

# 공동구 내 결로 예방을 위한 경고 알고리즘 및 모니터링 시스템 개발

최상일<sup>1</sup> · 김정훈<sup>2</sup> · 공석민<sup>3</sup> · 변요셉<sup>4</sup> · 이성원<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 대구가톨릭대학교 컴퓨터소프트웨어학부 조교수

<sup>2</sup>비회원, 대구가톨릭대학교 컴퓨터소프트웨어학부 조교수

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 박사후연구원

<sup>4</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원

<sup>5</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구위원

## Development of a warning algorithm and monitoring system for preventing condensation in utility tunnels

Sang-Il Choi<sup>1</sup> · Jung-Hun Kim<sup>2</sup> · Suk-Min Kong<sup>3</sup> · Yoseph Byun<sup>4</sup> · Seong-Won Lee<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, School of Computer Software, Daegu Catholic University

<sup>2</sup>Assistant Professor, School of Computer Software, Daegu Catholic University

<sup>3</sup>Post-Doctoral Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>4</sup>Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>5</sup>Senior Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*Corresponding Author : Seong-Won Lee, swlee@kict.re.kr

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
26(5)551-561(2024)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.5.551>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 21, 2024

Revised September 3, 2024

Accepted September 3, 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

### Abstract

Underground utility tunnels are spaces densely packed with various infrastructure facilities, such as power, telecommunications, and water supply and drainage systems, making internal environment management crucial. An investigation into accident cases and on-site demands in these tunnels revealed that while fires and floods are the most common types of incidents, the demand for real-time condensation prevention and response is frequent according to on-site managers. Condensation occurs due to the difference in humidity and temperature between the inside and outside of the tunnel. Frequent or prolonged condensation can lead to metal pipe corrosion, electrical failures, and reduced equipment lifespan. Therefore, this study developed a control algorithm and monitoring system to prevent condensation in underground utility tunnels. The proposed control algorithm estimates the likelihood of condensation in real-time based on the measured temperature and humidity and suggests appropriate responses for each stage to the managers. Finally, a practical condensation prevention monitoring system was built based on the developed algorithm, verifying the feasibility and applicability of this technology in the field.

**Keywords:** Utility tunnel, Condensation prevention, Warning algorithm, Monitoring system

## 초 록

지하 공동구는 전력, 통신, 상하수도 등 다양한 인프라 시설이 밀집해 있는 공간으로, 내부 환경 관리가 매우 중요하다. 공동구에서 발생한 사고 사례 및 현장 요구를 조사한 결과, 가장 많이 발생하는 사고 형태는 화재 및 침수였지만, 실제 공동구에서 근무하는 현장 관리자들의 의견에 따르면 실시간 결로 예방 및 대응에 대한 요구가 빈번한 것으로 확인되었다. 결로 현상은 공동구 내부 습도와 내부 및 외부의 온도 차이로 인해 발생하며, 빈번하게 발생하거나 장시간 지속될 경우 금속관로 부식, 전기적 고장, 장비 수명 단축 등의 문제를 야기할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 지하 공동구 내 결로 생성을 방지하기 위한 경고 알고리즘 및 모니터링 시스템을 개발하였다. 제안된 경고 알고리즘은 실시간으로 측정되는 온도와 습도를 바탕으로 결로 발생 가능성을 추정하고, 각 단계에 따른 관리자의 대응 방식을 제안한다. 마지막으로, 개발된 알고리즘을 바탕으로 실제 구동 가능한 결로 예방 모니터링 시스템을 구축하여, 해당 기술의 현장 적용 가능성과 활용성을 검증하였다.

