

# 수치해석을 이용한 플라스틱 풀리 성형품의 최적 성형에 관한 연구

김경아<sup>1</sup> · 한성렬<sup>†</sup>

공주대학교 금형설계공학과<sup>1,†</sup>

## A study on the optimum molding of plastic pulley using numerical analysis

Kyung-A Kim<sup>1</sup> · Seong-Ryeol Han<sup>†</sup>

Department of Mold & Die Engineering, Kongju National University<sup>1,†</sup>

(Received March 14, 2020 / Revised March 27, 2020 / Accepted March 31, 2020)

**Abstract:** Plastic pulleys used for the purpose of power transmission have to very high roundness characteristics. The roundness of plastic pulleys is influenced by many factors. In this study, the effect of molding conditions on the roundness of pulleys was analyzed using a numerical analysis program. To improve the roundness, molding conditions that minimize the amount of deformation of the pulley were studied through an experimental design method. Among the experimental design methods, the Taguchi method was used, and the main molding conditions affecting the deformation of the pulley were the resin temperature and the holding pressure. It was found that the amount of deformation is reduced by about 2.86% when molding with the optimum molding conditions compared to when the optimum molding conditions are not applied.

**Key Words:** Design of Experiment, Injection Molding, Numerical Analysis, Pulley, Taguchi Method

### 1. 서 론

플라스틱 재료를 이용하는 사출성형은 많은 장점을 가지고 있는 가공방법으로 현재 많은 분야에서 사출성형을 이용하여 성형된 제품과 부품이 사용되고 있다<sup>1,2)</sup>. 특히, 사출성형 방법은 한 번의 가공으로 복잡하고 정밀한 제품을 얻을 수 있기 때문에 앞으로도 지속적으로 발전하리라는 전망은 확실하다.

이러한 장점을 바탕으로 많은 부품들이 성형되지만 부품 성형 이전에 무엇보다 우선되어야 할 조건은 금형의 정밀 설계 및 성형기술이 필요하다. 정밀한 금형 설계를 위해서는 설계 초기단계에서 성형품의 변형량을 미리 예측하는 것이 매우 유리하다. 예측되는 변형량을 금형 설계에 반영하여 변형을 최소화 할 수 있는 금형을 설계하는 것이 현재의 트렌드이다<sup>3-5)</sup>.

성형품의 변형량 예측을 위하여 사출성형 시뮬레이션이 이루어지고, 그 결과를 분석하여 금형 설계

의 데이터로 활용하는 것이 현재 사출금형 설계의 주요한 흐름이다. 이러한 일련의 과정을 통하여 금형 제작비 절감, 성형 비용 절감, 금형 납기 단축이 가능하게 되었다. 그러나 사출성형 시뮬레이션만으로는 한계가 있다. 왜냐하면 사출성형에 적용되는 사출성형 조건이 많으며, 각 조건들의 상호작용에 의한 영향이 성형품질에 많은 영향을 미치기 때문이다. 성형조건들 중에서 성형품의 품질 특성에 크게 영향을 미치는 조건들을 찾아서 최적화하여 성형 품질을 극대화 할 필요가 있다. 성형 최적화를 위하여 실험계획법을 이용한 연구가 많이 이루어지고 있다.

Han 등은 자동차의 경량화를 위한 플라스틱 에어백 하우징의 변형을 최적화하기 위하여 실험계획법의 일환인 다구찌 방법을 이용하였다<sup>6)</sup>. Tang 등은 얇은 판의 성형을 최적화하기 위하여 다구찌 방법을 이용하여 실험 계획을 최적화 하였다. 이를 통하여 판 성형품의 휨을 최적화 하였다<sup>7)</sup>. Naveen Sait 등은 다구찌 방법을 유리섬유 강화 플라스틱 파이프의 가공조건을 최적화하는데 적용하였다<sup>8)</sup>.

