

Bobb in 성형품의 변형에 관한 연구

김병곤(동의대 대학원 기계공학과), 민병현(동의대 기계공학과)

A Study on Warpage of Bobbin Molded by Injection Molding Process

B. G. Kim(Mech. Eng. Dept., DEU), B. H. Min(Mech. Eng. Dept., DEU)

ABSTRACT

Warpage analysis of bobbin, molded by injection molding process was performed. Concerned with a mold design, cooling system was designed based on Taguchi method, the distance between cavity wall and cooling channel was most influent factor amongst four design variables like an inlet temperature of coolant, a coolant flow rate, a diameter of cooling channel, and the distance between cavity wall and cooling channel. Optimal packing processes to reduce the warpage of molded part was analyzed based on the response surface method by considering holding time, persistence time up-to no-flow temperature, persistence time up-to ejecting temperature, and holding pressure. Their optimal processing conditions were 9.4 seconds, 5.3 seconds, 15.2 seconds, and 85MPa, respectively.

Key Words · Warpage Analysis(휨 해석), Injection Molded Parts(사출 성형품), Filling Analysis(충전해석), Packing Analysis(보압해석), Cooling Analysis(냉각해석), DOE(실험계획법)

1. 서론

플라스틱 제품은 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 제조품의 하나로 약 1/3 정도가 사출성형법에 의해 생산되어지고 있다. 사출성형 공정은 저렴한 비용으로 복잡하고 다양한 플라스틱 제품들을 생산할 수 있으며, 가볍고 강도가 매우 높은 고분자 재료의 개발과 더불어 전기·전자 제품은 물론이고 자동차, 항공기 등 정밀제품의 생산에 이르기까지 응용분야가 확대되고 있다. 사출성형품을 제조하는데 있어서 주변 여건 변화에 강건한 제품의 품질을 얻기 위해서는 사출기의 성능, 사출금형, 재료의 특성 및 사출성형 공정조건 등을 분석할 필요가 있다. 특히 사출성형을 하고 난 뒤 제품에서 오는 변형은 제품에 치명적인 결함을 줄뿐만 아니라 하나의 부품에서 완제품으로 조립되었을 때는 전체 제품에도 나쁜 영향을 미칠 수가 있다. 일반 플라스틱 재료에 대한 사

출성형공정, 성형품의 잔류응력, 수축 및 휨에 관한 연구는 오래 전부터 활발히 진행되어 오고 있다.¹⁾

본 논문에서 검토될 성형품은 선을 감는 보빈(Bobbin)으로 정밀 사출성형공정을 통하여 제조되며 보빈의 몸통 부는 선을 감아야 하기 때문에 적정 강도를 유지해야 하며, 장기적인 사용에 따른 보빈의 아래 부분과 윗 부분이 변형에 견딜 수 있는 신뢰성을 가져야 한다. 사출금형설계를 보다 최적화하기 위해서 CAE(Computer Aided Engineering)기법을 활용하였고, CAE해석 도구로는 Moldflow 상용 소프트웨어를 사용하였다. 냉각관의 영향을 보기 위해 냉각관이 없는 경우와 있는 경우에 대하여 각 공정을 비교하였으며, 냉각채널과 관련한 많은 인자들 중 캐비티와 냉각관사이의 거리(A), 냉각수 입구온도(B), 냉각수 유량(C) 및 냉각관의 직경(D) 등을 설계인자로 하였다.²⁾ 또한 충전, 보압 및 냉각 과정의 해석을 바탕으로 제품의 경량화, 경비 절감 및 공정 단축에

기여할 수 있는 사출성형공정을 채택하여 성형품의 변형해석을 수행하였다

2. 제품 개요

본 연구에 적용될 보빈의 모델링이 Fig. 1에 보여지며, 제품의 특성상 보빈이 고정되기 위해 보빈의 한 부분에 고정 구멍이 있으며 이로 인해 구조의 형상이 대칭이 아니다 성형품의 재료는 강도와 내진성이 강한 플라스틱 수지의 일종인 스틸렌 아크릴로니트린 수지(AS)를 사용하였는데 AS수지는 일반수지와 비교해서 보다 높은 연화점(軟化點), 강성 및 내 용제성을 가지고 있어 강성과 치수안정이 필요할 때 많이 사용된다³⁾

