한국정밀공학회지 제 17 권 제 12 호 (2000 년 12 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 12, December 2000.

초미세 천공 펀치의 성형에 대한 연구

임형준*, 임영모**, 김수현*, 곽윤근*

Study on the Fabrication of Ultrathin Punch

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

ABSTRACT

Micro punching is one of general methods to fabricate simple holes such as permanent ink-jet printer nozzles. A thin punch, that is need for micro punching, usually has been obtained by mechanical machining. There are some methods to obtain a thin punch from a cylindrical rod, e.g., microgrinding and WEDG (Wire Electro-Discharge Grinding). Inefficiently, only one punch can be obtained from these machining methods. In contrast with these methods, many punches can be fabricated simultaneously by electrochemical process. Electrochemical process has usually aimed to obtain very sharp probe for atomic force microscopy (AFM) or scanning tunneling microscopy (STM), and it has not been considered the whole shape of a probe in spite of good merits. In this paper, an ultrathin punch with a tapered shape and a cylindrical tip is newly fabricated by electrochemical process.

Key Words : Micro Punching(초미세 펀칭), Electrochemical Process(전해 프로세스) , Ultrathin Punch(초미세 천공펀치), Tapered Shape (테이퍼 형상)

1. 서론

최근 시스템의 크기가 점차 작아짐에 따라 μm 단위의 구조물을 성형하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 간단한 예로, 잉크젯 프린터나 섬유 방사노즐을 제작함에 있어서 수~수십 μm 의 미세 구멍을 대량으로 생산할 필요성이 있다. 이러한 구조물을 얻기 위해서는 기존의 기계가공 방법만으로는 불가능하므로, IC 제조기술을 확장시켜 응용하거나[1,2] 방전 가공 또는 미세 펀칭 작업의 규모를 줄이는 등 다양한 방법으로의 연구가 진행중이다. 금속성 재질의 높은 종횡비를 가지는 단순한 구멍 형상은 현재 대부분 마이크로 펀칭에 의해서 얻고 있다. 현재 마이크로 펀칭은 약 30 μm 의 직경을 가지는 미세 노즐을 제작하기 위한 방법으로 사용되고 있으며, 이는 단순하면서도 빠른 가공 속도를 가지고 있기 때문에 미세 기계 가공의 가장 기본적인 요소로써 자리잡고 있다.

이를 위해서 미세 구멍과 유사한 형상을 가지는 펀치를 제작해야 한다. 현재는 미세 펀치를 위하여 주로 와이어 방전연삭(Wire Electrodischarge Grinding)과 같은 기계가공에 의존하고 있으나, 이러한 방법은 한 번의 공정을 통하여 하나의 펀치밖에 생산하지 못하며 대략 100 분 안팎의 많은 시간을 소요하는 등 효율면에서 좋지 못한 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 것과는 다른

* 한국과학기술원 기계공학과
** 한국과학기술연구원 마이크로시스템연구센터

방법을 이용하여 여러 개의 초미세 펀치 형상을 손쉽게 제작할 수 있는 방법을 고안하고, 이를 실제로 제작하기로 한다.

초미세 펀치 형상의 기본이 되는 미세 전극의 제작에 관련된 기존 연구 결과를 살펴보면 다음과 같다. 1995 년 T. Higuchi[3] 등은 초정밀 절삭기술을 이용하여 직경 10 μm 의 직경을 가지는 전극을 제작하였다. K. Okano[4] 등은 1995 년에 마이크로 연삭기술을 이용하여 직경 50 μm 의 전극을 가공하였으며, 임영모[5]는 2000 년 전해 프로세스를 이용하여 직경 10 μm 의 전극을 얻었다. 본 논문에서는 이러한 미세 펀치를 제작하는 방법으로써 전해프로세스를 이용하였다. 현재까지 전해프로세스는 그 가공 형상의 제어에 상당한 어려움으로 인하여 주로 STM(Scanning Tunneling Microscopy)이나 AFM(Atomic Force Microscopy)에 사용되는 날카로운 탐침을 얻기 위해서 주로 이용되었다[6-8]. 특히 전해프로세스에 의한 가공결과를 보면 직경의 변화 정도가 상당히 작아서 급격하게 그 모양이 변하는 형상을 얻을 수 없었다. 본 논문에서는 전해프로세스에 의한 가공 중 수직방향의 이송을 이용함으로써 테이퍼 형상과 균일한 직경의 형상을 동시에 얻어내고자 한다. 이 방법은 기존의 기계가공과는 달리 한번의 공정으로 많은 양의 펀치를 동시에 생산할 수 있는 장점이 있어 산업현장에서 상당히 유리한 방법으로 쓰일 것이라 여겨진다.

