

# 유리섬유/폴리에스터 복합재료를 위한 유전 경화 모니터링

김형근\* · 김진국\* · 이대길\*

## Dielectric Cure Monitoring for Glass/Polyester Prepreg Composites

Hyoung Geun Kim, Jin Kook Kim and Dai Gil Lee

**Key Words :** Glass/Polyester (유리섬유/폴리에스터), Cure Monitoring (경화 모니터링), Dielectric Property (유전 성질), Degree of Cure (경화도), Dissipation Factor (소산 계수)

### Abstract

The on-line cure monitoring of fiber reinforced thermosetting resin matrix composite material was performed for the better quality and productivity during manufacturing. Since the dissipation factor measured by dielectrometry method is dependent on the degree of cure and temperature of resin, in this study, a new method to obtain the degree of cure during on-line cure monitoring for glass/polyester composites was developed by employing a combination function of the temperature and the dissipation factor. Two sensor signals from a K-type thermocouple and an interdigitated dielectric sensor were processed during curing process under various cure cycles. The DSC (Differential Scanning Calorimetry) data was also used for the reference of degree of cure.

#### 기호설명

- $T^*$  Normalized Temperature
- $D^*$  Normalized Dissipation Factor
- $T_f$  Focal Temperature
- $D_f$  Dissipation Factor at  $T_f$
- $k$  Dissipation Factor Coefficient
- $m$  Temperature Exponent
- $n$  Degree of Cure Exponent
- $S_i$  Initial Slope in the Cubic Relation
- $S_r$  Relative Slope in the Cubic Relation

### 1. 서론

복합재료에 대한 경화 모니터링은 제품의 품질과 공정상의 생산성을 높이기 위해 필요하다. 빠른 시간 내에 균일하고 경화상태가 좋은 제품을 만드는 것은 제품의 경쟁력을 높여 준다. 경화 모니터링 방법으로는 DSC (differential scanning calorimetry), DMA (dynamic mechanical analysis), 광학 기법 (optical method) 및 유전 기법

(dielectrometry) 등이 쓰이고 있다. DSC는 등온 또는 동적 시험에서의 발열량을 측정하여 경화도를 측정하는 방법이고, DMA는 재료의 동적특성이 온도 변화에 대하여 변화하는 양상을 측정하는 방법이며, 광학 기법은 광섬유를 사용하여 빛의 굴절률 변화에 의한 경화도를 측정하는 방법이다. 그리고 유전기법은 수지가 경화에 의해 액체상태에서 고체상태로 변화하기까지의 유전적 성질의 변화를 측정하여 경화도를 구하는 방법이다.

DSC 방법은 실제 공정에 대한 실시간 모니터링이 어려운 특징이 있으며, 광학 기법은 미세한 광섬유를 사용하므로 재료의 손상을 최소한으로 줄일 수 있는 장점을 가지고 있으나, 경화 모니터링에 사용하기에는 감도가 약한 단점이 있다. Yilmaz<sup>(1)</sup>, Dwyer<sup>(2)</sup>, Kalra<sup>(3)</sup> 등은 여러가지 센서들에 의한 신호의 해석을 시도하였는데, 이 중에서 유전율을 통한 방법이 간편성과 적용성 측면에서의 장점 때문에 경화 모니터링에 보편적으로 쓰이고 있다.<sup>(4-14)</sup> 또한 이러한 경화 모니터링은 복합재료 제조 전문가 시스템<sup>(15, 16)</sup>에 응용되기도 한다.

물질의 유전특성은 전기를 통하는 성질 (conductance)과 이를 저장하는 성질 (capacitance)

\* 한국과학기술원 기계공학과

의 조합으로 표시될 수 있으며, 이로부터 수치 내에 존재하는 쌍극자 (dipole)들의 배향<sup>(1, 4)</sup>과 이온의 이동<sup>(5)</sup>을 통한 점성저항을 관찰하고 이로부터 경화도를 해석하는 방법으로 사용되어 왔다.

$$R = L/(\omega A \epsilon'' \epsilon_0), \quad C = (\epsilon' \epsilon_0 A)/L \quad (1)$$

수지에 대한 유전특성 (dielectric permittivity  $\epsilon'$ , loss factor  $\epsilon''$ )에 대한 식은 다양하게 제안되기도 하였다<sup>(6, 7)</sup>. 그러나 위와 같은 문헌에서 제안된 식들은 각각의 수치 시스템에만 적용이 제한되기도 한다.

