

MCD 및 NCD 코팅 볼 엔드밀의 정삭가공에서의 최적절삭조건에 관한 연구

김종수^{1,*}

한국생산기술연구원 뿌리기술연구소^{1,*}

A study on optimal cutting conditions of MCD or NCD coated ball end-mills for finishing

Jong-Su Kim^{1,*}

Korea Institute of Industrial Technology, Research Institute of Advanced manufacturing & materials Technology^{1,*}

(Received November 14, 2022 / Revised December 27, 2022 / Accepted December 31, 2022)

Abstract: Recently, several studies are being conducted to achieve a curvature of 180° or more for the edge of the display glass. The thermocompression molding process is applied to the manufacture of curved glass, and high hardness G5 graphite is used as the mold material to withstand the impact applied to the mold. G5 graphite has high hardness and strong brittleness, which makes tool wear and surface damage easy during machining. Therefore, the demand for diamond-coated tools with good mechanical properties is increasing in the G5 machining field. In this study, the optimal cutting conditions and machinability of a nanodiamond (NCD) coated ball end mill being developed by a tool manufacturer were analyzed and evaluated. For this purpose, the same test was performed on the microdiamond (MCD) coated ball end mill and compared together. In summary, the machinability of MCD and NCD coated tools showed better cutting performance at a cutting speed of 282 m/min, a feed rate of 1,400 mm/min, and a radial depth of cut of 0.08 to 0.1 mm.

Key Words: Ball end-mill, Machinability, MCD, NCD, Optimal cutting conditions

1. 서론

플렉서블 디스플레이에 대한 수요가 증가하면서 인체공학적 감성의 곡면 디자인에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 스마트 모바일의 엣지 부분을 패넬로 활용하면서 글라스 모서리의 곡률 구현이 90° 이하에서 현재 최대 180°까지 증가하고 있는 추세이다. 따라서 모바일 글라스 제조업체에서는 금형을 이용한 열 압축 성형을 통해 곡률을 구현하고 있다. 글라스의 열 압축 성형 공정에는 주로 고경도의 G5 흑연 소재가 이용되고 있는데 다음과 같은 조건에 부합하기 때문이다. 첫째, 글라스의 금형으로 이용되는 소재는 600° 이상의 고온 환경과 반복적인 압축 힘 그리고 글라스와의 미세 슬라이딩 마찰을 견딜 수 있어야 한다. 둘째, 글라스와의 열화학적 상호작용 및 물리적 특성 차이로 인한 제품의 성능 저

하를 피하기 위해 물리화학적 물성이 유사하여야 한다. G5 흑연은 수 마이크로 이하 크기의 미세입자로 구성되어 있어 일반 흑연보다 고경도이다. 또한 화학적으로 안정하며, 유리와 열팽창계수가 유사하여 성형 시 형상 정밀도 구현에 유리하다^{1,2)}. 반면 G5 흑연의 경도는 HRC 55 이상 (쇼어 경도: 75)이면서 흑연 고유의 특성인 취성까지 더해지면서 가공을 어렵게 하는 문제가 있다.

G5 흑연소재 가공 시, 취성으로 인해 절삭 면이 국부적으로 파쇄되면서 미세입자가 배출되고, 고경도의 입자들은 가공면의 손상과 절삭공구의 파손에 영향을 준다. 이러한 이유로 기계적 성능이 우수한 다이아몬드 코팅 공구가 G5 흑연소재의 가공에 많이 이용되고 있다. 다이아몬드 코팅 공구는 마이크로 또는 나노 결정 크기의 미세 다이아몬드 입자를 화학기상 증착법 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 을 통해 공구 모체에 증착하여 제작한다. CVD 공법은 절삭공구 코팅 기술에서 가장 먼저 산업적으로

적용된 기술이다. 다이아몬드 코팅은 결정 크기에 따라 마이크로 (MCD), 나노 (NCD) 및 나노-마이크로 다층막 (Multi-layer) 등이 있으며, 종류에 따라 공구 수명과 절삭 성능이 확연히 변화한다^{3,4)}.

