

차세대 AI 반도체 냉각을 위한 친환경 2상 냉각유체

- 사람·자연·첨단AI가 공존하는 미래 일상을 완성한다 -

FURE: Fluorine-free sUustainable REfrigerant for Next-generation AI Chips

문서번호

ASTRA02_2602PPR1

담당PM

백영진 책임PM

세부사업명 [내역사업명]	미래개척융합과학기술개발사업[미래유망융합기술파이오니어(도전형 - 한계돌파 R&D)]				
지원정보	[기간] 4년 (2단계: 2+2) [규모] 연간 4억원 내외	공모유형	☐ 지정공모 ☒ 품목공모(분야공모) ☐ 자유공모	보안과제 여부	☐ 보안 ☒ 일반
지원 과제 수	1개 내외	세부 프로그램	-	연구개발기관 구성요건	기업 참여 필수 (주관 또는 공동)

1. 프로젝트 개요

□ 목적 및 한계돌파 질문

본 프로젝트는 “불소(Fluorine)를 사용하지 않으면서도 차세대 AI 반도체의 고발열·고열유속을 감당할 2상 냉각유체를 구현할 수 있는가?” 라는 한계도전적 문제를 제시하며, 그 해결 방법을 찾고자 함.

□ 목표 및 도전성

- (최종 목표) 상기 한계도전적 문제 해결을 위해 본 프로젝트에서는 친환경·무독성·비가연성·전기절연성을 만족하면서, 차세대 AI 반도체의 고발열·고열유속에 대응 가능한 불소-free 2상^{two-phase} 냉각유체 순물질^{single-component fluid} 후보군을 발굴하고, 요구 성능을 실험적으로 검증함.
- (도전적 기술 목표 설정 필수) 본 프로젝트는 “목표달성의 불확실성은 높으나 과제 수행 결과의 파급효과가 상당히 큰 연구개발”을 대상으로 하는 「한계도전 R&D」* 프로젝트로서, 향후 기술 완성 시점을 기준으로 글로벌 선도기업^{Chemours, Solstice} 등의 예상 기술 수준을 상회하고 기술·시장 우위 확보를 위해 필요한 수준의 도전적 기술 목표 설정 필수

*(관련규정) 한계도전 R&D 운영규정(과학기술정보통신부훈령 제268호, '24. 5. 17.)

2. 추진배경 및 기대효과

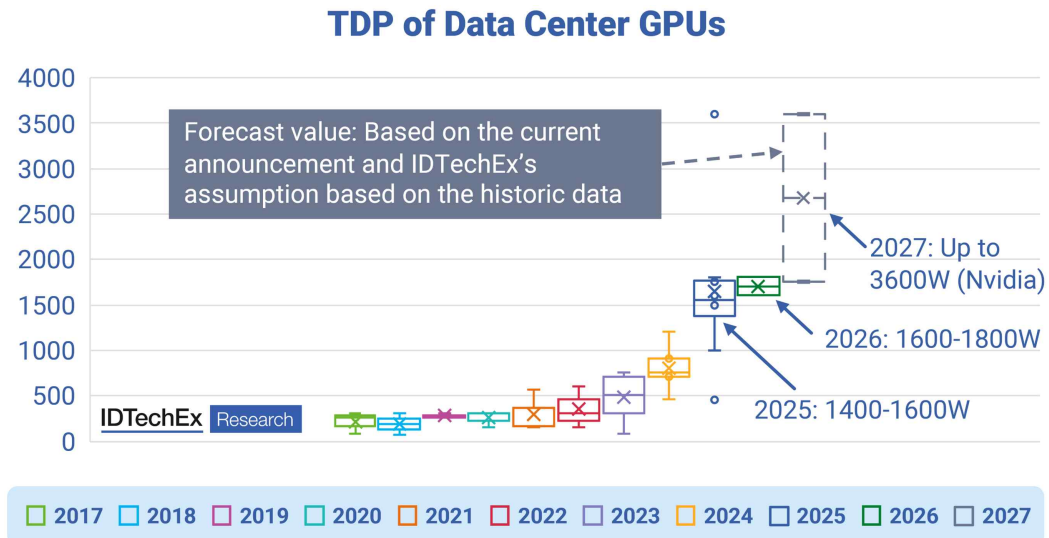
□ 글로벌 현황

- (AI 컴퓨팅 확산과 반도체 전력밀도 급증) 생성형 AI와 초거대 AI 모델의 급속한 확산에 따라 데이터센터의 연산수요가 폭증하고 있으며, 이를 위한 GPU·AI 가속기의 연산성과 소비전력*이 빠르게 증가¹⁾ (그림 1. 참조) 특히 AI 반도체의 소비전력 증가뿐 아니라 고집적에 따른 국부^{Hot Spot} 열유속의 급격한 증가²⁾가 차세대 AI 시스템 구현의 핵심 기술적 병목으로 작용 우려.

