

전해 프로세스에 의한 초미세 펀치의 제작

임형준* · 임영모** · 김수현* · 곽윤근*

Fabrication of Ultrathin Punch by Electrochemical Process

Hyung-Jun Lim, Young-Mo Lim, Soo-Hyun Kim and Yoon Keun Kwak

Key Words : Fabrication, Electrode, Punch, Electrochemical Process, Etching, Polishing

Abstract

With the development of micro machining, it becomes an important part to fabricate an electrode which has tens of μm or less. There are two methods to get a narrow hole; non-contact type such as EDM(Electrodischarge machining) and contact type such as punching. A punch which has a tapered shape with a cylindrical tip is fabricated in this paper. To make this punch, a method which was used to fabricate a cylindrical shape by electrochemical process was applied. The control factors for the shape and their limits are verified through an experiment.

1. 서론

최근 기계장치의 소형화와 함께 이들을 이루는 부품을 가공하는 기술에 대한 요구가 점차 증가하고 있다. 이러한 형상은 접촉식 범용가공기술로의 접근으로는 불가능하기 때문에 주로 비접촉식 가공의 소형화 또는 반도체 공정의 응용으로 제작되어지는 것이 일반적이다. 비접촉 가공의 대표적 방법인 방전가공은 대상 재질이 다양하며 직경에 대한 길이의 비율이 큰 값을 가지도록 가공할 수 있는 특징이 있다. 이를 위해서 균일한 직경을 가지는 미세 전극의 제작이 필요하다⁽¹⁾. 이는 범용기계장치의 작업공구와 유사한 역할을 수행하며, 임의의 형상가공을 가능하게 한다. 전해프로세스에 의하여 균일한 원형 단면을 가지는 미세 전극의 제작 방법에 대한 연구는 일본을 비롯한 국외 및 국내에서도 수행되어왔다⁽²⁻⁴⁾.

실제로 노즐과 같이 단순한 형태의 구멍은 먼

저 동일한 형상을 가지는 전극을 제작하여 이 모양을 가공물에 그대로 전사함으로써 얻을 수 있다. 이를 위해서는 단순히 균일한 직경을 가지는 형상이 아닌 특정 형태의 전극 제작이 필요하다. 본 논문에서는 전체적으로는 테이퍼 형상을 가지며 끝부분에 균일한 직경을 유지하는 부분을 가지는 펀치형태를 제작한다. 먼저 기존의 전해프로세스를 이용한 균일한 직경의 가공을 수행한 후 이를 이용하여 펀치형상을 제작한다.

2. 전해프로세스에 의한 전극 가공

2.1 전해 프로세스의 특징

전해 프로세스는 화학반응에 의해 가공 대상물을 분자 단위로 가공하기 때문에 수 μm 의 직경을 가지는 미세전극의 제작도 가능하며 매끄러운 표면 형상을 얻을 수 있다. 또한, 화학 반응을 이용한 비접촉 방식이어서 텅스텐과 같이 강성이 높은 재료의 가공이 용이하며, 가공 하는 데에

* 한국과학기술원 (KAIST)

** 한국과학기술연구원 (KIST)

있어서 방향성이 없으므로 전극의 진원도가 좋다. 또한 단순히 전해액 속에 담근 후 이들 사이의 전압 및 전류의 조절만으로 가공이 이루어지기 때문에 구조가 간단하며 저렴한 것이 특징이다⁽⁵⁾.

하지만, 공구를 사용하여 직접 가공하는 것이 아니므로 다양한 형상으로 가공하는 것이 어렵고, 가공된 정도를 실시간으로 알기 어려운 단점이 있다. 또한 반응조건에 따라 가공 형상이 달라지므로 가공 조건과 가공 형상 사이의 관계에 대한 정확한 해석이 필요하다.

2.2 전해 프로세스의 원리

전해액에 담겨있는 두 금속 재질의 양단에 전류를 흘려주면 양극에서는 금속이 전자를 잃으면서 금속 이온의 형태로 변해 전해액 속으로 용해되는 산화반응이 일어난다. 반면 음극에서는 주변의 이온이 전자를 얻어 원자나 분자 형태로 변하여 석출되는 환원반응이 일어난다. 전해프로세스는 양극의 산화반응을 이용하여 가공물을 가공해나가는 방법이다.