흑연소재의 가공에 주로 이용되는 MCD 코팅 공구는 모재와의 접착강도가 우수하여 NCD 코팅 공구보다 사용 수명에 장점이 있다. 그러나 뾰족한 모서리를 갖는 콘 형태의 마이크로 결정 형상 및 절연 반경의 증가로 인해 NCD 코팅 공구에 비해 가공 정밀도가 저하한다. 금형 표면의 거칠기나 형상 정밀도가 그대로 글라스 사출품에 전사되는 성형공정의 특성상, 절삭공구의 정밀가공 성능은 중요한 요소이다. 따라서 고정밀 가공과 코팅 수명 향상을 위해 나노코팅, 다층막 코팅 및 복합 코팅에 대한 연구가 지난 몇 년간 활발히 지속되어 왔다.

다이아몬드 코팅의 내마모성 및 가공 성능 향상에 대한 연구는 필라멘트 가열 화학기상 증착 법 (HF-CVD, Hot Filament CVD)에서와 같이 증착 변수를 직접적으로 제어하여 다이아몬드 결정 크기, 두께, 성장률 등을 조절한 후 각 코팅층의 성능을 비교한 연구가 주를 이루고 있다⁵⁾. 이는 다이아몬드 코팅뿐만 아니라 내마모 코팅 분야의 일반적인 연구 흐름이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 현재 절삭공구 제조사에서 HF-CVD 증착 법을 적용하여 개발 중인 나노다이아몬드 코팅 볼 엔드밀의 정삭 가공 성능을 평가하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 먼저 평면 가공 도중, 절삭 속도, 이송 속도 그리고 이송 방향 절입량 조건을 순차적으로 변경하며 정삭 가공을 진행하였다. 이후, 도출된 최적 절삭조건에 대해 평면, 측면, 경사면 가공을 수행하여 가공 표면 정도를 확인하였다. 동사 상용제품인 MCD 코팅 공구에 대해서도 동일하게 실험을 수행하여 성능을 함께 비교·평가하였다. 본 연구를 통해 개발 공구의 다이아몬드 코팅 성능의 확인 및 정삭 가공에 대한 적정 절삭조건 범위를 제시하였다.

2. 실험 방법

2.1. 가공시스템 및 셋업

본 연구의 실험에 활용된 공작기계와 가공 셋업을 Fig. 1에 도시하였다. MCD 또는 NCD 코팅 볼 엔드밀은 스피indle에 장착되었고, G5 흑연 피삭재는 바이스에 고정하였다. Table 1은 장비 사양을 나타

낸다.

Table 1 Specification of high-speed machine tool

Company	Model	Spindle speed (RPM)	Max. feed rate (mm/min)	Machining accuracy (um)
Roeders	RXP 500	0~42,000	60,000	±0.2



(a) Machine tool (b) Experimental set-up
Fig. 1 High speed machine tool and experimental set-up

Table 2 Mechanical properties of G5 (Mersen)

Bulk density (g/cm ³)	1.84
Grain size (μm)	7
Flexural strength (MPa)	72
Hardness Rockwell "H"	90

Table 3 Information of WC-Co material (GK05A)

Grain size (μm)	Cobalt (%)	Density (g/cm ³)	Hardness (HV ₃₀)
1.0	6.0	14.9±0.1	1740±50

2.2. G5 흑연 및 절삭공구 모재

Graphite Grade Glass 5 (G5, MERSEN, USA)는 글라스 금형에 상용되고 있는 소재이다. 본 연구에서도 동일 소재를 피삭재로 하였고, Table 2에 소재의 주요 기계적 특성을 표기하였다.

