

전해가공 시의 정밀도의 향상을 위한 음극 설계와 모사

유시철, 조수익, 손헌준*, 강탁*

서울대학교 공과대학 자원공학과 *서울대학교 공과대학 재료공학부

Cathode design and simulation in electrochemical machining

S. C. Yu, S. I. Jo, H. J. Sohn* and T. Kang*

Dept. of Mineral and Petroleum Eng., Seoul Nat. Univ., Seoul 151-742

*School of Material Science and Eng., Seoul Nat. Univ., Seoul 151-742

Abstract

The electrochemical machining of carbon steel was carried in various electrolytes which contain NaCl and NaClO₃. Though electrolyte containing NaCl yields fast machining rate, dimensional control is rather difficult. In the case of electrolyte with NaClO₃, dimensional control of anode shape can be obtained through modification of cathode design. Mathematical modeling is also performed for these systems and agreements are good compared with experimental data. The constant gap experiment between two electrode yielded faster machining rate than constant cathode moving rate experiment.

1. 서 론

전해가공(electrochemical machining, ECM)은 가공할 재료를 양극으로 하여 전기화학적 용해작용을 재료의 필요한 부분에 집중, 제한함으로써 필요로 하는 형상이나 치수, 표면 상태를 얻는 가공법이다. 이 방법은 가공할 재료의 경도가 높거나 형상이 복잡하여 기계적 가공을 하기 어려운 경우에도 적용할 수 있어서 방전 가공과 결합하면서 발전하고 있다. 전해가공은 전도성의 금속이면 경도, 인성에 관계없이 가공할 수 있고, 공구전극(음극)의 소모가 전혀 없으며, 가공된 면은 경면에 가까우므로 소재 가공 분야에서 각광 받는 기술의 하나로서 자리잡고 있다^{1,2)}.

전해가공을 효과적으로 수행하는데 영향을 미치는 요소로는 크게 전해액과 공구 전극의 설계를 들 수가 있다. 전해액으로 가장 많이 사용하는 염으로는 NaCl, NaClO₃, NaClO₄ 및 NaNO₃ 등이 있으며, 이중 NaCl염 전해액은 가공 속도가 빠르고 가격이 저렴한 반면 정밀한 가공을 요하는 목적에는 부적합하다. 이를 보완할 수 있는 것이 금속이 용해될 때 특정 전위 범위에서 금속 표면에 부동태의 보호 피막을 형성하여 원하는 부분만이 전류가 집중되고 다른 부분은 부동태 영역으로 안정화시키는 전해액을 사용하는 것이다. 이런 특성을 가지고 있는 경우가 NaClO₃와 NaNO₃염 등을 사용한 전해액이며 이중 NaNO₃염 전해액은 NaClO₃염 전해액에 비해서 부동태 영역의 형성전위가 넓으

나 전류효율이 무척 낮은 것으로 보고되었다³⁻⁷⁾. 공구 전극은 정밀도에 가장 직접적인 영향을 미치며 전해액의 공급방식과 전극모양의 설계, 그리고 고온에 견디는 견고한 절연 피마의 부착 등이 정밀도 향상에 큰 기여를 한다⁸⁾.

전해공정에서는 음극의 모양에 따른 양극 가공모양의 예측을 하고, 목적하는 양극모양을 얻을 수 있는 음극을 설계하는 것이 가장 중요하다. 이를 위해서는 크게 해석적인 접근과 수치 해석적인 접근으로 나눌 수 있는데, 해석적인 접근으로는 perturbation method 와 complex variable method 그리고 $\cos \theta$ method 등이 연구되었으나 음극의 크기나 모양이 한정되고 과전압을 고려하지 못한다는 단점이 있다^{9,10)}. 한편 수치해석을 통해 양극의 가공모양을 예측하는 방법으로는 유한차분법을 사용하였으나 경계의 이동이 원활하고 mesh의 작성이 쉬운 경계요소법이 대안으로 연구되고 있다^{11,12)}.

본 연구에서는 탄소강 시편에 원통형이나 사각기둥 형태의 구멍을 팔 때 NaCl 과 NaClO_3 염 전해액에서 전해가공한 후 그 가공형태를 직접 측정하여 전해액과 공구 전극 모양에 따른 결과를 비교하였다. 또한 경계요소법을 이용하여 공구 전극 모양에 따른 양극의 가공형태를 모사하고 이를 근거로 해서 공구 전극의 설계 및 가공 공정의 설정에 응용하였다.

