

초고압 절연 스페이서의 자동가압 겔화 성형 공정을 위한 경화 보압의 최적화

이찬용, 조한구, 이재형 

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Optimization of Curing Pressure for Automatic Pressure Gelation Molding Process of Ultra High Voltage Insulating Spacers

Chanyong Lee, Hangoon Cho, and Jaehyeong Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received August 8, 2023; Revised August 23, 2023; Accepted August 25, 2023)

Abstract: By introducing curing kinetics and chemo-rheology for the epoxy resin formulation for ultra-high voltage gas insulated switchgear (GIS) Insulating Spacers, a study was conducted to simulate the curing behavior, flow and warpage analysis for optimization of the molding process in automatic pressure gelation. The curing rate equation and chemo-rheology equation were set as fixed values for various factors and other physical property values, and the APG molding process conditions were entered into the Moldflow software to perform optimization numerical simulations of the three-phase insulating spacer. Changes in curing shrinkage according to pack pressure were observed under the optimized process conditions. As a result, it was confirmed that the residence time in the solid state was shortened due to the lowest curing reaction when the curing holding pressure was 3 bar, and the occurrence of deformation due to internal residual stress was minimized.

Keywords: Automatic pressure gelation (APG), Moldflow simulation, Cure kinetics, Packing pressure, Spacer, Gas insulated switchgear (GIS)

1. 서론

반응 성형 공정은 열 경화성 복합 수지를 금형에 충전시킨 후, 경화 반응을 통하여 짧은 시간 내에 제품을 성형하는 공정으로, 반도체 패키징과 섬유강화수지(FRP)로 전기전자, 자동차, 우주항공과 선박 등의 다양한 구조 부품들을 제작하는 데 활용되는 성형기술이다 [1-4]. 최근에는 이

러한 공정 중 선도적인 기술의 하나인 자동가압 겔화 (automatic pressure gelation, APG) 공정으로 제조한 중저압급 중소형 제품에서부터 초고압급 제품의 전기절연 부품들을 생산하는 데에 사용되고 있다.

자동가압 겔화(APG) 공정은 먼저 2가지 이상의 액상 반응물들을 충전제들과 함께 혼합하여 균질화 및 탈포를 한 후 자동가압 겔화 장치에 의해 가열되어 있는 금형으로 주입되는 충전 과정을 거친다. 이렇게 주입된 복합체 수지는 경화 과정을 통해 액체에서 고체로 상 변화가 일어나게 된다. 경화된 복합 수지는 탈형을 하고 경화 과정의 완료와 점진적 냉각을 위해 후경화 과정을 통해 열적, 화학적 응력을 완화시킨다 [5]. 하지만 자동가압 겔화 공정을 통한 성

✉ Jaehyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

Copyright ©2024 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.

형 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 어려움이 있다. 그러므로 정확한 수치 해석을 통한 공정 조건의 최적화를 제시하기 위해 컴퓨터 수치 모사인 Moldflow software를 사용하였다. Moldflow software를 통해 제품의 개발 및 양산단계에서의 비용 절감뿐만 아니라 반응 성형 공정 동안 발생하는 복잡한 현상으로 도체와 수지의 접촉면의 경화도 및 발열 온도, 에어 트랩, 웰드 라인, 제품 내부의 크랙과 같은 성형 결함 등의 기술적 문제를 찾는 데 유용한 정보를 제공한다 [6-9].

본 연구에서는 기존의 진공 성형 공정보다 자동화되고 생산리드타임을 저감할 수 있는 자동가압 겔화 공정으로 목표 제품인 초고압 가스절연 차단기용 스페이서를 성형함에 있어서 사용되는 바이오 기반 에폭시 복합체의 반응 속도식과 점도반응식을 유도하였다. 또한 스페이서 내부 잔류 응력의 발생 원인 중 하나인 수축률에 대한 시뮬레이션 해석을 진행하기 위해 바이오 기반 에폭시 수지에 대한 PVT 측정을 통해 Moldflow parameter data 값을 추출하였다. 이를 통해 바이오 기반 에폭시 복합체의 물성 파라미터 및 금형 설계 구조를 Moldflow software에 적용하였다. 최적화된 온도 조건에서의 경화 충전 압력의 영향에 따른 변형의 차이를 분석하였으며 복합 수지 유동 및 경화 해석을 실시하여 실제로 발생하는 문제점을 파악하고 최적의 가공 조건을 확인하고자 한다.

