

스테인리스 망의 전기화학 폴리싱(ECP) 조건에 따른 가공 특성

김옥수*, 박정우*,#

*조선대학교 기계시스템공학과

Machining Characteristics according to Electrochemical Polishing (ECP) Conditions of Stainless Steel Mesh

Uk Su Kim*, Jeong Woo Park*#

*Department of Mechanical System Engineering, Chosun UNIV.,

(Received 10 August 2015; received in revised form 3 October 2015; accepted 10 October 2015)

ABSTRACT

Stainless steel mesh has been used as a filter in various fields, including domestic, medical, etc. However, the surface before machining may have an adverse effect the product quality and performance because it is not smooth. Especially, adsorbed impurities in the surface result in difficulty in cleaning. Therefore, in this paper, we propose an improved surface quality through electrochemical polishing (ECP). Two electrodes, composed of STS304 (anode) and copper (cathode) underwent machining with two conditions according to polishing time and current density. As the polishing time and current density increase, the surface of curvature decreases, and roughness and material removal rate (MRR) improves. The machined surface roughness and image were obtained through the atomic force microscope (AFM) and stereoscopic microscope. The study also analyzed hydrophilic effect through contact angles. This obtains corrosion resistance, smoothness, hydrophilic property, etc.

Key Words : Electrochemical Machining(전기화학 가공), Stainless Steel Mesh(스테인리스 망), Atomic Force Microscope(원자현미경), Hydrophilic(친수성), Contact Angle(접촉각)

1. 서 론

최근 인류에 삶의 질이 향상되면서 높은 정밀도와 청정도를 요구하는 분야가 증가하고 있다. 특히 인체친화형 제품은 수요가 증가하면서 스테인리스 강의 재질의 사용량도 증가되고 있다.

스테인리스 망은 생활주변에서는 방충망, 주방용품 등에 이용되고 있으며, 산업현장에서는 필터분야에

서도 이용되고 있다. 기존에는 일반적인 강재가 사용되었으나 부식 발생과 청정도에 악영향을 미치기 때문에 스테인리스 재료를 사용하는 분야가 증가하고 있다. 그러나 일반적으로 연마처리가 되어 있지 않은 재료들은 미세한 표면굴곡이 심하여 청정 분야에서는 악영향을 미칠 수가 있다. 그러나 기존의 기계적 연마로는 재료의 표면에 미세한 가공 흔적이 남아 청정분야에 적용하기에는 다소 무리가 있다. 또한 얇은 와이어로 구성된 스테인리스 망은 기계적 청정 표면가공의 어려움이 있다.^[1] 따라서 본 연구에서는 공구와 공작물이 비접촉 상태에서 가공 할 수 있는 전기화학적인 연마 기술인 전기화

Corresponding Author : jwoopark@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7277, Fax: +82-62-230-7277

학 폴리싱 (Electrochemical polishing, ECP)을 사용하여 망 형태의 재료를 연마하고자 한다. ECP는 전기 화학적 반응을 이용한 가공기술로서 공작물이 되는 부분을 산화전극, 공구가 되는 부분을 환원전극으로 구성하고 전해액에 침지된 상태에서 전류를 발생시켜 금속의 미소 용해작용을 이용해 표면을 가공하는 기술이다.^[2-4]

본 연구에서는 스테인리스 망을 전류밀도, 가공시간에 따른 두 조건으로 ECP하여 가공특성을 연구하고자 한다.

2. 전기화학 폴리싱 원리

ECP는 전기화학 반응을 이용한 대표적인 비접촉 가공 기술 중 하나이다. 기계적으로 가공이 어려운 복잡한 형상, 난삭성 재료 가공에 적합하다. 또한 접촉가공 보다 가공이 빨리 진행되어 경제적이다. Fig. 1은 보통 ECP를 위한 기본적인 개략도를 보여 준다. 두 전극을 전해액에 침지시켜 전류를 부여하여 가공하게 된다. 공작물이 되는 부분을 산화전극이고, 공구가 되는 부분을 환원 전극으로 구성한다. 전해액 내부에서 금속의 전기화학 용출을 이용하여 산화 전극 표면에 부식 저항성, 표면 평활화, 디버링 (deburring), 광택, 세정 등 효과를 향상 시킨다.

