

공기질 IoT 센서를 이용한 열사병 예방관제 시스템

김유신*

한신대학교 빅데이터융합학과 교수

Heat-stress Monitoring System based on Air Quality IoT Sensor

Yoosin Kim*

Professor, Dept. of Big Data Convergence, Hanshin University

요약 지구온난화와 도시 열섬현상으로 인해 산업현장에서도 폭염 위험이 급격히 높아지고 있다. 특히 제조업 생산현장, 건축현장, 물류창고, 지하 주차장 등 폐쇄적이거나 환기가 제한된 작업공간에서는 공기 온도뿐 아니라 복사열, 습도, 공기 정체 등 복합적인 요인으로 인해 열사병과 같은 온열질환 위험이 매우 높고 실제 사고도 빈번히 발생하고 있다. 본 연구는 이러한 실내 폭염현장에서의 온열질환 관리를 위한 공기질 측정 및 냉난방 공조 시스템 제어를 위한 공기질 IoT 센서 시스템을 구현하고 국내 제조업 생산 현장과 일본 물류센터에서 이를 실증하였다. 제안 시스템은 IoT 센서를 통해 계속된 온습도 데이터를 기반으로 국내에서는 체감온도, 일본에서는 WBGT 지수를 산출하여 산업현장에서 온열질환이 유발될 수 있는 위험 상황이 되면 관리자에게 위험을 경고하고 자동으로 냉난방기의 작동 및 설정 온도를 제어할 수 있도록 하였다. 이를 통해 폭염현장에서의 온열질환 인명 사고를 예방하고 나아가 에너지 절감 효율도 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

주제어 : 공기질 IoT, 온열질환 예방, 체감온도, WBGT, 에어컨 자동제어

Abstract Heat exposure risks in industrial workplaces are increasing due to global warming and urban heat island effects. Enclosed or poorly ventilated environments are particularly vulnerable to heat-related illnesses. This study proposes an IoT-based indoor environmental sensing and HVAC control system to mitigate heat stress in indoor workplaces. The system was validated in manufacturing facilities in Korea and a logistics center in Japan. Apparent temperature and WBGT were calculated using IoT sensor data to detect heat risk levels and automatically control air-conditioning systems. The proposed approach effectively reduces heat-related health risks while improving energy efficiency.

Key Words : Air Quality Sensor, Heat Stress Index, HVAC Control, IoT Sensor System

1. 서론

최근 기후변화로 인한 여름철 고온 현상은 실외뿐 아니라 실내 공간에서도 폭염과 열스트레스(heat stress) 문제를 심화시키고 있다[1]. 특히 제조업 생산현장, 건축현장, 물류창고, 지하주차장 등 폐쇄적이거나 환기가 제

한된 작업공간에서는 공기 온도뿐 아니라 복사열, 습도, 공기정체 등 복합적인 요인으로 인해 열스트레스 수준이 인체 허용한계를 초과하기 쉽다. 이로 인한 열사병(heat stroke), 열탈진(heat exhaustion), 실신 및 사고 증가는 산업재해로 직결되며, 생산성 저하와 작업 중단 등 경제적 손실도 초래한다. 한국의 고용노동부를 포함하여

본 논문은 한신대학교 학술연구비 지원으로 연구되었음.

*교신저자 : 김유신(yoosin25@hs.ac.kr)

접수일 2026년 01월 05일 수정일 2026년 01월 30일 심사완료일 2026년 02월 16일

전 세계적으로 폭염현장의 작업환경 모니터링 및 예방 시스템 구축을 규제화하고 있다[2, 3, 4].

본 연구는 공기질 사물인터넷 센서(Internet of Things, IoT)를 이용하여 산업 현장의 열위험지수(heat stress index)를 산출하고, 이를 기반으로 예방적 대응이 가능한 온열질환 예방관리 시스템을 제안하고자 한다. 구체적으로는 외부 온습도 및 실내 온습도를 기반으로 체감온도 또는 WBGT 등 온열질환 지수를 산출하고 냉난방기의 가동 및 온도 설정을 자동 제어하는 IoT 기반 시스템이다. 체감온도와 습구구온도(Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)는 인체가 실제로 경험하는 열부하 수준을 평가하기 위한 대표적인 온열질환 지표이다. 단순 기온과 달리 이들 지표는 기온, 습도, 복사열 및 기류 등의 복합적인 환경요인을 반영하여 인체의 생리적 열스트레스 정도를 정량화한다. 특히 WBGT는 국제표준(ISO 7243) 및 산업안전 지침에서 작업·휴식 기준과 허용 열노출 한계를 설정하는 데 활용되는 공인 지표로, 산업현장의 온열질환 예방에 중요한 기준으로 사용되고 있다. 체감온도는 기온과 습도 등을 반영하여 사람이 실제로 느끼는 더위를 추정하는 지표로서 폭염 대응 및 생활 안전 관리에 널리 활용된다. 따라서 이러한 온열지수는 산업현장에서 열사병 및 열탈진과 같은 온열질환 위험을 사전에 판단하고 대응하기 위한 핵심 지표라 할 수 있다. 이를 통해 온열질환이 유발될 수 있는 위험 상황을 회피하고 나아가 에너지 절감 효과도 동시에 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

2. 관련 연구

기후변화로 인한 고온 일수와 폭염 강도는 산업, 상업, 공공시설 전반에서 열사병과 같은 온열질환 위험을 높이고 있으며, 이로 인해 폭염 위험 현장에서의 열스트레스 관리가 중요해지고 있다. 이에 대응하여 체감온도, WBGT 등 인체 열부하 지표를 측정하여 온열질환을 예방하고자 하는 연구들이 나타나고 있으며, 나아가 냉난방 HVAC 제어를 통한 온열질환 예방과 에너지 절감으로까지 관련 연구와 시스템 개발이 확대되고 있다. 이와 관련한 초기 연구는 건물의 에너지 사용과 설비 운전을 통합적으로 관리·제어하기 위한 BEMS(Building Energy Management System)와 BAS(Building Automation System)에서부터 시작되었는데, IoT 기능을 가진 환경 센서(온도, 습도, CO₂ 등)와 외부 기상 데이터, 재실 정보등을 통합하

여 사전 냉방, 설정온도 최적화, 환기 제어까지 점차 기능이 다양해지고 있다[5].

