

EVA 를 이용한 가변 용착 쾌속 조형 공정의 개발

이상호*, 신보성**, 정준호*, 안동규*, 양동열*

Development of Variable Deposition Manufacturing for Ethylene Vinyl Acetatecopolymer

Sang Ho Lee*, Bo Sung Shin**, Jun Ho Jeong*, Dong Gyu Ahn*, Dong Yol Yang*

ABSTRACT

RP techniques have their unique characteristics according to the working principles: stair-stepped surface of parts due to layer-by-layer stacking, low build speed caused by line-by-line solidification to finish one layer, and post processing to improve surface finish, etc. The objective of this study is to propose a new RP technique, Variable Deposition Manufacturing (VDM), which can make up for the disadvantages of the existing RP techniques, and to develop an apparatus to implement the technique. The proposed process can greatly reduce the build time and improve the surface finish of parts generated. Experiments are carried out to obtain the range of temperature of molten material to maintain its fluidity and to investigate the effect of gas cooling on the preservation of the slopes. Some simple shapes such as a line-shape, an S-shape, and a circle-shape are fabricated from Ethylene Vinyl Acetatecopolymer (EVA). In order to examine the applicability of VDM to more general shapes, a tensile specimen and a yo-yo shape were manufactured by the proposed RP method using EVA material as a trial approach. The current basic study shows a high potential of practical use of the proposed VDM process to prototyping of a general three-dimensional shape.

Key Words : Rapid Prototyping(쾌속조형), Variable Deposition Manufacturing(가변용착쾌속조형), build time(적층 시간), Ethylene Vinyl Acetatecopolymer(EVA)

1. 서론

쾌속 조형법이 등장한지 10 여년이 경과하는 동안 3 차원 시작품 제작을 위하여 여러 가지 새로운 쾌속 조형 기술이 개발되었다¹⁾. 현재 상용화되었거나 개발중인 쾌속조형법에는 StereoLithography Apparatus(SLA), Fused Deposition Modeling(FDM), Shape Deposition Manufacturing(SDM)²⁾, Selective Laser Sintering(SLS), 3D printing, Laminated Object Manufacturing(LOM) 등이 있다³⁾.

이러한 기존의 쾌속 조형 공정은 다음과 같은 문제점이 있다.

- 3 차원 CAD 데이터를 z 방향으로 슬라이싱하

여 2 차원 슬라이스 데이터를 얻는 과정에서 z 방향으로 계단형상의 단차가 생긴다. 이러한 계단 형상 때문에 시작품의 정밀도가 떨어진다. 그러므로 시작품의 정밀도를 향상시키기 위해서 추가적으로 시작품의 계단 형상 제거를 위한 후처리 공정이 요구된다.

- 고정된 두께의 얇은 층(LOM의 경우 한 층의 두께는 0.1067 mm 임)과 선 형태로 적층하기 때문에 많은 조형 시간이 소요된다.

이와 같은 기존의 쾌속 조형 공정의 문제점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 정밀도 향상과 조형 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있는 새로운 개념의 가변 용착 쾌속 조형 공정(Variable Deposition Manufacturing)을 제안하며, 이에 대한 실제적인 예

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국기계연구원

로써 봉 타입의 핫멜트 접착제의 주재로 널리 쓰이는 Ethylene Vinyl Acetatecopolymer(EVA)를 공급 재료로 사용하는 VDM 공정을 개발하였다.

2. 가변 용착 패속 조형 공정

가변 용착 패속 조형 공정(Variable Deposition Manufacturing)은 가변 노즐로부터 유출되는 용융 재료의 폭(width), 두께(thickness), 그리고 측면 경사(slope)를 실시간 제어하여 3차원 형상을 적층 조형하는 패속 조형 공정이다. Fig. 1은 가변 용착 패속 조형 공정(VDM)으로 측면 경사를 가진 3차원 타원체의 적층 과정과 적층 형상을 나타내고 있다.

