

자기전해연마공정의 복합파라미터 최적화에 관한 연구

Optimum Multi-Parameter of Magnetic-Electrolytic Polishing Process

김동섭*, 최민석, 김정두 (KAIST)

1. 서론

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 가공표면거칠기를 개선한 연구결과들[1-5]이 보고된 바 있다. 그러나, 이러한 복합가공공정에서 자기장이 어떠한 기구로 어느정도의 영향을 미치는지에 대한 연구는 아직 미비한 실정이고 따라서 자기장을 결합시킨 복합가공공정의 최적화가 이루어지지 않고 있다.

자기전해복합가공에서 전해액은 전극간극 전류의 작용에 의해 이온화되고 이 이온들은 전기장에 수직한 자기장 내에서 로렌츠(Lorentz)힘을 받아 운동이 복잡해지고 결과적으로 가공능률을 향상시키는 효과를 발생시킨다.

본 연구에서는 전해연마공정에 영향을 미치는 자기장의 작용원리를 이론적인 배경을 바탕으로 정립하고 자기전해복합연마가공을 위한 파라미터의 최적화 방안을 제시한다. 또한 자기전해가공의 모델실험을 통하여 전해공정에 미치는 자기장의 영향을 체계적으로 분석하고 자기전해가공 및 자기전해연마공정에 대한 최적의 복합파라미터를 규명한다.

2. 전해공정에 대한 자기장의 작용원리

전해가공은 전해액 및 금속 이온들의 전기화학적 반응에 의해 가공이 이루어지

기 때문에 가공에 참여하는 이온들의 갯수에 비례하는 금속의 제거가 일어난다. 일반적으로 전해액은 정지상태로 가공영역에 남아있지 않고 흘러지나가기 때문에 모든 이온들이 금속표면과 반응한다고 할 수 없다. 따라서 이온들의 운동경로를 복잡하게 함으로써 금속과 반응하는 실제 이온의 갯수를 증가시킨다면 금속제거량이 증가하고 전해가공의 능률을 향상시킬 수 있을 것이다. 이와같이 전해이온들의 운동을 복잡하게 하기 위한 자기장의 효과에 대해 알아보면 다음과 같다.

Fig.1은 전해공정의 모델실험을 위한 개략도를 나타낸다. 전해가공중에 이온화된 질량 m [g], 전하 q [C]인 이온이 전기장 E [V/m] 및 자기장 B [T]가 존재하는 공간에서 속도 v [m/s]로 운동할 때 자기장에 의해 받는 로렌츠힘 F [6]는

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

이므로 이온의 운동방정식은 다음과 같다.

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

초기에 정지상태에 있던 전하 q [C]인 이온은 전기장 E [V/m]에 의해 가속되어 움직인다고 하면 이 때의 운동방정식은 식(2)에 의해

$$m \frac{dv}{dt} = qE \quad (3)$$

로 주어진다. 또한, 이온에 대해 전기장이 한 일은 식(3)의 양변에 $vdt=dx$ 를 곱하여 적분함으로써 구할 수 있다.

$$\text{좌변 : } \int_0^x m \frac{dv}{dt} dx = m \int_0^x v dv = \frac{1}{2} mv^2 \quad (4)$$

$$\text{우변 : } \int_0^x qE dx = q \int_0^x E dx = qV_x \quad (5)$$

여기서 V_x 는 음의전극으로부터 x 만큼 떨어진 위치의 전위를 나타낸다. 식(4)와 식(5)에 에너지보존법칙을 적용시키면 다음과 같이 이온의 속도를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2} mv^2 = qV_x$$

$$v = \sqrt{\frac{2qV_x}{m}} \quad (6)$$

따라서 초속도 0인 x위치에 있는 이온이 음극면과의 전위차 V_x [volts]에 의해 운동 에너지 qV_x [J]를 얻어 속도 v [m/s]로 된다.

초속도 v 인 이온이 균일한 자기장내에 수직으로 입사되면 식(1)과 같이

$$F = qvB \quad [\text{N}] \quad (7)$$

의 크기를 갖는 로렌츠힘을 받음과 동시에 원심력

$$F' = \frac{mv^2}{r} \quad [\text{N}] \quad (8)$$

과 평형을 이루게 되어 이온은 원운동을 하게 된다. 여기서 이온의 질량을 m 이라고 하면 원운동 궤적반경 r 은 다음과 같이 구해진다.

$$r = \frac{mv}{qB} = \sqrt{\frac{2mV_x}{qB^2}} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

전해공정에서는 모든 이온들이 자기장에 수직하게 입사되지 않고 제각기 입사각을 갖기 때문에 그 운동궤적은 단순한 원운동이 아닌 나선형의 복잡한 운동을 하게 된다. 더구나 전극간극공간내의 위치에 따라 전위차가 다르기 때문에 이온들의 운동은 더욱 복잡한 형태를 나타낸다.

