

Underfill용 액상 Epoxy Compound의 Filler 충전에 따른 Flow특성 연구

김원호 · 황영훈 · 배종우 · 정혜욱

부산대학교 화학공학과

Flow Properties of Liquid Epoxy Compounds as a Function of Filler Fraction for the Underfill

Wonho Kim, Young-Hun Hwang, Jong-Woo Bae and Hye-wook Jung

Department of Chemical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

초 록 : 반도체 공정의 발전에 의해 새롭게 요구되어지는 underfill의 개발을 위해, epoxy/anhydride/cobalt(II)촉매와 크기가 다른 두 종류($1\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$)의 용융 실리카를 충전제로 하여 충전율에 따른 시료의 물성을 측정하고 결과 값의 상호관계를 분석하였다. 우선 80°C 의 흐름공정에서는 경화반응을 일으키지 않고, 성형공정에서 빠른 경화와 100%경화를 얻기 위해서는 15분간 160°C 로 경화시킨다는 조건에서 1.0 wt%의 촉매가 요구된다는 것을 경화 profile을 이용하여 알 수 있었다. 필러 충전에 따른 표면장력과 점도의 변화 관찰을 통해, real flow가 점도의 변화에 따라 급격한 변화를 보이는 것을 확인할 수 있었다. $1\ \mu\text{m}$ 의 필러가 충전된 시료의 경우 만족할 만한 흐름성을 보여주지 못하였지만 점도개선을 통해 gap 크기가 작은 새로운 공정에 적절히 이용되리라 판단되며, $8\ \mu\text{m}$ 의 필러가 충전된 시료의 경우는 55~60 vol%에서 높은 흐름성을 나타내고 있다. 마지막으로 Matthew 모델은 높은 점도- 낮은 표면장력 underfill의 경우에만 침투거리 예측이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

Abstract : To develop the underfill materials which are required for the new process of semi-conductor industry, the properties of epoxy/anhydride/cobalt(II) catalyst system with two types of fused silica($1\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$) are studied as a function of filler fraction. According to the curing profile, the optimum catalyst amount was 1.0 wt% for full curing at the conditions of $160^\circ\text{C}/15\ \text{min.}$, and we could conclude that the viscosity has superior effect on the real flow through the relationship between surface tension and viscosity data. The underfills which were filled with $1\ \mu\text{m}$ fused silica did not show good flowability, but they should be useful by improving the viscosity for a future process which has small gaps. The underfills which were filled with $8\ \mu\text{m}$ fused silica showed good flowability when the filler contents were 55~60 vol%. The model which was referred by Matthew can predict the real flow length only when the underfill has high viscosity and low surface tension.

1. 서 론

고분자 물질들은 저가이며, 낮은 유전상수를 가지는 장점에 의해 전자 패키징의 소재로 많이 이용되고 있다. 반도체 개발에서의 주요 경향은, 소형화와 다기능화이다.¹⁾ 이러한 경향에 따라 반도체 부분은 BGA(Ball Grid Arrays), 또는 flip chip on board assembly 등과 같은 공정으로 전환되어 가고 있으며, 공정의 변화에

따라 반도체 패키징 소재는 기존의 패키징 소재의 특성인, 높은 열전도도, 낮은 열팽창계수 등의 특성을 만족하면서 침투에 의한 공정이 가능한 저점도 액체 상의 새로운 물질(이후 Underfill로 명명함.)을 요구하고 있다. 이러한 underfill을 이용한 대표적 공정을 간단히 나타내면 다음 Fig. 1과 같다.

Underfill은 Fig. 1과 같은 공정을 거치는 과정에서 여러가지 중요한 특성들이 요구되어 지는데, 공정 중 요

구되는 주요 물성들을 보면, underfilling 공정에서 underfill은 capillary action에 의해 gap 사이를 완벽하게 채우도록 유도될 수 있을 정도의 높은 흐름성과 흐름공정 중 경화반응이 일어나지 않을 정도의 높은 경화온도를 요구하고, 경화공정에서 공정 중 열 소비에 대한 경제성 확보와 칩의 열적 stress를 감소를 위한 빠른 경화속도, 경화 후 solder/chip과 solder/substrate가 공존하는 공간에서 칩과 substrate사이의 열팽창의 불일치로 일어나는 물리적 stress를 최소화하기 위해 solder ball의 열팽창계수와 유사한 underfill의 열팽창계수를 필요로 한다.^{2,3)} 이때 각 요구물성들은 underfill resin, 경화제, 충전물(filler), 촉매 등의 underfill 첨가물의 각각의 물성, underfill 내의 조성, 첨가물들간의 상호관계에 의해 결정되므로, 각 물질들의 특성을 파악하고 이들의 상호관계를 연구하여 전체 underfill 요구물질들의 조성을 결정하는 것은 underfill 개발의 매우 중요한 연구분야이다.⁴⁾

