

2 금속 불화물(metal fluoride) 나노복합체 기반의 고에너지밀도 리튬 이차전지 양극 소재 기술

글_천진녕 선임연구원 | 한국세라믹기술원 에너지환경본부

1. 서론

휴대용 전자기기의 대중화와 함께 전기자동차(xEV) 및 에너지 저장장치(energy storage system, ESS) 시장의 급격한 성장으로 현대 사회에서의 리튬 이차전지 수요는 빠른 속도로 증가하고 있다. 리튬 이차전지는 높은 에너지 밀도와 함께 메모리 효과(memory effect)가 없고 낮은 자가 방전(self-discharge) 특성을 바탕으로 미래 이차전지 산업에서 가장 높은 시장 점유율을 보일 것으로 전망된다. 그러나 모바일 기기에서 요구하는 전력 사용량 증가와 배터리의 소형화, 전기자동차의 주행거리 증가 등 주요 이슈에 대응하기 위해서는, 보다 높은 질량당/부피당 에너지밀도를 갖는 리튬 이차전지의 개발이 요구되고 있다.

리튬 이차전지에서의 전극 소재는 전지의

본질적인 용량을 좌우할 뿐만 아니라 제조 단계에서 가장 높은 비중을 차지하고 있어, 차세대 리튬 이차전지 개발에 있어 가장 핵심적인 요소로 고려되고 있다. 특히 현재 상용화되어 있는 양극소재(e.g. LCO, NCM 등)는 전지에 포함된 소재의 단계에서 약 40%의 높은 비중을 차지하면서도 단위 질량당 발현할 수 있는 용량은 음극(e.g., graphite, Si 등)에 비해 낮아, 향후 저가/고에너지밀도의 차세대 리튬 이차전지 구현은 새로운 양극 소재의 개발과 직결되어 있다고 볼 수 있다.

기존의 리튬 이차전지 전극 소재는 삽입(intercalation)/탈리(deintercalation) 반응을 기반으로 리튬 이온을 주고받으며 충방전이 진행되었는데, 안정적인 전지 구동과 긴 사이클 특성 구현 측면에서 장점이 있으나 전극 소재의 단위 분자당 이용 가능한 리튬 이온 수

가 제한적이어서 현대 산업에서 요구하는 에너지밀도 달성에는 명확한 한계를 보이고 있다. 이에 따라 최근에는 전환(conversion) 또는 합금(alloying) 반응을 통해 단위 분자당 다수의 리튬 이온을 주고받을 수 있는 전극 소재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이에 해당하는 대중적으로 가장 잘 알려진 소재로 음극으로는 실리콘(Si) 계열, 양극으로는 황(sulfur)을 들 수 있다.

금속 불화물(metal fluoride)은 전환 반응을 통해 리튬을 주고받으며 다른 금속 화합물 대비 높은 이론 작동전압을 바탕으로 고에너지밀도 양극재료의 활용이 기대되는 소재이다. 금속 불화물 소재를 리튬 이차전지에 효과적으로 적용하기 위해서는 본질적으로 낮은 전기전도도, 높은 전압 이력, 고전압에서의 활물질 용출 등 극복해야 할 장벽이 매우 높은 상황이지만, 이론적으로 리튬-황 전지 이상의 부피당 에너지밀도 구현이 가능한 특징을 가지고 있다 [1]. 이에 따라 일본의 NEDO(신에너지산업기술종합개발기구)에서는 전기차용 배터리 기술에 대한 향후 전망으로 전고체전지를 뒤이어 등장할 차세대 이차전지 중 하나로 conversion battery, 즉 금속 불화물의 전환 반응을 기반으로 한 리튬 이차전지를 소개하며 이에 대한 연구를 진행하고 있음을 공개하였다 (그림 1) [2]. 이에 본고에서는 이차전지 양극재로서 금속 불화물의 주요 특성을 소개하고, 금속 불화물 나노복합체 기반의 리튬 이차전지 개발에 대한 최근 연구동향을 살펴보고자 한다.