1, † 교신저자: 공주대학교 금형설계공학과  
E-mail: srhan@kongju.ac.kr

Hentati 등은 PC/ABS 블렌드 수지의 사출성형 공정 매개 변수를 최적화하기 위해 다구찌 방법을 사용하였다. 최적화된 공정 매개 변수에 의한 시뮬레이션에서 성형품의 결함이 없음을 관찰하였다<sup>9)</sup>. Han 은 자동차 스티어링 휠에 조립되는 플라스틱 베젤의 변형을 최적화를 위하여 다구찌 방법을 적용하였다<sup>10)</sup>.

본 연구에서는 동력전달의 핵심부품이며 진원도가 요구되는 플라스틱 풀리(pulley)의 성형을 최적화하기 위하여 다구찌 방법을 적용하였으며, 성형해석 시뮬레이션을 통하여 최적화 결과를 확인하였다.

## 2. 성형해석

### 2.1. 풀리 모델링

Fig. 1은 본 연구의 대상인 플라스틱 V-풀리의 3D CAD 모델이다. 플라스틱 풀리는 타이밍 체인이 헐거운 것을 막는 장력 조절 장치의 부품 중 하나로 사용되고 있다. V-풀리는 진원 정도에 따라 소음 문제와 밀접한 관련이 있기 때문에 풀리의 성형 시 변형의 발생을 최소화하여 진원도를 향상시킬 필요가 있다. V-풀리의 높이는 24.5mm, 외경은  $\varnothing 109\text{mm}$ 이고, 내경은  $\varnothing 31\text{mm}$ 이다.

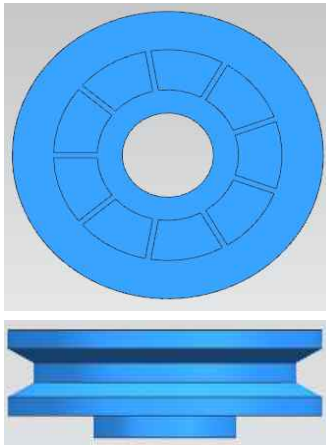


Fig. 1 V-pulley 3D modeling

### 2.2. 성형해석 모델과 결과분석

풀리 성형품의 진원도의 향상을 위하여 금형설계 전에 성형해석을 수행하였다. 성형해석은 Autodesk사의 Moldflow Insight를 사용하였다<sup>11)</sup>. 해석에 사용되는 V-풀리는 유리섬유가 포함된 Ascend

Performance Materials사의 Vydyn R540H BK02 Q530(PA66, Glass fiber 40%) 수지를 사용하였다. Table 1은 성형수지의 물성을 나타낸 것이다.

Table 1 Mechanical and thermal properties of Vydyn R540H BK02 Q530

Property	Unit	Value
Elastic modulus	MPa	1,340
Poisson ratio	-	0.392
Shear modulus	MPa	481.3
Conductivity(246℃)	W/m·℃	0.179
Specific heat(220℃)	J/kg·℃	3612.4
Melt density	g/cm <sup>3</sup>	0.687
Mold temperature range	℃	20 ~ 80
Melt temperature range		200 ~ 280
Ejection temperature		93

Fig. 2는 성형해석 모델을 나타낸 것이다. 사용된 메쉬는 3D 사면체 메쉬이며, 총 2,429,667개 이다. 핫 런너와 게이트(hot runner & gate) 시스템이 적용되었다. 게이트는 120° 각도로 3개로 구성되어 있으며, 직경은  $\varnothing 3$  이다. Table 2는 풀리의 성형을 위하여 구성된 성형조건을 나타낸 것이다. 이 성형조건은 Moldflow Insight에서 제시하는 추천 성형조건을 조합하여 구성되었다.

