

용융금속 액적의 고체표면 충돌거동

양영수* · 손광재** · 강대현**

*전남대학교 기계공학과

**전남대학교 기계공학과 대학원

Collision Behavior of Molten Metal Droplet with Solid Surface

Young-Soo Yang* , Kwang-Jae Son** and Dae-Hyun Kang**

*Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam National University Graduate School, Kwangju 500-757, Korea

Abstract

This paper presents a study of the solder bumping process. The theoretical model, based on the variational principle instead of solving the Navier-Stokes equation with moving boundaries, was developed to consider the energy dissipation in semi-solid phase and the approximate solidification time of the molten metal droplet. The simulation results revealed that the developed model could reasonably describe the collision behavior of molten metal with solid surface. Simulations were made with variation of initial droplet temperature, substrate metal and initial substrate temperature.

(Received February 22, 2000)

Key Words : molten metal droplet, variational principle, solidification

1. 서 론

용융금속 액적(droplet)의 고체표면 충돌과 관련된 문제는 균일재질을 얻기 위한 Spray Forming 이나, 용융금속을 떨어뜨려 제품을 제작하고자 하는 직접식 캐속조형(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 있다¹⁾.

액적의 고체표면 충돌 후 거동에 대한 많은 연구들이 이루어 졌다²⁻⁸⁾. 그러나, 액적의 고체표면 충돌 후 거동을 설명하기 위해서는 이동경계조건(moving boundary condition)과 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 한다^{2,3)}. 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^{4,5)}.

본 연구의 이론적 기초는 Kendall and Rohsenow (1978) 과 H. Y. Kim (1999)의 연구의 결과를 토대로 시작하였다^{6,7)}. H. Y. Kim의 연구에서는 물, 잉크, 실리콘 오일 액적의 고체표면과 충돌에 대하여 Navier-Stokes 방정식을 계산하지 않고, 변분법(variational principle)을 이용하여 간단한 2차 미분 방정식을 얻은 후 해석하였다⁷⁾. 본 연구에서 해석 기법은 H. Y. Kim의 연구와 동일하나 금속액적을 사용하였으며, 반고체상(semi-solid phase) 개념을 도입하여 금속 액적의 거동을 해석하였다. 해석 시 미분방정식은 MATLAB 상용프로그램을 이용하여 계산하였다.

2. 모델링(MODELING)

구형 용융금속 액적은 중력에 의해 고체표면에 접근, 충돌 후 퍼짐(spreading)이 일어난다. 표면장력에 의

해 적절한 조건이 형성되면 원래의 상태로 회복되는 recoiling 현상이 일어난다. 구형 용융금속 액적이 액체상태로 계속 존속하게 되면 퍼짐과 recoiling이 반복되지만, 고체표면으로 열전달이 발생하면 액적은 응고되기 시작한다. 용융 액적 내에서는 충돌에 의해 내부 유동이 활발히 일어나므로 액적 내부에서 균일온도 분포를 가진다고 가정하였다. 내부 온도분포가 균일하면 액체상태의 액적은 반고체(액체 + 고체, semi-solid) 상태를 거쳐 고체상태로 변화하게 된다. 이와 같은 액적의 충돌거동을 해석하려면 이동경계조건과 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 한다. 지금까지의 연구는 수치해석에 의한 방법이 주류를 이루고 있으나 일부 연구자들에 의해 해석적 기법이 연구되었다. 본 연구에서는 H.Y.Kim⁷⁾에 유도된 방법을 사용하였다. H.Y.Kim은 액체상태의 액적만을 대상으로 연구를 수행하였으나, 본 연구에서는 액적의 상태를 Fig. 1과 같이 액체상태와 반고체상태로 분리하여 액체상태에서는 H.Y.Kim의 모델을 사용하였고, 반고체상태에서는 새로운 모델을 제시하였다.

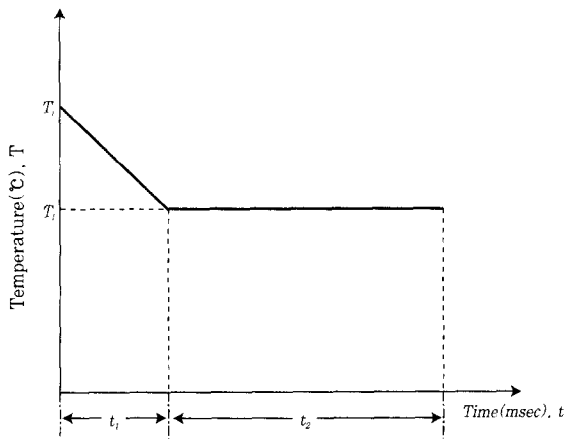


Fig. 1 Thermal history of solder droplet (T_1 : initial temperature at impact, T_2 : melting temperature, t_1 : time for liquid state, t_2 : time for semi-solid state)

2.1 액체상태 영역

액적의 거동은 변분법(variational principle)에 의해 다음과 같이 표시된다⁹⁾.

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta E_k + \delta E_p + \delta W_f) dt = 0 \tag{1}$$

여기서, E_k : 운동에너지(kinetic energy), E_p : 위치에너지(potential energy), W_f : 마찰 손실일

(friction work), t : 시간(time), t_3, t_4 : 임의의 시간 구간을 나타낸다. 고체표면에서 액적거동을 Fig. 2와 같이 직경(D), 높이(h)인 실린더 형상으로 가정하였다. 액적의 부피(V)는 실린더의 체적과 같으므로 다음과 같이 표시된다.

