초경 그린파트 마이크로 절삭가공 특성 분석

김건희¹ · 정우철¹ · 윤길상¹ · 허영무[#] · 권영삼² · 조명우³

Investigation of Micro Cutting Characteristics for Tungsten-Carbide Green Part

G. H. Kim, W. C. Jung, G. S. Yoon, Y. M. Heo, Y. S. Kwon, M. W. Cho

(Received March 24, 2010 / Revised April 2, 2010 / Accepted April 12, 2010)

Abstract

Tungsten-carbide as typical difficult-to-cut material has excellent mechanical properties such as high thermal resistivity, mechanical strength and chemical durability. However, it is next to impossible for tungsten-carbide to be fabricated the needed parts by cutting process. In this study, for establishing the micro fabrication method of tungsten-carbide for micro injection or compression molding core, the investigation on micro cutting characteristics of tungsten-carbide green part which is made by powder injection molding process and easy to cut relatively was performed. For this, micro endmilling experiments of tungsten-carbide green part were performed according to various cutting conditions. Finally, the wear trend of micro endmill and the appearance of micro rib according to feed-rate and cutting depth per step were analyzed through SEM images of micro cutting feature and microscope images of micro tools.

Key Words: Tungsten-Carbide, Green Part, Micro-Endmilling, Metal Injection Molding

1. 서 론

마이크로 형상가공 기술은 크게 반도체 제조공정을 응용한 전기화학 또는 화학적 가공법과 기계적인 재료제거 공정으로 나눌 수 있다. 이 중 기계적인 재료제거를 기반 메커니즘으로 하는 마이크로 절삭가공 기술은 최근 관련 장비 및 공구의 발달로 인해 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 마이크로 절삭가공 기술은 다양한 재료 및 마이크로 형상, 패턴 변화에 대한 대응이 우수함에 따라 마이크로 패턴 및 형상을 내제한 부품 또는 제품의 대량생산을 위한 마이크로 금형코어 가공에 적용 가능하다.

마이크로 절삭가공의 경우 앞서 언급한 바와

같이 가공품질의 차이는 있으나 다양한 재료를 가공할 수 있다는 것이 장점이라고 할 수 있다. 마이크로 사출 및 압축성형 등을 수행할 경우 미세한 패턴 또는 형상의 재현성을 향상시키기 위하여 고온, 고압의 성형조건을 부여하는 경우가 많으며, 이로 인하여 코어의 내구성이 저하되는 문제점이 발생될 우려가 매우 높다. 마이크로 형상 및 패턴을 포함하고 있는 금형코어의 경우 제작비용이 대부분 고가임에 따라 코어의 성형능력(capacity)이 향상될 경우 제품 품질과 더불어 성형품 가격 경쟁력까지 모두 확보할 수 있다. 그러나, 고온, 고압 등의 극한 환경에서도 내구성을 확보할 수 있는 금속재료는 대부분 난삭재로 분류되는 재료들이며, 상대적으로 매크로 절삭공정

1. 한국생산기술연구원 금형·성형연구부

2. 세타텍

3. 인하대학교 기계공학부

교신저자: 한국생산기술연구원 금형·성형연구부,

E-mail: ymheo@kitech.re.kr

보다 비절삭 에너지(specific cutting energy)가 높은 마이크로 절삭가공 시에는 난삭재 가공이 더욱 어렵다고 할 수 있다[1]. 초경(tungsten-carbide)소재는 고온 열변형이 작으며, 내마모성, 내압축성이 매우 우수하여 절삭공구 재료로 많이 사용되어 왔으며, 최근에는 금형재료로 적용하는 사례가 증가하고 있다. 그러나, 초경 및 초경합금소재는 대표적인 초난삭재로서 취성이 매우 강하므로 일반적인 엔드밀링, 선삭 등의 절삭공정으로는 가공이 불가능하다. 따라서, 다이아몬드 공구를 이용한 연삭 및 방전가공, 전해가공, 레이저 가공 등 특수가공법을 이용해 형상 및 패턴가공을 수행하는 경우가 대부분이며, 미미하지만 고온절삭법을 통한 초경합금소재 절삭 시 현상분석, 가공효율성 검증에 대한 연구사례가 있다[2~9].

