

## 論文

고온 복합재료의 경화 모니터링을 위한 고온 유전센서의  
제작 및 성능평가에 관한 연구

김일영\* · 최진호\*\* · 이대길\*\*\*

A Study on the Performance Test and Manufacture of the Dielectric Sensor for the  
Cure Monitoring of the High Temperature Composites

I. Y. Kim\*, J. H. Choi\*\*, and D. G. Lee\*\*\*

## ABSTRACT

As fiber reinforced composite materials are widely used in aircraft, space structures and robot arms, the on-line cure monitoring during the cure process of the composite materials has become an important research area for the better quality and productivity. In this paper, the dielectric circuit of the Wheatstone bridge type for measuring the dissipation factor during cure of thermosetting resin matrix composite materials was designed and manufactured. Also, the dielectric sensor for the cure monitoring of high temperature cure composites was developed and tested. The residual thermal stresses of the dielectric sensor during high temperature cure were analyzed by the finite element method and its dielectric characteristics at high temperature were evaluated. The on-line cure monitoring of the BMI(Bismaleimide) resin was performed using the developed Wheatstone bridge type circuit and the high-temperature dielectric sensor.

## 초 록

복합재료는 우수한 비강성, 비강도 특성 때문에 기존의 항공우주산업뿐만 아니라 로봇 팔, 공작기계 등에 널리 사용되고 있다. 복합재료 경화중의 온라인 모니터링기법은 생산성 향상 및 품질의 신뢰성 향상을 위하여 매우 중요한 연구분야로 대두되고 있다. 본 논문에서는 휘스톤 브리지식 유전회로를 설계하고 제작하였다. 또한 고온 경화 복합재료에 적용할 수 있는 고온 유전센서를 개발하여 그 성능을 평가하였다. 유한요소해석을 이용하여 유전센서에 작용하는 열 잔류응력을 계산하였으며, 고온분위기 하에서 유전센서의 유전특성을 평가하였다. 이상에서 개발된 유전회로와 고온 유전센서를 이용하여 BMI(Bismaleimide) 수지의 경화모니터링을 수행하였다.

## 1. 서론

최근들어 사용이 증가하고 있는 열경화성수지 복합재료는 기존의 재료에 비해 높은 비강도, 비강성을 가지고 있어 스포츠 및 레저용품뿐만 아니라 항공·우주

산업에 이르기까지 사용 범주가 다양화되고 있다. 열경화성수지 복합재료의 경화과정은 복합재료의 품질을 좌우하므로 경화과정에 대한 정확한 이해와 측정은 매우 중요하다. 복합재료의 경화과정은 재료의 성질이 시간에 따라서 변화하며 다상(multiphase)내에서의 화

\*라킵텍(주) 기술연구소

\*\*경상대학교 수송기계공학과 항공기부품기술연구센터

\*\*\*한국과학기술원 기계공학과, 교신저자(E-mail: dglee@kaist.ac.kr)

학적 반응 및 열, 밀도, 운동량 변화를 수반한다[1-2]. 따라서 복합재료에 대한 경화모니터링은 제품의 성능 평가와 품질관리에 중요한 역할을 한다.

수지의 경화정도를 모니터링하는 방법으로는 DSC(differential scanning calorimetry), IRS(infrared spectroscopy), DMA(dynamic mechanical analysis), 광학기법(optical technique) 및 유전기법(dielectrometry) 등이 있다[3]. DSC는 정적 및 동적 온도실험으로부터 샘플(sample)의 반응열을 측정하여 경화정도를 구하는 방법이다. DMA는 온도변화에 따른 재료의 동적특성을 실험적으로 결정하는 방법으로, 사인파형(sinusoidal wave)의 하중을 가하고 나타나는 응답으로 가교(cross-link)의 상태를 알 수 있다. 광학기법은 광섬유의 빛전달 특성을 이용한 방법으로, 광섬유의 빛에 대한 굴절률의 변화로 수지의 경화도를 구할 수 있으며 미세한 광섬유를 사용하기 때문에 재료의 손상이 적다는 이점이 있다. 본 논문에서 사용한 유전기법은 수지(resin)가 모노머(monomer)의 액체로부터 가교된 고온의 불용성고체로 변하는 전과정의 경화상태를 연속적으로 모니터링할 수 있는 방법이다[4-7].

본 논문에서는 유전기법을 이용하여 고온용 수지인 BMI(bismaleimide)의 경화정도를 모니터링할 수 있는 측정회로 및 유전센서를 개발하였다. 고온에서 경화되는 BMI 수지의 경화과정을 측정하기 위해서는 고온에서 안정적인 특성을 지닌 고온용 유전센서가 필요하므로, 이에 적합한 유전센서를 설계, 제작하였다. 또한, 센서로부터 나온 신호를 정밀하게 측정하기 위하여 휘스톤 브리지(wheatstone bridge)식 측정회로를 설계, 제작하여 기존의 측정회로와 그 성능을 비교 평가하였다.

