

열 공구를 이용한 폼 가공 공정 개발에 관한 연구

김효찬*, 이상호, 송민섭, 양동열(한국과학기술원 기계공학과), 박승교(메닉스)

A study of development of Rapid Foam Shaping process using hot tool

H. C. Kim, S. H. Lee, M. S. Song (Mechanical Eng. Dept., KAIST), S. K. Park (Menix Engineering Ltd.)

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 step of manufacturing trial molds. In order to realize three dimensional shape on CAD, the machining process has been widely used because it offers practical advantages such as precision and versatility. However, traditional machining process spends a lot of time in cutting product and the remained material causes trouble such as inconvenience for clean. In this work, a new machining process using the hot tool has been proposed to overcome those limitations. In the process, the hot tool moves the predetermined path and the heat of the tool decomposes the remained material. In order to set up the process, the hot tool to satisfy requirements is designed and the material thermal properties are obtained using the DSC and TGA machine. The relationships between process parameters and thermal radius of the tool are obtained through experiment.

Key Words : Rapid Foam Shaping (폼 가공), Hot tool(열 공구), Thermal Decomposition (열 분해)

1. 서론

오늘날 제품 개발의 추세는 다품종 소량생산의 단계에서 한걸음 더 나아가 모든 수요자의 기호에 맞추어 생산하는 대량 맞춤(Mass customization)시대로 접어들었다. 따라서 각 소비자의 기호에 맞는 제품 생산을 위해 디자인이 매우 다양하고 빠르게 변화하고 있고 이들 제품의 제작 기간 단축이 요구되고 있다.

CAD 상의 3 차원 형상을 단시간내에 구현하기 위해서는 단위 형상을 적층하여 3 차원 형상을 제작하는 폼 가공 기술이나 재료를 절삭하는 가공 방법을 주로 사용해 왔다. 적층식 폼 가공의 경우는 1987 년 미국의 3D system사에서 처음으로 개발된 이후 20 여가지 이상의 상용화 공정이 개발되었다. 적층되는 특성에 의해 내부에 복잡한 형상이나 공구의 접근성을 고려하지 않는 형상의 제작이 가능하다. 그러나 재료가 매우 고가이고 고정밀 가공이 난해한 단점이 있다.

그에 비해 절삭 가공은 전통적으로 시제품 제작에 가장 많이 사용되어 오던 조형 방법으로 고정밀

도의 시제품을 빠른 시간에 제작할 수 있는 대표적인 공정이다. 다양한 소재를 다룰 수 있으며, 실물과 가까운 형상 정밀도 및 표면 상태를 나타낼 수 있다. 따라서, 이를 활용한 폼 조형 기법이 다양한 방식으로 응용되고 있다.

Kulkarni 는 기존 폼 조형 시스템의 정밀도 향상시키기 위하여 절삭 공정의 도입 방법을 제시하고, 3 축 공정을 이용한 정밀도 향상을 시도하였다^[1]. Hur 는 병렬 기구를 이용하여 3 축 양면 가공과 결합, 5 축 가공을 이용한 후공정으로 시제품을 제작하는 Eclipse RP 시스템을 개발하였으며, Chen 은 로봇 시스템에 밀링 절삭 기구를 붙여 절삭과 적층을 반복하는 방법으로 시제품을 제작하는 RoLM 시스템을 개발하였다^[2,3]. Takahashi 등은 초고속 밀링 기술을 이용하여 플라스틱 핸드폰 케이스등을 제작하였으며 Shin 등은 고속 절삭 공구와 충진이 가능하고 양면 가공을 수행할 수 있는 인덱싱 테이블을 이용하여 다양한 3 차원 형상을 가공하였다^[4,5]. 또한, Jung 등은 합성 수지를 가공하기에 적합한 5 축 범용 폼 조형 장치를 개발하여 3 차원 형상의 가공을 시도하였다^[6].

그러나 절삭을 이용한 공정들의 경우는 절삭량이 많은 황삭 단계에서 많은 시간을 소비할 뿐만 아니라 발생하는 잔여 재료(Chip)에 의해 가공 제품 및 공작기계의 손상이 발생하며 가공 환경을 악화시킨다. 또한, 작업 후 작업자가 잔여 재료 제거를 위해 소요되는 시간 및 비용에 의해 절삭 가공에서 생산성을 저하시킨다. 따라서, 본 논문에서는 절삭에서 발생하는 이러한 문제점을 극복하기 위해 쾌속 황삭을 수행하고 잔여재료가 거의 발생하지 않는 열 공구를 이용한 쾌속 폼 가공 공정을 제안한다. 공정 구현을 위해 제안된 공정에 적합한 공구를 설계 및 제작을 수행하며 가공되는 폼 재료의 열 물성치를 실험을 통해 얻어낸다. 또한, 공정 변수에 따른 선 가공 실험을 수행하여 공정 변수 조건에 따른 열 반경을 구하였다.

