

경계요소법에 의한 전해가공물의 형상예측에 관한 연구

김대철*, 양재봉**, 김현영***, 전병희****

A Study on The Prediction of Workpiece Shape of The Electrochemical Machining by Boundary Element Method

D.C. Kang, J.B. Yang, H.Y. Kim, and B.H. Jeon

Abstract

The BEM (Boundary Element Method) is a computational technique for the approximate solution of problems in continuum mechanics. In the BEM, both volume and surface integrals transformed into boundary integral equations. So, we applied the ECM (Electrochemical Machining) process to boundary problem, because our focus is only deformed shape. The ECM process is modeled as a two-dimensional problem assuming constant properties of electrolyte, and an incremental formulation is used with automatic mesh regeneration. As a result, the final shape is roughly agreed with experimental shape. But, it has an error of exact shape, because a chemically factor is not considered.

Key Words : BEM, ECM, Probe pin, 경계요소법, 전해가공

1. 서 론

전해가공(Electrochemical Machining, ECM)은 양극용해에 의해 금속을 제거하는 가공으로 항공산업, 반도체용 강관의 표면가공, 금형재 등 난삭재의 표면 가공에 많이 사용되었다. 그 이유로는 가공 후 잔류응력이 남지 않으며, 가공표면의 거칠기가 우수하고, 단축방향의 공구이송으로 복잡한 형상을 가공할 수 있기 때문이다.⁽¹⁾ 또한 강도가 커서 기존의 방법으로는 가공이 잘 안되는 금속이나 합금의 가공에도 많이 사용되어왔다. 최근에는 가공의 특성상 난삭재의 미세가공이 가능하기 때문에 반

도체 등 미세가공 분야에서 많이 사용되고 있다. 반면, 단점으로는 장치가 다소 복잡하여 초기에 설치 및 가공에 시간이 많이 소요된다.

본 연구에서는 약 150~300 μ m의 직경을 갖는 텅스텐 봉을 전해가공을 통해서 가공하고, 이때의 형상을 경계요소법(boundary element method, BEM)을 이용해서 계산한 결과와 비교한다. 이러한 연구를 통해서 가공 후 형상에 따른 가공 전 형상을 예측할 수가 있다.

2. 본 론

* 강원대학교 대학원

** SFTC

*** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

**** 인덕대학 컴퓨터응용기계계열

2.1 전해가공

전해가공은 전기화학적 작용을 통해 가공을 하는 방법이다. Fig. 1 과 같이 가공물(workpiece)에 양극(anode)을 연결하고, 전극(electrode)에 음극(cathode)을 연결한 후 전압을 가한다. 이때 전압차에 의해서 양이온은 전해액을 통해서 음극으로 움직이고, 음이온은 양극으로 움직인다. 양극에서는 금속의 용출현상이 일어나며 질량이 감소하게되고, 음극에서는 전해액의 수산화이온(hydroxyl ion, OH⁻)이 발생하며 금속원자의 침전반응이 일어난다.⁽²⁾

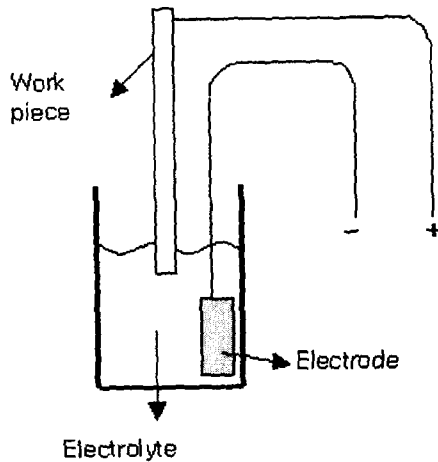


Fig. 1 Concept diagram of electrochemical method

전해가공의 가공 메커니즘을 설명하기위해 Fig. 2 와 같이 이중층을 적용하기도 한다. 가공물에 양극을 인가하면 공작물내의 에너지가 여기상태가 되어 불안정한 상태가 된다. 표면에는 음이온이 모이고 전기화학적 반응을 통해 용출현상이 일어나기 쉬운 상태가 된다. 이때 음이온이 가공물의 양이온과 결합하여 가공물이 용출되게 된다. 여기서 가공물이 용출되며, 음이온의 농도가 높은 구간을 Helmholtz 층 이라 하며, Helmholtz 층 바깥 쪽으로 음이온과 양이온이 공존하는 구간을 Gouy-Chapman 층 이라 한다.

