

방전 가공을 이용한 미세 공구 제작과 응용

김보현*, 김동준, 이상민(서울대 대학원 기계항공공학부), 주종남(서울대 기계항공공학부)

Fabrication of Micro-tool by Micro-EDM and Its Applications

B. H. Kim* (Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU), D. J. Kim (Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU),
S. M. Yi (Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU), C. N. Chu (Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU)

ABSTRACT

Micro-milling is an efficient method for fabricating micro structures because of its high machining rate compared with other non-conventional micro machining processes. But it is not easy to make a micro milling tool with less than 50 μm in diameter by conventional machining. In this study, the characteristics of a micro milling tool fabricated by wire electrical discharge machining (WEDM) were studied. The workpiece is copper and stainless steel. The effects of some machining conditions such as feed rate, depth of cut, and a shape of tool were studied. The tools with D-shape and square shape in cross section were tested for machining micro grooves and 3D structures.

Key Words : Micro-milling (미세 밀링), Micro-EDM (미세 방전 가공), Micro-tool (미세 공구), WEDM (와이어 방전 가공)

1. 서론

최근 정밀 공학은 여러 분야에서 그 중요성이 증대되고 있다. 또한 정밀 공학 분야의 발전에 따라 최근 가공 부품이 소형화, 정밀화 되고 보다 정밀한 미세 가공 기술에 대한 요구가 높아지고 있다. 지금까지 미세 가공을 가능하게 하는 여러 기술들이 개발되었고 본 논문의 마이크로 밀링도 그 중 하나이다. 미세 가공 기술 중의 하나로 반도체 공정 프로세스를 이용한 미세 가공 기술이 있으나 재료 선택의 한계와 2.5 차원의 형상 가공에 국한되는 단점이 있다. 또한 미세 방전을 이용한 미세 방전 밀링 기술이 있는데 이는 가공력이 작아 미세 형상 가공에 적합하지만 방전 가공 원리의 특성상 전기 전도체만을 가공 할 수 있어 재료 선택에 많은 제한이 따르고 가공 중 전극 마모가 심하기 때문에 정밀한 형상 가공에 어려움이 있다.^[1] 이에 반해 절삭 가공을 이용한 마이크로 밀링은 비교적 가공 효율이 좋고 재료 선택의 제한도 없다. 또한 다양한 형상의 3 차원 가공이 가능한 이점이 있다. 기존의 마이크로 밀링에서 사용하는 미세 공구는 정밀 CNC 공작 기계에서 선삭이나 연삭으로 제작되었지만 절삭 가공에 의해 발생하는 가공력 때문에 공구

가 부러지는 등 공구 제작에 많은 어려움이 있다.^[2] 또한, 미세 공구를 제작했다 하더라도 공구 장착 시 발생하는 오차로 인해 미세 형상 가공에 정밀도가 떨어지는 우려도 있다. 기존의 상용 마이크로 밀링 공구는 기술적 한계로 인해 100 μm 정도로 크기의 제한이 따르고 가격이 상당히 비싸다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 와이어 방전 가공(wire electrical discharge machining, WEDM)을 이용하여 밀링 공구를 제작해 미세 가공을 하고자 한다.

와이어 방전 가공을 이용한 미세 절삭 공구의 제작은 미세 방전 가공의 특성으로 방전 가공력이 작아 미세 공구 제작에 적합하며 공구를 제작하고 공작물을 가공하는 과정을 같은 기계에서 수행할 수 있으므로 공구 장착 오차가 발생하지 않고 직경이 50 μm 이내의 미세 공구를 제작할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 방전 가공을 이용하여 미세 공구를 제작하고 이 공구를 이용한 마이크로 밀링에서의 가공 특성을 살펴보고자 한다.

2. 와이어 방전 가공을 이용한 미세 공구 제작

와이어 방전 가공을 이용한 공구의 제작은 가이

드를 따라서 움직이는 금속 와이어 전극을 통해 공구를 가공하는 방법이다. 이 경우 와이어 전극이 공구를 제작하기 위한 공구가 된다. Figure 1 은 와이어 방전 가공 장치의 개략도를 보여주고 있다.