2. 유전회로의 설계 및 성능평가

2.1 직렬방식회로(Direct type circuit)

본 논문에서는 유전기법을 이용하여 수지의 경화과정을 모니터링하기 위하여 수지의 소산계수(dissipation factor)값을 이용하였다. 소산계수  $D_f$ 는 수지의 등가 저항  $R_m$ 과 등가 콘덴서  $C_m$ 의 항으로 정의될 수 있으며 다음과 같은 관계가 성립한다[4].

$$D_f = \frac{1}{R_m C_m \omega} \tag{1}$$

복합재료 수지의 등가 저항과 등가 콘덴서 값을 측정하기 위한 방법은 여러 가지가 있으나 Kim[8] 등이 사용한 직렬방식회로가 일반적인 방법으로 알려져 있다. Fig. 1은 직렬방식의 회로구성으로, 미리 측정되어진 저항R을 이용하여 복합재료 수지의 등가 저항과 등가 콘덴서 값을 측정할 수 있도록 한 회로이다. Fig. 1의 직렬방식회로에서 수지의 소산계수는 임, 출력 전압비  $V_r = |V_m / V_i|$ 과 위상차  $\phi$ 로 정의되어진다[8].

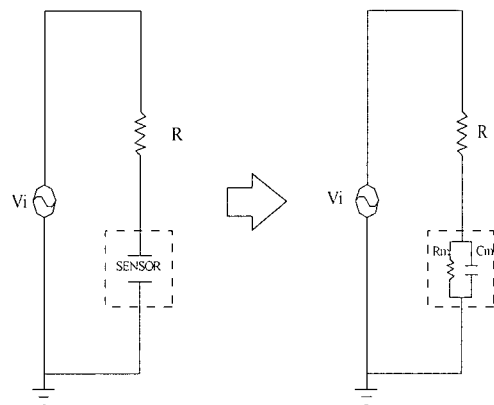


Fig. 1 Electric equivalence of the composite materials in the direct type circuit.

$$D_f = \frac{|V_m / V_i| \cdot \cos\phi}{\sin\phi} \tag{1}$$

위 식(2)에서 보는 바와 같이 전압비  $V_r$ 과 위상차  $\phi$ 를 측정하면 소산계수  $D_f$ 를 측정할 수 있다. 이상과 같은 직렬방식회로에서 등가저항  $R_m$ 의 측정 범위는 이론적으로 0에서 무한대( $\infty$ )까지이므로 측정 범위가 매우 커져서 정밀도가 저하될 우려가 있다. 복합재료 수지의 등가저항은 대개 수  $M\Omega$  이상이므로, 저항의 측정범위를 무한대에서  $M\Omega$  사이로 축소하여 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있는 새로운 회로를 제안하였다.

2.2 휘스톤 브리지식 회로(Wheatstone bridge type circuit)

앞에서 설명한 바와 같이 등가 저항  $R_m$ 의 측정 범위를 무한대에서  $M\Omega$  사이로 축소하여 측정의 정밀도

를 향상시키기 위해 Fig. 2와 같은 휘스톤 브리지식 회로를 구성하였다[9]. 브리지식 회로는 크게 평형 브리지 방법과 불평형 브리지 방법으로 나누어진다. 본 논문에서는 시간에 따라 변화되는 센서부분의 저항과 콘덴서값을 측정해야 되므로 불평형 브리지 회로를 사용하였다. 미리 정해진 저항  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  의 임피던스  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  와 복합재료 내의 수지의 임피던스  $Z_m$  을 구하면,

$$\begin{aligned} Z_2 &= R_2, Z_3 = R_3, \\ Z_4 &= R_4, Z_m = \frac{R_m}{1+j\omega C_m R_m} \end{aligned} \quad (3)$$

이다. 여기서  $j = \sqrt{-1}$ 이다. 수지에 걸리는 전압은 다음과 같이 표현된다.

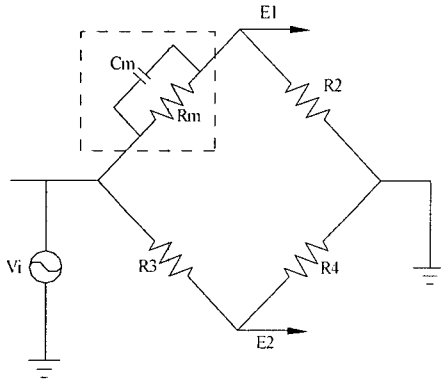


Fig. 2 Electric equivalence of the composite materials in the wheatstone bridge type circuit.

$$V_m = \left[ \frac{Z_m}{Z_m + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right] V_i \quad (4)$$

여기서,

$$V_m = E_1 - E_2 \quad (5)$$

이며 센서부분의 출력전압에서 반대쪽의 출력전압을 뺀 전압의 차이이다. 위 식을 정리하면 다음과 같다.

