

언더필 공정에 대한 유동 특성과 침투 시간 예측 연구

심형섭* · 이성혁** · 김종민** · 신영의**

*중앙대학교 기계공학부 대학원

**중앙대학교 기계공학부

Flow Characteristics and Filling Time Estimation for Underfill Process

Hyung-Sub Sim*, Seong-Hyuk Lee**, Jong-Min Kim** and Young-Eui Shin**

*Graduate School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

**School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

Abstract

The present study is devoted to investigate the transient flow and to estimate the filling time for underfill process by using the numerical model established on the fluid momentum equation. For optimization of the design and selection of process parameters, this study extensively presents an estimation of the filling time in the view points of some important factors related to underfill materials and flip-chip geometry. From the results, we conclude that the filling time changes with respect to the under fill materials because of different viscosity, surface tension coefficient and contact angle. It reveals that, as the gap height increases, the filling time decreases substantially, and goes to the saturated values.

*Corresponding author : shlee89@cau.ac.kr

(Received April 13, 2007)

Key Words : Underfill process, Flow characteristics, Filling time, Solder bump resistance, Flip chip

1. 서 론

전자기기가 경박화, 소형화되면서 전자기기의 중추적인 역할을 하는 IC 패키지는 더욱 발전된 고집적, 고신뢰성의 패키징 체제의 요구가 급증하고 있다¹⁾. 기존의 IC 패키지 형태인 QFP나 SOP의 칩 접속 방법인 와이어 본딩(wire bonding)이나 테이프 본딩(tape automated bonding)으로는 고밀도 실장의 요구를 충족시키는데 한계가 있다¹⁾. 이에 따라 기존의 방법과는 달리 칩의 모든 면적을 활용할 수 있는 격자 배열(area array) 방식을 활용하여 접속 간격을 늘린 플립칩(flip hip) 기술이 거의 모든 전자기기에 급속도로 적용되고 있다²⁾. 하지만 플립칩은 칩과 기판 사이의 열팽창(coefficient of thermal expansion)의 차이 때문에 열 사이클 공정(thermal cycle) 동안에 아주 큰 전단 응력이 발생해서 플립칩의 피로 파괴(fatigue)나 균열

(crack)이 발생된다³⁾. 이와 같은 플립칩의 피로파괴나 균열은 전자기기의 신뢰성을 현격히 떨어뜨린다. 따라서 피로 파괴나 균열을 방지하기 위해 플립칩 내에 언더필 재료(underfill material)를 주입하여 칩과 기판 사이의 열팽창 계수 차이에 의한 전단 응력을 중간 부분에 위치한 솔더 범프(solder bump)에 집중시키게 된다. 또한 언더필 공정은 플립칩의 사용 온도 변화에 의한 열 충격(thermal shock), 먼지/습기에 의한 전기적 이동(migration) 그리고 솔더 합금에서 발생하는 α -ray에 의한 오작동을 예방할 수 있는 장점이 있다. 언더필 공정은 플립칩을 제작하는데 전자기기의 신뢰성을 향상시키는 측면에서 볼 때 매우 중요하다³⁻⁶⁾.

언더필 공정 기술은 주로 그림 1과 같이 칩의 한쪽 모서리나 면에서 언더필 재료를 주입하고 칩과 기판 사이의 솔더 범프에 의한 미세한 크기의 구멍(cavity)에 의한 모세관 현상(capillary action)과 플럭스(flux)의 잔사에 의해서 칩과 기판 사이를 채우는 방법을 이용한