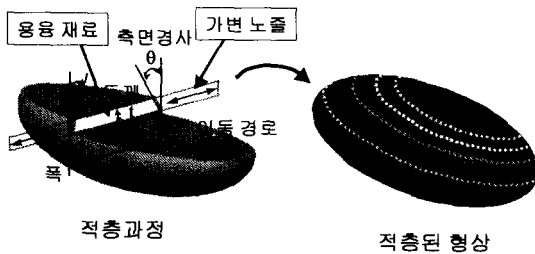


Fig. 1 Schematic of Variable Deposition Manufacturing (VDM)

3. 가변 용착 패속 조형 공정의 실험 장치

3.1 장치의 구성

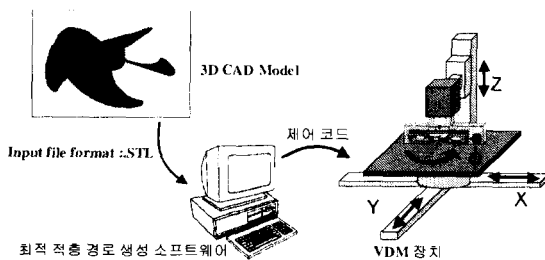


Fig. 2 The work flow of VDM

Fig. 2는 가변 용착 패속 조형 공정(Variable Deposition Manufacturing)의 공정 흐름도이다. 먼저, SolidWorks 98 Plus 나 Pro-Engineer 같은 3차원 CAD Modeler를 이용하여 조형하고자 하는 파트를 모델링한다. 이렇게 모델링된 3차원 CAD 모델은 STL 파일 포맷으로 변환한 후, 'Slicing' 소프트웨어

어에 입력하여 적층 단면 및 최적 적층 경로를 생성한 후에 인터페이스용 제어 코드로 변환된다. 이 제어 코드에 따라 VDM 장치는 x 축, y 축, z 축으로 이송과 ϕ 축으로 회전을 반복하면서 3차원 형상을 제작하게 된다.

Fig. 3은 가변 용착 패속 조형 공정을 위해서 개발된 실험 장치이다. VDM 실험 장치는 가변 용착 노즐, 이송 테이블 장치, 그리고 구동 컨트롤러(controller)로 구성된다.

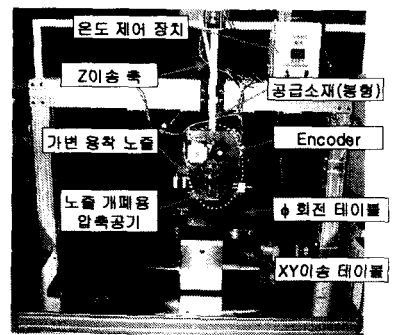


Fig. 3 The experimental apparatus for VDM

이 가변 용착 패속 조형 장치에서 가장 중요한 부분은 가변 용착 노즐 장치이다. 가변 용착 노즐의 최대 폭은 25 mm 이고, 최대 두께는 3 mm 로 하였다. VDM 공정을 집진적으로 구현하기 위해서 1차적으로 가변 폭 개념을 구현하고, 측면 경사는 수직선에서의 각도로 표시하며 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°로 교체할 수 있도록 함으로써 가변 경사의 개념을 적용할 수 있도록 하였다. 정밀한 제어를 하기 위해서 소재의 공급량을 감지하는 인코더와 테이블의 이송부는 서로 동기를 시켜서, 소재가 공급되는 동안에는 테이블이 이송되지만, 소재가 공급되지 않으면 테이블의 이송을 멈추고, 노즐의 출구가 닫히도록 설계하였다. 이송 테이블 장치는 가변 용착 노즐 시스템의 설계 변경(무게, 크기)에 적절하게 대응하도록 하기 위해서 테이블이 x 축, y 축, z 축으로 이송되고, ϕ 축으로 회전하도록 설계하였다. 작업공간(Working space)의 크기는 300×300×240 mm³ 이고, table의 최대 이송 속도는 50.8 mm/sec 이다. 테이블 장치에는 주목할 점은 ϕ 축으로 회전이송이 가능하다는 점이다. 이 때문에 VDM 장치는 축 대칭 파트의 시작에 유리하다. 각각의 축의 스테핑 모터를 구동하기 위한 컨

트롤러와 컴퓨터 입출력 인터페이스 카드를 제작하여 컴퓨터에 의해 테이블의 이송과 소재의 공급을 동시에 제어할 수 있도록 하였다. 모터 제어를 위한 소프트웨어는 C언어를 이용하여 직접 프로그래밍 하였다.