위에서 열거한 요구물성들을 만족시키기 위해 많은 연구들이 진행되고 있는데, 기존의 연구 결과인 용융 실리카 15 μm 이상을 충전물로 이용한 underfill의 물성 연구와 예측 모델은 solder ball 크기의 감소로 인해 gap 크기가 작은 새로운 공정에 대한 적용여부가 의문시 되고 있다. 따라서, 보다 작은 크기의 충전물을 이용한 물질의 물성연구를 바탕으로 이전의 연구결과와의

비교를 통해 차이점과 새로운 특성을 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는, 크기가 작은 충전물 중 혼합물 내에서 상대적 높은 흐름성을 보이는 용융 실리카(1 μm, 8 μm)를 이용하여, 저점도 에폭시/저점도 anhydride/cobalt(II) 촉매 system에서 충전물 양에 따른 capillary 흐름 특성을 연구하고, 또한 이를 근거로 하여 유사 real flow test를 통해 그들의 상관성을 파악하고, 기존 모델과 비교를 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 재료

본 연구에서 사용한 에폭시는 3,4-epoxy cyclohexylmethyl-3,4-epoxy cyclohexane carboxylate (Aldrich Co., USA)이며, 경화제(hardner)와 촉매는 각각 hexahydro-4-methylphthalic anhydride(Aldrich Co., USA)와, cobalt(II)acetylacetonate(Aldrich Co., USA)를 사용하였으며 화학구조식은 Table 1에 나타내었다. 충전제(filler)는 spherical type의 용융 실리카 2종 (Tokuyama Co., Japan, 평균입자경; 1 μm, 8 μm)을 사용하였다.

2.2. 시료 제조

필러 첨가 이전에 에폭시와 경화제의 원활한 분산을

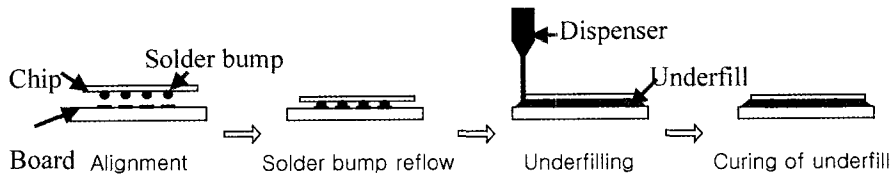


Fig. 1. Schematic diagram of general underfilling process.

Table 1. Chemical structures of raw materials.

Name of chemicals	Structure of chemicals	Equiv. weight
3,4-epoxy cyclohexylmethyl-3,4-epoxy cyclohexane carboxylate		236.2
hexahydro-4-methylphthalic anhydride		168.2
cobalt(II)acetylacetonate		

위해 에폭시와 경화제를 2시간, 60~70°C에서 자기 교반(magnetic stirrer)으로 충분히 혼합한 후, 촉매를 첨가하고 2시간, 60~70°C에서 동일한 방법으로 다시 혼합하였다. 이렇게 혼합된 시료에 적정량의 필러를 투입하고 교반을 이용(1시간, 느린속도<300 RPM)하여 충분히 혼합하고 진공 chamber(1시간 이상, 60~70°C)를 이용하여 기포를 제거하고 냉장고(-40°C)에 보관하였다.²⁾

2.3. 물성평가

2.3.1. 경화도

촉매의 양에 따른 에폭시의 경화도를 측정하기 위해서 질소가스(N₂) 분위기에서 DSC(Perkin Elmer Co., USA, model Pyris1)를 이용하여 촉매 양을 달리한 시료 각각을 5°C/min, 10°C/min, 20°C/min의 승온속도로, 40~250°C 범위에서 실험한 자료를 바탕으로 pyris kinetic program을 이용하여 경화도를 구하고 이를 전화율(conversion ratio)로 나타내었다.

