

# 무산소동의 초정밀 절삭 특성을 이용한 아노드 및 캐비티의 가공

원종호\*(충남대 기계공학과), 김주환, 박순섭(충남대 대학원 기계공학과),  
김건희(한국기초과학지원연구원), 김상석(한국광기술원)

Machining of Anode and Cavity applying Ultraprecision Machining Characteristics of OXFC

J. H. Won(Mechanical Eng. Dept. CNU), J. H. Kim, S. S. Park(CNU),  
G. H. Kim(KBSI), S. S. Kim(KOPTI)

## ABSTRACT

Klystron which is micro wave amplifier tube are mainly used in fields of science such as accelerator, nuclear fusion, broadcasting, communication fields, and defense industry fields, ect.

The quality of Klystron anode and cavity are determined by form accuracy and roughness of the worked surface. Therefore anode and cavity are restricted the form accuracy strictly and the surface roughness be under  $R_{max}$  0.03S. As a work material of anode and cavity, the oxygen-free copper, that is used for optical parts of aerospace and laser mirror is selected. An outside diameter of material is  $\phi$  100 mm and an inside diameter is  $\phi$  30~33 mm.

In this study, to find the optimum ultra precision cutting condition of oxygen-free copper with diamond turning machine, the surface roughness is examined for various diamond tool nose radius, main spindle speed, feed rate and depth of cut. As a result of experiment, we could machined the anode and cavity with a surface roughness within  $R_a$  3.2 nm, a form accuracy within 0.01  $\mu$ m

**Key Words :** Klystron (클라이스트론), Anode and Cavity (아노드와 캐비티), Surface roughness (표면 거칠기), Oxygen-free copper (OXFC:무산소동)

### 1. 서론

현대산업은 정밀기계, 전기, 전자, 반도체, 광학 관련 기기를 비롯한 영상, 정보 및 항공 우주 산업 등의 급속한 발달로 인하여 그 구성 부품들의 고정도 가공에 대한 필요성이 확대되고 있다. 산업이 고도화됨에 따라 그 중요성이 더욱 강조되고있는 초정밀 가공기술은 제품의 고부가가치 창출은 물론 산업 전반에 가공기술의 파급효과를 미치고 있다.<sup>1)</sup>

본 연구는 초정밀 가공기를 이용하여 클라이스트론 증폭관의 내면, 즉 아노드와 캐비티의 가공을 목적으로 수행하였다.

현재 포항 선형가속기에 사용되고 있는 대출력 클라이스트론 증폭관은 작동 주파수가 2.856 GHz 이며 첨두 출력은 80 MW 급으로써 1기 당 20 만볼이

상을 호가하는 고가의 소모성 장치이다.

대출력 클라이스트론 증폭관의 내면 즉 아노드 및 캐비티면에 고전압, 대용량의 전자 및 마이크로파가 진행하게된다. 아노드와 캐비티면을 전자 및 마이크로파가 진행하는 동안 표면의 요철에 의한 아크 발생의 유무가 그 성능을 좌우한다. 또한 내면의 거칠기는 표면적과 직접적인 상관관계를 가지며 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.

아노드 및 캐비티의 재료로는 항공우주 광학

부품, 레이저 미러 등에 이용되는 무산소동을 사용하였으며, 재료의 외경은  $\downarrow 100$  mm 이며, 가공내경은  $\downarrow 30 \sim 33$  mm 정도로 7 개의 부품을 가공하여 조립 후 용접하는 제품이다.

아노드 및 캐비티의 초정밀 가공 기술 확보를 통하여 클라이스트론의 국산화를 가능하게 할 수 있으며, 초정밀 가공 치공구 설계·제작기술 향상과 무산소동 표면의 초정밀 가공 DB 구축으로 국내 초정밀 가공기술을 향상시킬 수 있다.

또한, 클라이스트론의 국산화로 포항가속기연구소에 이미 확립된 대출력 마이크로파 장치 시험 시설, 화학세정 시설, 고품질 용접 기술, 정밀 측정 시설 등의 기반 시설들과 고급 인력을 적극 활용 및 개발함으로써 국내외의 차세대 대형 사업에 공헌할 수 있다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치 및 재료

본 연구에서는 클라이스트론의 초정밀 가공을 위하여 한국기초과학연구원(KBSI)에 있는 영국 Talyer Hopson 의 계열사인 미국 Precitec Co.에서 개발한 Nanoform 600 다이아몬드 터닝 머신을 사용하였다.<sup>2),3)</sup> 또한 표면 거칠기 측정을 위하여 WYKO 사의 비접촉식 표면 측정기 NT2000 및 WYKO 6000 을 사용하였다.