텅스텐 카바이드-코발트 (Tungsten Carbide - Cobalt, WC-Co) 소재는 절삭공구의 모재로 가장 많이 활용되고 있다. 코발트 (Cobalt, Co)의 함유량 조절은 공구 모재의 기계적 특성을 제어하는 한 방법으로, 함유량이 낮을수록 기계적 물성 확보에 유리하다. 또한 WC-Co 소재는 다이아몬드의 핵생성이 용이한 소재이기 때문에 다이아몬드 코팅 공구의 모재로 적합하다⁶⁾. Table 3에 본 연구에 활용된

WC-Co 소재의 주요 정보를 표시하였다.

2.3. 가공 형상 및 가공조건

본 연구에서는 공구 제조사에서 개발 중인 NCD 코팅 볼 엔드밀을 사용하였다. 공구 형상은 성능 비교용 MCD 코팅 볼 엔드밀 (2DRB-020-160-660, HAN SONG, South Korea)과 동일한 제원으로 제작되었다. 공구 볼 반경은 R1.5 mm이고 생크 직경은 $\varnothing 6.0$ mm이며, 헬릭스 각 30° 의 절삭 날은 2개이다. S자 형태로 두 날이 교차하며, 날장은 8.0 mm이다.

마이크로 또는 나노 다이아몬드 결정은 각각 $10 \mu\text{m}$ 과 $8 \mu\text{m}$ 의 두께로 공구 모재에 증착되었다. 두 코팅의 특성은 지난 연구⁷⁾에서 확인되었으며, Table 4에 간략히 정리하였다.

2.4. 가공 형상 및 가공조건

가공 형상은 두 가지 실험에 대해 Fig. 2와 같이 다르게 설계되었다. MCD 또는 NCD 공구의 최적 절삭조건 도출 실험은 평면으로, 최적 절삭조건 하에서의 가공 성능 비교 실험은 평면, 측면, 경사면 가공이 포함되도록 설계되었다.

최적 절삭조건 도출 실험의 가공조건은 공구 제조사의 추천 조건으로 수행한 선행 연구⁷⁾를 참조하여 도출하였다. 선행 연구에서 스핀들 속도 11,000 RPM, 이송속도 1,200 mm/min, 이송 방향 절입량 0.1 mm로 정상 가공을 하였을 때, 가공 표면의 거칠기가 Ra 0.7부터 Ra 1.6 μm 까지 비교적 큰 값을 보였다. 따라서 본 연구에서는 나노 코팅 공구로 정상 가공하였을 때의 표면 거칠기가 Ra. 0.5 μm 이하가 되는 가공조건을 도출하기 위해, 기존의 논문을 참조하여⁸⁻¹²⁾ 스핀들 속도를 높이고, 이송 방향과 이송 방향 절입량의 범위를 다양하게 하여 Table 5와 같이 조건을 선정하였다.

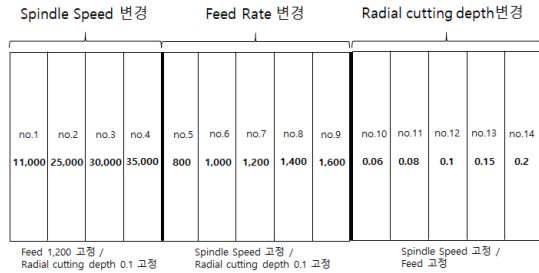
Table 4 Information of MCD or NCD coatings

Grain size and Shape	MCD : 3~5 μm Corn shape NCD : ~ few nm, Beads shape
Adhesion strength	MCD : no delamination, NCD : aver. of critical load 14N
Surface roughness (μm)	MCD : Ra. 0.618, NCD : Ra. 0.622

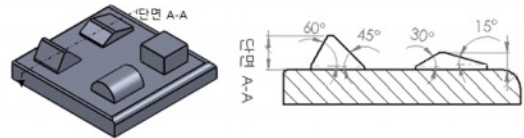
Table 5 Cutting conditions for two different tests

Tests	Spindle speed (RPM)	Feed rate (mm/min)	Depth of cut of feed direction (μm)
Derive the optimal cutting conditions	11,000 / 25,000 / 30,000 / 35,000	800 / 1,000 / 1,200 / 1,400 / 1,600	0.06 / 0.08 / 0.1 / 0.15 / 0.2
Compare the machinability	30,000	1,400	0.1

