

## VLM-ST 제품의 국부형상 정밀도 향상을 위한 후가공 공정개발에 관한 연구

김효찬\*(KAIST 대학원), 안동규(KAIST 대학원), 이상호(KAIST 대학원), 양동열(KAIST)

Investigation into development of post-processing system to improve geometrical conformity of VLM-ST parts for the detail shape

H. C. Kim(Graduate School, KAIST), D. G. Ahn(KAIST), S. H. Lee(Graduate School, KAIST),  
D. Y. Yang(KAIST)

### ABSTRACT

Surface finishing is still indispensable for most rapid prototyping (RP) processes because of the inherent stair-stepped surface and shrinkage of the parts. These problems can be minimized in the VLM-ST process, because it uses expandable polystyrene foam sheets, each of which has a thickness of 3.9 mm and a linear-interpolated side slope. The use of thick layers however, limits the process capability of constructing fine details. This study focuses on the design of post-processing tool for fine details of VLM-ST parts and investigation of thermal characteristics during EPS foam cutting using the post-processing tool. To calculate the heat flux from the tool into the foam sheet, the tool was modeled as a heat source of radiation for finite element analysis. Results of the analysis agreed well with those of the experiment.

**Key Words :** Variable Lamination Manufacturing process (가변 적층 폐속조형공정), Post-processing (후가공 공정), Radiation Heat Source(복사 열원), Transient thermal analysis(비정상 열전달 해석), Detailed shape(국부 형상)

### 1. 서 론

산업 구조의 변화에 따라 현대 사회에서는 신속한 제품의 시작과 생산이 중요하게 되었으며 이러한 요구를 만족하기 위한 방안으로 동시공학적 개념의 새로운 시작품 제작 공정인 폐속조형공정 (Rapid Prototyping : RP)이 도입되었다<sup>(1)</sup>. 1986년에 미국에서 개발된 ‘광조형법 (SLA : StereoLithography Appatatus)’ 공정을 필두로 하여 다양한 공정들이 개발되어 현재는 20 여가지 이상의 공정들이 상용화되었다.

폐속 조형 공정의 제품은 대부분의 경우 후가공 공정이 필수적이다. 폐속 조형 공정의 특성상 얇은 층의 재료를 쌓거나 작은 크기의 분말등을 결합시키거나 혹은 재료의 상의 변화를 통하여 제품을 제작하기 때문에 층간의 단차(Stair-Step)나 상의

변화에 의한 재료의 수축 혹은 재료의 미결합에 의해 표면이나 형상에 결함이 발생한다. 이러한 결함을 제거하기 위해 후가공 공정의 연구가 진행되어 왔다. 일반적인 후가공 공정으로는 단차나 구멍에 분말을 채워 넣고 표면에 코팅을 한 후 사포를 이용하여 표면의 재료를 제거하는 방법등이 있다<sup>(2)</sup>. 또한, Shi 와 Gibson 의 경우는 선택적 레이저 소결 공정 제품의 표면 정밀도를 높이기 위해 산업용 로봇을 이용하여 조형물의 표면 절삭을 통해 표면 정밀도를 향상시켰다<sup>(3)</sup>.

기존의 후가공 공정은 수직벽을 가진 얇은 층을 적층하여 제작된 RP 제품들의 표면 정밀도 향상을 주목적으로 해왔다. 한편, 최근 개발되고 있는 경사를 가진 두꺼운 층을 적층하여 제품을 제작하는 후판 적층식 폐속 조형 공정에서는 후가공은 표면 처리 뿐만 아니라 세부/미세 형상을 후가공을 통하여

구현하여야 한다. 현재 국내에서 개발되고 있는 발포 폴리스티렌 품을 이용한 단속형 가변 적층 폐속 조형 공정(Transfer Type Variable Lamination Manufacturing Process using Expendable Polystyrene Foam : VLM-ST)<sup>(4,5)</sup>의 경우 후판 적층식 폐속 조형 공정으로서 정교한 형상을 가진 세부/미세 형상을 구현하기 위해서는 추가적인 후처리 공정이 소요된다.

