

“과열·고장 없는 열관리 시스템 나온다”

한-미 공동연구팀,

냉각시스템 성능 저하 정확히 예측하는 기술 개발

- GIST-성균관대-美 퍼듀대 공동연구팀, 열전달 기술 분야의 고질적 문제 해결한 혁신적인 기계학습 응용 기술 개발... 최초 드라이아웃 발생 시점의 정확한 예측 가능
- 우주탐사 분야 등 극한 환경에서 효율적으로 작동할 수 있는 냉각 시스템 설계에도 응용 기대... 국제학술지 《International Journal of Heat and Mass Transfer》 게재



▲ (왼쪽부터) 기계공학부 이승현 교수, 노현석 석사과정생, 성균관대학교 김성민 교수, Purdue Univ. Issam Mudawar 교수

최근 사회적 문제가 되고 있는 전기차 화재 사고의 주요 원인으로 배터리 과열에 의한 폭발과 열폭주가 지적되면서 **사고 예방을 위한 열관리의 중요성**이 커지고 있는 가운데 **배터리 열관리 시스템에 적용 가능한 인공지능 기법이 한-미 공동연구팀에 의해 개발**되었다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 기계공학부 이승현 교수팀과 성균관대학교 김성민 교수, 미국 퍼듀대학교 이쌘 무다와(Issam Mudawar) 교수 공동연구팀이 열전달 기술 분야의 고질적 문제를 해결한 **혁신적인 기계학습 응용 기술을 개발**하는데 성공했다고 밝혔다.

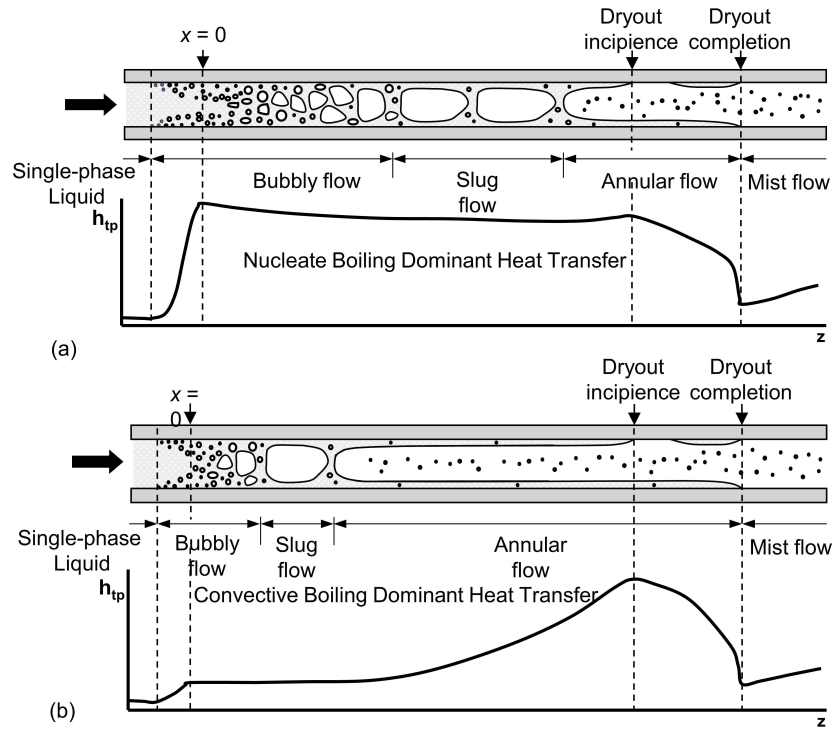
이번 연구 성과로 최초 드라이아웃(dry-out)* 발생 시점의 정확한 예측이 가능하여 **높은 열유속(heat flux)*에서도 과열이나 고장 없이 작동할 수 있는 더욱 신뢰성 있는 열관리 시스템을 설계**할 수 있게 되었다.

