

열 공구를 이용한 쾌속 열용삭 공정 개발에 관한 연구

김효찬*, 이상호**, 양동열#, 박승교***

Investigation into Development of Rapid Heat Ablation process Using hot tool

Hyo Chan Kim*, Sang Ho Lee**, Dong Yol Yang# and Seong Kyo Park***

ABSTRACT

Recently, life cycle and lead-time of products have been shortened with the demand of customers. Therefore, it is important to reduce time and cost at the stage of manufacturing trial molds. In order to realize a three-dimensional shape on CAD, the machining process has been widely used because it offers practical advantages such as precision and versatility. However, the traditional machining process needs a large amount of time in cutting a product and the remained material causes trouble such as inconvenience for clarity. In this work, a new rapid manufacturing process using the hot tool, Rapid Heat Ablation process, has been developed to overcome such limitations. While the hot tool moves the predetermined path, the heat of the tool decomposes the remained material. The radius of heat affected zone related to process parameters was investigated through experiments to improve the quality of ablated parts. In order to examine the applicability of the proposed process, three-dimensional shapes such as hemisphere and standard test part, were ablated utilizing the apparatus.

Key Words : Rapid heat ablation, Hot tool, Rapid manufacturing

기호설명

- η = kerfwidth
- Q_i = Heat input of the hot tool
- V = Speed of the hot tool
- Q_{eff} = Effective heat input
- R_{heat} = Radius of heat affected zone
- Ω = Normalized error
- α = Radius of heat affected zone on X axis

β = Radius of heat affected zone on Z axis

1. 서론

오늘날 수요자의 다양한 기호에 따라 제품 모델이 다양화 되고, 국내외 시장에서 경쟁이 치열해지면서 제품의 개발기간 및 비용의 단축이 절실하게 요구되고 있다. 이러한 시장의 요구에 효과적으로 대처하고, 제품의 경쟁력을 제고하기 위해

*** 접수일: 2005년 1월 25일; 게재승인일: 2005년 4월 15일

* 한국과학기술원 기계공학과

** LG 전자 생산 기술원

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

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

*** (주)메닉스

서는 제품의 설계에서부터 시작품 생산에 이르는 제품 개발에 소요되는 비용과 시간을 절감하여 신속하고 저렴하게 제품을 시장에 출하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 이러한 시장의 요구를 만족시키고 기존 제품 개발에서 나타나는 장시간의 개발 기간을 단축할 수 있는 방법으로 동시공학 개념의 3 차원 형상 구현의 방법으로 Fig. 1에서 보는 것과 같이 쾌속 생산 시스템이 도입되었다.

특히, 디지털화 된 3 차원 형상을 빠르게 구현하는 기술은 CAD/CAM 환경에서 제품의 설계부터 조립까지 모든 공정을 쉽고 빠르게 수행하여 시작품을 제작하는데 가장 큰 장점이 있다.¹

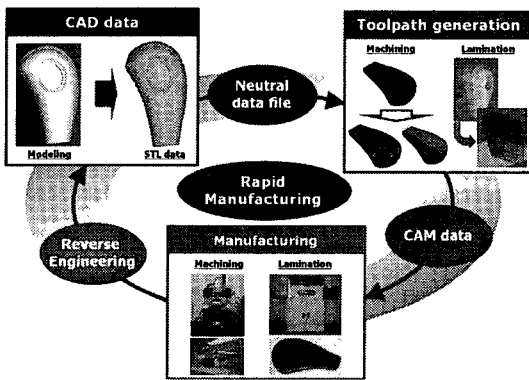


Fig. 1 Procedure of rapid manufacturing system

쾌속 시작 제품을 제작하는 방법으로는 재료를 일정한 두께로 적층하여 조형하는 방법과 원재에 정해진 부분을 절삭하여 형상을 제작하는 방법으로 두 가지로 분류할 수 있다. 적층 방식의 쾌속 조형 공정은 1987년 미국의 3D system사에서 광조형 공정(SLA)를 처음으로 개발된 이후 20여가지 이상의 상용화 공정이 개발되었다.² 적층형 쾌속 조형 공정의 경우 내부의 복잡한 형상이 있는 제품의 제작에 유리한 반면 표면에 적층 무늬가 존재하여 산업적으로 활용하기 위해서는 추가적인 표면 후처리 공정이 필요하며 가공 재료 선택의 한계 및 제작 크기 한계가 존재하며 고가의 장치와 재료등의 문제점이 존재하여 산업적으로 활용도가 높지 않다.

