

# 전해 가공을 이용한 텅스텐 카바이드 미세축 제작

강명주\*, 오영탁\*\*, 주종남\*\*\*

## Fabrication of Tungsten Carbide Microshaft Using Electrochemical Machining

Myung Ju Kang\*, Young Tak Oh\*\* and Chong Nam Chu\*\*\*

### ABSTRACT

Tungsten carbide microshaft is used as micro-punch, electrode of MEDM (micro-electro-discharge machining), and micro-tool because it has high hardness and high rigidity. In this study, the tungsten carbide microshaft was fabricated using electrochemical machining. Concentration of material removal at the sharp edge and metal corrosion layer affect the shape of the microshaft. Control of microshaft shape was possible through conditioning the machining voltage and electrolyte concentration. By applying periodic voltage, material removal rate increased and surface roughness improved. The fabricated microshaft in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolyte maintained sharper end edge and better surface finish than those fabricated by other electrolytes.

**Key Words** : Electrochemical machining (전해가공), Electrolyte concentration (전해액농도), Periodic voltage (주기적전압), Tungsten carbide microshaft (초경합금미세축)

### 1. 서론

전해가공은 전해액과 가공하고자 하는 금속 재료 사이의 전기화학적 용해반응을 이용해서 재료를 가공하는 방법이다. 전해가공은 일반적인 기계 가공과 달리 비접촉식 가공으로서 가공물과 전극 사이에 힘이 작용하지 않으므로 가공물에 변형이나 응력이 남지 않고 전극 마모가 발생하지 않는다. 또한 분자 단위의 전해 반응을 이용한 가공법이므로 가공물의 표면 거칠기가 우수하며 미세가공이 가능하다. 그리고 여러 개의 공작물을 동일한 조건으로 동시에 가공할 수 있으므로 대량

생산에 적합하며 정밀한 위치 제어 장치나 스피들이 요구되지 않는다. 그러나 형상과 크기를 정밀하게 제어하기가 힘들며 가공 시 발생하는 기포에 의한 영향을 배제하기 힘든 단점이 있다.

텅스텐과 같은 단일 금속 재료에 대한 전해가공은 많은 연구가 진행되어 왔다. Muller 등<sup>(1)</sup>이 전해 에칭법을 이용하여 최초로 FIM (Field Ion Microscopy)의 탐침을 제작한 이래, Fotino, Morikawa, 인치현, 우선기 등<sup>(2-5)</sup>에 의해서 STM (Scanning Tunneling Microscopy), AFM (Atomic Force Microscopy), 반도체 검사용 프로브 카드 등에 사용되는 미세 탐침을 제작하는 연구가 진행되었다.

2001년 9월 21일 접수  
\* LG 전자 냉장고연구소  
\*\* 서울대 정밀기계설계공통연구소  
\*\*\* 서울대 기계항공공학부

그러나 이러한 연구들은 원뿔 형상의 미세 탐침을 제작하는 것에 초점이 맞추어져 왔으므로 응용분야가 매우 제한적이다. 임영모 등<sup>(6)</sup>은 진류 밀도 제어를 통해 길이 4 mm, 직경 50  $\mu\text{m}$ 의 균일 직경 텅스텐 미세축을 제작함으로써 전해 프로세스를 이용하여 균일 직경의 미세축 가공이 가능함을 보였다.

텅스텐 카바이드는 경도가 높고 내마모성이 우수하다. 따라서 텅스텐 카바이드 미세축은 잉크젯 프린터 노즐이나 자동차 연료 분사 노즐과 같은 미세 구멍의 가공에 이용되는 미세 편지로 사용될 수 있다. 또한 전해가공의 특성을 이용하여 대량 생산된 미세축은 여러 개의 미세 구멍을 동시에 가공하는 미세 방전 가공에 이용될 수 있다. 텅스텐 카바이드의 전해반응에 대한 연구는 Human 등<sup>(7)</sup>에 의해 진행되었는데 텅스텐 카바이드 공구의 전기화학적 침식 반응에 의한 마모에 연구의 초점을 맞추어 전해반응 특성을 분자 구조적 관점에서 고찰함으로써 실제 가공 특성에 대한 연구는 이루어지지 못하였다. Masuzawa 등<sup>(8)</sup>은 텅스텐 카바이드 가공품 표면의 품질 향상을 위해 전해 프로세스를 사용하였다.