전해가공의 공정을 해석하기위해 많은 연구가 진행되어왔는데, Mcgeough 는 cosine method 를 사용하여 공구의 형상을 예측하였고⁽¹⁾, Reddy 등은 correction factor method 를 사용하여 공구의 초기형상을 원하는 공작물의 형상과 상보형태가 되도록 설정하여 correction factor를 계산하고, 공구의 초기형상에 factor를 적용하여 다시 수정한다. 이 과정을 여러가 제한범위에 도달할 때

까지 반복하여 공구를 설계 했다.⁽³⁾ 이강운은 공구와 가공물이 형상의 변화가 없는 평형상태에 도달하는 것을 이용하여 경계요소법을 적용시켜 해석하였고⁽²⁾, 이동환은 유한요소법을 사용하여 가공 공정을 해석했다.⁽⁴⁾

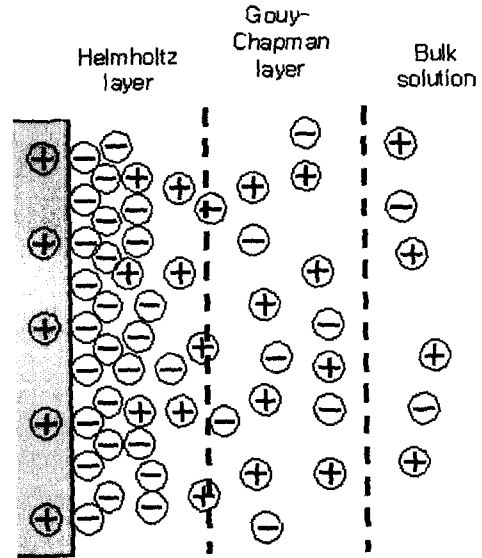


Fig. 2 Schematic diagram of double layer

앞에서 언급한 연구는 모두 공구의 형상으로 가공물이 가공되는 일반적인 경우의 전해가공에 대한 연구뿐이다. 본 연구는 probe pin 과 같이 공구와 가공물의 형상이 다른 경우에 대한 연구이다. 텅스텐 봉을 끝단이 날카로운 형상으로 가공하는데, 이 가공물은 probe pin 과 같은 반도체 검사용 장비에 사용된다. 또한 가공 조건에 따라서 편차와 같이 균일 직경을 가진 형상으로도 가공이 가능하다. Fig. 3은 전해가공 후 형상을 나타낸다



Fig. 3 Electrochemical machined tungsten rods

2.2 경계요소법

경계요소법은 연속체 문제에 있어서 근사해를 구하는 수치적 기법이다. 경계요소법은 지배미분

방정식을 같은 값인 경계적분방정식으로 변환하여, 유한요소법과 같이 이산화를 하여 해를 구하는 경계형 해법이다. 유한요소법과 같은 영역형 해법에 비해서 방정식의 원수가 적게되고, 입력 데이터 수나 계산시간을 큰 폭으로 감소시킬 수 있다는 장점이 있다.⁽⁵⁾

전해가공은 가공물에 직접적인 물리력을 가하지 않으므로 내부에 잔류응력이 발생하지 않는다. 즉 가공 후 형상이 중요한 평가 요소가 된다. 따라서 전해가공 공정을 가공물 표면의 전압 포텐셜 문제로 국한시켜 가정하면 경계요소법을 사용하여 공정 해석을 할 수 있다.⁽²⁾ 이때는 가공물의 내부의 상태는 중요하지 않고, 외곽의 형상만을 관심의 대상으로 삼는다.

2.3 경계요소모델

본 연구에서는 축대칭의 형상을 가공하므로 2차원 형상으로 모델을 단순화 하였다. 또한 일반적으로 전해가공에서 가공물의 선형제거율은 다음과 같은 페러데이의 법칙(Faraday's law)에 따르는 것으로 알려져 있다. 이것은 이미 전해가공의 역 과정인 도금에 적용되어 도금 두께의 예측에도 응용된다.⁽⁶⁾

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\gamma m}{zF\rho} J$$

여기서, dr/dt 은 가공물의 선형제거율, γ 는 전류효율, m 은 양극의 원자량, z 는 원자가, F 는 페러데이 상수로 96500쿨롱이고, ρ 는 가공물의 밀도, J 는 전류밀도 이다.

