

스테인레스 강의 전해연마 가공특성에 관한 연구

*박정우⁺· 이은상⁺⁺· 송지복⁺⁺

A Study on the Machining Characteristics of Electropolishing for Stainless Steel

*Jeong-Woo Park⁺, Eun-Sang Lee⁺⁺ and Ji-Bok Song⁺⁺

⁺ 부산대학교 기계공학부 대학원 ⁺⁺ 부산대학교 기계공학부

Abstract

Electropolishing is the anodic dissolution process in the transpassive state. It removes non-metallic inclusions and improves mechanical and corrosion resistance of stainless steel. If there is a Bailby layer, it will be removed and the true structure of surface will be recovered again. Electropolishing is normally used to remove a very thin layer of material on the surface of a metal component.

The aim of this study is to determine the tendencies of electropolishing STS316L tubes in terms of current density, machining time, temperature, electrode gap and surface roughness.

Keywords : Electropolishing(전해연마), Anodic dissolution(양극용해), Bailby layer(가공변질층, 베일비층), Current density(전류밀도), Electrode gap(전극간극), Electrolyte(전해액)

1. 서론

최근 반도체 산업 등 청정도를 요구하는 산업의 발달로 재료의 정밀도와 청정도가 동시에 요구되어지며, 기존의 기계적 가공방법으로는 공작물 표면에 미소한 가공흔적이 남아있어 요(凹) 부분에 불순물이 잔재하게 된다. 이러한 불순물은 청정도를 요구하는 산업분야에는 적절하지 못하며, 이를 달성하기 위해서 기존의 공구와 공작물이 접촉하는 방식의 가공법에서 탈피한 새로운 비접촉 연마방식인 전해연마(electropolishing)가 필요하게 되었다. 전해연마는 반도체 제조장비, 식품위생기기, 의료기기, 초순수 제조기, 고순도 가스용기, 정밀금형 및 원자력기기등 표면의 정밀도와 청정도를 함께 요구하는 다양한 산업분야에

응용되고 있다. 전해연마는 1912년 독일정부가 시안화 용액으로 은을 마무리 하는 가공방법으로부터 시작되었고, 1935년 Pierre Jacquet이 동(銅)의 전해연마를 성공한 이후 체계적인 실험이 계속되었으며 제2차 세계대전을 계기로 새로운 제법과 결과가 발표되었다.⁽¹⁾

기존의 전해연마 관련 연구^{(2)~(5)}에서는 주로 전류밀도에 따른 금속학적 측면에서의 표면조직 관찰이 주목적이었으나, 본 연구에서는 전해연마 가공을 적용하여 가공물의 표면 거칠기와 표면의 품위, 그리고 조직적 측면을 통해 가공성을 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 스테인레스 강 STS316L의 최적 전해연마 가공특성을 전류밀도, 가공시간, 전해액 온도, 전극간극, 전(前)가공 표면거칠기 등에 따라 평가하고자 한다.

2. 전해연마 가공기구

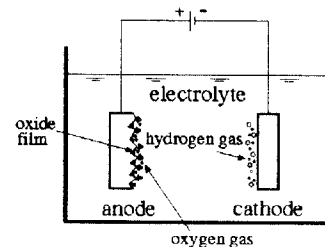


Fig. 1 Principle of electropolishing

전해연마는 전기-화학적 반응을 이용한 연마 방법으로 공작물을 양극, 전극을 음극으로 하여 양극 표면에서의 금속용출을 이용해 표면 평활도, 광택도, 내식성 등을 향상시키는 연마법이다.

Fig. 1과 같이 적절한 전해액 속에 양극인 공작물과 음극인 전극을 넣고 전류를 인가하면 양극 측에서는 미량의 산소가스가 발생하면서 금속의 용해가 이루어지고, 음극 측에서는 용해작용

없이 다량의 수소가스가 발생한다.

