

레이저 용접공정과 밀링공정에 의한 쾌속 금속 시제품

최두선*, 이수홍**, 신보성*, 윤경구*, 황경현*, 박진용***

Rapid Product Fabrication using Wire Welding with CO₂ Laser Irradiation and Milling Process Technology

D. S. Choi*, S. H. Lee**, B. S. Shin*, K. K. Yoon*, K. H. Whang*, J. Y. Park***

ABSTRACT

The rapid prototyping and tooling technology has been developed. However, most commercial ones currently use resins or waxes as the raw materials. These days, the direct metal deposition methods are being investigated as new rapid prototyping and tooling technology. A fundamental study on rapid prototyping and tooling with wire welding technology using CO₂ laser radiation was carried out in this paper. The main focus is to develop a simple commercial rapid prototyping and tooling system with the existing laser welding technology. The process is investigated as a function of laser parameters and process variables. Test parts were fabricated as output and their microstructure, hardness and tensile strength are examined for the reliability. In addition, its advantages and disadvantages are discussed as a rapid prototyping and tooling system.

Key Words : Rapid prototyping and tooling(쾌속조형-툴링), Metal deposition(금속용착), Laser welding(레이저 용접), Mild steel(연강)

1. 서론

일반적으로 쾌속 조형법은 CAD/CAM, 레이저, 재료, 제어기술 등이 복합된 첨단 가공 기술로서 기존의 절삭가공 방법과는 달리 CAD데이터를 얇은 두께로 절단해 단면형상을 얻은 후 각 단면들을 적층, 원하는 형상을 제작하는 방식이다. 따라서 복잡한 외관 또는 제품의 내부 형상까지도 손쉽게 자동적으로 제작할 수 있어 전자제품의 금형은 물론 자동차부품 금형제작 등의 분야에도 폭넓게 이용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 기존에 사용된 쾌속조형 방식이 대부분 비금속 재료를 사용하고 있어 금형을 제작할 경우에는 많은 후가공을 요구

하고 있다. 따라서 금속 적층을 통해 직접 제품이나 금형을 생산하려는 기술의 개발에 초점이 모아지고 있다. 금속을 용착시켜 제품을 생산한다는 자체에 있어서 제품으로써 정도를 얻기 힘들고 표면정도도 비교적 좋지 못하므로 이에 필연적으로 후처리가공을 통하여 표면정도와 정밀도를 향상시키는 방법이 연구되고 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 본 연구의 공정은 순수한 적층방식이 아니고 적층을 위한 레이저용접 기술과 후처리를 위한 밀링등의 기술을 접목시켜 저비용이고, 실용적인 쾌속조형 장치를 개발하는데 목표를 두고 현재 연구

* 한국기계연구원 자동화연구부, 연세대학교 대학원

** 연세대학교 기계공학과

*** 한국과학재단 인턴연구원

를 수행 중에 있다. 본 연구는 적층식 방법과 기존의 절삭가공 방식을 결합시켜 두 방법의 장점을 살릴 경우 절삭가공으로 제작이 불가능했던 형상들을 제작할 수 있는 동시에 적층식 방법의 최대 단점인 정밀도와 표면조도를 보강할 수 있다.^{(1)~(5)}

따라서 본 논문은 레이저 용접으로 비드 생성시의 최적조건 선정, 선정된 최적조건으로 기본 형상의 제작과 각종 기계적 성질을 테스트하여 궁극적으로 사출성형에 사용될 수 있는 시삭 금형을 제작하고자 한다.

