

피스톤 핀의 자기전해 경면연마 시스템 개발 (Development of Magneto-Electrolytic-Abrasive Polishing System for Piston Pin)

김정두, 김영복, 서언맹(KAIST 기계공학과), 한금태, 유필상(삼영기계공업(주)), 민경석(승리금속)
J.D Kim, Y.B Kim, E.M Seo(Dept. of Mechanical Eng. KAIST), G.T Han,
F.S Ryu(Sam Young Machin Industry), K.S Min(Seng Lee Metal)

ABSTRACT

We need to achieve the mass product through methods of higher efficient, higher precise manufacturing process than those of existing precision abrasive machining. Thus, this study is to develop mirror-like surface machining technique of outer diameter of the piston pin by the compound magneto-electrolytic abrasive polishing system. The procedure of machining is followed as first, fulfill the pre-processing by cylindrical grinder, second, complete mirror-like surface by the method of magneto-electrolytic abrasive polishing used CBN non-woven abrasive pads.

In this study, it was found that the best suitable conditions of mirror-like surface polishing were that the electrode density was $0.1A/cm^2$, the applied pressure $1.5kg/cm^2$, the feed rate $0.5mm/rev$, and the rotation velocity of workpiece $80rpm$, and that the surface roughness was reduced in this conditions.

1. 서론

국내의 초정밀 경면가공 관련업체에서는 현재보다 더 우수한 표면 정밀도를 요구하고 있으며 생산성 향상을 위해 다듬질 가공시간의 단축을 필요로 하고 있다. 현재 사용되는 정밀다듬질 가공방법에는 래핑(Lapping)이나 폴리싱(Polishing), 슈퍼피니싱(superfinishing)과 같은 기존의 정밀다듬질 가공법은 정밀부품가공시 최종 표면정도를 달성하기 위해 장시간

가공을 해야 하므로 생산성이 매우 떨어지며 물리적인 힘에 의한 가공흔적이나 피이드마크(Feed mark)가 가공면에 존재하여 가공면의 질을 악화시키는 원인이 된다. 또한 공작물의 가공에 있어서 절삭깊이, 이송속도, 절삭력, 가공속도 등과 같이 기계가공과 관련한 표면 거칠기의 영향인자들이 많이 존재한다. 최근의 초정밀 가공기술은 다종의 에너지를 복합화함으로써 새로운 정밀가공을 실현시키고 있으며 이러한 복합공정의 연구예로는 전해연마공정에 미세지립의 경절삭작업을 결합시켜 가공물 표면의 미소요철을 제거하는 전해복합 가공기술을 개발하여 고탄소강 연마에 적용한 연구 사례가 발표된 바 있다.

본 연구는 피스톤 핀의 자기전해 경면연마 시스템 개발로서 자기전해연마 시스템에 의해 경면가공시 표면 거칠기에 영향을 미치는 요인들을 분석하고, 경면가공공정을 개발해 최적의 경면가공조건을 도출하여, 피스톤 핀을 본 연구의 최종 달성목표인 $R_{max} 0.4\mu m$ 정도로 완성해 기존의 초정밀 가공보다 고능률, 고정도 가공의 양산화를 실현시켜 제품의 품질을 개선하자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 자기전해연마가공법의 원리

자기전해연마 시스템은 초정밀 가공기술로써 연마제에 의한 연마공정에 자기장을 인가한 자기전해복합연마 시스템으로 전극 및 자기장 생성부, 점탄성연마제부, 전원 및 전해액 공급부, 진동부의 네 부분으로 이루어지며 경

취재료, 연성재료 등 재질에 관계없이 전도성이 있는 어떤 재료에 대해서나 고능률, 고정도 경면가공이 가능한 시스템이다. 전해연마의 원리는 전극(-)과 공작물(+) 사이에 전해액을 공급하고 전기를 인가하면 전해이온들이 공작물(금속) 표면에서 금속원자와 반응하여 표면을 매끄럽게 연마함과 전해반응결과로 금속의 표면에 얇은 피막을 형성한다. 이 피막이 생성되기 시작하면 전해이온들이 금속의 표면에 도달하지 못하도록 방해받기 때문에 전해반응이 둔화되고 막이 두꺼워질수록 전해반응은 중단된다. 따라서 전해반응에 의한 가공이 계속적으로 일어나도록 하려면 이러한 절연피막을 제거하는 것이 필수적이다.