Ben Franklin은 어떤 형상의 금속에 전기를 인가하면 모서리, 뾰족한 부분 그리고 불규칙한 부분에 전류가 집중한다는 결과를 증명한 바 있다. 전해연마는 근본적으로 금속의 용출을 이용하는 가공법이므로 이 결과를 도입하면 양극 산화층에서 돌출된 부분에 전류가 집중하여 요(凹) 부분에 비해 빠른 금속용해가 이루어지는 현상을 나타낸다.⁽²⁾

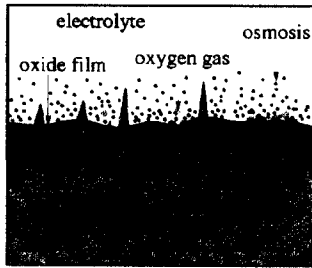


Fig. 2 Electropolishing mechanism

산화층 내의 금속이온은 주위의 전해액 보다 낮은 금속농도를 가지므로 농도 차에 의한 삼투 현상에 의해 Fig. 2와 같이 금속이온의 전해액으로 이동하는 현상이 활발하게 진행된다. 즉 산화층 내에서도 전해액과 접하는 바깥층의 이온이동이 활발하게 이루어져 양극의 돌출부위를 덮고있는 절연성 산화막 두께를 줄여 돌출부위를 전해액 중에 서서히 드러나게 함으로써 그 부분의 선택적 용해를 촉진시킨다.^{(2)~(3)}

전해연마 중에는 산소가 발생하는데, 이는 금속표면에서 발생하는 것이 아니라 Fig. 2와 같이 양극산화층의 바깥부분에서 발생한다. 이후에 산소는 가스화 되어 표면으로 돌출하여 산화층의 표면을 따라 전해액으로 이동한다. 이러한 산소가스의 움직임으로 산화층의 표면부분을 제거하여 돌출부의 우선적 용해를 촉진하게 된다. 그러나 전류밀도가 높으면 다량의 산소가스가 발생하게 되고, 금속표면에 피트(pit)자국이 남게되어 도리어 악영향을 초래한다.⁽³⁾

전해연마는 위에서 언급한 여러반응이 동시에 복합적으로 이루어져 Fig. 3과 같이 표면의 평활화를 달성시킨다. Fig. 3(a)는 공작물의 초기표면을 나타내고 전해연마가 진행됨에 따라 돌출부의 용해속도가 요(凹)부의 속도보다 빨리 진전되어 (b)와 같이 표면이 어느정도 평활화 되며, 보다 시간이 경과되면 (c)와 같이 최종의 다듬질 표면을 나타낸다.

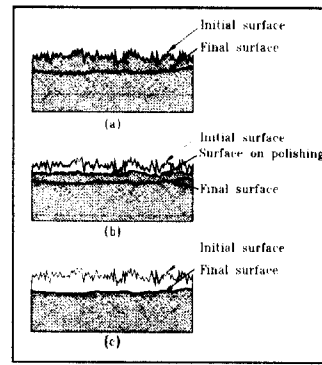


Fig. 3 Leveling process of surface

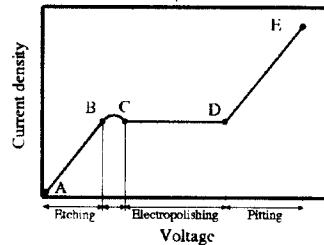


Fig. 4 Current density-Voltage curve of electropolishing⁽³⁾

적절한 용액 내에서 전극과 공작물을 가까이 접근하고 전압을 서서히 높여가면 Fig. 4와 같은 전압-전류밀도 곡선을 얻게 된다. 그림의 AB구간(낮은 전류밀도)은 조직이 나타나는 에칭현상이 발생하며, BC구간은 산화막의 급속한 생성이 일어난다. Plateau구간이라 지칭하는 CD구간에서는 전압의 증가에 따른 전류밀도의 변화가 적는데, 여기가 바로 전해연마 효과가 일어나는 구간이다. 그러나 DE구간에서와 같이 높은 전류밀도를 사용하면 짧은 시간내에 전해연마가 완성될 수 있는 반면 피트(pit)와 같은 표면결함이 발생되기 때문에 일반적으로 plateau구간내의 전류밀도를 사용하게 되나, 실질적으로는 이보다 약간 높은 값을 적용하는 경우가 많다.