본 연구에서는 VLM-ST으로 제작된 제품의 세부/미세 형상 정밀도를 향상시키기 위하여 후가공 시스템 개발에서의 핵심 기술인 후가공 공구 설계에 대하여 연구하였다. 또한, 후가공 시스템의 형상 구현도와 설계된 공구의 열전달 특성을 분석하기 위하여 유한요소해석 및 실험을 수행하여 후가공 시 EPS 품 내부에 발생하는 열 특성을 연구하였다.

## 2. 후가공 공구 설계 및 기초 실험

VLM-ST로 제작된 시작품의 세부/미세 형상 자동 후가공 시스템의 개념도는 Fig. 1과 같다.

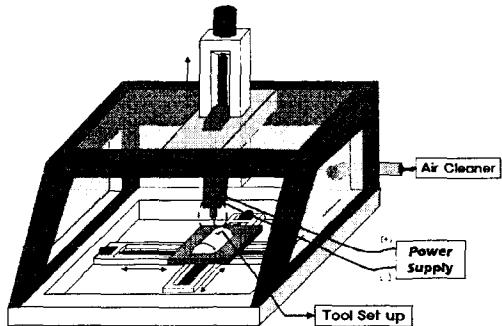


Fig. 1 Schematic of the proposed post-processing system

이 후가공 시스템에서의 핵심 기술은 후가공 공구의 설계이다. 본 후가공 공구는 열을 이용하여 EPS 품을 가공함으로 정확한 설계 요구조건 축득과 열특성 평가를 위하여 기초 실험을 수행하였다.

기초 실험은 3축 CNC 장치를 이용하였으며, 후가공 공구는 Fig. 2와 같이 곡선 형상의 열선과 홀더로 구성하였다. 본 기초 실험은 공구를 EPS 품 내부로 절입시켜 가공된 재료가 벗겨지면서 기화되도록 하였다.

기초 실험 결과 가공된 잔여 재료는 Fig. 3과 같이 모두 열분해 되지 않고 용융되어 가공된 재료 표면에 고착되면서 잔여 재료 내부에 존재하는 열을 재료로 전달시켜 표면에 결함을 발생시켰다. 또한, 절입식으로 가공할 경우 최대 가공 속도가 25 mm/s 이하 이었다. 25 mm/s 이상일 경우 기계적 절단이 시작되어 공구 변형이 일어나기 시작하였다.

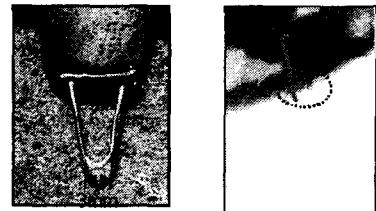


Fig. 2 Post-processing tool with the curved hotwire

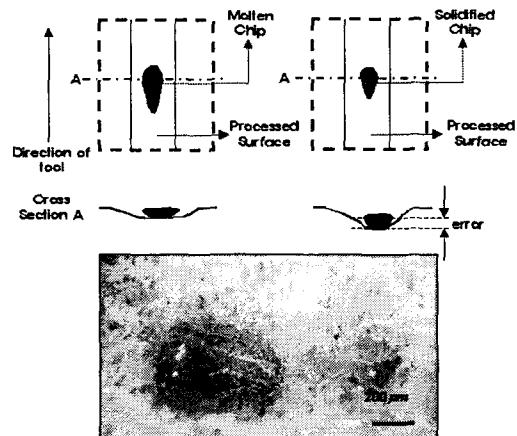


Fig. 3 Surface defects induced by the remaining melted material

본 기초 실험 결과 다음과 같은 공구 설계 및 공정 설계를 할 수 있었다.

- 절단부는 고온의 열원을 유지하여야 한다. ( $T > 480^{\circ}\text{C}$ )
- 공구 재료는 고온에서 기계적 성질이 우수하여야 한다.
- 공구의 방향성이 존재하지 않아야 한다.
- 공구의 가공 형태는 비접촉식이어야 한다.

