

니켈-철 전지 전극의 전위 및 전류밀도 분포 예측

신치범[†] · 홍정호 · 윤경석* · 조병원* · 조원일* · 김운석*

아주대학교 화학공학과

*한국과학기술연구원 화학연구부

(1996년 4월 26일 접수, 1996년 7월 9일 채택)

Prediction of the Potential and Current Density Distribution within the Electrodes of a Ni-Fe Battery

Chee Burm Shin[†], Jung Ho Hong, Kyung-Suk Yoon*, Byung Won Cho*, Won Il Cho* and Un Suk Kim*

Dept. of Chem. Eng., Ajou University, Suwon, Korea

*Div. of Chem. Eng., KIST, Seoul, Korea

(Received 26 April 1996; accepted 9 July 1996)

요 약

니켈-철 전지 전극판에서의 전위와 전류밀도 분포를 계산하고, 이를 통하여 전극의 방전깊이 분포의 변화를 예측할 수 있는 유한요소법에 근거한 전산모사 프로그램을 개발하였다. 각기 전극판의 종횡비와 탭의 위치가 다른 전극들에 대하여 해석을 실시한 바에 의하면, 전극판의 종횡비와 탭의 위치 변화는 전극의 전위와 전류밀도 분포에 영향을 주어 전극의 방전깊이 분포를 결정함을 알 수 있었다. 전극의 방전깊이의 분포를 균일하게 함으로써 전극의 활물질 이용률을 높이고 전지의 수명을 연장하기 위하여는 전극형상 설계의 최적화가 필요함을 확인할 수 있었다.

Abstract—A computer simulation program based on the finite element method was developed in order to calculate the potential and current density distribution for the electrodes in a Ni-Fe battery, through which the depth of discharge(DOD) distribution and variation with time could be predicted. The analysis on the electrodes of different aspect ratios and tab positions revealed that the aspect ratio and the tab position influence the potential and current density distribution, thus affecting the DOD distribution within the electrode. As a result, it was found that an optimization for the design of an electrode shape is necessary to make the DOD distribution more uniform and to enhance the utility of the active material of an electrode influencing the cycle life of a battery.

Key words: Ni-Fe Battery, Potential, Current Density, DOD

1. 서 론

최근 환경문제와 더불어 전기자동차용 고성능 2차 축전지에 대한 관심이 고조되고 있다. 이중 니켈-철 전지는 전기적·기계적 충격에 강하고, 수명이 길며 저공해이고 저가라는 장점으로 많은 연구의 대상이 되어 왔다[1]. 그러나 니켈-철 전지가 다른 종류의 축전지에 대하여 비교우위를 가지기 위하여는 에너지 밀도의 제고가 필수적이다. 에너지 밀도를 높이기 위하여는 축전지 전극의 성능에 영향을 미치는 인자들을 분석하고, 이에 근거한 전극 설계의 최적화가 필요하다.

축전지 전극에서의 전위 분포는 전극의 종횡비(aspect ratio), 탭(tab)의 위치, 전도성 그리드(grid)의 모양 및 전극판을 흐르는 전해질의 세기 등에 영향을 받는다[2-4]. 전극의 설계가 부적절한 경우 전극에서의 전위 분포는 매우 불균일하게 되고, 전류밀도 분포의 불균일화를 초래하여 전체 전극의 이용률 저하를 유발한다[5-7]. 이러

한 현상은 축전지의 에너지 밀도에 직접적인 영향을 미치므로 적절한 전극형상의 선택은 축전지 설계에서 매우 중요하다.

현재까지 니켈-철 전지의 개발연구는 주로 실험에 의한 시행착오법에 근거하여 진행되어 왔다. 그러나 이 경우 연구개발에 소요되는 시간 및 비용이 막대하다는 문제점이 있다. 따라서 적절한 이론적 방법에 근거하여 연구개발에 필요한 시간 및 비용을 절감할 필요가 있다. 본 연구의 목적은 니켈-철 전지를 방전시키는 동안 전극에서의 전위 분포를 계산할 수 있는 모델을 설정하고, 이를 통하여 방전 도중 전극에서의 전류밀도의 분포 및 방전깊이(depth of discharge; DOD)의 분포를 예측할 수 있는 전산모사 프로그램을 개발하는 것이다.

2. 수학적 모델

2-1. 지배 방정식 및 경계조건

Fig. 1은 축전지의 두 평행판 전극을 나타낸 개략도이다. 두 전극

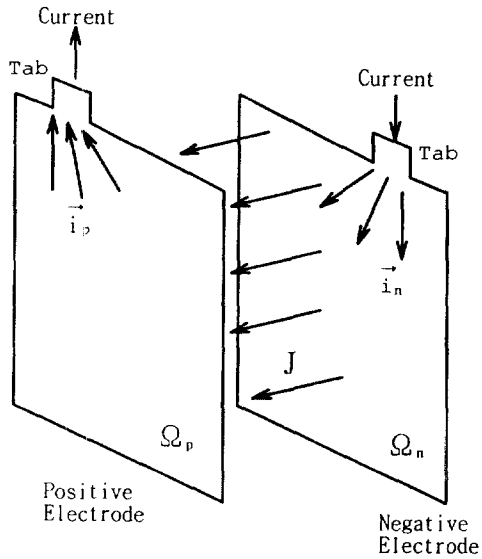


Fig. 1. Schematic diagram of the positive and negative electrodes in the Ni-Fe cell.

