

미세 홈 형성을 위한 마이크로 전해가공에 관한 연구

박정우*, 이은상**, 문영훈***

A Study on the Electrochemical Micro-machining for Fabrication of Micro Grooves

Jeong-Woo Park*, Eun-Sang Lee**, and Young-Hun Moon***

ABSTRACT

A specially-built EMM (Electrochemical Micro Machining) / PECM (Pulse Electrochemical Machining) cell, a electrode tool filled with non-conducting material, a electrolyte flow control system and a small & stable gap control unit are developed to achieve accurate dimensions of recesses. Two electrolytes, aqueous sodium nitrate and aqueous sodium chloride are applied in this study. The former electrolyte has better machine-ability than the latter one because of its appropriate changing to the transpassive state without pits on the surface of workpiece. It is easier to control the machining depth precisely by micrometer with pulse current than direct current. This paper also presents an identification method for the machining depth by in-process analysis of machining current and inter electrode gap size. The inter electrode gap characteristics, including pulse current, effective volumetric electrochemical equivalent and electrolyte conductivity variations, are analyzed based on the model and experiments.

Key Words : EMM(Electrochemical Micro-Machining, 마이크로 전해가공), PECM(Pulse Electrochemical Machining, 펄스 전해가공), Electrolyte(전해액), Inter Electrode Gap(전극간극), Electrochemical Equivalent (등가전기화학량)

기호설명

A = atomic weight
z = valency of dissolving ions
I = current
i = current density
F = Faraday's constant
A/z = electrochemical equivalent
XA = % of element A

S = gap size
V = voltage
f = feed-rate of electrode
Kv = effective volumetric electrochemical equivalent

1. 서론

마이크로 가공기술은 전자 통신, 반도체, 컴퓨터

--- 2001년 7월 20일 접수
* 부산대학교 ERC, 대학원
** 인하대학교 기계공학부
*** 부산대학교 ERC

터 OA 기기, 초정밀 공작기계 분야의 한단계 진보를 위해서는 필수적으로 적용되어야 하는 분야이다. 실제로 이론적 해석에 의하여 미세 형상이나 치수가 거의 구현되어 있는 현 시점에서, 그 정밀가공이 난해하거나 불가능하여 더 이상의 이론적 개발이 이론적인 결과로서만 남게되는 현상은 실용화를 위한 경제, 산업적 측면에서 상당한 손실임에 틀림없다.^[1, 2, 3]

전세계적으로 소형화, 저가, 고속의 전기 시스템의 필요성이 대두되고, 그에 따라 기존의 가공법에서 탈피한 새로운 방식의 가공법이 발생, 발전하게 되었다. 이러한 발전의 한 단계로 전기, 화학 반응을 이용하는 가공기술이 대두되고 있는데, 예로써 electro plating, electro-polishing, electrochemical machining, chemical etching, electro etching 등이 있다.^[4, 5]

Pulse Electrochemical Machining(PECM) 기술은 종래의 직류전원을 사용하는 Electrochemical Machining 기술뿐만 아니라, 여러 특수가공기술을 대체할 수 있는 하나의 대안이 될 수 있는 기술로 대두되고 있다. Pulse Electrochemical Machining에서만 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.^[6, 7, 8] 전기화학 가공기술은 그 기본원리상 비의 제거, 표면잔류응력 제거, 피가공물(workpiece)의 기계적 성질에 제한을 받지 않으며, 공구(tool)의 마모가 전혀 없기 때문에 자동차, 항공기, 터빈 등의 산업분야에 응용되어 왔다. 특히 고속회전을 요구하는 레이저 프린터(LBP), 하드디스크 드라이브(HDD), 스캐너(Scanner) 등의 회전부에 적용되는 차세대 공기동압 베어링의 미세 그루브(Groove)는 경제성 및 가공정도를 고려할 때 전해가공의 적용이 가장 바람직하다.

본 연구에서는 여러 전해 파라미터를 이용한 전극간극의 메커니즘을 적용하고, 이를 이용한 마이크로미터 수준의 정밀가공을 구현하고자 한다.

