'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 원자력 주요 부품재료에의 레이저직접조형기술 적용

# Application of a Laser-aided Direct Metal Manufacturing Technique to Key Parts Materials in NPPs

서정훈, 김정수

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

## 요 약

3차원 형태의 CAD/CAM 설계 데이터로부터 바로 부품이나 제품이 요구하는 기능성 소재(금속, 합금, 세라믹 등)를 이용하여 3차원 형태의 실제 부품이나 제품 또는 제품생산에 필요한 몰드나 금형 등을 여러 중간 제조단계를 거치지 않고 빠른 시일 내에 레이저 빔으로 직접 제작할 수 있는 새로운 조형기술(near-net shaping technology)인 레이저직접조형기술은 자동차, 항공기, 공작기계 등 일반 산업뿐만 아니라 국방 및 원자력 산업에 사용될 수 있다. 이 기술에 대한 기본기술 및 특징에 대하여 기술하였으며, 원자력 주요 부품재료에 적용될 수 있는 가능성을 제안하였다.

## Abstract

Laser-aided direct metal manufacturing technology is one that combines laser cladding technologies with the advanced methodologies of rapid tooling to manufacture complex 3-dimensional geometries directly in functional metals, the design data of which are supplied by CAD/CAM. This technology does not need intermediate process stages during manufacturing the 3-D parts. So the time, man power and money for manufacturing the parts can be reduced tremendously comparing to the existing conventional methods. In this paper, the technology and its

characteristics are described and it is shown that this technology can be used for the key parts in nuclear power plants.

## 1. 서론

산업의 급속한 발달에 따른 소비자 욕구의 다양화로 생산되는 산업제품이 소량 다양화되고 신제품의 수명 사이클(life-cycle)이 단축됨에 따라 다양한 제품의 신속하고 경제적인 제조가 요구되고 있다. 특히 전자산업의 발달에 의한 정보통신 기술의 고도화로 정보가 거의 실시간으로 이루어짐에 따라 생산되는 신 산업제품에 대한 정보가 즉시 전 세계의 국가로 전달되어 소비자의 욕구를 충동질하고 있기 때문에 그에 따른 산업제품의 신속한 개발과 생산이 이루어지지 않으면 이미 새로운 제품의 출현으로 산업경쟁에서 낙오하고 만다. 또한 과학의 발달로 제품의 구조가 복잡하고 부품의 개수가 증가하게 되어 한 부품에 대한 설계나 중간 공정에서의 오류로 제품개발이 지연되는 경우가 많았으며, 기존의 방법에 의한 신제품 개발에서는 설계로부터 생산까지의 과정에서 여러 가지 시행착오가 일어나 인력과 시간과 예산의 낭비가 매우 많았다. 예를 들면 기존의 방법으로는 복잡한 형상의 몰드나 금형을 제조하는데는 설계로부터 최종 제품이 생산되기까지 짧게는 수개월에서 길게는 1년 이상의 소요되었다. 이러한 속도로는 급속한 변화를 추구하는 미래의 산업구조하에서는 살아 남을 수가 없다.

이러한 산업구조의 급변과 신 제품개발에 대한 수명 싸이클 감소에 의한 소비자 욕구를 충족시키기 위하여 제조산업에 새로운 기술이 연구 개발되고 있는데, 대표적인 것이, Rapid Prototyping(RP), Rapid Tooling(RT) 등이다.[1] 그러나 이러한 기술들은 사용하는 재료가 최종 부품의 재료와는 다른 광경화성 수지, 레진, 플라스틱 또는 금속분말에 binder를 결합제로 사용한 재료들을 사용하여 기본 형태를 만든 다음 일부 몇 단계의 공정을 거쳐 최종 몰드를 만들거나, 마스터 패턴을 만든 다음 그 패턴 위에 전기주조나 다른 plating 또는 코팅 방식으로 금속을 형상화하는 방법, 또는 수지를 코팅한 금속분말로 형상화한 다음 고온에서 결합제인 수지를 녹여 내고 구리나 청동으로 침투시키는 방법 등으로 부품이나 금형 또는 몰드 등을 제작한다. 이러한 방법들은 물론 기존의 방법보다는 제조시간과 인력, 비용을 현저히 감소시켰으나 아직도 최종 부품을 만드는 데까지는 여러 중간 공정을 필요로 하며 형성된 부품도 본 부품 재료와는 다른 비기능성 재료로 되어있기 때문에 최종 부품으로서의 성능이나 기능시험을 할 수 없다는 단점