Derive the optimal cutting conditions	11,000 / 25,000 / 30,000 / 35,000	800 / 1,000 / 1,200 / 1,400 / 1,600	0.06 / 0.08 / 0.1 / 0.15 / 0.2
Compare the machinability	30,000	1,400	0.1



(a) To derive the optimal cutting conditions for the two-type diamond coating tools



(b) To compare the machinability of the two-type diamond coating tools

Fig. 2 Machining shape of each test

2.5. 표면 거칠기 측정

두 코팅 공구로 정상 가공된 표면의 거칠기는 표면 형상 측정기 (HOMMEL -ETAMIC nanoscan855, JENOPTIK)를 활용하여 측정되었다. 반경(R) 2.0 μm 의 스타일러스 팁을 가공 표면에 접촉한 후, 0.3 mm/s의 스캔 속도로 총 12 mm 길이를 이동하면서 거칠기 데이터를 수집하였다. 표면 거칠기는 측정 구간 중 4.8 mm의 길이를 중심선 평균 산출법 (Ra)으로 평가하여 획득하였다. 이때의 컷오프 필터 (λ)는 0.8 mm의 기준 길이와 동일하게 설정하였고, 장비의 분해능은 0.6 nm이다.

2.6. 가공 순서

본 연구의 가공 실험은 두 가지 경우에 대해 순차적으로 진행되었다. MCD와 NCD 코팅 공구의 최적 절삭조건을 도출하기 위해 평면 가공 실험을 선행한 후, 도출된 값으로 가공 형상을 다양하게 하여 각 공구의 절삭 성능을 평가하였다. 최적 절삭조건 도출 실험 순서는 먼저 스핀들 속도에 대한 최적화를 진행한 후, 이송속도와 이송 방향 절입량의 순으로 최적화를 진행하였다. 평면, 측면, 경사면에 대한

가공 성능 실험은 절삭조건 조합 중 가장 적합한 표면 거칠기를 갖는 조합으로 가공을 수행하고 MCD와 NCD 코팅 공구의 가공성을 비교·평가하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1. 가공조건 최적화 실험

MCD 코팅 표준 공구와 NCD 코팅 개발 공구의 가공 성능을 최적화하기 위해 Fig. 3과 같이 가공조건을 변화하며 정삭 가공을 수행한 후, 가공 표면 거칠기를 측정하였다.

Fig. 4(a)에서 절삭 속도 (V_c , m/min) 조건의 경우, 스피들 속도 11,000 RPM ($V_c = 104$ m/min) 일 때, MCD와 NCD 코팅 공구로 정삭 가공한 표면의 거칠기는 각각 $Ra. 0.73 \mu\text{m}$ 과 $Ra. 0.78 \mu\text{m}$ 로 가장 큰 값을 보였다. 절삭속도를 높임으로써 최대 70% 이상 가공 성능이 향상되었으며, 30,000 RPM ($V_c = 300$ m/min) 이상의 절삭속도에서는 가공 성능이 정체되거나 감소하였다.

일반적으로 절삭 속도가 증가하면 가공 표면의 품위는 향상되며, 특히 고속 절삭 영역에서는 절삭력의 감소로 공구의 휨 (Deflection)이 작아져 정밀 가공이 가능하게 된다¹³⁾. 본 실험의 절삭 속도는 일반 가공 영역에 해당되지만, 104 m/min의 절삭 속도와 비교하여 최소 2배 이상 가공 속도가 증가하였기 때문에 가공 표면 품위 또한 2배 이상 향상된 것으로 보인다.

전 구간에서 NCD 코팅 공구로 가공한 표면의 거칠기가 MCD 코팅 공구보다 낮았으며, 최대 33% 정도 (283 m/min의 절삭속도 조건에서) 향상되었다.



