J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 35, No. 4, pp. 386-391 July 2022
DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.4.11
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

Regular Paper

APG 주형방식을 이용한 가스절연개폐기용 절연 스페이서 제작에 관한 연구

이찬용[1], 배재성[1], 조한구[1], 이상묵[2], 이재형[1]

[1] 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과
[2] 단국대학교 화학공학과

A Study on the Manufacture of Gas Insulated Switchgear Spacer Using APG Molding Process

Chanyong Lee[1], Jaesung Bae[1], Han-Gu Cho[1], Sangmook Lee[2], and Jaehyeong Lee[1]

[1] Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea
[2] Division of Chemical Engineering, Dankook University, Yongin 16890, Korea

(Received January 18, 2022; Revised March 25, 2022; Accepted April 27, 2022)

Abstract: The gas insulation switchgear, which is a device for protecting a power system, cannot be supported by the insulation gas itself in a charge unit stored in a metal container. Therefore, molding technology is required to manufacture a gas insulation switch spacer. The APG method injection molding simulation was performed by applying the variables obtained through the physical properties of an epoxy composite used for manufacturing an insulating spacer to a moldflow software. After varying the temperature conditions of heater in the simulation, the thermal characteristics and the degree of hardening of the spacer were analyzed, based on which the optimum process conditions are presented.

Keywords: Gas insulated switchgear (GIS), Spacer, Moldflow, Automatic pressure gelation (APG) molding process

1. 서 론

전 세계적으로 전력 수요의 급증에 따라 전력 계통은 대용량 및 초고압화되어 가고 있다. 전력계통을 보호하는 장치인 초고압 가스절연개폐기(gas insulated switchgear)는 내부에 절연 성능이 높은 SF_6 가스로 충진되어 밀봉한 개폐 설비 시스템을 말한다. 가스절연개폐기는 금속 용기 내에 수납되는 충전부에 절연 가스 자체만으로는 지지할 수 없어 가스절연개폐기용 절연 스페이서를 제작하기 위한 성형공정기술 및 장치가 필요하다 [1,2].

절연 스페이서 제작에 사용되는 기존 주형 방식과 APG (automatic pressure gelation) 방식 두 가지 형태가 있다. 기존 주형 방식은 예열된 금형에 직접 수지를 주입하는 형식으로 경화시간이 길어짐에 따라서 생산 효율이 낮은 편이다. 또한 수지 주입구가 상단부에 위치하여 작업자가 직접 주형하기 때문에 수지 주입 시 내부가 부분적으로 불규칙한 경화에 의해 굴곡이 생길 우려가 있어 제품 외관이 매끄럽지 못할 수 있다. 반면 APG 방식은 에폭시 수지를 가압/가열을 통해 성형되는 자동 주형 방식이며 clamping M/C 자체가 한쪽은 금형을 고정하고 반대쪽에서 유압 실린더를 통해서 미는 방식으로 사용되어 인력 손실이 저하

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

Copyright ©2022 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.

되고 clamping M/C를 이용하여 금형을 닫음으로써 예열하는 과정에서 고온 유지가 가능하기 때문에 생산성을 높일 수 있다 [3].

절연 스페이서 제작 과정에 있어서 시간과 비용을 줄이기 위해 APG 방식의 사출 성형 시뮬레이션을 통해 각 공정 조건에 따른 사출성형 결과를 분석할 수 있으며 그에 따른 최적화 공정 조건을 선정할 수 있다. 또한, 사출 성형 공정에서 발생하는 성형 불량을 미리 검토하여 최소화시키는 목적뿐만 아니라 스페이서의 품질 향상과 제조 비용 절감 등을 고려한다면 사출 성형 시뮬레이션 및 해석을 통한 공정 조건의 최적화가 필수적이다.

본 논문에서는 절연 스페이서 성형에 앞서 문제점을 파악하기 위해 몰드플로우 소프트웨어를 이용하여 각 히터 간의 온도를 가변함으로써 최적의 공정 조건을 도출하였다.