2. 전해프로세스에 의한 전극 가공

2.1 전해 프로세스의 원리

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 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[9].

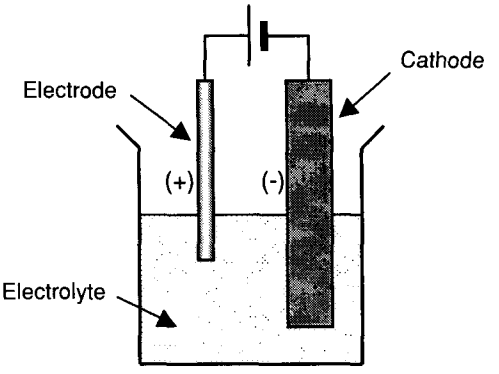


Fig. 1 Schematic diagram of electrochemical process

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.

Fig. 1 과 같이 전해액에 담겨있는 두 금속 재질의 양단에 전류를 흘려주면 양극에서는 산화반응, 음극에는 환원반응이 일어난다. 전해프로세스는 양극의 산화반응을 이용하여 가공물을 가공해 나가는 방법이다. 미세전극의 재료로 텅스텐을, 전해액으로는 수산화칼륨(KOH)용액을 사용하면 다음과 같은 두 단계의 반응을 거쳐 텅스텐의 산화반응을 얻을 수 있다[10].

반응 I : $W + 6OH^- \Rightarrow WO_3 + 3H_2O + 6e^-$

반응 II : $WO_3 + 2OH^- \Rightarrow WO_4^{2-} + H_2O$

반응 I 은 전극 표면의 텅스텐 원자들이 주위의 수산화이온(OH^-)과 반응하여 텅스텐 산화물(WO_3)로 바뀌는 과정으로 반응속도는 인가된 전류에 비례하게 된다. 반응 II 는 텅스텐 산화물이 다시 주변의 수산화 이온과 반응하여 이온으로 변하여 전해액 속으로 용해되는 과정이다. 이것은 전류와 상관없이 화학반응 조건에 따라 일정한 속도로 반응이 일어나게 된다.

2.2 균일한 직경을 가지는 전극의 가공

실제로 전해 프로세스를 통하여 원뿔형 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[5].

3. 초미세 펀치 형상의 가공 방법

본 연구에서 얻고자 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 수직방향의 이송을 이용한 가공방법을 적용한다.

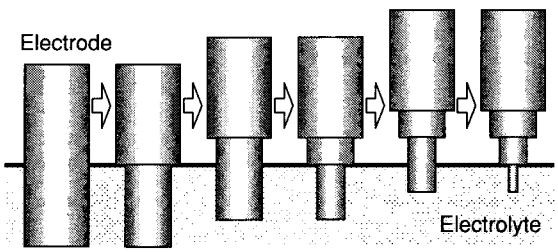


Fig. 2 Basic concept for stepped shape

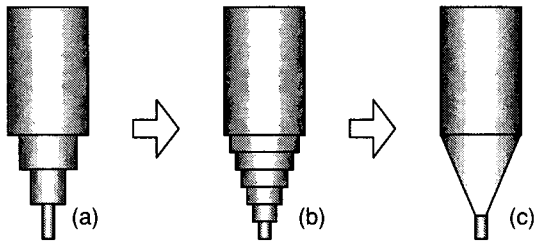


Fig. 3 Micro punch from the stepped shape

균일한 직경의 가공 방법을 응용한 다단계 형상의 가공 원리는 Fig. 2 와 같다. 가공이 일어나는 중에 전해질에 담겨 있는 전극의 깊이를 일정한 비율로 줄여나가면 왼쪽의 결과와 같이 일정한 직경변화를 가지는 다단계 형상을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어지는 형상은 그 스텝 간격을 줄여나감으로써 Fig. 3 과 같이 초미세 펀치의 형상을 얻을 수 있다.

