



# Li-ion 전지 성능 개선을 위한 플라즈마 기술 응용

이대훈, 허민 | 한국기계연구원

## [ 요약문 ]

최근 아이폰, 아이패드 등으로 대표되는 소형 가전의 보급이 확대되고 있으며 hybrid 및 plug-in 전기자동차가 주목을 받으면서 2차 전지 기술에 대한 시장과 기술의 관심이 높아지고 있다.

2차 전지 기술은 기본적으로 전기 화학과 재료 분야 연구자들의 역할이 중요하지만 생산 및 공정이라는 관점에서 기계공학 연구자들이 기여할 부분들이 많이 있다. 본 논고에서는 특히 플라즈마 기술을 이용, 2차 전지의 성능 개선 및 혁신을 위한 기술적 접근 가능성에 대해 살펴보고 몇 가지 가능한 연구 주제들을 제시하고자 한다.

## 1. 서론

세계 2차 전지 시장은 일본이 선두를 지키고 있으며 한국과 미국이 그 뒤를 맹추격하고 있는 양상이다. 국내 업체의 경우 SDI가 5대 생산 업체에 이름을 올려놓고 있으며 25% 정도의 시장 점유율을 가지는 것으로 조사되고 있다.<sup>[1]</sup> 일본과 유럽의 경우 Joule I, II, III 프로그램 등 국가적 차원에서 연구 개발을 진행하고 있으며 기존의 전지 개념과는 다른 Li-air, 아연-air 전지, super-capacitor 등 새로운 개념에 대한 기초 연구도 진행되고 있다. 하지만 가까운 시일에는 Li-ion 전지가 주류를 이룰 것으로 예상되며 이에 Li-ion 전지의 성능 혁신을 위한 기술 개발은 시장 영향력이 큰 연구 주제에 해당한다.

우리나라에서도 지난 2010년 7월 대통령 주재의 제8차 녹색성장 위원회에서의 보고를 통해 지식경제부가 2020년까지 15조원 규모의 정부 및 민간 부문 투자를 유도할 계획이라고 밝혔다.<sup>[2]</sup> 이는 현재 123억 달러 수준인 2차 전지 시장 규모가 오는 2020년이면 779억 달러로 급격히 팽창할 것을 염두에 둔 계획으로 비교적 성숙한 기술에 속하는 2차 전지 시장이 자동차나 대용량 저장 장치 등 새로운 시장 개척을 통해 급성장할 것임을 예고하는 사례라 할 수 있다.

실제 소형 가전의 보급 확대, hybrid 및 plug-in 자동차의 시장 진입, 신재생 에너지 활용을 위한 대용량 저장 장치 등 2차 전지 기술의 시장성은 그 어느 때보다 밝은 상황이다. 하지만 지속적인 용량의 증대, 수명 연장을 위해서는 기술적인 breakthrough 가 필요한 시점이기도 하다. 이에 2차 전지, 특별히 Li-ion 전지의 구조적 특징, 생산 공정에 대한 이해를 통해 성능과 수명을 연장할 수 있는 기술적 시도의 가능성을 타진해 보고자 한다.

표 1. 주요 전지 기술 비교

Specific energy (Wh/kg)	10~35	10~40	~75	~150
Energy density (Wh/L)	50~90	40~100	~240	~400
Nominal voltage (V)	2.0	1.2	1.2	4.0
Cycle life (cycles)	200~1,500	500~10,000	300~600	1,000+



2차 전지는 사용하는 전도성 물질의 종류에 따라 다양한 종류로 분류할 수 있다. 표 1에는 현재 많이 사용되고 있는 주요한 전지들의 특성이 제시되어 있다.<sup>[3]</sup>

표에 제시된 바에 따르면 Li-ion 전지가 기존의 다른 전지 개념들에 비해 여러 성능 지표에서 뛰어난 것으로 나타나 있다. 하지만 기존 Li-ion 전지의 경우 주로 소형 가전 위주로 시장이 형성되어 있으며 소형 가전의 작동 특성에 적합한 기술 개발이 이루어져 왔다.

기존 hybrid 자동차의 경우 Ni-metal hydride 전지가 사용되고 있는데 Li-ion 전지의 용량 증가와 출력 동특성이 개선된다면 Li-ion 전지가 자동차 혹은 대용량 저장 장치의 표준으로 자리 잡을 수 있는 가능성이 높은 것으로 판단된다.