3.2 적층 과정과 실험 재료

Fig. 4는 Fig. 3에 나타낸 VDM 실험 장치를 이용한 적층 과정을 나타내고 있다. 현재 가변 용착 노즐은 z축에 고정되어 있고 조형테이블이 x, y축으로 직선 이송되고, z축을 중심으로 회전하면서 적층을 수행하게 된다.

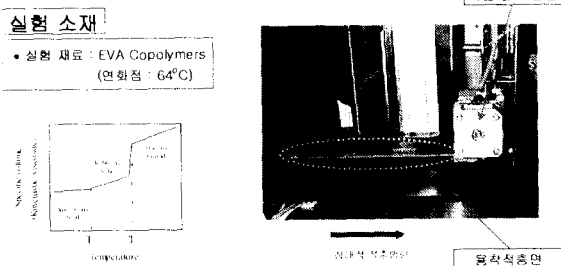


Fig. 4 One layer deposition process of VDM

실험 재료는 봉 타입의 핫멜트 접착제의 주재로 널리 쓰이는 EVA를 사용하였다. 여기서 사용되는 재료의 연화점은 초산 비닐의 첨가량에 따라서 달라지지만 약 64°C 정도이다¹⁵⁾.

4. EVA를 이용한 실험 및 실험 결과

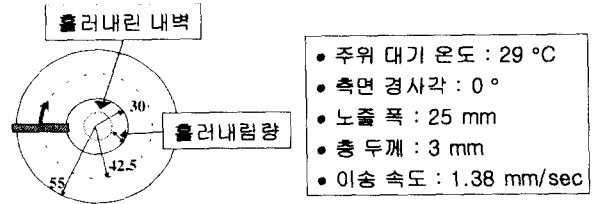
4.1 원형 용착 적층 실험 (1)

Fig. 5(a)에서처럼 흘러내림량을 안쪽 원의 벽면에서부터 흘러내린 내벽까지의 거리로 정의 하였다.

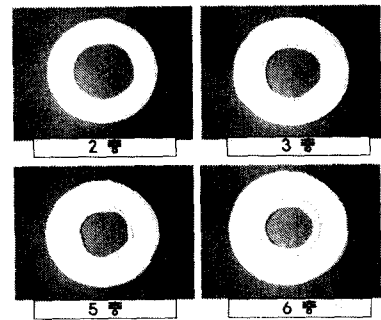
Fig. 5(b)는 위의 실험 조건하에서 냉각을 하지 않았을 때, 적층 실험 결과를 보여 주고 있다.

Fig. 6에서 냉각을 하지 않았을 때, 위 층으로 갈수록 흘러내림량이 많아지는 이유는 위층으로 갈수록 온도가 상승하기 때문임을 알 수 있다.

따라서, VDM 공정에서 용융 재료를 다층 적층할 때, 주위와의 열전달의 불균일과 층간의 온도차 때문에 발생하는 흘러내림을 방지하여 제대로 된 형상을 만들기 위해서는 반드시 냉각 메커니즘이 있어야 한다.



(a) Experimental conditions



(b) Experimental results

Fig. 5 Deposition of a multi-layered circular shape without cooling

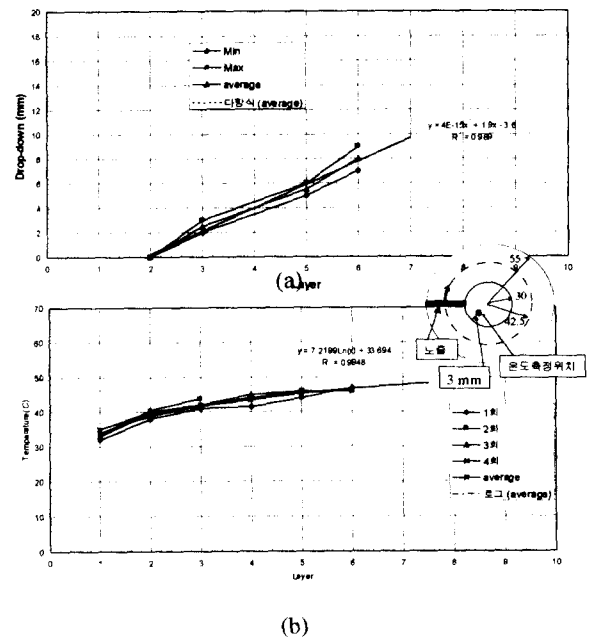
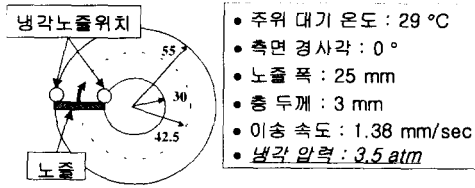
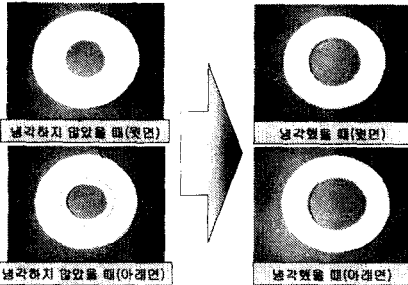


