

# 고온 복합재료의 경화 모니터링을 위한 유전센서의 개발

김일영\*·최진경\*·최진호\*\*·이대길\*\*\*

## Development of the Dielectric sensor for the Cure monitoring of the high temperature Composites

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

**Key Words:** Dielectric sensor(유전센서), Cure(경화), Dissipation factor(소산계수)

### Abstract

The fiber reinforced composite materials is widely used in aircraft, space structures and robot arms because of high specific strength and high specific modulus. 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 was designed and manufactured. Also, the dielectric sensor for the cure monitoring of the high temperature composites was developed.

The residual thermal stresses of the dielectric sensor were analyzed by the finite element method and its dielectric characteristics under high temperature were evaluated.

The on-line cure monitoring of the BMI resin was performed using the wheatstone bridge type circuit and developed high-temperature dielectric sensor.

### 1. 서 론

최근들어 용도가 급증하고 있는 열경화성수지 복합재료는 기존의 재료에 비해 높은 비강도, 비강성을 가지고 있어 스포츠 및 레저용품뿐만 아니라 항공·우주산업에 이르기까지 사용 범주가 다양화되고 있다. 열경화성수지 복합재료의 경화특성은 복합재료의 품질을 좌우하므로 경화과정에 대한 정확한 이해와 측정은 매우 중요하다.

복합재료의 경화과정은 재료의 성질이 시간에 따라서 변화하며 다상(multiphase)내에서의 화학적 반응 및 열, 밀도, 운동량 변화를 수반한다[1]. 따라서 복합재료에 대한 경화모니터링은 제품의 성능평가와 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[2]. 본 논문에서 사용한 유전기법 (Dielectrometry)은 현재까지 제품성형시 경화를 모니터링할 수 있는 유망한 방법으로 알려져 있다[3]. 이 방법은 수지 (resin)가 모노머 (monomer)의 액체로부터 가교 (cross-link)된 고온의 불용성고체로 변하는 전과정의 경화상태 및 점도를 연속적으로 모니터링할 수 있다[4-6].

본 논문에서는 유전기법을 이용하여 고온용 수지인 BMI의 경화정도를 모니터링할 수 있는 측정회로 및 유전센서를 개발하였다. 고온에서 경화되는 BMI수지의 경화과정을 측정하기 위해서는 고온에서 안정적인 특성을 지닌 고온용 유전센서가 필요하므로, 이에 적합한 유전센서를 설계, 제작하였다. 또한 센서로부터 나온 신호를 정밀하게 측정하기 위하여 Wheatstone

\* (주) 라킵텍

\*\* 경상대학교 항공기계 수송공학부

\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과

Bridge식 측정회로를 설계, 제작하여 기존의 측정회로와 그 성능을 비교 평가하였다.

## 2. 소산계수 측정회로 설계

### 2.1 측정회로

#### 2.1.1 Direct Method Circuit

복합재료 수지의 소산계수를 측정하기 위해서는 복합재료 수지의 등가 저항과 등가 콘덴서 값을 측정하여야 한다. 복합재료 수지의 등가 저항과 등가 콘덴서 값을 측정하기 위한 여러 가지 방법이 있으나 Kim[7]등이 사용한 Direct Method가 일반적인 방법으로 알려져 있다.

Fig. 1은 Direct Method의 일반적인 회로 구성으로, 미리 측정되어진 저항  $R$ 을 이용하여 복합재료 수지의 등가 저항  $R_m$ 과 등가 콘덴서  $C_m$ 을 측정할 수 있도록 한 회로이다.

