

BGA 패키지를 위한 언더필의 열적 특성과 유동성에 관한 연구

노보인* · 이보영** · 김수중** · 정승부*

*성균관대학교 신소재공학부

**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Evaluation of Thermal Property and Fluidity with Underfill for BGA Package

Bo-In Noh*, Bo-Young Lee**, Soo-Jung Kim** and Seung-Boo Jung*

*School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

**Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Hankuk Aviation University, Goyang 412-791, Korea

Abstract

In this study, the curing kinetics and thermal degradation of underfill were investigated using differential scanning calorimetry (DSC) and thermo gravimetry analysis (TGA). The mechanical and thermal properties of underfill were characterized using dynamic mechanical analysis (DMA) and thermo-mechanical analysis (TMA). Also, we presented on underfill dispensing process using Prostar tool. The non-isothermal DSC scans at various heating rates, the exothermic reaction peak became narrower with increasing the heating rate. The thermal degradation of underfill was composed of two processes, which involved chemical reactions between the degrading polymer and oxygen from the air atmosphere. The results of fluidity phenomena were simulated using Star CD program, the fluidity of the underfills with lower viscosity was faster.

*Corresponding author : sbjung@skku.ac.kr

(Received December 13, 2005)

Key Words : BGA package, Underfill, Glass transition temperature, Viscosity

1. 서 론

플립칩 (flip chip)과 ball grid array (이하 BGA)와 같은 고밀도 면실장 패키지는 많은 수의 핀 카운트 (pin count)로 구성되어 있고, 동시에 빠른 전기적 동작 신호의 이동이 가능하므로 전자 부품의 패키지 기술로서 그 사용 빈도수가 증가되고 있다. 특히 클럭 주파수 (clock frequency)가 증가하게 되면 고주파 신호의 지연, 노이즈의 발생과 같은 문제도 발생할 가능성이 매우 높으므로 플립칩과 BGA를 패키지 기술에 적용하기 위해서 솔더 접합부의 신뢰성이 중요한 관심사가 되었다¹⁾. 동시에 솔더 접합부 신뢰성의 감소는 리플로우 후의 자기 정렬 현상 또는 열팽창 계수 차이에 의한 혼합 변형 (응력, 압축, 전단 등)으로 인하여 발생되며

그 대책으로 언더필 (underfill)이 사용되고 있다²⁾.

언더필은 전자 패키지에서 실리콘 칩 (silicon chip : Si의 CTE - 2.8ppm/°C)과 유기체 기판 (organic substrate : FR-4의 CTE - 20~30ppm/°C) 사이에 위치하여 칩과 기판 사이의 열팽창 계수 차이로 발생하는 응력과 변형을 재분배하는 역할은 물론 습기나 다른 모듈에 끼치는 전기적, 자기적 환경의 영향을 최소화하는 역할을 한다³⁾. 그러나, 패키지에 언더필의 적용은 패키지 공정의 증가로 인한 제조 원가가 상승하고, 그로 인하여 패키지 공정의 시간이 증가한다는 단점을 가지게 된다. 그러므로 패키지의 공정 시간을 감소시키기 위하여 언더필의 빠른 경화 속도와 우수한 유동 특성이 요구되므로 더욱 정확한 언더필의 동역학적 정보가 필요하다⁴⁾.

언더필이 패키지내에 디스펜싱 (dispensing) 되는

시간과 관련된 언더필의 유동성은 칩과 기판 사이의 좁은 간격 사이로 균일하게 퍼져 채워지는 능력에 좌우되고 그 특성은 에폭시 수지의 분자 구조, 필러 크기, 칩과 기판사이의 간격, 온도에 영향을 받는다.

본 연구에서는 열분석법으로 언더필의 물성을 분석하고 언더필의 점성이 디스펜싱 과정에 미치는 영향을 시뮬레이션으로 해석하였다.

2. 실험 방법

2.1 열분석

Table 1은 본 실험에서 사용된 세 종류의 언더필 조성을 나타낸다.