이에 비해 절삭 가공을 이용하여 시작품을 제작하는 공정은 다양한 재료를 가공할 수 있으며

실물과 가까운 형상 정밀도 및 표면 상태를 나타낼 수 있어 현업에서 많은 활용이 되고 있다. 절삭 공구를 이용한 쾌속 조형 시스템은 크게 3가지 형태로 연구되었다. 첫 번째 방법으로 고속 가공 공구와 다면 가공 인덱싱 테이블을 이용하여 3차원 형상을 가공하는 방법으로 Nakagawa 등은 초고속 밀링 기술을 이용하여 플라스틱 핸드폰 케이스등을 제작하였으며 Shin 등은 고속 절삭 공구와 양면 가공이 가능한 인덱싱 테이블과 자동 충전 기법을 이용하여 다양한 3 차원 형상을 가공하였다.^{3,5} 또한, Jung 등은 동시 5축 가공 가공기를 이용하여 합성수지를 가공함으로써 빠르게 3 차원 형상을 구현할 수 있었다.⁶ 두 번째 방법으로 공구가 접근하지 못하는 형상을 가진 제품을 일정한 두께로 절단하여 공구가 접근할 수 있도록 한 후 절단된 각 파트를 가공하여 최종적으로 적층하여 파트를 완성하는 적층 방법과 절삭 방법의 하이브리드(Hybrid) 방식이 연구되었다. Kim 등은 병렬 기구를 이용하여 3축 양면 가공 후 접합, 5축 가공을 이용한 후공정으로 시작품을 제작하는 Eclipse RP 시스템을 개발하였으며, Chen 등은 로봇 시스템에 밀링 절삭 기구를 붙여 절삭과 적층을 반복하는 방법으로 시작품을 제작하는 RoLM 시스템을 개발하였다.^{7,8} 세 번째 방법으로 다축 로봇 팔에 절삭 공구를 부착하여 한번의 셋업으로 다면에서 가공이 가능하도록 하여 3 차원 형상을 가공하는 방법이 연구되었다. Kim 등은 3 차원 측정과 가공을 수행하는 3 차원 형상을 로봇을 이용하여 가공하였으며 Huang 등은 가공 시간의 축소와 공구 접근성 향상을 위해 듀얼 로봇 팔을 이용하여 황삭과 정삭을 수행하여 자유 면 가공을 수행하였다.^{9,10}

이러한 절삭의 쾌속 시작품 제작 방식은 근본적인 문제점인 단위 이송 거리당 작은 절삭량에 의해 대형 제품을 가공하기 위해서는 많은 시간이 소모되며 가공시 발생하는 잔여 재료(Chip)는 공작기계의 이송부에 끼어 잔고장을 일으키는 주요 원인이 될 뿐만 아니라 작업자가 직접 청소를 하여 제거하기 때문에 그에 따른 생산성이 떨어지고 생산 비용이 올라가게 된다. 그리고 회전 공구를 사용하는 절삭 공구의 경우 회전날에 의한 작업자의 안전사고 위험이 높으며 공구에 의한 진동 효과를 최소화 시키기 위해 장치의 크기와 가격이 상승하는 문제가 존재한다. 이러한 문제점은 회전

하는 날에 의해 일정량의 재료를 제거하는 절삭 가공의 기본 개념에 의해 발생하는 문제로써 이러한 문제를 극복하기 위해서는 재료 가공 개념을 바꾸어야 한다.

따라서, 본 논문에서는 절삭 가공의 기본 개념을 바꾸는 쾌속 열용삭 가공의 개념을 제안한다. 가공 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있으며 가공 도중 잔여 재료가 거의 발생하지 않고 회전 공구에 의한 진동문제가 발생하지 않는 쾌속 열용삭 가공(Rapid Heat Ablation process: RHA process)을 개발하고자 한다.

2. 쾌속 열용삭 공정의 개념 및 장치

2.1 쾌속 열용삭 가공의 개념

빠르게 3 차원 형상을 가공하고 잔여 재료가 거의 발생하지 않으며 회전하지 않는 공구를 사용하여 형상을 제작하는 새로운 개념의 쾌속 열용삭 가공 공정이 개발중에 있다.

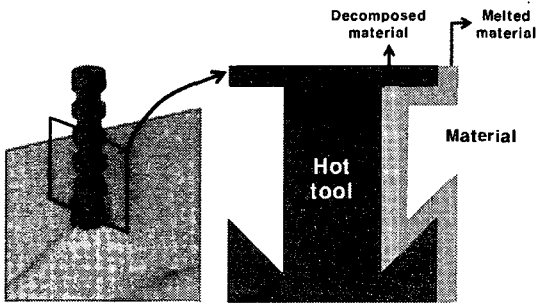


Fig. 2 Concept of heat ablation using a hot tool

열용삭 가공 원리는 Fig. 2에서 보는 것과 같이 가공재료의 열 분해 이상의 온도를 가진 열 공구가 주어진 경로를 따라 움직이면서 가공재를 열에 의해 용융시키고 용융된 재료는 기계적 또는 화학적으로 제거되는 원리로써 이러한 제거 방식을 본 연구에서는 열용삭(Heat ablation)이라 명명한다.

이러한 가공 원리를 이용하여 개발중인 쾌속 열용삭 가공 공정의 개념도 Fig. 3 과 같이 가공하려는 형상 데이터를 읽어 들여 열 공구 가공에 적합한 공구 경로를 생성한다. 생성된 공구 경로를 따라 열 공구가 이동하면서 재료를 열용삭에 의해 제거한다. 단위 시간당 가공량이 큰 열용삭으로 빠

르게 황삭을 수행하며 표면 처리 가공은 절삭 공구를 이용하여 최종 가공을 수행한다. 이 때 발생하는 잔여 재료는 대부분 열분해(Decomposition)에 의해 기화되거나 용융되어 외부 형상에 달라붙게 된다.