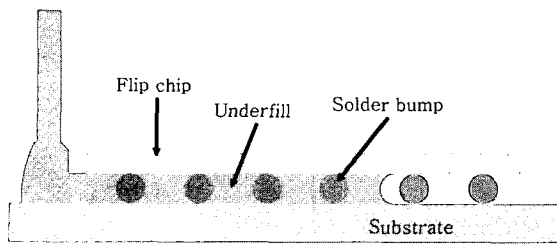


Fig. 1 Dispensing underfill flow process⁷⁾

다⁷⁾. 칩의 크기가 커짐에 따라 언더필 재료를 채우는데 있어 기공이 형성되거나 제대로 채워지지 않는 아주 심각한 문제가 발생한다. 따라서 이와 같은 언더필 공정에서 발생하는 문제점을 해결하기 위해서 많은 연구자들이 실험적, 수치해석적 방법을 이용하여 언더필 유동을 연구하였다⁷⁻⁹⁾. Washburn¹⁰⁾ 등은 언더필 유동을 1차원, 비압축성 그리고 뉴턴 유체(Newtonian fluids)라는 가정을 통해서 언더필의 진행 위치(front position)와 침투 시간(filling time)간의 관계를 제시하였다. 그러나 Washburn 모델은 언더필이 흐를 때, 기판과의 접촉각(contact angle)을 고정하는 한계 때문에 실험 결과와 비교했을 때 아주 큰 오차를 보였다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 Han과 Wang⁸⁾은 실험을 통해서 언더필이 기판과 칩 사이를 흐를 때 접촉각의 변화를 측정함으로써 기존의 모델에서 고려하지 못한 접촉각의 변화에 대한 영향을 고려하는 모델을 제안하였다. 그러나 Han과 Wang이 제안한 모델 또한 솔더 범프에 의한 저항이나 비뉴턴 유체인 언더필 재료의 특성을 고려하지 못하기 때문에 실험 결과와 큰 차이를 보였다. 따라서 Wan 등은 Han과 Wang의 모델의 한계점을 보완하기 위해 솔더 범프의 저항을 압력 강하로 처리하여 새로운 모델을 제안하였다. Wan 등이 제안한 모델을 실험 결과와 비교해 볼 때 비교적 잘 일치한다. 본 연구에서는 Wan 모델을 이용하여 언더필 공정에서의 비정상 유동을 해석하고, 다양한 언더필 재료와 솔더 범프의 크기에 따른 침투 시간을 예측하였다. 또한 다른 연구자들의 실험 결과와 비교를 통해서 본 연구에서 이용한 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 이론 및 해석 조건

그림 2와 같이 진행되는 유동을 해석하기 위해서 본 연구에서는 언더필 유체가 비압축성이고 2차원 완전 발달 유동이라고 가정하였다. 이와 같은 가정하에, 모텐 텡 지배 방정식은 다음과 같다⁷⁾.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

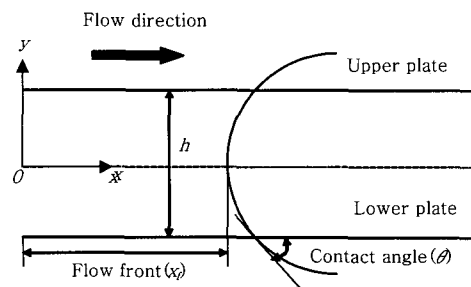


Fig. 2 Underfill flow between chip and substrate^{7,9)}

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

식 (2)로부터 압력은 x 만의 함수임을 알 수 있다. 따라서 식 (1)은 다음과 같다.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3)$$

여기서 v는 동점성 계수(kinematic viscosity)이다. 식 (3)의 해를 구하기 위해서 초기 조건과 경계 조건을 다음과 같이 적용한다⁹⁾.

$$u(y, 0) = 0, \quad u(b, t) = 0, \quad \frac{\partial u(0, t)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

여기서 식 (4)의 각 식들은 초기 속도가 0(zero)이고, 벽면에서의 점착(no-slip)조건이고, 마지막 식은 가운데 지점의 속도가 일정함을 의미한다.

식 (3)에 식 (4)의 경계 조건과 초기 조건을 적용하여 해석적 해를 구하면 다음과 같다^{7,9)}.

$$\frac{u(y, t)}{(-dp/dx)b^2/\mu} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(\lambda_n b)^3} \exp(-\lambda_n^2 vt) \cos \lambda_n y \quad (5)$$

여기서, $\lambda_n b = \frac{(2n+1)\pi}{2}$ 와 $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ 이다.

