

레이저를 이용한 균일 금속액적 적층에 관한 연구

유성복, 김용욱(전남대 대학원 기계공학과), 양영수(전남대 기계공학과)

A Study on the Uniform Metal-Droplet Deposition Using Laser

S. B. Yoo, Y. W. Kim(Mech. Eng. Dept., CNU), Y.-S. Yang(Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

Uniform metal-droplet deposition using laser is analyzed. Using the variation principle and modeling the semi-solid phase as a non-Newtonian slurry, this model can greatly save the computational expenses that conventional numerical procedures have suffered from. 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 the falling distance and time.

Key Words : Metal-droplet deposition(금속액적 적층), Variation principle(변분법), Semi-solid phase(반고체상태), Droplet diameter(액적직경), Collision behavior(충돌거동)

1. 서론

레이저를 이용한 용융 금속 액적의 고체판 충돌 거동 해석은 직접식 쾌속 조형(Direct RP) 분야 등에서 활발히 진행되고 있으나 지금까지 적층에 사용된 재료들은 저융점 금속들이 주류를 이루었다.⁽¹⁾ 사실 RP 기술은 미국, 유럽 등 선진국에서 전자, 항공, 자동차 등의 분야에 접목시킴으로써, 제품의 생산성 효율을 크게 제고(提高)하여 경제성에 이바지하고 있는 것이 현실이다. RP의 종류에는 SL(Stereo Lithography), LOM(Laminated Object Manufacturing), FDM(Fused Deposition Method)등의 제작 기술이 있다.⁽²⁻⁹⁾ 그러나 레이저를 이용한 금속 적층 연구는 아직까지는 미개척 분야이다. 저융점 금속을 이용한 기존의 방법들 보다는 레이저를 이용하여 고용점 금속 액적을 적층시키는 기술은 RP에 있어서 더더욱 경제적 효과가 클 것으로 기대된다.

본 연구의 이론적 기초는 양영수 등⁽¹⁰⁾의 해석 기법을 토대로 하고 있으며 액적의 상태를 액체상태와 반고체 상태로 분리하여 모델화시켰다. 그리고 높이에 따른 액적(droplet) 형성의 최적 조건을 찾기 위해 미분 방정식을 해석 시 MATLAB 상용 프로그램을 이용하였다.

2. 모델링

용융 금속 액적의 거동은 크게 고체 표면으로의 자유낙하, 충돌, 퍼짐 등 세 부분으로 나뉜다. 고체판에 충돌하였을 때는 퍼짐(spreading)과 표면 장력에 의해 구형의 상태로 회복되려고 하는 recoiling현상이 일어나는데 고체판으로의 전도에 의한 열전달은 미미하지만 공기 중으로의 열대류가 없다면 액적은 계속 그 과정을 반복하게 된다. 이때 액적은 액체상태에서 반고체 상태로 전이되는 과정을 보이며 고체화하게 되는데 액적의 거동해석은 Fig. 1과 같이 액체상태와 반고체 상태로 분리하여 수행되어진다. 해석 방법은 양영수 등⁽¹⁰⁾의 해석모델을 적용하였다. 그러나 본 연구에서는 기존의 해석에서 더 나아가 고용점 금속 액적의 높이에 따른 직경 변화 추이를 연구하였다.

2.1 액체상태 영역

고체표면에서 액적거동은 Fig. 2 와 같이 직경(D), 높이(h)인 실린더 형상으로 가정하였다.

$$h D^2 = \frac{4V}{\pi} \tag{1}$$

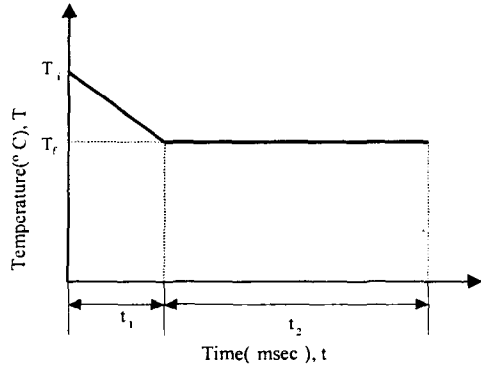


Fig. 1 Thermal history of solder droplet (T_i : initial temperature at impact, T_f : melting temperature, t_1 : time for liquid state, t_2 : time for semi-solid state)

여기서 V 는 금속액적의 체적을 나타낸다. 액적의 거동은 변분법(variation principle)에 의하여 식을 정의하였고, 간단한 2차 미분방정식으로 다음과 같이 표현하였다.

