

2024년 전자장비 냉각 및 열관리 분야 연구동향

박준영* · 이강원* · 노석완* · 남영석*†

Research Trends in Electronics Cooling and Thermal Management 2024

Junyeong Park*, Kangwon Lee*, Seokwan Roh*, Youngsuk Nam*†

Key Words : Electronics cooling technologies(전자장비 냉각 기술), Heat pipe(히트파이프), Heat exchanger(열교환기), Phase change cooling(상변화 냉각), Thermal management(열관리)

ABSTRACT

This paper reviews recent research trends in electronics cooling and thermal management. A total of 71 papers were published in this field, covering various topics such as electronics cooling technologies, heat pipe heat exchanger performance enhancement, heat pump-based thermal management in industrial processes, and thermal solutions for defense electronics. With the increasing demand for high-performance electronic devices and energy-efficient cooling technologies, research in these areas has been actively conducted. In the electronics cooling sector, studies on phase-change cooling, heat transfer enhancement, and alternative working fluids have been widely explored. In the defense sector, the development of advanced thermal management solutions for avionics and military radar systems is accelerating. Studies on lightweight and high-efficiency heat dissipation technologies are also gaining attention. Furthermore, the integration of heat pumps into industrial thermal management is emerging as a key research focus, aiming to improve energy utilization and sustainability. This paper seeks to provide a comprehensive review of these research trends, highlight key findings, and propose directions for future studies.

1. 서론

본 원고에서는 2024년 한국유체기계학회 하계 및 동계 학술대회에서 발표된 전자장비 냉각 및 열관리 분야의 연구 결과를 분석하고 소개하고자 한다. 해당 분과에서는 총 71편의 논문이 발표되었으며, 본 원고에서는 이를 전자장비 냉각 및 열관리, 히트파이프 열교환기 성능 향상, 산업공정에서의 히트펌프 기반 열관리 기술, 방위산업 전자장비 열관리, 방위산업 방열설계의 다섯 가지 주제로 구분하여 다루고자 한다. 특히, 기존의 열유체 공학 연구가 지속되는 가운데, 전자장비 및 데이터센터 냉각 기술이 빠르게 발전하고 있으며, 이에 따라 고효율 열관리 및 에너지 절감이 중요한 연구 분야로 부각되고 있다.

Table 1 Number of Papers by Submission Type in 2024

투고 방법		논문 수
논문집		4
하계학술대회	일반세션	16
	특별세션	22
	포스터	5
동계학술대회	일반세션	4
	특별세션	16
	포스터	4
합 계		71

2. 전자장비 냉각 및 열관리

전자장비의 열관리는 장비의 성능과 신뢰성을 유지하는 데 중요한 요소로, 다양한 냉각 기술이 연구되고 있다. 본 절

* 한국과학기술원 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

† 교신저자, E-mail : ysnam1@kaist.ac.kr

에서는 전자장비의 효율적인 냉각을 위한 다양한 연구들을 소개하며, 특히 위킹 성능, 열전달 특성, 다양한 작동유체를 이용한 실험적 접근 등을 다룬다.

김용현 등⁽¹⁾은 ZnO 나노와이어의 형상 변화에 따른 위킹 성능을 연구하였다. 나노와이어의 길이와 지름을 조절하고, 이미지 가시화 방법으로 위킹 성능을 평가하였다. 나노와이어의 길이가 증가할수록 모세관력이 증가하고, 지름이 커질수록 점성저항이 감소하여 위킹 성능이 향상됨을 확인하였다.

홍동희 등⁽²⁾은 수소 충전소에서 예냉 온도 변화에 따른 수소 충전 동특성을 분석하였다. Aspen HYSYS를 이용하여 충전 프로세스를 모사하고 실험 결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 예냉 온도가 낮을수록 충전 속도가 증가하며, 외기 온도가 높을수록 충전 효율 개선 효과가 커지는 것을 확인하였다.

최승우 등⁽³⁾은 샌드블라스팅을 이용한 표면 조도 변화에 따른 흐름 비등 열전달과 압력강하 특성을 연구하였다. 샌드블라스팅 표면과 기본 채널을 비교하여 열전달계수와 압력강하를 분석하고, 유동 가시화를 수행하였다. 표면 조도가 증가할수록 열전달계수가 향상되지만 압력강하 또한 증가하는 경향을 확인하였다.

서진혁 등⁽⁴⁾은 이상 밀폐형 써모사이폰 내 가이저 비등 현상의 압력 및 힘을 측정하였다. 가시화 실험을 통해 가이저 비등의 발생 여부를 판단하고, 압력 및 힘의 변화를 비교하였다. 기존의 압력 및 온도 변화만으로는 가이저 비등을 엄밀히 판별하기 어렵고, 로드셀을 이용한 힘 측정이 새로운 기준이 될 수 있음을 확인하였다.

김선호 등⁽⁵⁾은 진공청소기용 팬-모터 모듈의 축 방향 배치에 따른 방열 특성을 수치 해석하였다. 전산유체역학(CFD) 해석을 통해 축 방향 거리비가 작을수록 모터 온도가 낮아지는 경향을 분석하였다. 특히, 팬-모터의 전체 길이가 길어질 때 환류가 증진되어 코일 표면 냉각 효과가 향상됨을 확인하였다.

