다구찌의 강건설계 기법을 이용한 사출 성형품의 싱크 마크를 최소화하기 위한 사출성형 조건의 최적화

권윤숙*, 정영득**
***부경대학교 대학원, **부경대학교 기계공학부**
(2007. 6. 30. 접수 / 2007. 10. 31. 채택)

Optimization of injection molding to minimize sink index with Taguchi's Robust Design technique

Youn Suk Kwon*, Yeong Deug Jeong**
(Received June 30, 2007 / Accepted October 31, 2007)

ABSTRACT

In the manufacture and processing of large plastic materials, product quality is tested and verified through several techniques such as injection processing, residual stress through injection molding and shrinkage. With regards to the injection molding process, common problems such as inconsistent density is seen when different points of the product are discovered to have varying thickness levels. Sink marks in product are then evident. This occurs when there is poor molding conditions caused about by poor runner and packaging systems incorporated into the process. We designed the runner system which is possible balanced filling to cavities using CAE program Moldflow™ and then obtained optimal processing conditions by Taguchi's Robust Design technique.

Key Words : Sink index(싱크 지수), Filling balance(균형충전), Taguchi method(다구찌 방법), Volumetric shrinkage(체적수축), ABS(아크릴로니트릴-부타디엔-스티렌), S/N ratio(신호대 잡음 비)

1. 서 론

일반 플라스틱 재료에 대한 사출 성형공정, 성형품의 잔류응력, 수축 및 성형품의 품질에 관한 연구는 활발히 진행되어 오고 있다[1]. 그 중 성형품질에 관한 것으로서 성형품의 두께가 상대적으로 두꺼운 부위는 게이트의 고화 후에도 계속 수축하는 경우와 금형설계상 스프루, 러너 및 게이트의 위치가 적절하지 않아 두꺼운 부위까지 보압을 전달하지 못하게 되는 경우에 각 부위별 체적수축(Volumetric shrinkage)의 차이로 인한 싱크마크(sink marks)가 종종 발생한다[2,3]. 사출성형에 있어서 금형의 캐비티 말단까지 수지가 유입되는지, 즉 완전충전이 가능한 지가 중요하며 완전충전이 되더라도 용융수지가 게이트에서 제품의 끝단까지 흘러들어 갈 때 각 캐비티 사이에 동시충전이 중요하다.

본 논문에서는 원통형 4캐비티의 러너시스템에서 일어나고 있는 충전 불균형에 의해 발생하는 싱크마크의 최소화를 위한 사출성형 조건의 최적화를 모색하고자 한다. 일반적으로 다수캐비티 금형에서 충전불균형에 의한 싱크마크의 최소화를 위해서는 금형제작자와 성형 기술자의 경험과 직관에 의해 해결하는 시행착오법에 의존하고 있다. 시뮬레이션

도구를 이용하여 실제의 금형을 제작하기 전에 그 결과를 예측할 수 있으며, 사출성형 조건의 변화에 따른 성형품의 상태를 알 수 있어 최적 조건의 도출에 활용 할 수 있다.

2. 성형품의 형상 및 특징

본 연구의 대상 성형품은 Fig. 1과 같은 정수기의 필터 제품(central pipe, 이후 성형품으로 호칭) 으로 정밀 사출성형공정을 통하여 제조되며 두께는 3㎜, 직경은 17㎜, 길이는 260㎜인 긴 원통 구조를 가지고 있으며, 정수되어진 물이 빠져 나올 수 있도록 원통 면에 직경3.5의 구멍이 14개 있는 것이 특징이다. 파이프의 수지는 내화학, 약품성, 내유성이 뛰어나고 또한 가공적응성이 좋은 ABS 수지로 하였다. 4개의 캐비티로 구성되어 있으며 안쪽 2개 캐비티의 게이트와 러너의 크기와 바깥쪽 2개 캐비티의 크기가 다름을 알 수 있다. 게이트는 각각 2개씩 안쪽은 직경0.8, 바깥쪽 직경0.9, 스프루와 러너의 크기는 직경4x100㎜, 직경7x130㎜이며 이를 사출성형 하는데 있어서 기존의 공정에서는 Fig. 2에서 같이 싱크 마크가 눈에 띄게 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 러너와 게이트는 대칭적인 형상의 동시충전이 가능하게 하기 위하여 기존의 게이트와 러너의 형상에서 성형 해석용 모델링을 이용하여 우선 시뮬레이션 하였다.