실제 그림 1에 나와 있는 바와 같이 Li-ion 전지를 자동차 부분에 적용하기 위해서는 power density 와 specific power discharge 영역을 제외한 대부분의 영역에서 기술 혁신이 요구된다.<sup>[4]</sup>

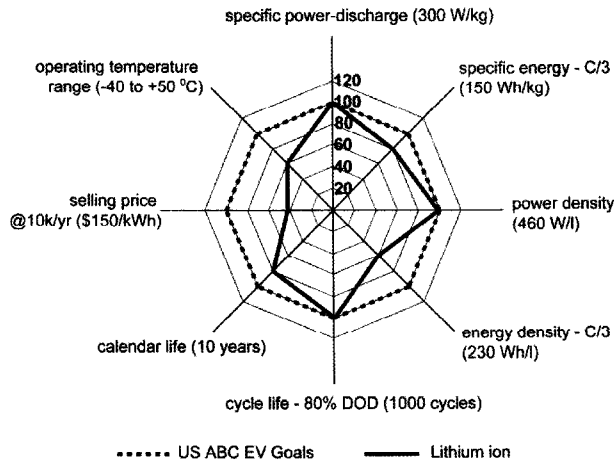


그림 1. USABC 에 의한 Electrochemical Energy Storage Technical Team Technology Development Roadmap 에 근거한 자동차 적용을 위한 state of the art Li-ion 전지 기술 평가.

전지 가격의 경우 비교적 고가인  $\text{LiCoO}_2$ 를 대체할 수 있는 새로운 물질의 개발이 필요한 반면 calendar life, specific energy 등의 분야에 있어서는 공정 개선이나 물질 최적화를 위한 처리 등 공정 개선의 방법을 통해서 요구 조건에 근접해 갈 수 있는 여지가 존재한다. 이에 기존 전지 제작 공정상에 적용 가능한 새로운 기술을 통해 전지의 용량과 수명을 늘리는 것은 Li-ion 전지의 적용 영역 확장 및 단기간에 시장 파급 효과가 큰 연구 개발 목표가 될 것으로 판단된다.

한편 플라즈마는 통상 고체, 액체, 기체에 이은 제4의 물질 상태라고 알려져 있다. 좀 더 구체적으로는 이온화 된 기체 상태로 높은 에너지를 가지는 전자를 비롯한 활성 높은 화학종들을 다수 포함하고 있다. 플라즈마는 전자와 기체 분자의 상대적 온도 특성, 밀도 등에 따라 고온 플라즈마와 저온 플라즈마로 분류되기도 하는데 이러한 상대적인 에너지의 분포에 따라 상온에서 10,000K 이상에 이르기 까지 다양한 양상으로 존재하게 된다.<sup>[5]</sup> 특히 저온 플라즈마의 경우 표면처리, 반도체 공정 등 응용분야에 다양하게 적용되고 있으며 고온 플라즈마의 경우 고에너지 반응을 요하는 물질 합성, 용융, 용접, 절단 등의 분야에 적용되고 있다. 플라즈마의 발생과 물성에 대한 이해 및 전지의 구조와 생산 공정에 대한 이해를 바탕으로 적절한 응용 분야를 도출한다면 전지의 성능과 수명 연장을 위한 새로운 도약이 가능할 것으로 예상된다. 이에 본 논고에서는 플라즈마 공정 기술을 이용한 전지 성능 개선의 가능성 및 그 적용 분야를 타진해 보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 전지 관련 구성과 연구 분야

전지 관련된 연구 분야는 크게 제조 공정과 단위 cell 관련 연구로 분리해서 접근해 볼 수 있다. 통상 전지 관련 연구는 그 특성상 전기화학 반응 내지는 소재 분야의 연구위주로 소개가 되어 있고 또 실제 전지 관련 논문들은 소재의 특성에 대한 실험 내지 해석 관련 내용들이 주를 이루고 있다. 하지만 소재와 같은 장기적인 연구 주제의 성격이 아닌 전지의 성능 및 안전성 개선, 생산성 제고의 차원에서 전지 생산 공정에 대한 연구도 전지 기술 혁신에 기여할 수 있는 바가 많을 것으로 예상된다. 이러한 관점에서 전지 생산을 위한 전체적인 공정에 대한 관점에서 접근해 볼 수 있는 연구 주제들을 선별해 보았다. 우선 전지의 제조 공정을 간략하게 도시하면 그림 2와 같은 흐름도로 나타낼 수 있다. 이러한 흐름도에 근거한 생산 공정 차원에서의 기계공학적 접근 가능 부분은 표 2와 같이 정리해 볼 수 있다.