사이의 거리가 매우 가까워서 양극과 음극 사이를 흐르는 전류가 극판과 수직을 이룬다고 가정한다. 극판에서의 전류의 보존법칙으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{i}_p - J = 0 \quad \text{in } \Omega_p \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{i}_n + J = 0 \quad \text{in } \Omega_n \quad (2)$$

여기서 \vec{i}_p 와 \vec{i}_n 은 각각 양극과 음극에서 단위 길이당 흐르는 전류 벡터[A/cm]를 나타내며, Ω_p 와 Ω_n 은 각각 양극과 음극의 계산 영역을 나타낸다. Ohm의 법칙을 적용하면, \vec{i}_p 와 \vec{i}_n 은

$$\vec{i}_p = -\frac{1}{r_p} \nabla V_p \quad \text{in } \Omega_p \quad (3)$$

$$\vec{i}_n = -\frac{1}{r_n} \nabla V_n \quad \text{in } \Omega_n \quad (4)$$

의 형태로 나타낼 수 있고, 이때 V_p 와 V_n 은 각각 양극과 음극에서의 전위[V]이고, r_p 와 r_n 은 각각 양극과 음극에서의 저항치[Ω]이다. 이들을 식 (1)과 (2)에 대입하여 정리하면, V_p 와 V_n 에 대하여

$$\nabla^2 V_p = -r_p J \quad \text{in } \Omega_p \quad (5)$$

$$\nabla^2 V_n = +r_n J \quad \text{in } \Omega_n \quad (6)$$

의 형태를 가진 Poisson 방정식을 얻게 된다.

이때 V_p 가 만족시켜야 하는 경계조건은

$$\frac{\partial V_p}{\partial n} = 0 \quad \text{on } \Gamma_{p1} \quad (7)$$

$$-\frac{1}{r_p} \frac{\partial V_p}{\partial n} = \frac{I_0}{L} \quad \text{on } \Gamma_{p2} \quad (8)$$

이며, 여기서 $\partial/\partial n$ 은 경계의 바깥쪽으로 수직한 방향의 구배(gradient)를 나타낸다. 첫 번째 경계 조건은 탭이 달려있지 않은 경계(Γ_{p1})를 통과하는 전류가 영이라는 것이고, 두 번째 경계 조건은 폭이 L[cm]인 탭(Γ_{p2})을 통과하는 전류의 총량이 I_0 [Amp]로 일정하다(일정전류 방전일 경우)는 것을 나타낸다. V_n 이 만족시켜야 하는 경계조건은

$$\frac{\partial V_n}{\partial n} = 0 \quad \text{on } \Gamma_{n1} \quad (9)$$

$$V_n = 0 \quad \text{on } \Gamma_{n2} \quad (10)$$

이다. 첫 번째 경계 조건은 V_p 에 대한 경우와 유사하고, 두 번째 경계 조건은 cell voltage를 측정할 때 음극의 탭에서의 전위를 영으로 하여 기준을 삼는다는 의미이다.

식 (5)와 (6)에 나타난 저항 r_p 또는 r_n 은 다음과 같이 계산하였다.

$$r = \frac{1}{(h_g S_g + h_a S_a)} \quad (11)$$

여기서 h_g 와 h_a 는 각각 그리드와 활물질의 두께[cm]이고, S_g 와 S_a 는 각각 그리드와 활물질의 전기전도도[S/cm]이다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 한국과학기술연구원 전기화학연구실에서 개발한 니켈-철 전지의 경우 그리드로는 팽창니켈메쉬(expanded nickel mesh)를 사용하고 있으며, h_g 의 값은 그리드의 무게[g]를 니켈의 밀도[g/cm³]와 겉보기 넓이[cm²]로 나눈 값인 0.001 cm를 사용하였고 S_g 의 값은 1.04×10^5 S/cm[8]을 사용하였다. 양극과 음극의 h_a 의 값은 실제 실험에 사용한 양극과 음극의 두께 0.075 cm와 0.065 cm를 각각 사용하였고, S_a 의 값은 양극과 음극에 대하여 각각 6.67×10^3 S/cm[9]와 1.04×10^5 S/cm[8]을 사용하였다.

