

자기전해에 의한 스테인레스강의 폴리싱에 관한 연구

A Study on the Polishing of Stainless Steel by Magneto Electrolytic

*김 정 두 (한국과학기술원)/ 이 상 훈, 윤 상 진 ((주)우진산전)

강 원 석 (대전산업대학교)

*Jeong-Du Kim (KAIST)/ Sang-Hun Lee, Sang-Jin Yun(WISE)

Won-Suk Kang (Taejon National University of Technology)

Abstract

Magneto Electrolytic Polishing (MEP) is a process in which metal ions are removed from a abrasive through a combination of magnetic electric current and chemical solution. The substrate is immersed into the magnetic effect, chemical solution, and DC current is applied.

Several factors affect the rate at which the metal ions are removed from the substrate. Three of the most significant are the amount of time in which the substrate is immersed in the solution, and the amount of direct current applied in magnetic field. In this study, the surface finishing characteristics and optimal finishing condition for the stainless steel were experimented upon and analyzed.

1. 서 론

반도체용 고순도 가스공급용 튜브류 및 피팅류 부품은 부식방지 및 가스오염방지를 위하여 극정정조건이 요구되며 비금속계재물 0.05%이하, $O \leq 12ppm$, $N \leq 100ppm$, $H \leq 2ppm$ 이 요구된다. 전해액 중에서 양극의 용출을 이용하여 표면을 평활하게하는 방법을 전해폴리싱이라 하며, 일반 전해가공에 비해 낮은 전류밀도를 사용하고 양극 생성피막을 이용하여 평활화, 광택성 및 내식성 등의 우수한 표면을 얻는 목적으로 개발되었다. 전해폴리싱에서의 평활화기구는 완전히 해명되어 있지 않으나, 공작물 표면에 전압을 인가시키면 가공물에서 용출한 이온과 전해액에 의하여 비

중, 점성, 전기저항이 높은 에밀션이 생성하고, 이것이 표면요철의 요부를 덮어 그 부분에서의 공작물 용출을 방해하여 결과적으로 철부가 우선적으로 용출함으로서 평활화가 이루어진다. 그러나 일반전해가공은 전해액 및 금속이온의 전기화학적 반응에 의하여 폴리싱이 이루어지기 때문에 가공에 참여하는 이온들의 개수에 비례하여 표면이 제거된다. 가공표면은 균일하지 않고 요철현상을 갖고 있기 때문에 가공물 표면에 접근하는 이온들의 입사각도가 표면의 품질에 영향을 준다.

본 연구에서는 기존의 전해공정에 자기장을 인가하여 음의 전하를 띄는 전해이온 운동경로를 활성화 시킴으로서 금속과 반응하는 실제이온의 개수를 증가시키고 가공물 표면요철에 대한 이온의 입사각을 변화시켜 능률적인 다듬질 가공효과에 대하여 개발하였다.

2. 자기전해 연마기구

전해연마의 기본원리를 응용한 경우, 양극의 금속가공물은 전해분극곡선의 영역에 따라 에칭(etching), 전해폴리싱(electro polishing) 또는 피팅현상(polishing with pitting)에 의하여 가공된다. Fig.1은 전해공정의 기본특성인 전류-전압곡선을 나타내었다. 에칭영역인 A-B구간에서는 양극금속의 부식, 용해가 일어나며, B-C구간은 부동태화영역이라 불리우며 금속표면에 얇은 절연피막이 형성된다. C-D구간은 평활한 광택면이 얻어지는 전해폴리싱 영역으로서 최종표면처리에 사용되는 구간이다. D-E는 배표면이 생성되는 피팅발생영역으로 표면에 많은 분화구형상을 나타내기 때문에 피하는 것이 좋다.

