



Analysis of the Physical Quantity Variation in the Cavity and the Quality of the Molded Product According to the Injection Speed in Injection Molding

Soon Yong Kwon, Jung Hwan Cho, Hyung Jin Roh, Sung Hwan Cho, Yoo Jin Lee*, and Min-Young Lyu*[†]

Samyang Central R & D Center, 730 Daedeokdae-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34055, Republic of Korea

**Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Republic of Korea*

(Received December 3, 2017, Revised December 13, 2017, Accepted December 14, 2017)

Abstract: Molding conditions can be described as factors that determine the quality of a product obtained from injection molding. Many studies have been performed on the injection molding pressure, injection temperature, packing pressure and other molding conditions related to part quality. However, the most accessible factor among the adjustable molding conditions during actual injection is the injection speed. In this study, we simulated the variation of the physical quantity according to injection speed and performed experiments to understand the effect of injection speed on the actual product. A CAE analysis program (Moldflow) was used to simulate and analyze the results using PC and PBT for two models. In order to compare these results with the experimental results, an actual injection molding was performed for each injection speed, and the correlation between simulation and injection molding, especially for the shrinkage of the molded article, was discussed.

Keywords: injection molding, injection speed, computer simulation, PC, PBT

Introduction

사출 성형은, 고분자 성형 공정 중 가장 정밀도가 높고 생산성이 높아 그 활용도가 가장 높다. 사출 성형은 고온의 플라스틱을 고압으로 금형의 캐비티에 주입한 후 냉각하여 제품을 성형한다. 사출 성형의 사이클은 가소화, 충전, 보압, 냉각의 모드로 이루어져 있다.¹ 이러한 성형 공정을 거치면서 제품이 형성되는데, 각 공정마다 공정설정은 제품의 품질에 영향을 미친다.^{2,3} 사출성형에 중요시 되는 공정 조건은 사출 속도, 사출압력, 보압 절환 위치, 보압 크기, 보압 시간, 수지 온도 그리고 금형 온도 등이다.⁴

사출속도에 대한 사출압력은 U커브를 보인다.⁵ 사출속도가 느리면 열 발생보다 냉각이 더 커서 유동선단 온도가 강하하여 점도가 증가하고, 고화층의 두께가 증가하여 유동저항이 증가하며, 사출압력이 상승한다. 반대로 사출속도가 빠르면 유동선단 온도는 상승하여 점도는 낮아지고 고화층의 두께는 줄어들지만, 고화층과 유동층 사이의 마찰저항이 크게 증가하여 오히려 사출압력이 증가한다.^{6,7} 따라서 캐비티 내에서 유동선단이 적절한 일정속도로 흐를 때 사출압력은 가장 낮아진다. 성형공정 입장에서 최적의 사출속도는 주어진 조건에서 사출압력이 최소가 되게 하는 것이다. 캐비티의 두께에

따라서도 사출속도는 달라져야 한다.⁸ 두께가 얇은 경우가 두꺼운 경우보다 금형에 의한 냉각으로 열 손실이 훨씬 크기 때문에 사출속도를 증가하여 전단 변형률을 높여 마찰열을 증가시켜야 유동선단의 온도는 일정하게 유지되고 사출압력도 낮아진다. 플라스틱 재료에 따라서 비열, 열전도율, 점도 등이 상당히 다르다. 온도변화에 따라서 점도 변화가 심한 재료(PC, PMMA)는 가파른 U 커브를 가지지만 그렇지 않은 재료(PP, ABS)는 완만한 U 커브를 가진다.⁹⁻¹¹ 사출속도는 이렇게 공정상에 큰 영향을 미치는데 이에 따른 체계적인 실험과 해석은 아직도 미진한 실정이다.¹²⁻¹⁴

본 연구에서는 컴퓨터 해석을 통해 두가지 모델 그리고 두가지 재료에 대하여 사출 속도에 따른 캐비티 내의 물리량 변화 및 제품의 성형 변형을 분석하였다. 그리고 컴퓨터 해석을 통해 분석한 시편의 변형과, 실제 실험을 통해 측정된 변형량의 차이를 비교하여 해석과 실험 결과를 비교 확인하고자 하였다. 이를 통해 최적 사출속도를 산출하는 기본적인 데이터를 확보하여 실제 상황에 응용하고자 한다.

Simulation and Experiment

1. Study model

Figure 1에 본 연구에서 사용한 모델의 형상과 치수를 나타

[†]Corresponding author E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

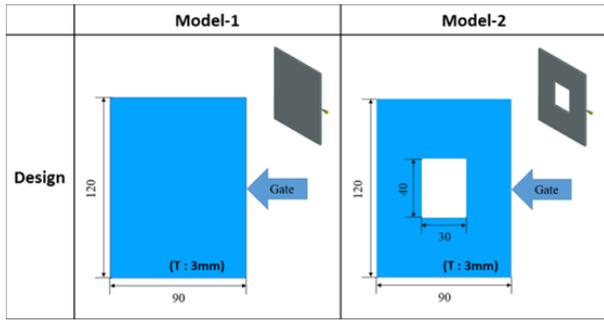


Figure 1. Two study model and dimensions (Model-1: Plate model, Model-2: Hole model).

