

펄스 전기화학 복합가공기술을 적용한 미세 그루브 가공

이은상#, 박정우*, 문영훈**

Machining of Micro Grooves using Hybrid Electrochemical Processes with Voltage Pulses

Eun-Sang Lee[#], Jeong-Woo Park^{*} and Young-Hoon Moon^{**}

ABSTRACT

Pulse electrochemical machining process with high or low current density may produce a non-lustrous surface on workpiece surface. The usual polishing process to remove a black layer from the surface has been hand polish the part. But the milli-to-micro meter scale structure formed by the electrochemical machining process may be destroyed while polishing process. The application of ultra short voltage pulses based on the analysis of electrical double layer charging process allows high resolution electrochemical machining and polishing. This technique was based on the specific polarization resistance from the comparison of ideal and experimental potential variation during short voltage pulses.

Key Words : Pulse electrochemical machining/polishing(펄스 전기화학 가공/연마), Electrical double layer(전기 이중층), Specific polarization resistance(편극비저항)

기호설명

- τ = time constant
- ρ_p = specific polarization resistance
- c_{DL} = electrical double layer capacity
- E = electrode potential

1. 서론

전해가공기술(Electrochemical Machining, ECM)은 전기화학 반응을 이용하여 기계적 가공효과를 일으키는 특수가공 기술이다. 전극에 대치된 국부적 부위의 집중적인 금속용출을 이용하여 원하는 표

면형상을 도출하는 것으로 고장력강, 내열재, 초경합금 등의 가공에 사용되는 방법이다. 공작물을 산화전극(anode)으로 하고 환원전극(cathode)과 함께 전해액 속에 넣어 통전하면 전기화학 작용에 의하여 대전부분이 전해 제거되는 원리이다. 마이크로 전해가공 기술(Electrochemical Micromachining, EMM)은 기존의 전해가공 기술을 응용한 가공법으로 전해가공의 본질적인 용도인 절단, 디버링, 구멍뚫기, 형조각 등의 벌크형 가공을 탈피하여 미세 형상의 가공을 달성하는 기술이다.

전해가공기술을 이용하여 경면을 달성 시키고자 한 여러 연구에 의하면 높은 전류밀도를 사용한 전해가공에 있어서는 가공품질이 경면에 가까

접수일: 2003 년 1 월 16 일; 게재승인일: 2003 년 7 월 11 일
 # 교신저자: 인하대학교 기계공학과
 E-mail: leees@inha.ac.kr, Tel: (032) 860-7308
 * 부산대학교 ERC, 대학원
 ** 부산대학교 기계공학과, ERC/NSDM

운 결과를 나타내었으나 낮은 전류밀도를 사용하면 표면에 검은 부식층이 잔재하게 되는 결과를 초래하게 되었다. 그러나 낮은 전류밀도에서는 표면의 치수정확도가 현저히 증가하고, 또한 펄스 전원을 적용하였을 경우에는 20 μ m 깊이 이하의 미세 그루브에서도 정밀한 치수조절이 가능하며 표면의 검은 부식층이 다소 제거됨을 알 수 있었다.^{1, 2} 즉, 펄스 전해가공기술(Pulse Electrochemical Machining, PECM)을 적용하면 정밀한 표면치수 제어와 부식층의 제거가 동시에 이루어져 효율성이 증대하고 정밀도가 증대함을 알 수 있다. 그러나 더욱 정밀한 부품에 있어서는 표면의 치수 정밀도 뿐만 아니라 표면 거칠기 또한 중요한 파라미터가 되므로 이의 개선이 요구되고 있다. 현재 대두되고 있는 대안으로는 브러쉬(brush), 연마제 등을 사용한 기계적 연마방법과 전기화학 연마법(Electrolytic Polishing, ECP)이 있는데, 전자의 경우에는 효율성의 문제와 미세 그루브의 요(凹)부분 연마가 난해하고, 후자의 경우에는 과도한 금속제거에 의한 미세 형상의 보존이 난해하다는 단점이 있으나 전해 파라미터의 조절을 통해 이를 해소할 수 있는 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 고주파 펄스전원을 사용한 마이크로 전해가공기법을 통하여 미세 그루브의 치수정밀도를 향상시키고, 이를 구현하기 위하여 이론적, 실험적 결과를 비교, 고찰한다. 또한 전기화학 가공에 의하여 생성된 그루브의 연마에 있어서 선행연구에서 밝혀진 전기화학 연마의 평활도, 내식성, 광택도 증가의 여러 이점과 본 연구에서 소개하는 펄스전원을 복합하여 초기 그루브 형상을 최대한 유지하도록 펄스전기화학 폴리싱(Pulse Electrochemical Polishing, PECP)기법의 펄스 조절을 통한 미세경면그루브를 달성하고자 한다.^{3, 4}