먼저, 건물 에너지 절감을 위한 연구에서는 아두이노 기반 IoT 센서 네트워크를 통해 온도·습도·점유(재실여부) 정보를 실시간으로 모니터링하고 이를 바탕으로 HVAC 제어시 온도와 습도 조절 및 체감온도를 고려한 최적의 실내 환경 유지 방법을 찾고자 하였다[6]. HVAC(Heating, Ventilation, and Air Conditioning)는 난방, 환기 및 공기조화를 통합적으로 수행하는 설비 시스템으로 실내 온도, 습도 및 공기질을 제어하여 쾌적하고 안전한 환경을 유지하는 역할을 한다. 산업현장에서는 HVAC 시스템의 운전 상태와 설정 온도가 작업자의 열노출 수준에 직접적인 영향을 미치므로, 온열질환 예방을 위해 적절한 제어가 중요하다. 따라서 온열지수 기반의 HVAC 자동 제어는 폭염 상황에서 위험을 신속히 완화하고 동시에 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 효과적인 방법으로 활용될 수 있다. 여기에는 자연 환기를 통해 냉방을 보완하는 방안을 제시하고, 절전모드를 통해 사용자의 부재 시 에너지를 절감할 수 있는 기능을 구현하여 에너지 소비를 약 40% 절감하면서도 쾌적성을 유지할 수 있었다.

구축 건물의 에너지 절감을 위한 또 다른 연구에서는 내외부 환경 데이터, 온도, 습도, 바람속도, 일사량 등을 수집하고 활용하여 미래의 실내온도 변화를 예측하는 인공신경망(ANN) 모델을 개발하고 HVAC 최적 가동 알고리즘을 구현하여 에너지 절감 효과를 얻고자 하였다[7]. 구축 건물 에너지 절감을 위한 에어컨 제어 시스템 개발 연구에서도 건물 내 설치된 구형 Non-IoT 에어컨 냉난방기기를 교체하거나 별도의 시설 공사 없이 손쉽게 제어하고 전력 사용량을 절감하는 에너지 절감 지능형 IoT 자동제어 시스템을 구현하였다[8].

홍콩의 고층 오피스건물에 IoT 기반 무선 센서 네트워크를 구성하고, 온도·습도·복사열·풍속 등을 1분 단위로 측정한 연구에서는 동일 건물 내에서도 위치별로 복사온도(mean radiant temperature) 편차가 크게 나타날 수 있음을 확인하였다[9]. 이는 IoT 기반 센싱 네트워크가 순간적인 환경 변화를 보다 정밀하게 포착하여, 실내환경의 공간적 특성과 시간적 변동성에 대한 유의미한 통찰을 제공할 수 있음을 의미하며, 또한 고빈도 데이터 수집을 통해 작업 중 열부하 급상승(예: 장비 가동 시, 환기 중단 시)을 탐지할 수 있어 즉각적인 경보 시스템(trigger system) 구축에 유용할 수 있음을 보여주었다. 소규모 주택이나 일반 가정을 대상으로 한 연구에서는

저비용(low-cost)의 IoT 기기 및 적절한 제어 알고리즘을 사용하여 기존의 가정용 에어컨 제어를 통해 에너지 절감과 사용자 쾌적성 유지가 가능한지 살펴보고자 하였다[10]. 이를 통해 여름에는 약 36% 겨울에는 약 10%의 비용 개선이 이루어 졌음을 확인하였는데, 비교적 단순한 IoT센서와 아두이노 마이크로컨트롤러 만으로도 유의미한 에너지 절감 효과를 얻을 수 있음을 보여주었다. 이와 유사한 연구로 저소득 가구를 대상으로 온도·상대습도·흑구온도·풍속·조도·CO₂ 등의 복수 센서를 저비용 IoT 센서 네트워크로 구축하여 사회복지를 지원할 수 있는 저비용 관제 시스템을 구현한 사례도 있으며, 대학 캠퍼스에 스마트 전등스위치, 스마트 콘센트, 레이더, 온습도 센서, 스마트 에너지미터 등 IoT센서를 활용해 스마트 에너지 절감 시스템을 구현한 사례도 있다[11, 12]. 이러한 연구들은 대부분 사무실이나 주거공간을 대상으로 한 연구이지만, IoT 기반 센서 시스템이 현장 설치가 간편하고 실시간 데이터 수집이 가능하다는 점에서, 산업현장용 열스트레스 모니터링 인프라의 기술적 기반을 제공하고 있다.

한편 제조 생산현장을 대상으로 한 연구에서는 디지털 전력량계 및 IoT 센서를 이용해 에너지 관련 데이터와 환경 정보들을 실시간 수집/분석하고 모니터링할 수 있는 시스템을 제안하였다[13]. 이를 통해 온도, 습도, 분진, 가스, 공기질, 기계동작 상태, 에너지 관리 등을 통합 관제하면서 제조 공장 인프라의 안전성 향상과 에너지 절감 효과를 얻고자 하였다. 또 다른 산업시설에서의 IoT 연구에서도 IoT 센싱 기술을 활용하여 구축된 빅데이터를 활용하여 피크 전력 사용을 예측하는 인공지능 모델을 개발하고 비교 분석하였다[14]. 농업용 온실 시설물을 대상으로 한 연구에서는 스마트 온실 시스템을 개선하고자 하였는데, 기존의 지능형 온실 시스템이 가격은 높지만 지능형 제어가 원활하지 않은 것을 NB-IoT 네트워크를 통해 고도화하고자 하였다[15].