초정밀 가공실의 온도는  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , 습도  $40 \pm 5$  %인 항온 항습의 클린룸이며, 장비의 진동방지를 위하여 독립 지반 구조로 되어있다.

실험에 사용한 Diamond tool nose radius 는 0.3, 0.5, 1.0, 1.5 mm 이며, 각각의 경사각은  $0^\circ$  이며 여유각은  $10^\circ$  로 예리하게 완성된 바이트를 사용하였다.

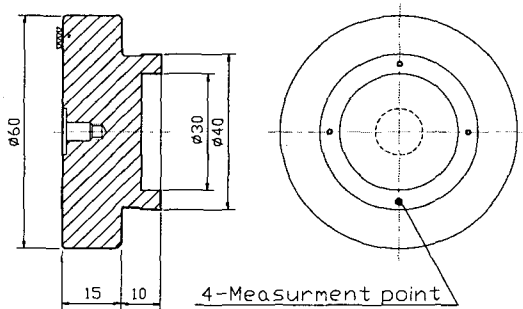


Fig. 1 Shape of test workpiece

Fig. 1 은 공작물의 형상을 나타내며 무산소동의 성분은 Table 1 과 같다.

Table 1 Compositions of work piece used in experiment

	Cu	Cr	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Al
%	rest	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.40

Fig. 2 는 아노드와 캐비티의 3 차원 모델링을 나타낸다.

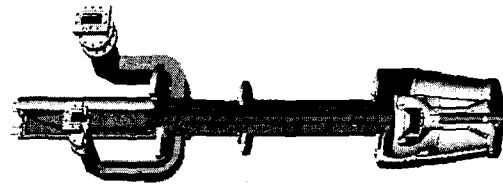


Fig. 2 3D assemble modeling of klystron anode and cavity

### 2.2 실험 방법

무산소동의 초정밀 최적 가공 조건을 찾기 위하여 Table 2 와 같이 여러 가지 주축 회전속도, 이송속도 및 절삭 깊이에 따른 표면 거칠기를 측정하였다.

이 때 사용되는 절삭유의 급유 방식은 방전유를 압축 공기와 혼합하여 분사하는 세미드라이 방법을 취하였으며, 가공 후 절삭 조건에 따른 가공면의 표면 거칠기는 광학식 비접촉 표면 조도 측정기인 NT2000 으로 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )를 측정하여 비교 하였다.

표면 거칠기의 측정은 Fig. 1 에서와 같이 4 지점을 측정하여 측정값의 오차를 줄이고자 했다.

Table 2 Basic set of cutting conditions.

Material	Oxygen-free copper
Spindle speed (rpm)	400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400
Feed rate (mm/min)	2.5, 5, 10, 15
Depth of cut ( $\mu\text{m}$ )	3, 5, 8, 10
Chucking pressure( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	21
Cutting fluid	Air + oil

또한 무산소동의 초정밀 절삭 특성을 바탕으로 아노드와 캐비티의 가공을 수행하였다.

Fig. 3 은 아노드의 초정밀 가공 사진이다.

