

# 전해 프로세스에 의한 미세축 가공시 형상 및 직경 제어

임영모\*, 임형준\*\*, 김수현\*\*

## Shape and Diameter Control of Microshafts in Electrochemical Process

Young-Mo Lim\*, Hyung-Jun Lim\*\*, and Soo Hyun Kim\*\*

### ABSTRACT

Fabrication methods are shown to produce slender and cylindrical tungsten shafts by electrochemical etching. The shape of microshaft formed by electrochemical etching is determined by the combination of two conflicting factors, i.e., initial shape and diffusion layer. We can obtain a desirable shaft profile by adjusting the thickness gradient of diffusion layer. The diameter of microshaft is controlled by mathematical model based on relation between process parameters and diameter.

**Key Words** : Micro-machining (미세가공), Electrochemical etching (전해 에칭), Surface tension (표면장력), Current density (전류밀도), Microshaft (미세축)

### 1. 서론

최근 미세 가공(micro-machining), 전자, SPM(scanning probe microscope), 세포 생물학 등 여러 분야에서 미세축에 대한 수요가 증대되고 있다. 미세축을 가공에 대한 연구는 크게 두 가지 방향으로 수행되어 왔다. 우선, 기계가공기술을 극대화하는 방법으로 일본을 중심으로 활발히 연구가 수행되어 왔다.<sup>[1-3]</sup> 하지만 이러한 기계 가공법들은 가공속도가 느려서 생산성이 떨어지고 고도의 숙련된 기술이 필요하기 때문에 반복성이 떨어지는 단점이 있다. 다른 연구 방향으로는 본 연구에서 사용하고 있는 방법과 같은 전기화학적 방법(electrochemical method)이 있다.

전해 프로세스(electrochemical process)는 전기화학적 가공방법으로 원자나 분자 등을 측정하는데

사용되는 STM(scanning tunneling microscope), AFM(atomic force microscope), FEM(field ion microscope)장치의 미세 탐침을 제작하는데 많이 사용되어 왔다. Muller 는 전해 에칭법을 사용하여 FEM 의 탐침을 최초로 제작하였고, 그 이후 Binning 에 의해 STM 과 AFM 이 개발되면서 전해 프로세스에 대한 연구가 활발히 진행되었다. Fotino, Bryant, Morikawa 등은 전해 에칭과 전해 연마 방법을 사용하여 나노미터(nano meter) 정도의 끝단 반경(apex radius)을 갖는 미세 탐침 가공 기술을 개발하였다.<sup>[4-7]</sup> 전해 프로세스는 비접촉식 가공으로 화학반응을 이용하여 원자단위로 가공하기 때문에 기계 가공 방법에 비하여 축을 미세하게 가공할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, 이 방법에 대한 연구는 STM 이나 AFM 과 같은 SPM(scanning probe microscope)장치에 사용되는 미

\* 한국과학기술연구원 마이크로시스템연구센터

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

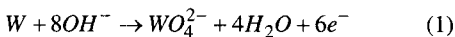
세 탐침의 제작을 위해 원뿔 모양(cone shape)으로 날카롭게 가공하는데 초점이 맞춰져서 수행되어 왔기 때문에 그 응용분야가 매우 제한되어 왔다. 또한, 미세축을 가공하는데 있어 기계 가공법과는 다르게 공구를 사용하지 않기 때문에 축의 형상과 직경의 제어가 아주 어려운 문제점이 있다.

본 연구에서는 전해 프로세스로 미세축을 가공할 때 가공조건이 축의 형상에 미치는 영향을 실험적으로 알아보았으며, 실험결과를 반응속도론(reaction kinetics)에 입각하여 해석하였다. 이러한 해석을 바탕으로 전류 밀도를 제어하여 균일한 직경을 가지는 미세축을 제작하였다. 또한, 축의 직경을 제어하기 위하여 가공조건과 축의 직경의 관계를 수학적으로 모델링 하였으며, 이를 실험을 통하여 검증하였다.

