

비접촉식 열공구를 이용한 VLM-ST 제품의 미세 형상 가공 공정 개발에 관한 연구

김효찬*, 이상호*, 안동규**, 양동열#

Development of Shape refining process of VLM-ST Parts Using Noncontacting Hot Tool .

Hyo Chan Kim*, Sang Ho Lee *, Dong Gyu Ahn**, Dong Yol Yang#

ABSTRACT

In most RP processes, the inherent stair-stepped surfaces and shrinkage-induced warping of the parts require post processing such as surface finishing. To minimize such defects, VLM-ST, a newly developed RP process, employs a 3.9-mm thick expandable polystyrene (EPS) foam sheet and a hot wire to contour it to have slant linear-interpolated sides. The use of relatively thick sheets for layers, however, limits the process capability of constructing fine details, especially smaller than the layer thickness. This study is focused on the development of a post processing method for fine details of VLM-ST parts. The post-processing tool was designed to meet all the requirements for the desirable post processing. It adopted a hot wire as a means of melting the EPS foam sheet. Various basic experiments on the post processing were carried out to obtain the optimal process conditions. The dominant process parameters such as the radiated heat input, the tool speed, and the gap between the tool tip and the foam sheet (tool height) were considered in the experiments. The effectiveness of the developed post-processing method for forming or engraving fine details on the VLM-ST parts has been thus demonstrated. The experiments on engraving several sets of letters, such as CANESM, 人間, and 한국과학기술원, on the EPS foam sheet were carried out. In addition, a flowery shape was engraved on a three-dimensionally curved surface of a pottery-shape VLM-ST part.

Key Words : VLM(가변적층쾌속조형공정), Post-Processing(후가공 공정), Noncontact cutting (비접촉식 가공)

1. 서론

다품종 소량 생산 형태의 현대 산업 구조에서는 빠르게 변화하는 소비자의 요구와 기호에 맞추어 생산자가 제품을 생산해야 하기 때문에 제품의

개발 주기 및 시작품의 제작 기간을 단축 시켜야 한다. 이러한 요구를 만족하기 위한 방안으로 동시 공학적 추구가 필수적인데 이에 적합한 새로운 방식의 시작품 제작 기법으로 쾌속조형기술(Rapid Prototyping Technology)이 도입되었다. 기본적인 쾌

접수일: 2003년 5월 24일; 게재승인일: 2003년 11월 14일

* 한국과학기술원 기계공학과

** 조선대학교 기계공학과

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

Email dyyang@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3214

속 조형 기술의 절차는 Fig. 1 과 같다. STL 파일을 적층방향에서 일정한 두께 간격으로 슬라이싱하여 2차원 단면 데이터를 생성하며 이를 쾌속 조형 장치에 입력하여 플라스틱, 종이, 광경화성 수지 및 금속 등의 재료를 이용하여 2차원의 얇은 층들을 가공한 다음, 한 층씩 연속적으로 쌓아서 3차원의 형상을 제작한다^{1,2}.

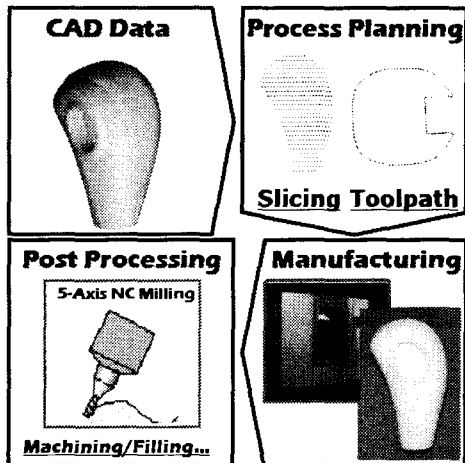


Fig. 1 Procedure of RP technologies

기존의 쾌속 조형 공정은 얇은 층과 선 형태로 적층하기 때문에 많은 조형 시간이 요구되고 장치의 가격과 유지비가 고가이다. 이러한 기존 공정들의 문제점을 극복하고 조형 시간을 획기적으로 단축시킨 새로운 쾌속 조형 공정으로 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 단속형 가변 적층 쾌속 조형 공정 (VLM-ST : Transfer type Variable Lamination Manufacturing using Expandable Polystyrene Foam)이 개발되었다^{3,4}.

