

레이저를 이용한 균일 금속 액적 생성

강대현**, 양영수*, 김용욱**, 조성규**, 박성민**

*전남대학교 기계시스템공학부

**전남대학교 대학원 기계공학과

Uniform metal droplet generation using laser

Dae-Hyun Kang **, Young-Soo Yang *, Yong-Wook Kim **, Sung-Kyu Cho **,
Sung-Min Park **

ABSTRACT

The uniform metal droplet generation using Nd-YAG laser was studied and experiment was carried out. The shape and volume of developed droplet was measured and the Young-Laplace equation and equilibrium condition of force were applied this model. The differential equation predicting shape of droplet using equilibrium condition of force instead of Navier-stokes equation was induced and numerical solution of differential equation compared with experimentation data. The differential equation was solved by Runge-Kutta method. Surface tension coefficient of droplet was determined with numerical solution relate to experimental result under the statical condition. In case of dynamic vibration, metal droplet shape and detaching critical volume are predicted by recalculating proposed model. The result revealed that this model could reasonably describe the behavior of molten metal droplet on vibration.

Key words: SFF공정, 직접식 쾌속조형공정(direct RP), Droplet, Surface tension, Vibration

1. 서 론

제품개발에 있어서 시작공정은 제품 경쟁력에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 특히, 다품종 소량생산체제 하에서는 제품의 시작

공정에서 소요되는 비용과 시간을 절감하여 저렴한 가격으로 신속하게 제품을 시장에 출하하는 것이 제품의 경쟁력을 제고하는데 필수적이다. 이러한 시작공정의 방법으로 크게 SFF공정과 2차공정을 이용한 방법과 직접식 금속 쾌속조형공정 방법으로 나눌수 있다. 그

러나 첫 번째 방법은, 금속재료를 이용하여 직접 금속 시작품 또는 금형을 제작하는 직접식 금속조형공정에 비하여 비용과 시간 면에서 비효율적이다. 최근의 직접식 쾌속조형 공정(direct RP, free form fabrication)에서 용융금속액적의 생성에 관한 연구는 용융금속을 떨어뜨려 제품을 제작하고자 하는 경우 중요하게 취급되고 있으며 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 반도체 패키징(packaging)의 경우에는 액적을 직접 투하하여 solder bump를 제작하고자 하는 연구가 진행되고 있다.[1] 본 연구의 목적은 레이저를 이용한 금속선의 용융 시 액적의 형상과 크기를 예측하여 용융금속액적을 이용한 응용의 이론적 근거를 제시하는 것이다.

액체상태의 액적의 생성과 이의 형상예측에 관한 연구는 1900년대부터 활발히 연구되어 왔다. 그러나 연구의 대부분이 비금속물질의 액상에서 액적의 형상과 관련되어 왔고 이를 위해서는 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 하는 어려움이 있다. 이 경우 수치해석은 너무 많은 계산량이 요구되므로 실제 응용을 위해서는 비경제적이다. 따라서 액적의 형상을 적절한 가정을 통해 얻는 연구가 이루어져 왔다.[2-8] 금속의 경우 용융액적생성 및 이송에 관한 연구가 미미한 상태이다. 용융금속액적의 이송에 관련 하여는 용접과 연관된 연구가 있으며 정량적 예측보다는 실험 및 해석에 중점을 두어 연구되어왔다.[9-10]

본 연구는 Nd-YAG Laser를 이용해 금속선을 용융시키고 이때 발생된 액적의 형상과 체적을 측정하였으며 힘의 평형을 이용한 액적의 형상을 유도하여 실제 실험을 통해 얻은 데이터와 비교하였다. 액적의 형상을 구하는데 있어서는 Navier-Stokes 방정식을 이용하지 않고 힘의 평형을 이용한 미분방정식을 유도하였으며 유도된 식을 수치해석을 이용

해 구하였다. 해석의 앞부분에서는 외부의 영향을 고려하지 않고 액적의 형상을 예측하였으며 이를 실험과 비교하여 식을 수정하여 다시 수치 해를 얻은 방법이 사용되었다. 이렇게 구한 해석결과를 이용해서 외부의 영향이 가해진 상태의 액적의 형상 및 힘의 평형에 의한 단락조건을 구하였다.

