

금속재료를 이용한 직접식 3차원 형상제조공정의 실험적 연구 (Experimental Study of Direct Metal Prototyping Process)

신민철,* 손현기,** 양동열**

* 기아자동차 중앙기술연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

ABSTRACT

This study attempts to develop a process which can produce three-dimensional shapes of metals directly from CAD data. Prototypes made from metals, can not only be used to test the mechanical properties of the product, but also potentially become the actual die or product itself. The test-device of the process has been designed and manufactured. The laser scanning method using a scanning path schedule composed of circle and arc elements, scanning speed variation method and dwell method have been developed, which resist warping phenomenon and increase the adhesiveness between the layers. For the production of prototypes with pure iron powder, the optimal values of the principal process parameters have been determined, through which cross-shaped and twisted clover-shaped prototypes have been fabricated. In order to improve the strength of the prototype, the experimental studies of solid-phase sintering, and copper infiltration have been done.

Key Words : Rapid Prototyping Techniques(폐속 3차원 조형법), Laser Sintering(레이저 소결법), Laser Scanning method(레이저 스캐닝 방법), Solid Phase Sintering(고상소결), Copper Infiltration(구리 용침)

1. 서 론^[1-14]

현대 산업 사회의 기업경쟁력은 소비자의 다양하면서 빠른 기호 변화에 얼마나 잘 대처할 수 있는가에 달려 있다. 따라서 제품생산방식에 있어서 소품종 대량생산체제에서 다양한 모델을 빠른시간에 공급하는 단품종 소량생산체제로의 변화가 요구되어 왔고, 이에 따른 제품개발기간의 단축과 원가절감이라는 명제의 구현을 위한 새로운 개념으로 '동시공학(concurrent engineering)'이 대두되었다. 즉 제품개발 초기부터 제품개발상의 모든 단계를 동시적으로 상호협력하여 이루어지게 함으로써, 제품개발 과정의 수정 보완 단계를 효율화하여 결과적으로 제품경쟁력을 향상시키고자 하는 노력이 계속적으로 이루어져 왔다.

최근 10년동안 급격히 부상하며 각광받고 있는 폐속 3차원 조형법(Rapid Prototyping Techniques)은 이런 동시공학을 구현하는 대표적인 기술이라고 할 수 있으며, 현

재 제품개발에 있어 매우 중요한 단계인 시작품(prototype) 제작공정의 혁신을 주도하고 있다. 기존의 시작품 제작공정은 NC 가공 또는 수가공으로 이루어지며, 이는 상당한 시간과 경비를 필요로 한다. 이에 반해 폐속 3차원 형상 제조법은 CAD 데이터를 이용하여 빠르고 정확하게 복잡하고 난이한 형상의 시작품을 만들 수 있다. 이는 시작품 제작기간을 크게 단축했으며, 병행하여 경비의 절감을 가져왔다. 그리고 시작품의 수정, 보완이 용이하여 전체적으로 제품개발 기간을 크게 줄이는 역할을 했다.

초기에 폐속 3차원 조형법은 시작품의 디자인 검증이나 조립성 평가를 위해 개발되었으며, 광경화성 수지(Stereolithography), 종이(LOM), 왁스 및 일부 플라스틱 소재 등(SLS, BPM, FDM 등)과 같은 재료로 이런 목적에 부합하고 있다. 또한 부분적으로 이런 재료를 사용하여 인베스트먼트 캐스팅(investment casting)용의 마스터 모델(master model) 등에 응용하기도 한다. 그러나 기술

이 발전함에 따라 보다 보편적으로 널리 쓰이는 금속재료를 이용한 시작품 제작에 대한 연구가 진행중이다. 금속재료로 된 시작품은 기존의 기능뿐만 아니라 보다 나아가 강도나 인성 평가와 같은 제품의 시험성 평가에도 응용될 수 있다. 또한 궁극적으로 직접 금형(Die/Mold)이나 실제 품을 제작함으로서 그 응용범위를 극대화할 수 있다.

