

다구치 법을 통한 다이슬라이드식 사출성형의 공정파라미터 최적화에 관한 연구

정수진*, 문성준, 정선경, 이평찬, 문주호¹
 자동차부품연구원, ¹한일산업(주)
 (sjujeong@katech.re.kr*)

Study on Optimization of Process Parameters for Plastic Injection Molding with Die Slide Injection by Using Taguchi Method

Soo-Jin Jeong*, Seong-Joon Moon, Sun-Kyoung Jeoung, Peong-Chan Lee, Ju-ho Moon¹
 Korea Automotive Technology Institute, ¹Hanil Industrial co.
 (sjujeong@katech.re.kr*)

1. 서론

최근 전세계적으로 친환경이 대두되면서 환경규제를 만족하는 신소재 및 신공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편 신공법 중 밀폐용기를 생산하는 다이슬라이드식 사출성형은 제품의 형상과 치수 정밀도를 향상시켜 기능부품으로써 완성도를 향상시킬 뿐 아니라, 부가 공정을 삭제하여 공정을 최소화할 수 있는 친환경 제조공정이다. 그러나 밀폐용기를 재결합하는 과정에서 제품에 발생하는 결함을 없애기 위해서는 다양한 전산 모사 해석과 실험을 통한 사출성형 공정파라미터들의 최적화가 필요하다.

사출성형에 대한 연구는 1940년 이전 Hele-shaw가 정리한 일반화된 점성모델을 바탕으로 1950년대에는 Spencer와 Gilmore는^(1,2) 금형내의 수지의 유동상태를 실험하고 고분자의 유동에 대한 상태방정식을 정리했고, 이후 Hieber은⁽³⁾ 유한요소법과 유한차분법을 혼용한 하이브리드 해석으로 2차원 유동과 두께방향을 해석했고, Dymond 등은⁽⁴⁾ 밀도변화 계산 시 액상과 고상에 모두 적용할 수 있는 2-domain Tait 방정식을 정리했다.

본 연구에서는 밀폐용기인 자동차 냉각수 보조탱크를 다이슬라이드식 사출성형을 통해 성형했을 때 발생하는 여러 가지 결함을 해결하고자, 유한요소법과 유한차분법에 기반한 사출성형해석을 수행한다. 1차 공정에서 제품의 상부와 하부의 사출성형을 해석하고, 2차 공정에서 제품의 상·하부의 결합성형을 위해 2단 사출성형해석을 수행한다. 다구치 법의 망소특성과 L16 직교배열을 사용한 실험계획으로 최적의 공정파라미터를 결정하고, 최적화 조건에서 성형된 해석결과를 분석하였다.

2. 이론

사출성형은 계량부에 있는 플라스틱 용융수지가 스크류의 피스톤 운동에 의해 러너로 유입되면서 시작하며, 이후 게이트를 지나서 금형부인 캐비티를 채우는 과정을 거친다. 이때 플라스틱 용융수지는 비뉴턴 유체로서 점탄성 거동을 하며 유동선단부터 고화되면서 캐비티에 충전된다. 본 연구에서 이러한 유동에 대한 충전모델로 일반화된 Hele-Shaw⁽¹⁾ 모델을 사용하며, 수치해석은 유한요소법과 유한차분법을 혼용하여 사용한다. 플라스틱 용융수지의 밀도변화가 충전과정 이후 유동에 미치는 영향을 고려하기 위하여, 밀도변화를 계산할 때 액상과 고상에 모두 적용할 수 있는 Dymond 등이⁽⁴⁾ 제안한 2-domain Tait 방정식을 이용한다.

3. 실험 방법

본 연구에서는 밀폐용기인 냉각수 보조탱크를 다이슬라이드식 사출성형으로 제작할 때 발생하는 결함을 없애기 위하여 다구치 실험계획법에 의한 사출성형해석을 수행하였다. 유한요소 해석을 위해 3D(Solid) 요소를 사용하고 각 요소의 aspect ratio를 평균 9.93으로 설정하며, 이에 맞는 스프루, 러너, 게이트를 모델링하였다. 플라스틱 용융수지는 대표적인 열가소성 수지인 폴리프로필렌으로 물성은 Table 1과 같고, 수지의 Cross-WLF 점도모델은 Table 2와 같다. 한편 사출품의 성형 후 수축과 변형, 잔류응력 등은 공정파라미터인 용융온도, 사출속도, 보압력, 냉각시간 등의 중첩원리에 기인한다. 따라서 다구치법의 품질특성 중 망소특성(Smaller-the-better characteristics)으로 접근할 수 있으며, 기대손실을 최소화할 목적함수인 S/N ratio(Signal to noise ratio)를 사용하였다.

