

디스크 전극을 이용한 미세 전해 밀링 가공에서의 테이퍼 형상 방지

김보현#, 이영수*, 최덕기**, 주종남*

Taper Reduction in Micro Electrochemical Milling Using Disk-type Electrode

Bo Hyun Kim[#], Young Soo Lee^{*}, Choi Deok Ki^{**} and Chong Nam Chu^{*}

ABSTRACT

In this paper, micro electrochemical machining (ECM) for micro structure fabrications is presented. By applying ultra short pulses, the chemical reaction can be restricted only to the region very close to the electrode. Micro ECM is applied to machining micro structures through electrochemical milling process because it doesn't suffer from tool wear. Using this method, 3D micro structures were machined on stainless steel. It was found that micro machining is possible with good surface quality in the low concentration electrolyte, 0.1 M H₂SO₄. In ECM, as the machining depth increases, better flushing of electrolyte is required for sufficient ion supply. Layer-by-layer milling is advantageous in flushing. However, layer-by-layer milling causes taper of structures. To reduce the taper, application of a disk-type electrode was introduced. By electrochemical milling, various 3D micro structures including a hemisphere with 60 μm diameter were fabricated.

Key Words: Electrochemical machining (전해 가공), Electrochemical milling (전해 밀링), Micro structure (미세 구조물), Ultra short pulses (초단펄스), Disk-type electrode (디스크 형상 전극)

1. 서론

최근 미세 정밀 부품의 수요에 맞춰 마이크로/나노 형상 가공에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 미세 가공 기술의 대표적인 예로써 반도체 공정 기술을 들 수 있다. 이 기술은 정밀한 미세 형상 제작과 대량 생산이 용이한 장점이 있으나, 근본적으로 2 차원 가공에 국한되며, 초기 시설 투자 비용이 높고 제작 시간이 많이 소요되

는 단점이 있다. 또한 실리콘 등 가공 재료의 선택에 제한이 있다. 이에 비해 다양한 금속 재료에 3 차원 형상을 가공할 수 있는 미세 가공 기술로서는 미세 밀링, 미세 방전 등을 들 수 있다. 미세 밀링은 낮은 가공 비용과 빠른 가공 속도로 금속의 미세 가공에 응용되고 있다. Schaller¹ 등은 미세 밀링 공구를 제작하여 50 μm 이하의 홈을 가공하였다. 하지만 버의 발생, 공구의 마모 등의 문제점이 있었다. 한편 방전 가공은 재료의 강도와 무

접수일: 2004년 9월 14일; 게재승인일: 2005년 1월 21일

교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

E-mail ssborry@prema.snu.ac.kr Tel. (02) 880-7147

* 서울대학교 기계항공공학부

** 강릉대학교 정밀기계공학과

관하게 금속을 가공할 수 있어 오랫동안 산업에서 금형 가공 등에 많이 이용되어 왔으며 최근에는 미세 방전 가공을 이용한 미세 구멍이나 미세 방전 밀링을 이용한 미세 형상 가공에 대한 연구도 이루어졌다.² 하지만, 미세 방전 가공은 전극 마모가 있기 때문에 3 차원 형상 가공에서는 전극 마모량을 고려하여 전극 이송 경로를 생성해야 하는 단점이 있다.

전해 가공은 방전 가공과 더불어 복잡한 형상의 금형 가공에 많이 이용되어 왔다. 특히 전해액과 금속 사이의 화학적 반응을 이용하여 전극의 형상을 가공물에 그대로 전사시키는 가공 방법이므로 가공물의 변형이나 잔류 응력이 없으며 변질층이 생기지 않는 장점이 있다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 가공 간극이 비교적 크고 형상 정밀도가 떨어져 미세 형상 제작에 이용되지 못했다. 하지만 최근 Schuster³ 등은 초단펄스 전원을 이용하여 전해 영역을 최소화 함으로써 가공 간극을 수 마이크로 이내까지 조절하였으며 이를 바탕으로 수 마이크로의 미세 형상을 가공하였다.

