



수치해석을 이용한 다목적 아레나의 대공간 공조 시스템 계획 방법 - 난방운전을 중심으로 -

*Numerical Analysis-Based Design Method for a Large-Space HVAC System in a Multi-Purpose Arena
- Focusing on Heating Operations during the Winter Season -*

조진균* · 김진호**
Jinkyun Cho* · Jinho Kim**

* Professor, Dept. of Building and Plant Engineering, Hanbat National Univ., Daejeon, South Korea (jinkyun.cho@hanbat.ac.kr)

** Corresponding author, Professor, Dept. of Fire Protection, Safety and Facilities, Suwon Science College, Hwasung, South Korea (jinho.kim@ssc.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: This study aims to analyze the design and performance of the HVAC system in a large-scale multipurpose arena, focusing on winter heating conditions, using the S-Arena as a case study. The objective is to propose an optimized design solution that satisfies thermal distribution in large indoor spaces and enhances energy efficiency. **Method:** The study utilized CFD simulations to analyze airflow and air temperature distribution the HVAC system. Key HVAC components of the S-Arena were evaluated in terms of their design and performance. The placement and operating conditions of these components were configured to ensure uniform temperature distribution and energy efficiency within the large space. **Result:** The CFD simulation results demonstrated that the HVAC system generally met the recommended airflow velocity range (< 0.5 m/s) and provided thermal comfort while efficiently reducing energy consumption. Additionally, the system maintained a uniform temperature range of 20.5°C to 22.0°C in central and activity spaces, ensuring thermal comfort for occupants. Localized airflow and temperature deviations identified in certain areas were found to be improvable through design adjustments. The proposed design was shown to operate efficiently under winter heating conditions, and the application of CFD simulations demonstrated the feasibility of optimizing the system during the initial design stage.

KEYWORD

다목적 아레나
공조시스템
전산유체역학
난방운전
온도 성층화

Multi-purpose Arena
HVAC System
CFD: Computational Fluid Dynamics
Heating Mode
Temperature Stratification

ACCEPTANCE INFO

Received Jan. 21, 2025
Final revision received Jan. 27, 2025
Accepted Feb. 4, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

최근의 다목적 아레나 및 대규모 스포츠 시설은 관객 또는 재실자 모두에게 열적 쾌적성을 제공하면서 에너지 효율성을 극대화하는 지속 가능한 설계를 요구한다. 특히, 겨울철 난방 운전은 냉방 운전과는 다른 공기 흐름 및 온도 분포 문제를 동반한다. 높은 수직적 층고/천장고와 넓은 수평적 면적을 가진 대공간에서는 가열된 따뜻한 공기가 부력으로 인해 거주 영역을 벗어나 상부로 상승하는 온도 성층화 현상이 빈번하게 발생하며, 이는 열적 쾌적성을 저해하고 에너지 손실을 초래하는 주요 요인으로 작용한다[1-3].

다목적 아레나 등은 빈번하게 계획되지 않으며 일반적인 공조설비 설계 방법은 이러한 대공간의 특수성을 충분히 반영하지 못하고 있고 또한 온도 분포의 불균형과 에너지 효율성 저하 문제를 해결하는 데 한계가 있다. 따라서 전산 유체 역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)을 활용하여 기류 흐름과 온도 분포를 분석하고, 이를 기반으로 한 최적의 설계 방안을 모색하는 접근이 매우 요구되고 있다[4,5].

대공간에서의 난방 운전은 공기 공급 온도, 기류 속도, 디퓨저의 배치와 같은 설계 요소에 따라 성능이 크게 좌우된다[6]. 그러나 이러한 요소들이 거주 영역 내 열 분포 개선과 에너지 소비에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구는 제한적이다. 특히, 난방 운전 시 따뜻한 공기를 거주 영역에 안정적으로 전달하기 위한 공기 분배 전략과 최적화 설계 방안은 여전히 실무에서 도전 과제로 남아 있다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 CFD 기법을 활용하여 다목적 아레나의 겨울철 난방운전을 중심으로 대공간 공조 시스템의 설계 방법을 제안하는 것을 목표로 한다. 이를 위해, 다음과 같은 세부 연구 목표 설정이 필요하다. 첫째, 난방 운전 시 발생하는 대공간의 온도 성층화와 기류 흐름 특성을 분석한다. 둘째, 사례조사 건물의 CFD 시뮬레이션을 통해 다양한 공기 분배 전략의 성능을 비교하고, 열 분포 개선과 에너지 효율성을 극대화하는 설계 요소를 도출한다. 마지막으로 대공간 난방 시스템 설계의 기준을 정립하고, 이를 바탕으로 실질적인 설계 방안을 제안하였다.

본 논문은 설계의 실질적인 문제를 해결하기 위한 이론적 기반과 실무적 도구를 제공하며, 난방 운전의 효율성과 쾌적성 간의 균형을 달성하기 위한 새로운 방향을 제시하고자 한다.

2. 대공간 공기조화

2.1. 대공간의 공기조화 설계 방향

대공간 건물은 천장고가 높고 공간의 용적이 커서 공기의 밀도 차이에 의한 부력효과로 상하 온도 차이가 발생하기 쉬우며, 이는 난방, 냉방, 환기와 같은 공조 효율을 저하시켜 온열환경의 제어를 어렵게 만든다. 또한, 대공간의 전체 체적 중 실제로 사람이 머무는 거주 지역의 비율이 낮기 때문에, 전체 공간을 대상으로 냉·난방을 실시하기보다는 특정 거주 영역에 집중하여 효율적으로 제어하는 설계가 요구된다. 대공간 건물은 외부와 접하는 외벽의 비율이 높아 외벽으로의 열 손실 또는 열 획득이 증가할 가능성이 크며, 이는 에너지 효율에 부정적인 영향을 미칠 수 있으므로 단열 등을 고려한 친환경적 설계가 중요하다[7,8].

천장 구조나 기둥과 같은 건축 요소는 공조 시스템의 설계에 영향을 미칠 수 있으며, 공간의 형태와 열적 특성을 충분히 반영한 설계가 필요하다. 따라서 대공간 건물의 공조 설계는 에너지 효율성과 쾌적성을 동시에 충족시키기 위해 특정 구역에 집중한 부분 공조와 열교환 관리를 포함한 종합적인 접근이 필수적이다[7,9].

2.2. 선행연구 고찰

대규모 다목적 아레나 및 스포츠 스타디움과 체육관에서의 공조 설계 및 열적 쾌적성 확보는 에너지 효율성과 사용자 만족도를 동시에 고려해야 하는 중요한 연구 분야이다. 이를 위해 다양한 연구들에서 기계환기, 자연환기, 하이브리드 환기 등을 CFD 기반으로 대규모 공간의 공조 시스템을 분석하고 설계 방향을 제안하였다. Losi et al.[10]은 FIFA 2022 월드컵을 대비하여 설계된 카타르의 축구 경기장에서 공조 시스템이 극단적인 고온다습한 환경에서도 관객과 선수 모두에게 열적 쾌적성을 제공할 수 있음을 확인하였다. 특히, 세미오픈 구조에서 공조 시스템이 열적 중립성을 유지하며, 에너지 소비를 약 50% 절감할 수 있는 가능성을 제시하였다. 유사한 연구로 Sofotasiou et al.[11]은 카타르의 지속 가능한 월드컵 스타디움 설계를 위한 열적 스트레스 지수와 냉방 부하를 분석하였으며, 세미아웃도어 구조에서 냉방 부하가 약 115MWh에 이르는 점을 확인하며 에너지 효율성을 높이기 위한 설계 전략을 강조하였다.