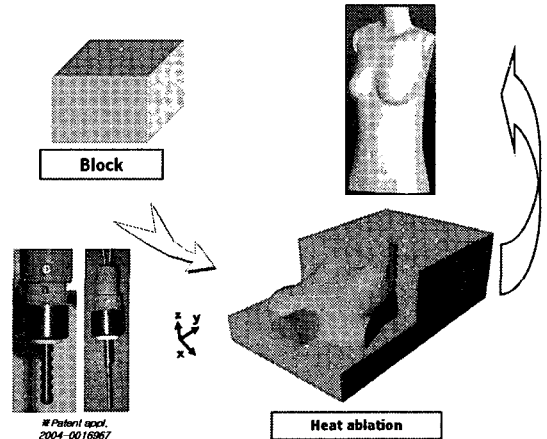


Fig. 3 Procedure of rapid heat ablation using a hot tool

2.2 쾌속 열용삭 공정 및 장치 개발

2.2.1 쾌속 열용삭 장치의 구성

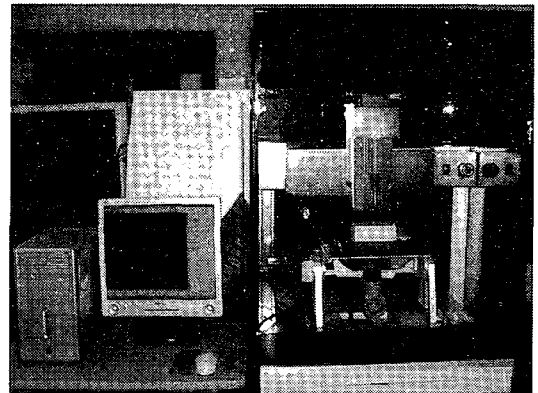


Fig. 4 Apparatus of rapid heat ablation using hot tool

쾌속 열용삭 공정의 구현을 위해 제작한 장치는 Fig. 4 와 같으며 장치의 규격은 Table 1 과 같다. 개발된 장치의 구성은 공구 경로 생성 소프트웨어, 5 축 제어 보드, 5 면 가공 인덱싱 테이블, 열 공구 등으로 구성된다. 제어 소프트웨어는 CAD/CAM

소프트웨어를 이용하여 생성된 공구 경로를 로딩 후 각 축에 공구 경로의 정보를 보내주며 가공 재료를 셋업 후 재료와 장치의 원점을 맞출 때 사용된다. 본 장치에서 사용되는 제어 축수는 총 5 축이며 공구를 이송하는 X, Y, Z 축의 3 축은 공구 경로에 의해 연동되며 2 축은 인덱싱 테이블을 제어하는 축이다.

Table 1 Specifications of rapid heat ablation system

Range of X, Y, Z axis	X	200 mm
	Y	200 mm
	Z	200 mm
Range of indexing table	θ_x	0 - (+) 90 °
	θ_y	(-)180 -(+)180 °
Specifications of Tool	Tool diameter	5, 11 (Rough) 1, 0.5 (Fine)
	Tool speed	10 - 50 mm/s
	Input value	10 - 100V

2.2.2 쾌속 열용삭 가공 경로 생성

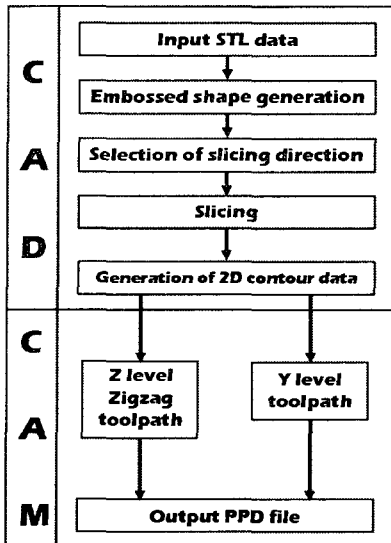


Fig. 5 Procedure of toolpath generation for rapid heat ablation

쾌속 열용삭 공구 가공 경로 생성 절차는 Fig. 5 와 같다. Z 수준 가공 경로는 3 차원 형상 데이터를 로딩 후 음각화 형상을 생성한 후 슬라이싱 방향을 선택하고 때 언더컷이 발생하지 않도록 하기 위해 슬라이싱 정지 조건(Stop slicing criteria)를 이용하여 슬라이싱 높이를 계산하도록 한다. 2 차원 윤곽 데이터에서 지그재그 방법을 이용하여 최종 공구 경로를 생성한다. Y 수준 가공 경로에서는 슬라이싱을 통해 윤곽데이터만 생성하고 이를 직접 공구 경로로 저장하게 된다. 최종 생성된 가공 경로 데이터는 출력 파일 .PPD 형태로 저장하도록 한다.

2.2.3 쾌속 열용삭을 위한 가공 재료 조건

쾌속 열용삭가공에 적합한 가공 재료는 다음과 같은 특성을 가져야 한다.

