

# 전해 가공을 이용한 WC 미세축 제작

최세환<sup>#</sup>, 류시형<sup>\*</sup>, 최덕기<sup>\*\*</sup>, 주종남<sup>\*\*\*</sup>

## WC Micro-shaft Fabrication Using Electrochemical Etching

Se Hwan Choi<sup>#</sup>, Shi Hyoung Ryu<sup>\*</sup>, Deok Ki Choi<sup>\*\*</sup> and Chong Nam Chu<sup>\*\*\*</sup>

### ABSTRACT

Tungsten carbide microshaft can be used as various micro-tools for MEMS because it has high hardness and high rigidity. In this study, experiments are performed to produce tungsten carbide micro-shaft using electrochemical etching. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution is used as electrolyte because it can dissolve tungsten and cobalt simultaneously. Optimal electrolyte concentration and machining voltage satisfying uniform shape, good surface quality, and high MRR of workpiece are experimentally found. By controlling the various machining parameters, a straight micro-shaft with 5 μm diameter, 3 mm length, and 0.2° taper angle was obtained.

**Key Words:** Electrochemical machining(전해가공), Micro-shaft(미세축), Tungsten carbide(텅스텐카바이드), Electrolyte(전해액)

### 1. 서론

전해가공은 전해액과 가공하려는 금속간의 전기 화학적 용해 반응을 이용해서 재료를 원하는 형상으로 가공하는 방법이다. 산업 현장에서는 보통 난삭재의 금형 제작 및 표면 거칠기 향상을 위한 마무리 가공의 목적으로 전해가공을 이용하고 있다. 전해가공은 비접촉식 가공이므로 가공물에 변형이나 잔류 응력을 발생시키지 않고, 공구의 마모가 없으며, 원자 단위로 일어나는 가공이므로 표면 거칠기 또한 우수하다. 여러 개의 공작물을 같은 조건에서 동시에 가공할 수 있고, 시스템을 구축하는데 많은 비용이 소요되지 않기 때문에 저가 대량 생산에 적합한 공정이다.<sup>1</sup> 21 세기에 접어

들어 마이크로/나노 기술 개발에 관한 연구가 활발해지고 있으며, 향후 미세 부품의 수요는 급증할 것으로 예상된다. 미세 전해 가공 기술은 미세 노즐과 채널, MEMS/NEMS 의 각종 부품 및 센서, 미세 다이 및 몰드 등 미세 구조물의 제작에 광범위하게 응용될 것으로 보인다.<sup>2</sup> 이에 따라 미세 공구, 전극, 프로브 등으로 사용될 수 있는 미세축 및 미세탐침 제작 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 범용 가공 공정으로는 직경 0.2 mm 이하의 W 또는 WC 미세축을 제작하는데 한계가 있어 새로운 가공 방법의 개발이 요구된다.

텅스텐에 대한 전해가공으로는, Muller<sup>3</sup> 등이 전해 에칭법을 사용하여 최초로 FIM (Field Ion Microscopy) 의 프로브를 제작한 이래로, Morikawa<sup>4</sup>,

접수일: 2003 년 7 월 7 일; 게재승인일: 2004 년 4 월 9 일  
교신저자: 서울대학교 기계항공공학부 대학원  
Email: sewany77@dreamwiz.com, Tel. (02) 880-7147  
\* 전북대학교 기계항공시스템공학부  
\*\* 강릉대학교 정밀기계공학과  
\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

Fotino<sup>5</sup>, In<sup>6</sup> 등이 STM, AFM, 반도체 검사용 프로브 카드 등에 사용되는 미세 탐침을 제작하는 연구를 수행한 바 있다. Lim<sup>7</sup> 은 전류 밀도 등을 제어함으로써 직경 50  $\mu\text{m}$  의 텅스텐 미세촉을 제작하였다. 일반적으로 STM 등에서는 텅스텐이나 백금 또는 백금 합금 프로브를 많이 사용하나 이들은 강성이 좋지 않아 응용 분야가 한정된다. 따라서 미세한 크기에서도 강성을 유지하며 반복성을 보장할 수 있는 공구의 제작이 필요하다.

