

다구치 법을 통한 다이슬라이드식 사출성형의 공정파라미터 최적화

정수진[†] · 문성준 · 정선경 · 이평찬 · 문주호*

자동차부품연구원
330-912 충청남도 천안시 동남구 풍세면 용정리 74
*한일산업(주)
336-881 충청남도 아산시 신창면 공화리 96-35
(2011년 6월 15일 접수, 2011년 9월 30일 채택)

Optimization of Process Parameters of Die Slide Injection by Using Taguchi Method

Soo-Jin Jeong[†], Seong-Joon Moon, Sun-Kyoung Jeoung, Pyoung-Chan Lee and Ju-ho Moon*

Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea
*Hanil Industrial Co., 96-35 Koonghwa-ri, Shinchang-myeon, Asan-si, Chungnam 336-881, Korea
(Received 15 June 2011; accepted 30 September 2011)

요 약

플라스틱 제품의 다이슬라이드식 사출성형은 기존 사출공법의 부가공정을 삭제하여 제품 생산에 요구되는 비용과 시간을 현저히 줄여준다. 그러나 다이슬라이드식 사출성형은 사출제품의 백화, 수지침투, 기공, 수지넘침 등의 결함들을 해결해야한다. 본 연구에서는 사출성형의 공정파라미터들을 유한요소법과 다구치법을 사용하여 최적화하고자 한다. 사출 성형해석은 Moldflow insight 2010 코드로 해석하며 2차 사출에서는 단단 사출코드를 적용한다. 폴리프로필렌 (PP)을 밀폐용기인 냉각수 보조탱크로 성형할 때 사용하는 공정파라미터들은 다구치법의 망소특성과 L₁₆ 직교배열을 사용한 실험계획을 통해 최적화된다. 한편 최적값은 유의수준 5% 수준의 분산분석을 통해 타당성을 검증한다. 그리고 최적화 조건에서 성형된 제품과 기존 제품의 치수정확도를 비교한 결과 치수안정성이 5% 이상 개선됨을 확인하였다.

Abstract – Die slide injection marvelously reduces the cost and time in processing plastic products because they can simplify the conventional process through eliminating additional process. However, this process must resolve some defects like whitening, resin infiltration, blowhole, resin overflow, etc. In this study, the process parameters of the injection molding are optimized by using the finite element method and Taguchi method. The injection molding analysis is simulated by employing the Moldflow insight 2010 code and the 2nd injection is by adopting the Multi-stage injection code. The process parameters are optimized by using the L₁₆ orthogonal array and smaller-the-better characteristics of the Taguchi method that was used to produce an airtight container (coolant reservoir tank) from polypropylene (PP) plastic material. Meanwhile, the optimum values are confirmed to be similar in 95% confidence and 5% significance level through analysis of variance (ANOVA). Moreover, new products and old products were compared by measuring the dimensional accuracy, resulting in the improvement of dimensional stability more than 5%.

Key words: Die Slide Injection, Airtight Container, Polypropylenes, Injection Molding Analysis, Taguchi Method

1. 서 론

사출성형은 저렴한 설비투자로 복잡한 형상의 제품을 대량으로 생산할 수 있는 대표적인 소성가공법으로 산업계 전반에서 폭넓게 사용되고 있다. 특히 기간산업인 자동차 분야는 연비 향상 및 배기가스 감소를 위한 차량경량화의 일환으로 사출제품들의 사용 비중을 확대하는 추세이다. 또한 친환경이 전세계적으로 대두되면서 사출성형 분야도 환경규제를 만족하는 신소재 및 신공법에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 한편 밀폐용기를 생산하는 다이슬라이드식

사출성형은 제품의 형상과 치수 정밀도를 향상시켜 기능부품으로써 완성도를 향상시킬 뿐 아니라, 부가공정을 삭제하여 공정을 최소화할 수 있는 친환경 제조공정이다. 그러나 밀폐용기를 재결합하는 과정에서 제품에 발생하는 결함을 없애는 금형수정 및 공정조건 최적화가 필요하다.

