

유한요소해석을 이용한 전주공정에서의 전류밀도 분포 예측

강대철* · 김현영** · 전병희***

(2004년 2월 10일 접수)

Estimate of Current Density Distribution in Electroforming Process Using Finite Element Analysis

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

Abstract

Electroforming is the highly specialized use of electrodeposition for the manufacture of metal parts and basically a specialized form of electroplating. So, we can apply electrochemical system analysis for electroforming process. Electrochemical systems are concerned with the interplay between electricity and chemistry, namely the measurements of electrical quantities, such as current density, potential, and charge, and their relationship to chemical parameters. This paper based on the basic equations of electrics and electrochemical kinetics, was employed for a theoretical explanation of the current density distribution on electroforming process. We calculated current density distribution and potential distribution on cathode. Also, calculated current density distribution of vertical direction. It was shown that current density is related with distance of between anode and cathode and mass transfer process.

Key Words : Electroforming, FEM, Current Density Distribution, Electrochemical System, Multi Physics

1. 서 론

최근 산업의 부가가치는 절삭이나, 프레스와 같은 전통제조업에서 반도체, 바이오 등 초정밀 산업에 바탕이 되는 반도체공정, 전해가공 등 초정밀 제조업으로 재편되고 있다. 특히 반도체공정은 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System) 분야의 성장과 함께 중요한 가공방법중의 하나로 부각되고 있다. 전주(electroforming)는 반도체공정중의 한 공정으로 전사성이 뛰어나고, 정밀도가 높아 전주공정 자체만으로도 제품의 생산이 가능하고, 특히 대량생산(mass production)에 유리하므로 CD, 마이

크로 기어, PDP 디스플레이 격벽 가공 등 전자부품에 많이 사용하고 있다.⁽¹⁾ 전주공정은 일반적으로 도금공정과 유사한 공정을 가진다. 도금(plating)은 표면 광택이나 보호가 주 목적인 반면 전주는 원래의 몰드에서 도금층을 분리시켜 사용하는 것이 일반 도금 공정과 다른 특징이다.⁽²⁾ 중요한 공정변수로는 도금액 조성비, 전류밀도, 전극간 거리, 유기 첨가제의 구성비 등이다. 기본적으로 도금과 같은 공정을 가지기 때문에 도금과 유사한 공정 변수를 갖는다. 본 연구에서는 전극간 거리와 물질이동(mass transfer process)를 고려한 유한요소 해석을 통해 전류밀도 분포를 구하고 이

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

*** 인덕대학교 컴퓨터 응용설계 전공

를 최적화하는 공정 변수를 구한다.

2. 전주 공정 이론

2.1 전주의 원리

전주는 1837년 Jacobi가 프린팅 기관에 구리를 도금하는 과정에서 처음 알려졌다.⁽¹⁾ 장점으로 치수정밀도가 높고, 복잡한 형상의 전사성이 우수하며, 대량생산이 가능하여 그 중요성이 날로 증가되고 있다.⁽²⁾ Fig. 1에 전주의 기본 개념도를 나타내었다. 도금조 속에 원형이 되는 몰드를 넣고 “-”를 연결하고, 전극을 넣고 “+”를 연결한다. 그리고 전원을 인가하면 도금액 속의 금속 이온이 음극(몰드)측에 석출되면서 도금이 된다. 도금량은 Faraday의 법칙에 의해 구해지고, 원하는 두께로 도금이 되면 도금조에서 꺼내 몰드에서 분리시켜 제품으로 사용하거나 후 공정을 적용 한다.

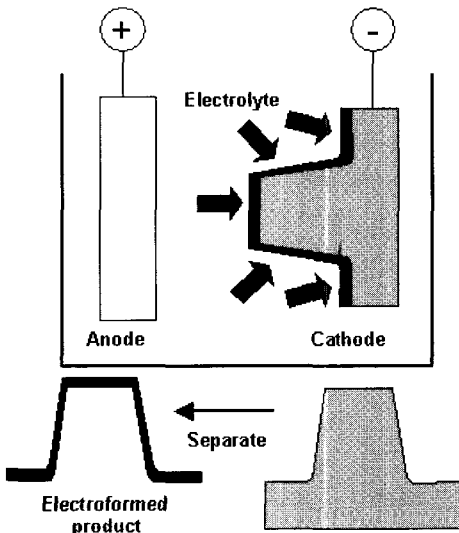


Fig. 1 Concept diagram of electroforming

전주는 도금조에서 금속이온의 이동에 의한 분자 형성과정이다.⁽³⁾ 따라서 금속이온의 확산과 대류, 전류에 의한 전하 이동 반응 등은 중요한 공정변수 이다.

