

수치해석을 통한 7인치 도광판 사출압축성형 공정범위 예측

홍석관^{1,2}· 민인기²· 강정진¹· 윤경환[#]

Numerical Prediction of Process Window for Injection-Compression Molding of 7-inch LGP

S. K. Hong, I. K. Min, J. J. Kang, K. H. Yoon

(Received December 20, 2010 / Revised January 3, 2011 / Accepted January 5, 2011)

Abstract

The main objective of the present study is to predict the process window of injection-compression molding corresponding to the capability of an injection machine for fabricating 7 inch LGP. The open distance and volume filled after injection stage were found to be two important factors that affect critical requirements such as flow length, injection pressure and clamping force for the process. Process window for the key factors was also predicted by response surface method. As a result, predicted process window for open distance and volume filled after injection stage satisfying the critical requirement with a given injection machine was in the range of 60 ~ 75%, and 104.00 ~ 104.25%, respectively.

Key Words : Injection-Compression Molding, LGP(Light Guide Plate), Process Window, Simulation, Response Surface Method, Design of Experiments

1. 서 론

현재 지속적인 시장 확대가 진행되고 있는 LCD TV나 광학 제품에 사용되는 도광판은 BLU (Back Light Unit)의 핵심부품으로서 그 표면에 광로를 조절하고 제어하기 위한 마이크로미터 스케일의 광학 패턴들이 형성되어있어 점광원(LED)을 균일한 면광원으로 만드는 역할을 한다.

이러한 도광판은 주로 투명한 플라스틱 소재를 사용하고 있으며, 높은 형상정밀도와 광특성을 요구한다. 이와 같은 요구조건에 대응하기 위해 본 연구에서는 플라스틱 성형 공법중의 하나인 사출/압축 성형을 적용하였다.

플라스틱 사출/압축 성형은 충전과정에서 제품 전면에 걸쳐 압축을 하는 기술로서, 도광판 표면

의 마이크로 광학 패턴의 전사성을 높이며, 충전시 발생하는 성형품 내부의 응력을 낮추고, 고분자 배향을 경감시킴으로써 제품의 형상 정밀도를 확보하고, 광특성을 향상시키는 데 효과가 있다 [1~6].

이러한 사출/압축 공법을 만들고자 하는 대상에 적용함에 있어 자신이 소유한 성형기가 적합한지에 대한 검토는 사용자가 가장 먼저 해야 할 일일 것이다. 이때 단순히 사출기의 사출압과 형체력만으로 사출/압축 공정범위(process window)를 검토하는 것이 아니라, 제품의 품질에 영향을 미치는 인자들의 영향도 동시에 고려하는 것이 바람직할 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 CAE tool과 통계적 기법들을 이용한다. 본 연구에서는 Moldflow를 이용한 사출/압축 CAE 공정해석을

1. 한국생산기술연구원
2. 단국대학교 대학원
교신저자: 단국대학교, E-mail: khyoon@dku.edu

통해 실험계획법을 수행하고, 도광판 품질에 영향을 미치는 주요 사출/압축 공정인자를 도출한다. 이로부터 도출된 주요인자를 바탕으로 반응표면법을 수행하여 최종적으로 7인치 도광판의 품질을 고려한 공정범위를 예측한다.

2. 요인과 반응

사출/압축 성형 대상은 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 7인치 도광판으로 가로 160.64mm, 세로 90.86mm, 두께 1mm 크기이며, 두께 2mm의 팬 게이트(fan gate)를 갖추고 있다. 수지는 미쯔비시레이온(Mitsubishi Rayon)사의 LCD 도광판용 PMMA (TF8 grade)이며, 성형해석을 위한 물성치 정보는 Moldflow사에서 제공하는 데이터를 사용하였다. 본 연구에서 적용하고 있는 사출/압축방식은 Fig. 2에 나타난 것처럼 사출 전 일정 거리만큼 금형을 연 상태에서 일정량의 수지를 사출하고 이어서 금형을 이동시켜 수지를 압축하는 인젝션 프레스 방식(injection press mode)에 해당된다. 이때 hot runner system의 밸브게이트는 압축과 동시에 닫혀서 수지의 역류를 방지한다.

본 해석에서 고려된 사출기는 LS엠트론사의 LGE110D이며 주요 사양은 최대 형체력 110tonne, 최대 사출압 240MPa, 최대 사출률 185cm³/sec, 최대 스트로크 111mm, 최대 압축속도 57mm/sec 이다. 본 사출기는 전동식 제어 시스템을 갖추고 있어, 사출 및 압축이 서보모터에 의해 구동된다.

