주제 우수성과 | 세계 최고 수준의 출력밀도를 갖는 차세대 고출력 밀도의 바나듐 흐름 전지용 스택 기술개발

주제 연구자 | 한탁돈 선임연구원 / 김보연구소 팀장

흐르지 않는 에너지 탱크로 친환경시대 온다

We need an energy miracle.
(우리는 에너지 기적이 필요합니다)

- 빌 게이츠

NASA가 쏘아 올린 작은 공

인류의 역사는 전기 에너지를 가두기 위한 투쟁의 역사였다. 1800년 이탈리아 물리학자 알레산드로 볼타가 발명한 전기를 발명한 이래 인류는 전기를 이용하여 인간의 삶에 큰 기여를 하였다는 데 집중해 왔다. 하지만 그 부분은 오랫동안 그쳤다는 듯 속에 감춰 있었다. 인류는 늘 전기이라는 인간의 고대한 시이에 에너지를 얻어다는 방식이었고, 에너지의 원형을 키우려면 배터리 관리의 기술이 가장 는 수밖에 없었다.

이 고정관념에 굴복이 깨진 것은 1960년 시점부터 인류의 시선이 지구 밖 우주로 향하던 1970년대부터 당시 미국 항공우주국(NASA)의 연구원이었던 로버트 스콘은 전기를 얻어 있었다. 우주선이 그 기자에서 태양광으로 인한 전기를 오랫동안 지탱하려면 수십 년 뿐 뭐일 수 있는 수명과 가혹한 지장 용량이 필요했기 때문이다. 하지만 당시에 그들에 배터리의 양지를 가지는 데 한계가 있었다. 여기서 찾아는 역 에너지를 꼭 고체 전구에만 가두어야 할까라는 질문에 봉착했다.

그렇게 탄생는 흐름 전지라는 개념을 생각해냈다. 에너지를 고체전이 아닌 액체 상태인 전해질에 녹여 저장한 탱크에 보관하고, 이를 펌프로 순환시키는 개념스 흐름전지(Redox Flow Battery)의 기초 개념을 정립했다. 전지를 하나의 부품이 아니라 화학 공장과 같은 '순환 시스템'으로 바꾼 것이다.

이 발명은 에너지 저장의 패러다임을 바꾼 시간이었다. 실험에 참집되는는 장치는 당시 공대 수준의 아주 단순한 수준이었다. 그러나 이 아이디어는 훗날 전지의 근본적인 한계를 뛰어넘는 시발점이 되었다. 흐름전지 전해질 탱크에 보관하고 펌프로 순환시키는 방식은 전지의 용량과 수명을 물리적으로 분리하여 전지의 크기로 조절하는 획기적인 구조가 완성된 것이다. 그게 바로 바나듐 흐름 전지다.

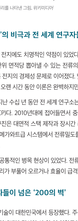
▲ 1970년 NASA가 개발한 첫 흐름전지 특허 문서 일러스트, NASA

바나듐 흐름전지는 전해질 탱크에 산화환원 상태를 달리한 두 개의 바나듐 이온을 저장하고 펌프를 통해 순환시키는 구조다. 전극 위에서 전자가 오가는 동안 전해액 자체가 에너지를 저장하는 방식이다. 이 덕분에 용량은 탱크 크기에 비례하고 수명은 전극 상태에 의존하는 구조가 완성된 것이다. 그게 바로 바나듐 흐름 전지다.

바나듐 흐름 전지는 고체가 들어 있지 않아 수명이 거의 무한하고 화재 가능성이 없으며 장기 보관이 가능하다는 장점을 가진다. 이 덕분에 기존 전지는 중요시하는 과제 양에서는 바나듐 흐름 전지의 기대한 그렇지 않을 할 때가 있다.

