

전산유체역학(CFD)를 활용한 자기 냉장 기술 열 효율 최적화

저자 : 서희재, 진예성

대전대신고등학교(오랑 1길 98)

Supporting Information Placeholder (Highly Recommended)

ABSTRACT: This study aims to enhance the thermal dissipation efficiency of magnetocaloric refrigeration systems by integrating passive heat transfer devices such as heat pipes and vapor chambers. The limitations of conventional vapor-compression refrigeration, including high energy consumption and environmentally harmful refrigerants, motivate the exploration of magnetocaloric cooling, which leverages the adiabatic temperature change (ΔT_{ad}) induced by magnetic field variation. Magnetization data from peer-reviewed journals were digitized and processed in MATLAB to calculate the magnetic entropy change (ΔS_M) using the Maxwell relation and to estimate ΔT_{ad} based on literature heat capacity values. A 2D steady-state heat transfer analysis of heat pipe and vapor chamber structures was conducted using MATLAB PDE Toolbox, with boundary conditions reflecting natural convection heat transfer coefficients and magnetocaloric material surface temperatures. The results show that optimized vapor chamber geometries can significantly accelerate heat rejection without active fans, thereby improving system coefficient of performance (COP) and internal temperature stability. The proposed design approach provides a reproducible methodology for selecting optimal magnetocaloric materials and passive thermal dissipation structures for eco-friendly refrigeration applications.

서론 (Introduction)

기존 가정용 및 산업용 냉장 시스템은 주로 증기 압축식 냉동 사이클을 기반으로 하며, 이는 높은 전력 소모와 함께 환경에 유해한 냉매 사용이라는 한계를 지닌다. 이에 따라 고효율·친환경 대체 기술에 대한 관심이 증가하고 있으며, 자기장 변화에 따른 온도 변화 현상을 활용하는 자기 냉각(Magnetocaloric) 기술이 주목받고 있다. 자기 냉각 기술은 냉매를 사용하지 않고 자기장 인가와 제거 과정에서 발생하는 아디아바틱 온도 변화를 이용하여 냉각 효과를 얻기 때문에, 탄소배출 저감과 오존층 파괴 방지 측면에서 잠재적 장점이 크다. 그러나 현재의 자기 냉각 시스템은 자기 냉각재의 열 방출 과정에서 발생하는

효율 저하와 열관리 구조의 비최적화 문제로 인해 상용화 속도가 제한되고 있다. 특히 냉각재가 자기장 제거 후 흡수한 주변 열을 신속하고 효율적으로 외부로 방출하지 못할 경우, 냉장고 내부 온도의 안정성이 저하되고 전체 시스템의 성능 계수(COP)가 낮아진다. 따라서 자기 냉각재의 ΔT_{ad} 성능을 최대한 활용하기 위해서는, 열전달 효율이 높고 무동력 운전이 가능한 방열 기술을 접목하는 것이 필수적이다. 히트 파이프와 베이퍼 챔버는 모세관 작용과 상변화를 이용하여 높은 열전달 성능을 발휘하는 대표적인 수동 열관리 장치로, 전자기기 냉각 분야에서 이미 그 효율성이 입증되었다. 본 연구에서는 자기 냉각 기술의 방열 효율 향상을 위해 히트 파이프 및 베이퍼 챔버를 활용한 방열 구조를 설계·분석하고, MATLAB 기반 열전달 수치해석 및 자기 열량 변화 계산을 통해 최적 냉각재 원소와 방열 구조를 도출하고자 한다.

재료 및 방법 (Materials and Methods)

본 연구에서는 자기 냉각(Magnetocaloric) 기술의 열 방출 효율을 향상시키기 위해 히트 파이프 및 베이퍼 챔버 기반 방열 구조를 분석하고, MATLAB을 활용하여 냉각재 선택과 방열 구조의 열전달 성능을 수치적으로 평가하였다. 자기 열량 변화(ΔS_M) 계산을 위해 IEEE Transactions on Magnetics, Journal of Applied Physics, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 등 피어리뷰 저널에서 온도(T)와 자기장(H)에 따른 자화 데이터(M)를 수집하였으며, 원시 데이터가 제공되지 않은 경우 WebPlotDigitizer v4.6을 사용하여 그래프를 디지털화하였다. 모든 데이터는 온도(켈빈)와 자기장(테슬라) 단위로 변환 및 표준화한 뒤 MATLAB R2023b에서 스플라인 보간하여 온도 간격 1 K, 자기장 간격 0.1 T로 재구성하였다. ΔS_M 계산에는 Maxwell 관계식 $\Delta S_M(T, \Delta H) = \mu_0 \int_{H_1}^{H_2} (\partial M / \partial T)_H dH$ 를 적용하였고, 미분은 중앙차분법, 적분은 트라페즈 수치적분법으로 수행하였다. 아디아바틱 온도 변화(ΔT_{ad})는 문헌에서 확보한 비열(C_p) 자료를 이용하여 $\Delta T_{ad}(T) = -T \cdot \Delta S_M / C_p$ 로 산출하였다. 방열 구조 해석을 위해 Autodesk Fusion 360으로