음극 전극으로부터의 거리 x 에서의 전위 V_x 는 전극간극을 δ , 전극간 전위차를 V 라 할 때 다음과 같이 선형적으로 가정한다.

$$V_x = \frac{x}{\delta} V \quad [\text{volts}] \quad (10)$$

식(10)을 식(9)에 대입하면 주어진 전극간 전압, 전극간극, 자속밀도에 대하여 특정 위치의 이온 운동반경 r 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r = \sqrt{\frac{2mV}{qB^2\delta}} x \quad [m] \quad (11)$$

3. 실험 및 고찰

1) 실험조건 및 방법

음극전극과 양극공작물 사이에 일정한 간극을 주고 전해액을 공급하면서 양극에 전류를 흘려주면 전기화학반응에 의해 양극인 공작물의 표면에서 가공이 이루어진다. 이 때 전기장과 수직인 방향의 자기장을 인가하면서 전해과정에 일어나는 변화를 고찰하였다. 자기장의 강도는 전자석 코일에 흐르는 전류의 세기를 변화시킴으로써 0~0.3T 범위에서 제어할 수 있게 하였다. 전해액은 활성형인 NaCl(20%)와 비활성형인 NaNO₃(20%)를 사용하였고 공작물은 SM45C와 SUS304를 사용하였다. 음극재료는 동(Cu)으로 하고 금속의 제거량 실험에서는 전해액의 유량을 1000ml/min으로 하였다.

2) 실험결과 및 고찰

Fig.2는 전자석의 코일전류에 따른 자극간극내의 자속밀도를 측정한 결과이다. 이론적으로 전자석 코일전류의 증가에 대해 자속밀도는 선형적인 증가를 나타내어야 하나 측정결과 전류가 커질수록 선형에서 약간씩 벗어나는 것은 자기회로의 손실에 기인한다고 사료된다.

① 자기장이 전해전류밀도에 미치는 영향

Fig.3은 전극간극이 5mm와 1mm일때, NaCl(20%) 수용액을 이용한 전해과정에서 자기장의 크기를 파라미터로 한 전극간극 전압과 전해전류밀도와의 관계를 나타낸다. 전극간극전압이 증가함에 따라 전해전류밀도도 증가하며 자기장의 크기가 클수록 전해전류밀도도 증가한다. 또한, 전극간극이 1mm일때는 5mm인 경우에 비해 전체적으로 큰 전류밀도가 얻어지는데 이것은 전해액의 전기저항이 전극간극거리에 반비례하기 때문이다.

Fig.4는 같은 전극전압에서 자속밀도에 따른 전해전류 및 전해액의 전기저항의 변화를 나타낸 것이다. 자속밀도가 클 수록 전해전류밀도는 증가하고 전기저항은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 자속밀도가 큰 경우에 가공영역의 이온입자에 주는 로렌츠힘이 보다 크게 작용하기 때문에 이온확산 운동이 가속화되어 더 많은 수의 이온들이 동시에 공작물과의 반응에 참여하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig.5는 전극간극이 5mm인 경우와 1mm인 경우에 대해 비활성형 전해액 NaNO_3 (20%수용액)을 이용한 전해과정에서 자속밀도의 크기를 파라미터로한 전극간극전압과 전해전류밀도의 관계를 표시한다. 활성형 전해액인 NaCl 과는 달리 비활성형 전해액 NaNO_3 를 이용한 전해과정에서는 자기장을 인가함으로써 전해전류밀도가 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다. 자속밀도가 작은 $B=0.06[\text{T}]$ 의 자기장을 인가하면 자속밀도가 큰 $B=0.28[\text{T}]$ 를 인가할 때보다 더 큰 전해전류밀도의 감소를 나타낸다. 이에 비해 전극간극이 5mm인 경우에는 자속밀도가 $B=0.28[\text{T}]$ 로 큰 경우에 전해전류밀도는 약간 증가하였다. 이러한 현상은 비활성형 전해액을 이용한 전해에서 양극의 공작물 표면에 생성되는 부동태화 피막에 의한 것으로 이해된다. 즉, 전기장에 수직한 자기장을 인가함으로써 전극간극내의 이온입자는 로렌츠힘을 받아 확산운동이 가속화되어 전극전류밀도를 증가시키게 되고 이에따라 양극표면에 형성되는 부동태화 피막의 두께를 증가시키게 되고, 이것은 다시 전해전류밀도를 감소시키는 복합적인 작용 때문으로 사료된다.

