

단결정 다이아몬드 공구에 의한 Corner Cube 가공 시, 형상정밀도에 미치는 동 도금층의 경도의 영향

이준용*, 김창호#, 서충완**

(*미래나노텍, #동의대학교, **미래나노텍)

Plating hardness and its effect to the form accuracy in shaping of corner cube on cu-plated steel plate using a single diamond tool

J. Y. Lee*, C. H. Kim#, C. W. Sea**

(Received 10 July 2014; received in revised form 30 July 2014; accepted 11 October 2014)

ABSTRACT

This article presents machining experiments to assess the relationship between the profile accuracy and the workpiece hardness using a natural diamond tool on an ultra-precision diamond turning machine. The study is intended to secure a corner cube prism pattern for reflective film capable of high-quality outcomes. The optical performance levels and edge images of corner cubes having various hardness levels of the copper-coated layer on a carbon steel plate are analyzed. The hardness of the workpiece has a considerable effect on the profile accuracy. The higher the hardness of the workpiece, the better the profile accuracy and the worse the edge wear of the diamond tool.

Key Words : form accuracy(형상정밀도), Corner cube (코너 큐브), Micro pattern (마이크로 패턴), Diamond Turning Machine (DTM, 다이아몬드 선삭기)

1. 서 론

초정밀 절삭은 연질의 피삭재를 표면거칠기 $0.01\mu\text{m}$, 형상정밀도 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 다듬질이 요구되는 기술로 매우 높은 정밀도를 가지는 공작기계와 강성이 우수한 다이아몬드 공구를 사용하는 공정이다. 특히, 디스플레이 광학용으로 사용되는 초정밀 미세패턴 가공은 육안 시인성 불량에 제로에 가까운 제작 품질이 요구되므로 높은 수준의 금형 가공 기술이 요구된다.^[1]

이와 관련한 제품 중 대표적인 것이 재귀반사(retroreflection) 필름으로 차량의 후미 안전 표식, 공사현장의 안전 기구물, 도로의 교통 표지판, 중앙선의 배색 등 대부분 산업안전이나 교통 분야 등에 많이 쓰이고 있는 초정밀 광학부품이다. 이 필름은 그 표면에 수 나노미터의 V자형 혹은 U자형의 서브 마이크론(sub-micron)의 홈(groove)의 회절 격자가 형성되어 있다. 산업안전용 광학용 가공 소재 중 Cu, NiP 등은 대표적인 가공소재이다.

Fig. 1은 코너 큐브 형상을 이용한 재귀반사의 원리를 나타낸 것으로 코너 큐브 전면에서 입사된 빛(incident ray)은 임계각 허용 범위에서 후면으로 빛들이 통과되며 통과된 빛들은 형상의 내부에서 3면이 이루는 각도에 따라 내부반사가 일어나며

Corresponding Author : Department of Mechanical Engineering, Dong-eui University
E-mail : chkim21@deu.ac.kr

*, ** MNtech Co.Ltd

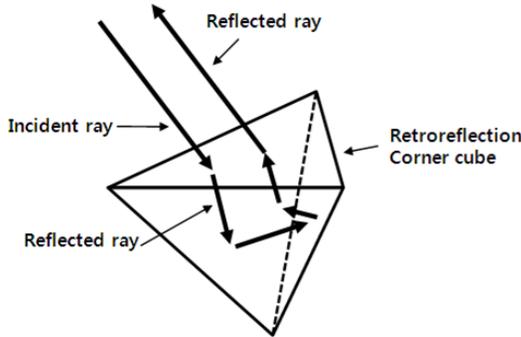


Fig 1. Retroreflection by corner-cube

빛이 다시 입사한 방향으로 되돌아가는 빛(reflected ray)이 나가는 원리이다.^[2-5]

본 논문에서는 저탄소강 판재에 도금한 동(Cu) 소재를 다이아몬드 공구로 코너 큐브 형상을 플레이닝(planing) 방식으로 가공하였을 때 동 도금층의 경도의 변화에 따른 절삭면의 손상 여부 및 형상 정밀도와 공구의 파손정도를 규명하고 코너 큐브(corner cube) 형상 정밀도가 재귀반사 특성에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장비

Table 1과 같은 제원을 가진 다이아몬드 선삭기(Diamond Turning Machine, Nachi Co. AMG- 62P)를 사용하여 코너 큐브 형상을 가공하였다.