언더필 유동전방속도(flow-front velocity)는 다음과 같이 평균속도(mean velocity)로 나타낼 수 있다^{7,9)}.

$$u_m = \frac{1}{b} \int_0^y u(y, t) dy = \left(-\frac{dp}{dx} \right) \frac{b}{\mu} \left[\frac{1}{3} b - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{2n} \exp(-\lambda_n^2 vt)}{(\lambda_n b)^3 \lambda_n} \right] \quad (6)$$

또한, 유동 전방 위치(front position)의 시간에 대한 변화가 평균속도의 변화이기 때문에 평균속도로부터 시간에 따른 유동 전방 위치 변화를 알 수 있다. 최종적으로 언더필 유동 전방의 위치를 아래와 같이 얻을 수 있다^{7,9)}.

$$x_f^2 = \frac{2\Delta p b^2}{3\mu} t - \frac{4\Delta p b^2}{\mu} \left(1 - \exp\left(\frac{\pi^2}{h^2} \nu t\right) \right) \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(\lambda_n b)^4} \frac{1}{\lambda_n \nu} \quad (7)$$

여기서 x_f 는 유동 전방 위치이고, Δp 는 압력강하를 의미한다. 식 (7)에서 지수함수 항(exponential function term)은 시간에 따라 매우 빠르게 감소하기 때문에 무시할 수 있다. 또한, 식 (7)의 마지막 항도 첫째 항에 비해서 거의 무시할 수 있기 때문에 다음과 같이 언더필 유동 전방 위치에 대한 식을 유도할 수 있다^{7,9)}.

$$x_f^2 \approx \frac{\Delta p h^2}{6\mu} t \quad (8)$$

여기서 h 는 $2b$ 이다. 기판과 칩 사이의 모세관 현상에 의해 언더필 유동이 발생할 때, 압력강하는 표면 장력으로 아래와 같이 나타낼 수 있다^{7,9)}.

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \theta}{h} \quad (9)$$

여기서 σ 는 표면 장력 계수(surface tension coefficient)이다. 식 (9)을 식 (8)에 대입하면 최종적인 언더필 전방 위치를 다음과 같이 얻을 수 있다^{7,9)}.

$$x_f^2 \approx \frac{h\sigma \cos \theta}{3\mu} t \quad (10)$$

최종적으로 유도된 언더필 전방 위치에 대한 식 (10)는 시간에 따른 접촉각의 변화와 솔더 범프에 의한 저항을 고려하지 않고 있다. 따라서 이에 대한 고려가 요

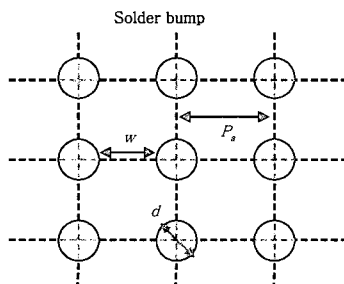


Fig. 3 The patterns of solder bump in flip chip⁹⁾

구된다. 이 때 접촉각의 변화는 Han과 Wang의 실험 결과를 이용하고 솔더범프에 의한 저항은 압력강하에 대한 항으로 처리하여 다음과 같이 나타낼 수 있다^{7,9)}.

$$\Delta p = \Delta p_\sigma - \Delta p_r \quad (11)$$

여기서 Δp_σ 은 표면 장력에 의한 압력 강하를 의미하고, Δp_r 은 솔더 범프 저항에 의한 압력 강하이다^{7,9)}.

$$\Delta p_\sigma = 2\sigma \cos \theta \left(\frac{1}{w} + \frac{1}{h} \right) \quad (12)$$

$$\Delta p_r = 2\sigma \cos \theta \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{P_s} \right) \quad (13)$$

식 (12)과 (13)를 식 (11)에 대입하면 압력강하는 아래와 같이 나타낼 수 있다^{7,9)}.

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \theta (w^2 + hw + dw - dh)}{hw(w+d)} \quad (14)$$

접촉각의 변화와 솔더 범프에 의한 저항을 고려하여 언더필 전방 위치를 유도하면 다음과 같다^{7,9)}.

$$x_f^2 = \frac{4b^2 \sigma \cos \theta_e (w^2 + hw + dw - dh)}{3\mu hw(w+d)} \times \left[t + \frac{a}{c} e^{-ct} \right] \quad (15)$$

여기서 θ_e 는 평형상태에서의 접촉각이고, a 와 c 는 계수이며 다음 식을 통해서 구해진다⁸⁾.

$$a = 1 - \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_e} \quad (16)$$

$$c = \frac{\sigma}{\mu M} \quad (17)$$

여기서 M 은 언더필 재료와 접촉된 표면에 의존하는 상수이고, μ 는 점성 계수(viscosity)를 의미하고 언더필 재료에 따라 결정된다.

