

PET 사출성형공정의 공학적 해석

조 형 민 · 이 광 회[†] · 진 병 석*

인하대학교 고분자공학과, *동덕여자대학교 응용화학과
(1996년 4월 27일 접수)

Engineering Analysis of PET in Injection Molding Process

Hyung Min Cho, Kwang Hee Lee[†], and Byung Suk Jin*

Dept. of Polym. Sci. and Eng., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea

*Dept. of Appl. Chem., Dongduk Women's Univ., Seoul 136-714, Korea

(Received April 27, 1996)

요약: 본 연구에서는 DSC를 이용하여 PET의 비등온결정화 속도를 구하고, 컴퓨터 모사를 통하여 사출온도, 금형온도, 시편두께 등의 사출성형조건에 따른 금형 내에서의 온도구배와 결정화도의 변화를 계산하였다. 계산된 결과는 실제 사출시편의 부위별 결정화도 측정 결과와 비교함으로써 컴퓨터 모사의 타당성을 입증하였다. 핵제를 첨가하지 않은 PET의 경우에는 시간에 따른 시편 내의 온도 및 결정화도 구배가 비교적 균일하였으나 느린 결정화속도로 인하여 5분 이상의 냉각시간이 필요하였다. 반면에 핵제가 첨가된 PET의 경우에는 3분 이내에 결정화가 종결되었으나 시편의 위치에 따른 온도 및 결정화도의 변화에는 큰 차이를 보여 주었다. 금형온도나 시편두께의 증가는 냉각효과의 저하를 가져오기 때문에 중심부에서의 결정화를 느리게 하였으며, 특히 시편두께의 영향이 현저하게 나타났다. 사출성형조건에 따른 몰폴로지 차이는 시편의 기계적 물성에 영향을 주는데, 높은 금형온도에서 제조된 시편의 경우 구멍이 상대적으로 크게 성장하여 낮은 충격강도를 보여 주었다.

ABSTRACT: Nonisothermal crystallization rate of PET was derived by using the data obtained from the DSC. The profile changes of temperature and crystallinity in the mold with the injection temperature, mold temperature and specimen thickness were calculated through the computer simulation. To verify the propriety of this computer simulation, the calculated values were compared with the data of crystallinity measured experimentally with the injection molded specimen. For neat PET, the profiles of temperature and crystallinity within the specimen were relatively uniform, but cooling time more than 5 min was required due to slow crystallization rate. On the other hand, for the nucleated PET, the crystallization was completed in 3 min, but considerable change in the temperature and crystallinity with the position of specimen was observed. As the mold temperature or specimen thickness was increased, the crystallization at the center position of mold was delayed due to the decreased cooling effect. Especially, the effect of specimen thickness on crystallization was found to be more significant. The variation in morphology with injection molding condition had an effect on the mechanical property of specimen. The injection molded specimen at higher temperature showed lower impact strength because of the relatively larger spherulites.

Keywords: nonisothermal crystallization, PET, nucleating agent, computer, simulation, injection molding.

서론

사출성형은 플라스틱 산업에서 가장 널리 사용되고 있는 공정 중의 하나로서 단순 문구류부터 자동차 부품에 이르기까지 다양한 분야에 걸쳐 응용되고 있다. 최근에는 사출성형품의 품질과 생산성에 대한 요구가 고도화됨에 따라 사출성형공정의 정밀제어를 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 사출 시의 유동특성 분석이나 냉각조건에 따른 금형 내의 온도분포의 해석은 사출공정의 최적화를 위한 중요한 연구분야로 대두되고 있다.¹⁻³

결정성 고분자의 물성은 가공공정 중에 일어나는 결정화 거동에 의해 크게 좌우된다. 즉 용점 이하로 냉각 시 냉각조건에 따른 시편 내의 결정화 거동의 차이는 고분자의 미세구조를 변화시키고 결과적으로는 성형품의 물성에 직접적인 영향을 미친다. 결정성 고분자는 용융상태의 밀도와 고화된 후의 밀도 차이가 크기 때문에 사출성형에 있어서 제품의 수축이나 변형이 일어날 가능성이 높으며, 외관상의 문제점이 나타나지 않은 경우라도 성형품 내부에 어느 정도의 응력이 존재한다.^{4,5} 고분자의 밀도가 1차적으로 결정화도에 의해 지배된다는 점을 고려할 때, 사출성형 시의 보압이나 금형설계를 비롯한 여러 가지 가공조건을 최적화하기 위하여서는 금형 내의 결정화도 변화에 대한 정확한 예측이 반드시 필요하다.⁶