Fig. 2는 다이아몬드 선삭기를 이용하여 코너 큐브 형상을 가공하는 방법을 나타낸 것으로 V형상의 단결정 다이아몬드 공구를 기계의 주축에 고정된 채 테이블을 한 방향으로 4000~8000mm/min 이동하면서 V형상의 홈 가공을 종료한다. 테이블을 회전한 후 동일한 방법으로 홈 가공을 하면 기존의 V홈의 후면에 V홈이 성형되고 마지막으로 테이블을 한번 더 회전하여 홈가공 함으로 코너 큐브의 형상이 완성된다.

가공된 형상은 공초점 현미경(Kenyon Co. VK-9500)과 반사성능 측정기(파이맥스 Co. PR3000)를 사용하여 결과를 분석하였다.

Table 1 Experimental apparatus

Main specifications(Nachi Co. AMG- 62P)		
Table	Working surface(mm)	500 x 750
	C1 axis equipped(mm)	Ø 300
Travel	X(mm)	750
	Y(mm)	600
	Z(mm)	100
Maximum feed rate	X	20m/min
	Y	20m/min
	Z	1m/min
Scale resolution	X,Y,Z	0.001um
	A	0.0000275°
	C	0.0001°

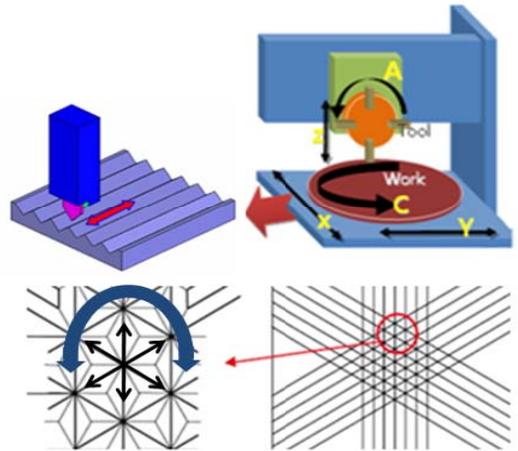


Fig 2. Machining process using diamond turning machine for corner cube pattern

공초점 현미경은 표면 스캔 방식의 레이저현미경이며 공초점 원리는 광원이 되는 레이저에서 시료의 초점과 맞지 않는 빛은 제거하고 초점과 일치하는 빛만 쓴다는 뜻이다.

반사성능 측정기는 반사체의 빛에 의한 재귀반사를 측정하는 장비로서 도로 교통 관련법규에 의한 정밀한 광학적 품질관리가 요구될 때 쓰이는 장비이다.

2.2 피삭재 및 절삭공구

피삭재는 Fig. 3과 같이 20mm 두께의 저탄소강 (SK 10종)의 판재 상단에 전기도금으로 800 μ m 두께의 동을 도금하였다. 도금조건을 다르게 하여 동 도금의 경도(Hv100 ~ 300)를 변화시켰을 때 동 도금의 경도변화가 코너 큐브의 형상정밀도에 미치는 영향을 분석하였다.

절삭 공구는 V형 다이아몬드 공구를 사용하였다. Fig. 4(a)는 본 실험에 적용된 바이트 도면으로, 날끝각이 각각 63.5°, 83.5°인 2종류의 바이트이다. Fig. 4(b)는 실제로 제작한 공구로 다이아몬드 두께는 1.5mm, 여유각은 6°로 2종 모두 동일하다.