- (1) 열에 의해 재료의 상태가 액상이 되고 열분해가 발생하는 온도가 500 ℃이하에서 발생해야 한다.
- (2) 재료의 용융상태에서 충분한 점도를 가지고 있어 중력방향으로 흘러내리지 않고 공구의 단구조에 모이거나 외부에 묻혀져서 제거되어야 한다.
- (3) 고체 상태에서 열용융이 일어나 액체 상태로 상변화가 일어날 때 부피가 급격하게 감소되어 발생하는 용융재료가 최소가 되어야 한다.
- (4) 재료의 열전도도가 매우 낮아 열용삭시 가공부의 집중 열원에 의한 열영향부의 영역의 크기가 최소화되어야 한다.
- (5) 난연성 재료이며 쉽게 발화하지 않아야 한다.

이러한 성질을 만족하는 적합한 재료로는 열가소성 폴리머 폼(Thermoplastic polymer foam)을 사용할 수 있다. 폴리머 폼의 경우 용융점이 낮고 열분해 온도가 450 - 500 ℃ 사이이며 용융 재료가 되었을 때 점도가 충분히 있어 열용삭이 용이하다. 또한, 폼 재료 특성에 의해 상당량의 부피가 용융되었을 때 액상의 부피가 10 %이하로 줄어들어 용융 재료에 의한 형상 표면의 결함을 최소화시킬 수 있으며 폼 재료 자체가 단열물질로 내부 열전도도가 매우 낮아 열영향부가 최소화 되어 이에

의한 결합이 거의 발생하지 않는다.

본 공정에서는 열 가소성 폴리머 폼으로 산업적으로 널리 활용되고 있는 EPS foam (Expandable polystyrene foam)을 가공재로 선정하였다. 선정된 폼 재료는 패속 조형 산업에서 3 차원 조형을 위해 활용되고 있을 뿐만 아니라 제작된 폼 형상을 EPC(Evaporable Pattern Casting) 공정등의 2 차 공정을 통해 복잡한 형상의 금속 제품을 한번에 제작할 수 있어 활용도가 매우 높다. 열 공구 개발을 위해 사용되는 재료의 열 및 물리적 물성값이 필요하며 Table 2 은 EPS 폼 재료의 물성값을 참고문헌을 통해 조사한 결과이다.¹¹

Table 2 Properties of EPS foam

Properties	Value
Density (Kg / m^3)	6.26
Glass transition Temperature ($^{\circ}C$)	240
Decomposition Temperature ($^{\circ}C$)	470
Thermal conductivity (W/mK)	0.028

2.2.4 패속 열용삭 공구

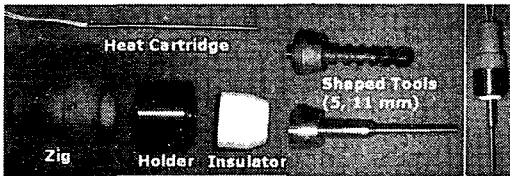


Fig. 6 Components of hot tool

제작된 열공구는 Fig. 6 에서 보는 것과 같이 크게 지그(Zig),홀더(Holder),절연부(Insulator), 형상을 가진 공구(Shaped tool), 히트 카트리지(Heat cartridge)등의 다섯 부분으로 구성된다.

(1) 지그 (Zig)

공구를 장치에 고정해주는 지그는 단열 및 내열성을 가진 재료를 이용하여 제작하였다. 열공구에서 발생하는 열이 장치로 전달되어 장치에 좋지 않은 영향을 주는 것을 최소화하는 동시에 공구의 열을 장시간 견디어야 하기 때문이다. 이러한 성질

을 만족하는 재료는 내열성 폴리머인 페놀 수지 계열의 베크 라이트를 사용 하였다.

(2) 홀더 (Holder)

지그와 절연부를 연결해주는 부분으로 장시간 열에 견디어야 하며 체결을 하는 부분이기 때문에 기계적 성질이 우수해야 한다. 이러한 성질을 만족하고 가공성이 용이한 SUS (Steel Use Stainless)를 사용하였다.

(3) 절연체 (Insulator)

고온의 열공구 발열부를 직접 지지하는 부분으로 공정 수행시 표면 온도가 $500^{\circ}C$ 이상으로 유지된다. 따라서, 재료의 내열성이 매우 뛰어나고 절연성의 성질을 가진 세라믹 (Ceramic)을 이용하여 제작하였다.

(4) 형상을 가진 공구 (Shaped Tool)

열용삭이 수행되기 위해 형상의 표면에 이중 구조의 계단 형상을 제작하였다. 표면의 이중구조에 의해 외각 공구에 의해 용융되는 폴리머는 공구의 내부로 모이게 되며 내부의 높은 온도에 의해 열분해가 된다. 가공양을 조절하기 위해 $\phi 5, 11 mm$ 의 두 가지 열공구를 제작하였으며 공구의 재료는 경제적이고 열전도도가 좋은 구리를 사용하였다.

