

## 텅스텐카바이드 미세축의 전해가공 시 최적가공조건 선정

최세환\*(서울대 대학원 기계항공공학부), 류시형(서울대 대학원 기계항공공학부),  
최덕기(강릉대 정밀기계공학과), 주종남(서울대 기계항공공학부)

### Optimal Machining Condition of WC-Microshaft Using Electrochemical Machining

S. H. Choi\*(Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU), S. H. Ryu(Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU),  
D. K. Choi(Dept. of Precision Mech. Eng., KNU), C. N. Chu(Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU)

#### ABSTRACT

Tungsten carbide microshaft is used as various micro-tools in MEMS because it has high hardness and good rigidity. In this study, experiments were performed to produce tungsten carbide microshaft using electrochemical machining.  $H_2SO_4$  solution was used as electrolyte because it can dissolve tungsten and cobalt simultaneously. Optimal electrolyte concentration and machining voltage satisfying uniform shape and large MRR of workpiece were found. For one-step machining, the immersion depth over 1 mm was selected for avoidance of concentration of electric charge at the tip of the microshaft. The limit diameter with good straightness was shown and an empirical formula for WC-microshaft machining was suggested. By controlling the various machining parameters, a straight microshaft with 30  $\mu m$  diameter, over 1 mm length and under  $0.5^\circ$  taper angle was obtained.

**Key Words:** Electrochemical Machining(ECM, 전해가공), Micro-machining(미세가공), Microshaft(미세축), Tungsten Carbide(WC, 텅스텐카바이드)

#### 1. 서론

##### 1.1 전해가공의 개요

21 세기 들어 미세부품의 수요가 급증하면서 정밀 미세축의 대량 제작 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 텅스텐카바이드(WC) 미세축은 높은 경도와 뛰어난 강성을 지니고 있어 잉크젯 프린터 노즐의 가공에 사용되는 마이크로 펀칭기, 미세 구멍가공을 위한 마이크로 방전가공 또는 전해가공의 전극 등 여러 분야에 이용되고 있다. 범용 가공기로 직경 0.3 mm 이하의 미세축을 가공하는 데는 한계가 있어, 새로운 가공 방법의 개발이 요구된다.

전해가공은 전해액과 가공하려는 금속간의 전기 화학적 용해 반응을 이용해서 재료를 원하는 형상으로 가공하는 방법이다. 산업 현장에서는 보통 난삭재의 금형 제작 및 표면 거칠기의 향상을 위한 마무리가공의 일환으로 전해가공을 사용하고 있다.

비접촉식 가공이므로 가공물의 변형이나 잔류응력이 없고, 공구의 마모가 일어나지 않으며, 분자 단위로 일어나는 가공이므로 가공물의 표면 거칠기가 우수하다. 또한 여러 개의 재료를 같은 조건으로 동시에 가공할 수 있고, 스펀들이 요구되지 않기 때문에 저렴한 장치로 대량 생산이 가능하다.

텅스텐에 대한 전해가공으로는, Muller 등이 전해 에칭법을 사용하여 최초로 FIM의 탐침을 제작한 이래로, Morikawa 등, Fortino, 우선기 등, 인치현 등<sup>[1]</sup>이 STM, AFM, 반도체 검사용 프로브 카드 등에 사용되는 원뿔형 미세 탐침을 제작하는 연구를 진행하여 좋은 성과를 얻었다. 임영모 등<sup>[2]</sup>은 세장비가 큰 텅스텐의 미세축을 제작하였지만 실제 방전 공구로 사용되는 텅스텐카바이드 미세축 제작에 대한 연구결과는 제시되지 않았다.

