

## 사출성형 공정에서 젯팅 현상에 관한 고찰

류민영\*

### A Study on the Jetting Phenomena in Injection Molding Process

Min-Young Lyu

#### Abstract

Surface defects in injection molded parts are due to the unsteady flow of polymer melt which are related to the geometries of cavity and gate, the operational conditions of injection and the rheological properties of polymer. In this study we have examined jetting phenomena in injection molding process for three kinds of PCs which have different molecular weight and structure, PBT and PC/ABS alloy with several injection speeds. We have used various cavity shapes that are tensile, flexural and impact test specimens with various gate and cavity thicknesses. Through this study we have observed that the formation of surface defect associated with jetting during filling stage in injection molding is strongly related to die swell. This means that the jetting is strongly affected by the elastic property rather than the viscous property in viscoelastic characteristics of molten polymer. Large die swell would eliminate jetting however, the retardation of die swell would stimulate jetting. In the point of mold design, reducing the thickness ratio of cavity to gate can reduce or eliminate jetting and associated surface defects regardless of magnitude of elastic property. It also enlarges process window that can produce steady flow of polymer melt in injection molding.

**Key Words** : Surface Defect, Rheological Property, Jetting, Injection Molding, Die Swell

#### 1. 서 론

사출성형 제품에 흔히 나타나는 표면결함은 flow mark, jetting, sink mark, weldline, 그리고 whitening 등등이 있는데 이들 표면결함 들은 사출성형 제품의 질을 저하 시키는 주요한 원인이며 특히 외장용으로 사

용될 경우에는 그 문제는 더욱 심각해 진다. 이러한 표면 결함 중 플라스틱 용융물의 유변학적 성질 뿐만 아니라 gate 및 cavity design과 가장 밀접한 관련이 있는 것은 jetting이다. Flow mark 및 jetting 과 관련하여 사출성형물의 표면결함에 대하여 많은 연구가 행하여져 왔으며<sup>(1-11)</sup> 이들 연구는 주로 jetting에 의한 flow ma

\* 서울산업대학교 금형설계학과

rk의 형성 mechanism에 대하여 다루고 있다. 또한 이러한 flow mark를 감소시키거나 없애기 위해서 사출성형공정의 작업조건과 gate의 dimension을 서로 관련지은 연구도 있다<sup>(5-7), 11</sup>. 사출성형 공정에서 flow mark의 원인이 되는 또 다른 특성은 flow instability와 melt fracture인데 이는 고분자 용융물이 gate와 cavity를 통과할 때 받는 전단응력과 밀접한 관계가 있다<sup>(6,7,12,13)</sup>. 이들은 고분자 용융물의 층류유동의 streamline을 파괴하여 수지가 금형 안에서 고화 된 후 flow mark가 형성되게 한다. 고분자 용융물은 점탄성 성질을 갖고 있는데 이중 탄성은 jetting 형성과 매우 밀접한 관련이 있으며 이러한 탄성은 전단속도가 클수록 증가한다<sup>(9,13)</sup>. Jetting현상은 적절히 높은 전단속도에서 감소되거나 제거될 수 있다<sup>(9)</sup>. 반면 높은 전단속도는 전단응력을 증가시키고 높은 전단응력은 melt instability를 야기하며 이 또한 flow mark등의 표면결함의 원인이 된다<sup>(6,7,12,13)</sup>. 대부분의 표면결함에 관련한 연구들은 매우 제한적인 요인들에만 초점을 맞추었으며 고분자 용융물의 유변학적 특성과 관련지은 gate 및 cavity의 dimension에 대해서는 많은 연구가 없었다. 본 연구에서는 PC, PBT, PC/ABS alloy등 유변학적 성질이 다른 고분자 재료를 사용하여 gate와 cavity의 dimension, 그리고 사출성형 공정 중 고분자 용융물의 유변학적 성질이 jetting과 이로 인한 표면결함에 미치는 영향에 대하여 연구 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 재료 및 특성

본 실험에서 사용한 고분자는 polycarbonate (PC), polybutylene terephthalate (PBT), polycarbonate/acrylonitrile butadiene styrene (PC/ABS) alloy 등의 engineering plastic 재료를 사용하였다. 이중 PC의 경우는 분자량과 분자구조가 고분자 용융물의 유동과 표면결함에 미치는 영향을 파악하기 위하여 선형의 저분자량 PC (PC1), 선형의 고분자량 PC (PC2), 그리고 분지화 된 PC (PC3)를 사용하였다. PC/ABS alloy의 경우엔 PC와 ABS가 무게비로 70:30의 조성을 갖는 것을 사용하였다. 본 실험에 사용된 모든 수지는 (주)삼양사의 것이 사용되었으며 table 1에 요약하였다.