2. 본론

2.1 쾌속 금속 조형공정

레이저 빔을 모재 위에 조사하고 동시에 와이어를 레이저 초점에 일정한 속도로 진입을 시켜 용융풀을 만들고 X-Y Table을 이송시켜 1층의 비드를 생성한 다음, 그 비드를 다층으로 적층하는 방식을 기본으로 하고 있다. 생성된 1층의 비드를 수평방향으로 오버랩시켜 2차원 평면층을 생성하고, 이렇게 형성된 2차원 평면층을 수직방향으로 적층시켜 3차원 형상을 제작하게 된다. 비드 생성 후 또는 2차원 평면층을 생성 후 밀링머신을 이용하여 비드의 윗 부분을 절삭가공 하게 된다. 이는 적층된 비드 위로 새로운 다른 층이 적층 될 때 표면을 편평하게 만들어, 새로운 층을 안정적으로 쌓기 위한 가공 단계이다. 3차원 형상의 적층이 완료가 되면 외부면을 정삭으로 절삭가공하여 완성된 제품을 얻게 된다.

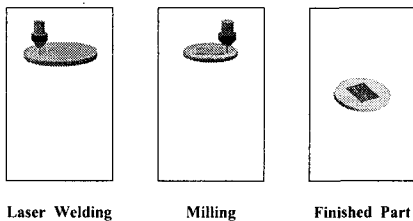


Fig. 1 3D Laser Welding and Milling Process

2.2 쾌속 금속조형 장치

실험장치는 CO₂ 레이저와 ARC 용접기, 범용 밀링머신, 와이어 피딩장치로 크게 3가지 부분으로 나눌 수 있다. 기존의 범용 밀링머신을 사용하

서 제어장치를 본 연구에 적용할 수 없어 쾌속금속 조형장치에 적합한 PC-NC기반의 통합제어 장치를 개발하였다. 개발된 통합제어 장치에서는 5축 동기제어로 레이저 용접과 밀링공정, 와이어 피딩장치의 제어가 가능하도록 하였다. 실험 장비에 대한 그림(Fig. 2)이 아래에 자세히 보여지고 있다. 적층시 산화를 방지하기 위하여 질소 가스를 사용하였고, 작업시 그 공정을 자세히 관찰하기 위하여 CCD 카메라를 설치하여 PC를 통해 모니터링하였다.

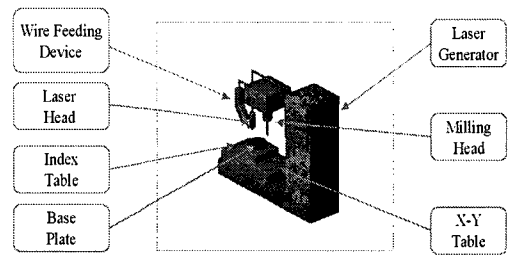


Fig. 2 Schematic diagram of Rapid Direct Metal Deposition machine

2.3 소프트웨어 구성

쾌속 금속조형 공정에 필요한 가공 데이터는 2차원 단면 데이터인 CLI 파일로부터 생성된다. CLI 파일은 단면의 내부, 외부 경계 정보만을 가지고 있는 관계로, 쾌속 금속조형 공정에 필요한 NC 데이터를 얻기 위해서는 2차원 단면정보와 더불어 공정에 필요한 데이터를 첨가해야 한다. 이러한 데이터를 총칭하여 공정변수라 정의하며, 공정변수로는 단면을 채우는 용접속도, 용접 비드와 비드 사이의 간격, 단면의 높이를 맞추기 위한 절삭시의 절삭속도 등, 용접과 절삭에 직접적으로 관련된 변수와 단면을 채우는 방법, 단면들 사이의 용접 적층방향 등 공정을 수행할 때의 전략들이 포함된다.

Fig. 3은 Rapid NC의 구성도 이다. Rapid NC는 실험에서 얻어진 공정 변수를 데이터베이스로 구축하여 관리한다. Rapid NC는 CLI 파일로부터 2차원 단면 데이터를 읽어 들인 후 작업이 용이하도록 RPG라는 이진 파일로 저장한다. RPG 파일로 변환할 때 작업자에 의해 데이터베이스에서 선택된 공정 변수들이 같이 저장된다. 이렇게 저장된

RPG 파일을 이용하여 Tool path 데이터를 생성하고 최종적으로 쾌속 금속조형 공정에서 사용할 수 있는 NC 데이터로 변환된다.