② 자기장이 금속제거량과 표면조도에 미치는 영향

Fig.6은 NaCl 을 전해액으로 사용한 경우 자속밀도의 크기와 양극금속제거량의 관계를 나타낸다. 활성형인 자속밀도가 증가함에 따라 금속제거량이 증가하며 자속밀도가 약 $0.06[\text{T}]$ 이상으로 커지면 금속제거량의 증가율이 감소함을 알 수 있다. Fig.7은 비활성형 전해액인 NaNO_3 를 사용한 경우의 금속제거량 및 가공표면조도를 자기장의 세기에 따라 나타낸 것이다. NaCl 의 경우와 같이 금속제거율은 자속밀도 0.06T 이후에 감소하며 표면조도 또한 0.06T 에서 가장 양호하게 나타났다. Fig.8은 전해가공된 표면의 윤곽(profile)을 나타낸다. 일반 전해가공에서 표면윤곽의 정상점들이 용출함과 동시에 골부분에서도 용출이 일어나 자기장을 인가할 경우에는 골부분의 용출이 대폭 감소되어 표면조도에 개선효과를 나타낸다. 그러나 자속밀도가

커지면 골부분의 용출도 증가하여 표면조도가 거칠어지는 것을 알 수 있다. 이와같이 자기장의 세기가 너무 크거나 작아도 좋지않은 결과를 나타내는 것은 전해이온의 운동반경과 전극간극의 크기가 상호 종속적인 관계를 갖으면서 가공프로세스에 영향을 미치기 때문으로 사료된다. Fig.9는 식(11)을 이용하여 자기장이 0.06T일때와 0.28T일때 전극사이의 각 위치에 존재하는 OH⁻ 이온들의 운동반경을 계산한 결과이다. 음의 이온인 경우에는 힘의 방향이 반대가 되므로 그림에서 x=0인 곳이 금속표면이고 x=1mm인 점이 음극 전극이라고 보면 된다. 최적의 자속밀도로 나타난 0.06T의 경우 양극 표면근처에 존재하는 이온들은 운동반경이 거의 영에 가까우며 음극표면근처에 존재하는 이온들의 운동반경은 6.8mm정도로 나타났다. 이상의 결과로부터, 자속밀도 0.06[T]정도에서 금속제거량이 현저히 증가되고 동시에 표면조도도 대폭 개선되기 때문에 자기전해복합경면가공 최적치로 선정할 수 있다.

전해과정에 미치는 전극간극 크기의 영향을 알아보기로 한다. Fig.10은 NaCl수용액을 이용한 전해가공에 자속밀도 0.06[T]를 인가한 후 전류밀도를 일정하게 하여 전극간극의 크기와 금속제거량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전극간극이 증가함에 따라 금속제거량은 거의 선형적으로 감소되며, 간극이 2mm보다 커지면 자기장을 인가하지 않을 때보다 작아진다. 이것은 자기장 내에서 이동하는 이온이 로렌츠힘을 받아 일부이온이 전극에 도달하지 못하고 전극간극영역을 빠져나가기 때문이라고 사료된다. 이것은 앞서도 언급하였듯이 전극간극과 이온 운동반경의 상호관계로부터 야기되는 결과이다. 이러한 결과로부터 자기전해복합 연마공정에서는 전극간극을 2mm이내로 될 수 있는 한 작게 설정하여야 한다는 것을 알 수 있다.

Fig.11과 Fig.12는 NaCl수용액을 이용한 자기전해복합공정에서 SM45C와 SUS304의 전극간극전압의 변화에 따른 금속제거량과 표면조도의 변화를 각각 나타낸다. 본 실험에서는 앞서의 실험결과에 의해 전극간극을 1mm로 설정하고 자속밀도는 0.06[T]로 인가하였으며 자기장이 인가되지 않은 경우와 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전극간극전압이 높아짐에 따라 금속제거량이 증가되며 표면조도도 거칠어진다. SM45C의 전해공정에서는 자기장을 복합시킴으로써 금속제거량이 증가되며 표면조도도 대폭 개선된다. SUS304의 자기전해복합공정에서는 전극간극전압이 3.75[volts]천후(전극전류밀도 $J=0.7A/cm^2$)에서 금속제거량이 대폭 증가함고 동시

에 표면조도가 가장 작게 나타났다.

