

21세기 전기화학의 신경향

한국과학기술연구원 김수길

서론

전기화학은 전극과 전해액 계면에서의 전자 이동과 관련된 다양한 상호작용을 다루는 학문이다. 산업적 측면에서의 전기 화학은 금속의 제련, 다양한 유/무기 화합물의 제조, 내부식성/광택성 표면 코팅, 전지의 제작 등 광범위한 응용분야를 가지며 학문적 측면으로는 계면 및 표면에서의 원자 및 분자단위의 반응 관찰, 새로운 물질의 합성, 물질의 미세구조 조절, 표면 개질, 생체 전기반응의 관찰 등 자체적으로 광범위한 연구 분야를 가지고 있음은 물론이고 여러 분야의 과학 연구의 중요한 수단으로써 활용되고 있다. 현대의 전기화학은 고전적인 산업에의 응용뿐만 아니라 나노 기술, 표면 분석 기술 등의 급격한 발전에 힘입어 나노 구조를 가진 재료의 합성 및 물성 조절, 극초미세 선풍의 반도체, 친환경 재생 및 분산 에너지 시스템 등 과학기술 전반에 걸쳐 그 응용 범위를 넓혀가고 있으며, 분자 이하 단위의 물질의 조절능력을 그 근간으로 하고 있다. 본 정보 제공은 이러한 새로운 과학기술 시대의 도래에 있어 전기화학이 어떻게 응용되어 왔으며 앞으로 어떻게 발전할 수 있을지에 대한 소개를 목적으로 한다.

최근 연구 동향

그림 1은 작년 미국 전기화학회 추계 학술대회에 발표된 약 2070편의 초록의 연구 분야를 분석한 도표이다. 전체 논문 중 반도체 (소자, 재료, 공정 포함)가 차지하는 논문이 약 719편으로 약 35%를 차지하고 연료전지 (237편, 11.5%) 및 배터리 (283편, 13.7%)를 포함하는 에너지 분야가 25.2%로 그 뒤를 차지 하고 있다. 나노 및 바이오는 각각 150편 (7.3%), 103편 (5.0%)이 발표되었으며, 환경분야는 33편 (1.6%)로 비교적 적은 양의 논문이 발표되었다. 주목할 점은 부식, 분석화학 등 고전적인 전기 화학이 차지하는 분야 보다 전자소자, 에너지, 나노 등 최근 들어 각광을 받고 있는 분야로의 전기화학의 진출이 두드러진다는 사실이다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 재료공학과 관련 표면/물질 분석 기술의 발달, 나노 화학을 축으로 하는 새로운 나노 구조의 합성 및 분석기술의 발달에 힘입어 전기화학이 새로운 영역을 구축하고 있음을 의미하고 있다. 이중 나노 재료의 합성과 분석, 반도체 공정

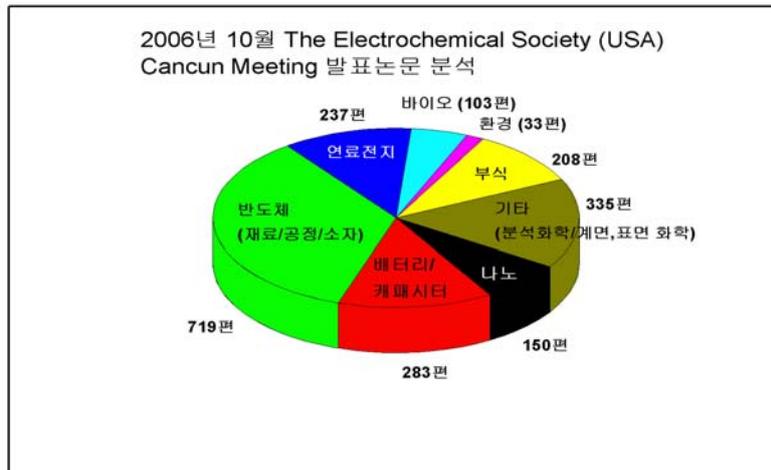


그림 1. 2006년 10월 미국 전기 화학회 추계 학술 대회 발표 논문 분석

및 소자에의 응용, 연료전지 및 2차전지 등 분산 에너지 시스템에의 적용 등 핵심이 되는 몇 가지 분야에 있어 구체적인 예를 통해 전기 화학이 구축하고 있는 새로운 영역에 대해 간략히 알아 보겠다. 이상의 여러 분야는 향후 정보제공 일정에 따라 세부적으로 다시 다루어질 예정이다.

