사출성형에서의 비등온, 3차원 유동해석과 그 응용

Flow Analysis of Non-Isothermal Three Dimensional Filling Phase in Injection Molding and its Application

김 대 업, 정 근 섭, 이 귀 영
D. E. Kim, G. S. Jung, K. Y. Lee

김 대 업
• 1961년 12월생
• 유한요소법을 이용한 구조해석 및 유동해석
• 대우자동차 기술연구소 주임연구원

정 근 섭
• 1957년 6월생
• 차체 구조해석, 유동해석 및 metal forming해석
• 대우자동차 기술연구소 책임연구원

이 귀 영
• 1950년 9월생
• 선행기술 담당 총괄
• 대우자동차 기술연구소 수석연구원

Nomenclature and Notation

Ce : Contour across which melt enters cavity
Ci : Contour of any insert boundaries
Cm : Contour of melt-front boundaries
Co : contour of outer boundary of cavity
$Cp(T)$: Specific heat of polymer melt
h : Half-gap thickness
k : thermal conductivity of polymer melt
n : Power law index of modified-cross model
p : Pressure
S : Fluidity
t : Time
T : Temperature
Tb : Temperature sensitivity of melt viscosity
Te : Inlet temperature
Tw : Wall temperature
u : Velocity component in x-direction for plane flow
v : Velocity component in y-direction for plane flow
β : Pressure coefficient in 5-constant model
γ : Shear rate
Δt : Time increment
η : Shear viscosity of polymer melt
ν_0 : Zero-shear viscosity
$\rho(T, P)$: Density of polymer melt
τ : Shear stress
τ^* : Modified-cross model parameter

1. 서 론

최근 지구 온난화와 관련하여 배기가스 및 연비규제가 강화되고 고기능화와 다품종 소량생산을 지향함에 따라 자동차에서의 플라스틱 부품의 적용이 확대되고 있어 플라스틱 사출금형의 비중이 점점 높아져 가고있다.

그러나 플라스틱 부품의 설계 및 성형에서는 과거경험과 숙련된 기능에 의존한 시행착오법으로 진행되어온 것이 많다.

이것은 재료구성, 부품형상 등의 인자가 많아 사출성형에 대한 정량적인 기술축적이 어려웠기 때문이며 이로인하여 금형설계 및 시제품 제작에 많은 공수와 비용이 필요하게 되었다.

한편 최근의 수치해석 기술의 발전으로 인해 금형내의 재료유동, 성형후의 특성예측 및 금형형상의 최적화 등에 대한 정량화가 가능하게 되었다.[1,2]

이후 본론에서는 사출성형 과정 중 충진과정에 대한 콤퓨터 시뮬레이션과 그 적용사례에 대하여 살펴보기로 한다.

2. 유동 해석

2.1 개 요

사출이란 뜨거운 녹은 플라스틱이 차가운 몰드 속으로 흘러 들어가 굳어지는 일련의 과정이며 이 과정 중에서 열이 플라스틱에서 몰드 접촉면으로, 접촉면에서 냉각체 및 몰드 외부로 발산되는 과정을 거치게 된다.

즉, 사출성형 문제는 열전달과 유체유동이 복합된 문제라고 할 수 있다.

사출성형 공정은 충진(filling), 보압(packing) 및 냉각과정(cooling phase)으로 이루어진다.

충진과정은 높은 점성의 Non-Newtonian유체가 몰드내의 캐버티로 사출됨으로써 이루어지며 플라스틱의 점성도는 플라스틱의 온도 및 유동속도와 관련이 크며 이 flow-rate는 점도와 더불어 변화한다.

CAE 유동해석 프로그램은 유체의 흐름과 열전달을 해석에 이용하여 충진과정을 이해하는데 이용되고 있다.

2.2 VISCOSITY

사출성형공정에 사용되는 고분자재료(polymer)는 점탄성(viscoelastic) 재료로 구분된다. 고분자재료의 유동특성을 잘 표현하고 있는 비선형 점탄성 구성방정식은 BKZ model, White-Metzner model 등이 있으나 아직 캐버티와 같은 복잡한 유동영역에 사용하기란 현실적으로 어렵다.