사출성형에 관한 연구는 1868년 Hyatt 형제가 가소물인 셀룰로이드를 개발하고, 1946년 Watson 등이 기계식 사출성형기를 개발하여 산업계에 널리 보급되면서 시작하였다. 1940년 이전 Hele-shaw가 정리한 일반화된 점성모델을 바탕으로, 1950년대에는 Spencer와 Gilmore[1,2]는 금형 내의 수지의 유동상태를 실험하고 고분자의 유동에 대한 상태방정식을 정리했고, 1970년대 Kamal과 Kenig[3,4]은

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: sjjeong@katech.re.kr

power law와 Spencer-Gilmore 상태방정식을 통해 게이트에 따른 유동선단의 모양을 예측했다. 이후 1980년대 Hieber와 Shen[5]은 유한요소법과 유한차분법을 혼용한 하이브리드 해석으로 2차원 유동과 두께방향을 해석했고, Hirt와 Nichols[6]은 자유계면의 운동을 표현하는 VOF법을 정의했다. 그리고 Dymond와 Malhotra[7]는 밀도변화 계산시 액상과 고상에 모두 적용할 수 있는 2-domain Tait 방정식을 정리했고, Rudman[8]은 용합선단의 이동을 추적하는 제어부피법을 제안하였다. 한편 Taguchi[9]는 과거 통계적 실험계획법에 시스템 내부 파라미터를 효율적으로 결정하는 공학적 실험계획법을 제안하였다.

본 연구에서는 밀폐용기인 자동차 냉각수 보조탱크를 다이슬라이드식 사출성형을 통해 성형했을 때 발생하는 여러 가지 결함을 해결하고자, 유한요소법과 유한차분법에 기반을 둔 사출성형해석을 수행한다. 1차 공정에서 제품의 상부와 하부의 사출성형을 해석하고, 2차 공정에서 제품의 상·하부의 결합성형을 위해 2단 사출성형해석을 수행한다. 다구치 법의 망소특성과 L_{16} 직교배열을 사용한 실험계획으로 최적의 공정파라미터들을 결정하고, 기존 제품과 개선된 제품을 비교하여 개선효과를 분석한다.

2. 다이슬라이드식 사출성형

자동차용 밀폐용기를 생산하는 방법으로 제품의 상부와 하부를 따로 사출하여 냉각·취출하고, 부가 공정인 열용착공정으로 결합한 후 누설시험을 거치는 것이 일반적이다. 그러나 친환경공법인 다이슬라이드식 사출성형은 제품의 상부와 하부를 1차 사출로 성형하고, 중공코어 금형이 이동한 후, 2차 사출에서 수지밀봉을 통해 제품을 제작한다(Fig. 1참조). 따라서 기존 공법의 부가공정들을 삭제함으로써 유해물질 감소와 에너지 효율 향상, 생산시간 감소, 비용 및 공간 절약 등이 가능하다.

그러나 Fig. 2와 같이 일반적인 사출성형 결함인 백화(Stress whitening), 밀봉결함(Defect sealing), 수지침투(Resin infiltration), 기공(Blowhole), 수지 넘침(Resin overflow)이 제품의 각 해당 위치에 발생한다. 이는 1차 사출이후 제품 상부에서 발생하는 뒤틀림(Warpage)이 수지밀봉을 위한 2차 사출에서 발생하는 결함에 큰 영향을 줄을 의미한다. 그리고 2차 사출에서 발생하는 미성형을 없애

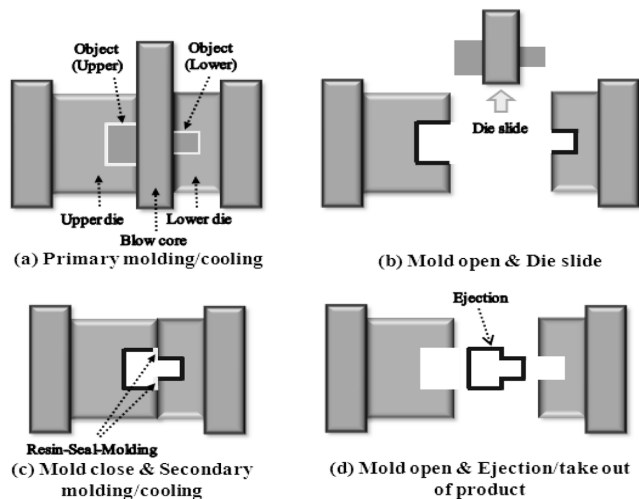


Fig. 1. Schematic view of the die slide injection process.

