



실험계획법을 활용한 두더지 덫 부품의 플라스틱 사출성형 공정개선

김대호^a, 홍준희^{b*}

Improvement of Plastic Injection Molding Process of Mole Trap Parts using Design of Experiments

Dae Ho Kim^a, Jun Hee Hong^{b*}^a Graduate School of Mechanical Engineering, Chungnam National University^b Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	20	January	2023
Revised	8	February	2023
Accepted	13	February	2023

Keywords:

Injection molding
Design of experiment
Productivity
Warpage

ABSTRACT

Injection molding is a widely used mass production process. Damage due to residual stress has been observed in mole trap parts manufactured by the mass production process. Excessive deformation of the parts due to the shortened injection process caused the residual stress. Furthermore, the damage had occurred in products in which the gap in the middle of the cooled parts exceeded 101.5 mm. This study aimed to determine the process conditions in which the gap would be narrower than 101.5 mm, and the process time would be short. To explore the process conditions that restrict the deformation within the tolerance range and reduce the injection process time, the experimental design method was used. The results were used to improve the production process through regression modeling using full factorial design.

1. 서론

1.1 연구배경

사출성형은 다양한 크기와 형태의 제품을 가장 효율적으로 생산할 수 있는 기술로, 국방, 자동차 등의 첨단 부품에서 일상 생활용품에 이르기까지 대량생산에 가장 적합한 공정이다. 관련 제조업의 제조 경쟁력 및 품질 경쟁력에 크게 영향을 미치는 공급 가치 사슬의 바탕이 되는 기술로써, 국가에서 뿌리산업으로 지정하여 육성, 관리하고 있다. 사출성형공정은 제품의 형상을 기반으로 제작된 틀인 금형을 사출성형기에 설치한 후 가소화된 수지를 금형에 주입하는 충전공정(filling), 금형 내에 충전된 수지가 냉각되며 수축되며 변형이 발생하는 것을 보상하기 위해 추가로 수지를 공급하며 가압하는 보압공정(packing), 제품의 형상대로 고화될 때

까지 금형 내에서 유지하는 냉각(cooling)공정, 다음 사이클에 충전할 적정량의 수지를 배럴에 계량하며 고온으로 가열하여 용융시키는 가소화 공정(plasticizing), 냉각이 완료된 제품을 금형에서 분리하는 취출 공정(take-out)으로 이루어진다(Fig. 1)^[1].

사출성형은 고정밀의 제품의 대량생산에 적합한 장점이 있으나, 제품별로 요구되는 품질수준 및 생산수율이 상이하고, 사출성형기에서 제어하는 온도, 압력 등의 각종 작업조건, 금형의 설계 및 표면 조도와 같은 다양한 요인에 의해 품질, 생산성이 결정되므로, 일반화된 최적화 기법을 적용하기 어려운 단점이 있다.

사출성형으로 생산된 제품에는 공정조건, 금형 구조상 문제 등으로 웰드라인(weld line), 에어트랩(air trap), 휨(warp) 등의 문제가 발생하며, 그 중에서도 휨은 수지가 주입된 후 냉각되는 과정에서 수축이 불균일하거나, 충분한 냉각이 이루어지지 않았을 때

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5642

E-mail address: hongjh@cnu.ac.kr (Jun Hee Hong).

