

스테인리스강의 표면 결점 개선을 위한 진동 전기화학 폴리싱

김옥수^a, 박정우^{b*}

Vibration Electrochemical Polishing (VECP) for Improved Surface Defects of Stainless Steel

Uk Su Kim^a, Jeong Woo Park^{b*}^a Department of advanced parts and materials engineering, Chosun university, Republic of Korea^b Department of mechanical design engineering, Chosun university, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	24	May	2013
Revised	28	August	2013
Accepted	8	October	2013

Keywords:

Vibration Electrochemical Polishing
 Ultrasonic vibration
 Electrolyte
 Electrochemical machining
 STS 316L

ABSTRACT

This paper describes a novel hybrid surface polishing process combining non-traditional electrochemical polishing (ECP) with external artificial ultrasonic vibration. The purpose of this study is to develop an easier method for improving stainless steel surfaces. To this end, vibration electrochemical polishing (VECP), a novel ultrasonic manufacturing process, for enhancing electrochemical reaction and surface quality compared with that achieved using conventional ECP is suggested. In addition, for finding the optimized experimental conditions, the two methods are compared under various current densities. Localized roughness of the work material is measured with atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM) for obtaining detailed surface information.

1. 서론

초소형, 초정밀, 초미세, 극 청정 등 최근 첨단부품들의 발전으로 우리 주변에서 자주 사용되고 있으며, 산업 분야에서 중요한 기술들이다. 이들은 기존의 품질보다 뛰어난 성능을 가지는 기술들이며, 최근에 많은 발전을 하고 있다. 특히 초정밀 가공 분야에서는 다양한 연구결과와 새로운 공정의 개발이 끊임없이 이루어지고 있다. 그 중 표면 폴리싱 기술은 제품 표면을 보호하고, 시각적인 효과를 주기 위해 사용되고 있다. 표면 폴리싱 기술은 크게 접촉 가공 방식과 비접촉 가공 방식으로 구분된다. 접촉 가공 방식은 공작물과 공구가 접촉하여 가공하는 기술로서 공구가 마모되고, 가공 후 표면에 미세한 요(凹)부분과 철(凸)부분이 남게 되는 근본적인 단

점을 가지고 있다. 그 결과 표면의 작은 결함들이 부식의 원인이 되어 표면의 정밀도와 청정을 요구하는 분야에서는 애로사항이 발생되고 있다. 이를 개선하기 위하여 초정밀 부품 표면에 대한 표면 경면 가공 공정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 새로운 특수 가공 기술들이 연구개발 되고 있다. 그 중 비 접촉 방식은 접촉식 가공에서 발생하는 문제점들을 개선하는데 보완점들을 제공하였다. 특히 전기화학 반응을 이용하는 전기화학 폴리싱(Electrochemical Polishing, ECP)은 대표적인 비접촉 표면가공 기술로서 공작물의 표면을 폴리싱하여 표면의 광택, 평활화, 디버링(Deburring), 수소제거, 부식저항, 세정력 등의 탁월한 효과를 나타낸다.

이러한 장점으로 생활용품, 가전기기, 의료기기, 인체친화형 제품 등에 응용되고 있다. 그러나 일반적인 ECP는 극청정 분야에서

* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-7277

Fax: +82-62-230-7277

E-mail address: jwoopark@chosun.ac.kr (Jeong Woo Park).