그러나 고분자재료는 점성도가 크기 때문에 탄성효과를 무시할 수 있으므로 shearthinning 효과를 비뉴튼성 점성유체(Non-Newtonian viscous fluid)로 처리하는 것이 가능하며 실험적으로도 입증되어 캐버티 충진 시뮬레이션을 위한 CAE에는 이를 사용하고 있다.

고분자재료의 shear viscosity는 Fig.1과 같이 낮은 shear rate에서는 Newtonian 유체가 되고 높은 shear rate 영역에서는 Power-law 모델로 표현되는 shear-thinning 거동을 나타낸다.[3]

C-MOLD에서는 viscosity modeling에 다음과 같은 modified-Cross model을 사용하고 있다.

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$$

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T,\ p)}{1-\left(\frac{\eta_0\dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}}$$

$$\eta_0(T) = b\ \exp\left(\frac{T_b}{T}\right)$$

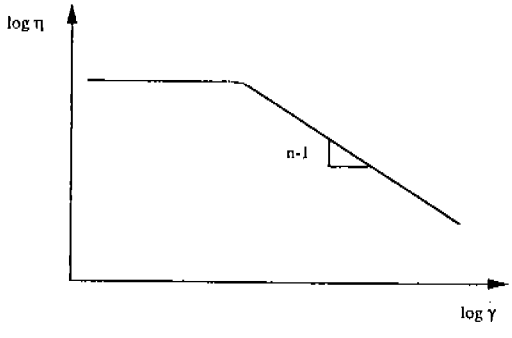

Fig. 1 Schematic diagram of shear viscosity as a function of shear-rate

2.3 지배 방정식(governing equation)

사출성형 유동해석에 사용되는 지배 방정식은 Continuity, Momentum, Energy Equation 이다.[4,5,6]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+(\nabla\cdot\rho\,\bar{v})=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}+(\rho\bar{v})=-\nabla p+\nabla\cdot\sigma \tag{2}$$

$$\rho C_P\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\bar{v}\cdot\nabla T\right)=\beta T\left[\frac{\partial p}{\partial t}+\bar{v}\cdot(\nabla p)\right]$$

$$+p(\nabla\cdot\bar{v})+\eta\dot{\gamma}^2+k\nabla^2T \tag{3}$$

충진과정에서 플라스틱을 비압축성 유체(incompressible fluid)라 가정하면 식(1)은

$$\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}=0 \tag{4}$$

가 되며 여기서 $\bar{u}$와 $\bar{v}$는 x, y축의 평균속도이다.

$$\bar{u}\equiv\int_{-h}^{+h}u\,dz/2h,$$

$$\bar{v}\equiv\int_{-h}^{+h}u\,dz/2h\ (2h:\ \text{gap thickness}) \tag{5}$$

이들 평균속도는 수지선단의 진행과 volumetric flow rate 계산에 사용된다.

다음으로 streamline 방향에서의 압력강하에 비하여 두께방향에서의 pressure variation은 무시할 수 있으므로 식 (2)는 Cartesian coordinate에서 다음과 같이 표현된다.

$$0=\frac{\partial}{\partial z}\left(\mathrm{h}\frac{\partial u}{\partial z}\right)-\frac{\partial p}{\partial x} \tag{6}$$

$$0=\frac{\partial}{\partial z}\left(\mathrm{h}\frac{\partial v}{\partial z}\right)-\frac{\partial p}{\partial y} \tag{7}$$

여기서 유동속도를 구하기 위하여 momentum equation을 적분하면

$$\bar{u}=\frac{S}{h}\frac{\partial p}{\partial x},\quad \bar{v}=\frac{S}{h}\frac{\partial p}{\partial y} \tag{8}$$

$$S=\int_0^h\frac{z^2}{\eta}dz\ (\text{fluidity}) \tag{9}$$

식 (4)와 (8)을 결합하면

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(S\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(S\frac{\partial p}{\partial y}\right)=0 \tag{10}$$

가 된다.