본 논문에서는 0.1 M 의 묽은 황산 용액과 초단 펄스를 이용하여 스테인리스강의 미세 전해 가공과 가공 형상의 테이퍼 감소 방법에 대해 연구하였으며 이로부터 미세 홈을 포함한 다양한 미세 형상을 가공하였다.

2. 미세 전해 가공

2.1 초단 펄스를 이용한 전해 가공

전해액에 닿아 있는 전극에 전압을 인가하면 전극과 전해액의 계면에 이온의 분포 차이로 인해 전기 이중층이라는 얇은 층이 형성된다. 이 전기 이중층은 축전지 (capacitor)와 비슷한 전기적 성질을 갖는 것이 알려져 있으며 실험적으로 금속의 경우 전해액의 농도에 큰 관계없이 단위 면적당 축전 용량이 약 10 - 30 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 의 값을 나타낸다. 따라서 전극이 전해액 속에 담겨있는 전해셀은 Fig. 1 과 같이 축전기와 저항으로 이루어진 등가 회로로 나타낼 수 있다.^{4,5} R_s 는 용액 저항, R_p 는 편극 저항, C_d 는 단위 면적당 전기 이중층의 축전 용량을 나타낸다. 만약 이러한 전해셀에 펄스 전압을 인가하면 충전 시정수 ($\tau = R_s \cdot C_d$) 를 따라 전기 이중층도 충전된다. 용액 저항은 전극과 공작물 사이의 거리에 따라 비례하므로 전극과 공작물

의 간극이 작은 부분은 용액 저항이 작고 그 충전 시정수도 작아진다 ($\tau_{small} = R_{s, small} \cdot C_d$). 반면 간극이 큰 부분은 상대적으로 큰 충전 시정수를 갖게 된다 ($\tau_{large} = R_{s, large} \cdot C_d$). 만약 인가한 펄스 폭이 이 두 시정수 사이의 값을 가지면 간극이 작은 부분에서의 전기 이중층에 상대적으로 큰 전위가 충전된다. 전기 화학적 반응 속도는 전기 이중층의 과전위에 지수함수적으로 비례하므로 간극이 작은 부분에서만 전기 화학 반응이 일어나도록 하여 가공 간극이 수 마이크로인 미세 전해 가공을 할 수 있다.

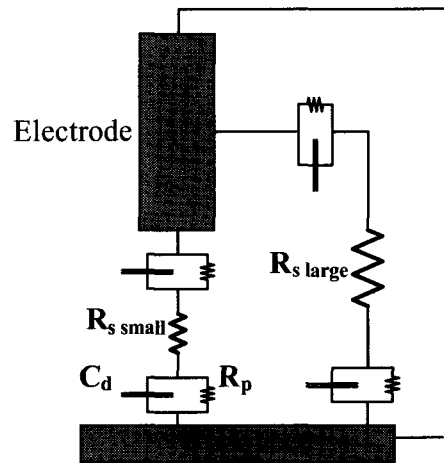


Fig. 1 Equivalent circuit model of electrochemical cell^{4,5}

2.2 전해 가공 시스템

Fig. 2 는 실험에서 사용한 전해 가공 시스템의 개략도이다. 전해 가공 시스템은 전해셀, 펄스 발생기, 0.1 μm 의 분해능을 갖는 X-Y-Z 이송축으로 구성되어 있다. 전극과 공작물 사이의 전위는 오실로스코프로 측정하였다. 공작물은 두께 300 μm , 크기 15 mm x 15 mm 의 스테인리스강 (STS 304)을 사용하였다. 스테인리스강을 전해 가공하는 경우, 부동태 막이 생기지 않도록 전해액과 공작물의 전위를 조절해야 한다. 즉, 부동화 상태를 피하기 위해 펄스 휴지 기간에도 일정한 전위가 공작물에 인가되어야 한다. 하지만 펄스 휴지 기간의 전위 (pulse off-time voltage)로 인해 공작물이 전체적으로 가공되면 안되므로 부동화 영역이 끝나고 과부동화 영역이 시작될 때의 전위를 인가하는 것이 바람직하다. 이러한 전위는 일정전위기 (potentiostat) 를 사용하여 조절할 수 있으나 본 실험에서는 펄

