

복합재료 경화도 측정을 위한 유전 센서

김학성*, 권재욱*, 김진국*, 이대길**, 최진경***, 김일영***

Dielectric sensor for cure monitoring of composite materials

Hak Sung Kim, Jae Wook Kwon, Jin Kook Kim, Dai Gil Lee, Jin Kyung Choi, and Il Young Kim

Key Words : Dielectric sensor (유전센서), Composite materials (복합재료), Degree of cure (경화도)

ABSTRACT

The on-line cure monitoring during the cure process of composite materials is important for better quality and productivity. The dielectric sensor for cure monitoring consists of base film and electrodes. Because the characteristic of dielectric sensor for the on-line cure monitoring is dependent on the base material, width and number of electrode, etc, the dielectric sensor should be standardized. And the selection of base film material of sensor is very important. In order to prevent the measuring errors generated from the increase of environmental temperature, the base film material should have stable dielectric constant with respect to environmental temperature. In this study, the newly developed dielectric sensor for cure monitoring was designed and the dissipation factor which is function of degree of cure was measured using the sensor. The relationship between the dissipation factor and degree of cure with respect to environmental temperature was investigated.

1. 서 론

열 경화성 수지 기지 복합재료 (Thermosetting resin matrix composites)는 높은 비강도 (S/ρ), 비강성 (E/ρ) 및 우수한 진동 감쇠 성능을 가지고 있기 때문에 항공우주 산업분야에서 비행기, 우주선의 소재로 널리 사용되어 왔으며, 최근에는 자동차와 스포츠, 레저 용품 등의 중 저가 및 생활 용

품의 소재로도 각광을 받고 있다. 일반적으로 열 경화성 고분자 재료를 기지 (Matrix)로 하는 복합재료의 경화과정은 재료의 성질이 시간에 따라서 변화하며 다상 (Multiphase)내에서의 화학적인 반응 및 열, 밀도, 운동량 변화를 수반한다 [1-3]. 고분자 재료의 화학적 반응은 단량체간의 가교 결합에 따른 발열 반응 때문에 복잡한 경향을 나타낸다. 또한 고분자 재료의 열전도 계수는 금속 재료에 비하여 낮기 때문에 성형시 발생하는 발열반응으로 인하여 제품 내부에 온도 구배가 발생하여 제품의 품질이 불균일해진다. 따라서 복합재료의

* 한국과학기술원 기계공학과

** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

*** (주) 라컴텍

품질 관리 (Quality control)를 위해서는 경화과정에 대한 정확한 이해가 필요하며, 온라인 경화 모니터링을 통하여 주변의 온도와 압력을 정확히 제어하면 가장 짧은 시간에 신뢰성 있는 제품의 성형이 가능해진다. 일반적으로 유전센서 (Dielectric sensor)는 베이스의 종류, 전극의 수, 전극간격, 전극 폭 등에 의하여 그 성질이 달라지므로, 유전센서의 규격을 통일하여 경화 모니터링을 수행하여야 한다 [4]. 특히 베이스 재료의 선택은 고분자 복합재료의 경화 모니터링시 센서의 온도변화에 따른 측정오차를 발생시킬 수 있으므로, 센서의 설계에 있어서 매우 중요하다.

본 연구에서는 보다 정확한 경화 모니터링을 위하여, 다양한 베이스와 제조 방법 등에 따라 센서를 설계 및 제조하였고, 유전기법 (Dielectrometry)을 이용한 고분자 복합재료의 경화 모니터링을 이용하여 유전센서의 특성을 연구하였다.

2. 본 론

2.1 유전기법의 원리

복합재료 내에 두개의 전극을 삽입한 후 교류 전기장을 가하면 Fig. 1과 같이 복합재료 내의 기지가 유전재료 역할을 하여 전극 사이에 축전기를 형성한다..

축전기에 축전된 전하량은 기지 내의 쌍극자와 이

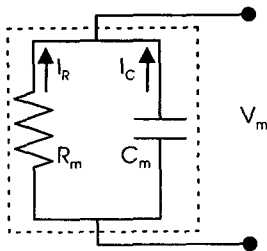


Fig. 1 Equivalent circuit of composite materials.