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

여기서 $B(h)$, $C(h)$, $D(h)$ 는 다음과 같다.

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

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

$$D(h) = \frac{1}{A} \left[\sqrt{\frac{\pi V}{h}} - (1 - \cos \theta) \frac{V}{h^2} \right] \quad (5)$$

$$A = \rho V \left(\frac{1}{3} + \frac{V}{8\pi h^3} \right) \quad (6)$$

$$\delta_h = \left(\frac{\mu^2}{\pi^2 \rho \sigma D_0} \right)^{1/4} D_0 \quad (7)$$

여기서 ρ 는 금속액적의 밀도, μ 는 금속액적의 점성계수, g 는 중력가속도, F_d 는 마찰 상수, σ 는 금속액적의 표면장력, θ 는 접촉각, δ_h 는 경계층 두께, D_0 는 초기 실린더 직경을 나타낸다.

식(2)를 계산하기 위해서 h 와 $\frac{dh}{dt}$ 의 초기조건이 필요하다. 초기 액적과 모델형상을 선정된 실린더의 위치에너지는 동일하다는 조건을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

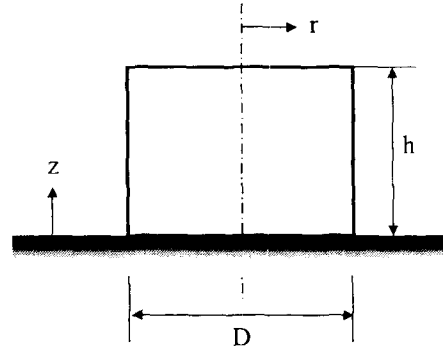


Fig. 2 Geometry of the cylinder model

$$\frac{1}{4} (1 - \cos \theta) D_i^3 - D_0^2 D_i + \frac{2}{3} D_0^3 = 0 \quad (8)$$

$$\left(\frac{dh}{dt} \right)_0 = - \sqrt{\frac{U^2}{\frac{1}{3} + \frac{V}{8\pi h_0^3}}} \quad (9)$$

여기서 D_i 는 구형의 액적 실제 직경, D_0 는 실린더 모델의 초기직경, h_0 는 초기높이, $\left(\frac{dh}{dt} \right)_0$ 는 초기높이의 미분값을 나타낸다. 액체상태 시간 t_1 을 계산하기 위하여 일차원 열전달 문제로 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{n=1}^5 \beta_n t_1^{(2n-1)/2} = \frac{4\rho V c (T_i - T_f)}{\pi^{1/2} \eta_s (T_f - T_\infty)} \quad (10)$$

여기서 β_n , ($n=1, \dots, 5$)는 다음과 같다.

$$\beta_1 = 2D_i^2$$

$$\beta_2 = -\frac{8}{3} \frac{(D_i^2 - D_i D_m)}{t_m}$$

$$\beta_3 = \frac{1}{5} \frac{(12D_i^2 - 20D_i D_m + 8D_m^2)}{t_m^2}$$

$$\beta_4 = -\frac{8}{7} \frac{(D_i - D_m)^2}{t_m^3}$$

$$\beta_5 = \frac{2}{9} \frac{(D_i - D_m)^2}{t_m^4}$$

$$\eta_s = \frac{k_s}{\alpha_s^{1/2}}$$

여기서 D_m 은 최대직경, t_m 은 최대직경 때 시간을 나타낸다.

