

論文

유전기법을 이용한 접착 조인트의 실시간 경화 모니터링

권재욱*, 진우석**, 이대길****

On-line Cure Monitoring of Adhesive Joints by Dielectrometry

Jae-Woo Kwon*, Woo-Seok Chin**, and Dai-Gil Lee****

ABSTRACT

Since the reliability of adhesively bonded joints is much dependent on the curing status of thermosetting adhesive, the on-line cure monitoring during the cure of adhesively joints could improve the quality of adhesively bonded joints. In this work, the dielectric method which measures the dissipation factor of the adhesive during the cure of joints and converts it into the degree of cure of the adhesive was devised. The relation between the dissipation factor and the degree of cure of adhesive was investigated, which could eliminate the temperature effect on the dissipation factor that is a strong function of the degree of cure and temperature of adhesive. From the investigation, it was found that the dissipation factor showed a trend similar to the cure rate of the adhesive.

조 록

접착 조인트의 안전성은 사용되는 열경화성 접착제의 경화상태에 많은 영향을 받기 때문에, 실시간으로 접착 조인트의 경화를 모니터링 할 수 있다면 조인트의 품질을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 조인트의 경화 중 접착제의 소산계수를 측정하여 이를 접착제의 경화도로 환산할 수 있는 기법을 제안하였다. 접착제의 소산계수와 경화도의 관계를 실험적으로 연구하였으며, 온도와 경화도에 따라 민감하게 변하는 소산계수로부터 온도가 미치는 영향을 제거하였다. 연구결과 접착제의 소산계수는 그 경화율과 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다.

Key Words: 유전기법(Dielectrometry), Differential scanning calorimetry(DSC), 실시간 경화 모니터링(On-line cure monitoring), 접착 조인트(Adhesively bonded joint), 자체센서(Self-sensor)

1. 서 론

접착 조인트는 접합되는 물질의 기하학적 형상, 표면처리 상태, 사용 온도 및 습도, 경화 온도와 압력, 시간 등 제조 공정 변수에 의해 많은 영향을 받는데, 이는 접합에 사용되는 고분자 수지 계열 접착제가 공정 변수에 따라 가교결합(crosslink) 정도와 경화도가 바뀌기 때문이다. 따라서 접착 조인트의 성능 향상을 위하여 접착 조인트의 경화과정을 모니

터링하고 적합한 경화과정을 적용하는 것이 중요하다. 또한, 실시간으로 접착 조인트의 경화를 모니터링하면 온도, 압력 등의 제조 공정 변수를 조절할 수 있어 조인트의 품질관리에 효과적이며 최단시간 안에 만족할 만한 품질을 얻을 수 있다. 그러나 접착 조인트의 경화 과정은 접착용 재료의 성질이 시간에 따라 변화하며 다상(multiphase) 내에서의 화학적 반응 및 열, 밀도, 점도, 운동량 등의 물리적 변화를 수반하므로, 이를 실시간으로 정확히 모니터링 하기가 어렵다[1-3].

* LG디지털 디스플레이 연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

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

경화과정을 모니터링하는 기법에는 DSC(differential scanning calorimetry), DMA(dynamic mechanical analysis), IRS (infrared spectroscopy), 광학기법(optical technique) 및 유전기법(dielectrometry) 등이 있다[4]. 이러한 기법들 중 유전기법은 열경화성수지의 경화과정을 모니터링 할 수 있는 유망한 기법으로 수지가 단량체(monomer)의 액체로부터 가교된(cross-linked) 불용성고체로 변하는 전 과정의 경화상태 및 점도를 연속적으로 모니터 할 수 있다[4-8]. 유전기법과 경화 모니터링과 관련하여 다양한 연구가 수행되었으나 [9-14], 경화도(degree of cure)와 유전특성의 명확한 관계를 규명한 사례는 거의 없는 실정이다. 이는 소산계수(dissipation factor) 등의 유전데이터가 고분자 물질의 점도에 따라 변화하고, 이러한 점도 또한 경화도 및 온도에 강한 영향을 받으므로 이들의 정확한 상관관계를 규명하기가 어렵기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 유전기법으로 측정된 소산계수와 DSC로 측정된 경화율 간의 상관관계를 실험적으로 연구하여 임의의 상태에서의 소산계수로부터 접착 조인트의 경화도를 예측할 수 있는 방법을 제시하였고, 다양한 경화사이클에 이를 적용하여 그 성능을 평가하였다.

접착 조인트에 센서를 부착하여 경화과정을 모니터링하는 몇 가지 방법이 있는데[14], 이 경우 부착된 센서 자체가 조인트의 결함으로 작용할 수 있으므로 본 연구에서는 접착 조인트 자체를 센서로 사용하여 실시간으로 경화과정을 모니터링 할 수 있는 자체 센서 기법을 개발하였다. 부가적인 센서를 부착할 필요 없이 접착조인트의 경화상태를 모니터링 할 수 있었으며, 이를 통해 조인트의 강건성(integrity)을 향상시켰다.

