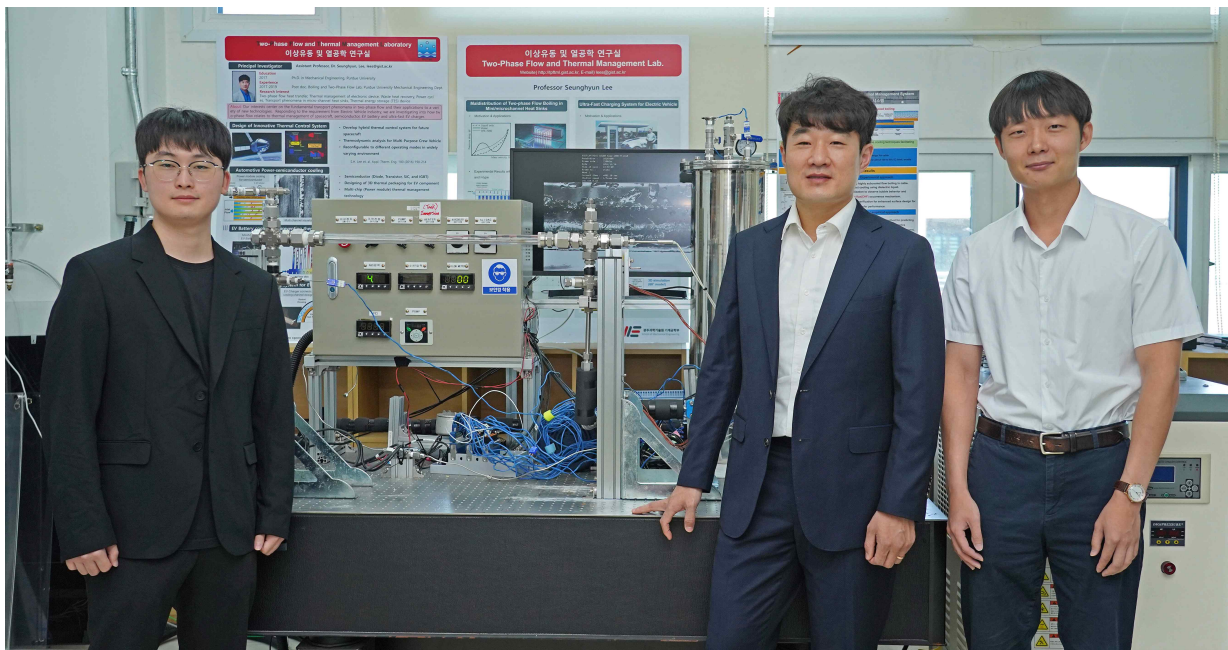


GIST, 전기차 충전시간 3분 20초로 단축하는 초고속 케이블 냉각 기술 개발

- 기계로봇공학부 이승현 교수팀, 전기차 충전 중 발생하는 고발열 문제 해결하는 혁신적 냉각 방법 개발해 전기차 충전 시간을 내연기관 주유 시간 수준인 3분 20초 이내로 단축 가능
- 고전류 전송 분야 및 환형관 구조 장치에도 활용... "전기차 사용 편의성 획기적 향상 기대" 국제학술지 《International Communications in Heat and Mass Transfer》 게재



▲ (왼쪽부터) 기계공학부 노현석 석사과정생, 이승현 교수, 정해인 박사과정생

국내 연구진이 **전기차 충전 시간을 대폭 단축하는 기술을 개발**했다. 이 기술은 전기차 충전 시스템뿐만 아니라, 초저온 냉각 케이블, 고속열차, 모노레일, 송전선 등 **고전류를 전송하는 다양한 분야에 활용**될 수 있으며 원자로, 석유 및 천연가스 시추시설 등 고온의 중심축이 통과하는 **환형관 구조를 가진 장치에도 응용**될 수 있을 것으로 기대된다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 기계로봇공학부 이승현 교수 연구팀이 고성능 전기차 배터리 충전 시간을 내연기관 차량의 주유 시간인 **3분 20초*** 이내로 단축할 수 있는 **혁신적인 충전 케이블 냉각 기술을 개발**하는 데 성공했다고 밝혔다.

