

미세 펄스전원을 이용한 스테인레스강 300 계열의 전기화학연마

이동활* · 박정우* · 문영훈**

(2003 년 5 월 15 일 접수)

Study on Electrochemical Polishing for Stainless Steel 300 Series using Micro Pulse Current

D. H. Lee, J. W. Park and Y. H. Moon

Abstract

Electrolytic polishing is the anodic dissolution process in the transpassive state. It removes non-metallic inclusions and improves mechanical and corrosion resistance of stainless steel. Electrolytic polishing is normally used to remove a very thin layer of material from the surface of a metal object. An electrolyte of phosphoric acid 50% in vol., sulfuric acid 20% in vol. and distilled water 30% in vol. has been used in this study. In the low current density region, there can be found plateau region and material removal process and leveling process occur successively. In this study, an electrochemical polishing process using pulse current is adopted as a new electrochemical polishing process. In electrochemical machining processes, it has been found that pulse electrochemical processes provide an attractive alternative to the electrochemical processes using continuous current. Hence, this study will discuss the electrochemical polishing processes in low current density region and pulse electrochemical polishing.

Key Words : Electrochemical Polishing (ECP), Anodic Dissolution, Current Density, Electrolyte, , Leveling Process
Material Removal Process, Pulse Electrochemical Polishing (PECP)

1. 서 론

최근 반도체 산업 등 청정도를 요구하는 산업의 발달로 재료의 정밀도와 청정도가 동시에 요구되어 지며, 이를 달성하기 위해서 기존의 공구와 공작물이 접촉하는 방식의 가공법에서 탈피한 새로운 비접촉 연마방식인 전기화학연마(Electrochemical Polishing)가 필요하게 되었다. 기존의 기계적 가공방법으로는 공작물 표면에 미소한 가공흔적이 남아있어 근본적으로 청정한 표면을 얻을

수 없으며, 전기화학연마는 반도체 제조장비, 식품위생기기, 의료기기, 초순수 제조기, 고순도가스 용기, 정밀금형 및 원자력 기기등 표면의 정밀도와 청정도를 함께 요구하는 다양한 산업분야에 응용되고 있다.⁽¹⁻²⁾

전기화학관련기술을 이용하여 경면을 달성 시키고자 한 여러 연구에 의하면 높은 전류 밀도를 사용한 전기화학가공(Electrochemical Machining)에 있어서는 가공품질이 경면에 가까운 결과를 나타내었으나 낮은 전류밀도를 사용하면 표면에 검은

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 정밀기계공학과 / 정밀정형 및 금형가공 연구센터

부식층이 잔재하게 되는 결과를 초래하게 되었다. 그러나 낮은 전류밀도에서는 금속제거량이 미세하기 때문에 전원부의 적절한 조절로 연마 효과를 발생시킬 수 있는 가능성이 있다.

즉, 펄스 전기화학기술을 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 이를 해소하기 위한 대안의 강구가 시급하다. 현재 대두되고 있는 대안으로는 브러쉬(brush), 연마제 등을 사용한 기계적 연마방법과 전기 화학 연마법이 있는데, 전자의 경우에는 효율성의 문제와 표면의 균일한 연마가 난해하고, 후자의 경우에는 과도한 금속제거에 의한 기존형상의 보존이 난해하다는 단점이 있으나 전해 파라미터의 조절을 통해 이를 해소할 수 있는 가능성이 있다.

따라서, 본 연구에서는 전기 화학연마의 평활도, 내식성, 광택도 증가의 여러 잇점과(3-4) 선행연구에서 밝혀진 펄스 전원을 이용한 가공에서(5) 그루브의 형상을 최대한 보존하는 잇점을 복합하여 저전류 영역에서의 전기화학 연마법의 효과를 입증하고 직류 펄스전원을 도입한 펄스 전기화학연마 기술개발을 위한 기초적 연구수행을 달성함이 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