2. 모델링

금속선은 레이저에 의해 가열되며 용융온도이상에 도달하면 표면장력에 의해 금속액적을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 금속액적은 일정 부피 이상에 도달하여 표면장력과 중력의 영향에 의해 금속선에서 분리되어 구형의 금속액적을 이루게 된다. 내부 온도분포가 균일하면 액체상태의 액적은 반고체(액체+고체, semisolid)상태를 거쳐 고체상태로 변화하게 된다. 이렇게 생성된 금속액적은 외부와의 열 전달에 의해 응고된다. 본 연구에서는 금속선이 용융온도이상에 도달하여 용융된 후에 금속액적의 형상의 변화를 예측하며, 이때의 금속액적의 부피를 구함으로써 금속액적이 금속선으로부터 분리되는 조건을 구하게 된다.

2.1 용융상태의 액적형상 예측

용융상태의 금속액적은 표면장력과 중력에 의해 일정한 형상을 갖게 된다. 이의 해석을 위해 Fig. 1과 같이 액적의 일부분을 취하여 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 Young-Laplace 방정식을 얻을 수 있다.

$$\gamma_s(r_1 + r_2)dL_1dL_2 = \Delta p r_1 r_2 dL_1 dL_2 \quad (1)$$

$$\gamma_s \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \Delta p \quad (2)$$

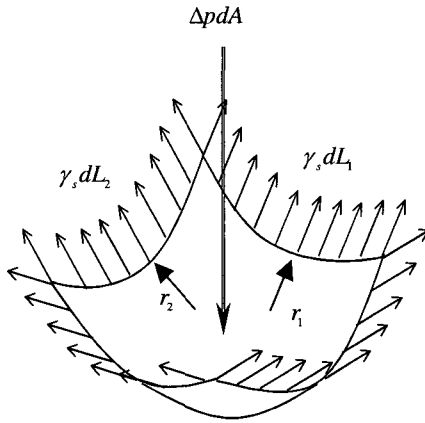


Fig. 1 Element of droplet interface showing principal radii of curvature and pressure.

여기서 γ_s 는 표면장력계수(surface tension coefficient)이고, Δp 는 액적표면에서의 압력차이다. 액적의 형상을 Fig. 2와 같이 축대칭으로 가정하면, 액적의 끝단($x = z = \theta = 0$)에서의 경계조건인 축대칭의 가정에 의해 곡률이 $1/b$ 로 일정하므로, 무차원변수 c 를 이용하여

다음과 같이 무차원화된 미분방정식으로 나타낼 수 있다.[7]

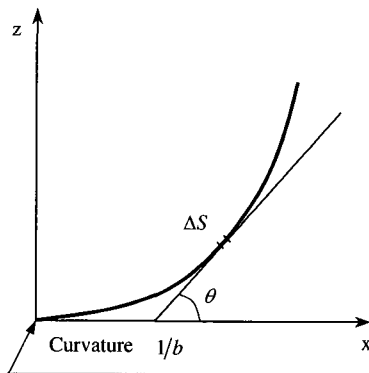


Fig. 2 Notation for axisymmetric equilibrium surface determined by gravity and surface tension

$$\frac{d\theta}{dS} = \frac{1}{B}, \frac{1}{X} \frac{d}{dX} (X \sin \theta) = \frac{2}{B} - Z \quad (3)$$

$$c = (\rho_m - \rho_g) g / \gamma_s \quad (4)$$

여기서 ρ_m 는 액적의 밀도, ρ_g 는 액적 외부의 밀도, $X = \sqrt{cx}$, $Z = \sqrt{cz}$, $B = \sqrt{cb}$, $S = \sqrt{cs}$ 는 무차원화된 x, z, b, s 이다. 그리고 액적의 체적은 아래의 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \int_0^Z \pi X^2 dZ = \pi X^2 Z - 2\pi \int_0^X ZX dX \quad (5)$$

$$V = v c^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

여기서 V 는 무차원화된 액적 체적, v 는 액적체적이다. 식(3)을 이용하면 직접 V 를 구할 수 있다.

$$V = \pi X^2 \left(Z + \frac{2 \sin \theta}{X} - \frac{2}{B} \right) \quad (7)$$