텅스텐카바이드 (WC) 미세촉은 높은 경도와 뛰어난 강성을 지니고 있어 잉크젯 프린터 노즐의 가공에 사용되는 마이크로 편칭용 공구, 미세 방전가공이나 미세 전해가공의 전극 등 여러 분야에 응용되고 있다.<sup>2</sup> WC 는 텅스텐과 달리 여러 물질의 합금이기 때문에 전해액이나 전압에 따른 전해 특성이 매우 복잡하다. Human<sup>8</sup>, Basu<sup>9</sup>, Andersson<sup>10</sup> 등은 WC Plate 의 산화과정 등 전해 반응 특성을 전류 측정이나 성분 분석을 통하여 분자 구조적 관점에서 고찰하였다. WC 미세촉 제작에 관한 연구로서는 Kang<sup>11</sup> 이 전해 가공에서 금속이온층 분포와 모서리부 가공집중 효과를 이용하여 직경 40  $\mu\text{m}$  의 WC 미세촉을 가공하였으나 미세촉의 형상이 불균일했다. Lee<sup>12</sup> 는 이를 극복하기 위해 낮은 전압에서 가공을 시도하여 3 단계의 가공 공정을 통해 형상이 우수한 직경 30  $\mu\text{m}$  의 미세촉을 제작하였지만 각 단계마다 오차가 증폭되어 반복성이 저하되며, 가공시간이 많이 소요되는 단점이 있었다.

본 연구에서는 코발트를 결합제로 한 WC 미세촉을 전해가공을 통해 제작하였다. WC 의 전기 화학적 특성을 고려하여 전해액을 선정 한 후, 미세촉의 형상을 결정짓는 대표적 인자인 전해액 농도와 인가 전압의 변화에 따른 가공 특성을 살펴 보았다. 이를 바탕으로 최적의 가공 조건을 선정하여 전해가공을 수행함으로써 기존의 것보다 직경이 훨씬 작으면서도 진직도가 뛰어나며 표면이 매끄러운 WC 미세촉을 제작하였다.

## 2. WC 의 전해가공

### 2.1 WC 의 특성

초경합금으로 일컬어지는 WC 는 경도, 강도, 내마모성이 우수한 공구 재료로서 분말야금 기술을 이용해서 생산한다.<sup>13</sup> 본 연구에 사용한 시편은

텅스텐 카바이드 봉으로서 직경은 200  $\mu\text{m}$ , 길이는 2.5 cm 이고, 주요 물성치로는 밀도 12.3  $\text{g/cm}^3$ , 경도 87.5 HR<sub>a</sub>, 항복강도 4600  $\text{N/mm}^2$ , 영률 460  $\text{kN/mm}^2$  이다. 시편의 WC 와 Co 의 무게 비율은 각각 68 % 와 28 % 이며 Ti 등 나머지 원소들이 4 % 를 구성하고 있다. WC 는 텅스텐과 탄소 원자가 일대일로 결합하고 있는 화합물을 Co 결합제가 붙잡고 있는 형태이다. 따라서, 단일 금속 물질의 전해 반응과는 달리 복잡한 반응 양상을 가지므로 주요 구성 원소들을 고려하여 전해액을 선정 하여야 한다.

### 2.2 전해액의 선정

텅스텐카바이드 미세촉의 전해가공을 위해서는 WC 입자와 Co 를 동시에 용해시킬 수 있는 전해액을 사용해야 하는데, 이러한 용액으로 NaCl 과 NaOH 의 혼합용액과 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액이 있다. WC 는 순수 텅스텐과 화학 반응의 특성이 매우 다르며, 특히 Co 의 함량이 높아지면 중성이나 염기성 용액에서 반응 속도가 현저히 저하되는 것으로 알려져 있다.<sup>10</sup> 따라서 산성 용액을 전해액으로 사용하는 것이 전해가공에 더욱 적합하다. 또한 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액은 농도 조절이 용이하며, 용해 속도가 빠르고, 가공 후의 표면 상태가 좋아 미세 공구 제작에 유리하다고 판단되어 본 연구에서는 전해액으로 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액을 선정하였다.

