

재자원화기술

## 재제조를 위한 레이저 직접 금속조형공정의 생산성 및 환경영향의 평가

장윤상\*

수원대학교 기계공학과  
445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산2-2  
(2007년 8월 23일 접수; 2007년 9월 10일 채택)

### Evaluation of the Productivity and Environmental Effects of Laser Aided Direct Metal Deposition Process for Remanufacturing

Yoonsang Chang\*

Department of Mechanical Engineering, University of Suwon  
San 2-2 Wau-ri, Bongdam-eup, Hwasung City, Kyunggi-do 445-743, Korea  
(Received for review August 23, 2007; Revision accepted September 10, 2007)

#### 요 약

본 연구에서는 금형의 재활용을 촉진하기 위하여 성형공정을 소재의 제거공정과 부가공정으로 보고, 신속 성형 방법인 레이저 직접 금속조형(LADMD) 공정의 환경영향 및 생산성을 제거공정인 밀링가공과 비교하여 평가하였다. 두 가지 형상의 금형에 대하여 CAM 프로그램인 PowerMill을 이용하여 가공경로를 생성하고 가공시간을 예측하여 생산성을 알아본 결과 LADMD 공정의 생산성은 가공량이 유사한 경우에도 밀링공정에 비하여 월등히 우수한 결과를 보였다. 환경 친화적 가공방법으로 알려져 있는 LADMD 공정을 에너지의 사용에 초점을 맞추어 평가한 결과로는 레이저의 발생을 위하여 사용하는 전기에너지의 양이 전통적인 밀링가공법에 비하여 월등하게 많은 점이 앞으로 개선하여야 할 문제임을 알 수 있었다. 여러 가지 장점을 갖고 있는 LADMD 공정은 생산성 및 경제성이 우수하고 자원의 낭비를 줄일 수 있으며 친환경적인 가공법으로 재제조 분야에서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

**주제어** : 신속 성형, 레이저 직접 금속조형, 밀링공정, 환경영향, 생산성, 재제조

**Abstract** - In this study, the productivity and environmental effects of laser aided direct metal deposition (LADMD) process which is one of promising rapid manufacturing technology is evaluated. The production time predicted using PowerMill shows that the productivity of LADMD is superior to that of conventional milling process. Though LADMD is known as an environment-friendly technology, it has a disadvantage to utilize much energy to generate laser beam. Considering both productivity and environmental effects, LADMD is expected to be widely used in remanufacturing industry.

**Key words** : Rapid manufacturing, Laser-aided direct metal deposition, Milling process, Environmental effect, Productivity, Remanufacturing

#### 1. 서 론

금속이나 플라스틱의 성형과정은 금형을 이용한 주조, 사출, 단조, 스탬핑(Stamping) 등 여러 제조 공정을 포함하고 있다.

금형을 사용하는 성형공정은 동일한 형상과 우수한 품질의 제품을 저 비용으로 단 시간에 대량 제작할 수 있는 장점이 있다. 그러나 금형의 제작은 높은 치수 정밀도와 표면 조도가 요구되기 때문에 주로 절삭공정에 의하여 이루어지며 고 비용에

\* E-mail : yschang@suwon.ac.kr

전문기술이 필요하고 시간이 많이 걸리는 작업이다. 금형 사용의 경제성에 대한 또 하나의 문제점은 고온 고압의 열악한 사용 환경에 의하여 파괴된 금형이나 제품의 설계변경으로 형상이 일부 수정되어 사용할 수 없는 금형의 처리이다. 사용이 불가능하게 된 금형의 수정이나 보수 내용이 소재의 제거공정이란 절삭공정으로 가능하나 소재의 부가(build-up)공정이라면 적용이 어려운 용접 외에는 특별한 방법이 없다. 따라서 구형의 금형은 고가임에도 불구하고 폐기 처리할 수밖에 없다. 이러한 기술적, 경제적 문제점의 해결 방법으로 근래에 제안된 성형공정이 신속성형(Rapid Manufacturing) 기술이다.

