

Epoxy Molding Compound의 경화거동에 관한 연구

윤상영[†] · 오명숙 · 박내정

홍익대학교 화학공학과

(2000년 6월 14일 접수)

A Study on the Cure Behavior of Epoxy Molding Compound

Sang Young Yun[†], Myongsook Oh, and Nae Joung Park

Department of Chemical Engineering, Hong Ik University, Seoul 121-791, Korea

[†]e-mail: chem507@hanmail.net

(Received June 14, 2000)

요약: 본 연구에서는 반도체 봉지제로 사용되는 상용 EMC중 가속제의 함량이 다른 두 종류의 프리프레그에 대하여 그 경화거동을 등온 및 승온조건에서 시차 주사 열량계, 점도계 및 유전율 측정계를 이용하여 분석하였다. 경화반응 속도변수는 Kamal의 자동촉매 반응식을 이용하여 $m+n$ 을 2로 가정한 후 Ryan & Dutta의 방법에 따라 계산하였고 계산에 의한 경화반응 속도의 예측치와 실제 실험 데이터가 100 °C를 제외한 나머지 온도에서는 잘 일치하는 경향을 나타내었다. 경화과정 중 겔화와 유리화와 같은 상 전이를 관찰하였으며 각각의 등온 경화온도에서 경화시간에 따른 유리전이 온도 (T_g)를 측정하여 경화온도와 유리전이 온도가 같아지는 유리화점을 구할 수 있었고 절대온도와의 사이에 Arrhenius관계가 성립함을 확인하였다. 또한 평판형 전극을 이용한 DEA는 EMC의 경화 과정을 동정하는데 효과적으로 이용될 수 있음을 알 수 있었다. 같은 종류의 수지 시스템에서는 TTT diagram상에서 $_{gel}T_g$ 가 가속제의 농도에 상관없이 일정한 온도에서 나타남을 확인하였다.

ABSTRACT: The cure behavior of commercial epoxy molding compounds (EMC) commonly used for IC package was studied at constant cure temperatures as well as at constant heating rates using differential scanning calorimetry (DSC), rheometer, and dielectric analyzer (DEA). The cure kinetics were obtained using autocatalytic reaction model according to the Ryan & Dutta method after assuming $m+n$ equal to 2. The prediction of reaction rates by the model equation corresponded well to experimental data at all temperatures except for 100 °C. The phase transitions such as gelation and vitrification occurred during network formation. At each isothermal cure temperature, T_g was measured in accordance with cure time, and the vitrification point was attained when T_g was equal to T_{cure} . The temperature dependence of gel points and vitrification points showed good agreement with Arrhenius relation. DEA using parallel plate electrode was effective for the monitoring of EMC cure. we knew that if the resin systems are materials of comparable quality, $_{gel}T_g$ is constant regardless of accelerator concentration in TTT (Time-Temperature-Transformation) diagram.

Keywords: epoxy molding compounds (EMC), differential scanning calorimetry (DSC), rheometer, dielectric analyzer (DEA), autocatalytic reaction.