2. DSC를 통한 경화 반응식 모델

본 연구에서는 접착 조인트의 제작에 IPCO 9923 (National Starch and Chemical, Korea) 에폭시 접착제를 사용하였다. IPCO 9923은 IPCO 9923 A(에폭시 수지)과 IPCO 9923 B(경화제)로 이루어진 2액형 접착제로 수지와 경화제를 1:1의 비율로 섞어서 사용하며 각각의 구성성분과 함유량은 Table 1과 같다.

IPCO 9923의 경화반응은 폴리옥시프로필렌 디아민(polyoxypropylene diamine)의 아민기의 수소 원자가 DGEBA(diglycidyl ether of bisphenol-A)의 에폭시 그룹의 C-O 결합과 연속적으로 반응하여 가교결합을 형성하며 일어난다. 이러한 일련의 반응이 연속적으로 발생하여 서서히 3차원의 망상구조를 형성하게 된다.

DSC(Differential Scanning Calorimetry)는 접착제 등의 열경화성 수지의 경화 상태를 모니터링 하는 일반적인 방법으로, 수지의 경화 시 발생하는 열량을 측정하여 경화도를 구하게 된다. 본 연구에서는 DSC Q 100(TA instruments,

USA) 시험기를 사용하여 IPCO 9923 접착제의 경화도를 측정하였다. 9~11mg 정도의 IPCO 9923 접착제를 시험기에 넣고 등온주사(isothermal scanning)와 동적주사(dynamic scanning)를 통해 시간에 대한 열발생율(heat generation rate)을 측정하였다. 등온주사는 50~90 °C의 범위에서 10 °C 간격으로 5 가지 경우를 시험하였으며, 동적주사는 3.5 °C/min로 시험하였다.

Table 1 Compositions and contents of IPCO 9923

Component	Content (%)
BPA epoxy resin (DGEBA)	55
Modified epoxy resin (DGEBA with flexibilizers)	35
Silicon dioxide (fine silica)	5
Titanium dioxide	5
Other	Below 1

(a) IPCO 9923 A

Component	Content (%)
Polyoxypropylene diamine	70
TEPA (tetraethylene pentamine)	10
Bisphenol-A	10
Silicon dioxide (fine silica)	10
Other	Below 1

(b) IPCO 9923 B

DSC 시험기를 사용하여 경화도를 구하는 방법은 다음과 같다. 먼저 경화율 $d\xi/dt$ 는 다음 식과 같다.

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{1}{H_u} \left(\frac{dH}{dt} \right)_r \quad (1)$$

여기서 ξ 는 경화도(dynamic degree of cure), $\frac{d\xi}{dt}$ 는 경화율(cure rate), $\left(\frac{dH}{dt} \right)_r$ 는 등온주사 시 열발생율(heat generation rate during isothermal scanning; J/sec/g=W/g), H_u 는 동적주사 시 총 발열량(total heat generation during dynamic scanning; J/g)이다.

위 식 (1)에 등온 경화율(isothermal cure rate) 항 $d\xi/dt$ 을 도입하면 다음과 같다.

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{H_r}{H_u} \frac{d\xi}{dt} \quad (2)$$

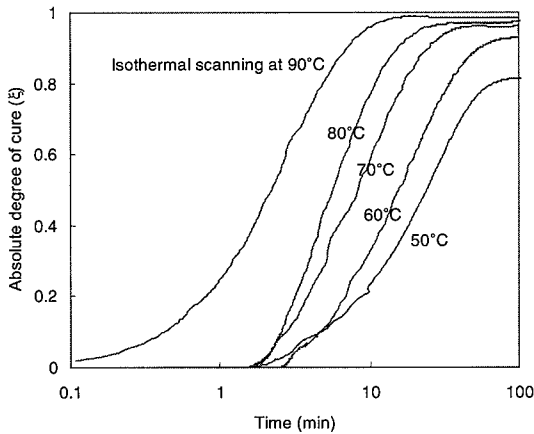


Fig. 1 Absolute degree of cure ξ of IPCO 9923 epoxy adhesive during isothermal scanning.

Table 2 Total heat of dynamic and isothermal scanings

Dynamic scanning	3.5°C/min	212 J/g
Isothermal scanning	50°C	173 J/g
	60°C	197 J/g
	70°C	204 J/g
	80°C	207 J/g
	90°C	210 J/g

여기서 ζ 는 등온 경화도(isothermal degree of cure), HT는 등온주사 시 총 발열량(total heat generation during isothermal scanning; J/g)이다.

따라서 경화도 ξ 는 식 (2)를 적분하여 구할 수 있다.

$$\xi = \frac{H_T}{H_U} \int_0^{\xi} \left(\frac{d\xi}{dt} \right) dt \quad (3)$$

IPCO 9923 접착제의 등온주사 시의 경화도는 Fig. 1과 같으며, 동적 주사 시 열발생율과 경화도는 Fig. 2와 같다. 등온주사 및 동적주사 시의 열발생율을 정리하면 Table 2와 같으며, 동적주사를 통해 얻은 전체 발열량은 212 J/g이었다.