2-2. 전류밀도와 전위와의 관계식

식 (5)와 (6)에 나타난 전류밀도 J는 양극과 음극의 전위차($V_p - V_n$)의 함수이며, 그 함수의 형태는 축전지 전극의 분극특성(polarization characteristics)에 따라 달라진다. 본 연구에서는 Tiedemann과 Newman[2]이 사용한 식을 채택하였으며, 그 식의 형태는 다음과 같다.

$$J = Ya(V_p - V_n - U) \quad (12)$$

이때 Ya와 U는 fitting parameter이며, 본 연구에서는 U를 다음과 같이 DOD의 함수로 표시하였다.

$$U = a_0 + a_1(\text{DOD}) + a_2(\text{DOD})^2 + a_3(\text{DOD})^3 \quad (13)$$

여기서, a_0, a_1, a_2, a_3 는 실험적으로 결정하여야 하는 상수이다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 니켈-철 전지의 경우 C/5로 방전하였을 경우 Ya의 값으로는 0.2191을 a_0, a_1, a_2, a_3 의 값으로는 각각 1.449, -0.5123, 0.5033, -0.1681을 사용하였다.

2-3. 방전깊이와 균일도

앞에서 열거한 식들의 해를 구하면 전극판 사이를 흐르는 전류밀도 J의 분포를 알 수 있다. 이때 J는 전극판의 위치 및 시간의 함수이다. 따라서 방전깊이(DOD) 역시 전극판에서의 위치 및 시간에 따라 변하게 된다. 전극판에서의 DOD의 분포는 각 시간에서 계산된 J의 분포로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{DOD} = \frac{\int_0^t J dt}{Q_T} \quad (14)$$

여기서, t는 시간[hr]을, Q_T 는 단위 면적당의 이론 방전용량[C/cm²]을 나타낸다.

DOD의 균일도(uniformity index; UI)는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{UI} = \frac{\text{DOD}_{\max} - \text{DOD}_{\min}}{2\text{DOD}_{\text{avg}}} \quad (15)$$

이때 DOD_{\max} , DOD_{\min} 및 DOD_{avg} 는 각각 DOD의 최대치, 최소치 및 평균치를 의미한다. DOD의 UI가 크다는 것은 DOD의 분포가 불균일하다는 것을 의미하는 것으로서, 전극 설계시 가능하면 DOD의

Table 1. Dimension of the electrodes and position of the tabs

	W	H	D	L
Type A	6.60	11.50	0.70	1.00
Type B	8.71	8.71	0.66	1.06
Type C	12.32	6.16	0.56	1.12
Type D	12.32	6.16	3.92	1.12

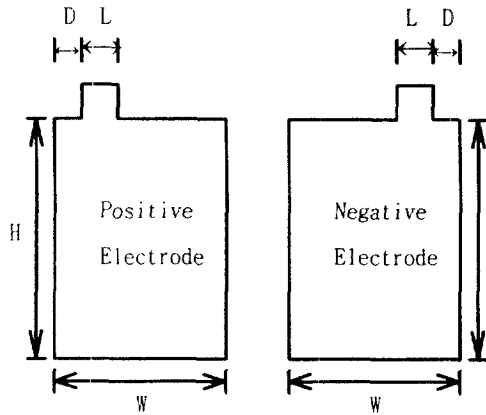


Fig. 2. Shape of the electrodes.

UI가 낮아질 수 있도록 하는 방안을 찾아야 한다.

3. 전산모사

본 연구에서는 각기 형태는 다르지만 면적은 동일한 4가지의 전극들에 대하여 전산모사를 수행하였으며, 각 전극의 크기와 탭의 위치를 Table 1에 표시하였다. Table 1에서 사용한 기호의 의미는 Fig. 2에 표시하였다.

지배방정식 (5), (6)과 경계조건 (7)-(10)을 만족하는 V_p 와 V_n 을 구하기 위하여 Galerkin 유한요소법[10]을 채택하였다. Type A의 전극의 해석에 사용된 유한요소 mesh를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 (+)와 (-)로 표시된 부분에 각각 양극과 음극의 tab이 위치하고 있다. 계산의 정확도를 유지하되 계산시간을 절약하기 위하여 전위의 변화가 심한 탭근처의 영역에서는 비교적 가는 mesh를, 탭에서 멀리 떨어진 영역에서는 굵은 mesh를 사용하였다. Fig. 3에 나타낸 mesh는 884개의 bilinear quadrilateral element(945 nodes)로 이루어져 있다. 계산에 사용한 time step의 크기는 방전율에 따라 0.05-0.5 hour로 조절하였다. 계산은 HP 715/50 workstation에서 수행되었으며, 한 time step을 계산하는데 소요되는 CPU time은 20초였고 전체 방전과정을 계산하는데 소요되는 CPU time은 약 9-13분이었다.

4. 결과 및 토의

Fig. 4는 type A의 전극으로 구성된 축전지의 방전특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 한국과학기술연구원 전기화학 연구실에서 개발한 니켈-철 전지의 방전곡선과 본 연구의 유한요소법에 근거하여 예측된 방전곡선이 서로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 이로써 본 연구에서 개발된 전산모사프로그램이 유효하다는 것을 부분적으로 증명할 수 있다.