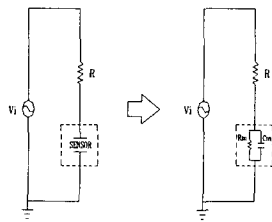


Fig. 1 Electric equivalence of the composite materials in the direct type circuit

소산계수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$D_f = \frac{|V_m/V_i| - \cos \varphi}{\sin \varphi} \quad (1)$$

위 식(1)에서 보는 바와 같이 전압비  $|V_m/V_i|$ 와 위상차  $\varphi$ 를 측정하면 소산계수  $D_f$ 를 측정할 수 있다. 이상과 같은 Direct Method에 따르면 등가저항  $R_m$ 의 측정 범위는 이론적으로 0에서 무한대( $\infty$ )까지이므로 측정 범위가 매우 커져서 정밀도가 저하될 우려가 있다. 특히, 복합재료 수지의 등가저항은 대개 수  $M\Omega$ 이상이므로 측정범위를 축소하여 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있는 회로의 구성이 요구되어진다.

#### 2.1.2 Wheatstone bridge Circuit

앞에서 말한 바와 같이 등가 저항  $R_m$ 의 측정 범위를 축소하여 측정의 정밀도를 향상시키기 위해 Fig. 2와 같은 Wheatstone Bridge식 회로를 구성하였다[8].

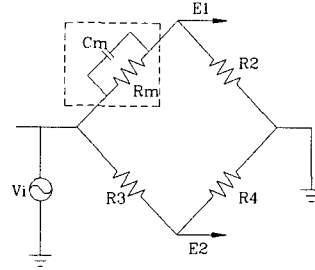


Fig. 2 Electric equivalence of the composite materials in the wheatstone bridge type circuit

미리 정해진 저항  $R_2, R_3, R_4$ 의 임피던스  $Z_2, Z_3, Z_4$ 와 복합재료 수지의 임피던스  $Z_m$ 을 구하면,

$$\begin{aligned} Z_2 &= R_2, \quad Z_3 = R_3, \\ Z_4 &= R_4, \quad Z_m = \frac{R_m}{1 + j\omega C_m R_m} \end{aligned} \quad (2)$$

이다. 수지에 걸리는 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$V_m = \left[ \frac{Z_m}{Z_m + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right] V_i \quad (3)$$

여기서,

$$V_m = E_1 - E_2 \quad (4)$$

로 센서부분의 출력전압에서 반대쪽의 출력전압을 뺀 전압의 차이이다.

위식을 정리하면 다음과 같다.

$$V_m = \frac{a - bj}{c} V_i \quad (5)$$

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

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

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

식

(5)에서  $V_i$ 와  $V_m$ 의 전압비  $V_r = \left| \frac{V_m}{V_i} \right|$ 와 위상차  $\varphi$ 를 구하면

$$V_r = \left| \frac{V_m}{V_i} \right| \quad (6)$$

$$= -\frac{b}{c \sin \varphi}$$

$$\tan \varphi = -\frac{b}{a} \quad (7)$$

이다.

이때,  $R = R_2 = R_4$ 라 놓고, 식 (6)과 (7)를 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$A R_m^2 + B R_m + C = 0 \quad (8)$$

$$A = 2V_r^2 R_3^2 \sin^2 \varphi + 2V_r^2 R^2 \sin^2 \varphi + 4V_r^2 R R_3 \sin^2 \varphi + 2V_r^2 (R + R_3)^2 \cos^2 \varphi + 2V_r R_3^2 \cos \varphi - 2V_r R^2 \cos \varphi - 2R R_3$$

$$B = 4V_r^2 R R_3^2 \sin^2 \varphi + 8V_r^2 R^2 R_3 \sin^2 \varphi + 4V_r^2 R^3 \sin^2 \varphi + 4V_r^2 R (R + R_3)^2 \cos^2 \varphi + 4V_r R^2 R_3 \cos \varphi + 6V_r R R_3^2 \cos \varphi - 2V_r R^3 \cos \varphi + 2R R_3^2 - 2R^2 R_3$$

$$C = 2V_r^2 R^2 R_3^2 \sin^2 \varphi + 2V_r^2 R^4 \sin^2 \varphi + 4V_r^2 R^3 R_3 \sin^2 \varphi + 2V_r^2 R^2 (R + R_3)^2 \cos^2 \varphi + 4V_r R^2 R_3 (R + R_3) \cos \varphi + 2R^2 R_3^2$$

따라서, 위 식 (8)를 풀이하면 수지의 등가저항  $R_m$ 과 등가 콘덴서  $C_m$ 값은 다음과 같다.

$$R_m = \frac{-B - \sqrt{D}}{2A} \quad (9)$$

$$C_m = \frac{-R_m + \sqrt{R_m^2 - 4V_r^2 (R + R_m)^2 \sin^2 \varphi}}{2V_r R R_m \sin \varphi} \quad (10)$$

여기서,

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

이다.

