

자기장이 전해복합연마공정에 미치는 영향

Effects of Magnetic Field on Electrochemical Polishing Process

김정두(KAIST), 최민석*(KAIST), 김동섭(KAIST)

ABSTRACT

The paper describes the effects of magnetic field on the electrochemical polishing process in the view of ionic motion in the electrolyte. Theoretical background was suggested how magnetic field increases the material removal efficiency and surface finishing ability. Magnetic field changes the ionic movement in the electrolyte from linear motion to curved or complex oscillating one, thus increases the electrolytic current density and, as the results, the finishing efficiency.

1. 서론

최근에 난삭재 정밀가공의 고능률화를 위한 전해복합공정기술의 개발이 활발히 진행되고 있다. 기존의 전해공정에 자기장의 효과를 결합시킨 전해연삭, 전해연마 등 [1-2]이 대표적인 예라 할 수 있다. 그러나, 이러한 자기전해 복합공정에서 자기장이 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 자기전해연마가공의 모델실험을 통해 전해공정에 미치는 자기장의 영향에 대해 고찰하였다.

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 갯수에 비례하는 금속의 세기가 일어난다. 또한 가공물 표면은 균일하지 않고 요철(凹凸) 형상을 갖고 있기 때문에 가공물 표면에 접근하는 이온들의 입사각도가 연마가공특성에 영향을 준다. 자기전해복합연마법은 기존의 전해공정에 자기장을 인가하여 음의 전하를 띠는 전해이온들의 운동경로를 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.

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

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

이므로 이온의 운동방정식은 다음과 같다.

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

일반적인 전해가공 및 전해연마에서 전해액은 가공면 간극으로 유동시켜 공급되며 이 때 유입되는 전해액의 속도를 전해이온의 초속도로 가정하고 식(2)를 풀면 다음

과 같다.

$$v_x = \frac{V}{Bl} \sin \frac{eB}{m} t + v_x(0) \cos \frac{eB}{m} t \quad (3)$$

$$v_y = -\frac{V}{Bl} (1 - \cos \frac{eB}{m} t) + v_y(0) \sin \frac{eB}{m} t + v_y(0) \quad (4)$$

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.

$$x = \frac{mV}{eB^2 l} (1 - \cos \frac{eB}{m} t) + \frac{m}{eB} v_x(0) \sin \frac{eB}{m} t + x_0 \quad (5)$$

$$y = -\frac{mV}{eB^2 l} \sin \frac{eB}{m} t + \frac{m}{eB} v_x(0) (1 - \cos \frac{eB}{m} t) + (-\frac{V}{Bl} + v_y(0))t + y_0 \quad (6)$$

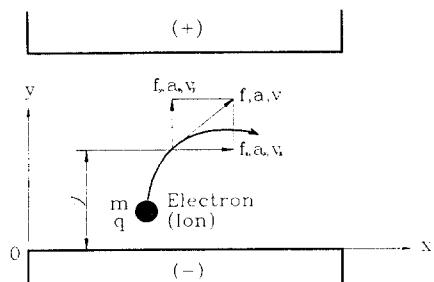


Fig.1 Ionic movement in the electrode gap

Fig.1은 전해공정에서 전극과 공작물과의 간극에서 일어나는 전해이온들의 운동을 모델링하기 위한 그림이다. 여기서 전해이온의 운동은 전기장 및 자기장에 의해서만 일어난다고 보고 이온운동도차에 의한 확산운동은 없는 것으로 가정하였다. 또한 이온의 운동은 2차원 운동이라 가정하였다. 전해이온중 양의 이온은 음극쪽을, 음의 이온은 양극쪽으로 이동한다.