이러한 피막을 제거하기 위해 점탄성 연마재를 이용하여 연속적으로 전해연마 작용을 시켜 경면연마의 능률을 향상시키고 동시에 기계적인 표면요철을 제거하며, 점탄성을 갖고 있기 때문에 부가적인 가공스크래치(scratch)가 존재하지 않는다. 또한 점탄성연마재는 자기전해시스템에 이용되는 중요한 절삭재이며, 입자, 수지, 섬유등의 세가지 기본 성분으로 구성되어 있고 필요한 압력을 가할 수 있도록 적절한 두께로 제작되었다.

일반적인 전해가공은 전해액 및 금속이온들의 전기화학적 반응에 의해 가공이 이루어지기 때문에 가공에 참여하는 이온의 갯수에 비례하는 금속의 제거가 일어난다. 또한 가공물 표면은 요철(凹凸)모양을 하고 있기 때문에 가공물 표면에 접근하는 이온들의 입사각도가 연마가공특성에 영향을 준다. 자기전해연마법은 기존의 전해공정에 자기장을 인가하여 음의 전하를 띄는 전해이온들의 운동경로를 복잡하게 함으로써 금속과 반응하는 실제 이온의 갯수를 증가시키고 가공면 표면의 요철부위에 대한 이온의 입사각을 변화시켜 능률적인 다듬질가공이 이루어지게 한다. 그리고 로렌츠(Lorentz)원리에 의하여 전기장내의 이온들의 확산운동이 활발하게 되어 전해공정을 가속화시키고, 전해이온들의 운동을 복잡하게 하기 위한 자기장의 효과는 다음과 같다. 전해가공중에 이온화된 질량 $m[\text{kg}]$, 전하 $q[\text{C}]$ 인 이온의 전계 $E[\text{v/m}]$ 및 자속밀도

가 $B[\text{T}]$ 인 자계가 존재하는 공간에서 속도 $v[\text{m/s}]$ 로 운동할 때 자기장에 의해 받는 로렌츠(Lorentz)의 힘벡터 F 는 다음과 같다.

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad [\text{N}]$$

Fig.1의 (a)는 자기장이 없는 경우로서 전해이온들이 공작물 표면의 골부분까지 수직하게 입사하여 공작물 표면의 골부분까지 전해 반응에 의한 가공이 이루어져 표면 거칠기가 좋지 않게 된다. Fig.1의 b)는 자기장이 있는 경우로서 자기장을 전기장에 수직하게 걸어주면 전해이온들의 로렌츠원리에 의해 직선운동이 아닌 사이클로이드 곡선운동을 하게 되고 공작물 표면에 경사지게 입사하기 때문에 표면의 정상점에 많은 이온들이 집중하게 되어 표면 거칠기를 매우 빠르게 개선시키고 최종적인 표면 거칠기도 자기장이 없는 경우보다 우수한 표면연마가 이루어진다.

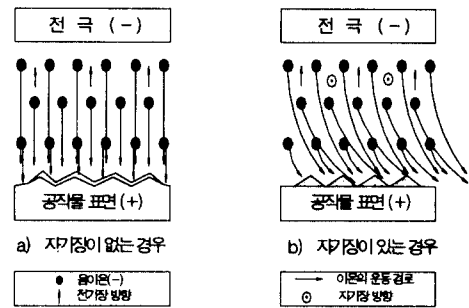


Fig. 1 Magnetic flux influence of MEAP

2.2 시스템 구성

Fig.2는 자기, 전기, 기계 등의 에너지를 이용한 복합 자기전해연마 시스템의 구성도로서 전류를 발생시키기 위한 직류전원(0~30V, 0~5A) 및 회로로 구성되어 있다.

