

액화질소를 이용한 오픈 셀 실리콘 폼의 냉동 절삭조건 최적화

황지홍^{a*}, 조광희^a, 박민수^a

Cryogenic Machining of Open-Cell Silicone Foam

Jihong Hwang^{a*}, Kwang-Hee Cho^a, Min-Soo Park^a^a Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology
232 Gongneung-Ro, Nowon-Gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	4	October	2013
Revised	5	December	2013
Accepted	21	January	2014

Keywords:

Open-cell silicone foam
Cryogenic machining
Optimal machining conditions

ABSTRACT

Open-cell silicon foam is difficult to cut using conventional machining processes because of its low stiffness. That is, open-cell silicon foam is easily pressed down when the tool is engaged, which makes it difficult to remove the material in the form of chip. This study proposes an advanced method of machining open-cell silicon foam by freezing the material using liquid nitrogen. Furthermore, the machining conditions are optimized to maximize the efficiency of material removal and minimize the usage of liquid nitrogen by conducting experiments under various machining conditions. The results show that open-cell silicone foam products with free surface can be successfully machined by employing the proposed method.

1. 서 론

최근 제품 생산 및 서비스 기술이 발전하면서 개인 소비의 형태는 각자의 개성을 강조한 맞춤형 제품이 선호되는 추세이다. 이는 사용자의 특징에 맞게 개별적으로 제작되어야 하는 의료 보조 장비나 보호 장비의 경우 특히 중요하게 인식된다. 이 경우 소재를 원하는 형상에 맞게 가공하는 기술이 필수라고 할 수 있다.

맞춤형 장비의 제작에 사용할 수 있는 기술 중에는 절삭 가공이 있다. 절삭 가공은 사용자의 외형을 스캐닝하고 CAD 프로그램을 이용하여 맞춤형 제품을 설계하고 CAM 프로그램을 이용하여 가공 경로를 생성하는 일련의 자동화된 프로세스를 적용할 수 있어 맞춤 제작에 선호되는 가공 방법이라 할 수 있다. 하지만 의료 보조 장비나 보호 장비에 사용될 경우 장점이 클 것으로 기대가 되는 오픈 셀 실리콘 폼(open-cell silicone foam)은 기존의 절삭 가공

방법으로는 가공하기가 힘들다. 실리콘(Silicone) 소재는 그 자체로 우수한 생체 적합성을 지니고 있고^[1] 오픈 셀 폼(open-cell foam) 구조는 제품의 탄성과 밀도, 그리고 통기성을 적절하게 통제할 수 있는 수단을 제공해 준다^[2]는 점에서 의료 보조 장비나 보호 장비 소재로서 매우 적절하다고 할 수 있다. 하지만 Fig. 1에서 보는 바와 같이 강성이 낮아 적은 힘으로도 변형이 발생한다. 따라서 일반적인 절삭 가공 방법을 적용할 경우 공구가 소재를 압착하게 되어 절삭이 이루어지지 않는다. 또한 소재 특성상 쾌속 조형 기법(rapid prototyping)과 같은 방법을 적용하기도 어려워 오픈 셀 실리콘 폼을 이용한 제품 개발에 한계가 있다.

따라서 본 연구는 오픈 셀 실리콘 폼을 가공하기 위한 적절한 방법을 찾고 경제적으로 실현 가능한지를 알아보는 것을 그 목적으로 한다. 구체적으로는 절삭 시 액화질소를 오픈 셀 실리콘 폼에 분사시켜 절삭 가능한 상태로 만드는 것이며 나아가서는 그 과정에

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6396

Fax: +82-2-976-5173

E-mail address: hwangjh@seoultech.ac.kr (Jihong Hwang).