3. 패속 열용삭 공정 변수에 따른 가공 특성 분석

패속 열용삭 가공시 열공구 열반경에 따라 가공의 양상이 달라지게 된다. 따라서, 개발된 공정에서 열반경에 영향을 주는 공정 변수에 따른 가공 특성을 분석하고 관계를 규명하는 것이 필요하다. 열공구의 열영향부를 결정하는 주요 공정 변수는 가공 속도, 열입력량이 있다. 일반적으로 열을 이용한 용접 공정이나 열선등을 이용한 공정에서 가공 속도와 열입력량을 주요 가공 변수로 선정하여 영향성 분석을 수행한다.¹²

따라서, 본 절에서는 가공 속도와 열입력량을 변화시켜가며 가공너비의 변화를 실험을 통해 측정하여 두 공정 변수와 가공 너비의 관계를 규명한다. 또한, 가공 속도와 열입력량을 통합한 유효 열입력량을 정의하여 가공 너비와의 관계를 규명한다.

3.1 공정 변수와 가공 너비의 관계

공정 변수인 가공 속도와 열입력량을 변화 시켜가며 가공 너비의 변화를 관찰함으로써 가공너비와 두 공정변수와의 관계를 규명하도록 한다.

실험 과정은 Fig. 7 과 같이 각 시편의 가공 조건에 맞는 열입력량과 가공속도를 설정한 후 충분한 시간을 두어 열공구의 표면온도가 더 이상 올라가지 않는 정상상태(Steady State)에 도달할 때까지 대기한다. 그 다음 열공구를 이용하여 동일 조건으로 직선 가공을 수행하며 가공 위치를 변경 후 공정 조건을 다시 조절하여 앞의 과정을 반복한다. 실험 조건으로 열공구의 직경은 5 mm 이며 전기저항은 70.8 Ω 이다. 가공 속도는 20, 30, 40, 50 mm/s 의 4 가지 조건으로 실험을 수행하였으며 열입력량은 60, 65, 70, 75 V 로 4 가지 조건으로 실험을 수행하였다.

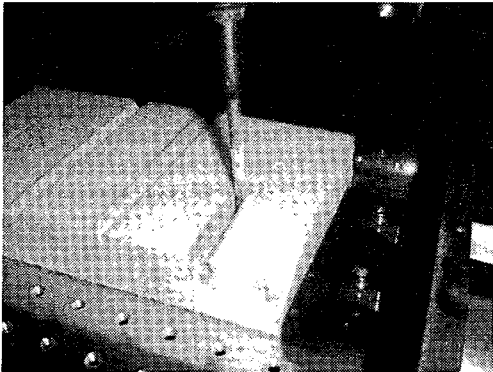


Fig. 7 Experiments for various parameters

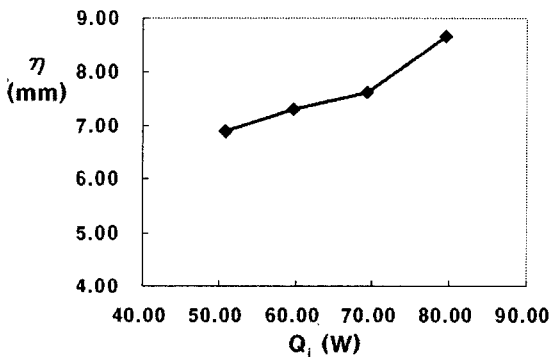


Fig. 8 Relationship between heat input and kerfwidth

실험을 통해 얻어진 열입력량과 가공 너비와의 관계는 Fig. 8 과 같다. 열입력량이 증가할수록 열공구의 열영향부의 범위가 넓어져 가공 너비가 증가함을 알 수 있다. 또한, 가공 너비와 열입력량의 관계를 선형 근사한 결과는 식(1)과 같다.

$$\eta = 0.06 * Q_i + 3.77, R^2 = 0.94 \quad (1)$$

가공 속도와 가공너비와의 관계는 Fig. 9 와 같으며 가공 속도가 증가할수록 단위 넓이의 열입력량이 줄어들게 되고 이에 따라 열공구의 열반경이 감소하게 되어 가공 너비가 줄어들게 된다.

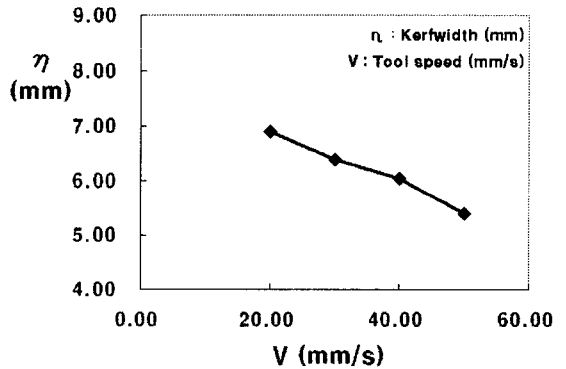


Fig. 9 Relationship between tool speed and kerfwidth

또한, 가공 속도가 점점 증가할수록 열공구에 가공저항력이 증가하여 가공 특성이 좋지 못하게 된다. 가공 속도와 가공 너비와의 관계의 선형 근사식은 식 (2)와 같으며 99 %이상의 매우 높은 선형율을 알 수 있다.