Fig. 6 (a) The amount of drop-down versus the number of layers (b) Temperature of the bottom layer versus the number of layers

4.2 원형 용착 적층 실험 (II)



(a) Experimental conditions



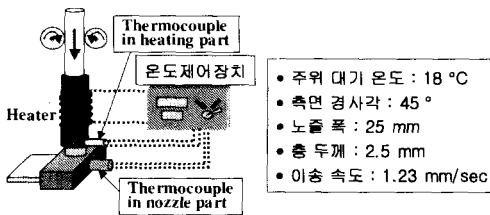
(b) Experimental results

Fig. 7 Deposition of a multi-layered circular shape with cooling

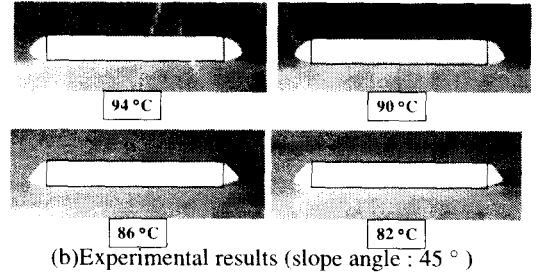
Fig. 7(b)는 냉각을 하지 않았을 때와 냉각을 했을 때의 윗면과 아래면의 흘러내림 정도를 나타내고 있다. 냉각을 하지 않았을 때, 내경쪽의 벽면은 6 mm 이상의 흘러내림이 발생하였고, 외경쪽의 벽면도 1 mm 정도의 흘러 내림이 발생하였다. 이에 비해서 냉각을 수행했을 때, 6층 이상을 적층하여도 외경쪽의 벽면은 물론이고, 내경쪽 벽면에도 흘러 내림이 거의 발생하지 않았다.

따라서, VDM 공정에서 용융 재료를 다층 적층할 때, 냉각 메커니즘에 의해서 주위와의 열전달의 불균일과 층간의 온도차 때문에 발생하는 흘러내림을 방지하여 제대로 된 형상을 만들 수 있었다.

4.3 온도 제어에 따른 경사각 구현 실험



(a) Schematic diagram of the temperature control unit



(b) Experimental results (slope angle : 45°)

Fig. 8 The effects of temperature control on the slope and fluidity of one layer

Fig. 8 (b)는 위의 실험 조건하에서 노즐의 Al 몸체의 온도를 94 °C에서 82 °C까지 4°C 간격으로 점차 낮추어 가면서 직선 단층 적층 실험을 수행한 결과이다. 온도를 낮추면 경사각은 구현되지만 재료의 유동성이 떨어지고, 온도를 높이면, 유동성은 개선되지만, 경사각이 구현되지 않는다. 실제의 결과에서도 94 °C에서는 두께와 폭은 비교적 균일하지만 측면 경사각은 용융 재료의 표면장력과 중력 때문에 측면이 곡면 형태를 이루면서 아래로 처지는 현상이 발생하였다. 82 °C 이하에서는 소재의 유동성이 떨어져서 재료의 공급이 제대로 이루어 지지 않았다. 86 °C에서 소재의 유동성도 떨어지지않고, 45°의 경사각이 어느 정도 구현되는 결과를 얻었다. 하지만, 86 °C에서 경사각이 어느 정도 구현되는 대신에 용융 재료의 유동성이 떨어져서, 점성이 커지므로 인해서 가장자리 부분이 바닥에 용착되지 않고 뜨는 현상을 관찰할 수 있었다.