2. 전해가공의 금속제거량

페러데이 법칙(Faraday's law)에 의해 전기화학 가공 시 용해되는 이온의 원자량, A 와 원자가, z

를 알 수 있다면, 전해 제거되는 금속량은 통전하는 전류량과 등가전기화학량에 비례하므로 다음과 같이 정의된다.

$$m = \frac{AIt}{zF} \tag{1}$$

따라서 단위시간당의 금속 제거율은 다음과 같다.

$$m = \frac{AI}{zF} \tag{2}$$

여기서, A/z 는 등가전기화학량(electro-chemical equivalent)이라 하여 마이크로 가공 시 중요한 파라미터가 된다. 합금의 경우에는 함유원소의 개수가 많기 때문에 등가전기화학량을 구하기 위하여 "superposition of charge" 방법을 적용하였는데, 이 방법은 다음과 같은 수식에 의해 정의된다.^[9]

$$\left(\frac{A}{Z}\right)_{Alloy} = 100 \left(\frac{X_A}{(A_A/Z_A)} + \frac{X_B}{(A_B/Z_B)} + \dots \right) \tag{3}$$

3. 실험장치

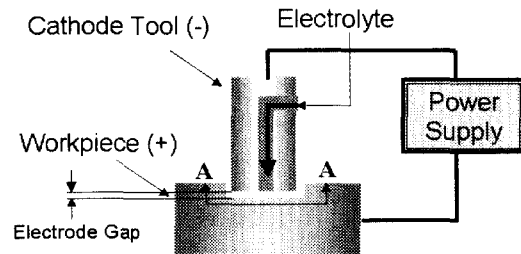


Fig. 1 Schematic diagram of electrochemical micro machining test setup

Fig. 1 은 미세 전해가공을 위한 실험장치의 개략도이다. 전원 공급기에서 전극과 공작물에 각각 음극과 양극의 전원을 공급하고, 외부에서 공급되는 전해액은 직경 2.8mm 의 전극내부 또는 공작물 지그 내부를 통해 전극과 공작물의 사이에 분사된다. 이는 전극과 공작물 사이에 원활한 전해액을 공급하여 균일한 전해용출 작용을 일으키기 위함

이다. 사용된 전해액은 1 μ m, 2 μ m 의 이중 탄소필터를 이용한 필터링을 통하여 1m/s 의 유속으로 재공급 되도록 순환하여 사용한다. 초기 전극간극은 실험목적에 따라 0.1, 0.15, 0.2mm 로 유지하였다. 사용된 공작물은 스테인레스 강 STS304 재질이며, 전극은 동 재질이다.

Fig. 2 는 Fig. 1 의 공작물 상단부위 단면을 나타낸 것으로 불필요한 부위의 전해작용을 피해 공작물과 전극에 전원이 공급되고 협소한 전극간극의 유지와 균일한 전해액의 공급이 이루어지면 집중적인 전해용출작용으로 전극의 형상 그대로 공작물에 홈이 발생하게 된다.

전극의 모든 부위에 전원이 공급될 경우에는 전극의 모서리 부위에 전류가 집중하여 불필요한 부분까지 전해용출 작용을 일으키기 때문에 원하는 홈의 형상이 달성될 수 없다.

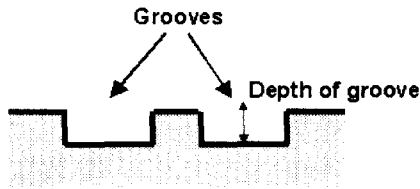


Fig. 2 Cross-sectional diagram of A-A in Fig. 1

Table 1 Experimental set up

Power supply	20V, 500A DC, Pulse τ_{on} 0~999ms τ_{off} 0~999ms
Workpiece (anode)	STS304 DISC
Electrolyte	Aqueous 30% NaCl Aqueous 30% NaNO ₃
Tool electrode (cathode)	Bronze
Surface roughness tester	Mitutoyo Surftest SV400
Surface measurement	CCD Camera (100x, 200x)

Table 1 과 같이 본 실험에 사용된 전원은 최대 20V, 500A 의 직류 및 가변 펄스전원이며, 질산나

트륨 수용액, 염화나트륨 수용액의 전해액이 사용되었다. 모든 시편은 실험 후 표면거칠기 측정기로 그루브의 형상과 깊이를 측정하였으며, 깊이 측정 시 Fig. 2 와 같이 그루브 바닥면의 중심부를 기준으로 3 회 측정하여 평균값을 기술하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 전해액에 따른 전해특성

본 실험에서 적용한 전해액은 중성의 질산나트륨 수용액과 염화나트륨 수용액으로 각각 농도를 달리하여 실험하였다.

