

# 1 수계 전해질 기반 이차전지 및 전극 소재 연구 동향

글\_이지훈 교수 | 경북대학교 신소재공학부

## 1. 서론

가격경쟁력이 우수하고 안전성이 확보된 에너지 저장 시스템(energy storage systems)에 대한 필요성이 증가함에 따라 기존의 리튬 이온전지(lithium ion batteries, LIBs)를 대체할 수 있는 차세대 전지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 소듐( $\text{Na}^+$ ), 포타슘( $\text{K}^+$ )과 같은 알칼리 금속 이온 뿐만 아니라, 마그네슘( $\text{Mg}^{2+}$ ), 아연( $\text{Zn}^{2+}$ ) 등 다가 이온을 활용하는 전지들은 LIBs와 비슷한 전기화학적 성능을 나타냄과 동시에 가격 경쟁력이 우수하다는 점에서 매우 큰 각광을 받고 있다. 특히, 다가 이온 전지 같은 경우 캐리어 이온 하나 당 두 개의 전자를 이용하기 때문에, 이론적으로는 소재의 부피 당 에너지 밀도를 두 배 높일 수 있다는 장점은 주목할 만하다. 하지만 기존

비-수계 전해질(non-aqueous electrolyte)을 사용할 경우, 화재의 위험성에서 자유롭지 않으며 전해질과 전극 소재 간의 불안정한 계면 형성으로 인해 낮은 쿨롱 효율과 수명 열화 특성이 문제가 된다 [1,2].

이와 같은 문제점을 극복하고자, 최근 수계 전해질(aqueous electrolyte)을 기반으로 하는 에너지 저장 시스템, 즉 수계 이차전지(aqueous rechargeable batteries, ARBs)가 큰 각광을 받고 있다. 전해질에 수화된 상태로 존재하는 염의 양이온(예:  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  등)뿐만 아니라, 물을 구성하는 프로톤( $\text{H}^+$ )과 수산기 이온( $\text{OH}^-$ )을 캐리어 이온을 활용할 수 있다는 점에서 다양한 전지 반응이 가능하다는 특징을 갖고 있다. 뿐만 아니라, ① 기존의 LIBs에 비해 월등히 높은 캐리어 이온의 이동도(mobility)와 출력 밀도(power capability),

② 수분 제어를 요구하지 않는 전지 조립 환경과 수계 전해질을 사용함에 기인하는 우수한 가격 경쟁력(cost-effective), ③ 불이 나지 않는 구동 환경으로 인한 안전성(Safety)은 ARBs의 가장 큰 장점이라고 할 수 있을 것이다 [1]. 하지만, 기존의 LIBs에 비해 여전히 낮은 ARBs의 구동 전압(~4.5 V vs. ~1.2 V)과 이로 인한 낮은 에너지 밀도는 여전히 뛰어넘어야 할 과제로 남아있다.

본 기고에서는 수계이차전지에 대한 총괄적인 연구 동향 및 전극소재에 대한 최근 연구 동향을 살펴보고자 한다. 2.1장에서 ARB로서 가장 먼저 시도가 된 형태인 전기화학 커패시터와의 하이브리드형 ARB를 소개하고, 2.2장에서 니켈-수소화물 전지 구성을 차용한 수산화물 ARB의 연구동향을 소개한다. 2.3장에서는 수화 탈·삽입이라는 새로운 메커니즘을 기반으로 하는 ARB연구들을 요약하며 새로운 ARBs 시스템을 상세히 기술하고자 한다.

## 2. 수계 전해질 기반 이차전지의 연구 동향

### 2.1 하이브리드형 수계 이차전지

ARB를 구성하는데 있어 가장 큰 어려운 부분은 물이 분해되지 않는 전기화학 창(electrochemical window)안에서 평탄한 작동 전압을 갖는 소재를 선정하는 것이다. 이와 같은 문제는 양극(cathode)의 전지 반응은 물이

산화되어 산소가 발생하는 반응(oxygen evolution reaction, OER)과 경쟁하며, 음극(anode)의 전지 반응은 물이 환원되어 수소가 발생하는 반응(hydrogen evolution reaction, HER)과 경쟁하기 때문이다. 특히, HER 반응의 낮은 과전압과 빠른 반응속도로 인해 HER과 경쟁반응에서 우위에 있는 음극 소재를 찾는 것은 열역학적으로 매우 어려운 과제라고 할 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하고자, 양극은 전지 반응을 하는 소재를 활용하고 음극은 커패시터 반응을 하는 다공성 탄소 소재를 활용한 하이브리드형 수계 이차전지(hybrid-type ARB, H-ARB)가 활발히 연구되었다 (그림 1(a)).