2. 실험

2.1 원료 및 배합

식물계 바이오 수지는 바이오 함량(탄소 함량)이 20%인 DGEBA형으로 180~190 g/equ.인 국도화학의 YD-127D

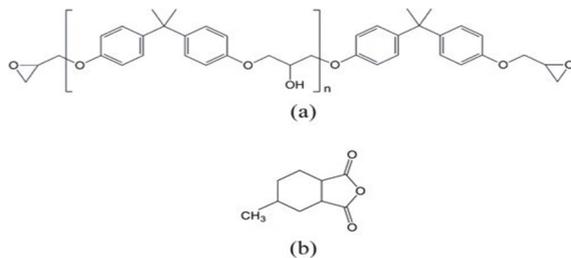


Fig. 1. Chemical structure of epoxy resin and curing agent used in this research (a) bisphenol A di-glycidyl ether (DGEBA) and (b) methyl hexahydrophthalic anhydride (MHHPA).

를 사용하였다. 경화제는 산무수물계 MHHPA (methyl hexahydro phtalic anhydrie), 반응촉매는 제3아민계로 사용한 에폭시 수지와 경화제의 구조식은 그림 1에 나타내었다. 또한, 에폭시 수지의 기계적 특성 향상을 위해 평균 입도가 서로 다른 2종의 알루미나 분말을 70 wt% 첨가하였으며, 내크랙성 개선을 위해 아크릴계 코어 셸 고무를 첨가하였다.

2.2 전산 모사

본 논문에서는 반응 성형 공정의 초고압 가스절연 차단기용 스페이서 절연물을 모델로 한 수치 모사는 미국 Autodesk사의 몰드플로우(Moldflow) 소프트웨어를 사용하였다. 절연 스페이서 절연물의 3차원 도면은 그림 2와 같다. 금형 내부에 히터를 8개씩 총 16개를 설치하여 금형 및 히터 온도의 변화를 주면서 성형품 내부의 발열 온도 및 경화도 등의 결과를 통해 최적화된 조건을 구했다 [8]. 본 연구에서 사용된 금형, 중심도체 및 인서트, 바이오 기반 에폭시 복합체의 특성 들은 표 1에 기재하였으며, simulation

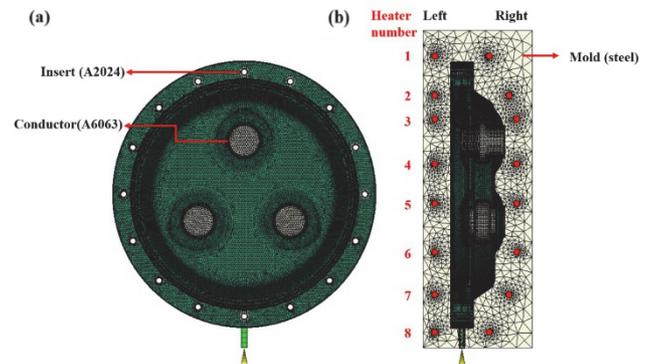


Fig. 2. GIS spacers used in this study: (a) front and (b) side.

Table 1. Basic physical properties of the materials used in this research.

Material	Density (g/cm ³)	Specific heat (J/kg.°C)	Thermal conductivity (W/m-C)
Epoxy compounds	2.263	962~1,363	0.895
Conductor (A6063)	2.7	900	200
Insert (A2024)	2.78	875	151
Mold (steel)	7.8	460	29

Table 2. Processing and optimized heater temperature conditions used in this research.

Initial resin temperature (°C)	60			
Filling time (sec.)	300			
Packing time (min.)	30			
Packing pressure (bar)	1~4			
Heater No. (from top to bottom)	1-2	3-4	5-6	7-8
Temperature (°C)	140	137	135	130

해석을 위한 공정 조건 및 히터 온도 조건은 표 2에 나타내었다. 절연 스페이서의 주입구는 직경이 20 mm, 길이는 50 mm로 설계되었으며 주입구의 위치는 금형의 하단 중앙부에 위치하도록 설정하였다.