신속시작(RP, Rapid Prototyping)기술에 기초한 신속성형 기술은 SLS, SDM, Droplet 등 여러 가지가 있으나 그중에서 가장 주목받고 있는 방법은 레이저를 이용한 직접 금속조형(LADMD, Laser Aided Direct Metal Deposition)이다[1]. LADMD는 3차원의 CAD 모델로부터 금속 제품을 직접 성형하는 레이저 클래딩(Laser Cladding) 기술이다[2]. LENS, DLF, CMB, 또는 DMD로 불리는 이 기술은 기본적으로 모두 같은 개념으로 레이저 클래딩 기술을 기본으로 하고 있다 [3-7]. 기술적인 차이가 거의 없는 이러한 몇 가지 공정들은 지난 수년간 거의 동시에 여러 연구기관에서 개발되어 각각의 특정 분야에서 상용화 되었다. LENS 시스템은 Nd:YAG 레이저를 이용하여 Sandia National Laboratory에서 개발되어 Optomec사에 의하여 상용화되었다. DLF와 CMB는 각각 Los Alamos National Laboratory와 독일에서 개발된 공정의 이름이다. DMD는 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 미시간대학에서 개발되어 POM사에 의하여 상용화되었다. 또한 MTS Systems의 자회사로 Johns Hopkins 대학과 펜실바니아 주립대학의 연구를 바탕으로 설립된 AeroMet사는 이 공정에 의해서 항공우주 분야를 대상으로 타이타늄 제품을 제조하고 있다.

LADMD 기술의 장점은 높은 생산성과 기존의 기술을 대체하거나 향상시킬 수 있는 다양한 적용 분야 및 재료학적으로 우수한 제품의 생산에 있다. 생산성을 살펴보면 LADMD 기술은 다품종소량생산이 적용되는 제조 분야에 적합하며 절삭가공과 비교하여 짧은 시간, 저 비용으로 다양한 기능성 제품을 만들 수 있다. 절삭공정과 유사한 성형 경로를 가지고 있으나 소재 제거가 아닌 부가 형태로 성형함으로써 소재 제거량이 많은 형상의 생산 시간을 줄이고 소재의 낭비를 없앨 수 있다. 또한 청정 생산의 개념에서 생산성의 저하 없이, 폐 절삭유나 칩의 발생이 없는 환경 친화적인 생산이 가능하다.

대표적인 적용 분야는 RP개념에서 출발한 빠른 시간에 제작 가능한 시작품의 제작과 양산을 위한 금형의 가공을 들 수 있다. 금형의 경우 위에서 언급한 바와 같이 설계변경으로 인하여 사용할 수 없는 구형 제품의 재제조에 의하여 재사용이 가능하여 제조업체의 비용절감에 기여할 수 있다. 또한 내부형상을 갖고 있는 제품을 성형할 수 있기 때문에 금형의 수명을 연장시키기 위한 냉각수로(Cooling Channel)를 금형의 형상에 따라 적절하게 성형하거나 열 전도성이 좋은 재료를 삽입하여 금형의 생산성을 높일 수 있다.

또 다른 적용 분야로는 FGM(Functional Graded Material) 제품의 제조를 들 수 있다[1,2]. FGM은 성질이 다른 두개의 양

극 층 사이에서 성분이 점차적으로 변하는 재료로서, 금속과 세라믹 같은 이질성 재료의 접합이나 열팽창계수가 전혀 다른 물질의 코팅 등에 사용된다. 나아가 단일 제품 내에 여러 가지의 재료를 다양하게 조합함으로써 열팽창계수, 탄성계수, 포아손비 등 성질이 부분별로 다른 제품을 성형할 수 있다. 따라서 금형의 경우 열전도성이 좋은 구리를 내부 재료로 사용하고 표면에 경도가 높은 공구강을 이용하여 열적성능이 우수한 공구를 제작할 수 있으며 내부는 연성, 외부는 취성을 갖는 제품을 생산하거나, 재료표면의 내마모성이나 내열성을 주기위한 표면처리 공정을 생략하는 것도 가능할 수 있다.

LADMD 기술은 비교적 최근에 개발되었기 때문에 실제 적용을 위해서는 아직도 많은 연구가 필요하다. 매달린 형상(overhang) 등 성형의 완전성(Integrity)나 적층된 소재의 재료적 결함, 열 공정에 의한 잔류응력에 의한 결함 등이 대표적인 기술적 문제점이다. 본 논문에서는 금형의 성형공정을 재제조의 측면에서 소재의 제거공정과 부가공정으로 보고 부가공정인 LADMD 공정을 대표적인 소재의 제거공정인 밀링공정과 비교하여 환경영향 및 생산성을 평가하였다. 두 가지 형상의 금형에 대하여 CAM 프로그램인 PowerMill을 이용하여 가공 경로를 생성하고 가공시간을 예측하여 생산성을 알아보았다. 환경친화적 가공방법인 LADMD의 환경영향은 레이저 발생에 필요한 고 에너지의 사용에 초점을 맞추어 평가하였다. 마지막으로 LADMD 공정과 밀링공정의 경제성을 가공시간과 에너지 사용을 기초로 분석하여 LADMD 공정의 우수성을 보여주었다.

