미세금형 가공을 위한 전기화학식각 공정의 유한요소 해석 및 실험결과 비교

류현열 · 임현승* · 조시형 · 황병준* · 이성호* · 박진구†

한양대학교 바이오테크놀로지학과, *한국생산기술연구원 미래융합 연구그룹

Finite Element Simulation and Experimental Study on the Electrochemical Etching Process for Fabrication of Micro Metal Mold

Heon-Yul Ryu, Hyeon-Seung Im*, Si-Hyeong Cho,
Byeong-Jun Hwang*, Sung-Ho Lee* and Jin-Goo Park†

Department of Bionano Technology, Hanyang University

*Advanced Convergent Technology R&D Division, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

(2012년 7월 10일 접수 : 2012년 8월 21일 최종수정 : 2012년 8월 22일 채택)

Abstract To fabricate a precise micro metal mold, the electrochemical etching process has been researched. We investigated the electrochemical etching process numerically and experimentally to determine the etching tendency of the process, focusing on the current density, which is a major parameter of the process. The finite element method, a kind of numerical analysis, was used to determine the current density distribution on the workpiece. Stainless steel(SS304) substrate with various sized square and circular array patterns as an anode and copper(Cu) plate as a cathode were used for the electrochemical experiments. A mixture of H_2SO_4 , H_3PO_4 , and DIW was used as an electrolyte. In this paper, comparison of the results from the experiment and the numerical simulation is presented, including the current density distribution and line profile from the simulation, and the etching profile and surface morphology from the experiment. Etching profile and surface morphology were characterized using a 3D-profiler and FE-SEM measurement. From a comparison of the data, it was confirmed that the current density distribution and the line profile of the simulation were similar to the surface morphology and the etching profile of the experiment, respectively. The current density is more concentrated at the vertex of the square pattern and circumference of the circular pattern. And, the depth of the etched area is proportional to the current density.

Key words finite element simulation, electrochemical etching, TMEMM, metal mold.

1. 서 론

미세 금형은 수십에서 수백 μm 크기의 미세 3차원 구조형상을 가지는 금속 가공물로서 금속의 프레스가공, 플라스틱의 사출성형과 임프린트 공정에 주로 사용된다.^{1,2,3)} 이러한 미세 금형의 제작에는 미세 가공기술이 이용되고 있다. 미세 가공기술은 기계산업, 전자산업 등의 제조업 뿐만 아니라 의료, 생물, 화학분야에 걸쳐 광범위하게 응용되는 기반기술로서 광범위한 기술 응용분야를 가지고 있다.^{4,5,6)} 전자 산업에서는 잉크젯 프린터 헤드, 반도체 테스트 프로브 카드, 그리고 microphone을 비롯한 vibration analyzer, flow meter, gas sensor, radiation detector 등의 각종 센서류에 널리 응용되고 있다.

미세 가공기술은 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 그 중

하나는 Micro Electro Mechanical Systems(MEMS) 기술을 이용하여 가공하는 방법이다.⁷⁾ 이 방법은 수 μm 크기의 극미세 구조를 낮은 단가로 대량 생산할 수 있지만 이러한 기술로 가공이 가능한 재질이 실리콘으로 한정되어 있기 때문에 강성이 높은 금속의 가공이 불가능하다. 다른 방법으로는 기계적 미세가공이 있으며 그 종류로는 미세 방전가공, 미세 전해가공, 레이저가공 그리고 $FeCl_3$ 습식식각이 있다. 미세 방전가공은 절연 가공액을 통한 방전현상을 이용하며 가공물이 전도성을 가진다면 금속의 강도와 관계없이 가공할 수 있지만 연속적인 방전현상에 의한 가공부의 높은 온도로 인해 표면의 거칠기가 좋지 않다.⁸⁾ 미세 전해가공은 전해액을 통한 양극의 전기화학적 이온용출을 이용하며 복잡한 형상도 가공할 수 있지만 날카로운 코너 형상의 가공에 적합하지 않다는 단점을 보인다.⁹⁾ 레이저가공의 경우는 레이저 빔을 이용하여 가공하여 높은 정밀도를 보이지만 가공부의 높은 온도에 의한 열적 영향으로 인해 표면의 상태

†Corresponding author

E-Mail : jgpark@hanyang.ac.kr (J. G. Park)

가 좋지 않다.^{10,11)} 그리고 철을 주성분으로 하는 재료의 가공에 사용하는 FeCl_3 습식식각의 경우 역시 표면의 거칠기가 좋지 않은 단점을 지니고 있다.