이석진 등⁽⁶⁾은 제설용 지열 써모사이폰의 성능을 실험적으로 연구하였다. 아세톤을 작동유체로 사용하여 15℃ 지열 환경에서 0℃ 외기 조건에서의 제설 성능을 평가하였다. 30mm 적설량을 제거하는 데 약 3시간이 소요되었으며, 제설 수준 B 도로에 적용 가능함을 확인하였다.

고정훈 등⁽⁷⁾은 매니폴드 기류기 변화가 U자형 공랭식 배터리 팩의 냉각 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 매니폴드의 말단부 너비를 조정하여 냉각제의 유량 균일성을 평가하고 배터리 셀의 온도 변화를 비교하였다. 출구 매니폴드의 말단부가 확장될수록 냉각 성능이 향상되고 소비 동력이 감소하는 경향을 확인하였다.

정인아 등⁽⁸⁾은 18650 리튬인산철 배터리의 열폭주와 온도 거동을 수치적으로 분석하였다. 전기-열적 모델과 배터리 열폭주 모델을 결합하여 배터리의 충방전 시 내부 온도 변화

를 예측하였다. 충전율이 10 C 이상일 때 열폭주가 발생하며, 대류 열전달 계수가 증가할수록 배터리의 열적 안정성이 향상됨을 확인하였다.

신상현 등⁽⁹⁾은 2상 액침냉각 환경에서 여러 열원 간의 상호작용을 연구하였다. 다중 열원이 배치된 서버 보드 모형을 제작하여 열원 간 거리 변화에 따른 온도 균일성과 기포 거동을 분석하였다. 상하로 배치된 열원에서 상호작용이 더 크게 나타났으며, 열원 배치가 냉각 성능에 중요한 영향을 미침을 확인하였다.

김진영 등⁽¹⁰⁾은 대면적 멀티채널 히트싱크에서 R-134a를 이용한 흐름 비등 열전달 특성을 연구하였다. 비등 커브 분석을 통해 드라이아웃 발생 전후의 온도 차이를 비교하고, 열전달 계수를 측정하여 기존 상관식과 비교하였다.

정승수 등⁽¹¹⁾은 이상 액침냉각 시스템에서 칩의 열전달 특성을 예측하는 모델을 구축하였다. FC-72를 작동유체로 사용하여 가시화 실험을 수행하고, 칩 내부에서 발생하는 기포 거동을 분석하였다. 칩의 표면이 아닌 내부에서 기포가 발생하는 특성을 반영하여 모델링을 진행하였으며, 계산된 모델과 실험 결과를 비교하였다.

이상우 등⁽¹²⁾은 핀 원을 활용한 충돌/유출 냉각시스템의 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. Reynolds 수와 제트 분사판과 충돌판 간격(H/D)의 영향을 분석하였으며, Reynolds 수가 증가할수록 냉각 성능이 향상됨을 확인하였다. 또한, 사각 핀 원의 평균 Nusselt 수 예측 상관식과 실험 결과를 비교 검증하였다.

류채현 등⁽¹³⁾은 UAM용 수소연료전지 추진 기관의 냉각 시스템 연구 동향을 조사하였다. 공랭식과 수냉식 냉각 기법을 비교하고, 냉각 유로 최적화 및 신기술 적용 가능성을 분석하였다. 고출력 연료전지의 열관리 기술 개발이 필요함을 강조하였다.

송태환 등⁽¹⁴⁾은 P2H 시스템 구현을 위한 PCM 열저장장치의 성능을 평가하였다. NACOL 22-98 PCM을 사용하여 실험실 규모의 열저장 장치를 제작하고, 축·방열 성능을 분석하였다. 이를 바탕으로 실증사이트에 적용할 300MJ급 PCM 열저장장치 개발을 계획하였다.

현병찬 등⁽¹⁵⁾은 구리 파우더를 이용하여 고열전도성 열계면물질을 제조하였다. 두 종류의 열계면물질을 제조하고 ASTM-D5470 기준을 참고하여 열전도도를 측정하였다. 상용 TIM 대비 약 2.5~3배 높은 열전도도를 확인하였다.

안성진 등⁽¹⁶⁾은 슬롯제트/매니폴드 미니채널 열교환기의 열전달 및 유동 특성을 수치적으로 연구하였다. 채널 높이와 너비가 증가할수록 유량 불균일성이 개선되고 압력강하는 감소하지만, 열전달 성능은 저하됨을 확인하였다. 긴 단일 제트 형상이 작은 제트 배열보다 높은 냉각 성능을 보였다.

최준영 등⁽¹⁷⁾은 아세톤을 이용한 알루미늄 마이크로 다공성 표면의 풀비등 열전달을 연구하였다. 표면 구조가 비등을

촉진하고 임계 열유속(CHF)을 증가시키며, 최적의 표면 두께는 파티클 크기에 따라 달라짐을 확인하였다.

최승우 등⁽¹⁸⁾은 샌드블라스팅 표면이 R245fa 흐름 비등 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 표면 조도가 증가할수록 비등 개시 과열도가 감소하고 열전달계수가 향상됨을 확인하였으며, SUS wire cut 0.6 mm에서 가장 높은 성능을 보였다.

서진혁 등⁽¹⁹⁾은 작동유체 변화에 따른 이상 밀폐 써모사이폰의 가이저 비등 특성을 연구하였다. 물에서만 가이저 비등이 발생하였으며, 높은 충격력이 응축부 상단에 전달됨을 확인하였다. 아세톤과 에탄올은 낮은 열유속에서 비등 개시가 빨라 상대적으로 우수한 작동유체로 분석되었다.

