

차세대 이차전지용 유기전극소재 개발을 위한 전기화학적 특성분석법 소개

Developing Organic Electrode Materials for Future Secondary Batteries: Introduction to Electrochemical Characterization Methods

권지언 | Ji Eon Kwon

Functional Composite Materials Research Center, Institute of Advanced Composite Materials,
Korea Institute of Science and Technology (KIST), 92, Chudong-ro, Bongdong-eup, Wanju-gun,
Jeollabuk-do 55324, Korea
E-mail: jekwon@kist.re.kr

1. 서론

1991년 SONY사가 상용화에 성공한 이후 리튬이온전지(lithium-ion battery, LIB)는 스마트폰, 노트북 등 모바일 IT 기기의 발달과 함께 각종 전자기기의 전원을 공급하고, 휴대성과 이동성을 부여하는 핵심 부품으로써 매우 중요한 역할을 해오고 있다.¹ 최근에는 전기자동차 및 신재생에너지 발전을 위한 대용량 전력저장 시스템(ESS) 산업의 발달 뿐만 아니라, 가전제품의 무선(cordless)화가 급속도로 진행됨에 따라 LIB에 대한 수요가 폭발적으로 증가하는 추세에 있다.² 그러나 리튬이온과 전이금속 산화물 전극재에 의존하는 현재 LIB 이차전지 기술은 에너지 밀도 상승의 한계, 불안한 안정성, 자원 매장량의 한계와 지역적 편중에 따른 치솟는 원가 부담, 채굴에 따른 환경 문제 등이 대두되고 있어, 이를 해결할 수 있는 차세대 이차전지의 개발이 시급한 상황이다.³

현재 연구되고 있는 다양한 차세대 이차전지 가운데, 산화환원 활성이 있는 유기물을 전극으로 활용한 유기전지(organic battery)는 각각에 풍부한 원소를 바탕으로 환경친화성과 지속가능성을 확보할 수 있어 최근 관심이 크게 높아지고 있다.⁴ 특히 유기전극소재는 충방전 방식의 특성 상 구동 이온의 종류에 구애받지 않고 다양한 방식의 전지에 활용될 수 있으며, 산화환원 반응의 속도가 빨라 고출력의 가능성이 있고, 다전자 반응을 쉽게 유도할 수 있어 대용량을 전달할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 유기전지에 대한 연구는 Williams와 동료들이 dichloroisocyanuric acid를 리튬전지의 양극으로 활용할 수 있음을 1969년에 처음 보고했을 정도로 매우 긴 역사를 가지고 있으나,⁵ 산화환원 반응의 가역성이 떨어지고 실제 발현되는 용량(capacity)이 작은 등 여러 단점으로 인하여 그 동안 도외시되어 온 것이 사실이다. 그러나 최근 환경적인 이슈와 더불어 착용형(wearable), 체내삽입형(implantable)과 같은 미래지향적인 전자소자가 활발히 연구됨에 따라 유연성과 생체적합성을 갖춘 새로운 전지와 소재에 대한 개발 요구가 늘어나고 있고, 그동안의 꾸준한

Author



권지언

2006 서울대학교 재료공학부 (학사)
2014 서울대학교 재료공학부 (박사)
2014-2016 서울대학교 BK21 플러스 창의인재양성 재료사업단 (Post-Doc.)
2016-2020 서울대학교 신소재공동연구소 연구조교수
2016-2020 제6기 대통령 포스닥 펠로우
2020-현재 한국과학기술연구원(KIST) 전북분원 복합소재기술연구소 선임연구원

연구를 통해 기존 소재와 견줄 정도로 좋은 성능을 가진 유기전극소재가 보고되고 있어 다시금 주목을 끌고 있다.⁶

본 고에서는 유기전지의 개념과 유기전극소재의 작동방식에 대하여 간략하게 알아본 후, 유기전극소재 개발을 위한 기본적인 전기화학적 분석법에 대하여 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 이차전지의 기본 개념

전지는 전해질과 맞닿은 서로 다른 두 전극에서 일어나는 산화환원 반응을 통해 화학적 에너지를 전기에너지로 변환하여 직류 전력을 생산하는 장치로 충전여부에 따라 일차전지와 이차전지로 나뉘어 진다. 일반적으로 LIB와 같은 금속이온 전지는 그림 1에서와 같이 금속이온염(LiPF₆ 등)이 녹아 있는 유기용매(ethylene carbonate, dimethylcarbonate 등) 전해질에 다공성 고분자(PP, PE 등) 분리막으로 분리된 음극(anode)과 양극(cathode)으로 구성되어 있다.⁷ 이때, 두 전극의 전위차에 의해 음극에서는 산화반응이 자발적으로 일어나 금속이온이 전해질로 녹아 나오게 되며, 생성된 전자는 외부 회로를 따라 흘러 전기적 일(work)을 하고 양극으로 오게 된다. 양극에서는 금속이온과 전자가 만나 자발적으로 환원반응이 일어나게 되어 하나의 전기화학적 전지(electrochemical cell)를 구성하게 되며, 이와 같은 일련의 과정을 방전(discharge)이라 일컫는다.