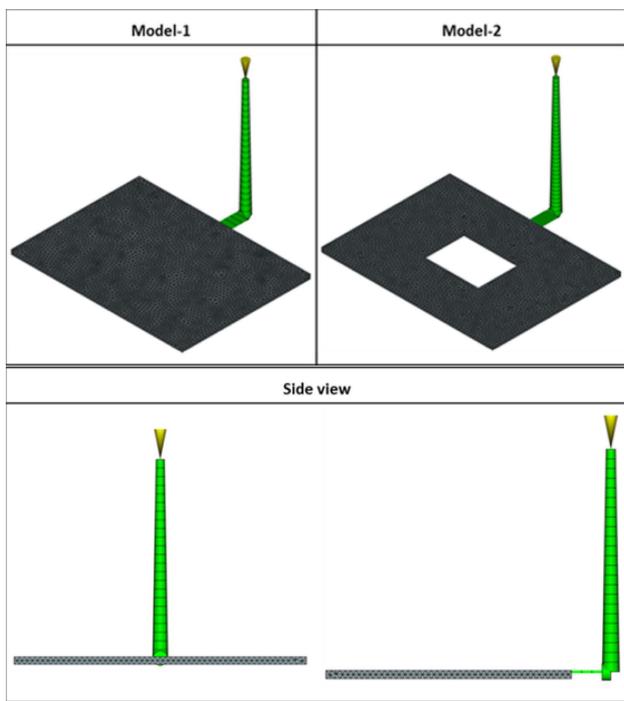


Figure 2. 3D modeling of study model and mesh generation for computer simulation.

내었다. 첫 번째 모델은 기본적인 판상형 시편으로 직사각형 모양을 하고 있어 기본적인 유동 흐름을 확인 하기 쉬우며, 두 번째 모델은 같은 크기의 직사각형 시편 내에 사각 홀이 존재하여 좀 더 복잡한 유동 흐름을 유도 할 수 있다.

Figure 2에 해석을 위한 본 연구에서 사용한 모델의 메시(mesh) 형상과 게이트 및 스프루, 런너를 나타내었다. 메시는 dual domain으로 작성하였으며, 실제 사출금형 제작 도면과 일치하는 스프루, 런너, 게이트 모양을 형성하여 해석에 사용하였다. 이는 해석과 실제 사출과의 비교 분석을 위한 것이다. Model 1의 경우 총 요소(element)의 수는 15,126개 이며, Model 2의 경우 총 요소 수가 14,006개 이다.

2. Materials

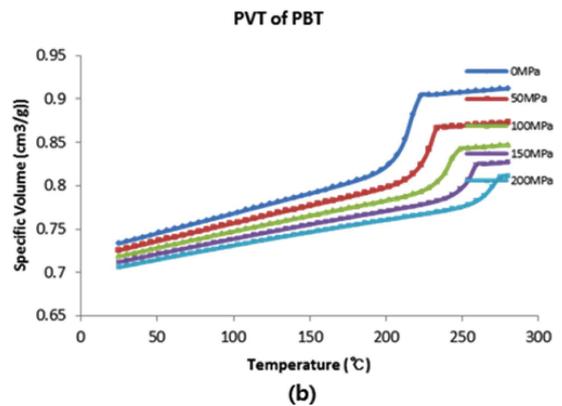
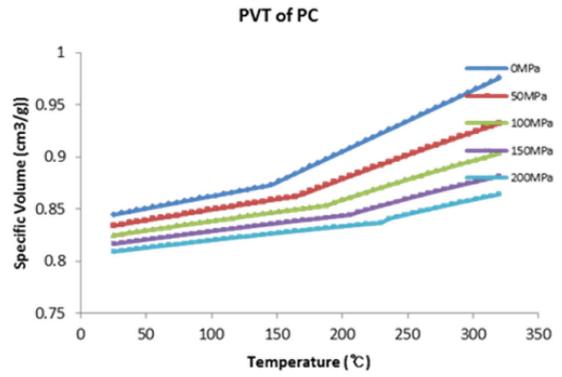


Figure 3. PVT diagram. (a) PC, (b) PBT

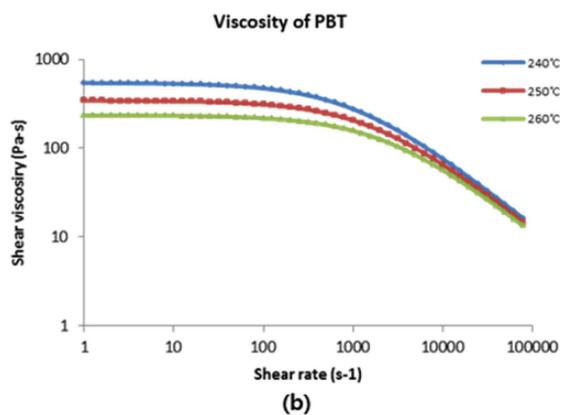
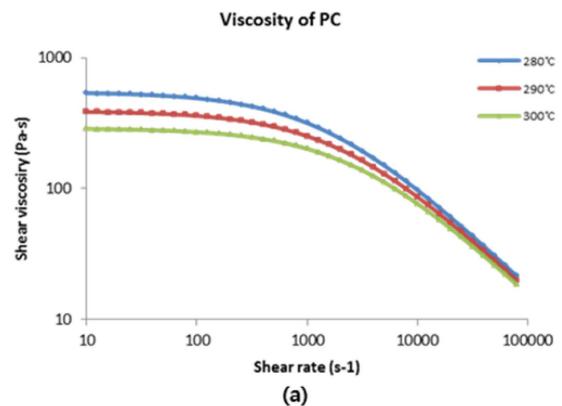


Figure 4. Shear viscosity curve. (a) PC, (b) PBT

Table 1. Information of Materials Used in This Study [PC]

Item	Method	Unit	Value
Specific gravity	ASTM D792	-	1.2
Melt index	ASTM D1238	gr/10 min, 300/1.2 kg	14

