

세라믹 사출성형에 대한 게이트 크기의 영향

이상찬 · 윤재륜

한국과학기술원 생산공학과
(1991년 8월 29일 접수)

Effects of Gate Size on Ceramic Injection Molding

Sang Chan Lee and Jae Ryoun Youn

*Department of Production Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology
P.O. Box 150, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea
(Received August 29, 1991)*

요 약

세라믹 재료들을 성공적으로 사출성형하기 위한 적절한 사출조건을 얻기 위하여 그동안 많은 실험을 하여 왔으나 게이트 크기가 미치는 영향에 대한 연구는 미진하였다. 본 연구에서는 압출기를 사용하여 미세한 질화규소분말과 결합제시스템을 혼합하였으며 이러한 세라믹혼합물을 이용하여 사출압력, 보압시간, 보압, 배럴온도, 게이트의 형태와 크기 등을 변화시키면서 사출성형 실험을 수행하였다. 55%의 세라믹혼합물을 사출실험한 결과 적절한 게이트의 크기와 형태를 선택하고 105 MPa의 사출압력과 10초의 보압시간, 240°C의 배럴온도와 같은 사출조건 하에서 성형한다면 불완전 충전, 체적수축과 젯팅현상을 최소화시킬 수 있어 성공적으로 인장시편과 굽힘시편을 성형할 수 있음을 알 수 있었다. 상용 프로그램인 C-MOLD를 이용하여 사출조건과 게이트의 크기를 변화시키면서 혼합물의 유동특성을 해석하였다. 유동해석 결과, 세라믹혼합물은 순수고분자보다 열전도도가 크고 비열이 작아서 고화가 빨리되므로 게이트의 크기는 사출압력, 배럴 온도와 같은 사출조건과 더불어 중요한 사출변수임을 예측할 수 있었다.

Abstract—Injection molding of a ceramic material was studied experimentally to determine successful molding conditions for the net shape manufacturing. Mixtures of fine ceramic powders and binder systems were prepared using a single screw extruder and pelletized for injection molding. Some important molding conditions including gate size, injection pressure, filling time, holding time, and barrel temperature were varied when 55% ceramic mixture was molded. A commercially available flow analysis program, C-MOLD, was employed to predict filling behavior of the mixture for given molding conditions. Since the ceramic mixture was solidified faster than pure polymeric melts due to high thermal conductivity and low specific heat, gate size affected injection molding more significantly than other processing variables. When the gate was enlarged to a proper size, short shots, defects, volume shrinkage, and jetting phenomenon were avoided resulting in successful molding of tensile and bending specimens. Results of the flow analysis also predicted that gate size, injection pressure, and barrel temperature influence the performance of ceramic injection molding. It was found that the satisfactory injection molding of 55% ceramic mixture was achieved with injection pressure of 105 MPa, barrel temperature of 240°C, holding time of 10 sec, and the proper gate size.

Key Words: Injection molding, Ceramic material, Gate, short shot, Jetting, Binder system

1. 서 론

사출성형(Injection Molding) 공정은 다른 가공 방법보다 생산성이 좋으며 마무리 가공을 거의 필요로 하지 않는 정형 형태(net shape)로 제조가 가능하고 복잡한 형상을 만들 수 있어 플라스틱(plastic) 재료의 32%를 사출성형법으로 가공하고 있다 [1]. 고경도와 고내열성을 가지며 고온하에서 변형(creep)이 적고, 내부식성(corrosion resistance)은 우수하나 취성(brittleness)으로 인하여 그 사용이 제한되었던 세라믹 재료가 고순도 미세원료 분말의 합성, 소결방법의 향상 등으로 1960년 후반 부터는 공학재료로서 사용되고 있으며, 그 예로 고강도, 고인성의 질화규소(Si₃N₄)와 탄화규소(SiC) 등의 세라믹 재료들이 엔진부품과 터어보 자동차엔진용 로우터(rotor), 가스터빈 등에 사용되는 터빈 날개(turbine blade)의 제조에 쓰이고 있다.

세라믹 사출성형 과정은 Fig. 1에 정리된 것처럼 먼저 세라믹 분말(ceramic powder)을 제조하고, 그 분말을 유기 결합제(organic binder)와 혼합한다. 사출기에서 결합제(binder)의 용점 이상으로 가열하여 금형안으로 사출 성형한 다음, 장시간의 열처리를 통하여 결합제를 제거하는 탈지공정(debinding)을 거쳐, 마지막으로 부품을 소결(sintering)한다. 그러나 세라믹과 결합제시스템 혼합물의 열전도율(thermal conductivity)은 플라스틱의 약 10

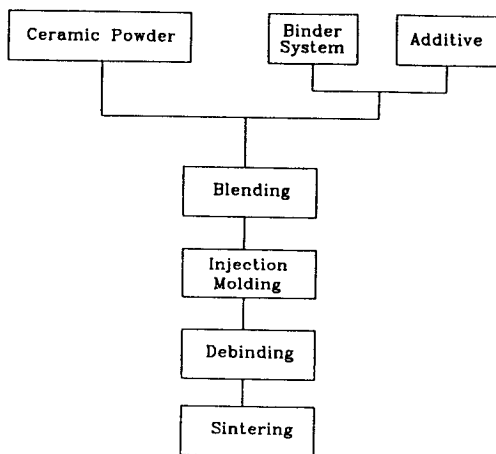


Fig. 1. Ceramic injection molding process.

배이고 비열(specific heat)은 약 0.5배이며[2] 혼합물의 점성은 순수고분자(pure polymer)보다 커지는 경향이 있어 빨리 고화되므로 세라믹 혼합물의 사출성형은 순수 고분자보다 높은 사출압력을 필요로 한다. 순수고분자나 복합재료의 사출성형시와 같이 세라믹 혼합물의 사출성형시에도 Table 1과 같은 결함들이 발생한다.