Moldflow는 각 절점에서의 점도, 전단응력, 온도, 경화도 등의 다양한 변수들이 복합적으로 계산되는 데 있어서 바이오 에폭시 복합체 수지의 cure kinetics, reactive viscosity는 Kamal-Sourour kinetics model 식과 cross Castro-Macosko model 식을 이용하여 파라미터를 추출하였다. Cure kinetics는 일반적인 에폭시-아민 시스템으로 자촉매 반응(autocatalytic reaction)의 형태를 보인다 [10-12]. Cure kinetics를 구하는 식으로는 여러 가지 식이 있는데 식 (1)은 이를 표현하는 현상학적 모델로서 Kamal-Sourour에 널리 사용되고 있다. 경화도에 따른 경화 속도는 다음과 같다 [13,14].

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m)(1 - \alpha)^n$$

$$\text{where } k_i = k_0 e^{-E_{ai}/RT} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

여기서 k_1 은 1차 에폭시-아민 반응속도 상수이며, k_2 는 아민 경화제와 에폭시의 반응에서 생성된 수산화기의 촉매작용으로 인한 자촉매 반응에 해당하는 반응 속도 상수이다. m 과 n 은 반응차수, k_0 는 지수 앞자리인자, E_{ai} 는 활성화 에너지이다. 열경화성 수지는 외부에서 열이 가해질 때 반응에 의해서 가교 결합이 형성됨에 따라서 점도 또한 증가하게 되는데 이를 표현하는 여러 가지 모델이 연구되고 있다. 화학 반응의 발생과 점도의 변화를 설명하는 에폭시 수지에 자주 사용되는 반응성 점도 모델인 cross Castro-Macosko model 식을 사용하였다 [11].

Table 3. Estimated parameters of the Kamal-Sourour model.

Activation energy (K)		Pre-exponential factor (s ⁻¹)		Reaction order	
E _{a1}	E _{a2}	K _{a1}	K _{a2}	m	n
9,053	7,532	2.906 × 10 ⁶	4.859 × 10 ⁵	0.948	1.209

Table 4. Chemorheological parameters of the cross Castro-Macosko model.

α_{gel}	n	τ^* (Pa)	B (Pa.s)	T _b (K)	C ₁
0.453	0.845	1.0 × 10 ⁻²	2.167 × 10 ⁻³	3,595	0.378

$$n(\alpha, T, \gamma) = n_0(T) \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha} \right)^{C_1 + C_2 \alpha}$$

$$\text{Where } n_0(T) = \text{Bexp} \left(\frac{T_b}{T} \right)$$

$$n(\alpha, T, \gamma) = \frac{n_0(T)}{1 + \left(\frac{n_0(T)\gamma}{\tau^*} \right)^{1-n}} \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha} \right)^{C_1 + C_2 \alpha} \quad (2)$$

여기서 α 는 경화도이고 α_g 는 겔화점에서의 경화도, C_1 , C_2 는 실험 상수, τ^* 는 임계 전단 응력(critical shear stress), γ 는 shear rate이다. DSC와 Rheometry 기기로 분석한 경화 반응식과 화학유변 점도식은 표 3, 4와 같다.

경화 보압에 따른 스페이서 절연물의 변형 해석을 위해 PVT (pressure volume temperature) 특성은 Fox 50 Heat Flow Meter (TA Instruments, New Castle, US)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

초고압 가스절연 차단기용 스페이서의 충전 과정은 그림 3에 시간에 따라 나타냈으며 충전 과정에서는 경화 반응이 거의 일어나지 않았다. 이는 금형 및 히터의 충분한 열이 바이오 기반 에폭시 복합체로 전달되지 않아 경화 반응이 거의 일어나지 않았을 거라 사료된다. 주입 초기에는 미경화된 복합체가 금형 주입구를 지나 채워지고 더욱 시간이 경과하면 흐름이 아래쪽 도체를 만나 갈라지는 것을 볼 수 있다. 주입 시간이 3분이 되었을 때는 아래쪽 도체 주위로 복합체가 채워졌다. 이후에 갈라진 복합체가 중심 도체와 만나는 점들의 부분을 웰드 라인(weld line)이라고 하며 열 경화성 수지의 경우, 상대적으로 낮은 점도 및 평

균 경화도를 나타내기 때문에 접촉면에서의 물성 저하 및 미경화와 같은 문제점은 없을 것이라 사료된다. 주입 시간이 4분 이후에는 복합체가 위쪽의 중심도체를 만나 다시 갈라지고 절연 스페이서 금형 내부를 바이오 기반 에폭시 복합체로 완전히 충전하게 된다. 본 연구의 충전 과정은 중력 및 관성 효과를 제외시킨 조건으로 유동 해석을 진행하여 전형적인 분수 흐름(fountain flow) 형태를 나타내고 있다 [8].