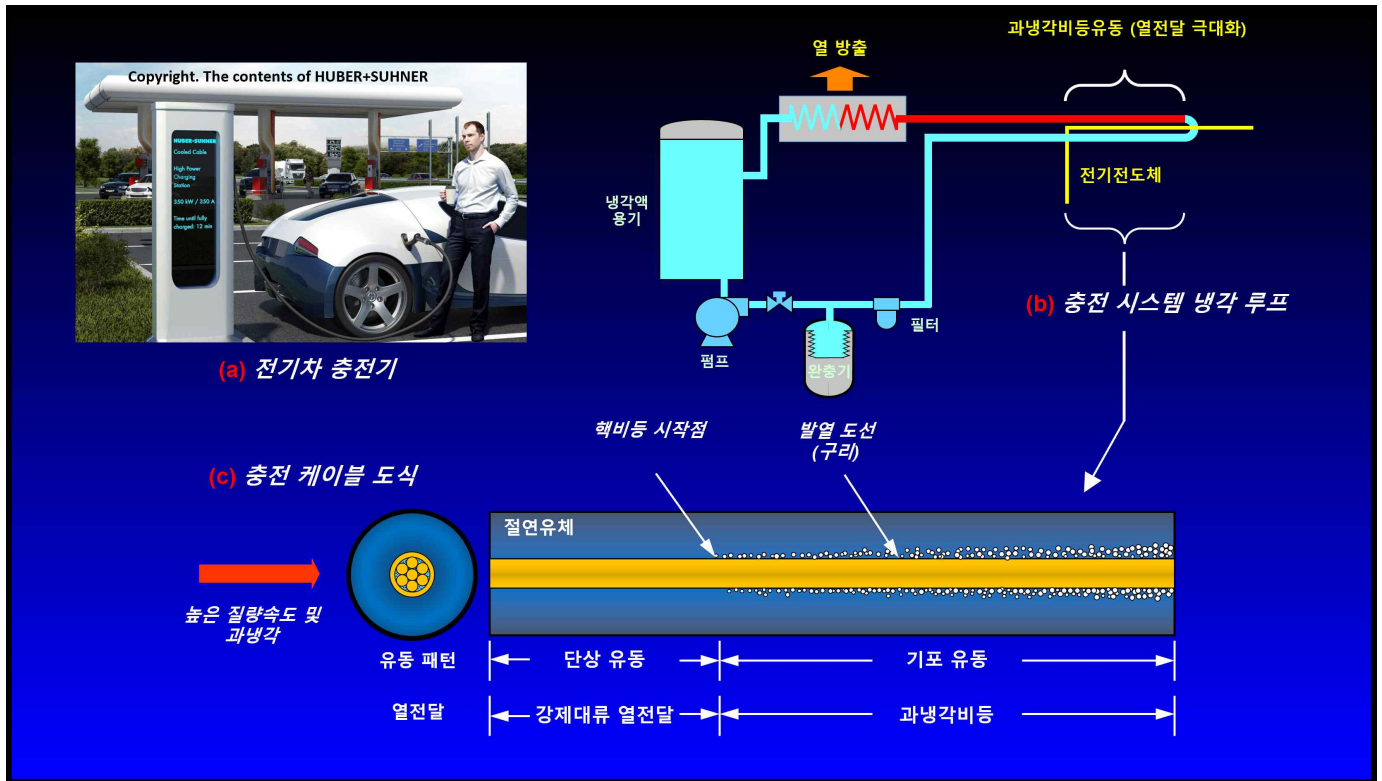
* 100kWh 전기차 배터리(테슬라 모델S, 기아 EV9 급 고성능 전기차 배터리)를 80%까지 충전하는 데 소요되는 시간으로, 800Vdc 전압과 7m 길이의 충전 케이블을 사용해 케이블 표면 온도를 안전 온도(80℃)로 유지하는 조건에서 예측된 충전 시간. 배터리 용량이 작은 경우 충전 시간이 더 단축될 수 있음.

급속 충전을 하더라도 30분 이상 걸린다는 점*이 전기차 사용의 불편 요인으로 남아 있는데 이렇게 긴 충전 시간이 필요한 이유는 크게 두 가지다.