2. 실험 방법

Moldflow를 통한 시뮬레이션 해석을 위해 사용된 에폭시 수지는 YD-127 (Kukdo Chemical, Korea)인 DGEBA (diglycidyl ether of bisphenol A)이며 경화제는 MHHPA (methyl-hexahydrophthalic anhydride)를 사용하여 에폭시 복합체의 유변학적 및 경화 특성의 측정 결과를 통해 데이터베이스화를 진행하였다. 열적 물성 분석으로 DSC (differential scanning calorimeter) 측정을 하여 나온 결과로부터 비열용량 및 식 (1)을 이용하여 경화도 그래프를 구하였다 [4]. 비열 용량은 냉각과정에서 20℃/min으로 측정을 진행하였고 에폭시 복합체의 열전도도는 25℃ 온도 조건에서 측정하였으며 DSC 측정 조건의 경우 30~300℃의 온도 범위에서 승온 속도 5℃/min, 20℃/min, 40℃/min로 가변하여 각 승온 속도마다 반응이 발생하는 지점과 끝나는 지점을 법선으로 연결한 후 면적을 적분하여 경화도 그래프를 도출하였다. 측정값을 통해 얻은 데이터를 Kamal-Sourour 방정식에 적용함으로써 Kinetics 변수로 변환하여 시뮬레이션을 진행하였다. Kamal-Sourour 방정식은 식 (2)에 나타내었다 [5,6]. DSC 측정은 Seico사의 DSC720을 사용하였으며 열전도도는 NETZSCH사의 LFA467을 사용하였다.

$$\alpha(\text{Conversion}) = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_{Total}} = \frac{\text{The amount of change up to t seconds}}{\text{The total area of change amount}} \quad (1)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m)(1-a)^n \qquad k_i = k_{i0}e^{-E_{ai}/RT} \quad (2)$$

유동 물성 분석으로는 Rheometer를 통해 온도에 따른 점도를 측정하였고 Rheometer 측정 조건의 경우 30~185℃ 온도 범위에서 전단 속도 및 승온 속도에 따라 총 9가지 조건으로 진행하였다. 측정을 통해 얻은 데이터를 cross Castro-Macosko chemorheology model 방정식에 적용함으로써 reactive viscosity 변수로 변환하여 DSC와 동일하게 moldflow에 적용하였다. Cross Castro-Macosko model 식은 식 (3)에 나타내었다 [7]. Rheometer 측정은 TA사의 ARES-G2를 사용하였다.

$$n(\alpha, T, \gamma) = \frac{n_{0(T)}}{1+(\frac{n_{0(T)}\gamma}{Tau})^{1-n}}\left(\frac{\alpha_{gel}}{\alpha_{gel}-\alpha}\right)^{C_1+C_2a} \quad (3)$$

사출 성형 시뮬레이션 프로그램으로 Moldflow (Autodesk, San Rfel, US)를 사용하였으며, 에폭시 복합체 물성 측정 결과값을 통해 데이터 베이스화 하였다. 또한 가스절연개폐기용 스페이서의 열 유동 및 경화 시뮬레이션을 진행하기 위해 스페이서를 3D 모델링 하였으며 보다 정확한 결과를 도출하기 위해 기존 mesh 수 약 97만 개에서 약 560만 개로 증가시켰다. 주입구 크기의 경우 이전에 진행하였던 주입구 크기에 따른 시뮬레이션 결과를 기반으로 주입구 크기는 20 mm로 선정하였다 [8]. 3D 모델링 된 스페이서 및 히터 구간은 그림 1에 나타내었으며 표 1에 스페이서의 사출성형을 위한 주요 공정 조건을 나타내었다. 금형의 경우 각 부분의 히터 온도를 가변 해서 내부의 온도 및 경화도를 분석하였으며 히터 온도 조건은 표 2에 작성하였다.

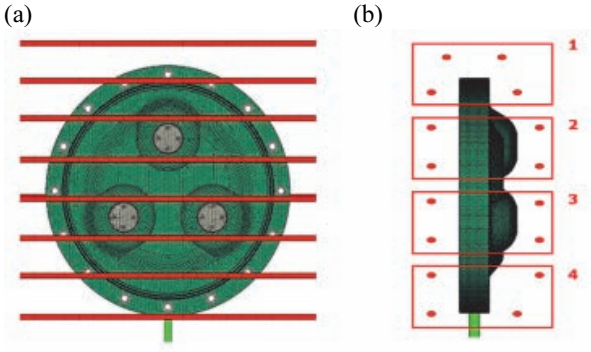

Fig. 1. (a) Spacer mesh image for GIS modeled in 3D and (b) heater temperature setting section.