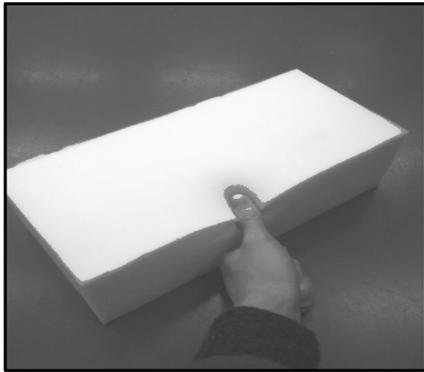


Fig. 1 Open-cell silicone foam

서 사용되는 액화질소의 양을 최소화하기 위한 경제적인 방법을 찾는 것이다. 이는 액화 질소를 이용한 기존의 연구들^[3-5]이 주로 절삭 온도를 낮춰 공구의 마모를 줄이고 가공 특성을 향상시키고자 했다는 점에서 차별화된다고 할 수 있다. 또한, 레이저를 이용한 절삭 가공(laser assisted machining)^[6-8]의 경우 가공 부위를 미리 예열함으로써 취성을 연성으로 바꾼다는 점에서 절삭 가공을 위해 소재의 성질을 개선시키는 본 연구와 공통점이 있다고 할 수 있으나 본 연구에서는 냉각을 통해 소재의 취성을 높인다는 점에서 차별화된다고 할 수 있다.

2. 냉동 절삭 장치의 구성

본 연구에서는 램 타입(ram type) CNC 밀링 머신(총 중량: 2,500 kg, 주축 최대 회전 속도: 6,000 rpm, 최대 이송 속도: 150 mm/min, 작업 거리: 700 mm(x축) × 350 mm(y축) × 400 mm(z축))을 기반으로 냉동 절삭 장치를 구성하였다. 가공을 위한 공구로는 직경 20 mm, 날 길이 38 mm의 표준 2날 볼 엔드밀(ball-end mill, YG1, SEM813 series)을 사용하였다. 액화질소는 165 L의 압력 용기를 이용하여 분사하였는데, 초저온 유량계를 설치하여 분사되는 액화질소의 양을 제어할 수 있도록 하였다. 또한 Fig. 2와 같이 풋 스위치(foot switch)가 달린 초저온 솔레노이드 밸브(solenoid valve)를 압력 용기와 유량계 사이에 장착하여 액화 질소 분사를 손쉽게 제어할 수 있도록 하였다. 저온 특성(비등점 -196°C/대기압)을 유지시키면서 가공 부위까지 액화 질소를 효율적으로 전달하기 위해 초저온 플렉서블 호스(flexible hose)와 노즐(nozzle)을 연결하였다. 이 때, 초저온용 플렉서블 호스와 노즐은 절삭에 방해가 되지 않는 범위 내에서 공구에 최대 밀착시켰으며 액화질소 분사 시 발생하는 반력을 견딜 수 있도록 호스 클램프(hose clamp)를 이용하여 단단히 고정시켰다. 노즐이 하나만 존재할 경우에는 공구의 이송 방향에 따라 냉각 효과가 달라질 수 있으므로 Fig. 3과 같이 노즐을 한 개 더 추가로 설치하여 절삭의 효율

