

회전 열공구를 이용한 쾌속 열용삭 공정 개발에 관한 연구

김효찬*(한국과학기술원 기계공학과 대학원), 박석희(한국과학기술원 기계공학과 대학원),
양동열(한국과학기술원 기계공학과), 박승교(쥬메닉스)

Development of Rapid Heat Ablation process Using Rotary Hot tool

H. C. Kim(Graduate school, M.E., KAIST), S. H. Park(Graduate school, M.E., KAIST), D. Y. Yang(M.E.,
KAIST), S. K. Park(Menix Eng. Inc.)

ABSTRACT

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 due to cleaning process. This paper introduces a new rapid manufacturing process called Rapid Heat Ablation process (RHA) using the rotary hot tool to overcome limitations of traditional machining process. The rotary hot tool to satisfy requirements of RHA process is designed and produced. In order to examine relationships between kerfwidth and process parameters such as heat input, speed of tool and speed of revolution, experiments were carried out. In addition, relationship between the kerfwidth and the effective heat input was obtained. Based on the experimental results, double-curved shape was ablated to show the validity of proposed process. In the procedure, the rough cut and fine cut were performed according to the conditions of process parameters without tool change process. The practicality and effectiveness of the proposed process have been verified through ablation of three-dimensional shape.

Key Words : Rapid Manufacturing System(쾌속생산시스템), Rapid Heat Ablation Process(쾌속 열용삭 공정), Rotary Hot Tool (회전 열공구), Heat affected zone (열영향부)

1. 서론

현대 산업 사회는 급격한 산업 발전과 소비자의 다양한 기호에 따라 제품의 모델이 다양화되고 형상이 복잡해지고 있다. 또한, 국내의 시장에서 제품의 개발기간과 시작품 제작 기간의 단축이 요구되고 있으며, 이에 따른 시장 도입시기 및 제품개발의 납기 단축이 중요한 문제로 대두되었다. 따라서 제품의 다양성과 시작기간의 단축에 부응할 수 있는 시작품 제작 방법의 기속 혁신이 필요하게 되었으며 제품 설계 및 개발의 동시 공학적 추구가 필수적이다. 이러한 시장의 요구를 만족시키고, 고품질의 신제품을 빠른 시간에 개발하기 위해 쾌속 생산 시스템이 도입되었다.

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.¹ 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 3 가지 형태로 연구되었다. 첫 번째 방법으로 고속 가공 공구와 다면 가공 인덱싱 테이블을 이용하여 3 차원 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.^{2,3} 또한, Jung 등은 동시 5 축 가공 가공기를 이용하여 합성수지를 가공함으로써 빠르게 3 차원 형상을 구현할 수 있었다.⁴ 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 3 축 양면 가공 후 접합, 5 축 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.^{5,6} 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.^{7,8}

이러한 절삭을 이용한 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 주요원인이 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 최소화시키기 위해 장치의 크기와 가격이 상승하는 문제가 존재한다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 재료 가공 개념을 바꾸어하며 이러한 요구에 맞추어 열공구를 이용한 쾌속 열용삭 가공 공정(Rapid Heat Ablation process: RHA process)이 개발중에 있다. 본 공정에서는 연질 재료를 열공구를 이용하여 쾌속 가공하며 잔여 재료는 모두 열분해되어 제거되기 때문에 잔여 재료는 거의 발생하지 않는다. 그러나 기존의 열용삭 공정에서는 단속 형상을 가진 열공

구를 이용하여 가공을 수행하기 때문에 용융 폴리머의 제거가 용이하지 않으며 열공구 표면의 열분포의 불균일성에 의해 가공 표면 조도에 좋지 않은 영향을 미친다.⁹

따라서, 본 연구에서는 기존의 단속 형상의 열용삭 공구의 단점을 보완하기 위해 저속 회전 열공구의 개념을 새롭게 제안하며 설계 및 제작을 수행한다. 또한, 제작된 회전 열공구를 이용하여 공정 변수에 대한 가공 특성을 분석함으로써 공정 변수와 가공 너비와의 실험식을 도출하고 유효 열입력량과 가공 너비의 관계를 분석한다. 또한, 가공 과정에서 공정 변수에 따라 하나의 회전 열공구로 황삭과 정삭을 동시에 수행할 수 있는 방법을 제안한다. 이러한 실험의 결론을 바탕으로 이중 곡률을 가진 형상을 가공함으로써 개발된 공정과 실험결과의 타당성을 입증하도록 한다.