이러한 기존 공정의 단점을 보완하고 미세한 형상의 가공을 위해서 전기화학식각 공정을 이용하려는 연구가 시도되고 있다.¹²⁾ 전기화학식각 공정이란 미세 전해가공과 반도체 공정의 photolithography 공정을 결합한 방법으로 볼 수 있다. 가공물의 표면에서 원하는 부분만 식각하여 원하는 형상을 제작하기 위해 반도체 공정의 photolithography 공정을 이용하여 감광액(photoresist)을 마스크로 이용한다. 이렇게 표면에 원하는 형상의 절연물질을 코팅하고 가공을 원하는 부위만 노출시켜 가공하는 방법을 Through Mask Electrochemical Micro Machining (TMEMM)이라고 한다.¹³⁾ 전기화학식각 공정은 원자 단위의 이온용출을 이용하기 때문에 가공 표면의 상태가 양호하고 photolithography 공정을 이용하여 정교한 패턴의 형성이 가능하지만 전류, 온도, 극간거리와 전해액의 조성 등의 변수가 많고 재현성이 낮아 공정 결과를 예측하기 어렵다는 단점이 있다.¹⁴⁾

본 연구에서는 위와 같은 단점을 보완하기 위하여, 수치해석의 한 종류인 유한요소해석을 이용하여 가공물 표면에서의 전류밀도 분포를 파악하고 이를 실제 공정 결과와 비교하여 전기화학식각 공정의 경향성을 알아보고자 하였다. 유한요소해석을 위한 시뮬레이션 프로그램으로 ANSYS를 이용하였고, 공정 결과의 분석을 위하여 3D-profiler(μ -surf, Nanofocus, Germany)와 FE-SEM(S-4800, Hitachi, Japan)을 이용하였다.

2. 실험 방법

2.1 유한요소해석

전기화학식각 공정에서의 전류밀도 분포를 알아보기 위하여 유한요소해석 방법을 이용하였고, 해석 과정에서 기본적으로 반응속도 분포는 전위에 의해서 좌우된다고 가정하고 다음과 같은 가정들을 세웠다. (1) 시편에서의 전류밀도 분포는 옴의 법칙을 따르고 전극은 등가전위

Table 1. Isotropic resistivity of materials(ohm*m).

Material	Isotropic Resistivity (ohm*m)
Cu	1.6×10^{-8}
Electrolyte	0.03 [331 mS/cm]
Photo resist	1×10^9
SS304	7.7×10^{-7}

(equipotential)를 가진다. (2) 교반 효과로 인해 전해액 내의 농도 구배는 없다. (3) 전해액의 전도도는 일정하다. (4) 공정 중에 전류 효율은 변하지 않는다.

유한요소해석을 위해서는 먼저 해석하고자 하는 대상을 모델링 해야 한다. 본 실험에서 사용한 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 전극의 크기와 전극간 거리는 실제 수치와 동일하게 하였다. 해석 과정에서 설정한 전극, 전해액과 감광액에 대한 물성 값들을 Table 1에 표시하였다. Fig. 1(a)에서는 전체적으로 실제 크기의 1/4로 축소된 모델을 사용하였는데, 이는 컴퓨터의 해석에 소요되는 시간을 단축하기 위하여 대칭모델을 적용하였기 때문이다. Fig. 1(b)에서는 모델에 접점을 지정한 모습을 볼 수 있는데 분석하고자 하는 부분에 조밀하게 집중시켜서 보다 정밀한 결과를 얻을 수 있도록 하였다.

