

니티놀 형상기억합금의 표면 거칠기 향상 및 미세 버 제거를 위한 마이크로 전해연마의 가공특성 분석

신민정*, 백승엽*, 이은상⁺

(논문접수일 2007. 7. 22, 심사완료일 2007. 8. 27)

A Study for Improving Surface Roughness and Micro-deburring Effect of Nitinol Shape Memory Alloy by Electropolishing

Min-Jung Shin*, Seung-Yub Baek*, Eun-Sang Lee⁺

Abstract

Electropolishing, the anodic dissolution process without contact with tools, is a surface treatment method to make a surface planarization using an electrochemical reaction with low current density. Nitinol is a metal alloy composed of Ni and Ti around 50% respectively which has shape memory effect. Nitinol can be put various applications which require purity and high precision surface of products. The aim of this study is to investigate the characteristic of electropolishing effect for nitinol workpieces. In order to analyze the characteristics of electropolishing effect, surface roughness and micro-burr size were measured in terms of machining conditions such as current density, machining time and electrode gap. The tendencies about improvement of surface roughness and deburring effect by electropolishing for nitinol workpieces were determined.

Key Words : Electropolishing(전해연마), Electrochemical deburring(전해디버링), Shape memory alloys(형상기억합금), Nitinol(니티놀)

1. 서론

현재 다양한 분야에 대한 산업이 발달함에 따라 초정밀 미세부품, 인체 삽입용 의료기기, 마이크로 센서 등 특수한

목적용 가진 제품의 요구가 증대하고 있다. 각 제품의 목적에 맞는 가공 기술이 요구되고 있으며, 특히 인체용 의료기기, 마이크로센서, 반도체 기기 등에서는 기존 기계적인 연마 방식으로 이룰 수 없는 표면 품질을 요구하고 있는 실정

* 인하대학교 기계공학과 대학원
+ 교신저자, 인하대학교 기계공학과 (leees@inha.ac.kr)
주소: 402-751 인천시 남구 용현동 253

이다. 기존 기계적인 가공방법은 가공 후 표면 거칠기가 양호하게 되더라도 공작물 표면에 미소한 가공흔적 및 가공변질층이 남아있어 극 청정한 표면 품질을 요구하는 제품에 적용할 수 없다.

이에 따라 기존의 공구와 공작물의 접촉하는 방식을 사용하는 가공방식을 배제하고 전기-화학적 용출반응을 응용한 전해연마가 필요하게 되었다. 전해연마는 전기-화학적 제거가공을 일컫는 전해가공의 일종으로서 전해액 중에 공작물을 (+) 극에, 불용해성이며 전기저항이 작은 동(銅) 등을 (-) 극에 연결하고 전류를 통할 때 공작물의 표면을 용해시켜 매끈하고 광택이 있는 면으로 만드는 방법으로서 표면의 미소 돌출부를 선택적으로 용해함으로써 일반 가공부품의 표면 거칠기 값을 50~80% 정도 향상시킨다. 또한 기계가공으로 인한 표면의 가공 흔적 및 가공변질층 등을 제거해주어 표면 거칠기를 향상시켜 평활한 표면 및 광택을 얻게 해주며 부식에 대한 저항성을 증가시킨다. 또한 피로파괴 촉진과 박테리아 성장을 일으키는 수소의 제거, 표면의 광택효과, 변색과 응력의 제거, 접착성 증가, 디버링 효과 등을 가져온다⁽¹⁻⁴⁾.

현재 일본을 비롯한 여러 나라에서는 형상기억 성질을 가지고 있는 니티놀(Ni-Ti shape memory alloy; nitinol)의 사용을 점차 증진시켜 마이크로 액츄에이터, 마이크로 로봇 등과 같은 미세 부품 제작에 활용되고 있다. 온도의 변화에 따라 결정구조가 변하는 성질을 가지고 있는 니티놀은 현재까지 개발되었던 형상기억 합금 중 가장 좋은 기억력을 가지는 것으로 평가되어 인체 삽입용 스텐트 및 인공근육 등과 같은 의료가기, 온도 제어장치에 이용되는 등 차후 그 이용가치가 점점 높아지리라 기대되고 있다.