비활성형 전해액을 이용한 전해연마공정에서는 가공물 표면에 생성된 부동태화 피막을 연마재등을 이용하여 제거함으로써 전해작용을 연속적으로 진행시켜 고능률 정밀 표면연마가공을 달성한다. 그러나, 가공물 표면에 생성된 부동태화 피막이 너무 두꺼우면 단시간내에 완전히 제거되지 못하므로 가공효율이 낮아지며 표면조도도 거칠어진다. 따라서 부동태화 피막이 활발하게 형성되기 시작하는 시점의 전극 전류밀도 $0.7A/cm^2$ 를 택하는 것이 바람직하다고 사료된다.

4. 결 론

전해연마공정에 자기장을 복합시킨 자기전해연마공정에서 자기장이 전해공정에 미치는 영향을 알아보기 위하여 SM45C 및 SUS304에 대한 자기전해복합가공 모델 실험을 수행하고 최적의 복합파라미터를 선정한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 전해공정에 자기장을 인가하면 로렌츠힘에 의한 전해이온들의 운동이 복잡해지고 전체운동길이 및 전해반응이 증가하기 때문에 금속제거량이 증가한다.
- 2) 이온의 운동반경은 자기장의 세기에 반비례하고 특정 전극간극 크기에 대해 최적의 운동반경이 존재하기 때문에 자기장의 세기 또한 최적의 값이 존재한다. 전극간극이 1mm인 경우 최적의 자속밀도는 0.06T이다.
- 3) 활성형 전해액인 NaCl 수용액은 금속제거량이 크고 가공 표면조도가 높은 반면에 비활성형 전해액인 $NaNO_3$ 수용액은 금속제거량이 작고 표면조도가 양호하기 때문에 연마가공에 적합하다. $NaNO_3$ 수용액을 사용한 자기전해연마에서는 가공물 표면에 생성되는 부동태화 피막을 연마재등을 이용하여 제거하는 공정을 복합시킴으로써 고품위 표면연마가공이 가능하다.
- 4) 자기전해연마공정의 주된 복합파라미터 최적값으로서 전극전류밀도는 $0.7A/cm^2$, 자속밀도는 0.06 T, 전극간극은 2mm이하로 할 경우 가공능률이 급속히 증가하고 동시에 표면에 피막이 형성되어 표면거칠기가 가장 양호하게 나타났다.

참고문헌

- [1] G.Kuppuswamy, An Investigation of the Effect of Magnetic Field on Electrolytic Diamond Grinding Wear, 54 (1979) 257-272
- [2] 金 東燮, 電解磁氣とその研磨機構の研究, 2nd International Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology, 1992
- [3] 金 東燮, A Study on the Electrolytic Magnetic Nonwoven Abrasive Finishing, 3rd International Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology, 1994
- [4] 夏 恒. 磁場對電火花加工中放電柱的影響, 電加工(中國) 1992. 5
- [5] 熊谷一男, 神谷修, 森田 武, 強磁性材料における研削加工磁氣效果-研削量と研削抵抗に及ぼす磁場影響-, 精密工學會誌, 58. 10 (1992)
- [6] B.I.Bleaney, Electricity and Magnetism, 2nd Ed., Oxford Univ. Press, 1965

