

VLM-ST 공정과 삼단역전 쾌속 툴링 공정을 이용한 3차원 제품 정형가공에 관한 연구

안동규*, 이상호⁺, 양동열⁺

Three-Dimensional Net Shaping Combining VLM-ST and the Triple Reverse Rapid Tooling

Dong-Gyu Ahn*, Sang-Ho Lee⁺, Dong-Yol Yang⁺

Abstract

The technical combination of RP and RT has a potential for rapid manufacturing of three-dimensional parts. In the present work, a new RP system, VLM-ST, is proposed to manufacture net shapes of 3D prototypes. □ human head shape and a knob shape are manufactured by the VLM-ST apparatus. In addition, a new RT technology, which utilizes a RTV molding technique and a triple reverse process technique, is proposed to manufacture net shapes of 3D plastic parts using prototypes of VLM-ST. A plastic part of the knob shape is produced by the proposed RT technology. The combination of the proposed RP and RT enables the manufacture of a plastic knob within two days.

Key Words : Rapid Manufacturing, Rapid Prototyping, Rapid Tooling, 3-D Functional Parts

1. 서론

최근의 경제 상황 및 산업 현장의 두드러진 특징은 생산 방법의 급속한 발전과 소비자의 다양한 기호에 의한 제품의 다양화 및 제품 사이클의 현저한 단축과 국내외 시장의 치열한 경쟁이라 할 수 있다. 이 같은 시장 상황은 거의 모든 산업 분야에서 다품종 소량 생산의 특성을 가지고 있으며 제품 개발 및 생산 기간의 단축으로 인한 시장 진입 시간 및 투자 비용을 최소화할 수 있는 효과적인 제품 개발 및 생산 방법을 절실히 요구하고 있다.

이러한 시장 요구를 만족시키는 한가지 대안으로 동시 공학적 개념의 새로운 제품개발 및 생산 방식인 쾌속조형

(Rapid prototyping : RP), 쾌속 툴링 (Rapid tooling : RT) 기술을 결합한 쾌속 제품 생산 (Rapid manufacturing : RM) 방식이 국내·외적으로 활발하게 연구되고 있다.⁽¹⁾

쾌속 조형의 경우 1986년 광조형법 (SLA) 이 개발된 이후 약 20여가지 이상의 RP공정 및 장치들이 연구/개발 되고 있다.⁽¹⁾ 또한, 각 RP 공정들은 제작된 제품의 재료적 특성 극복과 대량생산을 위하여 각 공정에 적합한 RT 공정을 계속적으로 개발 및 연구하고 있다.

기존의 RP 공정 및 장치의 경우 장시간의 조형 시간, 고가의 장치 도입/유지비 및 추가적인 후처리 공정의 소요등의 단점을 가지고 있다. 최근에는 장치의 소형화, 공정 특성의 개선 및 재료 개발등을 통하여 기존 RP

* 주저자, 조선대학교 기계공학과 (smart@mail.chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375

+ 한국과학기술원 기계공학과

공정의 단점을 극복하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 제작 시간 최소화를 위하여 측면 경사를 가진 두꺼운 층을 쌓아 올려서 3차원 제품을 제작하는 후판 적층식 RP 공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Thomas 등은 상·하 두개의 xy 플로터 상대 운동에 의한 열선 경사를 이용하여 경사 절단을 수행하는 ShapeMakerII⁽²⁾를 개발하였다. Hope 등은 5축 워터젯으로 윤곽가공한 후, 이를 수작업으로 적층하여 물체를 완성하는 TrueSurf 공정⁽³⁾을 개발하였다. Zheng 등은 레이저 절단기가 부착된 5축 경사면 절단 시스템과 로봇 재료 이송 시스템을 이용한 CAM-LEM⁽⁴⁾ 공정을 개발한 바 있다. 하지만, 이러한 후판 적층식 RP 공정의 경우 적층 두께가 모두 10 mm 이상으로 매우 두꺼우며 고가의 절단 시스템과 대형 재료 운송 시스템으로 구성되어 실용적으로 사용되지 못하고 있다.