이차전지의 경우 외부에서 전기에너지를 인가하여 두 전극에서 방전과 정반대되는 전기화학적 반응을 유도함으로써

써 화학적 에너지를 전극에 저장하는 전해전지(electrolytic cell)를 구성하여 충전(charge)을 할 수 있다. 충방전시 전극에서 일어나는 산화환원 반응이 뒤바뀔에 따라 전극의 극성이 반대로 바뀌게 되므로 혼란을 방지하기 위해 일반적으로 방전을 기준으로 용어를 사용한다.

현재 우리가 사용하고 있는 LIB는 LiCoO₂, LiFePO₄ 등의 전이금속산화물을 양극재로, graphite 등을 음극재로 활용하고 있으며, 충방전 과정에 따라 리튬이온이 음극과 양극 사이를 번갈아 왕복하기 때문에 rocking-chair형 전지로 불리고 있다.

2.2 유기전극소재와 유기전지의 구동방식에 따른 분류

유기물의 산화환원 반응은 분자내에 포함된 특정 산화환원 기능단(redox center)에서 이루어지며, 기능단이 연관된 경계분자궤도(frontier molecular orbital, FMO)에서 외부로 또는 외부에서 FMO로 전하이동이 일어나게 된다. 주목할 점은 여타의 소재와 달리 유기물의 산화환원 반응은 원자간 결합의 생성/해리와 같은 구조적 변화를 수반하지 않는 경우가 많아 반응속도론적 관점에서 매우 유리하다는 것이다.^{6,8}

한편, 유기물의 산화환원 기능단은 반응에 참여하는 FMO 및 안정화이온의 종류에 따라 그림 2d에서와 같이 두 가지로 나눌 수 있다.

첫번째는 가역적인 환원 반응을 보이는 경우로 전하 중성(neutral) 상태에서 LUMO로 전하를 받아 음이온(또는 라디칼 음이온)이 되며, 전하 안정화(charge compensation)를 위해 전해질내의 양이온이 반응에 참여하게 된다. 대표적으로 carbonyl 등이 이러한 n형(n-type) 기능단에 해당하며, benzoquinone,⁹ naphthalene diimide¹⁰ 등이 전극소재로 많이 연구되고 있다. 반응 메커니즘 상 n형 소재는 전자 친화도(electron affinity, EA)에 따라 전극전위가 결정되며, 일반적으로 Li/Li⁺ 대비 2~3 V의 전위를 갖는다. 그러나 terephthalate¹¹나 Schiff base¹²계열의 경우 0~1 V vs. Li/Li⁺의 전위를 보이는 경우도 있다(이하 본 고에서는 Li/Li⁺을 기준으로 전위에 대하여 서술함).

두번째는 가역적인 산화 반응을 보이는 경우로 중성 상태의 HOMO에서 전하를 잃어버리고 양이온(또는 라디칼 양이온)이 되며, 전해질내의 음이온이 반응에 참여하게 된다. 대표적으로 amine 등이 이러한 p형(p-type) 기능단에 해당하며, triphenylamine,¹³ phenoxazine¹⁴ 등이 전극소재로 연구되고 있다. 이런 p형 소재는 이온화에너지(ionization potential, IP)에 따라 전극전위가 결정되며, 일반적으로 3~4 V의 높은 전위를 보인다. 한편 viologen의 경우 p형이지만 2~3 V의 비교적 낮은 전위를 보인다.

따라서 어떤 종류(즉, n형 또는 p형)의 유기소재를 전극

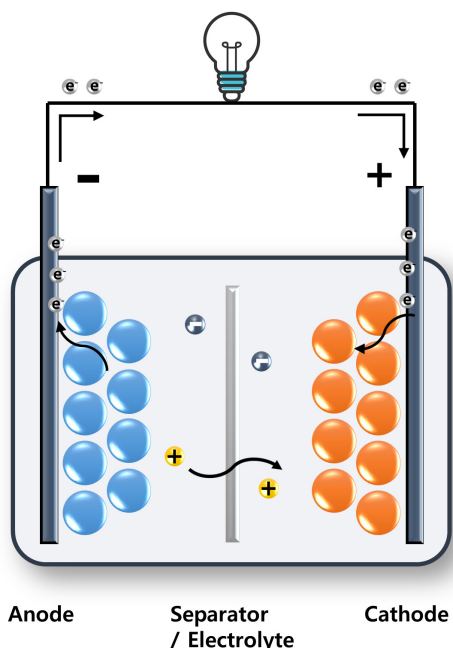


그림 1. 금속이온 이차전지의 구성 및 구동 방식 모식도 (방전기준).

재로 활용하는가에 따라 다음과 같이 다양한 방식의 유기전지를 구성할 수 있다.

