

전해 프로세스를 이용한 미세축 제작

임영모*, 임형준**, 김수현**

Fabrication of Microshafts using Electrochemical Process

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

ABSTRACT

We proposed a new fabrication method using electrochemical process for microshafts. This method is a kind of atomic removal process by chemical reaction. Therefore, it is possible to make thin and long shafts regardless of the stiffness of materials. Because shaping process is simply switched to polishing process by varying process conditions, we can precisely fabricate microshafts with very smooth surface. We also fabricated a very thin shaft with the diameter as small as 10 μm and a microshaft with high aspect ratio.

Key Words : Micro-machining(미세가공), Electrochemical etching(전해 에칭), Electrochemical polishing(전해 연마), Microshaft(미세축)

1. 서론

최근 기계, 전자 제품 등에 사용되는 미세 부품의 제작에 있어서 미세축 가공에 대한 수요가 점차 증가하고 있다. 미세축 가공기술은 잉크젯 프린터(Ink-Jet Printer)의 노즐 가공에 사용되는 마이크로 펀칭기(Micro Punching)의 공구제작, 이온빔 가공기(Ion-Beam Machining)의 에미터 축(Emitter Electrode), 직경 10 μm 이하의 미세 구멍가공을 위한 마이크로 방전가공(Micro Electro-Discharge Machining)의 공구전극 제작 등 여러 분야에 이용되고 있다. 그러나 미세축의 직경이 줄어들면 이에 따라 강성도 작아지기 때문에 기존의 범용 가공기로 직경 0.3 mm 이하의 미세축을 가공하는데는 한계가 있다. 미세축 가공에 대한 연구는 일본

을 중심으로 활발하게 이루어져 왔다. T. Higuchi 등은 선삭가공 기술을 극대화하여 직경 10 μm 의 미세축을 가공하였으며^[1], K. Okano 등은 연삭기술을 이용하여 직경 50 μm 의 미세축을 가공하였다^[2]. 또한 T. Masuzawa 등은 WEDG(Wire Electro-Discharge Grinding)라는 방전가공법으로 직경 5 μm 로 가공하였다.^[3] 그러나 이러한 가공법들은 가공속도가 느려서 생산성이 떨어지며, 고가의 NC 장치나 정밀 이송장치들을 사용하고 있어 가공 시스템의 가격이 비싸지는 단점이 있다.

본 연구에서는 기존의 미세축 가공 방법들의 단점들을 보완할 수 있는 전해 프로세스를 이용한 새로운 미세축 가공법을 개발하였다. 전해 프로세스의 원리와 특성을 살펴보았으며, 가공 시스템과 프로세스를 개발하였다.

* 한국과학기술연구원 마이크로시스템연구센터

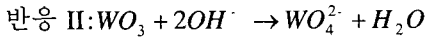
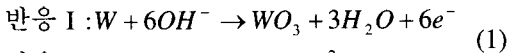
** 한국과학기술원 기계공학과

2. 가공원리 및 특성

2.1 가공 원리

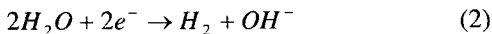
전해액(Electrolyte)에 담겨져 있는 두개의 전극(Electrode)에 전류를 흘려주면 양극(Anode)에서는 금속이 전자를 잃으면서 금속이온의 형태로 전해액으로 용해되는 산화반응이 일어난다. 음극(Cathode)에서는 주변의 이온이 전자를 얻어 원자나 분자 형태로 변하여 석출되는 환원반응이 일어난다. 전해 프로세스법은 양극의 산화반응을 이용하여 가공물을 가공하는 방법이다.

