

쾌속 열용삭 공정에서 열반경 최소화를 위한 열 공구 설계에 관한 연구

김효찬*(한국과학기술원 기계공학과), 이상호(LG 전자 생산 기술원), 송민섭(㈜한국전력기술), 양
동열(한국과학기술원 기계공학과), 박승교(㈜메닉스)

A Study of Design for Hot Tool to Minimize Radius of Heat Affected Zone in Rapid Heat Ablation process

H. C. Kim(Mecha. Eng. Dept. KAIST), S. H. Lee(Design Eng. Gr., LG Elec. Inc.), M. S. Song(RCS Mecha. Eng
Gr., KOPEC), D. Y. Yang(Mecha. Eng. Dept. 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 for clarity. Therefore, a new rapid manufacturing process using the hot tool, Rapid Heat Ablation process (RHA), has been developed. In this paper, the hot tool for RHA process is devised to minimize radius of heat affected zone and also investigated for verification. TRIZ well-known as creative problem solving method is applied to overcome the contradictive requirements of the hot tool. For the detailed design of the hot tool, numerical model is established with several assumptions. Based on the numerical results, surface temperature is measured with K-type thermocouple at the predetermined location. Numerical and experimental results show that the devised hot tool fulfils its requirements. It verifies the practicality of hot tool that the hemisphere shape is ablated using the hot tool with stair structure.

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

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 요구를 만족시키고 기존 제품 개발에서 나타나는 장시간의 개발 기간을 단축할 수 있는 방법으로 동시공학적 개념의 3차원 형상 구현의 방법으로 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 3가지 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 집합, 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 횡삭과 정삭을 수행하여 자유 면 가공을 수행하였다.^{7,8}

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 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 문제점은 회전하는 날에 의해 일정양의 재료를 제거하는 절삭 가공의 기본 개념에 의해 발생하는 문제로서 이러한 문제를 극복하기 위해서는 재료 가공 개념을 바꾸어야 한다. 이러한 요구에 맞추어 열공구를 이용한 쾌속 열용삭 가공 공정(Rapid Heat Ablation process: RHA process)이 개발중에 있다.

쾌속 열용삭 가공 공정에서는 연질 재료를 열공구를 이용하여 빠르게 가공을 수행할 수 있으며 가공된 잔여 재료는 모두 용융되어 제거되거나 열분

해되어 제거되기 때문에 잔여 재료는 거의 발생하지 않는다. 이러한 열용삭 가공 특성을 구현하기 위해서는 설계 요구 조건에 적합한 열공구를 설계 및 제작해야 한다. 특히, 열공구에서는 연질재료의 열분해를 수행하기 위한 높은 온도가 필요한 반면 열반경을 최소화하여 파용삭을 막기 위해 최대한 낮은 온도가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 모순된 설계 요구 조건을 가진 열공구를 설계하기 위해 TRIZ의 발명원리를 활용하여 이를 해결하고 개념설계를 수행한 후 상세 설계를 위해 수치 해석을 수행한다. 해석 결과를 바탕으로 내열재료를 이용하여 열공구를 제작하고 실험을 통해 입력전압과 표면온도의 관계 및 표면 온도 분포를 구한다. 최종적으로 제작된 열공구를 이용하여 열용삭을 수행함으로써 제작된 공구가 설계조건 만족 여부를 검증하고자 한다.

2. 쾌속 열용삭 공정 개념 및 장치 개발

2.1 쾌속 열용삭 가공의 개념

열용삭 가공 원리는 Fig. 1 에서 보는 것과 같이 가공재료의 열 분해 이상의 온도를 가진 열 공구가 주어진 경로를 따라 움직이면서 가공재료를 열에 의해 용융시키고 용융된 재료는 기계적 또는 화학적으로 제거되는 원리로서 이러한 제거 방식을 본 연구에서는 열용삭(Heat ablation)이라 명명한다.

