

초경합금의 미세 전해 가공

최세환*, 김보현#, 주종남**

Micro Electrochemical Machining of Tungsten Carbide

Se Hwan Choi*, Bo Hyun Kim# and Chong Nam Chu**

ABSTRACT

Micro machining of tungsten carbide by electrochemical machining was studied. In ECM, machining conditions and electrolyte should be chosen carefully according to the property of workpiece materials. In this paper, sulfuric acid and nitric acid were used for tungsten carbide machining and machining characteristics were investigated according to machining conditions such as electrolyte, workpiece potential and applied pulse voltage. By using mixture of sulfuric acid and nitric acid, micro structures with sharp edge and good surface quality were obtained. Micro electrochemical turning was also introduced to fabricate micro shafts.

Key Words : Electrochemical machining (전해 가공), Tungsten carbide(초경합금)

1. 서론

최근 미세 정밀 부품의 수요에 맞춰 마이크로/나노 형상 가공에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 전해 가공(electrochemical machining)은 전해액 속에서 공구 전극과 가공물 사이에 전위를 인가하여 재료의 원하는 부위를 전기 화학 반응으로 용해시킴으로써 형상을 제작하는 기술이다. 전해 가공은 재료의 경도와 관계 없이 가공이 가능하고 잔류 응력을 남기지 않는 장점을 가지고 있어서 고경도 금속 등 난삭재의 가공에 이용되어 왔다. 최근에는 전해 현상의 국부화를 이용하여 금속의 미세 형상 제작에도 전해 가공을 적용한 연구가 보고되었다.¹ 전원으로 초단 펄스를 사용하면 가공

정밀도를 수 마이크로미터에서 수십 나노미터 정도까지 얻을 수 있어 미세 공구 전극을 이용하여 구리, 니켈 및 스테인리스 강 등의 미세 전해 가공에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.¹⁻⁴

전해 가공에서는, 금속의 종류에 따라 전해 특성이 각각 다르며, 그에 따라 전해액 및 전압 조건 등 가공 조건의 선정이 중요하다. 초경합금(텅스텐카바이드, WC)은 텅스텐(W)과 탄소(C) 원자의 화합물을 코발트(Co) 결합체가 붙잡고 있는 형태이다. 따라서, 단일 금속 물질의 전해 반응과는 달리 복잡한 반응 양상을 가지므로 주요 구성 원소들을 고려하여 전해액을 선정하여야 한다. 초경합금에 대한 전해 가공은 주로 DC 전원을 사용하여 이루어져 왔을 뿐, 초단 펄스를 사용한 미세 전해

접수일: 2006년 8월 8일; 게재승인일: 2006년 10월 9일

* 서울대학교 기계항공공학부

교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

E-mail ssborry@plaza1.snu.ac.kr Tel. (02) 880-7147

** 서울대학교 기계항공공학부

가공에 대한 연구는 없었다. 따라서 본 논문에서는 난삭재인 초경합금의 미세 전해 가공에 대해 연구하였다.

2. 전해 가공 조건 선정

2.1 전해 가공 시스템 구성

Fig. 1 과 같이 미세 전해 가공을 위해서 전극 전위의 조절을 위한 일정전위기(potentiostat)와 초단 펄스를 인가하기 위한 펄스 발생기, 두 개의 전원 장비로 가공 시스템을 구성하였다. 일정전위기는 기준 전극(RE)의 전위에 대해 시편의 전극 전위(Φ_{work})를 직접 제어한다. 펄스 발생기는 시편의 전위를 기준으로 공구 전극에 초단 펄스를 인가하며, 펄스 발생기의 오프셋(offset)을 조절함으로써 공구 전극 전위(Φ_{tool})를 제어할 수 있도록 하였다. 기준 전극(RE)과 대전극(CE)은 백금(Pt) 전극을 사용하였다.

