2-3. 냉각 방정식

수지의 결정 잠열, 다른 부분으로부터 금형이 흡수하는 열량 및 금형이 대기중이나 사출 성형기로 빼앗기는 열량이 없다고 가정하여 단위 시간당 수지로부터 금형으로 이동하는 열량을 계산하였으며, 두께가 다른 부분의 냉각시간은 아래 식에 근거하여 최대 살 두께를 기준으로 계산하였다.

캐비티 중앙부분이 냉각되는데 소요되는 시간 t_c는 다음과 같이 나타낼 수 있는데,

$$t_c = \frac{h^2}{\pi^2\alpha}\ln\left(\frac{T_X - T_M}{T_P - T_M}\right) \quad (15)$$

냉각 시간은 $\ln\left(\frac{T_X - T_M}{T_P - T_M}\right)$와 성형품의 살두께(h)의 제곱에 비례한다.

여기서, T_X는 캐비티 중앙의 온도, T_M은 금형온도, T_P는 용융수지온도 그리고 α는 열 확산계수이다.

2-4. Local Database 측정

본 연구에 사용한 MOLDFLOW사의 CAE S/W는 수지의 실측 값을 바탕으로 하여 2nd order 점도 방정식에 넣어 만들어진 master curve에서 얻은 data와 이상 조건에서 표준 실험 장치를 사용하여 얻어낸 자료(standard database)를 기본으로 만들어졌으며, 신뢰도가 매우 뛰어나다. 그러나 실제로 제품을 생산하는 현장 환경에서는 data를 측정할 때 이상적 환경과의 차이로 오차가 있을 수 있으므로, 그 한계를 비교하기 위하여 일반적 환경에서 전단속도를 측정하여 local database로 하였다. 실제 점도는 Rosand사의 Advanced Capillary Extrusion Rheometer로 측정하였다.

2-5. Filling Balance

Filling balance는 flow balance와 runner balance로 나눈다. Flow balance는 고르지 못한 충전이나 과충전으로 내부 잔류응력이 커져서 야기되는 제품의 변형이나 기계적 물성 저하를 방지한다. 반면에 후자는 각각의 gate로부터 사출되는 수지의 양을 균등하게 조절하여 sprue내에서 발생되는 gas를 억제하고, 제품 말단의 미성형을 억제한다.

3. 해석과정 및 절차

본 연구에서는 사출성형 공정의 최적화를 실현하기 위하여 MOLDFLOW사의 전후 처리기인 MF/VIEW를 사용하였으며, Solver로는 MF/FLOW,

MF/COOL, MF/WARP등을 사용하였다.

본 연구에서 CAE 해석은 유한요소법를 기본으로 수학적 계산을 효율적으로 분할하기 위하여 일반적 사출성형 해석에 사용되는 삼각형 요소 형태의 shell mesh를 사용하였다.

해석의 정밀도는 요소의 크기와 aspect ratio(삼각형 요소에서 삼각형을 이루는 가장 긴 변에 대한 수직 높이의 비에 의해 좌우되는데, 요소 숫자가 증가하면 aspect ratio는 작아지지만 해석 시간이 기하급수적으로 증가하므로 해석 목적에 따라 적당하게 결정하였다. 그 예로, 유동 및 냉각 해석의 경우는 1.5, 변형 및 구조해석 경우는 1.3 사이의 범위에서 설정하였다. 그리하여 위의 조건에 맞게 형성한 surface에 스프루, 런너, 게이트 등을 모델링한 후 사용할 수지의 데이터, 사출성형기의 사양 및 사출성형 공정조건을 적용하여 해석하였다. 과정을 간략히 요약하면, 전 처리 과정인 모델링(modelling)과 요소분할(meshing), 해석 과정인 요소방정식 유도(derivation of element equations), 요소방정식 조합(assembly of element equations), 경계조건의 설정(application of boundary conditions) 및 시스템식의 해석(solution of system equations)의 순으로 처리하여 디스플레이값(display results)을 얻었다[23].

게이트를 통해 흘러 들어가는 수지의 유동이력(melt flow history)에 영향을 주는 인자인 수지 종류, 게이트 위치 및 수, 성형제품의 기하학적 형태, 수지 점도 및 유동 선단의 위치 등에서, 본 연구에서는 게이트 위치와 수, 사출시간, 금형 온도 등 사출성형에 영향을 미치는 변수들을 고정하고, 모델의 부분적 두께 변화에 의한 수지의 유동을 변수로 설정하여 최적 사출조건을 찾았다.

