

레이저를 이용한 금속액적 적층시 온도분포와 잔류응력 해석

윤진오*, 양영수#

Analysis of Temperature Distribution and Residual Stress in Deposition Process of Metal Droplet by Using Laser Beam

Jin Oh Yun*, Young Soo Yang#

ABSTRACT

The temperature distribution of the deposited droplet was predicted by using the finite element analysis and it was assumed that the droplet was axisymmetrical model. The analysis of residual stress was performed with the temperature data, which is obtained from the result. Axisymmetric droplet is deposited three times to consider the actual phenomenon of droplet deposition. The analysis of the temperature distribution is respectively performed whenever the axisymmetric droplet is laminated and the residual stresses of the laminated axisymmetric droplet are calculated with the value of the temperature distribution.

Key Words : Metal droplet(금속액적), Temperature distribution(온도분포), Residual stress(잔류응력), Finite element analysis(유한요소해석), Drop deposition(액적적층).

1. 서론

최근에는 금형이나 몰드를 제작하지 않고 직접 시작품(prototype)을 빠르게 제작할 수 있는 패속조형 기술이 전자, 항공 자동차 등의 주요한 제조업 전반에 도입되어 제품의 시작공정에 소요되는 비용과 시간을 크게 절감함으로써 제품의 경쟁력을 제고하는 데 기여하고 있다.¹⁻³ 그러나 패속조형에 이용된 재료들을 살펴보면 비금속이거나 저 용접 금속들이 주류를 이루고 있어 직접식 패속조형 적용분야에 한계를 드러내고 있다.^{4,7} 자동

차, 항공기, 선박과 같은 가혹한 하중 하에 놓여 있는 구조부재 등을 패속조형 기술을 이용하여, 바로 대체적용이 가능한 고 강도와 고 강성을 갖춘 금속제품을 직접 제작하지는 못하고 있다. 소재가 충분한 강성과 강도를 가지고 있다면 패속조형기술의 응용분야로 각광 받고 있는 Rapid Tooling(Direct Rapid Prototyping)인 몰드 및 다이와 같은 생산가공기술의 분야에도 적용될 수 있다. 이와 같은 패속조형기술의 소재 측면에서 한계점을 극복하기 위하여 고 강성의 금속제품을 신속하고 저 경비로 직접 제작할 수 있도록 하는 다양한

* 접수일: 2004년 6월 4일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

* 전남대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 전남대학교 기계공학과

E-mail ysyang@chonnam.ac.kr Tel. (062) 530-1675

기법의 많은 연구들이 진행되고 있다. 가장 많이 연구가 진행되고 있는 방법은 용접기술과 절삭가공기술의 조합으로 GMAW 용접으로 평판 한층을 적층 후 NC 공작기계를 이용하여 필요한 부분을 가공하고 다시 용접으로 적층 후 NC 가공을 반복하여 제품을 완성한다. 그러나 이러한 방법은 가공공정이 복잡하여 많은 문제점을 포함하고 있다.⁸ 본 연구에서는 복잡하고 정교한 부품의 정밀가공이 가능하고 고 용점 금속재료의 가공이 수월하며 특히 열원의 정밀한 제어가 용이한 레이저빔을 이용한 Rapid Tooling 기법을 개발하고자 하였다. 실제 적층을 위한 장치의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 레이저 빔이 가공될 소재 내부에 흡수되어 소재에 가열, 용융, 증발 등과 같은 열적인 현상을 이용하여 소재의 표면경화, 절단, 천공, 용접, 미세가공 등에 이용되어지고 있다. 이와 같은 레이저의 열 가공기술의 특성을 이용한 새로운 패속조형기수의 기법이 적용 가능하다. 고출력의 레이저빔을 고 용점 금속 와이어에 연속 조사하면 가열로 인한 용융된 재료는 표면장력에 의하여 금속 액적이 생성되고 액적이 표면장력과 체적력의 힘의 평형조건에 의하여 단락되어진 후, 연속적인 적층을 할 수 있다. 패속조형의 기본기법은 2 차원 평면제작 후, 평면을 적층하여 입체적인 형상을 만드는 것으로 금속액적을 투하하여 2 차원 평면을 제작하고, 평면을 적층하여 원하는 형상을 만들 수 있다. 이와 같은 새로운 패속조형기술의 기법을 실제로 적용하기 위해서는 금속 액적의 생성과 형상, 그리고 거동에 관한 연구를 필요로 한다. 본 연구에서는 실제로 레이저빔을 고 용점 금속와이어에 연속조사하여 적층판에 금속액적을 적층시키고 적층된 액적의 지름을 실제로 측정하였다. 수치해석 모델링을 위하여 실제로 측정된 액적의 지름으로 실린더 형태를 가정하였으며 레이저에 의한 액적의 생성은 고려하지 않고 적층된 액적에 대해서만 해석을 수행하였다. 실린더의 높이는 용융된 와이어의 부피와 측정된 지름으로 결정하였다. 적층된 액적의 온도분포와 응력분포를 파악하기 위하여 상용코드인 ABAQUS 를 이용하여 온도분포와 응력분포 해석을 수행하였다. 단일액적인 경우를 위하여 축대칭 해석을 하였고 연속적인 액적적층의 모델링을 위하여 중심축에 액적이 1 회 적층된 후 원주방향으로 연속적으로 액적이 빠른 속도로 적층된다고 가정하여 총 3 회의 축대칭 적층을 가