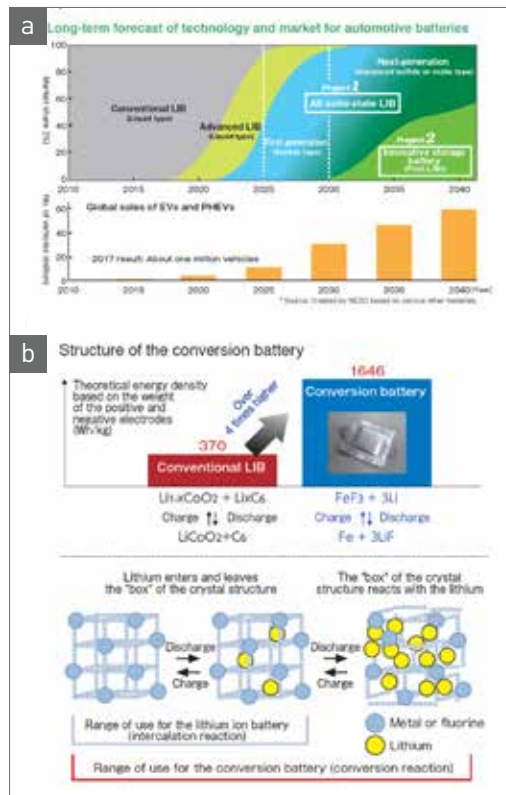


그림 1 ▶ (a) Long-term forecast of technology and market for automotive batteries and (b) structure of the metal fluoride-based conversion battery [2].

2. 금속 불화물 기반 리튬 이차전지 양극재의 주요 특성

금속 불화물은 금속과 불소 간의 강한 이온 결합 특성으로 인하여 리튬 이차전지 내에서 충방전 반응의 전압대가 높은 특징을 갖고 있다. 이에 따라 리튬과 전환 반응을 통해 충방전을 진행할 수 있는 다양한 금속 화합물(e.g., 산화물, 질화물, 황화물 등) 중에서, 양극으로 적용되어 높은 에너지밀도를 구현할 수 있는 소수의 후보군 중 하나이다. 금속 불화물

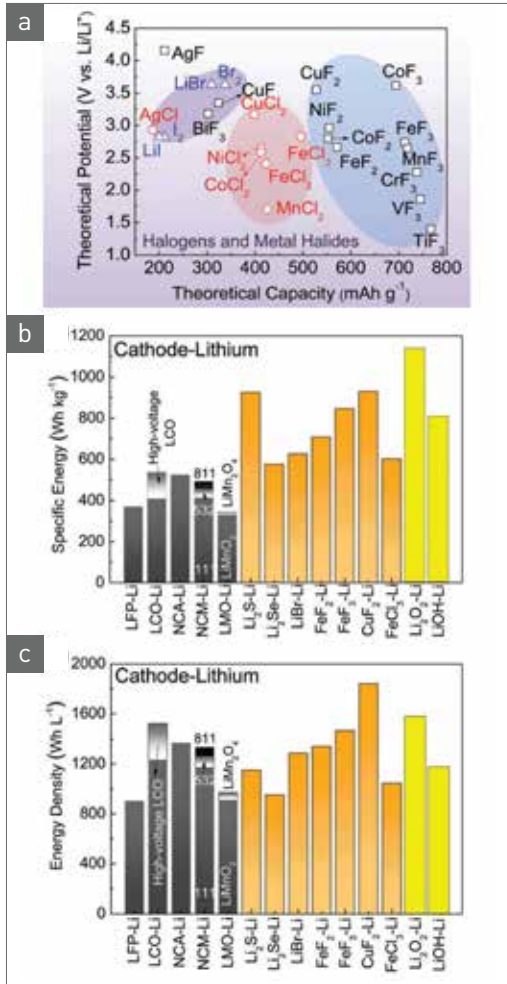


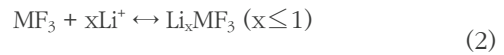
그림 2 ▶ (a) Theoretical gravimetric capacities and potentials of metal halides, (b) estimation of the specific energies, and (c) volumetric energy densities in rechargeable Li batteries achievable with lithium anodes, commercial cathodes, and selected conversion-type cathodes [1].

기반 양극재 중 가장 많이 연구되어온 FeF₃의 경우 2.74 V (vs Li/Li⁺)의 이론 작동전압을 나타내며, 이외에 CoF₃ (3.62 V), CuF₂ (3.55 V), NiF₂ (2.96 V), CoF₂ (2.80 V), FeF₂ (2.74 V) 등의 금속 불화물이 2.5 V 이상의 이론 작동전압을 나타낸다 (그림 2(a)) [3,4].