강소현 등⁽²⁰⁾은 수평 진동이 열사이펀의 열전달 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 진동이 강할수록 가이저 보일링이 억제되고 액막 형성과 증발이 촉진됨을 확인하였다. 입열량이 증가할수록 진동의 영향이 감소하는 경향을 보였다.

최준영 등⁽²¹⁾은 미세 두께 구리 폼의 다양한 기공률에 따른 풀보일링 열전달 성능 변화를 실험 및 시각화 분석을 통해 연구하였다. 실험은 두께 200 μ m, 기공률 54%, 68%, 85%의 구리 폼을 사용하였다. 기공률이 증가할수록 열전달 계수는 감소하였으며, 85% 기공률 구리 폼은 가장 높은 임계 열유속(CHF)을 기록하였다.

이석용 등⁽²²⁾은 수평 날개가 있는 원통형 PCM 히트 싱크의 냉각 성능을 수치 해석을 통해 분석하였다. 수평 날개는 열전도 표면적을 증가시켜 바닥 온도 상승을 낮추고, SPT 도달 시간을 최대 44% 증가시켰다.

문영훈 등⁽²³⁾은 냉동 탑차 외부에 베이퍼 챔버를 적용하여 냉각 성능을 평가하였다. 베이퍼 챔버 개수를 0개에서 8개로 변화시키며 냉각 성능을 분석한 결과, 베이퍼 챔버의 개수가 많을수록 냉각 성능이 개선됨을 확인하였다. 또한, 속도 증가에 따른 냉각 성능의 향상도 관찰되었다.

이대규 등⁽²⁴⁾은 소형 이송장치의 내부 온도 변화 및 편차를 최소화하기 위해 잠열물질의 배치 방법을 분석하였다. 연구에서는 다양한 배치 형상에 따른 온도 변화 및 편차를 수치 해석을 통해 비교한 결과, 잠열물질을 다수 배치한 모델이 내부 온도 변화를 최소화하며, 특히 상부 벽에 배치한 경우 온도 편차가 가장 적었다.

이대규 등⁽²⁵⁾은 축열모듈의 튜브 간격 변화가 방열 성능에 미치는 영향을 수치 해석을 통해 연구하였다. 연구에서는 튜브 간격이 클수록 열전달률이 증가하는 경향을 보였으며, 잠열물질의 액분율은 간격이 작을수록 빠르게 감소했다. 또한, 방열 초기에는 열전달률이 크지만 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 확인하였다.

최재훈 등⁽²⁶⁾은 전동기의 권선 발열에 대해 직접 냉각과 간접 냉각 방식을 적용하여 열전달 및 냉각 성능을 분석하였다. 연구에서는 냉각 유체의 종류와 유량에 따른 권선 온도

변화를 실험과 수치 해석을 통해 비교한 결과, 냉각 성능이 냉각 유체의 종류와 유량에 따라 차이를 보였으며, 전동기의 효율적인 열관리를 위한 냉각 설계의 중요성을 확인하였다.

이성빈 등⁽²⁷⁾은 전자광학추적장비의 냉각 성능 향상을 위한 듀얼 임펠러 열교환기를 분석하였다. 연구에서는 임펠러 회전속도가 증가할수록 열교환 효율이 향상됨을 확인하였으며, 회전속도가 높을수록 유입 유량과 난류 운동 에너지가 증가하여 더 원활한 열교환이 이루어짐을 보였다.

송태환 등⁽²⁸⁾은 P2H 기술을 위한 고밀도 열저장 장치를 연구하였다. 무기질 PCM을 이용한 열교환 성능 평가를 통해 재생에너지 출력제한 문제 해결을 위한 모델을 제시하였다.

나다을 등⁽²⁹⁾은 비회토류계 자석 기반 Axial Motor의 전자기 손실 및 방열 특성을 분석하였다. 방열핀이 추가된 경우 열저항이 낮아져 방열 성능이 향상됨을 확인하였으며, 향후 냉각 효과 최적화를 통해 추가 개선 가능성을 제시하였다.

박재윤 등⁽³⁰⁾은 히트싱크 입구 헤더 내 유동 가이드 형상 변화가 유량 분배 및 압력강하에 미치는 영향을 분석하였다. 유동 가이드를 적용한 경우 유량 불균일도가 25%에서 10.08%로 감소하여 유동 균일성이 크게 개선됨을 확인하였다.

서진영 등⁽³¹⁾은 외부 환경 변화에 따른 차량 내부 온도 제어 방법을 비교하였다. PID 제어를 적용한 경우 On-Off 제어 대비 난방 소비전력이 최대 8% 감소하였으며, 속도와 일사량 변화가 소비전력에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3. 히트파이프 열교환기 성능향상 기술

히트파이프 열교환기는 고효율 열전달을 위해 널리 사용되며, 성능 향상을 위한 다양한 기술들이 연구되고 있다. 본 절에서는 열교환기 성능을 향상시키기 위한 표면 처리 기술, 구조 최적화, 바이펄릭 표면 패턴 등의 방법들을 다루며, 히트파이프 열교환기의 효율적인 설계와 적용 방안을 제시한다.

강석경 등⁽³²⁾은 이상 폐쇄형 서모사이폰(TPCT)의 구속 효과(Confinement Effect)를 연구하였다. 소형 TPCT에서의 열전달 특성을 분석하고, 열 구속 및 소형화가 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

신동환⁽³³⁾은 SUS347-Al Fin 히트파이프를 이용한 열교환기 열성능시험을 수행하였다. 기술개발 배경과 내용을 바탕으로 시험설비를 설계하고 제작한 후, 시운전 및 보안을 진행하였다. 이후, 히트파이프 열교환기 시작품에 대한 열성능 시험을 진행하고 결과를 도출하였다.