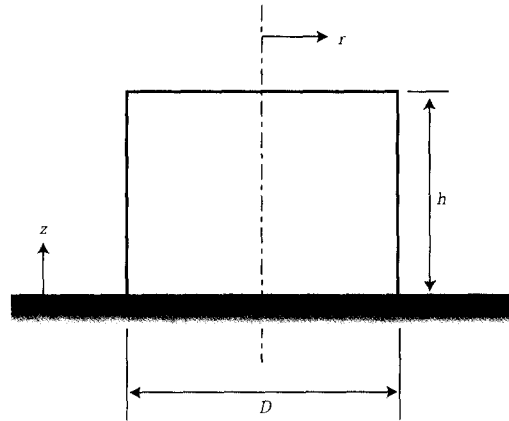


Fig. 2 Geometry of the cylinder model

$$hD^2 = \frac{4V}{\pi} \tag{2}$$

축대칭 운동으로 생각하면 운동에너지는 다음과 같이 표시된다.

$$E_k = \frac{1}{2} \rho \int (u_z^2 + u_r^2) dV \tag{3}$$

여기서 u_z : 축방향속도(axial velocity), u_r : 반경방향속도(radial velocity), ρ : 밀도를 나타낸다. 변수 h 로 속도항을 변화시키면 다음과 같다.

$$u_z = \frac{z}{h} \frac{dh}{dt} \tag{4}$$

$$u_r = -\frac{1}{2} \frac{r}{h} \frac{dh}{dt} \tag{5}$$

식(4), (5)를 식(3)에 대입하고 적분을 수행하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$E_k = \frac{1}{2} \rho V \left(\frac{1}{2} + \frac{V}{8\pi h^2} \right) \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \tag{6}$$

이를 h 에 관한 증분항으로 표시하면 운동에너지는 다음과 같다.

$$\delta E_k = \frac{1}{2} \rho V \left[2 \left(\frac{d^2h}{dt^2} \right) \left(\frac{1}{3} + \frac{V}{8\pi h^2} \right) - \frac{3V}{8\pi h^3} \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \right] \delta h \tag{7}$$

위치에너지 E_p 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E_p = \left(\frac{\pi}{4} D^2 + \pi Dh\right) \sigma - \alpha \cos \theta \left(\frac{\pi}{4} D^2\right) \quad (8)$$

여기서, σ : 표면장력(surface tension), θ : 접촉각(contact angle between the liquid droplet and the solid surface)이다. 식(2)에 의해 위치에너지는 다음과 같이 표시된다.

$$E_p = 2\sigma \sqrt{\pi V h} + \alpha(1 - \cos \theta) \frac{V}{h} \quad (9)$$

이를 h 에 관한 증분항으로 표시하면 위치에너지는 다음과 같다.

$$\delta E_p = \sigma \left[\sqrt{\frac{\pi V}{h}} - (1 - \cos \theta) \frac{V}{h^2} \right] \delta h \quad (10)$$

접촉면에서 전단응력에 의한 마찰 손실일(δW_f)은 다음과 같이 표시된다.

$$\delta W_f = \int \tau \delta \Delta_r dA \quad (11)$$

여기서 τ : 전단응력(shear stress at the base of the droplet), Δ_r : 반경방향 변위(radial displacement), A : 면적(base area)이다. 전단응력을 정의하기 위하여 경계층 두께 δ_H (hydrodynamic boundary layer thickness)는 참고문헌⁸⁾을 이용하여 다음과 같이 정의하였고,

$$\delta_H = \left(\frac{\mu^2}{\pi^2 \rho \alpha D'}\right)^{\frac{1}{4}} D' \quad (12)$$

이때, 전단응력(τ)은 다음과 같이 표시된다.

$$\tau = F_d \frac{\mu u_i}{\delta_H} \quad (13)$$

여기서, F_d : 상수(dissipation factor), μ : 점성계수(viscosity), δ_H : 경계층 두께, D' : 액적 직경(drop diameter)을 나타낸다. 반경방향 변위를 Δ_r 로 표시하면, 식(5)에 의해 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$\Delta_r = \int u_i dt = -\frac{1}{2} r \ln h \quad (14)$$

이를 h 에 관한 증분항으로 표시하면 반경방향 변위는 다음과 같다.

$$\delta \Delta_r = -\frac{1}{2} r \frac{\delta h}{h} \quad (15)$$

식(12), (13), (15)를 식(11)에 대입하여 적분을 수행하면 다음과 같다.

$$\delta W = \frac{F_d \mu V^2}{8\pi \delta_H h^2} \left(\frac{dh}{dt}\right) \delta h \quad (16)$$

식(7), (10), (16)을 식(1)에 대입하고, 정리하면 다음과 같은 미분방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{d^2 h}{dt^2} - B(h) \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 + C(h) \frac{dh}{dt} + D(h) = 0 \quad (17)$$

여기서,

$$B(h) = \frac{1}{A} \frac{3\rho V^2}{16\pi h^4} \quad (18)$$

$$C(h) = \frac{1}{A} \frac{F_d \mu V^2}{8\pi \delta_H h^2} \quad (19)$$

$$D(h) = \frac{1}{A} \sigma \left[\sqrt{\frac{\pi V}{h}} - (1 - \cos \theta) \frac{V}{h^2} \right] \quad (20)$$

$$A = \rho V \left(\frac{1}{3} + \frac{V}{8\pi h^3}\right) \quad (21)$$

2.1.1 초기조건

식(17)을 계산하기 위해서는 h 와 $\frac{dh}{dt}$ 의 초기조건이 요구된다. 초기 액적과 모델형상으로 선정된 실린더의 위치에너지 E_p 는 동일하기 때문에 식(2)를 이용하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{4} (1 - \cos \theta) D_0^3 - (D')^2 D_0 + \frac{2}{3} (D')^3 = 0 \quad (22)$$