기초 실험 결과를 반영하여 공구 설계사항을 만족시키는 Fig. 4와 같은 공구를 설계하였다.

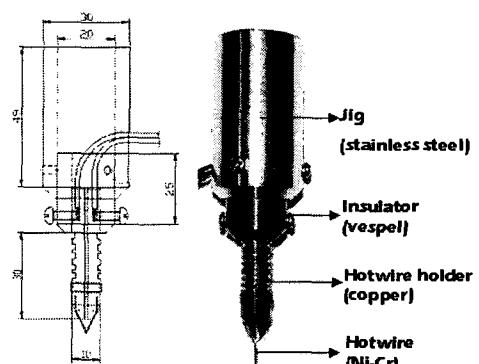


Fig. 4 Designed post-processing tool

### 3. 후가공 공정에 대한 유한요소해석

#### 3.1 지배방정식 및 유한요소 수식화

고열 열원을 가진 후가공 공구를 이용한 열전달 공정은 비정상 열전달 현상으로 가정할 수 있다. 열원과 동일한 속력으로 이동하는 이동 좌표계 (Moving coordinate system)를 이용한 3 차원 비정상 열전달 현상에 대한 지배 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_M} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_M} \right) + \frac{\partial}{\partial y_M} \left( k \frac{\partial T}{\partial y_M} \right) + \frac{\partial}{\partial z_M} \left( k \frac{\partial T}{\partial z_M} \right) + q = \rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t_M} - V_{tr} \frac{\partial T}{\partial x_M} \right) \quad (1)$$

여기서,  $(x_M, y_M, z_M)$ 은 이동좌표계,  $k$ 는 열전도 계수,  $\rho$ 는 밀도,  $C_p$ 는 비열,  $V_{tr}$ 은 열선 이동 속력이다.

식(1)을 등방성 요소에 적용하여 유한 요소 수식화 하면 식(2)를 얻게 된다.

$$[C(T)]\dot{T} + [K(T)]T + \{V\} = \{Q(t)\} \quad (2)$$

여기서,  $[C(T)]$ ,  $[K(T)]$ ,  $\{V\}$  및  $\{Q(t)\}$ 는 각각 커팘시 턴스 행렬, 강성 행렬, 속도 벡터 및 열 유동 벡터이다.

#### 3.2 열원 모델링 및 유한요소해석

본 공정에서는 Fig. 5 와 같이 공구와 모재가 비 접촉되어 있어 대류와 복사 형태로 공구에서 모재로 열전달이 발생한다. 그러나, 실제 공구와 모재의 온도차가 크기 때문에 복사에 의한 열전달이 대부분이다. 그러므로, 본 논문에서는 후가공 공구에서 모재로 전달되는 열량을 복사 열전달로 가정하고 열원의 강도와 열분포를 계산하였다.

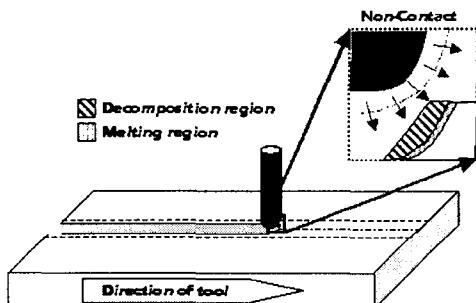


Fig. 5 Principle of the proposed post-processing

열원 모델링에 주요 변수는 형상함수(view factor), 공구의 열량, 모재의 표면 상태이다. 형상함수는 공구에서 복사에 의해 모재로 투입하는 열량과 모재에 흡수되는 열량의 비이다. 형상함수는 열전달이 일어나는 공구의 형상과 위치의 함수가 된다. 본 논문에서는 Fig. 6 과 같은 간략화된 공구형

상과 모재 형상으로부터 형상함수를 계산한 후 복사열 평형방정식을 풀어 공구에서 모재에 전달되는 열원 분포와 강도를 계산하였다. 형상함수 계산식은 식(3)이며, 모재에 투입되는 열입력량은 식(4), (5)에 의해 결정된다.