H-ARB의 가장 큰 특징은 셀 전체의 출력 밀도와 에너지 밀도는 각각 양극 소재와 음극 소재에 의해 결정된다는 것이다. 따라서 음극은 [3,4] 더 높은 정전 비용량(specific capacitance; F/g 또는 F/cm<sup>3</sup>)을 갖는 이중 원소가 도핑된 그래핀, 다공성 활성탄 등이 활용되었으며, 양극은 [5-7] 빠른 충·방전을 위해 다양한 나노 구조체와 양이온-전이금속-유기 골격체가 널리 활용되었다 (그림 1(b)).

어떤 수계 전해질을 선택하느냐에 따라서 양극과 음극 소재의 선택이 크게 달라질 수 있다는 점은 주목할 만하다. 염기성 용액(pH=14)의 경우, OER은 잘 일어나는 반면, HER은 잘 일어나지 않기 때문에 상대적으로 H-ARB를 구성하기 쉽다고 할 수 있다. 대표적인 구성은 니켈을 포함하는 산화물(NiO)을 양극으로, 환원 그래핀 산화물(reduced graphene oxide, RGO)를 음극으로 채택한 것

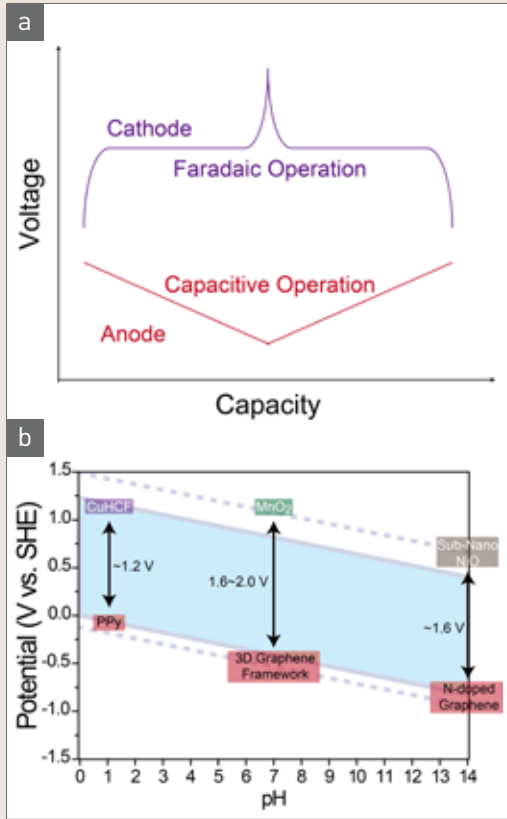


그림 1 ▶ (a) Schematic illustration for H-ARB and (b) Pourbaix diagram of H<sub>2</sub>O where dotted lines indicate the kinetic-controlled electrochemical window. The ARB operations for CuHCF|PPy, MnO<sub>2</sub>||3D Graphene Framework, and sub-nano NiO||N-doped Graphene are illustrated together.

이다. 니켈 산화물과 수산화물이 pH=14 조건의 HER 전압 대비 약 1.4 V에서 전지 반응을 할 수 있기 때문에 1.6 V급 H-ARB를 구성할 수 있다. 최근 리튬화 공정을 통한 분쇄화(pulverization)를 거친 서브 나노수준의 NiO(sub-nanoscale NiO)과 질소가 도핑된 그래핀을 각각 양·음극 소재로 활용한 H-ARB가 80 Wh/kg의 에너지 밀도와 21 kW/kg의 출력 밀도를 보이면서 10만회 충·방전 이후

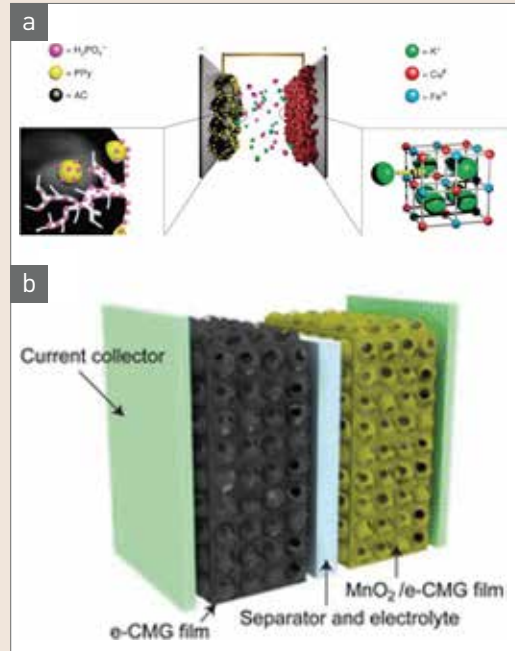


그림 2 ▶ Schematic illustration for ARBs based on (a) CuHCF|PPy and (b) MnO<sub>2</sub>||3D graphene framework. [*Nature Commun.*, 2014, 5, 3007 and *ACS Nano*, 2012, 6, 4020].