이러한 미세 부품 및 의료가기 등 첨단 구조물을 제작하기 위해서는 미세 가공 및 표면 처리에 대한 기술 개발이 필수적이다. 특히 이러한 제품을 사용하기 위해서는 극 청정하고 평활한 고품질의 표면 품질을 요구하게 된다. 그러나 니티놀은 상온에서 취성을 가진 난 가공성 소재로 알려져 있어 공구가 직접 접촉하여 가공하는 기계가공, 기계 연마 등의 고에너지 가공기술을 적용하면 가공 후 소재 특성이 변화됨으로써 형상기억효과가 크게 떨어지는 것으로 보고되고 있다⁽⁵⁾.

따라서 본 논문에서는 니티놀 소재를 이용한 구조물의 효과적인 표면연마 및 디버링 효과를 확인하기 위하여 전해연마를 적용하여 가공조건에 따른 가공특성을 조사하고자 한다. 전해연마의 가공특성을 결정짓는 중요한 인자인 전류밀도, 가공시간, 간극에 따른 표면 거칠기와 실험 전, 후의 미세 버의 크기를 측정하여 실험 결과를 분석하여 각 가공 조건에 따른 가공 경향을 파악하였다.

2. 전해연마 실험 및 실험결과

2.1 실험 장비

Fig. 1은 본 실험에서 쓰인 전해연마 실험 장치를 나타낸 개략도 이다. 공구로 사용되는 전극은 구리를 사용하여 (-) 극에 연결하였고, 구리선으로 연결된 지그를 (+)극에 연결하여 마이크로 이송장치에 부착하여 전해 수조 내에서의 공작물의 위치를 조절하기 용이하도록 설치하였다.

표면 거칠기 향상을 위한 실험으로서는 시편의 표면이 전극에 평행하게 하여 실험을 진행하였으며, 미세 버의 제거를 위한 실험에서는 시편 제작 당시 임의로 만들어진 버의 위치와 수직이 되도록 전극을 위치하여 실험을 진행하였다. 실험 전 니티놀 시편의 표면 거칠기는 $0.8\mu\text{mRa}$ 이었으며, 임의로 제작한 미세 버의 크기는 $700\mu\text{m}$ 이었다.

2.2 가공조건 설정

전해연마의 가공효과에 영향을 미치는 가공 변수들 중에서 전해액의 구성, 전극의 재질, 가공온도를 고정조건으로 두고 전류밀도, 가공시간, 간극을 변화시키며 실험하여 실험 후의 표면 거칠기를 측정하였다. Table 1은 본 실험의 실험 조건을 나타내고 있다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 표면거칠기 향상 효과에 대한 실험

3.1.1 전류밀도에 따른 표면 거칠기 향상

형상기억 합금의 표면 거칠기 향상을 위한 전해연마 특성을 파악하기위하여 전해연마 실험을 진행하였다. Fig. 2는 니티놀 형상기억합금의 전해연마 실험 결과로서 인가된 전류밀도에 따른 표면 거칠기를 나타내고 있다. 본 실험에서 적용한 가공시간은 180sec, 가공 간극은 1mm이며, 전해액

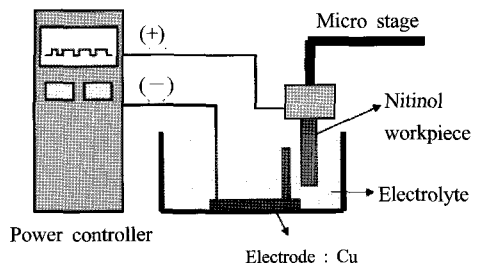


Fig. 1 Electropolishing system

Table 1 Fixed condition in experiment

Conditions	Values
Composition of electrolyte	Phosphoric acid (H ₃ PO ₄) Sulphuric acid (H ₂ SO ₄) Distilled water (H ₂ O)
Workpiece	Nitinol 1Ni: 51%, Ti: 49%
Electrode	Copper (99%)
Chucking	Copper (99%)
Surface roughness tester	Taylor Hobson Surtronic 3 ⁺
Size of burr measurement	Camscope