2. 회전 열공구를 이용한 쾌속 열용삭 공정 개념 및 장치 개발

2.1 회전 열공구에 의한 열용삭 가공의 개념

회전 열공구에 의한 열용삭 가공 원리는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 가공재료의 열 분해 이상의 온도를 가진 열 공구가 주어진 경로를 따라 움직이면서 가공재를 열에 의해 용융시키고 용융된 재료는 회전에 의해 용융 폴리머가 가공 표면에서 이송되고 이송 재료는 열분해에 의해 제거된다. 이러한 가공 방법을 본 연구에서는 열용삭(Heat ablation)이라 명명한다.

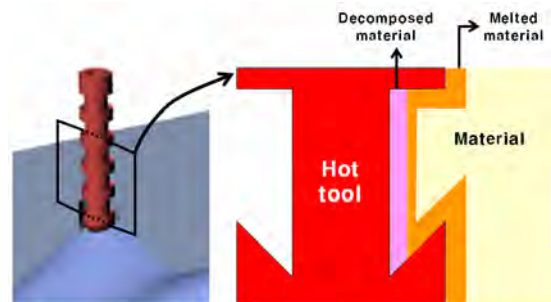


Fig. 1 Concept of heat ablation

이러한 가공 원리를 이용하여 개발중인 쾌속 열용삭 가공 공정의 개념도 Fig. 2 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 빠르게 황삭을 수행하며 표면 처리 가공은 정삭 조건에 의해 최종 가공을 수행한다. 이 때 발생하는 잔여

재료는 대부분 열분해(Decomposition)에 의해 기화되거나 용융되어 외부 형상에 달라붙게 된다.

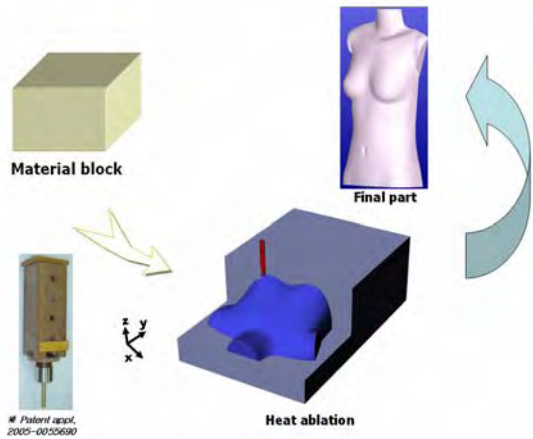


Fig. 2 Procedure of rapid heat ablation using rotary hot tool

2.2 쾌속 열용삭 가공의 공정 및 장치개발

쾌속 열용삭 공정의 구현을 위해 제작한 장치는 Fig. 3 와 같으며 장치의 규격은 Table 1 과 같다.



Fig. 3 Apparatus of rapid heat ablation

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	7 mm
	Tool speed	10 – 50 mm/s
	Input value	0 – 220V

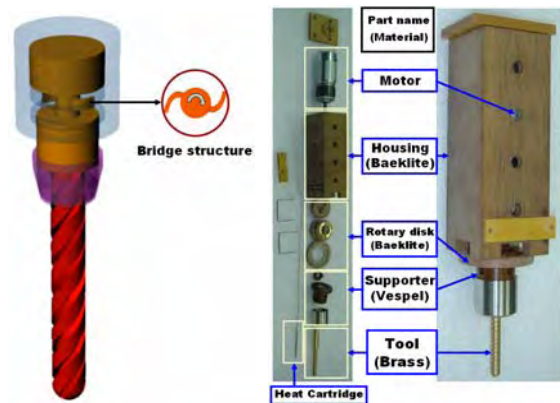
개발된 장치의 구성은 공구 경로 생성 소프트

웨어, 5 축 제어 보드, 5 면 가공 인덱싱 테이블, 열공구 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.

