

사출 금형 히터의 센서 기반 제어 방법 연구

김미진^a, 최재혁^{b,*}

Sensor-Based Control Method for Heaters in Injection Molds

Mijin Kim^a, Jae Hyuk Choi^{b,*}^a Department of Future Technology Convergence Engineering, Graduate School, Gwangju University^b School of Mechanical & Automotive Engineering, Gwangju University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	27	August	2024
Revised	25	September	2024
Accepted	27	September	2024

Keywords:

Injection mold
Cartridge heater
Control method
Thermoset molding
CAE

ABSTRACT

This study presents the development of an innovative control methodology for heaters used in molding processes. The conventional methodology for regulating heater temperature employs an on/off mechanism, which results in considerable temperature fluctuations across different regions. Hence, a control method is developed to minimize the temperature deviations between regions during the heating process. Applying this method to a sample mold reduced the temperature deviation by up to 69% without increasing the preheating time. Moreover, the efficiency of the proposed method is confirmed from the filling and curing processes. During the filling process, the maximum and minimum temperatures decreased by approximately 5%, respectively, thus indicating a reduction in temperature variation during the process. During the curing process, the minimum cure degree improved by approximately 91%, as evaluated based on the cure degree of the product.

1. 서론

최근엔 사출성형 공정에서 높은 내열성이 필요하거나 화학적 안정성이 요구되는 제품의 수요가 증가되고 있으며 이러한 경우엔 액상의 열경화성 수지를 이용해 제품을 성형한다. 사출성형에 사용되는 일반적인 열경화성 수지는 저온에서 액상을 유지하지만 경화제와(hardner) 혼합 후 금형에 주입하고 금형을 가열하면 빠른 경화반응을 통해 제품으로 성형된다^[1-4].

금형을 가열하는 열원온도, 스팀 등이 있으나 작업성 및 비용적인 측면을 고려해 주로 카트리리지 히터를 사용한다. 이때 금형을 가열하는 시간을 단축하기 위해 금형을 예열하는 공정을 추가한 후 원하는 온도에 도달하면 소재를 주입하게 된다^[5,6].

문제는 미리 금형을 가열시키는 예열과정이 금형 크기에 따라 수십 분에서 수백 분까지의 긴 시간이 소모된다는 것이다. 예열과정에 소모되는 시간을 단축시키기 위해 히터의 출력을 높여 단순히 승온속도만 올릴 경우 승온되면서 발생하는 불균일한 온도분포에 의해 온도 편차가 커지고 제품품질에 문제가 발생할 확률이 증가되므로 본 방법은 적용이 어렵다.

이러한 문제의 해결을 위해 원하는 형태로 구부릴 수 있는 Flexible 히터가 개발되고 있지만 히터가 삽입될 수 있도록 금형 내부 또한 히터의 형상에 맞게 가공되어야 하기에 3D 프린팅과 같은 새로운 금형제작 방법이 필요하다. 하지만 긴 제작일정과 높은 제작비용을 고려했을 때 이를 양산 현장에서 적용하기엔 한계가 있다^[7-9].

* Corresponding author. Tel.: +82-62-670-2947

E-mail address: jhchoi@gwangju.ac.kr (Jae Hyuk Choi).

Kim은 일반적인 직선형 히터를 사용하면서 금형의 온도 편차를 감소시키기 위해 히터의 깊이와 간격을 최적화하는 방법을 연구하였다^[10]. 그러나 전술한 방법은 예열공정을 고려한 방법이 아니며 제품마다 새롭게 최적화를 수행해야 하기에 이미 제작된 금형엔 적용이 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 이를 해결하고자 센서 기반의 히터 제어 방법론을 개발하였다. 히터는 금형에 사용될 때 여러 개를 묶어서 하나의 존(zone)으로 정의하고 각 존별로 온도센서를 하나씩 설치하여 제어를 진행한다. 이때 존별로 온도 편차가 크게 발생하는 것을 확인하고 이를 감소시킬 수 있도록 존별 온도 편차를 모니터링하여 이 값이 지나치게 증가되지 않도록 제어하였다. 이때 별도의 금형 수정이나 센서 추가 없이 이미 제작이 완료된 금형에 적용 가능하도록 히터의 온도 제어를 위해 삽입된 센서를 제어용 센서로 사용하였다.

