

EV 초급속 충전기의 케이블 설계 변수에 따른 직접냉각 시스템의 냉각특성에 관한 수치적 연구

황성국*, 박수정*, 이기수**, 이기현***, 곽주연***, 고범석***, 이무연*

*동아대학교 기계공학과

**동명대학교 미래자동차학과

*** (주)유라

e-mail:mylee@dau.ac.kr

Numerical study on Direct Cooling Characteristics according to Cable Design Parameters in Ultra-Fast EV Chargers

Seong-Guk Hwang*, Su-Cheong Park*, Gee-Soo Lee**, ki-Hyun Le***,

Joo-Youen Kwak***, Beom-Seok Ko***, Moo-Yeon Lee*

*Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

**Dept. of Automotive Engineering, Tongmyong University

***Yura Co., Ltd

요 약

본 연구는 초급속 전기차 충전기의 직접냉각 시스템의 설계 변수에 따른 냉각 성능을 평가하기 위해, ANSYS Fluent를 활용하여 냉각 특성을 수치적으로 분석하였다. 해석 조건은 케이블 길이, 수력직경, 작동유체 질량유량, 인가전류에 따라 설정하였으며, 케이블 심선 냉각을 위하여 냉각유체로 비전도성 유체를 적용하였고, 인가전류 변화에 따른 해석 결과를 실험값과 비교하여 줄 발열 기준 최대 4.55% 오차를 확인하여 해석 모델의 신뢰성을 확보하였다. 해석 모델을 기반으로 설계 변수 변화에 따른 케이블 심선 최대 온도, 접촉부 온도, 냉각유체 압력강하 및 전압강하 특성을 비교 및 분석하였다. 이를 통해 케이블 및 커넥터의 열적 안정성 확보를 위한 주요 설계 변수의 영향을 검토하였다.

1. 서론

전기자동차 보급 확대와 충전 인프라 고출력화에 따라 충전 케이블 및 커넥터의 열관리 중요성이 증가하고 있다. 특히 초급속 충전 시스템에서는 수백 A 이상의 고전류가 케이블 심선과 접촉부를 통과하므로, 도체 저항에 의한 줄 발열이 크게 발생한다. 이러한 발열은 케이블 온도 상승, 접촉부 열화, 전기적 손실 증가 및 사용 안전성 저하로 이어질 수 있으므로, 고출력 충전 조건에 적합한 냉각 시스템 설계가 요구된다. 기존 완속 및 일반 급속 충전 시스템에서는 공기를 활용한 자연대류 방식이나 간접냉각 방식이 적용되고 있으나, 충전 전류가 증가할수록 케이블 내부에서 발생하는 열을 외부로 배출하는 데 한계가 있다. 이에 따라 케이블 심선 주변으로 냉각유체를 직접 공급하는 직접냉각 방식이 초급속 충전기용 열관리 기술로 주목받고 있다. 직접냉각 방식은 심선에서 발생한 열을 냉각유체가 직접 제거할 수 있다는 장점이 있으나, 냉각 성능은 케이블 길이, 유로의 수력직경, 작동유체 유량 등 설계 및 환경 조건에 따라 크게 달라지며, 유량 증가를 통해 냉각 성능을 향상시킬 수 있지만, 동시에 압력강하가 증가하

게 된다.

따라서 본 연구에서는 초급속 전기차 충전기의 직접냉각 시스템을 대상으로 설계 변수 변화에 따른 열유동 및 전기적 특성을 수치적으로 분석하였다. 주요 설계 변수로는 케이블 길이, 수력직경, 작동유체 질량유량 및 인가전류를 설정하였으며, 각 조건에서 케이블 심선 최대 온도, 접촉부 온도, 냉각유체 압력강하 및 전압강하 특성을 비교하였다.

2. 수치해석 모델링

본 연구에서는 상용 수치해석 프로그램인 ANSYS Fluent의 Electric Potential 기반 전기-열 연성 해석 모델을 적용하여 초급속 충전기 직접냉각 시스템의 열유동 해석을 수행하였다. 해석 대상은 냉각유체가 케이블 심선 주변을 유동하며 발열부를 냉각하는 구조로 구성하였으며, 케이블 심선에서 발생하는 줄 발열을 고려하기 위해 전기-열 연성 기반의 해석 모델을 적용하였다. 냉각유체는 전기적 안전성을 고려하여 비전도성 유체로 설정하였다.

해석 조건은 케이블 길이, 수력직경, 작동유체 질량유량 및 인가전류를 주요 변수로 설정하였다. 인가전류 조건은 초급속 충전

운전 범위를 고려하여 600-1000 A로 부여하였으며, 케이블 길이 및 전류 조건에 따른 전압강하를 분석하였다. 수치해석 모델 검증을 위하여 해석값과 실험값을 비교한 결과, 줄 발열 기준 최대 4.55%의 오차를 확인하여 수치해석 모델의 신뢰성을 확보하였다.

3. 결과 및 결론

해석 결과를 바탕으로 설계 변수 변화에 따른 케이블 심선 최대 온도, 접촉부 온도, 냉각유체 압력강하 및 전압강하 특성을 비교하였다. 인가전류가 증가할수록 케이블 심선에서 발생하는 줄 발열이 증가하여 최대 온도와 접촉부 온도가 상승하는 경향을 보였다. 특히 고전류 조건에서는 냉각유량과 유로 형상에 따라 온도 상승 억제 효과가 달라지므로, 단순히 전류 조건만이 아니라 냉각유체 공급 조건과 케이블 구조를 함께 고려한 설계가 필요함을 확인하였다.

Acknowledgement

이 성과는 (주)유리(2025-0475)와 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업단지공단의 지원(VCDM2502) 및 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-25436201).

참고문헌

- [1] Devahdhanush, V.S., Lee, S., and Mudawar, I., "Consolidated theoretical/empirical predictive method for subcooled flow boiling in annuli with reference to thermal management of ultra-fast electric vehicle charging cables," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 175, 121224, 2021
- [2] Devahdhanush, V.S. et al., "Experimental investigation of subcooled flow boiling in annuli with reference to thermal management of ultra-fast electric vehicle charging cables", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 172, 121176, 2021
- [3] Wu, Y. et al., "Optimal design of liquid cooling structures for superfast charging cable cores under a high current load", *Case Stud. Therm. Eng.*, 53, 103821. 2024