스 발생기에서 펄스 휴지 기간 전위를 조절하였다. 또한 공구 전극 옆에 백금 보조 전극 (electrical balance electrode)을 부착하여 전극과 공작물 사이의 전위를 조절하였다.^{6,7}

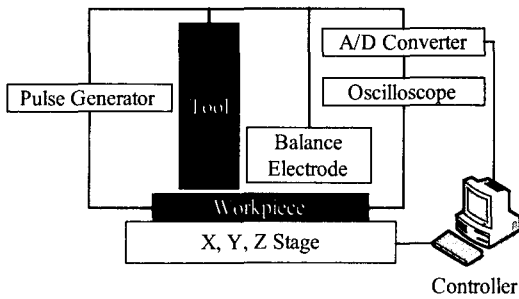


Fig. 2 Micro electrochemical machining system

2.3 전해액

전해 가공에서 전해액의 종류나 농도는 표면 조도나 가공 속도 등에 큰 영향을 미친다. 일반 전해 가공의 경우, 스테인리스강을 높은 가공 속도로 가공하기 위해 농도가 높은 NaCl 등을 사용하지만 미세 전해 가공에서는 가공 정밀도, 가공 속도, 표면 조도 등을 고려하여 전해액 종류와 농도를 선택해야 된다.⁸ 본 실험에서는 스테인리스강의 전해 가공을 위해 묽은 황산 용액을 사용하였다. 묽은 황산 용액을 사용하는 경우 인가하는 펄스의 전압이 일정치 (약 4 V) 이상 되어야 가공이 일어났으며 이보다 작으면 가공이 안되거나 가공 속도가 매우 느려졌다. 또한 농도가 높을수록 가공 간극이 커지고 가공 속도가 빨라졌다. 이는 농도가 높을수록 전해액 용액 저항이 낮아지고 전기 이중층의 충전 시정수가 작아지므로 전기 이중층에 높은 전위가 충전이 되기 때문이다. 전해액의 농도가 낮을수록 가공 간극이 줄어드는 것을 예상할 수 있으나 농도가 너무 낮으면 이온 확산에 어려움이 있어 가공 부분에 이온 공급이 부족하여 가공이 더 이상 안되거나 불안정해진다. 본 실험에서는 가공 간극과 가공 속도를 고려하여 0.1 M 황산 용액을 사용하였다.

2.4 미세 전극 제작

전해 밀링 가공 도중에 미세 전극과 공작물의 접촉으로 인해 전극이 부러지거나 휘는 것을 최소화하기 위하여 미세 전극의 재료로 텅스텐 카바이

드 (WC)를 사용하였다. 전극은 와이어 방전 가공 (WEDM)으로 제작을 하였다.⁹ 와이어 방전 가공은 재료의 경도와 무관하게 지름 수 마이크로에서 수십 마이크로의 미세 전극을 비교적 쉽게 가공할 수 있다. Fig. 3 은 미세 와이어 방전 가공으로 제작한 미세 원형 전극의 예이다. 본 실험에서는 같은 기계에서 와이어 방전 가공과 미세 전해 가공을 할 수 있도록 하여 전극 탈부착에 따른 오차를 없앨 수 있었다.