언더필의 유리전이온도 (glass transition temperature : 이하 Tg)는 시차주사열량측정(differential scanning calorimetry, 이하 DSC, Seiko Co)을 이용하여 25 ~ 250°C 온도 구간에서 승온 속도를 3, 5, 10, 20°C/min으로 변화시키면서 질소 분위기에서 실시하였다. 언더필의 열화 특성(thermal degradation)은 열중량측정 (thermo gravimetry analysis, 이하 TGA, Seiko Co)를 이용하여 25 ~ 600°C 온도 구간에서 승온 속도를 5, 10, 20, 40°C/min으로 변화시키면서 대기 분위기에서 실험을 실시하였다.

언더필의 댄핑 특성은 언더필을 150°C 온도에서 10분 동안 경화시킨 후 얇은 필름 형상 (2×10×0.5mm)으로 가공하여 동역학분석 (dynamic mechanical analysis, 이하 DMA, Seiko Co)을 실시하였다. 실험 조건은 -50 ~ 250°C 온도 구간에서 주파수를 1, 10, 50, 100 Hz로 변화시키며 질소 분위기에서 실험을 실시하였다.

언더필의 열팽창 계수는 열적-기계적 분석 (thermal mechanical analysis, 이하 TMA : Seiko Co)을 -50 ~ 250°C 온도 구간에서 승온 속도를 3, 5, 10, 20°C/min으로 변화시키며 질소 분위기에서 실험을 실시하였고 이때 하중은 50 mN였다.

Table 1 Chemical compositions of underfills

Composition	sample A	sample B	sample C
Epoxy resin	50-60	50-60	50-60
Hardener	30-40	30-40	30-40
Acrylic monomer	-	3-7	-
Adhesion promoter	-	-	2-3
Silica	-	2	2

2.2 디스펜싱 과정의 시뮬레이션

대표적인 전산 유체 역학 (computational fluid dynamics : CFD) 소프트웨어인 Star CD를 이용하여 언더필의 점도에 따른 유동 현상을 시뮬레이션 하였다⁵⁻⁷⁾.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 BGA 패키지 모델의 형상이다. 시뮬레이션에서 사용된 Si, Sn-37Pb 솔더, FR-4 기판의 열팽창계수는 각각 2.8 ppm/°C, 18 ppm/°C, 24.5 ppm/°C이다. Sn-37Pb 솔더의 지름은 650 μm이고 Si와 FR-4 기판의 두께는 500 μm이다. 각 솔더의 피치는 1mm이고 25개의 솔더로 구성되어진 BGA 패키지 형상을 사용하였다. 그리고, 시료 A, B, C 언더필의 점도는 각각 4,600 cps, 6,000 cps, 4,000 cps값을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열분석

에폭시의 경화 반응은 DSC 분석으로 Fig. 2와 같이 승온 속도 5°C/min의 조건으로 실시하였다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 시료 B와 C 언더필의 유리전이온도

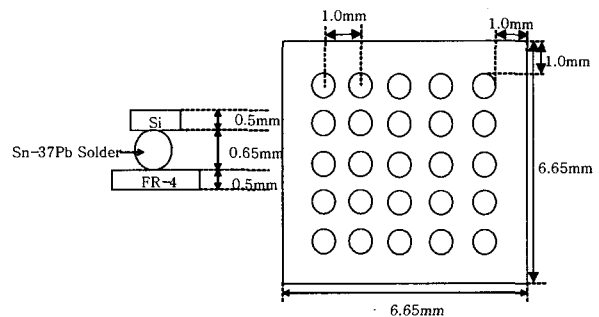


Fig. 1 The shape of BGA package for simulation

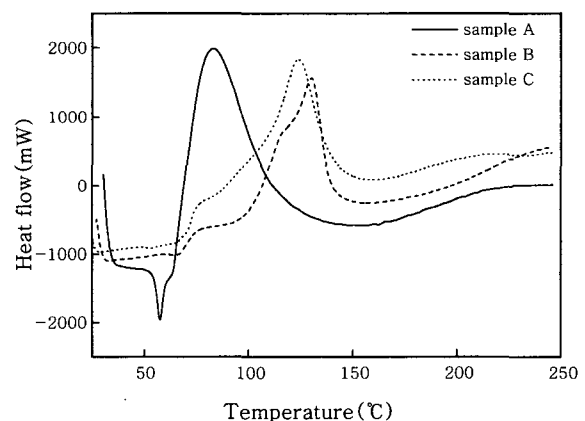


Fig. 2 The results of DSC at heating rate of 5°C/min

가 A 언더필에 비하여 높고 경화시 두 시료의 열 유동 거동이 유사한 것을 확인할 수 있었다. 이는 시료 B와 시료 C 언더필의 구성 성분 (에폭시 수지, 경화제, 첨가제 등)과 성분비가 유사하기 때문이라 사료된다. 또한, 시료 A 언더필의 유리전이온도가 시료 B와 C에 비하여 낮기 때문에 고무 상태 (rubbery state)로 변환할 수 있고, 따라서 BGA 패키지에서의 리페어 특성 (repair property)이 우수하리라 사료된다.