### 2.3 실험장치의 구성

실험에 사용된 전해가공 장치의 개략도를 Fig. 1 에 나타냈다.

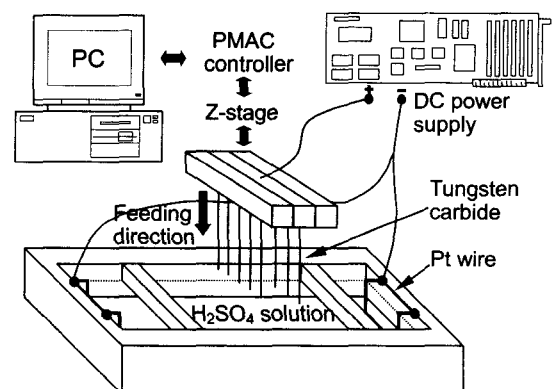
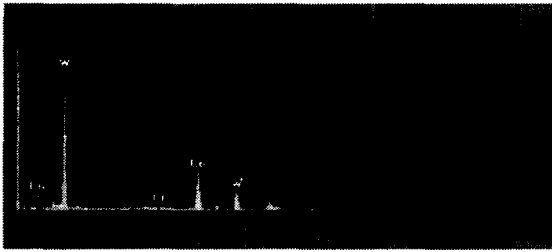
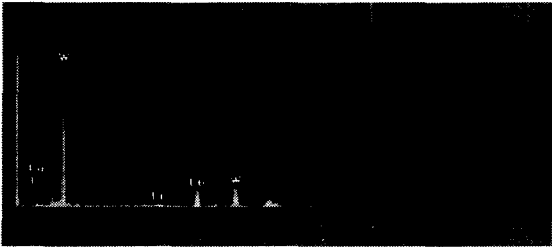


Fig. 1 Schematic diagram of the ECM system

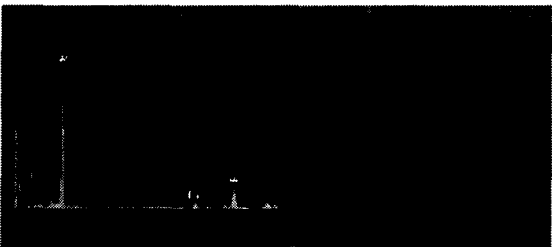
텅스텐카바이드 미세축을 제작하기 위한 실험 장치는 가공을 위한 전해가공 시스템과 세척 장치, 측정 장치 등으로 구성된다. 시편을 부착한 지그를 정밀 이송 스테이지 (Paker MSA 6705)의 Z 축에 장착하고, DeltaTau 사의 PMAC motion controller 를 통해 PC 에서 이송을 제어하였다. 아크릴 수조에 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액을 채우고 백금을 전원 공급기의 음극에 시편 지그를 양극에 연결하여 전해가공을 수행하였다. 가공 중의 상태는 SNU Precision 사의 MVS-300 비전 시스템으로 모니터링하였다.



(a) Before machining



(b) After machining



(c) After cleansing by NaOH

Fig. 2 Ingredients of workpiece surface

가공 후에는 다공성의 가공 생성물이 시편에 부착된 상태로 존재한다. 생성물의 성분은 텅스텐 산화물 또는 코발트 산화물로서 이를 제거하는 방법으로 초음파 세척 등 기계적으로 제거하는 방법과 다른 용액에서 화학적으로 용출시키는 방법이

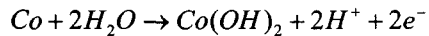
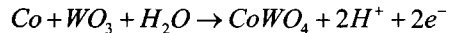
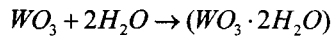
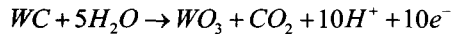
고려될 수 있다. 초음파 세척을 하게 되면 세척 중에 가공된 미세축이 부러질 우려가 있고 슬러지가 완전히 제거되지 않는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 화학적인 방법으로 미세축 외면에 형성된 슬러지를 제거하였다. 가공된 시편을 2 M NaOH 수용액에서 하루 정도 담그어 두면 슬러지가 깨끗하게 제거된다. pH 가 낮은 용액에서는 슬러지의 성분인 WO<sub>3</sub>, CoWO<sub>4</sub> 등이 용해되지 않지만, 높은 pH 의 염기성 용액에서는 이온의 형태로 용해되기 때문이다.<sup>10</sup> Fig. 2 의 성분 분석을 통해 전해 가공 전후의 산화막 생성과 이의 제거를 확인할 수 있다. 슬러지가 제거된 후의 최종 형상의 관찰과 성분 분석에는 JEOL 사의 JSM 5600 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscopy) 이 사용되었다.

