

# 자기전해복합경면가공의 개발에 관한 연구(제1보)

— 전해공정에 미치는 자기장의 영향 —

김정두\*, 최민석\*\*

Development of the Magnetic-Electrolytic-Abrasive Polishing(MEAP)(1st)  
— Effect of magnetic field on electrolytic finishing process —

Jeong-Du Kim and Min-Seog Choi

### Abstract

A new finishing process, magnetic-electrolytic-abrasive polishing(MEAP), combining Lorentz' force effect in the traditional electrolytic finishing process was developed to realize the high efficiency as well as high surface quality of finishing. The paper describes the theoretical basis about the modification of electrolytic ions motion by the magnetic field. The effect of magnetic field on the electrolytic process was discussed and analyzed from the result of model test.

Keywords : Magnetic-Electrolytic-Abrasive Polishing(자기전해복합경면가공), Magnetic field(자기장)장, Ionic movement(이온운동), Lorentz' Force(로렌츠힘), Electropolishing(전해연마), Finishing Efficiency(연마능률), Surface Roughness(표면거칠기)

## 1. 서 론

최근에 여러가지의 에너지를 복합시켜 난삭재 가공의 고능률화를 달성하기 위한 복합가공기술이 활발히 개발되고 있다. 그 중 기존의 가공법에 자기장의 효과를 복합시킨 자기전해연삭, 자기전해연마, 자기전해점탄성연마 및 자기방전가공등이 개발되어 가공능률을 향상시키고 가공 표면거칠기를 개선한 연구결과들 [1-2]이 보고된 바 있다. 그러나 이러한 복합가공공정에서 자기장

이 어떠한 기구로 어느정도의 영향을 미치는지에 대한 연구는 전무한 실정이고 자기장을 결합시킨 복합가공공정의 최적화가 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 전해연마공정에서 자기장이 전해이온들의 운동에 미치는 영향에 대해 이론적 배경을 바탕으로 분석하고 자기전해가공의 모델실험을 통해 전해공정에 미치는 자기장의 영향에 대한 분석과 자기전해연마공정의 최적화를 위한 복합과라미터에 대하여 고찰하였다.

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

## 2. 전해공정에 대한 자기장의 작용원리

자기전해복합연마는 기존 전해연마공정의 전해이온들의 운동궤적을 적절히 조절함으로써 연마공정의 고능률·고정도를 동시에 달성하기 위해 개발된 공정이다. 일반적인 전해가공은 전해액 및 금속 이온들의 전기화학적 반응에 의해 가공이 이루어지기 때문에 가공에 참여하는 이온들의 궤구에 비례하는 금속의 제거가 일어난다. 또한 가공물 표면은 균일하지 않고 요철(凹凸) 형상을 갖고 있기 때문에 가공물표면에 접근하는 이온들의 입사각도가 연마가공특성에 영향을 준다. 자기전해복합연마법은 기존의 전해공정에 자기장을 인가하여 음의 전하를 띄는 전해이온들의 운동궤로를 복잡하게 함으로써 금속과 반응하는 실제 이온의 갯수를 증가시키고 가공물 표면요철에 대한 이온의 입사각을 변화시켜 능률적인 다듬질 가공이 이루어지도록 한다. 이와같이 전해이온들의 운동을 복잡하게 하기 위한 자기장의 효과는 다음과 같다.