**주요어:** 공동구, 결로 예방, 경고 알고리즘, 모니터링 시스템

## 1. 서론

지하 공동구는 전력, 통신, 상하수도 등 다양한 인프라 시설이 밀집해 있는 중요한 공간으로, 이러한 인프라의 원활한 운영을 위해 내부 환경 관리가 매우 중요하다. 지하 공동구는 지면 아래에 위치해 있어 지하수나 비가 스며들 가능성이 높고, 외부 환경과의 차단으로 인해 환기가 제한된다. 이러한 조건들은 내부의 습도와 온도 변화를 크게 만든다. 예를 들어, Fig. 1과 같이 여름철 외부의 고온 다습한 공기가 유입되면 지하 공동구 내부의 상대적으로 낮은 온도와 만나 결로가 발생할 수 있고, 반대로 겨울철에는 내부의 습한 공기가 외부의 낮은 온도와 접촉하면서 결로를 유발할 수 있다. 이처럼 공동구 외부 환경의 변화는 결로 현상을 초래할 수 있고, 이러한 결로 현상은 금속 구조물의 부식 촉진, 전기적 장비의 오작동, 장비 수명 단축 등 다양한 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 문제는



Fig. 1. Condensation inside utility tunnels

전력 및 통신 공급 중단, 관로 손상으로 인한 누수, 누전으로 인한 화재, 등 더욱 큰 재난으로 이어질 수 있으므로 결로 문제를 사전에 예측하고 대응함으로써 예방하는 것은 공동구 관리에 있어 필수적으로 요구된다(Park et al., 2022; Tai et al., 2022; Kim et al., 2023; Ma et al., 2023).

이러한 내용을 증명하듯, 공동구에서 발생한 사고 사례 및 현장 요구 조사 결과를 확인해보면, 가장 많이 발생한 사고 유형은 화재와 침수이지만(Ko, 2015; Bai et al., 2020; Jung et al., 2021; Chen et al., 2023), 실제 공동구에서 근무하는 현장 관리자들의 설문조사 의견에 따르면 실시간 결로 예방 및 대응에 대한 요구가 많이 있는 것으로 확인된다(Yoon et al., 2014). 현재 많은 현장에서는 팬을 통해 공기를 순환하는 환기 시스템 방식을 활용하고 있지만, 결로 발생에 대한 현재 상태의 가능성 및 긴급성을 고려하지 못하기 때문에 긴 시간 지속적으로 운용될 수밖에 없고, 그 결과 높은 에너지 소비 및 환기 팬 과부하의 한계, 등 다양한 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 각 공동구 별 상이한 계측 장치에 독립적으로 운영 가능한 효율적인 공동구 내 결로 예방을 위해서는 결로 대응에 대한 명확한 데이터 기반 알고리즘 및 실시간 모니터링 기술의 적용이 필요하다.

Park (2009)은 서울시 6개의 공동구 결로 현황을 조사하였으며, 난방관을 수용하는 공동구의 경우 결로 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 이를 바탕으로 공동구 결로 상습 구간의 현장데이터를 분석하고 여름철 결로 상습 구간의 상대습도를 20% 저감시켜 결로 발생을 감소시키는 방안을 모색하였다. Yoon et al. (2014)은 공동구의 내부의 온도와 습도를 측정하여 하절기에 비해 결로 발생 위험은 적지만 연구가 미흡한 가을철과 겨울철 공동구의 환경정보를 수집하고 결로 여부를 판단하였다. 연구를 통해 가을철과 겨울철 각각의 최고 온도와 온도 발생 위치를 측정하였으며, 환기시스템 운전 시 온도 감소 패턴을 확인하여 결로가 발생하지 않음을 판단하였다. Ma et al. (2023)은 지하 공동구에서의 환기가 온도 및 습도 환경에 미치는 영향에 대해 현장과 CFD (computational fluid dynamics) 해석을 통해 연구하였다. 공동구의 평균 온도와 습도를 측정하였고, 평균 상대 습도는 92.8%로 공동구 내부 센서에 악영향을 미치고 있음을 확인하였다. 또한 연구를 통해 공동구 입구 공기의 온도가 24°C에서 30°C 사이일 때, 습도 비율을 9.7 g/kg<sub>dry</sub> (주어진 공기의 총 질량에 대한 수증기의 질량 비율을 나타내는 단위로 9.7 g/kg<sub>dry</sub>는 건조 공기 내에 9.7 g의 수증기가 포함된 상태를 의미함) 이하로 유지하는 것이 최적이며, 습도 비율이 10.4 g/kg<sub>dry</sub> 초과인 경우 환기를 중단해야 함을 연구하였다. 이와 같이 기존 연구는 현장에서 측정한 온도, 습도 데이터를 바탕으로 결로 및 습도가 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 온도, 습도 조절을 통해 결로를 예방하는 방안을 제안하였다. 하지만 현장에서 매번 온도와 습도를 계산하여 결로 발생을 사전에 판단하고 제어장치를 가동하는 것은 현실적으로 쉽지 않다. 따라서 현장의 편의성을 높이기 위해 본 연구에서는 지하 공동구 내 결로 생성을 방지하기 위한 경고 알고리즘 및 모니터링 시스템을 제안하고자 한다. 먼저, 실시간으로 측정되는 지하 공동구의 온도와 습도 정보를 바탕으로 결로 발생 가능성을 시설 관리자에게 시사하고, 각 상황에 맞는 최적의 환기 및 제습 절차를 수행할 수 있도록 경고 알고리즘을 설계하였다. 이를 통해, 결로 발생을 사전에 방지하고, 에너지 소비 및 팬 부하 측면에서 기존의 지속적 환기 장치 운용보다 높은 효율성을 보유할 수 있다.

