



고경도 소재 가공을 위한 다이아몬드 전착 드릴의 형상 최적화에 관한 연구

최상준^a, 김재선^a, 윤재웅^{b*}

Design Optimization of Diamond Electro-Deposited Drill for High-Hardness Workpiece Machining

Sang-Joon Choi^a, Jae-Seon Kim^a, Jae-Woong Youn^{b*}^a Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Daegu University^b Division of Mechanical Engineering, Daegu University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	24	March	2020
Revised	10	April	2020
Accepted	14	April	2020

Keywords:

Electro-deposited drill
Drill shape
FEM analysis
High-Hardness workpiece
Chip flow

ABSTRACT

Recently, there has been an increase in the demand for the machining of high-hardness materials using diamond electro-deposition tools. However, a systematic analysis of these tools in terms of machinability has not been performed yet. In this study, a tool design optimization is performed to improve the machinability of diamond electro-deposition drills in drilling SiC ceramic materials. Each drill is analyzed using FEM analysis and the results are compared with the corresponding experimental results. Additionally, the particle drop rate and surface roughness of the machined surface are analyzed for each drill. Consequently, we discover that the most important aspect in drilling using a diamond electro-deposition drill is the proper discharge of the machined chip. Furthermore, we determine the optimal drill shape for the improvement of machinability.

1. 서론

현재 국내의 가공 산업은 부품의 성능과 내구성을 향상시키기 위하여 고경도 소재로의 전환이 활발하게 이루어지고 있다. 고경도 소재의 경우 경도가 높으며 내열성을 갖추어 고온에서 사용되는 부품에 많이 이용되고 있으며, 일부 전기효율이 높은 세라믹 소재들은 배터리나 반도체, 전기자동차 등의 산업에서 그 활용도가 증가하고 있다. 그 중, 고경도 세라믹인 탄화규소(SiC) 소재는 고온에서도 안정성이 보장되기 때문에 전기자동차의 모터 및 인버터 등 핵심 부품에 많이 활용되고 있다. 또한, 최근에는 웨이퍼 서셉터(wafer susceptor) 등 다양한 반도체 산업에도 활용도가 높아지고 있으며, 이 소재의 가공 수요도 함께 증가하고 있다.

그러나 고경도 소재의 가공 시, 높은 경도와 내마모성으로 인하여 큰 가공 저항과 많은 열을 동반하는 등 다양한 문제들이 발생한다. 이러한 고경도의 소재를 가공하기 위해서 사용되는 공구로는 PCD (Polycrystalline Diamond) 공구나 다이아몬드 전착 드릴이 사용된다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 다이아몬드 전착 드릴은 샹크 바디(shank body) 표면에 전기도금을 통하여 니켈 금속으로 다이아몬드 입자(diamond particle)를 고정된 공구로서 다이아몬드 입자로 인한 예리한 인선과 입자의 집중도가 높아 연삭 가공 효율이 매우 높은 것으로 알려져 있다^[1,2].

다이아몬드 공구의 필요성이 증가함에 따라 고경도 소재 가공 시 다이아몬드 공구의 손상과 수명 등에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다^[3,4]. 수명이 짧은 다이아몬드 공구의 단점을 보완하기

* Corresponding author. Tel.: +82-53-850-6684

E-mail address: jwyoun@daegu.ac.kr (Jae-Woong Youn).

위해 가공 조건에 따른 공구의 마모를 분석하는 연구가 진행된 바 있다. 또한, 가공 시 발생하는 열에 의해 다이아몬드 입자의 결합체인 니켈이 연화되어 다이아몬드 입자의 탈락이 가속화된다는 연구 결과가 있었다^{5,6,7}. 그러나 대부분의 연구는 다이아몬드 전착 공구를 사용한 특정 공정을 실험적으로 분석하는 연구에 국한되어 다이아몬드 전착 공구의 가공 특성 분석 및 공구 설계의 최적화 등에는 제한적인 결과들이라고 볼 수 있다⁸. 한편, 본 논문의 선행 연구에서는 고경도 SiC 소재 가공 시 다이아몬드 전착 드릴의 가공성을 분석하였으며, 다이아몬드 전착 드릴의 가공 공정에서 가장 중요한 것은 칩 배출이며 이것이 공구의 수명과 매우 밀접한 연관성을 가진다는 것을 확인하였다⁹. 다이아몬드 전착 공구를 이용해 드릴 가공에서 칩이 쉽게 배출될 수 있는 구조로 공구를 제작하였을 때 가공 저항이 낮아지며 공구의 수명이 향상되는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 고경도 세라믹 소재의 가공을 위한 다이아몬드 전착 드릴의 가공성과 공구의 수명향상을 위해서 더욱 다양한 관점에서 칩 배출의 중요성을 분석하고, 그에 따른 최적의 공구 형상을 제시하고자 한다. 최적의 공구 설계를 위하여 FEM 해석 소프트웨어와 실험을 통한 분석을 수행하고, 그 결과의 유사성에 대해 비교 분석하고자 한다. 공구 형상에 따른 가공성을 검증하기 위하여 칩 배출의 유효성 관점에서 다양한 다이아몬드 전착 드릴을 설계 및 제작하여 실험을 진행하였다. 이와 같은 연구는 다양한 소재 및 공정의 변화에 따른 다이아몬드 전착 공구의 형상 설계 최적화 및 고경도 소재의 가공성을 향상시키는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 다이아몬드 전착 드릴 공정의 FEM 해석