전해가공에서의 전해액은 전극과 공작물 사이에 공급되어 양극의 전해용출을 일으키고, 그에 따른 전해생성물을 제거함과 동시에 가공중 발생하는 열을 제거하는 역할을 한다.

Fig. 3 은 각각의 질산나트륨 수용액과 염화나트륨 수용액에 의해 미세 전해가공을 수행하였을 때 각 공작물의 가공상태를 비교한 것이다. 전해액의 온도는 20℃이며, 외부에서 연속적으로 분사하는 상태에서 직류 전원을 일정시간 동안 공급하였다. 염화나트륨 수용액으로 가공을 수행하였을 경우, 일반적으로 가공면이 불량하고 가공깊이가 불균일하게 형성되었음을 알 수 있다.

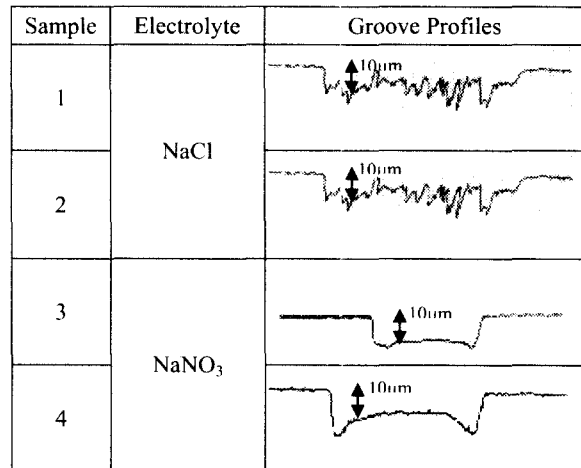


Fig. 3 Comparison of groove profiles created with 2 electrolytes (Applied DC voltage = 8V, T = 20℃)

또한 국부적인 피트 현상으로 인하여 가공되

기 전의 공작물 표면상태가 가공후보다 오히려 양호한 결과를 보이고 있다.

염화나트륨 수용액의 경우에는 약간의 부식성이 있는 동시에 전류밀도의 대소에 불구하고 거의 100%의 전류효율이 얻어지기 때문에 전극간극이 큰 부위에도 가공이 일어나고, Table 2 에서와 같이 Cl⁻ 이온은 부동태화 하기 어렵기 때문에 과도한 전해용출로 인한 국부적인 피트(pit)작용이 발생하여 높은 가공정밀도를 얻기는 힘들다.^[5]

반면에 질산나트륨 수용액의 경우에는 염화나트륨 수용액의 경우에서 보다 상당히 향상된 결과를 보이고 있다. 가공깊이가 5~10 μm이내에 존재하며 가공표면의 거칠기가 가공전의 표면과 거의 유사한 결과를 나타내고 있다. 이는 Table 2 에서와 같이 질산나트륨의 부동태화 정도가 그리 강하지도 약하지도 않아 금속표면에 적당한 부동태 피막을 형성하여 균일한 전해작용을 일으킬 뿐만 아니라 낮은 전류밀도 영역에서는 전류효율이 낮기 때문에 원하는 부위에만 전해작용을 일으키기 때문이다.

그러나 공작물 측면의 국부적인 침강을 나타내고 있음을 볼 수 있는데, 이는 전극 모서리 부위의 과도한 전류집중으로 인하여 전해작용이 활발히 진행되었기 때문이다

Table 2 Capability of changing in transpassive state

OH ⁻	ClO ₃ ⁻	CrO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	CH ₃ COO ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
← Easy						→ Hard

4.2 전극간극 및 전극의 형상에 따른 특성

Fig. 4 는 전극간극에 따른 그루브의 가공깊이를 나타낸 것이다. 5 초의 가공시간, 0.54, 0.58A/cm²의 전류밀도, 20℃의 전해액 온도가 적용되었으며, 전해액은 질산나트륨 수용액이 사용되었다. 전해액은 외부펌프에 의해 전극내부로 공급되어 공작물에 전달되고, 필터링을 통해 강제순환하는 방식이다.