식 (15)로부터 침투 시간을 유도하면 아래와 같이 비선형적인 해를 얻을 수 있다^{7,9)}.

$$t_f = \frac{3\mu w(w+d)}{h\sigma \cos \theta_e (w^2 + hw + dw - dh)} x^2 + \frac{a}{c} (1 - e^{-ct_f}) \quad (18)$$

식 (18)은 양변에 알고자 하는 변수가 존재하기 때문에 반복법을 이용하여 침투 시간을 유도해야 한다.

본 연구에서는 C++ 언어를 이용하여 프로그램을 작성하였으며, 식 (18)의 침투 시간을 구하기 위해서 반복법을 적용하였다. 각 반복 계산의 수렴 조건은 상대오차가 10⁻³보다 작은 경우로 간주하였다. 본 연구에서 다루는 해석 경우에는 언더필 재료의 점성계수 (viscosity), 접촉각(contact angle), 표면 장력(surface tension), 그리고 밀도(density)가 서로 다른 세가지 종류의 언더필을 고려하였다. 그리고 플립칩의 솔더 범프 형상에 대한 영향을 고려하기 위해 범프의 지름 (diameter)과 범프 간의 폭(width)을 변화시키면서 비정상 언더필 유동의 특성과 침투 시간(filling time)의 차이를 확인하였다. Table 1는 본 연구에서 고려된 언더필 재료의 물성을 정리한 것이다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 언더필이 범프 간의 모세관 현상에 의해서 플립칩 내에 채워지는 시간을 보여준다. 본 연구에서 적용한 모델의 타당성을 검증하기 위해서 다른 문헌의 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 여기서 고려한 플립칩의 크기와 솔더 범프의 지름, 간격 등은 Table 2에 정리되어 있다. 이와 같은 조건 아래, 침투 시간을 식 (18)을 이용하여 계산하였다. Han과 Wang의 실험에서 언더필이 채워진 부피비(fraction of volume filled)는 0.926를 고려하였을 때, 침투 시간은 대략 60 s 정도임을 알 수 있고, Wan의 결과에서도 동일 조건에서 침투 시간은 대략 61 s로 예측되었다. 본 연구에서도 동일한 조건에서 얻은 침투 시간이 대략 63.5 s 이며, Han과 Wang의 실험 결과와 Wan의 해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에

Table 1 Properties of underfills⁹⁾

Underfill material	Density (kg/m ³)	Viscosity (Pa·s)	Surface tension (N/m)	Contact angle (degree)
Type A	1600	0.7	0.027	25.5
Type B	1600	0.34	0.027	20.4
Type C	1700	0.165	0.031	17.5