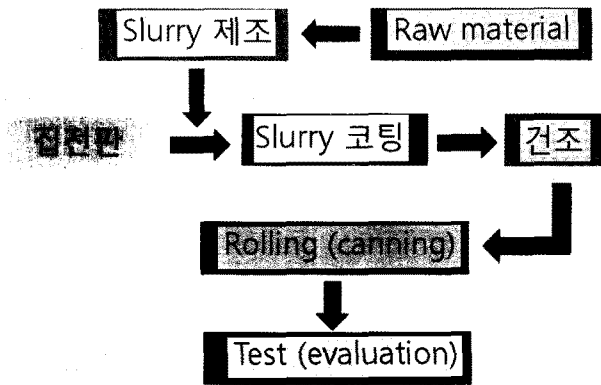


그림 2. 간략하게 도시된 전지 제작 공정 흐름도

우선 다공성 전극 구조물을 구성하고 있는 활물질, 바인더, 첨가물 등의 slurry를 제조 하는 과정에서 입자들의 균일한 분산과 혼합은 전극 층/방전시의 SEI(Solid Electrolyte Interface) layer 특성/성장/파괴 등의 특성에 영향을 줄 뿐 아니라 전극 내부 저항 특성에도 영향을 줄 수 있는 중요한 주제에 해당한다. 집전판의 경우 전극 slot coating이 이루어지는 집전판 표면의 특성에 따라 접촉 저항의 감소와 집전판-전극 접착면의 균일한 표면 특성이 요구된다. slurry coating 공정에서는 coating과정에서의 입자 균일도가 SEI 생성 특성에 영향을 줄 수 있으며 특히 SEI 내에서 발생할 수 있는 intercalation stress 에 의한 파괴를 방지하고 높은 용량 retention을 유지하기 위해 보호막 coating을 형성하는 것 또한 중요한 issue가 되고 있다.<sup>[6]</sup> 열풍 건조 등의 방법으로 이루어지고 있는 slurry 건조 과정에서 막질에 미치는 영향을 최소화 하거나 습기를 제어하기 위한 기술도 주요한 공정 단계 기술에 해당하며 특히 전지 용량 증대에 대한 요구로 인해 단위 cell의 크기와 rolling 회수가 증가하게 될 경우 균일한 대면적 rolling 기술 또한 고려되어야 한다. canning 과정에서의 전해질 dipping 특성을 위한 전극 구조물의 표면 처리 또한 성능 개선에 영향을 줄 수 있는 요소가 된다. 이 경우 나노 구조의 다공성 전극구조 내부로 전해질이 잘 침투해 들어가서 발생 가능한 내부 저항을 저감시키는 것이 주요한 목적이 된다. 취급 상의 안전 요인을 고려한 canning 충격 파괴에 대한 해석과 방지 또한 필요한 연구 주제이다.

단위 cell로 들어가면, 통상 전지의 단위 cell은 그림 3과 같이 크게 양극 집전판, 양극, 분리막, 전해질, 음극, 음극 집전판으로 구성된다.<sup>[7]</sup> 이러한 구성으로 인해 전지는 일견 간단한 구조적 특징을 가지고 있는 것으로 보인다. 하지만 좀 더 자세히 그 안을 들여다 보면 다양한 물질들과 전도성 이온을 포함한 여러 화학종들 간의 전기화학 반응과 나노-마이크로 스케일에서의 여러 입자, 물질들의 기계 역학적 거동들이 복잡하게 얽혀 있는 하나의 시스템으로 이



표 2. 전지 생산 공정상의 연구 가능 분야

공정 단계	내 용
slurry 제조	- 보다 균질의 slurry 제조를 위한 분산 및 혼합 기술 - slurry에 혼입되는 입자의 크기, 분산 제어 기술
집전판	- slurry coating 특성 개선을 위한 표면처리 - slurry coating 시의 contact resistance 저감
slurry 코팅	- slurry 코팅 면의 입자 균일도 제어 (SEI 균일도 제어)
건조 기술	- 습기 제어 - 건조 과정에서의 막질 제어
Rolling / Canning	- (특히 대용량의 경우) 대면적 rolling 공정 제어 - electrolyte dipping 과정에서의 침투 특성 제어 - canning material 기계적 강도 및 특성 - safety 구조

루어져 있다. 특히 다공성 전극의 경우 그림 4와 같이 활성물질, 바인더, 첨가물이 섞여 있는 슬러리 형태로 집전판에 코팅 되므로 다공성 혼합물에서의 다양한 전기 화학 반응과 이에 수반되는 구조 역학적 거동을 해석하고 예측해야 하는 난점이 따르게 된다.

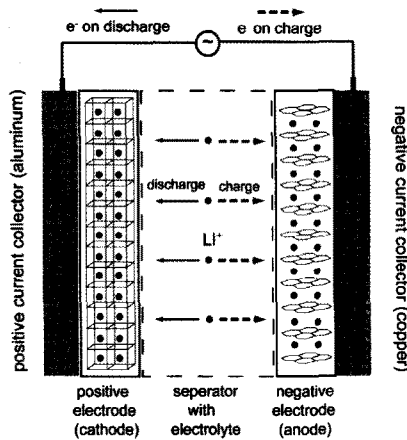


그림 3. 전극 cell 구조 개략도

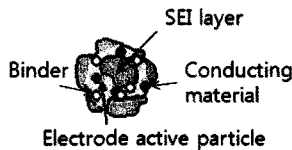


그림 4. 다공성 전극 내 SEI layer 형성

이러한 단위 cell 관점에서의 연구들은 크게 아래와 같이 나뉘 볼 수 있다.