이 있다.

이제는 이러한 방법의 단점을 제거할 수 있는 새로운 제조 공법이 개발되고 있는데, 이 방법은 최종 부품이나 몰드 또는 금형과 동일한 금속분말을 사용하여 레이저빔으로 직접 최종 형상의 부품이나 몰드 또는 금형을 제조하는 기술이다. 물론 CAD/CAM으로부터 3차원의 복잡한 형상도 전혀 중간 공정 없이 직접 최종 물품을 제조할 수 있기 때문에 앞에서 언급한 기술보다 인력, 시간, 비용 등을 상당히 절감할 수 있다. 일반적으로 이 기술을 사용하면 기존 금형제조 방법보다 약 40% 이상의 공정 시간을 절약할 수 있다고 한다.[2] 뿐만 아니라 이 기술을 이용하면 사용 중 손상된 복잡한 부품도 원래 그 부품에 대한 CAD/CAM 설계자료로부터 새 부품 상태와 꼭 같은 부품으로 보수할 수 있다. 따라서, 이 기술은 국방분야나 산업분야에 매우 획기적인 제조공정을 제공할 것으로 기대되기 때문에 미국방성에서도 이 기술에 대하여 매우 큰 관심을 보이고 있다. 최근 미국의 제조과학센타(National Center for Manufacturing Science, NCMS)의 조사에 의하면 미국의 금형 생산에 소요되는 비용, $108억 중 이 방법을 이용할 경우, 이 금액중 수십 억불을 절감할 수 있다는 결과가 발표되었다. 이러한 기술은 현재 미국 일부 관련 연구기관에서만 개발에 성공한 것으로 미국에서도 산업화 초기단계에 있는 신기술이다. 국내에서는 유일하게 한국원자력연구소에서 이 기술에 대한 기본 기술을 확보한 상태에 있으며 현재 그 기술을 국내 원자력 주요부품 재료에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 이에 따라 이 기술에 대한 소개를 하고자 한다.

## 2. 기술설명

레이저직접조형(Laser-aided Direct Metal Manufacturing)기술은 필요한 부품이나 제품을 3차원 CAD/CAM 설계 데이터로부터 바로 부품이나 제품이 요구하는 기능성 소재(금속, 합금, 세라믹 등)를 이용하여 3차원 형태의 실제 부품이나 제품 또는 제품생산에 필요한 몰드나 금형(Fig. 1) 등을 여러 중간 제조단계를 거치지 않고 빠른 시일 내에 레이저 빔으로 직접 제작할 수 있는 새로운 조형기술(near-net shaping technology)이다. 다시 말하면 Fig. 2에서 보는 것처럼 다양한 부품이나 제품을 그 부품이나 제품의 소재분말로부터 직접 레이저 빔을 이용하여 설계된 CAD/CAM 자료에 따라 한 층 한 층씩 용융첨가하는 방법으로 3차원의 실 부품이나 제품을 제작하는 기술로 Fig. 3에서 보는 것처럼 이 기술의 기본기술은 레이저 클래딩(laser

cladding)기술이다.[3,4]

