

유전 센서 및 광섬유 센서를 이용한 EMC 유효 경화 수축 측정

백정현¹ · 박동운¹ · 김학성^{1,2,†}

¹한양대학교 융합기계공학과

²한양대학교 나노과학기술연구소

Measurement of effective cure shrinkage of EMC using dielectric sensor and FBG sensor

Jeong-hyeon Baek¹, Dong-woon Park¹, and Hak-sung Kim^{1,2,†}

¹Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

²Institute of Nanoscience and Technology, Hanyang University, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

(Received December 18, 2022; Revised December 28, 2022; Accepted December 30, 2022)

초 록: 최근 반도체 패키지 두께가 점점 얇아짐에 따라 휨(warpage) 문제가 대두되고 있다. 휨(warpage)은 패키지 구성요소들 간의 물성 차이로 인해 발생하기 때문에, 휨(warpage)을 예측하기 위해서는 주된 구성요소인 EMC(Epoxy molding compound)의 정확한 물성 파악이 필수적으로 요구된다. 특히 EMC는 경화 공정 중 경화 수축을 보이는데, 겔점 이후에 발생하는 유효 경화 수축은 휨(warpage) 발생의 핵심 요소이다. 본 연구에서는 유전 센서를 이용해 측정된 소실 계수로부터 실제 반도체 패키지 경화 공정 동안 발생하는 EMC의 겔점이 정의되었다. 유전 센서로부터 얻은 결과를 분석하기 위해 DSC(Differential scanning calorimetry) 시험과 rheometer 시험이 수행되었다. 그 결과, 유전 측정법이 EMC 경화상태 모니터링에 효과적인 방법임이 검증되었다. 유전 측정과 동시에 광섬유 센서를 이용해 EMC의 경화 공정 중 변형을 변화 추이가 함께 측정되었다. 위 결과들로부터 경화 공정 중 발생하는 EMC의 유효 경화 수축이 측정되었다.

Abstract: Recently, as the thickness of the semiconductor package becomes thinner, warpage has become a major issue. Since the warpage is caused by differences in material properties between package components, it is essential to precisely evaluate the material properties of the EMC(Epoxy molding compound), one of the main components, to predict the warpage accurately. Especially, the cure shrinkage of the EMC is generated during the curing process, and among them, the effective cure shrinkage that occurs after the gelation point is a key factor in warpage. In this study, the gelation point of the EMC was defined from the dissipation factor measured using the dielectric sensor during the curing process similar with actual semiconductor package. In addition, DSC (Differential scanning calorimetry) test and rheometer test were conducted to analyze the dielectrometry measurement. As a result, the dielectrometry was verified to be an effective method for monitoring the curing status of the EMC. Simultaneously, the strain transition of the EMC during the curing process was measured using the FBG (Fiber Bragg grating) sensor. From these results, the effective cure shrinkage of the EMC during the curing process was measured.

Keywords: EMC (Epoxy molding compound), Cure shrinkage, Gelation point, Dielectrometry, FBG (Fiber Bragg grating) sensor

1. 서 론

반도체는 고집적 및 성능 향상을 위해 점점 더 얇아지고 있는 추세이다. 반도체 두께가 얇아짐에 따라 굽힘에 취약해지기 때문에 휨(warpage) 문제가 대두되고 있다.¹⁾ 휨(warpage)이 발생할 경우, 다이의 균열 및 박리, 와이어의 파단을 초래할 수 있다. 또한 표면 실장 기술 과정에

서 칩의 실장 오차를 발생시켜 접합이 어려워지고, 패키지와 인쇄 회로 기판 사이 솔더 조인트의 접착 불량 등 다양한 문제를 야기한다.²⁾ 이는 제품의 심각한 제조성 저하를 초래하므로, 제품 설계 단계에서 이를 정확하게 예측하는 것은 필수적이다.

휨(warpage)은 일반적으로 열적 물성이 다른 다양한 패키지 구성요소들이 고온의 공정을 거치면서 발생한다.³⁾

[†]Corresponding author

E-mail: kima@hanyang.ac.kr

© 2022, The Korean Microelectronics and Packaging Society

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.