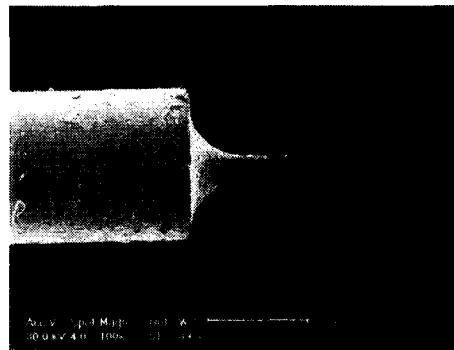


Fig. 3 Micro electrode fabricated by WEDM (WC, ϕ 20 μ m)

3. 미세 전해 밀링

미세 전해 가공은 전극의 마모가 없으므로 기존의 밀링 가공처럼 전극을 이송하여 3 차원 형상 가공에 응용될 수 있다.³ 본 논문에서는 펄스 폭 60 ns, 주기 1 μ s 의 6 V 펄스를 사용하여 스테인리스강에 다양한 3 차원 형상을 가공하였다.

가공을 시작하기 전에 공작물과 전극을 전기적으로 접촉시켜 상대적 위치를 측정된 후 공작물에서 1 μ m 떨어진 지점에서부터 가공을 시작하였다. 가공 깊이가 깊어지면 가공 중에 발생하는 기포의 배출과 전해액의 원활한 공급이 어려워지므로 Fig. 4 와 같이 전극을 공구 경로를 따라 이송시키며 깊이 1 - 3 μ m 씩 가공하였다. 이러한 다층 가공은 전해액의 순환이 용이하다는 장점이 있다. 전극의 이송 속도는 수 μ m/s 으로 설정하였다. 미세 전극은 공작물과 접촉 시 파손되기 쉬우므로 가공 상태와 펄스 조건, 가공 깊이에 따라 이송 속도가 조절되도록 하였다.

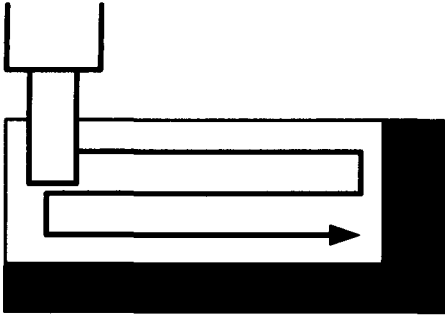


Fig. 4 Layer-by-layer machining

3.1.3 차원 미세 형상 가공

Fig. 5 는 미세 전해 밀링으로 가공한 미세 홈이다. 지름 약 $38 \mu\text{m}$ 의 미세 전극을 이용하였다. 미세 홈의 크기는 폭 $50 \mu\text{m}$, 깊이 $110 \mu\text{m}$, 길이 $300 \mu\text{m}$ 이다. Fig. 4 와 같이 $3 \mu\text{m}$ 깊이로 한 층씩 가공을 하였다. 가공 중에는 전극과 공작물의 접촉은 발생하지 않았으나 미세 홈의 윗면 모서리 부분이 둥글게 된 것을 볼 수 있었다. 모서리 부분의 전류 밀도가 상대적으로 높아서 가공량이 다른 부분보다 많은 것으로 생각된다.

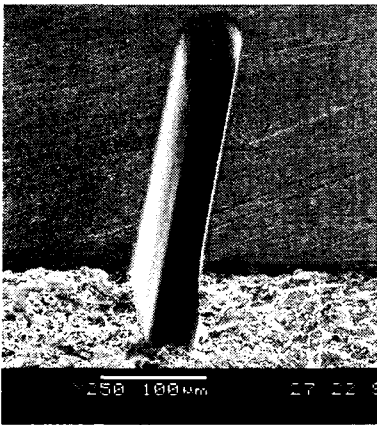


Fig. 5 Micro groove machined by electrochemical milling (STS 304, $50 \mu\text{m}$ width, $300 \mu\text{m}$ length, $110 \mu\text{m}$ depth, 6 V, 60 ns pulse on-time)

Fig. 6 은 미세 전해 밀링으로 가공한 미세 반구이다. 원기둥 위에 약 지름 $60 \mu\text{m}$ 의 반구를 가공하였다. 이 형상은 3 단계의 가공을 통하여 제작하였다. 먼저 지름 $120 \mu\text{m}$, 높이 $90 \mu\text{m}$ 의 원기둥을 가공하고, 원기둥 위에 지름 $100 \mu\text{m}$ 의 반구를

