



컴퓨터 해석을 통한 사출압축성형의 성형특성에 관한 연구

천용호 · 안형광 · 류민영[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

접수일(2012년 10월 11일), 수정일(2012년 11월 13일), 게재확정일(2012년 11월 27일)

A Study on the Molding Characteristics of Injection Compression Molding Through Computer Simulation

Y. H. Chun, H. G. An, and M. Y. Lyu[†]

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology
172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul, 139-743, S. Korea

(Received October 11, 2012, Revised November 13, 2012, Accepted November 27, 2012)

요약 : 사출성형은 고분자성형법 중에서 가장 광범위하게 활용되고 있다. 사출성형은 전형적인 사출성형 외에 가스사출, 물사출, 그리고 사출압축성형 등과 같이 특수한 사출성형방법들이 쓰인다. 사출압축성형은 사출과 압축공정이 합쳐진 것으로 균일한 물성 및 성형의 정밀도를 향상시키기 위하여 사용된다. 또한 사출압축은 잔류응력을 줄이는데도 효과적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 성형품의 형상에 따라 다양하게 나타나는 사출압축성형의 특성에 대해서 컴퓨터 해석을 통해 분석하였다. 성형품에 벽이 있는 제품은 벽의 두께가 압축의 방향과 직각이므로 압축효과가 작게 나타났다. 사출압축성형을 일반사출성형과 비교하였을 때 수축의 균일성 및 수축량 또는 성형수축률이 작게 나타나서 정밀성형에 유리하게 나타났다. 실험계획법을 통해 실제로 제작되고 있는 렌즈에 대해서 최적 사출압축조건을 구하고 이의 결과를 사출성형의 결과와 비교분석하였다.

ABSTRACT : Injection molding is one of the widely used polymer processing operations. It is being used for not only conventional injection molding but gas injection molding, water injection molding, and injection compression molding. Injection compression molding involves injection and compression operation, and it gives uniform physical property and high dimensional quality of product. In this study, injection compression characteristics for various product shapes have been investigated by computer simulation. Product containing side wall showed not much effective in injection compression molding since wall thickness direction was perpendicular to the compression direction. Uniform and low shrinkage was observed in injection compression molding comparing conventional injection molding. Subsequently injection compression molding can be used for molding precise product. Optimal injection compression molding condition was obtained using design of experiment for plastic lens and the results were compared with conventional injection molding.

Keywords : injection molding, injection compression molding, compression gap, compression speed, compression delay time

I. 서 론

고분자 성형공정 중 사출성형은 가장 정밀도가 높고 생산성이 높아 많은 플라스틱 제품들의 성형에 응용되고 있다. 사출성형공정은 제품의 형상과 요구특성에 따라 다양하게 변형된 공정이 활용되고 있다. 일반적인 사출성형 (CIM, Conventional Injection Molding) 외에 가스사출성형 (GIM, Gas Injection Molding), 물사출성형 (WIM, Water Injection Molding), 사출압축성형 (ICM, Injection Compression Molding) 등이 있다.¹ 이러한 여러 사출성형 공정은 각각의 특성을 가지고 있고 제품의

형상이나 품질의 정도에 따라 선택하여 사용하게 된다. 광학적 특성을 요구하는 렌즈 제품이나 높은 치수 정밀도를 요구하는 제품은 많은 경우에 사출압축성형에 의해 성형된다.