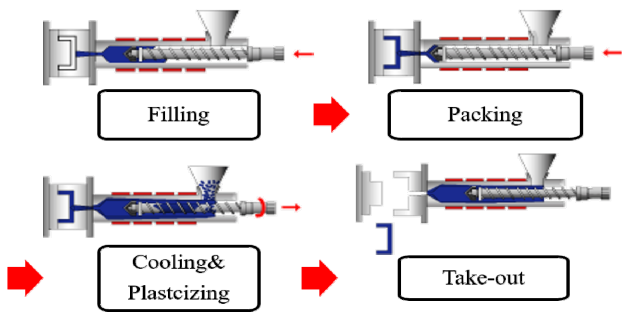


Fig. 1 Injection molding process

발생하며, 변형으로 인해 조립, 부품간 간섭이 발생하므로 제어되어야 하는 문제이다. 예를 들어, 미세한 변형에도 제품의 기능이 현저히 떨어지는 광학 부품의 경우, 금형 온도를 높이고 냉각 시간을 길게 하여 수지를 서냉시킴으로써, 변형을 최소화하는 방법으로 품질을 확보하나, 일반적인 산업군에서 사용하는 부품의 경우 변형의 공차 범위를 설정하고, 사이클 타임을 단축하여 생산성을 확보하는 형태로 공정조건을 제어하고 있다.

하지만 사출성형 제어인자가 다양하고 제품의 형상마다 품질에 미치는 주요인과 효과가 상이하여 일반화하기 어려운 단점이 있고, 제품마다 CAE(computer aided engineering)을 통한 해석을 통한 공정개선을 하기에는 많은 비용이 요구되어 모든 제품에 적용하기 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존에 양산하고 있는 제품에서 발생한 문제를 개선하기 위하여 사출 성형기에서 제어 가능한 인자인 보압 압력, 보압 시간, 냉각 시간, 배럴 온도의 4 요인을 2 수준으로 반복이 있는 완전요인배치법(full factorial design)으로 실험하여, 사출공정 시간을 단축하였을 때 발생하는 휨을 예측함으로써, 생산성을 고려한 품질 개선 방향을 제안하였다.

1.2 연구 동향

사출성형 공정최적화를 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 분야별로 중요시하는 인자, 연구방법이 각각 상이함을 확인할 수 있었다. Kim^[2] 등은 휴대폰 후면 커버의 사출성형 과정에서 냉각 시간 단축을 통한 공정시간 절감을 위해 냉각시간, 보압압력을 인자로 하여 6-sigma, 실험계획법, 반응표면분석법을 활용하여 치수 안정성 및 휨 량이 기존과 동일 혹은 개선하는 방향의 최적화를 연구하였으며, Lee^[3] 등은 보압압력, 배럴온도, 냉각수온도, 냉각시간을 인자를 5수준으로 다구찌기법을 적용하여 자동차 horn cover의 변형을 최적화하는 방법을 연구하였다. Yang^[4] 등은 실험계획법과 다구찌기법을 적용하여 배럴온도, 사출속도, 사출압력을 인자로 하여 사출된 부품의 변형량, 인장응력, 질량변동을 최적화하는 방법을 연구하였다. 다수의 연구가 냉각시간, 보압, 배럴온도를 비롯한 다양한 인자를 조절하여 변형, 잔류응력

등을 다양한 최적화 기법을 적용하여 개선 및 최적화하는 방향으로 연구를 진행하고 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 공정관리자의 경험으로 결정되던 공정변수들을 실험계획법을 활용한 실험을 통하여 인자의 주 효과를 확인하고, 공정개선 방향을 제안하고자 한다.

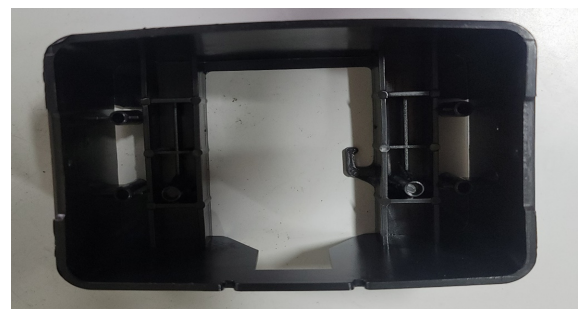
2. 실험장비 및 방법

2.1 실험 장비 및 목표

개선할 제품은 두더쥐 포획용 덫의 부품으로 사출성형 후 냉각되는 과정에서 잔류응력으로 인해 변형이 발생하여, 과도한 변형이 발생한 경우, 조립 시 파단이 발생하는 문제가 있었다. 부품의 재질은 HDPE로 대한유화의 M690을 사용하였다(Fig. 2).

