J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 34, No. 6, pp. 426-432 November 2021
DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.6.4
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

Regular Paper

열경화성 에폭시를 이용한 가스 절연 개폐기용 절연 스페이서의 사출 성형 최적화 시뮬레이션

배재성, 이원창, 지홍섭, 홍병유, 이재형
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Simulation for Injection Molding of Insulation Spacers for Gas-Insulated Switches Using Thermosetting Epoxy Resin

Jaesung Bae, Wonchang Lee, Hongsub Jee, Byungyou Hong, and Jaehyeong Lee
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received June 27, 2021; Revised July 21, 2021; Accepted July 27, 2021)

Abstract: Injection molding is used in many industrial fields such as home appliances, vehicle parts, and electronic device parts because various resins can be molded, leading to mass production of complex shapes. Generally, the empirical prediction method is used to set the initial processing conditions of injection molding. However, this approach requires a lot of cost and its presented solution is not accurate. In this paper, injection molding was simulated through the Moldflow™ in order to manufacture the spacer for gas insulated switch. Through the simulation, the flow of the resin with respect to the diameter of the inlet was analyzed. It was found that the process was possible at a higher resin temperature as the diameter of the inlet increased. In addition, through thermal analysis during injection of the resin, it was confirmed that a stagnation phenomenon occurred at the insert portion during injection molding, and the temperature of the resin was higher than that of the mold. As in this paper, if the spacer is manufactured by optimizing the injection hole and the temperature of the injection process based on simulation, it is expected that the spacer can be manufactured with high productivity.

Keywords: Injection molding, Moldflow, Simulation, Spacer, Gas insulated switchgear (GIS)

1. 서 론

사출 성형은 다양한 수지 성형이 가능하고 복잡한 형상의 대량 생산이 가능하기 때문에 가전 제품, 자동차 부품, 전자 기기 부품 등 많은 산업 분야에서 사용되고 있다 [1,2]. 사출 성형 시 발생하는 미성형, 에어 트랩, 웰드 라인 등과 같은 성형 결함은 제품의 품질과 생산성을 저하시키고 [3-5] 제품의 기계적 물성에 영향을 미칠 수 있다 [6-8]. 이러한 사출 성형 결함을 해결하기 위해 일반적으로 수행되는 경험적 예측에 의한 개선 방법은 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 비효율적이다. 또한 새로운 수지를 사용할 때 발생하는 문제는 경험적 예측으로 개선하기 어렵기 때문에 정확한 시뮬레이션 및 해석을 통한 공정 조건의 최적화가 필수적이다. 본 논문의 목표 제품인 스페이서를 제조하는 데 사용되는 기존의 진공 성형 방법은 하루에 생산되는 제품 수가 약 1개이며, 경화에서 탈형까지 성형하는 데 오랜 시간이 걸린다 [9,10]. 반면 사출 성형법은 예열된 금형

✉ **Jaehyeong Lee; jaehyeong@skku.edu**

Copyright ©2021 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에 압력을 가하여 제품을 경화시킴으로써 진공 성형법보다 더 좋은 생산성을 가질 수 있다 [11]. 그러나 스페이서와 같이 부피가 큰 제품의 사출은 주입구와 상부의 온도 차이로 인해 미성형 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 수지 물성, 금형, 사출기 물성 등 다양한 변수를 고려한 해석을 통해 성형 조건을 최적화할 필요가 있다 [12,13].

본 논문에서는 가스 절연 개폐기용 스페이서의 사출 성형 공정을 최적화하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 주입구 직경에 따른 수지의 유동 특성을 파악하였고 이후 금형 및 수지 온도에 따른 스페이서의 사출 결과를 분석하였다.