Table 1. Simulation process conditions.

Initial resin temperature (℃)	60℃
Center conductor temperature (℃)	140℃
Filling time (sec)	350 sec
Packing pressure (bar)	0.15 bar

Table 2. Heater Temperature sets used in this study.

Temperature	Heater temperature (℃)

section	Condition-1	Condition-2	Condition-3	Condition-4
1	140	140	140	140
2	140	135	130	137
3	140	135	130	135
4	140	135	130	133

3. 실험 결과

3.1 에폭시 복합체 물성 측정

DSC 측정은 그림 2에 에폭시 복합체의 온도에 따른 heat flow를 각 승온 속도에 따라 나타내었다. 측정된 DSC 결과로 heat flow를 시간에 따라 적분하여 각 승온 속도의 전체 반응열(ΔH_{total})과 경화도 및 비열 용량을 계산할 수 있다. 반응이 시작된 지점부터 반응이 끝난 시점까지의 면적을 적분하여 계산된 반응열은 표 3에 나타내었고, 경화도 및 비열 용량은 그림 3, 4에 나타내었다. 열전도도는 온도 80℃에서 0.957 W/m℃로 측정되었다.

각 승온 속도 및 전단 속도에 따른 레오미터 측정값을 그림 5에 나타내었다. 1 rad/s, 2℃/min, 5℃/min, 10℃/min 경우 95℃, 100℃, 150℃ 이상의 온도 조건, 5 rad/s, 2℃/min, 5℃/min, 10℃/min 경우 110℃, 125℃, 150℃ 이상의 온도 조건, 10 rad/s, 2℃/min, 5℃/min, 10℃/min 경우 110℃, 125℃, 150℃의 온도 조건에서 점도가 상승하였다. 각 승온 속도가 증가함에 따라 전체적으로 높은 온도 쪽으로 이동하였는데 이는 레오미터의 설정온도가 샘플의 온도를 도달하지 못하였기 때문이라고 추측된다.

Table 3. Total heat of reaction according to the heating rate.

Heating rate	Total heat of reaction (J/kg)
5℃/min	83,223.72
10℃/min	79,248.91
20℃/min	86,384.72
40℃/min	75,888.99

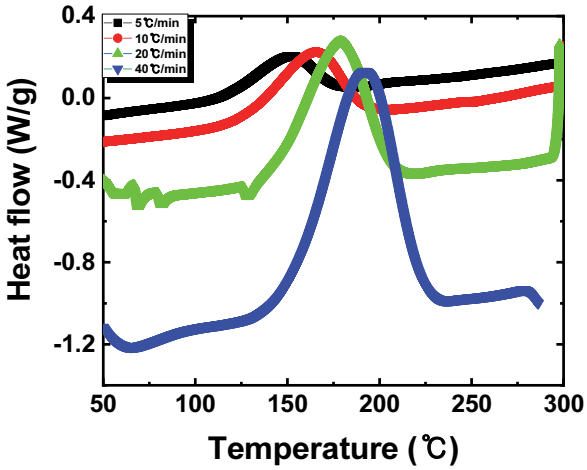

Fig. 2. DSC results of the measured epoxy composite.

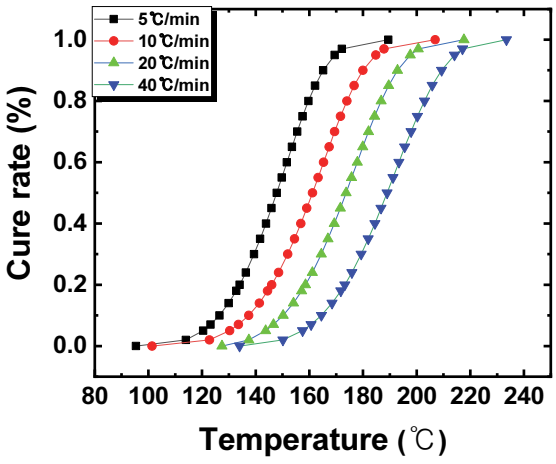

Fig. 3. Graph of epoxy composite by heating rate.