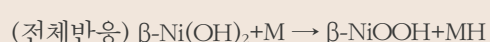
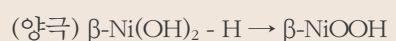
에도 용량을 그대로 유지하는 특성을 보였다 [5]. 이는 기존의 LIBs에 버금가는 에너지 밀도와 출력 밀도를 보였다는 점에서 의미있는 연구 결과라고 할 수 있겠다.

이 외에도 산성 용액(pH=1)에서 프리시안 블루 유사체(prussian blue analogues, CuHCF)와 폴리피롤(polypyrrole, PPy)를 이용한 H-ARB가 제시되었으며 [6] 천회 충·방전 이후에도 초기 용량의 99.8%를 유지하는 훌륭한 전기화학적 특성을 보였다 (그림 2(a)). 그 밖에도, 중성 용액(pH=7, 1M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)에서 유사 커패시턴스(pseudo-capacitance)를 보이는 망간 산화물(MnO<sub>2</sub>)과 다공성 3차원 그래핀 구조체를 양·음극으로 하는 H-ARB가 [7]

보고되었다 (그림 2(b)). 중성 용액을 전해질로 사용할 경우, 환경적인 측면에서 유리할 뿐만 아니라, 물 분해 반응을 효과적으로 억제할 수 있기 때문에 2 V급 H-ARB를 구성할 수 있다는 장점이 있다. 이와 같은 장점을 통해 구성된 H-ARB는 최대 44 Wh/kg의 에너지 밀도와 25 kW/kg의 출력 밀도를 얻을 수 있었다.

## 2.2 수산화물 기반 수계 이차전지

2.1에 기술한 NiO||N-doped Graphene과 같은 구성의 H-ARB는 니켈-금속수소화물 전지(nickel-metal hydride, Ni-MH)의 전기화학 반응에 착안해서 구성된 것이다. Ni-MH는 양극은 베타상 니켈 수산화물( $\beta$ -Ni(OH)<sub>2</sub>)을 이용하고 음극은 수소화물이 될 수 있는 금속(M=LaNi<sub>5</sub>, TiMn<sub>2</sub>, ZrMn<sub>2</sub> 등)을 이용한다. 충전 반응 시,  $\beta$ -Ni(OH)<sub>2</sub>가  $\beta$ -NiOOH로 산화되며 프로톤의 탈리반응이 일어나고 M이 프로톤과 반응하여 금속수소화물(MH)가 된다 [8].



물의 안정적인 전기화학 창을 모두 활용해 1.2 V의 작동 전압을 보였으며, 높은 에너지 밀도(~200 Wh/kg)와 출력 밀도(~200 W/kg)를 보임과 2,000회 이상의 충·방전 이후에도 눈에 띄는 열화반응이 없었다. 이로 인해 Ni-MH 전지는 다양한 환경에 사용될 수 있었다. 하지만,  $\beta$ -Ni(OH)<sub>2</sub>에서 프로톤을 하나 이상

탈리시키게 되면  $\gamma$ -NiOOH<sub>0.5</sub>로 상전이가 일어나면서 과충전(overcharging)효과가 생겨나게 되고 급격한 열화현상이 생기게 된다. 따라서, Ni-MH 전지의 에너지 밀도를 높이고자 130 mAh/g의 이론용량을 갖는  $\beta$ -Ni(OH)<sub>2</sub>을 대체할 수 있는 새로운 소재를 찾는 연구가 활발히 진행되고 있다.

$\beta$ -Ni(OH)<sub>2</sub>을 대체할 수 있는 소재로서, 수산화물(hydroxide)의 다른 한 종류인  $\alpha$ 상 수산화물이 활발하게 연구되었다 [9-11].  $\alpha$ 상 수산화물은  $\beta$ 상 수산화물의 전이금속 층(slab) 사이에 다양한 음이온(anion)과 결정수(crystal water)가 층간 삽입물(intercalant)로서 들어간 소재이다. 이 전이금속 층과 층간 삽입물이 번갈아가면서 층상을 이룬다고 하여 층상이