전극 이송은 $0.1 \mu\text{m}$ 의 분해능을 갖는 3축 스테이지에서 제어하였고, 공구와 가공물 사이의 전위차를 측정함으로써 단락의 발생 여부를 검출하여 이송량을 조절하였다. 전위차를 측정하기 위하여 A/D 변환기를 제어기와 연결하였고, 초단 펄스를 이용하는 고주파 시스템에서 가공 셀(cell)이 측정 시스템의 내부 임피던스의 영향을 받지 않도록 전압 폴로어(voltage follower)를 구성하여 각 회로를 분리하였다. 또한 회로의 노이즈와 인덕턴스(inductance)를 최소화하기 위하여 동축 케이블을 사용하였고 전선의 길이를 최대한 줄였다.

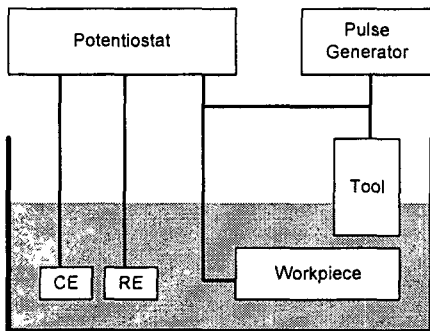


Fig. 1 Schematic diagram of electrochemical machining system

2.2 전해액의 선정

미세 전해 가공에 있어서 전해액은 다음 두 가지를 고려하여 선정하는 것이 바람직하다. 첫째로 가공 중에 전해 생성물(슬러지)이 생기지 않아야 하고, 둘째로 가공 표면 품질이 우수해야 한다. 초경합금의 특성상 텅스텐 및 코발트를 동시에 용해시킬 수 있는 용액이 필요하다. 질산 용액은 텅스텐을 용해시킨다는 점에서 우수하지만 코발트의 용해가 원활하게 이루어지지 못하는 문제점이 있다. 코발트의 용해에 적합한 용액으로는 황산이 알려져 있다.⁵ 하지만 황산 용액만을 사용할 경우에는 텅스텐이 슬러지 형태로 존재하게 되어 미세 가공에 적합하지 못하다.⁶

질산 및 황산 혼합 용액은 텅스텐과 코발트를 동시에 용해시키며 가공 시 전해 생성물을 남기지 않아 미세 가공에 적합하다. 또한 황산 용액만을 사용하는 경우에 비해 더 빠른 가공 속도를 보이면서도 가공 간극은 작은 것으로 나타났다. 마이크로미터 단위의 가공 간극을 얻기 위해선, 용액의 비저항을 크게 하기 위하여 적절히 낮은 농도를 사용할 필요가 있어,³ 0.2 M 질산 과 0.5 M 황산을 섞은 혼합 용액을 선택하였다.

2.3 전압 조건 선정

텅스텐은 중성이나 산성 용액에서 용해될 때 텅스텐 산화물(WO_x)을 만드는 경향이 있다.^{5,7} 이를 방지하기 위해서는 염기성 용액을 사용하는 것이 바람직하나, 염기성 용액에서는 코발트 산화물이 생성되기 쉽다.⁵ 따라서 본 연구에서는 산성 용액에서의 텅스텐 산화물을 방지하기 위해 전압 조건을 조절하는 방법을 사용하였다.

일반적으로 시편의 전극 전위는 가공 목적과 가공의 원활함을 고려하여 금속의 특성에 따라 정해진다. 시편의 전극 전위를 평형 전위보다 낮은 전압을 인가하면 수산화기(OH^-)가 발생하여 시편 주위의 용액은 순간적으로 염기성을 띠게 된다. 이때 생긴 수산화기로 인해 텅스텐 산화물은 용해된다.⁷ 시편에 인가되는 전위 및 펄스를 Fig. 2 에 도시하였다.

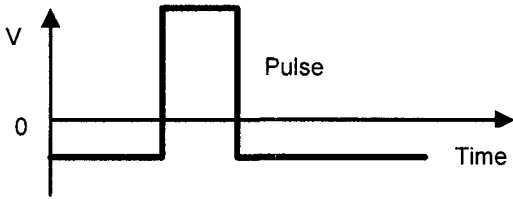


Fig. 2 Pulse shape applied to the workpiece

시편의 전극 전위에 따른 가공 특성을 알아보았다. 전극 전위의 변화에 따른 가공 간극의 변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 전극 전위가 낮을수록, 즉 전극 전위에 걸리는 (-) 값이 커짐에 따라 가공 간극이 작아지는데, 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