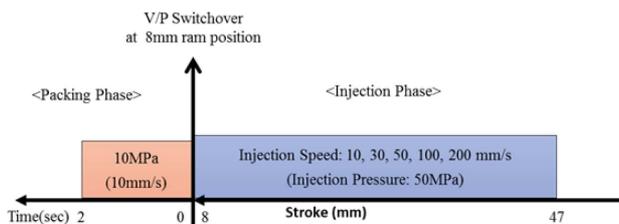
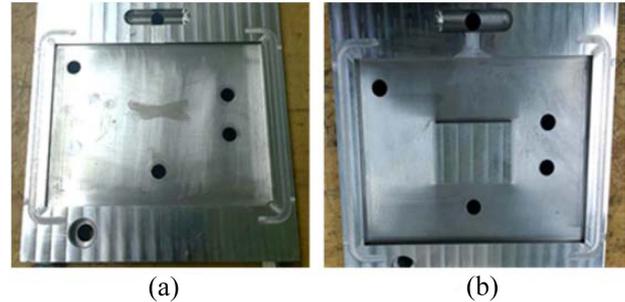
[PBT]

Item	Method	Unit	Value
Specific gravity	ASTM D792	-	1.3
Melt index	ASTM D1238	gr/10 min, 235/2.16 kg	11

본 해석 및 실험에 사용한 재료는 두 가지로, Polycarbonate (PC, TRIREX 3022L1-I2, SAMYANG)와 Poly Butylene Terephthalate (PBT, TRIBIT 1503, SAMYANG)을 사용하였다. Figure 4와 Figure 5에 본 연구에 사용한 두 수지의 PVT 선도 및 전단점도를 나타내었다. 고분자 점도는 온도가 높을수록, 전단 변형률(shear rate)이 클수록 줄어들기 때문에 3개의 온도에서 전단 변형률에 따른 점도를 측정하였다. Table 1에는 사용된 재료의 물성 정보를 나타내었다.

3. Injection molding condition

본 연구에서는 두 가지 모델과 두 가지 재료를 사용하여 해석 및 실험을 진행 하였다. 사출속도에 따른 경향성을 비교하

**Figure 5.** Injection molding condition for simulation and experiment.**Figure 6.** Picture of Injection molding machine used in this study.**Figure 7.** Mold for experiment. (a) Mold for Model-1, (b) Mold for Model-2**Table 2.** Information of Injection Molding Machine Used in This Study

Screw diameter	ϕ 32
Max. Injection Speed	400 mm/s
Max. Injection Pressure	202 MPa
Max. Packing Pressure	161 MPa
Clamping Force	110 Ton

고자, Figure 5과 같이 사출 조건을 설정하였다. 사출 온도 (PC: 290°C, PBT: 260°C), 금형 온도(80°C), 보압 절환 위치(8 mm), 보압 및 보압 시간(10 MPa/1 sec, 7 MPa/2 sec)은 고정 조건이며, 사출 속도를 10, 30, 50, 100 그리고 200 mm/s로 하여 해석과 실험을 진행하였다.

해석은 Moldflow를 사용하여 해석을 진행하였다.

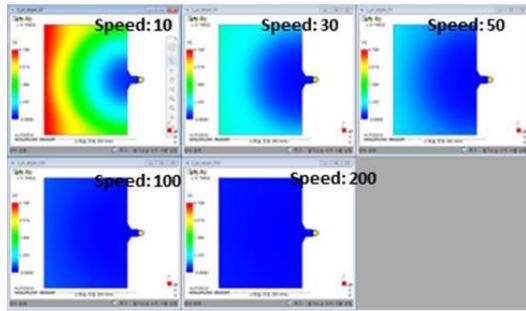
실제 사출 실험을 진행하고자 해석 모델과 동일한 치수를 가진 금형을 제작하여 사출을 진행하였으며(WOOJIN PLAIMM, TE110), 사출 조건은 해석 조건과 동일하게 진행하였다. Figure 6의 사출기를 이용해서 사출을 진행하였으며, Figure 7은 금형을 보여주고 있다. Table 2에 사출기의 기본 정보를 나타내었다.

Results and Discussion

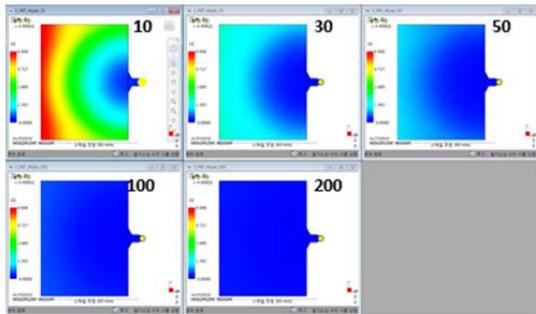
1. Simulation results

Figure 8~11까지는 해석 결과를 보여주고 있는데 각 그림에서 상단 왼쪽부터 오른쪽으로 사출 속도가 10, 30, 50 mm/s 이고, 하단 왼쪽부터 오른쪽으로 사출속도가 100, 200 mm/s 이다.

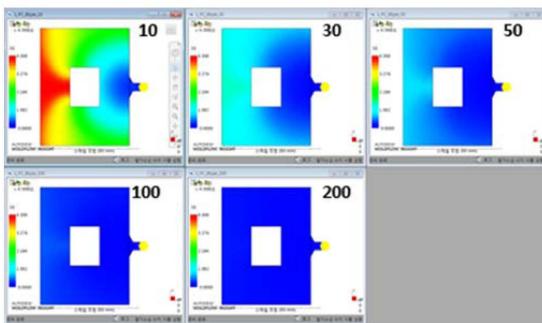
Figure 9는 사출 속도에 따른 충전 패턴이다. 모델 및 사출 속도에 따른 충전 시간에는 차이가 있으나, 충전 패턴은 사출 속도와 재료에 관계 없이 일정한 모양으로 사출이 진행된다. 사출 시간은 사출 속도에 영향을 가장 크게 받기 때문에, 10 mm/s의 사출 속도에서와 200 mm/s의 사출 속도에서의 총 사출에 걸리는 시간은 약 20배 차이로 추정되며, 실제 해석상