점도 변화에 기인한 유전 특성의 변화는 이온 점도와 유리전이온도의 관계<sup>(8)</sup>, 경계층 정전용량에 측정에 의한 접착층의 경화 모니터링<sup>(9)</sup>등 다양한 방법으로 연구되고 있다. 이러한 방법은 이온점도와 실제점도를 측정하여 그 상관관계로부터 경화도를 추정하는 방법으로서 경화중의 점도 측정이 용이한 에폭시 수지 등에서 많이 적용되어 왔다<sup>(3, 7, 9-13)</sup>. 그러나 폴리에스터 프리프레그 등과 같이 경화 초기에 점도가 급격히 상승하게 되면 점도를 통한 경화도의 분석이 사실상 불가능하다. 이 때는 소산계수 (dissipation factor,  $D$ )등과 같은 인자를 분석하는 것이 효과적인 방법이 될 것이다.

$$D = \tan \delta = \epsilon''/\epsilon' = 1/(\omega RC) \quad (2)$$

소산 계수에 의한 경화도의 분석이 Kim등에 의해 수행되었다<sup>(14)</sup>. 최대 소산계수점을 기준으로 하여 그 변화량을 경화도의 함수로서 표현하였다. 그러나 소산계수는 경화도 뿐만 아니라 온도에 의해서도 영향을 받으므로, 이의 분석방법에 있어서 등온경화 (isothermal cure) 조건으로 해석할 경우는 온도분포가 일정하지 않을 때의 현상에 대한 설명이 어렵게 된다. 따라서 온도변화에 의한 영향이 경화도 분석에 포함되어야 한다.

본 논문의 목적은 유리섬유/폴리에스터 복합재료에 대하여, 유전기법에서의 변수 중 하나인 소산계수 (dissipation factor)와 온도간의 복합적인 함수로부터 경화도를 정량적으로 산출하는 것이다. 경화 과정의 실시간 모니터링 (on-line cure monitoring)은 이러한 방법으로 접근할 수 있다. 첫째, 유리섬유/폴리에스터 복합재료의 경화과정에 대한 열분석과 유전기법을 같은 경화 조건에서 진행하였다. 동적경화 (dynamic cure)와 2단계 경화 (2-step cure)과정에서 분석을 진행하였다. 그리고, 그 관계를 정립하기 위하여 표준매개변수

(normalized parameters)의 개념을 도입하였다. 마지막으로, 반복적인 실험에서 같은 결과를 산출하기 위한 변수분리를 설명하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료 및 장비

유리섬유/폴리에스터 프리프레그 (preg)는 (주)강남정공 (한국, 진영)에서 제조된 것을 사용하였다. S2-유리섬유가 평직 (plain weave)으로 제작되어 있으며, 경사 (warp) 및 위사 (fill)의 폭은 각각 5.0mm이다. 이는 불포화 폴리에스터 (unsaturated polyester) 수지로 함침되었는데, 이 수지는 HET산 (hexachloro-endomethylene-tetrahydrophthalic acid)과 DAP (diallyl phthalate)를 함유한 난연성의 수지로서 135°C에서 경화하는 특성을 갖고 있다. 한 층의 두께는 약 0.6mm이며, 섬유부피분율 (fiber volume fraction)은 수지를 연소시키는 방법으로 측정할 결과 51~54%의 범위를 가지고 있었다.

DSC 장비는 미국 TA Instrument사 (미국, Delaware)의 DSC 2910을 이용하였고 점도측정은 Rheometric Dynamic Spectrometer (미국)로 측정하였으며, 유전을 측정장비 및 측정 프로그램은 (주)라컴텍 (한국, 대전)의 제품을 이용하였다. 유전 센서는 Fig. 1과 같이 마주보는 전극끼리 각지를 끼운 형태 (interdigitated type)로 제작하여 사용하였다.