대체적으로 전극간극이 근접하면 저항의 감소로 인해 전류효율이 증가하게 되고 그에 따른 활발한 전해작용으로 가공깊이가 증가하게 된다. 그

러나 전극간극이 너무 근접하면 전해액 공급이 원활히 이루어지지 않기 때문에 가공면 상태가 불균일하게 되고, 간극이 큰 경우에는 공작물과 전극 사이에 저항이 커지므로 전류가 원활히 공급되지 않아 집중적인 전해용출 현상이 방해받기 때문에 미세 홈의 정밀급 가공이 수행되지 않는다.

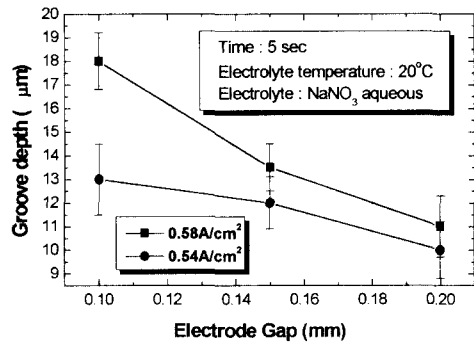
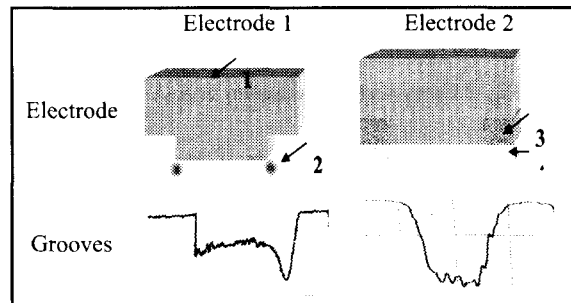


Fig. 4 Relationship between electrode gap and depth of grooves



- 1 : Electrode
- 2 : Transient current
- 3 : Embedded material
- 4 : Homogeneous current distribution

Fig. 5 Comparison between two different electrodes

전극의 불균일한 부분, 모서리 부분 등은 전류의 집중현상이 발생하므로 전극의 형상설계가 제대로 되지 않으면 원하는 가공형상이 달성되지 않게 된다. 따라서 본 실험에서는 전극의 형상을 달리한 전극을 사용하여 그 특성을 분석해 보고자 한다.

Fig. 5 는 형상이 다른 두 개의 전극, 즉 전극 1 과 전극 2 를 사용하여 미세 전해가공을 수행한 결과, 공작물의 그루브 상태를 측정한 자료이다.

일반적인 전극 1 을 사용한 경우에는 모서리 부위의 전류집중 현상으로 공작물 상에 전극 모서리 부위에 해당되는 부분이 침강한 결과를 보이는 반면에 새로운 형상의 전극 2 를 사용하여 가공한 공작물 상에는 균일한 전류분포로 인하여 직사각형상의 우수한 결과를 보이고 있다. 따라서 미세 전해가공 시 전극의 형상설계는 상당히 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4.3 펄스전해가공(PECM) 해석 모델

4.3.1 전극간극 메커니즘

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 전원 조건에 영향을 받는 각각의 파라미터에 대한 해석 후에 이를 조합하는 것이 효율적이다.

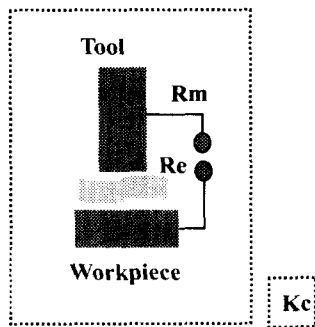


Fig. 6 Schematic diagram of combined electrolyte conductivity

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 Fig. 6 과 같이 기계적 연결부를 조합하여 이들의 저항을 모두 포함하도록 실 가공시의 전류, 전압특성을 획득하여 Ohm's law 에 적용하

면 다음과 같다.

$$\kappa_c = \frac{Si}{V} \tag{4}$$

여기서 κ_c 는 여러 기계적 요소의 저항(Rm)과 전해액의 저항(Re)을 조합한 전도도이고, i 는 전류밀도, V 는 전압, S 는 전극간극을 나타낸다.