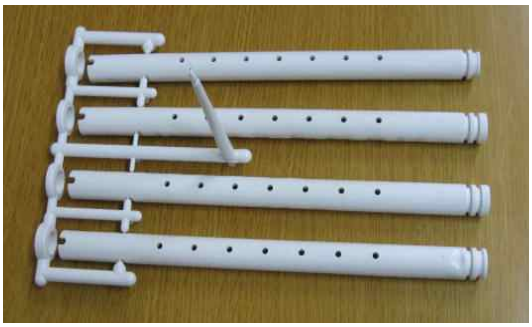

Fig. 1 Parts of central pipe and runner system for injection molding

Fig. 2 Detailed sink mark on the central pipe

3. 실험계획법에 의한 공정 최적화

3.1 공정해석

본 연구에서는 우선 사출성형에 있어서 금형의 캐비티 말단까지 수지가 유입하는지, 즉 완전충전이 가능 한 지와 완전충전이 되더라도 용융수지가 게이트에서 제품의 끝단까지 흘러들어 갈 때 동시충전을 성형해석 프로그램을 통해 개선시켰다[4].

또한 동시충전이 되고 난 후의 부품의 품질에 영향을 미치는 인자가 어떤 것들이 있는지를 조사하는 것이 중요한 요소이다. 첫 단계에서는 기존의 성형공정조건으로 해석을 실행 한 후 싱크마크와 연관되어 있는 인자들의 영향을 다구찌 실험계획법으로 분석하였다.

러너와 게이트는 대칭적인 형상의 동시충전이 가능하게 하기위하여 Fig. 3과 같이 기존의 성형 해석용 모델링을 게이트의 크기를 각각 직경0.8, 직경0.9, 스프루와 러너의 크기를 직경4x100㎜, 직경7x130㎜ 이용하여 우선 시뮬레이션 하였으며, Fig. 4와 같이 게이트의 형상과 크기를 직경1로 수정하여 시뮬레이션하여 제품의 싱크마크에 영향을 미치는 인자를 선정하였다.

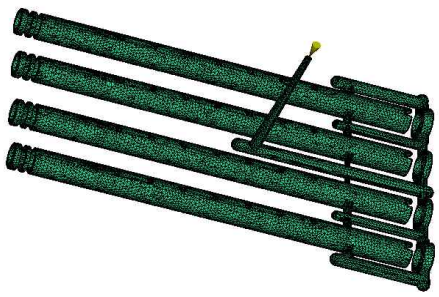

Fig. 3 Solid molding for central pipe

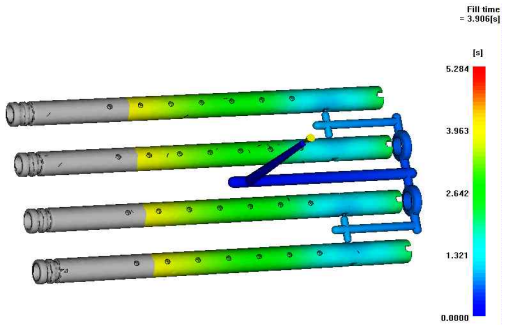

Fig. 4 modified runner system

3. 2 사출성형 공정 최적화

본 연구에서는 주어진 조건을 최적화하는 데 소요시간을 최소화하기 위해 다구찌 실험계획법을 사용하였다. 품질특성치가 싱크마크 이므로 망소특성에 해당되며 SN비는 식(1)에 의해서 계산된다[5,6,7]. 각 인자에 대한 수준(level)은 Table 1에서와 같은 재료의 물성치를 바탕으로 요구되는 성형범위 한계내에서 각각 2수준으로 정하였으며, 성형품의 품질특성치에는 치수, 강도 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 싱크 지수(sink index)를 다구찌 실험의 데이터로 사용하였다. 싱크 지수에 영향을 미치는 성형조건은 Table 2에서와 같이 게이트의 형상, 사출시간, 용융 수지온도, 금형온도, 성형조건들을 배치하고 각각 2수준으로 정하였다. 또한 직교표는 Table. 3과 같이 $L_{12}(2^6)$표로 선정하여 성형조건을 할당하여 각각의 망소특성으로 계산하였다.

$$SN_i = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} y_{ij}^2\right) \qquad (1)$$

단, y_{ij} 는 설계변수 행렬의 i 번째 실험점에서 관측된 j 번째 특성치이고, n 은 한 실험 점에서의 y의 반복수이다. 식(1)의 $\left(\frac{1}{n}\sum y^2{}_{ij}\right)$ 은 i 번째 실험점에서 $E(y^2)$의 추정이라고 볼 수 있으며, SN_i 는 이것을 로그로 변환시킨 다음 (-10)을 곱한 것이므로 SN_i를 크게 하는 설계조건을 찾는다는 것은 기대비용을 적게 하는 조건을 찾는 것과 대등하다고 할 수 있다.