수지의 소산계수  $D_f$ 는 정의에 의해

$$D_f = \tan \delta = \left| \frac{I_{R_m}}{I_{C_m}} \right| = \left| \frac{V_m / Z_{R_m}}{V_m / Z_{C_m}} \right| = \frac{1}{\omega R_m C_m} \quad (11)$$

이다.

따라서 위 식(9)과 (10)을 식 (11)에 대입하면 복합재료 수지의 소산계수를 측정할 수 있다.

본 논문에서는  $R = R_2 = R_4 = 10 \text{ M}\Omega$ 으로,  $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$ 으로 선정하여 회로를 구성하였다.

## 2.2 측정방법 및 성능 평가

### 2.2.1 측정방법

복합재료의 소산계수를 측정하기 위해서는 식(9)과 (10)에서 보는 바와 같이 전압비  $V_r$ 와 위상차  $\varphi$ 를 측정해야한다.

전압비  $V_r$ 과 위상차 ( $\varphi$ )측정하기 위해서 Fig.3과 같은 미분 증폭회로 (Differential amplifier circuit), Buffer, 두 개의 비교측정기(Comparator)와 배타적 논리합 게이트 (Exclusive OR gate)를 구성하였다.

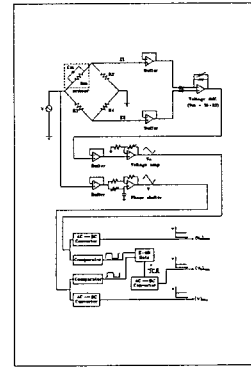


Fig. 3 Schematic diagram of the wheatstone bridge type circuit

이들 측정신호들은 RMS값으로 변환시켜 측정되어진다. RMS의 정의식은 다음과 같다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \{V(t)\}^2 dt} \quad (12)$$

위 식 (12)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} V_{max}^2 2\varphi} = V_{max} \sqrt{\frac{2\varphi}{T}}$$

식에서 위상차  $\varphi$ 의 식을 유도해 내면

$$\varphi \text{ (rad)} = \frac{T}{2} \left\{ \frac{V_{rms}}{V_{max}} \right\}^2 = \pi \left\{ \frac{V_{rms}}{5} \right\}^2$$

가 된다.

Fig. 4는 복합재료 수지의 소산계수를 측정하기 위하여 제작된 Wheatstone Bridge식 회로의 모습이다.

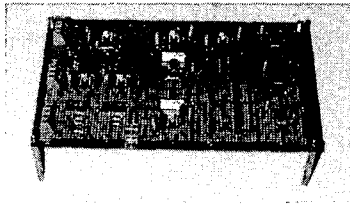


Fig. 4 Photograph of the wheatstone bridge type circuit board for measuring the dissipation factor of the composite materials

### 2.2.2 회로의 성능평가

소산계수 측정회로에서 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있도록 최적의 입력 주파수와 입력전압을 선택하여야 한다. Direct Method식 회로는 Kim[7]이 제시한 주파수 1kHz, 전압 1V를 사용하였으며, Wheatstone Bridge식 회로는 실험을 통해 가장 적합한 값을 선택하였다. 본 논문에서는 입력주파수를 400Hz로, 입력전압을 3V로 선택하였다.

미리 측정되어진 5개의 저항과 콘덴서를 사용하여 Direct Method식 회로와 Wheatstone Bridge식 회로의 성능을 상호 비교 평가하였다.