Table 2 Geometry sizes of flip chip and material constants⁹⁾

L (mm)	h (mm)	d (mm)	w (mm)	θ_0 (degree)	M
7.0	0.1	0.16	0.09	84.8	17.1

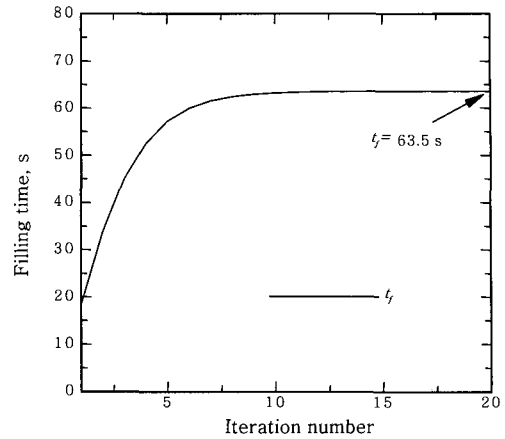


Fig. 4 Filling time calculated with Wan's model by using the iteration method

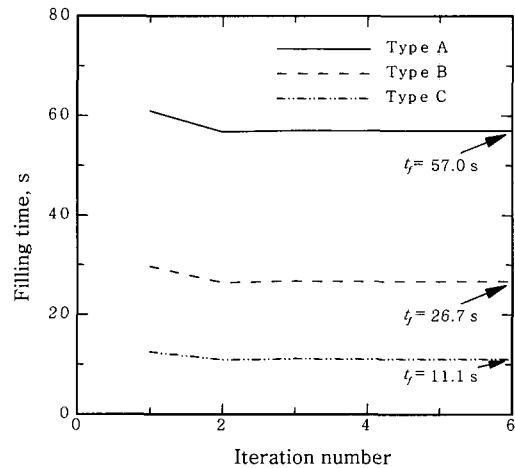


Fig. 5 Estimated filling times with respect to the materials of underfill

서 적용한 모델의 타당성이 검증되었다.

그림 5는 언더필 재료에 따른 침투 시간을 비교한다. 점성 계수, 표면장력 계수 그리고 접촉각 등이 다른 세가지 종류의 언더필을 고려하였다. 식 (18)을 이용하여 예측한 침투 시간은 Type A는 대략 57 s, Type B는 26.7 s, Type C는 11.1 s이다. 표 1에서처럼 언더필의 침투 시간에 크게 영향을 주는 인자는 점성 계수이다. 점성 계수가 작아짐에 따라 언더필의 침투 시간은 역시 현격히 감소한다.

그림 6는 언더필 재료를 변화시키면서 칩과 기판 사이의 간극에 따른 침투 시간을 보여준다. 칩과 기판 사이의 간극이 증가함에 따라 언더필 재료에 상관없이 침투 시간이 급격히 감소하다가 일정한 값으로 수렴한다. 이와 같은 현상은 간극의 크기가 커질수록 범프 저항에 의한 압력 강하가 거의 무시될 수 있기 때문에 발생한다. 그림 5에서처럼 Type A가 상대적으로 Type B와

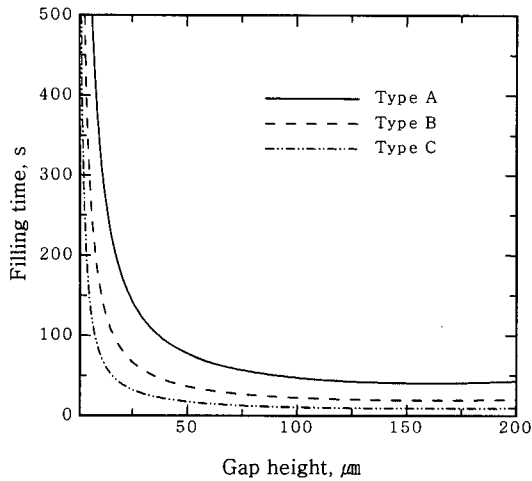


Fig. 6 Effect of the gap height on the filling times with different underfills

C보다 침투 시간이 큼을 알 수 있다. 또한 Type A의 경우 침투 시간이 대략 100 μm에서 수렴함을 알 수 있다. 이와 달리, Type B와 C는 침투 시간이 50 μm 정도에서 일정한 값으로 수렴한다. 최종적으로 Type A는 대략 41.1 s로 수렴하고, Type B는 19.3 s 그리고 Type C는 9.2 s의 일정한 값으로 수렴한다.

그림 7은 언더필의 주입 온도와 플립칩 내에 채워지는 부피비에 대한 영향을 간격을 변화시키면서 나타나는 침투 시간의 차이로 확인하였다. 언더필의 주입 온도가 높을수록 침투 시간이 증가한다. 이는 주입 온도에 의해서 언더필의 표면장력과 접촉각의 변하기 때문이다. 또한 침투 시간의 변화에 따른 임계 간극도 달라진다. 온도가 높을수록 간극의 변화에 따라 더 빠르게 침투 시간이 감소한다.