Fig.2에서 Fig.4는 자기장의 크기에 따른 이온의 운동 특성을 조사하기 위해 하나의 물이온에 작용하는 힘을 나타낸 것이다. x방향의 힘은 자속밀도가 증가함에 따라 서서히 증가하나 자속밀도의 값이 어느 이상 증가하게

되면 방향이 바뀌면서 진동하고 시간이 지남에 따라 그 크기가 증가한다. y 방향의 경우도 비슷하나 자기장의 영향으로 힘의 크기가 서서히 감소하다가 진동한다. 이온에 작용하는 힘의 합력은 자속밀도가 증가함에 따라 증가율이 매우 높아진다.

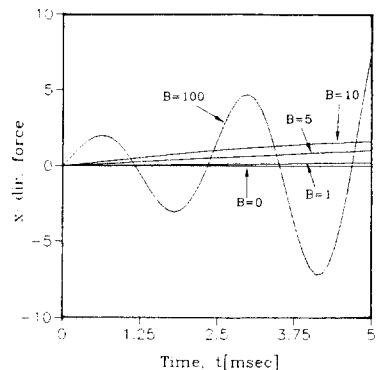


Fig.2 x-component of force

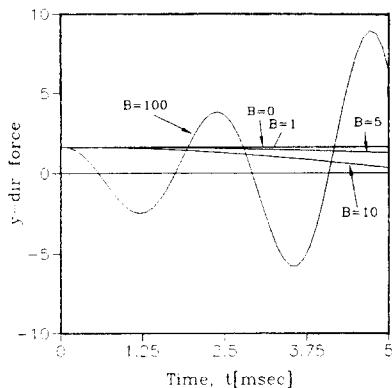


Fig.3 y-component of force

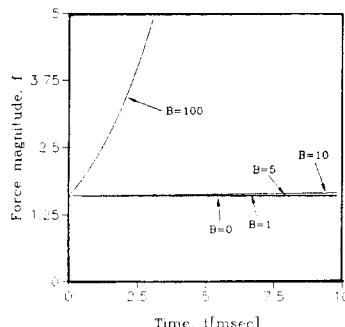


Fig.4 Magnitude of net force

Fig.5에서 Fig.7은 이온의 속도변화를 나타낸 것이다. x 방향의 경우 속도는 0에서 자속밀도의 증가에 따라 증가하다가 자속밀도가 어느값 이상이 되면 방향이 바뀌면서 진동하고 크기가 점차 증가한다. y 방향의 경우에는 자속밀도의 증가에 따라 속도크기가 점차 감소하다가 진동

한다. 합속도(Fig.7)는 자속밀도가 서서히 증가할 경우 약간씩 감소하나 자속밀도가 어느값이상이 되면 점차 그 크기가 커져서 자기장을 인가하지 않은 경우보다 커지기도 한다.

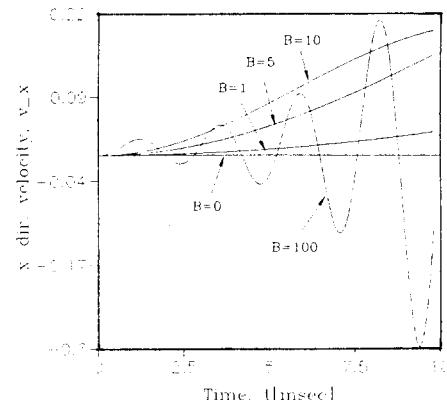


Fig.5 x-component of velocity

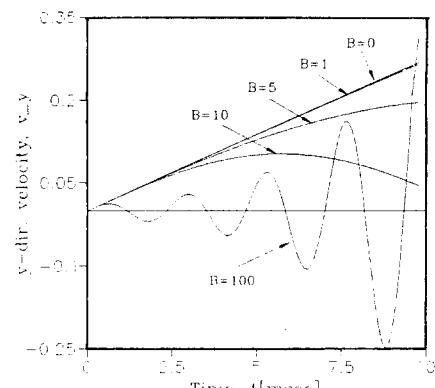


Fig.6 y-component of velocity

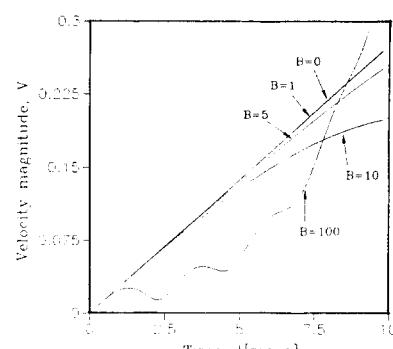


Fig.7 Magnitude of net velocity

이와같이 진해이온의 속도는 자속밀도의 크기가 어느값 이상으로 커지면 일반적인 곡선운동에서 매우 심한 요동운동으로 발전하며 가속된다.