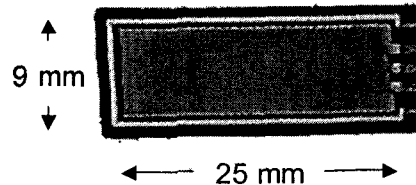


Fig. 1 Grid shape of the interdigitated dielectric sensor

### 2.2 실험방법

유리섬유/폴리에스터 복합재료에 대한 경화공정을 DSC 및 유전을 측정방법을 통하여 동일한 조건에서 관찰하였다. DSC 시험결과 2.0°C/min의 승온속도에서 180°C에 도달하였을 때 경화반응이 종료되는 것을 알 수 있었다. 따라서 0.5, 1.0 그리고 2.0°C/min의 세가지 승온속도를 사용하여, 상온에서부터 180°C까지 0.2°C 간격으로 데이터를 분석하였다. 1회당 사용한 재료의 양은 10~15mg이었다.

경화에 따른 점도변화를 참고하기 위하여 프리프레그에서 폴리에스터 수지만을 추출하여 Disc and Plate type의 점도측정 방법으로 온도에 따른

점도 변화를 관찰하였다. 아세톤을 용매로 하여 프리프레그의 수지를 반복적으로 용해한 후, 그 용액을 65°C의 진공오븐내에서 5시간 건조시켜 아세톤을 제거하는 방법으로 수지를 추출하였다. 이 수지를 다시 상온으로 냉각시킨 다음 점도계를 이용하여 3가지 승온속도로 점도를 측정하였다. Disk 간격 1.8mm, Torsional rate 10rad/sec, 최대변형을 50%, sampling rate는 6초 간격으로 점도를 측정하였다.

유전 기법을 이용한 경화 모니터링 방법으로 센서를 프리프레그 사이에 삽입하여 오토클레이브에서 경화를 진행하였다. 먼저 유리판 위에 유리 섬유/폴리에스터 프리프레그 1장을 적층하고 그 위에 Fig. 2와 같이 유전센서 (dielectric sensor)와 열전대 (thermocouple)를 밀착시킨 후, 다시 프리프레그 1장을 적층하여 전체를 진공백으로 둘러쌌다. 이렇게 총 2장 (1.2mm)의 적층으로 경화과정에서의 열전달을 원활히 하고, 발열에 의한 온도과승을 억제하도록 하였다.

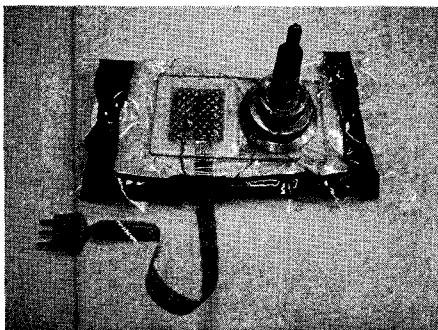


Fig. 2 Inserted thermocouple and dielectric sensor

경화중의 수축이나 열응력 등에 의한 복합재료의 변형에 의해서 유전센서의 전기용량에 영향을 받을 수 있으므로, 이 변형을 방지하는 것은 매우 중요하다. 이를 위하여 복합재료를 적절한 재질의 판재위에서 적층을 하여 진공백을 씌우게 된다. 본 실험에서는 유리판을 선택하였는데, 이는 다음의 2가지 원인에 기인하였다.

첫째, 알루미늄, 철 등과 같은 금속판을 사용할 경우, 유전센서와의 사이에서 추가적인 전기용량 (electrical capacitance)으로 인한 소산계수의 변화를 주게 된다. 그러나 유리와 같은 비전도성 물질을 사용할 경우 이러한 문제를 해결할 수 있다. 둘째, 고분자 수지로 된 재질을 사용할 경우, 경화온도 범위내 (25~180°C)에서 통상의 고분자 재료가 갖는 유리전이온도 (glass transition temperature)등으로 인하여, 복합재료 자체의 경화과정에 의한 소산계

수의 변화 이외의 외란이 발생하게 된다. 그러나 유리 재질은 이 온도범위에서 전이온도를 갖지 않기 때문에 일정한 주위환경을 구성하여 준다.

진공백을 오토클레이브 안에 설치하고 Fig. 3과 같이 모니터링 회로를 구성하여 DSC 실험과 같은 3가지 승온 속도에서 경화를 진행시켜 6초 간격으로 온도와 소산계수를 측정하였다.

