

리튬이온 이차전지의 전극소재 분석기술

글 _ 정경윤, 박남신, 장원영, 김창삼
한국과학기술연구원

1. 서론

최근에 국가적으로 반도체와 LCD 분야의 뒤를 이을 제3의 범국가적 기술육성분야로서 이차전지기술이 급격히 부상되고 있다. 그리고 전세계의 주요 자동차 메이커들은 향후 1~2년 이내에 이차전지가 장착된 전기자동차의 신제품 발표를 준비하고 있다. 이와 같은 분위기 속에서 최근에 전기화학 및 세라믹 관련 기술자들도 이차전지 기술분야에 많은 관심을 가지면서 향후 좀더 기초적이고 핵심적인 분야에 대한 연구개발 경쟁이 한층 심화될 것으로 예측되고 있다.

이차전지 분야에서 향후 핵심적이고 기초적인 소재 분야의 연구 개발 경쟁이 확대되면서 그에 따른 물리 화학적 소재 분석기술이 더욱 활발히 도입되고, 좀더 세분화되어 활용될 것으로 예상하고 있다. 이러한 흐름에서 향후 많은 활용이 예상되는 이차전지 핵심소재 분석의 주요 기술로서는 방사광 가속기를 이용한 전극 활물질의 연구개발과 핵자기 공명(NMR) 원리를 이용한 리튬이온의 동역학 연구, 그리고 전자 현미경을 활용한 소재의 미세 표면 분석 기술 등이 있으며, 본 기고문에서는 이와 같은 3가지 분석기술에 대하여 이차전지 전극소재 개발에 적용되는 사례 및 특성들을 간단히 기술하였다.

2. 방사광 가속기를 기반으로 한 이차전지 전극 소재의 in situ 분석기술

이차전지의 4대 핵심소재는 양극소재, 음극소재, 전해질, 분리막으로 나누어지며, 이중 특히 전기화학 반응에 실제로 참여하며 전지의 성능에 가장 큰 영향을 주는 것

은 양극소재와 음극소재이다. 따라서 이들 양극 및 음극 소재의 반응 거동 및 열화 메커니즘에 대한 이해는 매우 중요하며 이를 바탕으로 기존 소재의 개선 및 새로운 소재에 대한 연구가 가능해진다.

이러한 반응 거동 및 열화 메커니즘을 이해를 위해서는 전극 소재에 대한 이해가 매우 중요하다. 이를 이해하기 위해서는 다양한 분석 기술이 도입되어야 한다. 그러나 기존의 분석 기술들은 대부분 이차전지에 대한 충방전 및 기타 전기화학 반응을 진행시킨 후, 이를 멈추고 분석하고자 하는 대상을 분리해내서, 즉 전지를 분해하여 양극 및 음극 소재를 회수하여 실험을 진행하는 ex situ 분석법이 주를 이루고 있다. 그러나 이러한 ex situ 분석은 전극 소재가 실제로 전기화학 반응 중에 있을 때의 상황을 직접적으로 보여주지는 못하고, 이들의 반응이 종료된 후 간접적으로 상황을 나타내어 준다. 따라서 실제 전기화학 반응 중의 전극소재의 실제 상황을 직접적으로 파악하기 위해서는 in situ 기법의 적용이 필수적이다.

이러한 in situ 분석 기법의 한가지로 많이 사용되고 있는 것이 방사광 가속기 기반 X-선을 활용한 분석법이다. 방사광 가속기 기반 in situ X-선 기법은 미국 Brookhaven National Lab.의 James McBreen 박사 그룹에서 처음으로 적용을 하였다.¹⁾ 초기에는 주로 방사광 가속기를 기반으로 한 in situ X-선 near edge 흡수 분광법 (in situ time-resolved x-ray absorption near edge structure spectroscopy)을 이용하여 Ni-Cd 혹은 Ni-MH 이차전지의 전극 소재 특성에 대한 연구가 주로 진행되다 XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) 및 EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure)를 포함한 in situ XAS (X-ray absorption spectroscopy)로 확대가 되었



으며,²⁾ 이후 in situ XRD (X-ray diffraction)³⁾ 및 time resolved XRD 등의 기법이 개발되었다.

