

공간 난방, 직사드라이, 제습 기능을 적용한 스마트 욕실 시스템의 CFD 기반 성능 평가

CFD-based Performance Evaluation of Smart Bathroom Systems with Space Heating, Direct Drying, and Dehumidification

김현수^{1,2}, 김정수³, 김지훈^{1,#}, 강성욱^{4,#}Hyun Soo Kim^{1,2}, Jung Su Kim³, Ji Hoon Kim^{1,#}, and Sung Wook Kang^{4,#}¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)² 한국생산기술연구원 극한공정제어그룹 (Extreme Process Control R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)³ 대전대학교 IT기계공학과 (Department of IT Mechanical Engineering, Daejin University)⁴ 창원대학교 스마트오션 모빌리티공학과 (Department of Smart Ocean Mobility Engineering, Changwon National University)

Corresponding Authors / E-mail: kimjh@pusan.ac.kr, TEL: +82-051-510-3031, ORCID: 0000-0003-1703-5720

E-mail: swkang@changwon.ac.kr, TEL: +82-055-213-3681, ORCID: 0000-0001-9334-0503

KEYWORDS: Smart bathroom system (스마트 욕실 시스템), CFD analysis (CFD 해석), Space heating (공간 난방), Direct drying (직사드라이), Dehumidification (제습)

This study presents results of Computational fluid dynamics (CFD) analysis conducted to evaluate performances of various functional products developed for smart bathroom systems. The primary objective was to analyze the efficiency of space heating, direct drying, and dehumidification functions in a winter bathroom environment. Representative bathroom models in South Korea were selected and detailed CFD simulations were performed on these models. Results showed that bathtub models exhibited higher efficiency overall in space heating and dehumidification than shower booth models. This was attributed to differences in bathroom structure and internal air flow. Additionally, the direct drying function showed higher efficiency in bathtub models, determined by the placement of air outlets and inlets. This study provides essential foundational data that can contribute to the design and enhancement of smart bathroom systems' functionality, offering valuable insights for the development of optimized smart bathroom products.

Manuscript received: October 27, 2024 / Revised: January 31, 2025 / Accepted: February 5, 2025

NOMENCLATURE

n_{air} = Air Density
 P = Pressure
 R = Specific Gas Constant for Dry Air
 T = Temperature
 T_D = Dew Point Temperature
 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ = Partial Pressure of Water Vapor (in hPa)
 e = Vapor Pressure, which refers to the partial pressure exerted by water vapor in the air

$X_{\text{H}_2\text{O}}$ = Volume Mixing Ratio of Water Vapor
 $M_{\text{H}_2\text{O}}$ = Molar Mass of Water (in g/mol)
 M_{dry} = Molar Mass of Dry Air (in g/mol)
 q = Specific Humidity (Ratio of Water Vapor to Air Mass)
 mmv = Mass Mixing Ratio
 $C_{\text{H}_2\text{O}}$ = Mass Concentration of Water Vapor (in g/m³)
 H_2O = Molecular Concentration of Water Vapor of Water Vapor (in molecules per cubic meter)

1. 서론

최근 몇 년간의 급격한 사회적, 기술적 변화는 우리의 생활 방식뿐만 아니라 주거 공간의 설계와 사용에도 큰 영향을 미치고 있다. 특히 COVID-19 팬데믹을 겪으면서 많은 사람들이 집에서 보내는 시간이 증가함에 따라 주거 환경에 대한 관심이 더욱 높아졌으며, 욕실은 이제 단순 위생을 유지하는 공간에서 사용자의 건강과 심리적 안정에 중요한 역할을 하는 다기능 공간으로 재조명되고 있다[1]. 이러한 변화는 기술의 발전과 맞물려, 스마트 욕실 시스템이라는 새로운 개념으로 구체화되고 있다. 국내외에서 스마트 욕실 시스템에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 일본의 TOTO사는 자동 변기, 샤워 시스템과 같은 첨단 제품으로 시장을 선도하며, 욕실 내에서의 사용자 경험을 향상시키기 위한 다양한 기술들을 상용화하였다. 미국의 Kohler와 독일의 Grohe 또한 IoT 기반 욕실 시스템을 개발하여, 사용자 맞춤형 온도 제어, 습도 관리, 그리고 음성 인식 기술을 접목한 욕실 솔루션을 제시하고 있다. 반면, 국내에서는 삼성전자와 LG전자가 스마트 홈 기술과 연계한 욕실 환경 제어 기술을 일부 제품에 적용하고 있지만, 욕실 환경 전체를 아우르는 통합적인 시스템에 대한 연구는 상대적으로 부족한 상황이다. 이러한 점에서 본 연구는 국내 아파트 환경을 기반으로 스마트 욕실 시스템의 최적화를 연구한 사례로, 차별성과 신규성을 가지며 실용적인 가치를 제시할 수 있다. 스마트 욕실 시스템은 첨단 기술을 활용해 사용자에게 최적의 환경을 제공하는 혁신적인 시스템이다. 이러한 시스템은 공간 난방, 제습, 직사드라이 기능을 통합하여 사용자의 편의성과 건강을 증진시키고 있다. 공간 난방의 기능은 온도를 신속히 조절하여 쾌적한 환경을 유지하고, 제습 기능은 곰팡이와 세균의 성장을 억제하며, 직사드라이 기능은 샤워 후 물기를 빠르게 제거하여 편리함을 제공한다[2]. 이러한 기능들은 욕실을 단순한 사용 공간에서 벗어나, 개인의 건강과 웰빙을 촉진하는 중요한 생활 공간으로 변모시키는 역할을 하고 있다. 다시 말하면, 스마트 욕실 시스템의 발전은 단순히 편의성을 제공하는 것을 넘어서, 주거 환경의 혁신을 이끄는 중요한 요소로 자리잡고 있는 것이다. 스마트 욕실 시스템은 다양한 공조 및 환기 기술을 통해 실내 환경을 최적화하고, 사용자 맞춤형 서비스를 제공할 수 있는 잠재력을 가지고 있다[3]. 예를 들면, 욕실의 환기 시스템은 실내 공기의 순환을 원활하게 하여 습기와 냄새를 효과적으로 제거하고, 실내 공기의 질을 개선하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 기술적 발전은 기존 욕실이 가진 한계를 극복하고, 사용자의 경험을 중심으로 한 혁신적인 공간으로 재탄생 시키는 데 기여하고 있다고 볼 수 있다. 특히, 욕실 공간은 주거 공간 내에서 가장 극적으로 온도와 습도 변화를 경험하는 곳 중 하나로, 이러한 환경 변화는 사용자의 건강과 안전에 직접적인 영향을 미칠 수 있다[4]. 스마트 욕실 시스템은 이러한 문제를 해결하기 위해 설계되었으며, 사용자의 다양한 요구에 부응하는 맞춤형 환경을 제공하도록 설계되었다. 이는 단순한 기술적 혁신에 그치는 것이 아니라, 사용자의