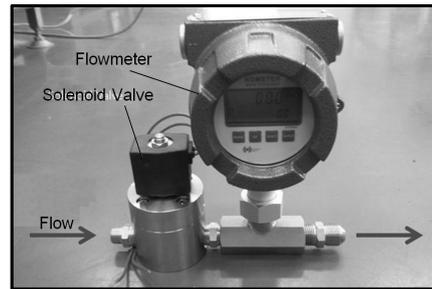


Fig. 2 Solenoid valve and flowmeter

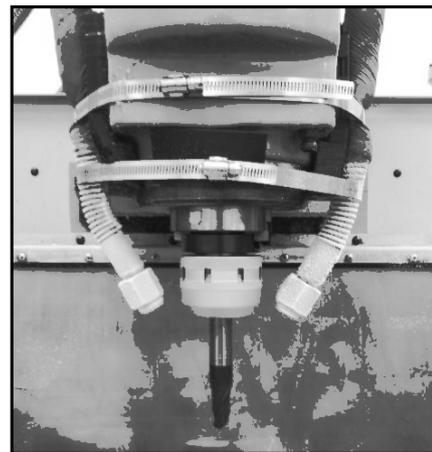


Fig. 3 Cryogenic flexible hoses and nozzles

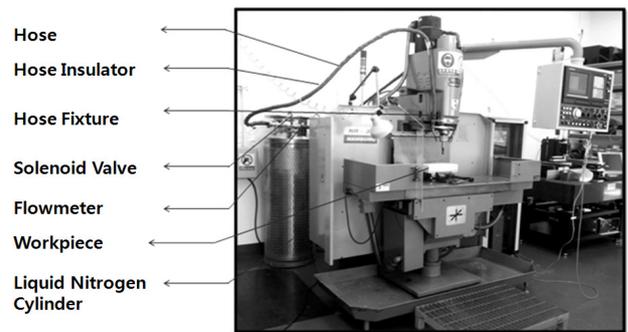


Fig. 4 Cryogenic machining system



Fig. 5 Fixture device

성을 높였다. 즉, 노즐이 하나만 존재할 경우 가공 경로의 방향이 반대가 되면 새롭게 절삭될 부분(공구의 전면부)이 아니라 이미 절삭된 부분(공구의 후면부)에 분사가 집중되어 냉각 효과가 떨어지므로 두 개의 노즐을 설치하여 공구의 전면부와 후면부를 동시에 냉각하는 방법을 사용하였다. Fig. 4는 최종적으로 구성된 냉동 절삭 장치의 전체적인 모습을 보여준다.

한편, 오픈 셀 실리콘 폼의 냉동 절삭을 위해서는 소재의 고정을 위한 특별한 주의가 요구되었는데 이는 소재의 강성이 작아 변형되기 쉽고 통기성이 있어 바이스나 진공척 같은 절삭 가공에 사용되는 일반적인 고정구로는 고정하기가 어려웠기 때문이다. 또한 실험에 사용된 제품 모델의 경우 측면까지 가공해야 하기에 네스팅(nesting) 방식의 고정구 역시 사용상에 어려움이 있었다. 따라서 Fig. 5와 같이 목재 합판에 나사못을 박아 그 위에 소재를 꽂아서 고정하는 방법이 도입되었다. 그 결과 나사못의 위치와 높이를 조정함으로써 소재를 안정적으로 고정할 수 있었고 소재의 측면을 간섭 없이 가공할 수 있었다. 또한, 작업 후 소재를 분리했을 때에도 자국이 남지 않아 제품의 상품적 가치를 유지할 수 있었다.

3. 냉동 절삭 실험

냉동 절삭 실험은 냉동 절삭과 액화질소 사용량에 가장 큰 영향을 주는 주요 인자로 가공 깊이(axial depth of cut), 가공 경로 사이 간격(step over), 냉동 유지 시간을 선정하고 이들의 최적 조건을 찾는 것을 목표로 수행되었다. 각각의 실험은 총 3회 반복되었는데 액화질소 분사량은 흐름에 난류를 생성하지 않으면서 소재의 표면 및 공구에 반사되어 튀겨 나가지 않는 범위에서 최대가 되도록 정하였다. 이렇게 분사량이 정해진 후로는 모든 실험에 걸쳐 동일한 유량의 분사가 이루어지도록 압력 용기의 분사 압력(13 kg/cm²)과 밸브 개방 정도를 고정시켰다. 한편, 주축의 회전 속도와 이송 속도는 실험에 사용된 밀링 머신의 성능과 공구의 직경을 고려하여 3,000 rpm과 1,500 mm/min을 사용하였다. 즉, 가공 효율을 극대화하기 위해 이송 속도로는 기계가 낼 수 있는 최대 속도인 1,500 mm/min을 사용하였으며, 주축 회전 속도로는 공구 장착 시 공구의 회전 상태가 안정적으로 얻어지는 범위 내에서 최대인 3,000 rpm을 사용하였다. 이상의 실험 조건은 Table 1과 Table 2에 나타나 있다.

첫 번째 실험(Exp. 1)은 액화질소 분사 시 어느 깊이까지 절삭 가능 상태의 냉동이 되는지를 파악하기 위해 수행되었다. 실험은 가공 너비는 공구 직경(20 mm)과 동일하게 유지(full cut)한 채 가공 깊이가 공구 날 길이(38 mm)를 넘지 않는 범위에서 네 수준(10, 20, 25, 30 mm)으로 변화시키면서 직선 경로를 따라 냉동 절삭을 수행하는 것으로 이루어졌다. 한편 정상적인 절삭이 가능한 수준의 소재의 냉동 여부는 칩의 발생 유무 및 표면 상태로부터 판단하였는데, 이는 가공면의 뜯김 없이 소재가 칩의 형태로 깨끗하게 제거되는 상태라고 할 수 있다.