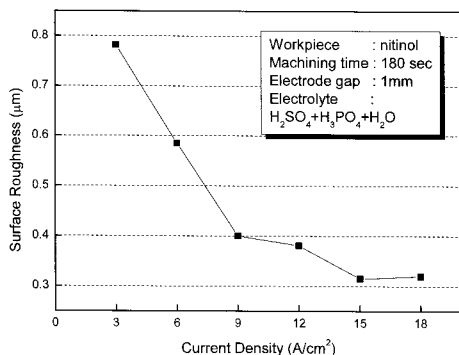


Fig. 2 The relationship between surface roughness and current density

은 인산(H₃SO₄), 황산(H₂SO₄), 증류수(H₂O)의 혼합용액을 사용하였다.

같은 가공시간에 서로 다른 전류밀도를 인가하였을 때 전류밀도가 높을수록 표면 거칠기가 향상되는 경향을 보이고 있다. 표면 거칠기는 인가한 전류 밀도가 약 9A/cm²이상의 영역에서 큰 향상을 보이고 있다.

Fig. 3은 실험 전과 전류 밀도가 6A/cm², 12A/cm², 18A/cm² 일 때의 표면 현미경 사진이다. 가공 전 표면 사진(fig. 3(a))를 분석하면 tool mark 등과 같은 스크래치를 비롯하여 표면 불순물, 작은 돌기 등을 확인할 수 있다.

Fig. 3의 (b)와 (c)는 6A/cm², 12A/cm²의 전류밀도로 180sec 동안 전해연마 가공을 실행한 후의 표면 사진을 나타내고 있다. 가공 후의 표면 거칠기는 전류밀도가 6A/cm²일 때 약 0.58µmRa, 12A/cm²일 때 약 0.38µmRa를 나타내어 가공 전 표면 거칠기에 비하여 큰 향상을 보이고 있음을 확

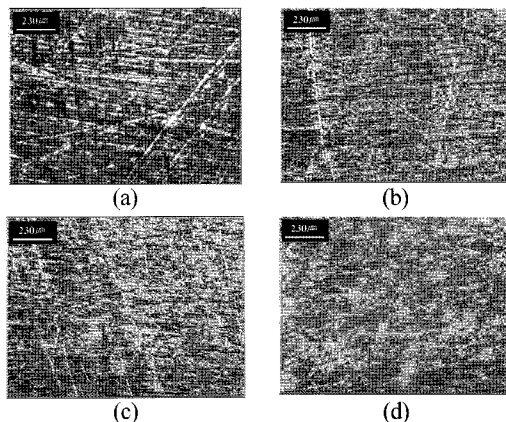


Fig. 3 Micrographics of surface (a)before electropolishing and applying (b)6A/cm² (c)12A/cm² (d) 18A/cm²

인할 수 있으며, 사진을 통하여 가공 전의 표면에 남아있던 스크래치와 표면 불순물 등이 많이 사라진 것을 확인할 수 있다.

18A/cm²의 전류밀도를 인가하여 120sec 가공 후의 표면 사진은 Fig. 3의 (d)에 나타나 있다. 이때의 표면 거칠기는 약 0.32µm를 나타내고 있으며, 표면상에 남아있던 스크래치 등의 불순물이 완벽하게 사라진 것을 확인할 수 있다.

본 실험을 통하여 전해연마를 통하여 표면 거칠기를 향상시키는 데에 있어서 전류밀도가 중요한 역할을 하고 있는 것을 확인할 수 있다. 높은 전류밀도를 사용하면 짧은 가공 시간에서도 낮은 전류밀도를 사용하여 가공 하였을 때 보다 양호한 전해연마 효과를 발생시킬 수 있다.