이러한 결함들의 원인을 규명하고 방지하기 위한 많은 연구가 수행되었는데 Peshek[3]는 세라믹 성형을 위해서는 압력, 온도, 사출속도(injection speed)의 최적화가 필요하다고 하였으며 Peltsman[4]은 사출압력(injection pressure)은 전형적으로 35-140 MPa의 범위에서 결정된다고 하였다. 불완전 충전(short shot)은 재료의 낮은 유동성, 낮은 금형온도, 낮은 배럴온도(barrel temperature) 또는 낮은 사출속도와 압력에 의하여 발생한다. 이 결함을 방지하기 위하여 금형온도를 너무 높히면 성형물을 금형에서 제거(eject)할 때 성형물의 뒤틀림(distortion)이 발생하고, 배럴의 온도가 높으면 혼합물 속의 고분자가 분해(degradation)되므로 주의하여야 한다[5]. 세라믹 사출성형에서 고화될 때 발생하는 공동 또는 균열등의 결함은 비균일 수축에 관련되어 있으며[6] 사출을 하면 금형 표면에 고화층(solid layer)이 형성되고, 이 층의 두께가 증가함에 따라

Table 1. Defects frequently observed in injection molded products

Stage	Defect type
Mold filling	Weld line Short shot Abrasive contamination from molding machine
Solidification	Shrinkage-related void Void caused by poor drying of feedstock Shrinkage-related crack
Ejection	Ejector pin indentation Bulk deformation or cracking Blistering caused by thermal degradation in the cavity

수축이 발생하여 잔류응력(residual stress)을 발생시킨다. 이러한 수축현상은 표면에 함몰표적(sink mark), 균열을 발생시키고 성형품에서 마지막으로 고화되는 부분에 공동을 형성한다. 체적수축(volume shrinkage)은 다음과 같은 2가지 이유에 의하여 발생한다. 첫째로, 냉각할 때 열 수축(thermal contraction)에 기인하는데 이것은 낮은 연화점(softening point)을 갖는 결합제 시스템(binder system)을 선택함으로써 감소시킬 수 있다. 둘째로, 상(phase)변화에 기인한다. 이것은 낮은 결정도(crystallinity)를 갖는 결합제(binder)의 사용에 의하여 감소시킬 수 있다[7]. 세라믹혼합물은 순수고분자보다 게이트에서 빨리 고화되므로 고화되는 시간을 길게하는 것이 매우 중요한데, Edirisinghe[8]는 컴퓨터 모사(computer simulation)의 결과에서 게이트 고화시간을 길게하기 위해서는 금형온도를 혼합물의 연화점에 근접하여 유지하여야 한다고 주장하였다. 그러나 실험결과에 의하면 높은 금형온도는 결합제의 분해를 발생시켜 물질형성(blistering)을 야기시키며 금형에서 성형물을 제거할 때 변형이 발생하므로 이것은 바람직하지 않다. 위에서 간단히 살펴본 바와 같이 지금까지의 연구는 결함을 방지하기 위하여 사출압력, 사출속도, 금형온도와 같은 사출조건에 치중되었다.

본 연구에서는 세라믹분말(Si_3N_4)의 체적비율이 55%인 세라믹혼합물을 결합없이 사출성형을 하기 위한 최적의 사출조건을 실험적으로 구하였으며, 특히 순수고분자의 사출성형과 비교하여 볼 때 게이트(gate) 크기가 세라믹혼합물의 사출성형에 주는 영향이 더욱 클 것으로 기대할 수 있으므로 게이트의 크기가 세라믹의 사출성형에 미치는 영향을 조사하였다. 나아가서 본 연구에 사용된 세라믹혼합물의 사출성형에 적절한 게이트의 크기와 형태 및 사출조건을 결정하였다.

2. 유동해석 및 실험

2.1. 세라믹혼합물의 충전실험

세라믹혼합물의 사출실험을 위하여 자동차용 터어보엔진의 로우터블레이드의 재료로 사용되는 질화규소(Si_3N_4)를 적절한 바인더시스템과 혼합하여

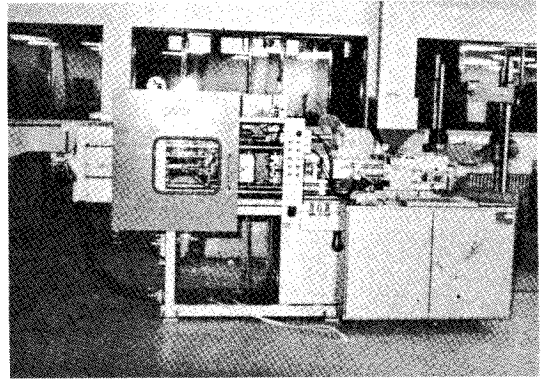


Fig. 2. Injection molding machine.

Table 2. Specifications of the injection molding machine employed for experiment

Clamp Unit	
Clamping force	50 ton
Distance between tie bars	324 mm(horizontal) 273 mm(vertical)
Maximum daylight clamp stroke	546 mm 375 mm
Minimum mold height	171 mm
Maximum mold size	321 mm(h)×431 mm (v)
Injection Unit	
Capacity	3.5 oz
Volume	101 cm ³
Injection speed	79 cm ³ /s
Stroke	127 mm
Pressure	1406 kg/cm ²
Screw diameter	31.75 mm
Screw speed	240 RPM
Plasticizing capacity	31.8 kg/hr
Nozzle	Open

세라믹혼합물을 준비하였다. 실험에 사용된 사출기(Jaco III-H-3)는 Fig. 2에 나타나 있으며 자세한 사양(specification)은 Table 2에 표시하였다. Fig. 3에 표시된 치수를 갖는 인장시편과 굽힘시편의 2개의 캐비티를 갖는 금형을 제작하여 사출기에 장착하였다.