$$V_m = \frac{a-bj}{c} V_i \quad (6)$$

식 (6)의 상수 a, b, c는 다음과 같이 표현된다.

$$a = -R_2^2 R_3 + R_2 R_4 R_m - R_2 R_3 R_m + R_4 R_2^2 + R_2^2 R_3 R_m^2 C_m^2 \omega^2$$

$$b = R_2 R_3 R_m^2 C_m \omega + R_2 R_4 R_m^2 C_m \omega$$

$$c = (R_3 + R_4) [(R_m + R_2)^2 + R_2^2 R_m^2 C_m^2 \omega^2]$$

식 (6)에서 전압비  $V_r$ 과 위상차  $\phi$ 를 구하면

$$V_r = \left| \frac{V_m}{V_i} \right| = \frac{c}{c \sin \phi} \quad (7)$$

$$\tan \phi = -\frac{b}{a} \quad (8)$$

이다. 이때  $R = R_2 = R_4$ 라 놓고, 식 (7)과 (8)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$A R_m^2 + B R_m + C = 0 \quad (9)$$

여기서 상수 A, B, C는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A &= 2V_i^2 R_3^2 \sin^2 \phi + 2V_i^2 R^2 \sin^2 \phi + 4V_i^2 R R_3 \sin^2 \phi \\ &+ 2V_i^2 (R + R_3)^2 \cos^2 \phi + 2V_i^2 R_3 \cos \phi \\ &- 2V_i^2 R^2 \cos \phi - 2R R_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= 4V_i^2 R R_3^2 \sin^2 \phi + 8V_i^2 R^2 R_3 \sin^2 \phi \\ &+ 4V_i^2 R^3 \sin^2 \phi + 4V_i^2 R (R + R_3)^2 \cos^2 \phi \\ &+ 4V_i^2 R^2 R_3 \cos \phi + 6V_i^2 R R_3^2 \cos \phi \\ &- 2V_i^2 R^3 \cos \phi + 2R R_3^2 - 2R^2 R_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= 2V_i^2 R^2 R_3^2 \sin^2 \phi + 2V_i^2 R^4 \sin^2 \phi \\ &+ 4V_i^2 R^3 R_3 \sin^2 \phi + 2V_i^2 R^2 (R + R_3)^2 \cos^2 \phi \end{aligned}$$

$$+ 4V_r R_3 (R + R_3) \cos \varphi + 2R^2 R_3$$

따라서, 위 식 (9)를 풀이하면 수지의 등가저항  $R_m$  과 등가 콘덴서  $C_m$  값은 다음과 같다.

$$R_m = \frac{-B - \sqrt{D}}{2A} \quad (10)$$

$$C_m = \frac{-R_m + \sqrt{R_m^2 - 4V_r^2 (R + R_m)^2 \sin^2 \varphi}}{2V_r R_m \sin \varphi} \quad (11)$$

$$D = B^2 - 4AC$$

따라서, 위 식(10)과 (11)을 식 (1)에 대입하면 복합 재료 수지의 소산계수를 측정할 수 있다. 이상과 같은 휘스톤 브리지식 회로에서 측정의 정밀도를 향상시키기 위해 저항 R과  $R_3$ 을 적절히 선정하여야 한다. 본 논문에서는  $R=R_2=R_4=10 \text{ M}\Omega$ 으로,  $R_3=1 \text{ M}\Omega$ 으로 선정하여 회로를 구성하였다.

### 2.3 유전회로의 구성

복합재료의 소산계수를 측정하기 위해서는 식 (10)과 (11)에서 보는 바와 같이 전압비  $V_r$ 와 위상차  $\varphi$ 를 측정하여야 한다.

Fig. 3은 전압비와  $V_r$ 와 위상차  $\varphi$ 를 측정하기 위한 회로 구성도이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이  $V_m$ ,  $V_r$ 의 값을 측정하기 위하여 미분 증폭회로(differential amplifier circuit)와 버퍼(buffer)를 구성하였고, 회로보정을 위해 위상차 및 전압 보상을 설치하였다. 그림에서 보는 바와 같이 두 개의 비교측정기(comparator)와 배타적 논리합 게이트(exclusive OR gate)를 구성하여 위상차  $\varphi$ 를 측정하였다[8]. Fig. 4는 복합재료 수지의 소산계수를 측정하기 위하여 제작된 휘스톤 브리지식 회로의 모습이다.