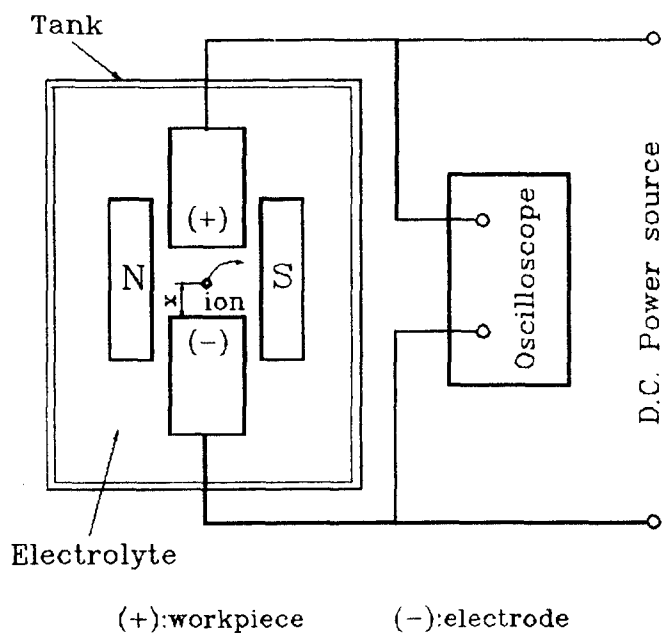


Fig.1 Schematic diagram of experimental process

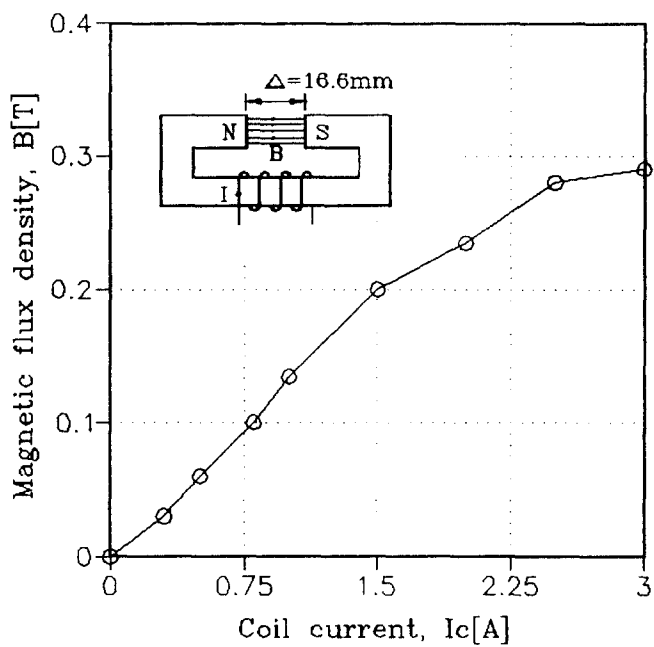


Fig.2 Relation between input coil current and flux density of the electromagnet

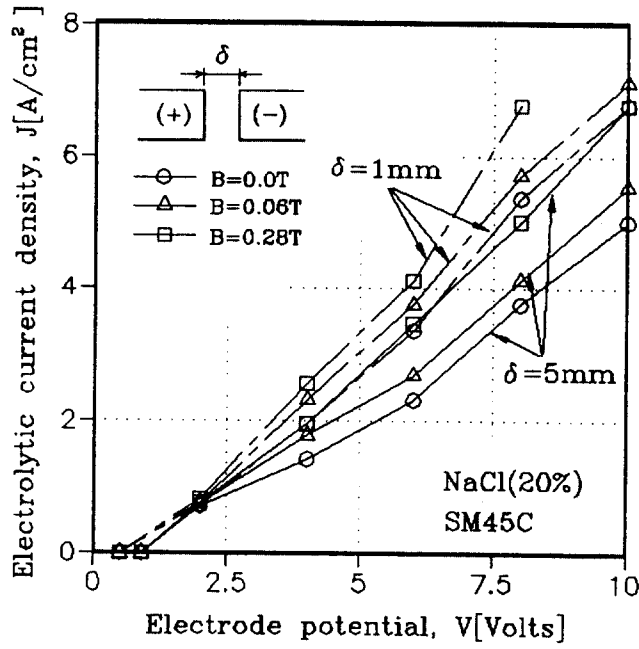


Fig.3 Electrolytic current density with respect to electrode potential in the case of using NaCl

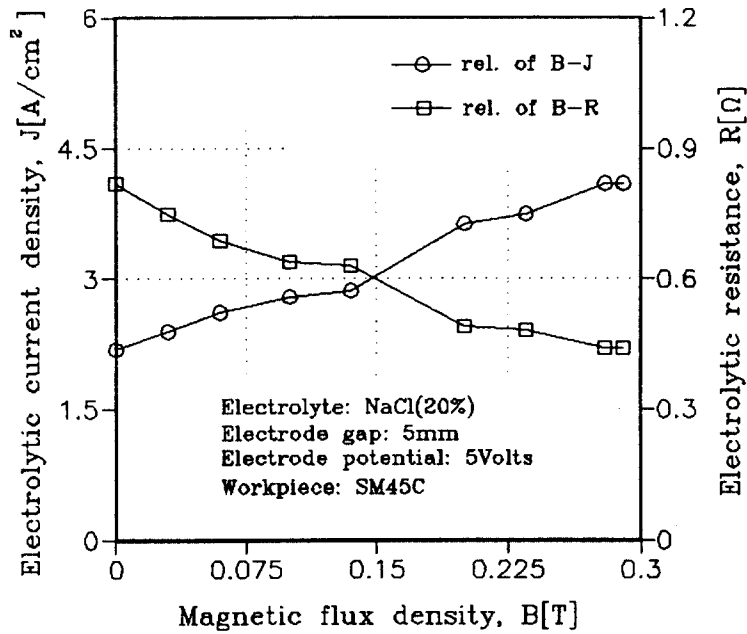


Fig.4 Electrolytic current density and electrolytic resistance change due to magnetic flux density