2. 이론적 배경

전해가공은 전도성의 금속을 사용하여 공구 전극을 제작하고 전해액을 수평 또는 수직으로 전해조에 주입하면서 양극금속을 원하는 모양으로 가공해 가는 것으로서 공구전극의 설계와 이동속도의 결정이 매우 중요한 인자이며, 이를 위하여 공구 전극인 음극의 모양에 따른 양극 표면의 전류분포와 가공되는 형태변화를 예측할 수 있는 기구가 필요하다. 예측된 양극의 형태변화를 통해 가장 적절한 공구전극을 설계하고 아울러 전극간 거

리를 일정하게 유지시키기 위해서 각 시간단계에서의 음극의 이동속도를 결정함으로써 공정의 최적화가 가능하다. 이를 위하여 본 연구에서는 경계요소법을 사용 모사 하였으며 모델의 설정은 전해 가공에서는 일반적으로 고전압을 가하므로 계면에서의 과전압은 무시할 수 있으며 전해액은 계속해서 빠른 속도로 공급되므로 농도 분극도 무시할 수가 있어서 일차 전류분포를 가정하였다. 양극 음극을 제외한 전극 주변은 무한대의 평면인 절연체로 가정하였으며 전극이 대칭이기 때문에 Fig. 1에서 볼 수 있는 것과 같이 2차원적인 한 단면만을 대상으로 모델링을 행하였다.

용액내의 전위분포는 일차전류 분포를 가정했으므로 다음과 같은 전위에 대한 Laplace식과 경계조건으로 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

$$\text{절연체와 대칭선에서} : \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (2)$$

$$\text{금속표면에서(양극)} : \phi = V \quad (3)$$

$$\text{음극에서} : \phi = 0 \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 전위, n 은 전극표면의 수직 방향, V 는 가한 전위로서 편의상 음극을 0으로 했을 때의 전위차 값을 나타낸다. 가공 표면에 수직방향

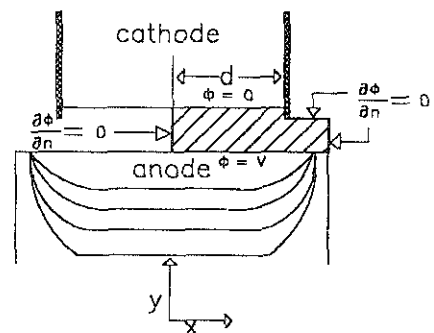


Fig. 1 A visualization of evolution of metal surface and boundary conditions

의 전류밀도는 음의 법칙에 따라서 다음과 같이 표현된다.

$$i_n = -\chi \nabla \phi \quad (5)$$

여기서 χ 는 전해액의 전도도를 나타낸다. 위의 식에서 구한 전류밀도로부터 가공면의 위치변화는 Faraday법칙에 따라서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v = \frac{\epsilon M}{z F \rho} i_n \bar{n} \quad (6)$$

또한 이를 유한차분법을 이용하여 각 방향으로의 거리로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta x \bar{n}_x = \frac{\epsilon M}{z F \rho} \Delta t i_n \bar{n}_x \quad (7)$$

$$\Delta y \bar{n}_y = \frac{\epsilon M}{z F \rho} \Delta t i_n \bar{n}_y \quad (8)$$

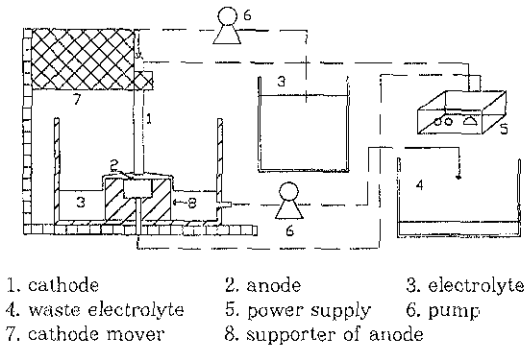
여기서 v 는 가공면의 이동속도를 나타내고 M , z , ρ , ϵ 는 각각 분자량과 전자가 그리고 금속의 밀도와 전류효율을 나타내며, i_n 와 \bar{n} 은 표면에 수직인 전류밀도와 단위벡터를 그리고 Δt 는 시간의 변화를 나타낸다. 경계요소법을 이용해서 식 (1)-(5)을 풀어 양극 표면에서의 전류와 극간의 전위 분포를 얻는다. 식 (6)에서 v 는 금속이 용해하여 변화하는 표면의 속도를 나타내고 식 (7), (8)과 같이 유한차분법을 이용하여 x , y 방향의 거리의 변화를 결정하였으며 음극을 일정한 속도로 이동하면서 보사 각 시간에서의 y 방향의 거리의 변화를 계산하여 형태변화를 예측하였다.