여기서, D_0 : 초기 실린더 직경(initial diameter of the cylinder), D' : 액적 직경(drop diameter)이다. 식(22)를 이용하여 초기 직경 D_0 및 높이 h_0 를 구할 수 있으며, 운동에너지 동일성을 이용하면 초기 높이의 미분 값은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\left(\frac{dh}{dt}\right)_0 = -\sqrt{\frac{u_i^2}{\frac{1}{3} + \frac{V}{8\pi h_0^3}}} \quad (23)$$

여기서, $\left(\frac{dh}{dt}\right)_0$: 초기 높이의 미분 값, u_i : 충돌 시 액적 속도(droplet velocity at impact)이다.

2.1.2 액체상태 시간

그림1의 액체상태 시간 t_f 을 계산하기 위하여 일차원

열전달 문제로 가정하였다. 그림2에서 실린더 액적 내부는 균일온도로 가정하였다. 대류에 의한 공기중으로 열손실은 무시하였으며, 접촉면을 통한 열전도량 E_c 는 다음과 같이 가정하였다.

$$E_c = kA \frac{dT}{dz} = kA \left(\frac{T_s - T}{h} \right) \quad (24)$$

여기서, k : 고체 판의 열전도 계수 (conductivity of substrate), A : 접촉면적 (contact area), T_s : 고체 판의 온도 (substrate temperature), T : 액적 온도 (droplet temperature)이다. 열평형을 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$k \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \frac{T_s - T}{h} = \rho c V \frac{dT}{dt} \quad (25)$$

여기서, c : 액적의 비열 (specific heat of droplet material), ρ : 액적의 밀도 (density)이다. 이식을 식 (2)를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$-\frac{\pi^2 k}{16 \rho c V^2} D^4 (T - T_s) = \frac{dT}{dt} \quad (26)$$

온도차에 관한 변수(θ)를 도입하면 위 식은 다음과 같다.

$$\theta = T - T_s \quad (27)$$

$$\left(\frac{dT}{dt} \right) = \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \\ -\frac{\pi^2 k}{16 \rho c V^2} D^4 \theta = \frac{d\theta}{dt} \quad (28)$$

변수분리법을 이용하여 액체상태 시간(t_1)에 대하여 적분을 수행하면 다음과 같다.

$$-\frac{\pi^2 k}{16 \rho c V^2} \int_0^{t_1} D^4 dt = \int_{\theta_i}^0 \frac{d\theta}{\theta} \quad (29)$$

여기서, $\theta_i = T_i - T_s$, $\theta_f = T_f - T_s$, T_i : 액적 용융온도 (melting temperature of droplet)이다.

$$\int_0^{t_1} D^4 dt = \frac{16 \rho c V^2}{\pi^2 k} \ln \left(\frac{T_i - T_s}{T_f - T_s} \right) \quad (30)$$

충돌 후 액적의 직경은 퍼짐에 의해 증가하고, 최대 직경에 도달 후 감소한다. 시간에 대한 직경의 변화를 2차함수로 가정하여 다음과 같이 표시하였다.

$$D = \frac{D_0 - D_m}{t_m^2} (t - t_m)^2 + D_m \quad (31)$$

여기서, D_0 : 초기직경 (initial diameter of cylinder), D_m : 최대직경 (maximum diameter), t_m : 최대직경 때 시간 (peak time at maximum diameter)이다. Fig. 3에 개략도가 나타나 있으며 D_m , t_m 은 식(17)과 (2)를 이용하여 구할 수 있다. 식 (31)을 식(30)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\int_0^{t_1} \left[\frac{D_0 - D_m}{t_m^2} (t - t_m)^2 + D_m \right]^2 dt = \frac{16 \rho c V^2}{\pi^2 k} \ln \left(\frac{T_i - T_s}{T_f - T_s} \right) \quad (32)$$

$$C_9 t_1^9 + C_8 t_1^8 + C_7 t_1^7 + C_6 t_1^6 + C_5 t_1^5 + C_4 t_1^4 + C_3 t_1^3 + C_2 t_1^2 + C_1 t_1 \\ = \frac{16 \rho c V^2}{\pi^2 k} \ln \left(\frac{T_i - T_s}{T_f - T_s} \right) \quad (33)$$

여기서,

$$C_1 = A_3^4, C_2 = A_3^3 A_6, C_3 = \frac{1}{3} (2A_3^2 A_5 + A_6^2), C_4 = \frac{1}{2} (A_3^2 A_4 + A_5 A_6),$$

$$C_5 = \frac{1}{5} (2A_1^2 A_3^2 + 2A_4 A_6 + A_5^2), C_6 = \frac{1}{3} (A_1^2 A_6 + A_4 A_5),$$

$$C_7 = \frac{1}{7} (2A_1^2 A_5 + A_4^2), C_8 = \frac{1}{4} (A_1^2 A_4), C_9 = \frac{1}{9} A_1^4$$

$$A_1 = \frac{D_0 - D_m}{t_m^2}, A_2 = -2A_1 t_m, A_3 = A_1 t_m^2 + D_m, A_4 = 2A_1 A_2$$