개발된 방법론의 검증은 위해 실제 양산 제품의 형상과 금형 설계를 사용하여 사출성형 해석을 수행하였고 기존 제어 방법인 단순 On/Off 제어를 적용했을 때와 본 연구에서 개발된 센서 기반 제어 방법 적용했을 때의 온도 편차를 비교하였다. 이후 예열과정을 단축시키기 위해 히터의 출력을 증가시킨 후 그 결과를 분석하였다. 마지막으로 충전 및 경화 공정에 본 방법을 적용하여 센서 기반 제어의 효과를 검증하였다.

2. 센서기반 제어 방법론

2.1 제어방법론의 개요

카트리지 히터를 사용하는 금형 내부엔 다수의 히터가 설치되어 있고, 여러 개의 히터를 묶은 하나의 존에 하나의 온도센서를 설치하여 히터의 제어를 수행한다. 이때 사용자가 특정 온도를 설정하면 온도센서에서 검출되는 온도값이 설정값에 도달할 때까지 히터를 켜서 금형을 승온시킨 후 설정값에 도달하면 히터를 꺼서 과열되지 않도록 한다.

하지만 히터가 제품에서 떨어진 거리가 항상 동일한 위치에 설치되지 못한다. 각종 구조물과의 간섭을 피해 특정 위치에선 제품과의 거리가 멀 수도 있으며 특정 위치에선 가까울 수도 있다. 결국 승온되면서 존 마다의 승온속도 차이가 크게 발생되며 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 센서 기반 제어 방법론을 제안하였다.

금형 예열을 시작하면 Fig. 1에 표시된 각 존에서 온도를 측정한다. 다음 두 가지 규칙에 따라 히터가 On/Off 되도록 하였다. 첫 번째는 최저 온도를 가지는 센서보다 10°C 이상 높은 온도를 가지는 센서가 생길 시, 해당 센서가 설치된 존의 히터 전부를 Off 하도록 하였다. 이때 히터가 꺼지는 기준값은 기존 사용되던

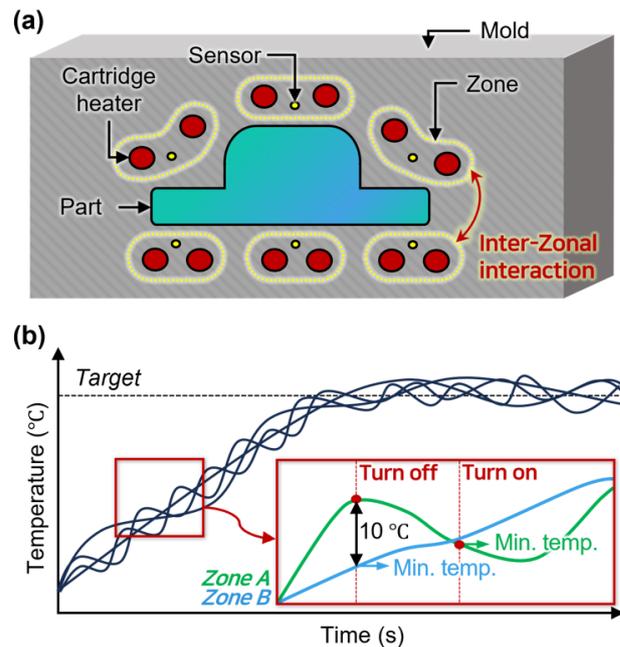


Fig. 1 Sensor-Based control method for heaters (a) Inter-Zonal interaction in thermoset molding (b) Two rules of sensor-based control method turn off the heater in the zone 10°C above the minimum temperature, and turn on the heater if the zone in the off state is at the minimum temperature

On/Off 제어의 범위인 $\pm 5^\circ\text{C}$ 를 참고하여 정의하였다.