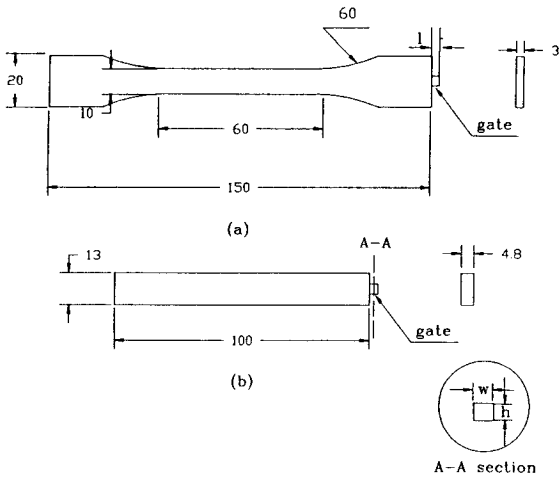


Fig. 3. Geometry of the cavity in the mold made for experiments(unit : mm).
(a) tensile specimen (b) bending specimen

Table 3. Composition of two different ceramic mixtures

Component	Volume fraction(%)		Weight fraction(%)	
	1	2	1	2
Si ₃ N ₄	50.0	55.0	78.26	81.48
Polypropylene	25.0	22.5	11.06	9.42
Stearic Acid	15.0	13.5	6.27	5.34
Paraffin Wax	10.0	9.0	4.42	3.77

Table 3에 표시된 바와 같이 질화규소 분말입자의 부피비가 50%, 55%인 세라믹혼합물을 압출기를 사용하여 만든 후 다음과 같은 실험을 수행하였다. 충전과정을 조사할 목적으로 불완전충전을 야기시키기 위하여 사출조건을 Table 4와 같이 정하고 0.3초부터 0.2초 간격으로 3.0초까지 각 단계별로 사출하였다. 이러한 실험은 사출압력을 35 MPa, 70 MPa, 105 MPa, 130 MPa로 변화시키면서 하였고, 또한 Table 5에 주어진 바와 같이 게이트의 크기를 세가지로 변화시키면서 동일한 실험을 수행하였다. 충전실험을 수행한 후 만족할 만한 성형물을 사출하기 위한 사출성형조건을 결정하기 위하여 세라믹혼합물을 사출성형할 때 중요한 변수라고 예상되는 사출압력과 보압시간(holding time)을 Table 6에

Table 4. Molding conditions employed to investigate cavity filling process

	Ceramic mixture		Polypropylene
	vol 50%	vol 55%	
Barrel temp. profile(°C) (feed-nozzle)	210-210-220	230-240-240	195-200-200
Mold temp.(°C)	60	60	60
Injection pressure (MPa)	35, 70, 105 130	35, 70, 105 130	35, 70, 105 130
Holding pressure	0	0	0
Cure time(sec)	15	15	15

Table 5. Size of three different gates employed for each specimen cavity

		width(w)	length(l)	height(h)
gate I	bending specimen	3.1 mm	2 mm	0.8 mm
	tensile specimen	3.25 mm	2 mm	1 mm
gate II	bending specimen	4.95 mm	2 mm	1.35 mm
	tensile specimen	5.45 mm	2 mm	2 mm
gate III	bending specimen	7.25 mm	2 mm	3.25 mm
	tensile specimen	7.45 mm	2 mm	3 mm

주어진 바와 같이 변화시키고 동시에 게이트 크기도 바꾸어 가면서 사출실험을 실시하였다. 본 실험을 통하여 다른 사출조건들은 고정시켰으며 특히 사출시간은 2초, 고화시간을 25초, 금형온도는 60°C로 고정하였다.

각 조건에서 발생하는 성형물의 내부결함을 관찰하기 위하여 동일한 조건에서 얻어진 시편을 무작위로 3개씩 선택했다. 그 시편들을 파단하여 표면을 백금처리 한 후 주사전자현미경(SEM)으로 촬영하였다. 그리고 체적수축율을 측정하기 위하여 같은 조건에서 얻어진 시편 2개씩을 골라서 각각의 길이방향으로 5군데를 측정하여 평균값을 사용하였다.

Table 6. Molding conditions for ceramic injection molding

I/M Conditions	Value
Filling Time(sec)	2
Holding Time(sec)	3, 6, 10, 15
Injection Pressure(MPa)	35, 70, 105, 130
Mold Temp.(°C)	60
Melt Temp.(nozzle-back)(°C)	240-240-230
Cure Time(sec)	25
Holding Pressure(MPa)	25, 60, 95, 120

2.2. 유동해석

충진과정을 해석하기 위하여 유한요소법과 유한차분법을 이용하여 개발된 상용프로그램인 C-MOLD를 사용하였으며 유동해석을 하기위한 가정은 아래와 같다.

- 1) 유동은 층류, 비뉴톤유동이며 Hele-Shaw flow이다.
- 2) 운동량과 에너지방정식에서 법선응력은 무시한다.
- 3) 2차원 평면유동이다.
- 4) 유동선단 근방에서의 fountain 효과를 무시한다.
- 5) 두께 방향의 온도 대류는 무시한다.

이와 같은 가정하에 유동해석 프로그램이 구성된 이론적 배경은 Fig. 4와 같은 좌표계에서 아래와 같이 간략히 정리할 수 있다.

연속 방정식(continuity equation)은 아래식으로 표현되며

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

\bar{u} 는 x방향의 평균속도, \bar{v} 는 y방향의 평균속도이며, $2b$ 는 Fig. 4에서 두께를 나타낸다.