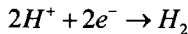
#### 2.4 화학 반응

Co 결합체의 WC 가 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액에서 전해 가공될 때의 양극과 음극에서의 화학 반응식은 다음과 같다.<sup>8,9,10</sup>

Anodic reaction; (1)



Cathodic reaction; (2)



양극에서는 WC 와 H<sub>2</sub>O 가 반응하여 그 중 W 는 WO<sub>3</sub> 로 산화되어 슬러지의 형태로 시편에 부착되고, C 는 전극 계면에서 CO<sub>2</sub> 기체를 발생시킨다. pH 1 이하의 강한 산성 용액에서는 WO<sub>3</sub> 가 물 분자와 결합하여 수화물의 형태(WO<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O)로 존재하는 경향이 있다.<sup>10</sup> 또한, WO<sub>3</sub> 중의 일부와 Co 가 H<sub>2</sub>O 와 반응하여 CoWO<sub>4</sub> 를 생성한다. 대부분의 Co 는 전해액의 OH<sup>-</sup> 와 반응하여, Co<sup>2+</sup> 이온 형태로 용해되지만 일부가 CoWO<sub>4</sub> 또는 CoSO<sub>4</sub> 의 산화막 형태로 시편에 부착된 채 남게 된다.<sup>8</sup> 한편, 음극에서는 전해액 속의 양성자 H<sup>+</sup> 가 전자를 얻어 백

금 전극 주위에서 수소 기체 H<sub>2</sub> 로 환원된다.

텅스텐은 산화되면서 그 부피가 증가하는 것으로 알려져 있으므로 가공 후에 생성된 슬러지의 부피가 커진다는 것은 산화텅스텐의 생성을 증명한다.<sup>9</sup> Fig. 3 에서 보듯이 슬러지는 미세축의 바깥면에서 방사상의 형태로 성장하였으며, 슬러지로부터 많은 기포들이 생성되는 것으로 보아 다공성 구조를 이루고 있는 것으로 보인다. 또한 슬러지의 성분을 분석해보면, 코발트의 비율이 낮아지는 대신 텅스텐의 비율이 매우 높다는 것과 미소한 양의 전해액 속에서 가공할 경우 용액의 색이 코발트 이온을 나타내는 붉은 색으로 변하는 것으로부터 코발트가 이온 상태로 존재함을 유추할 수 있다. 이산화탄소와 수소의 발생은 실험 중에 양극으로 사용한 WC 시편과 음극으로 사용한 백금 전극 주위에서 기포가 발생하는 것을 통해 확인할 수 있었다.



Fig. 3 Sludge growth during WC etching

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 전해액 농도에 따른 전해 특성

황산 전해액의 농도에 따른 가공 특성의 변화를 파악하기 위해 두 전극 사이의 전압을 4.1 V, 시편의 침지 깊이를 3 mm로 유지한 상태에서, 농도를 0.5 M 에서 2.5 M 까지 변화시켜가며 각각 210 초 동안 가공한 후 시편의 직경을 측정하고 재료의 제거량을 구하였다. Fig. 4 에서 보듯이, 전해액 농도와 제거량의 관계가 포물선의 형태를 나타냈고, 1.5 M 의 농도에서 가공 속도가 최대가 되어 가공된 축의 직경이 가장 작았다. 반면, 실험된

범위 내에서 가공 후 시편 형상의 균일함이나 표면 상태는 농도의 변화에 따른 변화가 크지 않았다. 따라서 본 연구에서는 텅스텐카바이드 미세축을 가공하기 위한 황산 수용액의 농도를 1.5 M 로 결정하였다.