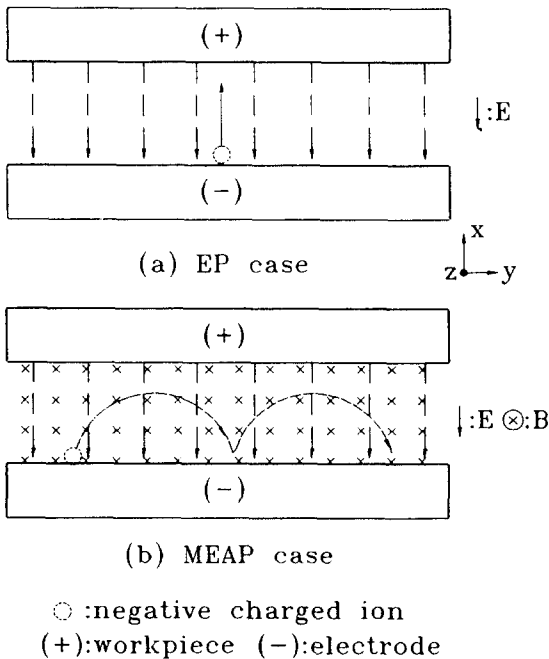


Fig. 1 Comparison of ionic movement in (a)EP and (b)MEAP

전해가공중에 이온화된 질량  $mp[g]$ , 전하  $q[C]$ 인 이온이 전기장  $E[V/m]$  및 자속밀도가  $B[T]$ 인 자계가 존재하는 공간에서 속도  $v[m/s]$ 로 운동할 때 자기장에 의해 받는 로렌츠힘벡터  $F$ 는[3]

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

이므로 이온의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2)$$

Fig.1은 기존의 전해공정(a)과 자기전해공정(b)에서 이온들의 운동특성을 비교하기 위한 모델이다. (a)의 공정에서 음의 전하를 갖는 전해이온들은 음극면에서부터 양극의 가공물 표면까지 직선적인 운동을 한다. 이 경우 표면형상의 골(凹)부분보다 정상점(凸)에서 정밀한 가공이 이루어져 표면이 평활화 된다. 그러나 공작물의 전 표면에서 전해이온과 금속이온의 반응이 일어나기 때문에 평활화 속도(다듬질 능률)는 매우 낮다. 여기에서 전체 반응 이온의 수는 같게하고 골부분에 도달하는 전해이온들의 수를 줄인다면 금속 표면의 평활화는 매우 신속하게 진행된다. 그림(b)는 전기장과 자기장이 수직하게 존재하는 영역에서 음의 전하를 갖는 이온들의 운동특성을 보여주고 있다. 이 때 이온들은 로렌츠힘에 의해 사이클로이드 곡선운동을 하게 된다. 음의 전해이온은 양극과의 전위차에 의해 양극(공작물) 방향으로 가속이 되고 다시 자기장에 의해 로렌츠힘을 받아 다음과 같은 운동을 하게 된다.

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{e}{m} \left( \frac{V}{l} - v_y B \right) \quad (3)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{e}{m} v_x B \quad (4)$$

이온이 가속되기 전에 정지상태에 있다고 하면 시간  $t$  후의 속도는

$$v_x = \frac{V}{Bl} \sin \frac{eB}{m} t \quad (5)$$

$$v_y = \frac{V}{Bl} \left( 1 - \cos \frac{eB}{m} t \right) \quad (6)$$

이고 이온의 초기위치를  $(x_0, y_0)$ 라 하면 시간  $t$ 에 대한 이온의 자취는

$$x = \frac{mV}{eB^2 l} \left( 1 - \cos \frac{eB}{m} t \right) + x_0 \quad (7)$$

$$y = \frac{mV}{eB^2} \left( \frac{eB}{m}t - \sin \frac{eB}{m}t \right) + y_0 \quad (8)$$

와 같게 된다.

일반적인 전해가공 및 전해연마에서 전해액은 가공면 간극으로 유동시켜 공급되며 이때 유입되는 전해액의 속도를 전해이온의 초속도로 가정하고 식(3)과 식(4)를 풀면 다음과 같다.

$$v_x' = \frac{V}{Bl} \sin \frac{eB}{m}t + v_x(0) \cos \frac{eB}{m}t \quad (9)$$

$$v_y' = \frac{V}{Bl} (1 - \cos \frac{eB}{m}t) + v_x(0) \sin \frac{eB}{m}t + v_y(0) \quad (10)$$

여기서  $v_x(0)$ ,  $v_y(0)$ 는 전해액의 유동속도성분으로 이온의 초기 속도를 나타낸다. 시간에 따른 이온의 자취 ( $x'$ ,  $y'$ )는 초기위치 ( $x_0$ ,  $y_0$ )인 경우 다음과 같다.