$$A_5 = 2A_1 A_3 + A_2^2, A_6 = 2A_2 A_3$$

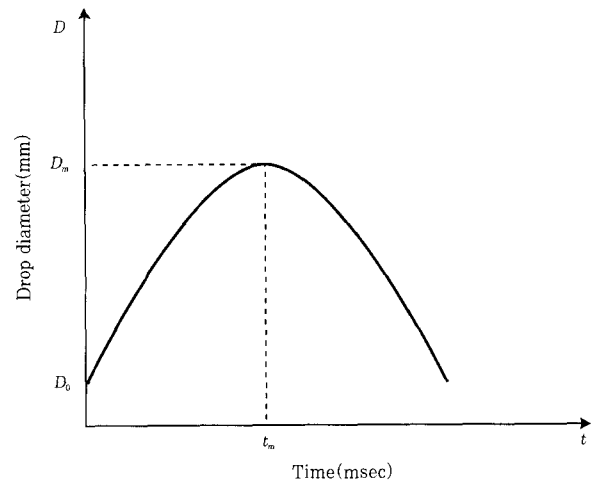


Fig. 3 Assumed behavior of droplet diameter for calculation of solidification time .

2.2 반고체상태 영역

반고체 (semi-solid) 상태에서 고체의 비율이 0.05-0.1 영역에서는 non-Newtonian 유동을 보이고, 높은 비율 (약 0.6 이상)에서는 비선형 점소성 (viscoplastic)의 고체로서 거동하게 된다¹⁰⁾. 본 연구

에서는 용융금속의 유동이 발생하는 최대 고체비율을 0.625로 선정하였다¹⁰⁾. 반고체 상태에서 유동에 의한 에너지 손실(rate of energy dissipation \dot{e} for the semi-solid)은 참고문헌을 이용하여 다음 식을 사용하였다^{10,11)}.

$$\dot{e} = \frac{1}{2} \mu \gamma^2 \frac{\frac{9}{8} \left(\frac{C}{C_{max}} \right)^{\frac{1}{3}}}{1 - \left(\frac{C}{C_{max}} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (34)$$

여기서, C : 고체체적분율(solid volume fraction), $C_{max}(=0.625)$: 최대고체체적분율, γ : 전단변형률(shear strain rate), μ : 점성계수(viscosity)를 나타낸다. 전단변형률 및 고체체적분율 다음과 같이 가정하였다.

$$\dot{\gamma} = \frac{u_r}{h} \quad (35)$$

$$C = \frac{t}{t_2} - \frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{t_2}(t-t_1) \quad (t_1 \leq t \leq t_1+t_2) \quad (36)$$

여기서, t_1 : 액체영역시간, t_2 : 반고체영역시간을 나타낸다. 식(35), (36)을 식(34)에 대입하면 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{e} = \frac{9}{64} \mu \frac{1}{h^4} \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \frac{\left(\frac{t-t_1}{0.625t_2} \right)^{\frac{1}{3}}}{1 - \left(\frac{t-t_1}{0.625t_2} \right)^{\frac{1}{3}}} \cdot \gamma^2 \quad (37)$$

방출된 일에너지(δW_d)는 다음과 같다.

$$\delta W_d = \int \Delta \dot{e} dV = \frac{9\mu V^2}{128\pi h^5} \frac{1}{1 - \left(\frac{t-t_1}{0.625t_2} \right)^{\frac{1}{3}}} \left(\frac{dh}{dt} \right) \delta h \quad (38)$$

반고체 상태상태에서 운동에너지와 위치에너지는 액체상태의 식(7), (10)과 동일하므로, 식(7), (10), (38)을 식(1)에 대입하면 식(17)과 유사한 2차미분방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{d^2h}{dt^2} - B(h) \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 + C(h) \frac{dh}{dt} + D(h) = 0 \quad (39)$$

여기서,

$$B(h) = \frac{1}{A} \frac{3\rho V^2}{16\pi h^4} \quad (40)$$

$$C(h) = \frac{1}{A} \frac{9\mu V^2}{128\pi h^5} \frac{1}{1 - \left(\frac{t-t_1}{0.625t_2} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (41)$$

$$D(h) = \frac{1}{A} \sigma \left[\sqrt{\frac{\pi V}{h}} - (1 - \cos\theta) \frac{V}{h^2} \right] \quad (42)$$

$$A = \rho V \left(\frac{1}{3} + \frac{V}{8\pi h^3} \right) \quad (43)$$

(1) 반고체상태 시간

반고체 상태는 액체 상태와 유사하게 일차원 열전달 문제로 가정하였다. 공기중으로 대류를 무시하고 식(24)를 고려하여 열평형 방정식 구하면 다음과 같다.

$$\int_{t_1}^{t_1+t_2} \left[k \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \frac{dT}{dz} \right] dt = \int_{t_1}^{t_1+t_2} \left[k \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \frac{T_s - T_l}{h} \right] dt = -\rho V Q_L \quad (44)$$

여기서, Q_L : 잠열(latent heat)를 나타내며, 식(2)를 이용하여 식(44)를 정리하면 다음과 같다.

$$\int_{t_1}^{t_1+t_2} D^4 dt = \frac{16\rho Q_L V^2}{\pi^2 k (T_l - T_s)} \quad (45)$$