Energy equation을 간략화하기 위하여 다음과 같은 가정이 사용된다. 즉, 일반적으로 캐버티는 두께가 얇기 때문에, x-y면에서의 conduction은 두께방향에 대하여 무시할 수 있다.

또한 두께방향의 convection항$\left(\rho C_p w\frac{\partial T}{\partial z}\right)$는 계산되는 압력 값에 큰 영향을 미치지 않으므로 계산을 간단히 하기 위하여 생략할 수 있다. 그러므로 energy equation은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=k\frac{\partial^2T}{\partial z^2}+\eta\dot{\gamma}^2 \tag{11}$$

이상과 같이 유동해석 문제는 적절한 경계조건에 대하여 식 (10)과 (11)을 해석하면 된다.

두께방향의 경계조건은 다음과 같은 식으로 나타내어 진다.

$$u=v=0\ at\ z=h,\ \frac{\partial u}{\partial z}=\frac{\partial v}{\partial z}=0\ \text{at}\ z=0$$

$$T=Tw\ \text{at}\ z=h,\ \frac{\partial T}{\partial z}=0\ \text{at}\ z=0$$

X-y plane에서의 경계조건을 도식화 하면 Fig.2와 같다.

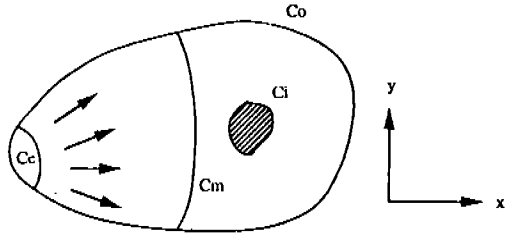

Fig. 2 Schematic representation and notation in plan view

Ce는 수지가 캐버티로 들어가는 영역이며, Cm은 수지의 선단위치를 나타낸다.
Co는 캐버티의 외곽경계이며, Ci는 insert의 경계이다.

수지선단은 공기와 접촉하여 있으므로

$$p=0 \text{ on } Cm$$

이다.

캐버티 입구에서는

$$p=p_e(t),\ T=Te \text{ on } Ce$$

이며
$p_e(t)$는 주어진 volumetric flow rate에 대하여 결정된다.

X-y면에서의 thermal diffusion은 무시하므로 Co와 Ci에 대하여 열적 경계조건은 적용되지 않는다.

2.4 NUMERICAL METHOD

충진과정에서의 일정밀도를 가진 점성유체에 대한 열전달과 유체유동에 대한 해석은 hybrid finite-element/finite difference method의 수치해석 기법을 이용한다.

즉, 유한요소법을 이용하여 압력을 구하며, 온도는 유한차등법으로 구해진다.

계산은 아주 작은 시간($t1$)에서 시작하며 온도 T)는 Te이다. 이때의 압력은 식(10)과 경계조건을 이용하여 구할 수 있다.

$t1$에서의 유동속도는 식 (8)에서 얻어지며, 이를 이용하여 새로운 시간($t2=t1+\Delta t1$)에 대한 수지선단이 결정된다.

시간 $t2$에서의 온도는 식 (11)에 대하여 유한차등법으로 구해진다.

$t2$에서의 압려과 속도는 위의 방법과 같은 순서로 결정되며 이러한 과정이 캐버티가 수지로 채워질 때까지 반복된다.

3. 해석 예

유동해석은 플라스틱이 어떻게 캐버티 내에 유입되는가에 대한 정보를 제공하여 주며 이를 이용하여 게이트 위치 및 런너 크기 등을 조절하여 유동패턴을 개선하고 몰드조건을 최적화하는 것이다.[7]

CAE를 이용한 유동해석시 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

(1) 플라스틱은 전 충진과정에서 한 방향(unidirection)으로 흘러야 한다. 플라스틱은 flow방향과 transverse방향의 물성치가 다르므로 유동이 복잡할 경우 제품이 휠 경향이 있다.