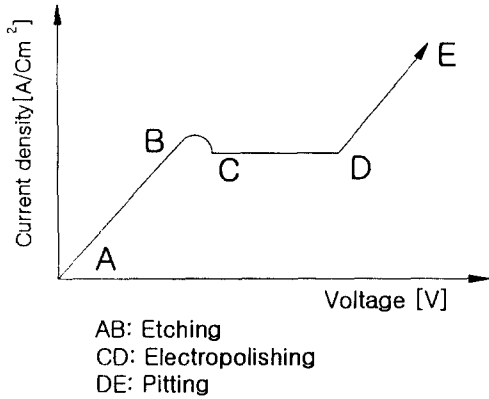


Fig.1 Relationship between Voltage and current density of Electropolishing

전해폴리싱의 특징은 첫째, 스테인레스강과 같은 금속의 표면거칠기를 향상시키는 표면의 평탄화, 둘째, 금속표면에 수소가 존재할 경우 금속의 피로파괴와 박테리아의 성장유도를 발생시킴으로 스테인레스강에 있어서 수소를 제거하는데 가장 유효한 방법이 전해폴리싱이며, 이 방법은 표면의 수소뿐만 아니라 금속내부 깊숙히 존재하는 수소까지 제거되어 금속의 피로현상을 방지하게 된다. 셋째, 스테인레스강의 부식은 패시베이션(passivation)에 의하여 억제된다. 전해폴리싱은 슈퍼패시베이션 공정이다. 넷째, 전해폴리싱은 표면의 광택이 우수한 가공법이다. 스테인레스강의 성분중에는 크롬과 니켈이 있으며, 전해가공후 표면에는 다크롬층(chrome rich layer)이 남게되며, 이것은 근본적으로 접착현상을 제외하면 크롬도금과 매우 유사한 효과를 나타낸다. 이러한 다크롬층은 금속에 있어 균질의 구성성분으로서 분리되거나 벗겨지지 않으며 매우 강한 내부식성을 갖고 있다.

자기전해폴리싱은 기존 전해폴리싱 공정의 전해이온들의 운동궤적을 활성화시킴으로서 폴리싱 공정의 고능력·고정도를 동시에 달성하기 위하여 개발된 공정이다. 즉, 일반적인 전해가공은 전해액 및 금속이온의 전기화학적 반응에 의하여 가공이 이루어지므로 가공에 참여하는 이온들의 양에 비례하여 금속의 제거가 일어난다. 이에 반하여 자기전해폴리싱법은 기존의 전해공정에 자기장을 인가하여 음의 전하를 띤 전해이온들의 운동궤적을 활성화시킴으로서 금속과 반응하는 실제이온의 양을 증가시키고 가공물 표면에 대한

이온의 입사각을 변화시켜 능률적인 표면가공이 이루어진다.

이와같이 자기전해연마기구에 의한 자기장의 효과는 다음과 같다. 전해가공중에 이온화된 질량 $m[g]$, 전하 $q[C]$ 인 전해이온이 전계 $E[V/m]$ 및 자속밀도가 $B[T]$ 인 자계가 존재하는 공간에서 속도 $v[m/s]$ 로 운동할 때 자기장에 의해 받는 로렌츠(Lorentz)힘 벡터 F 는

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \text{-----}(1)$$

이므로 이온의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \text{-----}(2)$$

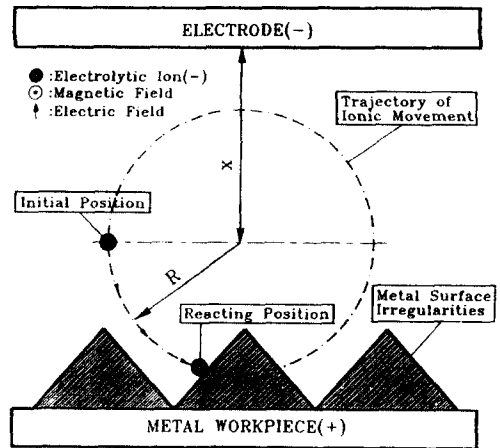


Fig.2 Model of Ionic Motion at Magnetic Flux

Fig.2는 자기전해폴리싱에서 전해이온의 운동 경로 모델이다. 여기서 곡률반경 R 은 음의 전극으로부터 X 만큼 떨어진 거리에 존재하는 이온의 원운동방향을 표시하고 있다. 이온은 음의 전하를 띤고 있고, 전기장은 금속표면에서 전극쪽으로 향하고 있으며 자기장은 지면으로부터 나오는 방향으로 설정하면 로렌츠힘은 이온에 대하여 우측으로 작용하고 곡률반경은 다음과 같다.