3. 실험방법

실험장치는 Fig. 2와 같으며 전력 공급계(HP, 30V×100A)를 사용 직류 전압을 가했으며, 전해액의 흐름속도는 펌프를 사용하여 300 cc/min로서 조절하였다. 양극은 직경 1.5cm와 3cm원형으로 가공한 disk형의 탄소강을 사용하였고 그 주위를 아크릴을 사용하여 고정시켰다. 음극은 구리봉을 가공

하여 Fig. 3과 같이 원통형과 또는 사각기둥 형태로 만들어 사용하였으며 음극 주위에 0.1mm 두께의 유리를 부착하여 절연면을 만들었다. 음극의 크기는 두 가지로 전해액인 NaCl과 NaClO₃에 따라서 각각 0.4cm×0.4cm 및 1cm×1cm를 사용하였고 전동 이동장치를 사용하여 음극의 이동속도를 조절하였다. 전해액은 5ℓ 용기로부터 펌프를 이용하여 음극 중앙의 직경 1mm 구멍을 통해서 전해조로 흐르도록 하고 반응된 후의 용액은 다른 펌프를 사용하여 배출시켰다.

NaClO₃염 전해액의 전류/전위곡선을 얻기 위하여 상대전극(counter electrode)과 기준전극(reference electrode)을 구리봉(1cm²×10cm)으로



- 1. cathode
- 2. anode
- 3. electrolyte
- 4. waste electrolyte
- 5. power supply
- 6. pump
- 7. cathode mover
- 8. supporter of anode

Fig. 2 Schematic drawing of ECM process

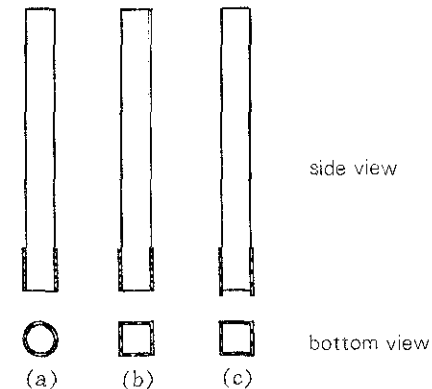


Fig. 3 Shape of cathode of (a)C1, (b)C2 and (c)C3

사용하였으며 작동전극(working electrode)은 탄소강으로 하였다.

전해가공을 할 때 NaCl 전해액의 경우는 음극 모양을 원형(C1)과 사각형으로 나누어 실험을 행하였으며 사각형 전극에 대해서는 주위에 절연막을 입힐 때 전극 밖으로 절연막이 0.4 mm 나오게 한 것과(C3), 그렇지 않은 것(C2)의 두 가지 형태로 만들었다. NaClO₃ 전해액의 경우는 C2, C3 전극을 사용해서 NaCl 전해액과 동일하게 실험을 행하여 전해액과 전극의 종류에 따른 가공 모양의 변화를 서로 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 전류효율의 측정과 전압의 결정

2M NaCl, 4M NaClO₃염을 넣은 전해액의 전도도는 각각 0.1367, 0.1527(S/cm)로 농도차이는 크더라도 전도도 차이는 그렇게 크지 않았다. 한편 정전류를 흘려주고서 실험 전후의 전극의 무게를 측정하여 계산한 전류 효율은 NaCl의 경우 거의 100% 이었으나 NaClO₃ 용액에서는 전류밀도가 2 A/cm² 까지는 전류효율이 0이었다, Chin⁴⁾와 Mao⁵⁾ 등은 이 단계에서는 부동태피막의 형성으로 금속의 용해는 발생치 않고 산소발생만이 일어난다고 보고하고 있다. Chin⁴⁾은 NaClO₃염 전해액의 경우 전류밀도가 10 A/cm²일 때 정밀가공에 가장 적합하다고 하였는데 이 연구의 실험조건에서 전위가 20V일 때에 전류밀도가 10A/cm²에 가깝기 때문에 이를 근거로 20 V의 정전압을 실험과 모델링의 조건으로 선택하였으며, NaCl용액에서 가공할 때도 비교를 위해서 동일한 전압을 선택하였다.