* 미국 자동차공학회(SAE) Level 3 기준

첫째, 열전도도가 낮은 충전 케이블의 절연 피복이 열을 잘 전달하지 못해 내부 열을 외부로 방출하는 데 한계가 있다는 점이며, 둘째로는 급속 충전 시 발생하는 과도한 열을 효과적으로 냉각하지 못해 충전 시간이 길어진다는 것이다.

이를 해결하기 위해 연구팀은 급속 충전 조건[그림(a)]에서의 냉각 루프를 활용[그림(b)]하고, 수평 환형관 구조[그림(c)]에서 절연유체를 사용하여 발열 케이블을 효율적으로 냉각하는 방법을 실험으로 검증했다.



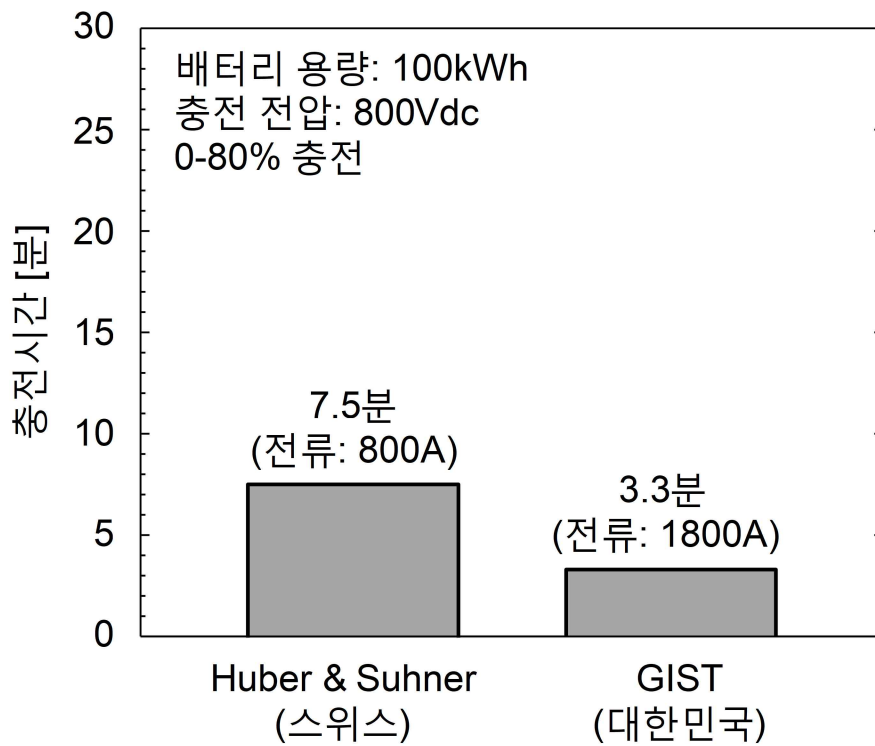
▲ 전기차 급속 충전 시 절연유체를 활용한 과냉각 비등유동 냉각 컨셉 이미지: (a) 전기차 고전력 급속 충전 장면, (b) 충전기 내부 도체 케이블 냉각을 위한 냉각액 루프 모식도 - 냉각액이 전기 전도체를 냉각시킴, (c) 전기 전도체 내부의 환형관에서 절연유체가 주변을 감싸며 흐르고, 상류는 단상 대류에 의한 냉각, 하류는 기포 비등에 의한 냉각을 나타낸다.

이 과정에서 발열 케이블 표면에 기포 생성을 촉진하여 상변화(끓음)에 의한 더욱 효율적인 열전달을 가능하게 했고, 이를 통해 과열이나 고장을 방지할 수 있었다.

연구팀은 냉각 실험 데이터를 기반으로 7m 상용 충전기 케이블에 대한 예측 결과, 800Vdc 전기차 배터리 기준으로 1,440kW(1,800A)급 충전이 가능하다는 결론을 도출했으며[그림 2], 이는 현재 세계에서 가장 빠른 640kW(800A)급 급속 충전기보다 2배 이상 빠른 충전 속도를 실현할 수 있다는 것을 보여 주었다.