이승재 등⁽³⁴⁾은 다공성 매체 접근법을 이용한 소형 열교환기의 열 성능을 분석하였다. 다공성 매체 모델을 설정하여 유동 및 열전달 특성을 평가하고, 열교환기 설계 최적화를 위한 지표를 제시하였다.

김준수 등⁽³⁵⁾은 써모사이폰 응축기 표면의 강인한 초발수 코팅을 연구하였다. 세리아/폴리머 기반 하이브리드 코팅을 개발하여 자가 회복 특성과 열전달 성능을 분석하고, 응축 열교환기의 효율 향상 가능성을 평가하였다.

김규창 등⁽³⁶⁾은 biphilic 스트라이프 패턴 표면이 적용된 보일링 구간의 열전달 특성을 연구하였다. 친수성과 소수성 패턴을 조합하여 기포 형성과 이동을 조절하고, 이에 따른 핵비등 열전달 성능 향상을 분석하였다.

강석경 등⁽³⁷⁾은 증발부 나사산 가공을 통한 이상 밀폐형 써모사이폰(TPCT)의 열성능 향상을 연구하였다. 나사산 표면을 적용하여 열전달 면적을 증가시키고, 이에 따른 열 저항 감소 및 성능 개선 효과를 분석하였다.

신동환 등⁽³⁸⁾은 Cu-Cu 핀 히트파이프를 이용한 열교환기의 환경 및 열 성능 실험을 수행하였다. 히트파이프 기반 열교환기의 열전달 특성을 평가하고, 다양한 환경 조건에서의 성능 변화를 분석하였다.

김우석 등⁽³⁹⁾은 다공성 매체 모델을 활용한 핀형 히트파이프 열교환기의 열 설계를 연구하였다. CFD 해석을 통해 열교환기의 열유체 성능을 분석하고, 실험적 접근의 비용과 시간 소모를 줄이기 위해 복잡한 핀 구조를 다공성 매체로 대체하는 방법을 제안하였다.

이강원 등⁽⁴⁰⁾은 써모사이폰의 열전달 성능 향상을 위한 강인한 초발수 응축기 표면을 연구하였다. 세리아/폴리머 기반 하이브리드 코팅을 적용하여 응축 표면의 초발수성을 강화하고, 이에 따른 열전달 성능 개선 효과를 분석하였다.

김규창 등⁽⁴¹⁾은 biphilic 스트라이프 패턴 표면의 내구성을 연구하였다. 친수성과 소수성 패턴이 결합된 표면에서의 핵비등 및 임계 열유속(CHF) 특성을 분석하고, 보일링 구간에서의 장기적 성능 유지 가능성을 평가하였다.

김규일 등⁽⁴²⁾은 복잡한 수치 해석 없이 열 성능을 계산할 수 있는 경험적 분석 모델을 사용한 열교환기 설계 프로그램을 제안하였다. 이 프로그램은 실험적 상관식을 사용하여 열전달 계수와 압력 강하를 계산하며, 실험 결과와 비교해 평균 오차 0.8%를 보였다.

이석진 등⁽⁴³⁾은 도로 제설 및 결빙 방지에 지열 써모사이폰을 적용한 실험을 수행하였다. 아세톤을 작동유체로 사용하여 실험한 결과, 75% 이상의 채우기 비율에서 최적의 열 성능을 나타내며 효과적인 제설과 결빙 방지가 가능함을 확인하였다.

4. 산업공정 히트펌프 이용 열관리 기술

산업공정에서의 효율적인 열관리는 에너지 절약과 환경 친화적 운영을 위해 중요하다. 본 절에서는 히트펌프와 관련된 다양한 열관리 기술들을 소개하며, 재생에너지 활용, 폐열 회수 및 효율적인 냉각 시스템 적용을 다룬 연구들을 다

룬다.

우성용 등⁽⁴⁴⁾은 자원 회수 및 폐수 처리를 위한 흡착식 수처리 공정의 적합성을 연구하였다. 매립지 침출수와 해수를 적용하여 물 회수율에 따른 처리 성능을 평가하고, ZLD 공정의 사전 농축 단계로서의 활용 가능성을 분석하였다.

함민규 등⁽⁴⁵⁾은 데이터센터 액체 냉각을 위한 분리막 기반 제습·냉각 시스템의 성능을 평가하였다. 기체-액체 분리막 냉각과 흡수식 제습 기술을 결합하여 냉각 성능을 분석하고, 데이터센터 냉각 시스템 적용 가능성을 검토하였다.

김영민 등⁽⁴⁶⁾은 재생에너지 잉여전력을 활용한 P2H 시스템의 실증 연구를 수행하였다. 잉여전력을 효율적으로 활용하기 위한 열에너지 변환 기술을 분석하고, 시스템의 성능과 적용 가능성을 평가하였다.

김우현 등⁽⁴⁷⁾은 유체 흐름 조건에 따른 해수를 이용한 장주기 에너지저장 시스템의 성능을 평가하였다. 전해질과 해수의 유량 변화에 따른 이온 분리 및 전기화학적 효율을 분석하고, 에너지 저장 기술의 최적 운전 조건을 도출하였다.