사출압축 시뮬레이션은 상용 해석 소프트웨어인 Moldflow를 이용하였다. 이때 해석모델은 Fig. 1(b)에 보이는 것처럼 midplane으로 가정하였다. 또한, 냉각채널에 의한 금형의 온도분포는 고려하지 않았다. 따라서 금형표면이 균일한 온도분포를 갖는다고 가정하였다.

사출/압축 공정 CAE 해석을 이용한 실험계획법(DOE)을 수행하기 위해서는 공정인자 도출과 인자의 수준범위를 결정해야 한다. 공정인자는 Fig. 3에 보이는 바와 같이 피시본 다이어그램(fishbone diagram)을 이용하여 제품의 품질에 영향을 미치는 요소들을 나열하였다. 이와 같은 인자들 중에서 6개의 인자를 선별하였다. 또한, 이들 인자들의 수준범위는 Table 1에 명시하였다.

적정 사출/압축 공정조건을 찾는 문제에서 목표하는 대상에 따라서 공정범위는 다른 결과를 보일 것이다. 본 연구에서는 미충전이 없는 범위에서

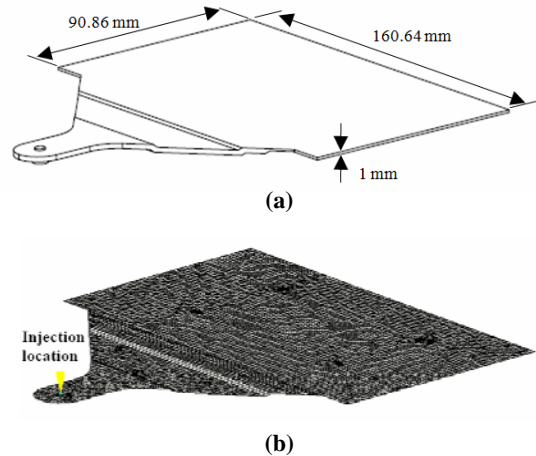


Fig. 1 7inch LGP shape; (a) 3D part model and (b) finite-element model

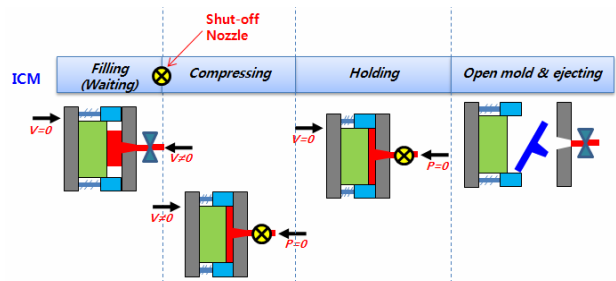


Fig. 2 Injection press mode

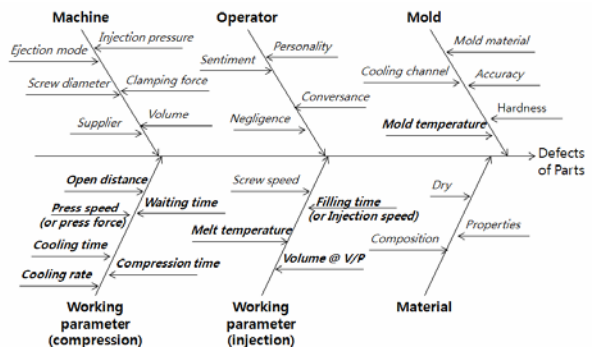


Fig. 3 Fishbone diagram for quality of molded part

사출압과 형체력(또는 압축력)이 제약조건을 넘지 않는 범위뿐만 아니라 전단응력과 휨변형과 같은 제품의 품질도 고려 하여 이들을 동시에 만족하는 공정범위를 찾을 것이다.

따라서, Table 2에 명시한 바와 같이 주요 요구사항(critical requirement)인 충전률, 사출압, 형체력

Table 1 Level of process factors for simulation

No.	Uncoded parameter	Levels		remarks
		Low	High	
1	Mold temperature (°C)	50	70	Recommended
2	Melt temperature (°C)	240	270	Recommended
3	Fill time (sec)	0.2*	1.2**	*227, **38 (mm/s)
4	Volume@V/P (%)	100	110	@each melt temp.
5	Open distance (%)	10*	100**	*0.1, **1 (mm)
6	Press speed (%)	10*	100**	*5.7, **57 (mm/s)

Table 2 Constraints and responses

No.	Classification	responses	Constraints		remarks
			Min.	Max.	
1	Critical requirement	Volume filled (%)	100	-	Flow length
2		Inj. pressure (MPa)	-	240	@nozzle
3		Press force (tone)	-	110	Eq. Clamp force
4	Part quality	Shear stress (MPa)	-	0.4	Include gate
5		Warpage (mm)	-	1.3	Include gate

외에 제품의 품질과 관련 있는 최대 전단응력, 휨 변형량을 반응값으로 고려하였다.