Fig.2의 1은 연마장치부로서 점탄성연마재가 설치되어 있으며 가압 스프링의 힘에 의해 기계적인 연마작용을 일으키고 전해작용에 생성된 침전피막을 제거한다. 압력의 조절은 선반의 가로 이송대에 의해 조절되고 그 수치는 스프링과 다이얼게이지를 이

용하여 측정되도록 하였다.

Fig2의 그림2는 진동부로서 자기전해연마의 효율을 높이기 위해 공작물의 축방향으로 진동을 주었으며, 선반의 복식공구대를 제거하여 왕복대의 전후이송대에 설치했다.

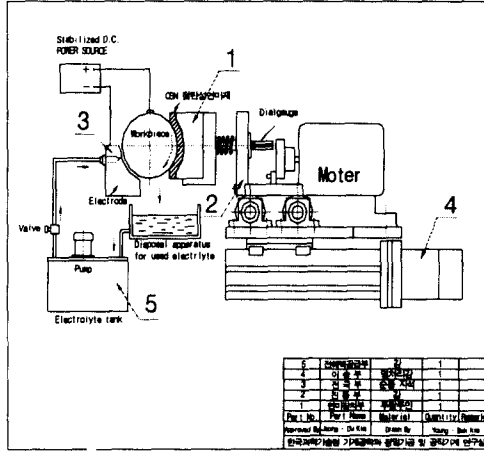


Fig. 2 MEAP system assembly

Fig.2의 3은 전극부로서 전기를 공작물에 (+), 전극부에 (-)를 인가시켜 전해연마작용을 하며, 전해작용을 활성화시키기 위해 자기장이 전기장과 수직으로 교차되도록 영구자석을 설치하였고 가공영역의 자속밀도는 모델실험 결과 최적값으로 분석된 0.06(T)로 하였다.

Fig.2의 5는 전해액공급부로서 가공간극에 공급되는 전해액 주입구로 전극을 통과하여 공작물과의 간극에 공급된다. 이는 전극 내부에서 다섯 개의 분류로 나뉘어져 간극에 분출되며, 분출속도는 밸브에 의해 조절되도록 하였다. 공작물의 고정에는 양센터 지지법을 이용하였으며, 피스톤 핀의 재질은 크롬몰리브덴강(SCM 440)으로 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of workpiece

| Material | Properties (%) | | | |
|----------|----------------|----------|-----|----------|
| | C | Mn | Cr | Mo |
| SCM 440 | 0.38~0.43 | 0.6~0.85 | 1.0 | 0.15~0.3 |

2.3 가공조건

본 연구에서는 CBN 점탄성연마재를 이용한 자기전해연마 시스템으로 피스톤 핀의 경면가공 특성을 분석하고, 각각의 변수를 선정하여 그 변수들이 피스톤 핀의 표면 거칠기에 미치는 영향을 분석하였다. 우선 피스톤 핀을 자기전해연마법으로 가공하기 전에 1차적으로 원통연삭기에 의해 정가공을 실시했다.

이때 사용된 휠은, 슛들의 강성이 높고 절삭성이 좋으며 정밀연삭에 적합한 비트리파이드 정반휠로써 입도가 #15000이고, 절삭유는 수용성 절삭유 1:19(물)를 사용해 가공하였다. 다음으로 본 연구의 방향인 CBN 점탄성재를 이용한 자기전해연마 시스템으로 피스톤 핀의 외경을 경면가공하기 위해 시스템의 기본조건으로 자속밀도 0.06(T), 진동수 20(Hz), 전해액으로 비활성수용액인 NaNO₃(20%)를 사용하였고, 전극간극은 3mm로 설정하며 각각의 실험에 CBN 점탄성연마재 #1000, #2000로 연마공정의 품질과 고정밀, 고능률을 달성하기 위한 주요 파라미터들, 즉 전압, 가공압력, 회전속도, 이송속도를 각각의 조건으로 변화시켜 실험하였다. 본 연구의 최적가공조건 도출시에는 CBN 점탄성연마재 #1000, #2000, #3000, #4000을 순차적으로 연마하면서 가공하였다. Table 2는 각각의 실험조건을 나타낸 것으로서 전극밀도에 대한 실험은 가공압력 0.5 kg/cm², 공작물의 회전속도 80rpm, 이송속도 1mm/rev으로 고정하고, 전극전류밀도를 0.1A/cm², 0.3A/cm², 0.5A/cm², 1A/cm²으로 변환하여 각각의 조건으로 가공하여 측정하였다. 가공압력에 대한 실험은 전극전류밀도를 0.2A/cm², 공작물의 회전속도 80rpm, 이송속도 1mm/rev으로 고정하고 가공압력을 0.5kg/cm², 1kg/cm², 1.5kg/cm², 2.5kg/cm²으로 변환하여 각각의 조건으로 가공하여 측정하였다. 공작물의 회전속도에 대해서는 전극전류밀도 0.2A/cm², 가공압력 0.5kg/cm², 이송속도 1mm/rev으로 고정하고 주축의 회전속도를 30rpm, 60rpm, 80rpm, 110rpm으로 변환하여 각각의 조건으로 가공하여 측정하였으며, 이송속도에 대해서는 절삭속도를 80rpm, 가공압