쾌속 조형 공정으로 제작된 시작품은 원하는 표면 정밀도를 위해 대부분의 경우 후처리 공정이 필요하다. 쾌속 조형 공정의 특성상 층간의 단차 (Stair-Step)나 상의 변화에 의한 재료의 수축 혹은 재료의 미결합에 의해 표면이나 형상에 결함이 발생한다. 이러한 결함을 제거하기 위해 쾌속 조형 공정의 후처리 공정에 대한 연구가 진행되어 왔다. 1993년에 Dickens등은 쾌속 조형 제품의 표면 처리 기술에 대해 연구를 수행하였다⁵. 1995년에는 DTM사에서 개발된 레이저 소결 공정(SLS) 제품

의 표면 처리 방법에 대한 소개로 단차나 구멍에 분말을 채워넣고 표면에 코팅을 한 후 사포를 이용하여 표면의 재료를 제거하는 방법에 대해 연구를 수행하였다⁶. 또한, 1998년에는 Leong등이 광조형법으로 제작된 보석류의 모델들을 “연마제 제트 버제거(Abrasive jet deburring)”을 이용하여 다양한 공정 변수에 대하여 표면처리를 수행하였다⁷. 2000년에는 Shi와 Gibson은 선택적 레이저 소결 공정(SLS) 제품의 표면 정밀도를 높이기 위해 산업용 5축 로봇을 이용하여 조형물의 표면 절삭을 통해 표면 정밀도를 향상시켰다⁸.

최근 국내에서 개발된 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 단속형 가변 적층 쾌속 조형 공정(VLM-ST)에서는 측면에 경사각이 부여되어 있으므로 측면 단차가 거의 존재하지 않아 표면 후가공은 거의 요구되지 않으나 4 mm이내의 후판을 적층하여 3차원 제품을 제작하기 때문에 적층되는 판의 두께보다 작은 세부 형상이나 표면의 형상 구현에 한계가 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 VLM-ST공정 시제품의 후가공을 통해 미세/세부 형상의 구현을 하여 시제품의 국부 형상 정밀도를 향상시키는 공정을 제안하였으며 제안된 공정에 대한 공정 설계 및 장치 설계/제작을 수행하였다. 특히, 본 공정의 핵심 기술인 비접촉식 열공구 설계/제작과 새롭게 시도되는 열 반경에 의한 비접촉식 가공 메커니즘에 적절한 공정 변수를 선정하여 공정 변수값과 가공 영역 값의 관계를 실험적으로 규명함으로써 본 공정이 제어 가능한 공정임을 입증하였다.

또한, 개발된 본 공정을 실제 VLM-ST 시제품의 적용하여 시제품의 국부 형상 정밀도를 향상시키는 것을 확인한다.

2. 비접촉식 열공구를 이용한 가변적층쾌속 조형 공정의 후가공 공정 설계/제작

본 공정의 개념은 Fig 2 와 같이 3 축 NC 가공기에 제안한 비접촉식 공구를 장착하여 VLM-ST 시제품의 후가공을 수행한다.

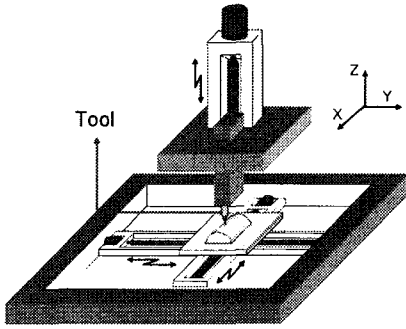


Fig. 2 Schematic of post-processing apparatus

2.1 장치의 구성

장치의 구성은 Fig. 3 과 같이 공구와 공구를 이송시키는 3 축 NC 테이블, 전원, 제어 소프트웨어로 구성되어 있으며 공정 전체의 흐름도는 Fig. 4 와 같다.

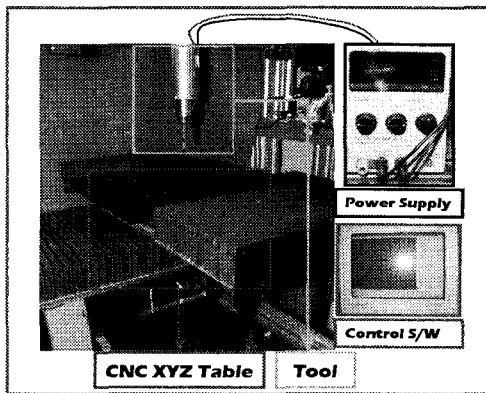


Fig. 3 Post-processing apparatus

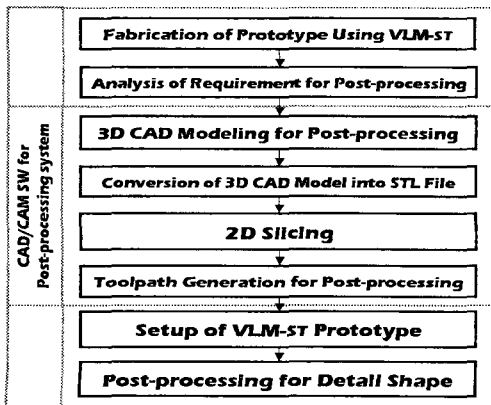


Fig. 4 Workflow of the post-processing process

2.2 비접촉식 열 공구 설계

폼 재료의 가공에서는 열을 이용하여 재료를 가공하는 것이 일반적이다. 열을 이용하여 재료를 가공할 경우 레이저 가공과 열선에 의한 가공 두 가지 형태가 고려된다. 그러나 레이저를 이용하여 폴리머 가공을 수행할 경우 열선에 비해 고비용, 고열량, 고에너지 소비가 되기 때문에 본 공정에서는 열선을 이용한다. 재료에 열선을 절입하여 재료를 가공할 경우 Fig. 5 와 같은 중요한 사실을 발견하였다.