## 2. 전해 에칭

### 2.1 전해 에칭 원리

전해액(electrolyte)에 담겨져 있는 두개의 전극(electrode)에 전류를 흘려주면 양극(anode)에서는 금속이 전자를 잃으면서 금속이온의 형태로 전해액으로 용해되는 산화반응이 일어난다. 음극(cathode)에서는 주변의 이온이 전자를 얻어 원자나 분자 형태로 변하여 석출되는 환원반응이 일어난다. 전해 에칭은 양극의 산화반응을 이용하여 가공물을 가공하는 방법이다. 미세축의 재료로 강성이 높은 텅스텐(tungsten)을 사용하였을 때 텅스텐은 다음의 식(1)과 같은 화학반응을 거쳐 표면으로부터 용해된다.<sup>[8]</sup>



### 2.2 실험 장치

전해 에칭에 의한 미세축 가공실험을 수행하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 있다. 가공시스템은 가공 대상물과 전해액의 접촉길이를 제어하기 위한 정밀 직선 이송장치와 극간 전류 검출장치, 극간 전압 검출장치로 구성된다. 정밀 직선 이송장치의 최대 이송거리는 50 mm 이고 분해능은 0.5 μm/step 이다. 극간 전류는 회로에 직렬로 저항을 삽입하여 측정하였다. 극간 전류와 전압

값은 A/D 변환기를 사용하여 1 kHz 로 샘플링하고 1000 개의 데이터를 평균하여 얻었다. 전해액으로 5 mol 의 수산화칼륨(KOH) 용액을 사용하였으며 상온에서 가공을 수행하였다. 미세축의 재료로는 직경 0.5 mm 의 텅스텐 봉을 사용한다.

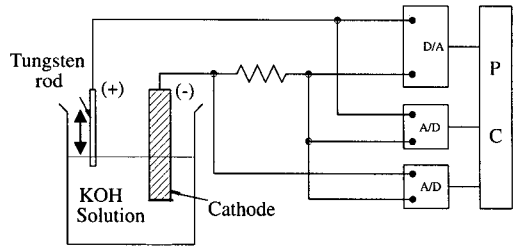
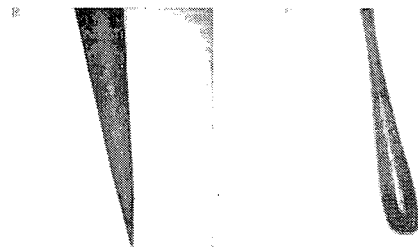


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

## 3. 형상 제어

### 3.1 전해 프로세스의 형상 가공 특성



(a) at low current

(b) at high current

Fig. 2 Typical appearances of tungsten microshaft under various levels of current

전해 에칭으로 나노미터 크기의 끝단 반경을 갖는 날카로운 탐침을 제작하는 경우 낮은 전해액 농도와 전류에서 가공이 이루어진다. 이와 같은 반응조건에서 가공하면 축은 Fig. 2(a)와 같이 원뿔 모양으로 가공된다. 이러한 현상은 축의 깊이 방향에 따라 국부적인 용해속도의 차이에 의하여 발생한 것이다. 전해 에칭은 전해액에 금속이 용해될 때 평평한 부분보다 돌출된 부분에서의 용해속도가 빠른 특성을 가지고 있다. 따라서, 큰 곡률반경(curvature radius)을 가지는 축의 옆 부분에 비하여 상대적으로 작은 곡률반경을 가지고 있는 끝부

분에서의 용해속도가 크기 때문에 축이 원뿔 모양으로 가공된 것이다. 전해 에칭의 이와 같은 가공 특성 때문에 지금까지는 날카로운 탐침을 제작하는 것에만 국한되어 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 전해액의 농도와 전류를 높여가면서 축의 가공형상을 관찰한 결과, 위에서 언급한 것과 같은 효과에 의하여 원뿔 형태로 가공되는 가공특성(이를 형상 효과(geometric effect)라고 정의)이 점점 사라지고, 오히려 Fig. 2(b)와 같이 반대의 가공결과를 얻을 수 있었다.