2.2 전기화학공정

전주의 가공 메커니즘은 전기화학공정(electrochemical process)을 통해 이루어진다. 전기화학공정은 전기와 화학의 경계에 서있는 분야로 두 가지 현

상이 동시에 다루어 져야 한다. 또한 도금액이 계속 순환되므로 유체의 유동도 고려되어야 하므로, 이러한 물리적인 문제를 동시에 고려하여 다중물리현상(multi physics) 으로 시스템을 해석해야 한다.

Popov⁽⁴⁾ 등은 “current line division” 이라는 개념을 도입하여 전주공정 중 “corner weakness” 를 수치 모사 하였고, Mcgeough⁽⁵⁾ 등은 전류의 극성을 이용하여 균일두께분포를 갖는 전주물의 전류와 전극형상최적화를 수치해석을 이용해 시도했다. 채만승⁽⁶⁾ 등은 전주물의 분리력과 전류밀도에 따른 내부응력 평가를 했으며, Hülsenberg⁽⁷⁾ 등은 전류밀도와 시간을 공정변수로 하여 고 세장비 구리회로를 유리에 전주로 형성하였다. 기존의 연구 내용을 보면 아직까지 다중물리현상에 대한 고려는 미비하다. Fig. 2는 Gerischer의 전기화학모형을 나타내고 있다. Gerischer의 전기화학모형은 다중물리현상을 포함하고 있는데, 전극 내에서의 전자의 이동이나 전극-전해질 계면에 있어서의 전하 이동반응(charge transfer reaction) 그리고 도금액 내의 물질이동과정(mass transfer process)을 고려한 모델이다. 이때 물질이동과정은 전기영동(electrical migration), 대류(convection) 및 확산(diffusion)에 의해 일어난다.⁽⁸⁾

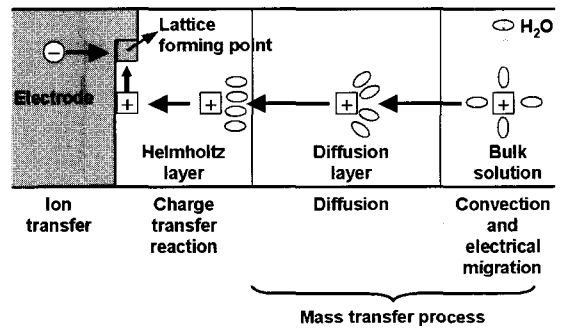
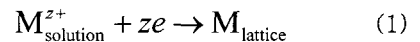


Fig. 2 Gerischer's electrochemical model

일반적으로 전기화학공정에서 전주는 도금액 속에서 외부의 전원공급에 의해 z 개의 전자에 의해 금속이온이 석출되는 과정이다.



이때 단위시간당 석출되는 금속의 양은 Faraday의 법칙으로 구할 수 있다.

$$\frac{dr}{dt} = \frac{A}{zF\rho_M} J \quad (2)$$

여기서 A는 금속의 원자질량, J는 전류밀도, z는 결합가(valency), ρ_M 은 금속의 밀도, F는 Faraday 상수이다.⁽⁹⁾

식 (2)에서 알 수 있듯이 금속의 석출량은 전류 밀도에 비례한다. 따라서 전류밀도 분포에 다중물리현상을 고려할 필요가 있다.

