

## 용융금속 액적의 고체표면 충돌거동

### Behavior of Molten metal Droplet on Collision with Solid Surface

강대현(전남대학교 기계공학과 대학원), 양영수(전남대학교 기계공학과)

#### 1. 서 론

용융금속 액적(droplet)의 고체표면 충돌과 관련된 문제는 균일재질을 얻기 위한 Spray Forming 이나, 용융금속을 떨어뜨려 제품을 제작하고자 하는 직접식 패속조형(direct RP, free form fabrication)등 여러 분야에서 중요하게 취급되고 있다. 또한, 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 반도체 패키징(packaging)의 경우에는 액적을 직접 투하하여 solder bump를 제작하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

액적의 고체표면 충돌 후 거동에 대한 많은 연구들이 이루어 졌다[1-5]. 그러나, 액적의 고체표면 충돌 후 거동을 설명하기 위해서는 이동경계조건(moving boundary condition)과 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 한다[1]. 이 경우 수치해석은 너무 많은 계산량이 요구되므로 실제 응용을 위해서는 비경제적이다. 그래서 일부 연구자들에게 의해 해석적 기법(analytical techniques)이 연구되었으며 본 논문에서도 이 방법을 사용하였다[2].

본 연구의 이론적 기초는 Kendall and Rohsenow(1978) 과 H.-Y. Kim (1999)의 연구의 결과를 토대로 시작하였다[3,4]. 본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식을 계산하지 않고, 변분법(variational principle)을 이용하여 간단한 2차 미분방정식을 구한 후 MATLAB 상용프로그램을 이용하여 계산하였다. H.-Y. Kim의 연구에서는 물, 잉크, 실리콘 오일 액적이 고체표면과 충돌에 대하여 해석하였고[4], 본 연구에서는 반고체상태(semi-solid phase) 개념을 도입하여 금속 액적의 거동을 해석하였다.

#### 2. 모델링(MODELING)

구형 용융금속 액적은 중력에 의해 고체표면에 접근, 충돌 후 퍼짐(spreading)이 일어난다. 표면장력에 의해 적절한 조건이 형성되면 원래의 상태로 회복되는 recoiling 현상이 일어난다. 구형 용융금속 액적이 액체상태로 계속 존속하게 되면 퍼짐과 recoiling이 반복되지만, 고체표면으로 열전달이 발생하면 액적은 응고되기 시

작한다. 용융 액적 내에서는 충돌에 의해 내부 유동이 활발히 일어나므로 액적 내부에서 균일 온도분포를 가진다고 가정하였다. 내부 온도분포가 균일하면 액체상태의 액적은 반고체(액체+고체, semi-solid) 상태를 거쳐 고체상태로 변화하게 된다. 본 연구에서는 액적의 상태를 그림1과 같이 액체상태와 반고체상태로 분리하여 해석하였다.

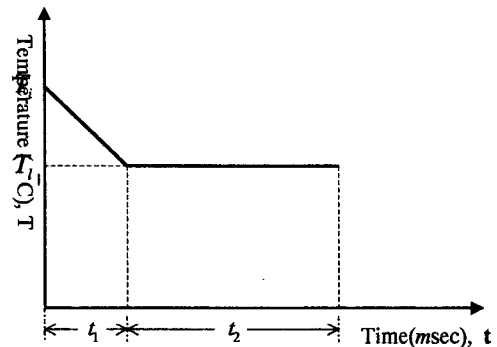


Figure 1 Thermal history of solder droplet ( $T_i$  : initial temperature at impact,  $T_m$  : melting temperature,  $t_1$  : time for liquid state,  $t_2$  : time for semi-solid state)

##### 2.1 액체상태 영역

고체표면에서 액적거동을 그림2와 같이 직경( $D$ ), 높이( $h$ )인 실린더 형상으로 가정하였으며 변분법에 의해

$$\int_{t_0}^{t_1} (\delta E_k + \delta E_p + \delta W_f) dt = 0 \quad (1)$$

여기서,  $E_k$  : 운동에너지(kinetic energy),  $E_p$  : 위치에너지(potential energy),  $W_f$  : 마찰 손실일(friction work),  $t$  : 시간(time)을 나타낸다.