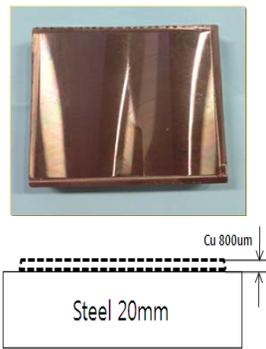
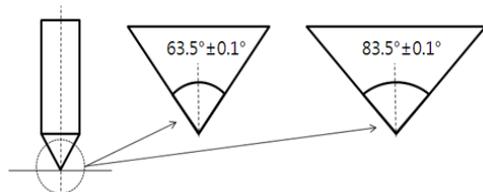
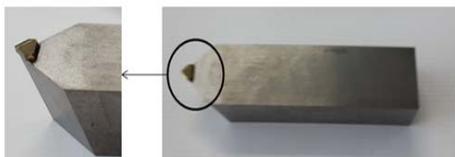


Fig. 3 Workpiece



a) Drawing the V-type Diamond Tool



(b) Photograph of the V - type Diamond tool

Fig. 4 V-type Diamond tool

2.3 가공 방법

가공조건은 Table 2와 같이 4,000~8,000mm/min 절삭 속도로 80 μ m 가공깊이를 플레이닝 방식으로 테이블을 회전시키면서 각도를 분할 가공하여 동일한 절삭 조건으로 동도금층의 경도별 코너 큐브 형상을 가공 후 절삭성을 평가 하였다.^[6,7]

가공 소재를 C축을 기준으로 회전시키며 황삭용 바이트(날끝각 63.5°) 2개, 정삭가공용 바이트(날끝각 83.5°) 1개를 사용하여 가공하였다.

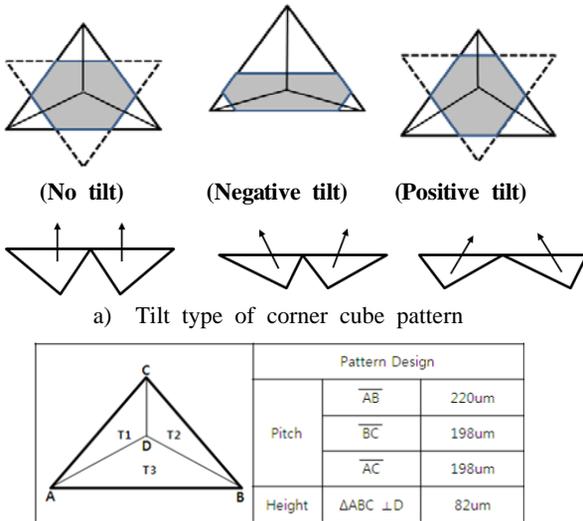
바이트 이용 순서는 88.5°→63.5°→63.5°→83.5° 순서로 82 μ m 이상 가공 깊이를 분할(10회 이상)하였고 절삭 횟수가 많은 63.5°바이트는 최종 가공 전까지 황삭으로 가공함으로 공구 날끝의 마모에 대한 형상 왜곡을 최소화하고자 하였다.

Fig. 5(a)는 corner cube의 Top 꼭지점의 위치에 따라 유효면적율과 형상이 변한다. Fig. 5(b)는 가공 설계 수치에 단위 면적당 누적 공차를 감안하여 설계된 치수이다.

꼭지점 ABC들이 이루는 바닥면은 이등변 삼각형이며 꼭지점 D에서 바닥면은 수직이며 이는 바닥면이 정삼각형보다 + 7°이내(Positive Tilt)로 기울어진 형태이며 경사면을 이루며 근접되어있는 T1, T2, T3 면들은 이웃하는 면과의 사이 각이 90°에 근접한 예각으로 형성되어 있다.

Table 2 Experimental instruments and cutting conditions

Instruments	
Machine	AMG-62P
Tool	single diamond tool (Angle 63°, 83°)
Workpiece	Cu-plated SK10 plate (300*300*5mm)
Measurement	Image measurement : VK-9500 Optical measurement : PR3000
Cutting conditions	
Feed	4000~8000mm/min
Cutting method	planing(cutting depth:80um)
Workpiece Conditions	
Hardness(Hv)	100 ~ 300