두 전극이 전해액에 침지시켜 전류를 인가하면 공구가 되는 부분에서는 다량의 수소가스를 포함하는 기포가 발생하게 된다. 공작물이 되는 부분은 Fig. 2와 같이 가공 전의 표면이 요(凹)부분과 철(凸)부분의 폭이 불규칙적으로 형성되어 있다. 이때 인가된 전류에 의해 산소를 포함하는 기포들이 발생하면서 금속의 용해가 이루어지게 된다. 가공이 이루어지고 있을 때 산화전극 부분에서는 농도차에 의한 삼투압 현상으로 금속 이온의 전해액으로 이동하는 현상이 활발하게 진행된다. 동시에 절연특성을 가지는 산화막으로 덮여져 있지 않고 전해액에 노출된 철부분이 선택적으로 빠르게 용해가 이루어지게 된다. 반대로 요 부분은 상기의 절연 산화막에 의하여 용해작용이 방해받게 되고 이러한 복합작용에 의하여 표면이 평활화 된다. 스테인리스강의 경우 ECP 전과 비교하면 다량의 크롬, 니켈

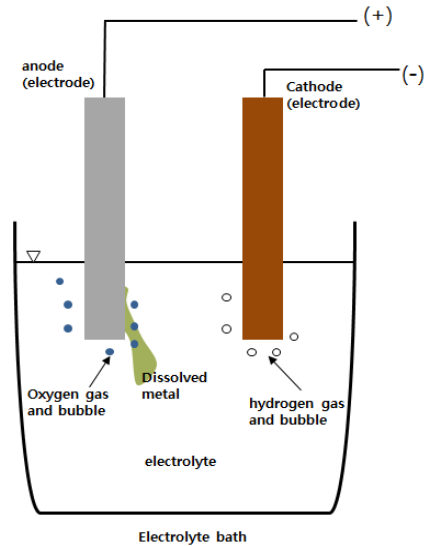


Fig. 1 Principle of electrochemical polishing

Table 1 Experimental conditions

power supply	50 V, 12 A
workpiece(anode)	STS 304
cathode electrode	copper (Cu)
electrode gap	10 mm
surface measurement	AFM (PSIA, XE - 100) SM (Olympus)

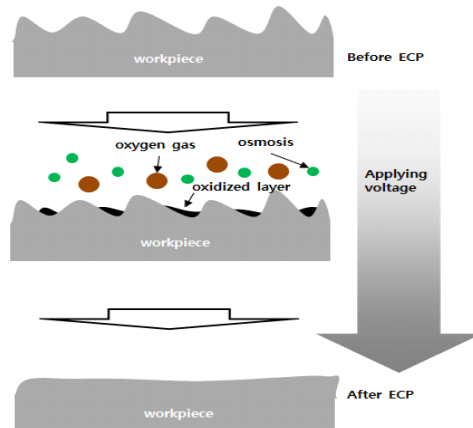


Fig. 2 Electrochemical polishing mechanism

등이 표면에 잔류하여 표면에 산화크롬 및 산화니켈의 막이 형성되기 때문에 표면 내부식성이 약 15~20배 정도 향상되는 효과가 있다고 보고되었다.^[5-9]

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 스테인리스 망의 가공을 위해서 Fig. 3과 같이 전용 실험장치를 구성하였다.

스테인리스 망의 경우 모든 표면에서 가공이 필요하기 때문에 양쪽에 환원전극을 배치하였다. 또한 전극의 간격을 양쪽 모두 일정하게 되도록 고정시켰다. 자세한 실험조건은 Table 1에 표기하였다. 사용된 전원 공급 장치는 직류전원공급기(최대 50V, 12A)를 사용하였으며, 핫플레이트를 통해서 전해액의 온도를 일정하게 유지시켜 주었다. 환원전극은 전기전도성이 좋은 구리(Cu)로 사용하였다. 산화전극은 스테인리스 망 형태로 STS 304 이며, 화학성분은 Table 2와 같다.^[10] 각각의 선경은 $\varnothing 0.29$ 이며, 가로 세로 서로 겹쳐있다. 정확한 실험을 위해 전극은 110×20 mm 의 크기로 준비하였다. 실제 가공되는 부분은 50×20 mm 이며, 가공되는 부분을 제외한 나머지 부분은 정확한 실험 분석을 위해 절연도포제로 도포하였다.