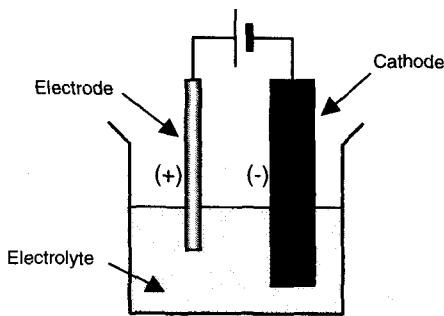
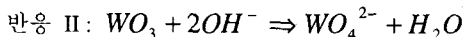
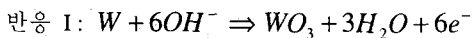


Fig. 1 Schematic diagram of electrochemical process

미세전극의 재료로는 강성이 높으면서 순수 금속 재질인 텅스텐을, 전해액으로는 수산화칼륨(KOH) 용액을 사용하면 다음과 같은 두 단계의 화학반응을 거쳐 텅스텐의 산화반응을 얻을 수 있다⁽⁶⁾.



반응 I은 전극 표면의 텅스텐 원자들이 주위의 수산화이온(OH^-)과 반응하여 텅스텐 산화물(WO_3)로 바뀌는 과정으로 반응속도는 인가된 전

류에 비례하게 된다. 반응 II는 텅스텐 산화물이 다시 주변의 수산화 이온과 반응하여 이온으로 변하여 전해액 속으로 용해되는 과정이다. 이것은 전류와 상관없이 화학반응 조건에 따라 일정한 속도로 반응이 일어나게 된다.

한편 음극에서는 주변에 있는 물 분자가 수소 이온과 수산화 이온으로 분해되면서 수소 이온들이 전자를 얻어 수소 기체로 되는 반응이 일어난다. 이때 생성된 수소 기체들은 기포를 형성하여 음극 표면을 따라 올라오게 된다.

2.3 균일한 직경을 가지는 전극의 가공

실제로 전해 프로세스를 통하여 STM이나 AFM에 사용되는 탐침을 제작하는 경우 통상 낮은 전해액 농도와 전류에서 가공을 수행하므로 가공후 형상은 끝부분으로 갈수록 가늘어지는 원뿔 모양이 된다. 이는 금속이 용해될 때에 곡률반경이 큰 부분보다 작은 부분일수록 용해속도가 빠른 특성에 의한 것이며 이를 형상 효과라 한다.

한편, 앞 절의 화학식의 첫번째 반응에서 발생한 텅스텐 산화물은 수산화 이온과 만나기 전에 전극 주변에 일정한 형태의 막을 형성하며 아래 방향으로 흐르게 되는데, 수직 아래방향으로 갈수록 그 층이 두터우므로 가공 속도의 저하가 일어나게 된다. 이러한 확산층 효과는 가공후 형상이 끝부분으로 갈수록 직경이 커지는 결과를 가져오게 된다.

이렇게 서로 상반된 두 효과의 상쇄 효과로 인하여 적당한 전해질 농도와 전류값 하에서 균일한 직경 분포를 가지는 전극의 제작이 가능하다⁽²⁾.

3. 초미세 펀치 형상의 가공 방법

3.1 수직방향 이송을 이용한 다단계 형상가공

본 연구에서 언급자 하는 초미세 펀치의 형상은 다음 그림과 같이 전체적으로는 테이퍼 형상이며, 끝부분에 균일한 직경 부분을 가지는 형상이다.

실제로 형상 효과만을 이용하여 가공을 수행하게 되면 테이퍼 형상을 얻을 수 있으나, 끝부분의 균일한 직경을 가지는 부분을 동시에 제작하는 것이 어렵기 때문에 다음과 같이 수직방향의 이송을 이용한 가공방법을 적용한다.

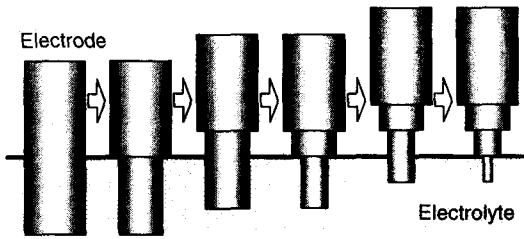


Fig. 2 Basic concept for stepped shape

위 그림 2는 균일한 직경의 가공 방법을 응용한 다단계 형상의 가공 원리에 대한 것이다. 가공이 일어나는 중에 전해질에 담겨 있는 전극의 깊이를 일정한 비율로 줄여나가면 왼쪽의 결과와 같이 일정한 직경변화를 가지는 다단계 형상을 얻을 수 있다.