Faraday 의 법칙에 의하여 펄스 on-time 에서의 금속제거량은 다음과 같다.^[10, 11, 12]

$$\frac{dS}{dt} = \frac{A\kappa_c(V_0 - \Delta V)}{zF\rho_a F} - f \tag{5}$$

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.

$$\int_{\tau_{on}}^{\tau_{off}} SdS = \int_{\tau_{on}}^{\tau_{off}} \frac{A\kappa_c(V_0 - \Delta V)}{zF\rho_a F} dt \tag{6}$$

$$S_1 = \sqrt{S_0^2 + 2K_v\kappa_c Vt}$$

$$K_v = \frac{A}{zF\rho_a} \tag{7}$$

K_v 는 effective volumetric electrochemical equivalent 로 정의되며, 공작물에 따라 결정되는 상수로 본 연구에서는 $3.57 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{sA}$ 이고 초기 조건은 $t = 0$ 일 때 $S = S_0$ 이다.

상기의 해석결과로 볼 때 전극간극은 적용 전압과 시간에 따라 거듭제곱근 곡선으로 비례하여 증가하게 된다.

4.3.2 미세 홈 가공깊이

Fig. 7 은 τ_{on} 상태에서의 적용 전압값의 변화에 따른 전극간극의 변화를 나타낸 것으로, 시간에 따른 전극간극의 증가량이 전해용출되는 공작물의 가공깊이가 되며, 직류전원의 공급을 위하여 τ_{off} 는 0 으로 하였다. 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 $S = 0.08\text{mm}$, $V_0 = 12\text{V}$, $t = 400\text{sec}$ 일 때, 가공깊이 $S = 0.1\text{mm}$ 정도가 됨을 알 수 있으며, 미세 전해가공에 접근하기 위해서는 가공 파라미터 τ_{on} 을 적게 해주어야 한다.

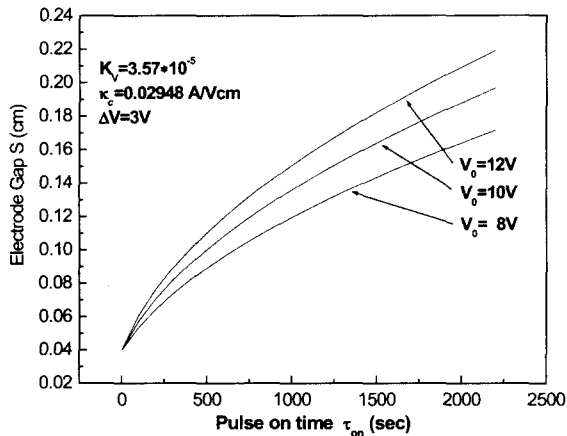


Fig. 7 Model results of gap variation with pulse duration τ_{on} and voltage V_0 for three voltages

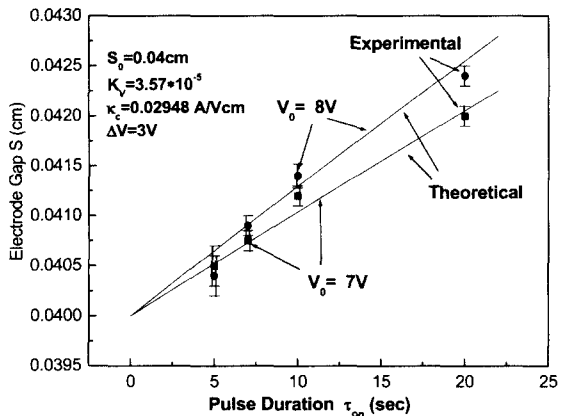


Fig. 8 Change of inter electrode gap with short pulse on-time τ_{on} and voltage V_0

Fig. 8 은 가공깊이를 마이크로 단위로 제어하기 위하여 적은 가공시간 영역에서의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로 실험결과와 상당히 일치함

을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과를 토대로 하면 $V_0 = 7\text{V}$, $t = 5\text{sec}$ 일 때 가공깊이 $S = 5.2 \mu\text{m}$, $V_0 = 7\text{V}$, $t = 10\text{sec}$ 일 때 $S = 10.4 \mu\text{m}$ 이며, 실험에 의한 결과도 각각 $S(V_0 = 7\text{V}, t = 5\text{sec}) = 5 \mu\text{m}$, $S(V_0 = 7\text{V}, t = 10\text{sec}) = 12 \mu\text{m}$ 로 되어 상당히 근사함을 보이고 있다.