일반적으로 바이오 기반 에폭시 복합체는 성형 공정에 관계없이 금형을 분리하는 탈형(demolding) 작업을 할 때의 주입구 부분의 경험적인 평균경화도가 75~85% 수준으로 본 연구에서는 에폭시 수지의 이론적인 겔화 경화도인 65% 이상인 평균 경화도가 78%, 85%에 도달하는 시간을 기준으로 최소와 최대 성형(탈형)시간으로 설정하였다. 그림 4는 금형으로부터 스페이서의 절연물을 탈형하기 위한 에폭시 복합물의 최소(78%) 및 최대(85%) 평균 경화율 도달 시간을 보압(pack pressure)에 따라 나타낸 것이다. 충전 과정의 평균 경화도는 1% 미만이지만 금형 온도와 경화 보압의 영향을 받는 패키징 과정은 평균 경화율이 78%일

때 경화 보압이 증가할수록 경화 시간이 증가하는 경향을 나타냈다. 하지만 평균 경화율이 85%일 때에는 2 bar까지 경화 시간은 점차 증가했다가 3 bar에서 약 21분에 85%를 달성하였고, 4 bar에서 경화 시간이 다시 증가하였다. 이는 3 bar의 조건이었을 때 바이오 기반 에폭시 복합체가 패키징 과정에서 경화 반응에 의해 액체 상태에서 겔화를 거쳐 고체상태의 상 변화가 일어나고 이로 인한 부피의 변화가 다른 경화 보압 조건에 비해 낮을 거라 사료된다. 이러한 결과를 통해 경화 보압은 바이오 기반 에폭시 복합체의 경화 반응에 있어서 큰 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

패키징 과정에서의 경화 보압의 변화에 따른 바이오 기반 에폭시 복합체 스페이서 중심 부근의 최대 발열 온도와 도달 시간을 그림 5에 나타내었다. 경화 보압이 증가함에 따라 경화 반응이 저하되어 금형 내의 온도 구배의 차이가 줄어들고 이로 인하여 복합 수지의 최대 발열 온도가 저하되고 도달 시간은 낮아지는 경향을 보여주고 있다. 하지만 경화 보압이 3 bar인 경우 4 bar보다 최대 발열 온도가 낮다. 이는 보압에 의해 주입되는 수지의 유동을 고려하였을 때 3 bar는 4 bar의 보압 조건에 비해서 경화 반응과 온도 구배 차이가 낮기 때문이다. 다음으로 3 bar의 보압 조건하에서 시간에 따른 금형 온도 변화를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 금형 내부에서의 주입구 부근부터 벤트까지 순차적으로 온도가 증가함을 확인할 수 있다. 또한 스페이서 하단부터 상단까지의 히터 온도 편차가 낮으므로 히터 간의 내부 잔류 응력이 낮을 것이라 사료된다.

패키징 과정에서의 경화 보압의 변화에 따른 각 축방향으로의 내부 잔류 응력에 의한 변형률을 그림 7에 나타내었다. 각 축 방향에 대한 변형률은 경화 보압이 증가함에 따라 감소하고 2 bar일 때 최소값을 지나 보압이 더욱 증가하면 오히려 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 경화 보압이 낮을수록 경화 반응이 빠르기 때문에 반응 수축이 빠

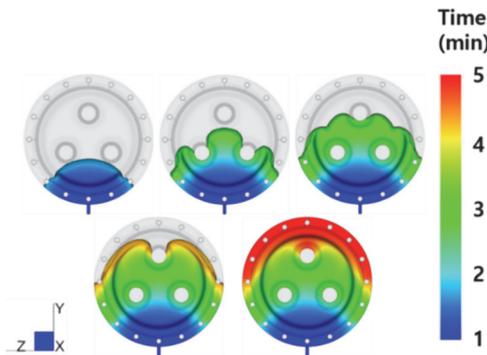


Fig. 3. Flow profile during filling stage.

