

# 젖음곡선의 해석을 통한 BGA 패키지의 솔더 Ball 형상 예측에 관한 연구 Analysis of the Wetting Curve and It's Application to the Prediction of Ball Shape of BGA Package

박재용\*, 강춘식\*, 한현주\*\*, 정재필\*\*

\* 서울대학교 재료공학부

\*\* 서울시립대학교 재료공학과

## 1. 서론

패키지의 미세화 경향과 더불어, 접합된 부품의 수명을 결정하는 신뢰성 평가의 중요성도 점차 증가하고 있는데, creep test, 열피로 시험 등으로 솔더 결합부의 신뢰도를 판단하는 한편 수학적 모델링으로부터 출발하여 수명을 예측하는 연구가 많이 진행되고 있다. 이러한 계산에서 가장 기초적인 과정은 솔더 결합부의 형상을 예측하는 작업인데, 이는 솔더링 작업 후 형성된 결합부에 관한 경계조건을 바탕으로 신뢰도 평가모델을 세우기 때문이다.[1]

본 연구에서는 reflow 과정이 끝난 후 용융된 솔더 볼의 형상을 예측할 수 있는 방법에 대해 연구하였다. wetting balance test로부터 솔더 볼 예측에 있어서 가장 중요한 변수인 액상 솔더의 표면장력을 계산한 후, 이를 이용하여 Laplace equation을 통해서 솔더 볼의 형상을 계산하였다. 또, 계산결과와 비교하기 위하여 열풍방식의 reflow 솔더링 장치를 이용하여 솔더 볼의 reflow 실험도 병행하였다. 솔더 볼의 재료로는, Sn-Pb 솔더 볼 및 현재 Pb-free 솔더 계열 중 가장 대표적이라 할 수 있는 Sn-Ag 공정솔더를 사용하였다. 공정조건은 최고 온도 및 conveyor 속도를 제어하여 reflow 조건을 정하였다.

## 2. 이론적 배경

### 표면장력의 측정

wetting Balance Test로부터 표면장력을 구하는 방법은 Wilhelmy plate 모델 이후 꾸준히 제기되어 왔는데, 이 모델에 의하면, plate를 액상에 담근 후 plate에 걸리는 힘F를 다음과 같이 제시한다.

$$F = p\gamma \cos \theta \quad (1)$$

p는 plate의 둘레,  $\gamma$ 는 액상의 표면장력,  $\theta$ 는 plate와 액상이 이루는 접촉각이다. 따라서, wetting balance test에서 얻어지는 평형상태에서의 힘과 plate와 액상솔더 사이의 접촉각 만으로 액상솔더의 표면장력을 구할 수 있게 된다. 그러나, 기술적으로 wetting balance test

과정에서 접촉각을 구하는 문제가 쉽지 않고, 측정한다 하더라도 오차가 크기 때문에, 식 (1)만을 이용해서 표면장력을 계산하기가 어렵다.[4] 따라서, 이 모델을 기본으로 하여, 접촉각 측정 없이 표면장력을 계산하려는 노력이 꾸준히 시도되어 왔고, R.J. Wassink, Makato Miyazaki et al. 등에 의해 제시된 방법이 있다. [2],[3] 이러한 시도와는 달리, 본 연구자는 최근 wetting balance test 결과로 얻게되는 wetting curve 중에서, plate를 끌어당기는 과정에서 측정되는 인출력곡선으로부터 표면장력을 계산하는 방법을 제안하였으며, 본 연구에서도 같은 방법으로 표면장력을 계산하였다. [5]-[7]

withdrawal force curve는 액상솔더에 침적된 plate를 다시 인출하는 과정에서 생성되는 곡선으로서, 이 곡선의 최고점에서는 plate와 액상솔더와의 접촉각이 0이 된다. 따라서, 식(1)에서 코사인 항이 1이 되므로 최고점에서의 힘  $F_{wf}$ 는 다음과 같다.

$$F_{wf} = p\gamma - F_{end} \quad (2)$$

$F_{end}$ 는 wetting curve의 마지막에 측정되는 값으로서, plate에 묻어있는 솔더의 무게를 반영한다. 식 (2)에서 힘  $F_{wf}$ ,  $F_{end}$ 는 wetting curve로부터 얻을 수 있는 값이므로, 결국 측정된 wetting force를 통해 표면장력  $\gamma$ 를 구할 수 있게 된다.