본 논문에서는 마이크로 사출 및 압축성형 금형코어 제작 시 초경소재 절삭을 통한 코어 제작공정의 가능성을 검토하기 위하여 금속분말 사출성형(metal injection molding process)를 통하여 제작된 초경소재 그린파트(green part)의 절삭성을 고찰하였다. 그린파트의 경우 탈지(debinding) 및 소결(sintering) 공정 전 상태로 초경 금속분말, 폴리머 등이 혼합되어 있다. 따라서, 소결 후 초경소재보다 절삭이 용이하나 혼합되어 있는 폴리머 등으로 인해 연성이 높고 강도가 매우 약한 상태이다. 초경소재 그린파트의 마이크로 절삭가공 시 비교적 재현성이 높은 미세 형상 제작이 가능할 경우 탈지 및 소결 과정을 거쳐 마이크로 형상 및 패턴을 내재한 초경소재 제작이 가능하다. 또한, 탈지 및 소결 과정을 통하여 그린파트는 압축 및 수축이 됨에 따라 그 정도에 대한 고찰이 수행된다면 상대적으로 큰 형상 가공을 하더라도 더욱 미세한 형상을 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 초경소재 그린파트 상에 마이크로 엔드밀링을 통하여 마이크로 리브(rib)를 가공하였으며, 공구마모 상태 및 SEM 이미지 측정 등을 통하여 초경소재 그린파트의 마이크로 절삭가공 특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 마이크로 엔드밀링 시스템

본 연구의 마이크로 절삭가공 실험에 사용된 가공 시스템은 Fig. 1과 같다. 본 시스템은 3축 공작기계와 동일한 구조로 제작되었으며, 주축의 경

우 수직방향으로 설치되어 있어 수직형 3축 공작기계와 동일하다. 주축에는 공구 직경대비 날당 이송량이 매우 큰 마이크로 엔드밀링을 위하여 이에 적합한 고속의 회전속도 확보가 가능한 고주파 모터 및 에어베어링이 조합된 스핀들(spindle)을 적용하였다. 또한 가공 전 공구의 장착, 장착 후 가공원점 셋업, 시편 위치보정 등 가공 전 준비과정이 매우 난해하기 때문에 가공 시편의 분리없이 가공 중간 단계에서 형상 측정을 수행할 있도록 탈부착이 가능한 비전센서를 적용하였다. 마이크로 절삭공정의 경우 가공 시스템 자려진동 저감도 중요하나 외부로부터 전달되는 진동 저감도 매우 중요하게 고려되어야 함에 따라 시스템이 설치된 정반 하부에 아이솔레이터(isolator)를 설치하여 지면으로부터 전달되는 외부 진동을 최소화할 수 있도록 하였다. 절삭공정 시 발생하는 절삭열 냉각을 위한 절삭유 공급의 경우 마이크로 절삭영역이 매우 미세하기 때문에 미스트(mist) 형태(5cc/shot)로 공급되도록 하였으며, 분사압력의 최대 7bar 까지 조정할 수 있도록 구성하였다. 또한 미스트 형태의 절삭유가 이송 스테이지 등에 적체되어 발생할 수 있는 오작동을 방지하기 위하여 미스트 오일 집진기도 설치하였다. 가공시편의 셋업과 관련하여 시편의 기울어짐(tilting error)으로 인한 절삭 깊이 변화를 가공 전에 보정할 수 있도록 시스템 베드(bed)상에 별도의 수동식 틸트 스테이지를 장착하였다. Table 1은 가공 시스템의 세부 사양을 정리한 것이다.