두 번째로는 Off 상태의 히터와 연결된 센서가 최저 온도를 가질 시 해당 히터를 다시 On 하도록 하였다. Off 상태의 히터를 On 할 때에는 꺼져 있던 히터가 켜질 때의 승온 딜레이를 감안하여 최저 온도를 가지자마자 On 되도록 방법론을 정의하였다.

2.2 유한요소해석

센서기반 제어 방법론을 해석적으로 검증하기 위해 사출성형 해석 프로그램인 Moldex3D 2021를 이용 유한요소해석을 수행하였다. 해석 모델은 부피 약 8,000 cc, 직경 약 500 mm의 반구 형태 제품을 사용하였고 제품의 형상과 히터 및 센서 배치를 Fig. 2에 나타내었다. 실제 개발 중인 제품이기에 보안 문제로 상세한 크기 및 형상 정보는 기입하지 않았다. 제품의 소재는 Epoxy 기반의 열경화성 소재를 사용하였고 금형 소재는 P20을 사용하였다. 실제 양산에 사용되는 소재이므로 보안상의 이유로 제품 소재의 물성은 별도로 기입하지 않았다. 해석은 예열 600초, 충전 60초, 경화 1800초의 공정 조건으로 입력하였다.

본 연구에서 방법론 검증에 사용한 양산 금형에는 센서 8개와 히터 16개가 삽입되어 있으며, 센서 1개당 히터 2개가 묶여서 하나의 존을 이룬다. 본 연구에서의 형상은 총 8개의 존을 가지고 있다. 이에 8개의 온도 센서에서 신호를 수집하도록 해석을 수행하였다.

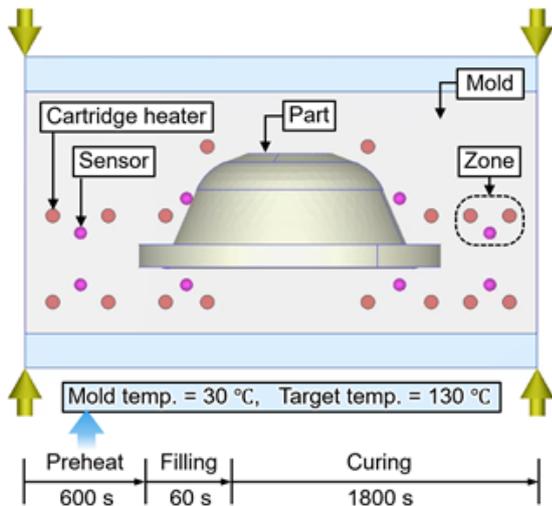


Fig. 2 Geometry of part and mold with heater zone and molding process conditions. The initial temperature of mold is 30 °C, the target temperature of heater zones is 130°C

2.3 예열과정에서 제어방법론 적용결과

센서기반 제어의 효과를 검증하기 위하여 먼저 예열 단계에서 본 제어 방법론을 적용한 후 총 8개의 센서 중 최대 온도와 최소 온도를 가지는 센서의 온도 차이를 분석하였다. Fig. 3에 기존 제어를 적용했을 때와 센서기반 제어를 적용했을 때 8개 센서에서의 온도 값을 함께 표시했다.

Fig. 3을 참고하면 예열이 시작되면 기존제어 방법에선 8개의 존이 각각 다른 속도로 승온되면서 온도 편차가 커지는 걸 확인할 수 있다. 기존 제어에선 온도 편차가 최대 47.57°C로 나타나는 데 비, 센서 기반 제어를 적용했을 때 최대 12.45°C로 온도편차를 약 74% 감소시킬 수 있었다.

또한 평균온도의 경우 기존제어에서는 최대 116.21°C로 나타나는데 센서기반 제어를 적용했을 때 최대 92.03°C로 약 21% 감소 되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 존별 제어 방식이 승온속도가 빠른 존의 히터를 끄는 방식으로 제어를 진행하기 때문에 전반적으로 가열이 늦어져 발생된 현상이다.

하지만 예열과정은 빠르게 진행해야 제품 생산시간을 단축시킬 수 있으므로 이를 해결하고자 히터출력을 현재의 1.5 kW에서 3.0 kW로 두 배 증가시켜 재해석을 수행하였고 제어 방법별 승온 속도를 Table 1에 제어 방법별 온도 편차를 Fig. 4에 각각 나타내었다.