서 론

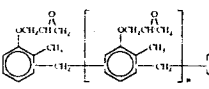
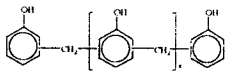
반도체 봉지제는 외부의 물리적 화학적 영향에서 반도체 chip을 보호해주는 역할을 한다. 그러므로 봉지제의 재료는 수송이나 조립 중에 생길 수 있는 물리적 손상을 막아 줄 수 있는 기계적 강도를 가져야 하며 수분의 침투를 막아 줄 수 있어야 하고 chip의 금속과 비슷한 열팽창 계수를 가져야 하며 금속에 좋은 계면접착성도 갖고 있어야 한다. 또 장기적인 신뢰도를 높이기 위해서는 화학적으로 안정된 물질일 뿐만 아니라 온도의 변화에 손상되지 않는 열 안정성도 갖고 있어야 한다. 현재 봉지제용 수지에는 크게 epoxies, silicones, polyimides의 3종류가 사용되고 있다.¹⁻³ 그 중에서도 에폭시 봉지제 (epoxy molding compound; EMC)가 가장 보편적으로 사용되고 있다. EMC는 에폭시 수지, 경화제, 실리카 충전제, 커플링제, 개질제, 이형제, 착색제 등의 혼합물인데 정확한 화학적 조성은 제조사의 기밀로 되어 있으며 제품의 질은 기계적 기능성 검사에 의해서 평가되고 있다. 반도체 packaging공정에서 EMC의 성형작업은 트랜스퍼 몰드를 이용한 연속적인 공정이다. 트랜스퍼 몰딩공정에서 온도와 시간에 따른 EMC의 유변학적 변화의 특성은 중요한 공정 조절인자이다. 트랜스퍼 몰드에 주입된 EMC의 용융점도는 미리 정해진 제한 영역 안에서 유지되어야 한다. 영역 밖의 낮은 온도에서는 cavity 충전시 제어가 어려워지며 휘발성 물질 및 가스의 trap에 의한 미세 기공의 형성을 초래하게 되고 높은 점도는 성형물 안의 응력 형성의 원인이 되어 심한 경우에는 성형물 표면에 굴곡이 형성되거나 불완전 충전이 일어나게 된다. 따라서 EMC가 경화반응 동안 물리적 화학적으로 어떤 변화가 일어나는 지에 대한 정확한 지식이 필요하다. 또한 신규 에폭시 수지의 개발과 더불어 각 수지 시스템에서의 경화특성을 파악하는 것 또한 시급한 실정이다. 따라서 공정과정을 실제로 평가하고 제품의 최종 물성을 제어하기 위해서 *in-situ monitoring*에 대한 연구가 많이 수행되어 왔다.⁴⁻⁶ 이상적인 공정평가 방법은 우선 얻어진 데이터가 신뢰성과 반복성이 있어야 하고, 실제 공정이 일어나는 환경 하에서 수행되어야 하며, 더 나아가서는 실제 제품을 만드는 과정에서 제품의 변화를 관찰할 수 있어야 한다. 최근

에는 센서를 직접 구조물에 부착하여 공정중에 수지의 변화를 관찰하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 dielectric analysis (DEA)는 얻어진 데이터의 물리적 의미가 비교적 명확하고 해석이 용이하다는 점에서 널리 이용되고 있다. 그러나 EMC가 여러 성분의 혼합물인 데다가 혼합 성분들의 상호작용으로 인하여 복잡한 경화거동을 나타내기 때문에 하나의 실험 방법으로 경화거동을 해석하기보다는 다양한 방법들을 사용하여 서로 연관되는 부분을 찾고 이를 바탕으로 경화거동을 해석하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 가속제의 함량이 다른 제일모직(주)의 SI-7200GS와 SI-7200GSM에 대해서 그 경화 특성을 분석하여 실제 가공공정에서 공정변수의 설정 및 공정의 최적화에 기여할 수 있는 근거를 마련하고자 하였다.

실 험

EMC 시료. 본 연구에 사용된 EMC는 제일모직(주)의 상용 EMC인 SI-7200GS와 SI-7200GSM이다. 이 EMC는 기저수지로서 *o*-cresol novolac형 (EOCN1020) (Nippon Kayaku Co), 경화제로 phenol novolac (HF-1), 가속제로 BASF AG의 triphenylphosphine (TPP)을 사용하였고 각각에 대한 화학식과 당량은 Table 1과 같다. 그밖에도 실리카 충전제, 착색제, 이형제 등이 혼합되어 있으며 정확한 조성은 제작사의 노하우로 알려져 있다. 다만 두 EMC간의 차이점은 가속제의 함량으로 SI-

Table 1. Chemical Structure of Raw Materials Used in EMC

material	standard formula	equivalent weight
ortho-cresol novolac type epoxy resin		210
phenol novolac hardener		07
triphenyl-phosphine		

7200GS가 1.38 phr SI-7200GSM이 1.61 phr이다.

경화반응 속도의 측정. 각 EMC의 경화반응 속도는 Rheometric Scientific사의 시차 주사 열량계 (DSC, DSC Plus)를 이용하여 질소 분위기 하에서 100, 120, 140, 160 °C의 등온조건에서 측정하였다. 측정된 데이터는 식 (1)과 같은 자동촉매 반응식을 이용하여 분석하였다.⁷⁻⁹

$$\frac{da}{dt} = k a^m (1-a)^n \quad (1)$$

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서 a 는 경화도, k 는 반응속도 상수, m 과 n 은 반응차수, E 는 활성화 에너지, R 은 기체상수, T 는 절대온도를 나타낸다.