에폭시 등의 열경화성 수지의 $d\xi/dt$ 를 예측하기 위하여 식 (4)와 같은 경험식을 주로 사용하고 있다[12].

$$\frac{d\xi}{dt} = (g_1 + g_2 \cdot \zeta^{g_3}) (1 - \zeta)^{g_4} \quad (4)$$

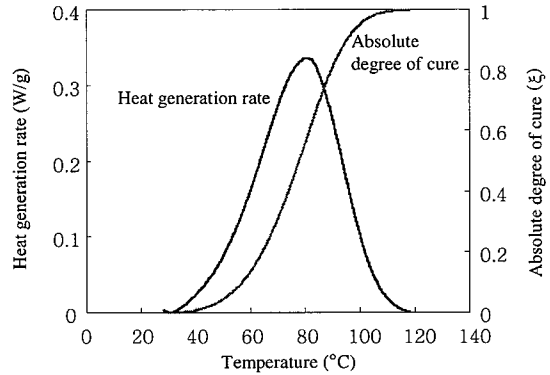


Fig. 2 Heat generation rate and degree of cure ξ of IPCO 9923 epoxy adhesive during dynamic scanning.

Table 3 Kinetic parameters of IPCO 9923 adhesive obtained from DSC measurements

$g_1 = 8.103 \times 10^5 \cdot e^{\frac{6964}{T}}$
$g_2 = -6.626 \times 10^5 \cdot e^{\frac{6883}{T}}$
$g_3 = 1.759 \times 10^{-1} \cdot e^{\frac{819.6}{T}}$
$g_4 = 8.600 \times 10^{-7} \cdot e^{\frac{20100}{T}}$

위 식에서 g_1 , g_2 , g_3 와 g_4 는 Arrhenius형태로 표현되며, 온도에 따른 $d\xi/dt$ 와 ζ 의 실험적 관계식으로부터 비선형 최소제곱법(nonlinear least squares curve fit)을 사용하여 결정할 수 있다. 위 상수들은 온도, T 의 함수로 표현되며, Table 3과 같다.

3. 접착 조인트 제작

본 연구에서는 Table 4의 물성을 갖는 IPCO 9923 에폭시 접착제와 강철 피접착체를 이용하여 Fig. 3과 같은 원통형 단일 겹치기 접착 조인트를 제작하여 시험을 수행하였다. 조인트의 치수는 Table 5와 같으며, 접착두께는 최적 값인 0.2 mm로 고정하였다[15]. 일반적으로 접착제의 접착특성은 피접착체의 표면상태에 민감하므로, 적당한 표면처리가 필요하다. 본 실험에서는 #80의 사포를 이용하여 강철 피접착체를 기계적 표면처리 하였다[15]. 접착 조인트를 정밀하게 가공된 V-블록 위에 올려놓아 경화함으로써 안쪽과 바깥쪽 피접착체의 중심이 서로 일치하도록 유지하였으며, 0.6 MPa, 1.0~3.5 °C/min의 승온율(temperature increase rate)로 오토클레이브에서 3시간 동안 경화시켰다.

Table 4 Material properties of the epoxy adhesive and the steel adherend used

	Adhesive (IPCO 9923)	Adherend (Steel)
Young's modulus, E (GPa)	2.50	210
Poisson's ratio, ν	0.41	0.30
Tensile strength, S_t (MPa)	45.0	350
Shear strength, S_s (MPa)	29.5	200
C.T.E., α ($1/^\circ\text{C}$)	72×10^{-6}	11.7×10^{-6}
Cure temperature ($^\circ\text{C}$)	80.0	-
Cure time (hour)	3	-

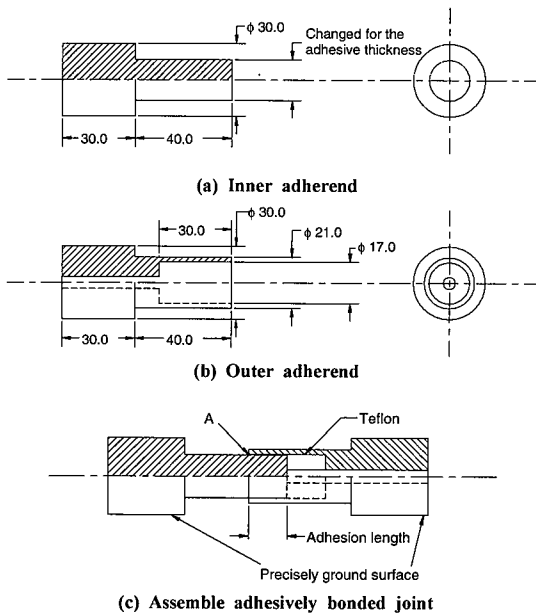


Fig. 3 Configuration of the adhesively bonded joint.