2.2 반고체상태 영역

본 연구에서는 용융금속의 유동이 발생하는 최대 고체비율을 0.625로 선정하였다. 간단한 미분방정식

Table 1 Material properties of metal-droplet

Surface tension ($N m^{-1}$)	Density ($Kg m^{-3}$)	Viscosity ($Kg m^{-1} s^{-1}$)	Specific heat ($J Kg^{-1} K^{-1}$)	Latent heat ($J Kg^{-1} K^{-1}$)	Melting temperature ($^{\circ}C$)	Dissipation factor (F_d)	Contact angle (deg.)
1.1	6,258	6.0×10^{-6}	753	2.47×10^5	1500	15	90

Table 2 Thermal properties of the substrates used in the simulations

Density ($Kg m^{-3}$)	Specific heat ($J Kg^{-1} K^{-1}$)	Thermal conductivity ($W m^{-1} K^{-1}$)	Substrate temperature ($^{\circ}C$)
7,000	477	15	30

으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 h}{dt^2} - B(h) \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 + C^*(h, t) \frac{dh}{dt} + D(h) = 0 \quad (11)$$

$$C^*(h, t) = \frac{1}{A} \frac{9\mu V^2}{128\pi h^5} \frac{1}{1 - \left(\frac{t-t_1}{0.625t_2} \right)^{1/3}} \quad (12)$$

반고체 상태는 액체 상태와 유사하게 일차원 열전달 문제로 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n [(t_1 + t_2)^{(2n-1)/2} - t_1^{(2n-1)/2}] = \frac{4\rho VL}{\pi^{1/2} \eta_s (T_f - T_{\infty})} \quad (13)$$

2.3 계산과정

유도된 식은 상용프로그램인 MATLAB을 이용하여 계산하였으며, 계산과정은 다음과 같다.

- ① 재료의 물성치와 액적에 관한 공정변수를 입력하고 식 (1), (8)과 (9)를 이용하여 실린더 모델의 초기 직경 D_0 , 초기높이 h_0 , 초기높이의 미분값 $\left(\frac{dh}{dt} \right)_0$ 를 구한다.
- ② 구한 초기값과 식 (2)을 이용하여 h 를 계산한다. 이때 h 가 최소에 도달 후 증가하는 값으로 나타날 때까지 충분한 시간동안 계산한다.
- ③ 계산 결과 ②와 식 (1)을 이용하여 최대직경 D_m 과 그때의 시간 t_m 을 구한다.
- ④ 식 (10)과 계산결과 ③을 이용하여 액체상태시간 t_1 을 계산한다.
- ⑤ 식 (13)을 이용하여 액체상태시간 t_2 을 계산한다.

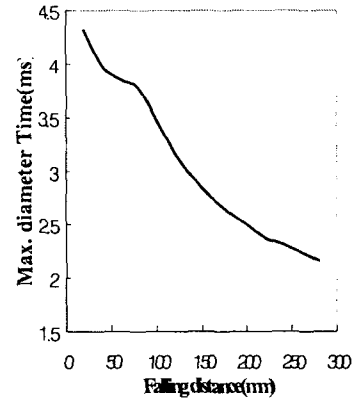


Fig. 3 Maximum diameter time vs. falling distance

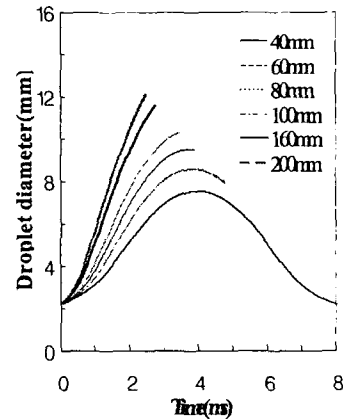


Fig. 4 Droplet diameter vs. time

- ⑥ 식 (2)을 이용하여 액체상태 구간 t_1 에서 h 를 계산한다.
- ⑦ 계산 결과 ⑥을 초기조건으로 식 (11)를 반고체상태 $0.625t_2$ 구간에서 높이 h 를 구한다.
- ⑧ 식 (1)과 계산 결과 ⑥과 ⑦을 이용하여 액적직경 D 를 구한다.

