

에폭시/유리섬유 프리프레그의 경화공정에서 차폐막 두께에 따른 분리형 단평면 센서로 측정된 유전물성의 영향에 대한 연구

김 홍 경·안 규 종*·하 중 민*·차 국 헌†

서울대학교 공과대학 화학공학과, *한국 항공기술 연구원

(1997년 4월 9일 접수)

The Effect of Blocking Layer Thickness on Dielectric Properties during the Curing of Epoxy/Glass Fiber Prepregs as Measured by a Remote Single Surface Sensor

Hongkyeong Kim, Kyu Jong Ahn*, Jongmin Ha*, and Kookheon Char†

Department of Chemical Engineering, Seoul National University, 56-1 Shinlim-dong,

Kwanak-gu, Seoul 151-742, Korea

*Korea Institute of Aeronautical Technology, 118, 2-ka, Namdaemun-ro, Chung-gu, Seoul 100-092, Korea

(Received April 9, 1997)

요 약: 본 연구에서는 항공기용 구조물로 쓰이는 에폭시/유리섬유로 구성된 프리프레그의 경화반응을 평판형 센서와 분리형 단평면 센서를 이용한 유전을 측정법을 통하여 등온조건에서 살펴보았다. 평판형 센서를 이용하여 측정한 결과 100 °C의 등온 조건에서 일반적으로 경화반응이 종료된 것으로 판단되는 시간 이후에도 미세한 반응이 진행되고 있는 것을 알 수 있었다. 분리형 센서를 이용한 경우에는 차폐막 효과에 의해 유전을 상수와 손실 인자 등이 평판형 센서의 결과와 다른 형태를 보였고, 주파수를 낮출수록 이 영향은 크게 나타났다. 차폐막의 두께를 보정하여 평판형 센서의 결과와 비교함으로써 분리형 센서의 전기장이 미치는 범위가 센서 표면에서 약 1 mm 정도가 된다는 것을 알 수 있었고, 분리형 센서의 위와 아래에 각기 적층한 프리프레그의 두께를 달리하였을 때 측정되는 유전물성으로부터 이를 확인할 수 있었다. 또한 측정되는 유전물성은 분리형 센서의 아랫부분에 적층된 프리프레그의 두께에는 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT: Curing reaction of epoxy/glass fiber prepregs has been investigated under isothermal condition using dielectric analysis with both parallel plate electrode sensors and remote single surface sensors. Minute changes in dielectric properties even after the end of curing reaction determined by other methods were detected with DEA carrying parallel plate sensors. Dielectric properties obtained with remote single surface sensors were generally different from those with parallel plate sensors due to blocking layer effect, which was observed to be more significant as applied frequency was lowered. Upon correction due to blocking layer thickness, it was shown that the electric field of remote single surface sensor reached to about 1 mm above the sensor surface and it was confirmed by the results of dielectric properties measured with remote sensors inserted to different places across the prepreg thickness. We also found that prepreg thickness beneath the sensor had no effect on the measured dielectric properties of the prepreg.

Keywords: dielectric analysis (DEA), remote single surface sensor, parallel plate sensor, blocking layer.

서 론

최근에 구조 재료로 널리 쓰이고 있는 고분자 복합 재료는 점성 또는 점탄성 성질을 갖는 고분자 수지와 이를 보강해 주기 위하여 일정한 방향성 또는 비방향 성을 갖고 연속적으로 배열된 강도가 높은 고탄성 섬유로 이루어져 있다. 이러한 고분자 복합재료를 제조 하기 위해서는 여러 가지 방법이 사용되고 있는데, 그중 많이 사용되는 것 중의 하나가 열경화성 고분자 수지가 함침된 프리프레그를 여러 겹 적층하여 오븐 내에서 경화시키는 방법이다. 고분자 복합재료의 매트릭스 수지로 많이 사용되고 있는 열경화성 수지는 경화되기 전에는 점성 유체로 존재하여 섬유 보강재 직조 사이의 유동 및 적심(wetting)이 좋아 다루기가 편하고, 열을 가하여 경화시키면 가교 구조를 형성하여 최종 복합재료 제품을 얻게 된다.

고분자 복합재료 가공공정에 있어서 생산된 제품의 최종 물성을 조절하기 위해서는 직조상의 섬유에 함 침된 수지의 경화과정 및 공정 중에 발생하는 모든 현상들을 살필 필요가 있다. 그러나 지금까지 널리 사용되는 열분석 및 유변물성 분석방법 등은 공정과 는 별도로 수행되므로 공정 중의 온도 변화 및 여러 가지 현상들을 직접 관찰할 수 없다는 약점이 있다. 이러한 이유로 초음파 검사법, 광섬유 센서 및 dielectric analysis (DEA) 방법은 센서를 구조물에 직접 부착하여 복합재료 가공공정 중에 측정할 수 있다는 장점이 있기 때문에 현재 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 이러한 방법을 실제의 복합재료의 경화 공정에 이용하기 위해서 기존의 다른 여러 가지 방법으로 관찰한 결과와의 비교 검토를 위한 연구가 많이 진행되어 왔다.¹⁻¹⁶

본 연구에서는 복합재료 가공공정 중에 일어나는 경화과정을 직접 분석하기 위해서 분리형 단평면 센서(remote single surface sensor)를 에폭시/유리 섬유로 구성된 프리프레그 내에 삽입하여 유전물성을 관찰하였고, 그 결과를 이미 기존의 다른 여러 가지 경화반응 분석방법과의 연관성이 잘 밝혀진 평행 평판(parallel plate)을 이용한 DEA 결과와 비교하였다.