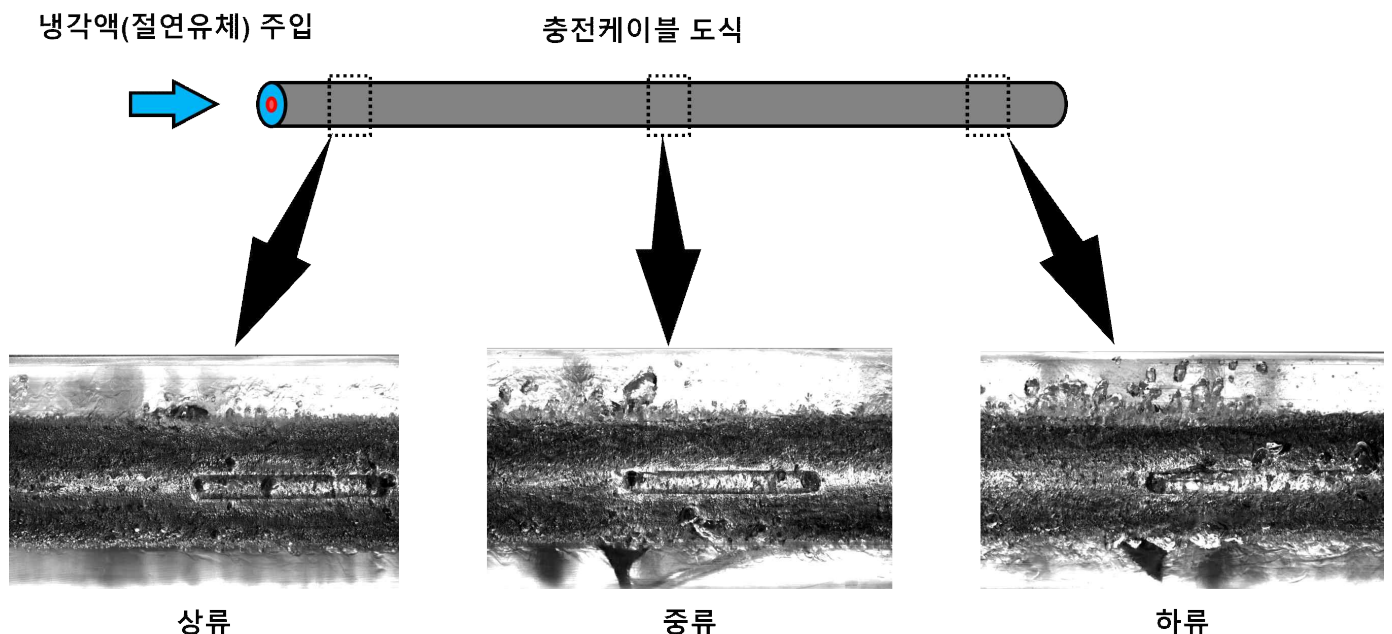
이때 케이블 표면 온도가 80℃ 이하로 안전하게 유지되는 것 또한 확인했다. 특히, 100kWh급 고성능 전기차 배터리를 80%까지 충전하는 기준으로 이 결과를 도출했으며, 배터리 용량이 이보다 작은 경우 충전 시간이 더욱 단축될 수 있다.

* 환형관: 내관(Inner cylinder)과 외관(Outer cylinder)이 동심을 이루는 구조물.



▲ **100kWh 전기차 배터리의 0-80% 이론적 충전 시간 비교.** 세계에서 가장 빠른 상업용 전기차 충전기 중 하나로 알려진 Swiss의 Huber & Suhner사 초급속 충전기의 충전 시간과 본 연구에서 이용된 과냉각 비등 유동 절연유체 냉각 실험의 충전 가능 시간을 비교한 결과. 실험은 7m 케이블 표면 온도가 안전 온도인 80°C 이하로 유지되는 조건에서 최대 충전 전력이 지속될 때 달성 가능한 시간을 의미하며, 절연 냉매 도선 직접 접촉 과냉각 비등 유동 냉각을 통해 고성능 전기차 배터리 충전 시간을 내연기관 주유 시간인 3분 20초로 단축할 수 있다.