실제로 탄소 종류를 위해 신재생에너지를 쓰려면 기대한 저장소가 필요하다. 태양광과 풍력 같은 신재생에너지는 저장의 상황에 따라 불안정이 시시각각 변하기 때문이다. 낮에 남은 전기를 밤에 쓰고, 겨울의 바람을 여름까지 보관하려면 도시 단위의 에너지를 저장할 수 있어야 가능한 에너지 댐이 필요하다. 그게 바로 에너지 저장 시스템, ESS(Energy Storage System)다. 하지만 리튬이온전지는 가연성 에너지를 액체를 하기엔 저장하기는 위험이 있다. 첫째는 인연상이다. 리튬이온 전지는 가연성을 사용하는 특성상 발 폭주 현상이 하지마다, 한 번 불이 붙으면 잡기 힘들다. 이게 이유로인지, 화재는 수명과 비례한다. 수천 번의 충전, 방전을 거치면 한 다리 노화해 성능이 급격히 떨어지고, 대용량으로 구축할수록 위험 부담이 높아지는 특성 때문에 기술 개발이 어려웠다.

이 지점에서 바나듐 흐름 전지가 주목받는 이유가 분명해진다. 물을 산성의 수계 전해질을 사용해 화재 위험이 사실상 제로에 가깝고, 전극의 노화가 없어 20년 이상의 수명을 보장하기 때문이다. 이러 댓이 놓아는 그대로 본 제 저수지의 연못인 댐에 들어 있는 것처럼, 탱크 크기만 키우면 용량은 확장할 수 있는 방식이다. 그래서 한 개 저수지 ESS를 위한 최적의 해답으로 꼽힌다.



▲ 바나듐 흐름 전지의 원리를 나타낸 그림, 위키피디아

'양치한 큰 거인'의 비극과 전 세계 연구자들의 사투

하지만 바나듐 흐름 전지에도 치명적인 약점이 있었다. 에너지 밀도 문제 입니다. 액체를 순환시키려면 반응물 농도와는 구조적 특성상 단위 면적당 충전량 수 있는 전류의 양 즉 전류밀도가 매우 낮다는 것이다. 전지에 비해 현저히 낮았던 것이다. 이는 곧 바나듐 흐름 전지가 대량의 공간을 차지하게 된다는 것을 의미했다. 당시에 이미 설치 비용을 원했고, 바나듐 흐름 전지는 오랜 시간 동안 상용화되지 못했던 결정적인 이유가 바로 이것이었다.

이 약점을 개선 위해 지난 수십 년간 전 세계 연구소는 끊임없는 경쟁을 이어왔다. 대표적인 공이 중국에서한 대한 화학물리연구소(DICP)는 2010년에 전이금속이 중국의 강력한 추격자로 떠올랐다. 대한화학물리연구소(DICP)를 중심으로 한 연구진은 대한민국 스택 제작과 장시간 운전 실증에 집중했다. 이들은 실험실 수준의 성능 개선보다, 수백 킬로와트에서 메가와트급 시스템에서 전류밀도를 안정적으로 유지하는 기술을 축적하여 바나듐 흐름 전지의 산업화를 앞당겼다.

대한민국 과학자들이 남긴 '200의 벽'

최근 이 벽을 넘은 기술이 대한민국에서 등장했다. 주식회사 에이치투 홀딩스의 다음테스코프프라이, JNTG, 한국전자기술연구원, 연세대학 공동팀은 기존 전지의 2배 이상 고밀도 전지 스택 수준인 200mA/cm²의 고전류밀도 스택 제조 기술을 확보하는 데 성공했다.

▲ 에이치투 기술연구소에서 조립되고 있는 전지 스택, 에이치투

전류밀도가 120에서 200으로 늘어났다는 건 동일한 출력을 내는 데 필요한 스택의 크기를 거의 절반 가까이 줄일 수 있다는 뜻이다. 스택은 바나듐 흐름 전지 시스템 비용의 약 30~40%를 차지하는 핵심 부품이기 때문에 스택의 개수가 줄어들면 이를 연결하는 배관, 펌프, 센서 등 주변 장치의 비용도 함께 줄어든다. 게다가 100시간 이상의 충·방전 실험을 한 후에도 초기 수준의 90% 이상의 성능을 유지하는 것 확인했으로써 연구팀은 '상용 가능'이라는 말에 힘을 실었다.