### 2.1.1 전극 물질 개선

기존 Li-ion 전지의 양극 물질로 사용되고 있는  $\text{LiCoO}_2$ 의 경우 소니에 의해 최초의 상용 Li-ion 전지용 전극물질로 소개된 이후 계속 그 위치를 차지하고 있다. 하지만 가격 문제로 인해 용량 대형화의 장애물이 되고 있고 Co의 독성으로 인해  $\text{LiNi}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFePO}_4$  등 대체 물질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[6]</sup> 하지만 열적으로 안정되고 가격이 저렴하며, 높은 용량을 가지고 사이클 수명이 긴 물질을 찾는 것은 많은 연구를 필요로 한다.

음극 물질의 경우 graphite와 같은 기존의 카본 물질은 400mAh/g이내의 이론적인 용량을 가진다.<sup>[3]</sup> 때문에 4,000mAh/g 이상의 이론적 용량을 가질 수 있는 Si 등의 물질을 사용하려는 연구가 진행되고 있다. 하지만 Si의 경우 intercalation-deintercalation 과정에서 팽창이 과도하게 발생하는 구조적 한계 때문에 nanowire 등의 형태로 Si 전극을 구현하기 위한 노력들을 하고 있다.<sup>[8]</sup> Si 외에  $\text{LiTi}_5\text{O}_{12}$  등의 물질을 이용, 체적 팽창문제를 해결하려는 시도들도 있지만 낮은 출력 전압의 문제를 극복해야 하는 숙제를 안고 있다.

### 2.1.2 분리막과 전해질

분리막의 경우 통상 폴리머 계열의 물질을 사용한다. 사용하는 물질의 종류에 따라 특성이 다르지만 전해질의 retention 특성이 cell의 저장증가와 수명 감축에 영향을 줄 수 있으므로 분리막의 표면 특성은 중요한 issue가 된다.<sup>[7]</sup> 특히 친수 특성이 이러한 전해질 retention에 영향을 주기 때문에 플라즈마, UV grafting, E-beam 등의 방법을 사용하여 표면 처리를 수행한다.<sup>[9]</sup>

전해질은 전극 소재 보다 덜 중요하게 인식되는 경향이 있고 전극 소재 보다 그 전기화학적 기전들이 덜 밝혀지긴 하지만 실제 이온이 이동하는 경로를 제공하기 때문에 전지의 특성에서 중요한 역할을 감당한다.<sup>[7]</sup> 전해질은 Li염, 용액 첨가물로 구성되어 있으며 높은 이온 전도도를 가지는 전해질을 구성하기 위해서는 이들 각 요소에 대한 이해와 연구가 필요하다. 특히 첨가물의 경우 통상 전해질의 5% 이상을 넘지 않는 양이지만 SEI 생성특성 개선, 음극 보호, 전해질 Li염 안정화, Li 침전개선, Al 부식 방지 등 다양한 기능을 하는 핵심요소이다.<sup>[10]</sup> 극성을 가지지 않는 분리막의 경우 전해질의 분리막 젖음성을 개선하기 위한 기능 또한 가능하다. 이러한 첨가물의 대표적인 예로는 SEI 생성 특성 개선을 위한 carboxyl phenol, aromatic esters 등을 들 수 있으며 특성과 필요한 기능들에 맞는 적절한 첨가물의 설계가 요구된다.

## 2.2 플라즈마 적용 가능한 연구 item

간략한 소개이지만 앞서 소개한 공정상 혹은 단위 cell 상에 적용할 수 있을만한 플라즈마 공정은 아래와 같다.

### 2.2.1 플라즈마 표면처리

전지 전체적인 공정과 구조에 있어 플라즈마 표면처리를 통해 성능 개선 혹은 공정 개선이 가능한 분야는 아래와 같다.

#### ■ 집전판 표면 처리

집전판의 경우 slurry 코팅을 통해 전극 물질이 형성되는 기판이다. 통상 양극의 경우 Al, 음극의 경우 Cu 전극을 사용한다. 집전판은 전자의 이동을 통해 충전이 이루어지는 경로를 형성하므로 slurry 코팅시 전극 물질과 집전판의 접촉 특성이 좋아야 한다. 즉 코팅 과정에서의 내부 저항을 최소화할 필요가 있다. 이를 위해 도전성 표면 처리를 수행하여 그 성능을 개선할 수 있는데, Al의 경우 이러한 표면처리가 어렵다는 문제점이 있다. 이에 대해 플라즈마 기술을 이용 양극 집전판의 접촉 저항을 최소화 하기 위한 연구를 수행할 필요가 있다.

#### ■ 건조 공정

기존 slurry 코팅의 경우 보통 열풍 건조 방식으로 slurry 건조를 수행한다. 이 경우 유체 역학적인 간섭이 발생할



가능성이 있고 표면에서의 침투 깊이에 따라 발생하는 건조 phase의 차이가 발생할 수 있다. 때문에 건조 공정 과정에서 플라즈마를 이용하면 가열, UV, 내부 activation 등 플라즈마 발생으로 인한 건조 방식을 활용할 수 있다.

