

양극분극곡선을 이용한 미세 전해가공

최영수*, 강성일(울산대학교 대학원), 전종업, 박규열(울산대학교)

Micro Electrochemical Machining using Anodic Polarization Curve

Young-Soo Choi*, Seong-II Kang, Jong Up Jeon, Kyu-Yeol Park

ABSTRACT

In this research, the mechanism of micro-ECM was investigated with potentiodynamic method and the optimal condition for micro-ECM was selected by voltage-current-time curve with potentiostatic method. From the experimental result, it was confirmed that anodic voltage curve could be used very effectively for determining the optimal condition of micro-ECM, and the micro part which has extremely fine surface could be fabricated by use of micro-ECM with point electrode method.

Key Words : Micro Electrochemical machining (미세전해가공), Anodic Polarization curve (분극곡선), Potentiostat (포텐셔스타트), Point electrode method(점 전극법)

1. 서론

전해가공(Electrochemical Machining: ECM)은 전기 화학가공이라고도 불리며, 전기화학적 용해작용(양극용출 또는 전해용출)을 재료의 필요한 부분에 집중, 제한함으로써 필요로 하는 형상이나 치수 및 표면상태를 얻는 가공법이다. 전해가공은 전기화학적 가공전체를 포함하고 있으나 협의적으로는 전기화학적 제거가공을 일컫는다. 전해가공에서는 기존의 기계가공에 비해 전해가공은 경도가 크고 인성이 큰 재료에 대해서도 가공속도가 높으며, 복잡한 3차원 형상의 경우에도 가공재료 상에 공구의 흔적이나 버(Burr)의 발생이 없이 금속을 제거하는 것이 가능하다. 또한 일반 기계가공에서 발생하는 열이나 힘이 작용하지 않는 연유에 금상학인 결함(Metallurgical Defect)이 방지됨과 동시에 전극소모가 없다는 장점을 가지는 반면, 가공정밀도에 한계가 존재한다는 가공기구 상의 문제로 인하여 높은 정밀도가 요구되는 초정밀 부품의 가공에는 적용이 제한되고 있는 실정이다⁽¹⁾. 그러나 최근 마이크로 단위의 크기를 가지는 초정밀 부품의 제작기술 분야에서 전해가공의 효용성이 재고되고 있다. 이와 같은 사실은 마이크로 부품의 경우에 일반 기계부품에 비하여 질량효과의 감소에 따른 표면효과

증대 및 이로 인하여 마이크로 트라이볼로지(Micro Tribology)의 역할이 중요하게 대두되며, 전해가공에서는 전술한 바와 같이 다른 제거가공법에서 발생하는 가공변질층의 문제가 해결된다는 점과 동시에 극히 평활한 면을 얻는 것이 가능하다는 사실을 배경으로 하고 있는 것으로 추정할 수 있다⁽²⁻⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 극히 작은 단위의 크기를 가지는 부품을 제작에 있어서 전해가공의 적용성을 확장하는 것을 목적으로 금속의 포텐셔스타트(Potentiostat)를 사용하여 얻어진 양극분극곡선으로부터 미세 전해가공의 최적조건을 도출하고자 하였다. 또한 전해가공에 있어서는 가공 중에 극간의 전류 밀도를 높이고 전해반응 속도를 촉진시키면서 전해액 내부에서의 전압강하를 감소시키기 위하여 전해가공용 전극으로 미세전극(이하 점전극으로 약함)을 이용하였으며, 동 방식에서는 전술한 전기화학적 특성으로 인하여 특히 높은 형상정밀도가 요구되는 초미세 형상의 제작에 유리한 것으로 추정할 수 있다.