2.1 FEM 해석 모델

본 연구에서는 고경도 SiC 소재의 가공에서 다이아몬드 전착 드릴의 가공성 분석을 위해 절삭 전용 FEM 해석 소프트웨어인 AdvantEdge™를 이용하고자 한다. AdvantEdge™ 소프트웨어는 3차원 절삭 해석에 있어 변형률, 변형률 속도 및 온도 등을 반영하여 유동응력(flow stress)을 결정한다. 또한, 라그랑지(lagrange) 방식의 FEM 해석으로 6개의 절점을 갖는 삼각형 요소를 사용하며, Marusich-Ortiz의 구성방정식 및 쿨롬(coulomb) 마찰 조건을 사용하는 소프트웨어이다¹⁰.

본 연구의 대상인 다이아몬드 전착 공구는 무수한 다이아몬드 입자로 가공이 이루어지는 연삭 공구이다. 절삭가공용 FEM 해석 소프트웨어를 활용하기 위해서 본 연구에서는 다이아몬드 전착 공구를 작은 날이 많은 절삭공구로 단순화시켜 해석을 진행하고자 한다. 연삭 공정과 절삭공정 사이에는 칩의 배출 양상이나 가공

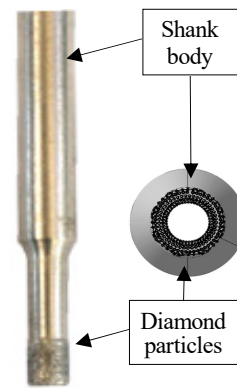


Fig. 1 General shape of diamond electro-deposited drill

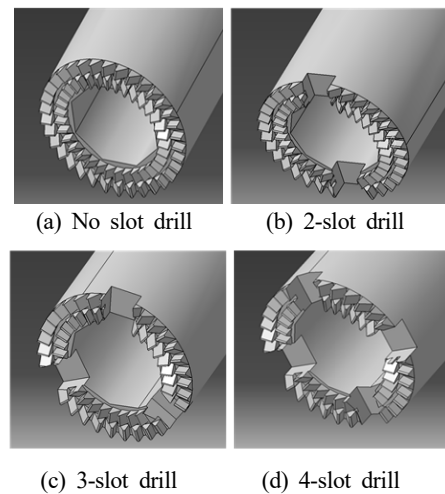
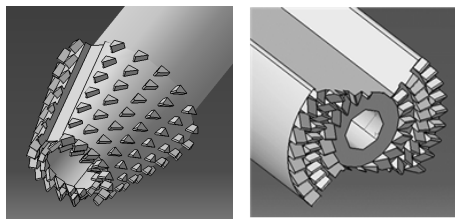


Fig. 2 Diamond drill modeling for different number of drill slots

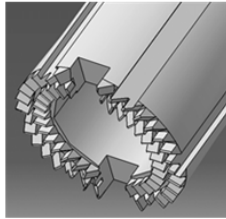
저항, 열 발생 측면에서 많은 차이가 있다. 이러한 공정의 차이에도 불구하고, 가공 토크 등 해석의 정확성보다는 가공성 향상을 위한 공구 설계의 관점에서 해석 도구를 활용하였다. 본 연구에서는 다양한 공구별 가공 토크 해석의 결과를 실험과 비교 분석함으로써 절삭 FEM 소프트웨어를 활용한 드릴 가공공정 해석의 유효성을 검증하고, 최적의 공구 형상을 설계하는 데 활용하고자 한다.

2.2 다이아몬드 전착 드릴 구조

해석에 사용될 공구는 다이아몬드 전착 공구의 다이아몬드 입자를 유한한 개수를 가진 작은 날(edge)로 표현하였으며, 절삭날의 인선은 SEM 촬영을 통해 다이아몬드 입자를 확인하여 분포가 가장 많은 인선을 기준으로 형상화하였다. 또한, 다이아몬드 전착 공구에서 칩 배출을 원활하게 하는 것이 가공성과 공구 수명에 큰 영향을 준다는 선행 연구 결과를 이용하여, Fig. 2와 같이 공구 끝단에서 칩 배출을 원활하게 하기 위한 슬롯(slot)의 수를 변화시키며 공구의 성능을 분석하고자 한다. 한편, Fig. 3과 같이 칩 배출을 위한 슬롯 개수의 변화 이외에도 칩 배출을 원활하게 하기 위한



(a) Tapered drill (b) Gundrill type drill



(c) Chip-space drill

Fig. 3 Diamond drill shape modeling for chip evacuation

샙크 바디 자체의 형상도 변화시켜 3개의 추가적인 공구로 모델링 하였다. Fig. 3(a)와 같이 샙크 바디 형상을 바꾼 다이아몬드 드릴의 경우 공구가 진입하면서 피삭재와의 접촉면적을 점차 늘려가는 형태와 (b)와 같이 깊은 홈 가공을 위한 건드릴(gun-drill) 형태, 그리고 2개의 슬롯에 추가로 칩이 외부로 배출될 수 있도록 4개의 칩 배출 공간을 둔 칩 스페이스(chip-space) 드릴을 모델링하여 절삭 FEM을 활용한 연삭 해석의 유효성을 검증하고 칩 배출의 영향을 분석하고자 한다.