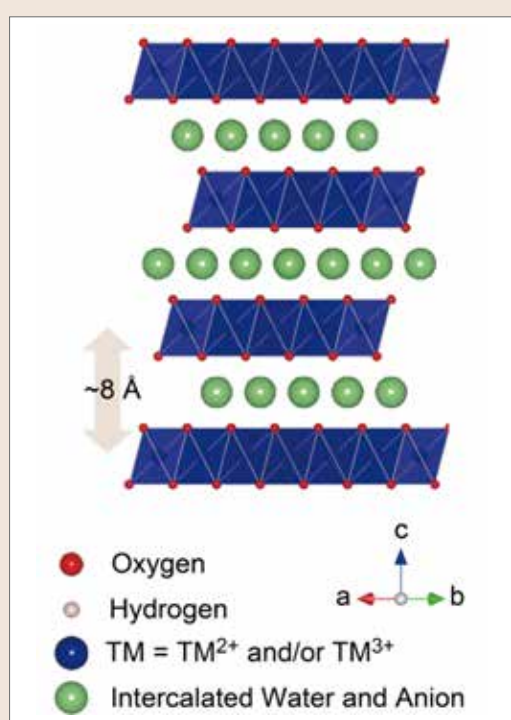


그림 3 ▶ Crystal structure of layered double hydroxide (LDH). [Adv. Funct. Mater., 2017, 27, 1605225].

중수산화물(layered double hydroxide, LDH)로 불리고 있다. 층간 삽입물로 인해 LDH의 화학식은  $\beta$ 상과는 다르게  $(TM^{2+})_1-nx(TM^{3+})_nx(OH)_2[x(A^n)y(H_2O)]$ 로 구성된다. 음이온은 질산이온( $NO_3^-$ ), 염화이온( $Cl^-$ ), 황산이온( $SO_4^{2-}$ ), 탄산이온( $CO_3^{2-}$ ) 등 다양하게 쓰일 수 있으며, 음이온의 양만큼 전이금속의 일부가 3+로 산화가 된다는 것을 알 수 있다(그림 3).

최근 최장욱 교수 연구팀에서 Ni과 Co를 이용해 합성한 LDH (NC-LDH)를 이용해 다양한 ARB가 보고되고 있다 [10,11]. Ni은 2+에서 4+까지 산화수 변화를 하면서 높은 용량을 가져오고, Co는 3+로 산화수가 고정되어 전체적인 층상 구조의 안정화에 기여하는 것으로 X선 흡수미세구조 분석과 회절 분석을 통해 밝혔다. 연구팀은 NC-LDH와  $Fe_3O_4$ 를 각각 양·음극으로 구성한 ARB는 ~200 mAh/g의 높은 용량, 1.2 V급의 높은 작동전압, 1분 중·방전이 가능한 고출력 특성, 1만회 중·방전 이후에도 70% 가량의 초기 용량을 유지하는 장수명 특성을 갖춘 것으로 보고했다(그림 4). 이와 같은 고용량·장수명·고출력 특성은 충전 과정에서 생기는 격자 변형을 결정수의 초격자 배열이 효과적으로 완화시켜 줄 수 있기 때문이라고 보고했다 [10].

$Fe_3O_4$ 를 대신해 Zn 금속을 음극으로 사용함으로써 1.7 V급의 고전압 ARB 구성을 최근 보고했으며, 이와 같은 고전압 특성은 Zn/ $Zn(OH)_2$ 의 레독스 커플(redox couple)의 낮은 전위(-1.25 V vs. SHE)에 기인한 것으로 이해할 수 있다(그림 5). 한편, LDH를 합성하는

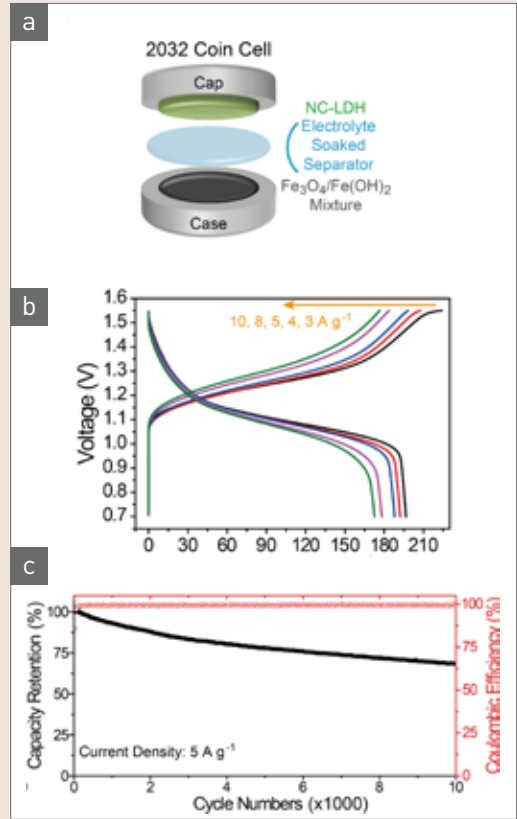


그림 4 ▶ (a) Schematic illustration of a 2032 coin-type ARB cell consisting of the NC-LDH cathode and  $Fe_3O_4$  anode, (b) the galvanostatic charge/discharge profiles measured at different current densities, and (c) cycling performance measured at 5 A/g. [Adv. Energy Mater., 2018, 8, 1703572].