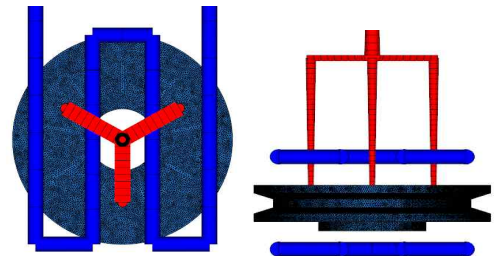


Fig. 2 Injection molding analysis pulley model

사출성형 해석에 사용된 Moldflow에서 용융수지의 유동은 비뉴턴(non-Newtonian), 비등온(non-isothermal), 비압축(imcompressible) 거동으로 가정하였으며, 지배방정식은 질량 보존, 운동량 보존 및 에너지 보존 방정식을 기본으로 사용하고 있다. 이것을 식 (1)~(3)으로 구성하였다<sup>12)</sup>.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \rho \vec{g} - \nabla P + \nabla \cdot (\eta \nabla \vec{V}) \quad (2)$$

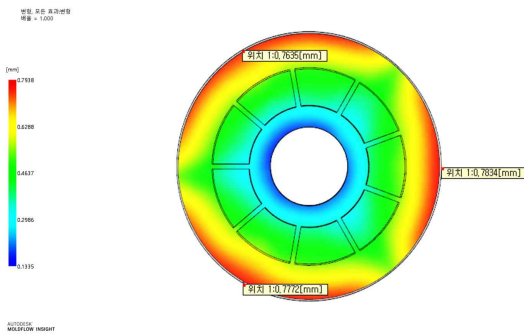
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

여기서,  $\rho$ 는 수지의 밀도,  $C_p$ 는 수지의 비열,  $k$ 는 열전도도,  $\eta$ 는 수지의 점도,  $\dot{\gamma}$ 는 수지의 전단율이다.

**Table 2** Initial injection molding conditions

Process conditions	Unit	Value
Melt temperature	℃	283
Cooling temperature	sec	40
Holding pressure	MPa	60
Cooling time	sec	25
Gate diameter	mm	0.6

Fig. 3은 성형품의 변형결과를 나타낸 것으로 최대 변형이 발생하는 3곳의 변형값을 나타낸 것이다. 대략 최대 0.77(mm)의 변형이 발생하는 것을 알 수 있었다. 결과에서 보아 알 수 있듯이 진원이 요구되는 풀리 성형품에 불균형적인 변형이 발생하는 것이 관찰되었다. 이를 보완하기 위하여 현 성형조건에 대하여 변형이 최소로 발생하는 성형조건을 구하기 위하여 실험계획법을 이용하였다.



**Fig. 3** Deformation result of the molded pulley by the initial molding conditions

### 3. 성형 최적화 연구

#### 3.1. 다구찌 방법

풀리의 변형을 최소화하는 최적의 성형조건을 구하기 위하여 다구찌 방법(Taguchi Method)을 사용하

여 해석을 진행하였다<sup>13)</sup>.

다구찌 방법에 적용되는 성형조건은 A. 수지 온도(melt temperature), B. 냉각수 온도(coolant temperature), C. 보압(holding pressure), D. 냉각 시간(cooling time), E. 게이트 직경(gate diameter) 등의 5 가지를 선정하였다. Table 3은 실험에 적용될 주요 성형조건과 각 조건별 3단계 수준을 나타낸 것이다.

5개의 성형조건과 조건별 3개의 수준을 모두 포함하는 실험은 총 243회를 수행해야 하지만 다구찌 방법을 이용하면 총 27회의 실험만 수행하면 된다. Table 4는 27회의 실험 내용을 정리한 L27(3<sup>5</sup>) 직교배열표를 나타낸 것이다.

**Table 3** Factors and levels used in the experiment

Factors	Level		
	1	2	3
A. Melt temperature	283	293	303
B. Cooling temperature	40	45	50
C. Holding pressure	60	70	80
D. Cooling time	25	30	35
E. Gate Diameter	0.6	0.8	1

**Table 4** L27 orthogonal array

No.	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	3
4	1	2	2	2	1
5	1	2	2	2	2
6	1	2	2	2	3
7	1	3	3	3	1
8	1	3	3	3	2
9	1	3	3	3	3
10	2	1	2	3	1
11	2	1	2	3	2
12	2	1	2	3	3
13	2	2	3	1	1
14	2	2	3	1	2
15	2	2	3	1	3
16	2	3	1	2	1
17	2	3	1	2	2
18	2	3	1	2	3
19	3	1	3	2	1