## 2. 레이저 직접 금속조형 시스템

LADMD 공정에 사용되는 시스템은 Figure 1과 같이 기본적으로 레이저 시스템과 분말재료 공급장치로 이루어진 레이저 클래딩 장치에, 공정의 자동화를 위한 CAD/CAM 및 수치제어(CNC) 장치, 그리고 성능향상을 위한 피드백 위치제어 장치로 구성된다 [8].

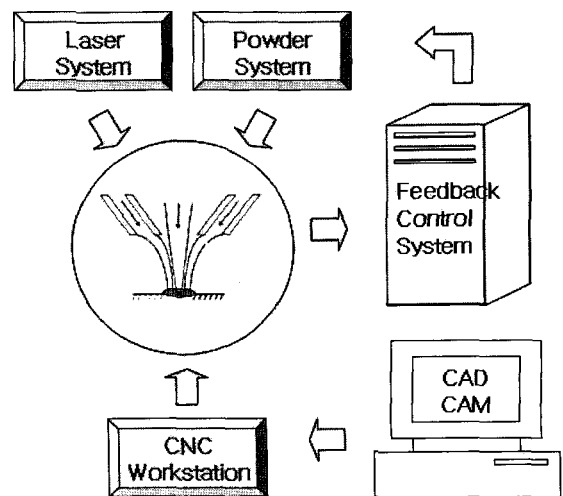


Figure 1. Laser aided direct deposition system.

2.1. 레이저 클래딩 시스템

LADMD 시스템의 주 기술인 레이저 클래딩은 오랫동안 표면처리 분야에서 각광받는 기술로 알려져 왔다. 레이저 클래딩은 Figure 2와 같이 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.

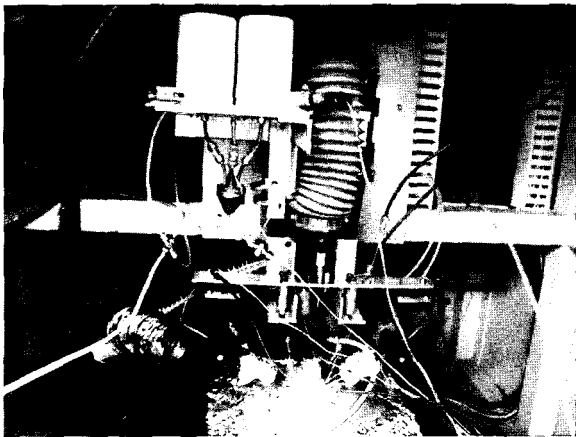


Figure 2. Laser cladding system.

레이저 클래딩은 기존의 플라즈마 용사, 아크용접 등의 기술에 비하여 여러 가지 우수한 장점을 가지고 있다. 우선 모재와 클래딩 층이 완전한 용융접합(Fusion Bonding)을 이루기 때문에 모재와 클래딩 층 사이의 접합이 매우 우수하다. 또한 모재에 적은 에너지가 흡수되므로 모재의 용융을 최소화(Reduction of Dilution) 할 수 있다. 따라서 기존의 방법에 비해 열 뒤틀림이 적고, 클래딩 층의 기공률을 낮추거나 없앨 수 있으며, 클래딩 층을 정밀하게 원하는 위치에 입힐 수 있어 후 가공비용을 줄일 수 있다. 대기 중에서 한 번의 공정으로 급속 응고조직이 형성되어 0.3~3mm 두께의 클래딩 층을 얻을 수 있고, 비교적 매끈한 표면을 얻을 수 있다. 또한 자동화가 용이하다는 장점도 갖추고 있다.

2.2. CAD/CAM 및 수치제어 시스템

기존의 RP장비들은 STL 형식의 설계정보에 의하여 운용되고 있다. STL 형식은 SLA를 처음 상업화한 3D Systems의 표준체계를 그대로 사용하며 비롯된 것으로 설계된 제품형상의 기하학적 정보를 평면 삼각형들의 근사화된 집합으로 표현한 것으로 모델이란 용어로 쓰기에는 부적당하다. STL 형식은 자료구조가 간단하고 2차원 단면자료로 전환하기가 용이하나 근사화된 정보에 의하여 정확도, 완성도, 중복성 등에서 심각한 문제점이 있다. 따라서 LADMD 공정에서는 CAD 모델로부터 CAM 시스템에 의하여 직접 생성한 NC 코드에 의하여 CNC workstation을 작동한다. CAM 시스템은 CAD 파일 또

는 STL 파일을 받아서 적층 대상을 일정한 두께로 박편화(Slicing)한다. 각각의 박편화된 층(Layer)에 대하여 공구경로가 형성되고 그 밖의 부가정보가 더해져서 workstation을 구동하기 위한 NC 코드로 만들어진다.

