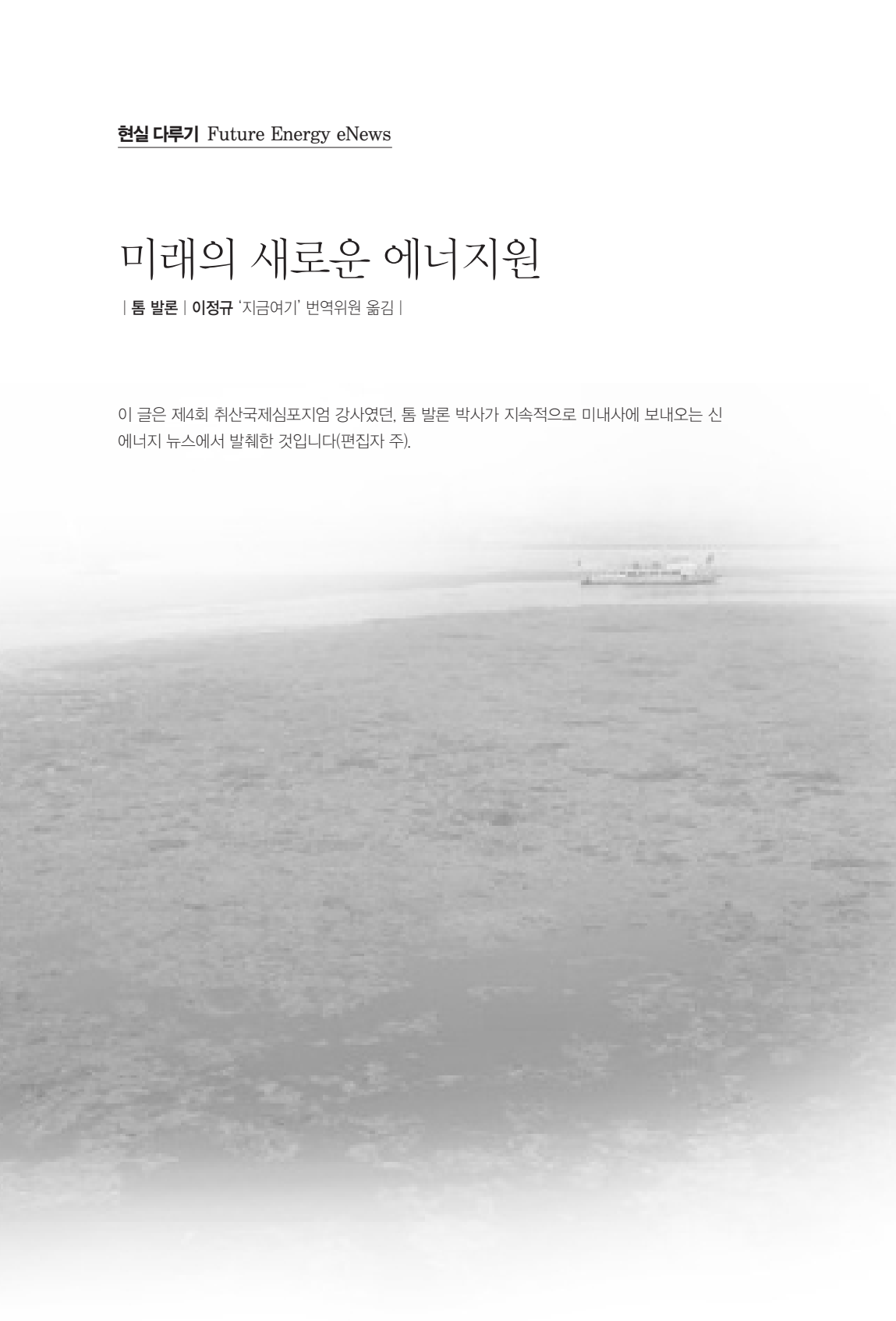
미래의 새로운 에너지원

| **톰 발론** | **이정규** '지금여기' 번역위원 옮김 |

이 글은 제4회 취산국제심포지엄 강사였던, 톰 발론 박사가 지속적으로 미내사에 보내오는 신 에너지 뉴스에서 발췌한 것입니다(편집자 주).



조류藻類에서 수소를 얻다

프라치 파텔-프레드(Prachi Patel-Predd), 테크놀로지 리뷰

유전자 조작된 조류에서 수소와 생물원료를 얻을 수 있을까?

http://www.technologyreview.com/Energy/19438/

조류는 생물연료원으로 유망하다. 재배가 쉽고 다루기 쉬운데다 일부 조류에서는 대두에서 생산되는 것과 비슷한 기름이 풍부하고 수소도 생산해낸다. 조류는 광합성 과정에서 자연스레 소량의 수소를 만들어내는데, 버클리에 있는 캘리포니아 대학에서 식물학과 미생물학을 가르치는 아나스타시오스 멜리스(Anastasios) 교수는 이 작은 녹색 유기체의 유전자를 조작해 수소를 얻을 수 있을 것이라 주장한다.