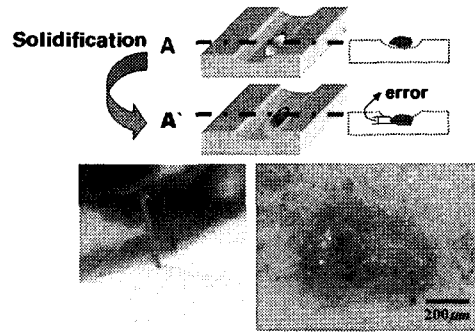


Fig. 5 Surface defects induced by the remaining melted material

가공 후 잔여 재료는 Fig. 5 와 같이 모두 열분해 되지 않고 용융되어 가공된 재료 표면에 고착되면서 잔여 재료 내부에 존재하는 잠열이 재료로 전달되어 표면에 결함을 발생시킨다. 또한, 절입식으로 가공할 경우 속도 증가에 따른 공구에서의 열손실량이 빠르게 증가하여 열선 입력 최대 열량 23.94W 일 때 최대 가공 속도가 25 mm/s 이하로 제한된다. 동일 열량 25 mm/s 이상일 경우 기계적 절단이 시작되어 공구 변형이 일어나기 시작한다.

이러한 실험을 통하여 설계되는 공구는 가공 속도의 한계에 따른 공구의 변형 및 파괴현상이 없으면서 재료에 열에너지를 전달할 수 있는 형태인 절삭 저항이 없는 비접촉식 가공 형태가 되어야 함을 알았으며 다음과 같은 공구 설계 조건을 도출하였다.

첫째, 절단부는 고온의 열원을 유지하여야 한다. ($T > 480^{\circ}\text{C}$) 폼 재료의 열분해 온도 보다 높아야 완전 열분해가 가능해진다.

둘째, 공구 재료는 고온에서 기계적 성질이 우수하여야 한다. 작업 수행 시간 동안 공구의 표면

가공 메커니즘이 제어 가능함을 입증한다.

본 절에서는 실험적인 방법을 통해 공정 변수를 선택하며 공정 변수와 가공 영역의 관계를 규명한다. 또한, 다양한 공정 변수를 하나의 변수로 통합하여 제어할 수 있음을 실험 데이터로부터 정리하며 공정 변수에 따른 물리적인 특징도 파악한다.

3.1 공정 변수와 가공 영역의 관계

가공 영역에 도달하는 열 에너지에 관련된 물리량은 공구의 열 입력량, 가공속도, 공구와 모재의 거리, 모재의 표면 상태, 가공 주변의 분위기 등이 있다. 이러한 주요 공정 변수를 결정하고 각 공정 변수와 가공 영역의 관계를 알아보기 위해 Fig. 9 와 같은 실험을 수행한다.

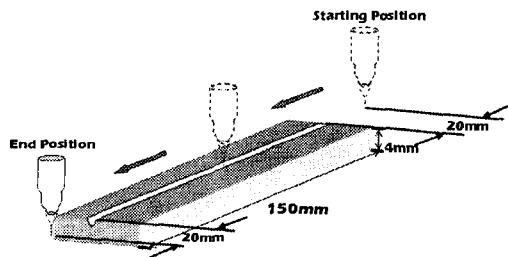


Fig. 9 Schematic of experiment

가공 영역을 결정하는 것은 Fig. 10 에 표시되어 있는 것과 같은 가공 너비(Kerfwidth)와 가공 깊이(Depth of cut)를 이용한다.

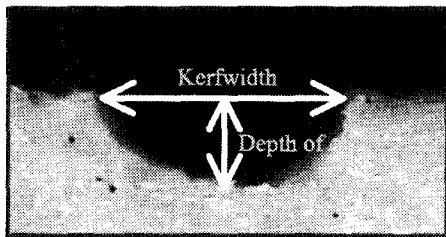


Fig. 10 Definition of Kerfwidth(Ω) and Depth of cut(β)

각 공정 변수에 따른 실험 결과 주 공정 변수는 열 입력량, 가공속도, 공구와 재료의 거리가 있다. 나머지 변수는 실제 가공에서 자주 변하는 요

소가 아니며 가공 영역에도 많은 영향을 미치지 않는다. 따라서, 본 실험에서는 결정된 공정 변수와 가공 영역과의 관계를 규명한다.