2.2 전기화학식각 공정

전기화학식각 공정에서는 Fig. 2에서와 같이 가공물을 양극단자에 연결하고 음극단자에 백금 또는 구리와 같은 금속을 연결한 뒤, 두 전극을 전해액에 침지시켜 전류를 인가하게 되면, 양극의 금속이 산화하게 되면서 미량의 산소가스와 함께 금속이온의 용출이 발생한다. 시편 준비과정에서 크기 $3 \times 3 \text{ cm}^2$, 두께 0.05 cm의 스테인레스강(SS304) 시편을 기관으로 사용하였고, 기관 위에 원하는 패턴을 형성하기 위해 photolithography 공정을 수행하였다. AZ1512(AZ Electronic Materials, USA) 감광액을 spin-coater(CMS-120, Gensys, Korea)를 이용하여 도포하고 soft bake를 거친 뒤, 마스크가 장착된 자외선 노광장비(EVG620, EVG, Austria)를 이용하여 노광시킨다. 이후 AZ300MIF 현상액을 이용해 현상하면 마스크

Fig. 1. The Result of modeling (a) 3-dimensional view and (b) model with node.

Fig. 2. Schematic diagram of electrochemical etching process system.

Fig. 3. The designs of mask which have (a) square pattern and (b) circle pattern.

상의 패턴이 기판 위에 형성된다. 이 기판을 구리테이프 및 절연체기판을 이용하여 Fig. 2와 같이 구성하고 양극단자에 연결한다. 패턴을 형성하는 과정에서 사용된 마스크의 도안을 Fig. 3에 나타내었다. 사각형과 원형 패턴을 이용하였으며 전해액에 노출된 영역에 대한 차이를 알아보기 위해 1000 μm , 500 μm 그리고 100 μm 의 3가지 크기를 사용하였고 Table 2에 각 패턴의 크기와 패턴사이의 간격을 나타내었다. 각 도안의 가운데를 기준으로 25개의 정렬된 패턴이 존재하며 패턴과 패턴사이 간격의 비율은 1:2이다.

Table 2. Dimension of mask design.

Pattern size (side of square, diameter of circle)	Gap between patterns
1000 μm	2000 μm
500 μm	1000 μm
100 μm	200 μm

Table 3. Basic properties of electrolyte.

Property	Value
Composition	$\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 : \text{DIW} = 3 : 5 : 2$
pH	-0.72
ORP	840 mV
Conductivity	331 mS/cm
Temperature	25°C

전기화학식각 실험에서 전해액으로는 황산(H_2SO_4), 인산(H_3PO_4), 그리고 초순수가 3:5:2의 부피비로 섞인 용액을 사용하였고, 제조된 전해액에 대한 물성을 Table 3에 나타내었다. 식각하고자 하는 시편과 반대 전극으로 사용되는 구리판(Cu plate)을 함께 전해액에 담근 뒤 시편에는 양극단자를, 구리판에는 음극단자를 연결하였다. 양 전극간 거리는 10 cm로 유지하였으며, 전해액 내의 이온 농도를 고르게 하고, 시편의 표면에 발생하는 산 소기포를 없애기 위해 교반기를 사용하였다. 인가된 전류는 0.1 A, 공정 시간은 5분으로 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석 결과

Fig. 4는 사각형과 원형 패턴의 크기에 따른 시편 표면에서의 전류밀도 분포를 보여주고 있다. (a), (b), (c)는 사각형 패턴의 1000 μm , 500 μm , 100 μm 시편이고 (d),

Fig. 4. Current density distribution on the surface. Square pattern of (a) 1000 μm , (b) 500 μm , (c) 100 μm and circle pattern of (d) 1000 μm , (e) 500 μm , (f) 100 μm .