사출성형 공정은 일반적으로 형폐, 사출, 보압, 냉각, 형개 및 취출의 과정으로 이루어져 있다. 반면 사출압축성형 공정은 금형을 완전히 닫지 않고 갭을 형성한 다음에 사출을 하고 난 후 압축과정을 통하여 갭을 닫고, 냉각, 형개 및 취출 과정이 이루어진다. 사출압축성형은 금형이 어느 정도 열린 상태에서 수지가 충전되기 때문에 캐비티 내의 가스 배출이 용이하고 저압사출이 가능한 장점을 가지고 있다.^{2,4} 같은 크기의 제품을 성형할 때 사출압축성형은 일반사출보다 낮은 압력이 요구되고 압축공정으로 최종성형을 마치기 때문에 제품에 분

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

자배향이나 잔류응력이 작게 형성된다.^{5,7} 또한 압축공정에서 금형모양으로의 전사가 잘 이루어지기 때문에 치수정밀도가 높다. 따라서 렌즈나 광디스크, 도광판 같은 광학적 특성을 요구하는 제품은 압축 공정을 통해 균일한 밀도를 가지게 되고, 잔류응력이 적어 복굴절을 줄일 수 있다.⁸⁻¹¹

본 연구에서는 사출압축성형에 관한 성형특성을 파악하고 그 효과를 분석하였다. 사출압축성형은 사출단계에서는 압력에 의해 수지가 금형에 충전되고 그 후 압축의 힘에 의해 수지가 최종적으로 충전이 완료되는데 제품의 형상에 따라 압축효과가 다르다. 따라서 사출압축성형품의 형상을 몇 가지로 분류하여 컴퓨터해석을 통해 형상에 따른 압축효과를 분석하였다. 이러한 연구결과는 사출압축성형의 형상설계에 활용될 수 있으며 형상에 따라 사출압축의 효과를 판단할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 제품의 형상 별 사출 압축 효과

1. 형상 선정

사출압축성형 시 제품 형상에 따른 압축 효과를 살펴보기 위해 사출성형으로 많이 생산 되고 있는 제품들을 단순 정형화한 다섯 가지 형상으로 Figure 1과 같이 분류하였다.

CAE 해석을 수행하기 전에 정형화된 형상 별 압축 효과는 다음과 같이 예측된다. 형상 1과 같은 경우는 전체적으로 고른 압축을 받을 것으로 예측 된다. 형상 2의 경우 바닥면은 압축이 잘 될 것 같으나 측면은 압축방향과 평행하기 때문에 압축효과가 없을 것으로 예상된다. 형상 3은 상자의 옆면이 테이퍼

되어 있어서 형상 2의 측면보다는 압축효과가 클 것으로 예상된다. 형상 4는 반구형으로 구의 꼭지부분에서는 압축효과가 크나 옆 부분으로 갈수록 압축효과가 점차 떨어질 것으로 예측된다. 형상 5는 반구의 꼭지부분이 납작하게 변형된 것으로 압축효과가 반구형 꼭지부분보다 좋을 것으로 예측된다. 각 형상에 따른 압축방향과 압축효과의 정도를 Figure 2와 같이 화살표와 크기로 나타내었다.

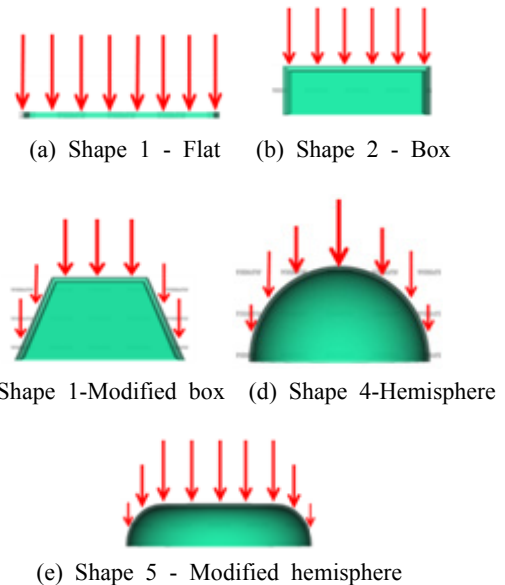


Figure 2. Compression direction for each model during injection compression molding.

2. 해석결과 및 토의

사출 압축성형 해석은 Moldflow를 이용하여 실시하였다. 다섯 가지 형상의 두께는 2 mm이고, 사출량은 PC를 기준으로 54 g으로 동일하게 설정하였다.