실 험

본 연구에서는 미국 Boeing사의 소재 인증 내역에 등재되어 있는 항공기용 구조물 성형에 사용되는 BMS 8-79 프리프레그를 입수한 형태 그대로 이용하여 실험하였다. 이 프리프레그에는 약 60 wt%의 유리섬유가 직조의 형태로 포함되어 있으며, diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA) 계열의 에폭시 수지, 아민 계열의 경화제 및 기타 첨가제 등이 유리섬유 직조 사이에 함침되어 있으나 정확한 구성 비율 및 물질은 제작사의 노하우에 관련되어 알려져 있지 않다.

유전물성을 측정하는 데는 실제 프리프레그 가공 공정에도 쓰일 수 있도록 하기 위하여 분리형 센서를 Fig. 1(a)와 같이 조합하여 사용하였다. DEA는 TA Instrument사의 DEA 2970 모듈을 분리형 센서를 사용하여 측정하였고, PID 제어온도 컨트롤러를 RS232C 케이블을 통해 제어하여 경화온도를 조절하였다. 프리프레그는 30겹으로 적층하여 두께를 약 3.5 mm 정도로 사용하였고, 압력 조절에 의하여 프리프레그 내의 공극 등이 변함으로써 측정되는 유전물성에 미치는 영향을 제거하기 위하여 적층한 프리프레그를 알루미늄박으로 감싼 후 동일한 압력을 가해 주었고, 경화온도는 100 °C의 등온으로 하였다. 측정되는 위치에 따른 유전물성의 변화를 분석하기 위해서 30층의 프리프레그 중 위에서부터 5, 10, 15, 20 및 25층의 위치에 분리형 센서를 각각 삽입하여 측정하였다.

분리형 센서는 단일 표면 전극의 일종으로 약 25 μm 두께의 폴리이미드 필름이 3.8×2.5 mm 크기의 센서 부위를 제외한 나머지 부분을 보호하기 위하여 감싸고 있는 형태로 이루어져 있고, 센서 부위에는 서로 평행한 120여개의 전극이 (+)와 (-)가 교대로 위치하도록 설계되어 있으며, 개략적인 형태를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 이 전극들에 의해 Fig. 1(c)와 같이 센서 표면에 전기장이 형성된다. 이 전기장 내에 시료가 위치할 경우 가해 준 전압과 측정된 전류 사이에 위상차가 발생하는데 이로부터 유전물성이 계산된다.

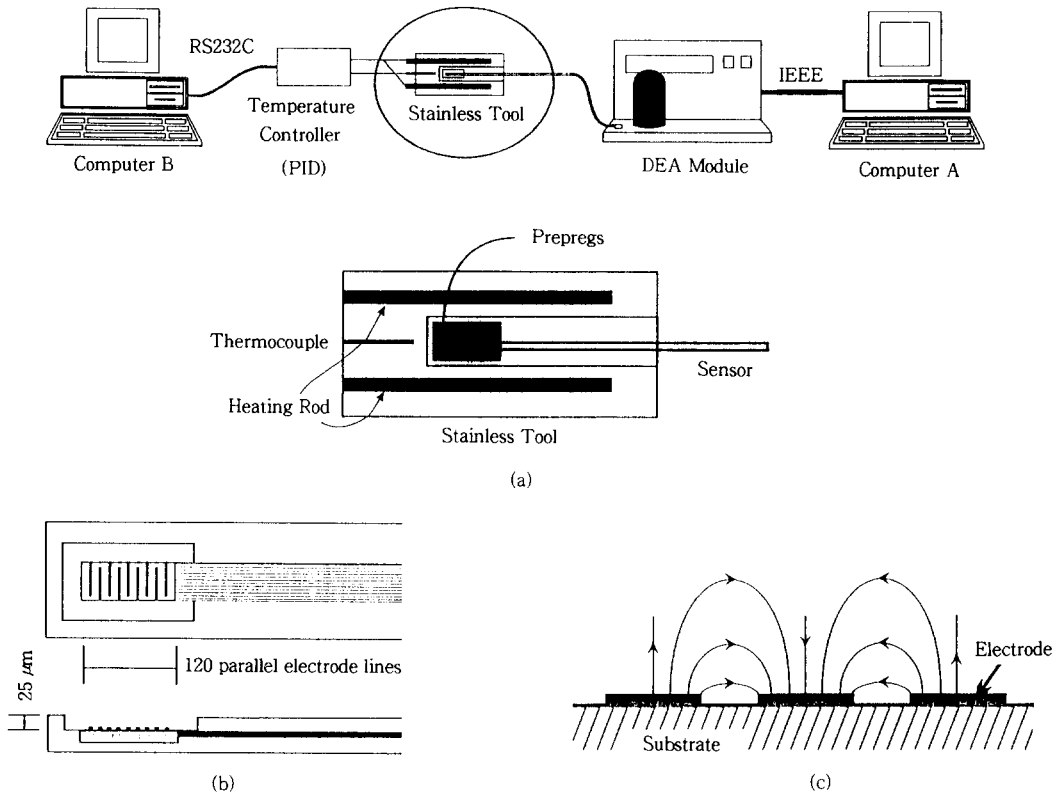


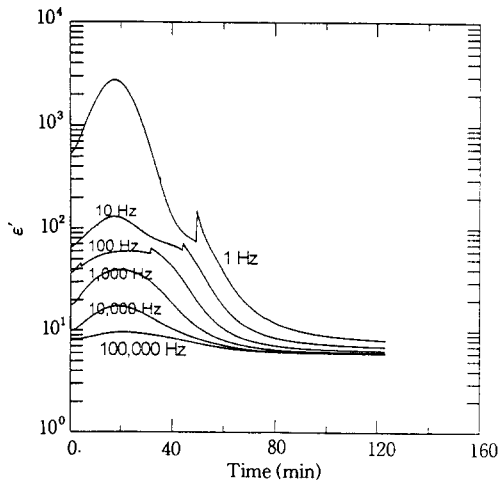
Figure 1. Schematic illustrations of (a) prepreg curing device with a DEA remote single surface sensor, (b) remote single surface sensor, and (c) electric field distribution in the neighborhood of the electrodes.