나노 구조와 전기 화학

전기화학은 다양한 나노 구조의 합성 및 AFM (atomic force microscope) 및 STM (scanning tunneling microscope) 등의 주사탐침현미경과의 결합을 통해 물질 표면의 원자 및 분자 단위의 나노 구조를 관찰하는데 응용될 수 있다. 이중 전기화학을 이용한 나노 구조 합성의 대표적인 예를 그림 2에 도시하였다 (Ref. 1). 그림 2는 벌집모양의 일정하게 배열된 anodic aluminum oxide (AAO)를 템플레이트로 사용해 전해도금 (electrodeposition)으로 형성시킨 Cu_2O 의 나노선 배열을 보여주고 있다.

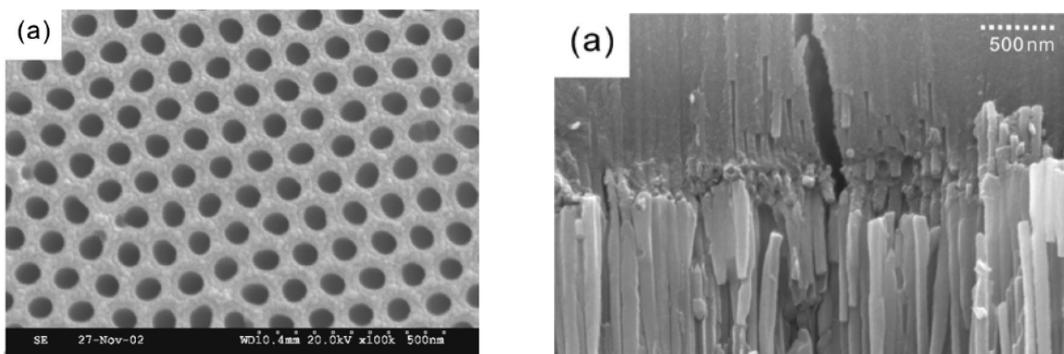


그림 2. 벌집 모양의 일정한 구조를 가진 AAO 템플레이트의 표면 및 이 템플레이트를 이용해 electrodeposition으로 형성시킨 Cu_2O 의 나노선 배열 (Ref. 1)

AAO는 알루미늄 표면을 전기 연마 (electropolishing)과 양극 산화 (anodization) 및 양극산화를 통해 표면에 생성된 알루미늄 산화물을 식각 함으로써 형성할 수 있고, 공정 변수 및 공정 횟수를 조절 함으로써 다양한 pore 크기와 깊이를 가지는 템플레이트의 제작이 가능하다. 형성된 AAO 템플레이트는 그 자체로 수십~100 nm 단위의 규칙적인 구조를 가지는 나노 구조체 이며, 금속 표면에 형성된 AAO 템플레이트는 기판의 금속을 도전층 (seed layer)으로 사용하여 원하는 금속 및 반도체 물질을 electrodeposition을 통해 나노 구조내에 채워넣어 나노튜브나 나노선을 형성할 수 있다 (그림 2 (b)). 이렇게 형성된 나노튜브나 나노선들은 고집적 반도체 소자, 자성체 메모리 소자 및 바이오 소자 등에 응용될 수 있다.