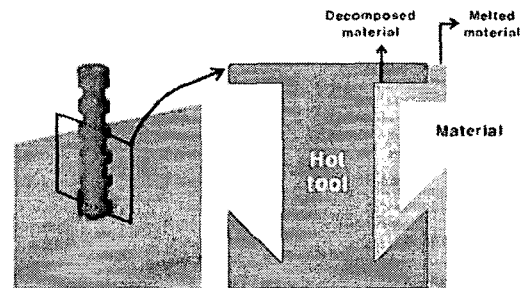


Fig. 1 Concept of heat ablation using a hot tool

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 공구를 이용하여 최종 가공을 수행한다. 이 때 발생하는 잔여 재료는 대부분 열분해(Decomposition)에 의해 기화되거나 용융되어 외부 형상에 달라붙게 된다.

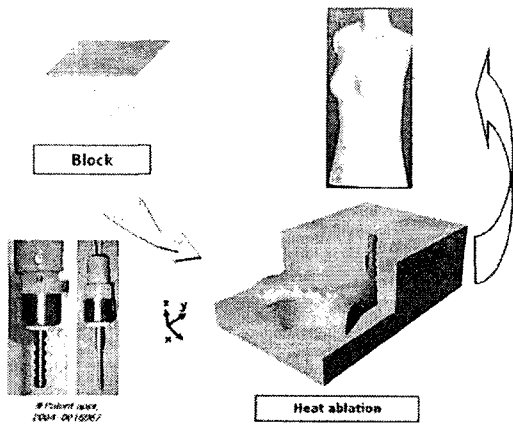


Fig. 2 Procedure of rapid heat ablation

2.2 쾌속 열용삭 가공의 공정 및 장치개발

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

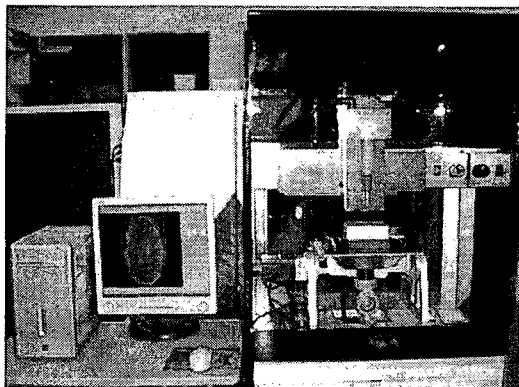


Fig. 3 Apparatus of rapid heat ablation

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	5, 11 (Rough) 1, 0.5 (Fine)
	Tool speed	10 ? 50 mm/s
	Input value	10 ? 100V

개발된 장치의 구성은 공구 경로 생성 소프트웨어, 5축 제어 보드, 5면 가공 인덱싱 테이블, 열공구 등으로 구성된다. 제어 소프트웨어는 CAD/CAM 소프트웨어를 이용하여 생성된 공구 경

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

3. 쾌속 열용삭을 위한 열공구 개발

3.1 TRIZ을 이용한 열공구 개념 형상 설계

쾌속 열용삭 가공 공정에서는 열공구를 이용해서 연질 재료를 매우 빠르고 잔여재료 없이 가공해야 한다. 이러한 특징을 나타내기 위해서는 열공구에 충분한 열에너지를 공급하여 고온을 유지하여 제거되는 많은 양의 재료를 열분해시켜야 하는 반면 정밀한 열용삭 가공을 위해 최소한의 열반경 유지를 위해 공급 열에너지를 최소화 해야 한다. 이러한 동일한 부품에서 두가지 모순(Contradiction)되는 기능을 모두 만족해야 하는 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 TRIZ 문제 해결 방법을 활용하였다.

TRIZ는 러시아 말로 “창의적 문제해결 이론”의 약자로 헨리 알트슐러(Genrich Altshuller) 박사가 수백만건의 발명특허들을 분석한 결과를 기반으로 고안한 체계적인 문제 해결 방법이며 그 방법들은 이상적 최종 결과(IFR) 정의, 40 가지 발명원리, 기술적 물리적 모순의 정의, 자원과 효과의 사용, 기술진화의 유형, ARIZ 등이 있다.