Fig. 3은 시료 C 언더필을 승온 속도와 함께 열 유동특성을 DSC 분석한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 열적 지연 효과 (thermal delay effect)로 인하여 승온 속도가 증가할수록 유리전이온도 및 발열 구간이 고온 쪽으로 이동하고, 언더필의 발열 구간의 영역은 감소하였다.

DSC 실험 결과를 $\ln(\beta/Tp^2)$ 와 $(1/Tp)$ 사이의 관계를 나타내는 Kissinger 방법⁸⁻⁹⁾과 $\ln(\beta)$ 와 $(1/Tp)$ 사이의 관계를 나타내는 Ozawa 방법⁸⁻⁹⁾을 이용하여 해석하면 경화 반응에 필요한 활성화 에너지 (activation energy for curing reaction)를 구할 수 있다. 활성화 에너지를 계산하기 위한 Kissinger 방법과 Ozawa 방법을 아래의 (1)과 (2)식으로 나타내었다.

$$-\ln(\beta/Tp^2) = \ln(E/R) - \ln(A_n) - (n-1)\ln(1-a)p + (E/RTp) \quad (1)$$

$$\log\beta = (1/2.303)\ln\beta = -0.4567(E/RTp) + (\log(AE/R) - \log F(a) - 2.315) \quad (2)$$

위 식에서, E는 활성화 에너지, R은 기체 상수, a는 변환 정도, β 는 승온 속도, Tp는 발열 구간의 최대 온도를 각각 나타낸다. Fig. 4에 시료 C 언더필을 Kissinger와 Ozawa 방법을 이용하여 계산한 활성화 에너지를 나타내었다. Kissinger 방법으로 계산된 활성화 에너지

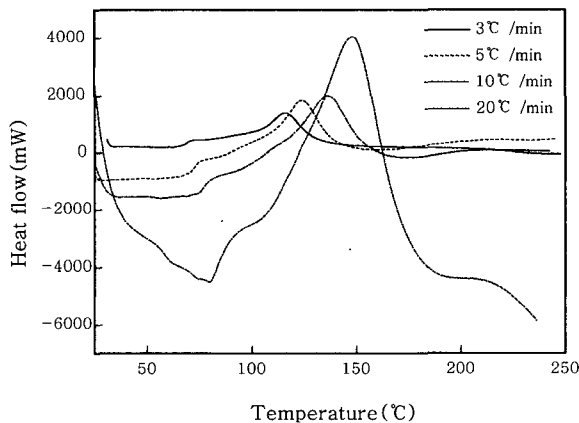


Fig. 3 The results of DSC for sample C underfill

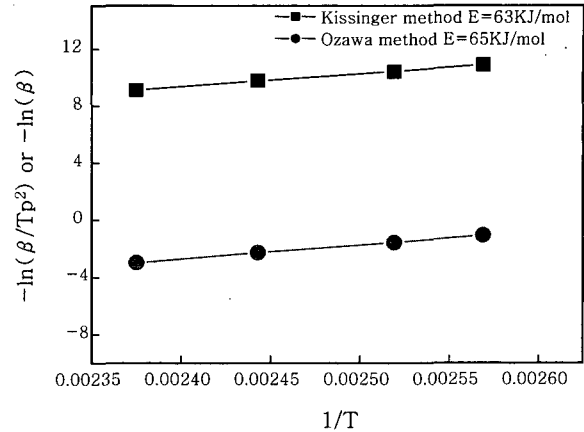


Fig. 4 Activation energy for curing reaction of sample C underfill

는 시료 C 언더필의 경우 63 kJ/mol, A와 B는 각각 74 kJ/mol과 105 kJ/mol로 계산되었다. 또한, Ozawa 방법으로 구한 활성화 에너지는 시료 C 언더필의 경우 65 kJ/mol, A와 B는 각각 77 kJ/mol과 106 kJ/mol이었고, 그 순서는 Kissinger 방법으로 구한 결과와 유사한 경향으로 나타났다. 활성화 에너지는 화학 반응에 필요한 에너지를 의미하고 그 값이 낮을수록 쉽게 반응하므로 시료 C 언더필이 A와 B 언더필보다 쉽게 전이가 발생할 것으로 사료된다.