Fig.8과 Fig.9는 이온의 운동궤적을 나타낸 것이다. Fig.8에서와 같이 자속밀도가 비교적 작은 경우에는 자속밀도의 증가에 따라 조금씩 끊어지게 되나 자속밀도 큰 경우에는 Fig.9에서와 같이 매우 좁은 영역에서도 심한 요동운동이 일어난다.

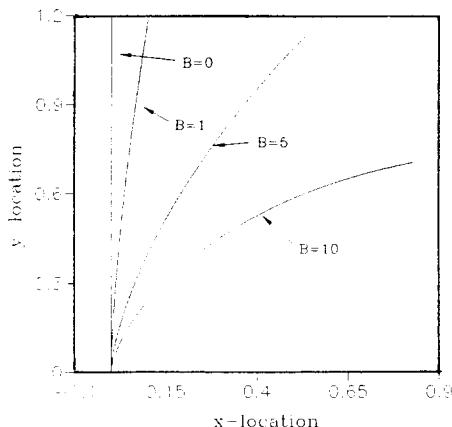


Fig.8 Trace of ionic motion at low magnetic flux

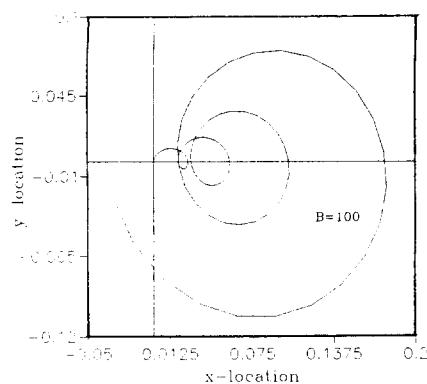


Fig.9 Trace of ionic motion at high magnetic flux

이와같이 자기장의 영향으로 전해이온은 자속밀도의 세기에 따라 원만한 곡선운동 또는 심한 요동운동을 하기 때문에 가공하고자 하는 표면형상에 대해 최적의 자기장세기가 존재하는 것으로 사료된다.

Fig.10은 이와같은 계산결과를 바탕으로 기존의 전해공정 및 자기장을 인가한 자기전해공정에서 예상되는 전해이온들의 운동특성 및 표면가공특성을 도식화한 것이다. 기존의 전해공정(a)에서는 전기장에 의해 음의 이온들이 양극쪽으로 직선운동을 하기 때문에 이온들은 전체 금속표면에 도달하고 끝부분까지 이온이 도달하여 금속과 반응하기 때문에 비등률적으로 표면요철이 제거된다. 반면에 자기장에 의해 곡선운동을 하는 이온들(b)은 요철의 끝부분보다는 정상점에 집중적으로 작용하여 매우 능률적으로 요철을 제거하게 되고 최종 표면거칠기를 향상시키게 된다.

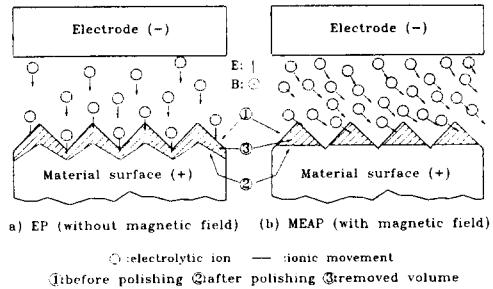


Fig.10 Model of ionic motion with/without magnetic field in electrochemical polishing

3. 자기장이 전해연마공정에 미치는 영향

전해가공 및 전해연마에 있어서 가공의 능률을 결정하는 가장 중요한 요인은 금속이온과 반응하는 전해이온들의 운동특성이다. 자기장의 작용은 전해이온의 운동특성을 변화시키기 때문에 전해연마공정의 가공능률 및 가공 정밀도에 영향을 미칠것으로 사료된다. 일반 전해연마공정에서 금속 공작물의 제거량이 결정되는 과정은 다음과 같다.