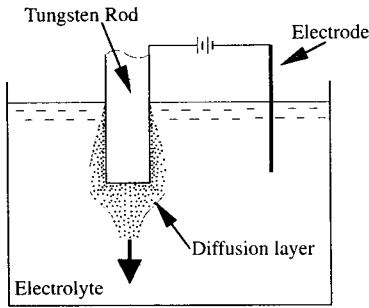


Fig. 3 Schematic diagram of the diffusion layer

이러한 현상은 가공 축의 표면 근처에 있는 이온들의 이동(migration) 및 확산(diffusion) 특성이 전류의 크기에 의해 변하기 때문이다. 전류의 크기가 커지면 금속이 용해되는 속도가 금속이온이 확산에 의하여 떨어져 나가는 속도보다 크게 되어, 붓의 주위에 확산층(diffusion layer)이라는 양극 전해질(anolyte)에 의한 얇은 층이 형성된다. 확산층 안에는 양극 전해질의 농도가 층의 경계에서 금속의 표면으로 접근할수록 높아지는 농도 기울기(concentration gradient)가 존재하게 되어 용액 내부(bulk solution)의 이온들이 표면으로 이동하는 것을 방해하게 된다. 따라서, 확산층의 두께가 두꺼워질수록 이온의 이동속도가 떨어지게 되어 금속이 용해되는 속도가 늦어지게 된다. 한편, 확산층의 내부에 있는 금속이온은 주변의 용액보다 비중이 커서 중력방향으로 점성 흐름(viscous flow)을 형성하며 이동한다. 이러한 이온의 흐름은 Fig. 3에서처럼 깊이방향으로 내려갈수록 확산층을 두꺼워지게 하여 확산층의 두께가 얇은 축 윗부분의 용해속도는 커지고, 반대로 확산층이 두꺼운 밑부분의 용해속도는 작아지게 된다. 이와 같이 확산층의 기울기에 의한 용해속도의 변동은 형상 효과를 상쇄

시키고 역원뿔 형태의 가공결과를 유발하게 된다. 추후의 논의에서는 위에서 언급한 것과 같은 확산층 두께의 기울기가 미세축 형상에 미치는 영향을 확산층 효과(effect of diffusion layer)라고 정의한다.

이상에서 살펴보듯이 전해 프로세스에 의하여 가공된 미세축의 형상은 형상 효과와 확산층 효과의 두 가지 상반된 가공효과의 상대적인 크기에 의하여 결정된다는 것을 알 수 있다. 또한, 두 가지 요인이 서로 상쇄될 수 있도록 크기를 조절하면 균일한 직경의 원통형 미세축도 얻을 수 있다.

### 3.2 형상 제어 실험

전해 프로세스를 이용하여 균일한 직경을 갖는 미세 축을 가공하기 위해서는 가공 형상을 결정하는 중요한 두 가지 요인, 즉, 형상 효과와 확산층 효과가 서로 상쇄될 수 있도록 반응조건을 조절하여야 한다. 이들 효과 중 형상효과는 축의 형상에 의하여 결정되기 때문에 반응조건으로 조절하는 것이 불가능하지만 확산층 효과는 반응 조건에 의하여 조절이 가능하다. 따라서 원하는 형상의 미세축을 얻기 위해서는 확산층 효과에 영향을 미치는 가공 조건을 조절하여야 한다.