2.3 다이아몬드 전착 드릴의 FEM 해석 조건

해석 소프트웨어 AdvantEdge™는 피삭재의 거동을 존슨-쿡 모델(Johnson-cook material model)을 통해 해석한다. 존슨-쿡 모델의 경우 강도, 경도뿐만 아니라 변형경화지수, 변형강화계수, 열연화 계수 등 다양한 물성 정보가 필요하다. 그러나 AdvantEdge™ 소프트웨어에는 본 연구의 가공 소재인 탄화규소에 대한 물성 정보가 포함되어 있지 않다. FEM 해석의 정확도를 높이기 위해서는 해석에 필요한 탄화규소의 물성 정보를 알고 있어야 하지만 이는 본 연구의 범위에 포함되어 있지 않다. 본 연구의 목표는 다이아몬드 전착 공구를 이용한 고경도 소재의 드릴 가공에서, 발생된 칩의 배출이 절삭성에 가장 중요하다는 관점에서 최적의 공구를 설계하고자 하는 것이다. 따라서 소재의 물성 정보를 이용하여 FEM 해석을 수행하고, 드릴링 토크 등 정량적 결과의 정확성보다는 다양한 공구 형상에 따른 가공 토크의 상대 비교에 관점을 두고자 한다. 따라서 본 연구에서는 AdvantEdge™에서 제공하고 있는 소재 중 Al7050 소재를 사용하여 절삭 해석을 진행하였으며, 해석된 가공 토크의 절대값 보다는 공구별 가공 토크값을 상대 비교 하고, 이를 실험 결과와 비교하고자 한다.

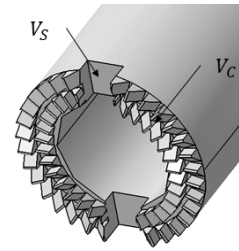


Fig. 4 Chip evacuation space of diamond drill

Table 1 Chip evacuation space that can be filled with chip

Drill type	Cutting edge space volume (V_c , mm^3)	Slot space volume (V_s , mm^3)	Total space volume (V_c+V_s , mm^3)	Theoretical No. of drill rotation for feedrate = 0.5 mm/rev
No slot	53.24	0	53.24	3.5 rev.
2-slot	34.04	46.21	80.25	5.2 rev.
3-slot	28.1	69.04	97.14	6.3 rev.
4-slot	23.12	92.17	115.29	7.5 rev.

Table 2 Cutting conditions for FEM analysis

Number of drill revolutions for FEM analysis	- No slot/ 2-slot : 6 revolutions - 3-slot : 8 revolutions - The others : 9 revolutions
Tool diameter	4 mm
Tool material	Diamond
Workpiece material	Al 7050
Feedrate	0.5 mm/rev (50 mm/min)
RPM	100 rpm

일반 드릴 가공에서 발생된 칩은 드릴의 홈을 따라서 공작물 밖으로 배출된다. 그러나 다이아몬드 전착 공구를 이용한 드릴 가공에서 발생된 칩은 외부로 빠져나가지 못하고, Fig. 4에서와 같이 공구의 날 사이 빈 공간(V_c)과 슬롯 내부(V_s)에 쌓이게 된다. 가공이 진행되어 칩이 이 두 공간에 가득 차게 되는 경우, 칩 배출이 어려워져 가공 토크는 갑자기 증가하게 되고 드릴 가공은 더 이상 진행되기 어려워질 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Table 1에서와 같이 제안된 공구별로 V_s 와 V_c 에 해당하는 체적을 계산하고, 드릴 가공된 칩이 두 체적을 가득 채워 가공이 불가능해질 때까지의 공구 회전수를 계산하였다. FEM 해석은 드릴링 가공의 시작에서부터 가공이 불가능해질 것으로 예측된 회전수까지의 전공정에 대해 수행하였다. Table 2는 FEM 해석이 수행된 공구별 회전수와 가공 조건을 보여주고 있다. 절삭공정의 FEM 해석은 많은 시간이 소요된다. 본 연구에서는 FEM 해석이 수행되는 드릴의 총 회전수를 줄이기 위해 다이아몬드 전착 드릴의 이송속도를 실제 이송속도보다 좀 더 높게 설정하여 의도적으로 가공이 빨리 진