사출압축성형 해석 시에는 압축거리 (금형 사이의 갭), 압축 속도 (압축 시 금형을 닫는 속도), 압축대기시간 (사출시작 후 압축이 시작될 때까지의 시간)과 같은 조건들이 중요하다. 이러한 조건들을 토대로 성형조건을 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1. Injection compression molding condition for simulation

Screw Diameter/Injection Stroke	40 mm/43 mm
Resin	Trirex3022IR (PC)
Mold Temperature/Resin Temperature	80 °C/300 °C
Compression Gap	0.6 mm
Waiting Time for Compression	2.7 sec
Compression Speed	1 mm/s

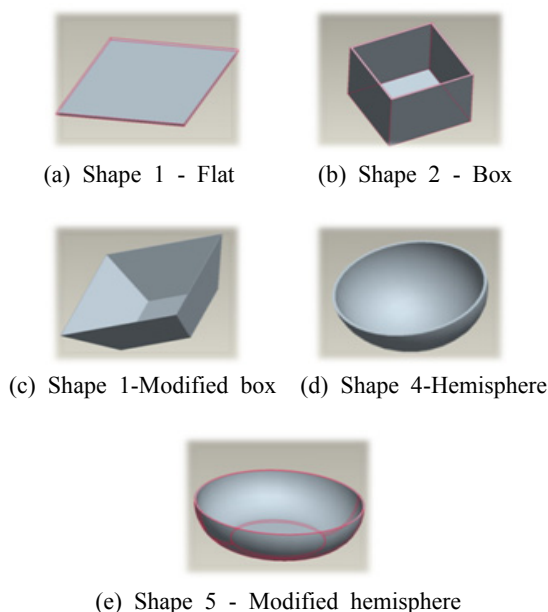


Figure 1. Selected shapes for injection compression molding products.

Moldflow 에서 사용되는 점도 모델은 Cross-WLF모델이다. 식 (1)은 Cross law로 shear rate에 따른 점도를 나타낸다.¹²

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

여기서, η 는 점도, T 는 온도, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도, τ^* 는 뉴턴 특성에서 비뉴턴 특성으로 천이될 때의 전단응력이며, n 은 전단속도 민감도이다. η_0 는 전단속도가 ‘0’에 가까워질 때의 점도이며, 식 (2) 와 같이 사용된다.

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[- \frac{A_1(T - T_g)}{A_2 + (T - T_g)} \right] \quad (2)$$

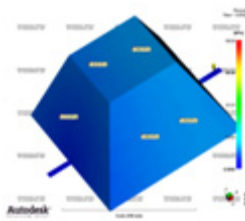
여기서, T_g 는 유리전이온도이고, A_1 , A_2 , D_1 은 상수이다.

해석 결과 중 사출압축성형품의 품질을 평가하기 위해 형상별 수축률을 관찰하였다. 제품 내 위치 별로 부피 수축률이 적고 또한 제품내 수축률의 편차가 작을수록 균일한 압축 효과를 받아 치수정밀도가 좋고 균일한 밀도를 갖는 형상이라 할 수 있다. 해석의 결과가 Table 2에 나타나있다. Table 2을 통해 비교해 본 결과 형상 1이 수축이 작으면서도 수축률 편차가 0.22%로 압축효과가 가장 좋은 형상임을 알 수 있다. 압축 받는 면이 다른 형상에 비해 균일하고 넓어 일정한 압축을 받아 부피 수축률 편차가 가장 낮았다. 이는 앞에서 형상별 압축 효과를 추측해본 결과와 일치하였다. 압축을 받는 평평한 면이 많을수록 큰 압축을 받는 것을 알 수 있다. 형상 2는 수축률 편차는 작아 균일한 수축이 예측되나 전체적으로 수축률이 커서 치수정밀도가 떨어질 것으로 판단된다.