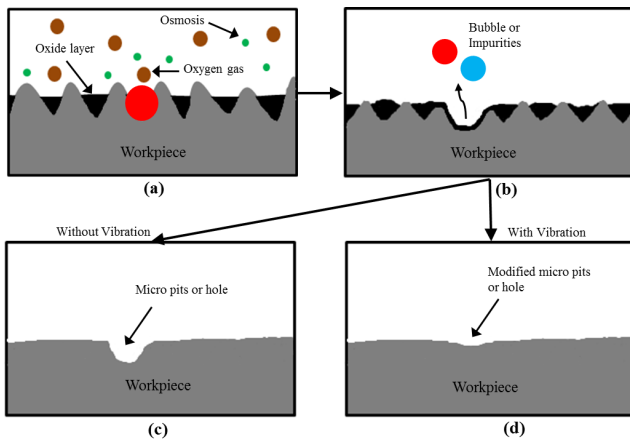


Fig. 1 Mechanism of ECP and VECP

마이크로 피트(Micro pits)가 제품 수명 및 품질에 문제가 있을 수 있다. Fig. 1(c) 는 일반적인 ECP 후 표면에 마이크로 피트가 발생이 됨을 나타낸다. 마이크로 피트는 가공 중에 산화막이 원활하게 요 부분을 채우지 못하거나 버블(Bubble) 또는 재료의 불순물에 의해서 발생이 될 수 있다. 가공 중에 발생된 마이크로 피트는 표면 정밀도를 떨어트리거나 부식을 유발 할 수 있다. 그래서 극 청정을 요구하는 산업분야에서는 예측하지 못한 애로사항이 발생될 수 있다^[1-3]. 본 연구에서는 최근의 연구 추세인 기존의 ECP 방식에 초음파와 진동을 부가적으로 발생시켜 개선된 결과물을 얻고자 한다. 이러한 복합가공 방식은 단일가공방식에서는 해결하지 못한 다양한 문제점을 극복할 수 있는 가능성이 존재한다. 대표적으로 방전 가공에서는 초음파와 진동을 이용하여 전해액 공급을 원활하게 하고 표면 품질을 높인 사례가 있고, 레이저 가공에서도 초음파와 진동을 이용하여 정밀도를 높인 사례가 있다^[4-5]. 이러한 기술처럼 복합적인 가공 기술을 ECP에 접목 시켜 공작물의 마이크로 피트 발생 빈도를 줄이고, 표면의 평탄화를 높여 표면 품질을 높이고자 한다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 ECP에 진동을 발생시키는 복합적인 방식인 진동 전기화학 폴리싱(Vibration Electrochemical Polishing, VECP)을 최초로 제안 하고, 스테인리스 강에 대하여 비교 및 분석을 하고자 한다.

2. 전기화학 폴리싱 원리

ECP는 비 접촉 가공 방식 중 하나인 전기화학적 반응을 이용한 표면을 폴리싱하는 가공 기술이다. 전극으로 구성되는 부분 중 공작물이 되는 부분을 산화 전극이고, 공구가 되는 부분을 환원 전극으로 구성한다. 전해액 내부에서 금속의 전기화학 용출을 이용하여 산화 전극 표면에 부식 저항성, 표면 평활화, 디버링 등을 향상시킨다. Fig. 1은 ECP 가공 시 공작물의 표면 폴리싱 메커니즘을 나타