RT의 경우 RP 제품을 이용한 기능성 제품 제작을 위하여 지속적으로 개발되고 있다. RT에서는 RP 제품을 이용하여 직접 물체를 제작하는 방법과 RP에 의하여 제작된 원형으로부터 부가적인 공정을 거쳐 물체를 제작하는 2차 공정법이 있다. 현재 개발된 RP 기법에서는 경제적인 면과 기술적인 면을 고려할 때 2차 공정에 이용하여 제품을 제작하는 2차 공정법이 유리하기 때문에 이 방법이 광범위하게 활용되고 있다.⁽¹⁾ 2차 공정법에는 역전횟수에 따라 일단 역전 공정, 이단 역전 공정 및 삼단 역전 공정으로 나뉜다.⁽¹⁾

RP와 RT 공정의 장점을 결합한 RM 방법의 경우 여러 분야에서 다양하게 연구되고 있다. Park and Yang⁽⁵⁾은 SLA를 이용한 금형 제작 방법에 대하여 연구하였고, Kuzman 과 Geiger⁽⁶⁾는 DMSL 공정을 이용하여 직접식으로 박판 성형용 금형을 제작하였으며, Ahn과 Yang 등⁽⁷⁾은 연속형 가변적층 패속조형공정과 응용기술을 이용하여 금속 제품을 제작하였다.

본 연구에서는 RP 공정인 VLM-ST 공정과 VLM-ST 공정의 시작품을 이용한 삼단 역전 RT 공정(Triple reverse process) 및 이 두가지를 결합한 패속 3차원 기능성 제품 패속 제작 공정을 제안하였다. VLM-ST 공정으로 인체 두상과 노브 형상을 제작하여 본 공정의 적용성과 효율성을 보였다. VLM-ST로 제작된 시작품을 제안된 RT 공정에 적용하여 실리콘 금형과 3차원 플라스틱 제품을 제작하여 본 공정의 효율성을 검증하였다.

2. VLM-ST 공정 및 3차원 시제품 정형 기공

2.1 VLM-ST 공정 원리 및 특징

신개념 RP 공정인 VLM-ST 공정의 원리 및 조형 공정은 Fig.1과 같다.

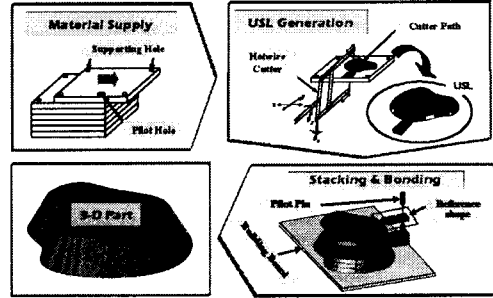


Fig. 1 Principle and building process of VLM-ST

VLM-ST 공정은 단속적으로 공급되는 여러 가지 두께를 가진 판재 형태의 재료를 실시간 동시 4축 제어되는 4자유도 열선 절단기를 사용하여 CAD 형상과 일치하도록 가변 폭, 가변 경사 및 가변 길이로 절단하여 단위 형상층(USL)을 생성한 후 파일럿 구멍과 적층 보조 장치를 사용하여 반자동으로 적층함으로써 임의 3차원 형상의 제품을 패속 조형한다.

VLM-ST 공정은 3가지 주요 특징을 가지고 있다.

가. 두꺼운 층과 측면 경사각을 이용한 패속조형

VLM-ST 공정은 두꺼운 층을 사용하여 연속되는 두께 사이가 선형 보간되어 측면 경사를 가지도록 한다. 두께에 의해 발생하는 오차를 최소화하기 위하여 4 mm 이하로 한층의 두께를 제한한다. 두께의 증가에 의하여 조형 속도는 획기적으로 증가시킬 수 있다.

나. 공정 설계

VLM-ST 공정 설계는 USL 개념과 재료 절단 후 적층 및 접착 수행 방법 및 파일럿 홀과 적층 보조 장치를 이용한 반자동 적층/접착 방법의 3가지 특징을 가지고 있다.