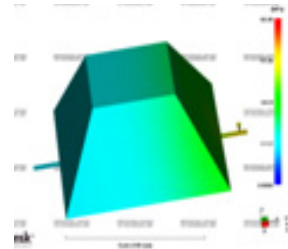
사출성형과 사출압축성형 시, 캐비티 내의 압력 차이를 비교하기 위해 형상 3에 대해서 사출성형과 사출압축성형 해석을 수행하였다. 그 결과 Figure 3(a)의 사출성형 해석결과에서는 최대압력이 64.48 MPa로 나타났고 전반적으로 압력분포가 불균일하게 형성되었다. 반면 그림 3(b)의 사출압축성형에서는 최대압력이 54.54 MPa로 나타났고 압력분포가 균일하게 나타났다. 다른 네 가지의 형상들도 형상 3과 마찬가지로 사출 압축성형에서 압력이 더 낮고 보다 균일하게 나타났다.

Table 2. Comparison of volumetric shrinkage for each shape

					
Max	2.14%	8.57%	8.31%	8.88%	8.64%
Min	1.92%	6.79%	6.03%	5.43%	4.42%
Max-Min	0.22%	1.78%	2.27%	3.45%	4.42%



(a) Conventional injection molding



(b) Injection compression molding

Figure 3. Comparison of pressure distributions.

III. 실제 제품에 대한 CAE 해석

1. 제품선정 및 해석 목표

실제로 현장에서 성형되고 있는 렌즈 제품에 대하여 일반사출과 사출압축성형을 비교 분석하였다. Figure 4와 같은 두 종류의 렌즈를 선정하였다. 렌즈 1은 평판인 렌즈이고, 렌즈 2는 삼각형으로 프리즘 형상의 렌즈이다. 따라서 그 형상에 따른 압축 효과에 차이가 있으리라 예상하고 각 렌즈의 최적 사출압축 조건을 찾는 목적으로 성형해석을 수행하였다.

2. 렌즈1의 해석결과 및 토의

수지와 사출량을 고려하여 사출기, 금형온도, 냉각시간의 조건은 고정하여 해석을 실시하였다. 압축거리, 압축속도, 압축대기시간은 다섯 가지 수준으로 구분하고 라틴방격법을 이용하여 Table 3과 같이 렌즈 1의 해석을 위한 실험계획표를 작성하였다.¹³



(a) Lens 1



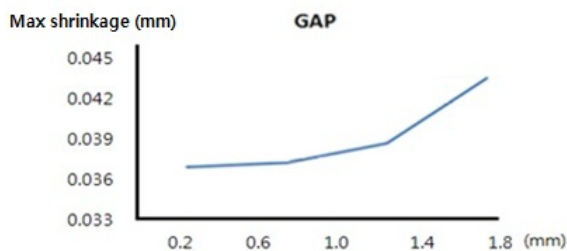
(b) Lens 2

Figure 4. Selected products comparing conventional injection molding and injection compression molding.

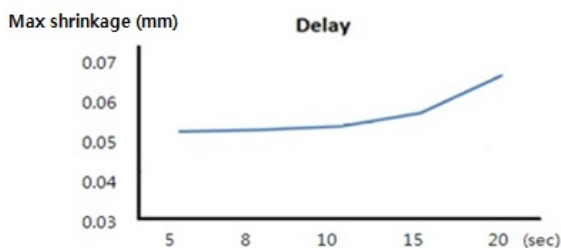
Table 3. Design of experiment for injection compression molding of lens 1

		Delay Time (sec)				
		5	20	8	15	10
Gap (mm)	1.4	0.2	0.4	0.6	0.8	1
	0.6	0.4	0.6	0.8	1	0.2
	0.2	0.6	0.8	1	0.2	0.4
	1.8	0.8	1	0.2	0.4	0.6
	1	1	0.2	0.4	0.6	0.8
		Speed (mm/s)				