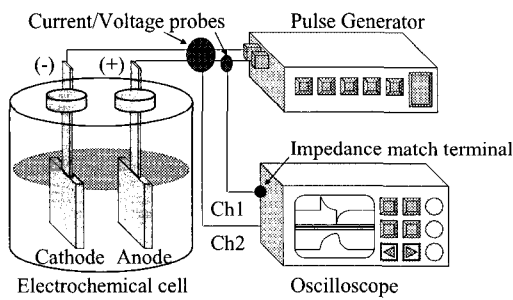


Fig. 1 Schematic diagram of electrochemical polishing

Fig. 1 은 펄스 전기화학연마를 위한 실험장치의 개략도로서 고주파 펄스 generator 에서 산화전극과 환원전극에 각각 전원을 공급하고, 전해액은 인산, 황산 및 증류수의 혼합액이다. 사용된 공작

물은 스테인레스 강 STS316L 및 STS304 재질이며, 환원전극은 판형의 황동 또는 인청동을 사용하였다.

실험에 사용한 펄스 generator 는 최소 10ns 의 펄스폭, 최대 32V p-p(into open circuit)을 가지는 가변형 50MHz 이며, 직류 전원공급기는 50V, 10A, 500W 급 정류기이다. 고속 신호분석은 200MHz (500MS/s sampling rate) 신호분석기기를 사용하였고 고주파 전류분석을 위하여 50 옴, 최대 36A, 1.2kHz - 200MHz 급 current probe 를 적용하였다.

Table 1 Experimental setup

Power supply	50V~10A, DC32V p-p, 50MHz,Pulse
Workpiece(anode)	STS 316, 304
Electrolyte	Aqueous EP Elec.
Tool electrode(cathode)	Copper
Surface roughness tester	Taylor Hobson Form Talysurf Series 2
Surface measurement	CCD Camera

3. 실험결과 및 고찰

3.1 저전류 밀도영역에서의 전기화학연마

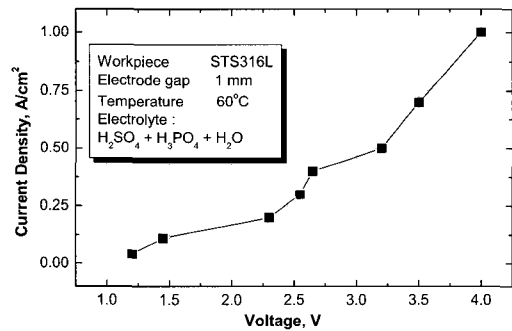


Fig. 2 Low current density voltage curve of 316L stainless steel

Fig. 2 는 STS 316L 강 의 전기화학연마 결과 얻어진 전압전류밀도의 관계를 나타낸 곡선이다. 적용한 전류밀도의 범위는 0.04~1A/cm² 이며, 전극 간극은 1mm, 전해액은 인산(H₃PO₄) 50%, 황산(H₂SO₄) 20%, 증류수(H₂O) 30%의 혼합용액, 전해액

온도는 60°C, 그리고 가공시간은 500sec 이다.

연마전 공작물의 표면 거칠기는 Ra 0.3 μm, Rmax 2.0 μm이다. 전체적으로 전압의 증가에 따라 전류밀도가 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 전류밀도가 0.04 ~ 0.2A/cm²의 영역에서는 전압상승에 따라 완만한 전류밀도의 증가를 나타내며, 0.2~0.4A/cm²의 영역에서는 전류밀도가 급격히 상승하는 것을 보이고 있다. 특히 0.4~0.6A/cm²의 영역에서는 전압의 상승에 따라 전류밀도의 완만한 상승을 나타내며, 0.6 A/cm²이상의 구간에서는 다시 급속한 전류밀도의 상승곡선을 나타내고 있다. Fig. 2의 결과로는 정확한 전기화학연마 구간(plateau 구간)을 알 수 없기 때문에, 이 결과를 토대로 전기화학연마가 일어나는 구간을 검토하기 위하여 금속 제거량과 표면 거칠기, 그리고 공작물의 표면 사진을 분석하였다.

