

레이저 빔에 의해 생성된 금속액적의 충돌거동

김 용 옥* · 양 영 수**

*전남대학교 대학원

**전남대학교 기계공학과

Collision Behavior of Molten Metal Droplet by Laser Beam

Y. W. Kim* and Y. S. Yang**

*Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam Graduate School

**Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam National Univ.

Abstract

A molten metal droplets are deposited onto solid substrate for solid freeform fabrication. Collision dynamic and substrate heat transfer associated with solidification determine the final shape of molten metal droplets. In this study, the experimental model, based on the variational condition with substrate temperature and falling height, was produced reliable optimal data of droplet pattern.

Key Words : molten metal droplet, falling height, substrate temperature

1. 서 론

용융액적 투하를 이용하여 가공하는 기법은 Spray Forming, 반도체 패키징의 Solder Bump Process 등 여러 분야에서 응용되고 있다. 또한 최근 새로이 개발된 가공기법인 직접식 캐속조형(Direct R. P.)에 용융금속 액적을 적층하여 제품을 제작하는 Solid Freeform

Fabrication에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁴⁾ 비교적 가공이 수월한 비금속재료나 저융점 금속재료에 관한 연구에 치중했고 금속재료라고 할지라도 강도가 요구되지 않은 시제 모델개발이 대부분이었다.

Spray Forming, Solder Bump Process 와

같은 기법과는 달리 장비의 배치가 비교적 단순하고 저렴한 경비로 목적인 바를 이룰 수 있는 기법으로 레이저 빔을 이용한 재료가공 분야에서 최근 활발한 연구가 진행되고 있다.

재료의 레이저 가공기술은 레이저 빔과 물체의 상호작용에 의해 발생하는 열을 이용하는 열 가공기술(Thermal processing)과 레이저 자체의 물리적 특성을 이용하는 비열가공 기술(Non thermal processing)로 분류할 수 있다. 열 가공기술(Thermal processing)은 레이저 빔이 가공될 소재 내부에 흡수되어 소재에 가열, 용융, 증발 등과 같은 열적현상을 띄게 되는데 레이저 빔의 가열로 인한 용융된 재료는 레이저 빔에 노출되지 않은 주변소재로 열을 방출하게 되므로 중앙부분과 가장자리 부의 온도차가 발생하게 되어 용융면에 표면장력에 의한 유동이 발생하게 되는데 시간의 경과에 의해 차츰 냉각되어 고체화되면 입체적인 형상이 만들어지게 된다. 레이저빔을 이용하여 금속액적을 생성 후 시편표면에 투하, 적층하여 원하는 제품을 제작하고자하는 것이다. 적층을 위해 선행되어야 할 연구가 금속액적의 고체표면 충돌 후 거동이다. 액적의 고체표면 충돌 후 거동에 대한 많은 연구들이 이루어졌으나,⁵⁾ 본 연구와 관련된 금속액적의 고체표면 충돌 거동을 연구하기 위해서 레이저 출력, 보호가스 양, 금속선재 공급방법 및 진동에 관한 대책 등 다양하고 복잡한 변수들을 고려하여 최적조건을 찾아야 한다.⁶⁾ 본 연구에서는 CW Nd-YAG 레이저 빔을 금속선재 면에 연속 조사하여 금속액적을 생성하고 고체 면에 낙하 후 Spreading과 Recoiling 현상이 연속된 변화과정을 거치며 액체 상태에서 반 고체상태를 통해 냉각되어 최종형상을 결정하는 과정을 갖는 금속액적의 충돌 거동에 관해 연구하였다.⁷⁻¹⁰⁾ 액적이 고체 면에 충돌 후 일정한 형상과 Size를 갖는 것은 적층 구조물에 대한 강도, 형상 및 적층기법을 결정하는 데 중요한 수단이 된다.

2. 실험

금속액적 충돌실험 과정은 레이저 빔에 의해 용융된 금속액적이 자유 낙하하여 고체판에 충돌하도록 하였으며 액적의 생성, 단락 및 고체판에 대한 충돌거동을 상세히 분석하기 위하여 고속카메라를 이용하여 초당 1000프레임의 속도로 촬영하였다.