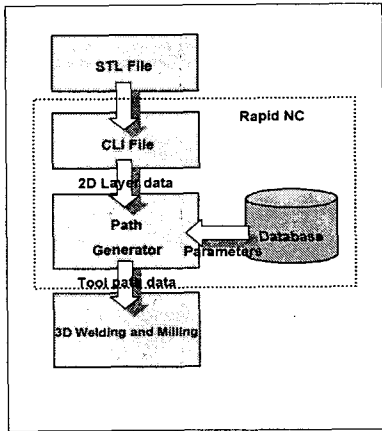


Fig. 3 Flowchart of Rapid NC

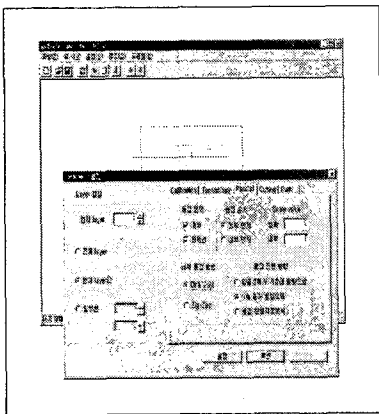


Fig. 4 Display of Rapid NC

2.3.1 공정변수

최종 제품의 품질에 영향을 미치는 변수는 고정변수와 가변변수로 나눌 수가 있다. 고정변수라고 하는 것은 매 작업마다 값을 바꿀 수 없는 것으로 용접 Wire의 종류 및 크기, 가스의 종류, 용접 모재 종류, 용접 주파수, 용접 전압, 전류, 레이저 출력, 와이어 피드속도 등이 있다. 이에 반해 가변변수로는 용접속도, 절삭속도, 단면적층 방법 등 매 가공마다 그 값을 바꾸어 줄 수 있으며, 이러한 값을 조절함으로써 제품의 품질의 향상과 시간 단

축의 효과를 거둘 수 있는 변수를 말한다. 가변변수의 종류와 최적 값은 실험을 통하여 결정하였으며 이들을 기능에 따라서 각각 Technology, Parallel, Cutting, Path 공정변수로 나누었다.⁽⁶⁾

2.3.2 Technology 공정변수

Technology 공정변수는 용접시 비드의 품질크기에 영향을 미치는 변수로서 비드의 품질과 크기에 영향을 미치는 변수로써 비드 사이의 간격, 용접속도, 보상값이 여기에 속한다. 비드의 두께는 용접속도에 반비례하기 때문에 용접속도를 통해서 비드의 두께와 폭을 조절할 수 있다. 또한 외곽을 용접하는 경우는 단면을 채울 때 보다 비드의 두께가 얇아야 하는데 외곽의 용접속도를 내부보다 빠르게 함으로써 조절할 수 있다. 또한 용접 끝 부분에서도 비드가 용접방향으로 흘러내리는 현상이 발생하는데 이를 막기 위해 용접건을 용접방향의 반대방향으로 이동시켜 보상을 해준다. 이때 사용되는 공정변수가 보상값이다.

2.3.3 Parallel 공정변수

Parallel 공정변수는 단면 적층방법을 설정하는 공정 변수로서 외곽선 용접과 내부용접의 유무, 용접우선 순위, Scale value, 내부용접시 적층방법, 각 단면간의 적층방향 설정 등이 parallel 공정변수에 포함된다. 용접으로 생성되는 단면은 외곽선과 내부로 구분된다. 외곽선과 내부는 작업자에 의해 공정변수를 조절함으로써 선택적으로 생성될 수 있다. Scale value는 실제 단면 데이터보다 내부와 외곽선을 확대시키거나 축소시켜 용접경로를 생성시키는 공정변수다. 외곽과 내부를 모두 용접하는 경우에는 외곽 용접선과 내부용접선 사이에 Overlap되는 부분을 Scale value를 사용하여 조절할 수 있다. Fig. 5은 핸드폰 금형 Core의 N번째 층을 적층하는 경우 Rapid NC에 의해 생성되는 내부 용접경로와 외부 용접경로를 보여준다.