유리전이 온도 (T_g)의 측정. 각각의 등온 경화온도에서 일정시간 경화시킨 시료를 급냉시킨 후 DSC를 이용하여 30~200 °C까지 5 °C/min의 승온조건으로 열량변화를 측정하여 T_g 를 구하였다. 이와 같이 얻어진 각 등온 경화온도에서 T_g 를 경화시간에 따라 플롯하여 경화온도와 T_g 가아지는 시간을 각 등온 경화온도에서의 유리화 점으로 하였다. 또한 완전 경화시킨 각 EMC의 T_g 는 175 °C의 오븐에서 시료를 6시간 경화시킨 후 DSC를 이용하여 측정하였다.

점탄성의 측정. 경화반응 중의 시료의 점탄성 변화 측정에는 TA Instrument사의 Rheometer (CSL² 500)를 이용하였다. 시편은 시료 0.65 g을 압축 성형기를 사용하여 지름 20 mm 두께 1 mm의 디스크로 만들었다. 측정방식은 oscillation mode로 하였고 copper parallel plate 사이의 간격은 1 mm, 주파수는 6.28 rad/s로 하여 120, 125, 130, 140 °C의 등온경화 조건에서 경화시간에 따른 시료의 점도, 저장탄성률 (G'), 손실 탄성률 (G'')의 변화를 측정하고 겔화시간을 구하였다. 또 실제 트랜스퍼 몰딩 공정 온도인 175 °C에서의 겔화시간은 Curelaster (II-F, 日合 CO., LTD)를 이용하여 pressure gauge 4.5 kg-f/cm², torque range 200 (1/4)의 조건에서 측정하였다.

유전율의 측정. 유전율의 측정에는 Hewlett Packard사의 impedance analyzer (4192A)를 이용하였

고 0.25 g의 시료를 지름 12 mm, 두께 1 mm의 펠렛으로 성형한 후 실버페인트를 발라 완전 건조하여 평판형 전극으로 사용하였다. 50과 200 kHz의 주파수에 대하여 30~200 °C의 온도 범위에서 5 °C/min의 승온속도로 성형된 시료를 경화시키면서 유전상수 (dielectric constant, ϵ')와 유전 손실인자 (dielectric loss factor, ϵ'')의 변화를 관찰하였고 등온 실험을 병행하였다.

결과 및 고찰

경화반응속도. Figure 1(a)와 (b)는 DSC로 측정 한 가속제의 함량이 다른 두 EMC 프리프레그의 각각의 등온 경화온도에서의 경화반응 속도이다. 그림

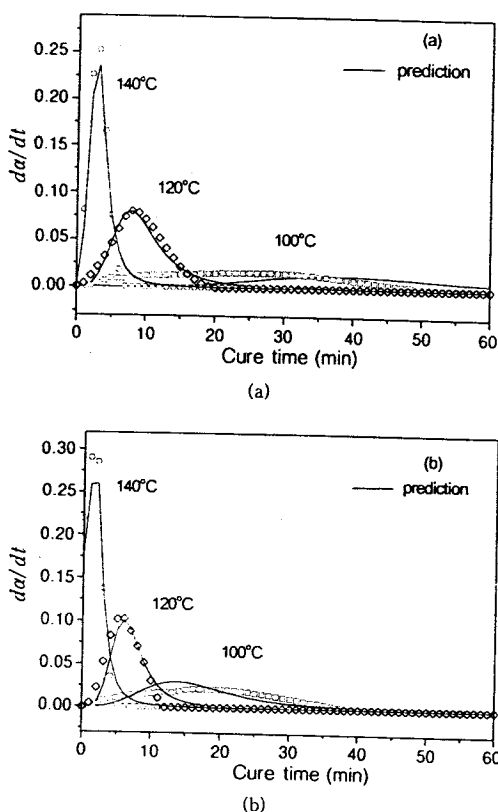


Figure 1. Comparison between cure reaction rate measured by isothermal DSC and predicted from the isothermal kinetic model at different cure temperature. (a) SI-7200GS and (b) SI-7200GSM.

