

# 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 에폭시 수지의 경화도 모니터링

## Cure Monitoring of Epoxy Resin by Using Fiber Bragg Grating Sensor

이진혁\*, 김대현\*\*†

Jin-Hyuk Lee\* and Dae-Hyun Kim\*\*†

**초 록** 에폭시 수지는 여러 산업분야에서 다양한 구조물의 접합과 제조에 사용된다. 구조물의 안전성과 접합재료의 최적 성능 확보를 위해서는 에폭시 수지의 경화 과정 모니터링 기반의 공정 제어가 요구된다. 광섬유 센서는 실과 같은 형태적 특징으로 인해 에폭시 수지의 경화 모니터링에 적합한 센서이다. 본 연구에서는 광섬유 브래그 격자 센서(fiber Bragg grating, FBG)를 이용하여 에폭시 수지의 경화 모니터링 연구를 수행하였다. 실제 실험을 통해, FBG를 기반으로 에폭시 수지의 경화과정에서 에폭시의 부피 수축에 의해 센서에 가해지는 변형률을 측정하고 온도의 변화에 의한 신호 변화를 보정하여 경화과정에서 발생하는 변형률의 정확한 모니터링이 가능함을 확인하였다. 추가적으로, 두 가지 에폭시 수지의 경화도 과정을 비교 분석하여 에폭시 종류에 따른 경화과정의 차이를 확인하였다. 결론적으로 FBG 센서가 에폭시 수지의 경화도 모니터링에 유용하다는 점을 확인하였다.

**주요용어:** 에폭시 수지, 광섬유 브래그 격자 센서, 경화 모니터링, 온도 감시, 구조 건전성 감시

**Abstract** In several industrial fields, epoxy resin is widely used as an adhesive for co-curing and manufacturing various structures. Controlling the manufacturing process is required for ensuring robust bonding performance and the stability of the structures. A fiber optic sensor is suitable for the cure monitoring of epoxy resin owing to the thready shape of the sensor. In this paper, a fiber Bragg grating (FBG) sensor was applied for the cure monitoring of epoxy resin. Based on the experimental results, it was demonstrated that the FBG sensor can monitor the status of epoxy resin curing by measuring the strain caused by volume shrinkage and considering the compensation of temperature. In addition, two types of epoxy resin were used for the cure-monitoring; moreover, when compared to each other, it was found that the two types of epoxy had different cure-processes in terms of the change of strain during the curing. Therefore, the study proved that the FBG sensor is very profitable for the cure-monitoring of epoxy resin.

**Keywords:** Epoxy-Resin, Fiber Bragg Grating (FBG), Cure-Monitoring, Temperature-Monitoring, Structural Health Monitoring (SHM)

### 1. 서 론

에폭시 수지는 다양한 재료의 접합을 통한 구조물 제작에 광범위하게 사용되고 있는 재료이다. 특히 에폭시 수지는 다양한 소비재로부터 산업분야에 이르기까지 여러 분야에서 사용되고 있으며 특히 복합재료 구조물의 제작에 필수적으로 활용되고 있다[1]. 또한 제작과정에서 수지 경화

도 모니터링을 통한 제작공정 최적화 필요성이 이전부터 현재까지 대두되고 있다[2].

일예로, 무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV), 인공위성 등은 에너지원으로 태양광을 이용하기 위하여 다수의 태양광전지(solar cell)를 날개 위에 에폭시를 이용하여 접합하고 운행된다[3,4]. 이러한 이차-접합 공정에서 최적의 접합강도 등을 도출하기 위해서는 에폭시의 경화 모니

[Received: April 6, 2016, Revised: June 16, 2016, Accepted: June 16, 2016] \*한국전력공사 전력연구원(서울과학기술대학교 박사 졸업), \*\*서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea (E-mail: dskim@seoultech.ac.kr)

터링이 요구되며, 특히 태양광전지와 같이 민감하고 파손이 쉬운 취성재료의 적합을 위해서는 경화 정도에 따른 접합공정 제어가 필요하다. 이러한 필요성으로 인해, 최근 에폭시 수지의 접합 공정에서 직접적으로 에폭시 수지의 경화반응을 모니터링하기 위한 광섬유 센서의 적용이 확대되고 있다[5-7]. 이는 광섬유의 형태가 매우 작은 직경으로 다양한 재료의 접합층에 삽입이 용이하기 때문이며, 특히 복합재료 가공 시 접합층 내부에 센서로 삽입되어 수지의 경화도를 모니터링하는 연구에 활용될 수 있다.