본 연구에서는 전해가공시 나타나는 모서리부 가공집중 현상과 금속 침식층 성장 특성을 이용하여 균일한 직경의 끝 모서리가 날카로운 텅스텐 카바이드 미세축을 가공할 수 있음을 보였다. 전압과 전해액의 농도에 따른 텅스텐 카바이드 재료의 가공 특성을 파악하고 적절한 가공 조건의 설정을 통해 원하는 형상과 크기를 갖는 미세축을 가공할 수 있었다. 또한 전압을 주기적으로 인가함으로써 재료제거율(MRR)이 향상되며 공작물의 표면거칠기가 개선됨을 확인하였다. 황산( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )을 전해액으로 사용하고 적절한 가공 조건의 설정을 통해 직경 200  $\mu\text{m}$ 의 텅스텐 카바이드 축을 전해가공 하여 직경 40  $\mu\text{m}$ , 길이 400  $\mu\text{m}$ 의 미세축을 제작하였다.

## 2. 황산 전해액 및 형상 가공 특성

### 2.1 황산 전해액의 특성

실험에 사용된 텅스텐 카바이드 축은 텅스텐 카바이드 입자들을 코발트로 결합시킨 혼합물이다. 텅스텐 카바이드의 전해가공에 사용되는 전해액으로는 결합제만을 가공하는 전해액과 결합제와 텅

스텐 카바이드 입자를 동시에 가공하는 전해액이 있다.

결합제만을 가공하는 대표적인 전해액으로는 염화나트륨 ( $\text{NaCl}$ )과 염화암모늄 ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )이 있다. 이들은 중성염으로서 유해하지 않고 쉽게 다룰 수 있는 장점이 있으나 결합제인 코발트만을 가공하므로 가공 표면에 텅스텐 카바이드 입자를 남기게 되어 표면이 매끄럽지 못하다. 또한 가공 시 가공 표면에 부동태 피막이 생기기 쉬워 가공이 용이하지 않은 단점이 있다.

텅스텐 카바이드 입자와 결합제를 동시에 가공할 수 있는 전해액으로는 염화 나트륨과 수산화 나트륨 ( $\text{NaOH}$ )의 혼합 용액과 황산이 있다. 염화 나트륨과 수산화 나트륨 혼합 용액을 사용하면 결합제만을 가공하는 것에 비해 표면이 매끄러워지는 장점이 있지만 모서리부에 가공이 집중되어 날카로운 모서리를 얻기가 힘들다. 이에 반해 황산 전해액을 사용할 경우 표면이 매끄럽고 날카로운 모서리부를 얻기가 용이하므로 미세 공구의 제작에 유리하다. 또한 농도와 가공 전압을 조절함으로써 형상을 제어할 수 있으며 점도가 낮아 가공 시 발생하는 슬러지(sludge)의 제거가 용이한 장점이 있다.

### 2.2 형상 가공 특성

미세축의 전해가공 시 축의 형상에 영향을 미치는 두 가지의 특성이 존재한다. 첫번째는 텅스텐 카바이드 축의 초기 형상에 모서리부가 존재할 경우 그곳에 전해반응이 집중되는 현상이며 두번째는 가공 중에 생성되는 금속 이온이 확산되지 못해서 형성되는 금속침식층이다.

일반적으로 전하는 곡률이 큰 모서리부에 집중하는 성질이 있다. 따라서 Fig. 1과 같이 가공하고자 하는 텅스텐 카바이드 공작물의 초기 형상에 모서리부가 존재할 경우 그곳에 전하가 집중되어 산화 반응이 활발해져 금속의 용출이 많아지게 되어 모서리부의 가공량이 다른 부분에 비해 증대되므로 가공되는 축이 테이퍼 형상을 가진다.