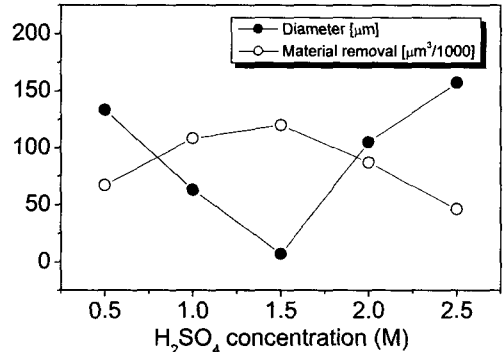


Fig. 4 Diameter and material removal according to electrolyte concentration

농도가 증가함에 따라 반응 속도가 증가하지 않는 이유는 화학반응 속도를 결정하는 이온 활동도의 변화로부터 설명될 수 있다. 식 (3) 에서 보듯이 이온 활동도 (a) 는 반응 상수 (r) 과 용액 농도 (m) 에 의해 결정된다. 반응 상수는 농도가 낮은 영역에서는 거의 일정한 값을 유지하나 농도가 높아짐에 따라 그 값이 급격히 감소하는데, 그 이유는 고농도로 갈수록 이온들끼리의 간섭과 이온 회합 (ionic association) 이 증가하고 유전율 (permittivity) 은 감소하기 때문이다.<sup>14, 15</sup>

$$a = r \times m \tag{3}$$

where, a: activity of ion,

r: activity coefficient,

m: electrolyte concentration

#### 3.2 인가 전압에 따른 전해 특성

인가 전압 3.0 V 이하에서는 반응 속도가 매우 느리며, 20 μm 이하의 직경을 갖는 미세축을 제작하기가 곤란하였다.<sup>16</sup> 2 ~ 3 V 영역에서는 전해작용이 잘 일어나지 않는데 이는 텅스텐 및 코발트 산화막의 생성으로 인해 전해작용이 방해받기 때문

이다. WC 가 여러 가지 물질의 합금인 관계로 산화막이 생성되는 전압의 구간이 각 금속의 부동화 특성에 따라 넓은 범위에 걸치는 것으로 보인다. 5 V 이상의 영역에서는 축의 형상이 매우 불규칙하고 표면상태가 거칠 뿐 아니라 반복성이 떨어지는 문제점이 있는데, 이는 과다하게 발생하는 기포로 인해 전해작용이 균일하지 못함때 원인이 있다고 생각된다.

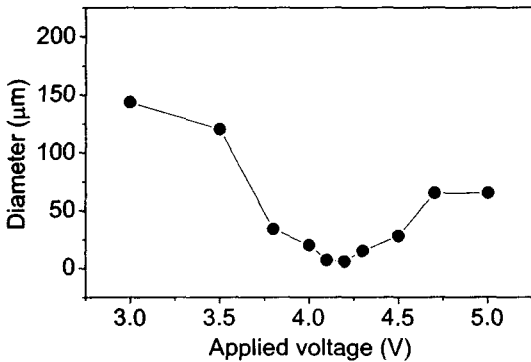


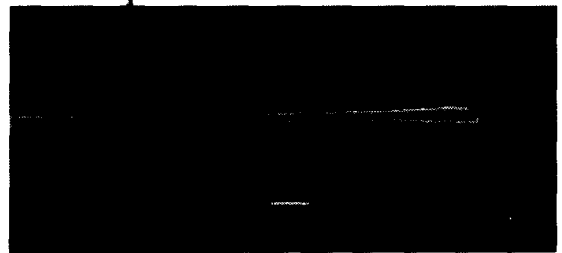
Fig. 5 Diameter according to applied voltage

황산 전해액 농도 1.5 M 에서 인가 전압을 변화시키면서 210 초간 가공을 수행한 결과를 Fig. 5 에 나타냈다. 인가 전압이 4.0 ~ 4.5 V 인 조건에서 가공 속도가 최대가 됨을 확인할 수 있다.

