

공구강을 이용한 레이저 직접 금속조형 공정의 적층 특성

장윤삼* (수원대학교 기계공학과)

Characteristics of Laser Aided Direct Metal Deposition Process for Tool Steel

Yoonsang Chang (Mech. Eng. Dept., University of Suwon)

ABSTRACT

Laser aided direct metal deposition (LADMD) process offers the ability to make a metal component directly from 3-D CAD dimensions. A 3-D object can be formed by repeating laser cladding layer by layer. The key of the build-up mechanism is the effective control of powder delivery and laser power to be irradiated into the melt-pool. A feedback control system using optical sensors is introduced to control laser power and powder mass flow rate. Using H13 tool steel and CO₂ laser system, comprehensive analysis are executed to test the efficiency of the system. In addition, the dimensional characteristics of directed deposited material are investigated with the parameters of deposition thickness, laser power, traverse speed and powder mass flow rate.

Key Words : ELaser Aided Direct Metal Deposition(레이저 직접 금속조형), Laser Cladding(레이저 클래딩), Feedback Control(피드백 제어), Rapid Manufacturing(쾌속생산)

1. 서론

현재 전 세계적으로 여러 가지 쾌속생산 기술이 연구되고 있으나 그 중 기능성 금속 제품을 만들 수 있는 기술은 많지가 않다. Welding을 응용한 기술, 레이저 소결을 이용한 Selective Laser Sintering, 재료를 용융상태에서 물방울 형태로 주사하여 성형하는 Uniform Droplet Spray 기술 등이 발표되었으나 적용 범위가 제한적이고 아직 개발 중인 것도 많다. 레이저를 이용한 직접 금속조형 (Laser Aided Direct Metal Deposition: LADMD)은 3차원의 CAD 모델로부터 금속 제품을 직접 성형하는 레이저 클래딩(Laser Cladding) 기술이다 [1]. Laser Engineered net Shaping (LENS), Direct Light Fabrication (DLF), Controlled Metal Build-up (CMB), 또는 Direct Metal Deposition (DMD)로 불리는 이 기술은 기본적으로 모두 같은 개념이며, 레이저 클래딩 기술을 기본으로 하고 있다 [2-6]. 기술적인 차이가 거의 없는 이러한 몇 가지 공정들은 지난 수년간 거의 동시에 여러 연구기관에서 개발되어 각각의 특정 분야에서 상용화 되었다.

클래딩 공정의 기술적인 문제점 중 하나는 얼마

나 정확하게 기하학적 형상을 만드는가에 있다. 이상적인 경우는 성형표면이 평평하고 높이가 일정하여야 하나, 분말재료의 공급이 정확하게 일정하지 않고 레이저 출력도 변동이 있기 때문에 실제로는 그렇지가 못하다. 적층 높이가 일정치 않으면 층간 경계사이에서 void 같은 예기치 않은 결함이 발생하기 쉽고 결함보완을 위한 열처리나 후처리 절삭가공의 부담이 커지게 된다. 이러한 문제점을 해결하려면 용융점의 크기나, 가열온도, 응고시간 등을 제어하여야하나 분말재료의 사용률이나 열 전달률 등을 제어하는 것은 거의 불가능하다. 최근 몇 년 동안 효율적인 방법을 찾기 위하여 연구가 진행되었다. 적층 높이 등 기하학적 완성도를 얻기 위해서는 레이저 출력, 레이저 빔 지름, 재료 공급률, 가공속도, 경로중첩도 등 LADMD 공정의 주요 변수를 제어하는 것이 효과적이며, 제안된 방법 중 하나는 레이저의 비에너지(specific energy)와 분말재료 공급량을 피드백으로 제어하는 것이다.