$$x' = \frac{mV}{eB^2} (1 - \cos \frac{eB}{m}t) + \frac{m}{eB} v_x(0) \sin \frac{eB}{m}t + x_0 \quad (11)$$

$$y' = -\frac{mV}{eB^2} \sin \frac{eB}{m}t + \frac{m}{eB} v_x(0) (1 - \cos \frac{eB}{m}t) + \left( \frac{V}{Bl} + v_y(0) \right) t + y_0 \quad (12)$$

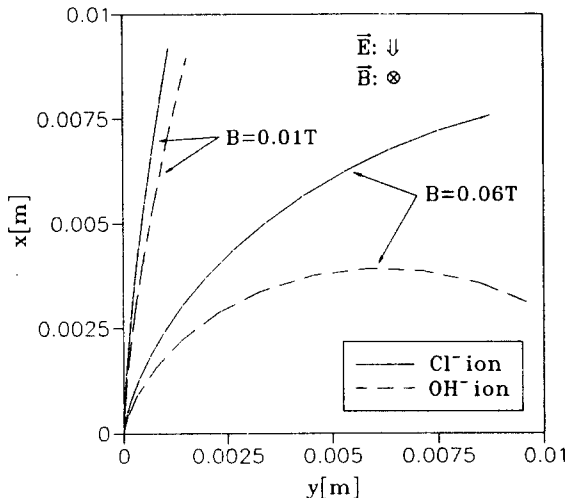


Fig. 2 Trace of ionic movement in the MEAP according to the magnetic field

Fig.2는 자기장의 크기가 다를 때 전해이온  $OH^-$  및  $Cl^-$ 의 가공영역에서의 운동경로를 계산한 결과이다. 그

림에서 전기장은 아래방향으로 향하고 자기장은 지면에 수직하게 들어가는 방향이 된다.  $OH^-$ 에 비해  $Cl^-$ 이온의 경로는 자기장의 영향에 의해 운동되는 정도가 작게 나타나는데 이것은 두 이온의 질량차에 의한 것이다. 두 경우 모두 자기장의 세기가 0.01T의 경우보다 0.06T일 때 큰 굽힘운동량의 경향을 보인다. 자기장의 세기가 전극간극에 비해 너무 작거나 너무 크면 이온들이 공작물 표면요철에 접근하는 각도가 너무 작거나 크게되어 다듬질 능률의 향상을 기대하기가 어려워지므로 적절한 자기장의 세기가 필요하게 된다.

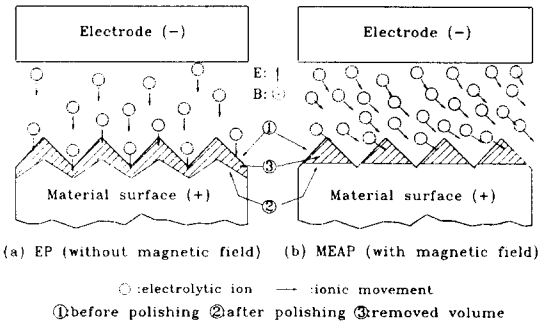


Fig. 3 Magnetic field effect in the MEAP for finishing efficiency

Fig.3은 이와같은 계산결과를 바탕으로 기존의 전해가공 및 자기장을 인가한 자기전해가공에서의 전해이온들의 운동특성 및 표면가공특성을 도식화한 것이다. 기존의 전해가공(a)에서는 전기장에 의해 음의 이온들이 양극쪽으로 직선운동을 하기 때문에 앞에서 언급했던 바와 같이 이온들은 전체 금속표면에 도달하고 비능률적으로 표면요철이 제거된다. 반면에 자기장에 의해 곡선운동을 하는 이온들(b)은 요철의 골구분보다는 정상점에 집중적으로 작용하여 매우 능률적으로 요철을 제거하게 되고 최종 표면거칠기를 향상시키게 된다.