사용된 수지의 점도, 저장탄성계수, 손실탄성계수 그리고 위상차 등의 유변학적 성질을 ARES (Advanced Rheometric Expansion System) rheometer 및 capillary

rheometer (Rosand, Advanced Rheometer System)를 사용하여 측정하였다. 그리고 각 수지의 die swell은 melt index (Tinius Olsen Testing Machine Co.)기기를 사용하여 측정하였으며 이때 die의 지름과 L/D는 각각 2mm와 4를 사용하였다.

Table 1 Tested Materials for this Experiment

Polymer	Grade	Structure/Mw	
Polycarbonate	PC1	TRIREX® 3022	Linear/23,500
	PC2	TRIREX® 3030	Linear/31,000
	PC3	TRIREX® 3026	Branched/30,500
PBT	TRIBIT® 1700S		
PC/ABS Alloy	TRILOY® 215NA		

### 2.2 사출성형

사출성형에서 jetting과 이에 따른 표면결함을 조사하기 위해서 Battenfeld사의 사출성형기 (형체력 75ton)를 사용하였다. 사출기 노즐에서의 사출속도 (체적속도)는 20.4 (low), 54.4 (medium), 88.4 cm/sec (high)의 세가지로 실험하였으며 이때 사출압은 127 MPa로 고정시켜서 조작하였다. 사출압은 cavity 내에서 수지의 흐름에 영향을 미치는 요인이나 사출압과 사출속도는 상호연관관계에 있기 때문에 사출속도만을 변화시키며 실험을 수행하였다. 모든 시편형태는 기계적 물성 평가를 위한 ASTM 규격에 따른 형상이며 실험에 사용된 금형의 cavity와 gate의 치수는 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에서는 사출성형의 충전 단계에서의 flow pattern을 관찰하기 위하여 injection screw의 stroke를 조절하여 인위적으로 short shot이 일어나도록 하였다.

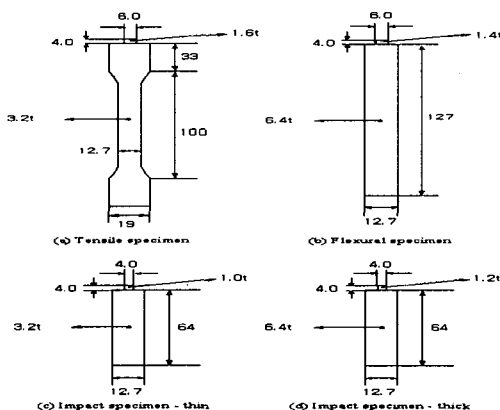


Fig. 1 Dimensions of cavities and gates for the experiment of injection molding (Unit : mm)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 재료의 유변학적 물성

본 연구는 점도가 같은 상태에서 그 외의 서로 다른 유변학적 성질이 금형 내에서 흐르는 수지에 미치는 영향을 보기 위함이므로 점도를 같게 하기 위해 각 수지의 측정온도를 달리 하였다. 그리고 그 온도에서 다른 유변학적 물성을 측정 하였다. Fig. 2는 전단점도를 보여주고 있는데, 다섯 가지의 수지가 사출성형이 이루어지는 전단변형을 영역에서 유사한 점도를 보이고 있다. 이때의 온도는 PC1은 290 °C, PC2와 PC3는 325 °C, PBT는 240 °C이며 PC/ABS는 260 °C이다.