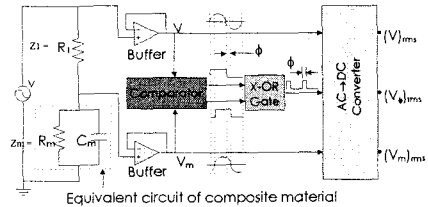


Fig. 3 Schematic diagram of cure monitoring system

기존의 경화 모니터링 방법에 의하면 유전을 측정장비에서 여러가지 주파수에 대한 scanning 자료로부터 이온전도도를 구하고 이로부터 이온 점도를 환산하고, 점도계 측정에 의한 점도로 다시 전환한 후, DSC를 이용한 경화도를 유도하는 방법이 대표적으로 사용된다.

그러나 본 연구에서 사용한 프리프레그는 2% 경화도 이후의 값을 측정할 수 없으므로 이와 같은 방법을 통한 경화도의 추정은 불가능하다. 따라서, DSC 결과에서 얻은 온도-경화도 관계와 유전을 측정장비에서 얻은 온도-소산 계수간의 관계로부터 직접적으로 온도-경화도-소산계수간의 상호 관계를 유도하였다.

소산계수는 경화도 뿐만 아니라 온도에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 이 두 변수의 영향을 분리하기 위해서 동적경화방법을 통한 실험을 수행하였다. 특히 두꺼운 복합재료의 경우에 열전달 조건 및 발열반응에 의해 경화시 온도가 일정하게 유지되지 못하므로, 이렇게 개발된 방법은 온도가 변할 때에도 효과적으로 쓰일 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실험결과

Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 세가지 승온 조건에서의 온도에 따른 경화도, 점도 그리고 소산계수의 변화를 나타낸 것이다. 경화반응은 110~120°C의 온도에서 시작하여 180°C전후에서 종료되는 것을 알 수 있다.

점도의 변화는 상온에서 출발하여 경화반응이 시작되기 전인 100°C 근방까지 점차적으로 감소하

다가 반응의 초기에 다시 급격히 상승하여 110~120°C의 온도 (경화도 기준 2% 내외)에서는 과하중으로 인해 점도측정이 불가능한 영역까지 증가하는 경향을 보였다. 따라서, 이 온도이후의 점도측정은 사실상 불가능하였다.

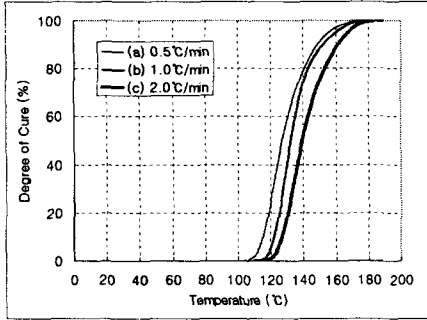


Fig. 4 Degree of cure with different heating rate

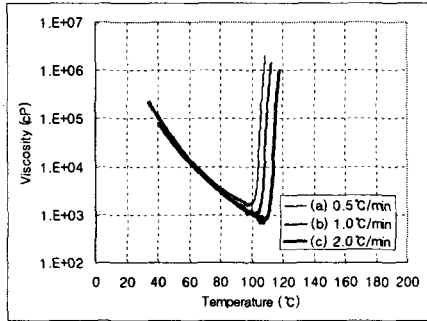


Fig. 5 Viscosity with different heating rate

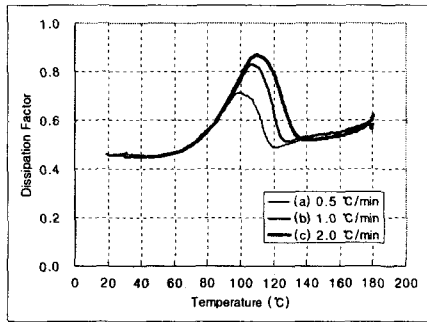


Fig. 6 Dissipation factor with different heating rate

동적시험의 경우는 등온시험과는 달리 공정초기에 상온에서의 물성변화부터 정확히 측정이 가능하고 최대 경화도는 100%까지 진행이 가능하므로 등온발열량을 계산할 필요가 없다. 그러나 온도와 경화도가 식 (3)과 같이 동시에 변화하므로, 이 두 변수가 소산계수에 미치는 영향을 적절히 분리하는 방법이 필요하다.

온도 및 경화도의 영향을 식 (4)와 같이 서로 분리하기 위해 다음과 같은 순서로 분석을 진행하였다.