Guo et al.[12]은 아열대 지역 중규모 체육관에서 EnergyPlus와 CFD를 결합하여 자연환기와 열 부력을 활용한 공조 시스템의 효율성을 분석하였다. 자연환기가 봄과 가을에는 높은 효율을 보이지만, 여름철에는 공조 시스템의 보조가 필요하다는 점을 확인하였다. 이와 관련하여 Zofron Afif et al.[13]은 인도네시아의 다목적 체육관에서 자연환기가 평균 환기율(ACH) 6.14를 달성하며 기계적 환기 없이도 충분한 공기 순환이 가능하다는 점을 확인하였다.

Lin et al.[14]은 아이스링크에서 구역별 열 및 습기 이동을 분석하며, 제습기와 공조 시스템의 상호작용이 에너지 소비와 열적 성능에 큰 영향을 미친다는 점을 제시하였다. 동일 저자들의 또 다른 연구[15]에서는 다양한 공기 분배 시스템이 아이스링크 내 온도 및 습도 분포에 미치는 영향을 분석하며, 열적 성숙화를 최소화하고 에너지 효율성을 높일 수 있는 최적의 설계 방향을 제시하였다.

Nishioka et al.[16]은 일본의 대규모 돔 스타디움에서 좌석 아래 공조 시스템과 지환 환기 방식이 공간을 효과적으로 구분하며 객실 구역의 열적 쾌적성을 유지하는 데 효율적임을 확인하였다. 유사한 맥락에서 Lestinen et al.[17]은 스웨덴의 다목적 아레나에서 혼합 환기와 지환 환기를 결합하여 하부와 상부 좌석 간 온도와 공기 흐름의 균일성을 유지하며, CO₂ 농도가 경기 중 약 900ppm으로 상승하는 점을 분석하였다.

국내에는 최동호 외[9]가 동계 조건에서 대규모 실내 체육관의 열적 성숙화를 실측하고 난방 시 상층부로 열이 집중되는 문제를 지적하며, 개선 방안을 제시하였다. 송두삼 외[7]는 대공간 구조물의 HVAC 설계 사례를 분석하며, 일본과 싱가포르 등의 해외 사례를 통해 구체적인 설계 기준을 제안하였다. 또한 윤재욱 외[18]은 인천 국제공항 제2터미널 대공간의 냉방 환경에서 온도와 기류 분포를 CFD로 분석하며, 개선된 설계를 통해 실내 온도를 25°C로 유지하고 쾌적성을 확보할 수 있음을 입증하였다.

해당 연구는 대규모 공간에서의 열 분포를 개선하고 에너지 효율을 극대화하기 위해 다양한 공조 시스템과 설계 방법을 제안하며, 공조 설계 초기 단계에서 CFD와 같은 시뮬레이션 도구의 활용이 필수적임을 강조하였다. 이를 통해 온도 성숙화, 구역별 열 및 습기 이동 등 대규모 공간이 직면하는 문제를 효과적으로 해결할 수 있었다. 그러나 해당 연구의 주요 관점인 난방시 부력에 의한 온도 성숙화 문제 해결을 위한 연구는 충분히 이루어지지 않았다. 따라서 향후 대규모 공간의 공조 시스템 설계와 난방시 열 분포 개선을 위한 추가적인 연구가 필요하다.



Fig. 1. S-Arena: a multipurpose cultural and sports complex

Table 1. Architectural information of S-Arena

Item	Details
Location	Seoul, South Korea
Total floor area	Approximately 50,000m ²
Building scale	B2F/6F
Maximum height	Approximately 45m
Ceiling height	Central arena with a height of 35m
Structure	Steel-reinforced concrete (SRC)
Facade design	Double skin facade for energy efficiency
Main uses	Large-scale concert hall, multipurpose sports arena, commercial spaces, and cultural areas
Special design	Modular seating systems and flexible layouts for diverse events

3. 사례분석

3.1. 대상 건물의 개요

본 연구에서는 S-아레나를 대상으로 35m 대공간 공조 시스템 설계와 열 분포 개선 평가를 수행하고자 하며, 특히 겨울철 난방 운전 조건을 중심으로 분석을 진행하였다. Fig. 1에서와 같이, S-아레나는 대한민국 최초의 전문 대형 공연장으로, 다양한 문화스포츠 행사를 수용할 수 있는 다목적 공간으로 계획되었다.

앞에서 언급한 난방 시 열적 불균형을 방지하기 위한 방안들이 설계에 반영되었고 본 연구도 그 일환으로 실제 프로젝트 기반으로 진행되었다. 주요 건축적 및 기능적 특성은 Table 1.과 같다.

3.2. 상세 공조계획

S-아레나의 공조방식은 대규모 다목적 공간의 특성과 다양한 이벤트를 효과적으로 수용할 수 있도록 설계되었다. 주요 공조 방식으로는 치환 환기 방식과 혼합 환기 방식이 결합되어 사용된다. 전체 단면으로의 개념은 Fig. 2.와 같다.

수평적인 공조조닝으로 먼저, 1층 무대 및 객석이 형성되는 중앙부는 천장 설치형 콘형 치환 취출구(①CDO: Conical Displacement Outlet)를 활용하여 35m의 높은 천정고 조건에서 하부까지 공기 분

배를 가능하도록 하였다. 중앙 구역 전체에 걸쳐 균일한 공기를 분배하고, 난류를 최소화하고 안정적인 수직 공기 패턴을 유지하도록 하였다. 이로 인하여 객석 및 거주구역 내에서 효과적인 열 분포 개선과 공기 순환을 보장하도록 설계되었다. CDO 1개의 풍량은 11,000 CMH이고 각 존(A-Zone, B-Zone, C-Zone, D-Zone) 당 55,000 CMH 그리고 총 20개의 유닛에서 220,000 CMH 풍량을 공급한다. 소음 수준은 69dB(A)/64 NC로 조절되어, 이벤트에 적합한 쾌적한 음향 환경을 유지한다. 운전 압력강하는 18.8mmAq로 설정되어, 시스템 성능을 확보하고 에너지 소비를 고려하였다. CDO는 전동 액추에이터를 통해 밸브 디스크를 가변적으로 제어할 수 있으며, 실시간 재실 상태 및 온도 조건에 따라 공기 분배를 정밀하게 조정할 수 있다. 여름과 특히 겨울에서 운영이 가능하도록 설계되어 연중 열 분포 개선을 제공하고 구역별 온도를 조정하여 불필요한 에너지 소비를 줄였다.