*現 GB300 GPU 패키지당 TDP 1.4kW, NVL72 약 140kW/랙,

`27년 Rubin Ultra GPU 패키지당 TDP 3.6kW(전망), NVL576 약 600kW/랙 전망³⁾,

`29년 Feynman Ultra GPU 패키지당 TDP 6.0kW(전망), >MW/랙 전망⁴⁾



〈그림 1. 데이터센터용 GPU의 TDP^{Thermal Design Power(열설계전력)} 변화 추이 및 전망¹⁾〉

- (공랭에서 액체냉각으로 냉각 패러다임 전환) 기존 공랭 방식만으로 고발열 AI 반도체를 냉각하기 어려워짐에 따라 공기보다 열전달 성능이 높은 액체를 이용하여 고밀도 발열을 효과적으로 제거하는 액체냉각 기술의 도입이 확대되고 있으며, 현재는 물·글리콜계 유체 등을 사용하는 Cold Plate 기반 단상 직접액체냉각(DLC) 기술*이 시장을 중심으로 빠르게 확산 중. NVIDIA는 `22년

1) <https://www.idtechex.com/en/research-article/two-phase-cold-plate-cooling-will-take-off-as-early-as-2026-2027/34068>

2) <https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.116729>

3) <https://www.aitimes.com/news/articleView.html?idxno=168947>

4) <https://www.tomshardware.com/pc-components/cooling/future-ai-processors-said-to-consume-up-to-15-360w-massive-power-draw-will-demand-exotic-immersion-and-embedded-cooling-tech>

부터 데이터센터 GPU에 직접액체냉각(DLC) 방식을 도입하였으며, '24년 Blackwell GB200 NVL72부터 액체 냉각을 고밀도 AI 시스템의 핵심 열관리 아키텍처로 본격 채택.

*'26년 6월, CoolIT은 15kW 용량의 Cold Plate를 시연⁵⁾

○ (액체냉각 시장·기술의 현황 및 전망)

- (시장 규모 및 전망) 데이터센터 액체냉각 세계 시장 규모 전망치는 정의 범위와 예측 모델에 따라 다르지만 '26년 3월의 한 시장보고서⁶⁾에 따르면 2026년 40.7억 달러(약 5.5조원)로부터 2033년 276.5억 달러(약 38조원)로 연평균 31.5% 성장할 것으로 전망. 이는 AI·HPC 확산에 따른 서버·랙의 고전력·고밀도화로 기존 공랭 방식으로 대응하기 어려운 고열유속·고발열 환경이 확대되면서 고성능 액체냉각 기술 수요 급증에 따른 것으로 분석. 냉각유체(cooling fluids)만의 세계 시장 규모는 2025년 2.8억 달러(약 0.4조원)로부터 2032년 20.1억 달러(약 2.7조원)로 연평균 32.7% 성장할 것으로 전망⁷⁾
- (DLC, 직접액체냉각) 현재 액체냉각은 Cold Plate 기반 DLC(Direct Liquid Cooling) 방식이 주도하고 있으며, 향후 AI 반도체의 발열밀도 증가에 대응하기 위해 냉각유체를 칩의 발열부에 더욱 가깝게 접근시켜 열저항을 최소화하려는 기술개발이 활발히 진행 중.
 - Microsoft-Corintis⁸⁾: 기존 DLC 인프라와 연계 가능한 인칩 마이크로 유체(In-chip Microfluidic) 냉각기술을 공개. 실리콘 칩 내부에 마이크로 채널을 형성하여 냉각유체를 발열원 가까이 직접 공급하는 방식으로 Cold Plate 방식 대비 열 제거 성능 최대 3배 향상 및 GPU 실리콘 내부 최대 온도 상승폭 65% 감소 주장('25년 9월)
 - TSMC⁹⁾: 자사의 3.3X-reticle CoWoS^{Chip-on-Wafer-on-Substrate-R} Redistribution Layer 패키지에 Micropillar 기반 Direct-to-Silicon Liquid Cooling* 기술을 통합, 40°C DI water(탈이온수)를 냉각유체로 사용하여 6 LPM의 유량에서 5 kW 이상의 균일 발열 제거 및 1.6X-reticle SoC^{시스템 반도체} 기준 370 W/cm²의 열유속 처리 시연('26년 5월)

*실리콘과 냉각유체 사이의 TIM(Thermal Interface Material)을 제거하고

5) https://www.coolitsystems.com/resources/news/15kw_press_release/

6) <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/data-center-liquid-cooling-market-84374345.html>

7) <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/data-center-liquid-cooling-fluids-market-49122450.html>

8) <https://datacenters.microsoft.com/wp-content/uploads/2025/09/Microfluidic-Cooling-Infographic.pdf>

9) <https://ieeexplore.ieee.org/document/11561150>

냉각유체가 칩 표면을 직접 흐르도록 함으로써 열저항을 줄이고 방열 성능을 향상

- (ILC, 액침냉각) 한편, DLC(Direct Liquid Cooling)와 별도의 기술경로로, 서버 또는 전자부품을 절연성 냉각유체에 직접 침지하는 ILC(Immersion Liquid Cooling) 기술도 개발·상용화되고 있음. ILC 기술의 경우 전자부품과 냉각 유체가 직접 접촉하므로 높은 전기절연성, 비가연성, 재료호환성 및 장기 안정성을 동시에 갖는 냉각유체 확보가 중요 기술 요건.