본 연구에서는 LADMD 시스템의 분말재료 공급장치와 optical sensing system을 이용한 레이저 출력의 피드백 제어 시스템을 구성하고 H13 공구강의 직접 성형을 실행하여 적층 높이에 대하여 제어 시

시스템의 성능을 평가하였다. 또한 적층높이에 대하여 레이저 출력, 분말재료 공급률, 가공속도, 적층 두께 등 4가지 공정변수의 영향을 분석하였다.

2. LADMD 공정의 제어시스템

2.1 LADMD 공정

LADMD 시스템은 Fig. 1과 같이 기본적으로 레이저 시스템과 분말재료 공급 장치로 이루어진 레이저 클래딩시스템에, 공정의 자동화를 위한 CAD/CAM 및 수치제어 시스템으로 이루어진다. 또한 시스템에 따라 성능향상을 위하여 적층 크기를 제어할 수 있는 피이드백 제어 시스템이 구성되기도 한다.

LADMD 시스템의 주 기술인 레이저 클래딩은 오랫동안 표면처리 분야에서 각광받는 기술로 알려져 왔다. 레이저 클래딩은 레이저가 기지재료(substrate)에 용융점(melt-pool)을 만들고 분말이나 선형의 재료를 그 용융점에 가하여 녹여서 금속 결합을 만드는 공정이다. 전체 형상이 완성될 때까지 층층이 이 클래딩 공정을 가함으로써 적층성형(layered manufacturing)이 완성되게 된다.

레이저 클래딩 시스템에서 레이저 특성만큼 클래딩의 완성도를 결정하는 중요한 인자가 금속 분말의 흐름이다. LADMD 공정에서 제품을 얼마나 작은 크기로 제작할 수 있는가는 금속 분말의 크기로 결정된다. 용융점의 크기가 레이저 빔 지름과 같다고 봤을 때 $10\mu\text{m}$ 이하의 작은 분말의 거동을 제어한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 분말 재료는 부력효과에 의하여 자유로이 운동하며 정전기나 기타 예기치 않았던 문제로 인하여 흐름에 문제가 생길 수도 있다. 따라서 효과적인 분말재료의 공급방법이 중요하다. 또한 LADMD 공정의 특징 중 하나인 Functionally Graded Material을 제작하기 위해서는 여러 종류의 분말을 공급하여야 한다. 혼합비율이 수시로 달라지는 여러 가지 종류의 미세 분말을 정확한 양으로 균일하게 배합하고, 효율적으로 용융점에 공급하는 시스템이 필요하다. 본 연구에서 제작되고 사용된 분말재료 공급 시스템은 powder container, powder blender, concentric nozzle assembly, delivery gas inlet 으로 구성되어 있다.

LADMD 공정에서 사용되는 CAD/CAM 시스템은 CAD 모델로부터 직접 생성한 NC 코드에 의하여 CNC workstation을 작동한다. CAM 시스템은 CAD 파일 또는 STL 파일을 받아서 적층 대상을 일정한 두께로 slicing한다. 각각의 slicing된 층(layer)에 대하여 공구경로가 형성되고 그 밖의 부가정보가 더해져서 workstation을 구동하기 위한 NC 코드로 만들어진다.