결과 및 고찰

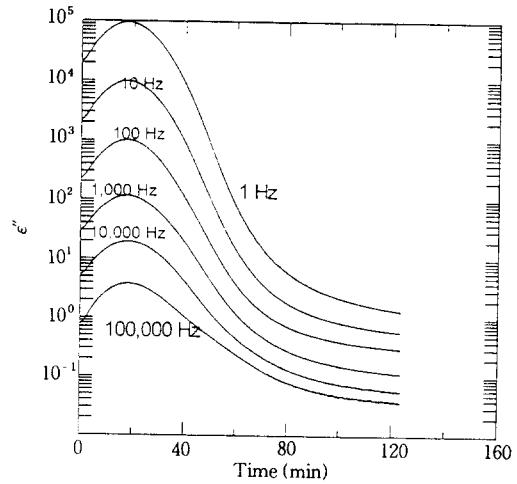
Fig. 2는 평판형 전극을 사용하여 100 °C에서 등온경화시킨 DEA 결과로, Fig. 2(a)는 유전율 상수 (dielectric constant, ϵ'), Fig. 2(b)는 유전율 손실인자 (dielectric loss factor, ϵ'') 그리고 Fig. 2(c)는 $\tan \delta$ (loss tangent)를 나타내었다. 경화반응 시간이 경과됨에 따라 $\tan \delta$ 의 피크가 나온 후 $\tan \delta$ 값이 감소하는 것으로부터 이 프리프레그는 100 °C에서 등온반응을 시킬 때 약 60분 이내에 반응이 거의 완료되는 것으로 나타났다. 또한 유전율 손실인자의 변화를 살펴보면 120분이 지난 후에도 계속 기울기가 감소하는 것으로부터 경화과정에서의 미세한 변화가 계속 진행하는 것을 알 수 있었다.¹³⁻¹⁵ 그러나 평판형 전극을 사용한 경우도 열분석법, 유변물성 측정법 및 기타 다른 측정방법과 마찬가지로 공정과는 별도로 분석을 수행하기 때문에 공정 중의 수지의 변

화를 실시간으로 관찰할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 분리형 센서를 적층된 프리프레그 사이에 삽입하여 경화과정을 실시간으로 관찰해 보았다.

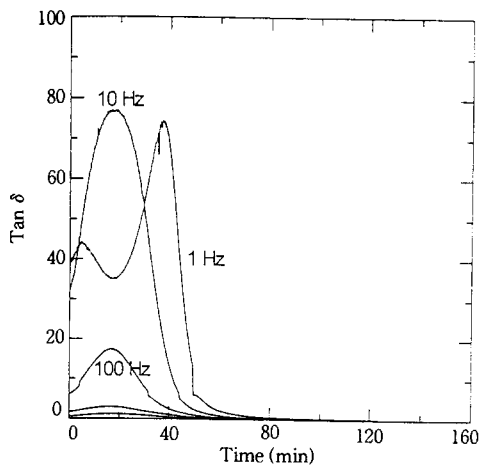
Fig. 3은 분리형 센서의 윗부분에 프리프레그를 25겹, 아래에 5겹을 적층하여 100 °C로 유지시킨 치공구 내에서 경화시키면서 측정된 유전물성의 결과로 (a)는 유전율 상수, (b)는 유전율 손실인자, 그리고 (c)는 $\tan \delta$ 를 나타내었다. Fig. 2의 평판형 센서를 이용하여 측정한 결과와 비교하면 측정된 유전물성에 몇 가지 차이점을 보이는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 3의 (a) 및 (b)를 각각 살펴보면, 주파수가 낮을수록 유전율 상수와 유전율 손실인자가 피크 부분에서 편평해지는 것이 관찰되었다. 또한 평판형 센서를 사용한 Fig. 2 (c)의 $\tan \delta$ 곡선에서는 주파수가 1 Hz인 경우에는 피크가 분리되어 두개의 피크처럼 보이지만 10 Hz 이상에서는 하나의 피크로 나타나는 것을 관찰할 수 있으나, 분리형 센서를 사용한 Fig. 3



(a)



(b)



(c)

Figure 2. Dielectric properties measured with a parallel plate sensor as a function of time for prepregs cured under isothermal condition at 100 °C, (a) dielectric constant ϵ' , (b) dielectric loss factor ϵ'' , and (c) dielectric loss tangent $\tan \delta$ with applied frequencies of 1, 10, 100, 1000, 10000 Hz.

(c)의 경우에는 1000 Hz의 주파수에서 $\tan \delta$ 곡선의 피크가 두개의 피크로 나뉘어지고 주파수가 감소함에 따라 두개로 나뉘어진 피크 중 두 번째 피크가 나타나는 시간이 점점 느려지고 첫 번째 피크는 빨라지다가 사라지는 것을 관찰하였다.