높은 천장고에 노출된 1~3층 객석부는 선회 제트 노즐(②SJN: Swivel Jet Nozzle)을 활용한 공조 시스템으로 설계되었다. 해당 시스템은 여름철 냉방과 겨울철 난방 모두에 적합하며, 관객이 밀집한 환경에서도 효과적인 열 분포 개선을 제공할 수 있다. 각 SJN의 풍량은 1,600 CMH이고 각 존(E, F, G, H)으로 40,000 CMH, 그리고 총 100개의 유닛이 160,000 CMH의 풍량을 개방된 객석에 공급한다. 객석 측벽 기준으로 설치 높이는 15m이고 공급 거리는 25m로

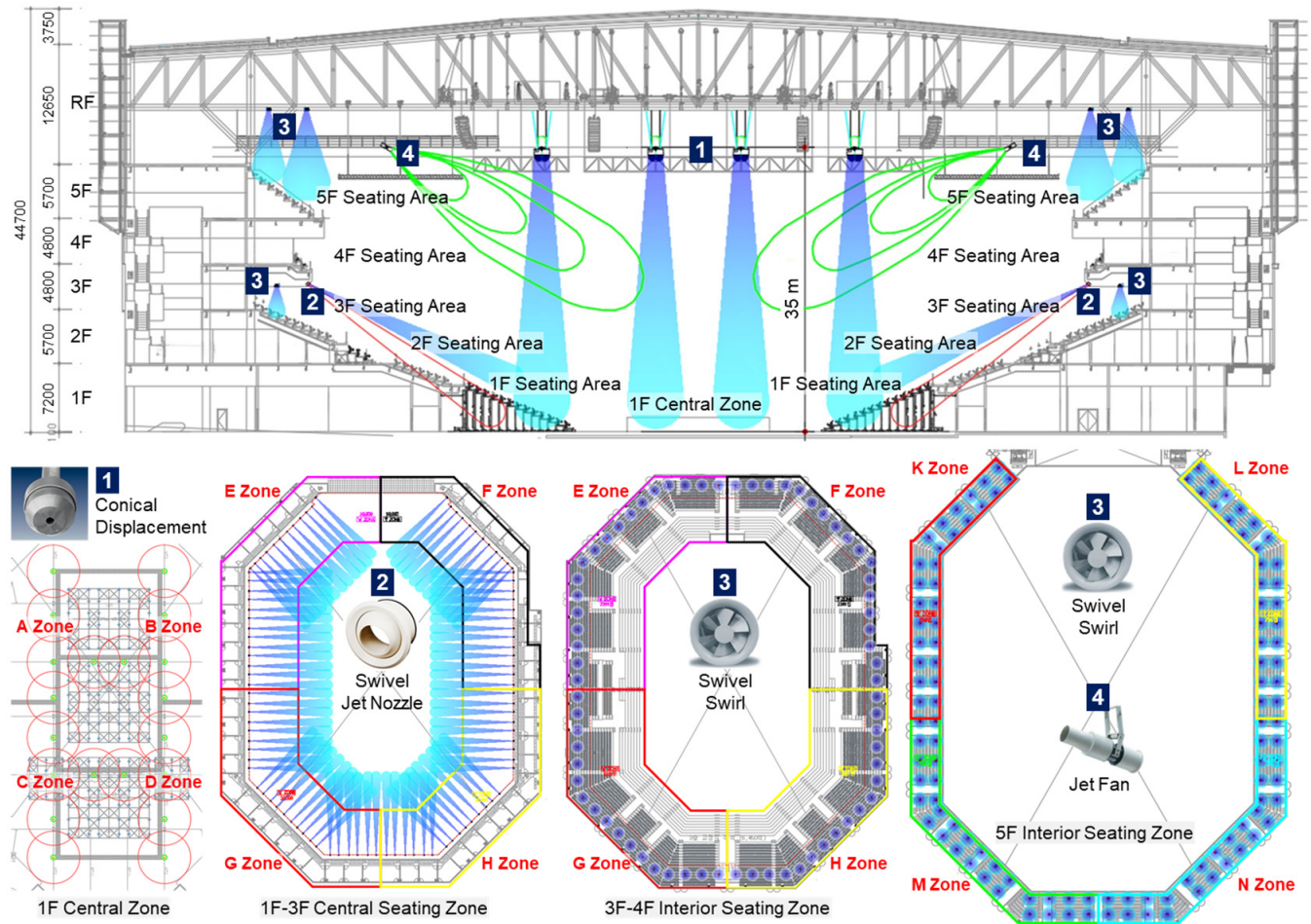


Fig. 2. HVAC zoning and air distribution strategy for S-Arena

설계되어 객석 전역에 균일한 공기 분배를 고려하였다. 소음 수준은 51dB(A)/46 NC로 설정되어 이벤트에 적합한 환경을 제공한다. 각 노즐의 압력 강하는 13.0mmAq로 에너지 효율성과 동시에 균일한 공기 흐름을 유지한다.

SJN은 전동 액추에이터를 통해 각도를 조절할 수 있어 실시간으로 공기 흐름 방향과 범위를 제어할 수 있다. 객석 구역 내 콜드 드래프트(cold draft) 현상을 방지하여 효과적으로 쾌적한 환경을 유지할 수 있다.

4층과 5층 상부에 위치한 내부존 좌석에는 가변 선회 디퓨저(③ SSD: Swivel Swirl Diffuser)가 적용되었으며, 높이 10m 이내의 국소적인 공기 분배를 통해 열적 균일성을 유지하면서도 상부 공간의 효율적인 냉난방 공급이 가능하다. 4층은 하나의 디퓨저가 555 CMH를 공급하며, 4구역(E, F, G, H)으로 총 72개의 유닛이 40,000 CMH의 풍량을 공급한다. 5층의 각 디퓨저는 833 CMH(60개) 및 892 CMH(56개)의 공기를 공급하며, 안정적인 환경을 유지한다. 각 존(K, L, M, N)은 25,000 CMH의 급기로 총 100,000 CMH의 객석 전체의 균형 잡힌 공기 흐름을 유지한다. 소음 수준도 37dB(A)/32 NC로 유지되어 이벤트 중 방해를 최소화하였다. 각 디퓨저는 2.7mmAq의 낮은 압력 강하에서 작동하고 공급 각도는 35~75°까지 조절 가능하며, 특정 객석 요구에 맞는 공기 흐름을 제공한다. 액추에이터가 장착되어 공기 공급 방향과 양을 실시간으로 조정할 수 있어 다양한 조건과 재실수준에 적용할 수 있어 상층부 객석의 열적 성층화 문제를 해결하였다.

마지막으로, 12,000 CMH 기류 순환 팬(④JF: Jet Fan) 10대를 추가하여 공간 내부의 공기 흐름을 안정적으로 유지하며, 콜드 드래프트 현상과 에너지 소비를 최소화하도록 설계하였다.

S-아레나의 공조 시스템은 각각의 객석 구역과 층별 요구 사항에 맞춘 다양한 공조 전략을 통해 대규모 공간에서의 열 분포 개선을 극대화하는 동시에, 에너지 절약과 소음 제어를 최우선으로 고려할 설계를 특징으로 한다. 이러한 공조 방식은 다목적 아레나로서의 기능적 요구를 충족시키는 데 중요한 역할을 하며 상세적용사항은 Table 2.와 같다.