우선 n형 소재를 양극에 사용하는 경우, 기존 양이온 rocking-chair 방식의 금속이온전지와 동일한 전지를 구성할 수 있다(그림 2a). 이때 음극은 리튬 등의 금속이나 graphite, 또는 낮은 전위(<1 V)를 보이는 n형 소재를 사용한다. 현재 보편적으로 이용되고 있는 LIB를 포함한 금속이온전지의 기존 전극을 대체할 수 있는 장점 때문에 가장 활발하게 연구되고 있으며, 대부분의 논문에서는 실험의 편의성을 위해 금속박막을 음극으로 구성한 metal-organic 전지를 보고하고 있다.

다음으로는 p형 소재를 양극에 사용하는 경우로 음극에 어떤 소재를 사용하는가에 따라 두가지 방식으로 나뉜다. 첫번째는 음극에 상대적으로 낮은 전압을 보이는 p형 소재를 사용하는 것으로, 이 경우 음이온 rocking-chair 방식이라는 특수한 형태의 전지를 구성할 수 있다(그림 2b).¹⁵ 이러한 새로운 방식의 전지는 음이온의 이온 전달율(transference number)과 한계 몰 전도도(limiting molar conductivity)가 양이온에 비해 높아 고출력을 낼 수 있는 가능성을 가지고 있지만, 상대적으로 구성할 수 있는 전지의 전압이 낮고(<1.5 V), 특히 음극재의 사이클 안정성이 떨어지는 문제가 있다. 따라서 viologen외에 음극으로 쓸 수 있는 상대적으로 낮은 전위를 보이는 새로운 p형 소재의 개발이 필요한 상황이다.

마지막으로 양극에 p형 소재를, 음극에 n형 소재 또는 금

속박막을 사용하여 Dual-ion형 전지(DIB)를 구성할 수 있다(그림 2c). 이 경우 유기전지 중 가장 높은 전압을 구현할 수 있어 최근 활발한 연구가 진행중이나, DIB의 경우 rocking-chair형에 비해 상당히 많은 양의 전해질을 필요로 하는 단점이 있다.¹⁶

2.3 유기전극재의 전기화학적 기초 특성 분석

고성능 유기전극소재 및 유기전지 개발을 위해서는 전극재를 이차전지 소자에 적용하기 전에 전극재에 대한 전기화학적 기초 특성 분석이 선행되어야 한다. 본 고에서는 유기물의 전기화학적 특성 분석을 위한 다양한 방법 중 가장 기초적이고 필수적인 분석법에 대해서 알아보려고 한다.

2.3.1 순환 전압전류법(Cyclic Voltammetry, CV)

순환 전압전류법(CV)은 전기화학적 활성을 보이는 소재의 산화환원 특성을 분석할 수 있는 기초적인 방법으로 가장 널리 쓰이고 있다.¹⁷ CV 측정을 통하여 우리는 유기물의 산화환원 전위와 가역성 등을 포함한 다양한 정보를 얻을 수 있다. 일반적으로 CV 측정은 기준전극, 상대전극, 작업전극의 3전극을 통해 이루어지며, 주로 유기용매를 사용하기 때문에 특정농도의 AgNO_3 가 녹아 있는 용액에 담긴 Ag wire를 기준전극으로 활용한다. 이때, ferrocene의 CV 측정을 수행하여, 알려져 있는 ferrocene/ferrocenium(Fc/Fc^+) 산화환원 쌍의 전위를 내부표준으로 삼아 기준 전극의 전위(Ag/Ag^+)를 보정한다.