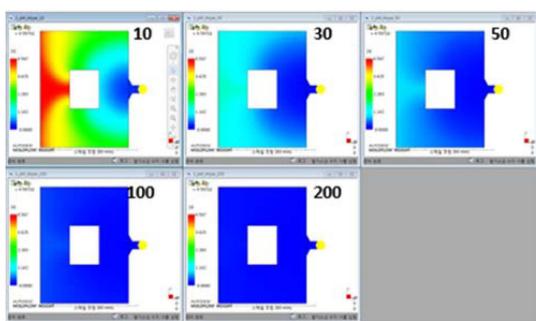
(a)



(b)



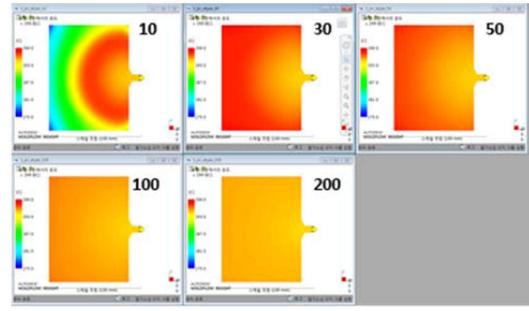
(c)



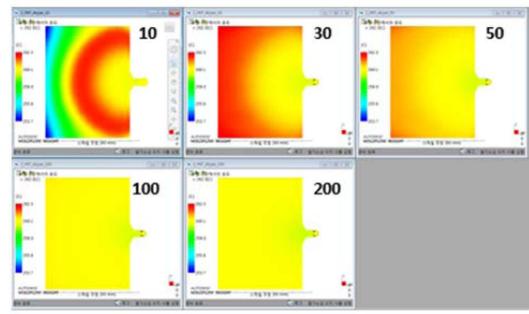
(d)

Figure 8. Flow pattern according to injection speed. (a) Model-1, PC, (b) Model-1, PBT, (c) Model-2, PC, (d) Model-2, PBT

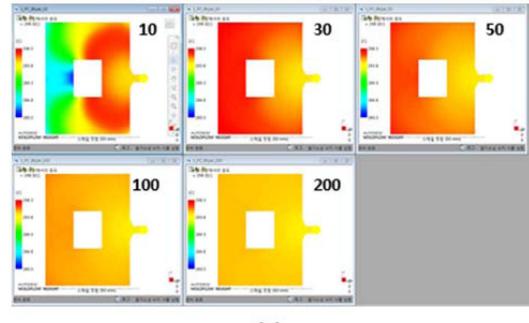
에서 걸리는 사출 시간의 차이도 17배 정도로 비슷한 수치임을 확인할 수 있다. 즉, 속도에 따른 유동 흐름의 변화는 크지 않으나, 완전 사출까지 걸리는 소요시간의 차이는 존재하며, 사출 속도로 인한 캐비티 내 수치 흐름에는 변화가 없을 것으로 예측 된다.



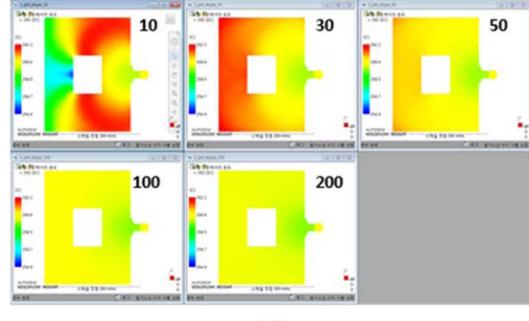
(a)



(b)



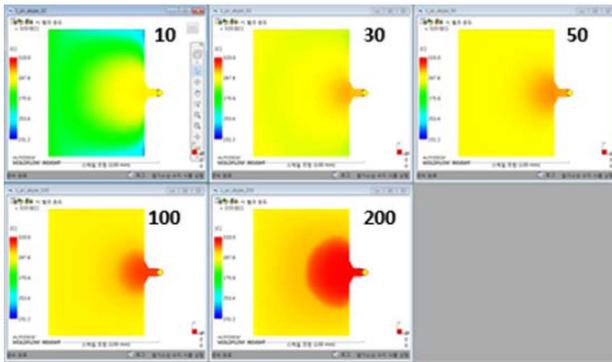
(c)



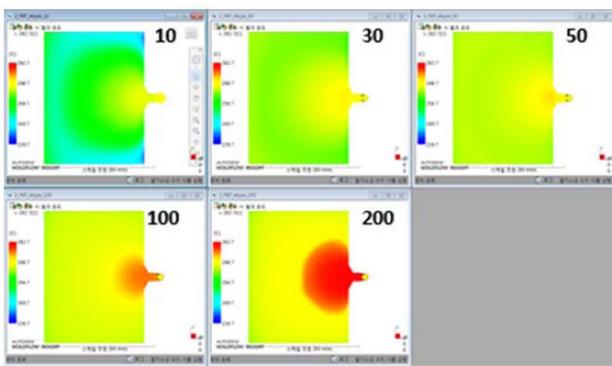
(d)

Figure 9. Temperature at melt front according to injection speed. (a) Model-1, PC, (b) Model-1, PBT, (c) Model-2, PC, (d) Model-2, PBT

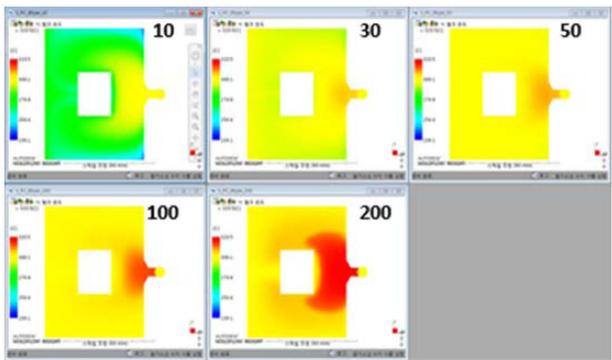
Figure 9는 사출 속도에 따른 유동 선단에서의 온도 분포이다. 사출 속도가 느릴수록 사출 시간이 길어져 금형 내에서의 온도 저하가 크게 일어난다(PC의 경우 30°C 이상, PBT의 경우 10°C 내외). 실제로 사출속도가 작을수록 전단 변형률 (shear rate)이 작아 온도 상승이 적을 것으로 예상되며, 사출