Human 등<sup>[3]</sup>, Basu 등<sup>[4]</sup>은 텅스텐카바이드의 전해 반응 특성을 전류의 측정이나 성분 분석을 통하여 분자 구조적 관점에서 고찰하였다. 강명주<sup>[5]</sup>는 금속

이온층 효과와 모서리부 가공집중 효과를 이용하여 텅스텐카바이드 미세축을 가공하였으나, 미세축의 형상이 불균일했다. 이강희<sup>6)</sup>는 이를 극복하기 위해 낮은 전압에서 가공을 시도하여 3 단계의 가공공정을 통해 형상이 우수한 미세축을 제작하였지만 각 단계마다 오차가 증폭되어 반복성이 저하되며, 가공시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

본 연구에서는 코발트를 결합제로 한 텅스텐카바이드의 미세축을 전해가공을 이용하여 제작하되, 기존의 방법보다 침지를 깊게 함으로써 한번의 가공으로 미세축을 제작한다. 우선 텅스텐카바이드의 특성을 살펴보고 이에 적합한 전해액을 선정 한 후, 미세축의 형상을 결정짓는 대표적 인자인 전해액 농도와 가공전압의 변화에 따른 가공 특성, 가공 깊이와 가공시간이 축의 형상에 미치는 영향을 이론적, 실험적으로 분석한다. 이를 바탕으로 최적의 가공 조건을 선정하여 전해가공을 수행함으로써 가늘고 길며 표면이 매끄럽고 직경이 균일한 텅스텐카바이드 미세축을 제작하고, 원하는 직경과 길이의 미세축의 제작을 위한 실험식을 제시한다.

## 2. 전해가공의 원리

### 2.1 텅스텐카바이드와 황산수용액의 특성

초경합금으로 일컬어지는 텅스텐카바이드(WC)는 경도, 강도, 내마모성이 우수한 공구 재료로서 분말야금기술을 이용해서 제작한다<sup>7)</sup>. 본 연구에 사용한 시편의 텅스텐카바이드와 코발트의 무게비율은 68%와 28%이며 몰리브덴과 티타늄 등이 4%를 구성한다. 시편은 텅스텐카바이드 봉으로서 직경은 200 μm, 길이는 2.5 cm이다.

텅스텐카바이드 미세축의 전해가공을 위해서는 혼합물이라는 특성상 WC 입자와 코발트를 동시에 가공할 수 있는 전해액을 사용해야 하는데, 이러한 용액으로 NaCl 과 NaOH 의 혼합용액과 황산수용액(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)이 있다<sup>6)</sup>. 황산수용액은 혼합물질과 달리 농도 조절과 제어가 쉽고, 용해속도가 빠르며, 가공 후의 표면이 매끄러워 미세 공구 제작에 적합하므로 본 연구의 전해액으로 황산수용액을 사용하였다.

### 2.2 실험장치의 구성

전해가공장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 텅스텐카바이드 봉을 하나 이상 부착할 수 있는 지그를 두랄루민으로 만들었고, 시편을 두 개의 두랄루민판 사이에 고정하여 통전시켰다. 시편을 부착한 지그를 정밀 이송 스테이지(Paker MSA6705)의 Z축에 장착하고, PMAC 컨트롤러를 이용해서 PC에서 이송을 제어하였다. 아크릴 수조에 황산수용액을 채우고 백금을 음극으로 하고 시편을 양극으로

해서 DC 전원에 연결하여 전해가공을 수행하였다.

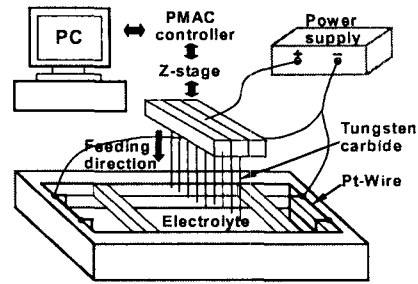
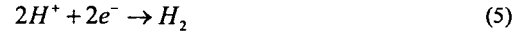
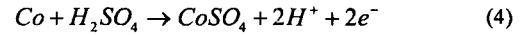
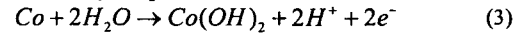
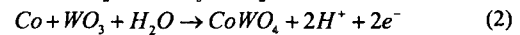
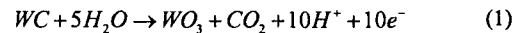


Fig. 1 Schematic diagram of the ECM system

### 2.3 화학 반응

DC 전원에서 코발트를 결합제로 한 텅스텐카바이드가 황산 전해액에서 전해 가공되는 화학 반응식은 다음과 같다<sup>3)4)</sup>.