(b) Positive tilt design
Fig. 5 Pattern design of corner cube

3. 실험결과 및 고찰

3.1 corner cube 형상정밀도

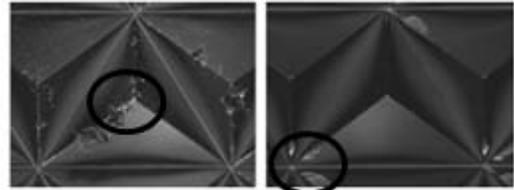
a) 형상정밀도 불량

Fig. 6은 전 탄소강 판재위에 도금된 동 도금층의 경도가 Hv 130~250일 때 코너 큐브를 가공하였을 때 관찰된 형상 이미지이다. Fig. 6의 (a)와 (b)와 같이 도금층의 경도가 Hv 140 및 190일 때 발생한 불량으로, (a)와 같이 절삭방향으로 밀려 뜯기거나 (b)와 같이 뜯기고 파이는 불량이 발생하였다. 경도가 증가 할수록 형상에서 불량 위치가 꼭지점(Top)에서 다이아몬드 바이트의 절삭 교차부분인 빗면의 모서리를 따라 바닥면으로 이동하는 것이 관찰 되었다.

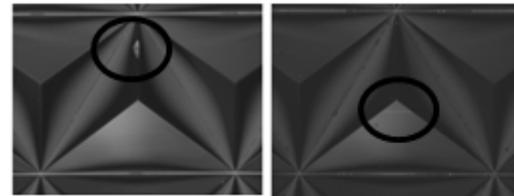
Fig. 6(c)은 경도가 Hv 200~250 사이의 동 모재로 가공 시 경도가 Hv 200이하의 모재 보다는 뜯김 형상이 크게 개선되었으나 (c)의 좌측 그림과 같이 모서리의 상단부가 뜯기거나 (c)의 우측 그림과 같이 표면에 스크래치가 발생하였다. 이는 바이트 절삭면에 이물질 유입되거나 바이트가 손상이 발생했을 때 나타나는 현상이다.

즉, 경도가 낮을 경우 그루브의 모서리에서 뜯김 현상이 심하며 경도가 높을수록 뜯김 현상이

점진적으로 감소하며 이런 현상은 특정 가공부분인 꼭지점부터 바닥면으로 점점 뜯김이 줄어들면서 개선되는 것이 확인되며 뜯김 발생 위치는 절삭부의 교차부인 모서리 중심으로 집중화 되어 있다.



(a) Hv 140(x 3,000) (b) Hv 190 (x 3,000)



(c) Hv 200~250 (x 3,000)

Fig. 6 Machining defects of micro pattern

b) 형상정밀도 개선

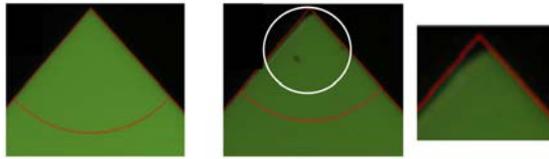
Fig. 7은 도금된 동 도금층의 경도를 Hv 250이상 상승시킨 뒤 동일한 방법으로 코너 큐브를 가공하였을 때의 형상으로 불량면적이나 불량이 없이 형상정밀도가 개선된 것을 볼 수 있었다.



Fig. 7 Improved pattern

3.2 공구의 마모

Fig. 8은 절삭하기 전 후의 공구날 끝으로 공구를 동 도금층의 경도가 높아질수록 Fig. 8(b)과 같이 공구날 끝의 마모도가 증가되었는데 이는 가공 가능한



(a) Before (b) After
Fig. 8 Tool wear before and after using

크기 및 가공 면적에 제한적인 요소로 작용 될 수 있다.

Table 3은 도금층의 경도별 가공 후 Fig. 5에서 설명한 각 면들이 이루고 있는 면각을 공초점 현미경으로 측정한 면각(Dihedral angle)의 결과이다. 코너 큐브 설계값은 이등변 삼각뿔 구조로 격면들이 이루는 면각을 90°에 근접하게 계산되었으며 이는 제품 성형에 대한 치수 공차를 감안하여 설계된 수치이다.

이에 따른 실제 가공된 코너 큐브의 면각은 설계치와 차이를 보이는 것이 관찰되었다. T1-T2이 이루는 면각은 상대적으로 T1-T3, T2-T3가 이루는 각도들 보다 더 예각($\Delta 0.17^\circ \sim 0.63^\circ$)으로 측정되었다. 이와 같이 Grooving 방향별 면각의 차이가 발생된 것은 바닥면이 정삼각형 코너 큐브보다 기울어진 이등변 삼각형 코너 큐브로 제작하기 위해 절삭각이 다른 2종(63°, 83°)의 공구를 사용하면서 발생한 절삭 깊이의 차이에 의해 생긴 것으로 사료된다.