Fig. 5는 승온 속도 5°C/min 조건에서 분석한 TGA 결과를 나타낸다. 이 결과로부터 T₁₀(전체 무게에 대한 무게 손실이 10%될 때의 온도)의 온도가 전체적으로 시료 C (312°C) < B (315°C) < A (336°C)의 순서로 높다. 이는 시료 A 언더필이 B와 C 언더필에 비하여 상대적으로 우수한 내열 특성을 가지고 있다는 것을 의미한다. 또한, 열적 지연 현상에 의해 승온 속도가 증가할수록 T₁₀은 고온 쪽으로 이동하고, 300°C와 500°C영역에서 두 번의 상변태가 발생하고 있다. 이는 대

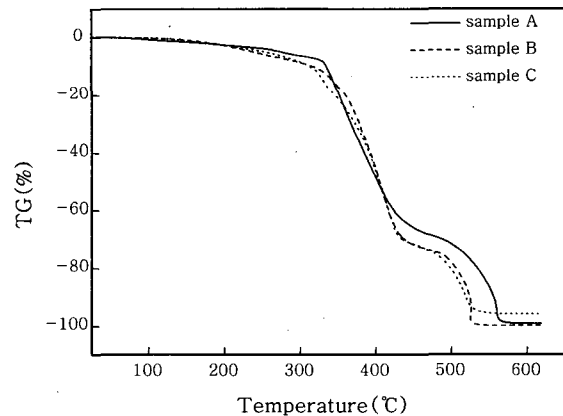


Fig. 5 The results of TGA at heating rate of 5°C/min

기 중에서 온도의 상승과 더불어 폴리머가 두 단계의 열화 과정¹²⁾을, 질소 분위기에서는 한 단계의 열화 과정¹³⁾을 거친다는 타 연구자의 연구^{12,13)}와 일치하고 있다.

Fig. 6에 열화 현상을 Kissinger 방법¹⁰⁻¹¹⁾으로 구한 활성화 에너지값을 나타내었다. 시료 C 언더필의 활성화 에너지는 126 kJ/mol, A와 B는 각각 176 kJ/mol, 253 kJ/mol로 계산되었다.

언더필의 주성분은 필러와 폴리머 수지로 구성되어 있고 온도와 변형률 (strain rate)은 열적-기계적 특성에 큰 영향을 미친다. Fig. 7에 50 Hz 주파수에서 저장 계수 (E' , storage modulus)에 대한 DMA 분석 결과를 나타내었다. 여기서 저장계수 (E')는 사이클당 변형에 대한 에너지의 저장량 (stored energy)을 나타내며 손실 계수 (loss modulus : E'')는 사이클당 변형에 대한 에너지의 손실량을 나타낸다. 그리고 $\tan \delta$ (댐핑 특성)는 온도와 주파수에 의존하는 물성으로 손실 계수에 대한 저장 계수의 비를 나타내는 값이다.