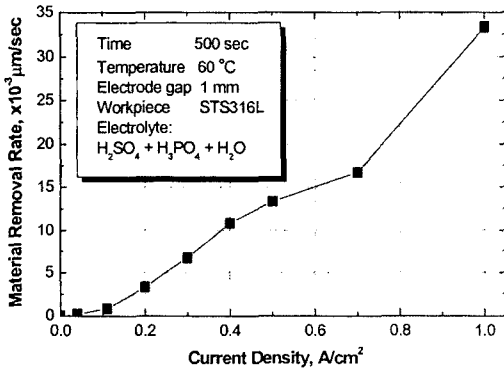


Fig. 3 Relationship between material removal rate and current density in low current density region

Fig. 3 은 전류밀도에 따른 금속 제거량의 관계를 나타낸 것으로, 금속 제거량은 단위시간당 공작물 표면으로부터의 가공된 깊이를 나타내고 있다. 전체적으로 전류밀도의 상승에 따라 약 0.2~35×10⁻³ μm/sec 까지의 금속 제거량 상승을 나타내고 있으며, 특히 전류밀도가 0.4 ~ 0.6A/cm²의 구간에서는 완만한 금속 제거량의 증가곡선을 나타내고 있다. 이는 Fig. 3 에서의 결과를 토대로 비교해 볼 때 전류밀도와 금속 제거량에 상관관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 공급전류가 증가하면 공작물 표면에서의 전류밀도가 상승하여 화학작용을 촉진시키게 되고, 이러한 전기 화학적 작용에 의해 금속의 제거율이 증가하게 된다.

Fig. 4 는 전류밀도와 공작물 표면 거칠기와의 상관관계를 나타낸 것으로 전체적으로 전류밀도의 상승에 따라 공작물 표면의 금속제거가 활발해져 표면 거칠기가 양호해 지며, 0.4~0.6A/cm²의 전류밀도 영역에서는 표면 거칠기의 양호성이 약간 정체된 경향을 보이고 있다. 전기화학연마에 의해 가공을 수행하면 약 50%정도의 표면 거칠기 (Ra) 향상을 나타내는 것으로 알려져 있는데, 이를 토대로 하면 약 0.6A/cm²부근에서 표면 거칠기가 가공전보다 50%정도 양호해진 결과를 나타내고 있기 때문에 0.4 ~ 0.6A/cm²구간이 전기화학연마가 일어나는 구간임을 알 수 있다.

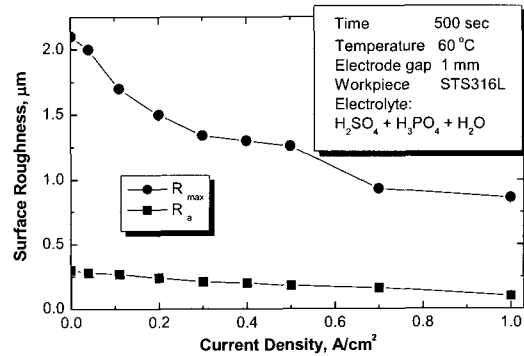


Fig. 4 Relationship between surface roughness and low current density

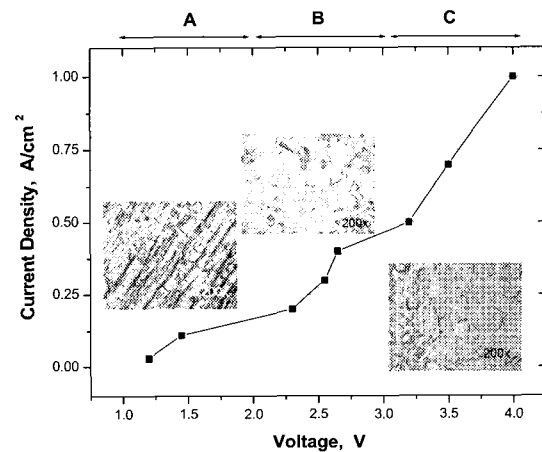


Fig. 5 Surface investigation in low current density region

연마표면의 성상을 관찰하기 위하여 각각의 영역 즉, A 구간($0.04 \sim 0.4 \text{ A/cm}^2$), B 구간($0.4 \sim 0.6 \text{ A/cm}^2$), C 구간(0.6 A/cm^2 이상)으로 나누어 Fig. 5 와 같이 나타내었다. A 구간에서는 연마가 제대로 되지 않아 기계가공 흔적이 남아있고, 가공 변질층이 잔재하여 약간의 조직만을 나타내고 있으며, B 구간에서는 기계가공 흔적이 줄어들고 조직입계가 뚜렷이 나타난다. 이는 전기화학연마 효과가 적절히 발생하여 돌출부위의 선택적 용해에 의해 표면의 평활화가 이루어지고, 표면에 잔재하는 가공 변질층의 완전한 제거가 이루어진 결과이다. C 구간에서는 B 구간과 유사한 표면품위를 가지며 높은 전류밀도 영역에서 발생하는 피팅은 관찰되지 않았다.