2. 전해질-전극계면 간의 등가 전기회로 해석

본 연구는 전극쪽에 있는 전자전하(electronic charge)와 용액쪽에 있는 이온전하(ionic charge)가 서로 밀접하게 대치하고 있는 전기 이중층(electrical double layer)의 충전현상에 기초를 둔다. 산화전극(anode)과 환원전극(cathode)의 두 전극이 용액 속에 근접하여 대치된 상태에서 전원을 인가하면 전극쪽에 모이는 전하는 중성금속에 비하여 전자의 과잉(-전하), 또는 전자의 부족(+전하)으로 생기는

전자 전하이므로, 용액쪽에 모이는 전하는 용액의 얇은 층에 양이온과 음이온 중 어느 한 쪽이 많아서 생기는 이온 전하이므로, 실제로 전극과 용액 사이에 짧은 주기의 펄스 전압이 인가되면 퍼텐셜의 변화가 생기며 이로 인하여 경계면에 모이는 전기량은 전위차에 따라 변하는 커패시턴스(capacitance, 축전용량)를 나타낸다. Fig. 1은 전기 이중층에 대한 Bockris-Devanathan-Müller의 모형도이다. 전극 표면에서 외부 Helmholtz 평면까지를 전기 이중층의 내부층 또는 조밀 전기 이중층(compact double layer, CDL)이라 하고, 그 밖의 층을 외부층 또는 확산 전기 이중층(diffuse double layer, DDL)이라 한다.⁵

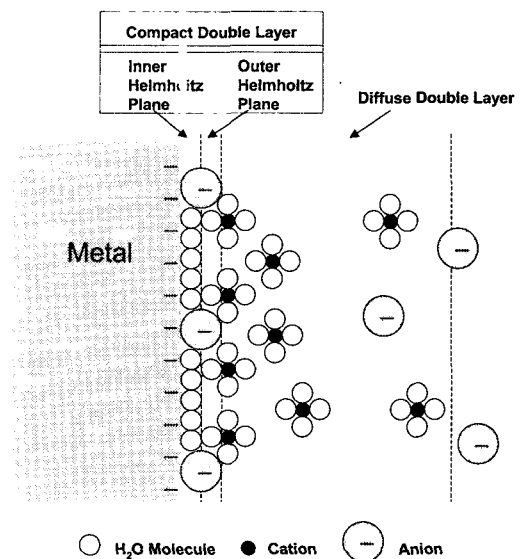


Fig. 1 The electrical double layer

축전기 모델에 의하면 시정수 τ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = RC = \rho dc_{DL} \quad (1)$$

전기 화학계에서의 시정수의 의미는 전기화학 반응계의 시간상수 즉, 반응이 얼마나 빨리 일어나는지의 척도가 된다. 식 (1)에 의하면, 비저항(ρ)은 전해액에 따라 좌우되는 상수이고 전기 이중층의 커패시턴스(c_{DL})는 조밀 이중층의 커패시턴스(c_{CDL})와 확산 이중층의 커패시턴스(c_{DDL})의 합으

로 정의되는 상수이므로 국소적인 전극간극(가공 정밀도, d)는 시정수와 비례하는 결과를 나타낸다.

밀접하게 대치된 두 전극사이의 전기 화학계는 Fig. 2 와 같이 이상적이진 않지만 전기 축전기 거동을 하는 저항과 커패시터의 복합회로로 재구성될 수 있다. Fig. 2 에 의하면 커패시터는 확산 이중층과 조밀 이중층의 두 커패시터의 직렬연결로 정의되는데, 각기 다른 커패시턴스를 가지는 두 커패시터의 직렬연결의 합은 작은 커패시턴스 값에 근사하므로 용액의 종류에 상관없이 $10\sim 20\mu F/cm^2$ 의 값을 가진다.⁶ 또한 저항은 축전기 거동을 하는 커패시터와 병렬 연결된 편극저항(R_p)과 이들 R_p - C_{DL} 시스템 과 직렬 연결된 용액저항(R_s)의 두 가지로 분류된다. 편극저항이 병렬연결되는 이유는 직류전원이 전기 화학계에 공급되어 반응이 일어나기 위해서는 직렬방식의 연결은 적절하지 못하기 때문이다.

그러나 앞서 언급된 식 (1)과 같이 시정수 해석 시에 적용되는 저항값은 편극저항인데, 일반적으로 전기전도도 측정기기에서 측정된 저항값은 단순히 용액의 저항값만을 나타내는 것이 아니고 커패시턴스를 포함하는 복합적 임피던스를 나타낸다.