2.1 실험재료

Table. 1 Material Properties of Metal-droplet

Surface tension	($N m^{-1}$)	1.2
Density	($Kg m^{-3}$)	6,25
Viscosity	($Kg m^{-1} s^{-1}$)	5.2×10^{-3}
Specific heat	($J Kg^{-1} K^{-1}$)	753
Latent heat	($J Kg^{-1} K^{-1}$)	2.47×10^5
Melting temperature	($^{\circ}C$)	1500
Dissipation factor	(F_d)	15
Contact angle	(deg.)	90

Table. 2 Thermal properties of the substrate

Material		SUS304
Density	($Kg m^{-3}$)	7,900
Specific heat	($J Kg^{-1} K^{-1}$)	477
Thermal conductivity	($W m^{-1} K^{-1}$)	15
Effusivity	($kg/K/s^{5/2}$)	7518

본 실험에 사용된 재료는 Table. 1과 같이 강도와 용융점이 높은 금속을 패속조형에 이

용하기 위하여 연강 및 고장력 강의 용접에 사용되는 직경 1.2mm의 용접봉을 사용하였다. 제품명은 TGS-40이고 일반적으로 연강의 산소아세틸렌 가스용접에 용강재로 사용되는 재료이다. 고체판은 Table. 2와 같은 물성치를 갖는 SUS304 스테인리스강을 사용하였다.

2.2 실험조건

금속액적의 생성에 관한 주요 공정변수로는 레이저 출력, 보호가스, 금속선재 이송속도 등이 있다.

본 연구에서는 반복된 실험결과 최적의 금속액적을 생성하고 단락이 균일하게 진행되는 조건으로 레이저출력 1000W, 보호가스는 금속선재에 과다한 진동 발생으로 레이저 빔 조사시간에 비례한 균일한 금속액적 생성이 불가능하여 공급이 차단된 상태에서 수행하였고, 금속선재 이송속도는 31.8mm/s로 설정하여 실험을 수행하였는데 금속액적 평균생성시간은 0.97sec 이었다. 그리고 금속액적 충돌에 관한 주요 공정변수는 고체판의 가열온도와 충돌속도이며, 고체판의 가열온도를 변화시키고 충돌속도를 변화하기 위해 낙하높이를 단계적으로 조절하는 방법을 사용하였다.

2.3 실험방법

본 실험에 이용된 레이저 장치는 Photo. 1과 같이 TRUMPF사의 LASMA 1054 로서 3kw 급 발진기를 보유한 장비로 Material Removal, Joining, Surface Modification 등 레이저에 의한 다양한 가공에 효과적인 적용이 가능한 장비이다. 부가장치를 보면 레이저 발진에 따른 장치의 충격과 보호가스와 같은 외적요인의 영향으로 발생하는 진동을 효과적으로 차단할 수 있도록 금속선재 공급부에는 가이드 홀을 지닌 파이프를 장착하여 금속선재 선단의 진동을 최소화시켰고, 장치 하단의 고정면은 기본적으로 마그네트와 강체로 고정하

고 추가로 셀로판 테이프를 부착하여 흔들림을 원천적으로 봉쇄하여 실험 정확도를 향상시켰다. 그리고 금속액적이 생성되어 낙하되는 고체면의 청결도를 향상시키기 위하여 금속판재를 고온의 물에 침탕하여 탈지시키고 드라이어로 건조시켰다. 실험진행은 레이저빔이 금속선재에 조사되어 금속선재가 용융되어 일정한 체적에 도달하면 표면장력과 중력의 상대적인 차에 의하여 금속선재에서 단락이 진행되어 금속액적이 만들어지고 SUS304 재질의 사각평판에 액적이 도달하면 사전에 낙하 위치에 설치된 고속카메라에 의해 금속액적의 형상을 촬영하게 된다. 이와 같은 방법으로 촬영된 사진에 의하여 액적의 생성, 단락, 충돌에 관한 거동을 관찰하였다. 그리고 금속액적의 크기를 정확히 측정하기 위하여 고체판 설정온도별로 철자의 눈금을 촬영하여 PC 모니터 상에 측정기준치를 설정하였다. 금속판의 가열은 비연소식 전기가열로에 의해 설정온도를 25℃, 100℃, 200℃로 고정하였고 온도를 검증하기 위하여 Thermo-Couple이 부착된 온도측정기에 의해 실험초기와 말기에 온도를 측정했다. 추가로 레이저 빔의 Focusing은 사각 평판을 가공면에 두고 레이저 헤드 이송거리를 ±5mm간격으로 상하 이동하여 최소가공 홀의 직경을 가진 0.6mm 지점에 고정시켜 실험을 진행하였다.