20	3	1	3	2	2
21	3	1	3	2	3
22	3	2	1	3	1
23	3	2	1	3	2
24	3	2	1	3	3
25	3	3	2	1	1
26	3	3	2	1	2
27	3	3	2	1	3

**3.2. 성형조건의 최적화**

Table 4의 직교배열표를 기준으로 사출성형해석을 수행하였고, 각 실험의 변형량 결과를 SN비 (signal to noise ratio, 신호대 잡음 비)를 분석하였다. 폴리 변형량은 작을수록 좋은 것이므로 다구찌 방법의 망소 특성에 해당하며, SN 비를 구하는 식은 (1)과 같다. 단위는 dB이다.

$$SN = -10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \quad (1)$$

n : 인자의 수준별 실험 회수  
 yi : 각 실험의 특성치

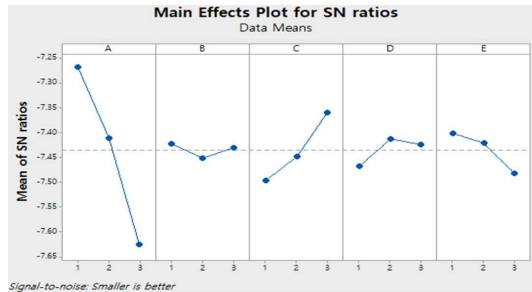
Table 5는 성형해석에서 구한 성형품의 최대 변형량과 SN비를 나타낸 것이다. SN비 값이 클수록 변형이 작은 것을 의미한다. 참고로 SN비의 계산은 통계프로그램인 Minitab을 이용하였다.

**Table 5** Deformation values and S/N ratio

No.	Deflection	S/N ratio
1	2.3241	-7.3251
2	2.3245	-7.32659
3	2.3449	-7.40249
4	2.2986	-7.22927
5	2.313	-7.28351
6	2.3214	-7.3150
7	2.2678	-7.1121
8	2.2914	-7.20202
9	2.2967	-7.22209
10	2.3301	-7.34749
11	2.3438	-7.39841

12	2.3598	-7.4575
13	2.3257	-7.33107
14	2.3406	-7.38654
15	2.3549	-7.43945
16	2.3756	-7.51547
17	2.3406	-7.38654
18	2.3549	-7.43945
19	2.3695	-7.49313
20	2.3617	-7.46449
21	2.3953	-7.5872
22	2.4127	-7.65007
23	2.420	-7.67631
24	2.4392	-7.74495
25	2.4012	-7.60857
26	2.4155	-7.66014
27	2.4358	-7.73283

Fig. 4는 계산된 SN비를 나타낸 것이다. 각 성형조건 별로 SN비 값이 가장 큰 수준의 조합이 성형품의 변형이 최소가 되는 조건이다. 즉 성형품의 변형이 최소로 되는 성형조건은 수지 온도 283℃, 냉각수 온도 40℃, 보압 80%, 냉각시간 30sec, 게이트 직경 0.6mm이다.



**Fig. 4** Main effects of S/N ratio

Table 6은 성형조건의 수준별 SN비를 나타내며, 델타(delta)값은 인자의 수준별 SN비의 최대값과 최소값의 차이를 나타낸다. 랭크(rank)는 델타 값이 큰 순서를 나타낸다. 델타 값이 크다는 것은 성형조건의 수준별 SN비의 변화가 크다는 것을 의미하는 것이다. 따라서 결국 랭크가 높은 조건일수록 특성치에 더 많은 영향을 주고 있음을 의미한다. 참고로 SN비 계산은 통계처리 프로그램인 Minitab을 이용

하였다. 성형조건 중에서 성형품의 변형에 가장 큰 영향을 미치는 성형조건의 순서는 수치 온도, 보압, 게이트 직경, 냉각 시간, 냉각수 온도이다. 이러한 조건 중에서 성형품의 변형에 유효한 성형인자의 확인은 SN비 값으로 판단할 수 있다.