2.3. 피이드백 위치제어 시스템

클래딩 공정의 기술적인 문제점 중 하나는 얼마나 정확하게 기하학적 형상을 만드는가에 있다. 이상적인 경우는 표면의 평

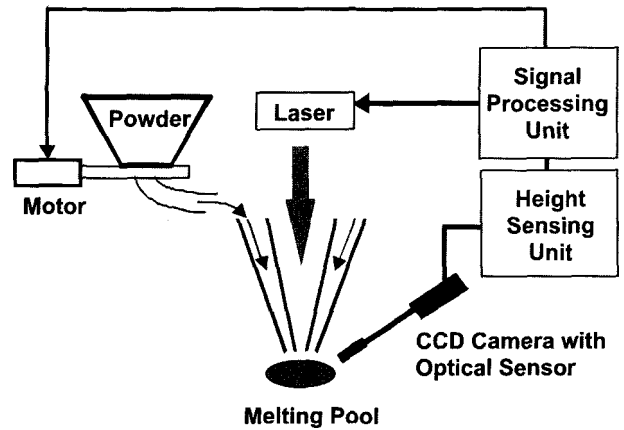


Figure 3. Feedback control system.

평도가 일정하여야 하나, 분말재료의 공급이 정확하게 일정하지 않고 레이저 출력도 변동이 있기 때문에 실제로는 그렇지 못하다. 적층 높이가 일정치 않으면 층간 경계사이에서 공극(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. 적층 높이 등 기하학적 완성도를 얻기 위해서는 레이저 출력, 레이저 빔 지름, 재료 공급율, 가공속도, 경로중복 등 5가지 인자를 제어하는 것이 효과적이며, 제안된 방법 중 하나는 레이저의 비에너지(Specific Energy)와 분말재료 공급량을 피이드백(Feedback)으로 제어하는 것이다[1]. 피이드백 제어 시스템의 기본 기능은 Figure 3과 같이 높이 감지부와 신호처리부로 구성된 시스템에 의하여 공정상 발생하는 적층높이를 감지 대상으로 하여 에너지와 재료를 조절하여 최대 적층 높이를 직접 제한한다.

3. 금형성형공정의 생산성 평가

현재 금형의 제작 공정에 사용되는 가공 방법은 소재의 제거공정(Metal Removal Process)으로, 주로 사용되는 가공법에는 공구를 이용한 절삭가공과 전극을 이용한 방전가공이 있다. 방전가공은 절삭가공에 비하여 정밀도가 높은 고 품질의 금형을 제작할 수 있으나 고비용, 저효율적인 방법이다. 환경

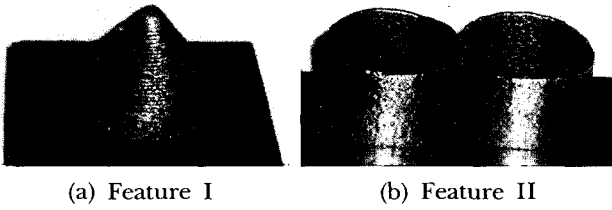


Figure 4. Die features for evaluation.

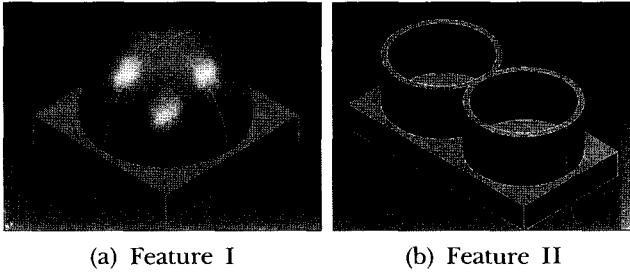


Figure 5. Geometric models.

적으로 평가하면 대용량의 전기를 사용하고, 유해물질인 유전체(Dielectrics)를 발생시키며, 많은 양의 그래파이트(Graphite)나 구리 성분을 전극의 마모를 통하여 발생시킨다. 따라서 본 연구에서는 절삭가공 중에서 많이 사용하는 밀링가공을 소재의 제거공정으로 사용한다. 금형 재료로는 이미 LADMD의 재료 특성 연구에 많이 사용되었던 H13 공구강을 사용한다.

밀링 공정과 LADMD 공정의 환경영향 및 생산성을 종합적으로 평가하기 위하여 두 가지 경우의 금형가공 공정을 분석하였다. 대상 형상은 Figure 4와 같이 이미 LADMD 공정의 특성을 평가하기 위하여 제작된 형상이다[9]. 형상 I은 반지름 13mm의 반구형상으로 일반적인 가공에서 많이 나타나는 형상이다. 형상 II는 내경 18mm, 높이 10mm, 폭 1mm의 8자형상으로 소재 제거량이 커서 밀링가공보다 LADMD 공정으로 제작하기 적합하다고 여겨지는 형상으로 설정하였다. Figure 4의 형상을 CAM 프로그램인 PowerMILL을 이용하여 Figure 5와 같이 모델링하였다. 밀링가공을 위한 모재의 크기는 소재 제거량이 가능한 한 적은 경우로 하기 위하여 형상 I의 경우 28 X 28 mm 면적에 가공높이 13mm, 형상 II의 경우 41 X 22 mm 면적에 가공높이 10mm로 설정하였다.