시간차에 대한 변수 $a(a = t-t_1, da = dt)$ 를 도입하면, 식(31)과 (45)는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$D = \frac{D_0 - D_m}{t_m^2} (a+t_1-t_m)^2 + D_m \quad (46)$$

$$\int_0^{t_2} D^4 da = \frac{16\rho Q_L V^2}{\pi^2 k (T_l - T_s)} \quad (47)$$

식(46)을 식(47)에 대입하고 적분을 수행하면 다음과 같다.

$$C_5 t_2^9 + C_8 t_2^8 + C_7 t_2^7 + C_6 t_2^6 + C_5 t_2^5 + C_4 t_2^4 + C_3 t_2^3 + C_2 t_2^2 + C_1 t_2 = \frac{16\rho Q_L V^2}{\pi^2 k (T_l - T_s)} \quad (48)$$

여기서,

$$C_1 = A_1^4, C_2 = A_3^3 A_6, C_3 = \frac{1}{3} (2A_3^2 A_5 + A_6^2), C_4 = \frac{1}{2} (A_3^2 A_4 + A_5 A_6),$$

$$C_5 = \frac{1}{5} (2A_4^2 A_3^2 + 2A_4 A_6 + A_3^3), C_6 = \frac{1}{3} (A_4^2 A_6 + A_4 A_5),$$

$$C_7 = \frac{1}{7}(2A_1^2 A_3 + A_2^2), C_8 = \frac{1}{4}(A_1^2 A_4), C_9 = \frac{1}{9}A_1^4$$

$$A_1 = \frac{D_0 - D_m}{t_m^2}, A_2 = -2A_1(t_m - t_1), A_3 = A_1(t_m - t_1)^2 + D_m$$

$$A_4 = 2A_1 A_2, A_5 = 2A_1 A_3 + A_2^2, A_6 = 2A_2 A_3$$

2.3 계산과정

유도된 식은 상용프로그램인 MATLAB를 이용하여 계산하였으며, 계산과정은 다음과 같다.

- ① 재료의 물성치와 액적에 관한 공정변수를 입력하고 식(2), (22), (23)을 이용하여 실린더 모델의 초기직경 D_0 , 초기높이 h_0 , 초기높이의 미분값 $(\frac{dh}{dt})_0$ 를 구한다.
- ② 구한 초기값과 식(17)를 이용하여 h 를 계산한다. 이때 h 가 최소에 도달 후 증가하는 값으로 나타날 때까지 충분한 시간동안 계산한다.
- ③ 계산결과 ②와 식(2)를 이용하여 최대직경 D_m 과 그때의 시간 t_m 을 구한다.
- ④ 식(33)을 계산결과 ③을 이용하여 액체상태시간 t_1 을 계산한다.
- ⑤ 식(48)을 이용하여 반고체상태시간 t_2 를 계산한다.
- ⑥ 식(17)을 이용하여 액체상태 구간 t_1 에서 h 를 계산한다.
- ⑦ 계산결과 ⑥을 초기조건으로 식(39)를 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 참고문헌 H. Y. Kim⁷⁾의 결과를 이용하였다. 실험에서는 균일액적공정(uniform droplet process)을 이용하여 주석(Sn) 액적을 생성 후, 고체 평면(알루미늄, 스테인리스강)으로부터 0.43m 높이에서 액적을 투하하고, 초당 1000 프레임의 고속비디오 카메라를 이용하여 액적의 거동을 관찰하였다. 스테인리스 판에 주석 액적이 투하되어 거동하는 모양이 Fig. 4⁷⁾에 나타나 있다. 액적은 고체 판과 충돌 후 퍼짐이 발생하고 표면장력에 의해 더 이상이 퍼짐이 일어나지 못하게 되면 원래의 형상으로 수축하게 되는데 이를 recoiling이라 한다. Recoiling하는 동안 액적은

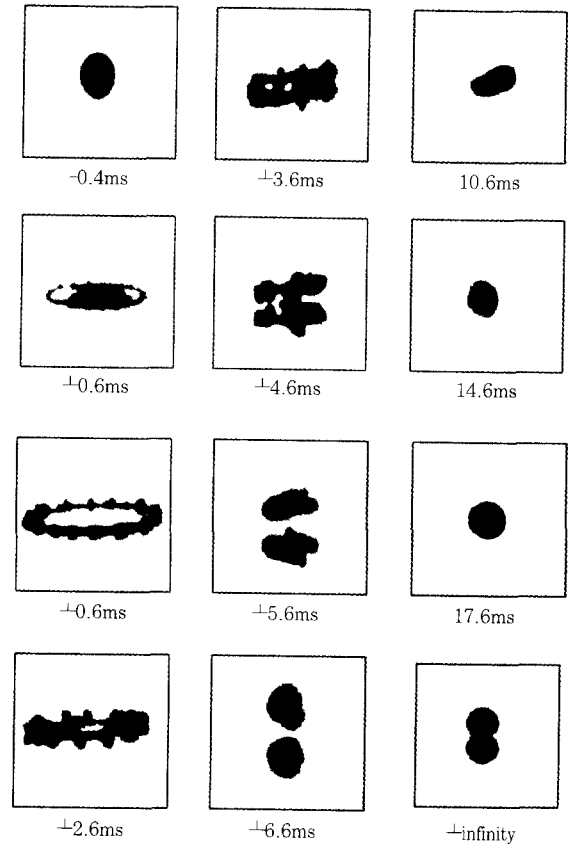


Fig. 4 Images of molten tin droplets bouncing off SUS 304 surface. Original droplet diameter : 1.67 mm, Impact velocity : 3.08 m/s, Droplet temperature at impact : 263℃, Substrate temperature : 195℃ [Reference 7]. (Where, the photo having the symbol "±" includes reflecting image)

고체표면에서 분리되어 위로 올라오는 bouncing 현상이 일어난다. 이것은 마치 공이 바닥에서 튕겨 오르는 것과 같다. Table 1,2에 계산에서 사용된 재료의 물성치가^{12,13)}, Table 3에 실험조건이 표시되어있다.