본 연구에서는 금속과 같은 기능성 재료로 제품의 CAD 데이터로부터 직접 원하는 모양으로 만들 수 있는 직접식 3차원 형상 제조 공정을 설계하고, 실제 실험 및 분석을 통해 강도가 보강된 시작품의 제작가능성을 보였다.

2. 직접식 3차원 형상 제조 공정

2.1. 제조 공정

본 연구에서는 금속분말을 소재로 한 직접식 3차원 형상 제조 공정을 개발하였으며 그 기본원리는 레이저 소결법(Laser Sintering)을 이용하고 있다. Fig. 1 은 본 제조 공정을 도식적으로 보여주고 있으며 단계별로 살펴보면 다음과 같다.

- 1 단계 : 나이프(knife)를 이용해 금속분말을 일정한 두께로 도포한다.(Fig. 1 (a))
- 2 단계 : 도포된 금속분말표면에 레이저를 정해진 스캐닝 방법에 따라 주어진 충형상으로 주사해 금속분말을 소결시킨다. 이때, 금속의 산화를 억제하기 위해 보호가스(shield gas)를 분무한다. (Fig. 1 (b))
- 3 단계 : 이렇게 해서 한 층이 만들어지면, 일정한 높이(층두께 : layer thickness)만큼 플랫폼을 내린다.(Fig. 1 (c))
- 4 단계 : 1-3 단계를 정해진 횟수만큼 반복한 다음, 플랫폼을 맨 처음 위치로 올리고 남아 있는 소결되지 않은 금속분말입자들을 제거하여 원하는 형상의 제품을 얻는다.(Fig. 1 (d), (e))

2.2. 제조 장치의 구성

Fig. 2 는 제조장치를 개략적으로 나타내고 있으며, 구체적으로 장치의 구성요소들을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 금속분말 도포 및 레벨링 장치
금속분말을 균일하게 도포 및 레벨링하는 방법으로 나이프(knife)를 이용한다.
- 2) 엘리베이팅 장치
일정한 높이만큼 플랫폼을 상하로 이동시키는 장치로서

플랫폼, 모터, 가이드핀, 분말제거통, 접촉센서로 구성된다

3) 컨트롤 박스(control box)

엘리베이팅 장치를 제어하는 박스이며, 펄스발생기, 전원공급장치, 각종 스위치로 구성된다.

4) Nd:Yag 레이저 CNC 가공기

레이저빔을 발생시키고 이를 주어진 길(path)에 따라 스캐닝(scanning)하도록 하는 장치로서, 스캐닝시 레이저 헤드는 고정되어 있고 아래에 X-Y 테이블이 움직이도록 되 있으며, 금속의 용융, 용고시 산화를 최소화하기 위해 질소 또는 아르곤 가스의 분사할 수 있다. CNC 가공기를 구동시키는 프로그램ming은 G 코드로 이루어진다.

3. 직접식 3차원 형상제조공정에 의한 시작품 제작

3.1. 데이터 파일의 생성과정

데이터 파일의 생성과정을 단계별로 살펴보면 다음과 같다.

- 1 단계 : AUTO CAD로 2-D 드로잉을 한다.
- 2 단계 : .dxf 파일로 출력한다.
- 3 단계 : 주요 공정변수를 입력받고 정해진 스캐닝 방법에 따라 각 요소들을 정렬(sort)한다.
- 4 단계 : G코드로 전환, 출력시킨다.

AUTO CAD 2-D 드로잉에서는 각 층(layer)의 형상을 먼저 그리고, 이에 따라 스캐닝 요소 데이터를 만들게 된다. 스캐닝 요소는 선(line), 호(arc) 그리고 원(circle)으로 정의된다. 드로잉이 끝난 후 .dxf 파일로 출력하며, 여기서 각 스캐닝 요소들은 2-D 드로잉에서 그려진 순서대로 출력되므로 정해진 스캐닝 방법에 따라 정렬(sort)한다. 그리고 스캐닝속도와 같은 주요공정변수를 입력받는다. 마지막으로 CNC 가공기에 입력하기 위해 정렬된 스캐닝 요소들을 G 코드로 전환, 출력한다. 실제 프로그램에서는 .dxf 파일을 입력받아 정렬(sort)한 후 G 코드로 출력하게 된다.