가공시간에 따른 실험을 위하여 전류밀도는 10.29 A/cm^2 로 고정 하였으며, 가공시간은 각각의 시편마다 50 초부터 500 초까지 50 초 범위로 설정하였다. 전류밀도에 따른 실험은 가공시간 350 초로 고정 하였으며, 전류밀도는 각각의 시편마다 1.03 부터 10.3 A/cm^2 까지 1.03 A/cm^2 범위로 하였다. 가공된 표면은 원자현미경(atomic force microscope, AFM)과 실체현미경으로 표면 거칠기와 이미지를 측정하였다. 또한 재료 제거율(material removal rate, MRR)을 측정하기 위해 시편의 가공 전과 후의 가로 부분인 20 mm 와이어 일부를 채취하였다. 와이어는 마이크로미터로 표면의 두께를 측정하여 조건에 따른 재료의 체적변화량을 분석하였다. 마지막으로 표면의 친수/소수 변화를 관찰하기 위하여 접촉각 측정기로 분석하였다.

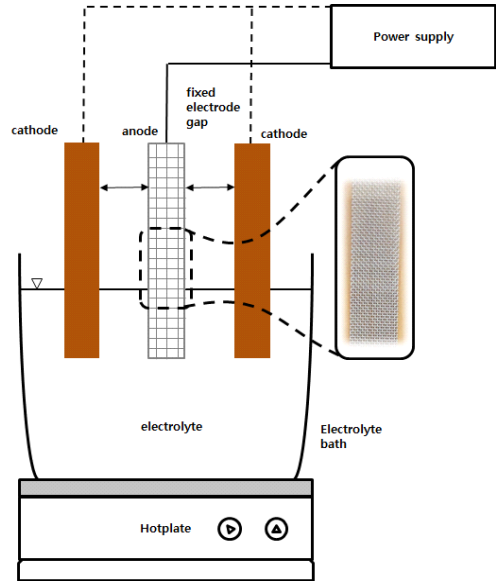


Fig. 3 Schematic diagram of electrochemical polishing for stainless steel mesh

Table 2 Chemical composition of Stainless steel 304 (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.08	1.0	2.0	0.045	0.030	7.5 ~ 10.50	18 ~ 20

4. 실험결과

4.1 가공시간에 따른 표면 분석

가공 전의 스테인리스 망은 표면이 매우 굴곡차가 커서 거칠기가 좋지 않다. Fig. 4는 가공 전의 표면을 실체현미경 40배 확대하였으며, AFM으로 $10 \times 10 \mu\text{m}$ 의 크기로 측정한 결과를 나타낸 이미지이다. 표면 거칠기는 약 79 nm Ra 이며, 3차원 이미지를 보아도 굴곡이 차이가 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 가공시간에 따라 ECP한 결과를 각각의 시편의 표면을 AFM으로 표면 거칠기를 측정하여 측정된 결과를 그래프로 나타낸 이미지이다. 전체적으로 가공시간이 증가할수록 표면 거칠기는 점점 향상되고 있음을 확인할 수 있었다. 50 초부터 가공

이 이루어지기 시작하여 300 초대부터는 표면 거칠기가 약 5 nm Ra 대로 표면이 매우 평활화 되는 것을 알 수 있다. 그 이후부터는 표면 거칠기의 변화가 크지 않다. 더 자세한 표면의 상태를 분석하기 위해 가공 후 150, 300, 400 초 가공된 시편의 표면을 실체현미경과 AFM 3차원 이미지로 표면 상태를 확인하였다. Fig. 5의 그래프에서 가공이 이루어지고 있는 구간인 150 초 부분의 시편을 측정하였다. 그에 대한 결과는 Fig. 6의 이미지와 같다. 실체현미경 이미지를 보면 가공 전과 마찬가지로 표면 굴곡의 차가 있으나 굴곡의 크기가 완만해지고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 5에 도시된 결과에 따라 실제 가공이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