3. 쾌속 열용삭을 위한 회전 열공구 개발

3.1 회전 열공구 개념 설계 및 제작

본 절에서는 회전 열용삭 공구를 제작하기 위해 개념설계를 수행하였다. 제작되는 회전 열공구에서는 다음과 같은 요구 조건을 만족해야 한다.



(a) Schematic diagram (b) Assembled part

Fig. 4 Design and manufacture of rotary hot tool

첫째, 열공구가 회전하면서 외부에서 내부에 열 에너지를 계속적으로 공급할 수 있는 구조를 가지고 있어야 한다. 이러한 기능을 구현하기 위해서 본 연구에서는 Fig. 4 (a) 에서 보는 것과 같은 브릿지 구조를 설계 및 제작하였다. 이러한 구조는 하나의 고정된 전도체와 다른 고정 전도체 사이에 움직이면서도 접촉을 유지할 수 있는 유연한 구조를 가진 전도체 구조가 연결되어 있어 움직이는 동안에도 연속적으로 내부 전도체에 전기에너지를 전달할 수 있게 한다.

둘째, 열공구를 구성하는 재료는 내열 및 단열 성질이 뛰어나야 한다. 특히, 열공구를 고정해주는 지그의 재료는 절연체로써 내열성질이 뛰어나야 하기 때문에 내열성 폴리머인 베스펠 (Vespel)을 활용하여 제작하였다. 그외에도 무게가 가볍고 강성이 좋은 베크라이트를 이용하여 회전 열공구의 회전판과 하우징을 제작하였다.

셋째, 열공구 내부에는 작은 크기를 가지면서도 높은 열용량을 발산할 수 있는 열유닛이 필요하다. 이러한 기능을 수행하기 위해 일반적으로 정밀 급형의 열간단조를 위해 사용되는 히트카트리지를 활용하였다. 제작된 열공구에 사용된 히트카트리는 직경 3 mm, 길이 50 mm 이며 최대 열유속은 59.02 J/s 이다.

이러한 요구조건에 맞추어 Fig. 4 (b) 는 제작된 열공구의 분해도와 조립형상을 보여주고 있다.

3.2 회전 열공구의 입력 전압과 표면 온도의 관계

제작된 열공구에서 입력 전압에 따른 표면 온도를 측정하여 열용삭이 가능한 입력 전압 영역을 도출하도록 한다. 본 공정에서 가공을 수행하는 EPS foam 재료는 용융 온도가 240 °C이며 열 분해가 온도가 470 °C이기 때문에 열용삭이 가능한 입력 전압 영역은 적어도 용융 온도 이상의 범위에서 가공을 수행해야 한다. 제작된 열용삭 공구에서 입력전압과 표면 온도와의 관계를 규명하기 위해 K-Type 열전대를 이용하여 각 입력 전압에 따른 표면 온도를 측정된 결과 Fig. 5 와 같은 관계를 도출할 수 있었다.