Table 5 Dimensions of the adhesively bonded tubular single lap joint

r_{2i} (mm); inner radius of the outer adherend	8.5
r_{2o} (mm); outer radius of the outer adherend	10.5
r_{1i} (mm); inner radius of the inner adherend	0.0
r_{1o} (mm); outer radius of the inner adherend	8.3
L (mm); bond length (adhesion length)	15.0
η_a (mm); bond thickness	0.2

4. 접착 조인트의 경화 모니터링

유전기법은 고분자 재료의 경화과정을 연속적으로 모니

터링 할 수 있는 방법으로, 본 연구에서는 에폭시 접착제를 유전물질로, 안쪽과 바깥쪽 강철 피접착체를 2개의 전극으로 사용하였다. 따라서 본 연구의 원통형 단일 겹치기 접착 조인트의 접착부는 2개의 전극 사이에 유전물질이 채워져 있는 평행판 축전기라 가정할 수 있다. 축전기에 축적된 전하량은 에폭시 접착제 내의 이온과 쌍극자의 이동성과 관련되며, 재료의 경화정도에 따라 그 값이 변한다 [12]. 에폭시 접착제의 경화가 시작되기 전에는 접착제 내의 이온과 쌍극자의 이동성이 높은 반면, 경화가 진행되면 이동성이 낮아지게 된다.

이러한 이동성의 정도는 쌍극자들에 인가된 전기 에너지에 대한 쌍극자들의 운동 시 소비되는 에너지의 비로 표현되는 소산계수 D (dissipation factor)로 나타낼 수 있다. 접착 조인트는 Fig. 4(a)와 같이 저항 R_m 과 축전기 C_m 이 병렬로 연결된 등가회로로 모델링 할 수 있으며, 등가회로의 소산계수는 다음의 식 (5)를 통해 구할 수 있다.

$$D = \frac{I_R \cdot V_m}{I_C \cdot V_m} = \frac{I_R}{I_C} = \frac{Z_C}{Z_R} = \frac{1}{\omega \cdot R_m \cdot C_m} \quad (5)$$

여기서 I_R (A)은 저항으로 흐르는 전류, I_C (A)는 축전기로 흐르는 전류, V_m (V)은 등가회로에 걸리는 전압, Z_R (Ω)은 저항의 등가 임피던스(impedance), Z_C (Ω)는 축전기의 등가 임피던스이다.

전류 I 는 Fig. 4(b)와 같이 I_R 과 I_C 의 벡터 성분을 가지며, 다음의 식 (6)과 같이 표현된다[12].

$$\begin{aligned} I &= j \cdot \omega \frac{A}{d} (\kappa' - j \cdot \kappa'') \cdot V_m \\ &= j \cdot \omega \frac{A}{d} \kappa' \cdot V_m + \omega \frac{A}{d} \kappa'' \cdot V_m \\ &= I_C + I_R \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 κ 는 복수 유전상수이며, 다음의 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\kappa = \kappa' - j \cdot \kappa'' \quad (7)$$

이 때 κ' 는 투과율(permittivity), κ'' 는 손실계수(loss factor)로 각각 저장되는 전기 에너지, 소산되는 전기 에너지와 연관된다.

식 (6)의 I_R 과 I_C 를 식 (5)에 대입하여 정리하면, 다음의 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$D = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\omega \frac{A}{d} \kappa'' \cdot V_m}{j \cdot \omega \frac{A}{d} \kappa' \cdot V_m} = \frac{\kappa''}{\kappa'} \quad (8)$$

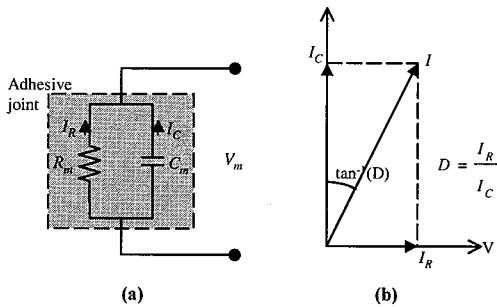


Fig. 4 (a) Equivalent circuit for an adhesively bonded joint. (b) Electric current through the dielectric material and the definition of the dissipation factor.

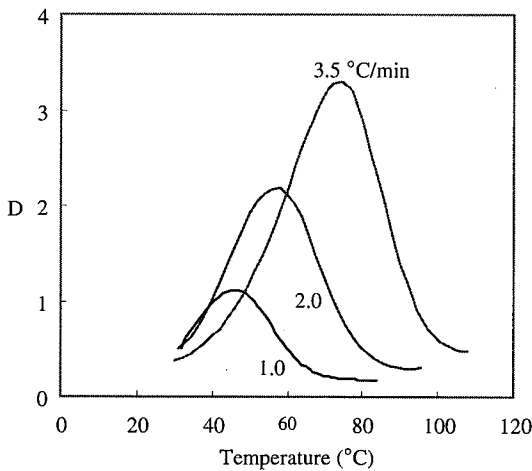


Fig. 5 Dissipation factor D of the adhesively bonded joint at different temperature increase rates.