Fig. 1 Micro endmilling system

Table 1 Specification of the micro endmilling system

Traveling range	X,Y-axis(600mm), Z-axis(200mm)
Resolution	All axes 0.1 μm
Accuracy	X, Y-axis(6 μm), Z-axis(2 μm)
Repeatability	All axes 0.2 μm
Rotational speed	Max. 100,000 rpm (rev./min)
Spindle runout	Max 0.7 μm
Specimen weight	Max 10kg

Table 2 Experimental conditions

Used tool	Nominal Dia. 100 μm 2-flute endmil
Workpiece	Green part of tungsten-carbide
Cutting feature	Micro-slot [width 100 μm , depth 100 μm]
Spindle speed (V)	50,000 rpm
Cutting conditions	# Tool wear observation - D.O.C 10 μm /step - Feedrate(f) 40, 80 mm/min
	# Observation of micro feature - Feedrate 40mm/min - D.O.C 10, 25 μm /step

Fig. 2 Tungsten-carbide green part made by MIM

2.2 실험조건

Fig. 2 는 본 논문의 실험시편으로서 금속분말사출성형(metal injection molding) 공정을 통하여 제작된 초경소재 그린파트 및 SEM 이미지를 나타낸 것이다. SEM 이미지에서 볼 수 있듯이 성형 공정 직후의 성형품인 초경소재 그린파트는 조직간의 밀집력이 상대적으로 약하고 금속분말의 유동성 확보를 위하여 첨가된 폴리머 재료들이 혼합되어 있는 상태이다.

초경소재 그린파트 절삭실험 조건은 공구 마모를 고찰하기 위한 조건과 절삭깊이 방향 절입량 따른 마이크로 슬롯형상 재현성을 하기 위한 조건 등으로 구분하였다. Table 2 는 마이크로 엔드밀링 실험조건을 정리한 것이다.

각 항목별 실험조건 중 공구 회전속도는 50,000 rpm으로 고정하였으며, 공구 마모실험 시에는 공구

Fig. 3 Micro endmill used in experiments

이송속도, 마이크로 슬롯 재현성 고찰의 경우 절삭깊이 방향 절입량을 변화시키는 조건을 선정하였다.

Fig. 3은 본 실험에 적용한 공칭직경 100 μm 2날 마이크로 엔드밀을 나타낸 것이다. 마이크로 공구의 경우 공구 날부의 크기가 매우 작음에 따라 가공공정과 상관없이 파손될 우려가 높으며, 파손 여부를 일반 매크로 공구와 같이 육안으로 관찰하는 것이 불가능하다. 따라서, 실험이나 가공 전 공구현미경 등을 이용하여 공구 날부 확인 및 직경 측정이 필요하다. 본 연구의 가공실험에 적용

Fig. 4 Micro cutting of WC-green part

된 공구 직경 실측결과 공칭직경보다 더 작은 $84.15\mu\text{m}(\pm 0.6\mu\text{m})$ 로 측정되었으며, 이는 마이크로 엔드밀 기하 특성상 공구 제조 시 공구 생크(shank)와 공구 날부 사이의 편심량, 장착 시 발생하는 런아웃(runout) 등을 고려하여 가공 시 오버컷(overcut) 발생을 방지하기 위함으로 판단된다.

3. 실험 및 고찰

Fig. 4는 초경소재 그린파트 마이크로 절삭가공 실험 모습을 나타낸 사진이다. 실제 가공실험 전 균일한 절삭깊이 확보를 위한 사전작업으로 초경소재 그린파트 가공면 평탄화 가공을 수행하였으며, 실험 시에는 센서를 이용하여 주축방향(절삭깊이 방향) 가공원점을 설정하였다. 공구마모 고찰을 위한 실험의 총 가공길이는 210mm이며, 절입량에 따른 가공형상 재현성 고찰을 위한 실험의 가공길이의 경우 절입량에 따라 다르게 되므로 가공형상 재현성 고찰 외 공구마모는 별도로 고려하지 않았다. 모든 실험의 절삭환경은 지용성 절삭유를 미스트 형태로 절삭영역에 가공 중 지속적으로 분사하는 습식 절삭조건을 부여하였다.

Fig. 5와 6은 초경소재 그린파트 절삭 시 공구마모 양상을 고찰하기 위한 실험의 가공형상 SEM 이미지를 나타낸 것이며, Fig. 7은 실험조건별 공구밀면 마모상태를 마이크로 비전센서를 이용하여 획득한 이미지를 나타낸 것이다.