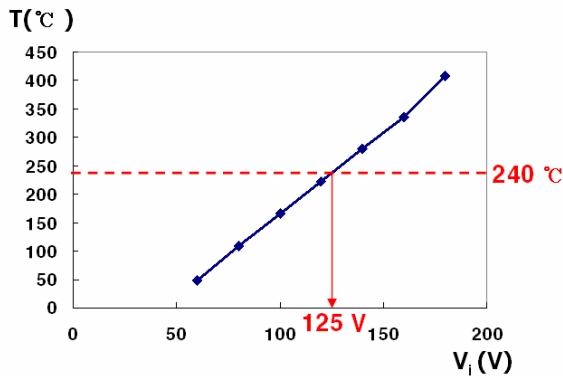


Fig. 5 Relationship between temperature and input voltage

$$T = 0.18 * V_i + 5.52, R^2 = 0.99 \quad (1)$$

공구의 표면 온도 (T), 입력 전압(V_i)인 식 (1)로부터 재료의 열용삭이 가능한 240 °C 이상의 온도를 유지할 수 있는 열공구의 입력전압은 125 V 이상에서 열용삭이 가능함을 실험적으로 도출할 수 있었다. 또한, 이러한 실험 결과를 이용하여 열용삭이 가능한 입력전압 영역을 도출하였을 뿐만 아니라 입력전압에 따라 표면 온도를 계산할 수 있어 향후 입력전압에 따른 가공 특성을 분석하는데 적용할 수 있다.

4. 회전 열공구를 이용한 쾌속 열용삭 공정 변수에 따른 가공 특성 분석

쾌속 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. 회전 열공구에서 가공 특성에 영향을 주는 주요 공정 변수로는 열입력량, 가공속도, 공구 회전 속도 및 가공 재료 밀도 등이 영향을 미친다. 이러한 공정 변수에 의해 나타나는 가공 특성은 가공 너비 및 가공재 표면조도 이다.

따라서, 본 절에서는 열입력량, 가공속도 및 회전속도를 변화시켜가며 가공 너비 및 가공재 표면상태의 변화 특성을 분석하여 이들의 상관관계를 실험적으로 규명한다. 또한, 가공 속도와 열입력량을 통합한 유효 열입력량을 정의하여 가공 너비와의 관계를 규명한다.

4.1 공정 변수와 가공 너비와의 관계

열입력량과 가공 속도를 변화시켜가며 가공 너비의 변화를 관찰함으로써 가공너비와 두 공정변수와의 관계를 규명하도록 한다.

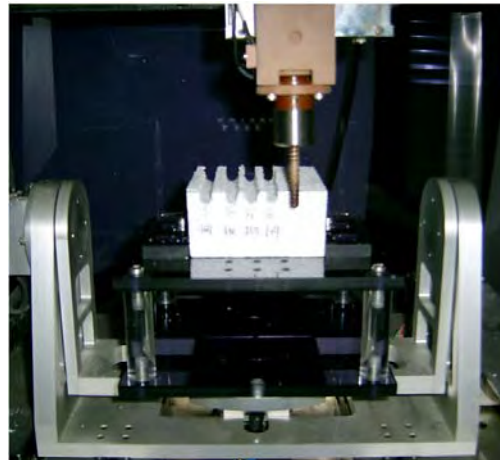


Fig. 6 Experimental setup for parameter study

실험 과정은 Fig. 6 과 같이 각 시편의 가공 조건에 맞는 열입력량, 가공속도 및 회전속도를 설정한 후 충분한 시간을 두어 열공구의 표면온도가 더 이상 올라가지 않는 정상상태에 도달할 때까지 충분히 기다린 후 동일 조건으로 직선 가공을 수행하며 가공 위치와 조건을 변경한 후 앞의 과정을 반복한다. 실험 조건으로 열공구의 직경은 7 mm 이며 가공 재료의 밀도는 15 Kg/m³ 이며 모든 시편의 가공 깊이는 10 mm 로 동일하다. 각 공정 변수의 가공 조건으로 입력 전압은 120, 140, 160, 180 V 이고

가공 속도는 20, 30, 40, 50 mm/s 이며 회전 속도는 0, 30, 60, 90, 120 RPM 으로 80 개의 조건이 다른 시편을 가공하여 특성을 분석하였다.

공정 변수 실험을 통해 얻어진 열입력량과 가공 너비와의 관계는 Fig. 7 과 같다. 열입력량이 증가할수록 재료의 단위 부피당 열유입량이 증가하여 가공 영역이 증가함을 알 수 있다. 식 (2)는 가공 너비와 열입력량의 관계를 선형 근사한 결과를 보여주고 있다.