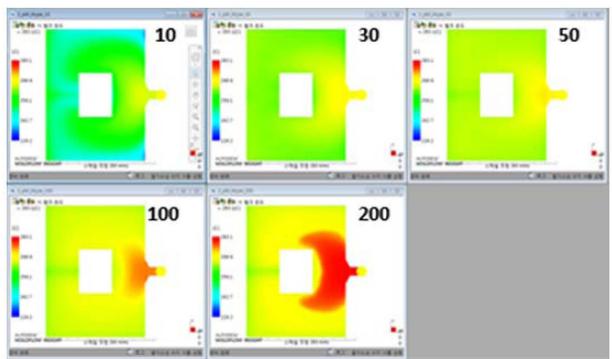
(a)



(b)

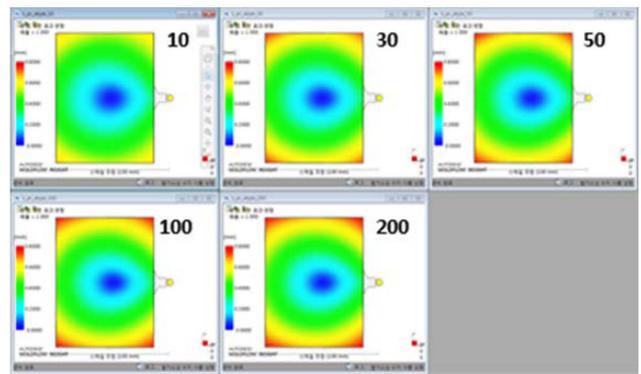


(c)

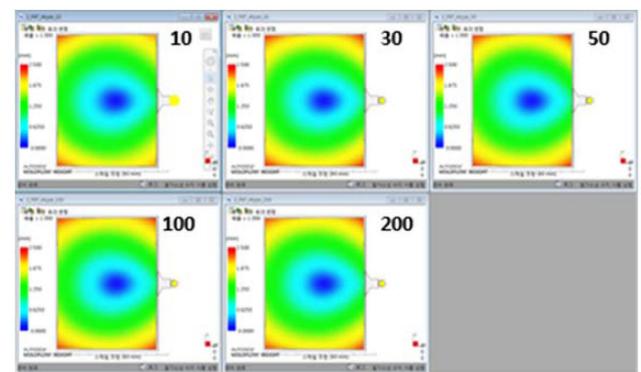


(d)

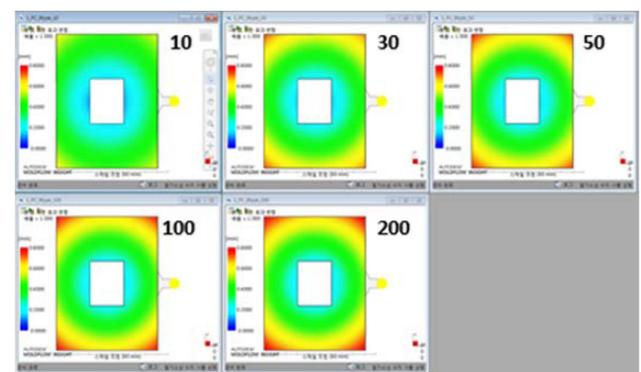
Figure 10. Temperature at the end of filling according to injection speed. (a) Model-1, PC, (b) Model-1, PBT, (c) Model-2, PC, (d) Model-2, PBT



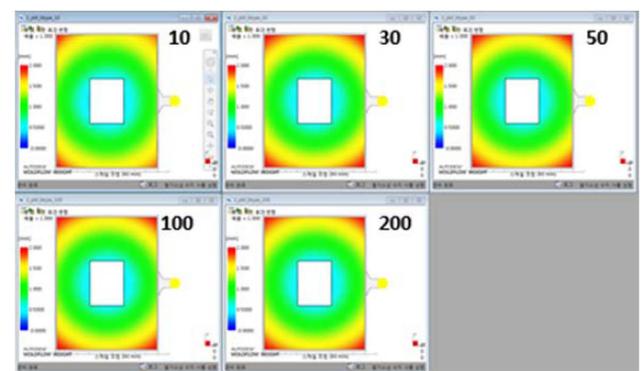
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 11. Deformation according to injection speed. (a) Model-1, PC, (b) Model-1, PBT, (c) Model-2, PC, (d) Model-2, PBT

속도가 클 수록 유동선단의 온도저하가 적고 온도가 균일함을 확인 할 수 있었다.

Figure 10은 사출 속도에 따른 사출 완료 시 성형품의 온도 분포이다. 사출 속도가 느릴수록, 게이트 반대 방향(유동 끝단) 온도가 매우 낮아진다(PC의 경우 30°C 이상, PBT의 경우 10°C 내외). 또한 사출 속도가 빠를수록 게이트 근처의 온도가 크게 증가 하는데, 이는 충전에 걸리는 시간이 짧으므로, 게이트 부위는 사출 온도와 거의 유사할 것으로 예상된다. 해석으로 나타난 위의 두 가지 온도분포(Figure 9와 Figure 10)를 통해 알 수 있는 점으로, 캐비티 내의 균일한 온도를 위한 사출 속도가 존재한다는 것을 확인 할 수 있다. 이는 금형에서의 냉각으로 인한 온도 편차가 가장 적은 속도 범위가 존재하는 것을 의미한다.