건강과 안전을 보호하고, 보다 쾌적한 생활 환경을 조성하는 데 중점을 두고 있다. 스마트 욕실 시스템의 개발 과정에서 중요한 과제는 이러한 기능들을 최적화하고 통합화 하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석을 활용하여 스마트 욕실 시스템의 주요 기능인 공간 난방, 제습, 직사드라이 기능의 성능을 평가하고, 각 기능의 효율성을 분석하였다[5]. 스마트 욕실 시스템의 실제 사용 환경 내 작동 방식과 각 기능 간 상호작용을 규명하는 데 중점을 두었다. 또한, 국내 아파트의 화장실 면적(3-5 m²)을 적용한 후 Bath tub-Type Model 2개와 Shower Booth-Type Model 2개(총 4개)를 생성하여 CFD 시뮬레이션을 수행하였다. CFD 해석을 통해 각 모델의 성능 차이를 규명하고 최적의 환경 제어를 위한 설계 지침을 도출하는 것을 목표로 하였다. 이는 사용자 맞춤형 욕실 환경 구현에 필요한 중요한 기초 자료를 제공하며, 향후 스마트 욕실 시스템의 발전 방향을 제시하는 데 기여할 것이다.

스마트 욕실 시스템의 성능 평가와 최적화 방안은 현대 주거 환경에서 욕실 공간의 역할과 중요성을 재조명하고, 보다 쾌적하고 안전한 생활 공간을 구현하는 데 기초 자료로 활용될 것이다[6,7]. 본 연구에서 제시한 성능 평가와 최적화 방안은 이러한 요구를 충족시키는 데 기여하며, 향후 스마트 욕실 시스템의 개발과 적용에 중요한 기반을 제공할 것으로 기대된다.

이를 통해 사용자들의 생활의 질이 향상되고, 새로운 주거 문화가 정착될 것이다. 나아가, 새로운 스마트 욕실 시스템을 통해 주거 공간의 새로운 패러다임을 제시하고자 한다.

2. CFD 기반 스마트 욕실 시스템의 성능 평가

2.1 스마트 욕실 시스템 성능 평가 개요

스마트 욕실 시스템의 성능을 평가하기 위해, 제품 설치 가용 공간의 선정이 필수적이다. 국내 화장실의 배관 구조는 층상 배관과 층하 배관(이중 배관, 벽면 배관)으로 구분된다. 층하 배관의 경우 층간 소음 및 비위생적 문제로 인해 최근에는 거의 사용되지 않고 있으며, 대신 신축 아파트에서는 이중 배관과 벽면 배관이 주로 사용되고 있는 추세다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 국내 화장실의 평균 천장 높이와 배관 구조를 고려하여 기능성 욕실 전자제품의 설치 가용 위치를 선정하였다. 해당 설치 위치는 Fig. 1에 제시되어 있다.

스마트 욕실 시스템 환경 구축을 목표로, 본 스마트 욕실 시스템의 성능 평가를 위해 본 연구에서는 CFD 해석을 활용하였다. 연구의 목표는 스마트 욕실 시스템 환경 구축을 위해 코어 하드웨어 개발을 중심으로 진행되었으며, 이를 기반으로 상위 하드웨어, 편의 기능, 상호작용 AI 및 AI 빅데이터를 구현하여 최종적으로 통합된 스마트 욕실 시스템을 개발하는 것이다. 스마트 욕실 시스템은 공간 난방, 제습, 직사드라이 기능을 포함한 다양한 첨단 기능을 통해 사용자의 편의성과 건강 증진을 목표로 한다. 각 기능의 효율성을 평가하기 위해, 본 연구에서는

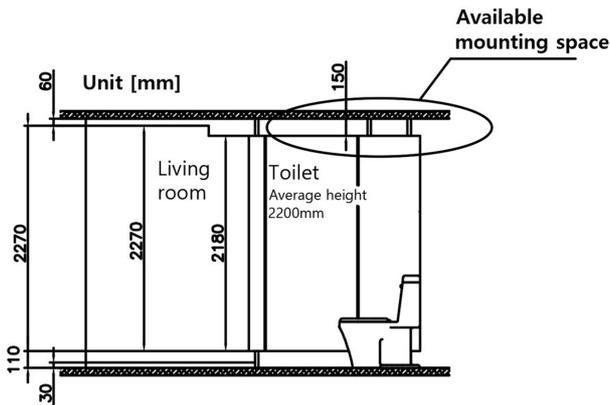


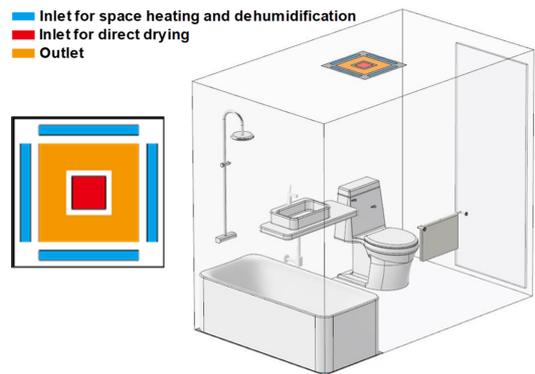
Fig. 1 Product installation space according to ceiling height and structure of domestic bathrooms

욕실 환경 내 열전달, 공기 흐름, 그리고 습도 변화를 시뮬레이션 하였다. 이 과정은 스마트 욕실 시스템의 동작 메커니즘을 명확히 이해하고, 각 기능의 성능을 정량적으로 분석하기 위한 중요한 기반이 된다. 이를 통해, 최적의 환경 제어를 위한 스마트 욕실 시스템의 성능을 평가하고, 각 기능이 실제 사용 환경에서 어떻게 상호작용하는지를 규명하고자 하였다.

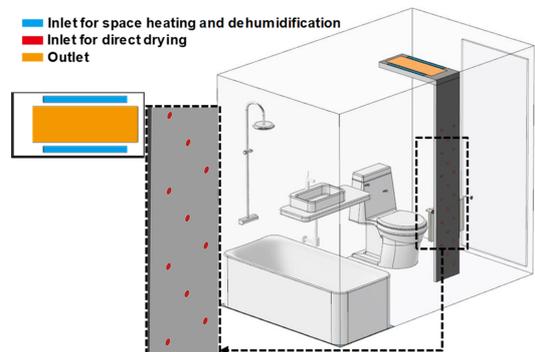
본 연구에서는 스마트 욕실 시스템의 각 기능별 성능을 평가하기 위해 비정상 상태 해석(Transient Analysis)을 수행하였다. 시간에 따라 변화하는 물리적 현상을 정확히 반영하기 위해 Time Scale을 1초 간격(Time Step)으로 설정하였다. 해석 조건으로는 공간 난방 및 직사 드라이에 대해 50초, 제습에 대해서는 100초간의 시뮬레이션 시간을 적용하였다. 이러한 설정을 통해 각 기능의 시간에 따른 공기 흐름, 열전달 특성, 그리고 습도 변화를 정량적으로 평가하였다.