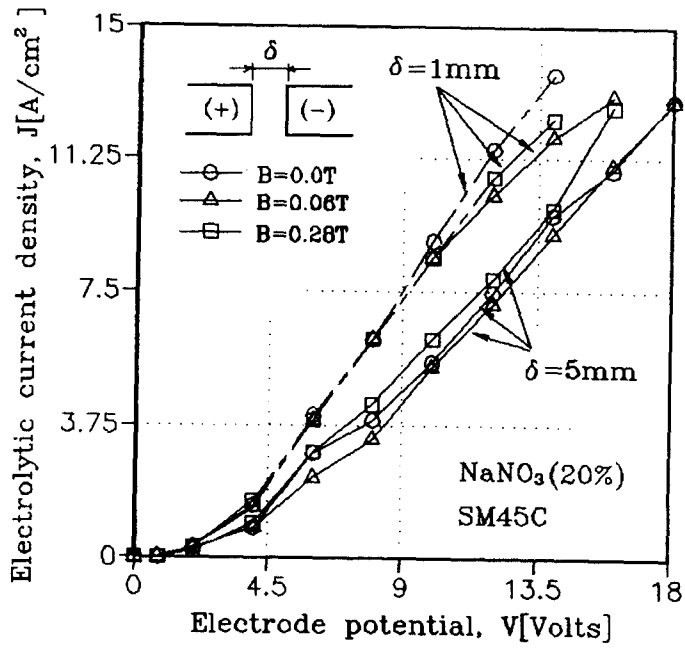


Fig.5 Electrolytic current density with respect to electrode potential in the case of using NaNO_3

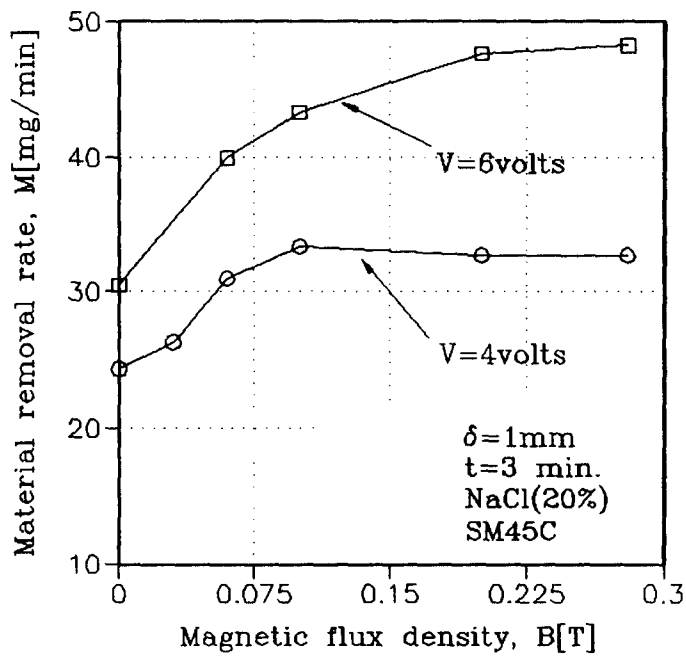


Fig.6 Removal rate with respect to magnetic flux density

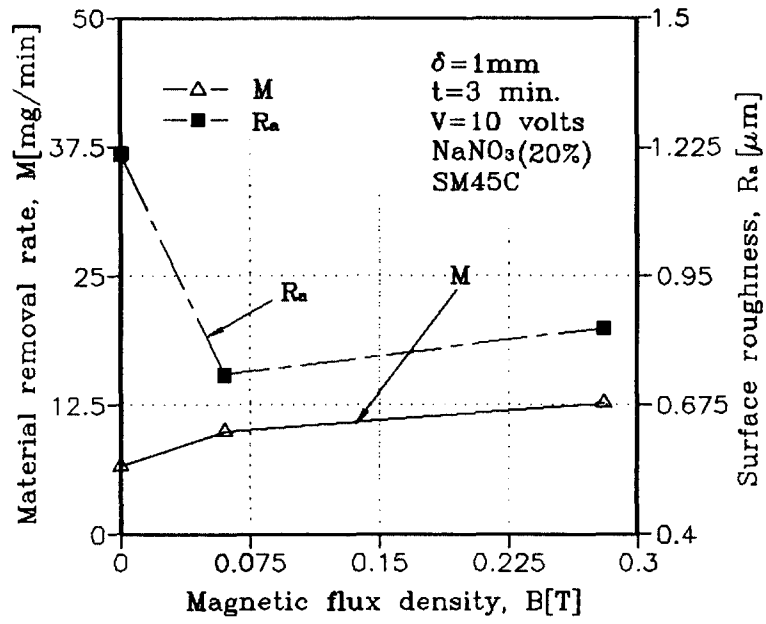
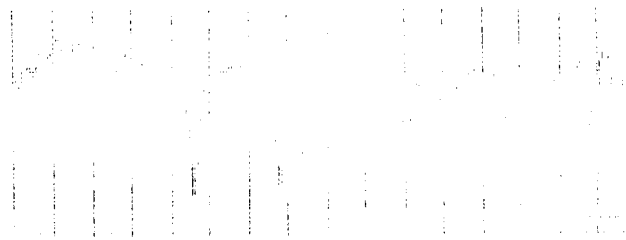