저장 계수는 시료 C < B < A의 순서로 높은 값을

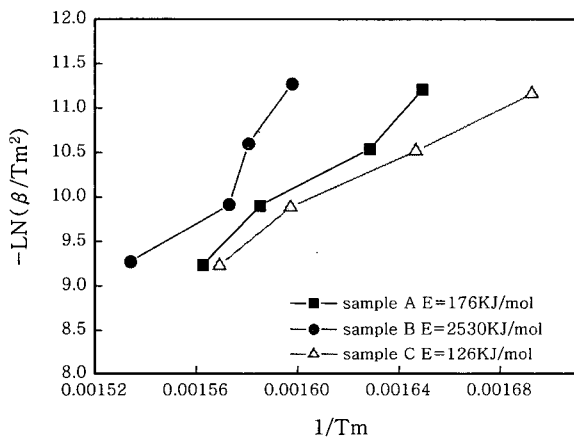


Fig. 6 Activation energy for thermal degradation reaction

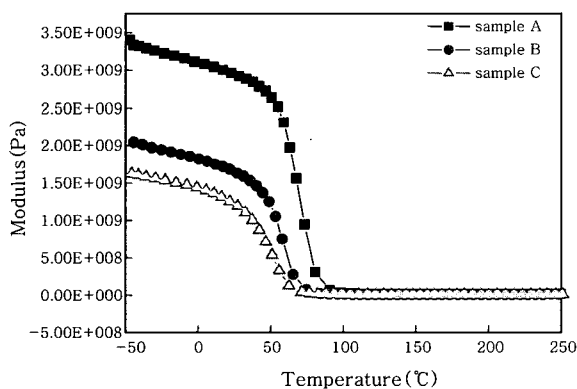


Fig. 7 Storage modulus at condition of 50 Hz frequency

가지고 있었으며 손실 계수의 크기도 같은 경향으로 나타났다. 이와 같은 결과는 외부 주파수에 대한 시료 A 언더필의 체인 결합 매트릭스 구조가 시료 B와 C 언더필에 비하여 강하다는 것을 의미한다. 또한, 높은 저장 계수를 갖는 언더필이 높은 손실 계수를 갖는다는 것을 확인할 수 있었다. Lau³⁾는 주파수가 증가하면 저장 계수도 증가한다고 보고하고 있다. 또한, 유리전이온도 근처에서 폴리머의 손실 계수와 $\tan \delta$ 값은 최대값을 나타내며 $\tan \delta$ 의 최대값에서 길이 변형률 또한 최대가 된다고 보고되었다.¹⁴⁾

언더필의 기계적 강성(stiffness)은 그 구성에 따라서 변화되고 그로 인하여 패키지의 접합 강도 또한 큰 영향을 받기 때문에 강성이 우수한 언더필을 사용한 BGA 패키지일수록 상대적으로 우수한 피로 특성을 나타낸다.¹⁴⁾

Fig. 8에 주파수 50 Hz의 주파수에서 $\tan \delta$ 에 대한 DMA 분석 결과를 나타내었다.

일반적으로 주파수가 증가할수록 $\tan \delta$ 의 영역은 필러와 필러, 필러와 폴리머 사이의 분해 에너지의 마찰로 인하여 넓어지게 되고 필러의 불균일한 분배와 열응력은 $\tan \delta$ 의 특성에 영향을 주게 된다. 따라서, 주변의 높은 주파수는 필러와 필러, 필러와 폴리머 수지 사이의 분해 에너지를 증가시키고 길이 변형률을 증가시켜 유리전이온도 근처에서 수지의 구조가 최대로 완화되기에 길이 변형률이 최대가 된다³⁾. Fig. 8로부터 주파수에 의한 분해 에너지 (dissipation energy)의 최대 온도를 나타내는 $\tan \delta$ 값이 시료 C < B < A의 순서로 높은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었고 이 $\tan \delta$ 는 길이 변형률이 최대가 되는 언더필의 유리전이온도를 나타내므로 외부 주파수에 의한 언더필의 유리전이온도는 시료 C < B < A의 순서로 높은 온도를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 시료 C 언더필이