Table 1에 나타난 승온속도는 각 존 센서들의 온도 평균을 구하고, 예열 시작 시점과 예열 종료 시점에서의 차이를 공정 시간으로 나누어 계산된다. 이를 참고하면 히터의 출력을 3 kW로 증가시킴으로써 센서 기반 제어를 적용하였음에도 기존 제어 방법과 동일

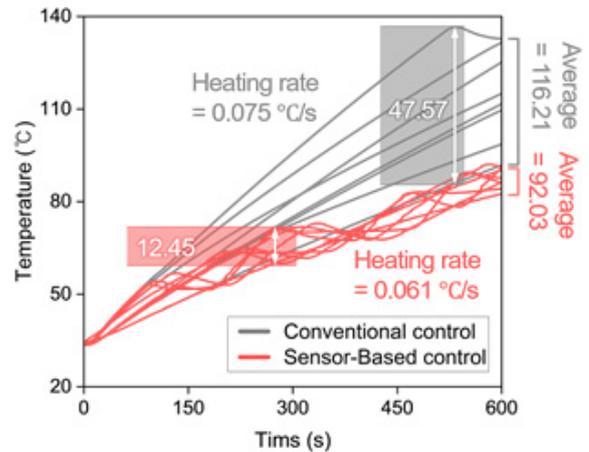


Fig. 3 Comparison of temperature values from 8 sensors during preheating using conventional control and sensor-based control

Table 1 Comparison of heating rates based on control method

Control method	Heating rate
Conventional control	0.075 °C/s
Sensor-Based control (1.5 kW)	0.061 °C/s
Sensor-Based control (3 kW)	0.075 °C/s

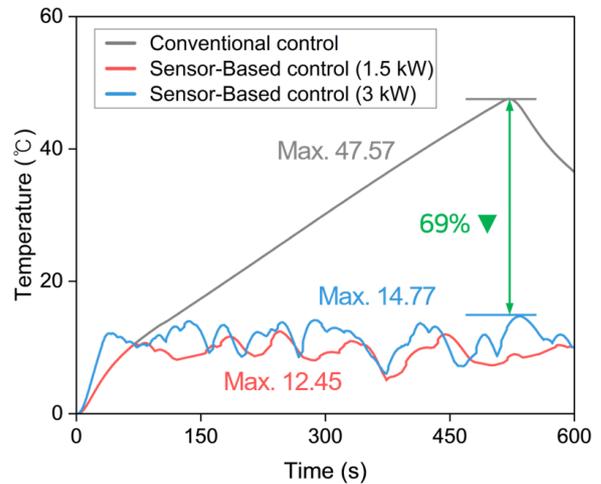


Fig. 4 Temperature deviation of cavity surface for different control methods, defined as the difference between maximum and minimum temperature

한 승온속도를 확보할 수 있었다.

하지만 Fig. 4를 참고하면 승온속도는 동일함에도 불구하고 온도 편차는 최대 약 15°C를 넘지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존 제어 방법의 약 69% 수준으로, 히터의 출력을 증가시켜 예열 속도를 올렸음에도 불구하고 편차는 증가되지 않음을 검증할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 센서 기반 제어의 출력을 3 kW로 선정하였다.

2.4 충전 및 경화공정에서 제어방법론 적용결과

예열 공정에의 검증 후, 히터 제어 방법론이 실제 경화 공정에 끼치는 영향을 분석하기 위해 충전 및 경화 해석에 이어서 본 방법론을 적용하였다. 충전 및 경화 공정은 예열 공정과 달리 금형 내에 소재가 충전되어 있는 공정이기 때문에 제품의 온도와 경화도를 함께 분석하였다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_a + K_b\alpha^m)(1-\alpha)^n \quad (1)$$

$$K_a = A \exp(-T_A/T), K_b = B \exp(-T_B/T) \quad (2)$$

경화도는 Kamal's model에 의해 0~1의 값으로 계산되며 이를 식(1)에 나타내었다^[11]. 식 (1)에서 α 는 경화도를 의미하며 0은 경화가 전혀 일어나지 않은 상태를, 1은 경화가 100% 완료된 상태를 나타낸다. 식 (1)은 n차 반응에 대한 영향을 나타내는 $K_a(1-\alpha)^n$ 항과 자가 촉매 반응의 영향을 나타내는 $K_b\alpha^m(1-\alpha)^n$ 항의 선형 조합으로 구성되어 있으며 m, n는 모델 상수이다. K_a 와 K_b 는 식 (2)에 의해 계산되며 A와 B는 모델 상수이고 T_A 와 T_B 는 활성화 온도(activation temperature)를 의미한다.