### 2.4 유전회로의 성능평가

미리 측정되어진 5개의 저항과 콘덴서를 사용하여 직렬방식회로와 휘스톤 브리지식 회로의 성능을 상호 비교 평가하였다. 소산계수 측정회로는 측정의 정밀도를 향상시킬수 있도록 최적의 입력 주파수와 입력전압을 선택하여야 한다. 직렬방식회로에서는 Kim[8]이 제시한 1kHz의 주파수와 1V의 전압을 사용하였으며, 휘스톤 브리지식 회로는 실험을 통해 가장 적합한 값을

선택하였다. 본 논문에서는 입력주파수를 400Hz로, 입력 전압을 3V로 선택하였다. Fig. 5는 저항의 오차를 비교한 그래프로, 직렬방식회로는 약  $\pm 1\%$ 의 오차를 나타내는 반면, 휘스톤 브리지식 회로는  $\pm 0.5\%$ 의 오차를 나타내었다. Fig. 6은 콘덴서의 오차를 측정된 그래프로서, 직렬방식회로의 오차는  $\pm 2\%$ , 휘스톤 브리지식 회로의 오차는  $\pm 1\%$ 로 나타났다. 따라서 휘스톤 브리지식 회로는 최대 오차가  $\pm 1\%$ 이하로, 기존의 직렬방식회로보다 우수한 정밀도를 가짐을 볼 수 있다.

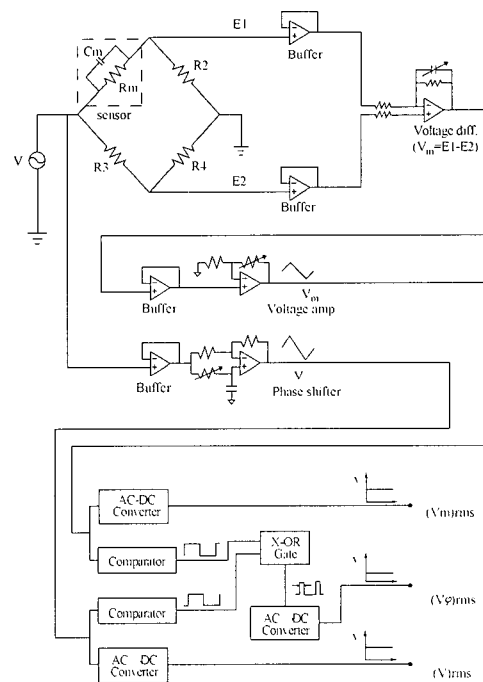


Fig. 3 Schematic diagram of the wheatstone bridge type circuit.

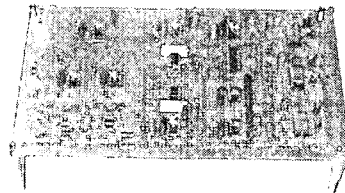


Fig. 4 Photograph of the wheatstone bridge type circuit board for measuring the dissipation factor of the composite materials.

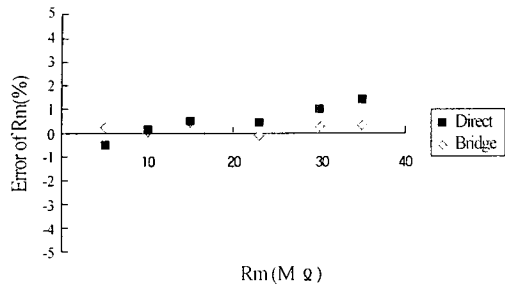


Fig. 5 Errors of the resistance in the direct type circuit and the wheatstone bridge type circuit.

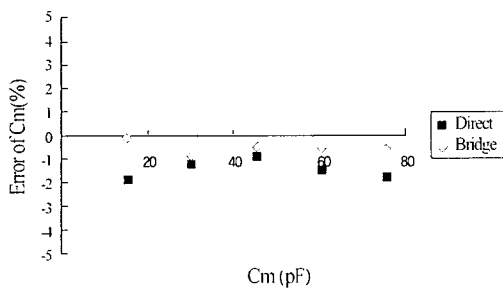


Fig. 6 Errors of capacitance in the direct type circuit and the wheatstone bridge type circuit.

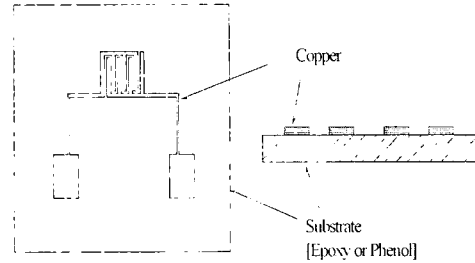


Fig. 7 Structure of polymer based dielectric sensor.

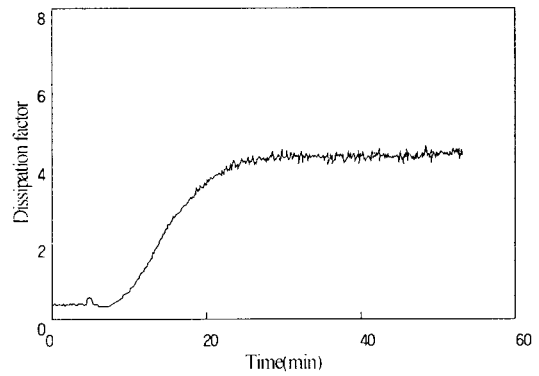


Fig. 8 Variation of the dissipation factor of the conventional dielectric sensor by itself when the holding temperature is 493K.

