[서식8] 산학연계 캡스톤디자인 결과보고서

2025학년도 산학연계 캡스톤디자인 과제 결과보고서

과제 현황	
과제명	AI와 열화상 데이터 분석을 활용한 IoT 기반 서버 쿨링 시스템
팀명	5인분같은 4인분
과제 수행기간	2025년 3월 ~ 2025년 11월
Github주소	*https://github.com/2025-Capstone-Project*

지 도 교 수		참여기업(멘토)	
소 속	*컴퓨터공학과*	기 업 명	*한국전자통신연구원*
성 명	이 상 금	성 명	신 한 솔
전 화	042-821-1205	전 화	010-7130-1372
E-mail	sangkeum@hanbat,ac,kr	E-mail	hansol.shin@etri.re.kr

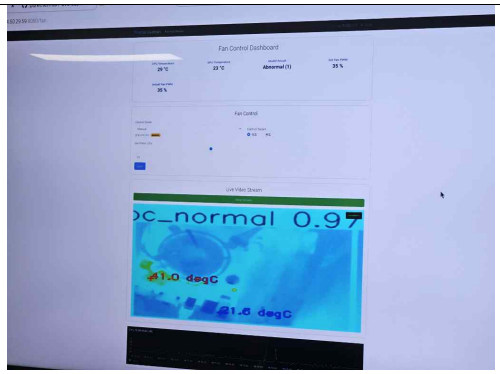
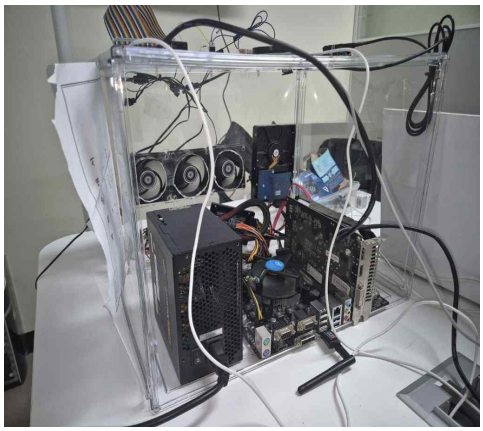
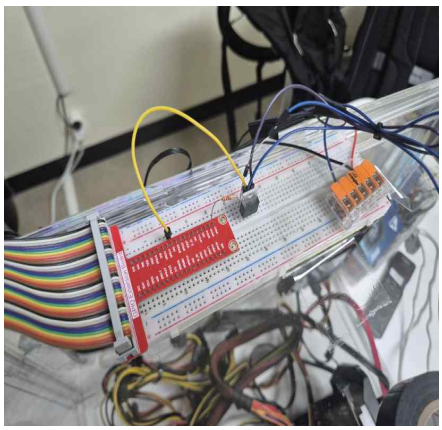
참 가 인 원(팀원)

No.	성 명	소속학과	학번	전화번호	E-mail
1	홍 수 민	컴퓨터공학과	20201793	010-2737-8034	20201793@edu.hanbat.ac.kr
2	길 기 훈	컴퓨터공학과	20201859	010-4607-4653	20201859@edu.hanbat.ac.kr
3	오 민 석	컴퓨터공학과	20202689	010-8455-2379	20202689@edu.hanbat.ac.kr
4	지 원 근	컴퓨터공학과	20201755	010-2774-8730	20201755@edu.hanbat.ac.kr
5					
6					
7					
8					