3.1.2 가공 시간에 따른 표면 거칠기 향상

가공 시간에 따른 표면 거칠기의 향상을 확인하기 위하여 전해연마 실험을 진행하여 가공시간 30, 60, 90, 120, 180, 210sec 후의 시편의 표면 거칠기를 측정하였다. 본 실험에서 적용한 전해밀도는 9A/cm²이었으며 가공 간극을 1mm, 전해액은 인산(H₃SO₄), 황산(H₂SO₄), 증류수(H₂O)의 혼합용액을 사용하였다.

Fig. 4는 가공 전 표면 거칠기가 0.8µmRa인 니티놀 시편의 가공 후 표면 거칠기를 나타내고 있다. 전체적으로 가공 시간이 길어질수록 공작물 표면 거칠기가 향상되는 경향을 보이고 있다. 시편의 표면 거칠기는 전해연마 가공 시작 후 120sec에서 급격한 향상을 보였으며, 이때의 표면 거칠기는 약 0.5µmRa를 나타내고 있다. 120sec를 초과하여 180sec

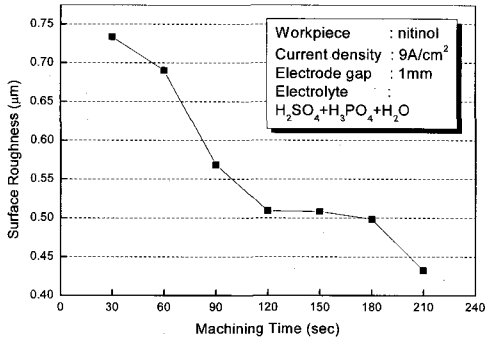


Fig. 4 The relationship between surface roughness and machining time

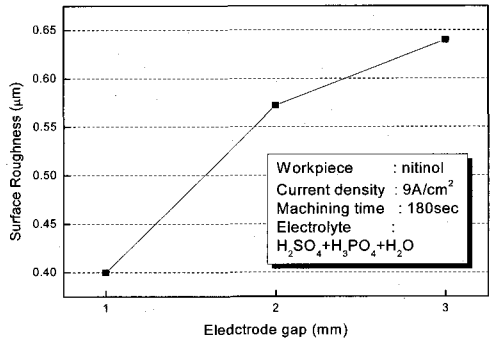


Fig. 6 The relationship between surface roughness and electrode gap

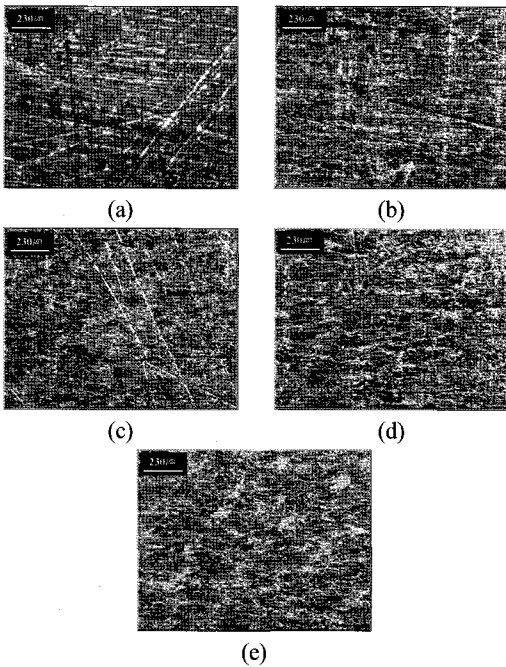


Fig. 5 Micrographics of surface (a)before electropolishing and after electropolishing (b)60sec (c) 120sec (d)180sec (e)more than 300sec

영역에서는 표면 거칠기의 향상은 있으나 향상정도가 크지 않다. 그러나 가공시간이 180sec를 넘어서는 다시 표면 거칠기의 향상이 다시 커져 가공 후 210sec 가 지난 후의 표면 거칠기는 약 0.43µmRa를 나타내어 결과적으로 가공 전 표면 거칠기에 비하여 약 50%의 향상을 나타냈다.