Fig. 5는 type A의 전극으로 구성된 축전지를 13시간 동안 C/20의 방전율로 방전한 후 양극에서의 전위분포를 나타내는 contour plot이다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 양극전위의 gradient는 양극

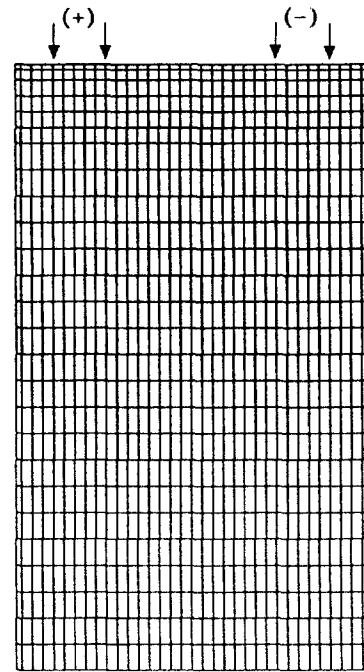


Fig. 3. Finite element mesh used for the electrodes of type A.

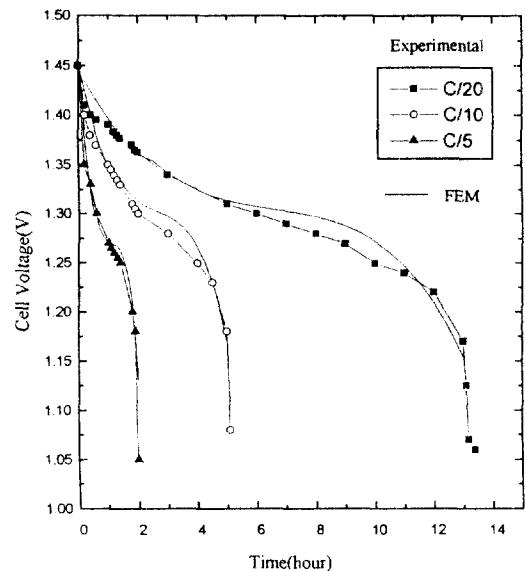


Fig. 4. Comparison between the experimental and predicted discharge curves of the cell with the electrodes of type A.

의 탭 근처에서 가장 크게 나타나는데, 이는 전극판에서 생성된 전류가 전도성 그리드를 따라 탭을 통하여 흘러나가기 때문이다. 양극에서 전위가 높은 부분과 낮은 부분의 전위차는 약 0.5 mV를 나타내고 있다. Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서 음극의 전위분포를 나타내는 contour plot으로서, 이 그림에서도 음극의 탭근처에서 높은 전위의 gradient를 볼 수 있는데 이는 탭을 통하여 음극판 전체로 전류가 흘러들어가기 때문이다. 음극판에서 전위가 높은 부분과 낮은 부분의 전위차는 약 0.05 mV를 나타내는데, 이는 양극판에서의 값보다 1/10 정도로 작은 값이다. 이것은 음극판의 활물질의 전기전도도가 양극판보다 약 10배 정도 높기 때문이다. Fig. 7은 Fig. 5와 같은 조건하에서 DOD의 분포를 나타내는 contour plot이다. 이 그림에서

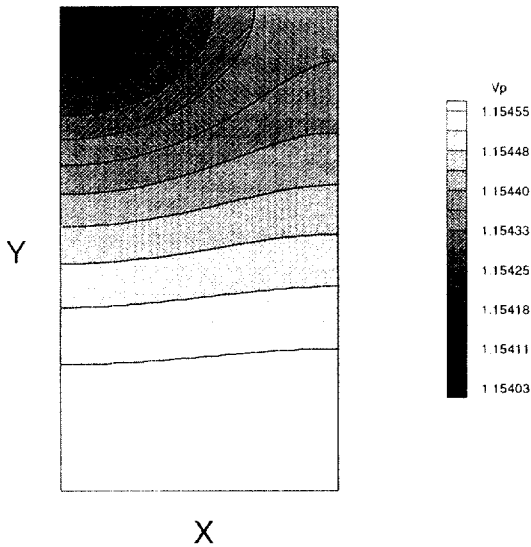


Fig. 5. Potential distribution on the positive electrode of type A after the discharge of 13 hours with C/20 rate.

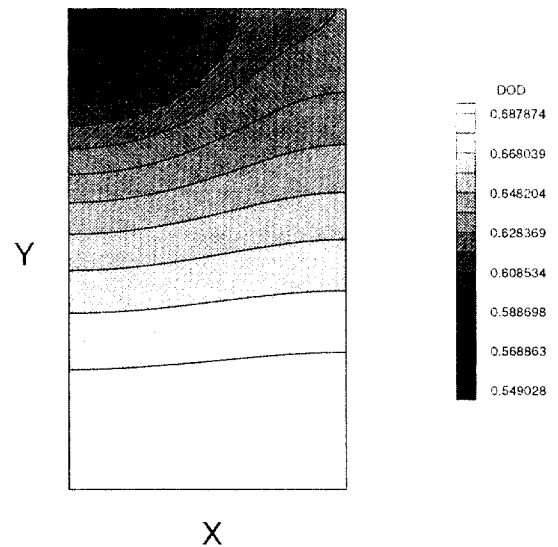


Fig. 7. DOD distribution on the electrodes of type A after the discharge of 13 hours with C/20 rate.