스테인리스 판에 주석 액적이 투하되었을 때 계산결과와 실험의 비교가 Fig. 5에 나타나있으며, 비교적 잘 일치됨을 보여주고 있다. 액적이 고체표면에 충돌 후 약 $t=1.5$ msec까지 퍼짐이 발생하고, 다음으로 recoiling이 시작되었음을 알 수 있다. 충돌 후 약 $t=2.5$ msec까지 유동이 일어났으나, 냉각에 의해 응고가 완료된 후에는 유동이 없음을 보여주고 있다.

Fig. 6은 스테인리스 판의 온도를 증가 시켜 계산 및 실험한 결과이다. 초기 퍼짐 과정에서는 실험과 계산결과가 잘 일치 되고있다. 그러나 계산결과는 액적이 충돌 후 약 $t=2.9$ msec에서 응고가 완료되었고, 실험에서는 약 $t=6.5$ msec에서 응고되었다. 이는

Table 1 Material properties of tin droplet

Surface tension (Nm^{-1})	Density (Kgm^{-3})	Viscosity ($Kgm^{-1}s^{-1}$)	Specific heat ($JKg^{-1}K^{-1}$)	Latent heat ($JKg^{-1}K^{-1}$)	Melting temperature ($^{\circ}C$)	Dissipation factor (F_d)	Contact angle ($deg.$)
0.544	7000	0.00271	257	59500	232	15	90

Table 2 Thermal conductivity of substrate ($Wm^{-1}K^{-1}$)

SUS304	Aluminum	Copper	Silicon	Al_2O_3
17	.180	400	150	30

Table 3 Experimental conditions by H.-Y. Kim.

Substrate material	Substrate temperature ($^{\circ}C$)	Droplet temperature ($^{\circ}C$)	Droplet diameter (mm)	Impact velocity (m/sec)
SUS304	183	257	1.40	2.91
SUS304	195	263	1.67	3.08
Aluminum	30	261	1.57	3.04

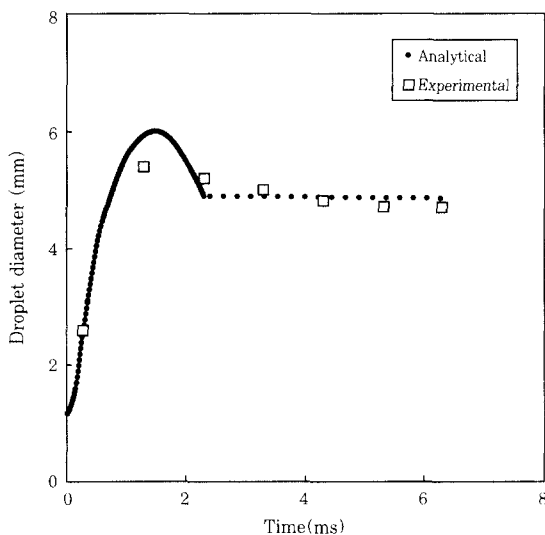


Fig. 5 Prediction of analytical model and experimental measurement for tin droplet on SUS304 surface. Original droplet diameter : 1.40mm, Impact velocity : 2.91m/s, Droplet temperature at impact : 257 $^{\circ}C$, Substrate temperature : 183 $^{\circ}C$

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.

Fig. 7은 알루미늄 판에 주석 액적이 투하될 때 거동을 나타내고 있다. 알루미늄은 열전도 계수가 크기 때

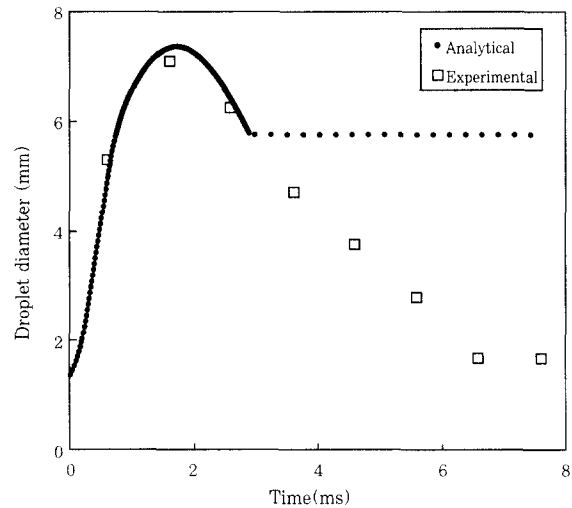


Fig. 6 Prediction of analytical model and experimental measurement for tin droplet on SUS304 surface. Original droplet diameter : 1.67mm, Impact velocity : 3.08m/s, Droplet temperature at impact : 263 $^{\circ}C$, Substrate temperature : 195 $^{\circ}C$