현재 CAD/CAM을 이용한 가공공정분석이 많이 시도되고 있으나, 적용시 도입되는 가정들과 단순화에 의해서 모든 시스템이나 재료에 적용하는데는 한계가 있다.⁷ 특히 결정성 고분자의 사출성형분석 시, 비등온결정화에 대한 정확한 해석이 미비한 관계로 그 응용이 크게 제한되고 있다. 본 연구에서는 미분형태의 비등온결정화식을 사용하여 이러한 문제점을 해결하였으며 금형온도, 사출온도 및 시편두께에 따른 금형 내에서의 온도구배와 결정화도의 변화를 컴퓨터 모사를 통하여 예측함으로써 사출공정 최적화를 위한 새로운 접근방법을 제시하였다.

실 험

물 질. PET는 TPA법으로 제조된 (주)SKC의 bottle용 등급을 사용하였다. 이 PET의 고유점도

(intrinsic viscosity)는 0.628이었으며 용점은 263 °C였다. 핵제가 첨가된 PET는 Mini-Max extruder를 이용하여 실험실에서 직접 제조하였는데, 사용한 핵제는 Asahi Denka의 유기핵제인 NC-11이었으며 핵제의 함량은 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0 wt%로 조절하였다.

열분석. Neat PET 및 핵제가 첨가된 PET의 동적 결정화거동을 Perkin-Elmer DSC-4로 조사하였다. 약 10 mg 정도로 정량된 시료를 285 °C에서 5분을 유지시켜 충분히 용융시킨 후, 10, 20, 30 °C/min의 일정속도로 냉각하였다.

사출성형. Mini-Max injection molder를 사용하여 사출성형을 하였다. 80 °C 진공오븐에서 24시간 이상 건조한 시료를 300 °C에서 3분간 용융시킨 후, 가열블록에 의해 일정온도로 유지된 금형 내로 사출시켰다. 이 때 사용한 금형은 직사각 막대 형태의 금형으로 길이, 폭 및 두께가 각각 760, 120, 10 mm였으며 사출시간은 대략 2초 이내였다. 사출된 시료는 시간에 따른 두께 방향의 물폴로지 관찰 및 밀도 변화 측정을 위하여 30초, 1분, 2분, 3분 동안 유지시킨 후, 액체 질소에 담가 급냉시켰다.

결정화 속도식. 결정화는 핵형성과 성장과정을 거쳐서 구정이라고 불리는 다결정을 생성하는 과정을 말한다. 결정구조의 형태나 모양은 결정화 속도에 많이 의존하며 이것은 고분자 재료의 물리적, 기계적 성질에 많은 영향을 미친다.⁸

일반적으로 시간에 따른 결정화도의 변화는 Avrami에 의해 수학적으로 유도되어졌으나, 단지확률에 의한 유도과정을 거침으로써 고분자계에 그대로 적용하기에는 많은 문제점이 있다. 따라서 구정성장 시 수반되는 impingement 현상을 감안하여 결정 성장속도를 상수로 두지않고 함수로 설정한 여러 식들이 소개되었다.⁹⁻¹¹ 그러나, 이런 식들은 대부분 적분형태로 되어 있어서 사출성형과 같이 비등온 결정화가 일어나는 분야에 적용하기에는 수학적으로 매우 불편하다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Lee와 Kim이 유도한 다음과 같은 미분형태의 비등온 결정화식을 사용하였다.¹²

$$\frac{da}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \exp\left(-\frac{\phi T_m^0}{T(T_m^0 - T)}\right) \times$$

$$a^{2/3}(a_{eq}-a) \quad (1)$$

여기서, a 는 0부터 평형결정화도, a_{eq} 까지의 결정화도이고, A 는 핵수와 연관된 상수, E_D 는 결정상 영역으로 분자사슬이 확산하는데 필요한 활성화 에너지, T_m^0 은 평형용융온도, ϕ 는 임계크기 이상의 핵을 형성하는데 필요한 자유에너지와 관련된 상수이다.

Neat PET의 동적 DSC 데이터를 Marquardt의 비선형 회귀알고리즘과 4차 Runge-Kutta 수치해석법에 적용하여^{13,14} neat PET의 결정화에 대한 속도론적 인자를 구하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. Fig. 1은 DSC 실험치와 Table 1의 인자를 식 (1)에 대입하여 계산한 결과를 비교한 것인데 거의 전영역에서 잘 들어맞는 것을 볼 수 있다. 이것은 식 (1)이 PET의 비등온 결정화를 해석하는데 적합하다는 것을 의미한다.