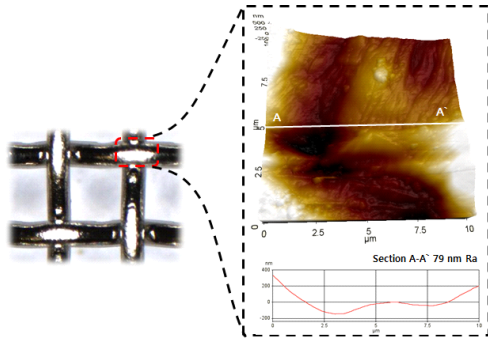


Fig. 4 Sample surface before ECP. stereoscopic, AFM topographical image, cross sectional profile along A-A'

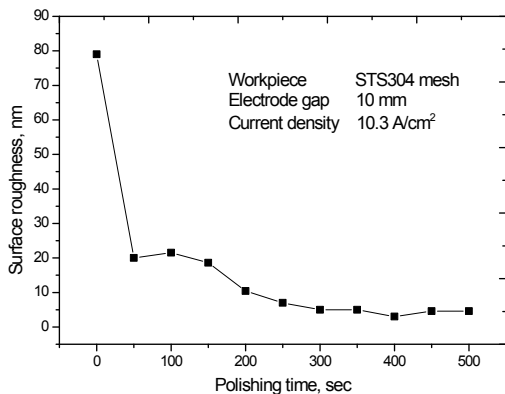


Fig. 5 Comparison of surface roughness variation in ECP according to various polishing time

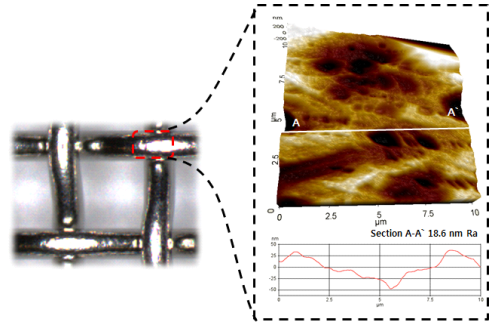


Fig. 6 Sample surface after ECP. stereoscopic, AFM topographical image, cross sectional profile along A-A' at 150 sec

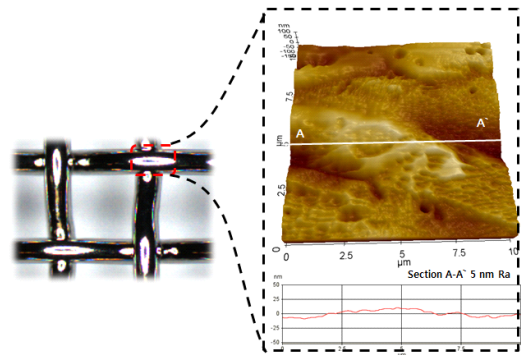


Fig. 7 Sample surface after ECP. stereoscopic, AFM topographical image, cross sectional profile along A-A' at 300 sec

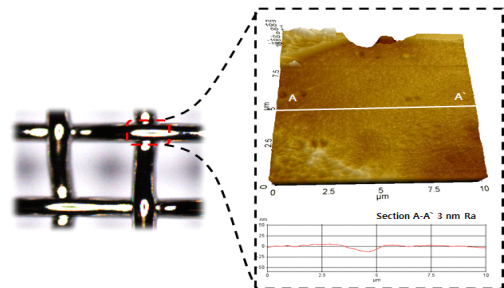


Fig. 8 Sample surface after ECP. stereoscopic, AFM topographical image, cross sectional profile along A-A' at 400 sec