또한 우주탐사 분야와 같은 **극한 환경에서 효율적으로 작동할 수 있는 냉각 시스템의 설계에도 큰 도움**이 될 것으로 보인다.

* **열유속**: 단위시간, 단위면적당 흐르는 열의 양으로 물체 벽면과 이에 접해 흐르는 유체와 사이의 열전달량을 의미한다.

* **드라이아웃(dry-out)**: 열 유속이 증가하게 되면 증열에 대한 액체 공급이 계속되지 않고 액막이 끊어져 전열면이 증기에 의해 건조하게 되는데 이것을 드라이아웃이라고 한다.

이 상태로 열 유속을 임계 수치까지 높이면 해당 시스템의 열전달 효율이 급격히 떨어지게 되며, 전열면에서 급격한 열파괴가 일어나게 된다.



▲ 채널 내의 드라이아웃(dry-out) 형성 과정. 열전달 특성에 따른 ((a) 핵비등* 지배 열전달, (b) 대류 비등 지배 열전달) 드라이아웃 형성 과정과 유체 거동 변화에 따른 열전달 계수 변화를 나타낸다.

* **핵비등(nucleate boiling):** 비등형태의 하나로, 발포점을 핵으로 하여 기포를 발생하는 비등을 일컫는다.

오늘날 전자기기와 항공우주 부품과 같은 **고열유속* 발열 장치의 발전으로 효과적인 열관리가 필수적인 요소로 자리 잡게 되었다.** 냉각 시스템 내 드라이아웃 발생은 열전달 효율을 급격히 저하시킬 수 있으며, 특히 미니/마이크로 채널*에서 이 현상이 두드러지게 나타나는데 작은 채널의 단면적과 제한된 기하학적 구조 때문에 비등과 증발 과정이 더욱 복잡해진다.

일반적인 최초 드라이아웃 발생 예측 방법은 주로 경험적 상관관계(empirical correlation)와 해석적 모델에 의존하고 있으며, **다양한 유체 및 채널 기하학 구조에 따른 복잡한 현상을 해석하는 데 한계가 있는 상황이다.** [그림1]

오랜 시간 많은 연구자들이 전자 장비에서 발생하는 발열로 인해 발생하는 드라이아웃 현상을 예측하기 위해 실제 실험을 기반으로 경험적 상관관계 모델을 개발하려는 노력을 기울였지만 다양한 해석적 한계에 봉착하였다.

* **고열유속:** 열유속이란 단위시간, 단위면적당 흐르는 열의 양으로 물체 벽면과 이에 접해 흐르는 유체와 사이의 열전달량을 의미하는 것이며, 고열유속 범위는 보편적으로 10^2 W/cm^2 이상의 열유속을 지칭

* **미니/마이크로 채널:** 표면 냉각을 위해 넓은 판형 위에 유체가 지나다닐 수 있는 밀리미터 혹은 마이크로 미터의 직경을 가지는 채널이 한 개 혹은 그 이상 배치되어 있는 냉각 모듈