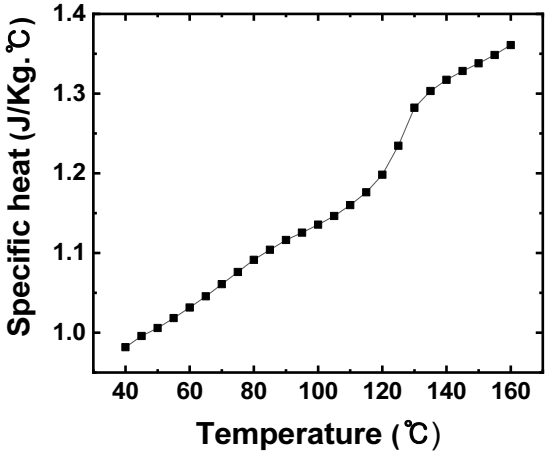

Fig. 4. Graph of specific heat of epoxy composite.

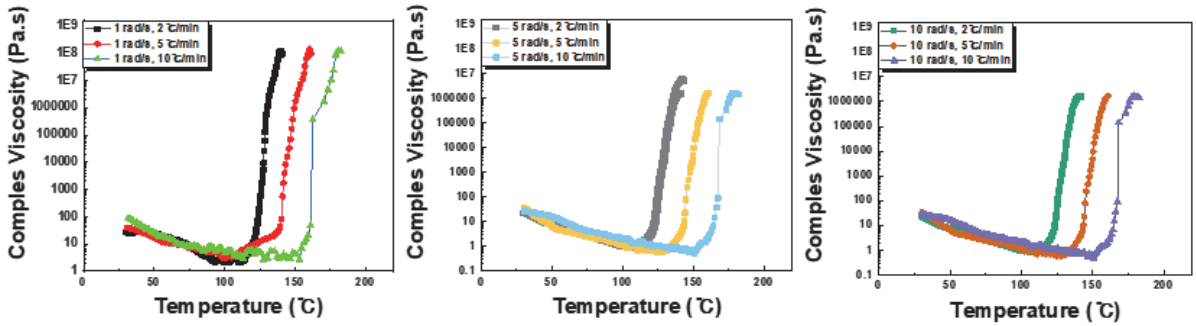

Fig. 5. Rheometer measurement result graph of epoxy composite.