표면 거칠기는 약 18.6 nm Ra 이며, 자세한 표면 상태를 확인하기 위해 AFM 3차원 이미지와 프로파일 곡선을 보면 표면의 굴곡은 가공 전보다 조금 완만해지고 있으나 용해가 이루어지는 과정에서 나타나는 피트(pit)는 최대 약 0.8 μm 의 크기로 표면에 생성됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 300 초로 가공한 시편의 표면을 측정한 이미지이다. 표면 거칠기는 약 5 nm Ra로 측정이 되었으며, 실체현미경으로 측정된 표면 이미지를 보면 Fig. 6보다 표면의 굴곡이 보이지 않으며, 광택효과가 발생되기 시작하였다. AFM 3차원 이미지를 보면 미소한 굴곡은 있으나 거의 완만해졌으며, 피트의 크기도 많이 감소하였다. 프로파일 곡선도 굴곡의 차가 거의 없어져 표면이 평활화 되어졌다. Fig. 8은 400 초로 가공한 시편의 표면을 측정한 이미지이다. 표면 거칠기는 약 3 nm Ra로 측정이 되었으며, 실체현미경으로 측정된 표면 이미지를 보면 Fig. 7과는 거의 차이 없음을 정도로 표면의 굴곡이 완만하고, 광택효과가 측정되었다. AFM 3차원 이미지를 보면 굴곡이 거의 대부분 완만해졌으며, 피트도 Fig. 7보다 축소 및 감소되었다.

Fig. 9는 가공시간에 따른 ECP한 시편의 와이어를 채취하여 각 조건별 재료제거율을 나타낸 그래프이다. 100 초까지는 변화가 없으나 150 초부터 재료가 제거되기 시작한다. 특히 150 초 부분에서 가장 높은 30.3 μm³/sec 제거율을 보이고 있으며 이후부터는 20 μm³/sec 대로 일정한 제거율을 유지한 것을 알 수 있다.

즉, 150 초 부분까지는 철부분이 심한 부분의 선택적인 용해가 가장 활발하게 이루어지고 있으며, 이후부터는 안정된 절연 산화막이 형성되어 전기화학적 재료제거작용이 둔화된 것을 예상할 수 있다.

4.2 전류밀도에 따른 표면 분석

Fig. 10은 정해진 가공시간에 전류밀도의 변화에 따라 ECP된 시편의 표면의 거칠기를 나타낸 그래프이다.

전류밀도 1.03 A/cm²부터 가공이 이루어지기 시작하며, 표면 거칠기는 전류밀도가 높아질수록 향상된다. 전류밀도 7.2 A/cm²부터 표면 거칠기는 약 2.6 nm Ra로 가장 좋으며, 이후부터는 약 5 nm Ra 이

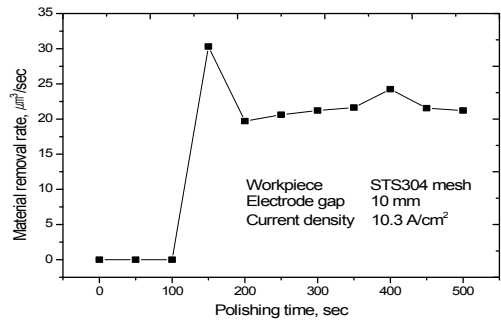


Fig. 9 Material removal rate variations according to polishing time

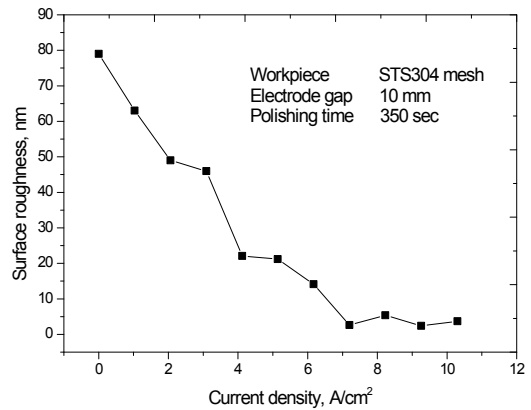


Fig. 10 Comparison of surface roughness variation in ECP according to various current

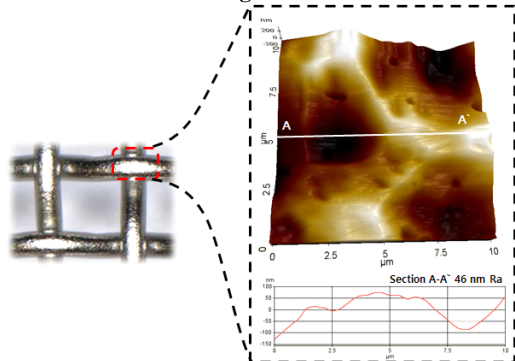


Fig. 11 Sample surface after ECP. stereoscopic, AFM topographical image, cross sectional profile along A-A' at 3.09 A/cm²