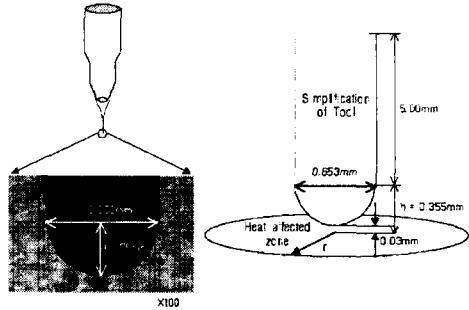


Fig. 6 Simplified geometry of the proposed post-processing tool

$$F_{12}(r) = 0.5 \times \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1+R^2}} \right), \quad R_2 = \frac{r}{h} \quad (3)$$

$$J_2(r) = \frac{F_{21} \times q_i}{1 + E_2 - F_{21} \times F_{12}} \quad (4)$$

$$Q_{in}(r) = \frac{\varepsilon_2}{1 - \varepsilon_2} (E_{b2} - J_2(r)) \quad (5)$$

여기서,  $F_{12}$ 는 공구에서 모재로 열전달될 때의 형상함수이고  $F_{21}$ 는 모재에서 공구로 열전달될 때의 형상함수이며  $q_i$ 는 공구에 투입되는 입열량이고  $J_2$ 는 모재 표면에서 발산되는 열량이며  $E_{b2}$ 는 모재가 흑체일 때 발산하는 열량이다. 또한,  $r$ 은 모재의 열원 반경이며  $h$ 는 모재와 공구의 간격이다.

위식들에 의해 계산된 모재에 투입되는 열입력량은 Fig. 7 과 같다.

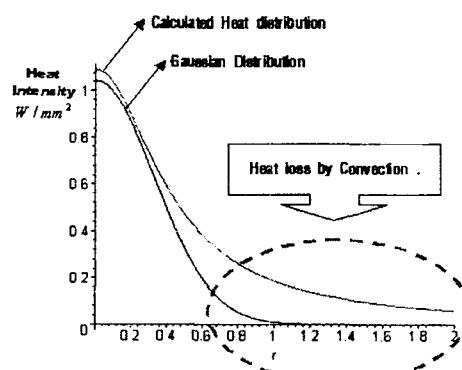


Fig. 7 Distribution of heat intensity for the proposed heat flux model

고열 열원을 가진 후가공 공구를 가진 열절단 공정은 상용 유한요소해석 프로그램인 SYSWELD +<sup>(9)</sup>를 이용하였다. 유한 요소 해석에 적용된 형상은 Fig.8 와 같다.

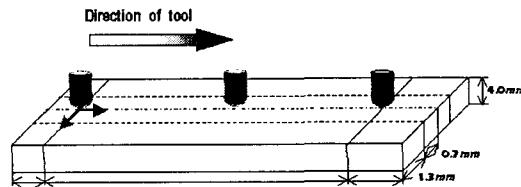


Fig. 8 Configuration of analysis domain

#### 4. 후가공 공정에 대한 열특성 실험

유한 해석 결과의 타당성을 검토하고 실제 후가공이 발생하는 열 특성을 고찰하기 위하여 2 차원 후가공 실험을 수행하였다.

후가공 실험은 Fig. 9 와 같이 3 축 가공기에 후가공용 셋업을 부착하여 실험하였으며, 공구 경로는 시편 형상은 Fig. 10 과 같다. 실험시 절단 속도는 일정하게 하고 열 입력량을 변경함으로써 모재에 투입되는 유효 열 입력량을 변화시켰다.