일반적으로 도금액자체의 반응이 없고, 정상상태를 가정 했을 때 질량균형식(mass balance)과 전류밀도는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_i + R_i = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{N}_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_i F c_i \nabla \phi + c_i \mathbf{u} \quad (4)$$

$$\mathbf{i} = F \sum_i z_i \mathbf{N}_i \quad (5)$$

여기서 \mathbf{N}_i 는 단위면적당 몰의 이동량을 나타내고(flux density; mole m^{-2}), c_i 는 이온 i의 농도(mole m^{-3}), z_i 는 결합가, D_i 는 확산도($m^2 s^{-1}$), u_i 는 mobility(mole $m^2 s^{-1} V^{-1} A^{-1}$), F는 Faraday 상수이고, ϕ 는 전압, 그리고 \mathbf{u} 는 속도벡터($m s^{-1}$)이다.

식 (4)에서 확산항과 대류항을 무시하고, 도금액은 전기적으로 중성이라 가정하면, 전류밀도는 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$\mathbf{i} = -F^2 \sum_i z_i^2 u_i c_i \nabla \phi \quad (6)$$

전극 표면에서 전류밀도가 평형상태에 수렴하고, 식 (6)을 대입하면 아래와 같이 된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{i} = 0, \nabla \cdot \left(- \left(F^2 \sum_i z_i^2 u_i c_i \right) \nabla \phi \right) = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (-\kappa \nabla \phi) = 0 \quad (8)$$

여기서 κ 는 전도도(conductivity; $\Omega^{-1} m^{-2}$)이며 식 (8)은 옴의 법칙(Ohm's law)이라 한다.⁽¹⁰⁻¹¹⁾

3. 유한요소해석

3.1 유한요소모델 및 경계조건

니켈 전주욕은 크게 와트욕(watt electrolyte)과 설

파민산 니켈옥(nickel sulfamate acid electrolyte)이 있다. 본 연구에서는 설파민산 니켈옥을 해석 대상으로 선정했고, 설파민산 니켈옥의 구성과 작업조건을 Table 1에 나타내었다.⁽¹²⁾

Table 1 Typical composition and operating condition of nickel sulfamate acid solution

Compositions	Conditions
Nickel sulfamate [Ni(NH ₂ SO ₃) ₂ ·4H ₂ O]	300~450g/Litter
Nickel chloride [NiCl ₂ ·6H ₂ O]	0~30g/Litter
Boric acid [H ₃ BO ₃]	30~45g/Litter
Temperature	40~60 °C
pH	3.5~4.5
Anode voltage	12V

해석은 Fig. 3에 나타난것과 같이 단위 셀에 대해 해석을 수행한다. 전주가 이루어지는 음극의 지름은 100 μ m이고, 침지되는 깊이는 1.25mm이다. 두가지 모델에 대해 해석을 수행하며, 첫번째는 수평방향의 2D 모델로 거리 L을 변화시키며 전류밀도 분포를 계산한다. 이때는 도금액의 유동이 수직방향으로 전극의 주위로 균일한 흐름이 발생하므로 질량이동의 영향은 고려하지 않는다. 두번째는 수직방향의 2D 모델로 도금액의 흐름이 질량이동에 미치는 영향을 고려하여 계산을 수행한다.

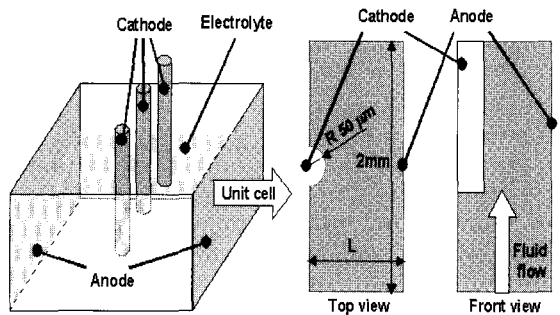


Fig. 3 Schematic diagram of electroforming model

FE 모델은 Fig. 4와 같으며, ①, ②는 음극 (cathode)에 해당하며, ③은 양극 이고, ④, ⑤, ⑥, ⑦은 insulation 이다. 그리고 ⑧은 도금액의 흐름이 발생하는 곳이다.