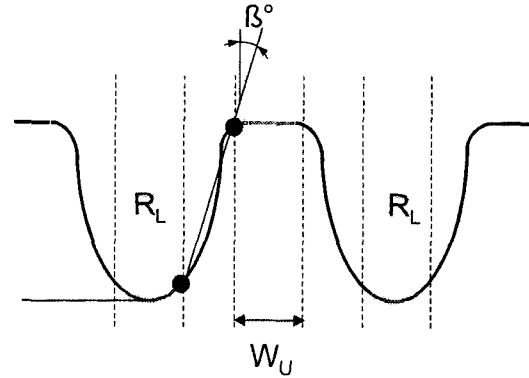
위의 여러 결과를 토대로 전류밀도는 전기화학연마에 중요한 역할을 하는 인자이며, 이의 적절한 조절로 적절한 전기화학연마 구간 즉, 전압의 상승에 따라 전류밀도의 변화가 적은 구간은 B($0.4 \sim 0.6 \text{ A/cm}^2$) 영역이고, 초기의 A 영역은 표면 거칠기와 표면사진으로 검토한 결과 적절한 전기화학연마 구간이 아님을 알 수 있다.

3.2 펄스전원을 적용한 전기화학 연마

3.2.1 펄스 전기화학 연마에 의한 미소 그루브의 형상변화

미소 그루브의 전기화학 연마에 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 된다. 따라서 DC 전원에 의한 전기화학연마에 있어서는 미소 그루브의 형상이 용해되어 형상유지가 어려운 반면, 펄스전기화학 폴리싱 기법은 펄스 파라미터의 조절로 이를 극복할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 전압신호분석을 기초로 펄스 폭의 변화에 따라 초기 그루브의 형상변화를 관찰하기 위하여 다음의 기초실험을 수행하였다. Fig. 6 은 그루브 패턴이 새겨져 있는 형상의 공작물 단면을 나타낸 것으로 추후 고찰하고자 하는 목적에 따라 미세 그루브의 형상, 치수 및 표면거칠기를 각 부위별로 정의하였다.

Fig. 7 은 펄스 duty factor 에 따라 전원계의 voltage, ampere 그리고 표면거칠기 변화를 나타낸 그래프이다. 입력 I_p 7A, off time 200 sec 이며, 총 가공시간은 180sec 이다.



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

Fig. 6 Nomenclature of micro groove parameters

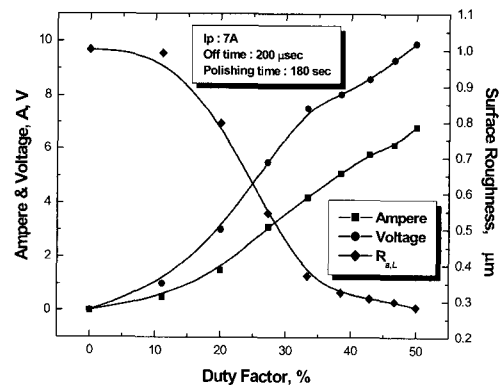


Fig. 7 Relationship between duty factor and roughness of groove surface (R_L)

대체적으로 duty factor 값이 높은 전원조건 에서 펄스 전해가공 후의 부식면이 제거됨과 동시에 거친표면의 평활화가 이루어져 표면 상태가 양호해 짐을 알 수 있다. 이는 duty factor 값이 증가할수록 전기화학 반응에 소요되는 전류의 양이 증가함에 따라 단위면적당 분포하는 전류밀도가 높아지기 때문이다. 또한 전압과 전류의 변화로 볼 때 그 표면에 소량의 산화막이 생겨 저항치가 점점 증가함을 알 수 있어, 연마효과가 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다.

