

제품 수축 최소화를 위한 공정조건 분석과 공정모니터링 시스템의 활용

박형필, 강중근, 장형건, 조영기, 이병욱
아주대학교 기계공학과

The analysis of process conditions and application of the process monitoring system to minimize shrinkage of injection molded parts

Hyung-Pil Park, Joong-Geun Gang, Hyung-keun Chang, Young-Kee Cho,
Byung Ohk Rhee
Division of Mechanical Engineering, Ajou University

서론

사출성형품의 수축은 치수정밀도가 높은 제품 생산에 큰 영향을 미치며, 특히 전자제품, 자동차등에 사용되는 플라스틱 부품은 불균일한 수축으로 인한 제품 변형 문제로 부품 조립에 많은 어려움을 겪고 있다. 사출성형 시 충전/보압 중에 발생하는 높은 압력과 냉각 공정에서의 불균일한 온도 분포로 인하여 체적 변화를 일으킨다. 특히, 제품 부위에 따라 불균일하게 분포되는 수축은 제품 내부에 잔류 응력을 발생시켜 성형품에 변형을 일으킨다. 공정조건 변화, 금형의 온도 차이, 금형 내 구속 및 수지의 결정화도 등이 불균일 수축과 변형의 영향요소로 알려져 있다.

고정밀도의 부품 생산에 사출성형이 이용되면서 제품 변형의 최소화 및 예측을 위한 많은 연구가 이루어져왔다. 사출성형품의 변형을 예측하기 위해서 Inoue등은 2.5D와 Full-3D의 실험 결과를 비교 분석하여 Full-3D 해석이 제품 코너 부위의 Hotspot을 예측하여 실제 실험결과에 근사함을 밝혔다. Kennedy등은 2.5D 해석에 Spring forward/ Corner effect를 적용하여 변형을 예측하고 해석을 수행한 결과를 실험에 적용하여 비교 분석을 하였다. Gipson등은 자동차에 가장 많이 사용되는 PP수지를 대상으로 공정조건 변화에 따른 변형량을 측정하고 분석하였다.

본 연구에서는 제품 수축에 영향을 주는 인자 분석을 위하여 다구찌 실험계획법의 L_{27} 직교 배열표에 따른 실험을 수행하였다. 제품 수축에 영향을 주는 제어 인자로써 5개의 공정 변수(수지온도, 사출속도, 보압, 금형온도, 냉각시간)를 선정 하였으며, 각 변수는 3수준으로 정의 하였다. 각 공정 조건의 정확한 구현을 위해 공정 모니터링 시스템(Process Monitoring System;PMS)을 이용하였다. 제품 수축에 대한 분석이 완료된 후 효율적인 공정/품질 관리를 목적으로 PMS 파라미터를 정의하고, 이들과 제품 수축과 중량과의 상관관계 분석을 실시하였다.

실험 조건 및 재료

Fig.1에 보듯이, 사각 BOX 형상의 수축량 측정을 위한 격자를 가진 금형을 사용하였으며, 금형 및 사출성형기 노즐에 Kistler사의 압력 및 압력/온도 센서를 설치하였다. 실험에는 LG Caltex의 PP MT62CP(talc 20%)를 사용하였으며, 25톤의 Arburg사의 유압식 사출성형기를 사용하였다. 실험은 각 조건 당 10번의 성형을 수행 후 5개의 성형품에 대하여 측정을 하였다. Table 1에는 실험에 사용된

제어 인자 및 수준을 나타내고 있으며, 실험을 통해 얻어진 제품의 수축률은 INTEC Premium - 800C (18x-223x) 비접촉 광학 측정기로 측정하였다.

공정 모니터링 시스템(Process Monitoring System;PMS)

PMS 이용하여 제어인자의 변화에 따라 종속적으로 변하는 보압시간 및 보압 절환 시점을 설정하였다. 보압시간 설정은 시간을 점차 늘려가면서, 제품 중량을 측정하여 중량이 더 이상 변하지 않는 시점으로 설정하는 것이 일반적인 방법이다. 보압절환의 경우 초기 실험을 통해 보압절환점을 선정하였다 할지라도 수지의 온도 및 사출속도가 변화함에 따라서 보압절환 시점이 변화하게 된다. 만약, 초기 실험에서 선정된 보압 절환시점을 모든 공정조건에 적용하여 실험한다면 실험에 많은 오차를 유발할 수 있다. 따라서 올바른 실험을 위해서는 공정모니터링 시스템을 이용한 정확한 공정조건 설정이 매 조건 실험에 선행되어야 한다.