싱크지수에 대한 값과 SN비를 구한 값은 Table 3과 같다. Table 3에서와 같이 싱크 지수를 부품의 5곳을 선정하여 품질의 특성치로 정하였다. 이를 이용하여 Fig. 5에 나타나 있는것과 같이 주요인 효과도를 알 아 볼 수 있었다. Table 3의 직교표에서 A, B, E, F를 제외한 나머지 두 항을 오차항으로 간주하였으며, 분산분석을 할 때 오차항으로 계산된다. Fig. 5의 주요인 효과도에서 나타나 있는 것과 같이 A_1, B_1, E_1, F_1 이 최적 조건임을 알 수 있었다. 본 논문에서는 Table 4에서 나타난 것과 같이 게이트의 형상(A)와 사출시간(B)이 실험에 가장 유의한 인자로 작용 한다는 것을 알 수 있다. 금형의 온도와 수지의 온도는 적은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 최적공정을 적용시켜 시뮬레이션한 결과를 Fig. 6에서 나타내고 있다.

Table 1 Material properties of ABS

Properties	Unit	Value
Conductivity	W/m/degC	0.15
Specific Heat	J/kg/degC	1968
Melt Density	g/㎤	0.9283
Ejection Temperature	deg.C	89

Table 2 Control factors and level

Control factors		Level	
		1	2
Type of gate shape (A)		current	modification
Injection time (B)	sec	10	5
Mold temperature (E)	℃	60	55
Melt temperature (F)	℃	235	230

Table 3 S/N ratio for central pipe

A	B	e	e	E	F	y1	y2	y3	y4	y5	SN ratio
1	1	1	1	1	1	1.33	0.41	0.57	0.85	1.32	0.2270
1	1	1	1	1	2	1.52	1.01	1.01	1.26	1.48	-2.1371
1	1	2	2	2	1	1.70	1.02	0.94	1.13	1.51	-2.2854
1	2	1	2	2	1	1.87	1.45	1.43	1.62	1.89	-4.4449
1	2	2	1	2	2	1.76	1.36	1.41	1.53	1.84	-4.0754
1	2	2	2	1	2	1.93	1.53	1.52	1.67	2.09	-4.9497
2	1	2	2	1	1	1.95	1.34	1.45	1.69	1.91	-4.5656
2	1	2	1	2	2	1.54	1.21	1.12	1.33	1.63	-2.7868
2	1	1	2	2	2	1.69	1.18	1.11	1.34	1.44	-1.9491
2	2	2	1	1	1	2.03	1.57	1.75	1.88	2.08	-5.4743
2	2	1	2	1	2	2.03	1.67	1.71	1.80	1.87	-5.2198
2	2	1	1	2	1	2.11	1.66	1.64	1.77	1.93	-5.2658

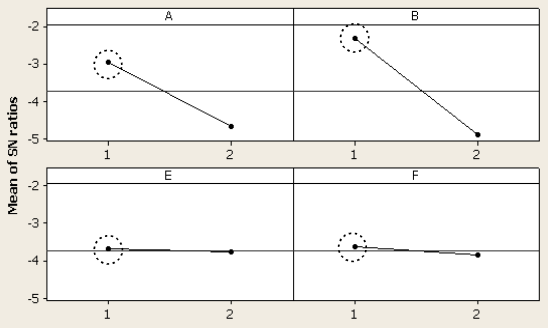

Fig. 5 Main effects for design variable

Table 4 Analysis for design variable

	DF	SS	MS	F
A	1	8.051	5.861	5.861*
B	1	16.181	16.181	16.181**
error	8	7.376	7.376	0.922
Total	10	31.609		

4. 최적조건에 의한 사출성형 시뮬레이션

본 연구에서는 실험적 모델을 사용하여 다구찌 실험계획법의 하나인 파라미터 설계(parameter design)를 이용하기로 하였다. 많은 선택조건에 대해 해석을 수행하게 되면 많은 시간과 비용이 소요되고 납기가 지연 될 수 있다. 따라서, 해석에 대한 경우의 수를 최소화하고 주어진 조건을 최적화하는데 시간을 최소화 하기 위해 실험계획법을 사용했다.