2.2 외력에 의한 액적의 형상 변화

액적에 외력을 가하게 되면 액적의 형상과 크기가 변화하게 된다. 외력에 의해 액적 내부에 발생하는 가속도를 a 라 하면 압력차는 다음과 같이 된다.

$$\Delta p = 2 \frac{\gamma_s}{b} - (\rho_m - \rho_g)(g + a)z \quad (8)$$

액적의 형상을 Fig. 2와 같이 축대칭으로 가정하면 액적의 끝단($x = z = \theta = 0$)에서의 경계조건인 축대칭의 가정에 의해 곡률이 $1/b$ 로 일정하므로, 무차원변수 c 를 이용하여 다음과 같이 무차원화된 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\theta}{dS} = \frac{1}{B}, \frac{1}{X} \frac{d}{dX}(X \sin \theta) = \frac{2}{B} - Z' \quad (9)$$

여기서 $Z' = Z(1 + \frac{a}{g})$,

$X = \sqrt{cx}, Z = \sqrt{cz}, B = \sqrt{cb}, S = \sqrt{cs}$ 는 무차원화 된 x, z, b, s 이다. 그리고 외력이 작용할 경우의 액적의 체적은 아래의 식(10)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \int_0^Z \pi X^2 dZ' = \pi X^2 Z' - 2\pi \int_0^X Z' X dX \quad (10)$$

여기서 V 는 무차원화 된 액적체적이다.

식(9)을 이용하면 V 를 직접 구할 수 있다.

$$V = \pi X^2 (Z' + \frac{2 \sin \theta}{X} - \frac{2}{B}) \quad (11)$$

2.3 액적의 분리

생성된 액적은 체적력과 표면력에 의해 금속선으로부터 분리가 이루어진다. 체적력은 액적의 체적증가에 비례하여 증가하게 되며 표면력은 액적의 표면장력과 압력 차에 의해서 발생된다. 이 두 가지 작용력만을 고려한다면 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 액적의 단락이 발생할 조건은 다음과 같다.

$$F_{Bodyforce} + F_{\Delta p} \geq F_{Surfacetension} \quad (12)$$

$$\rho g \int_0^z \pi x^2 dz + \pi r_e \gamma_s \geq \int_0^{2\pi} \gamma_s x d\theta \quad (13)$$

여기서 r_e 는 와이어의 반경이다. 표면력과 체적력이 평형에 도달하여 액적의 체적이 평형상태보다 더 크게되면 액적이 단락되어 금속선으로부터 분리가 이루어지게 되는데, 액적의 단락조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

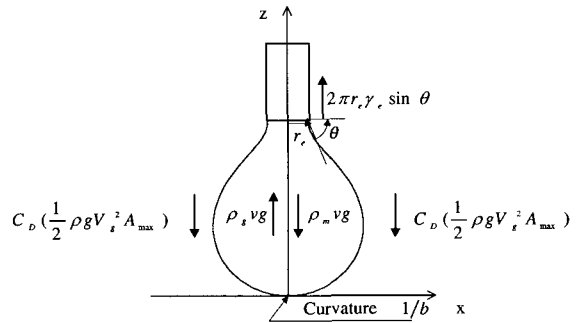


Fig. 3 Equilibrium forces in a metal droplet on the end of metal wire (V : Volume)

$$\pi X^2 (Z + \frac{2 \sin \theta}{X} - \frac{2}{B}) \geq \pi X \quad (14)$$

$$\pi X^2 (Z' + \frac{2 \sin \theta}{X} - \frac{2}{B}) \geq \pi X \quad (15)$$

그러나 실제 액적의 생성과정에서 레이저 주사부로부터 보호가스의 영향에 의한 항력이 작용하게 되며, 이 때문에 액적의 크기가 증가할수록 항력도 증가하게 된다. 따라서 체적력, 항력, 표면력이 평형에 도달하여 액적의 체적이 평형상태보다 더 크게되면 액적이 단락되어 금속선으로부터 분리가 이루어지게 된다. 액적의 단락이 발생할 조건은 다음과 같다.

$$F_{Bodyforce} + F_{\Delta p} + F_{Dragforce} \geq F_{Surfacetension} \quad (16)$$

$$\rho g \int_0^z \pi x^2 dz + \pi r_e \gamma_s + C_D \left(\frac{1}{2} \rho_g V_g^2 A_{max} \right) \geq \int_0^{2\pi} \gamma_s x d\theta \quad (17)$$

