

## ◆ 특집 ◆ 바이오매스 대량생산을 위한 평판형 광생물반응기 개발

## 미세표면 평활화를 위한 진동 전기화학 폴리싱

## Vibration Electrochemical Polishing for Localized Surface Leveling

김옥수<sup>1</sup>, 김영빈<sup>1</sup>, 박정우<sup>2,✉</sup>Uksu Kim<sup>1</sup>, Youngbin Kim<sup>1</sup>, and Jeongwoo Park<sup>2,✉</sup><sup>1</sup> 조선대학교 첨단부품소재공학과 (Department of Advanced Parts and Materials Engineering, Chosun Univ.)<sup>2</sup> 조선대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Chosun Univ.)

✉ Corresponding author: jwoopark@chosun.ac.kr, Tel: +82-62-230-7277

Manuscript received: 2012.12.15 / Accepted: 2012.12.21

*This study demonstrates a novel hybrid surface polishing process combining non-traditional electrochemical polishing(ECP) with external artificial ultrasonic vibration. ECP, typical non-contact surface polishing process, has been used to improve surface quality without leaving any mechanical scratch marks formed by previous mechanical processes, which can polish work material by electrochemical dissolution between two electrodes surfaces. This research suggests vibration electrochemical polishing(VECP) assisted by ultrasonic vibration for enhancing electrochemical reaction and surface quality compared to the conventional ECP. The localized roughness of work material is measured by atomic force microscopy(AFM) for detailed information on surface. Besides roughness, overall surface quality, material removal rate(MRR), and productivity etc. are compared with conventional ECP.*

Key Words: Vibration Electrochemical Polishing (진동 전기화학 폴리싱), Electrochemical Machining (전기화학 가공), Ultrasonic Vibration (초음파 진동), Atomic Force Microscope (원자현미경), Electrolyte (전해액)

## 1. 서론

최근 산업의 급속한 발달로 인해 정밀도, 청정도를 요구하는 기계, 인체친화적 부품, 의료기기 등의 수요가 급격히 증가하고 있다. 또한 스테인리스 강과 같이 뛰어난 물리적 성질을 지닌 난삭재들은 신속하고 정밀한 기계적 가공에 있어 여러 가지 기술적인 문제를 갖고 있다. 이러한 물리적 성질을 갖고 있는 난삭재들은 접촉적인 방법으로 가공을 할 경우 표면에 미세한 요(凹)와 철(凸)부분이 남게 되어 부식의 원인이 되거나, 표면 거칠기에 악영향을 미치게 된다. 특히 바이오매스 전달계 등 청정도와 직결되는 부품에는 표면의 작은

결함이 생산시스템 전체에 치명적인 악영향을 초래할 수도 있다. 따라서 초정밀 청정 부품 표면에 대한 표면 경면 가공 공정에 대한 연구가 활발하게 진행 되고 있으며, 그 결과 전기화학 폴리싱(ECP), 전기화학 가공(ECM) / 방전가공(EDM), 자기유변유체(Magnotorhelogical fluid) 등을 이용한 표면 가공 등과 같이 새로운 특수 표면 가공 기술들이 소개되고 있다. 그러나 이러한 다양한 표면 가공 기술들은 각각의 가공 기술에 대한 특징을 갖고 있으며, 서로 다른 재료들에 대하여 가공 할 경우 재료의 특징에 맞추어 제품의 제작이 어려워지기 때문에 표면 정밀도나 생산성을 맞추는데 어려움을 갖고 있다. 따라서 이러한 가공 법의 장점