텅스텐 카바이드 축에서 산화되어 용출되는 금속 이온들은 빠른 속도로 전해액 속으로 확산된다. 만약 산화되는 속도가 금속 이온이 확산되는 속도보다 빠르면 전해액 속으로 확산되지 못한 금속 이온들이 Fig. 2와 같이 축 주위로 층을 형성하게 되는데 이를 금속침식층이라 일컫는다<sup>(9)</sup>. 금

속침식층은 시간이 지남에 따라 성장해 가면서 텅스텐 카바이드 축과 전해액의 만남을 방해하여 텅스텐 카바이드의 산화 용출을 방해한다. 따라서 이 층이 형성된 곳에서는 가공량이 줄어든다. 금속침식층은 시간이 지날수록 아래로 내려가므로 축의 아래부분에서 금속침식층의 두께가 두터워져 가공속도가 저하되며 이로 인해 축이 역테이퍼 형상을 가지게 된다. 만약 전압이 증가하면 금속 이온의 용출 속도가 증대되어 금속침식층의 성장 속도가 빨라지므로 역테이퍼 형상이 심화된다.

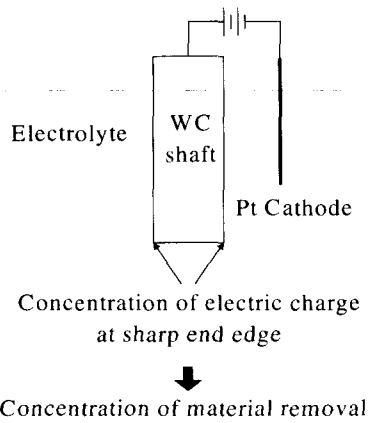


Fig. 1 Material removal concentration at sharp edge

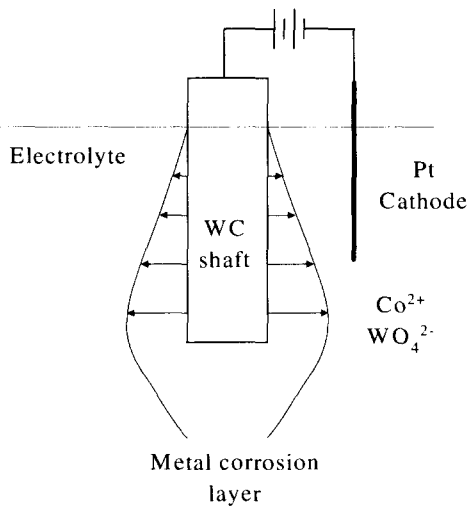


Fig. 2 Growth of metal corrosion layer

텅스텐 카바이드 미세축의 전해가공 시 형상에 영향을 미치는 두 요소 중, 모서리부 가공 집중 현상은 축의 초기 형상에 기인하므로 조절이 어렵지만 금속침식층의 성장 속도는 전압에 의해 조절이 가능하므로 가공축의 형상 또한 제어가 가능하다. 따라서 전압의 조절을 통해 금속침식층의 성장 속도를 제어함으로써 미세축 형상의 역테이퍼 정도를 조절하여 모서리부 가공 집중 현상에 의한 테이퍼 정도와 평형을 맞추면 직경이 균일한 미세축의 가공이 가능하다.

### 3. 실험 장치 및 가공 조건

#### 3.1 실험 장치의 구성

Figure 3 은 실험 장치의 개략도이다.

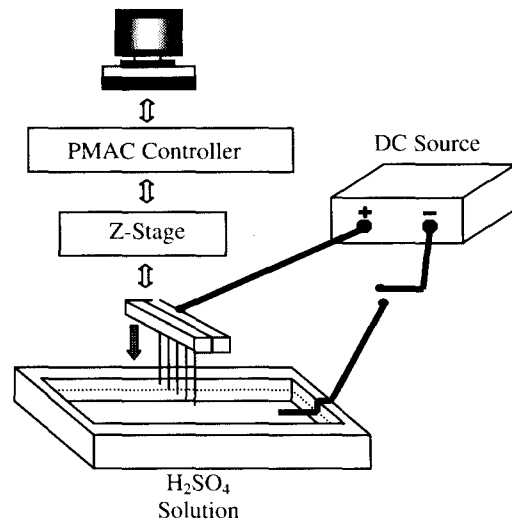


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

공작물에 해당하는 직경 200  $\mu\text{m}$  의 텅스텐 카바이드 봉을 부착할 수 있는 두랄루민 지그(jig)를 제작하였고 텅스텐 카바이드 봉과 지그는 알루미늄 박판으로 통전시켰다. 두랄루민 지그를 정밀이송 스테이지 (Parker MSA6705)의 Z 축에 장착하였고 PMAC 컨트롤러를 PC 와 인터페이스 시킴으로써 전해액 속으로의 가공물 침지 깊이를 조절하였다. 전해액으로는 황산 용액을 사용하였으며 백금을 전극으로 사용하였다. 아크릴 재질의 수조에 황산 용액을 담은 후 Z 축을 이송하여 텅스텐 카

바이드 붕을 황산 용액에 침지시킨 후 DC 전원의 양극을 텅스텐 카바이드 붕이 부착된 두랄루민 지그에 연결하고 음극을 백금 전극에 연결하였다.