컴퓨터 모사. 직사각 막대형 금형에서의 금형의 폭방향과 길이방향의 열전도는 무시하고 두께 방향

(z-방향)만의 열전도만 고려한 1차원적인 에너지 균등식을 Cartesian 좌표축으로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{\kappa t_0}{\rho C_p H^2} \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} + \frac{(\Delta H_c) A t_0}{C_p T_0} \times \exp\left(-\frac{E_D^*}{T^*}\right) \exp\left(-\frac{\phi^*}{T^*(T_m^{0*}-T^*)}\right) \times a^{2/3}(a_{eq}-a) \quad (2)$$

여기서 C_p 는 열용량, κ 는 열전도도, ρ 는 밀도, ΔH_c 는 결정화열, T_0 와 t_0 는 기준 온도와 시간, T_w 는 금형벽면의 온도이며 윗첨자에 *가 붙은 것은 무차원 인자들로서 $t^*=t/t_0$, $T^*=T/T_0$, $T_m^{0*}=T_m^0/T_0$, $T_w^*=T_w/T_0$, $z^*=z/\text{금형 반두께}(H)$, $\phi^*=\phi T_m^0/T_0^2$, $E_D^*=E_D/RT_0$ 이다. 식 (2)를 유도하기 위해 사용한 가정과 이에 따른 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

1) 폭방향과 길이방향으로의 열전도는 두께방향의 열전도에 비하여 매우 작다.

2) PET의 모든 물리적 상수들은 일정한 값을 가진다.

3) 금형벽면의 온도는 사출공정 동안 일정하다.

4) 금형충진 시간이 2초 이내이므로 금형충진 동안의 열이력 변화는 무시한다.

5) 초기조건 : $T^*=1$ at $t^*=0$

6) 경계조건 : $\partial T^*/\partial z^*=0$ at $z^*=0$
 $T^*=T_w^*$ at $z^*=1$

본 연구에서는 식 (2)를 중심으로 여러 가지 공정 조건에 따른 금형 내의 온도구배와 결정화도 분포를 컴퓨터 모사를 통해 구했는데 컴퓨터 모사를 위한 사출성형공정의 기본인자로는 금형온도를 80 °C, 금형두께를 1 cm, 사출온도를 300 °C로 설정하였다(별도의 명시를 하지 않은 경우에는 Table 2의 기본 인자들을 사용한 결과들이다).

Table 1. Crystallization Kinetic Parameters of PET Calculated through a Marquardt's Nonlinear Regression Algorithm

parameter	symbol	value
overall kinetic constant	A	$5.808 \times 10^8 \text{ (s}^{-1}\text{)}$
activation energy for diffusion constant	E_D	$1.521 \times 10^4 \text{ (cal/mole)}$
	ψ	$5.51 \times 10^2 \text{ (K)}$
correction coefficient	R^2	0.991

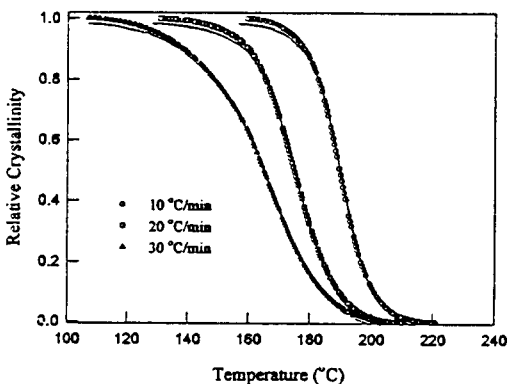


Figure 1. Comparison of the experimental data (point) with the calculated values (line) from Eq. 1 at different cooling rates.

Table 2. Base Conditions for the Simulation Parameter

parameter	value (unit)
heat capacity ²⁰	0.410(cal/g·K)
heat of crystallization ²⁰	33.4(cal/g)
density ²⁰	1.38(g/cm ³)
thermal conductivity ²⁰	6.0×10 ⁻⁴ (cal/cm·s·K)
equilibrium crystallinity ²⁰	0.36
mold thickness	1.0(cm)
injection temperature	300(°C)
mold temperature	80(°C)

결과 및 고찰

Fig. 2와 3은 두께 방향으로 다섯 지점에서 시간에 따른 neat PET의 온도구배와 결정화도의 변화를 나타낸 것이다. 벽면과 중앙보다는 그 사이 영역에서 결정화가 더 빠르게 진행되며, 벽면 바로 아래층 부위가 초반 3분 동안은 가장 빠른 결정화 거동을 보여 준다. 중앙 부위에서는 낮은 열전도도로 인하여 냉각 속도가 느리고 이에 따라 결정화가 열적으로 지연된다. 반면에 벽면 부위는 사출 즉시 PET의 유리전이 온도 근처까지 급냉되기 때문에 PET 분자사슬의 이동성이 크게 떨어져 결정화 속도가 늦어진다. Neat PET는 금형 내 모든 부위에서 결정화가 전반적으로 느리게 일어나는 관계로 사출 후 5분이 경과한 경우에도 결정화도가 아직 평형결정화도에 도달하지 못하였다.