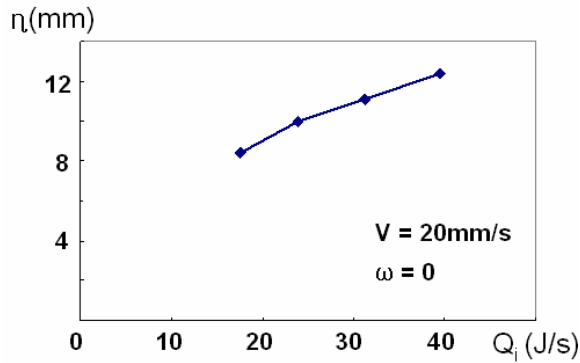


Fig. 7 Relationship between kerfwidth and heat input

$$\eta = 0.18 * Q_i + 5.52, R^2 = 0.99 \quad (2)$$

여기서 η 은 가공너비(kerfwidth)를 나타내며 Q_i 는 열입력량을 나타낸다.

가공 속도와 가공 너비와의 관계는 Fig. 8 과 같으며 가공 속도가 증가할수록 재료의 단위 부피당 열입력량이 줄어들게 되어 가공너비가 감소되며 실험식은 식 (3)과 같다.

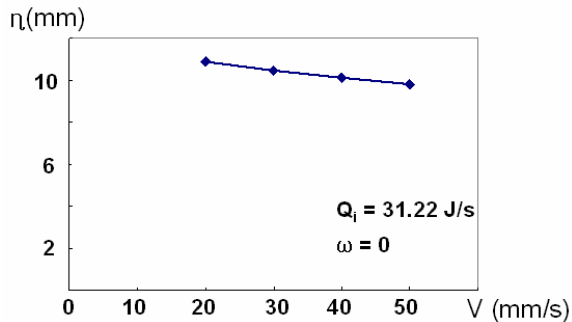


Fig. 8 Relationship between kerfwidth and tool speed

$$\eta = -0.04 * Q_i + 11.57, R^2 = 0.99 \quad (3)$$

Fig. 9 에서 보는 것과 같이 공구 회전속도 변화에도 가공 너비가 영향을 받지 않는 것으로 나타난다. 이러한 결과는 가공 너비에 직접적으로 영향을

주는 재료에 유입되는 단위 부피당 열입력량이 공구 회전속도에는 영향을 받지 않는 것으로 분석할 수 있다. 그러나 공구의 회전에 의해 공구의 진행 방향으로 분포되는 열에너지가 균일한 상태로 가공이 수행되어 가공 저항이 줄게 되고 최소한의 열반경에서도 가공이 가능하게 된다. 또한, 회전에 의해 발생하는 용융 폴리머의 유동을 제어할 수 있어 가공재 표면의 결함을 최소화할 수 있다.

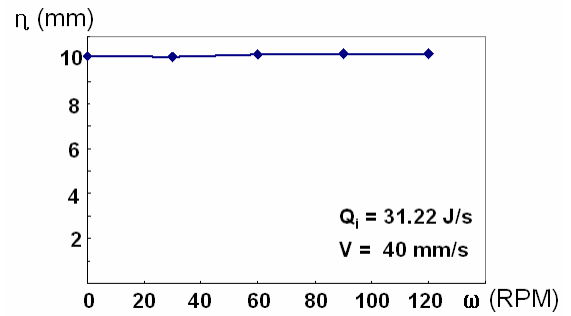


Fig. 9 Relationship between kerfwidth and speed of revolution

4.2 유효 열입력량과 가공 너비와의 관계

앞 절에서 실험을 통해 가공 너비에 영향을 미치는 열입력량 및 가공 속도와 가공 너비의 관계를 실험적으로 규명하였다. 두 공정 변수는 모두 선형적인 관계를 유지함으로 식 (4)와 같이 하나의 변수로 표현할 수 있으며 이를 유효 열입력량 (Effective heat input)이라 정의한다.