과정에서 사용되는 음이온의 종류를 조절하여 NC-LDH의 층간에 위치하는 음이온이 전기화학적 성능에 미치는 영향이 매우 흥미로울 수 있다. 음이온의 크기(effective radius), 전하(charge) 등과 무관하게 음이온의 선택에 따라 결정수와 전이금속 층의 수소 결합의 세기에 따라 결정성(crystallinity)이 달라지고 이 결정성에 의해 수명과 용량의 교환관계(trade-off)가 있다는 점은 향후 고용량·고출력 소재



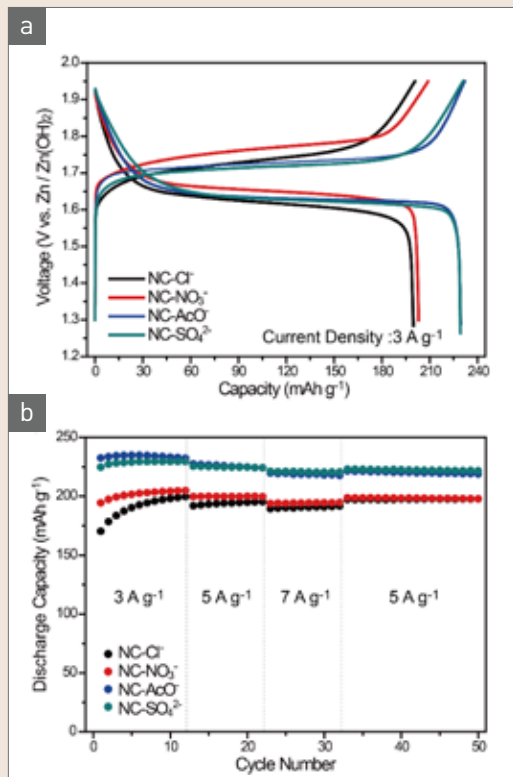


그림 5 ▶ (a) Galvanostatic charge/discharge curves and (b) cycle lives at 3 A/g of NC-LDH cathodes with different anions. [ChemSusChem, 2020, 13, 6546].

를 연구하는데 있어 하나의 가이드라인을 제시한다고 할 수 있다 [11].

### 2.3 수화 탈·삽입형 전극 기반 수계 이차전지

고용량 · 고출력 ARB를 구성하는데 있어, 캐리어 이온(carrier ion)이 전극 소재 안에서 확산해나가는 과정을 이해하는 것은 매우 중요하며, 다음과 같이 간단히 생각해볼 수 있다. 전해질 안에서 수화된 형태로 존재하는 캐리어 이온(hydrated carrier ion)은 전극 소재로 삽입(intercalation)되기 위해서 먼저 탈수화(dehydration)이 되어야하고, 그 후 캐리어 이

온이 격자 안을 확산해나갈 수 있을 것이다. 캐리어 이온이 양이온인 경우, 캐리어 이온의 확산속도는 캐리어 이온과 격자를 구성하는 음이온과의 정전기적인 인력(electrostatic attraction)에 의해 크게 영향을 받으며 이는 전지의 출력 밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 또한, 캐리어 이온이 격자와 강하게 상호작용을 하는 경우, 심각한 격자 변형(lattice strain)을 야기하기 때문에 전지의 수명 특성에도 큰 영향을 끼친다. 이와 같은 문제를 해결하고자, 2.1절에서 언급한 바와 같이 다양한 나노 구조를 이용한 전극 소재들이 제시되었으나 낮은 부피당 전극 밀도(low tap density)로 인한 낮은 에너지 밀도, 높은 부피당 표면적으로 인한 부반응(side reaction) 열화, 대량 생산이 어려운 문제 등으로 인해 많은 한계점을 보였다 [2].

최근 다양한 연구 그룹에서 “수화 삽입(hydrated intercalation)”이라는 새로운 소재 전략을 통해 캐리어 이온과 격자 간의 상호작용을 조절하는 연구를 수행하고 있다. 전해질에 수화된 캐리어 이온이 수화된 상태를 유지한 채 격자 내로 삽입이 되면 캐리어 이온의 전하를 상대적으로 중성화(neutralization)시켜 고체 확산을 도울 수 있기 때문이다. 이와 같은 수화 삽입 효과는 특히 캐리어 이온이 다가 이온(multivalent ion)인 경우 더욱 효과적인 것으로 보고되고 있다.