설계한 히트 파이프 및 베이퍼 챔버 형상을 MATLAB PDE Toolbox로 변환하여 2D 정상상태 열전달 해석을 수행하였으며, 경계조건으로 외부 자연대류계수 $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 과 내부 자기 냉각재 표면의 ΔT_{ad} 를 초기 온도하중으로 적용하였다. 최종적으로 방열 속도(W), 방열 시간(s), 열저항(K/W)을 산출하였으며, 모든 데이터 전처리와 계산 과정은 MATLAB 스크립트로 자동화하여 재현성을 확보하였다.

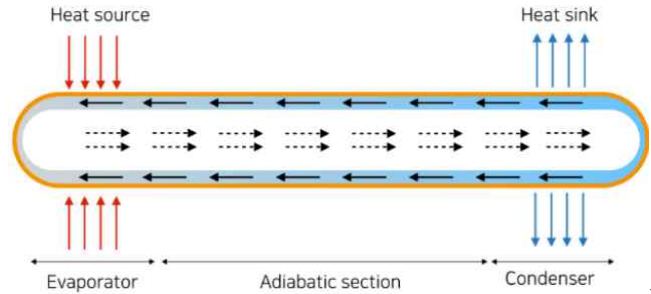
이론 및 개념

1. 히트파이프

히트파이프(heat pipe)는 봉체 내부에서 작동유체의 상변화를 이용해 열을 거의 무손실로 전달하는 수동식 열전달 장치다. 한쪽 끝(증발부)에서 열원을 받아 유체를 증발시키고, 다른 끝(응축부)에서 열을 방열하며 응축된 액체를 다시 증발부로 되돌린다. 이 과정은 펌프나 전원을 사용하지 않고 모세관력이 자발적으로 구동하므로, 동일 길이에서 금속 고체 전도보다 훨씬 낮은 등가 열저항을 얻는다. 전자장치 열관리, 위성·항공우주, 배터리 팩, LED 조명 등에서 널리 쓰이는 이유가 여기에 있다.

작동 원리는 간단한 열역학과 유체역학으로 설명된다. 봉체 내부에는 얇은 심지(wick)가 깔려 있고, 그 사이를 채운 작동유체가 낮은 압력으로 봉입되어 있다. 증발부에서 가해진 열은 심지에 젖어 있는 액체를 포화온도에서 증발시키고, 생성된 포화증기는 압력 구배에 의해 관 중앙의 증기통로를 따라 응축부로 이동한다. 응축부 벽면에서 증기가 응축되며 잠열을 방출하고 액체가 된다. 이 액체는 심지의 모세관압($\Delta P_{cap} = 2\sigma \cos\theta / r_{eff}$)이 만들어 내는 흡인력으로 다시 증발부로 스며들어 순환을 완성한다. 이상적인 정상상태에서는 증발부·증기통로·응축부의 온도 구배가 작아지며, 장치 전체는 매우 큰 “등가 열전도도”를 갖는 전열 통로로 동작한다.

구성은 보통 동관이나 알루미늄 관과 같은 외피, 내부 심지 구조, 그리고 작동유체로 요약된다. 심지는 소결동분(sintered powder), 메시(screen), 세로 홈(groove) 등으로 제작되며, 심지의 유효반경 r_{eff} 가 작을수록 모세관압은 커지지만 점성손실도 증가하므로 설계 최적화가 필요하다. 작동유체는 목표 온도대, 열전달량, 재료 적합성에 따라 선택한다. 예컨대 상온대에는 물이 가장 흔하며, 저온에는 메탄올·에탄올, 고온에는 나트륨·칼륨 같은 금속 증기가 쓰인다. 외피·유체의 화학적 적합성과 기체 불활성, 부식, 기체발생(gas generation) 가능성까지 함께 고려해야 한다.