력을 0.5kg/cm^2 , 전극전류밀도를 0.2A/cm^2 으로 고정하고, 이송속도를 0.5 mm/rev , 1mm/rev , 1.5mm/rev , 2.25 mm/rev 로 변환하여 각각의 조건으로 가공하여 측정하였다.

Table 2 Experimental condition

| Fixed condition | Pressure [kg/cm ²] | Rotation [rpm] | Feed rate [mm/rev] | Electrode density [A/cm ²] |
|--|--------------------------------|----------------|--------------------|--|
| | 0.5 | 80 | 1 | 0.2 |
| Process | ① | ② | ③ | ④ |
| Electrode density [A/cm ²] | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 1 |
| pressure [kg/cm ²] | 0.5 | 1 | 1.5 | 2.5 |
| Rotation [rpm] | 30 | 60 | 80 | 110 |
| Feed rate [mm/rev] | 0.5 | 1 | 1.5 | 2.25 |

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면 거칠기에 대한 가공조건의 영향

다음의 Fig.3에서와 같이 전극밀도와 표면 거칠기의 관계에서는 전극밀도가 적을수록 표면 거칠기가 향상되었고, Fig.4의 가공압력에 따른 표면 거칠기의 변화에서는 압력이 증가할수록 표면 거칠기가 향상되었으나 2.0kg/cm^2 이상에서는 점탄성연마재의 파손으로 피막이 잘 제거되지 않고 전해연마가 잘 이루어지지 않아 표면 거칠기가 커짐을 알 수 있다.

Fig.5의 공작물의 회전수에 따른 표면 거칠기의 변화에서는 공작물의 속도가 빠를수록 표면 거칠기가 향상됨을 알 수 있다. 그러나 고속영역에서는 점탄성연마재의 피막제거가 제대로 이루어지지 않고 전해액의 이탈 현상으로 고속영역은 알맞지 않다. Fig.6의 이송속도에 따른 표면 거칠기의 변화에서는 이송속도가 느릴수록 표면 거칠기가 향상됨을 볼 수 있다.