또한, CAE 작업에 필요한 고분자의 열적 특성(열전도도, 비열, 용융밀도, 흐름정지온도, 취출온도 등)과 관련된 입력데이터 중에서, 본 연구에 사용된 프로그램인 MOLDFLOW에서는 고분자 용융체의 기본적 열 분산식은 열전도도, 비열, 용융밀도를 이용하여 구하고, 일반적인 고분자 용융체의 열 분산정도는 10^{-7} m^2/sec를 사용하였다. Shear stress, $\tau_{zx}=\eta(dv_x/dz)$에서, 비례 상수 η는 겉보기점도(apparent viscosity), 속도 구배인 dv_x/dz는 전단율이다.

또한 용융수지는 위소성 유동으로 가정하였으므로 유동해석을 위하여 점도는 온도와 전단율의 함수로 표시하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 모델의 형상 및 제원

사용된 모델인 A사의 29" TV backcover의 모델 형상 및 제원을 Fig. 3과 Table 1에 도시하였다. 제품의 크기는 가로 651.6 mm 세로 573.3 mm 높이 325.6 mm이며, 이 제품의 총부피와 총중량은 각각 2212.3 cm^3와 2.1 kg이다. 금호케미칼의 고유동 HIPS(high impact polystyrene)수지를 사용하였고, Fig. 3의 붉은색으로 나타낸 3 hot runner system을 적용하여 수지를 주입하였다. Fig. 3에 색깔로 나타낸 바와 같이 각 부분에 따라 두께를 달리하였으며, 각 부분별 두께는 Table 1에 적어두었다.

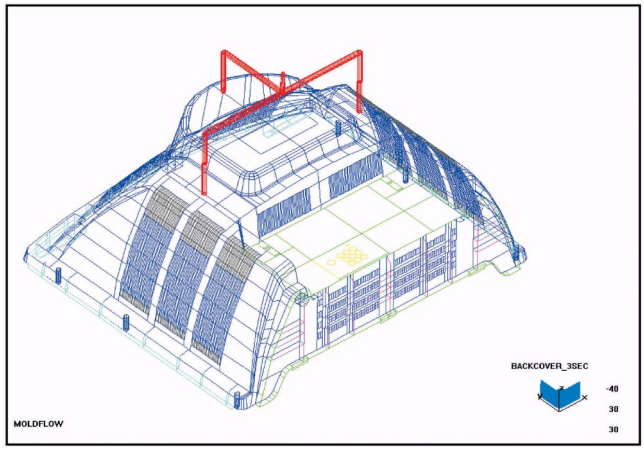


Fig. 3. Shape of the model used in this study.

Table 1. Characteristics of the 29" TV monitor backcover

Dimensions	Length 651.0 mm Width 573.3 mm Height 325.6 mm
Thickness (by color)	Green 3.0 mm Cyan 2.0 mm Blue 2.8 mm Purple 3.5 mm Yellow 1.5 mm Gray 2.25 mm
Volume & weight	Gross Volume: 2212.28 [cm^3] Gross Weight: 2.06 [kg]
Used resin	Kumho chemicals: High flowing HIPS
Application gate	3 SIDE-GATE system (red)

4-2. 유동 패턴과 비교군 설정에 의한 유동해석

게이트로부터 사출된 수지는 유동저항이 낮은 곳으로 흘러 파팅부 영역에서 최종 충전이 이루어지게 되는데 충전 시간별 수지의 유동패턴을 Fig. 4에 도시하였다. 수지로 완전히 충전하는데(Fig. 4(d)) 걸린 시간은 3.455초이며 Fig. 4(a), (b)와 같이 전반적으로 제품의 상단부에 비하여 하단부에 늦게 충전되며, 특히 Fig. 4(c)에서는 균등하게 충전되지 못하는 불균등 유동을 볼 수 있다.

수지 유동이 위에서처럼 캐비티의 말단부까지 균등하게 충전되지 못하면 빠르게 충전되는 부분에서는 과충전 현상이 일어나 내부 잔류응력이 증가되고 제품의 기계적 물성이 저하되는 동시에 수지가 냉각될 때 변형이 발생한다. 따라서 수지를 캐비티의 말단부까지 균등하게 충전시키고, 제품의 기계적 물성을 유지시키는 범위에서 다음의 3가지 방법으로 두께를 변화시켜 모델의 유동패턴에 따른 불균형을 해소하려고 하였다.