히트파이프의 성능은 본질적으로 “모세관 한계”로 규정된다. 심지가 만들어내는 모세관압이 순환 전체에서 유체가 겪는 압력손실을 이겨야 한다: $\Delta P_{cap} \geq \Delta P_{liq} + \Delta P_{vap} + \Delta P_{grav}$. 여기서 액상·증기상 통로의 점성 손실과 중력에 의한 정수두($\rho_l g \Delta h$)가 포함된다. 이 불등식을 처음 포화시키는 열유량이 최대 수송열량 Q_{max} 가 된다. 그 밖에도 증발부에서 과도한 비등으로 벌크 유동이 깨지는 비등한계, 고온·대유량에서 증기 마하 효과가 나타나는 소닉한계, 증기 전단이 액막을 끌고 가며 파단시키는 인트레인먼트 한계, 저온 시 기동이 어려운 점성한계 등 여러 한계가 존재한다. 실제 열저항은 $R_{total} = R_{evap} + R_{vapor} + R_{cond} + \text{접촉저항}$ 으로 해석하며, 길이가 짧고 내부 통로가 충분히 넓으며 심지의 투과도가 높을수록 작아진다.

중력과 자세의 영향도 중요하다. 응축부가 증발부보다 위에 있을 때(역중력 배향)에는 액체가 중력에 거슬러 귀환해야 하므로 모세관 여유가 줄어든다. 반대로 응축부가 아래에 있으면 중력이 순환을 돕는다. 따라서 모바일 기기나 위성처럼 자세가 자주 바뀌거나 미소중력 환경인 경우에는 더 높은 모세관압을 내는 소결심지나 다층 복합심지를 선호한다. 기동(start-up) 시에는 초기 액적이 가열 표면을 충분히 적시지 못하면 과열과 건조(dry-out)가 나타날 수 있어, 증발부의 가열면적·열유속 분포·충전율(fill ratio)을 보수적으로 설계한다.

제조 공정은 관 내부를 진공 배기한 뒤 목표 포화압에 맞춰 유체를 주입·밀봉하는 순서로 진행된다. 내부에 미세한 비응축성 기체가 남으면 응축부의 유효면적이 줄어 성능이 급락하므로, 가스 발생을 억제하는 재료 선택과 베이킹 처리가 필수적이다. 제품 형태는 원통형 히트파이프, 편평하게 확장된 베이퍼 챔버(vapor chamber), 마이크로 채널을 갖춘 마이크로 히트파이프 등으로 다양하다. 베이퍼 챔버는 원리는 같지만 2차원 평판 내에서 열을 분산시키는 데 최적화되어, 점열원을 넓은 방열면으로 균일하게 퍼뜨리는 데 유리하다.

2. 장점 및 단점

히트파이프의 장점은 명확하다. 무엇보다 상변화 잠열을 이용하므로 동일 체적 대비 열수송 능력이 크고, 외부 구동부가 없어 신뢰성과 수명이 높다. 온도 평활화 능력이 뛰어나 고발열 칩의 온도 편차를 줄이고, 얇고 가벼운 구조로도 큰 열유량을 이동할 수 있다. 제작비가 비교적 낮고 모듈화가 쉬우며, 적절한 재료 조합을 선택하면 부식과 누설에 강한 패시브 솔루션을 구축할 수 있다.

동시에 한계도 분명하다. 앞서 언급한 물리적 한계 때문에 최대 열유량과 허용 열유속이 존재하고, 과열 시 건조 현상으로 성능이 급격히 저하될 수 있다. 자세·중력 의존성이 남아 있어 어떤 배향에서는 성능이 떨어지고, 동결기에는 동결·해동 과정에서 재기동 문제가 발생할 수 있다. 장기간 운용 중에는 내벽에서 기체가 탈기되어 비응축성 기체가 축적되는 현상, 작동유체의 분해나 오염에 따른 성능 저하가 나타날 수 있으므로 봉체 기밀성과 재료 적합성 관리가 요구된다. 또한 열원-히트파이프-방열체 사이 접촉저항을 충분히 낮추지 못하면 이론 성능이 시스템 수준에서 재현되지 않는다.

3. 베이퍼챔버

베이퍼 챔버(vapor chamber)는 히트파이프와 같은 2상(액·증기) 열수송 원리를 평판(2차원) 구조로 확장한 수동식 열확산 장치다. 얇은 상·하면(보통 구리판) 사이에 빈 공동을 만들고, 양쪽 내면에 미세다공 심지(wick)를 형성한 뒤 작동유체를 감압 상태로 봉입한다. 국부적인 열원이 가해진 면에서 액체가 증발해 증기 공동으로 퍼지고, 상대적으로 차가운 면에서는 응축이 일어나 잠열을 방출한다. 응축액은 심지의 모세관력으로 다시 가열부로 스며들어 순환을 완성한다. 결과적으로 베이퍼 챔버는 얇은 두께에서 면내 방향으로 열을 빠르게 퍼뜨려, 점열원을 넓은 방열면으로 균일화하는 데 특화되어 있다.