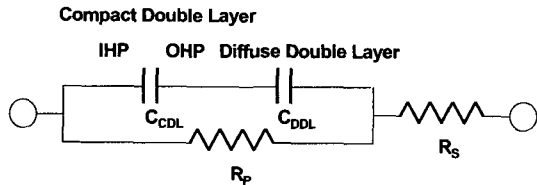


Fig. 2 Electrochemical equivalent circuit between electrode and electrolyte

따라서 전기전도도 측정기기에서의 측정값은 복합적 임피던스를 나타내기 때문에 이를 전기축전기와 관련된 전기 화학계의 해석에 필요한 편극 저항값으로 보기에는 적절하지 못하다. 그러므로 본 연구에서는 전기화학가공에 의한 미세 그루브의 전기화학연마를 행함에 있어 충전 퍼텐셜 변화 신호를 실험적으로 획득하여 이를 이론적 결과와 비교함으로써 전해액의 근사적 편극 저항값을 구현하고 이를 응용하여 펄스전원을 적용한 전기화학 가공/연마 시 적절한 펄스 파라미터를 구현하고자 한다.

3. 펄스 전기화학 가공에서의 가공정밀도 분석

3.1 실험장치

Fig. 3 은 펄스 전기화학 가공/연마 복합가공을 위한 실험장치의 개략도이다. 고주파 펄스 generator 에서 산화전극과 환원전극에 각각 전원을 공급하고, 외부에서 공급되는 전해액은 전극내부를 통해 두 전극 사이에 분사된다. 이는 산화전극과 환원전극의 대치면적이 큰 경우 전극과 공작물 사이에 원활한 전해액을 공급하여 발열과 발생가스를 제거함으로써 균일한 전해용출 작용을 일으키기 위함이다. 사용된 전해액은 이중필터를 이용한 필터링을 통하여 재공급 되도록 순환하여 사용한다. 사용된 공작물은 원형의 스테인레스 강 STS304 재질이며, 환원전극은 직경 20mm 인 원형의 황동 또는 200, 150, 75 μm 의 미세 초경전극 또는 Pt 와이어 전극으로 황동의 경우는 산화전극 대치표면에 임의형상의 패턴이 새겨진 상태이다.

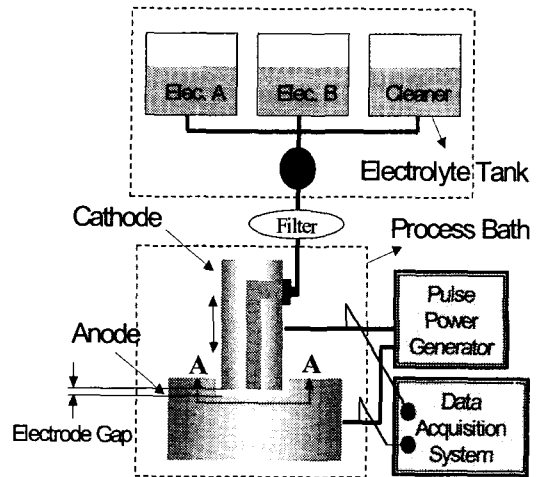


Fig. 3 Schematic diagram of combined electrochemical process setup

3.2 치수정밀도 분석

전기화학 가공에서는 반응형성의 척도가 되는 시정수보다 약간 증가된 펄스를 가하여 두 전극의 충전을 촉진시킴으로써 비로소 반응이 발생하게 된다. 이는 두 전극의 극간 거리에 충전된 전해액이 순환되지 않고 정체된 상태일 때 적용되는 것

으로 앞서 언급하였듯이 τ 는 전해액의 편극비저항, 커패시턴스 그리고 극간거리에 의존하는 변수이다. 이를 정량적으로 분석하면 Fig. 4 의 실험결과와 같다.

Fig. 4 는 각기 다른 펄스 폭에 따른 가공 정밀도 [(final width-tool width)/2-electrode distance]를 도시한 것으로 실험에 적용된 전해액은 3.5M NaNO₃ 이며 전해액의 비저항은 62.5 Ω cm, 전기 이중층 커패시턴스는 18 μ F/cm² 이다.⁶ 따라서 식 (1)에 의하여 0.1mm 의 초기 간극에서 τ 는 11.25 μ sec 이므로 약 13 μ sec 의 펄스를 인가하였다. 특히, 전극의 대치면적이 넓은 가공조건에서는 발열과 가스 발생이 전기화학 반응에 악영향을 미치기 때문에 이를 방지하기 위하여 유속 1m/sec 로 강제 순환 방식을 채택하였다.