2. 실험 방법

본 논문에서는 사출 성형을 위한 시뮬레이션 프로그램으로 Moldflow (Autodesk, San Rafael, US) 소프트웨어를 사용하였다. 그림 1은 가스 절연 개폐기용 스페이서의 3D 모델링 이미지 및 시뮬레이션을 위한 메쉬 이미지를 나타낸다. 메쉬는 총 약 97만 개의 3D 메쉬를 사용하였으며 평균종횡비는 4.31로 시뮬레이션에 적합한 메쉬를 구성하여 시뮬레이션 하였다. 모델링 된 스페이서의 총 부피는 18,991 cm^3이다. 스페이서는 전체적으로 원형을 가지고 있으며 외곽에는 금속 인서트가 총 16개가 삽입되고 중앙부에는 3개의 금속인서트가 삽입되어 있다. 또한 스페이서의 전계를 완하시키기 위한 원형 고리 형태의 쉴드링이 스페이서 내부에 삽입되어 사출 성형을 진행한다.

Moldflow는 각 절점에서의 점도, 전단응력, 온도, 데이터 피팅 계수 등 다양한 변수들이 복합적으로 계산되고 각 상황 및 사용되는 수지의 특성에 따라 다양한 점도 모델을 이용하여 시뮬레이션이 진행된다. Moldflow에서 열경화성 재료의 점도를 계산하기 위한 대표적인 모델로는 Herschel-Bulkley-WLF 점도 모델과 Cross Castro Macosko 모델이 있으며 아래 방정식을 통해 나타내었다.

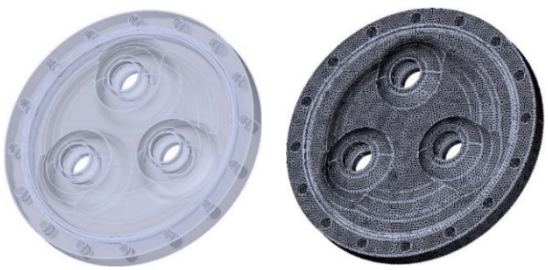

Fig. 1. 3D modeling and mesh image of spacer for GIS (gas insulated switchgear).

η은 점도, γ는 전단율, T는 온도, α는 경화도 η, τ^*, B, T_b, b, C_1, C_2, a_g, g는 Moldflow에서 사용되는 데이터 피팅 계수를 나타낸다 [14].

$$\eta(\alpha,T,\gamma)=\frac{\eta_0(T)}{1+\left(\frac{\eta_0(T)\gamma}{\tau^*}\right)^{1-n}}\left(\frac{a_g}{a_g-\alpha}\right)^{(C_1+C_2\alpha)} \quad (1)$$

$$\eta_0(T)=Bexp\left(\frac{T_b}{T}\right) \quad (2)$$

실제 스페이서 제작에는 bisphenol A 기반의 에폭시 주제를 이용하여 성형을 진행한다. 본 논문에서는 실제 스페이서 제작에 사용되는 수지의 점도를 레오미터(TA instruments, ARES-G2, New Castle)를 사용하여 측정한 후 그와 가장 유사한 특성을 가지는 수지를 Moldflow 데이터베이스상에서 선정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 2는 실제 스페이서 성형에서 사용되는 수지의 점도 측정값과 Moldflow 데이터베이스 상의 KCM-630 수지의 점도를 나타낸다. 추가적으로 선정된 KMC-630 수지의 경우 스페이서 성형에 사용되는 수지와 동일하게 알루미나 필러가 배합되어 있기 때문에 이를 최종적으로 선정하여 시뮬레이션을 진행하였다 [15]. 시뮬레이션에 사용된 KMC-630 수지의 경우 추가적인 열적 물성의 경우 표 1에 나타내었다.

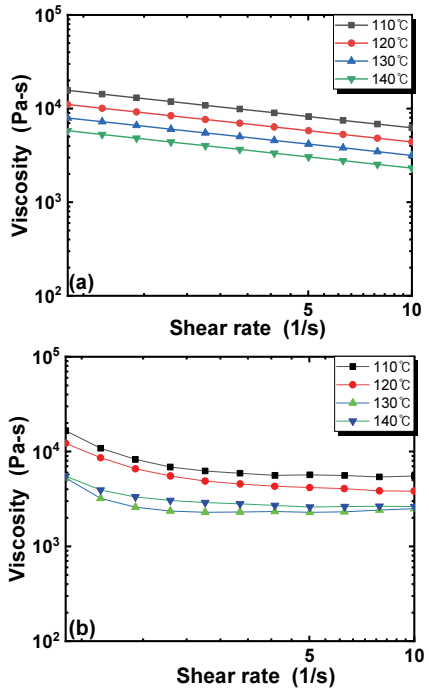

Fig. 2. Viscosity graph of epoxy resin according to temperature, (a) Moldflow database and (b) measurement value.