하로 유지되면서 표면 거칠기가 둔해진 것을 알 수 있다. 다음으로 더 자세한 표면 상태를 분석하기 위해 전류밀도 3.09, 4.12, 7.2 A/cm²의 시편의 표면을 실체현미경과 AFM을 통해서 분석하였다.

Fig. 11는 3.09 A/cm²로 가공한 시편의 표면을 측정된 이미지이다. AFM으로 측정된 표면 거칠기는 약 46 nm Ra이며, 가공 전보다 표면 거칠기가 향상되었다. 3차원 이미지를 보면 가공 전보다는 표면에 금속용해가 이루어져 피트 흔적이 측정되었다. 피트는 약 5μm 이상의 크기를 가지고 있다.

Fig. 12는 4.12 A/cm²로 가공한 시편의 표면을 측정된 이미지이다. AFM으로 측정된 표면 거칠기는 약 22.1 nm Ra이며, 앞의 가공조건인 Fig. 11 보다는 향상되었다. 그러나 3차원 이미지를 보면 무수히 많은 피트가 측정이 되었다. 피트의 크기는 약 0.83 μm 정도 된다. 실체현미경으로 측정된 이미지를 보면 Fig. 4보다 표면의 굴곡이 감소되고 광택효과가 발생되기 시작한 것을 알 수 있다. Fig. 13은 7.2 A/cm²로 가공한 시편의 표면을 측정된 이미지이다. AFM으로 측정된 표면 거칠기는 약 2.6 nm Ra이다. 프로파일 곡선을 보면 앞의 결과들보다 굴곡의 깊이가 거의 없으며, 표면이 평활화 된 것을 알 수 있다. 3차원 이미지를 보면 약간의 미세한 피트의 흔적은 있으나 Fig. 5보다 많이 감소했다. Fig. 14는 전류밀도 변화 따라 ECP 한 시편의 와이어를 채취하여 각 조건별 재료 제거율을 나타낸 그래프이다. 전류밀도가 상승될수록 재료의 제거율이 높아지는 것을 알 수 있다. 전류밀도 2.06 A/cm²까지는 재료의 제거가 이루어지지 않으나 이후부터는 재료 제거가 시작되며, 전류밀도 4.12 A/cm²부터 7.2 A/cm²까지 부분에서 주춤해진다. 이 부분은 11.26 μm³/sec의 재료 제거율을 보이고 있다. 전류밀도 8.23 A/cm²에서 상승하여 10.3 A/cm²부분까지 주춤해진 것을 알 수 있다.

이 부분은 14.72 μm³/sec의 재료 제거율을 보여주고 있다. 높은 전류밀도의 사용은 의도하고자 하는 범위를 넘어선 과도한 금속의 전해용출로 인한 치수정밀도 저하와 지나치게 활발한 반응에 의한 표면 피트의 발생을 야기할 수 있다. 따라서 재료의 종류와 형태 및 각종 실험조건에 따라 적절한 전류밀도의 선정이 필요하다고 판단된다.

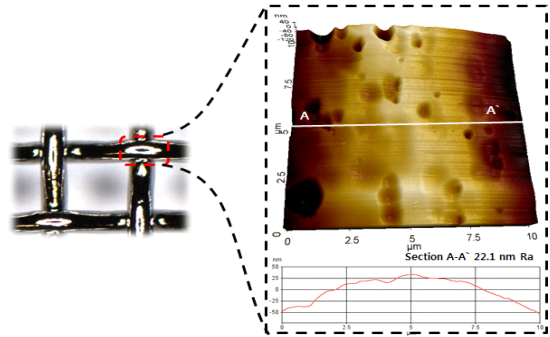


Fig. 12 Sample surface after ECP. stereoscopic, AFM topographical image, cross sectional profile along A-A' at 4.12 A/cm²

