

전원특성에 따른 마이크로 전해가공에 관한 연구

박정우*(부산대 대학원 기계공학부), 이은상(인하대 기계공학부), 문영훈(부산대 기계공학부)

A Study on the Electrochemical Micromachining with Various Pulse Currents

J. W. Park(Mech. Eng., PNU), E. S. Lee(Mech. Eng., IHU), Y. H. Moon(Mech. Eng., PNU)

ABSTRACT

Pulse electrochemical micromachining offers significant improvements in dimensional accuracy as compared with conventional electrochemical machining. One primary issue in pulse electrochemical micromachining is to identify and control machining depth as well as interelectrode gap size. This paper presents an identification method for the machining depth by in-process analysis of machining current and interelectrode gap size. The inter electrode gap characteristics, including pulse current, effective volumetric electrochemical equivalent and electrolyte conductivity variations, are analysed based on the model and experiments.

Key Words : PEMM(Pulse Electrochemical Micro-Machining, 펄스 마이크로 전해가공), Accuracy (정밀도), Electrochemical equivalent (등가전기화학량)

1. 서론

Pulse Electrochemical Micromachining(PEMM) 기술은 종래의 직류전원을 사용하는 Electrochemical Machining 기술뿐만 아니라, 여러 특수가공기술을 대체할 수 있는 하나의 대안이 될 수 있는 기술로 대두되고 있다. Pulse Electrochemical Micromachining에서 만 구현되는 한 단계 진보된 전해액 공급시스템, 협소한 전극간극의 안정된 유지, 펄스전원의 안정된 공급 등은 집중적인 양극에서의 전해용출을 일으켜 치수정확도와 가공품질을 한층 더 높일 수 있고, 더욱 나아가 미세형상 가공기술의 고능률화가 실현될 수 있다.^{(1)~(3)} 전기화학 가공기술은 그 기본원리상 버의 제거, 표면잔류응력 제거, 피가공물(workpiece)의 기계적 성질을 제한을 받지 않으며, 공구(tool)의 마모가 전혀 없기 때문에 자동차, 항공기, 터빈 등의 산업분야에 응용되어 왔다. 이러한 전기화학반응의 장점을 응용하여 electro plating, electro-polishing, chemical etching, electro etching 등의 여러 가공법으로 변형되어 적용되고 있다. 전해가공의 적용을 위해서는 메커니즘의 이해가 필수적인데, 이를 위한 연구는 오래 전부터 진행되어 여러 전해 파라미터가 정의, 적용되었다. 최근에는 펄스전원 적용시의 전기

화학 가공조건에 대한 연구가 진행되고 있다.^{(3)~(6)}

본 연구에서는 여러 전해 파라미터를 이용한 전극간극의 메커니즘을 적용하고, 이를 이용한 마이크로미터 수준의 가공깊이 제어를 전원특성에 따라 구현하고자 한다.

2. PEMM Process Model Development

2.1 Inter Electrode Gap Mechanism

적절한 전해가공의 파라미터의 선정은 가공정밀도의 향상과 더불어 집중적인 전해용출을 유도할 수 있으나 이를 위해서는 가공메커니즘의 정확한 이해뿐만 아니라 각 파라미터들과의 연계성, 적절한 최적화 기술을 필요로 한다. 따라서 전원조건에 영향을 받는 각각의 파라미터에 대한 해석 후에 이를 조합하는 것이 효율적이다.

우선 전해액 전도도는 전해가공시의 저항의 역할을 하는 파라미터의 하나로 온도, 수소가스의 발생 등에 영향을 받는 파라미터로 인식되어 있다. 그러나 본 연구에서는 실제 가공조건에 가장 근접하기 위해 기계적 연결부를 조합하여 이들의 저항을 모두 포함하도록 실가공시의 전류, 전압특성을 획득하여

Ohm's law에 적용하면 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$x_c = \frac{S_i}{V} \quad (1)$$

여기서 x_c 는 여러 기계적 요소와 전해액의 저항을 조합한 전도도이고, i 는 전류밀도, V 는 전압, S 는 전극간극을 나타낸다.