온들이 교류전기장에 응답하여 배열하는 양에 의존하며, 경화의 단계에 따라 변화한다. 인가 전기

장의 방향에 따라 쌍극자들이 정렬할 때 지닌 에너지에 대한 쌍극자들이 정렬하고 이온들이 이동하는데 소비되는 에너지의 비를 소산계수 (Dissipation factor)라고 한다. 본 연구에서는 소산계수를 이용 경화 상태를 측정하였다. 등가회로 (Fig. 1)에서의 소산계수는 다음과 같다.

$$D = \frac{|I_r V_m|}{|I_c V_m|} = \frac{|I_r|}{|I_c|} = \frac{|Z_c|}{|Z_r|} = \frac{1}{\omega R_m C_m} \quad (1)$$

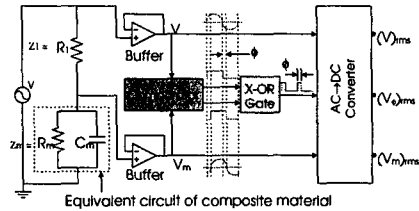


Fig. 2 Electric circuit for measuring dissipation factor of the composite materials.

Fig. 2는 소산계수를 측정하기 위한 회로이다. 교류전압 (V)을 회로에 인가하였을 때, 유전센서의 전압 (Vm)과 인가한 전압 사이의 관계는 아래와 같다.

$$\frac{V_m}{V} = \frac{Z_m}{Z_m + Z_1} \quad (2)$$

식 (2)로부터 저항 (Rm)과 정전용량(Cm)을 구하면 아래와 같다.

$$R_m = \frac{|Z_m|^2}{\text{Re}[Z_m]} \quad (3)$$

$$C_m = -\frac{\text{Im}[Z_m]}{\omega |Z_m|^2} \quad (4)$$

식 (1)에 식 (3), (4)을 대입하면 소산계수를 얻을 수 있다.

2.2 센서의 제작

유전센서의 형상과 전극의 간격을 결정하기 위하여 다양한 크기와 다양한 전극 개수를 갖는 센서들을 제작하였다. 제작된 센서의 형상과 정전용량을 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다.

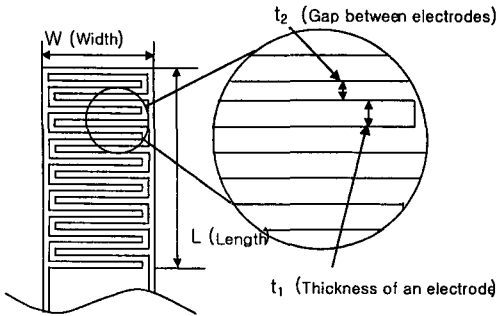


Fig. 3 Schematic feature of the dielectric sensor.

Table 1 Specification of sensors.

	Type (a)	Type (b)	Type (c)
t_1 (μm)	200	100	100
t_2 (μm)	200	100	100
L(mm)	3	3	25
W(mm)	3	3	9
Number of electrode	8	16	125
Capacitance (pF)	1.3	3.2	23

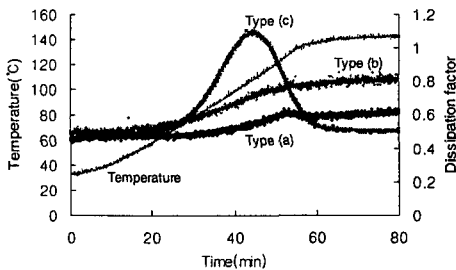


Fig. 4 Cure monitoring of glass/polyester composite using various sensors.

Fig. 4는 유리섬유/폴리에스터 복합재료 (Glass/polyester composite)의 경화과정동안 각각의 센서로 측정된 소산계수를 보여준다.

Type (c) 센서는 피크 (Peak)를 정확히 측정하여 유리섬유/폴리에스터 복합재료의 경화과정의 모니터링이 가능했지만 Type (a)와 Type (b)센서는 감도가 너무 낮아서 측정이 불가능했다.