Table 6 Result of S/N ratio each factor

Level	A	B	C	D	E
1	-7.269	-7.422	-7.496	-7.468	-7.401
2	-7.411	-7.451	-7.448	-7.413	-7.421
3	-7.624	-7.431	-7.360	-7.423	-7.482
Delta	0.356	0.028	0.137	0.055	0.081
Rank	1	5	2	4	3

상대적 효과는 분산을 분해하므로 잘 알 수 있는데 이를 분산분석(ANOVA)이라 하며, Table 7에 나타내었다<sup>14)</sup>. 분산분석 결과에서 유의수준을 10%로 할 때 유의한 성형인자는 수치 온도(A)와 보압(C)이었다. 즉, 수치 온도와 보압이 성형품의 변형에 영향을 미치는 주요 성형조건임을 알 수 있었다.

Table 7 Analysis of variance of S/N ratio

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	2	0.042514	0.021257	196.54	0.000
B	2	0.000299	0.000150	1.38	0.279
C	2	0.006336	0.003168	29.29	0.000
D	2	0.001140	0.000570	5.27	0.017
E	2	0.002377	0.001189	10.99	0.001
Error	16	0.001730	0.000108		
Total	26	0.054397			

#### 4. 풀리의 변형량 변화

##### 4.1. 최적 성형 수의 변형

실험계획법을 통해 얻은 최적 성형 조건 값을 토대로 성형해석을 재 수행하였다. 그 결과 Fig. 5는 최적 조건을 적용하여 성형한 풀리의 변형해석 결과이다. A점에서는 변형이 0.0208mm, B점은 변형이 0.0238mm, C점은 변형량이 0.0215mm 각각 감소하였다. 성형 조건의 최적화 이전의 변형량과 비교하면 평균적으로 약 2.86%의 변형량이 감소하는 결과를 보였다. 이런 결과를 종합하면 기존 성형조건으

로 성형한 풀리보다 성형조건의 최적화를 통한 성형으로 인하여 더욱 진원도가 향상됨을 알 수 있었다. 향후 최적화 후의 변형량을 바탕으로 금형을 보정 설계한다면 진원도가 대폭 향상될 수 있을 것으로 사료된다.

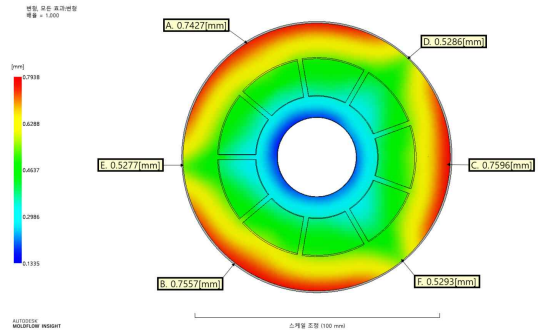


Fig. 5 Deformation result of the molded pulley by the optimal conditions

#### 4. 결론

본 연구에서는 동력전달에 중요한 역할을 하는 플라스틱 원형 풀리의 진원도 향상을 위하여 성형조건의 최적화를 연구하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 기존의 성형조건에서 풀리의 진원도에 영향을 미치는 조건을 순서대로 정리하면 수치 온도, 보압, 게이트 직경, 냉각 시간, 냉각수 온도의 순이다.
- 2) 분산분석으로 통하여 확인한 유효한 성형조건은 수치 온도와 보압이었다.
- 3) 성형조건의 최적화 후의 변형량이 성형조건 최적화 이전과 비교하여 약 2.86%의 감소하는 것을 알았다.
- 4) 최적 성형조건으로 성형된 변형량을 기준으로 금형을 보정 설계한다면 진원도가 대폭 향상시킬 수 있는 데이터를 확보하였다.

#### 참고문헌

- 1) S. R. Han, "A Study on Improvement of 100 Tons Toggle Injection Molding Machine's Weight Using Numerical Analysis", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 10, pp. 4713-4718, 2013.