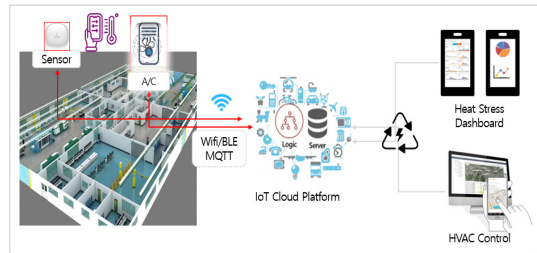
그러나 실제 산업현장에서 온열질환 예방을 위한 통합 관제시스템을 구현하는 것은 기술적·운영적 측면에서 쉽지 않다. 온열지수(WBGT 또는 체감온도)는 다양한 환경 변수의 복합적 계측을 요구하며, 센서 정확도, 데이터 지연, 통신 안정성, 설비 간 프로토콜 차이 등으로 인해 실시간 통합 제어에 어려움이 존재한다. 또한 산업현장에는 제조사 및 제어 방식이 상이한 다수의 냉난방 설비가 혼재되어 있어 일관된 제어 정책을 적용하기가 쉽지 않다.

따라서 실효성 있는 통합 관제시스템을 구현하기 위해서는 (1) 신뢰성 있는 환경 데이터 수집 체계, (2) 온열질

환 지수의 실시간 산출 및 위험 단계 판단 알고리즘, (3) 설비 연동이 가능한 표준화된 제어 인터페이스, (4) 위험 발생 시 자동 경보 및 공조설비 제어가 가능한 통합 플랫폼 구조가 필요하다. 이에 본 연구에서는 이러한 요구사항을 반영하여 IoT 기반 온열질환 대응 통합 관제 아키텍처를 설계하고, 이를 산업현장에 적용한 실증 결과를 다음 장에서 제시한다.

3. 온열질환 예방관제 IoT 시스템

그럼에도 불구하고, 선행 연구들을 통해 확인된 기술적 성과(저비용 IoT 센서 네트워크, 실내 간이식 WBGT 지수와 체감온도 산출, 실시간 데이터 처리 시스템 등)은 산업안전 관점의 온열질환 예방관제 시스템(Heat-stress Monitoring System, HMS)으로 활용될 수 있으며, 아래와 같은 기능 모듈을 포함한 IoT 클라우드 시스템으로 구성할 수 있다 [그림 1].



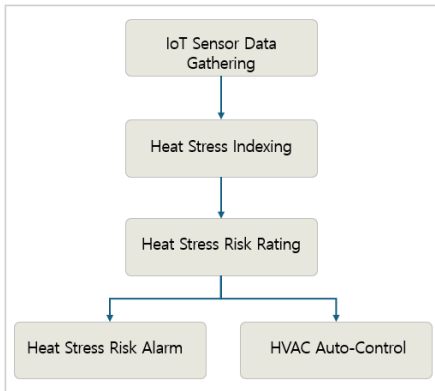
[Fig. 1] Heat-stress Monitoring System

- (1) 다중 센서 융합(Multi-sensor fusion) :
작업 현장의 온도, 습도, 공기질 데이터 등
- (2) 지표 계산(Computation) : 실시간 WBGT /
체감온도 산출
- (3) 경보 시스템(Alerting) : 기준 초과 시 시각·음성·
모바일 경보
- (4) 자동 제어(Actuation) : 에어컨 HVAC 냉방
장치, 환기장치 등 자동 제어
- (5) 데이터 기반 예방(Data-driven prevention) :
열사병 발생 전조 탐지 및 작업중지 권고

3.1 시스템 구성

온열질환 예방관제 시스템(HMS)은 온도, 습도를 포함하는 환경 데이터를 수집하는 온열질환 환경 데이터 수신부, 상기 수신된 데이터를 기반으로 온열질환 지수를

산출하는 온열질환 지수 산출부, 상기 온열질환 지수 및 환경 데이터를 기반으로 온열질환 위험기준을 산출하고 냉난방기의 작동 여부 및 설정 온도를 산출하는 온열질환 위험기준 산출부 및 온열질환 위험을 알려주는 온열질환 위험 알림부와 상기 산출된 온열질환 위험기준에 따라 연결되어 있는 냉난방기를 제어하는 냉난방기 제어부로 구성된다[그림2].



[Fig. 2] System Flow and Main Modules

시스템은 IoT 센서로부터 발생되는 실시간 데이터의 수집/저장/처리/분석/제어를 위한 통합 관제 플랫폼으로, IoT센서와는 Wifi/BLE/MQTT 프로토콜을 사용한다. 예를 들어 산업현장 내 폭염 예상 위치에 IoT 공기질 센서를 설치하여 주위의 온도, 습도 및 미세먼지, 이산화탄소 등의 공기질 데이터를 실시간으로 센싱하여 클라우드의 IoT 플랫폼으로 데이터를 전송하고 시스템은 수집된 데이터를 실시간으로 파싱/처리/가공/분석하여 온열질환 위험과 관련된 열스트레스 지수를 산정하고 위험도를 평가하며, 이를 기반으로 열사병 위험 경고와 폭염 현장 주위의 에어컨 냉난방 HVAC 설비 등을 자동 제어한다.