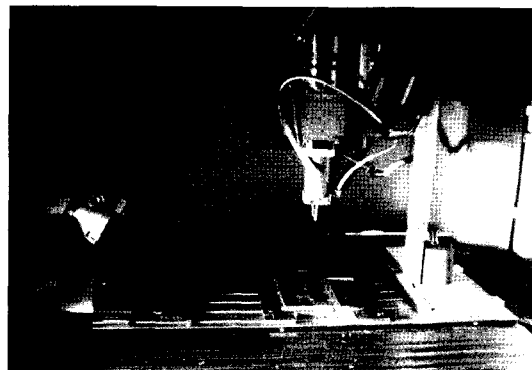


Photo. 1 Experimental device of droplet impact behavior

3. 결과 및 고찰

레이저 빔에 의해 용융되어 생성된 금속액적이 고체판에 낙하되어 적층이 되면 일정한 형상을 갖추게 된다. 낙하높이 140mm에서 25℃, 100℃, 200℃ 온도의 고체판에 낙하되는 거동을 고속카메라에 의해 초당 1000프레임의 속도로 촬영한 화상의 일 부분을 Photo. 2, Photo. 3, Photo. 4에 나타내었다. 금속선재에 레이저빔이 조사되어 용융된 후 단락되어 낙하되고, 고체판 표면에 낙하되기 직전의 사진을 시작으로 고체판에 충돌하게된다. 금속액적이 고체판에 충돌하면 운동에너지에 의해 spreading 현상이 나타나 넓게 퍼진다. 최대퍼짐이 발생 후 표면장력에 의해 금속액적의 직경이 줄어드는 recoiling 현상이 나타난다. 고체판과 충돌 후 spreading, recoiling 현상이 일어나는 동안 용융금속 액적에서 고체판으로 열전달이 이루어져 용융금속은 응고된다. 낙하높이가 증가할수록 spreading 현상은 크게 일어나 열전달 양이 증가할 것이며, 고체판의 온도가 높을수록 열전달 양은 감소할 것이다. spreading, recoiling 현상이 일어나는 동안 어느 한 순간 응고가 일어나 더 이상 움직이지 않고 최종 형상의 액적모양을 이루기 때문에 낙하높이와 고체판의 온도는 금속액적의 최종 형상을 결정하는데 중요한 인자이다.

본 연구에서 수행한 실험결과는 25℃, 100℃, 200℃ 온도 별로 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm, 140 mm, 160 mm에 이르는 낙하높이를 설정하여 시간에 따른 금속액적의 직경변화를 비교 관찰하였다. Fig. 1은 고체판이 상온 25℃ 상에 금속액적을 낙하시켰는데, 낙하높이가 증가될 수록 금속액적의 시간에 따른 직경변화가 크게 나타난다. 액적의 직경이 증가하는 Spreading과 감소하는 Recoiling 현상을 확실히 관찰할 수 있다. 낙하높이를 140 mm 이상으로 하면 액적이 비산되는 splat 현상이 나타나 더 이상 증가시킬 수는 없었다. Fig. 2는 고체판이 가