4. 방법론




4.1. CFD 수치해석 개요

S-아레나의 공조 성능과 열 분포 개선을 평가하기 위해 CFD시뮬레이션이 수행되었다. 본 연구에서는 STAR-CCM+ 소프트웨어를 사용하여 공기 흐름, 온도 분포, 환기 효율성 등을 정밀 분석하였다. CFD 시뮬레이션은 유체 흐름과 열 전달 현상을 지배하는 주요 방정식을 기반으로 수행되었으며, 연속 방정식(질량 보존), 운동량 방정식(Navier-Stokes 방정식), 에너지 방정식(열 보존), 그리고 난류 모델($k-\epsilon$ 모델)을 포함한다. 이를 통해 기류의 속도와 압력, 온도 변화, 열 에너지 전달 과정을 정량적으로 해석하였다. CFD 시뮬레이션의 궁극적인 목표는 공조 시스템 설계와 최적화를 위한 중요한 데이터와 효율적인 공조 운영을 위한 방향성을 제시하는데 있다.

4.2. 수치해석 모델링

S-아레나는 다양한 공연과 스포츠 이벤트를 소화할 수 있는 복합 공간으로, 내부의 규모 및 크기는 139m(L) × 122m(D), 44m(H)로 CFD 모델링은 Fig. 3.과 같다.

Table 2. Detailed HVAC system design for S-Arena

Item / Zone	1F Central zone	1-3F Central seating zone	4-5F Interior seating zone
System type			
Air supply method	CDO: Conical Displacement Outlet Vertical displacement type	SJN: Swivel Jet Nozzle Sidewall jet type	SSD: Swivel Swirl Diffuser Vertical swirl type
Features	<ul style="list-style-type: none"> - Suitable for high ceilings with low energy loss - Maximum throw distance of 40m - Adjustable penetration depth using electric actuator - Optimized air distribution for various purposes - Requires minimal ductwork 	<ul style="list-style-type: none"> - Enables cooling up to 25-30m for side seating - Precisely controlled discharge angle using an electric actuator - Efficient noise suppression with aerodynamic construction - External diffuser for high thermal efficiency 	<ul style="list-style-type: none"> - High air distribution efficiency - Dual-mode control (cooling/heating) using an actuator - Prevents cold draft due to induced air mixing - Simplifies installation by minimizing ductwork - Ideal for local airflow requirements
Technical data	<ul style="list-style-type: none"> - Q = 11,000 CMH/EA - 69dB(A) - Max. Throw = 40m 	<ul style="list-style-type: none"> - Q = 1,600 CMH/EA - 51dB(A) - Max. Throw = 30m 	<ul style="list-style-type: none"> - Q = 892 CMH/EA, 833 CMH/EA - 42dB(A) - Max. Throw = 11m
Heating efficiency	A	B	A
Cooling efficiency	A	A	A

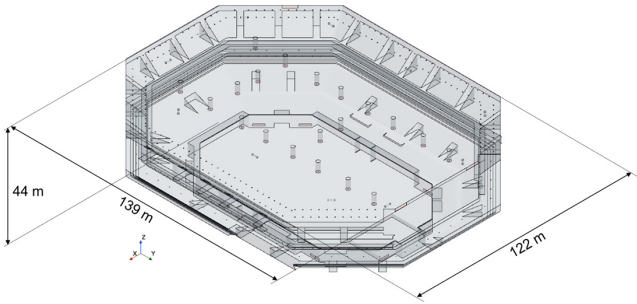


Fig. 3. CFD 3D modeling for S-Arena

공조 시스템은 중앙 공조기(AHU)에서 각 구역 및 존별 조건에 맞게 CDO, SJN, 및 SSD 그리고 기류순환을 위한 JF로 구성되었다. 각 구성 요소는 대규모 공간에서 균일한 온도를 유지하고 에너지 효율을 극대화하도록 설계되었다. 먼저, 중앙 AHU는 3층과 5층 그리고 천장에 각각 설치되었으며, 3층에는 50,000 CMH 용량의 4개 유닛, 5층에는 25,000 CMH 용량의 유닛 4대 그리고 천장형 55,000 CMH 유닛 4대가 배치되었다. 급기온도는 35°C로 설정하였으며, 제어 방법은 PID 제어를 사용하였다. 이러한 시스템은 대규모 공기를 처리하여 공연장 중앙과 객석부로 균일하게 분배하는 역할을 한다. 객석부 공조는 앞에서 이미 언급한 바와 같이, 층별로 설계된 공기 분배 장치를 통해 이루어진다. 또한, 환기 시스템은 1층과 5층에 RA(EA) 장치를 설치하여 효율적인 공기 배출을 보장하였다. 1층에는 23,750 CMH 용량의 장치 8대가, 5층에는 52,500 CMH 용량의 장치 4대가 배치되었다. JF는 천장 상부에 설치되어 공기 순환을 지원하며, 성능 최적화에 기여한다. 조명과 객석에서 발생하는 열 부하는 시뮬레이션에서 중요한 변수로 고려되었다. 천장 조명은 258,264W(20W/m²)의 발열 부하를 발생시키며, 관람석의 인체 부하는 120.28W/m²로 잠열과 현열을 별도로 구분하지 않고 전열을 기준하였다. 이러한 변수들은 공연장 내부의 온열환경을 보다 정확히 예측하기 위해 반영되었다. 외기 조건은 겨울철 서울 지역평균 외기 온도 -11.3°C를 적용하였으며, 중부2지역 단열기준을 고려하여 모델링하였다. 실내 환경은 난방 시 18~20°C를 유지하도록 계획되었다[19]. 공연장은 최대 18,256명의 관람객을 수용할 수 있다. CFD 모델링은 내부를 7,092,534개의 격자로 세분화하여 정밀한 시뮬레이션을 가능하게 하였다. 주요 경계 조건은 Table 3.과 같다.

5. 수치해석 결과

수치해석 시뮬레이션의 주요 목적은 공연장 내부의 공기 흐름과 열 분포를 분석하여 공조 시스템의 효율성을 검증하는 것이다. 수치해석 결과는 S-아레나의 공조 시스템 설계 및 운영 전략을 제안하는데 중요한 기초 자료로 활용되어 반영되었다.

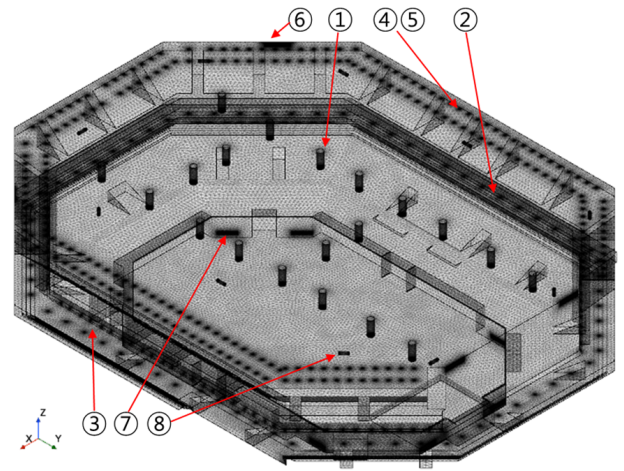
본 논문은 대공간의 겨울철 난방운전에 초점을 두었기 때문에 난방조건을 중심으로 결과를 정리하였다.