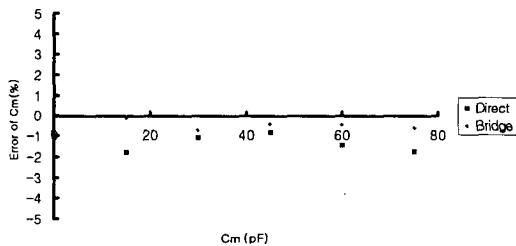


Fig. 5 Errors of the direct type circuit and the wheatstone bridge type circuit in measuring the capacitance

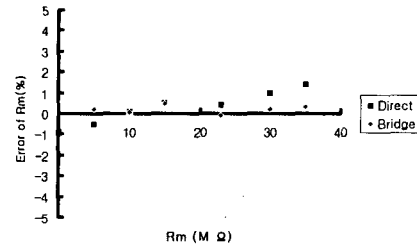


Fig. 6 Errors of the direct type circuit and the wheatstone bridge type circuit in measuring the resistance

Fig. 5과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 Direct Method식 회로는 저항의 측정에서는 약  $\pm 1\%$ 의 오차를 나타내는 반면, Wheatstone Bridge식 회로는  $\pm 0.5\%$ 의 오차를 나타내었다. 또한 콘덴서의 측정에서는 각 회로의 측정값의 오차가 각각  $\pm 2\%$ ,  $\pm 1\%$ 로 나타났다. 따라서 Wheatstone Bridge식 회로는 최대 오차가  $\pm 1\%$  이하이므로, 기존의 Direct Method식 회로보다 우수한 정밀도를 가짐을 볼 수 있다.

## 3. 고온 유전센서의 개발

### 3.1 유전센서

#### 3.1.1 저온( $\approx 150^\circ\text{C}$ 이하) 유전센서

기존의 상용 유전센서는 센서의 기저(Base)가 에폭시(Epoxy)나 유리-에폭시(Glass-Epoxy) 계열이다. 기저(Base)가 에폭시(Epoxy)나 유리-에폭시(Glass-Epoxy)인 센서는 그 사용 온도가  $150^\circ\text{C}$ 로 제한된다. 왜냐하면, 기저인 에폭시(Epoxy)가  $150^\circ\text{C}$  이상의 온도에서는 자체의 전기적인 변화를 일으켜 복합재료 수지의 소산계수 측정에 많은 오차를 유발하기 때문이다. Fig. 7은 유전센서를  $250^\circ\text{C}$ 분위기 하에서 장시간 방치한 결과로서 약 1분여 후부터 증가하기 시작하여 30여분 후에는 기저가 탄화되어 측정이 매우 불안정함을 볼 수 있다.

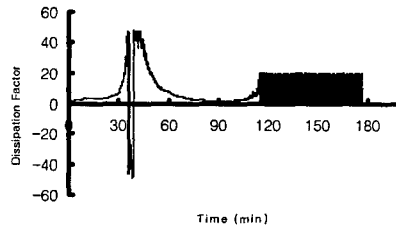


Fig. 7 Variation of the dissipation factor of the conventional dielectric sensor by itself when the holding temperature is  $523\text{K}$

Fig. 8은 저온 유전센서를 이용하여 고온 복합재료 수지인 BMI(CIBA-GEIGY사의 Matrimid 5292)의 경화 정도를 실험으로 측정해 본 그림이다[11]. 실험 조건은 10°C/min 상승 후 200°C 유지상태이다. 측정된 결과에서 보듯이 BMI수지는 200°C분위기 하에서 약 3분 후 소산계수가 최대가 되고 약 10분 후 경화가 완료됨을 알 수 있다. 하지만 약 10 여분이 지난 후부터는 다시 소산계수 값이 증가함을 보여준다. 이는 저온 센서의 기저인 에폭시의 탄화에 의한 영향으로 보여진다. 이러한 영향으로 인해 BMI와 같은 180°C이상의 고온 복합재료 수지의 경화도 측정에는 많은 오차를 수반할 우려가 있다. 따라서 180°C이상의 온도에서 기저의 변화를 일으키지 않고 전기적인 특성이 우수한 고온 유전센서의 필요성이 요구되어진다.