가공하였다. 마지막으로 정삭 과정으로 지름 $60 \mu\text{m}$ 의 반구를 가공하였다. 전극의 가공 경로는 미세 형상과 가공 간극을 고려한 프로그램을 통해 생성하였다. 전해 가공에서 가공 간극은 전위를 인가하는 시간에 비례하여 증가하게 된다. 정삭 과정에서는 가공량이 매우 적으므로 전극 이송 속도를 $20 \mu\text{m/s}$ 까지 올릴 수 있었다. 전극 이송이 빠른 경우 전체 가공 시간이 줄어들기 때문에 가공 간극을 작게 유지한 채 가공이 가능해진다.

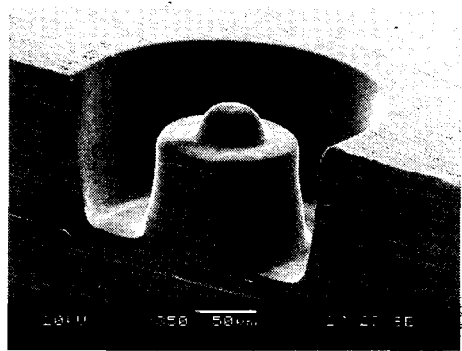


Fig. 6 Micro hemisphere with $60 \mu\text{m}$ diameter machined by rough and finish cut ($\phi 45 \mu\text{m}$ electrode, STS 304, 6 V, 60 ns pulse on-time, 1 μs period)

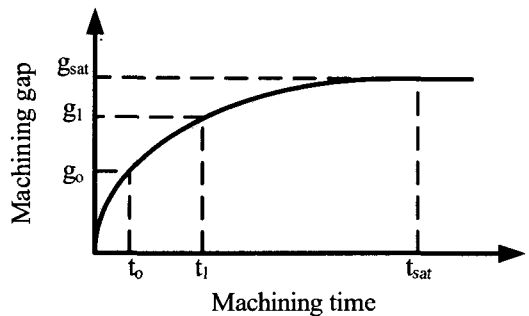


Fig. 7 Machining gap according to machining time

3.2 테이퍼 형상 방지

Fig. 7 은 전해 가공에서 가공 시간에 따른 가공 간극을 도식적으로 나타낸 그래프이다.⁶ 전해 국부화로 인해 가공 간극은 시간에 따라 증가하다가 일정 시간 (t_{sat}) 후에는 일정한 값 (g_{sat})으로 유지된다. 전해 밀링 가공으로 한 층씩 (layer-by-layer) 가공하는 경우 가공 깊이가 깊어지면 마지막으로 가공한 층보다 처음 가공한 층에서 전해 조건에 노출된 시간, 즉 전해 시간 (dissolution

time)이 길어지게 된다. 결국 보다 긴 시간 동안 (t_1) 전해가 일어난 윗부분의 가공 간극 (g_1)이 바닥 부분의 가공 간극 (g_0)보다 커지게 된다. 이로 인해 측면에서 테이퍼 형상이 나타나게 된다.

Fig. 8 과 9 는 미세 전해 밀링을 통하여 가공한 미세 홈의 확대 사진과 높이가 약 $45 \mu\text{m}$ 인 미세 원기둥의 사진이다. 모두 원형 전극을 이용하여 가공하였으며 사진에서도 볼 수 있듯이 첫 번째로 가공한 층의 간극이 마지막으로 가공한 층의 간극보다 커져 테이퍼 형상이 나타난다. 구멍 가공의 경우 가공 깊이에 따라 펄스 폭을 바꿔서 가공 간극을 조절하거나, 펄스 폭을 바꿔서 여러 번 가공을 함으로써 측면 부분 전해를 최소화시킬 수 있지만 복잡한 3 차원 형상 가공에는 적용하기가 힘들다.⁶