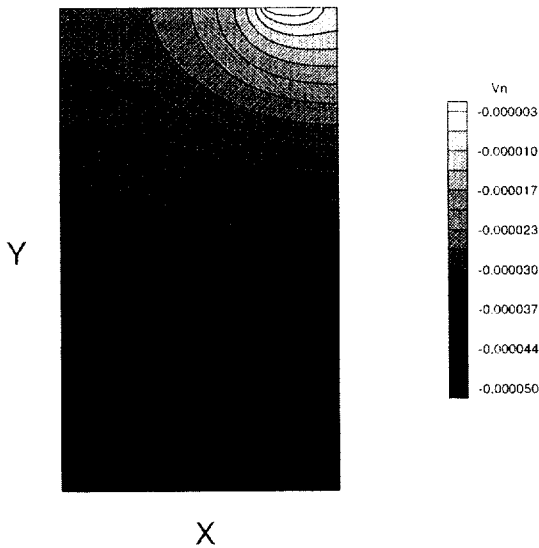


Fig. 6. Potential distribution on the negative electrode of type A after the discharge of 13 hours with C/20 rate.

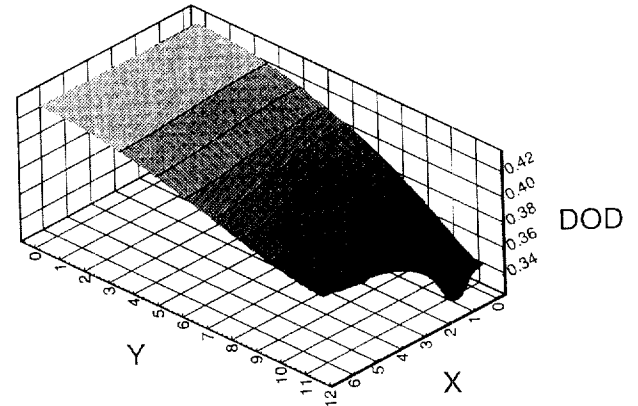


Fig. 8. DOD distribution on the electrodes of type A after the discharge of 2 hours with C/5 rate.

볼 수 있는 바와 같이 양극의 탭이 위치한 부분의 DOD는 값이 낮고 탭으로부터 멀어질수록 DOD는 높아진다.

Fig. 8은 type A의 전극으로 구성된 축전지를 2시간 동안 C/5의 방전율로 방전한 후의 DOD의 분포를 나타내는 3차원 그림이다. Fig. 8에 나타난 DOD의 분포역시 Fig. 7의 경우와 유사하게 양극의 탭 근처에서 낮은 값을, 탭에서 멀어질수록 높은 값을 나타낸다. 그러나 DOD분포의 경우 그 절대치보다는 (15)식에 의하여 UI로 정의되는 분포의 균일도가 더 큰 의미를 가진다. Fig. 9는 세 가지의 서로 다른 방전율에 대하여 평균 DOD에 따라 DOD의 UI가 변화하는 양상을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 특정한 평균 DOD값에 대하여 UI의 수치 및 증가율이 고율 방전의 경우가 높다. 이는 방전율이 높을수록 전극판의 활물질을 고르게 이용하지 못한다는 것을 보여주고 있다. 다시 말해서 고율 방전을 계속할 경우 축전지 극판의 일부분만을 반복해서 과도하게 사용함으로써 전지의 수명을 단축시킬 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 사실은 이미 경험적

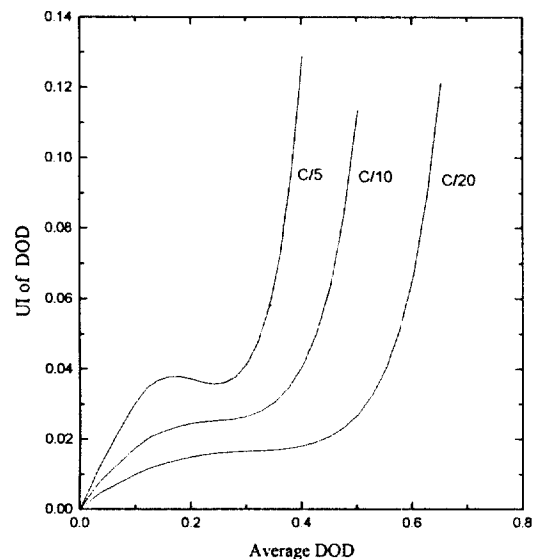


Fig. 9. Uniformity index of DOD during discharge of the cell with the electrodes of type A.