(2) 캐버티를 가능한 한 균일한 압력으로 동시에 플라스틱으로 채워야 한다. 즉, 과충진(overpacking)은 뒤틀림의 원인이 되므로 이를 방지하는 수지전달계를 설계해야 한다.

(3) 가장 효율적인 유동패턴은 압력구배 즉, 단위길이당 압력강하가 flow path에 따라 일정할 때이다.

(4) 충진과정 중의 shear stress는 재료의 허용치 보다 낮아야 하며 허용치의 한계는 플라스틱의 유형과 사용방법에 따라 다르다.

(5) Hesitation과 underflow를 방지하도록 게이트 위치를 선정해야 한다.

플라스틱 door trim에 대하여 유동해석한 예를 살펴 보기로 한다.

Fig.3은 해석할 door trim의 F.E.model이며 삼각형 요소를 이용하여 pre-processor인 CAEDS에서 모델링하였다. 런너와 스프루는 보 요소를 사용하였으며 C-FLOW에서 제공하는 translation program(CTRANS)를 이용하여 해석용 input file을 작성하였다. 사용된 요소는 총 2421개이며 모델의 체적은 1391cu.cm이다.

해석에 사용된 성형조건은 다음과 같다.

MOLD TEMPERATURE·····50 deg.C
MOLD TEMPERATURE·····250 deg.C
INJECTION TIME·····7 sec.
CLAMPING FORCE·····1600 tonne

사용수지는 내열성 ABS이며 밀도가 970kg/cu. m, 비열이 2442J/Kg-K, 열전도도는 0.18W/m-K 이다.

유동해석의 목적은 유동 밸런스를 이루면서 weld line을 arm rest위치로 제어할 수 있는 수지 전달계를 설계하는 것이다. 게이트의 위치를 선정하기 위하여 검토된 금형조건은 대포적으로 3가지가 있으며 Fig.4는 case1의 수지 유동상태를 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이 캐버티의 다른 부분은 모두 채워졌으나 금형 center를 중심으로 우측 하단부는 미성형 되었으며 이 부분을 채우기 위해서는 다른 부분에서 과충진되어 뒤틀림(warpage)의 요인이 된다.

Case1의 게이트 시스템을 검토한 결과, 제품의 하단부 쪽에도 게이트 설치가 필요하며 중앙부에 설치된 게이트의 수가 많음을 알 수 있었다.

Fig.5는 Case2 경우의 수지 유동상태를 나타

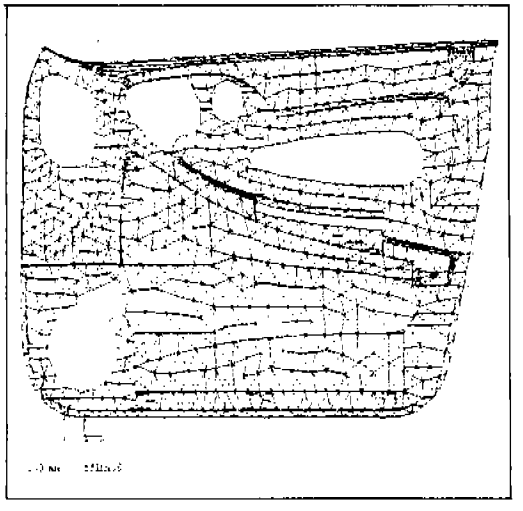

Fig. 3 F.E. Model of Door Trim

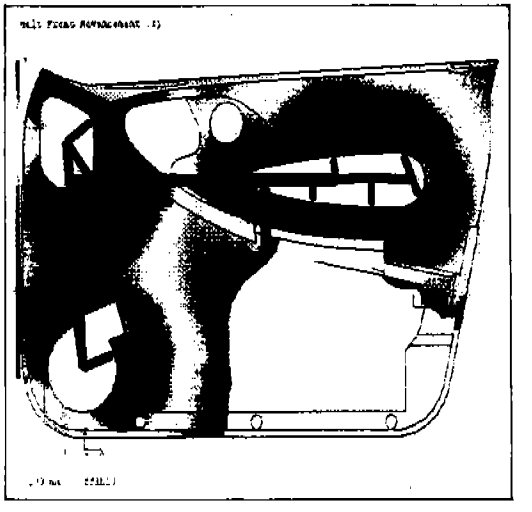

Fig. 4 Filling pattern(case1)