전류의 크기가 확산층 효과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음의 실험을 수행하였다. 전해액 접촉길이를 5 mm로 하고 전류를 50, 60, 70 mA로 각각 일정하게 흘려주었을 때, 가공이 진행되는 따라 미세축의 형상이 어떻게 변하는지를 실험한 결과는 Fig. 4에 나타나 있다. 여기에서, 미세축의 형상은 축의 끝 부분( $D_E$ )과 윗 부분( $D_S$ )에서 각각 0.5 mm와 1 mm 떨어진 지점의 직경의 차이로 정의하였으며,  $D_0$ 는 축의 초기 직경,  $\bar{D}$ 는 가공된 축의 평균 직경이다. 그림에서 보면 가공초기에는 축의 밑부분 직경이 윗부분보다 작은 원뿔형태가 되었으나 점점 에칭이 진행됨에 따라 윗부분의 직경이 줄어드는 속도가 밑부분보다 커져 초기와는 반대로 역원뿔 형태가 됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 확산층 효과가 가공이 진행됨에 따라 지배적으로 되기 때문이다. 전류의 크기를 일정하게 유지시키면 단위 시간당 용해되는 금속의 양은 일정하다. 그러나, 축의 표면적은 에칭이 진행됨에 따라 줄어들게 되어 단위 면적당 생성되는 양극 전해질의 양은 증가하게 되고, 이에 따라 확산층의 두께 차이도 증가하여 확산층 효과

가 지배적 요인으로 된 것이다. 또한 전류가 증가할수록 균일한 형상을 갖게 되는 직경이 커짐을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 전류의 크기가 커질수록 확산층 효과가 커지게 되므로 형상 효과를 상쇄시키는 지점이 빨라져서 일어난 것이다.

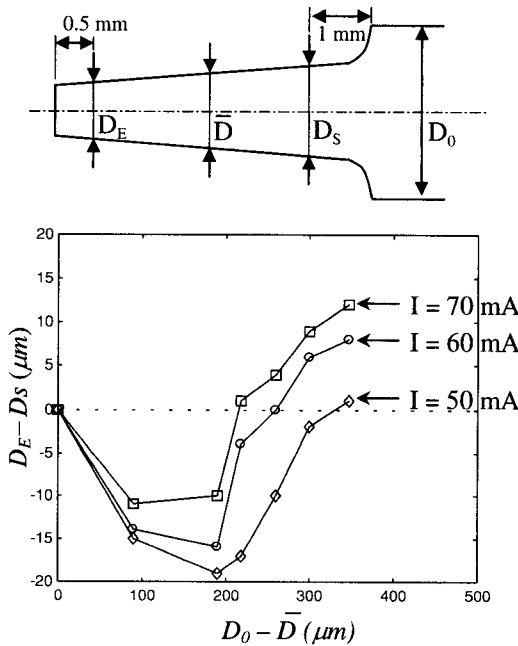


Fig. 4 Variation of the straightness of microshaft for various levels of current

#### 4. 직경 제어

##### 4.1 패러데이 법칙

전해 프로세스법은 공구를 사용하여 가공 대상물을 직접 가공하는 것이 아니기 때문에 도중에 가공된 정도를 알기가 어렵다. 따라서 전해 프로세스를 사용하여 미세축을 가공하기 위해서는 가공조건과 가공량 사이의 관계를 정확히 모델링하는 것이 중요하다. 전해 프로세스를 이용하여 미세축을 가공할 때 인가해준 전기량과 가공량 사이의 관계식은 패러데이 법칙(Faraday's law)을 사용하여 얻을 수 있다. 패러데이 법칙에 의한 전기량과 가공된 금속의 부피의 관계식은 아래와 같다.<sup>[8]</sup>

$$V_p = \frac{A}{\rho_M z F} Q \quad (2)$$

여기서,  $V_p$  은 가공된 금속의 부피이고,  $Q$  는 인가해준 전기량(amount of electricity),  $A$  는 금속의 원자질량,  $\rho_M$  는 금속의 밀도,  $z$  는 하전수(valency),  $F$  는 패러데이 상수이다.