$$\eta = -0.05 * V + 7.85, R^2 = 0.99 \quad (2)$$

3.2 유효 열입력량과 열 반경의 관계

앞 절에서 실험을 통해 열입력량 및 가공 속도와 가공 너비의 관계를 규명하였다. 두 공정 변수와 모두 선형의 관계를 유지함을 실험을 통해 알 수 있었다. 따라서, 두 선형 관계를 가진 두 공정변수를 하나의 변수로 표현하기 위해 식 (3)과 같이 유효 열입력량 (Effective heat input)을 정의한다.

$$Q_{eff} (J/mm) = \frac{Q_i (J/s)}{V (mm/s)} \quad (3)$$

열입력량을 가공 속도로 나눈 값이며 단위 환산을 통해 유효 열입력량은 가공 방향으로 단위 면적당 입력되는 열량임을 알 수 있다. 유효 열입력량값과 가공너비와의 관계를 나타내면 Fig. 10 과 같으며 선형 관계식은 식 (4)와 같다.

$$\eta = 0.82 * Q_{eff} + 5.14, \quad R^2 = 0.92 \quad (4)$$

가공 너비에서 공구 자체의 직경을 빼고 반경으로 변경하면 각 조건에서의 순수 열반경 값을 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_{heat} = 0.41 * Q_{eff} + 0.1 \quad (5)$$

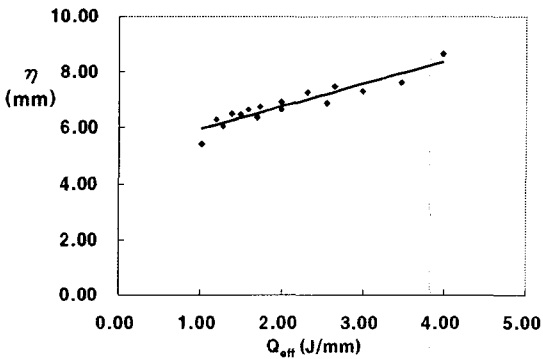


Fig. 10 Relationship between effective heat input and kerfwidth

3.3 가공 깊이와 열반경의 관계

본 연구에서 제안한 열용삭 가공은 XZ 평면에서 가공이 이루어지므로 공정 변수에 따라 X 방향과 Z 방향으로 가공 특성 분석이 이루어져야 한다. 따라서, 본 절에서는 가공 깊이에 따라 각 방향으로의 열반경을 규명하기 위한 실험을 수행한다.

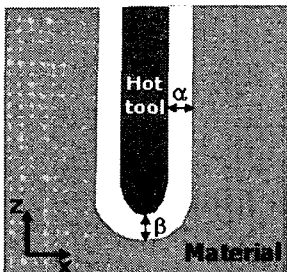


Fig. 11 Definitions of α , β

Table 3 Experimental results at various depths

Q _{eff} (J/mm)	Depth (mm)							
	2	4	6	8	10	12	14	
2.42	α	0.73	1.07	1.12	1.16	1.08	1.26	1.25
	β	1.01	1.58	1.44	1.36	1.41	1.39	1.01
1.92	α	0.79	1.30	1.33	1.32	1.62	1.50	1.32
	β	1.47	1.93	1.76	1.99	1.71	1.59	1.56
1.69	α	1.03	1.24	1.52	1.53	1.62	1.65	1.76
	β	1.68	1.51	1.77	1.87	1.69	1.8	1.5
1.57	α	1.21	1.48	1.56	1.92	2.18	1.82	2.07
	β	1.74	1.91	2.14	1.86	2.36	1.89	2.73

실험 수행 결과는 Table 3 과 같으며 Fig. 11 에서 보는 것과 같이 α 는 X 방향으로의 열반경값으로 가공 너비에서 공구 직경을 뺀 값이며 β 는 Z 방향으로의 열반경 값으로 가공 후 가공 깊이 값을 측정 후 공구의 설정 깊이 값을 뺀 값이다.

본 실험에서는 가공 깊이와 공정 변수에 따라 X 방향 열 반경과 Z 방향의 열 반경의 차이를 규명함으로써 향후 가공 경로 보정시 오프셋을 방향에 따라 적용하는 방법을 결정하기 위한 실험이다. 따라서, 가공 깊이에 따른 두 값의 차이를 알아보기 위해 식 (6)과 같이 평준화 오차(Normalized error)를 정의하였다.

$$\Omega = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n (\alpha_k - \beta_k)^2}}{n} \quad (6)$$