2. 쾌속 폼 가공 공정 개발

2.1 쾌속 폼 가공 개념

본 논문에서 제안하는 열 공구를 이용한 쾌속 폼 가공 공정의 개념은 Fig. 1 과 같다. 가공하려는 형상 데이터를 읽어 들여 공구 경로를 생성한다. 생성된 공구 경로를 따라 열 공구가 이동하면서 재료를 제거한다. 고용량 열공구를 사용하여 단위 시간당 재료 제거량이 커서 쾌속 가공이 가능하다. 또한, 가공시 발생하는 잔여 재료는 대부분 열분해(Decomposition)가 되어 기화되거나 용융되어 외부 형상에 달라붙게 되어 작업 후 작업자가 추가로 청소할 잔여 재료가 거의 발생하지 않는다.

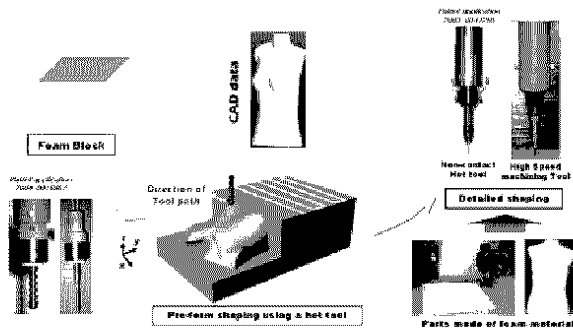


Fig. 1 Concept of rapid foam shaping process using the hot tool

2.2 장치의 구성

쾌속 폼 가공 공정의 구현을 위해 제작한 장치의 모습은 Fig. 2 와 같으며 장치의 Spec.은 Table 1. 과 같다. 본 장치의 구성은 크게 제어 소프트웨어, 제어 보드, 인덱싱 테이블, 열 공구, 가공 재료 지

그로 구분된다. 제어보드에서는 공구 이송축 3 축을 동시 제어하고 인덱싱 테이블 2 축을 제어한다.



Fig. 2 Apparatus of rapid foam shaping system

Table 1. Specifications of rapid foam shaping system

Range of X, Y, Z envelop	X	200 mm
	Y	200 mm
	Z	200 mm
Range of Indexing Table	θ_x	0 - 90°
	θ_z	-180° - 180°
Hot tool and material	Diameter	5.11 mm
	Shaping speed range	10 - 50 mm/s (600- 3000 mm/min)
	Input Voltage	10 - 100 V
	material	Foam

2.3 열 공구 설계

본 공정에서 열 공구의 조건은 가공재를 열 분해시킬 수 있는 온도(450 °C)에서 장시간 견디어야 하며 발생하는 고열을 장치에 미치는 영향을 최소화할 수 있도록 단열 효과도 있어야 한다. 또한, 발생하는 용융 폴리머를 효과적으로 제거할 수 있는 구조를 가지고 있어야 한다. 이러한 특징을 만족시키기 위해 다음과 같이 열 공구를 제작하였다. 내부에 700 °C 까지 온도가 상승할 수 있는 열 카트리지를 장착하고 공구와 지그 사이에 세라믹을 두어 내열성을 증가시키고 지그는 단열성 폴리머를 사용하여 장치로 전도되는 열을 최소화 시켰다.

제작된 열 공구의 입력 전압에 따른 표면 온도의 관계를 알아보기 위해 Fig. 3 와 같이 표면에 열 전대를 부착하여 입력 전압에 따라 표면 온도를 측정하였다.

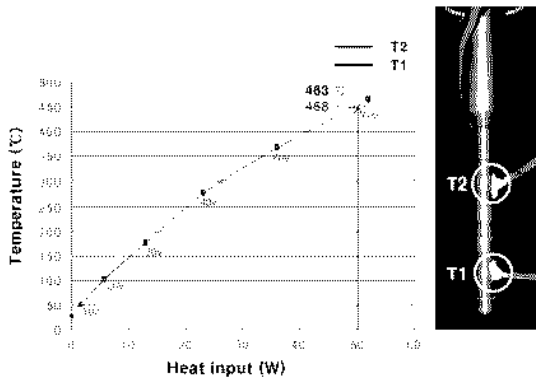


Fig. 3 Relationship between input voltage and temperature on the tool surface

실험 결과 300 °C이하에서는 입력 전압과 표면 온도가 선형적이거나 표면 온도가 높아질수록 기울기가 줄어들음을 알 수 있다. 이러한 현상은 표면 온도가 상승함에 따라 외부에 복사 및 대류에 의해 손실되는 열이 점점 증가하여 표면 온도의 증가폭이 줄어들어 나타나게 된다. 또한, 실험을 통하여 폴리머를 열분해하면서 가공을 수행하기 위해서는 60 V 이상에서 가공이 이루어져야 함을 알 수 있다.