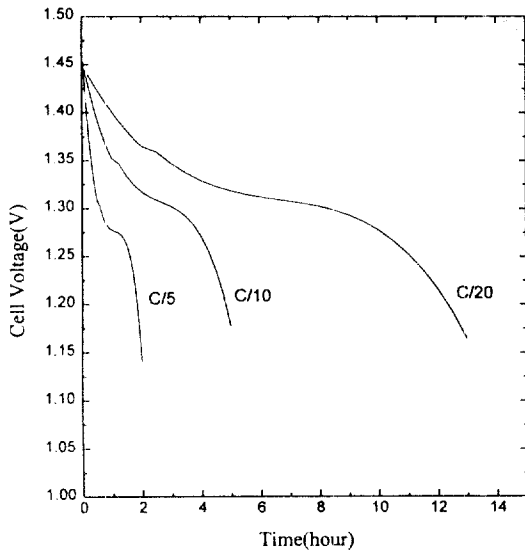


Fig. 10. Discharge curves of the cell with the electrodes of type B.

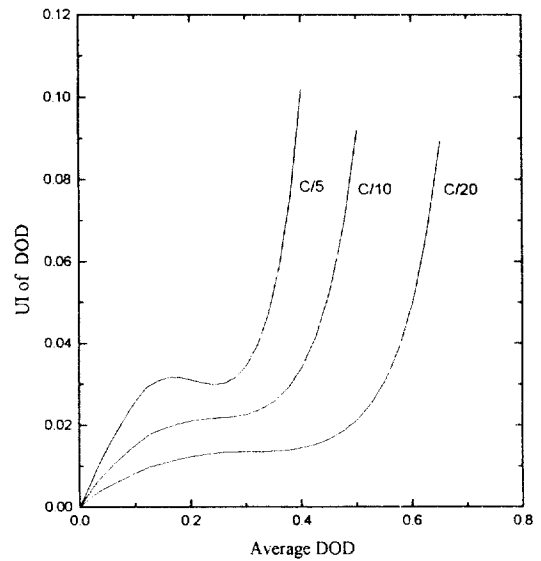


Fig. 12. Uniformity index of DOD during discharge of the cell with the electrodes of type B.

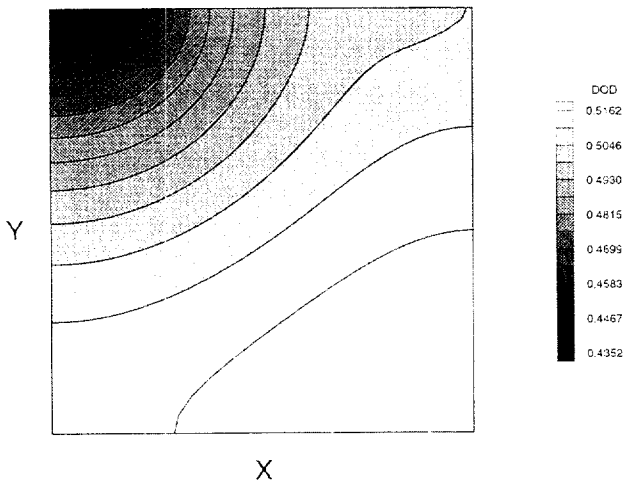


Fig. 11. DOD distribution on the electrodes of type B after the discharge of 5 hours with C/10 rate.

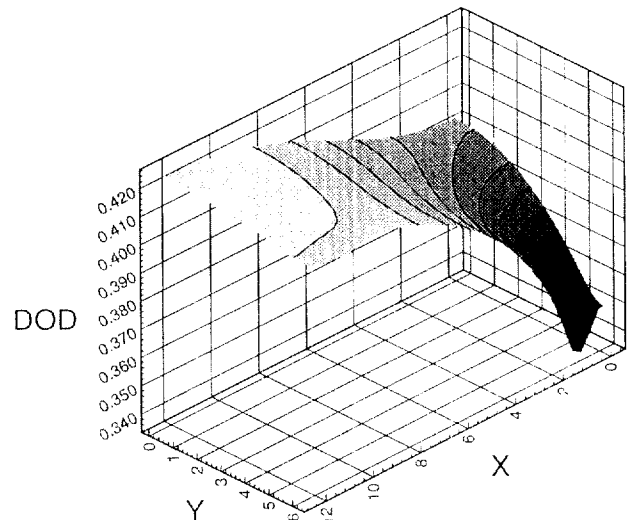


Fig. 13. DOD distribution on the electrodes of type C after the discharge of 2 hours with C/5 rate.

으로 알고 있는 현상과 일치한다.

Fig. 10은 type B의 극판을 가지는 축전지의 방전곡선이다. 이 방전곡선을 Fig. 4와 비교하면 전극판의 중형비가 바뀌어도 cell voltage의 특성은 거의 없음을 알 수 있다. Fig. 11은 type B의 극판으로 구성된 전지를 C/10의 방전율로 5시간 동안 방전 후의 DOD의 분포를 나타내는 contour plot이다. 이 그림의 경우 역시 DOD는 양극판의 탭 주위에서 그 값이 낮다는 것을 보여준다. Fig. 12는 type B의 극판을 가진 전지의 경우 평균 DOD에 대한 DOD의 UI 변화를 나타낸 그림이다. 이 그림에서도 고율 방전의 경우가 UI의 수치 및 증가율이 높게 나타나 Fig. 9의 경우와 유사하다. 그러나 Fig. 9의 경우와 비교할 때 UI의 최고치가 약 0.02 정도씩 낮은 값을 보이고 있는데, 이 값들은 type A의 전극으로 이루어진 축전지의 UI 값을 기준으로 할 때 약 20% 정도 낮은 값이다. 이것은 전극판의 중형비를 바꾸는 경우 cell voltage에서는 특성이 없지만, 전극판 활물질의 이용률에서는 특성이 있음을 의미한다. 따라서, 전극판의 중형비가 달라짐에 따라 축전지의 수명은 차이가 날 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 type C의 전극에서 C/5의 방전율로 2시간 방전 후 DOD 분포를 나타낸 3차원 그림이다. 이 그림에서도 양극판의 탭 주위에

