

초정밀가공기를 이용한 무산소동 절삭특성

고준빈*, 김건희**, 원종호***

Cutting Characteristics of Oxygen-Free Using the Ultra Precision Machining

Jun-Bin Ko*, Geon-Hee Kim**, Jong-Ho Won***

ABSTRACT

The needs of ultra-precisely machined parts are increasing more and more. But the experimental data required to ultra precision machining of nonferrous metal is insufficient. The behavior of cutting in micro cutting area is different from that of traditional cutting because of the size effect. Copper is widely used as optical parts such as LASER reflector's mirror and multimedia instrument. In experimental, after oxygen-free copper is machined by ultra precision machine with natural mono crystal diamond tool (NCD) and synthetic poly crystal diamond tool (PCD), we compared chip formation and tool's wear according to used tool. Also, we researched optimized cutting condition with the results measured according to cutting condition such as spindle speed, feed rate and depth of cut. As a result, the optimal working condition that makes good surface roughness is obtained. The surface roughness is good when spindle speed is above 80 m/min, and feed rate is small and depth of cut is above 0.5 μm . In cutting of klystron anode and cavity 3.2 nmRa of surface roughness is obtained.

Key Words : ultra-precision machining(초정밀 가공), PCD(다결정 인조 다이아몬드), NCD(단결정 천연 다이아몬드), surface roughness(표면거칠기), chip curl radius (칩컬반경)

1. 서론

최근 항공 우주산업, 반도체, 컴퓨터, 영상정보 산업, 정밀기계산업 등의 발달로 인해 정밀기계부품의 가공은 고부가가치 기술로서 매우 중요하게 인식되고 있으며, 특히 이러한 제품을 생산하기 위한 초정밀 가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있

다. 초정밀 절삭의 기본원리는 매우 정도가 높은 공작기계의 운동을 날카로운 인선을 가진 공구를 이용하여 공작물에 전사하는 것을 말한다. 따라서 이러한 산업기술 요구에 부응할 수 있는 각종 가공 기술의 확립은 그 무엇보다도 시급히 해결해야 할 과제로 나타나고 있다.¹⁾

가공기술확립을 목적으로 다양한 기간기술들이

2002년 5월 3일 접수

* 한밭대학교 기계설계공학과

** 한국기초과학연구소

*** 충남대학교 기계공학과

개발되고 있으며 초정밀절삭 또한 주요 초정밀가공 기술의 하나로서 관심을 모으고 있다. 그러나, 절삭 공구에 의한 절삭가공은 오늘날 가장 보편화된 가공기술중의 하나이지만, 신소재 및 새로운 가공영역의 출현은 절삭가공공정 및 그 메커니즘에 대한 재조명을 필요로 하고 있으며, 또한, 주로 강 구조 중심으로 구축되어온 가공 기술과 데이터 베이스에서 벗어나 보다 다양한 재질의 공구, 공작물에 대한 기초 절삭성 실험들이 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 무산소동의 초정밀가공시에 단결정 천연다이아몬드와 다결정 인조다이아몬드공구의 차이를 절삭 칩 형상과 인선마모에 따른 실험 결과로 비교하였다. 또한, 절삭속도, 이송속도 및 절삭깊이에 따른 최적표면조도 형성조건을 찾아내고, 이에 바탕을 둔 최적조건을 사용함으로써 대출력 클라이스트론 증폭관의 내면을 개발하고자 하는 Ra 30nm 이내의 표면조도를 달성하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 무산소동에 대한 미소절삭실험을 수행하기 위하여 초정밀 비구면 가공기인 Nanoform 600을 사용하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 초정밀가공기이다.²⁻³⁾