3.2. 레이저 스캐닝 방법에 대한 고찰

1) 선요소와 원 및 호 요소에 의한 스캐닝방법의 비교

선요소에 의한 방법은 선요소를 일정한 간격으로 평행이동시키면서 스캐닝하는 것이며, 원 및 호 요소에 의한 방법은 단면내의 중심에서 원이나 호의 반경을 일정한 간격으로 증가시키거나, 외곽(boundary)에서 중심으로 반경을 감소시키면서 충형상을 스캐닝하는 것이다. Fig. 3 은 각각 선요소와 원 및 호 요소에 의해 직사각형(3 cm x 2

cm) 형상을 스캐닝하는 방법을 보여주고 있으며, Fig. 4는 실제 각각의 방법으로 스캐닝해 만들어진 직사각형 형상의 예를 보여주고 있다. 선요소에 의한 스캐닝의 경우는 스캐닝 초기에 선요소의 양끝이 호 모양으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 이는 스캐닝 초기시 양 모서리 부분이 자유면이라 기하학적인 구속이 적고, 모터구동방식에 기인해 양 끝에서 속도가 0에서 스캐닝속도에 도달할 때까지 일정시간이 소요되므로 보다 많은 에너지를 흡수하게 되어 평면방향으로의 수축과 웅집력이 보다 심화되기 때문이다. 원 및 호 요소를 이용한 스캐닝은 선요소에 의한 방법보다 정확한 직사각형 형상을 보여준다. 이는 원형 형상에 기인한 기하학적인 구속때문에 휘이 억제되기 때문이다.

직접식 3차원 형상 제조 공정은 고온의 레이저 범이 도포된 금속분말 표면에 국부적으로 주사되며 이동하기 때문에 극심한 온도구배를 가지며 이로 인한 열변형이 심각하다. Fig. 5는 각각의 스캐닝 방법으로 두 충을 적중했을 때의 휨현상을 보여준다. 두 충을 적중했을 때 휨현상이 보다 심각함을 알 수 있다. 이는 첫번째 충을 만들 때는 분말의 용착력에 의해 충이 형성되는 효과가 지배적인 반면, 두 번째 충을 쌓을 때는 이미 형성된 아래충이 윗충의 수축력에 의해 전체적으로 휘어지기 때문이다. 즉, 각 부분의 휨량이 누적되어 전체적인 휨량은 크게 나타난다. Fig. 5는 또한 절대적인 휨량이 원 및 호 요소를 이용한 방법이 적음을 보여준다. 이는 원 및 호 요소를 이용한 방법이 원형 형상에 의한 기하학적인 구속력이 크고 스캐닝이 시작되는 지점과 끝나는 지점의 거리가 선 요소에 의한 방법에 비해 거의 절반 밖에 되지 않기 때문이다. 따라서 휨억제면에서도 원 및 호 요소를 이용한 방법이 효과적임을 알 수 있다. 그러나 휨현상을 완전히 없애기 위해서는 플랫폼에 지지대를 설치할 필요가 있다.

2) 스캐닝 속도변화와 드웰방법에 의한 공정조건 개선

원 및 호 요소를 이용한 스캐닝 방법은 같은 속도로 스캐닝할 때, 중심으로 갈수록 에너지 집중도가 높아지고 이로 인해 표면이 핵물되거나 파편이 생기게 된다. 이러한 거친 표면은 다음 적층시 분말의 도포 및 레벨링에 지장을 주게 되고 충간 결합에 방해요소로 작용하게 된다. 에너지 집중도를 낮추는 것은 중심으로 갈수록 스캐닝 속도를 높이거나 레이저 출력을 낮춤으로써 해결될 수 있을 것이다. 여기서 레이저 출력은 프로그램에 의해 조정될

수 없으므로 스캐닝 속도를 높이는 방법을 선택할 수 있다. 또 다른 방법으로는 사이 시간(interval time) 방법, 즉 중심부분에서 한 요소를 스캐닝한 다음 일정시간동안 정지한 뒤 다시 스캐닝함으로써 에너지 집중도를 낮출 수 있다. 실제 프로그램(G 코드)에서는 드웰 기능(dwells : G04)에 의해 조절할 수 있다.

