

단상 정지 액침 냉각 시스템에서 입자 필터를 이용한 절연유체 냉각성능 저하 예지

태영규^{*†} · 강서연^{*} · 장석필^{*,**}

*한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과, **한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

Prognosis of Cooling Performance Degradation of Dielectric Fluids in a Single-Phase Static Immersion Cooling System Using a Particle Filter

Younggyu Tae^{*†}, Seo Yeon Kang^{*} and Seok Pil Jang^{*,**}

* Dept. of Smart Air Mobility, Korea Aerospace Univ., ** Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.

1. 서 론

온실가스 저감 요구가 증가함에 따라 내연기관 차량에서 전기차로의 전환이 가속화되고 있다. 전기차의 주요 동력원인 리튬이온 배터리는 충·방전 과정에서 상당한 열이 발생하며, 부적절한 열 관리는 성능 및 수명 저하와 안전 문제를 초래할 수 있다. 현재 대부분의 배터리 열관리 시스템은 수랭식 냉각 방식을 사용하지만, 고체 계면의 열접촉저항으로 인해 냉각성능이 제한되는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 열원과 절연유체가 직접 접촉하는 액침냉각 방식이 차세대 냉각 기술로 주목받고 있다⁽¹⁾.

액침냉각 시스템의 냉각성능은 절연유체의 열물성에 크게 의존하며, 장기간 운용 시 열 노화로 인해 이러한 물성이 변화할 수 있다⁽²⁾. 그러나 절연유체 열화가 단상 정지 액침냉각 시스템의 냉각성능에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 충분하지 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 열 가속 노화 시험을 통해 절연유체 열화에 따른 물성 변화와 냉각성능 변화를 분석하고, 이를 입자필터 기반 예지 기법에 적용하여 장기간 운용 시 절연유체의 냉각성능 변화 경향을 예측하고자 한다.

2. 본 론

단상 정지 액침냉각 시스템의 냉각성능을 정량적으로 평가하기 위해 절연유체의 열전도도, 비열, 밀도, 점도로 구성된 열 효율비를 냉각성능 지표로 제안하였다. 서로 다른 물성을 갖는 5 종의 절연유체를 사용하여 냉각성능 비교 실험을 수행하였으며, 실험적 열 효율비와 열 물성치로 계산된 이론적 열 효율비를 비교하여 제안된 지표의 타당성을 검증하였다. 또한 냉각성능에 대한 각 물성의 상대적 기여도를 평가하기 위해 Weight Factor 분석⁽³⁾을 수행하였다.

절연유체 열화에 따른 냉각성능 변화를 분석하

기 위해 400 사이클의 열 가속 노화 시험에서 열 물성치를 측정하고, 열 효율비 변화를 계산하였다. 최종적으로 전기차 장기 운용 조건에서의 냉각성능 변화 경향을 예측하기 위해 입자 필터 기반 예지 기법에 열 가속 노화 시험 데이터를 적용하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 절연유체의 열 물성으로 구성된 열 효율비를 단상 정지 액침냉각 시스템의 냉각성능 평가 지표로 제안하고, 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다. 냉각성능에 대한 열전도도, 비열, 밀도, 점도의 Weight Factor 분석 결과 점도가 전체 냉각성능 기여도의 78% 이상을 차지하며, 온도가 증가할수록 그 영향이 더욱 커지는 경향을 보였다. 또한 열 가속 노화 시험 결과 점도가 절연유체 노화에 가장 민감한 물성이며 냉각성능 변화에 지배적인 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 마지막으로 입자 필터 기법을 적용해 점도와 열 효율비 변화 경향을 예측하였으며, 예측 결과가 실제 측정 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022R1A2C1009997).

참고문헌

- (1) Tong, B., Shi, J., Cao, M., Xuan, W., Chen, J., Jin, K., Sun, J., and Wang, Q., 2025, "Comprehensive comparison study on battery thermal management modules with indirect and direct liquid cooling." *Applied Thermal Engineering*, Vol. 268, 125945.
- (2) Tormos, B., Bermúdez, V., Ruiz, S., and Alvis-Sanchez, J., 2023, "Degradation effects of base oils after thermal and electrical aging for EV thermal fluid applications." *Lubricants*, Vol.11, No. 6, 241.
- (3) Chen, X., Huang, Y., Xu, S., Bao, C., Zhong, Y., Chen, Y., and Zhang, C., 2024, "Thermal performance evaluation of electronic fluorinated liquids for single-phase immersion liquid cooling." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 220, 124951.

† Presenting Author, 2023318018@kau.kr