과제 세부 설명	
1. 개발 동기 및 목적, 필요성	현대의 서버 및 고성능 컴퓨팅 환경은 점점 더 높은 연산 능력을 요구하고 있으며, 이에 따라 CPU·GPU를 비롯한 각종 전자 부품의 발열 문제는 시스템 안정성을 위협하는 핵심 요인으로 떠오르고 있다. 특히 AI 학습·추론, 그래픽 렌더링, 대규모 데이터 처리와 같이 연속적인 고부하 작업이 이루어지는 환경에서는 발열량이 기하급수적으로 증가하며, 이로 인해 장비의 성능 저하와 수명 감소, 심각하게는 시스템 손상까지 야기될 수 있다. 하지만 현재 널리 사용되고 있는 온도 관리 방식은 대부분 CPU/GPU 내부 센서와 BMC(Baseboard Management Controller)에서 제공하는 제한된 스칼라 값에 의존하고 있어, 시스템 전체의 열 거동을 충분히 이해하고 대응하기에는 구조적인 한계를 지니고 있다. 실제로 PDF에 기록된 바와 같이 "기존 온도센서로는 놓치기 쉬운 표면 온도 분포와 국부적 핫스팟을 감지하기 어렵다"는 문제점은 서버 운영자들에게 오래된 난제로 남아 있다. 이러한 문제는 특히 국부적 발열(Hotspot) 에 대한 대응이 불가능하다는 점에서 더욱 두드러진다. CPU·GPU는 케이스 내부에서 가장 열이 집중되는 부품이지만, 실제 시스템의 발열은 전원부(VRM), 메모리 모듈, SSD, PCB 기판 자체의 열전도 구조 등 다양한 요소에 의해 결정된다. 기존의 센서는 이러한 구성요소의 열적 특성을 포착하지 못하므로, 관리자는 시스템 외부에서 발생하는 열 변화를 육안이나 경험에 의존해 판단할 수밖에 없었다. 이는 서버의 안정적인 운영과 예측 가능한 냉각정책 수립에 본질적인 제약을 주며, 오작동이나 고장을 조기에 탐지하지 못해 큰 비용 손실로 이어질 위험이 크다. 따라서 서버 전체의 표면 온도를 고해상도로 분석하고, 그 변화를 실시간으로 파악할 수 있는 새로운 접근 방식이 반드시 필요하다. 본 시스템은 라즈베리파이와 열화상 카메라를 이용하여 서버의 표면 온도를 실시간으로 측정하고, YOLO 모델을 통해 이상 여부를 판단한다. 판단된 결과는 BMC 데이터와 함께 InfluxDB에 저장되며, Grafana와 스프링프레임워크 기반의 실시간 모니터링 시스템을 통해 서버의 냉각 안정화를 도모하는 통합 냉각 시스템이다. 이에 본 과제는 열화상 데이터·AI 분석·IoT 제어를 융합하여 기존 센서가 감지하지 못하는 국소적 고온 지점을 정밀하게 포착하고, 부품 단위를 넘어 시스템 전체의 열적 상태를 분석하여 단계적인 냉각을 제어하는 지능형 시스템 구축을 목표로 한다.
2. 과제 수행 내용	본 과제는 서버 시스템의 표면 온도 분포와 내부 부품 온도를 통합적으로 감지하고, 이를 기반으로 팬 속도를 자동 제어하는 지능형 냉각 시스템(IoT 기반 서버 쿨링 시스템)을 구축하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 다음과 같은 기술 요소를 통합하였다. • **열화상 카메라 기반 표면 온도 측정** 서버 케이스 전체의 온도 분포를 실시간 캡처하여 기존 BMC에서 제공하지 못하는 지역적 핫스팟까지 감지한다. • **YOLO 기반 이상 탐지 모델** 수집된 열화상 데이터를 분석하여 정상/비정상을 이진 판별하고, 팬 작동 단계에 반영한다. • **PWM 기반 팬 속도 제어** Raspberry Pi GPIO → MOSFET 회로를 통해 팬(12V)을 단계적·지능적으로 제어한다. • **InfluxDB + Grafana 기반 모니터링** 열화상 프레임, BMC 스칼라값, 모델 판별 결과, PWM 기록을 모두 시계열 DB에 저장하고, 웹 대시보드를 통해 실시간 수치·이력·이상 이벤트를 제공한다. • **Spring Boot 기반 제어 및 UI 서버** REST API/WebSocket을 통해 팬 속도 명령 전달, 실시간 상태 갱신, 수동 제어 기능을 제공하는 웹 애플리케이션으로 구성하였다. 이 시스템은 **센서(열화상+온도) → AI 분석 → PWM 제어 → 데이터 축적 → 웹 모니터링**까지 전체 파이프라인이 모듈화되어 있으며, 유지보수·확장성이 높다는 점이 특징이다.