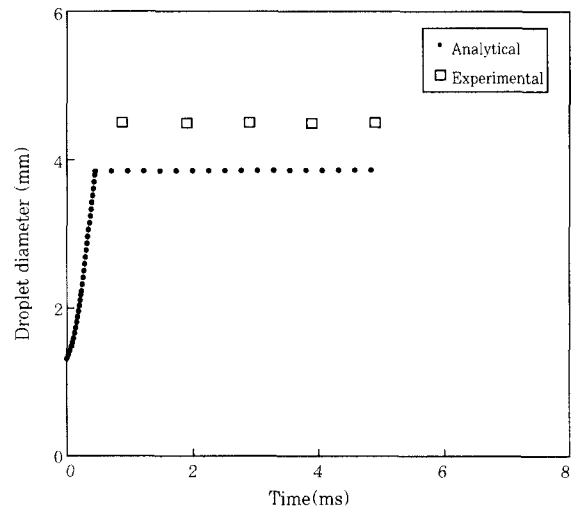


Fig. 7 Prediction of analytical model and experimental measurement for tin droplet on aluminum surface. Original droplet diameter : 1.57mm, Impact velocity : 3.04m/s, Droplet temperature at impact : 261 $^{\circ}C$, Substrate temperature : 30 $^{\circ}C$

문에 액적의 퍼짐 과정 도중에 유동이 정지됨을 알 수 있다. 이 경우도 계산결과와 실험이 비교적 일치함을 볼 수 있다.

반도체 패키징에 사용되는 solder bump에 응용하기 위하여 여러 가지 조건에 대하여 해석을 수행하였다. Table 4에 고체 판의 재질 및 온도, 액적의 초기 온도 등 공정변수가 나타나있다¹⁴⁾. 구리 판에 주석 액적이 투하되고, 구리 판의 온도변화에 따라 액적의 응고 후 최종 직경이 Fig. 8에 나타나있다. 구리 판의 온도가 상온에서 150℃정도까지 증가함에 따라 최종직경이 조금씩 증가하고, 이후에는 약 215℃때까지 급격히 증가함을 보여주고 있다. 이것은 구리 판의 온도가 약 215℃이내일 경우에 액적은 퍼짐 과정 도중에 응고가 완료되었음을 나타낸다. 주석의 용융온도가 232℃인 점을 고려하면 상당히 높은 온도까지 고체 판을 가열하여야 recoiling이 발생함을 알 수 있다. 이것은 구리의 열전달 계수가 매우 크기 때문이다. 액적의 초기온도가 증가함에 따라 최종직경도 증가함을 보여주고 있으나, 영향이 미미함을 알 수 있다.

실리콘 판에 대한 결과가 Fig. 9에 나타나 있으며, 구리 판과 유사한 결과를 보여주고 있다. 구리와 비교하여 recoiling이 일어나는 온도가 약 180℃정도로 이동

하였는데, 이것은 열전도 계수가 구리에 비하여 낮기 때문이다. Fig. 10은 알루미늄(Al₂O₃) 판에 대한 계산결과 이다. 알루미늄의 열전도 계수가 매우 낮기 때문에 recoiling이 일어나는 고체 판의 온도가 상온 이하임을 보여 주고있다. 알루미늄 판에 주석 액적을 투하할 경우에는 상온 주변에서 많은 변화가 일어나고 있으므로 온도가 주요한 변수로 작용되고 있음을 보여준다.

Fig. 11은 구리, 실리콘, 알루미늄을 함께 보여준 것으로 고체 판의 열전달 계수의 차이에 따라 응고과정이 많이 다르게 나타남을 보여준다.

Table 4 Analytical conditions for solder bump application.

Substrate material	Substrat temperature (℃)	Droplet temperature (℃)	Droplet diameter (mm)	Impact velocity (m/sec)
Copper	242, 262, 282	20~230	0.1	1.0
Silicon	242, 262, 282	20~200	0.1	1.0
Al ₂ O ₃	242, 252, 262	0~40	0.1	1.0

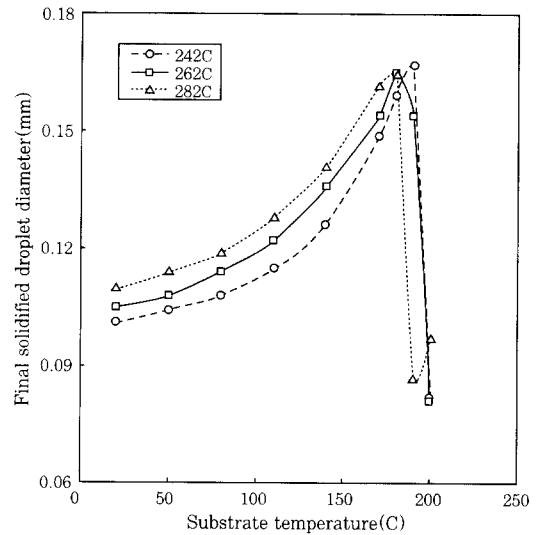


Fig. 9 Final solidified droplets diameter for tin as funtions of silicon substrate temperature with various initial droplet temperature. Original droplet diameter : 0.1mm, Impact velocity : 1.0m/s

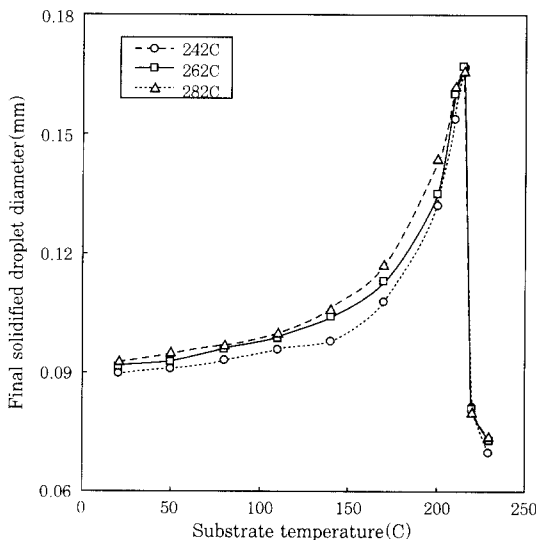


Fig. 8 Final solidified droplets diameter for tin as funtions of copper substrate temperature with various initial droplet temperature. Original droplet diameter : 0.1mm, Impact velocity : 1.0m/s