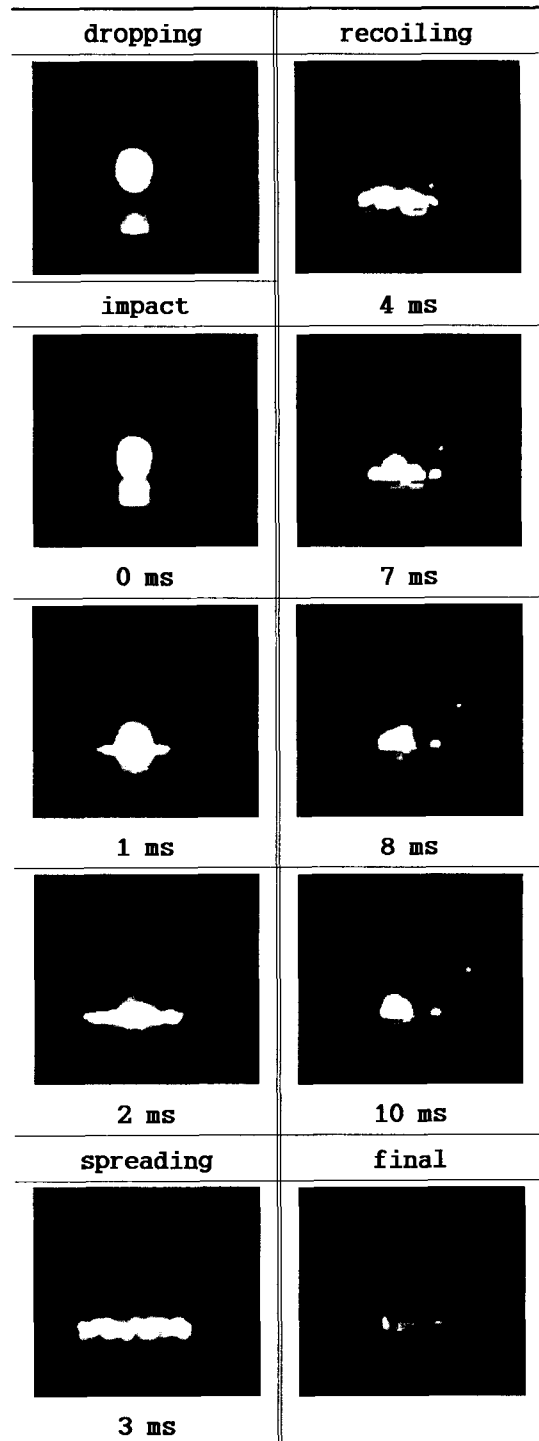


Photo. 2 Photography of droplet behavior falling height 140 mm for on substrate plate of 25℃