에서 알 수 있듯이 경화반응 속도가 시간에 따라 증가하다가 최대 반응속도에 이른 다음부터는 다시 감소하는 전형적인 자동촉매 반응의 형태를 나타내었다. 반응속도 변수의 계산 및 경화반응 속도의 예측은 앞서 언급한 식 (1)을 기본 식으로 사용하였고 Ryan & Dutta의¹⁰ 방법과 같이 최대 경화반응 속도 즉 피크점에서의 반응속도의 시간에 대한 미분값은 0인 점을 이용하여 식 (1)로부터 유도한 다음 식으로부터 모든 변수들을 계산하였다. 또한 계산의 편의를 위하여 $m+n$ 을 2로 가정하였으며 대개의 경우가 가정은 잘 들어맞는다는 것이 알려져 있다.¹¹

$$\alpha_p = \frac{m}{m+n} \quad (3)$$

$$r_p = k \frac{m^{mn}}{(m+n)^{m+n}} \quad (4)$$

여기서 α_p 는 발열 피크에서의 전환율을, r_p 는 발열 피크에서의 경화반응 속도를 의미한다. Table 2에서 보는 바와 같이 m 값은 0.6~0.7, n 값은 1.3~1.4로 두 시료 모두 비슷한 경향을 보였고 k 는 경화온도가 증가함에 따라 같이 증가하였다. 또 같은 등온 경화 온도에서는 가속제의 함량이 높은 SI-7200GSM의 k 값이 더 높게 나타났다. 이로써 EMC의 경화반응 속도는 경화온도와 가속제의 농도에 의존함을 확인할 수 있었다.

활성화 에너지는 식 (2)에서 $\ln k$ 대 $1/T$ 의 Arrhenius plot으로부터 쉽게 구할 수 있다. Figure 2에서 알 수 있듯이 SI-7200GS가 17.7 kcal/mol, SI-7200GSM이 15.1 kcal/mol로 나타났다. 따라서 가속제의 함량이 낮은 경화 반응계가 온도에 더 민감함을 알 수 있었다.

T_g 와 유리화 점. Figure 3(a)와 (b)는 100, 120, 140, 160 °C의 등온 경화온도에서 DSC로 측정된 경화시간에 따른 T_g 의 변화이다. 그림에서 보듯이 반응물의 T_g 가 경화시간에 따라 증가하다가 어느 시점에서는 경화물의 T_g 와 경화온도가 같아지는데 이때가 유리화 점이다. 이후부터는 계의 유리화로 인한 반응속도의 지연으로 완만하게 T_g 가 증가하게 되고 이때부터 확산 지배(diffusion control)로 반응이 진행된다. 경화반응 후반에 유리화가 일어나면 이 확

Table 2. Calculated Value of Kinetic Parameters Obtained by Ryan & Dutta Method in SI-7200GS & SI-7200GSM

	cure temperature (°C)	m	n	k
SI-7200GS	100	0.70	1.30	0.124
	120	0.70	1.30	0.416
	140	0.62	1.38	1.259
SI-7200GSM	100	0.68	1.32	0.210
	120	0.70	1.30	0.420
	140	0.58	1.42	1.500

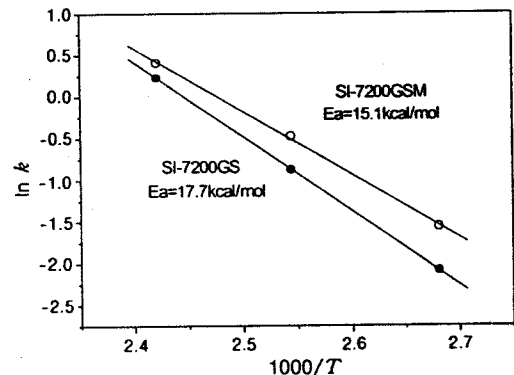
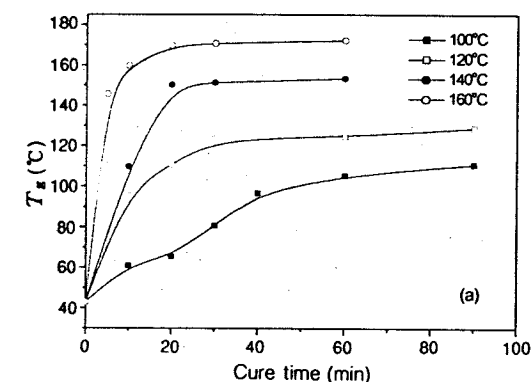


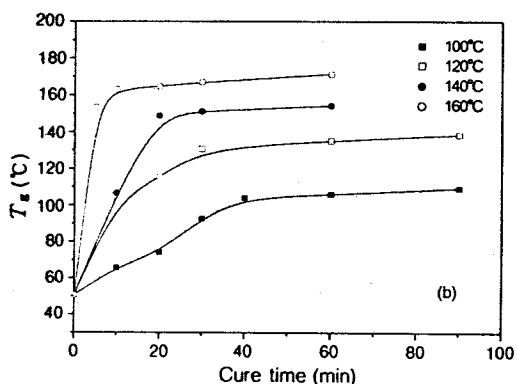
Figure 2. Calculation of activation energy. (a) SI-7200GS and (b) SI-7200GSM.