$$\frac{M v_x^2}{2} = q(V - V_x) \text{-----}(3)$$

여기서 M 은 이온의 질량, v_x 는 이온의 x 방향 초기운동속도, q 는 이온의 전하량, V 는 전극과 공작물표면사이의 걸리는 전위, V_x 는 x 지점의 전위를 나타낸다. 전극과 금속표면사이의 전위분포를

선형적으로 가정하면 V_x 는 $\frac{x}{\delta} V$ 로 되고, 여기에서 δ 는 전극과 금속표면과의 전해간극이다. 이상의 식으로부터 x 지점의 이온운동 초기속도를 구하면 다음과 같다.

$$V_x = \sqrt{\frac{2qV}{m} \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)} \quad (4)$$

또한, 자기장내에 수직으로 입사하는 전하에 대하여 로렌츠힘과 원심력은 일치하기 때문에

$$F = qv_x B = \frac{Mv_x^2}{R} \quad (5)$$

이 성립된다. 여기서 B 는 자속밀도 (T), R 은 원운동을 하는 이온의 반지름 즉, 곡률반경을 나타낸다. 식(4)와 (5)로부터 곡률반경을 구하면 다음과 같다.

$$R = \sqrt{\frac{2MV}{qB^2} \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)} \quad (6)$$

이와같은 이온운동의 발생원리를 정리하면 초기에 x 위치에 존재하는 전해이온은 전기장에 의하여 이온화 되는 동시에 전기장의 힘에 의하여 식(4)와 같은 초기속도의 운동을 하게 되며 이러한 운동전하는 자기장이 존재하기 때문에 로렌츠힘을 받아 식(6)과 같은 곡률을 갖는 운동을 시작하게 된다.

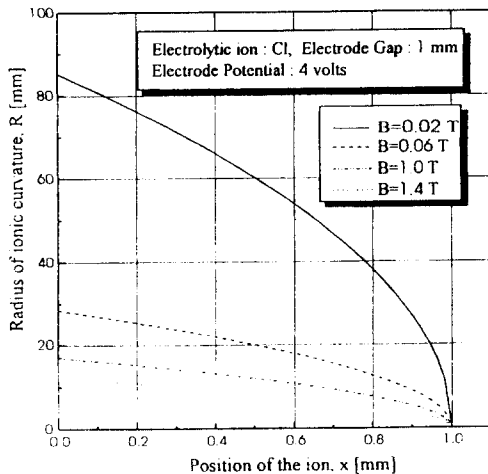


Fig.3 Trace of Ionic motion Radius(R) at Various Magnetic Flux

Fig.3은 초기이온의 위치 x 에 대한 운동반경 계산결과를 나타낸 것이다. 전해이온으로는 Cl^- 를 사용하였으며, 전극간극은 1mm, 전극간 전위차는 4볼트로 하고 자속밀도의 크기에 따라 운동반경을 계산하였다. 이온의 운동반경은 금속공작물 표면에

접근할수록 작아져서 표면부근에서는 영에 가까운 매우 미소한 원운동이 일어남을 알 수 있다.

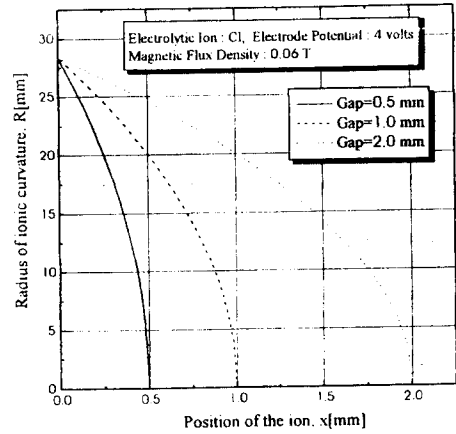


Fig.4 Trace of Ionic motion Radius(R) at Various Electrolytic Gap

Fig.4는 자속밀도가 일정할 경우 전극간극의 변화에 따른 이온운동 반경의 변화특성을 나타낸 것이다. 전극면 위치에서의 이온운동반경은 간극의 변화에 의하여 영향을 받지않고 일정하며 간극이 감소할수록 위치변화에 대한 운동반경값은 급격히 감소함을 알 수 있다.