이 기술을 이용하면 복잡한 형상의 부품이나 몰드 또는 금형 등의 제조에 소요되는 인력, 시간, 비용 등을 획기적으로 절감(지면설계, 주형제작, 용해 및 주물 공정 단계의 생략으로)할 수 있으며 기존에 비슷한 목적으로 개발된 RP&T(rapid prototyping and rapid tooling)보다 한 단계 앞선 최신기술이다. RP 기술은 3차원 CAD/CAM 자료로부터 시각적(또는 직관적)으로 관찰할 수 있는 시작품(prototype)을 빠른 시일 내에 제조할 수 있지만 사용되는 소재가 부품이나 제품이 원하는 실(기능성) 소재가 아닌 광경화성 수지, 왁스, 종이 등의 비기능성 소재로 국한되어 있으며, 제작된 시작품은 실제 사용은 물론이고 성능 및 물성 평가가 불가능하다. 한편 RT의 경우는 금속소재를 사용하여 시작품을 제조할 수 있지만 사용 가능한 금속 소재가 특수하게 만들어진 특수금속 분말로 가격이 매우 고가이며 또한 정밀한 치수의 제품을 제조하기가 어렵다. 뿐만 아니라 RP나 RT기술은 최종 부품이나 제품을 제조하기 위하여 모형(pattern)이나 몰드를 제작하여 최종적으로 주물(casting)로 제품을 만들기 때문에 여러 중간 제조단계가 필히 요구된다.[1]

그러나 레이저직접조형기술의 특징을 보면[3,4,5] 1)제품의 설계단계에서 작성된 CAD/CAM 자료로부터 직접 최종 부품 또는 제품을 짧은 시간에 제작 가능하기 때문에 신제품의 개발기간 단축 및 비용절감 효과를 가져올 수 있으며, 2) 사용소재(기능성)의 제한이 없고, 3) 제품의 기계적 특성이 기존 제품보다 우수하거나 동등하며 이방성(異方性)이 없는 특징이 있을 뿐만 아니라 4) 한가지 부품을 제조하더라도 부위별로 다양한 소재를 사용하여 각 부위의 성능을 최대화 할 수 있는 고기능 다(多)소재 부품의 제작뿐만 아니라 고가의 전략소재를 절약할 수 있다. 그리고, 5) 조형과정 중에 부품 또는 제품 내부에 냉각로(conformal cooling channel)를 삽입할 수 있기 때문에 제품의 내구성과 생산성을 향상시킬 수 있으며, 6) 소비자의 욕구에 따라 주문적응형 생산 또는 사이버 생산으로 능동적으로 대처할 수 있고, 7) 새로운 보수(repairing)기술 및 정밀주조 대체기술로 활용될 수 있다. 앞으로는 사용부품이나 제품이 사용 중 손상되었을 경우 그 부품이나 제품의 원래 CAD/CAM 설계자료로부터 손상된 부분만을 원형 그대로 보수할 수 있을 뿐만 아니라 터빈 블레이드나 복잡한 형상의 제품을 주조 대신 이 기술로 제조할 수 있다. 또한 8) 이 기술은 생산자와 소비자의 공간적, 시간적 제한을 극복할 수 있게 해준다. 즉, 소비자가 외국 부품이나 제품을 사용하다 제품이나 부품에 손상이 발생했을 경우 그 부품이나 제품을 외국으로부터 가져오는데 많은 시간과 공간적 제한을 받게 된다. 하지만 이러한 기술을

가지고 있을 경우 필요한 부품이나 제품의 CAD/CAM 설계자료를 internet 으로 전송 받아 그 대로 직접 제작 또는 보수함으로서 많은 시간과 비용을 절감할 수 있다.[2]

## 3. 기술 현황

레이저직접조형기술은 원래 미국국방 관련 연구소인 Sandia Nationa lLab. 및 Los Alamos National Lab.에서 Nuclear 관련 무기부품 생산을 위해 연구가 시작되었으나 이 기술은 산업전반에 활용성이 매우 높다. 이 기술은 미국을 주축으로 하여 현재는 독일 및 일본 등지에서 활발하게 연구가 되고 있으며 그 대표적인 기술은 다음과 같다.