Fig. 4는 사출 후 150초가 경과한 금형을 액체 질소에 급냉시켜 결정화를 강제로 중단시킨 시료의 위치별 편광현미경 사진이다. 편광현미경 사진은 컴퓨터 모사에 의해 예측한 Fig. 3의 150초에서의 결정화 구배 결과와 비교할 때 그 경향이 잘 들어맞는 것을 알 수 있다. 즉 금형의 벽면은 온도가 너무 낮아 결정이 거의 자랄 수 없으며 금형의 중앙에서는 열전달 문제로 인하여 결정화가 지연되어 낮은 결정화도가 얻어졌다.

Fig. 5는 컴퓨터 모사에 의해 계산된 결정화도와 일정 시간에서 급냉시킨 시료를 다이아몬드 톱을 이용하여 두께방향으로 분할하여 밀도측정법으로 구한 결정화도를 비교한 것이다. 정밀한 시편 분할이 매우 어렵고 분할된 시편 역시 어느 한 지점의 결정화도가

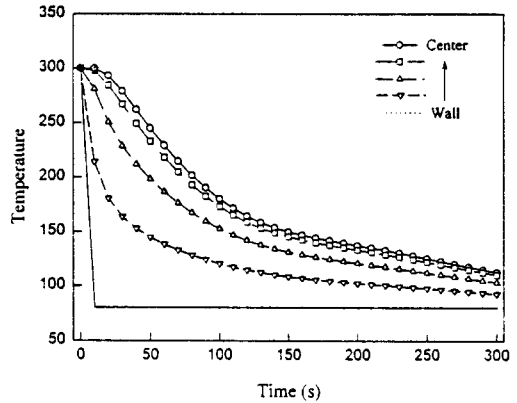


Figure 2. Temperature change of neat PET at five positions in the mold.

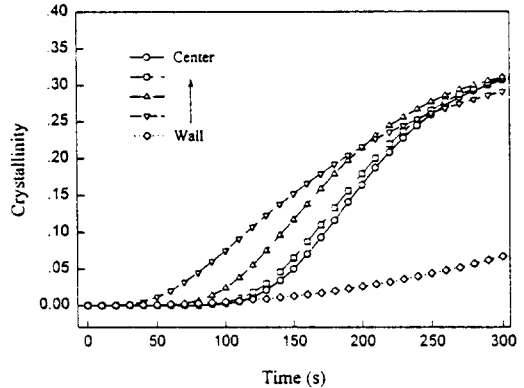


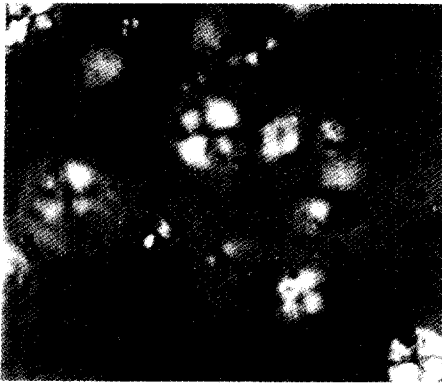
Figure 3. Crystallinity change of neat PET at five positions in the mold.

기보다는 분할된 부위의 평균결정화도라는 실험적 오류가 있으나 Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 모사 결과와 측정치가 매우 근접함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 컴퓨터 모사 접근방식이 많은 가정하에서 이루어졌으나 PET 사출성형을 공학적으로 해석하는데는 매우 유용한 방법이라 평가할 수 있다.

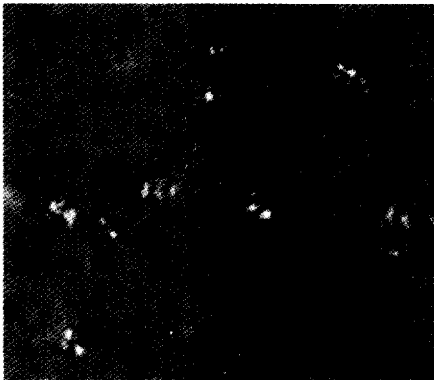
Fig. 6은 핵제 첨가에 따른 결정화 속도 증가효과를 보여준다. 소량의 핵제만 첨가된 경우라도 핵제의 첨가효과가 뚜렷하게 나타나, 10 °C/min으로 냉각시 얻어지는 DSC thermogram의 피크온도가 20 °C 정도 빨라지는 것을 볼 수 있다. 그러나 핵제의 첨가량이 0.5 wt% 이상인 경우에는 핵제의 균일한 분산을 도모하기 어렵고, 이에 따라 핵제들이 서로 응집



(a) wall



(b) middle



(c) center

Figure 4. Polarized optical micrographs of neat PET at three positions in the bar type mold (Magnitude $\times 1000$; sample quenched after 150s).