2.4 가공 재료의 공학적 데이터 분석

본 가공에 적합한 폼 재료는 다음의 조건을 만족해야 한다. 용융된 폴리머의 점성이 충분히 있어 가공 표면에 흘러내리지 않고 공구표면에 붙거나 외부면에 붙어 있어야 하며 완전 열 분해시 유해가스가 발생하지 않아야 한다.

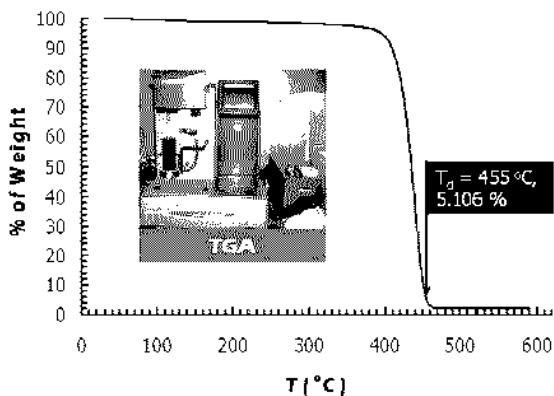


Fig. 4 Measurement of decomposition temperature using TGA

이러한 특성을 가지는 폼 재료로 건축재료에서 사용되는 아이소 펑크를 선택하여 쾌속 폼 가공을 수행한다. 가공 재료의 열물성값을 실험적으로 Fig.

4, 5 와 같이 TGA, DSC 장치를 이용하여 열분해 온도(T_d)와 유리전이온도(T_g)를 구하였다.

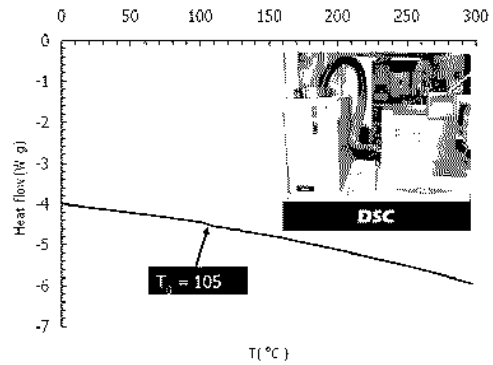


Fig. 5 Measurement of glass transient temperature using DSC

3. 공정 변수에 따른 가공 열 반경

3.1 공정 변수

열 공구 가공시 공구 주변에 형성되는 열 에너지 분포에 의해 쾌속 가공시 열 공구보다 큰 영역으로 가공이 수행된다. 또한, 주변 열 에너지 분포에 의해 생성된 열반경은 주요 공정 변수에 의해 변하게 된다. 일반적으로 속도를 가진 공구를 이용한 열 가공에서 주요 변수는 가공 속도와 입열량이다^[7]. 따라서, 본 연구에서는 열 공구의 속도와 입열량을 변화시켜가며 가공시 나타나는 열 반경을 실험을 통하여 관찰하였다.

3.2 공정 변수와 열 반경의 관계

공정 변수와 열 반경과의 관계를 알아보기 위해 Fig. 6 과 같은 실험을 수행하였다. 각 공정 변수 조건에 따라 선 가공을 수행한 후 가공된 선폭을 측정하여 열 반경을 알아낸다.



Fig. 6 Experiment for various parameter conditions

실험을 통하여 얻어진 가공 너비와 공정 변수와 관계를 나타내면 Fig. 7,8 과 같다. 가공 속도가 증가함에 따라 가공 너비가 줄어들을 알 수 있으며 열 입력량에는 비례함을 알 수 있다.