### 가. 국외

● Direct Metal Deposition(DMD)[3,7]

이 기술은 미국 미시건 대학(Ann Arbor)의 J.Mazumder교수에 의하여 개발된 기술로 현재 레이저직접조형기술 중에서 가장 우수한 기술을 보유하고 있다. 이 기술은 금속분말을 직접 기판 위에 공급하면서 레이저로 용융시키면서 CAD/CAM의 3차원 모형에 따라 적층하여 원하는 3차원 형상의 제품(Fig. 1 참조)을 제작하는 것으로 특징은 높이 제어기술, conformal cooling channel 기술 및 다소재 부품제작 기술 등을 보유하고 있으며, 99년 1월에 Precision Optical Manufacturing(POM)이라는 회사를 설립하여 이 기술을 상업화하였다.

● Laser-Engineered Net Shaping(LENS)[6]

이 기술은 1995년 미국 Sandia National Lab.에서 개발을 시작한 기술로 기술의 상용화를 위하여 Eastman Kodak, Lockheed Martin, MTS, 3M, Allied Signal Hasbro 등 많은 회사들이 컨소시움(Cooperative Research and Sevelopment Agreement, CRADA)을 구성하여 활발한 기술개발로 현재 상용화 부분에서는 가장 앞서있다. 현재 유일하게 사업화(Optomec 사)하여 상용화 장비를 출시하였으며(모델은 LENS 750, Fig. 4에 표시)), 1999년 2월에 LENS 750을 Lockheed Martin Tactical Aircraft System 사의 생산라인에 설치하였다. 이 기술은 앞의 DMD와 유사한 기술이나 크래딩 층의 높이 제어기술을 보유하고 있지 않으며 software적으로 높이를 제어하는 것으로 알려지고 있다.

● Direct Light Fabrication(DLF)[7]

이 기술은 미국 Los Alamos National Lab.에서 개발된 것으로 LENS기술과 유사하며 마찬가지로 클래딩 층의 높이제어에 문제가 있는 것으로 알려져 있다.

● Lasform[5,8]

이 기술은 미국의 MTS사에서 개발하여 AeroMet이라는 자회사를 설립하여 사업화한 것으로 주로 항공기 소재로 사용되고 있는 Ti 합금의 부품이나 구조물(약 2.5X3.0 $m^2$)을 Fig. 5에서 보는 것처럼 레이저직접조형기술(LENS 기술과 유사)로 진공 또는 불활성 기체 분위기에서 제작하고 있다. 제작하는 부품(Fig. 6)의 크기가 크기 때문에 고에너지의 레이저 발생장치가 요구되며, 따라서 정밀한 형상보다는 Near-net shaping하여 최종적으로 정밀도를 증가하기 위하여 기계가공을 하는 공정을 사용하고 있다.

● 기타

이러한 기술 외에도 Stanford 대학(SDM)[9]이나 독일의 Fraunhofer연구소[10] 등에서 활발한 연구가 진행되고 있으나, 공정 중에 milling 작업을 해야 하는 등의 기술적인 결함을 가지고 있다.

### 나. 국내

국내에서는 아직 분말을 이용하는 레이저직접조형기술은 유일하게 한국원자력연구소가 보유하고 있으며, 한국기계연구원, 한국과학기술원(KAIST) 및 한국과학기술연구원(KIST) 등이 공동으로 유사기술을 개발하였으나[11] 이 기술은 분말대신 wire를 사용하여 cladding하기 때문에 높이제어나 cladding 층의 이방성 제거에 문제가 있다. 그래서 이 기술에서도 한 층을 cladding한 다음 milling 작업으로 높이를 일정하게 연마한 다음 적층하는 다소 복잡한 기술을 사용하고 있다. 그러나 한국원자력연구소에서 보유하고 있는 기술은 분말을 이용한 cladding기술로 분말공급계통기술, 레이저 빔 제어기술, 레이저출력자동제어기술 등을 확보하고 있으며, 현재는 상용화 기술개발을 추진하고 있다.