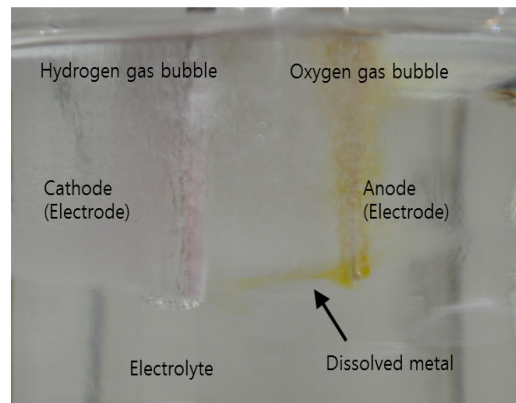


Fig. 2 Electrochemical reaction during ECP

낸 것으로 농도 차에 의한 삼투압 현상과 철 부분의 선택적으로 요 부분의 깊이까지 용해하여 표면을 평탄화 한다. 산화 막이 덮여 요 부분의 용해를 방해하고, 가공 시 전류가 증가하면 양극에서는 Fig. 2에 나타난 이미지를 보면 산소 gas와 버블이 공작물의 표면에 급속하게 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 폴리싱 중에 이러한 버블과 공작물의 불순물에 의해서 공작물의 전기적인 용해를 방해하는 요소가 되므로 공작물 표면에 마이크로 피트가 발생하게 된다. 본 연구에서는 이러한 가공 중에 발생하는 현상을 바탕으로 진동을 이용하여 가공 중 표면의 산화막 형성으로 요 부분을 메우고, 버블 또는 불순물의 분리 그리고 전기적인 용해가 공작물의 표면으로부터 원활하게 하여 표면 품질을 높여 보고자 한다^[6-8].

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 일반적인 ECP 장치에 초음파와 진동 발생기를 설치하여 표면 품질 개선을 위해 구성을 하였다. Fig. 3은 실험에 사

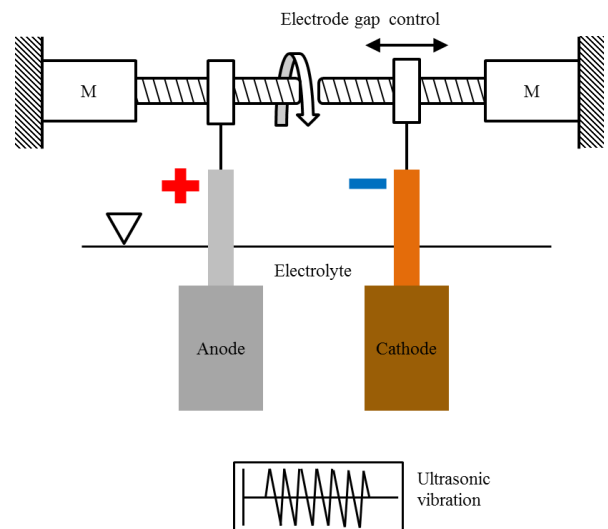


Fig. 3 Schematic diagram of VECP

Table 1 Experimental setup of VECP

Power supply	12 V, 50 A
Anode	STS 316 L
Cathode	Copper
Sonication	28 kHz, 100 W
Electrolyte	H ₂ SO ₄ + H ₃ PO ₄ + H ₂ O
Surface measurement	AFM (PSIA, XE-100) SEM (FE-ESEM)

용한 장치 구성의 개략도 이다. 일반적인 ECP와 VECP장치의 구성 차이는 크지 않다. VECP는 기본적인 ECP장치의 구성을 바탕으로 진동을 발생 하는 장치가 추가로 장착되어 있다. Table 1은 VECP 실험 조건을 나타낸다. VECP장치의 구성은 산화 전극에는 스테인리스 강(STS 316L)을 사용하였고, 환원 전극에는 불용해성이며, 전기저항이 적은 구리(Cu)로 사용하였다. 전해액으로는 황산, 인산, 초순수를 일정한 비율로 혼합하였다. 공작물인 스테인리스 강의 표면을 일정한 면적으로 가공하기 위하여 5 mm × 5 mm의 면적을 제외한 나머지 부분을 절연체로 도포하였다. 가공 시 산화 전극과 환원 전극의 간격은 10 mm로 하고, 전원 발생 장치를 이용한 ECP방식을 채택하였다. VECP구성을 위해 추가적으로 초음파 발생 장치(28 kHz, 100 W)를 전해조 외부에 구성하였다. 구성된 장치에서 전기를 발생시키고 초음파 진동을 발생시키면 실험이 진행된다. VECP에서 스테인리스 강의 전기적인 가공조건을 위해서 전류밀도 변화에 따른 실험을 하였다. 가공된 공작물의 표면 측정에는 AFM (PSIA, XE-100), SEM (FEI, FE-ESEM)을 이용하여 국부적인 나노미터 정밀도의 표면을 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 ECP와 VECP를 비교 및 분석하여 스테인리스 강에서 VECP의 표면 품질을 확인하였다.