실험에 사용된 측정장비로는 가공물의 표면 거칠기는 WYKO사의 레이저 간섭에 의한 비접촉식 표면조도 측정기인 NT2000으로 측정하였다. 또한, 가공면의 전체형상은 WYKO사의 레이저 간섭에 의한 비접촉식 형상측정기인 WYKO6000과 접촉식 표면조도 측정기인 Talyer Hobson사의 Form Talysurf series 2로 측정하였다. 또한, 공구의 상태와 칩의 형상은 최대 1000배의 확대 배율을 갖고, 모니터를 통하여 고배율, 고해상도의 이미지를 얻을 수 있는 공구현미경을 이용하여 확인하였다

절삭 실험에 사용된 재료로는 항공우주 광학부품, 레이저 미러 등에 이용되는 무산소동을 초정밀 절삭실험을 수행하였으며, 무산소동 성분은 Table 1과 같다. 또한 다이아몬드 공구는 코너 반경 노즈 R=0.3mm, 경사각 0°, 여유각 10°로 예리하게 완성된 R바이트를 이용하였다. 또한, 가공액으로서 방전유를 압축공기와 혼합하여 분사하는 방법을 취하였다.

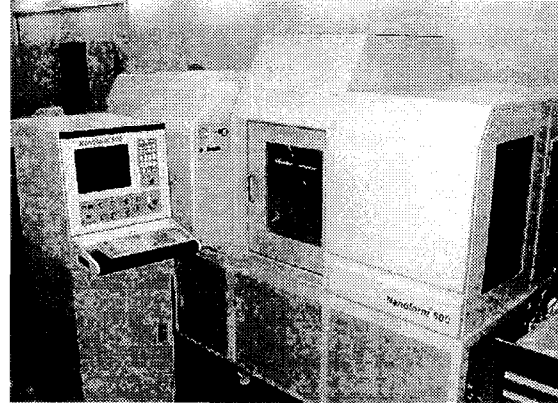


Fig. 1 Photograph of the ultra precision machine (Nanoform600)

Table 1 Compositions of work piece used in experiment

Elements	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Al
wt(%)	0.01	rest	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.40

2.2 실험방법 및 절삭조건

실험방법은 일차 초정밀 가공한 무산소동을 주축의 진공척에 진공압력 20Psi로 고정하여 회전시키고 공구대에 단결정 다이아몬드 공구를 장착한 후 절삭조건에 따라 실험을 수행하였다. 그리고 가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 표면거칠기는 광학식 비접촉 표면조도 측정기인 NT2000으로 중심선 평균거칠기(Ra)를 측정하였으며, 클라이스트론 아노드 및 캐비티의 구면형상은 접촉식 형상측정기인 Form Talysurf로 표면 형상정도를 측정하였다. 초정밀 가공기에서 무산소동에 대한 미소절삭실험을 수행하기 위하여 단결정 천연 다이아몬드(NCD) 바이트와 다결정 인조 다이아몬드(PCD) 바이트를 사용하여 절삭실험을 행하였다.

Table 2는 본 실험에 선정된 절삭조건들을 나타낸 것이다. 먼저 절삭속도 40~100m/min 범위에서 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 확인하여 최적 가공속도를 구하였다. 그리고 최적절삭속도 범위에서 공구 인선반경에 대한 절삭칩의 형상과 공구인선의 상태를 공구현미경을 통하여 측정

하였다. 그 후 최적절삭속도 범위에서 절삭속도를 일정하게 고정하고 이송속도를 1~20mm/min으로 변화시켰고, 절삭깊이를 0.1~20 μ m까지 다양하게 변화시켜 실험하였다. 이러한 실험결과를 바탕으로 선형가속기에 사용되는 대출력 대출력 클라이스트론 증폭관의 내면을 초정밀가공하였다.