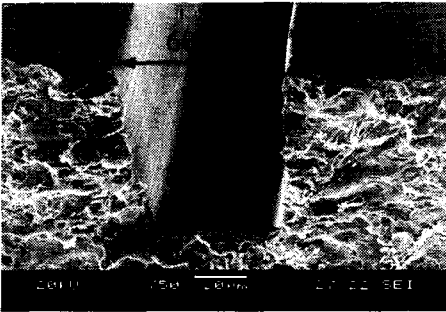


Fig. 8 Micro groove machined by a $\phi 38 \mu\text{m}$ cylindrical electrode (STS 304, 1 MHz, 6 V, 60 ns pulse on-time, 1 μs period)

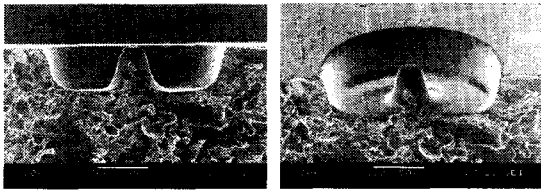


Fig. 9 Micro cylindrical column with $50 \mu\text{m}$ diameter (bottom) and $45 \mu\text{m}$ height which was machined by a $\phi 40 \mu\text{m}$ cylindrical electrode (STS 304, 6 V, 60 ns pulse on-time, 1 μs period)

Fig. 10 은 전극 형상에 따른 가공 측면부의 형상 변화를 도식적으로 나타낸 그림이다. 원형 전극을 사용하는 경우 측면 윗부분의 간극이 아래 부분보다 커지게 된다. 하지만 디스크 형상의 전

극을 사용하게 되면 측면의 윗부분과 전극 사이의 거리가 멀어지게 되므로 일정한 간극 (g_0)을 유지할 수 있다. 이 때 디스크 형상 전극의 홈 깊이 (d)는 이상적으로 식 (1)의 조건을 만족해야 된다.

$$g_0 + d = g_{sat} \quad (1)$$

펄스의 조건에 따라 간극의 크기가 달라지므로 필요한 홈의 깊이도 가공 조건에 따라 달라져야 한다. 또한 디스크의 높이가 작을수록 정밀한 형상을 가공하기에 유리하다. 가공 간극은 가공 시간에 따라 달라지지만 약 $10 \mu\text{m}$ 정도로 수렴하는 것을 볼 수 있었다. 따라서 실험에서는 홈 깊이를 $10 \mu\text{m}$ 이상 되도록 하였다. Fig. 11 은 미세 방전 가공으로 제작된 디스크 형상 전극의 예이다. 사진에서와 같이 전극의 측면부에 홈 가공을 하여 전극의 측면부와 공작물 사이의 거리를 크게 하고자 하였다. 전극의 지름은 $55 \mu\text{m}$ 이며 전극 끝 부분에 깊이 $16 \mu\text{m}$, 폭 $100 \mu\text{m}$ 의 홈을 가공하여 디스크 형상의 전극을 제작하였다.

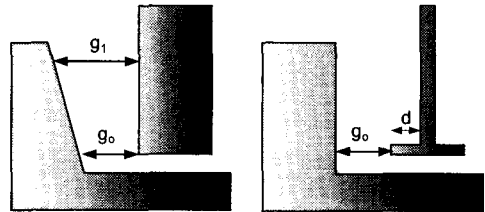


Fig. 10 Machining gap change according to tool shape

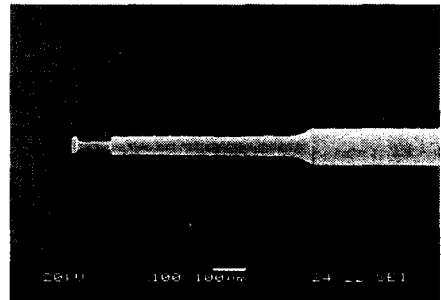


Fig. 11 Disk-type electrode fabricated by micro EDM (disk diameter: $54 \mu\text{m}$, neck diameter: $22 \mu\text{m}$)