Fig. 3 Machined surfaces according to the cutting

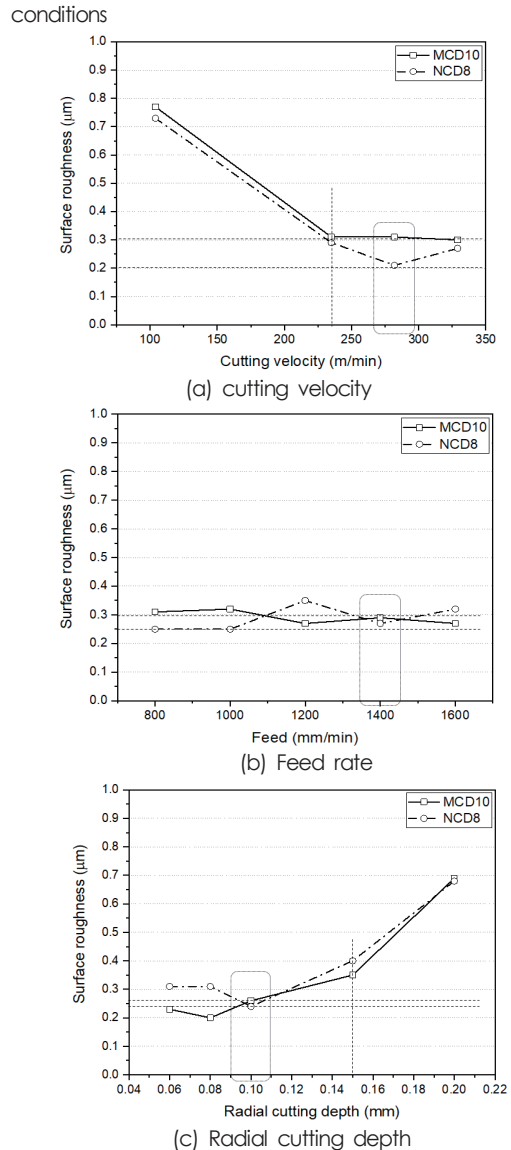


Fig. 4 Surface roughness according to the cutting conditions

NCD 코팅 공구의 경우, 나노 크기의 미세한 다이아몬드 결정이 코팅층을 이루고 있다. 따라서 MCD 공구에 비해 절삭 날의 치수 정밀도 구현에 유리하여 정밀 가공에 적합하다. 그러나 MCD 공구에 비해 코팅층의 박리가 빠르므로 공구 마모가 빠르게 발생하는 임계 절삭 속도 이상에서는 가공 표면 거칠기가 다시 증가할 수 있다. 본 연구의 실험 조건에서는 NCD 코팅 공구의 경우, 약 283 m/min의 절삭 속도가 임계점으로 보인다. MCD 코팅 공구는

NCD 코팅보다 박리가 지연되므로, 본 실험 조건에서는 임계점이 확인되지 않았다.

이송속도 (Feed, mm/min) 조건에서는 절삭속도를 283 m/min으로 고정하였다. 이송속도 변화에 대한 두 코팅 공구의 가공 표면 거칠기 값의 범위는 Ra. 0.25 μm 에서 Ra. 0.35 μm 사이로 절삭 속도 조건에서의 변화와 비교하면 급격한 증감을 보이지 않았다. 또한 전 이송속도 구간에서 서로 반복적으로 교차하며 변화하는 경향을 보였고, 1,400 mm/min의 이송속도에서 각각 Ra. 0.29 μm 와 Ra. 0.27 μm 로 유사한 값을 보였다. 또한 낮은 이송속도에서는 MCD 코팅 공구의 가공 표면 거칠기가 NCD 코팅보다 20% 정도 큰 값을 보였으나, 이송속도가 증가하면서 1,600 mm/min에서는 반대의 경향을 보였다. 이는 이송속도의 증가는 소재 제거율 및 공구 마모를 동시에 증가시키므로 코팅의 박리가 더 늦게 발생하는 MCD 코팅 공구가 가공 표면 조도에 유리한 것으로 보인다. 낮은 이송속도 구간에서는 코팅의 박리보다 다이아몬드 입자에 의한 가공 표면의 손상이 영향을 주어 미세한 결정 입자를 갖는 NCD 코팅 공구가 가공 표면 거칠기의 확보에 유리한 것으로 생각된다.