하여 결정이 성장할 수 있는 가시적 표면적을 감소시키므로써 결정화 속도가 약간 느려지는 경향을 보였

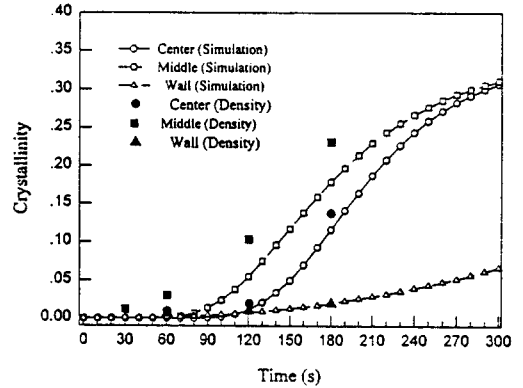


Figure 5. Comparison of the crystallinity obtained by density (experimental) with simulation data.

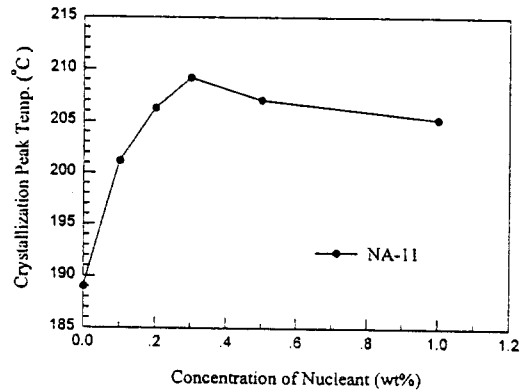


Figure 6. Change of the crystallization peak temperature of PET nucleated with NC-11 as a function of concentration at the cooling rate $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

다.^{15,16}

Fig. 7은 핵제 첨가에 따른 속도상수, A 를 도시한 것이다. 비균질 결정화가 우선적으로 일어나는 경우에 A 는 단위부피 당 유효 핵수에 선형적으로 비례하는 향이기 때문에 Fig. 6과 동일한 경향을 보여주고 있다. 반면에 E_D 와 ϕ 등은 PET의 열역학적 인자이기 때문에 핵제의 첨가 유무에 관계없이 일정한 값을 나타내었다.¹⁷

Fig. 8과 9는 NC-11이 0.3 wt% 첨가된 PET의 경우, 두께 방향으로 다섯 지점에서의 시간에 따른 온도구배와 결정화도의 변화를 도시한 것이다. 전체적인 경향은 neat PET의 경우와 비슷하나 빠른 결정화 속도로 인하여 몇가지 차이점을 보여준다.

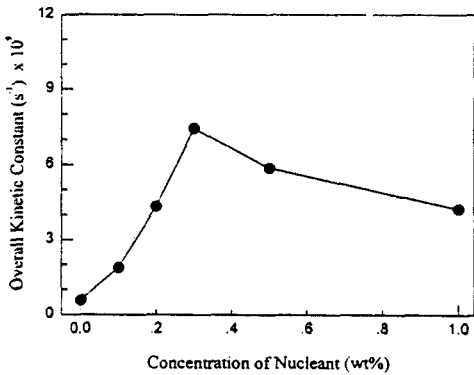


Figure 7. Change of the overall kinetic constant(A) as a function of concentration of nucleant.

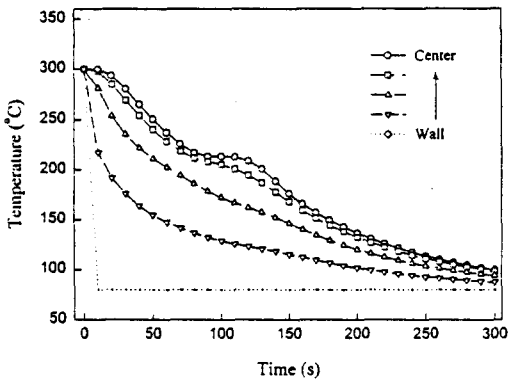


Figure 8. Temperature change of PET with NC-11 (0.3 wt %) at five positions in the mold.