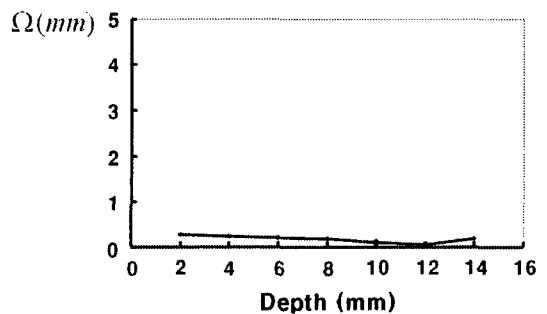


Fig. 12 Relationship between normalized error and depth

Fig. 12 에서 보는 것과 같이 각 깊이에 따라

평균화 오차값이 0.2 mm 이하임을 알 수 있으며 깊이에 따른 상관관계가 없음을 알 수 있다. 따라서, 실제 가공에서 열반경에 의한 깊이 방향과 너비 방향으로 열반경의 차이는 거의 없다고 볼 수 있으며 가공 깊이와 공정 조건에 상관없이 깊이 방향과 너비 방향의 열반경은 동일하기 때문에 열반경 형상은 불엔드밀과 같은 형상이 된다. 이는 가공 경로에서 불엔드밀 가공 경로를 적용할 수 있을 뿐만 아니라 공구의 일반성 또한 검증한다고 볼 수 있다.

4. 열용삭 가공 공정을 이용한 3 차원 형상 가공

본 장에서는 개발된 공정의 타당성을 검증하기 위하여 반구 형상과 기준 형상의 가공을 수행한다.

4.1 반구 형상 가공

φ90 mm 의 반구형상을 모델링한 후 열공구를 이용하여 용삭 가공을 수행한 후 정삭 공구를 이용하여 표면 처리를 수행하도록 한다. 용삭 가공 경로 생성시에는 앞 절의 실험에서 구한 관계식을 이용하여 공정 조건에 적합한 열반경을 계산한 후 가공 오프셋을 준다. 공정 변수 조건은 입력 전압 110 V 에 가공 속도 40 mm/s 이며 이에 따른 가공 오프셋은 6.1 mm 를 주어 공구 경로를 생성하였다. Fig. 13 은 열용삭 가공을 수행하여 반구 형상을 가공하는 과정과 결과를 나타낸다.

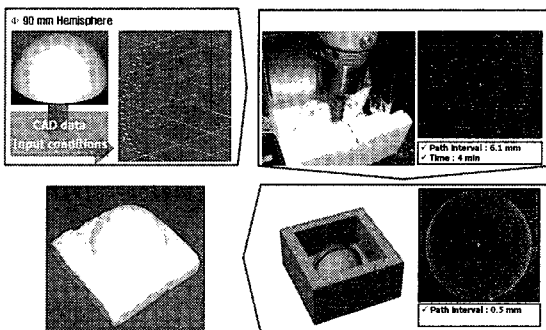


Fig. 13 Procedure for hemisphere shaping

쾌속 열용삭 공정을 이용하여 90 x 90 x 45 mm 크기의 반구 형상을 가공한 결과 가공 시간은 4 분

이 소요되어 매우 빠르게 시작품을 가공할 수 있음을 검증하였다. 또한, 열용삭 수행시 잔여재료가 거의 발생하지 않고 용융 폴리머가 공구 표면에 달라 붙어 열분해가 수행되는 것을 확인할 수 있어 실제 가공시 설계된 공구의 특징이 잘 적용됨을 알 수 있었다. 가공된 반구 형상의 직경을 측정된 결과 89.89 mm 로 제작하려는 형상 90.00 mm 와 비교할 때 오차율이 0.12 %으로 매우 정밀하게 가공이 수행되었음을 알 수 있다.

4.2 기준 형상 가공

쾌속 조형 생산 시스템에서 개발된 공정의 가공성을 테스트하기 위해 정의된 기본 형상을 가공함으로써 개발된 공정의 타당성을 검증하였다. 가공 조건은 10 mm 이하의 형상이 존재하기 때문에 5.0 mm 열공구를 사용하여 열용삭을 수행하였으며 공정 변수 조건은 열 입력량 70 V, 가공 속도 40 mm/s 이며 이에 따른 열반경 오프셋 거리는 3.3 mm 로 설정하여 공구 경로를 생성하였다. Fig. 14 는 실제 가공이 수행되는 과정과 결과를 보여주고 있다.

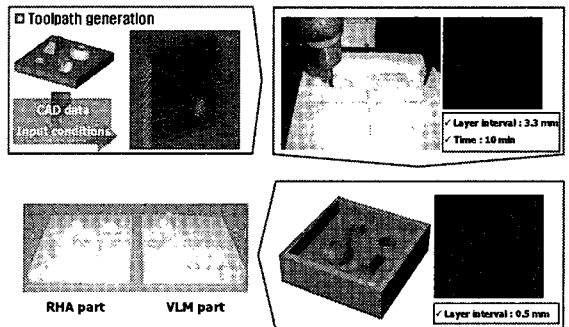


Fig. 14 Procedure for standard test part shaping

쾌속 열용삭 공정을 이용하여 160 x 160 x 38 mm 크기의 기준 형상을 가공한 결과 가공 시간은 10 분이 소요되어 포켓 형상에 대하여 빠르게 시작품을 가공할 수 있음을 검증하였다.