3. 실험장치 및 방법

전해연마의 가공특성을 실험하기 위해 Fig. 5와 같은 실험장치를 구성하였다. 전극고정 장치에 음극인 전극을 장착하고, 양극인 공작물을 가공조 내에 두어 전해액에 침전된 채로 전원을 공급하였다. 사용전원은 최대 50V, 50A의 가변이고, 실험후의 시편은 절단하여 연마면(tube내면)을 관찰하였다.

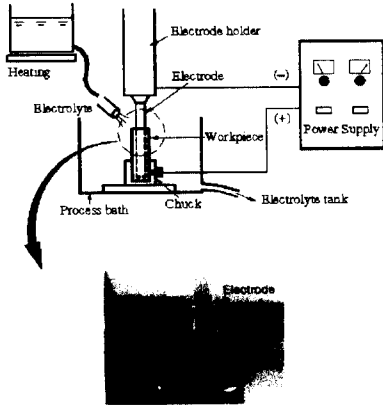


Fig. 5 Experimental setup

Table 1 Chemical composition of STS316L(%)

Symbols for element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Composition (%)	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	12.0~15.0	16.0~18.0	2.0~3.0

Table 2 Experimental conditions

Power supply	50V, 50A DC Bu-Heung Electronics
Workpiece (anode)	STS316L pipe Φ10.6mm (t:1.8mm)
Electrolyte	Phosphoric acid(H ₃ PO ₄) 50% Sulphuric acid(H ₂ SO ₄) 20% Water(H ₂ O) 30%
Electrode (cathode)	Cu (Φ6, 5, 4, 3mm)
Chucking	STS304 (chucked by bolt)
Surface roughness tester	Mitutoyo Surftest SV400
Surface measurement	Olympus BH2-UMA
Metallographic measurement	Olympus DME3-312B

본 실험에서 사용한 재료는 스테인레스 강 STS316L이며, 화학성분은 Table 1과 같다. 시편은 그 용도에 따라 #600, #1800, #3000의 연마입자를 이용하여 래핑으로 전(前)가공을 수행하였다. 사용 전해액은 각각 인산(H₃PO₄), 황산(H₂SO₄), 증류수(H₂O)의 혼합용액을 사용하였다. 인산은 적절한 조건에서는 다른 강산에서 나타나는 부식, 침식, 산화 등이 없이 균일한 용해작용을 일으키며, 황산은 금속의 초기 용해를 일으켜 전류효율을 높이는 역할을 한다.⁽⁵⁾ 전극의 재질은 순동으로 각각 다른 직경으로 가공하였고, 공작물 고정장치는 스테인레스 강 STS304로 제작하였다. 실험

조건은 Table 2와 같다. 모든 시편은 연마후 표면 거칠기, 표면사진, 조직사진으로 검사하였다.

4. 실험결과 및 고찰

(1) 전류밀도에 따른 평가

Fig. 6은 STS316L강의 전해연마 결과 얻어진 전압-전류밀도의 관계를 나타낸 곡선이다. 전극간극은 1mm, 전해액 온도는 60℃, 그리고 사용 전해액은 인산(H₃PO₄), 황산(H₂SO₄), 증류수(H₂O)의 혼합용액이다. 전체적으로 전압의 증가에 따라 전류밀도가 상승하는 경향을 나타내고 있다.