평판형 전극을 사용하여 얻은 결과와 분리형 센서

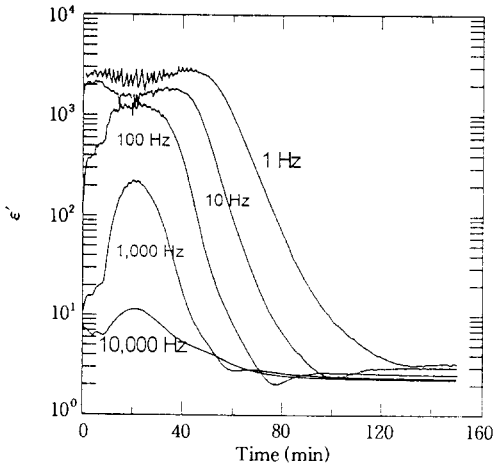
를 사용하여 측정한 결과가 이처럼 다르게 나타나는 것은 분리형 센서에서 나타나는 차폐막 (blocking layer) 효과의 영향으로 생각된다. 차폐막 효과는 자유 이온에 의한 전극의 편극화 현상이나, 전극을 여러번 사용하기 위하여 전극과 시료 사이에 넣어주는 필름, 그리고 시료와 전극의 접촉 문제 등 여러 가지 요인에 의하여 발생된다.⁵ 전극의 편극화 현상은 시료 내에서 자유로이 움직이는 작은 이온들이 전기장의 방향에 의해 센서 표면에 흡착되어 양 극판에 반대 전하를 띤 차폐막을 형성하게 되는 현상으로, 가해주는 주파수가 낮을수록 심해진다.⁵ Day 등은 평행한 두 전극과 시료 사이에 차폐막을 위치시켰을 때, 측정되는 유전물성이 차폐막 효과에 의해 실제 유전물성과 달라지는 것에 대해서 다음과 같은 관계식을 제시한 바 있다.¹⁷

$$\epsilon_b' = f_1 (\epsilon', \epsilon'', L, t_b, \omega, \dots)$$

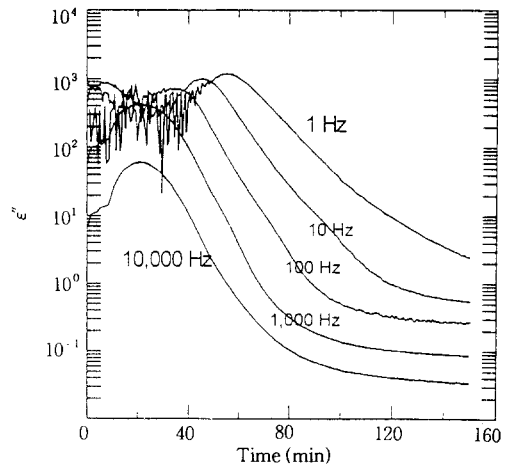
$$= \epsilon' \frac{L}{2t_b} \left[\frac{(\tan \delta)^2 + \left(\frac{L}{2t_b}\right)}{(\tan \delta)^2 + \left(\frac{L}{2t_b}\right)^2} \right]$$

$$\epsilon_b'' = f_2 (\epsilon', \epsilon'', L, t_b, \omega, \dots)$$

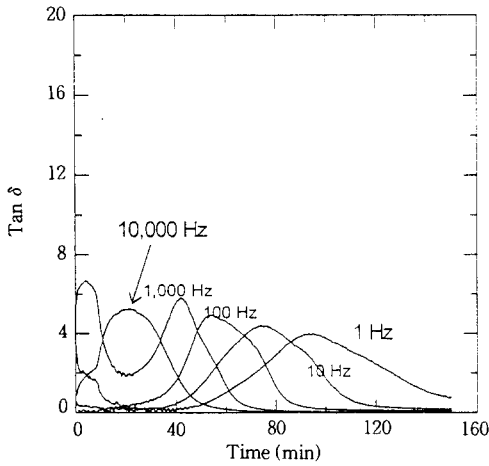
$$= \epsilon'' \frac{L}{2t_b} \left[\frac{\left(\frac{L}{2t_b} - 1\right)}{(\tan \delta)^2 + \left(\frac{L}{2t_b}\right)^2} \right] \quad (1)$$



(a)



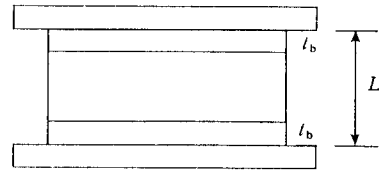
(b)



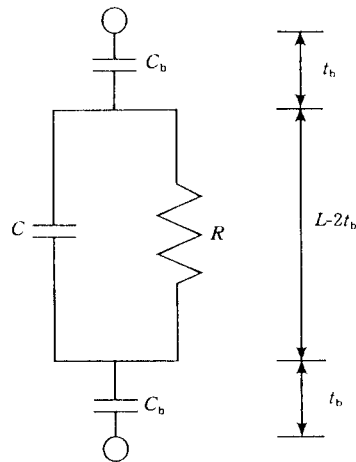
(c)

Figure 3. Dielectric properties measured with a remote single surface sensor as a function of time for prepregs cured under isothermal condition at 100 °C. (a) dielectric constant ϵ' , (b) dielectric loss factor ϵ'' , and (c) dielectric loss tangent $\tan \delta$ with applied frequencies of 1, 10, 100, 1000, 10000 Hz. The remote sensor was inserted to 25th layer from the top.

여기서 L 은 두 평판 전극 사이의 간격, ω 는 가해진 교류 전원의 주파수, ϵ' 과 ϵ'' 은 시료가 갖는 고유의 유전물성들이고, 여기에 아래 첨자 b 가 붙은 경우는 DEA 센서를 이용하여 측정되는 유전물성들이며, 차폐막은 Fig. 4(a)와 같이 두 전극 표면에 각각 t_b 의 두께로 존재하여 유전물성의 측정값에 영향을 준다고



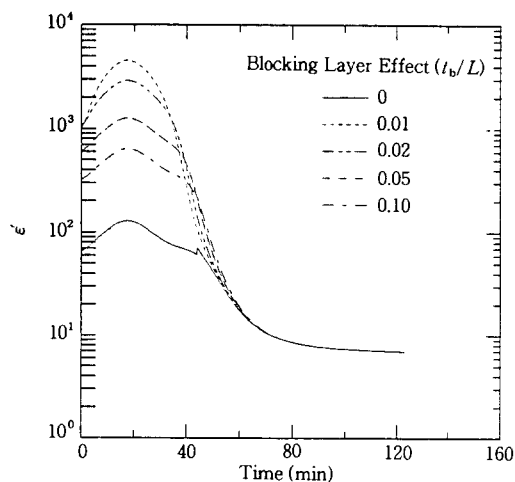
(a)