### 3. 고온 유전센서의 개발

#### 3.1 저온 유전센서

기존의 상용 유전센서는 감도를 향상시키기 위하여 Fig. 7과 같은 빗살(comb) 모양으로 되어 있으며, 센서의 기저(base)는 에폭시(epoxy) 등의 고분자로 되어있다[10]. 기저가 에폭시 등의 고분자로 되어있는 센서는 그 사용 온도가 약 150°C 이하로 제한된다. 왜냐하면 기저인 에폭시가 150°C 이상의 온도에서는 유리전이온도(glass transition temperature)에 도달하여 복합재료 수지의 소산계수 측정에 많은 오차를 수반하기 때문이다. Fig. 8은 유전센서를 220°C분위기 하에서 장시간 방치하여 센서자체의 소산계수를 측정한 그래프로서, 약 25분 후에는 기저가 탄화되어 매우 불안정한 특성을 나타냄을 볼 수 있다.

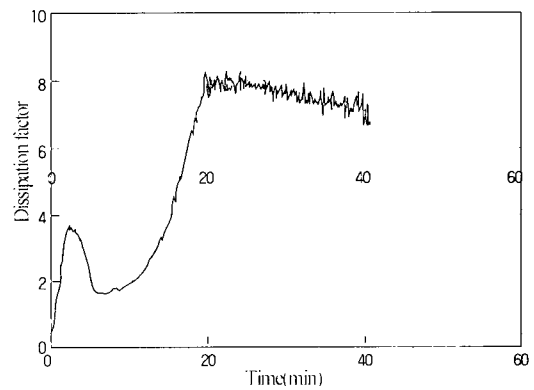


Fig. 9 Dissipation factor of the BMI resin using the conventional dielectric sensor.

Fig. 9는 저온 유전센서를 이용하여 BMI(CIBA-GEIGY사[11]의 Matrimid 5292)수지의 소산계수를 측정된 그래프로서, BMI수지의 경화온도는 220°C이다. 측정된 결과에서 볼 수 있듯이 BMI수지는 220°C분위기 하에서 약 3분 후 소산계수가 3.6이상이 되며 약 10분 후 최소값을 가진다. 그러나 10분 후부터는 소산계수 값이 다시 증가되며 불안정한 특성을 보였다. 이는 유전센서자체의 특성변화에 기인한 것으로, BMI수지와 같은 고온용 복합재료 수지의 경화모니터링에는 적합하지 않다는 결론을 내릴 수 있다.

### 3.2 고온 유전센서

위에서 설명한 바와 같이 에폭시를 기저로 사용하는 저온 유전센서의 문제점을 극복하기 위하여, 200°C 이상의 온도에서 기저의 변화를 일으키지 않고 전기적인 특성이 우수한 고온 유전센서를 개발하였다. 유전센서는 센서패턴을 이루고 있는 구리박판과 구리박판을 지지하는 기저부분으로 나눌 수 있다. 유전센서를 고온에서 사용하려면 기저의 재료를 고온용으로 교체해 주어야 한다. 기저는 열팽창계수가 적어야 하고 고온에서 안정된 구조를 가져야 하며 전기적 부도체가 되어야 한다. 이상의 조건을 만족하는 재료에는 고온용 열경화성 수지, 유리, 세라믹 등이 있다. 이들 중에서 고온용 열경화성 수지는 열팽창과 전기적인 특성변화로 인해 고온 분위기 하에서의 사용에 제한이 예상된다. 본 논문에서는 구입이 용이하고 가격이 저렴한 유리를 기저재료로 사용하였다. 유리위에 구리박판을 접합하기는 곤란하므로 에폭시와 미세한 구리입자의 혼합제로 되어있는 구리 페이스트(copper paste)를 구리박판 대신 사용하였다. 실험에 사용한 구리 페이스트는 ASAHI사의 ACP-060으로, 유리판 위에 도포한 후 150°C의 온도로 약 1시간정도 경화시키면 전도성을 갖는 특성을 지니고 있다. 실험에 사용한 구리 페이스트의 물성치는 Table 1과 같다. Fig. 10은 구리 페이스트를 센서패턴으로 도포하기 위한 금형으로 방전 와이어커팅법에 의하여 제작되었다. 가공된 금형은 이형처리를 한 다음, 구리 페이스트를 도포하여 120°C에서 약 2시간 정도 경화시켰다. 경화된 센서는 다시 150°C에서 약 30분 동안 유지하여 경화를 완료하였다. 금형에서 분리한 센서는 패턴높이가 불균일하므로 사포를 이용하여 연마하였다. 유리기저에 묻어있는 이형제는 센서에 좋지 않은 영향을 미치므로 아세톤으로 세척한 다음 건조시켜 제작하였다.