운동 방정식(momentum equation)은 다음과 같으며

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

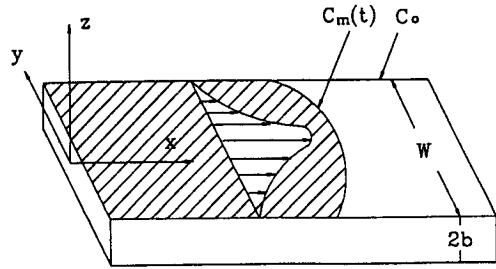


Fig. 4. Coordinate system for mold filling analysis.

p는 압력, η 는 점도이다.

에너지 방정식(energy equation)은 다음식으로 주어지며

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \tag{3}$$

여기서,

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, T) \tag{4}$$

$$\dot{\gamma} = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{5}$$

이고 ρ 는 유체의 밀도, C_p 는 비열, T 는 온도, t 는 시간, k 는 열전도도, $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률속도(shear strain rate)를 나타낸다.

압력에 대한 지배방정식은 다음과 같이 구할 수 있다[9].

$$\nabla \cdot (S \nabla p) = 0 \tag{6}$$

여기서,

$$S = \int_0^b \frac{z^2}{\eta} dz$$

그리고 점도(η)는 일반화된 Cross-Carreau 모델을 적용한다[10].

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{\left[1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau} \right)^a \right]^{(1-n)}} \tag{7}$$

- 여기서, η_0 : zero-shear-rate viscosity
- τ : shear stress
- a : dimensionless parameter
- n : power-law exponent

유한요소 식으로 표현하기 위하여 압력 P를 형상 함수, Ψ_j 를 이용하여 근사화 하면

$$P = \sum_{j=1}^m \Psi_j P_j \quad (8)$$

이다. 유한요소 해석을 위해 식 (6)에 가중잔류치법 (WRM)을 적용하여 유한요소화 하면 다음과 같다.

$$\oint_C \Psi_i S \left[\sum_{j=1}^m (\Psi_{j,x} P_j \hat{n}_x + \Psi_{j,y} P_j \hat{n}_y) \right] ds - \int_{\Omega} \nabla \Psi_i \cdot \left(S \sum_{j=1}^m \nabla \Psi_j P_j \right) d\Omega = 0 \quad (9)$$

여기서,

\hat{n}_x, \hat{n}_y : control volume 경계에 대한 수직벡터의 x, y 성분

j: 하나의 요소(element)에 포함된 절점의 번호

m: 하나의 요소에 포함된 절점의 총 수

s: control volume의 경계선

Ω : control volume의 영역

식 (9)를 이용하여 유체이동을 유한요소법으로 해석하고 식 (3)을 이용하여 온도분포를 유한차분법으로 해석하여 유동해석이 이루어진다. 해석을 하기 위한 사출조건은 사출압력을 105 MPa, 배럴 온도를 240°C로 하였고 세라믹 혼합물의 물성은 Table 7에 주어진 값을 사용하였다. 밀도와 비열은 혼합법칙(rule of mixture)을 이용하여 결정하였고 열전도도는 Hashin과 Shtrikman[11]의 계산방법에

Table 7. Physical properties of 55% ceramic mixture

	Density (g/cm ³)	Specific heat (erg/g·K)	Thermal conductivity (erg/sec·cm K)
Si ₃ N ₄	3.185	7.1×10 ⁶	1.72×10 ⁶
P.P	0.90	1.932×10 ⁷	1.26×10 ⁴
S. Acid	0.85		
P. Wax	0.90		
Ceramic Mixture	2.15	1.26×10 ⁷	3.92×10 ⁵

의한 최대값과 최소값의 평균값으로 구하였다. 그리고 게이트는 Table 5와 같이 크기에 따라 게이트 I, 게이트 II, 게이트 III으로 변화시키면서 해석을 하였다. Fig. 5는 모세관 점도계를 이용하여 실험적으로 얻은 점성자료를 일반화된 Cross-Carreau 모델에 의하여 curve fitting한 것인데 그림에서 보듯이 55% 세라믹 혼합물은 전단변형율이 100-1,000 sec⁻¹ 범위에서 점성이 10,000 poise 이하이므로 실질적으로 사출이 가능하다.

Fig. 6을 보면 게이트 I을 사용하였을 경우 세라믹 혼합물의 완전 충전시간은 3.19초임을 알 수 있으며 Fig. 7은 캐비티 내부에서의 세점(입구, 정중앙, 끝점)에서 시간에 따른 온도의 변화인데, 굽힘시편내에서 가장 낮은 온도는 약 120°C이고 인장시편내의 최저온도는 100°C이다. 주 결합제인 폴리프로필렌의 용융온도는 150°C - 160°C이므로 게이트 I의 경우는

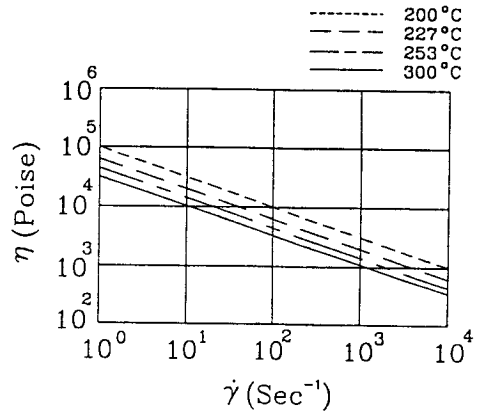


Fig. 5. Viscosity vs. shear rate relationship curve fitted by Cross-Carreau model.

MAX. VALUE= 3.19(sec)
MIN. VALUE= 0.00(sec)
STEP INCR.= 0.08(sec)

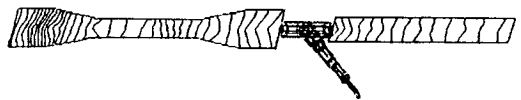


Fig. 6. Melt front advancement of the ceramic mixture injection molded using gate I.