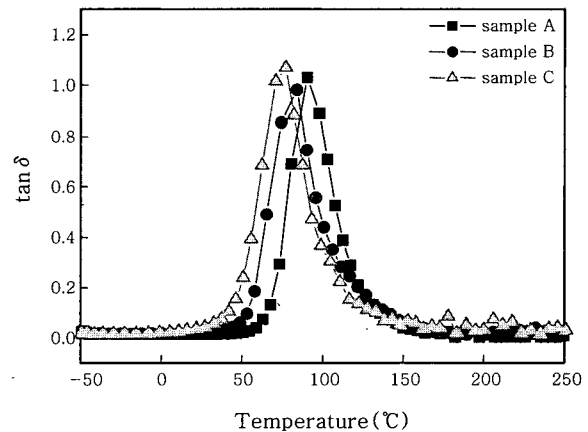


Fig. 8 The results of $\tan \delta$ at frequency of 50 Hz

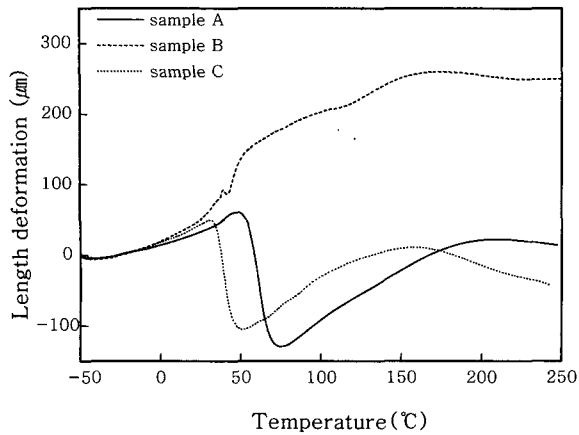


Fig. 9 The results of TMA at heating rate of 5°C/min

다른 A와 B 언더필에 비하여 외부 주파수에 의해 쉽게 분해될 것이라 사료된다.

Fig. 9는 승온 속도 5°C/min의 조건에서 실시한 TMA 실험 결과이다. 언더필 경화 후 50 ~ 150°C 온도 구간에서 시료 B < C < A의 순서로 길이 변형률 변화가 큰 것을 확인할 수 있었다. 열팽창 계수 차이가 작은 언더필이 열피로 특성이 우수하다는 결과가 보고 되고 있다⁴⁾.

3.2 디스펜싱 과정의 시뮬레이션

전자 패키지 과정에서 언더필은 모세관 현상을 통하여 칩과 기판 사이의 공간에 채워지므로 언더필의 모세관 특성은 매우 중요하다. 언더필의 흐름은 점도, 접촉각과 필러 크기와 필러의 분율로서 그 특성을 평가할 수 있다. 일반적으로 언더필의 점성은 필러 함유량이 증가되면 점성도 증가하고, 유동률은 온도가 증가하면 증가하고 필러 함유량이 증가하면 감소한다.

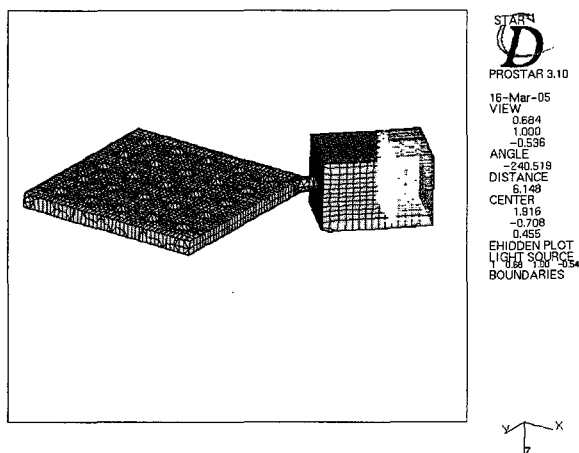


Fig. 10 The BGA package shape of dispensing process

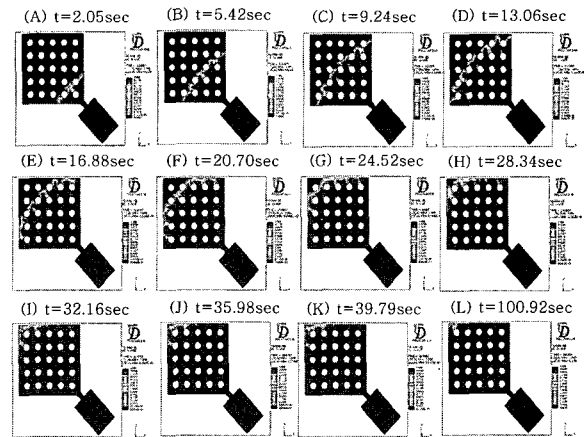


Fig. 11 The flow phenomena of sample A underfill

L. Nguyen 등¹⁶⁾은 언더필의 유동 현상 해석을 FEM (finite element method) 등과 같은 전산모사법으로 시도하였다. 본 연구에서 Star CD (computational dynamics. co)를 이용하여 유동 현상을 시뮬레이션 해석하기 위한 패키지의 형상을 Fig. 10에 나타내었다. 이때 언더필이 디스펜싱되는 출입구의 온도는 80°C, 언더필의 주입 속도는 5 mm/sec, 언더필의 주입 압력은 50 psi로 BGA 패키지 사이로 디스펜싱된다고 가정하였고 시간 간격을 0.382초로 지정하여 언더필의 점도에 따른 유동 흐름의 거동 특성을 관찰하였다.