5.1. 난방공급의 적정성(속도장)

아레나 내부에서 발생하는 온도 성층화는 난방 공기의 부력으로

Table 3. Boundary conditions for CFD simulation

No.	Modeling	Boundary conditions
①	CDO	SA 11,000 CMH × 20ea
②	SJN	SA 1,600 CMH × 100ea
③	SSD (3F)	SA 555 CMH × 72ea
④	SSD (5F)	SA 892 CMH × 56ea + 833 CMH × 60ea
⑤		RA 840 CMH × 112ea
-	Light (Ceiling)	258,264W (20W/m ²)
⑥	RA (5F)	RA 52,500 CMH × 4ea
⑦	RA (1F)	RA 23,750 CMH × 8ea
⑧	JF (Ceiling)	12,000 CMH × 10ea
-	Seating area	120.28W/m ²
-	Grid number	7,092,534ea



인해 거주 영역을 벗어나 상부로 이동하면서 발생한다. 이는 열적 쾌적성을 저해하고 에너지 손실을 초래하는 주요 요인으로 작용한다. 본 설계안에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 CDO와 SJN의 강한 하강 기류를 활용하여 공기를 균일하게 분산시키고, SSD와 JF를 통해 열 성층화를 억제하려는 시도가 이루어졌다. Fig. 4.는 겨울철 난방 모드에서의 각각의 시스템별로 속도장 분석 결과를 보여준다.

Fig. 4(a)는 아레나 전역에서의 기류 속도를 나타내며, 모든 공조 시스템이 작동했을 때의 이상적인 공기 흐름 특성을 보여준다. 가열된 공기가 부력으로 인해 상부로 상승하려는 성질을 보이지만, CDO와 SJN에서 공급된 하강 기류가 이를 억제하며 거주 영역 내에 공기를 균일하게 분포시키는 역할을 한다. 다만, 특정 구역에서 약간 높은 속도(최대 20m/s)의 기류가 관찰되며, 이는 열적 쾌적성을 저해할 가능성이 있지만, 전체적인 설계 맥락에서 공기 순환 효율을 고려했을 때 수용 가능한 수준으로 볼 수 있다.

CDO는 높은 천장에 설치되어 난방 시 하강 기류를 형성하며, 열 성층화를 억제하고 거주 영역으로 효과적으로 열을 전달한다. Fig. 4(b)에서 확인할 수 있듯이, CDO는 1층 및 2층 좌석에 균일한 온도를 유지하기 위해 공기를 분산시키며, 하강 기류의 속도는 관객의 불편을 최소화할 만큼 적절히 조정되어 있다. 특히, 상부에서 공급되는 공기가 하부로 원활히 전달되어 열 효율성을 높이는 데 중요한 역할을 한다.

SJN은 측벽에 설치되어 1층에서 3층 좌석까지 난방 공기를 공급

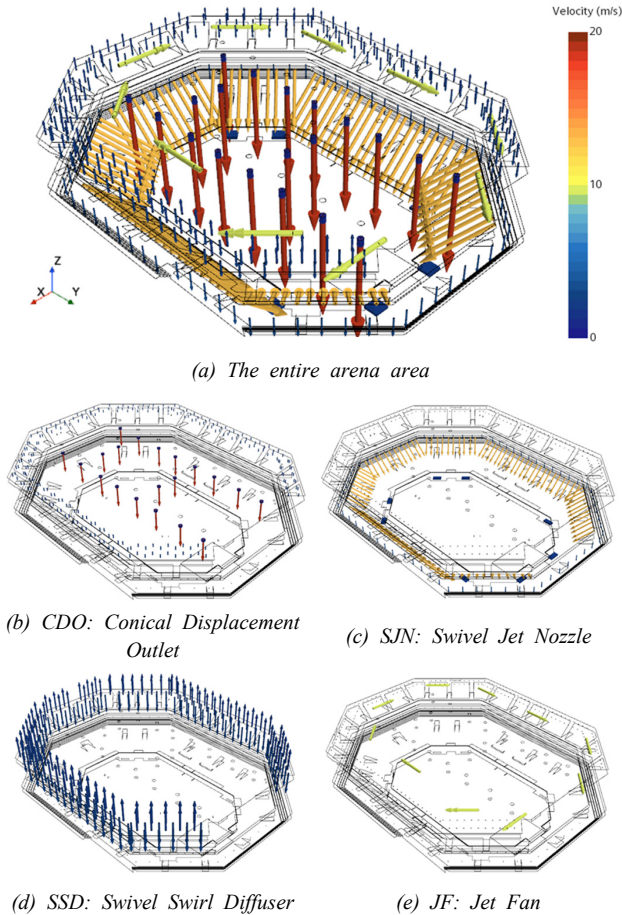


Fig. 4. Analysis of CFD velocity field in winter heating mode

하며, Fig. 4(c)에서는 SJN이 각기 다른 방향으로 기류를 조정해 좌석 영역으로 공기를 정확히 전달하는 모습을 보여준다. SJN에서 생성된 공기는 강한 방향성을 가지며, 객석 등 거주역에 적절한 속도로 도달하여 열 분포 개선을 보장할 수 있다. 특히, 높은 천장 구조로 인해 상부로 상승하는 부력을 효과적으로 상쇄시키며, 관객의 열적 편안함을 유지할 수 있는 이상적인 설계로 평가된다.

Fig. 4(d)의 SSD는 3층, 4층 중층부와 5층 좌석에서 국부적인 공기 분배를 담당하며, 공기가 비교적 낮은 속도로 확산되는 모습을 보여준다. 이 장치는 상부에서 하부로의 열 전달을 강화하며, 성층화 현상을 완화시키는 데 중요한 역할을 한다. 특히, 국부적인 열 분포를 개선하면서 상층부와 하층부 간 온도 차이를 줄이는 데 효과적이다. 이 시스템은 저속 기류로 관객의 불쾌감을 최소화하면서도 충분한 난방 효과를 제공할 수 있다.

마지막으로, Fig. 4(e)와 같이, JF는 천장 상부에 설치되어 난방 모드에서 공기 순환을 보조하며 열 성층화를 방지한다. JF는 상층부에서 강한 공기 흐름을 유도하여 아레나 전체의 공기 순환을 향상시키는 데 기여한다.

특히, 상부로 상승하려는 따뜻한 공기를 다시 하부로 재분배함으로써 에너지 손실을 최소화할 수 있다. 그러나 JF에서 발생하는 소음이 관객에 영향을 미칠 가능성이 있어 추가적인 소음 완화 대책이 필요하다.

5.2. 온도분포 결과

겨울철 난방 모드에서의 온도 분포는 중앙부와 객석, 그리고 아레나 전체의 다양한 높이와 위치에서의 특징적인 온도 변화를 보여준다. 각각의 영역과 높이별로 상세히 분석한 결과는 Fig. 5와 같다.