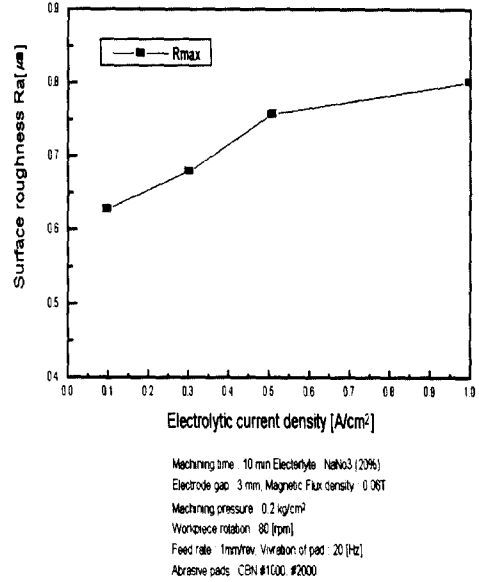


Fig.3 Relation between electrolytic current density and surface roughness

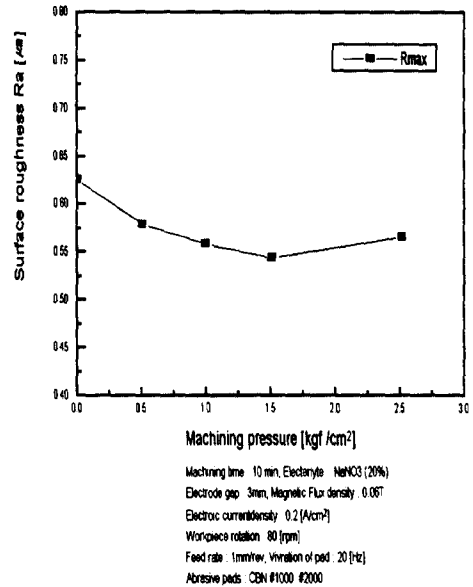


Fig.4 Relation between machining pressure and surface roughness

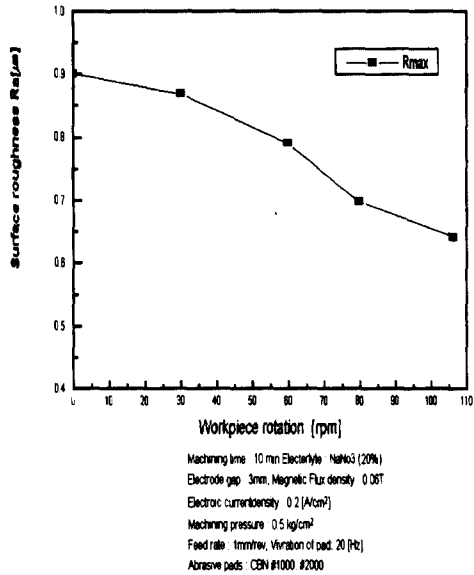


Fig.5 Relation between workpiece rotation and surface roughness

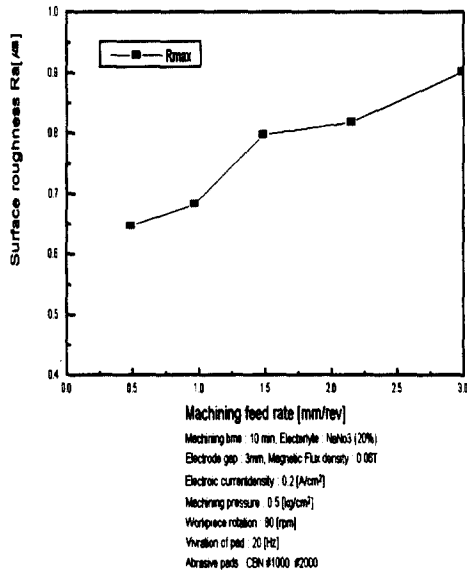


Fig.6 Relation between machining feed rate and surface roughness

3.2 최적가공조건 도출

실험을 통해 분석한 결과 얻어진 최적화 경면조건으로는 피스톤 핀의 외경을 원통연삭기

의 비트리파이드 정반월에 의해 정가공한 후 최종적으로 CBN 점탄성 연마재에 의한 자기전해연마 시스템으로 Rmax 0.35μm 정도의 경면을 완성하였다. 자기전해연마법의 최적 조건은 고정조건으로 자속밀도 0.06T(600Gauss), 전극과 공작물의 간극은 3mm로, 진동수 20Hz, 공작물 회전속도 80rpm, 전극밀도 0.1~0.3A/cm²으로 보통 가공시에는 0.3A/cm², 정밀 가공시는 0.1A/cm²로 연마하며, 가공압력은 0.3~0.5 kg/cm²로 보통 가공시에는 0.5kg/cm², 정밀 가공시는 0.3kg/cm²로 연마하며, 이송속도는 0.5mm/rev이다. 점탄성연마재 변환시에는 Table 3의 조건과 같이 CBN 점탄성연마재의 입자별로 전극밀도와 압력을 제어해 가공한다.