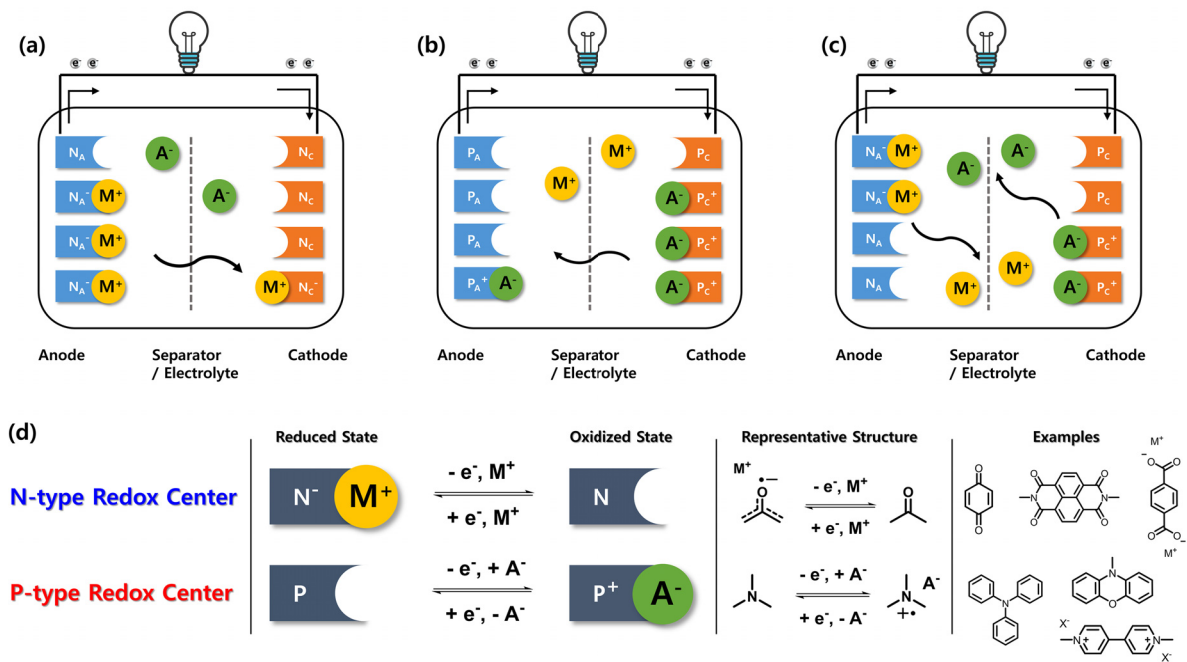


그림 2. 유기물 전극을 기반으로 하는 이차전지의 종류와 구동 방식 모식도: (a) 양이온 rocking-chair 방식, (b) 음이온 rocking-chair 방식, (c) Dual-ion 방식, (d) 산화환원 거동 방식에 따른 유기물의 분류.

그림 3a는 CV로 측정된 Fc의 전류-전위곡선으로 일반적인 유기물은 이와 같이 두개의 피크를 가진 이른바 ‘오리’ 모양 곡선을 보여준다. 이때, 소재의 형식 전위(formal potential)는 각 산화와 환원 피크 전압($E_{p,a}$ 와 $E_{p,c}$)의 평균 값($E_{1/2}$)으로 구할 수 있다. 또한, 이상적인 가역반응을 보이는 경우 각 산화와 환원 피크 전류($i_{p,a}$ 와 $i_{p,c}$)의 비율이 1:1 이 되며, 산화환원 피크 전압의 차이($\Delta E_p = E_{p,a} - E_{p,c}$)가 $57/n$ mV(n 은 반응에 참여한 전자 수)가 된다. 그러나 산화 환원 반응의 속도가 느릴 경우, ΔE_p 값이 커지게 된다. 또한 대부분의 유기물은 준가역(quasi-reversible) 형태의 곡선을 보여주며, $i_{p,a} > i_{p,c}$ 와 $\Delta E_p > 57/n$ mV의 값이 측정된다.

한편, 한 분자내에 동일한 산화환원 기능단이 여러 개 존재하는 경우, 일반적으로 각 기능단의 반응이 순차적으로 일어나게 된다.¹⁸ 예를 들어, 분자내에 가역적인 1전자 산화 반응을 할 수 있는 p형 기능단인 phenothiazine(PTZ)을 1개(PhPTZ), 2개(m2PTZ), 3개(3PTZ) 가진 소재의 경우(그림 3b), 그림 3c에서와 같이 보유하고 있는 기능단의 개수와 같은 수의 1전자 산화환원 피크가 순차적으로 나타나는 곡선이 측정된다.¹⁴

그러나 후속 반응이 일어나는 것이 선행 반응보다 동역학적으로 유리할 경우, 다전자 반응이 동시에 일어나는 것이 가능하다.¹⁸ 예를 들면, phenoxazine(PXZ) 기능단의 경우 1전자 산화반응에 있어 반응 전후의 분자구조의 입체구조(conformation)적 변화가 매우 작아 반응속도가 빠른 특

질이 있다.¹⁴ 특히 분자내에 PXZ기능단을 여러 개 가진 경우, 이러한 특징으로 인하여 후속반응이 일어나는 것이 매우 유리해지게 된다. 따라서 그림 3d에서와 같이 여러 개의 피크가 하나로 합쳐진 형태의 다전자 반응과 같은 곡선을 보여주게 된다. 이 때, ΔE_p 값은 크게 줄어들게 되며, i_p 값은 Randles-Sevcik 식에 따라 $n^{3/2}$ 에 비례하므로 크게 증가하게 된다.¹⁸

2.3.2 회전원판전극(Rotating Disk Electrode, RDE)

유기 전극재의 산화환원 반응에 대한 동역학적 분석은 회전원판전극을 이용한 선형주사전위법(linear sweep voltammetry, LSV) 측정을 통해 가능하다.¹⁹

우선 RDE의 회전속도를 다르게 하여 측정된 LSV곡선(그림 4a)에서 회전속도별 한계전류(limiting current, i_{lim}) 값을 얻은 후, 다음의 Levich 식(식 (1))을 이용한 Levich곡선(그림 4b)을 분석하여 곡선의 기울기로부터 소재의 확산 계수(diffusion coefficient, D)를 구할 수 있다.²⁰

$$i_{lim} = 0.62nFAD^{2/3}\nu^{-1/6}\omega^{1/2}C_0 \quad (1)$$

여기서 n 은 반응에 참여한 전자 수, F 는 Faraday 상수, A 는 전극 면적, ν 는 용액의 동점도(kinematic viscosity), ω 는 회전속도, C_0 는 농도이다.