■ 전극 표면 처리

음극 전극 물질로 사용되고 있는 graphite의 경우 최초의 intercalation이 발생하기 전에 fresh graphite 표면이 촉매로서의 기능을 하여 solvent의 환원 반응을 유도하게 되고 이로 인해 다공성 전극 내부에 기체가 발생하게 된다. 또한 compact하고 안정적인 SEI의 형성은 graphite surface의 morphology와 surface chemistry에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 때문에 graphite 전극면에 대한 mild chemical oxidization이나 physical surface coating을 통해 SEI를 안정적으로 생성하고 부반응으로 인한 기체 발생을 감소시킬 수 있다.

■ 기능성 카본 나노 물질의 합성

2차 전지의 음극 물질로서 다양한 나노 물질, 특히 카본계 나노 물질들이 거론되고 이의 적용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 플라즈마를 이용 CNT나 graphene과 같은 카본계 물질을 합성할 경우 적절한 분리 기술이 추가된다면 상업 조건에서의 합성을 통해 throughput을 높일 수 있고 생산 단가를 저감할 수 있는 기술적 가능성이 있다.

2.3 플라즈마 표면 처리 기술

플라즈마 그 중에서도 대기압 플라즈마는 최근 들어 IT, BT, ET 등 다양한 응용 분야가 발굴 되면서 그 산업적 응용의 가치가 높아지고 있다. 이 중 저온 플라즈마에 의한 표면처리 기술은 대표적인 플라즈마의 산업 응용 기술에 해당한다. 공산품의 도장을 위한 표면처리와 같은 예에서 볼 수 있듯이 우리 일상 생활속에는 이미 플라즈마를 이용한 다양한 표면처리 기술이 적용된 제품들이 많다.

표면처리는 세정, 산화, 경화, 중합 등 목적에 따라 다양한 형태의 응용을 포함하며 플라즈마를 발생시키는 기체나 플라즈마 표면처리 대상 표면의 특성에 따라 플라즈마에 의한 표면 처리 공정은 표3과 같이 분류할 수 있다.

표 3. 사용 기체와 대상 표면 특성에 따른 플라즈마 표면처리 반응

Inert gas plasma	Reactive gas plasma	
	Non-volatile surface product	Volatile surface product
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plasma cleaning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plasma Oxidation</li> <li>• Surface activation</li> <li>• Surface hardening</li> <li>• Polymerization</li> <li>• Film deposition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface activation</li> <li>• Plasma ashing</li> <li>• Plasma etching</li> </ul>

표를 통해서 확인할 수 있는 바와 같이 플라즈마 처리를 통해서 얻고자 하는 표면 특성의 목적에 따라 다양한 응용이 가능하다.

다양한 플라즈마 표면 처리의 예로는 표면 에너지의 증가를 들 수 있다. 표면 에너지의 증가는 우선적으로 표면의 젖음성(wettability)을 변화 시킨다. SUS 표면을 플라즈마 처리 하지 않은 경우와 처리한 경우를 비교한 그림 5와 같이 플라즈마 표면 처리는 표면 에너지를 증가시켜 표면 젖음성을 향상시킨다.

특히 친수/소수 특성의 변화를 위해 단순한 표면 에너지 증가 이외에 친수성을 부여하는 Fluorine계 화합물 플라즈마 처리를

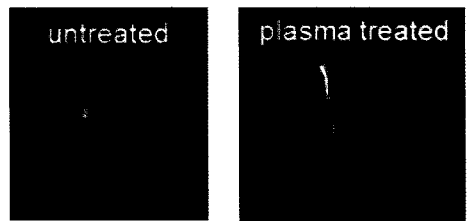


그림 5. 플라즈마 처리된 SUS 표면과 처리되지 않은 표면에서의 젖음성 비교

하거나 carbonyl, hydroxyl 등 친수성을 가지는 라디칼을 표면에 형성하는 방법과(그림 6) 표면 식각을 통해 처리 대상 표면의 morphology 를 변화 시키는 방법도 사용되고 있다.<sup>[11]</sup>

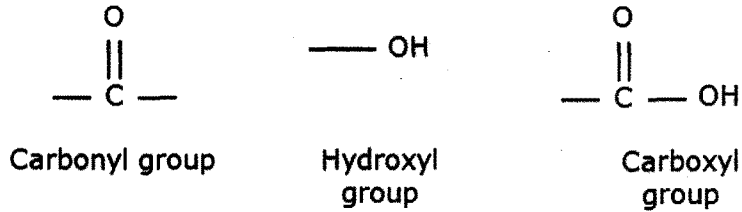


그림 6. 대표적인 친수성 라디칼

그림 7은 플라즈마 표면 처리를 통한 PR ashing 공정을 보여준다. 플라즈마 공정은 건식 공정을 가능하게 하며 비교적 빠른 시간에 처리가 가능하므로 PR ashing외에 세정 등 여러 반도체 공정에도 적용 가능하다.