을 살리며, 단점을 보완 하기 위해서 두 가지 또는 그 이상의 가공방법을 동시에 사용하는 복합적인 가공 법이 연구되고 있다. 최근에는 방전가공에서 마이크로 홀 가공 시에 초음파 진동을 이용하여 공구와 공작물 사이의 전해액 공급을 원활하게 하는 연구가 있으며, 접촉식 가공에서 드릴링 가공시 초음파를 이용하여 가공 정밀도가 향상된 사례가 있다.<sup>1-3</sup> 본 연구에서는 바이오매스 전달계 부품생산에 적용하기 위하여 전기화학 폴리싱(ECP)과 초음파진동을 이용하여 스테인리스 강의 표면을 복합적인 방법으로 가공 하여 기존의 ECP 가공 방법과 초음파 진동을 부가한 진동 전기화학 폴리싱(VECP)을 비교하려고 한다. ECP 는 일반적인 표면 가공 공정에 비해 가공 시간을 단축시킬 수 있으며 효과적으로 표면 거칠기를 향상 시켜 경면가공을 가능하게 하며 부식 저항성을 향상시킨다.<sup>4</sup> 그러나 ECP 가공 시 공작물 표면에는 미세한 마이크로 피트(micro pits)가 남게 된다. 이러한 마이크로 피트의 생성으로 인하여 표면 정밀도, 특히 바이오매스 전달계 표면에 악영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 스테인리스 강의 표면에 마이크로 피트의 생성을 개선하기 위해서 전해액에 초음파 진동을 부가한 복합 가공을 수행하였고, 일반적인 ECP 와 초음파를 부가한 VECP 를 비교 분석하고자 한다.

**2. 전기화학 폴리싱 원리**

ECP 는 전기화학적 반응을 이용한 표면을 가공하는 방법으로 공작물은 (+), 반대인 전극은 음극(-)으로 하여 금속의 전기화학 용출을 이용하여 공작물 표면에 부식 저항성, 표면 평탄화 등을 향상시키는 방법이다. Fig. 1 은 일정하게 혼합된 전해액에 산화 전극과 환원 전극을 침지시킨 후, 전류를 인가시켰을 때 공작물 표면인 스테인리스 강에서 금속이 용해 증류상태로 느리게 되어 흐르는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 2 는 ECP 가공 시 공작물의 표면 폴리싱 메커니즘을 나타낸 것으로 농도 차에 의한 삼투압 현상과 철(凸)부분의 선택적 용해를 설명하고 있다. 전류를 인가하면 공작물의 요(凹)부분은 안정화된 산화 막이 덮여져 보호되며, 철부에는 전기의 선택적인 용해가 이루어 지면서 표면 가공이 이루어 진다. ECP 가공 시 전류가 증가하면 양극에서 산소 가스가 공작물의 표면에 급속하게 증가하게 되는데 이러한 산소 가스의 증가로