Table 1 Properties of the copper paste(ACP-060\*)

Viscosity (ps at 25 °C)	400-600
specific gravity (g/cc at 25 °C)	3.2
Curing conditions	150 °C × 30 min.
Hardness(H)	3
Humidity aging(%)	±30
Solder resistance(%)	±30
Shear strength(MPa)	15

\*ASAHI CHEMICAL RESEARCH LABORATORY CO.,LTD. , Tokyo, Japan

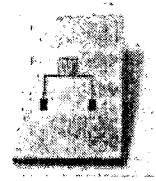


Fig. 10 Photograph of the steel mold for the manufacture of the high temperature dielectric sensor.

일반적으로 센서패턴의 높이가 높을수록 감도는 우수하다. 그러나 센서패턴의 높이가 너무 높으면 열 잔류응력 등으로 인하여 센서가 파손될 우려가 있다. 본 논문에서는 최적의 센서높이를 결정하기 위하여 상용 유한 요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 센서 주위의 열응력을 해석하고 실험을 통하여 이를 검증하였다 [12]. Fig. 11은 센서주위의 열 잔류응력을 계산하기 위한 유한요소모델을 나타낸 그림으로 3차원 고체요소를 사용하였다. 경화전후의 온도차를 180°C로 가정하였으며, 센서패턴의 높이를 35µm, 100µm, 150µm, 200µm, 250µm 로 변화시켜 센서주위의 열 잔류응력을 해석하였다. Fig. 12는 센서패턴의 높이에 따른 최대 잔류응력값을 나타낸 그림으로, 센서패턴부분은 전단응력이 주로 작용하므로 전단응력으로 나타내었고, 기저부분은 Von-Mises의 상당응력으로 나타내었다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 센서패턴에 작용하는 열 잔류응력은 구리 페이스트 패턴의 전단강도값 이하로 나타나, 센서패턴의 파손은 발생하지 않음을 볼 수 있다. 그러나, 기저인 유리에 작용하는 응력은 센서패턴의 높이가 250µm가 되면 유리의 파괴강도인 35MPa로 되어 유리가 파괴되는 것으로 나타났다. 이상과 같은 유한요소해석의 결과를 검증하기 위하여 센서패턴의 높이를 변화시켜가며 센서패턴 위에서 BMI수지를 경화시켰다. 이때 BMI 수지의 경화온도는 220°C로 선정하였다. 실험결과 센서패턴의 높이가 250µm이상이 되면

센서의 파괴가 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 13은 센서가 파괴된 모습을 나타낸 사진으로, 유리로 되어있는 기저부분이 파괴되었음을 볼 수 있다. 이상의 결과로부터, 열 잔류응력으로 인한 센서의 파괴를 방지하기 위한 센서패턴의 높이는 약250 $\mu\text{m}$  이하이어야 한다는 결론을 내릴 수 있었다.

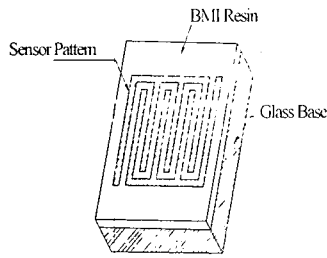


Fig. 11 Finite element model.

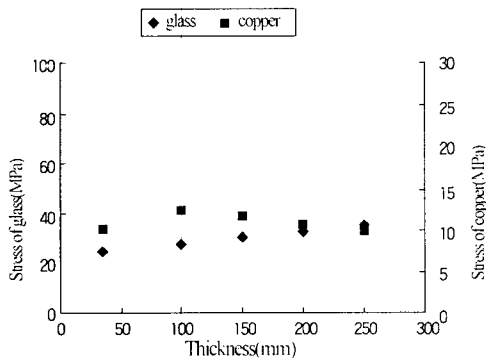


Fig. 12 Residual thermal stresses of the glass base and the copper pattern of high temperature dielectric sensor w.r.t height of the sensor pattern.

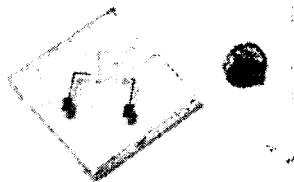


Fig. 13 Photograph of the fractured dielectric sensor by the residual thermal stresses.

### 3.3 고온 유전센서의 표면처리

제작된 고온 유전센서는 센서패턴이 구리 페이스트로 형성되어 있으므로, 센서 표면이 전기적으로 불균일할 수 있다. 본 논문에서는 전기적으로 불균일한 센서 표면을 안정화시키기 위하여 전기 도금법을 이용하여 센서 표면에 크롬 도금을 형성하였다[13].

센서 표면에 전기적 특성이 우수한 크롬 도금층을 형성하기 위한 최적의 조건을 구하기 위해 Fig. 14와 같은 실험 장치를 구성하였다.