이러한 in situ X-선 기법들은 in situ 기법의 특성상 작동하고 있는 이차전지를 X-선이 투과하여 X-선 신호를 측정하여야 하기 때문에 coin cell 등에 변형을 가하여 X-선이 투과하며 전기화학반응이 진행될 수 있는 cell을 고안하여 사용하며, 또한 강력한 X-선을 사용하여야 하기 때문에 실험실용 X-선 장비로도 실험은 가능하나 양질의 data를 획득하기 위해서는 가속기를 활용하는 것이 유용하다. Fig. 1은 현재 포항가속기 연구소의 10B KIST-PAL 빔라인에 설치되어있는 in situ XRD 장치의 사진이다.

각각의 기법을 이용하여 분석할 수 있는 내용은 다음과 같다.

- In Situ X-ray Absorption Spectroscopy (In Situ X선 흡수분광법)
 - 특정이온의 산화가
 - Site symmetry
 - Covalent bond strength
 - 원자간 거리
 - 배위수
 - Debye-Waller factor 등
- In Situ X-ray Diffraction (In Situ X선 회절법)



Fig. 1. Images of in situ XRD (10B KIST-PAL) in POSTECH, Korea.

- 충방전 과정중의 구조변화 양상
- 격자상수
- Unit cell 부피
- 기타 XRD를 이용하여 분석할 수 있는 내용들을 충방전 과정중 분석 가능
- Time-resolved X-ray Diffraction (시간 분해능 X선 회절법)
 - 온도 상승에 따른 구조변화 양상 (상온~1000°C)
 - 충전 깊이별 시료 준비에 따른 충전 깊이에 따른 전극 소재의 안전성
 - 전극 소재의 합성 과정중 구조변화 양상, 등

상기 기법 이외에도 방사광 가속기를 활용한 다양한 in situ 분석 기법이 개발되고 있으며, 이러한 기법을 활용하여 전극 소재의 반응 및 열화 거동에 대한 이해가 증대될 수 있으리라 기대된다.

3. 리튬이온 이차전지 전극소재의 NMR 분석 기술

정보통신기술의 급격한 발전에 따른 전력 수요의 급격한 확대 및 화석연료 고갈에 대비한 대체에너지와 신재생 에너지 개발을 위하여 고효율의 차세대 에너지 연구 개발이 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 또한 최근 mobile 통신기기와 laptop 컴퓨터 전원, 그리고 전기 자동차용으로 고용량, 고출력 전원으로 리튬이온이차전지의 수요가 늘어나고 있으면 획기적인 진화가 요구되고 있다⁹⁾.

이렇게 관심을 모으고 있는 리튬이온이차전지 활물질의 연구개발에는 리튬이온의 위치 및 리튬이온 이동 채널에 대한 연구가 매우 중요한 역할을 차지하고 있다. 특히 양극활물질에서 리튬이온과 전이금속산화물과의 결합구조설계 및 구조 동역학 연구에 있어서 핵자기공명(NMR, Nuclear Magnetic Resonance) 분석 기술의 활용이 새롭게 관심을 모으고 있다. 리튬이온이차전지의 활물질 개발에는 고체 NMR 분석기술이 많이 적용되며 고체 NMR 분석은 액체 NMR 분석과는 다르게 측정 신호

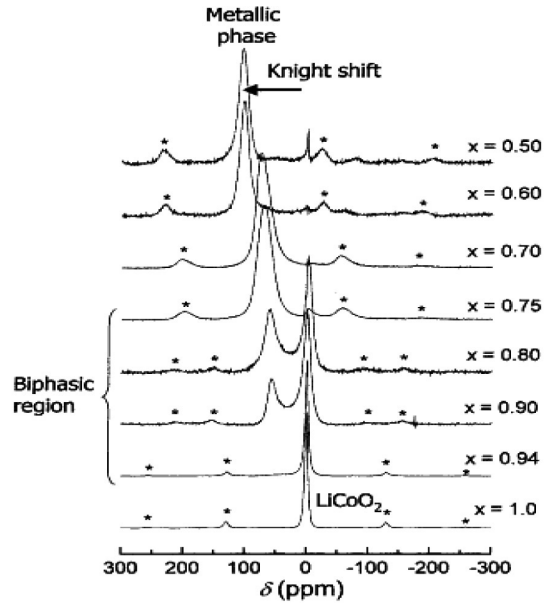


Fig. 2. ⁷Li MAS NMR spectra for Li_xCoO₂ (asterisks indicate spinning sidebands). The spikes at 0 ppm seen in the spectra of x = 0.05 and 0.6 are artifacts. The LiCoO₂ local environment and resonance due to the metallic phase are marked.