따라서 단위 시간(1 초) 동안  $i$  의 전류를 흘려주었을 경우 가공되는 금속의 양은 식 (2)의 계수에 전류  $i$  를 곱한 것이 된다 여기에서 식 (2)의 계수를 전기화학 등가부피상수 (electrochemical equivalence volume constant)  $\alpha_e$  라 한다.

미세축의 재료로 텅스텐을 사용하였을 때, 텅스텐의 전기화학적 등가부피상수를 구하여 보면 다음과 같다. 텅스텐의 원자질량  $A$  는 183.45, 밀도  $\rho_M$  는  $19.3 \text{ g/cm}^3$ , 패러데이 상수  $F$  는 96,487C 이고, 텅스텐이 화학반응 할 때의 하전수 변화량  $z$  는 6 이므로 전기화학 등가부피상수  $\alpha_e$  는  $0.016419 \text{ mm}^3/C$  이 된다.

##### 4.2 표면장력을 고려한 수학적 모델

텅스텐 봉을 전해액의 표면과 수직하게  $L$  만큼 전해액에 넣으면 표면장력의 영향으로 봉 주위로 전해액이 올라오게 되어 전해액과 봉의 접촉면적이 증가하게 된다. 표면장력의 영향으로 전해액과 접촉하는 부분에서도 역시 예칭이 발생하게 되므로 가공량을 정확히 계산하기 위해서는 이 부분에 대한 고려가 필요하다.

표면장력의 영향으로 증가한 접촉길이를  $h$  라 하고, 초기 직경이  $D_0$  인 봉을 가공하여 직경이  $D$  가 되었을 때의 가공된 봉의 단면형상은 Fig. 5 과 같이 둘 수 있다.

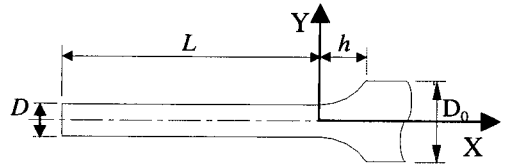


Fig. 5 Cross section of the processed microshaft

그림에서 볼 수 있듯이 표면장력에 의해서 접촉된 부분은 곡선형태로 가공된다. 표면장력에 의해 가공된 곡선 부분이 2 차 함수의 형태를 가진다고 가정하였을 때 식(3)과 같이 둘 수 있다.

$$y = \frac{1}{2} \left( \frac{D_0 - D}{h^2} x^2 + D \right) \quad (3)$$

따라서 표면장력으로 인하여 가공된 부분을 고려할 때, 축의 직경이  $D$  가 될 때 가공된 부피  $V_p$  와 전해용액에 접하는 표면적  $A_m$  는 다음과 같이 얻어진다.

$$V_p = \frac{1}{4} \pi L (D_0^2 - D^2) + V_s \quad (4)$$

$$= \frac{\pi}{4} \left[ - \left( L + \frac{8}{15} h \right) D^2 - \frac{4}{15} h D_0 D + \left( L + \frac{4}{5} h \right) D_0^2 \right]$$

$$A_m = \pi \left[ \frac{1}{4} D^2 + \left( L + \frac{2}{3} h \right) D + \frac{1}{3} h D_0 \right] \quad (5)$$

그러므로, 식 (2)와 (4)을 이용하여 축의 직경과 인가해준 전기량  $Q$  사이의 관계는 다음과 같이 얻어진다.

$$Q = \frac{\pi}{4 \alpha_c} \left[ - \left( L + \frac{8}{15} h \right) D^2 - \frac{4}{15} h D_0 D + \left( L + \frac{4}{5} h \right) D_0^2 \right] \quad (6)$$

### 4.3 직경 제어 실험

상온에서 5 M 의 KOH 용액에 텅스텐 봉을 넣었을 때 표면장력의 영향으로 추가적으로 접촉하게 되는 접촉길이  $h$  를 실험을 통하여 측정된 결과 0.64 mm 이었다