Kinetic 소프트웨어는 DSC 측정의 peak 분석을 통해, 반응공정을 결정하는 specific kinetic parameter를 계산하여 준다. 어떤 물질 반응이 다음 식 (1)과 같이 주어질 수 있다.



여기서, A는 반응전 물질, B는 반응후 물질, ΔH는 흡수 또는 방출된 열, 그리고 k는 Arrhenius rate 상수이다. 또한 Arrhenius 방정식은 식 (2)와 같다.

$$k = Z \exp(-E_a/RT) \tag{2}$$

여기서, Z는 pre-exponential constant, E_a는 반응의 활성화 에너지, R은 기체상수, 그리고 T는 절대 온도(K)이다. 반응속도(dx/dt)는 DSC에 의해 직접 측정될 수 있으며 식 (3)과 같이 표현된다.

$$dx/dt = k(1-x)^n \tag{3}$$

여기서, dx/dt는 반응속도, x는 반응분율, t는 시간, k는 Arrhenius rate 상수, 그리고 n은 반응차수이다. 식 (1)과 같은 반응을 n차 반응 율속, 일정 program rate, 활성화 에너지, 그리고 pre-exponential constant 라고 가정하면 위 식 (2)와 식 (3)으로부터 다음과 같은 식 (4)를 얻는다.

$$dx/dt = Z \exp(-E_a/RT)(1-x)^n \tag{4}$$

반응분율 x는 DSC반응 peak의 fractional area와 직접

적인 관계를 가지고 있다. Kinetic parameters인 Z, E_a, 그리고 n은 MLR(advanced multi-linear regression)을 사용함으로써 결정할 수 있다.^{5,6)}

2.3.2. 표면장력

Capillary 침투의 주 변수인 표면장력을 측정하기 위해 모세관(D: 1.1~1.2 mm)을 이용하여, 식 (5)을 적용하여, 측정하였다.⁷⁾

$$\gamma \text{ (surface tension)} = \frac{r h \rho g}{2} \tag{5}$$

여기서 r은 모세관 반지름, h는 모세관을 통해 올라간 높이, ρ는 밀도, 그리고 g는 중력 가속도(9.8 m/s²)를 말한다. 표면장력을 계산하기 위해서는 밀도를 알아야 하는데 80°C 온도 상승에 따른 부피 팽창이 극히 적다는 가정 하에 mixing rule(식 (6))을 적용하여 밀도를 구하였다.⁸⁾

$$\rho_m = v_E \rho_E + v_H \rho_H + v_F \rho_F \tag{6}$$

여기서 ρ_m는 혼합된 시료의 밀도, v_E는 에폭시의 부피 분율(volume fraction), v_H는 경화제의 부피 분율, v_F는 필러의 부피 분율, ρ_E는 에폭시의 밀도, ρ_H는 경화제의 밀도, 그리고 ρ_F는 필러의 밀도를 나타낸다.

2.3.3. 점도

표면장력과 함께 침투의 주 변수인 점도를 측정하기 위해서 temp. controlled rheometer(Rheometrics, RDAII)를 이용하여 cone-plate(직경: 2.5 cm) method, 80°C, 10 rad/s 조건에서 점도를 측정하였다.⁹⁾

2.3.4. Real flow test

Matthew K. Schwiebert 와 William H. Leong(1995)은 capillary action에 의한 parallel plates 내에서의 충

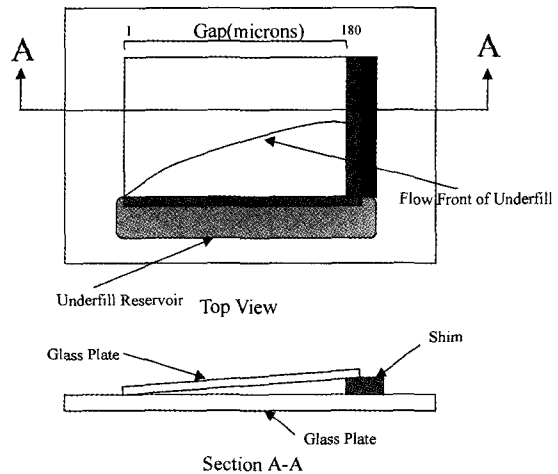


Fig. 2. Schematic diagram of real flow test set up.