$$\delta E_k = \frac{1}{2} \rho V \left[ 2 \left( \frac{d^2 h}{dt^2} \right) \left( \frac{1}{3} + \frac{V}{8\pi h^2} \right) - \frac{3V}{8\pi h^4} \left( \frac{dh}{dt} \right)^2 \right] \delta h \quad (2)$$

$$\delta E_p = \sigma \left[ \sqrt{\frac{\pi V}{h}} - (1 - \cos \theta) \frac{V}{h^2} \right] \delta h \quad (3)$$

$$\delta W_f = \frac{F_{d\mu} V^2}{8\pi \delta_H h^4} \left( \frac{dh}{dt} \right) \delta h \quad (4)$$

식 (2),(3),(4)를 식(1)에 대입하면,

$$\frac{d^2h}{dt^2} - B(h)\left(\frac{dh}{dt}\right)^2 + C(h)\frac{dh}{dt} + D(h) = 0 \quad (5)$$

여기서,

$$B(h) = \frac{1}{A} \frac{3\rho V^2}{16\pi h^4} \quad (6)$$

$$C(h) = \frac{1}{A} \frac{F_d \mu V^2}{8\pi \delta_H h^4} \quad (7)$$

$$D(h) = \frac{1}{A} \sigma \left[ \sqrt{\frac{\pi V}{h}} - (1 - \cos \theta) \frac{V}{h^2} \right] \quad (8)$$

$$A = \rho V \left( \frac{1}{3} + \frac{V}{8\pi h^3} \right) \quad (9)$$

이다.

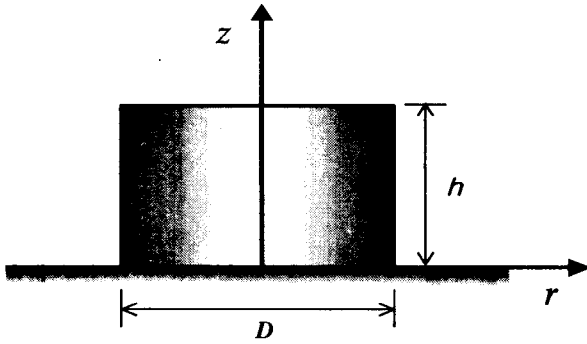


Figure 2 Geometry of the cylinder model

## 2.2 반고체상태 영역

반고체(semi-solid) 상태에서 고체의 비율이 0.05-0.1 영역에서는 non-Newtonian 유동을 보이고, 높은 비율(약 0.6이상)에서는 비선형 점소성(viscoplastic)의 고체로서 거동하게 된다[6]. 본 연구에서는 용융금속의 유동이 발생하는 최대 고체비율을 0.625로 선정하였다[6]. 반고체 상태에서 유동에 의한 에너지 손실(rate of energy dissipation  $\dot{e}$  for the semi-solid)은 참고문헌을 이용하여 다음 식을 사용하였다[6].

$$\dot{e} = \frac{1}{2} \mu \dot{\gamma}^2 \frac{\frac{9}{8} \left( \frac{C}{C_{\max}} \right)^{\frac{1}{3}}}{1 - \left( \frac{C}{C_{\max}} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (10)$$

여기서,  $C$  : 고체비율(solid volume fraction),  $C_{\max}(=0.625)$  : 최대고체비율,  $\dot{\gamma}$  : 전단변형률(shear strain rate),  $\mu$  : 점성계수(viscosity)를 나타낸다. 전단변형률 및 고체비율을 다음과 같이 가정하였다.

$$\dot{\gamma} = \frac{u_r}{h} \quad (11)$$

$$C = \frac{t}{t_2} - \frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{t_2} (t - t_1) \quad (t_1 \leq t \leq t_1 + t_2) \quad (12)$$

여기서,  $t_1$  : 액체영역시간,  $t_2$  : 반고체영역시간을 나타낸다. 식(11), (12)을 식(10)에 대입하여 정리하면 방출된 일에너지( $\delta W_d$ )는 다음과 같다.