## 4. 원자력에의 적용

원전은 가동 중 안전성이 최우선이기 때문에 1차측 설비들(펌프, 밸브, 노심부품, 배관 등)은 대부분 매우 엄격한 규제나 성능평가를 통과한 부품이나

제품을 사용하고 있으며, 또한 그 제품들이 산업전반에 늘리 사용되고 있지 않는 것들이 많아 부품이나 제품을 외국으로부터 수입하여 사용하는 것들이 많고 또한 특수한 제작공정으로 제조된 것들이 많다. 이러한 부품(특히 펌프, 밸브 부품)이나 제품(2차측 터빈 블레이드나 다른 발전기 부품 들) 에 손상이 생겼을 경우 본 기술을 사용하여 국내에서 신속히 제조하여 사용할 수 있기 때문에 안전성이나 가동율 향상에 매우 큰 역할을 할 수 있다. 예를들면, 원자력발전소 발진기 저압(LP) 터빈의 마지막 단에 있는 블레이드의 leading edge 부분이 수증기가 응축된 물방울에 의하여 마모,침식이 심하게 일어난다. 그런데 이러한 고가의 블레이드가 edge 부분의 손상으로 교체되는데, 이 때 교체된 손상품은 보수에 의하여 다시 사용치 않고 폐기처분된다. 이러한 블레이드를 레이저직접조형기술로 보수하면 원형과 동일하게 복원시킬 수 있기 때문에 많은 외화를 절감할 수 잇다. 한편, 미국에서는 응력부식균열로 손상된 발전기 로타를 교체하기 위하여 이 기술로 신속히 제작하기도 하였다.

## 5. 요약

3차원 형태의 CAD/CAM 설계 데이터로부터 바로 부품이나 제품이 요구하는 기능성 소재(금속, 합금, 세라믹 등)를 이용하여 3차원 형태의 실제 부품이나 제품 또는 제품생산에 필요한 몰드나 금형 등을 여러 중간 제조단계를 거치지 않고 빠른 시일 내에 레이저 빔으로 직접 제작할 수 있는 새로운 조형기술(near-net shaping technology)인 레이저직접조형기술은 자동차, 항공기, 공작기계 등 일반 산업뿐만 아니라 국방 및 원자력 산업에 사용될 수 있다. 이 기술에 대한 기본기술 및 특징에 대하여 기술하였으며, 원자력 주요 부품재료에 적용될 수 있는 가능성을 제안하였다.

후기
본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력중장기과제로 수행된 것입니다.

## 참고문헌

1. *Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry*, ed. by Wohlers, Wohers Associates, inc. 1998

2. J. mazumder, J. Choi, K. nagarathnam, J. Koch, and D. Hetzner, "The Direct Metal Deposition of H13 Tool Steel for 3-D Components", JOM (1997) pp.55-60
3. J.L. koch and J. Mazumder, "Rapid Prototyping by laser Cladding", ICALEO (1993) pp. 556-565
4. M. Murphy, C. Lee and W.M. Steen, "Studies in Rapid Prototyping Laser Surface Cladding", ICALEO (1993) pp. 882-891
5. D.M. Keicher and J.E. Smugeresky, "The Laser Forming of Metallic Components Using Particulate Naterials", JOM (1997) pp.51-54
6. M.L. Griffith, P.M. Keicher,, C.L. Atwood, J.A. Lomero, J.E. Smugeresky, L.D. Harwell, and D.L. Greene, "Free Form Fabrication of Metallic Components using Laser Engineered Net Shaping(LENS), Proc. Solid Freeform Fabrication (1996) pp. 123-131
7. G.K. Lewis, R. Nemec, J. Milewski, Dan J. Thomas, D. Cremers, and M. Barbe, "Direct Lig ht Fabrication", ICALEO (1994) pp. 17-26
8. F.G. Arcella, D.H. Abbott, and M.A. House, "Rapid Laser Forming of Titanium Structures", Powder Metallurgy World Congress (1998) pp.1-6
9. Y.P. Hu, C.W. Chen, and K. Mukherjee, "Laser Cladding of Wear-resistant Tool Steel", Advanced Materials & Processes, August (1997) pp.31-32
10. F. klocke, H. Wirtz and N. Meiners, "Direct Manufacturing of Metal prototypes and prototype Tool", Proc. Solid Freeform Fabrication (1996) pp. 141-148
11. Y.-A. Song, S. Park, K. Hwang, D. Choi, and H. Jee, "3D Welding and Milling for Direct Prototyping of Metallic Parts",