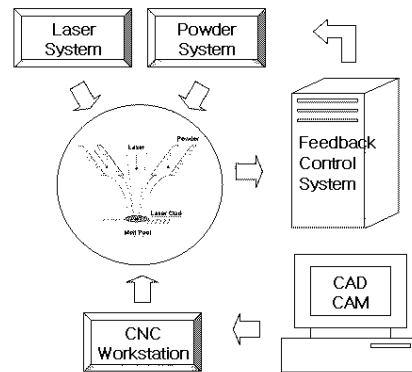


Fig. 1 LADMD System

2.2 제어시스템

클래딩 공정의 기술적인 문제점 중 하나는 얼마나 정확하게 기하학적 형상을 만드는가에 있다. 이상적인 경우는 표면의 평평도가 일정하여야 하나, 분말재료의 공급이 정확하게 일정하지 않고 레이저 출력도 변동이 있기 때문에 실제로는 그렇지 못하다. 이러한 문제점을 해결하려면 용융점의 크기나, 가열온도, 응고시간 등을 제어하여야 하나 분말재료의 사용률이나 열 전달률 등을 제어하는 것은 거의 불가능하다. 최근 몇 년 동안 효율적인 방법을 찾기 위하여 연구가 진행되었다. LADMD 공정에는 레이저 출력, 레이저 빔 지름, 재료 공급율, 가공속도, 경로중복 등 5가지 주요 변수가 있다. 적층 높이 등 기하학적 완성도를 얻기 위해서는 이 5가지 인자를 제어하는 것이 효과적이며, 제안된 방법 중 하나는 레이저의 비에너지(specific energy)와 분말재료 공급량을 feedback으로 제어하는 것이다 [7]. 피이드백 제어 시스템의 기본 기능은 공정상 발생하는 적층높이를 감지 대상으로 하여 에너지와 재료를 조절하여 최대 적층 높이를 직접 제한하는 것이다.

피이드백 제어 시스템은 Fig. 2와 같이 높이 감지부와 신호처리부로 구성되어 있다. 용융부의 적층 높이를 감지하는 optical photo-sensor는 두개 이상이 사용되어 공구경로의 변화로 발생하는 감지 방향의 변화를 보완하게 된다 [7]. optical sensor는 용융점의 예상되는 크기와 적층부 높이에 따라 미리 감지 위치를 보정하고 적층 높이가 한도 높이 내에 있을 때는 신호를 발생하지 않도록 한다. 레이저 출력의 불안전성과 용융점의 분말 공급율의 변화로 과 적층이 발생한 경우 sensor가 용융점의 이미지를 인식하여 제어 신호가 신호 처리부로부터 레이저 제어기 및 재료공급 시스템의 모터 제어기로 보내지게 된다. 그러나 과 적층이라는 하나의 대상을 제어하기 위하여 레이저 차단 시간, 레이저 출력 크기, 재료 공급

를이라는 세 가지 변수를 효율적으로 결정하기에는 아직 예비 실험 및 제어 알고리즘의 개발이 부족하다. 따라서 현재에는 레이저 차단 시간이라는 하나의 인자만으로 적층 높이를 제어하고 있다.

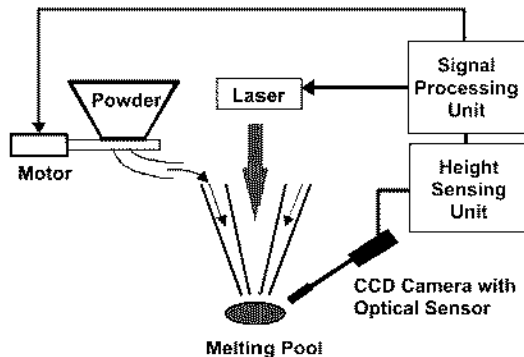


Fig. 2 Concepts for Feedback Control

3. 적층경로에 따른 적층특성

피드백 제어 시스템의 성능을 평가하기 위하여 Table 1과 같은 조건의 실험을 실시하였다. 공구 및 금형에 많이 사용되는 AISI H13 공구강은 Stellite Coatings 사로부터 공급되는 mesh size 100 크기의 분말이다. 적층 크기는 20.32mm, 20.32mm, 5.08mm 이며 기저 시편은 AISI 1018 강이다. TEM00 모드 1.75kW CO₂ 레이저 시스템이 사용되어 60Hz 주파수와 95% duty cycle의 펄스가 사용되었다. 제어 성능을 알아보기 위하여 x 방향, y 방향, xy 방향, 회전 방향의 4가지 적층경로에 대하여 실험하였다. x 방향은 두 개의 optical sensor의 방향을 의미한다.