Fig. 6 의 (a), (b) 는 각각 4.0 V, 4.5 V 에서의 가공 후 형상을 나타낸다. 가공 후 공작물의 형상과 표면 상태를 관찰한 결과, 4.0 V 이하의 이 영역에서는 축 직경이 감소함에 따라 시편 하단부가 뾰족해지는 특성을 나타냈다. 또한 4.2 V 이상의 전압에서는 축의 하단부 직경이 더 큰 역 테이퍼 형상이 일어났으며 표면 상태도 균일하지 못함을 볼 수 있었다. 이는 용해된 금속 이온들의 확산층 분포에 의한 확산 효과와 뾰족한 곳으로 전하가 집중되는 형상 효과의 조합으로 인한 것으로 보인다.<sup>7</sup> 한편 4.5 V 근처에서는 수면부에서 시편이 부러지는 necking 현상이 자주 일어났는데 이는 수면에서 활성이 큰 관계로 전하가 집중되어 가장 가공이 빠르게 되기 때문이다. 따라서 형상 정밀도와 반복성, 가공 속도 등을 고려할 때 4.1 V 가 최적 가공조건으로 판단된다.



(a) 4.0 V



(b) 4.5 V

Fig. 6 Machined shape under electrolyte 1.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, and machining time 210 sec

### 3.3 가공 시간에 따른 전해 특성

1.5 M 의 황산 수용액에서 4.1 V 의 전압을 인가한 후, 가공 시간에 따른 축 직경과 형상 변화를 관찰하였다.

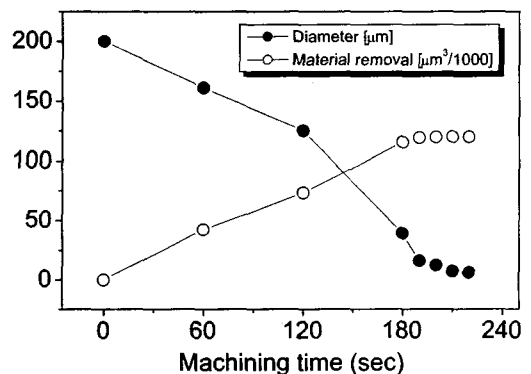


Fig. 7 Diameter and material removal according to machining time

Fig. 7 에서 보듯이 가공 시간 200 초 까지는

가공량이 시간에 비례하여 증가하였으며 축의 형상도 테이퍼 없이 균일한 형상을 유지하였다. 따라서 Fig. 7 의 결과를 토대로 가공시간을 적절히 선정하면 직경 10  $\mu\text{m}$  까지의 진직성이 우수한 미세축을 제작할 수 있다. 또한 동일 조건에서 여러 번의 실험을 통하여 직경 편차가 3 ~ 5  $\mu\text{m}$  이내로서 가공의 반복 재현성이 좋음을 확인할 수 있었다. 가공 시간이 200 초를 경과하면 시편의 끝단 부에서 가공이 집중되어 점차적으로 테이퍼진 형상으로 진행하였으며, 가공 시간이 220 초를 지나면 시편은 탐침 형태로 변하면서 축 방향으로 가공이 빠르게 진행되어 시편의 길이가 급격히 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 240 초가 지난 후의 시편 형상을 Fig. 8 에 나타냈다.



Fig. 8 Machined shape under applied voltage 4.1 V, electrolyte 1.5 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , and machining time 240 sec

### 3.4 WC 미세축의 제작

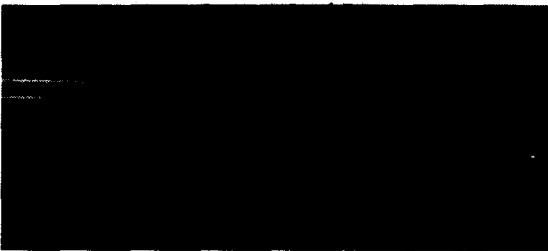


Fig. 9 WC micro-shaft with 3 mm length, 5  $\mu\text{m}$  diameter, and 0.2° taper angle; applied voltage 4.1 V, electrolyte 1.5 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , and machining time 210 sec

실험된 범위에서 최적의 조건으로 판단된 인가 전압 4.1 V, 전해액 농도 1.5 M 에서 210 초간

가공한 미세축의 형상을 Fig. 9 에 나타냈다. 외부의 슬러지는 초음파 세척 후 NaOH 수용액에서 하루동안 담그어 제거하였다. 가공된 미세축의 최종 직경은 5  $\mu\text{m}$  이며, 테이퍼 각은 0.2° 이다.