### 솔더볼 형상의 계산

평형에 도달한 액상의 형상에 관한 계산은 Laplace 식으로부터 출발하고, 다음과 같다.

$$p_0 - p_a = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

$p_0$ 는 내부 압력,  $p_a$ 는 주위압력,  $\gamma$ 는 액상의 표면장력이고,  $R_1$  및  $R_2$ 는 액상표면의 곡률반경이다. 볼에 작용하는 압력을 정수압 상태로 가정하면 식(3) 좌항의 압력차이는  $\rho g y$ 로 나타낼 수 있고, 따라서 식(3)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dy = \frac{\sin \theta d\theta}{\frac{2 \sin \theta_0}{x_0} - \frac{\sin \theta}{x} - \frac{\rho g y}{\gamma}} \quad (4.a)$$

$$dx = \frac{-\cos \theta d\theta}{\frac{2 \sin \theta_0}{x_0} - \frac{\sin \theta}{x} - \frac{\rho g y}{\gamma}} \quad (4.b)$$

패드와 솔더볼이 접촉하고 있는 초기 접촉각  $\theta_0$ 를 구하기 위해 reflow 전후 과정에서 솔더볼의 부피변화가 없다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V = \pi \int_0^h x^2 dy = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \quad (5)$$

### Experimental Procedure

액상 솔더의 표면장력을 측정하기 위하여 wetting balance test를 실시하였다. wetting balance tester는 Rhesca에서 만든 SAT-5000 모델이며, 측정결과는 PC로 저장된다. plate로는 99.99% 순도, 두께 0.3mm의 구리판을 길이 20mm, 너비가 각각 6, 8, 10mm 가 되도록 절단한 후 사용하였다. 본 실험에 사용한 flux는 R-type 이다. 산화막을 제거하기 위하여, 아세톤에 초음파 세척한 구리판을 묽은 염산에 약 5분간 침적시킨 후 알코올로 세척하여 건조시킨 후 flux를 도포하였다.

솔더는 Sn-37Pb 및 Sn-3.5Ag를 사용하였으며, 온도에 따른 표면장력 값을 계산하기 위하여, Sn-37Pb의 온도는 210, 250, 290°C로 변화시켰으며, Sn-3.5Ag의 경우 납조의 온도를 250, 290°C로 변화시켜 측정하였다. 침적 속도는 15mm/sec, 침적깊이는 4mm, 침적시간은 5초로 고정하였다. 매 조건에서 10회씩 실험하여 최고값과 최저값을 제외한 나머지 값의 평균을 구하였다.

### Results & Discussion

#### Surface Tension의 계산

그림 2는 SnPb solder를 이용한 wetting balance test 결과 얻을 수 있는 wetting curve를 보여준다. 납조의 온도가 210°C인 경우, Sn-Pb 공정합금의 융점인 183°C보다 크게 높지 않아, 솔더의 점성이 크고 유동성이 낮아 젖음특성이 좋지 않음을 보여준다. 따라서, 젖음시간은 길고, 최대 젖음력은 낮게 나타났다. 이에 반해, 250, 290°C 에서는 젖음특성이 뛰어난 액체의 전형적인 wetting curve를 보여주고 있다. 세 조건 모두에서, 침적시간이 끝난 후 시편을 잡아당길 때 생기는 인출력곡선(withdrawal force curve)을 보여주고 있다. 앞에서 설명한 바와 같이, 이 곡선에서의 최대값을 이용하여 액상솔더의 표면장력을 계산할 수 있고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

일반적으로 알려진 바와 같이, 온도가 증가함에 따라

Sn-Pb 및 Sn-Ag 모두 표면장력이 감소하였음을 알 수 있다. 또, Sn-Pb의 표면장력은 235°C에서 0.4~0.42N/m, Sn-Ag의 표면장력은 250°C에서 0.45~0.55N/m로 보고되어 있는데, 본 연구에서 계산한 결과는 두 솔더 모두 보고된 값의 범위에 포함된다.

#### Solder Ball의 형상 계산

Reflow 솔더볼의 형상을 예측하기에 앞서, 표면장력 값의 변화가 솔더볼 형상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 부피가 동일하고 (직경 0.76mm) 표면장력값이 다른 솔더볼을 가정한 후 액상 평형상태에서의 불형상을 계산해 보았다. 주어진 표면장력값의 범위 안에서는, 동일한 부피조건에서 표면장력이 증가할수록 솔더 볼의 높이는 감소하고, 너비는 증가하였다. 또, 기판과 이루는 초기각도도 표면장력값의 증가에 따라 감소한다. 다시 말하면, 표면장력값이 증가할수록 솔더 볼의 모양이 더 찌그러지는 경향을 보인다. 이것은 동일 부피에서의 표면적의 차이에 따른 결과로서, 초기각도가 작고, 높이가 낮은 경우의 솔더 볼이, 높은 초기각도와 높이가 높은 솔더 볼에 비해 표면적이 더 크기 때문이다. 그러나, 표면장력값이 0.3 ~ 0.55 N/m 로 변화할 때 솔더 볼의 높이, 너비, 그리고 초기 각도의 변화는 아주 작게 나타났다. 실제 reflow 온도 범위의 변화, 즉, 210 ~ 290°C 의 온도변화에 따른 액상솔더의 표면장력의 변화는 약 0.5 ~ 0.4N/m 정도이므로, reflow 공정변수에 따른 솔더 볼의 외관상의 변화는 크게 나타나지 않을 것으로 기대된다.