- CASE 1: 기존안에 대한 유동해석
- CASE 2: 수지의 유동이 상대적으로 적은 부분의 두께를 증가
  두께 증가: 2.8 mm→3.3 mm: 상단 좌·우측, 뒷면 하단 중앙)
- CASE 3: 수지의 유동이 상대적으로 빠른 부분의 두께를 감소
  (두께 감소: 2.8 mm→2.5 mm: 상단 중앙, 좌·우 측면 중앙)

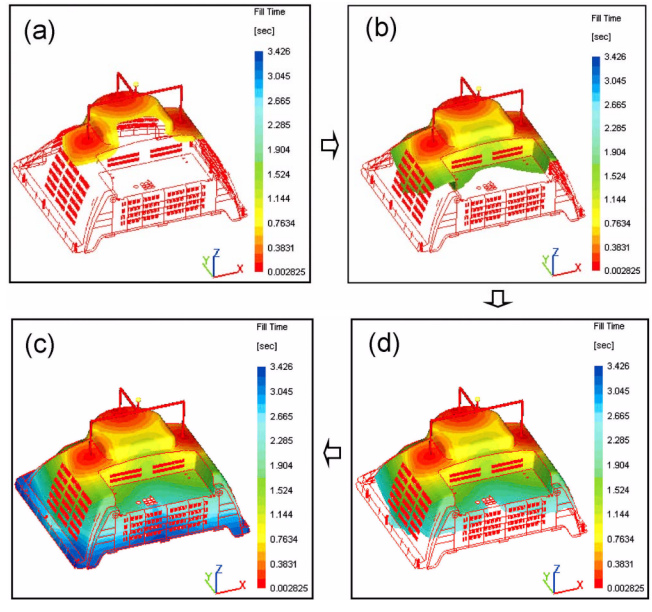


Fig. 4. Flow pattern of the molten resin.

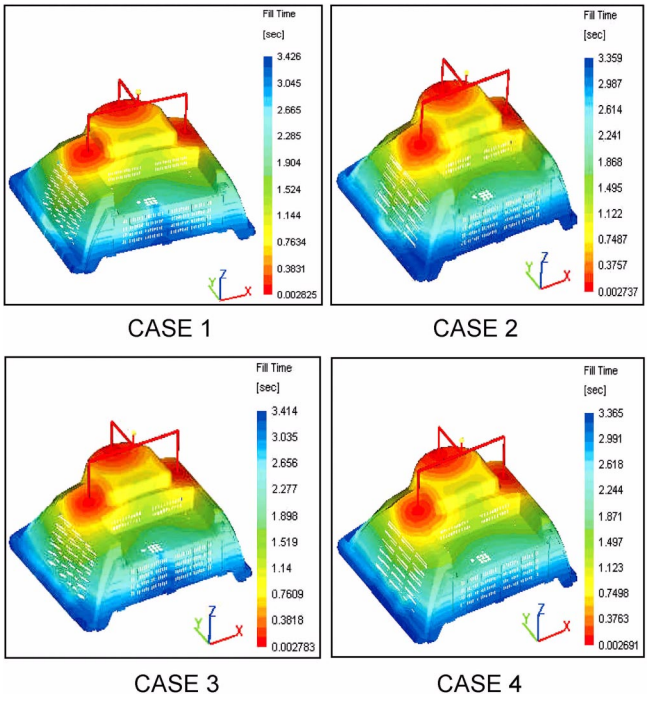


Fig. 5. Flow pattern in each CASE.

• CASE 4: CASE 2와 CASE 3의 혼합형태로 유동의 밸런스 구현
(두께 증가: 2.8 mm→3.3 mm: 상단 좌·우측, 뒷면 하단 중앙)
(두께 감소: 2.8 mm→2.5 mm: 상단 중앙, 좌·우 측면 중앙)

네 가지 비교군에 대한 해석결과를 Fig. 5와 Table 2에 도시하였는데, 본래의 모델인 CASE 1에 비하여 모델 두께에 변화를 준 CASE 2, 3 및 4의 유동패턴이 향상되었음을 보여주고 있다. 그 중에서도 CASE 4의 유동이 가장 우수하여 이를 최종 안으로 채택하였다. 시각적 충전 차이를 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 6에 CASE 1과 CASE 4의 시간별 유동패턴을 비교·도시하였는데, 3초 경과 되었을 때의 유동 패턴이 상당히 안정적으로 향상되었음을 확인 할 수 있다.