Table 2 Cutting condition

Item	Cutting condition
Cutting speed(m/min)	40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
Feed rate(mm/min)	1, 2, 4, 6, 8, 10, 20
Depth of cut(μ m)	0.1, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20
Vacuum pressure	20 kgf/cm ²
Cutting fluid	Air + EDM oil

3. 고찰

3.1 초정밀 절삭에 있어서의 절삭깊이에 따른 절삭칩의 형상 및 공구마모 형상

Fig. 2는 원주절삭에서 공구인선반경이 R0.3인 단결정 천연다이아몬드 화이트와 다결정 인조다이아몬드 화이트를 사용하여 주축속도 80m/min, 이송속도 10mm/min에서 절삭깊이 변화에 따른 칩 킨 반경의 변화를 나타낸 것이다. 대체적으로 절삭깊이가 증가할수록 칩 킨 반경이 증가하고 있으며, 절삭깊이가 0.1~1 μ m로 변화될 때 칩 킨 반경이 급격히 증가하고 있다. 이와 같은 현상을 나타내는 이유는 절삭공구의 인선 형상과 깊은 관련이 있는 것으로 절삭점을 미시적으로 볼 때 새로운 공구라도 무딘 공구 날 끝을 갖고 있으므로 절삭깊이가 작아질수록 전단에 의하여 공구 경사면을 따라 피삭재를 칩으로 제거시키기 어렵게 되고, 공구의 경사면과 여유면이 이루는 모서리에서 국부적으로 음의 경사각을 이루게 되어 전단현상이 집중되기 때문에 칩 킨 반경이 작게 나타나는 것으로 판단된다.

또한 PCD공구의 절삭칩의 칩 킨 반경은 NCD공구와 유사하게 나타나며 PCD공구의 칩은 두께가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 PCD공구가 육방정의 탄소입자를 고온에서 초고압으로 입방정화 한 것으로 이것은 Fig. 3에 나타난 PCD공구의

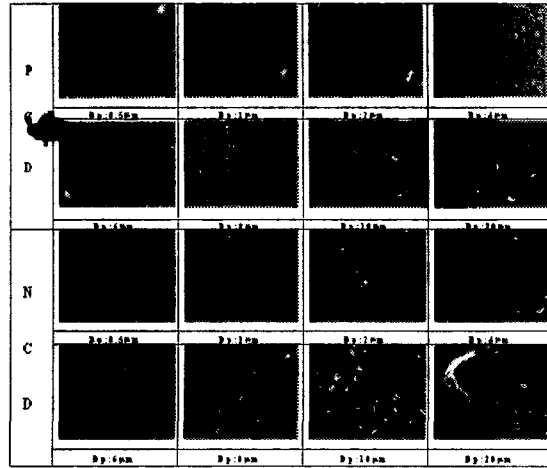


Fig. 2 Chip formation with respect of cut

사용전후 공구인선형상에서 보는 바와 같이 절삭깊이 10 μ m이하의 미세절삭시 화이트의 결정입자가 NCD공구처럼 단결정이 아닌 여러개의 결정입자에 의해 가공되기 때문이다. 또한, 이렇게 균열되거나 탈락이 일어난 공구 날 끝의 형상은 공작물에도 전사되므로 표면거칠기에도 악영향을 미친다. PCD공구는 다결정체 이기 때문에 NCD보다 거칠은 날 끝을 가지고 있으며 가공 후 공구 날 끝에 크랙이 발생된 것을 발견할 수 있다.

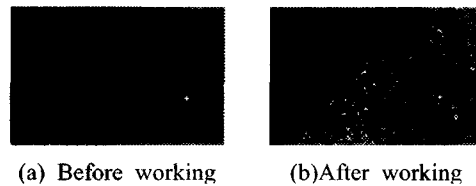


Fig. 3 Shape of PCD tool($\times 200$)

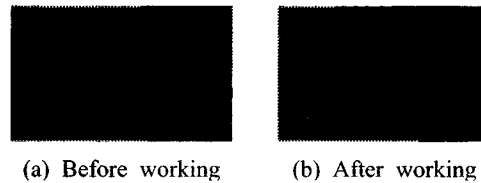


Fig. 4 Shape of NCD tool($\times 200$)