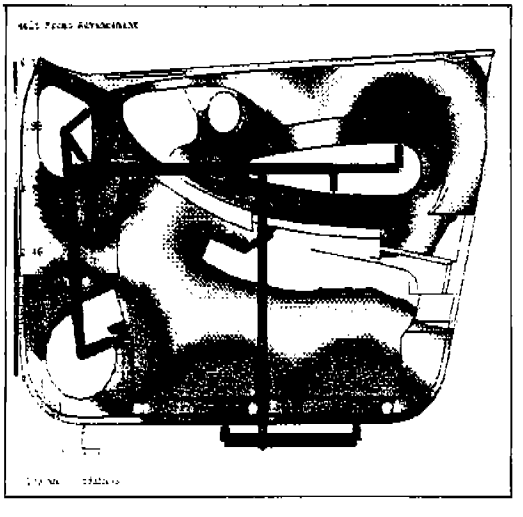

Fig. 5 Filling pattern(case2)

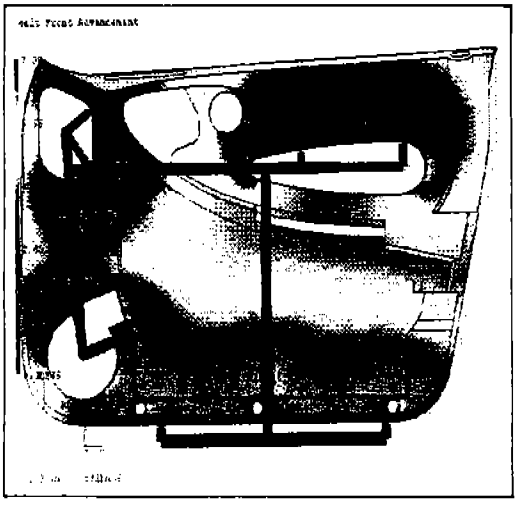

Fig. 6 Filling pattern(case3)

내며 Case1에 비하여 flow balance는 향상되었다.

그러나 weld line이 arm rest 아래에 형성되어 식별이 쉬우며 캐버티를 95% 정도 채웠을 때 Air trap으로 인하여 미성형될 가능성이 있다.

최종적으로 weld line을 arm rest에 형성시키기 위하여 Case3에서 하단부에 게이트를 1개 추가하고 중앙부의 게이트를 1개 제거하여 위치를 조정하였다.

Fig.6은 Case3 경우의 수지 유동상태를 나타내며 flow balance를 이루면서 weld line은 arm rest위치에 형성되었다.

Fig.7은 사출직후의 온도분포를 나타내며 사출시 마찰에 의한 수지 온도상승과 캐버티 내에서의 hot spot의 위치를 알 수 있어 cooling channel의 설계에 도움이 된다.