진된 에폭시의 흐름을 모델화 하였고, 유사 실험을 통해 모델의 신뢰성을 입증하였다. 모델에 따른 침투거리 예측식은 식 (7)과 같다.¹⁰⁾

$$L = \sqrt{\frac{ht\gamma\cos\theta}{3\mu}} \quad (7)$$

여기서 L 는 침투거리, h 는 판과 판 사이의 거리 또는 gap, t 는 시간, γ 는 표면장력, θ 는 wetting angle, 그리고 μ 는 점도를 나타낸다. 위 식에서 일반적으로 대부분의 underfill이 parallel plate상에서 거의 0의 wetting angle을 가지므로 $\cos\theta=1$ 라고 가정하였고 나머지 물성치들은 실험을 통한 측정치를 이용하였다. 그리고 이 모델을 이용한 신뢰성 확보를 위한 real flow test set up은 Fig. 2와 같이 하였으며, 80°C 온도를 유지하기 위해 항은 오븐(oven) 내에 설치하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 경화 profile

3.1.1 경화 mechanism

에폭시/anhydride/cobalt(II) acetylacetonate 촉매

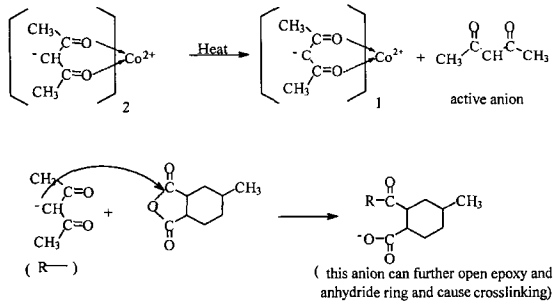


Fig. 3. Schematic initiation mechanism.

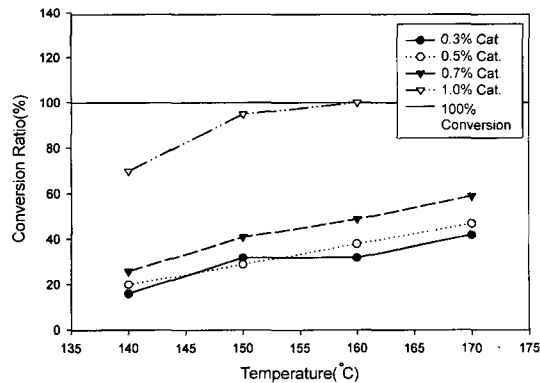


Fig. 4. Conversion ratio of epoxy/anhydride for different accelerator contents during 15 minutes.

system의 경화 mechanism은 아직 현재까지 완벽히 규명되지 않고 있다. 최근에 Smith¹¹⁾와 C. P. Wong¹¹⁾이 제안한 초기(initiation) mechanism은 Fig. 3과 같다.

이는 Co²⁺의 붉은 특정색이 경화 후 Co³⁺의 green 색으로 바뀌지 않는 실험적인 결과와, 일반적인 anhydride의 경화 mechanism에서 볼 수 있는 개환(ring opening) mechanism¹²⁾이 포함되어 있어서 실제 mechanism과 상당히 근접한 것으로 평가되어진다. 여기서 acetylacetonate anion은 매우 강한 염기로서 anhydride의 carboxylic carbons을 공격하여 carboxylic anion을 형성하거나, 다른 anhydride에 접근하여 anionic polymerization과 경화반응을 개시시킨다.¹⁾

3.1.2 경화도

에폭시 수지는 종류에 따라 다른 경화특성을 가지고 있으며, 단독으로 사용되는 경우는 거의 없다. 에폭시는 경화제와 배합하여 3차원의 열경화성 물질로 경화시켜 사용되므로 그 성능은 경화제의 선택에 크게 좌우된다. Anhydride계의 경화제를 사용하는 경우에 경화 온도가 높기 때문에, 경화시간의 단축과 칩의 열 피로를 막기 위해서 경화촉진제를 자주 사용한다. 이 때, 과량의 촉진제는 경화도를 낮추고 부반응을 일으키는 원인이 되므로 적절한 촉진제의 양을 선정하는 것은 매우 중요하다.^{11,12)}