4-3. 최종 안에 대한 해석

4-3-1. 온도분포

유동해석에서 계산한 충전 과정과 충전 직후의 온도분포를 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 이 모델에서 계산한 온도 분포는 216.9 ºC에서 231.1 ºC 사이로 그 차가 약 14.2 ºC로 적어서 비교적 양호하였다. 일반적으로 충전 중 온도분포는 금형에 수지가 유입되는 순간 각 위치에 나타나는 온도분포인데 그 차이는 대략 20 ºC 이하이어야 한다. 온도 차

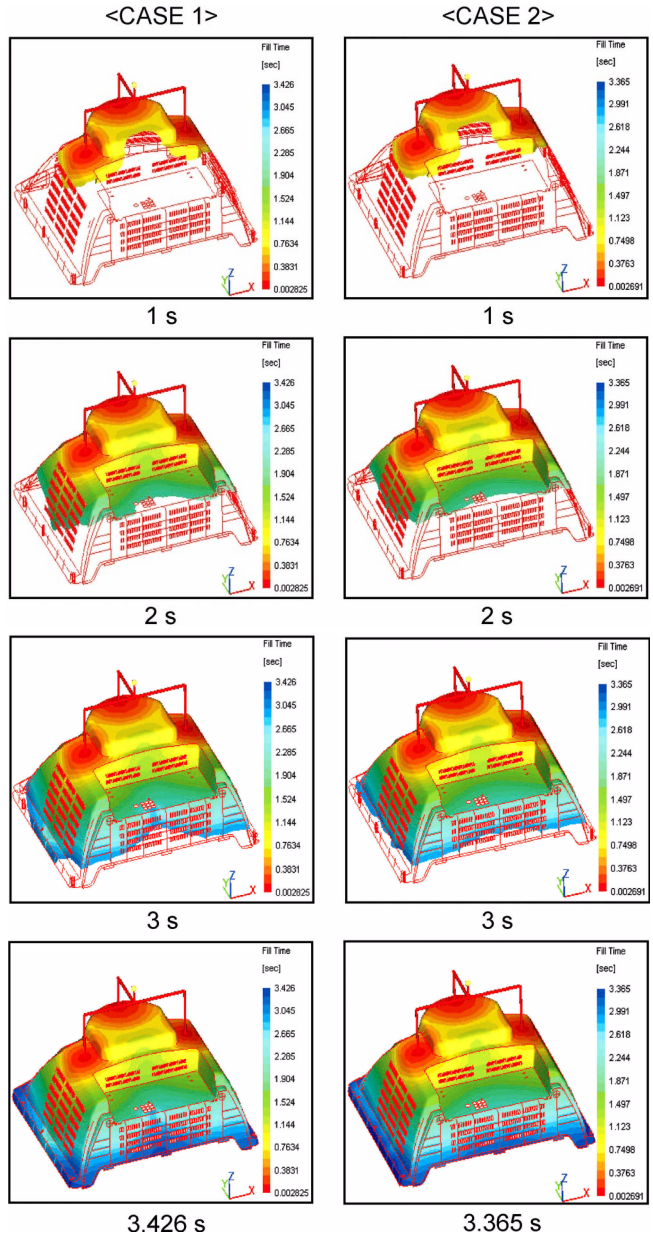


Fig. 6. Flow pattern upon injection time.

이가 크면, 수지 유동저항의 편차가 증가함은 물론, 제품의 외관에 영향을 미치는 weld line의 정도나 기계적 물성이 달라진다. 용융수지의 유동성은 재료의 점도에 의존하는데 점도는 온도의 함수이므로 금형의 어

Table 2. Comparison of the flow analysis in each CASE

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
used resin	HIPS	HIPS	HIPS	HIPS
mold temperature	50 ºC	50 ºC	50 ºC	50 ºC
resin temperature	230 ºC	230 ºC	230 ºC	230 ºC
injection time	3.426s	3.359s	3.414s	3.365s
molding pressure (MPa)	59.85	64.62	62.01	65.84
temperature distribution (during filling)	217.5 ºC-231.2 ºC	217.3 ºC-231.1 ºC	218.4 ºC-231.2 ºC	216.9 ºC-231 ºC
temperature distribution (after filling)	174.9 ºC-239 ºC	184.9 ºC-239.7 ºC	182.5 ºC-239.3 ºC	204.3 ºC-235.9 ºC
Shear stress (MPa)	0.26-0.53	0.35-0.53	0.24-0.47	0.31-0.39
Shear rate (1/s)	12883-75036	379075	19996-77902	239913.23
clamp force (tonne)	1678.3	1661.9	1723.4	1705.6