4.2 NaCl 전해액에서 가공형태의 모사와 모델의 검증

NaCl염 전해액은 가공속도가 빠르고 가격이 저렴하여 전해가공에 많이 쓰이는 전해액이지만 정

밀도가 떨어지기 때문에 음극 모양의 적절한 설계로 이를 극복해 보고자 하였다. NaCl염 전해액은 NaClO₃염 전해액과는 달리 부동태 피막을 형성치 못하기 때문에 이론적으로는 양극 표면의 전류밀도가 0이 되는 부분까지 양극의 가공영역에 포함되어야 하는 데, 음극의 크기를 0.2cm로 하고 전극간 간격을 0.1cm로 한 경우에 음극 C3, C2 등은 양극 중심으로부터의 거리가 각각 0.4cm와 0.5cm에 까지 전류가 흘렀으며 그 이상은 무시할 수가 있었다. 따라서 경계요소법을 실행하기 위한 양극면의 경계까지의 길이를 각각 0.4 cm와 0.5cm로 설정하였다. 20V의 정전압을 양극에 가하고 그리고 음극의 이동속도를 2 μ m/sec로 할 때 모델링을 통해 얻은 가공형태는 Fig. 4와 같으며, 전극 C1, C2와 C3의 모든 경우에 음극의 크기인 0.2cm보다 훨씬 큰 0.4-0.5cm범위까지 가공되는 것으로 예측되었다. 실제로 원통형 C1 음극을 쓰면 Fig. 5의 (a)와 같이 음극에 비해서 2배정도 커진 구멍이 얻어짐을 볼 수가 있었으며, 사각형 구멍을 가공할 때는 모서리 부분이 둥글게 되어 정밀한 가공이 어려운 것으로 나타났다. 이처럼 가공된 구멍의 형태는 음극의 모양과 크게 다르지만 그 구멍의

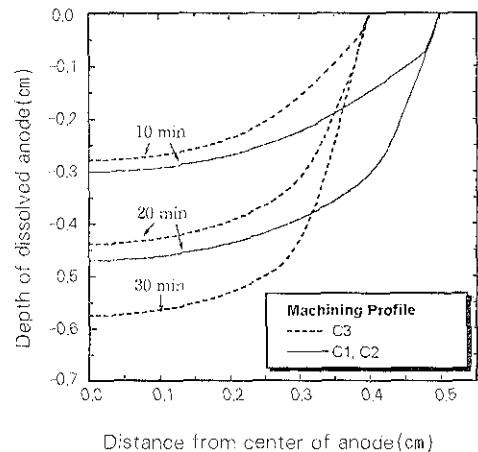


Fig. 4 Simulated machining profile with a time interval of 10 minutes in 2 M NaCl