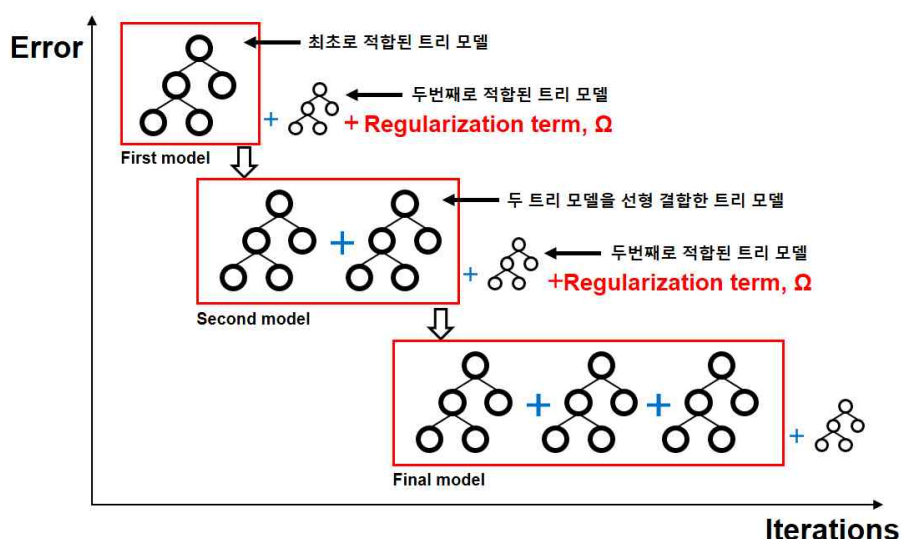
연구팀은 미니/마이크로 채널 내의 포화비등유동(saturated flow boiling)*에서 발생하는 초기 드라이아웃 발생 건도(quality)*를 예측하기 위해 고성능 기계학습(machine learning)* 알고리즘 중 하나인 XGBoost를 사용하여 기존 경험적 상관관계 및 해석적 모델보다 더 높은 예측 정확도 2.45%를 달성하였다.

* **포화비등유동(saturated flow boiling):** 작동 유체가 전부 포화 상태에 놓여있으며, 채널 벽면의 주어진 열유속 및 채널 입구 유속 조건을 바탕으로 나타나는 유체의 거동을 의미

* **건도(quality):** 열역학에서 건도(quality)는 포화 혼합물의 증기 질량 분율을 의미하며, 포화 증기는 100%의 건도(quality)를 가지며, 포화 액체는 0%의 건도(quality)를 가진다.

* **기계학습(machine learning; ML):** 인공 지능의 하위 범주로, 신경망을 활용하여 패턴을 인식하고, 이러한 패턴 식별 역량을 개선하는 컴퓨터 프로세스를 의미한다.

연구팀은 채널 내의 최초 드라이아웃 발생 시점을 더 정확하게 예측하기 위해 기계학습을 활용했다. 특히, XGBoost 알고리즘*을 적용해 다양한 실험 데이터를 기반으로 최초 드라이아웃 발생 건도를 예측하는 데 성공했다.



▲ **XGBoost 예측 모델 형성 과정에 대한 개략도.** 아래 축은 기계학습 반복 횟수를 의미하며, 왼쪽 축은 XGBoost 예측 모델로 예측된 값과 실제 값의 오차를 의미한다. 학습 반복 횟수가 증가할수록, 이전 학습 모델의 취약점이 개선되어 예측 정확도를 향상시키는 형태로 나타난다.

연구팀이 활용한 데이터베이스는 13가지 작동 유체와 다양한 채널 크기 및 유동 조건을 포함하는 26개의 연구 자료에서 수집된 997개의 데이터 포인트로 구성되어 있으며, 기계학습 모델의 훈련에 충분한 기반을 제공했다.

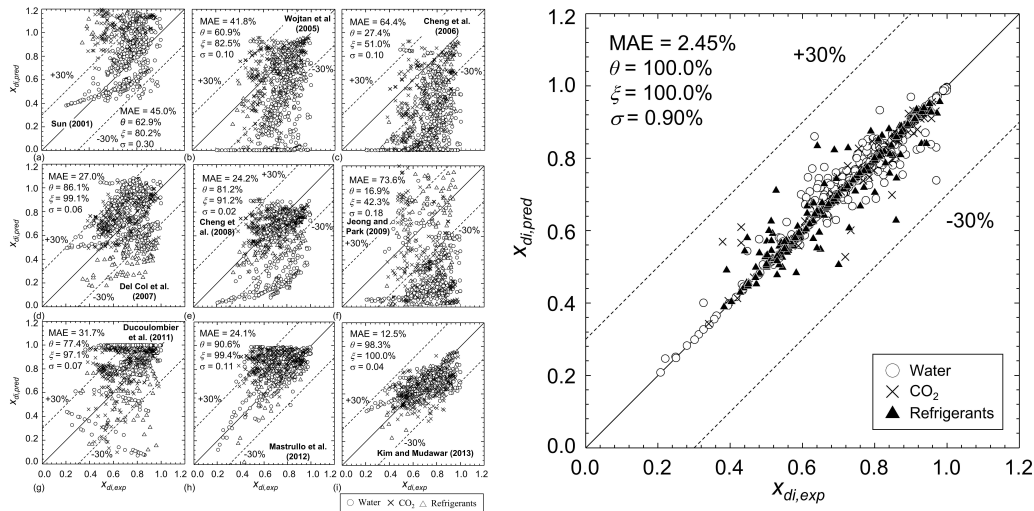
* **XGBoost 알고리즘:** 기계학습의 종류 중 하나로 기존의 Gradient Boosting 알고리즘에 과적합(overfitting)* 방지를 위한 기법이 추가된 지도 학습(supervised learning)* 알고리즘