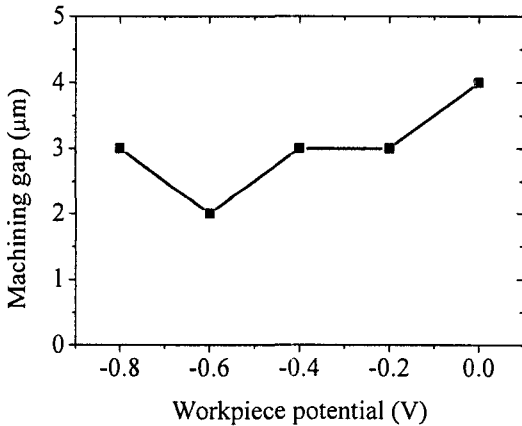
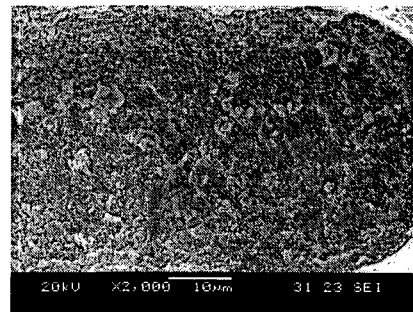


Fig. 3 Machining gap according to workpiece potential (electrolyte: 0.5 M NaNO₃ + 0.2 M H₂SO₄ solution, pulse amplitude: 6 V, pulse duration: 100 ns)

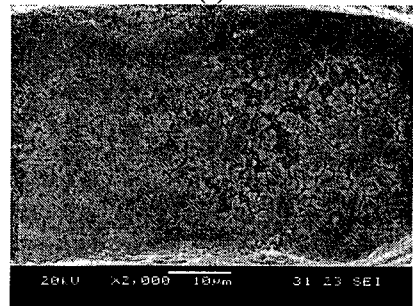
반면에 가공 표면은 전극 전위 값(Φ_{work})의 변화에 매우 민감하며, 그 결과를 Fig. 4 에서 확인할 수 있다. 전극 전위가 0 V 일 경우는 사진에서 흰색으로 나타나는 산화물이 표면에 부착되는 것을 볼 수 있으며, -0.4 V 일 경우도 어느 정도 남아있음을 볼 수 있다. -0.8 V 에서 가공하는 경우 불규칙한 산화막이 제거됨을 확인할 수 있다. Fig. 4(a) 의 표면에서 많이 나타나는 밝은 부분에서는, EDX (Energy Dispersive X-ray Microanalysis) 분석 결과 산소가 많이 검출되었다. 산화막의 생성으로 인해 가공이 방해되고 불규칙한 표면을 나타내는 것으로 판단된다.

한편, 가공 중에 발생하는 현상을 살펴볼 때,

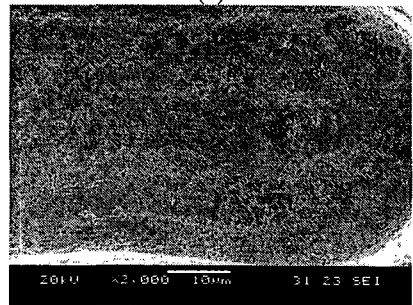
전극 전위의 (-)값이 클수록 가공이 원활히 진행되어 더 빠른 속도로 가공이 이루어졌다. 이송 속도를 2 μm/s 로 설정한 경우, 전극 전위 0 V 의 경우에는 수십 번의 단락이 발생한 반면, -0.8 V 로 가공할 시에는 단락이 일어나지 않고 가공이 이루어졌다. 하지만 전극 전위를 -0.8 V 보다 낮은 값을 설정할 경우 시편 전체에 걸쳐 기포가 발생함과 동시에 공구에 금속의 증착이 일어나 미세 가공에 적합하지 못하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Surface of the ECMed WC with different workpiece potentials (a) 0 V (b) -0.4 V (c) -0.8 V (electrolyte: 0.5 M NaNO₃ + 0.2 M H₂SO₄ solution, pulse amplitude: 6 V, pulse duration: 100 ns, period: 1 μs, feedrate: 2 μm/s)