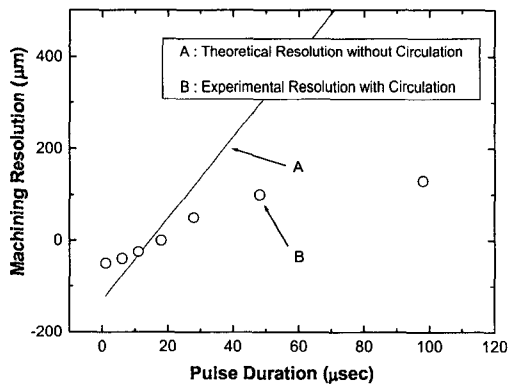


Fig. 4 Machining resolution in pulse ECM with electrolyte circulation

Rolf Schuster 와 Viola Kirchner 는 이미 전해액이 정제된 상태에서의 결과는 실험적인 데이터와 일치함을 보였는데⁷ 본 실험에서는 펄스 폭이 증가함에 따라 그 오차가 점진적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 펄스전원이 인가되어 두 극판 사이의 전해액에 전하가 충전되는 과정에 있어서 전해액에서의 충전 및 전류흐름은 이온전하의 이동으로 발생되는데, 전해액의 강제 순환에 의하여 충전된 이온의 이동이 방해받기 때문이다. 즉, Fig. 5 와 같이 가공된 산화전극의 표면을 분석하면 $\tau < 13\mu$ sec 인 조건에서는 이온의 부족 충전현상으로 인하여 오히려 환원전극의 패턴 폭(tool width) 보다 작은 패턴 폭을 나타내며 다소 뚜렷한 경계

면의 형상이 형성되었고 13μ sec $< \tau < 20\mu$ sec 인 조건에서는 Fig. 4 에서 보이듯이 패턴 폭이 거의 일치(final width-tool width ≈ 0)하며 뚜렷한 경계면을 보였다. 또한 $\tau > 20\mu$ sec 인 조건에서는 전하의 과충전으로 인하여 가공 정밀도가 악화되며 전기화학 반응이 환원전극의 패턴 폭을 벗어난 구간까지 발생하여 경계면의 형상이 다소 무디어짐을 보였다.

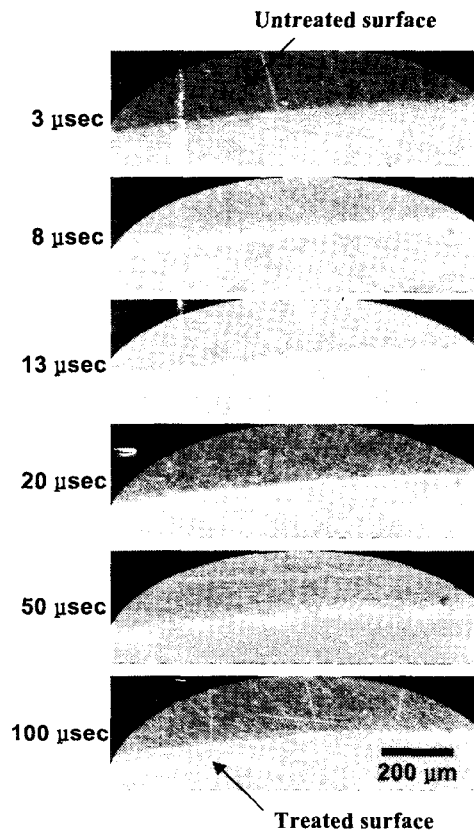


Fig. 5 Groove patterns with various pulse durations. Bright parts show electrochemically-machined grooves and dark parts show untreated metal surface. In 3.5M NaNO₃ solution with 4.0V for 1 min

Fig. 6 은 전기화학 가공을 적용하여 스테인레스강 304 표면에 Pt 와이어 전극을 사용하여 직경 200 μ m 인 분화구 형상의 미소무늬를 새기는 과정에 있어서 과충전, 적정충전, 부족충전현상을 단적으로 보여주는 사진으로, 동일한 전기화학가공 조건이라 하더라도 펄스 폭에 따라 미소형상의 가공

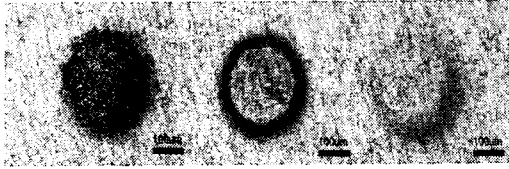


Fig. 6 200 μ m-diameter crater-shape patterns with nano duration pulse electrochemical machining process in DHF+ H₂SO₄ solution

정도에 상당한 영향이 미침을 알 수 있으므로 펄스 전기화학 프로세스에 있어서 펄스 폭의 적용이 신중히 고려되어야 함을 알 수 있다.