패키지 구성 요소 중 패키징 소재로 주로 성형성, 기계적 물성이 우수하며 저렴한 EMC(Epoxy molding compound)가 일반적으로 사용되고 있다. EMC는 열경화성 플라스틱으로 에폭시 기반의 소재이기 때문에 고온의 공정을 거치며 경화되면서 경화 수축을 보이는데, 이 중 겔점 이후 발생한 경화 수축만이 휨(warpage) 형성에 영향을 미친다.⁴⁾ 겔점은 고분자의 경화가 진행되면서 모든 단량체들이 연결되어 하나의 중합체가 되는 시점으로, 이때부터 강성이 발생하기 시작한다.⁵⁾ 따라서 유효 경화 수축을 측정하기 위해서는 정확한 겔점 검출이 수반되어야 하는데, 다양한 연구가 진행됐음에도 불구하고 아직 EMC의 유효 경화 수축을 측정하는 방식은 완전히 정립되어 있지 않은 실정이다.⁶⁾

겔점 현상은 눈에 띄는 화학적 변화나 경화 반응을 동반하지 않기 때문에, 일반적으로 경화 분석에 많이 사용되는 DSC(Differential scanning calorimetry) 분석으로 검출하기 어렵다.⁷⁾ 또다른 방식으로 rheometer 시험의 점도 변화 분석을 통해 겔점을 검출하는 방식이 존재하나, 역시 명확한 기준이 정립되어 있지 않으며, 심지어 EMC는 고농도의 실리카 필러를 함유하고 있기 때문에 정확한 점도 측정이 어렵다.⁸⁾

본 연구에서는 실제 반도체 공정과 유사한 경화 조건에서 유전 센서를 이용하여 분자 구조적인 접근을 통해 겔점을 검출하였다. 추가적으로 유전 센서로부터 얻은 데이터는 DSC 시험 및 rheometer 시험 결과와 함께 분석되었다. 또한 같은 경화 조건에서 광섬유 센서를 이용해 EMC의 변형률 변화를 측정하였다. 그 결과, 유전 센서를 이용해 검출된 겔점부터 발생하는 유효 경화 수축이 성공적으로 측정되었다.

2. 실험방법

2.1. 유전 센서를 이용한 겔점 검출

유전 기법은 고분자 복합재료의 경화 상태를 모니터링하는 강력한 기법 중 하나로 알려져 있다.⁹⁾ EMC 내부에 유전 센서의 두 개 전극을 삽입하여 교류 전기장을 인가하면, 전극과 유전 재료인 에폭시의 배열은 축전기와 같은 역할을 하게 되며 Fig. 1과 같이 모델링할 수 있다. 즉, 인가 교류 전기장에 반응하여 유전 재료 내 이온과 쌍극

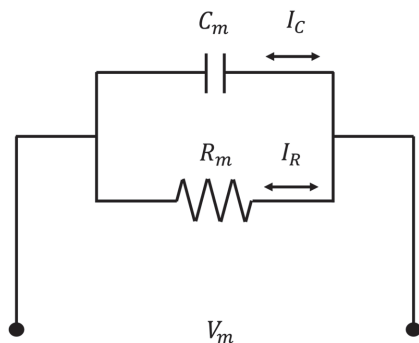


Fig. 1. Equivalent electrical circuit of the EMC.

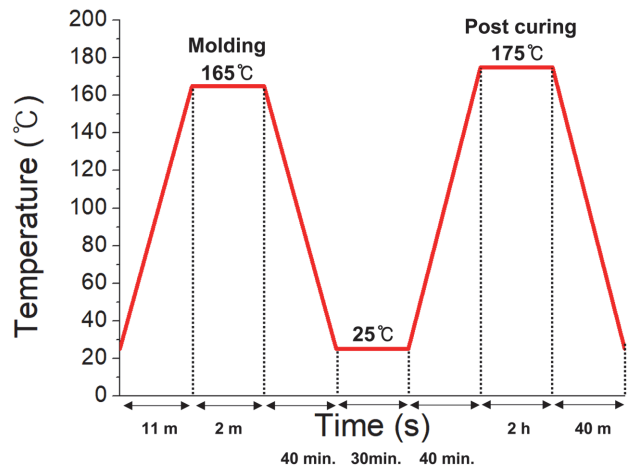


Fig. 2. Curing condition for measuring the effective cure shrinkage of the EMC.