그림 4은 초기각도의 변화에 따른 솔더 볼 형상변화를 나타낸 그림이다. BGA 공정은 솔더볼을 가운데 두고 아래 위 양 쪽에 패드가 존재하는 샌드위치 모양으로 진행된다. 따라서, 기판 위에 있는 솔더 볼이 일정한 하중의 패드를 건디는 형상이므로, 초기각도 조건에 따른 솔더볼의 형상이 달라지게 된다. 초기각도를 0에서부터 0.5mN까지 0.1mN 씩 변화시켜 계산한 결과 초기각도, 너비 및 높이 모두 뚜렷하게 변화하였음을 관찰할 수 있다. 이 결과는 표면장력의 변화에 따른 외관변화의 값이 크지 않았던 결과와 비교할만 하다. 즉, reflow 공정변화를 통한 외관의 변화보다는, 패키지의 무게와 같은 외적인 하중의 변화에 의한 솔더 볼 형상변화가 훨씬 크게 작용함을 알 수 있다. 다만, 위의 계산 결과는 액상 솔더가 충분히 녹은 이후 평형을 유지하였다는 가정 하에 나온 결과이므로, reflow 공정 변수 중 conveyor speed를 통한 reflow time의 변화는 주의할 필요가 있다. 만약 conveyor 속도가 너무 빨라 솔더볼이 액상으로 완전히 변하지 못한다면, 계산된 결과와 상당한 차이를 보일 것이기 때문이다. 이에 대한 연구는 솔더의 시간에 따른 변화를 관찰하는 kinetics 영역이고, 현재까지는 이에 대

한 정확한 예측 연구가 이뤄지지 못하고 있다.

이상의 결과를 종합하여 비교하기 위하여, 그림 5 (a)에는 wetting balance test의 결과를 통해 얻은 Sn-Pb 액상솔더의 250℃에서의 표면장력 0.401N/m 값을 이용하여 Laplace equation에 적용한 결과를 각각 나타내었다. 같은 조건에서, 10 (b)의 실제 reflow 공정을 통하여 얻은 솔더볼의 외관과 비교하였을 때, 매우 유사한 형상을 얻었다.

계산과정에서 고려하지 않은 변수로는, 솔더볼 자체의 중력, reflow 과정에서 생성되는 Marangoni effect, 그리고 reflow 구간에서의 온도변화에 따른 표면장력의 변화 등을 예로 들 수 있다. 그러나, 중력의 효과는 0.76mm 직경의 작은 솔더볼에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고된 바 있다.[9] Marangoni 효과는, 솔더 표면의 온도 차이에 따른 유동의 변화를 설명하는 이론인데, 솔더볼의 경우, reflow 구간의 변화에서 생기는 온도차이가 크지 않을뿐더러, 이런 변화의 결과에 따른 표면장력의 변화가 아주 미세하기 때문에 역시 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 따라서, wetting balance test의 인출력곡선으로부터 얻은 젖음력을 통해 솔더의 표면장력을 구하는 것, 그리고 이렇게 계산한 값을 Laplace equation에 적용하고 그 결과 솔더 볼의 형상을 예측하는 작업 모두가 실제 형상을 잘 모사한다고 할 수 있다.

### Summary

솔더 결합부의 신뢰도 평가의 기초가 되는 솔더 결합부 형상 예측 방법에 대한 연구를 진행하였다. 표면장력은 wetting balance test의 인출력곡선(withdrawal force curve)에서의 최고값에서 솔더박막의 무게를 보정한 힘으로부터 계산하였다. 계산결과 Sn-Pb 솔더의 표면장력은, 250℃에서 0.401N/m, 290℃에서 0.389N/m로 나왔다. Sn-Ag 솔더의 경우, 250℃에서 0.522, 290℃에서 0.411로 측정되었다.