2. 양극분극곡선을 이용한 미세전해가공의 시스템 구성 및 실험방법

미세전해가공용 시스템은 공작물 장착용의 주축

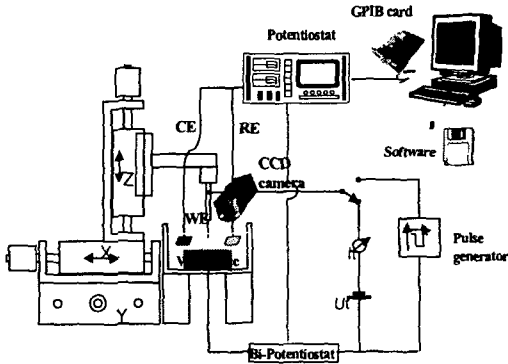


Fig. 1 Schematic Illustration of Micro ECM System

스핀들과 공구전극의 위치결정기구를 포함하는 시스템 본체, 전원 공급장치와 포텐셔스타트를 포함하는 전해조건의 조절장치와 가공상태의 감시 및 평가장치로 구성된다. Fig. 1은 점 전극을 이용한 미세전해가공 시스템의 개략도를 나타낸다. 본 시스템에서는 공작물이 전해액 중에 침적상태에서 가공이 진행되는 일반적인 전해가공방식과 전해액을 외부에서 가공부위로 공급하는 두 가지 방식이 가능하도록 설계하였다. 후자의 경우에는 전해액의 소모가 적을 뿐만 아니라 가공이 진행되는 부위를 현미경을 통해서 직접 관찰할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 전해액은 황산(H_2SO_4)과 인산(H_3PO_4) 등을 사용하였다. 공구전극은 점 전극을 구현하기 위하여 공작물과 동일한 재질의 $\phi 600\mu m$ 의 선재를 사용하여 끝 단면을 원추형상으로 성형하였으며 선단부위를 제외하고는 에폭시 수지로 피복하여 절연시켰다.

3. 양극분극곡선을 이용한 미세전해가공

3.1 분극곡선과 전해거동의 관계

STS410의 전해거동을 조사하기 위하여 분극곡선을 구하였다. 분극실험에서는 미국 EG&G PARC사의 포텐셔스타트: 263A와 부식해석용 소프트웨어: M352를 사용하였다. 공작물(Working Electrode: WE)은 SUS304, 공구전극(Counter Electrode: CE)은 백금(Pt), 참조전극(Reference Electrode: RE)는 염화은(Ag/AgCl)을 사용하였으며, 전해액은 H_2SO_4 와 H_3PO_4 및 $H_2SO_4: 3H_3PO_4$ 의 세 종류를 사용하였다. 분극실험에서 시편은 전해액의 평형전위상태에서 한시간 동안 침전시킴으로서 순수한 Cell의 환경에 의해서 전위가 결정되어지는, 개방회로전위(Open Circuit Potential)를 갖도록 하였으며, 안정된 부식전위(E_{corr})가 얻어진 후에는 전위를 0.25V에서 1.6V 혹은 그 이상의 원하는 지점까지 0.5mV/s 간격으로

Table1 Measuring Condition of Potentiodynamic Polarization Curve

Parameter	Set-up
Initial Delay	10sec
Scan Rate	0.5mV/s
Scan Increment	1mV
Step Time	2sec
Initial Potential	-250mV
Final Potential	1.6V
Current Range	Auto
Reference Electrode	Ag/AgCl(0:197)

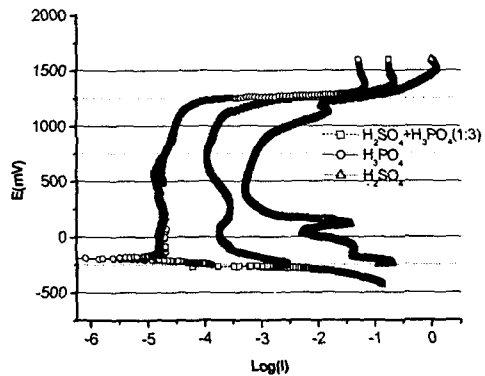
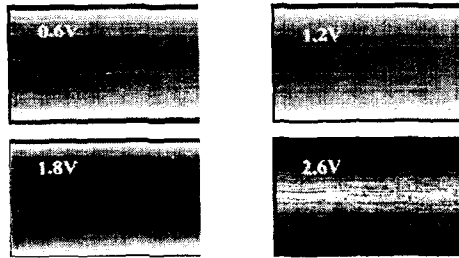


Fig. 2 Anodic Polarization Curve of STS410

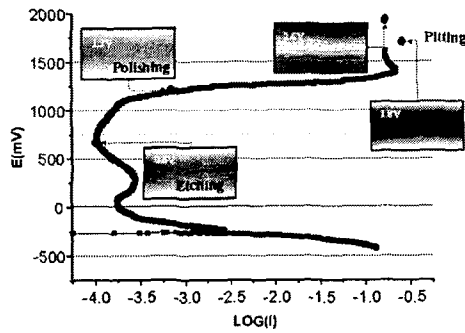
증가시켰다. Table 1은 분극실험에 사용된 조건을 나타낸다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 활성형 전해액에 해당하는 H_2SO_4 의 경우에 비전도도가 높아서 H_3PO_4 에 비하여 상대적으로 높은 가공성을 가지는 것을 알 수 있다. 반면, H_3PO_4 은 비활성형 전해액으로 전류밀도가 너무 낮아서 정상적인 금속용출 자체가 어려운 것을 알 수 있다. 한편, $H_2SO_4: 3H_3PO_4$ 의 전해액에서는 H_2SO_4 의 활발한 금속용출 작용과 H_3PO_4 이 가지는 크롬층 제거 및 크롬산화층 생성으로 인한 광택발생 작용이 동시에 발생하는 영역이 존재하며, 체적제거와 표면의 평활화가 동시에 요구되는 마이크로 전해가공에서 유효하게 활용가능한 전해액 조성으로 판단할 수 있다. 단, $H_2SO_4: 3H_3PO_4$ 의 경우에도 전압이 1.4V를 초과하면 산소의 발생과 더불어 합금성분의 이온화로 인하여 전류밀도가 급격하게 증가하는 것으로 확인되었다.