레이저가 맨 처음 표면에 주사될 때는 표면에 파편이 튀게 된다. 이는 갑작스런 고온의 에너지가 집중되고 열전달에 의해 아래층 표면까지 녹여 결합할 만한 충분한 시간을 갖지 못하기 때문이다. 이 경우에는 드웰 시간(dwells time) 방법, 즉 일정시간 동안 한 곳에서 레이저를 계속 주사함으로써 충간결합을 위한 열전달시간을 줄 수 있다. 실제 프로그램(G 코드)에서는 마찬가지로 드웰 기능(dwells : G04)에 의해 조절된다.

외곽에서 중심으로 원 및 호 요소에 의해 스캐닝할 때 형상의 갑작스런 변화가 생기는 부분에서 위와 같은 레이저를 맨 처음 표면에 주사한 효과가 발생하여 파편이 튀게 된다. 따라서 이와 같은 부분에서도 드웰 시간(dwells time) 방법을 적용해야 할 것이다.

3.3. 철분말을 이용한 시작품 제작

본 연구에서는 철분말(100 mesh)을 이용하여 십자가 형상과 적층방향으로 뒤틀린 크로바 형상을 만들었으며 Fig. 6은 각 충형상의 치수를 보여준다. 철은 가장 널리 쓰이는 금속재료이므로 본 공정에 의해 제작된 시작품 또한 그 용용가능성이 매우 크다고 볼 수 있다.

스캐닝은 원 및 호 요소를 이용했으며, Fig. 7은 각 형상의 스캐닝방법과 스캐닝속도 변화와 드웰(dwells) 방법이 적용되는 곳을 보여준다. 충형상 중심에서의 1 번은 중심에서 외곽으로 스캐닝을 시작하는 부분이며, 단면 외곽에서의 1 번은 외곽에서 중심으로 스캐닝을 시작하는 부분이다. 2 번은 외곽에서 중심으로 스캐닝할 때 형상의 변화가 심하게 일어나는 부분이다. 1 번과 2 번의 경우 드웰 시간(dwells time)을 0.2 초로 하였다. 3 번은 중심부분으로 에너지집중도를 낮추기 위해 사이 시간(interval time)을 주고 속도를 높여야 하는 곳으로, 사이 시간(interval time)을 1 초로 주고 스캐닝 속도는 600 mm/min 으로 하였고, 중심부분에서는 200 mm/min 간격으로 1200 mm/min 까지 증가시켰다.

또한 적층에 따른 용력분포를 고르게 하기 위해 한 번은 스캐닝을 중심에서 외곽으로 한 번은 외곽에서 중심으

로, 변갈아서 하게 된다. 외곽형상의 치수정확도를 높이기 위해 단면 내부를 스캐닝한 후 마지막에 외곽을 두 번 스캐닝하며, 외곽형상은 실제 요구되는 치수보다 빔 반경만큼 단면 내부 방향으로 옵셋(offset)시키게 된다. Table 1은 본 실험에 사용된 주요 공정변수의 설정치 및 최적치를 보여준다. Fig. 8은 이와 같은 조건에서 제작된 십자가 그리고 뒤틀린(twisted) 크로바 형상의 시작품들을 보여준다. 제작된 시작품은 표면에 단이지므로 이를 없애기 위해 보다 고운 금속분말로 코팅하게 된다.