원인 파악 과정에서 냉각이 완료된 후 중간 부분의 최대 외곽 치수(이하 치수로 표기)가 101.5 mm 이내의 제품은 조립 및 사용상에 파손 문제가 발생하지 않았으나, 치수가 101.5 mm를 초과하는 제품군에서 조립, 사용상에 파손이 간헐적으로 발견되었다. 생산량을 늘리기 위한 공정조건 조정과정에서 치수 편차가 고려되지 않아 발생한 문제로 판단, 냉각 완료 후의 치수가 101.5 mm 이하의 공정조건을 찾는 것을 목표로 실험을 진행하기로 하였다.

치수를 측정하기 위한 장비로 이미지 치수 측정기 IM-7500 (Keyence: 일본)를 사용하였다(Fig. 3)^[10]. 측정기의 최대 측정범위는 200×200 mm이며, 측정 정도 ± 2 μm, 반복 정도 ± 1 μm 수준으



(a) Mole rat trap part - passed



(b) Mole rat trap part - failure

Fig. 2 Mole rat trap part



Fig. 3 Equipment for measurement – IM-7500

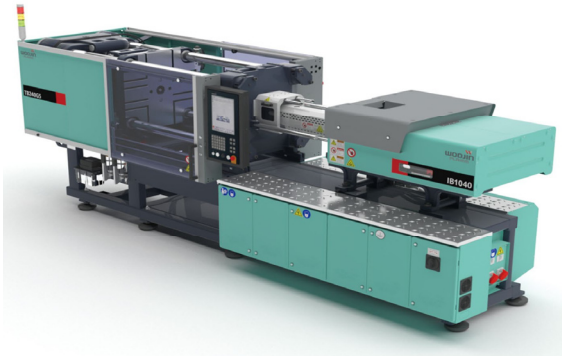


Fig. 4 Injection molding machine – TB120G5

로 고정밀한 측정이 가능하다.

플라스틱 사출성형 장비로는 하이브리드 사출성형기인 TB120G5 (우진플라임: 대한민국)를 사용하였다(Fig. 4)^[11].

생산공정 최적화를 위해 제어 값과 실제값의 차이를 피드백하는 것이 중요하기 때문에 최근의 사출성형기는 closed-loop 회로로 구성되어 고 정밀한 제어가 가능하도록 제작되고 있다. 또한 실시간 공정 모니터링을 위한 다수의 내장 센서를 포함하고 있어, 실제 값이 지정한 범위를 벗어난 사이클에 대하여 자동 라벨링 기능이 있으며, 양산하면서 축적되는 데이터를 활용한 간단한 통계처리 기능을 제공하고 있다.

2.2 실험 방법

기존의 연구들을 참고하여 실험계획법을 적용한 실험을 설계하였다. 보압 시간(packing time), 냉각 시간(cooling time), 보압 압력(packing pressure), 수지를 계량하는 배럴 온도(barrel temperature)를 인자로 하여 각 10회의 반복이 있는 4인자 2수준의 완전 요인 배치법(4 factor 2 level full factorial design with

Table 1 Parameter and levels

Parameter	Levels	
	0	1
A : Packing time (sec)	2	4
B : Packing pressure (bar)	40	80
C : Cooling time (sec)	35	40
D : Barrel temperature (°C)	180	200

Table 2 2⁴ full factorial design array

#	A	B	C	D	#	A	B	C	D
1	0	0	0	0	9	0	0	0	1
2	1	0	0	0	10	1	0	0	1
3	0	1	0	0	11	0	1	0	1
4	1	1	0	0	12	1	1	0	1
5	0	0	1	0	13	0	0	1	1
6	1	0	1	0	14	1	0	1	1
7	0	1	1	0	15	0	1	1	1
8	1	1	1	0	16	1	1	1	1

repetition)으로 실험하여 각 인자의 주 효과(main effect) 및 교호작용(interaction)을 확인할 수 있도록 한다. 사출성형에서는 각 인자가 상호 영향을 미칠 수 있으므로 교호작용이 고려될 필요가 있어 반복 실험을 수행하였다.