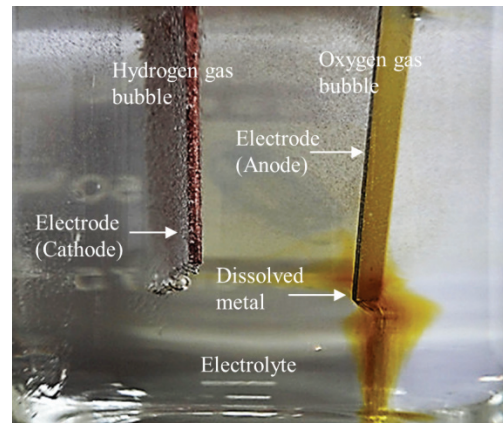


Fig. 1 Electrochemical reaction during ECP

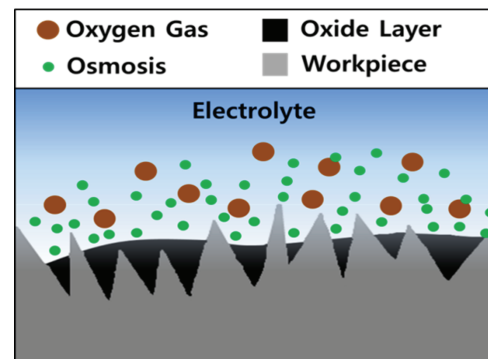


Fig. 2 Electrochemical polishing mechanism

인하여 스테인리스 강 표면에 마이크로 피트가 발생하게 된다. 음극 전극인 구리(Cu)에서는 수소가스가 발생하게 된다. ECP 는 공작물과 공구역할을 하는 두 전극에 전류를 인가하는 비접촉적인 가공 방법이므로 복잡한 3 차원 형상, 경도와 재질에 구애 없이 표면 가공이 가능하며 부식의 원인인 금속의 변형층을 제거하여 부식저항성을 향상시키며, 스테인리스 강의 경우 ECP 가공 시 가공 전에 비해 크롬, 니켈, 등이 표면에 잔류하여 표면에 산화크롬 및 산화니켈의 막이 형성되기 때문에 표면 내부식성이 15~20 배 향상되는 효과가 있다.<sup>5-9</sup>

**3. 실험장치 및 방법**

본 연구에서 사용된 전기화학 폴리싱 장치는 Table 1 에 표기된 실험조건으로 사용 되었다. 일반적인 전기화학 폴리싱에 사용된 장치는 파워 서플라이 (50 V, 12 A), 전해액으로는 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 및

Table 1 Experimental conditions

Power supply	50 V, 12 A
Anode	Stainless steel 316L
Cathode	Cu
Electrode gap	10 mm
Sonication	28 kHz, 100 W
Surface roughness	AFM(PSIA, XE-100)

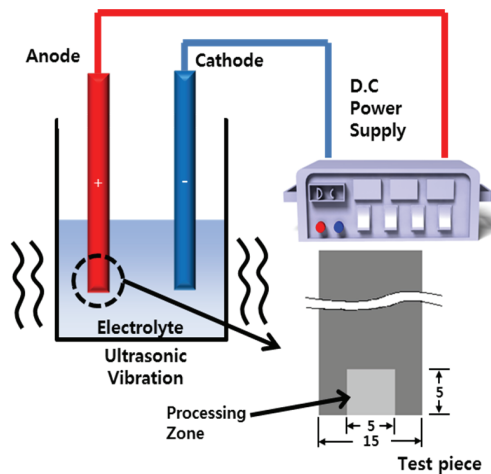


Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic vibration ECP

초 순수(H<sub>2</sub>O)가 일정 비율로 혼합되어 있다. 산화전극에는 스테인리스 강(STS 316L)을 사용하였다. 환원 전극에는 불용해성이며, 전기저항이 작은 구리(Cu)로 사용하였다. 전기화학 폴리싱 가공 시 산화 전극인 스테인리스 강에 일정한 면적을 가공하기 위하여 5 mm × 5 mm의 면적을 제외한 나머지 부분을 절연체로 도포하였다. 가공 시 산화 전극과 환원 전극의 간격은 10 mm로 하고, 전원발생 장치를 이용한 전기화학 폴리싱 방식을 채택하였다. 진동 전기화학 폴리싱은 위의 일반적인 전기화학 폴리싱 장치에 초음파 발생 장치(28 kHz, 100 W)를 추가적으로 사용하였으며, Fig. 3과 같이 일반적인 전기화학 폴리싱 방식에서 전해액에 외부 초음파 진동을 가하였다. 가공된 공작물의 표면 거칠기 측정은 PSIA사의 AFM(XE-100)을 사용하여 국부적인 나노미터 정밀도의 표면을 측정하였으며, 각각의 조건에서 실험한 결과물의 표면을 비교 분석하였다. 본 연구에서는 전압과 가공시간의 변화에 따라 각각의 표면을 분석하여 차이

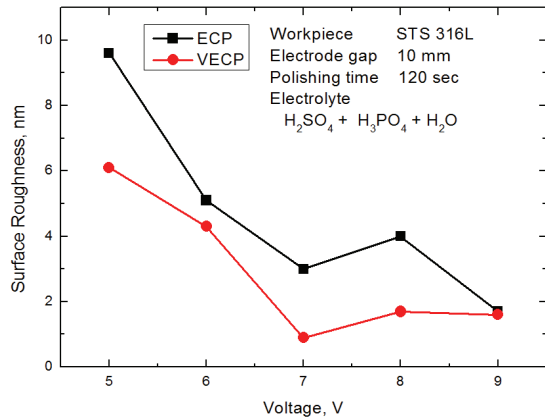


Fig. 4 Comparison of surface roughness variation in ECP and VECP according to various input voltages