마지막으로, 제안 알고리즘의 현장 적용 가능성을 검증하기 위해 공동구 내 결로 예방을 위한 모니터링 시스템의 프로토타입을 개발하고 활용해본 결과, 결로 발생 가능성에 대한 지속적인 확인, 시설 관리자에게 현 시점에서

의 결로 발생 가능성 알림, 대응 방안 수립, 결로 대응 단계 조정, 등의 기능이 포함된 본 연구 결과물이 향후 공동구 통합 모니터링 시스템으로의 흡수 혹은 개별 관리 시스템으로 활용이 될 경우, 지속적인 환기 시설의 운용이 아닌 결로 발생 가능성이 높아진 시기에 일시적으로 환기 시설을 운용하여 환기 시간의 최적화를 이끌어냄으로써 전력 효율성이 향상된 공동구 내부 환경 관리에 기여할 수 있을 것이다.

## 2. 결로 생성 방지를 위한 대응 단계 수립

결로는 공동구 내에서 발생하는 타 재해/재난인 화재 및 침수처럼 짧은 시간 내에 큰 위험 요인으로 발전하여 큰 인명 피해를 일으키는 요인이 아닌, 긴 시간 동안 노출될 경우 관 부식으로 인한 누수 및 침수, 전력선에서의 누전 및 감전, 내부 시설물 내구연한 감소, 등의 문제를 일으킬 수 있으므로 지속적인 상태 관리를 통해 2차 사고가 발생하지 않도록 조정 및 관리가 필요한 요소로 구분된다. 본 연구에서는 결로가 발생하지 않는 효율적인 환경 유지를 1차 목표로 설정하고, 혹여 외부적 혹은 내부적 요인으로 인해 결로가 발생할 경우, 최대한 빠른 시간 안에 결로를 제거하여 쾌적한 공동구 내 환경을 유지할 수 있는 형태로 공동구 시설 관리자의 대응 방안 및 경고 알고리즘을 설정하고자 한다. 따라서, 기존 타 연구에서 적용된 화재 및 침수 위기 경보단계로 적용된 4단계가 아닌, Table 1과 같이 심각 단계를 제외한 3단계로의 관리 방안을 제안한다(Seo et al., 2019). 본 연구에서 제외한 심각 단계는 화재 상황에서 고온의 화염과 염화수소, 에틸렌, 일산화탄소와 같은 다량의 유해 가스가 방출되어 즉각적인 작업자의 대피 및 외부 유관 기관으로의 전파를 통한 재난 대응 본부 설립, 등의 대응이 수행되는 단계로, 결로 발생에 따른 타 위험 요인의 발생이 아닌 이상 결로 자체만으로는 유효하지 않은 단계이므로 이상상태 대응 단계에서 생략되었다.