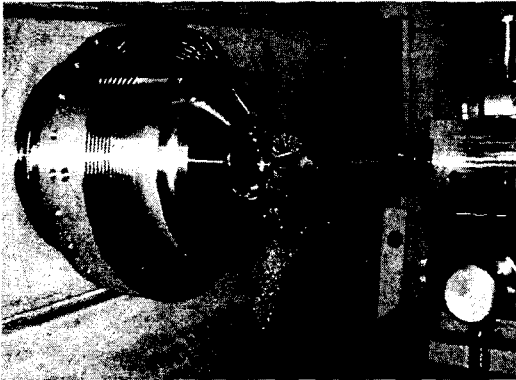


Fig. 3 Manufacture of Anode

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 주축 회전속도에 대한 표면 거칠기

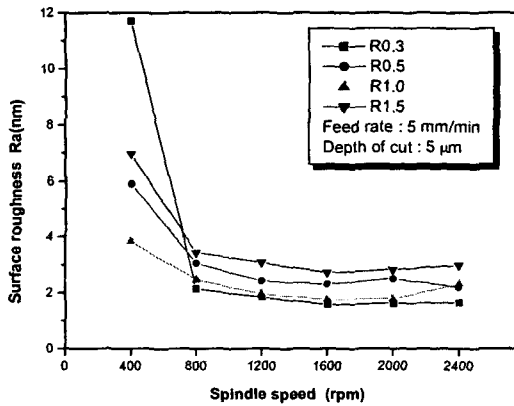


Fig. 4 Surface roughness versus spindle speed

Fig. 4 는 절삭깊이 5  $\mu\text{m}$ , 이송속도 5 mm/min 에서 여러 가지 Tool nose radius 에 대한 주축 회전속도에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다.

800 rpm 이상에서는 주축회전 속도에 따른 표면 거칠기의 변화는 거의 없으며 800 rpm 미만에서는 급격한 절삭력의 증가로 인하여 표면 거칠기는 악화된다. Tool nose radius 에 대한 표면 거칠기의 변화는 거의 같은 경향을 나타냈으며 Tool nose radius 가 0.3 mm, 주축회전속도 1600 rpm 일 때 1.58 nm 로 가장 양호하게 나타났다.

#### 3.2 이송속도에 대한 표면 거칠기

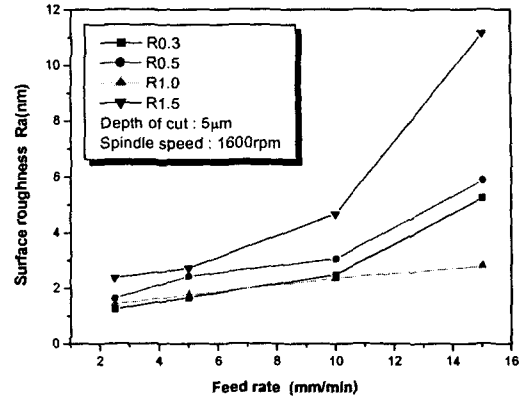


Fig. 5 Surface roughness versus feed rate

Fig. 5 는 절삭깊이 5  $\mu\text{m}$ , 주축회전속도 1600 rpm 에서 여러 가지 Tool nose radius 에 대한 이송 속도에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다.

이송속도가 증가하면서 표면 거칠기가 나빠지는 경향을 볼 수 있으며, 이러한 실험 결과는 이송방향의 표면 거칠기는 인선반경과 공작물의 1 회전당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면 거칠기와 유사한 경향을 나타내고 있다.<sup>4)</sup>

공작기계의 진동과 외부 환경 변수들이 절삭 과정에 미치는 영향은 이송이 작은 범위에서 크게 작용하게 되며 10 mm/min 을 초과하면서부터 이러한 영향보다 이송의 영향이 가공면의 표면 거칠기에 더 크게 작용하고 있음을 볼 수 있다.

따라서 가공에 적절한 이송속도는 5  $\mu\text{m}$  정도임을 알았다.

#### 3.3 절삭깊이에 대한 표면 거칠기

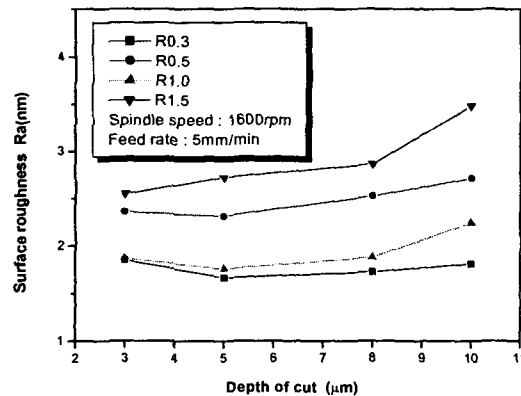


Fig. 6 Surface roughness versus depth of cut

Fig. 6 은 주축회전속도 1600rpm, 이송속도 5 mm/min 에서 여러 가지 Tool nose radius 에 대한 절삭 깊이에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다.

절삭깊이에 대한 표면 거칠기의 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 절삭깊이가 아주 작을 경우의 칩 배출 과정은 주로 러빙(rubbing)이나 버니싱(burnishing)같은 소성변형에 의해 원활하게 이루어지지 못하며, 소성 변형을 일으킨 표면에서는 큰 잔류응력이 형성되어 표면의 질에 악영향을 끼친다.