Fig. 4는 NCD공구의 사용전후 공구인선 형상을 나타내고 있다. 사용 후 NCD 공구의 인선 형상을 보면 인선 형상에 많은 마멸이 일어난 것을 볼 수 있으며, PCD공구처럼 크랙이나 날끝이 탈락된 것은 볼 수 없으나 사용 후 NCD공구에는 공작물이 미세하게 용착되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 공작물의 표면 거칠기에 악영향을 주며, 공작물 용착을 피하기 위해서는 절삭속도를 고속으로 높여주는 방법이 학회에 보고되고 있다.⁴⁾ 공구가 공작물의 거칠기 및 품위에 미치는 영향이 크므로 적절한 공구의 수명을 예측 할 수 있는 장치에 대한 연구가 필요하다.

3.2 거칠기 특성

3.2.1 절삭속도에 따른 표면거칠기

Fig. 5는 NCD공구와 PCD공구를 사용해 무산소동을 이송속도 10mm/min, 절삭깊이 10 μ m로 고정하고, 절삭 조건에서 주축 속도 변화에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 40~100m/min까지 속도를 단계적으로 변화 시켰으며 그 결과 NCD공구와 PCD공구의 표면 거칠기가 많은 차이를 보이고 있다. 그 이유는 PCD공구는 다결정체로 NCD공구에 비해 거친 날끝을 가지며, 또한 가공 중 결정입자의 탈락이 이루어져 표면거칠기에 악영향을 주기 때문에 판단된다. NCD공구는 40m/min에서 점점 속도를 증가시킴에 따라 표면 거칠기가 향상되고 80m/min이상의 속도에서는 표면 거칠기의 변화가 거의 나타나지 않았으며, PCD공구는 50m/min부분의 속도에서 비교적 좋은 표면 거칠기 속성을 나타내고 있다. 이런 결과로 무산소동의 미소절삭에서 절삭속도는 NCD공구는 80m/min이상으로 PCD공구는 40m/min의 주축 속도로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 도움을 준다.

3.2.2 이송속도에 따른 표면거칠기

무산소동의 최적 면을 얻기 위해 Fig. 6은 표면 거칠기가 가장 양호한 80m/min의 주축속도, 절삭깊이는 10 μ m고정하고 1~20mm/min까지의 이송속도 변화에 대한 표면 거칠기를 나타낸다. 그 결과 본 초정밀가공에 있어서 가공 표면의 형상은 공작물의 회전과 공구의 이송으로 인한 미세한 나사상의 표면을 형성시키고, 2차원적으로 이송방향을 따라 공구의 형상이 이송률 만큼 간격을 두고 반복적으로 이루어진다. PCD공구와 NCD공구가 비슷한 경향을

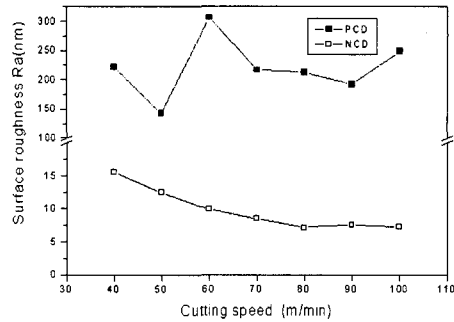


Fig. 5 Surface roughness versus spindle speed (Feed: 10mm/min, Depth of cut: 10 μ m)

보이고 있으며 이송속도 4mm/min까지는 이송량이 너무 작아 표면 거칠기의 변화가 거의 없으나 4mm/min이상의 이송속도 에서는 동일한 절삭깊이에서 이송률의 증가에 비례하여 표면거칠기가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

이러한 표면거칠기 결과는 이송방향의 표면거칠기는 인선반경과 공작물의 1회전당 이송량에 따라 기하학적으로 결정되는 이론적 표면거칠기식⁵⁾

$$R_y = \frac{f^2}{8R} \times 10^3$$

와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나, 실험결과와 이론적 표면거칠기 값과의 차이가 약 1.5배에 달하는데 이와 같은 이유는 실험에 사용된 무산소동이 연성이고, 미소한 재료의 용착이 발생하기 때문에 가공면의 표면 거칠기에 나쁜 영향을 미치는