○ (차세대 AI 반도체의 고열유속 대응을 위한 2상^{two-phase} 냉각기술 부상)

- Honeywell은 chip power가 약 1.5 kW 수준에 이르면 2상 냉각이 필요한 것으로 판단¹⁰⁾(25.3) IDTechEx¹¹⁾또한 업계 인터뷰를 바탕으로 약 1.5 kW 에서 단상 DLC가 한계에 부딪히기 시작하고 약 2 kW를 실질적인 한계 (practical ceiling)로 본다는 업계 consensus를 제시(25.11)
- 이와 같이, 향후 AI 반도체의 발열 밀도가 지속적으로 증가할 경우 유체의 현열만을 이용하는 단상 냉각 방식은 요구 유량 증가에 따른 펌핑동력*에너지 소비 증가와 열전달 성능 측면에서 한계가 우려됨. 이에 따라 상변화(증발) 잠열을 이용하여 높은 열유속을 감당할 수 있는 2상 냉각 기술이 차세대 고성능 AI 반도체 냉각 기술로 부상하고 있으며**, ZutaCore, LiquidStack 및 Accelsius 등 글로벌 기업들이 2상 직접액체냉각(DLC) 및 액침냉각(ILC) 솔루션의 개발·상용화를 추진 중.

*단상 액체냉각 방식에서 증가하는 열부하에 대응하기 위해 냉각수 유량을 증가시킬 경우, 동일 유로에서 유량을 2배로 증가시키면 펌핑동력은 이론적으로 층류에서 약 4배, 난류에서 약 6배 이상 증가 가능.

**美 ARPA-E COOLERCHIPS 프로그램 內

- OMNICOOL 프로젝트¹¹⁾NVIDIA 주도

- “Systems Two Phase Cooling” 프로젝트¹²⁾IBM 주도

- “Enabling Two-Phase Immersion Cooling to Support High TDP” 프로젝트¹³⁾Intel Federal 주도

10) <https://www.honeywell.com/content/dam/honeywellbt/en/documents/downloads/hon-corp-design-for-more-efficient-data-centers-whitepaper.pdf>

11) <https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/search-all-projects/omnicool-pumped-two-phase-cooling-architecture-deployable-ai-factory-and-hpc-systems>

12) <https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/search-all-projects/systems-two-phase-cooling>

13) <https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/search-all-projects/enabling-two-phase-immersion-cooling-support-high-tdp>

○ **(친환경 2상 냉각유체의 전략적 중요성 확대)** 2상 냉각 시스템의 성능은 냉각 장치 구조뿐 아니라 냉각유체의 비등점, 증발잠열, 점도, 표면장력, 열전도도, 전기절연성 및 재료호환성 등에 의해 결정되므로, AI 반도체의 고열유속에 대응하면서 에너지 효율·전기적 안전성·장기 신뢰성을 동시에 확보할 수 있는 냉각유체 자체가 2상 냉각의 성능을 좌우하는 핵심 소재기술로 부상.

○ **(글로벌 2상 냉각유체 시장의 재편)** 기존 시장을 주도했던 3M의 PFAS 소재 사업 철수에 따라, Chemours, Solstice Advanced Materials(舊, Honeywell Advanced Materials) 등 글로벌 화학기업들이 HFO(Hydrofluoroolefin) 계열을 중심으로 低GWP·zero ODP 및 우수한 열전달 특성을 갖는 차세대 불소계 냉각유체를 개발·공급하며 시장 선점 경쟁 중.

- **(Chemours)** Opteon™ SF33(HFO-1336mzz-Z)¹⁴⁾을 2상 DLC 냉각유체로 공급하고, 2상 ILC용 신규 HFO계 절연유체 Opteon™ 2P50(HFO-153-10mczz-E)¹⁵⁾을 개발. 2P50은 정상 비등점(NBP) 약 49°C, GWP 10, ODP zero, 비가연성 및 높은 전기절연성($5.1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 Volume Resistivity)을 특징으로 하며 기존 PFPE·HFE·FK·PFC 계열 냉각유체 대체 추진

- **(Solstice Advanced Materials, 舊 Honeywell Advanced Materials)** Solstice는 자사의 백서¹⁰⁾에서 DLC 및 ILC 모두 PFAS의 장기 환경영향에 대한 우려로 불소계 화합물에 대한 규제가 강화되고 있음을 지적하고, 이에 대응하여 低GWP·低유전율·비가연성을 동시에 만족하는 non-PFAS (美 EPA 기준) 차세대 냉각유체 개발을 추진 중임을 밝힘(25.3)

· 低GWP HFO 기반 A1 혼합냉매 Solstice® N15(R-515B, HFO-1234ze(E) 91.1 wt% + HFC-227ea 8.9 wt%)를 Intel·Vertiv·Parker 등과 공동 개발한 냉매 기반 pumped two-phase DLC 시스템의 작동유체로 적용·실증 추진¹⁶⁾ '25년 6월, 동 pumped two-phase DLC 기술은 실제 운영 환경에서 시스템 프로토타입 실증에 성공하여 TRL 7에 도달했으며, 상용화 준비도는 CRL(Commercial Readiness Level) 2(최초 상업적 시험·소규모 실증 단계) 수준으로 보고¹⁷⁾ 다만, 공개된 자료만으로는 R-515B 기반 2상 DLC 시스템의 실제 데이터센터 고객 대상 상용 판매·납품 사례는 아직 확인되지 않음.