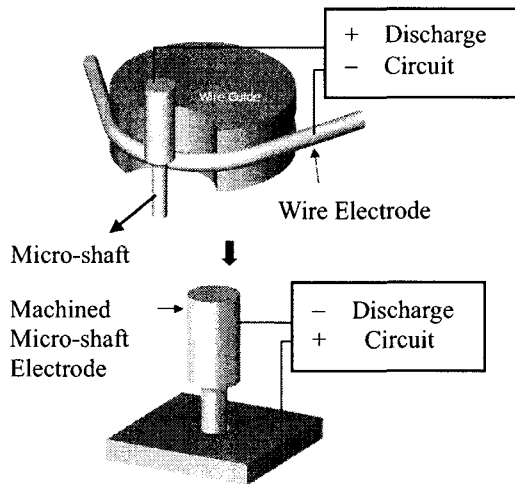


Fig. 1 Schematic diagram of WEDM

와이어 방전 가공을 이용하면 다양한 형상의 전극 가공을 할 수가 있다. 예를 들면, 기본적인 원형 전극이나 삼각형, 사각형 모양의 전극 뿐만 아니라 스크류 모양의 전극도 가공이 가능하다. 따라서, 본 논문에서는 사각형과 만원 모양의 두 가지 형상의 공구를 사용하여 마이크로 밀링의 가공 특성 실험을 수행하였다. 방전 가공에서는 방전 에너지에 비례하여 가공면의 거칠기가 나빠진다. 미세 공구의 가공 날은 가능한 한 예리해야 함으로 가공 시 방전 에너지를 최소화하여야 한다. 이를 고려하여 실험에서 적용된 가공 조건은 Table 1 과 같다. 공구 표면 형상의 급격한 변화에 의한 응력 집중을 방지하기 위해 초경 500 μm 의 공구를 3 단계의 직경으로 나누어서 가공한 다음 마지막으로 가공 날 부분을 가공하였다. 공구의 재료는 텅스텐 카바이드를 사용하였다. 텅스텐 카바이드는 열적 성질이 우수하여 마모가 적고, 다른 재료에 비해 강성이 뛰어나 마이크로 방전 가공에 주로 사용된다.^[3]

Figures 2, 3 은 와이어 방전 가공에 의해 제작된 미세 공구의 SEM 사진이다.

3. 가공 조건에 따른 미세 공구의 가공 특성

최적의 가공 조건을 찾기 위해 가공 조건들을 변화시켜가며 직선 홈을 가공하는 실험을 수행하였다. 만달 모양과 사각형 공구에 대해서 실험을 수행하였으며 주축 회전 속도와 절삭 깊이(depth of cut)의

Table 1 Experimental conditions used in WEDM

Electrode	WC
Voltage	60 V
Resistance	1 k Ω
Dielectric fluid	Kerosene
Capacitance	10 pF

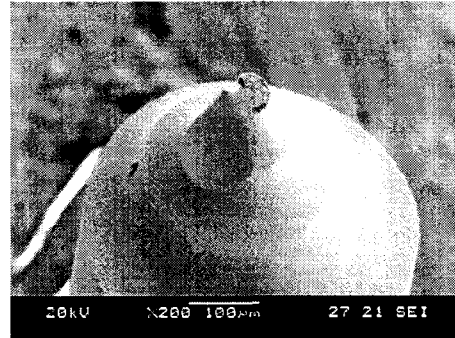


Fig. 2 Photograph of a D-shape tool

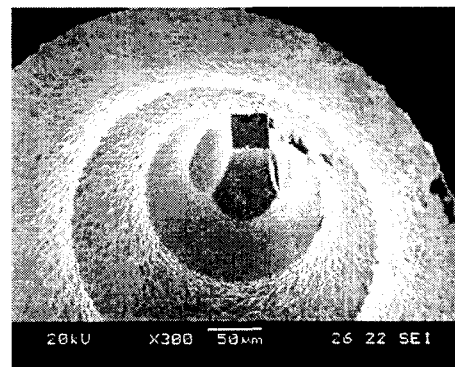


Fig. 3 Photograph of a rectangular shape tool

변화에 따른 결과를 살펴보았다. 가공 조건은 Tables 2, 3 과 같다. 공구의 크기는 공구의 회전 반경을 기준으로 하였으며 사각형의 공구와 만달 모양의 공구 모두 직경이 50 μm 로 제작하였다. 가공 깊이는 모두 50 μm 이다.