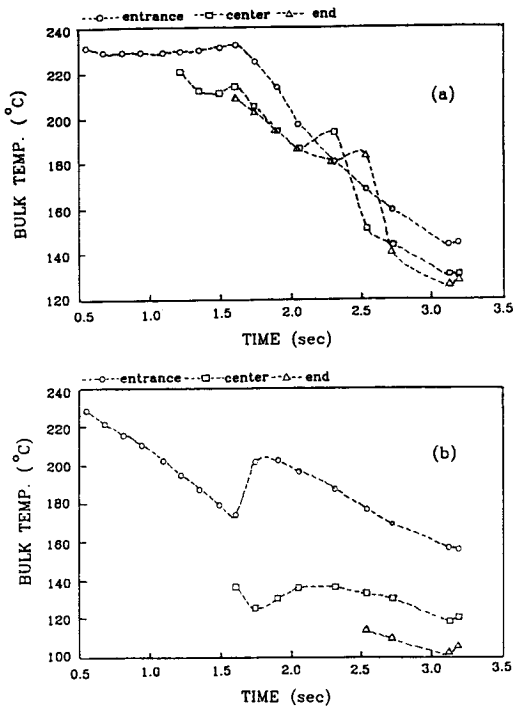


Fig. 7. Variation of temperature at selected positions during filling of the cavity using gate I. (a) bending specimen (b) tensile specimen

MAX. VALUE= 2.12(sec)
MIN. VALUE= 0.00(sec)
STEP INCR.= 0.05(sec)



Fig. 8. Melt front advancement of the ceramic mixture injection molded using gate II.

완전충전이 어려울 것으로 예상된다. Fig. 8은 게이트 II를 사용하였을 때 완전 충전시간이 2.12초 임을 나타내며 게이트 I과 동일하게 급형시편이 먼저 충전됨을 보여준다. Fig. 9에서 보듯이 충전해석 결과 급형시편의 가장 낮은 온도가 160°C보다 크고 인장시편은 140°C이다. 그러므로 인장시편의 완전 충전이 다소 어려울 것으로 예상된다. Fig. 10에 나타난 것

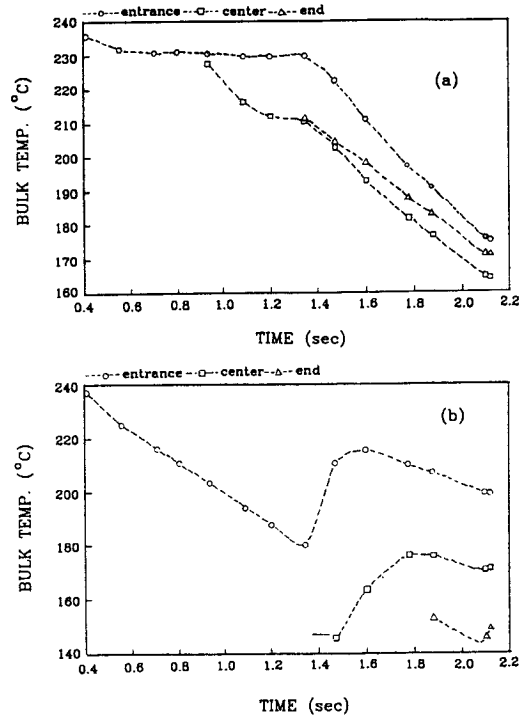


Fig. 9. Variation of temperature at selected positions during filling of the cavity using gate II. (a) bending specimen (b) tensile specimen

MAX. VALUE= 1.65(sec)
MIN. VALUE= 0.00(sec)
STEP INCR.= 0.04(sec)



Fig. 10. Melt front advancement of the ceramic mixture injection molded using gate III.

처럼 게이트 III을 사용한 경우 충전 시간은 1.65초이다. Fig. 11에서 보듯이 양 시편 모두 가장 낮은 온도가 150°C 이상이다. 이 게이트 크기에서는 충전이 용이할 것이라는 예상을 할 수 있다.

순수 고분자는 게이트의 변화에 따른 캐비티 내에서의 온도와 압력의 변화가 2-3%라고 발표된 예가 있으나 55% 세라믹 분말이 함유된 혼합물의 유동

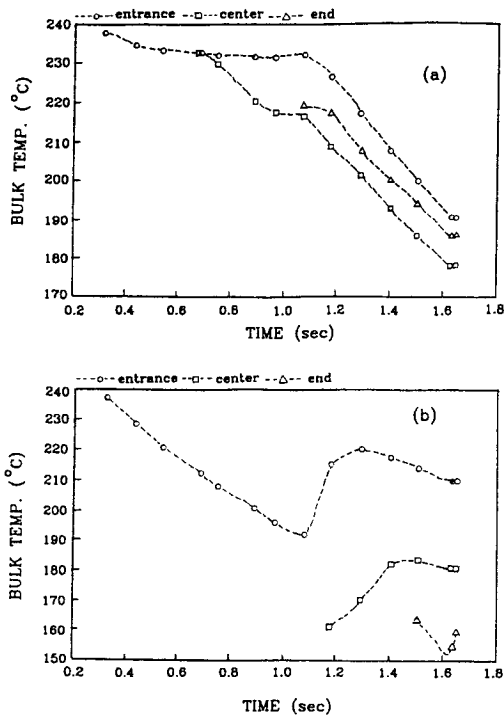


Fig. 11. Variation of temperature at selected positions during filling of the cavity using gate III. (a) bending specimen (b) tensile specimen

해석 결과 게이트 크기에 따른 변화가 많음을 알 수 있다. 게이트 크기의 변화에 따라 동일한 사출 조건에서 충전시간이 감소하는데 순수 고분자와는 달리 고화가 빨리 일어나는 세라믹 혼합물에서는 매우 중요한 현상이다. 그러므로 세라믹 혼합물에서는 게이트 크기가 다른 사출 조건과 더불어 매우 중요한 변수임을 예상할 수 있다.