공구밀면 사진에서 볼 수 있듯이 공구 이송량이 증가함에 따라 공구의 플랭크(flank) 마모가 과도하게 발생함을 확인할 수 있었다. 그러나, 초경

Fig. 5 $v=50,000\text{rpm}$, $f=80\text{mm/min}$, $\text{D.O.C}=10\mu\text{m/step}$

Fig. 6 $v=50,000\text{rpm}$, $f=40\text{mm/min}$, $\text{D.O.C}=10\mu\text{m/step}$

소재 그린파트의 경우 일반적인 금속과 다른 물성 및 강도를 가짐에 따라 가공조건과 무관하게 공구마모가 발생하지 않거나 매우 작을 것으로 예상하였으나, 초경소재 분말로 인하여 공구마모도 상당량 발생할 수 있다는 것을 확인하였다. 가공형상 SEM 이미지에서도 공구마모 양상에 따른 가공형상 품질을 정성적으로 평가할 수 있었다. 공구 이송량 80mm/min 조건에서는 공구마모에 따른 영향도 있었으나, 과도한 공구 이송량으로 인하여 리브 상단부 및 측벽부에서 초경소재 그린파트가 일부 또는 과도하게 분리되는 현상을 확인할 수 있었다.

Fig. 8, 9는 공구회전속도, 이송속도는 고정하고 절삭깊이 방향으로의 스텝(step)당 절입량 변화에 따른 가공형상 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 한 스텝당 절입량 변화는 절삭부피 변화를 의미하는 것이며, 재료의 특성에 따라 절입량 변화를 통해 절삭부피를 증가시키는 것이 유리할 경우도 있으나, 초경소재 그린파트의 경우 일반적인 금속소재

(a)

(b)

(c)

Fig. 7 (a) New tool, (b) $v=50,000\text{rpm}$, $f=80\text{mm/min}$, D.O.C= $10\mu\text{m/step}$, (c) $v=50,000\text{rpm}$, $f=40\text{mm/min}$, D.O.C= $10\mu\text{m/step}$

와 유사하게 절입량 증가에 따른 절삭부피 증가로 형상가공 품질이 현저하게 저하됨을 확인하였다. 특히 스텝당 절입량이 $25\mu\text{m}$ 인 조건에서는 리브 측벽부에 물결무늬(scallop)가 발생되었으며, 이는 금속소재 가공 시에도 과도한 이송량 또는 절입량 조건이 부여될 경우 공구 변형, 칩 배출을 위한 부하 증가 등으로 인해 관찰이 가능한 현상이다. 또한, 그린파트는 금속분말 내 폴리머가 혼합되어 있는 상태이며, 혼합정도가 부분적으로 균일하지 않을 경우도 있기 때문에 조직간의 접합력도 차이가 날 수 있다. 따라서, 스텝당 절입량이 큰 조건에서는 앞서 언급된 측벽부 또는 리브

Fig. 8 $v=50,000\text{rpm}$, $f=40\text{mm/min}$, D.O.C= $10\mu\text{m/step}$

Fig. 9 $v=50,000\text{rpm}$, $f=40\text{mm/min}$, D.O.C= $25\mu\text{m/step}$

상단부에서 소재 일부가 분리되는 현상을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 마이크로 형상 및 패턴 성형에 유리한 초경소재 마이크로 금형코어 제작의 한 방법으로 초경소재 그린파트를 가공 후 탈지, 소결을 통해 코어를 제작하는 공정을 제안하고 본 연구에서는 그린파트의 마이크로 형상가공 특성 분석을 수행하였다.

초경소재의 경우 절삭이 거의 불가능하거나 연삭, 연마 등의 재료 제거율이 매우 낮은 절삭공정으로만 가공이 가능한 초단삭제 중의 하나이지만 분말사출성형 공정을 통하여 제작한 초경소재 그린파트의 경우 금속분말과 폴리머 등이 혼합되어 있는 상태임에 따라 탈지 및 소결공정을 거친 초경소재에 비해 강도 및 조직의 치밀성이 상대적으로 낮음에 따라 절삭가공이 매우 용이하다. 그러나, 금속분말과 폴리머가 혼합되어 있는 상태임에 따라 일반적인 금속 및 합금 절삭과는 다른양상을 보일 수 있으며, 특히 절삭부피가 매우 작은 마이크로 절삭가공 시에는 절삭가공 형상의 재현성이 더욱 저하될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 마이크로 엔드밀링 공정 실험을 통하여 초경소재 그린파트 마이크로 절삭시 공구 마모 양상, 절삭부피에 따른 가공형상 재현성 등을 SEM 이미지 분석을 통하여 고찰하였다.