4. 시작품의 강도 보강을 위한 연구

4.1. 고상소결 및 구리 용침^[15]

직접식 3차원 형상 제조 공정에 의해 만들어진 시작품은 아직까지 금속으로서의 높은 강도를 가지지 못한다. 고상소결(solid phase sintering) 및 구리용침(copper infiltration)은 이러한 시작품의 강도를 보강하기 위해 거치게 되는 후처리 공정이다.

고상소결과 구리 용침은 가열로에 시작물을 넣어 일정 시간 동안 높은 온도를 유지한 다음 식히는 방법으로 하게 된다. 여기서 기존의 산화막을 제거하고 또한 가열중 산화를 막기 위해 수소 가스를 이용해 환원분위기를 조성해 준다. 가열로 속에 바로 수소를 채우면 공기중 산소와의 반응으로 폭발할 위험이 있으므로 먼저 질소가스를 불어 넣어 가열로속의 공기를 완전히 제거한 다음 수소가스를 채운다. 가열 및 냉각 작업이 끝난 뒤에도 질소가스를 먼저 불어 넣어 수소가스를 제거한 다음 시작물을 꺼내야 한다.

본 실험에서 사용한 가열로는 튜브형으로 5 cm 길이의 등온 구간을 가진다. 등온 구간은 온도변화 폭은 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 이다. 노의 내경은 $1\frac{1}{4}$ inch이고 밀폐형이 아니기 때문에 가스를 일정압으로 계속 공급 및 방출해야 한다. 수소 가스의 경우는 대기중에서 폭발할 위험이 있으므로 가스 출구에 불을 부쳐 태워야 한다. 또한 시작품의 튜브속 이동을 위해 적절한 형태의 보우트(boat)를 제작하여 사용하게 된다. Fig. 9는 가열로의 내부 구조도와 고상소결과 구리용침의 준비과정을 보여준다.

철분말을 소재로 한 시작품의 고상소결은 1125°C 에서 40시간동안 행해졌고 구리 용침은 철소재의 시작품과 같은 중량으로 구리판을 제작하여 시작품 위에 올려 놓고 1145°C 에서 10분간 유지함으로써 이루어졌다. 구리 용

침의 경우, 구리 용침이 균일하게 되고 용융된 구리가 보우트 밖으로 넘치지 않도록 하기 위해 구리판이 시작품 위에 수평으로 놓이도록 주의해야 된다. 가열시간은 4시간으로 셋팅하고 냉각시간은 자연냉각으로 약 8시간이 소요됐다.

4.2. 밀도 측정 및 압축 시험

본 연구에서는 구리용침 후의 시작품의 밀도 측정 및 압축시험을 하였다. 이를 위해 먼저 3 cm X 2 cm 의 직사각형 층을 50층 적층하여 초기 시작품을 만들었고 고상소결 후, 구리 용침을 하였다. 시편은 적층방향으로 지름 4 mm, 길이 6 mm 인 원기둥 3개, 이에 수직인 방향으로 지름 3 mm, 길이 5 mm 인 원기둥 3개를 만들었다. 가공은 와이어 커팅(wire cutting)으로 하였다.

시편의 겉보기 밀도는 겉보기 부피를 시편의 치수에서 계산하고 무게를 측정하는 방법으로 얻었으며, 평균하여 7.85 g/cm^3 가 나왔다. 구리(밀도 = 8.96 g/cm^3)와 철(밀도 = 7.87 g/cm^3)이 중량비로 1대 1로 혼합되었을 때, 혼합밀도는 다음과 같다.

$$2 / (1/\text{구리밀도} + 1/\text{철밀도}) = 8.38 \text{ g/cm}^3 \quad (1)$$

따라서 시편의 체적율은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{겉보기 밀도} / \text{혼합밀도} = 7.85 / 8.38 = 93.7 \% \quad (2)$$

고상소결 전의 체적율은 소결에 의한 수축과 불순물의 영향을 무시할 때, 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$(\text{겉보기 밀도}/2) / \text{철밀도} = (7.85/2) / 7.87 = 49.9 \% \quad (3)$$

이상에서 보듯이 구리함침으로 시작품의 체적율을 50% 이하에서 90% 이상으로 높일 수 있다는 것을 알 수 있다.