Fig. 5. Current density distribution at the cross section. Square pattern of (a) 1000 μm , (b) 500 μm , (c) 100 μm and circle pattern of (d) 1000 μm , (e) 500 μm , (f) 100 μm .

(e), (f)는 원형 패턴의 1000 μm , 500 μm , 100 μm 시편의 결과이다. 대칭 모델을 적용하였기 때문에 1/4로 축소된 크기의 결과를 얻었다. 그림에서 사각형 및 원형 패턴의 주위는 감광층 부분이고, 패턴의 내부가 전해액에 노출되어 식각이 진행되는 부분이다. 전류 밀도의 크기는 각 그림의 좌측에 색으로 구분 지은 축의 상단에 가까울수록 전류 밀도가 높음을 의미한다. 결과를 보면, 사각형의 경우는 네 개의 꼭지점 부근에, 원형의 경우는 원주 부근이 패턴의 중심보다 상대적으로 높은 전류밀도 분포를 보이고 있다. 사각형의 경우 모서리보다 꼭지점 부분에 전류밀도가 집중되는 것은 모서리 부분에 집중하는 전하의 특성이 꼭지점과 같은 부분에서 더 크게 나타나는 경향에 의한 것으로 사료된다. Fig. 5는 단면에서의 전류밀도 분포를 보여주고 있다. Fig. 4와 마찬가지로 (a), (b), (c)는 사각형 패턴의 1000 μm , 500 μm , 100 μm 시편이고 (d), (e), (f)는 원형 패턴 1000 μm , 500 μm , 100 μm 시편의 결과이다. 기관의 두께에 비해 감광층의 두께는 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 감광층 부분을 얇은 막대로 확대하여 나타내고 하단의 진한 부분을 기관으로 가정하였다. 전류밀도는 노출된 영역을 중심으로 반구형상으로 분포되어 표면에서 멀어질수록 감소하는 것을 확인할 수 있으며 패턴의 가장자리에 더 집중되는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서는 전류밀도 분포를 프로파일로 나타내었다. 각각의 그래프는 (a), (e)의 패턴에서 가운데 위치한 선에 해당하는 부분의 전류밀도 수치를 보여주고 있으며 (b), (c), (d)는 사각형 패턴의 1000 μm , 500 μm , 100 μm 시편이고 (f), (g), (h)는 원형 패턴의 1000 μm , 500 μm , 100 μm 시편의 결과이

Fig. 6. Line profile of current density. Square pattern of (a) standard line for each profile, (b) 1000 μm , (c) 500 μm , (d) 100 μm and circle pattern of (e) standard line for each profile (f) 1000 μm , (g) 500 μm , (h) 100 μm .

다. 앞선 결과와 마찬가지로 패턴의 가장자리에서 상대적으로 높은 전류밀도의 경향을 확인 할 수 있다.

3.2 전기화학식각 공정 결과 및 유한요소해석 결과의 비교

Fig. 7은 비접촉 광학식 분석장비인 3D-profiler로 측정 한 표면 식각 결과의 라인 프로파일이며, 각각의 그래프는 패턴에서의 화살표를 따라 측정된 단차를 보여주고 있다. 샘플은 전기화학식각공정 후 아세톤과 초음파세척기를 이용하여 감광층을 제거 한 뒤 측정하였다. 1000 μm 패턴의 경우는 식각이 비교적 균일하게 이루어졌지만 500 μm 와 100 μm 패턴으로 갈수록 가장자리 부분의 식각이 더 많이 진행된 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 전해액에 노출된 영역의 넓이도 하나의 변수가 될 수 있는 것을 알 수 있었다. Fig. 8은 전기화학식각 공정 후 측정된 FE-SEM이미지이다. FE-SEM 측정을 통해 광학식 분석장비로 분석한 Fig. 7에서는 확인할 수 없었던 식각 단면의 계면 기울기를 확인할 수 있었다. 1000 μm 패턴에서는 평탄하고 예리한 계면을 가지는 식각 결과를 확인할 수 있고, 상대적으로 500 μm , 100 μm 패턴에서는 패턴의 가장자리에 더 집중되어 식각되었으며 완만한 곡

Fig. 7. Line profile of etching result. Square pattern of (a) 1000 μm, (b) 500 μm, (c) 100 μm and circle pattern of (d) 1000 μm, (e) 500 μm, (f) 100 μm.