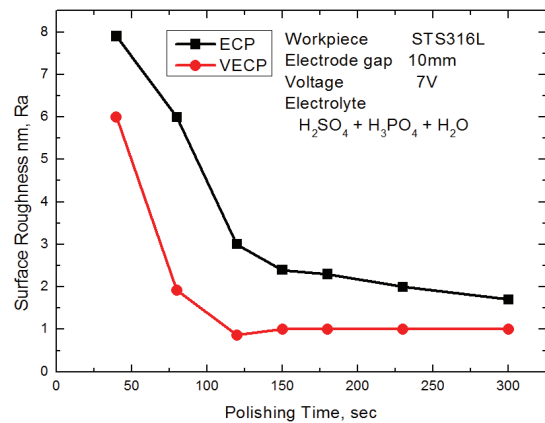


Fig. 5 Comparison of surface roughness variation in ECP and VECP according to various polishing time

점을 비교하고 진동 전기화학 폴리싱 법의 우수성을 검증하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 초음파 진동을 가하지 않은 전기화학 폴리싱과 초음파 진동을 부여한 전기화학 폴리싱에 있어서 전압의 변화에 따른 표면 거칠기 변화를 그래프로 나타낸 결과이다. 전압은 5V부터 9V까지 범위에서 1V단위로 증가시키면서 120초 동안 폴리싱을 하였다. 전체적인 표면은 진동을 부가한 VECP 처리 후 표면 거칠기가 향상된 결과가 나온다는 것을 알 수 있다. 그 중 Fig. 4의 7V 부근에서 양호한 표면을 얻을 수 있다.

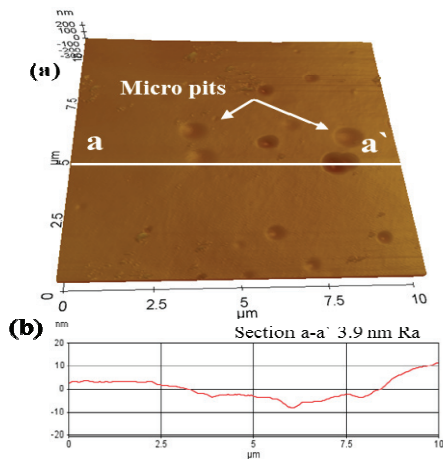


Fig. 6 Sample surface with ECP. (a) AFM topographical image (b) cross sectional profile along a-a` at 7 V

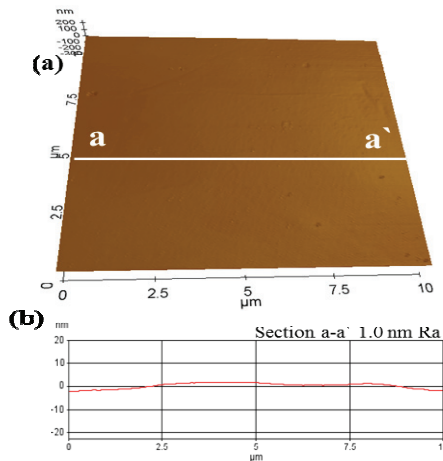


Fig. 7 Sample surface with VECP. (a) AFM topographical image (b) cross sectional profile along a-a` at 7 V

Fig. 6 은 ECP 처리 후 국부 표면을 AFM 으로 측정 한 결과이다. 표면 거칠기는 약 3.9 nm Ra 이다. Fig. 7 은 같은 조건에서 초음파 진동을 가한 VECP 이후의 결과이다. AFM 으로 측정 한 표면의 거칠기는 약 1.0 nm Ra 이었다. ECP 의 경우 Fig. 6(b) 프로파일 곡선에 의하면 요부분과 철부분의 굴곡이 심한 반면 VECP 를 한 Fig. 7(b) 프로파일에 의하면 요부분과 철부분의 굴곡이 ECP 보다 현저히 평활화가 진행된 것을 알 수 있다. ECP 를 한 Fig. 6(a) AFM 3 차원 이미지를 보면 직경이 1 μm 이내의 마이크로 피트 발생 부분이 눈에 띄게 발생되어 있는 것을 확인 할 수 있으며, VECP 처리한 Fig. 7(a)