정하였다. 위의 모델링에 대한 열전달 해석을 수행하였고 그에 따른 잔류응력분포 해석을 수행하였다. 액적이 적층되는 적층판의 온도를 변화시키면서 온도분포와 잔류응력 분포의 결과를 비교하여 적절한 적층을 위한 적층판의 온도에 대하여 고찰하였다.

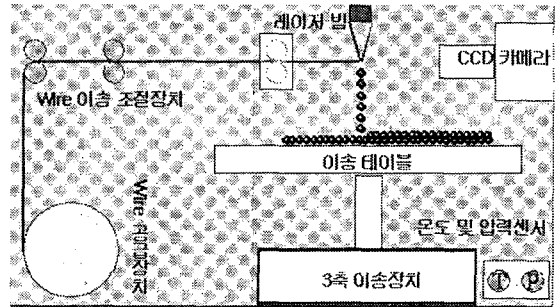


Fig. 1 A set of SFF system by using laser beam

2. 유한요소 모델링과 실험

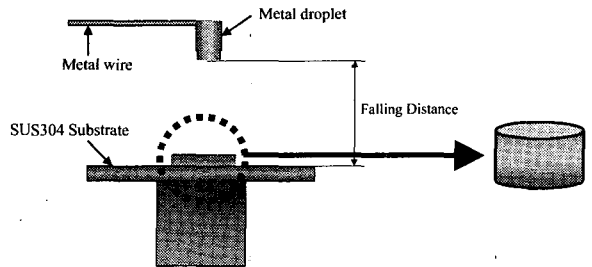


Fig. 2 Geometry of deposition process

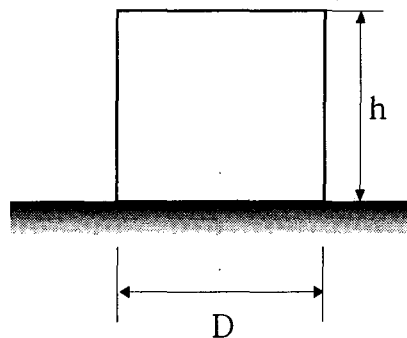


Fig. 3 Geometry of the cylinder model

Fig. 1 과 같이 와이어 공급장치를 통하여 일정한 속도로 송급되는 금속와이어에 레이저 빔이 조사 되면 금속와이어는 가열됨으로써 용융되고 액적이 생성된다. 생성된 액적은 일정체적에 도달하면 낙하하여 적층판에 적층된다. 실제로 레이저를 금속 와이어에 조사하여 액적을 생성시키고 적층된 후의 금속액적의 지름을 측정하는 실험을 수행하였다. Fig. 2 의 그림에서 보여주는 바와 같이 금속액적을 적층시키고 적층된 후의 형태를 Fig. 3 과 같이 실린더로 가정하여 축대칭으로 모델링 하였다. 적층된 액적의 지름 D 를 측정하고 송급된 와이어의 부피를 계산하여 실린더로 가정된 액적의 높이 h 를 계산하였다.⁹ 실제 레이저를 조사하여 금속 액적을 적층시켜 측정된 액적의 지름 $D=3.9\text{mm}$ 이고 그에 대한 $h=2.89\text{mm}$ 로 계산되었다.¹⁰ 유한요소 해석을 위한 열적 경계조건은 Fig. 4 와 같이 초기의 액적의 초기 온도를 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하고 회전축을 제외한 모든 영역에서 대류 열전달 조건을 주었다. Fig. 5 에서는 축대칭 모델링을 위한 요소분할 그림을 보여주고 있다. 