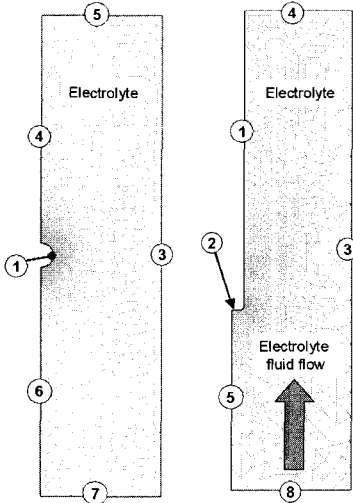


Fig. 4 FE model

경계조건은 다중물리현상을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우를 비교하여 2 가지로 구분했다.⁽¹⁰⁾

- i) 전극 전해액 계면에서의 전하이동반응을 고려한 경우(첫번째 모델)

$$(-\kappa \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} = i_0 \exp\left(\frac{\alpha F (\phi_s^0 - \phi)}{RT}\right)$$

: electrode kinetics

$$\phi = \phi_0 : \text{given potential}$$

$$(-\kappa \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} = 0 : \text{insulation}$$

- ii) 전극 전해액 계면에서의 전하이동반응과 확산, 대류를 고려한 경우(두번째 모델)

$$(-\kappa \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} = i_0 \left(\frac{c_i}{c_i^0}\right) \exp\left(\frac{\alpha F (\phi_s^0 - \phi)}{RT}\right)$$

: electrode kinetics

$$\phi = \phi_0 : \text{given potential}$$

$$\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{nF} i_0 \left(\frac{c_i}{c_i^0}\right) \exp\left(\frac{\alpha F (\phi_s^0 - \phi)}{RT}\right)$$

: Faraday's law

$$(-\kappa \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} = 0 : \text{insulation}$$

3.2 해석결과 및 고찰

Fig. 5는 수평방향 전류밀도분포를 나타낸다. 거리의 증가에 따라 전류밀도가 감소한다. 전극간의 거리가 전극 반지름의 약 3 배가 되면 전류밀도가 균일해지는 것을 알 수 있다.

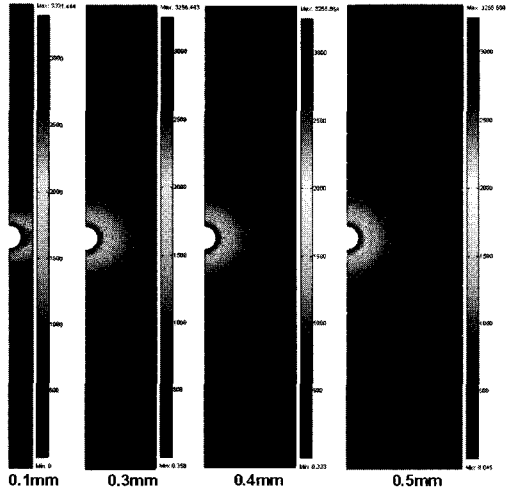


Fig. 5 Current density distribution of electrode

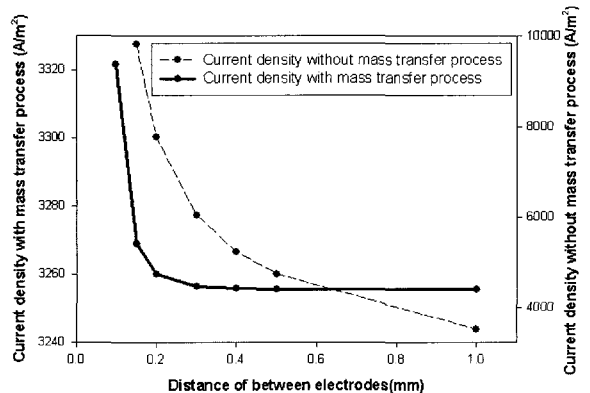


Fig. 6 Results of maximum current density

Fig. 6은 전극 전해액 계면에서의 전하이동반응을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하여 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면, 전극 전해액 계면에서의 전하이동반응을 고려한 경우 일정거리(전극 반경의 약 3배)가 되면 전류밀도의 변화가 거의 일정하게 나타났다. 하지만 전극 전해액 계면에서의 전하이동반응을 고려하지 않은 경우 거리에 반비례해서 지속적으로 계속 증가하고 그 값도 상당히 크게 나타난 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 7의 수직방향 전류밀도 분포를 비교해보면 전극 전해액 계면에서의 전하이동반응과 질량이동효과를 고려하지 않은 경우 모서리 부분에서 전하의 집중 현상으로 전류 밀도가 급격히 증가한 것을 알 수 있다. 하지만 전극 전해액 계면에서의 전하이동반응과 질량이동효과를 고려한 경우 전류밀도가 더 고르게 분포 되어있는 것을 알 수 있다. 따라서 전주공정 해석 시 전기화학적 효과를 동시에 고려하는 것이 적절하다는 것을 알 수 있다.