김인관⁽⁴⁸⁾은 R-1234ze(E) 냉매를 적용한 가변용량 고온수 히트펌프 시작품의 설계 및 기초시험을 수행하였다. 히트펌프의 주요 요소 부품인 열교환기, 압축기, 냉매의 설계를 진행하고, 사이클 설계와 제어 시퀀스를 정립하였다.

정동열 등⁽⁴⁹⁾은 히트펌프 증발열원 공급을 위한 하이브리드형 잠열축열 모듈의 축방열 특성을 연구하였다. 축열 및 방열 과정에서 열전달 특성을 분석하고, 효율적인 에너지 저장 및 활용 방안을 제시하였다.

구경민⁽⁵⁰⁾은 정련/수세 공정의 폐열회수 시스템에 대한 건전성 예측 및 유지관리 방안을 연구하였다. 파울링 형성에 따른 열저항 증가와 시스템 성능 저하를 분석하고, 폐열회수의 실용성을 높이기 위한 유지관리 및 예지보전 솔루션을 제안하였다.

5. 방위산업 전자장비 열관리

방위산업 전자장비의 효율적인 열관리는 장비의 성능과 안정성에 중요한 영향을 미친다. 본 절에서는 다양한 방위산업 전자장비의 열관리 기술과 냉각 시스템에 대한 연구를 소개하며, 극한 환경에서의 열관리, 냉각 성능 최적화 및 대체 냉매 적용 등 방열 성능 향상을 위한 다양한 설계 방안을 다룬다.

윤영석 등⁽⁵¹⁾은 지향성 방해기술에 사용되는 레이저의 방열구조 최적화를 연구하였다. 다양한 설계 변수에 따른 열관리 성능을 분석하고, 효율적인 방열 설계를 제안하였다.

이상우 등⁽⁵²⁾은 AMESim을 활용하여 대형 레이더 냉각장치에서 저지구온난화잠재력(Low GWP) 대체 냉매인 R450A의 Drop-in 성능을 해석하였다. 기존 냉매 대비 열역학적 성능을 분석하고 적용 가능성을 평가하였다.

최윤석 등⁽⁵³⁾은 군용 전자장비 방열플레이트의 냉각 성능을 연구하였다. 다양한 설계 조건에서 열 제거 효과를 분석하고, 방열 성능 향상을 위한 최적 설계 방안을 도출하였다.

윤민한 등⁽⁵⁴⁾은 항공기 장비 냉각공기 매니폴드의 형상 최적화를 연구하였다. 공기 흐름 분포를 개선하기 위한 설계 변수 분석을 수행하고, 최적 형상을 도출하였다.

배종인 등⁽⁵⁵⁾은 극한 환경에서 전자광학시스템(EOTS) 냉각을 위한 PHP 열교환기 모듈을 개발하였다. PHP(Pulsating Heat Pipe) 기반 열교환기의 성능을 분석하고, 극한 환경에서의 안정적인 열관리 기술을 평가하였다.

김상운 등⁽⁵⁶⁾은 AMESim을 이용하여 수냉식 냉각장치의 유량제어밸브 동특성이 온도제어에 미치는 영향을 연구하였다. 유량제어밸브의 응답 특성을 분석하고, 냉각 시스템의 온도 안정성을 향상시키기 위한 제어 방안을 평가하였다.

최필경 등⁽⁵⁷⁾은 사막 환경에서의 안테나 냉각장치를 개발하고 성능을 평가하였다. 극한 환경에서의 열관리 성능을 분석하고, 안정적인 냉각 시스템 구현을 위한 최적 설계를 검토하였다.

박시목⁽⁵⁸⁾은 배열 충돌 제트 냉각기법의 유동 및 기하학적 매개변수가 냉각 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 다양한 설계 변수를 고려하여 제트 충돌 냉각의 열전달 특성을 분석하고 최적 냉각 성능을 평가하였다.

6. 방위산업 방열설계

최근 방위산업 분야에서 고발열을 발생시키는 전자장비 및 무기 시스템의 효율적인 열관리가 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 본 절에서는 고발열 소자의 온도 균일화 및 방열 성능 향상을 위한 다양한 연구를 소개한다.

장수진 등⁽⁵⁹⁾은 차등적 열전도 소재를 활용하여 고발열 소자의 온도 평준화를 연구하였다. 해석적 및 실험적 접근을 통해 열 분포 균일화 효과를 분석하고, 최적 설계 방안을 제시하였다.

이연수 등⁽⁶⁰⁾은 고발열 소자 간 온도 평준화를 위한 수냉핀의 최적 설계를 연구하였다. 해석적 및 실험적 접근을 통해 열 분포 균일화 효과를 분석하고, 최적 설계 방안을 도출하였다.

이제희 등⁽⁶¹⁾은 냉각유로 형상에 따른 고발열 소자 간 온도 평준화 효과를 연구하였다. 해석적 및 실험적 접근을 통해 최적 냉각유로 설계를 분석하고 열 분포 균일화를 평가하였다.

김희준 등⁽⁶²⁾은 모듈 간 온도 균일화를 위한 하부냉각 방식 냉각판의 유로 설계를 연구하였다. 다양한 유로 디자인을 분석하여 열 분포 균일화 성능을 평가하고 최적 설계를 도출하였다.

박종범 등⁽⁶³⁾은 공랭식 냉각구조를 갖는 대형 레이더용 송

수신조립체의 방열 설계를 연구하였다. 열 저항 특성을 분석하고 냉각 성능 향상을 위한 최적 설계 방안을 도출하였다.