### 3. 모델실험 및 고찰

#### 1) 실험조건 및 방법

Fig.4는 전해가공에 미치는 자기장의 효과를 알아보기 위한 모델실험 장치를 나타낸다. 음극전극과 양극공작물

사이에 일정한 간극을 주고 전해액을 공급하면서 전압을 인가하면 전해액이 이온화하여 음의 전해이온을 생성시킨다. 이러한 음의 전해이온들이 양극인 금속공작물의 표면에 도달하면 양의 금속이온과 반응하여 표면으로부터 금속이온들을 제거시킴으로써 가공이 이루어진다. 이때 전기장과 수직인 방향의 자기장을 인가하면서 전해과정에 나타나는 변화를 관찰하였다. 자기장의 강도는 전자석 코일에 흐르는 전류의 세기를 변화시킴으로써 0.~0.3T 범위에서 조절할 수 있게 하였다. 전해액은 공작물 표면에 피막이 형성되지 않도록 하기 위해 활성형인 NaCl수용액(20%)을 사용하여 사용하였고 공작물로는 SM45C를 사용하였다. 음극 전극재료는 동(Cu)으로 하고 금속의 제거량 실험에서는 전해액의 유량을 1000ml/min으로 하였다.

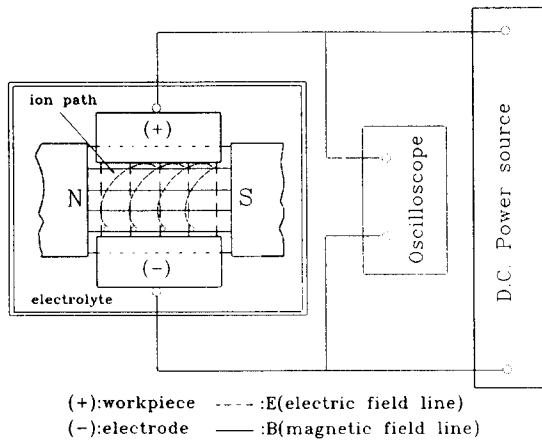


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup to test the magnetic field effect in MEAP

2) 실험결과 및 고찰

① 자기장이 전해전류밀도에 미치는 영향

Fig.5는 전극간극이 5mm와 1mm일때, NaCl(20%) 수용액을 이용한 전해과정에서 자기장의 크기를 파라미터로 한 전극간극 전압과 전해전류밀도와의 관계를 나타낸다. 전극간극전압이 증가함에 따라 전해전류밀도가 증가하여 전극간극이 5mm인 경우에 자기장이 강할수록 전류밀도가 증가한다. 반면에 전극간극이 작은 1mm의 경우에는 자기장이 0이거나 0.28T인 경우보다 0.05T인 경우에 가

장 큰 전류밀도를 나타내고 있다. 자기장을 인가할 경우 자기장을 인가하지 않은 경우와 같은 전압에서 전류밀도가 증가하는 것은 전해이온들이 로렌츠힘을 받아 가속되어 실제 가공운동을 수행하는 이온의 수가 증가하기 때문인 것으로 분석되었다. 또한 특정 전극간극에 대해서는 가공능률을 최대로 하는 자기장 세기가 존재함을 알 수 있다.

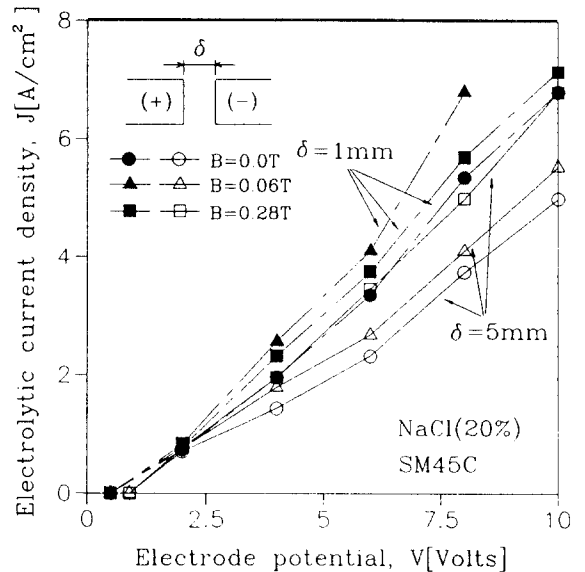


Fig. 5 Effect of magnetic field on the electrolytic current density

② 자기장이 금속제거량과 표면조도에 미치는 영향

Fig.6은 NaCl을 전해액으로 사용한 경우 자속밀도의 크기와 양극금속제거량의 관계를 나타낸다. 전극 전압이 높은 경우(6V)에는 자속밀도가 증가함에 따라 금속 제거량이 증가하나 전극전압이 비교적 작은 경우(4V, 2V)에는 특정 자속밀도 크기에서 극대치를 보이고 있다. 이와같은 결과로부터 최대의 가공량을 얻기 위한 전극전압 및 자속밀도 사이에 최적의 크기관계가 존재함을 알 수 있다.