2.2 CFD 해석 모델 및 유체 물성

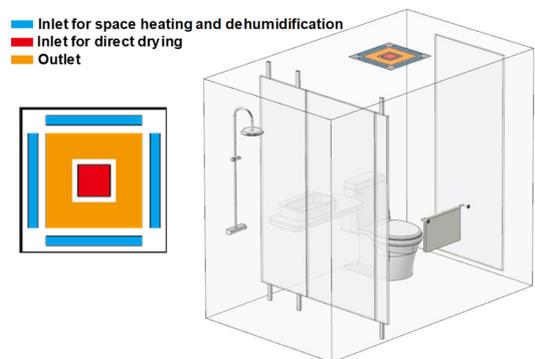
스마트 욕실 시스템의 성능 평가를 위해, 한국의 주거 환경에서 흔히 볼 수 있는 욕실 구조를 반영한 모델을 선정하였다. 총 4개의 케이스(Bathtub-Type 2개, Shower Booth-Type 2개)에 대해 모델링 하였으며, 이들 모델은 서로 다른 욕실 구조와 크기를 반영하고 있다. 각 모델의 경우 Fig. 2와 같으며, 스마트 욕실 제품의 설치 및 운영에 최적화된 형태로 설계되었다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 한국 아파트 욕실의 평균 천장 높이와 배관 구조를 고려하여 구성하였다. 해석에 사용된 Fig. 2의 모델에서 파란색으로 표기된 영역은 공간 난방과 제습을 위한 Inlet을 나타내고, 붉은색으로 표기된 영역은 직사드라이를 위한 Inlet을 나타낸다. 주황색 영역은 3가지 케이스의 Outlet 영역을 시각화하여 공기 흐름 경로를 명확히 나타내었다. 해석에 사용된 유체는 공기와 물이다. 공간 난방과 직사드라이 기능 작동 시 특정 온도의 공기가 Inlet을 통하여 욕실 내부로 공급된다. 또한, 제습 기능의 성능 평가를 위하여 초기 습도를 가정하여 계산하게 되는데 이때 물과 공기 혼합 유체가 필요하게 된다. 이러한 유체들의 물성 값은 Table 1에 정리하였으며, Fluent에서 제공하는 값을 사용하였다.



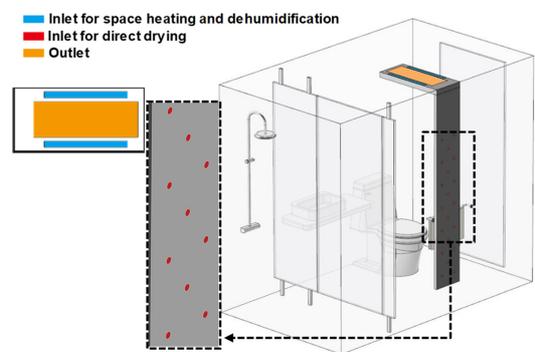
(a) Bathtub-type Case 1: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(b) Bathtub-type Case 2: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(c) Shower booth-type Case 3: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(d) Shower booth-type Case 4: Space heating, direct drying, and dehumidification model

Fig. 2 Four different smart bathroom concept designs and functional inlet/outlet schematics

Table 1 Material properties

Material	Density [kg/m ³]	Thermal Conductivity [W/(m·K)]	Viscosity [kg/(m·s)]	Molecular Weight [kg/kmol]
Air	1.225	0.0242	1.789e-05	28.966
H ₂ O	0.554	0.0261	1.340e-05	18.015

Table 2 Mesh information

Case	Nodes	Elements
Bathtub-type case 1	221,578	1,192,793
Bathtub-type case 2	259,202	1,386,598
Shower booth-type case 3	267,962	1,399,958
Shower booth-type case 4	271,192	1,401,348

2.3 CFD Mesh

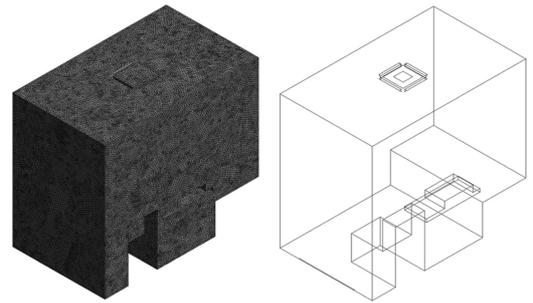
효율적인 CFD 해석을 수행하기 위해 각 케이스에 대해 단순화 작업을 진행한 후, 3D CFD 해석 모델을 구축하였다. 이러한 모델은 실제 욕실 환경에서 발생할 수 있는 다양한 조건을 반영하여 설계되었으며, 단순화된 모델과 Mesh 구조는 Fig. 3에 제시되어 있다.

Grid Convergence Index (GCI) 방법을 적용하여 Mesh의 독립성을 충분히 확보하기 위해 검증을 수행하였고, 그 결과 25 mm Mesh 사이즈에서 해석 결과가 Mesh에 영향을 받지 않는 수준에 도달한 것을 확인하였다. 각 CFD 모델의 노드(Node)와 요소(Element) 수는 Table 2에 정리되어 있다. Mesh의 유형은 Tetrahedron Mesh를 선택하여 복잡한 기하학적 형상을 정확하게 표현하고자 하였다.

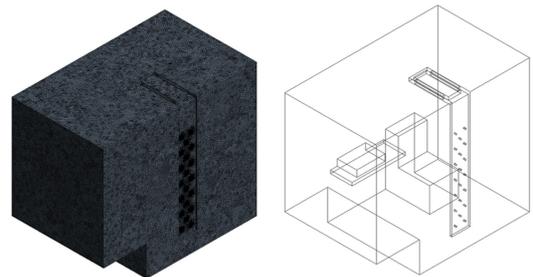
또한, 벽 근처 유동의 정확도를 평가하기 위해 Fluent 소프트웨어에서 벽면 전단응력(T_w) 값을 계산하였으며, 이를 기반으로 아래의 식(1)과 식(2)를 활용하여 y+ 값을 계산하였다. 벽면 전단응력은 유동장과 벽면 간의 상호작용을 나타내는 물리적 값으로, y+ 계산에 핵심적인 요소이다. y+ 값은 다음과 같은 공식으로 계산된다: 여기서, T_w는 벽면 전단응력(Pa), y는 첫 번째 셀 중심까지의 거리(본 연구에서는 0.025 m), ν는 운동 점성 계수(1.7894 × 10⁻⁵ m²/s), ρ는 공기 밀도(1.225 kg/m³)를 나타낸다. 계산된 벽면 전단응력 값과 y+ 값은 Tables 3과 4에 정리되어 있다. 계산된 y+는 150에서 278 사이의 값을 가지며, 이는 기존 연구 결과를 바탕으로 합리적이라고 판단된다[8]. 이러한 y+ 범위는 벽 근처 층류-난류 전이 영역을 효과적으로 해석할 수 있는 조건을 충족하며, CFD 해석 결과의 신뢰성을 보장한다. 또한 이를 통해 Mesh 크기와 난류 모델 간의 균형을 유지하며, 해석 정확도를 높이고 추가적인 계산 비용을 최소화할 수 있었다.

