

반도체칩 봉지재용 에폭시 몰딩 컴파운드의 점도거동

이명천[†] · Sejin Han^{*}

동국대학교 화학공학과

^{*}School of Mechanical & Aerospace Engineering, Cornell University

(2001년 12월 6일 접수, 2002년 2월 28일 채택)

Viscosity Behaviors of Epoxy Molding Compound for the Semiconductor Microchip Encapsulant

Myung Cheon Lee[†] and Sejin Han^{*}

Department of Chemical Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

^{*}School of Mechanical & Aerospace Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, USA

(Received 6 December 2001; accepted 28 February 2002)

요 약

반도체 봉지재용 에폭시 몰딩재(EMC)의 점도를 평행판형 레오미터와 특별히 고안된 슬릿형 레오미터를 이용하여 측정하였다. 저온과 저전단율에서의 점도는 평행판 레오미터를 이용하여, 그리고 고온과 고전단율에서의 점도는 슬릿형 레오미터를 이용하였다. 평행판형 레오미터 실험결과는 Cox-Merz식 보다는 변형된 Cox-Merz식이 EMC의 점도거동을 더 잘 나타내고 있음을 보여주었으며, 고온 고전단율에서 슬릿형 레오미터를 이용하여 측정 한 점도측정 자료는 이 자료에 의해 결정된 Cross-Macosko식의 점도값과 잘 일치됨을 보였다. 또한, EMC의 spiral flow length는 슬릿형 레오미터와 시차주사열량계(DSC)로 각각 결정된 Cross-Macosko식과 Kamal식을 이용한 예측치와 잘 일치되었다.

Abstract – The viscosity of epoxy molding compound(EMC) for the encapsulation of semiconductor chip has been measured using a parallel plate rheometer and a specially designed slit rheometer. The viscosity of EMC at low temperature and low shear rate has been determined with a parallel plate rheometer, while that at high temperature and high shear rate has been determined with the slit rheometer. The experimental results of the parallel plate rheometer revealed that the modified Cox-Merz relation was more suitable for the characterization of viscosity behavior of EMC than the Cox-Merz relation. The viscosity data measured using the specially designed slit rheometer at high temperature and shear rate exhibited a good agreement with the fitted values calculated using the Cross-Macosko equation. The Cross-Macosko equation and Kamal equation determined by the slit rheometer and differential scanning calorimeter(DSC), respectively, made a good prediction in spiral flow length of EMC.

Key words: EMC, Viscosity, Slit Rheometer, Cross-Macosko, Kamal

1. 서 론

반도체칩의 봉지재에 사용되어지는 EMC(Epoxy Molding Compound)의 점도변화거동은 봉지과정의 예측과 최적화에 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 그러나, 이 EMC에 사용되는 수지는 열경화성 수지이며 젤화 시간이 30-40초 정도로 짧고 고농도의 충전제가 포함되어 있는 고점도이기 때문에 점도의 측정이 매우 어렵다.

충전제로는 실리카 충전제가 대부분을 차지하고 있는데, 보통 충전제의 함량이 65 vol% 이상을 차지하고 있으며[1, 2], 높은 충전제 함량으로 인해 EMC의 점도 거동은 충전제들에 의한 영향이 매우 크다

고 할 수 있다. 고농도의 충전제 함유 고분자들의 거동 변화를 파악하는 데는 대부분 경험적이거나 반경험적인 수식들을 적용하여 사용하고 있다. 일반적으로 높은 탄성 유체와 고분자 용융 유체의 경우는 낮은 전단율에서의 정적전단점도를 측정하는 것이 매우 어렵다. 특히 영점전단율(zero shear rate)에서의 점도를 구하기 위해서는 전단율에 따른 점도 변화를 구한 후 얻어진 결과들을 외삽하여 구할 수 있는데, 이를 위해서는 우선적으로 주파수에 따른 점도 변화 값을 측정하여 전단율에 따른 점도 변화 값으로 변환해야 한다. 이러한 전단점도(shear viscosity)를 예측하는데 유용한 경험식들이 제안되어졌는데, 그 중에 많이 사용되어지는 것이 Cox-Merz식으로 다음의 식 (1)과 같이 표시되어진다[3].