14) <https://www.opteon.com/en/-/media/files/opteon/opteon-sf33-specialty-fluid-technical-bulletin.pdf?rev=f57fb549239246618cc2982739fe372a>

15) <https://www.opteon.com/en/-/media/files/opteon/opteon-2p50-gic-product-info-sheet-fnl-100523.pdf?rev=1b708201ecd7489b8a9cf86c4de7ffc5>

16) <https://www.opencompute.org/documents/2p-refrigerant-based-dlc-wp-v1-pdf-1>

17) <https://www.vertiv.com/en-ca/insights/articles/blog-posts/pumped-two-phase-direct-to-chip-cooling-advancing-ai-data-center-efficiency/>

□ 현행 기술의 한계

- (불소계 냉각유체의 근본적 한계) 차세대 대안으로 부상한 HFO 등 불소계 냉각유체는 기존 高GWP 유체 대비 GWP·ODP를 크게 개선하였으나, EU 포괄적 PFAS 제한안(Universal PFAS Restriction)*의 광범위한 구조적 정의에 포함될 가능성이 있어 향후 규제 범위 및 용도별 예외 여부에 대한 불확실성이 존재. 이에 PFAS 규제 논쟁에서 근본적으로 자유로운 불소-free 냉각유체로의 소재 전환 필요.

*EU는 약 1만 종의 PFAS를 대상으로 하는 포괄적 PFAS 제한안¹⁸⁾ Universal PFAS Restriction을 추진 중이며, Apple^{Apple's Commitment to Phasing Out PFAS(22)} 등 글로벌 빅테크 기업들은 선제적인 탈(脫)PFAS 공급망 가이드라인 강화 추세

- (불소-free 친환경 소재 니즈, 동시에 한계도전적 난제) 불소를 배제할 경우 기존 불소계 유체가 제공해 온 비가연성, 전기절연성, 화학적 안정성 및 2상 냉각에 적합한 열역학적 특성을 동시에 확보하기 어려우며, 환경성·열역학적 성능·안전성·안정성을 동시에 만족하는 단일성분 유체의 화학적 선택지가 매우 제한적인 것으로 보고됨.¹⁹⁾ 특히 높은 증발잠열·우수한 비등열전달 성능과 비가연성·전기절연성·무독성·환경성을 동시에 만족하는 유체를 발굴하는 것은 다수의 성능목표와 필수 제약조건을 동시에 충족해야 하는 고난도 다목적·다제약 최적화 문제임. 따라서 기존의 경험·직관 기반 후보물질 탐색 접근 방법을 넘어, 방대한 화학공간에서 요구성능을 만족하는 새로운 후보 분자를 탐색·설계하는 한계도전적 접근 필요.
- (AI 기반 물질 탐색 기술의 진화, 그러나 미탐색 화학공간에서의 예측 신뢰성 난제)
 - (AI 기반 초대규모 냉각유체 탐색 가능성 입증) 최근 AI·머신러닝 기술의 발전으로 분자구조로부터 냉매·냉각유체의 핵심 물성을 신속하게 예측하고 수백만~수십억 규모의 화학공간에서 유망 후보물질을 가상 탐색하는 기술이 발전. 한편, 최근에는 생성형 AI를 활용해 목표 물성을 갖는 신규 분자구조를 직접 생성·최적화하는 역설계 기술 연구도 추진.
 - Microsoft²⁰⁾ : Agentic AI 기반 Discovery를 활용하여 기존 수개월 이상 소요될 수 있는 냉각유체 탐색을 가속화하고, 약 200시간의 디지털 탐색을 통해 새로운 PFAS-free 데이터센터 액침냉각유체 후보 발굴 사례 발표(25.5)

18) <https://echa.europa.eu/pt/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>

19) <https://www.nature.com/articles/ncomms14476>

20) <https://www.youtube.com/watch?v=IC0QLivuRgw>

- LG AI Research²¹⁾ : 범용 물성예측 AI GATE를 활용해 구매 가능한 약 4,100만 개 분자와 화학반응 기반 조합으로 생성한 약 25억 개의 가상 분자공간을 구축하고, AI로 냉각유체 관련 다중 물성을 초고속 예측·스크리닝하여 약 9.3만 개의 액침냉각유 후보를 발굴. 특히 각 물성을 독립적으로 학습하는 기존 단일과제학습(STL)과 달리, 34개 물리·화학 물성 간 상관관계를 공동 학습하고 물성 간 지식을 전이(Cross-property Transfer)하는 GATE를 통해 학습데이터 밖의 OOD(Out-of-Distribution) 화학공간에서도 예측 일반화 성능을 향상. 기존에 알려진 물질군을 넘어 실제 합성·조달 가능성을 고려한 방대한 가상 화학공간으로 탐색범위를 확장하고, 미탐색 화학공간에서의 AI 예측 신뢰성 저하 문제를 완화할 수 있는 접근을 제시.(25.10)
- ENEOS²²⁾ : NVIDIA ALCHEMI를 활용하여 액침냉각유체 개발을 위해 약 1,000만 개의 분자 후보를 AI·DFT·MD 기반으로 가상 스크리닝하고, 이 중 약 1,000개의 non-PFAS 유망 후보를 후속 실험평가 대상으로 선정.(25.12)
- RefGen²³⁾ : 약 3,700만 개의 PubChem·ChEMBL·SureChEMBL 분자 SMILES 데이터로 Llama 3.2 1B를 미세조정(fine-tuning)한 분자 생성모델을 기반으로 미탐색 화학공간의 신규 냉매 분자구조를 직접 생성하고, AI 물성예측에 상태방정식(EOS)·열화학 모델·냉동사이클 해석 등 물리기반 평가 및 제약을 결합. 평가 결과를 강화학습(RL)의 보상으로 환류하여 목표 성능을 만족하는 방향으로 신규 냉매 분자를 반복 생성·최적화하는 Physics-informed 역설계 기술을 제시.(25.9)
- (미탐색 화학공간에서의 AI 예측 신뢰성 저하 우려) 생성형 AI·가상 분자 열거 (enumeration) 기술로 기존 데이터베이스를 넘어 수십억 규모의 미탐색 화학 공간까지 탐색 가능해졌으나, AI 물성예측 모델은 대부분 알려진 분자의 제한된 실험·계산 데이터로 학습되어 학습 데이터와 구조적으로 유사한 분자에서는 높은 정확도를 보이더라도, 학습 분포를 벗어난 신규 분자(OOD)에서는 예측 정확도와 신뢰성이 저하될 수 있는 근본적 한계가 존재.
 - 특히 비등점·임계물성 등 비교적 데이터가 축적된 열역학 물성에 비해, 가연성·독성·전기절연성·화학적 안정성 및 2상 열전달 특성 등은 학습 데이터가 절대적으로 부족하며, 기존 냉매 계열과 구조적으로 상이한 불소