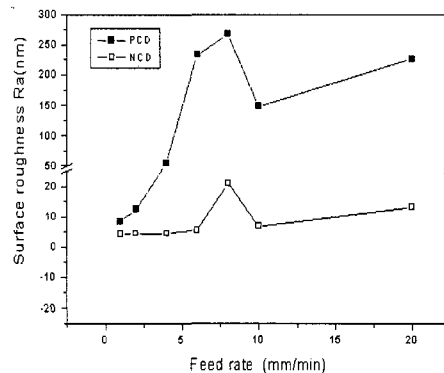


Fig. 6 Surface roughness versus feed (Spindle speed: 80m/min, Depth of cut: 10 μ m)

것으로 판단된다. 윤착을 없애기 위해서는 스피들 속도를 더 높이는 방법이 있다고 학회에 보고되고 있다.

3.2.3 절삭깊이에 따른 표면거칠기

Fig. 7은 무산소동을 PCD공구와 NCD공구로 주축속도 80m/min, 이송속도를 10mm/min으로 고정하고 절삭 깊이가 변화에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 절삭가공에 있어서 이론적 표면거칠기 값은 절삭깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 미소절삭에서는 Fig. 7의 결과를 볼 때 NCD공구는 0.5 μ m까지 표면거칠기가 급격히 악화되는 것은 공구의 절삭날 끝 인선반경 정도의 작은 절삭 깊이로 가공됨으로써 마이너스 윗면경사각에 의해 절삭이 이루어지기 때문이다. 이 경우의 칩 배출 과정은 주로 러빙(rubbing)이나 버니싱 같은 소성변형에 의해 원활하게 이루어지지 못하며 소성변형을 일으킨 표면에서는 큰 잔류 응력 층이 생성되어 표면의 질에 악영향을 끼치기 때문이다⁶⁾.

절삭날은 완전하게 날카롭지는 못하므로 절삭날 예지 부분을 확대하여 모델화하면 실린더형으로 가정할 수 있다. 이 때 실린더 부분에 작용하는 힘을 플로잉 힘(plowing force)이라 한다. 일반적인 절삭 가공에 있어서는 절삭 깊이가 절삭날 반경에 비하여 상당히 크기 때문에 플로잉 힘이 전체 절삭력에 미치는 영향은 거의 없어 무시가 가능하였다. 그러나, 절삭 깊이가 감소할수록 플로잉 힘은 비례적으로 커져 더 이상 무시될 수 없게 된다. 이러한 힘의 존재로 절삭깊이가 감소할수록 비절삭 에너지(specific cutting energy)가 증가하는 치수 효과가 나타난다. 초정밀 가공에서는 이러한 치수 효과를 잘 보여준다. 이러한 결과로부터 미소절삭 시 표면거칠기는 절삭깊이의 증가와 관련이 있다고 할 수 있다.

미소절삭 시 이송률이 작아 질수록 절삭깊이에 영향을 크게 받으며, 절삭깊이는 0.5 μ m이상으로 하는 것이 유리하다.

PCD공구에서는 0.1 μ m에서 가장 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있고 절삭깊이가 2 μ m 이상에서는 NCD공구와 유사하게 거칠기의 큰 변화가 나타나지 않는 것을 알 수 있다. PCD공구에서는 0.5 μ m 이하의 절삭깊이에서 거칠기가 매우 양호하게 나타나는 이유는 단결정 다이아몬드입자들의 결합으로 이루어진 단결정 입자 중 하나의 다이아몬드입자보다

작은 절삭깊이로 가공함에 따라 나타난 결과로 사료된다.