Laplace 식을 이용한 용융 솔더볼의 외관을 계산하였다. 표면장력값이 낮을 때에는 초기각도와 솔더볼의 높이가 감소하였고, 솔더 볼의 너비는 증가하였다. 실제 reflow 솔더링 공정을 통하여 SnPb 솔더볼에 대한 실험 결과 계산결과와 유사하였음을 확인할 수 있었다.

### 6. References

- [1] D.R. Frear et al, The Mechanics of Solder Alloy Interconnects, Van Nostrand Reinhold, NY, p361-p413
- [2] K.J. Wassink, Soldering in electronics, Electrochemical publication limited, Oxon, England, p45-46
- [3] M. Miyazaki et al, Conditions for measurement of surface tension of solders with a wetting balance tester, Proc. 2nd symposium "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", Feb. 1-2, 1996, Yokohama, p85-p88
- [4] Hisaaki Takao et. al, "Development of Contact Angle Measurement in Meniscograph Method(1)", Paper presented at the 2nd Symposium "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", Yokohama, Japan 1-2 February 1996), 101-106
- [5] Jae Yong Park, Jae Pil Jung, Choon Sik Kang, IEEE Trans. CPM, 23 (9), 1999
- [6] Jae Yong Park, Jae Pil Jung, Choon Sik Kang, Proc. 5th symposium "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", Feb. 4-5, 1999, Yokohama, p85-p88
- [7] Jae Yong Park, Jae Pil Jung, Choon Sik Kang, JEM, v.27 (11), 1655, 1999
- [8] K.N.Chiang, W.L.Chen, "Electronic Packaging Reflow Shape Prediction for the Solder Mask Defined Ball Grid Array", J. Electronic Packaging, V 120, June, 1998, p175-17
- [9] K.W.Moon et al, "Dynamic Aspects of Wetting Balance Tests", Journal of Electronic Packaging, 118 (1996), 174-183

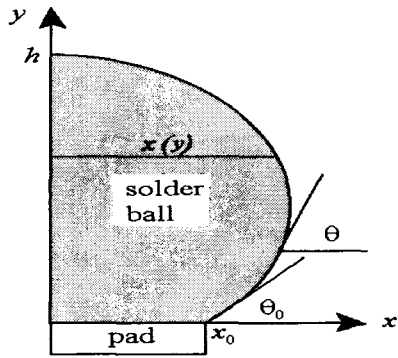


그림 1 Schematic Diagram of Solder Ball ( $dy/dx=\tan \theta$ )

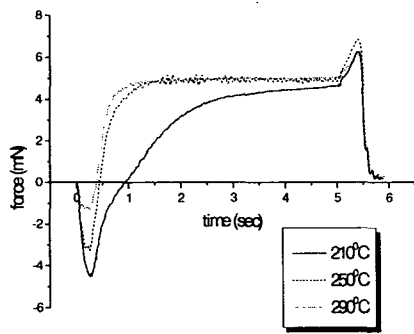


그림 2 Wetting curve of Sn-Pb solder at 210, 250, 290 °C

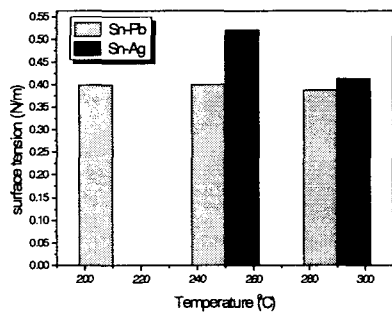


그림 3 Measured surface tensions of Sn-Pb and Sn-Ag solders

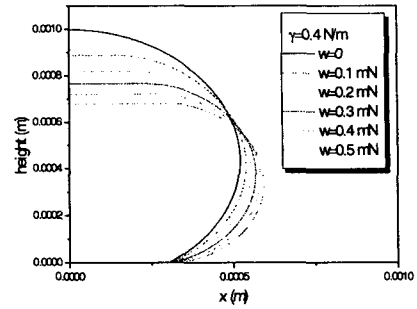


그림 4 Calculated geometry of solder ball after reflow under different initial loads

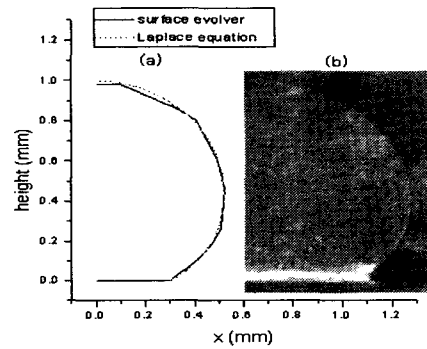


그림 4 (a) Comparison between ball shape calculated by surface evolver and by Laplace equation, (b) Picture of solder ball shape after reflow at 250 °C