선의 계면을 확인할 수 있다.

유한요소 해석과 전기화학식각 공정을 통해 얻은 각각의 결과들을 비교하여 보았다. Fig. 4와 Fig. 7을 비교해 보면 1000 μm 패턴을 제외하고는 전류밀도 분포와 식각 결과의 표면 형상이 같은 경향으로 나타나있는 것을 알

수 있다. 균일하게 식각된 1000 μm 패턴의 경우는 가해지는 전류밀도에 대한 노출 면적이 넓어서 가장자리에 전류가 집중되는 정도가 작기 때문인 것으로 사료된다. 또한 Fig. 4의 사각형 패턴에서 각 꼭지점에 집중된 전류밀도분포는 Fig. 8에서 둥글게 식각된 결과(500 μm, 100 μm 시편)로 확인할 수 있었으며 이와 같은 경향으로 장시간 식각을 진행할 경우 사각형에서 원형에 가까운 결과가 발생할 것으로 예상된다. 이렇게 사각패턴의 모서리보다 꼭지점에 전류밀도가 집중되고 꼭지점이 둥글게 식각된 결과를 통해 같은 부피의 영역에서 전해액과 시편의 표면 사이 계면의 넓이가 클수록 더 많은 전하가 집중되는 것을 알 수 있었다. Fig. 6의 FEM 결과에서 500 μm 시편의 경우 다른 크기의 시편과는 다르게 패턴 가운데의 전류밀도가 낮아, 실제 실험 결과의 식각 깊이 분포와 다른 경향을 나타내었다. 이는 ANSYS 프로그램 내에서 해석을 진행하는 과정이 공개되지 않아 알기 어려운 부분이지만, 500 μm 패턴에서 가장자리에 집중되는 전류밀도 값은 90~200 mA/mm²으로 다른 크기의 패턴보다 매우 높으나 가운데 부분의 전류밀도 값은 2~5 mA/mm²으로 비슷하여 가장자리와 가운데의 전류밀도 차이가 큰 것을 알 수 있다. Fig. 7과 같이 식각되는 영역이 넓을수록 식각되는 깊이가 작아지는 실제 공정과는 달리 FEM의 해석과정에서는 식각되는 영역이 넓어짐에 따라 전류밀도 값이 감소하지 않고 500 μm 에서 가장 높은 값을 보였다. 이러한 차이점의 이유로는 본 논문의 FEM

Fig. 8. SEM images of electrochemical etching result. Square pattern of (a) 1000 μm, (b) 500 μm, (c) 100 μm and circle pattern of (d) 1000 μm, (e) 500 μm, (f) 100 μm.

Fig. 9. Comparison of the line profiles(500 μm patterns). (a), (c) Upside-down line profile of square and circle pattern from ANSYS and (b), (d) etching profile of square and circle pattern from process.

과정에서는 다른 공정요인의 영향을 배제하기 위해서 적용시킨 가정의 영향으로 사료되며 이에 따라 전류밀도의 구체적인 수치 보다는 분포의 경향에 비중을 두고 비교하였다. Fig. 9는 유한요소해석 결과의 전류밀도 분포 그래프와 전기화학식각 공정의 단면 프로파일을 비교한 결과이다. 식각의 정도는 전류밀도의 크기에 비례할 것이라고 예상하였기 때문에 Fig. 9의 (a), (c)와 같이 전류밀도 분포 그래프에서 전류밀도 축을 반대순서로 적용하여 전류밀도가 높은 부분이 아래로 향할 수 있도록 하였다. 그 결과 그래프의 모양이 Fig. 9의 (b), (d)의 단면 프로파일 그래프와 비슷한 형상이 된 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 전기화학식각 공정에서 전류밀도의 분포는 공정의 결과에 직접적인 영향을 미치며 노출된 부분의 가장자리에 집중되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 미세금형 가공을 위한 방법으로 이용되는 전기화학식각 공정과 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션을 함께 수행함으로써 전기화학식각 공정의 경향성에 대해 연구하였다. 공정 시 전류밀도 분포를 알아보기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였고, 해석과정을 통해 시편 표면과 단면에서의 전류밀도 분