압축시험은 Universal Testing Machine(INSTRON 4206)으로 수행되었으며, 압축속도는 0.05 mm/min으로 하였다.

Fig. 10은 방향에 따른 압축 응력-변형률 커브(stress-strain curve)를 보여준다. 각 방향의 커브는 실험데이터를 평균하여 얻었다. 변형율이 증가함에 따라 응력이 계속적으로 증가하는 것은 압축에 의한 단면적의 증가량을 고려하지 못한 영향이 지배적이라고 볼 수 있다. 또한 시편의 파단이 일어나지 않고 계속적으로 변형이 일어나는 것을 알 수 있는데, 이는 연성이 큰 구리의 영향이라고 보아진다. 단면방향의 응력이 낮게 나타는 것은 기공율이 상대적으로 높기 때문이다. Table 2는 다른 폐속 3차원 형상 조형법에 의해 제작된 시작품의 강도와 구리, 철의

강도를 본 공정(DMP)에 의해 제작된 시작품의 강도를 비교해 보여준다.^[16] 본 공정에 의해 제작된 시작품은 금속 재료를 소재로 사용하므로, 광경화성 수지나 왁스, 폴리아미드를 사용한 공정보다 뛰어난 강도를 가짐을 알 수 있다. 또한 구리와 철의 강도 사이에 존재하며, 고밀도화에 의해 보다 더 강도를 개선할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서 얻은 결론을 종합적으로 정리해 보면 다음과 같다.

1. 금속 재료를 이용한 직접식 3차원 형상 제조 공정의 개념 설계와 장치의 실제 설계 및 제작을 통하여 기본 개념의 타당성을 입증하였다.
2. 시작품의 표면 특성과 중간결합도를 높이기 위한 스캐닝 방법, 스캐닝 속도변화방법과 드웰(dwell)방법을 제안, 검증하였다.
3. 철분말에 대한 주요 공정변수들의 최적치를 찾고 이를 바탕으로 각각 십자가 형상과 3차원 뒤틀린 크로바 형상의 시작물을 제작하여 본 공정의 타당성과 가능성을 보였다.
4. 본 공정에 의해 제작된 시작품의 강도를 보강하기 위해 후처리 공정(고상소결, 구리용침)에 대한 실험연구를 수행하였다. 구체적으로 적절한 주요공정변수(온도 사이클, 환원분위기)를 찾았고, 최종 시작품의 밀도 측정 및 압축시험으로 시작품의 밀도향상과 강도보강의 가능성을 입증하였다.

참 고 문 헌

1. J.P.Kruth, "Material Ingress Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques", Annals of the CIRP, Vol.40/2/1991, p.603-614.
2. 이우종, 홍유석, 이용한, "신속시작체계 정립 방안", 대한기계학회지/제 33 권 제 4 호, 1993년, p.297-310.
3. "광리소그래피에 의한 3차원형상 모델의 제작기술", 기계기술, '91년 12월, p.70-77.
4. T.Nakagawa, J.Wei, "Laser Stereolithography and Its Application to Forming Industries", Advanced Technology of Plasticity 1993.
5. "THE PRODUCTION OF WAX MODELS BY THE BALLISTIC PARTICLE MANUFACTURING PROCESS", The 2nd Int. Conf. on Rapid Prototyping, June 23-26, 1991, p.15-22.
6. "SELECTIVE LASER SINTERING WITH ASSISTED POWDER HANDLING", United States Patent, Patent Number 4938816.
7. S.Ashley, "Rapid Mold-Making For Investment Casting", Mechanical Engineering, November 1992, p.49-51.
8. "RAPID MOLD MAKER PROMISES FASTER METAL PROTOTYPES", Machine Design, November 26, 1992, p.52-53.
9. "Three-dimensional printing techniques", European Patent Application, EP 0431924A2.
10. S.Ashley, "Rapid Prototyping Systems", Mechanical Engineering, April 1991, p.34-43.
11. D.J.Albert, "SOLID MODELS AND RAPID CHANGES", Machine Design, May 28, 1993, p.86-92.
12. P.Dvorak, "RAPID PROTOTYPES FOR PRODUCTION PARTS", Machine Design, October 1993, p.48-50.
13. D.Hauber, "Automatic Production of P/M Parts Directly From A Computer Aided Design Model", The Int. J. of Powder Metallurgy, Volume 24, No.4, 1988, p.337-342.
14. S.Ashley, "Prototyping with advanced tools", Mechanical Engineering, June 1994, p.48-45.
15. 황농문, "액상소결과 고상소결에서 미세구조와 상변태에 관한 연구", KAIST 박사학위논문, 1985.1.26.
16. E.P.Degarmo, J.T.Black, R.A.Kosher, Materials and processes in manufacturing, Maxwell Macmillan, 7th edit., p.262.