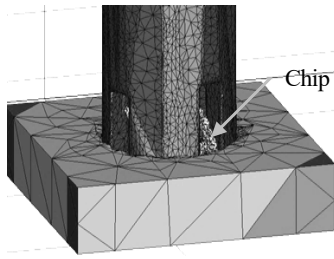
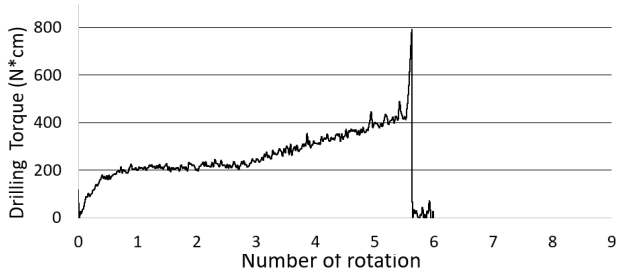
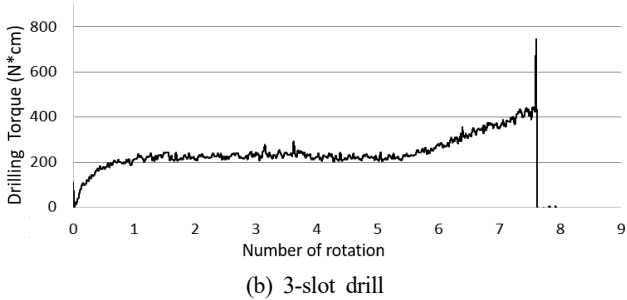


Fig. 5 FEM analysis for drilling



(a) 2-slot drill



(b) 3-slot drill

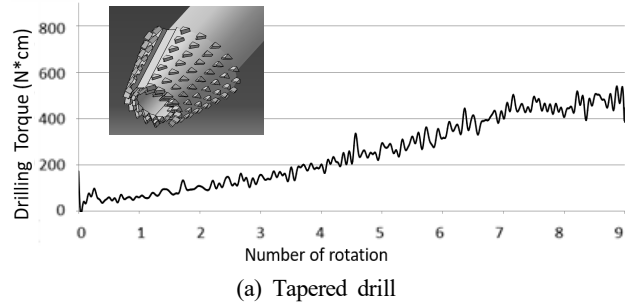
Fig. 6 FEM analysis results for different number of slots

행될 수 있도록 하였다.

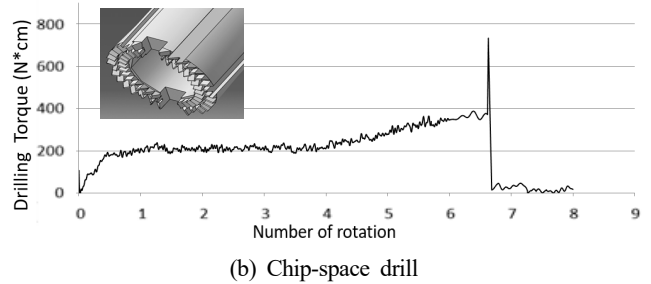
2.4 다이아몬드 전착 드릴의 FEM 해석 결과

AdvantEdge™를 통한 다이아몬드 전착 드릴의 가공 시뮬레이션 분석 결과를 Fig. 5에서 보여주고 있다. 4-슬롯 드릴을 이용하여 가공할 때, FEM 해석에서도 칩의 생성이 잘 묘사되고 있으며, 생성된 칩이 가공에 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 FEM 해석에서 계산한 가공 토크 선도를 보여주고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 가공이 진행되면서 드릴의 빈 공간이 칩으로 가득 채워질 경우, 가공 토크가 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 가공 토크가 갑자기 증가하는 드릴의 회전수가, 채워진 칩으로 인해 공구의 진행이 불가능해지는 이론적 회전수와 매우 유사한 값을 보여주고 있음을 알 수 있다.

샌크 바디의 형상을 변형시킨 공구의 경우, Fig. 7(a)의 테이퍼 드릴은 칩 배출이 제한되지 않는 형태로 설계되었기 때문에 해석 시 공구의 진입이 멈추는 현상은 발생하지 않는다. 그러나, 드릴이 이송될수록 가공 면적이 커지는 형상이므로 이송에 따라 가공 토



(a) Tapered drill



(b) Chip-space drill

Fig. 7 FEM analysis results for different drill shapes

Table 3 Drilling torque and theoretical number of rotations in FEM

	Drilling torque (N-cm)	Theoretical No. of rotations until drilling stops
No slot	2,980	4.2 rev
2-slot	2,413	5.6 rev
3-slot	2,012	7.8 rev
4-slot	2,298	8.1 rev
Tapered drill	2,243	
Gun drill type	2,461	
Chip-space drill	2,124	

크가 계속 증가하는 것으로 나타나고 있다. 한편, Fig. 7(b)의 칩 스페이스 드릴은 2-슬롯 공구에 비해 상대적으로 칩 배출 체적이 커서 비교적 가공 토크가 낮게 나오는 것을 볼 수 있으며, 7회전 가까이 회전했을 때 가공 토크가 갑자기 증가하는 것으로 나타나고 있어 2-슬롯 공구보다는 가공성이 좋은 것으로 나타나고 있다.