Fig. 5은 은 실험 전과 가공 시간 60, 120, 180, 300sec 경과후의 표면 사진이다. 가공 전(a) 표면 사진을 분석해 보

면, 기계적인 표면 가공을 통하여 생긴 tool mark 등과 같은 표면 불순물을 확인할 수 있다.

Fig. 5의 (b)~(d)는 가공시간이 경과함에 따라 표면의 품질이 향상되는 것을 시각적으로 나타내고 있다. 가공 전에 비하여 가공시간이 경과함에 따라 점차적으로 표면 불순물이 사라지고 있는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 300sec 경과 후 표면에 잔재하는 흠집 등의 불순물들이 완벽히 사라지고 표면 품질이 크게 향상된 것을 볼 수 있었다.

3.1.3 가공 간극에 따른 표면 거칠기 향상

니타놀 시편의 표면 거칠기 향상 정도를 확인하기 위하여 가공 간극을 달리하여 실험한 결과 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. 이 실험에서 인가된 전류밀도는 9A/cm², 가공시간은 180sec 이었으며, 사용된 전해액은 상기 실험들과 같은 인산(H₃PO₄), 황산(H₂SO₄), 증류수(H₂O)의 혼합용액을 사용하였다.

Fig. 6에서와 같이 가공 간극이 커질수록 표면 거칠기는 오히려 약화되는 경향을 보이고 있다. 표면 거칠기는 가공 간극이 가장 작은 1mm일 때에 0.4µm를 나타냈으며 가공 간극이 가장 큰 3mm에서는 약 0.64µm를 나타내었다. 이는 가공 간극이 멀어질수록 음극과 양극 사이에 일어나는 전기-화학적인 효과가 미치지 못하기 때문이다. 또한, 본 실험에서는 나타나지 않았으나 가공 간극이 아주 근접한 경우에는 방전 현상으로 인한 피트(pit)면이 발생하는 등의 표면 품질의 저하를 가져오므로 적절한 가공 간극의 선정이 전해연마를 통하여 표면 거칠기를 향상시키는 데에 중요한 역할을 수행하고 있음을 나타낸다.

3.2 디버링 효과에 관한 실험

전해연마를 통한 미세 버 제거효과를 확인하기 위하여

Fig. 7과 같은 니티놀 시편을 제작하였다. 인위적으로 생성한 미세 버의 크기는 약 $700\mu\text{m}$ 이었으며 가공 후의 잔존하는 버의 크기를 측정하여 전해연마 효과를 확인하였다.

Fig. 8은 버의 크기가 90% 이상 제거되어 $70\mu\text{m}$ 이하가 될 때의 전류 밀도에 따른 가공 경과 시간을 나타내고 있다. 이때 사용된 전해액은 인산(H_3SO_4), 황산(H_2SO_4), 중류수(H_2O)의 혼합용액이며, 가공 간극은 1mm 이었다.

인가된 전류밀도가 $3\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때에 버의 크기를 90% 이상 제거하는 데에는 700sec 이상이 소요 되었으나, 전류밀도가 $6\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때에는 270sec 가 소요되어 전류밀도가 증가할수록 미세 버를 빠른 시간 안에 효과적으로 제거할 수 있음을 확인할 수 있었다. 전류밀도가 가장 큰 $9\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때에는 120sec 가 소요되었다.

Fig. 9는 시간이 경과함에 따라 버의 크기를 측정하여 나타낸 그래프이다. 본 실험에서의 전류밀도는 $6\text{A}/\text{cm}^2$ 이었으며, 다른 실험조건은 상기 실험과 같다.