Fig. 3은 Fig. 2의 분극곡선과 전해가공에 따른 표면상태의 차이를 증첩시켜서 나타낸 것으로, 초기 미세전류로 인하여 미약한 에칭이 진행되다가 부동태구간에서 산화환원의 평형을 이루며, 크롬산화층의 피막형성으로 인하여 표면상태가 향상되는 것을



(a) Surface Condition



(b) Anodic Polarization Curve

Fig. 3 Relationship between Voltage & Surface Condition

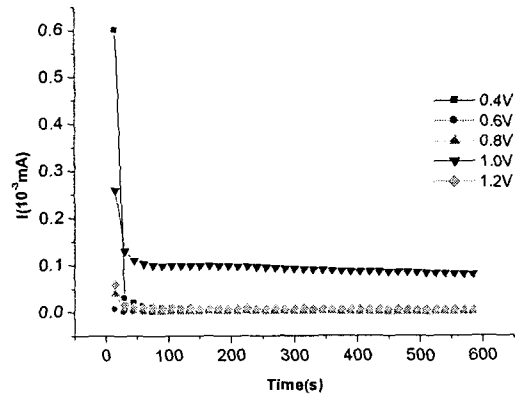
알 수 있다.

전기의 Fig. 2와 Fig. 3의 실험에서는 전압의 차이에 따른 전해반응의 대략적인 경향은 파악이 가능하지만 금속표면에서의 인가전압에 따른 산화반응의 차이를 구체화하는 것은 곤란한 것으로 판단할 수 있다.

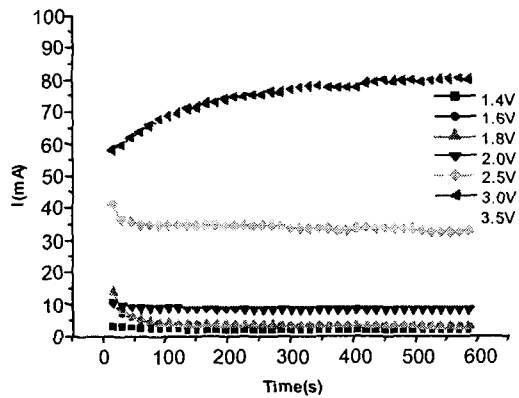
Fig 4는 포텐셔스타트를 이용하여 정전압을 일정 시간 인가하면서 인가전압 0V~3.5V의 범위에서 시간의 경과에 따른 전류치의 변화거동을 측정된 결과이며, 가공조건은 Table 3에 나타낸다. Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같이, μA 의 단위의 비교적 적은 전류밀도를 가지는 0.4V~1.2V의 구간에서는 1.0V의 조건에서 산화반응이 우선하여 전류밀도가 다소 증가하지만, 이후 1.2V에서는 산화환원반응의 균형을

Table 3 Measuring Condition of Potentiostatic Time-Current Curve

Parameter	Set-up
Time Step	600sec
Time/Pt	15sec
No. of Points	39
Rise Time	High Stability
Density	7.900g/ml
Counter Electrode	Ag/AgCl



(a) 0.4V~1.2V



(b) 1.4V~3.5V

Fig. 4 Current-Time Curves of STS410 in H3PO4: 3H2SO4

이루는 부동태의 영향으로 전류밀도가 다시 저하되는 것으로 확인되었다. 이 영역에서는 전해반응이 미약하여 미세 에칭 및 연마작용이 발생하는 구간이라 판단할 수 있다. 반면, Fig. 4(b)에서 1.4V 이상의 인가전압에서는 전류밀도가 mA를 초과하면서 급격하게 전해가공이 진행되며, 전압이 증가할수록 피팅(Pitting)현상과 더불어 전해반응이 격렬해지는 것으로 관찰되었다. 또한 인가전압 3.0V와 3.5V의 결과에서 보이는 바와 같이 일정구간을 초과하는 인가전압의 조건에서는 셀 내부의 급격한 전해작용으로 인하여 데이터에 변동이 발생하며, 이 영역을 전후로 음극에서의 수소기포의 발생이 급격하게 증가하는 것이 육안으로 관찰되었다. 이와 같은 결과는 미세전해가공에서 미세형상의 창성과 동시에 표면의 평활화를 달성가능하기 위한 전기적 조건이 서로 다르며, 미세형상의 초정밀 전해가공을 실현하기 위해서는 인가전압을 포함하여 적절한 전해환경이 구성되어야 한다는 사실을 시사하는 것으로