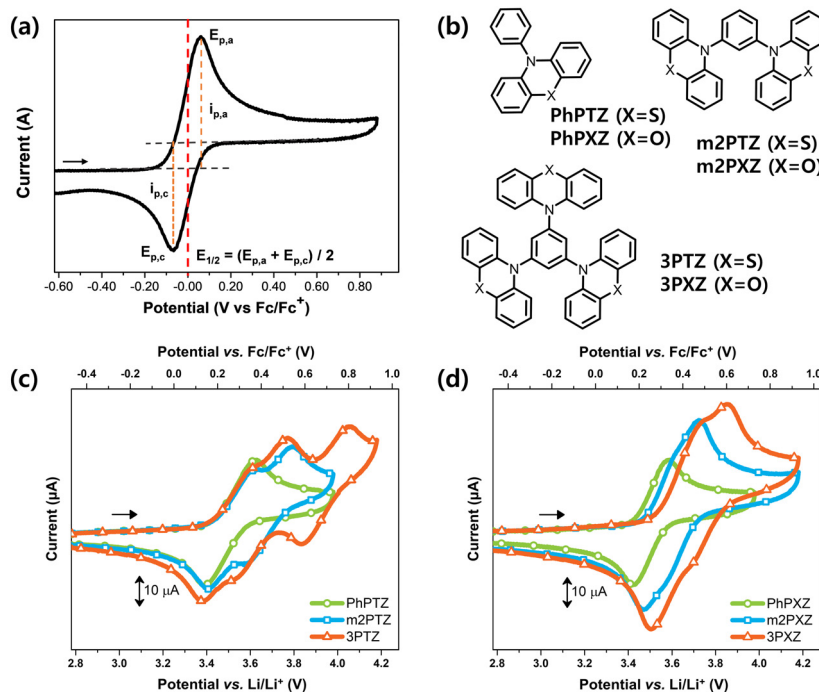


그림 3. (a) CV를 통해 얻은 ferrocene(Fc)의 전류-전위곡선(5 mM Fc, 주사속도 100 mV s^{-1}). 한 분자 내에 다수의 동일한 산화환원 기능단을 가지고 있는 유기물의 (b) 분자구조와 CV 곡선: (c) phenothiazine의 경우, (d) phenoxazine의 경우.¹⁴

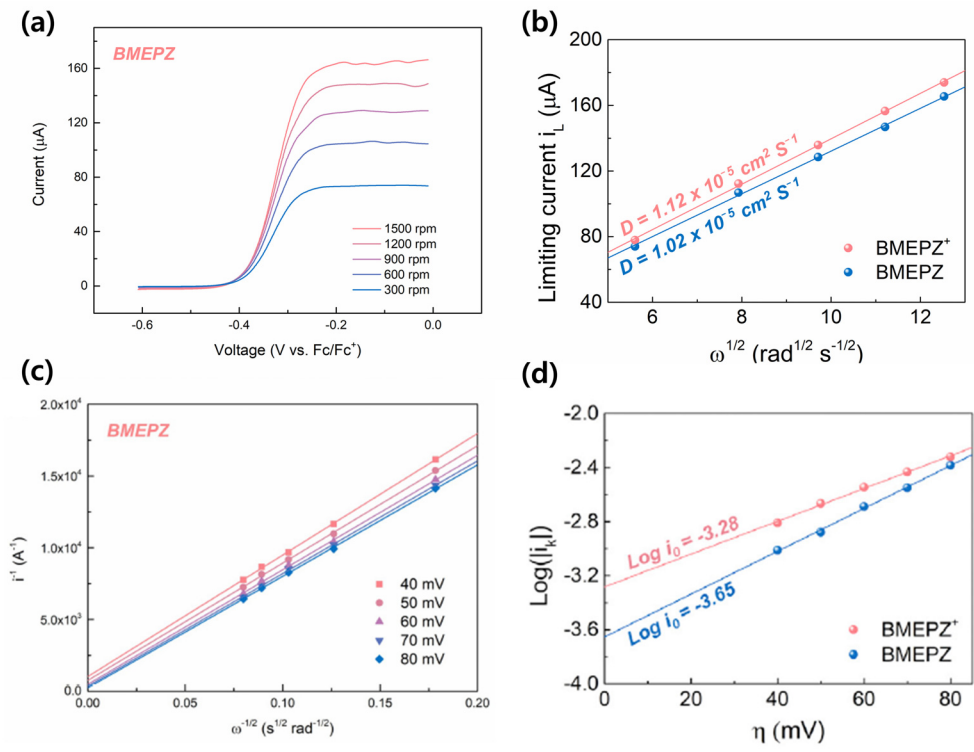


그림 4. RDE를 활용한 동역학적 분석의 예: (a) RDE의 회전속도에 따른 전압전류곡선, (b) Levich 곡선, (c) Koutecký-Levich 곡선, (d) Tafel 곡선.²⁰

또한, 전하이동에 대한 동역학적 분석은 다음의 Koutecký-Levich (식 (2))으로 할 수 있다.