**Table 1.** Factors for detecting abnormal conditions and response measures by stage

Type	Abnormal condition	Detectable devices	Mitigation plan
Interest (blue)	<ul style="list-style-type: none"> <li>The stage where the difference between the calculated dew point temperature and the dry-bulb temperature is narrowed with in the pre-established “Interest” range for the utility tunnel</li> </ul>	Temperature and humidity sensor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Response executed based on the pre-established interest level response manual</li> </ul>
Caution (yellow)	<ul style="list-style-type: none"> <li>The stage where the difference between the calculated dew point temperature and the dry-bulb temperature is narrowed with in the pre-established “Caution” range for the utility tunnel</li> </ul>	Temperature and humidity sensor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Response executed based on the pre-established caution level response manual</li> </ul>
Alert (orange)	<ul style="list-style-type: none"> <li>The stage where the calculated dew point temperature is equal to or higher than the dry-bulb temperature, causing condensation to start forming on the surfaces of structures and facilities</li> <li>The period during which condensation continues to occur on the surfaces of structures and facilities</li> </ul>	Temperature and humidity sensor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perform ventilation to expel humid air from the utility tunnel</li> <li>Operate heating, cooling, and air circulation systems to adjust the dry-bulb temperature</li> </ul>

먼저 결로의 단계별 이상 상태 요인을 정의하기 전에, 결로 발생 가능성에 대한 사전 파악을 수행함으로써 현재 시점을 기준으로 향후 결로가 발생할 수 있는 위험 요인이 있는지, 결로가 발생할 가능성이 생겼다면 어느 정도의 대비 시간이 있는지, 결로 발생을 저지하기 위해서는 어떤 절차를 수행해야 하는지에 대한 명확한 데이터 확보가 필요하다. 이를 위해, 본 연구에서는 상대 습도와 온도를 바탕으로 결로 발생 시점 온도를 연산하는 Magnus-Tetens 식을 활용하여 결로 발생 위험 단계를 구분하고자 한다(Murray, 1967). 해당 수식에서는 노점온도(습공기가 냉각되어 응축된 수증기가 표면에 이슬로 맺혀 결로가 발생하는 시점의 온도)를 건구온도(외부 노출된 센서를 통해 획득되는 현재 온도)와 상대습도 정보를 바탕으로 도출하였고, 이를 통해 본 연구에서 주요하게 활용되는 현재 상대 습도 상태에서 결로가 발생하기까지 어느 정도의 온도 여유를 가지고 있는지에 대한 정보를 확인할 수 있다. Magnus-Tetent 수식을 통해 확인한 건구온도와 상대습도를 바탕으로 노점온도를 도출하는 절차는 아래와 같다.

$$e_s = 6.1078 \times \exp((17.2694 \times t_{air}) / ((237.3 + t_{air}))) \quad (1)$$

-  $e_s$  : 포화수증기분압(Pa),  $t_{air}$  : 건구온도(°C)

$$e_a = (RH/100) \times e_s \quad (2)$$

-  $e_a$  : 실제 수증기압(Pa),  $RH$  : 습공기의 상대습도,  $e_s$  : 포화수증기분압(Pa)

$$t_{dew} = (-237.3 \times \ln(e_a/6.1078)) / (\ln(e_a/6.1078) - 17.2674) \quad (3)$$

-  $t_{dew}$ : 노점온도(°C),  $e_a$ : 실제 수증기압(Pa)

위 수식을 바탕으로 노점온도( $t_{dew}$ )가 공동구 내 벽 혹은 천정과 같은 구조체 및 배관의 표면 온도( $t_{sur}$ )보다 같거나 높은 상태( $t_{dew} \geq t_{sur}$ )이면 표면 결로가 발생한다. 여기서 노점온도는 현재 공기 중 수분 함량을 수용할 수 있는 가장 낮은 온도로, 만약 노점온도보다 건구온도가 같거나 더 낮은 경우에는 현재 건구온도 시점에서 수용할 수 있는 공기 중 수분 함량이 현재 공기 중 수분 양보다 더 낮기 때문에 공기 중에 수용되지 못하고 포화되어 넘친 수분이 결로로 시설물 및 벽체에 생기게 되는 것이다.