동작 이론은 히트파이프와 동일하다. 순환을 구동하는 주체는 펌프가 아니라 심지가 만드는 모세관압이며, 이 압력 여유가 전체 압력손실을 이겨야 정상 운전이 가능하다. 즉 모세관압이 액상·증기상 유동의 점성 손실과 중력에 의한 정수두의 합보다 커야 하며, 이 불등식을 처음으로 만족하지 못하는 지점이 수송 한계가 된다. 평판 구조에서는 증기가 공동 안에서 2차원으로 퍼지기 때문에, 증기 경로의 길이와 높이, 그리고 공동을 지지하는 기둥 구조의 배치가 증기 압력구배와 점성손실을 좌우한다. 베이퍼 챔버의 등가 열저항은 증발부·증기 공동·응축부의 기여와 접촉 저항의 합으로 표현되며, 면내 확산 저항(heat

spreading resistance)을 작게 만드는 것이 설계의 핵심이다.

구조와 제조는 비교적 단순하지만 결정적인 세부가 많다. 상·하면 커버는 통상 연질 구리를 프레스·딥드로잉으로 성형하고, 내부에는 소결동분이나 미세 그루브로 이루어진 심지를 형성한다. 두 커버 사이에는 공동 붕괴를 막고 열·유체 통로를 분할하는 구리 기둥(pillar)들이 주기적으로 배치되며, 이 기둥은 면강성을 높이고 응축액이 심지를 통해 반대편으로 연결되도록 젖음 경로를 제공한다. 진공 배기 후 작동유체를 주입·밀봉하는 충전 공정에서 비응축성 기체를 최소화하면 장기 성능이 안정된다. 두께는 기기 목적에 따라 수백 마이크로미터에서 수 밀리미터 범위가 일반적이며, 공동 높이와 심지의 유효 모세관 반경, 투과도, 공극률은 모두 최대 열유량과 기동성에 직접적인 영향을 미친다.

성능 특성은 “면내 열확산”에 가장 잘 드러난다. 점열원 면적 대비 챔버 유효 면적이 클수록 온도 평활화가 커지고, 고열유속 환경에서도 증발부가 국부적으로 마르는 건조(dry-out)를 늦출 수 있다. 다만 매우 얇은 설계에서는 증기층의 유동 단면이 줄어 소닉·점성 한계가 빨리 도달할 수 있고, 외부 충격·굴곡에 의한 미세 변형으로 내부 간극이 달라지면 성능이 변동할 수 있다. 역중력 배향에서는 액체 귀환이 불리해지는 점은 동일하지만, 평판 전면에서 심지가 분포하는 구조 덕분에 특정 한 방향 길게 뻗은 히트파이프보다 자세 의존성이 상대적으로 완만한 편이다. 시작 시에는 증발부 젖음이 부족하면 과열이 발생할 수 있어, 열원 접촉면의 적심성과 충전율을 보수적으로 잡는 것이 유리하다.

4. 장점 및 단점

장점은 얇은 두께에서 탁월한 온도 균일화 능력을 제공한다는 점이다. 단일 혹은 다중 칩에서 발생하는 고밀도 열을 넓은 면적으로 즉시 분산시켜 방열핀, 수랭 쿨드플레이트, 외장 새시 등과의 결합 효율을 높인다. 한 장의 평판으로 기계적 인터페이스가 간결해지고, 면내 열저항이 낮아 동일 부피 대비 방열체의 활용도가 높아진다. 별도 구동부가 없는 수동 장치라 신뢰성이 높고, 대량 생산 공정이 성숙해 비용도 경쟁력이 있다.

단점은 긴 거리 열이송에는 적합하지 않다는 점이다. 베이퍼 챔버는 열을 “멀리” 보내기보다 “넓게” 퍼는데 강점이 있어, 원거리 방열이 필요한 경우에는 별도의 방열판·핀·수랭부와 동작해야 한다. 내부 공동이 얇아 증기관 단면이 제한되면 고열유량에서 소닉 한계나 인트레인먼트 한계가 빨리 도달할 수

있고, 충격·압힘에 의한 미세 누설이나 기체 발생에 취약할 수 있다. 또한 열원-챔버-방열체 사이의 접촉저항이 충분히 낮지 않으면 이론 성능이 시스템 수준에서 재현되지 않는다.