4. 실험결과

Fig. 4는 전류밀도 변화에 따른 표면을 ECP와 VECP를 하여 측정된 표면 거칠기를 그래프로 나타낸 결과이다. 전극의 간격은 10 mm, 가공시간은 80 sec로 하였으며, 전류(A)는 0.3 A부터 1.3 A까지 0.2 A 범위로 증가시키면서 ECP와 VECP의 표면을 비교 분석 하였다.

ECP는 2.8 A/cm² 영역부터 표면 거칠기가 향상되기 시작 하다가 5.2 A/cm² 영역부터는 표면 거칠기 상승이 둔해졌다. VECP는 ECP와 마찬가지로 2.8 A/cm² 영역부터 최초 표면 거칠기가 향상되기 시작하면서 높은 전류밀도 영역으로 갈수록 표면 거칠기 상승이 둔해지기 시작했다. 두 방식의 표면을 정확히 분석하기 위해 AFM과 SEM을 통해서 측정하였다. 측정된 범위는 표면이 좋아지

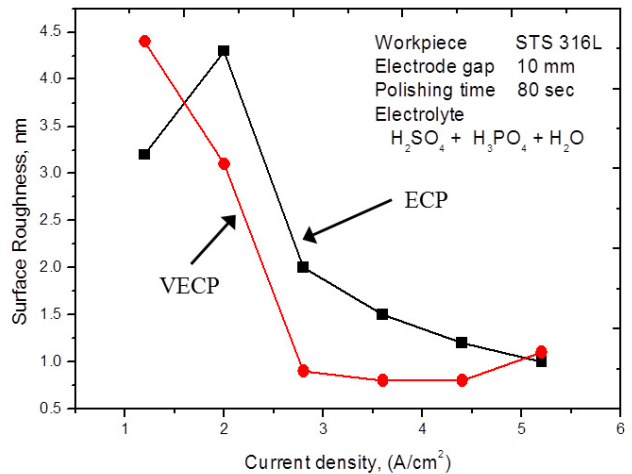


Fig. 4 Comparison of surface roughness variation in ECP and VECP according to various current densities

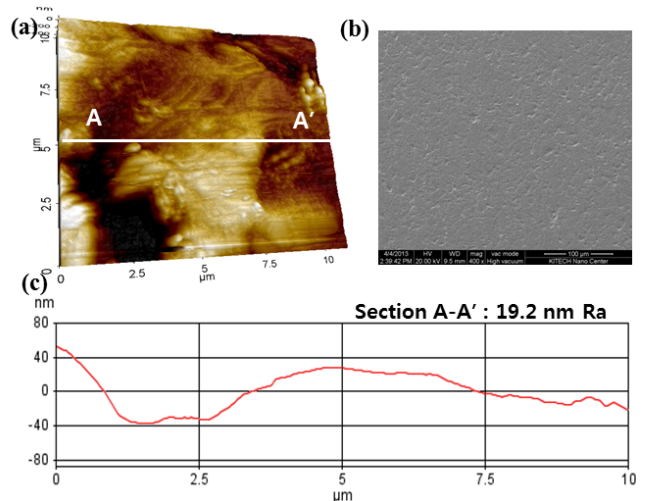


Fig. 5 Sample surface before ECP of STS 316 L (a) AFM topographical image (b) SEM of the surface (c) cross-sectional profile along A-A'

는 3.6 A/cm² 영역의 표면을 분석하였다.

Fig. 5는 폴리싱 전과 후를 원활한 비교를 위해 폴리싱 전에 스테인리스 강 STS 316L의 표면을 AFM과 SEM을 통해서 측정된 이미지이다. Fig. 5(a)는 AFM으로 국부적인 면적 (10 μm × 10 μm) 측정을 통한 3차원 이미지 결과이다. 표면의 굴곡이 좋지 않은 것을 잘 나타내고 있으며, 표면 거칠기가 약 19.2 nm Ra로 측정 되었다. Fig. 5(b)는 SEM을 400배 확대하여 측정한 이미지이며 이 이미지상으로 표면의 굴곡이 크고 거칠다는 것을 보여주고 있다. Fig. 5(c)는 AFM으로 측정된 결과를 정확한 표면 굴곡을 나타내기 위해 프로파일 곡선으로 나타낸 이미지이다. 이 결과를 보면 최대 굴곡이 약 40 nm 이상 차이가 나는 것을 알 수 있다.