두 번째 실험(Exp. 2)은 정삭 시 가공 경로 사이 최적 간격을 파악하기 위해 수행되었다. 본 실험에 앞서 소재에 25 mm의 가공 깊이와 20 mm(full cut)의 가공 경로 사이 간격을 가지고 직선 경로를 따라 황삭을 행하였다. 본 실험은 공구의 높이를 황삭 시와 동일하게 유지한 채 가공 경로 사이 간격을 기하학적인 계산에 의한 커스프(cusp)의 높이가 대략 0.3 mm 이하가 되도록 세 수준(정삭: 2.5, 3.5, 5 mm)으로 변화시키면서 수행하였다. 가공은 황삭과 같은 방향의 직선 경로를 따라 이루어졌으며 가공 후에는 각각의 표면 상태를 비교하여 정삭을 위한 최적의 가공 경로 사이 간격을 설정하였다.

세 번째 실험(Exp. 3)은 액화질소의 지속적 분사가 아닌 간헐적 분사를 통해 액화질소의 사용량을 줄일 수 있는지 여부를 살펴보기 위해 수행되었다. 본 실험에 앞서 한 번의 직선 경로 냉동 절삭에 의해 얼마나 넓은 범위까지 주변 영역이 냉각되는지를 살펴보았다. 이를 위해 짧은 거리의 직선 경로(짧은 가공 시간, 5초 이내)를 액

Table 1 Cryogenic machining conditions

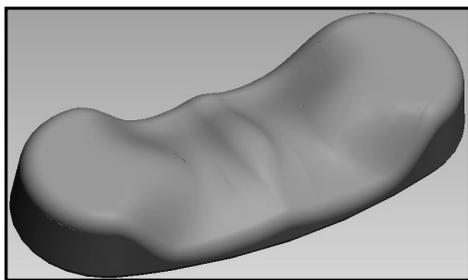
Parameter	Value
Tool	Ball end mill (No. of teeth: 2, length: 38mm)
Cutting speed	3,000 rpm
Feed rate	1,500 mm/min
Nozzle size (dia.)	10 mm
Nozzle distance	105 mm (from the tip of the tool)
LN container pressure	13 kg/cm ²

Table 2 Experimental conditions

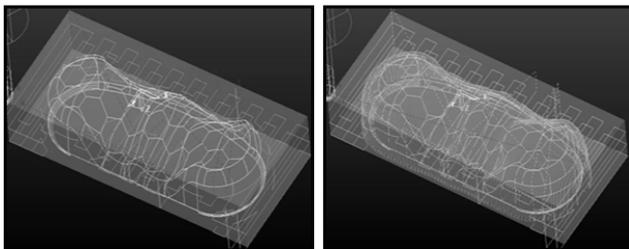
No.	Level	
Exp. 1	Roughing	Depth of cut: 10, 20, 25, 30 mm Step over: 20 mm (full cut)
Exp. 2	Roughing	Depth of cut: 25 mm Step over: 20 mm (full cut)
	Finishing	Step over: 2.5, 3.5, 5 mm
Exp. 3	Roughing	Depth of cut: 25 mm Step over: 20 mm (full cut)
Exp. 4	Roughing	Depth of cut: 25 mm Step over: 20 mm (full cut)
	Finishing	Step over: 2.5 mm

화질소를 분사하면서 냉각한 후 이번에는 가공 경로를 20 mm씩 옆으로 이동해 가면서 액화질소의 추가적인 분사 없이 가공을 수행하였다. 그 결과 3번째 경로(첫 번째 가공 경로로부터 40 mm 이동했을 때)부터는 가공면의 뜯김 현상이 발생하여 절삭이 정상적으로 이루어지지 않음을 알 수 있었다. 즉, 한 번의 직선 경로 냉각 절삭에 의해 최소 20 mm 이내의 주변 영역이 냉각됨을 알 수 있었다. 따라서 본 실험은 충분히 긴 거리의 직선 경로(긴 가공 시간, 20초 이상)를 액화질소를 분사하면서 가공한 후 가공 경로를 20 mm 옆으로 이동하여 액화질소의 추가적인 분사 없이 가공을 수행하는 것으로 이루어졌다. 절삭 조건은 앞 실험과 동일하였는데 해동이 시작되어 가공 표면의 뜯김 현상이 발생하는 시점에서 이전 경로 가공 시 해당 지점이 냉각된 시점의 차를 구하여 한 번의 직선 경로 냉동 절삭에 의해 주변 영역이 얼마나 오랫동안 냉동 상태를 유지하는지를 파악할 수 있었다.