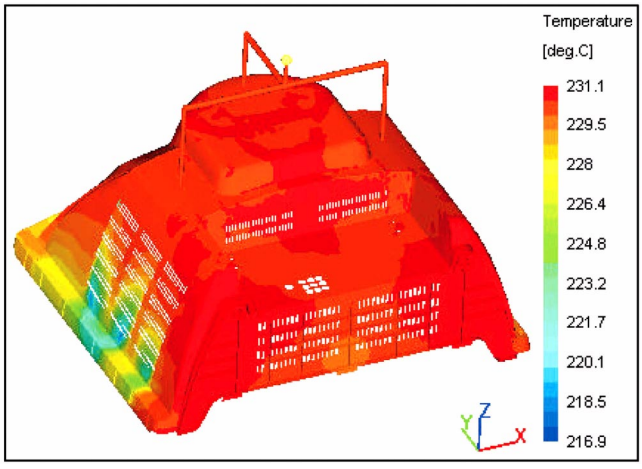


Fig. 7. Temperature distribution before injection.

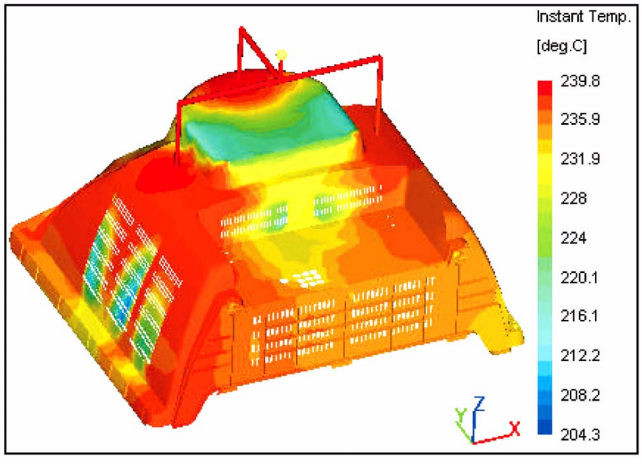


Fig. 8. Temperature distribution after injection.

느 위치에서 수지의 온도가 낮아진다면 이 지점의 유동저항이 커져서 사출압력과 내부응력이 증가하여 성형성은 물론 제품 물성에 영향을 준다.

충전 직후의 온도분포는 충전이 끝난 직후, 냉각이 시작되기 전까지의 온도변화로써 냉각라인 설계에 중요한 자료이다. 온도가 높은 부분과 낮은 부분이 공존하는 경우에는 온도가 높은 쪽의 냉각효율을 증가시켜 온도분포를 조절해야 한다. 온도 차이가 크면 수축 정도가 달라서 잔류응력에 의해 제품에 크랙(crack)이 발생 될 수 있다. 그러나 제품의

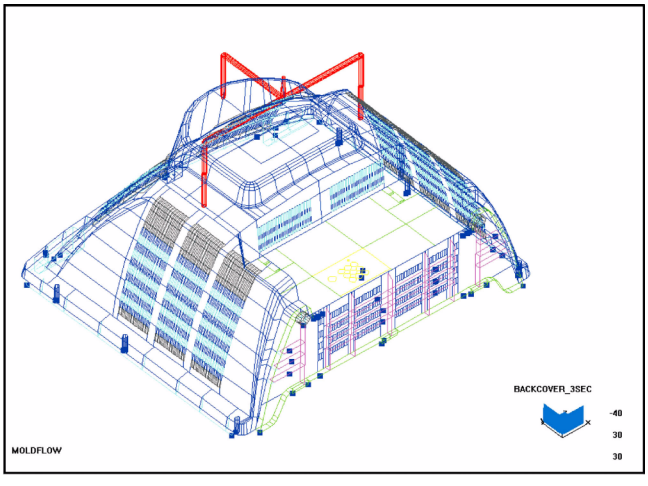


Fig. 9. Air trap.