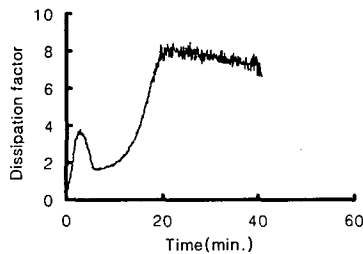


Fig. 8 Dissipation factor of the BMI resin using the conventional dielectric sensor

### 3.1.2 고온(200°C이상) 유전센서의 개발

위에서 논지한 에폭시 기판을 기저로 사용하는 저온 유전센서에서의 문제점을 극복하기 위해서는 기저의 선택이 매우 중요하다. 유전센서는 센서패턴을 이루고 있는 구리박판과 구리박판을 지지하는 베이스 기판으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 생산단가를 낮출 수 있고 기저의 변화를 일으키지 않으며, 쉽게 구할 수 있는 세라믹계 제품인 유리를 베이스 기판으로 사용한 센서개발에 대하여 연구하였다.

유리 기판위에 구리박판을 접합하기는 곤란하므로 에폭시와 미세한 구리입자의 혼합제로 되어있는 구리 페이스트 (Copper paste)를 구리박판대신 사용하였다. 실험에 사용한 구리 페이스트 (Copper paste)는 ASAHI사의 ACP-060으로, 유리판 위에 도포한 후 150°C의 온도로 약 1시간정도 경화시키면 전도성을 갖는 특성을 지니고 있다. ACP-060에 대한 물성치 (Material Property)는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Properties of the copper paste. (ASAHI, Japan)

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

구리 페이스트 (Copper paste)를 센서패턴으로 도포하기 위하여 본 연구에서는 금속 금형을 이용하였다.

사용한 금형은 센서패턴의 정밀도를 위해 방전 와이어컷팅 방법을 이용하여 Fig. 9와 같이 제작하였다. 가공된 금형은 이형처리를 한 다음, 구리 페이스트 (Copper paste)를 도포하여 120°C에서 2시간 정도 경화시킨다. 실험에서 사용한 ASAHI사의 ACP-060 구리 페이스트 (Copper paste)는 앞에서 언급한 바와 같이 150°C에서 완전히 경화가 일어난다. 따라서 금형으로 만든 센서는 완전히 경화되지 않은 상태이므로 다시 약 30분간 150°C에서 경화시킨다. 금형에서 분리한 센서는 연삭가공하여 완성한다. Fig. 10은 제작된 고온 유전센서의 모습을 보여준다. 일반적으로 센서 패턴의 높이는 높을수록 감도가 우수하다. 최적의 센서높이를 결정하기 위해 본 논문에서는 상용 유한 요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 센서 주위의 열응력을 해석하고 실험을 통하여 이를 상호 비교하였다.

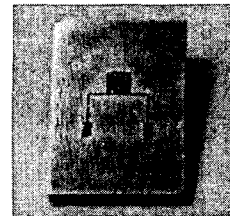


Fig. 9 Photograph of the steel mold for the manufacture of the high temperature dielectric sensor

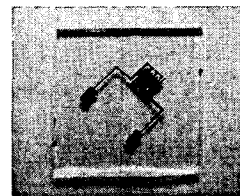


Fig. 10 Photograph of the high temperature dielectric sensor

본 논문에서는 측정 전후의 온도차를 180℃로 가정 하였으며, 센서 패턴의 높이를 35  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ 로 변화시켜 센서주위의 열 잔류 응력을 해석하였다. Fig. 11은 센서 패턴의 높이에 따른 기저 부분과 센서 패턴 부분에 작용하는 최대 응력 분포를 나타낸다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 센서 패턴에 작용하는 최대 전단 응력은 Epoxy의 파괴강도에 미치지 못한다. 그러나, 기저인 유리에 작용하는 응력은 센서 패턴의 높이가 200  $\mu\text{m}$ 가 되면 유리의 파괴 강도에 이르고, 센서 패턴의 높이가 250  $\mu\text{m}$ 가 되면 기저인 유리가 파괴되는 것으로 나타났다. 이는 실험을 통해 얻은 실험의 결과와 잘 일치하였다. Fig. 12는 센서의 높이가 250  $\mu\text{m}$ 일 때의 센서의 기저인 유리가 파괴된 모습을 보여준다.