첫째, 미경화 (0%) 상태와 완전경화 (100%) 상태에서 온도에 따른 소산계수의 변화를 분석하였다. Fig. 7과 같이 미경화 상태는 초기 승온구간 (40°C~100°C)에서, 그리고 완전 경화 상태는 최종 냉각구간 (170°C~40°C)에서의 신호로부터 얻었다. 상온에서 가까운 영역에서는 온도의 변화에 대하여 소산계수가 변하지 않는 영역이 존재하며 그 이후의 관계도 선형적으로 나타나지 않으므로 절대온도 ( $T$ )와 소산계수 ( $D$ ) 자체를 변수로 사용하지 않고 아래의 식 (5), (6)과 같은 무차원 매개변수  $T^*$ 와  $D^*$ 의 개념을 도입하였다.

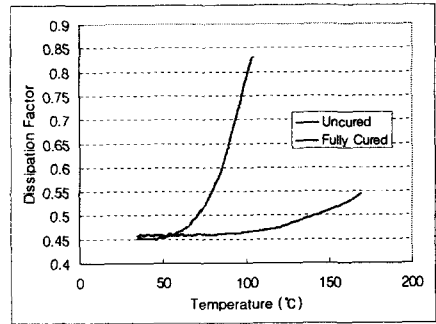


Fig. 7 Dissipation factor of uncured or fully cured specimen

$$D = f(\alpha, T) \quad (3)$$

$$D^* = f_1(\alpha) f_2(T^*) \quad (4)$$

$$T^* = (T - T_0) / T_0 \quad (5)$$

$$D^* = (D - D_0) / D_0 \quad (6)$$

위의 식에서  $T_0$ 와  $D_0$ 는 소산계수가 온도의 영향을 받지 않는 최고온도 및 그 온도에서의 소산계수가 된다.  $T_0$ 가 이동함에 따라 기울기가 변화하며, 미경화 상태와 완전경화 상태에서의 관계가 동일하게 나타나지 않는 결과를 보일 수 있다. 그러나 특정한 온도 ( $T_0 = 42.7^\circ\text{C}$ )에서는 Fig. 8과 같이 동일한 기울기를 가져오게 된다. 따라서  $T_0$ 를 이 온도로 결정하였으며 이를 초점 온도 (focal temperature,  $T_f$ )라 명명하였다. 이에 따라  $D_0$ 도  $D_f$ 로 결정된다. 따라서 식 (5), (6)은 다음과 같이 식 (7)과 (8)로 표현된다.

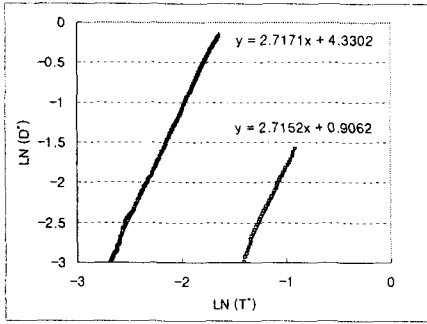


Fig. 8 Normalized relationship for  $T_o = 42.7\text{ }^\circ\text{C}$

$$T^* = (T - T_f) / T_f \quad (7)$$

$$D^* = (D - D_f) / D_f \quad (8)$$

Fig. 8로부터 표준화 매개변수간의 관계가 식 (9), (10)과 같이 정리되었다. 이 중  $S_i$  는 온도에 관계없이 경화도에만 관계하는 변수이다.

$$\ln(D^*) = m \ln(T^*) + \ln(S_i) \quad (9)$$

$$D^* = S_i (T^*)^m \quad (10)$$

둘째, 부분경화에 대하여는 서로 다른 승온속도의 데이터를 이용하였다. DSC 실험결과로부터 특정한 경화도 (2.5%, 5.0%, 10%, 20%, 40%)를 나타내는 온도를, 세 가지 승온속도의 그래프로부터 추출하여 Fig. 9에 data point로 표시하였다. 동일한 경화도를 나타내는 data point 들을 같이 묶어서 내삽 (interpolation)한 기울기 (slope)로부터 경화도 ( $\alpha$ )-기울기 ( $S_i$ )간의 관계를 Fig. 10와 같이 유도하여 식(11), (12)에 나타내었다.