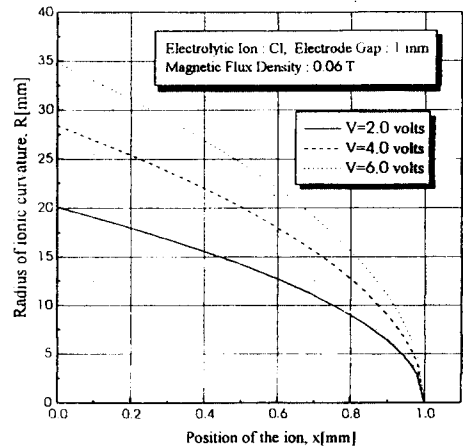


Fig.5 Trace of Ionic motion Radius(R) at Various Volts

Fig.5는 전극간 전위차에 따른 이온운동의 변화 특성을 나타낸 것이다. 전극면 위치에서의 운동반경은 전위차가 증가할수록 증가하고 금속표면에서는 영으로 감소하기 때문에 그 변화가 급격하게 된다.

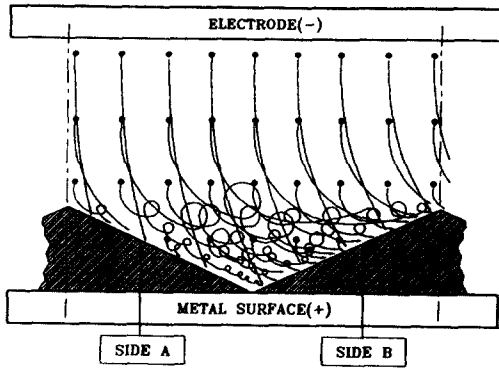


Fig.6 Characteristics of Ionic Motion in Electrolytic Gap

Fig.6은 이와같은 결과를 바탕으로 전극사이의 위치에 따라 존재하는 전해이온의 금속표면에 대한 접근운동특성을 개념적으로 나타낸 것이다. 운동반경이 큰 전극부분의 이온들은 단순한 곡선운동에 의하여 금속표면에 도달하게 되나 접근할수록 이온의 곡률반경이 감소하여 복잡한 운동경로를 그린후에 표면에 도달하게 된다. 이것은 실제 전해이온의 운동이 나선형태를 취하면서도 이동중에 큰 반경이 변화하기 때문이다. 여기에서 표면요철A와 측면B에 최종적으로 도달하는 이온의 개수를 정성적으로 비교할 수 있으며 측면A에 도달가능한 이온들은 대부분이 이온운동반경이 큰 전극부분의 이온들이며, 대부분의 이온들은 곡선운동에 의하여 측면B쪽으로 도달함을 알 수 있다.

3. 시스템설계

Fig.7은 개발된 내경용 자기전해폴리싱시스템의 구성도로서 전극이송기구, 전해연마셀, 전해액 순환시스템 및 컨트롤러로 구성된 일차 시제품이다. 설계상에서 고려된 사항은 전해액이 접촉하는 모든부분은 내산용 재료를 사용하여 전해연마수행시 산성전해액에 의한 부식을 방지하였다. 또한 전해연마시 배출되는 독성가스의 유출을 방지하기 위하여 집진장치가 설치되어있고, 전체시스템의 외부를 케이스로 차단하였으며, 전해연마셀을 이중도어하여 작업의 편리성과 유독가스의 유출을 차단하였다.