따라서 VDM 공정에서 가변 노즐로부터 유출되는 용융 재료의 경사각을 구현하기 위해서는 노즐의 온도를 특정온도로 유지하는 것이 중요하다. 이때의 온도는 재료의 유동성과 아래층과의 접착을 위한 최소의 온도와 형상을 유지하기 위한 최대의 온도 사이에서 절충이 필요하다. 이 실험 조건하에서는 86°C가 소재의 유동성도 좋고, 측면 경사각도 구현되는 온도로 볼 수 있다.

4.4 형상 정밀도 향상을 위한 방법

4.4.1 Rolling 을 이용한 윗면 평탄화

Fig. 9 (b)는 위의 실험 조건하에서 롤러를 이용하지 않은 경우와 롤러를 이용한 경우, 각각에 대하여 단면의 평면도¹⁷⁾를 비교한 것이다. 롤링을 하

지 않았을 때, 가운데 부분이 주어진 두께인 2.5 mm 보다 0.1 mm 정도의 두껍게 나타난다. 또한, 가장자리 부분에서는 표면 장력과 중력 때문에 측면이 곡면 형태를 이루면서 아래로 처지는 현상이 발생하였다.

하지만 롤링을 수행하였을 때, 거의 균일한 두께를 나타내고 있다. 그리고, 가장자리 부분도 바닥에 완전히 용착됨을 알 수 있다.

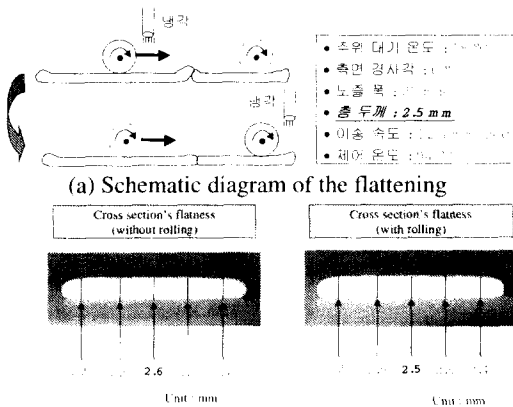


Fig. 9 The flattening of upper surface of one layer deposition by rolling

4.4.2 Filling 을 이용한 측면 단차 제거

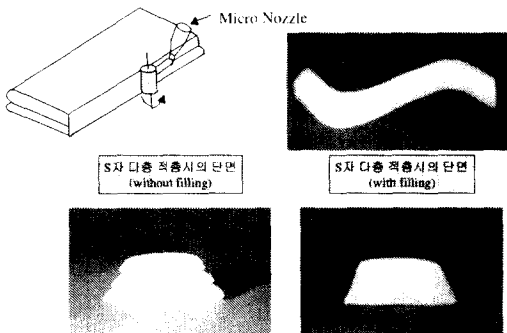


Fig. 10 The filling process for correcting the staircase of a multi-layered S-shape

Fig. 10 의 아래쪽은 위의 실험 방법을 S 자 형상에 적용하여 단차를 제거한 실험 결과이다. 필링(Filling)을 수행하지 않았을 때, 가장자리 부분에서는 표면 장력과 중력 때문에 측면이 곡면 형태를 이루면서 아래로 처지는 현상이 발생하였고, 88 °C 에서 45° 의 경사각이 어느 정도 구현되는 대신에

용융 재료의 유동성이 떨어져서, 접성이 커지므로 인해서 가장자리부분이 바닥에 용착되지 않고 뜨는 현상이 역시 발생하였다. 이러한 문제점 때문에 필링을 수행하지 않고, S 자 형상을 3 층으로 폭을 줄여 가면서 적층 하였을 때의 단면은 Fig. 10 아래쪽의 왼쪽에 보여진 것과 같이 측면에 단차가 발생하였다. Fig. 10 아래쪽의 오른쪽에 보여진 바와 같이 필링을 수행하였을 때, S 자 형상의 다층 적층 시에 측면의 단차가 거의 제거 되었음을 알 수 있다.