위의 수식을 활용하여 현재 공동구 내의 건구온도와 상대습도를 활용해 결로가 발생하기 시작하는 노점온도를 도출할 수 있으므로 현재 상태에 대한 노점온도를 실시간으로 도출하고 노점온도와 건구온도의 간격이 좁아질 경우 내부 냉방 및 환기 장치 가동을 통해 결로 발생을 사전에 저지할 수 있다. Table 1은 실제 공동구 현장에서의 원활한 결로 생성 방지 대응을 위해 본 연구에서 제시하는 심각 단계를 제외한 3단계의 단계별 이상 상태 감지 요인 및 대응 방안을 나타낸다.

결로의 경우, 개별 공동구 내부 구조 및 인근 환경 요소의 차이로 관심, 주의, 경계 단계에 대한 대응 속도 및 결

로 저감 소요 시간이 크게 다를 수 있으므로 본 연구에서는 결로 예방을 위한 각 단계를 명시적으로 구분하지 않고, 현장의 상황에 따라 조정 가능한 ‘개별 현장에서 사전 설정한 노점온도와 건구온도의 차 범위’를 각 단계의 구분 요소로 적용하였다. 본 연구의 궁극적인 목적은 공동구 현장 내부에 결로가 발생하지 않도록 적절한 시기에 환기와 송풍 절차를 시작하는 것이므로, 개별 현장들의 환기를 통한 상대습도 변화와 송풍을 통한 건구온도 저감 수준을 바탕으로 관심 및 주의 단계에서 결로에 충분히 대응하여 경계 단계로 이상 상태 수준이 향상되는 것을 막을 수 있는 적절한 ‘노점온도와 건구온도의 차 범위’를 설정하는 것을 권장한다.

### 3. 이상 상태 단계 기반 결로 예방을 위한 관리자 대응 알고리즘

Fig. 2는 본 연구에서 공동구 내에서 측정된 건구온도와 상대습도를 활용하여 실시간으로 노점온도를 연산하고, 노점온도와 건구온도의 차이를 바탕으로 내부 냉방 및 환기 장치 가동 여부를 Table 1에서 정의한 3단계 이상