본 연구에서는 미세축의 재료로 강성이 높은 텅스텐(Tungsten)을 사용하였으며 전해액으로 KOH(Potassium Hydroxide)용액을 사용하였다. 이때 양극에 연결되어 있는 텅스텐은 다음의 식과 같은 두 단계의 화학반응을 거쳐 표면으로부터 용해된다.¹⁴⁾



반응 I 은 텅스텐 표면의 원자들이 주위의 수산화 이온(Hydroxide ion)들과 반응하여 텅스텐 산화물(Tungsten Oxide)로 바뀌는 과정이고, 반응 II 는 텅스텐 산화물이 다시 주위의 수산화 이온과 반응하여 이온으로 변하여 전해액으로 용해되는 과정이다.

음극에서는 음극 주변에 있는 물 분자가 수소 이온과 수산화 이온으로 분해되면서 수소 이온들이 전자를 얻어 수소 기체로 되는 반응이 일어난다. 생성된 수소 기체들은 기포를 형성하며 음극 표면을 따라 올라오게 된다. 음극에서 일어나는 화학반응식은 다음과 같다.



전해 프로세스법은 화학반응에 의해 가공대상물을 분자 단위로 가공하기 때문에 마이크론 단위(Micron Order)의 직경을 갖는 미세축을 가공할 수 있으며 매끄러운 표면을 얻을 수 있다. 또한, 화학반응을 이용하기 때문에 텅스텐이나 초경합금 같은 강성이 높은 재료도 가공이 가능하다. 기존의 가공법과는 달리 축을 가공하기 위해 공구를 사용

하지 않기 때문에 비싼 NC 장치나 정밀한 공구 이송장치가 필요 없어 저렴한 가격으로 시스템을 구성할 수 있다.

2.2 전해 프로세스

앞 절에서 살펴본 바와 같이 양극에서 금속이 용해되는 과정은 두 단계의 화학반응을 거치게 된다. 각 단계의 반응속도는 각각 다른 가공 조건에 의하여 결정되므로 가공 조건에 따라 전해 프로세스의 가공특성이 달라지게 된다.

전류가 낮게 인가했을 때에는 산화물의 생성속도가 산화물의 용해속도보다 작기 때문에 산화물은 생성되는 즉시 전해액으로 용해된다. 그러나, 전류를 높게 인가할 경우 산화물의 생성속도가 용해속도보다 크기 때문에 축의 표면에 일정한 두께의 고체 산화막(Solid Oxide Film)이 형성된다. 고체 산화막에서의 이온의 이동특성은 전해액에서의 특성과 다르기 때문에 산화막의 존재여부는 전해 프로세스의 가공특성을 달라지게 한다.

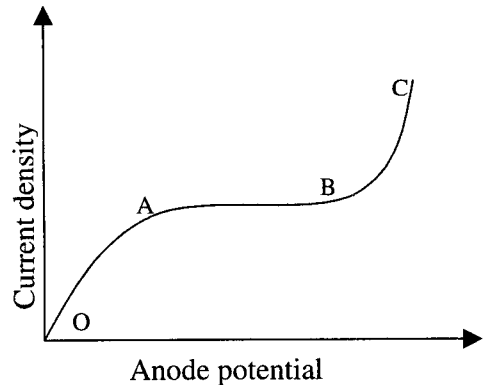


Fig. 1 Anode potential-current density polarization curve

산화막이 가공특성에 미치는 영향은 전압과 전류밀도의 관계를 나타내는 Fig. 1의 분극곡선(Polarization Curve)에 잘 나타난다. OA 구간에서는 축의 표면에 산화막이 형성되지 않아서 전압에 비례하여 전류밀도가 증가한다. 전압이 계속 증가하여 A 보다 높게 되면 전류밀도가 더 이상 증가하지 않는 평평한 AB 구간이 생긴다. 여기서는 산화물의 생성속도가 용해되는 속도보다 커지게 되어 축 표면에 고체 산화막(Solid Oxide Film)이 생성된다. 이온들의 산화막을 통과한 축표면으로의 이동은 화

산(Diffusion)에 의해서만 이루어지는데 확산속도에
 는 제한이 있어서 전압이 높아져도 전류밀도가 더
 이상 전류밀도가 증가하지 않게 된다. 전압이 더
 욱 커지면 축의 표면에서 산소가 생성되면서 산화
 막을 파괴되어 급격하게 전류가 흐른다(BC 구간).