Faraday의 법칙에 의하여 펄스 on-time에서의 금속제거량은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Ax_c(V_0 - \Delta V)}{Sz\rho_a F} - f \quad (2)$$

S : gap size

A : atomic weight

t : machining time

z : valency

V_0 : voltage pulse

ΔV : overpotential

F : Faraday's constant (96500C)

x_c : combined electrolyte conductivity

본 연구에서는 마이크로 전해가공의 실현을 위해 미소한 전극간극과 전압치를 적용하였으므로 전극은 이송시키지 않았다. 따라서 τ_{on} 시점에서 τ_{off} 시점까지의 금속제거에 의한 전극간극은 다음과 같이 정의된다.

$$\int_{\tau_{on}}^{\tau_{off}} S dS = \int_{\tau_{on}}^{\tau_{off}} \frac{Ax_c(V_0 - \Delta V)}{z\rho_a F} dt \quad (3)$$

$$S_1 = \sqrt{S_0^2 + 2K_v x_c V t} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } K_v = \frac{A}{zF\rho_a}$$

K_v 는 effective volumetric electrochemical equivalent로 정의되며, 공작물에 따라 결정되는 상수로 본 연구에서는 $3.57 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{sA}$ 이고 초기조건은 $t=0\text{sec}$ 일 때 $S=S_0$ 이다.⁽⁸⁾

상기의 해석결과로 볼 때 전극간극은 적용 voltage와 시간에 따라 루트곡선으로 비례하여 증가함을 알 수 있다.

2.2 Machining Depth Analysis

Fig. 1은 미세 전해가공을 위한 실험장치의 개략도이다. 전원 공급기에서 전극과 공작물에 각각 음극과 양극의 전원을 공급하고, 외부에서 공급되는

전해액은 전극의 내부를 통해 전극과 공작물의 사이에 분사된다. 이는 전극과 공작물 사이에 원활한 전해액을 공급하여 균일한 전해용출 작용을 일으키기 위함이다. 사용된 전해액은 적절한 필터링을 통하여 재공급 되도록 순환하여 사용한다. 사용된 공작물은 스테인레스 강 STS304 재질이며, 전극은 동(Cu) 재질이다.

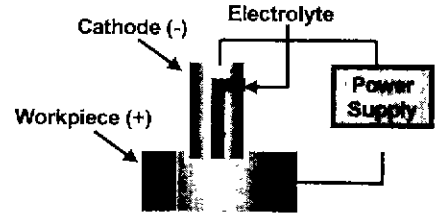


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set

Fig. 2는 τ_{on} 상태에서의 적용 Voltage 값의 변화에 따른 전극간극의 변화를 나타낸 것으로, 시간에 따른 전극간극의 증가량이 전해용출되는 공작물의 가공깊이가 된다. 직류전원을 사용하였을 때는 수소가스, 발열 등의 문제로 초기 전극간극을 작게 할 수 없기 때문에 $S_0=0.4\text{mm}$ 의 가공조건을 선정하였다. 시뮬레이션 결과를 토대로 하면 $V_0=8\text{V}$, $t=400\text{sec}$ 일 때, 가공깊이 $\Delta S=0.8\text{mm}$, $V_0=12\text{V}$, $t=400\text{sec}$ 일 때, 가공깊이 $\Delta S=0.1\text{mm}$ 정도가 됨을 알 수 있으며, 미세 전해가공에 접근하기 위해서는 가공 파라미터 τ_{on} 을 적게 해주어야 한다.

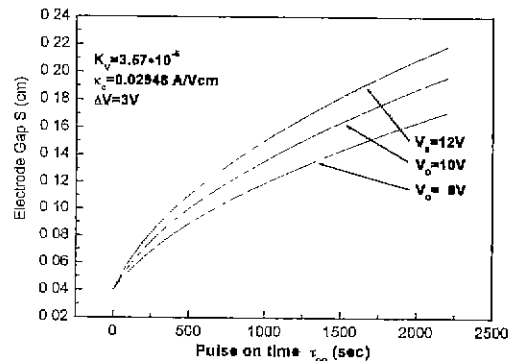


Fig 2 Change of inter electrode gap with pulse on-time τ_{on} and voltage V_0

Fig. 3은 가공깊이를 마이크로 단위로 제어하기 위하여 작은 가공시간 영역에서의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로 실험결과와 상당히 일치함을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과를 토대로 하면 $V_0=7\text{V}$, $t=5\text{sec}$ 일 때 가공깊이 $\Delta S=5.2\mu\text{m}$, $V_0=7\text{V}$, $t=10\text{sec}$ 일

때 $\Delta S=10.4\mu\text{m}$ 이며, 실험에 의한 결과도 각각 ΔS ($V_0=7\text{V}$, $t=5\text{sec}$)= $5\mu\text{m}$, ΔS ($V_0=7\text{V}$, $t=5\text{sec}$)= $12\mu\text{m}$ 로 되어 상당한 일치를 보이고 있다.