멜리스 교수가 만들어낸 돌연변이 조류는 정상 조류보다 햇빛을 더 잘 활용하고 생산하는 수소의 양도 세 배나 더 많다. 또 생물연료가 되는 기름의 생산량도 늘렸다.

이는 대규모 상용 배양조(bioreactors)에서 수소 생산을 극대화하는데 중요한 발견이다. 실험실에서 멜리스 교수는 말한다. "[우리는] 빛이 모든 방향에서 침투할 수 있도록 얇은 병에서 저밀도로 배양한다." 이렇게 함으로써 세포는 들어오는 빛 모두를 이용할 수 있다. 하지만 햇빛이 내리쬐는 야외의 연못에서 조류가 고밀도로 배양되는 상업적 배양조에서는 상층의 조류가 햇빛을 모두 흡수하지만 아주 일부만 이용할 수 있을 뿐이다.

멜리스 교수와 동료들은 엽록소가 적은 조류를 고안해 햇빛을 적게 흡수하도록 하고 있다. 햇빛이 더 깊이까지 들어가 깊은 곳의 조류도 수소를 만들어 내도록 하기 위해서이다.

연구자들은 광합성이 일어나는 중심 세포 조직인 엽록체 내의 엽록소 양을 조절하는 유전자를 조작한다. 자연상태에서 각 엽록체에는 엽록소 분자가 600개 있다. 지금까지 연구자들은 이 수를 절반으로 줄였고 앞으로 이 수를 130개까지 더 줄일 계획이다. 그렇게 되면 배양조에서 고밀도로 배양된 조류는 현재보다 수소를 세 배 더 생산하게 될 것이라고 멜리스 교수는 이야기한다.

로렌스 버클리 국립 실험실의 에너지 공학자 롤프 멜혼(Rolf Mehlhorn)은 "[엽록소를] 감소시켜 생산성을 높이게 되면 이후 만들어지는 생산품 모두가 영향을 받게 될 것"이라고 한다. 햇빛을 보다 효과적으로 이용하는 조류는 기름을 더 많이 생산해낼 것이다. 콜로라도 주에 있는 Soliz Biofuels나 캘리포니아 주에 있는 Live Fuels 같은 창업사들이 조류에서 기름을 추출하려 시도하고 있는데, 이 기름을 정제해 디젤 연료나 제트 연료를 만들 수 있다.

수소 생성에 이르기까지 아직 적어도 5년이 더 걸릴 것으로 보인다. 우선 조류에서 생산되는 수소의 양을 늘려야 한다. 정상적인 광합성에서 조류는 태양 에너지를 이용해 탄소와 물을 포도당으로 전환하고 이 과정에서 산소를 배출하는데 광합성의 3-5%만 수소로 바뀐다. 멜리스 교수는 조류의 광합성 전부가 수소 생산에 이용된다면 매일 에이커 당 80kg의 수소를 생산할 수 있을 것이라 추정한다.

조류 광합성의 100%를 수소로 전환하는 게 불가능할 수도 있다. 멜리스 교수는 "어림잡아 50%까지 끌어올릴 수 있다면 경제성이 있다."고 말한다. 50% 효율이면 하루에 에이커 당 40kg의 수소를 생산할 수 있고, 이에 따른 생산가는 킬로그램 당 $2.80 정도가 될 것이다. 이 가격이라면 수소 1kg이 가솔린 1갤런에 맞먹게 되어 가솔린과 가격 경쟁을 할 수 있게 된다.

2000년에 멜리스 교수는 국립재생에너지실험실(NREL)의 연구자들과 조류에서 황 영양소를 빼버리면 더 많은 수소가 만들어진다는 것을 발견했다. 유황소 결핍은 한 번에 며칠씩 밖에 할 수 없었지만 그동안 조류 광합성량의 10%가 수소의 생산에 이용되었다.

선임 연구원 마이클 사이버트(Michael Seibert)에 따르면 NREL의 연구원들은 수소 생산 효율을 높이는데 진전을 보이고 있다. 이제는 조류의 수소 생산 기간을 단지 며칠이 아니라 최대 3개월까지로 늘렸다. 사이버트는 이 과정을 대규모 배양조에 적용할 때 멜리스 교수가 만든 엽록소를 줄인 조류가 유용할 것이라고 기대한다. 하지만 돌연변이 조류를 NREL의 연구원들이 테스트해 보기 전에는 이에 대해 이야기하기 너무 이르다고 말한다.