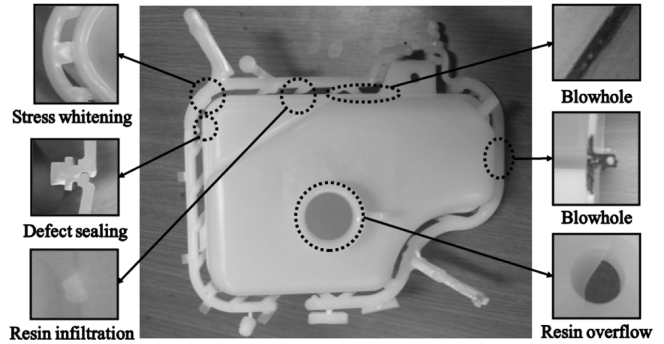


Fig. 2. Positions and types of product defects.

기 위해 일정 수준 이상의 사출압이 필요하며, 사출압이 과도한 경우 수지침투와 수지 넘침이 생기고, 이로 인해 잔류응력이 증가하면 치수가 불안정해져 기능부품으로서 제품의 완성도를 떨어뜨린다.

3. 수치해석

본 연구에서 제안한 다이슬라이드식 사출성형을 전산모사 하고자 수치해석을 위한 이론과 해석조건을 제안하고, 이를 통해 산출한 해석결과를 실험과 비교하여 수치해석의 정확도를 검증한다.

3-1. 이론

사출성형은 계량부에 있는 플라스틱 용융수지가 스크류의 피스톤 운동에 의해 러너로 유입되면서 시작되며, 이후 게이트를 지나서 금형부인 캐비티를 채우는 과정을 거친다. 이때 플라스틱 용융수지는 비뉴턴 유체로 점탄성 거동을 하며 유동선단부터 고화되면서 캐비티에 충전된다. 본 연구에서 이러한 유동에 대한 충전모델로 일반화된 Hele-Shaw 모델을 사용하며, 수치해석은 유한요소법과 유한차분법을 혼용하여 사용한다.

플라스틱 용융수지의 밀도변화가 충전과정 이후 유동에 미치는 영향을 고려하여, 밀도변화를 계산할 때 액상과 고상에 모두 적용할 수 있는 Dymond [7] 등이 제안한 2-domain Tait 방정식을 이용한다.

$$v(P, T) = v(0, T) \left\{ 1 - C \ln \left(1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right\} \quad (1)$$

이 식에서 C는 0.0894이고, B는 온도 파라미터, $v(0, T)$ 는 압력이 0 일 때의 비체적이다. 한편 보압과 냉각과정에서 비정상 상태의 압축성, 비등온 유동을 통해 액체에서 고체로의 상변화에 대한 에너지 식은 (2)와 같으며, 비압축성 유체와 일반화된 뉴턴 유체, 일정한 열전도율을 가진다고 가정한다[9].