결과적으로 HMS 시스템은 공기질 IoT 센서에서 측정된 데이터를 이용하여 폭염현장의 온열질환 위험도평가, 시간대별 위험지표, 폭염일수, 위험도 알림, 실행 결과 등을 데이터에 기반한 시간정보와 함께 저장하여 온열질환 예방 관련 규정을 준수하고 사후 분석, 리포팅을 신속히 수행할 수 있다. 또한 온열질환 지수를 기준으로 냉난방기의 작동 여부 및 설정 온도를 자동 산정하여 폭염 상황에서 작업자, 이용자의 열 스트레스 위험을 선제적으로 저감할 수 있다. 시스템은 관리자 대시보드에서 위험등급 분포, 장치 상태, 제어 정책 적용 현황을 실시간 제공함으로써 운영자의 개입 시간을 단축하고 현장 대응 속도를 높일 수 있다.


3.2 온열질환 환경 데이터 수신부

온열질환 환경 데이터 수신부는 온도와 습도를 포함하는 환경 데이터를 수집하며, 필요에 따라 미세먼지, tVOC, 이산화탄소 등 추가 공기질 데이터를 수집할 수 있다. 또한 작업현장의 폭염 열사병 예방을 위한 HVAC 설비의 원격 가동을 위해 제어장치를 추가할 수 있다.

- Air Quality Sensor
온도, 습도, 미세먼지(PM2.5, 10), tVOC, 이산화탄소(CO₂) 센서, MQTT, wifi/ble
- HVAC IR Remote Controller
에어컨 냉난방기, 환기장치, 전열교환기 등의 HVAC 시스템을 적외선 IR 리모컨 기능을 이용하여 원격 제어할 수 있는 IR 제어기

본 연구에서는 온도와 습도 데이터를 측정하는 센서기능과 에어컨 HVAC을 원격제어할 수 있는 IR 리모컨 기능이 하나로 구동되는 IoT 장치를 활용하였다.

<Table 1> Specification of IoT Sensor

IoT Sensor Device		
	Model No.	AirDeep Q/RT-AQS-201
	Size/Weight	67x67x26mm/79g
	Sensor	Temperature, Humidity, Acceleration
	Network	wifi, Bluetooth
	Gauging Temp(°C)	-10 ~ 60
	AC Control	IR Control

3.3 온열질환 지수와 위험 기준 산출부

온열질환 지수 산출부는 수신된 환경 데이터를 기반으로 온열질환 지수를 산출하며, 외기 온습도 및 실내 온습도 데이터를 이용해 체감온도 또는 WBGT(습구흑구온도 지수)를 포함하는 지수를 산출한다.

- 체감온도
국내 기상청, 산업안전, 보건 분야에서는 체감온도를 열지수(Heat Index)로 사용하는데, 단순한 기온이 아니라, 습도와 풍속 등 기상 요소가 인체의 열교환 과정에 미치는 영향을 종합적으로 고려하여 사람이 실제로 느끼는 더위 또는 추위를 정량화한 지표이다[2]. 여름철 고온 환경에서는 기온과 상대습도를 반영한 열지수를 체감온도로 활용하고, 겨울철 저온 환경에서는 기온과 풍속을 고려한 풍속 체감온도(Wind Chill Temperature)를 적

용하여 계절별 열환경 위험을 평가한다. 이러한 체감온도 지표는 인체의 발한, 증발 냉각, 대류 열손실 특성을 반영함으로써 폭염 및 한파 상황에서의 온열질환 및 한랭질환 발생 가능성을 보다 현실적으로 평가할 수 있다.

$$\text{체감온도} = -0.2442 + 0.55399 \times Tw + 0.45535 \times Ta - 0.0022 \times Tw^2 + 0.00278 \times Tw \times Ta + 3.0$$

Tw : 습구온도 (°C)

Ta : 기온 (°C)

정확한 습구온도(Tw)는 별도의 측정 장비로 정확한 값을 구하거나 다음과 같은 식으로 간접적으로 계산할 수 있다.

$$Tw = Ta \text{ATAN}(0.151977(RH + 8.313659)0.5) + \text{ATAN}(T + RH) - \text{ATAN}(RH - 1.676331) + 0.00391838(RH)^{3/2} \times \text{ATAN}(0.023101 \times RH) - 4.686035$$

RH : 상대습도 (%)

• WBGT(Wet Bulb Globe Temperature)

WBGT는 온열질환(열탈진, 열사병 등) 위험을 정량적으로 판단하기 위한 대표적인 지표로, 세계보건기구(WHO), 국제노동기구(ILO), ISO, 미국 NIOSH 등에서 공식 기준으로 채택하고 있다. WBGT는 사람의 열 스트레스(Heat Stress) 수준을 평가하기 위해 단순한 기온이 아니라 습도, 복사열(태양광), 바람 등이 인체에 미치는 영향을 반영한 통합지수이다. 1950년대 미 해군에서 고온 환경 작업자의 열사병 예방을 목적으로 개발되었으며, 현재는 산업안전, 군사, 스포츠, 건설, 공공보건 분야에서 국제적으로 활용되고 있다.

공식 WBGT 계산에는 특수 센서(습구온도계, 흑구온도계 등)가 필요하지만, 일상에서는 이를 갖추기 어려우므로 일본 환경성 등은 기온과 상대습도만으로 추정할 수 있는 간이공식을 제공하고 있다.