에폭시 수지는 경화과정에서 화학적, 물리적 변화가 발생하며, 특히 고분자화(polymerization), 유리화(vitrification) 과정에 따라 부피 수축과 밀도의 변화가 발생한다[5,6]. 기존에는 이러한 물리적 변화를 측정하는 기법으로 광섬유 끝단 수직면에서 빛의 Fresnel 반사에 의한 반사파 강도 변화를 측정하는 방법이 다양하게 적용되었다[5]. 이러한 방법은 매우 단순한 계측 시스템의 구성이라는 장점을 가지고 있지만, 경화도 모니터링 이후 광섬유가 잔유물로 구조물 내부에 남게 되고 이는 구조물 내부의 파손 가능성을 높인다. 이에 따라 광섬유 센서의 활용도 증대를 위하여 복합재료 성형(co-curing) 시 최초 에폭시 경화과정 모니터링과 추후 구조물 상태 감시를 목적으로 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG)를 이용하는 연구가 진행되었다[6]. 특히, FBG 센서는 구조물 상시 감시센서로 연구와 적용이 활발히 진행되고 있어 유용성이 높다[8,9]. 그러나 이러한 연구는 고온, 고압의 공정에서 FBG의 파장의 변화를 단순히 에폭시의 경화 정도에 대한 정보로 분석하여, 실제 에폭시의 유동에 의한 수지 자체의 인장, 압축 등의 상태 정보와 온도 정보를 분리하는 신호 분석 연구가 미흡한 상태이다. 결과적으로, 에폭시 경화 공정을 정확히 측정하기 위해서는 온도와 유동 정보를 분리할 수 있는 신호해석이 요구된다.

최근에는 FBG센서가 UAV의 날개와 태양광전지 사이에 삽입되어 비행 중 날개에 가해지는 공력에 의해 발생하는 구조 변형을 성공적으로 모니터링하는 연구가 수행되었다[9]. 여기에 본 연구를 통해 얻게 될 에폭시 수지 경화도 모니터링 결과를 결합한다면, FBG 센서를 비행체 제작과정과 운행 중에도 사용할 수 있게 되어 센서의

사용성을 극대화시킬 수 있게 된다.

본 연구에서는 태양열 UAV의 태양광전지 부착에 사용되는 두 가지 에폭시 수지의 경화 공정 모니터링과 구조물 감시를 위한 FBG 센서 적용 연구를 수행하였다. 재료의 이차접합을 고려하여 일정한 온도 환경에서 에폭시 수지의 경화 진행에 따른 FBG 센서 신호 변화 정보와 별도의 열전대를 이용해 취득한 온도 변화 정보를 이용해 순수 변형률 값을 도출하였다. 이를 통해, FBG를 이용한 에폭시 수지의 경화도 모니터링이 가능함을 확인하였고, 경화도 모니터링 이후에는 구조물 감시 센서로 FBG 센서가 지속적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

## 2. 광섬유 브래그 격자 센서의 원리

광섬유 코어에 일정한 간섭무늬를 형성하면 굴절률의 변화가 발생한다. 이러한 간섭무늬는 빛의 특정 반사 현상을 일으키게 되고 이를 브래그 격자라 한다. 이 격자에 광대역의 파장을 입사하면 간섭무늬의 브래그 조건에 의해 특정 파장 성분이 보강 간섭을 일으키며 반사되고 나머지 파장 성분은 통과하게 된다. 브래그 조건은 다음의 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

여기서,  $n_e$ 는 격자의 유효 굴절률이고  $\Lambda$ 는 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다.

위의 브래그 조건에서 보듯이 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이다. 그리고 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다.

브래그 조건에서 브래그 파장을 전미분을 취한 후 온도, 변형률과 유효 굴절률, 격자 간격의 식을 대입하면 식(2)를 얻을 수 있다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B [(\alpha_f + \xi_f) \Delta T + (1 - p_e) \epsilon] \quad (2)$$

여기서,  $\alpha_f$ 는 온도에 의한 광섬유의 열팽창계수이고,  $\xi_f$ 는 온도에 따른 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학계수,  $p_e$ 는 광탄성상수이다.