USL 개념은 연결자와 횡단선을 이용하여 단순 연결된 3차원 형상내의 한 층을 생성함으로써 구멍이나 고립 형상이 존재하는 다중 연결 영역 (Multiple connected domain) 을 포함하는 다양한 형상을 절단할 수 있도록 하였다. 또한, USL은 적층/접착의 기준인 파일럿 구멍과 실제 형상 부분의 연결자인 적층 기준 형상을 가지도록 하였다. 재료 절단후 적층 및 접착을 수행하는 방법은 박판

조형공정 (LOM)에서 나타나는 다중 연결 영역과 지지대 영역에 존재하는 잔여재료 제거 공정을 최소화하였다.

다. 공급재료와 절단장치의 조합

열선 절단기는 발포 폴리스티렌 (EPS) 폼 절단시 절삭 저항이 매우 작기 때문에 매우 빨리 절단할 수 있다. 또한, VLM-ST 공정은 전기 저항을 이용하는 선형 열선절단기와 발포 폴리스티렌 폼을 사용함으로써 장치의 도입비와 운영/유지비가 매우 저렴하다.

2.2 단위형상조각 (USL) 데이터 생성

경사각을 보유하는 3차원 열선 이동 경로를 포함하는 USL 데이터를 생성하기 위하여 일반적인 RP 공정의 입력 데이터 생성 프로그램과 달리 측면 형상 복원(Surface reconstruction), 중간 단면(Mid-slice) 생성 및 측면 경사각 계산이 소요되며, 적층/접착을 효과적으로 수행하기 위하여 파일럿 구멍을 포함하는 기준 형상 생성이 추가적으로 소요된다. Fig.2는 USL 데이터 생성과정을 인체 두상 형상을 이용하여 나타내었다. USL 데이터의 측면 경사각 (ϕ_x, ϕ_y) 은 식(1) 과 식(2)에 의하여 계산된다.

$$\phi_y = \sin^{-1}(n_y u_z - n_z u_y) \quad (1)$$

$$\phi_x = \sin^{-1}\left(\frac{n_x u_z - n_z u_x}{\cos \phi_y}\right) \quad (2)$$

여기서, n_x, n_y, n_z 와 u_x, u_y, u_z 는 CAD 데이터에서 표면 삼각형 패킷상의 법선 벡터 및 열선 진행 방향 벡터이다.

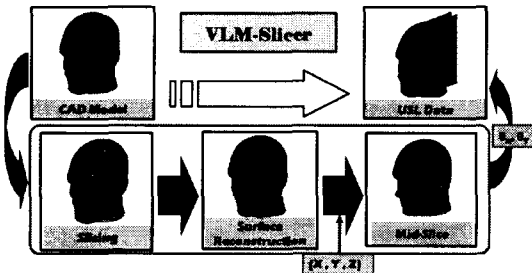


Fig. 2 Process flow to generation USL data

2.3 VLM-ST 장치

VLM-ST 장치는 Fig.3과 같이 4가지 세부 공정으로 구성된다. 본 장치의 제작 가능 크기는 평면내에서는 220 mm × 180 mm 이며, 최대 적층 높이는 제한이 없다.

재료 저장 및 공급부는 형상 생성부에 소요되는 판재 형태의 EPS 폼을 단속적으로 공급한다. 초기 공급 재료에

는 형상 생성 후 적층을 정확하게 수행하기 위하여 적층 안내 구멍과 형상 생성부까지 이송을 위한 지지 구멍이 뚫어져 있다.