특히, TRIZ에서의 모순은 주어진 문제를 해결하기 위하여 하나의 공학적 특성을 개선할 경우, 그 시스템의 다른 공학적 특성이 악화되는 관계를 뜻한다. 일반적으로 공학적으로는 이러한 모순들을 해결하기 위해 타협과 최적화하는 방법을 쓰지만 이는 근본적인 해결책이 되지 못한다. 따라서, TRIZ에서는 모순에 대한 근본적인 해결 방법을 제시해주며 이러한 모순은 크게 기술적 모순(Technical Contradiction)과 물리적 모순(Physical Contradiction)으로 분류할 수 있다.⁹

본 연구에서 하나의 시스템 내에서 어떠한 상황에서는 특성이 향상되어야 하고, 다른 상황에서는 그 특성이 악화되어야 하는 물리적 모순의 해결 방법을 적용하도록 한다.

이와 같은 물리적인 모순을 해결하기 위해서는 분리의 원리를 사용한다.

- (1) 시간의 분리 (Separation of time)
- (2) 공간의 분리 (Separation of space)
- (3) 크기의 분리 (Separation of scale)
- (4) 조건의 분리 (Separation upon condition)

열공구의 설계에서 발생하는 물리적 모순의 문제를 해결하기 위해서 (2) 공간의 분리 방법을 적용하였다. Fig. 4 와 같이 열공구의 표면에 계단 형상 (Stair structure)을 주어 모순되는 두가지 기능이 동시에 다른 장소에서 이루어지도록 한다. 또한, 이러한 기능이 작용하는 계단 형상을 반복적으로 적용함으로써 균일하게 기능이 수행될 수 있도록 하였다.

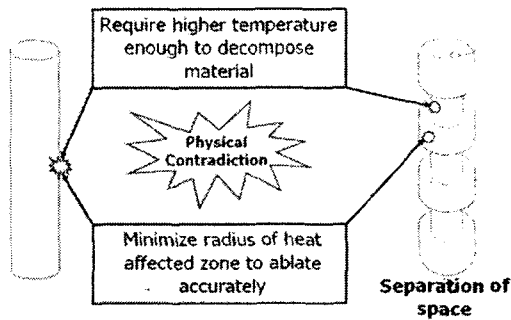


Fig. 4 Tool shape design using TRIZ

3.2 수치 해석 모델을 이용한 설계 검증

앞 절에서 열공구에 요구되는 두가지 모순 조건을 만족하기 위해 TRIZ 의 문제 해결 방법을 이용하여 계단형 공구를 설계하였으며 본 절에서는 설계된 열공구에서 요구조건을 만족하는지 검증하고 상세설계를 위해 수치 해석을 수행하였다.

제작된 열공구는 계단 구조를 가진 복잡한 축대칭 형상을 가지고 있기 때문에 유한 요소 법(Finite element method)을 이용하여 수치적인 방법으로 설계된 열공구에서 온도 분포를 예측하였다.

유한 해석을 하기 위한 고정 좌표계에서 비정상 열전달 지배 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\vec{\nabla} \cdot (\mathbf{k} \vec{\nabla} T) + \dot{q} = \rho c \dot{T} \quad (1)$$

단, k 는 열전도 계수 (Thermal conductivity), \dot{q} 는 단위 체적당 열 생성율 (Heat generation rate per unit volume), ρ 는 밀도이며 C_p 는 비열(Specific Heat) 이다.

식 (1)의 해는 식 (2)의 초기조건(Initial condition), 식 (3) 및 식(4)의 경계조건(Boundary condition)을 만족해야 한다.