Figure 11은 사출 속도에 따른 사출 완료 시 성형품의 변형으로, X, Y, Z세 방향의 변형을 고려한 최종 변형이다. 이는 X, Y, Z축에서의 변형 효과를 종합하여 최종 변형이 어떠한 방향으로 이루어 졌는지를 확인 할 수 있는 자료이다.

사출속도가 빠를수록 변형이 더 커짐을 확인 하였다. PC의 경우, 최종 변형량(원점 기준)은 1 mm 이내이며, PBT의 경우 수축이 많이 일어나 2 mm 이상의 변형을 보인다.

온도에 따른 수축률 차이 및 결정화로 인한 수축(결정성 수치) 때문에 비결정성 수지(PC)와 결정성수지(PBT)의 변형량 차이가 크다.

2. Comparison with simulation and experiment

사출 금형을 이용 하여 두 가지의 재료를 가지고 사출 성형 실험을 실시하였다. 사출 성형에 사용된 재료는 충분한 건조시간을 가지고 사출을 진행하였으며, 각 사출 조건에서 5개



Figure 12. Injection molded specimen for PC.

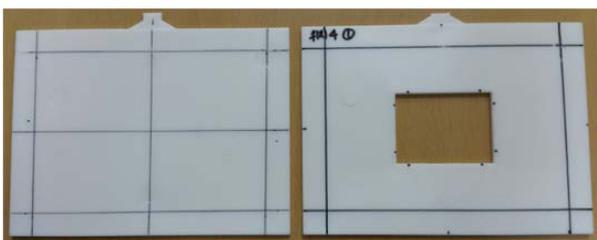


Figure 13. Injection molded specimen for PBT.

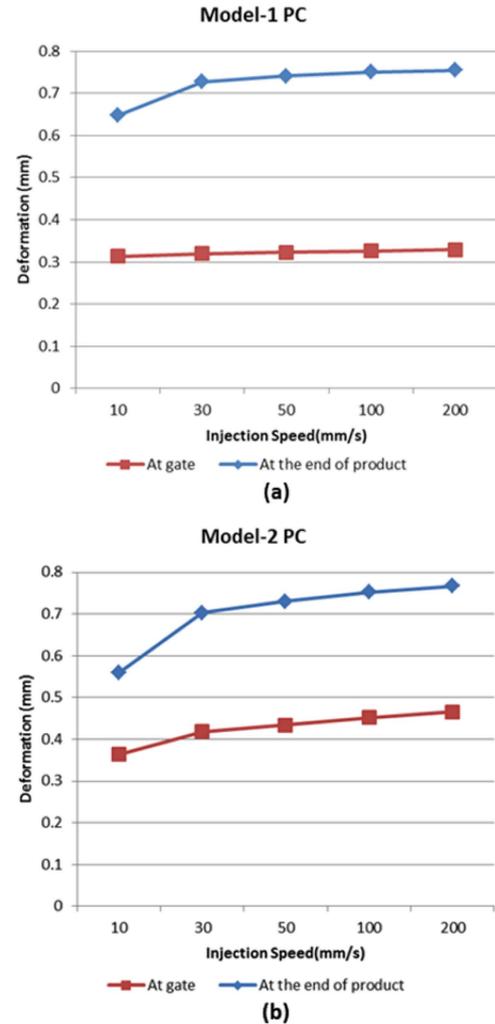


Figure 14. Variation of deformation in simulation according to injection speed. (a) Model-1, PC, (b) Model-2, PC

의 시편을 취합해 변형 값을 측정 하였다. 아래의 Figure 13과 14는 실제 사출 성형으로 제작한 시편이다.

Figure 14에 PC의 사출속도에 따른 변형해석 결과를 정리 하였다. 해석상 결과로는 사출 주입점(게이트 부분)과 유동 선단 끝부분(제품의 끝부분)의 변형량 비교 결과, 사출 속도가 느릴 수록 최대 변형량이 적음을 확인하였다.

Figure 15에 PBT의 변형해석 결과를 속도에 따라 정리하였다. 30 mm/s에서의 변형이 가장 크고, 10 mm/s에서의 변형이 가장 작음을 확인 하였다. PBT의 경우, PC와는 상이한 결과가 나왔다. 사출 속도가 클수록 캐비티 내의 온도가 높고, 따라서 냉각 시간이 길어짐에 따라 결정성 수치인 PBT의 경우 결정화도가 높아져 변형이 커질 수 있다. 그러나 속도가 너무 크게 되면 전단에 의한 열 발생이 커져 수지의 점도가 낮아지고 흐름성이 좋아져서 결국 이는 수지가 캐비티 내에 잘 채워지게 된다. 결국 사출속도가 매우 크게 되면 수지가 캐비티 내에 패키징이 잘 되어서 변형이 작을 수 있음을 보여준다.

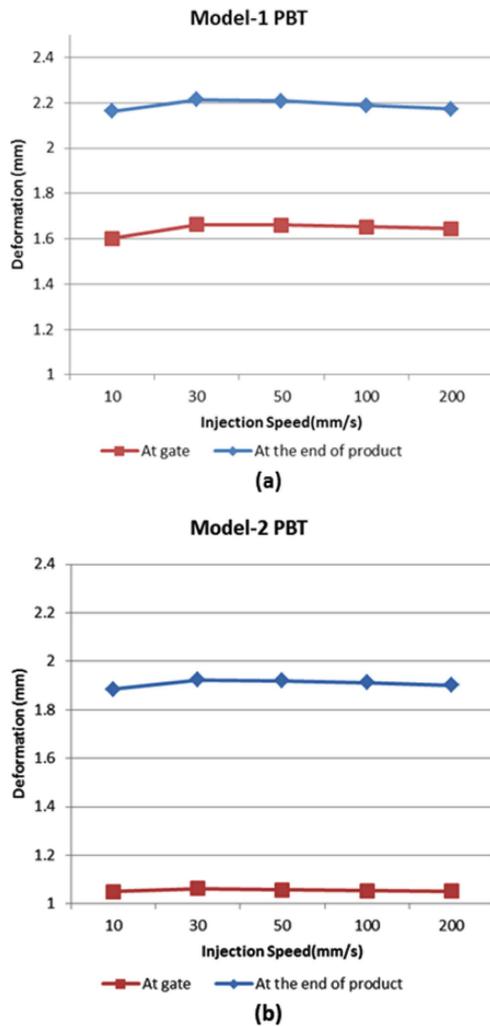


Figure 15. Variation of deformation in simulation according to injection speed. (a) Model-1, PBT, (b) Model-2, PBT