Fig. 12 는 미세 디스크 형상 전극으로 미세 형상 가공을 한 예이다. 지름 $50 \mu\text{m}$, 높이 $75 \mu\text{m}$ 의 미세 원기둥을 제작하였다. 사진에서 볼 수 있듯

이 가공물의 테이퍼는 무시할 만큼 작아졌다. 디스크 형상 전극을 이용하면 원형 전극으로 가공하는 경우와 달리, 테이퍼가 없는 높은 세장비의 미세 구조물을 가공할 수 있다는 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 12 와 같이 가공 밑바닥이 불균일하게 가공된 것을 가끔 볼 수 있었는데, 이는 가공 도중 전극 바닥에 금속 이온으로 생각되는 물질이 달라붙어 그 형상이 전사된 것이다. 따라서 전해 가공 중 용해된 금속 이온이 전극 표면에 다시 증착되지 않도록 전극의 전위도 독립적으로 조절할 필요도 있다.

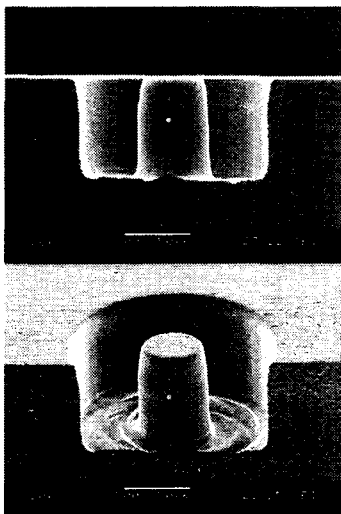


Fig. 12 Micro cylindrical column with 50 μm diameter and 75 μm height machined by a ϕ 40 μm disk-type electrode (STS 304, 6 V, 60 ns pulse on-time, 1 μs period)

4. 결론

본 논문에서는 미세 전해 밀링을 이용한 미세 3 차원 형상 가공에 대하여 연구하였다. 펄스 폭이 수십 나노 초의 초단 펄스를 사용하여 가공 간극을 줄일 수 있었다. 미세 형상 가공을 위해 6 V, 60 ns 폭의 펄스를 사용하여 스테인리스강을 가공하였다. 미세 전해 가공은 전해액 종류와 농도에 민감하므로 적절한 가공 조건을 찾는 것이 중요하다. 본 논문에서는 0.1 M 의 황산 용액을 이용하여 높은 표면 품질과 정밀도로 미세 형상 가공이 가능함을 알 수 있었다. 미세 전해 가공에서는 가

공 시간에 따라 가공 간극이 커지므로 가공물에 테이퍼 형상이 남게 된다. 이러한 테이퍼 형상을 방지하기 위해 미세 디스크 형상 전극을 제안하였으며 이 전극을 사용하여 효과적으로 테이퍼 형상을 줄일 수 있었다.

후 기

본 연구는 나노 메카트로닉스 기술 개발 사업의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 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.
- Yu, Z. Y., Masuzawa, T. and Fujino, M., "Micro-EDM for Three-Dimensional Cavities - Development of Uniform Wear Method -," Annals of the CIRP, Vol. 47, No. 1, pp. 169-172, 1997.
- Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Etrl, G., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
- Bard, A. J. and Faulkner, L. R., Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2000.
- Paik, W. K. and Park, S. M., Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Processes, Cheongmoongak, Seoul, 2001.
- Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Localized Electro-chemical Micro Drilling Using Ultra Short Pulses," J. of the KSPE, Vol. 20, No. 8, pp. 213-220, 2003.
- Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Electro-Chemical Micro Drilling Using Ultra Short Pulses," Precision Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 129-134, 2004.
- McGeough, J. A., Principles of Electrochemical Machining, Chapman and Hall, London, 1974.
- Masuzawa, T., Fujino, M. and Kobayashi, K., "Wire Electro-Discharge Grinding Method," Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 1, pp. 431-434, 1985.