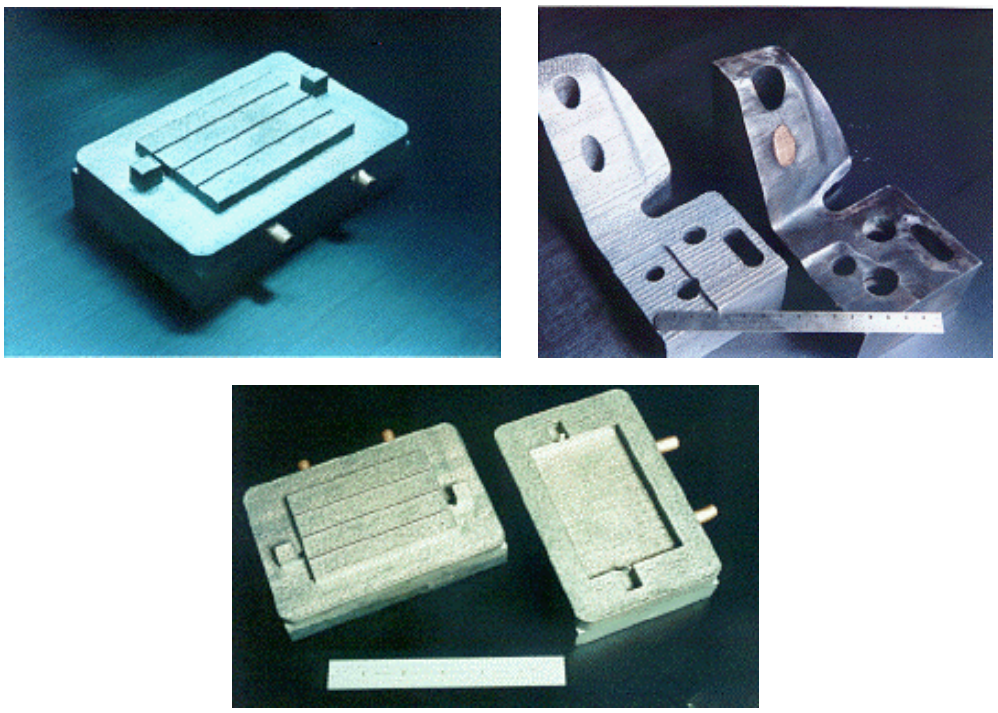

Fig. 1 Dies manufactured using the Laser-aided Direct Metal Manufacturing Technology