액적이 낙하하는 동안 대류로 인한 열전달은 무시하였고 액적이 적층된 후 최종적인 실린더 형태를 가정하고 열전달 해석을 수행하였다. 적층판의 온도에 따라 해석을 수행하여 결과를 비교하였으며 유한요소 해석은 상용코드인 ABAQUS 를 사용하였다.

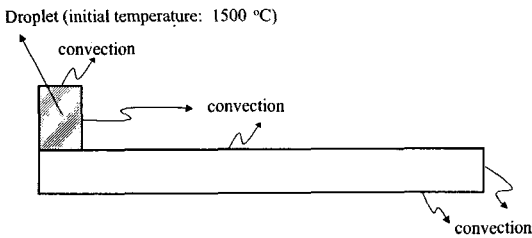


Fig. 4 Thermal Boundary conditions



Fig. 5 Finite element mesh generation

3. 결과 및 고찰

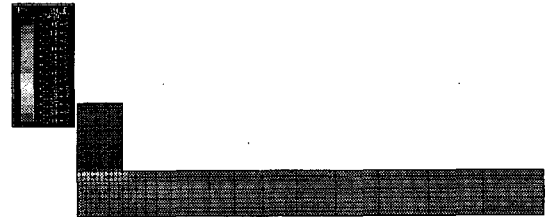
3.1 단일적층 해석

Fig. 6 의 그림은 액적이 적층판의 온도가 $20\text{ }^\circ\text{C}$,

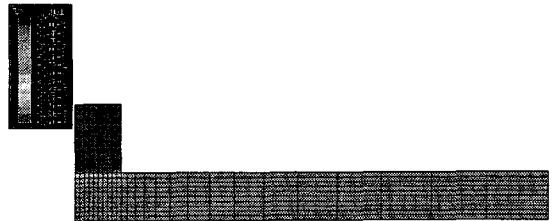
$100\text{ }^\circ\text{C}$, $200\text{ }^\circ\text{C}$ 일때 적층된 직후의 온도 분포 양상을 보여주고 있는 그림이다. 액적에서 적층판으로의 열전달이 일어나기 시작하는 초기의 모습을 보여주고 있다.



(a) substrate temperature : $20\text{ }^\circ\text{C}$

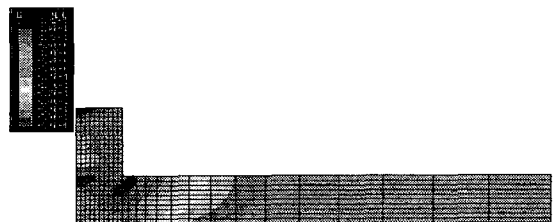


(b) substrate temperature : $100\text{ }^\circ\text{C}$

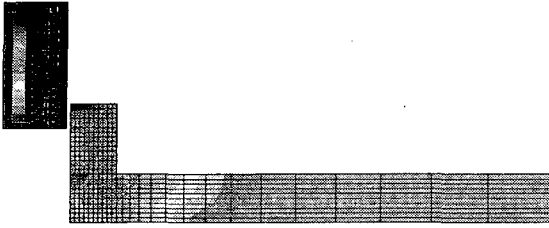


(c) substrate temperature : $200\text{ }^\circ\text{C}$

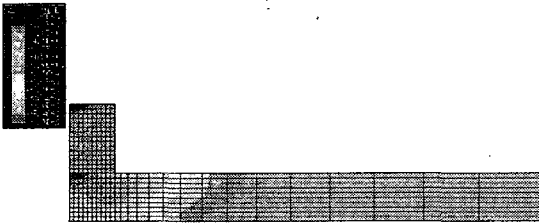
Fig. 6 Temperature distribution of droplet