전해이온의 이동도(mobility), 비전도도(conductivity), 전해전류밀도, 금속 제거율은 다음식[4]과 같이 구해진다.

$$u_e = \frac{q_e \cdot \tau_{cn}}{m_e} \quad (7)$$

$$k_e = \frac{q \alpha n_e C N}{1000} (u_e + u_p) \quad (8)$$

$$J = k_e \cdot E \quad (9)$$

$$\dot{m} = \frac{A}{z} \frac{S}{F} J \quad (10)$$

여기서 u_e 는 이온(음의 이온)의 이동도, q_e 는 전하량, τ_{cn} 은 이온입자간의 평균 충돌시간, m_e 는 질량, k_e 는 전해액의 비전도도, α 는 용해도, n_e 는 둘가 이온가, C 는 농도, $N=(6 \times 10^{23})$ 은 아보가드로상수, J 는 전류밀도, E 는 전기장의 세기, m 은 금속제거량, A 는 금속의 원자량, z 는 금속의 원자가, S 는 전극의 단면적, F 는 패러데이 상수를 각각 나타낸다.

자기전해공정에서 전해이온의 평균 충돌시간 τ_{cn} 으로부터 순차적인 계산을 수행하면 가공량을 계산할 수 있으나 이온의 평균 충돌시간을 구하기가 어렵다. 앞절의 이온운동으로부터 구한 이온의 운동속도를 이용하여 가공량의 계산이 가능하다. 이온의 이동도는 운동속도와 다음과 같은 관계가 있다[4].

$$v = u \cdot E \quad (11)$$

따라서 이온의 운동해석으로부터 속도 v 가 변하면 이온의 이동도 u 가 변하고 식(8)에서 식(10)에 의하여 결과적으로는 가공된 금속제거량에 영향을 준다. 즉, 자기장이 전해이온들의 운동에 직접적인 변화를 일으킴으로써 전해공정을 변화시키고 궁극적으로는 전해공정에 의한 금속의 제거 메커니즘에 영향을 준다.

4. 모델실험 및 고찰

4.1 실험조건 및 방법

Fig.11은 전해공정에 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. 이 때 전기장과 수직한 방향의 자기장을 인가하면서 전해과정에 나타나는 변화를 고찰하였다. 자기장의 강도는 전자석 코일에 흐르는 전류의 세기를 변화시킴으로써 0 ~ 0.3T 범위에서 조절할 수 있게 하였다. 전해액은 공작물 표면에 피막이 형성되지 않도록 하기 위해 활성행인 NaCl수용액(20%)을 사용하여 사용하였고 공작물로는 SM45C를 사용하였다. 음극 전극재료는 동(Cu)으로 하고 금속의 제거량 실험에서는 전해액의 유량을 1000ml/min으로 하였다.

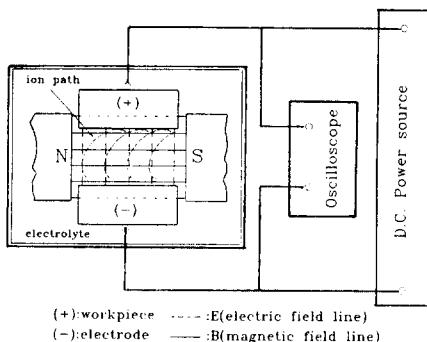


Fig.11 Device for model test

4.2 실험결과 및 고찰

· 자기장이 전해전류밀도에 미치는 영향

Fig.12는 전극간극이 5mm와 1mm일 때, NaCl(20%) 수용액을 이용한 전해과정에서 자기장의 크기를 파라미터로 한 전극간극 전압과 전해전류밀도와의 관계를 나타낸다. 전극간극전압이 증가함에 따라 전해전류밀도가 증가하여 전극간극이 5mm인 경우에는 자기장이 강한 0.28T