그림 1. 조류 전력

정상적인 녹조류가 내리쬐는 대부분의 빛을 흡수하는 동안(오른쪽), 엽록소 수를 줄인 유전자 조작 조류는 빛을 통과시킨다. 대규모의 고밀도 배양조에서 엽록소가 부족한 조류는 햇빛이 보다 깊숙한 곳에 있는 조류에도 전달될 수 있게 하여 햇빛을 보다 효율적으로 이용한다.

〈사진 제공: 아나스타시오스 멜리스 교수, 버클리의 캘리포니아 대학〉

바이러스 결집 배터리

케빈 불리스, 테크놀로지 리뷰,
http://www.technologyreview.com/printer_friendly_article.aspx?id=16673#

생물학적 주형으로 전극 활동은 촉진하고 크기는 줄인다.

오늘날 우리가 사용하는 배터리 크기와 무게의 절반 이상은 에너지를 저장하는 것과 상관이 없다. 연구자들은 유전자 조작된 바이러스를 이용해 활성화된 배터리 물질을 작고 균등한 아주 얇은 투과성의 배터리 전극으로 응축시켜 현재의 리튬-이온 배터리보다 세 배의 에너지를 저장할 수 있다는 것을 보여주었다. 이는 대용량 자기응축 배터리로의 첫 걸음이다.

이 기술은 휴대폰과 노트북의 플랫 스크린에 얇은 판 모양으로 되어 있거나, 보청기에 부착된 고에너지 배터리에 응용될 수 있다. MIT연구자들에 따르면 이 같은 응축기술은 무기물의 위치를 정교하게 조작해 더욱 효율적인 촉매나 태양열 집열판으로 이용될 수도 있다.

재료공학과 생물공학자이며 이 프로젝트의 연구자인 안젤라 벨처(Angela Belcher) 교수가 설명한다. "이 대부분은 유전자 조작을 통해 정상적으로는 배터리 전극이 되지 않는 유기체에 정보를 주어 배터리 전극을 만들도록 하고 이를 하나의 장치로 조립하도록 했습니다." "내 꿈은 재료의 합성을 코드화할 수 있는 DNA순서를 갖고 비커에서 장치를 고안해내는 것이다. 그리고 이 연구가 그 길로 가는 큰 한걸음이라고 생각한다."

지난 사이언스지 온라인 판에 발표된 바에 따르면 연구자들은 M13 바이러스를 이용해 리튬-이온 배터리의 양극을 만들고 이를 재래식 음극으로 테스트했다. 이 바이러스는 단백질로 만들어졌는데 이들 단

백질 대부분은 코일처럼 뭉쳐 길고 얇은 원주를 만든다. 바이러스의 DNA에 뉴클레오티드 순서를 추가해 이 단백질들이 코발트 이온에 결합되는 부가적인 아미노산을 만들도록 했다. 그러면 새로운 단백질을 가진 이 바이러스는 스스로를 코발트 이온으로 코팅 처리하여, 물과 반응한 뒤에 코발트 산화물이 된다. 이 산화물은 현재 리튬-이온 배터리에 사용되는 탄소 기반 재료보다 훨씬 저장량이 큰 발전된 배터리 재료이다.

전극을 만들기 위하여 연구자들은 우선 폴리머 전해물을 조작한 바이러스 용액에 담근다. 바이러스는 전해질 표면에 균등하게 코팅된다. 그런 다음 코팅된 전해물을 배터리 재료를 함유한 용액에 담근다. 바이러스는 이들 물질을 고밀도 배터리를 위한 결정구조로 질서정연하게 배열한다.

[배터리형성과정에 대한 그림을 보려면 아래의 사이트로 가보세요.]
http://www.technologyreview.com/printer_friendly_article.aspx?id=16673#

이들 전극은 탄소를 기반으로 한 것들보다 용량이 두 배라는 것이 증명되었다. 이를 더 낫게 개선하기 위하여 연구자들은 다시 유전자 공학으로 시선을 돌렸다. 코발트를 결집시킬 유전자 코드는 그대로 두고 금과 결합할 바이러스 단백질을 생산하는 DNA 가닥을 더 첨가했다. 그런 다음 바이러스는 코발트 산화물과 금 입자로 구성된 나노와이어로 결집되었다. 이렇게 만들어진 전극에는 에너지가 30% 더 저장되었다.