[특수센서 이용 시 공식]

$$WBGT_{out} = 0.7 \times Tw + 0.2 \times Tg + 0.1 \times Td$$

$$WBGT_{in} = 0.7 \times Tw + 0.3 \times Tg$$

WBGT_{out}: 실외(태양있음) WBGT(°C)

WBGT_{in}: 실내(태양없음) WBGT(°C)

Tw: 자연통풍 습구온도(°C)

Tg: 흑구온도(°C) - 태양복사 포함 열환경 반영

Td: 건구온도(°C)

[WBGT 간이추정 공식(실내)]

$$WBGT_{out} = 0.735 \times T + 0.0374 \times RH + 0.00292 \times T \times RH - 4.064$$

$$WBGT_{in} = 0.567 \times T + 0.393 \times e + 3.94$$

WBGT_{out}: 간이추정 실외 WBGT(°C)

WBGT_{in}: 간이추정 실내 WBGT(°C)

T: 기온(°C)

e: 수증기압 (hPa)

$$(e = 6.105 \times \exp((17.27 \times T) / (237.7 + T))) \times RH / 100$$

RH : 상대습도 (%)

즉, 온열질환 지수 산출부는 센서를 이용하여 체감온도와 WBGT를 산출하는데, 한국에서 적용되는 체감온도는 하절기 고온 구간에서는 열지수(Heat Index)를 적용하고 한랭 구간에서는 풍속 체감온도(Wind Chill)를 적용하며, 일본 등에서 사용되는 WBGT는 간이 추정식을 이용하여 실내/실외 WBGT 지수를 산출한다. 시스템에서는 이렇게 산출된 온열질환 지수 및 환경 데이터를 기반으로 온열질환 위험기준을 표출한다. 체감온도를 사용하는 한국의 경우에는 산업안전보건공단에서 기온과 상대습도 데이터를 입력값으로 적용하여 산출한 체감온도를 위험등급을 아래 그림3과 같이 제시하고 있다.

H	T	Risk Category														
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
25	22.2	23.1	24.0	24.9	25.8	26.7	27.6	28.5	29.5	30.4	31.3	32.2	33.1	34.0	35.0	35.9
30	22.8	23.7	24.6	25.5	26.5	27.4	28.3	29.2	30.2	31.1	32.0	33.0	33.9	34.8	35.8	36.7
35	23.3	24.2	25.2	26.1	27.0	28.0	28.9	29.9	30.8	31.8	32.7	33.7	34.6	35.6	36.5	37.5
40	23.8	24.7	25.7	26.6	27.6	28.5	29.5	30.4	31.4	32.4	33.3	34.3	35.3	36.2	37.2	38.2
45	24.2	25.2	26.1	27.1	28.1	29.0	30.0	31.0	32.0	32.9	33.9	34.9	35.9	36.9	37.8	38.8
50	24.6	25.6	26.6	27.6	28.6	29.5	30.5	31.5	32.5	33.5	34.5	35.4	36.4	37.4	38.4	39.4
55	25.1	26.0	27.0	28.0	29.0	30.0	31.0	32.0	33.0	34.0	35.0	36.0	37.0	38.0	39.0	40.0
60	25.5	26.5	27.5	28.4	29.4	30.4	31.4	32.4	33.5	34.5	35.5	36.5	37.5	38.5	39.5	40.5
65	25.9	26.9	27.9	28.9	29.9	30.9	31.9	32.9	33.9	34.9	35.9	36.9	38.0	39.0	40.0	41.0
70	26.2	27.2	28.2	29.3	30.3	31.3	32.3	33.3	34.3	35.4	36.4	37.4	38.4	39.5	40.5	41.5
75	26.8	27.8	28.8	29.7	30.7	31.7	32.7	33.7	34.8	35.8	36.8	37.8	38.8	39.9	40.9	42.0
80	27.0	28.0	29.0	30.0	31.1	32.1	33.1	34.1	35.2	36.2	37.2	38.3	39.3	40.4	41.4	42.4
85	27.3	28.4	29.4	30.4	31.4	32.5	33.5	34.5	35.6	36.6	37.7	38.7	39.7	40.8	41.8	42.9
90	27.7	28.7	29.7	30.8	31.8	32.9	33.9	34.9	36.0	37.0	38.1	39.1	40.2	41.2	42.3	43.3
95	28.0	29.1	30.1	31.1	32.2	33.2	34.3	35.3	36.4	37.4	38.5	39.5	40.6	41.6	42.7	43.7
100	28.4	29.4	30.5	31.5	32.6	33.6	34.6	35.7	36.7	37.8	38.9	39.9	41.0	42.0	43.1	44.1

[Fig. 3] Heat Index Table in KOREA

이러한 위험등급은 실제 시스템에서는 그림 6과 같이 열사병 지수와 아이콘의 표현 색깔로 활용할 수 있다.

3.4 온열질환 위험 알림부

온열질환 위험 알림부는 온열질환 지수 산출부에서 도출된 체감온도 또는 WBGT 지수를 기반으로 온열질환 위험을 알리며, 산출 결과가 임계 범위를 초과하면 태블릿이나 모니터 디스플레이와 같은 시스템 연동 표시장치에 온열질환 응급조치 가이드와 연락 안내를 표출하는 알림 신호를 생성한다.

체감온도를 기준으로 예를 들면, 온도가 36도 이상이고 습도가 80% 이상인 경우, 그림3의 위험등급표에서는 체감온도가 38.3℃를 초과함을 나타내며, 이는 즉각적인 작업 중지 조건으로 폭염현장에서 즉시 철수하여야 한다. 국내 기상청, 산업안전, 보건 분야에서는 통용되는 체감온도에 따른 위험수준과 권고 조치는 아래 표와 같으며 이는 고용노동부의 산업안전보건기준에 관한 규칙과 산업안전보건공단의 가이드에 따른다[2].

<Table 2> Heat Index-based Risk Classification

체감온도(°C)		
기준	위험수준	권고 조치
<25	관심	일상활동가능
27~31	주의	장시간 야외활동 자제
31~33	경고	격렬한 활동 제한 휴식 주기 확보
33~35	위험	야외/중노동 중단 권고
35≤	매우위험	야외활동 자제, 작업 중지

일본 기상청, ISO, 미국 등에서는 아래 표2과 같이 WBGT 지수 기반의 온열질환 위험분류기준을 사용한다.