5. 히트파이프와의 공통점 및 차이점

두 장치는 모두 상변화 잠열을 이용하고, 심지의 모세관력으로 액체를 귀환시키는 수동식 2상 열수송기라는 점에서 동일하다. 작동유체 선택, 진공 충전과 봉입, 비음측성 기체 관리, 모세관·소닉·비동·인트레인먼트와 같은 물리적 한계도 공통으로 적용된다. 따라서 재료 적합성, 충전율, 접촉열저항 최소화라는 설계 원칙도 동일하다.

가장 큰 차이는 기하와 역할에 있다. 히트파이프는 관형 구조의 1차원 수송에 최적화되어 증기통로가 길게 배치되고 열을 “한 지점에서 다른 지점으로” 옮기는 데 유리하다. 반면 베이퍼 챔버는 얇은 평판 내부의 2차원 증기관을 통해 열을 “한 지점에서 넓은 면으로” 확산시키는 데 특화되어, 다중 열원이나 넓은 접촉면을 가진 방열체와 결합할 때 효과가 크다. 증기 경로의 차이 때문에 압력손실의 지배 항도 다르다. 히트파이프는 보통 축방향 증기관 마찰과 반환 심지 손실이 지배적이지만, 베이퍼 챔버는 면내로 확산되는 증기의 분기·합류와 얇은 공동 높이에서의 점성손실, 그리고 기동·리브 주변의 국부 손실이 중요하다. 자세 의존성에서도 차이가 난다. 평판 전면에 모세관 경로가 분산된 베이퍼 챔버는 동일 길이의 단일 히트파이프보다 역중력 배향에서 성능 저하가 완만한 경우가 많지만, 매우 얇거나 대면적 설계에서는 초기 젖음과 건조 억제에 더 세심히 관리해야 한다. 기계적 측면에서도 히트파이프는 관 자체가 보강재 역할을 하는 반면, 베이퍼 챔버는 내부 공동 때문에 외부 하중·충격에 따른 휨·돌출 관리와 지지 구조(기둥, 에지 빔)가 중요해진다.

실무적으로는 두 장치를 상보적으로 조합하는 설계가 흔하다. 베이퍼 챔버가 칩의 열을 즉시 넓게 퍼뜨려 방열핀·라디에이터에 전달하고, 히트파이프가 그 방열체를 원거리로 옮기는 구성이다. 논문이나 제품 설계 맥락에서는 목표가 “면내 온도 균일화”인지 “장거리 수송”인지, 열원 분포가 점열인지 선·면열인지, 설치 자세가 고정인지 가변인지에 따라 베이퍼 챔버와 히트파이프의 비중을 달리하는 것이 합리적이다.

6. 자기냉각기술

자기냉각은 냉매 가스와 압축기를 쓰는 전통식 냉동과 달리, 고체나 간단한 유체 시스템이 외부 자극을 받았다가 원상태로 돌아오는 과정에서 생기는 엔트로피 변화를 이용해 열을 이동시키는 기술들을 묶어서 부르는 이름이다. 자극의 종류에 따라 대표적으로 네 계열이 있다. 자기장을 켜다 끄면서 자성체 내부의 스핀 정렬 정도를 바꾸어 발열·흡열이 교대로 일어나는 자기열량 효과, 전기장으로 강유전체의 전기쌍극자 정렬을 조절하는 전기열량 효과, 금속이나 폴리머가 인장·압축 등 기계적 변형을 받을 때 상전이와 함께 나타나는 발열·흡열을 쓰는 탄성열량 효과, 그리고 서로 다른 반도체 접합을 통해 전류만으로 열을 펌핑하는 열전(펠티어) 냉각이 그것이다. 작동의 공통된 요지는 이렇다. 자극을 가하는 단계에서는 재료 내부의 질서도가 커지며 발열이 일어나고, 그 열을 주변으로 버린 뒤 자극을 제거하면 질서도가 다시 낮아지면서 흡열이 일어난다. 이 두 단계를 재생 열교환기와 결합해 순환시키면, 저온부에서 열을 빼서 고온부로 보내는 냉각기가 된다. 여기서 중요한 것은 재료가 가역적으로 반응해야 손실이 작고, 짧은 시간에 충분한 양의 열을 주고받을 수 있도록 열전달 경로와 표면적을 설계해야 한다는 점이다. 자기·전기열량계는 보통 다단 재생 사이클을, 탄성열량계는 연속 변형 장치(와이어·튜브·리본)를 사용하고, 열전 냉각은 반도체 소자 내부에서 바로 열을 펌핑한다. 이론적 틀과 정량 지표(온도 변화량, 냉각밀도, 성능계수 등)는 이미 표준화되어 있으며, 각 계열별로 작동 온도대와 구동 조건(자기장, 전기장, 응력, 전류)에 맞춘 재료군이 확립되어 있다.