무기물 결집에 바이러스를 이용하는 데는 몇 가지 장점이 있다고 산타바바라에 위치한 캘리포니아 대학의 생화학과 분자유전학 교수인

다니엘 모르스(Daniel Morse)는 말한다. 우선 단백질들과 이들에 결합된 코발트와 금의 위치가 정확하다. 바이러스는 번식이 빨라 많은 양으로 시작할 수 있어서, 이 제작 기술이 급속히 성장할 수 있음을 암시한다. 그리고 현재 배터리 재료 생산에 필요한 그런 값비싼 과정이 필요 없다.

"산업 단계에서도 금방 사용할 수 있다."고 오스틴에 있는 텍사스 대학의 생화학과 유기화학 교수인 브렌트 아이버슨(Brent Iverson)은 말한다. "나는 나노입자를 만들 수 있는 이보다 싼 주형이나 틀은 상상이 안 됩니다."

MIT의 재료 과학과 공학 교수이자 벨처의 공동연구자 중의 하나인 옛-믹 치앙(Yet-Mig Chiang)은 이 처리 과정을 이용한 특수한 용도의 소형 배터리를 2년 안에 만들 수 있지만, 아직 할 일이 많이 남아있다고 이야기한다. 예를 들어 코발트 산화물이 최고의 재료가 아닐 수도 있어 연구자들은 바이러스가 다른 재료와 결합할 수 있도록 조작할 계획이다.

이들이 과거 사용했던 방법 중 하나는 "진화 유도"라는 과정이다. 바이러스가 결합하기 바라는 재료를 담은 유리병에 여러 가지 바이러스들과 그 변종 수백 만 가지를 집어넣는다. 이들 중 일부 바이러스가 가진 단백질이 재료와 결합하게 된다. 이 바이러스를 고립시키려면 단순히 재료를 씻기만 하면 된다. 재료와 결합된 바이러스만이 남는 것이다. 그런 다음 이 바이러스들을 번식시킨다. 결합과 씻어내는 것을 몇 번 반복하고 나면 재료와 가장 잘 결합하는 바이러스만 남게 된다.

연구자들은 음극을 결합하는 바이러스도 만들고자 한다. 그런 다음 양극과 음극을 자기 결집 폴리머 전해질의 반대편에 놓을 것이다. 이 전해질은 프로젝트의 또 다른 주요 기여자인 폴라 하몬드[Paula

Hammond* 정정: 바이러스 배터리 작업은 MIT 연구자들의 공동 연구 결과이다. 원본에선 안젤라와 옛-밍 치앙이 언급되어있는데, 이 연구의 주요 부분은 화학공학 교수인 폴라 하몬드의 자기 결집 폴리머 전해질(self-assembled polymer electrolyte)이었다]가 개발한 것으로, 이렇게 되면 그저 전극이 아닌 자기 결집 배터리가 만들어진다. 또 다른 목표는 두 빗살이 서로 겹치듯 음극과 양극 재료가 교차하는 "깍지 낀(interdigitated)" 배터리를 만드는 것이다. 이렇게 하면 더 많은 양의 에너지를 저장하고 보다 강력하게 에너지를 분출하는 배터리를 만들 수 있다.

그리고 배터리는 단지 시작일 수 있다. 바이러스가 다른 위치에 다른 단백질을 가질 수 있으므로-중심부의 단백질과 끝의 단백질- 연구자들은 어떤 재료와는 중심에서 결합하고 다른 재료와는 양끝 부분에서 결합하는 바이러스로 만들어낼 수 있다. 이미 벨처의 그룹은 스스로를 반도체로 코팅하고 나서 금 전극에 양끝을 붙일 수 있는 바이러스를 만들어 냈는데, 이로써 사용 가능한 트랜지스터로 발전될 수 있다.

아이버슨은 말한다. "이런 식으로 정말 유용한 배터리를 만들어낼 수 있다면, 그게 어떻게 적용될지는 상상을 초월합니다."

전력망 수리(Fixing the Power Grid)

피터 페어레이(Peter Fairley), 테크놀로지 리뷰(Technology Review)
http://www.technologyreview.com/Energy/19584/?nlid=618

대용량 배터리로 정전을 방지하고, 재생 전력을 경제적으로 만들 수 있다.

대규모 동력 저장은 에너지 미래에 매우 중요하다: 미국의 전기

설비 선두 연구개발조합인 전력연구소(Electric Power Research Institute)는 저장소가 재생 전력 사용을 널리 퍼지게 할 것이며, 보다 믿을 수 있고 효율적인 전력망을 만들 것이라고 한다. 오하이오 주 콜롬부스에 본부를 둔 대형설비업체 미국전력(American Electric Power, AEP http://www.aep.com/)은 드디어 전력망 저장 기술이 미국 내에서 상용화될 준비가 되었다고 발표했다. 지난달에 AEP는 수백만 와트 배터리 시스템 세 개를 주문했고, 2010년까지 25백만 와트 저장소를, 2020년까지는 이의 40배를 갖는 것을 목표하고 있다.