여기서 C_D 는 항력상수이고 V_g 는 보호가스의 속도를 나타내며 A_{max} 은 액적의 최대 단면적이다. 식(17)의 좌변 첫 항은 액적의 체적을 나타내고 실제 금속선의 공급량과 일치해야하며, 액적의 단락조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V + C_D \left(\frac{1}{2} \rho_g V_g^2 A_{max} \right) \left(\frac{\sqrt{c}}{\gamma_s} \right) \geq \pi X \quad (18)$$

$$V = v_{wire} t \left(\frac{\pi}{4} d_{wire}^2 \right) c^{\frac{3}{2}} \quad (19)$$

여기서 v_{wire} 는 금속선 공급속도이고 t 는 액적 생성시간을 나타내고 d_{wire} 는 금속선 직경이다. 액적에 진동자를 이용해 진동을 유발하면 위에서 유도된 힘의 평형에 관한 식을 수정하여야 한다. 액적에 진폭이 m , 주기가 ω 인 사인함수형태의 변위를 가하면 액적의 단락이 발생하기 위한 힘의 평형에 관한 식은 Fig. 4에 보이는 바와 같이 다음과 같이 나타낼 수 있다.

식(21)를 식(18)과 동일한 형태로 나타내면 액적의 단락조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이 경우에서 실제 금속선 공급량과 일치하여야 하므로 식(19)를 만족하여야 한다.

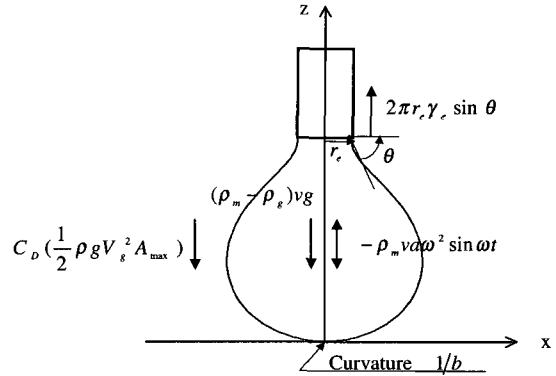


Fig. 4 Equilibrium forces in a metal droplet on the end of metal wire applying vibrating force (v : Volume)

$$F_{Bodyforce} + F_{\Delta p} + F_{Vibratingforce} + F_{Dragforce} \geq F_{Surfacetension} \quad (20)$$

$$\rho(g - m \omega^2 \sin \omega t) \int_0^z \pi x^2 dz + \pi r_e \gamma_s + C_D \left(\frac{1}{2} \rho_g V_g^2 A_{max} \right) \geq \int_0^{2\pi} \gamma_s x d\theta \quad (21)$$

식(21)를 식(18)과 동일한 형태로 나타내면 액적의 단락조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이 경우에서 실제 금속선 공급량과 일치하여야 하므로 식(19)를 만족하여야 한다.

$$V \left(1 - \frac{m \omega^2 \sin \omega t}{g} \right) + C_D \left(\frac{1}{2} \rho_g V_g^2 \left(\frac{\sqrt{c}}{\gamma_s} \right) \right) \geq \pi X \quad (22)$$

2.4 계산과정

모델링된 식은 FORTRAN을 이용하여 계산하였다. 액적의 형상을 구하기 위한 미분방정식은 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하였다. 해석에 사용된 공정변수는 Table. 1에 나타나 있다. 먼저 액적의 형상에 대한 식(3)과 같은 미분 방정식을 유도한 후 미분방정식 수치해를 Runge-kutta 방법을 통해 얻는다. 위에서 얻은 수치해를 이용해 곡률반경에 따른 액적의 형상을 계산한 후 Table. 1에 있는 재료의 물성치와 액적에 관한 공정변수를 입력하고 실험결과와 비교한다. 식(17)을 만족하는 표면장력계수를 계산한 후, 앞에서와 같은 방법으로 정적상태 액적의 실제형상을 계산한다. 그리고 외력 작용시의 액적형상에 관한 미분방정식 식(9)의 수치해를 구한 후 진동이 가해졌을 때의 액적의 형상을 계산한다. 진동이 가해졌을 때의 액적 단락 조건을 식(22)에 나타난 힘의 평형에 의해 결정한다. 전체적인 계산과정의 흐름도는 Fig. 5에 나타내었다.