Fig. 7은 NaCl수용액을 이요한 자기전해복합공정에서 SM45C의 자속밀도 크기에 따른 표면조도의 변화를 나타내고 있다. 자기장을 인가한 경우에는 자기장을 인가하지 않은 경우보다 표면조도가 양호하게 나타났으며 특

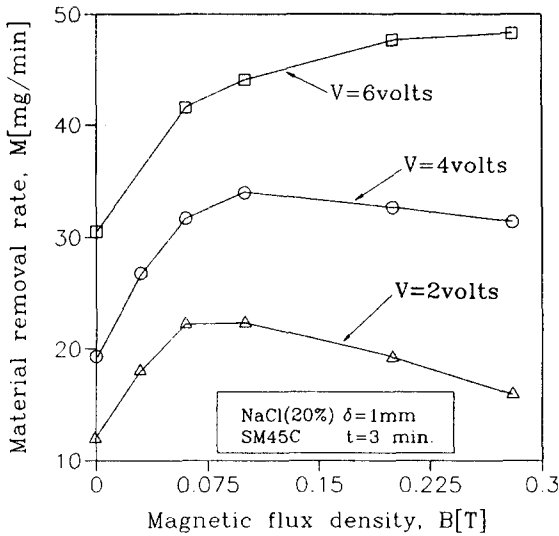


Fig. 6 Effect of magnetic field on the material removal rate

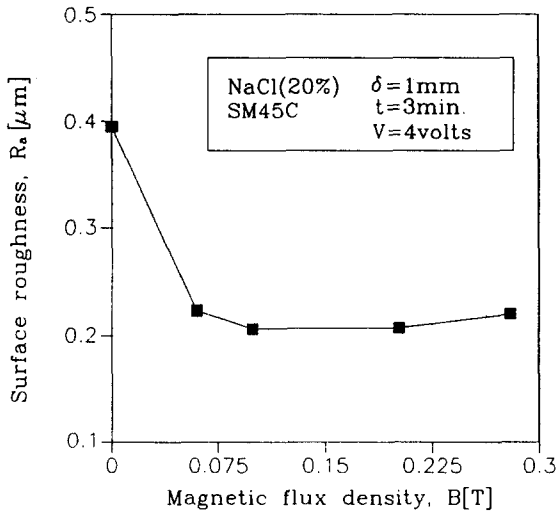
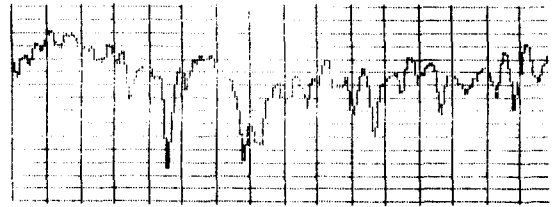


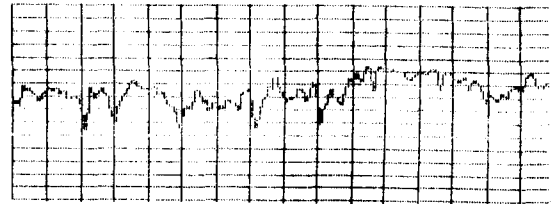
Fig. 7 Effect of magnetic field on the surface roughness

히 0.06T 부근에서 가장 우수하게 나타났다. Fig.8은 가공 후 얻어진 표면형상을 나타낸다. (a)는 자기장을 인가

하지 않은 일반적인 전해공정(EP)의 경우이고 (b)는 자기장을 인가한( $B=0.06\text{T}$ ) 자기전해복합공정(MEAP)의 경우이다. (a)의 경우는 표면요철의 골부분이 매우 깊게 형성되고 있으나 (b)의 경우에는 그렇지 않음을 알 수 있다. 이것은 앞에서도 언급하였듯이 전해이온들이 직선운동을 하는 것과 곡선운동을 하는 것의 차이에서 비롯된다고 할 수 있다.