Fig.8은 압력분포를 나타내며 전반적으로 균일한 분포를 나타내나 arm rest부위는 수지가 마지막으로 채워지므로 압력이 다른 부분에 비

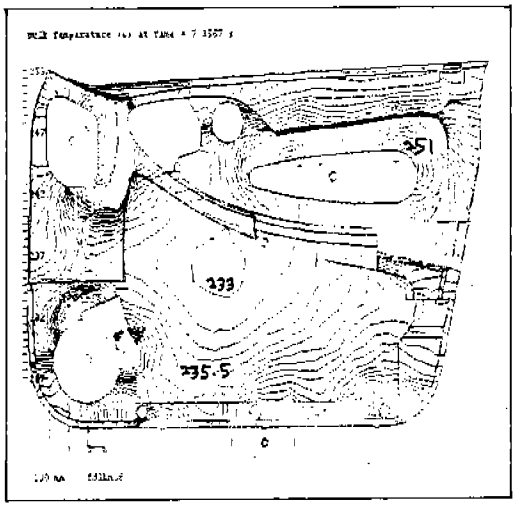

Fig. 7 Temperature distribution

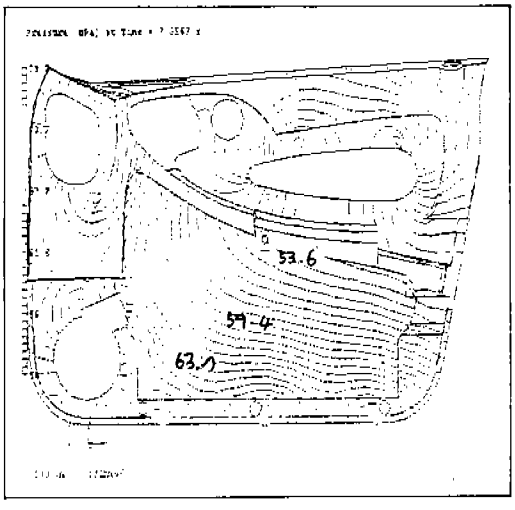

Fig. 8 Pressure distribution

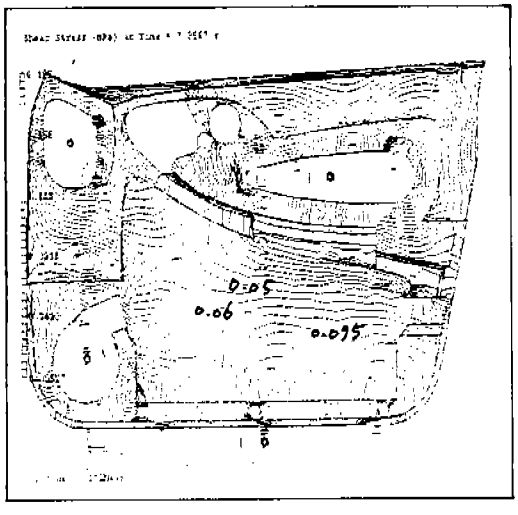

Fig. 9 Shear stress distribution

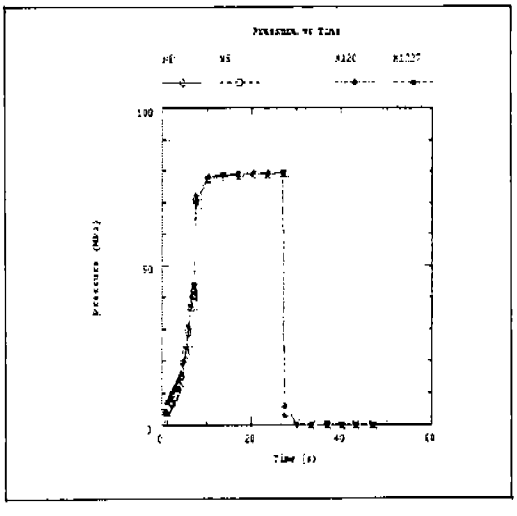

Fig. 10 Pressure profile at gates

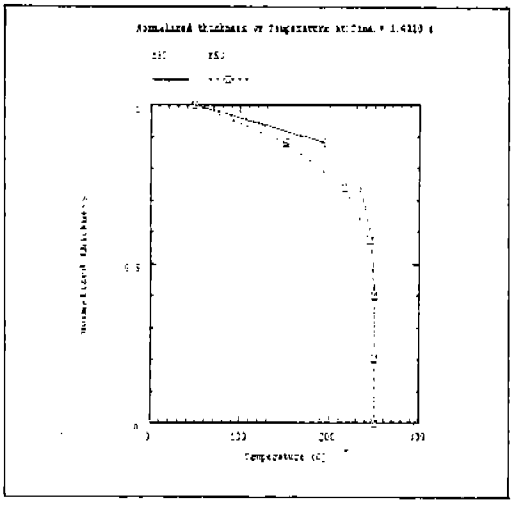

Fig. 11 Temperature profile across gapwise thickness

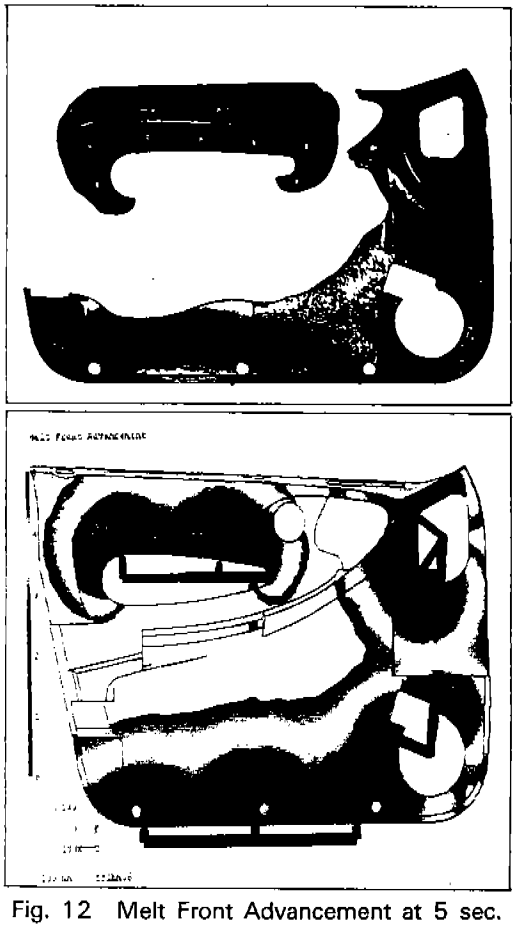

Fig. 12 Melt Front Advancement at 5 sec.

하여 약간 작음을 알 수 있다.