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta^*(\omega) \quad (1)$$

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: leemc@dongguk.edu

여기에서 $\dot{\gamma}$ 는 전단율, η^* 는 복합점도(complex dynamic viscosity), ω 는 주파수이다. 이 식은 cone-and-plate나 parallel plate를 사용하는 레오미터로 유동 특성을 파악하게 되는 경우에는 낮은 범위의 전단율에서의 정적전단점도(steady shear viscosity), η 를 측정하는 것이 어렵기 때문에 실험에 의해 용이하게 측정할 수 있는 주파수 범위 내에서 복합점도, η^* 를 결정하여 정적전단점도, η 로 전환하는 유용한 경험식이다. 하지만, 이 식은 점도변화가 변형에 무관한 순수 수지에 있어서는 적용이 가능하지만, 수지가 커다란 측체를 포함한다거나 고농도의 충전제가 포함되어 있는 경우에는 변형률의 변화에 따라 점도 거동이 달라지기 때문에 잘 맞지 않는다고 알려져 있다[4]. 그러므로, 높은 함량으로 충전된 물질에 대해서는 정적전단점도를 유효전단율(effective shear rate), $\gamma_m\omega$ 의 함수로 표시한 modified Cox-Merz식이 제안되었으며, 이 관계식은 다음의 식 (2)와 같이 표시된다[5].

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta^*(\gamma_m\omega) \quad (2)$$

여기에서 γ_m 는 최대변형률이다. Doraiswamy et al.[5] 등은 충전제가 고농도로 충전된 계에서 복합점도, η^* 가 유효전단율, $\gamma_m\omega$ 의 함수로 결정됨을 수식으로 유도하였으며 이 식을 이용하여 주파수가 낮은 경우와 높은 경우 각각에 대하여 η 대 $\dot{\gamma}$ 의 값들이 η^* 대 $\gamma_m\omega$ 의 값들과 같아질 수 있음을 증명하였다. 또한 이 결과를 실험으로 검증할 때에는 실리코입자가 70 vol%의 고농도로 충전된 폴리에틸렌계에 대하여 최대 변형률값을 3, 20, 50%로 변화시켜가며 동적점도값을 주파수의 함수로 측정 한 후 동적 점도값을 주파수의 함수로 나타내었을 때는 서로 다른 변형률에 대해서는 곡선이 일치하지 않았지만 주파수에 최대변형률을 곱한 $\gamma_m\omega$ 의 함수로 나타내었을 때는 세 경우의 곡선들이 잘 일치함을 보여주었다.

열경화성 수지에 대한 경화과정에서의 점도 측정은 지금까지 여러 번의 시도가 이루어 졌으며 대표적인 것으로는 Castro and Macosko[6]의 연구가 있으며 이 연구에서는 열경화성 폴리우레탄 시스템에 대해 점도와 경화도의 관계를 밝힘으로써 다음과 같은 Macosko식을 제안하였다.

$$\eta(\alpha, T) = \eta_0(T) \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha} \right)^{(C_1 + C_2\alpha)} \quad (3)$$

$$\eta_0(T) = B \exp(T_b/T) \quad (4)$$

여기에서 η 는 전단점도, η_0 는 영점전단율 점도, α 는 경화도, α_g 는 젤화점에서의 점도, γ 는 전단율, 그리고, C_1, C_2, B, T_b 는 상수이다. 또한, Kamal and Ryan[7]의 연구가 있는데 이 연구에서는 mechanical spectrometer와 모세관 점도계를 이용하여 열경화성 수지의 점도를 측정하였다.

그러나, EMC 수지는 열경화성 수지가 갖고 있는 일반적인 점도측정의 어려움 외에 실제 봉지공정온도인 170 °C 정도의 가공온도에서 30-40초 정도의 짧은 시간에 젤화가 되는 문제와 60-70%의 높은 첨가제 함량으로 인한 yield stress 거동, 높은 전단율 의존성 그리고 아주 높은 점도 등의 문제를 추가로 갖고 있다. 이외에도 점도측정 범위의 넓음을 들 수 있는데 예를 들면 전단율의 경우 1-5,000 s⁻¹ 정도의 범위에서 공정이 이루어지며 온도의 경우 70-180 °C 범위에서 이루어진다.