본 연구에서는 용융온도, 사출속도, 보압력, 냉각시간을 설계변수로 결정하였으며, 각각 4개의 수준을 가지도록 하여 4인자-4수준의 실험계획을 설계하였다(Table 3 참조). 여기서 용융수지 온도는 일반적인 폴리프로필렌 수지의 권장온도 범위 내에서 정하였으며, 1차 사출공정에서 사출속도는 계량부 램 속도로 대신하였는데, 각 램 포지션 173-143mm, 143-103mm, 103-49mm, 49-0mm의 순서에 대한 최고속도 대비 가변속도를 나타낸다. 그리고 보압력은 0-4sec 동안 지속되는 형폐력이고 냉각시간은 1차 사출 후 2차 사출까지 걸리는 시간을 합한 것이다. 한편 2차 사출의 경우 용융수지 온도는 1차 사출과 같으며, 사출속도는 각 램 포지션 26-21mm, 21-8mm, 8-0mm의 순서에 대한 최고속도 대비 가변속도를 나타낸다. 그리고 보압력은 0.6sec 동안 지속되는 형폐력이고 냉각시간은 2차 사출 후 제품 취출까지 걸리는 시간으로 정하였다. 이러한 공정파라미터를 바탕으로 정한 L16 직교배열은 Table 4와 같다.

Table 1 Material properties of Polypropylens (PP)

Item	Value	Item	Value
Commercial product name	J-370 H.P.C	Material characteristics	Crystalline
Density of solution [g/cm ³]	0.687(melt) 0.913(solid)	Ejected temp. [°C]	93
Viscosity [Pa s]	Cross-WLF	Modulus of elasticity [MPa]	1,340
Recommended die temp. [°C]	20~80	Shear modulus [MPa]	481.3
Recommended melt temp. [°C]	200~280	Poisson ratios	0.392

Table 2 Cross-WLF model coefficients of Polypropylens (PP)

n	Tau*[Pa]	D ₁ [Pa·s]	D ₂ [K]	D ₃ [K/Pa]	A ₁	A ₂ [K]
0.4929	1248	1.03e+014	263.15	0	31.335	51.6

Table 3 The process parameters and their levels

1st Injection					2nd Injection				
Lv.	Process parameters				Lv.	Process parameters			
	X ₁ : Melt temp. [°C]	X ₂ : Ram speed [% , Max]	X ₃ : Packing pressure [Mpa]	X ₄ : Cooling time [sec]		X ₁ : Melt temp. [°C]	X ₂ : Ram speed [% , Max]	X ₃ : Packing pressure [Mpa]	X ₄ : Cooling time [sec]
1	200	75·70·73·65	25·20	30	1	200	25·22·15	12	25
2	230	80·75·78·70	30·25	40	2	230	30·27·20	16	35
3	260	85·80·83·75	35·30	50	3	260	35·32·25	20	45
4	280	90·85·88·80	40·35	60	4	280	40·37·30	24	55

Table 4 Orthogonal array(L₁₆) for experiments

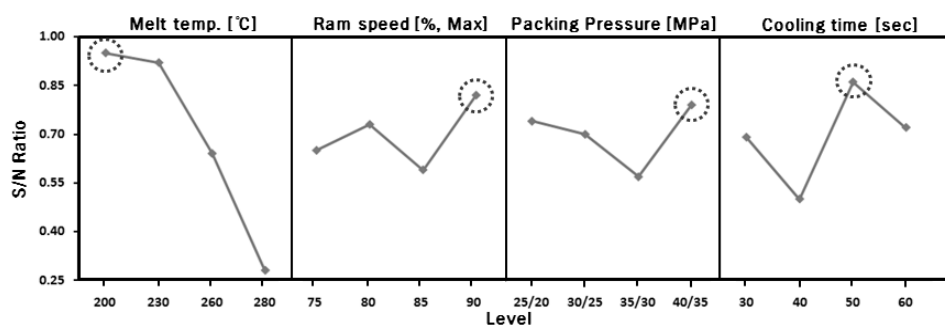
No	Process parameters				No	Process parameters			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	1	1	1	1	9	3	1	3	4
2	1	2	2	2	10	3	2	4	3
3	1	3	3	3	11	3	3	1	2
4	1	4	4	4	12	3	4	2	1
5	2	1	2	3	13	4	1	4	2
6	2	2	1	4	14	4	2	3	1
7	2	3	4	1	15	4	3	2	4
8	2	4	3	2	16	4	4	1	3

4. 실험 결과

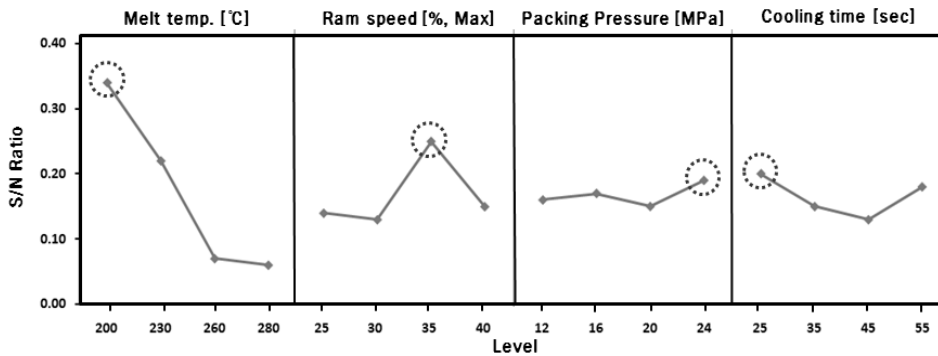
Table 5는 L16 직교배열에 따라 설정된 실험들의 사출성형 전산모사 결과이다. 도출된 각 특성치들은 단위와 차원이 다르기 때문에 S/N ratio로 최적화 하기 위하여 무차원화(Normalizing) 하였다. 그리고 Fig. 1은 각 설계변수의 수준 변동에 따른 S/N ratio의 변화로 직교배열에서 각 설계변수가 갖는 동일 수준의 S/N ratio 평균값을 도시한 것으로 각 그래프의 가장 큰 값이 최적 수준을 의미한다. 또한 유의수준을 95%수준에서 분산 분석한 결과 1차 사출에서 X₁은 수준 변동에 따라 결과가 매우 유의하였으며, 2차 사출에서는 X₁과 X₂가 크게 영향을 주었다. Fig 2는 최적조건으로 성형해석을 수행한 결과이다.