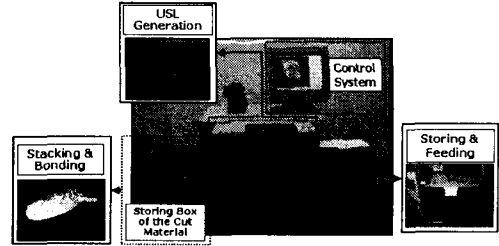


Fig. 3 VLM-ST apparatus

형상 생성부는 공급된 판재 형태의 재료를 시스템 제어부에서 제공되는 가공 경로 데이터를 이용하여 3차원 목적물의 각층인 USL을 생성한다. USL은 4축 동시 제어되는 자동 열선 절단기 시스템에 의하여 생성된다.

VLM-ST 공정에서는 일체형 구조와 평형 사변형 링크 메카니즘을 가진 열선 절단기를 이용하여 가공물 과용용 방지와 열선 발열량이 일정하게 유지되도록 사용하였다.

열선 절단기의 운용 조건은 열선의 절단중 휨 현상이 발생하지 않으며 측면 경사 절단시 경사각이 구현되는 범위인 유효 열입열량이 0.012-0.017 Watt · sec/mm² 으로 제한하였다. 식(3) 와 Fig.4 는 열선 유효 열입열량과 절단폭(n)의 관계를 나타낸다. 식(3)를 이용하여 열선 절단시 용융량을 고려한 수정된 열선절단기 절단 경로를 생성한다.

$$\eta = 48.2Q_{eff} - 0.02 \quad (3)$$

여기서, η 와 Q_{eff} 는 각각 절단폭과 열선에 투입되는 유효 열입열량이다.

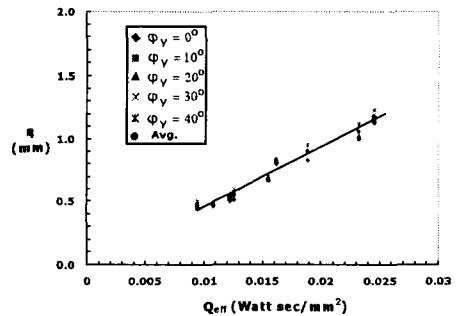
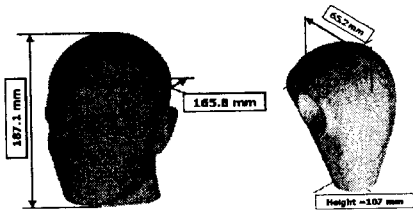


Fig. 4 Relationship between the kerfwidth and the effective heat input

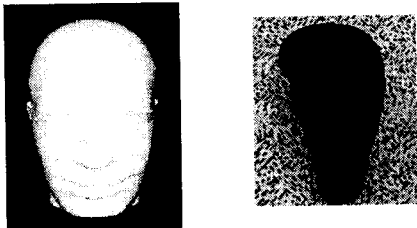
2.4 3차원 제품 제작 실험 결과 및 고찰

VLM-st 공정의 적용성을 검증하기 위하여 인체 두상 형상 및 자동차 노브 (Knob) 을 제작 실험을 수행하였다.

인체 두상 형상 및 자동차 노브 형상 제작에 사용된 공정 조건은 단위 길이당 열선 입력량 0.34 Watt/mm 및 절단 속도 40 mm/s 이다. Fig.5 와 Fig.6 은 인체 두상 형상 및 자동차 노브 형상에 대한 CAD 형상 및 VLM-st 로 제작된 제품 형상이다. Fig.5 와 Fig.6 의 비교 결과 두가지 제품 모두 CAD 형상과 동일한 외부 형상을 나타냄을 볼 수 있다.



(a) Human head shape (b) Knob shape
Fig. 5 CAD model of a human head shape and a knob shape



(a) Human head shape (b) Knob shape
Fig. 6 Fabricated Shape of the human head and the knob

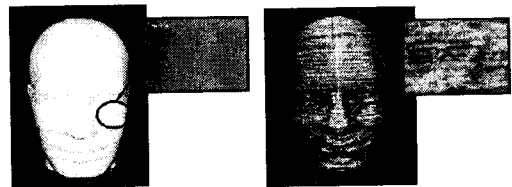
Table 1 Results of fabrication for a human head shape and a knob shape