가 비교적 매우 넓은 spectrum 폭을 가지고 있다. 따라서 먼저 다양한 리튬 전이금속산화물에서 ⁷Li, ⁶Li 핵에 대한 NMR 신호를 얻고, 이 신호의 미세한 차이에 대하여 주변 물질과의 상호 작용을 해석하면서 최적의 리튬이온 이차전지의 활물질 구조연구를 수행하게 된다. Fig. 2는 Li_xCoO₂의 양극활물질에서 얻은 ⁷Li MAS NMR 신호로서 Li 양에 따른 NMR 신호 위치의 미세한 변화를 보여 주고 있다⁹⁾. Li_xCoO₂ 양극 활물질에서는 일반적으로 리튬이온의 약 50% 전후까지만 전지의 충방전에 활용하고 나머지는 활물질의 구조유지를 위하여 삽입 탈리하지 않는다. 최적의 구조설계를 통하여 리튬이온의 활용도를 높일 수 있다면 리튬이온이차전지의 용량을 상당량 개선시킬 수 있는 것이다.

고체 분말의 Li NMR 분석에 있어서 ⁷Li 및 ⁶Li의 핵자기공명에는 핵스핀이 1 이상(⁶Li, I = 1; ⁷Li, I = 3/2)에서 형성되는 사중극 작용(quadrupolar interaction)이 발생하여 측정되는 신호가 매우 복잡하게 된다. 또한 리튬 전이금속산화물의 활물질에는 여러 종류의 상자성을 갖

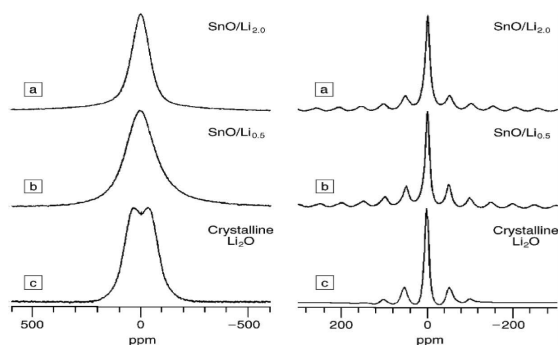


Fig. 3. ${}^7\text{Li}$ NMR spectra, (a) $\text{SnO}/\text{Li}_{2.0}$, (b) $\text{SnO}/\text{Li}_{0.5}$, (c) Crystalline Li_2O ; left side, wide-line spectra; right side, high-resolution MAS spectra.

는 paramagnetic 물질들이 함유되어 있어서 Li 핵의 자기공명을 방해하여 NMR 신호대역을 넓게 하는 문제점을 가지고 있다. 특히 paramagnetic 물질인 Fe, Mn 등은 짝을 이루지 못한 외각 전자들을 가지고 있어서 Li 핵의 핵자기공명 자극을 방해하며, Li NMR 신호를 매우 넓고 복잡하게 확장시켜서 신호해석을 힘들게 하는 문제점을 가지고 있다. 고체 NMR 분석에 있어서 측정 신호의 복잡성을 보완하기 위한 기법으로서 고체 분말 시료를 일정 각도($\theta=54.74^\circ\text{C}$)를 가지고 고속으로 회전시키며 자기공명 신호를 측정하는 방법인 MAS (magic angle spinning) 기법을 적용하게 된다. 고체 분말의 NMR 분석에 있어서 Fig. 3과 같이 고속의 MAS 기법을 적용하면 비교적 넓은 측정신호에서 필요한 부분의 분별력을 향상시킬 수 있는 고분해능 신호를 얻을 수 있다⁷⁾.

NMR 신호는 리튬이온의 mobility, 전기 전도도, 산화 환원 반응에 관여하는 양이온의 전자분포 변화 등 리튬이온이차전지의 작동 효율에 직접적으로 관계되는 물리적 인자들에 매우 민감한 특성을 가지고 있다. 또한 NMR 신호 분석은 특히 고체 화합물의 국부적 위치에서의 작은 변화를 측정하는데 매우 유용한 장점을 가지고 있다. 그러나 고체 NMR 분석기술은 다양한 핵종에 대한 NMR 신호 측정 및 해석에 비교적 긴 기간의 경험이 요구되고, 액체 NMR에 비해 장비의 자동화가 어려운 문제점 등에 의해서 활용이 크게 확대되지 못하고 있는 것이 현실이다. 향후 리튬이온이차전지의 실용화 기술개

발에 있어서 좀더 핵심적인 기반 기술의 연구개발이 요구되고, 특히 새로운 구조의 리튬이온 활물질 및 음극 활물질 그리고 전해질 및 SEI(solid electrolyte interphase)의 연구개발에 고체 NMR 분석 기술이 크게 기여할 것으로 기대되고 있다.