Figure 16에서는 PC의 실제 사출 후 측정된 변형결과를 속도에 따라 정리하였다. 해석상 결과로는 사출 주입점(케이스트 부분)와 유동 선단 끝부분(제품의 끝부분)의 변형량 비교 결과, 사출 속도가 느릴 수록, 최대 변형 수치가 적음을 확인하였는데, 실제 사출에서도 비슷한 경향성을 나타내며 사출 속도가 빠를 수록, 변형량이 커지는 것을 확인 하였다.

Figure 17에서는 PBT의 실제 사출 후 측정된 변형 결과를 속도에 따라 정리하였다. Model 1 에서는 속도가 가장 작은 10 mm/s에서 실제 사출 결과와 해석 결과가 조금은 상이하게 나타났다. 그러나 Model 2에서는 실제 사출 결과도 해석 결과와 일치하게 나타났다.

3. Discussion

사출 성형 시, 수축이 발생하는 원인은 용융상태에서 냉각이 이루어질 때 온도 저하에 따른 열 수축이 일어나기 때문

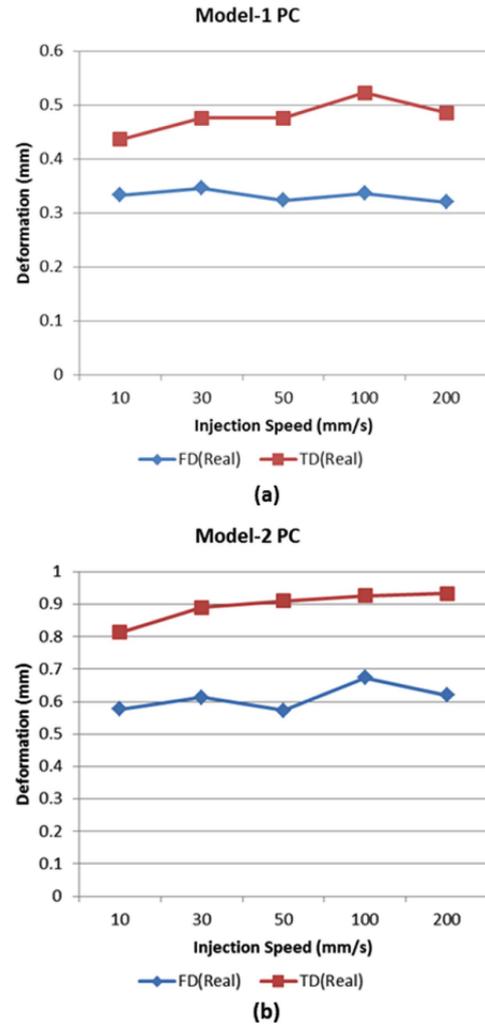


Figure 16. Variation of deformation in experiment according to injection speed. (a) Model-1, PC, (b) Model-2, PC

이다. 그리고 추가로, 결정성 고분자의 경우에는 결정화가 같이 일어나게 되어 수축이 좀 더 진행 된다(PBT).

PC의 경우와 PBT의 경우에서 속도에 따른 변형 효과가 차이나는 이유는 결정성 고분자와 비결정성 고분자의 차이의 영향이 크다.

사출 속도가 느릴 경우, 사출 완료 시 캐비티 내의 제품 온도가 사출시의 수지 온도보다 낮으며, 이는 최종 제품의 온도까지의 차이가 적음을 의미한다. 이는 온도 저하에 따른 열 수축이 고속 사출의 경우보다 적을 수 있다는 것을 의미하며, 실제 해석 결과와도 일치한다.

비결정성 고분자인 PC에서는 온도 저하로 인한 열 수축이 변형에 가장 큰 영향을 미치기 때문에, 사출 속도가 낮을 수록 변형이 적어짐을 확인 하였으나, 결정성 고분자인 PBT의 경우에는 열 수축 이외에도 결정화로 인한 수축의 영향도 있음을 확인 하였다.

실제 PBT의 경우에는 10 mm/s의 초 저속 사출에서와 200

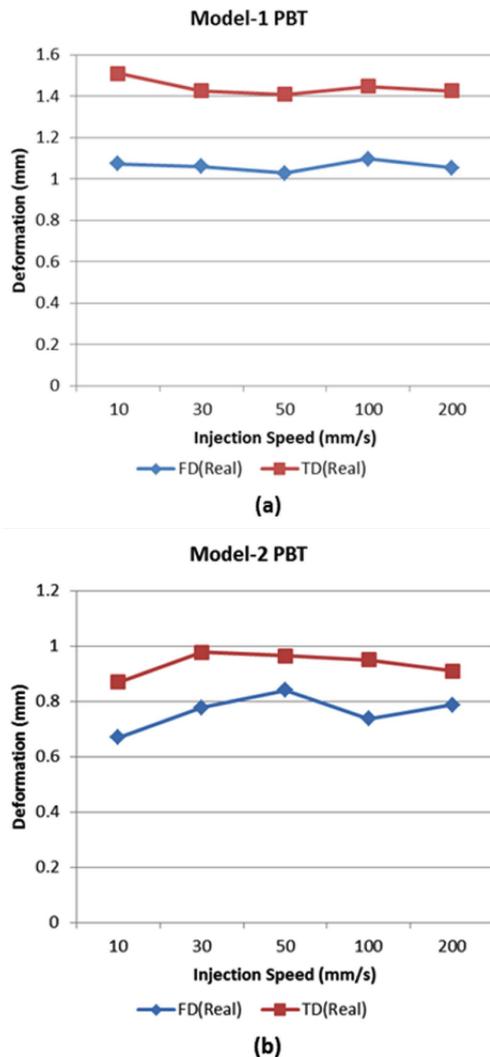


Figure 17. Variation of deformation in experiment according to injection speed. (a) Model-1, PBT, (b) Model-1, PBT