마그네슘(Mg)은 알칼리토금속(alkali-earth metal) 중 베릴륨(Be) 다음으로 가장 가벼운 원소이며 독성이 없고 상온에서 물과 특별한 반응이 없기 때문에 마그네슘 이온( $Mg^{2+}$ )을

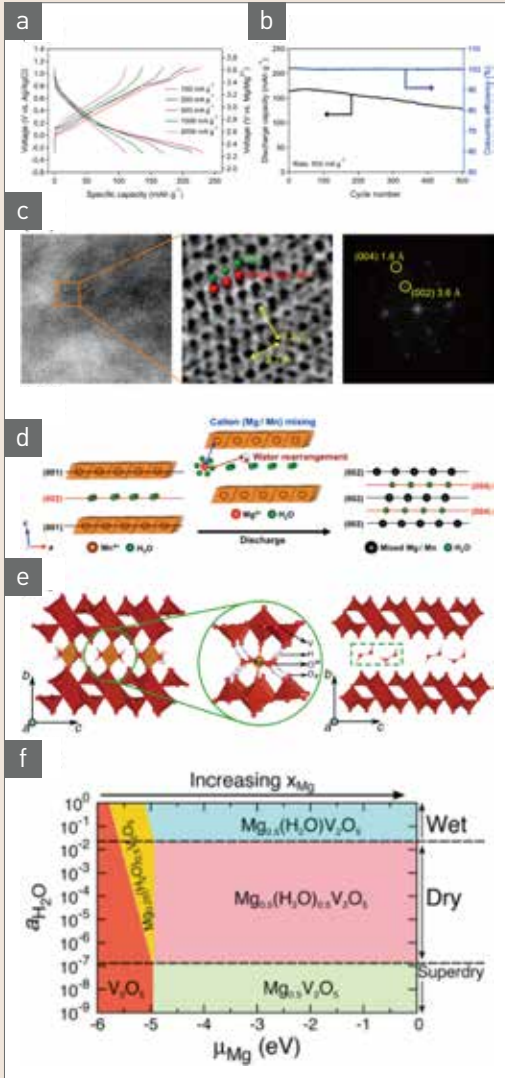
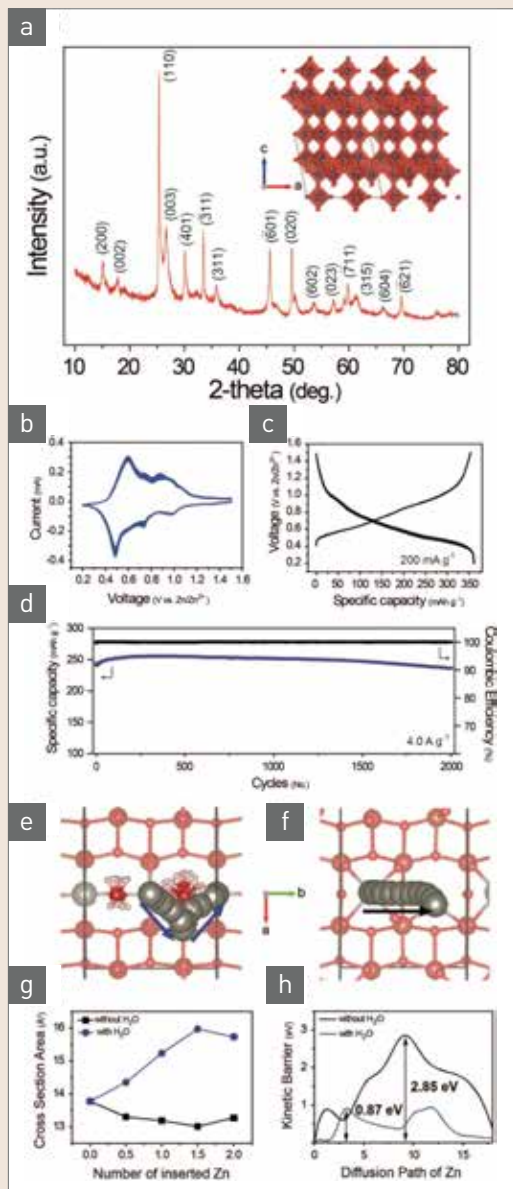


그림 6 ▶ [a]-[c] Mg-ARB performance of  $\delta$ - $\text{MnO}_2$ . (a) Galvanostatic charge/discharge profiles, (b) cyclability, and (c) high-resolution scanning transmission electron microscopy images at the fully-discharged stage. (e) Crystal structure of Xerogel- $\text{V}_2\text{O}_5$  at discharged (left) and charged (right) stages. (f) Grand-potential phase diagram with different activity values of  $\text{H}_2\text{O}$  and different amount of Mg present in Xerogel- $\text{V}_2\text{O}_5$ . [*Nano Lett.*, 2015, 15, 4071 and *Nano Lett.*, 2016, 16, 2426].