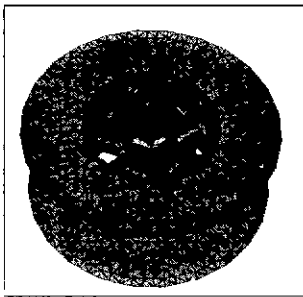


Fig. 1 Solid modeling of bobbin

3. 성형 공정 분석

3.1 충전공정 분석

보빈 성형품은 제품의 특성상 보빈 고정을 위해 설계된 구멍에 의해 360° 회전 방향으로 보면 비대칭 구조이므로 충전 공정동안 균일한 유동평형을 이루면서 용융 수지가 캐비티 내를 채워나가는 것이 중요한 요소이다. 따라서 첫 단계에서는 냉각채널에 냉각수를 흘리지 않고 시뮬레이션을 행하여 균일 유동을 달성할 수 있는 게이트를 결정하고, 이 후 냉각채널에 냉각수를 순환시키면서 균일 유동 충전을 분석하고, 이때 냉각공정과 관련된 인자들의 영향을 다구찌의 실험계획법으로 분석하고자 한다.

3.1.1 냉각채널이 없는 충전 공정

게이트는 핀 포인트 게이트를 사용하고 게이트는 60° 간격으로 보빈의 내부 원통의 중간에 6점의 게이트를 배치하고 게이트의 입구 지름은 5곳이 1mm, 보빈을 고정시키기 위한 보빈의 고정 원통부 쪽의 게이트 입구 지름은 1.5mm, 런너의 지름은 8mm로 하였으며, 보빈의 몸통과 날개의 두께를 조정하면서

시뮬레이션을 행하여 유동 평형 상태를 살펴보았다

두께가 두꺼울수록 유동의 상태는 한쪽으로 편향된 유동이 나타남을 볼 수 있었고 날개 및 몸통의 두께가 1.5mm 일 때 유동의 상태가 가장 균일함을 확인할 수 있었으며 Fig. 2에 충전 결과를 보여주고 있다

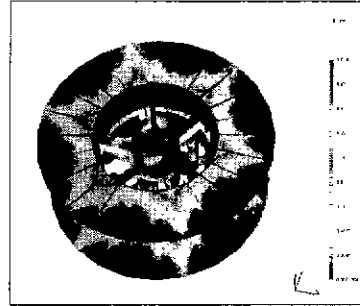


Fig. 2 Filling pattern of bobbin
(Thickness of body and wing, 1.5mm)

3.1.2 냉각채널을 이용한 충전 공정

앞 절에서 나온 해석 결과를 가지고 냉각채널에 냉각수를 순환시키면서 다시 충전공정을 분석하였다 실제 사출성형품을 생산 할 경우 냉각채널에 냉각수를 흘려서 사출성형을 하기 때문에 실제 현장에서 작업하는 환경과 같은 조건을 이용하여 충전 시뮬레이션을 수행하였다. 냉각채널에서 가지는 많은 인자들 중 캐비티와 냉각관사이의 거리(A), 냉각수 입구온도(B), 냉각수 유량(C), 냉각관의 직경(D)을 설계인자로 하였다.

본 해석에서는 다구찌의 실험계획법에 의한 4인자 3수준을 포함하는 직교배열표를 이용하였다

$L_9(3^4)$ 직교배열표는 본 시뮬레이션의 목적에

부합되며 상세한 실험조건은 Table 1에 보여진다.

Table 1 Value of parameters for the simulation

제어인자	수준		
	1	2	3
냉각관사이의 거리(A)	16	18	20
냉각수 입구온도(B)	45	50	55
냉각수 유량(C)	3.04	3.8	4.56
냉각관직경(d)	8	10	12

각 인자의 수준은 실제 입력인자의 실험조건을 변환하여 3수준으로 하였으며 수준에 따른 설계번호의 값은 사출금형 핸드북의 값을 이용하여 격정범위로 선정하였으며⁴⁾ 시뮬레이션 수행은 각 조건에서

한 번만 수행하였다. 동시충전을 판단할 수 있는 성능인자로 충전시간(NS)을 본 논문에서는 규정하였으며, 잡음인자에 강인한 설계를 하기 위하여 신호 대 잡음비(SN Ratio)를 분석하는데 이때 이 인자들의 값들이 작을수록 동시충전이 잘 이루어졌다고 할 수 있으므로 이 값들을 최소화하는 방안으로 망소특성을 택하여 구한 SN비의 값을 Table 2에 보여준다.