21) <https://arxiv.org/abs/2510.23371v2>

22) https://www.hd.eneos.co.jp/english/news/release_information/year/2025/20251205_02_01_mr03/

23) <https://arxiv.org/pdf/2509.19588>

-free 신규 분자에 대한 AI 예측 신뢰성 확보가 더욱 어려움.

- 따라서 단순히 더 많은 가상 분자를 생성·스크리닝하는 것을 넘어, Cross-property transfer²¹⁾·대규모 사전학습²³⁾·Domain adaptation²⁴⁾·Transductive learning²⁵⁾·Molecular reconstruction²⁶⁾등을 통한 AI 자체의 OOD 일반화 성능 향상, DFT·COSMO-RS·MD 등 계산 화학 및 물리기반 검증을 통한 예측 신뢰성 보완, 그리고 OOD·저신뢰 후보에 대한 계산·실험과 재학습을 반복하여 신뢰 가능한 화학공간 자체를 지속적으로 확장하는 등, 미탐색 화학공간에서 AI 예측 신뢰성을 확보하기 위한 다층적 기술개발이 핵심 난제로 부상.

□ 프로젝트 기획 방향

- (문제의 재정의 : Better 기존 기술 → Beyond 기존 기술) 기존 불소계 냉각 유체의 GWP를 낮추거나 일부 물성을 개선하는 것이 아니라, “불소를 사용하지 않으면서도 차세대 AI 반도체의 고발열·고열유속을 감당할 2상 냉각유체를 구현할 수 있는가?”를 핵심 도전문제로 설정.
- (기존 냉매 계열을 넘어, 미탐색 화학공간으로 탐색 확장) 기존 냉매·냉각 유체에서 활용되어 온 분자구조에 한정하지 않고, AI 기반 超대규모 화학공간 탐색과 다목적 분자설계·역설계를 통해 새로운 후보분자를 탐색·설계하고, 계산과학 및 실험검증을 연계하여 차세대 불소-free 2상 냉각유체 후보물질을 발굴.
- (한계도전적 목표 설정) 현재 가능한 수준이 아닌 향후 기술 완성 시점을 기준으로 글로벌 선도기업^{Chemours, Solstice} 등의 예상 기술 수준을 상회하고 기술·시장 우위 확보를 위해 필요한 수준의 도전적 기술 목표를 설정함으로써, 향후 데이터센터 및 AI 반도체가 요구할 핵심 기술 역량을 선제적으로 확보.

□ 기대효과

- (사회경제적 효과)
 - (차세대 AI 반도체 Cooling Bottleneck 돌파) 現 현열 중심의 단상 냉각을 넘어 증발잠열을 활용하는 고성능 2상 냉각으로 냉각성능의 한계를 돌파하고, 급증하는 AI 반도체의 전력밀도·열유속에 선제적으로 대응하여 초고집적·초고성

24) <https://www.nature.com/articles/s41524-024-01316-4>

25) <https://www.nature.com/articles/s41524-025-01808-x>

26) <https://www.nature.com/articles/s42256-026-01216-w>

능 AI 컴퓨팅의 지속적 확장을 가능케 하는 핵심 냉각기술 기반 확보

- (Post-PFAS 차세대 냉각기술 패러다임 선도) 기존 불소계 냉각유체의 低 GWP化를 넘어 불소-free로의 근본적 소재 전환을 통해 PFAS 규제 불확실성을 원천적으로 해소하고, Post-PFAS 시대의 차세대 데이터센터 냉각기술 패러다임 선도
- (차세대 냉각유체 신시장 선점) 향후 고열유속 AI 칩의 확산과 함께 성장할 2상 DLC·ILC 시장에서 불소-free 냉각유체라는 차세대 제품군의 First Mover 기술·특허를 확보, 글로벌 냉각유체 및 데이터센터 열관리 시장 진입 기반 마련.
- (해외 불소계 냉각유체 의존 탈피 및 공급망 자립) 現 글로벌 화학기업 중심의 고기능성 불소계 냉각유체 의존도를 낮추고, 국내 독자 분자설계-합성-유체 제조-냉각시스템 적용으로 이어지는 산업 생태계와 공급망 구축 기반 확보
- (국가 AI 3대 강국 전략목표 달성 기여) 차세대 AI 반도체의 초고발열에 대응하는 고성능 불소-free 2상 냉각유체 원천기술을 확보하여 AI 컴퓨팅 인프라의 핵심 병목인 냉각 한계와 환경·규제 리스크를 동시에 해소하고, 고효율·지속가능한 AI 데이터센터 확산 및 국가 AI 3대 강국 도약을 견인