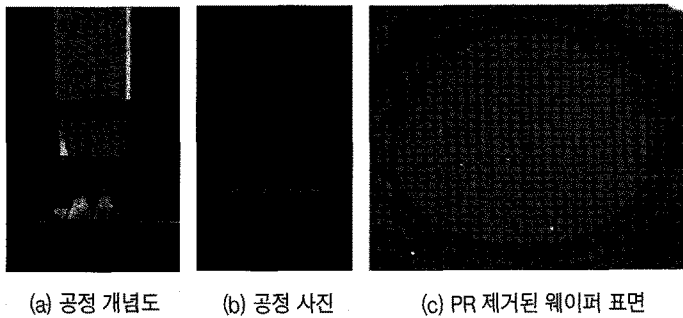


그림 7. 플라즈마 표면 처리를 통한 PR ashing

그림 8은 칫솔에 도장을 하기 위한 플라즈마 표면처리 공정을 보여준다. 표면 활성화를 통해 플라스틱, 금속 등 다양한 도장 면에서의 인쇄, 도장 특성을 높여준다.



그림 8. 도장을 위한 칫솔 표면 플라즈마 처리

폴리머의 기능화를 위한 플라즈마 표면 처리 또한 중요한 산업적 응용 분야이며 처리 방식, 대상 폴리머의 특성에 따라 Pore size control, grafting 등 다양한 표면 처리 기능을 가진다. 다양한 폴리머 표면 처리 방식들에 대한 간략한 공정들의 개념은 그림 9에 제시된 바와 같다.<sup>[12]</sup>

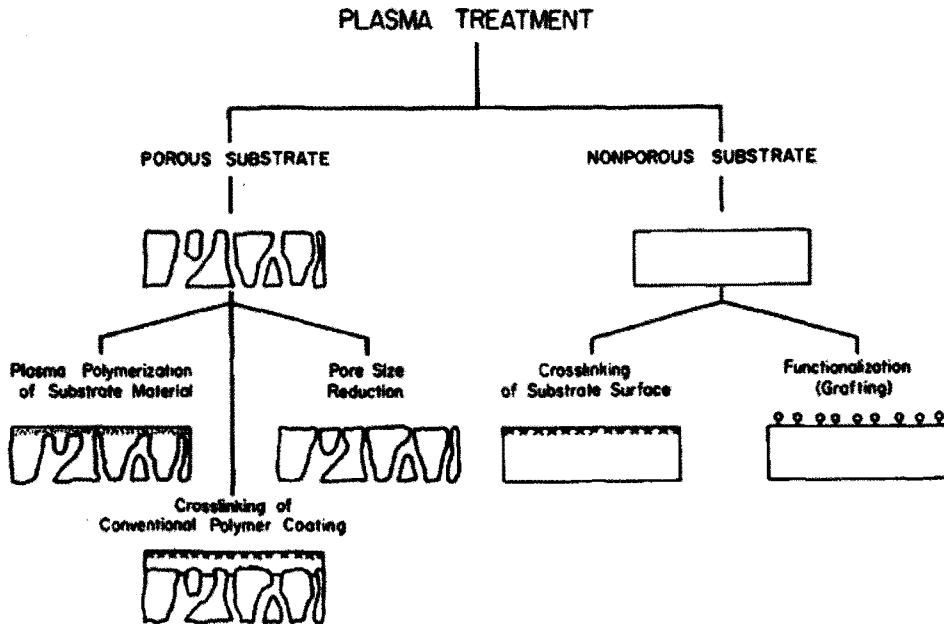


그림 9. 플라즈마 표면처리를 통한 다양한 폴리머 표면의 기능화

## 2.4 플라즈마 물질 합성 기술

플라즈마는 일반 연소 공정을 통해서 얻기 힘든 2,000K 이상의 온도 조건을 형성하는 것이 가능하며, 저압 조건에서 플라즈마를 발생시킬 경우 플라즈마 발생 체적 내에 매우 균일한 반응장을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 이로 인해 플라즈마를 이용한 물질 합성은 플라즈마 공정에서의 오랜 연구 주제가 되어 왔다.

한편 최근 들어 그림 10에 나와 있는 바와 같이 CNT, graphene 등 다양한 카본계 나노 입자들이 가지는 우수한 전기전도 특성과 구조적 특징들이 밝혀 지면서<sup>[13, 14]</sup> 플라즈마를 이용해 이들 나노 입자들을 형성 하고, 특별한 기능을 부여하는 기술들이 주목받고 있다.