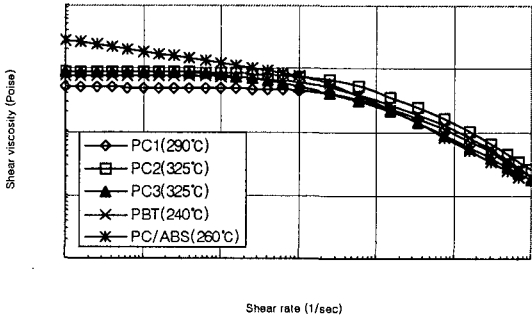


Fig. 2 Viscosity curves of PCs, PBT and PC/ABS alloy

Fig. 3에 저장탄성계수, 손실탄성계수 그리고 위상차를 나타내었고 Fig. 4에는 die swell의 측정결과를 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4를 검토해 볼 때 사용된 다섯 종류의 수지는 같은 점도에서 탄성의 차이가 크게 있음을 알 수 있다. PC/ABS가 탄성이 가장 크고 PC1과 PBT가 상대적으로 작음을 알 수 있다.

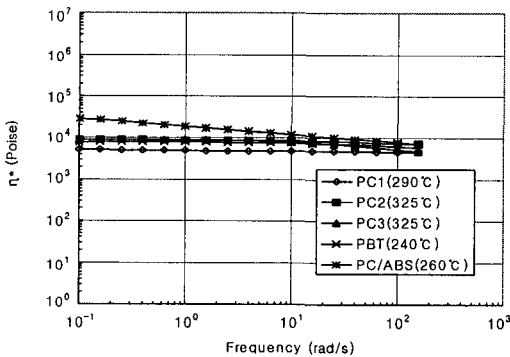


Fig. 3 Viscosity curves of PCs, PBT and PC/ABS alloy

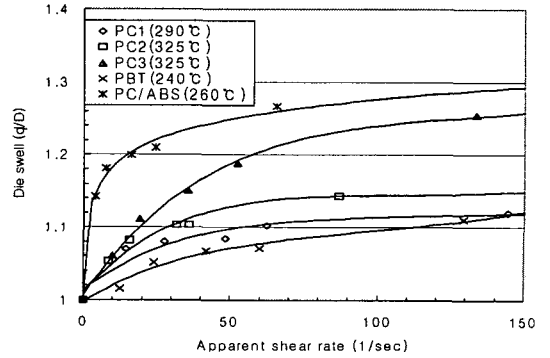


Fig. 4 Die swells of PCs, PBT and PC/ABS alloy

#### 3.2 사출실험 결과

##### 3.2.1 인장시편

PC, PBT, PC/ABS의 서로 다른 사출속도에서의 인장시편의 short shot 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다. PC와 PBT의 경우엔 모든 사출속도에서 흐름이 매우 안정적이며 jetting과 flow mark는 나타나지 않았다. 그러나 PC/ABS의 경우엔 Fig. 5(e)에서 보는 것처럼 모든 사출속도에서 jetting이 발생하였다. PC/ABS의 충전 pattern은 gate를 통과한 용융수지가 gate주위를 완전히 채우지 않고 cavity 끝부분까지 뿔어 나갔으며 용융물의 선단이 cavity의 끝부분에 다다른 후에야 gate주위를 다시 채우면서 cavity에 충전되고 있다. 이렇게 충전 pattern이 균일하지 않은 경우에는 용융수지가 금형 내에서 고화된 후 표면에 광택이 있는 부분과 없는 부분을 동시에 갖게 된다. 용융물이 금형에 충전되면서 층류유동을 하여 금형 표면과 닿는 부분은 광택이 있고 그렇지 않은 유동에 의해 접촉되는 부분은 광택이 없다.

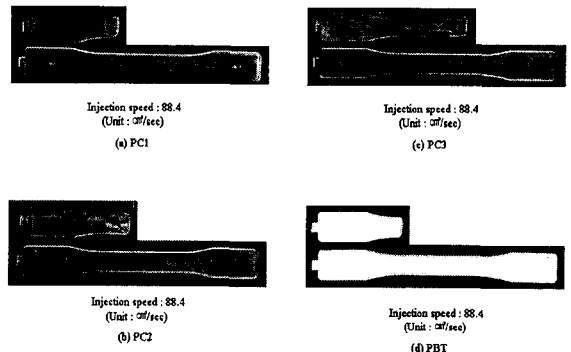


Fig. 5 Short shot experiment of tensile specimen with different injection speed

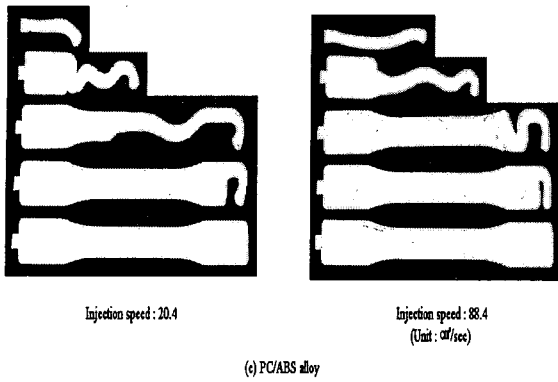


Fig. 6 Short shot experiment of tensile specimen with different injection speed (continued)