양극에서는 WC와 HO<sub>2</sub>가 반응하여 그 중 W는 WO<sub>3</sub>이 되어 슬러지의 형태로 시편에 부착되고, C는 CO<sub>2</sub>로 산화된다. 이어서, WO<sub>3</sub> 중의 일부와 Co가 다시 HO<sub>2</sub>와 반응하여 CoWO<sub>4</sub>를 생성한다. 대부분의 Co는 OH<sup>-</sup>나 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>과 반응한 후, Co<sup>2+</sup>의 형태로 용해된다. 한편, 음극에서는 전해액 속의 H<sup>+</sup>가 전자를 얻어 H<sub>2</sub>로 환원된다.

## 3. 가공 조건 선정

### 3.1 전해액의 농도 선정

황산 전해액 농도에 따른 가공특성의 변화를 파악하기 위해 두 전극 사이의 전압을 1.5 V, 시편의 침지 깊이를 1 mm로 고정하고, 농도를 5%에서 40

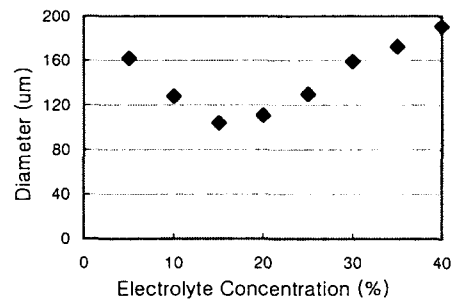


Fig. 2 Diameter according to electrolyte concentration

%까지 변화시켜가며 각각 15 분 동안 가공한 후 시편의 직경을 측정하여 Fig. 2 에 나타내었다. 농도와 직경의 관계가 포물선의 형태를 보이며 15 %의 농도에서 최소의 직경을 나타내고, 가공속도가 최대가 된다. 가공 후 시편의 형상의 균일함이나 표면상태는 농도의 변화에 따른 변화가 미미하다. 따라서 텅스텐카바이드 미세축을 가공하기 위한 황산 용액의 최적 농도는 15%로 결정되었다.

### 3.2 가공전압 선정

15 %의 황산 수용액에서 음극으로 백금, 양극으로 WC를 사용하여 0 V부터 2 V까지 전압을 변화시킬 때 두 전극 사이에 흐르는 전류의 변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 1.3 V 이하의 전압에서는 전압이 증가해도 흐르는 전류가 거의 일정하지만 그 이상에서는 전류가 급격하게 증가한다. 1.5 V 이하에서는 양극 금속의 용해가 주된 반응이지만, 1.5 V 이상에서는 양극 금속의 용해보다 물의 전기분해가 지배적이다<sup>[6]</sup>.

1.6 V 이상의 전압에서는 양극의 표면에서 다량의 기포가 계속적으로 발생하기 때문에 가공 표면이 거칠어진다. 또한 수면에서 기포가 터지며, 금속 이온층이 형성되어 테이퍼가 생기는 등, 형상이 좋지 못하며 반복성이 떨어진다<sup>[6]</sup>. 1.6 V 미만의 낮은 전압에서는 가공속도는 작지만 기포가 적게 발생하고, 금속이 용해되는 속도보다 용해된 이온이 용액 속으로 확산되는 속도가 빠르기 때문에 가공을 방해하는 이온층의 효과가 나타나지 않는다. 따라서, 가공물의 원통도가 좋고 형상의 제어가 쉽기 때문에 1.6 V 미만에서의 가공이 적합하다.