실험을 수행한 결과 가공성은 이송 방향의 속도나 공구 형상에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 다만, 만달 모양 공구의 경우 가공 날이 하나이기 때문에 가공 날이 4 개인 사각형 공구에 비해 4 배의 절삭력을 받으므로 절삭 깊이가 깊을 경우 공구가 부러지는 단점이 있었다.^[4] 절삭 깊이가 깊어짐에 따라 벽면의 거칠기가 나빠지고 버의 생성 또한 많아졌다.

Figures 4, 5, 6 은 절삭 깊이를 각각 2, 5, 10 μm 로 하여 사각형 공구로 가공한 홈을 보여준다. 그림과 같이 절삭 깊이가 2 μm 인 경우 벽면의 성질이 가장 좋고 버의 발생도 적었다. 절삭 깊이가 2 μm 보

Table 2 Experimental conditions for groove machining (1)

Rpm	6000 rpm
Feed rate	1, 3, 5, 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$
Depth of cut	10 μm
Tool size	45 ~ 55 μm in diameter
Dielectric fluid	Kerosene

Table 3 Experimental conditions for groove machining (2)

Rpm	6000 rpm
Feed rate	5 $\mu\text{m}/\text{sec}$
Depth of cut	2, 5, 10, 20 μm
Tool size	45 ~ 55 μm in diameter
Dielectric fluid	Kerosene

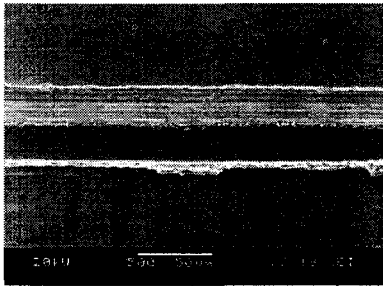


Fig. 4 Groove machined with a rectangular tool: 6000 rpm, 5 μm feed, and 2 μm depth of cut

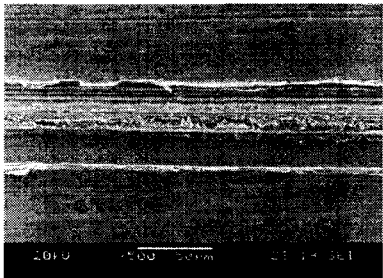


Fig. 5 Groove machined with a rectangular tool: 6000 rpm, 5 μm feed, and 5 μm depth of cut

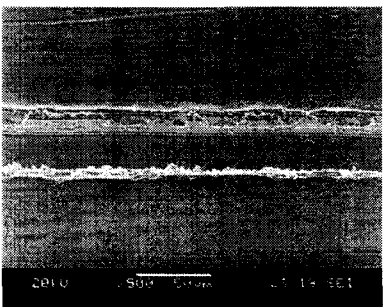


Fig. 6 Groove machined with a rectangular tool: 6000 rpm, 5 μm feed, and 10 μm depth of cut

다 작은 경우 공구의 선단 반경(cutting edge radius: 1~2 μm)보다 가공 깊이가 작아지기 때문에 실제 재료가 가공된 다기 보다는 공구가 재료를 밀고 지나갈 수 있으므로 실험 조건에서 제외하였다. 선단 반경은 공구의 SEM 사진으로부터 측정되었다.

Figure 7은 절삭 깊이 2 μm , 이송 속도 5 $\mu\text{m}/\text{s}$ 로 가공된 너비 20 μm 홈의 1000 배 확대 사진이다. 가공 깊이는 종횡비(aspect ratio)가 2 인 40 μm 이다. 실제 상용 마이크로 공구의 경우 100 μm 보다 작은 공구를 만들기 힘들고 제작할 수 있다 하더라도 가격이 상당히 비싸지만 와이어 방전 가공을 통해 20 μm 의 공구를 제작할 수 있었고 이를 통해 20 μm 의 직선 홈을 가공하는데 성공하였다.

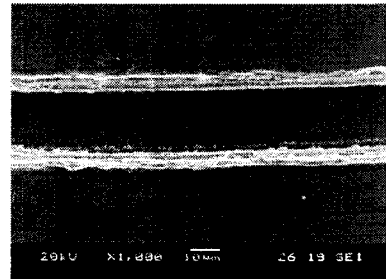


Fig. 7 Groove machined with a 20 μm rectangular tool: 6000 rpm, 5 μm feed, and 2 μm depth of cut

4. 버의 제거

일반적으로 와이어 방전 가공으로 제작한 공구를 사용한 경우가 아니라 하더라도 밀링을 하게 되면 상당한 양의 버가 발생한다. 이러한 버는 정밀한 형상이 요구되는 마이크로 가공에서 반드시 제거되어야 하는 부분이다. 버를 제거하는 방법에는 가공 후 경도가 높은 다이아몬드 공구로 표면을 밀링 해주거나 전해 연마(electrochemical polishing)를 이용하는 등의 여러 가지 방법^[2]이 있지만 본 논문에서는 독자적인 방법으로 버를 제거하였다.