첫째, Fig. 5(a)는 중앙부의 바닥에서 1.5m 높이에 해당하는 온도 분포로 주요 아레나 하부 거주 영역의 열 분포 개선을 확인할 수 있는 중요한 지표이다. 이 높이에서의 온도는 대체로 20.0°C에서 22.0°C 사이로 분포, 평균 21.64°C로 균일하게 유지되고 있으며, 관객이나 사용자들이 주로 머무는 높이에서 적절한 난방이 이루어지고 있음을 보여준다. 그러나 일부 가장자리 구역에서는 약간의 열 손실이나 18.0°C 아래로 온도가 낮아지는 부분이 관찰되었다.

둘째, 중앙부의 바닥에서 3.0m 높이인 Fig. 5(b)의 온도 분포는 하부와 비교하여 더 큰 온도 차이를 보여준다. 이 높이에서는 부력 효과로 인해 따뜻한 공기가 상층으로 이동하면서 온도가 20.5°C에서 22.5°C 사이로 분포한다. 그러나 평균온도는 20.91°C로 큰 문제없이 설정온도에 근접한다. 만약 과열 현상이 발생할 경우, 이는 온도 성층화가 진행되고 있다는 것을 의미하며, 상부 공간에 불필요한 에너지 소비가 발생할 수 있다. 이 문제를 완화하기 위해 상층부 JF의 가동이 필요하지만 분석결과는 문제가 발생하지 않았다.

셋째, 1~3층 객석에서 1.0m 높이의 온도 분포는 Fig. 5(c)와 같이, 20.5°C에서 22.0°C로 비교적 균일한(평균 21.10°C) 패턴을 보인다. 이는 관객들이 주로 앉아 있는 높이에서 열 분포 개선을 확보하고 있다는 점에서 중요하다. 그러나 일부 객석부 외주부에서는 온도가 18.5°C까지 낮아져 중앙부와 온도 차이가 존재한다. 이는 외주부의 난방 효율이 상대적으로 낮거나, 외부 환경으로부터의 열 손실이 영향을 미쳤을 가능성을 보여준다. 따라서 외주부 좌석 구역에 대한 추가적인 풍량 조절로 난방 공급에 문제가 없도록 조치하였다.

넷째, 아레나 전체 종단면(Fig. 5(d))의 온도 분포는 온도 성층화에 문제가 없음을 더욱 명확히 보여준다. 하단부는 대체로 21°C로 안정적으로 유지되고, 상단부로 갈수록 온도가 약간 상승하여 22.5°C 정도로 유지된다. 이는 일부 부력 효과로 인한 따뜻한 공기의 상승이 주된 원인으로 작용하지만, 성층화에 따른 열적 쾌적성 저하의 문제는 발생하지 않았다. 그럼에도 불구하고 하부와 상층부에서의 온도 차를 효과적으로 줄이기 위해서 JF를 통한 아레나 전체의 재순환하는 메커니즘을 적용하였다.

다섯째, 아레나 전체 횡단면(Fig. 5(e))의 온도 분포도 중앙부 내부와 외주부 간의 온도 차이를 보여준다. 중앙부는 22.5°C로 안정적인 반면, 외주부는 약간의 열 손실로 21°C의 약간 낮아지는 현상이 확인되었다. 그러나 이 또한 문제 사항은 아니다.

현재 설계된 난방 시스템은 중앙부와 주요 활동 공간에서 대체로 열 분포 개선을 확보하고 있다. 성층화로 인한 상층부 과열 문제와 외주부 열 손실 문제는 매우 약하게 존재하지만 큰 문제의 소지는 없는 것으로 판단된다. 이를 개선하기 위해 공조 시스템의 취출 각도와 풍량 조정, 그리고 상층부 공기 순환 메커니즘을 가동하면 충분한 해소 가능하다. 이러한 운영상의 조치를 통해 에너지 소비를 줄이는 동시에 전체 공간에서 균일한 열 분포를 충분히 확보할 수 있다.

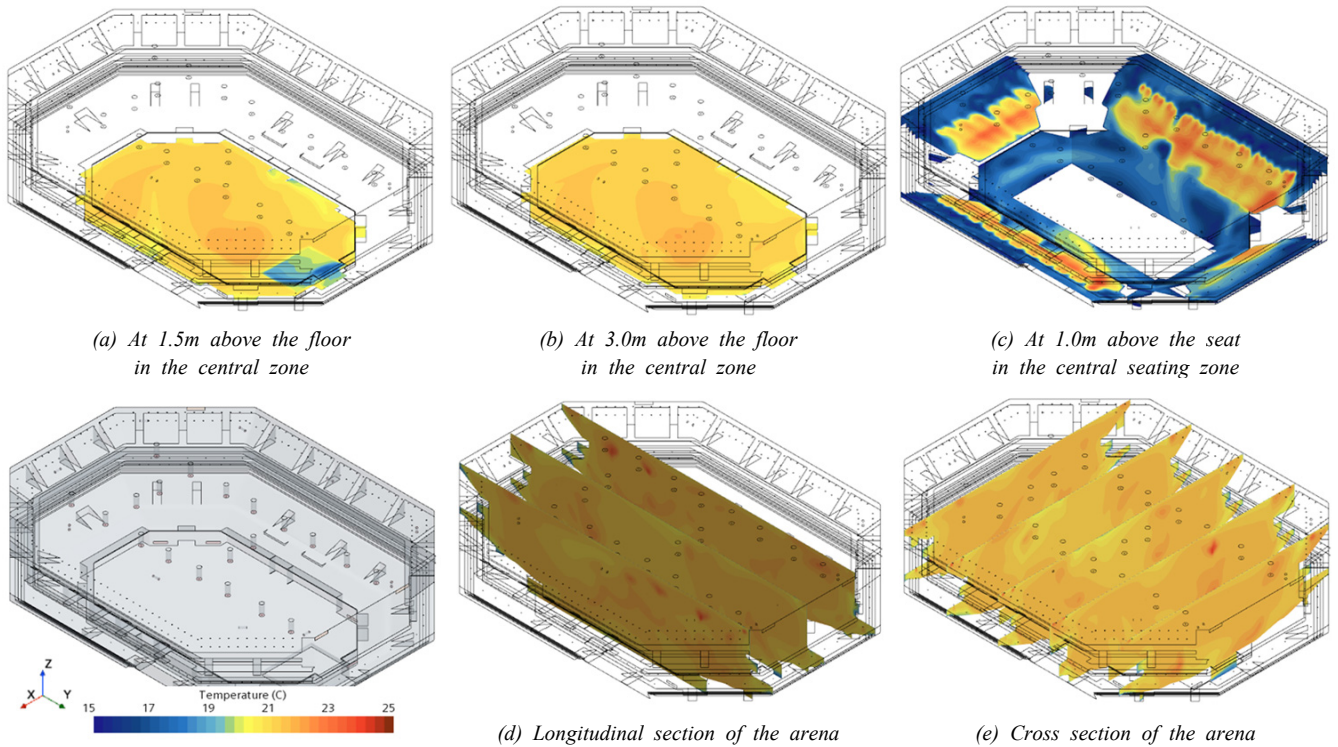


Fig. 5. Air temperature distribution under winter heating mode

5.3. 기류분포 결과

대공간 공조시스템의 기류속도 설계는 일반적으로 거주 영역에서 쾌적성을 유지하기 위해 기류속도를 0.5m/s 이하로 유지하며, 국부적으로 환기 효율을 높이기 위해 최대 1.0m/s까지 허용되지만 과도한 기류속도는 에너지 소비 증가와 불쾌감을 초래할 수 있으므로 피해야 한다. 구역별 공조 제어를 통해 각 영역의 열 부하를 효과적으로 처리하고, 공기 공급 각도와 속도를 최적화하여 온도 성층화를 최소화하는 것이 본 설계의 핵심이다. 각각의 영역과 높이별로 기류속도를 상세히 분석한 결과는 Fig. 6.과 같다.