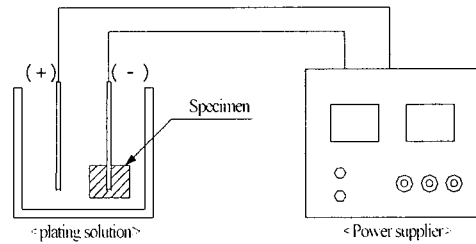


Fig. 14 Schematic diagram of the electroplating device.

Table. 2 Variation of Resistance w.r.t the electroplating currents

사용 전류 (A)	센서의 저항	
	도금 전 ( $M\Omega$ )	도금 후 ( $M\Omega$ )
0.2	34	0
0.4	34	$20 \times 10^{-6}$
0.6	34	42.75
0.8	34	-
10.	34	-



Fig. 15 Photograph of the high temperature dielectric sensor after the electroplating.

사용된 도금액은 표준 도금액으로 조성은 물 11당 6가 크롬 분말 250g, 크롬 질량의 1%인 황산으로 되어 있다. 황산 1g의 부피가 1.84ml이므로 황산은 질량에 상당하는 부피를 계산하여 스포이드로 첨가해주었다. 실험에 사용한 직류 전원 장치는 0~100V, 0~20A까지 사용할 수 있다. (+)전극은 불용성인 납을 사용하였고, (-)전극은 전도성이 높은 구리를 사용하였으며 전극에 크롬이 석출되지 않도록 도금 부분을 제외하고는 도금액에 닿지 않도록 하였다. 도금액의 온도는 약 25°C이고, 사용 전류를 0.2A에서 1.0A로 변화시켜가며 실험하였다. Table 2는 사용 전류에 따른 센서패턴의 저항변화를 실험한 결과를 나타낸 표이다. Table 2에서 보는 바와 같이 사용 전류가 0.2A일 때 전기저항값이 거의 영(zero)이 되어 전기적 특성이 우수한 것으로 나타났다. 또한 사용전류가 0.8A이상일 경우에는 센서패턴의 균열 발생으로 인해 도금층이 형성되지 않음을 관찰할 수 있었다. Fig. 15는 제작된 고온 유전센서의 모습을 나타낸 사진이다.

3.4 고온 유전센서의 성능 평가

제작된 고온 유전센서의 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 16과 실험장치를 구성하여 경화 모니터링 시스템을 완성하였다. Fig. 17은 완성된 실험장치로서, 고온 분위기하에서 장시간 방치하여 센서 자체의 특성을 고찰하였다. Fig. 18은 고온 유전센서를 250°C분위기 하에서 장시간 방치한 결과를 나타낸 그림으로, 소산계수가 거의 영으로 일정한 값을 가짐을 볼 수 있다.

고온용 수지인 BMI 수지의 경화모니터링을 수행하여 고온 유전센서의 적용 가능성을 검토해 보았다. 경화사이클은 분당 10°C상승 후 200°C로장시간 유지하였다.

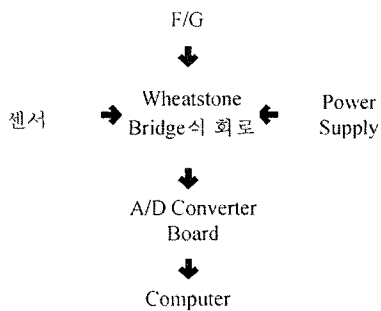


Fig. 16 Schematic diagram of the on-line cure monitoring system for measuring the dissipation factor of the composite material.

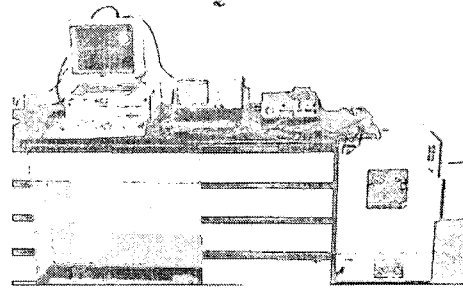


Fig. 17 Photograph of the on-line cure monitoring system for measuring the dissipation factor of the composite material.

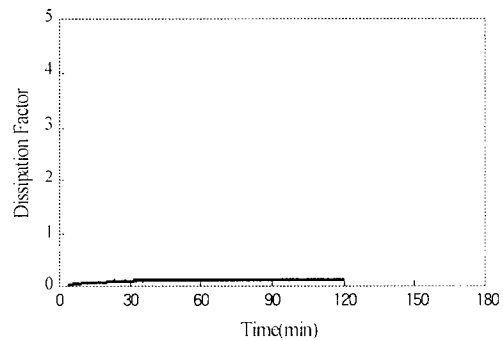


Fig. 18 Variation of the dissipation factor of the high temperature dielectric sensor by itself when the holding temperature is 523K.