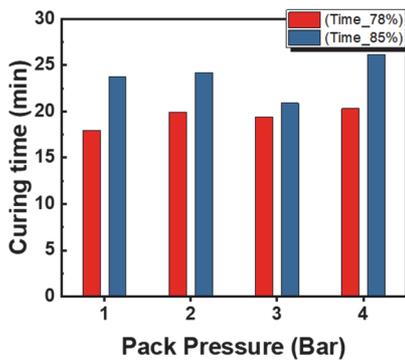


Fig. 4. Average curing degree and curing time with variation to pack pressure.

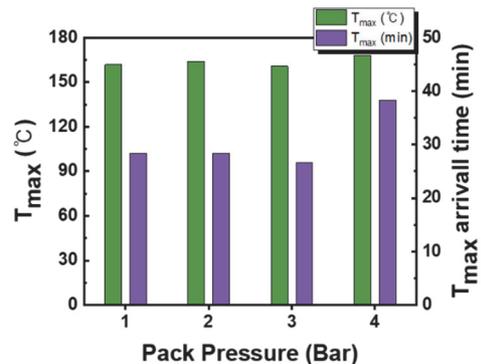


Fig. 5. Maximum exothermic temperature and arrival time with variation to pack pressure.

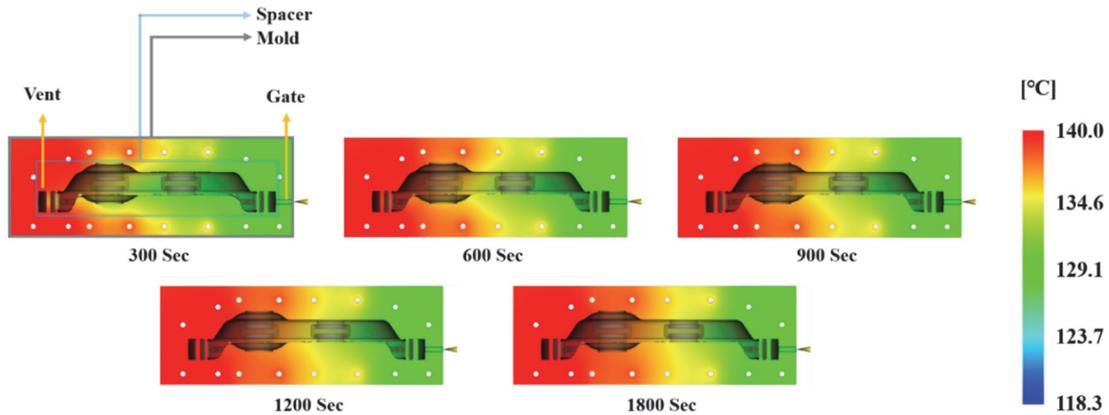


Fig. 6. Temperature variation of the mold over time (packing pressure condition: 3 bar).

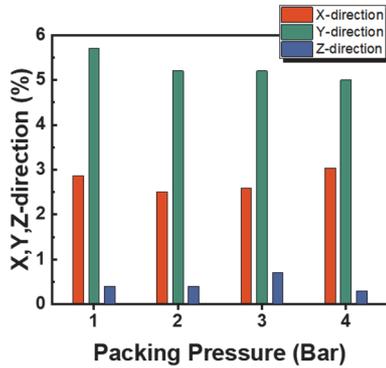


Fig. 7. Axial deformation (strain) according to the packing pressure.

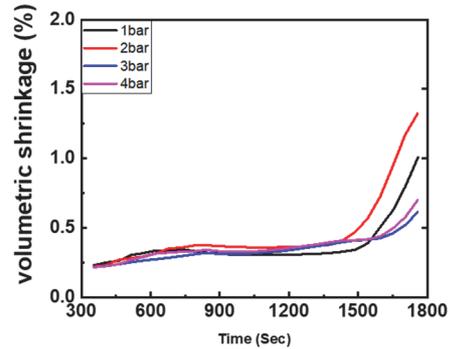


Fig. 8. Shrinkage variation in the center of the spacer over curing time.

Table 5. Maximum and minimum values of the average deformation for all directions.