가공조건은 Table 1과 같다. 밀링공정의 경우  $\phi 4$  2날의 초경 엔드밀을 공구로 사용하였을 때의 가공조건을 Machining Data Handbook [10]의 엔드밀링 표준 데이터로부터 설정하였다. LADMD 공정의 가공조건은 기존에 실행한 특성 실험으로부터 발췌하여 절삭가공의 조건으로 대체하였다[11]. 즉, LADMD공정의 가공조건에서 레이저 빔의 직경이 1mm이므로 이에 해당되는 공구 직경을 1mm로 설정하였고, 적층속도가 19mm/sec이고 적층높이가 0.5mm 이므로 이를 각각 이송속도 1000mm/min와 절삭깊이 0.5mm로 적용하여 가공시간을 산출하였다. 형상 I의 경우 LADMD 가공에서 적층경로는

Table 1. Milling and deposition conditions for PowerMill

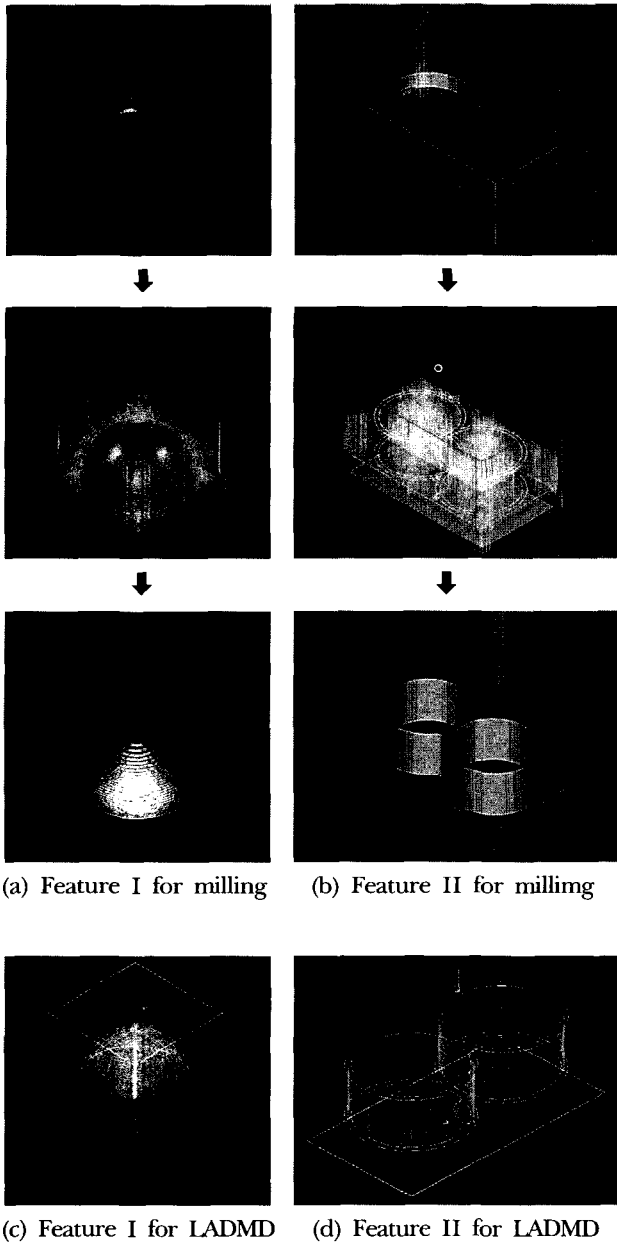
		Milling	LADMD
Tool	Diameter(mm)	4	1
	No. of Teeth	2	
Machining Parameters	Type	Down	
	Speed (rpm)	6000	
	Feed (mm/min)	300	1000
	Radial Depth (mm)	1	1
	Axial Depth (mm)	0.5	0.5

contour 방식을 사용하였기 때문에 절삭공구 경로도 동일하게 contour 방식을 적용하였다. LADMD 공정 및 생산성과는 관계없는 밀링방식과 주축속도는 밀링공정과 같이 하향밀링 및 6000rpm의 값을 대입하였다.