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{T_w}{\rho}} \tag{1}$$

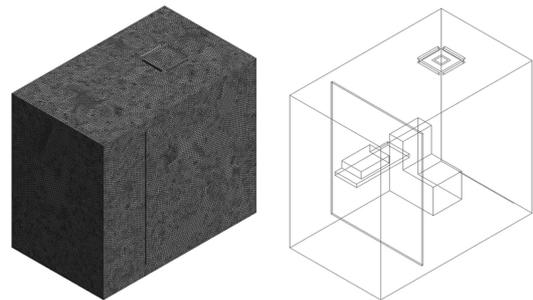
$$y^+ = \frac{u_{\tau} \cdot y}{\nu} \tag{2}$$



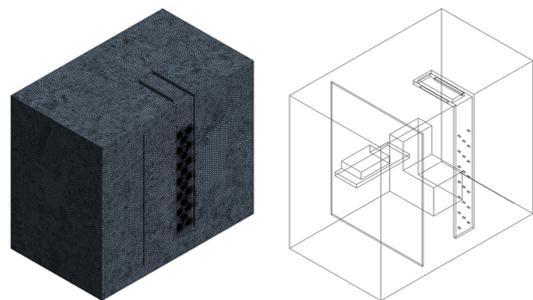
(a) Bathtub-type Case 1: Space heating, direct drying, and dehumidification model



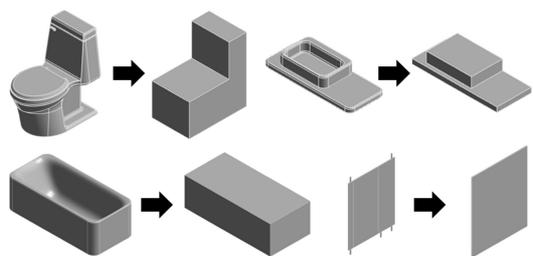
(b) Bathtub-type Case 2: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(c) Shower booth-type Case 3: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(d) Shower booth-type Case 4: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(e) 3D modeling simplification

Fig. 3 3D analysis model and mesh

Table 3 Wall shear stress

Case 1 [Pa]	Case 2 [Pa]	Case 3 [Pa]	Case 4 [Pa]
0.011593	0.024933	0.039465	0.010736

Table 4 y^+ Values for each case

Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
150.42	220.61	277.55	144.76

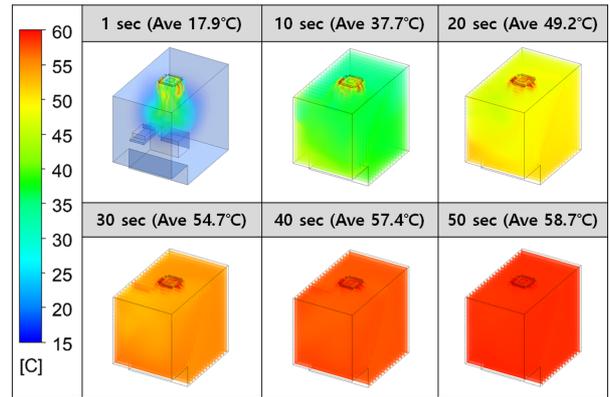
2.4 CFD 해석을 위한 난류 모델 및 가정

앞서 언급한 바와 같이 구축한 CFD 시뮬레이션 모델을 기반으로 해석을 수행하였다. 스마트 욕실 내부 유동을 구현하기 위하여 Ansys의 Fluent 소프트웨어(버전 2024 R2)를 사용하였으며, 난류 모델로는 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다. $k-\epsilon$ 모델은 실내 공기 유동 및 열 전달 해석에서 가장 널리 사용되는 난류 모델 중 하나로, 계산 효율성과 안정성이 뛰어나며, 복잡한 형상의 내부 유동 문제에 적합하다. 특히, 실내 공기 유동에서 발생하는 벽 근처 층류와 난류 특성을 균형 있게 반영하여 본 연구에 적합하다고 판단하였다. 특히, $k-\epsilon$ 모델은 평균적인 유동 특성을 계산하는 데 효과적이며, 스마트 욕실 시스템이 보유한 기능들과 같이 복잡한 물리적 현상이 아닌 내부 공기 온도 상승 패턴과 습도를 계산하는 데 적합하다.

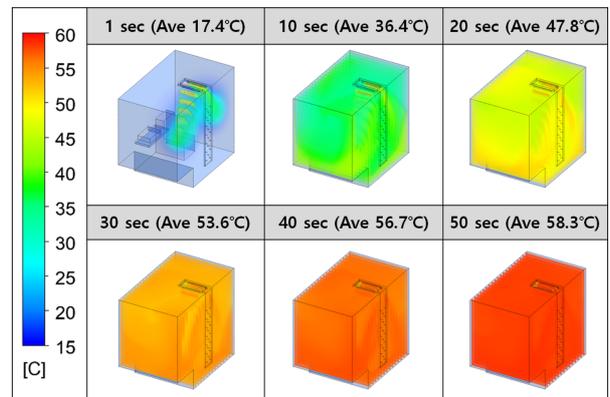
CFD 해석을 효율적으로 수행하기 위하여 본 연구에서는 폐쇄형 욕실 환경(Closed Bathroom Environment)을 가정하여 스마트 욕실 시스템의 성능을 평가하였다. 스마트 욕실 시스템의 공조 성능, 열 전달, 습도 제어 등 주요 성능 요소를 집중적으로 평가하고, 조건을 단순화하여 해석의 신뢰성을 확보하기 위함이다. 실제 사용 환경에서는 욕실 문틈을 통한 외부 공기 유입과 내부 공기 방출이 발생할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 이러한 외부 공기 유입 및 내부 공기 방출을 고려하지 않았다. 이는 욕실 문틈을 통한 공기 유입과 방출은 문틈의 크기, 주변 외부 온도, 외부 공기 유동 방향 등의 비선형적 변수를 발생시킨다. 본 연구의 주요 목적은 욕실 내부 공기 흐름과 열 전달 성능을 평가하고, 스마트 욕실 시스템의 공조 및 습도 제어 성능을 분석하는 것이다. 이를 위해 공기 흐름 경로는 시스템 내부 설비로 제한하였으며, 외부 공기 유입과 방출은 시스템 성능에 대한 직접적인 영향을 배제하기 위해 폐쇄형 도메인(Closed Domain)으로 설정하였다.