Fig.9는 전단응력 분포이다. 제품내의 최대 전단응력은 0.195MPa이며, 이는 사용 ABS의 허용응력의 한도 이내이다.

Fig.10은 Case3의 각 게이트 입구에서의 시간에 대한 압력선도이며 각 게이트에서의 압력에 차이가 없음을 알 수 있다. Fig.11은 두께 방향의 온도 선도를 나타내며 유동해석에서는 두께 방향으로 유동이 대칭이라고 가정한다.

이상과 같이 유동해석을 통하여 결정된 Melt Delivery System을 금형에 적용하여 시제품을 제작하였으며 해석결과의 신뢰도를 확인하기 위하여 시사출시 Short Shot 시켰다. Fig.12, 13, 14는 유동해석에 의한 유동선단 위치와 실제 사출 성형품의 Short Shot에 의한 결과를 나타내며 3차원 유동해석 결과의 정밀도에 대하여 쉽게 알 수 있다.

4. 결 론

자동차용 플라스틱 부품 개발에 있어 CAE적용예는 현재까지는 많지 않지만, 앞서 살펴 본 바와 같이 금형비 및 개발 trial 횟수를 감소시키고 cost down에도 기여하고 있으므로 유동해석은 유용한 도구라 할 수 있다.

향후에는 해석 적용의 확대와 함께 새로운 분야로의 이론해석을 병행하여 차량개발에서의 실질적인 효과를 현실화하고 해석기법 및 data base 등의 기술축적도 함께 발전되어야 하겠다.