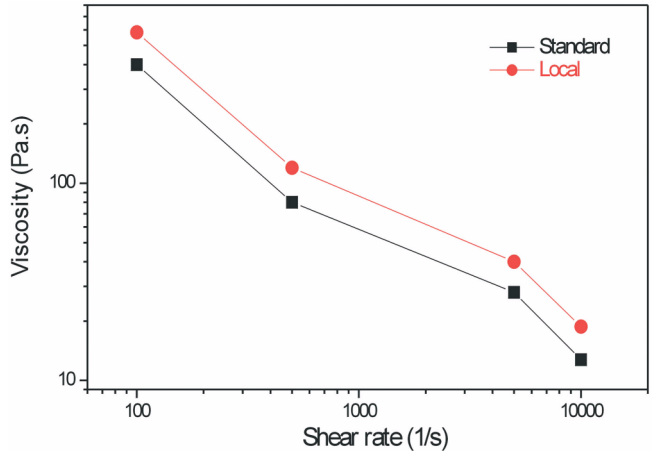
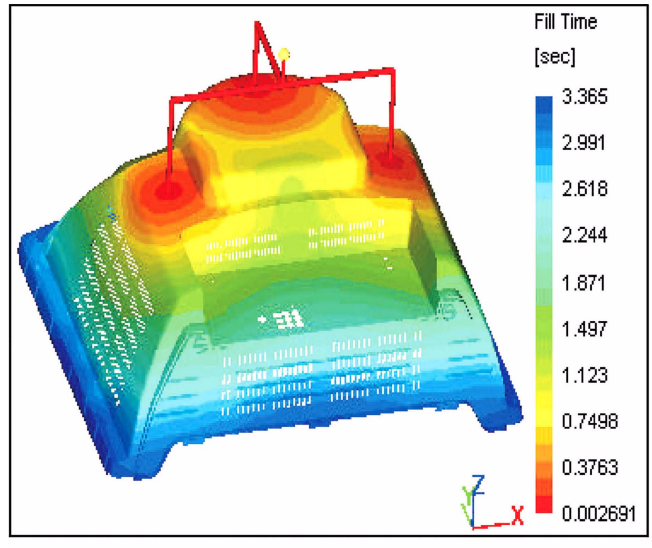
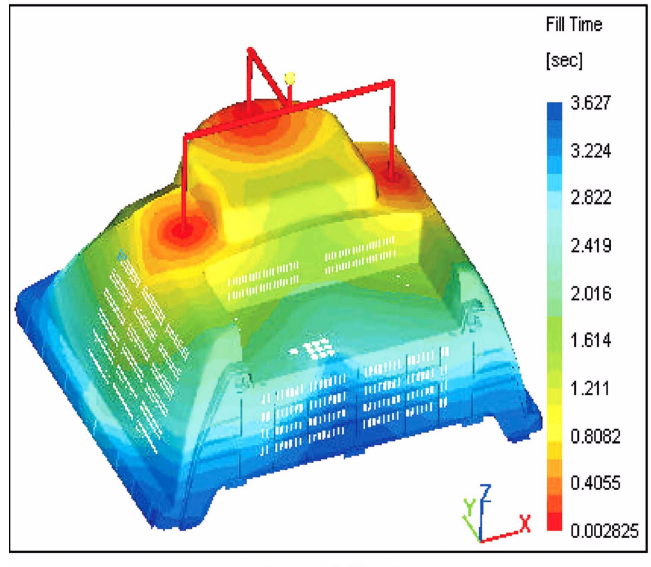


Fig. 10. Experimental local and standard database (shear rates vs. viscosity at 220 °C).



<Standard Data>



<Local Data>

Fig. 11. Comparison of flow pattern by the standard and local database.