그림 8은 온도에 따른 침투 시간과 표면장력 계수의 변화를 보여준다. 언더필 재료는 Type B가 고려되었

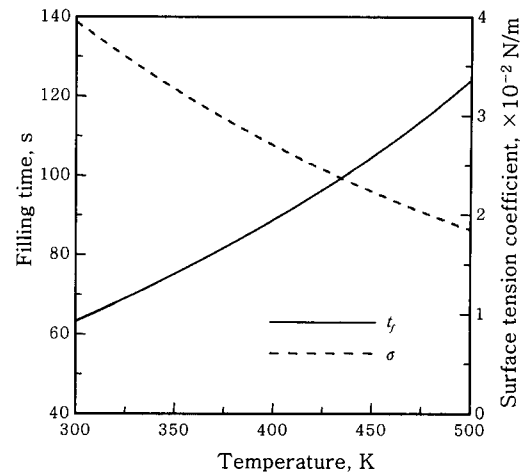


Fig. 8 Influence of temperature on filling time and surface tension coefficient

다. 이 때 주입되는 언더필의 부피비는 0.926이다. 그림 8에서처럼, 온도가 증가할수록 침투 시간은 급격하게 증가한다. 상온에서 Type B의 경우 대략 66 s이지만, 언더필을 500 K까지 가열해서 주입할 경우 침투 시간은 125 s를 넘는다. 이와 같은 현상은 언더필이 가열되면서 재료가 갖고 있는 성질이 변화하기 때문이다. 온도가 상승할 수록 언더필의 표면장력계수가 감소한다. 또한 온도의 영향에 의해서 접촉각이 변화한다.

그림 9는 솔더 범프의 지름의 크기에 따른 침투 시간을 비교한다. 솔더 범프의 지름은 50, 100, 200 μm를 고려하였고 칩의 크기는 10 mm로 고정하였다. 본 연구에서는 Full Grid방식의 솔더 범프를 고려하기 때문에 범프의 지름이 50 μm인 경우 70×70개로 총 4900개의 솔더 범프를 가진 도메인을 의미한다. 100 μm은 52×52이고, 200 μm인 경우는 34×34의 도메인이다. 그림 9에서처럼, 솔더 범프의 지름에 따른 침투

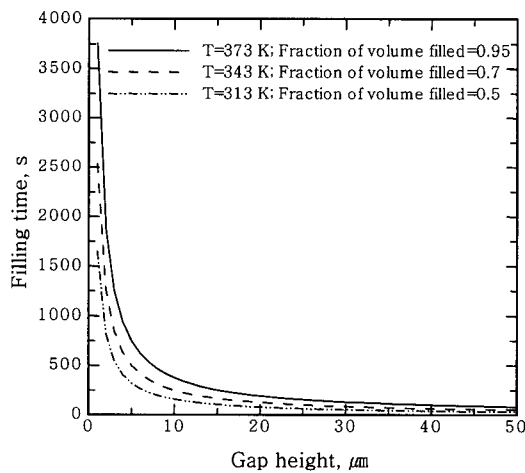


Fig. 7 Comparison of the filling times with respect to the injecting temperatures

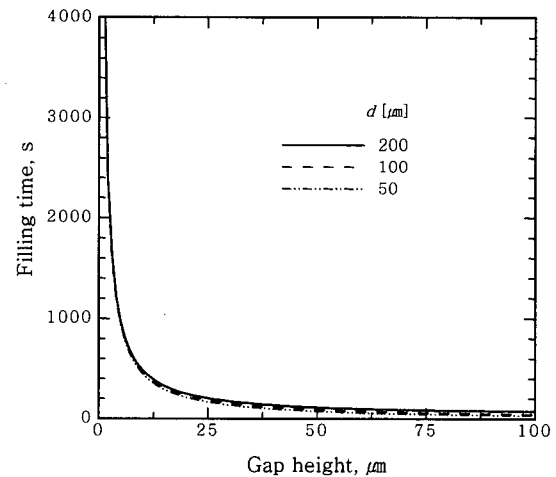


Fig. 9 Calculated filling time with different diameters of solder bump

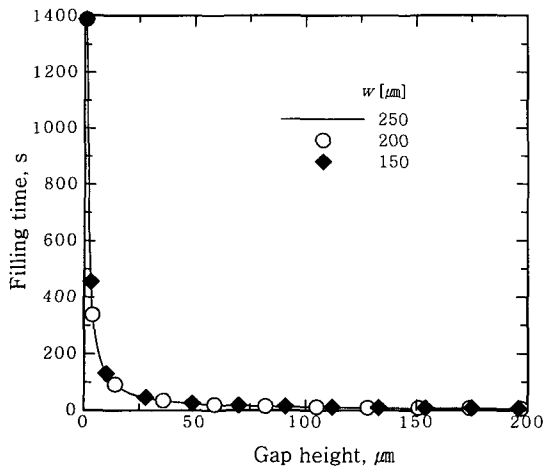


Fig. 10 Calculated filling time with different width between solder bumps

시간의 변화는 간격이 작을수록 거의 없다. 그러나 간극의 크기가 증가할수록 50, 100, 200 μm 에 대한 칩투 시간은 각각 35.8, 49.6, 78.7 s로 수렴한다.