반도체 전기화학

반도체 소자의 고속화, 고집적화, 고신뢰성화에 대한 요구는 알루미늄 합금으로부터 구리로의 배선 물질의 변화를 유도하였다. 낮은 비저항과 높은 내열화성을 특징으로 하는 구리는 그 전기적, 재료적 특성이 알루미늄과 상이하여 배선 형성에 있어 새로운 주변 재료와 공법을 필요로 한다. 구리 배선의 핵심적 공법은 층간절연막을 먼저 형성한 후 절연막을 사진 식각 공정으로 패터닝 (patterning)하여 구리 배선이 들어갈 자리를 형성하고, 전해 도금을 통해 수십nm 크기의 패턴에 구리막을 내부 결함 없이 채워 올려야 한다. 이러한 전해 도금을 이용한 3차원 다층 구리 배선 구조의 형성은 주로 황산구리/황산 수용액 상에서 구리 도전층이 형성된 웨이퍼 표면에서 구리 이온을 석출 함으로써 이루어지며 높은 종횡비와 좁은 선폴을 가지는 3차원 구조내에서의 도금시 전류 밀도의 분포와 물질 전달에 대한 해석 및 국부적인 도금 속도 제어를 위해 첨가해주는 소량의 유기 첨가제의 전극 표면에서의 전기화학 작용 기구등에 대한 다양한 연구를 필요로 한다.

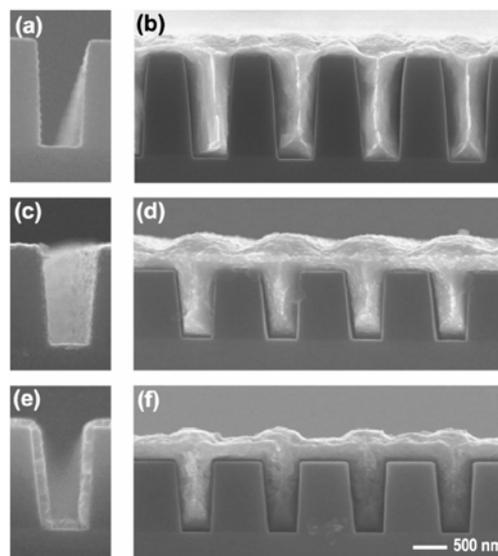


그림 3. Physical vapor deposition (a) 및 electroless deposition (c,e)으로 형성시킨 Cu seed layer와, 각 seed layer상에 electrodeposition을 통해 Cu superfilling을 구현한 단면 사진 (Ref. 2)

그림 3에 반도체 금속 배선용 3차원 패턴 구조상에서의 무전해 도금 (electroless deposition)을 이용한 도전층의 형성과 전해 도금 (electrodeposition)을 이용한 패턴 채움에 대한 사진을 도시하였다 (Ref. 2).

에너지 전기화학

연료전지는 수소나 수소를 포함하고 있는 탄화 수소계 연료 (메탄올, 에탄올, 개미산, 개솔린, 디젤 등)를 전극 표면에서 산화 시키는 과정에서 발생하는 전자를 이용해 전류를 생산해 내는 장치이다. 즉 연료가 가지고 있는 화학적 에너지를 전기 에너지로 바꾸는 고효율 분산 에너지 시스템이다. 일반적으로 연료전지의 산화극에서는 연료의 산화 반응이 일어나 이산화탄소, 물, 전자 및 이온 등이 발생되며 생성된 이온은 전해질을 통과해 환원극으로 이동하고 발생한 전자는 외부 회로를 통해 추출되어 전기 에너지로 쓰여진다. 사용되는 연료나 전해질의 종류에 따라 여러 다양한 연료전지가 있으며 작동온도에 따라 저온형 및 고온형으로 나뉜다. 저온형 연료전지의 대표적인 예는 수소 연료와 고분자 전해질을 사용하는 고분자 전해질 연료전지 (polymer electrolyte fuel cell, PEMFC) 및 메탄올을 연료로 사용하고 마찬가지로 고분자 전해질을 사용하는 직접 메탄올 연료전지 (direct methanol fuel cell, DMFC)등이 있다. 이러한 저온형 연료전지는 자동차 엔진을 대체하는 연구부터 가정용 소형 발전기 및 휴대폰, 노트북 등 휴대용 전자기기 전원용으로 널리 연구가 진행중 이다. 이러한 저온형 연료전지의 성능향상 및 상업화를 위해서는 연료전지의 여러 특성들이 개선되어야 하며, 그 중 중요한 것이 대상 연료에 대해 높은 활성을 보이며 불순물에 의한 피독을 최소화 할 수 있는 촉매의 개발이다.