본 논문에서는 사출금형설계를 보다 최적화하기 위하여 Fig. 6과 Fig. 7에 나타나 있는 것과 같이 3차원 모델링 도구(Computer Aided Engineering)를 활용하였고 사출 성형해석을 위한 시뮬레이션 도구로는 Moldflow®상용 소프트웨어로 모의실험을 하였으며, 충전, 보압 해석을 하였다. 사면체(tetrahedral) 메쉬를 이용하여 싱크지수 예측을 수행하였다. 그리고 싱크지수가 가장 적은 성형 조건을 찾을 수 있었으며, 그 공정을 실제의 시험 사출에 적용하였다.

다구찌 실험계획법을 적용하여 시뮬레이션 한 후 시험사출을 한 결과 싱크 마크를 최소화 하기 위해서는 Fig. 7과 낮은 압력으로 서서히 사출 하는 것이 싱크 마크를 줄이는 것임을 알 수 있었다.

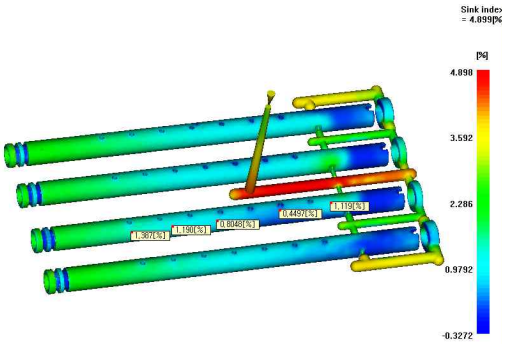

Fig. 6 Under optimization process for sink index

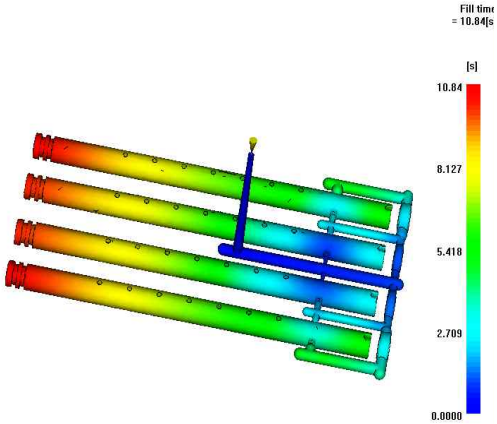

Fig. 7 Under optimization process for fill time

5. 결 론

본 연구에서는 기하학적으로 균형을 갖춘 러너를 가진 다수 캐비티 사출금형에서 균형충전과 싱크마크를 해결하기위한 실험연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 싱크마크를 줄이기 위한 성형공정 조건에 영향을 미치는 인자를 분석하기 위해 다구찌 실험계획법을 이용 하였으며 그 결과 유의한 성형조건은 게이트의 형상(A)과 사출시간(B)인 것을 알 수 있었다.

(2) 싱크마크 최소화하기 위한 최적 공정조건은 게이트 개수 4개(A_1) 사출시간 10초(B_1), 금형의 온도 60℃(E_1), 수지의 온도 235℃(F_1)로 나타났다.

(3) 위의 조건으로 실험을 한 결과 낮은 성형 압력으로 서서히 사출 하는 것이 싱크 마크를 최소화 시킬 수 있었다.

참고문헌

1) 권윤숙, "실험계획법을 이용한 사출 성형 공정의 최적화에 관한 연구", 부경대학교, pp. 9-10, 2002

2) 정영득, 구본흥, "사출성형해석에 의한 제품 및 금형설계", 인터비전, pp. 250-252, 2005
3) R. Y. CHANG and B. D. TSAUR "Experimental and Theoretical Studies of Shrinkage, Warpage, and Sink Marks of Crystalline Polymer Injection Molded Parts", Polymer engineering and science, Mid-August, Vol. 35, No. 15, pp. 1222-1230, 1995
4) Kevin Alam, Musa R. Kamal, "A robust optimization of injection molding runner balancing," Computer and Chemical Engineering, Vol. 29, pp. 1934-1944, 2005
5) Douglas C. Nontgomery "Design and Analysis of Experiments", John Wiley & Sons, Inc, pp. 218-246, 2001
6) 이승훈, "Minitab을 이용한 공학통계 자료분석", 이레테크, pp. 727-775, 2006
7) 박성현, "현대실험계획법", pp. 423, 2002