1.5 V에서는 기포가 적게 발생하고, 이온층의 영향이 전혀 없어 좋은 형상과 반복성을 기대할 수 있다. 따라서 균일한 형상과 반복성, 가공속도를 고려할 때 1.5 V의 전압이 최적으로 판단된다.

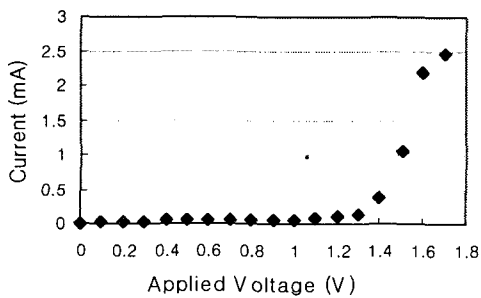


Fig. 3 Current according to applied voltage

### 3.3 침지 깊이가 가공특성에 미치는 영향

전해가공 중에 시편 주위의 전기장의 분포를 개략적으로 분석해보면, 시편의 수면 근처, 즉 상단은

전류밀도가 작으며, 하단이 상대적으로 전류밀도가 크다<sup>[8]</sup>. 따라서 하단부가 더 빠른 가공속도를 보여 테이퍼 형상이 나오게 되며, 시간이 흐를수록 하단부에 전하의 집중은 더욱 강화되며 형상이 뾰족해진다.

500  $\mu\text{m}$  침지 시 1.45 V에서 15% 농도의 황산 전해액으로 가공할 때, 가공시간이 20 분 정도까지는 원통도가 좋은 형상을 유지하지만 그 이후부터는 하단부에 전하가 집중됨에 따라 모양이 뾰족해지는 것을 관찰할 수 있고, 이 때의 직경은 60  $\mu\text{m}$  이상이다<sup>[6]</sup>. 침지를 깊게 하면 수면부의 영향이 상대적으로 작아져서, 하단부에 전하가 집중되는 현상이 약화된다. 이에 따라 시편 가공부 전체에 균일한 전기장이 분포되어, 테이퍼가 생기면서 끝부분이 뾰족해지는 시기가 지연된다. 따라서 초기 조건을 그대로 유지하며 원하는 직경의 미세축이 나올 때까지 한번에 가공을 수행할 수 있다. 또한, 가공을 수행한 후 시편의 상단부와 하단부의 직경 차이가 있어도 가공부의 길이가 길기 때문에 상대적으로 테이퍼는 작게 되는 이점을 가질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1 mm 이상을 침지하되, 침지 깊이의 변화에 따른 형상의 변화를 보기 위해 1 mm, 2 mm, 3 mm 를 침지시켜 가공을 수행하였다.

### 3.4 가공시간이 가공특성에 미치는 영향

15 %의 황산용액에서 1.5 V의 전압을 가해주고 1 mm 를 침지시켜 전해가공을 실시하였을 때, 가공시간에 따른 평균 직경을 구하였고 시편 형상의 변화과정을 Fig. 4 에 나타내었다. 초기에는 시편 가공부의 형상이 균일한 직경을 유지한다. 한편, 시편과 가공생성물 사이로 전해액이 스며들어 수면보다 높은 부분까지 점차적으로 전해작용이 일어나고 시편 하단은 가공되어 짧아지기 때문에 가공부의 전체 길이는 처음의 침지 깊이와 거의 동일하다. 가공을 계속할 경우는 시편의 끝부분에서 가공이 집중되고, 그 결과 점차적으로 테이퍼 형상으로 변하고, 시간이 더 흐르게 되면 시편은 탐침 형태로