(a) radial stress (substrate temperature : $20\text{ }^\circ\text{C}$)



(b) radial stress (substrate temperature : 100 °C)



(c) radial stress (substrate temperature : 200 °C)

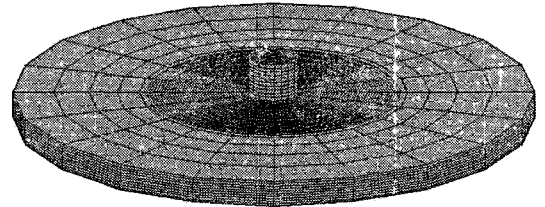
Fig. 7 Residual stress distribution of single droplet (kgf/mm²)

적층판의 온도의 변화에 대한 반경방향의 잔류응력계산 결과를 Fig. 7 에서 보여주고 있다. 적층판과 액적의 경계면을 기준으로 적층된 액적 영역에서는 압축잔류응력이 분포하고 적층판 영역에서는 인장잔류응력이 분포함을 알 수 있다. 적층판과 액적의 경계면에 불균일한 응력분포로 인해서 경계면이 충격과 강도면에서 취약할 것으로 판단된다. 온도차이에 대한 결과를 비교해보면 적층판의 온도가 증가할수록 잔류응력의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. Single droplet 인 경우에 적층판의 적절한 예열이 경계면의 취약점을 감소시키는 데 중요한 요소라고 예측할 수 있다.

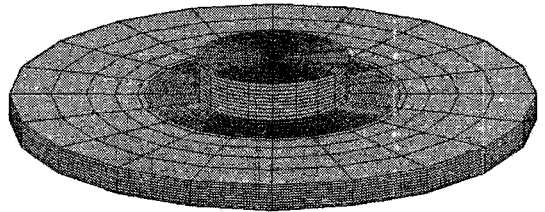
3.2 연속적층 해석

연속적으로 적층되는 현상을 모델링하기 위하여 중앙에 하나의 금속액적이 적층된 이후, 원주방향으로 연속적으로 축대칭 액적이 빠르게 2 회 적층된다고 가정하여 총 3 회의 축대칭 적층을 모델링하였다. 적층이 진행되는 대략적인 그림은 Fig. 8 과 같다. Fig. 8 의 (a)는 첫번째 축대칭 적층과정을 보여주고 (b)는 두번째 (c)는 세번째 축대칭 적층과정을 보여주고 있다. 위의 그림과 같이 연속

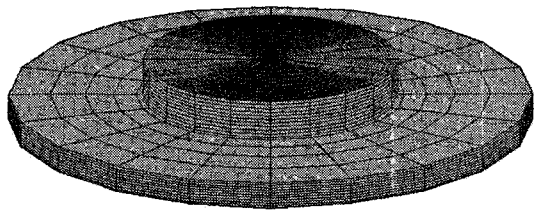
적인 적층을 모델링 하여 온도분포해석과 잔류응력해석을 수행하였다.



(a) 1 st deposition



(b) 2 nd deposition



(c) 3 th deposition

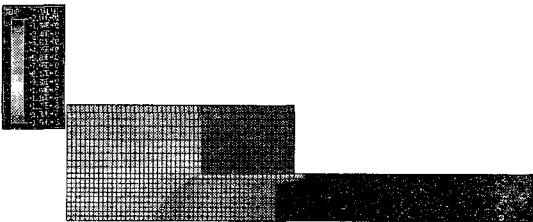
Fig. 8 Multi droplet deposition process



(a) temperature distribution of 1 st deposition



(b) temperature distribution of 2 nd deposition

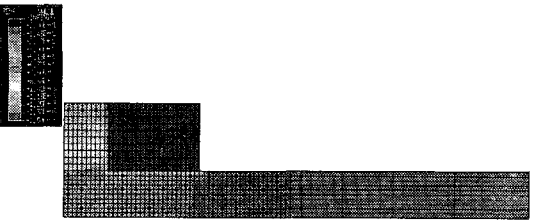


(c) temperature distribution of 3 th deposition

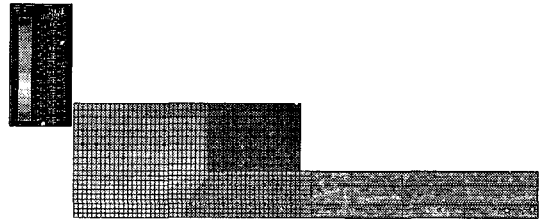
Fig. 9 Temperature distribution of multi droplet
(substrate temperature : 20 °C)