### 3.2 가공량 및 테이퍼 각의 정의

Figure 4 는 가공된 텅스텐 카바이드 미세축의 단순화된 형상 모델이다.

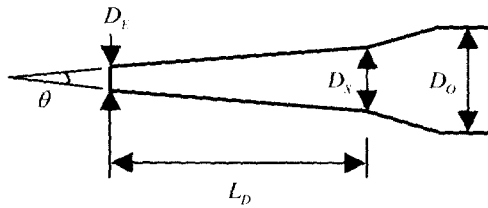


Fig. 4 Geometrical parameters of machined microshaft

\$D\_o\$ 는 가공하기 전 텅스텐 카바이드 붕의 직경, \$D\_s\$ 는 전해액 수면에서의 미세축 직경, \$D\_e\$ 는 미세축 끝 직경, \$L\_D\$ 는 침지 깊이, 그리고 \$\theta\$ 는 미세축의 테이퍼 각을 나타낸다. 가공된 미세축의 각 부분 치수를 측정함으로써 가공량과 직경이 균일한 정도를 나타내는 테이퍼 각을 식 (1)과 식 (2)로부터 계산할 수 있다. 가공량 계산 시 미세축 끝으로부터 침지 깊이까지만을 고려하였으며 길이 방향 가공량은 무시하였다.

$$MRR = \frac{\left[ \frac{1}{4} D_o^2 - \frac{1}{12} (D_s^2 + D_s D_e + D_e^2) \right] L_D \cdot \pi}{t_M} \quad (1)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left( \frac{D_s - D_e}{2 L_D} \right) \quad (2)$$

식 (1)에서 \$t\_M\$ 은 실제 가공 시간이다.

### 3.3 가공 조건

모서리부 가공 집중 현상과 금속침식층의 성장 특성을 이용하여 균일한 직경의 미세축을 가공할 경우 전해액의 농도와 전압에 따라 가공축의 형상이 달라진다. 따라서 전해액의 농도와 전압이 가공 형상에 미치는 영향을 실험적으로 파악하였으며 이를 통해 최적의 가공 조건을 결정하였다. 가공물의 침지 깊이와 가공 시간은 각각 \$500 \mu m\$ 와 120 sec 로 일정하게 하고 전압과 전해액의 농

도를 변화시키며 가공된 미세축의 형상을 관찰하였다. 전압을 걸어줄 때는 Fig. 5 와 같이 가전과 단전을 5 초씩 반복하는 주기적 가전을 하였으며 주기적 가전의 효과를 실험적으로 살펴보았다.

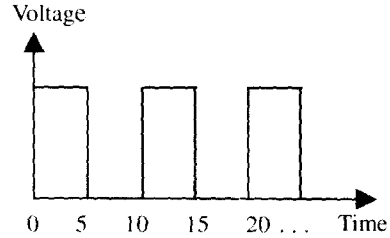


Fig. 5 Applied periodic voltage

## 4. 실험 결과

### 4.1 주기적 가전의 효과

Figure 6(a)와 (b)는 주기적 전압과 연속 전압 하에서 가공된 미세축의 형상을 보여주고 있다.



Fig. 6(a) Microshaft machined under periodic voltage for 120 sec (5 sec on and 5 sec off)



Fig. 6(b) Microshaft machined under continuous voltage for 60 sec

가공 전압은 6.5 V 였으며 황산 전해액의 농도는 5%였다. 주기적 전압 하에서 가공된 경우 연속 전압 하에서 가공된 경우에 비해 가공량이 많고 거스러미가 적게 발생하였음을 알 수 있다. 단전 시 가공중에 생성되어 성장한 금속 침식층이 전해액 속으로 확산될 시간을 벌어주어 가전 시 전해 반응에 대한 금속 침식층의 방해가 감소하여

가공량이 증가한 것으로 판단된다. 또한 단전에서 가전으로 전환할 때 발생하는 기포의 활동에 의해 거스르미가 떨어져 나가는 것으로 생각된다. 위 결과로부터 전해 가공 시 주기적 전압을 가하는 것이 가공량 증대와 거스르미의 발생 억제에 유리함을 알 수 있다.