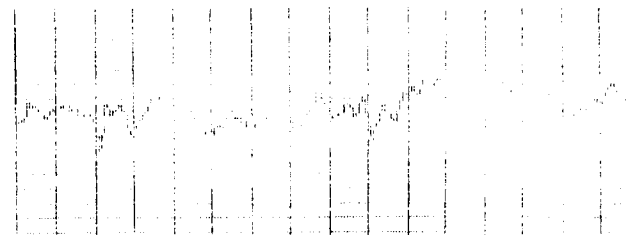
Fig.7 Removal rate and surface roughness with respect to magnetic flux density



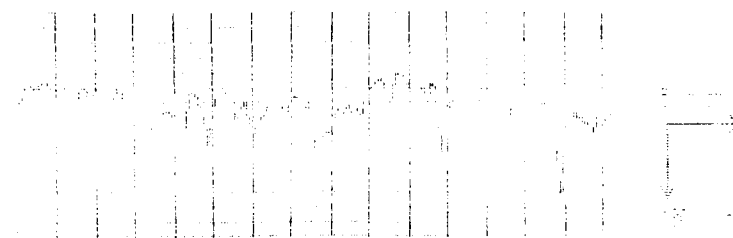
(a) Initial ground surface



(b) Surface without magnetic field



(c) Surface with B=0.06 T



(d) Surface with B=0.28 T

Electrolyte : NaNO_3 (20%), Electrode gap : 1 mm
 Machining time: 3 min., Electrode potential: 10 volts