3.1.1 열 입력량과 가공 영역의 관계

다른 공정 변수는 동일한 조건에서 열 입력량(Q_i)을 변화시켜가며 가공 너비(Kerfwidth)를 측정하여 정리한 결과는 Fig. 11 이며 실험 결과를 선형 근사화(Linear Fitting)한 결과는 Table 1. 과 같다.

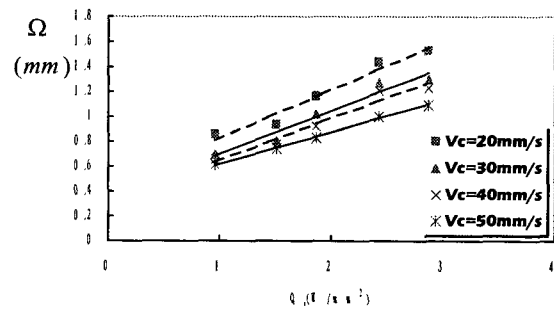


Fig. 11 Relationship between the kerfwidth and the heat input

Table 1 Coefficients for the relationship between the kerfwidth and the heat input

$$\Omega(\text{Kerfwidth}) = A_1 * Q_i + A_2$$

V_c (mm/s)	A_1	A_2	R^2
20	0.386	0.441	0.95
30	0.349	0.349	0.95
40	0.332	0.319	0.96
50	0.259	0.356	0.99

선형 근사율이 95%이상으로 열 입력량과 가공 너비는 선형관계에 매우 가까움을 실험을 통해 확인할 수 있다.

열 입력량(Q_i)에 따른 가공 깊이(Depth of cut)를 측정한 결과는 Fig. 12 이며 선형 근사화 결과는 Table 2 와 같다.

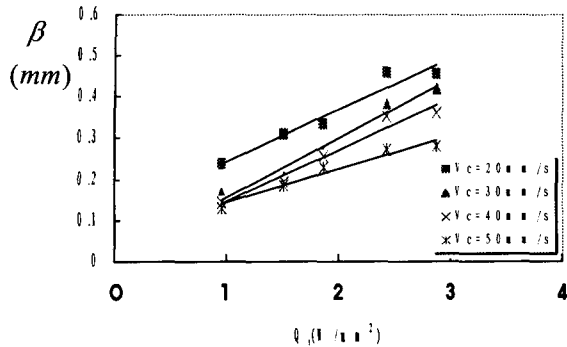


Fig. 12 Relationship between the depth of cut and the heat input

Table 2 Coefficients for the relationship between the depth of cut and the heat input

$$\beta(\text{Depth of Cut}) = B_1 * Q_i + B_2$$

$V_c (\text{mm/s})$	B_1	B_2	R^2
20	0.125	0.120	0.94
30	0.144	0.011	0.97
40	0.125	0.022	0.96
50	0.082	0.052	0.95

가공 깊이와 열 입력량은 선형 근사율이 95% 이상으로 선형 관계에 매우 가까움을 확인할 수 있다. 동일한 가공 속도와 가공 깊이에서 열 입력량 (Q_i) 변화에 따른 가공 영역의 시편 사진은 Fig. 13 과 같다.

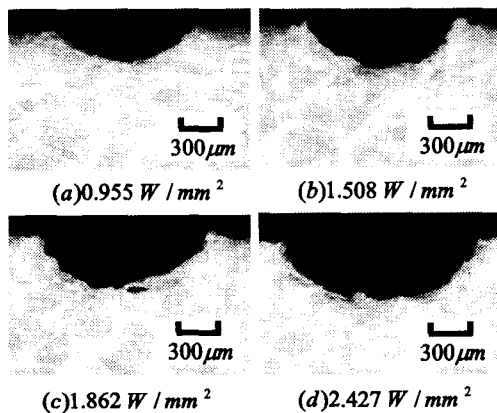


Fig. 13 Cross-section of specimens for variable Q_i

3.1.2 가공속도와 가공 영역의 관계

열 입력량과 가공 높이가 동일한 조건에서 가공 속도(V_c)를 변화시켜가며 측정된 가공 너비 (Kerfwidth)와의 관계는 Fig. 14 이며 선형 근사화한 결과는 Table 3 과 같다.