2.5 공간 난방 해석 조건 및 결과

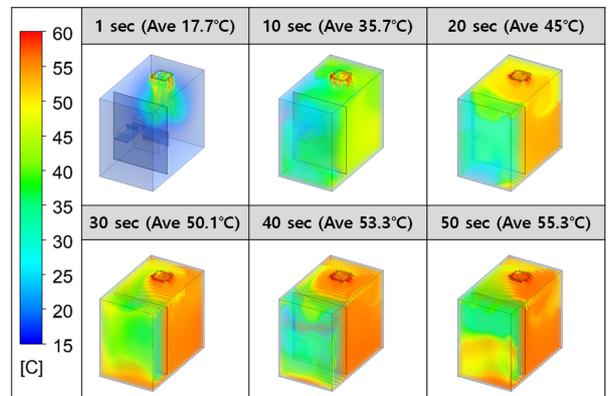
공간 난방 해석은 50초까지 수행하였으며, 욕실 내부의 평균 온도를 계산하였다. 초기 온도 상승 구간을 명확히 파악하기 위해 해석 결과는 1, 10, 20, 30, 40, 50초 시점에서의 온도 분포를 Fig. 4에 나타냈다. 또한, 공간 난방 해석에 사용된 주요 변수들은 Table 5에 정리되어 있다[9,10]. 공간 난방 해석에서 초기 온도는 15°C로 설정되었는데, 이는 겨울철 일반적인 가정집 욕실의 온도를 반영한 값으로, 이는 사람이 샤워나 목욕을 하기에는



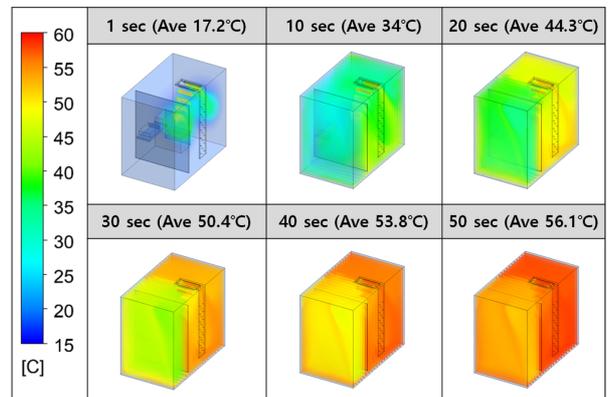
(a) Bathtub-type Case 1: Space heating



(b) Bathtub-type Case 2: Space heating



(c) Shower booth-type Case 3: Space heating



(d) Shower booth-type Case 4: Space heating

Fig. 4 Space heating analysis results: 1 to 50 seconds

Table 5 Space heating variable values

Initial Temperature [°C]	Wind speed [m/s]	Air inlet temperature [°C]	Air angle [°]
15	12	60	45

Table 6 Direct drying variable values

Initial Temperature [°C]	Wind speed [m/s]	Air inlet temperature [°C]	Air angle [°]
25	25	120	90

다소 추운 온도이다, 따라서, 공간 난방 시스템이 초기 온도에서 얼마나 빠르게 쾌적한 온도로 도달하는지를 평가하기 위해 초기 값을 15°C로 설정하였다. 이러한 설정은 실생활 환경을 모사하여, 공간 난방 시스템의 성능을 현실적으로 평가하는 데 중요한 역할을 한다.

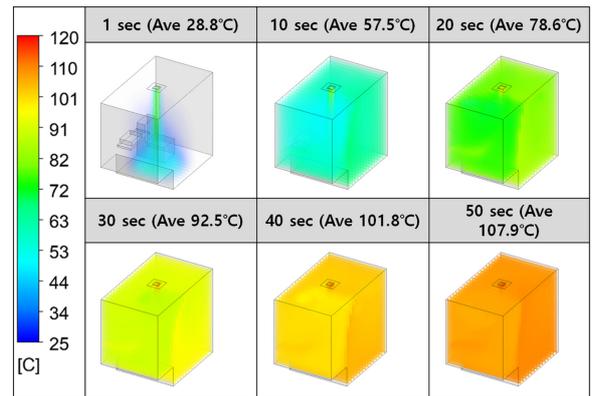
2.6 직사드라이 해석 조건 및 결과

직사드라이 해석에서 초기 온도는 25°C로 설정되었다. 이는 샤워나 목욕 후 욕실 내부의 일반적인 온도를 반영한 값으로, 샤워 후 욕실 온도는 대체로 25°C 수준까지 상승하기 때문이다. 직사드라이 시스템은 사용자가 수건 없이 몸을 말릴 수 있도록 설계되었으며, 25°C라는 따뜻한 환경에서 시스템의 성능을 평가하기 위해 이 온도로 설정되었다. 해석은 50초간 진행되었으며, 시간 경과에 따른 온도 분포는 1, 10, 20, 30, 40, 50초 시점에서 분석되었다. 해석 결과, 직사드라이 시스템은 짧은 시간 내에 샤워 후 물기를 효과적으로 제거할 수 있는 성능을 보였다. 각 시점에서의 온도 분포는 시스템의 효율성을 정량적으로 나타내며, 특히 샤워 직후 빠르게 온도를 상승시켜 사용자에게 쾌적하고 편리한 환경을 제공하는 것으로 나타났다.

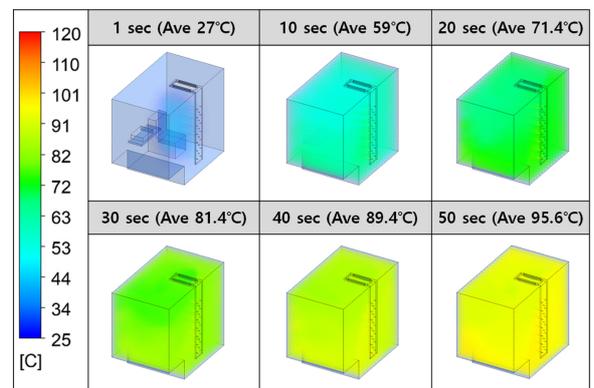
Table 6에는 직사드라이 해석에 사용된 주요 변수 값이 정리되어 있으며, Fig. 5를 통해 시간 경과에 따른 온도 변화와 공기 흐름을 시각적으로 확인할 수 있다. 이를 통해 직사드라이 시스템이 실사용 환경에서 얼마나 효과적으로 작동하는지 평가되었으며, 시스템의 설계와 성능 최적화에 대한 중요한 자료를 제공한다.

2.7 제습 해석 조건 및 결과

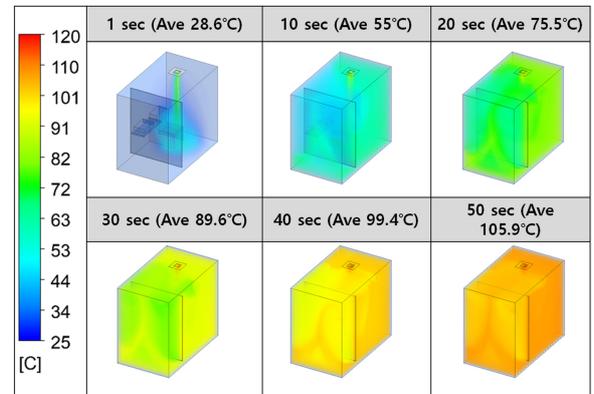
제습 계산에는 Ansys Fluent 소프트웨어의 Species Transport Model이 사용되었으며, 혼합물의 물성값(Mixture Properties)은 Mixture-Template을 적용하여 설정하였다. 제습 시스템의 성능을 평가하기 위해 초기 온도는 25°C로 설정되었으며, 이는 샤워나 목욕 후 욕실 내부의 일반적인 온도를 반영한 값이다. 샤워나 목욕 후 욕실의 온도는 자연스럽게 25°C 정도로 유지되며, 이러한 환경에서 제습 시스템이 작동하여 욕실 내부의 습기 제거, 곰팡이 및 세균 번식 억제, 쾌적한 욕실 환경 유지를 목표로 한다. 해석은 각각 5, 20, 40, 60, 80, 100초