Fig. 4는 촉매의 양을 달리한 시료들을 DSC로 측정하여 15분(underfill 요구 적정 경화시간)¹³⁾을 기준 시간으로 한 전화율을 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 촉매 0.7 wt%이하에서는 15분 내에 충분한 경화를 이루지 못하며, 1.0 wt%이상에서 160°C의 온도를 유지할 경우 15분 내에 100% 경화되는 것을 알 수 있다. 이를 통해 160°C정도의 온도에서 15분 이내에 100%경화를 위해서는 1.0 wt% 이상의

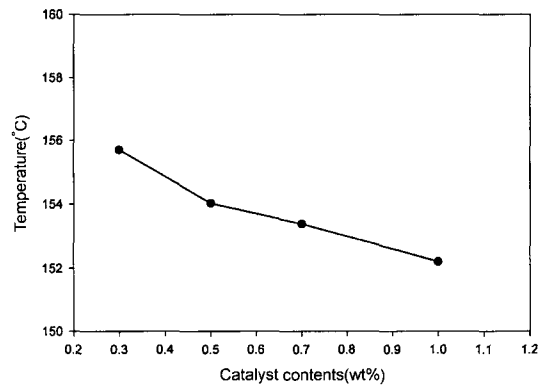


Fig. 5. Curing initiation temperature of epoxy/anhydride for different accelerator contents.

촉매가 필요한 것을 확인할 수 있었다.

또한, underfilling 공정에서 underfill의 유동성 확보를 위해 underfill의 온도를 80°C 전후로 상승시킨 후 칩 내부로 침투를 시키므로, 80°C 전후의 온도에서 경화 반응이 시작된다면 승온공정은 흐름성에 오히려 역효과를 줄 수 있으므로 경화시작온도 또한 매우 중요한 인자이다.

Fig. 5는 촉매의 양에 따라서 급속도로 경화가 시작하는 온도를 나타낸 것으로, 촉매의 양이 많아짐에 따라 약간의 온도 감소는 있으나 전체적으로 150°C 이상에서 급속도로 경화가 일어나는 것을 보여주므로, 80°C 전후의 흐름공정 중 경화가 일어나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5를 바탕으로 1.0 wt% 촉매가 첨가된 시료는, 80°C 전후의 underfilling 공정에서 경화가 일어나지 않으며 160°C에서 15분만에 완전경화가 일어나는 빠른 경화속도를 보여주는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 표면장력, 점도, real flow

Matthew의 모델에 따르면 침투깊이는 표면장력에 비례하고 점도에 반비례하는 것을 보여주고 있다.¹⁰⁾ 이를 바탕으로 크기가 다른(1 μm /8 μm) 필러 2종의 부피 분율에 따른 표면장력과 점도의 변화를 측정하여 Fig. 6에 나타내었다.

시료들을 만드는 과정에서 1 μm 의 필러의 경우에는 55 vol%를 초과 시에는, 필러의 과다충진으로 인한 혼합 중의 점도 증가로 균일한 분산 혼합이 어려웠고, 8 μm 필러의 경우에도 65 vol%를 초과하기가 어려웠다. 그리고 Fig. 6에서 1 μm -55 vol%와 8 μm -65 vol%의 액상 에폭시 컴파운드의 점도는 50 Poise를 상회하는 값을 가져 생략하였다.

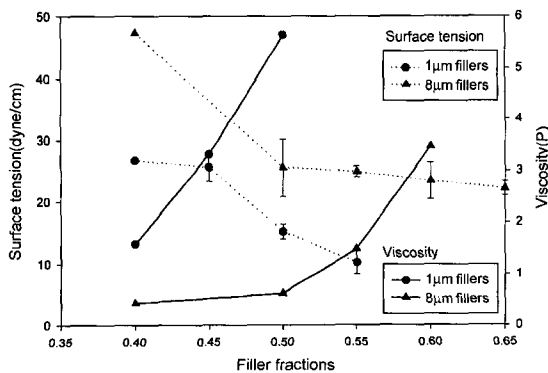


Fig. 6. Surface tension and viscosity of liquid epoxy compounds as a function of the volume fraction of a filler.