Table. 1 Mechanical and material properties

Metal wire		Shield gas(Ar)	
Density	6.25×10^{-3} Kg/mm ³	Density	1.67×10^{-6} Kg/mm ³
Wire velocity	2.25 mm/s	Shield gas velocity	9.724×10^3 mm/s
Wire diameter	0.9 mm	Drag coefficient	0.15

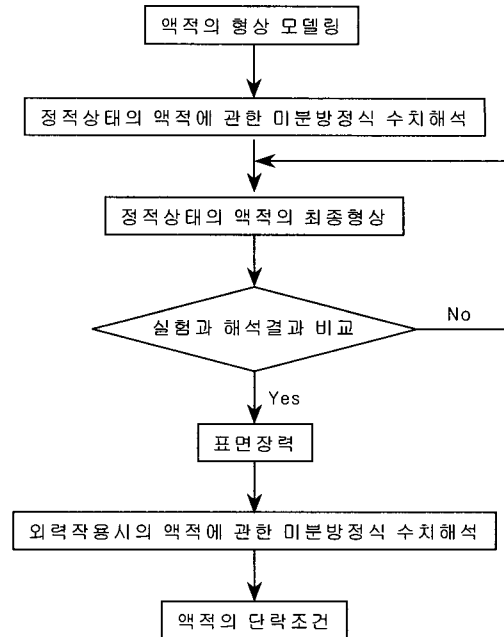


Fig. 5 Flow chart of driven differential equation and force equilibrium calculation

3. 실험 및 결과

액적생성 이론 해의 검증과 수정을 위하여 실험을 수행하였다. Fig. 6은 실험장치의 실제 형상이다. Fig. 6에서 보인 바와 같이 광섬유를 통해 레이저를 주사하고 용융금속 액적의 산화방지와 레이저 헤드부의 보호를 위해 보호가스로 사용된 아르곤이 레이저 헤드부의 노즐로부터 분사된다. 실험에 사용된 레이저는 평균출력 250W인 펄스형 다중모드 Nd-YAG레이저이다. 금속선의 공급과 위치 제어는 다중위치제어보드를 이용하였다. 금속선의 기계적 성질과 보호가스는 Table. 1과 같다.

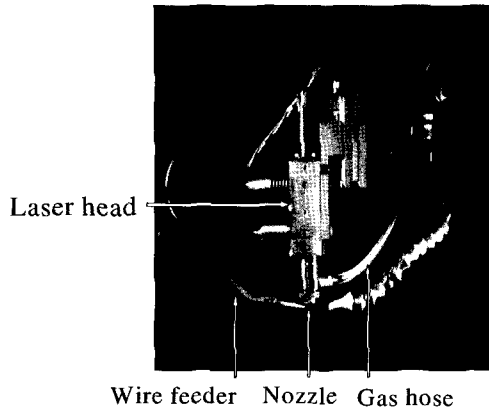


Fig. 6 Laser head, wire feeder, nozzle and gas hose. Laser beam is transmitted through light fiber on laser head and shield gas(Ar) is supplied through gas hose.

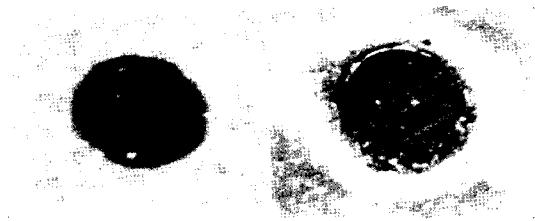


Fig. 7 Photograph of metal droplets

금속선은 가열되면서 용융되기 시작하고 용융된 금속은 유동하여 액적이 생성되며 이렇게 생성된 액적은 일정 조건에 도달하면 금속선으로부터 단락이 발생하게 된다. 단락된 금속액적은 낙하하면서 대류 열 전달에 의해 응고되어 고체상의 금속으로 상이 변화한다. 생성된 액적의 최종형상의 단면은 Fig. 7과 같다. 실험으로부터 구한 액적의 평균 직경과 평균체적은 Table. 2와 같다. 액적의 최종형상은 구형에 가까우며 액적생성의 평균 시간은 5.95초이다. Fig. 8은 식(3)의 수치 해를 이용해 구한 액적의 형상이다. 액적 끝단의 곡률 반경에 따라 무차원화된 액적의 형상이 변화하는 것을 보여주고 있다. 곡률반경

이 감소함에 따라 액적의 형상은 구에 가까운 경향을 보인다.