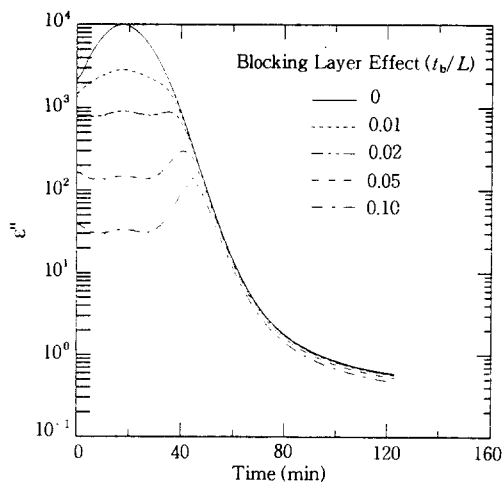
(b)

Figure 4. Schematic illustrations of (a) blocking layers between electrode and (b) equivalent circuit taking into account the blocking layers.

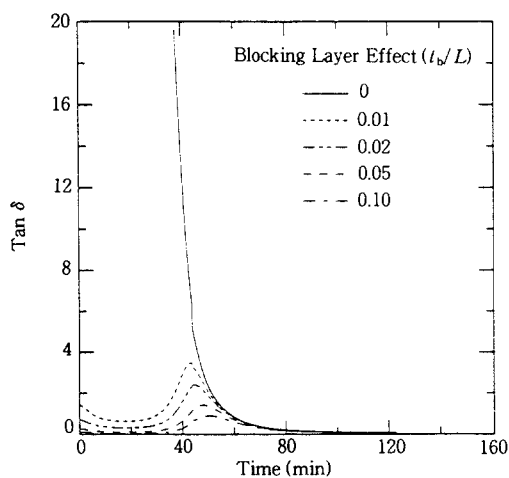
가정한다. Fig. 4(b)는 차폐막 효과가 존재할 때 이에 상응하는 전기적 저항-축전기 회로 모델을 제시한



(a)



(b)



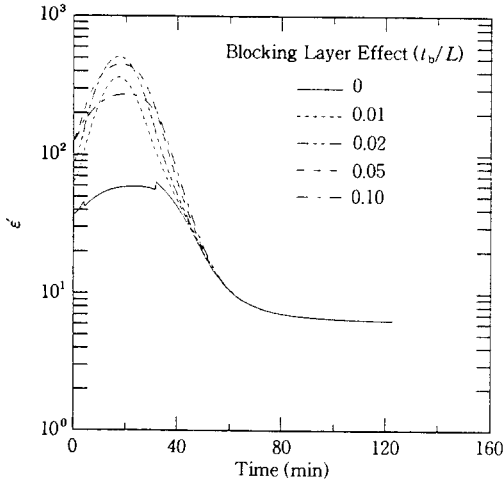
(c)

Figure 5. Estimated effect of blocking layer thickness on dielectric properties measured with a parallel plate sensor at 10 Hz.

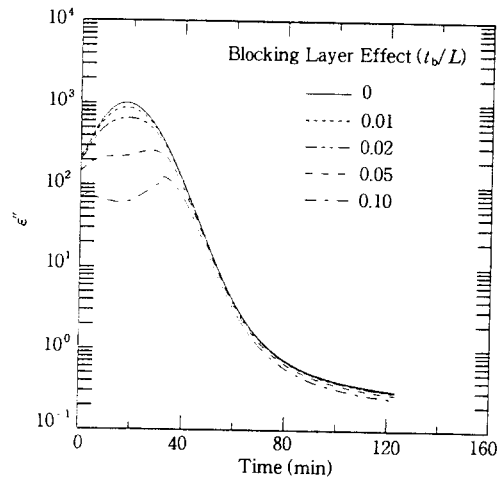
것으로 차폐막 효과는 축전량 C_b 로 나타난다고 가정하면 위의 식 (1)이 유도된다.

분리형 센서는 3.8×2.5 mm 크기의 센서 부위를 제외한 나머지 부분을 약 $25 \mu\text{m}$ 두께의 폴리이미드 필름이 감싸서 보호하는 형태로 되어 있어서 센서 외부의 필름 표면과 센서 부위의 표면 사이에는 약간의 층간격이 존재한다. 분리형 센서를 사용하여 액체 시료의 유전물성을 측정할 때에는 액체 시료가 센서 부