**4.2 전압 변화에 따른 미세축 가공 특성**

Figure 7(a)와 (b)는 5% 농도의 황산 전해액에서 전압을 5 V에서 10 V 까지 변화시키며 가공하였을 경우 가공량(MRR)과 테이퍼 각의 변화를 보여주고 있다.

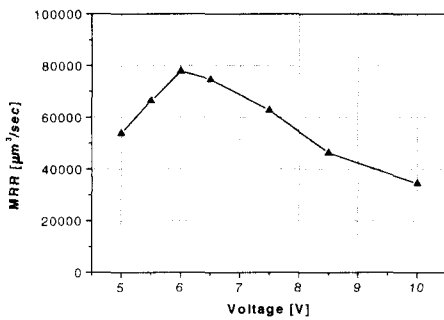
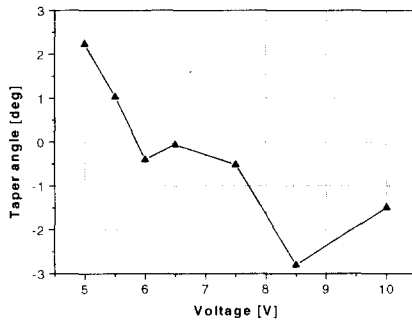


Fig. 7(a) Variation of MRR according to the voltage



change

Fig. 7(b) Variation of taper angle according to the voltage change

7 V 이상의 전압에서는 전압이 커질수록 가공량이 감소하며 역테이퍼 형상을 가진다. 이는 금속 침식층의 급속한 성장으로 인해 전해 반응이

방해를 받으며 금속 침식층의 하강으로 인해 전극 아래쪽의 가공량이 위쪽의 가공량에 비해 감소하기 때문이다. 5 V의 저전압에서는 고전압에서와 같이 가공량이 줄어드는 경향을 보이며 테이퍼 형상을 가진다. 가공량이 감소한 것은 전해 가공에 필요한 충분한 전류가 공급되지 못했기 때문이며 금속 침식층의 성장보다는 모서리부 가공 집중 현상이 우세하므로 전극 아래쪽의 가공량이 위쪽의 가공량에 비해 상대적으로 크기때문에 가공된 전극은 테이퍼 형상을 보인다.

Fig. 8(a), (b), 그리고 (c)는 각각 5.5 V, 8.5 V, 그리고 6.5 V 전압에서 가공된 텅스텐 카바이드 미세축의 형상들을 보여주고 있다. 5.5 V와 8.5 V의 전압에서 가공된 경우의 가공량이 6.5 V에서 가공된 경우에 비해 작음을 알 수 있고 형상 역시 균일하지 못하고 테이퍼 및 역테이퍼 형상을 가지고 있음을 볼 수 있다. 이상의 실험 결과로부터 6 V의 전압에서 가공량이 최대가 되며 6.5 V의 전압에서 테이퍼 각이 0에 가까운 값이 됨을 알 수 있다.