본 연구에서는 유전기법을 이용하여 접착 조인트의 경화 과정 중 접착제의 소산계수 D 를 측정하고, 이를 접착제의 DSC 결과와 서로 비교하고 연관성을 분석하였다. 또한, 도체인 강철 피접착체 자체를 유전센서로 사용하여 접착 조인트의 경화과정을 실시간으로 모니터링 하는 방법을 제안하였다. 이 때 접착 조인트의 접착제는 유전물질로, 안쪽과 바깥쪽의 피접착체는 유전센서의 2개의 전극으로 작용하게 되어, 접착 조인트를 저항과 축전기로 이루어지는 등가병렬회로로 모델링 할 수 있었다. 승온율을 1.0~3.5 °C/min의 범위에서 변화시켜 가며 접착 조인트의 경화 모니터링을 수행하여 Fig. 5의 결과를 얻었으며, 특정 승온율 하에서 온도에 대한 소산계수의 변화를 보여준다.

소산계수와 경화도의 관계를 분석하기 위하여 접착제의 경화 전과 후의 소산계수를 온도에 따라 측정하였다. 온도에 따른 경화 후 접착제의 소산계수 D_{∞} 는 Fig. 6과 같으며, 경화 전의 접착제의 소산계수 D_0 는 20 °C에서 0.3이었다.

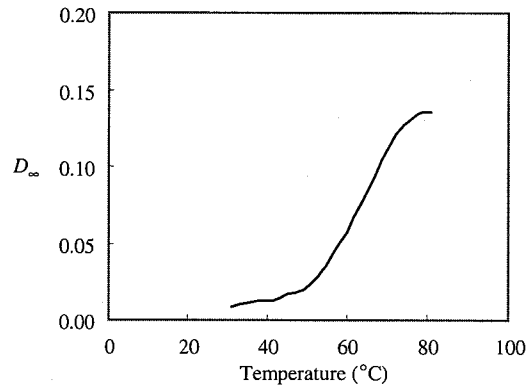


Fig. 6 Dissipation factor D_{∞} for the fully cured adhesive w.r.t. the temperature.

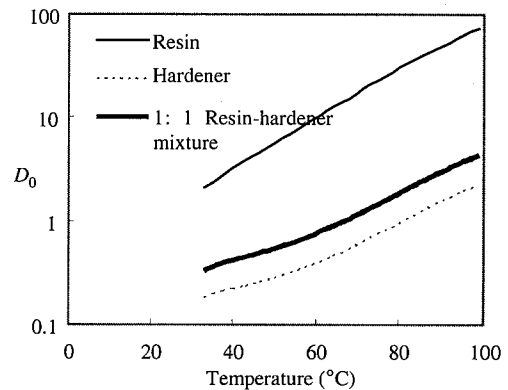


Fig. 7 Dissipation factor D_0 for the uncured adhesive w.r.t. the temperature.

온도에 따라 D_0 를 측정할 수 있다면 경화가 시작되기 전과 완료된 후의 소산계수 값을 전체 온도범위에 대해 얻을 수 있어 보다 정확한 분석을 할 수 있으나, 본 연구에서 사용된 IPCO 9923 접착제는 낮은 온도에서도 경화가 진행되기 때문에 높은 온도에서의 D_0 값을 구하기 어려웠다. 이에 본 연구에서는 경화되지 않은 수지와 경화제의 소산계수를 따로 분리하여 측정한 후 혼합법칙(rule of mixture)을 적용하여 접착제의 경화 전 소산계수 값을 구하였다. 수지와 경화제 각각의 경화 전 소산계수 및 이를 1:1로 섞은 접착제의 경화 전 소산계수는 Fig. 7과 같으며, 20°C에서의 경화 전 소산계수 측정값을 통해 그 타당함을 검증할 수 있다.

경화도중의 접착제가 경화 전과 경화 후의 혼합물이라고 가정하면, Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 통해 부분적으로 경화된 접착제의 소산계수를 임의의 온도와 경화도에 대해 구할 수 있다. 이 때 $d\xi/dr=0$ 일 때의 소산계수를 D_b 라 정의하고, 이를 Fig. 5의 모니터링 결과에서 빼면 Fig. 9(a)와 같은 보정된 소산계수 $D^*(=D-D_b)$ 를 얻을 수 있다.

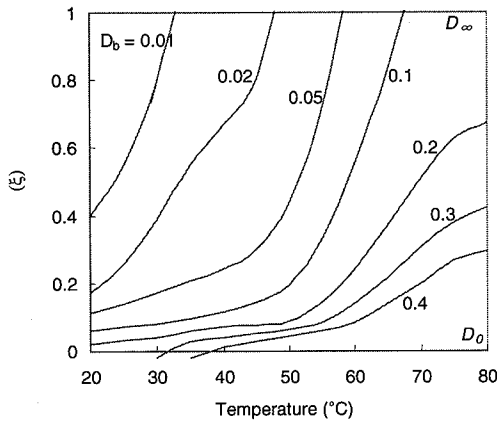


Fig. 8 Degree of cure ξ at $d\xi/dt = 0$ w.r.t. the dissipation factor and temperature.