2.3. 실험결과 및 고찰

본 실험은 질화규소의 부피비가 55%인 세라믹 혼합물로 간단한 모양의 시편을 사출성형하기 위한 사출변수들의 최적조건을 구하고 유동해석에서 알 수 있는 바와같이 세라믹 사출성형에서 성공적인 충전을 위한 중요한 변수라고 생각되는 게이트 크기변화의 영향을 규명함에 있다. 그리고 최종적인 목표는 질화규소의 부피비가 60%인 세라믹 혼합물

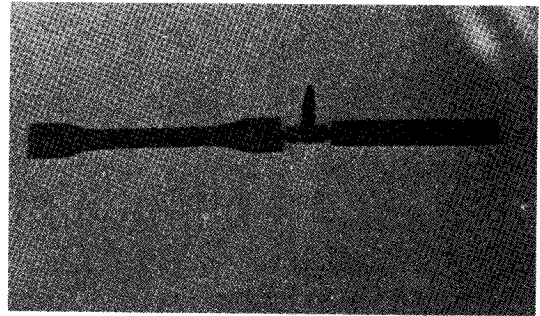
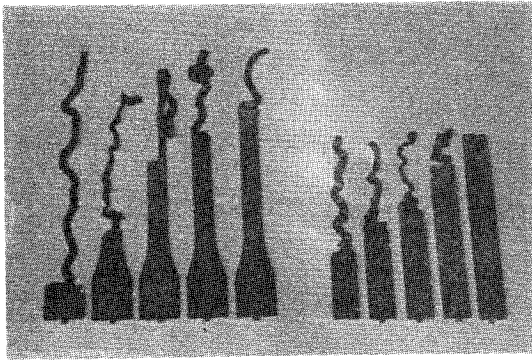


Fig. 12. Injection molded product as ejected from the mold.

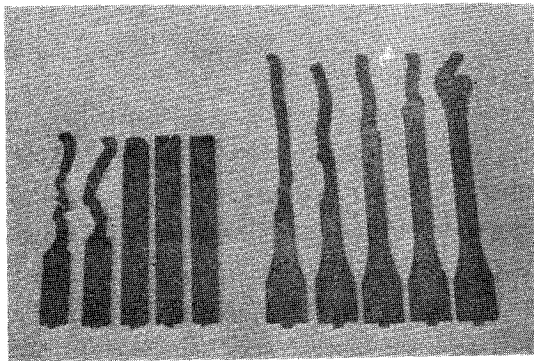
로 자동차 부품인 세라믹 로우터 블레이드(rotor blade)를 사출성형하기 위한 기초연구를 수행함에 있다.

Fig. 12는 세라믹 혼합물을 Table 4의 조건하에서 사출성형한 성형물을 보여준다. Fig. 13은 질화규소의 부피가 55%인 혼합물을 105 MPa의 일정한 사출압력에서 게이트의 크기를 변화시키면서 (a), (b)는 0.5초, 0.7초, 1.2초, 2초, 3초 (c)는 0.3초, 0.5초, 0.7초, 1.2초, 1.8초 후에 충전된 모습을 나타낸다. 게이트 I, 게이트 II를 사용한 경우에는 인장시편은 3초가 경과하여도 완전충전이 되지 않았으며, 게이트 III의 경우에는 1.8초 동안에 충전이 완료된다. 게이트 III의 경우 캐비티 두께(h)의 치수와 동일하게 게이트를 넓힌 인장시편은 젯팅이 발생하지 않고 폭(w) 방향으로 넓힌 굽힘시편은 젯팅이 일어났다. 이것으로 게이트는 성형품의 단면에서 얇은 치수방향으로 확장하는 것이 젯팅을 방지하는데 있어 효과적임을 알 수 있다.

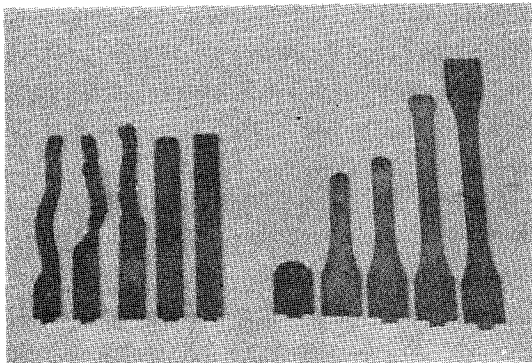
Fig. 14와 Fig. 15는 질화규소의 부피비가 55%인 혼합물을 게이트 II를 사용하고 Table 7의 사출조건하에서 인장시편을 완전충전시키기 위하여 사출조건들을 변화하며 실험한 결과이다. Fig. 14에 나타난 성형물의 형상은 충전시간을 2초, 사출압력을 70 MPa, 105 MPa, 130 MPa로 증가하였을 때 얻은 것이다. 사출압력의 증가로 충전량이 약간 증가함을 볼 수 있지만 불완전 충전을 막을 수는 없음을 나타낸다. Fig. 15의 시편은 130 MPa의 사출압력하에서 배럴의 온도를 220°C와 240°C로 하여 사출한 것이다. 온도를 220°C로 낮추었을때 유동성이 떨어져



(a)

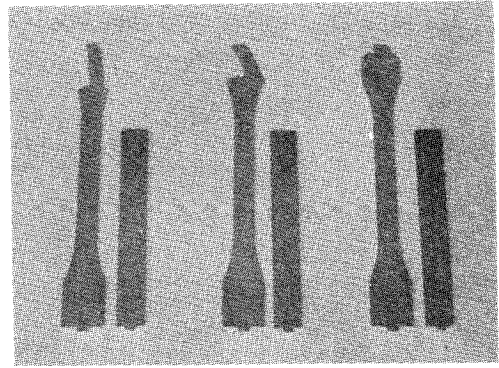


(b)