금속 불화물은 리튬 이차전지에 적용되었을 때 일반적으로 다음과 같은 전환 반응을 통해 용량을 발현하게 된다.



CuF₂, NiF₂, CoF₂와 같이 전이금속의 산화수가 +2인 불화물의 경우에는 전체 용량이 상기 전환 반응에 의해 발현된다. 한편 FeF₃와 같이 전이금속의 산화수가 +3인 불화물의 경우에는 삽입/탈리 반응과 전환 반응의 두 단계로 반응이 진행되며, 이론 용량에 가까운 용량 발현을 위해서는 전환 반응까지의 진행이 필수적으로 요구된다.



상기 전환 반응을 기반으로 한 금속 불화물의 이론 용량은 종류별로 FeF₃ (712 mAh g⁻¹), NiF₂ (554 mAh g⁻¹), CoF₂ (553 mAh g⁻¹), CuF₂ (528 mAh g⁻¹)을 나타내며, 상용화된 양극 소재 대비 2.5배 이상의 용량을 발현할 수 있는 가능성을 갖고 있다.

이러한 전환 반응 기반의 용량 발현 및 높은 이론 작동전압을 통해 금속 불화물은 높은 질량당 에너지밀도를 발현할 수 있다. 또한 주요 금속 불화물의 밀도는 FeF₃ (3.87 g cm⁻³), CuF₂ (4.23 g cm⁻³), NiF₂ (4.72 g cm⁻³)으로, 황 (2.07 g cm⁻³) 대비 2배 내외의 밀도를 나타내어 부피당 에너지밀도 측면에서도 장점을 갖

고 있다. 기존 문헌에서 리튬 금속 기반 전지에서 에너지밀도를 추정해 본 결과, 금속 불화물은 황에 근접한 질량당 에너지밀도를 보이면서 더 높은 부피당 에너지밀도의 발현이 가능함을 보여주고 있다 (그림 2(b), 2(c)) [1].

그러나 위와 같은 이론적인 장점에도 불구하고, 금속 불화물을 리튬 이차전지에 적용하여 의미있는 성능 구현을 위해서는 여러 문제점의 해결이 필요한 상황이다. 먼저 금속 불화물의 높은 이온 결합 특성은 작동 전압 상승의 효과를 가져오는 반면 소재의 전기전도도를 크게 낮추게 된다. 이러한 낮은 전기전도도 및 전환 반응 과정에서의 상변화 발생은 이론 전압 대비 큰 분극(polarization)을 야기하여 충방전의 효율을 떨어뜨리게 된다. 선행 연구결과를 살펴보면 작게는 0.5 V에서 크게는 2.0 V 이상의 높은 전압 이력이 발생함을 알 수 있다. 또한 전환 반응으로 형성된 전이금속 이, 충전을 통해 금속 불화물로 재전환되기 전에 고전압 영역에서 유기 전해질에 노출됨에 따라 용출 현상이 발생하면서 전극의 수명 특성을 크게 떨어뜨리게 된다. 한편, 전환 반응 과정에서 나타나는 물질의 부피 변화 또한 고려되어야 하는데, 비록 금속 불화물은 이론적으로 약 10~30% 수준의 부피 변화를 나타내며 황과 리튬과의 반응에서 나타나는 부피 변화(~80%) 보다는 작은 수치를 나타내지만, 전극의 안정성을 확보하기 위해서는 이와 같은 부피 변화를 완충할 수 있는 소재 또는 전극의 디자인이 필요하다 [1,4].

이러한 금속 불화물의 단점을 극복하기 위

한 소재 디자인 및 합성, 전해질 최적화, 다성분계 소재 조성 개발 등 다양한 접근 방향에서 연구가 진행되고 있으며 다음 장에서는 이와 관련된 주요 연구를 소개하고자 한다.

3. 금속 불화물 나노복합체 기반 리튬 이차전지 양극재의 연구 동향

3.1 금속 불화물 나노복합소재 합성 및 양극재 적용 연구

금속 불화물의 낮은 전기전도도 문제를 해결하기 위해서는, 리튬-황 전지의 경우와 유사하게 활물질의 나노화 및 전도성 소재와의 복합화 과정이 요구된다. 이에 따라 카본블랙, 탄소나노튜브, 그래핀, 메조포러스 카본 등의 전도성 탄소를 이용하여 금속 불화물을 나노복합화하는 연구가 다양하게 진행되어 왔다. 전도성 탄소와 금속 불화물 입자를 혼합한 후 밀링 처리를 하는 방식은 보편적으로 잘 알려진 복합소재 제조 방법이나 [5], 금속 불화물의 산화 방지를 위해서 비활성 기체 분위기 조성이 필요하며 소재의 정교한 구조 제어에 한계가 있다.