Fig. 6 은  $L$  이 5 mm 이고  $D_0$  가 0.5 mm 일 때 전기량에 따른 봉의 반지름의 변화를 실험한 결과이다. 그림에서 보면 실험결과와 식 (6)을 이용한 이론치가 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 표면장력에 의한 가공효과를 고려하지 않았을 때의 이론치와 실험결과는 애칭이 진행됨에 따라 점점 오차가 크게 됨을 알 수 있다. Fig. 7 는 봉의 초기 직경이 0.5 mm 이고 접촉길이  $L$  을 변화시켰을 때, 전기량과 애칭 가공된 축의 직경의 관계를 실험한 결과이다. 그림에서 보면 여러가지  $L$  값에서도 실험결과와 이론치가 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig. 8 은  $L$  을 5 mm 로 하고 봉의 초기 직경을 변화시켰을 때 인가해준 전기량에 따른 봉의 직경의 변화를 실험한 결과로 봉의 초기 직경이 변하여도 역시 실험결과와 모델이 잘 일치함을 알 수 있다.

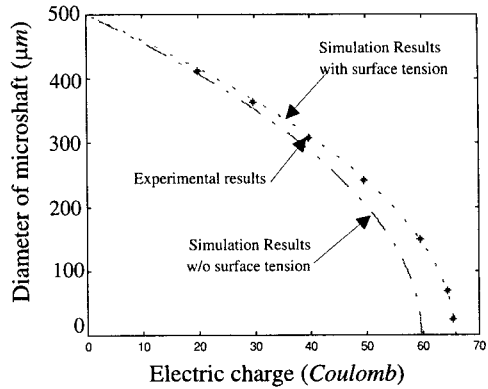


Fig. 6 Variation of diameter with electric charge at  $L = 5$  mm and  $D_0 = 0.25$  mm

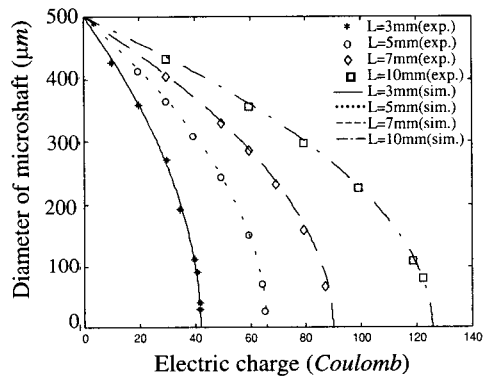


Fig. 7 Comparison of experimental results with simulation curve for various immersed depth at  $D_0 = 0.5$  mm

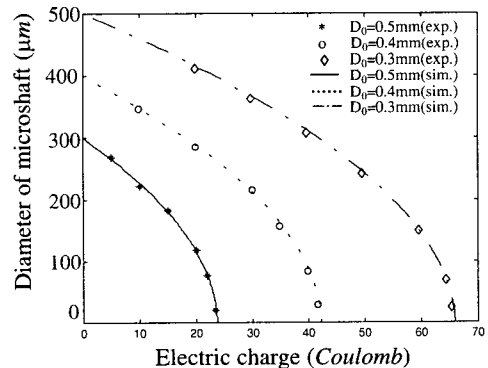


Fig. 8 Comparison of experimental results with simulation curve for various initial diameter at  $L = 5$  mm

이상의 실험결과를 통하여 축의 직경과 인가 해준 전기량의 관계에 대한 수학적 모델이 실제 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 유도한 수학적 모델을 이용하여 미세축의 직경을 제어할 수 있음을 알 수 있다. 전해 프로세스로 미세축을 가공할 때 축의 직경을 제어하는 프로세스는 다음과 같다. 우선, 가공을 시작하기 전에 식 (6)을 사용하여 원하는 직경에 해당하는 전기량을 계산한다. 미세 축 가공을 수행하면서 두 축 사이에 흘려준 전기량을 측정하고, 측정된 전기량이 계산을 통하여 얻은 전기량을 될 때까지 전하를 흘려줌으로써 직경 제어가 이루어진다. 인가된 전기량의 측정은 일정한 시간 간격으로 극간 전류를 측정하여 샘플링 시간(sampling time)과 측정된 전류량을 곱하고 이를 누적 시켜 얻는다.