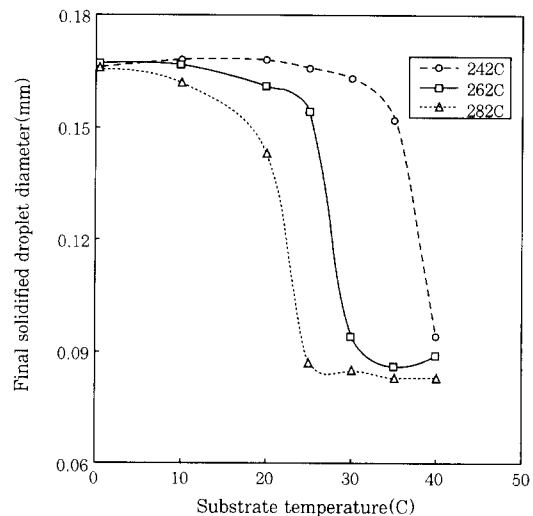


Fig. 10 Final solidified droplets diameter for tin as funtions of alumina substrate temperature with various initial droplet temperature. Original droplet diameter : 0.1mm, Impact velocity : 1.0m/s

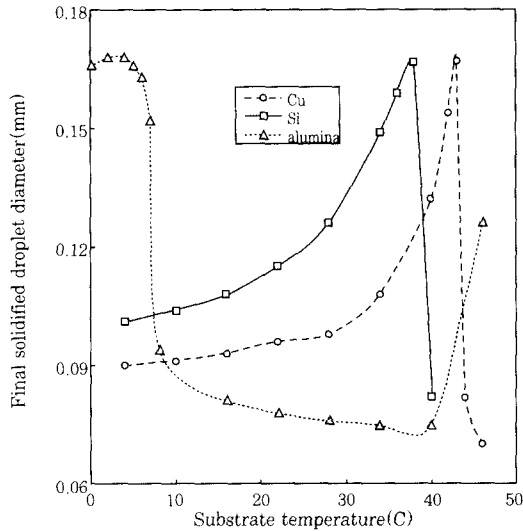


Fig. 11 Final solidified droplets diameter for tin as functions of substrate temperature with various substrate materials. Initial droplet temperature : 242 C, Original droplet diameter : 0.1mm, Impact velocity : 1.0m/s

4. 결 론

용융금속 액적이 고체 판과 충돌 후 거동에 대한 해석으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 용융금속 액적이 고체 판과 충돌 후 거동에 대한 해석적 모델을 제시하였으며, 제시된 모델은 non-bouncing 조건에서 실험과 잘 일치되었다.
- 2) 구리 판에 액적이 투하될 때 판의 초기온도, 초기 액적 온도의 변화에 따라 여러 가지 조건에서 계산을 수행한 결과 구리의 열전도 계수가 크기 때문에 대부분 퍼짐 과정 동안에 응고가 완료되었다.
- 3) 알루미나 판에서는 열전도계수가 작기 때문에 대부분 recoiling 후 응고가 일어났다.
- 4) 응고 후 최종 액적의 직경에 영향을 미치는 변수로 고체 판의 재질 및 온도는 중요한 변수이고, 액적의 초기온도는 미미한 영향을 나타내었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. D. J. Hayes, D. B. Wallace, M. T. Boldman and R.E. Marusak "Picoliter solder droplet dispensing", International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, Vol.16(1993), pp.173-180
2. 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
3. J. M. Waldvogel, D.Poulikakos, "Solidification phenomena in picoliter size solder droplet deposition on a composite substrate", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40(1997), pp.295-309
4. J. Madejski, "Solidification of droplets on a cold surface", International Journal of Heat and Mass Transfer(1976), Vol.19, pp.1009
5. S. Schiaffino and A.A. Sonin, "Molten droplet deposition and solidification at low Weber numbers", Physics Fluids(1997), Vol.9, No.11, pp.3172-3187
6. 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)
7. H. Y. Kim, "Spreading behavior of molten metal microdroplets", Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA(1999)
8. 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, Vol. 25, No.6(1981), pp. 963-971
9. S. H. Crandall, D. C. Karnopp, E. F. Jr. Kurtz and D. C. Pridmore-Brown, "Dynamics of mechanical and electromechanical systems"(1968), Robert E. Krieger Publishing Co., Marabar, FL.
10. 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
11. N. A. Frankel and A. Acrivos, "On the viscosity of concentrated suspension of solid spheres", Chemical Engineering Science, Vol. 22(1967), pp.847-853
12. Metals Handbook, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, Vol.2, 10th edition, pp. 1166-1168
13. D.L. Chung, "Materials for electronic packaging", Butterworth-Heinemann(1995), pp. 1-38
14. R.R. Tummala, E.J. Ramaszewski and A.G. Klopfenstein, "Microelectronics packaging handbook Part II : Semiconductor packaging", Chapman & Hall, second edition(1997), pp.136-185