$$\delta W_d = \int \Delta t \dot{e} dV \quad (13)$$

$$= \frac{9\mu V^2}{128\pi} \frac{1}{h^5} \frac{\left( \frac{t-t_1}{0.625t_2} \right)^{\frac{1}{3}}}{1 - \left( \frac{t-t_1}{0.625t_2} \right)^{\frac{1}{3}}} \left( \frac{dh}{dt} \right) \delta h$$

반고체 상태상태에서 운동에너지와 위치에너지는 액체상태의 식(7), (10)과 동일하므로, 식(7), (10), (13)를 식(1)에 대입하면 식(5)과 유사한 2차미분 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{d^2h}{dt^2} - B(h)\left(\frac{dh}{dt}\right)^2 + C(h)\frac{dh}{dt} + D(h) = 0 \quad (14)$$

여기서,

$$B(h) = \frac{1}{A} \frac{3\rho V^2}{16\pi h^4} \quad (15)$$

$$C(h) = \frac{1}{A} \frac{9\mu V^2}{128\pi} \frac{1}{h^5} \frac{\left( \frac{t-t_1}{0.625t_2} \right)^{\frac{1}{3}}}{1 - \left( \frac{t-t_1}{0.625t_2} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (16)$$

$$D(h) = \frac{1}{A} \sigma \left[ \sqrt{\frac{\pi V}{h}} - (1 - \cos \theta) \frac{V}{h^2} \right] \quad (17)$$

$$A = \rho V \left( \frac{1}{3} + \frac{V}{8\pi h^3} \right) \quad (18)$$

이다.

## 2.3 계산과정

유도된 식은 상용프로그램인 MATLAB를 이용하여 계산하였으며, 계산과정은 다음과 같다.

① 재료의 물성치와 액적에 관한 공정변수를 입력하고 실린더 모델의 초기직경  $D_0$ , 초기높이

$h_0$ , 초기높이의 미분값  $\left( \frac{dh}{dt} \right)_0$ 를 구한다.

② 구한 초기값과 식(5)를 이용하여  $h$ 를 계산한다. 이때  $h$ 가 최소에 도달 후 증가하는 값으로 나타날 때까지 충분한 시간동안 계산한다.

③ 계산결과 ②를 이용하여 최대직경  $D_m$ 과 그때의 시간  $t_m$ 을 구한다.

④ 계산결과 ③을 이용하여 액체상태시간  $t_1$ 을 계산한다.

⑤ 반고체상태시간  $t_2$ 를 계산한다.

- ⑥ 액체상태 구간  $t_1$ 에서  $h$ 를 계산한다.
- ⑦ 계산결과 ⑥을 초기조건으로 반고체상태  $0.625t_2$  구간에서 높이  $h$ 를 구한다.
- ⑧ 식(2)와 계산결과 ⑥,⑦을 이용하여 액적직경  $D$ 를 구한다.

### 3. 결과 및 고찰

해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 실험결과와 비교 후 여러 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 실험데이터는 H.-Y. Kim의 결과[4]를 이용하였다. 실험에서는 균일액적공정(uniform droplet process)을 이용하여 주석(Sn) 액적을 생성 후, 고체평면(알루미늄, 스테인리스강)으로부터 0.43m 높이에서 액적을 투하하고, 초당 1000 프레임의 고속비디오 카메라를 이용하여 액적의 거동을 관찰하였다. 스테인리스 판에 주석 액적이 투하되어 거동하는 모양이 그림 3에 나타나 있다.