금속 전구체가 녹아있는 용액 내에 전도성 소재를 분산시킨 후 불산(HF) 용액을 첨가하는 방법 또한 비교적 간단하게 금속 불화물 나노복합체를 제조할 수 있는 공정으로 알려

져 있다 [6]. 그러나 고위험성의 불산 용액 사용, 반응 용액 자체에서의 금속 불화물 용해도로 인한 수율 감소, 수화물 제거를 위한 후처리 공정이 필요한 점 등이 고려되어야 한다. 금속 화합물 나노복합체를 먼저 합성한 뒤, F_2 (fluorine), NF_3 (nitrogen trifluoride) 등의 기체 분위기에서 열처리하는 방법은, 기존에 알려진 다양한 나노소재 합성법에 쉽게 접목시킬 수 있으며 수율 감소도 최소화할 수 있는 장점이 있다 [7]. 그러나 이 경우, 고위험성의 불소 기반 기체를 안전하게 다룰 수 있는 열처리 시설이 갖추어져 있어야 한다. 한편, 불산 용액의 사용을 대체하여 불소성분이 포함되어 있는 이온성 액체(ionic liquid)를 이용하는 방법과 [8], hexafluorosilicic acid 등을 이용하여 금속 불화물 전구체를 먼저 합성한 뒤 열분해시키는 방법 등이 개발되어 왔는데 [9], 고가의 전구체 비용 및 복잡한 제조 공정 등의 문제 해결이 여전히 필요한 상황이다.

최근에는 이러한 단점을 해결하기 위하여 불화암모늄(NH_4F)의 분해물을 이용한 기상 반응법이 개발된 바 있다 [10]. 금속 화합물 나노복합체를 먼저 제조한 뒤, 이를 불화암모늄과 물리적으로 혼합한 후 열처리하는 간단한 공정을 통해 금속 불화물 나노복합체를 제조하는 방식으로, 상대적으로 높은 안전성, 수율 감소 최소화, 공정의 높은 활용성, 미반응 불화암모늄의 수거 및 재사용 등의 다양한 장점을 갖고 있다. 특히 공기 중에서 쉽게 수화될 수 있는 CuF_2 , FeF_3 등의 금속 불화물을 무수물(anhydrous) 형태로 직접 전환이 가능한 특징이 있다.

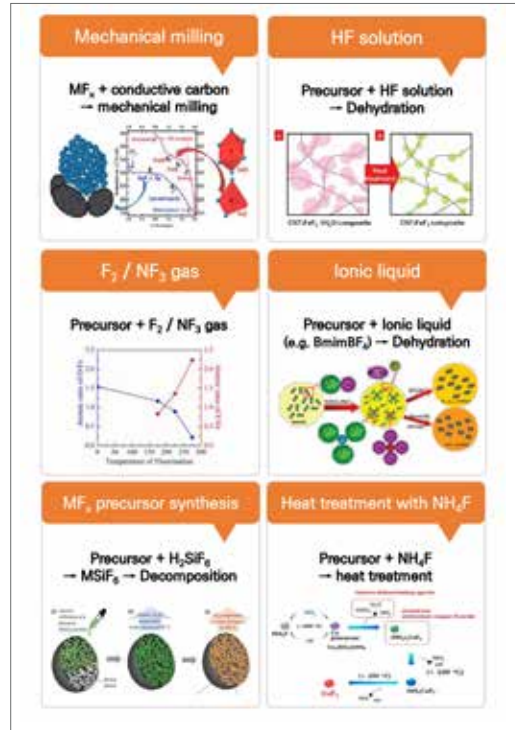


그림 3 ▶ Various synthetic methods for metal fluoride nano-composites.