4. 결과 및 고찰

용융금속 액적의 충돌 후 액적을 적층시키기 위

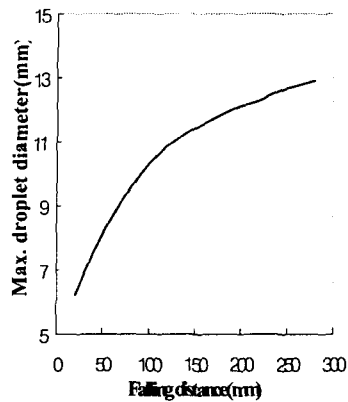


Fig. 5 Prediction of analytical model for molten-metal droplet on SUS304 surface

하여 최적의 낙하높이를 찾는데 MATLAB 상용 프로그램을 이용하여 해석하였다. Table 1과 2 에는 계산 과정에 사용한 재료의 물성치가 표시되어 있고, 이 재료를 이용하여 금속 액적 형성의 최적 조건을 찾아내기 위해 시산법(Trial and error)을 사용하였다. 금속액적의 낙하 높이에 따른 금속 액적의 최대 직경을 갖는 시간에 대하여 Fig. 3에 나타내었다. 낙하높이가 80mm이상인 경우에는 recoiling이 발생하지 않는다. 즉, 용융금속이 충돌 후에 퍼짐(spreading)현상이 발생한 후에 열전달에 의하여 recoiling 현상이 일어난다. 그러나, 낙하높이가 80mm이상인 경우에는 용융금속이 충돌 후 발생하는 퍼짐현상에서 열전달이 발생하므로 recoiling 현상은 발생하지 않는다. Fig. 4는 시간에 따라 액적의 직경이 변화되는 과정을 낙하높이에 따라서 나타내었다. 낙하높이가 80mm이상에서 recoiling 현상이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 낙하높이에 따라서 액적이 최대가 되는 직경을 Fig. 5에 나타내었다. 해석결과 액적의 낙하높이가 약 140mm까지는 최대 직경 변화가 급격히 일어나지만 그보다 더 높은 높이에서의 낙하시는 변화율이 감소한다. 이는 퍼짐(Spreading)현상이 일어날 수 있는 액적의 체적이 제한되어 있기 때문이라 추론할 수 있다. 또한 낮은 높이에서 고체판으로의 충돌시 일어나는 열전달보다 높은 높이에서 낙하했을 때 발생하는 열전달이 훨씬 효과적이라고 생각해 볼 수 있다.

5. 결론

레이저를 이용한 용융금속 액적의 적층에 대하여 용융금속 액적이 고체 판과 충돌 후 금속액적이 적층되는 최적의 조건에 대하여 해석적 모델을 제시하였다. 용융금속 액적은 적층과정에서 많은 공정 변

수의 영향을 받게 되므로 액적의 낙하높이와 시간등의 변화가 매우 민감하다고 할 수 있다. 본 연구를 통하여 낙하높이에 따라서 액적이 투하된 후에 고체 상태로 응고되는 최적의 높이를 예측하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 여러 가지 경우의 진동에 대한 액적의 형상 및 단락조건에 응용할 수 있다. 또한, 실제 레이저를 이용한 균일한 금속액적이 적층되는 과정은 향후연구로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 지역대학우수과학자(R05-2001-000-01108-0) 프로그램에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. 이관행, "제2회 쾌속조형 및 금형기술혁신 심포지움," 한국과학기술원 금형기술혁신연구센터, pp. 38-48,
2. Jacobs, P. F., "Rapid Prototyping & Manufacturing-Fundamentals of StereoLithography," SME, 1992.
3. Kruth, J. P., "Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques," Ann. CIRP, Vol. 42, No. 2, pp. 603-614, 1991
4. Deckard, C. R. and Beaman, J. J., "Recent Advances in Selective Laser Sintering," Fourteenth Conf. Production Research and Technology, pp. 447-452, 1987.
5. Crump, S. S., "Fast, safe Prototypes with FDM," PED-Intell. Des. Manfg Proto., Vol 50, 1992.
6. Madejski, J., "Solidification of Droplets on a Cold Surface," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 19, No. 11, pp. 3172-3187, 1997.
7. Becker, E., Hiller, W. J. and Kowalewski, T. A., "Experimental and Theoretical Investigation of Large-Amplitude Oscillations of Liquid Droplets," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 231, pp. 189-210, 1991.
8. Zhang, W., "Rapid Freezing Prototyping with Water," Materials and Design, pp. 139-145, 1999.
9. Seefeld, T., "Simulation of the Spray-Forming Process Using a Wire-Fed Laser Technique," Journal of Materials Synthesis and Processing, Vol. 5, No.1, 1997.
10. 양영수, 손광재, 강대현, "용융금속 액적의 고체 표면 충돌거동," 대한용접학회지, 제18권, 제4호, pp. 468-476, 2000.