4. 전자현미경을 이용한 이차전지 분석기술

재료의 여러 성질들은 미세구조, 즉 원자의 종류와 위치에 큰 영향을 받는다. 특히 나노규모의 시스템에 있어서 하나의 원자가 추가되거나 제거되더라도 재료의 전자, 기계, 광학, 열 및 자기적 특성 등에 크게 영향을 미칠 수 있고 이러한 개별 원자들의 움직임을 관찰하여 원자의 구성이 어떻게 진화하여 시스템의 특성에 영향을 미치는지를 알아내는 것은 매우 중요하다.

최근 이차전지관련 기술 개발에 있어 전지의 성능 향상을 위해 전극 활물질의 나노 입자화 및 조밀화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 잘 알려진 것처럼 활물질의 나노화는 마이크로 크기의 입자에 비해 활물질내에 상대적으로 균일한 전기장을 유도하여 표면 반응의 국부적 치우침 현상 없이 안정적인 반응을 가져오고, 전극내의 이온 확산거리 감소 및 활물질 계면의 표면적 증가로 인해 반응속도를 향상시키며, 또한 단위면적당 부피변화 감소로 인해 장수명 특성의 향상을 가져오는 등 많은 장점이 있다. 반면, 입자 크기 감소에 따른 계면 표면적 증가로 반응 초기에 전해질과 활물질 표면의 반응으로 인해 형성되는 SEI(Solid Electrolyte Interface) film의 양이 증가하여 초기효율의 감소를 야기하기도 한다. 고성능 리튬 이차전지용 전극소재의 개발을 위해서는 이러한 복합적인 양상을 보이는 나노 영역에서의 구조와 거동 및 성능 특성을 이해할 수 있어야 하고 이를 위해서는 X선 회절법 등과 같은 기존의 전통적인 벌크 분석 테크닉 이외에 나노, 원자 레벨에서의 재료구조 해석이 가능한 전자현미경을 이용한 분석법이 필수적으로 보인다.

전자현미경을 활용하여 리튬 이차전지 전극소재의 미세적 구조와 기능을 해석하는 연구는 오래전부터 국내외적으로 꾸준히 진행되어 왔다. 일례로 올리빈 구조의 리

튴 전이금속 인산화물에서의 안티사이트 결함을 고각환 상암시야 주사투과전자현미경(HAADF-STEM)을 이용하여 결함의 경향성뿐만 아니라 재료 격자들에서의 결함의 분포와 존재성을 직접적으로 관찰한 사례가 국내에서 발표되었다⁸⁾. 또한 일본 산업기술종합연구소(AIST)에서는 최근 대용량 신 양극소재로서 기대되고 있는 철함유 리튬망간 산화물을 주사투과전자현미경(STEM)과 전자 에너지손실분광법(EELS)를 조합한 스펙트럼 이미징 기법을 이용하여 그 미세구조와 리튬이온의 거동을 관찰한 결과를 소개하였다⁹⁾.

한편 전자현미경을 활용하여 나노, 원자 레벨의 미세 구조, 전자상태의 해석으로부터 실제 전지의 성능까지 연관시키는 연구에 있어서 최근 국내외적으로 가장 관심을 받고 있는 분야 중 하나로 in-situ TEM 분석기술의 개발을 꼽을 수 있다. 어떠한 정해진 상태에서의 특성만을 관찰할 수 있는 기존의 일반적인 TEM과는 달리 in-situ TEM 기법은 어떠한 프로세스가 진행되는 일련의 과정을 실시간으로 TEM을 이용하여 관찰하는 것으로 나노구조체의 성장^{10,11)}, catalytic system에서의 solid-gas 반응¹²⁾, 재료의 변형 및 파괴^{13,14)}, solution으로부터의 입자 핵 생성 및 성장거동 관찰¹⁵⁾ 등 이미 다양한 분야에서 그 활용성을 인정받고 있다. 최근 몇 년 사이 in-situ TEM 분석기법은 눈에 띄는 발전을 거듭하였는데 이처럼 보다 실제에 가까운 환경에서의 in-situ 관찰이 가능하게 된 주된 요인으로 환경제어적 TEM(environmental TEM)의 개발¹⁶⁾ 및 전자현미경 시료 제작기술의 진전으로 압축해 볼 수 있다. 환경제어형 TEM의 개발로 시료의 사용환경이나 제조환경에 가까운 환경(가스, 고온 등)을 전자현미경 내에서 만들어 내어 그 환경변화에 동반한 원자나 전자의 구조변화를 관측·해석하는 것이 가능하게 되었고, 집속 이온 빔(FIB) 가공장치를 이용하여 시료를 관측하면서 임의의 위치에서의 미세가공이 가능하게 되었다.