연구팀은 실험에서 과냉각 비등유동*을 이용해 냉각 유체를 끓는 점 이하로 공급했지만, 케이블 표면에서 길이 방향으로 비등(끓음)이 활성화되면서 냉각액이 증기로 상변화하여 효율적인 열전달이 이루어졌으며, 이러한 과정을 통해 표면 온도가 일정하게 유지될 수 있었다.



▲ **케이블 길이 방향의 냉각 특성 이미지:** 위 충전 케이블 모식도와 측면 고속 카메라 이미지는 냉각 절연유체 주입 시 발열 케이블 표면에서 길이 방향으로 비등이 활성화되어 열전달이 강화되는 과정을 보여준다. 이로 인해 충전 케이블 표면 온도가 일정하게 유지될 수 있음을 나타낸다.

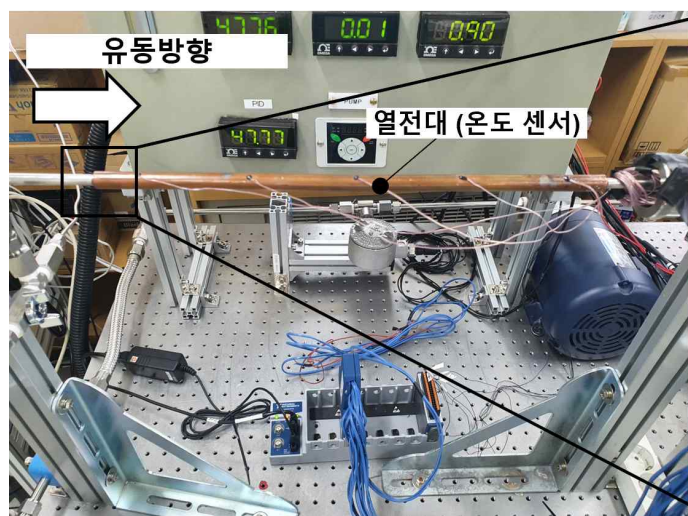
특히, 과냉각 비등유동은 단상 유동*에 비해 액체가 증기로 상변화하는 과정에서 더 높은 열전달 계수를 나타내어 동일한 조건에서 더욱 효과적인 냉각 성능을 제공했다. 이러한 열전달 특성은 **고온에서의 열전달 성능을 극대화하는 데 중요한 역할을 한다.**

* **과냉각 비등유동:** 냉각액이 포화 온도(끓는점) 보다 낮은 상태에서 벽면에서 기포가 발생하고, 그 기포가 주변의 차가운 냉각액에 의해 빠르게 응축되는 현상. 높은 열전달 성능을 보이며, 냉각 성능이 뛰어난 특징이 있음.

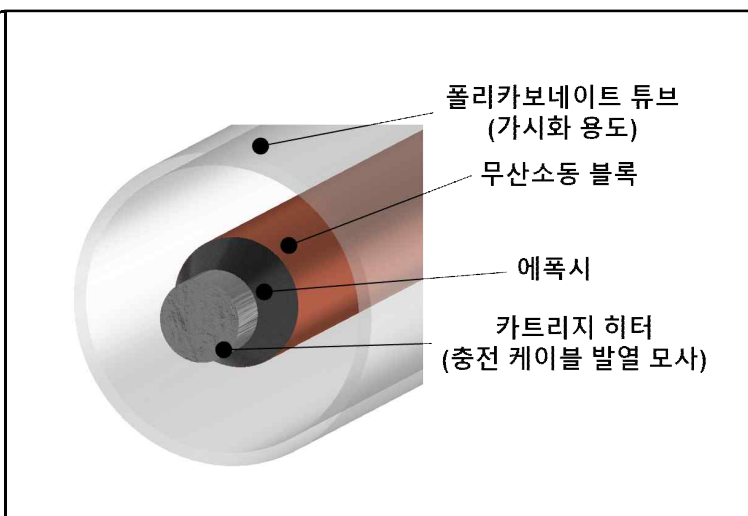
* **단상 유동:** 유체가 하나의 상(현재 연구에서는 액체)만으로 흐르는 유동. 기포 발생 없이 유동하며, 열전달 효율이 상대적으로 낮음.