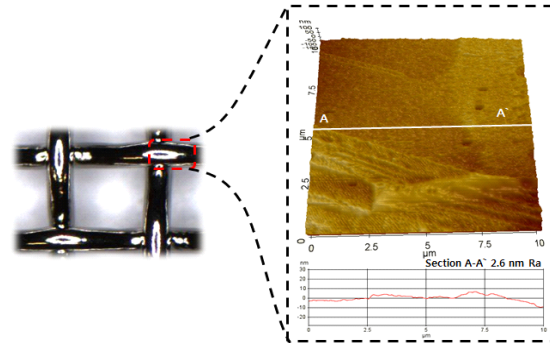


Fig. 13 Sample surface after ECP. stereoscopic, AFM topographical image, cross sectional profile along A-A' at 7.2 A/cm²

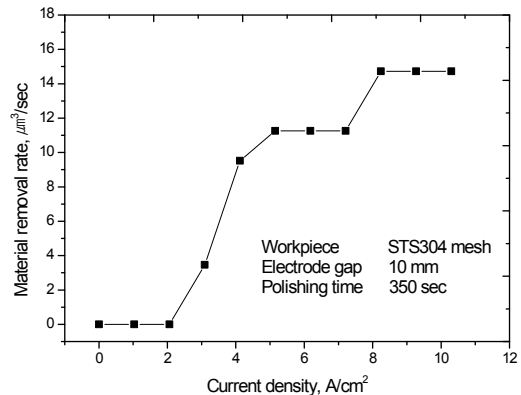


Fig. 14 Material removal rate variations according to current density

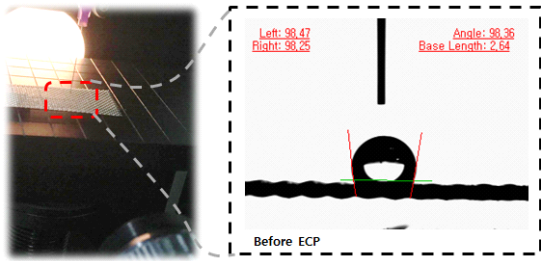


Fig. 15 Contact angle of before ECP

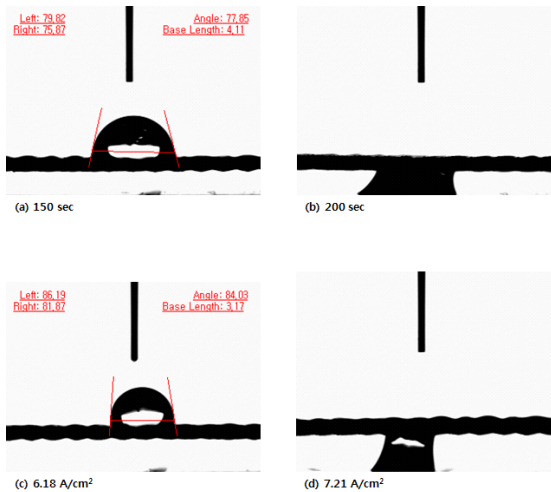


Fig. 16 Contact angle of after ECP (a), (b) polishing time (c), (d) current density

4.3 접촉각의 측정

ECP는 표면의 굴곡을 감소시켜 표면이 평활화 때문에 표면 에너지의 증가로 인하여 친수효과를 얻을 수 있다. Fig. 15는 가공 전의 시편에 접촉각 측정기로 측정한 결과이다. 약 98°측정되었으며, 망 형태로 되어 있지만 표면의 굴곡이 차가 커서 물이 통과되지 못한다. Fig. 16은 각각의 조건으로 전기화학 가공된 시편의 표면을 접촉각을 측정한 결과이다. 그 중 망에 통과되기 전과 후의 표면의 이미지를 보여준다.