페러데이의 법칙에 따르면 가공물의 선형제거율은 전류밀도에 비례함을 알 수 있다. 따라서 가공량을 전류세기에 비례한 것으로 가정하고, 전해용액의 농도와 가공 중 발생하는 산화막의 효과는 고려하지 않았다.

Fig. 4 는 전해가공 해석을 위한 2차원 경계요소 모델을 나타낸다. 경계를 구분하기 위해서 10개의 제어점(control point)을 설정하고, 제어점 사이를 경계요소로 나눈다. 그리고 계산영역을 3개의 영역(segment)으로 나누었다. 첫번째 영역은 양극영역(0-1-2-3) 이고, 두번째 영역은 음극영역(7-6)이며, 세번째 영역은 전해액영역(3-4-5-6, 7-8-9-0)이다.

전류의 계산은 양극영역과 음극영역의 거리에 비례하

여 계산되어지고, Fig. 5 와 같이 시간 t 초에서 계산한 전류값에 실제 가공에서 고려되어지는 가공상수(etching scale factor)를 곱한 만큼 경계요소에 수직벡터에 반대 방향으로 이동하여 t 초 후의 형상으로 갱신한다.

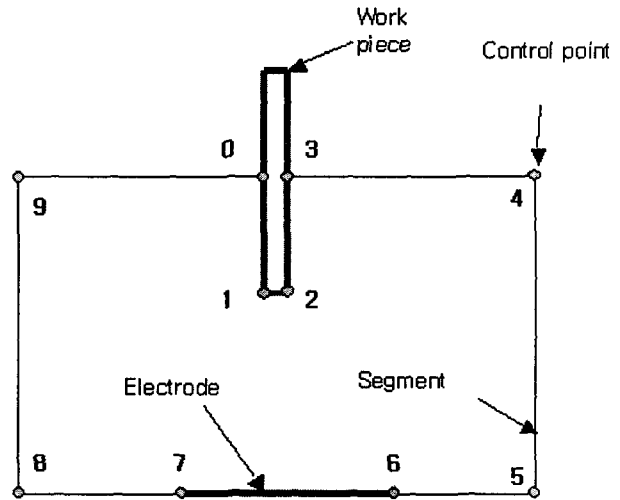


Fig. 4 BEM model

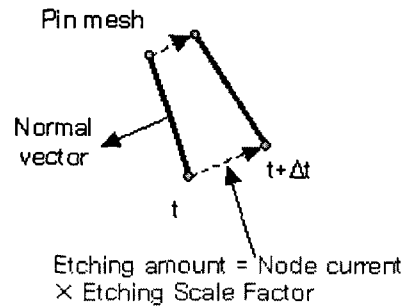


Fig. 5 Node movement

경계조건으로 가공전압은 15volt 이고, 텅스텐 봉의 직경은 150 m 이다. 전해액은 NaOH(농도: 2.5%)를 사용하고, 전극과 가공물 사이의 거리는 22mm 이며, 가공시간은 120초 이다. 양극영역과 음극영역의 경계요소는 0.25 m 크기로, 전해액영역은 0.5 m 크기로 요소분할 했다. Time step 은 0.25 초 이며, Table 1 에 경계조건을 나타냈다.

Table 1 Boundary conditions of simulation and experiment

Voltage	Concentration of NaOH	Etching time	Distance of electrode and workpiece
15V	2.5%	120 sec.	22 mm

2.4 해석결과

전해가공 시스템 전체를 해석하기 위해서는 많은 시간이 소요된다. 본 연구에서는 해석시간을 단축하기 위해 계산에 필요한 영역만을 포함시킨 축소모델(scaled model)과 전극의 일부를 잘라낸 모델(cutting model)을 사용하였다. Fig. 6 에 해석 모델을 나타내었다

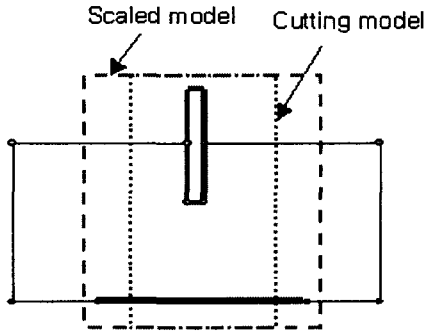


Fig. 6 Various models(scaled and cutting model)