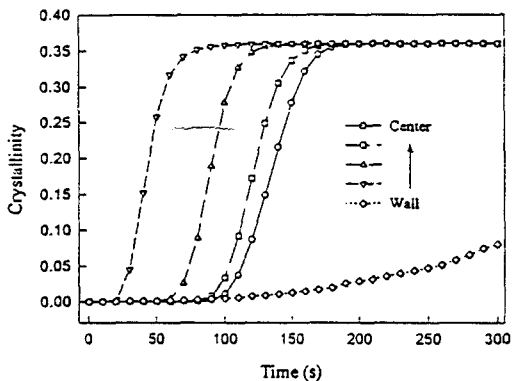


Figure 9. Crystallinity change of PET with NC-11 (0.3 wt %) at five positions in the mold.

Neat PET의 온도구배는 금형 내 위치에 관계없이 단순 감소를 보여주었으나 핵제가 첨가된 경우에는 약 100초 경과한 후 중심부의 온도가 약간 상승하여 20여초 정도 일정온도를 유지하다 다시 온도가 떨어졌다. 이것은 빠른 결정화 속도와 수반된 많은 발열이 낮은 열전도도로 인하여 금형 벽면쪽으로 용이하게 열전달되지 못하고 단시간적으로 중심 부위에 축적되므로써 나타나는 현상이다. 시간에 따른 결정화도의 추이를 살펴보면 neat PET의 경우에는 금형 내의 위치별 결정화도 차이가 비교적 적었던 반면에 결정화 속도가 빠른 경우에는 위치별로 상당한 결정화 속도의 차이를 나타내었다. 핵제가 0.3 wt% 첨가된 PET는 사출공정에서 평형결정화도에 도달하는 시간이 금형벽면 바로 아래층은 80여초 정도인데 비하여 중심부에서는 180초로 100초 이상의 차이를 보여준다. 이러한 결정화 속도의 차이에 의해 금형 내의 위치별 수축률에 큰 차이가 나타나며, 이는 결과적으로 사출성형품의 잔류응력문제를 더욱 심화시킨다.¹⁸ 따라서 성형품의 품질과 생산성을 고려하여 결정화속도가 적정 수준을 유지하도록 핵제의 첨가량을 선정하는 것이 필요하다. 지금까지 품질이 우수한 사출성형품을 제조하기 위해서는 금형내의 온도분포를 균일하도록 모든 설계 및 가공기준을 설정하는 것이 일반적인 접근방식이었다. 그러나, 결정성 고분자의 경우에는 약간의 온도 불균일이 결정화 속도에 지대한 영향을 미치기 때문에 보다 정밀한 공정제어를 위하여서는 본 연구에서와 같이 온도구배 뿐만 아니라 비등온결정화식을 이용하여 시간에 따른 위치별 결정화도의 진행 정도를 분석하는 것이 중요하다.¹⁹

Fig. 10은 금형온도에 따른 금형 중앙부위에서의 결정화도의 변화를 도시한 것이다. 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 금형은 온도가 낮아질수록 중앙부위의 냉각이 효과적으로 일어나 상대적으로 빠른 결정화속도를 보여주었다. 금형온도를 120 °C에서 25 °C로 변화시키면 컴퓨터 모사 결과 평형결정화도에 도달하는 시간이 30% 이상 단축되었다. 그러나 낮은 금형온도에서는 금형 내의 위치별 결정화 속도의 차이가 크게 발생할 뿐만 아니라 탈형 후에도 평형결정화도에 이르지 못하는 표피층의 두께가 두꺼워지기 때문에 이를 염두에 두고 금형온도를 설정하여야 한다.

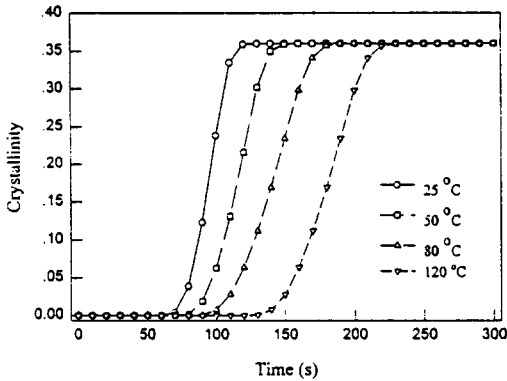


Figure 10. Effect of the mold temperature on the crystallization behavior of PET with NC-11 (0.3 wt%) at the center position of mold.