### 3.2.2 굴곡시편

굴곡시편의 short shot 실험결과는 Fig. 6에 나타나 있다. PC1과 PC2는 모든 사출속도에서 jetting이 나타나지 않았으며 (Fig. 6(a), (b)), PC3는 사출속도에 관계없이 매우 심한 jetting현상을 보이고 있다 (Fig. 6(c)). PC3의 충전 pattern은 충전 초기단계에서 gate를 빠져나온 용융수지가 cavity 폭보다 좁은 쪽으로 cavity의 끝부분까지 흐른 후 cavity의 끝부분에서 수지가 어느 정도 누적된 후에 gate주위를 채우기 시작하였다. PBT의 경우는 수지의 유동이 매우 안정적이며 모든 사출속도에서 jetting 이 발생하지 않았다 (Fig. 6(d)). PC/ABS의 경우에는 모든 사출속도에서 jetting이 발생하였다 (Fig. 6(e)). PC/ABS의 용융수지가 cavity 폭보다 좁은 쪽으로 cavity 끝까지 진행된 후 gate 부위부터 폭이 점차 넓어지면서 cavity를 채우고 있다.

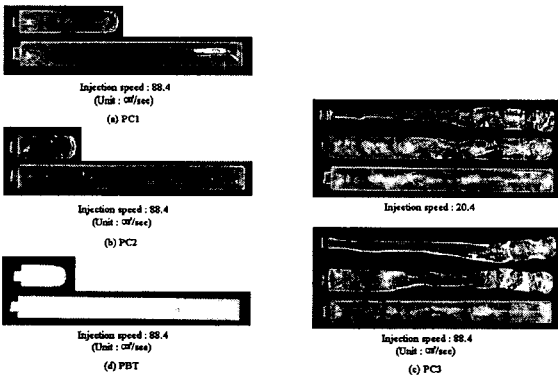


Fig. 7 Short shot experiment of flexural specimen with different injection speed

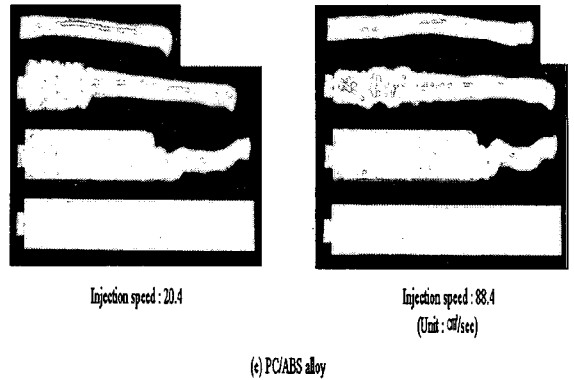


Fig. 8 Short shot experiment of flexural specimen with different injection speed (continued)

### 3.2.3 충격시편 thin (3.2 mm)

모든 PC와 PBT는 모든 사출속도에서 수지의 흐름이 안정적이었고 jetting이 없어 표면결함도 관찰되지 않았다 (Fig. 7). PC/ABS는 실험의 가장 낮은 사출속도에서는 (Fig. 7(e)의 injection speed 20.4 cm/sec) jetting이 일어나지 않았으나 중간 및 높은 사출속도에서는 (Fig. 7(e)의 injection speed 54.4와 88.4 cm/sec) jetting이 발생하였다. 충전 pattern은 PC/ABS의 굴곡시편의 경우와 유사하다.