### 5. 전류밀도 제어에 의한 미세축의 가공

#### 5.1 전류밀도 제어

확산층 효과는 확산층의 두께의 차이에 의하여 결정되므로 확산층 효과를 일정하게 유지하기 위해서는 확산층으로 들어오고 나가는 입자 유동(flow of particles)의 속도 차이를 일정하게 유지하여야 한다. 단위 면적당 확산층을 빠져나가는 양극 전해질의 수는 온도나 전해액의 농도와 같이 가공 중에 변하지 않는 반응조건에 의하여 결정되기 때문에 확산층 안의 양극 전해질의 수는 단위 표면적에서 용해되는 금속의 속도에 의해 결정된다. 따라서, 단위 표면적에서 생성되는 전해질의 부피를 일정하게 유지하면 확산층 효과를 일정하게 유지할 수 있다.

단위 시간동안  $i$ 의 전류를 흘려주었을 때 단위 표면적당 용해되는 금속의 부피  $D_v$ 를 식 (2)을 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$D_v = \frac{\Delta V_p}{A_m} = \frac{\alpha_e i}{A_m} = \alpha_e J \quad (7)$$

여기서,  $A_m$ 은 식(5)에서 구한 축의 표면적이고,  $J$ 는 전류 밀도(current density)이다.

식 (7)에서 볼 수 있듯이  $D_v$ 와  $J$ 는 비례 관계이므로 전류밀도를 일정하게 유지시켜주면 확산층 효과를 일정하게 유지할 수 있다. 형상 효과의

크기는 전극의 초기 형상에 의하여 결정되기 때문에 가공이 진행되어도 항상 일정하다. 따라서, 확산층 효과의 크기를 형상 효과와 상쇄되도록 결정하여 전류밀도 제어를 통하여 계속 일정하게 유지시키면 전체 가공과정동안 전극을 균일한 형상을 갖도록 가공할 수 있다.

#### 5.2 미세축 가공 실험

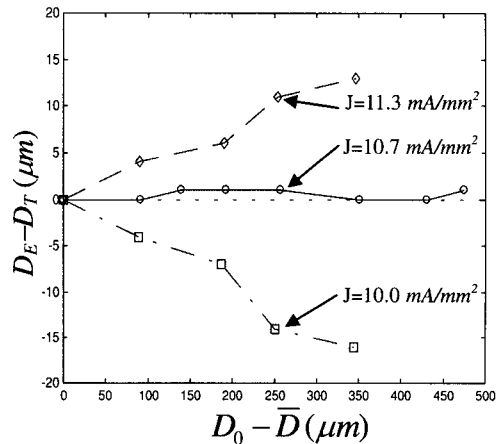


Fig. 9 Variation of the straightness of microshaft for various current densities

Fig. 9는 가공길이를 5 mm, 축의 초기 직경을 0.5 mm로 하고, 전류밀도를 변화시켰을 경우 가공특성의 변화에 관한 실험을 수행한 결과이다. 낮은 전류밀도에서는 형상 효과가 확산층 효과에 비해 가공특성에 큰 영향을 미쳐 축이 원뿔 형태로 가공되었고, 높은 전류밀도에서는 반대의 결과가 나타남을 관찰할 수 있었다. 또한, 전압이나 전류를 일정하게 하였을 경우의 가공특성과는 다르게 낮은 전류밀도에서는 가공이 진행되는 동안 계속해서 원뿔형태로 가공되었고, 높은 전류밀도에서는 반대의 가공결과를 보였다. 특히, 특정한 전류밀도에서는 전체 가공 구간에서 균일한 형상의 미세축을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이상의 실험결과로부터 전류밀도를 일정하게 유지하면 확산층 효과의 크기를 일정하게 할 수 있으며, 형상효과를 상쇄시키도록 전류밀도를 결정하면 전체 가공구간에서 균일한 직경의 원통형 미세축을 가공할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10 은 여러가지 직경의 원통형 미세축을 가공한 결과를 SEM(scanning electron microscope)으로 관찰한 결과이다. 그림에서 보면 미세축의 직경이 균일함을 알 수 있으며, 특히 (c)의 가공결과는 직경과 길이의 비가 80 으로 기존의 가공법에 비하여 우수하였는데 이러한 가공결과는 미세축을 제작하는데 어떠한 형태의 외력도 작용하지 않기 때문에 얻어진 것이다.