4. 펄스 전기화학 폴리싱

4.1 펄스전기화학 폴리싱의 전압신호분석

하나의 퍼텐셜 펄스(potential pulse)가 전극에 걸릴 때 전극과 전해질 용액 사이에는 갑자기 전위차가 달라지므로 전기 이중층에는 충전전류가 발생하게 된다. 충전전류는 전기 이중층의 커패시턴스와 전압변화속도의 곱과 같으므로 $I = CdE/dt$ 가 되며, 전위변화의 속도가 크면 그 순간 큰 전류를 나타낸다. 따라서 $t=0$ 일 때 축전기의 전하량도 0 이기 때문에 충전 및 방전시의 퍼텐셜 변화는 다음의 두 식으로 표현된다.⁸

$$E = E_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}), \text{ charging of DL} \quad (2)$$

$$E = E_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \text{ discharging of DL} \quad (3)$$

상기의 식에 의하여 여러 편극 저항의 비저항에 대한 전기 이중층에서의 순간 충전 퍼텐셜 변화는 Fig. 7 과 같이 직사각 형태의 입력 구형파 펄스형상과는 달리 표현된다.

Fig. 7 의 A, B, C, D 는 각각 편극 비저항 (ρ_p) 이 74.0, 35.0, 14.8, 3.7 일 때의 Duty Factor 50%인 주기적인 일련의 펄스변화이다. 특정 전해액이 채택된 전기 화학계의 편극 비저항과 커패시턴스는 일정한 값을 가지므로 실험적인 값과 비교하기 위하여 $t=200\mu$ sec 까지 도시하였다. 즉, A, B, C, D 에 대하여 τ 는 각각 200, 94.5, 40, 10μ sec 로 정의된다. A 의 경우, 200μ sec 의 펄스 폭을 가지는 전압

을 인가하였을 때 τ_A 와 거의 일치하게 되는데, 이 때의 전기화학 폴리싱 퍼텐셜 신호에 의하면 퍼텐셜 충전현상은 보이지만 충분한 충전현상에 도달하기까지는 펄스 시간이 부족하다는 것을 알 수 있다. 즉, 충분한 충전이 완료되기 전에 방전되는 현상이 반복되어 반응이 쉽게 일어나지 않는다는 것을 의미한다. 이는 시정수가 전기화학 반응이 얼마나 빨리 일어나느냐의 척도만 될 뿐 실제 가공조건에는 적용하기에는 불합리함을 보여주는 사례가 된다. 따라서 산화전극 표면에 전기화학 반응이 일어나기 위해서는 A, B, C 와 같이 충전이 완료되는 시간까지 $t > \tau$ 인 구간에서 펄스 폭을 인가함이 바람직하다.

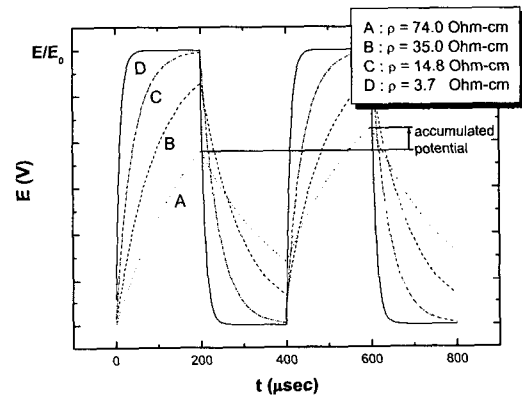


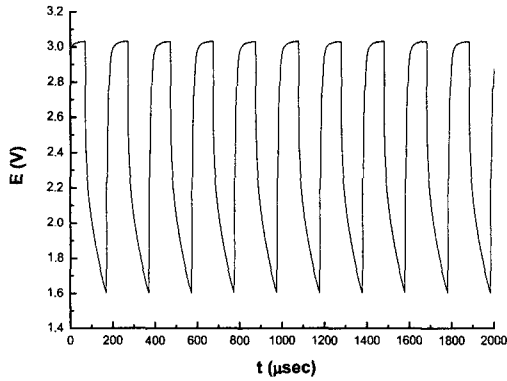
Fig. 7 Potential variation of charging and discharging of DL capacity. A, B, C and D are simulations of potential variations of pulse voltage for $\rho_p=74.0, 35.0, 14.8$ and $3.7 \Omega \text{ cm}$ respectively

Fig. 8 은 2.4M H₂SO₄, 5.9M H₃PO₄ 의 혼합 전해액⁴ 과 1cm² 의 단면적을 가지는 전극을 사용하였을 때, 실험적으로 획득한 퍼텐셜 변화를 나타낸 것으로 이상적인 충전 거동은 하지 않으나 시물레이션과 비슷한 경향을 나타내고 있다.