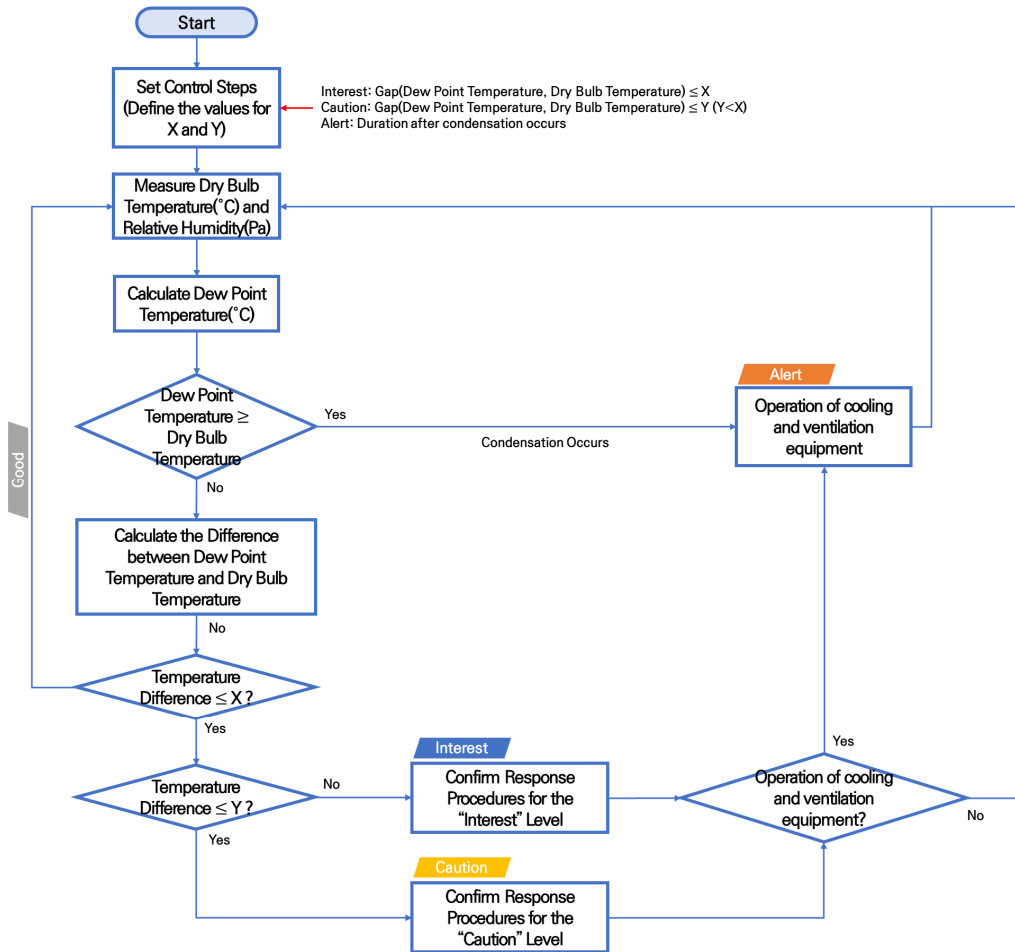


Fig. 2. Flowchart for condensation prediction algorithm using temperature and humidity

상태에 따라 구분하여 결로 예방에 기여하기 위한 관리자 대응 알고리즘 흐름도로, 제어 설정 단계에서 정의되는 X와 Y의 값은 관심 단계와 주의 단계에서 허용하는 노점온도와 건구온도의 온도차를 의미한다.

결로의 경우, 화재 및 침수와는 달리 지속적 관리가 매우 중요한 항목이기에, 본 연구의 예시와 같이 별도의 소프트웨어 혹은 공동구 관리 플랫폼 내의 서버 시스템으로 건구 온도, 상대 습도, 노점 온도를 상시 확인하며 결로 발생이 예상되는 경우, 사전 설정된 각 대응 단계에 따른 절차를 수행하는 반드시 요구된다.

#### 4. 공동구 내 결로 예방을 위한 모니터링 시스템 프로토타입 개발

다수의 현장에서 환기 팬을 활용한 공기 순환 환기 시스템 방식을 통해 결로 발생에 대비하고 있지만, 현재 상대 습도에 따른 결로 발생의 가능성 및 긴급성을 고려하지 못하기 때문에 긴 시간 지속적으로 환기 시스템을 운용할 수밖에 없고, 그 결과 높은 에너지 소비 및 환기 팬 과부하, 등 다양한 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 효율적인 공동구 내 결로 예방을 위해서는 결로 대응에 대한 명확한 알고리즘만큼 실시간 모니터링을 통한 대응 시스템의 적용이 필수적이다. 따라서, 본 연구에서 제안된 단계별 이상 상태에 따른 대응 방안 및 결로 발생 예측을 통한 내부 공조 장치 가동 여부 판단에 대한 절차도를 바탕으로 실제 공동구 관리 현장에서 활용할 수 있는 간략한 형태의 모니터링 프로토타입 시스템 개발을 수행하였다. 본 시스템의 개발에 반영된 요구사항은 다음과 같다.

- 간편하고 직관적인 관리를 위한 사용자 인터페이스(UI) 중심의 시스템
- 환경적 요소가 상이한 각 공동구별 상황 반영에 용이한 관심 단계 및 주의 단계 설정 기능
- 건구온도, 상대습도에 대한 간편한 게시와 손쉽고 지속적인 노점온도 계산 결과 확인 기능
- 건구온도와 노점온도의 차에 따른 현 시점 해당 공동구의 결로 관련 단계의 직관적인 확인
- 개별 온도 변동에 대한 손쉬운 검토, 등

위에서 고려한 요구사항을 바탕으로 개발된 본 연구의 공동구 내 결로 예방을 위한 모니터링 프로토타입 시스템은 아래의 개발 도구들을 활용하여 개발하였다.