Fig. 3은 제어 시스템을 사용하지 않았을 때와 비교하여 보여준다. 목표치보다 큰 적층높이를 만드는 공정변수를 사용하여도 제어시스템을 이용하면 목표치인 5.08mm에 근접한 적층을 할 수 있음을 보여준다. 4가지 적층경로를 비교하여 보았을 때 y 방향의 적층경로가 0.25mm의 오차로 가장 정밀한 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 센서의 측면감시가 앞이나 뒤에서의 감시보다 우수한 성능을 가짐을 보여준다. xy 방향의 경로에서 제어시스템이 가장 큰 오차의 축소를 보여주는데 이것은 가장 긴 시간동안 이상상태를 감지하고 레이저가 cut-off 되었음을 의미한다. xy 방향의 레이저 cut-off 시간은 약 32%로 긴 cut-off 시간은 분말의 부분적 용해로 인하여 void와 같은 결함을 발생시킬 수 있다. 높이 제어시스템을 사용하여도 공정변수를 가능한 한 최적화 시키는 것이 재료 특성을 위하여 바람직함을 알 수 있다.

Table 1 Process Conditions

Material	H13
Laser Power	660 W
Layer Thickness	0.254 mm
Powder Flow Rate	5.5 g/min
Traverse Speed	19.05 mm/sec
Path Overlap	50%
Delivery Gas Rate	10 ft ³ /hr
Shielding Gas Rate	20ft ³ /hr

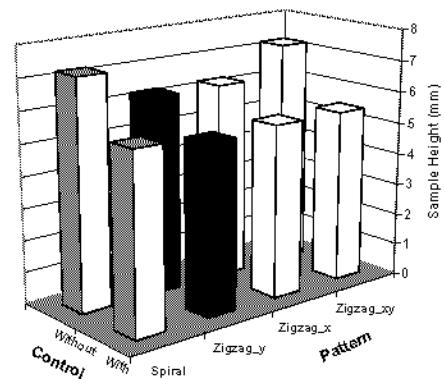


Fig. 3 Comparison of Controlled and Uncontrolled Processes

4. 다 공정변수에 의한 적층특성

적층 높이에 대한 LADMD 시스템의 공정 변수들의 영향을 분석하기 위하여 4개의 공정변수에 대한 실험을 수행하였다. Table 2와 같이 목표 적층 높이, 분말 공급률, 레이저 파워, 적층 속도의 4가지 요소에 대하여 3개의 수준을 선택하였다. 실험 데이터는 fractional factorial design 방법에 의하여 얻었다. 시편의 크기는 20.32mm, 20.32mm, 5.08mm 이며 delivery gas 공급률, shield gas 공급률, 경로 중첩률, 적층경로 형상은 각각 7.08 liter/min, 9.44 liter/min, 24%, 지그재그 형태 이다.

Table 2 Test Plan with 4 Factors and 3 Levels

Factors	Units	Levels		
		L	M	H
Layer Thickness	mm	0.254	0.381	0.508
Powder Flow Rate	g/mm	5	8	11
Laser Power	W	1000	1200	1400
Traverse Speed	mm/s	10.58	14.82	19.05

다수의 실험 결과 높이제어 시스템을 사용하여도 실제 적층 높이는 목표치와 다를 수 있음을 알 수 있었다. 27개의 시편 중 12개만 목표치와 일치함을 보여 주었다. 통계 프로그램 SAS의 ANOVA procedure를 사용하여 적층 높이에 영향이 큰 인자를 분석하였다. 분말재료 공급률과 목표 적층 높이가 0.05의 p-value 조건에서 인정할 만한 영향을 가진 인자였다. 특별히 재료 공급률의 영향은 지배적이다. Duncan의 multiple range test에서는 0.254mm와 0.508mm 적층높이의 목표치는 완전히 다른 적층 높이 오차를 가짐을 보여 주었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 높이 오차는 적층 목표치가 작을수록 바람직하다. 한편 분말 재료 공급률은 8g/min 및 11g/min에서 통계적으로 인정할 수 없는 오차크기의 차이를 보이고 있다. 또한 Fig. 5와 같이 높은 재료 공급률이 향상된 적층높이 정확도를 보여준다.