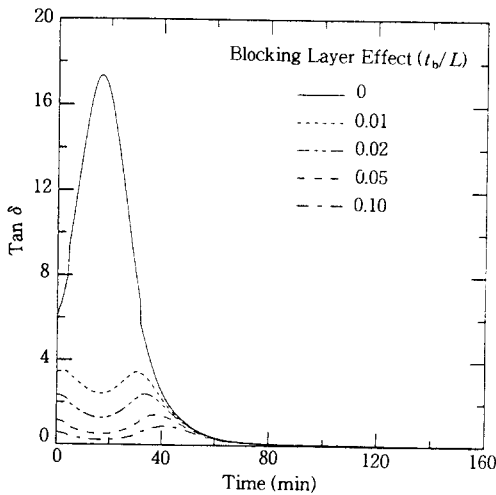
위의 표면까지 흐르게 되어 접촉이 되지만, 본 실험에서 사용한 프리프레그는 유연성이 떨어지므로 시료와 센서 표면 사이에 간격이 그대로 존재하여 차폐막의 역할을 하게 된다. Fig. 5와 Fig. 6은 평판형 전극으로 측정된 결과 (Fig. 2)를 차폐막이 여러 가지 다른 두께로 존재할 경우에 대하여 식 (1)을 이용하여 계산한 것으로, 유전율 상수는 차폐막의 두께가 커짐에 따라 증가하다가 차폐막의 두께가 어느 정도 이상이 되면 다시 감소하는 경향을 보이고, 유전율 손실인자는 차폐막의 두께에 따라 꾸준히 감소하는 경향을 보였다. 그러나 교류 전원의 주파수를 10 Hz로 한 Fig. 5의 결과가 100 Hz에 대한 Fig. 6의 결과에 비해 유전율 상수나 유전율 손실인자가 차폐막의 두께에 의한 영향이 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. $\tan \delta$ 의 피크를 관찰하여도 마찬가지로 10 Hz의 경우에 차폐막에 의한 영향이 훨씬 크게 나타나는데, 차폐막의 두께가 전극 간격의 약 1% 정도만 되더라도 하나의 $\tan \delta$ 의 피크가 분리되어 두개의 피크로 나타난다. 또한 가해진 교류 전원의 주파수가 낮을수록 얇은 차폐막에서도 $\tan \delta$ 의 피크가 확연히 분리되어 두개의 피크로 관찰된다는 것을 알 수 있었고, 평판형 전극을 사용하여 얻은 결과에서 1 Hz의 $\tan \delta$ 피크가 분리되는 것도 차폐막의 존재에 의한 것으로 생각할 수 있다. Fig. 3의 분리형 센서를 사용하여 얻은 $\tan \delta$ 곡선에서는 1000 Hz의 주파수에서도 피크가 분리되어 두개로 나타나는 것으로부터



(a)



(b)



(c)

Figure 6. Estimated effect of blocking layer thickness on dielectric properties measured with a parallel plate sensor at 100 Hz.

차폐막 효과가 크다고 생각할 수 있다. 그러나 분리형 센서를 이용한 실험에서 센서 표면과 시료 사이의 간격은 경화가 진행되면서 매트릭스 수지의 유동 및 시료의 잔류응력 등에 의해 변하게 되어 차폐막 효과의 정도가 달라지므로 차폐막 효과를 정확히 계산하여 제거하는 것은 불가능하다. 분리형 센서를 사용하여 측정된 Fig. 3(c)의 10000 Hz에서 측정된 $\tan \delta$ 피크를 살펴보면 경화 피크에 앞서 쇼울더가 나타나

는데 이것은 경화가 진행되면서 프리프레그가 받는 응력에 의해 센서 표면과 시료 사이의 간격이 급격히 변화하면서 생기는 것으로 생각할 수 있다.

일반적인 수지에 대해 Debye 등은 수지가 단일 완화시간을 갖는다는 가정 하에 이온의 전기전도도와 쌍극자의 배향에 대한 영향을 고려하여 다음과 같은 식을 제시한 바 있다.^{5,16}

$$\begin{aligned}\epsilon' &= \epsilon_u + \frac{\epsilon_r - \epsilon_u}{1 + (\omega\tau)^2} \\ \epsilon'' &= \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} + \frac{(\epsilon_r - \epsilon_u)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}\end{aligned}\quad (2)$$

여기서 ϵ_u 는 시료에 가하는 전기장의 교류 주파수를 무한히 크게 하여 쌍극자가 전혀 완화되지 않을 때의 유전율이고, ϵ_r 는 주파수가 0인 직류 전기장을 가하여 쌍극자가 완전히 완화된 상태에서의 유전율을 의미한다. 또한 τ 는 쌍극자의 완화시간, ϵ_0 는 진공에서의 유전율, 그리고 σ 는 이온의 전기전도도를 나타낸다. 시료가 이러한 Debye 모델을 따를 때, 가로축을 ϵ' 으로 하고 세로축을 ϵ'' 으로 하는 Cole-Cole plot을 도시하면 반원형태가 나타나는 것이 알려져 있다.^{5,16-17} 그러나 시료 또는 전극에 차폐막이 존재하면 반원의 반지름이 차폐막의 두께가 커질수록 작아지게 된다.^{5,17}

Fig. 7은 평판형 전극으로 측정된 유전율 상수와

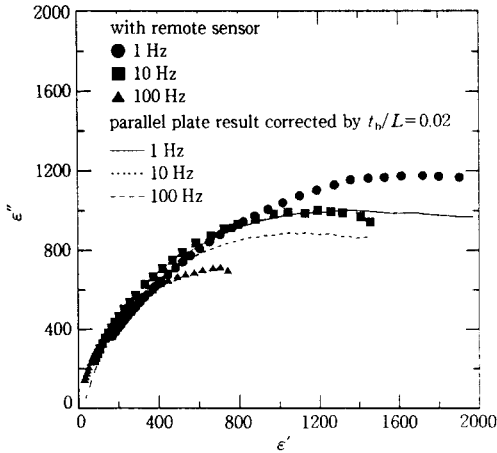


Figure 7. Cole-Cole plot of dielectric properties measured with a remote single surface sensor (symbols) as compared with the Cole-Cole plot of dielectric properties measured with a parallel plate sensor and corrected by $t_p/L=0.02$ (lines).