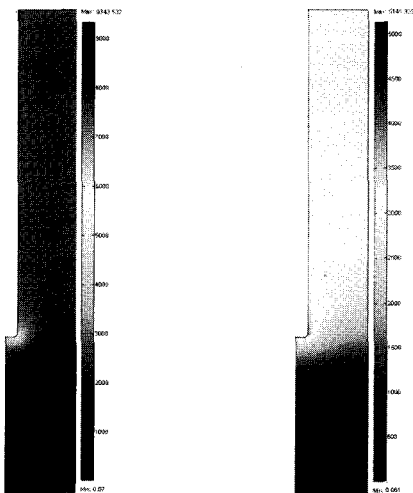
전하이동반응과 질량이동효과를 동시에 고려하는 것이 적절함을 보였다. 또한 전극간 거리가 전극 반경의 약 3배가 되면 균일한 전류밀도 분포를 보이는 것을 알 수 있었다. Faraday의 법칙에 의하면 전류밀도에 비례하여 도금이 되므로 균일한 전류밀도 분포를 가질수록 균일한 두께분포를 갖게 된다. 따라서 균일한 전류 밀도를 갖도록 전극을 설계하면 균일한 두께의 도금 또는, 전주물을 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 "고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술 개발 사업"의 세부과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) M. J. Sole, 1994, "Electroforming: Methods, Materials and Merchandise", Minerals, Metals and Materials, Vol. 46, pp. 29~35.
- (2) J. A. McGeough, M. C. Leu, K. P. Rajurkar, A. K. M. De Silva, Q. Liu, 2001, "Electroforming Process and Application to Micro/Macro Manufacturing", Annals of the CIRP, Vol. 2, pp. 499~514.
- (3) 김기호, 배차현, 1988, "전주에 의한 구조물 제작에 관한 연구", 부산공전 연구논문집 제 8호, pp. 423~427.
- (4) K. I. Popov, R. M. Stevanovic, 2000, "A new current line division concept for the determination of the current distribution in electrochemical cells. Part I. Theoretical background of the "corner weakness" effect in electroforming", J. Serb. Chem. Society, Vol. 65, pp. 905~914.
- (5) J. A. McGeough and H. Rasmussen, 1981, "Theoretical Analysis of the Electroforming Process", J. Mechanical Engineering Science, Vol. 23, No. 3, pp. 113~120.
- (6) 채만승, 이회근, 1991, "Study on separation of electroformed shell from a mold", 부산공전 연구 논문집 제 16호, pp. 285~290.
- (7) D. Hülsenberg, A. Harnisch, C. Jakob, M. May, B. Straube, 1996, "High Aspect Ratio Structures



(a) Without mass transfer process (b) With mass transfer process

Fig. 7 Current density distribution of vertical direction

4. 결 론

유한요소해석을 이용해 전주공정 시 전류밀도 분포를 계산하였고, 유한요소 해석 시 전극 전해액 계면에서의 전하이동반응과 질량이동효과를 동시에 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교 해석하였고, 해석 시 전극 전해액 계면에서의

Obtained by Electroforming in Microstructured Glass", *Microsystem Technologies* Vol. 2, pp. 109~113.

- (8) 엄희택, 이주성, 2004, "도금·표면처리", 문운당.
- (9) 임영모, 임형준, 김수현, 2001, "전해 프로세스에 의한 미세축 가공시 형상 및 직경 제어", 한국정밀공학학회지, 제18권, 제5호, pp. 50~56.
- (10) FEMLAB Tour CD, 2004, COMSOL Co.
- (11) J. S. Newman, 1991, "Electrochemical Systems", 2nd edition, Prentice Hall, NJ.
- (12) R. Parkinson, 1996, "Electroforming Course", NiDI and AESF.