Table 3 Dihedral angle of corner cube pattern

Cu Hv	Dihedral angle (°)		
	T1-T3	T1-T2	T2-T3
200 ↓	89.80	89.63	89.79
250 ↓	89.83	89.20	89.80
300 ↓	89.80	89.49	89.77

3.3 corner cube의 반사성능

제품의 반사성능은 코너 큐브의 형상정밀도와 제품의 굴절률에 의해 좌우되는 요소로 성형용 몰드 및 성형된 반사필름을 제작하여 반사성능을 평가한다.

Table 4 Retro-reflectivity of corner cube sheet

Cu Hv	Retro-reflectivity (cpl.)		
	Avg.	Max	Min
200 ↓	611	636	569
250 ↓	797	870	719
300 ↓	913	974	843

Table 4는 동 도금층의 경도를 달리하여 가공된 코너 큐브 배열에 대한 제품의 반사성능을 측정된 결과이다. 경도가 낮을수록 반사성능의 수치가 낮은 것을 확인 할 수 있었다.

그리고 앞에서의 그림 Fig. 6, 7의 형상 이미지와 반사성능 수치의 상관관계를 비교해 볼 때, 경도가 Hv 200 인 모재의 경우, 뜯김 현상에 의해 면의 조도가 나오지 않아 반사성능이 낮았으나, 경도가 높은 모재의 경우 반사성능이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 경도가 높을수록 형상정밀도가 개선되고 반사성능이 향상되었다.

4. 결론

저탄소강 판재에 동 도금한 소재를 단결정 다이아몬드 공구로 코너 큐브 형상을 플레이닝 가공하였을 때, 동 도금층의 경도의 변화에 따른 절삭면의 손상 여부 및 형상 정밀도와 공구의 파손정도를 규명하고 코너 큐브(corner cube) 형상 정밀도가 재귀반사 특성에 미치는 영향을 알아본 결과 다음과 같은 연구결과를 얻을 수 있었다.

1) 동 도금층의 경도가 Hv 200이하에서 절삭 방향에 의한 면과 면 사이의 경계면에서 불량 발생하였으나 Hv 200~250에서는 교점가공 시 Top의 꼭지점에서 바닥면에 가까운 모서리 면으로 점진적으로 개선되었으며, Hv 250 이상에서 양질의 형상정밀도를 확보할 수 있었다.

2) 경도가 높을수록 형상정밀도가 개선되고 반사성능이 향상되었으나 공구의 마모가 발생하였다.

3) 절삭각이 다른 2종(63°, 83°)의 공구를 사용하면서 발생한 절삭 깊이의 차이에 의해 Grooving 방향별 면각의 차이가 발생되었다.

후 기

“이 논문은 2014년도 동의대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. T. J. Je, “A Study on Micro cutting technology for micro part” Thesis, Graduate School, Kum-Oh National Institute of Technology, 2004.
2. A. B. Fraser, “The Sylvanshine: Retroreflection from dew-covered trees”, Appl. Opt. No. 33, 1994.
3. J. B. Ko, G. H. Kim, and J. H. Won, “ A study on the cutting characteristics of non-ferrous metals using diamond turning machine”, Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 10, No. 5, pp. 124-129, 2001.
4. H. Kim and B. Lee, “Optimal design of retro-reflection corner-cube sheets by geo- metric optics analysis,”Opt. Eng. Vol. 45, 094002, 2007.
5. H. Kim, S. W. Min, and B. Lee, “Geometrical optics analysis of the structural imperfection of retroreflection corner cubes with a nonlinear conjugate gradient method,” Appl. Opt. vol. 47, pp. 6453-6469, 2008.
6. H. C. Kim, “Experimental investigation on machining feasibility of micro patterns using a single crystal diamond tool”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 5, pp. 76-81, 2012.
7. K. T. Min and H. S. Jang, “Cutting chip and surface roughness in micro groove cutting of brass”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9, No. 4, pp. 1-7, 2010.