<Table 3> WBGT-based Risk Classification

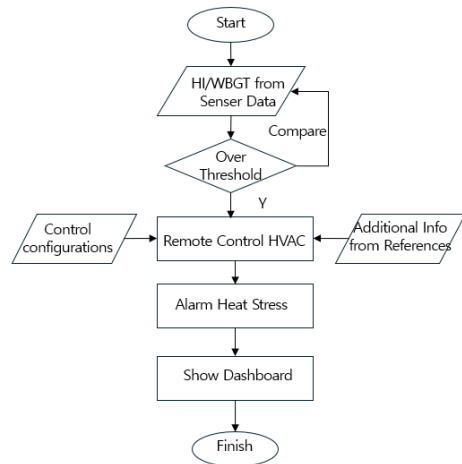
WBGT(°C)		
Base	Heat Stress Level	Health Risk Description
<21	Low 안전	Normal activity generally safe
21~25	Moderate 주의	Rest Recommended
25~28	High 경고	Workload reduction required
28~31	Very High 위험	Frequent breaks necessary
31≤	Extreme 매우위험	Strenuous activity should be suspended

결과적으로 이러한 온열질환 위험기준을 토대로 온열질환 위험을 경고하고 등급별 설정 온도, 풍량, 환기율을 포함하는 가동 모드를 결정하고, 결과를 냉난방기 제어부에 전달한다.

3.5 냉난방기 HVAC 제어부

냉난방기 제어부는 앞서 산출된 온열질환 지수와 위험기준에 따라 연결된 냉난방기를 자동 제어한다. 그림4는 냉난방기 자동 제어 방법의 흐름도를 도시한 도면이다. 먼저 체감온도 또는 온열질환 지수가 임계 기준값 이상이면 냉방기 가동 신호를 자동 생성하고, 제어 기준값에

따라 냉방기의 설정 온도를 기준값보다 소정 하향 보정치만큼 낮추는 제어신호를 생성한다. 제어기준은 위험등급에 매칭된 따른 운전 모드에 따라 설정 온도, 풍량 단계, 사전가동 리드타임 및 알람 색상을 포함하는 제어신호를 생성한다.



[Fig. 4] HVAC Control Flowchart

냉난방기 자동 제어시에는 작업장소별 관리온도 범위와 위험 등급에 따른 휴식 주기, 이와 연동되는 구역별 냉방 파라미터 등의 자동제어 설정 값을 참조하여 냉난방기 가동을 조정한다. 또한 기상청에서 제공하는 인근 지역의 외기 온도/습도 데이터와 폭염 주의보 또는 폭염경보 발령 정보 등과 같은 레퍼런스 데이터를 수신하여 냉난방기 제어의 파라미터로 활용할 수 있다.

냉난방기 제어부는 HVAC 자동제어 신호를 생성하며, 제어신호에 포함된 색상 정보 등을 관제시스템 대시보드에 표시되도록 구성하고, 시간대별 온습도 추이, 체감온도/WBGT 위험지표와 일 단위 폭염일수 및 HVAC 제어 이력 등을 저장매체에 기록·보관하고, 관리자가 이를 조회할 수 있도록 한다.

4. 실증 테스트

본 연구를 통해 구현한 온열질환 예방관제 시스템(HMS) 성능을 검증하기 위해 체감온도를 사용하는 국내 제조업 공장과 WBGT를 사용하는 일본의 물류센터를 각각 실증 대상으로 선정하여 공기질 IoT 센서를 설치하고 시스템 가동 테스트를 진행하였다.

4.1 국내 제조업 생산/조립 공장

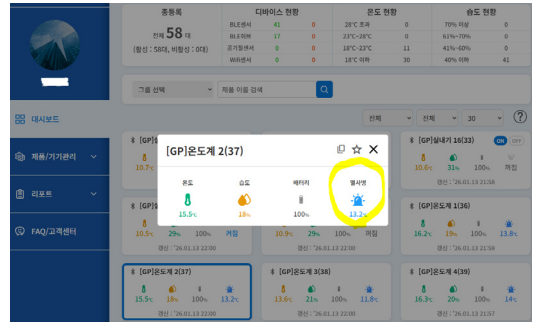
체감온도를 열스트레스 지수로 사용하는 국내 실증 산업현장은 충북에 위치한 산업용 기계설비 생산/조립공장이다. 공장 건물 내부의 폭염 위험이 있는 작업 현장은 제조 공정 6곳이며 건물 내에는 LG 대형 스탠드 에어컨 35대가 설치되어있다. 폭염 위험 장소의 체감온도를 측정하기 위하여 6개의 IoT 온/습도 센서를 설치하였고, 에어컨 35대 모두에도 원격제어 IoT 장치를 설치하고 시스템에 등록하였다[그림5].



[Fig. 5] IoT Device for Sensing and Control

온열질환 예방관제 시스템에 등록된 각각의 센서는 설치 장소 또는 일련번호 등의 네이밍을 부여받고 대시보드 화면에서 카드 형태로 배열된다[그림6]. 대시보드에서는 상단에 총 등록 장치 수(예: 58대)와 현재 정상 작동 중인 장치 수 및 비활성 장치 수 등 설치된 IoT센서들의 가동 현황을 한눈에 볼 수 있도록 제공하며, 관리자는 그룹 선택과 상세 선택 기능을 통해 특정 작업장소 또는 구역 단위로 데이터를 필터링할 수 있다. 또한 온습도 현황을 그룹별로 집계하여 보여주는데, 온도 현황은 18도 이하, 19~23도, 24~27도, 28도 이상의 구간별로 장치 수를 집계하여 표시하며, 습도 현황은 40% 이하, 41~60%, 61~70%, 70% 이상으로 구분된 상대습도 범위에 따라 분류된 장치 수를 제공하였다.