Table 3은 FEM 해석의 결과로서 평균 가공 토크와 토크가 급격히 증가할 때까지의 드릴 회전수를 보여주고 있다. 여기서 가공 토크값은 가공이 시작될 때의 과도기를 제외한 구간에서 토크값의 평균제곱근(RMS)을 계산한 결과이다. 2-슬롯 공구의 경우, Table 1에서 계산된 이론 회전수인 5.2회전을 조금 지난 5.6회전에서 공구의 진입이 멈췄으며, 다른 공구 역시 이론 회전수를 조금 지나 공구의 진입이 멈추는 유사한 양상을 보여주고 있다. 가공이 멈춰지는 회전수에서 FEM의 계산이 이론적 회전수보다 약간 크게 나타나는 이유는 FEM 해석에서 칩 일부가 슬롯 외부로 배출되거나

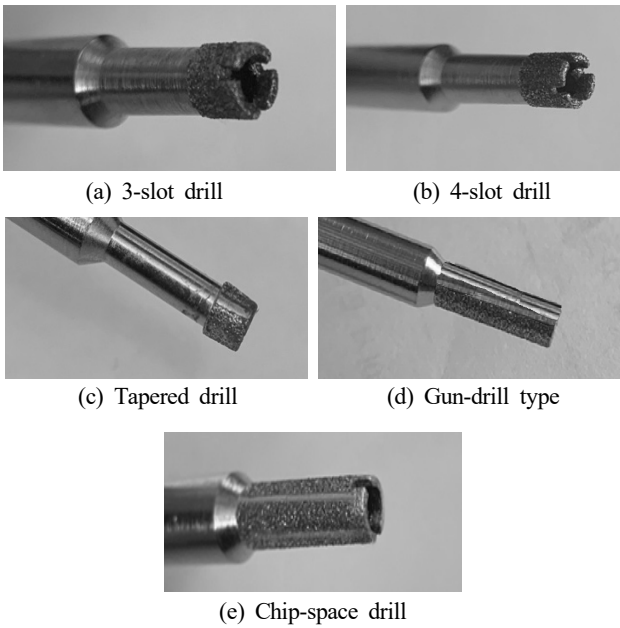


Fig. 8 Manufactured diamond drills

버(burr)의 발생으로 인하여 슬롯이 모두 채워지는 시점이 약간 늦어지는 것으로 판단된다.

Table 3에서 볼 수 있듯이, 드릴의 칩 배출 공간인 슬롯의 수가 증가함에 따라 칩 배출이 원활해져 가공 토크가 감소하나, 슬롯이 3개에서 4개로 늘어날 때는 오히려 토크값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 동일한 크기의 드릴에서 슬롯의 개수가 너무 많아지면 상대적으로 가공에 참여하는 날의 개수가 적어져 오히려 가공 토크값이 증가하는 것으로 판단된다. 형상을 바꾼 공구의 경우, 칩 스페이스 드릴이 3-슬롯 드릴과 유사한 값으로 가장 낮은 토크값을 보이고 있다.

3. 다이아몬드 전착 드릴의 가공실험 및 결과 분석

3.1 가공 토크 측정 실험

AdvantEdge™ 해석 결과와의 비교를 위해 슬롯의 수가 다른 다이아몬드 드릴과 샹크 바디의 형상이 다른 다이아몬드 드릴을 Fig. 8과 같이 제작하였다. 다이아몬드 전착 드릴의 가공 토크 측정을 위하여 Fig. 9와 같이 실험 장치를 준비하였다. 가공실험은 화천 Sirius-650 머시닝센터를 사용하였으며 Kistler 4축 공구동력계(Kistler9272)를 이용하여 토크 신호를 측정하고, 앰프(Kistler5019B)에서 신호를 증폭시켜 A/D 컨버터(NI DAZ9171) 및 Labview 소프트웨어를 통하여 신호를 분석하였다.

드릴 가공실험은 SiC소재를 사용하였으며 상세한 실험 조건은 Table 4와 같다. 실험은 0.6 mm/min의 이송속도로 진행하였다. 해석에서 사용한 이송속도 조건은 50 mm/min이었으며, 이는 칩

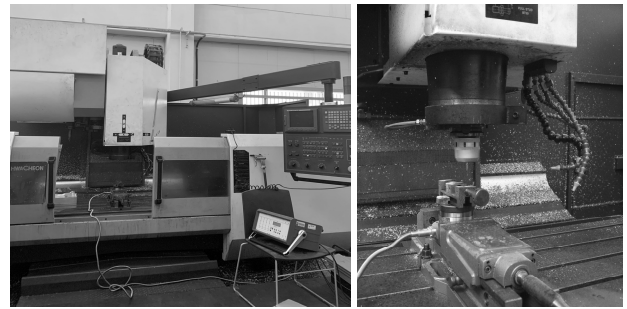


Fig. 9 Experimental set-up

Table 4 Experimental conditions

Workpiece material	CVD SiC
Feedrate	0.6 mm/min
rpm	1,200 rpm
Data sampling time	3,000 Hz
Low-pass filtering	300 Hz
Number of data	32,768

배출의 어려움으로 가공이 중지되는 시간을 빨리함으로써 가공이 중지되는 시점까지 전체 과정을 해석하기 위함이었다. 그러나, 실제 가공에서는 고경도 소재인 만큼 이송속도를 매우 느리게 하여 가공을 수행하였다.