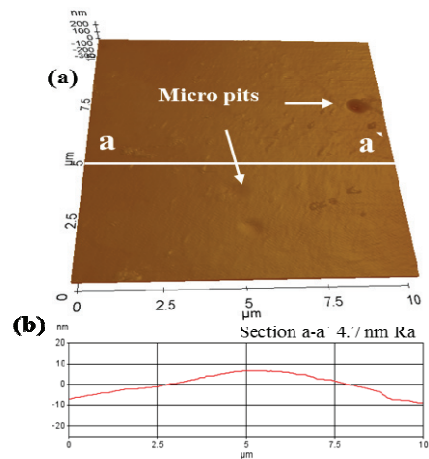


Fig. 8 Sample surface ECP. (a) AFM topographical image (b) cross sectional profile along a-a` in polishing time 120 sec

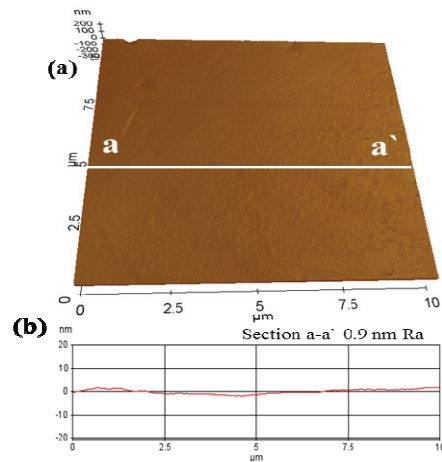


Fig. 9 Sample surface VECP. (a) AFM topographical image (b) cross sectional profile along a-a` in polishing time 120 sec

의 AFM 3 차원 이미지를 보면 마이크로 피트 발생이 현저하게 줄어든 결과를 얻을 수 있다. Fig. 5 는 ECP 와 VECP 처리 시간의 변화를 40 초에서 300 초까지 일정한 간격으로 변화를 주어 샘플 표면의 변화를 그래프로 비교 분석한 결과이다. 그래프의 전체적인 경향은 진동을 가한 표면의 거칠기가 진동을 가하지 않은 표면의 거칠기 보다 상당히 개선된 결과를 얻을 수 있다. 특히, 80~150 초 영역에서 최적의 개선 표면을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 8 은 가공시간 120 초 동안 ECP 처리