산지배에 의해 식 (1)의 계산보다 반응이 훨씬 느려진다. 이러한 영역의 확산에 의한 반응 진행도 계산할 수 있는 수식을 제안한 문헌도 있으나 EMC 경화공정이 고온에서 짧은 시간 동안의 트랜스퍼 물딩공정과 충분한 후경화 공정으로 이루어져 있으므로 특별히 고려할 필요는 없다. 또 경화온도가 높을수록 T_g 의 상승비율이 큰 것으로 보아 온도가 높을수록 에폭시기가 빠르게 망상구조를 형성함을 알 수 있고 가속제의 함량이 높은 SI-7200GSM이 같은 경화온도에서 SI-7200GS보다 유리화 점에 빨리 도달하는 것으로 보아 반응속도와의 연관성을 찾을 수 있었다. 175 °C에서 6시간 경화시킨 시료의 T_g 인 $T_{g\infty}$ 는 SI-7200GS가 162.7, SI-7200GSM이 163.4로 비슷한 경향을 나타냈는데 이는 가속제의 함량은 다를지라도 수지 시스템이 같고 고온에서 충분한 시간, 즉 완전 경화되었기 때문이다.

점탄성과의 관계. Figure 4(a)와 (b)는 120, 125, 130, 140 °C에서 등온 경화반응 시간에 따른



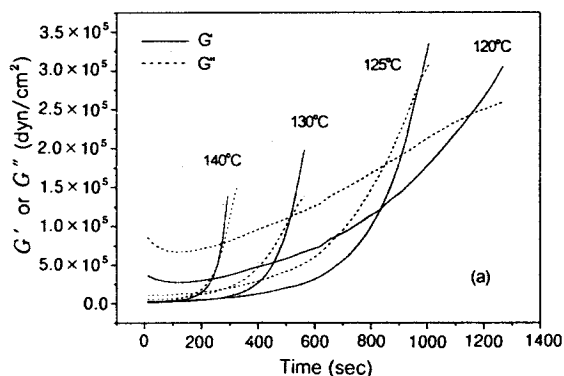
(a)



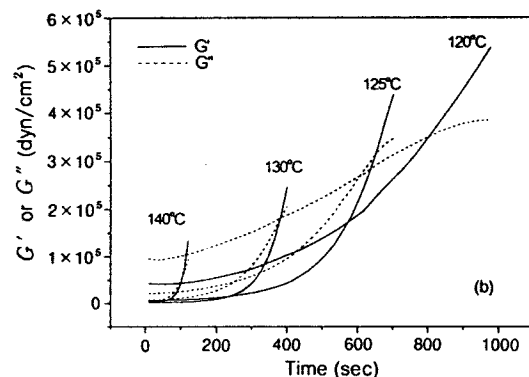
(b)

Figure 3. Time variation of T_g at various cure temperatures. (a) SI-7200GS and (b) SI-7200GSM.

G' 과 G'' 의 변화를 나타낸 것이다. Tung과 Dynes,¹² Chambon 등은 $G'-G''$ 의 교차점 ($\tan \delta=1$)이 겔화점과 일치한다고 제안했다. Loss tangent ($\tan \delta$, 한 사이클의 변형 동안에 저장된 에너지에 대한 손실된 에너지의 비)는 어떤 수치 시스템의 탄성과 점성의 상대적인 기여도를 측정하는 것이다. 따라서 점성 액체는 점성을 나타내는 G'' 가 탄성을 나타내는 G' 보다 클 것이므로 $\tan \delta$ 는 1보다 크게 되고, 반면에 탄성고체 (고무 또는 유리상)의 경우에는 1보다 작게 된다. 경화과정에서 수지는 점성액체에서 탄성고체로 전이된다. 이 때에 즉 점성액체와 탄성고체 사이의 전이상태에서 $\tan \delta$ 가 1이라 추정된다. 그림에서 볼 수 있듯이 $G'-G''$ 의 교차점을 지나기 전에는 상대적으로 G'' 가 G' 보다 크다는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Figure 4. Changes in storage modulus G' and loss modulus G'' at different cure temperature. (a) SI-7200GS and (b) SI-7200GSM.