식(2)에서 파장의 변이는 온도의 변화에 의한 것과 변형률의 변화에 의한 것을 모두 포함하고 있다. 정적인 온도 환경 등 센서에 인가되는 온도 차이가 없는 상태에 국한시키면 식(2)에서  $\Delta T=0$ 으로 둘 수 있고 다음의 식(3)과 같이 변형률과 파장의 관계식을 얻을 수 있다. 또한 온도 변화를 브래그 격자 센서나 정밀한 온도 센서를 적용하여 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 스트레인을 식(2)를 통하여 정확하게 도출할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{1}{1-p_c} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

그리고 브래그 격자 센서의 변형이 없는 상태 ( $\varepsilon=0$ )로 센서를 적용할 수 있다면, 식(2)를 다음 식(4)와 같이 정리하여 온도와 파장의 관계식을 도출할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha_f + \xi_f} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

최종적으로 센서에서 발생하는 브래그 파장의 변화를 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 스트레인을 계산해 낼 수 있다. 이러한 원리로 광섬유 브래그 격자가 멀티파라미터 센서로 사용될 수 있다[10].

### 3. 에폭시 접착제 경화도 측정

일반적으로 사용되는 에폭시 접착제 중 다수는 액상형인 에폭시와 경화제를 혼합하여 경화과정을 거쳐 고체화 된다. 경화과정에서 에폭시는 고분자화(polymerization)로 부피 수축, 밀도 변화 등이 발생하고 이에 따라 인장과 압축의 유동 현상이 발생하게 된다. 또한 경화제와 화학적 반응에 의한 온도의 변화가 발생할 수 있다. 이러한 반응 현상을 기반으로 에폭시 수지의 경화 정도를 확인할 수 있다.

#### 3.1. 에폭시 경화도 측정 실험

FBG 센서는 일반적으로 구조물에 적용 시 완전 접착을 통한 정확한 변형률 측정에 이용된다. 접착 경화 중에도 센서는 변형과 온도의 동시 측

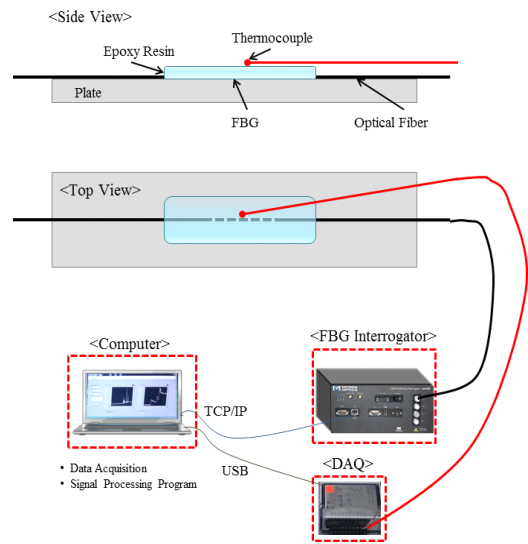


Fig. 1 Schematic diagram of cure monitoring test

정이 가능하여 에폭시 수지의 경화과정에 따라서 발생하는 밀도 변화에 의한 인장과 압축, 그리고 온도 변화를 측정할 수 있다. 이러한 과정의 변화를 정밀하게 측정하게 되면 실제 에폭시의 경화 정도를 파악할 수 있게 된다. 에폭시의 경화 과정에서 발생하는 부피와 온도를 측정하여 경화 정도를 확인하기 위하여 실험을 구성하였다. 실험은 평판위에서 에폭시를 혼합한 직후 FBG 센서를 에폭시와 평판의 경계층에 배치하고 FBG 인터로게이터와 컴퓨터를 이용하여 파장 변화를 연속적으로 취득하였다. 그리고 에폭시의 온도 변화를 정확히 측정하기 위하여 열전대 온도 센서를 추가하였다. Fig. 1은 실험의 구성의 개략도를 보여준다.

FBG 기반의 에폭시 경화도 측정기법이 다양한 종류의 에폭시에 적용 가능함을 확인하기 위하여 본 실험에서는 두 가지의 에폭시를 사용하였다. 실험에는 일반적으로 많이 사용되고 있는 5분 경화 에폭시(araldite rapid, HUNTSMAN co.)와 탄성 에폭시(EP001, Cemedine co.)를 적용하여 경화 후 특성이 상이한 에폭시의 경화과정에서의 FBG 파장의 변화를 관찰하였다. Fig. 2는 5분 경화 에폭시 실험사진이고, Fig. 3은 탄성에폭시의 실험사진을 보여준다.