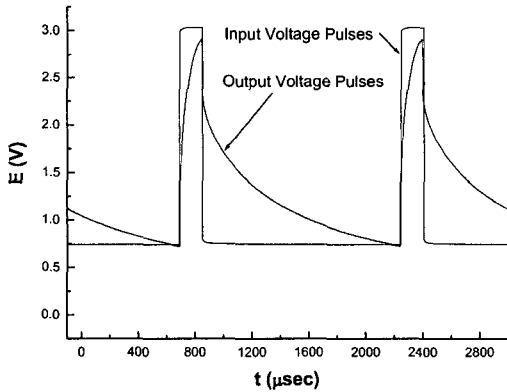
Fig. 8 (a)는 50%의 duty factor 조건에서 200μ sec 의 펄스 폭을 가지는 전압을 인가하였을 때 출력되는 퍼텐셜 변화를 나타내는 그래프로서 Fig. 7 과 비교하면 ρ_p 가 $3.7\Omega \cdot \text{cm}$ 인 것처럼 추측된다. 그러나 이 때의 시정수는 10μ sec 로 계산되는데 Fig. 7 의 D 에 의하면 충분한 충전효과가 50μ sec 근처에서 발생함을 알 수 있다.

따라서 충분한 충전현상을 고려하여 50μ sec

에서 전기화학연마를 수행하였으나 연마효과가 극히 미약하여 표면 거칠기의 개선 및 표면 평활화가 뚜렷하지 못하였다. 이는 Fig. 7 에 도시하였듯



(a)



(b)

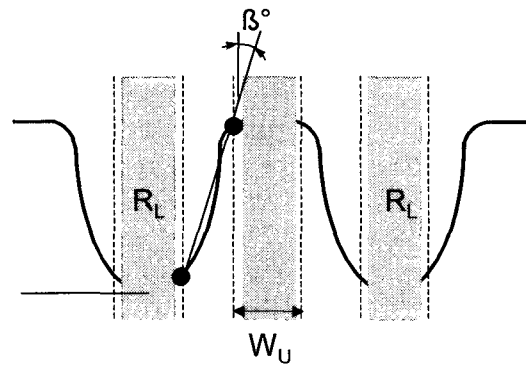
Fig. 8 Experimental potential variation for 2.4M H₂SO₄ and 5.9M H₃PO₄ electrolyte and 1cm² of electrode area. Potential signals for various pulse width of 200μ sec with 50% duty factor (a) and with 10% duty factor (b) considered significant discharge

이 충분한 방전시간의 부족에 기인한 것이다. 즉, 충분한 방전시간이 주어지지 않을 경우, Fig. 7 과 같이 펄스 off 시간에 방전되지 않은 축적 퍼텐셜 (accumulated potential)이 다음차례의 펄스신호에 첨가되어 출력 퍼텐셜 신호에서는 보다 빨리 반응이 일어나는 것처럼 보인다.

따라서 이러한 오류를 피하기 위하여 충분한 방전시간 (10% duty factor)을 적용한 상태에서 실

험하여 Fig. 8 의 (b)와 같은 신호를 획득하였다. (a)와 비교해 보면 동일한 펄스주기 임에도 불구하고 약간 상이한 충전현상을 볼 수 있어 (a)는 축적된 퍼텐셜에 의한 불명확한 신호라고 할 수 있다. 따라서 Fig. 7 과 Fig. 8 (b) 를 비교해 보면 가장 유사한 충전 거동을 하는 편극 비저항치를 근사적으로 구할 수 있다. 본 실험에서는 $\rho_p = 14.8\Omega \cdot \text{cm}$ 에서의 충전 graph 가 실험적인 결과와 가장 유사하게 나타남을 보이고 있어, 상기 전해액을 사용한 전기화학 폴리싱에서는 $\tau = 40\mu \text{ sec}$ 임을 알 수 있다. 따라서 충분한 전기화학 반응을 일으키기 위해서는 실험적 퍼텐셜 변화 graph 에 의거하여, 충전현상이 완료되기 시작하는 시기인 200μ sec 가 적당하다는 것을 알 수 있다.

4.2 펄스 전기화학 폴리싱에 의한 초기 그루브의 형상변화



W_U : width of upper area
 R_L : roughness of lower area
 β : slope angle

Fig. 9 Nomenclature of micro groove parameters

전기화학 가공에 의하여 생성된 그루브의 전기화학 폴리싱에 있어서, 초기 그루브 형상을 최대한 유지하면서 폴리싱을 수행하기 위해서는 종래의 DC 전원에 의한 폴리싱은 펄스방식에 비해 급속 용해속도 및 용해량이 급속히 증가되고 이의 미세한 조절이 어렵기 때문에 전류의 크기조절만이 하나의 파라미터로 되는 반면, 펄스전기화학 폴리싱 기법은 펄스 파라미터의 조절로 이를 극복할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 전압신호분석

을 기초로 펄스 폭의 변화에 따라 초기 그루브의 형상변화를 관찰하기 위하여 다음의 기초실험을 수행하였다. Fig. 9는 Fig. 3의 공작물 상단부위(A-A) 단면을 나타낸 것으로 추후 고찰하고자 하는 목적에 따라 미세 그루브의 형상, 치수 및 표면거칠기를 각 부위별로 정의하였다.