"4, 5년 전엔 꿈에 불과했던 일이 지금 실제로 일어나고 있습니다."라고 AEP에서 일하는 전력 저장 분야의 전문가인 알리 누라이(Ali Nourai)가 말한다.

AEP 시스템은 체계는 2층 버스 크기의(아래 참조) 나트륨-황배터리에다 파워 일렉트로닉스(power electronics: 발전 · 변전 등의 고전압 · 대전류를 다루는 전자공학)를 사용해 직류 배터리에서 나오는 교류 전류를 조절한다. 이 시스템이 미국에는 새로운 기술이지만 일본에서는 1990년대 초부터 백만 와트 규모로 사용이 되어왔다. 나고야의 NGK 절연체 회사(http://www.ngk.co.jp/english/index.html)가 생산한 배터리가 사용되었다.

변화하는 찰스턴 : AEP는 이 대형 나트륨-황배터리를 웨스트 버지니아 주의 찰스턴에 시범 배치하였다. 배터리는 변전소에 과부하 없이 최대 7시간 동안 1.2백만 와트의 전력을 제공하였다. 2006년에 설치한 이후로 아무런 문제가 발생하지 않아 AEP는 이 에너지 저장 기술이 보다 활성화가 될 준비가 되었다고 확신하게 되었다.

〈자료제공:AEP〉

2006년 대형저장장치 시스템을 설치한 찰스턴에서의 시험운행으로 AEP와 미국의 다른 공익기업이 저장장치가 지닌 경제성과 신뢰도에 자신감을 갖게 되었다고 누라이 씨는 말한다. 전기 사용량이 많은 여름과 겨울에 찰스턴 일대의 지역 변전소 변압기들이 과부하로 정전이 나곤 했다. 전력 사용량을 수용할 변전소를 다시 세우려면 적어도 3년은 걸린다. 하지만 전력 수요가 낮을 때 충전을 해서 사용량이 최고조에 달할 때 1백 2천만 와트의 전력을 7시간 동안 공급할 수 있는 배터리 시스템을 AEP가 설치하는 데는 9개월 밖에 걸리지 않았다.

AEP의 새로운 프로젝트는 전력을 안정적으로 공급하는데 어려움을 겪고 있는 지역에 용량이 조금 더 큰 2백만 와트의 7시간 전력 공급 배터리 시스템을 설치하는 것이다. 예를 들어서 버지니아 주의 밀튼(Milton)지역에 설치된 배터리는 전력선이 약해 쉽게 정전이 일어나는 지역의 소비자들에게 예비전력을 공급할 것이다. "정전이 발생하면 가능한 한 많은 이들에게 배터리 전력을 곧바로 공급해 소비자들은 정전이 있었다는 것도 알 수 없을 것입니다."라고 누아리 씨는 설명한다. 이 배터리 시스템으로 밀튼 지역에 추가로 건설하려던 지역 변전소 건설을 5~6년 늦출 수 있게 됐다.

AEP가 지역 변전소를 보다 영구적으로 업그레이드하기로 결정하거나 새로운 전력선을 설치하게 되면(이런 작업은 5~6년 걸린다) 가까이 있는 예비 배터리를 다른 전력 부족 지점으로 옮기면 된다. "배터리를 지게차로 들어올려 트럭에 실기만 하면 됩니다. 일주일이면 새 장소에서 바로 작동 가능합니다."라고 누아리 씨는 말한다.

〈에너지 저장, Energy Storage: A Nontechnical Guide〉의 저자이자 지난 주 축전(蓄電) 기술에 관해 뉴욕시에서 열린 회의의 의장을

맡았던 리차드 박스터(Richard Baxter) 씨는 AEP의 새로운 프로젝트는 이 분야의 "좋은 리트머스 시험"이 될 것이라고 한다. "이제 축전 기술은 실용가능하고 경제성이 있는 상품이 되고 있습니다."

전력망 저장 시장이 등장하면서 배터리 개발에 새로운 사업자들이 몰리고 있다. 일리노이 주의 페오리아에 있는 '반딧불이 에너지'사(Firefly Energy, http://www.fireflyenergy.com)는 표면이 넓은 나노 구조 전극을 사용해 납축전지 기술을 되살리고 있고, 네바다 주의 리노에 본부를 둔 알테어 나노테크놀로지사(Altair Nanotechnolo-gies, http://www.altairnano.com)는 리튬 배터리를 개발하고 있다. 6월에 다국적 설비회사 AES는 알테어사 배터리를 다량 구매하기로 했다. 최고경영자인 알란 고쳐(Alan Gotcher) 씨는 알테어사가 1백만 와트 용량의 15분 견본을 연말까지 배달하기로 했다고 밝혔다.