마지막(Exp. 4) 실험은 앞 실험들을 통해 얻어진 결과들을 적용하여 Fig. 6 (a)와 같은 자유 곡면을 가진 제품(맞춤형 베개의 축소 모델, 300 mm(가로) × 135 mm(세로) × 50 mm(최대높이))을 가공하는 실험이 수행되었다. 자동화된 가공 경로 생성을 위해 CAM 프로그램으로 Delcam사의 PowerMill을 사용하였는데, 라스터, 옵티마이즈, 스파이럴 등의 가공 경로 시뮬레이션을 통해 앞 실험 결과 들을 가장 잘 적용 시킬 수 있으면서 최단 시간 및 최적의 표면 조도를 얻을 수 있는 가공 경로를 선정하였다. 이렇게 하여 얻은 최적 가공 경로가 Fig. 6의 (b)와 (c)에 나타나 있다.



(a)



(b)

(c)

Fig. 6 (a) Surface model of the product and tool path generated using a CAM software for (b) roughing and (c) finishing

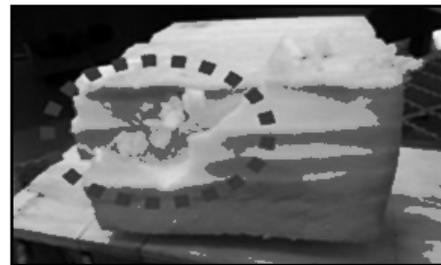
4. 실험 결과

4.1 가공 깊이에 따른 실험(Exp. 1)

가공깊이 변화 실험에서는 가공 깊이가 10, 20 mm 일 때는 칩이 발생하여 가공면 상태가 우수하였으나 가공 깊이가 30 mm일 때는 이 깊이까지 소재의 냉동이 이루어지지 않아 처음부터 소재가 공구를 따라 말려 올라가는 현상을 보였다. 따라서 가공 깊이를 25 mm 로 낮춰 실험을 수행한 결과 절삭이 정상적으로 수행됨을 알 수 있었다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 가공 깊이가 각각 25 mm와 30 mm 일 때의 실험 결과를 보여주는데, 가공 깊이가 25 mm일 때는 절삭이 정상적으로 이루어져 깨끗한 가공면이 얻어졌으나 가공 깊이가 30 mm일 때는 처음부터 소재가 공구를 따라 말려 올라가 결국 톱이 뜯겨 나가 절삭이 더 이상 진행되지 못했음을 알 수 있다. 황삭 가공 시에는 가능한 한 많은 양의 재료를 제거하는 것이 바람직하므로 25 mm를 황삭을 위한 최적의 가공 깊이로 선정하였다.



(a) Axial depth of cut = 25 mm



(b) Axial depth of cut = 30 mm

Fig. 7 Effects of the axial depth of cut

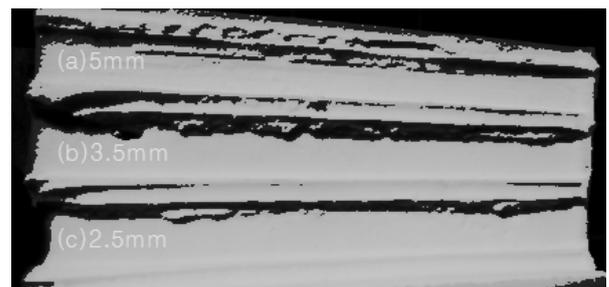


Fig. 8 Effects of the length of step over

4.2 가공 경로 사이 간격에 따른 실험(Exp. 2)