시간이 경과함에 따라 버의 크기는 점차 줄어들었으며, 최

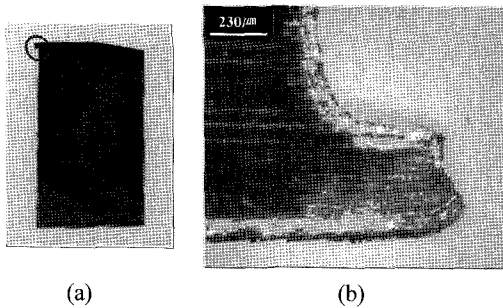


Fig. 7 The shape of burr in nitinol workpiece

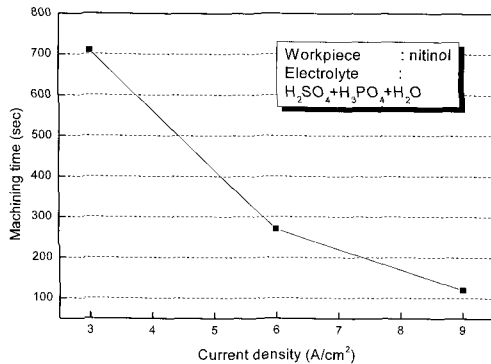


Fig. 8 Machining time when the burr size is smaller than $70\mu\text{m}$

종적으로 버의 크기가 완벽히 제거되는 데에는 전 전류밀도 구간에서 900sec 이상의 가공시간이 소요되었다. 미세 버의 크기가 줄어들어 뾰족한 첨단부분이 완만해 질수록 버를 제거하는 데에 소요되는 가공시간이 늘어나는 경향을 보이는 이유는 전류가 집중되는 첨단부분의 면적이 버가 줄어들수록 넓어지기 때문이다. 이는 뾰족하고 완만한 형상의 버를 제거하는 것보다 얇고 뾰족한 형상의 버를 제거할 경우 짧은 가공시간을 소요함을 보여주고 있다.

전류밀도에 따른 버의 크기를 감소시키는 데에 소요된 가공시간은 Fig. 10에 나타나 있다. 전류밀도가 클수록 버가 제거되는 속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12의 (a)-(c)는 각 전류밀도 구간에서의 전해연마 가공시간 120sec 경과 후의 버의 크기를 나타고 있으며 Fig. 12의 (d)는 전류밀도가 $9\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때 버가 완벽하게 제거되었음을 보여주고 있다. 이때 소요된 가공 시간은 900sec 였다.

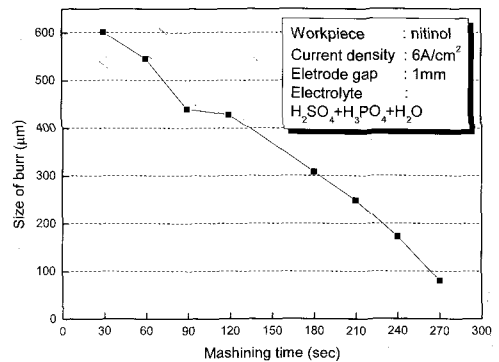


Fig. 9 The relationship between burr size and polishing time in $6\text{A}/\text{cm}^2$