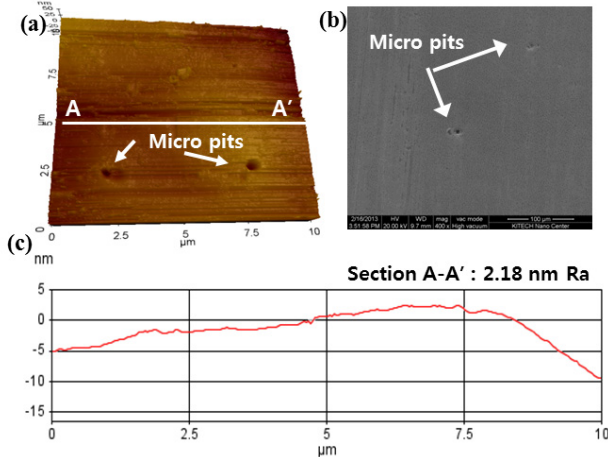


Fig. 6 Sample surface after ECP in current density 3.6 A/cm^2 of STS 316 L (a) AFM topographical image (b) SEM of the surface (c) cross-sectional profile along A-A'

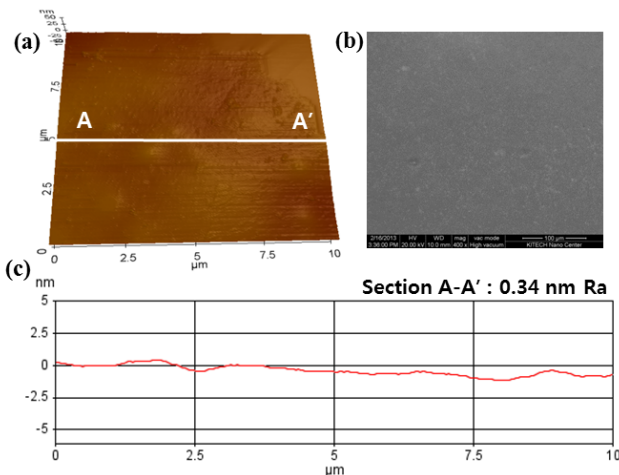


Fig. 7 Sample surface after VECP ECP in current density 3.6 A/cm^2 of STS 316 L (a) AFM topographical image (b) SEM of the surface (c) cross-sectional profile along A-A'

Fig. 6은 스테인리스 강 STS 316 L의 전류밀도 3.6 A/cm^2 영역을 일반적인 ECP를 한 결과이다. 측정은 Fig. 5와 같은 조건에서 측정을 하였다. AFM으로 측정한 Fig. 6(a) 3차원 이미지는 Fig. 5(a)와 비교하면 표면 굴곡과 거친 부분이 상당히 줄어든 것을 알 수 있으며 표면 거칠기가 약 2.18 nm Ra 로 측정 되었다. 폴리싱 전과 비교하면 약 10배 가까이 향상된 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 ECP의 장점 중 하나이다. 그러나 표면에 약 $0.83 \mu\text{m}$ 크기의 마이크로 피트가 측정되었다. Fig. 6(b)는 SEM 측정된 결과이며 폴리싱 전의 결과보다 표면 굴곡 향상을 알 수 있으나 약 $14 \mu\text{m}$ 크기의 마이크로 피트가 측정 되었다. Fig. 6(c)는 AFM으로 측정된 이미지의 프로파일 곡선을 나타낸다. 폴리싱 전과 비교하면

표면 굴곡이 확실히 줄어든 것을 알 수 있다. 최대 굴곡은 약 $10 \mu\text{m}$ 정도를 나타내고 있다.