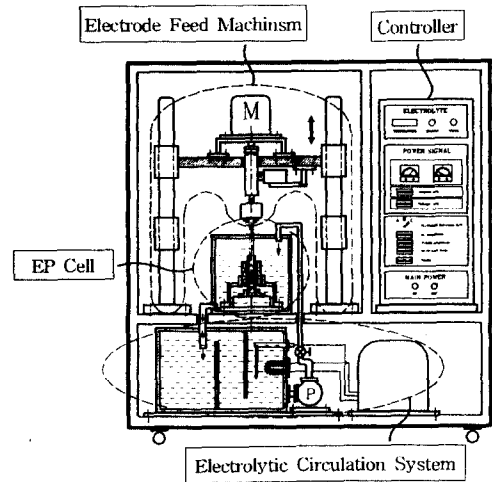
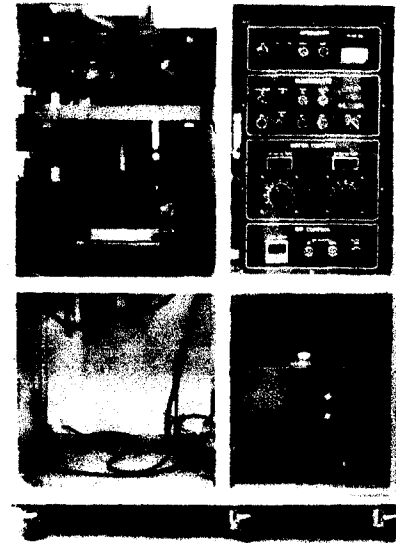


Fig.7 Magneto Electrolytic Polishing System

전극의 이송은 튜브의 전체내면에 대한 균일한 가공이 이루어 질 수 있도록 높은정밀도를 요구하며 이송 및 회전정밀도는 $\pm 0.1\text{mm}$ 이고, 이송스트로크는 0~150mm범위내에서 설정할 수 있도록 하였다. 공구의 하단점에 리미트센서를 사용하여 설정하고 제어판넬에서 공작물길이에 따라 이송스트로크를 적절히 설정하도록 하였다. 전극의 상하이송은 모터의 회전을 리이드 스crews를 통하여 전극이송판에 전달하며 네 개의 이송가이드를 따라 정밀하게 운동하도록 설계되었다. 또한 구동시 슬립을 방지하기 위하여 마그네틱 트랜스포머를 사용하여 리이드 스crews의 회전을

지지하도록 하였다. 전해액의 온도제어범위는 0~100℃이며 0.1 μ m의 내산필터를 사용하여 사용된 후 수거된 전해액을 정화시키도록 하고 내산필터를 통하여 다시 전해연마셀로 공급된다.

전해액의 유동속도 및 공급량은 조절밸브를 사용하며, 탱크의 용량은 10~40ℓ 범위이다. 컨트롤러는 네단으로 구성되었으며 수동 및 자동모드의 변환이 가능하고 작동시간의 설정기능과 전해액의 온도설정기능을 갖고 있다.

전극 및 공작물의 로딩, 언로딩은 공압을 이용한 풀릿척에 의하여 정밀한 회전 및 이송이 이루어지도록 하였다. 전극봉은 동과 티타늄으로 제작하였으며, 전극봉의 내부에는 전해액을 공급하기 위한 홀이 전길이에 대하여 뚫려있으며, 외부에는 전해액이 상방향으로 배출될 수 있도록 네개의 홈을 만들어 놓았다. 전극공구 주위에는 영구자석을 적절히 배치하고, 영구자석은 부식성이 강한 산성전해액을 사용할 때 부식을 방지하기 위하여 테프론케이스 내부에 설치하였으며, 인접한 영구자석의 극성이 반대가 되도록 함으로서 발생된 자기장과 전기장이 수직으로 교차하도록 하였다. 전극과 공작물 간극에서 전해반응이 일어날 경우 기포가 발생하면 전해연마 표면에 손상을 주기 때문에 이를 최대한 억제시키고 전해액의 균일한 흐름을 유도하여 전해연마 표면이 균일하게 가공될 수 있도록 공작물을 회전시키고 전극의 상단에 배출 전해액에 저항을 가할 수 있는 단을 만들어 놓았다. 전해전원은 전극과 공작물 사이의 전류를 일정제어하며 이때의 전류 및 전압을 표시하고 세가지 형태의 출력이 가능하도록 하였다. 각각의 신호에 대한 평균전류값, 펄스 주파수 및 작동시간을 설정할 수 있다.