Table 3 MEAP non-woven abrasive pads optical condition

| Process | Item | | |
|---------|--|--------------------------------|------------|
| | Electrode density [A/cm ²] | Pressure [kg/cm ²] | CBN [mesh] |
| 1 | 0.3 | 0.5 | #1000 |
| 2 | 0.3 | 0.4 | #2000 |
| 3 | 0.2 | 0.25 | #3000 |
| 4 | 0.1 | 0.2 | #4000 |

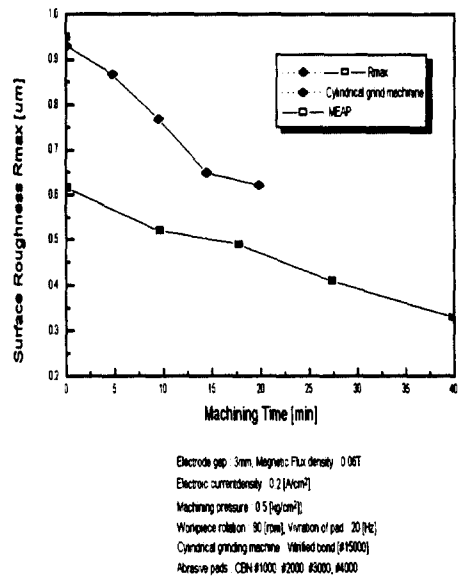


Fig.7 Effect of Polishing on Piston pin

Fig.8은 피스톤 핀을 자기전해연마 시스템의 최적가공조건으로 가공하여 가공전의 것과 비교한 것이다.

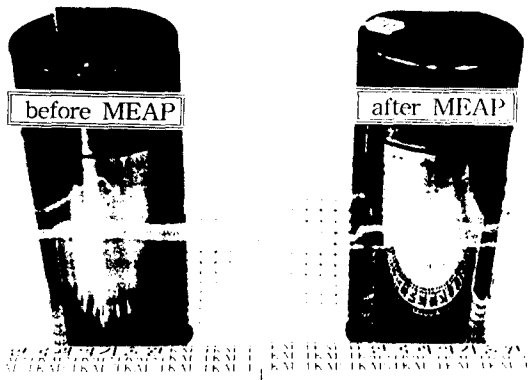


Fig.8 Comparison between before and after

4. 결 론

자기전해경면가공법에 의한 피스톤 핀의 경면연마 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 전극밀도는 $0.1A/cm^2$ 수준에서, 가공압력은 $1.5kg/cm^2$ 에서 표면 거칠기가 향상됨을 알 수 있었다.
- (2) 공작물의 속도는 빠를수록 표면의 조도가 향상되는 것을 볼 수 있었으며, 고속영역에서는 전해액의 이탈현상과 전해연마작용이 제대로 이루어지지 않으므로 80rpm의 속도가 최적임을 확인할 수 있었다.
- (4) 이송속도는 $0.5mm/rev$ 에서 표면 거칠기가 향상됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Takeo SHINMURA, Koya TAKAZAWA, Eiji HATANO, "Study on magnetic Abrasive Finishing-Effects of Magnetic Abrasive on Finishing Characteristics", Bull. JESP, Vol. 21, No. 2(June 1987), pp139~141
- [2] KazuoKUMAGAL, Ossamu KIMMIYA and Takeshi MORITA, "Magnetic

Effects on Grnding of Ferromagnetic Materials-Effect of Magnetic Field on Stock Removal and Grind Force", Int. JESP, Vol. 27, no3, pp215~220

- [3] Metals Handbook, Ninth Edition, Vol. 5, "surface Cleaning, Finishing, and coating", pp138~149
- [4] H. T. Nakagawa, mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-Process Dressing", Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp329~330, 1990
- [5] J.Dash and W.W. King, "Electrothining and Electrodeposition of Metals in Magnetic Fields", January 1972, J Electrochem. Soc. Vol. 119, No. 1, pp51~56
- [6] 김정두 외 2인, "자기전해연마공정의 복합 파라미터 최적화에 관한 연구", 1995, 한국공작기계기술학회 춘학술대회 논문집, pp.118~132
- [7] 김정두 외 1인, "자기전해복합경면 개발에 관한연구(제1보)", 1995 한국공작기계기술학회지 제4권 제3호, pp 25~30