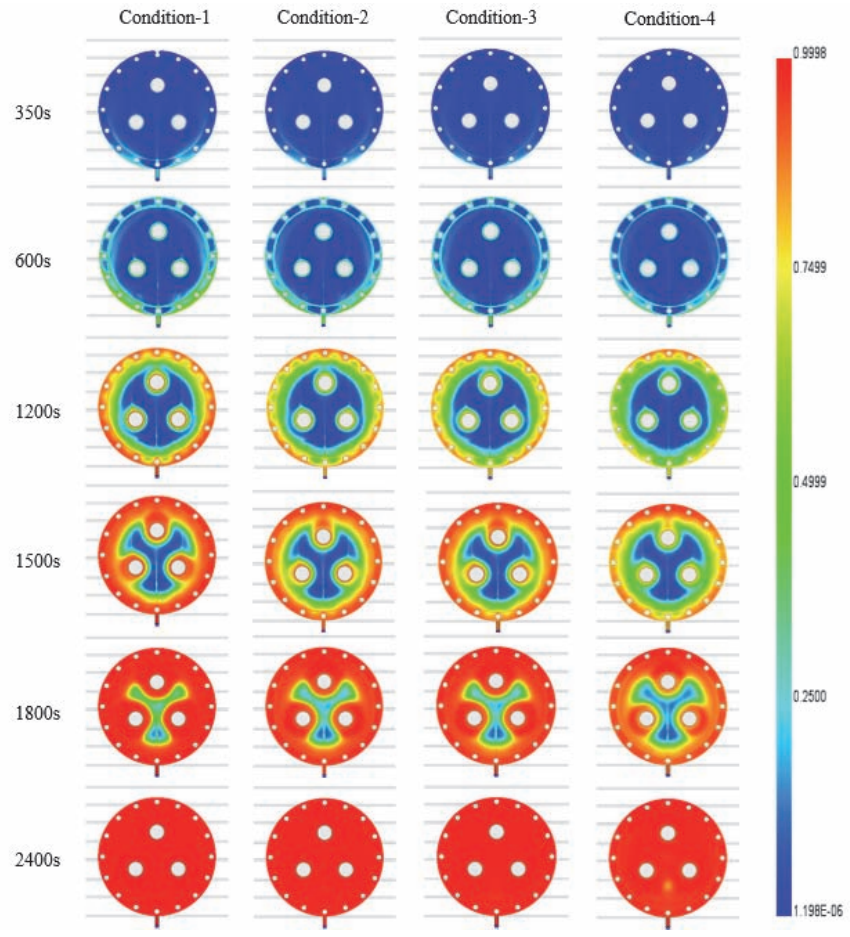

Fig. 6. Degree of cure under different heater temperature conditions.

3.2 Moldflow 시뮬레이션

4가지 조건으로 시뮬레이션을 진행한 결과의 금형 내부 경화도를 그림 6에 나타내었고 각 지점에서의 경화 특성을 시간에 따른 그래프로 그림 7에 나타내었다. 그림 6은 정면도에서 XY 면을 따라 두께의 중간으로 자른 단면이다. Condition-1 조건의 경우 1,800초 부근에서 주입구(A)는 경화율 약 96% 진행되었다. 이 경우는 전체적으로 경화가 완료되지 않은 상태에서 입구가 막히는 현상이 나타날 수 있으며, 경화 이후 충분한 보압을 유지하지 못하므로 스페이서의 중앙부위에서의 수축이 발생할 수 있다. 그러므로

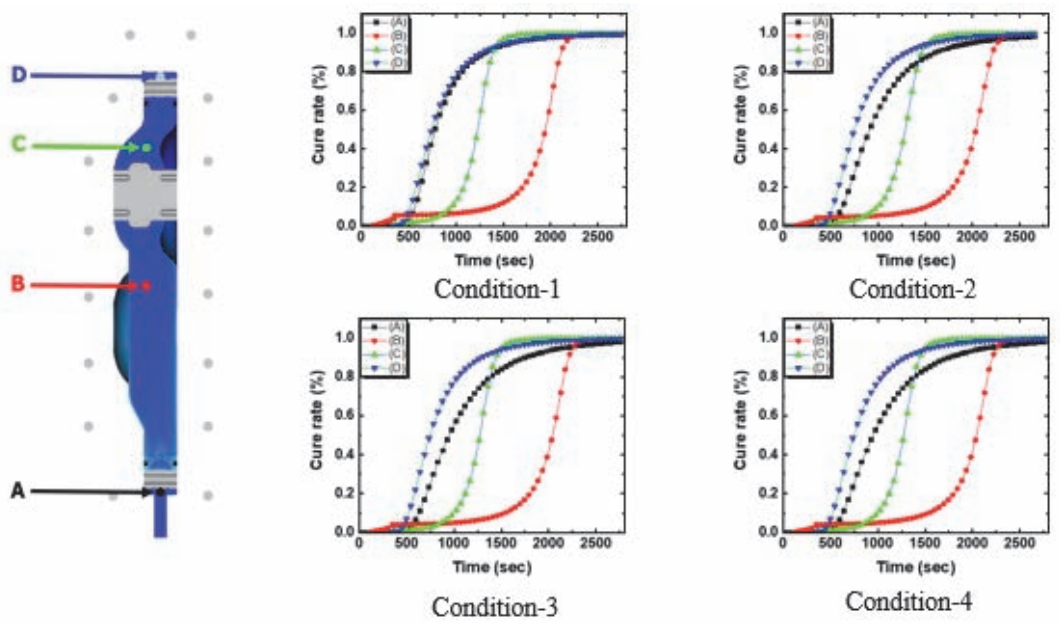

Fig. 7. Result of cure rate graph of inside the spacer over time.

주입구 부근에서의 경화 속도를 늦추기 위해 4번 위치의 히터 온도를 낮추고 2~3번 히터 온도 위치에 있는 스페이서 내부 경화도를 보게 되면 내부보다 외곽이 먼저 경화가 진행되는 걸 확인할 수 있다 [9]. 이를 고려하였을 때 주입구 부근과 마찬가지로 외곽이 먼저 경화되어 내부 경화가 원활하지 않을 수 있기 때문에 2~3번 역시 히터 온도를 낮추어 시뮬레이션을 진행하였다.