이러한 EMC에 대한 점도의 측정은 지금까지 여러 차례 시도되어 왔다. 대표적인 예를 들면 Blyler 등[8]은 모세관 레오미터와 transfer-molding 기기를 접합하여 점도를 측정하였는데 전단율 변화에 따른 점도변화가 크지 않음을 보여주었고 있다. Turng and Wang [9]은 평행회전판을 이용하여 온도와 경화도에 따른 점도변화를 가열정도를 변화시켜가며 측정하였다. Nguyen 등[10]은 slit rheometer를 이용하여 온도와 경화도 외에 전단율을 변화시켜가며 점도를 측정하였는데 전단율을 변화시킬 경

우에는 경화축매를 사용하지 않았으며 다음과 같은 Cross 모델(Cross[11]; Hieber[12])을 이용하였다.

$$\eta(\alpha, T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left(\frac{\eta_0(T)\dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha} \right) (C_1 + C_2\alpha) \quad (5)$$

$$\eta_0(T) = B \exp(T_b/T) \quad (6)$$

여기에서 γ 는 전단율, τ^* 와 n 은 상수이다.

모세관 레오미터의 경우 10 s⁻¹ 이상의 높은 전단율에서의 점도측정에는 적당하지만 기계적으로 열경화성 수지의 점도측정에는 무리가 있으며 회전형 점도측정기인 RMS(Rheometric System)나 RDS(Rheodynamic System)같은 점도측정기는 1 s⁻¹ 이하의 낮은 전단율에서의 점도측정에만 적합하며 또, 온도를 170 °C까지 올리는데 많은 시간이 걸리기 때문에 단시간에 젤화하는 EMC의 점도 측정에는 적당하지 않다.

기준에 가장 많이 사용한 방법은 RMS나 RDS를 이용하여 100 °C 정도의 낮은 온도와 1 s⁻¹ 이하의 낮은 전단율에서 점도를 측정 한 후 이를 외삽하여 실제 가공공정에서의 점도값을 예측하는 방법을 써오고 있었다. 그러나, 이러한 방법은 많은 오차를 불러올 수 있기 때문에 실제 가공공정에서 점도를 측정할 수 있는 측정기에 대한 요구가 지속적으로 있어왔다. 한편 RMS의 저전단율 측정범위와 모세관 레오미터의 고전단율 측정범위 사이의 중간정도 전단율 범위 사이에서 점도변화를 측정할 수 있는 점도측정기로는 슬릿형 레오미터가 알려져 있다. 그러나, EMC와 같이 짧은 시간에 경화가 일어나고 높은 충전제 함유에 따른 고점도의 열경화성 수지의 점도를 측정하기 위해서는 특별한 설계가 필요하기 때문에 지금까지 적당한 슬릿형 레오미터가 제작되지 못하여 왔다.

최근 Han 등[13]은 짧은 시간에 경화가 일어나는 열경화성 수지에 적합한 슬릿형 레오미터를 제작하였으며 다양한 재료들을 시험하여 그 유용함을 검증 받아오고 있다. 본 연구에서는 반도체 봉지재에 사용되는 EMC를 이 슬릿형 레오미터에 적용하여 점도를 측정하여 보았다. 측정 온도는 140, 155 그리고 170 °C의 세 온도에서 실시하였으며 EMC의 점도변화를 시간에 따라 측정하였다. 또한, 이 결과값과 시차주사열량계를 이용한 경화거동 실험값을 이용하여 C-MOLD의 Kamal식과 Cross-Macosko식에 적용하여 점도값을 계산하여 보았다. Cross-Macosko식에 의한 예측값은 다시 슬릿형 레오미터에 의한 실험값과 비교하여 보았고 그 정확성은 다시 SFL(Spiral Flow Length)측정 실험을 통하여 확인하였다.

2. 실험

본 연구에 사용되어진 에폭시 수지는 반도체 봉지재에 보편적으로 사용되어지고 있는 노블락계 수지로서 수평균분자량이 660이며 Nippon Kayaku(주)의 제품이다. 충전제는 구상 실리카로서 용융되어 제조되었으며 일본의 Hitachi사의 제품을 사용하였다. 수지와 충전제 그리고 경화제의 혼합은 Brabender 혼련기를 사용하여 80 °C의 온도에서 10분간 혼련하여 제조하였다. 이렇게 얻어진 시료는 분쇄기를 사용하여 분말로 제조하였다.