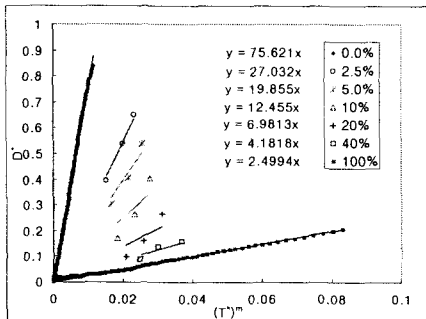


Fig. 9 Linear interpolation to find cure effect

$$\ln(S_i) = n \ln(\alpha) + \ln(k) \quad (11)$$

$$S_i = k (\alpha)^n \quad (12)$$

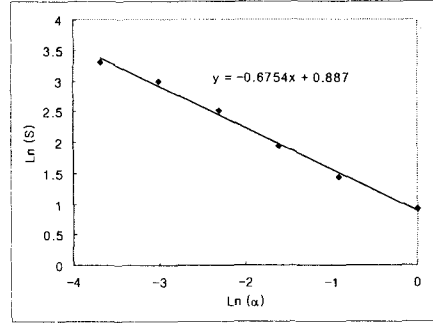


Fig. 10 Relationship between the degree of cure ( $\alpha$ ) and the slope ( $S_i$ )

따라서 표준화 매개변수는 아래의 식 (13)과 같이 정리되며, 역으로 경화도 ( $\alpha$ )는 식 (14)와 같은 매개변수  $D^*$  와  $T^*$ 의 조합으로 계산된다.

$$D^* = k (\alpha)^n (T^*)^m \quad (13)$$

$$\alpha = [D^* / \{k (T^*)^m\}]^{1/n} \quad (14)$$

위의 식에 의하면, 경화도는 시간을 기준으로 한 그래프 (Fig. 11)나 온도를 축으로 한 그래프 (Fig. 12)로 나타낼 수 있다. 이것은 DSC 결과와 일치하는 경향을 보여준다.

소산계수와 온도의 복합작용에 의한 접근방법의 장점은 시간에 따른 온도의 변화에 관계없이 유용하게 사용될 수 있다. 그러나, 초기의 미세한 경화 반응단계에서의 소산계수의 변화가 비교적 큰 반면, 약 70%이상의 경화도에서는 극히 미세하기 때문에 정확한 경화도의 계산이 어렵다는 단점을 지니고 있다. 따라서 이 방법의 용도는 최종경화도의 추정에 있기보다는 초기 경화 진행에서의 경화 모니터링과 이를 통한 경화 사이클 제어의 용도로 사용하기에 알맞은 방법이라 할 수 있다.

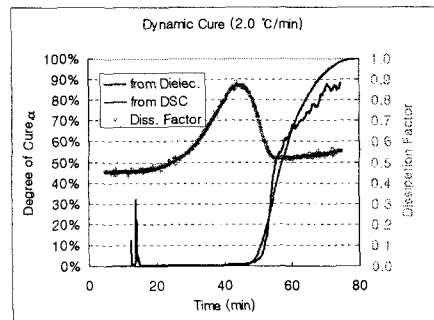


Fig. 11 Time base expression (dynamic cure)

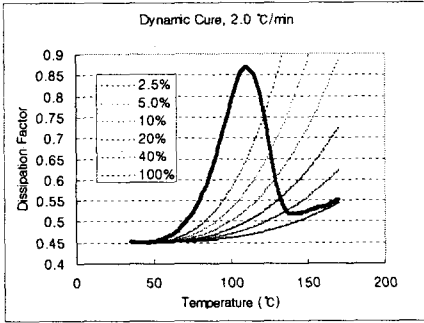


Fig. 12 Temperature base expression (dynamic cure)

개별 센서 용량 및 시편 접촉상태의 미소한 차이에 따라 초기 소산계수값 ( $D_0$ )과 그 증가율 ( $S_0$ )이 시편마다 약간씩 변동하는 경향을 보인다. 이 차이를 고려하지 않으면 경화도 계산 결과가 공정상의 모든 범위에 걸쳐 실제보다 높게, 또는 낮게 추정될 여지가 있다. 따라서 개별 시험시에 추출해야 하는 매개변수를 고려하여 모든 시험에 적용할 수 있도록 하여야 한다. 아래와 같은 식 (15)에서 변수를 나누어 적용하면 그와 같은 변화를 제거할 수 있다.

$$S_i = k(\alpha)^n = S_0 k'(\alpha)^n = S_0 S_r \quad (15)$$

선행 시험은 최소한 1회의 DSC 실험과 1회의 소산 계수 측정으로 이루어지며, 이 과정에서 결정되어야 할 값은  $T_j$ ,  $k'$ ,  $m$  그리고  $n$ 의 네 가지이다. 그리고, 실제 공정에서 개별적으로 산출되어야 할 변수는  $D_0$ 와  $S_0$ 의 두 가지이다.