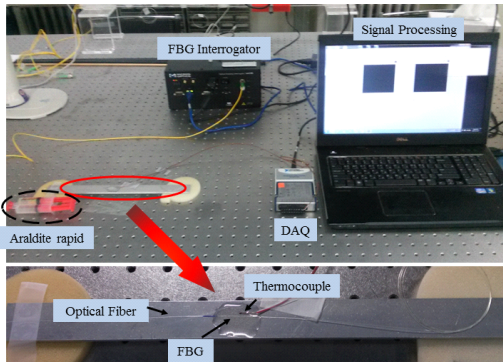


Fig. 2 Cure monitoring of rapid epoxy

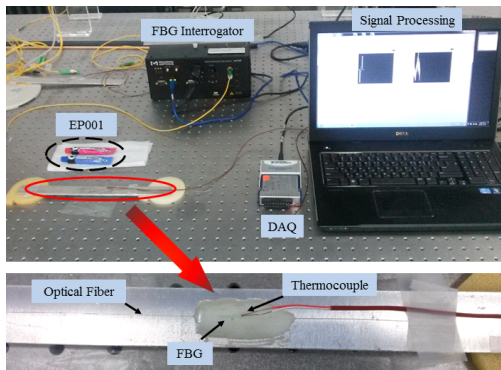


Fig. 3 Cure monitoring of elastic epoxy

3.2. 에폭시 경화도 측정 실험 결과

FBG를 이용해 에폭시의 경화도를 측정하기 위하여 에폭시 내의 FBG 파장 변화를 수집하였다. 이때 화학반응에 의한 온도 변화를 측정하고 이를 보정하여 정확한 고분자화에 따른 유동을 확인하였다. 실험 결과 FBG의 파장 변화 확인 결과 에폭시 수지와 경화제의 최초 혼합 시점에는 유동에 의한 인장이 FBG 센서에 가해지고 일정시점 이후에 압축이 가해지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 5분 경화 에폭시에서 FBG 센서의 시간에 따른 파장 변화를 나타낸다. 초기 파장 변화의 안정화를 거친 후 센서를 에폭시와 결합 과정에서 파장의 변화가 일종의 노이즈로 발생하였다. 그리고 화학반응에 의한 온도 변화를 열전대를 이용하여 동시에 측정하였다. 실제 온도의 변화는 Fig. 5에서 확인할 수 있다. FBG 센서의 파장 변화는 외부 변형률과 온도 인자를 동시에 포함할 수 있다. 특히 열전대의 온도 변화와 Fig. 4에서 FBG 파장 변화가 매우 유사함을 확인할

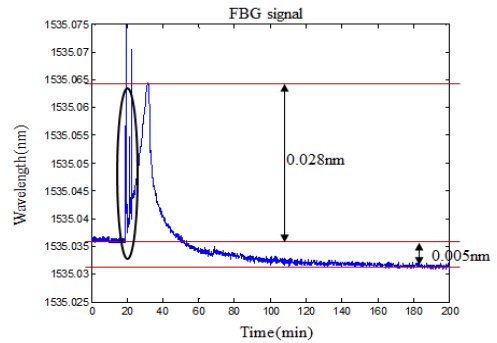


Fig. 4 Wavelength data of FBG in the rapid epoxy

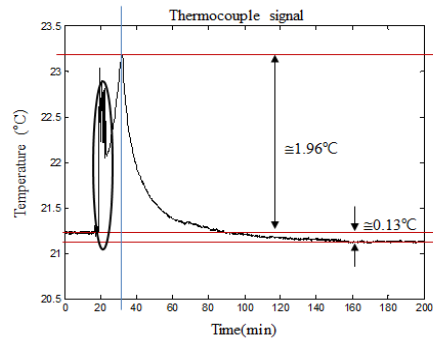


Fig. 5 Temperature data of the rapid epoxy in curing process

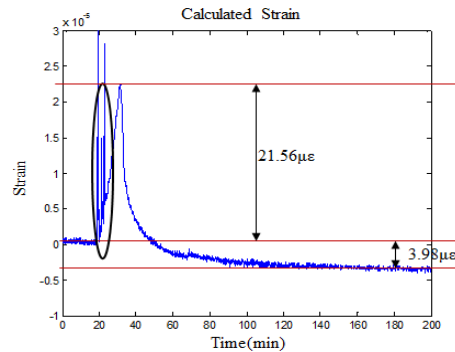


Fig. 6 Calculated strain with the wavelength data

수 있다. 이러한 온도 변화에 따른 파장 변화를 식(2)을 이용해 보정하고 순수 변형률을 계산하여 Fig. 6에 나타냈다. 여기서, 온도의 변화는 최대 1.96°C 정도로 측정되었으며, 이는 FBG의 파장에 최대 2.8 pm 정도의 변화를 발생시킬 수 있다. 이러한 파장 변화값은 실제 측정된 파장 변화의 10% 내외로 에폭시 경화과정에서 온도보다 고분자화에 의한 인장과 압축이 상대적으로 크게 발생함을 확인할 수 있다.