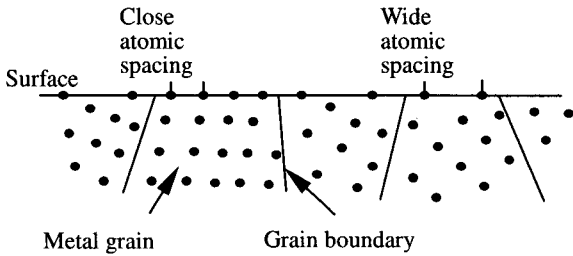


Fig. 2 Structure of a metal surface

전해 프로세스를 이용한 금속가공은 가공조건
 에 따라 두가지로 분류된다. 우선, 분극곡선의 OA
 구간에서 가공할 경우에는 전해 에칭(Electrochemical
 Etching) 현상이 발생한다. 에칭 조건에서는 축의 표
 면에 있는 금속 원자들의 배열 상태에 따라 국부
 적인 용해속도의 불균일성이 발생한다. 금속 원자
 들이 Fig. 2 와 같이 배열되어 있다고 하면, 원자들
 이 넓게 배열된 부분의 용해속도가 좁게 배열된
 부분보다 약간 크게 된다. 이러한 용해속도의 불
 균일성은 가공된 축의 표면 거칠기를 나쁘게 한다.

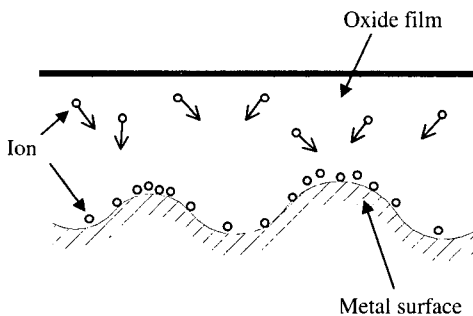


Fig. 3 Schematic diagram of the movement of ions
 in oxide film

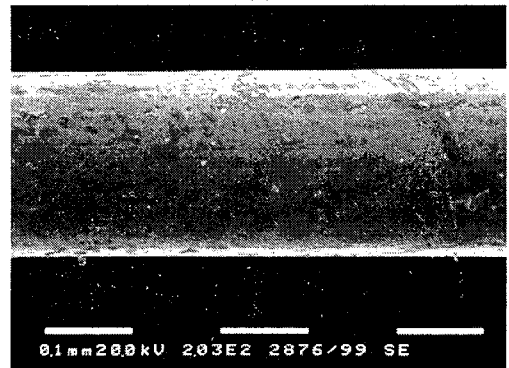
AB 구간에서는 축의 표면에 일정한 두께의 산
 화막이 형성되어 용액 속에 있는 이온들은 산화막
 을 통과하여 표면의 원자와 반응하게 된다. 용액
 과 산화막의 경계면(Oxide-Solution Interface)을 통

과한 이온들은 Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 확산을
 통하여 랜덤하게 이동하기 때문에 금속 표면의 원
 자나 입자의 배열과는 상관없이 표면에서 돌출된
 부분과 먼저 반응하게 된다. 따라서 표면의 볼록
 한 부분에서의 용해속도가 오목한 부분보다 크게
 되어 전체적으로는 평평하게 가공되므로 표면 거
 칠기가 좋아진다. 이와 같은 현상을 전해 연마
 (Electrochemical Polishing) 라 한다⁵⁾.

앞에서 살펴본 봐와 같이 전해 프로세스는 가
 공조건에 따라 전해 에칭 또는 전해 연마 가공을
 수행한다. 전해 에칭 영역에서는 두 전극에 인가
 되는 전류와 전압을 임의로 조절할 수 있고, 전해
 연마 영역에서는 축의 표면 거칠기를 향상시킬 수
 있는 특징을 가지고 있기 때문에, 전해 프로세스
 를 이용하여 미세축을 가공하기 위해서는 이러한
 특징들을 고려하여 가공조건을 선정하여야 한다.