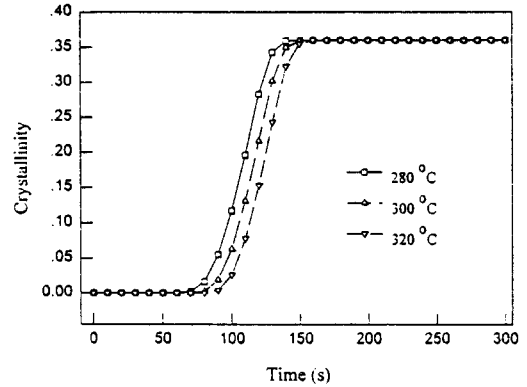


Figure 12. Effect of the injection temperature on the crystallization behavior of PET with NC-11 (0.3 wt%) at the center position of mold.

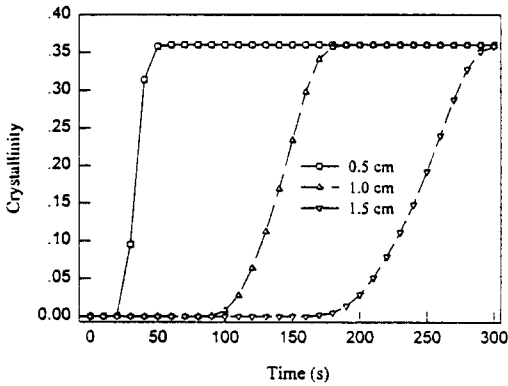


Figure 11. Effect of the mold thickness on the crystallization behavior of PET with NC-11 (0.3 wt%) at the center position of mold.

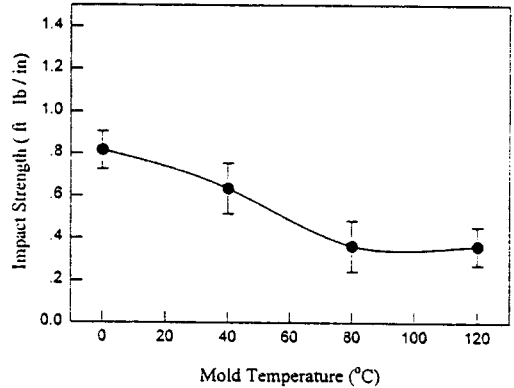


Figure 13. Effect of mold temperature on the impact strength of neat PET.

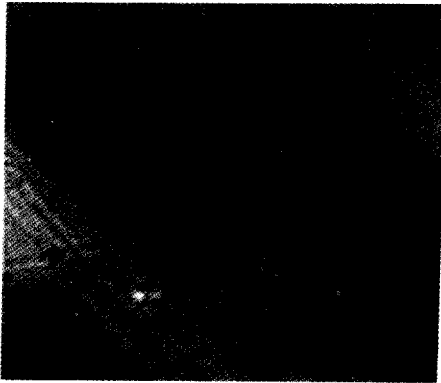
Fig. 11은 시편두께의 영향을 보여준다. 고분자 물질의 낮은 열전도도로 인하여 약간의 시편두께 증가에 대하여서도 결정화속도는 매우 민감하게 달라진다. 시편두께가 0.5 cm에서 1.5 cm으로 3배 증가하였을 때, 평형결정화도에 도달하는 시간은 약 55초에서 300초 이상으로 늘어났다. 반면에 Fig. 12에서 볼 수 있는 바와 같이 사출온도의 영향은 매우 미미하였다. 이것은 사출온도가 PET의 결정이 성장할 수 있는 온도와 큰 격차가 있어 결정화온도 영역으로 냉각되는 동안에 고온의 사출물과 금형과의 열전달이 비교적 효과적으로 일어나 실제 결정이 일어나는 온도영역에서의 온도차이가 사출온도의 온도차이보다

작아지기 때문이다.

사출성형에서 금형 내의 결정화 속도는 사출사이클 시간을 결정하는 가장 중요한 인자이나 성형품의 기계적 물성을 염두에 둘 경우에는 결정화 속도 및 결정온도영역의 분포에 따른 최종 결정화도 분포와 얻어지는 결정구조의 차이점을 반드시 고려하여야 한다. 한가지 예로서 Fig. 13은 서로 다른 금형온도를 사용하여 neat PET를 사출 후 3분간 유지한 다음 액체질소에 급냉시켜 제조한 시편의 충격강도를 ASTM D256법으로 측정한 결과이다. 금형온도의 차이에 따라 Fig. 14에서 보는 바와 같이 시편 내의 결정화도에 차이가 있으며 형성된 구정의 크기가 서로 다르다. 충격강도는 결정화도와 구정크기에 일반



(a)



(b)



(c)

Figure 14. Polarized optical micrographs of neat PET at the center position of mold for different mold temperatures: (a) 0 °C, (b) 40 °C, and (c) 80 °C.