Fig. 16 (a), (b)는 가공시간에 따른 조건으로서 150 초에서 망에 통과되지 않으나 200 초부터 망에 쉽게 통과되어진다. Fig. 16 (c), (d)는 전류밀도에 따른 조건으로서 6.18 A/cm²까지 망에 잘 통과되지 않으며, 약 84°측정되었다. 이후 7.21 A/cm²부터 측정이 불가할 정도로 망에 통과가 된다. 즉, 전기화학 가공을 통하여 재료의 표면을 연마하게 되면, 소수성질의 표면이 친수성질의 표면으로 변하게 되는 적절한 실험조건이 존재함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 스테인리스 304 망의 전기화학 폴리싱의 가공시간 및 전류밀도에 따른 조건으로 가공하여 표면을 비교 및 분석하였다.

(1) 가공시간

표면 거칠기는 가공시간이 증가할수록 향상되었다. 특히 300 초대부터 표면의 굴곡이 폭이 감소하며, 광택효과를 얻을 수 있었다. 또한 표면 거칠기 약 5 nm Ra 정도의 평활화가 될 뿐만 아니라 피트의 크기와 수가 감소되었다.

재료 제거율의 경우 150 초 부분에서 가장 높은 제거율을 보여주며, 이후 일정한 제거율을 유지한다.

(2) 전류밀도

전류밀도가 증가할수록 표면 거칠기는 향상되었으며, 특히 7.2 A/cm² 부분에서 약 5 nm Ra 이하의 가장 높은 표면 거칠기를 얻었다.

재료 제거율의 경우 3.09 A/cm²부터 재료가 제거되는 것을 알 수 있으며, 강제로 전류밀도를 높일수록 일정하게 유지하는 구간과 다시 향상되는 구간이 구분되어 진다.

(3) 접촉각 측정

가공시간 조건에서는 200 초부터 표면이 친수화되기 시작하였으며, 전류밀도 조건에서는 7.21 A/cm²부터 친수화되기 시작하였다. 전체적으로 표면 거칠기가 약 20 nm Ra 이하부터 물이 망에 걸려 접촉각을 형성하지 않고 곧바로 통과되는 것을 알

수 있다. 향후 세정테스트를 통하여 더 자세한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2014년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2014R1A1A2059775)을 받아 수행한 연구 과제입니다.

REFERENCES

1. Hibert, L. R., Bagge-Ravn, D., Kold, J. and Gram, L., "Influence of Surface Roughness of Stainless Steel on Microbial Adhesion and Corrosion Resistance." *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, Vol. 52, No. 3, pp. 175-185, 2003.
2. Lee, S. J. and Lai, J. J., "The Effects of Electropolishing (EP) Process Parameters on Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 140, pp. 206-210, 2003.
3. Rajurkar, K. P., Zhu, D., McGeoug, J. A., Kozak, J. and De Silva, A., "New Developments in Electro Chemical Machining," *CIRP Ann-Manuf. Technol.*, Vol. 48, No. 2, pp. 567-579, 1999.
4. An, S. W., Lee, J. H, and Park, M. S., "A Study on the Characteristics of Electro-Polishing and Utility Materials for Gas Transitting", *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.* Vol. 3, No. 3, pp. 52~57, 2004.
5. 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.
6. Song, J. B. Lee, E. S. and Park, J. W., "A Study on the Machining Characteristics of Electropolishing for Stainless Steel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 23, No. 2, pp. 279-286, 1999.
7. Kim, U. S. and Park, J. W., "Vibration Electrochemical Polishing (VECP) for Improved Surface Defects of Stainless Steel," *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, Vol. 22, No. 5, pp. 795-799, 2013.
8. Zhao, H. and Humbeeck, J. B., "Electrochemical Polishing of 316L Stainless Steel Slotted Tube Coronary Stent," *J. Mater. Sci: Mater.Med.*, Vol. 13, pp. 911-916, 2002.
9. Kim, Y. B., Kim, J. T., Ahn, D. G., Park, J. R., Jeong, S. H. and Park, J. W., "AFM based Surface Verifications of Pulse Electrochemical Polishing for Various Frequency Conditions", *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, Vol. 21, No. 2, pp. 246-251, 2012.
10. Lee, S. J. Bae, H. J. Juen, H. Y. and Park, H. S., "Presumption of Mathematical Model on Spindle Vibration of STS304 for the End Milling Working by Design of Experiment," *Proc. K SMPE Spring Conf.* 2004, pp. 60-65, 2004.