펄스 전압의 크기에 따른 가공 속도와 가공 간극의 변화에 대해 알아보았다. Fig. 5 와 같이 전압이 작아질수록 가공 간극이 작아지는 대신 가공 속도는 감소하였다. 예를 들어, 시편 전위를 -0.6 V, 펄스 폭을 100 ns 로 고정시키고 전압을 변화시킬 때, 가공 속도가 6 V 에서는 2 $\mu\text{m/s}$, 4V 에서 1 $\mu\text{m/s}$ 로 진행되었다. 반면 가공 간극은 각각 3 μm 와 1 μm 였다. 이는 기존의 연구 결과와 일치하는 현상으로, 전압이 작아질수록 전해 국부화로 인해 가공 영역이 뚜렷해짐을 확인할 수 있다.

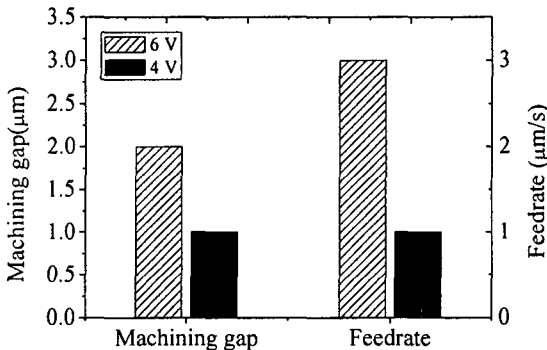


Fig. 5 Machining gap and feedrate according to the applied pulse voltage (electrolyte: 0.5 M NaNO_3 + 0.2 M H_2SO_4 solution, pulse duration: 100 ns, pulse period: 1 μs)

3. 미세 형상 제작

3.1 미세 전해 밀링

텅스텐 카바이드의 전해 가공을 시험해보기 위해 여러 가지 형상을 제작해 보았다. 전해 밀링 (electrochemical milling)의 예로서, Fig. 6 에 보이는 미세 기둥을 제작하였다. 가공 간극은 1 ~ 2 μm 로서, 미세한 크기의 구조물 제작 및 정밀한 크기 조절에 대한 가능성을 확인할 수 있다. Fig. 7 은 십자 홈을 제작한 것이다. 100 μm 길이의 홈을 50 μm 깊이로 가공하고 나서 다시 100 μm 길이의 홈을 교차로 가공하여 제작한 것이다.

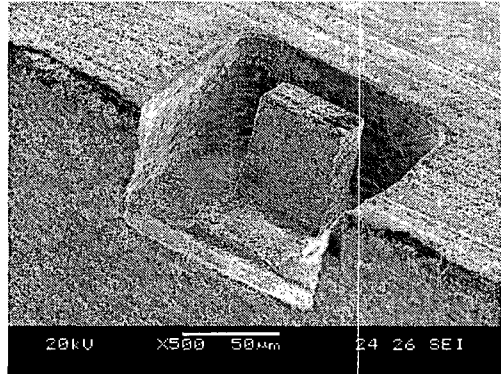


Fig. 6 Micro column (workpiece potential: -0.8 V, pulse amplitude: 4 V, pulse duration: 100 ns, pulse period: 1 μs , feedrate: 1 $\mu\text{m/s}$, size: 30 x 50 μm , height: 60 μm , machining gap: 1 ~ 2 μm , machining time: 160 min)

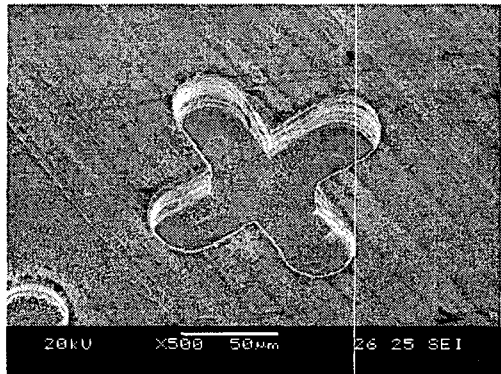
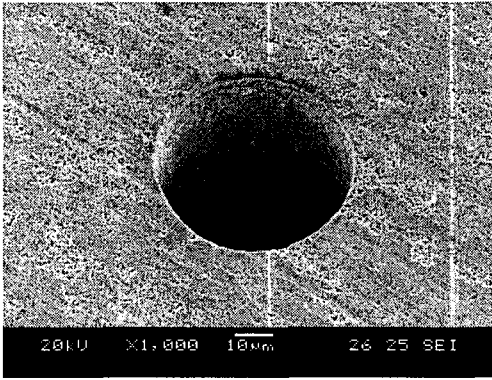