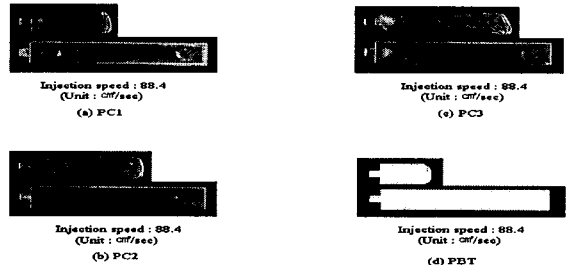


Fig. 9 Short shot experiment of impact-thin specimen with different injection speed

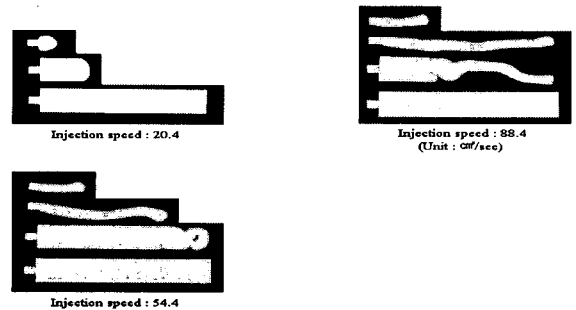


Fig. 10 Short shot experiment of impact-thin specimen with different injection speed (continued)

### 3.2.4 충격시편 thick (6.4 mm)

6.4 mm 충격시편의 short shot 실험결과는 Fig. 8에 나타나 있다. 모든 PC의 경우에 jetting 현상이 관찰되었으나 PC의 종류에 따라서 그 양상이 약간씩 다르다. PC1의 경우에는 낮은 사출속도 (20.4 cm/sec)에서 수지의 흐름이 불연속적으로 적층되면서 jetting이 생기고 cavity를 채운다. 사출속도가 증가하면 jetting이 일어난 후 용융수지가 꼬여지면서 cavity를 채운다.

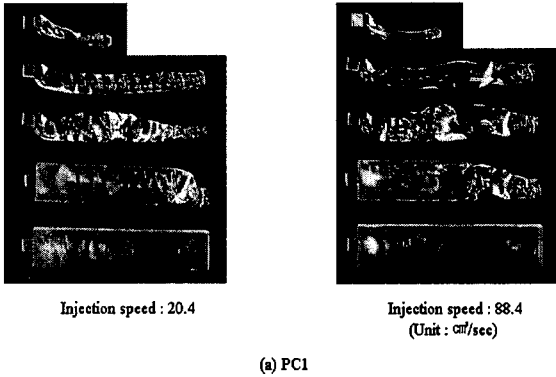


Fig. 11 Short shot experiment of impact-thick specimen with different injection speed

이러한 현상 때문에 PC1의 시편 표면에 광택 부분과 무광택 부분이 교대로 나타나는 flow mark가 생성되어 있다. PC2의 경우에는 낮은 사출 속도에서는 용융수지가 cavity 길이의 절반 정도까지 jetting된 후 gate 주위부터 다시 채워 나가고 있으며 gate 주위에서 매우 미미한 flow mark가 나타나고 있다. 중간 이상의 사출속도에서는 jetting이 심화되며 gate에서 분출된 수지가 cavity 끝에까지 다다른 후 gate 주위부터 다시 채워지고 있다. Flow mark는 사출속도가 증가함에 따라서 점점 더 뚜렷해지고 있다. PC3의 경우에는 모든 사출 속도에서 jetting이 cavity의 끝까지 이르렀으며 그 후에 수지가 cavity를 채우고 있다. 이러한 불균일한 충전 현상 때문에 심한 flow mark의 표면결합이 시편에 나타나 있다. PBT는 모든 사출속도에서 jetting 및 flow mark가 나타나지 않았다 (Fig. 8(d)). PC/ABS는 모든 사출속도에서 jetting이 발생하였고 jetting된 용융수지가 마치 screw처럼 꼬여지면서 전체 cavity를 채워가고 있다.

### 3.3 고찰

실험결과와 고찰을 위해 실험의 결과를 table 2에 정리

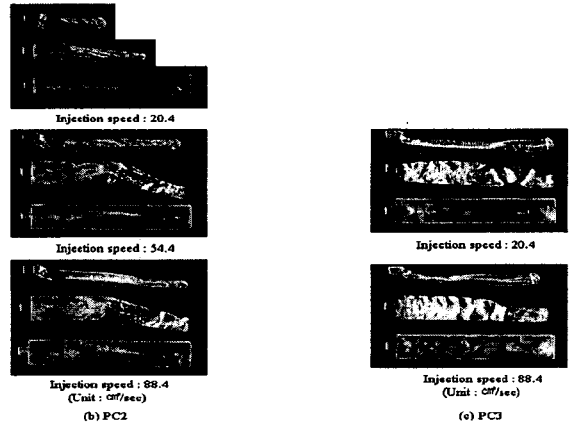


Fig. 12 Short shot experiment of impact-thick specimen with different injection speed (continued)