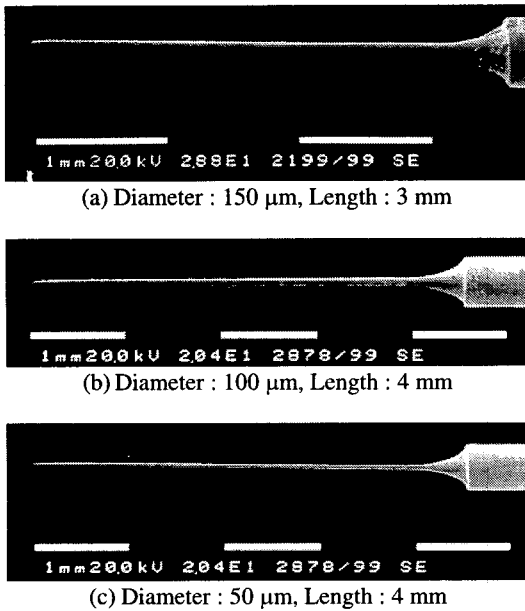


Fig. 10 Examples of uniform cylindrical microshafts

## 6. 결론

전해 프로세스에 의해 가공된 미세축의 형상은 형상 효과와 확산층 효과의 두 가지 상반된 요인의 상대적인 크기에 의해 결정된다. 미세축의 형상 제어는 가공조건으로 조절이 가능한 확산층 효과의 크기를 제어함으로써 이루어진다. 이러한 확산층은 전류 밀도를 제어함으로써 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 미세축의 직경을 제어하기 위하여 패러데이 법칙과 표면장력 효과를 고려하여 전하량과 직경 사이의 관계를 모델링 하였으며, 이를 실험으로 검증하였다.

## 후 기

본 논문은 BK21 사업지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Y. Yamagata, T. Higuchi, "Three-Dimensional Micro Fabrication by Precision Cutting Technique," JSPE, Vol. 61, No. 10, pp. 1361-1364, 1995.
2. T. Waida, K. Okano, "Micro-grinding of Micro-machin Component," JSPE, Vol. 61, No. 10, pp. 1365-1368, 1995.
3. T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi, "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining," Annals of the CIRP, Vol. 34, pp. 431-424, 1985.
4. M. Fotino, "Nanotips by reverse electrochemical etching," Appl. Phys. Lett., Vol. 60, No. 23, pp. 2935-2937, 1992.
5. M. Fotino, "Tip sharpening by normal and reverse electrochemical etching," Rev. Sci. Instrum. Vol. 64, No. 1, pp. 159-167, 1993.
6. P. J. Bryant, H. S. Kim, Y. C. Zheng and R. Yang, "Technique for sharpening scanning tunneling microscope tips," Rev. Sci. Instrum. Vol. 58, No. 6, p. 1115, 1987.
7. H. Morikawa and K. Goto, "Reproducible sharp-pointed tip preparation for field ion microscopy by controlled as polishing," Rev. Sci. Instrum. Vol. 59, No. 10, pp. 2195-2197, 1988.
8. J. A. McGeough, "Principles of electrochemical machining," Chapman and Hall Ltd., 1974.