한편 AEP는 보다 주도적으로 축전 분야에 변화를 가져오고자 탐색 중이다. 풍력 발전이나 태양광 발전과 같이 전력 생산량이 일정하지 않은 재생가능 에너지원들을 보다 안정적이고 의존할 수 있게끔 바꾸는 것이다. 이 회사의 계획은 보유한 세 번째 2백만 와트 배터리 시스템을 풍력 터빈들과 연결하는 것이다. 누아리 씨는 터빈에서 흐르는 전력이 짧은 시간 동안 변하는 현상을 배터리를 사용해 없앨 수 있는지 알아보는 것이 목표라고 말한다. 그게 가능하다면 전력회사들은 풍력 발전에서 오는 에너지를 자기네 전력망으로 더 많이 흡수해 들일 수 있게 된다.

하지만 누아리 씨는 AEP가 전력 저장을 통해 풍력 에너지의 가치도 높일 수 있는지 알고 싶다고 한다. 이는 적어도 두 가지 방법으로 가능한데, 우선 밤 시간 동안 풍력 에너지를 저장해 두었다가 사용량

이 많아 전력 공급가가 가장 높은 낮 시간에 공급하는 것이다. 또 풍력발전소에서 전력을 보다 안정적으로 공급하게 되면 수익성도 더 높아질 것이다. 풍력발전소 운영자 등 독립적으로 전기를 생산하는 사람들이 전력 판매업자들에게 공급하려면 정해진 시간에 적정량의 전력을 공급하겠다는 약속을 할 수 있어야 한다. 판매 대상이 지역인지 전국인지 규모에 세부사항은 다소 다르겠지만 바람이 기대대로 불지 않는다는 등의 이유로 제때 전력을 공급하지 못하는 풍력발전소 운영자들은 벌칙을 받을 수 있다. 바람이 불 때 생산된 전력의 일부를 저장해 둘 수 있는 이런 시스템은 이런 위험을 대부분 제거할 수 있다.

누아리 씨는 일본의 전력회사들은 풍력발전을 보다 믿을 수 있고 수익성 있게 만드는 이런 전력 저장 기술을 이미 설치하고 있다고 지적한다. 이는 축전기 시스템 개발비용의 1/3을 떠맡은 정부 장려금과 밤낮 시간에 따라 요금의 차이가 큰 덕분이다. 현재 매년 9천만 와트에 해당하는 나트륨-황 배터리 시스템을 생산하는 NGK는 밀려드는 수요를 감당하기 위해 두 번째 공장 건설을 고려하고 있다고 한다. 반면 아일랜드의 에너지 정책 연구기관인 '지속가능한 에너지 아일랜드'에서 올해 끝마친 연구를 통해 시차를 이용한 에너지 저장/공급 계획은 유럽에서도 이미 수익성이 있다고 결론 내렸다 (http://www.sei.ie/ 참고).

그러나 지난 해 전력연구소에서 모은 전문가 위원회는 그런 시차를 둔 저장/공급 방식이 미국 시장에서 경제성이 있으려면 축전 가격이 킬로와트-시간 당 150불 이하로 내려야 할 것이라 판단했다. 올 봄 연구소에서 발간한 보고서에서 NGK의 나트륨-황 배터리를 사용한 축전 시스템의 킬로와트-시간 당 생산가가 300에서 500불에 달한다고 추산한다. 이런 가격 차이로 인해 최근에는 전기보다 저장이 더 쉬

운 열의 형태로 에너지를 저장하는 태양열 발전소에 대한 관심이 높아지게 되었다. (“태양에너지를 효율적으로 저장하는 법” 참고)

참고 사이트 》》

아일랜드에서의 연구
http://www.sei.ie/getFile.asp?FC_ID=2901&docID=59

태양에너지 저장
http://www.technologyreview.com/Energy/19440/

EPRI 보고서
http://www.epriweb.com/public/000000000001014668.pdf

작은 태양전지(Tiny Solar Cells)

케빈 불리스, 테크놀로지 리뷰
http://www.technologyreview.com/Nanotech/19595/?nlid=618

나노와이어(nanowire) 광전지로 태양전지판을 싸게 만들다.

하버드 대학의 연구자들은 사람 머리카락보다 훨씬 가는 태양전지를 만들었다. 폭이 300나노미터에 불과한 나노와이어 하나로 만들어진 이 전지들은 환경 모니터링이나 군사적 용도로 쓰이는 작은 센서나 로봇들에 전력을 공급하는데 유용하게 쓰일 수 있다. 게다가 이 태양전지의 기본 디자인은 대규모 전력 생산에도 쓰임새가 많아 태양에서 전기를 얻는데 드는 비용을 낮출 가능성이 크다.