센서의 형상을 Type (c)로 결정한 후, 베이스 필름과 전극이 될 금속 박판을 접착하는 세가지 방법의 공정을 수행하였다. 베이스 필름으로는 온도에 관계없이 유전 특성이 일정한 폴리이미드 (Polyimide)를 사용하였다. 필름 접착 공정으로는 Table 2의 세가지 방법을 사용하였으며, 제조된 필름의 안정성을 확인하기 위하여 각 필름으로 제작된 센서를 공기 중에 놓고 온도에 따른 소산계수 변화를 측정하였다.

Table 2 Fabricating process of base films for dielectric sensors.

	Description
Method #1	Bonding between polyimide film and copper film with epoxy adhesive
Method #2	Laminating copper film and polyimide film (Utem 1000) (0,4MPa, 320°C, 3hour)
Method #3	Deposition of copper on polyimide film (Fabricated in Toyometallizing)

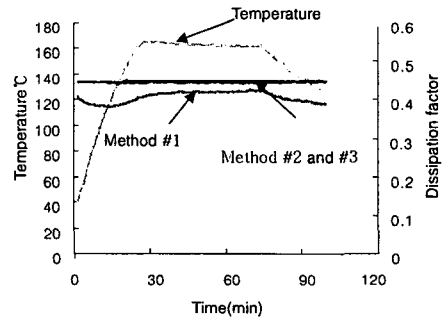


Fig. 5 Dielectric characteristics of the sensors with respect to fabricating process.

Fig. 5는 위 세가지 센서 베이스 제조 공정에 따른 소산계수 변화를 측정된 결과이다. 방법 1으로 제조된 센서는 온도가 증가하면서 소산계수가 증가하였고, 나머지 센서는 일정한 소산계수를 보였다. 이는 방법 1에서 사용된 에폭시 접착제 (Epoxy- adhesive)가 온도에 따라 변하는 유전 특성을 가졌기 때문으로 판단된다. Fig. 6은 제조된 센서의 형상과 치수를 보여준다.

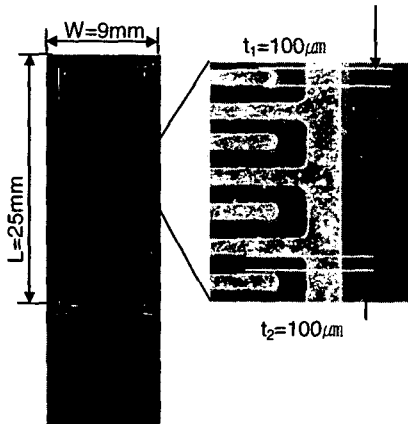


Fig. 6 Shape of the newly developed dielectric sensor.

2.3 센서 정전용량 해석

본 연구에서는 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS 6.1을 이용하여 센서의 정전 용량을 해석하였다.

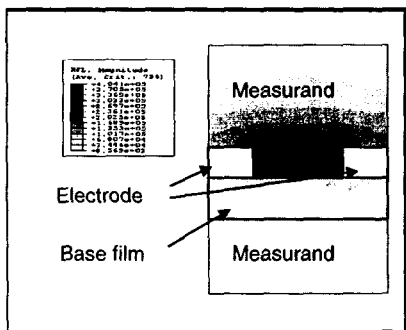


Fig. 7 Analysis of capacitance of the dielectric sensor.

Fig. 7은 ABAQUS를 이용한 센서의 정전 용량 해석 과정을 보여준다.

Table 3 Capacitance of the sensor by the 2-D FEM analysis and by measuring.

Capacitance by 2-D FEM Analysis(pF)	21.1
Measured Capacitance(pF)	23.0
Error(%)	7.8

Table 3은 센서 정전용량의 해석한 값과 실제 측정값이다. 측정값과 해석한 값 사이에 약 7.8%의 오차를 보였다. 오차의 원인은 센서의 연결 단자인 리드 (Lead)선의 영향으로 사료된다.

2.4 제작된 센서를 이용한 경화도 측정

Table 2에서 제시한 공정에 의하여 제작된 3가지 센서를 이용하여 유리섬유/폴리에스터 복합재료의 소산계수를 측정하였다. 측정 시편은 유리섬유/폴리에스터 복합재료를 30mm×30mm의 크기로 8장 적층하고, 중앙에 유전센서와 열전대 (Thermocouple)을 삽입하였다.