점도 측정을 위해서 제조된 분말은 몰드를 이용하여 시편을 제작하였는데 평행판형 레오미터용 시료의 경우 직경 25 mm, 높이 2 mm, 슬릿형 레오미터용 시료의 경우 직경 60 mm, 높이 30 mm의 원통형 시료로 제조하였다. 평행판형 레오미터의 경우 Rheometric사의 RMS를 이용하여 90 °C의 온도에서 주파수 범위는 1-100 s⁻¹, 그리고 변형률값 변화는 1, 5, 10, 50%로 하였다. 슬릿형 레오미터를 이용한 점도의 측정

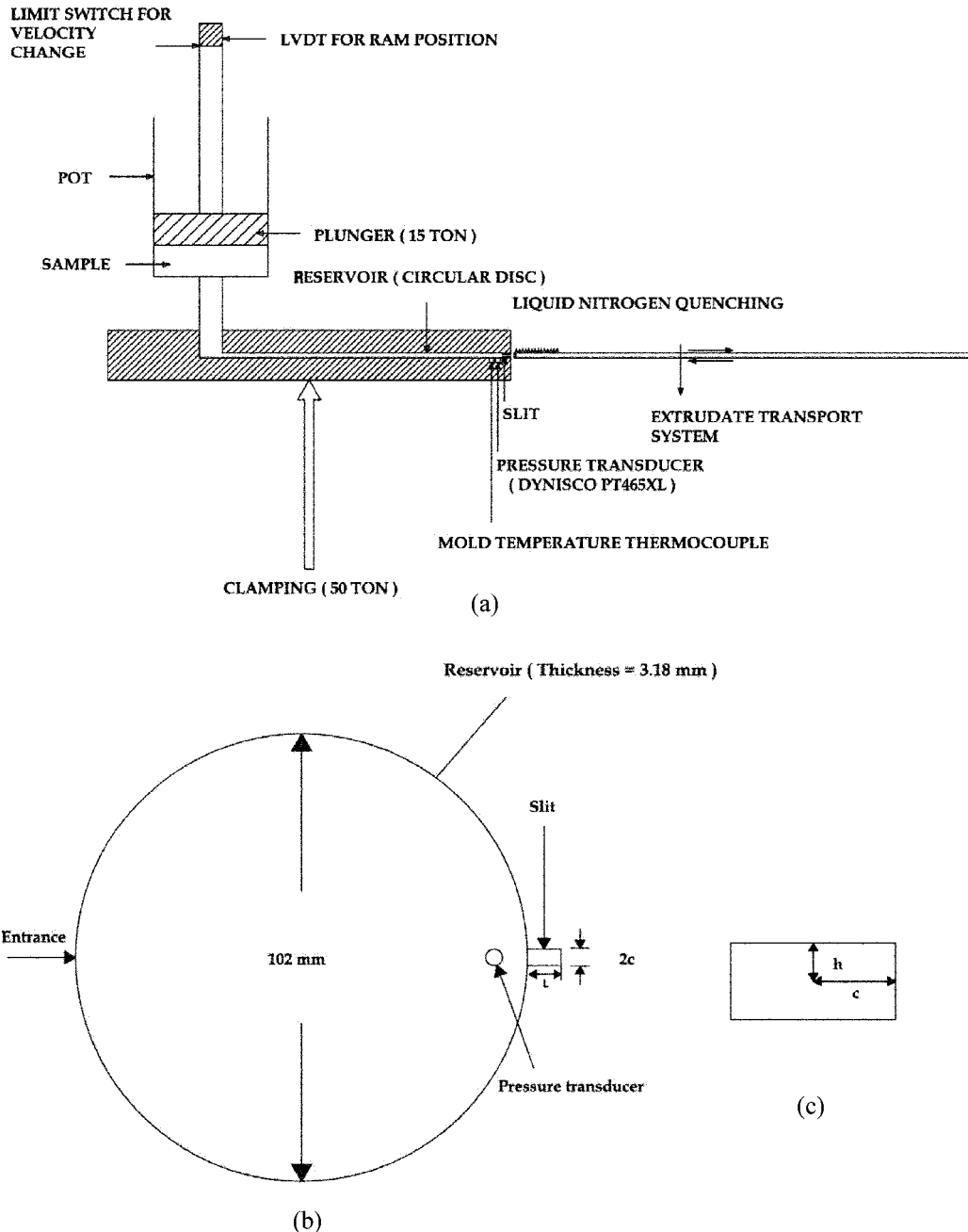


Fig. 1. Slit rheometer for viscosity measurement of epoxy molding compounds: (a) overall side view, (b) top view of reservoir, and (c) cross section of slit.