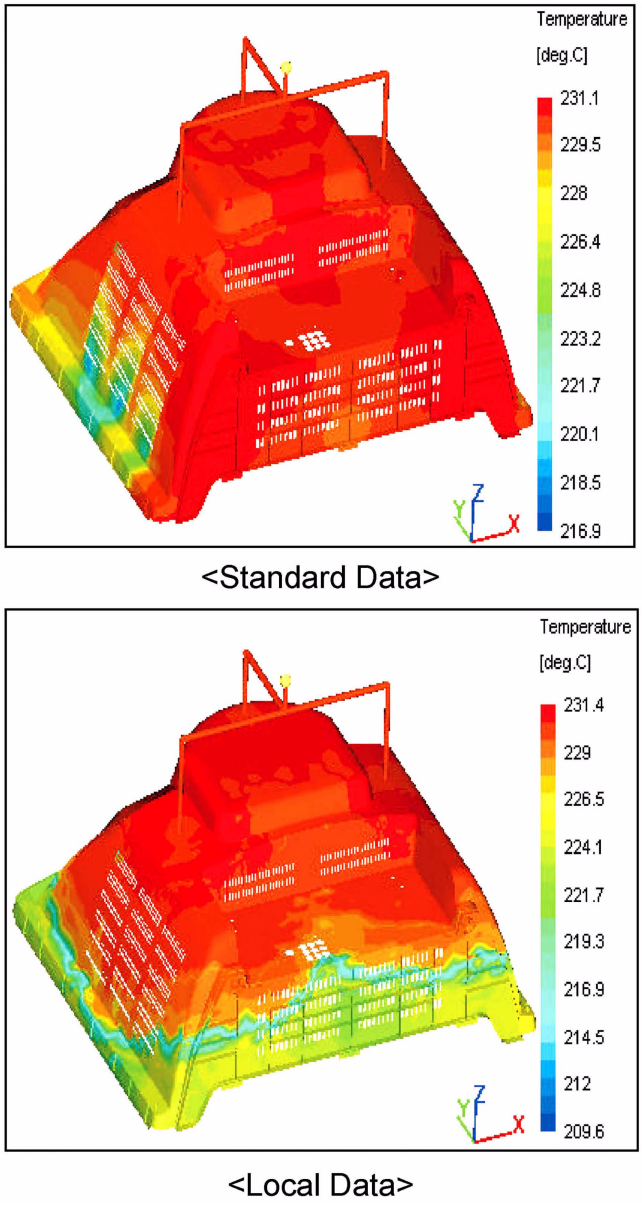


Fig. 12. Comparison of temperature distribution during filling by the standard database and local database.

구조나 다른 이유로 인해 온도 차이를 줄이지 못할 경우에는 Rib 등을 보강하는 구조적 방법으로 이를 보완한다.

4-3-2. Air Trap

Fig. 9는 사출 성형시 가스가 발생하는 위치를 보여주고 있으며, 이 데이터를 토대로 벤트(vent)를 설치하는데, 벤트의 규격은 두께가 0.02 mm-0.03 mm이며 너비는 약 10 mm 정도이다.

모든 수지는 사출 성형시 가스를 발생하므로 금형 안으로 유입되는 가스를 제거해 주지 않으면 가스가 발생하는 지점에서 미성형이나 단열 압축에 의해 제품이 타는 현상 또는 가스자국(burning, burn mark) 등이 남아 표면이 거칠게 보이는 등 성형 불량이 생긴다. 가스를 제거하기 위한 방법으로 그 발생위치를 금형의 파팅선(parting line)쪽으로 옮겨주거나 그 부분에 취출핀(ejector pin)을 설치하여 제거하는데, 이것이 불충분한 경우 가스가 발생하는 위치에 벤트를 설치하여 제거하기도 한다.

4-4. Local database에 의한 해석

Standard와 local database에 의한 master curve로 만들어진 온도 및 전단속도에 대한 점도 값을 Fig. 10에 도시하였는데, 전자에 비하여 후자의 실측 값이 다소 높게 나타났다.

위의 두 가지 database를 가지고 29" TV backcover 성형과정에 대한 유동 해석의 결과를 Fig. 11에 도시하였는데, 두 가지 경우에서 거의 유사한 유동 패턴을 보이고 있다. 충전 중 온도 분포에 대한 비교에서 local database를 사용한 경우(Fig. 12)는 209.6 ℃-231.4 ℃로써 standard database에 의한 온도 분포 216.9 ℃-231.1 ℃에 비하여 편차가 7.6 ℃ 정도 더 커졌지만, 이 역시 온도 허용범위 이내이므로, 두 database 모두 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

5. 결 론

사출성형 공정은 사출성형 조건에 따라 다양한 형태의 열 이력과 변형 이력을 받게 되고 그 결과 최종 성형품의 기계적 물성이 현저히 달라지므로, 본 연구에서는 A사의 29" TV backcover model의 디자인 과정에서 수지의 충전에 영향이 큰 부분의 두께를 조절하면서 MOLDFLOW사의 CAE S/W를 이용하여 유동 과정을 해석하였다. 그 결과로 29" TV backcover의 성형과정에서 수지의 유동 불균형이 해소되도록 유동에 정체가 발생하는 부분의 두께는 증가시키고, 유동이 빠른 부분의 두께는 적절히 감소시킴으로써 이상적인 수지의 유동패턴을 구현할 수 있었다.

그리고 실제로 각각의 온도별 점도와 전단속도를 측정한 값인 local database와 standard database에 의한 해석 결과, 전자가 후자에 비해 점도가 다소 높게 측정되고 해석의 결과에서 온도 편차 역시 소폭 증가하였지만, 두 가지 해석 결과 사이에 큰 오차가 없는 일관된 결과가 도출되었다.