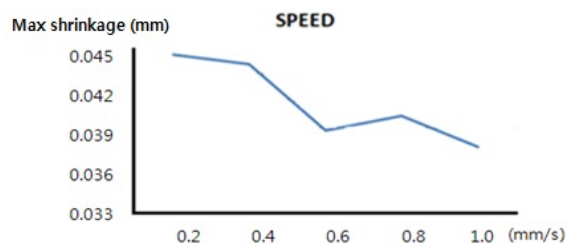
위의 조건에 따라 3D-Timon과 Moldflow 두 성형해석 프로그램을 사용하여 해석하였다. 3D-Timon은 최대 수축량 (mm)을, Moldflow는 최대 부피수축률 (%)을 기준으로 최적의 성형 조건을 찾고자 하였다. Figure 5는 3D-Timon에 대한 해석결과이다. 3D-Timon 해석 결과 압축거리는 0.2 mm, 압축속도는 1 mm/s, 압축대기 시간은 5 sec에서 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다.



(a) Max shrinkage for compression gap



(b) Max shrinkage for compression delay time



(c) Max shrinkage for compression speed

Figure 5. Variations of maximum shrinkage according to operational conditions for lens 1.

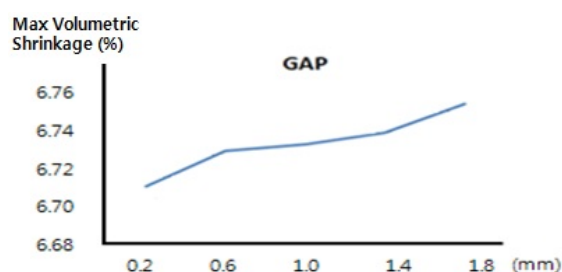
Figure 6은 Moldflow 해석을 통한 최대 부피수축률을 보여주고 있다. Moldflow 해석결과 역시 3D-Timon 해석결과와 유사한 결과를 나타내었다. 압축거리는 0.2 mm에서, 압축속도는 1 mm/s에서, 압축대기 시간은 5 sec에서 가장 좋은 결과를 보여주고 있다.

Figure 7은 사출과 사출압축 성형의 결과를 비교하여 보여주고 있는데 사출압축에서 최대 수축률이 2.3% 정도 낮게 관찰되었다.

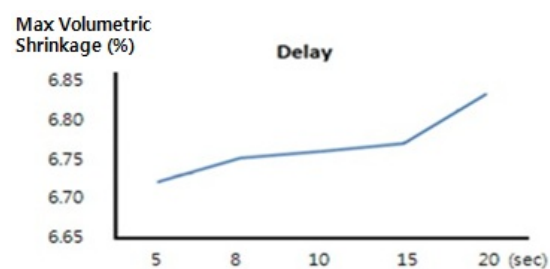
3. 렌즈2의 해석결과 및 토의

렌즈 2의 경우 Moldflow를 이용한 사출압축성형 해석에서 Mid-plane을 이용한 해석이 어려워 3D-Timon만을 이용하여 성형해석을 수행하였다. 조건은 렌즈 1과 마찬가지로 주요 인자 세 가지를 선정하여 라틴방격법을 이용한 실험 계획을 Table 4와 같이 작성하였다.

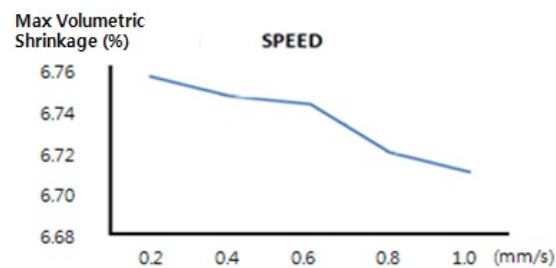
각 인자들에 따른 최대 수축량이 Figure 8에 나타나 있다. 사출압축성형조건에 따른 결과를 비교해 보면 정도의 차이



(a) Max shrinkage for compression gap

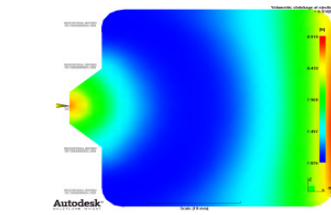


(b) Max shrinkage for compression delay time

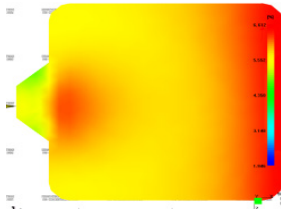


(c) Max shrinkage for compression speed

Figure 6. Variations of maximum volumetric shrinkage according to operational conditions for lens 2.