피삭재의 변경 및 큰 폭의 이송속도 감소에 따라 가공 토크값은 실제의 가공 결과와 해석의 결과에 큰 차이가 있을 것이라 판단된다. 앞서서도 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 다이아몬드 전착 드릴 공정에서 FEM 해석을 통해 최적의 공구 형상을 설계하는 것이 목적이므로, 해석으로 계산된 가공 토크값의 절대적인 정확도 보다는 그 경향의 상대적 유사성을 분석하고자 한다. 따라서 다양한 공구별 가공 토크를 상대 비교하기 위하여 해석값과 실험값을 비슷한 수준으로 조정해주는 변환식을 식 (1)과 같이 설정하였다.

$$(\text{Torque})_{FEM-conversion} = k \cdot a_c \cdot b_c \cdot (\text{Torque})_{FEM} \dots\dots\dots (1)$$

where $k = 28.1$

$$a_c = \frac{(H_v)_{Al7050}}{(H_v)_{SiC}} = \frac{162}{2,800} = 0.058,$$

$$b_c = \frac{(\text{feedrate})_{\text{experiment}}}{(\text{feedrate})_{FEM}} = \frac{0.6}{50.0} = 0.012$$

여기서 k는 FEM 해석과 실험으로 구한 가공 토크값을 비슷한 수준으로 맞추기 위해 설정한 조정계수로서, 2-슬롯 드릴의 실험값과 해석값의 차이를 비율로 환산하여 설정한 값이다. 한편, a_c 는 알루미늄과 SiC 소재의 비커스 경도값 보정 계수이고, b_c 는

Table 5 Comparison of drilling torque between experimental result and FEM result (unit : N-cm)

	Experimental result	FEM Analysis result	FEM result conversion	Error (%)
No slot	53.02	2980	58.19	9.75
2-slot	47.12	2413	47.12	0.59
3-slot	35.86	2012	39.29	9.56
4-slot	42.3	2298	44.87	5.39
Tapered drill	41.56	2243	43.8	5.39
Gun drill type	45.05	2461	48.06	6.68
Chip-space drill	39.2	2124	41.47	5.79

이송속도 보정계수이다. 실험과 FEM 해석으로 얻은 가공 토크 및 변환식을 사용하여 조정된 토크값을 Table 5에 보여주고 있다. FEM 해석으로 도출된 토크값과 실험값 사이에는 평균적으로 약 6.16%의 오차가 발생함을 알 수 있었다. 그러나, 앞서서도 언급한 바와 같이, 이 오차의 크기는 특별한 의미가 있는 것은 아니다. 본 연구에서는 FEM 해석으로 도출된 가공 토크값과 실험 토크값의 결과가 다양한 공구에 대해 유의미한 유사성을 갖는가를 분석하는 것이 목적이기 때문이다. 그 결과, 다양한 다이아몬드 전착 드릴의 가공 토크값이 해석과 실험에서 어느 정도의 오차범위 내에서 그 경향이 유사함을 확인할 수 있었고, FEM 해석을 통한 다이아몬드 전착 드릴 형상의 최적화 설계가 가능함을 확인할 수 있었다.

Table 5에서 볼 수 있듯이, 다이아몬드 전착 드릴을 이용한 고경도 소재의 드릴 가공에서 3-슬롯과 칩 스페이스 드릴이 다른 공구에 비해 가공 토크가 낮게 나옴을 확인할 수 있었다. 이것은 다이아몬드 전착 드릴을 이용한 드릴 가공에서 칩 배출이 잘 될 수 있도록 설계하는 것이 가공 토크의 관점에서 매우 중요하다는 것을 의미한다. 한편, 4-슬롯 드릴의 경우에는 슬롯의 면적이 증가하면서 절삭날의 개수가 상대적으로 줄어들어 날당 가공의 부하가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 드릴의 형상을 변화시킨 경우에는 가공 토크 관점에서 크게 향상되지 못함을 알 수 있었고, 이것은 가공 면적이 커진 원인이라고 판단된다. 따라서 드릴 가공에서 가공 면적은 줄이고, 칩 배출을 원활하게 할 수 있도록 설계하는 것이 가장 중요하다는 것을 의미한다.