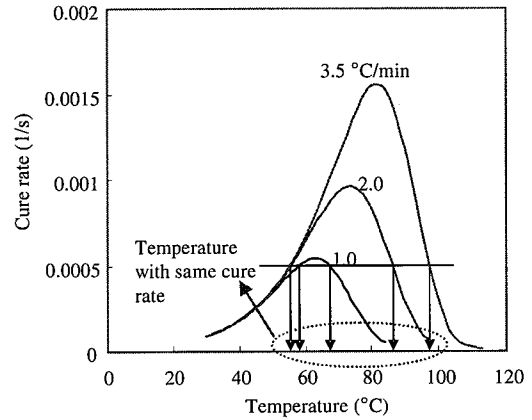
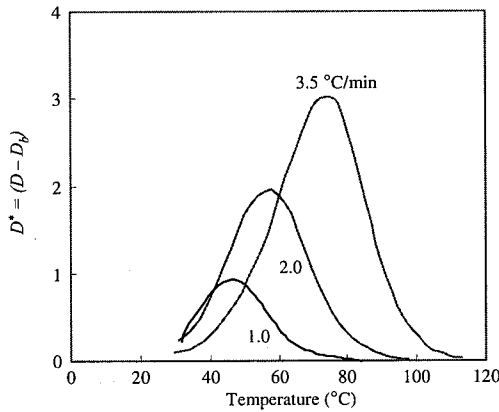
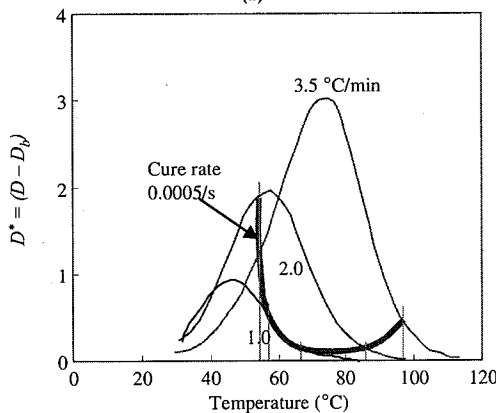


Fig. 10 Cure rate $d\xi/dt$ estimated by DSC w.r.t. the temperature increase rate.



(a)



(b)

Fig. 9 (a) Modified dissipation factor $D^*(= D - D_b)$ w.r.t. the temperature increase rate (b) Contour of (T, D^*) for the same cure rate.

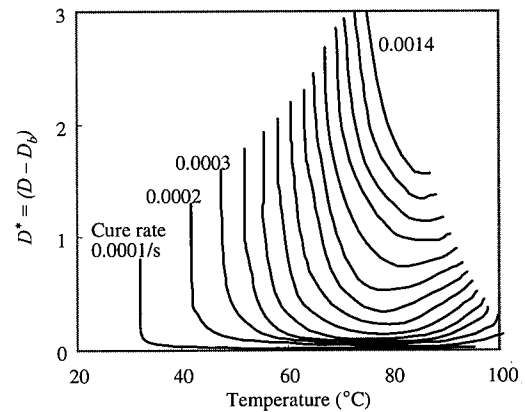


Fig. 11 Contour of the cure rate $d\xi/dt$ w.r.t. the temperature and modified dissipation factor, D^* .

이렇게 보정된 소산계수는 경화도와는 관계없이 에폭시의 경화율과 온도에 대한 성분만을 포함하게 된다. 경화율이 0인 이상적인 값 D_b 는 보정을 위한 기준선이 되며, 온도와 경화도(DSC로 얻은)에 대한 D_b 는 Fig. 8과 같다. 식 (2)와 (4)를 이용하여 1.0~3.5 °C/min의 범위에서 경화율의 변화를 나타내면 Fig. 10과 같으며, Fig. 9(a)의 보정된 소산계수와 유사한 경향을 보이지만 최대값이 조금 높은 온도에서 나타남을 알 수 있다.

소산계수와 경화율 $d\xi/dt$ 의 관계를 분석하기 위하여 온도와 보정된 소산계수에 대한 경화율 $d\xi/dt$ 의 등고선 그래프를 다음과 같은 방법을 통해 구했다.

a) Fig. 10으로부터 각각의 경화율 값에서의 온도 데이터를 얻는다.

b) Fig. 9(b)에서 앞서 얻은 온도 데이터에 상응하는 보정된 소산계수 값을 찾는다.