4.2.1 표면거칠기 변화

Fig. 10은 펄스 Duty Factor에 따라 전원계의 voltage, ampere 그리고 그루브 바닥면의 표면거칠기 변화를 나타낸 그래프이다. 입력 I_p 7A, off time 200 μ sec 이며, 총 가공시간은 180sec 이다.

대체적으로 Duty Factor 값이 높은 전원조건에서는 펄스 전해가공 후의 부식면이 제거됨과 동시에 거친표면의 평활화가 이루어져 표면상태가 양호해 짐을 알 수 있다. 이는 Duty Factor 값이 증가할수록 전기화학 반응에 소요되는 전류의 양이 증가함에 따라 단위면적 당 분포하는 전류밀도가 높아지기 때문이다.

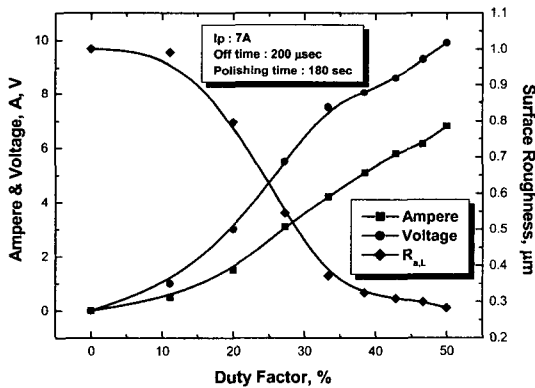


Fig. 10 Relationship between duty factor and roughness of groove surface (R_L)

4.2.2 Slope Angle 변화

Fig. 11은 전해가공 처리후의 경사각, β 를 미리 측정한 상태에서 펄스 전해연마처리 후 측정된 경사각의 각도변화를 나타낸 것으로 30% 이상의 Duty Factor 영역에서 급속히 각도가 증가하는 경향을 나타내었다. 50%의 Duty Factor 펄스조건을 기준으로 분석해보면 전체적으로 초기상태보다 약 4-5° 증가하였으며 이는 약 28-30%의 경사각 증가율을 나타내고 있어, 경사각 관점에서의 초기의

미세 그루브 형상이 약 70%이상 유지되고 있음을 알 수 있다.

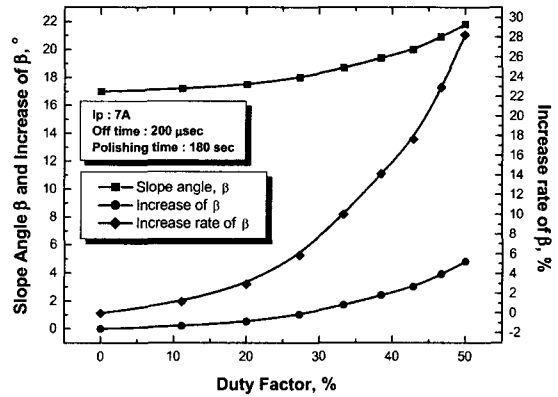


Fig. 11 Relationship between duty factor and increase of slope angle (β)

4.2.3 Groove Width 변화

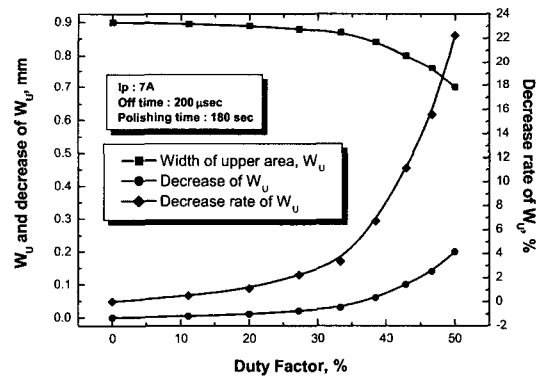


Fig. 12 Relationship between duty factor and decrease of width of upper area (W_U)

Fig. 12는 전해가공 처리후의 그루브 상단면 폭, W_U 를 미리 측정한 상태에서 펄스 전해연마처리 후 측정된 그루브 상단면 폭의 길이변화를 나타낸 것으로 35% 이상의 Duty Factor 영역에서 급속히 폭의 길이가 감소하는 경향을 나타내었다. 50%의 Duty Factor 펄스조건을 기준으로 분석해보면 전체적으로 초기상태보다 약 0.2mm 증가하였으며 이는 약 22-23%의 그루브 상단면 폭 감소율을 나타내고 있어, 상기의 관점에서의 초기의 미세

그루브 형상이 약 77%이상 유지되고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 11, 12, 13의 결과를 검토해보면 폴리싱 효과와 초기형상 유지는 펄스 폭에 따라 서로 상반된 결과를 보이고 있으므로 그루브의 형상을 유지하면서 폴리싱 효과를 나타내는 적절한 펄스조건, 즉 펄스 폭 및 Duty Factor를 선택할 수 있음을 알 수 있다.