이것은 시료가 탄성보다는 점성의 성질을 더 크게 갖는 액상 영역임을 의미하고 교차점을 지나서는 G' 값이 상대적으로 커지게 된다. 그림에서 보듯이 같은 시료에서 겔화점은 경화온도가 높을수록 빠르게 나타남을 알 수 있고 경화온도가 높을수록 겔화점 이후부터 G'' 이 급격히 증가함을 알 수 있다. 한편 같은 경화온도에서는 가속제의 함량이 높은 SI-7200GSM의 겔화시간이 짧은 것으로 나타남을 알 수 있다.

유전율과의 관계. Figure 5와 6은 DEA를 통해 얻은 승온 조건에서 경화과정 중 ϵ' 와 ϵ'' 의 변화이다. 경화가 시작되기 이전에는 ϵ' 과 ϵ'' 이 증가하는 현상을 볼 수 있는데 이것은 온도의 증가로 인해 시료 내 이온들의 모빌리티가 증가하기 때문이다. 그러나 더욱 온도가 증가하여 경화가 시작되면서부터는

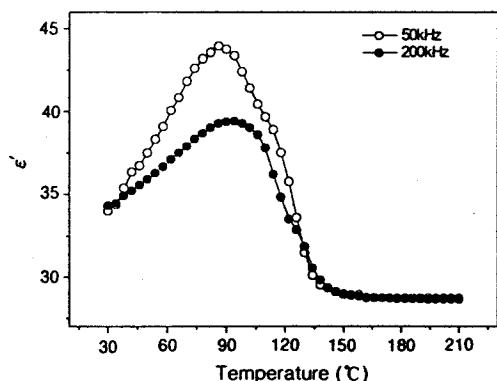


Figure 5. Changes in dielectric constant ϵ' of SI-7200GS measured by DEA.

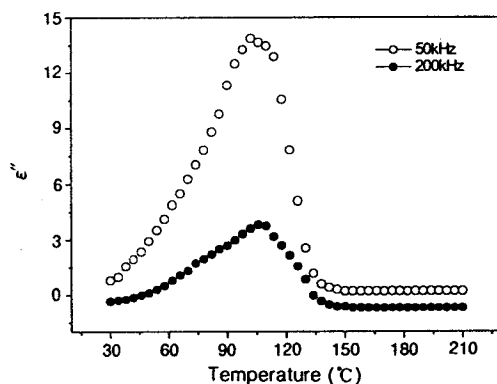


Figure 6. Changes in dielectric loss factor ϵ'' of SI-7200GS measured by DEA.

가교반응에 의해 전기 쌍극자 수가 감소하게 되어 ϵ' 값이 떨어지게 되고 ϵ'' 도 경화반응에 의해 쌍극자의 움직임이 어렵게 되므로 감소하게 된다. 경화가 거의 끝난 이후에도 ϵ' 은 조금씩 감소하고는 있지만 후경화 과정 동안 일어나는 시료내의 물리화학적 변화를 관찰하기에는 충분하지 못하다. 이 부분에 있어서는 더 광범위한 범위의 주파수를 적용한 연구가 필요할 것으로 사료된다. ϵ'' 은 경화가 진행되지 않은 저온에서는 수지 내 미량으로 함유된 이온의 모빌리티가 상대적으로 크기 때문에 이온의 전기 전도도가 지배적이고 경화가 진행됨에 따라 이온의 모빌리티는 떨어지고 대신 쌍극자의 영향이 커진다. 이온의 전기 전도도는 이온의 모빌리티를 나타내는데 이온의 전기 전도도의 역수가 분자 수준의 저항이므로 미시적 점도로 볼 수 있다. 언급한 바와 같이 경화 이전에는 이온의 전기 전도도가 지배적이기 때문에 다음의 관계가 성립한다고 알려져 있다.¹¹

$$\epsilon'' \sim \frac{1}{\eta^*} \quad (5)$$

경화가 진행되면서 수지의 점도가 급격히 증가하는데 반해 이온의 전기 전도도는 감소하게 된다. 따라서 쌍극자의 배열에 의한 영향이 이온의 전기 전도도에 대한 영향보다 커지므로 식 (5)의 관계에서 벗어나게 된다. 이러한 관계는 DEA를 이용하여 수지의 점도를 간접적으로 알 수 있다는 점에서 매우 중요하다.¹⁴⁻¹⁶

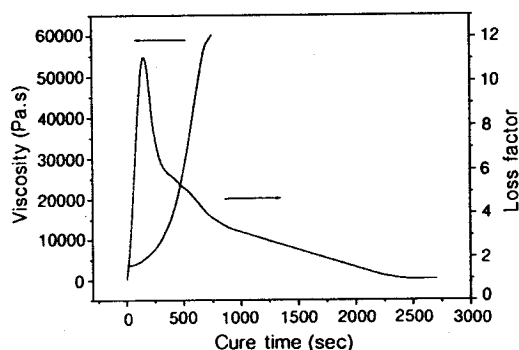


Figure 7. Changes in dielectric loss factor ϵ'' and viscosity of SI-7200GSM at constant cure temperature (125 °C).