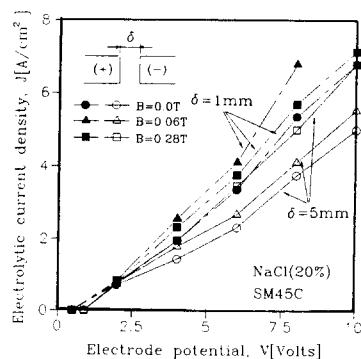


Fig.12 Relationship between electrode potential and electrolyte current density

슬라(T)일 때 전류밀도가 가장 높게 나타난 반면 전극간극이 작은 1mm의 경우에는 자기장이 0이거나 0.06T인 경우보다 0.06T인 중간 값에서 가장 큰 전류밀도를 나타내고 있다. 따라서 전극간극에 따라 최대의 능률을 나타내는 특정한 자기장의 세기가 존재함을 알 수 있다.

· 자기장이 금속제거량과 표면조도에 미치는 영향

Fig.13은 NaCl을 전해액으로 사용한 경우 자속밀도의 크기와 양극금속제거량의 관계를 나타낸다. 전극 전압이 높은 경우(6V)에는 자속밀도가 증가함에 따라 금속제거량이 증가하나 전극전압이 비교적 작은 경우(4V, 2V)에는 특정 자속밀도 크기에서 국대치를 보이고 있다. 이와같은 결과로부터 전압에 따라 최대의 가공능률을 얻기 위한 특정 자속밀도가 존재함을 알 수 있다.

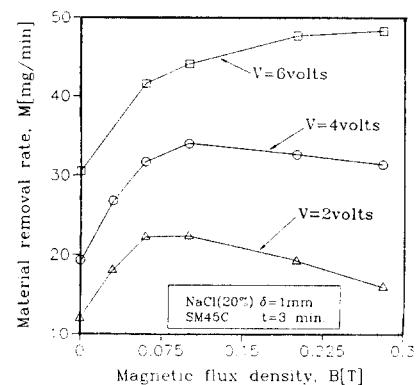


Fig.13 Relationship between magnetic flux density and material removal rate

Fig.14는 자속밀도 크기에 따른 표면조도의 변화를 나타내고 있다. 자기장을 인가한 경우에는 자기장을 인가하지 않은 경우보다 표면조도가 양호하게 나타났으며 특히 0.06T부근에서 가장 우수하게 나타났다. Fig.15는 가공후 얻어진 표면형상을 나타낸다. (a)는 자기장을 인가하지 않은 일반적인 전해공정(EP)의 경우이고 (b)는 자기장을 인가한($B=0.06T$) 자기전해복합공정(MEAP)의 경우이다. (a)의 경우는 표면요철의 골부분이 매우 깊게 형성되고 있으나 (b)의 경우에는 그렇지 않을 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서도 언급하였듯이 전해이온들이 직선운동을 하는 것과 곡선운동을 하는 것의 차이에서 비롯된다고 할 수 있다.