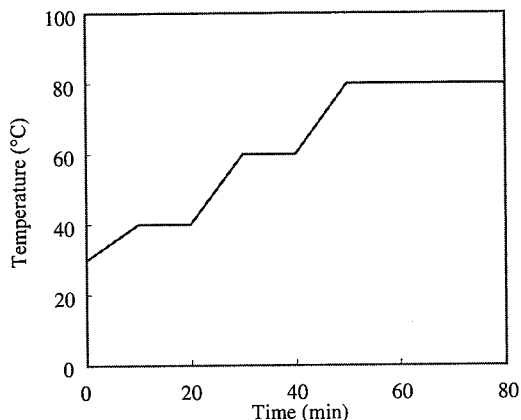
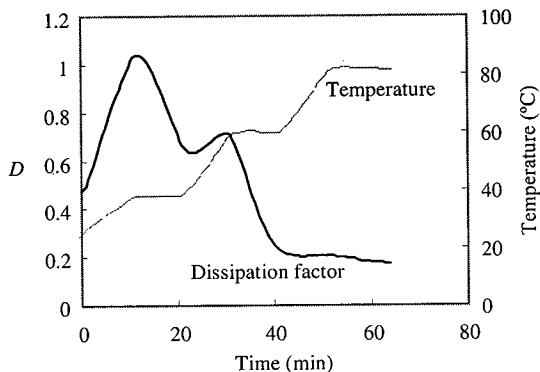
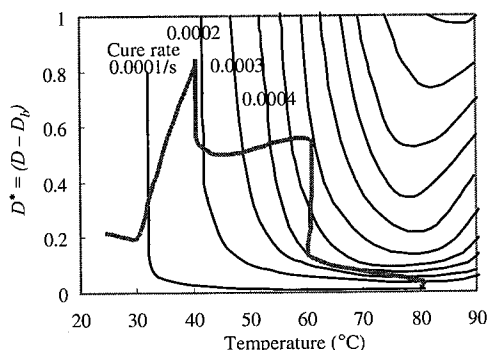


Fig. 12 Cure cycle for the epoxy adhesive.



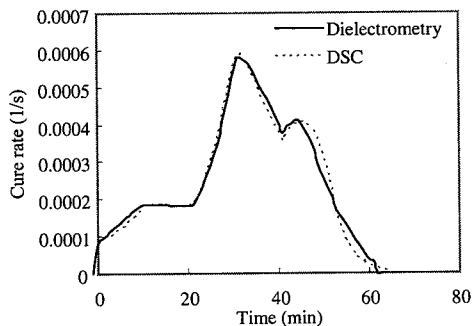
(a) D and temperature



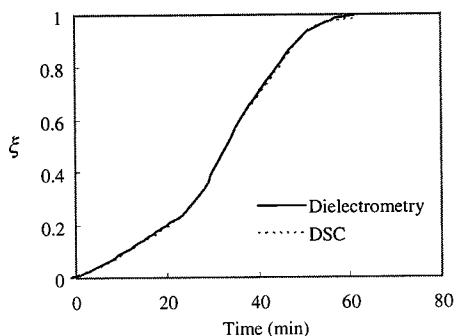
(b) D^* and contour of cure rate

Fig. 13 Cure monitoring results for the adhesively bonded joint with the cure cycle of Fig. 12.

- c) Fig. 9(b)와 같이 같은 경화율을 갖는 (T, D^*) 점들을 연결한다.
 d) 각각의 경화율에 대하여 c)의 작업을 반복하면 Fig. 11의 경화율의 등고선 그래프를 얻는다.



(a) Cure rate $d\xi/dt$.



(b) Degree of cure ξ .

Fig. 14 Comparison between cure monitoring results by dielectrometry and DSC.

이를 통하여 임의의 시점에서 온도와 소산계수를 측정하면 경화율 $d\xi/dt$ 를 얻을 수 있고 이를 적분하여 경화도를 얻을 수 있다. 이상의 결과를 검증하기 위하여 Fig. 12의 경화 사이클로 접착제를 경화시키며 소산계수와 온도를 측정하였고, 본 연구의 방법을 이용해 경화도를 계산하였다.

유전기법으로부터 얻은 접착 조인트의 경화 모니터링 결과는 Fig. 13(a)와 같으며, 다음과 같은 방법으로 측정된 소산계수로부터 경화율을 계산하였다. 먼저, 초기상태 (Time=0)에서 경화도가 0이라고 가정하고, 이 때의 소산계수와 온도를 측정한다. 이로부터 Fig. 8에서 D_b 를 얻는다. 경화 모니터링으로 측정한 소산계수 D 에서 D_b 를 제하여 $D^*(=D-D_b)$ 를 계산하면, 임의의 시점에서 D^* 와 온도에 따른 경화율 $d\xi/dt$ 를 Fig. 11로부터 얻을 수 있다. Fig. 13(b)는 계산된 D^* 와 소산계수의 등고선 그래프를 함께 보여준다. 이렇게 얻은 경화율을 적분하여 경화도를 구할 수 있으며, 이를 반복하여 경화시간에 따른 경화도의 변화를 얻을 수 있다.