유전율 손실인자에 대해, 차폐막의 크기가 전극 사이 간격의 2%가 되는 경우에 대해 식 (1)을 이용하여 계산한 값과 분리형 센서를 이용하여 최대 경화반응을 나타내는 지점 이후에 대하여 측정된 결과를 비교하여 Cole-Cole plot을 통하여 나타낸 것이다. 최대 경화반응 이전에는 측정되는 유전율 상수와 유전율 손실인자가 측정 한계를 벗어나 노이즈가 심하기 때문에 최대 경화반응 이후에 대해서만 도시하였다. 이 그림은 시료에 가한 교류 주파수가 1, 10 및 100 Hz인 경우에 대하여 나타낸 것으로 분리형 전극으로 측정된 결과를 잘 예측하고 있지만 가한 주파수가 낮을수록 오차가 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2를 보면 평판형 센서를 이용하여 측정된 결과에서도 1 Hz와 같은 낮은 주파수에서는 차폐막 효과에 의한 영향이 존재하여 차폐막의 영향을 다른 주파수와 같은 정도로 고려할 때 차폐막의 두께에 오차가 발생하는 것으로 생각된다. 또한 1000 Hz와 10000 Hz의 경우에는 차폐막의 영향이 그리 크지 않기 때문에 오차가 거의 없지만 측정되는 유전율 상수나 유전율 손실인자의 값의 변화가 작아서 다른 주파수에서의 결과와 비교하여 나타내기가 어렵다. 차폐막의 두께를 전극간 거리의 2%로 설정할 때 평판형 센서와 분리형 센서가 잘 일치하는 것으로부터, 차폐막이 약 25

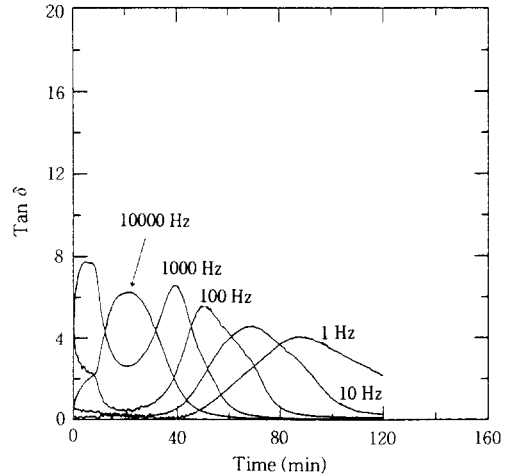


Figure 8. Tan δ as a function of time measured with a remote single surface sensor inserted to 20th prepreg layer from the top for prepregs cured at 100 °C.

μm 두께의 폴리이미드 필름에 의해 생기는 센서 표면과 시료 사이의 간격에만 기인한다고 하면 분리형 센서를 사용할 때 전기장이 미치는 범위는 약 1.2 mm 정도가 될 것으로 예측할 수 있다. 따라서 적층한 프리프레그의 두께가 분리형 센서를 이용하는데 있어서 큰 변수가 될 수 있음을 시사한다고 생각할 수 있다.

Fig. 8은 분리형 센서의 윗부분에 프리프레그를 20겹, 아래에 10겹을 적층하여 100 °C로 유지시킨 치공구 내에서 경화시키면서 측정된 tan δ 결과이고, Fig. 9는 센서의 위와 아래에 각각 15겹씩, Fig. 10은 센서 위 10겹과 센서 아래 20겹으로, 그리고 Fig. 11은 센서 위 5겹과 센서의 아래 25겹씩 적층하여 경화시킨 경우의 tan δ 결과이다. 센서의 윗부분과 아랫부분에 각각 25겹 및 5겹을 적층한 Fig. 3의 tan δ 곡선과 비교하면 Fig. 8과 Fig. 9는 약간의 오차는 존재하지만 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 그러나 센서의 윗부분에 적층한 프리프레그의 높이를 감소시킴에 따라 Fig. 10의 결과는 피크의 전체적인 높이가 약간 감소되었고, Fig. 11의 경우에는 피크의 높이가 감소한 것뿐만 아니라 그 형태도 매우 둔화되어 나타났다. 이때 센서의 윗부분에 적층한 프리프레그의 높이는 Fig. 10과 Fig. 11의 경우 각각 약 1.0 mm 및 0.5 mm로, 분리형 센서의 교류 전기

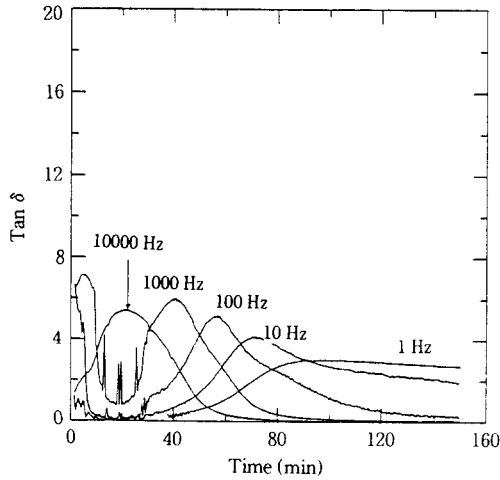


Figure 9. Tan δ as a function of time measured with a remote single surface sensor inserted to 15th prepreg layer from the top for prepregs cured at 100 °C.

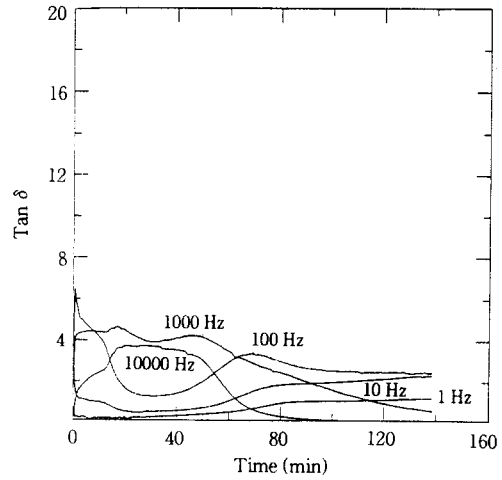


Figure 11. Tan δ as a function of time measured with a remote single surface sensor inserted to 5th prepreg layer from the top for prepregs cured at 100 °C.