(a) EP case ( $B=0.0\text{ T}$ )



(b) MEAP case ( $B=0.06\text{T}$ )  
Electrolyte: NaCl(20%), Electrode potential: 4Volts  
Machining time: 3min., Electrode gap: 1mm

Fig. 8 Comparison of the surface profile in (a)EP and (b)MEAP case

특정한 자기장의 세기가 효과를 나타내기 위한 전극간극의 크기 관계를 알아보기 위해 자기장의 세기를 0.06T로 고정하고 전극간극만 변화시키면서 가공량을 측정하였다. Fig.9는 그 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전극간극이 약 2mm 이상으로 커지면 자기장을 인가한 경우가 자기장을 인가하지 않은 경우보다 오히려 가공능률이 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 주어진 조건에서 자기장의 세기 0.06T의 효과를 얻기 위해서는 전극간극은 2mm 이하로 가능하면 작게 택하는 것이 좋다.

#### 4. 결 론

기존의 전해연마(EP)공정에 자기장을 복합시킨 자기

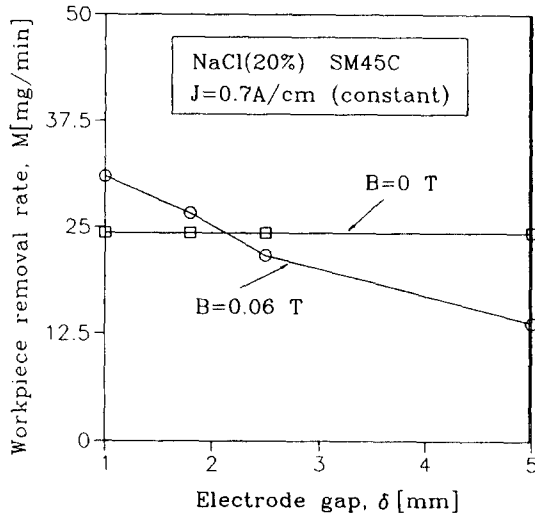


Fig. 9 Effect of magnetic field on material removal rate according to the electrode gap

전해경면연마(MEAP)공정에서 자기장이 전해공정에 미치는 영향을 알아보기 위하여 공작물로 SM45C를 이용하고 활성형 전해액인 NaCl을 사용하여 자기전해복합가공 모델실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 전해공정에 자기장을 인가하면 로렌츠힘에 의한 전해이온들의 운동이 활발해지고 전해반응이 가속화되어 금속제거능률이 증가한다.
- 2) 자기장의 영향으로 이온들의 운동경로가 직선에서 사이클로이드곡선으로 변화하고, 금속표면에 도달

하는 이온들의 입사각도가 표면요철을 효과적으로 제거하기 때문에 매우 능률적이고 효과적인 표면 조도의 개선을 가능하게 한다.

- 3) 자기장이 약하면 이온운동은 직선에 가깝고 자기장이 너무 강하면 운동의 곡률반경이 너무 작아져서 금속표면에 도달하지 못하는 이온의 수가 증가하기 때문에 가공능률을 극대화시키기 위한 최적의 자기장 세기가 존재한다.
- 4) 전극간극에 따라 최적의 자기장 세기는 달라지며 전극간극이 1mm인 경우 최적의 자속밀도는 0.06T이다.
- 5) 전극간극의 크기는 가공능률에 대한 자기장의 효과를 증가 또는 감소시킬수 있으며 0.06T의 자속밀도에 대해서는 전극간극을 2mm이하로 선정해야 한다.

#### 참 고 문 헌

- (1) G.Kuppuswamy, An Investigation of the Effect of Magnetic Field on Electrolytic Diamond Grinding Wear, 54 (1979) 257-272
- (2) D.X.Jin, A Study on the Electrolytic Magnetic Nonwoven Abrasive Finishing, 3rd International Conference on Precision surface Finishing and Burr Technology, 1994
- (3) B.I.Bleaney, Electricity and Magnetism, 2nd Ed., Oxford Univ. Press, 1965