적으로 반비례하나 그 경향은 고분자의 종류에 따라 다르게 나타날 수 있다. 본 실험에서는 neat PET의

경우 금형온도의 증가에 따라 충격강도가 감소하였는데, Fig. 14와 neat PET에 대한 컴퓨터 모사 결과 (Fig. 3)를 고려할 때 금형온도에 따른 충격강도의 감소는 형성된 구정의 크기차이와 결정화도의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

결론

DSC 결과를 비등온 결정화속도식에 적용하여 비선형 회귀알고리즘으로 속도론적 인자를 구하여 본 결과, neat PET와 핵제를 첨가한 PET의 모든 경우에 실험치와 계산값이 전 결정온도 영역에서 잘 들어맞았다. 또한 금형의 폭방향과 길이방향의 열전도는 무시하고 두께방향, z-방향만의 열전도만 고려한 1차원적 에너지 균등식을 사용한 컴퓨터 모사 결과는 실제 밀도측정법으로 측정한 실험치와 거의 일치하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 비등온 결정속도식과 컴퓨터 모사 접근방식이 PET 사출성형을 공학적으로 해석하는데는 매우 유용한 방법이라 평가할 수 있었다. 컴퓨터모사 결과에 따르면 사출성형조건 중 가장 영향을 많이 미치는 요소는 시편두께이며 금형온도도 매우 중요한 공정변수임을 알 수 있었다. 사출사이클 시간만을 고려할 경우에는 금형내에서 결정화가 빠르게 진행되는 공정조건을 선정하는 것이 중요하나 시편두께나 금형온도와 같은 공정변수의 변화에 따라 사출성형품에서의 온도 및 결정화도의 구배가 다르며 최종 결정화도의 분포와 결정구조의 차이가 나타난다. 이러한 차이는 결과적으로 성형품의 내부 응력정도와 기계적 물성을 결정하는 중요한 인자로 작용하기 때문에 최적 사출성형 조건을 찾기 위해서는 사출성형의 공정변수 간의 상호영향을 보다 면밀하게 고찰하는 것이 필요하다.

감사의 글: 본 연구는 1995년도 인하대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

1. A. R. Agrawal, I. O. Pandelidis, and M. Pencht, *Polym. Eng. Sci.*, **27**, 1345 (1987).
2. J. Divinagracia, *SPE ANTEC'93*, 2135 (1993).

3. J. Bozzeli, B. Furches, R. Bujanovski, and J. Little, *SPE ANTEC'92*, 2198 (1992).
4. C. H. Han, "Rheology in Polymer Processing", Academic Press, 1976.
5. L. Mandelkern, "Crystallization of Polymers", McGraw Hill, New York, 1964.
6. I. J. Catic, *Polym. Eng. Sci.*, **19**, 893 (1979).
7. M. Okamoto, Y. Shinoda, N. Kinami, and T. Okayama, *J. Appl. Polym. Sci.*, **57**, 1055 (1995).
8. T. H. Yang and R. E. Nunn, *SPE ANTEC'92*, 48 (1992).
9. F. T. Simon and J. M. Rutherford, Jr., *J. Appl. Phys.*, **35**, 82 (1964).
10. J. Rabieska and A. J. Kovacs, *J. Appl. Phys.*, **32**, 2314 (1961).
11. M. C. Torbin, *J. Polym. Sci., Phys. Ed.*, **14**, 2253, (1976).
12. K. H. Lee and S. C. Kim, *Polym. Eng. Sci.*, **28**, 13 (1988).
13. J. L. Kuester and J. H. Mize, "Optimization Technique with Fortran", McGraw-Hill, New York, 1973.
14. B. Carnahan, H. A. Luther, and J. D. Wilkes, "Applied Numerical Method", John Wiley & Sons, 1969.
15. Y. C. Kim, C. Y. Kim, and S. C. Kim, *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 1009 (1991).
16. D. Mitra and A. Misra, *J. Appl. Polym. Sci.*, **36**, 387 (1988).
17. B. Wunderlich, "Macromolecular Physics", vol. 2, Academic Press, New York, 1976.
18. A. Davidoff, F. Jacque, and H. Bung, *SPE ANTEC '92*, 1882 (1992).
19. K. Yakemoto, T. Sakai, Z. Maekawa, and H. Hamada, *SPE ANTEC'93*, 2192 (1993).
20. D. W. Van Krevelen, "Properties of Polymers", Elsevier Sci. Pub., 1990.