Table 5 Simulation result associated with the experiments

1st Injection				2nd Injection			
No	Warp. [mm]	Shrink. [%]	S/N ratio	No	Warp. [mm]	Shrink. [%]	S/N ratio
1	1.819	9.681	1.111	1	1.816	9.828	0.382
2	1.983	9.591	0.869	2	1.825	9.918	0.318
3	1.975	9.587	0.891	3	1.829	9.806	0.359
4	1.935	9.586	0.961	4	1.832	9.829	0.341
5	1.952	9.682	0.878	5	1.883	10.063	0.118
6	1.942	9.623	0.927	6	1.861	10.007	0.198
7	1.934	9.627	0.934	7	1.822	9.889	0.341
8	1.933	9.607	0.949	8	1.853	10.034	0.202
9	2.139	9.748	0.511	9	1.884	10.223	0.052
10	1.864	9.623	1.064	10	1.885	10.250	0.035
11	2.280	9.712	0.279	11	1.871	10.240	0.074
12	2.045	9.693	0.709	12	1.871	10.217	0.083
13	2.373	9.604	0.158	13	1.879	10.260	0.048
14	2.425	9.689	0.026	14	1.891	10.260	0.017
15	2.287	9.602	0.316	15	1.837	10.250	0.148
16	2.150	9.566	0.582	16	1.899	10.250	0.004

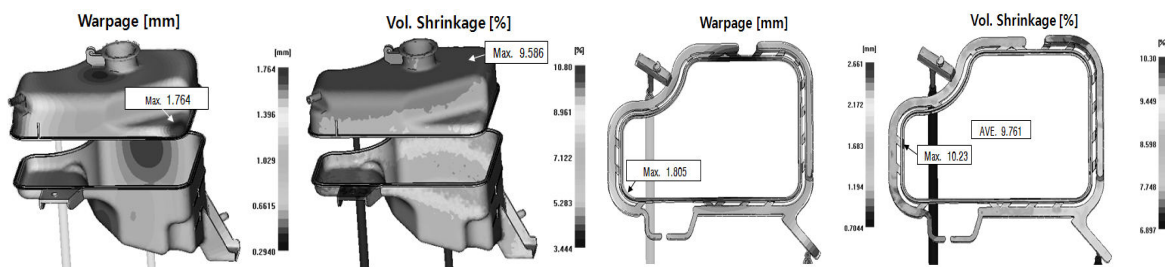


(a) 1st Injection



(b) 2nd Injection

Fig. 1 Means of S/N ratios and optima of design variables-circle



(a) 1st Injection

(b) 2nd Injection

Fig. 2 The analysis results through the optimum conditions

5. 결론

본 연구에서는 사출성형 전산모사를 수행하여 다이슬라드식 사출성형에서 발생하는 결함을 해결하고자 다구치 실험계획법의 망소특성과 L16 직교배열법을 공정파라미터를 최적화하는데 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 1차 사출에서 변형을 최소화 시키는 공정조건으로 용융수지 온도 200℃, 최고속도 대비 램 속도 90%, 보압력 40Mpa, 냉각속도 60sec 로 결정한다.

2) 2차 사출에서 제품 상·하부 결합시 누설방지를 위한 최적의 공정조건으로 용융수지 온도 200℃, 최고속도대비 램 속도 35%, 보압력 24Mpa, 냉각속도 25sec 로 결정한다.

3) 사출성형의 여러 공정파라미터 중 용융온도와 램 속도가 제품성형에 절대적인 영향을 주는 공정파라미터임을 유의수준 95%의 분산분석을 통해 확인하였다.

참고문헌

1. Spencer, R. S. and Gilmore, G. D., "Flow Phenomena in the Injection Molding of Polystyrene", J. Collid. Sci., 6, 118(1950)
2. Spencer, R. S. and Gilmore, G. D., "Equation of State for High Polymers", J. Appl. Phys., 21, 523(1950)
3. Hieber, C. A. and Shen, S. F., "A Finite-element/Finite-difference Simulation of the Injection-molding Filling Process", J. Non-Newton Fluid Mech., 7, 1(1980)
4. Dymond, J. H. and Malhotra, R., "The equation 100 years on", International Journal of Thermophysics, vol. 9 (6), 941-951(1988)