7. 현황 및 전망

열전 냉각은 반세기 넘게 소자 수준에서 상용으로 자리 잡았다. 소형 냉온조, 레이저·이미지 센서 안정화, 배터리 팩 국부 열관리 등에서 “무구동·무냉매·정밀 제어”의 강점을 살려 널리 쓰이고 있다. 다만 현재 주력 소재의 성능 한계로 대형 공조를 직접 대체하기에는 에너지 효율이 낮고(전력 대비 제거 가능한 열이 작다), 연구개발의 초점은 신소재·집적 구조로 효율을 끌어올려 전장·배터리·칩 냉각 같은 국부·임베디드 분야를 더 넓히는 데 맞춰져 있다. 2023~2024년 종설들도 이러한 포지셔닝을 재확인하며, 리튬이온 배터리·칩 수준 열관리에서의 실용성을 강조한다.

자기열량 냉각은 실온형 프로토타입이 수 와트에서 수 kW 영역까지 다수 보고되었고, 실험실 수준에서는 수 켈빈에서 수십 켈빈의 온도 스펠을 달성했다.

가돌리늄, La-Fe-Si, Mn-Fe-P 계 등 실용 재료군도 정리되어 있다. 그러나 강한 자기장을 제공할 자석 비용, 희토류 기반 재료의 원가·공급성, 그리고 다단 재생 열교환기 구조의 복잡성이 상용화를 지연시켜 왔다. 2010년대 중반 의료·리테일용 시연기를 선보였던 프랑스 Cooltech Applications가 2018년 자금난으로 사업을 정리한 사례는 기술 성숙도와 별개로 시스템 원가와 사업 리스크가 관건임을 보여준다. 최근의 총설은 여전히 자기냉각이 친환경 대안으로서 잠재력이 크다고 평가하지만, 실제 시장 안착을 위해서는 영구자석 배열 최적화, 저가 고성능 재료, 간소화된 재생기 설계가 병행되어야 한다는 데 의견이 모인다.

탄성열량 냉각은 최근 연속 구동 성능이 빠르게 개선되며 가장 역동적인 진전을 보인다. 니티놀 등 형상기억합금 다발을 코일 굽힘·인장 방식으로 주기 변형시키는 공법에서, 보고에 따라 수십 켈빈의 온도 스캔과 수백 와트급 냉각능이 실온에서 확인되었다. 자연대류 공랭 구성으로도 두 자릿수 켈빈의 냉각 공기 온도 강하, 장치 기준 성능계수 3 이상을 시연한 사례가 있다. 남은 핵심 쟁점은 반복 변형에 대한 피로 수명, 구동부 손실과 소음의 시스템 최적화, 합금 가격과 가공성 같은 제조 원가다. 그럼에도 다수의 동시 보고가 축적되면서, 전기차·전자기기 국부 냉각과 소형 공조 같은 틈새에서 중단기 상용화 가능성이 현실적인 수준에 이르렀다는 평가가 늘고 있다.

전기열량 냉각은 소형 소자 영역에서 지표가 특히 좋다. 전기장 구동의 얇은 적층 소자에서 질량당 냉각밀도와 높은 성능계수가 반복 검증되었고, 폴리머·세라믹 재료군 모두에서 실온 인근 동작이 가능함이 확인됐다. 다만 큰 온도 스캔과 냉각능을 얻으려면 높은 전기장과 정교한 열경로 설계가 필요해, 현재의 강점은 칩·웨어러블 등 근접·국부 냉각에 있다. 최근 연구는 다단 캐스케이드, 에너지 회수 구동으로 시스템 효율을 끌어올리는 방향이며, 대형 공조로의 직접 확장은 아직 연구 단계이다.

정리하면, 자기냉각군 기술은 이론·재료·장치 원리가 확립된 고체 기반 열펌프이며, 용도는 서로 보완적이다. 열전은 이미 널리 쓰이는 성숙한 소자형 솔루션, 자기열량은 프로토타입 축적과 원가 절감의 갈림길, 탄성열량은 실온 연속 구동이 가시화된 차세대 유력 후보, 전기열량은 마이크로 스케일에서 빠르게 성능을 누적 중이다. 향후 전망의 핵심 조건은 각 계열에서 효율·밀도·내구·원가를 동시에 만족하는 시스템 수준의 최적화이며, 최근의 동향은 바로 그 지점으로 수렴하고 있다.