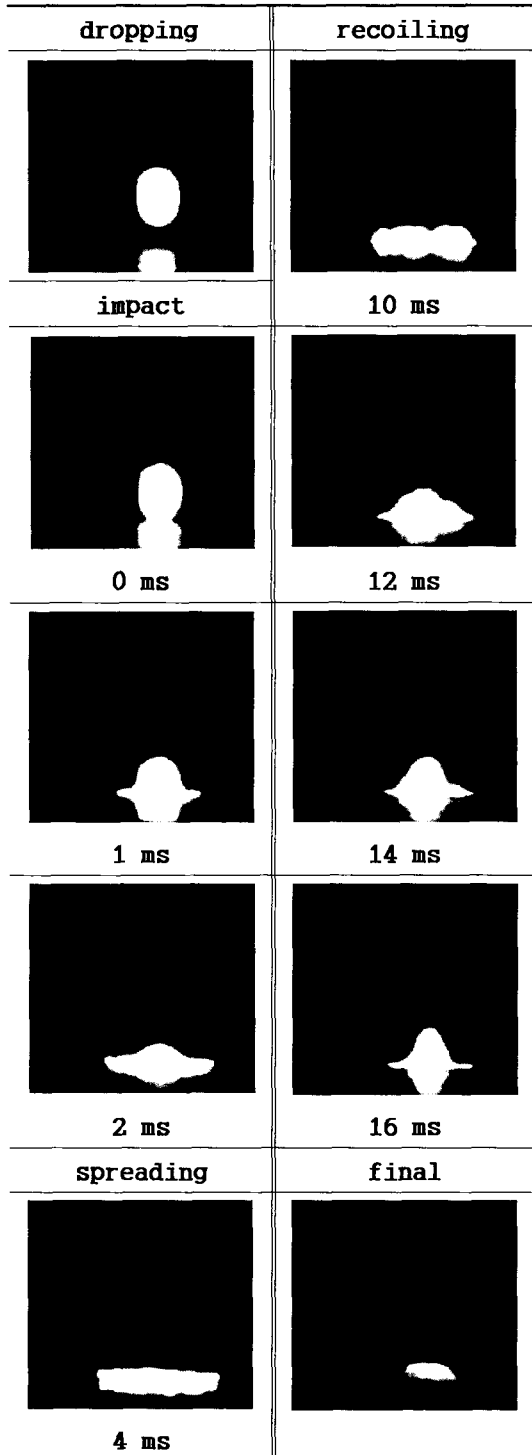


Photo. 3 Photography of droplet behavior falling height 140 mm for on substrate plate of 100 ℃

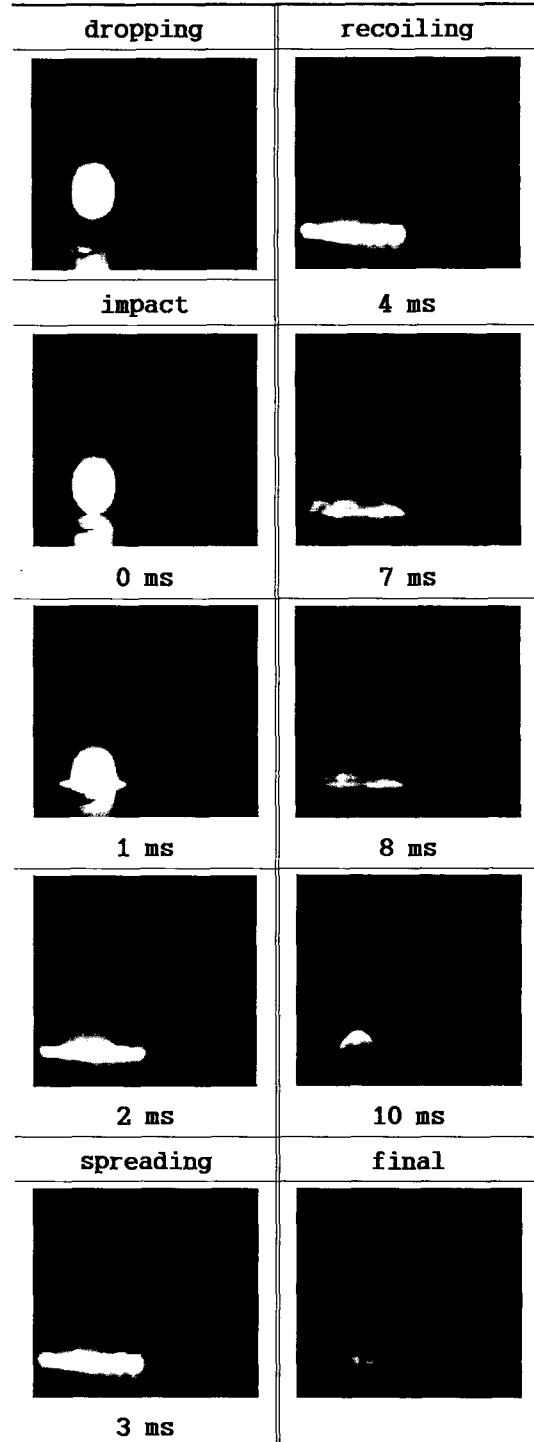


Photo. 4 Photography of droplet behavior falling height 140 mm for on substrate plate of 200 ℃

열되어 100℃ 상에 도달될 때 금속액적을 낙하시켰는데 Fig. 1의 결과와 유사한 경향을

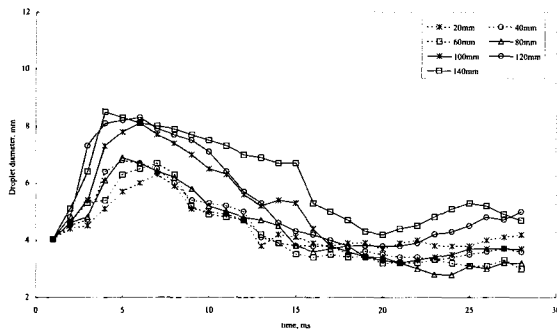


Fig. 1 Droplet diameter according to falling height and time on substrate plate of 25℃