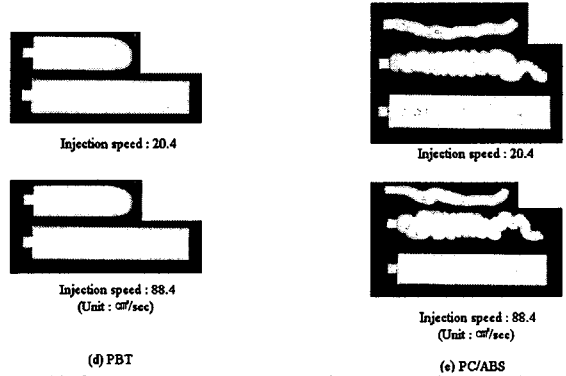


Fig. 13 Short shot experiment of impact-thick specimen with different injection speed (continued)

하였다. 본 고찰에서는 수지의 유변학적 성질과 cavity와 gate의 dimension이 flow에 미치는 영향을 분석하고 이것이 표면결합에 어떻게 작용하는지에 대하여 논의하고자 한다.

### 3.3.1 수지의 점도가 유동에 미치는 영향

본 실험에서 사용한 수지의 점도는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 PC/ABS의 낮은 전단변형속도 (10-101 rad/sec)의 경우를 제외하고는 수지별로 차이가 거의 없다. 특히 실제 사출성형시의 전단변형 속도인 103 rad/sec 이상에서는 다섯 가지 수지 모두 큰 차이를 보이지 않았다. 모든 수지의 점도가 비록 유사하지만 flow pattern은 short shot 실험의 결과에서 보는 바와 같이 서로 다른 것을 알 수 있다. 이들 실험결과는 흐름성이 충분한 점도에서 성형품의 표면결합을 야기하는 인자는 점도 보다는 그 외의 다른 유변학적 성질이 큰

영향을 주고 있음을 시사한다.

### 3.3.2 수지의 탄성이 유동에 미치는 영향

고분자 용융물은 점탄성 성질을 가지며 이는 탄성과 점성으로 나누어 생각할 수 있다. 이들 특성을 대변하는 전형적인 값들로는 Fig. 3에 나타난 저장탄성계수 ( $G'$ )와 손실탄성계수 ( $G''$ )가 있다. 또한 고분자 용융물의 탄성을 나타내는 특성은 die swell 이다 (Fig. 4). 즉 탄성변형의 복원이 die swell 이다<sup>13, 14</sup>. 탄성이 큰 수지는 높은  $G'$ 값과 적은 위상차 ( $\tan \delta$ ), 그리고 큰 die swell을 갖는다. 사출성형에 있어서 금형의 gate에서 die swell은 jetting을 방지할 수 있다<sup>8, 9</sup>. 그것은 swell된 고분자 용융물이 금형의 두 표면에 쉽게 접촉해 매우 안정된 흐름을 주어 jetting이 일어나는 것을 방지할 수 있기 때문이다. 그러나 본 실험에서 die swell이 작은 수지와 (PC1, PC2, PBT) 큰 수지를 (PC3, PC/ABS) 비교해 보면 위의 설명과는 상반되게 die swell이 큰 수지가 jetting이 더 많이 일어난 것을 알 수 있다. 이는 jetting에 영향을 주는 요인은 die swell의 크기 뿐만이 아니라 die swell의 retardation 시간, 즉 die를 빠져 나온 수지가 최대 swell을 일으키는 시간, 또는 capillary die 끝에서부터 최대 swell된 부분까지의 거리 역시 jetting에 영향을 미치기 때문이다. 고분자 용융물이 좁은 단면적을 가진 곳을 통과할 때 고분자 chain들이 흐름방향에 평행하게 배향되게 되고 이 배향된 고분자 chain들이 큰 단면적을 갖는 장소로 빠져 나왔을 때 고분자 chain의 배향이 풀어지게 되고 결과적으로 die swell이 일어나게 된다. 이러한 현상이 molecular relaxation과 die swell 이다<sup>13</sup>. 이러한 molecular relaxation은 탄성변형의 회복인데 이 회복은 즉시 일어나는 것이 아니라 얼마간 시간이 지연된 후 나타난다. 따라서 gate를 빠져 나온 용융수지는 die swell이 생기기까지 얼마간의 거리를 전진하게 되는데 이 거리는 흐름의 속도와 die swell의 retardation 시간과 같은 수지의 특성에 영향을 받는다. 용융수지의 retardation 시간이 큰 경우에는 gate를 통과한 수지가 두 금형 표면에 바로 접촉하지 않고 긴 거리를 전진하게 되며 이는 jetting을 촉진시킨다. 이러한 현상은 모든 PC/ABS 시편과, PC의 경우 gate두께에 비해 cavity의 두께가 두꺼운 6.4 mm 두께의 충격시편에서 볼 수 있다.