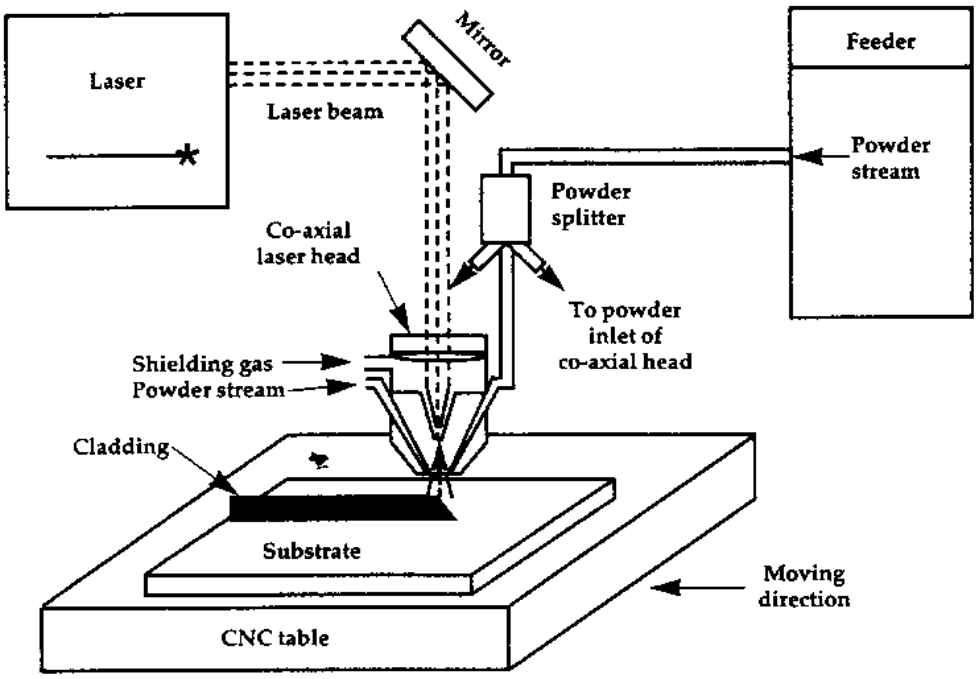


Fig. 2 Schematic diagram of laser classinf system

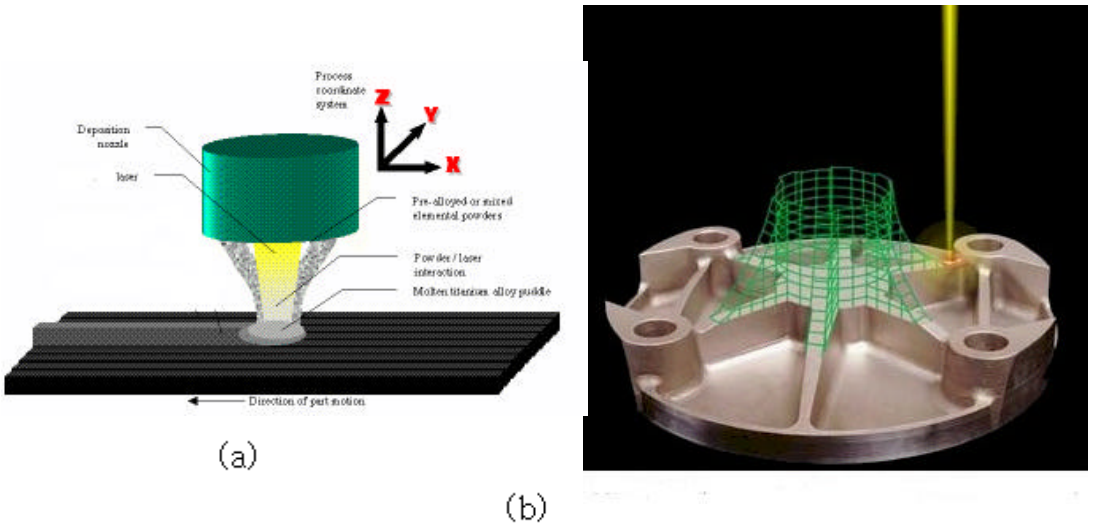


Fig. 3 (a) Laser-aided direct metal deposition process and (b) Process showing manufacturing process using CAD data.