기반으로 하는 ARB가 활발히 연구되었다. 특히, 망가니즈 산화물이 전극소재로 연구되었

는데, 이 중 LDH와 같이  $[\text{Mn-O}_6]$  팔면체로 구성된 Mn층과 결정수 층이 번갈아가면서 구성된 버네사이트(*birnesite*,  $\delta$ - $\text{MnO}_2$ )가 매우 높은 용량( $\sim 220 \text{ mAh/g}$ )을 보였다 (그림 6(a)) [12]. 뿐만 아니라,  $0.5 \text{ A/g}$ 의 전류밀도에서도 500회 충·방전 이후 초기 용량의 80% 가량을 유지했다 (그림 6(b)). 이는 다른 망가니즈 산화물 양극보다 월등히 우수한 성능으로써, 마그네슘 이온의 수화 삽입 및 결정수의 전하 가리움 효과(*screening effect*) 때문으로 이해할 수 있다. 고배율 투과 전자현미경을 이용해 수화 삽입된 Mg이온과 Mn이 혼합된 상태(*cation mixing*)로 전이금속 층에 존재하는 것을 확인했다 (그림 6(c), 6(d)). Mg 이온의 수화 삽입에 대한 유용성은 양자화학 계산을 기반으로 한 연구결과에서도 제시되었다. Xerogel- $\text{V}_2\text{O}_5$ 의 경우 [13] 결정수를 포함하고 있는 소재이며 물의 Activity에 따라 Mg이온이 수화된 채,  $\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{O})_x$  ( $x=0.5\sim 1$ )의 형태로 삽입되는 것이 열역학적으로 선호된다는 것을 밝힌 바 있다 (그림 6(e), 6(f)).

Mg이온에서와 마찬가지로 아연 이온( $\text{Zn}^{2+}$ ) 역시 수화 삽입 메커니즘을 통한 ARB 성능의 향상에 관한 연구가 수행되었다. L. F. Nazar 교수 연구팀에서 Bronze상  $\text{V}_2\text{O}_5$ 를 양극 소재로 활용해 Zn-ARB를 구성했다 [14]. 전이금속 층에 Zn이온과 결정수가 기둥(*pillar*) 역할을 하고 있기 때문에 가역적인  $\text{Zn}^{2+}$ 이온의 삽·탈리가 가능했으며 1C 조건(=1시간 충·방전)에서  $300 \text{ mAh/g}$ 의 고용량을 보였다. 뿐만 아니라, 1,000회 충·방전 이후에 초기 용



**그림 7** ▶ (a) Crystal structure of  $V_6O_{13}$  and its X-ray diffraction pattern. (b) Cyclic voltammograms, (c) galvanostatic charge/discharge profiles, and (d) cycle lives. Diffusion paths of Zn ion (e) with and (f) without water. Corresponding (g) cross section area of Zn ion and (h) calculated kinetic barrier with and without water. [Adv. Energy Mater., 2019, 9, 1900083].

량의 80%를 유지하는 것을 통해 Zn와 결정수의 기둥 역할이 중요한 역할을 하는 것을 보고

했다. 실시간 X선 회절 분석을 통해, Zn이온이 수화 탈·삽입 되는 메커니즘을 확인했다. 최장욱 교수 연구팀은 바나듐 산화물( $V_6O_{13}$ , 그림 7(a))이 Zn이온의 수화 탈·삽입이 가능한 소재임을 보고했다 [15]. 0.2 A/g에서 360 mAh/g의 고용량을 보였으며, 2,000회 충·방전 이후에도 초기 용량의 92%를 유지했다 (그림 7(b)-(d)). 특히, 양자화학 계산을 통해서 수화된 Zn 이온이 수화되지 않은 Zn이온보다  $V_6O_{13}$  격자 안에서 훨씬 더 넓은 확산 채널 넓이를 갖고 있음을 확인했고, 그에 따라 반응속도장벽(kinetic barrier, eV)가 크게 낮아지는 것(2.85 → 0.87 eV)을 확인했다 (그림 7(e)-(h)). 따라서,  $V_6O_{13}$ 의 고용량·장수명·고출력 특성이 Zn 이온의 수화 삽입에 기인함을 밝힐 수 있었다.