(c)

Fig. 13. Results of mold filling experiments at the injection pressure of 105 MPa using gates of different sizes (55% ceramic mixture). (a) gate I (b) gate II (c) gate III

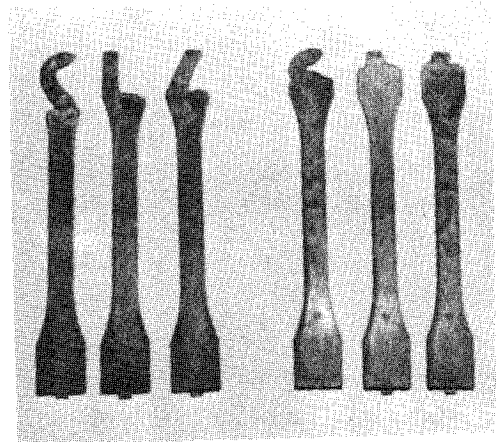


(a)

(b)

(c)

Fig. 14. Injection molded specimens using gate II with different injection pressure. (a) 70 MPa (b) 105 MPa (c) 130 MPa



(a)

(b)

Fig. 15. Injection molded specimens using gate II with injection pressure of 130 MPa and melt temperature. (a) 220°C (b) 240°C

240°C의 경우보다 충전량이 적음을 볼 수 있다. 또한, 배럴의 온도를 260°C로 올렸을 때에는 결합제의 분해 (degradation)가 발생하여 고체 상(phase)의 세라믹 분말들의 엉킴(solid bridge)이 발생하여 노즐 구멍이 막혀 사출이 불가능한 현상이 일어났다. 순수 고분자를 사출성형 하기 위하여 금형을 제작할 때에는 게이트의 크기를 일반적으로 정하여 금형을 제작한 후 그 크기에 맞도록 사출조건을 조절하여도

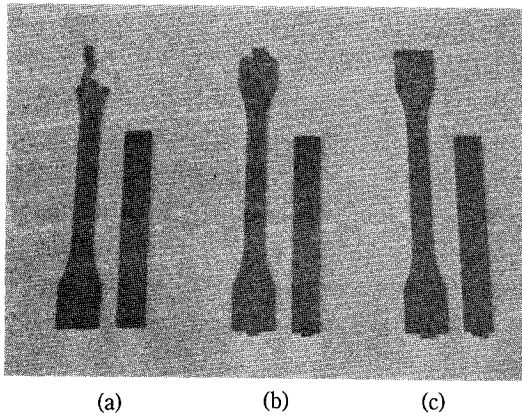
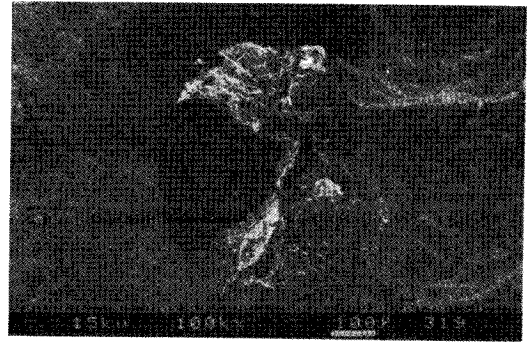


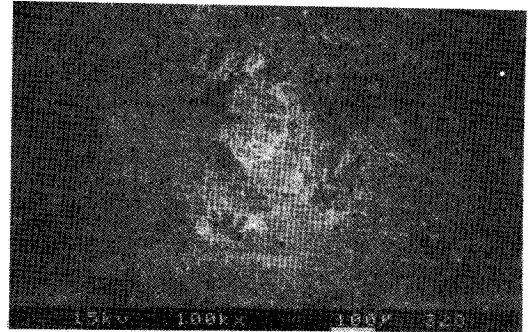
Fig. 16. Injection molded specimens using gates of different sizes at the same injection pressure of 130 MPa.
(a) gate I (b) gate II (c) gate III

게이트에서 고화시간이 늦으므로 대부분의 경우에는 큰 문제없이 완전충전이 된다. 그러나 본 실험에서 보았듯이 55% 세라믹 혼합물은 게이트가 작으면 사출조건 변화만으로는 완전한 충전을 달성하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 또한, 단면의 형상이 변하는 인장시편에 있어 게이트 크기와 형태의 효과는 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

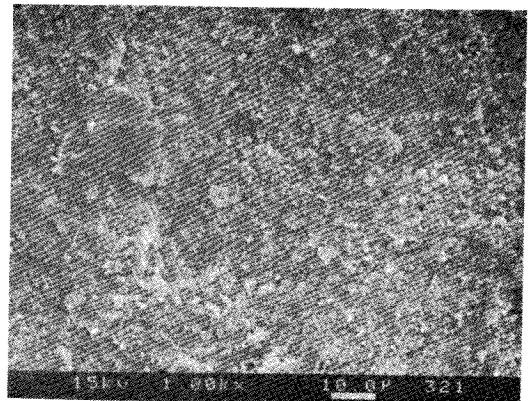
Fig. 16은 사출압력을 130 MPa, 충전시간을 2초, 보압시간(static holding time)을 15초로 하였을 때 게이트의 변화에 따라 사출된 성형물을 보여준다. 게이트 I과 게이트 II를 사용한 경우에서 불완전충전이 나타났고 게이트 III을 사용하였을 때에 완전충전을 볼 수 있다. 또한 게이트 III을 사용한 경우에는 105 MPa의 사출압력, 2초의 충전시간, 240 °C의 배럴온도 등의 조건하에서도 만족할 만한 충전을 얻을 수 있었다. Fig. 17은 사출압력을 130 MPa, 보압시간은 15초로 일정하게 하고 게이트를 변화시키면서 사출된 성형품의 내부결함을 관찰하기 위하여 주사전자현미경을 이용하여 촬영한 사진을 보여준다. (a)에서는 크기가 500 μm인 공동(void)이 관찰되고 (b)에서는 300 μm 크기의 공동을 볼 수 있다. 이것은 탈지공정(debinding)시 불균일한 수축을 야기시켜 성형물이 뒤틀리는 현상을 일으킨다. 그러나 (c)에서는 0.1 μm의 미세한 공동이 존재함을 볼 수 있다. 이상의 실험결과에서 입증된 바와 같이