○ (기술의 수혜자)

- (AI 서버·데이터센터 개발·운영기업) 고열유속 AI 서버의 냉각 한계를 해소하고 냉각유량·펌핑동력 등 냉각 에너지 부담을 저감하여 고밀도 AI 서버·랙의 안정적 구축·운영 및 데이터센터 에너지효율 향상
- (데이터센터 DLC·ILC 냉각장비·관리 기업) 친환경 2상 냉각유체를 적용한 콜드 플레이트·CDU·2상 DLC 및 액침냉각 시스템의 개발·실증을 통해 차세대 AI 데이터센터 열관리 솔루션의 제품 경쟁력 확보
- (냉각유체·정밀화학 소재기업) 기존 불소계 유체를 대체할 친환경 2상 냉각유체의 분자설계·합성·제조 원천기술을 확보하여 글로벌 차세대 냉각유체 시장 진입 및 신사업 창출
- (AI 신물질·화학소재 연구기관 및 기업) 미탐색 화학공간에서 신규 분자를 생성-물성예측-계산검증-합성·실증하는 AI 기반 신물질 탐색기술을 활용하여 냉매·절연유·윤활유 등 다양한 고기능성 유체·소재 개발로 확장
- (국가·사회) 고효율·친환경 AI 데이터센터 확산으로 국가 AI 산업 경쟁력을 강화하고 AI 발전의 혜택을 국민·산업 전반으로 확산하여, 사람·자연·첨단AI가 공존하는 지속가능한 미래 일상을 실현

3. 프로젝트 목표 및 범위

□ 최종 목표

- 상기 한계도전적 문제 해결을 위해 본 프로젝트에서는 친환경·무독성·비가연성·전기절연성을 만족하면서, 차세대 AI 반도체의 고발열·고열유속에 대응 가능한 불소-free 2상^{two-phase} 냉각유체 순물질^{single-component fluid} 후보군을 발굴하고, 요구 성능을 실험적으로 검증함.
- 본 프로젝트는 “목표달성의 불확실성은 높으나 과제 수행 결과의 파급효과가 상당히 큰 연구개발”을 대상으로 하는 「한계도전R&D」* 프로젝트로서, 글로벌 기술·시장 우위 확보를 위해 필요한 수준의 도전적 기술목표를 설정함.

* (관련규정) 한계도전 R&D 운영규정(과학기술정보통신부훈령 제268호, '24. 5. 17.)

- 기존 데이터센터 냉각시스템의 대규모 변경 없이 FURE 연구결과를 신속하게 적용·활용할 수 있는 수준의 성능·안전성·호환성 확보를 위해, 글로벌 데이터센터 산업계가 주도하는 OCP²⁷⁾(Open Compute Project) 제시 요구수준, 실제 2상 DLC·ILC 시스템의 운전조건 및 상용 냉각유체의 성능수준을 반영하여 조기 상용화가 가능한 수준으로 기술목표를 설정

(최종 목표)

- 비불소계 2상 냉각유체 순물질 후보 도출 : ≥ 3 종
 - 후보물질별 분자식·분자구조 규명 및 고순도 순물질 시료 확보
 - 최종 대표 후보 1종에 대해서는 고순도 순물질 시료 확보 ≥ 1 kg
 - 각 후보물질은 아래 (공통) 목표를 모두 충족하고, (DLC 경로) 또는 (ILC 경로) 중 최소 1개 경로의 목표를 모두 충족

(공통)

- Fluorine content : 0 wt%
- $GWP_{100}^* \leq 10$
- *Opteon™ SF33: 2, Opteon™ 2P50: 10, Solstice® N15: 293 참조
- 동일 운전조건에서 現 불소계 상용 2상 유체와 동등 수준의 열성능*

*기존 데이터센터 냉각시스템의 대규모 변경 없이 FURE 연구결과를 신속하게 적용·활용할 수 있는 수준

27) <https://www.opencompute.org/>

(DLC 경로) OCP 2상 절연유 기반 열전달 유체 가이드라인²⁸⁾ 제시 요구수준 참조

- Normal boiling point* : -50°C to 60°C @ 101.3 kPa
 *Opteon™ SF33: 33.4°C , Opteon™ 2P50: 48.9°C , Solstice® N15: -18.9°C 참조
- Flammability*/Toxicity : ASHRAE Standard 34 A1 (또는 A2L) Class
 *Opteon™ SF33: Nonflammable, Opteon™ 2P50: No flash point,
 Solstice® N15: ASHRAE Safety Classification A1 (Nonflammable) 참조
- Latent Heat of Vaporization : $\geq 100 \text{ kJ/kg}$
- Fluid density : $> 800 \text{ kg/m}^3$ @ 25°C
- ODP < 1.01
- 그 외 OCP 가이드라인에 따른 수명, 열적·화학적 안정성, 재료 호환성, 장기 안정성, 전기 절연성 등 확보