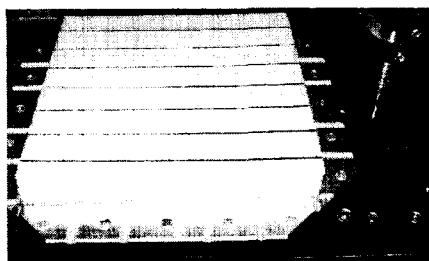


Fig. 9 Experimental setup

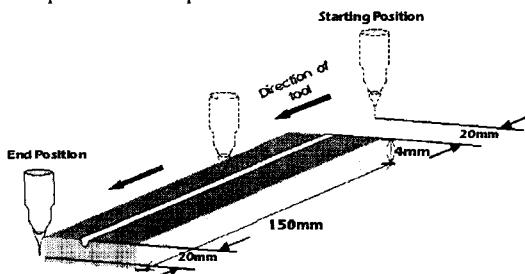


Fig. 10 Specimen and path of the post-processing tool

#### 5. 실험/해석 결과의 분석 및 고찰

본 실험을 통하여 설계된 공구의 가공 특성 및 열 입력 범위를 찾을 수 있었다. 단위 길이에 전달되는 열 입력량  $Q_{eff}$ <sup>(7)</sup>의 값이 0.33J/mm 보다 클 때에는 과도한 열 입력량에 의해 가공 중 품 내부

의 가스에 의해 불꽃이 발생하여 가공이 불가능하였으며  $Q_{eff}$  값이 0.12J/mm 이하에서는 가공이 되지 않았다.  $Q_{eff}$  값의 범위가 0.12 ~ 0.33J/mm 에서는 용융된 잔여재료는 없었으며 가공 깊이와 너비가 매우 일정하게 가공되어 제안된 후가공 공정의 공구로 적절함을 알 수 있었다.

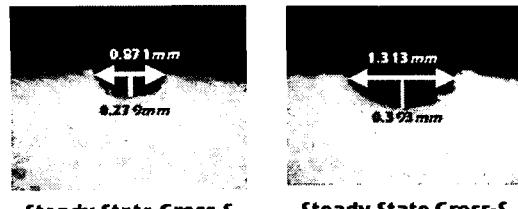


Fig. 11 Results of Experiments

Fig. 11 은 정상 상태에서 가공한 시편의 단면을 활용한 결과이다. 앞에서 제안한 열원 모델을 이용하여 모재에 대한 유한 요소 해석을 수행하였다.

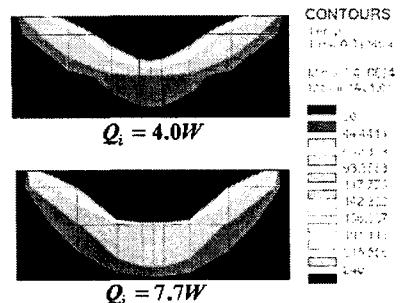


Fig. 12 Results of analysis (Temperature distribution)

Fig. 12 는 정상 상태인 단면에서의 온도 분포를 나타낸다. 실험 결과를 통하여 가공 가능 범위에 있는 열 입력량을 적용하여 해석을 한 결과를 보인 것이다.

해석과 실험에서의 가공 영역을 비교함으로써 해석에서의 열원 모델링의 타당성을 검증하였다.

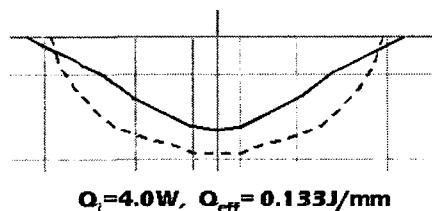


Fig. 13 Comparison results of analysis with those of experiment

Table. 1 Analysis of error

	Result of analysis (mm)	Result of experiment (mm)	Error (mm)	Error (%)
Y direction	0.897	0.871	0.026	2.98
Z direction	0.220	0.279	0.059	21.15

표. 1의 비교 결과를 보면 Y 방향으로는 실험과 해석값이 거의 일치한다고 볼 수 있으나 Z 방향으로는 21%정도의 실험값과 해석값의 차이를 보이고 있다.