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

4. 초미세 펀치의 제작 및 분석

초미세 펀치의 제작을 위하여 Fig. 4 와 같은 실험장치를 구성하였다.

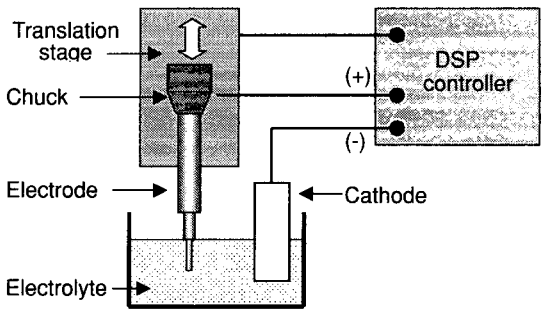


Fig. 4 Experimental Setup

전극은 순도 99.9 % 의 텅스텐을 이용하였으며, 직경 0.5 mm 의 원통형 모양이다. 전해액으로는 5.0 mM 의 KOH 수용액을 이용하였다. 전극은 광학용 스테이지와 스텝 모터로 구성된 이송장치에 의하여 이송된다. 그리고 전극 및 음극 양단에는 전류 및 전압 조절이 가능한 제어장치가 연결되어 있다. 전류밀도 14 mA/mm^2, 가공 온도는 26.5°C 에서 가공이 수행되었다. 그 밖의 가공 조건은 테이퍼 길이 및 끝단의 길이와 같은 형상에 의하여 결정되는 값이며, 여기에는 삽입 깊이, 가공 시간 등이 있겠다. Fig. 5 는 가공 된 결과의 한 예를 보여준다. 테이퍼 부의 길이는 0.72 mm, 끝단 직경은 60 μm 를 가지도록 가공을 수행하였으며, 테이퍼 부 가공을 위한 스텝 이송 간격은 20 μm 이다. 실제로 가해진 전류의 경우 모든 시간에 대하여 14 mA/mm^2 을 유지하도록 흐르므로, 초기에는 35.6 mA 에서 종료 직전에는 5.0 mA 까지 줄어들게 된다. 이때의 총 가공 시간은 903 s 이며, 흘러들어간 총 전하량은 17.1 C 으로 계산된다.

초미세 펀치 형상의 제작에 있어서 테이퍼 부의 선형화 정도 및 균일한 직경 부분의 직진도는 그 형상에 있어서 중요한 요소이다. Fig. 5 의 점선 부분을 확대한 것이 Fig. 6(a)이며, 가공된 형상에 대한 선형화 및 연결 부위의 곡률반경을 측정하기 위하여 길이방향으로 20 μm 씩 이동해가며 직경을 측정한다. 측정은 400 배의 배율을 가진 광학식 현미경을 이용하였고, 최대 측정 오차는 0.5 μm 이다. Fig. 6(b)에서 보듯이 균일한 직경 부분과 테이퍼 부분으로 나누어져 있으며, 그 사이에 곡률반경 140 μm 로 연결되어 있다. 테이퍼 각은 22.4 °이다. 각 부분의 직경 값으로 선형화 한 후 그 값에 대한 실제 측정값과의 오차는 Fig. 6(c)에 있다. 여기서 보면 알 수 있듯이 최대 편차는 2.5 μm 이다.