실험은 카트리지 히터에 구리 블록을 씌워 충전 케이블의 발열을 모사하며, 다양한 유량 및 온도 조건에서 진행되었다.

케이블 냉각 실험 모듈 사진



케이블 냉각 실험 모듈 도식

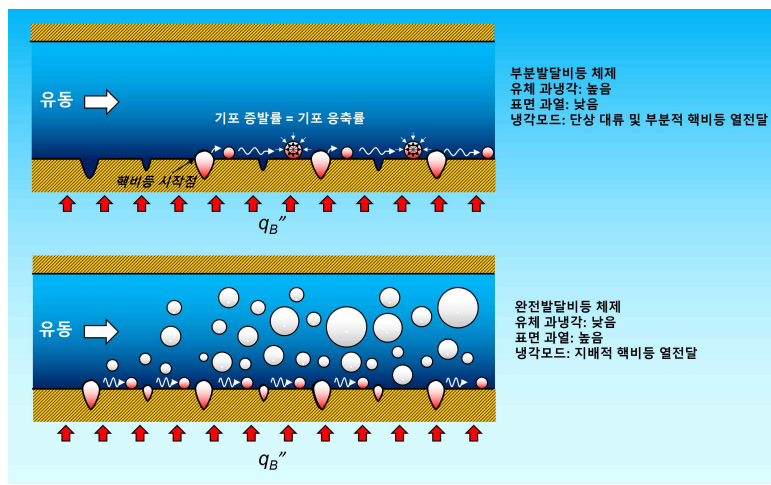


▲ **충전 케이블 길이 방향 온도 측정을 위한 실험 구성:** 카트리지 히터 표면에 구리 블록을 설치하고, 표면 온도를 측정하기 위한 열전대를 부착한 사진 및 모식도로서, 카트리지 히터는 충전 케이블의 구리 전도체에서 발생하는 줄 열을 모사하며 길이 방향 및 상하부 온도 변화를 측정하기 위해 구리 블록의 여러 위치에 열전대를 설치하였다.

실험 장치는 열전달 계수를 정밀하게 측정하기 위해 히터 표면에 열전대 온도 센서를 부착하여 설계되었으며, 압력 및 유량 센서와 데이터 수집 시스템을 통해 모든 데이터가 컴퓨터에 저장되었다.

연구팀은 고속 카메라를 실험 모듈 측면에 설치해 발열 특성을 관찰하고, 기포의 거동과 냉각 과정을 기록했다. 이를 통해 **다양한 운전 조건에서 과냉각 비등유동의 성능을 분석할 수 있었다.**

냉각액이 끓는점 이하로 유지되면서도 케이블 표면에서 국부적으로 과열되어 기포가 생성되는 과냉각 비등유동 실험 결과, 과냉각 비등유동은 부분발달비등(PDB)과 완전발달비등(FDB)으로 구분된다.



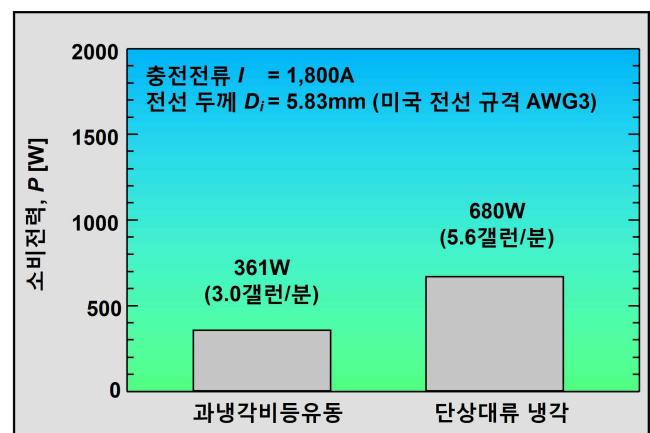
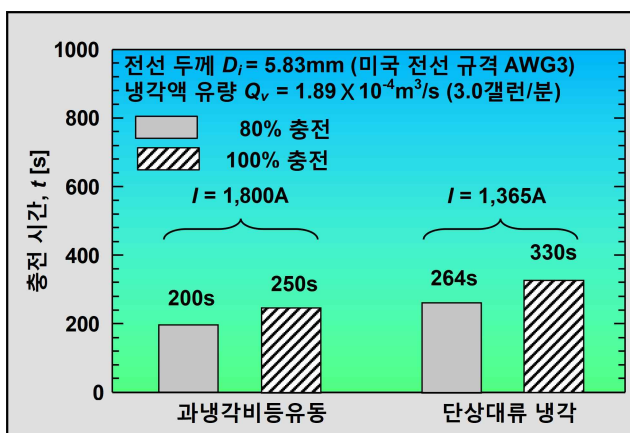
▲ **수평 환형관 내 과냉각 비등유동의 냉각 열전달 체제 모식도:** 과냉각 비등유동 체제는 냉각액의 과냉각이 크고 표면 과열이 작아 기포 생성이 억제되는 부분발달비등(Partially Developed Boiling, PDB)과, 작동 유체가 포화온도(끓는점)에 가까워지며 표면 과열이 증가해 기포 생성이 활성화된 완전발달비등(Fully Developed Boiling, FDB)으로 나뉜다.