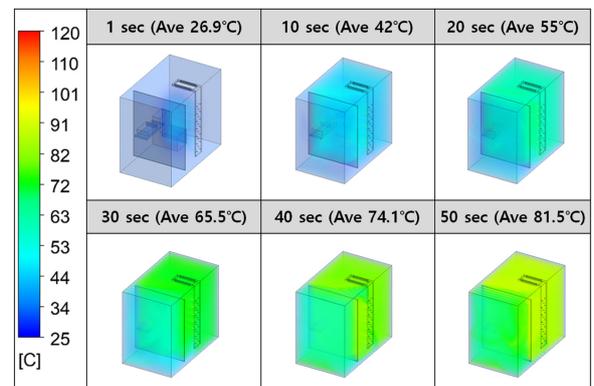
(a) Bathhtub-type Case 1: Direct drying



(b) Bathhtub-type Case 2: Direct drying

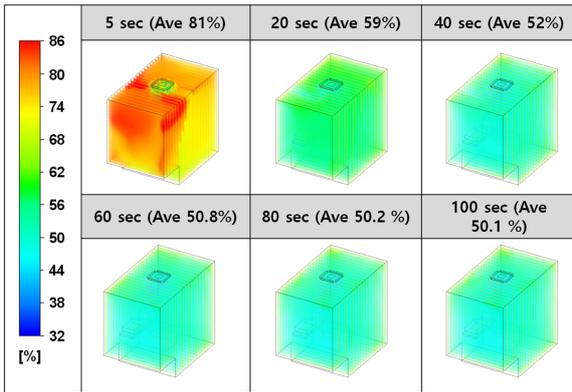


(c) Shower booth-type Case 3: Direct drying

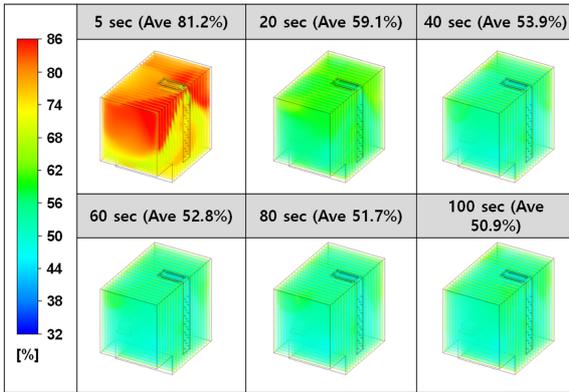


(d) Shower booth-type Case 4: Direct drying

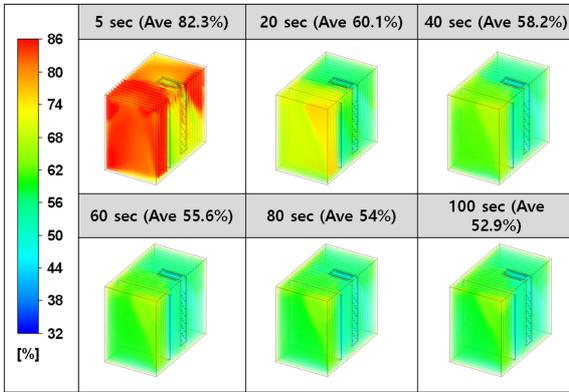
Fig. 5 Direct drying analysis results: 1 to 50 seconds



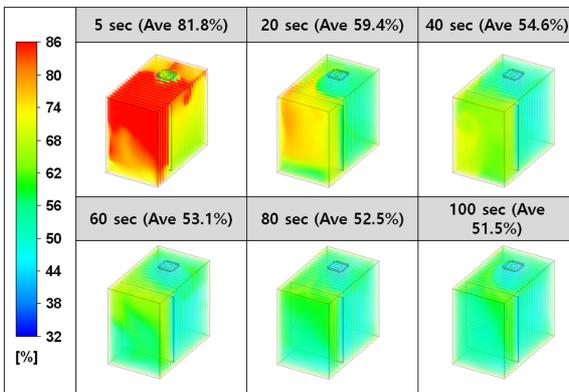
(a) Bathtub-type Case 1: Dehumidification



(b) Bathtub-type Case 2: Dehumidification



(c) Shower booth-type Case 3: Dehumidification



(d) Shower booth-type Case 4: Dehumidification

Fig. 6 Dehumidification analysis results: 5 to 100 seconds

Table 7 Dehumidification variable value

Initial temperature [°C]	Humidity [%]	Wind speed [m/s]	Air inlet temperature [°C]	Air angle [°]
25	90	12	30	45

시점에서 진행되었으며, 시간이 경과함에 따라 제습 시스템의 성능을 확인할 수 있다. 최종 습도는 아래의 식(3)부터 식(9)를 활용하여 산출되었으며, 습도 해석 결과는 Fig. 6에 제시되었다. 특히, 식(9)에서 좌변의 [H₂O]는 공기 중 물 분자의 농도를 나타내는 표시이다. 제습 해석에서 물 분자의 농도는 실내 공기의 습기를 효과적으로 제거하는 시스템 성능을 평가하는 데 필수적인 요소이다. 여기서, 대괄호는 공기 중 물의 몰 농도 (Molar Concentration)를 의미하며, 제습 과정에서 물 분자의 분포를 명확히 정의하기 위해 사용되었다. 이러한 정의를 통해 제습 시스템이 욕실 내부의 습기를 얼마나 효과적으로 제거할 수 있는지를 구체적으로 평가할 수 있다. 제습 해석에 사용된 주요 변수들은 Table 7에 정리되어 있다. 제습 시스템은 샤워 후 욕실 환경에서 곰팡이 및 세균의 번식을 막고, 실내 습도를 적절한 수준으로 유지함으로써 사용자에게 쾌적한 환경을 제공하는데 기여한다[11].

$$n_{air} = \frac{P \cdot 100}{R \cdot (T + 273.15)} \tag{3}$$

$$RH = \frac{e(T_D)}{e(T)} \cdot 100 = \frac{P_{H_2O}}{e(T)} \cdot 100 \tag{4}$$

$$X_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P} \tag{5}$$

$$q = \frac{X_{H_2O} \cdot M_{H_2O}}{X_{H_2O} \cdot M_{H_2O} + (1 - X_{H_2O}) \cdot M_{dry}} \cdot q = \frac{mmv}{1 + q} \tag{6}$$

$$mmv = \frac{q}{1 - q} \tag{7}$$

$$C_{H_2O} = X_{H_2O} \cdot n_{air} \cdot M_{H_2O} \tag{8}$$

$$[H_2O] = X_{H_2O} \cdot n_{air} \cdot N_A \cdot 10^{-6} \tag{9}$$

2.8 해석 결과 비교 및 분석

Fig. 7의 그래프는 Bathtub-Type 모델과 Shower Booth-Type 모델의 Space Heating Efficiency 해석 결과를 기반으로, 욕실 내부 평균 온도 변화를 비교한 결과를 나타낸다. 해석 결과, Bathtub-Type 모델은 Shower Booth-Type 모델에 비해 더 높은 평균 내부 온도를 유지하였다. 이는 Shower Booth-Type 모델의 구조적 특성, 특히 유리문이 존재함으로 인해 특정 영역의 공기 흐름 제한이 발생하고, 온도 상승이 저하된 것으로 분석된다. 이 결과는 욕실 공기 순환과 열 분포가 욕실 구조적 설계에 따라 직접적인 영향을 받는다는 점을 시사한다. 따라서, 스마트 욕실 시스템 설계에서는 구조적 요인과 공기 흐름 경로 최적화를 세심하게 고려해야 한다.