Table 1과 같은 가공조건에서 PowerMill을 이용하여 모의가공을 실행하였다. LADMD공정의 적층경로 생성을 위한 프로그램은 아직 개발되지 않았으나 레이저빔의 운동이 밀링공구의 이송운동과 같으며 적층경로도 밀링공정의 소재 제거경로와 같고 방향만 반대이기 때문에 하나의 프로그램을 이용하여 생산성의 비교 분석이 가능하다. Figure 6은 생성한 밀링공정과 LADMD 공정의 공구 경로이다. 이해를 돕기 위하여 밀링공정인 Figure 6 (a), (b)에는 가공 전 소재의 형상과 가공 후 제품의 형상을 함께 표현하였다.

PowerMill을 이용하여 밀링공정과 LADMD 공정의 생산성을 비교한 결과는 Table 2와 같다. 형상 I의 경우 밀링공정에서 제거하거나 LADMD 공정에서 적층한 부피는 5,593 mm<sup>3</sup>와 4,599 mm<sup>3</sup>으로 거의 같다. 그러나 모의 가공에서 생성한 공구경로에 따른 가공시간은 51분 58초와 10분 25초로 약 5배의 차이가 있다. 이것은 15,592 mm와 10,425 mm의 가공경로 길이의 차이와, 300 mm/min와 1,000 mm/min의 이송속도의 차이에 의하여 발생한 결과이다. 따라서 절삭가공이 많이 적용되는 일반적인 금형가공 형상에서도 LADMD 공정의 생산성이 밀링공정보다 우수함을 알 수 있다. 이 차이는 LADMD 공정에 적합한 형상 II에서 더 커짐을 알 수 있다. 약 7배의 가공 부피의 차이는 약 3.6배의 가공경로 차이를 만들고 54분 26초와 4분 34초라는 약 12배의 가공시간에 따른 생산성 차이를 초래한다.

두 가공방법의 생산성을 결정하는 기본 요소는 가공량이다. 밀링가공에 의하여 제거하는 소재량과 LADMD 공정에 의하여 부가되는 소재량의 크기에 따라 일차적으로 생산성을 예측할 수 있다. 두 번째 요소는 소재 제거율(적층율)이다. 위의 예에서는 단위시간 당 소재 제거(적층) 면적이 0.5 mm<sup>2</sup>으로 같기 때문에 공구의 이송속도와 레이저빔의 적층속도에 따라 제거율(적층율)이 결정된다. 일반적으로 레이저빔의 적층속도가 더 빠르기 때문에 LADMD 공정이 부가되는 소재량이 많더라도 생산성이 높은 경우가 많다. 정확한 가공시간은 가공길이에



(a) Feature I for milling (b) Feature II for milling  
(c) Feature I for LADMD (d) Feature II for LADMD

**Figure 6. Tool path generation for CNC milling and LADMD.**

따라 결정되는데 가공량을 알더라도 가공하는 제품의 형상에 따라 가공길이도 달라지기 때문에 가공시간의 크기는 예측이 어렵고 CAM 프로그램에 의존할 수밖에 없다.

**4. 환경영향 및 경제성 평가**

가공공정의 환경영향을 평가하기 위해서는 공정에 투입되고 배출되는 물질/에너지 수치가 필요하다. 절삭가공에는 공구, 절삭유제 등의 물질과 에너지가 투입되고 폐 공구, 폐 절삭유제 등의 물질과 대기 방출 가스가 배출된다. 절삭가공에서 배출되는 폐공구, 폐 절삭유는 재활용이 가능하며 주 환경영향

**Table 2. Productivity of milling and LADMD**

	Feature I		Feature II	
	Milling	LADMD	Milling	LADMD
Volume (mm <sup>3</sup> )	5,593	4,599	7,868	1,152
Mass (g)	43.9	36.1	61.8	9.0
Path Length (mm)	15,592	10,425	16,332	4,582
Time (min:sec)	51:58	10:25	54:26	4:34

**Table 3. Energy consumption and emissions of air pollutants**

Base Time		Material Production		Die Production		
		Plate	Powder	CNC Milling		LADMD
				Milling	Fluid	
Energy (MJ/kg)	Electric	20.41	15.9	24		7708
	Other	5.15	1.72			
Airborne Emissions (g/kg)	CO <sub>2</sub>	2976	2710	6072	9.72	1,950,124
	SO <sub>x</sub>	9.87	7.53	33.6	0.051	10,791.2
	NO <sub>x</sub>	4.04	3.89	9.6	0.057	3083.2
	CO	1.29	0.94		0.015	
	PM	2.73	2.41			