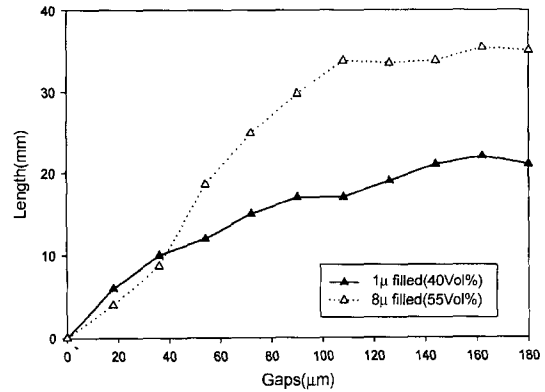


Fig. 7. Real flow length as a function of the gap size during 8 min.

Fig. 6을 분석하여 보면, 동일 부피분율에서 1 μm 의 필러가 충전된 시료들이 8 μm 의 필러가 충전된 시료들에 비해 낮은 표면장력 값을 가지는 반면에, 점도는 반대로 1 μm 의 필러가 충전된 시료들이 상대적으로 높은 값을 보여주고 있다. 이는 동일 부피분율 비교시 상대적 비 표면적의 차이(1 μm : 16 m^2/g , 8 μm : 2 m^2/g)로 생각되어 진다. 전체적으로 필러 분율이 증가함에 따라 표면장력은 감소하는 반면 점도는 증가하는데, 여기서 표면장력의 감소는 비극성인 유기물내에 극성인 무기물의 첨가로 인한 표면장력의 감소로 보이고,⁷⁾ 점도의 증가는 시료 내에서 필러의 증가로 인해, 시료가 이동할 때 흐름을 위한 필요에너지의 증가가 원인으로 생각된다.¹⁴⁾

8 μm 의 필러가 충전된 시료의 경우 50 vol%의 충전까지는 점도 증가가 적으나 55 vol%의 경우에는 점도 증가가 커지는 것을 볼 수 있다. 1 μm 의 필러가 충전된 시료의 경우에는 전체적으로 상당히 높은 점도를 보여 실제흐름에서도 적용이 어려울 것으로 예상되는데, device의 소형화에 따른 gap 크기가 갈수록 작아지는 추세를 감안하여 real flow test를 통해 gap 크기에 따른 흐름성의 차이를 살펴보았다.

Gap 크기에 따른 흐름성을 보기 위해 1 μm 의 필러가 40 vol% 충전된 시료와 8 μm 의 필러가 55vol% 충전된 시료의 real flow test 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Gap 크기가 큰 영역(40 μm 이상)에서는 8 μm 의 필러가 충전된 시료가 충전율이 높음에도 불구하고 높은 흐름성을 보이지만, gap 크기가 작은 영역(40 μm 미만)에서는 1 μm 의 필러가 충전된 시료가 높은 점도에도 불구하고 상대적으로 높은 흐름성을 보이는데, 이는 시료가 plate와 plate 사이로 들어갈 때 상대적으로 큰 필러 입자들이 작은 공간을 통과하지 못하여 생기는 현상

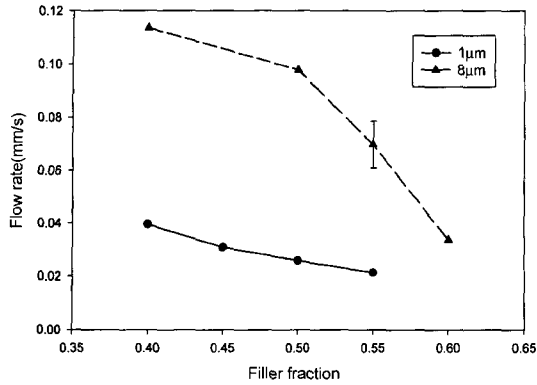


Fig. 8. Flow rates as a function of the volume fraction of a filler at the gap width of 126 μm .

으로 보인다. 따라서, 작은 gap에서 미세 필러가 가지는 상대적인 흐름 우수성과, 미세 필러 라는 특징으로 인해 예상되어 지는 고분산성, 저침전성과 같은 장점들로 인해, 1 μm 의 필러를 충전제로 이용한 underfill의 개발은 흐름성 향상을 목적으로 계속 연구할 필요가 있을 것으로 보인다.