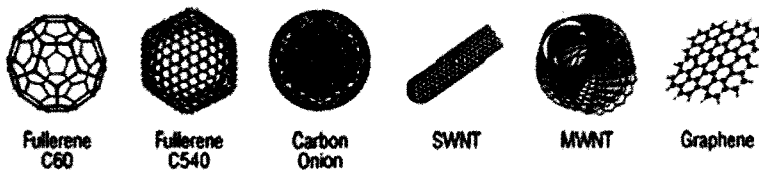


그림 10. 다양한 carbon 나노 물질들

상용의 2차 전지에 graphite가 사용되고 있는 것은 주지의 사실이며, 이와 관련하여 다양한 카본계 물질들을 특별한 기능을 가지도록 패터닝 하여 기판위에 형성하거나 도포하기 위한 시도들도 이루어지고 있다. 이러한 관점에서 플라즈마를 이용 기능성 카본 나노 입자를 제조하거나 그 박막을 형성하는 기술은 2차 전지의 성능 혁신을 위해 유망한 후보 기술의 하나가 된다.

플라즈마를 이용한 카본 나노 물질 형성의 예로 그림 11과 같이 CNT pillar 구조를 형성하는 방식이 있다.<sup>[15]</sup> pillar 방식 카본 나노 구조는 빠른 방전 응답성을 가지는 전지 전극 구조물로의 응용을 위해 가능한 방식의 하나로 고려되



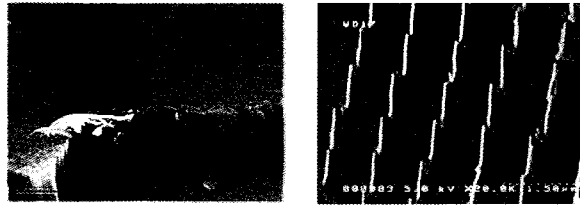


그림 11. 플라즈마 공정을 통해 형성된 CNT pillar 구조

고 있으며 공정 압력을 상압으로 올릴 수 있는 추가적인 기술이 개발된다면 산업 응용성이 높을 것으로 전망된다.

graphene의 경우 평면 구조와 높은 전기 전도도로 인해 최근 가장 각광을 받고 있는 carbon 나노 물질이다. 이를 전극 물질로 활용하기 위한 연구도 다양하게 시도되고 있다. 특히 graphene에 특정한 기능을 부여하여 산업적 응용 가능성을 높이기 위한 연구들이 시도되고 있는데 대표적인 예가 그림 12에 나와 있는 바와 같이 epoxide와 hydroxyde를 graphene 표면에 부착시켜 친수성을 부여하고 촉매로서 기능하도록 한 예이다. graphene에 이와 같은 기능을 부여할 경우 FBC(Fuel Borne Catalyst)로 사용했을 때 연소속도에 획기적인 증가를 가져온다는 것이 최근의 연구 결과를 통해 밝혀진바 있다.<sup>[16]</sup> (그림 13)

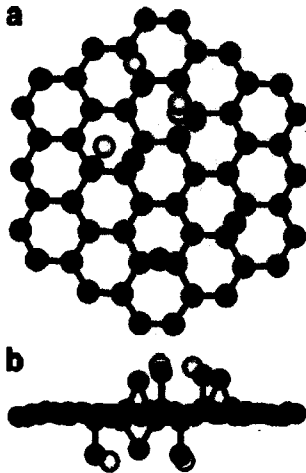


그림 12. Graphene 평면상에 부착된 epoxide와 hydroxyde 구조의 개념도

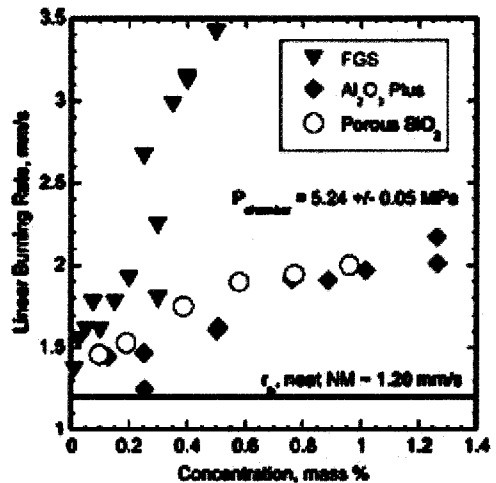


그림 13. 기능화 된 graphene FBC 사용을 통해 증가한 연소 속도(붉은 색이 graphene FBC 사용 결과)

플라즈마를 이용해 이러한 carbon계 나노 입자들을 대기압 조건에서 생산할 수 있다면 분리 공정이 추가로 필요할 수도 있지만, carbon계 나노 입자들의 생산성을 향상시켜 가격 경쟁력을 부여할 수 있는 획기적인 기술이 될 것이다. 또한 플라즈마 공정을 통해 특정 작용기를 carbon계 나노 입자에 부착시킬 수 있다면, 특히 2차 전지 전극 물질의 성능 개선을 가능하게 하는 공정 기술로 채택될 수 있을 것이다.