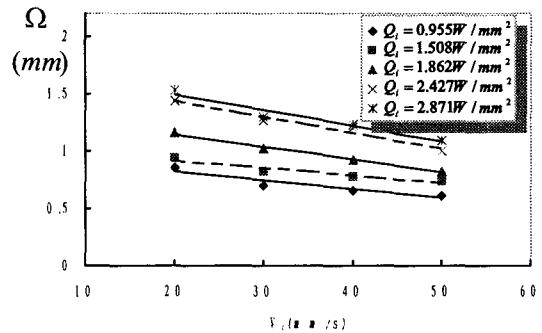


Fig. 14 Relationship between the kerfwidth and the cutting speed of the tool

Table 3 Coefficients for the relationship between the kerfwidth and the cutting speed of the tool

$$\Omega(\text{Kerfwidth}) = C_1 * V_c + C_2$$

$Q_i (W/mm^2)$	C_1	C_2	R^2
0.955	-0.0078	0.9785	0.69
1.508	-0.0063	1.0401	0.92
1.862	-0.011	1.3689	0.99
2.427	-0.0136	1.7119	0.97
2.871	-0.0136	1.7659	0.95

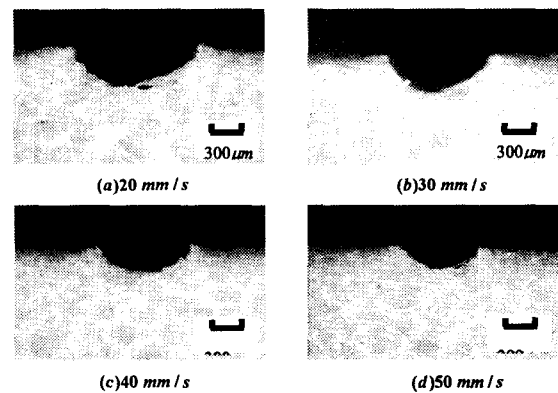


Fig. 15 Cross-section of specimens for variable V_c

선형 근사율이 90%이상으로 가공 속도와 가공 너비는 선형관계에 가까움을 확인할 수 있다

가공 속도와 가공 깊이(Depth of cut)도 선형 관계를 가짐을 확인할 수 있으며 실제 가공 속도 변화에 따른 가공 영역의 시편 사진은 Fig. 15 와 같다.

3.1.3 가공 깊이와 가공 영역의 관계

열 입력량과 가공 속도가 동일한 조건에서 가공 깊이(h)를 변화시켜가며 측정된 가공 너비(Kerfwidth)와의 관계는 Fig. 16 이며 선형 근사화한 결과는 Table 4 와 같다.

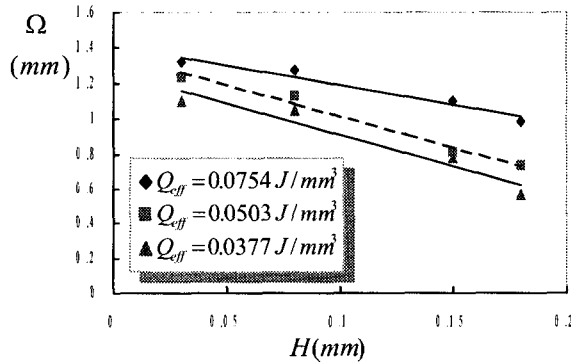


Fig. 16 Relationship between the kerfwidth and the height of the tool

Table 4 Coefficients for the relationship between the kerfwidth and the height of the tool

$$\Omega(Kerfwidth) = E_1 * V_c + E_2$$

$Q_{eff}(J/mm^3)$	E_1	E_2	R^2
0.0754	-2.2101	1.4126	0.95
0.0503	-3.5500	1.3675	0.98
0.0377	-3.5478	1.2638	0.93

3.2 통합 공정 변수와 가공 영역의 관계

3.1 에서 실험한 공정 변수들은 모두 가공 너비 및 가공 깊이와 선형적인 관계를 가진다. 이처럼 선형적인 관계를 가지는 여러 개의 변수는 식 (1)과 같이 통합 변수를 이용하여 하나의 변수로

표현이 가능하다.

$$Q^h_{eff} = \frac{Q_{eff}}{H} = \frac{Q_i}{V_c \cdot H} \quad (1)$$

열 입력량을 가공 속도와 가공 깊이로 나누어 표현하였으며 Q^h_{eff} 는 단위 높이 당 유효 열 입력량이라 명명한다. Fig. 17 은 제안된 공정 변수 단위 높이 당 유효 열 입력량과 가공 너비와의 관계를 나타내는 것이며 식 (2) 는 선형화한 결과이다.