본 실험결과에서도 절삭깊이 5  $\mu\text{m}$  미만에서 그러한 경향을 찾아 볼 수 있다.<sup>9)</sup>

여러 가지 실험 결과 최적의 절삭 조건은 가공 효율성을 고려할 때 주축 회전속도는 1600 rpm, 이송속도는 5 mm/min, 절삭깊이는 5  $\mu\text{m}$  일 때 가장 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.

### 3.4 아노드 및 캐비티의 가공특성

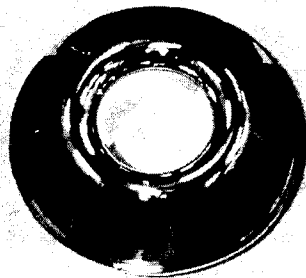
무산소동의 초정밀 절삭 특성을 바탕으로 아노드와 캐비티를 가공하였으며, Table 3 은 아노드와 캐비티의 가공 조건을 나타낸다.

Table 3 Cutting conditions of Anode and Cavity

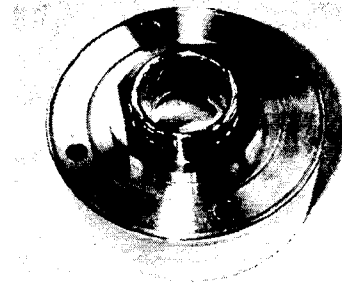
Material	Oxygen-free copper
Spindle speed (rpm)	1600
Depth of cut ( $\mu\text{m}$ )	5, 8, 10
Feed rate (mm/min)	5
Nose radius of tool (mm)	0.3

아노드와 캐비티의 가공방법은 무산소동의 가공에서 가장 양호한 표면 거칠기를 나타낸 조건을 기준으로 주축 회전속도가 1600 rpm, 이송속도 5 mm/min 로 하고 절삭깊이 10  $\mu\text{m}$  로 황삭 가공을 하였으며 8  $\mu\text{m}$  로 중삭가공 후 5  $\mu\text{m}$  절삭깊이로 정삭가공을 수행하였다.

Fig. 7 은 아노드와 캐비티의 가공 후 사진을 나타낸다.



(a) anode



(b) cavity

Fig. 7. Photo of klystron anode and cavity.

### 4. 결론

본 연구에서는, 여러 가지 주축 회전속도, 이송속도 및 절삭 깊이에 따른 무산소동의 초정밀 가공을 바탕으로 아노드와 캐비티의 초정밀 가공을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 무산소동의 소재 가공에 관한 초정밀 절삭 특성을 통하여 무산소동의 최적 가공조건은 본 실험 조건 내에서 주축 회전속도는 1600 rpm, 이송속도는 5 mm/min, 절삭깊이는 5  $\mu\text{m}$  일 때 가장 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.

(2) 천연 다이아몬드 공구의 Nose radius 에 따른 표면 거칠기 평가에서는 R 0.3 mm 에서 가장 양호한 표면 거칠기 Ra 1.66 nm 를 얻을 수 있었다.

(3) 초정밀 가공기를 이용하여 클라이스트론의 핵심 부품인 아노드와 캐비티의 표면에 요구되는 표면 거칠기에 만족하는 Ra 3.2 nm 표면 거칠기와 0.01  $\mu\text{m}$  이하의 형상정밀도를 얻을 수 있었다.

### 참고문헌

1. T. Sugan, K. Takeuchi, "Diamond turning of an Aluminum Alloy for Mirror.", ann. CIRP, Vol.35, pp17~20, 1987.
2. Ikawa, Ultraprecision Metal Cutting - The Past, the Present and the Future, ann. CIRP, Vol.40, pp. 587~594. 1991.
3. J. D. Kim, "Mirror cutting of Al alloy as the shape natural diamond tool edge", Transactions of Korea Society of Mechanical eng., Vol.14, No.6, pp. 1515~1522. 1990.
4. E. Brinksmeier O Riemer, Tools and Setting for Improved Surface Finish in Diamond Turning, proc. of Int. Precision Engineering, pp.125~133, 1993.
5. T. Moriwaki, K. Okuda, "Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting", ann CIRP, Vol.38, pp. 115~118, 1989.