(ILC 경로) OCP Immersion Fluids 가이드라인²⁹⁾³⁰⁾ 제시 요구수준 참조

- Dielectric Strength over lifetime : $\geq 6 \text{ kV/mm}$ @1 mm
- Dielectric Constant (ϵ_r , D_k) from 20MHz to 40GHz : ≤ 2.3
- Dielectric Loss Tangent (D_f , $\tan \delta$) from 20 MHz to 40 GHz : ≤ 0.05
- Volume Resistivity : $\geq 1 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$
- Normal boiling point : $> 45^{\circ}\text{C}$, $< 55^{\circ}\text{C}$ @1 atm
- Fluid density : $< 2000 \text{ kg/m}^3$ @ 25°C
- ODP : zero
- Auto-ignition temperature : $> 300^{\circ}\text{C}$
- 그 외 OCP 가이드라인에 따른 가연성, 독성, 내구성, 열적·화학적 안정성, 재료 호환성, 장기 안정성 등 확보

28) <https://www.opencompute.org/documents/dielectric-coolant-fluid-base-specification-v1-0-final-pdf>

29) <https://www.opencompute.org/documents/ocp-base-specification-for-immersion-fluids-20221201-pdf>

30) <https://www.opencompute.org/documents/ocp-acs-immersion-requirements-rev-2-1-pdf>

□ 단계별 목표 방향

※ 단계/연차별 확정 마일스톤은 과제 선정 후, 책임PM과의 협의로 확정

○ (1단계) 미탐색 화학공간에서 AI 예측 신뢰성 향상 핵심원리 검증 및 비불소계 2상 냉각유체 발굴 가능성 평가

- 최종 비불소계 2상 냉각유체 후보 도출을 위한 핵심 한계기술(Critical Bottleneck) 식별 및 해결 가능성 검증
- AI-고정밀 계산-합성-실험을 연계한 新물질 탐색 파이프라인 구축 및 미탐색 화학공간에서의 신규 냉각유체 분자 발굴 가능성 입증
- 비불소계 순물질을 최우선 탐색하되, 필요시 AI 예측모델의 학습·검증 데이터 확보 및 화학공간 확장을 위해 다음 물질군까지 탐색범위를 확대
 - Solstice® N15¹⁶⁾를 참조하여 순물질과 유사한 상변화 특성을 가지며, 현행 데이터센터 2상 냉각시스템의 운전·제어 및 유체관리 방식에 중대한 변경 없이 적용 가능한 비불소계 azeotropes

▶ 단계 관문 : 비불소계 2상 냉각유체 발굴 가능성 입증

- 미탐색 화학공간에서 AI 물성예측 신뢰성 확보 및 신규 분자에 대한 예측-실측 정합성 입증
- 비불소계 2상 냉각유체 유망 후보물질 확보 : ≥ 5 종
 - Fluorine content : 0 wt%
 - GWP₁₀₀ : ≤ 10
 - 후보물질별 분자식 · 분자구조(azeotropes의 경우 구성성분 및 조성) 규명 및 물성 실측이 가능한 수준의 시료* 확보
 - *순물질은 고순도 시료, azeotropes의 경우 고순도 구성성분 및 정밀 조성 시료
 - 각 후보물질에 대해 위 (DLC 경로) 또는 (ILC 경로) 중 최소 1개 경로의 핵심 성능목표 충족 가능성 입증

○ (2단계) 상용 불소계 냉각유체 대체-ready 신규 비불소계 2상 냉각유체 순물질 후보 확보

- 1단계에서 확보한 미탐색 화학공간에서의 신뢰성 향상 AI 물성예측 기술 및 新물질 탐색 파이프라인을 활용한 유망 화학공간 집중 탐색 및 최종 후보 도출
- 후보물질의 열물성·안전성·전기절연성·열적·화학적 안정성·재료 호환성 등 냉각유체 핵심 성능 종합 평가 및 DLC 또는 ILC 적용경로별 최종 목표 달성

- 불소계 상용 2상 냉각유체와 동일 운전조건에서 열성능 비교·검증
- 장기 운전시험(가속열화 등)을 통한 유체 수명·열적·화학적 안정성 및 재료 호환성 검증

▶ 최종 관문 :

- 비불소계 2상 냉각유체 최종 후보 순물질 확보 : ≥ 3 종
 - Fluorine content : 0 wt%
 - GWP₁₀₀ : ≤ 10
 - 동일 운전조건에서 現 불소계 상용 2상 유체와 동등 수준의 열성능 확보
 - 후보물질별 분자식·분자구조 규명 및 최종 성능 검증이 가능한 수준의 시료 확보
 - 최종 대표 후보 1종에 대해서는 고순도 순물질 시료 확보 ≥ 1 kg
 - 각 후보물질은 위 (DLC 경로) 또는 (ILC 경로) 중 최소 1개 경로의 목표를 모두 충족