### 3.3.3 분자량 및 분자구조가 유동에 미치는 영향

분자구조가 다른 수지는 서로 다른 용융특성을 보이게 된다. 분자량이 높은 수지의 용융물은 분자량이 낮은 수지의 용융물에 비해서 탄성이 더 크며 분자구조를 갖고 있는 고분자는 선형 고분자에 비해 높은 탄성을 갖는다<sup>15</sup>. 본 실험에서 흐름성, 즉 점도가 같은 상태에서 수지간 분자량의 차이가 유동 현상에 미치는 영향을 파악할 수 있는데 분자구조는 같고 분자량이 다른 PC1과 PC2의 6.4 mm 두께의 충격시편에서 확인할 수 있다. PC1과 PC2의 점도를 맞추기 위해 서로 다른 온도에서 사출하였고 점도가 같은 각각의 온도에서 분자량이 큰 PC2가 PC1 보다 큰 die swell을 가지게 되며 낮은 사출속도에서 jetting 발생이 적다. 분지화 된 구조를 가지고 있는 PC3의 경우엔 비슷한 분자량에 선형 구조를 가진 PC2에 비해서 jetting현상이 두드러지는데 이는 분지화 된 구조가 선형구조에 비해 diffusion 속도가 느려 retardation 시간이 길어지기 때문으로 생각할 수 있다<sup>15</sup>. 이러한 현상은 6.4 mm 두께의 충격시편과 굴곡시편에서 확인할 수 있다.

### 3.3.4 Gate와 cavity의 dimension이 유동에 미치는 영향

Gate의 dimension은 전단변형속도와 연관하여 jetting에 영향을 미친다. Die swell과 retardation 시간은 전단속도와 밀접한 관계에 있으며 전단속도가 커질수록 증가한다<sup>13</sup>. 6.4 mm 두께의 충격시편과 굴곡시편은 이러한 gate의 효과를 잘 반영해주고 있다. 6.4 mm 두께의 충격시편의 gate dimension은 4 mm 폭에 1.2 mm 두께이며 굴곡시편은 6 mm 폭에 1.4 mm 두께를 가진다. 두께가 얇은 gate는 높은 전단속도를 야기하며 큰 die swell을 가져오며 또한 retardation 시간이 길어지게 된다. 따라서 1.2 mm의 게이트 두께를 갖는 충격시편은 매우 심한 jetting을 보이고 있다. Cavity의 두께도 역시 jetting에 영향을 미친다. Die swell이 같을 경우 cavity의 두께가 얇으면 jetting을 방지할 수 있다. 그러므로 jetting은 용융물의 die swell보다 cavity의 두께가 두꺼운 6.4 mm 두께의 충격시편에서 빈번히 발생하며 3.2 mm 두께의 충격시편에선 거의 일어나지 않고 있다. Cavity와 gate의 두께비, 즉 thickness ratio ( $TR = \text{cavity두께} / \text{gate두께}$ )는 jetting과 표면결합의 형성에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. Cavity의 두께가 gate의 두께에 비해 크게 두껍지 않다면, 즉 TR이 작은 경우에는 jetting을 방지

Table 2. Results of Injection Molding Experiments and Die Swell

	T.R.* (T/t)	PC1			PC2			PC3			PBT			PC/ABS			
		Injection speed (cm/sec)															
		20.4	54.4	88.4	20.4	54.4	88.4	20.4	54.4	88.4	20.4	54.4	88.4	20.4	54.4	88.4	
S p e c i m e n	Tensile	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	J	J	J
	Impact-Thin	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	J	J
	Flexural	4.6	-	-	-	-	-	J	J	J	-	-	-	J	J	J	
	Impact-Thick	5.3	J	J	J	Ⓧ	J	J	J	J	J	-	-	-	J	J	J
Die swell ( $d_s/D$ )**		1.11			1.15			1.26			1.11			1.29			