(a) temperature distribution of 1 st deposition

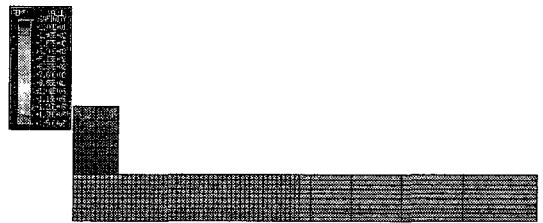


(b) temperature distribution of 2 nd deposition

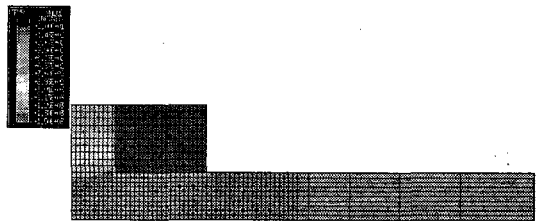


(c) temperature distribution of 3 th deposition

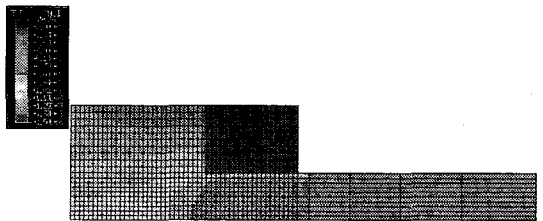
Fig. 10 temperature distribution of multi droplet
(substrate temperature : 100 °C)



(a) temperature distribution of 1 st deposition



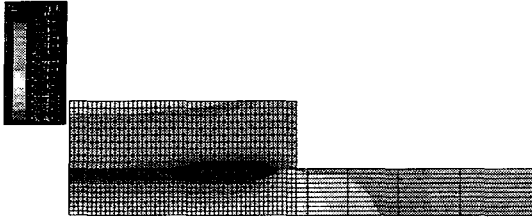
(b) temperature distribution of 2 nd deposition



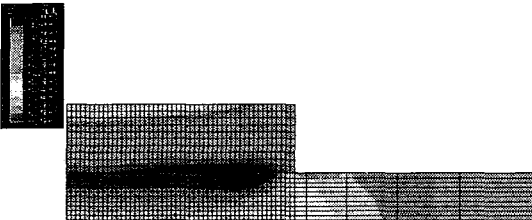
(c) temperature distribution of 3 th deposition

Fig. 11 Temperature distribution of multi droplet
(substrate temperature : 200 °C)

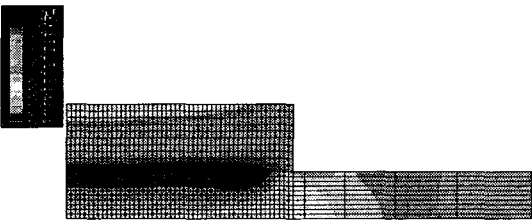
Fig. 9 는 적층판 온도가 20 °C 일때 Fig. 8 의 축대칭 단면의 연속적인 적층과정에서의 온도분포 해석을 보여주고 있다. 각각의 축대칭 액적의 초기 열전달 해석을 나타내고 있다. Fig. 10 과 Fig. 11 은 적층판 온도가 100 °C 인 경우와 200 °C 인 경우의



(a) radial stress (substrate temperature : 20 °C)



(b) radial stress (substrate temperature : 100 °C)



(c) radial stress (substrate temperature : 200 °C)

Fig. 12 Residual stress distribution of multi droplet (kgf/mm²)