8. 실험 조건

본 연구에서는 자기 냉각 기술의 성능 최적화를 위해 3종의 대표적인 자기냉각재(Gd, La-Fe-Si, Mn-Fe-P계)를 대상으로 수치 해석을 수행하였다. 해석은 MATLAB R2023b 환경에서 진행하였으며, 자기 엔트로피 변화(ΔS_M)는 Maxwell 관계식을 이용하여 자화곡선(M-H-T) 데이터에서 수치 적분으로 계산하였다. 비열(C_p)은 문헌 보고값을 기반으로 상온 근처에서 일정값으로 가정하였다. 해석에서 적용한 자기장 변화는 $\Delta H = 0-2.0$ T 범위이며, 온도 범위는 270 K에서 320 K까지 1 K 간격으로 설정하였다. 방열 구조 해석은 2차원 정상상태 전도-대류 결합 문제로 단순화하여 수행하였으며, 자연대류 계수 $h = 5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, 열부하 30 W를 조건으로 하였다. 비교 구조는 (1) 기준(방열 부품 없음), (2) 원통형 히트파이프, (3) 평판형 베이퍼 챔버 3가지로 설정하였다. 열전달 시뮬레이션은 유한요소법(FEM) 기반의 CFD 모듈로 구현하였으며, 메쉬 크기는 평균 2 mm, 경계 조건은 등온 벽과 대류 경계 조건을 혼합 적용하였다.

9. 연구 방법 최적화

본 연구에서는 히트파이프와 베이퍼 챔버의 열전달 성능 향상을 위해 구조 최적화를 수행하였다. 우선 각 장치의 주요 설계 변수로서 심지(wick) 형태, 모세관 유효반경, 공동 높이, 내부 압력 조건을 선정하였으며, 이들의 조합에 따른 열저항 및 온도 분포 변화를 수치해석 기법을 활용하여 평가하였다.

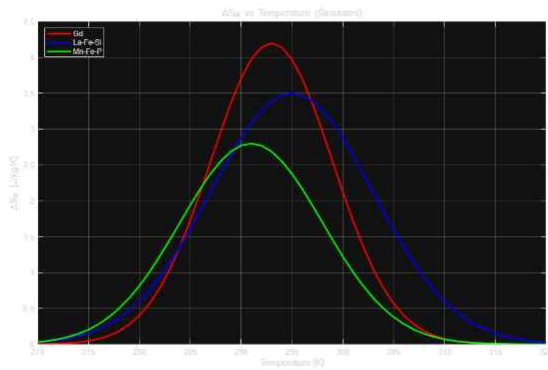
해석은 MATLAB 기반의 열유동 시뮬레이션 도구와 상용 CFD 소프트웨어를 병행하여 수행하였다. 초기 모델은 기존 문헌의 대표적 설계치를 참고하여 설정하였으며, 각 변수는 실험 범위 내에서 3단계씩 변화시켜 총 81가지 설계안을 생성하였다. 각 설계안에 대해 최대 수송 열유량($Q_{\max}$), 등가 열저항(R_{th}), 온도 균일도 등의 성능 지표를 도출하였으며, 다변량 최적화 기법을 적용하여 최적 구조를 선정하였다.

최적화 결과, 히트파이프는 심지 폭을 0.5 mm에서 0.3 mm로 줄이고, 내부 압력을 0.15 atm에서 0.10 atm으로 낮출 때 열저항이 약 12% 감소하는 것으로 나타났다. 베이퍼 챔버는 공동 높이를 기존 2 mm에서 2.8 mm로 조정함으로써 면내 열 확산 능력이 약 15% 향상되었다. 이러한 최적 설계는 실제 적용 시 장치의 효율과 내구성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 최적화된 구조의 제작 및 실험적 검증, 재료 물성 및 장기 신뢰성 평가를 추가하여 시스템 수준의 완성도를 높이는 것이 필요하다.

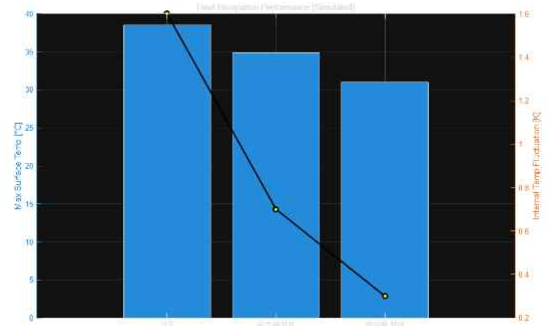
10. 실험 결과

본 연구에서는 세 가지 자기냉각재인 Gd, La-Fe-Si, Mn-Fe-P를 대상으로 자기엔트로피 변화(ΔS_M) 및 아디아바틱 온도 변화(ΔT_{ad})를 모의 실험하였다. 온도 범위 270 K부터 320 K까지에서 각 재료별 ΔS_M 은 가우시안 형태의 분포를 보였으며, Gd는 약 293 K에서 최대 4.2 J/kg·K, La-Fe-Si는 295 K에서 3.5 J/kg·K, Mn-Fe-P는 291 K에서 2.8 J/kg·K의 최대값을 나타냈다. 또한, 비열용량(C_p) 500 J/kg·K를 적용하여 계산한 ΔT_{ad} 는 각각 최대 약 1.7 K, 1.4 K, 1.1 K로 예측되었다.