3.2 다이아몬드 전착 입자의 탈락 및 표면 거칠기

다이아몬드 전착 드릴의 수명을 분석하기 위해 가공 후 입자 탈락률을 측정하였다. 입자 탈락률은 다이아몬드 전착 드릴의 가공 전과 가공 후의 무게 감소 비율로 계산하였다. 무게 측정은 고정밀 분석용 전자저울(Ohaus Dx224G)를 사용하였으며 2 mm 깊이 가

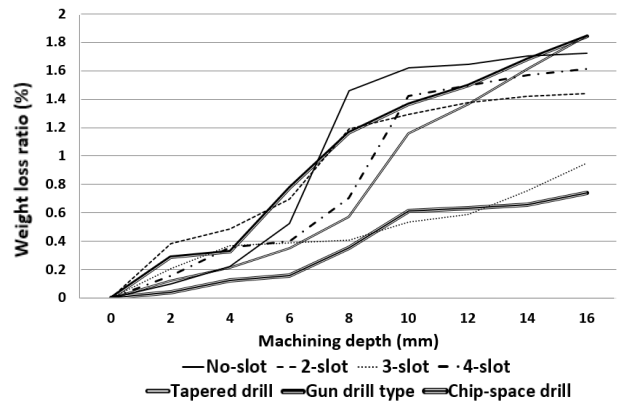


Fig. 10 Diamond particle dropout rate

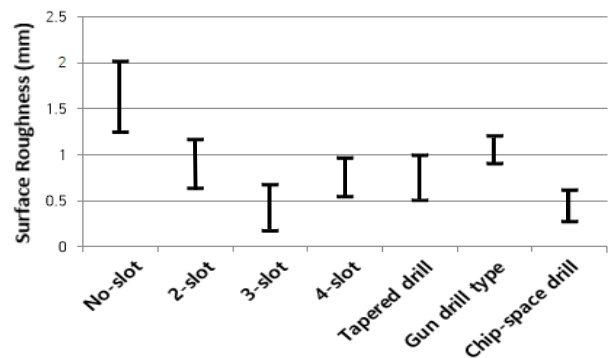


Fig. 11 Machined surface roughness for various kinds of shape

공마다 반복 측정하여 공구당 총 8회를 측정하였다. Fig. 10에서 나타나듯이 다른 공구에 비해 가공 토크가 상대적으로 낮게 해석된 3-슬롯 드릴과 칩 스페이스 드릴의 입자 탈락 정도가 약 0.8% 정도로 낮게 나왔다. 특히 칩 스페이스 드릴의 경우 0.77%로 아주 적은 양의 다이아몬드 입자가 탈락되었다.

다이아몬드 전착 드릴의 주요 성능인 가공면의 표면 거칠기를 극소 홀 표면거칠기 측정기(Mitutoyo 178-392)를 사용하여 측정하였다. 총 7개의 공구로 3개씩의 홀 가공을 하였고, 홀 내부를 각각 다른 면으로 4회 측정하여 공구 당 총 12회의 표면거칠기를 측정하여 Fig. 11과 같이 정리하였다. Fig. 11에서 나타나듯이, 입자 탈락과 마찬가지로 가공 토크가 낮게 해석된 3-슬롯 드릴과 칩 스페이스 드릴이 가장 좋은 표면거칠기를 보여주고 있다.

앞에서 가공 토크 분석과 절삭성을 함께 분석한 결과, 다이아몬드 전착 드릴의 가공에서는 칩의 배출이 매우 중요함을 알 수 있었다. 칩의 배출을 좌우하는 슬롯의 개수가 적은 공구는 칩의 배출이 원활하지 않아 가공 토크와 절삭성이 좋지 않았으며 슬롯의 수가 늘어남에 따라 가공 토크가 감소하고 입자탈락 및 표면거칠기 등의 절삭성이 좋아졌다. 그러나 슬롯이 4개인 경우는 너무 많은 슬롯으로 인하여 실제로 가공에 참여하는 다이아몬드 입자의 수가 줄어들어 칩 배출은 원활하여도 가공 토크와 절삭성 측면에

서 슬롯이 3개인 드릴보다 성능이 떨어졌다. 생크 바디의 형상을 변화시킨 공구들의 경우에는 테이퍼드 드릴과 건 드릴 타입은 칩의 배출은 원활하지만 가공면의 면적이 넓어져 오히려 가공 토크가 증가하고 절삭성이 좋지 못하였다. 그러나 칩 스페이스 드릴의 경우에는 칩의 배출이 막히지 않아 가공 토크가 낮았으며 가공면의 표면거칠기도 낮았다. 특히 공구 수명과 직결되는 입자 탈락률이 공구 중 가장 낮게 측정되어 칩 배출에 최적인 형상으로 판단된다.

4. 결론

최근 고경도 소재의 가공을 위한 다이아몬드 전착 공구의 사용이 늘어나고 있다. 본 연구에서는 고경도 세라믹 소재인 SiC 소재의 홀 가공을 위한 다이아몬드 전착 드릴의 설계 최적화에 대해 연구하였다. 가공공정의 분석과 드릴 형상 최적화를 위해 절삭 해석용 FEM 소프트웨어를 활용하여 연삭 공정을 절삭공정으로 모사하여 분석을 수행하였고, 그 결과를 실험과 비교 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

먼저, 다이아몬드 전착 공구에서 절삭성에 가장 중요한 영향을 미치는 인자는 원활한 칩 배출임을 확인하였다. 본 연구에서는 다이아몬드 전착 드릴의 구조에서 칩 배출이 원활하게 일어날 수 있는 공구 형상을 7가지 제안하였고, 각각의 공구에 대하여 절삭 FEM 소프트웨어를 활용한 가공 토크 해석을 수행하였다.