Table 1은 인자와 수준을 나타내고, Table 2는 24 full factorial design array를 나타낸다.

실험의 결과를 기반으로 회귀모형을 도출하여 개선 목표인 치수가 101.5 mm 이하의 공정조건을 예측하도록 한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험 및 분석

각 실험 Set 별로 10회의 반복 실험을 수행하였으며 통계처리에 이점이 있는 R Studio(Ver 4.1)을 이용하여 통계처리, 회귀모델 도출을 하였다. Table 3은 각 실험 Set별 3회까지의 결과 및 10회까지의 평균 및 표준편차를 나타낸다.

실험 결과를 가지고 각 인자 및 교호 작용이 유의미한지 판단하기 위해 분산분석을 실시하였고, Table 4에 정리하였다.

분산분석 결과 모든 인자 및 교호작용이 유의하였다. (P-value 0.05이하) 보압 시간(A)에 따른 치수 편차의 변화를 분석한 결과, 2초인 경우와 4초인 경우의 치수는 Fig. 5와 같은 양상을 보였으며, 보압 압력(B)이 40 bar인 경우와 80 bar인 경우의 치수는 Fig. 6, 냉각 시간(C)이 35초인 경우와 40초인 경우의 치수는 Fig. 7, 배럴 온도(D)가 180°C인 경우, 200°C인 경우의 치수는 Fig. 8의 양상을 보였다.

Table 3 Experimental runs and results (unit: mm)

#	1	2	3	Mean	S.D.
1	102.034	102.032	102.033	102.032	0.0059
2	101.923	101.933	101.932	101.926	0.0084
3	101.988	101.994	101.997	101.997	0.0095
4	101.944	101.943	101.942	101.936	0.0068
5	101.345	101.335	101.338	101.333	0.008
6	101.311	101.308	101.295	101.294	0.0091
7	101.254	101.258	101.264	101.260	0.0054
8	101.132	101.145	101.144	101.144	0.0067
9	101.994	101.987	102.021	102.002	0.0124
10	101.954	101.945	101.956	101.948	0.0087
11	101.982	101.977	101.975	101.971	0.0065
12	101.921	101.922	101.924	101.920	0.0056
13	101.108	101.117	101.132	101.119	0.0089
14	101.022	101.021	101.033	101.021	0.0059
15	101.089	101.097	101.094	101.095	0.0086
16	101.055	101.056	101.042	101.047	0.0073

Table 4 ANOVA results of the dimension

	Df	SS	MS	F	P
A	1	0.2043	0.2043	3247.3	0.000
B	1	0.0578	0.0578	919.1	0.000
C	1	25.7538	25.7538	40926	0.000
D	1	0.3988	0.3988	6337.4	0.000
A:B	1	0.0003	0.0003	4.8	0.003
A:C	1	0.0005	0.0005	7.9	0.006
B:C	1	0.0117	0.0117	186.4	0.000
A:D	1	0.0032	0.0032	50.6	0.000
B:D	1	0.0226	0.0226	359.3	0.000
C:D	1	0.3045	0.3045	4838.9	0.000
A:B:C	1	0.0035	0.0035	56.2	0.000
A:B:D	1	0.0044	0.0044	70.1	0.000
A:C:D	1	0.0017	0.0017	27.1	0.000
B:C:D	1	0.0424	0.0424	674.5	0.000
A:B:C:D	1	0.0172	0.0172	273.7	0.000
Residuals	144	0.0091	0.0001		

실험계획법의 결과를 바탕으로 치수를 목적함수로 하는 각 인자의 주 효과도는 Fig. 9~12와 같이 나타났다.

각 인자 간의 2차 교호작용은 Fig. 13과 같으며 계층구조의 원칙에 따라 3, 4차 교호작용은 무시하였다.