크게 두 가지 접근 방법으로 버를 제거하였는데 첫 번째는 가공 중에 버를 제거하는 것이고 두 번째는 가공 후 버를 제거하는 것이다. Figure 8은 버를 제거하지 않고 홈을 가공한 사진인데 이와 비교하여 아래의 그림들은 각각의 방법으로 버를 제거한 결과이다.

먼저 가공 중에 버를 제거하기 위해서 방전을 이용하였다. 즉 밀링 가공 중에 공구와 시편 사이에 전압을 걸어 주어 방전이 일어나게 함으로써 버를 제거하는 것이다. 이는 공구의 가공 경로와 관련이 있다. 즉, 가공 시 같은 깊이를 가공할 때 공구가 한번만 지나가게 하는 것이 아니라 왕복하게 함으로써 이미 가공된 깊이를 공구가 두 번째로 지나칠

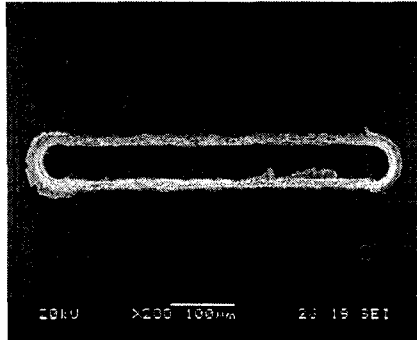


Fig. 8 Groove without burr removal

때 공구 회전 시 생기는 공구와 시편 사이의 간격을 통해 방전이 발생하게 하여 버를 제거하였다. Figure 9 는 그 결과를 보여준다. 그림에서와 같이 버는 완전히 제거되고 홈 윗 부분의 모서리도 잘 표현이 되어 있다. 그러나, 방전 과정 중 버만 제거 되는 것이 아니라 공구 또한 마모가 되기 때문에 가공 후반기에는 공구가 사각형 형상을 유지하지 못하고 모서리가 둥글게 된다. 이로 인해 홈 아래 부분 또한 둥근 형상을 하고 있다.

두 번째로 홈의 형상을 왜곡시키지 않기 위해 가공이 끝난 후 버가 발생한 표면에 방전을 일으켜 버를 제거하였다. Figure 10 은 단순히 홈 표면에서 홈 가공 시의 이송 방향으로 공구를 지나가게 하여 방전을 일으킨 결과이다. Figure 11 은 시편 표면의 홈 모서리를 따라가면서 직사각형 모양의 경로로 방전을 일으켜 버를 제거한 결과이다. 그림에서 홈의 위쪽 모서리 부분의 버는 완전히 제거된 것을 볼 수 있다. 이 경우 방전의 영향을 받은 홈 주변과 방전의 영향을 받지 않은 시편 표면과의 높이 차를 5 µm 이내로 유지하며 버를 제거하는데 성공하였다.

마지막 방법으로 먼저 시편에 전해를 이용하여 구리를 코팅한 후 그 위에 밀링 가공을 하였다. 보통 버가 발생하는 곳이 주로 표면이므로 시편 표면

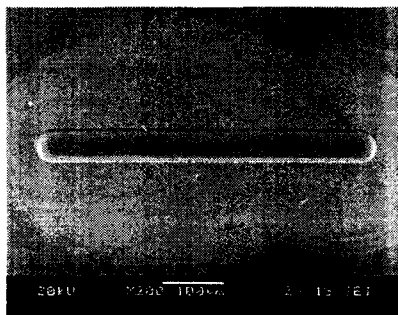


Fig. 9 Groove with burr removal by electrical discharge machining during machining with 50 pF

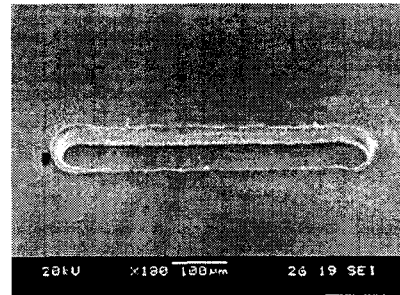


Fig. 10 Groove with burr removal by electrical discharge machining inside the groove after machining