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla P \right) + \eta \dot{\gamma}^2 + k \nabla^2 T \quad (2)$$

이 식에서 ρ 는 용융밀도, \vec{v} 는 속도, P는 압력, C_p 는 비열, β 는 재료의 확장계수, k는 열전도도, η 는 겔보기 점도, $\dot{\gamma}$ 는 전단율이고, $\tau = \eta \dot{\gamma}$ 이다[9]. 냉각과정에서 금형이 대기 중이나 사출성형기로 빼앗기는 열량이 없다고 가정하여 단위 시간당 수지로부터 금형으로 이동하는 열량에 대한 식은 (3)과 같다.

$$t_c = \frac{h^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left(\frac{T_x - T_M}{T_p - T_M} \right) \quad (3)$$

이 식에서 T_x 는 캐비티 중앙의 온도, T_M 은 금형온도, T_p 는 용융수지온도, α 는 열 확산계수이다[9]. 그리고 본 연구에서는 비뉴턴유체의 점성모델 중 열가소성 수지의 점도를 예측하는 Cross-WLF 모델을 사용하며, 식은 (4)와 같다.

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[\frac{-A_1(T-T^*)}{A_2+(T-T^*)} \right]$$

$$T^* = D_2 + D_3P$$

$$A_2 = A_2 + D_3P \tag{4}$$

이 식에서 η_0 는 온도 T 일 때의 점도, D_1 은 전단속도가 뉴턴영역일 때 점도가 일정한 영역으로 기준점도, A_1 은 상수로 유리전이온도일 때 17.44, A_2 는 상수로 유리전이온도일 때 51.6, $T-T^*$ 는 설정온도와 점도 측정시 기준온도, T^* 는 T_0 기준온도 실험시 D_3 을 고려한 온도, D_2 는 기준온도, D_3 은 압력의존계수이다.

3-2. 해석조건

다이슬라이드식 사출성형으로 자동차용 냉각수 보조탱크를 성형할 때 발생하는 결함을 없애기 위하여 다구치 실험계획법에 의한 사출성형해석을 수행하였다. 사출성형해석은 'Moldflow Insight 2010 코드'를 사용하였으며, 제품의 상·하부를 성형하는 1차 사출은 열가소성사출성형해석(Thermoplastics Injection Molding)을 사용하였고, 수지밀봉을 위한 2차 사출은 열가소성오버몰딩해석(Thermoplastics Overmolding)을 사용하였다. 1차 사출의 수치해석에는 솔리드 요소(3D mesh)로 각 요소의 종횡비(aspect ratio)는 평균 9.93으로 설정하고 이에 맞는 스프루, 러너, 게이트를 모델링하였다. 그리고 2차 사출의 수치해석에는 솔리드 요소(3D mesh)

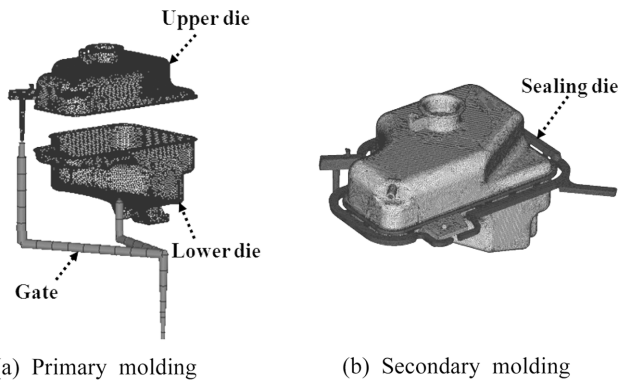


Fig. 3. Tool layout for coolant reservoir tank injection-molding.

Table 2. Material properties of Polypropylene (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 3. Cross-WLF model coefficients of Polypropylene (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 1. Number of finite elements for injection molding analysis of coolant reservoir tank

Process order	Model	Mesh
1st Injection	Die	Tetras 3D (885,660)
	Gate	Beam (69)
2nd Injection	Die	Tetras 3D (1,130,076)
	Gate	Beam (71)

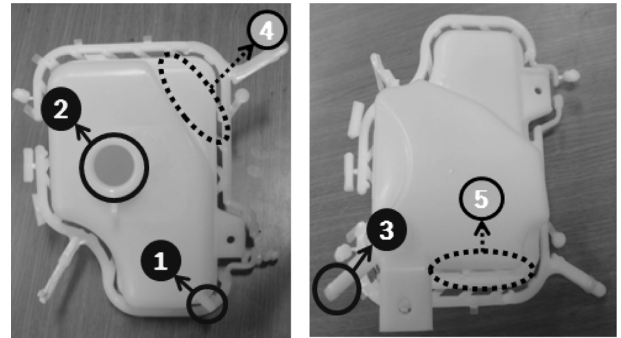


Fig. 4. Positions in coolant reservoir tank for measuring dimensional accuracy.