4.3.3 펄스 전해가공 (PECM)

일반적으로 전해가공시, 전기화학반응이 일어날 때 발생하는 수소가스, 발열 등의 문제로 초기 전극간극을 작게 설정하고 이를 일정하게 유지시키기가 어렵다. 이를 해결하기 위해 펄스전원을 사용하여 초기 전극간극을 0.2mm 이하로 설정할 수 가능해지고 마이크로 단위의 제어가 가능해지기 시작했다.

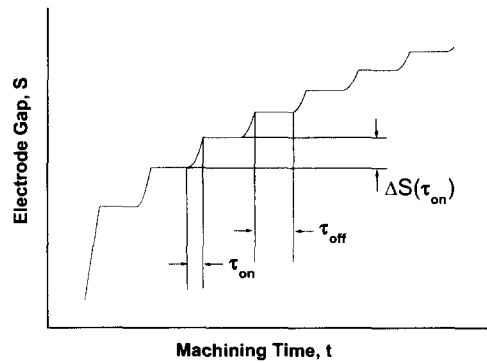


Fig. 9 PECM working cycles within short pulse periods

펄스전원을 사용한 PECM 가공해석을 위해 식 (5)를 인용하면 다음과 같다. 즉, On-time($t = k$)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.

$$S_n(\tau_{on}) = \sqrt{S_{n-1}(\tau_{on})^2 + 2K_v \kappa_c V t} \quad (8)$$

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

tk 에서의 S_k 치를 그대로 유지하게 된다. 따라서 off-time 일 때의 S_n 값은 다음과 같다.

$$S_n(\tau_{off}) = S_k(\tau_{on}) \quad (9)$$

즉, PECM 의 경우에는 Fig. 9 와 같이 on-time 일 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.

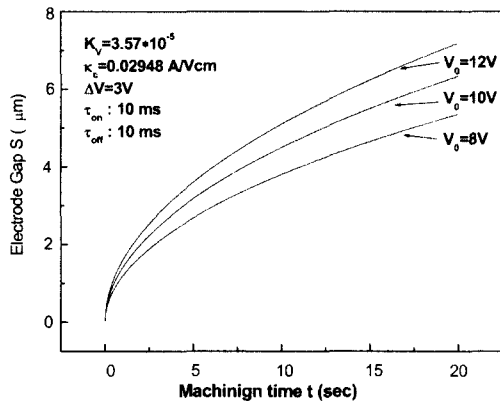


Fig. 10 Model results of gap variation with pulse duration

Fig. 10 은 초기 간극을 제로로 두고 입력 전압 값은 8V 로 하여 PECM 의 가공시간에 따른 전극간극의 변화를 나타낸 것으로, 마이크로미터 수준의 가공깊이를 제어할 수 있음을 나타낸다. 예를 들면 $t = 10\text{sec}$ 일 때 $V_0 = 8\text{V}$, $V_0 = 10\text{V}$, $V_0 = 12\text{V}$ 에 대해서 전극간극의 증가량 S 는 각각 $3.8 \mu\text{m}$, $4.5 \mu\text{m}$, $5.1 \mu\text{m}$ 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 factor 를 적용하는데 이는 다음과 같이 정의된다.

$$DutyFactor = \frac{\tau_{on}}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (10)$$

그러나 펄스 전해가공에 있어서 duty factor 에 따라 가공특성이 결정되는 것으로 인식될 수 있으나 실제 가공 시에는 동일한 duty factor 를 가지는 전원조건인데도 불구하고 서로 다른 결과를 보임을 알 수 있다. 따라서 이를 명확히 하기 위하여 Fig. 11 과 같이 duty factor 에 따라 전극간극이 변화하는 경향을 나타내었다.

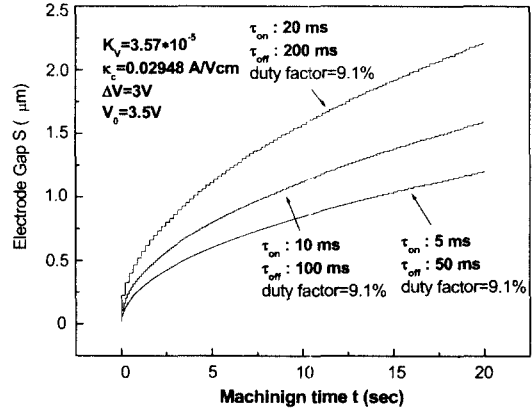


Fig. 11 Model results of gap variation with duty factor

Fig. 11 의 결과에 의하면 같은 duty factor 를 가지는 전원조건인데도 불구하고 on, off-time 수치에 따라 서로 다른 결과를 보이고 있다. 즉, 동일한 duty factor (=9.1%)를 가짐에도 불구하고 각각의 조건에 따라 $t = 10\text{sec}$ 일 때 전극간극의 증가량 S 가 $1.6 \mu\text{m}$, $1.1 \mu\text{m}$, $0.8 \mu\text{m}$ 로 서로 상이한 결과를 보이고 있다.