Table. 2 Average droplet diameter and volume by experiment

Diameter	Volume
2.53 mm	8.51 mm ³

Table. 3 Vibration condition of external force

Displacement magnitude	Frequency
0.05 mm	50 Hz

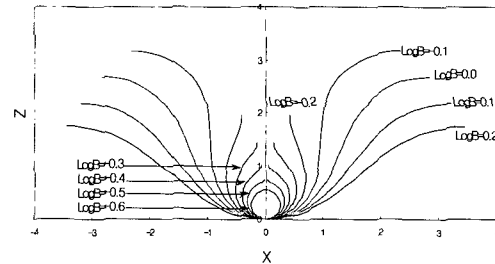


Fig. 8 Drop shape of variation of X with Z for different values of parameter $\log_{10}B$

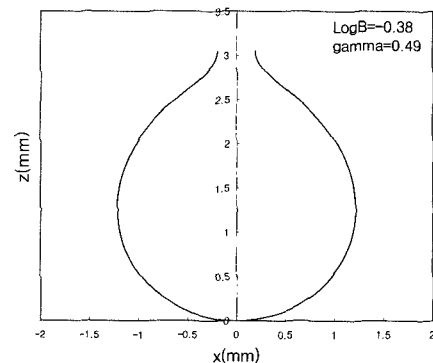


Fig. 9 Prediction of droplet shape satisfied force equilibrium condition without external force

Fig. 9은 Table. 1의 상수를 대입하여 정적 상태에서의 액적이 단락 될 조건에 이르렀을 때의 액적의 형상을 예측한 것이다. 이때 액적의 곡률반경은 2.4mm이고, 단락이 발생할 때의 체적은 8.42mm³이다. 단락이 이루어질 때의 표면장력계수를 계산하여 보면 0.98N/m이다. 이는 참고문헌[9]의 결과와 유사한 값을 알 수 있다. 일반적인 용융금속의 표면장력 계수는 1.2~1.8N/m이나 외부환경에 따라 그 값이 변화한다. 즉, 용융금속의 성분과 온도, 외부의 기체의 성분 등이 표면장력계수에 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 표면장력계수를 직접 실험과 비교하여 계산된 값을 사용하였다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 사용한 Table.1의 상수를 적용한 후 초고속 카메라를 이용하여 실제 액적을 촬영하였다. Fig. 11은 액적에 진동을 가하였을 때의 예측된 형상변화를 보여 주고 있다. 이때의 진동조건은 Table. 3와 같다.

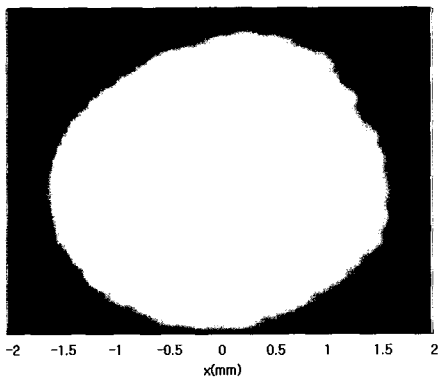


Fig. 10 Experiment of droplet shape satisfied force equilibrium condition without external force