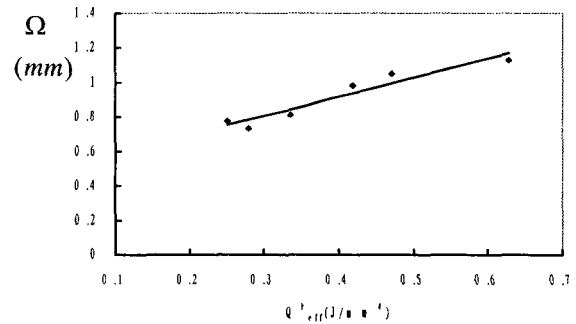


Fig. 17 Relationship between the kerfwidth and the height of the tool

$$\Omega(Kerfwidth) = 1.11 * Q^h_{eff} + 0.47 \quad R^2 = 0.92 \quad (2)$$

3.3 실험 고찰

가공 영역을 제어 하는 열 입력량, 가공 속도, 가공 높이에 대하여 실험적인 방법을 통해 가공 너비 및 깊이와의 관계는 식(3), (4)로 표현 할 수 있다.

$$\Omega = F(Q_i, V_c, H, \dots) \quad (3)$$

$$\beta = F(Q_i, V_c, H, \dots) \quad (4)$$

독립적인 공정 변수를 통합한 단위 높이 당 유효 열 입력량(Q^h_{eff})을 제안하여 하나의 변수로 가공 너비 및 깊이의 제어가 가능함을 확인할 수 있었다. 이러한 사실을 수식으로 표현하면 식 (5) 와 같다.

$$\Omega = F(Q^h_{eff}, \dots), \quad \beta = F(Q^h_{eff}, \dots) \quad (5)$$

공정 변수에 따른 실험을 통하여 다음과 같은 사실을 관찰할 수 있었다.

첫째, 가공 실험 결과에서 가공이 가능한 공정 변수들의 일정 범위에서 가공 너비 및 깊이가 선형 관계를 나타낸다. 일정 범위 밖에서의 관계는 비선형적인 특성을 띄며 이로부터 가공의 물리적 특성을 추측할 수 있었다. Table 5. 는 각 공정 변수들의 가공 너비 및 깊이와 선형적인 관계를 가지는 범위를 나타낸 것이다.

Table 5 Linear ranges of the dominant process parameters

Parameter	Range
Q_c	0.955 - 1.910 W/mm^2
V_c	20 - 50 mm/s
H	0.03 - 0.15 mm

둘째, 공정 변수와 가공 너비 및 깊이와의 비선형적인 관계를 가진 범위에서 관계가 어떻게 이루어지는가를 관찰함으로써 공정 변수들의 물리적인 특성을 알아 낼 수 있었다.

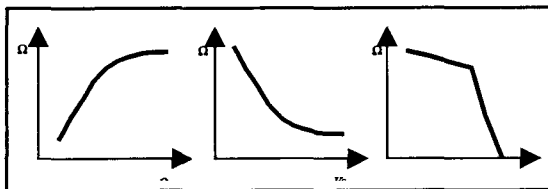


Fig. 18 Relationships between the dominant parameters

Fig. 18 에서 가공 높이는 경우는 일정 높이까지는 가공이 수행되다가 어느 높이 이상이 되면 가공 영역이 급격하게 감소한다. 이러한 현상은 열원의 복사 열 전달 특성에서 찾아 볼 수 있는데 열원과 가까운 거리에서는 복사 열 전달에서 매체(공기)의 효과가 매우 미미하여 무시되지만 거리가 멀어질 경우 매질의 효과가 급격히 증가하여 모재에 전달되는 열 입력량이 급격하게 감소하게 되는 것이다.

4. VLM-ST 시제품의 후가공 결과

본 장에서는 공구 경로 생성 데이터와 공정 변수 실험 데이터를 이용하여 실제 후가공을 수행

함으로써 공정의 타당성을 분석하고 공정 적용시 나타나는 특성에 대해 분석 해보려 한다.

4.1 2.5 차원 제품의 후가공 수행

VLM-ST 공정 시제품은 표면에 글씨나 형상을 새기는 것이 어려우므로 개발된 후가공 공정을 이용하여 글씨를 새겨보도록 한다. 공구 경로 특성상 단순 연결 영역(Simple contour)과 다중 연결 영역(Multiple contours)으로 구분하였다.

4.1.1 단순 영역

Fig. 19 는 영문 로고를 VLM-ST 시제품에 제작하는 과정이다.

공정 변수 조건은 $Q_{eff}^h = 0.233 J/mm^4$ ($Q_c = 1.396 W/mm^2$, $V_c = 40 mm/s$, $H = 0.15 mm$) 이다.

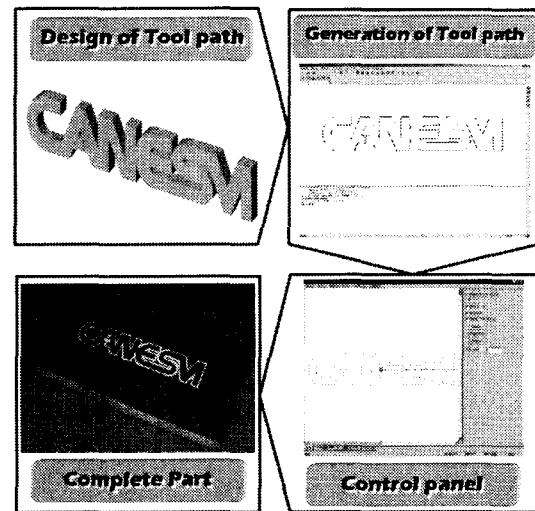


Fig. 19 Application of post-processing part with simple contour

4.1.2 다중 영역

여러 개의 연결 영역(Multiple contours)로 이루어진 공구 경로인 후가공 예제를 수행하였다.