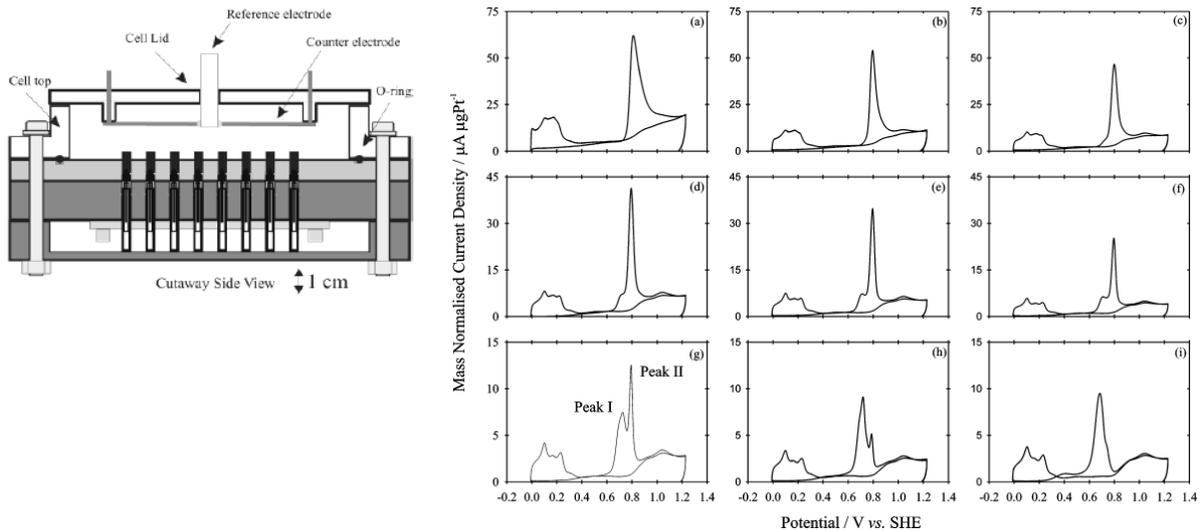


그림 4. 64가지 촉매 조합을 screening 할 수 있도록 설계된 electrochemical cell 및 이를 이용해 다양한 무게비를 가지는 Pt/C 촉매의 CO stripping voltammetry를 수행한 결과 (Ref. 3)

특정 연료에 대해 높은 활성과 우수한 내피독성을 가진 촉매는 보통 하나의 물질로 구성되지 못하고 두 가지 이상 물질이 다양한 조성비로 결합되어 있는 구조를 가진다. 이러한 다양한 조성을 가지는 촉매의 활성을 평가하는 가장 일반적인 방법은 연료를 포함하고 있는 전해액상에서 다양한 조성을 가지는 촉매를 임피던스 분석법 (electrochemical impedance analysis), 순환 전위 분석법 (cyclic voltammetry) 등의 다양한 전기화학 분석을 통해 촉매의 활성, 전기화학적 유효 표면적 및 촉매 표면에서의 연료 산화의 속도론적 분석 등을 수행하는 방법이다. 그림 4에 64가지의 서로 다른 촉매를 동시에 순환 전위 분석법으로 screening 할 수 있도록 설계된 전기화학적 셀 및 이를 이용해 다양한 무게비를 가지는 Pt/C 촉매의 분석 결과를 도시하였다 (Ref. 3).

상기의 예들과 같이 전기 화학은 여러 다양한 과학 기술 분야의 경계에서 그 영역을 지속적으로 확장하고 있다. 상기 분야들을 포함한 과학의 새로운 여러 분야에 있어 전기화학이 적용되고 있는 구체적인 사례들이 향후 중점적으로 다루어질 예정이다.

참고 문헌 (References)

1. J. Oh, Y. Tak, and J. Lee, *Electrochem. Solid-State Lett.*, 7, C27 (2004).
2. S. -K. Kim, S. K. Cho, J. J. Kim, and Y. -S. Lee, *Electrochem. Solid-State Lett.*, 8, C19 (2005).
3. S. Guerin, B. E. Hayden, C. E. Lee, C. Mormiche, J. R. Owen, and A. E. Russell, *J. Comb. Chem.*, 6, 149 (2004).