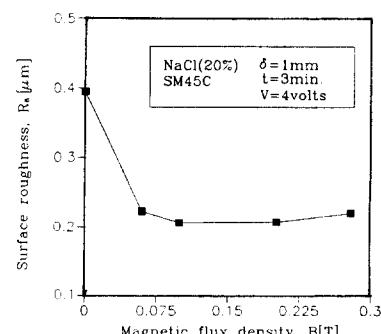


Fig.14 Relationship between magnetic flux density and surface roughness

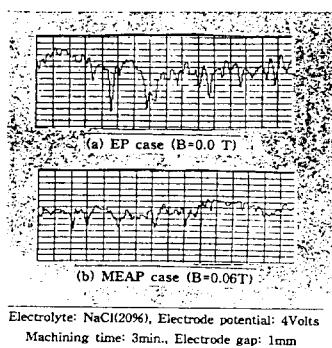


Fig.15 Comparison of surface profile

특정한 자기장의 세기가 효과를 나타내기 위한 전극 간극의 크기 관계를 알아보기 위해 자기장의 세기를 0.06T로 고정하고 전극간극만 변화시키면서 가공량을 측정하였다. Fig.16은 그 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯 바와 같이 전극간극이 약2mm이상으로 커지면 자기장을 인가한 경우가 자기장을 인가하지 않은 경우보다 오히려 가공능률이 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 주어진 조건에서 자기장의 세기 0.06T의 효과를 인기 위해서는 전극간극은 2mm이하로 가능하면 작게 택하는 것이 좋다.

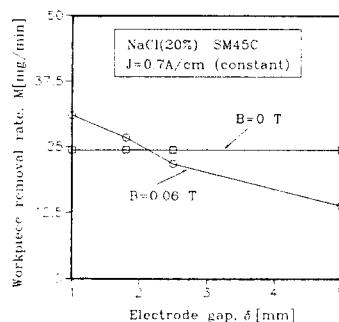


Fig.16 Magnetic field effect depending on the electrode gap

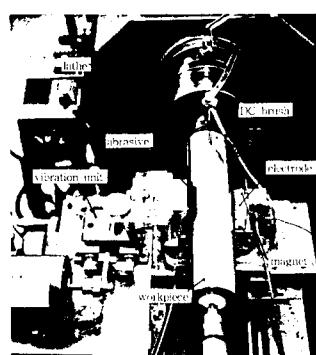


Fig.17 Magneto-electrolytic abrasive machining system

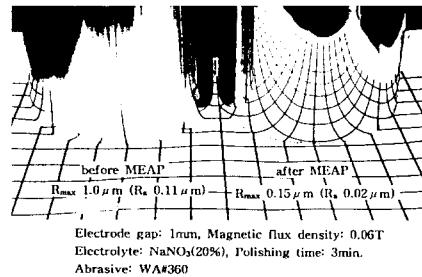


Fig.18 Roller surfaces(a) and surface profiles(b) before/after polishing by MEAP process

5. 자기전해복합연마기를 이용한 실험 예

Fig.17은 전해연마공정에 자기장을 복합시킨 자기전해복합연마기의 구성을 나타낸다. 시스템의 구성은 전해전극 및 영구자석, 접탄성 부직포연마재, 진동유니트, 전해액 공급장치 및 전원등으로 구성되어 있다.

Fig.18은 자기전해복합연마기를 이용한 크롬코팅로울러(Cr-coated roller)의 경면가공 예를 나타낸다. 연마전표면조도 R_{max} 1.00 μm 를 R_{max} 0.15 μm 로 개선한 결과이며, 기존 수파피니싱에 비해 3배의 가공능률을 나타낸다.

6. 결 론

기존의 전해연마(EP)공정에 자기장을 복합시킨 자기전해연마(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 전해이온들이 곡선 또는 융동운동을 하고 전해반응이 가속화되어 금속제거능률이 증가한다.
- 2) 전해공정에서 자기장은 전해이온의 운동속도 변화에 의해 궁극적으로 금속제거량에 영향을 미친다.
- 3) 금속표면에 도달하는 이온들의 입사각도가 표면요철을 효과적으로 제거하기 때문에 효과적인 표면조도의 개선을 가능하게 한다.
- 4) 최대의 가공능률을 나타내는 특정값의 자기장 세기가 존재하며 전극간극 및 전압의 크기에 따라 다르다.

참고문현

- [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
- [4] J.A.McGEOUGH, Principles of Electrochemical Machining , 1974, Chapman and Hall, London