3.2 다단계형상의 극소화로 인한 펀치형상 가공

앞 절에서 얻어진 다단계 형상은 그 스텝 간격을 줄여나감으로써 다음과 같이 초미세 펀치의 형상을 얻을 수 있다.

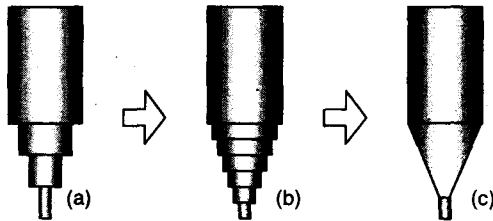


Fig. 3 Micro punch from the stepped shape

전해질 용액의 표면장력이 전혀 없는 경우라면 그림 3(c)와 같은 형상의 제작을 위해서는 가공 중 전극을 등속으로 상승시켜야 한다. 하지만, 표면 장력의 효과와 그 유동성을 고려하면 수십 μm 정도의 스텝 이송만으로도 충분히 테이퍼 형상을 얻을 수 있다.

3.3 초미세 펀치의 형상 결정 요소

초미세 펀치의 형상은 끝단의 길이, 끝단의 직경, 그리고 테이퍼 각에 따라 좌우된다. 이러한 형상은 전해질의 농도와 온도, 전극의 담금 깊이, 초기 직경, 재료상수, 가공 중 전류의 변화 등에 의하여 결정지어진다.

이와 같이 펀치의 형상을 결정하기 위한 제어

요소 및 이들이 결정짓게 되는 펀치 형상과의 관계는 그림 4에 있다. 그림 4의 좌측열은 제어 요소, 우측열은 가공 형상을 의미한다. 전극의 담금 깊이에 의하여 가공 길이가 정해지며, 초기 직경을 비롯한 전극의 상수 값들과 함께 가해지는 전류에 따라 전극 직경의 변화가 일어나게 된다.

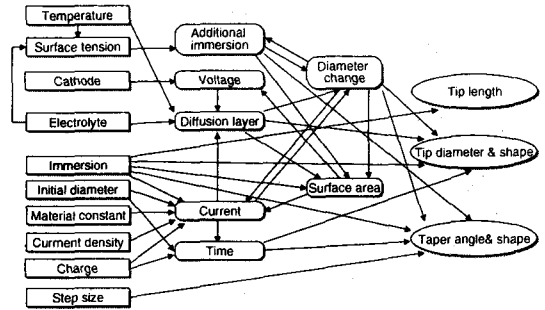


Fig. 4 Relation between the punch shape and its control factors

4. 초미세 펀치의 제작

4.1 가공 장치

균일한 직경을 가지는 전극 및 초미세 펀치의 가공을 위한 장치가 그림 5에 있다.

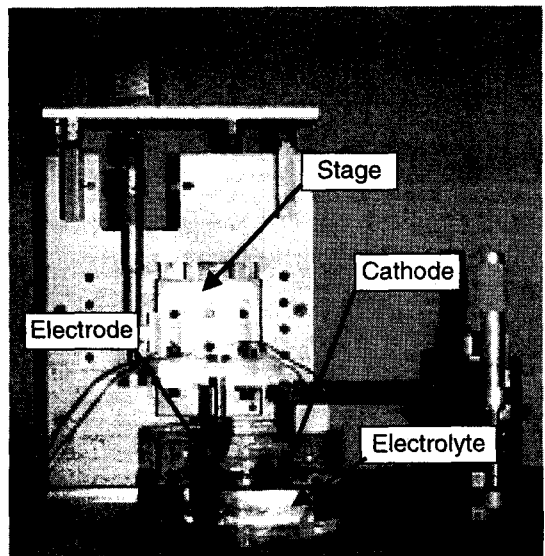


Fig. 5 Fabrication system

전해액 속에 전극 및 음극이 각각 홀더에 의하여 삽입되어 있으며, 광학용 스테이지와 스텝 모터로 구성된 전극 이송장치가 있다. 전극으로는 순도 99.9%의 텅스텐 재질로 이루어져 있으며, 전해질은 수산화칼륨 용액이다.