2.3.4 Cutting, Path 공정변수

Cutting 공정변수는 절삭 작업을 설정하는 변수로써 한 단면의 적층이 끝난 후 단면의 높이를 맞추기 위한 절삭작업을 수행한다. 공구의 반경 및 절삭 속도, Z축 방향절삭과 옆면 절삭선택, Z축 방향 절삭시 절삭 경로 설정등이 여기에 속한다.

Path 공정변수는 용접공정 실행시 작업시작 높이와 작업 끝 높이, Layer 회전등을 설정할 수 있는 변수이다.

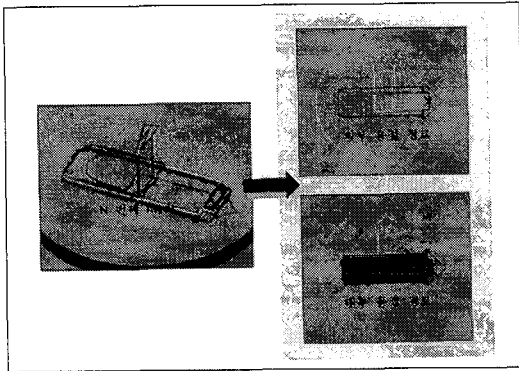


Fig. 5 External and internal Path of Welding

2.4 실험변수

레이저 출력은 와이어를 용융시키는데 필요한 출력을 결정한다. 이송속도와 와이어 진입속도는 용접시 생성된 비드의 두께와 폭을 결정하는 변수이고, 보호가스는 생성된 비드의 산화를 방지하기 위해 사용하였다. 본 실험에서 가장 중요한 변수는 레이저 출력, 이송속도, 와이어 진입속도 등의 변수이다. 적층에 요구되는 각각의 변수를 아래의 항목(Table 1.)에 자세히 보여지고 있다. 이 변수들의 최적조건을 선정하기 위해 Single line 실험을 하였고 여기서 선정된 최적의 변수로 기본형상을 제작하였다.

Table 1 Parameter and Range of experiment

변수	범위
Laser Power(P)	600-700 [W]
Table Speed(F _t)	200-600 [mm/min]
Wire Feed Rate(F _w)	400-600 [mm/min]
Shield Gas Pressure	10-15 [l/min]
Spot size(diameter)	2.5-3.0 [mm]
Angle of the Wire Feeding	20-30 [Deg.]

Table 2 of Wire Chemical Properties(%) (KS D 7025 YGW12)

C	Mn	Si	P	S
0.08	1.07	0.45	0.012	0.011

2.5 실험방법

실험은 단층실험과 적층실험으로 나누어 실행하였다. 먼저 단층실험에서 와이어 진입각도를 설정한 다음, 레이저 출력과 와이어 진입속도를 고정시키고 이송속도를 변화시켜 이송속도에 따른 비드형상의 영향을 조사하였다. 다음 단계에서는 레이저 출력과 이송속도를 고정시키고 와이어 진입속도를 변화시켜 와이어 진입속도에 대한 영향을 관찰하였고, 마지막으로 레이저 출력의 변화에 따른 비드형상의 영향을 조사하였다. 이와 같이 반복해서 얻은 최적변수와 레이저 초점, 보호가스 압력에 따른 영향도 조사하였다. 이렇게 생성된 비드 중 양호한 것을 선별하여 비드의 높이와 폭을 측정하여 변수들의 영향을 조사하였다. 적층실험에서는 단층실험을 통해 얻은 각각의 최적조건과 비드사이의 간격을 변화시켜 양호한 평면이 얻어지는 조건을 선정하였다.