자들의 배열이 변하는 정도에 따라 축적되는 전하량이 달라지며, 경화 정도에 따라 그 크기가 달라지게 된다. 이는 유전 재료 내 이온과 쌍극자들이 정렬하는데 소비되는 에너지인 소실계수(D)를 이용해 표현할 수 있으며, Fig. 1의 등가 회로 모델을 이용해 Eq. 1과 같이 계산 가능하다.¹⁰⁾

$$D = \left| \frac{I_R \cdot V_m}{I_C \cdot V_m} \right| = \left| \frac{I_R}{I_C} \right| = \left| \frac{Z_C}{Z_R} \right| = \frac{1}{\omega \cdot R_m \cdot C_m} \quad (1)$$

이 때, I와 Z는 전류 및 등가 임피던스, V_m은 각 주파수 ω가 인가됐을 때 유전센서의 교류 전압, R과 C는 등가회로에서의 저항과 정전용량을 의미한다.

본 연구에서는 유전 센서를 EMC에 내장한 채로 실제 반도체 공정(짧은 시간 동안 고온에서 선경화시킨 후 긴 시간 동안 고온에서 후경화)과 유사한 Fig. 2와 같은 온도(경화) 조건을 따라 EMC의 소실계수 추이를 모니터링 하였다. EMC가 가열됨에 따라 고점도 액체 상태가 되면서 이온과 쌍극자의 움직임이 활발해짐에 따라 소실계수가 증가하며, 이어 고체로 경화되면서 이온과 쌍극자의 움직임이 둔해지면서 소실계수가 감소한다. 이 때, 소실계수의 일차 미분값의 극대값과 극소값을 이용해 경화 시작점과 겔점의 검출이 가능하다.¹¹⁾

2.2. 광섬유 센서를 이용한 변형률 측정

광섬유 센서는 Bragg 조건을 만족하는 특정 주파수를 반사 및 투과시키는 성질이 있다. 특정 주파수는 BW(Bragg wavelength, λ_B)로 표현되며, BW의 변화는 Eq. 2와 같이 온도의 영향을 받는 Intrinsic BW(λ_Bⁱ) 변화와 응력에 의한 변형의 영향을 받는 deformation BW(λ_B^d) 변화의 합으로 나타낼 수 있다.¹²⁾

$$\Delta \lambda_B = \Delta \lambda_B^i + \Delta \lambda_B^d \quad (2)$$

Intrinsic BW 변화는 온도와 이차식의 관계를 갖고 있으며, Fig. 3과 같이 본 측정에 앞서 먼저 calibration 되었

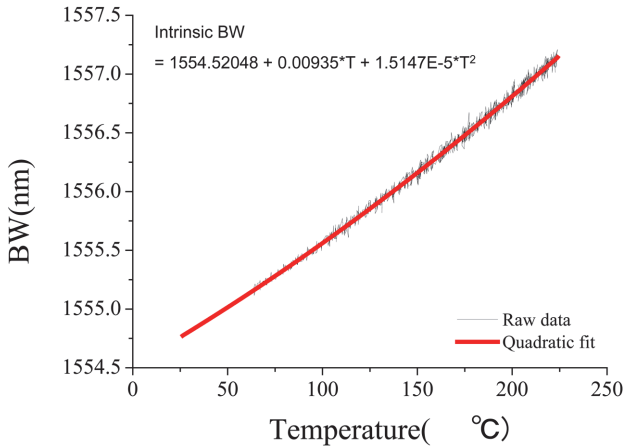


Fig. 3. Calibration result of bare FBG sensor.

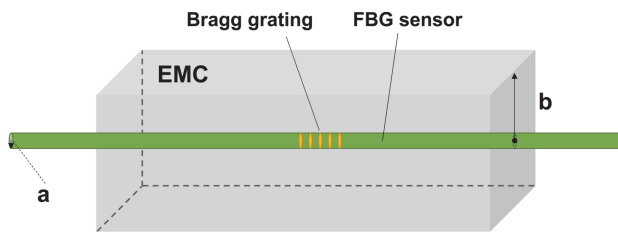


Fig. 4. Configuration of the FBG sensor embedded in the EMC.

다.¹³⁾ 다음으로 Fig. 2의 경화 공정 동안 광섬유 센서를 이용해 BW가 측정되었으며, intrinsic BW를 보상해줌으로써 deformation BW이 도출되었다.

Fig. 4와 같이 측정 대상의 중심으로부터 가장자리까지의 최소 길이(b)가 FBG 센서의 반지름(a) 보다 200배 이상일 경우($b/a \geq 200$), 측정 대상의 변형률(ϵ) 변화는 Eq. 3과 같이 deformation BW로부터 도출할 수 있다.¹²⁾

$$\epsilon = \frac{\Delta \lambda_B^d}{\lambda_B(1 - P_k)} \quad (3)$$

이 때, P_k 는 등가 strain-optic 상수를 의미한다.