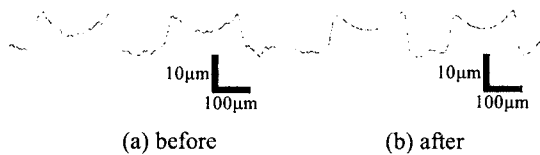


Fig. 13 Comparison of grooves before and after PECP

Fig. 13은 전기화학가공에 의한 미세 그루브 (a)와 이를 펄스 전기화학 연마한 미세 그루브 (b)의 표면 프로파일이다. 전기화학 가공에 의하여 생성된 거친 그루브 표면이 연마에 의하여 평활화가 진행되어 부드러운 표면 프로파일을 보여주고 있으며 초기의 그루브 형상을 잘 보존하면서 폴리싱 효과가 발생하였음을 알 수 있다.

5. 결론

펄스 전원을 적용한 전기화학 프로세스에 의하여 가공정밀도를 분석한 결과 펄스 폭이 증가함에 따라 치수정밀도가 감소함을 보였으며 적절한 펄스구간을 선택하기 위하여 미소 패턴의 경계를 관찰한 결과 3.5M NaNO₃ 용액에서는 경계면이 뚜렷이 나타나는 펄스 폭이 13-20µ sec 구간에 존재함을 규명하였다.

미세 그루브의 전기화학 연마에 있어서는 편극 저항치를 구함에 있어, 전기 이중층의 충전현상을 직접적으로 도시하는 이론적, 실험적 퍼텐셜 변화를 규명하여 이를 비교해석하는 새로운 방법을 제시하였다. 실험적인 데이터의 해석에 있어서 축적된 퍼텐셜에 의한 불명확한 신호의 존재를 확인하고 이를 보완하기 위하여 충분한 방전시간을 가지는 실험적 신호를 이론적인 신호와 비교분석함으로써 근사적인 편극 저항치를 채택하였다. 이를 이용하여 고주파 펄스를 이용하는 전기화학 프로세스에 있어서 적절한 전기화학 반응과 정밀

도를 한층 증가시키는 펄스 시간을 정의할 수 있었다. 2.4M H₂SO₄ 과 5.9M H₃PO₄의 혼합 전해액을 적용한 본 실험에서는 ρ_p=14.8Ω·cm에서의 충전방전 graph가 실험적인 결과와 가장 유사하게 나타남을 보이고 있었으며, 시정수 τ=40µ sec 임을 계산에 의하여 확인할 수 있었다. 따라서 충분한 전기화학 반응을 일으키기 위해서는 실험적 퍼텐셜 변화 그래프에 의거하여, 충전현상이 완료되기 시작하는 시기인 200µ sec 이상의 펄스를 인가함이 적당하다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구의 일부는 인하대학교 교내연구비의 지원에 의한 것 입니다.

참고문헌

1. Park, J. W., Lee, E. S. and Moon, Y. H., "A Study on the Electrochemical Micro-machining for Fabrication of Micro Grooves," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 4, pp. 101-108, 2002.
2. Park, J. W., Lee, E. S. and Moon, Y. H., "Development of Electrochemical Micro Machining for Air-Lubricated Hydrodynamic Bearings," Micro-system Technologies, Vol. 9, pp. 61-66, 2002.
3. Song, J. B., Lee, E. S. and Park, J. W., "A Study on the Machining Characteristics of Electropolishing for Stainless Steel," J. of the KSME, Vol. 23, No. 2, pp. 279-286, 1999.
4. Lee, E. S., Park J. W. and Moon, Y. H., "Development of Ultra Clean Machining Technology with Electrolytic Polishing Process," International Journal of the KSPE, Vol. 2, No. 1, pp. 18-25, 2001.
5. McGeough, J. A., Principles of Electrochemical Machining, Chapman Hall, London, 1974.
6. Delahay, P., Electrical Double Layer and Electrode Kinetics, Wiley, Part 1, 1965.
7. Schuster, R., Kirchner, V., "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
8. Giorgio Rizzoni, Principles and Applications of Electrical Engineering, 2nd ed., IRWIN, 1996.