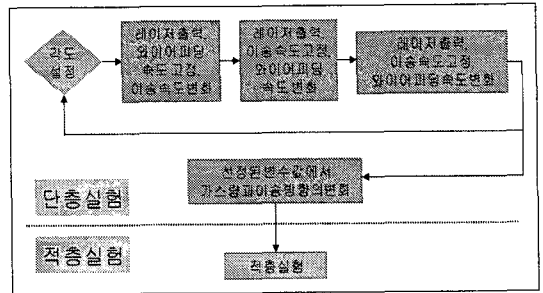


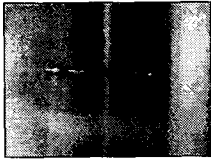
Fig. 6 Flowchart of Experiment

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단층실험

최적의 용융조건을 선정하기 위해 단층실험을 진행하였다. 레이저 출력과 와이어 진입속도를 일정하게 유지시키고, 이송속도를 증가시키면 비드의 두께와 폭의 크기는 감소하고, 반대로 이송속도를 감소시키면 비드의 두께와 폭은 증가한다. 또한 레이저 출력과 이송속도를 일정하게 유지시키고 와이어 진입속도를 증가시키면 두께와 폭의 크기는 증가하고 반대로 와이어 진입속도를 감소시키면 두께와 폭의 크기는 감소한다. 이와 같이 비드의 두께와 폭은 이송속도에 반비례하는 경향을 보였고, 와이어 진입속도에 비례하는 경향을 보였다.

레이저 출력, 이송속도, 와이어 진입속도, 레이저 초점크기, 와이어 진입각도 등을 고려하여 실험한 결과, 아래 Fig. 7과 같은 최적의 용융조건을 선정하였다.

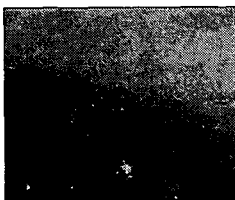


Laser Power	650W
Table Speed(Fr)	400mm/min
Wire Feed Rate(Fw)	450mm/min
Spot Size	2.5-3.0mm
Wire diameter	0.9mm
Shield Gas Pressure	3 bar
Deposition Length	50mm
Layer Thickness	0.5mm
Line Width	1.2mm
Angle of the Wire Feeding	30 (Deg.)

Fig. 7 Single Line of Bead

3.2 적층실험

적층실험을 통하여 기본 비드, 비드로 이루어진 벽, 벽으로 이루어진 육면체가 결과로 보여지고 있다. 비드가 생성될 때 윗부분의 모양이 곡면을 이루고 있어 다음 층을 적층시 용융된 금속이 흘러내리는 현상이 발생하였다. 또한 층마다 표면에 결함이 생겼을 경우, 적층을 할 때마다 결함이 더욱 커졌다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 적층 후 0.2mm 절삭가공을 수행한 결과, 항상 일정한 비드의 높이를 유지 할 수 있었으며 표면결함이 생겨도 절삭가공을 통해 이를 제거하여 적층이 가능하였다. 이렇게 비드의 윗면을 절삭해 줌으로서 용융된 금속이 흘러내리는 현상도 방지 할 수 있었다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 적층시의 최적조건과 최종형상의 모습을 나타내고 있다.

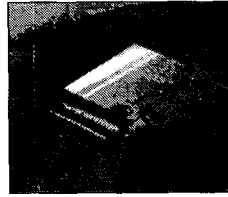


Laser Power	600-700W
Table Speed	400mm/min
Feed Rate	450mm/min
Spacing	1mm
Layer Thickness	0.5mm
Spot Size	2.5-3.0mm
Size	2×30×10mm (2Lines)

Fig. 8 Wall

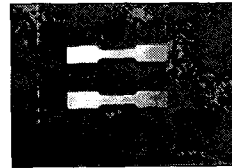
3.3 인장시편제작 및 인장시험

기본적인 형상 제작과 함께 쾌속 금속적층 공정으로 제작된 제품의 기계적성질 테스트를 위해



Laser Power	600-700W
Table Speed	400mm/min
Feed Rate	450mm/min
Spacing	1mm
Layer Thickness	0.5mm
Spot Size	2.5-3.0mm
Size	30×50×10mm (30Lines)

Fig. 9 Rectangularity



시편규격	ASTM E8M
Laser Power	600-700W
Table Speed	400mm/min
Feed Rate	450mm/min
Spacing	1mm
Layer Thickness	0.5mm
Spot Size	2.5-3.0mm
Size	100×12×3mm (12Lines)

Fig. 10 Tensile Specimens

ASTM 표준규격 인장시편을 제작(Fig. 10)하였다. 인장시편을 제작함으로써 제품의 정밀도와 인장강도를 측정하여 시작 금형 제작공정으로서의 가능성을 파악해 볼 수가 있었다.