2.3. 경화 공정 실험 셋업

위 형상적 조건을 만족하는 몰드에 과립형 EMC를 넣고 진공 배킹한 상태로, 100 kPa의 가압과 함께 전도성 히터를 이용해 Fig. 2의 molding 과정이 모사되었다.

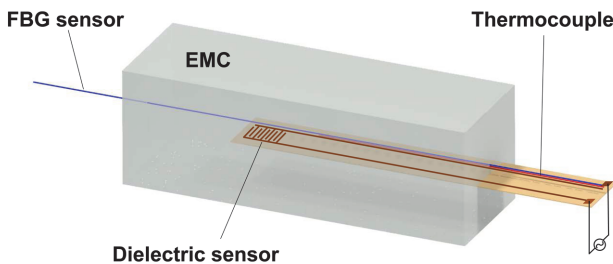


Fig. 5. Schematic of the FBG sensor, the dielectric sensor and the thermocouple embedded in the EMC.

Molding 이후 Fig. 2의 post curing 과정은 열풍 챔버의 대류 열을 이용해 모사되었다. 이 때, Fig. 5와 같이 EMC 내부에 유전 센서, 광섬유 센서, 열전대를 삽입한 채 전 과정 동안 실시간으로 소실계수, BW, 온도가 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 6는 molding 과정 동안의 온도, 유전 센서를 이용해 측정된 소실계수, 그리고 소실계수의 일차 미분값을 보여준다. 소실계수의 일차 미분값의 극대점으로부터 경화 시작점이 93°C로, 극소점으로부터 겔점이 148°C로 검출되었다.

유전 센서로부터 얻은 데이터는 타당성 검증을 위해 Fig. 7와 같이 DSC 시험과 rheometer 시험 결과와 함께 비교분석 되었다. 이 때, DSC 시험과 rheometer 시험은 EMC molding 승온 조건과 동일한 조건에서 수행되었다. 유전 센서를 이용해 검출된 겔점의 경화도는 0.27로 보편적인 겔점의 경화도 범위에 속하며, 경화시작점도 93°C로 DSC 시험으로 검출된 경화 시작점과 일치한다.¹⁴⁾ 하지만

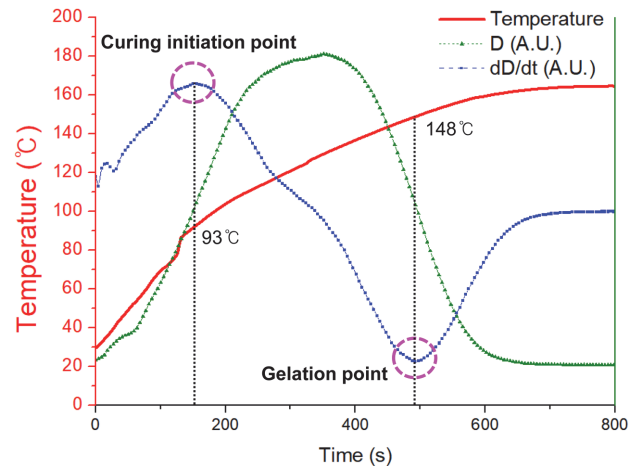


Fig. 6. Results of dissipation factor(D) and the rate of dissipation factor(dD/dt) during the molding process.

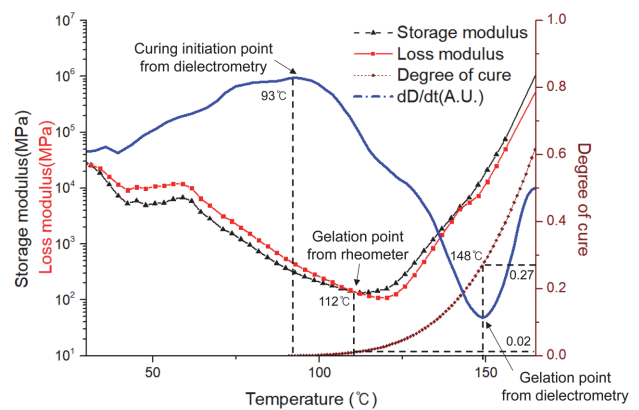


Fig. 7. Comparison results between dD/dt, DSC test and rheometer test.