그림 10은 솔더 범프간의 간격에 대한 칩투시간을 보여준다. 범프간의 간격은 150, 200 그리고 250 μm 으로 고려하였고 칩의 크기는 10 mm로 동일하다. 그림 9와 달리, 간극의 크기가 변함에 따라 칩투 시간은 거의 변하지 않는다. 세가지 경우 모두에 대해 칩투 시간이 대략 6.0 s 정도이다. 따라서 범프간의 간격이나 범프의 지름에 의한 형상적 영향은 언더필 재료에 물성의 변화에 대한 영향보다 작게 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 솔더 범프에 의한 저항을 고려할 수 있는 Wan 모델을 이용하여 언더필 공정에서의 비정상 유동을 해석하고, 다양한 언더필 재료와 솔더 범프 형상에 따른 칩투 시간을 예측하였다. 언더필 공정에서 사용되는 언더필 재료에 따른 칩투 시간이 다르다. 이는 언더필 재료에 따라 점성계수, 표면장력 계수, 접촉각 등이 다르기 때문이다. 또한 칩과 기판 사이의 간극에 따른 칩투 시간을 예측해보았는데, 간극이 증가할수록 칩투 시간이 급격하게 감소하며, 임계 간극을 지나서는 일정한 칩투 시간으로 수렴함을 알 수 있다. 그리고 언더필을 주입할 때의 온도에 대한 칩투 시간의 영향을 확인하여 보았다. 온도에 따라 표면장력계수와 접

촉각의 변화에 의해서 상온에 비해 온도가 상승할수록 칩투 시간이 급격하게 증가하였다. 최종적으로 플립칩 내의 솔더 범프 형상에 대한 칩투 시간의 영향을 알아 보았는데, 언더필 재료에 의한 물성변화보다 그 영향이 작음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구 2006년도 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. R.R. Tummala and E.J. Rymaszewski : Microelectronics Packaging Handbook, New York, 1989
2. M.H. Gordon, G. Ni, W.F. Schmidt, and R.P. Selvam : A Capillary-driven Underfill Encapsulation Process, *Advanced Packaging*, **8** (1999), 34-37
3. S.C. Machuga, S.E. Lindsey, K.D. Moore, and A.F. Skipor : Encapsulation of Flip-Chip Structures, *Proceedings of IEEE/CHMT Symposium* (1992), 53-58
4. F. Nakano, T. Soga, and S. Amagi : Resin Insertion Effect on Thermal Cycle Resistivity of Flip Chip Mounted LSI Devices, *Proceedings of ISHM Conference* (1987), 536-541
5. G. O'Malley, J. Giesler, and S.C. Machuga : The Importance of Materials Selection for Flip Chip on Board Assemblies, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, **17** (1994), 248-255
6. D. Suryanarayana, R. Hsiao, T.P. Gall, and J.J. McCreary : Enhancement of Flip-Chip Fatigue Life by Encapsulation, *IEEE Transaction on Components Hybrids Manufacture Technologies*, **14** (1991), 218-223
7. J.W. Wan, W.J. Zhang, and D.J. Bergstrom : Recent Advances in Modeling the Underfill Process in Flip-Chip Packaging, *Microelectronics Journal*, **38** (2007), 67-75
8. S. Han and K.K. Wang : Analysis of the Flow of Encapsulant during Underfill Encapsulation of Flip-Chips, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, **20-4** (1997), 424-433
9. J.W. Wan, W.J. Zhang, and D.J. Bergstrom : Influence of Transient Flow and Solder Bump Resistance on Underfill Process, *Microelectronics Journal*, **36** (2005), 687-693
10. E.W. Washburn : The Dynamics of Capillary Flow, *Physical Review*, **17** (1921), 273-283