강도를 측정하기 위해 ASTM 표준 인장시편을 제작하였다. 레이저 용접에 사용된 와이어는 AWE ER 70S-6 탄소강 소재이며 직경이 0.9mm이다.

인장시험 결과 시편의 인장강도가 55.66Kg/mm² 연신율이 53% 정도이었다. 이는 기존의 탄소강 강도와 연신율이 거의 같은 결과값을 나타내었다.

아래의 Table 3은 기존의 탄소강과 쾌속 금속조형장비로 제작한 시편의 비교 데이터이다.

Table 3 Comparison of Mechanical Properties between Mild Steel and Test Specimen

	항복강도 (Kg/mm ²)	인장강도 (Kg/mm ²)	연신율 (%)
탄소강	47	56	30
Test specimen	-	55.66	52

3.4 미세구조

적층 비드에 관한 조직 SEM 사진이 Fig. 11과 같이 보여지고 있다. Base에는 일반 연강의 조직구

조가 선명히 나타나 있다. 기저층이나 용접 선재에 의해 적층된 비드는 같은 연강에 속하지만 그 성분은 약간씩 다르다. [A] 부분은 기저층을 보여주고 있으며 또한 첫 비드가 적층이 되어진 바로 아래의 HAZ(Heat-Affected-Zone)가 [B]에 Fig. 11과 같이 나타나 있다. [C][D][E]는 용접 비드의 조직을 보여주고 있으며 [F]는 최상단 급냉에 의한 마텐사이트 조직을 보여주고 있다. [G]는 다른 적층 비드의 예로써 용착이 제대로 되지 않아 비드와 비드 사이에 틈이 보여지고 있다. 이러한 불량한 용착은 충분한 출력에서 용착이 이루어지지 않거나 선재의 공급량이 적당하지 않을 때 실험적으로 나타나고 있다.

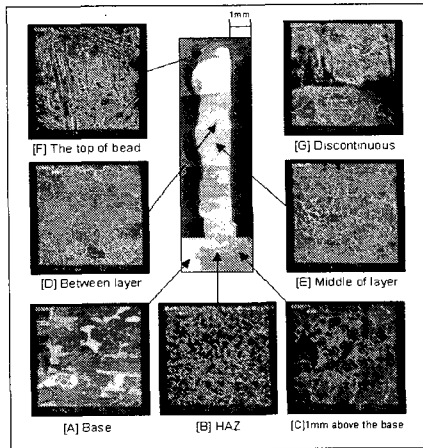


Fig. 11 Microstructure of the Wall

본 적층 실험에 중요한 포인트는 비드 사이에 접합부가 어떤 조직을 가지며 충분한 강성 및 연성을 가지고 있느냐는 것이다. 접합부에서 산화된 조직도는 마텐사이트 조직은 나타나고 있지 않은데 이것은 한층이 적층된 후 절삭 가공을 통해 그 부분이 제거되었기 때문이다. 미세 조직 사진에 나타난 비드 접합부[D]의 조직(20-30 μ m)은 비드 안의 가운데 부분(5-10 μ m)보다도 더 크게 나타나고 있다. 이는 상층 비드의 적층시 템퍼링의 효과가 나타나 조직의 성장으로 보여지며 이 부분의 강성은 비드 가운데 부분[E]과 비교하여 경도가 다소 감소하나 크랙이 발생하는 등의 취성에도 강한 것으로 여겨질 수 있다. 최상층에는 급속한 냉각에 의해 마텐사이트 조직이 나타나고 있으며 이는 그

림에서 잘 보여지고 있다.