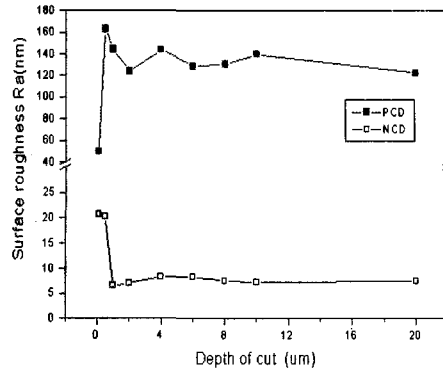


Fig. 7 Surface roughness versus Dept of cut (Spindle speed : 80m/min, Feedrate : 10mm/min)

3.3 대출력 클라이스트론 아노드 및 캐비티 제작 특성

선형가속기에 사용되고 있는 대출력 클라이스트론 증폭관(작동 주파수 = 2.856 GHz, 침투 출력 = 80 MW, 이하 클라이스트론이라 함.)의 내면(아노드 및 캐비티)은 전자 및 마이크로파가 진행하는 동안 표면의 요철에 의한 아크 발생의 유무가 그 성능을 좌우한다. 또한 내면의 거칠기는 표면적과 직접적인 상관관계가 있어 내부 진공도에 중요한 변수가 된다. 특히 아노드면은 전자총에서 발생된 전자의 집속을 결정하는 부품으로서 그 형상 및 표면의 거칠기에 따라 아노드 주변에 형성되는 자장의 품질이 결정된다. 따라서 아노드 및 캐비티의 내면은 엄격한 형상 규제와 함께 표면 거칠기 정도를 $R_{max} 0.03S$ 이하로 규제하고 있다.

클라이스트론 아노드 및 캐비티의 재료로는 항공우주 광학부품, 레이저 미러 등에 이용되는 무산소동을 사용하였으며, 재료의 외경은 $\phi 100$ mm이며, 가공내경은 $\phi 30\sim 33$ mm 정도로 7개의 부품을 가공하여 조립 후 용접하는 제품이다. 사용된 NCD 공구는 코너 반경 노즈 $R=0.3$ mm, 경사각 0° 로 여유각 10° 로 예리하게 완성된 R바이트를 이용하였다. 또한, 가공액으로서 방전유를 압축공기와 혼합하여 분사하는 세미드라이 방법을 취하였다.

무산소동의 초정밀 절삭 특성을 바탕으로 아노드와 캐비티를 가공하였으며, 일차가공은 CNC선

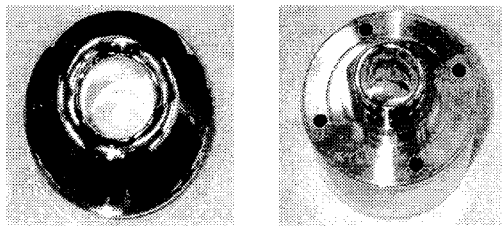
반에서 가공하였으며, 이때의 초정밀 가공 여유량은 단면부의 곡률 부분을 0.1mm 정도로 하였다. Table 3은 아노드와 캐비티의 가공 조건을 나타낸다.

Table 3 Cutting conditions of Anode and Cavity

Item	Cutting condition
Cutting speed(m/min)	80
Feed rate(mm/min)	4, 8, 30
Depth of cut(μm)	1, 4, 10
Vacuum pressure	20 kgf/cm ²
Cutting fluid	Air + EDM oil

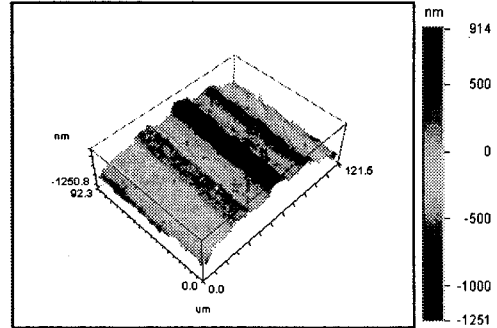
Fig. 8은 아노드와 캐비티를 Table 3의 황삭, 중삭 및 정삭 초정밀가공절삭조건으로 가공완료한 제품의 사진으로 (a)는 아노드, (b)는 캐비티의 제품사진이다.