Table 2 SN ratio for the balance of filling

#	A	B	C	D	Time (sec)	SN ratio
					NS	
1	1	1	1	1	19.4527	-25.7795
2	1	2	2	2	13.9916	-22.9173
3	1	3	3	3	16.5159	-24.3580
4	2	1	2	3	21.0208	-26.4529
5	2	2	3	1	20.6805	-26.3112
6	2	3	1	2	21.2465	-26.5457
7	3	1	3	2	22.6738	-27.1104
8	3	2	1	3	20.4430	-26.2108
9	3	3	2	1	21.0070	-26.4472

SN비에 대한 분산 분석에 따른 기여율을 살펴보면 캐비티와 냉각관 사이의 거리(A)의 기여율이 67.29%, 냉각수 입구온도(B)의 기여율이 18.23%, 냉각수 유량(C)의 기여율이 9.42% 및 냉각관 직경(D)의 기여율이 5.06%로 가장 낮게 나타났다.

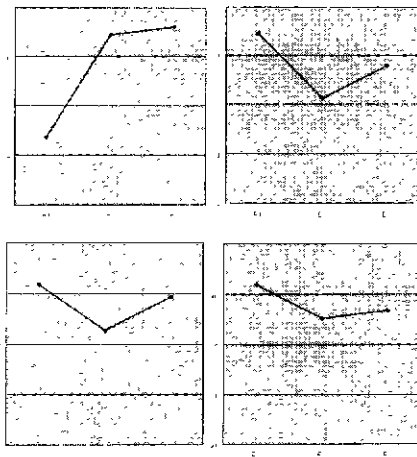


Fig. 4 SN ratio according to the level of design variables

Fig. 4는 냉각관의 설계와 관련한 설계인자의 각 수준에서 SN비의 점 추정치를 보여주는데 캐비티와 냉각관사이의 거리(A)는 1수준, 냉각수 입구온도(B)

는 2수준, 냉각수 유량(C)의 수준은 2수준, 냉각관 직경(D)은 2수준으로 조합될 때 최소의 SN비 값으로 균일 유동을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.2 보압 공정에서 변형 분석

보압 공정은 충전공정 동안에 캐비티를 채운 용융 수지가 금형 면과 접하면서 수축을 일으켜 줄어든 수지의 양을 보충하여 체적 수축을 보상하며, 이때 보압 공정은 게이트가 고화 될 때까지 지속된다. 게이트가 고화 된 후에는 압력을 가해도 제품에 영향을 미치지 않으므로 게이트가 고화 된 후에는 압력을 가하지 않고 냉각만 해주면 된다. 보압과 보압 시간의 결정은 우선 보압 시간을 고화 시간과 연계하여 결정하고, 보압 크기 및 냉각시간을 결정하였다. 직경이 1.5mm인 게이트의 고화 시간을 보압 시간으로 결정하면 9초(X_1), 수지가 더 이상 유통하지 않는 온도 150°C까지의 시간을 보면 약 5초(X_2), 성형품 취출이 가능한 온도 106°C까지 성형품 온도가 도달하는 시간이 약 15초(X_3)이며, 보압의 크기는 충전 공정에서 사용된 약 55MPa보다 큰 60MPa(X_4)로 결정하였다. 보압 공정을 위해 결정된 값들은 냉각채널을 이용한 충전 공정 이후 보압 공정에 적용된다. 이렇게 결정된 값들에 대해 실험계획법 중 중심합성계획법을 이용한 반응표면분석법으로 보압에 적용되는 값들이 변형에 영향을 미치는지를 알아보고 또한 변형을 최소화 할 수 있는 최적의 값들을 알아보았다. Table 3은 본 연구에서 중점적으로 고려하는 4 개의 설계변수를 중심합성계획법에 대해서 보여주고 있다.

Table 3 Value of design variables according to the central composite design

Variables	-1.414	-1	0	1	1.414
X_1	6	6.8784	9	11.1216	12
X_2	2	2.8784	5	7.1216	8
X_3	5	7.9279	15	22.0721	25
X_4	55	59.3918	70	80.6082	85

설계인자 변화에 따른 변형 값의 분포를 2차 회귀 방정식을 통해 아래에 보여주며, 최속강하법을 이용하여 최적화 한 해석결과 X_1 , X_2 , X_3 은 각각 0.1829, 0.1371, 0.0257로 허용범위 -1.414, 1.414 안에 존재함을 알 수 있으나, X_4 는 2.4311로 허용범위 밖에 있다. 이 결과로 X_2 가 변형에 가장 영향을 미치는

인자임을 알 수 있으며 위의 최적조건에서 변형 값은 7.4539mm 이었다.