3.3 Real flow test와 모델 비교

Fig. 2와 같이 유사 real flow test를 통한 측정치를 바탕으로 gap이 126 μm (일반적인 gap 크기: 75~175 μm ^{13,2)}를 기준으로 한 흐름속도는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8을 분석하여 보면, 1 μm 의 필러가 충전된 시료들의 경우는 낮은 표면장력과 높은 점도로 인해 적절한 흐름속도를 보여주지 못하고, 8 μm 의 필러가 충전된 시료들의 경우는 40 vol%~55 vol%에서 높은 흐름속도를 보여주고 있다. Fig. 6에서 8 μm 의 필러가 충전된 시료들의 경우, 점도의 변화가 작고 표면장력의 변화는 상대적으로 큰 영역(40 vol%~50 vol%)에서 real flow의 속도변화는 그다지 크게 나타나지 않고, 반대로 표면장력의 변화는 적고 점도 변화는 큰 영역(55 vol%~60 vol%)에서 real flow의 속도변화는 급격히 감소한다. 그리고 50%와 55%의 비교 시의 real flow의 감소는 유사 표면장력에서 점도가 2배 이상 증가함에 기인한 것으로 생각되어진다. 이러한 결과를 볼 때 실제 흐름속도는 모델 식에서와는 달리 표면장력의 영향보다는 점도가 주요 인자로 생각된다.

Fig. 2와 같은 유사 real flow test를 하여 8분동안 흘러간 거리와, Fig. 6에 나타난 측정치를 바탕으로 식 (7)의 모델을 이용하여 계산되어진 예상침투거리를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 ref. data는 Matthew가 모델의 검증에 위해 이용한 underfill(14.7 dyne/cm,

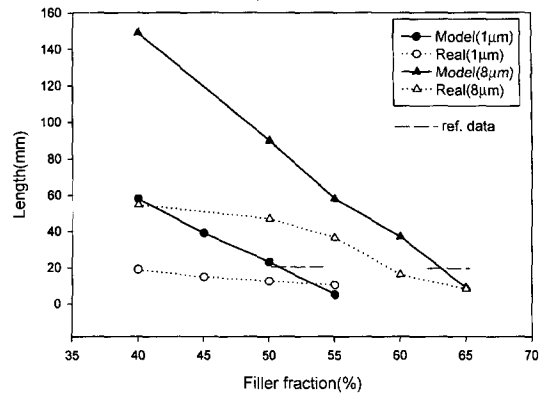


Fig. 9. Real vs. model flow length as a function of the volume fraction of a filler during 8 min.

7.74 Poise)의 필러 충전량을 자료로 제공하지 않아, 본 연구에서 실측한 점도와 표면장력 자료를 바탕으로 real flow 측정치를 표시한 것이다.¹⁰⁾

Fig. 9를 분석하여 보면, 높은 표면장력과 낮은 점도를 가지는 시료들에서는 real flow가 침투예측결과보다 훨씬 적은 값을 보여주고 낮은 표면장력과 높은 점도를 가지는 시료들에서는 real flow가 침투예측결과와 유사한 흐름성을 보여준다. 이는 동일 shear rate 라는 점도 측정 조건에서, 고충진 시료의 경우에 Newtonian 유체 거동을 따라가는 특성과 Matthew 모델에 적용되어진 Newtonian 유체라는 가정이 상호 일치하여 오차가 감소하는 반면, 저충진 시료의 경우에는 non-Newtonian 유체의 shear-thinning 효과의 증가로 인하여 예측식의 불일치를 일으키는 것으로 생각되어진다.¹⁶⁾

따라서 Matthew 모델은 고점도의 시료의 경우 맞는 예측값을 보여주지만 저점도 높은 표면장력을 보이는 underfill의 경우에는 적절한 예측값을 보여주지 못한다. 현재 underfill을 이용하는 공정에서 Matthew가 이용한 underfill과 같이 낮은 흐름성을 가지면서도 적용되는 경우도 있지만, 보다 빠른 흐름성을 요구하고 있는 추세를 미루어 볼 때 더 많은 실험적 결과를 바탕으로 새로운 실험적 모델이 필요하리라고 본다.^{4,11)}

4. 결 론

에폭시/anhydride/cobalt(II) 촉매를 이용하여 차세대 반도체 공정에서 요구되어질 underfill의 flow 특성 연구를 통해 몇가지 결론을 도출할 수 있었다. 우선 80°C의 흐름공정에서는 경화반응을 일으키지 않고, 성형공정에서 빠른 경화와 100%경화를 얻기 위해서는 15분