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{i_k} + \frac{1}{0.62nFAD^{2/3}\nu^{-1/6}\omega^{1/2}C_0} \quad (2)$$

여기서 i_k 는 속도지배전류(kinetic-controlled current)로써 Koutecký-Levich 곡선(그림 4c)에서 과전위(overpotential, η)별 i_k 값을 y절편에서 구할 수 있다. 이후, Tafel 곡선(그림 4d)을 분석하면 Butler-Vollmer식에 의해 교환전류(i_0)값을 y절편으로부터 구할 수 있다. 마지막으로 아래 식(3)에 의해 교환전류로부터 전자전달 속도 상수 k_0 를 구할 수 있게 된다.

$$i_0 = F A k_0 C_0 \quad (3)$$

2.4 유기전지의 기본 특성 분석

전지의 특성은 다양한 성능지표로 나타낼 수 있다. 이번 절에서는 전지의 성능을 나타내는 용어와 측정방법 등에 대하여 알아보도록 한다.

우선 전지의 용량(capacity)은 전지에 저장할 수 있는 전하량을 나타내는 것으로 일반적으로 Ah의 단위를 사용하

며, 1 Ah = 3,600 C에 해당한다. 전극소재를 다룰 때는 전하량을 활물질의 양으로 나눈 비용량(specific capacity, Ah g⁻¹)을 주로 사용한다. 유기전극소재의 이론적 비용량($C_{sp,th}$)은 다음 식(4)를 이용해 구할 수 있다.

$$C_{sp,th} = \frac{nF}{M} = 26801 \frac{n}{M} [mAh g^{-1}] \quad (4)$$

여기서 M은 소재의 분자량이다.

다음으로 전지가 갖는 에너지는 전지가 할 수 있는 일의 총량으로써 전지가 내는 전압에 용량을 곱한 값으로 구할 수 있다. 에너지 역시 주로 비에너지(specific energy) 또는 에너지밀도(energy density)로 나타내며, 각각 Wh kg⁻¹ 또는 Wh cm⁻³의 단위를 사용한다.

또한 출력(power)은 전지가 단위시간당 낼 수 있는 에너지로 W kg⁻¹의 단위를 사용한다.

한편, 이차전지에서는 충전에 들어간 에너지 대비 방전 시 사용할 수 있는 에너지의 효율이 매우 중요한 성능이 된다. 이때 충방전 용량의 비율을 쿨롱 효율(Coulombic efficiency, η_c)이라 하고 충방전 에너지의 비율은 에너지 효율(η_E)로 나타낸다.

일반적으로 가장 많이 사용되는 전지의 특성평가 방법은 정전류 충방전(galvanostatic charge-discharge, GCD)으로

일정전류를 계속적으로 인가하여 특정 전압범위(cut-off voltage) 내에서 연속적인 충방전 실험을 진행하는 것이다. 이러한 충방전 실험의 속도는 C-속도(C-rate)로 표기하는데 전지의 이론 용량을 1시간에 완전히 충전 또는 방전할 수 있는 전류 대비 GCD 충방전 시 인가된 전류로 나타낸다.

그림 5a는 앞선 2.3.1절에서 언급한 한 분자내에 PTZ와 PXZ 기능단을 각각 3개씩 포함하고 있는 3PTZ와 3PXZ 전극재의 GCD 측정 결과를 보여준다.¹⁴ 각 소재는 120과 129 mAh g⁻¹의 이론 용량을 가지고 있으며, 1C의 속도로 전류를 인가하여 3-4 V 사이에서 충방전 실험을 진행하였다. 이때 측정된 시간에 인가한 전류를 곱하여 실제 충방전이 된 용량을 구할 수 있으며 이를 통해 그림 5a와 같은 충방전 프로필(전압-용량 곡선)을 도출할 수 있다. 이 곡선에서 두 소재 모두 대략 3.7 V 정도에서 평탄전압이 나타나고, 실제 방전 용량은 3PTZ와 3PXZ가 각각 약 30과 100 mAh g⁻¹ 정도임을 알 수 있다. 그러나 충전 용량을 살펴보면 3PXZ는 방전 시와 비슷한 용량이 충전된 반면, 3PTZ는 더 많은 양이 충전되었던 것을 알 수 있다. 따라서 3PXZ는 100%에 가까운 η_c 를 보여준 반면, 3PTZ의 η_c 는 매우 좋지 않음을 알 수 있다.

이와 같은 방식으로 연속적인 충방전 실험을 지속하여 전지의 사이클 안정성을 평가하게 된다. 그림 5b에서 보듯이 3PXZ전극은 첫 사이클에서 112 mAh g⁻¹의 방전 용량을 보인 반면, 사이클이 계속되면서 용량이 점점 줄어들어 100번째 사이클에서는 첫 사이클의 65%에 해당하는 73 mAh g⁻¹의 용량을 낸 것을 알 수 있다. 일반적으로 유기전극소재는 유기전해질에 용해도가 높은 경우가 많아 충방전이 지속될수록 전극에서 활물질이 녹아 나가게 되어 사이클 안정성이 떨어지는 편이다.