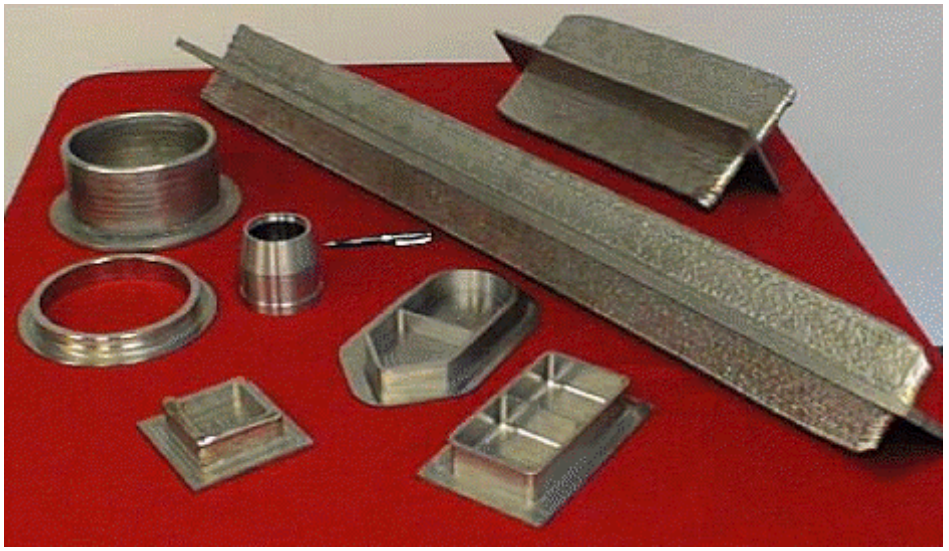

Fig. 4 Parts manufactured with Ti alloys using the Lasform

Fig. 5 photograph showing the LENS 750

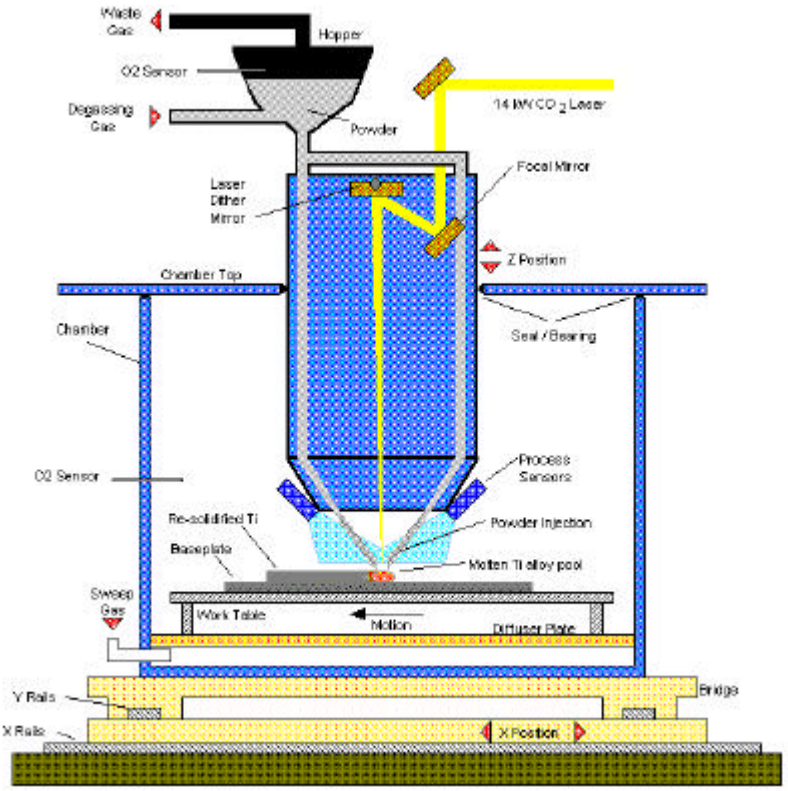


Fig. 6. Schematic diagram showing a Lasform system