

인가전류에 따른 EV 초급속 충전기 커넥터 직접냉각 시스템의 열적 가혹조건 수치적 연구

황성국*, 방유마*, 박수청*, 광주연**, 이기현**, 민경진**, 고범석**, 이무연*

*동아대학교 기계공학과

** (주)유라

e-mail:mylee@dau.ac.kr

Numerical Study on Direct Cooling System for Ultra-Fast EV Chargers Connectors based on Thermal Harsh Conditions

Seong-Guk Hwang*, You-Ma Bang*, Su-Cheong Park*, Joo-Youen Kwak**, Ki-Hyun Lee**,

Kyung-Jin Min**, Beom-Seok Ko**, Moo-Yeon Lee*

*Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

**Yura Co., Ltd

요 약

본 연구는 초급속 전기차 충전기 커넥터의 직접냉각 성능을 평가하기 위해, ANSYS Fluent의 줄발열 모델을 기반으로 열적 가혹조건을 수치적으로 분석하였다. 해석 조건은 전선 길이 6 m, 냉각유체로 비전도성 오일을 적용하였고, 인가전류 600-1000 A, 혹서 및 혹한 조건을 고려하여 외기조건은 50 °C, -15 °C 및 -40 °C로 설정하였다. 인가전류 변화에 따른 해석 결과를 실험값과 비교하여 입출구 온도차 기준 최대 1.92%, 줄 발열 기준 최대 1.69% 오차를 확인하여 해석 모델의 신뢰성을 확보하였다. 해석 결과, 800 A에서 커넥터 최대온도가 외기 대비 50 °C를 초과하여 허용기준을 초과하였고, -40 °C에서는 유체 점도 상승으로 압력강하가 크게 증가하여 혹한 운전 시 유체 예열의 필요성을 확인하였다.

하고, 600 A 이상의 인가 전류 조건에서 발생하는 열적 가혹조건을 수치적으로 분석하였다. 이를 통해 가혹조건에서의 시스템 한계를 규명하고, 그에 대응 가능한 냉각의 요구 냉각용량을 확인하였다.

1. 서론

전 세계적으로 탄소중립 요구가 고조됨에 따라 수송 부문에서 전기자동차의 비중이 점차 확대되고 있다. 이에 맞추어 전기자동차의 대표적 약점 중 하나인 긴 충전시간을 극복하기 위한 초급속 충전 시대가 본격적으로 도래하고 있다. 일반적으로 급속 충전은 50 kW부터 분류되며, 최근에는 350 kW급 이상의 급속 충전 시스템이 상용화되었으며, 600 kW급을 넘어서는 초급속 충전 시스템의 도입도 추진되는 중이다[1]. 기존 완속 및 급속 충전 시스템에서는 충전기 심선에서 발생하는 줄 발열이 크지 않아 자연냉각만으로 충분했으나, 출력이 300 kW를 넘어서는 고출력 조건에서는 발생 열량이 급격히 증가하여 자연 공랭식만으로는 발열을 감당하기 어렵다. 이에 따라 초급속 충전기의 경우 간접 수냉식이나 비전도성 유체 기반의 직접 냉각 방식이 적용되고 있다. 이와 관련하여 선행연구의 상당수가 짧은 케이블 심선을 대상으로 하나, 줄 발열은 케이블 길이에 비례하므로 실제 충전기의 발열 특성을 충분히 반영하지 못하고 있다[2, 3]. 충전기의 정확한 요구 냉각용량을 파악하기 위해서는 실제 충전기 심선의 길이를 고려한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 직접냉각 시스템을 적용하여 초급속 EV 충전기의 실제 심선 길이를 반영

2. 수치해석 모델링

본 연구에서는 상용 수치해석 소프트웨어인 ANSYS Fluent의 Electric Potential 모듈을 사용하여 줄 히팅을 적용하였다. 수치해석 모델링 구성은 전선 길이를 6 m로 하였으며, 냉각 유체는 P社 비전도성 오일로 설정하였다. 인가 전류는 600-1000 A, 외기 온도는 혹서 및 혹한 조건을 고려하여 50 °C, -15 °C, -40 °C로 부여하였으며, 전선 저항의 온도의존성을 UDF로 적용하였다. 격자의 경우 약 1,120만개의 셀로 구성하였으며, 인가 전류 변화에 따른 해석 결과와 실험 결과를 비교 결과, 입출구 온도차 기준 최대 오차 1.92%, Joule 발열량 기준 최대 오차 1.69%로 모델 신뢰성을 확보하였다. 허용 온도는 충전기의 경우 통상 외기온도 대비 50 °C를 이하를 기준으로 하며, 케이블 단면적 30 mm², 냉각유체의 유량은 3 LPM으로 설정하였다.

3. 결과 및 결론

해석 결과 800 A 전류 인가시 커넥터의 최대 온도가 외기와 50 °C 이상 발생하여 허용온도를 벗어나는 것을 확인하였다. -40 °C 혹한 조건 해석의 결과, 작동유체 점도 증가로 압력강하가 크게 상승하는 것을 확인하였으며, 이는 충전기의 직접냉각 시스템에서 혹한조건에서 가동할 시, 유체를 예열시킬 필요가 있음을 확인하였다.

Acknowledgement

이 성과는 (주유라(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] Saraswathi, V.N., et al., “comprehensive review on charger technologies, types, and charging stations models for electric vehicles”, Heliyon, e38945, October 2024
- [2] 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. 2023
- [3] 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