Table 1. Thermal properties of KMC-630 resin on Moldflow database.

Parameter	KMC-630
Solid density (g/cm^3)	2.8325
Melt density (g/cm^3)	2.8160
Thermal conductivity (70℃) (W/m-C)	2.73

전체 주입구는 원통형으로 설계되었으며 주입구의 위치는 금형의 하단 중앙부에 위치하도록 설정하였다.

우선적으로 주입구 직경에 따른 수지의 유동 경향성을 확인하기 위하여 주입구의 크기를 가변하였다. 기존 금형에 사용되는 주입구의 지름이 10~20 mm인 점을 고려하여 10 mm를 기존 최소 지름으로 설정하였고 주입구 지름에 따른 유동특성을 분석하기 위하여 지름을 30 mm, 50 mm로 증가시켜 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에서 설정된 수지 및 금형의 온도는 KMC-630 수지의 권장 온도(수지 온도: 154℃, 금형 온도: 175℃)로 설정하였고 수지의 주입 시간은 실제 스페이서 사출 시 600초 이내로 주입되는 것을 고려하여 600초로 설정하였다. 그 후 주입구 직경 10 mm, 50 mm를 선정하여 금형의 온도 및 수지의 온도를 가변하였고 미성형이 발생하는 조건에 대한 수지의 유동 및 경화 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

주입구 크기에 따른 수지의 흐름 결과를 그림 3에 나타내었다. 세 가지의 주입구 직경에서 주입구의 막힘으로 인해 주입 시간이 설정된 600초와 다르게 주입되었다. 이는 Moldflow에서 주입시간으로 주입 조건을 설정할 경우 계산된 31.52 cm^3/s의 유량이 지속적으로 주입된다. 하지만 높은 온도로 인해 주입구 외곽부터 경화가 발생하여 주입구 지름이 감소하게 될 경우 동일한 유량을 주입하기 위해서 더 높은 압력이 가해지게 되고 결국 설정된 최고 압력에 도달하게 된다. 결과적으로 최고 압력으로도 주입이 이루어지지 않는 지점에서 수지 주입이 멈추고 보압 및 경화 단계가 진행된다. 주입구 직경이 10 mm인 경우 전체 금형의 15.445%, 30 mm의 경우 42.48%, 50 mm의 경우 51.63%가 채워졌다. 이를 통해 주입구의 직경이 커질수록 더 많은 수지가 주입된 것을 확인할 수 있었고 주입구의 직경이 커짐에 따라 더 높은 온도에서 사출 성형을 진행할 수 있음을 예상할 수 있다.

위 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 통해 주입구 크기에 따른 수지 및 금형의 온도를 가변하여 추가적인 시뮬레이션을 진행하였다. 주입구의 직경은 10 mm와 50 mm로 선정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

우선적으로 주입구의 직경 10 mm에서 금형 및 수지의 온도를 가변하여 시뮬레이션 하였다. 표 2는 각 조건은 금형 내 사출품의 미성형이 발생하는 원인을 파악하기 위하여 설정된 금형 및 수지의 온도를 나타내며 그림 4는 각 온도 조건에서 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 조건 1과 조건 2의 금형 및 수지의 온도 조건에서는 미성형이 발생하지 않고 수지가 모두 채워진 것을 확인할 수 있다. 하지만 조건 3에서 조건 1, 조건 2와 달리 수지의 온도를 10℃ 올려 시뮬레이션 한 결과 주입구 부분의 경화로 인해 수지 주입이 멈추고 미성형이 발생하였다. 이를 통해 금형의 온도 증가보다 수지의 온도 증가가 미성형 발생에 더 큰 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다. 이는 에폭시 기반의 열경화성 수지의 경우 온도가 높아질수록 가교 반응이 빠르게 발생하기 때문에 그로 인한 빠른 경화가 진행된다 [16]. 결과적으로 금형 내 수지의 주입이 끝나기 전에 금형 내부의 수지가 경화되고 그에 따라 주입구를 막고 미성형이 발생한다.