3. 반응의 주효과

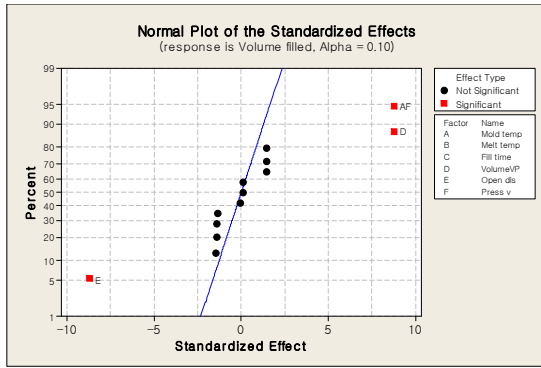
사출/압축 성형공정에서 어떤 요인이 결과에 유의한 영향을 주고 있는가를 파악하기 위해 실험 계획법(DOE)의 2수준 부분 요인 설계(fractional factorial design)를 수행하였다. 충전률, 사출압, 형체력에 대한 정규확률도와 주효과도를 Fig. 4에 각각 나타내었다.

충전률에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 Fig. 4(a)에서처럼 형개거리와 압축 전 충전량으로 예측되었다. 압축 전 충전량이 높은 수준에서 낮은 수준으로 이동할수록 충전률이 감소하는 것을 Fig. 4(b)의 주효과도에서 볼 수 있다. 이는 cavity 안으로 밀어 넣는 수지의 양이 적을수록 미충진이 발생할 확률이 높은 것을 의미한다. 본 연구에서 압축 전 충전량의 낮은 수준을 제품의 부피만큼으로 설정하였기 때문에 압축하는 도중 수지의 수축 정도에 따라 충전률이 민감한 반응을 하게 된다. 압축 도중 수축량이 크면 낮은 수

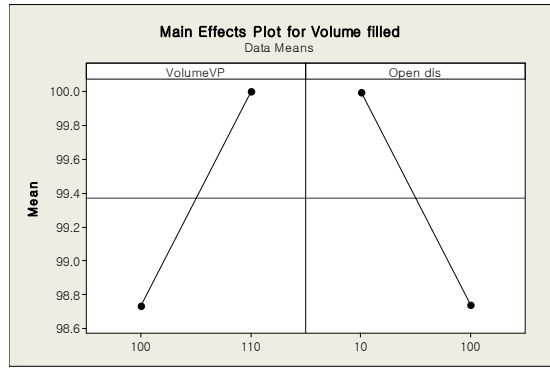
준의 압축 전 충전량 일 때는 미성형이 일어날 확률이 높게 된다. 이와 같은 경우는 형개거리가 클수록 나타나기 쉽다. 형개거리가 크면 압축하는데 소요되는 시간이 상대적으로 길어지기 때문에 형이 단힐 때까지 수축량이 늘어나기 때문이다. 이와 같은 이유로 형개거리가 높은 조건일면서 동시에 압축 전 충전량이 낮은 조건일 때 사출/압축 성형해석 결과 모두 미성형으로 예측되었다.

사출압은 Fig. 4(c)(d)에 보이는 바와 같이 형개거리에 가장 민감하게 반응하였고, 형개거리가 클수록 사출압이 작아지는 경향을 보였다. 이는 형개거리가 증가하면 cavity의 두께가 커져서 유동저항이 감소하기 때문이다.

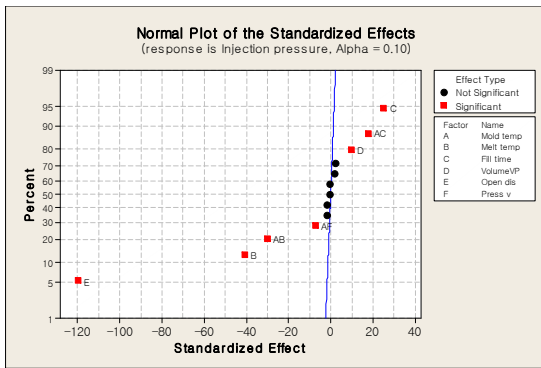
형체력에 대한 주요인자는 압축 전 충전량으로 예측되었으며, 압축 전 충전량이 증가할수록 형체력이 커지는 경향을 Fig. 4(e)(f)에서 볼 수 있다. 이는 압축 전 충전량이 증가할수록 압축되는 수지의 양이 증가하여 보압 효과가 커졌기 때문이다. 반면, 형개거리가 증가하면 압축도중 수축량이 커지므로 보압 효과가 작아지게 되고 형체력이 감소하는 경향을 보이게 된다.