Fig. 11은 BGA 패키지의 오른쪽 아래 모서리에서 시료 A 언더필을 디스펜싱하였을 때의 유동 흐름을 시뮬레이션한 결과이다. 언더필이 패키지의 오른쪽 아래 부분부터 채워지면서 완전히 패키지의 내부를 채우는 데 소요되는 시간이 대략 101초 정도임을 확인할 수 있었다. 언더필이 디스펜싱되는 곳에서 거리가 멀리 떨어진 패키지 부분에서는 상대적으로 거리가 가까운 패키지 부분에 비해 주입 압력이 약하기 때문에 언더필의 유동 속도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 솔더볼 주변 부분에서는 언더필이 솔더볼에 맞부딪히는 현상에 의해 언더필의 유동이 빨라지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 12와 같이 시료 A 언더필의 유동에 필요한 시간은 약 101초, B는 약 150초, C는 약 100초가 소요되어 점도가 높은 언더필일수록 BGA 패키지 내부로 완전하게 디스펜싱되는 시간이 길어진다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 상대적으로 높은 점도를 갖는 언더필은 실제 생산 공정 중에서 점도가 낮은 언더필에 비하여 언더필이 디스펜싱에 더 많은 시간이 소요될 것이라 판단되어 진다.

그러므로 현장에서는 언더필의 디스펜싱 시간을 단축시키는 방법으로 외부에서 기판에 열을 가하여 언더필

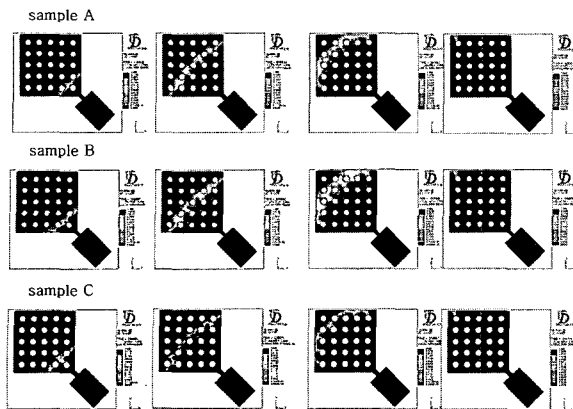


Fig. 12 The flow phenomena of underfills

의 흐름을 향상시키는 방법이 사용되고 있다.

4. 결 론

언더필의 조성에 따른 열적 특성과 언더필의 디스펜싱 과정의 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

1) 비등은 DSC 결과로부터 승온 속도가 증가할수록 언더필의 유리전이온도와 발열 구간이 고온쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있었으며 발열 구간의 영역이 좁아지는 것은 열적 지연 효과에 의하여 발생되어지는 것이라 판단된다. 승온 속도에 따른 경화 반응에 필요한 활성화 에너지를 구한 결과 시료 C < A < B의 순서로 활성화 에너지가 높은 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 시료 C 언더필이 동일한 열량을 가하였을 때 시료 A와 시료 B 언더필보다 빠른 상변태가 일어날 것이라 사료된다.

2) TGA 결과로부터 승온 속도가 증가할수록 언더필의 T_{10} (전체 무게에 대한 무게 손실이 10%될 때의 온도)의 온도도 고온쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 승온 속도에 따른 첫 번째 열화 과정에 대한 활성화 에너지를 구한 결과 시료 C < A < B의 순서로 활성화 에너지가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 시료 C 언더필이 시료 A와 B보다 무게 손실 반응에 필요한 에너지가 적을 것이라 사료된다.

3) DMA 실험 결과로부터 주파수에 의한 분해 에너지의 최대 온도를 나타내는 $\tan \delta$ 값은 시료 C < B < A의 순서로 높은 값을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 시료 C 언더필이 다른 언더필보다 외부 주파수에 의해 쉽게 분해되는 것을 의미한다.

4) TMA 실험 결과로부터 언더필 경화 후 50°C ~ 150°C 온도 구간에서 시료 B < C < A의 순서로 외부

에서 열을 가했을 때 언더필의 길이 변형을 변화가 큰 것을 확인할 수 있었다.