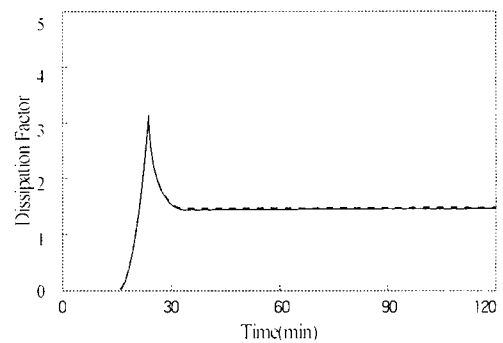


Fig. 19 Measurement of the dissipation factor of the BMI resin using the high temperature dielectric sensor.



Fig. 19는 BMI 수지의 경화모니터링 결과를 나타낸 그림으로, 약 23분 후에 소산계수값이 최대에 도달함을 볼 수 있다. 또한 약 30분 후부터는 소산계수값이 일정한 값을 가지므로 경화가 완료되었음을 볼 수 있다. 이상의 결과로부터, 제작된 고온 유전센서는 고온 복합재료의 경화모니터링에 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문은 유전기법을 이용하여 고온 복합재료 수지인 BMI의 경화정도를 모니터링하기 위하여 소산계수 측정회로 및 고온 유전센서를 개발하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 휘스톤 브리지식 유전회로는 기존의 직렬방식회로보다 2배 이상의 정밀도가 보장되었으며, 최대 측정오차를 1%이하로 감소시킬 수 있었다.
2. 150°C 이상의 고온 분위기 하에서 유전특성 및 물리적 변화가 없는 유리 기저의 고온 유전센서를 개발하였다.
3. 열 잔류응력 해석 및 경화실험의 결과로부터, 열 잔류 응력으로 인한 센서 및 기저부분의 파괴를 방지하기 위한 센서패턴의 높이는 약 200 $\mu$ m이어야 한다.
4. BMI수지의 경화도 측정결과, 약 23분 후 점도가 최소가 되었으며 30분 후 경화가 완료됨을 볼 수 있었다.

#### 감 사 의 글

본 논문은 과학기술부 · 한국과학재단 지정 항공기 부품기술연구센터와라컴텍(주)의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) J. B. Enns and J. K. Gillham. "Time-Temperature-Transformation (TTT) Cure Diagram: Modeling the Cure Behavior of Thermosets." *J. of Applied Polymer Science*. Vol. 28. 1983. pp. 2567-2591.
- (2) C. Y. M. Tung and P. J. Dynes. "Relationship between Viscoelastic Properties and Gelation in Thermosetting Systems." *J. of Applied Polymer Science*. Vol. 27. 1982. pp. 569-574.
- (3) W. G. McDonough, B. M. Fanconi, F. I. Mopsik and D. L. Hunston. "A Role of Cure Monitoring Techniques for On-line Process Control." *Proceedings of the 6th Annual ASME/ESD Advanced Composite Conference*. 1990. pp. 637-664.
- (4) 김진수. 탄소섬유 에폭시 복합재료의 경화모니터링에 관한 연구. 한국과학기술원 박사학위논문. 1996. Chap. 2.
- (5) D. E. Kranbuehl, S. E. Delos, M. S. Hoff, M. E. Whitham and L. W. Weller. "Dynamic Dielectric Analysis for Nondestructive Cure Monitoring and Process Control." *Proceedings of the 2nd Conference on Advanced Composites*. 1986. pp. 61-67.
- (6) R. E. Wetton, G. M. Foster, V. R. Smith, J. C. Richmond and J. T. Neill. "Dielectric Monitoring of Epoxy Cure-Detailed Analysis." *33rd International S. I. MPE Symposium*. 1988. pp. 1285-1294.
- (7) W. Sichina, C. L. Marozzi and P. S. Gill. "Dielectric Analysis of Polymer Materials." *35th International S. I. MPE Symposium*. 1990. pp. 1241-1250.
- (8) J. S. Kim and D. G. Lee. "On-line Cure Monitoring and Viscosity Measurement of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials." *J. of Materials Processing Technology*. Vol. 37. 1993. pp. 405-416.
- (9) Robert F. Coughlin and Frederick F. Driscoll. *Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits* (fourth edition). Prentice Hall. 1991. pp. 201-208.
- (10) J. S. Kim and D. G. Lee. "Analysis of the dielectric Sensor for Cure Monitoring of Composite materials." *J. of Korean Society of Mechanical Engineers*. Vol. 19. No. 7. 1995. pp. 1563-1572.
- (11) CIBA-GEIGY Corp., Three Skyline Drive, Hawthorne, New York 10532, U.S.A.
- (12) AYSYS 5. 5 User's manual. 1988.
- (13) K. K. Bang, J. K. Choi, H. S. Kim, D. G. Lee and H. S. Jeon. "Development of the Guide Rollers using Electroplated Carbon Fiber -Epoxy Composite for Thin Polymer Film Processing." *J. of Composite Structures*. Vol. 38. 1997. pp. 321-328.