한편, 전지의 출력 특성은 GCD 측정 시 C-속도를 바꾸어 가며 측정하여 평가할 수 있다. 그림 5c는 상기 두 소재를 1 C에서부터 20 C까지 인가 전류를 변화하며 각각 5 사이클씩 GCD 측정한 방전 용량을 1 C에서의 용량에 대비하여 표기한 것이다. 20 C-속도는 3분 동안 완전 충전/방전이 가능한 전류밀도로써, 3PXZ는 20 C에서도 상대적으로 저

속인 1 C에서의 용량의 70% 이상을 낼 수 있는 것으로 측정되었다. 이는 여타의 전극재 대비 출력특성이 월등히 좋은 것으로, 소재의 전압을 고려해 볼 때 용량과 사이클 안정성이 보완된다면 기존 전이금속 산화물 소재를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 결론 및 전망

본 고에서는 유기전극소재와 이를 활용한 유기전지의 기본 개념 및 작동원리부터 유기전극소재의 전기화학적 특성 분석 방법과 유기전지의 기초 특성 평가 방법에 대해 살펴 보았다.

오랜 역사에도 불구하고 여러 차세대 전지 기술 중 유기전극소재와 유기전지는 그 동안 큰 이목을 끌지 못한 것이 사실이다. 그러나 환경과 에너지에 대한 높아진 관심을 반영하듯 최근 2~3년간 유기전지에 대한 연구는 관련 SCI 논문만 연간 100편 이상이 쏟아지는 등 새로운 부흥기를 맞고 있다.⁶

이러한 전 세계적인 연구노력으로 말미암아 그림 6에서 보듯이 전압, 비용량, 그리고 비에너지 측면에서 기존 전이금속 산화물 소재에 버금가는 성능을 가진 유기전극소재가 이미 많이 보고된 것을 알 수 있다. 그러나 기존 소재를 대체하기 위해서는 월등히 높은 성능을 가진 새로운 소재의 개발이 필요한 상황이다. 특히 n형 소재는 비용량이 매우 높은 반면 전위가 낮은 단점이 있고, 반면 p형 소재는 전위는 높으나 비용량이 낮은 단점이 있어 이를 보완할 수 있는 소재의 개발이 필요하다.

한편 최근 전해질 최적화를 통해 p형 소재의 다전자 반응을 이끌어 냄으로써 비용량을 획기적으로 높일 수 있는 연구가 진행된 바 있으나²¹ 실용적인 연구가 되기 위해서는 아직 해결해야 할 문제가 많은 것이 현실이다. 이는 주로 유기물 고유의 높은 용해성과 낮은 전기전도도에 기인한 것으로 이를 해결하여 사이클 안정성을 확보하고 전극내 활물질 양을 높일 수 있는 방안이 필요하다.