이러한 차이는 열원 해석의 가정에서 찾을 수 있다. 유한 요소 해석에서 모재를 연속체로 가정하여 해석을 수행하였으나 실제 가공 재료인 EPS 품은 다공성 재료이다. EPS 품 재료는 내부에 0.1 – 0.15mm 크기의 입자로 구성되어 있어 연속체와는 차이가 있다. 따라서 가공 너비에 해당하는 Y 방향으로는 다공성이 매우 적어 해석과 실험 결과가 거의 일치하였으며 Z 방향으로는 다공성이 비교적 크기 때문에 해석과 실험결과값에 차이가 있었다.

따라서 향후에 유한 요소 해석에서 깊이 방향으로 재료의 다공성을 고려한다면 보다 근접한 해석 결과를 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 VLM-ST에서의 세부/미세형상을 가공할 수 있는 후가공 공정의 핵심 기술인 고열 후가공 공구에 대한 설계를 수행하였으며, 후가공 시 공구와 EPS 품 내부에 발생하는 열전달 특성을 유한요소해석 및 실험을 통하여 연구하였다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 기초 실험을 통하여 후가공 공구의 설계 요구조건을 도출하고 이 조건에 부합하는 공구설계를 수행하였다. 또한, 실제 후가공에서 가공 효율을 높이기 위해서는 비접촉식 가공이 이루어져야함을 알 수 있었다.

둘째, 고열 후가공 공정을 이동 좌표계를 이용한 3 차원 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 해석 결과 본 공정을 해석하기 위해서는 복사 열원을 고려한 열원 모델링이 필요함을 알 수 있었다.

셋째, 고열 후가공 공정에 대한 실험을 수행하여 제안된 후가공 공정의 가공 특성을 분석하였으며, 해석 모델의 타당성을 입증하였다. 또한, 해석과 실험결과로부터 제안된 후가공 공정이 공정 변수 조절에 의해 제어될 수 있는 공정임을 알 수 있었다.

향후 추가적인 연구를 통해서 제안된 후가공 공

정에 대한 공정 변수 영향성을 분석한 뒤, 이 결과를 이용하여 3 차원 제품의 후가공을 수행하여 국부 형상 정밀도를 향상하고자 한다.

## 후기

본 연구는 과학기술부 국가중점사업인 주문적 응형 쾨속제품개발시스템 사업단의 “가변 용착/적층에 의한 직접식 쾨속 조형 공정 및 응용 기술 개발” 연구 결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문현

- P. F. Jacobs, "Stereolithography and other RP&M Technologies," Society of Manufacturing Engineers, 1996.
- Surface Finishing of SLS Parts, DCN: 8275-00541, 1995(DTM Corporation)
- D. Shi, I. Gibson(2000), "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
- 안동규, 이상호, 최홍석, 양동열, 박승교, "단속형 재료 공급식 가변적층 쾨속 조형 공정 및 장치 개발에 관한 연구," 한국 정밀공학회지, 제 19 권, 제 2 호, pp. 95-105, 2002.
- "선형 열절단 시스템을 이용한 단속적 재료 공급식 가변적층 쾨속조형 공정 및 장치," 국내 특허, 특히 출원 번호 제 2001-0040212 호, 2001
- Ahn, D. G., Lee, S. H. and Yang, D. Y., "Investigation into thermal characteristics of linear hotwire cutting system for variable lamination manufacturing (VLM) process by using expandable polystyrene foam," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, pp. 427 – 439, 2002.
- Ahn, D. G., "Investigation into Development of Variable Lamination Manufacturing using Expandable Polystyrene Foam," 한국 과학 기술원 박사 학위 논문(2002)
- 최홍석, 안동규, 이상호, 양동열, "단속형 가변적층 쾨속 조형 공정(VLM-ST)을 위한 정밀도 향상에 관한 연구 및 실험적 검증," 한국 정밀공학회지, 제 19 권, 제 7 호, pp.97-105, 2002
- ESI Group, "SYSWELD+ 2.0 Reference Manual," SYSTUS International, New York, 1972.