이송 방향 절입량 (Radial cutting depth, mm) 조건의 경우, 절삭속도와 이송속도를 각각 283 m/min과 1,400 mm/min으로 고정하였다. 이송 방향 절입량에 대한 두 코팅 공구의 가공 표면 거칠기는 0.1 mm의 절입량에서 각각 Ra. 0.26 μm 와 Ra. 0.24 μm 로 유사한 값을 보였다. 0.1 mm의 절입량 이후부터 표면 거칠기 값이 급격하게 상승하였으며, 0.2 mm의 절입량에서 Ra. 0.68 μm 정도의 값을 보였다. 또한 0.1 mm 미만의 작은 절입량에서는 MCD 코팅 공구와 NCD 코팅 공구의 가공 표면 거칠기 값이 최대 50%의 차이를 보이다 절입량이 증가하면서 그 차이가 줄어들었다. 이는 이송속도 조건에서처럼, 이송 방향 절입량이 작을수록 가공 시간과 절삭 길이가 증가하여 공구의 마모가 더 발생하므로, MCD 코팅 공구가 NCD 코팅 공구보다 낮은 가공 표면 거칠기를 보이는 것으로 생각된다. 반면, 절입량의 증가는 절삭 공구와 가공 표면 사이에서 연삭 입자로 작용하는 경질의 다이아몬드 결정 입자의 영향을 증가시키므로 미세 입자를 갖는 NCD 코팅 공구의 가공 표면 거칠기가 MCD 코팅 공구와 근사해진 것으로 생각된다.

이송속도의 증가는 절삭 날 당 소재의 제거량을

증가시켜 가공시간을 단축하는, 즉 가공 효율을 증대하는데 목적이 있다. 반면 이송 방향 절입량의 경우, 표면의 거칠기에 반영되는 커슥 (cusp)을 생성하므로, 절입량을 감소시킴으로써 고품위 가공을 실현하는데 목적이 있다. 이와 같은 관점에서 가공 표면 거칠기의 변화 폭이 이송속도 조건 범위에서는 작고, 이송 방향 절입량 조건에서는 큰 경향이 설명될 수 있다. 실제로 이송속도 조건에서는 가공 표면 거칠기가 최대 40% 정도 증가하였으나, 이송 방향 절입량의 경우 그 값이 증가할수록 최대 2.8배 이상의 가공 표면 거칠기의 증가를 보였다. 결과적으로, 두 코팅 공구의 가공 성능은 이송속도의 영향이 가장 적었고, 낮은 절삭속도와 큰 절입량에서 급격한 성능 저하를 보였다. 또한 가공 표면 거칠기에 대한 코팅의 마모와 결정 크기의 영향이 이송속도와 이송 방향 절입량의 조건에서 유사한 경향을 보임을 확인하였다.

3.2. MCD 및 NCD 코팅 공구의 절삭 성능 실험

가공 형상에 대한 MCD 코팅 표준 공구와 NCD 코팅 개발 공구의 가공 성능을 평가하기 위해 정육면체와 경사면에 대한 가공 실험을 수행하였다. Fig. 5에 두 코팅 공구로 가공한 샘플 이미지를 도시하였다. Fig. 6에 가공 표면 거칠기 측정 결과를 도시하고, 그 값을 표기하였다.