Figure 7은 등온 (125 °C) 조건에서 측정된 SI-7200GSM의 ϵ'' 을 같은 조건에서 측정된 점도값과 비교한 것이다. 레오메타에서는 장치의 한계 상 750 초 이후 시료의 동적 점도를 더 이상 측정하지 못하는 것에 반해 DEA에서는 750초 이후로도 ϵ'' 값이 계속 감소함을 볼 수 있다. Figure 1(b)의 120 °C에서 경화반응 속도가 20분(1200초)이후 0임을 감안해 볼 때 125 °C에서는 이보다 빨리 0에 도달할 것이다. 그러나 DEA에서는 1200초 이후에도 그 값이 눈에 띄게 감소함을 볼 수 있다. 즉 DSC나 레오메타로는 감지할 수는 없지만 경화반응은 계속 진행중임을 DEA로 확인할 수 있었다.

TTT Diagram (Time-Temperature-Transformation Diagram). Figure 8(a)와 (b)는 각 EMC의

전체적이 경화거동을 살펴보기 위해 앞서 구한 겔화 시간과 유리화 점의 데이터를 이용해 작도한 TTT diagram이다. 일반적으로 에폭시의 경화공정은 이 TTT diagram을 참고로 하여 결정되는 것으로 대개는 겔화 곡선과 유리화 곡선의 교차점인 $_{gel}T_g$ 와 $T_{g\infty}$ 사이의 온도에서 수행된다.^{17,18} 이 온도 범위에서 에폭시는 가공 초기의 상태가 시간이 지남에 따라 경화되어 고무상으로 바뀌게 되고 더욱 시간이 지나면 유리형태로 상이 바뀌게 된다. 공정을 빠르고 편리하게 하기 위해서 수지의 점도는 낮을수록 좋고 그러기 위해서는 공정온도를 높여야 하나 성형품의 열 안정성 및 균일성을 위해 고온영역을 피해야 한다. 그림에서 보듯이 두 EMC 모두 $_{gel}T_g$ 가 113~114 °C 부근에서 나타났고 가속제의 함량이 높은 SI-7200GSM의 $_{gel}T_g$

가 시간적으로 앞서 나타난다는 차이점이 있다. 즉 SI-7200GSM의 TTT diagram의 전체적인 형상은 SI-7200GS의 겔화 곡선과 유리화 곡선을 경화시간 축을 따라 왼쪽으로 일정시간 평행 이동시킨 것과 유사하다. 따라서 OCN/PN의 경화 시스템에서 TPP의 함량 변화는 경화공정 온도구간에서 가교결합을 촉진하는 역할만을 함을 알 수 있다.

결론

가속제의 함량이 서로 다른 상용 EMC의 경화거동을 DSC, Rheometer, Curelaster, DEA를 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 자동촉매 반응식을 이용하여 Ryan & Dutta의 방법에 의해 각 시료의 경화반응 속도 변수를 결정할 수 있었고 가속제의 함량이 1.38 phr인 SI-7200GS와 1.61 phr인 SI-7200GSM의 활성화 에너지는 각각 17.7과 15.1 kcal/mol이었다.

2. 계산된 속도변수를 이용한 경화반응 속도 모델식에 의한 예측과 실제 실험 데이터가 100 °C에서 큰 차이를 보이는 것은 TTT diagram에서 보듯이 이 온도에서는 겔화에 앞서 유리화가 먼저 진행되기 때문이다.

3. EMC와 같이 무기물이 충전된 물질의 유전을 측정에는 평판형 전극이 매우 효과적이며 레오메타나 DSC가 장치의 한계상 감도를 나타내지 못하는 경화반응 말기의 시료내 미소변화를 확인할 수 있었는데 승온조건 보다는 등온조건에서 그 변화가 더 확연히 나타났다.