간 160°C로 경화시킨다는 조건에서 1.0 wt%의 촉매가 요구된다는 것을 curing profile을 이용해서 알 수 있었다. 그리고 필러 충전에 따른 표면장력과 점도 측정을 통해, real flow가 표면장력보다는 점도의 증감에 따라 급격히 변화하는 것을 알 수 있었고 이러한 점도 영향성은 향후 계속되어지는 underfill 연구에서 침투성 증가를 위한 물성향상의 방향을 제시해 주는 결과라 볼 수 있다. Real flow test를 통해 1 μm 의 필러가 충전된 시료의 경우 만족할 만한 흐름성을 보여주지는 못하였지만 본 실험에서의 결과를 바탕으로 점도향상을 목표로 연구를 계속한다면 작은 gap 크기를 가진 새로운 공정에서 효율성을 보일 것으로 보이며, 8 μm 의 필러가 충전된 시료의 경우는 55~60 vol%에서 높은 흐름성을 나타낸다. 마지막으로 이용한 모델과 실제 실험 결과를 비교해 보면, 앞에 제시한 모델은 상대적으로 높은 점도-낮은 표면장력 underfill의 경우에는 침투거리예측값이 실험값에 근접하나, 흐름성이 개선된 낮은 점도-높은 표면장력 underfill의 경우에는 보다 적절한 새로운 모델이 필요한 것을 확인할 수 있었다.

5. 참고문헌

1. C. P. Wong, S. Shi and G. Jefferson, "High Performance Underfill for Low-Cost Flip-Chip Applications," *Advances in Electronic packaging*, ASME, 1, 157-160 (1997).
2. C. P. Wong, M. B. Vincent and S. Shi, "Fast-Flow Underfill Encapsulant: Flow Rate and Coefficient of Thermal Expansion," *Advances in Electronic packaging*, ASME, 1, 301-306 (1997).
3. M. L. Minges, *Electronic Material Handbook*, ASE International, 1 (1989).
4. Wei H. Koh, "High Thermal Conductance Liquid Encapsulants For Direct Attach." *Electronic Components and Technology Conference*, 343-346 (1996).
5. Sergey Vyazovkin, "Mechanism and Kinetics of Epoxy-Amine Cure Studied by Differential Scanning Calorimetry." *Macromolecules*, 29, 1867-1873 (1996).
6. Panagiotis I. Karkanias, Ivana K. Partridge, "Modelling the Cure of a Commercial Epoxy Resin for Applications in Resin Transfer Moulding." *Polymer International* 41, 183-191 (1996).
7. Ira N. Levine, *Physical Chemistry 4th Ed.*, McGraw-Hill, Inc., New York (1995).
8. F. L. Matthews, R. D. Rawlings, *Composite Materials: Engineering and Science*, Chapman & Hall, London (1994).
9. H. A. Barnes, J. F. Hutton, K. Walters, *An Introduction to Rheology*, Elsevier, Amsterdam (1989).
10. Matthew K. Schwiebert, William H. Leong, "Underfill Flow as Viscous Flow Between Parallel Plates Driven By Capillary Action," *IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, 8-13 (1995).
11. J. D. B. Smith, "Metal Acetylacetonates as Latent Accelerators for Anhydride-Cured Epoxy Resins," *Journal of Applied Polymer Science*, 26, 979-986 (1981).
12. Henry Lee, Kris Neville, *Handbook of Epoxy Resin*, McGraw-Hill, Inc., New York (1967).
13. Mark Bonneau, "Flip Chip Underfill Epoxy with JEDEC Level 2 Performance," *IUMRS-ICEM-98*, Cheju, Korea (1998).
14. M. Mooney, "The Viscosity of a Concentrated Suspension of Spherical Particles," *Journal of Coll. Science*, 6, 162-169 (1951).
15. M. Chaturvedi, Y. L. Shen, "Thermal Expansion of Particle-Filled Plastic Encapsulant: A Micromechanical Characterization." *Acta Mater.* 46(12), 4287-4302 (1998).
16. H. A. Barnes, J. F. Hutton and K. Walters, *An Introduction to Rheology*, Elsevier, New York (1989).