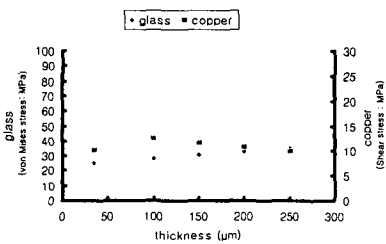


Fig. 11 Residual thermal stresses of the glass base and the copper pattern of high temperature dielectric sensor w.r.t height of the sensor pattern

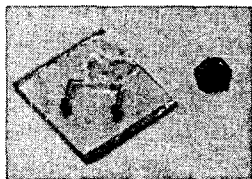


Fig. 12 Photograph of the fractured dielectric sensor by the residual thermal stresses

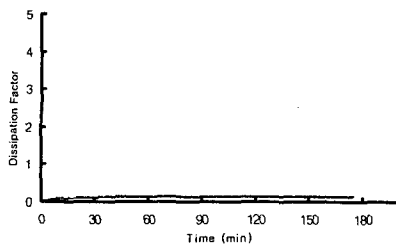


Fig. 13 Variation of the dissipation factor of the high temperature dielectric sensor by itself when the holding temperature is 523K

제작된 고온 유전센서의 특성을 측정하기 위하여 2 시간 이상 방치하여 센서 자체의 특성을 고찰하였다. Fig. 13은 고온 유전센서를 250℃분위기 하에서 장시간 방치한 결과로서 소산계수가 거의 0으로 소산계수의 변화를 일으키지 않았다. 또한 고온 유전센서의 실험 전후의 물리적 변화는 관찰되지 않았다.

### 3.2 고온 유전센서의 도금

제작된 고온 유전센서는 센서 패턴이 구리 페이스 트로 형성되어 있으므로, 센서 표면이 전기적으로 불균일할 수 있다. 전기적으로 불균일한 센서 표면을 안정화시키기 위하여 전기 도금법을 이용하여 센서 표면을 금속 코팅하였다.

센서 표면에 전기적 특성이 우수한 크롬 도금층을 형성하기 위한 최적의 조건을 구하기 위해 Fig. 14와 같은 실험 장치를 구성하였다. 사용된 도금액은 표준 도금액으로 조성은 물 1ℓ당 6가 크롬 분말 250g, 크롬 질량의 1%인 황산으로 되어있다. 황산 1g의 부피가 1.84ml 이므로 황산은 질량에 상당하는 부피를 계산하여 스포이드로 첨가해주었다. 사용된 직류 전원 장치로 0~100V, 0~20A까지 사용할 수 있다. (+) 전극은 불용성인 납을 사용하였으며, (-)전극은 전도성이 높은 구리를 사용하였다.

도금액의 온도는 상온 (25℃)이고, 사용 전류는 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 A로 변화시켜가며 실험하였다.

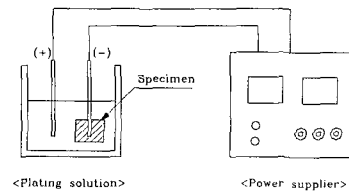


Fig. 14 Schematic diagram of the electroplating device

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

사용전류 (A)	센서의 저항	
	도금 전 (MΩ)	도금 후 (MΩ)
0.2	34	0
0.4	34	20 E-6
0.6	34	42.75
0.8	34	-
1.0	34	-



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

Table 2는 사용 전류에 따른 센서 패턴의 전기적 인 저항의 변화를 나타낸다. Table 2에서 보는 바와 같이 사용 전류가 0.2A 일 때 전기적 특성이 우수한 것으로 나타났다. Fig. 15는 도금된 센서를 보여준다.

### 3.3 고온 유전센서의 성능 측정

실험을 통해 고온 유전센서의 성능을 측정해보았다. 실험조건은 저온 유전센서의 실험과 동일한 200°C분위기 하에서 실시하였다. 사용한 수지는 앞에서 말한 고온 복합재료 수지인 BMI (CIBA-GEIGY사의 Matrimid 5292)이다.