초경소재 그린파트 마이크로 절삭 시 소재 조직의 치밀성, 강도 등이 매우 열악한 상태임에 따라 공구마모가 매우 미미할 것으로 예상하였으나, 초경분말 입자와의 마찰로 인하여 공구마모가 발생되는 것을 확인하였다. 특히 이송량이 커짐에 따라 절삭부피가 증가되고 이로 인해 공구마모는 일반적인 금속 마이크로 절삭과 대등한 수준의 공구마모가 발생됨을 확인하였다. 절입량 변화에 따른 마이크로 형상 재현성을 고찰한 결과 절입량이 증가하게 될 경우 가공형상의 재현성이 현저하게 저하됨을 확인할 수 있었다. 그린파트의 경우 앞서 언급한 바와 같이 조직 치밀성 및 강도가 낮음에 따라 절입량이 크더라도 가공형상 재현성이 비교적 우수할 것으로 예상하였으나, 절입량이 클 경우 절삭저항이 과도하게 발생하여 측면부에 물결무늬가 발생되고 치밀성이 낮은 부분에서는 조직이 무너지는 현상이 관찰되었다.

초경소재를 이용한 금형코어 및 마이크로 부품 제작시 그린파트를 이용할 경우 다양한 마이크로 형상 및 패턴을 마이크로 절삭가공을 통하여 가공할 수 있음을 확인하였다. 초경 그린파트의 마

이크로 절삭가공 특성 분석을 통하여 다양한 형상 가공시 발생될 수 있는 문제점을 예측할 수 있을 것으로 판단되며, 타 소재를 이용한 미소 부품 제작에도 적극 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 그린파트의 경우 탈지, 소결 공정을 거칠 경우 소재 조직 중 폴리머 성분이 제거되고 조직의 치밀성이 높아짐에 따라 가공형상도 축소된다. 이는 보다 작은 크기의 마이크로 형상 및 패턴을 확보하고자 할 경우 더욱 유리한 특징이 될 수 있으나, 확보하고자 하는 형상 및 패턴의 크기를 정밀하게 제어하고자 할 경우에는 탈지 및 소결 공정간 형상 및 패턴의 축소 방향 및 정도에 관한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Chae, S. S. Park, T. Freiheit, 2006, Investigation of micro-cutting operations, *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, Vol. 46, pp. 313~332.
- [2] S. C. Kim, J. W. Lee, 1997, Machining of WC-Co alloys with diamond tool, *J. Kor. Soc. Mach. Tool. Eng.*, Vol. 6, No. 2, pp. 102~111.
- [3] S. H. Choi, B. H. Kim, C. N. Chu, 2006, Micro Electrochemical Machining of Tungsten Carbide, *J. Kor. Soc. Prec. Eng.* Vol. 23, No. 12, pp. 111~116.
- [4] C. H. Kim, J. P. Kruth, 1999, Machinability and Surface Characteristics of Sintered Carbides in W-EDM, *J. Kor. Soc. Prec. Eng.*, Vol. 16, No. 8, pp. 100~105.
- [5] R. A. Mahdavinjad, A. Mahdavinjad, 2005, ED machining of WC-Co, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 162~163, pp. 637~643.
- [6] Chandra Nath, Mustafizur Rahman, Ken Soon Neo, 2009, A study on the effect of tool nose radius in ultrasonic elliptical vibration cutting of tungsten carbide, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, pp. 5830~5836.
- [7] S. Kumar, 2009, Manufacturing of WC-Co moulds using SLS machine, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, pp. 3840~3848.
- [8] K. Lui, X. Li, S. Y. Liang, 2004, Nanometer-Scale Ductile Cutting of Tungsten Carbide, *J. Manuf. Process.*, Vol. 6, No. 2, pp. 187~195.
- [9] K. Lui, X.P. Li, M. Rahman, X. D. Lui, 2003, CBN tool wear in ductile cutting of tungsten carbide, *Wear*, Vol. 255, pp. 1344~1351.