Fig. 8 은 미소 그루브의 경사각, β 를 미리 측정 한 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.

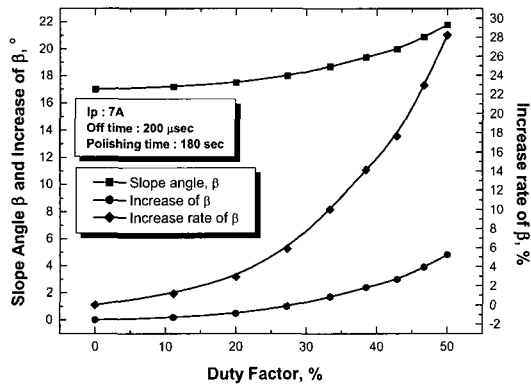


Fig. 8 Relationship between duty factor and increase of slope angle (β)

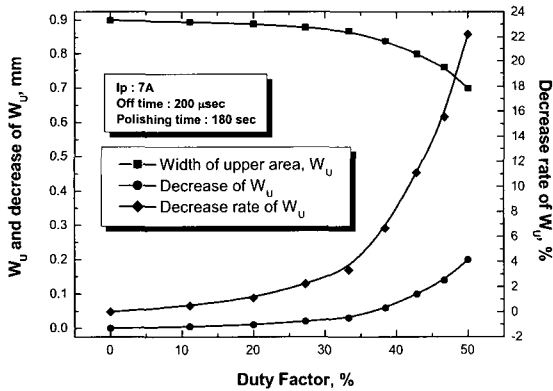


Fig. 9 Relationship between duty factor and decrease of width of upper area (W_U)

Fig. 9는 미소 그루브 상단면 폭, W_U 를 미리 측정된 상태에서 펄스 전기화학 연마처리 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. 7, 8, 9의 결과를 검토해보면 연마 효과와 초기형상 유지는 펄스 폭에 따라 서로 상반된 결과를 보이고 있으므로 그루브의 형상을 유지 하면서 폴리싱 효과를 나타내는 적절한 펄스 조건, 즉 펄스 폭 및 Duty Factor 를 선택할 수 있음을 알 수 있다.

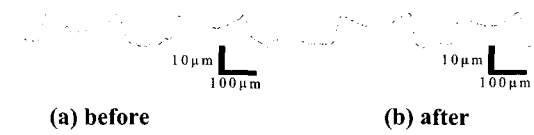


Fig. 10 Comparison of groove surface before and after PECP

Fig. 10은 초기 미세 그루브의 형상 (a)와 이를 펄스 전기화학 연마한 미세 그루브 (b)의 표면 프로파일이다. 전기화학 연마에 의하여 그루브 최표면에 잔재하는 거친 부분이 전해용출되어 거칠기가 향상되었음을 보여주고 있으며, 초기형상의 그루브에 대하여 깊이방향으로 1 μ m 이하의 극미소량의 전해용출이 발생함을 알 수 있다. 따라서 초기의 그루브 형상을 잘 보존하면서 폴리싱 효과가 발생하였음을 알 수 있다.

3.2.2. 펄스 전기화학 연마의 펄스 신호 변화

Fig. 11은 전기화학 연마시 획득한 펄스전압 신호의 실험적인 데이터이다. 펄스 제네레이터에서의 펄스입력은 구형파의 형상이었으나 출력 펄스 신호의 형상은 시정수를 가지는 약간 변형이 된 펄스신호임을 확인할 수 있었다.⁽⁶⁻⁷⁾ 또한 Fig. 11에 의하면 전류신호의 형상에서도 구형파의 입력 펄스신호와와는 달리 변형된 형상임을 확인할 수 있었다. 이는 종래의 직류전원을 사용하는 전기화학 연마법과는 달리 펄스 전기화학 연마에 있어서 새로운 펄스파라미터의 정의와 분석이 필요함을 시사하는 결과이다. 따라서 추후 연구에서는 본 신호의 분석 및 실험결과와의 상호고찰에 관한 연구를 진행하여 펄스 전기화학 연마법의 신기법에 있어서 그 파라미터의 정량적 정의에 대한 연구가 이루어질 예정이다.