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad \text{for } (x,y,z) \in D \quad (2)$$

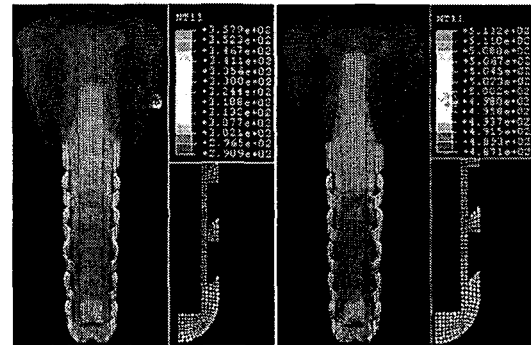
$$T(x, y, z) = T_0 \quad \text{for } (x,y,z) \in S1 \text{ and } t > 0 \quad (3)$$

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} - q - \sigma(T^4 - T_0^4) = 0 \quad \text{for } (x,y,z) \in S2 \quad (4)$$

여기서, T_0 는 전체 영역의 초기 온도, $S1$ 은 온도 경계 조건 적용면, h 는 대류계수(Convection coefficient), σ 는 복사계수(Radiation coefficient) 및 $S2$ 는 전도와 대류를 만족하는 경계면 영역이다.

3 차원 열 영향 분포 및 온도 분포를 얻기 위해서는 유한요소해석을 적용하였다. 사용된 상용 코드는 전도 열 유한 요소 해석에서 널리 사용되고 있는 ABAQUS 6.4 를 사용하였으며 해석 모드는 열이 전달될 때 응력과 변형율이 변하지 않는 Uncoupled Heat Transfer Analysis 이다.^{10,11}

공구의 온도분포를 해석한 결과는 Fig. 5 과 같다.



(a) $Q_i = 27.48 \text{ mW/mm}^2$ (b) $Q_i = 53.60 \text{ mW/mm}^2$

Fig. 5 Temperature distribution of the designed tool

수치 해석 조건은 내부 히트 카트리지 열유속 계산을 통해 100 V 입력 전압 일 때 27.48 mW/mm^2 이며 140 V 일 때는 53.60 mW/mm^2 이며 외기 온도 (Ambient temperature)는 18°C 로 하였다.

해석 결과로부터 설계된 열공구가 설계 요구 조건을 만족함을 알 수 있었다. 가공재료 열분해가 발생하는 영역인 열공구의 내부는 고온을 유지하고 가공 형상과 가까운 열공구의 외부는 재료를 용융시키는데 필요한 온도를 유지하여 가공 열반경이 최소화 되도록 하였다. 이러한 원리는 물리적으로 열원과 가까운 내부는 열전도 구간이 짧아 열유속이 크게 되어 단위 시간당 전달되는 열에너지가 높은 반면 외부는 열전도 구간이 길어 열유속이 작다. 또한, 열공구의 구조에서 내부의 구조적으로 안쪽으로 파여 손실되는 복사열이 간히게 되는 효과가 있어 높은 온도를 유지하는데 유리한데 비해 외부는 방해없이 복사열 손실이 발생하여 열반경을 최소화 시킨다.

3.2 실험을 통한 설계 검증

실제 제작된 열공구가 수치해석에서 예측한 것

과 같이 온도분포가 발생하여 설계요구조건을 만족하는지 검증하기 위해 용삭 가능 전압 영역에서 표면온도를 측정하였다.

실험 과정은 가공 가능한 입력 전압 100 V 이상의 일정 전기에너지를 유입 후 공구 표면의 10 곳에서 열전대를 이용하여 표면 온도를 측정하도록 한다. Fig. 6은 표면 온도를 측정하는 지정 위치 10 곳을 나타낸 그림이며 측정 결과는 Fig. 7과 같다.