(a)



(b)

Fig. 4 SEM photograph of a metal surface produced by
 (a) electrochemical etching
 (b) electrochemical etching and polishing

전해 프로세스를 이용하여 미세축을 가공할 때 축의 형상은 전류와 전압에 의해 결정되기 때문에 본 연구에서는 전해 에칭 조건에서 축의 전체적인 형상을 가공한 후 가공 조건을 변화 시켜 전해 연마 공정을 수행하도록 하였다. 이와 같이 전해 프로세스 가공법은 기존의 가공방법과는 다르게 단순히 가공조건만을 변화 시킴으로써 축 성형공정과 표면 연마공정을 하나의 장치에서 수행할 수 있기 때문에 표면 연마를 위한 가공 대상물의 이동이나 재결합공정이 필요 없게 되어 가공 정밀도를 높일 수 있다.

Fig. 4 는 전해 프로세스에 의하여 미세축을 가공하였을 경우 가공 조건에 따른 표면 거칠기의 변화를 관찰한 결과이다. (a)는 전해 에칭 공정만을 수행하여 축의 직경이 200 μm 이 되었을 때의 축의 표면을 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 관찰한 결과로 가공전의 표면의 결점(Defect)에 의하여 중간중간 오목하게 가공되어 있으며 전체적으로 표면 거칠기가 좋지 않음을 볼 수 있다. (b)는 에칭공정으로 축을 성형한 후 전해 연마로 표면처리를 하였을 때의 미세축의 표면을 관찰한 결과로 표면이 매우 깨끗하게 가공되었음을 볼 수 있다.

3. 미세축 제작

3.1 가공 시스템

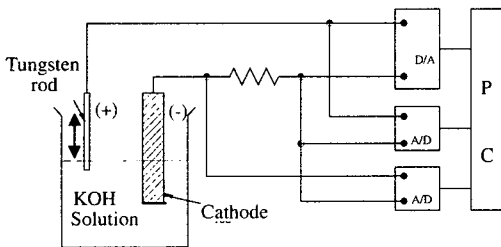


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

본 연구에서 개발한 미세축 가공 시스템의 개략도는 Fig. 5 와 같다. 가공 시스템은 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 $\mu\text{m}/\text{step}$ 이다. 극간 전류는 회로에 직렬로 저항을 삽입하여 측정

하였다. 극간 전류와 전압 값은 A/D 변환기를 사용하여 1kHz 로 샘플링(Sampling)하고 1000 개의 데이터를 평균하여 얻었다. 전해액으로 PH 14.7 인 농도 5 Mol 의 수산화칼륨(KOH)용액을 사용하였다. 가공 대상물로는 직경 0.5 mm 의 텅스텐 봉을 사용하였고 상온에서 가공을 수행하였다.

3.2 축 표면 세척 프로세스

전해 프로세스는 화학반응을 이용하여 가공하기 때문에 표면에 이물질을 묻어있으면 가공이 불균일하게 일어난다. 따라서 가공하기 전은 물론이고 가공 중에도 이물질을 제거하는 세척 과정이 필요하다. 세척 방법에는 용매세척(Solvent Cleaning), 산세척(Acid Cleaning/Pickling), 유제세척(Emulsion Cleaning), 알카리세척(Alkaline Cleaning), 염욕세척(Salt Bath Descaling), 연마세척(Abrasive Blast Cleaning), 배럴다듬질(Barrel Finishing) 등이 있다. 그리고 작은 크기의 복잡한 부품을 위해서는 초음파세척(Ultrasonic Cleaning)을 이용하기도 한다^[6]. 본 가공 대상물의 경우에는 금속성 재료의 표면에 존재하는 금속산화물과 소량의 단백질, 기름, 먼지 등의 이물질을 제거해야 한다. 또한 세척이 이루어지는 과정 중에 재료 자체의 형태 변화 및 화학적, 열적 변형도 최소화 되어야 한다. 따라서 본 가공 대상물의 예비세척(Pre-cleaning)으로 아세톤 용액에 담근 후 초음파 세척을 수행하였다. 그 후 남아있는 아세톤 성분의 제거 및 2 차 세척 방법으로 증류수에 담가 초음파 세척 한 후, 마지막 으로 표면을 건조시켰다.