Part	Building Time (min)	Building Cost (Won)	Dimensional Accuracy (%)	
			In-Plane (avg)	Building Dir.
Human Head	40	6,000	0.8	1.8
Knob	20	3,500	0.7	1.1

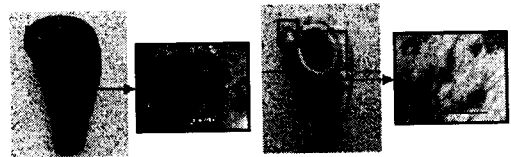
Table.1은 인체 두상 형상 및 자동차 노브 형상 제작 실험 결과이다. 인체 두상 형상과 자동차 노브 형상 모두 40분내에 제작되었다. 제품 정밀도의 경우 두 형상 모두 평면내에서는 0.8% 미만, 적층 방향으로로는 1.8% 미만을 나타내었다. 상용 RP 공정의 치수 정밀도가 2% 이하임⁽⁶⁾ 을 고려하면 VLM-st 공정이 정밀도를 유지하면서도 다양한 형상에 적용 가능한 공정임을 알 수 있었다.

본 공정의 효율성을 검증하기 위하여 인체 두상과 노브 를 VLM-st 공정 및 상용화 공정으로 제작하여 형상, 제작 시간, 제작 단가 및 제품 정밀도를 비교 분석하였다. 적용된 상용화 공정은 VLM-st 공정과 유사하며 조형 속도가 빠른 것으로 알려진 LOM 공정이며 장치 모델은 LOM 1015 이다.

실험 결과 Fig.7 및 Fig.8와 같이 인체 두상과 노브 형상의 경우 VLM-st 공정 및 LOM 공정으로 제작된 형상이 거의 일치하였다. 또한, VLM-st 공정으로 제작된 제품의 표면 상태는 후처리 완료 후 표면 상태가 매우 양호하나, LOM 으로 제작된 제품의 경우 후처리 완료 후에도 표면에 수직벽 적층에 의한 계단 현상이 존재하였다.



(a) VLM-st part (b) LOM part
Fig. 7 Comparison of the fabricated shape and its surface quality for the human head shape



(a) VLM-st part (b) LOM part
Fig. 8 Comparison of the fabricated shape and its surface quality for the knob shape

Table.2 는 VLM-st 공정 및 LOM 공정으로 제작된 인체 두상 형상 및 자동차 노브 형상에 대한 제작 실험 결과이다. Table. 2 의 실험 결과로부터 VLM-st 공정이 LOM 공정에 비하여 37~50 배 정도 제작시간이 단축되며, 150배

이상 제작비용이 저렴함을 알 수 있었다.

Table 2 Comparison of building time, building cost and dimensional accuracy for the human head shape and the knob shape

Part		Building Time (min)	Building Cost (Won)	Dimensional Accuracy (%)	
				In-Plane (avg)	Building Dir.
Human Head	VLM-ST	40	6,000	0.8	1.1
	LOM	2,350	960,000	0.7	1.8
Knob	VLM-ST	20	3,500	0.7	1.1
	LOM	740	550,000	0.8	1.2

제작시간의 경우 VLM-ST 공정이 획기적으로 감소된 것은 LOM 공정과 달리 초기 셋업 시간이나 기저 생성 시간이 요구되지 않는 점과 4 mm 정도의 두꺼운 층을 사용함으로써 0.106 mm 내외의 얇은 층을 사용하는 LOM 공정보다 조형 시간이 획기적으로 단축된 점 및 절단 후 적층/접착하는 방법을 도입함으로써 잔여재료 처리와 같은 후처리 공정이 최소화된 점에 기인한 것으로 사료된다.

제작단가의 경우 VLM-ST 공정에 사용되는 EPS 폼이 매우 저렴하므로 제작단가가 현저히 감소하였다. 실제적으로 LOM 공정의 경우 장치 자체가 2억원 내외의 고가 장비이며, 레이저와 얇은 층을 적층함으로써 실제운영비가 VLM-ST 공정에 비하여 매우 높을 것으로 사료된다.