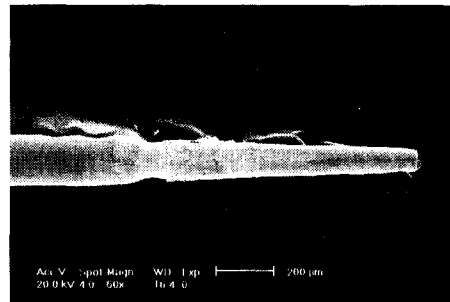


Fig. 8(a) Microshaft fabricated on 5.5 V

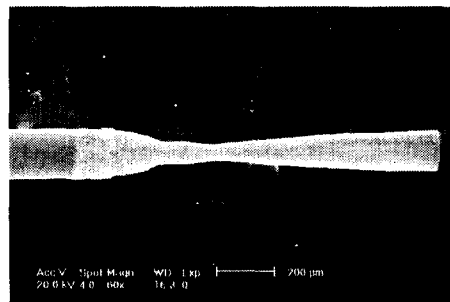


Fig. 8(b) Microshaft fabricated on 8.5 V

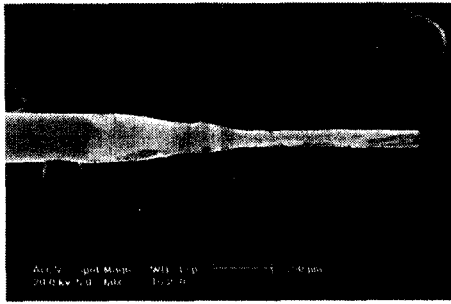


Fig. 8(c) Microshaft fabricated on 6.5 V

### 4.3 전해액 농도 변화에 따른 미세축 가공 특성

미세축의 가공량과 테이퍼 형상에 대한 전해액 농도의 영향 파악을 위해 전압을 6.5 V로 고정하고 전해액의 농도를 변화시키며 미세축을 가공하였다. 전해액 농도 변화에 따른 MRR과 테이퍼 각의 변화를 Fig. 9(a)와 (b)에 나타내었다.

동일한 전압에서도 전해액의 농도에 따라 미세축의 가공량과 테이퍼 각이 달라진다. 2.5%의 저농도 전해액에서는 가공량이 적고 양의 테이퍼 각을 가지며 10%의 고농도 전해액에서는 가공량이 적고 음의 테이퍼 각을 가진다. 전해액의 농도가 낮은 경우 전해 반응에 필요한 이온이 충분히 공급되지 못하여 가공량이 줄어들고 이온 농도가 낮아 금속 침식층이 전해액으로 확산되는 속도가 빨라 금속 침식층의 성장보다는 전극 끝 모서리부에서의 가공 집중 현상이 더욱 우세하므로 양의 테이퍼 각을 가진다. 고농도 전해액의 경우 전해 반응이 활발히 일어나지만 이온의 농도 또한 높아 지므로 금속 침식층이 전해액 속으로 확산되는 속도가 느려져 금속 침식층의 성장이 빠르게 되어 가공을 방해하게 되고 성장된 금속 침식층이 하강하면서 전극 아래쪽에서의 전해 반응이 전극 위쪽에 비해 더디므로 가공량이 줄어들고 음의 테이퍼 각을 가진다. Fig. 10은 6.5 V의 전압으로 10% 농도의 전해액에서 가공된 미세축의 형상이다. 5% 농도에서 가공된 미세축(Fig. 8(c))에 비해 가공량이 적고 역 테이퍼 형상을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 전해액 농도 변화 실험 결과 가공량이 최대인 전해액 농도는 3.75%인 것으로 나타났으며 5%의 전해액 농도에서는 테이퍼 각이 0에 가까운 값을 가짐을 알 수 있었다.

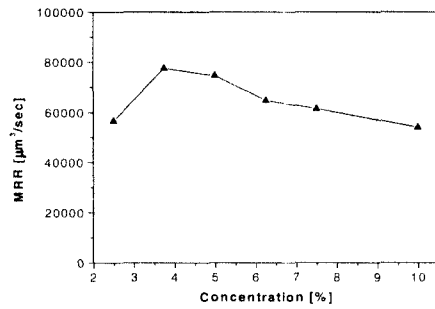


Fig. 9(a) Variation of MRR according to the change of electrolyte concentration

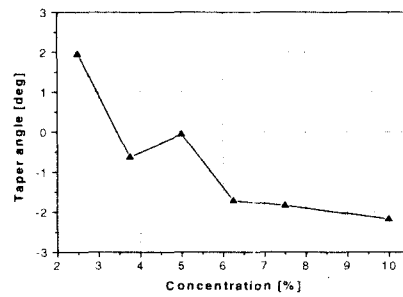


Fig. 9(b) Variation of taper angle according to the change of electrolyte concentration

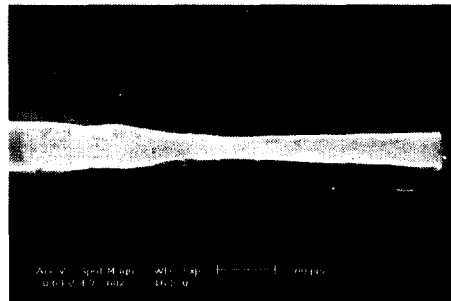


Fig. 10 Microshaft fabricated on 10% concentration

### 4.4. 균일 직경의 텅스텐 카바이드 미세축 제작

전압 및 전해액 농도 변화 실험을 통해 가공량이 최대인 전압과 전해액 농도는 6 V와 3.75%이며 균일한 직경을 얻을 수 있는 전압과 전해액 농도는 6.5 V와 5%임을 알 수 있었다. 위 가공 조