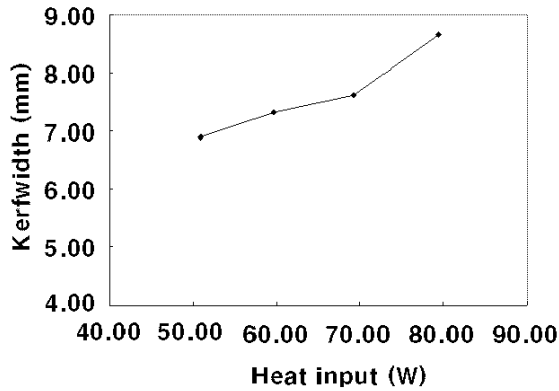


Fig. 7 Relationship between kerfwidth and heat input

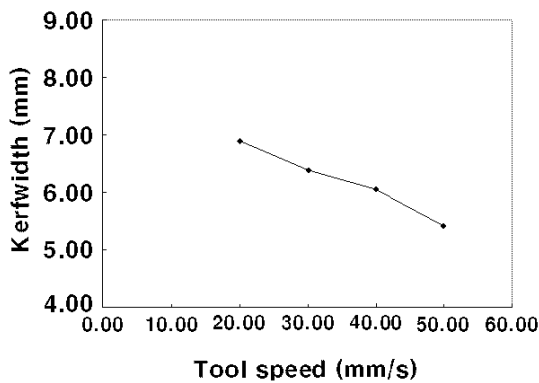


Fig. 8 Relationship between kerfwidth and tool speed

식 (1)과 같이 가공 열 입력량을 가공 속도로 나눌 경우 단위 길이에 유입되는 열 입력량을 구할 수 있으며 이를 유효 열 입력량이라 정의한다.

$$Q_{eff} (J/mm) = \frac{Q_i (J/s)}{V (mm/s)} \quad (1)$$

유효 열 입력량과 가공 너비의 관계를 나타내면 Fig. 9 와 같이 선형적인 관계를 유지함을 알 수 있으며 관계식은 식 (2)와 같다.

$$\eta = 0.82 * Q_{eff} + 5.14 \quad (2)$$

η : ker fwidth

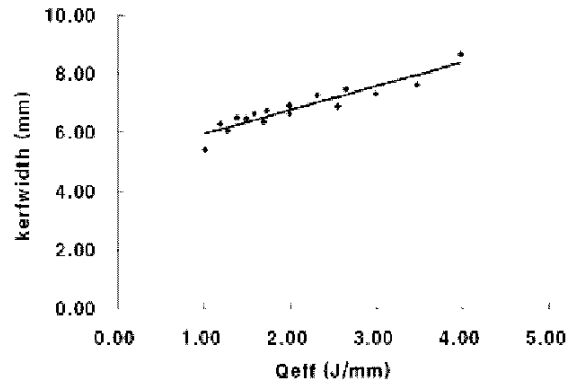


Fig. 9 Relationship between kerfwidth and effective heat input

Fig. 9 의 관계를 통해 쾌속 폼 공정에서 주요 두 변수와 가공 너비의 관계를 알 수 있었으며 가공 너비에서 공구의 너비를 빼면 식 (3)과 같이 열 반경과 유효 열 입력량의 관계식을 구할 수 있다.

$$r_{heat} = 0.41 * Q_{eff} + 0.1 \quad (3)$$

r_{heat} : Radius of heat affected zone

4. 결론

본 논문에서는 기존 절삭 가공의 단점을 극복하는 열 공구를 이용한 쾌속 폼 가공 공정을 제안한다. 제안된 공정에서는 열 공구에 의해 재료를 열 가공하며 가공된 재료는 열분해 되거나 용융되어 제거된다. 공정을 구현하기 위해 고온에서 견디는 열 공구를 설계 및 제작하며 적합한 폼 재료를 활용하여 폼 재료의 열 물성을 TGA 장치와 DSC 장치를 이용하여 측정하였다. 본 공정에서는 열 공구 주변에 열 반경이 생성되어 가공 범위에 중요한 영향을 미친다. 따라서, 공정 변수에 따라 선 가공 실험을 수행하여 공정 변수와 가공 너비의 관계를 규명하였다. 또한, 두 공정변수 관계를 이용하여 유효 열 입력량을 정의하였으며 유효 열 입력량과 열 반경의 관계를 실험적으로 구하였다.

향후에는 형상 가공시 공정 변수와 열 반경과의 관계를 이용하여 오차를 미리 보정한 후 수행할 경우 열 공구를 이용하여 정밀한 가공이 가능할 것이라 사료된다.

참고문헌

1. P. Kulkarni, and D. Dutta, "On the Integration of Layered Manufacturing and Material Removal Processes," ASME Journal, Vol. 122, No. 2, pp. 100-108, 2000.
2. J. H. Hur, I. H. Cho and H. S. Kang, "RapidWorks98: A Workbench for STL-based Rapid Prototyping Systems," The First International Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing, Beijing, July 21-23, pp. 236-243, 1998.
3. Y. H. Chen and Y. Song, "The development of layer-based machining system," Computer-Aided Design, Vol. 33, No. 4, pp. 331-342, 2001.
4. I. Takahashi, M. Anzai, M. Arai, "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. B. S. Shin, D. Y. Yang, D. S. Choi, E. S. Lee, T. J. Je, K. H. Whang, "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. 정태성, 양민양, "5 축 가공을 이용한 쾌속조형 시스템의 개발," 한국정밀공학회 2002 년 추계 학술대회, pp.1011-1014, 2002.
7. 김효찬, 이상호, 안동규, 양동열, "비접촉식 열공구를 이용한 VLM-ST 제품의 미세 형상 가공 공정 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 21, No. 1, pp. 149-158, 2004.