따라서 펄스전원을 적용한 전해가공에 있어서는 duty factor 가 전원인자가 아니라 실제 적용하는 on, off-time 의 수치가 가공성을 분별하는 인자로 고려되어야 하며, on-time 의 증가에 따라 전해용출량이 급격히 증가하므로 정밀한 제어를 위해서는 off time 의 수치를 적절히 조절하는 것이 더욱 효율적이다.

5. 결론

전해가공에 있어서 여러 전해 파라미터를 이용한 전극간극의 메커니즘을 적용하고, 이를 이용한 마이크로 전해가공의 가공특성을 해석한 결과

다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전해가공 표면의 거칠기 정도를 관찰한 결과 질산나트륨 수용액이 염화나트륨 수용액보다 양호한 결과를 나타내었고, 미세 홈의 마이크로 급 정밀가공을 가능하게 하기 위하여 안정된 전류분포를 가지는 전극형상을 구현하였다.
2. 전극간극의 메커니즘을 적용한 마이크로 전해가공의 가공깊이를 예측하는 시뮬레이션을 구축하기 위하여, 전해액의 전기 전도도를 구현함에 있어서 실제 가공조건에 가장 근접하기 위해 여러 기계적 연결부를 조합하여 이들의 저항을 모두 포함하도록 가공시의 전류, 전압 특성을 갖는 κc 를 적용하여 가공깊이를 예측하였다.
3. 펄스전원을 적용한 전해가공에서는 duty factor 가 전원인자가 아니라 실제 적용하는 on, off-time 의 수치가 가공성을 분별하는 인자로 고려되어야 하며, on-time 의 증가에 따라 전해용출량이 급격히 증가하므로 정밀한 제어를 위해서는 off time 의 수치를 적절히 조절하는 것이 더욱 효율적이다.

참고문헌

1. Datta, M., "Applications of Electrochemical Microfabrication: An Introduction," IBM Journal of Research & Development, Vol. 42, Issue 5, pp. 563, 1998.
2. McGeough, J. A., "Principles of Electro-chemical Machining," Chapman Hall, London, 1974.
3. Patterson, A.G., M. A. and A. M. I. E. E., "The Evolution and Design of An Aerodynamic Gas Bearing," Gas Bearing Symposium, March-April, Paper ①, 1965.
4. Chikamori, K., "Possibilities of Electro-chemical Micromachining," International Journal of JSPE, Vol. 32, pp. 37-38, 1998.
5. De Silva, A. K. M. and McGeough, J. A., "Process Monitoring of Electrochemical Micromachining," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 76, pp. 165-169, 1998.
6. 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.
7. Rolf Schuster, Viola Kirchner, "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98~101, 2000.
8. B. Wei, K. P. Rajurkar, S. Talpallikar, "Identification of Inter Electrode Gap Sizes in Pulse Electrochemical Machining," The Electrochemical society, Vol. 144, No. 11, pp. 3913~3918, 1997.
9. E. S. Lee, J. W. Park and Y. H. Moon, "Development of Ultra Clean Machining Technology with Electrolytic Polishing Process," International Journal of KSPE, Vol. 2, No. 1, pp. 18~25, 2001.
10. K. P. Rajurkar, B. Wei, J. Kozak, "Modeling and Monitoring Inter Electrode Gap in Pulse Electrochemical Machining," CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 177-180, 1996.
11. K. P. Rajurkar, D. Zhu, B. Wei, "Minimization of Machining Allowance in Electrochemical Machining," CIRP, Vol. 47, No. 1, pp. 165~168, 1998.
12. K. P. Rajurkar, B. Wei, J. Kozak, "Study of Pulse Electrochemical Machining Characteristics," CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 231~234, 1993.