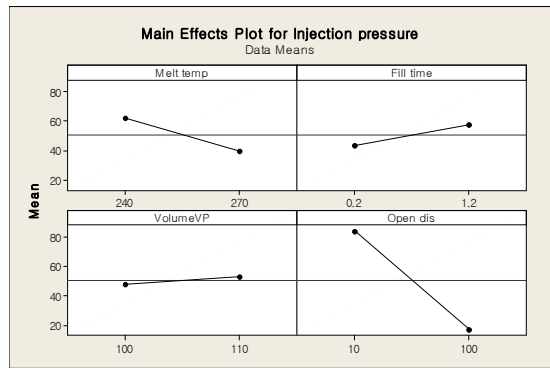
(a)



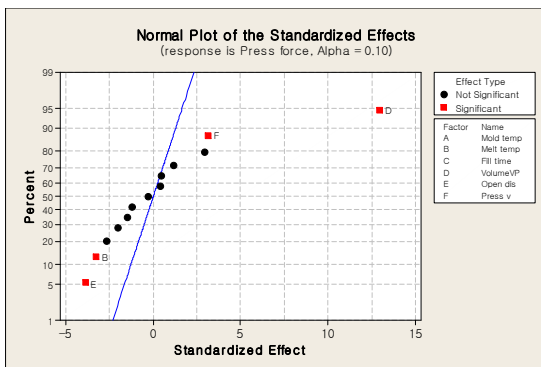
(b)



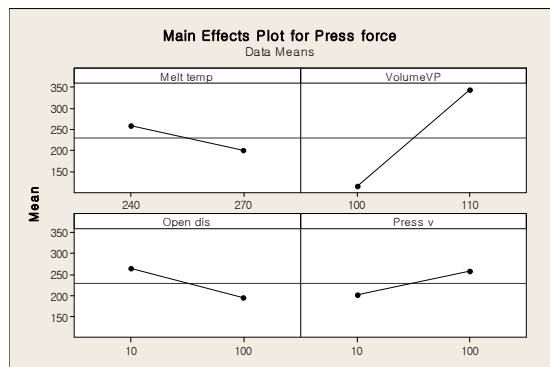
(c)



(d)



(e)



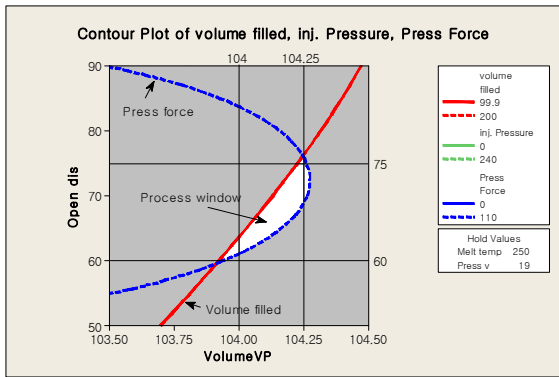
(f)

Fig. 4 Normal probability plot of effects for critical requirement; (a) volume filled, (c) injection pressure and (e) press force and main effect plot; (b) volume filled, (d) injection pressure and (f) press force

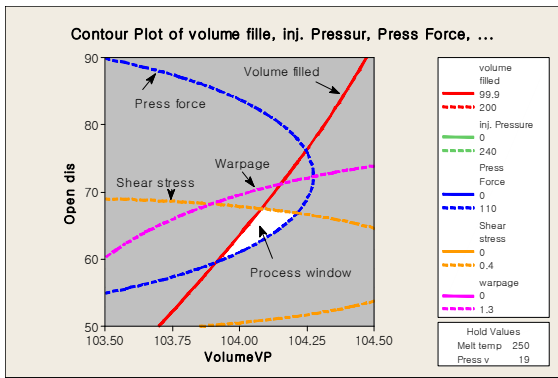
4. 공정범위 예측

앞서 부분 요인 배치법을 통해 사출/압축 공정에서 충전률, 사출압, 형체력(주요 요구사항)에 가장 큰 영향을 미치는 공정변수는 압축 전 충전량

과 형개거리였으며, 수지온도와 압축속도도 유의한 인자임을 알 수 있었다. 따라서 초기에 6개의 공정인자를 도출된 4개의 핵심인자로 축소하고 반응표면설계를 통해 공정범위를 예측하였다. 등고선도는 반응이 동일한 모든 점을 등고선으로



(a)



(b)

Fig. 5 Overlaid contour plot of (a) critical requirement (b) part quality

연결하여 2차원으로 표시한다. 중첩 등고선도를 사용하면 모든 요인수준 조합에 대한 반응값의 변화를 볼 수 있다.