Packing pressure	All-direction (mm)	
	Maximum	Minimum
1	1.226	0.2069
2	1.226	0.2062
3	1.226	0.1963
4	1.235	0.2124

르게 진행되었고 상대적으로 금형 내 고체상태에서의 체류시간이 증가하여 잔류응력이 증가하였기 때문이다. 하지만 모든 방향의 평균 변위 값을 비교하였을 때 다른 경화 보압에 비해 3 bar의 경우 가장 낮은 최대 변형 값 1.226 mm를 나타냈으며, 최소 변형 값도 0.1963 mm로 가장 낮은 변형이 진행되었다. 모든 방향의 평균 변형 값에 대한 최대/최소 값은 표 5에 기재하였다.

경화 시간에 따른 스페이서 중심부에 대한 수축 변화를 그림 8에 나타내었다. 경화 시간에 따른 스페이서 내부의 중심 지점에 대한 체적 수축 결과로 각 보압에 따라서 경화성은 동일했으나, 패킹 마무리 단계에서 3 bar의 보압 조건으로 진행하였을 때 가장 낮은 체적 수축 값을 나타냈다. 이는 스페이서 내부로 주입되는 바이오 기반 에폭시 복합체가 패킹 과정에서 경화 반응에 의해 액체 상태에서 겔화를 거쳐 고체상태의 상 변화가 일어나기 때문이다. 이로 인한 부피의 변화가 다른 경화 보압 조건에 비해 낮음으로써 보압 조건이 3 bar일 때 가장 낮은 체적 수축을 나타낼 거라 사료된다.

성형 시간과 경화 보압의 변화에 따른 평균 경화도의 변화는 그림 9와 같다. 평균 경화도는 성형 시간 전 구간에서 경화 보압이 3, 4 bar인 경우가 가장 낮고 2 bar, 1 bar 순으로 증가한다. 한편, 경화 보압의 변화에 따른 평균 경화도와 평균 발열 온도의 변화는 그림 10에 나타내었다. 평균 경화도와 평균 발열 온도는 서로 비례관계에 있으며, 경

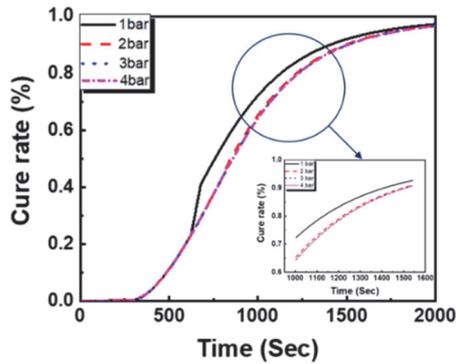


Fig. 9. Average curing degree with variation to pack pressure and process time.

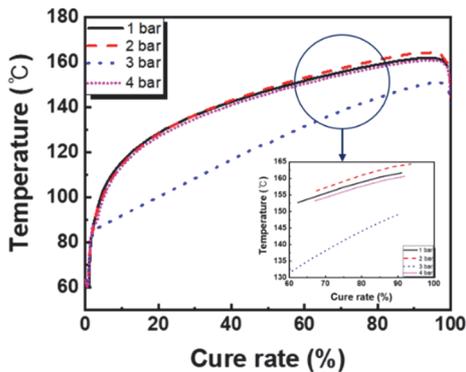


Fig. 10. Average curing degree verse average exothermic temperature with variation to pack pressure.

화 보압이 3 bar인 경우 최저이고 그 다음으로 4 bar일 때 내부 발열 온도가 낮음을 알 수 있다. 이는 경화 시간에 따라서 경화율은 3, 4 bar의 경향성이 동일했으나 3 bar에 비해 4 bar일 때 경화 반응이 많이 일어나므로 내부 발열 온도가 증가했을 거라 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 초고압 가스절연 차단기용 스페이서를 몰드플로우 소프트웨어를 이용하여 자동가압 겔화 공정에 대한 전산 모사를 실시하였다. 최적화 금형 온도 조건 하에서 패키징 과정의 경화 보압이 증가하면 바이오 기반 에폭시 복합체의 경화 반응은 감소한다. 이로 인하여 금형 내부의 발열 반응이 감소되어서 평균 경화도가 낮아지는 경향이 있음을 확인하였다. 하지만 4 bar에서부터 다시 경화 시간이 증가하였는데 이는 보압 조건이 3 bar일 때 바이오 기반 에폭시 복합체가 패키징 과정에서 경화 반응에 의해 액체 상태에서 겔화를 거쳐 고체상태의 상 변화가 일어나고 이로