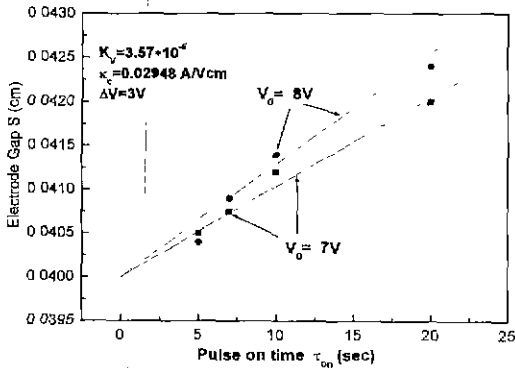


Fig. 3 Change of inter electrode gap with pulse on-time τ_{on} and voltage V_0

2.3 Pulse Electrochemical Micromachining (PEMM)

일반적으로 전해가공시, 전기화학반응이 일어날 때 발생하는 수소가스, 발열 등의 문제로 초기 전극 간극을 작게 설정하고 이를 일정하게 유지시키기가 어렵다. 이를 해결하기 위해 펄스전원을 사용하여 초기 전극간극을 0.2mm이하로 설정함이 가능해지고 마이크로 단위의 제어가 가능해지기 시작했다.

펄스전원을 사용한 PEMM 가공해석을 위해 식 (4)를 인용하면 다음과 같다. 즉, On-time($t=1 \sim k$)일 때는 전해작용이 활발히 진행되므로 가공시간에 따라 S_n 값이 비례적으로 증가하고 다음 시간대에 돌입해서는 초기간극 S_0 가 S_{n-1} 로 설정되기 때문에 on-time 구간내의 임의의 시간 t 에 대해서 전극간극은 다음과 같다.

$$S_n(\tau_{on}) = \sqrt{S_{n-1}(\tau_{on})^2 + 2K_v \alpha_c V t} \quad (t = 1 \sim k) \quad (5)$$

그러나 가공시간 t 가 off-time 시간대($t=k+1 \sim m$)에 접어들면 통전이 중지되기 때문에 이 때의 전극간극은 이전 on-time 시간대의 마지막 시간인 t_k 에서의 S_k 치를 그대로 유지하게 된다. 따라서 off-time일 때의 S_n 값은 다음과 같다.

$$S_n(\tau_{off}) = S_k(\tau_{on}) \quad (6)$$

즉, PEMM의 경우에는 Fig. 4와 같이 on-time일

때는 전해용출이 활발히 진행되어 전극간극이 증가하고 off-time 일 때는 가공이 일시 정지되어 발열, 수소가스 등을 함유한 전해액의 제거와 동시에 새로운 전해액의 공급을 원활히 한다.

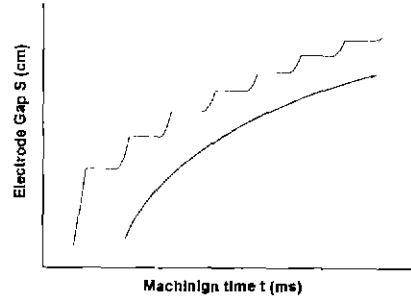


Fig. 4 PEMM working cycles within short pulse periods

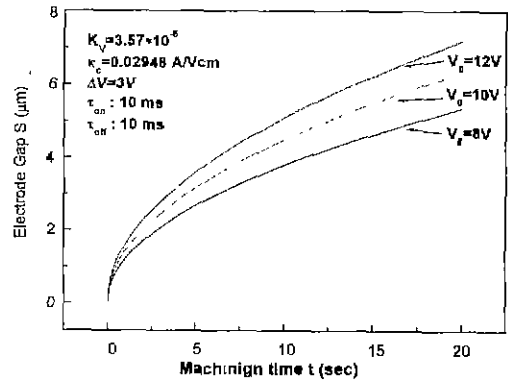


Fig. 5 Change of inter electrode gap with pulse parameter

Fig. 5는 초기 간극을 zero로 두고 입력 voltage 값은 8V로 하여 PEMM의 가공시간에 따른 전극간극의 변화를 나타낸 것으로, 마이크로미터 수준의 가공깊이를 제어할 수 있음을 나타낸다. 예를들면 $t=10\text{sec}$ 일 때 $V_0=8\text{V}$, $V_0=10\text{V}$, $V_0=12\text{V}$ 에 대해서 전극간극의 증가량 ΔS 는 각각 $5.1\mu\text{m}$, $4.5\mu\text{m}$, $3.8\mu\text{m}$ 를 나타내고 있다. 직류 전원을 사용할 때보다는 약간 낮은 수치를 보이나 직류보다는 낮은 전류가 공급되기 때문에 안전성과 전류의 집중도가 높아져 표면상태가 양호하게 된다.