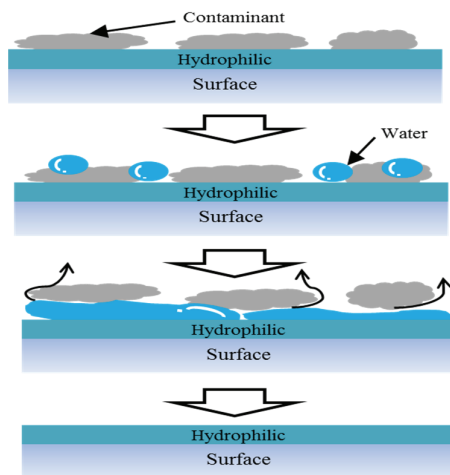


Fig. 10 Cleaning characteristics of super hydrophilic surface

한 샘플 표면을 AFM 으로 측정 한 결과이다. 표면 거칠기는 약 4.7 nm Ra 로 측정 되었다. Fig. 9 는 같은 조건에서 초음파 진동을 가하여 폴리싱을 한 결과이며, AFM 으로 측정 한 표면은 약 0.9 nm Ra 로 측정 되었다. ECP 처리 후인 Fig. 8(b)의 프로파일을 VECP 처리 후인 Fig. 9(b)의 프로파일과 비교하면 표면 굴곡이 비교적 큰 것을 알 수 있고, 진동을 부여한 폴리싱 결과물의 프로파일은 상당히 개선된 부드러운 표면을 제시하고 있다. ECP 를 한 Fig. 8(a)의 이미지를 보면 마이크로 피트 발생 부분과 미세한 굴곡이 VECP 를 한 Fig. 9(b)의 이미지 보다 발생 빈도가 높은 것을 알 수 있다. 종래의 연구 결과에 의하면 표면의 미세한 저주파 성분의 부드러운 요철은 표면에 친수성을 띠게 한다. 표면의 친수화는 Fig. 10 과 같이 이물질과 표면 사이에 세정액의 원활한 침투를 촉진시켜 표면의 자기세정 기능을 향상 시킨다. 이러한 VECP 의 표면 평활화 기능은 바이오 매스 전달 및 전송 시스템에의 적용 가능성을 한층 강화시킨다고 판단 할 수 있다.

5. 결론

본 실험에서는 동일한 조건에서 기존의 ECP 공정에 초음파 진동을 부가한 새로운 하이브리드 공정을 제시 하였다. 전압 변화에 따른 표면 변화는 같은 조건 가공 시 전압이 상승 할수록 향상된 표면의 평탄과 마이크로 피트 발생이 줄어들었다. 이 결과로 전압이 상승 할 수록 표면이 개선되는

것을 알 수 있다. 가공 시간에 따른 표면 변화는 가공 시간이 증가 할 수록 표면이 개선되는 것을 확인 할 수 있다. AFM 측정 한 결과 같은 조건에서 초음파 진동을 부여한 VECP 는 초음파 진동을 부여 하지 않은 ECP 보다 마이크로 피트 발생을 줄일 수 있다. 본 실험 결과를 통해서 두 방식의 차이를 확인하였고, VECP 의 표면 평활화 기능과 피트 발생 빈도의 저감은 바이오매스 전달 및 전송 시스템에 적용하여 반영구적인 대형 플랜트의 개발에 주요한 일부를 차지할 것이라 기대된다.

후 기

본 연구는 2010 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(2010302009020) 및 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2012004235)을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고문헌

1. Zhao, W., Wang, Z., Di, S., Chi, G., and Wei, H., "Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, pp. 101-106, 2002.
2. Azarhoushang, B. and Akbari, J., "Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1027-1033, 2007.
3. Nath, C. and Rahman, M., "Evaluation of Ultrasonic Vibration Cutting while Machining Inconel 718," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 9, No. 2, pp. 63-68, 2008.
4. Kim, Y. B. and Park, J. W., "Corrosion Rate Evaluation of Pulse Electrochemical Polishing for Stainless Steel," *Adv. Sci. Lett.*, Vol. 14, pp. 227-230, 2012.
5. Bannard, J., "The effect of a surface-active additive on the dissolution deficiency and surface finish in ECM," *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 7, pp. 189-195, 1977.
6. Park, J. W., Lee, E. S., and Moon, Y. H., "A Study on the Electrochemical Micro-machining for Fabrication of Micro Grooves," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 19, No. 4, pp. 101-108, 2002.

7. Lee, E. S. and Kim, C. G., "A study on machining characteristics of the electropolishing of Aluminim alloy," Annals of the KSMTE, Vol. 12, No. 2, pp. 17-22, 2003.
8. Park, J. W. and Lee, D. W., "Pulse electrochemical Polishing for microrecesses based on a coulstatic analysis," Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 40, No. 7-8, pp. 742-748, 2009.
9. Kim, Y. B., Kim, J. T., Ahn, D. G., Park, J. R., Jeong, S. H., and Park, J. W., "AFM-based Surface Characteristic of Pulse Electrochemical Polishing for Various Frequency Conditions," Annals of the KSMTE, Vol. 21, No. 2, pp. 246-251, 2012.