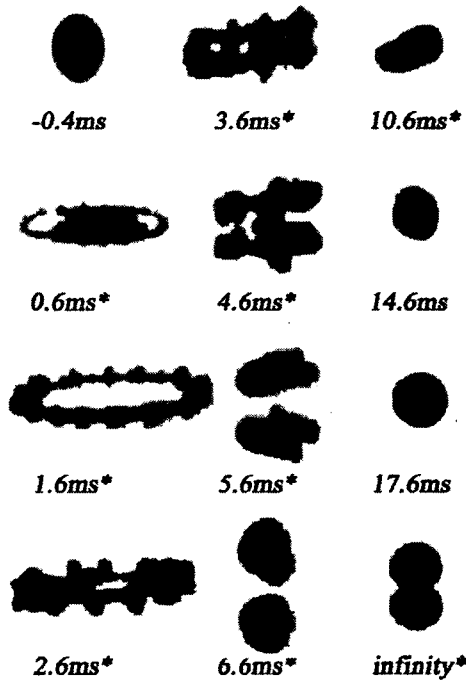


Figure 3 Images of molten tin droplets bouncing off the stainless steel 304 surface. Original droplet diameter = 1.67 mm, Impact velocity = 3.08 m/s, Droplet temperature at impact = 263 °C, Substrate temperature = 195 °C.(여기서, \* 기호는 고체 표면에 반사된 상을 포함한 사진임)

액적은 고체 판과 충돌 후 퍼짐이 발생하고 표

면장력에 의해 더 이상이 퍼짐이 일어나지 못하게 되면 원래의 형상으로 수축하게 되는데 이를 recoiling이라 한다. Recoiling하는 동안 액적은 고체표면에서 분리되어 위로 올라오는 bouncing 현상이 일어난다. 이것은 마치 공이 바닥에서 튕겨 오르는 것과 같다.

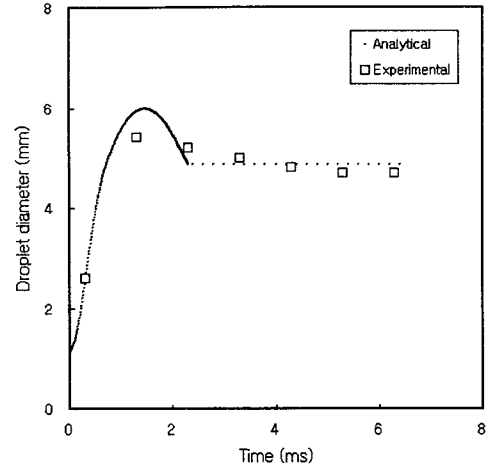


Figure 4 Prediction of analytical model and experimental measurement for tin droplet on SUS304 surface. Original droplet diameter=1.40mm, Impact velocity=2.91m/s, Droplet temperature at impact=257 °C, Substrate temperature=183 °C

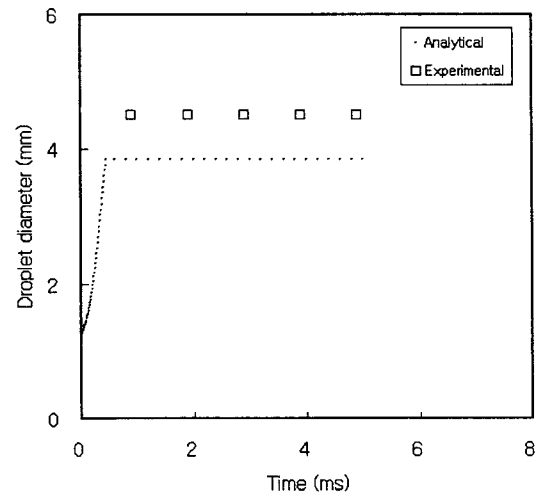


Figure 5 Prediction of analytical model and experimental measurement for tin droplet on SUS304 surface. Original droplet diameter=1.67mm, Impact velocity=3.08m/s, Droplet temperature at impact=263 °C, Substrate temperature=195 °C

스테인리스 판에 주석 액적이 투하되었을 때 계산결과와 실험의 비교가 그림4에 나타나 있으며, 비교적 잘 일치됨을 보여주고 있다. 액적이 고체표면에 충돌 후 약  $t = 1.5 \text{ msec}$ 까지 퍼짐이 발생하고, 다음으로 recoiling이 시작되었음을 알 수 있다. 충돌 후 약  $t = 2.5 \text{ msec}$ 까지 유동이 일어났으나, 냉각에 의해 응고가 완료된 후에는 유동이 없음을 보여주고 있다.