3. 과제 수행 결과	**1) AI 기반 열화상 데이터 분석 및 이상 탐지 모델 개발** 본 과제에서는 서버의 발열 상태를 비접촉식으로 정밀하게 진단하기 위해 FLIR Lepton 3.5 열화상 카메라와 AI 기술을 결합한 지능형 이상 탐지 모델을 개발하였다. 우선 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 Idle 상태부터 CPU 및 GPU에 극한의 부하를 주는 Stress 상황까지 다양한 환경을 조성하여 열화상 이미지를 수집하였다. 수집된 원본 데이터는 환경 변수에 따른 오차를 줄이기 위해 Min-Max 정규화를 거쳤으며, 노이즈와 이상치(Outlier)를 제거하는 전처리 과정을 통해 데이터의 품질을 높였다. 또한, 객관적인 라벨링 기준을 수립하기 위해 K-Means 클러스터링 기법을 도입하여 정상 상태와 비정상 상태를 구분하는 임계 온도를 과학적으로 도출하였고, 이를 바탕으로 학습 데이터셋을 구축하였다. 핵심이 되는 이상 탐지 알고리즘으로는 객체 탐지에 특화된 최신 YOLOv11 모델을 채택하여 파인 튜닝(Fine-tuning)을 진행하였다. 모델은 서버 내부의 주요 발열원인 CPU, GPU, RAM 등의 발열 패턴을 분석하여 현재 상태가 '정상'인지 '비정상(과열)'인지를 실시간으로 이진 분류하도록 학습되었다. 개발된 모델에 대한 성능 평가 결과, F1-Score 97%라는 높은 정확도를 달성함으로써 실제 서버 운영 환경에서도 신뢰성 있는 과열 진단이 가능함을 검증하였다. **2) IoT 기반 능동형 쿨링 제어 시스템 개발 및 하드웨어 구축** AI 모델이 탐지한 발열 정보와 서버 내부의 실제 센서 데이터를 융합하여 유연하게 물리적 냉각을 수행하는 IoT 하드웨어 제어 시스템을 구축하였다. 하드웨어 제어의 핵심인 쿨링 회로는 라즈베리파이(Raspberry Pi 4)를 메인 컨트롤러로 하고, 전력 제어를 위한 MOSFET과 릴레이 소자를 결합하여 설계하였다. 단순한 On/Off 방식이 아닌 PWM(Pulse Width Modulation) 제어 방식을 적용함으로써, 발열 정도에 따라 팬의 속도를 0%에서 100%까지 세밀하게 조절할 수 있도록 구현하여 냉각 효율을 극대화하였다. 또한, 열화상 이미지만으로는 파악하기 힘든 부품 센서의 상세한 온도 데이터를 확보하기 위해 BMC(Baseboard Management Controller)와 연동하는 파이썬 기반의 데이터 수집 모듈을 자체 개발하였다. 이를 통해 CPU와 GPU의 내부 센서 값을 실시간으로 추출하여 AI 분석 결과와 교차 검증할 수 있는 체계를 마련하였다. 시스템 간의 통신 보안성 또한 강화하였는데, 라즈베리파이와 제어 서버 간의 데이터 전송 구간에 GCP(Google Cloud Platform) 기반의 VPN 서버를 구축하고 SSH 터널링 기술을 적용함으로써, 민감한 서버 상태 정보가 외부로 유출되지 않도록 안전한 데이터 전송 인프라를 완성하였다 **3) IoT 기반 능동형 쿨링 제어 시스템 개발 및 하드웨어 구축** 수집된 방대한 온도 데이터와 AI 모델의 분석 결과를 관리자가 직관적으로 파악하고 효율적으로 운영할 수 있도록 실시간 통합 관제 시스템을 개발하였다. 먼저, 초 단위로 발생하는 시계열 데이터를 효율적으로 처리하기 위해 InfluxDB를 도입하여 데이터베이스를 구축하였다. 데이터 저장 시 호스트(Host)와 부품별로 태그(Tag)를 체계적으로 관리하도록 설계하여, 대량의 데이터 속에서도 원하는 정보를 빠르게 조회하고 분석할 수 있는 최적의 데이터 파이프라인을 형성하였다. 시각화 및 관제 영역에서는 Grafana와 Spring Framework를 연동하여 웹 기반의 대시보드를 구현하였다. 대시보드에서는 CPU와 GPU의 실시간 온도 변화 추이, AI 모델이 판별한 서버의 정상/비정상 상태 등 핵심 지표를 그래프와 차트 형태로 시각화하여 제공한다. 이를 통해 관리자는 웹 브라우저를 통해 언제 어디서든 서버실의 현황을 모니터링할 수 있으며, 실시간으로 열화상 카메라 화면을 스트리밍하여 시스템의 과열 징후를 포착할 수 있도록 하여 장애 발생 이전에 선제적인 대응이 가능한 안정적인 서버 운영 환경을 제공한다.