Fig. 9는 캐비티의 곡률 R1.75의 부분을 (a)는 CNC 선반에서 가공한 표면형상이며, (b)는 다이아몬드 터닝 머신을 이용하여 가공한 형상을 비접촉식 표면거칠기 측정기인 NT2000으로 측정한 결과이다. 형상측정사진결과에서 보듯이 일반 CNC가공결과와는 동일한 천연다이아몬드 공구를 사용하더라도 장비의 이송정밀도나 진동등의 원인으로 나노미터 정도의 표면형상을 얻기가 매우 어렵다. 형상 측정결과 CNC 선반가공 표면은 Ra 300nm, 초정밀가공 결과는 Ra 10nm 정도의 형상정밀도를 얻을 수 있었다.

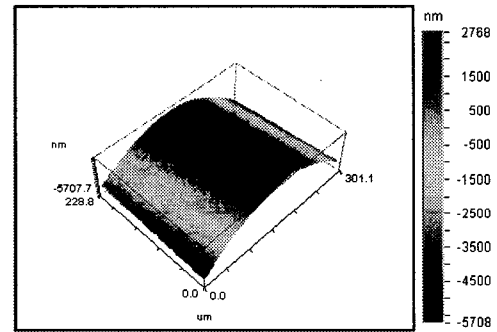


(a) Anode (b) Cavity

Fig. 8 Photo of klystron anode and cavity



(a) Surface measurement 3D analysis of CNC Lathe



(b) Surface measurement 3D analysis of DTM

Fig. 9 Curve radius measure of cavity by NT2000

4. 결론

무산소통을 다이아몬드 공구로 초정밀가공시 절삭조건인 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이의 변화에 따른 표면거칠기에 관한 고찰과 대출력 클라이스트론 아노드 및 캐비티의 초정밀가공으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MCD공구는 80mm/min, PCD공구는 50m/min의 속도에서 가장 양호한 표면거칠기를 얻었다.
2. MCD, PCD공구는 모두 4mm/min이하의 이송속도에서 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다.
3. MCD공구는 절삭깊이 0.5 μm 에서 PCD공구는 2 μm 에서 가장 좋은 표면 거칠기를 얻었다.

4. 무산소동의 초정밀 가공시 주축속도는 80m/min 이상으로 하는 것이 유리하고, 이송속도는 작게 할수록 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있으며, 절삭깊이의 영향 낮으나 0.5mm 이상으로 하는 것이 유리하다.
5. 초정밀 가공기를 이용하여 대출력 클라이스 트론의 핵심부품인 아노드와 캐비티의 표면에 요구되는 표면 거칠기에 만족하는 Ra 3.2nm 표면 거칠기와 RMS 10nm 이하의 형상정밀도를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. R.R. Donaldson, D.D.Thompson, "Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine," ann. CIRP, Vol. 35, pp. 373-376, 1986.
2. Ikawa, Ultraprecision, "Metal Cutting - The Past, the Present and the Future," ann. CIRP, Vol. 40, pp. 587-594, 1991.
3. Geon-Hee Kim, Kwon-Hee Hong, Sang-Suk Kim, Jong-Ho Won, "Nano-turning Technology Using Ultraprecision Machining System," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 1, January 2002.
4. C.H. Seong, H.C. Kim, K.S. Kim, "Charac teristics of surface roughness in the high speed micro turning of aluminum alloy," Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 94-100, 1999.
5. E. Brinksmeier O Riemer, "Tools and Setting for Improved Surface Finish in Diamond Turning," proc. of Int. Precision Engineering, pp. 125-133, 1993.
6. Moriwaki, K. Okuda, "Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting," ann CIRP, Vol. 38, pp. 115-118, 1989.