정육면체 가공은 평면과 측면 가공에 대한 절삭 성능 평가이다. 경사면 가공은 절삭 날과 가공 표면의 접촉 각도에 대한 볼 엔드밀 공구의 절삭 성능 평가이다. 일반적으로 볼 엔드밀 공구는 고속 가공 시 피삭재와 절삭 날과의 접촉각이 15° ~ 20° 사이일 때, 절삭이 최적화되는 것으로 알려져 있다¹⁴⁾. Kol14)에 따르면, 가공 경사각이 증가할수록 절삭 단면적이 감소되면서 절삭력이 감소하여 가공 효율이 증대된다. 반면 공구의 마모에 영향을 주는 절삭 길



(a) MCD tool

(b) NCD tool

Fig. 5 Machined surface for different machining shape by two type of diamond coated tools

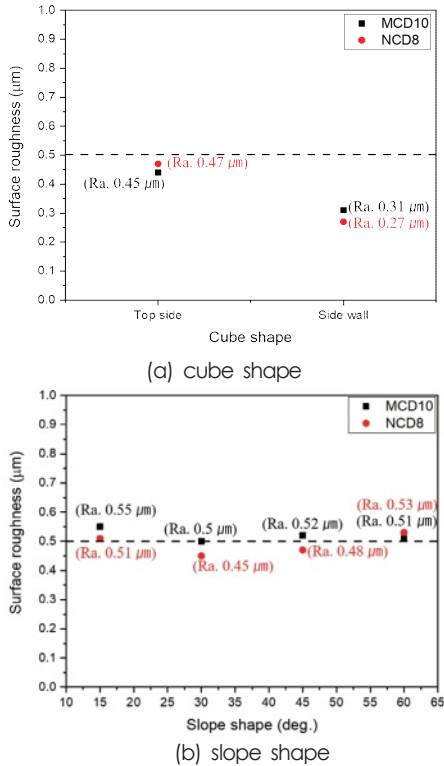


Fig. 6 Surface roughness for different shape machining with two type of diamond coated tools

이 (칩의 길이)는 증가하기 때문에, 가공 경사각이 작을수록 절삭에 유리하다. 따라서 최적의 경사 각도는 절삭력과 공구 마모의 측면에서 모두 고려되어야 하며, 두 개의 결과에서 최적의 절삭가공 효율이 발생하는 임계각도가 도출된다고 보고하였다. 본 연구의 경우 일반 절삭 속도 범위의 실험에 해당하며, 두 코팅 공구 모두, 15°와 30°의 경사각도 범위에서 표면 거칠기가 향상되었고, 임계 경사각도는 30° 임을 확인하였다. 더하여 두 코팅 공구 모두 평면과 측면 정삭 가공에서는 가공 표면 거칠기가 Ra. 0.5 μm 이하를 만족하였다. 경사면의 경우, 경사각에 따라 두 공구 모두 Ra. 0.5 μm 에 근접하거나 그 이하를 만족하였다. Ra. 0.5 μm 이하의 정삭 가공 표면 거칠기 범위는 Ra. 0.25 ~ 0.48 μm 로 확인되었다.

4. 결론

본 연구는 공구 제조사에서 개발 중인 나노 다이

아몬드 (NCD) 코팅 볼 엔드밀의 최적 절삭조건과 절삭 성능의 평가를 위해 수행되었다. 결론은 다음과 같다.

(1) 가공 표면 거칠기는 MCD 코팅 공구와 NCD 코팅 공구 모두, 낮은 절삭 속도와 큰 이송 방향 절입량에서 급격히 증가되었다.

(2) 또한, 가공 표면 거칠기 변화에 대해 이송속도의 영향이 가장 적었다.

(3) NCD 코팅 공구로 가공한 표면의 거칠기가 절삭 속도 전 구간에서 MCD 코팅 공구보다 낮았고, 283 m/min의 절삭 속도에서 최대 33% 정도의 차이를 보였다.

(3) NCD 코팅 공구의 임계 절삭 속도는 283 m/min로 확인되었다.

(4) 수십 나노 크기의 미세 결정이 소결된 NCD 코팅 공구는 정밀 절삭에 유리한 반면, 코팅 박리가 빠르기 때문에 임계 절삭 속도가 MCD 코팅 공구보다 낮을 수 있다.

(4) 두 코팅 공구의 임계 가공 경사각은 30°로 확인되었다.