은 140, 155 그리고 170 °C의 온도에서 각각 측정하였다. EMC의 경화 거동은 시차주사열량계(Perkin-Elmer DSC-7)를 사용하였으며 승온속도는 5, 10, 20 그리고 40 °C/min로 변화시켰다.

새로이 제안된 슬릿형 레오미터의 구조는 아래의 Fig. 1에 나타내었으며 자세한 작동원리는 Han 등(1997)의 논문에서 묘사되어 있다. 주요 구조를 설명 하면 우선 점도 측정부는 RTM(Resin Transfer Molding)과 연결이 되어 있고, 측정부위의 단면은 사각형으로 되어 있으며 측정하고자 하는 전단율값 범위에 따라 단면적이 다른 부품으로 교환하도록 그리고 세밀한 전단율의 조절은 RTM에 있는 램(ram)속도로 조절하도록 되어 있다. 기존의 슬릿형 레오미터와 다른 점은 짧은 시간에 시료를 고온으로 가열하기 위해 측정부 직전에 원판형 저장고(disk-shaped

reservoir)를 설치하여 압력 측정 부위에 진입하기 전에 이곳에서 어느 정도 머물면서 최종온도로 가열되도록 한 부분이다.

3. 결과 및 토론

전단을 변화에 따른 점도변화를 알아보기 위해 평행판형 레오미터인 RMS를 사용하였다. 이때 주파수 변화에 따른 점도변화를 먼저 측정 한 후 이를 Cox-Merz식을 이용하여 전단을 변화로 환산하였으며 그 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 측정 온도는 90 °C로 하였는데 이 이상의 온도가 되면 측정도중 경화반응에 의한 영향을 받게 된다. 변형률은 1, 5, 10, 50%로 변화시켜가며 측정하였다. 변형률이 5%일 때 1%인 경우보

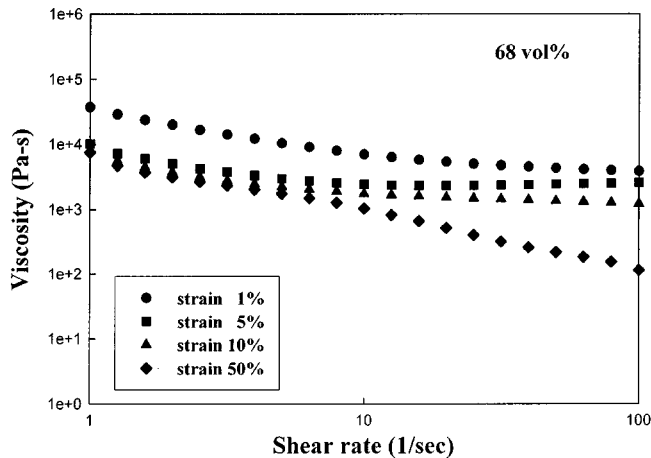


Fig. 2. Viscosity changes of EMC containing 68 vol% of filler with frequency and shear rate (when the Cox-Merz rule is applied) at various strains.

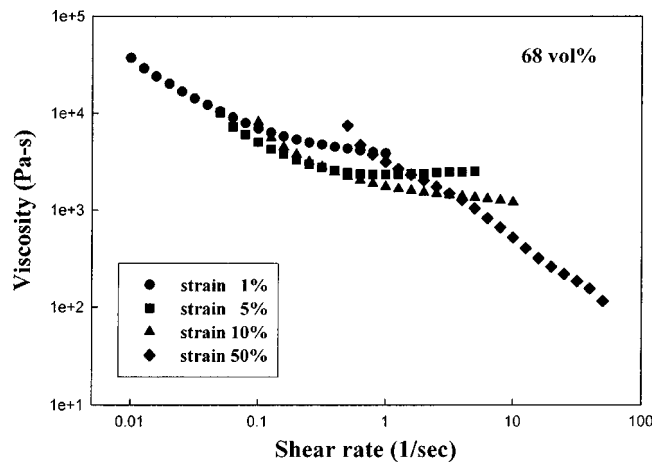


Fig. 3. Viscosity changes of EMC containing 68 vol% of filler with shear rate (when the modified Cox-Merz rule is applied) at various strains.