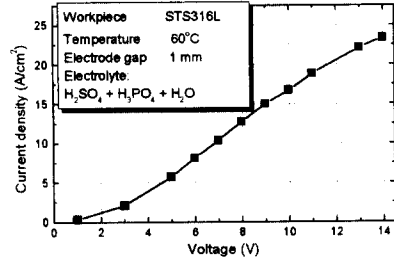
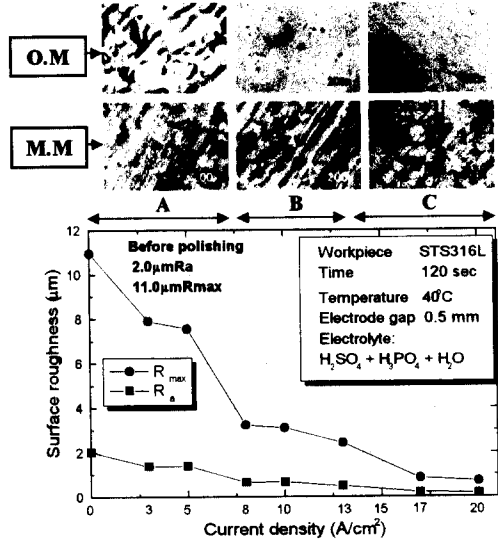


Fig. 6 Current density-Voltage curve of STS316L



O.M : Optical micrographs
M.M : Metallographic micrographs

Fig. 7 Relationship between surface roughness and current density

Fig. 7은 전류밀도와 공작물 표면 거칠기의 상관관계, 그리고 각 전류밀도 영역에서의 표면 성장과 조직사진을 나타내고 있다. 가공전의 공작물 표면 거칠기는 2.0µmRa, 11.0µmRmax이다.

본 실험에서 적용한 가공시간은 120sec, 전해액 온도는 40℃이고 전극간극은 0.5mm이며, 사용 전해액은 인산(H₃PO₄), 황산(H₂SO₄), 증류수(H₂O)의 혼합용액을 사용하였다. 3~20A/cm²의 비교적 높은 전류밀도 영역까지 실험하였기 때문에 가공성에 차이를 두기 위하여 120sec의 짧은 가공시간을 적용하였다. 전체적으로 전류밀도가 높을수록 표면 거칠기는 향상되는 경향을 보이고 있으며, 전류밀도가 약 8A/cm²이상의 영역에서는 큰 향상을 보이고 있지 않다.

0~8A/cm²의 A영역에서의 표면사진과 조직사진을 분석해 보면, 공작물 표면에 용융 재용착에 의해 많은 돌기가 관찰되어 확실한 표면 거칠기 향상과 조직이 전혀 나타나지 않고, 8~13A/cm²의 B영역에서는 수많은 돌기와 변형층이 제거되기 시작하여 입계가 흐린 조직을 보이고 있으며, 13~20A/cm²의 C영역에서는 돌출부분의 선택적 용해로 표면의 평활화가 이루어져 양호한 표면품질을 보이고 있으나, 약간의 피트(pit)자국이 발생하였다. 조직사진에서도 보이는 바와 같이 조직입계가 뚜렷이 관찰되어 짧은 가공시간에서도 양호한 연마효과가 나타났음을 알 수 있다.

(2) 가공시간에 따른 평가

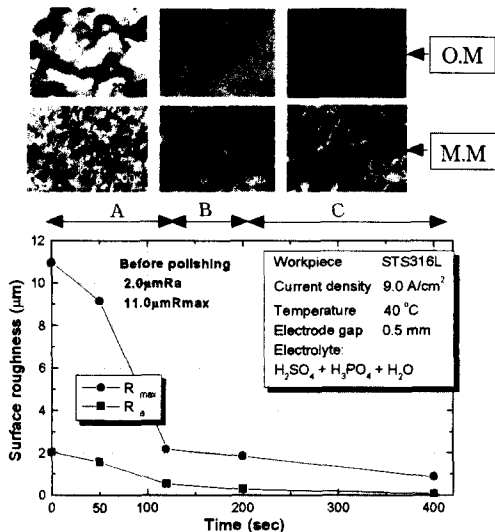


Fig. 8 Relationship between surface roughness and polishing time

Fig. 8은 가공전 공작물 표면 거칠기가 2.0μm Ra, 11.0μmRmax인 시편을 가공시간에 따라 연마하여 공작물 표면 거칠기와의 관계를 나타낸 것

이다. 사용 전류밀도는 9.0A/cm²이고, 전해액 온도는 40℃, 전극 간극은 0.5mm 이다. 전해액은 인산(H₃PO₄), 황산(H₂SO₄), 증류수(H₂O)의 혼합용액을 사용하였다.