건들을 이용하여 균일한 직경의 텅스텐 카바이드 미세축을 가공하였다. 그런데 가공 중 전압을 변경하는 것은 용이하지만 전해액 농도를 변경하는 것은 전해액을 교환해야 하는 번거로움이 있다. 또한 본 연구에서는 균일한 직경의 미세축을 얻는 것에 더 큰 목적을 두고 있으므로 전해액의 농도를 5%로 고정하였다. 균일 직경의 미세축 제작을 위한 상세 가공 조건을 table 1 에 나타내었다.

Table 1 Two step machining conditions

Parameter	1st step	2nd step
Electrolyte concentration	5%	5%
Dipping length	500 $\mu\text{m}$	400 $\mu\text{m}$
Voltage	6 V on and off	6.5 V on and off
Machining time	100 sec	40 sec

1 차 가공에서는 가공율(MRR)의 최대화를 목적으로 하였으며 2 차 가공에서는 텅스텐 카바이드 미세축의 직경을 균일하게 함으로써 원통형의 미세축을 얻는 것을 목적으로 하였다. 1 차 가공과 2 차 가공에서 침지 깊이를 달리한 것은 축의 전해가공시 축과 전해액 수면의 경계 부위에서 일반적으로 발생하는 네킹(necking) 현상을 배제하기 위해서이다. Table 1 에 제시된 조건으로 직경 200  $\mu\text{m}$  의 텅스텐 카바이드 전극을 전해가공 하였다. 가공된 미세축의 형상을 Fig. 11(a)에 나타내었고 그 끝의 자세한 형상을 Fig. 11(b)에 나타내었다.

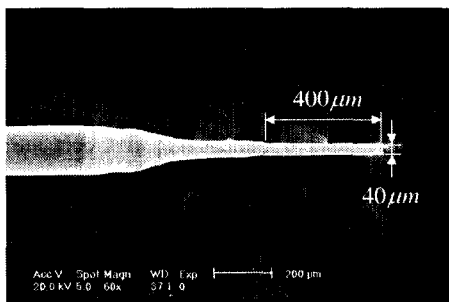


Fig. 11(a) Tungsten carbide microshaft with 40  $\mu\text{m}$  diameter and 400  $\mu\text{m}$  length

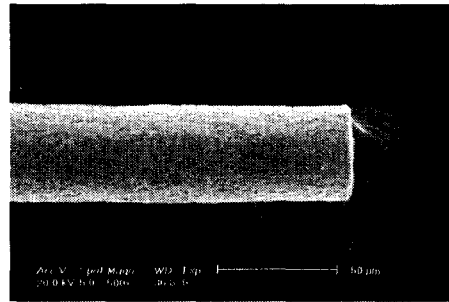


Fig. 11 (b) End shape of fabricated microshaft

가공된 미세축의 직경은 40  $\mu\text{m}$  이며 균일한 직경이 유지되는 길이는 400  $\mu\text{m}$  였다. 제작된 미세축의 원통도는 3.3  $\mu\text{m}$  였다. 가공된 미세축의 끝 모서리부는 가공 전 전극 끝의 형상과 동일하게 날카로움을 유지하고 있으며 가공 표면 또한 매우 우수함을 확인할 수 있다. 축끝단의 날카로움을 유지시키는 원인이 되는 금속 침식층의 영향에 의해 축방향 가공량은 무시할 수 있을 정도로 작았다. 따라서 본 연구에서 제시한 가공 조건으로 텅스텐 카바이드 미세축을 가공할 경우 직경이 균일하며 표면이 우수하고 끝 모서리부의 날카로움을 유지하는 미세축을 제작할 수 있다.

본 연구를 통해 가공된 미세축의 형상과 표면을 다른 전해액에서 가공한 미세축의 형상 및 표면을 비교하였다. Fig. 12(a)는 염화나트륨 전해액을 사용하여 가공한 텅스텐 카바이드 미세축의 형상이며 Fig. 12(b)는 염화나트륨과 수산화나트륨 혼합용액을 전해액으로 사용하여 가공한 미세축 끝의 형상이다.