충전 및 경화공정 완료 후 제품 온도 결과를 Fig. 5에 나타내었고 각각 최대값과 최소값을 표기하였다. 제품 온도의 최대값은 기존 제어에서 144.84°C였으며 센서기반 제어에서는 137.37°C로 약 5% 감소하여 제품의 국부적 과열이 해소되는 효과를 확인하였다. 이때 온도의 최소값은 기존 제어 113.7°C에서 센서 기반 제어에서 119.28°C로 약 5% 증가하였다.

온도의 최대값이 감소함과 동시에 최소값은 증가하였으므로 전체 온도 편차가 낮아지는 방향으로 히터가 효율적으로 제어되었다고 판단하였다.

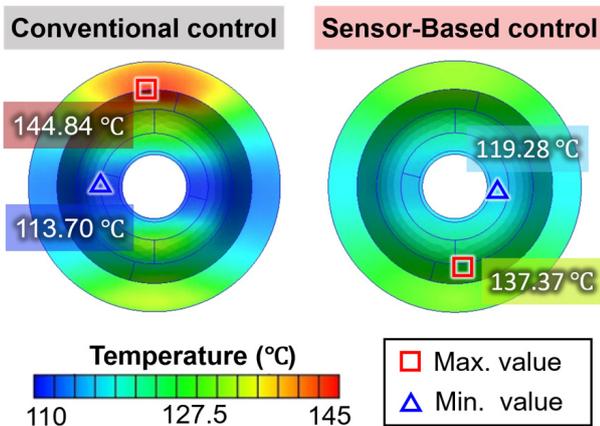


Fig. 5 Temperature results of conventional control(left) and sensor-based control(right) after the end of curing process

경화공정 후 제품에서의 경화도 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 경화도는 식 (1)에 의해 0~100%의 값으로 계산되었으며 온도 결과와 동일하게 최대값과 최소값을 표기하였다.

본 결과는 1800초의 경화 공정이 적용된 후의 경화도를 나타내므로 과열 구간의 경우 경화가 충분히 진행되었기에 경화도 최대값은 두 제어 방법론 모두 약 99% 내외로 유사하게 나타났다. 반면 경화도의 최소값은 기존 제어에서 19.8%, 센서 기반 제어에서는 37.88%로 센서 기반 제어 적용 시 기존 대비 약 91% 증가

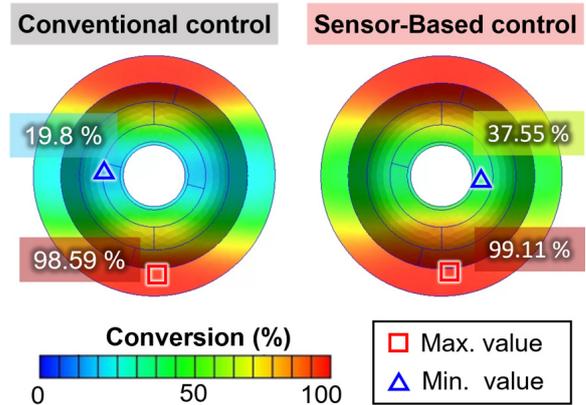


Fig. 6 Conversion results of conventional control(left) and sensor-based control(right) after the end of curing process