전체적으로 가공시간이 길어질수록 공작물 표면 거칠기가 향상되는 경향을 보이며, 약 120sec에서 급격한 향상을 나타내고, 120sec를 넘어서면 표면 거칠기의 향상은 있으나 향상정도가 크지 않다. 0~120sec의 낮은 가공시간을 가지는 A영역에서는 연마가 제대로 되지 않아 표면에 수많은 돌기가 남아있는 표면 형상을 나타내고, 9.0A/cm²의 비교적 높은 전류밀도의 사용으로 입계가 흐린 조직을 보이고 있다. 120~200sec의 B영역에서는 수많은 돌기가 어느정도 제거되고, A영역보다는 입계가 뚜렷한 조직을 나타내고 있으며, 200~400sec의 C영역에서는 표면 품위가 양호하고 입계가 선명한 조직이 나타나는 것으로서 변형층이 완전히 제거되었음을 알 수 있다. 그러나 가공시간을 더욱 증가시켜도 표면품위의 향상이 크지 않으므로 가공효율을 고려할 때 적당한 시간을 선택하는 것이 바람직하다.

(3) 전해액 온도에 따른 평가

Fig. 9는 전해액의 가공중 평균온도에 따른 공작물의 표면 거칠기 변화를 나타낸 것이다. 공작물의 가공전 표면 거칠기는 2.0μmRa, 11.0μmRmax이며, 13A/cm²의 전류밀도, 150sec의 연마시간, 그리고 0.5mm의 전극간극을 사용하였다. 전해액은 인산(H₃PO₄), 황산(H₂SO₄), 증류수(H₂O)의 혼합용액을 사용하였으며, 적절한 전해액 온도에서는 화학반응이 활발하게 진행되어 효과적인 연마표면을 얻을 수 있다. 스테인레스 강 STS316L, 인산-황산-증류수의 전해액을 적용한 본 실험에서는 온도가 상승함에 따라 표면 거칠기가 서서히 양호해 지고, 특히 68℃의 온도에서 표면 품위가 가장 우수함을 알 수 있었다.

전해액의 온도가 높으면 효과적인 금속용해가 이루어지며 따라서 전해액 중에 금속농도가 줄어들게 되어 전해액의 점성이 점점 증가하게 되며, 이로 인해 고점성의 산화층을 형성시켜 금속표면의 요(凹)부분을 덮고 돌출부위만을 우선적으로 용해시키는 선택적 용해가 더욱 활발히 진행되어 가공성을 증가시키게 된다.⁽³⁾ 20~30℃인 낮은 온도의 A영역에서는 Fig. 9와 같이 연마가 제대로 되지 않아 수많은 돌기, 입계가 흐린 조

직을 나타내었다. 30~60°C의 B영역에서는 다량의 돌기가 사라지기 시작하고, A영역 보다는 입계가 선명한 조직을 보이고 있으며, 68°C의 적절한 온도를 포함하는 60°C이상의 C영역에서는 표면 거칠기의 향상정도가 크고, 표면성상과 조직이 아주 양호함을 보이고 있다.