$$\begin{aligned} \varphi = & 8.8071 + 0.0082X_1 - 0.0017X_2 + 0.0056X_3 - 0.5215X_4 + 0.0674X_1^2 + 0.0675X_2^2 + 0.1080X_3^2 + 0.0073X_4^2 \\ & + 0.0073X_1X_2 + 0.0073X_1X_3 + 0.0138X_1X_4 \\ & - 0.0011X_2X_3 - 0.0074X_2X_4 - 0.0042X_3X_4 \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 5는 X_1 , X_2 , X_3 의 값을 고정하고 X_4 값에서 P1, P2 값을 가지고 변형해석을 한 결과로 P1점은 반응 표면 분석에서의 X_4 의 최적 값이고 P2는 P1점에서 가장 가까운 중심 합성 구간의 점이다⁵⁾ 시물레이션에 의한 변형 값이 P1일 때 변형 값이 4.333mm이고 P2일 때 변형 값이 4.383mm로 나타나고 있다

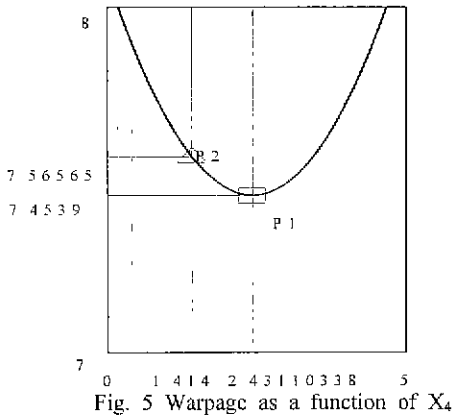


Fig. 5 Warpage as a function of X_4

Fig. 6은 P2점에서 변형에 대한 시물레이션을 수행한 값을 보여 주는데, 2차 회귀 방정식의 최적 결과에 대한 최적 점은 P1점이지만 실제 시물레이션으로 변형 해석을 수행한 결과 P1과 P2는 제품에 크게 영향을 끼칠 정도의 변형차이는 나지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 반응표면분석법으로 나온 최적 값은 보압 시간이 9.3882초, 수지가 더 이상 유동하지 않는 시간이 5.2911초, 성형품 취출이 가능한 온도 106℃까지 성형품 온도가 도달하는 시간이 15.1823초, 보압 크기는 95.7896 MPa로 결정되었다.

4. 결과

사출성형공정을 이용한 Bobin 성형품의 제조를 위하여 공정에 따른 변형 분석이 수행되었으며, 특히 시물레이션 S/W를 이용하여 냉각채널에 냉각수가 순환되고 있는 조건하에서 변형 해석이 이루어졌다. 충전공정 단계에서 유동 평형이 이루어질 수

있는 유동 시스템을 다구찌 실험계획법을 이용하여 도출하였으며, 냉각채널에 냉각수가 순환되고 있는 상태에서 충전에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 냉각관과 캐비티 사이의 거리라는 것을 분산분석을 통하여 알 수 있었다. 보압 공정에서는 수축과 변형을 최소화하기 위해 반응표면분석법이 적용되었는데 최속강하법을 이용하여 구한 최적조건이 보압 시간이 9.3882초, 수지가 더 이상 유동하지 않는 시간이 5.2911초, 성형품 취출이 가능한 온도 106℃까지 성형품 온도가 도달하는 시간이 15.1823초, 보압 크기는 95.7896MPa로 나타났다. 반응표면분석법에서 도출된 최적조건(P1)의 변형 값과 보압 크기만을 변화하여 도출된 최적조건(P2)의 변형 값이 크게 차이가 나지 않음을 시물레이션 수행 결과로 알 수 있었기에 향후 보압의 크기로 인한 금형의 피로응력을 감안하여 보압의 크기는 P2 조건에서의 값인 85MPa를 적용하는 것이 바람직 할 것으로 본다.

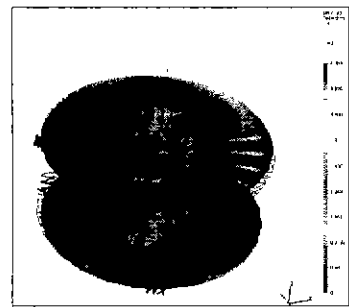


Fig. 6 Warpage at the condition P2

참고 문헌

1. 정성택, 권태현, "단점유 보강 플라스틱 사출성형품의 섬유 방향성에 따른 기계적 성질 예측," 유변학, Vol. 8, pp78 ~ 91, 1996.
2. 민병현, "사출금형의 냉각시스템 설계에 관한 연구", 「'99 추계학술대회 논문집」, pp. 910-913, 한국정밀공학회, 1999.
3. 홍명웅, 사출성형기술 II, 기전연구소, pp13 ~ 18, 1990.
4. 조용수, 이정일, 사출성형 이론, 일진사, pp155 ~ 160, 1995.
5. 민병현, 여홍태, 허관도, "A study on the design of free stressed cold extrusion die with stress rings based on design of experiment," ICME 2000, 상하이, pp.584-588, November 21-22, 2000.