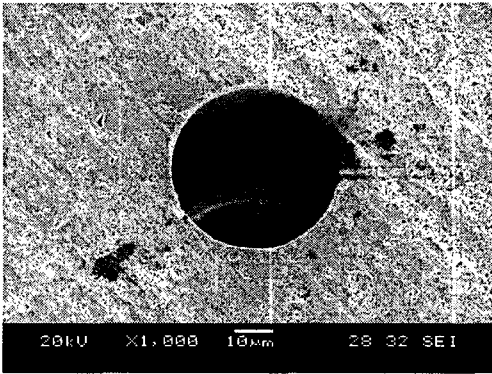
Fig. 7 Crossed groove (workpiece potential: -0.8 V, pulse amplitude: 5 V, pulse duration: 100 ns, pulse period: 1 μs , feedrate: 2 $\mu\text{m/s}$, machining time: 50 min)

3.2 미세 전해 드릴링

Fig. 8 은 전해 드릴링 (electrochemical drilling)의 예로서, 두께 200 μm 의 초경합금에 미세 구멍을 가공한 것이다. 진원도가 뛰어나고 모서리의 날카로운 것을 볼 수 있다. 다만 앞면과 뒷면의 직경 차이가 약 6 μm 인 것에서 알 수 있듯, 약간의 테이퍼가 생기는 문제점이 발생하였다.



(a) Hole entrance



(b) Hole exit

Fig. 8 Micro hole by MECM (workpiece potential: -0.8 V, pulse amplitude: 6 V, pulse duration: 100 ns, period: 1µs, depth: 200 µm, feed: 0.1 µm/s, tool: φ 37 µm, hole entrance: 49 µm, hole exit: 43 µm, machining time: 40 min)

3.3 미세 전해 선삭

Fig. 9 는 선반 가공에서의 선삭을 응용한 전해 선삭(electrochemical turning) 공정을 개략적으로 나타낸 것이다. 지금까지 연구되어 왔던 일반적인 미세 가공에서의와 달리 평판이 공구로서 사용되고, 봉이 시편이 된다. 미세 팁을 제작하기 위해서, 평판을 고정시킨 채로 봉을 회전시키면서 하방으로 이송시키면서 전해 작용을 일으킨다. 더 가느다란 미세팁을 제작하고 싶은 경우, 봉을 평판 쪽으로 더 가깝게 이동시킨 후 이와 같은 과정을 반복한다.

Fig. 10 은 전해 선삭을 이용하여 초경합금으로 마이크로 팁을 제작한 것이다. 시편과 공구와의 간격, 전압과 펄스 폭을 제어함으로써 직경을 조절하

였다. 전압 또는 펄스 폭을 감소시켜가며 여러 단계의 가공을 거쳐 완성한 것이다. Fig. 11 은 Fig. 10 의 경우와 달리 방전 가공으로 황삭을 한 후 전해 가공으로 미세한 형상을 마무리한 것이다. 방전 가공을 끝낸 후 전해 가공을 수행할 시, 하나의 가공 시스템 안에서 다른 장치는 같이 사용하면서, 수조와 전원 시스템만을 교체하기 때문에 전해 가공만을 수행할 때보다 가공 시간을 줄이면서 높은 정밀도의 팁을 얻을 수 있게 된다.