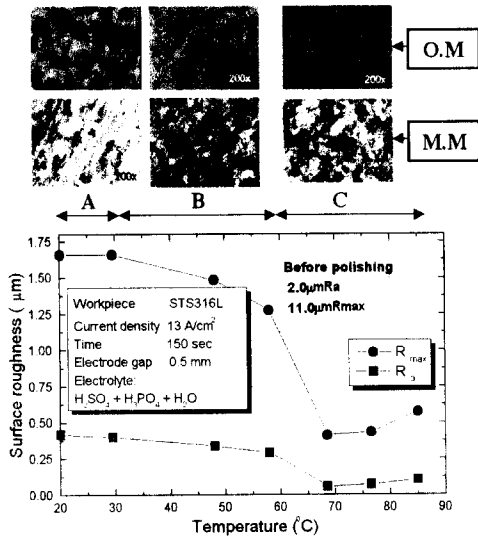


Fig. 9 Relationship between surface roughness and electrolyte temperature

(4) 전극간극에 따른 평가

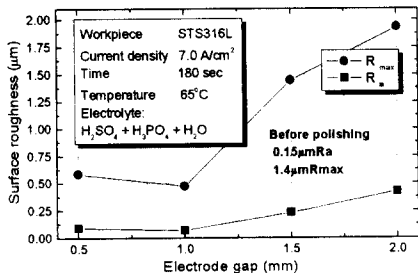


Fig. 10 Relationship between surface roughness and electrode gap

#600의 평균입경을 가지는 입자로 래핑 후, 0.15 μ mRa, 1.4 μ mRmax의 전가공 표면 거칠기를 가지는 시편을 전극간극에 따라 실험한 결과 Fig. 10과 같은 결과를 얻었다. 여기서 사용한 전류밀도는 7.0A/cm²으로 비교적 낮으며 연마시간은 180sec, 전해액 온도는 65°C, 그리고 전해액은 인산(H₃PO₄), 황산(H₂SO₄), 증류수(H₂O)의 혼합용액을 사용하였다.

전극간극이 먼 경우(1.5mm 이상), 오히려 전

가공 표면 거칠기보다 나쁜 결과를 얻게 되었는데 표면사진으로 검사한 결과 Fig. 9의 A영역과 유사하게 용융 재용착 과정에 기인한 수많은 돌기가 관찰되었다. 즉, 낮은 전류밀도의 사용과 전극간극 너무 크기 때문에 전해연마가 제대로 이루어지지 않은 영향인 것이다. 전극간극이 근접한 경우 표면 거칠기의 향상을 보였고, 전극간극이 아주 근접한 경우, Fig. 11 (a)에서와 같이 전극간극 0.5mm에서는 1.0mm에 비해 많은 피트(pit)면이 관찰되었다. 원래 피트(pit)는 과도한 전류밀도의 국부적 집중으로 인한 것인데, 전극간극이 너무 접근한 경우도 그 발생빈도가 증가하게 된다. 그러나 전극간극이 아주 근접한 경우에는 방전현상으로 인해 실험 중 스파크가 생기면서 Fig. 11 (b)와 같이 표면이 움푹 패이는 현상이 나타났다. 따라서 스테인레스 강 STS316L을 전해연마 할 경우 적절한 전극간극이 요구되어진다.



(a) Pitting mark (b) Electro discharge mark
Fig. 11 Surface defects

(5) 전(前)가공 표면거칠기에 따른 평가

#600, #1800, #3000의 연마입자를 적용하여 래핑후 전(前)가공 표면 거칠기를 달리하여 실험한 결과는 Fig. 12와 같다. 가공조건은 9.0A/cm²의 전류밀도, 200sec의 가공시간, 1mm의 전극간극, 65°C의 전해액 온도를 사용하였고, 전해액은 인산(H₃PO₄), 황산(H₂SO₄), 증류수(H₂O)의 혼합용액을 적용하였다.

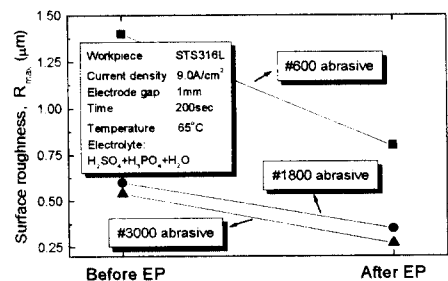


Fig. 12 Relationship between surface roughness of before and after electropolishing

#600의 연마입자를 사용한 양호하지 않은

1.4 μmRmax 의 전(前)가공면을 전해연마한 경우에는 연마 후 표면 거칠기가 0.79 μmRmax 로 되어, #1800을 적용한 0.59 μmRmax 의 전(前)가공면 보다도 가공표면상태가 양호하지 않다. 그러나 #1800, #3000의 연마입자를 사용하여 전(前)가공을 수행한 0.59 μmRmax , 0.53 μmRmax 의 양호한 표면거칠기를 가지는 시편을 전해연마한 경우에는 연마 후 표면 거칠기가 각각 0.35 μmRmax , 0.27 μmRmax 의 고정도 표면을 달성할 수 있었다. 즉, 전해연마시 표면거칠기의 향상정도는 한계가 있으므로 보다 양호한 가공면을 얻기 위해서는 전(前)가공면이 매우 중요한 역할을 하게된다.