요소는 절삭유제의 사용 중 칩과 제품에 묻어나가고 대기 중으로 발산되는 손실량에 기인한다. LADMD 공정에서는 전기 에너지와 냉각수 외에 사용하는 물질이 거의 없으며 분말재료 운반 가스와 클래딩 중 반응에 의하여 발생하는 가스 성분들을 방출한다. 절삭가공에서 칩과 제품에 묻어나가는 절삭유제의 양은 가공 조건에 따라 달라지며 세정 등에 의해서 후처리가 가능하기 때문에 본 연구에서는 LADMD 공정과 동등한 조건으로 사용 에너지와 대기 방출 가스를 환경영향의 요소로 한정하였다. 현재 절삭유제의 대기방출량 자료는 정리된 것이 없어서 유사한 윤활유의 방출량 자료를 참조하였다 [12]. 밀링과 LADMD 공정의 사용 에너지와 대기 방출 가스의 자료는 참고문헌 [13]의 미국의 경우를 인용하여 두 자료를 Table 3과 같이 정리하였다.

금형성형에 사용되는 재료는 절삭가공의 경우 판재(Plate) 형태가 필요하고 LADMD에서는 분말(Powder) 형태가 필요하다. 따라서 재료의 생산과정에 따라서 잠재적인 환경영향의 차이가 발생하므로 Table 3에서와 같이 재료생산 단계를 금형 생산 단계와 구별하여 평가하였다. H13 공구강의 판재를 생산하는 경우 약 20 MJ/kg의 전기 에너지가 필요하고 그 밖에 5 MJ/kg의 오일, 천연가스 등의 에너지가 필요하다. 반면에 LADMD 공정에 사용되는 분말 형태의 재료 생산에는 약 20%의 에너지가 적게 사용된다. CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, 미세 입자 같은 대기 방출 물질의 경우도 분말재료의 생산에서 3%에서 27%까지 적게 방출된다. 이 결과는 LADMD 공정이 절삭공정에 비하여 환경영향에 있어서 잠재적인 장점을 갖고 있

Table 4. Economics of milling and LADMD

		Feature I		Feature II	
		Milling	LADMD	Milling	LADMD
Electric	Mass (g)	43.9	36.1	61.8	9.0
	Qn'ty (kJ)	1,054	278,258	1,482	69,680
	Qn'ty (kWh)	0.29	77.29	0.41	19.36
	Cost (₩)	13	3478	18	871
Labor	Time (min)	51.97	10.42	54.43	4.57
	Cost (₩)	10,809	2,167	11,321	951
Total Cost (₩)		10,822	5,645	11,339	1,822

다고 보여준다.

금형의 가공에 사용되는 밀링가공은 많은 양의 소재를 제거하기 위한 황삭과 정밀도를 위한 마지막 정삭으로 나눌 수 있고 사용되는 에너지양도 차이가 있다. LADMD 공정에서도 밀링가공과 같이 적층 후 마지막 형상의 완성을 위하여 정삭이 필요하므로 밀링공정의 황삭의 경우를 에너지 소비 및 대기방출 가스 자료로 사용하였다. Table 3에서 보듯이 절삭유제에 의한 대기 방출 가스량은 밀링공정 중에 사용된 전기에너지에 의한 대기 방출 가스량에 비교하여 상당히 작다. 따라서 본 연구에서는 절삭유제의 대기 환경영향을 무시하기로 하였다. Table 3에서 LADMD 공정의 에너지 소비 및 대기방출 가스 자료를 보면 대부분의 환경영향이 전기 소비량에서 발생함을 알 수 있다. 밀봉과 분말 운반용으로 사용되는 Ar, He 등의 가스는 환경적으로 큰 문제가 되지 않는다. 금속 분말재료는 작업자의 건강에 영향을 미칠 수 있기 때문에 제품의 추출과정에서 주의와 철저한 관리가 필요하다. 작업 중의 미세입자(PM)은 HEPA 필터에 의해서 걸러져 미국 직업안전 건강 기준의 기준치 이하로 방출된다 [13]. 밀링공정과 LADMD 공정의 에너지 사용량을 비교해보면 LADMD 공정이 약 320배로 압도적으로 크다. 에너지 사용량으로만 단순 비교하였을 때 LADMD에 의해서 부가되는 양보다 밀링가공에 의해서 제거되는 양이 320배 이상이었을 때 LADMD 가공이 경제성이 있으며 환경영향도 작아진다.