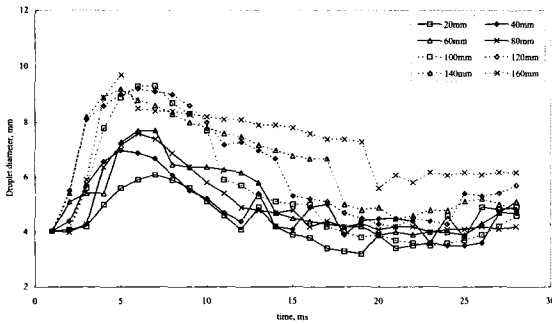


Fig. 2 Droplet diameter according to falling height and time on substrate plate of 100℃

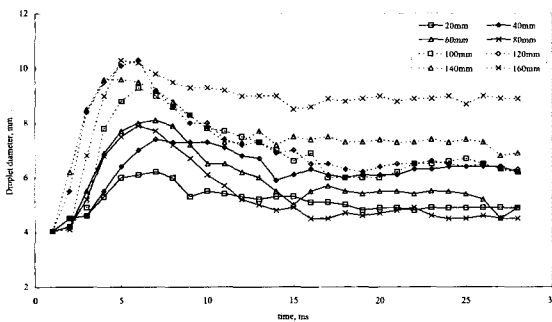


Fig. 3 Droplet diameter according to falling height and time on substrate plate of 200℃

나타내었으며, splat 낙하높이가 160mm로 증가하였다. 그리고 Fig. 1과 Fig. 2에서 나타난 공통적 내용인 4 ~ 7ms 전후에서 액적의 최대퍼짐이 일어난 후 최종 액적의 형태를 갖추기 전의 시간대에서 spreading과 recoiling 현상의 빈도가 2 ~ 5회로 불규칙한 형태를 반복하여 차츰 안정된 형태의 액적으로 진행되어지고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 3는 고체판이 가열되어 200℃ 상에 도달될 때 금속액적을 낙하시켰는데 Fig. 1, Fig. 2와 같은 경향인 낙하높이가 증가될수록 금속액적의 시간에 따른 직경변화가 커졌지만 Spreading과 Recoiling 빈도가 현저히 줄어들었고 신속하게 안정한 상태로 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 위의 실험결과로 splat가 일어나지 않은 범위에서 액적의 최종직경을 제어하기에는 평판의 온도가 높을수록 유리함을 알 수 있다.

Fig. 4, 5, 6은 일정낙하높이에서 고체판의 온도를 변화하였을 때 시간 변화에 따른 금속액적의 직경을 나타낸다. 고체판의 온도가 증가함에 따라 초기에는 고체판으로 열전달량이 감소하여 spreading 현상이 크게 나타나 최대액적직경이 증가한다. 그러나 액적직경이 증가함에 따라 고체판과 접촉면적이 넓어지기 때문에 열전달량이 커져서 recoiling 현상이 적게 나타나고 응고한다. 즉, 고체판의 온도가 증가함에 따라 온도차에 의한 열전달량은 감소하나 접촉면적의 증가에 의한 열전달량은

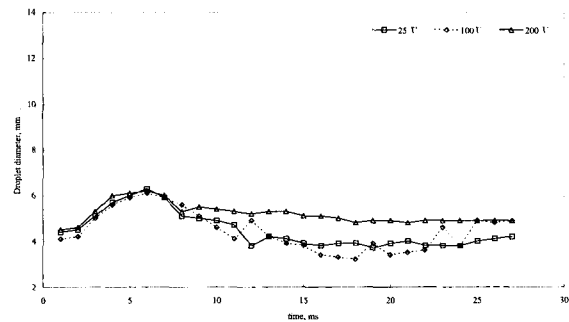


Fig. 4 Droplet diameter according to substrate temperature variation at the falling height of 20 mm