미성형 없이 형체력이 110tonne을 넘지 않는 범위는 형개거리가 60~75%, 압축 전 충전량은 104.00~104.25% 수준 내에서 만족하는 것을 Fig. 5(a)로부터 알 수 있다. 하지만, 이와 같은 결과는 주요 요구사항만을 고려한 결과이다. 여기에 제품의 품질과 관련 있는 전단응력과 휨변형량이 각각 0.4 MPa, 1.3mm를 넘지 않는 제약조건을 추가하면, 압축 전 충전량은 변동이 미미한 반면, 형개거리는 약 60~65%로 그 범위가 더욱 좁아지는 것을 Fig. 5(b)에서 볼 수 있다.

5. 결론

7인치 도광관을 대상으로 사출성형기의 사양에

대응하는 사출/압축 공정범위를 시뮬레이션과 통계적 기법을 이용하여 예측하였다. 본 연구에서 적용한 사출/압축 공정의 주요 요구사항인 충전률, 사출압, 형체력에 영향을 미치는 핵심 인자는 형개거리와 압축 전 충전량으로 도출되었다. 만약 우리가 최대 110톤의 형체력을 갖는 사출성형기로 본 연구에서 적용한 7인치 도광관을 사출/압축 공정을 통해 제작하고자 한다면, 형개거리와 압축 전 충전량(계량거리)을 다른 인자들보다 주의해서 설정해야 할 것이다. 그 이유는 주요 요구사항을 만족시키기 위해서는 본 사출성형기의 최고 형체력을 모두 발휘해야 하기 때문이다. 성형기의 안전을 고려한다면, 더 큰 용량을 갖는 성형기로 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 비록 본 연구결과는 실험결과로부터 검증하는 일이 숙제로 남아있지만, 사출/압축 성형과 연관되는 인자들에 대한 반응을 이해하고 실험 전 대략적인 공정범위를 가늠하는 데 도움이 될 것이다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식 경제부의 재원으로 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받은 연구과제로 수행되었습니다(Project No. 10033710).

참 고 문 헌

- [1] H. Ito, H. Suzuki, 2009, Micro-features formation in injection compression molding, J. of Solid Mech. Mater. Eng. 63, Vol. 3, No 2, pp. 320~327.
- [2] S. Bickerton, M. Z. Abdullah, 2003, Modeling and evaluation of the filling stage of injection-compression moulding, Compos. Sci. Technol. 63, pp. 1359~1375.
- [3] Y. B. Lee, T. H. Kwon, K. H. Yoon, 2002, Numerical prediction of residual stresses and birefringence in injection-compression molded Center-Gated Disk. Part I: Basic Modeling and Results for Injection Molding, Polym. Eng. Sci., Vol. 42, No. 11, pp. 2246~2272.
- [4] Y. B. Lee, T. H. Kwon, K. H. Yoon, 2002, Numerical prediction of residual stresses and birefringence in injection-compression molded Center-Gated Disk. Part II: Effects of processing conditions, Polym. Eng. Sci., Vol. 42, No. 11, pp. 2273~2292.

- [5] W. B. Young, 2005, Effect of process parameters on injection compression molding of pickup lens, *Appl. Math. Modell.* 29, pp. 955~971.
- [6] H. X. Huang, K. Li, S. Li, 2009, Injection-compression molded part shrinkage uniformity comparison between semicrystalline and amorphous plastics, *Polym. Plast. Technol. Eng.* 48, pp. 64~68.
- [7] T. Lin, B. Chananda, 2003, Quality improvement of an injection-molded product using design of experiments: a case study, *Qual. Eng.*, Vol. 16, No. 1, pp. 99~104.
- [8] D. Mathivanan, N. S. Parthasarathy, 2009, Prediction of sink depths using nonlinear modeling of injection molding variables, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 43, pp. 654~663.
- [9] W. C. Lo, K. M. Tsai, C. Y. Hsieh, 2009, Six sigma approach to improve surface precision of optical lenses in the injection-molding process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 41, pp. 885~896.
- [10] A. Kramschuster, R. Cavitt, D. Ermer, Z. Chen, L. S. Turug, 2005, Quantitative study of shrinkage and warpage behavior for microcellular and conventional injection molding, *Polym. Eng. Sci.*, DOI 10.1002/pen.20410, pp. 1408~1418.