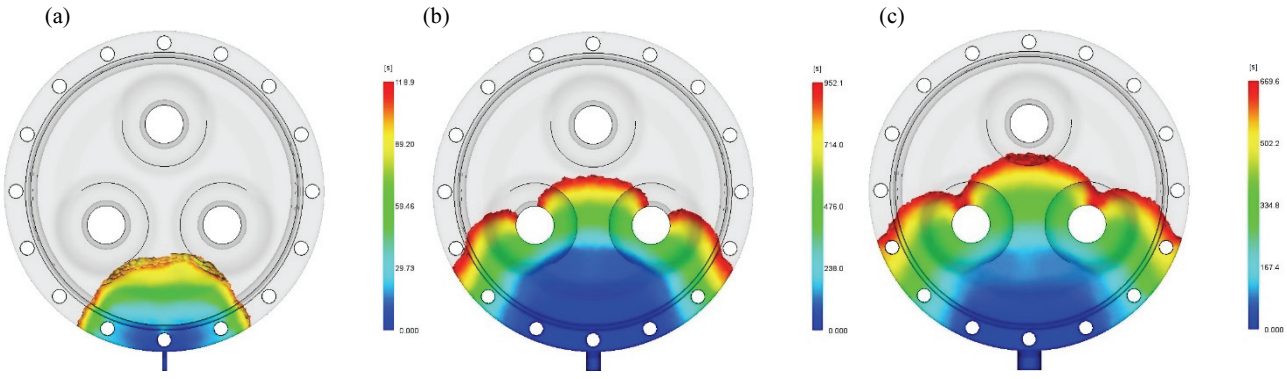

Fig. 3. Flow change of resin according to the size of the inlet. (a) 10 mm, (b) 30 mm, and (c) 50 mm.

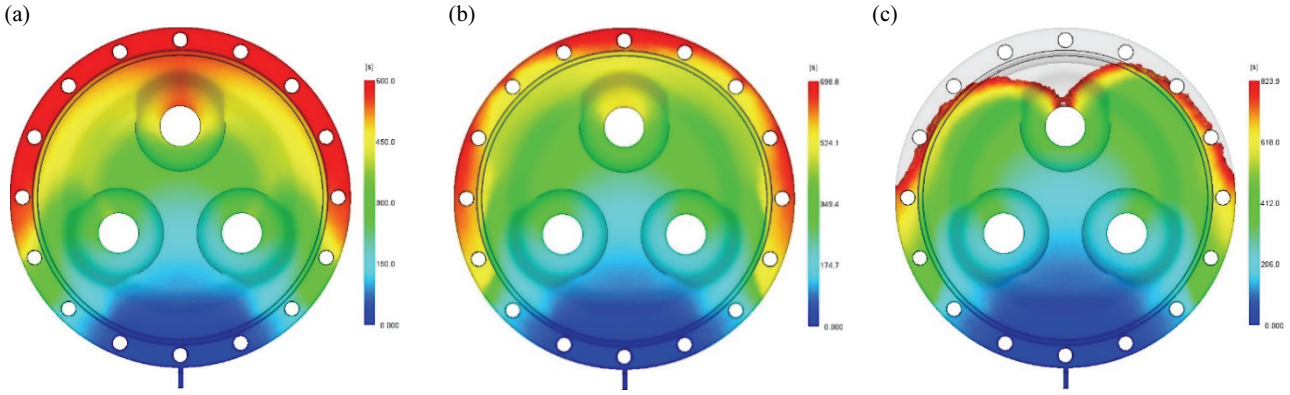

Fig. 4. Flow changes according to mold and resin temperature (a) condition-1, (b) condition-2, and (c) condition-3.

Table 2. Flow change temperature conditions according to the temperature of the mold and resin.