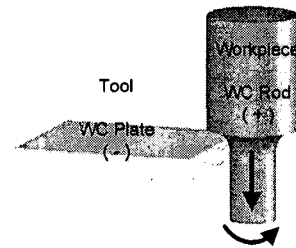


Fig. 9 Schematic diagram of electrochemical turning

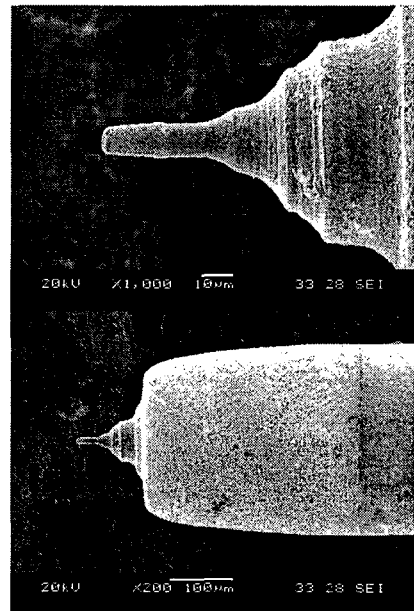


Fig. 10 Micro tip by electrochemical turning (diameter: 10 µm, pulse amplitude and pulse duration - 1st machining: 6 V, 300 ns, 2nd machining: 5 V, 200 ns, 3rd machining 5 V, 100 ns, machining time: 90 min)

참고문헌

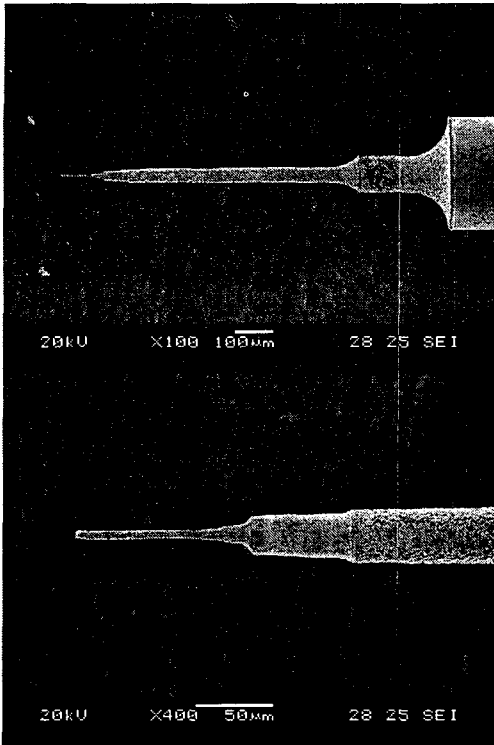


Fig. 11 Micro tip by electrochemical turning (diameter: 5 μm, pulse amplitude pulse duration - 1st machining: 5 V, 100 ns, 2nd machining: 4V, 100 ns, machining time: 50 min)

4. 결론

초단 펄스를 이용하여 초경합금(tungsten carbide with cobalt, WC)에 대한 전해 가공을 수행하였다. 가공 조건(전해액 종류, 농도, 전원 조건)에 따른 가공 표면 특성에 대한 연구를 수행하였고 전해 국부화가 이루어짐을 확인할 수 있었다. 전해액으로서 황산과 질산을 섞은 혼합 용액을 사용할 경우 질산 또는 황산만을 사용했을 때보다 표면 품질이 뛰어난 장점이 있다. 시편에 인가하는 전위를 (-)로 유지하면서 가공하는 경우, 전해 생성물의 발생과 산화막 생성이 억제되는 효과가 있다. 기초 실험을 바탕으로 간단한 형상을 가진 구조물들을 가공해 보았다. 전해 선삭이라는 새로운 가공 방식을 시도하여 미세 팁 제작에 성공하였다.

1. Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Ertl, G., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
2. Kock, M., Kirchner, V. and Schuster, R., "Electrochemical Micromachining with Ultrashort Voltage Pulses - a Versatile Method with Lithographical Precision," Electrochimica Acta, Vol. 48, pp. 3213-3219, 2003.
3. Kim, B. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Micro Electrochemical Milling," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 15, pp. 124-129, 2005.
4. 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.
5. Andersson, K. M. and Bergström, L., "Oxidation and Dissolution of Tungsten Carbide Powder in Water," Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 18, pp. 121-129, 2000.
6. Choi, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "WC Micro-shaft Fabrication Using Electrochemical Etching," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 172-178, 2001.
7. Masuzawa, T. and Kimura, M., "Electrochemical Surface Finishing of Tungsten Carbide Alloy," Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 199-202, 1991.