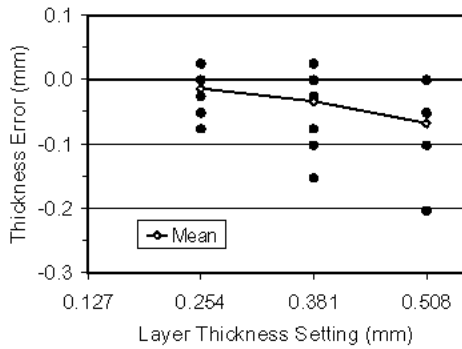


Fig. 4 Influence of Layer Thickness Setting on Thickness Error

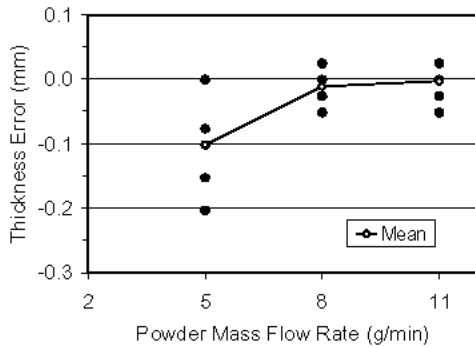


Fig. 5 Influence of Powder Mass Flow Rate on Thickness Error

5. 결론

LADMD 기술을 이용한 금속 제품의 성형공정은 이미 그 가능성을 입증 하였지만 성형된 제품의 품

질은 아직 연구하여야 할 여지가 많다. 사용자의 입장에서 주요 관심사 중의 하나가 형상의 완전성(integrity)이다. 본 연구에서는 적층 높이의 제어 시스템을 이용하여 적층 높이의 정확도를 높이고 공정 변수의 영향을 분석하여 공구강 재료를 이용한 LADMD 공정의 기하학적 특성을 보여 주었다.

LADMD 공정은 기술적으로 절삭가공에서 불가능한 내부형상 설계의 최적화에 따른 제품의 기능 향상, 열 영향의 저감 및 접합력의 증대에 의한 재료 적 성질 향상 등을 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 여러 가지 적용 분야를 갖고 있으며 기계/전자/자동차 금형산업, 항공/우주 부품산업, 의료제품 산업 등에서 생산성의 향상, 재고품 처리, 환경친화적인 생산 등을 실현할 수 있다.

후기

실험 데이터를 사용할 수 있도록 허락하여 주신 UMR의 Laser Aided Intelligent Manufacturing Lab.에 감사드립니다.

참고문헌

1. Mazumder J., et. al., "Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials", part 15, MPIF, pp. 107-118, 1996
2. Bunnell D.E., et. al., "Solid Freeform Fabrication of Powders Using Laser Processing", Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, Part 15, MPIF, pp. 93-106, 1996.
3. Keicher D.M., et. al., "Free Form Fabrication Using the Laser Engineered Net Shaping (LENS™) Process," Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, Part 15, MPIF, pp119-127, 1996.
4. Lewis G.K., et. al., "Direct Light Fabrication," Proc. of ICALEO, LIA, Orlando, FL, p17, 1994.
5. Kreutz E.W., et. al., "Rapid Prototyping with CO₂ Laser Radiation," Applied Surface Science, 86, pp310-316, 1995.
6. Koch J.L. and J. Mazumder, "Rapid Prototyping by Laser Cladding," Proc. of ICALEO, LIA, Orlando, FL, Vol. 77, pp. 556-565, 1993.
7. Mazumder J., A. Schifferer, J. Choi, "Direct Materials Deposition: Designed Macro and Microstructure," Materials Research Innovations, 3(3), pp. 118-131, 1999.