	Temperature of the mold (℃)	Temperature of the resin (℃)
Condition-1	120	100
Condition-2	140	100
Condition-3	140	110

그림 5는 금형 및 수지의 온도를 조건 3으로 설정한 후 주입구의 직경을 각각 10 mm, 50 mm로 설정하여 시뮬레이션 한 결과를 나타낸다. 주입구 직경 10 mm의 경우 이전의 결과와 동일하게 미성형이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 그에 비해 주입구 직경 50 mm의 경우 미성형이 발생하지 않고 정상적으로 수지가 주입된 것을 확인하였다. 이를 통해 주입구의 크기를 증가시킴으로써 사출 성형 가능한 온도를 상승시킬 수 있다는 것을 알 수 있었고 주입구 직경 50 mm, 조건 3의 공정 온도를 공정 조건으로 선정하였다.

추가적으로 선정된 조건 3의 공정 온도, 주입구의 직경 50 mm에서의 경화 특성을 분석하기 위하여 수지 주입 및 경화 시간에 따른 금형 내부의 온도를 분석하였다. 그림 6은 수지를 주입하는 시간(0~600초)에 따른 수지 온도의 변화를 나타낸다. 수지가 주입이 진행되는 방향의 경우 설정된 110℃로 주입되고 있는 것을 나타내며 금형 표면과 가까운 부위의 수지들이 우선적으로 가열되는 것을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서 설계된 스페이서 금형의 경우 수지 주입구 정면으로 금속 인서트가 위치하기 때문에 수지의 주입은 정면으로 이루어지지 않고 금속 인서트를 기준으로 양쪽으로 나뉘어 주입된다. 그로 인해 하단 외곽의 인서트 방향으로 새로운 수지가 유입되지 않고 먼저 주입된 수지가 정체되어 있는 현상이 발생한다. 그로 인해 새로운 수지가 주입되지 않고 금형에 의해 지속적인 열을 받기 때문에 금형의 온도보다 수지의 온도가 높아지는 역전현상이 발생하게 된다 [17,18].

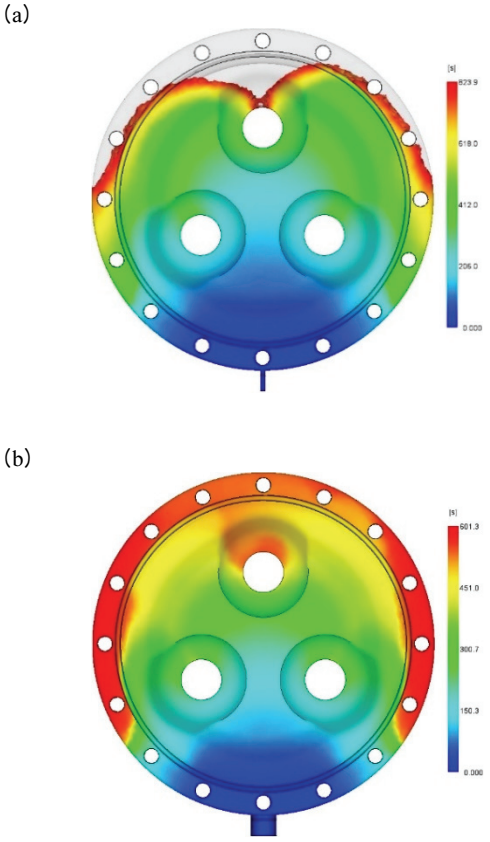

Fig. 5. Flow changes according to the size of the inlet (resin temperature 110℃, mold temperature 140℃) (a) 10 mm and (b) 50 mm.