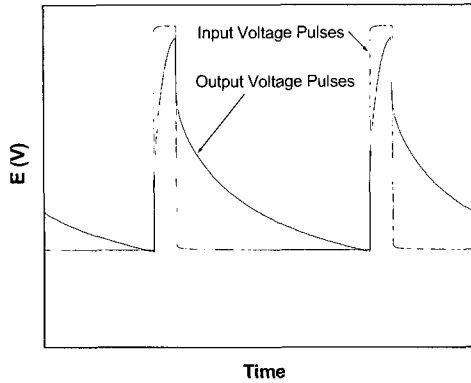


Fig. 11 Experimental potential variation

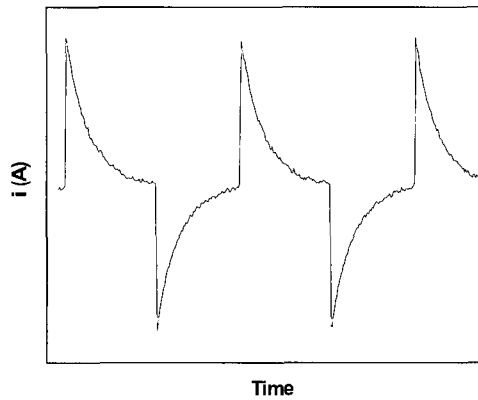


Fig. 12 Experimental current variation

4. 결론

스테인레스 강의 전기화학 연마에 있어서 미세 펄스전원을 적용하기 위하여 저 전류밀도에서의 기초 데이터를 획득함과 동시에 이를 기초로 펄스 전기 화학 연마를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스테인레스 강의 전기화학연마시 전류밀도는 중요한 인자가 되며 전류밀도, 표면 거칠기, 금속 제거량 및 표면사진으로 분석해 볼 때 낮은 전류밀도 영역에서는 $0.4 \sim 0.6A/cm^2$ 구간에서 전

기화학 연마효과가 발생함을 알 수 있어 저 전류치를 사용하는 펄스전원에서의 연마효과를 기대할 수 있었다.

(2) 펄스 전원의 펄스파라미터를 점진적으로 변화시키면서 실험을 수행한 결과 Duty factor 30% 이상의 조건에서 연마효과가 발생하기 시작 하였다. 또한 그루브의 경사각 및 상단면 변화 량을 측정된 결과 각각 초기형상의 70%, 77% 이상을 유지함을 알 수 있어, 펄스 전원을 적용 하면 미소량의 전해 용출량으로도 전기화학 연마 효과가 발생함을 알 수 있어 펄스 전기화학 연마 에 있어서는 펄스 폭의 적절한 선정이 또하나의 파라미터가 됨을 알 수 있다.

(3) 전기화학 연마시 획득한 펄스전압 신호의 실험적인 데이터를 분석하면 축전기 형태의 시정수를 가지고 충방전 현상을 보이는 펄스 신호임을 확인할 수 있어 새로운 펄스 파라미터의 정의와 분석방법이 있을 가능성을 시사하였다.

참 고 문 헌

- (1) J. A. McGeough, 1974, "Principles of Electrochemical Machining", Chapman Hall, London.
- (2) Davis R. L., 1995, "An Electropolishing Primer", Products Finishing, pp. 68~71.
- (3) 송지복, 이은상, 박정우, 1999, "스테인레스 강의 전해연마 가공특성에 관한 연구," 대한기계학회지, 제 23 권, 제 2 호, pp. 279~286.
- (4) E. S. Lee, J. W. Park and Y. H. Moon, 2001, "Development of Ultra Clean Machining Technology with Electrolytic Polishing Process," International Journal of KSPE, Vol. 2, No. 1, pp. 18~25.
- (5) J. W. Park, E. S. Lee, and Y. H. Moon, 2002, "Development of Electrochemical Micro Machining for Air-Lubricated Hydrodynamic Bearings," Microsystem Technologies, Vol. 9, pp. 61~66.
- (6) R. Schuster, V. Kirchner, 2000, "Electrochemical Micromachining," Science, Vol. 289, pp. 98~101.
- (7) Giorgio Rizzoni, 1996, "Principles and Applications of Electrical Engineering," 2nd ed., IRWIN.