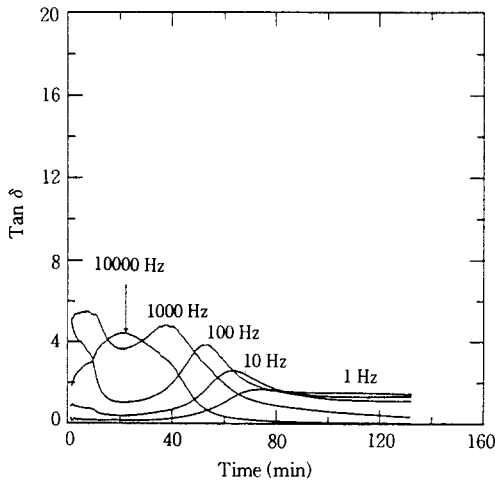


Figure 10. Tan δ as a function of time measured with a remote single surface sensor inserted to 10th prepreg layer from the top for prepregs cured at 100 °C.

장이 미치는 범위가 시료의 두께를 넘어서 외부 공기 층이 유전물성의 측정값에 영향을 주기 때문인 것으로 생각된다. 이는 앞서 평판형 센서의 결과와 분리형 센서의 결과를 비교할 때 차폐막의 두께로부터 구한 전기장이 미치는 범위를 센서 표면으로부터 약 1.2 mm로 결정한 것과 거의 같은 결과이다. 또한 센서의 아랫 부분에 적층된 프리프레그의 두께가 유전물성의 측정

값에 영향을 미치지 않는 것으로부터 센서의 전기장은 센서 표면의 윗부분으로부터만 형성된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 분리형 센서를 이용하여 프리프레그의 경화공정을 온라인으로 직접 관찰하고자 할 때에는 이러한 전기장이 미치는 범위를 고려하여 센서의 위치를 결정하는 것이 중요하다.

결 론

에폭시/유리섬유로 조합된 프리프레그의 경화반응을 평판형 센서와 분리형 센서를 이용한 DEA를 통하여 등온조건에서 분석하였다. 분리형 센서를 이용한 경우에는 실제 프리프레그 가공공정과 유사한 조건을 만들기 위하여 별도로 제작된 경화온도 조절이 가능한 치공구 내에서 경화시켰다. 분리형 센서를 이용한 경우에 유전율 상수와 손실인자 등이 평판형 센서의 결과와 다른 형태를 보였으며, 이는 차폐막 효과에 의한 영향으로 분석되었다. 차폐막 효과에 의한 영향은 가해진 주파수가 낮을수록 크게 나타났으며, 차폐막이 시료 두께의 2%에 해당한다고 가정하였을 때 평판형 센서의 결과와 서로 잘 일치하였고, 이 차폐막이 분리형 센서의 표면과 프리프레그 사이의 간격에만 의존한다고 가정하면 분리형 센서의 전기장이 미치는 범위는 센서 표면에서 약 1 mm 정도로 생각

할 수 있었다. 또한 적층한 프리프레그 사이에 삽입하는 분리형 센서의 위치를 바꾸어 가면서 측정된 유전물성들이 센서 윗부분에 적층된 프리프레그의 두께에 따라 변하는 것으로부터 분리형 센서의 전기장이 미치는 범위를 살펴보았을 때에도 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 한편 측정되는 유전물성은 분리형 센서의 아랫부분에 적층된 프리프레그의 두께에는 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글: 본 연구는 1994년도 한국과학재단의 국제공동연구과제 (94-KOSEF-NSF Joint Research Project)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. D. E. Kranbuehl, D. Eichinger, T. Hamilton, and R. Clark, *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 56 (1991).
2. D. E. Kranbuehl, S. Delos, E. Yi, J. Mayer, T. Jarvie, W. Winfree, and T. Hou, *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 338 (1986).
3. D. E. Kranbuehl, D. Hood, J. Rogozinski, and W. Limburg, *ACS Preprint*, **36**, 773 (1995).
4. F. Stephan, G. Boiteux, G. Seytre, and J. Ulanski, *ACS Preprint*, **36**, 771 (1995).
5. S. D. Senturia and N. F. Sheppard, *Adv. Polym. Sci.*, **80**, 1 (1986).
6. S. Radhakrishnan and D. R. Saini, *Polym. Eng. Sci.*, **33**, 125 (1993).
7. A. M. Maffezzoli, L. Peterson, and J. C. Seferis, *Polym. Eng. Sci.*, **33**, 75 (1993).
8. N. F. Sheppard, Jr. and S. D. Senturia, *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 354 (1986).
9. Z. N. Sanjana, *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 373 (1986).
10. A. J. Mackinnon, S. D. Jenkins, P. T. McGrail, and R. A. Pethrick, *Macromolecules*, **25**, 3492 (1992).
11. B. Ellis, "Chemistry and Technology of Epoxy Resin", Blackie Academic & Professional, Glasgow, 1993.
12. K. J. Ahn, K. M. Chung, Y. S. Eom, H. Kim, and K. Char, *J. Korean Soc. Composite Mat.*, **7**, 87 (1994).
13. H. Kim, Y. S. Eom, K. M. Chung, K. J. Ahn, and K. Char, *Polymer(Korea)*, **19**, 265 (1995).
14. H. Kim, K. J. Ahn, J. Hong, and K. Char, *Polymer(Korea)*, **20**, 1114 (1996).
15. P. Hedvig, "Dielectric Spectroscopy of Polymers", John Wiley & Sons, New York, 1977.
16. D. R. Day, T. J. Rewis, H. L. Lee, and S. D. Senturia, *J. Adhesion*, **18**, 73 (1985).