Fig 8은 전해 전원으로부터 전극과 공작물 사이에 공급되는 전류신호의 세가지 형태를 나타낸다. 직류신호를 비롯하여 직류형 펄스신호 및 직류신호에 펄스가 혼합된 신호가 가능하도록 설계하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig.9는 표면 특성에 따른 표면거칠기 측정결과를 나타내며 (a)는 정상적인 연마면을 나타낸 것으로서 프로파일의 굴곡은 연마 입자에 의한 스크래치 및 표면 결함에 의한 것이다. (b)는 표면에 존재하는 불순물 입자의 탈락으로 생긴 표면 결함에

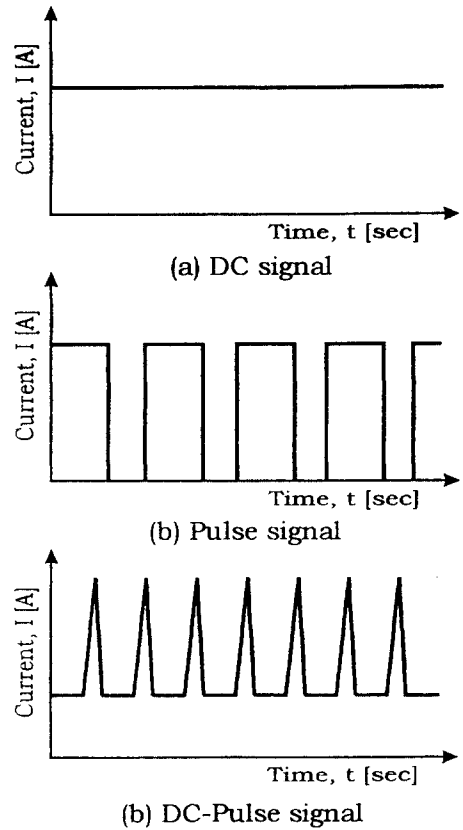


Fig.8 Current Signal

의해 특이하게 큰 표면굴곡을 나타내는 경우로서 R_a 의 값은 (a)와 비슷하나 R_{max} 의 값이 크게 나타난다. 불순물에 의한 표면 거칠기의 악화는 소재의 조성에 크게 영향을 받으며 기본 소재의 불순물 성분이 작을수록 평활한 연마면이 얻어지고 전해연마의 효율을 높일 수 있다.

Fig 10은 전해폴리싱과 자기전해폴리싱 특성을 분석하기 위한 실험결과를 나타낸 것이다. 동일 조건의 결과를 위하여 동일 로드상에서 생산된 스텐레스강(STS316L)을 사용하였고 (a)는 자기장을 인가하지 않은 ($B=0$) 일반적인 전해공정의 조건이고, (b)는 자기장을 인가한 ($B=0.06T$) 자기전해폴리싱의 조건이다.

실험조건으로 전해액 NaCl(20%), 전압 4V, 가공시간 3분, 전극갭 1mm의 조건으로 일반 전해폴리싱의 부동태화가 발생되는 범위를 택하였다. 자기장을 인가하지 않은 경우 일반 전해폴리싱의 경우에는 굵은 스크래치가 제거되지 않는 상태로 표면거칠기가 자기장을 인가한 경우에 비하여 떨어짐

을 알 수 있고 스크래치의 존재때문에 R_{max} 의 값이 차이를 보이고 있다.