- 사용 언어: Java (Java 21.0.2 2024-01-16 LTS version)
- 구현 도구: Visual Studio Code
- 사용자 인터페이스 구현을 위한 패키지: Java GUI (Swing & AWT)

Fig. 3은 위의 요구사항 및 개발 도구를 활용하여 개발된 시스템으로, 사전에 설정된 건구온도와 노점온도의 차이를 바탕으로 구분된 단계에 따라 서로 다른 결로 상황에 대한 메시지와 경고 메시지를 보여주는 모니터링 시스템의 화면이다. 수립된 요구사항에 따라 간편하고 직관적인 사용자 인터페이스를 보유하고 있고, 현재 온도와 상

대 습도, 예상 노점 온도를 명시적으로 나타냄으로써 관리자가 직관적으로 현재 온도의 노점 온도의 차를 통해 결로 발생이 가능한 온도차를 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 직관적인 현재 상태에 대한 확인을 위해 각 결로 단계 색깔에 맞게 경고 메시지를 표출하도록 화면 중앙에 공간을 두었으며, 지속적으로 노점온도가 상승하며 건구온도와 격차가 줄어들음을 명시적으로 관리자가 검토할 수 있도록 하단에 최근 측정된 20개의 건구온도와 연산된 노점온도를 그래프로 출력했다. 마지막으로, 각 현장의 상황에 맞게 관심 단계와 주의 단계에 대한 온도 설정을 할 수 있도록 온도 설정 버튼을 추가하였으며, 설정된 온도 정보를 손쉽게 확인할 수 있도록 시스템 좌측 하단에 명시적으로 설정된 온도 값들을 표기하였다.



Fig. 3. Prototype system for real-time monitoring and alerting of dew formation possibility using dry-bulb temperature and relative humidity



본 연구에서 개발한 공동구 내 결로 방지를 위한 모니터링 시스템을 활용할 경우, 결로 발생 가능성에 대한 지속적인 확인, 시설 관리자에게 현 시점에서의 결로 발생 가능성 알림, 대응 방안 수립, 결로 대응 단계 조정, 등의 기능들을 바탕으로 보다 직관적이고 편리한 결로 예방 및 방지를 수행하고, 측정 및 연산된 건구온도, 상대습도, 노점온도 데이터를 꾸준히 관리함으로써 향후 기온, 날씨, 계절, 등의 다양한 외부 원인 요소에 따른 결로 발생 가능성을 선제적으로 예측하고 사전 대응할 수 있는 형태로의 응용도 가능하다. 결과적으로, 연구 결과물이 향후 공동구 통합 모니터링 시스템으로의 흡수 혹은 개별 관리 시스템으로 활용이 될 경우, 효율적이고 안정적인 결로 발생 가능성에 대한 사전 확인 및 대비를 지원함으로써 더욱 경제적이고 최적화된 공동구 내부 환경 관리에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 지하 공동구 내 결로 발생을 효과적으로 방지하기 위한 경고 알고리즘 및 모니터링 시스템을 제안하였다. 지하 공동구는 전력, 통신, 상수도 등 다양한 인프라 시설이 밀집해 있는 중요한 공간으로, 내부 환경 관리는 이러한 인프라의 안정적인 운영에 필수적이다. 본 연구의 핵심은 실시간 온도와 습도 데이터를 기반으로 결로 발생 가능성을 정확히 예측하고, 이를 기반으로 최적의 환기 및 제습 절차를 자동으로 경고하는데 기여할 수 있는 관리 시스템을 제안하는 것이다.

제안된 시스템은 계절 및 시기에 관계없이 지하 공동구의 온도와 습도를 실시간으로 모니터링하며, 결로 발생의 가능성을 조기에 경고하여 시설 관리자에게 적시 대응을 가능하게 한다. 이는 결로로 인한 금속 구조물의 부식, 전기적 장비의 오작동, 장비 수명 단축 등의 문제를 사전에 예방할 수 있도록 도와준다. 또한, 기존의 지속적 환기 장치 활용 방법과 비교하여 에너지 소비 및 환기 팬 부하의 측면에서 높은 에너지 효율성을 제공할 수 있다.