Fig. 6(a), 중앙부의 바닥에서 1.5m 높이는 재실자들이 직접 체감하는 주요 공간으로, 기류 속도는 주로 0.2~0.5m/s 범위 내에서 관찰되었다. 극히 일부 구간에서는 최대 0.8m/s의 기류가 나타나기도 했지만 이 범위의 기류 속도는 쾌적성 기준에 대체로 부합한다. 전반적으로 중앙부의 기류 분포는 매우 균일하게 유지되고 있으며, 국소적으로 발생하는 고속 기류는 공조 시스템의 미세한 조정으로 개선이 가능하다.

중앙부 3.0m 높이는 거주영역은 아니지만 공간 전체의 기류 분포를 보여주는 중요한 영역으로, Fig. 6(b)와 같이, 기류 속도는 0.2~0.5m/s로 나타났으며, 일부 구간에서 0.8m/s까지 증가했다. 이 높이는 인체 쾌적성과는 직접적인 관련이 적지만, 난방 공기가 효율적으로 확산되고 열 성층화가 방지되는지 확인하는 데 중요한 지표이다. 분석 결과, 이 영역에서의 기류는 적정 수준을 유지하고 있으며, 열적 균일성을 높이는 데 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

객석에서 1.0m 높이는 객석에 착석한 관람객들이 가장 직접적으로

체감하는 영역이기 때문에 보다 기류조건이 적정해야 한다. Fig. 6(c)와 같이, 해당 구역의 기류 속도는 대체로 0.2~0.3m/s로 나타나 쾌적한 공조 환경을 유지하고 있음을 확인할 수 있었다. 다만, 일부 구간에서는 1.0m/s의 높은 기류가 관찰되었다. 이는 특정 구조적 요인이나 공조 설계의 세부적 조정으로 충분히 개선할 수 있다.

아레나 전체의 종단면에서의 기류 속도는 공간 내 공기의 수직적 확산을 평가하는 기준이 된다. 분석 결과, Fig. 6(d)와 같이, 대부분의 구역에서 0.2~0.5m/s로 나타났으며, 일부 구간에서는 0.8m/s의 기류가 확인되었다. 이 분포는 난방 공기의 하부 방향 확산이 잘 이루어지고 있음을 의미하며, 열 성층화를 억제하는 데 효과가 있음을 보여준다. 다만, 일부 국소적인 기류속도는 조정의 필요가 있다.

마지막 Fig. 6(e) 횡단면에서의 기류 속도 분포는 공기의 수평적 이동과 확산을 평가하는 데 초점을 맞춘다. 이 영역의 기류 속도는 0.2~0.5m/s로 나타나, 열 에너지가 좌우로 고르게 확산되고 있음을 보여준다. 일부 구간의 최대 0.8m/s의 속도는 특정 구조적 요인이나 공조 시스템 배치로 인한 결과로, 이를 보완하기 위한 여러 가지 설계 개선사항은 앞에서 언급했다.

전체적으로, 아레나 내부의 난방 모드에서 기류 속도는 대체로 쾌적성을 유지할 수 있는 적정 범위(0.2~0.5m/s)에 속하며, 열적 균일성을 확보하고 있다. 다만, 일부 구간에서 관찰된 높은 속도(최대 1.0m/s)는 국소적으로 체감 환경에 영향을 미칠 수 있어, 공조 시스템의 정밀한 조정이 필요할 수 있다. 평균 기류 속도는 0.33m/s로 나타나, 겨울철 난방 공조 시스템의 효율성과 쾌적성을 보장하는 데 적합한 수준으로 평가된다.

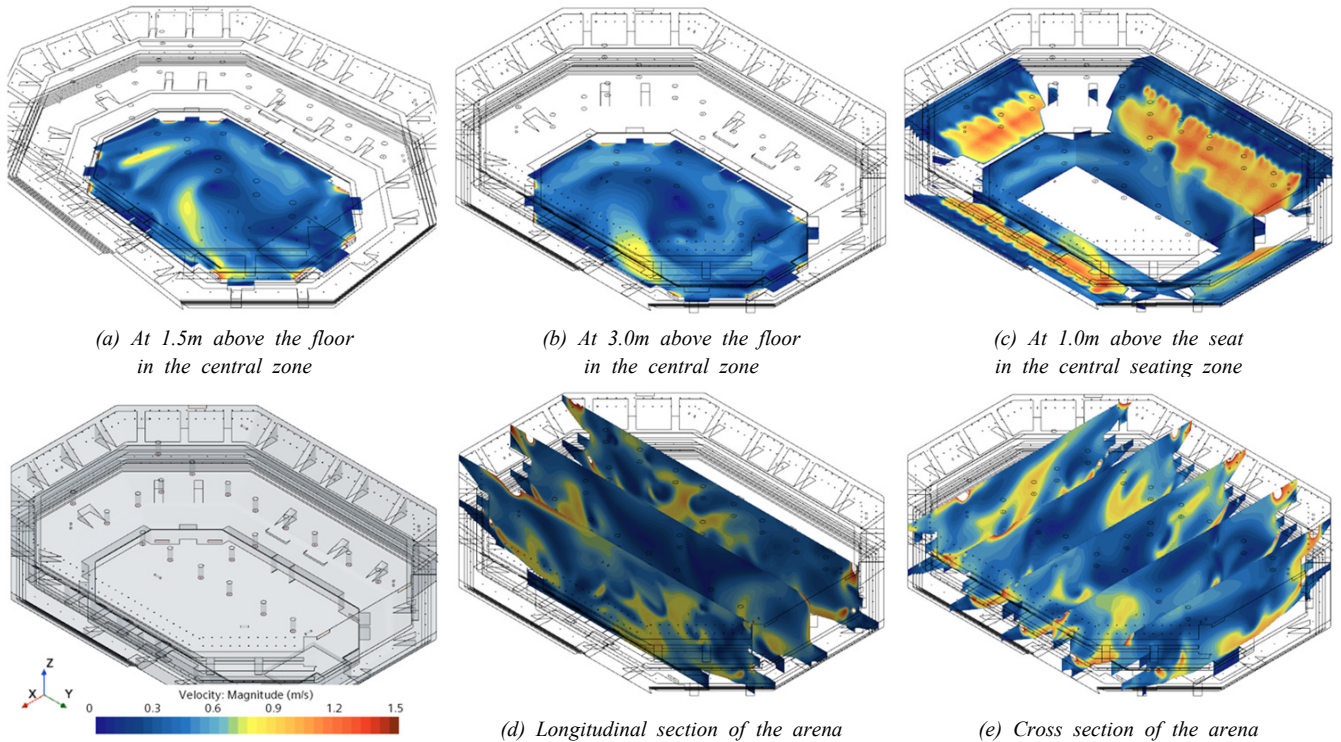


Fig. 6. Air velocity distribution under winter heating mode

6. 토의

본 연구에서 수행된 CFD 시뮬레이션을 통해 대공간 내부의 난방 모드에 따른 기류와 온도 분포를 분석하였으며, 이를 기반으로 아레나 내부의 공조 성능과 열 분포 개선을 평가하였다. 에너지 소비량 분석을 직접적으로 수행하지 않았으나, CFD 시뮬레이션 결과를 바탕으로 향후 에너지 절약 가능성을 평가할 수 있는 기초 데이터를 제공한다는 점에서 의미가 크다. 시뮬레이션 결과는 다음과 같은 실질적인 설계방안을 도출하였다.