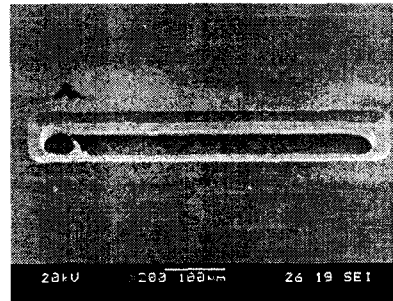


Fig. 11 Groove with burr removal by electrical discharge machining at the top surface of the periphery after machining

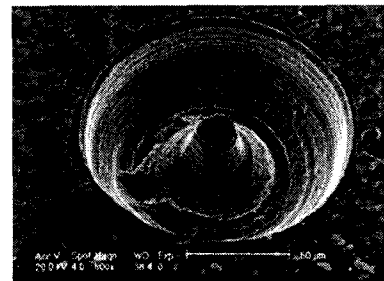


Fig. 12 Groove with burr removal by copper coating

의 구리 층에 버가 발생하게 한 다음 가공이 끝난 후 구리 층을 제거함으로써 버를 제거하였다. Figure 12 는 그 결과를 보여준다.

5. 3차원 구조물 가공

와이어 방전 가공으로 제작한 공구로 간단한 3차원 미세 밀링 가공을 해 보았다. 2 가지 높이를 가진 원형 모양의 형상을 가공한 후 앞 절에서 시술한 방법을 이용하여 버를 제거하였다. 두 번째 높이의 원형 구조물의 버는 제거가 되었지만 아래 쪽은 버가 아직 남아 있는 모습이다.

이처럼 와이어 방전 가공으로 제작한 공구를 사

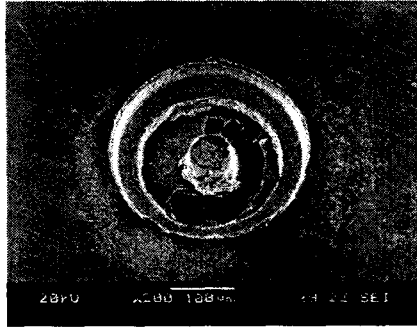


Fig. 13 Photograph of 3D structure

용하여 3 차원 구조물의 가공 가능성을 확인하였다. 공구 경로와 버의 문제만 해결된다면 더 다양한 형상의 미세 구조물을 가공할 수 있을 것이다.

6. 결론

미세 와이어 방전 가공(WEDM)을 이용하여 50 μm 이하의 밀링 공구를 제작하였으며, 제작한 공구의 가공성을 살펴보았다. 최적의 가공 조건을 찾기 위해 직선 홈을 가공하여 각각의 가공조건에 따른 가공성을 살펴보았다. 또한, 마이크로 밀링 가공에서 문제가 되는 버를 세가지 방법으로 제거하였다. 가공 중 방전을 이용하는 방법과 가공 후 방전을 이용하는 방법, 구리 코팅된 시편을 사용하는 방법을 사용하였다. 세가지 방법 모두 버는 잘 제거되었으나, 가공 중 방전을 하는 방법은 공구의 마모가 심해 버 제거 방법으로는 적합하지 않았다.

와이어 방전 가공으로 제작한 공구를 이용하여 최소 20 μm 의 폭을 가진 홈을 가공하는데 성공하였으며 3 차원 형상의 가공도 수행하였다.

참고문헌

1. Yu, Z., Masuzawa, T., and Fujino, M., "3D Micro-EDM with Simple Shape Electrode - Part 1: Machining of Cavities with Sharp Corners and Electrode Wear Compensation," *Int. J. of Electrical Machining*, No. 3, pp. 7 - 12, 1998.
2. Schaller, Th., Bohn, L., Mayer, J., and Schubert, K., "Microstructure Grooves with a Width of Less Than 50 μm Cut with Ground Hard Metal Micro End Mills," *Precision Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 229 - 235, 1999.
3. Tsai, Y. Y., Masuzawa, T., and Fujino, M., "Investigations on Electrode Wear in Micro-EDM," *Proceedings of the International Symposium for Electromachining, ISEM X III*, 2001, Spain, pp. 719 -

726.

4. Fu, H. J., "A Mechanistic Model for the Prediction of the Force System in Face Milling Operations," *Trans. ASME, J. of Engineering for Industry*, Vol. 106, pp. 81 - 88, 1984.