상기 소개한 다양한 공정을 통해 금속 불화물 나노복합체를 제조한 후 이를 리튬 이차전지 양극재에 적용한 연구가 진행되어왔다. 본고에서는 수명 특성 향상과 관련된 일부 연구를 아래에 소개하고자 하며, 금속 불화물 나노복합체 종류 및 각각의 이차전지 성능에 대한 세부적인 내용은 기존 문헌을 통해 확인할 수 있다 [11].

전도성 탄소 구조체 내부에 나노미터 크기 단위의 금속 불화물이 담지되어 있는 형태는 활물질의 전기전도성 향상과 함께 충방전 과정에서 용출 현상을 감소시킬 수 있는 효과적인 구조라고 할 수 있다. 다공성 탄소 내에 전구체를 함침시킨 후 금속 불화물로 전환

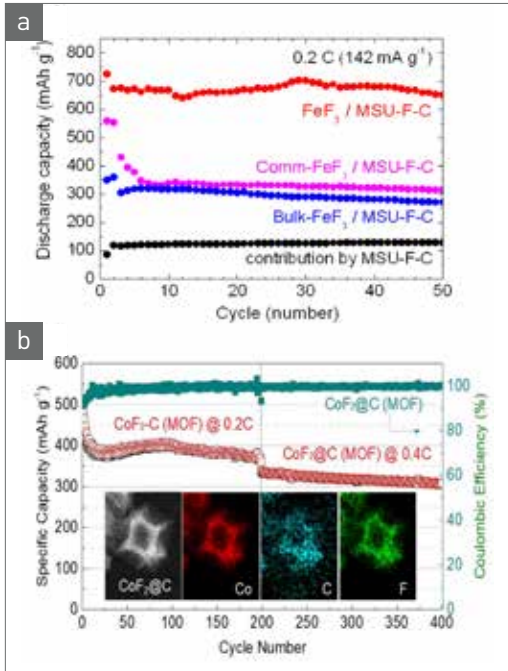


그림 4 ▶ Cycle properties of (a) FeF₃/mesoporous carbon [10] and (b) CoF₂/metal-organic framework-derived carbon nanocomposites [7].

시키는 방법을 통해 제조된 FeF_x 나노복합체는, 밀링을 통해 제조된 복합소재 대비 향상된 사이클 특성을 보여주었으며 [9], 50 사이클 이후에도 활물질 기준 650 mAh g⁻¹의 용량이 유지되는 결과도 보고되었다 (그림 4(a)) [10]. 한편, 탄소 전구체와 금속 산화물 전구체를 먼저 혼합한 후 탄화 및 NF₃ 분위기 열처리를 진행하는 방법을 통해 탄소 구조체 내에 금속 불화물 나노입자가 삽입되어있는 복합소재를 제조한 연구가 발표된 바 있으며 [7,12], CoF₂ 복합소재의 경우 활물질 기준으로 400 사이클 이후에도 300 mAh g⁻¹의 용량이 유지됨을 확인하였다 (그림 4(b)) [7]. 이 외에도 탄소나노튜브와의 복합체를 합성한 후, 원자층 증착법

(atomic layer deposition, ALD)을 통해 표면 코팅을 진행한 연구 등이 발표되었으며 [13], 향후 보다 향상된 양극재 성능 구현을 위한 다양한 소재 개발 연구가 지속될 것으로 예상된다.

3.2 전해질 최적화를 통한 금속불화물 나노복합체의 수명 특성 개선

금속 불화물 양극재의 수명 특성을 향상시키기 위해서는 충방전 과정에서의 전이금속 이온 용출을 최소화할 수 있는 기술의 개발이 무엇보다 중요하며, 이는 전극 소재의 디자인 뿐만 아니라 전해질 측면으로도 접근이 필요하다. 리튬 이차전지에 사용되는 전해질은 양극 표면에서의 cathode solid electrolyte interphase (CEI) 형성 및 금속 이온의 용출 정도에 영향을 미치기 때문에, 최적의 전해질 개발은 금속 불화물 기반 리튬 이차전지 구현에 있어 매우 중요한 요소라고 할 수 있다.