개별 센서의 사용자 인터페이스에서도 온열질환 환경 데이터를 기반으로 산출된 체감온도와 위험도 판별 기준에 따른 열사병 수준을 경고 아이콘을 이용해 직관적으로 제공하며, 관리자가 실시간으로 구역별 위험 상태를 판정하고 냉난방기 제어 또는 온열질환 위험 알람을 적시에 수행할 수 있도록 지원하였다.



[Fig. 6] Dash-board of Korean system

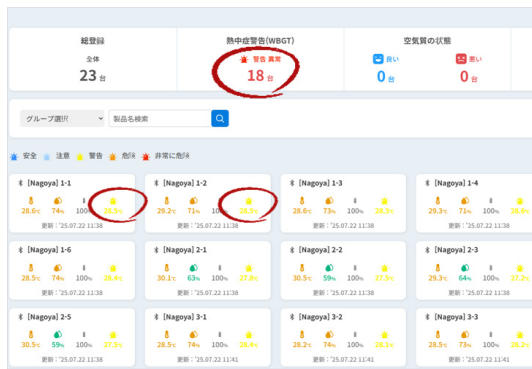
4.2 일본 물류센터 실증

일본의 경우 WBGT를 열스트레스 지수로 사용하고 있으며, 습구/건구 온도계 사용이 어려운 경우 일반적인 온습도계의 측정값을 활용한 간이 추정식으로 WBGT 지수를 산출할 수 있다. 이를 착안하여 일본에서는 나고야에 위치한 물류센터 건물 내부에 폭염위험 장소 23개소를 선정하고 각 위치에 IoT 온/습도 센서를 설치하고 WBGT 지수를 산출하여 시스템의 효용성을 검증하였다[그림7].



[Fig. 7] IoT Device in Warehouse

공간이 매우 넓고 적치물이 곳곳에 산재되어있으며 수시로 물건이 입출하되는 물류센터의 특성상 대체로 매우 덥고 습했으며 온열질환 위험도 매우 높다고 볼 수 있다. 때문에 전체 현황을 보여주는 대시보드에서는 총 등록 장치 수와 WBGT 지수가 기준을 넘어서는 열사병 위험 장소의 센서 대수를 바로 보여주도록 인터페이스를 제공하였다[그림8].



[Fig. 8] Dash-board of Japan system

WBG7 지수 기반 열사병 위험 수준은 안전, 주의, 경고, 위험, 매우위험으로 분류되는데, 실증 장소인 물류센터에서는 경고 이상에 속하는 경우 위험 장소로 인식하여 이들 위치 센서 수를 표시함으로써 관리자가 즉시 위험 상태를 파악할 수 있도록 하였다. 이는 온열질환 예방과 안전 관리의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있었다.

5. 결론

지구온난화와 도시 열섬현상으로 인해 산업현장에서도 폭염 위험이 급격히 높아지고 있다. 특히 제조업 생산현장, 건축현장, 물류창고, 지하주차장 등 폐쇄적이거나 환기가 제한된 작업공간에서는 공기 온도뿐 아니라 복사열, 습도, 공기정체 등 복합적인 요인으로 인해 열사병과 같은 온열질환 위험이 매우 높고 실제 사고도 빈번히 발생하고 있다.

본 연구는 지구온난화와 도시 열섬현상으로 인해 폭염 위험이 급격히 높아진 산업현장, 특히 제조업 생산현장, 건축현장, 물류창고, 지하주차장 등과 같은 실내 작업 현장에서의 온열질환 관리를 위한 공기질 측정 및 냉난방 공조 시스템 제어를 위한 공기질 IoT 센서 시스템을 구현하고 국내 제조업 생산 현장과 일본 물류센터에서 이를 실증하였다. 제안 시스템은 실증 현장에 설치된 IoT 센서를 통해 계속된 온습도 데이터를 기반으로, 국내에서는 체감온도를 기반으로 일본에서는 WBG7 지수를 산출하여 온열질환이 유발될 수 있는 위험 상황이 되면 이를 즉시 식별하여 경고하고, 연동된 냉난방 에어컨을 자동으로 작동 및 설정 온도를 제어할 수 있도록 시스템을 구현하고 정상적인 시스템 구동을 실증하였다.

이는 기존 연구들이 주로 WBG7 또는 체감온도와 같

은 온열지수의 모니터링, 실내 환경 계측, 또는 HVAC 개별 제어 알고리즘에 초점을 두었다면, 본 연구는 (1) 산업현장에 특화된 온열질환 예방 목적의 실시간 위험 판단 체계 구축, (2) 위험 등급에 연동된 자동 HVAC 제어 로직 구현, (3) 국내(체감온도)와 일본(WBG7) 현장에 적용한 실증 기반 비교 운용 사례 제시라는 점에서 차별성을 가진다.

그러나 본 제안 시스템이 개발되고 실증에 적용된 시점과 가동 기한이 길지 않아 여름 시즌의 열사병 위험 예측과 진단을 충분히 검증하지 못하였고, 일본의 경우 일본 기상청의 외부 기상 데이터를 시스템에 활용하지 못하였으며 일본의 에어컨 IR프로토콜이 상이하여 실증 현장의 에어컨을 제어하는 연동 테스트는 수행하지 못하였다. 나아가 온열질환 예방관제를 위한 에어컨 제어가 열사병 위험 감소뿐만 아니라 에어컨 최적 제어를 통한 에너지 절감까지 얻을 수 있다는 부수적 효과까지는 연구를 진행하지 못하였다.