주 효과 및 교호작용을 분석한 결과, 냉각 시간 변화에 따른 치수 편차가 가장 큰 것을 확인할 수 있었다. 공정개선 방향성을 찾기 위하여 냉각 시간과 다른 인자들 간의 치수에 대한 등고선도를 Fig. 14~16과 같이 나타내었다.

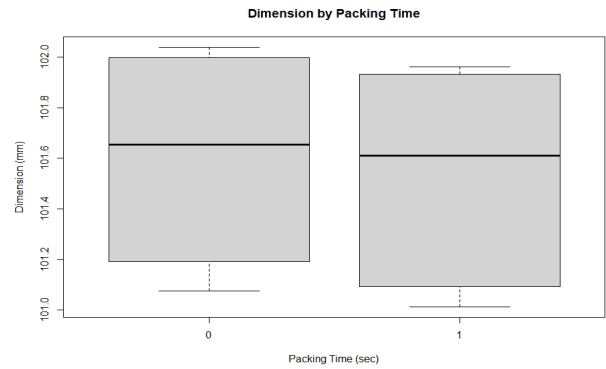


Fig. 5 Box diagram for dimension - packing time

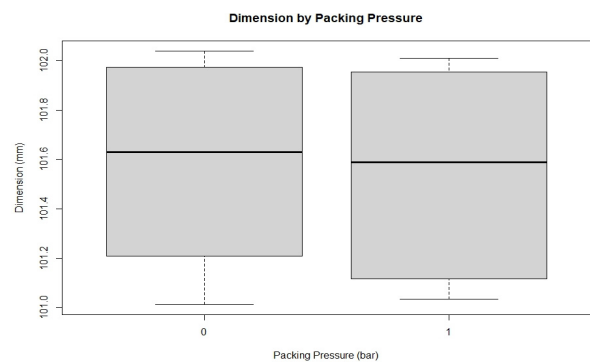


Fig. 6 Box diagram for dimension - packing pressure

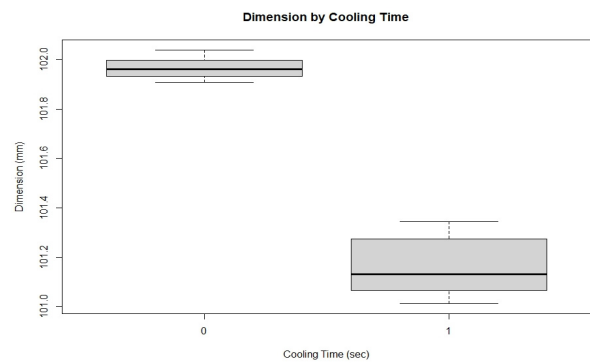


Fig. 7 Box diagram for dimension - cooling time

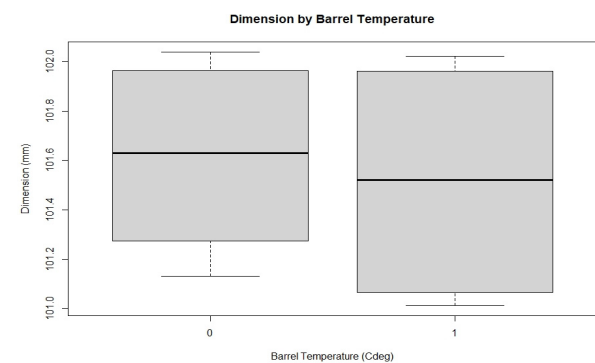


Fig. 8 Box diagram for dimension - barrel temperature

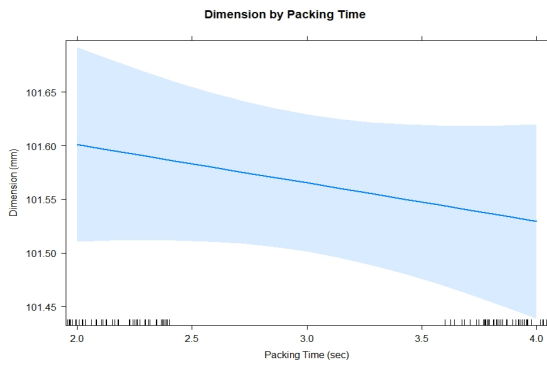


Fig. 9 Main effect for dimension – packing time

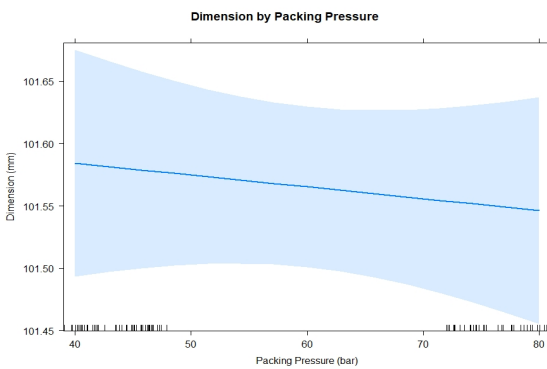


Fig. 10 Main effect for dimension – packing pressure