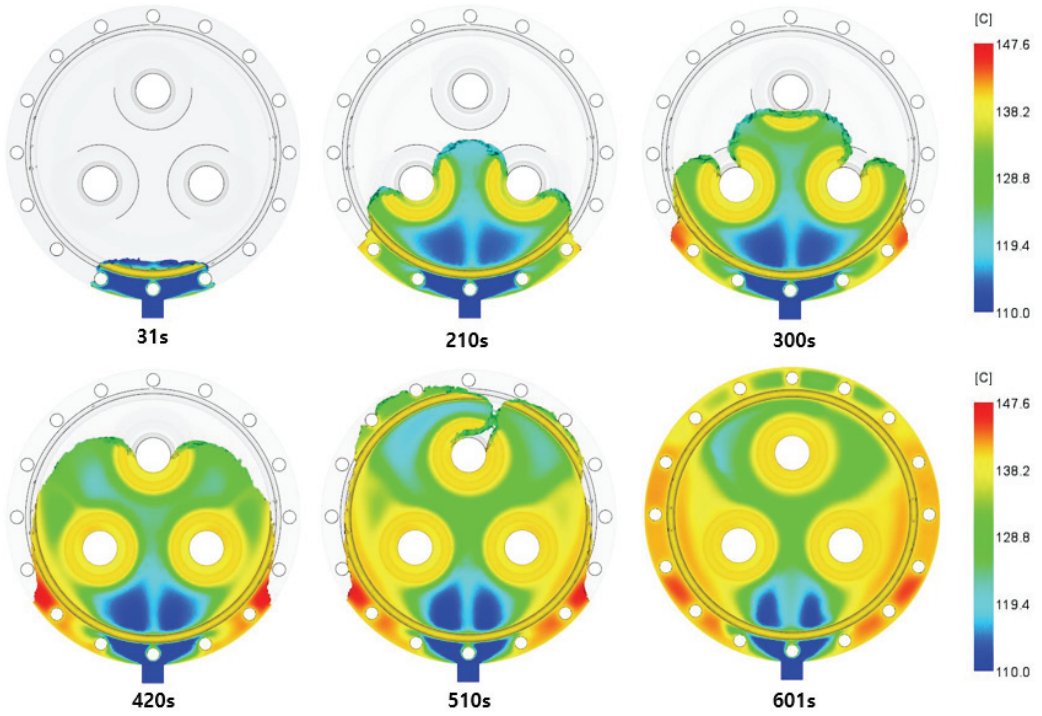

Fig. 6. Heat flow of resin inside mold according to filling time.

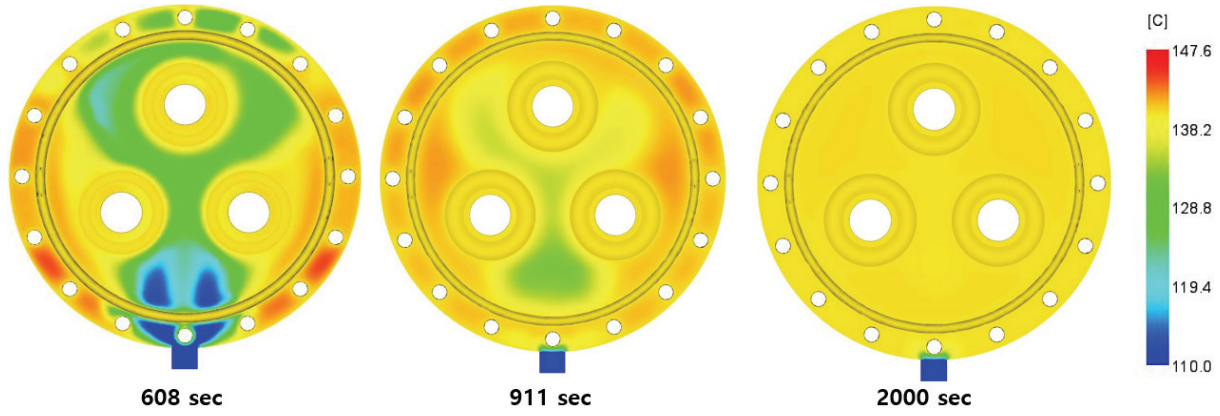

Fig. 7. Heat flow of resin inside mold according to curing time.

그림 7은 주입 이후 경화 단계(600~2,400초)에서 시간에 따른 수지의 온도 변화를 나타낸다. 경화 단계에서의 초기 온도 역시 정체 구간이 발생한 금형의 외각 부위 및 하단 부위의 경우 온도가 높게 나타났으나 시간이 지남에 따라 설정된 금형의 온도인 140℃로 균일해졌다. 금형 내 수지의 온도 차는 약 2,000초 이후 최대/최소 온도의 차가 0.3℃ 이내로 나타났다.