(a)



(b)



(c)

Fig. 17. Cross-sectional area of specimens molded at 130 MPa using gates of different sizes.
(a) gate I (b) gate II (c) gate III

게이트의 크기는 세라믹 사출성형에서의 결함을 줄이는 중요한 변수임을 알 수 있다.

Fig. 18은 사출압력이 105 MPa일 때 게이트 크기를 변화시키면서 굽힘시편의 체적수축율을 측정하는 것인데, 일반적으로 순수 고분자의 사출성형에서는

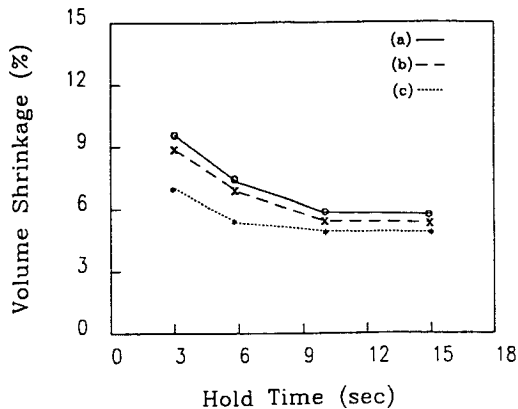


Fig. 18. Volume shrinkage vs. hold time when three different gates are used at the injection pressure of 105 MPa.

(a) gate I (b) gate II (c) gate III

게이트가 너무 크면 역류(back flow)가 발생하여 수축율이 증가하는데 세라믹 혼합물의 사출성형에서는 게이트가 빨리 고화되어 역류가 발생하지 않으며 게이트의 크기가 커짐에 따라 충전량이 충분하므로 체적수축율이 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

결과적으로, 세라믹 분말의 부피비가 55%인 세라믹 혼합물의 사출성형에서는 사출압력, 배럴온도와 더불어 게이트의 크기가 중요한 사출변수가 된다. 배럴의 온도는 260°C 이상에서 결합제의 분해가 발생하므로 그 온도보다는 작아야 하며 사출압력은 105 MPa 이상이어야 한다.

3. 결 론

1. 유동해석에 의하여, 세라믹 혼합물은 게이트 크기의 변화에 따라 충전시간, 캐비티 내의 온도, 전단변형률 등 사출거동이 현저하게 변하는 것을 알 수 있었는데 충전실험을 통하여 확인할 수 있었다.

2. 게이트의 크기와 형태는 충전실험, 주사전자현미경 사진 촬영, 체적 수축율의 측정 결과 불완전 충전(short shot), 공동, 균열과 같은 결함을 줄이는 중요한 변수임을 알 수 있었다.

3. 세라믹 분말의 부피비가 클수록 세라믹 혼합물을 사출성형할 때 부풀림이 작아지고 점도가 커져 젯팅현상이 필연적으로 발생함을 볼 수 있었다.

4. 젯팅을 방지하기 위해서는 사출조건을 조정만으로는 어려우며, 게이트의 크기를 시편의 단면중 작은 치수방향으로 확장하여야 함을 알 수 있었다.

5. 질화규소 분말의 부피비가 55%인 세라믹 혼합물로 시편을 사출성형하기 위한 최적의 사출조건은 사출압력 105 MPa, 배럴온도 240°C, 보압시간 10초임을 알 수 있었다.

6. 60%의 세라믹 혼합물로 형상이 복잡한 로우터 블레이드를 사출성형하기 위하여는, 우선 세라믹분말과 결합제들을 잘 혼합하여야 하며 혼합물의 유동성이 저하될 것으로 예상되므로 게이트는 성형품의 단면중 얇은 치수만큼 확장하여야 하고 사출압력은 130 MPa 이상, 배럴의 온도는 240°C에서 사출성형을 수행하여야 할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. D.V. Rosato, "Injection Molding Handbook," Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1986.
2. R.M. Criens and H.G. Moste, *SPE ANTEC Technical Papers*, **28**, 22 (1982).
3. J.R. Peshek, *Advances in Ceramics*, **9**, 234 (1984).
4. I. Peltsman and M. Peltsman, *Interceram.*, **4**, 56 (1984).
5. M.J. Edirisinghe and J.R.G. Evans, *Int. J. High Technology Ceramics*, **2**, 249 (1986).
6. R.J. Crawford, "Progress in plastics Engineering," Pergamon Press, 1981, p. 189.
7. M.J. Edirisinghe and J.R.G. Evans, *Mat. Sci. and Eng.*, **109**, 17 (1989).
8. M. J. Edirisinghe, *J. of mater. sci. lett.*, **7**, 509 (1988).
9. C.A. Hieber and S.F. Shen, *J. of Non-Newtonian Fluid mech.*, **7**, 1 (1980).
10. V.W. Wang and M.L. John, "C-Flow User's Guide," Advanced CAE Technology Inc., 1988.
11. Z. Hashin and S. Shtikman, *J. Appl. Phys.*, **33**, 3125 (1962).