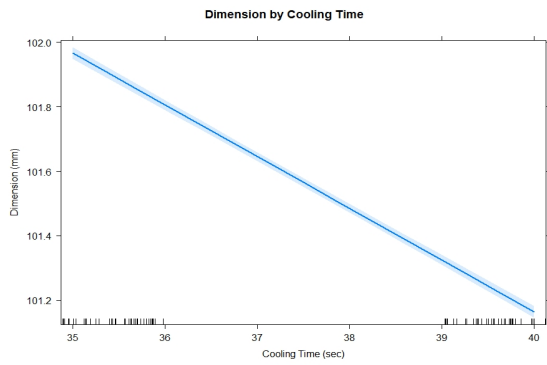


Fig. 11 Main effect for dimension – cooling time

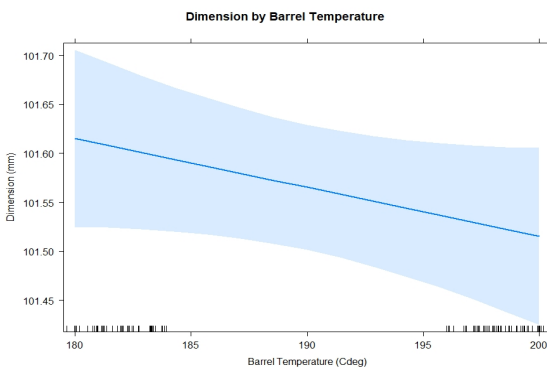


Fig. 12 Main effect for dimension – barrel temperature

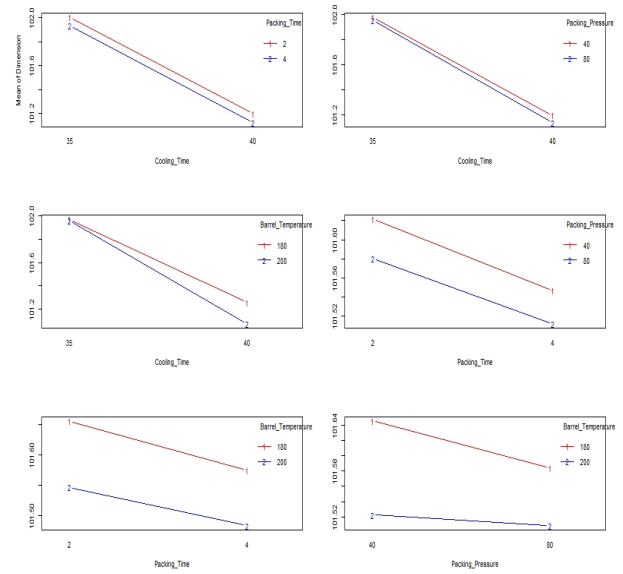


Fig. 13 Interaction effect for dimension – 2nd order

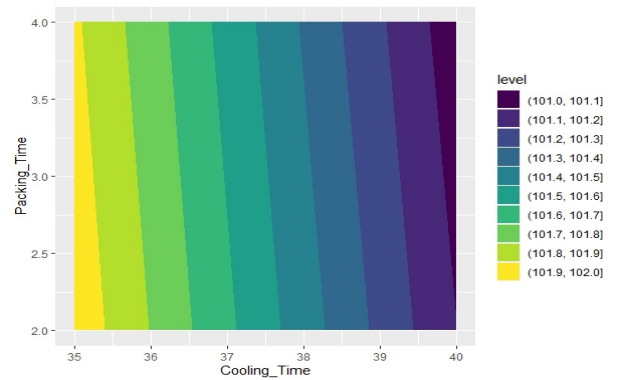


Fig. 14 Contour plot – cooling time : packing time

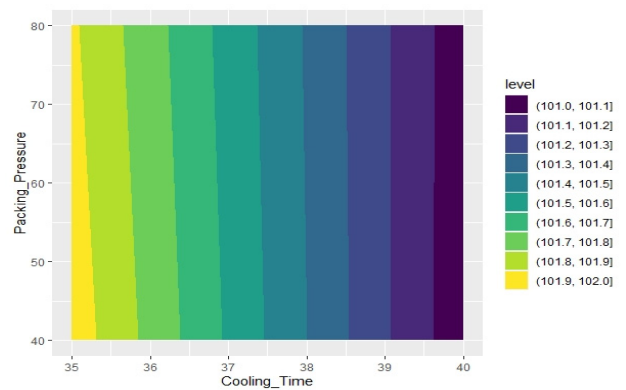


Fig. 15 Contour plot – cooling time : packing pressure

실험결과를 분석하여 치수를 Y(mm), 보압 시간을 A(sec), 보압 압력을 B(bar), 냉각 시간을 C(sec), 배럴 온도를 D(°C)로 하여 추정된 선형회귀식은 식 1과 같으며 이때, Adj. R-squared = 0.9996, P = 0.000으로 유의하였다.

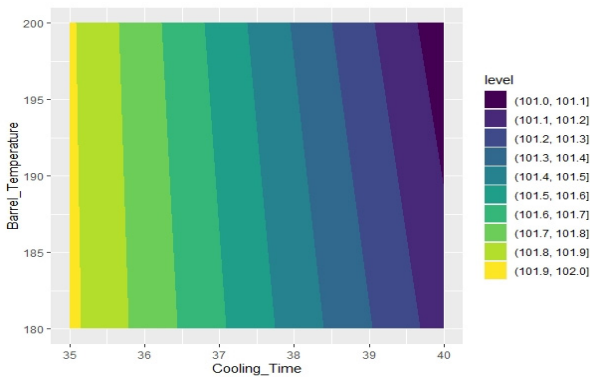