## 4. 결론

텅스텐카바이드 미세축의 전해 가공에서 최적 가공 조건을 실험적으로 결정하고 이를 바탕으로 미세축을 제작하였다. 혼합 물질인 텅스텐카바이드의 특성을 고려하여 황산을 전해액으로 사용하였다. 미세축의 형상과 표면 상태, 가공 속도 측면에서 황산 전해액 농도 1.5 M, 인가 전압 4.1 V 가 미세축 제작에 적절한 조건임을 확인할 수 있었다. 침지 깊이를 3 mm 로 하고 가공 시간에 따른 공작물의 형상 변화를 살펴보았으며 가공 시간이 210 초 일 때 최적 형상을 얻을 수 있었다. 슬러지는 초음파 세척 후 NaOH 수용액에서 제거하였다. 이를 바탕으로 표면 거칠기가 우수하며 형상이 균일한 직경 약 5  $\mu\text{m}$ , 길이 3 mm, 테이퍼 각이 0.2° 인 텅스텐카바이드 미세축을 제작하였다. 향후 본 연구에서 개발된 WC 미세축이 삼차원 미세 구조물 제작의 유용한 툴로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 나노메카트로닉스 기술개발사업의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Sato, T., Nontraditional Machining, Yokendo, Tokyo, 1994.
2. Joo, B. Y., Oh, S. I. and Jeon, B. H., "Development of Micro Punching System," Annals of the CIRP, Vol. 50, pp. 191-194, 2001.
3. Muller, E. W. and Tsong, T. T., Field Ion Microscopy : Principles and Applications, American Elsevier, New York, 1969.
4. Morikawa, H. and Goto, K., "Reproducible Sharp-pointed Tip Preparation for Field Ion Microscopy by Controlled AC Polishing," Review of Scientific Instruments, Vol. 59, No. 10, pp. 2195-2197, 1988.

5. Fotino, M., "Tip Sharpening by Normal and Reverse Electrochemical Etching," Review of Scientific Instruments, Vol. 64, No. 1, pp. 159-167, 1993.
6. In, C. H., Kang, M. J., Kim, G. M. and Chu, C. N., "Mass Production of Tungsten Needle Tips by Electrochemical Etching," Proceedings of the KSPE 1999 Fall Annual Meeting, pp. 1345-1350, 1999.
7. Lim, Y. M., Lim, H. J. and Kim, S. H., "Shape and Diameter Control of Microshafts in Electrochemical Process," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 50-56, 2001.
8. Human, A. M., Roebuck, B. and Exner, H. E., "Electrochemical Polarisation and Corrosion Behavior of Cobalt and Co(W,C) Alloys in 1 N Sulphuric Acid," Materials Science and Engineering, Vol. A 241, pp. 202-210, 1998.
9. Basu, S. and Sarin, V., "Oxidation Behavior of WC-Co," Materials Science and Engineering, Vol. A 209, pp. 206-212, 1996.
10. Andersson, K. M. and Bergström, L., "Oxidation and Dissolution of Tungsten Carbide Powder in Water," Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 18, pp. 121-129, 2000.
11. Kang, M. J., Production of Tungsten Carbide Microshaft Using Electro-chemical Machining, M.S Thesis, Seoul Nat'l Univ., 2001.
12. Lee, K. H., Electrochemical Machining Behavior of Tungsten-carbide Microshafts, Ph.D Thesis, Seoul Nat'l Univ., 2001.
13. Kalpakjian, S., Manufacturing Processes for Engineering Materials, 3rd Ed., Addison Wesley Longman, Inc., 1997.
14. Bard, A. and Faulkner, L., Electrochemical Methods, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2001.
15. Paik, W. K. and Park, S. M., Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Processes, Cheongmoongak, Seoul, 2001.
16. Choi, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Optimal Machining Condition of WC-Microshaft Using Electrochemical Machining," Proceedings of the KSPE 2002 Fall Annual Meeting, pp. 245-249, 2002.