금형 내부의 수지의 온도는 경화 결과에도 동일하게 나타난다. 그림 8은 스페이서 내부의 수지 경화도를 나타내었다. 수지가 지속적으로 주입되는 하단 중앙 부위의 경우 상대적으로 낮은 온도, 낮은 경화도가 나타났으며 수지의 온도가 균일해지는 2,000초 지점에서 경화가 약 98% 이상 완료된 것을 확인하였다. 이는 금형의 열을 우선적으로 받는 금형의 표면 부위 및 우선적으로 주입된 상단부 수지가 금형으로부터 열을 받아 높아진 온도로 인해 경화가 시작되는 것을 알 수 있었고 수지가 지속적으로 주입되는 하단 중앙 부위의 경우 스페이서 사출 성형 시 가장 뒤늦게 경화되는 것으로 분석하였다.

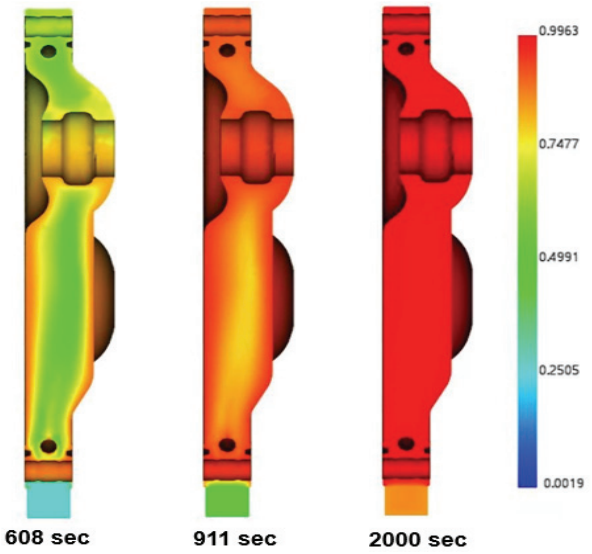

Fig. 8. Cure rate of resin inside mold according to curing time.

결과적으로 수지의 온도를 증가시켜 10 mm의 직경에서 발생하였던 미성형은 50 mm에는 발생하지 않았고 이를 통해 주입구의 직경이 증가함에 따라 더 높은 온도에서 공정이 가능함을 알 수 있었다. 또한 금형 내부 수지의 온도 분석을 통해 금형의 외각 부위에서 인서트에 의한 수지의 정체 현상을 발생하는 것을 알 수 있었으며 그로 인해 수지의 온도가, 설정된 금형의 온도보다 증가하는 역전현상이 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 향후 주입구 위치가 최적화된다면 수지의 주입 초기 단계 인서트에 의한 정체현상이 완화되고 그로 인해 역전 현상도 감소시킬 수 있을 것이라고 생각한다 [19-21]. 결과적으로 사출 성형 공정 진행 시 시뮬레이션을 통해 주입구 크기를 선정하고 그에 알맞은 사출 성형의 온도를 설정한다면 가스 절연 개폐기용 스페이서의 성형 결함을 막을 수 있으며 그에 따라 생산성 향상을 기대할 수 있다. 또한, 본 논문에서 나타낸 시뮬레이션 결과를 고려하여 주입구의 크기를 설계한다면 이후 속경화 수지를 사용하여 사출 성형을 제작할 때에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 논문에서는 가스 절연 개폐기용 스페이서를 Moldflow를 통해 시뮬레이션 하였다. 주입구의 직경에 따른 수지의 흐름을 분석하기 위하여 주입구의 직경을 10 mm, 30 mm, 50 mm로 설정하여 시뮬레이션 하였으며 3가지의 주입구 직경에서 모두 미성형이 발생하였다. 하지만 주입구 직경이 증가함에 따라 더 많은 양의 수지가 금형 내에 채워졌고 이를 통해 주입구의 직경이 증가할수록 더 높은 온도에서의 사출 성형이 가능함을 예측할 수 있었다. 이후 미성형 발생을 막기 위하여 수지 및 금형의 온도를 낮추어 시뮬레이션을 진행하였고 금형 내 수지의 열적 특성을 분석하였다. 금형 내부의 수지는 금속 인서트에 의해 정체현상 및 역전현상이 나타났고 향후 주입구 위치 및 히터 설계의 최적화를 통해 이를 해결할 수 있을 것이라고 생각한다.