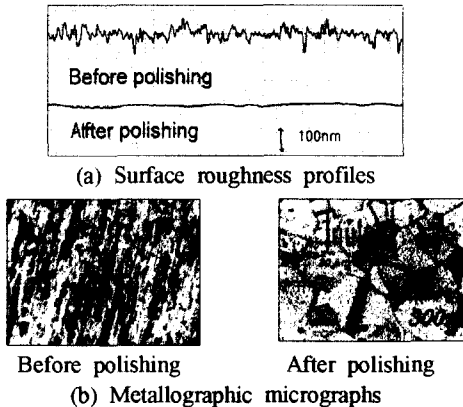


Fig. 13 Comparison of before and after electro-polishing

Fig. 13은 전해연마 전, 후의 표면거칠기 프로파일(profile)과 조직사진이다. 연마 전의 거친 표면에 비해 연마 후에는 표면의 평활화가 이루어져 부드러운 표면을 보이고 있으며, 연마 전에는 조직이 나타나지 않고 기계가공 흔적이 많이 관찰되었으나, 연마 후에는 기계가공 흔적, 변형층이 사라지고 입계가 깨끗이 나타나는 효과를 나타내었다. Fig. 14는 스테인레스 강 STS316L의 전해연마 전, 후의 공작물 내면반사 사진으로 표면의 보호막으로 인해 높은 내식성과 현저한 광택을 가지는 내표면을 달성할 수 있었다.



Fig. 14 Comparison of inside surface

6. 결론

스테인레스 강 STS316L의 전해연마 실험으로 그 경향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스테인레스 강의 전해연마시 전류밀도는 중요한 인자가 되며, 표면 거칠기와 표면사진으로 분석해 볼 때 8A/cm² 이상이어야 적은 가공시간에서도 양호한 표면을 달성할 수 있다.
2. 스테인레스 강을 전해연마할 경우 가공시간이 증가하면 표면 거칠기가 향상되는 경향을 보였으며, 가공시간 초기에는 급속한 표면 거칠기 향상을 보이고, 그 이후에는 표면 거칠기의 향상이 둔화되는 경향을 나타내었다.
3. 전해액의 온도가 68℃에서 우수한 표면품위를 얻을 수 있으며, 전극간극은 1mm정도가 적합하고 너무 근접하면 표면에 피트(pit), 방전자국이 남게된다.
4. 전해연마가공 후 표면 거칠기 향상을 보이나, 전해연마시 표면 거칠기의 향상정도는 한계가 있으므로 0.35 μmRmax 이하수준의 고정도의 표면을 달성하기 위해서는 전(前)가공에서의 표면 거칠기가 0.59 μmRmax 이하수준을 유지하여야 한다.

참고문헌

- (1) Robert L. Davis, 1995, "An Electropolishing Primer", Products Finishing, pp.68~71
- (2) Tadeusz Hryniewicz, 1990, "Towards a new conception of electropolishing of metals and alloys", Proceedings of First East-West Symposium on Materials and Processes, pp.243~252
- (3) J. P. Caire, E. Chainet, B. Nguyen, P. Valenti, "Study of a New Stainless Steel Electropolishing Process", E.N.S. d'Electrochimie et d'Electrometallurgie, pp.149~156
- (4) S. Ganesh Sundara Raman and K. A. Padmanabhan, 1995, "Effect of electropolishing on the room temperature low-cycle fatigue behavior of AISI 304LN stainless steel", Int. J. Fatigue, Vol. 17, No. 3, pp.179~182
- (5) Ryszard Rokicki, 1993, "Electropolishing of High Nickel Alloys", J. Metal Finishing, Vol. 91, No. 6, pp.103~104