다중 연결 영역에서는 각 영역을 가공하기 위해 하나의 영역을 가공 후 다른 영역으로 이송

되는 점에서 단순 영역과 차이가 있다.

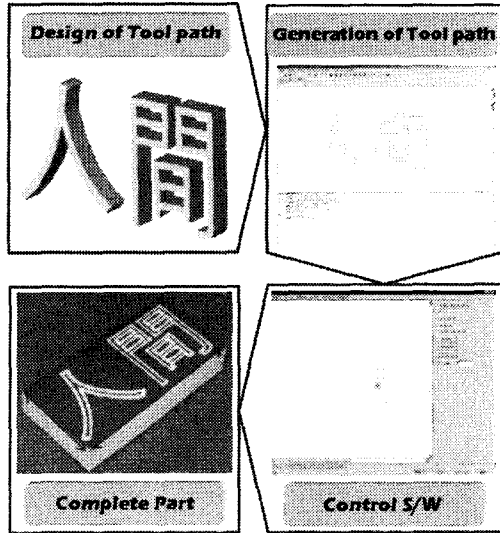


Fig. 20 Application of post-processing part. with multiple contours

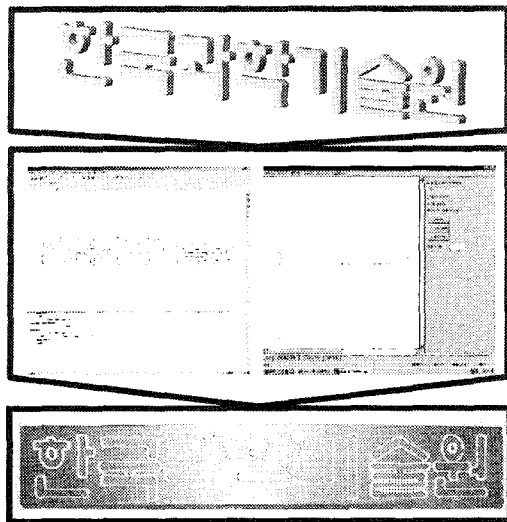


Fig. 21 Application of post-processing part. with multiple contours

Fig. 22 에서 보는 바와 같이 3 장에서 정리한 가공 너비와 단위 높이 당 유효 열 입력량의 선형 관계가 실제 예제에 매우 근접하게 일치함을 확인할 수 있다.

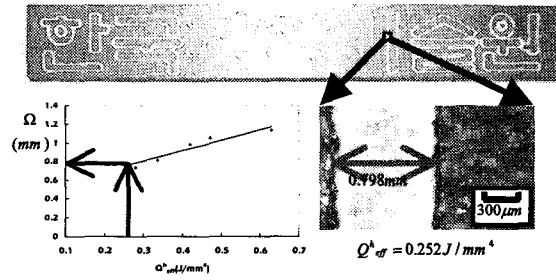


Fig. 22 Verification of relationship between the kerfwidth and the effective heat input per height for post-processing part

4.2 3 차원 제품의 후가공 수행

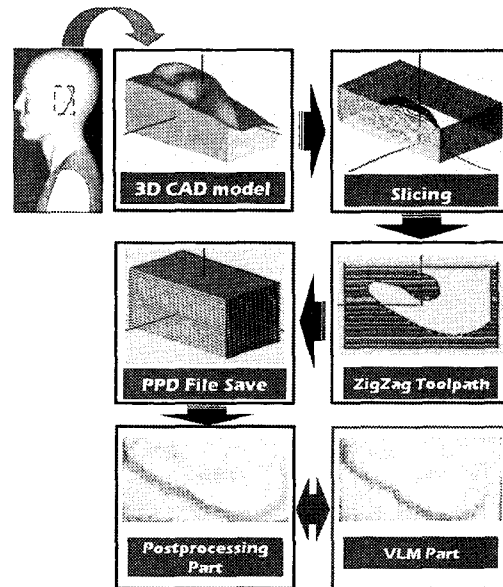


Fig. 23 Application of post-processing part with tool path of three dimensions

Fig. 23 에 보는 바와 같이 인체 두상에서 귀와같은 3 차원 세부 형상은 VLM 공정으로 구현할 경우 정밀도가 좋지 않으며 본 공정을 통해 정밀도를 향상할 수 있다. Fig. 24 에서 확인할 수 있듯이 에러 맵을 통해 후가공 공정을 적용하기 전과 적용 후의 시제품의 대한 정밀도가 향상 되었음을 정량적으로 확인할 수 있다.