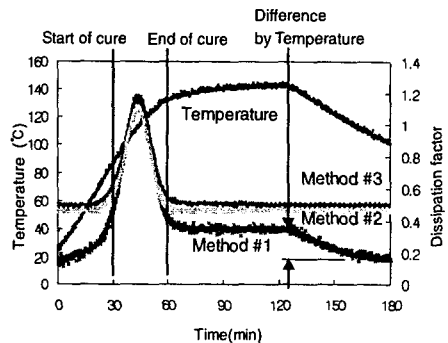


Fig. 8 Cure monitoring of glass/polyester composites.

Fig. 8은 세가지 방법으로 제작된 센서를 사용하여 유리섬유/폴리에스터 복합재료의 경화 과정 동안 소산계수를 측정된 결과이다. 방법 2, 방법 3으로 만들어진 센서로 소산계수를 측정하였을 때에

는 복합재료의 경화가 시작되기 전 온도가 상승하는 과정에서 소산계수가 일정하게 유지되었고, 경화가 완료된 후 온도 하강이 이루어지는 과정에서도 일정한 소산계수를 보였다. 그러나 방법 1의 경우에는 복합재료의 경화가 시작되기 전에도 온도가 상승하면서 소산계수가 급격하게 증가하였고, 경화가 완료된 후에도 온도를 상온으로 낮추었을 때 소산계수가 감소하였다. 이는 방법 1로 만들어진 필름에 존재하는 에폭시 접착제가 온도에 따라서 변화하는 유전 특성을 가졌기 때문이다. 이렇게 센서 자체의 소산계수가 온도에 따라서 변화하게 되면 수지의 경화도 측정에 오차를 발생 시키게 되며 이로 인해 정확한 경화도 예측이 어렵게 된다. 방법 1에서 온도에 의한 소산계수의 증가값은 측정 소산계수의 약 24%이고, 이것이 측정 오차로서 작용하였다. 따라서 유전센서의 베이스는 온도에 따라 유전특성이 일정한 재료이어야 하며, 베이스와 전극의 접촉 공정도 이러한 특성들을 고려하여 이루어져야 한다.

3. 결 론

본 연구에서는 유전기법을 이용한 복합재료 경화과정 모니터링시 센서 베이스에 의하여 발생하는 오차에 대한 연구를 수행하였다. 정확한 복합재료 경화도 측정을 위해서는 온도에 따른 센서 자체의 소산계수가 일정해야 한다. 이를 위해서 온도에 관계없이 안정한 소산계수를 가지는 재료

로 베이스 필름을 제작해야 하며 베이스 필름과 전극 사이의 접촉 공정도 중요하다. 본 연구에서는 기존의 베이스를 폴리이미드로 대체하고 필름과 전극의 접촉공정을 달리하여 감도를 높인 새로운 센서를 설계/제작하였다. 그 결과 온도에 따른 각 센서 베이스의 소산계수 변화를 확인할 수 있었으며 유리섬유/폴리에스터 복합재료의 경화과정을 정확하게 관찰할 수 있었다.

참고문헌

- (1) J. S. Kim and D. G. Lee, "On-Line Cure Monitoring and Viscosity Measurement of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, pp. 405-416 (1993).
- (2) B. Twombly and D. D. Shepard, "Simultaneous Dynamic-Mechanical Analysis and Dielectric Analysis of Polymer (DMA-DEA)," *Instrumentation Science and Technology*, Vol. 22, No. 3, pp. 259-271 (1994).
- (3) J. Fournier, G. Williams, C. Dutch and G. A. Aldridge, "Changes in Molecular Dynamics during Bulk Polymerization of an Epoxide-Amine System As Studied by Dielectric Relaxation Spectroscopy," *Macromolecules*, Vol. 29, No. 22, pp. 7097-7107 (1996).
- (4) J. S. Kim and D. G. Lee, "Analysis of Dielectric Sensors for the Cure Monitoring of Resin Matrix Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, pp.159-164 (1996).