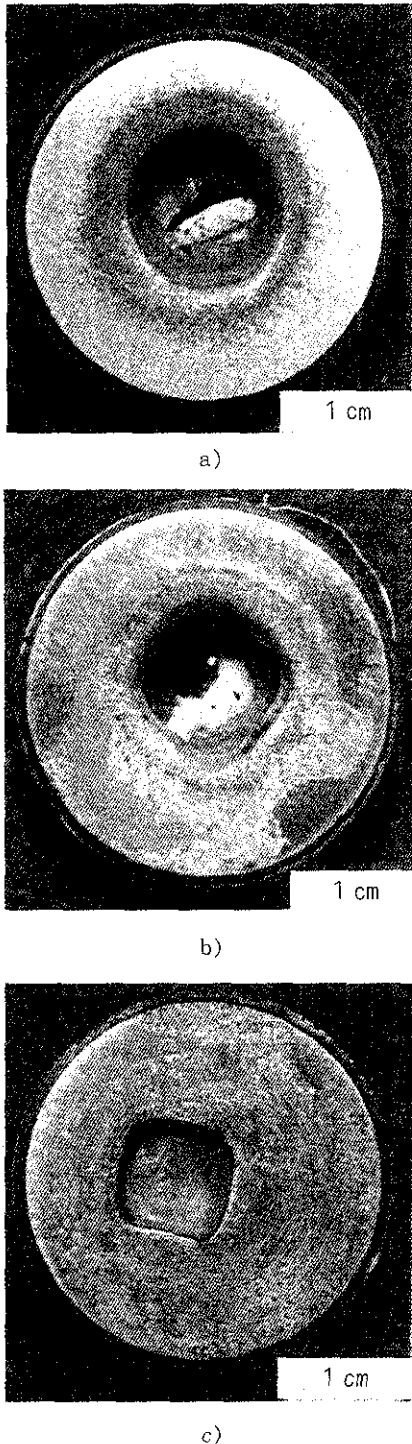


Fig. 5 Optical photographs of C1, C2 and C3 with 2M NaCl

단면을 측정하여 보면 Fig. 6에 보듯이 모델링 결과와 잘 일치하여, 이 연구에서의 모델이 양극의 가공형태를 잘 예측해 주고 있음을 알 수 있다.

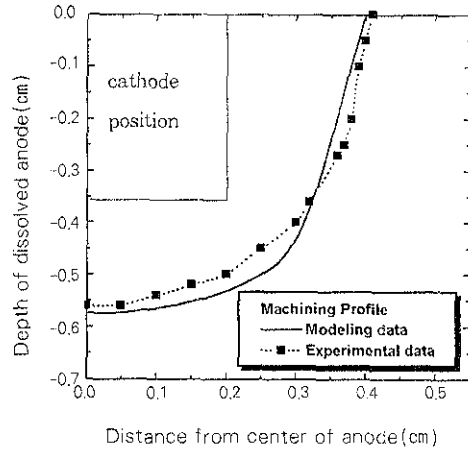


Fig. 6 The comparison of modeling and experimental data using C3 in 2M NaCl after 30 minutes

4. 3 NaClO₃염 전해액에서 가공형태의 모사와 모델의 검증

NaClO₃염 전해액에서 단면이 1cm×1cm 사각형 음극을 써서 전해할 때 양극표면의 전류분포를 계산한 결과는 Fig. 7과 같으며 전류밀도가 2A/cm² 이하일 때는 부동태 피막을 형성하여 금속이 전혀 가공되어지지 않고 산소 발생만이 일어나기 때문에 양극 표면의 중심으로부터의 거리가 C3, C2 각각 0.56cm, 0.62cm 이상에서는 전혀 가공이 일어나지 않으므로 이 길이를 경계에 포함되는 양극의 크기로서 각각 설정하였다. C2와 C3전극을 써서 20V의 정전압과 0.94μm/sec의 음극의 이동속도로 C2와 C3의 가공형태를 모사한 결과는 Fig. 8과 같으며 실제 가공된 구멍의 사진이 Fig. 9와 같다. 모사형태에서 C3은 C2에 비해서 음극의 모양과 크기에 더 근접하고 가공속도의 면에서도 거의 일치함으로써 선택적 가공에 더 유리한 것으로 나타

났다. 실제 가공 사전에서 볼 수 있듯이 C3은 C2에 비해서 사각 구멍의 모서리 부분이 각형성에서 더 양호했으며 가공 크기 또한 음극에 거의 가까운 결과를 나타내었는데 이는 음극의 형태가 가공의 크기와 모서리 부분의 각형성에 밀접한 관련이 있음을 보여준다. C3를 사용한 경우의 모사와 실험 결과를 비교한 것을 Fig. 10에 나타내었으며 NaCl 염 전해액에서와 같이 잘 일치함을 알 수 있다.