또한, 본 연구에서 시연한 공동구 내 결로 방지를 위한 모니터링 프로토타입 시스템을 통해 결로 발생 가능성에 대한 지속적인 모니터링, 실시간 알림, 대응 방안 수립 및 단계 조정 등 다양한 기능이 사용자 가시성이 높은 형태로 복합적으로 운영될 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 시스템은 향후 지하 공동구의 통합 모니터링 시스템에 기능적으로 반영되거나 개별 관리 시스템으로 활용되며 현장 관리자가 요구하는 다양한 데이터를 보관할 수 있는 기능이 추가될 경우, 결로 발생 가능성을 효율적으로 관리하고 대비할 수 있는 강력한 도구가 될 것이며, 이로 인해 지하 공동구 내부 환경 관리를 더욱 경제적이고 최적화된 방식으로 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

추후 CFD (computational fluid dynamics) 해석을 활용하여 공기의 흐름과 결로 발생에 대한 분석을 실시할 계획이다. 또한 팬 또는 외부공기 유입 차단 시설과 같은 제어장치를 통해 결로 발생을 효과적으로 방지할 수 있는 방안을 찾아, 본 연구에서 개발한 모니터링 시스템과의 연계를 추진해 나갈 예정이며 결로 발생과 관련하여 외부 공기 유입 외 타 요인들에 대한 부분도 함께 분석할 계획이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 공동구 활성화를 위한 스마트 운영 및 성능개선 기술개발 사업(RS-2023-00245334)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 저자 기여도

최상일은 연구 개념 및 설계, 원고 작성을 하였고, 김정훈은 알고리즘 개발 및 소프트웨어 개발을 하였고, 공석민은 자료 분석 및 알고리즘 설계를 하였고, 변요셉은 이상 상태 대응 설계를 하였고, 이성원은 개념 설계 및 원고 검토를 하였다.

## References

1. Bai, Y., Zhou, R., Wu, J. (2020), "Hazard identification and analysis of urban utility tunnels in China", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 106, 103584.
2. Chen, Y., Li, X., Wang, W., Wu, G., Wang, L. (2023), "Risk assessment and prediction of underground utility tunnels based on Bayesian network: a case study in Beijing, China", *Journal of Circuits, Systems and Computers*, Vol. 32, No. 6, 2350096.
3. Jung, Y., Park, G.D., Yu, Y. (2021), "Development of a digital twin-based flood disaster support platform technology for underground utility tunnel", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 22, No. 4, pp. 15-22.
4. Kim, D.I., Lee, I.B., Jung, W.S., Lee, B.J. (2023), "Predicting internal environment of underground utility tunnel using machine learning model", *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 17, No. 4, pp. 181-192.
5. Ko, J. (2015), "Study on the fire risk prediction assessment due to deterioration contact of combustible cables in underground common utility tunnels", *Journal of Korea Society of Disaster Information*, Vol. 11, No. 1, pp. 135-147.
6. Ma, H., Zhou, X., Huang, J. (2023), "Effect of ventilation on thermal and humidity environment of the underground utility tunnel in the plum rain season in southern China: field measurement and CFD simulation", *Underground Space*, Vol. 13, pp. 301-315.
7. Murray, F.W. (1967), "On the computation of saturation vapor pressure", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 6, No. 1, pp. 203-204.
8. Park, J.W. (2009), A study on decrease of condensation for utility-pipe conduit, Master Thesis, University of Seoul, pp. 18-20.
9. Park, S.J., Lee, I.B., Lee, S.Y., Kim, J.G., Cho, J.H., Decano-Valentin, C., Choi, Y.B., Lee, M.H., Jeong, H.H., Yeo, U.H., Jung, W.S., Jeong, D.Y. (2022), "Air conditioning system design to reduce condensation in an underground utility tunnel using CFD", *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 116384-116401.

10. Seo, H., Choi, H., Lee, M.C., Song, C.G. (2019), “Establishing a risk assessment scenario for fire prevention and safety management in underground urban utility tunnels”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 1, pp. 241-248.
11. Tai, C., Tian, G., Lei, W. (2022), “Measurement of indoor environmental parameters and analysis of the condensation phenomenon in urban utility tunnels”, *Indoor and Built Environment*, Vol. 31, No. 4, pp. 1091-1106.
12. Yoon, D.W., Seong, N.C., Shin, D.C. (2014), “A study on determining dew condensation at the underground utility tunnel as measurement thermal condition”, *Journal of the Korean Society of Living Environment System*, Vol. 21, No. 6, pp. 1014-1022.