그리고 산업현장의 고온·고습 환경에서는 IoT 센서 모듈이 허용 동작 온도 범위를 초과할 가능성이 있으며, 장시간 50℃ 이상의 환경에 노출될 경우 측정 오차 증가, 드리프트 발생, 부품 열화 또는 통신 불안정이 발생할 수 있다. 또한 WBG7 또는 체감온도 산출은 입력 기상 변수의 정확도에 의존하므로, 센서 노이즈, 일시적 통신 장애, 데이터 누락이 발생하면 위험 판단의 신뢰도가 저하될 수 있으며, 극한 환경에서는 오차 가능성이 존재한다. 아울러 산업현장 내 이기종 HVAC 설비 간 제조사별 통신 프로토콜 차이로 인해 연동에 제약이 있으며, 일부 구형 설비의 경우 자동 제어 인터페이스 또는 외부 API 연동이 제한되어 완전 자동화 대신 경보 기반의 수동 개입 방식으로 운용될 수 있다.

또한 본 연구는 산업 현장 실증을 통해 시스템의 적용 가능성을 확인하였으나, 실험을 통한 수치적인 성능 지표(KPI)의 제시와 분석은 제한적으로 수행되었다. 그러므로 향후 연구에서는 장기간 축적 데이터를 기반으로 위험 노출 시간 감소율, 에너지 절감률, 경보 정확도 등 정량 지표를 체계적으로 분석할 필요가 있으며, 이러한 미진한 부분을 보완할 수 있는 실증 환경과 시스템 구축을 개선하고자 한다.

REFERENCES

[1] C.Park, "The Impact of Climate Change on Hourly

WBGT and Working Capacity,” JRM, Vol 34, No. 2, 1~13, 2023.

[2] Ministry of Employment and Labor (MOEL), Rules on Occupational Safety and Health Standards.

[3] Mandatory Prevention of Heat-Related Illnesses during Heatwaves at Construction Sites, <https://biz.heraldcorp.com/article/10541689?ref=naver>

[4] Y.Shin, “A Legal Study on Japan’s Occupational Heat Illness Prevention for Workers under Heatwaves: Focusing on the 2025 Amendment of the Industrial Safety and Health Regulations and the WBGT-Based Multi-Layer,” Journal of the Society of Disaster Information Vol. 21, No. 3, pp. 759-767, 2025.

[5] M.K.R.Bagsiraj, S.R.Narwade, K.S.Pirjade, and A.S.N. Husainy, “A Review on Applications of IoT in Heating, Ventilation, Air Conditioning and its Control,” Asian Review of Mechanical Engineering, Vol 10, No. 2, pp. 1-3, 2021.

[6] H.B. Jo, J.S. Lee, S.K. Kim, and H.K. Park, “IoT-based Indoor Environment Control and Energy Consumption Optimization System,” Journal of KIECS, Vol. 20, No. 1, pp. 43-50, 2025.

[7] A.Morteza, H.K.Nazari and P.Pahlevani, “An IoT Framework for Building Energy Optimization Using Machine Learning-based MPC,” arXiv, 2024 arXiv.2408.13294.

[8] Y.S.Kim, “Legacy Air-Conditioner Control AIoT System for Energy Saving of the Public Office,” Journal of Internet of Things and Convergence, Vol. 11, No. 5, pp. 131-137, 2025.

[9] T.W.Tsang, K.W.Mui, L.T.Wong, A.C.-Y.Chan, and R.C.-W.Chan, “Real-Time Indoor Environmental Quality (IEQ) Monitoring Using an IoT-Based Wireless Sensing Network,” Sensors, Vol 24, No 21, 6850, 2024.

[10] P. Michailidis, P. Pelitaris, C. Korkas, I. Michailidis, S. Baldi and E. Kosmatopoulos, “Enabling Optimal Energy Management with Minimal IoT Requirements: A Legacy A/C Case Study,” Energies, Vol 14, No. 23: 7910., 2021.

[11] W.S.Yun, W.T.Ryu, H.C.Seo, W.H.Hong and S.W.Lee, “IoT-Based Indoor Thermal Environment and Occupancy Monitoring for Energy Poverty Care,” Energies, Vol 17, No.2, 326, 2024.

[12] Y.S.Kim, C.Y.Moon, S.D.Lee, M.J.Cho and Y.S.Shin, “Machine Learning Based Multi-IoT Sensor Solution for Occupancy Detection and Smart Energy Saving in University Campuses,” Proceedings of the Korean Institute of Information Technology conference, 2024.

[13] W.H.Choi, I.C.Kang and C.S.Kim, “A Study on Energy Saving and Safety Improvement through IoT Sensor Monitoring in Smart Factory,” Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 20, No. 1, pp. 117-127, 2024.

[14] I.R.Numonov, B.Peng, Y.Li, Y.Z.H.Ugli, T.O.Lee,

T.K.Kim, “Development of an AI-Based Energy Management System for Factory Power Saving,” Journal of Internet of Things and Convergence, Vol. 10, No. 6, pp. 49-55, 2024.

[15] H.Wei, Y.H.Kim, D.H.Jang and H.K.Jung, “Greenhouse Monitoring System Based on IoT,” JKCA, Vol. 24, No. 8, pp. 9-17, 2024.

김 유 신(Yoosin Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 국민대학교 정보관리학과 졸업
- 2013년 2월 : 국민대학교 비즈니스 IT전문대학원 졸업
- 2014년 3월 ~ 2015년 9월 : 텍사스주립대(UTA) 연구원

- 2018년 7월 ~ 2020년 12월 : 알티캐스트 데이터사업부 문장
- 2021년 1월 ~ 현재 : 에어딥 Founder/CEO
- 2024년 9월 ~ 현재 : 한신대학교 AI-SW대학 빅데이터융합학과 교수

<관심분야>

빅데이터, 인공지능(AI), 지능형 사물인터넷(IoT)