포 그리고 프로파일을 얻을 수 있었다. 전류밀도 분포는 시편의 패턴 내에서 가장자리에 집중되는 것을 확인하였다. 전기화학식각 공정은 스테인레스강(SS304)에 photolithography 공정을 통해 감광액이 패터닝(patterning)되어 있는 시편을 사용하였고 황산, 인산 및 초순수를 섞어 제조한 전해액을 사용하였으며 0.1 A 로 5 분 동안 진행하였다. 공정 결과, 일정한 전류 조건에서 전해액에 노출되는 영역이 작아질수록 가장자리에서 식각이 가운데 보다 활발하게 일어나는 것을 확인하였다. 결과적으로, 컴퓨터를 이용한 유한요소해석과 전기화학식각 공정의 결과를 각각 비교하여, 식각의 정도는 시편에서의 전류밀도 분포와 비례하고 노출된 영역의 가장자리에 집중되는 것을 알 수 있었다. 차후 지속된 연구를 통해 문제점을 보완한다면 공정의 재현성과 신뢰성을 높여 미세금형 가공에 활발히 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호 : 2008-0061862) 및 지식경제부 유무기복합 대면적 나노구조체 제작 기술과제(과제번호: 10033871)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. L. Yu, C. G. Koh, L. J. Lee, K. W. Koelling and M. J. Madou, *Polymer Eng. Sci.*, **42**(5), 871 (2002).
2. S. J. Oh and S. B. Kang, *Mater. Sci. Eng.*, **343**(1-2), 107 (2003).
3. X. Cheng and L. J. Guo, *Microelectronic Eng.*, **71**(3-4), 288 (2004).
4. I. Simon, N. Bârsan, M. Bauer and U. Weimar, *Sensor. Actuator. B Chem.*, **73**(1), 1 (2001).
5. K. P. Rajurkar, G. Levy, A. Malshe, M. M. Sundaram, J. McGeough, X. Hu, R. Resnick and A. De Silva, *CIRP Annals Manuf. Technol.*, **55**(2), 643 (2006).
6. P. P. Shiu, G. K. Knopf, M. Ostojic and S. Nikumb, *J. Micromech. Microeng.*, **18**(2), 025012 (2008).
7. C. Liu, *Foundations of MEMS*, p.1-27, Pearson Education International, NJ, USA (2006).
8. K. H. Ho and S. T. Newman, *Int. J. Mach. Tool. Manufact.*, **43**(13), 1287 (2003).
9. K. P. Rajurkar, D. Zhu, J. A. McGeough, J. Kozak and A. De Silva, *CIRP Annals Manuf. Technol.*, **48**(2), 567 (1999).
10. M. D. Shirk and P. A. Molian, *J. Laser Appl.*, **10**(1), 18 (1998).
11. S. J. Ahn, D. W. Kim, H. S. Kim, Y. J. Kim and Y. S. Lee, *Kor. J. Mater. Res.*, **11**(9), 792 (2001) (in Korean).
12. M. -S. Cho, H. -W. Lim, C. S. Lee, B. -K. Cho and J. -G. Park, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47**(6), 5217 (2008).
13. C. Madore, O. Piotrowski and D. Landolt, *J. Electrochem. Soc.*, **146**(7), 2526 (1999).
14. M. -S. Cho, S. -H. Cho, N. -G. Cha, H. -W. Lim, J. -G. Park and J. -S. Jo, *Electronic Mater. Lett.*, **3**(2), 93 (2007).