서 DOD값이 낮음을 알 수 있다. 전술한 것과 동일한 경향이 나타남을 알 수 있다. Fig. 14는 평균 DOD에 대한 DOD의 UI의 변화를 나타낸 그림으로서, Fig. 12와 비교할 때 전극판의 중형비가 바뀐 것이 DOD의 UI를 크게 향상시키지 못하였음을 알 수 있다. 이러한 현상은 type C의 경우 탭의 위치가 상대적으로 전극의 모서리와 가까운 부분에 위치함으로써 type B와 비교할 때 전위 및 전류분포가 탭 주위에서 더욱 불균일하기 때문이다. 이러한 사실은 중형비는 type C와 같으나 탭의 위치가 전극판의 중앙부에 가깝게 위치한 type D의 경우에 얻은 결과들에서 더욱 확연하게 알 수 있다.

Fig. 15는 type D의 전극에서 C/5의 방전율로 2시간 방전 후 DOD 분포를 나타내는 3차원 그림이다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 탭의 위치가 중앙부로 이동함으로써 전위 및 전류밀도 분포가 보다 균일해지고 이로 말미암아 DOD의 분포도 개선된다는 사실이다. Fig. 16은 type D의 전극으로 구성된 전지의 경우에 평균 DOD와 DOD의 UI와의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림을 Fig. 14와 비교하면,

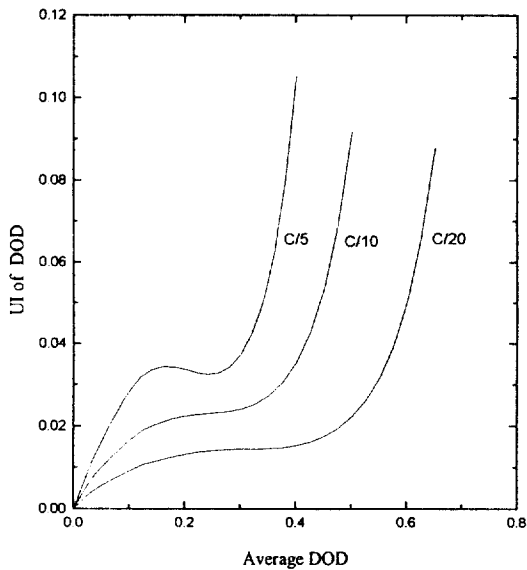


Fig. 14. Uniformity index of DOD during discharge of the cell with the electrodes of type C.

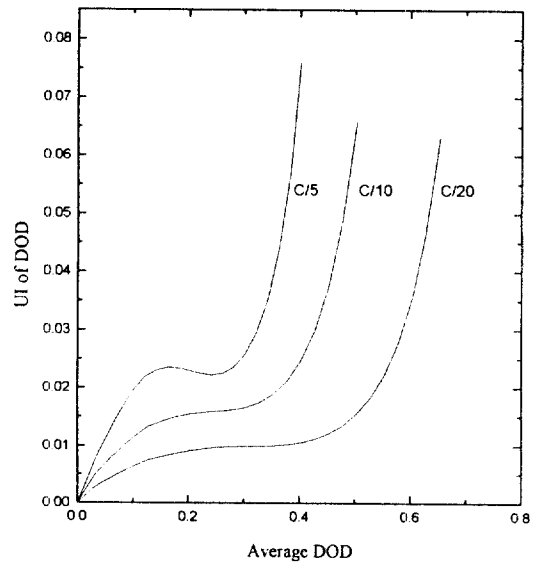


Fig. 16. Uniformity index of DOD during discharge of the cell with the electrodes of type D.

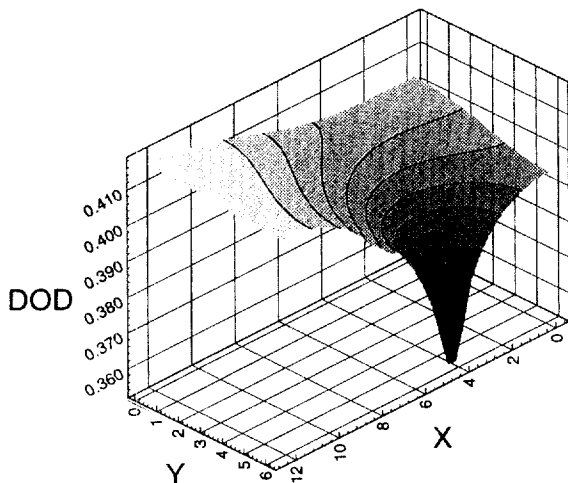


Fig. 15. DOD distribution on the electrodes of type D after the discharge of 2 hours with C/5 rate.