연속적인 적층시 적층이 이루어진 초기의 온도분포를 보여주고 있는 그림이다. 연속적인 적층인 경우의 잔류응력 해석결과를 Fig. 12 에서 보여주고 있다. 단일액적 적층인 경우와 같이 적층판과 액적의 경계면에 불균일한 응력 분포가 존재함을 알 수 있다. 경계면을 기준으로 전체 영역에 대하여 액적에서는 압축잔류응력이 분포하고 적층판에서는 인장잔류응력이 분포함을 알 수 있다. 단일액적 적층인 경우와 비교하면 단일액적 적층인 경

우에는 적층판의 온도 증가에 따라서 잔류응력분포가 감소하는 경향을 보였으나 연속적층인 경우에는 적층판의 온도증가에 대해서 잔류응력의 변화는 미소하였다. 연속적인 적층이 적층판의 예열과 비슷한 역할을 하여 잔류응력을 감소시킨 것으로 판단된다. 동일한 적층판의 온도에 대해서도 단일적층인 경우에 비해 연속적인 적층인 경우가 더 적은 잔류응력분포를 가지는 것을 알 수 있다. 이 또한 연속적인 적층과정에서는 단일액적 적층인 경우와 비교하여 더 높은 온도의 예열효과를 발휘하기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 따라서 연속적층의 경우에는 액적이 적층될 때 마다 예열의 효과를 가지므로 적층판의 예열보다는 액적이 빠른 속도로 적층되도록 적층되는 시간의 간격을 최소화 하는 것이 잔류응력의 감소에 큰 영향을 미친다고 예측 할 수 있다.

4. 결론

금속액적을 적층시키기 위하여 레이저빔을 와이어에 조사시키고 액적을 적층시켜 적층된 액적의 반경을 실제로 측정하였다. 측정된 액적의 지름으로 실린더로 가정된 액적의 높이를 구하였다. 실험으로 측정된 액적의 크기로 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 해석은 단일액적 적층인 경우와 연속적층인 경우 고려하여 유한요소 모델링에 적용하였다. 유한요소 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)단일액적 적층인 경우와 연속적층인 경우 모두 액적과 적층판의 경계면을 기준으로 응력의 심한 불균일한 분포로 인해 강도와 충격면에서 취약할 것으로 예측된다.
- (2)단일액적 적층인 경우에는 적층판의 온도가 증가할수록 잔류응력의 크기가 감소하는 경향을 보였다.
- (3)연속적층인 경우에는 적층판의 온도변화에 대해 잔류응력의 변화가 미소하였다. 이는 연속적인 적층이 적층판의 예열과 비슷한 역할을 하였기 때문이다.
- (4)연속적층의 경우에는 액적이 적층될 때 마다 예열의 효과를 가지므로 적층판의 예열보다는 액적이 빠른 속도로 적층되도록 적층되는 시간의 간격을 최소화 하는 것이 잔류응력의 감소에 큰 영향을 미친다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-01108-0)지원으로 수행되었음.

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. Prinz, F. B., Weiss, L. E., Amon, C. H. and Beuh, J. L., "Processing, Thermal and Mechanical Issues in Shape Deposition Manufacturing," Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, pp.118-129, 1995.
5. Orme, M. and Huang, C., "Phase Change Multipulation for Droplet-Based Solid Freeform Fabrication," ASME J. Heat Transfer, Vol. 119, pp. 818-823, 1997.
6. Liu, Q. B., Huang, C. Z. and Orme, M., "Mutual Electrostatic Interactions Between Closely Spaced Charged Solder Droplets," Atomization and Sprays, Vol. 10, pp. 565-585, 2000.
7. Amon, C. H., Beuth, J. L., Weiss, L.E., Merz, R. and Prinz, F. B., "Shape Deposition Manufacturing with Microcasting: Processing, Thermal and Mechanical Issues," ASME J. Manufacturing Science and Engineering, Vol. 120, pp. 656-667, 1998.
8. Atkinson, D., Rapid Prototyping and Tooling: A Practical Guide, Strategy Publication Ltd., UK, 1997.
9. Yoo, S. B., Yang, Y. S. and Kim, Y. W., "A Study on the Uniform Metal-Droplet Deposition Using Laser," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 667-670, 2002.
10. Kim, Y. W., Yang, Y. S., "Collision Behavior of Molten Metal Droplet by Nd-Yag Laser BeamNd-Yag," Proceedings of the Korean Society of Laser Processing Conference, pp. 122-126, 2003.