전자빔을 광원으로 이용하는 전자현미경의 특성상 내부가 고진공상태로 유지되고 또 리튬 배터리에 사용되는 liquid 상태의 전해질을 evaporation없이 유지시켜야 하는 등의 기술적 난제들로 인하여 in-situ TEM 기법은 과거

전기화학 분야에서는 그 활용도가 여타 분야에 비해 그리 많지 않았으나, 최근 들어 Oak Ridge National Lab.(ORNL), Sandia National Lab.(SNL), Pacific Northwest National Lab(PNNL), Brookhaven National Lab(BNL) 등을 중심으로 in-situ TEM 분석기술을 활용한 연구결과들이 본격적으로 보고되기 시작하였다¹⁷⁻²²⁾. 발표된 in-situ TEM 기법으로는 크게 열 및 전기화학적 in-situ 기법 두 가지로 압축할 수 있다. 우선 열적 in-situ TEM 기법은 말 그대로 온도를 올리며 형상 변화를 관찰하는 분석기술로서 일례로 리튬 전이금속 인산화물의 결정화 과정에서의 다중상변이 현상에 대해 작년 국내에서 발표되었으며¹⁸⁾, 올 가을 3rd ABAA 미팅¹⁹⁾과 미국 DOE 2010 annual merit review²¹⁾에서는 충상구조를 가지는 NCA계 충전양극의 열적 안정성 규명과 관련, 열적 in-situ TEM 기법을 이용하여 열처리 과정 중의 상변화 양상을 분석한 결과가 미국 BNL 연구진에 의해서 발표되기도 하였다. 전기화학적 in-situ 기법은 말 그대로 전기화학 반응이 일어나는 상태에서 실시간으로 측정 장비와 연결하여 데이터를 얻는 것으로 이를 이용하면 시스템에서의 전기화학 반응의 가장 기본적인 메커니즘을 쉽게 이해할 수 있는 단서를 제공하고 또 반응의 부산물 등을 측정하여 시스템의 안정성 등을 평가할 수 있다. 국내에서는 아직 이러한 전기화학적 in-situ TEM 분석에 관한 연구는 보고되지 않은 것으로 확인되나 국외의 경우 SNL과 PNNL 등에서 최근 ionic-liquid 기반의 고체전해질을 사용하여 전극/전해질 계면반응 및 전극내 구조변화를 전기화학적 in-situ TEM 기법을 이용하여 규명하고자 시도하였다^{21,22)}. 그러나, 실제 대다수 이차전지 시스템에서는 비수계 액체전해질이 사용되고 이러한 전극/전해질 계면에서 일어나는 solid-liquid interaction을 전기화학 반응 중 실시간으로 분석하기 위해서는 아직 기술적으로 해결되어야 할 난제들이 많아 아직은 개발 초기 단계에 있는 실정이다.

요약컨대, 전자현미경을 이용한 이차전지 소재의 합성 과정 또는 충방전 과정중에서의 실시간 분석 기술의 개발은 이차전지 전극소재의 반응 및 열화 메커니즘, 또한 안전성 저해 메커니즘의 분석 과 개선방향 제시에 탁월

한 역할을 할 것으로 예측되며 이는 값싸고 안전한 리튬 이차전지용 전극소재의 개발을 위하여 필수적인 기술로 판단된다.