박아미 등⁽⁶⁴⁾은 일사 조건에서 차열도료 적용에 따른 방열 성능을 연구하였다. 차열도료의 열 저감 효과를 분석하고 효율적인 열관리 방안을 평가하였다.

장호용 등⁽⁶⁵⁾은 Spaceclaim-Icepak을 활용하여 항공기 탑재 전자장비의 방열 해석과 검증을 수행하였다. 해석적 모델링을 통해 열관리 성능을 분석하고, 실제 환경에서의 검증 결과를 통해 방열 시스템의 신뢰성을 평가하였다.

유주선⁽⁶⁶⁾은 고발열 항공전자장비의 방열 성능 개선을 위한 Air Flow Through(AFT) 냉각 적용을 검토하고, 전도 냉각과 성능을 비교하였다. CFD 해석을 통해 AFT 냉각 방식의 열저항 감소 및 온도 균일화 효과를 분석하고, 기존 전도 냉각 대비 효율성을 평가하였다.

김이현 등⁽⁶⁷⁾은 쉘터 운용온도 환경시험을 위한 열해석 모델을 개발하고 검증하였다. 다양한 운용 조건에서의 열 환경을 분석하고, 신뢰성 높은 열관리 시스템 설계를 평가하였다.

송준형 등⁽⁶⁸⁾은 진공 환경에서 고발열 필스의 열적 안정성을 해석적으로 연구하였다. RF 증폭기 구조체 내에서 발생하는 열적 문제를 분석하고, 임계온도를 기준으로 열적 안정성을 평가하였다.

장수진 등⁽⁶⁹⁾은 고밀도·고발열 배열소자 간 온도 평준화를 위한 연구를 수행하였다. 배열소자의 열 분포를 분석하고, 균일한 온도 유지 및 방열 성능 향상을 위한 최적 설계를 평가하였다.

최규형 등⁽⁷⁰⁾은 항공용 경량화 전자장비의 방열 특성을 연구하였다. 방열 성능 향상을 위한 설계 방안을 분석하고 열해석을 통해 효과적인 냉각 방법을 도출하였다.

황지원 등⁽⁷¹⁾은 항공용 AESA 레이더의 방열핀 형상에 따른 냉각 성능을 분석하였다. 다양한 형상의 방열핀을 비교하여 열 분포와 냉각 효율에 미치는 영향을 평가하였다.

7. 결 론

본 원고에서는 2024년 한국유체기계학회에서 논의된 전자장비 냉각 및 열관리 기술과 관련된 연구 성과를 조망하였다. 최근 전자장비의 고성능화와 데이터센터의 확장에 따라 효율적인 열관리 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있으며, 이에 대응하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 주요 연구 분야로는 전자장비 냉각 및 열관리, 히트파이프 열교환기 성능 향상, 산업공정에서의 히트펌프 기반 열관리 기술, 방위산업 전자장비 열관리, 방위산업 방열설계 등이 있다. 이러한 연구들은 미래 열관리 기술의 혁신을 이끌 핵심 요소로 작용할 것으로 기대된다.

References

- (1) Kim, Y. H., Yun, M., Shim, D. I., and Cho, H. H., 2024, "Analysis of wicking performance according to shape change of nanowires growing on surface," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (2) Hong, D. H., Karng, S. W., and Rhee, G. H., 2024, "Dynamic analysis of hydrogen refueling characteristics by pre-cooling temperature variations," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (3) Choi, S., Doh, S. Y., and Lee, J., 2024, "Experimental investigation of flow boiling heat transfer and pressure drop of sandblasted surface," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (4) Seo, J. H., and Lee, J., 2024, "Pressure and Force Measurement of Geyser Boiling Phenomena in Two-phase Closed Thermosyphon," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (5) Kim, S. H., Kim, T. K., and Cho, S. H., 2024, "Numerical Simulation of Thermal Characteristics Based on the Arrangement of the Fan-Motor in Vacuum Cleaner," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (6) Lee, S., Kang, S., and Lee, J., 2024, "Visualization and Thermal Performance Study of Lab-scale Geothermal Thermosyphon for Snow Melting," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (7) Ko, J., Kim, J., and Kang, C., 2024, "The effect of varying slope of manifold on the cooling performance for U-type air cooled battery pack," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (8) Jeong, I., Kim, S., An, S., and Kang, C., 2024, "A numerical study on thermal runaway and temperature behavior of 18650 LiFePO₄ battery," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (9) Shin, S., Doh, S. Y., and Lee, J., 2024, "Mutual interaction among multiple heat sources in two-phase immersion cooling," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (10) Kim, J. Y., Park, J. Y., Choi, W. W., Kwak, D. H., and Kim, S. M., 2024, "Study on flow boiling heat transfer of large-area multi-channel heat sink," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (11) Jeong, S. S., Choi, W. W., Senguttuvan, S., and Kim, S. M., 2024, "Prediction model of heat transfer characteristics of chip in two-phase immersion cooling system," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (12) Lee, S. W., Jeong, S. S., Choi, W. W., and Kim, S. M., 2024, "An experimental study on heat transfer characteristics of impingement/effusion cooling system using pin fins," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (13) Ryu, C. H., Kim, G. M., Kim, S. G., and Kwak, J. S., 2024, "Research Trends on Cooling Systems of Hydrogen Fuel Cell Propulsion System for UAM," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (14) Song, T. H., Lee, J. H., Woo, S. Y., and Oh, S. J., 2024, "Evaluating the Performance of PCM Thermal Energy Storage for Implementation of P2H System," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (15) Hyun, B., Doh, S. Y., and Lee, J., 2024, "Fabrication of Highly Thermal Conductive Thermal Interface Material Using Copper Powder," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (16) Ahn, S. J., Choi, W. W., Sangutuvan, S., and Kim, S. M., 2024, "Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Slotjet/Manifold Mini-Channel Heat Exchanger," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (17) Choi, J., Doh, S. Y., and Lee, J., 2024, "Pool boiling enhancement on aluminum microporous surface in acetone," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (18) Choi, S., Doh, S. Y., and Lee, J., 2024, "Flow Boiling enhancement of R245fa on sandblasted surfaces of minichannel," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (19) Seo, J. H., and Lee, J., 2024, "Geyser Boiling Characteristics of Two-phase Closed Thermosyphon according to the Change of Working Fluid," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (20) Kang, S., and Kim, D., 2024, "Heat transfer performance of a thermosyphon under horizontal vibration," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (21) Choi, J., Doh, S. Y., and Lee, J., 2024, "Pool boiling heat transfer performance of micro-thick copper foam with porosity," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 27, No. 4, pp.38-46.
- (22) Lee, S. Y., Choi, W. W., and Kim, S. M., 2024, "Numerical study on thermal performance of phase change material based horizontal finned cylindrical heat sink," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 27, No. 1, pp.33-43.
- (23) Moon, Y., Lee, D., Lee, Y., Park, M., and Ahn, J., 2024, "Evaluation of cooling performance by varying the number of vapor chamber in the outer panel of food cold chain truck," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (24) Lee, D., Chung, D. Y., Kim, K., Kang, C., and Kim, J. Y., 2024, "Numerical study of a small transport device using latent heat material to minimize temperature deviation," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (25) Lee, D., Chung, D. Y., Kim, K., Kang, C., and Kim, J. Y., 2024, "Numerical study on the effect of tube spacing changes of thermal storage module on heat discharging characteristics," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (26) Choi, J., and Park, H., 2024, "Study of heat transfer and