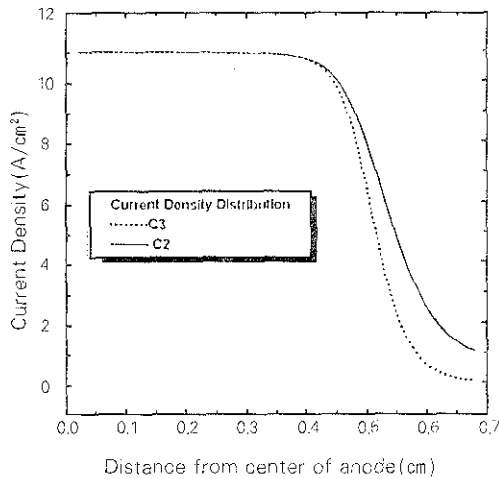


Fig. 7 The current density distribution of anode surface using C2 and C3 in 4M NaClO₃

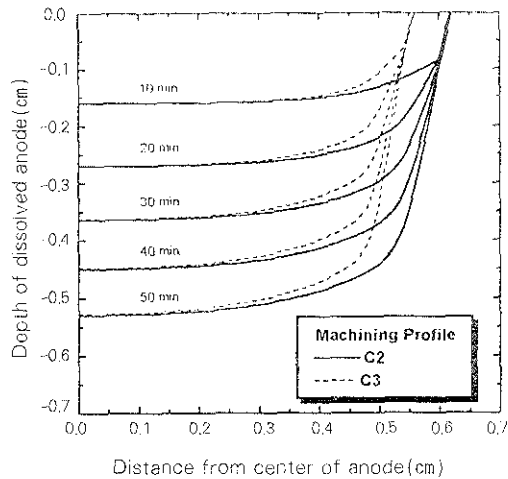
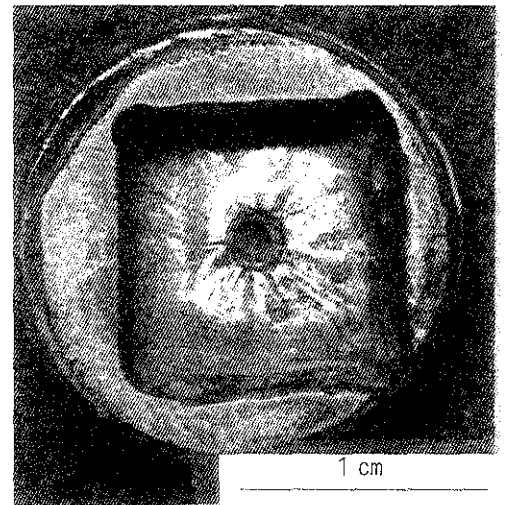


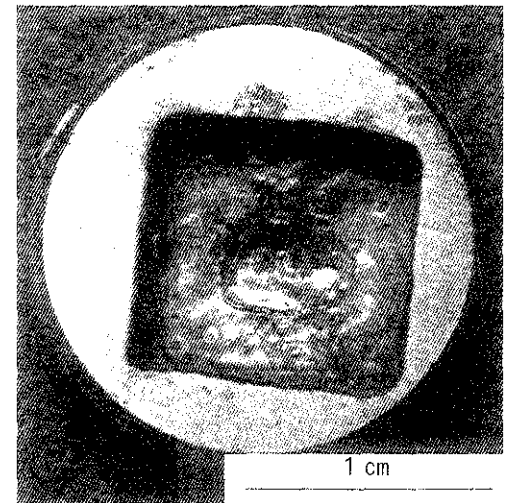
Fig. 8 Simulated anode profile with a time interval of 10 minutes in 4M NaClO₃

4. 4 NaClO₃염 전해액에서 모의 실험을 통한 음극 이동속도의 결정

전해가공을 할 때는 음극의 이동속도보다 전극간의 간격을 일정하게 유지시키는 것이 가공 속도론의 면에서 중요하다. 이를 위해서 두극간의 거리를 0.1cm로 일정하게 유지하면서 모의 실험을 행하여 양극의 가공 깊이의 시간에 따른 변화를



a)



b)

Fig. 9 Optical photographs of (a)C2 and (b)C3 in 4M NaClO₃

Fig. 11에 나타내었다. 이때의 전극간 거리는 음극표면에서 중심거리($x=0.5\text{cm}$)위치에서의 두극간의 높이 차로 하였으며, 그림에서 y축 또한 이 위치에서의 양극 가공깊이였다. 전극간의 거리를 음극의 중심에서의 두극간의 높이 차나 또는 음극 전체위치에서의 두극간의 평균높이차로 하지 않은 이유는 음극의 가장자리에 부착한 절연막이 양극