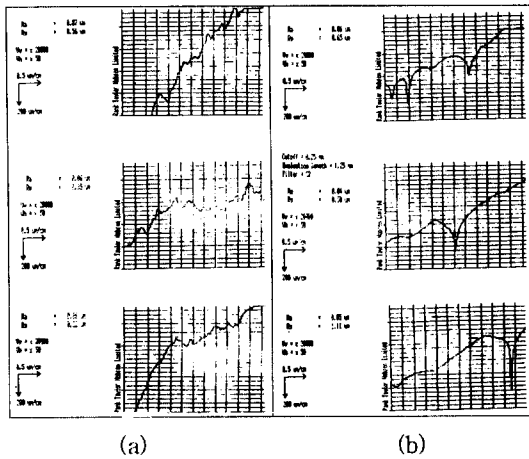


Fig.9 Result of Surface Roughness

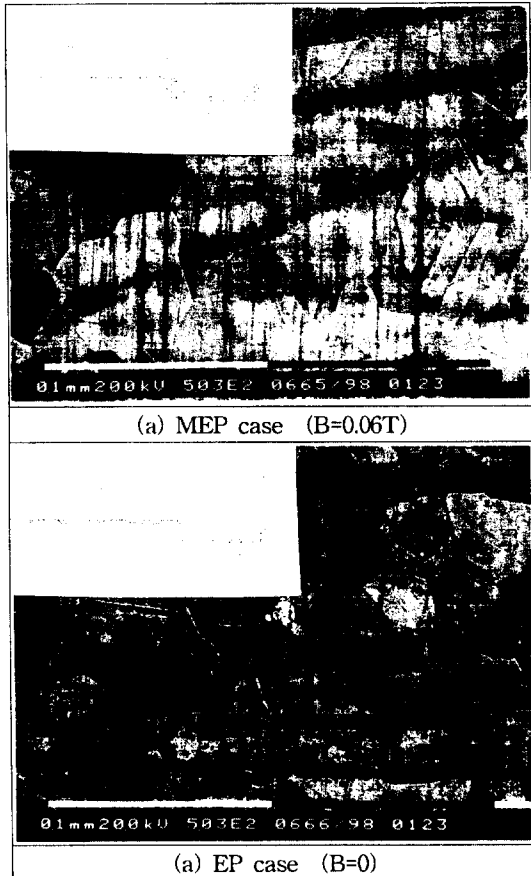


Fig.10 Comparison of the Surface Profile

5. 결론

전해연마의 고능률, 고정밀화를 동시에 달성하기 위하여 전해공정에 자기장 시스템을 개발하고, 스텐레스강을 폴리싱한바 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평활화, 광택화, 부동태화 및 표면핏팅등 전해연마 표면생성에 영향을 미치는 전해조건을 중심으로 원리 및 특성을 분석하고, 자기장 인가에 대한 영향을 수학적으로 계산하였다.
- 2) 전해연마에 자기장을 인가시킴으로서 로렌츠원리에 의한 전해이온들의 활성화를 기하였고, 공정변수들의 변화, 연마가공량 및 표면거칠기를 분석하였다.
- 3) 자기전해원리에 대한 수학적계산과 로렌츠원리에 의한 전해이온의 활성화원칙을 토대로 시스템의 설계 및 제작과 스텐레스강의 극정정표면가공에 유효함을 입증하였다.

참고문헌

- 1) J. D. Kim, Development of the Magneto-Electrolytic-Abrasive Polishing System (MEPS) and Finishing Characteristics of a Cr-Coated Roller, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol 37 No. 7, pp.997-1006, 1997
- 2) J. D. Kim, Development of the Magneto - Electrolytic - Abrasive Polishing System(MEPS) (1st Report) -Effect of Magnetic Field on Electrolytic Finishing process-, KSMTE, Vol 4 No. 3, pp.25-30, 1995.
- 3) J. D. Kim, Development of the Magneto-Electrolytic-Abrasive Polishing System (MEPS) (2nd Report) -Development of the MEAP System and Finishing Characteristics- KSMTE, Vol 4 No. 3, pp.31-38, 1995
- 4) J. D. Kim, Development of Nonwoven Abrasive Pads and Characteristics of Magneto-Electrolytic-Abrasive Polishing, 5th International Conference of Deburring and Surface Finishing, San Francisco, California, USA, pp.413-432, 1998