### 3. 맺음말

소형 가전의 증가, hybrid 및 plug-in 전기 자동차 등 고용량, 장수명의 다양한 전력 저장 장치에 대한 시장의 수요가 점점 늘어가면서 신개념의 전지 개발 및 기존 전지의 용량 증대를 위한 기술 개발이 가속화 되고 있다. 특히 상용화 된 기존의 여타 전지 개념보다 가장 높은 용량과 에너지 밀도를 가지고 이는 Li-ion 전지의 경우 추가적인 연구 개발을 통해 단기적인 2차 전지 시장을 잠식할 수 있는 가능성이 가장 높은 전지 개념이라 할 수 있다. 이에 본 논고에서는 플라즈마를 이용 Li-ion 전지의 성능 개선을 위해 적용 가능한 기술적 가능성에 대해 검토하고 단기적으로 적용해 볼 수 있는 접근 방법들에 대해 제안하였다. 더불어 전지 기술에 적용하기 위한 플라즈마 기술의 사례들을 통해 적용 가능성에 대한 이해를 도모하고자 하였다. 다양한 새로운 응용 분야들이 지속적으로 발굴되고 있지만, 공정 기술의 차원에서 본다면 대기압 플라즈마 표면 처리 및 물질 합성은 어느 정도 성숙한 기술의 단계에 도달해 있다. 따라서 플라즈마를 적용하여 2차 전지 성능 혁신을 위한 공정을 개발하는 것은 비교적 단기간에 결과를 얻을 수 있는 적절한 연구 주제로 판단되며 관련 연구자들이 노력한다면 현재 25% 정도의 글로벌 시장 점유율을 가지고 있는 국내 2차 전지 업체가 급격한 시장 팽창 과정에서 시장 점유율을 확대 할 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

### ❁ 참고 문헌

- [1] 2010 電池關連市場實態總調查 下卷, <https://www.fuji-keizai.co.jp/market/10005.html>
- [2] 지식경제부, 제8차 녹색성장위원회 보고자료, 2010.07
- [3] Xiangchun Zhang, MULTISCALE MODELING OF LI-ION CELLS: MECHANICS, HEAT GENERATION AND ELECTROCHEMICAL KINETICS, Ph.D Dissertation, Univ. Michigan, 2009.
- [4] M. W. Verbrugge and R. S. Conell, Electrochemical and Thermal Characterization of Battery Modules Commensurate with Electric Vehicle Integration, Journal of The Electrochemical Society, 149, A45-A53 (2002).
- [5] Alexander Fridman, Plasma Chemistry, Cambridge University Press, 2008
- [6] Jaephil Cho, Yong Jeong Kim, and Byungwoo Park, "Novel LiCoO<sub>2</sub> Cathode Material with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating for a Li Ion Cell," Chem. Mater. 2000, 12, 3788-3791
- [7] J.-M. Tarascon\* & M. Armand, "Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries," NATURE | VOL 414 | 15 NOVEMBER 2001, 359-367
- [8] P. L. Moss, G. Au, E. J. Plichta, and J. P. Zheng, An Electrical Circuit for Modeling the Dynamic Response of Li-Ion Polymer Batteries, Journal of The Electrochemical Society, 155, A986-A994 (2008).
- [9] W. M. Choi, "Battery performance of surface modified separator," IEEE 7th annual Battery Conference on Applications and Advances, 2002, 986375
- [10] S. S. Zhang, "A review on electrolyte additives for lithium-ion batteries," J. Power Sources 162, (2006) 1379-1394
- [11] Claire Tendero, Christelle Tixier, Pascal Tristant, Jean Desmaison, Philippe Leprince, "Atmospheric pressure plasmas: A review," Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Volume 61, Issue 1, January 2006, Pages 2-30
- [12] P.W. Kramer, Y.S. Yeh, H. Yasuda, "Low temperature plasma for the preparation of separation membranes," J. Membrane Science 46, 1, (1989) 1-28

- [13] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva and A. A. Firsov, "Electric Field in Atomically Thin Carbon Films," Science, 2004, 306, 666.
- [14] M. Pumera, "Electrochemistry of Graphene: New Horizons for Sensing and Energy Storage," The Chemical Record, 9, (2009) 211-223
- [15] M Meyyappan, "A review of plasma enhanced chemical vapour deposition of carbon nanotubes," J. Phys. D: Appl. Phys. 42 (2009) 213001 (15pp)
- [16] Justin L. Sabourin, Daniel M. Dabbs, Richard A. Yetter, Frederick L. Dryer, and Ilhan A. Aksay, "Functionalized Graphene Sheet Colloids for Enhanced Fuel/Propellant Combustion," ACS Nano, 2009, 3 (12), pp 3945-3954



이 대 훈

- 한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부  
선임연구원
- 관심분야 : 플라즈마 공정
- E-mail : dhlee@kimm.re.kr



허 민

- 한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부  
선임연구원
- 관심분야 : 플라즈마 물리
- E-mail : minhur@kimm.re.kr