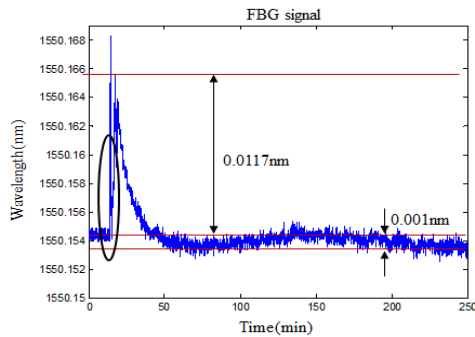


Fig. 7 Wavelength data of FBG in elastic epoxy

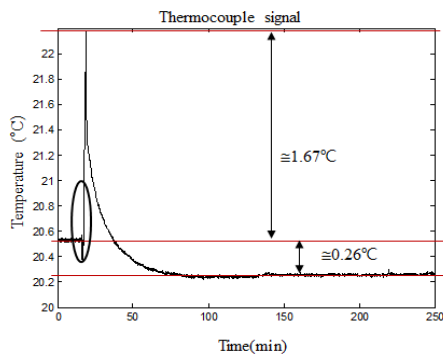


Fig. 8 Temperature data of elastic epoxy in curing process

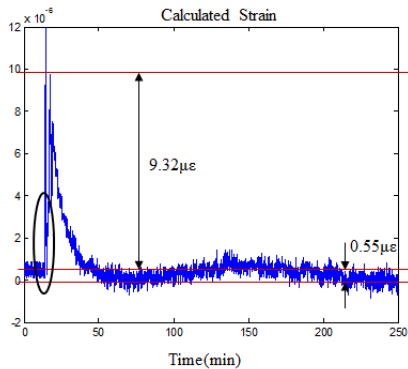


Fig. 9 Calculated strain with the wavelength data

순간경화 에폭시의 경화과정을 자세히 살펴보면, 에폭시는 경화제와 최초 혼합시 액체의 유동이 발생하여 센서를 통해 인장 변화가 측정되었고, 이때 화학적 반응으로 온도 또한 상승하였다. 그리고 고체화되면서 압축이 발생하였고 온도 또한 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 완전히 경화된 시점에는 에폭시 수지의 특성상 다른 연구에서 측정된 바와 같이 최초보다 부피의 수

축이 발생하며[11] FBG 센서가 실제적으로 압축 ( $\approx 3.98$  micro strain)을 받고 있는 것으로 확인된다.

Fig. 7, 8, 9는 이전 실험과 동일하게 각각 탄성 에폭시(EP001)의 경화에 따른 FBG의 파장 변화, 열전대를 통한 온도 변화 그리고 온도 변화에 의한 변형률을 제거한 순수 변형률을 보여주고 있다. 실험 결과를 살펴보면, 5분 경화 에폭시 때와 매우 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나 에폭시의 경화과정에서 FBG 파장 변화의 폭이 순간경화 에폭시에 비해 상대적으로 작게 나타나는 특이점을 발견할 수 있었다. 이를 통해, 탄성 에폭시의 경우, 에폭시의 유동이나 압축현상이 상대적으로 적게 발생한다는 점을 확인할 수 있었다.

또한 경화 완료 시점에 FBG에 가해지는 압축 또한 크지 않아 실제 구조물이나 센서의 부착 시 접착 에폭시에 의한 영향이 5분 경화 에폭시에 비해 상대적으로 적게 발생하였다. 정량적으로는 대략 7배 정도 적은 프리스트레인이 발생한다는 점을 확인할 수 있었다.