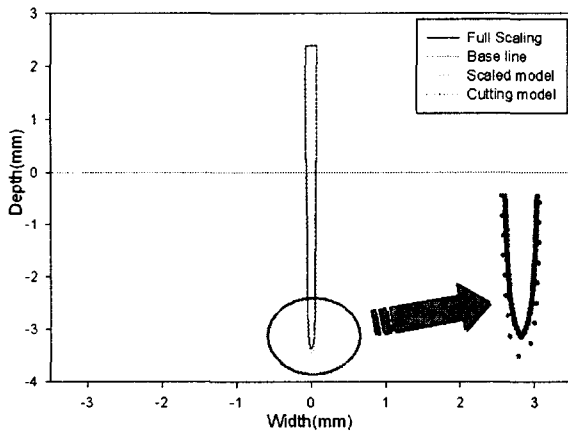


Fig. 7 Simulation results (tungsten rod shape)

Fig. 7 의 해석결과를 보면, 축소모델의 결과가 전체모델의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 전극을 포함하면 공간의 크기에 관계없이 전류값이 일정하게 계산됨을 알 수 있고, 계산시간은 전체모델에 비해서 1/3(30분) 로 줄었다. 따라서 전극을 포함하는 최소의 공간을 계산영역으로 설정하면 계산시간을 절약할 수 있다. 반면에 전극의 일부를 잘라낸 모델은 계산시간은 가장 작으나, 전류의 세기가 달라져서 가공량이 작게 평가된 것을 알 수 있다.

Fig. 8 에 실제 가공된 결과와 해석결과를 비교해 놓았다. 초기에는 그 형상이 비슷하나, 끝단으로 갈수록 직경과 길이가 다소 차이를 보이는데, 이것은 전해액의 농도와 산화막의 효과가 고려되지 않아서 발생하는 것이다. 따라서 정확한 형상을 표현하기 위해서는 화학적인 효과를 고려한 가공상수가 필요함을 알 수 있다.

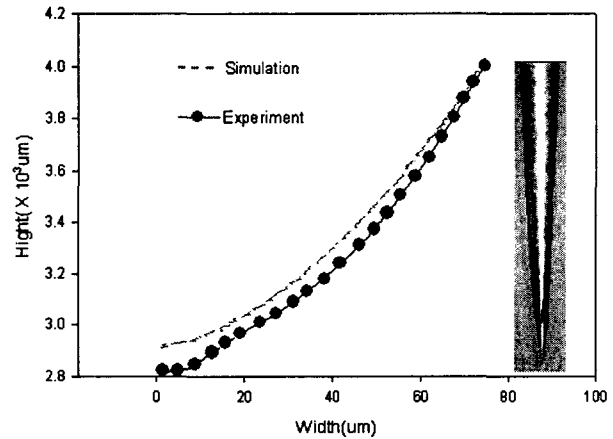


Fig. 8 Comparison of shape between simulation and experiment.

3. 결론

본 연구에서는 직경 150 μm 의 미세 텅스텐 봉을 사용한 전해가공 공정을 해석하기 위해 경계요소법을 적용하였다. 해석결과는 다음과 같다.

- (1) 경계요소법을 적용하여 전해가공 공정을 해석하였다.
- (2) 2.5% NaOH 용액에서 15volt 로 120초 동안 가공한 전해가공 공정을 해석하였다.
- (3) 해석시간을 줄이기 위해 음극영역을 포함하는 축소

모델을 사용하여 해석시간을 1/3(30분)로 줄일 수 있었고, 전체모델 해석결과와 잘 일치했다.

- (4) 전류의 세기에 비례한 계산을 하였다. 하지만 정확한 형상을 표현하기 위해서는 화학적인 효과를 고려한 가공상수가 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) Mcgeough J. A., 1974, "Principles of Electrochemical Machining", Chapman and Hall, London,
(2) 이강운, 1991, "경계요소법을 이용한 ECM의 가공물 모양 예측 및 공구의 형상최적설계", 한국과학기술원, 석사논문

- (3) Reddy M. S. , Jain V. K. and Lal G. K., 1988, "Tool Design for ECM : Correction Factor Method", ASME N. Engineering for Industry 110, pp. 111~118.

- (4) 이동환, 1992, "전해가공시 유한요소법을 이용한 공작물의 형상예측", 한국과학기술원, 석사논문

- (5) Kane J. H., 1994, "Boundary Element Analysis", Prentice-Hall, Inc..

- (6) 도금기술편람편집위원회., 1989, "도금기술편람", 기전 연구사.