- cooling performance according to the thermal management method of the electric motor," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (27) Lee, S., and Park, H., 2024, "Analysis of a double-impeller heat exchanger for enhancing the cooling performance of optical tracking system," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (28) Song, T. H., Lee, J. H., Ko, G. S., Woo, S. Y., and Oh, S. J., 2024, "Evaluating the performance of inorganic PCM using longitudinal finned tube heat exchanger" Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (29) Na, D., Cho, M., and Noh, J., 2024, "A study on electromagnetic loss and heat dissipation characteristics analysis of electronic water pump (EWP) axial motor," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (30) Park, J. Y., and Kim, S. M., 2024, "Numerical study on the effect of flow guide shape variation in heat sink inlet header on flow uniformity improvement," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (31) Seo, J. Y., and Lee, D., 2024, "A study on vehicle interior temperature control in response to external environmental changes," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (32) Kang, S., and Lee, J., 2024, "Confinement Effect in Two-Phase Closed Thermosyphon," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (33) Shin, D. H., Shim, J. H., Kim, W. K., and Kim, H. W., 2024, "Thermal performance testing of a heat exchanger using SUS347-Al fin heat pipes," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (34) Lee, S., Kim, Y., Seo, J. H., Lee, S. H., Lee, J., and Lee, H., 2024, "Thermal Performance Analysis of Small Heat Exchanger Using Porous Media Approach," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (35) Kim, J. S., and Nam, Y., 2024, "Robust Dropwise Condenser Surface for Thermosyphon," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (36) Kim, G., Lee, S. and Lee, J., 2024, "Heat Transfer Performance of Boiling Pipes with Bi-Philic Stripe Patterned Boiling Section," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (37) Kang, S., Lee, S., and Lee, J., 2024, "Performance Enhancement of Two-Phase Closed Thermosyphon with Threaded Evaporator Surfaces," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (38) Shin, D. H., Shim, J. H., Kim, W. K., and Kim, H. W., 2024, "Environmental and Thermal Performance Test of Heat Exchanger Using Cu-Cu Fin Heat Pipe," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (39) Kim, W., Lee, S., Kim, Y., Kang, S., Shin, D. H., Lee, S. H., Lee, J., and Lee, H., 2024, "Thermal Design of Finned Heat Pipe Heat Exchanger Using Porous Media Model," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (40) Lee, K., Kim, J. S., and Nam, Y., 2024, "Enhancing Heat Transfer Performance of a Thermosyphon Using Robust Superhydrophobic Condenser," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (41) Kim, G., and Lee, J., 2024, "Durability of Bi-Philic Stripe Patterned Surfaces Applied to the Boiling Section," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (42) Kim, K., Seo, J. H., Kang, S., and Lee, J., 2024, "Development and validation in thermal design program of thermosyphon heat exchanger," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 27, No. 1, pp.88-97.
- (43) Lee, S., Kang, S., Seo, J. H., and Lee, J., 2024, "Thermal performance of eco-friendly thermosyphon for snow melting and anti-icing," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 27, No. 4, pp.5-15.
- (44) Woo, S. Y., Kim, J. S., Oh, S. J., and Kim, Y. D., 2024, "Assessment of the Suitability of Adsorption Water Treatment for Resource Recovery and Wastewater Treatment," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (45) Ham, M. G., Oh, S. H., and Kim, Y. D., 2024, "Performance Evaluation of Membrane-Based Dehumidification and Cooling System for Data-Center Liquid Cooling," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (46) Kim, Y., Kim, D. W., Kim, T. H., Byun, S. Y., and Bu, H. J., 2024, "Demonstration of P2H System Using Surplus Renewable Energy," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (47) Kim, W. H., Seo, B. S., and Kim, H., 2024, "Performance Evaluation of Seawater-Based Long-Duration Energy Storage System According to Flow Pattern in a Stack," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (48) Kim, I., Kim, H., Yoo, I., and Kim, M., 2024, "Design and Basic Testing of a Prototype Variable Capacity Hot Water Heat Pump Using R-1234ze(E) Refrigerant," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (49) Chung, D. Y., Lee, D., Park, D., Kim, J. Y., and Kang, C., 2024, "The Study on Charging/Discharging Characteristics of Sensible-Latent Heat Hybrid Thermal Storage Unit for Heat Pump," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (50) Koo, K., 2024, "Prognostics and Health Management of Waste Heat Recovery System for Refining/Washing Machine," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (51) Yoon, Y., Choi, P., and Heo, J., 2024, "A Study on the Optimization of Thermal Design for Directional Countermeasures Laser," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (52) Lee, S., Kim, S., Yoo, N., Kim, T., and Heo, J., 2024, "Low