의 표면에 닿을 수가 있기 때문이다. 이러한 현상은 음극의 가장자리 위치에서 양극의 가공이 다른 위치에 비해 상대적으로 느리기 때문에 나타나며, C3의 경우에 더욱 커서 전극간 거리 결정에 필연적으로 고려되어야한다. 양극의 가공속도는 초기에 $2.2\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 일정하게 나타나다가 20분 후에 $0.7\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 늦어진다. 이와 같이 두단계로 나누어지

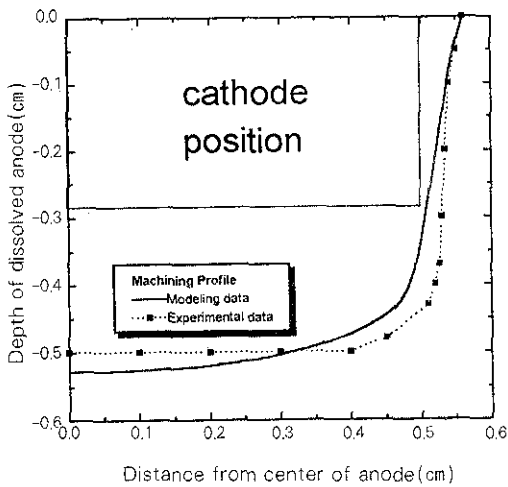


Fig. 10 The comparison of experimental and modeling data using C3 in 4M NaClO₃ after 50 minutes

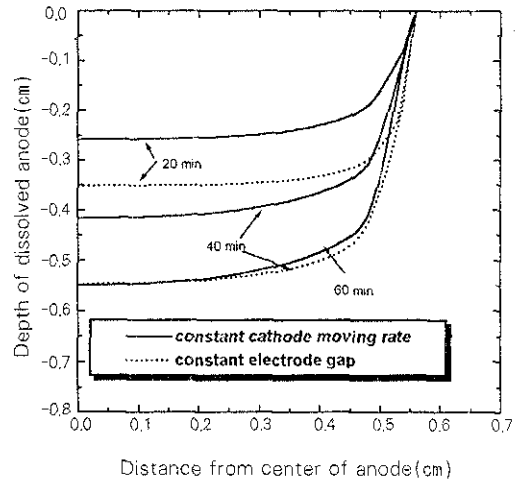


Fig. 12 Simulated anode profile with a time interval of 20 minutes using C3 in 4M NaClO₃

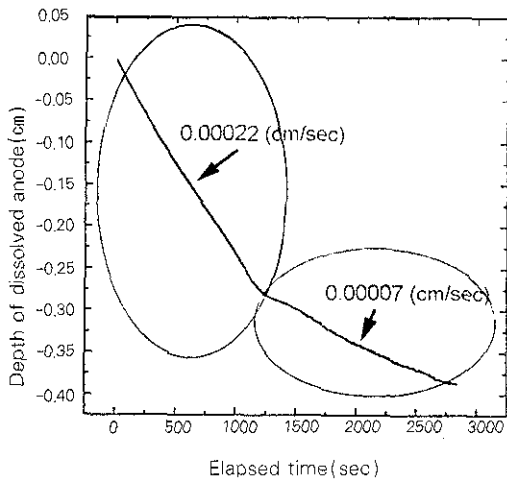


Fig. 11 Machining rate using C3 in 4M NaClO₃

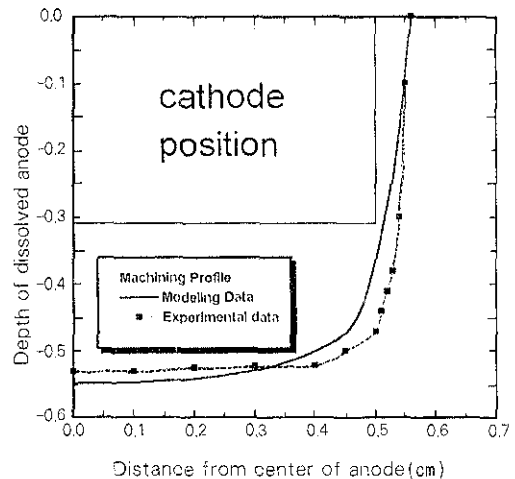


Fig. 13 The comparison of modeling and experimental data using C3 in 4M NaClO₃ for constant electrode gap case after 40 minutes