	참여인력 구분	성명	역할
4. 팀원 역할 분담	교수	이상금	프로젝트 지휘 및 조율
	멘토	신한솔	프로젝트 첨언 및 도움
	학부생	홍수민	팀장, DB구축 , 임베디드 제어, 라즈베리파이 통신
	학부생	길기훈	데이터 전처리, AI 학습, 열화상 카메라 모듈 제어 SW 개발, 클라우드 서버 구축
	학부생	오민석	프론트엔드, 백엔드, 네트워크 구축
	학부생	지원근	데이터 수집, 전처리, 데이터 분석, AI 학습

5. 결과물 사진 또는 동작 화면	 <사진 1. 웹 모니터링 시스템>  <사진 2. 라즈베리파이 GPIO 제어 모듈>  <사진 3. 서버 시스템 구성 사진>

6. 비용분석

예산배정금액	지출금액	잔액	비고
2,400,000원	1,901,768원	498,232원	

항목	세부항목	소요비용
재료비	[열화상 센서] FLIR Lepton 3.5	*255,200원*
재료비	FLIR LEPTON Break Board Ver2.0	*99,000원*
재료비	DC 12V2A 어댑터	*10,000원*
재료비	ARCTIC P8 PWM PST 쿨러	*20,000원*
재료비	특대형 아크릴 케이스 = 더블업	*25,000원*
재료비	PWM 암수 연장선 양쪽4핀	*6,000원*
재료비	1N4001	*3,900원*
재료비	MB-102 PCB 브레드보드	*9,000원*
재료비	와고커넥터 211-615	*3,600원*
재료비	IRLZ44N TO-220	*5,000원*
재료비	CHATGPT PLUS	*31,999원*
재료비	CHATGPT PLUS	*33,069원*
회의비	150,000원 * 4회	*600,000원*
전문가활용비	200,000원 * 4회	*800,000원*
합 계		*1,901,768원*

7. 기타

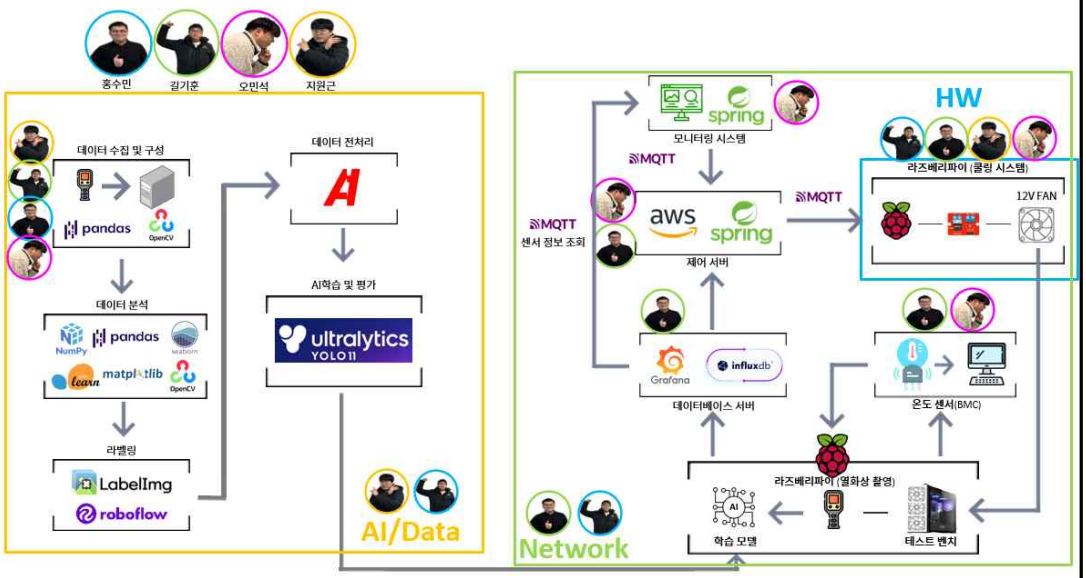
본 프로젝트는 초기 버전에서 단순한 열화상 기반 온도 측정 및 팬 속도 제어 기능을 중심으로 구성되어 있었으나, 9월 이후 개발 과정에서 시스템 구조를 전면적으로 재설계하여 센서–모델–제어–모니터링의 전체 파이프라인을 모듈형 구조로 재구축하였다. 기존에는 Raspberry Pi에서 개별적으로 데이터를 처리하고 단순 신호 기반 제어만 가능했으나, 개선된 시스템에서는 열화상 데이터와 BMC 온도를 통합적으로 수집하고, 이를 표준화된 이벤트(JSON) 형식으로 InfluxDB에 기록하는 안정적인 데이터 파이프라인을 확립하였다. 또한 열화상 카메라 입력에 대한 전처리(AGC 비활성화, 프레임 안정화)를 추가하여 기존 버전보다 훨씬 정확하고 일관된 온도 정보를 확보할 수 있도록 개선되었다.