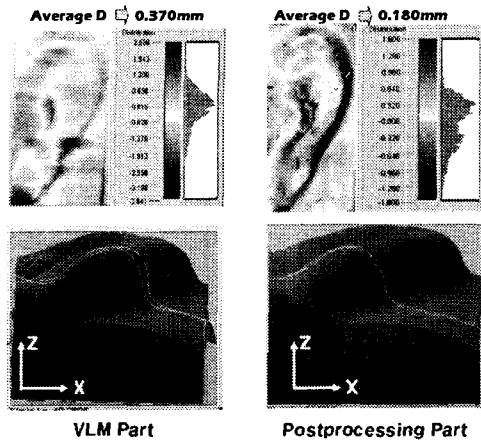


Fig. 24 Error map of post-processing part and VLM part

5. 결 론

본 연구에서는 VLM-ST 공정의 시제품의 미세/세부 형상을 구현하여 국부 형상 정밀도를 향상시키는 후가공 공정을 개발하였다. 이를 위해 다음과 같은 연구가 수행되었다. VLM-ST 공정의 세부 형상 구현을 위한 후가공 공정을 제안/구현하고 후가공 공정에서 핵심 기술인 후가공 공구의 제작을 위한 기초 실험을 통해 설계 조건을 도출하였으며 이러한 조건에 맞추어 공구를 설계/제작하였다. 또한, 후가공 공정에 적합한 CAD/CAM 소프트웨어를 개발함으로써 공정의 적용을 용이하게 하였다.

후가공 공정에서 가공 너비 및 깊이에 영향을 미치는 공정 변수에 대한 실험을 수행하여 가공 너비 및 깊이와의 관계를 도출하였다.

VLM-ST 시제품에 후가공 공정을 적용하여 제안된 후가공 공정의 타당성을 입증하였다.

향후에는 보다 일반적이고 안정적인 후가공 공정 개발을 위해 공정 변수의 해석적인 접근이 필요하며 3축 NC 테이블로 임의의 3차원 형상을 가공할 수 있는 테이블의 개발이 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가중점사업인 주문적응형 쾌속 제품 개발 시스템 사업단의 “가변 용착/적층에 의한 직접식 쾌속 조형 공정 및 응용 기술 개발” 연구 결과의 일부이며, 이에 관계자 여

러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. J. P. Kruth, “Material increase manufacturing by rapid prototyping techniques,” *Annals of the CIRP*, Vol.40, No.2, pp. 603-614, 1991.
2. P. F. Jacobs, *Stereolithography and other RP&M technologies*, ASME Press, 1996.
3. “Variable lamination manufacturing method and apparatus by using linear heat cutting system,” Korea, Patent number 0362737, 2002.
4. Ahn, D.G. Lee, S.H. Choi, H.S. Yang, D.Y. Park, S.K. “Investigation into Development of Transfer Type for Variable Lamination Manufacturing Process and Apparatus,” *KSPE*, Vol.19, No.2, pp.95-105, 2002.
5. P. M. Dickens, R. C. Cobb, “Surface Finishing Techniques for Rapid Prototyping,” *Proceedings of the SME Rapid Prototyping and Manufacturing '93 Conference*, Dearborn, MI, 1993.
6. “Surface Finishing of Parts.” DCN: 8275-00541, DTM Corporation, 1995.
7. K. F. Leong, C. K. Chua, G. S. Chua, C. H. Tan, “Abrasive jet deburring of models built by Stereolithography apparatus,” *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 83, pp.36-47, 1998.
8. D. Shi, I. Gibson, “Improving surface quality of selective laser sintered rapid prototyping parts using robotic finishing ,” *Engineers part B-Journal of proceedings of the Institution of Mechanical*, Vol.214, pp. 197-203, 2000.
9. Yang, D. Y. Sohn, H. K. “Recent State of Rapid Prototyping Techniques for Rapid Product Manufacturing,” *KSPE*, Vol. 17, No. 10, pp.5-10, 2000
10. Lee, S.H. Ahn, D.G. Yang, D.Y. “Calculation of Rotation Angle of the Linear Hotwire Cutting System for VLM-S,” *KSPE*, Vol. 19, No. 2, pp.87-94, 2002.
11. Choi, H.S. Ahn, D.G. Lee, S.H. Yang, D.Y. “Accuracy Improvement in Transfer-Type Variable Lamination Manufacturing Process using Expandable Polystyrene Foam and Experimental Verification,” *KSPE*, Vol, 19, No. 7, pp.97-105, 2002.