다 점도 값은 크게 떨어졌으나 변형률 10%와 50%에서는 5%의 경우에 비해 더 이상 큰 점도 값의 차이는 없었다. 그러나, 변형률이 50%의 경우 주파수가 어느 정도 커지면 점도가 급작스럽게 떨어지는데 이는 충전제가 고농도로 함유되어 있고 높은 변형률 및 높은 주파수에서 나타나는 현상으로 재료 자체의 현상보다는 시료와 측정장치의 원판 사이의 미끄럼 때문에 일어나는 현상으로 판단된다.

한편, 현재까지 알려진 바로는 Cox-Merz식은 순수한 선형 고분자 수지에는 잘 맞는 식이지만 충전제가 포함되어 있거나 비선형 고분자 수지일 경우에는 잘 맞지 않는다고 알려져 있다. Cox-Merz식을 적용하면 주파수값과 같은 값의 전단율에 대해서도 같은 점도값을 가져야 한다. 따라서, Cox-Merz식이 잘 맞는다면 한 그래프 안의 모든 선들이 최대 변형률값에 상관없이 모두 일치해야 하는데 최대 변형률값의 변화에 따른 선들이 잘 일치하지 않아 Cox-Merz식이 잘 맞지 않음을 보여주고 있다. 이는 변형률에 따라 충전제의 재배열이 되는 정도가 달라지기 때문일 것으로 사료된다.

Modified Cox-Merz식을 적용하는 방법은 주파수의 함수로 나타낸 점도값을 전단율, $\dot{\gamma}$ 의 함수로 전환하여야 하는데 이때 전단율은 주파수값에 최대변형률을 곱한 $\dot{\gamma} = \gamma_m \omega$ 의 식을 이용하면 된다. 예를 들면 변형

Table 1. Fitted curing kinetics parameters of Kamal equation

Parameters	Values
n	0.7347
tau(Pa)	7.3e-5
B(Pa-s)	8.3e-8
T_b (K)	12038.7
C_1	5.326
C_2	0.194
α_g	0.387

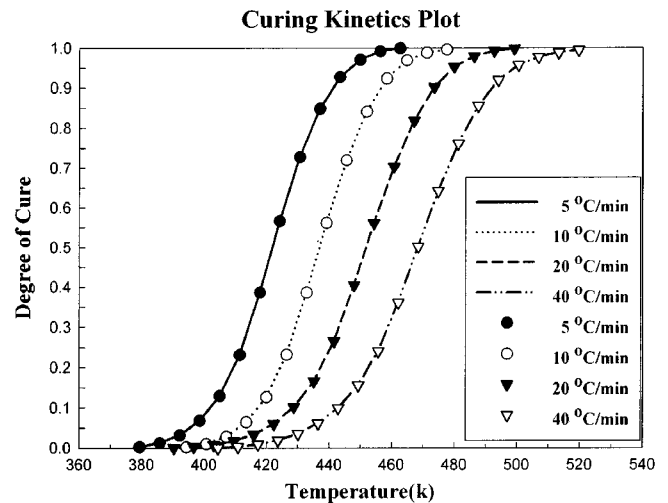


Fig. 4. Degree of cure measured by DSC at three different heating rates with corresponding best-fit curves based on Kamal's equation.

률이 1%이고 주파수가 10 s^{-1} 인 경우 modified Cox-Merz식을 적용하면 전단율값은 0.1 s^{-1} 이 된다. Fig. 3에서 보면 modified Cox-Merz식을 적용하였을 때 전단율의 범위가 최대변형률 만큼 왼쪽으로 이동하였으므로 $1-100 \text{ s}^{-1}$ 에서 $0.01-100 \text{ s}^{-1}$ 의 범위로 더 넓어졌고 서로 다른 최대변형률에서 측정한 값들이 이 전단율 범위에서 한 개의 마스터 곡선으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 이 마스터곡선을 이용하면 전단율에 따른 점도 변화 예측식을 보다 넓은 전단율 범위에서 결정할 수 있다.