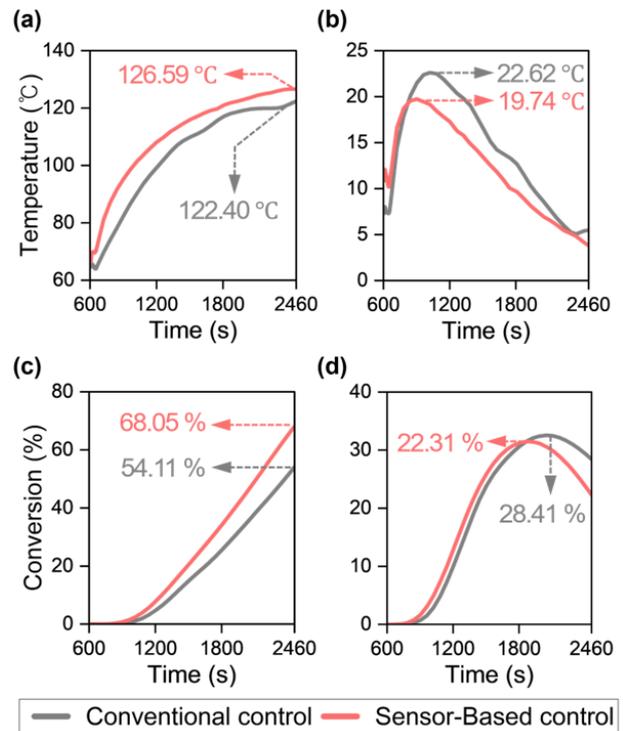


Fig. 7 Temperature and conversion of part during filling and curing process (a) average temperature of part (b) temperature standard deviation of part (c) average conversion of part (d) conversion standard deviation of part

하는 것으로 나타났다. 이는 금형온도가 낮아 경화속도가 느린 영역에서의 경화도를 센서 기반 제어를 통해 개선시켰다고 볼 수 있다.

제품 경화도의 상세한 분석을 위해 충전 및 경화과정 도중의 온도 및 경화도의 평균과 표준편차를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)와 (c)에 의하면 센서 기반 제어 적용 시 제품의 온도와 경화도 모두 평균값이 상승하였다. 표준편차 또한 Fig. 7(b)와 (d)에 나온 바와 같이 센서 기반 제어 적용 시 감소하는 걸 확인할 수 있었다. Fig. 7(d)에서 경화 공정 초반에 센서 기반 제어에서 기존 제어 대비 경화도의 표준편차가 소폭 크게 나타났다. 이는 센서 기반 제어의 히터 출력이 3kW로 기존 제어의 1.5kW보다 높기 때문으로 판단된다. 그러나 그 차이가 1% 내로 나타나며, 이때 경화도의 평균값은 25.8% 증가하였기에 경화도의 평균 상승 효과가 더 크다 판단되어 경화 초반 경화도 편차 상승 정도는 수용할 수 있는 수준으로 판단하였다.

3. 결론

본 연구에서는 열경화성 소재용 금형에 사용되는 카트리지 히터의 센서 기반 제어 방법론을 개발하였다. 히터가 존별 제어가 된다는 것에 착안하여 온도가 상대적으로 높은 존의 히터를 끄는 방식으로 금형의 전반적인 온도 편차를 감소시키도록 제어하였다. 개발된 방법론은 반구형태의 제품 형상에 적용하여 예열, 충전, 경화 공정에서 각 공정별 효과를 분석하였다.

예열공정 적용결과 온도 편차는 효과적으로 감소하였으나 승온 속도가 느려지는 현상을 관찰하여 히터의 출력을 2배 증가시켜 승온속도는 유지하면서 온도 편차는 약 69% 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

또한, 충전과정에서는 최대온도를 약 18% 감소시키고 최소온도는 약 5% 증가시켜 전체 온도 편차를 줄일 수 있었으며 경화공정에서는 최소 경화도를 약 91% 증가시켜 본 방법론의 효과를 확인할 수 있었다.

하지만, 본 연구에서는 실험을 수행하지 못하고 해석적인 검증만 수행했기에 실제 금형에 적용을 한다면 어떠한 효과가 나올지 검증이 되질 못했다. 또한, 특정 상수를 기준값으로 두고 존별 온도 차이에 따라 단순히 On/Off 제어만 수행했기에 제어 방법론이 효율적이지 못한 문제점도 존재한다. 존별 온도센서에서 측정된 값을 사용하여 제어하였기에 온도센서와 금형 표면 간의 거리가 상이해서 생기는 방법론적 오차 또한 검증이 필요하다.