4.5 EVA 를 이용한 3 차원 형상 제작

4.5.1 기초 형상 제작

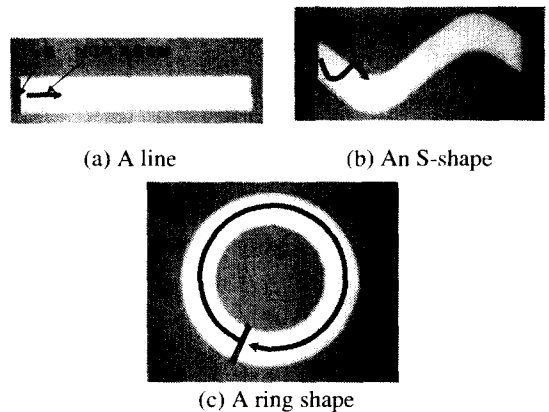


Fig. 11 Primitive shapes

Fig. 11 에 보여진 바와 같이 모든 형상을 만드는 기본이 되는 기초 형상인 직선형, S 자형, 원형을 가변노즐로부터 유출되는 용융재료를 적층하여 제작하였다.

직선형과 S 자형의 경우, 시작하고 끝나는 부분에서 발생하는 결함을 급냉한 후 끝을 잘라 내어 제거하였다. 그리고 원형의 경우, 시작하고 끝나는 부분이 만나는 곳에서 롤링을 하여 평탄화시켰다.

4.5.2 인장 시편 제작

Fig. 12 은 각각 LOM 과 VDM 으로 만든 인장 시편을 보여 주고 있다.

VDM 의 가장 큰 특징 중에 하나인 가변 폭 개념을 이용하여 인장 시편을 제작하였다. 기존의 용착조형공정(FDM)⁸⁾을 이용하여 이러한 시편을 제작하려면 선 형태로 적층 하여야 하기 때문에

하나의 path로 이러한 제품을 제작할 수가 없다. 하지만 VDM 공정은 한 층에서 폭을 변화 시킬 수 있기 때문에 이러한 인장 시편을 하나의 path로 제작할 수 있다. 이 점이 기존의 쾌속 조형 공정에 비해서 VDM 공정이 가지는 가장 큰 장점 중에 하나이다.

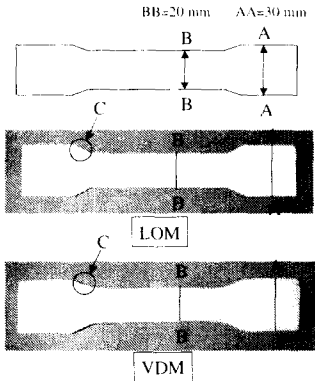


Fig. 12 Tensile specimens made by LOM and VDM

기존의 쾌속 조형 공정 중에 하나인 고정된 두께의 얇은 층을 적층하여 형상을 만드는 LOM과 순수 제작 시간을 비교하여 보았다. Table. 1에 나타낸 바와 같이, VDM이 기존의 LOM에 비해서 두꺼운 두께로 적층함으로써 순수 제작 시간의 측면에서 볼 때, 약 6 배 정도로 조형 시간을 대폭 단축 시켰다.

Table 1 Comparison of build time of a tensile specimen between LOM and VDM

	One layer's thickness	Total build thickness	Total number of build layer	Net build time
LOM (1015)	0.1067 mm	6 mm	56 layers	60 min
VDM	3 mm (×28)	6 mm	2 layers	10 min (×6)

Fig.12에서 VDM과 LOM의 치수 정밀도를 비교하면 다음과 같다. Fig.12의 가장 위쪽에 있는 그림은 실제 CAD 모델의 AA(30 mm)와 BB(20 mm)에서의 치수를 나타내고 있다. 인장 시편의 폭 방향의 치수는 LOM의 경우, AA=29.7 mm이고, BB=19.9 mm으로 각각 실제의 치수에 대해서 0.3 mm와 0.1 mm의 오차를 나타내고 있다. 이에 비해서 VDM의 경우, AA=30.5 mm이고, BB=19.4 mm

으로 각각 실제의 치수에 대해서 0.5 mm와 0.6 mm의 보다 큰 오차를 나타내고 있다. 이것은 재료의 수축보다는 현재의 VDM 장치의 적층 정밀도가 떨어지기 때문이다. C부분은 LOM에서는 거의 직선으로 모따기가 되었지만, VDM에서는 그렇지 못하다.