본 실험에 사용된 EMC의 경화거동을 알아보기 위해 시차주사열량계

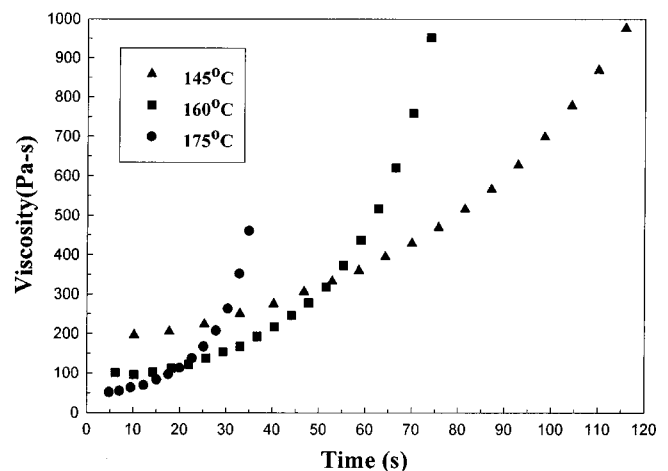
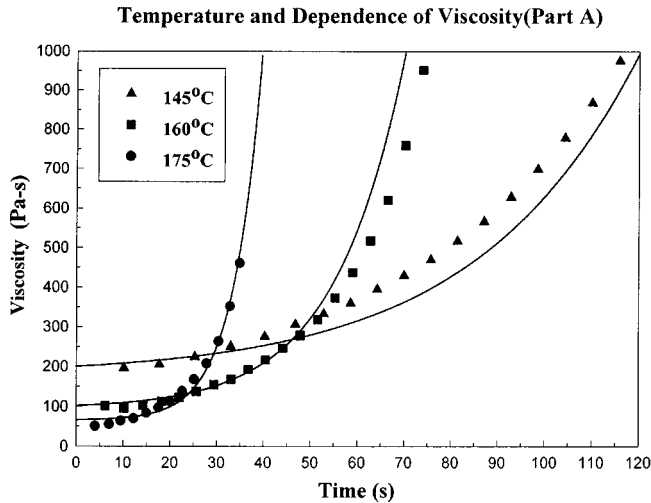


Fig. 5. Viscosity change of EMC with temperature and cure time.

Table 2. The values of fitted viscosity parameters(Cross-Macosko model)

Parameters	Values
m	0.601
n	1.252
A ₁	1.76e+9
A ₂	278359
E ₁	12415.7
E ₂	7314.1

**Fig. 6. Viscosity change of EMC with fitting curves based on the Cross-Macosko equation at three different temperatures.**

를 이용하였으며 승온속도는 5, 10, 20 그리고 40 °C/min로 변화시켰다. 시료의 경화도는 반응열을 이용하여 다음의 식을 이용하였다.

$$\alpha = \frac{H_t - H_e}{H_t} \quad (7)$$

이 결과를 이용하면 Kamal식의 매개변수값들을 결정할 수 있고 이 변수값들이 결정되면 이 Kamal식들을 이용하여 경화거동을 예측할 수 있다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = (K_1 + K_2 \alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (8)$$

$$K_1 = A_1 \exp(-E_1/T) \quad (9)$$

$$K_2 = A_2 \exp(-E_2/T) \quad (10)$$

Table 1에는 실험치를 fitting하여 얻은 매개변수값들을 정리하였다. Fig. 4에는 시차주사열량계에 의한 경화거동 실험치와 이 실험치를 이용하여 결정된 Kamal식에 의한 예측치가 함께 나타내어져 있다. 이 그림에서 보면 실험치와 Kamal식에 의한 값이 잘 일치함을 알 수 있다.

Kamal식이 경화거동을 나타내는 식이라면 경화도와 전단율에 따른 점도의 변화는 Cross-Macosko식[식 (3), 식 (4)]과 같이 나타내어진다. Cross-Macosko식에 있는 각 매개변수들을 결정하기 위해서 145, 160, 175 °C 세 온도에서의 점도 변화값을 slit rheometer를 이용하여 측정하였다. 점도를 측정하기 위한 slit rheometer의 실험조건으로 램속도는 8.26e-5 m/s 그리고 전단율은 366.6 s⁻¹으로 하였다.

점도측정실험 결과는 Fig. 5에 나타내었는데 높은 온도에서 측정할수록 점도의 증가속도가 크게 증가함을 볼 수 있다. 실제 공정온도가 175 °C 부근인데 이 온도에서의 실험결과를 보면 30초 정도의 시간에

이미 젤화점에 도달함을 알 수 있다.