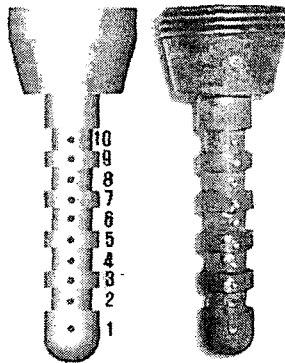


Fig. 6 Location of measurement on the tool

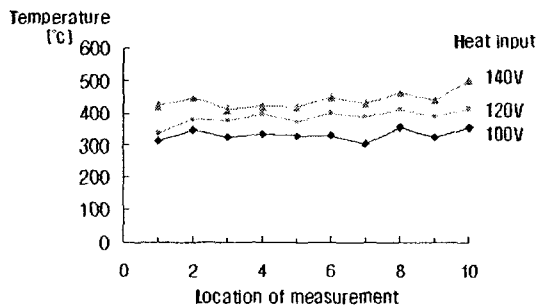


Fig. 7 Temperature at each point

계단 형상에서 내부와 외부의 온도차이가 입력 전압이 높아질수록 커짐을 알 수 있으며 입력 전압이 변하여도 공구 표면온도의 분포 경향은 유사함을 알 수 있다. 열공구의 열원에 가까운 내부 부분의 표면 온도는 외부의 표면온도에 비해 항상 높음을 알 수 있다. 이러한 현상은 설계과정에서 수치해석결과로 예측하였듯이 열원에서의 전도 거리에 의해 발생하고 내부의 형상에서 복사열에 의한 열손실양보다 외부의 형상에서의 복사열 손실양이 큰 이유에 의해서도 발생한다.

4. 쾌속 열용삭을 위한 열공구 개발

가공을 수행함으로써 제작된 열공구가 설계조건을 만족하는지를 확인한다. $\phi 90$ mm의 반구형상을

을 모델링한 후 열공구를 이용하여 용삭 가공을 수행한 후 정삭 공구를 이용하여 표면 처리를 수행하도록 한다. 용삭 가공 경로 생성시에는 실험에서 구한 관계식을 이용하여 공정 조건에 적합한 열반경을 계산한 후 가공 오프셋을 준다. 공정 변수 조건은 입력 전압 110V에 가공 속도 40 mm/s이다.

가공 결과 90 x 90 x 45 mm 크기의 반구 형상을 가공하는데 4분을 소요되어 쾌속 가공이 가능하였으며 가공시 잔여재료가 거의 발생하지 않아 공정의 특징이 잘 나타남을 검증할 수 있었다.



Fig. 8 Melted polymer on stair structure during processing

또한, Fig. 8에서 관찰하는 바와 같이 가공 도중 발생하는 용융 폴리머는 공구의 계단구조에 의해 측면에 수집이 되며 모인 용융 폴리머는 내부의 열에 의해 열분해가 발생함을 관측할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 형상의 가공 시간을 단축시키고, 가공 후 잔여 재료가 거의 발생하지 않는 쾌속 열용삭(Rapid Heat Ablation)공정을 구현하기 위한 계단형상을 가진 열공구를 개발하였다. 열공구 설계에서 모순되는 설계조건을 해결하기 위해 TRIZ의 발명 원리를 활용하여 개념설계를 하였으며 상세설계를 위해 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 바탕으로 계단 형상을 가진 열공구를 제작하였으며 실험을 통해 입력전압과 공구표면온도의 관계를 규명하여 가공적질 입력전압 영역을 찾았으며 각 부분에서 표면온도를 측정해서 실제 제작된 열공구에서 설계요구조건 만족 여부를 검증하였다. 또한, 제작된 열공구를 이용하여 실제 열용삭 가공을 수행함으로써 제작된 열공구가 설계조건에 적합하게 용융 폴리머가 제거됨을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Jacobs, P. F., Stereolithography and other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling, ASME Press, 1996.
2. Nakagawa, T., 고속 milling for die and mold making, Proceedings of the AFDM 9, pp. 11-18, 1999.
3. Shin, B. S., Yang, D. Y., Choi, D. S., Lee, E. S., Je. T. J., Whang, K. H., 개발 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., 연구 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., 하이브리드 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., 개발 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., 개발 rapid and flexible prototyping through a dual-robot workcell, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 19, pp. 263-272, 2003.
9. Suh, S. W., Park, K., Kim, B. J., 개발 older design for the bottle etching machine using TRIZ tools, Proceeding of society of CAD/CAM engineers, pp. 1086-1091, 2005.
10. Incropera, F. P., Dewitt, D. P., "Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons, 4th Edition, 1996.
11. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 개발 BAQUS/Explicit User Manual, Pawtucket, 2001.
12. 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.
13. Lee, S. H., Kim, H. C., Song, M. S., Yang, D. Y. and Park, S. K., 개발 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.