FeF₂ 나노복합체를 양극으로 적용한 리튬 이차전지에서 전해질을 구성하는 리튬염의 종류(LiPF₆, LiTFSI, LiFSI) 및 농도 (1~3 M), 유기 용매의 종류별(FEC-EMC, DME) 전기 화학 특성을 분석한 최근 연구 결과에 따르면, carbonate계 용매인 FEC (fluoroethylene carbonate)-EMC (ethyl methyl carbonate) 사용 시에는 LiTFSI (lithium trifluoro-sulfonamide)염을 사용했을 때 가장 고른 CEI 형성을 통해 안정적인 성능을 나타낸 반면, ether계 용매인 DME (dimethyl ether)를 사용했을 경우에는 LiFSI (lithium fluorosulfonamide)염을 조합했을 때 최적의 성능을 보였다. 용매의

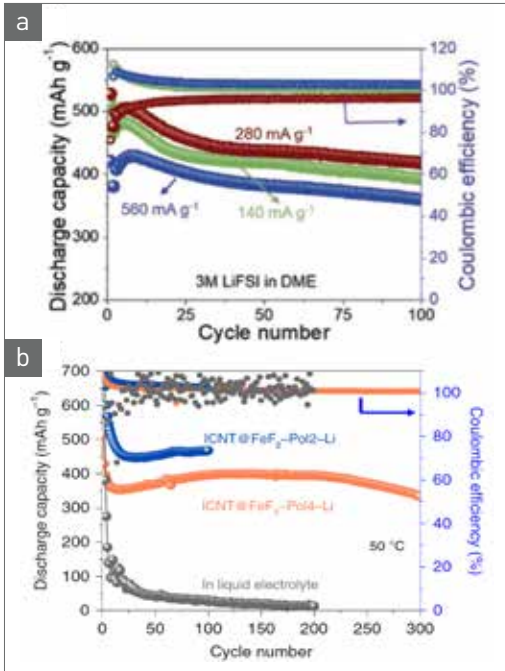


그림 5 ▶ Discharge capacities and coulombic efficiency of FeF_2 cathodes cycled in (a) 3 M LiFSI in DME [14] and (b) solid polymer electrolyte [15].

종류에 따라 리튬염의 최적화 농도도 변화함이 관찰되었으며, 3 M LiFSI가 DME에 녹아있는 전해질을 사용했을 때 100 사이클 후에도 80% 이상의 용량 유지율을 통해 400 mAh g^{-1} 이상의 용량 발현이 보고되었다 (그림 5(a)) [14].

일반적으로 사용되는 유기 전해질을 고체 고분자 전해질(solid polymer electrolyte)로 대체한 연구에서도, FeF_2 나노복합체 기반 양극재의 수명이 큰 폭으로 향상되어 50°C 의 온도에서 50 mA g^{-1} 속도로 300 사이클이 진행된 후에도 400 mAh g^{-1} 에 가까운 용량이 유지됨을 확인하였다 (그림 5(b)) [15]. 상기 소개한 두 연구는 전해질 최적화에 초점을 맞추어 진행되면서, 전극에서의 FeF_2 활물질 비율은

40 wt% 이하로 낮은 한계점을 나타내어, 소재 개발과의 접목을 통해 높은 활물질 비율에서도 장수명 특성을 구현할 수 있는 후속 연구의 진행이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 다성분계 및 신규 금속 불화물 조성 연구

전환 반응을 기반으로 하는 활물질의 경우, 방전 반응이 진행됨에 따라 금속 입자가 점차 형성되면서, 소재의 종류에 따라서 자체적으로 전기전도도 및 전환 반응 효율성이 향상될 수 있음이 보고된 바 있다 [16]. 이러한 원리를 활용하여 반응 전압대가 다른 이중의 금속 불화물로 구성된 양극재를 활용할 경우, 고전압대에서 전환 반응이 먼저 진행되어 형성된 금속 입자의 영향으로, 그보다 낮은 전압대에서 전환 반응이 진행되는 이중 금속 불화물의 전압 이력 감소 및 용량 향상 효과를 가져올 수 있을 것으로 예상된다. CuF_2 와 FeF_2 의 밀링을 통해 제조한 고용체 형태의 $\text{Cu}_y\text{Fe}_{1-y}\text{F}_2$ 를 양극재로 적용한 연구에서, 각각의 물질을 단순히 혼합한 소재 대비 전압 이력이 크게 감소한

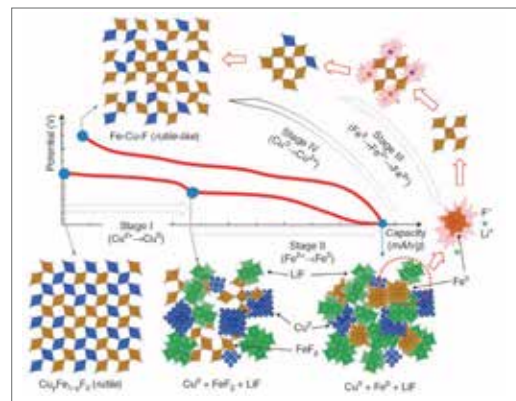


그림 6 ▶ Schematic illustration of the asymmetric reaction pathway in $\text{Cu}_y\text{Fe}_{1-y}\text{F}_2$ [5].