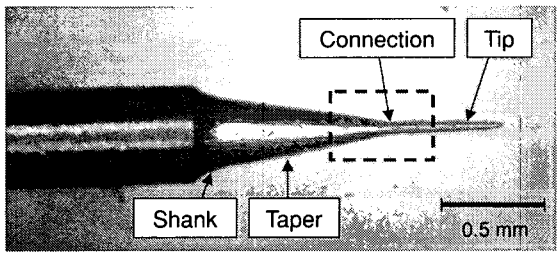
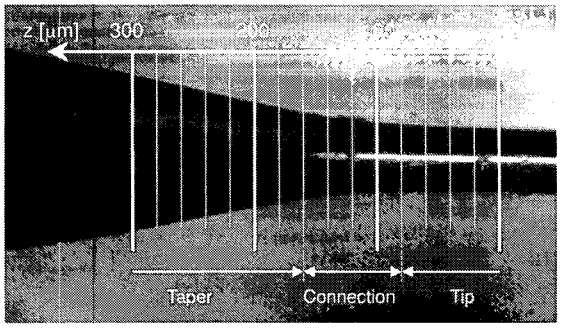
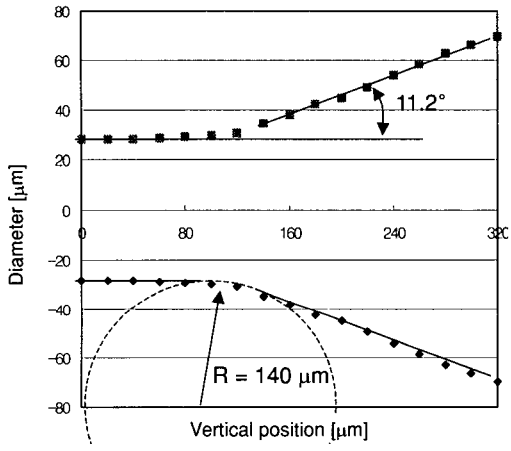


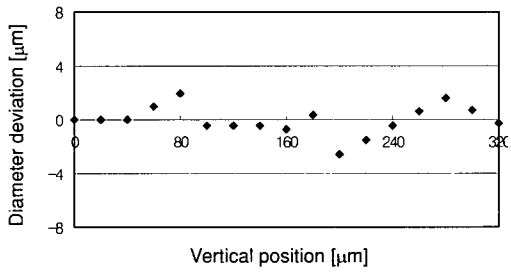
Fig. 5 Shape of the punch



(a) Measured vertical position



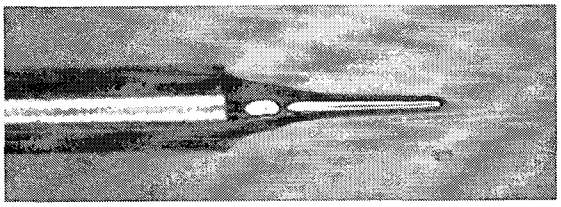
(b) Diameter profile



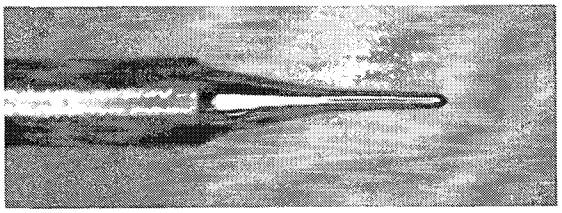
(c) Diameter deviation

Fig. 6 Analysis of the punch

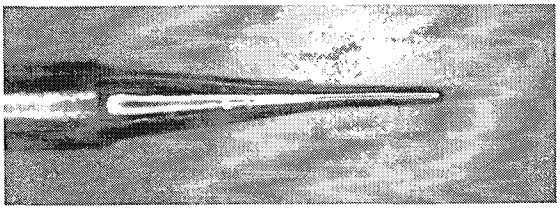
Fig. 5 와 6 에서 보면 가공이 이루어지지 않은 부분과 이루어진 부분의 연결 부위에서 연속적으로 직경의 변화가 일어나는 추가 가공이 이루어진 것을 확인할 수 있다. 이것은 전극이 전해질에 삽입되었을 때 표면장력으로 인하여 수면 부분에 전해질이 끌려 올라간 부분에서 추가로 가공되어 나타나는 현상이다. 현 실험의 조건에서 표면장력으로 인하여 발생되는 수면 상승의 효과가 나타나게 된다. 따라서 수면 상승의 높이 이하의 작은 테이퍼 길이를 요구하는 경우에 그 형상을 제대로 얻을 수 없는 등 테이퍼 길이의 제한이 따르게 된다. 따라서, Fig. 7(a) 와 같이 짧은 테이퍼 각을 얻을 때에 좋지 못한 결과가 얻어진다. 따라서 이 경우에는 테이퍼 각을 정의할 수 없게 된다.