참고문헌

1. Spencer, R. S. and Gilmore, G. D., "Flow Phenomena in the Injection Molding of Polystyrene," *J. Collid. Sci.*, **6**, 118(1950).
2. Spencer, R. S. and Gilmore, G. D., "Equation of State for High Polymers," *J. Appl. Phys.*, **21**, 523(1950).
3. Kamal, M. R. and Kenig, S., "Injection Molding of Thermoplastics. I. Theoretical Model," *Polym. Eng. Sci.*, **12**, 294-301(1972).
4. Kamal, M. R. and Kenig, S., "Injection Molding of Thermoplastics. II. Experimental Test of the Model," *Polym. Eng. Sci.*, **12**, 302(1972).
5. Ballman, R. L., Shusman, T. and Toor, H. L., "Injection Molding," *Ind. & Eng. Chem.*, **51**, 847(1959).
6. Harry, D. H. and Parrot, R. G., "Numerical Simulation of Injection mold Filling," *Polym. Eng. Sci.*, **10**, 209(1970).
7. Lord, H. A. and Williams, G., **"**Mold-Filling Studies for the Injection Molding of Thermoplastic Materials. II. Transient Flow of Plastic Materials in the Cavities of Injection-Molding Dies," *Polym. Eng. Sci.*, **15**, 569(1975).
8. Tadmor, Z. and Gogos, C. G., Principles of Polymer Processing, John Wiley & Sons, New York(1979).
9. Kamal, M. R., Kuo, Y. and Doan, P. H., "Injection Molding Behavior of Thermoplastics in Thin Rectangular Cavities," *Polym. Eng. Sci.*, **15**, 863(1975).
10. Wang, K. K., S. F., Stevenson, J. F. and Hieber, C. A., "Computer-Aided Injection Molding Syster," CIMP progress Report, Mo. 4, 9(1977).
11. Tadmor, Z., Broyer, E. and Gutfinger, C., "Flow Analysis Network (FAN). Method for Solving Flow Problems in Polymer Processing," *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 660(1974).
12. Friedl, C. F. and McCaffrey, N. J., "Crystallization Prediction in

Injection Molding," SPE ANTEC Technical Papers, **50**, 330(1991).
13. Bakerdjian, Z. and Kamal, M. R., "Distribution of Some Physical Properties in Injection-Molded Thermoplastic Parts," *Polym. Eng. Sci.*, **17**, 96-100(1977).
14. White, J. L. and Dee, H. B., "Flow Visualization for Injection Molding of Polyethylene and Polystyrene Melts," *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 211(1974).
15. Chinag, H. H., "Simulation and Verification of Filling and Post-Filling Stages of the Injection-Molding Process," Ph.D. Thesis, University of Cornell, Ithaca, New York(1989).
16. Sherbelis, G. and Friedl, C., "The Importance of Low Temperature Viscosity to CAE Injection Molding Simulation," SPE ANTEC, 954 (1992).
17. Dietz, W., White, J. L. and Clark, E. S., "Orientation Development and Relaxation in Injection Molding of Amorphous Polymers," *Polym. Eng. Sci.*, **18**, 277(1978).
18. Chung, T. S. and Ryan, M. E., "Analysis of the Packing Stage in Injection Molding," *Polym. Eng. Sci.*, **21**, 271(1981).
19. Sanschagrin, B., "Process Control of Injection Molding," *Polym. Eng. Sci.*, **23**, 431(1983).
20. Kamal, M. R. and Lafleur, P. G., "A Structure-Oriented Computer Simulation of the Injection Molding of Viscoelastic Crystalline Polymers. Part II: Model Predictions and Experimental Results," *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 103(1986).
21. Wang, K. K., Shen, S. F., Cohen, C., Hieber, C. A., Ricketson, R. C., Wang, V. W. and Emerman. S., "Integration of CAD/CAM for Injection Molded plastic Parts, CIMP Progress Report," No. 12, 12(1986).
22. Wang, K. K., Shen, S. F., Cohen, C. and Hieber, C. A., "Integration of CAD/CAM for Injection Molded Plastic Parts, CIMP Progress Report," No. 13, 13(1987).
23. Austin, C. and Kennedy, P., "Moldflow Data Theory," Moldflow Pty. Ltd(1992).
24. Min, N., Kim, S. W., Park, C. S., Lee, M. H. and Lee, K.-J., "Analysis of Warpage Phenomena of Fiber-Reinforced Injection Molded Parts," *HWAHAK KWNGHAK*, **35**(4), 468(1997).