ORCID

Jaehyeong Lee https://orcid.org/0000-0003-2918-4694

감사의 글

본 연구는 2021년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구입니다('20010965').

REFERENCES

[1] H. S. Park and T. T. Nguyen, *J. Comput. Des. Eng.*, **1**, 256 (2014). [DOI: https://doi.org/10.7315/JCDE.2014.025]

[2] J. S. Kim, J. D. Kim, O. R. Kim, and C. O. Kwon, *J. Korean Acad.-Ind. Coop. Soc.*, **9**, 1119 (2008). [DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2008.9.5.1119]

[3] Y. E. Yoo, Y. H. Seo, T. J. Je, and D. S. Choi, *Korean Society for Precision Engineering*, **22**, 23 (2005). [DOI: https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200514714087006.page]

[4] W. R. Kim, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **20**, 30 (2009). [DOI: http://pds16.egloos.com/pds/201004/14/01/Injection_molding_trend.pdf]

[5] K. Y. Park and J. C. Park, *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, **10**, 85 (2011). [DOI: https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201108163172983.page]

[6] J. H. Mo, H. S. Hong, and M. Y. Lyu, *Korean Soc. Technol. Plast.*, **10**, 211 (2003). [DOI: https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=NPAP08076264&dbt=NPAP]

[7] M. C. Quintana and P. Frontini, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **39**, 219 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1177/0731684419883941]

[8] Y. Zhao, T. Mattner, and D. Drummer, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **105**, 1723 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-019-04306-9]

[9] S. H. Kim, *J. Korean Contents Assoc.*, **12**, 119 (2012). [DOI: https://doi.org/10.5392/JKCA.2012.12.12.119]

[10] G. D. Kim, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, **24**, 131 (2007). [DOI: https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200727500001526.page]

[11] D. V. Rosato and M. G. Rosato, *Injection Molding Handbook* (Springer Science+Business Media, LLC, 2000) p. 776.
[12] M. Moayyedian, K. Abhary, and R. Marian, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **91**, 3977 (2017). [DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-017-0055-1]
[13] S. Kitayama, R. Onuki, and K. Yamazaki, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **72**, 827 (2014). [DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-014-5697-7]
[14] J. M. Castro and C. W. Macosko, *AIChE J.*, **28**, 250 (1982). [DOI: https://doi.org/10.1002/aic.690280213]
[15] H. P. Park, B. S. Cha, J. W. Lee, Y. B. Ko, S. G. Kim, T. S. Jung, D. H. Kim, and B. O. Rhee, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, **23**, 206 (2014). [DOI: https://doi.org/10.7735/ksmte.2014.23.2.206]
[16] S. Y. Eom, S. B. Seo, and K. Y. Lee, *Polymer (Korea)*, **37**, 240 (2013). [DOI: https://doi.org/10.7317/pk.2013.37.2.240]
[17] S. H. Park, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, **28**, 56 (2019). [DOI: https://doi.org/10.7735/ksmte.2019.28.1.56]
[18] L. J. Lee, J. M. Ottino, W. E. Ranz, and C. W. Macosko, *Polym. Eng. Sci.*, **20**, 868 (1980). [DOI: https://doi.org/10.1002/pen.760201306]
[19] H. S. Kim, J. S. Son, and Y. T. Im, *J. Mater. Process. Technol.*, **140**, 110 (2003). [DOI: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00700-3]
[20] J. C. Park and Y. K. Seong, *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, **9**, 21 (2010). [DOI: https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201007750339637.page]
[21] K. H. Han, D. S. Choi, H. S. Kim, and Y. T. Im, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **25**, 1575 (2001). [DOI: https://doi.org/10.22634/KSME-A.2001.25.10.1575]