또한, 유기전지의 실질적 이용을 위해서는 유기물의 낮

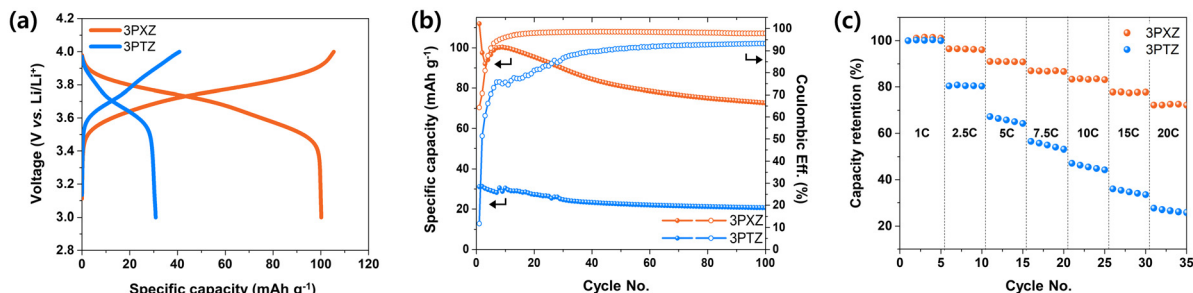


그림 5. (a) 정전류 충방전 곡선, (b) 충방전 사이클에 따른 용량 변화 곡선, (c) 충방전 속도에 따른 용량 변화 곡선.¹⁴

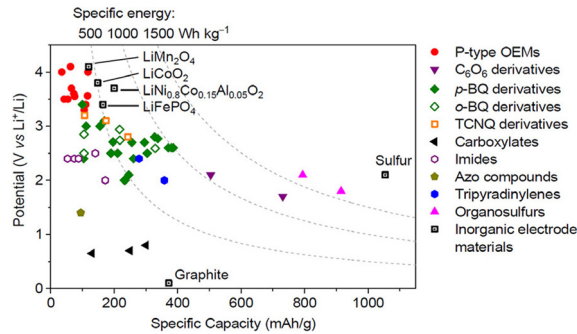


그림 6. 지금까지 보고된 이차전지용 유기전극소재와 기존 무기물 전이금속 산화물 전극 소재와의 성능비교 그래프.⁶

은 밀도에 따른 에너지 밀도 한계에 대한 고민과 생산단가에 대한 고려도 요구된다.²²

그럼에도 불구하고, 유기전극소재는 전지의 구동방식에 구애받지 않고 활용될 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 따라서 많은 연구자들이 유기전극소재를 소듐이온,²³ 포타슘이온,²⁴ 다가이온 전지²⁵는 물론 수용액 전해질 전지²⁶ 및 레독스 흐름 전지^{20,27} 등 다양한 전지에 응용하는 연구를 진행하고 있다. 앞으로 이러한 연구를 바탕으로 유기물의 장점을 더욱 살려 착용형, 인체부착형, 체내삽입형 전자 소자 등에 사용가능한 친환경, 무독성의 생체적합형 전지를 구현할 수 있을 날을 기대해 본다.

참고문헌

1. T. Kim, W. Song, D.-Y. Son, L. K. Ono, and Y. Qi, *J. Mater. Chem. A*, **7**, 2942 (2019).
2. G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **89**, 292 (2018).
3. M. Armand and J.-M. Tarascon, *Nature*, **451**, 652 (2008).
4. Y. Liang, Z. Tao, and J. Chen, *Adv. Energy Mater.*, **2**, 742 (2012).
5. D. L. Williams, J. J. Byrne, and J. S. Driscoll, *J. Electrochem. Soc.*, **116**, 2 (1969).
6. P. Poizat, J. Gaubicher, S. Renault, L. Dubois, Y. Liang, and Y. Yao, *Chem. Rev.*, **120**, 6490 (2020).
7. J. B. Goodenough and K. S. Park, *J. Am. Chem. Soc.*, **135**,

- 1167 (2013).
8. Z. Song and H. Zhou, *Energy Environ. Sci.*, **6**, 2280 (2013).
9. J. E. Kwon, C.-S. Hyun, Y. J. Ryu, J. Lee, D. J. Min, M. J. Park, B.-K. An, and S. Y. Park, *J. Mater. Chem. A*, **6**, 3134 (2018).
10. Z. Song, H. Zhan, and Y. Zhou, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **49**, 8444 (2010).
11. S. Lee, J. E. Kwon, J. Hong, S. Y. Park, and K. Kang, *J. Mater. Chem. A*, **7**, 11438 (2019).
12. E. Castillo-Martinez, J. Carretero-Gonzalez, and M. Armand, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **53**, 5341 (2014).
13. J. K. Feng, Y. L. Cao, X. P. Ai, and H. X. Yang, *J. Power Sources*, **177**, 199 (2008).
14. K. Lee, I. E. Serdiuk, G. Kwon, D. J. Min, K. Kang, S. Y. Park, and J. E. Kwon, *Energy Environ. Sci.*, in press, DOI: 10.1039/d0ee01003k (2020).
15. V. Cadiou, A. C. Gaillot, E. Deunf, F. Dolhem, L. Dubois, T. Gutel, and P. Poizat, *ChemSusChem*, **13**, 2345 (2020).
16. Y. Sui, C. Liu, R. C. Masse, Z. G. Neale, M. Atif, M. AlSalhi, and G. Cao, *Energy Storage Mater.*, **25**, 1 (2020).
17. N. Elgrishi, K. J. Rountree, B. D. McCarthy, E. S. Rountree, T. T. Eisenhart, and J. L. Dempsey, *J. Chem. Edu.*, **95**, 197 (2017).
18. A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Wiley, New York, p 505 (2001).
19. C. Friebe and U. S. Schubert, *Adv. Energy Mater.*, **5**, (2015).
20. G. Kwon, K. Lee, M. H. Lee, B. Lee, S. Lee, S.-K. Jung, K. Ku, J. Kim, S. Y. Park, J. E. Kwon, and K. Kang, *Chem*, **5**, 2642 (2019).
21. S. Lee, K. Lee, K. Ku, J. Hong, S. Y. Park, J. E. Kwon, K. Kang, *Adv. Energy Mater.*, in press, DOI: 10.1002/aenm.202001635 (2020).
22. Y. Lu and J. Chen, *Nat. Rev. Chem.*, **4**, 127 (2020).
23. Q. Zhao, Y. Lu, and J. Chen, *Adv. Energy Mater.*, **7**, 1601792 (2017).
24. B. Tian, J. Zheng, C. Zhao, C. Liu, C. Su, W. Tang, X. Li, and G.-H. Ning, *J. Mater. Chem. A*, **7**, 9997 (2019).
25. J. Xie and Q. Zhang, *Small*, **15**, e1805061 (2019).
26. Y. Liang, Y. Jing, S. Gheytani, K. Y. Lee, P. Liu, A. Facchetti, and Y. Yao, *Nat. Mater.*, **16**, 841 (2017).
27. Y. Ding, C. Zhang, L. Zhang, Y. Zhou, and G. Yu, *Chem. Soc. Rev.*, **47**, 69 (2018).