Fig. 16 Contour plot – cooling time : barrel temperature

$$Y = 111.9549 - 9.8109A - 0.21308B - 0.24614C - 0.02119D + 0.14645AB + 0.26628AC + 0.005749BC + 0.0504525AD + 0.0010935BD + 0.000427CD - 0.0040365ABC - 0.00075188ABD - 0.0013755ACD - 0.00002968BCD + 0.00002075ABCD$$

도출된 선형회귀식에 보압 시간, 보압 압력, 배럴 온도를 각각 1수준인 4초, 80 bar, 200도로 하고, 냉각 시간만을 조절하여 목표 치수인 101.5 mm 미만이 되는 조건을 찾은 결과, 냉각 시간이 37.5초인 경우, 101.484 mm로 예측되었다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 양산 중인 두더쥐 포획용 뿔 부품의 양산공정에서 발생한 문제를 실험계획법을 적용하여 공정 인자 에 따른 치수 편차를 예측하는 선형회귀식을 도출하였고, 사출 성형공정 시간 단축에 따른 치수 편차를 예측하여, 변형 위치에서의 목표 치수인 101.5 mm 이하를 만족하는 냉각 시간이 37.5초라는 결과를 얻었다. 이는 품질관리를 및 사출성형 공정개선 및 최적화에 있어서 실험계획법이 유용한 방법임을 의미한다.