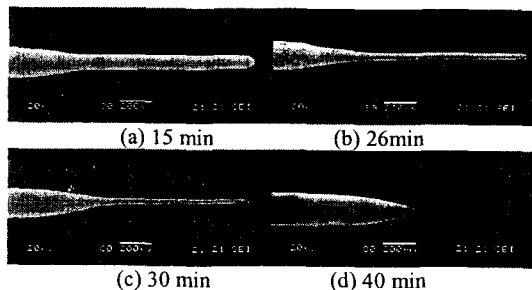


Fig. 4 Shape change according to machining time

변하면서 길이가 급격히 짧아지는 양상을 보인다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 침지 깊이, 가공시간과 형상변화와의 관계

각 깊이 별로 가공 후의 직경이 본래 직경의 반이 되는 시기부터 시편이 하단이 뾰족해지면서 급격히 짧아지는 시기까지의 변화를 분석하였다. 최적 농도와 전압에서 각 깊이 별로 5 분 간격으로 가공을 수행한 후, 시편 끝에서 위쪽으로 100 μm, 수면에서 아래쪽으로 100 μm 두 곳의 직경을 측정하였고, 가공 후 수면과 시편이 접촉하는 Z 축상의 위치와 가공 전 위치와의 차이를 이용해 줄어든 길이를 측정하였다. 가공 후 시편의 가공모델은 Fig. 5 과 같고, 평균 직경과 테이퍼 각 그리고 가공량은 다음과 같이 계산하였다.

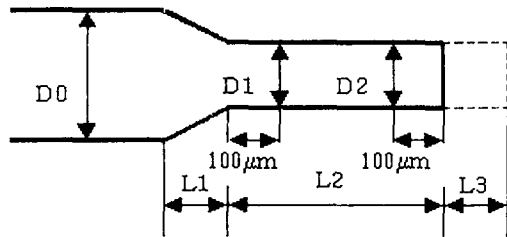


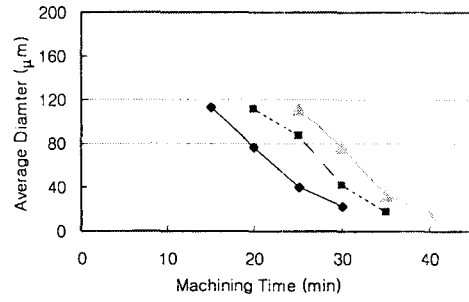
Fig. 5 Model of workpiece

$$D_{\text{ave}} = (D_1 + D_2) / 2 \quad (6)$$

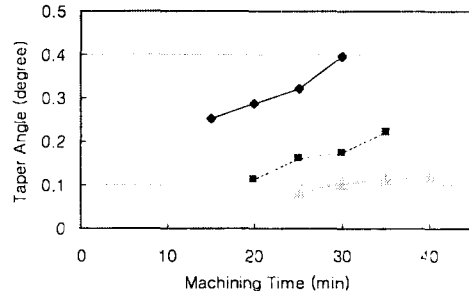
$$TA = \frac{D - D_1}{2(L_1 - 200)} \cdot 180 \quad (7)$$

$$\Delta V = L \frac{D - D_1}{2} \pi \left( \frac{D}{6} + \frac{D_1}{3} \right) + L_1 \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{4} + L_2 \frac{\pi D_1^2}{4} \quad (8)$$