인한 부피의 변화가 다른 경화 보압 조건에 비해 낮을 거라 사료된다. 패키징 과정에서의 절연 스페이서 내부의 최대 발열 온도의 경우 경화 보압이 증가함에 따라 경화 반응은 저하되고 금형 내에 온도 구배의 차이가 줄어들어 최대 발열 온도에 도달하는 시간은 낮아지는 경향을 나타낸다. 이 결과 3 bar의 조건에서 가장 낮은 발열 온도를 나타냈으며, 빠른 시간 내에 경화가 진행됨을 확인하였다. 각 축방향의 내부 잔류 응력에 의한 변형률을 분석한 결과 2 bar일 때 가장 낮은 변형률을 나타냈다. 하지만 모든 방향의 평균 변형 값의 경우 3 bar에서 최대 변형 값 1.266 mm 및 최소 변형 값 0.1963 mm의 결과를 나타냈으며 가장 낮은 변형이 진행됨을 확인하였다. 또한 스페이서 중심부에 대한 체적 수축 결과로 3 bar의 보압 조건이었을 때 가장 낮은 체적 수축 값을 나타냈다. 이에 따라서 최종 절연 스페이서의 품질을 고려하였을 때 3 bar의 경화 보압 조건으로 제작하게 되면 다른 경화 보압 조건에 비해 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 거라 생각한다.

ORCID

Jaehyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0001-7775-1142>

감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구입니다('20010965').

REFERENCES

- [1] L. T. De Paolis, A. Agrimi, A. Zocco, and G. Aloisio, *Proc. 11th WSEAS International Conference on Computers* (Agios Nikolaos, Crete Island, Greece, 2007) p. 514.
- [2] K. Kasza and Ł. Matysiak, *PAK*, **59**, 1143 (2013).
- [3] T. Nowak, R. Sekula, P. Saj, K. Kasza, H. Leskosek, and O. Claus, *Adv. Polym. Tech.*, **25**, 51 (2006). doi: <https://doi.org/10.1002/adv.20057>
- [4] T. Ageyeva, I. Sibikin, and J. G. Kovács, *Polymers*, **11**, 1555 (2019). doi: <https://doi.org/10.3390/polym11101555>
- [5] Y. G. Hong and S. M. Lee, *Polym. Sci. Korea*, **45**, 940 (2021). doi: <https://doi.org/10.7317/pk.2021.45.6.940>
- [6] X. Kong and D. Zheng, *Processes*, **9**, 770 (2021). doi: <https://doi.org/10.3390/pr9050770>
- [7] X. Kong, J. Guo, D. Zheng, J. Zhang, and W. Fu, *Processes*, **8**,

- 146 (2020).
doi: <https://doi.org/10.3390/pr8020146>
- [8] Q. Zhang, J. Li, X. Han, X. Zhang, C. He, and X. Yao, *IEEE Electr. Insul. Magazine*, **35**, 34 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1109/MEI.2019.8735668>
- [9] N. T. Tran and M. Gehde, *Polym. Test.*, **73**, 284 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.042>
- [10] Y. J. Woo and D. S. Kim, *J. Therm. Anal. Calorim.*, **144**, 119 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10159-2>
- [11] Y. G. Hong, S. M. Lee, Y. J. Yoo, and J. W. Lee, *Polym. Sci. Korea*, **41**, 260 (2017).
doi: <https://doi.org/10.7317/pk.2017.41.2.260>
- [12] Z. Ran, X. Liu, X. Jiang, Y. Wu, and H. Liao, *Thermochim. Acta*, **692**, 178735 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178735>
- [13] D. Abliz, B. Finke, A. Kwade, C. Schilde, and G. Ziegmann, *Cure Kinetics and Rheology*, In *Acting Principles of Nano-Scaled Matrix Additives for Composite Structures* (M. Sinapius and G. Ziegmann, Eds.) (Springer, 2021) p. 267.
doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68523-2_12
- [14] 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>