로 각 요소의 종횡비(aspect ratio)를 평균 9.4로 설정하였다(Fig. 3, Table 1참조). 플라스틱 용융수지는 대표적인 열가소성 수지의 폴리프로필렌으로 물성은 Table 2와 같고, 수지의 Cross-WLF 점도 모델은 Table 3과 같다.

3-3. 검증

수치해석 결과의 검증을 위해 냉각수 보조탱크 시작품과 전출한 수치해석으로 산출한 결과의 치수 정확도를 상대오차로 분석하였다. Fig. 4는 측정할 주요 치수부의 위치로 실선 원(1-3)은 각 주요 연결부의 외경과 내경이고, 점선 원(4-5)은 두께를 측정할 위치이다. 상대오차를 분석한 결과 평균 4% 수준으로 본 연구에서는 신뢰할 만한 수준으로 판단하였다(Table 4참조). 한편, 공정조건은 현장 작업자들과의 브레인스토밍으로 결정했고, 실 공정과 수치해석에 동일하게 적용하였다. 1차 사출에서 용융수지온도는 230 °C, 평균 사출속도는 최대 램 속도의 75%, 보압력은 8s 동안 4s 간격으로 25 MPa, 20 MPa, 냉각시간은 47s로 적용한 후, 2차 사출에서 용융수지온도는 230 °C, 평균 사출속도는 최대 램 속도의 31%, 보압력은 0.6s 동안 16 MPa, 냉각시간은 35s를 적용하였다.

Table 4. Dimensions and relative errors in the 5 circulars of coolant reservoir tank seen Fig. 4

Measured positions	Start product [mm]	Measured positions		
		Analysis results		
		Dimensions [mm]	Relative error [%]	
1	Outer diameter	7.9	7.8	1.3
	Internal diameter	3.9	3.8	2.6
2	Outer diameter	44.7	44.5	0.5
	Internal diameter	30.7	31.5	2.6
3	Outer diameter	8.8	8.7	1.1
	Internal diameter	5.3	5.0	5.7
4		2.0	2.16	8.0
5		2.0	2.65	32.5

4. 공정조건 최적화

다이슬라이드식 사출성형으로 자동차용 냉각수 보조탱크를 성형하기 위한 최적의 공정조건을 결정하고자, 다구치법을 통한 실험계획법으로 수치해석을 수행한다.

4-1. 다구치 실험계획법

사출품의 성형 후 수축과 변형, 잔류응력 등은 공정조건인 용융온도, 사출속도, 보압력, 냉각시간의 중첩원리에 기인하며, 이에 따라 4개의 설계변수들을 선정하고, 4개의 수준을 가지도록 하여 4인자-4수준의 실험계획을 설계하였다(Table 5. 참조). 여기서 용융수지 온도는 일반적인 폴리프로필렌 수지의 권장온도 범위 내에서 정하였다. 그리고 사출속도는 계량부의 램 속도로 대신하였는데, 1차 사출의 4개 값은 램 포지션 173~143, 143~103, 103~49, 49~0 mm의 순서에 대한 최대속도 대비 가변속도를 나타내고, 2차 사출의 4개 값은 램 포지션 26~21, 21~8, 8~0 mm의 순서에 대한 최대속도 대비 가변속도를 나타낸다. 또한 보압력은 0~4s 동안 지속되는 형폐력이고, 냉각

시간은 1차 사출 후 2차 사출까지 걸리는 시간과 2차 사출에서 제품 취출까지 걸리는 시간이다. 이러한 설계변수를 바탕으로 정한 L16 직교배열은 Table 6과 같다.