두 번째 변화는 제어 체계의 고도화이다. 초기 작품에서는 단순히 온도 임계치에 따라 팬 속도를 즉시 상승·하강시키는 구조였으나, 9월 이후에는 YOLO 기반 모델 판별 결과와 히스테리시스 로직을 결합한 **'단계적 PWM 제어 정책'**으로 발전시켰다. 이 과정에서 Raspberry Pi의 GPIO PWM 모듈이 안정적으로 동작하도록 회로·코드 모두 리팩터링하였으며, WebSocket/REST 통신 구조를 재정비하여 제어 명령이 지연이나 누락 없이 실시간 적용되도록 보완하였다. 이를 통해 기존과 달리 팬의 스핀업/스핀다운 반복 현상을 억제하고, 실제 서버 발열 상태를 반영한 지능형 제어가 가능해졌다. 또한 수동/자동 모드 전환, 목표 PWM 단계 유지, 단계적 상승/하강 규칙 등 제어 기능이 훨씬 풍부하고 안정적으로 확장되었다.

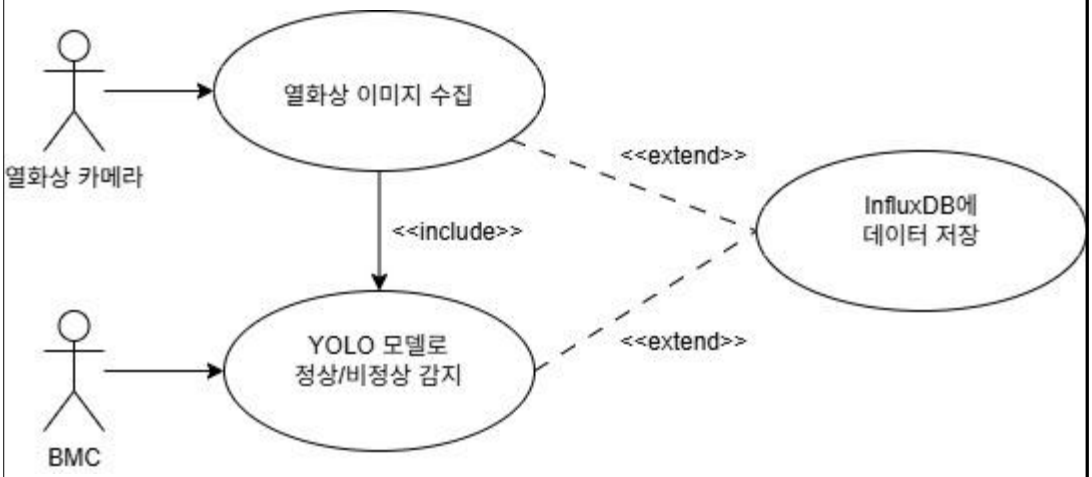
세 번째 변화는 모니터링 및 서버 연동 시스템의 완전한 고도화이다. 기존 작품은 단순한 값 표출 수준의 웹 화면만 제공했으나, 업그레이드 버전에서는 Spring Boot 기반의 백엔드를 새롭게 구축하고, InfluxDB·Grafana를 활용한 실시간 대시보드 시스템을 구현하였다. 그 결과 온도, 모델 판별 결과, 팬 속도, 제어 이벤트 등을 5초 단위로 갱신하며, 과거 이력 조회와 상태 변화 분석까지 가능한 전문적인 관제 환경을 마련하였다. 또한 프론트엔드 구조가 전면 재정비되면서 사용자 UI/UX가 크게 향상되었고, 외부 환경에서도 접근 가능한 안정적인 서버 아키텍처로 발전하였다. 이를 통해 기존 작품보다 확장성·유지보수성·정확성·운영 편의성 모두에서 크게 향상된 실질적인 IoT 기반 서버 냉각 관리 시스템으로 완성되었다.