이 세 온도에서 측정된 점도값과 앞에서 구한 Kamal식을 식[(3), (4)]에서 나타낸 Cross-Macosko식에 대입하면 이식에 있는 매개변수들을 결정할 수 있다. 결정된 매개변수들은 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 나타난 매개변수 값들을 Cross-Macosko식에 적용한 후 각 온도에서 시간에 따른 점도변화를 계산하였고 이를 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 실험치와 비교하여 보았다. 이 결과 Cross-Macosko식에 의한 값과 실험값들이 잘 일치함을 볼 수 있다. 특히 실제 공정 온도인 175 °C의 경우 다른 낮은 온도의 경우보다 더욱 잘 일치함을 볼 수 있는데 이는 Cross-Macosko식이 EMC와 같은 급격한 경화특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편, 이 슬릿형 레오미터를 이용하여 결정된 Cross-Macosko식이 반도체 봉지재용 EMC의 중요한 물성중의 하나인 SFL(Spiral Flow Length)을 어느 정도 잘 예측할 수 있는 지를 알아보기 위해 SFL측정 실험을 하였다. 실험에 사용된 SFL 측정장치의 관 길이는 115 cm 이며 175 °C에서 RTM을 이용하여 시료를 주입하도록 되어 있다. 이 결과 실험치는 58.4 cm를 흘려갔으며 Cross-Macosko식에 의한 예측은 56.3 cm 값을 보여 우수한 예측치를 보임을 알 수 있었다. 예측치의 계산은 C-MOLD를 활용하였으며 이때 이용된 수치해석 기법은 FEM(Finite Element Method)이며 mesh의 개수는 200개로 정하였다.

4. 결 론

반도체 봉지재용 EMC는 짧은 경화시간과 고충전제에 의한 고점도 문제로 그동안 낮은 온도에서 측정된 값을 외삽하여 구하는 간접적인 예측만이 가능했었다. 그러나, 새로이 제안된 슬릿형 레오미터에 적용하여 실제 가공온도에서 점도측정 실험을 한 결과 이것이 가능함을 보였고, 이 실험치를 Cross-Macosko식에 적용하여 SFL예측치를 계산한 후 이를 SFL실험값과 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한, Cross-Macosko식이 슬릿형 레오미터를 이용한 점도값을 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Pecht, M. G., Nguyen, L. T. and Hakim, E. B.: "Plastic Encapsulated Microelectronics; Materials, Process, Quality Reliability, and Application," John Wiley & Sons, New York, 55(1995).
2. Tummala, R. R., Rymaszewski, E. J. and Klopfenstein, A. G.: "Microelectronics Packaging Handbook-semiconductor Packaging", part III, 2nd ed., Champman & Hall, New York, 407(1997).
3. Cox, W. P. and Merz, E. H.: *J. Polym. Sci.*, **28**, 619(1958).
4. Dealy, J. and Wissbrun, K.: "Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing-Theory and Applications," Van Nostrand Reinhold, New York, 173(1990).
5. Doraiswamy, D., Mujumdar, A. N. and Metzner, A. B.: *J. of Rheology*, **35**, 647(1991).
6. Castro, J. M. and Macosko, C. W.: *SPE Technical Paper*, **26**, 434(1980).
7. Kamal, M. R. and Ryan, M. E.: *Polym. Eng. Sci.*, **20**, 857(1980).
8. Blyer, L. L., Bair, H. E., Hubbauer, P., Matsuoka, S., Pearson, D. S., Poelzing, G. W., Progelhof, R. C. and Thierfelder, W. G.: *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 1399(1986).
9. Turm, L. S. and Wang, V. W.: *J. Reinforced Plastics Composites*, **12**, 506(1993).
10. Nguyen, L. T., Danker, A., Santhiran, N. and Shervin, C. R.: "Flow Modeling of Wire Sweep during Molding of Intergrated Circuits,"

- ASME Winter Annual Meeting(1992).
11. Cross, M. M.: *J. Colloid Sci.*, **20**, 417(1965).
12. Hieber, C. A.: "Injection and Compression Molding Fundamentals," edited by A. I. Isayev, Marcel Dekker, New York, Ch. 1(1987).
13. Han, S., Wang, K. K., Hieber, C. A. and Cohen, C.: *J. Rheol.*, **41**, 177(1997).