Condition-2와 3의 경우 상단부(D)의 히터 온도는 고정하고 나머지 히터 온도를 가변하였다. 주입구는 condition-1 조건에 비해 서서히 경화가 진행되는 걸 확인할 수 있다. 하지만 2~3번 히터 온도 위치에서의 경화도를 보게 되면 스페이서 내부에 비해 외곽이 먼저 경화 진행이 종결되었음을 확인할 수 있다. 이러한 경우에는 경화가 원활하게 진행이 되지 않을 우려가 있고 내부에 부분적으로 미경화 및 크랙이 나타날 수 있으므로 상단부를 기준으로 하단부까지의 히터 온도를 순차적으로 낮추어 시뮬레이션을 진행하였다. Condition-4의 경우 히터 온도를 순차적으로 조절함으로써 경화 진행이 느리게 진행되었으며 외곽에서 내부까지의 경화가 원활하게 진행되었음을 확인하였다.

결과적으로 condition-4 조건을 최적 히터 온도 조건으로 선정하였고, 경화시간 2,400초 이후부터 스페이서는 완전 경화가 이루어져 실제 스페이서 탈형하는 과정, 충분한 보압 및 경화시간을 고려하였을 때 최적 1차 경화시간을 2,400초로 선정하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 가스절연개폐기용 절연 스페이서의 에폭시 복합체의 물성을 측정하여 moldflow 데이터베이스화를 통해 시뮬레이션을 하였다. 각 히터 온도에 따른 경화율을 분석하기 위해 히터 온도를 가변하여 진행하였다. 히터 온도를 가변하여 진행한 결과 수지 주입이 시작되는 하단부 부근의 온도를 높게 가져갔을 때 먼저 경화가 마무리되어 스페이서 중심부 부근의 경화가 덜 진행되었음을 확인할 수 있었다. 그리하여 하단 히터 온도를 낮춰 순차적으로 경화가 진행되는 온도 조건을 알 수 있었다. 이후 외각에서 내부까지의 경화가 원활하게 진행되었음을 확인하여 condition-4를 최적 공정온도로 선정하였고, 경화시간의 경우 2,400초 이후 99% 이상의 경화율이 진행되어 2,400초를 최적 1차 경화시간으로 예측할 수 있었다. 결과적으로 금형 내 수지의 열적 특성 분석 및 히터 설계를 통해 최적 조건을 선정하였다.

ORCID

Jaehyeong Lee https://orcid.org/0000-0001-7775-1142

감사의 글

이 연구는 2022년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원을 받아 수행한 연구입니다('20010965').

REFERENCES

[1] Y.S. Lee, 2013, *Bulletin of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, **26**, 9.

[2] G. M. Kwon, S. K. Lee, M. C. Kang, K. S. Jeong, and K. H. Kim, *Proc. 46th The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference*, (KIEE, Muju, 2015) p. 1181.

[3] J. J. Soh and P. J. Kim, *Proc. the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers Conference* (KIEEME, 2006), p. 240.

[4] H. J. Kwon, H. J. Park, E. J. Lee, S. M. Ku, S. H. Kim, and K. Y. Lee, *Compos. Res.*, **31**, 30 (2018). [DOI: https://doi.org/10.7234/composres.2018.31.1.030]

[5] D. Abliz, B. Finke, A. Kwade, C. Schilde, and G. Ziegmann, *Acting Principles of Nano-Scaled Matrix Additives for Composite Structures* (Eds. M. Sinapius and G. Ziegmann) (Springer, New York, 2021) p. 267. [DOI: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-68523-2.pdf]

[6] C. Leistner, S. Hartmann, D. Abliz, and G. Ziegmann, *Continuum Mech. Thermodyn.*, **32**, 327 (2020). [DOI: https://doi.org/10.1007/s00161-018-0708-9]

[7] N. T. Tran and M. Gehde, *Polym. Test.*, **73**, 284 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.042]

[8] J. Bae, W. Lee, H. Jee, B. Hong, and J. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 426 (2021). [DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.6.4]

[9] Y. G. Hong and S. M. Lee, *Polym. Korea*, **45**, 940 (2021). [DOI: http://doi.org/10.7317/pk.2021.45.6.940]