한편 상기와 같은 4인자-4수준의 실험계획법은 다구치법의 품질 특성 중 망소특성(Smaller-the-better characteristics)으로 접근할 수 있으며, 기대 손실을 최소화할 목적함수인 S/N ratio(Signal to noise ratio)는 식 (5)와 같다[10].

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \tag{5}$$

이 식에서 n은 특성치 개수, Y_i 는 측정된 특성치를 나타낸다. 한편 특성치의 가법성을 향상시키기 위하여 10 log를 취하고, 분산이 작을수록 S/N ratio를 커지게 하려고 음수를 취하였다.

4-2. 최적 수준 예측

Table 7은 L₁₆ 직교배열에 따라 설정된 실험들의 사출성형 전산모사 결과이다. 도출된 각 특성치들은 단위와 차원이 다르기 때문에 S/N ratio로 최적화를 위한 무차원화(Normalizing)가 필요하다. 따라서 수치해석으로 구한 결과에서 제품의 치수 완성도를 결정하는 비틀림(Warpage)과 수축(Shrinkage)을 특성치로 정하고, 1차 사출공정 이후 각 특성치에 대한 비율로 무차원화 하여 S/N ratio를 계산하여 수록하고, 상용 통계분석 프로그램인 Minitab 13을 사용하였다.

Fig. 5는 각 설계변수의 수준 변동에 따른 S/N ratio의 변화로 직교배열에서 각 설계변수가 갖는 동일 수준의 S/N ratio 평균값을 도식한 것으로 각 그래프의 가장 큰 값이 최적 수준을 의미한다. 따라서 S/N ratio로 제품의 결함을 최소화하는 공정조건을 결정하면, 1차 사출에서는 용융온도 200 °C, 램 최대속도 대비 평균 86.3%, 보압력 40 MPa/35 MPa, 냉각속도 50s이다. 그리고 2차 사출에서는 용융온도 200 °C, 램 최대속도 대비 평균속도 30.4%, 보압력 24 MPa, 냉각속도 25s이다. 한편 최적 수준을 분산분석 하면 신뢰도 95%, 유의수준 5%에서 p-value가 0.05보다 작은 변수는 1차 사출에서 X₁과 2차

Table 5. The process parameters and their levels

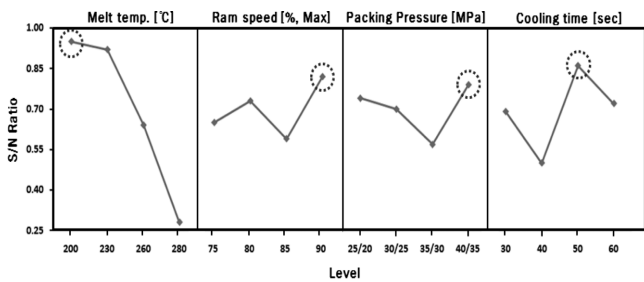
Lv.	1st Injection				Lv.	2nd Injection			
	Process parameters					Process parameters			
	X ₁ : Melt temp. [°C]	X ₂ : Ram speed [%, Max]	X ₃ : Packing pressure [MPa]	X ₄ : Cooling time [sec]		X ₁ : Melt temp. [°C]	X ₂ : Ram speed [%, Max]	X ₃ : Packing pressure [MPa]	X ₄ : Cooling time [sec]
1	200	75·70·73·65	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 6. Orthogonal array (L₁₆) for experiments

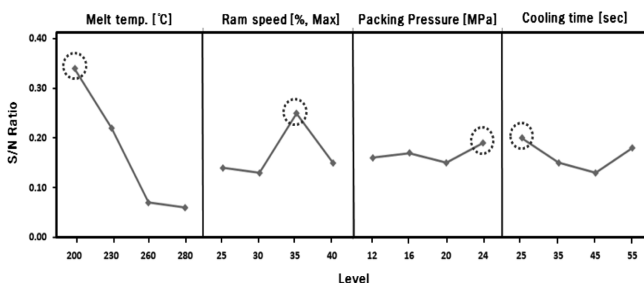
No	Process parameters				No	Process parameters			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	1	1	1	1	9	3	1	3	4
2	1	2	2	2	10	3	2	4	3
3	1	3	3	3	11	3	3	1	2
4	1	4	4	4	12	3	4	2	1
5	2	1	2	3	13	4	1	4	2
6	2	2	1	4	14	4	2	3	1
7	2	3	4	1	15	4	3	2	4
8	2	4	3	2	16	4	4	1	3

Table 7. 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. 5. Means of S/N ratios and optima of design variables (circles).