추후 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 시편금형을 제작한 후 실물검증을 수행함과 동시에 단순 On/Off 제어 방식이 아닌 PID 제어 방식을 차용하여 제어방법론을 보완하고자 한다. 또한

존별 온도센서와 금형 표면에서의 온도 간의 상관관계 분석을 통해 본 방법론의 효과를 더욱 향상시킬 예정이다.

후 기

이 연구는 2024년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

References

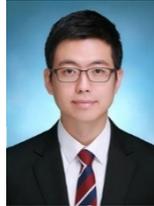
- [1] Schichtel, J. J., Chattopadhyay, A., 2020, Modeling Thermoset Polymers using an Improved Molecular Dynamics Crosslinking Methodology, *Comput. Mater. Sci.*, 174 109469, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109469>.
- [2] Li, C., Strachan, A., 2015, Molecular Scale Simulations on Thermoset Polymers: A Review, *J. Polym. Sci., Part B: Polymer Physics*, 53:2 103-122, <https://doi.org/10.1002/polb.23489>.
- [3] Vengatesan, M. R., Varghese, A. M., Mittal, V., 2018, Chapter 3 -Thermal Properties of Thermoset Polymers, in *Thermosets :structure, properties and applications (Second Edition)* ed. by Guo Q., Elsevier, Amsterdam, Netherlands, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101021-1.00003-4>.
- [4] Bont, M., Barry, C., Johnston, S., 2021, A Review of Liquid Silicone Rubber Injection Molding: Process Variables and Process Modeling, *Polym. Eng. & Sci.*, 61:2 331-347, <https://doi.org/10.1002/pen.25618>.
- [5] Lin, J. L., Young, W. B., 1999, The Effect of Preheater on the Resin Transfer Molding, *J. Reinf. Plastics and Composites*, 18:10 954-965, <https://doi.org/10.1177/073168449901801009>.
- [6] Fu, L., Zhang, M., Zhai, Z., Jiang, F., 2022, The Influence of Preheating Temperature on the Mechanical Properties of Injection-overmolded Hybrid Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composites, *Polym. Test.*, 105 107425, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107425>.
- [7] Kou, C. C., Tasi, Q. Z., Huang, S. H., Tseng, S. F., 2023, Enhancing Surface Temperature Uniformity in a Liquid Silicone Rubber Injection Mold with Conformal Heating Channels, *Materials*, 16:17 5739, <https://doi.org/10.3390/ma16175739>.
- [8] Phull, G. S., Kumar, S., Walia, R. S., 2018, Conformal Cooling for Molds Produced by Additive Manufacturing: A Review, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9:1 1162-1172.

- [9] Sanchez, D., Hawkins, G., Hinnen, H. S., Day, A., Woolley, A. T., Nordin, G. P., Munro, T., 2022, 3D Printing-enabled Uniform Temperature Distributions in Microfluidic Devices, Lab on a Chip, 22:22 4393-4408, <https://doi.org/10.1039/d2lc00612j>.
- [10] Kim, M. J., Choi, J. H., 2022, Study on the Arrangement of the Cartridge Heaters in Injection Mold Using a Multi-objective Optimization Method, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 31:5 312-318, <https://doi.org/10.7735/ksmt.2022.31.5.312>.
- [11] Lin, M. Y., Zeng, Y. J., Hwang, H. J., Wang, M. H., Liu, H. P., Fang, C. L., 2023, Warpage and Residual Stress Analyses of Post Mold Cure Process of IC Packages, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 124 1017-1039, <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10436-4>.



Mijin Kim

Ph.D Student in the Department of Future Technology Convergence Engineering, Graduate School, Gwangju University. Her research interest is Injection Molding Process.
E-mail: kmj5997@gmail.com



Jae Hyuk Choi

Professor in the School of Mechanical & Automotive Engineering, Gwangju University. His research interests are Optimization of Injection Molding Process and Thermoset Plastic Molding.
E-mail: jhchoi@gwangju.ac.kr