Fig. 8은 정삭 시 가공 경로 사이 최적 간격을 파악하기 위해 가공 경로 사이 간격을 변화시키면서 실험을 수행한 결과를 보여주는 그림이다. 가공 경로 사이 간격을 5 mm로 했을 때에는 Fig. 8 (a)에서 볼 수 있듯이 커스프의 존재를 맨 눈으로 확인할 수 있을 만큼 표면 상태가 만족스럽지 못했다. 가공 경로 사이 간격을 3.5 mm으로 했을 때에는 표면 상태가 좋아져서 Fig. 5 (b)에서 보는 것처럼 커스프의 존재가 크게 눈에 띄지 않았지만 세밀하게 관찰했을 때는 제품으로서의 요구 조건을 만족시킬 만큼의 수준을 보여주지는 못했다. 따라서 가공 경로 사이 간격을 2.5 mm로 설정하여 실험을 수행하였는데 가공 경로 사이 간격을 3.5 mm로 했을 때보다 표면 상태가 좋아져 만족스런 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 직경 20 mm의 볼 엔드밀을 사용하여 정삭 가공을 수행할 때 가공 경로 사이 간격을 2.5 mm로 설정(기하학적인 계산에 의한 커스프의 높이: 0.08 mm) 한다면 제품으로써 충분한 표면 상태를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다. 경우에 따라 가공 경로 사이 간격을 더 줄여 준다면 그만큼 더 좋은 표면을 얻을 수 있겠지만 가공 시간 역시 이에 반비례해서 늘어나므로 본 연구에서는 2.5 mm의 가공 경로 사이 간격을 최적 조건으로 선정하였다.

4.3 냉동 유지 시간 파악 실험(Exp. 3)

1차로 직선 경로를 따라 액화질소를 분사하면서 냉동가공 절삭을 실시한 후, 2차로 직선 경로를 20 mm만큼 횡으로 이동하여 액화질소의 분사 없이 반대 방향으로 절삭을 수행한 결과 소재가 해동되어 가공면의 뜯김 현상이 생기는 것을 볼 수 있었다. 가공면의 뜯김 현상이 생기는 지점을 파악하여 1차 가공 때 그 부근에

액화 질소가 분사된 시점과 2차 가공 때 가공면의 뜯김 현상이 발생한 시점과의 시차를 계산하여 한 번의 액화질소 분사로 인해 정상적인 절삭이 가능한 수준의 냉동이 얼마나 오랫동안 유지되는지를 파악하였다. 3회 반복 실험을 한 결과 냉동이 각각 29.4초, 31.6초, 36초 동안 유지됨을 알 수 있었다. 따라서 한 번의 액화질소 분사를 통해 20 mm 이내의 주변 영역을 약 32.3초 동안 액화질소의 추가 적인 분사 없이 절삭할 수 있음을 알 수 있었다.

4.4 제품 가공 실험(Exp. 4)

앞선 실험으로부터 황삭 시 가공 깊이, 정삭 시 가공 경로 사이 간격, 한 번의 직선 경로 냉동 절삭에 의한 주변 영역의 냉동 유지 시간이 Table 3에서와 같이 정해졌다. 이를 토대로 한 번의 직선 경로 냉동 절삭에 의해 냉동된 주변 영역(20 mm 이내)을 추가적인 액화질소 분사 없이도 가공할 수 있는지 CAM 소프트웨어의 시뮬레이션 기능을 이용하여 검증해 보고 필요에 따라 수동으로 보정하였다. 한편, 실제 가공 시에는 풋 스위치(foot switch)를 이용하여 액화질소의 분사를 통제하였는데 액화질소를 지속적으로 분사해 주었을 때와 간헐적으로 분사해 주었을 때의 액화질소 사용량에 대한 비교가 Table 4에 주어져 있다. 결과적으로 액화질소 사용량이 황삭 시에는 약 68%, 정삭 시에는 약 47%가 줄어들었음을 알 수 있다. 이렇게 가공된 최종 형상은 Fig. 9에 나타나 있는데 그림에서 알 수 있듯이 곡면이 성공적으로 가공되었음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 액화질소를 사용하여 난삭재 중 하나인 오픈 셀 실리콘 폼의 냉동 절삭 가능성을 시험하였으며 그 결과 칩이 형성되어 절삭이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 또한 가공 깊이, 가공 경로 사이 간격 등을 변화시키면서 실험을 수행하여 자유 곡면 형상을 갖는 모델을 가공하기 위한 최적의 절삭 조건을 구하였다. 더

Table 3 Optimal conditions for cryogenic machining of open-cell silicone foam

Parameter	Value
Axial depth of cut	25 mm
Step over for roughing	20 mm
Step over for finishing	2.5 mm
Pause of LN flow	32.3 sec