탭의 위치가 전극의 중앙부로 이동함으로써 DOD의 UI 값의 최고치가 각각 0.025-0.03 정도씩 낮아졌다는 것을 알 수 있으며, 이 값들은 type A의 전극으로 구성된 전지의 UI 값들과 비교할 때 약 40% 정도 낮은 값이다. 이로부터 전극판의 중횡비와 탭의 위치가 동시에 전극의 이용률 및 수명에 영향을 미침을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 니켈-철 전지 전극판에서의 전위와 전류밀도 분포를 계산하고, 이를 통하여 시간에 따른 전극의 DOD 분포의 변화를 예측할 수 있는 유한요소법에 근거한 전산모사 프로그램을 개발하였다. 각기 전극의 중횡비와 탭의 위치가 다른 4가지 형태의 전극으로 구성된 전지에 대하여 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

전극의 중횡비와 탭의 위치 변화는 전지의 cell voltage에는 별다른 영향을 미치지 못하지만, 전극에서의 전위와 전류밀도 변화에 심한 영향을 주어 전극의 DOD 분포, 즉 전극의 활물질 이용률에 영향

을 미친다는 사실이 발견되었다. 따라서, 전극을 설계할 때 적절한 전극형상의 선택이 전극의 활물질의 이용률 분포를 균일하게 하고 전지의 수명을 연장하는데 필요함을 알 수 있었다. 해석을 실시한 4가지 형상의 전극 중 가로와 세로의 비가 2:1이고 탭의 위치가 가로변의 중앙부에 근접한 전극이 가장 양호한 DOD의 균일도를 보여주었다.

본 연구는 고성능 니켈-철 전지의 전극 설계에 효과적으로 활용될 수 있으며, 여타의 축전지 전극 설계의 최적화에도 이용될 수 있다.

감 사

본 연구는 1995년도 한국전력공사 지원자금으로 시행한 기술개발 사업의 기술개발 결과의 일부입니다.

사용기호

H	: height of the electrode [cm]
h_a	: thickness of the active material [cm]
h_g	: thickness of the grid material [cm]
I_0	: total current set at the constant-current mode [A]
\vec{i}_n	: current vector per unit width in the negative electrode [A/cm]
\vec{i}_p	: current vector per unit width in the positive electrode [A/cm]
J	: current density between the electrodes [A/cm ²]
L	: width of the tab [cm]
Q_T	: theoretical discharge capacity per unit area [C/cm ²]
r_n	: resistance of the negative electrode [Ω]
r_p	: resistance of the positive electrode [Ω]
S_a	: conductivity of the active material [S/cm]
S_g	: conductivity of the grid material [S/cm]
t	: discharge time [hr]
U	: intercept of the voltage-current curve [V]
V_n	: potential of the negative electrode [V]
V_p	: potential of the positive electrode [V]
W	: width of the electrode [cm]

Y_a : inverse of the slope of the voltage-current curve [S/cm^2]

그리스 문자

Ω_n : computational domain of the negative electrode

Ω_p : computational domain of the positive electrode

Γ_{n1} : boundary with no current flux of the negative electrode

Γ_{n2} : boundary at the tab of the negative electrode

Γ_{p1} : boundary with no current flux of the positive electrode

Γ_{p2} : boundary at the tab of the positive electrode

참고문헌

1. Chakkaravarthy, C., Periasamy, P., Jegannathan, S. and Vasu, K. I.: *J. Power Sources*, **35**, 21(1991).
2. Tiedemann, W.H. and Newman, J.: in "Battery Design and Optimization". Gross, S., Ed., The Electrochem. Soc. Proc. Series, Princeton, NJ, 39(1979)
3. Choi, K.W. and Yao, N.P.: in "Battery Design and Optimization", Gross, S., Ed., The Electrochem. Soc. Proc. Series, Princeton, NJ, 50(1979).
4. Sunu, W.G. and Burrows, B.W.: *J. Electrochem. Soc.*, **129**, 688(1982).
5. Sunu, W.G. and Burrows, B.W.: *J. Electrochem. Soc.*, **131**, 1(1984).
6. Gu, H.: *J. Electrochem. Soc.*, **130**, 1459(1983).
7. Morimoto, Y., Ohya, Y., Abe, K., Yoshida, T. and Morimoto, H.: *J. Electrochem. Soc.*, **135**, 293(1988).
8. Lide, D.R. Ed.: "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 72nd ed., CRC Press(1991).
9. Bouet, J., Richard, F. and Blanchard, P.: in "Nickel Hydroxide Electrodes", Corrigan, D.A. and Zimmerman, A.H., Ed., The Electrochem. Soc. Proc. Series, Princeton, NJ, 260(1990).
10. Hughes, T.J.R.: "The Finite Element Method", Prentice-Hall (1987).