4. 수지 시스템이 같은 두 시료의 TTT diagram은 가속제의 함량이 높은 쪽의 겔화 및 유리화 곡선이 시간적으로 앞서 있을 뿐이며 전체적인 형태는 매우 유사하고 $_{gel}T_g$ 의 변화는 없었다.

5. 수지 시스템이 같다면 가공이 가능한 공정온도 구간은 변하지 않으며 가속제의 함량은 공정시간 제어에 매우 효과적이다.

참고문헌

1. L. T. Manzione, "Plastic Packaging of Microelectronic Devices" p. 68, van Nostrand Reinhold, N. Y., 1990.

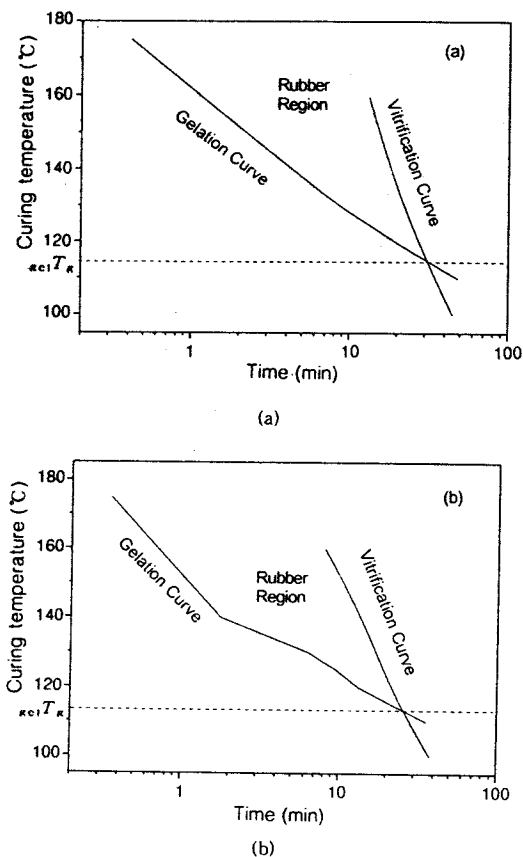


Figure 8. TTT diagram. (a) SI-7200GS and (b) SI-7200GSM.

2. D. S. Soane and Z. Martynenko, "Encapsulations and Packaging of Integrate Circuits", in "Polymers in Microelectronic, Fundamentals and Applications", p. 213, Elsevier, N.Y., 1989.
3. J. J. Licari and L. A. Hugues, "Handbook of Polymer Coatings for Electronics", p. 14, Noyes Publications, Park Ridge, N. J., 1990.
4. S. D. Senturia and N. F. Sheppard, *Adv. polym. Sci.*, **80**, 1 (1986).
5. A. M. Maffezzoli, L. Peterson, and J. C. Seferis, *Polym. Eng. Sci.*, **33**, 75 (1993).
6. A. J. Mackinnon, S. D. Jenkins, P. T. McGrail, and R. A. Petheric, *Macromolecules*, **25**, 3492 (1992).
7. I. Alig, D. Lellinger, K. Nancke, A. Rizo, and G. Fytas, *J. Appl. Polym. Sci.*, **44**, 829 (1992).
8. M. R. Kamal and S. Sourour, *Polym. Eng. Sci.*, **13**, 59 (1973).
9. K. W. Lem and C. D. Han, *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 3207 (1983).
10. M. R. Keenan, *J. Appl. Polym. Sci.*, **33**, 1720 (1987).
11. H. Kim, Y. S. Eom, K.-M. Chung, K. J. Ahn, and K. Char, *Polymer(Korea)*, **19**, 265 (1995).
12. C. Y. M. Tung and P. J. Dynes, *J. Appl. Polym. Sci.*, **27**, 569 (1982).
13. F. Chambon and H. H. Winter, *Polym. Bull.*, **B**, 499 (1985).
14. S. D. Senturia and N. F. Sheppard, *Adv. Polym. Sci.*, **80**, 1 (1986).
15. D. E. Kranbuehl, D. Hood, J. Rogozinski, and W. Limburg, *ACS Preprint*, **36**, 773 (1995).
16. K. J. Ahn, K. M. Chung, Y. S. Eom, H. Kim, and K. Chan, *J. Korean Soc. Composite Mat.*, **7**, 87 (1994).
17. C. A. May, "Epoxy Resins", Marcel Dekker, Inc., New York, 1988.
18. B. Ellis, "Chemistry and Technology of Epoxy Resin", Blackie Academic and Professional, Glasgow, 1993.