치수 정밀도 측면에서 두가지 공정 모두 평면내에서는 0.8%, 적층 방향으로는 1.8% 이하를 유지하였다.

본 실험 결과로부터 제안된 VLM-ST 공정이 효율적인 공정임을 알 수 있었다.

3. RTV 실리콘 성형을 활용한 삼단 역전 쾌속 틀링 공정 및 3차원 기능성 제품 정형 가공

3.1 RTV 실리콘 성형을 이용한 삼단 역전 공정

VLM-ST 공정에 의하여 제작된 시작품을 산업적으로 적용 가능한 실제 프로토타입으로 사용하기 위해서는 제품의 기능성을 구현할 수 있어야 한다. 또한, EPS 폼을 원형으로 사용하는 2차 공정의 단점인 하나의 원형에 하나만의 제품이 제작 가능한 점을 극복할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 VLM-ST 시작품을 이용하여 기능성을 가진 실제 프로토타입을 빠른 시간내에 제작할 수 있는

RT 공정을 RTV 실리콘 성형법과 삼단 역전 공정을 이용하여 제안하였다. 본 RT 공정은 Fig.9와 같이 VLM-ST 시작품 원형을 세 번 뒤집어 최종 제품을 제작하는 삼단 역전 공정이다.

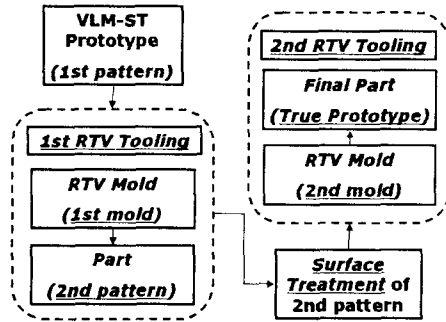


Fig. 9 Procedure of the proposed rapid tooling process

일반적인 삼단 역전 공정들은 상·하형 몰드를 제작하기 위하여 역전 공정을 수행한다. 그러나, 제안된 RT 공정은 EPS 폼 재료가 가지고 있는 내부 기공과 기공에 내재하는 가스들에 의하여 RT 제품의 표면에 발생하는 결함을 제거하기 위하여 중복 몰드와 이중 원형 및 표면 처리를 수행하는 것이 특징이다.

3.2 3차원 기능성 제품 정형 가공 실험 결과 및 고찰

제안된 RT 공정을 적용하여 Fig.10과 같은 플라스틱 노브를 제작 실험을 수행하였다. 1차 RTV 실리콘 몰드 제작시 Fig.10의 1차원형과 같이 VLM-ST 시작품의 표면 기공에 의한 결함과 기공내에 내재된 가스에 의하여 진공형성시 원형의 도포층에 발생하는 추가적인 기공이 1차 금형에 전사되었다. 그 결과 1차 금형에 의해 제작된 2차 원형의 표면 기공에 의한 구멍 및 1차원형에 미세하게 형성된 층간 피와 같은 표면 결함 나타났다. 이것을 제거하기 위하여 Fig.10의 2차원형과 같이 2차원형을 표면 처리한 후 2차 RTV 실리콘 몰드를 제작하였다. 표면 처리된 원형을 이용하여 몰드를 제작한 경우 1차 금형에서 나타났던 표면 결함들이 모두 제거된 몰드 표면을 얻었다. 2차 몰드를 이용하여 제작된 최종 플라스틱 노브는 Fig.10의 최종제품과 같이 부드러운 표면을 나타내었다.

본 실험에서 노브의 CAD 데이터로부터 최종 형상의 플라스틱 노브를 제작하는 전체 과정이 2일에 완료되었다.

일반적으로 RP와 RT를 이용하여 시제품 제작을 수행하는 전문업체의 경우 완성된 CAD 데이터로부터 기능성 제품 제작에 소요되는 기간이 약 5~7일 정도임⁽⁹⁾을 고려할 때 제안된 RP와 RT 공정의 결합에 의하여 제품 개발 기간이 획기적으로 단축되었음을 알 수 있다. 이 결과는 제안된 VLM-ST 공정의 획기적인 원형 제작 시간 단축 능력과 제안된 RT 공정의 신속한 기능성 제품 제작 능력에 기인한 것으로 사료된다.