5) 언더필 시료 A, B, C는 각각 4,600 cps, 6,000 cps, 4,000 cps의 점도값을 갖는 것을 고려하여 언더필의 유동 흐름에 대한 시뮬레이션을 실시한 결과 언더필이 BGA 패키지 안으로 완전하게 디스펜싱되는데 각각 101초, 150초, 100 초의 시간이 걸리는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 점도가 높은 언더필일수록 패키지 안으로 완전하게 디스펜싱되는데 많은 시간이 요구되는 것을 확인할 수 있었다.

언더필은 에폭시 수지, 경화제, 충전제, 첨가제의 종류나 함유량에 따라 각기 다른 유리 전이 온도, 열팽창 계수, 저항, 내수성, 점성, 척소성 같은 특성들을 포함하게 되므로 언더필을 선택할 시에는 사용되는 조건에 적합한 선택이 필수적이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역 기술 개발 프로그램 (MOCIE : No.RTI04-03-04)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Y.C. Chan, P. L. Tu, K. C. Hung : Study of the self-alignment of no-flow underfill for micro-BGA assembly, *Microelectronics Reliability*, 2001. 1867-1875
2. De-Shin Liu, Chin-Yu Ni : A study on the electrical resistance of solder joint interconnections, *Microelectronic Engineering*, 2002. 363-372
3. J. H. Lau : *Flip Chip Technologies*, McGraw-Hill, 1996. 123-153
4. Yi. He, Brian E. Moreira, Alan Overson, Stacy H. Nakamura, Christine Bider, John F. Briscoe : Thermal characterization of an epoxy-based underfill material flip chip packaging, *Thermochimica Acta*, 1-8 (2000). 357-358
5. S.Gordeev, V. Heinzl, V. Slobodtechouk : Features of convective heat transfer in heated helium channel flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (2005). 3363-3380
6. Jurgen Stabel, Mingmin Ren : Fluid-structure-interaction for the analysis of the dynamics of fuel storage racks in the case of seismic loads, *Nuclear Engineering and Design*, 206 (2001). 167-176
7. K. Schroder, H. Gelbe : Two- and three-dimensional CED-simulation of flow-induced vibration excitation in tube bundles, *Chemical Engineering and Processing*, 38 (1999). 621-629
8. Yi He : DSC and DEA studies of underfill curing kinetics, *Thermochimica Acta*, 367-368 (2001).

- 101-106.
9. D. T. Hsu, H. K. Kim, F. G. Shi, H. Y. Tong, S. Chungpaiboonpatana, C. Davidson, J.M. Adams : Curing kinetics and optimal cure schedules for underfill materials, *Microelectronics Journal*, 2000, 271-275
 10. Young-Shin Cho, Mi-Ja Shim, Sang-Wook Kim : Thermal degradation kinetics of PE by the Kissinger equation, *Materials Chemistry and Physics* 52 (1998), 94-97
 11. Chun Shan Wang, Ching Hsuan Lin : Novel phosphorus-containing epoxy resins. Part II: curing kinetics, *Polymer* 41 (2000), 8579-8586
 12. Yeh-Fang Duann, Tsan-Min Liu, Kuo-Chung Cheng, W.-F. Su : Thermal stability of some naphthalene- and phenyl-based epoxy resin, *Polymer Degradation and Stability*, 2004, 305-310
 13. Chin-Lung Chiang, Chen-Chi M. Ma, Feng-Yih Wang, Hsu-Chiang Kuan : Thermo-oxidative degradation of novel epoxy containing silicon and phosphorus nanocomposite, *European Polymer Journal*, 2003, 825-830
 14. J. H. Lau : Low Cost Flip Chip Technologies : For DCA, WLCSP, and PBGA Assemblies, 2000, 183-222
 15. S. Alberici, A. Dellafiore, G. Manzo, G. Santospirito, C.M. Villa, L.Zanotti : Organic contamination study for adhesion enhancement between final passivation surface and packaging molding compound, *Microelectronic Engineering*, 2004, 227-234
 16. L. Nguyen, C. Quentin, P. Fine, B. Cobb, S. Bayyuk, H. Yang, and S. A. Bidstrup-Allen : *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 1999, 168-176