그리고 전극 및 음극 양단에는 전류 및 전압 조절이 가능한 전원이 연결되어 있다.

4.2 균일한 형상의 전극 제작

앞 절에서 소개된 실험장치를 이용하여 균일한 직경을 가지는 전극을 가공한다. 4 mm의 길이를 직경 100 μm 로 가공한 결과가 그림 6에 있다. 이 경우 직경에 대한 길이의 비율은 40이다.



Fig. 6 Fabrication of cylindrical shape

4.3 초미세 펀치의 제작

균일한 직경의 제작을 이용하여 다음의 그림 7과 같이 초미세 펀치의 형상을 제작하였다. 초기 직경은 0.5 mm, 테이퍼 부 가공을 위한 스텝 이송 간격은 20 μm , 테이퍼 부의 길이는 0.72 mm, 끝단 직경은 60 μm 이다.

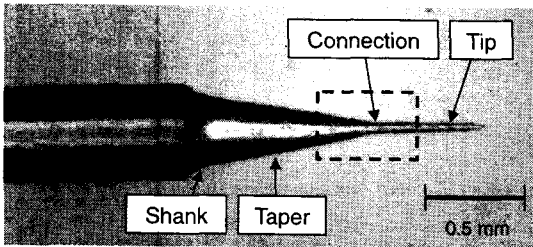


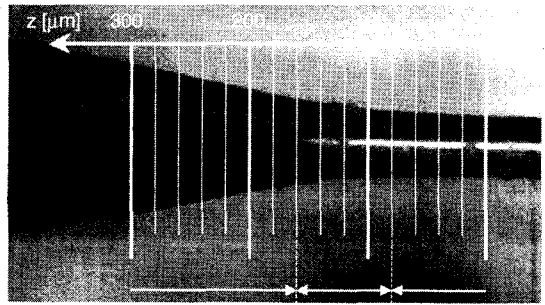
Fig. 7 Fabrication of the punch

5. 펀치의 형상에 관한 분석

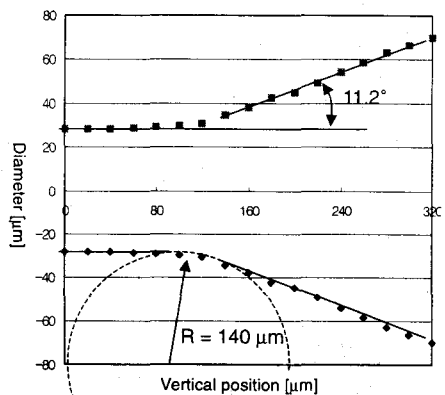
5.1 초미세 펀치의 직경 선형도 분석

초미세 펀치 형상의 제작에 있어서 테이퍼 부

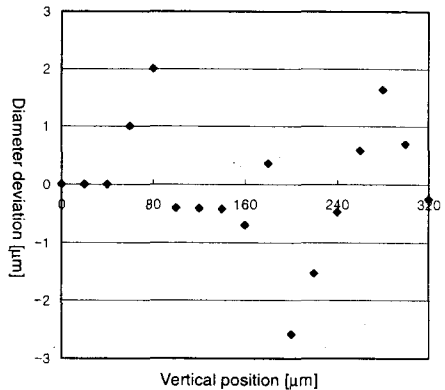
의 선형화 정도 및 균일한 직경 부분의 직진도는 그 형상에 있어서 중요한 요소이다.



(a) Measured position



(b) Diameter profile



(c) Diameter deviation

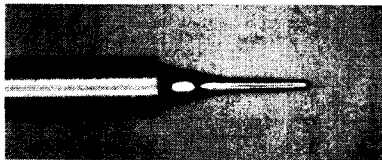
Fig. 8 Analysis of the punch shape

그림 7의 점선 부분을 확대한 것이 그림 8(a)에 있는데, 가공된 형상에 대한 선형화 및 연결 부위의 곡률반경을 측정하기 위하여 길이방향으로 20 μm 씩 이동해가며 직경을 측정한다. 측정은 400배의 배율을 가진 광학식 현미경을 이용하였

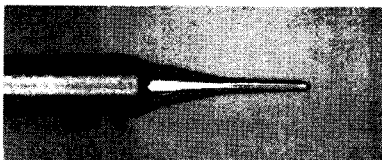
으며, 최대 측정 오차는 $0.5 \mu\text{m}$ 이다. 그림 8(b)에서 보듯이 균일한 직경 부분과 테이퍼 부분으로 나누어져 있으며, 그 사이에 곡률반경 $140 \mu\text{m}$ 로 연결되어 있다. 테이퍼 각은 22.4° 이다. 그리고 각 부분의 직경 값으로 선형화 한 후 그 값에 대한 실제 측정값과의 오차는 그림 8(c)에 있다. 여기서 보면 알 수 있듯이 최대 편차는 $2.5 \mu\text{m}$ 이다.