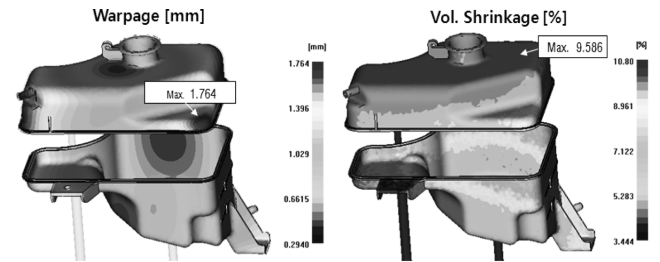
사출에서 X_1 과 X_2 가 유의하였으며, 모든 변수 값이 유의수준에 근사함을 확인하였다.

5. 결과 및 고찰

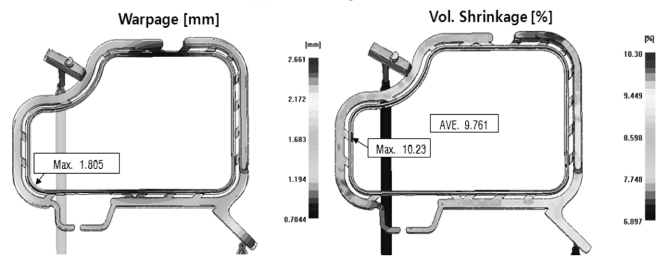
전술한 본문 4에서 결정된 1·2차 사출의 최적 공정조건에서 성형된 시작품을 기존제품과 비교분석한다.

5-1. 해석 결과

Fig. 6의 (a)는 1차 사출에서의 최적의 공정조건을 적용한 성형해석 결과이고, (b)는 2차 사출에서 최적의 공정조건을 적용한 성형해석 결과이다. 제품이 성형되었을 때 치수 안정성에 영향을 주며 최대 허용치보다 수치가 낮으면 안정성이 우수하다고 판단한다. 수치



(a) 1st injection



(b) 2nd injection

Fig. 6. Analysis results in optimal conditions.

해석 결과 1차 사출에서는 비틀림(Warpage)은 1.764 mm, 수축(Shrinkage)은 9.586%이고, 2차 사출에서는 비틀림(Warpage)은 1.805 mm, 수축(Shrinkage)은 최대 10.23%(평균 9.76%)로 최대 허용치인 3 mm, 20% 내에 있음을 확인하였다.

5-2. 개선 효과 및 고찰

기존 제품과 새로운 공정조건에서 성형한 시작품의 치수개선효과를 분석하였다. 측정된 치수부의 위치는 밀폐용기인 냉각수 보조탱크의 주요 치수부로 앞서 수록한 Fig. 4와 같다. Table 8은 각 주요 측정부에서 새로운 시작품의 치수 개선정도를 보여주며, 새로운 제품은 기존 대비 5% 이상 치수 정밀도가 우수함을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 공정조건은 각 구간마다 램 속도가 변하거나, 시간에 따라 보압력을 조절해야 한다. 따라서 좀더 정밀한 사출이 가능한 서보모터 시스템과 스크류의 개선이 필요하며, 이러한 개선이

Table 8. Dimensions and relative errors in the 5 circulars of coolant reservoir tank seen Fig. 4 (unit: mm)

Measured positions	Ideal [mm]	Measured positions				
		New product		Old product		
		Dimensions [mm]	Relative error [%]	Dimensions [mm]	Relative error [%]	
1	Outer diameter	7.90	8.08	2.3	7.59	3.9
	Internal diameter	4.00	3.91	2.3	3.12	22.0
2	Outer diameter	44.37	44.67	0.7	42.08	5.2
	Internal diameter	31.48	30.65	2.6	27.31	13.3
3	Outer diameter	8.74	8.78	0.5	8.64	1.1
	Internal diameter	4.83	5.28	9.3	4.75	1.7
4		2.00	1.97	1.5	1.84	8.0
5		2.00	1.98	1.0	1.88	6.0

이루어진다면 더욱 정밀한 공정조건들을 실험인자로 넣어서 최적화하는 것이 가능하다.