4.5.3 요요 형상 제작

Fig. 13(a)는 보다 복잡한 3차원 형상인 요요의 적층 경로와 제작 과정을 보여준다. 원형 적층 후에 시작과 끝이 만나는 부분에 형상 결함이 발생하기 때문에 롤링을 수행하여 평탄화 시켜 준다. 또한 그 위에 새로운 층을 쌓을 때, 90°씩 적층 시작 위치를 회전시켜서 적층함으로써 결함이 누적되는 것을 방지하도록 하였다. 원형에 rib를 붙일 때, 시작하는 부분에서 발생하는 결함도 롤링을 통해서 평탄화 시켰다.

rib 부분은 앞서 인장 시편과 마찬가지로 한 층에서의 가변 폭 개념을 적용한 예이다. 그리고 원형의 경우, 총 5층을 적층 하였는데, 위로 갈수록 폭을 달리하였다. 또한 유량 제어를 수행하여 위층의 폭이 변해도 테이블이 빨리 회전하도록 하여 균일한 두께를 얻었다.

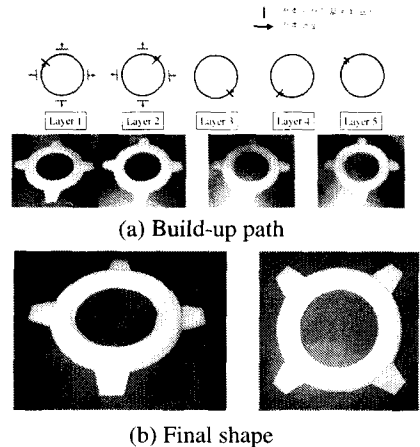


Fig. 13 The build-up path and final shape of yo-yo

Fig. 13(a)의 아래 그림은 실제 적층 과정을 나타내고 있다.

Fig. 13(b)는 롤링을 통해서 윗면을 평탄화 시키고, 필링을 수행하여 측면의 계단 형상을 제거한 최종 요요 형상을 나타내고 있다.

5. 결론

기존의 쾌속 조형 공정은 적층 시에 발생하는 계단 형상 때문에 시작품의 정밀도가 떨어진다. 이 때문에 시작품의 정밀도를 향상시키기 위해서 추가적으로 시작품의 계단 형상 제거를 위한 후처리 공정이 요구된다. 또한 고정된 두께의 얇은 층과 선 형태로 적층하기 때문에 많은 조형 시간이 소요된다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 다음과 같은 연구가 수행되었다.

첫째, 폭, 두께, 측면 경사 등이 조절 가능한 가변 용착 쾌속 조형 공정을 개발하였다.

둘째, 개발된 VDM 공정의 소재로 EVA 를 이용하여 선형과 S 자형, 그리고 원형 같은 기본 형상을 제작하고, 보다 일반적인 3 차원 형상인 인장 시편과 요요를 제작하였다.

셋째, 단면이 변하는 평평한 물체를 조형하는 경우, 기존의 쾌속 조형기 보다 넓은 폭과 두꺼운 두께로 조형함으로써 형상의 제작 시간을 대폭 단축시켰다.

향후 현재 VDM 공정의 정밀도를 보다 향상시키기 위해 EVA 재료 외에 다른 플라스틱이나 금속 재료에 대해서 VDM 공정을 적용해 보고, 보다 정밀한 가변 용착 노즐을 설계 제작하여 추가적인 적층 실험을 수행해 보아야 하겠다.

참고문헌

1. S. A. McMains, "Rapid Prototyping of Solid Three-Dimensional Parts," Master's Project under the direction of Carlo Sequin, 1995.
2. Fritz B. Prinz and Lee E. Weiss, "Novel Applications and Implementations of Shape Deposition Manufacturing," The Third Pacific Rim International Conference of Advanced Materials and Processing, pp. 1547-1554, 1998.
3. Paul F. Jacobs, Stereolithography and other RP&M Technologies, ASME Press, pp. 4-15, 1996.
4. 임영도, 이상부, 컴퓨터 응용과 자동제어 기법, 도서출판 영과일, pp. 205-238, 1995.
5. William D. Callister, Jr., Materials Science and Engineering An Introduction, John Wiley & Sons, pp.

444-472, 1994.

6. 정동천, 플라스틱 재료해설과 성형조건, 코플래드, pp. 371-386, 1996.
7. E. Paul Degarmo, J T. Black, and Ronald A. Kohser, Materials and Processes in Manufacturing, Prentice-Hall, 8th Ed., pp. 244-298, 1997.
8. "Solid Freeform Fabrication Methods," Unites States Patent, Patent Number 5738817.
9. "가변용착적층식 쾌속조형공정 및 장치," 국내 특허, 출원 번호 10-1999-0008594.