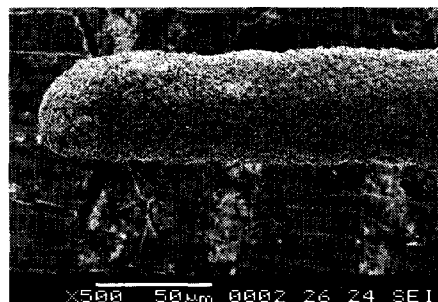


Fig. 12(a) End shape of microshaft fabricated in NaCl electrolyte

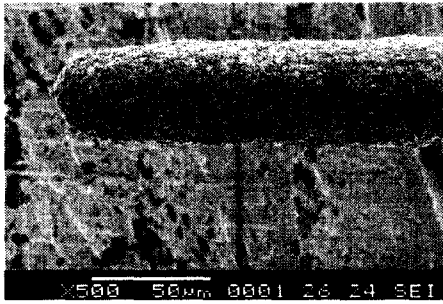


Fig. 12(b) Microshaft fabricated in mixed electrolyte of NaCl and NaOH

황산 전해액에서 가공된 미세축(Fig. 11(b))에 비하여 표면이 거칠고 끝 모서리부가 무너져 있음을 확인할 수 있다

### 5. 결론

황산 전해액을 사용하여 텅스텐 카바이드 미세축을 전해가공 하였다. 미세축의 전해가공 시 가공 형상을 결정짓는 모서리부 가공 집중 현상과 급속 침식층의 성장을 이용하여 직경이 균일한 미세축을 제작하였다. 가공 전압과 전해액의 농도에 따른 미세축의 형상 변화를 관찰하였고, 균일한 직경의 미세축 제작을 위한 최적의 가공 전압과 전해액 농도를 선정하였다. 이를 통해 직경  $40\ \mu\text{m}$ , 길이  $400\ \mu\text{m}$ 의 균일 직경 텅스텐 카바이드 미세축을 가공하였다. 가공된 미세축의 끝은 날카로운 모서리부 형상을 유지하였다. 또한 전해액의 종류에 따라 가공되는 텅스텐 카바이드 미세축의 형상과 표면을 관찰함으로써 텅스텐 카바이드 미세축의 전해 가공 시 황산 용액이 전해액으로서 우수한 성능을 보임을 실험적으로 검증하였다. 본 연구결과는 미세 방전 가공의 전극이나 마이크로 펀치로서 유용하게 쓰이는 균일 직경 텅스텐 카바이드 미세축의 대량 제작에 이용될 수 있다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부의 산업기반기술개발사업의 일환으로 진행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. E. W. Muller and T. T. Tsong, "Field Ion Microscopy," Elsevier, New York, 1969.
2. M. Fotino, "Tip Sharpening by Normal and Reverse Electrochemical Etching," Rev. Sci. Instrum., Vol. 64, pp. 159-167, 1993.
3. H. Morikawa and K. Goto, "Reproducible Sharp-pointed Tip Preparation for Field Ion Microscopy by Controlled AC Polishing," Rev. Sci. Instrum., Vol. 59, pp. 2195-2197, 1988.
4. 인치현, 김규만, 주종남, "전기화학적 에칭을 이용한 텅스텐 미세 탐침 가공," 한국 정밀공학회지, 제 18 권, 제 2 호, pp. 111-118, 2001.
5. 우선기, 이홍로, "전기화학적 에칭법에 의한 텅스텐 와이어의 Sharp Tip 제조에 대한 연구," 한국 표면공학회지, Vol. 31, pp. 45-53, 1998.
6. 임영모, 임형준, 김수현, "전해 프로세스를 이용한 미세축 제작," 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 3 호, pp. 169-174, 2001.
7. A. M. Human, B. Roebuck, and H. E. Exner, "Electrochemical Polarization and Corrosion Behavior of Cobalt and Co (W, C) Alloys in 1 N Sulphuric Acid," Materials Science and Engineering, A241, pp. 202-210, 1998.
8. T. Masuzawa, M. Kimura, "Electrochemical Surface Finishing of Tungsten Carbide Alloy," Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 199-202, 1991.