- GWP Alternative Refrigerant R450A Drop-in Performance Analysis of Large Radar Cooling Unit using AMESim," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (53) Choi, Y., Park, K., and Heo, J., 2024, "Experimental Study on the Cooling Performance of Military Electronic Equipment Heat Dissipation Plate," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (54) Yoon, M., Lee, J., Lee, J., and Heo, J., 2024, "A Study on the Shape Optimization for the Aircraft Equipment Cooling Air Manifold," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (55) Bae, J., Park, D., Lee, S., Park, H., Jeon, M., and Park, H., 2024, "Development of PHP Heat Exchanger Module for the Cooling of EOTS in Extreme Environmental Conditions," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (56) Kim, S., Heo, J., Yoon, K., and Ko, E., 2024, "A Study on the Temperature Control According to the Flow Control Valve Characteristics for Liquid Cooling Unit Using AMESim," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (57) Choi, P., Kwak, N., Kim, Y., Jung, B., and Heo, J., 2024, "Development and Performance Evaluation of Antenna Cooling Equipment in the Desert Environment," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (58) Park, S., 2024, "Study on the Effect of Flow and Geometric Parameters on Cooling Performance of Jet Array Impingement Cooling Method," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (59) Jang, S., Lee, J., Jeong, E., Lee, K., and Shin, H., 2024, "Analytical and Experimental Study on the Temperature Uniformity of High-Heating Devices Using Differential Heat Conductive Materials," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (60) Lee, Y., Lee, J., Jeong, E., Lee, K., and Shin, H., 2024, "Analytical and Experimental Study on the Optimization Design of Water Cooling Fin for Temperature of High-Heating Devices," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (61) Lee, J., Lee, J., and Jeong, E., 2024, "Analytical and Experimental Study on the Temperature Equalization between High-Heating Element Devices According to the Shape of the Cooling Channel," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (62) Kim, H., Hwang, J., Ra, Y., and Lee, J., 2024, "Study on the Channel Design of Bottom Cooling Type Cold Plate for Uniform Temperature Distribution between Modules," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (63) Park, J., Kim, K., Sim, M., Ra, Y., and Lee, J., 2024, "Study on the Heat Resistance Design of Transceiver Assembly for Large Radar with Air Cooling Structure," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (64) Park, A., Choi, T., and Hak, L., 2024, "Analysis of Heat Resistance Performance According to the Application of Heat Resistant Paint Under Solar Conditions," Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (65) Jang, H. Y., Kim, M. J., and Kim, J., 2024, "Heat Dissipation Analysis and Verification of Aircraft-Mounted Electronic Equipment Using Space Claim-Icepak," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (66) Yoo, J., 2024, "Assessment of Air Flow Through Cooling for Thermal Performance Enhancement in High-Heat Avionics and Performance Comparison with Conduction Cooling," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (67) Kim, Y., Lee, J., Lee, K., Jeong, E., and Yoon, J., 2024, "Development and Validation of Thermal Analysis Model for Environmental Test of Shelter Operation," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (68) Song, J. H., Won, J. H., Lee, I. G., and Jung, E. B., 2024, "An Analytical Study on the Thermal Stability of High Heating Pulse in Vacuum Environment," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (69) Jang, S., Lee, Y., Lee, J., Lee, J., Jeong, E., Lee, K., and Shin, H., 2024, "A Study on the Temperature Equalization Among High Density High Heating Array Elements," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (70) Choi, K., Gwon, D., Kim, B., Ra, Y., and Lee, J., 2024, "Study on the Thermal Dissipation Characteristics of Lightweight Electronic Equipment for Aviation," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.
- (71) Hwang, J., Kim, H., Kim, H., Ra, Y., Lee, Y., and Lee, J., 2024, "Analysis of Cooling Performance According to Heat Sink Shape of Airborne AESA Radar," Proceedings of the KSFM 2024 Winter Annual Meeting.