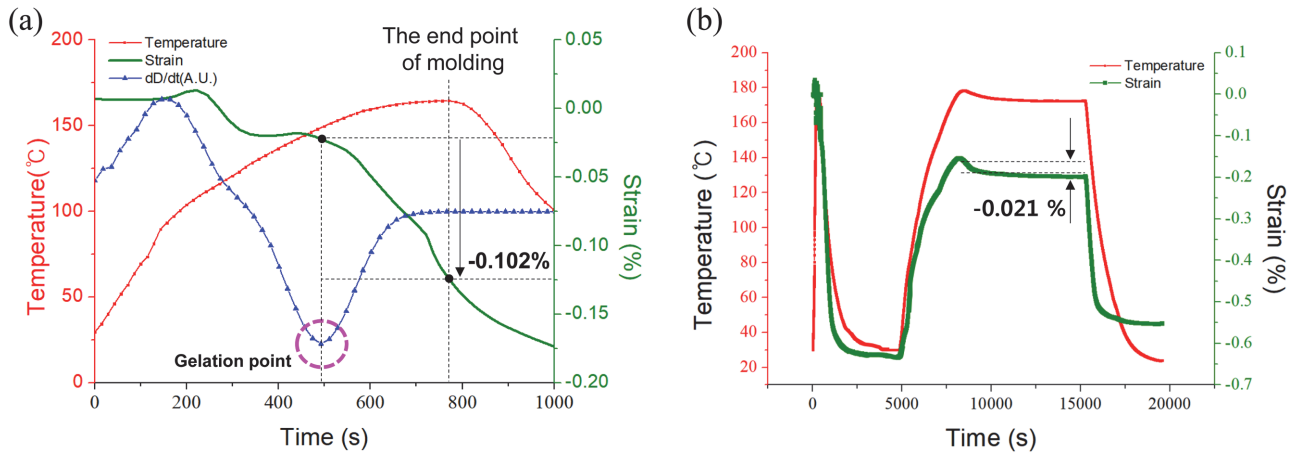


Fig. 8. Measurement results of (a) strain and the rate of dissipation factor(dD/dt) during the molding process, and (b) strain transition during the curing process.

rheometer 시험의 결과로부터 흔히 사용되는 storage modulus와 loss modulus의 교차점으로 검출된 겔점 112°C 에서의 경화도는 0.02로, 일반적인 겔점에서의 경화도로 보기 어렵다.^{14,15)} Rheometer 분석 결과를 이용해 겔점을 검출하는 보편적인 방식은 아직 정립되어 있지 않을 뿐더러, 고농도의 실리카 필러가 포함된 EMC의 경우 기계적인 응답이 실리카의 영향을 많이 받기 때문에 기계적인 방식으로 겔점을 정확하게 검출하기에는 어려움이 존재한다.¹⁶⁾ 따라서, 겔점 현상과 근본적으로 연관된 분자구조의 변화를 전기적 특성을 이용해 검출할 수 있는 유전 센서를 이용할 경우, 효과적으로 겔점 검출이 가능함이 확인되었다.

Eq. 2와 Eq. 3을 이용해 광섬유 센서로 측정된 BW 데이터로부터 경화 공정 동안의 EMC의 변형률이 검출되었다. Fig. 8 (a)는 molding 과정 중 EMC의 변형률 및 소실계수의 일차 미분값을 온도와 함께 보여주는데, 겔점 148°C 부터 molding 과정까지 약 0.102%의 유효 경화 수축이 발생한 것이 확인되었다. 또한 Fig. 8 (b)의 전체 공정 동안의 변형률 변화 추이로부터 post curing 동안 0.021%의 경화 수축이 발생함이 확인되었다. 최종적으로 전체 공정 동안 0.123%의 유효 경화 수축이 발생하였으며, 해당 값은 다른 문헌에서 측정된 수치와 유사한 수준으로 확인되었다.¹⁷⁾

본 연구에서 도출한 유효 경화 수축을 반영할 경우, 실제 반도체 패키지의 경화 공정 중 발생하는 휨(warp)을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 본 측정 방식은 경화 공정 중 발생하는 반도체 패키지 휨(warp)의 정교한 예측에 널리 사용될 뿐 아니라 유사 고분자 복합재에도 적용 가능할 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유전 센서를 이용해 측정된 소산계수의

추이로부터 반도체 경화 공정 중 EMC의 겔점을 검출하였다. DSC 시험 결과로부터 얻은 겔점에서의 경화도 및 경화 시작점을 통해 유전 측정법으로 얻은 데이터의 신뢰성이 확보되었다. 또한 rheometer 시험을 통해 검출한 겔점과 유전 측정법으로 검출한 겔점을 비교해보았을 때, 유전 센서를 이용한 EMC의 경화 상태 모니터링이 효과적인 방법임이 검증되었다. 더불어 광섬유 센서를 이용해 경화 공정 중 EMC의 변형률 추이를 측정함으로써, 최종적으로 EMC의 유효 경화 수축을 성공적으로 도출하였다.