참 고 문 헌

1. 山部 唱, "樹脂部品開發における CAE手法の活用と今後のシステム化", 日山技報, VOL 123, 1988
2. 中村 建, "射出成形における CAEの機能と効果", 合成樹脂, VOL.35, 1989
3. H.H. Chang, "Cornell Unv, Technical Report No.62", 1989
4. C-MOLD User Manual
5. MOLDFLOW theory Seminar Text

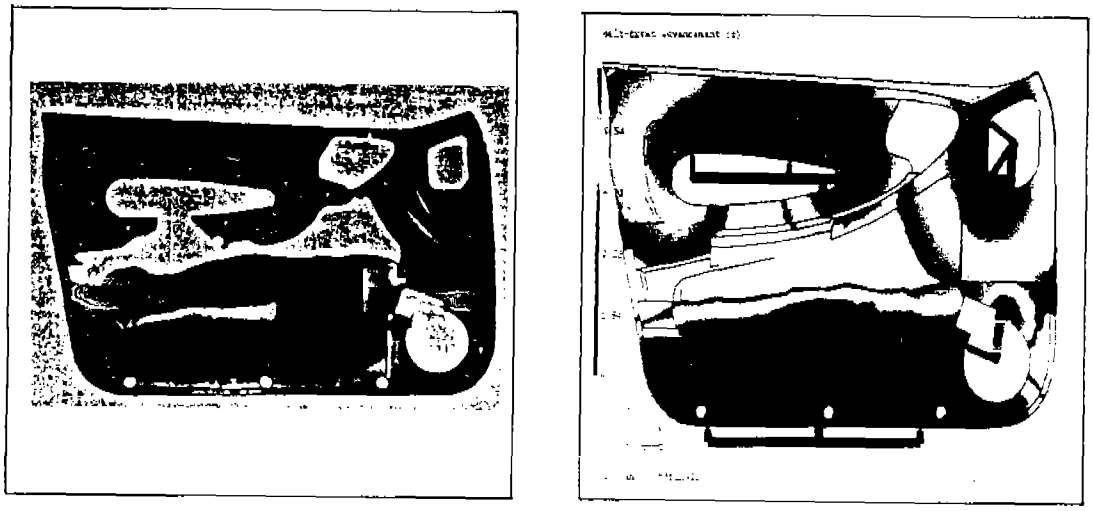

Fig. 13 Melt Front Advancement at 8 sec.

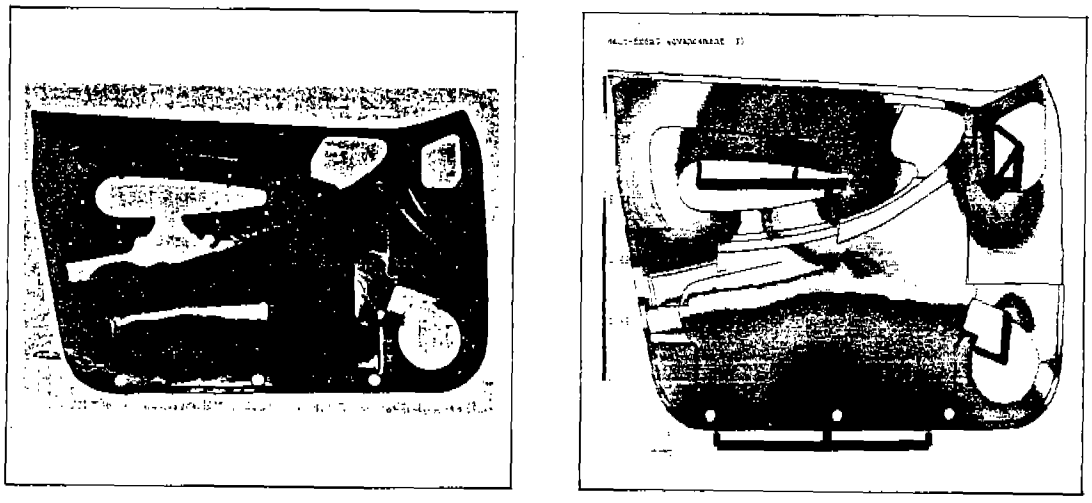

Fig. 14 Melt Front Advancement at 9 sec.

6. K.K. Wang, S.F. Shen, "CIMP progress Report No.12", 1986
7. E.C. Bernhardt, "Computer Aided Engineering for Injection Molding", Hanser Puiblisher