5. 결론

이차전지 전극소재 분석기술에 향후 많은 활용이 예상되는 대표적인 분석기술인 방사광 가속기, 핵자기 공명 장치 그리고 전자현미경 기술들에 대하여 그 기술특성과 응용 사례들을 정리해 보았다. 그러나 더욱 중용한 것은 전극소재 분야와 분석기술 분야가 상호간에 서로 긴밀하게 협력하고, 충분한 소통을 통하여 문제점들을 해결해야 하는 점이라고 생각된다. 지금까지는 소재기술과 분석기술이 별도의 영역으로 분리되어 추진 되었으나 향후 는 소재와 분석이 함께 병행하는 방식의 첨단소재 연구 개발이 요구되는 시대를 맞이하고 있는 것이다. 과거의 신소재 개발 방식에서 많은 시간이 소요되고 큰 효과를 얻지 못한 것은, 관계되는 기술분야의 전문가들이 서로의 영역만을 고집하면서 충분한 협력이 이루어 지지 못한 것이 큰 요인의 하나라고 생각된다. 신소재의 첨단 연구에서는 분석 분야의 기초지식이 신소재 개발에 필요한 참신한 아이디어를 제시할 수도 있으며, 소재 기술 분야의 신기술을 분석기술에 적용할 수도 있는 것이다. 아무쪼록 이 글이 이차전지 소재개발에 관여하는 많은 과학자들과 소재 분석기술자들에게 큰 도움이 되었으면 하는 마음을 기원하며 이만 글을 줄이고자 한다.

참고문헌

1. J. McBreen, W. E. O'Grady, G. Tourillon, E. Dartyge, A. Fontaine, and K. I. Pandya, "In situ Time-resolved X-ray Absorption Near Edge Structure Study of the Nickel Oxide Electrode", *J. Phys. Chem.*, **93** 6308 (1989).
2. K. Pandya, R.W. Hoffman, J. McBreen, and W.E. Ogrady, "In Situ X-ray Absorption Spectroscopic Studies of Nickel-oxide Electrodes", *J. Electrochem. Soc.*, **137** 383 (1990).
3. T. R. Thurston, N. M. Jisrawi, S. Mukerjee, X. Q. Yang, J. McBreen, M. L. Daroux, and X. K. Xing, "Synchrotron X-ray Diffraction Studies of the Structural Properties of Electrode Materials in Operating Battery Cells", *Appl. Phys. Lett.*, **69** 194 (1996).
4. W. S. Yoon, M. Balasubramanian, X. Q. Yang, J. McBreen, and J. Hanson, "Time-resolved XRD Study on the Thermal Decomposition of $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ Cathode Materials for Li-ion Batteries", *Electrochem. Solid State Lett.*, **8** A83 (2005).
5. M. Stanley Whittingham, "Lithium Batteries and Cathode Materials," *Chem. Rev.*, **104** 4271-301 (2004).
6. Clare P. Grey and Nicolas Dupre, "Sintering NMR Studies of Cathode Materials for Lithium-Ion Rechargeable Batteries," *Chem. Rev.*, **104** 4493-512 (2004).
7. Clare P. Grey and Steve G. Greenbaum, "Nuclear Magnetic Resonance Studies of Lithium-Ion Battery Materials," *MRS Bulletin/August*, 613 (2002).
8. S.-Y. Chung, S.-Y. Choi, T. Yamamoto, and Y. Ikuhara, "Atomic-Scale Visualization of Antisite Defects in LiFePO_4 ", *Phys. Rev. Lett.*, **100** 125502 (2008).
9. J. Kikkawa, T. Akita, M. Tabuchi, M. Shikano, K. Tatsumi, and M. Kohyama, "Real-Space Observation of Li Extraction/Insertion in $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.4}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_2$ Positive Electrode Material for Li-Ion Batteries", *Electrochem. Solid-State Lett.*, **11** [11] A183 (2008).
10. A.R. Harutyunyan, G.G. Chen, T.M. Paronyan, E.M. Pigos, O.A. Kuznetsov, K. Hewaparakrama, S.M. Kim, D. Zakharov, E.A. Stach, and G.U. Sumanasekera, "Preferential Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes with Metallic Conductivity", *Science*, **326** [5949] 116 (2009).
11. B.J. Kim, J. Tersoff, S. Kodambaka, M.C. Reuter, E.A. Stach, and F.M. Ross, "Kinetics of Individual Nucleation Events Observed in Nanoscale Vapor-Liquid-Solid Growth", *Science*, **322** [5904] 1070 (2008).
12. P.L. Hansen, J.B. Wagner, S. Helveg, J.R. Rostrup-Nielsen, B.S. Clausen, and H. Topsoe, "Atom-Resolved Imaging of Dynamic Shape Changes in Supported Copper Nanocrystals", *Science*, **295** [5562] 2053 (2002).
13. Z.W. Shan, R.K. Mishra, S.A.S. Asif, O.L. Warren, and A.M. Minor, "Mechanical Annealing and Source-Limited Deformation in Submicrometre-Diameter Ni Crystals", *Nat. Mater.*, **7** [2] 115 (2008).
14. A.M. Minor, S.A.S. Asif, Z.W. Shan, E.A. Stach, E. Cyranowski, T.J. Wyrobek, and O.L. Warren, "A New View of the Onset of Plasticity during the