Fig. 7은 스테인리스 강 STS 316L의 전류밀도 3.6 A/cm^2 영역을 진동을 이용한 VECP를 한 결과이다. Fig. 7(a)는 AFM으로 측정된 3차원 이미지이다. 일반적인 ECP와는 다르게 마이크로 피트가 감소한 것을 알 수 있다. 표면 거칠기가 약 0.34 nm Ra 로 측정 되었다. SEM 측정 결과인 Fig. 7(b)를 보면 마찬가지로 마이크로 피트 발생이 감소 한 것을 확인 할 수 있다. Fig. 7(c) 프로파일 곡선을 보면 표면의 최대 굴곡이 약 1 nm 정도 측정 되었다.

5. 결론

전류밀도 변화에 따른 실험을 통한 결과를 보면 ECP와 진동을 이용한 VECP는 전류밀도 3.6 A/cm^2 영역에서 표면 거칠기가 향상되는 것을 알 수 있다. 즉 전류의 증가는 산화 전극 표면이 용해가 활발해지는 것을 알 수 있으며, ECP는 폴리싱 전에 스테인리스 강의 표면을 평활화 시키는 효과를 알 수 있다. 그러나 동일한 조건에서 일반적인 ECP와 진동을 이용한 VECP의 실험결과를 보면 일반적인 ECP는 마이크로 피트 생성을 감소 시키지 못했다. ECP와 VECP 프로파일 곡선을 비교해 보면 표면이 눈에 띄게 평활화된 것을 확인 할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 전기화학 반응 중에 외부의 진동에 의해서 산화막 흐름이 원활하게 하여 마이크로 피트 발생 빈도가 줄어든 것을 알 수 있다. 진동을 이용한 VECP는 표면을 평활화 하고 마이크로 피트 생성을 감소 시켰을 뿐만 아니라 표면 거칠기가 향상되는 효과도 확인 하였다.

본 연구 결과를 바탕으로 스테인리스 강을 이용하는 클린부품의 수명연장 효과로 이를 요구하는 분야에서 큰 효과를 기대해본다.

후기

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2012004235)을 받아 수행된 연구 과제입니다.

References

- [1] Kao, P. S., Hocheng, H., 2003, Optimization of electrochemical polishing of stainless steel by grey relational analysis, J. Mater. Process. Technol. 140 255-259.
- [2] Zhao, H. Humbeck, J. V., 2002, Electrochemical polishing of 316L stainless steel slotted tube coronary stents, J. Mater. Sci.;Material in Medicine 13 911-916.

- [3] Kim, Y. B., Park, J. W., 2012, Corrosion Rate Evaluation of Pulse Electrochemical polishing for stainless steel, *Adv. Sci. Lett.* 14 227-230.
- [4] Zhao, W., Wang, Z., Di, S., Chi, G., Wei, H., 2002, Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy, *J. Mater. Process. Technol.* 120 101-106.
- [5] Kang, B. C., Kim, G. W., Yang, M. Y., Cho, S. H., Park, J. K., 2012, A study on the effect of ultrasonic vibration in nanosecond laser machining, *Optic and Laser in Engineering* 50 1817-1822.
- [6] Park, J. W., Lee, D. W., 2009, Pulse electrochemical polishing for microrecesses based on a coulometric analysis, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 40 742-748.
- [7] Kim, Y. B., Kim, J. T., Ahn, D. G., Park, J. R., Jeong, S. H., Park, J. W., 2012, AFM-based Surface Characteristic of Pulse Electrochemical Polishing for Various Frequency Conditions, *Annals of the KSMTE*, 21, 246-251.
- [8] Lee, D. H., Park, J. W., Moon Y. H., 2003, Study on Electrochemical Polishing for Stainless Steel 300 Series using Micro Pulse Current *Trans. Mater. Process.* 12:4 388-393.