그림5는 스테인리스 판의 온도를 증가 시켜 계산 및 실험한 결과이다. 초기 퍼짐 과정에서는 실험과 계산결과가 잘 일치 되고있다. 그러나 계산결과는 액적이 충돌 후 약  $t = 2.9 \text{ msec}$ 에서 응고가 완료되었고, 실험에서는 약  $t = 6.5 \text{ msec}$ 에서 응고되었다. 이는 실험에서는 bouncing 현상이 발생하여 응고시간이 길어졌기 때문이다. 즉, recoiling 후 bouncing이 발생하여 액적과 고체표면이 분리되었기 때문에 전도열전달이 일어나지 않아 응고시간이 길어진 것이다. 따라서, 본 연구에서 제안한 모델은 non-bouncing 조건으로 사용이 제한된다.

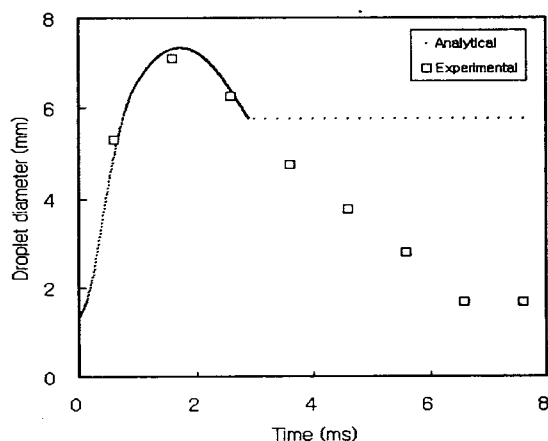


Figure 6 Prediction of analytical model and experimental measurement for tin droplet on aluminum surface. Original droplet diameter=1.57mm, impact velocity=3.04m/s, droplet temperature at impact=261 °C, Substrate temperature=30 °C

그림6은 알루미늄 판에 주석 액적이 투하될 때 거동을 나타내고 있다. 알루미늄은 열전도 계수가 크기 때문에 액적의 퍼짐 과정 도중에 유동이 정지됨을 알 수 있다. 이 경우도 계산결과와 실험이 비교적 일치함을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

용융금속 액적이 고체 판과 충돌 후 거동에 대한 해석적 모델을 제시하였으며, 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 실험과 비교하였다. 제시된 모델은 non-bouncing 조건에서 실험과 잘 일치되었다. 고체 판의 재질 및 온도, 초기 액적 온도의 변화에 따라 여러 가지 조건에서 계산을 수행한 결과, 구리 판에서는 대부분 퍼짐 과정 동안에 응고가 완료되었으며 알루미늄에서는 recoiling 후 응고가 일어났다. 또한, 응고 후 최종 액적의 직경에 영향을 미치는 변수로 고체 판의 재질 및 온도는 중요한 변수이고, 액적의 초기온도는 미미한 영향을 나타내었다.

#### REFERENCE

1. M. Pasandideh-Ford, R. Bhola, S. Chandra and J. Mostaghimi, "Deposition of tin droplets on a steel plate : simulations and experiments" International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, 1998, pp.2929-2945
2. J. Madejski, "Solidification of droplets on a cold surface", International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, Vol.19, pp.1009
3. G.E.Kendall and W.M.Rohsenow, "Heat transfer to impacting drops and post critical heat flux dispersed flow", Technical Report No. 85694-100, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1978
4. H.-Y. Kim, "Spreading behavior of molten metal microdroplets", Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1999
5. S. E. Bechtel, D. B. Bogy and F. E. Talke, "Impact of a liquid drop against a flat surface", IBM Journal of Research and Development, 1981, Vol. 25, No.6, pp. 963-971
6. P. Kumar, C. L. Martin, and S. Brown, "Flow behavior of semi-solid alloy slurries", Proceedings of the second International Conference on the Semi- Solid Processing of Alloys and Composites, 1992, June 10-12, MIT, pp.248-262

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 1998년 특정기초 국제공동연구 과제에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.