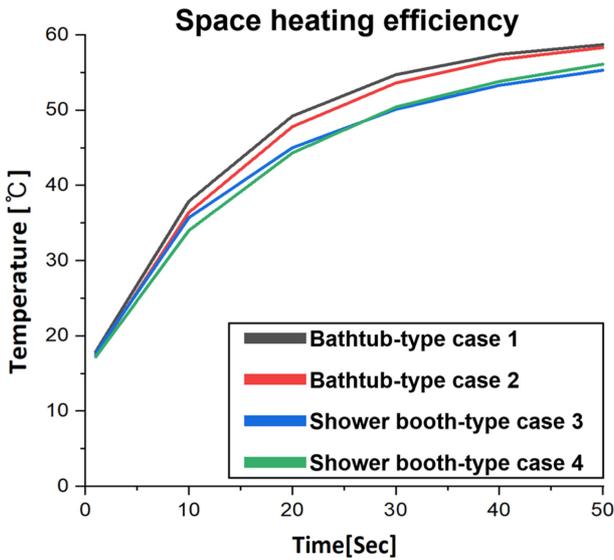


Fig. 7 Comparison of indoor average temperature over time between bathtub and shower booth types - Space heating

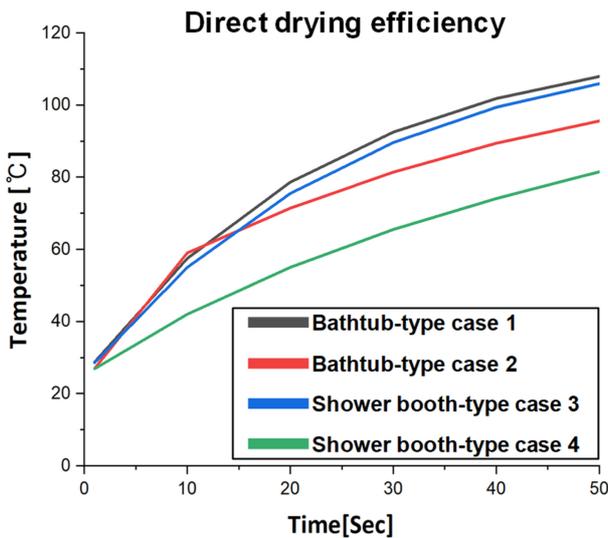


Fig. 8 Comparison of indoor average temperature over time between bathtub and shower booth types - Direct drying

Direct Drying 해석 결과는 Fig. 8 그래프에 제시되어 있으며, 공간 난방 해석 결과와 유사하게, Bathtub-Type 모델이 Shower Booth-Type 모델에 비해 내부 평균 온도가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 Shower Booth-Type 모델의 유리문 구조로 인해 공기 흐름 경로가 제한되어 해당 영역의 온도 분포가 상대적으로 낮아진 결과로 해석된다.

제습 해석 결과는 Fig. 9 그래프에 제시되어 있으며, Bathtub-Type 모델이 Shower Booth-Type 모델보다 더 높은 제습 효율을 보였다. 이는 Bathtub-Type 구조가 습도 조절에 있어 더 유리한 공기 흐름 환경을 제공했기 때문으로 해석된다.

Table 8에는 공간 난방, 식사드라이, 제습 효율을 종합적으로 비교한 결과가 나타나 있으며, Bathtub-Type Case 1이 모든

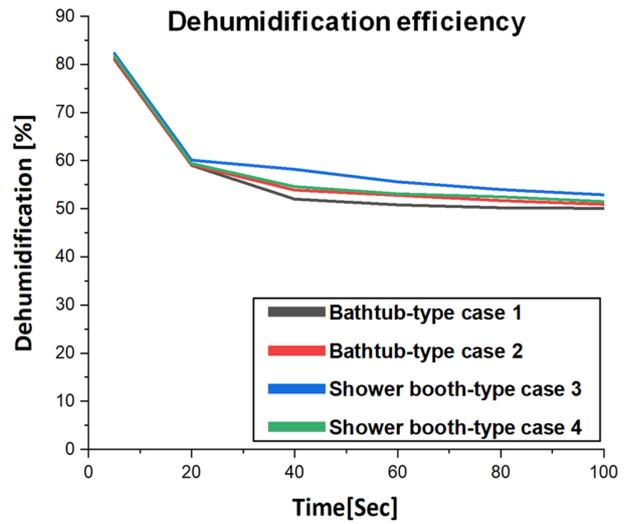


Fig. 9 Comparison of indoor average humidity over time between bathtub and shower booth types - Dehumidification

Table 8 Comparison of results

Case	Space heating efficiency	Direct drying efficiency	Dehumidification efficiency
Bathtub-type Case1	High	High	High
Bathtub-type Case2	High	Medium	Medium
Shower booth-type Case3	Low	High	Low
Shower booth-type Case4	Low	Low	Medium

기능에서 가장 높은 성능을 보인 반면, Shower Booth-Type Case 4는 가장 낮은 성능을 나타냈다. 이러한 결과는 스마트 욕실 시스템 설계에서 구조적 차이가 시스템 성능에 직접적인 영향을 미친다는 것을 보여준다. 따라서, 스마트 욕실 시스템 설계 시 각 기능별 구조적 특성과 공기 흐름 경로를 종합적으로 고려하는 것이 중요하다.