감사의 글

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government(MOTIE)(20212020800090, Development and Demonstration of Energy-Efficiency Enhanced Technology for Temperature-Controlled Transportation and Logistics Center)

References

1. W. K. Loh, R. Kulterman, H. Fu, and M. Tsuriya, "Recent trends of package warpage and measurement metrologies", 2016 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), IEEE, pp. 89-93 (2016).
2. N. Vijayaragavan, F. Carson, and A. Mistry, "Package on Package warpage-impact on surface mount yields and board level reliability", 2008 58th Electronic Components and Technology Conference, IEEE, pp. 389-396 (2008).
3. M. J. Yim, R. Strode, R. Adimula, and C. Yoo, "Effects of material properties on PoP top package warpage behaviors", 2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, pp. 1071-1076 (2010).
4. S. Phansalkar, C. Kim, and B. Han, "Why Is It Still Difficult to Make Accurate Prediction of the Warpage after Advanced

- Molding Processes?”, 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, pp. 1505-1513 (2021).
5. S. P. Phansalkar, C. Kim, B. Han, and P. J. Gromala, “Volumetric effective cure shrinkage measurement of dual curable adhesives by fiber Bragg grating sensor”, *Journal of Materials Science*, 55(22), 9655-9664 (2020).
 6. H.-C. Cheng and Y.-C. Liu, “Warping characterization of molded wafer for fan-out wafer-level packaging”, *Journal of Electronic Packaging*, 142(1), 011004 (2020).
 7. S. Han and K. Wang, “Integrated flow analysis during filling and post-filling stage of semiconductor encapsulation”, *J. Electron. Packag.*, 122(1), 20-27 (2000).
 8. S. Chao, Y. Liaw, and J.-H. Chou, “The effects of filler shape, type, and size on the properties of encapsulation molding components”, *Electronics*, 10(2), 98 (2021).
 9. Y. Yang, G. Chiesura, G. Luyckx, T. Vervust, F. Bossuyt, M. Kaufmann, J. Degrieck, and J. Vanfleteren, “Development of a dielectric sensor system for the on-line cure monitoring of composites”, *Procedia Technology*, 15, 631-637 (2014).
 10. D.-H. Kim and H.-S. Kim, “Smart cure cycle to improve tensile load capability of the adhesively bonded joint”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(16), 1739-1754 (2013).
 11. H. S. Kim, “Reduction of fabrication thermal residual stress of the hybrid co-cured structure using a dielectrometry”, *Composites Science and Technology*, 67(1), 29-44 (2007).
 12. Y. Wang, B. Han, D. Kim, A. Bar-Cohen, and P. Joseph, “Integrated measurement technique for curing process-dependent mechanical properties of polymeric materials using fiber bragg grating”, *Experimental Mechanics*, 48(1), 107-117 (2008).
 13. G. M. Flockhart, R. R. Maier, J. S. Barton, W. N. MacPherson, J. D. Jones, K. E. Chisholm, L. Zhang, I. Bennion, I. Read, and P. D. Foote, “Quadratic behavior of fiber Bragg grating temperature coefficients”, *Applied Optics*, 43(13), 2744-2751 (2004).
 14. N. Tanaka, Y. Okabe, and N. Takeda, “Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates”, *Smart Materials and Structures*, 12(6), 940 (2003).
 15. C. Y. M. Tung and P. J. Dynes, “Relationship between viscoelastic properties and gelation in thermosetting systems”, *Journal of Applied Polymer Science*, 27(2), 569-574 (1982).
 16. B.-S. Chiou, S. R. Raghavan, and S. A. Khan, “Effect of colloidal fillers on the cross-linking of a UV-curable polymer: gel point rheology and the winter–chambon criterion”, *Macromolecules*, 34(13), 4526-4533 (2001).
 17. C. Kim, S. P. Phansalkar, H. S. Lee, and B. Han, “Measurement of effective cure shrinkage of epoxy-based molding compound by fiber Bragg grating sensor using two-stage curing process”, *Journal of Applied Polymer Science*, 139(6), 51620 (2022).