결과가 보고된 바 있다 [5]. 이때 충전 과정에서의 CuF_2 분극 감소는, CuF_2 와 FeF_2 결정구조의 유사성으로 FeF_2 표면에서의 CuF_2 재전환 반응에 필요한 에너지가 감소하기 때문으로 해석하고 있다 (그림 6).

삽입-전환 반응의 다단계로 충방전이 진행되는 FeF_3 의 경우, 불소 이온 일부를 산소로 치환하게 되면 삽입-전환 반응 사이에서 중간상(intermediate phase)을 형성하는 반응이 추가적으로 진행되면서, 충방전 반응의 가역성이 크게 향상되고 전압 이력은 감소하는 연구 결과가 발표된 바 있다 [17]. 이 연구에서 사용한 $\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{OF}$ 조성의 소재는 0.5 A g^{-1} 의 전류 밀도에서 1,000 사이클 이후에도 350 mAh g^{-1} 의 용량을 안정적으로 발현하였으며, FeF_3 및 FeOF 조성 대비 향상된 이차전지 특성을 나타내었다.

한편 금속 불화물 중 이론적으로 가장 높은 에너지밀도를 나타내지만 공기 중에서 불안정하고 합성이 제한적인 CoF_3 소재를 연구하기 위한 우회적 방안으로, NaCoF_3 나노복합체를 개발하고 이에 대한 전기화학 특성을 분석한 연구가 보고된 바 있다. NaCoF_3 는 소듐 이온의 가역적인 탈리가 가능한 NaFeF_3 와 유사한 결정 구조를 나타내면서, 공기 중에서 안정하고 합성이 용이한 다성분계 금속 불화물이다. 따라서 나노복합체 합성을 통한 이차전지 특성 향상 및 전지 내에서의 전기화학적 소듐 이온 탈리를 통한 CoF_3 의 활용 가능성 확인 목적의 연구가 진행되었다. 그러나 4.5 V 이상의 고전압 인가에도 코발트의 산화수 변화는

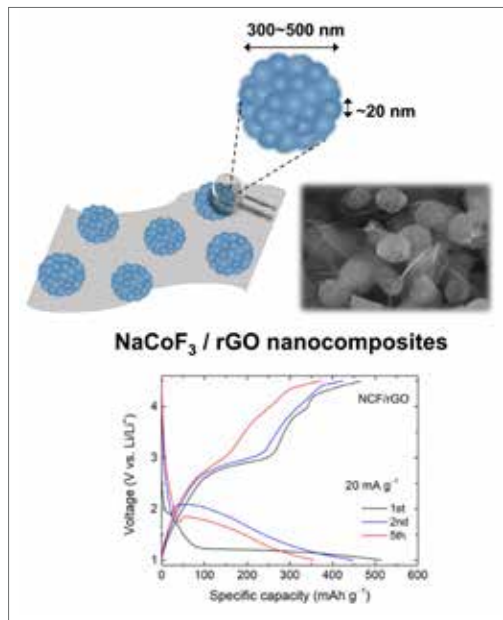


그림 7 ▶ Schematic of the NaCoF_3 nanocomposites and their electrochemical performance [18].