새로운 태양전지 각각은 중심에 있는 실리콘 결정을 다른 전기적 성

질을 가진 실리콘 층이 여러 겹 동심원으로 감싼 나노와이어이다. 이들 실리콘 층들은 기존의 태양전지에서 반도체 층들이 전기를 생산하기 위해 빛을 흡수해 전자를 포획하던 것과 똑같은 기능을 한다. 이 전지들을 만들기 위해 하바드 대학의 화학 교수인 찰스 리버(Charles Lieber)는 기존에 센서나 트랜지스터로 쓸 나노와이어를 만드는데 자신이 사용하던 방법을 일부 변경했다. 그리고 이들 태양전지로 자신이 이전에 만든 pH센서와 일련의 트렌지스터 같은 나노와이어 장치들에 전력을 공급할 수 있다는 것도 증명했다.

"이 논문은 단일 실리콘 나노와이어를 이용해 태양 에너지를 거둬들이는 첫 번째 예입니다."라고 죠지아 공과대학의 재료공학 교수인 즈옹 린 왕(Zhong Lin Wang)이 말한다. 그는 리버의 연구가 "나노기술 분야에서 돌파구가 되는 연구"라고 부른다.

이들 나노와이어 태양전지는 처음에는 아주 작은 센서나 부속 센서와 전자 부품들이 하나의 전원에서 전력을 공급 받으면 좋은 로봇 등과 같이 크기가 핵심인 틈새 영역에서 활용될 가능성이 가장 크다. "독립적인 나노기계와 나노시스템을 만드는 것에 대한 논의가 활발합니다.라고 IBM연구소의 연구원인 파돈 아보리스(Phaedon Avouris)는 말한다. "문제는 늘 어떻게 전력을 공급할 것인가 입니다. 중앙전원공급장치에 연결되지 않은 독립적인 자급식 나노시스템을 원한다면 이런 종류의 것이 필요합니다."

궁극적인 목표는 다른 식으로라면 불가능할, 스스로를 자기 조작해 기구를 만들어내는 전자 부품을 만드는 게 될 것이다(리버는 나노와이어를 사용하면 그런 부품을 만드는 것이 가능하다는 것을 보여주었다. 나노와이어는 용액 속에서 스스로 규칙적인 배열을 만들어낸다). "나노프로세서, 아마도 센서 같은 것, 기억장치와 그걸 작동할 전원을

통합하고 싶습니다."라고 리버 교수는 말한다. "기존의 기술로 이런 걸 다 집어넣으려면 꽤 번거로울 겁니다."

자그만 기계들에 전원을 공급하는 외에도, 미세한 와이어들로 만들어진 태양전지들은 결국에는 대형 어레이로 한데 묶여 기존에 지붕 위에 설치되던 태양전지판을 대체하게 될 것이다. 리버의 연구는 여전히 초기단계이지만 그의 새로운 나노와이어는 칼텍의 연구자들이 제안한 이론적인 태양전지가 현실적으로 가능하다는 것을 보여준다. 칼텍의 응용물리 및 재료과학 교수인 해리 앳워터(Harry Atwater)와 화학 교수인 나단 루이스(Nathan Lewis)는 나노와이어로 만들어진 태양전지들이 값싼 재료들로 만들 수 있기 때문에 기존의 태양전지보다 훨씬 쌀 것이라고 한다. 예를 들어 루이스 교수는 녹(rust)으로도 만들 수 있다고 생각한다.

지금까지 그런 싼 재료들로 만든 태양전지들은 설계상의 요구조건이 지닌 기본적인 모순들 때문에 실용적이지 못했다. 태양전지가 효율이 좋으려면 적어도 두 가지를 잘 해야 한다. 우선 빛을 잘 흡수해야 한다. 그래서 빛이 통과하지 못하도록 충분히 두꺼운 활성 물질이 필요했다. 하지만 흡수된 빛에서 떨어져 나온 전자들을 모을 필요도 있다. 이를 위해선 물질이 아주 얇은 게 낫다. 그렇지 않으면 전자들이 재료 안에 갇혀 버린다. 이런 모순적인 설계 조건을 조화시키는 한 가지 방법은 재료의 두께를 상대적으로 두껍게 하되 전자를 잡을 수 있는 결함이나 불순물이 없는 극히 순수한 결정질의 재료를 써야 했다. 그런 물질은 효율은 좋지만 아주 비싸서 태양전지판의 가격이 높아질 수밖에 없다.