3. 결론

3.1 성능 평가 결과 요약

본 연구에서는 스마트 욕실 시스템의 성능을 평가하기 위해 공간 난방, 식사드라이, 그리고 제습 기능을 중심으로 각 케이스별 성능을 CFD 해석을 통해 비교하였다. 해석 결과, 각 기능에서 효율성의 차이를 보였으며, 특히 Bathtub-Type과 Shower Booth-Type의 구조적 차이에 따라 성능이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 공간 난방 해석 결과에 따르면, Bathtub-Type 모델이 Shower Booth-Type 모델에 비해 평균 온도가 더 높게 유지되었다. 이는 Bathtub-Type 모델에서 공기 순환이 더 원활하게

이루어졌기 때문에 분석된다. 특히, Shower Booth-Type의 경우 유리문이 존재하여 특정 영역에서 온도 상승이 제한되었고, 이로 인해 욕실 전체의 온도 상승 효과가 감소한 것으로 나타났다. 직사드라이 해석 결과 또한 Bathtub-Type 모델이 Shower Booth-Type 모델에 비해 더 높은 평균 온도를 보였다. 이는 앞서 언급한 공간 난방과 마찬가지로, Shower Booth-Type의 유리문이 공기 순환을 방해하여 내부 온도가 상대적으로 낮아진 결과로 분석된다. 직사드라이 기능에서 Inlet과 Outlet 배치 및 크기는 온도 상승에 중요한 역할을 하였으며, Bathtub-Type 모델이 이러한 배치에 있어 더 유리한 결과를 나타낸 것으로 해석된다. 제습 해석 결과에서는 Bathtub-Type 모델이 Shower Booth-Type 모델보다 더 우수한 제습 효과를 보였다. 이는 Bathtub-Type 구조가 습도 조절에 있어 더 유리한 환경을 제공했기 때문에 분석된다. 특히, Bathtub-Type Case 1은 습도 제거 성능이 가장 우수하였으며, 이는 Inlet과 Outlet의 효율적인 배치가 제습 성능에 큰 영향을 미친 것으로 해석된다. 종합 평가 결과, 본 연구를 통해 스마트 욕실 시스템의 성능이 구조적 특성에 따라 크게 달라질 수 있음을 확인할 수 있었다. Bathtub-Type 모델은 공간 난방, 직사드라이, 제습 기능 모두에서 Shower Booth-Type 모델보다 우수한 성능을 보였다. 특히, Bathtub-Type Case 1이 가장 높은 효율성을 나타냈다. 이는 스마트 욕실 시스템 설계 시 구조적 특성과 공기 흐름 경로의 중요성을 강조하며, 최적의 성능을 위해 사용자의 요구와 욕실 구조에 맞는 맞춤형 설계가 필요하다는 것을 시사한다.

3.2 한계점 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 수치적 해석(CFD 해석)을 통해 스마트 욕실 시스템의 성능을 평가하고 주요 설계 가이드라인을 제안하였다. 설계 단계에서 스마트 욕실 시스템의 각 기능들의 성능 평가를 위하여 비정상 상태 CFD 해석을 수행하였다. 다양한 경계 조건과 공기 유동 변화를 동적으로 반영하기 위해 시험적으로 재현하기 어렵고 복잡한 물리적 현상을 수치적으로 접근하였다. 다만, 실험적 검증은 본 연구 범위에서 제외되었으며 해석 결과의 신뢰성 확보하기 위해 기존 문헌과 유사한 수치적 설정과 신뢰할 수 있는 수치적 기법(CFD 해석, 경계 조건 적용 등)을 사용하였다. 다양한 모델과 초기 조건을 명확히 기술하였고, Mesh의 수치적 검증 절차를 통해 해석 결과의 정확성과 재현성을 보장하고자 하였다.

연구 범위의 제한으로 인해 물리적 실험을 통한 결과 검증이 수행되지 못한 점은 향후 연구에서 보완이 필요하다. 즉, 스마트 욕실 시스템의 Prototype 제작 및 물리적 실험 환경 구축을 통해 실제 실험 결과와 CFD 해석 결과를 비교 분석을 통하여 CFD 해석의 신뢰도를 높이고 다양한 스마트 욕실 환경에 대한 확장 적용을 수행할 예정이다. 또한, 폐쇄 환경이 아닌 개방 환경을 고려한 CFD 해석을 통해 스마트 욕실 시뮬레이션을 고도화해야 한다. 최종적으로 전체 시스템의 스마트 욕실 시스템의

에너지 소비량 평가 및 스마트 제어 기술과 결합된 운영 최적화 방안을 수립하여 제시한 시스템의 지속 가능성과 비용 효율성을 향상시키는 것이 필요하다. 이러한 후속 연구는 스마트 욕실 시스템 설계 및 성능 평가의 신뢰성을 높이고, 보다 현실적인 시스템 구현을 위한 실질적인 데이터를 제공할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2025-2026년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

REFERENCES

1. Park, N., Yoon, H., Kim, Y., (2009), A Study on the Types of a Smart Bathroom with a Smart-healthcare System, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, 25(10), 3-10.
2. Lee, Y., Min, J., Ahn, N., Lee, J., Kim, H., (2020), Analysis of hygrothermal environment according to the usage pattern of the apartment house, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction (JAIK), 40(2), 374-375.
3. Kwag, B., Kim, T., Kim, G., Ji, W., Park, K., (2021), The Effects of Ventilation Strategies on Indoor Humidity Control in Multi-Family Residential Buildings in South Korea, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 15(5), 572-585.
4. Kim, O., Lee, S., Yang, J., (2012), A Study on the bathroom ventilation efficiency in residence building, Proceedings of the Annual Conference of AIK, 32(2), 295-296.
5. Kim, M., Kim, C., Kim, H., Min, B., Jeong, H., Ryu, J., Moon, S., (2019), Implementation of a convenient bathroom service system using a smartphone and a micro-controller, Proceedings of the KIIT Conference, (4), 291 - 294.
6. Kim, O., Lee, S., (2013), A study on the ventilation performance according to changing partition shape in bathroom, Proceedings of the Annual Conference of AIK, 33(2), 333-334.
7. Kim, J., Ahn, J., (2021), Dynamic simulation of system performance and indoor thermal environment under hybrid desiccant cooling according to outdoor conditions using TRNSYS, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, 45(5), 271-280.
8. Yoo, D., Paik, J., (2020), An evaluation of wall functions for RANS computation of turbulent flows, Journal of Korea Water Resources Association, 53(1), 1-13.
9. Kim, S., Nam, L., Seo, H., Choi, Y., (2001), Study on outlet flow characteristics for the outlet compartment shape of packaged air conditioner, Proceedings of the SAREK Conference, (2), 981-985.

10. Kong, T., Bae, K., Yi, C., Chung, H., Jeong, H., (2000), A study on the effect of room ventilation of natural convection into air conditioner duct, Proceedings of the SAREK Conference, (3), 1247-1252.
11. Lee, H., Kim, J., Lee, D., (2019), Humicon, A high-efficiency dehumidification air conditioning and ventilation system for a comfortable indoor environment, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 48(3), 16-26.

**Hyun Soo Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is CFD simulation and evaluate electric vehicle battery performance.

E-mail: hyun0702@pusan.ac.kr

**Jung Su Kim**

Professor in the Department of IT Mechanical Engineering, Daejin University. His research interest is welding, structural design.

E-mail: ipjskim@daejin.ac.kr

**Ji Hoon Kim**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is computational analysis of molding processes, multiscale microstructure-based modeling, flexible material modeling.

E-mail: kimjh@pusan.ac.kr

**Sung Wook Kang**

Professor in the Department of Smart Ocean Mobility Engineering, Changwon National University. His research interest is finite element analysis, weld simulation, structural/vibration/thermal analysis, structural optimization.

E-mail: swkang@changwon.ac.kr