▲ 에이치투 기술연구소 스택 특수 출력 장치에 동일한 스택이 있습, 에이치투

이번 연구 성과가 빛나는 이유는 상용화가 가장 어려운 지점을 넘었다는 데 있다. 대부분 연구가 실험실 수준의 성능만 보여주는 데 그쳤지만, 이번 팀은 실제 공장에 설치할 수 있는 크기의 장치를 만들어 실증 단계에 올렸다. 2023년 1월부터 2024년 2월까지 1년 동안 진행된 실증에서 이들은 수십 시간 연속 달리는 에너지 인한 기준이 까다롭기로 유명한 독일의 유럽 내 데이터 센터와 산업현장에서 인터넷 핵심 부품으로 판매되는 스택을 선택했다는 건 국내 기술이 글로벌 표준을 선도하고 있다는 증거다.

▲ 이차전지 기술개발 소개하고 있는 에이치투 홀딩스 대표, 에이치투

이번 연구 성과가 빛나는 이유는 상용화가 가장 어려운 지점을 넘었다는 데 있다. 대부분 연구가 실험실 수준의 성능만 보여주는 데 그쳤지만, 이번 팀은 실제 공장에 설치할 수 있는 크기의 장치를 만들어 실증 단계에 올렸다. 2023년 1월부터 2024년 2월까지 1년 동안 진행된 실증에서 이들은 수십 시간 연속 달리는 에너지 인한 기준이 까다롭기로 유명한 독일의 유럽 내 데이터 센터와 산업현장에서 인터넷 핵심 부품으로 판매되는 스택을 선택했다는 건 국내 기술이 글로벌 표준을 선도하고 있다는 증거다.

▲ 한탁돈 팀장, 에이치투

수출의 불보는 스케일업으로 이어진다. 현재 연구팀은 스케일 확대 규모인 8.8MWh급 바나듐 흐름 전지 ESS 구축 사업을 진행 중이다. 이는 국내 기술이 단품 부품 단계를 넘어 에너지저장시스템(ESS) 대형 시스템 전체가 하나 수출에 도달했음을 보여 준다. 국내 분야도 무척이다. 최근 한화기술사는 중앙계약 사업을 따낸 전지의 대한민국에 하는 흐름 전지를 제조하고 있다. 포항 산업 그룹에 스택은 국내 사정 진출을 위한 'EnerFLOW540' 모듈의 핵심 부품으로 탑재될 예정이다.

2023년 불렴에그는 에너지 리서치센터(BNEF) 보고에 따르면 ESS 설비 규모는 2022년 43.8GW/95.9GWh에서 2030년 508GW/1432GWh으로 10배 이상 증가 할 것으로 전망된다. 이에 따라 글로벌 ESS 연간 시장 규모도 2022년 152억 달러에서 2030년 395억 달러까지 3배가량 성장할 것으로 보인다.

지금 이 시장에서는 미국과 중국이 ESS 보급량이 절반 이상을 차지하고 있다. 하지만 이번 연구성과로 인해 우리나라 고출력 스택 기술을 선구 수출 시장을 개척할 가능성이 높아졌다. 실험실을 넘어 실제 산업 현장에 적용되기 시작한 국산 바나듐 흐름 전지 기술이 지속 가능한 에너지 인프라로 자리잡기를 기대해 본다.

▲ 연구팀은 스택만 제작 나오는 에너지, 에이치투

이용기 미니 인터뷰

Q 이번 연구성과가 갖는 가장 큰 의미는 무엇인가요?

A 국내 ESS 화재는 2017년 이후 5건째 일었니다. 이번 성과로 이에 대한 사회적 불안감을 해소할 수 있게 되었고 생각합니다. 화재의 위험성이 없는 전한 에너지 저장장치가 있다는 게 가장 큰 의미 입니다. 기존 흐름전지도 장치의 크기를 확기적으로 줄여, 공간 제약이 큰 건물 지하에도 흐을릭으로 설치할 수 있게 됐습니다. 또 재생에너지를 더 많이 꽂기 위해 전력 없는 화학적 에너지를 저장하는 방식은 상한수 수요, 전력시장 개방형 수요 등에서 큰 의미가 있다고 생각합니다.