3.5 Hardening

레이저의 특성상 아크 용접처럼 다른 열에 의한 공정보다는 효과적으로 그 열에 의한 효과를 제어할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 열에 의한 국부적 경화는 본 공정에 있어서도 필연적인 것이다.

본 공정을 통하여 사출금형 등을 제작했을 시 그 금형은 기본적으로 마모와 크랙(crack)에 대한 강성을 가져야함으로 이러한 관점에서 보면 긍정적인 측면으로 여겨질 수 있다. 열에 의한 경화는 그 온도 분포와 밀접한 관계를 가지고 있는데 온도 변화 및 분포에 관한 연구는 이러한 공정에서 필수적 요건이다. 그러나 실험적으로는 높은 온도 측정 및 급격한 온도 변화 때문에 이러한 온도 변화 분포를 얻기가 매우 어렵다고 여겨지고 이에 따른 대안으로 온도 분포 예측이 가능한 수치적 접근을 해야 함이 예상된다.

경도의 수치는 열전달에 의하여 급냉 된 기저층에서 비교적 높게 나타나고 위로 올라감에 따라 그 값이 수렴될 것임을 예측할 수 있고 실제 측정 값에서도 그 기저층 바로 윗 부분(1mm 상단)(Fig. 12)에서 높은 수치를 보여주고 있다.

층과 층 사이의 용융된 부분이 또한 의미 있는 수치를 가지고 있는데 여기에서는 경도가 층 중간보다 20 Hv 정도 다소 감소된 수치 나타나고 있고 이는 상위층 적층시 하위층에 대해 열에 의한 템퍼링 효과로 설명될 수 있다. 이러한 수치는 비드 하단에서 보다 잘 나타난다. 비드 전체에 걸쳐 경도는 상위부분으로 갈수록 점점 작아지며 수렴하는 것으로 보이고 있다. 최상단은 절삭되지 않은 부분으로 공냉으로 인한 마르텐사이트 조직이 나타나 있고 그 경도 또한 매우 높게 나타나고 있다.

4. 결론

- 1) 기본 파트제작으로 정밀 금형이나 금속 원형들을 적층할 수 있는 기본적 실험데이터를 얻을 수 있었다.
- 2) 적층된 벽의 미세 조직 검사 등을 통하여 전체 파트의 특성을 파악할 수 있었다.

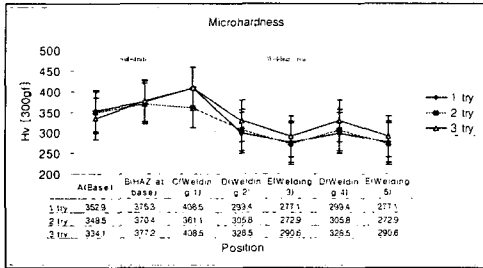


Fig. 12 Micro-Hardness

3) 쾌속 금속조형장치로 제작된 인장시편으로 인장시험과 경도시험을 실행한 결과, 측정된 강도나 정밀도를 살펴보면 사출성형을 실행 할 수 있는 시작 금형 제작에 응용될 수 있음을 보여준다.

참고문헌

1. M.Murphy, C.Lee, W.M. Steen, "Studies In Rapid Prototyping By Laser Surface Cladding," ICALEO, pp. 882-892, 1993.
2. Luqman Ahmad, Lesley Eckstrand, Jason Pantarotto, "Rapid Prototyping & Solid Freeform Manufacturing," Canadian Cermics Quarterly, pp. 104-107, May 1997.
3. Rapid Prototyping Report, CAD/CAM Publishing, Inc., pp. 4-6, Jan.1999.
4. B.K. Paul, S. Baskaran, "Issues in fabricating manufacturing tooling using power-based additive freeform fabrication," Journal of Materials Processing Technology 61, pp. 168-172, 1996.
5. Steven Ashley, "Rapid prototyping is coming of age," Mechanical Engineering, pp. 63-68, July 1995.
6. 최두선, 신보성, 황경현, 박진용, 송용익, 박세형, "레이저 용접공정과 밀링공정에 의한 쾌속 금속 시작품 제작," 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp. 763-766, 2000.