본 연구를 통해, 나노 또는 마이크로 다이아몬드 코팅 볼 엔드밀의 최적 절삭 조건 및 임계 가공 경사각을 제시하였다. 이는 공구 제조사뿐만 아니라 다이아몬드 코팅 공구를 활용하는 유저들에게 참조 데이터로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 소재부품기술개발사업 (20017218)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Ashby, M.F., "Materials Selection in Mechanical Design", 3rd edition, Elsevier Butterworth - Heinemann, Oxford, UK, 2005
- 2) Yang, Y.K., Chuang, M.T. and Lin, S.S., "Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in endmilling process via design of experiments methods", J. Mater. Process. Technol. Vol. 209, pp. 4395 - 4400, 2009.
- 3) Singla, A., Singh, N.K., Singh, Y. and Jangir, D.K., "Micro and nano-crystalline diamond coatings of co-cemented tungsten carbide tools with their

characterization”, J. Bio- Tribo-Corros. Vol. 7, pp. 1 - 11, 2021.

4) Bian, R., Ferraris, E., Ynag, Y. and Qian, J., “Experimental investigation on ductile mode micro-milling of ZrO₂ ceramics with diamond-coated end mills”, Micromachines, Vol. 9, 127, 2018.

5) Hodroj, A., Teulé-Gay, Lionel., Lahaye, Michel., et al., “Nanocrystalline diamond coatings: Effects of time modulation bias enhanced HFCVD parameters”, AIMS Materials Science, Vol. 5:3 pp. 519-532, 2018.

6) Wang, H., Yang, J. and Sun, F., “Cutting performances of MCD, SMCD, NCD and MCD/NCD coated tools in high-speed milling of hot bending graphite molds”, J. Mater. Process. Technol., Vol. 276, 116401, 2020.

7) Lee, H., Kim, J., Park, J. and Kim, J., “Analysis of Tool Wear and Roughness of Graphite Surfaces Machined Using MCD and NCD-Coated Ball Endmills”, Micromachines, Vol. 13, 766, 2022

8) Kim, B.C., Yoon, H.S. and Cho, M.W., “Fabrication and Evaluation of Machinability of Diamond Particle Electroplating Tool for Cover-Glass Edge Machining”, J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol. 11:1 pp.1-6, 2017.

9) Ha, S.J., Park, J.Y., Kim, G.H. and Yoon, G.S., “Micro cutting process technology for micro molds parts”, J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol. 13:1 pp.5-12, 2019.

10) Jung, S.T., Song, K.H., Choi, Y.J. and Baek, S.Y., “Research on ultra-precision fine-pattern machining through single crystal diamond tool fabrication technology”, J. Korea Society of Die

& Mold Engineering, Vol. 14:3 pp.63-70, 2020.

11) Seo, K.H., Son, M.K., Yoon, G.S. and Ko, Y.B., “A study on machining conditions on surface roughness in EPS End-milling”, J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol. 11:2 pp.46-50, 2017.

12) Jung, S.T., Wi, E.C., Kim, H.J., Song, K.H. and Baek, S.Y., “Reliability verification of cutting force experiment by the 3D-FEM analysis from reverse engineering design of milling tool”, J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol. 13:2 pp.54-59, 2019.

13) Yang, M. Y., 2001, Machining -Theory and Reality, first Edition, Cheongmoon,, Paju, pp. 41-43.

14) Ko, T. J., Jeong, H. and Kim, H. S., “Selection of Machining Inclination Angle of Tool Considering Tool Wear in High Speed Ball End Milling”, J. Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15:9 pp.135-144, 1998.

저자소개

김종수(Jong-su Kim)

[정회원]



- 2012년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2012년 3월~2019년 1월 : 삼성전자 반도체연구소 MASK개발팀, 책임연구원
- 2019년 1월~현재: 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소, 금형성형연구부문, 수석연구원

< 관심분야 >

초정밀가공, 금형, 사출공정, 반도체 노광공정