Fig.3은 실험을 통해 측정된 대표적인 압력 곡선을 나타내고 있다. 캐비티 압력의 경우 게이트가 고화된 뒤 급형 내 압력 곡선에 기울기 변화가 발생하게 되고, 러너 압력의 경우는 게이트 고화 후 캐비티로 압력전달이 더 이상 진행되지 않아 압력의 재상승 현상이 발생하게 된다. 이를 통하여 전체 실험 조건의 적정 보압시간을 7초로 하였다. 실제로 사출성형 현장에서 모니터링을 통한 올바른 보압시간 설정은 성형사이클 단축에 큰 효과를 준다. 또한, 보압절환 시점도 모니터링 장비를 통하여 쉽게 확인 할 수 있으며, 예비실험을 통하여 실험조건에 적합한 절환시점을 설정하였다.

영향 인자 분석

Fig1에서 보듯이, 제품의 수축률 측정은 수지흐름 방향과 직각 방향에 대하여 측정하였으며, 수축률이 작을수록 좋은 망소특성의 S/N비 및 영향인자를 분석하였다. 분석결과 수지흐름방향과 직각방향의 주요 영향인자는 유사경향을 나타내고 있으며, Table 2에는 S/N비에 의한 설계인자 기여도를 나타내고 있다. 수축률에 기여율이 큰 인자들 중 보압과 냉각시간이 공통적으로 큰 영향을 미치고 있었으며, 수지온도 및 급형온도는 기여도가 서로 다르게 나타나고 있었다. 그러나 사출속도는 수축률에 큰 영향을 주지 않았다. 따라서 수축률을 최소로 하는 최적 성형인자는 $A_2B_3C_3D_2E_3$ 임을 알 수 있었다. Table 3에는 중량에 대한 망대특성의 설계인자 기여도를 나타내고 있다. 수축률과 중량은 서로 불가분의 관계를 가지고 있기 때문에 수축률에 대한 확인을 위해 중량에 대한 기여도 분석을 실시하였다. 중량에 가장 영향을 주는 인자는 수축률과 동일하게 보압의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 다른 성형인자의 영향은 크지 않음을 확인하였다.

상관분석

실제 사출성형공정에서는 공정조건의 변동에 따른 수축률 변동이 발생할 수 있기 때문에 도출된 최적 조건이 실제 성형공정에서도 지속적으로 유지되기는 어렵다. 따라서 도출된 최적 조건을 즉각적이고 지속적으로 관리하기 위해서는 공정모니터링 시스템을 활용하여 관리를 해 줄 필요가 있다. 공정모니터링 시스템을 이용하여 공정/품질관리를 하기 위해서는 관리 목표값인 제품의 수축 및 중량과 PMS 파라미터와의 상관분석을 실시하여 가장 상관도가 높은 파라미터를 이용하여 관리하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 대표적인 PMS 파라미터를 정의하고 이를 목표값인 수축률과 중량에 대해 상관분석을 실시하였다.

Fig. 3에는 PMS 파라미터로서 최대 압력값(PK), 최대 압력값까지의 적분값(PIK), 전체 압력 적분값(PIC) 등을 보여주고 있으며, Table 4는 PMS 파라미터와 수축률 및 중량과의 상관분석을 통하여 얻어진 상관계수 값을 나타내고 있다.

수축율과 중량은 PK나 PIK 보다는 PIC와 높은 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. Fig. 4'6에는 회기분석을 통하여 회기분석식과 결정계수를 나타내고 있으며, 회기분석식에 제품 산포가 일정범위 내에 들어오도록 Up/Low 제한 영역을 설정하여 관리할 수 있다.

결론

본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 수축률 및 중량에 영향을 주는 최적 영향인자를 도출하였으며, 공정모니터링을 통하여 얻어지는 PMS 파라미터와의 상관 관계 및 회기 분석을 통하여 전체압력 적분값(PIC)이 밀접한 관계를 보이고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- Y. Inoue *et. al.*, 2001, Full 3-D Prediction of Warpage of Injection Molded Parts, SPE ANTEC, pp. 279-283
 P. K. Kennedy *et. al.*, 2005, Corner Effect in Warpage Simulation, SPE ANTEC, pp. 511-515
 P. M. Gipson *et. al.*, 1999, The Effects of Process Conditions, Nominal Wall Thickness, and Flow Length on the Shrinkage Characteristics of Injection Molded Polypropylene, J. of Injection Molding Technology, Vol. 3, pp. 117-125

Table 1 Processing control factor and level

Control Factor	Level 1	Level 2	Level 3
A Melt Temp.	200 ℃	215 ℃	230 ℃
B Injection Speed	16.8 cm ³ /sec	28 cm ³ /sec	44.8 cm ³ /sec
C Hold Pressure	200 bar	400 bar	600 bar
D Mold Temp.	26 ℃	36 ℃	46 ℃
E Cooling Time	10 sec	16 sec	28 sec