$$Q_{eff} (J/mm) = \frac{Q_i (J/s)}{V (mm/s)} \quad (4)$$

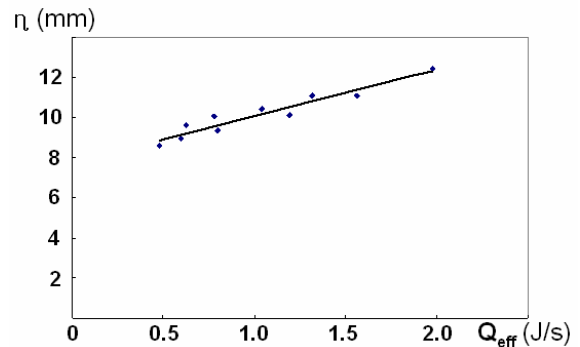


Fig. 10 Relationship between kerfwidth and effective heat input

$$\eta = 2.3 * Q_{eff} + 7.77, R^2 = 0.92 \quad (5)$$

열입력량을 가공 속도로 나눈 값이며 단위 환

산을 통해 유효 열입력량은 가공 방향으로 단위 면적당 입력되는 열에너지임을 알 수 있다. 유효 열입력량값과 가공너비와의 관계를 나타내면 Fig. 10과 같으며 선형 관계식은 식 (5)와 같다.

식 (5)을 이용하여 원하는 가공 너비를 가공하고자 할 때의 조건을 구할 수 있을 뿐만 아니라 공정 변수에 따른 열반경을 구할 수 있어 향후 수치 해석을 통한 결과값과 비교 가능하다. 또한, 실험 과정에서 열용삭 가공에서 유효 열입력량이 0.5 J/mm 이하에서는 부분적인 기계절삭이 발생하여 열용삭이 불가능한 영역임을 실험적으로 검증할 수 있었다.

5. 회전 열공구를 이용한 3차원 곡면 형상 가공

본 장에서는 개발된 공정의 타당성을 검증하기 위하여 이중 곡률 형상에 대한 가공을 수행한다. 이중곡률 형상을 모델링한 후 공정 변수를 설정한 다음 공정 변수에 맞는 가공 너비 데이터를 계산 후 가공 너비만큼 오프셋된 가공 경로를 생성한다.

앞절의 공정 변수 실험에서 알 수 있듯이 높은 유효 열입력량 조건에서는 단위 시간당 가공량이 많고 가공 열반경이 크기 때문에 황삭 가공에 유리하며 낮은 유효 열입력량 조건에서는 단위 시간당 가공량이 적고 가공 열반경이 최소화 되기 때문에 정밀하게 가공을 수행할 수 있어 정삭 가공에 유리하다. 이러한 특징을 이용하여 이중 곡률 형상 가공을 위한 황삭과 정삭 가공 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Conditions of heat ablation

Part size	Parameters	Conditions of rough cut	Conditions of fine cut
90 *	Q_i (J/s)	35.24	17.56
45 *	V (mm/s)	30	20
15 mm	ω (rpm)	60	120
	r_n (mm)	10.51	9.79

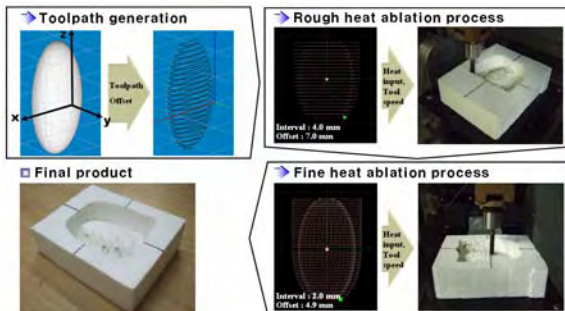


Fig. 11 Procedure of heat ablation of double-curved shape

Fig. 11에서 보는 것과 같이 황삭 과정에서는 가공 재료 블록에서 가공하고자 하는 대략의 형상을 빠르게 얻을 수 있었으며 정삭 과정에서는 황삭에서 얻어진 대략의 형상의 표면을 다시 가공하여 좋은 표면 정밀도를 가진 최종 제품을 얻을 수 있었다. 이러한 동일한 공구에서 황삭과 정삭을 동시에 수행함에 따라 기존의 기계 절삭에서 공구의 교체에 따른 셋업 비용 및 시간을 감소할 수 있을 뿐만 아니라 자동 공구 교체기등의 설치로 인한 부대 비용을 감소할 수 있다.