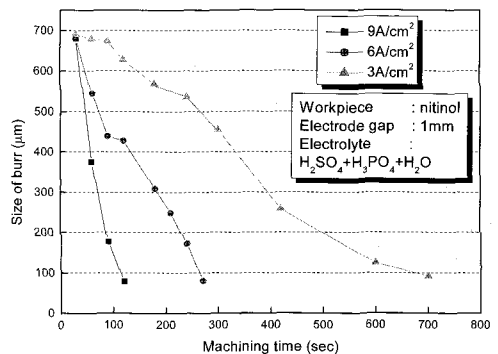


Fig. 10 The burr size in terms of machining time and current density

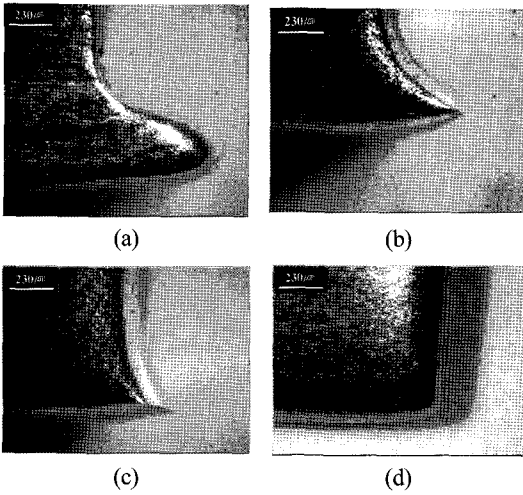


Fig. 11 Micrographics of micro-burr after 120sec electro-polishing with (a)3A/cm² (b)6A/cm² (c)9A/cm² and (d) after than 900sec at 9A/cm²

본 실험을 통하여 전해연마를 통하여 미세 버의 제거 효과를 확인하였으며 버의 크기와 전류밀도에 따라 소요되는 가공시간의 경향을 확인할 수 있었다.

4. 결론

니티놀 형상기억합금의 전해연마 실험을 진행하여 표면 거칠기 향상과 미세 버의 제거효과와 가공 경향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험결과 전해연마를 실행함에 있어서 전류밀도는 표면 거칠기 향상과 미세 버를 제거하는 데에 중요한 요소로 작용하며 전류밀도가 높아질수록 양호한 표면 거칠기 가지는 경향을 보였다. 9A/cm²이상의 전류밀도가 인가 되었을 때 적은 가공시간에도 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었으나, 전류밀도가 12A/cm² 이상으로 높아질 경우 표면 거칠기 향상정도가 둔화됨을 나타내었다.
- (2) 니티놀 시편을 전해연마 가공을 실행할 경우 가공시간이 증가함에 따라 표면 거칠기가 향상되는 경향을 보였다. 가공시작 후 120sec 경과 후 가공 전과 비교하여 급속한 표면 거칠기 향상을 보였으며, 120sec를 초과하여 180sec 사이의 영역에서는 표면 거칠기 향상 정도가 둔화됨을 보였다.

- (3) 표면 거칠기를 향상시키는 데에 있어서 적절한 가공 간극의 선정이 중요한 요소로 작용하며, 본 실험에서는 가공 간극이 가장 작은 1mm일 때 가장 좋은 표면 거칠기를 나타내었다. 가공 간극이 클 경우 전극과 공작물 사이에 작용하는 전해연마 효과가 공작물 표면에 미치지 못하여 표면 거칠기 향상을 저해시키는 것으로 나타났다.
- (4) 미세 버를 제거하는 데에 있어서 전류밀도가 높아질수록 버를 제거하는 데에 소요되는 가공시간을 단축할 수 있었다. 9A/cm²의 전류밀도를 인가하여 700μm 크기의 미세 버를 90% 이상 제거할 경우 3A/cm²의 전류밀도를 인가하여 버를 제거하였을 때보다 500sec 이상의 가공시간을 단축할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Lee, E. S., 2000, "Machining characteristics of electropolishing of stainless steel (STS316L)," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16 pp. 591~599.
- (2) Kim, W. M., Shin, M. J. and Lee, E. S., 2006, "A Study of Micro Electrolytic-deburring for Nitinol," *Korean Society for Precision Engineering Spring conference*, 229~230.
- (3) Lee, E. S. and Kim, C. G., 2003, "A study on machining characteristics of the electropolishing of aluminum alloy," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 2, pp. 17~21.
- (4) Lee, E. S., Park, J. W. and Moon, Y. H., 2001, "Development of ultra clean machining technology with electrolytic polishing process," *International Journal of KSPE*, Vol. 2, No. 1, pp. 18~25.
- (5) Mukherjee, R., Christian, T. F. and Thiel, R. A., 1996, "An actuation system for control multiple shape memory alloy actuator," *Sensor and Actuators A:physics*, Vol. 55, 185~192.