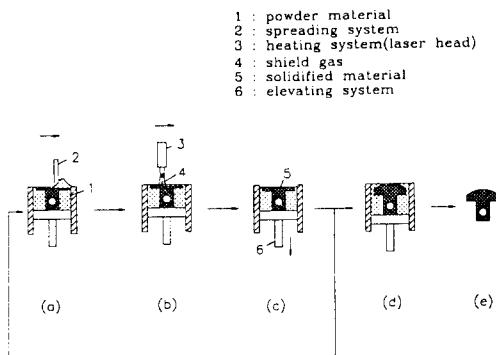


Fig. 1 Production process of direct rapid prototyping technique

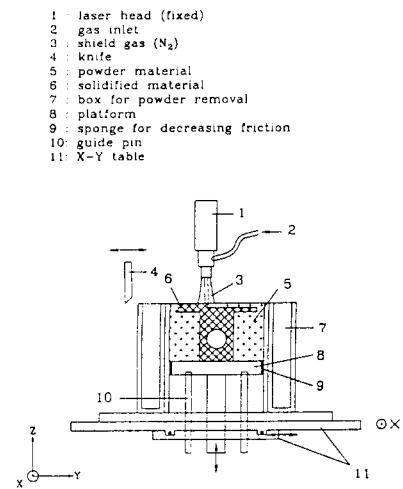


Fig. 2 Schematic diagram of direct rapid prototyping system

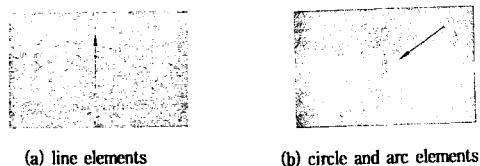


Fig. 3 Scanning path schedules for a 2 X 3 cm² rectangle shape

(--> : scanning direction)

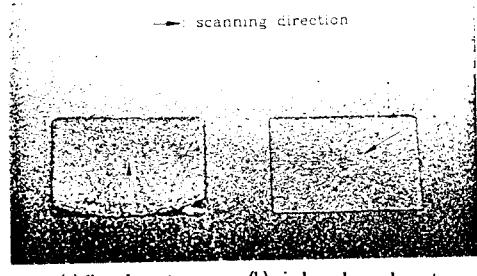


Fig. 4 Laser-sintered rectangular prototypes

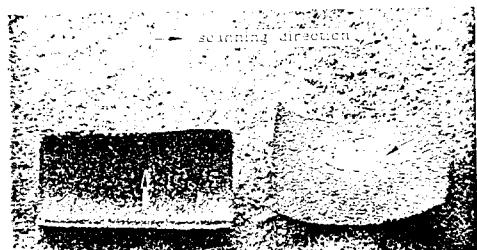


Fig. 5 Warped shapes of a rectangular prototype after laser-sintering of the second layer without a support