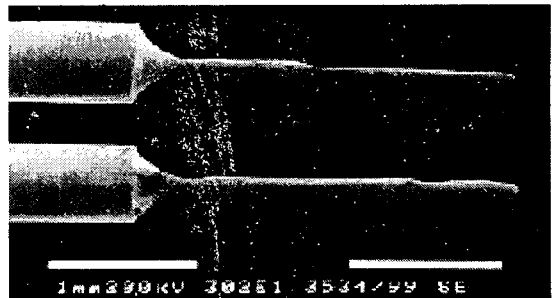


Fig. 6 SEM Photograph of fabricated microshafts without intermediate cleaning process

예비세척 프로세스만을 수행하고 미세축을 가공하였을 경우 전극의 형상이 균일하지 못하고

Fig. 6 에서 관찰할 수 있듯이 울퉁불퉁한 형태로 가공되었다. 이와 같은 현상은 가공하는 중에 축의 주변에 있는 이물질이나 화학반응에 의한 슬러지(Sludge) 등이 축 표면에 부착되어 화학반응이 균일하게 일어나지 못했기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 따라서, 균일한 형상의 미세전극을 제작하기 위해서는 가공하는 중간에 전극을 세척하는 과정이 필요하다. 그런데 가공 중에 축을 분리해서 세척하는 방법은 전극의 정렬이나 가공길이의 제어 등 정밀도를 유지하는데 어려움이 있고 번거로운 작업이기 때문에 축을 분리하지 않고 세척하여야 한다.

전해 프로세스는 가역전위(Reversible Potential) 보다 큰 전위를 유지하면서 가공을 수행하고 있기 때문에 양극 주위의 전위는 용액 내부보다 높게 된다. 그런데, 전위를 갑자기 낮추면 양극 표면의 전위가 주변에 있는 전해액의 전위보다 순간적으로 낮아지게 되어 수소기체가 생성되는 환원반응이 일어나게 된다.

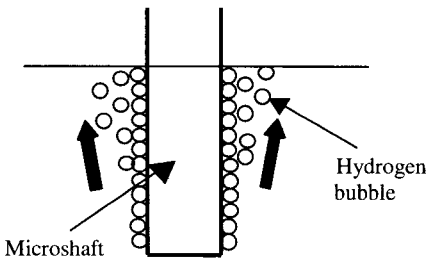


Fig. 7 Principle of intermediate cleaning process

양극 주위에 생성된 수소기체는 Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 기포를 형성하여 축을 따라 올라오면서 축 표면의 이물질을 제거하게 된다. 이와 같은 순간적인 전위차에 의한 수소 기포의 생성은 시간이 경과함에 따라 점점 줄어들게 된다. 그런데, 생성된 수소 기포 중에 공기 속으로 이동하지 못하고 축의 표면에 부착되어 있는 기포는 화학반응을 방해하여 표면을 불균일하게 하는 요인이 되므로 전극을 공기 중으로 이동시켜서 표면에 부착되어 있는 기포를 제거한 후 다시 전해액에 넣어 다시 가공을 수행한다. 이상과 같은 과정을 일정한 간격으로 반복하면 가공하는 중간에 축을 분리하지 않고 표면주위의 이물질을 제거할 수 있어서 가공 정밀도를 높일 수 있다.