5.2 테이퍼 길이에 따른 테이퍼 각

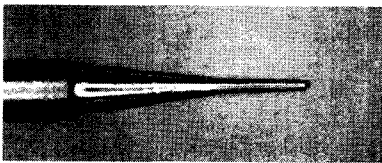
그림 7과 8에서 보면 가공이 이루어지지 않은 부분과 이루어진 부분의 연결 부위에서 연속적으로 직경의 변화가 일어나는 추가 가공이 이루어진 것을 확인할 수 있다. 이것은 전극이 전해질에 삽입되었을 때 표면장력으로 인하여 수면 부분에 전해질이 끌려 올라간 부분에서 추가로 가공되어 나타나는 현상이다. 현 실험의 조건에서 표면 장력으로 인하여 발생하는 수면 상승의 효과가 나타나게 되며, 이와 비슷하거나 작은 테이퍼 길이를 요구하는 경우에 그 형상을 제대로 얻을 수 없게 된다.



(a) $L_T = 0.2 \text{ mm}$, $\theta_T = 21^\circ$, $D_E = 113 \mu\text{m}$



(b) $L_T = 0.4 \text{ mm}$, $\theta_T = 24^\circ$, $D_E = 109 \mu\text{m}$



(c) $L_T = 1.0 \text{ mm}$, $\theta_T = 14^\circ$, $D_E = 112 \mu\text{m}$

Fig. 9 The angle of taper according to the length
(L_T : Desired taper length, θ_T : Taper angle,
 D_E : Average tip diameter)

따라서, 그림 9(a)와 같이 짧은 테이퍼 각을 얻을 때에 좋지 못한 결과가 얻어진다.

그림 9 및 표 1은 테이퍼의 길이 변화에 따라

얻어지는 테이퍼 각에 대한 실험 결과이다. 초기 직경 0.5 mm 으로부터 약 $100 \mu\text{m}$ 의 끝단 직경을 얻는 경우 가능한 최대 테이퍼 각은 24° 임을 확인할 수 있다.

Table 1. Relation between the length and the angle

Taper length [mm]	Taper angle [$^\circ$]
0.2	21
0.4	24
0.6	19
0.8	17
1.0	14

6. 결론

본 연구에서 직경 0.5 mm 의 재료로부터 균일한 직경을 가지는 원통형 전극을 얻어내는 방법을 이용하여 초미세 펀치의 형상을 제작하였다. 또한 전해질속에 전극이 담기는 깊이를 조절함으로써 다양한 테이퍼 각을 얻을 수 있음을 확인하였다.

여기서 얻어진 초미세 펀치로 초미세 방전 가공과 펀칭 방법을 통하여 동일한 형상을 가지는 미세 구멍을 얻을 수 있다.

추후 그림 4와 같은 형상 결정 요소들의 자세한 해석을 통하여 삽입 깊이 및 전류, 전압의 조절로 원하는 임의의 형상을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) 마이크로가공기술편집위원회, "마이크로 가공 기술", 기전연구소, 1993.
- (2) 임영모, "전해 프로세스에 의한 초미세 전극의 제작 및 응용", 한국과학기술원 박사학위논문, 1999.
- (3) Y. Yamagata, T. Higuchi, "Three-Dimensional Micro Fabrication by Precision Cutting Technique", JSPE, Vol. 61, No. 10, pp.1361-1364, 1995.
- (4) T. Waida, K. Okano, "Micro-grinding of Micro-machine Component", JSPE, Vol. 61, No. 10, pp. 1365-1368, 1995.
- (5) J. A. McGeough, "Principles of Electrochemical Machining", Chapman and Hall Ltd., 1974.
- (6) P. I. Ortiz, M. L. Teijelo, M. C. Giordano, "Electrochemical Behaviour of Tungsten in Alkaline Media", J. Electroanal. Chem., Vol. 243, pp.379-391, 1988.