Table 4 Comparison of liquid nitrogen use

	When continuously applied	When intermittently applied	Use of saving (%)
Roughing	7 m 20s	2 m 20s	68%
Finishing	22 m 40s	12 m 00s	47%

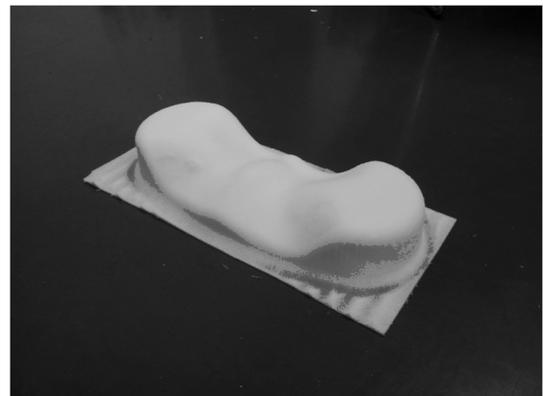


Fig. 9 Final product (300 mm × 130 mm × 50 mm)

불어 액화질소의 간헐적인 분사를 통해 냉동 절삭에 필요한 액화질소 양을 효과적으로 줄일 수 있는 가능성을 확인하였다. 보다 구체적으로는 직경 20 mm, 날 길이 38 mm의 표준 2날 블엔드밀을 사용하여 회전 속도 3,000 rpm과 이속 속도 1,500 mm/min로 냉동 절삭을 수행할 경우 25 mm의 깊이까지는 절삭이 안정적으로 수행됨을 알 수 있었다. 더불어 가공 경로 사이 간격은 황삭 시에는 20 mm, 정삭 시에는 2.5 mm가 적절한 것으로 파악되었다. 또한, 이상의 조건을 사용하여 자유 곡면을 갖는 제품(맞춤형 베개의 축소모델)을 가공할 경우 액화질소의 간헐적인 분사를 통해 황삭 시에는 약 68%, 정삭 시에는 약 47%까지 액화질소 사용량을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 제안된 냉동 절삭 가공은 오픈 셀 실리콘 폼 외에도 강성이 작아 절삭이 어려운 다른 소재, 예를 들어 고무나 스티로폼과 같은 소재의 가공에도 적용 가능할 것으로 기대된다. 또한, 이러한 소재들의 경우 가공 부하가 적어 고속의 가공 기계를 사용할 경우 생산 효율이 크게 증대되리라 생각되며 액화질소의 사용량도 줄일 수 있어 경제적인 효율 역시 크게 증대될 수 있으리라 기대된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Briquet, F., Colas, A., Thomas, X., 1996, Silicones for Medical Use, Dow Corning Customer Service Center, UK.
- [2] Furman, E. L., Finkelstein, A. B., Cherny, M. L., 2013, Permeability of Aluminum Foams Produced by Replication Casting Metals 3 49-57.
- [3] Kaynak, Y., Karaca, H. E., Noebe, R. D., Jawahir, L. S., 2013, Tool-wear Analysis in Cryogenic Machining of NiTi Shape Memory Alloys: A Comparison of Tool-wear Performance with Dry and MQL Machining, Wear 306 51-63.
- [4] Hong, S., Ding, Y., 2001, Cooling Approaches and Cutting Temperatures in Cryogenic Machining of Ti-6Al-4V, Int. J. Mach. Tool. Manu. 41 1417-1437.
- [5] Yildiz, Y., Nalbant, M., 2008, A Review of Cryogenic Cooling in Machining Processes, Int. J. Mach. Tool. Manu. 48 947-964.
- [6] Navas, V. G., Arriola, A., Gonzalo, O., Leunda, J., 2013, Mechanisms Involved in the Improvement of Inconel 718 Machinability by Laser Assisted Machining (LAM), Int. J. Mach. Tool. Manu. 74 19-28.
- [7] Skvarenina, S., Shin, Y. C., 2006, Laser-assisted Machining of Compacted Graphite Iron, Int. J. Mach. Tool. Manu. 46 7-17.
- [8] Lei, S., Shin, Y. C., Incropera, F. P., 2000, Deformation Mechanisms and Constitutive Modeling for Silicon Nitride Undergoing Laser-assisted Machining, Int. J. Mach. Tool. Manu. 40 2213-2233.