Fig. 16의 실험 결과에서 보듯이 BMI수지의 소산계수는 200°C분위기 하에서 약 3분 후 최대에 달하였으며, 약 10분 후 경화가 완료되는 것으로 나타났다. Fig. 16의 그림에서는 앞에서 말한 Fig. 8과 다르게 10여분이 지난 후에도 소산계수의 변화는 전혀 없었다. 이는 제작된 고온 유전센서의 기저의 물리적·화학적 변화가 없음을 의미한다. 따라서, 제작된 고온 유전센서는 고온 복합재료의 경화과정 모니터링에 사용될 수 있음을 알 수 있다.

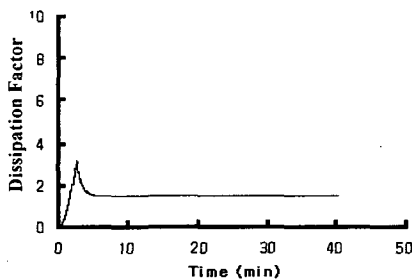


Fig. 16 Measurement of the dissipation factor of the BMI resin using the high temperature dielectric sensor

## 4. 결론

본 논문은 유전기법을 통하여 고온에서 경화되는

고온 복합재료 수지인 BMI의 경화정도를 모니터링하기 위해 소산계수 측정회로 및 고온 유전센서를 개발하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Wheatstone Bridge식 유전 회로는 기존의 Direct Method식 회로보다 2배 이상의 정밀도가 보장되었으며, 측정 오차를 최대 1%이하로 감소시킬 수 있었다.

2. 150°C 이상의 고온 분위기 하에서 유전특성 및 물리적 변화가 없는 유리 기저의 고온 유전센서를 개발하였다.

3. 열 잔류 응력 해석 및 경화 실험의 결과로부터, 열 잔류 응력으로 인한 센서 및 기저부의 파괴를 방지하기 위하여 센서 패턴의 높이는 약 200  $\mu\text{m}$  이하이어야한다.

4 BMI수지의 경화도 측정결과, 10°C/min 상승후 200°C 유지 상태에서 약 3분 후 점도가 최소가 되었으며, 약 10분 후 경화가 완료됨을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] J. B. Enns and J. K. Gillham, 1983, "Time-Temperature-Transformation (TTT) Cure Diagram: Modeling the Cure Behavior of Thermosets," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 28, pp. 2567-2591.
- [2] W. G. McDonough, B. M. Fanconi, F. I. Mopsik and D. L. Hunston, 1990, "A Role of Cure Monitoring Techniques for On-line Process Control," Proceedings of the 6th Annual ASM/ESD Advanced Composite Conference, pp. 637-664.
- [3] P. K. Mallick, 1998, Fiber Reinforced Composites, Marcel Dekker, Inc., Chapter 5.
- [4] D. E. Kranbuehl, S. E. Delos, M. S. Hoff, M. E. Whitham and L. W. Weller, 1986, "Dynamic Dielectric Analysis for Nondestructive Cure Monitoring and Process Control," Proceedings of the 2nd Conference on Advanced Composites, pp. 61-67.
- [5] R. E. Wetton, G. M. Foster, V. R. Smith, J. C. Richmond and J. T. Neill, 1988, "Dielectric Monitoring of Epoxy Cure-Detailed Analysis," 33rd International SAMPE Symposium, pp. 1285-1294.
- [6] W. Sichina, C. L. Marozzi and P. S. Gill, 1990, "Dielectric Analysis of Polymer Materials," 35th International SAMPE Symposium, pp. 1241-1250.
- [7] J. S. Kim and D. G. Lee, 1995, "Analysis of the dielectric Sensor for Cure Monitoring of Composite materials," J. of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 7, pp. 1563-1572
- [8] Robert F. Coughlin and Frederick F. Driscoll, Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits (fourth edition), Prentice Hall, pp. 201-203, 205-208(1991)