가공 토크 해석 결과 슬롯의 개수가 증가할수록 가공 토크가 감소하는 경향을 보였으나 슬롯이 4개일 경우는 오히려 가공에 참여하는 다이아몬드 입자 수 감소의 영향이 커지고 가공 토크가 증가함을 알 수 있었다. 형상을 바꾼 드릴의 경우 테이퍼 드릴과 건드릴 타입은 가공 면적이 커져 토크가 오히려 커졌으며, 칩 스페이스 공구의 경우 원활한 칩 배출로 가공 토크가 감소하는 것을 알 수 있었다.

이러한 해석 결과를 검증하기 위해 진행된 실험에서도 가공 토크에 있어서 해석과 같은 경향의 결과를 얻을 수 있었다. 특히, 소재의 경도와 이송속도를 조정하여 설정한 변환식을 활용하는 경우 실험과 해석의 가공 토크값이 10% 이내의 유사성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 다이아몬드 전착 드릴의 절삭성 관점에서 다이아몬드 전착 공구의 입자 탈락율과 가공된 표면의 표면거칠기를 조사하였다. 그 결과 가공 토크가 낮은 3-슬롯 드릴과 칩 스페이스 드릴이 가공면의 상태가 가장 좋았으며, 가장 적은 양의 입자가 탈락되어 공구의 수명 관점에서도 바람직하다는 것을 알 수 있었다.

이상의 연구 결과로부터, 다이아몬드 전착 공구를 활용하여 고경도 소재를 가공할 경우는 칩 배출이 원활한 구조로 공구를 설계하

는 것이 필수적이며, 가공에 참여하는 다이아몬드 전착 공구의 입자 수를 적절하게 해야 한다는 것도 알 수 있었다. 또한, 절삭 FEM 소프트웨어를 활용하여 연삭 공정을 모사하고, 그 결과를 활용하여 공구 형상의 최적 설계가 가능함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 향후 고경도 소재의 가공을 위한 다양한 공구 개발에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2019학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임.

References

- [1] Kang, S. K., Song, M. S., Jee, W. H., Cheng, K. J., Chung, S. C., 2007, Drilling Performance of the Diamond Tool, Korean Society of Precision Engineering Autumn Conference, 617-618.
- [2] Kwan, W. Y., Chang, S. C., 2008, Drilling Characteristics and Modeling of Diamond Core Drilling Processes, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 17:4 95-103.
- [3] Zhang, Q. H., Zhang, J. H., Sun, D. M., Wang, G. D., 2002, Study on the Diamond Tool Drilling of Engineering Ceramics, Journal of Materials Processing Technology, 122:2-3 232-236, [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00016-X](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00016-X).
- [4] Zhou, L., Huang, S., Xu, L., Bai, D., Zhao, P., 2013, Drilling Characteristics of SiCp/Al Composites with Electroplated Diamond Drills, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 69 1165-1173, <http://doi.org/10.1007/s00170-013-5096-5>.
- [5] Liu, W., Zhang, F. L., Lu, J. F., Chen, J. H., Huang, H. P., Zhou, Y. M., Tang, H. Q., 2018, Preparation of Ni₃Al Bonded Diamond Core Drill with Ni-Cr Alloy and Its Performance on Glass-ceramic, Ceramics International, 44 23080-23087, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.113>.
- [6] Park, S. H., Kim, K. M., Choi, S. D., Hong, Y. B., 2011, A Study on the Wearing Behavior of Diamond Tool used to Machining of Ceramics, KSMPE, 10:1 73-79.
- [7] Arai, S., Wilson, Stephen., Corbett, J., Whatmore, R. W., 2009, Ultra-precision Grinding of PZT Ceramics-Surface Integrity Control and Tooling Design, International Journal

of Machine Tools & Manufacture, 49:12-13 998-1007, <http://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.05.013>.

- [8] Masood, M., Thomas, R., Luiz, F., Suchay, Y., 2018, Wear Response of Impregnated Diamond Bits, *Wear*, 410-411 34-42, <http://doi.org/10.1016/j.wear.2018.04.010>.
- [9] Choi, S. J., Kim, J. S., Shin, J. H., Youn, J. W., 2019, Evaluation of the Machinability of Diamond Drills for High-hardness Ceramics, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 28:2 79-85, <http://doi.org/10.7735/ksmte.2019.28.2.79>.
- [10] Hans, K. T., Berend, D., 2013, *Basics of Cutting and Abrasive Processes*, Springer, Germany.



Sang-Joon Choi

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Daegu University. His research interest is precision machining. E-mail: joon-1204@daum.net



Jae-Seon Kim

Master student of Mechanical Engineering, Daegu University. His research interest is machining system. E-mail: sungogo2@naver.com



Jae-Woong Youn

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Daegu University. His research interest is machining system. E-mail: jwyoun@daegu.ac.kr