mm/s의 초 고속 사출에서의 변형이 가장 작았으며, 이는 고속 사출에서 캐비티 내의 온도 상승으로 수지의 유동성이 증가하여 수지가 캐비티에 잘 패킹이 되어 나타나는 현상이라 사료된다.

Conclusions

본 연구에서는 사출 속도에 따른 캐비티 내의 물리량 변화 및 최종 변형에 대하여 컴퓨터 해석을 통해 관찰 하였다. 또한 실제 사출 결과를 분석 진행하여 해석 결과와 비교하였다.

사출 성형 시 수축이 발생하는 원인으로는 용융상태에서 냉각이 일어날 때 온도 저하에 따른 열 수축이 가장 큰 이유를 차지한다고 볼 수 있다. 또한 결정성 고분자의 경우 결정화가 같이 일어나게 되어 변형 수축이 좀 더 진행 된다고 보여진다.

사출 속도가 느릴 경우, 캐비티 내의 제품 온도가 사출시의

수지온도보다 낮아 최종 제품과의 온도차이가 적음을 확인 하였다. 이는 온도 저하에 따른 열 수축이 고속 사출의 경우보다 적을 수 있다는 것을 의미하며, 실제 해석 결과와도 일치함을 확인 하였다. 비결정성 고분자인 PC의 경우에는 온도에 따른 수축 변형이 가장 중요한 요인으로 실제 해석 결과 및 실 사출 결과와도 일치하였다. PBT의 경우에는 온도에 따른 열 수축 이외에도 결정화로 인한 수축의 영향이 존재하며, 또한 캐비티 내의 수지의 유동성도 영향을 주었다고 보여진다. 이러한 영향이 복합적으로 작용하여 속도가 가장 작은 10 mm/s와 속도가 가장 큰 200 mm/s에서의 변형이 가장 작고, 속도 30 mm/s에서 변형이 가장 크게 나타난 것으로 판단 된다.

사출 성형시 사출 속도 범위를 지정하고자 한다면, 성형품의 형상과 소재에 따른 범위의 차이는 있다. 그리고 사출 성형시 성형품의 형상이 똑같다고 하더라도 수지마다 최적의 사출 속도가 존재한다.

Acknowledgments

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행 되었습니다.

References

1. M. Lee, H. Kim, and M.-Y. Lyu, "A Study on the Warpage of Glass Fiber Reinforced Plastics for Part Design and Operation Condition", *The Polymer Society of Korea*, **36**, 555 (2012).
2. M. Fujiyama and T. Wakino, "Molecular orientation in injection-molded Polypropylene Copolymers with Ethylene", *Intern. Polymer Processing*, **7**, 159 (1992).
3. N. Prabhu, J. Schultz, and S. G. Advani, "Role of Coupling Microscopic and Macroscopic Phenomena During the Semicrystalline Polymers", *Polymer Engineering and Science*, **41**, 1871 (2001).
4. M. C. Huang and C. C. Tai, "The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature", *Journal of Materials Processing Technology*, **110**, 1 (2001).
5. H. O. Hardenberg and F. W. Hase, "An empirical formula for computing the pressure rise delay of a fuel from its cetane number and from the relevant parameters of direct-injection diesel engines", *SAE Technical Paper* (1979).
6. D. Yao and B. Kim, "Increasing flow length in thin wall injection molding using a rapidly heated mold", *Polymer-plastics Technology and Engineering*, **41**, 819 (2002).
7. P. F. Bright, R. J. Crowson, and M. J. Folkes, "A study of the effect of injection speed on fibre orientation in simple mouldings of short glass fibre-filled polypropylene", *Journal of Materials Science*, **13**, 2497 (1978).

8. H. H. Chiang, C. A. Hieber, and K. K. Wang, "A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection molding. Part I: Formulation", *Polymer Engineering & Science*, **31**, 116 (1991).
9. M. L. Williams, R. F. Landel, and J. D. Ferry, "The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids", *Journal of the American Chemical Society*, **77**, 3701 (1955).
10. P. E. Rouse Jr, "A theory of the linear viscoelastic properties of dilute solutions of coiling polymers", *The Journal of Chemical Physics*, **21**, 1272 (1953).
11. J. D. Ferry, "Mechanical properties of substances of high molecular weight. VI. Dispersion in concentrated polymer solutions and its dependence on temperature and concentration", *Journal of the American Chemical Society*, **72**, 3746 (1950).
12. H. Yaguchi, H. Hojo, D. G. Lee, and E. G. Kim, "Measurement of planar orientation of fibers for reinforced thermoplastics using image processing", *Int. Polym. Processing*, **10**, 262 (1995).
13. K. M. B. Jansen, D. J. Van Dijk, and E. V. Burgers, "Experimental validation of shrinkage predictions for injection molded products", *Int. Polym. Processing*, **13**, 99 (1998).
14. M.-Y. Lyu, J. G. Choi, and Y. Pae, "Investigation of the Jetting Phenomena in Injection Molding for Various Injection Speeds, Resins and Mold Shapes", *Transactions of Materials Processing*, **12**, 3 (2003).