6. 결 론

본 연구는 친환경 공법인 다이슬라이드식 사출성형에서 발생하는 결함들을 해결하고자 다구치법을 사용하여 공정조건들을 최적화 하고, 금형수정 및 수지분석을 통해 수지밀봉 시 발생하는 결함들을 제거하였다. 그리고 금형수정 및 최적화 공정조건을 적용한 새로운 시작품을 기존 시작품과 비교하기 위해 치수 정밀도를 측정하여 신뢰성을 검증함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다구치법의 망소특성과 L₁₆ 직교배열을 사용한 실험계획을 통해 제품의 변형을 최소화시키는 공정조건으로, 1차 사출에서는 용융수지 온도 200 °C, 램 최대속도 대비 평균 86.3%, 보압력 40 MPa / 35 MPa, 냉각속도 50s로 결정하였고, 2차 사출에서는 용융수지 온도 200 °C, 램 최대속도 대비 평균속도 30.4%, 보압력 24 MPa, 냉각속도 25s로 결정하였다.

(2) 최적화된 공정조건을 적용하여 수치해석을 수행한 결과, 1차 사출에서 비틀림(Warpage)은 1.764 mm, 수축(Shrinkage)은 9.586% 이고, 2차 사출에서 비틀림(Warpage)은 1.805 mm, 수축(Shrinkage)은 최대 10.23%(평균 9.76%)로 최대 허용치인 3 mm, 20% 이내의 뛰어난 안정성을 확보함을 확인하였다.

(3) 최적화 조건을 적용하여 생산한 새로운 제품은 초기 조건을 적용한 기존 제품보다 치수완성도가 5% 이상 개선되었다.

감 사

본 논문은 중소기업청 주관 “제조현장녹색화 기술개발사업”의 일환으로 수행되었으며, 본 연구결과에 이르기까지 후원해 주신 관계

자분들께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- Spencer, R. S. and Gilmore, G. D., “Flow Phenomena in the Injection Molding of Polystyrene,” *J. Coll. Sci.*, **6**(2), 118-132(1950).
- Spencer, R. S. and Gilmore, G. D., “Equation of State for High Polymers,” *J. Appl. Phys.*, **21**(6), 523-526(1950).
- Kamal, M. R. and Kenig, S., “The Injection Molding of Thermoplastics. I. Theoretical Model,” *Polym. Eng. Sci.*, **12**(4), 294-301(1972).
- Kamal, M. R. and Kenig, S., “The Injection Molding of Thermoplastics. II. Experimental Test of the Model,” *Polym. Eng. Sci.*, **12**(4), 302-308(1972).
- 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), 1-32(1980).
- Hirt, C. W. and Nichols, D. D., “Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries,” *J. comp. Phys.*, **39**(1), 201-225(1981).
- Dymond, J. H. and Malhotra, R., “The equation 100years on,” *Int. J. Thermophys.*, **9**(6), 941-951(1988).
- Rudman, M., “A Volume-tracking Method for Incompressible Multifluid Flows with Large Density Variations,” *Int. J. Numer. Fluids*, **28**(2), 357-378(1998).
- Kim, B., Jang, W., Kim, J., Cho, J., Park, Y.-H. and Choe, S., “Application of CAE in Injection Molding Process,” *HWAHAK KONGHAK*, **41**(5), 577-584(2003).
- Taguchi, G., “Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Product and Processes,” *Asian Productivity Organization*, 1-191(1988).