### 3. 맺음말

범-지구적인 에너지 생태계가 지속가능한 발전하기 위해서는 기존의 LIB보다 더욱 안전하고 가격 경쟁력이 우수한 에너지 저장 수단이 필요하다. 본 고를 통해 이와 같은 필요조건을 만족하는 새로운 에너지 저장 수단 중 하나인 ARB의 연구 동향을 살펴보았다. 물의 제한적인 전기화학 창 안에서 양·음극이 작동전압을 갖는 소재를 발굴하는 것이 무엇보다 중요할 것이다. 특히, LIB와 다르게 ARB는 인공적인 계면(artificial interface)를 형성하는 기작이



없기 때문에, 수계 전해질 안에서 안정한 계면을 형성할 수 있는 소재를 발굴해야할 것이다. 이와 같은 맥락에서 본 기고에서 소개한 수화물(hydrated compound) 전극 소재와 수화탈·삽입 메커니즘은 고성능 ARB를 구성하는

데 매우 유용한 소재 디자인 전략이 될 것이다. LIB보다 상대적으로 연구 태동기에 있는 ARB 연구에 본 기고에서 다룬 연구 결과들이 다른 연구자들에게 큰 도움이 되길 기대한다. 🌱

## 참/고/문/헌

- [1] J. Y. Luo, W. J. Cui, P. He, and Y. Y. Xia, *Nat. Chem.*, **2**, 760 (2010).  
DOI: 10.1038/NCHEM.763
- [2] H. J. Lee, J. Shin, and J. W. Choi, *Adv. Mater.*, **30**, 1705851 (2018).  
DOI: 10.1002/adma.201705851
- [3] H. M. Jeong, J. W. Lee, W. H. Shin, Y. J. Choi, H. J. Shin, J. K. Kang, and J. W. Choi, *Nano Lett.*, **11**, 2472 (2011).  
DOI: 10.1021/nl2009058
- [4] J. H. Lee, N. Park, B. G. Kim, D. S. Jung, K. Im, J. Hur, and J. W. Choi, *ACS Nano*, **7**, 9366 (2013).  
DOI: 10.1021/nn4040734
- [5] H. M. Jeong, K. M. Choi, T. Cheng, D. K. Lee, R. Zhou, I. W. Ock, D. J. Milliron, W. A. Goddard III, and J. K. Kang, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **112**, 7914 (2015).  
DOI: 10.1073/pnas.1503546112
- [6] M. Pasta, C. D. Wessells, N. Liu, J. Nelson, M. T. McDowell, R. A. Huggins, M. F. Toney, and Y. Cui, *Nature Commun.*, **5**, 3007 (2014).  
DOI: 10.1038/ncomms4007
- [7] B. G. Choi, M. Yang, W. H. Hong, J. W. Choi, and Y. S. Huh, *ACS Nano*, **6**, 4020 (2012).  
DOI: 10.1021/nn3003345
- [8] H. Bode, K. Dehmelt, and J. Witte, *Electrochim. Acta*, **11**, 1079 (1966).  
DOI: 10.1016/0013-4686(66)80045-2
- [9] J. H. Lee, H. J. Lee, S. Y. Lim, K. H. Chae, S. H. Park, K. Y. Chung, E. Deniz, and J. W. Choi, *Adv. Funct. Mater.*, **27**, 1605225 (2017).  
DOI: 10.1002/adfm.201605225
- [10] J. H. Lee, H. J. Lee, S. H. Choi, J. Shin, S. Y. Chung, and J. W. Choi, *Adv. Energy Mater.*, **8**, 1703572 (2018).  
DOI: 10.1002/aenm.201703572
- [11] H. J. Lee, J. H. Lee, and J. W. Choi, *ChemSusChem*, **13**, 6546 (2020).  
DOI: 10.1002/cssc.202002306
- [12] K. W. Nam, S. Kim, S. Lee, M. Salama, I. Shterenberg, Y. Gofar, J. S. Kim, E. Yang, C. S. Park, J. S. Kim, S. S. Lee, W. S. Chang, S. G. Doo, Y. N. Jo, Y. Jung, D. Aurbach, and J. W. Choi, *Nano Lett.*, **15**, 4071 (2015).  
DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b01109
- [13] G. S. Gautam, P. Canepa, W. D. Richards, R. Malik, and G. Ceder, *Nano Lett.*, **16**, 2426 (2016).  
DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b05273
- [14] D. Kundu, B. D. Adams, V. Duort, S. H. Vajargah, and L. F. Nazar, *Nat. Energy*, **1**, 16119 (2016).  
DOI: 10.1038/NENERGY.2016.119
- [15] J. Shin, D. S. Choi, H. J. Lee, Y. Jung, and J. W. Choi, *Adv. Energy Mater.*, **9**, 1900083 (2019).  
DOI: 10.1002/aenm.201900083

## 저/자/약/력

---



<b>성명</b>	이지훈	
<b>학력</b>	2011년	서울시립대학교 신소재공학과 공학사
	2013년	KAIST EEWS대학원 공학석사
	2017년	KAIST EEWS대학원 공학박사
<b>경력</b>	2017년	KAIST 응용과학연구소 박사 후 연구원
	2017년 ~ 2020년	컬럼비아대학교 화학공학과 박사 후 연구원
	2020년 ~ 현재	경북대학교 신소재공학부 조교수

---