나타나지 않고 전압을 낮출 경우에는 CoF_2 와 유사한 전환 반응이 관찰되어 [18], 예상되었던 소재의 장점을 활용하기 위해서는 일반 유기 전해질이 아닌 고전압 영역에서 안정적인 특성을 갖는 전해질을 적용한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 맺음말

지금까지 금속 불화물 나노복합체 기반의 리튬 이차전지 양극재에 대한 연구 동향을 간략하게 살펴보았다. 금속 불화물은 높은 질량당/부피당 에너지밀도를 바탕으로 차세대 리튬 이차전지용 양극재로의 활용이 기대되고 있

으며, 소재의 본질적인 특성 및 전기화학적 전환 반응에 따른 성능 저하 문제를 해결하기 위한 여러 연구가 진행되고 있다. 본 고에서는 나노복합소재 디자인 및 합성, 전해질 최적화, 신규 금속 불화물 조성 개발로 주제를 나누어 연구 동향을 소개하였는데, 향후 상용화에 근접한 주요 특성을 갖는 금속 불화물 기반 양극재 개발을 위해서는 상기 소개된 기술들이 중

합적으로 연계되어야 할 것으로 판단된다. 그리고 현재 활발히 연구되고 있는 리튬-황, 리튬-공기, 고체전해질 기반 전지 등에서 개발되고 있는 요소를 효과적으로 접목한다면, 보다 빠른 시간 내에 리튬 이차전지용 금속 불화물 양극재 기술의 향상이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다. 🌐

참/고/문/헌

- [1] F. Wu and G. Yushin, *Energy Environ. Sci.*, 10, 435 (2017).
- [2] Focus NEDO, No. 69 (NEDO, 2018), pp. 8-15.
- [3] H. Li, G. Richter, and J. Maier, *Adv. Mater.*, 15, 736 (2003).
- [4] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, and G. Yushin, *Mater. Today*, 18, 252 (2015).
- [5] F. Wang, S. W. Kim, D. W. Seo, K. Kang, L. Wang, D. Su, J. J. Vajo, J. Wang, and J. Graetz, *Nat. Commun.*, 6, 6668 (2015).
- [6] S. W. Kim, D. W. Seo, H. Gwon, J. Kim, and K. Kang, *Adv. Mater.*, 22, 5260 (2010).
- [7] F. Wu, V. Srot, S. Chen, M. Zhang, P. A. Aken, Y. Wang, J. Maier, and Y. Yu, *ACS Nano*, 15, 1509 (2021).
- [8] C. Li, X. Mu, P. A. Aken, and J. Maier, *Adv. Energy Mater.*, 3, 113 (2013).
- [9] W. Gu, A. Magasinski, B. Zdyrko, and G. Yushin, *Adv. Energy Mater.*, 5, 1401148 (2015).
- [10] J. Chun, C. Jo, S. Sahgong, M. G. Kim, E. Lim, D. H. Kim, J. Hwang, E. Kang, K. A. Ryu, Y. S. Jung, Y. Kim, and J. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 35180 (2016).
- [11] N. Zhang, X. Xiao, and H. Pang, *Nanoscale Horiz.*, 4, 99 (2019).
- [12] F. Wu, W. Srot, S. Chen, S. Lorget, P. A. Aken, J. Maier, and Y. Yu, *Adv. Mater.*, 31, 1905146 (2019).
- [13] E. Zhao, O. Borodin, X. Gao, D. Lei, Y. Xiao, X. Ren, W. Fu, A. Magasinski, K. Turcheniuk, G. Yushin, *Adv. Energy Mater.*, 8, 1800721 (2018).
- [14] Q. Huang, K. Turcheniuk, X. Ren, A. Magasinski, D. Gordon, N. Bensalah, and G. Yushin, *Adv. Energy Mater.*, 9, 1803323 (2019).
- [15] Q. Huang, K. Turcheniuk, X. Ren, A. Magasinski, A. Y. Song, Y. Xiao, D. Kim, and G. Yushin, *Nat. Mater.*, 18, 1343 (2019).
- [16] N. Dudney and J. Li, *Science*, 347, 131 (2015).
- [17] X. Fan, E. Hu, X. Ji, Y. Zhu, F. Han, S. Hwang, J. Liu, S. Bak, Z. Ma, T. Gao, S. C. Liou, J. Bai, X. Q. Yang, Y. Mo, K. Xu, D. Su, and C. Wang, *Nat. Commun.*, 9, 2324 (2018).
- [18] J. Oh, J. Jang, E. Lim, C. Jo, and J. Chun, *Materials*, 14, 547 (2021).

저/자/약/력



성명	천진녕	
학력	2007년	서울대학교 화학생물공학부 공학사
	2015년	포항공과대학교 화학공학과 공학박사
경력	2015년 ~ 2016년	포항공과대학교 화학공학과 박사 후 연구원
	2016년 ~ 현재	한국세라믹기술원 선임연구원