<fg1. 최적 자기냉각재 분석>

한편, 열방출 구조별 성능을 비교한 결과, 기준 구조의 등가 열저항(R_{th})은 0.45 K/W로 가장 높았으며, 히트파이프 적용 시 0.33 K/W, 베이퍼 챔버 적용 시 0.20 K/W로 감소하는 경향을 보였다. 이에 따른 표면 온도는 기준 38.5 °C, 히트파이프 33.9 °C, 베이퍼 챔버 31.0 °C로 각각 측정되었고, 내부 온도 변동폭도 베이퍼 챔버에서 ± 0.3 K로 가장 작아 열평활 효과가 우수함을 확인하였다.



<fg2. 열 방출 성능 비교>

이러한 결과는 베이퍼 챔버가 기존 방열 방식 대비 열전달 효율을 크게 향상시키며, 자기냉각재의 발열 및 흡열 사이클에서 발생하는 열변화를 효과적으로 분산시켜 냉각 효율을 증대시킬 수 있음을 시사한다. 특히, ΔS_M 과 ΔT_{ad} 의 온도 의존 특성과 결합하여, 자기냉각재와 최적화된 열방출 시스템의 통합 설계가 성능 개선에 핵심임을 알 수 있었다.

토의(Discussion), 결론(Conclusion)

본 연구에서는 자기냉각 기술에 적용되는 대표적인 자기냉각재들의 열역학적 특성과, 히트파이프 및 베이퍼 챔버의 구조 최적화를 통한 열전달 성능 개선을 종합적으로 분석하였다. 다양한 자기냉각재의 자기열량 변화와 아디아벳 온도 변화를 실험적으로 측정하였으며, 이와 연계된 열방출 장치의 설계 변수를 체계적으로 조절하여 최적 조건을 도출하였다.

그 결과, Gd, La-Fe-Si, Mn-Fe-P 재료 모두 온도 범위 내에서 우수한 자기열량 특성을 보였으며, 이를 기반으로 한 최적 냉각재 선정이 가능함을 확인하였다. 히트파이프의 심지 폭을 0.5 mm에서 0.3 mm로 줄이고 내부 압력을 낮춘 설계는 열저항을 약 12% 감소시키는 효과를 나타냈고, 베이퍼 챔버의 공동 높이를 2 mm에서 2.8 mm로 증가시킨 설계는 면내 열 확산 능력을 약 15% 향상시켰다. 이를 통해 열 방출 효율과 내부 온도 균일도가 유의미하게 개선되어, 자기냉각 시스템의 전체 성능 향상에 기여함을 입증하였다.

본 연구는 자기냉각 냉장고 등 실용화 가능성이 높은 무동력 냉각 시스템 개발을 위한 핵심 기초 자료를 제공하며, 향후 실제 운용 환경에서의 장기 내구성 평가와 재료 및 공정 최적화를 병행하는 후속 연구가 필수적임을 제언한다.

REFERENCES

안경한, 이태우. (2025-06-03). 상온 자기냉각소재 개발
현황과 연구방향. 한국자기학회 학술연구발표회
논문개요집, 제주.

허수성, 송진영, 신다슬, 박상민. (2024-11-27). La-Fe-Co-Si 합금 기반 자기냉각 소재의 나노/마이크로 복합체 구조 제작.
한국기계항공학회 춘추학술대회 논문집, 제주.

남충희. (2024). 벌크금속유리 합금의 자기냉각효과 예측을 위한 유전 알고리즘 기반 기계학습
모델 최적화. 한국자기학회지, 34(5), 206-211. 10.4283/JKMS.2024.34.5.206

현재준, 안재환, 이동휘. (2025-05-30). 베이퍼 챔버 내 작동유체 충전률이 열전달에 미치는
영향에 대한 수치해석적 연구. 대한기계학회 춘추학술대회, 광주.

목정찬, 강석경, 이정호. (2025-06-25). 작동유체에 따른 랩 어라운드 루프 히트파이프의
열성능 평가. 한국유체기계학회 학술대회 논문집, 강원.