(a) L_T = 0.2 mm, θ_T = 21 °, D_E = 113 μm



(b) L_T = 0.4 mm, θ_T = 24 °, D_E = 109 μm



(c) L_T = 1.0 mm, θ_T = 14 °, D_E = 112 μm

Fig. 7 The angle of taper according to the length

Table 1 The relationship between the length and the angle of taper

Taper length [mm]	Taper angle [°]
0.2	-
0.4	24
0.6	19
0.8	17
1.0	14

Fig. 7 및 Table 1 은 테이퍼 길이의 변화에 따라 얻어지는 테이퍼 각에 대한 실험 결과이다. 각 경우에 대하여 초기 삽입 깊이만을 달리하여 가공을 수행하였다. 그 이외의 전해액, 전극재료, 전류밀도, 온도의 조건은 Fig.5 의 결과를 얻기위한 조건과 동일하다. Table 1 에서 L_T 는 테이퍼 길이, θ_T 는 테이퍼 각, D_E 는 끝단 직경을 의미한다. 초기 직경 0.5 mm 으로부터 약 100 μm 의 끝단 직경을 얻고자 하는 경우 가능한 최대 테이퍼 각은 24 ° 임을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서 전해프로세스에 의하여 균일한 직경의 끝단을 가지는 테이퍼 형상의 초미세 펀치를 제작하였다. 이렇게 얻어진 초미세 펀치는 가공 방법의 특성상 대량 생산이 가능하여 기존의 정밀 연삭 또는 방전가공에 의한 방법보다 훨씬 유리하다 할 수 있다. 전극이 전해용액에 담기는 깊이를 실시간으로 조절하여 다양한 테이퍼 길이와 각을 얻을 수 있으며, 전류 밀도와 가공 시간을 조절함으로써 끝부분의 직경 역시 조절이 가능하다. 따라서, 앞으로의 연구 방향은 좀 더 정확한 해석과 실험을 통하여 좀 더 큰 테이퍼 각 및 작은 끝단 직경을 얻어내는 것으로 이를 통하여 다양한 형태의 정확한 형상을 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 BK21 사업지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. L. S. Fan, "IC-processed Electrostatic Micromotors," Sensors & Actuator, Vol. 20, pp. 41-48, 1989.
2. Christophe Marques, Yohannes M. Desta, James Rogers, Michael C. Murphy and Kevin Kelly, "Fabrication of High-Aspect-Ratio Microstructures on Planar and Nonplanar Surfaces Using a Modified LIGA Process," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 6, No. 4, pp. 329-335, 1997.
3. Y. Yamagata, T. Higuchi, "Three-Dimensional Micro Fabrication by Precision Cutting Technique," Jpn. JSPE, Vol. 61, No. 10, pp. 1361-1364, 1995.
4. T. Waida, K. Okano, "Micro-grinding of Micro-machine Component," Jpn. JSPE, Vol. 61, No. 10, pp. 1365-1368, 1995.
5. Y. M. Lim and S. H. Kim, "Diameter control of an extremely thin cylindrical microprobe by electrochemical etching, " Rev. of Sci. Instum., Vol. 71, No. 5, pp. 2166-2168, 2000.
6. P. J. Bryant, H. S. Kim, Y. C. Zheng, and R. Yang, " Technique for shaping scanning tunneling microscope tips," Rev. Sci. Instrum., Vol. 58, No. 6, p. 1115 , 1987.
7. Mircea Fotino, "Nanotips by reverse electrochemical etching," Appl. Phys. Lett., Vol. 60, No. 23, pp. 2935-2937, 1992.
8. Mircea Fotino, "Tip sharpening by normal and reverse electrochemical etching," Rev. Sci. Instrum., Vol. 64, No. 1, pp. 159-167, 1993.
9. J. A. McGeough, "*Principles of Electrochemical Machining*," Chapman and Hall, 1974.
10. P. I. Ortiz, M. L. Teijelo, M. C. Giordano, "Electrochemical Behaviour of Tungsten in Alkaline Media : Part I. NaOH Solutions," J. Electroanal. Chem., 243, pp. 379-391, 1988.