연구팀은 추가적으로 하이퍼파라미터(hyperparameter)* 최적화 소프트웨어인 Optuna*를 사용하여 XGBoost 모델의 예측 정확도를 최대화했다. 그 결과, 최초 드라이아웃 발생 건도 예측에서 평균 절대 오차(MAE)가 2.45%에 불과한 매우 높은 정확도를 달성했다.

이는 기존의 상관관계 예측 모델(평균 절대 오차 = 12.5%)에 비해 크게 개선된 수치이다.

* **하이퍼파라미터(hyperparameter)**: 최적의 훈련 모델을 구현하기 위해 모델에 설정하는 외부 구성 변수로 학습률(learning rate), 훈련 반복 횟수 등을 포함한다.

* **Optuna**: 파이썬 기반인 기계학습 모델의 하이퍼파라미터를 자동으로 조정하고 최적화하는 오픈 소스 라이브러리



▲ 본 연구에서 개발한 XGBoost 예측 모델의 성능 평가 (좌) 이전 연구 결과 (우) 본 연구 결과. 아래 축은 실험 데이터를 의미하며, 왼쪽 축은 XGBoost 예측 모델로 예측된 값을 의미한다. 작동 유체와 관계없이 이전 가장 우수한 경험적 상관관계 모델의 평균 절대 오차 12.5%보다 낮은 2.45%로 우수한 예측 성능을 보여주고 있으며, 모든 데이터가 예측 30% 범위를 벗어나지 않는 것을 나타낸다.

이승현 교수는 "이번 연구를 통해 이상 유동* 열전달 및 열관리 분야에 대한 기계 학습의 성공적 적용 결과를 확인했다"며 "향후 다양한 유체와 시스템 작동 조건을 포함하도록 모델을 확장하고, 이상 유동 열전달 및 열관리 분야의 산업 현장에서 실시간 모니터링 시스템과 결합해 기계학습의 응용 범위를 넓히는 연구를 계획 중이며, 추후 전기차 배터리 열폭주 예방 및 예측에 활용할 계획"이라고 밝혔다.

* **이상 유동(two-phase flow)**: 고체, 액체, 기체 중 두 가지 상(phase) 이상이 존재하는 유동을 의미 이번 연구는 GIST와 성균관대학교, 미국 퍼듀대학교의 공동연구 성과로 GIST 기계 공학부 이승현 교수가 지도하고 노현석 석사과정생이 수행하였으며, 과학기술정보 통신부가 지원하는 한국연구재단(NRF) 사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 열전달 및 열관리 분야의 저명한 국제학술지 《International Journal of Heat and Mass Transfer》에 2024년 6월 15일 온라인 게재되었다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : International Journal of Heat and Mass Transfer (Impact Factor: 5.0)
- 논문명 : Utilization of XGBoost algorithm to predict dryout incipience quality for saturated flow boiling in mini/micro-channels.
- 저자 정보 : 노현석(제1저자, GIST 석사과정생), 김성민(성균관대학교), Issam Mudawar(Purdue Univ.), 이승현 (교신저자, GIST 교수)