□ 연구개발계획서 필수 포함 사항

- (AI 예측 신뢰성 확보 전략) 미탐색 화학공간에서 신규 분자에 대한 AI 물성 예측의 정확도·신뢰성 한계를 극복하기 위한 예측 신뢰성 향상 및 예측-실측 정합성 확보 전략 제시 필수
- (1단계 핵심 성능목표 전략) 최종 목표 달성의 관건이 될 1단계 핵심 성능지표 및 목표수준을 식별·설정하고, 그 설정 근거와 달성 가능성을 입증하기 위한 예측·계산·합성·정제·실험적 검증 전략 제시 필수
- (초격차 전략) Chemours, Solstice Advanced Materials 등 글로벌 화학기업들의 2상 냉각유체 개발 현황·전략 분석 및 본 연구를 통한 차별화·경쟁우위 확보 전략 제시 필수
- (최종 산출물의 상세 설명) 후보물질별 분자식·분자구조 및 고순도 순물질 시료와 더불어, 최종적으로 확보·제시 가능한 유·무형 연구성과물 및 검증자료를 구체적으로 제시 필수
- (리스크 관리 및 협업 전략) 핵심 기술 병목(Critical Bottleneck)이 극복되지 않을 경우의 대안 기술경로 및 우회 전략과 핵심 난제의 돌파구 도출·검증을 위한 협력연구 전략 제시 요망
- (후속 상용화 전략) 본 연구의 최종 목표 달성 이후 제품화·양산 및 시장진입에 필요한 후속 개발·실증·인증 계획 및 사업화 전략 검토·제시 요망

□ 지원 제외 범위

○ 본 과제에서는 아래에 해당하는 기술 개발을 지원 대상으로 고려하지 않음.

- 연구목표(최종·단계 목표)와 필요 성능지표가 정량적으로 제시되지 않는 연구
- 선행된 연구를 반복하거나 유사 연구의 중복, 후속 또는 이것을 확장하는 연구 (독보적인 지식재산권 창출이 어려운 연구)
- 기존 상용 냉매·냉각유체의 단순 조성 변경, 첨가제 적용 또는 물성 개선을 주목적으로 하는 연구
- 기존 DB 또는 알려진 분자군 내 후보 선별에 국한되고, 미탐색 화학공간에서의 신규 분자 발굴 및 실험적 검증을 포함하지 않는 연구
- AI·계산을 통한 후보물질 제안에 그치고 실제 합성·정제 및 물성 실측을 통한 예측-실측 검증을 포함하지 않는 연구

■ 4. 연구개발 수행 및 관리 방안

□ 연구개발 지원 규모 및 수행 조건

- 선정 예상 과제 수 : 1개 내외
- 예산 규모 : 연간 4억 원 내외
- 연구 기간 : 최대 48개월 이내
- 연구 진행 단계 : 최대 2단계 (각 단계 24개월)
- 연구개발기관 구성 : 기업이 주관연구개발기관으로 지원하는 경우, 대학 또는 정부출연연구기관이 공동연구개발기관으로 참여 필수
- 책임PM과 한계도전전략센터는 프로젝트의 최종목표 달성을 위해 연구성과 및 기술적 리스크를 지속적으로 점검하고, 그 결과에 따라 과제의 범위와 목표 등을 조정할 수 있음

□ 마일스톤 기반 연구관리 및 단계(Go/No-Go) 점검

- 연구 제안자께서는 각 단계 목표 달성을 위한 각 단계 내 복수의 마일스톤*을 구체적으로 제시 요망

*마일스톤 : 연구개발 최종·단계목표 달성 과정에서 확보·구현·입증되어야 하는 산출물(Deliverable: 시작품, 시험성적서, 설계도, 데이터셋, 소프트웨어, 검증보고서 등)을 객관적으로 점검할 수 있도록 설정하는 이정표로서, 연구

내용이나 수행행위가 아닌 ‘확인 가능한 산출물과 그 달성 수준’을 기준으로 설정

(예시1) ...공정개발(×) → 단위공정·물질수지·운전조건이 확정된 공정도(○)

(예시2) ...알고리즘 개발(×) → ...알고리즘(예측정확도 $\geq$ 90%)(○)

(예시3) ...소재 개발(×) → ...소재 샘플(순도 $\geq$ 99%, 100g)(○)

- 마일스톤 설정 시에는 과제 수행 중간단계에서 적용할 수 있는 성능지표와 관련 세부 업무내용이 포함되어야 함. 제안자께서는 전체 프로그램 일정을 준수하시고 모든 프로그램 목표, 지표, 중간단계 및 최종 성과물을 문제 해결 관점에서 제시 요망
- 본 한계도전 R&D에서는 목표 달성을 위해 책임PM이 수시로 연구수행자와 소통하며, 매 분기 현장방문과 전문가 패널 리뷰 미팅을 통해 연구과정의 지식화와 진화적 위험 관리를 추진함
- 책임PM은 단계(Go/No-Go) 점검을 통해 연구자께서 설정하신 마일스톤 목표의 달성 여부 및 최종목표 달성 가능성을 확인하고 다음 단계 연구과제의 진행 여부를 결정함

□ 연구성과 및 결과물 제출

- 연구책임자께서는 연구 수행기간 동안 최소한 다음과 같은 연구 결과물을 제공하셔야 하며, 책임PM의 요청에 따라 추가 자료 및 데이터를 제공하셔야 함
 - 분기별 책임PM과의 회의(현장방문, 전문가 리뷰)에서 연구수행의 진척상황을 파악할 수 있는 실험데이터 및 결과 요약자료
 - 성과 수준을 판단할 수 있는 연구결과 산출물
 - 연구수행 과정에서의 의미 있는 성과물 또는 시행착오에 대한 대응방안 등 연구자의 목표 달성 노력을 입증할 수 있는 자료 등