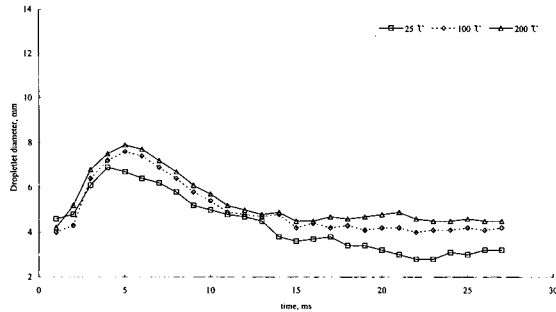


Fig. 5 Droplet diameter according to substrate temperature variation at the falling height of 80 mm

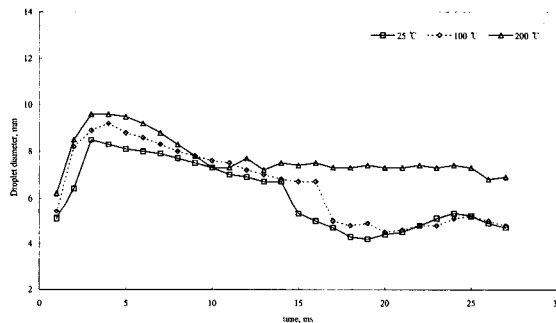


Fig. 6 Droplet diameter according to substrate temperature variation at the falling height of 140 mm

커지는 상반된 현상이 공존한다.

4. 결 론

본 연구의 실험은 제한된 조건에서 실시하여 일반적인 모든 조건의 영역을 포함하지는 못하지만 주어진 범위내에서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 금속선재에 레이저 빔이 조사되어 용융 금속이 단락 후 낙하할 때 고체판과의 높이가 증가할수록 액적직경의 퍼짐현상이 크게 나타난다. 이것은 낙하거리가 증가할수록 액적이 단락하여 자유낙하로

인한 위치에너지가 운동에너지로 변환하여 충격속도가 증대하기 때문에 splat이 발생하지 않은 범위내에서 액적높이를 증가하면, 연속된 액적의 적층을 수행할때 액적 간의 기공이 작은 일체형 구조로 되고, 더불어서 넓은 결합면을 갖게 되며 적정 강성을 지닌 구조물의 제작이 용이한 형태인 넓고 얇은 액적을 얻을 수 있다. 본 실험에서는 splat이 발생하지 않은 최대높이가 140-160 mm 정도이다.

- 2) splat가 일어나지 않은 범위에서 고체판의 가열온도가 높아질수록 액적의 최종 직경의 변화가 크게 나타나기 때문에 최종 직경을 제어하기에는 평판의 온도가 높을수록 유리함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국 과학 재단 목적 기초 연구 (R05-2001-000-01108-0) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jacobs, P. F., "Rapid Prototyping & Manufacturing Fundamentals of StereoLithography," SME, 1992.
2. Deckard, C. R. and Beaman, J. J., "Recent Advances in Selective Laser Sintering," Fourteenth Conf. Production Research and Technology, pp. 447-452, 1987.
3. Crump, S. S., "Fast, safe Prototypes with FDM," PED-Intell. Des. Manfg Proto., Vol 50, 1992.
4. J. M. Waldvogel, "Solidification

- phenomena in picoliter size solder droplet deposition on a composite substrate," International Journal of Heat Mass and Transfer, Vol. 40, No. 2, (1996), pp. 295-309
5. M. Pasandideh-Fard, R. Bhola, S. Chandre, 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
 6. 양영수, 손광재, 강대현, "용융금속 액적의 고체표면 충돌거동," 대한용접학회지, 제18권, 제4호, pp. 468-476, 2000.
 7. S. H. Crandall, D. C. Karnopp, E. F. Jr. Kurtz and D. C. Pridmore-Brown, "Dynamics of mechanical and electromechanical systems", (1968), Robert E.
 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. P. A. Joly and R. Mehrabian, "The Rheology of a partially solid alloy," J. Mat. Sci., vol. 11, pp. 1393-1418, (1976)
 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