- 2) D. H. Kim, "A Study on the Design Efficiency of Mold Design Using Design Automation Method in the CAD System", KSMTE, Vol. 20, No. 6, pp. 824-829, 2018.
- 3) H. S. Kim, J. R. Cho and S. R. Han, "Development of Automobile Wheel Speed Sensor Using the Injection Molding by Lifting the Insert Parts", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 41, Issue 11, 522, 2019.
- 4) S. R. Han, "Improvement of Deformation of Plastic Lens Hood for Camera by Applying Conformal Cooling Channel", KSMTE, Vol. 21, No. 1, pp. 133-139, 2019.
- 5) D. T. Kim and S. R. Han, "A Study on the Design of Door Module PNL Using CAE and Inverse Compensation for Warpage", KSDME, Vol. 12, No. 2, pp. 27-33, 2018.
- 6) S. R. Han, J. I. Park and J. R. Cho, "Development of Plastic Passenger Air Bag(PAB) Housing for replacing the Steel PAB Housing and Reducing the Automobile Weight", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 40, Issue 4, 224, 2018.
- 7) S. H. Tang, Y. J. Tan, S. M. Sapuan, S. Sulaiman, N. Ismail and R. Samin, "The Use of Taguchi method in the Design of Plastic Injection Mould for Reducing Warpage", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, Issues 1-3, pp. 418-426, 2007.
- 8) A. Naveen Sait, S. Aravindan, and A. Noorul Haq, "Optimisation of Machining Parameters of Glass-Fiber-Reinforced Plastic (GFRP) Pipes by Desirability Function Analysis Using Taguchi Technique", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 43, pp. 581-5899, 2008.
- 9) F. Hentati, I. Hadriche, N. Masmoudi and C. Bardai, "Optimization of the Injection Molding Process for the PC/ABS Parts by Integrating Taguchi Approach and CAE Simulation", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 104, Issue 9-12, pp. 4353-4363, 2019.
- 10) S. R. Han, "A Study on the Deformation Optimization of a Plastic Bezel Assembled on the Steering Wheel of an Automobiles", KSMPE, Vol. 16, No. 5, pp. 105-112, 2017.
- 11) S. Y. Martowibowo and A. Kaswadi, "Optimization and Simulation of Plastic Injection Process Using Genetic Algorithm and Moldflow", Chinese Journal of Mechanical Engineering, Vol. 30, Issue 2, pp. 398-406, 2017.
- 12) S. Y. Kim, B. G. Park, J. O. Jung, K. S. Cho and I. Chung, "Metal Injection Molding Analysis for Developing Embroidering Machine Rotary Hooks", KSMPE, Vol. 17, No. 4, pp. 160-168, 2018
- 13) K. A. Kim and S. R. Han, "A Study on Deformation Improvement of Plastic Charging of Electric Car", KSMTE, Vol. 21, No. 4, pp. 653-658, 2019.
- 14) Y. G. Yoo and H. S. Lee, "An Experimental Study on the Warpage of a Film Insert Molded Plate", Transaction of Materials Processing, Vol. 21, No. 1, pp. 30-35, 2012.

## 저자 소개

### 김 경 아(Kyung a. Kim)

[정회원]



- 2015년 3월: 홍익대학교 제품디자인 전공/디자인-공예학과(미술학박사)
- 2015년 0월~2019년 2월: 켈디자인(주) 디자인부서, 과장
- 2019년 3월~현재: 국립공주대학교 금형설계공학과 조교수

< 관심분야 >

제품디자인, Additive Manufacturing(3D printing), 사출성형

### 한 성 렬(Seong-Ryeol Han)

[정회원]



- 2007년 2월: 부경대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2007년 5월 ~ 2014년 2월: (주)화승알 엔에이 성능평가팀 팀장
- 2014년 3월~현재: 국립공주대학교 금형설계공학과 부교수

< 관심분야 >

사출 금형설계, CAE