Fig. 14(a)는 Fig. 13(b)의 유전기법으로부터 구한 경화율과 식 (2)와 (4)의 DSC 시험으로부터 구한 경화율을 나타내고 있으며, 45 분 이후의 결과에 약간의 오차가 발생하였다. 이는 Fig. 13(b)의 60 °C 이후의 결과로서 등고선의

간격이 매우 조밀하여 측정상의 오차가 경화율의 예측 값에 영향을 주었기 때문으로 판단된다. 또한, Fig. 14(b)는 Fig. 14(a)의 결과를 적분하여 구한 경화도를 나타낸다. 두 결과는 거의 같은 값을 보이며, 최대 오차는 1.5 % 이내였다. 본 결과로부터 Fig. 11의 경화율 등고선도가 실제 경화율 및 경화도를 잘 예측함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 에폭시 접착제의 유전특성을 이용하여 원통형 단일 겹치기 접착 조인트의 경화과정을 실시간으로 모니터링 하고 이를 분석하는 방법을 제시하였다. 별도의 센서를 삽입하는 기존 방법은 삽입된 센서가 구조물의 결합으로 작용하는 경우가 많지만, 본 연구의 기법은 접착 조인트 자체를 경화 모니터링 센서로 사용하므로 구조물에 영향을 미치지 않았다. 사용된 에폭시 접착제의 경화과정을 간단하게 파악하고, DSC 시험을 통해 경화 반응식 모델을 정립하였다.

유전기법을 통해 얻은 소산계수와 DSC로부터 얻은 경화율 간의 상관 관계를 연구하여, 임의의 상태의 소산계수와 온도로부터 경화율을 예측할 수 있었으며, 다양한 경화 사이클에 대해 접착 조인트의 경화 모니터링을 수행하여 결과를 검증하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업과 두뇌한국21사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

참고문헌

- Enns, J. B. and Gillham, J. K., "Time-Temperature-Transformation (TTT) Cure Diagram: Modeling the Cure Behavior of Thermosets," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 28, 1983, pp. 2567-2591.
- Tung, C. Y. M. and Dynes, P. J., "Relationship between Viscoelastic Properties and Gelation in Thermosetting Systems," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 27, 1982, pp. 569-574.
- Bang, K. G., Kwon, J. W., Lee, D. G. and Lee, J. W., "Measurement of the Degree of Cure of Glass Fiber Epoxy Composites Using Dielectrometry," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, 2001, pp. 209-214.
- McDonough, W. G., Fanconi, B. M., Mopsik, F. I. and Hunston, D. L., "A Role of Cure Monitoring Techniques for On-line Process Control," *Proceedings of the 6th Annual ASM/ESD Advanced Composite Conference*, Detroit, MI, 1990, pp. 637-644.
- Kranbuehl, D. E., Delos, S. E., Hoff, M. S., Whitham, M. E. and Weller, L. W., "Dynamic Dielectric Analysis for Nondestructive Cure Monitoring and Process Control," *Proceedings of the 2nd Conference on Advanced Composites*, 1987, pp. 61-67.
- Wetton, R. E., Foster, G. M., Smith, V. R., Richmond, J. C. and Neill, J. T., "Dielectric Monitoring of Epoxy Cure-Detailed Analysis," *33rd International SAMPE Symposium*, Anaheim, CA, 1988, pp. 1285-1294.
- Sichina, W., Marcozzi, C. L. and Gill, P. S., "Dielectric Analysis of Polymer Materials," *35th International SAMPE Symposium*, Anaheim, CA, 1990, pp. 1241-1250.
- Mallick, P. K., *Fiber Reinforced Composites*, Marcel Dekker, New York, 1988, pp. 415-425.
- Day, D. R. and Shepard, D. D., "Correlation of Dielectric Cure Index to Degree of Cure for 3501-6 Graphite Epoxy," *Proceedings of the 5th Annual ASM/ESD Advanced Composites Conference*, Dearborn, MI, 1989, pp. 147-151.
- Maistros, G. M., Bucknall, C. B., "Modeling the Dielectric Behavior of Epoxy Resin Blends during Curing," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 34, No. 20, 1994, pp. 1517-1528.
- Kim, J. S. and Lee, D. G., "On-Line Cure Monitoring and Viscosity Measurement of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, 1993, pp. 405-416.
- Kim, J. S. and Lee, D. G., "Measurement of the Degree of Cure of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 13, 1996, pp. 1436-1457.
- Kim, J. S. and Lee, D. G., "Analysis of Dielectric Sensors for the Cure Monitoring of Resin Matrix Composite Materials," *Sensors and Actuators B*, Vol. 30, 1996, pp. 159-164.
- Stephan, F., Duteurtre, X. and Fit, A., "In-Process Control of Epoxy Composite by Microdielectrometric Analysis. Part II: On-Line Real-Time Dielectric Measurements during a Compression Molding Process," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 38, No. 9, 1998, pp. 1566-1571.
- Kwon, J. W. and Lee, D. G., "The Effects of Surface Roughness and Bond Thickness on the Fatigue Life of Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 14, 2000, pp. 1085-1102.