최종적으로 2단계 경화 사이클에서의 경화도를 검증하였다. 실제로 2단계 경화공정에서의 관계를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다.

소산계수만을 기준으로 경화도를 계산하던 기존의 방법에서는 시간축 그래프에서의 변곡점을 경화 시작점으로 기준하며 경화가 진행됨에 따라 소산계수가 감소하는 양으로 등온경화도 ( $\beta$ )를 계산한다. 또한 변곡점 직후 최대점까지의 소산계수 증가는 경화도의 증가가 소산계수의 감소와 관계되도록 일관적인 방법으로 표현될 수 없기 때문에, 이 최고점을 기준으로 두 구간으로 나누어 등온경화도를 계산하게 된다. 그러나 Fig. 13과 같은 경우에서는 1단계 온도유지구간 전후에 2개의 변곡점이 나타나며, 2단계 온도유지구간 직전에 소산계수가 약간 증가하는 경향을 보인다. 따라서 이 방법으로는 설명하기 어려운 부분이 존재한다.

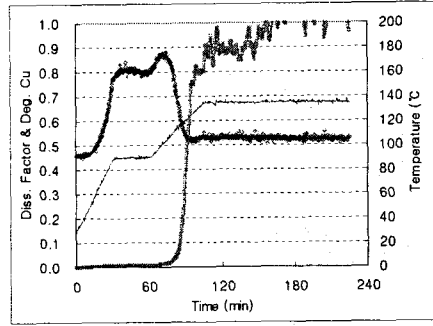


Fig. 13 Time base expression (2-step cure)

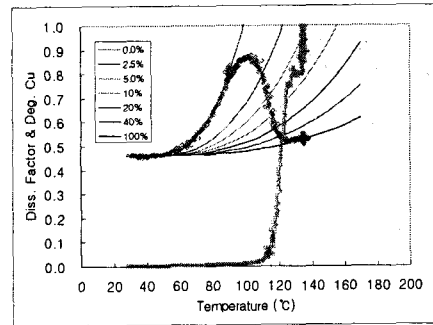


Fig. 14 Temperature base expression (2-step cure)

따라서, 이러한 경향은 소산계수와 온도의 복합적인 작용으로 경화도를 계산하는 방법으로서 완전하게 설명될 수 있다. Fig. 14와 같은 온도축 그래프에서는 변곡점이 1개로 나타나며 경화후반의 소산계수의 증가는 온도의 증가가 원인인 것으로 해석된다. 그리고 최고 소산계수점을 기준으로 구간을 나눌 필요없이 전체 구간에 대하여 하나의 식으로 표현할 수 있는 장점을 가지고 있다.

#### 4. 결론

- (1) 유전센서와 열전대에 의한 신호를 분석하여 소산 계수와 내부온도를 구하고 이로부터 재료의 경화상태를 해석하는 방법으로 실시간 경화모니터링이 가능하였다.
- (2) 이온점도도를 이용한 기존의 방법으로 모니터링하기 어려운 수지를 대상으로 한 경화도의 측정이, 소산계수로부터 경화도를 해석하는 방법을 통해서 가능하도록 하였다.
- (3) 소산계수에 대한 온도와 경화도 각각의 영향을 확인하고 이의 복합적인 작용을 분석하였기 때문에, 경화과정 전반에 걸쳐 온도가 변화하는 경우의 경화도 측정을 일관적인 해석방법으로 접근할 수 있었다.