\* : T.R. (T/t) : Thickness ratio of cavity to gate, \*\* : Die swell at shear rate 150 sec<sup>-1</sup>,  $d_s$  : diameter of strand, D : diameter of capillary

Ⓧ : Observed jetting and surface defect, J : Observed small jetting and no surface defect, - : Observed steady flow and no surface defect

하기 위해 큰 die swell을 필요로 하지 않는다. 이는 TR이 작은 경우에는 die swell이 크며 retardation 시간이 짧은 경우와 유사한 영향을 미치기 때문이다. 이는 TR이 작은 인장시편과 3.2 mm 두께의 충격시편에서 알 수 있다. Table 2 에서 보는 바와 같이 TR이 증가하면 jetting도 심화된다. Jetting에 기인하여 생기는 표면결함은 수지의 유변학적 특성에 따라 다르기 때문에 jetting을 막기 위해서는 수지마다의 gate와 cavity의 설계가 중요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 PC, PBT, PC/ABS alloy 등의 각기 다른 수지에 대해 사출성형 공정에서의 jetting과 그에 따른 표면결함의 형성에 대하여 조사하였다. Jetting은 수지의 점탄성 성질에 의존하는 현상이다. 전단변형속도가 증가함에 따라 수지의 탄성도 증가한다. 탄성이 큰 수지는 gate에서의 die swell이 크며 이는 jetting을 방지한다. 반면 전단속도가 커짐에 따라 retardation 시간 역시 증가하며 이는 jetting을 증가시킨다. 따라서 die swell이 크고 retardation 시간이 짧은 수지가 jetting을 막아 표면상태가 좋은 사출 성형품을 얻는데 유리하다. Gate와 cavity의 dimension 역시 사출성형에서 jetting에 영향을 주는 중요한 요인이다. Gate의 dimension, 특히 gate의 두께가 gate를 통과하는 용융물의 전단변형속도에 직접적으로 영향을 미친다. Jetting현상에서 가장 중요한 영향을 주는 인자는 cavity와 gate의 두께의 비, 즉 thickness ratio (TR)이다. TR이 작으면 수지의 유변학적 특성 및 사출속도에 크게 좌우됨이 없이 jetting을 효과적으로 방지할 수 있고 이로 인한 표면결함을 줄이거나 없앨 수 있다.

#### 참고 문헌

1. M.C.O. Chang, SPE ANTEC Tech. Papers, 40, 360(1994)
2. M.C.O. Chang, Intern. Polym. Proc., 11, 76(1996)
3. M. Yoshii, H. Kuramoto and K. Kato, Polym. Eng. Sci., 33, 1251(1993)
4. M. Yoshii, H. Kuramoto, T. Kawana and K. Kato, Polym. Eng. Sci., 36, 819(1996)
5. H. Yoko, S. Nagami, A. Kawasaki, and Y. Murata, SPE ANTEC Tech. Papers, 40, 368(1994)
6. M.C. Heuzey, J.M. Dealy, D. M. Gao and A. Garcia-Rejon, Intern. Polym. Proc., 12, 403(1997)
7. H. Hamada and H. Tsunawa, J. of Appl. Polym. Sci., 60, 353(1996)
8. J. L. White and W. Dietz, Polym. Eng. Sci., 19, 1081(1979)
9. K. Oda, J. L. White and E. S. Clark, Polym. Eng. Sci., 16, 585(1976)
10. 신희철, 양승관, 류민영, 한국고분자학회 연구논문초록집, 제24권 2호, 72 (1999)
11. D.M. Gao, K.T. Nguyen, P. Girard and G. Salloum, SPE ANTEC Techn. Papers, 40 712(1994)
12. S.Y. Hobbs, Polym. Eng. Sci., 32, 1489(1996)
13. C.D. Han, Rheology in Polymer Processing, Academic Press, NY, 1976
14. J.L. White, Principles of Polymer Engineering Rheology, John Wiley & Sons, NY, 1990
15. C.W. Macosko, Rheology : Principles, Measurements and Applications, Wiley-VCH, NY, 1994