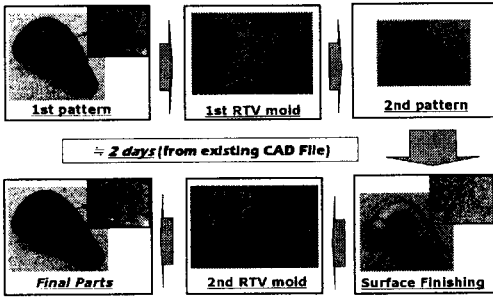


Fig. 10 Rapid tooling process to manufacture a plastic knob shape

4. 결론

본 연구 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 제안된 VLM-ST 공정을 다양한 3차원 형상의 제품 제작에 적용하여 본 공정의 적용성과 효율성을 검증하였다. 또한, VLM-ST로 제작된 제품과 상용 공정인 LOM 공정으로 제작된 제품을 제작시간, 제작비용 및 정밀도 관점에서 비교/분석 결과 VLM-ST 공정의 경우 제작시간 및 제작비용은 각각 35~50배 및 150배 이상 감소하였으며, 치수 정밀도는 두 공정 모두 1.8% 미만을 나타내었다.

둘째, 제안된 RTV 실리콘 성형을 이용한 삼단 역전 RT 공정을 이용하여 플라스틱 재질의 자동차 노브를 제작하여 본 공정의 효율성을 입증하였다. 그 결과, 제안된 RT 공정이 3차원 기능성 시작품을 쾌속 제작 가능한 공정임을 알 수 있었으며, 기존의 EPS 폼 원형이 가지고 있는 내부 기공 및 가스에 의한 표면 결함 문제와 일회성 원형의 한계를 극복할 수 있었다.

셋째, VLM-ST 공정과 삼단 역전 RT 공정의 결합은 플라스틱 노브의 경우 CAD 데이터로부터 기능성 시작품 제작까지 2일 정도로 시작품 제작 기간이 획기적으로 단축

됨을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Wohlers, T., 2001, "Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry, Wohlers Associates, Inc
- (2) Nova, A., Kaza, S., Wang, Z., and Thomas, C., 1996, "Techniques for improved speed accuracy in layered manufacturing" *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 609~617
- (3) Hope, R. L., Jacobs, P. A., and Roth, R. N., 1997, "Rapid Prototyping with Sloping Surfaces", *Rapid Prototyping Journal*, Vol.3, No. 1, pp. 12~19.
- (4) Zheng, Y., Choi, S., Mathewson, B. and Newman, W. S., 1996, "Rapid Prototyping with Sloping Surfaces", *Rapid Prototyping Journal, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 355~362.
- (5) Park, K., Yoon, J. W., Yang, D. Y., and Cho, J. R., 1996, "Concurrent Engineering Approach to the Die Design of Metal Forming Processes using Rapid Prototyping and Finite Element Analysis", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 13, No. 8, pp. 146~154.
- (6) Kuzman, K., Geiger, M., et al., 1999, "Rapid Sheet Metal Development chain supported by laser sintered active tool parts", *Proceedings of the 6th ICTP, Vol.II*, pp.999~1004.
- (7) Ahn, D. G., Lee, S. H. and Yang, D. Y., 2001, "Investigation into Net-Shape Manufacturing of Three-Dimensional Parts using VLM-SP and Its Applied Technology", *Transactions of Materials Processing*, Vol. 10, No. 6., pp.500~508.
- (8) Muller, T., 2000, *Fundamentals of rapid prototyping : RP&M 2000 Conference Tutorial Notes*, Chicago, U.S.A.
- (9) Hilton, P. D., Jacobs, P. F., 2000, "Rapid Tooling, Marcel Decker, Inc., pp. 51~57.