(a) Injection molding : 8.910%



(b) Injection compression molding : 6.612%

Figure 7. Comparison of maximum volumetric shrinkage by Moldflow for conventional injection molding (left, max volumetric shrinkage: 8.910%) and Injection compression molding (right, max volumetric shrinkage: 6.612%) for lens 1.

는 있었지만 렌즈 1의 결과와 비슷한 양상을 나타내며 압축거리는 0.2 mm, 압축속도는 1 mm/s. 압축대기 시간은 5 sec에서 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 또한 일반사출성형과 비교하면 최대 수축량이 일반사출성형의 1/4 수준임을 알 수 있다 (Figure 9). 이러한 결과로 보아 사출압축성형은 사출성형에 비해 물성이 균일하고 치수정밀도가 높은 제품을 성형하기에 매우 유리하다고 판단된다.

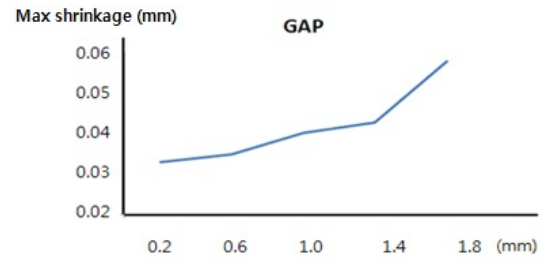
IV. 결 론

본 연구에서는 컴퓨터 해석을 통한 일반적인 사출성형과 사출압축성형의 성형 특성을 관찰하였다.

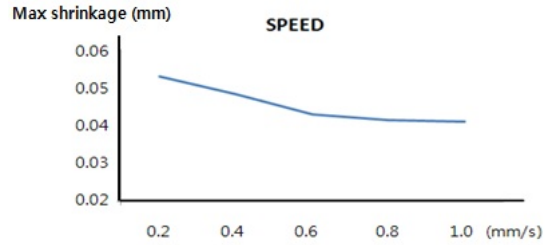
사출압축성형에서는 제품의 형상에 따라 압축의 효과가 다르기 때문에 사출압축성형의 효과도 다르게 나타났다. 제품의 형상 중 평탄한 제품에서 가장 압축의 효과가 컸고, 벽면이 있는 제품의 벽면에서는 압축의 효과가 작게 나타났다.

Table 4. Design of experiment for injection compression molding of lens 2.

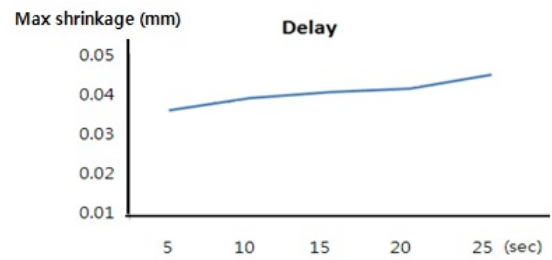
		Delay Time (sec)				
		20	15	5	25	10
Gap (mm)	2	0.2	0.4	0.6	0.8	1
	1.8	0.4	0.6	0.8	1	0.2
	1	0.6	0.8	1	0.2	0.4
	1.4	0.8	1	0.2	0.4	0.6
	0.6	1	0.2	0.4	0.6	0.8
		Speed (mm/s)				



(a) Max shrinkage for compression gap

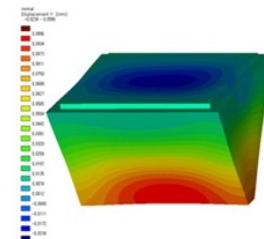


(b) Max shrinkage for compression delay time

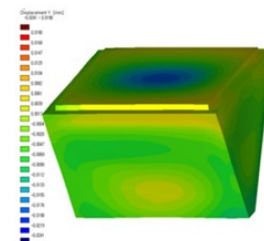


(c) Max shrinkage for compression speed

Figure 8. Variations of maximum shrinkage according to operational conditions for lens 2.