경제성 비교를 위하여 전기사용 요금과 생산성에 가장 큰 영향을 받는 임금을 두 형상에 적용하여 가공비용을 비교하였다. 한국전력공사의 산업용 전력요금 45 원/kWh를 적용하였을 때 Table 4에서와 같이 LADMD 가공의 전력요금은 밀링가공에 비하여 각각 268배와 48배가 발생한다. 그러나 월 200 만원을 받는 기술자의 임금을 고려하였을 때 총 가공비용은 형상 I의 경우 5,645원, 형상 II의 경우 1,822원으로 밀링가공 비용에 비교하여 각각 0.52, 0.16의 수준으로 적게 든다. 이 차이는 밀링공정에 절삭유제나 공구비를 포함하였을 경우 밀봉이나 분말운반 가스 외에 특별한 소모품이 없는 LADMD 공정에 비하여 더 커질 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

신속성형 방법으로 최근에 개발된 LADMD 기술은 기계/전자/자동차 금형산업, 항공/우주 부품산업, 의료제품 산업 등 여러 가지 적용 분야를 갖고 있으며 생산성의 향상, 재고품 처리, 환경 친화적인 생산 등을 실현할 수 있다. 본 연구에서는 금형의 성형공정을 재제조의 측면에서 소재의 제거공정과 부가공정으로 보고 부가공정인 LADMD 방법의 환경영향 및 생산성을 제거공정인 밀링가공과 비교하여 평가하였다. 두 가지 경우의 형상에 적용한 결과를 보면 최종형상의 완성을 위한 밀링가공량이 많을수록 LADMD 공정의 우수함을 볼 수 있었다.

LADMD 공정의 생산성은 가공량이 유사한 경우에도 생산성을 결정하는 가공길이 및 가공속도에 따라 밀링공정에 비하여 월등히 우수한 결과를 보였다. LADMD 공정을 포함하여 레이저를 이용한 신속 성형기술은 분말 재료의 용해결합 과정을 통하여 재료의 강도나 공극 등의 내부 결함이 발생할 수 있으나 가공 조건의 최적화를 통하여 이러한 문제점이 해결될 수 있음이 참고문헌[8, 11]을 통하여 이미 증명되었으므로 생산성이 우수한 LADMD 공정을 도입하여도 기계적 특성에서 문제가 발생하지 않는다.

LADMD 공정은 또한 전기에너지와 냉각수 외에 사용하는 물질이 거의 없으며 방출하는 가스 성분 들은 무해하여 친환경적인 가공방법이다. 레이저의 발생을 위하여 사용하는 전기 에너지의 양이 전통적인 밀링가공법에 비하여 월등하게 많은 점이 앞으로 개선하여야 할 문제이다. 여러 가지 장점을 갖고 있는 LADMD 공정은 생산성 및 경제성이 우수하고 자원의 낭비를 줄일 수 있으며 친환경적인 가공법으로 재제조 분야에서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 감 사

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-311-D00316).

## 참고문헌

1. Mazumder, J., Schifferer, A., and Choi, J., "Direct Materials Deposition: Designed Macro and Microstructure," *Mater Res Innov*, 3(3), 118-131, (1999).
2. Mazumder, J. et al. "Rapid Manufacturing by Laser Aided Direct Deposition of Metals," *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, part 15, MPIF, 107-118, (1996).
3. Bunnell, D. E., Bourell, D.L. and Marcus, H.L., "Solid Freeform Fabrication of Powders Using Laser Processing," *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, Part 15, MPIF, 93-106, (1996).
4. 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, 119-127, (1996).
5. Lewis, G. K. et al. "Direct Light Fabrication," *Proc ICALEO*, LIA, Orlando, FL, **78**, 556-565, (1994).
  6. Kreuz, E. W. et al. "Rapid Prototyping with CO<sub>2</sub> Laser Radiation," *Appl Surf Sci*, **86**, 310-316, (1995).
  7. Koch, J. L. and Mazumder, J., "Rapid Prototyping by Laser Cladding," *Proc ICALEO*, LIA, Orlando, FL, **77**, 556-565, (1993).
  8. Choi, J. and Chang, Y., "Analysis of Laser Control Effects for Direct Metal Deposition Process", *J Mech Sci Technol*, **20**(10), 1680-1690, (2006).
  9. Choi, J. and Mazumder J., "Rapid Manufacturing by Laser Aided Direct Metal Deposition Process: Issues and Examples," *Proc DETC*, Pittsburgh, PA, 1-6, (2001).
  10. Machinability Data Center, Machining Data Handbook, Institute of Advanced Manufacturing Sciences, Inc., 1980.
  11. Choi, J. and Chang, Y., "Characteristics of Laser Aided Metal/Material Deposition Process for Tool Steel," *Int J Mach Tool Manu*, **45**(4-5), 597-607, (2005).
  12. Eco-Frontier, Standardization and Development of LCI Module, Ministry of Environment, Korea, 2003.
  13. Morrow, W. et. al., "Environmental Aspects of Laser-Based and Conventional Tool And Die Manufacturing," *J Clean Prod*, **15**, 932-933, (2007).