Fig.8 Surface profiles before/after electrolytic process with magnetic field

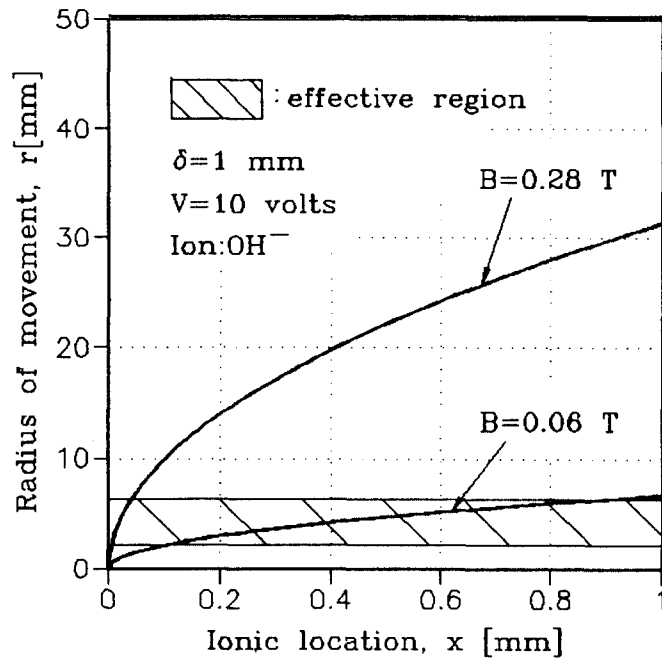


Fig.9 Radius of ionic movement with respect to its location between electrodes

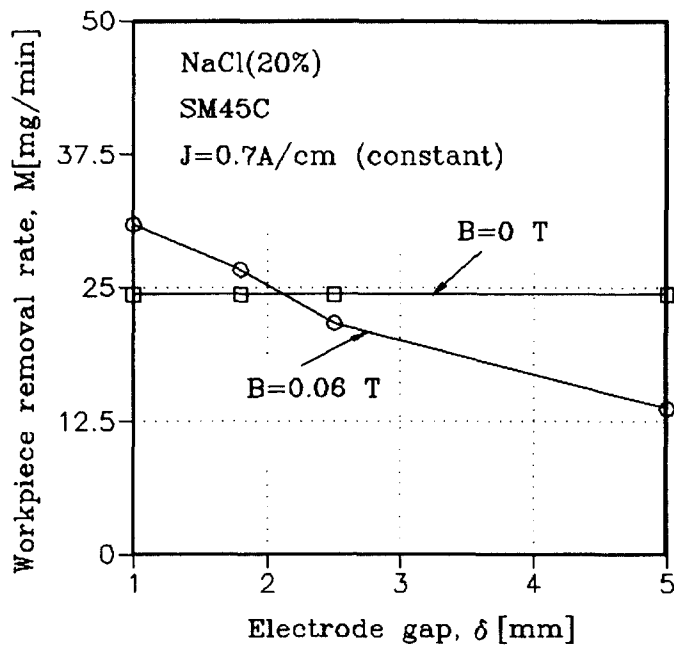


Fig.10 Workpiece removal rate with respect to electrode gap with/without magnetic field

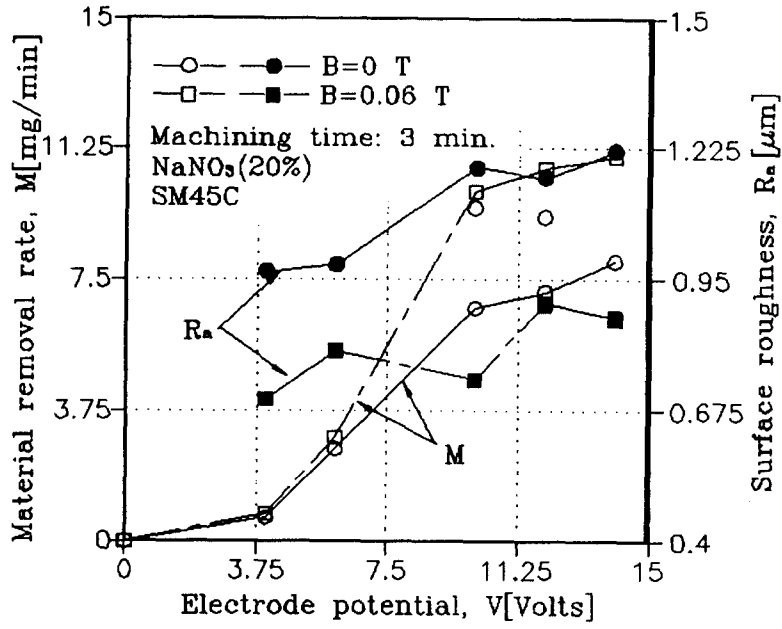


Fig.11 Material removal and surface roughness with respect to electrode potential

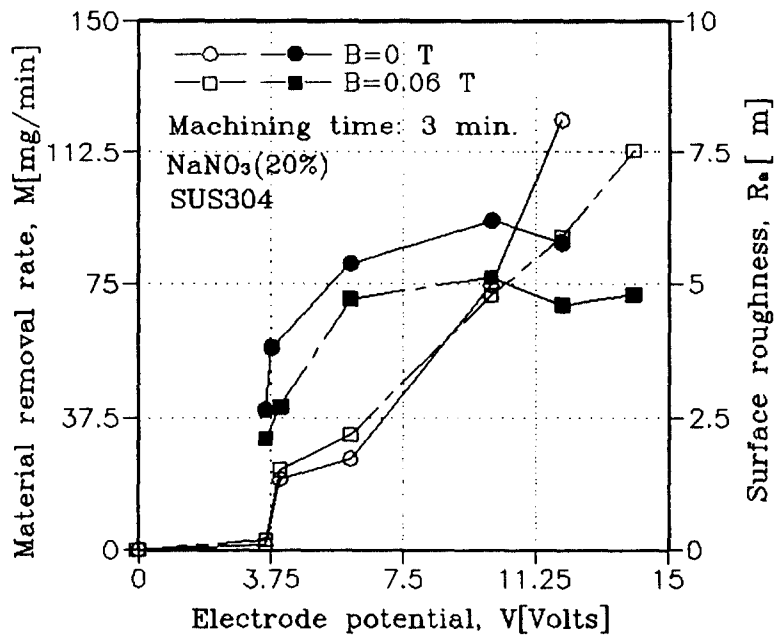


Fig.12 Material removal and surface roughness with respect to electrode potential