이번 연구에서는 요구된 사양에 따라, 해당 사양을 만족하는 개선 방향 제시에 그치는 한계가 있었으며, 차후 연구에서는 플라스틱 사출성형 공정개선을 위한 공정 제어인자 결정 및 실험설계방법에 대한 기준을 비롯한, 양산과정에서 일반화하여 적용할 수 있는 사출성형 공정개선 및 최적화에 대한 연구를 통해 국가 뿌리산업 경쟁력을 강화할 필요가 있다.

References

[1] Kim, D. H., Hong, J. H., 2022, Prediction of Injection Molding Quality Using Machine Learning, J. Korean Soc. Manuf. Technol.

Eng., 31:4 240-246, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.4.240>.

[2] Kim, J. K., Kim, J. S., Lee, J. H, Kwak, J. S., 2017, A Study on the Optimization of the Dimensional Deviation due to the Shortening of the Cycle Time for Rear Cover of Mobile Phone, J. Korean Soc. Manuf. Proc. Eng., 16:6 117-124, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2017.16.6.117>.

[3] Lee, Y. S., Cho, J. R., Han, S. R., 2021, Optimization of Injection Molding of Automotive Plastic Horn Cover Part using Taguchi Method and Reverse Engineering, Mater. Plast., 58:4 114-129, <https://doi.org/10.37358/MP.21.4.5537>.

[4] Yang, Y. K., Shic, J. R., Liao, H. T., Wen, J. L., Yang, R. T., 2008, A Study of Taguchi and Design of Experiments Method in Injection Molding Process for Polypropylene Components, J. Reinf. Plast. Compos., 27:8 819-834, <https://doi.org/10.1177/0731684407084988>.

[5] Byun, S. K., Choi, H. Y., 2020, A Study on Injection Mold Design Using Approximation Optimization, J. Korean Soc. Manuf. Proc. Eng., 19:6 55-60, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.06.055>.

[6] Phanphet, S., Bangphan, S., 2021, Applcation of Full Factorial Design for Optimization of Production Process by Turning Machine, Journal of Tianjin University Science and Technology, 54 35-55, <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/3TESD>.

[7] Koo, J. I., Yoon, J. S., Kim, D. I., 2019, Fault Diagnosis Framwork of the Moldflow Production Processes Based on Univariative Analysis, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 28:6 391-399, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2019.28.6.391>.

[8] Lee, S. Y., Kim, C., Kim, C. H., 2017, Optimization of Printing Conditions Using Design Experiments for Minimization of Resistances of Electrodes in Roll-to-roll Gravure Printing Process, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 26:4 351-356, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2017.26.4.351>.

[9] Sim, J. W., Choi, D. C., Shin, K. H., 2015, Characterization of Microscale Drilling Process for Functionally Graded M2-Cu Material Using Design of Experiments, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 24:5 502-507, <http://doi.org/10.7735/ksmte.2015.24.5.502>.

[10] KOREA KEYENCE Co., Ltd., n.d., Catalog - Image Dimension Measurement System IM-7000 Series, <https://www.keyence.co.kr/ss/products/measure-sys/instant_measurement/>.

[11] WOJIN PLAIMM Co., Ltd., n.d., Catalog - TB Series, <https://wojinplaimm.com/page/product/product.php?pd_id=5&me_code=2020>.



Dae Ho Kim

Ph.D. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is PDM, CAD/CAM, and Injection Mold.
E-Mail : scv3323@naver.com



Jun Hee Hong

Professor in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is Intelligent Measurement.
E-mail: hongjh@cnu.ac.kr