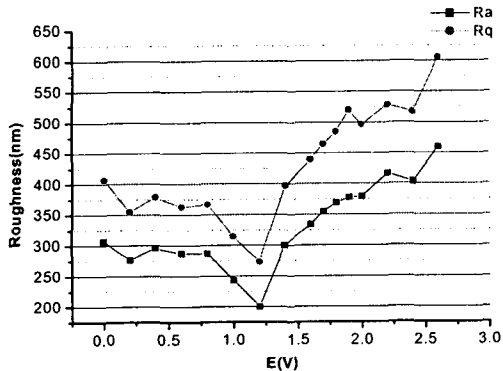


Fig. 5 Relationship between Voltage & Surface Roughness

판단할 수 있다.

3.2 분극곡선을 이용한 미세 전해가공

전기의 Fig. 2에서 Potentiodynamic 방법으로 확인한 양극분극곡선에서 조사한 전압의 범위를 포함하도록 인가전압을 0V부터 2.4V까지 증가시키면서 인가전압에 따른 전류치의 변화가 공작물의 표면상태에 미치는 영향을 조사하였다. 사용된 공작물은 $\phi 600\mu\text{m}$ 의 STS410선재이며, 전해액은 $\text{H}_2\text{SO}_4: 3\text{H}_3\text{PO}_4$ 의 혼합액을 사용하였다. 실험에 있어서는 인가전압 외에 전해가공에서 표면상태에 영향을 미치게 되는 가공간극 및 전해액의 공급조건 등은 동일하게 설정하였으며, 실험 후에는 표면상태의 측정에 앞서서 측정값의 정확성을 고려하여 공작물 표면의 이차부식을 방지하기 위해서 초음파세척을 하였다.

Fig. 5는 인가전압에 따른 표면거칠기의 차이를 조사한 결과이며, 인가전압에 따라서 전해현상의 차이로 인한 표면거칠기에 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 전류가 미약한 0.6V까지는 미세한 에칭이 일어나며, 부동태 구간으로 추정되는 1.2V에서는 에칭구간의 표면거칠기를 극복하고 전해연마 특성이 발휘되어 표면거칠기가 향상된다. 그 후, 전압의 지속적인 상승으로 인한 전류치의 증대로 공작물 표면에서 급격한 산화가 진행되어 표면거칠기가 악화되며 인가전압이 높아질수록 그 정도가 심해지는 것을 알 수 있다. 따라서 동 결과에 근거하면, 미세전해가공에서의 표면상태는 전기의 Fig. 3에서 얻어진 양극분극곡선의 추이를 추종하는 것으로 단정할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 미세전해가공의 적용성의 확장을 위하여 금속의 양극분극곡선으로부터 미세전해가공

의 최적조건을 도출하고자 하였으며, 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 미세전해가공에서 최적조건 선정에는 양극분극곡선이 매우 유용하며, 포텐서스타트를 이용하면 효과적인 분극곡선의 조사가 가능하다.
2. 미세형상의 전해가공에서는 일반 전해가공에 비하여 형상상성과 표면의 평활화에 이용가능한 가공영역이 명확하게 구분되며, 미세전해가공에서의 표면상태는 분극곡선의 추이를 추종한다.
3. 금속의 미세전해가공에서 전압에 따른 전류와 시간의 변화를 측정하면 전해가공에서의 가공특성을 정량화하는 것이 가능하다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지원 국제공동연구(I-01-04-A-001)로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 近森邦夫, “電解加工におけるパルス電流の利用,” 日本機械技術研究所報告, No. 137, 1986.
2. J. W. Schultze, A. Bressel, “Principle of electrochemical micro-and nano-system technologies,” *Electrochimica Acta* 47, pp. 3-21, 2001.
3. K. Chikamori, “Possibilities of electrochemical micromachining,” *Int. J. of Jpn. Soc. Prec. Eng.*, Vol. 32, No. 1, pp. 37-42, 1998.
4. 木光太朗, 酒井茂紀, 増澤隆久, 藤野正俊, “微細穴の電解仕上げに関する研究,” 電氣加工學會全國大會論文集, pp. 35-38, 1996.
5. T. Masuzawa, S. Sakai, “Quick finishing of WEDM products by ECM using a mate-electrode,” *Ann. of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 123-126, 1987.
6. V. Kirchner, L. Cagnon, R. Schuster, G. Ertl, “Electrochemical machining of stainless steel microelements with ultrashort voltage pulse,” *App. Phys. Lett.*, Vol. 79, pp. 1721-1723, 2001.
7. R. Schuster, “Nanoscale electrochemistry-a tool for forming structures of almost atomic dimensions,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 80, pp. 5599-5602, 1998.
8. R. Schuster, V. Kirchner, P. Allongue, G. Ertl, “Electrochemical micromachining,” *Science*, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.