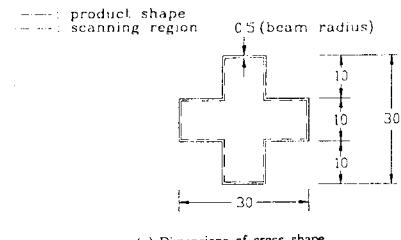


Fig. 6 Dimensions of cross and clover shapes (mm)

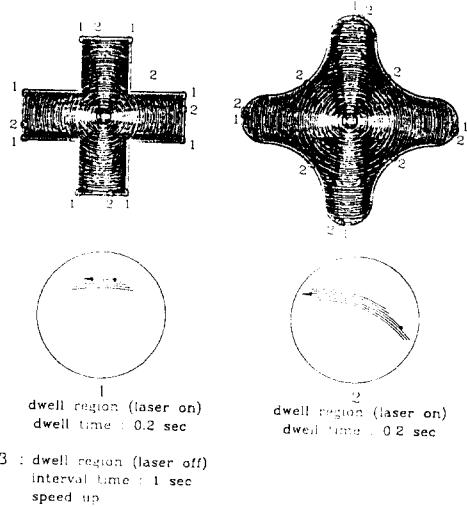


Fig. 7 Scanning path schedules composed of circle and arc elements, dwell region, speed variation region for cross and clover shapes

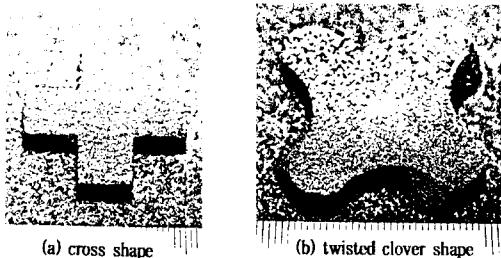


Fig. 8 Cross-shaped and twisted clover-shaped prototypes

laser-sintered with pure iron powder
o : heating wire

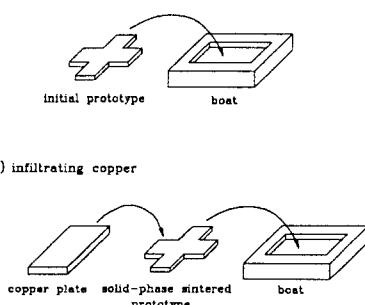
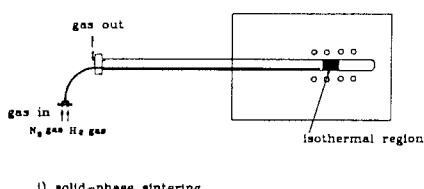


Fig. 9 Schematic diagram of furnace system

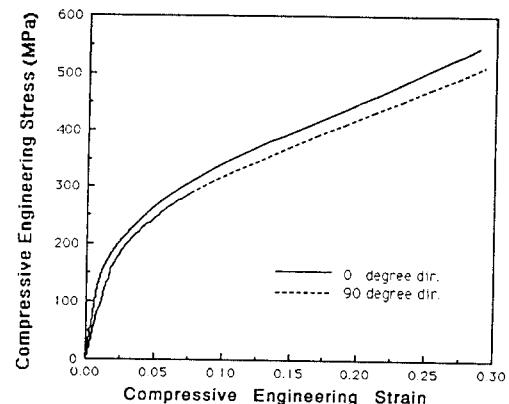


Fig. 10 Compressive engineering stress-strain curves

metal powder	iron(100 mesh)
average laser power	10 W - 12 W
scanning speed	600 mm/min
offset interval	0.2 mm
shield gas	N ₂
layer thickness	0.2 mm
laser beam diameter	1 mm
laser beam mode	JK 701 (multi beam mode)
laser beam pulse width	10 ms
laser beam frequency	40 Hz

Table 1 Principal process parameters for laser-sintering of pure iron powder

Process	material	strength(MPa)
SLA	photo polymer	60 - 80
FDM	wax, polyamid	8 - 12
DMP	copper + iron	137 - 151
	copper(C10200, rod)	69 - 303
	ductile iron	276 - 621

Table 2 Comparison of strength according to rapid prototyping processes and material