3.3 미세축 제작실험

본 연구에서 개발한 전해 프로세스법으로 제작한 미세축의 예는 Fig. 8 과 Fig. 9 에 있다. Fig. 8 은 미세축을 가공한 결과를 머리카락과 비교한 것으로 직경은 10 μm 이다. Fig. 9 은 길고 가늘게 축을 가공한 결과로 직경은 50 μm 이고 길이는 4 mm 로, 축의 직진도가 아주 좋음을 알 수 있다. 또한 직경과 길이의 비가 80 으로 기존의 가공법에 비하여 우수하였는데, 이러한 가공결과는 가공하는 도중에 축에 어떠한 형태의 외력도 작용하지 않기 때문에 얻어진 것으로 판단된다.

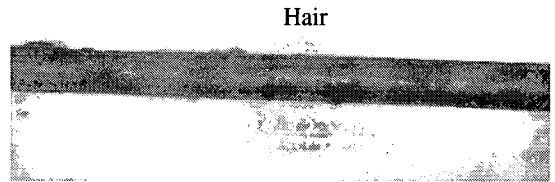


Fig. 8 Comparison of fabricated microshaft with hair (Mag. : x400, Diameter : 10 μm)

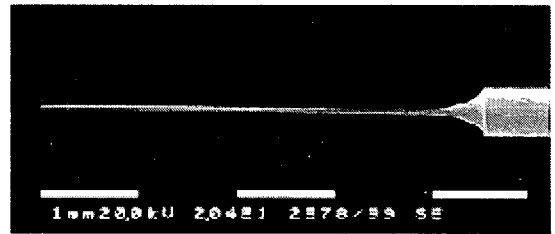


Fig. 9 Example of a very long and thin microshaft (Diameter : 50 μm , Length : 4 mm)

4. 결론

본 연구에서는 전해 프로세스를 이용하여 직경 10 μm 이하의 미세축을 제작할 수 있는 새로운 가공방법을 제시하였다. 전해 프로세스법은 화학 반응에 의해 가공대상물을 분자단위로 가공하기 때문에 축을 미세하게 가공할 수 있으며 비싼

NC 장치나 정밀 이송장치를 사용하지 않아도 되어서 저렴한 가격으로 시스템을 구성할 수 있다. 또한, 단순히 가공조건만을 변화 시킴으로써 축 성형공정과 표면 연마공정을 하나의 장치에서 수행할 수 있기 때문에 가공 정밀도가 높으며 좋은 표면 거칠기를 갖는 미세축을 제작할 수 있다.

미세축 가공장치를 개발하였으며, 순간적인 전 위치를 이용하여 가공을 수행하는 동안 축의 표면에 붙어있는 이물질을 세척할 수 있는 방법을 개발하였다. 미세축 제작 실험을 통하여 최소 직경 10 μm 의 미세축을 제작하였으며 직경과 길이의 비가 80 이상인 가늘고 긴 축을 제작하였다.

후 기

본 논문은 BK21 사업지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Y. Yamagata and T. Higuchi, "Three-Dimensional Micro Fabrication by Precision Cutting Technique," JSPE, Vol. 61, No. 10, pp. 1361-1364, 1995.
2. T. Waida and K. Okano, "Micro-grinding of Micro-machine Component," JSPE, Vol. 61, No. 10, pp. 1365-1368, 1995.
3. T. Masuzawa, M. Fujino, and K. Kobayashi, "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining," Annals of the CIRP, Vol. 34, pp. 431-424, 1985.
4. P. I. Ortiz, M. L. Teijelo, and M. C. Giordano, "Electrochemical Behaviour of Tungsten in Alkaline Media," J. Electroanal. Chem., Vol. 243, pp. 379-391, 1988.
5. J. A. McGeough, "Principles of electrochemical machining," Chapman and Hall Ltd., 1974.
6. William G. Wood, "Metals Handbook Ninth Edition - Volume 5 Surface Cleaning, Finishing, and Coating," American Society for Metals, 1982.