8. 참고문헌	*1. 국문 문헌* *1) 이성민, 김경철, 백자영, 양창주, 김만중, 조병효(2024), "수경재배 참외 인식을 위한 열화상 및 딥러닝의 적용 가능성 검토",「드라이브·컨트롤」, 21(4), 37-45.* *2) 고아라, 조정원(2024), "전통시장을 위한 열화상 기반 실시간 화재 감지 시스템 개발",「멀티미디어학회논문지」, 27(11), 1398-1405.* *3) 이지훈, 정임영(2022), "열화상 카메라를 통한 온도 측정 데이터 신뢰도 분석",「한국정보과학회 학술발표논문집」, 제주.* *2. 영문 문헌* *4) Kang, J., & Park, S.(2019), "Infrared Thermography for Fault Diagnosis in Electronic Equipment",「Journal of Electronic Testing, Vol.35, No.3」, pp.271–283.* *5) Wang, Y., Liu, X., et al.(2024), "Transformer-Based Abnormal Heat Identification in Thermal Images of Power Transformers",「Scientific Reports, Vol.14」, Article No.81286.* *6) Bao, C., Cao, J., et al.(2023), "Improved Dense Nested Attention Network Based on Transformer for Infrared Small Target Detection", arXiv:2311.08747.* *7) Li, L., Xu, H., et al.(2020), "Real-Time Thermal Anomaly Detection in Industrial Scenes Using YOLO",「Sensors, Vol.20, No.10」.* *8) Jocher, G., & Qiu, J.(2024), "Ultralytics YOLO11 (Version 11.0.0)", GitHub Repository, https://github.com/ultralytics/ultralytics*

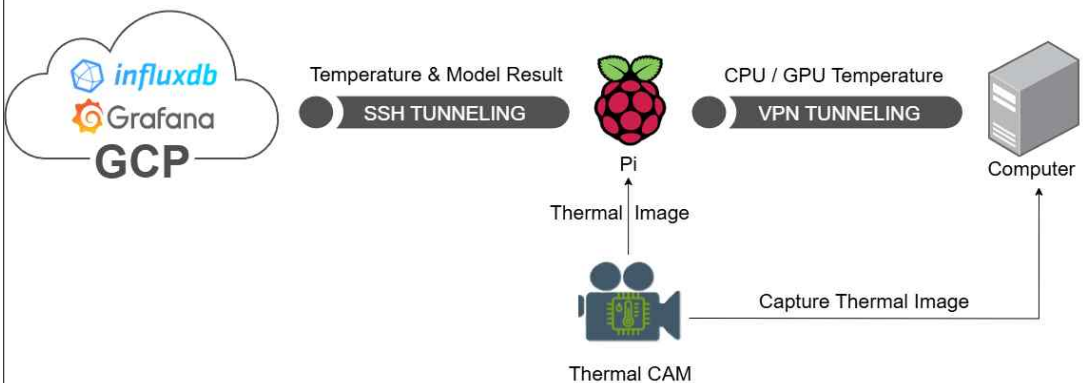
9. 작품사진



<그림 1> 구성도



<그림 2> DB 다이어그램



<그림 3> 네트워크 구조(열화상 촬영)