▲ 한탁돈 팀장, 에이치투

Q 바나듐기로 양한된 독일 시장에 국내 최초로 스택을 수출하셨습니다. 현재에 한국 기술이 어떤 점을 가장 높게 평가했나요?

A 독일 수출에 앞서, 당사 제품을 포함한 글로벌 시장의 주요 경쟁사 제품들을 구매하여 성능과 신뢰성 비교 평가를 실시했습니다. 그 결과 타사 대비 누적이 현저 없는 핵심 성능과 안전성을 입도적인 성능을 인정받을 수 있었습니다. 특히 한지보부터 '우수한 스택 성능(good stack performance)' 및 '장기 운전 안정성(Stable operation for longer time)'이라는 호평을 받았으며 이를 계기로 제공했습니다.

Q 앞으로 어떤 연구를 더 이어가실 계획인가요?

A 바나듐 흐름 전지 ESS 주요 유럽시장을 대용량 에너지 저장장치 시장을 목적으로 합니다. 그래서 그 규모에 따라 전해이나 단위의 대량 있을로 구상되는데, 현재 이렇게 큰 시스템을 장밥에게 검증하기 위한 국내 테스트 환경은 아직 마련되지 않았습니다. 이에 앞으로는 대규모 시장에 적합한 성능과 안전성을 확보할 수 있는 전용 시설을 구축하고, 이를 기반으로 실제 공장 환경에서 신뢰성을 검증하는 실증 연구를 하려고 합니다.

Q 개발하신 스택이 가장 오랫동안 어떻게 쓰이길 바라시나요?

A 개발한 스택을 실제 시스템에 적용하여 ESS를 구축하려면, 우선 전기 절감이 선행되어야 합니다. 그러려면 대량 생산 체계를 확보해 관련 산업 생태계 활성화가 필요합니다. 이와 더불어 정부의 실질적인 지원이 있어야 흐름전지 활성화 및 관련 등에 선도하고 정확한 성능 평가 장치도 함께 개발되어야 합니다. 그래서 저희는 앞으로 스택의 적용된 VFB ESS를 유럽에서 공모로 확장할 수 있도록 글로벌 규격에 부합하는 다양한 인증 획득을 추진할 계획입니다.

Q 이번 연구를 진행하는 과정에서 가장 결정적인 순간을 꼽는다면?

A 2017년 8월 당시 흐름전지 개발했던 ESS 화재 사고 이후 2018년에만 20건이 넘는 화재가 발생하면서 국내 ESS 사업은 큰 위기를 맞았습니다. 화재 사고 이전 국내 ESS 시장 규모는 전 세계 5위권이었지만, 화재사고 이후 한때 '보다운'에 가까운 수준에 머물러 있었기 때문입니다. 당시에 화재 위험이 없는 바나듐 흐름 전지 ESS 리튬이온전지 ESS 동일한 취급을 받았습니다.

그래서 당장 해결 방법이 보일 들었습니다. 하지만 이번 ESS 사고 시점은 일부분이 기술 다양성을 확보하기 위해 해외 시장 위험을 감행하기 구한하여 사업을 추진해 보고 있었습니다. 이에 독일, 폴란드, 베트남, 몰디브 등 해외 각 지역 바나듐 흐름 전지를 설치하여 국제적인 성공사례를 만들었습니다. 동시에 내부적으로는 연구개발에 역량을 집중하여 기술적 다양성 확보를 다지는 데 주력했습니다. 덕분에 스택 출력 밀도를 기존 대비 1.6배 이상 높여서 세계 최고 수준의 기술력을 확보하는 쾌거를 이루었습니다.

앞으로는 이 기술을 다져 고도화하여 화재 위험으로부터 국민 안전을 지키면서도 친환경에너지 시대를 이는 데 기여하고 싶습니다.

▲ 연구팀 단체 사진, 에이치투

글 고건아(광릉보안연구소 대표) 외
기획 한국과학기술기획평가원(KISTEP) 외
* 본 콘텐츠는 과학기술정보통신부가 선정한 2025 국가연구개발 우수성과 100선 최우수성과에 대한 이야기입니다.