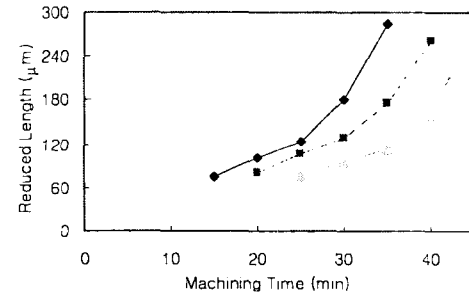
각 침지 깊이마다의 시간의 변화에 따른 평균 직경, 테이퍼 각, 감소한 길이 그리고 가공량은 Fig. 6 과 같다. 직경과 테이퍼 각은 침지 깊이에 관계 없이 시간의 흐름에 따라 선형적으로 변한다. 시편의 길이는 일정한 시간이 지나면 급격하게 감소하는 경향을 보이는데 이 때가 시편 하단에 전하집중이 생기면서 시편이 뾰족해지는 시기이다. 이 현상이 나타나는 시간은 침지 깊이가 증가할수록 증가한다. 한편, 침지 깊이가 클수록 가공량이 증가하지만 그 증가율은 침지 깊이의 증가율보다 작는데, 이는 전류밀도가 더 작음을 의미한다. 이로 인해 침지 깊이가 깊어질수록 가공속도는 감소하지만, 시편하단부의 전하집중 현상이 지연되어 좀 더 작은 직경까지 좋은 원통도를 유지할 수 있다.



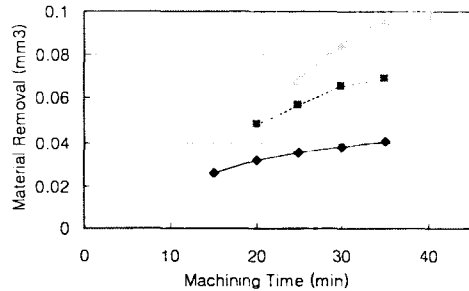
(a) Average diameter according to machining time



(b) Taper according to machining time



(c) Reduced length according to machining time



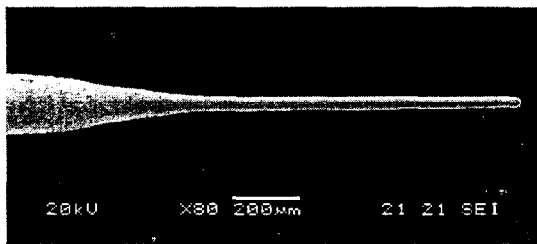
(d) Material removal according to machining time

Fig. 6 Change of machining parameters (Immersion depth, ◆: 1 mm, ■: 2 mm, ▲: 3 mm)

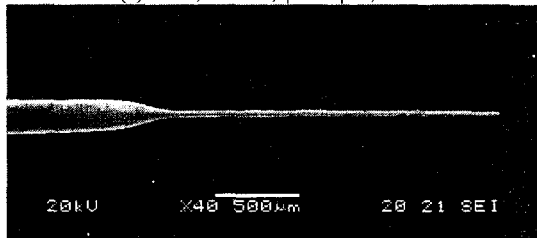
##### 4.2 텨스텐카바이드 미세축의 제작

상단부와 하단부의 직경차이가 10 μm 이 될 때까지의 가공시간을 한계시간, 이때의 직경을 한계 직경으로 정의한다. 실험 결과에 따라 한계시간을

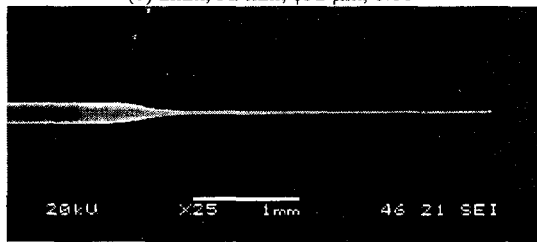
추정한 후 실험을 반복해보면, 침지 깊이 1 mm, 2 mm, 3 mm에서의 한계시간은 각각 26 분, 32 분, 36 분임을 알 수 있고, Fig. 7이 최적의 조건에서 각 침지 깊이에 해당하는 한계 직경을 가지는 미세축의 형상이다. 각각의 평균 직경은 39.5  $\mu\text{m}$ , 32  $\mu\text{m}$ , 28.5  $\mu\text{m}$ 이며, 테이퍼 각은 0.5° 이하이다. 미세축 끝의 형상과 표면상태를 보기 위하여 Fig. 15(a)의 끝을 확대하여 Fig. 7(d)와 Fig. 7(e)에 나타내었다. 시편의 전 구간에 걸쳐서 균일한 가공이 일어나 가공부의 원통도가 상당히 좋으며 표면의 상태도 상당히 양호한 것을 알 수 있다.