추가적으로 FBG 센서를 이용한 에폭시의 경화도 측정 결과 최초 혼합과정에서 유동에 의한 인장이 발생한 후 경화과정에서 부피가 수축함을 확인할 수 있었다. 5분 경화 에폭시의 경우는 최종 경화 후 부피가 수축하며 접착물 또는 센서에 압축을 가할 수 있음을 확인하였다. 반면에, 탄성 에폭시의 경우 경화과정에서 유동이나 수축 정도가 적은 것을 확인할 수 있으며, 최종 경화 후 부피 수축이 적어 접착물 또는 센서에 가하는 압축 정도가 크지 않을 것으로 예상할 수 있었다. 또한 이러한 경화과정에서 약간의 온도 변화가 발생함을 확인할 수 있었다. 접착물이 에폭시의 경화과정의 인장, 압축에 의해 손상될 수 있는 경우 이러한 결과는 유용한 정보로 활용될 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구는 에폭시 수지의 경화도 모니터링을 위하여 FBG 센서의 적용을 제안하였다. FBG 센서는 구조물에 에폭시를 이용한 접착 후 변형률 측정 등에 이용되고 있어 에폭시의 경화도 측정 후 구조물 감시 센서로 지속적으로 사용될 수 있어 매우 효과적이다. FBG를 이용한 에폭시의 경화도 모니터링 결과는 다음과 같다.

- 1) 에폭시의 유동 및 고분자화에 따라 수지 내부에 인장과 압축이 발생하고 FBG 센서가 이를 측정하고 온도 보상을 통해 정밀한 변형률 값을 도출할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 에폭시의 특성에 따라 경화과정에서 수축이 발생하여 접합물 또는 센서에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.
- 3) 에폭시의 경화 완료 후 FBG가 정상적으로 동작하고 이는 구조물 감시 센서로 지속적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.
- 4) 추가적으로 경화과정 중 발생하는 온도 변화가 FBG 측정 결과에 반영되는 것을 확인하였고, 최근 연구가 진행되는 온도 보상형 FBG 센서를 적용하거나 별도의 온도 센서를 적용하여 온도 보상을 병행하면 변형률 정보만을 이용한 모니터링이 가능할 것으로 예상된다.

또한 본 연구를 바탕으로 향후 기준 경화도 센서를 사용하여 에폭시 수지의 경화과정에서 발생하는 발열과 잔류 변형률의 변화가 최종 경화도와 어떠한 상관관계를 갖는지 보다 명확히 규명할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] R. F. Gibson, "Principles of Composite Material Mechanics," 3rd Ed., CRC Press, USA, pp. 1-52 (2011)
- [2] D. Huston, W. McDonough, B. Fanconi, F. Mopsik, F. Wang, F. Phelan and M. Chiang, "Assessment of the state-of-the-art for process monitoring sensors for polymer composites," NISTIR 4514, U.S. Department of Commerce NIST, USA, pp. 24-28 (1991)
- [3] R. J. Boucher, "History of solar flight," AIAA paper, pp. 84-1429 (1984)
- [4] J.-C. Kim, Y.-S. Lee, J.-H. Lee, I.-H. Choi, D.-H. Kim and S.-K. Cheong, "A study on the solar cell lay-down for solar powered aircraft using secondary-bonding method," *Proceedings of the KSME 2010 Fall Annual Meeting*, pp. 399-403 (2010)
- [5] J. B. Kim, J. H. Byun, C. H. Lee, S. K. Lee and M. K. Um, "Study on cure monitoring for epoxy resin using fiber optic sensor system," *Proceedings of the KSCM 2005 Spring Conference*, pp. 37-41 (2005)
- [6] V. M. Murukeshan, P. Y. Chan, L. S. Ong and L. K. Seah, "Cure monitoring of smart composites using fiber Bragg grating based embedded sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 79, No. 2, pp. 153-161 (2000)
- [7] F. Colpo, L. Humbert, P. Giaccari and J. Botsis, "Characterization of residual strains in an epoxy block using an embedded FBG sensor and the OLCR technique," *Composites: Part A*, Vol. 37, No. 34, pp. 652-661 (2006)
- [8] J. Im, M. Kim, K.-S. Choi, T.-K. Hwang and I.-B. Kwon, "FBG sensor probes with silver epoxy for tracing the maximum strain of structures," *Journal of Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 33, No. 5, pp. 459-464 (2013)
- [9] D. H. Kim, K. H. Lee, B. J. Ahn, J. H. Lee, S. K. Cheong and I. H. Choi, "Strain and damage monitoring in solar-powered aircraft composite wing using fiber Bragg grating sensors," *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, p. 869222 (2013)
- [10] H. Y. Kim, D. Kang, J. H. Lee and D. H. Kim, "Characteristics of thermal coefficient of fiber Bragg grating for temperature measurement," *Transactions of the KSME A*, Vol. 37, No. 8, pp. 999-1005 (2013)
- [11] K. F. Schoch, Jr., P. A. Panackal and P. P. Frank, "Real-time measurement of resin shrinkage during cure," *Thermochimica Acta*, Vol. 417, No. 1 pp. 115-118 (2004)