는 것은 양극 가공속도가 양극 가공깊이를 측정하는 위치에서의 전류밀도 분포에 큰 영향을 받아서, 초기에는 측정 위치에서 양극의 가공이 빠르나 어느 시점에서 급작히 감소 유지되기 때문이다. 전극간 간격을 바꾸어 가며 모의 실험을 한 결과 전극간의 간격에 관계없이 가공속도는 두 단계로 나누어지는 데 전극간 거리가 가까울수록 초기의 빠른 속도가 더 오래 유지되었다. Fig. 12는 이동속도를 $0.94 \mu\text{m}/\text{sec}$ 로 고정하였을 때와 전극간 간격을 0.1cm 로 유지했을 때의 전해가공 모의 실험을 하여 그 가공 깊이가 시간에 따라 변하는 과정을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 전극간의 간격을 일정하게 유지했을 때의 속도와 정밀도가 이동속도를 일정하게 하는 경우보다 향상되는 데 단지 가공 구멍의 크기는 조금 더 커진다. 이를 본 실험에 응용하기 위해서 두 단계로 조건을 조절하였다. 즉, 실험 초기에는 음극의 이동속도를 일정하게 유지하다가 20분 후에 이동속도를 바꾸어 전극간의 거리를 일정하게 유지하면서 전해가공을 하였다. 이때의 실험결과와 모사결과의 비교를 Fig. 13에 나타내었는데 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

탄소강을 전해가공할 때 음극의 모양과 전해액에 따른 양극의 가공형태의 변화를 조사하고 이를 해석하기 위한 모델을 설정하여 모사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) NaCl 전해액은 낮은 전류밀도에서 양극에 부동태 피막을 형성하지 않으므로 가공하고자 하는 면 밖으로 전류가 일부 흘러 공구전극보다 훨씬 큰 구멍이 생기며 결과적으로 가공정밀도가 낮아진다.

2) NaClO_3 전해액에서는 가공 정밀도를 높일 수가 있었는데 이는 낮은 전류밀도에서 부동태막이 형성되기 때문으로 설명할 수 있다. 이 때의 가공

과정을 모사하기 위해 양극 표면의 전류밀도 분포를 구하여 그 값이 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 이상인 영역만을 대상으로 하여 모사한 결과 실험결과와 잘 일치하였다.

3) NaClO_3 전해액을 사용하여 수행한 수치모사 및 실험결과로부터 절연막이 음극 면보다 돌출되어 있을 때 가공속도가 빠르고 사각기둥과 같은 각형의 가공에도 유리함을 알 수 있었다.

4) 일정하게 극간 거리를 유지하는 것이 음극의 이동속도를 고정하는 것보다 가공속도면에서 유리하였으며 정밀도 면에서는 거의 차이가 없었다.

참 고 문 헌

1. J. A. McGeough and M. B. Barker : *Electrochemistry, Past and Present*, J. T. Stock and M. V. Orna (ed.), American Chemical Society (1989) 578
2. J. A. McGeough : *Principles of Electrochemical Machining*, Chapman and Hall, London, (1974) 234
3. K. W. Mao : *J. Electrochem. Soc.*, 120 (1973) 1056
4. D. T. Chin and A. J. Wallace, Jr. : *J. Electrochem. Soc.*, 120 (1973) 1487
5. K. W. Mao and D. T. Chin : *J. Electrochem. Soc.*, 121 (1974) 191
6. K. W. Mao : *J. Electrochem. Soc.*, 118 (1971) 1870
7. Y. Sugie, C. Sakamoto, S. Fujii, S. Yashizawa and K. Yamakawar : *Denki Kagaku*, 49 (1981) 573
8. Y. Sugie, C. Sakamoto, S. Fujii, S. Yashizawa and K. Yamakawar : *Denki Kagaku*, 49 (1981) 159
9. J. M. Fitz-Gerald, J. A. McGeough and L. M. Marsh : *J. Inst. Math. and Applics.*, 5 (1969) 409

-
- 10 R. C. Hewson-Browne : J. Eng. Math. 4 (1971) 233
- 11 C. A. Brebbia and J. Dominguez : Boundary Elements An Introductory Course, Computational Mechanics Publications, Southampton Boston (1989) 45
- 12 G. J. Kwon, H. Y. Sun and H. J. Sohn : J. Electrochem. Soc., 142(1995) 3016