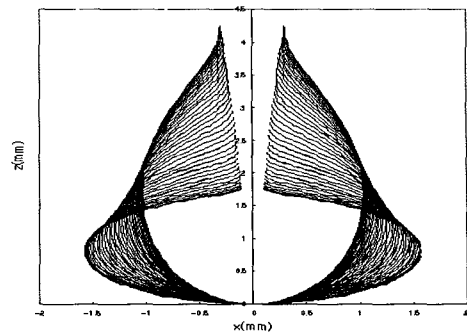


Fig. 11 Changing drop shape on the external vibrating force

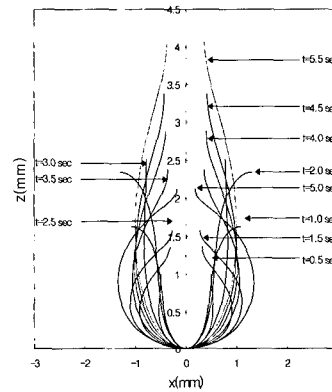


Fig. 12 Prediction of droplet shape correspond with time

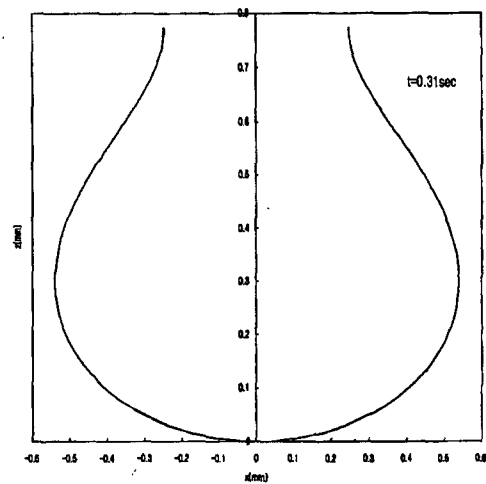


Fig. 13 Critical drop shape calculated under dynamic vibration force

Fig. 12는 액적이 실제 체적의 증가에 따라 진동에 의해 어떤 형상을 갖는 가를 시간의 변화에 따라 수치 해석적으로 예측한 것을 보이고 있다. 액적에 Table. 3에 주어진 조건과 식(21)에 의한 조건을 대입하여 얻은 액적의 단락조건은 Fig. 13에 나타내었다. 액적은 진동에 의한 형상의 변화에 따라 각 단면에서 표면장력에 의한 힘도 변화하게 되며 액적의 θ 가 90° 인 지점에서 단락이 발생한다는 조건을 가지게 되면 정적인 상태에서 단락되는 조건보다 이전에서 단락이 발생함을 알 수 있다.

4. 결론

금속액적의 생성에 관한 미분방정식을 수치해를 이용해 구하고 이를 이용해 정적상태에서 실제 실험과 비교하였다. 이를 이용해 실제 금속액적이 갖는 표면장력계수를 구하였고 이를 이용해 액적에 진동 등의 외력이 가해졌을 때의 액적의 형상과 액적의 단락조건을 구하였다. 액적은 생성과정에서 많은 공정 변수의 영향을 받게 되므로 표면장력계수나 형상, 체적 등의 변화가 매우 민감하다고 할 수 있다. 본 연구를 통해 얻은 액적해석은 실제 액적의 공정 변수를 가능한 한 간소화하여 해를 구하였고 이를 실험을 통해 검증하였다. 또한 정적상태의 액적생성에 대한 실험을 하여 동적 하중이 작용하는 경우에 대한 액적의 형상을 예측하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 여러 가지 경우의 진동에 대한 액적의 형상 및 단락조건에 응용할 수 있다.

후 기

본 연구는 2001년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었습니다. 이에 감사 드립니다.

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, pp. 173-180, 1993.
2. X. Zhang, "Dynamics of growth and break up of viscous pendent drops into air", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 212, pp.107-122, 1999.
3. 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, pp. 2929-2945, 1998.
4. 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, pp. 295-309, 1997.
5. R. M. S. M. Schulkes, "The evolution and bifurcation of a pendent drop", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 278, pp. 83-100, 1994.
6. E. Becker, W. J. Hiller and T. A. Kowalewski, "Experimental and theoretical investigation of large-amplitude oscillations of liquid droplets", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 231, pp. 189-210, 1991.
7. S. Hartled and R. W. Hartley, Axisymmetric Fluid-Liquid Interface, Elsevier Scientific Publishing company, New York, 1976.
8. J. Haidar, "Predictions of metal droplet for-mation welding", Journal of Applied Physics, Vol. 84, No. 7, pp. 3530-3540, 1998.
9. L. A. Jones, "Dynamic electrode force in gas metal arc welding", Master theses, MIT, 1996.
10. O. A. Basaran, "Nonlinear of viscous liquid drops", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 241, pp. 169-198, 1992.