일반적으로 펄스전원을 사용할 경우에는 각각의 조건구분을 위해 duty factor를 적용하는데 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Duty factor} = \frac{\tau_{on}}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (7)$$

그러나 펄스 전해가공에 있어서 duty factor에 따

라 가공특성이 결정되는 것으로 인식될 수 있으나 실제 가공 시에는 동일한 duty factor를 가지는 전원 조건인데도 불구하고 서로 다른 결과를 보임을 알 수 있다. 따라서 Fig. 6은 duty factor에 따라 전극간극이 변화하는 경향을 나타내었다.

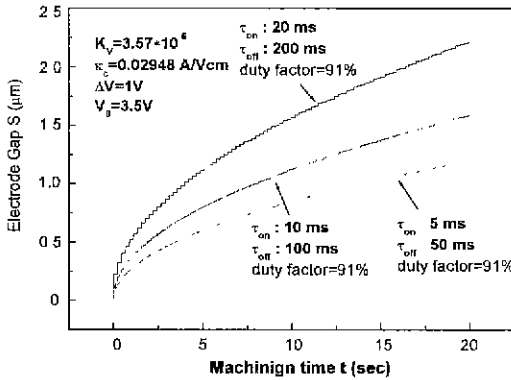


Fig. 6 Change of inter electrode gap with duty factor

Fig. 6의 결과에 의하면 같은 duty factor를 가지는 전원조건인데도 불구하고 on, off-time 수치에 따라 서로 다른 결과를 보이고 있다 즉, 동일한 duty factor(=0.91)를 가짐에도 불구하고 각각의 조건에 따라 t=10sec일 때 전극간극의 증가량 ΔS 가 1.6 μm , 1.1 μm , 0.8 μm 로 서로 상이한 결과를 보이고 있다.

따라서 펄스전원을 적용한 전해가공에 있어서는 duty factor가 전원인자가 아니라 실제 적용하는 on, off-time의 수치가 가공성을 분별하는 인자로 고려되어야 하며, on-time의 증가에 따라 전해 용출량이 급격히 증가하므로 정밀한 제어를 위해서는 off time의 수치를 적절히 조절하는 것이 더욱 효율적이다.

3. 결론

전해가공에 있어서 여러 전해 파라미터를 이용한 전극간극의 메커니즘을 적용하고, 이를 이용한 마이크로 전해가공의 가공특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전극간극의 메커니즘을 적용하여 마이크로 전해가공의 가공깊이를 예측하는 시뮬레이션을 구현하였다
2. 전해액의 전기 전도도를 구현함에 있어서 실제 가공조건에 가장 근접하기 위해 여러 기계적 연결부를 조합하여 이들의 저항을 모두 포함하도록 가공시의 전류, 전압특성을 획득하여 k_s 를 적용하였다.
3. 펄스전원을 적용한 전해가공에에서는 duty factor가 전원인자가 아니라 실제 적용하는 on,

off-time의 수치가 가공성을 분별하는 인자로 고려되어야 하며, on-time의 증가에 따라 전해 용출량이 급격히 증가하므로 정밀한 제어를 위해서는 off time의 수치를 적절히 조절하는 것이 더욱 효율적이다.

참고문헌

1. K. P. Rajurkar, D. Zhu, J. A. McGeough, J. Kozak, A. De Silva, "New Developments in Electro-Chemical Machining", CIRP, Vol. 48, No. 2, pp.567-580, 2000
2. Rolf Schuster, Viola Kirchner, "Electrochemical Micromachining", Science, Vol. 289, pp98~101, 2000
3. B. Wei, K. P. Rajurkar, S. Talpallikar, "Identification of Inter Electrode Gap Sizes in Pulse Electrochemical Machining", The Electrochemical society, Vol. 144, No. 11, pp3913~3918, 1997
4. K. P. Rajurkar, B. Wei, J. Kozak, "Modelling and Monitoring Inter Electrode Gap in Pulse Electrochemical Machining", CIRP, Vol. 44, No. 1, pp177-180, 1996
5. K. P. Rajurkar, D. Zhu, B. Wei, "Minimization of Machining Allowance in Electrochemical Machining", CIRP, Vol. 47, No. 1, pp 165~168, 1998
6. K. P. Rajurkar, B. Wei, J. Kozak, "Study of Pulse Electrochemical Machining Characteristics", CIRP, Vol. 42, No. 1, pp231~234, 1993
7. McGeough, J. A., "Principles of Electro-chemical Machining", Chapman Hall, London, 1974
8. 박정우, 이은상, 문영훈, "미세 홈 형성을 위한 마이크로 가공기술에 관한 연구", 추계정밀공학회는 문집, pp918~921, 2000