5. 결 론

기존의 재료를 제거하는 방식의 쾌속 조형 기술에서의 공통적으로 회전식 절삭 공구를 사용하

기 때문에 여러 가지 근본적인 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 형상의 가공 시간을 단축시키고, 가공 후 잔여 재료가 거의 발생하지 않으며 회전 날을 사용하지 않는 열 공구를 이용한 쾌속 열용삭(Rapid Heat Ablation)공정 및 장치가 개발하였다. 이를 위해 공정 개념 및 장치를 개발하였으며 공정 변수에 따른 가공 특성을 실험적으로 분석하였다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 열 공구를 이용한 쾌속 열용삭 공정을 위한 공정 설계 및 공정을 구현하기 위한 장치 개발을 수행하였다. 열용삭 공구를 구성하는 부품은 고온의 열에서 장시간 작업이 이루어져야 하므로 내열 및 단열성이 좋은 재료를 이용하여 제작하였다. 또한, 공구 이송시 장치의 모터에 신호를 주는 제어소프트웨어 및 제어 보드를 설치 장착하여 시스템 통합을 수행하였다.

둘째, 개발되는 쾌속 열용삭 공정에서 주요 공정 변수에 따른 가공 열반경의 변화를 실험적으로 고찰하였다. 주요 공정 변수로써 열 입력량과 가공 속도를 선정하였으며 공정 변수와 가공 너비의 관계를 실험적으로 도출하였다. 또한, 관계의 선형성을 이용하여 두 변수를 통합한 유효열입력량을 정의하였으며 가공 너비와의 관계를 도출하였다. 열용삭 가공이 XZ 평면에서 가공인 것을 고려하여 Z 방향으로의 깊이에 따른 열반경의 변화를 실험적으로 고찰하였으며 결과적으로 깊이 및 공정 변수에 상관없이 X 방향으로의 열반경과 Z 방향으로의 열반경이 유사함을 알 수 있었다.

셋째, 실험적으로 고찰한 가공 너비와 공정 변수와의 관계를 이용하여 3 차원 형상에 대한 가공을 수행하였다. 3 차원 형상인 반구와 기준 형상을 가공함으로써 개발된 공정의 타당성을 검증할 수 있었으며 전체 가공 시간이 10 분 이내로 단축됨으로써 기본적인 공정의 목적에 도달할 수 있었다.

향후에는 쾌속 열공구와 가공 재료에 대한 체계적인 연구가 필요할 것이라 사료된다.

참고문헌

1. Kruth, J. P., "Material increase manufacturing by rapid prototyping techniques," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 2, pp.603-614, 1991.
2. Jacobs, P. F., *Stereolithography and other RP&M Technologies*, ASME Press, 1996.
3. Nakagawa, T., "High-speed milling for die and mold making," *Proceedings of the AFDM'99*, pp. 11-18, 1999.
4. Takahashi, I., Anzai, M., Arai, M., "Application of ultra high speed milling to rapid fabrication of 3D products," *Proceedings of the Eighth International Conference on RP*, pp. 469-474, 2000.
5. Shin, B. S., Yang, D. Y., Choi, D. S., Lee, E. S., Je, T. J., Whang, K. H., "Development of rapid manufacturing process by high-speed machining with automatic fixturing," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, pp. 363-371, 2002.
6. Jung, T. S., "A study on the development of rapid prototyping system using 5 axis high speed machining," *KAIST Doctoral Thesis*, 2004.
7. Hur, J. H., Lee, K. W., Zhu, H. and Kim, J. W., "Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition," *Computer-Aided Design*, Vol. 34, No. 10, pp. 741-754, 2002.
8. Chen, Y. H. and Song, Y., "The development of layer-based machining system," *Computer-Aided Design*, Vol. 33, No. 4, pp. 331-342, 2001.
9. Kang, S. C., Hwang, Y. K., Kim, M. S., Lee, K. I. and Lee, C. W., "A Compliant Controller Dynamically Updating the Compliance Center by Contact Localization," *Robotica*, Vol 16, part 5, pp.543-550, 1998.
10. Huang, H. K., Lin, Grier C. I., "Rapid and flexible prototyping through a dual-robot workcell," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 19, pp. 263-272, 2003.
11. Ahn, D. G., Lee, S. H., Yang, D. Y., "Mechanical properties and anisotropy of expanded polystyrene foam sheet for the VLM-S rapid prototyping process," *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 21, pp. 747-749, 2002.
12. Ahn, D. G., Lee, S. H. and Yang, D. Y., "Investigation into Development of Progressive Type Variable Lamination Manufacturing(VLM-sp) Process using Expandable Polystyrene Foam and its Apparatus", *J. Eng. Manuf.*, Vol. 216, pp.1239-1252, 2002.
13. Kim, H. C., Lee, S. H., Ahn, D. G. and Yang, D. Y.,

"Development of shape refining process of VLM-ST parts using noncontacting hot tool," J. of the KSPE, Vol. 21, No. 1, pp. 149-158, 2004.

14. Lee, S. H., Kim, H. C., Song, M. S. and Yang, D. Y., "Development of surface finishing methodology for the laminated pattern removal of VLM-ST parts," J. of the KSPE, Vol. 22, No. 2, pp. 202-209, 2005.