제작된 회전 열공구로 공정 변수 연구를 통해 얻은 데이터를 이용하여 3차원 형상을 가공함으로써 개발된 공정의 타당성을 입증할 수 있었다. 또한, 기존의 단속적 열공구를 이용하여 형상을 가공할 때와 비교하여 낮은 열입력량에서도 가공이 가능하여 열공구로 정삭 가공이 가능하게 되었다.

5. 결론

본 논문에서는 형상의 가공 시간을 단축시키고, 가공 후 잔여 재료가 거의 발생하지 않는 쾌속 열용삭 공정에서 회전 열공구를 이용하는 공정을 구현하였다. 가공 저항이 적고 정삭 가공이 가능한 회전 열공구를 제작하기 위해 개념 설계 및 요구조건을 도출하였다. 요구조건을 만족하는 회전 공구를 이용하여 열용삭 공정 변수에 따른 가공 특성을 분석하였으며 공정 변수와 가공 너비와의 관계식을 실험적으로 도출하였다. 이러한 관계를 이용하여 쾌속 열용삭 공정으로 3차원 형상을 가공하였다. 회전 열공구는 높은 유효 열입력량에서는 황삭 가공을 수행하고 낮은 유효 열입력량에서는 정삭 가공을 수행함으로써 하나의 공구로 황삭과 정삭 가공을 수행하였다. 3차원 형상 가공 결과 개발된 회전 열공구를 이용한 쾌속 열용삭 공정의 타당성을 검증할 수 있었다. 향후에는 공정 변수에 따른 용융 폴리머의 거동을 분석하여 용융 폴리머를 효과적으로 제거할 수 있는 방법을 실험적으로 입증하는 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

1. Jacobs, P. F., Stereolithography and other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling, ASME Press, 1996.
2. Nakagawa, T., "High-speed milling for die and mold making," Proceedings of the AFDM'99, pp. 11-18, 1999.
3. 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.

4. Jung, T. S., “A study on the development of rapid prototyping system using 5 axis high speed machining,” KAIST Doctoral Thesis, 2004.
5. Hur, J. H., Lee, K. W., Zhu-hu and Kim, J. W., “Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition,” *Computer-Aided Design*, Vol. 34, No. 10, pp. 741-754, 2002.
6. Chen, Y. H., and Song, Y., “The development of layer-based machining system,” *Computer-Aided Design*, Vol. 33, No. 4, pp. 331-342, 2001.
7. 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.
8. Huang, H. K., Lin, C. I., “Rapid and flexible prototyping through a dual-robot workcell,” *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 19, pp. 263-272, 2003.
9. Kim, H. C., Lee, S. H., Yang, D. Y., Park, S. K., “Investigation into Development of Rapid Heat Ablation process Using hot tool,” *J. of KSPE*, Vol. 22, No. 6, pp. 222-231, 2005.
10. Kim, H. C., Lee, S. H., Ahn, D. G., Yang, D. Y., “Development of shape refining process of VLM-ST parts using noncontacting hot tool,” *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 1, pp. 149-158, 2004.
11. Lee, S. H., Kim, H. C., Song, M. S., Yang, D. Y. and Park, S. K., “Rapid fabrication of large-sized solid shape using 3D scanner and variable lamination manufacturing : Case study of mount rushmore memorial,” *Transactions of the KSME, A*, Vol. 28, No. 12, pp. 1958-1967, 2004.