- (4) 소산계수의 변화가 경화 진행의 초기에서 민감하므로, 경화 모니터링과 이를 통한 경화 사이클 제어의 용도로 사용하기에 알맞은 방법임을 확인할 수 있었다.
- (5) 실제 공정에서 변동할 수 있는 인자를 고려하였기 때문에, 실제 공정에서 경화도 측정의 적용성을 입증하였다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원 (위탁 연구)에 의하여 이루어진 것입니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Yilmaz, S., Wirges, W., Bauer-Gogonea, S., Bauer, S., Gerhard-Multhaupt, R., Michelotti, F., Toussaere, E., Levenson, R., Liang, J. and Zyss, J., 1997, "Dielectric, Piezoelectric, and Electro-optic Monitoring of the Cross-linking Process and Photoinduced Poling of Red Acid Magly," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 70, pp.568~570.
- (2) Dwyer, M. J. O., Maistros, G. M., James, S. W., Tatam, R. P. and Partridge, I. K., 1998, "Relating the State of Cure to the Real-time Internal Strain Development in a Curing Composite using in-fibre Bragg Gratings and Dielectric Sensors," *Meas. Sci. Technol.* Vol. 9, pp.1153~1158.
- (3) Kalra, L., Perry, M. J. and Lee, L. J., 1992, "Automation of Autoclave Cure of Graphite-Epoxy Composites," *J. Compos. Mater.* Vol. 26, pp.2567~2584.
- (4) Bauer-Gogonea, S., Wirges, W., Bauer, S., Gerhard-Multhaupt, R., Liang, J. and Zyss, J., 1996, "Electrical Determination of the Degree of Cross-linking in a Poled Non-linear Optical Polymer," *Chem. Phys. Lett.* Vol. 262, pp.663~667.
- (5) Day, D. R., Shepard, D. D. and Craven, K. J., 1990, "In-process End Point Determination of Epoxy Resin Cure," *Proc. 22<sup>nd</sup> Int. SAMPE Tech. Conf.*, pp.724~732.
- (6) Mijovic, J., Kenny, J. M., Maffezzoli, A., Trivisano, A., Bellucci, F. and Nicolais, L., 1993, "The Principles of Dielectric Measurements for In Situ Monitoring of Composite Processing," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 49, pp.277~290.
- (7) Maistros, G. M. and Bucknall, C. B., 1994, "Modeling the Dielectric Behavior of Epoxy Resin Blends During Curing," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 34, pp.1517~1528.
- (8) Day, D. R., Lewis, T. J., Lee, H. L. and Senturia, S. D., 1985, "The Role of Boundary Layer Capacitance at Blocking Electrodes in the Interpretation of Dielectric Cure Data in Adhesives," *J. Adhesion*, Vol. 18, pp.73~90.
- (9) Mijovic, J. and Yee, C. F. W., 1994, "Use of Complex Impedance to Monitor the Progress of Reactions in Epoxy/Amine Model Systems," *Macromolecules*, Vol. 27, pp.7287~7293.
- (10) Maistros, G. M. and Partridge, I. K., 1995, "Dielectric Monitoring of Cure in a Commercial Carbon-fibre Composite," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 53, pp.355~359.
- (11) Casalini, R., Corezzi, S., Livi, A., Levita, G. and Rolla, P. A., 1997, "Dielectric Parameters to Monitor the Crosslink of Epoxy Resins," *J. Appl. Polym. Sci.* Vol. 65, pp.17~25.
- (12) Nixdorf, K. and Busse, G., 2001, "The Dielectric Properties of Glass-fiber-reinforced Epoxy Resin during Polymerisation," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 61, pp.889~894.
- (13) Maistros, G. M. and Partridge, I. K., 1998, "Monitoring Autoclave Cure in Commercial Carbon Fibre/Epoxy Composites," *Compos. Part B* Vol. 29B, pp.245~250.
- (14) Kim, J. S. and Lee, D. G., 1996, "Analysis of Dielectric Sensors for the Cure Monitoring of Resin Matrix Composite Materials," *Sensor. Actuat. B-Chem.* Vol. 30, pp.159~164.
- (15) Choi, J. H. and Lee, D. G., 1995, "Expert Cure System for the Carbon Fiber Epoxy Composite Materials," *J. Compos. Mater.* Vol. 29, pp.1181~1200.
- (16) Ciriscioli, P. R., Springer, G. S. and Lee, W. I., 1991, "An Expert System for Autoclave Curing of Composites," *J. Compos. Mater.*, Vol. 25, pp.1542~1587.