PDB 구간에서는 냉각액의 과냉각이 크고 표면 과열이 작아 기포 생성이 억제되는 반면, FDB 구간에서는 작동 유체가 포화온도에 가까워지고 표면 과열이 증가하면서 기포 생성이 활성화된다. 특히 **FDB 체제에서는 기포들이 부력에 의해 상부로 집중**되며, 그 결과 **케이블 상부의 온도가 하부보다 높아지는 현상이 새롭게 확인**되었다.

연구팀은 7m 충전 케이블의 안전 온도(80℃ 이하)를 유지하는 조건에서 과냉각 비등유동과 단상 대류 냉각 성능을 비교하고, 동일한 냉각 유량 조건($Q_v = 3.0$ GPM)에서 케이블의 안전 온도를 유지하면서 전기차 배터리 80% 및 100% 충전 시 소요되는 충전 시간을 측정했다.

이를 통해 과냉각 비등유동은 단상 대류 냉각에 비해 우수한 냉각 성능을 발휘하여 고전류 충전이 가능하고, 충전 시간을 단축할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다 [그림 좌측 그래프].

또한, 동일한 충전 전류 조건($I = 1800A$)에서 케이블의 안전 온도를 유지하기 위한 냉각 유량과 펌프 모터 요구 동력을 비교한 결과, **과냉각 비등유동은 더 적은 냉각 유량으로도 안전 온도를 유지할 수 있어 에너지 소모 측면에서도 효율적**이었다.



▲ 7m 충전 케이블 안전 온도 80°C이내 유지 조건에서 과냉각 비등유동과 단상대류 냉각 성능 비교. 좌측은 동일 냉각 유량 조건($Q_c = 3.0\text{GPM}$)에서 케이블 안전 온도를 유지하는 최대 전류로 전기차 배터리 80%, 100% 충전 시 충전 시간을 나타내며 우측은 동일 충전 전류 조건($I = 1800\text{A}$)에서 안전온도를 유지하기 위한 냉각 필요 유량을 고려한 펌프 모터 요구 동력을 나타낸다.

이승현 교수는 “이번 연구 성과는 전기차 충전 시간을 크게 단축할 수 있는 기술적 토대를 마련했다는 점에서 **전기차 사용의 편의성을 획기적으로 향상시킬 것으로 기대된다**”고 밝혔다.

이번 연구는 GIST 기계공학부 이승현 교수의 지도하에 정해인 박사과정생과 노현석 석사과정생이 수행했으며, 한국전력공사 전력연구원의 지원과 과학기술정보통신부 중견연구사업의 지원을 받았다. 연구 결과는 열전달 분야의 저명한 국제학술지 《International Communications in Heat and Mass Transfer》에 2024년 9월 19일 온라인 게재되었다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : International Communications in Heat and Mass Transfer (Impact Factor: 6.4)
- 논문명 : Experimental and photographic investigation into horizontal subcooled flow boiling in concentric annuli for cooling system of ultra-fast electric vehicle charging cables.
- 저자 정보 : 정해인(제1저자, GIST), 노현석(공동저자, GIST), 이승현 (교신저자, GIST)