Table 2 The response table of SN ratio in the shrinkage

Level	Flow Direction Shrinkage					Transverse Direction Shrinkage				
	Melt Temp.	Injection Speed	Hold Pressure	Mold Temp	Cooling Time	Melt Temp.	Injection Speed	Hold Pressure	Mold Temp	Cooling Time
1	-0.8703	-0.5968	-2.4658	-0.6171	-1.1274	-1.3183	-1.2603	-2.8138	-1.1707	-1.666
2	-0.1892	-0.5493	-0.3221	-0.1606	-0.4099	-0.9423	-1.2709	-1.2347	-0.9174	-1.164
3	-0.3706	-0.2838	1.3579	-0.6523	0.1073	-1.2306	-0.96	0.5573	-1.4032	-0.6612
Delta	0.6811	0.313	3.8237	0.4918	1.2347	0.376	0.3109	3.3711	0.4859	1.0048
Rank	3	5	1	4	2	4	5	1	3	2

Table 3 The response table of SN ratio in the weight

Level	Melt Temp.	Injection Speed	Hold Pressure	Mold Temp	Cooling Time
1	24.93	24.95	24.73	24.93	24.93
2	24.93	24.93	24.94	24.94	24.93
3	24.94	24.93	25.14	24.94	24.94
Delta	0.01	0.02	0.4	0.01	0.01
Rank	5	2	1	3	4

Table 4 Correlation analysis result

PMS Parameter	Flow Shrinkage	Transverse Shrinkage	Weight
PK	-0.62942	-0.79763	0.79353
PIK	-0.65807	-0.80649	0.91086
PIC	-0.73215	-0.87939	0.97212

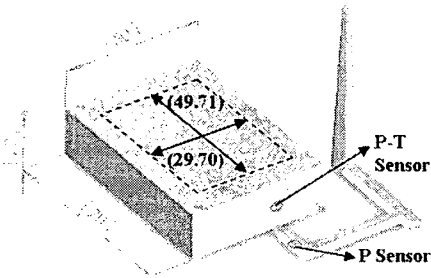


Fig.1 Product geometry and temperature/pressure sensor locations

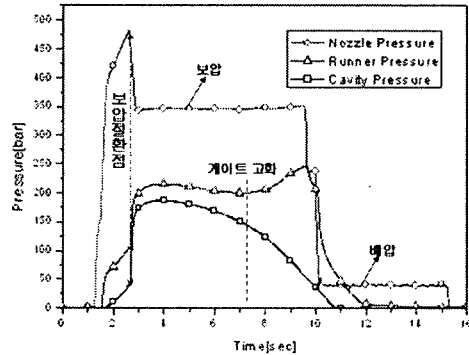


Fig.2 Pressure profile at nozzle, runner and cavity

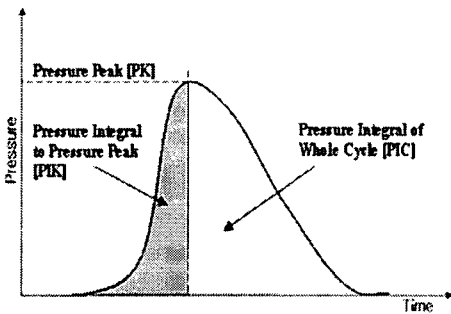


Fig.3 Monitoring System Parameters

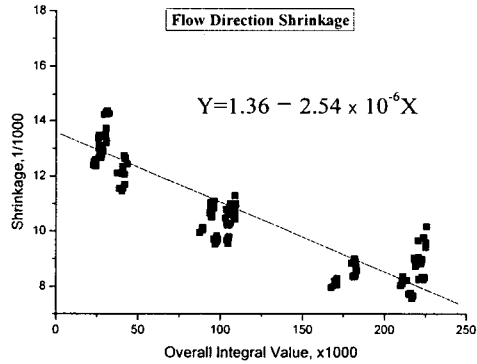


Fig.4 Regression analysis result of PIC to flow direction shrinkage

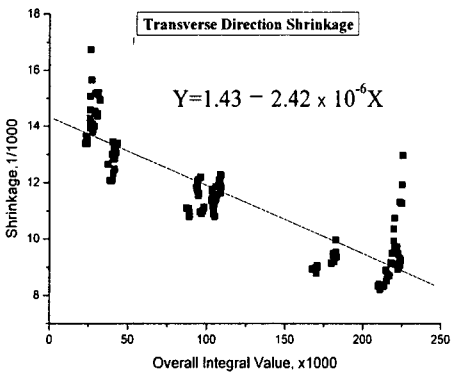


Fig.5 Regression analysis result of PIC to transverse direction shrinkage

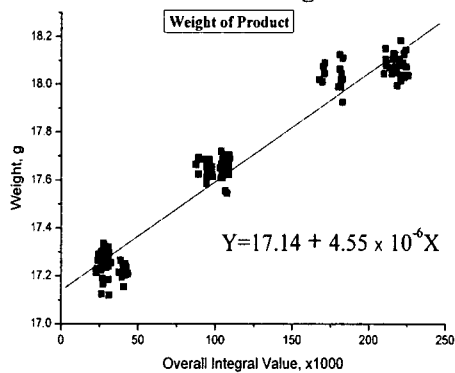


Fig.6 Regression analysis result of PIC to the product weight