리버 교수가 자신의 태양전지에 사용한 것과 같은 그런 나노와이어가 대안이 될 수 있다. 나노와이어는 길이를 따라 상당한 양의 빛을 흡

수할 수 있다. 동시에 전자들이 나노와이어 내부에 한 층에서 다른 층으로 조금만 움직여가면 수집된다(이들 층은 전자들을 전기적으로 양성인 '구멍'에서 전자들을 분리하는 역할을 해서 전자를 수집되도록 한다). 재료가 얇기 때문에 전자가 한 층에서 다른 층으로 옮겨가기 전에 결함에 의해 잡힐 가능성이 아주 낮아서 결함이 좀 더 많은 싼 재료를 사용할 수 있게 된다.

리버 교수는 나노와이어가 실제로 전기를 생산할 수 있음을 보여주긴 했지만, 상용 태양전지로 개발되려면 몇 가지 해결해야 할 문제점들이 있다. 리버 교수가 시험한 나노와이어 태양전지의 수가 많지 않다. 대규모로 응용할 수 있으려면 나노와이어는 화학적으로 키워져 집적 배열(dense array)할 필요가 있다. 앳워터와 루이스는 최근 이런 방향으로 연구를 진척시켰다. 리버의 와이어처럼 여러 층을 가지지 않고 미세 와이어를 집적배열로 키우는 방법을 기술하는 논문을 지난 달 두 편 발표한 것이다. 액체 전해질과 짝을 이룬 와이어로 빛에서 전기를 생산해냈다. 하지만 리버가 한 것과 같은 고체상태의 태양전지를 생산하는 것이 쉽기 때문에 루이스와 앳워터는 여러 층을 가진 와이어 배열을 생산하는 연구를 하고 있다.

이 두 그룹의 연구에 가장 큰 제한 사항은 태양전지의 효율이 아주 낮다는 점이다. 예를 들어 리버 교수의 전지는 들어온 빛의 3.4%만을 전력으로 전환시킨다. 실험실에서 이론을 검증하는 수준으로는 고무적인 수치이지만 기존의 실리콘 태양전지판의 20%가 넘는 효율에는 아직 한참 떨어져 있다. 값싼 원료를 사용할 수 있다는 잠재적인 장점에도 불구하고 와이어에 기반한 태양전지가 기존 기술과 경쟁력을 가지려면 효율이 10% 선은 되어야 한다. 이들 연구의 다음 단계는 더 많은 빛을 흡수할 수 있는 보다 집적된 와이어 배열을 만들고, 리버 교수

의 경우는 나노와이어 태양전지에서 생산되는 전압을 높이는 방법을 찾는 것이다.

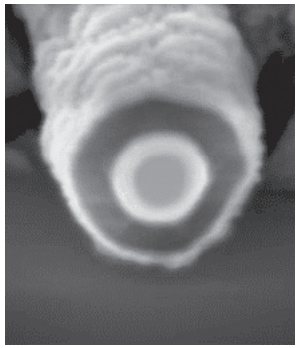


그림 2. 나노 태양전지

빛을 전기로 변환하는 실리콘 나노와이어의 단면. 전기로 전환하는 기기의 층을 색깔로 강조해 표시했다. 각 층은 전기적 성질을 다르게 하기 위해 다른 물질을 섞어 변경한 실리콘으로 만들어졌다. 산화 실리콘으로 된 외부층은 내부의 활성층을 보호한다. 나노와이어 내부의 전자가 광자에 의해 자유롭게 되면 전기적으로 양성인 '구멍'을 남기게 되는데, 푸른색 층과 붉은색 핵이 전자들을 구멍으로부터 분리시킨다. 일단 분리가 되면 전자들은 수집되어 전류를 생성한다. 노란색 층이 푸른색 층과 붉은색 층을 분리한다.〈자료제공: 하버드 대학의 찰스 리버 교수〉

(다음호에 계속)

저자 | **톰 발론**(Thomas Valone) | 물리학자이자 엔지니어로서 지난 20년 동안 신에너지 기술의 특허적용 범위와 정부승인, 투자기금 마련을 위한 조사를 해왔다. 이에 관한 그의 첫 번째 보고는 1980년 독일의 한스 니퍼 박사가 이끈 '중력장 에너지 컨퍼런스'에서 발표되었다. 뉴욕 주립대학에서 MD를 획득한 그는 여러 대학에서 물리학, 전기공학, 디지털과 마이크로프로세서 전자공학을 가르쳤다. 그 후 다양한 저술활동과 기고를 했으며, 3년간 미국 특허 심사관으로 일했다. 현재 비영리법인인 에너지 연구를 위한 Integrity Research Institute의 대표로 있다. 그리고 1999년 메릴랜드 베데스다에서 제1회 국제 미래에너지 컨퍼런스를 주최했다.

역자 | **이정규** | 천문학 · 물리학 전공