- Nanoindentation of Aluminium”, *Nat. Mater.*, **5** [9] 697 (2006).
15. H.M. Zheng, R.K. Simith, Y.W. Jun, C. Kisielowski, U. Dahmen, and A.P. Alivisatos, “Observation of Single Colloidal Platinum Nanocrystal Growth Trajectories”, *Science*, **324** [5932] 1309 (2009).
 16. R. Sharma, “An Environmental Transmission Electron Microscope for In Situ Synthesis and Characterization of Nanomaterials”, *J. Mater. Res.*, **20** [7] 1695 (2005).
 17. M. Dolle, S. Grugeon, B. Beaudoin, L. Dupont, and J-M. Tarascon, “In Situ TEM Study of the Interface Carbon/Electrolyte”, *J. Power Sources*, **97-98**, 104 (2001). S.-Y. Chung, Y.-M. Kim, J.-G. Kim, and Y.-J. Kim, “Multiphase Transformation and Ostwald’s Rule of Stages during Crystallization of a Metal Phosphate”, *Nat. Phys.*, **5** 68 (2009).
 18. K.W. Nam, X.Q. Yang, L.J. Wu, X.J. Wang, Y.N. Zhou, H.S. Lee, and Y. Zhu, “Structural Change Studies of Ni-based Cathode Materials during Heating Using Combined In Situ XRD and TEM”, 3rd International Conference on Advanced Lithium Batteries for Automobile Application, September 8-10, 2010, Seoul, Korea, IL-#40.
 19. X.Q. Yang and K.W. Nam, “Diagnostic Studies to Improve Abuse Tolerance and Life of Li-ion Batteries”, *2010 USDOE Annual Merit Review & Peer Evaluation Meeting*, June 7-11, 2010, Washington, DC, US, ES034.
 20. C.M. Wang, W. Xu, J. Liu, D.W. Choi, B. Arey, L.V. Saraf, J.G. Zhang, Z.G. Yang, S. Thevuthasan, D.R. Baer, and N. Salmon, “In Situ Transmission Electron Microscopy and Spectroscopy Studies of Interfaces in Li Ion Batteries: Challenges and Opportunities”, *J. Mater. Res.*, **25** [8] 1541 (2010).
 21. J.P. Sullivan, J. Huang, M.J. Shaw, A.Subramanian, N. Hudak, Y. Zhan, and J. Lou, “Understanding Li-Ion Battery Processes at the Atomic-to Nano-scale”, *Proc. of SPIE*, **7683** 76830B (2010).

정경윤



- 2003년 연세대학교 금속공학과 재료공학과 박사
- 2003년 연세 나노과학기술연구원 박사후 연구원
- 2004년 미국 Brookhaven National Lab. Chemistry Department Research Associate
- 2006년 한국과학기술연구원 이차전지센터 선임연구원

박남신



- 1987년 서울시립대학교 화학공학과 학사
- 1998년 아주대학교 정보전자공학과 석사
- 2007년 九州工業大學 生命體工學研究科 박사
- 1987년~1994년 삼성SDI 주임연구원
- 1994년~2005년 삼성종합기술원 전문연구원
- 2010. 7 한국과학기술연구원 연구원

장원영



- 2000년 한양대학교 재료금속공학부 학사
- 2002년 한국과학기술원 재료공학과 석사
- 2007년 Purdue University 재료공학과 박사
- 2009년 한국과학기술연구원 이차전지센터 연구원
- 2010년 한국과학기술연구원 이차전지센터 선임연구원

김창삼



- 1986년 한양대학교 무기재료공학과 석사
- 1992년 동경공업대학대학원 종합이공학연구과 박사
- 1992년 RIKEN Corp. 연구원
- 1994년 한국과학기술연구원 이차전지센터 선임연구원
- 2009년 한국과학기술연구원 이차전지센터 책임연구원