(a) Injection molding : 0.123 mm



(b) Injection compression molding : 0.045 mm

Figure 9. Comparison of maximum shrinkage by 3D-Timon for conventional injection molding (left, max shrinkage: 0.123 mm) and Injection compression molding (right, max shrinkage: 0.045) for lens 2.

사출압축성형 시 제품의 수축량이 일반사출에 비하여 작으므로 정교한 제품의 성형이 가능할 것으로 판단되었다. 사출압축의 성형조건 즉, 압축거리, 압축속도, 압축대기시간 등의 변화에 따른 수축을 비교한 결과 압축거리는 작을수록, 압축속도는 빠를수록, 압축대기 시간은 짧을수록 수축이 감소함을 알 수 있었다.

본 연구에서 도출된 사출압축성형의 특징은 균일한 물성과 정밀한 치수를 요구하는 다양한 사출압축 성형품설계와 최적 성형조건 설정에 활용 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. H.-Y. Kim and M.-Y. Lyu, "Introduction to Polymer Shaping Processes and Their Principles", *Poly. Sci. Technol.*, **20**, 157 (2009).
2. S. Y. Yang and M. Z. Ke, "Influence of processing on quality of injection-compression-molded disks", *Poly. Eng. Sci.*, **35**, 1206 (1995).
3. D. E. Smith, D. A. Tortorelli, and C. L. Tucker, "Analysis and sensitivity analysis for polymer injection and compression molding", *Computer Methods Appl. Mech. Eng.*, **167**, 325 (1998).
4. H.-S. Lee and A. I. Isayev, "Numerical simulation of flow-induced birefringence : Comparison of injection and injection/compression molding", *Int. J. Precision Eng. Manuf.*, **8**, 66 (2007).
5. C.-H. Wu and Y.-L. Su, "Optimization of wedge-shaped parts for injection molding and injection compression molding", *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **30**, 215 (2003).
6. S. Y. Yang and M. Z. Ke, "Experimental study on the effects of adding compression to injection molding process", *Adv. Polym. Technol.*, **14**, 15 (1995).
7. Y. B. Young, "On the Residual Stress and Shrinkage in Injection Compression Molding", *Int. Polym. Proc.*, **18**, 313 (2003).
8. B. Fan and D. O. Kazmer, "Simulation of injection-compression molding for optical media", *Polym. Eng. Sci.*, **43**, 596 (2003).
9. G. Klepek, "Moulds for manufacturing optical lenses", *Kunstst. German Plast.*, **77**, 13 (1987).
10. R. Y. Chang, W. Y. Chang, Y. H. Yang, W. L. Yang, and D. C. Hsu, "Three-Dimensional Simulation of Injection-Compression Molding of a Compact Disc(736)", *Soc. Plast. Eng.*, **1**, 741 (2001).
11. N. S. Lee, G. B. Sung, and S. I. Kang, "An Optimum design of Replication Process to Improve Birefringence Radial-tilt and Land-Groove Structure in DVD-RAM Substrates", *Trans. KSME C*, **6**, 438 (2001).
12. C. Fetecau, D. V. Dobrea, and I. Postolache, "Overmolding Injection Molding Simulation of Tensile Test Specimen", *Int. J. Modern Manuf. Technol.*, **2**, 2067 (2010).
13. C. R. Hicks and K. V. Turner Jr, "Fundamental Concepts in the Design of Experiments", 5th edition, Oxford University Press, USA (1999)