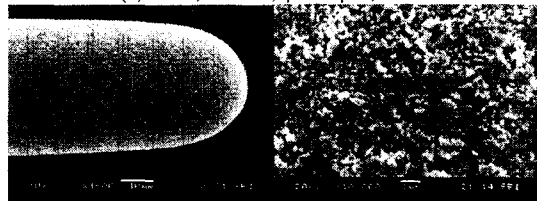
(a) 1mm, 26 min,  $\phi$ 39.5  $\mu\text{m}$ , 0.32°



(b) 2mm, 32 min,  $\phi$ 32  $\mu\text{m}$ , 0.16°



(c) 3mm, 36 min,  $\phi$ 28.5  $\mu\text{m}$ , 0.09°



(d) Magnification of (a) (e) Surface of (d)

Fig. 7 Shapes of microshafts

4.1 절의 실험결과를 바탕으로 침지 깊이(I)와 가공 시간(T), 그리고 미세축 직경(D) 사이의 관계를 나타내면 다음 식과 같다.

$$D = 200 - 6.2 \left( T + \frac{T^2(I-1)^2}{200} \right) (1.29 - 0.29I) \quad (9)$$

## 5. 결론

텅스텐카바이드 미세축의 전해 가공 시 최적 가공조건을 실험적으로 결정하고 이를 바탕으로 미세축을 제작하였다. 미세축의 형상과 표면상태, 가공속도를 고려할 때 황산 전해액의 농도는 15%, 가공전압은 1.5 V가 최적조건으로 선정되었다. 침지 깊이를 1 mm 이상으로 하여 한번의 가공으로 가늘고 균일한 직경을 가지는 형상을 가진 미세축의 제작이 가능하였고, 가공이 진행됨에 따른 시편의 형상변화를 살펴보았다. 최적조건에서 텅스텐카바이드 시편을 가공할 때, 침지 깊이와 가공시간 그리고 미세축 형상과의 관계를 파악하여 실험식을 제시하였다. 각 침지 깊이에 따른 한계시간을 구하였으며, 표면 거칠기가 우수하며 형상이 균일한 직경 약 30  $\mu\text{m}$ , 길이 1 mm 이상, 테이퍼 각이 0.5° 이하의 텅스텐카바이드 미세축을 제작하였다.

## 참고문헌

1. 인치현, 강명주, 김규만, 주종남, “전기화학적 에칭법을 이용한 텅스텐 탐침의 대량 생산,” 한국정밀공학회지 제 18 권 2 호, pp. 1345~1350, 1999
2. 임영모, 임형준, 김수현, “전해 프로세스를 이용한 미세축 제작,” 한국정밀공학회지 제 18 권 제 3 호, pp. 169~174, 2001
3. A. M. Human, B. Roebuck, and H. E. Exner, “Electrochemical Polarisation and Corrosion Behaviour of Cobalt and Co(W,C) Alloys in 1 N Sulphuric Acid,” Materials Science and Engineering, Vol. A241, pp. 202~210, 1998
4. S. N. Basu and V. K. Sarin, “Oxidation Behavior of WC-Co,” Materials Science and Engineering, Vol. A 209, pp. 206~212, 1996
5. 강명주, “전해가공을 이용한 텅스텐카바이드 미세축의 제작,” 서울대학교 석사학위논문, 2001
6. 이강희, “전해가공에서 텅스텐카바이드 미세축의 가공특성,” 서울대학교 박사학위논문, 2001
7. S. Kalpakjian, Manufacturing Process for Engineering Materials, 3th Ed, Addison Wesley Longman, Inc., 1997
8. A. J. Bard, L. R. Faulkner, Electrochemical Methods, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, Inc, 2001