첫째, 기류 속도와 열적 쾌적성의 상관관계를 통해 난방 시스템 설계의 적정성을 검토할 수 있었다. 전체적으로 기류 속도는 쾌적 범위인 0.2~0.5m/s를 유지했으나, 일부 구간에서 1.0m/s 이상의 국소적인 속도 증가가 관찰되었다. 특히, 이러한 높은 기류 속도는 객석 하부 및 상부 특정 위치에서 발생하며, 이는 공조 시스템 설계 시 보다 세부적인 기류 조절이 필요함을 시사한다.

둘째, 온도 분포의 균일성은 아레나의 난방 시스템 성능을 평가하는 주요 지표로 사용되었다. 중앙부에서는 온도 분포가 비교적 균일하게 유지되었으나, 일부 관람석 상부 구역에서는 상층부로 상승하는 온도 성층화 현상이 관찰되었다. 이는 난방 부하가 상부로 집중되는 현상으로, 에너지 효율성을 저하시킬 가능성이 있다.

셋째, 공조 시스템의 설계 적합성은 전체 시스템 구성 요소들의 배치 및 동작 특성에서 확인되었다. CDO와 SJN은 중앙 및 객석 하부 영역에서 효율적인 열 분배를 보여주었으며, SSD는 관람석 상부에서 발생하는 열적 불균형을 완화하는 데 효과적인 역할을 하였다. 그러나 일부 구간에서는 JF의 추가적인 활용이 필요함이 확인되었다.

넷째, 본 연구 결과는 에너지 절약과 쾌적성의 조화를 이루는 공조 설계의 중요성을 강조한다. 특히, CFD 시뮬레이션을 통해 공간별 세부 설계를 최적화할 수 있는 가능성을 확인하였으며, 이를 통해 에너지 소비를 줄이면서도 열 분포 개선을 확보할 수 있었다.

본 연구는 겨울철 난방 조건을 중심으로 공조 시스템을 분석하였으며, 여름철 냉방 운전 조건 및 계절적 요인은 고려되지 않았다. 또한, 본 연구에서 사용된 CFD 모델은 실험적 데이터 기반의 추가 검증이 이루어지지 않았으므로, 실제 운전 환경에서의 성능 차이가 발생할 가능성이 있다. 재실자의 행동 변화와 밀도 변화와 같은 동적 변수는 본 연구에서 포함되지 않았으므로, 이로 인한 열 분포 개선 및 에너지 효율에 대한 추가 연구가 필요하다.

7. 결론

본 연구는 S-아레나를 사례분석으로 하여, 다목적 대공간에서 겨울철 난방 운전 조건을 중심으로 공조 시스템의 설계와 성능을 평가하고, 열 분포 개선과 에너지 효율성을 동시에 만족시키는 최적화된 설계 방안을 제시하였다. 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- S-아레나의 대공간 특성에 적합하도록 설계된 공조 시스템은 CDO(콘형 치환 취출구), SJN(선회 제트 노즐), SSD(가변 선회 디퓨저), JF(기류 순환팬)으로 구성되었다. 각 장치는 대공간의 열 분포를 유지하며 에너지 효율성을 극대화하기 위해 역할별로 설계되었으며, CFD 시뮬레이션을 통해 성능이 검증되었다.
- 특히 CDO와 SJN은 중앙부와 주요 활동 구역에서 균일한 기류와 온도 분포를 제공하며, SSD는 열 손실을 최소화하는 데 기여

하였다.

- CFD 시뮬레이션 결과, 권장 기류 속도 범위(0.5 m/s 이하)를 대체로 만족하였으며, 일부 구역에서 1.0 m/s를 초과하는 구간은 특정 설계 요소의 조정을 통해 개선 가능성을 확인하였다. 이를 통해 공조 시스템의 세부 설계와 운전 조건을 최적화할 수 있는 가능성을 제시하였다.
- 온도 분포 분석 결과, 중앙부와 주요 활동 구역에서 20.5°C~22.0°C의 균일한 온도를 유지하였으며, 이는 열 분포 개선과 에너지 효율 간의 균형을 이루는 설계임을 보여주었다. 다만, 일부 구역에서 18.0°C 이하로 낮은 온도가 관찰되어 추가적인 설계 보완이 필요함을 도출하였다.

제안된 공조 시스템은 다목적 대공간에서 에너지 소비를 줄이면서도 열 분포를 개선할 수 있는 효율적인 설계 방안을 입증하였다. 특히, CFD 시뮬레이션을 활용하여 설계 초기 단계에서 최적화 가능성을 제시한 점은 학술적, 실무적으로 중요한 기여를 할 것을 판단된다.

본 연구의 한계는 에너지 소비량 분석이 포함되지 않았으며, 외기 조건 변화와 재실자의 동적 활동을 반영하지 못한 점이다. 이는 향후 연구에서 보완할 예정이다.

References

- [1] M. Taebnia et al., Developing energy calculation methodology and calculation tool validations: Application in air-heated ice rink arenas, *Energy & Buildings*, 226, 2020.11, 110389.
- [2] H. Caliskan, A. Hepbasli, Energy and exergy analyses of ice rink buildings at varying reference temperatures, *Energy and Buildings*, 42(9), 2010.09, pp.1418-1425.
- [3] G.O. Erol, E. Açıkkalp, A. Hepbasli, Performance assessment of an ice rink refrigeration system through advanced exergoeconomic analysis method, *Energy and Buildings*, 138, 2017.03, pp.118-126.
- [4] J. Lyu et al., Experimental and numerical analysis of air temperature uniformity in occupied zone under stratum ventilation for heating mode, *Journal of Building Engineering*, 43, 2021.11, 103016.
- [5] W. Lin, X. Liu, T. Zhang, Indoor thermal and humid stratification and statistical distribution in ice arenas, *Journal of Building Engineering*, 67, 2023.05, 106072.
- [6] H. Wang et al., On the calculation of heat migration in thermally stratified environment of large space building with sidewall nozzle air-supply, *Building and Environment*, 147, 2019.01, pp.221-230.
- [7] 송두삼, 박재중, 대공간 구조물의 공기조화설비, 한국공간구조학회지, 제16권 제3호, 2016.09, pp.24-30. // (D.S. Song, J.J. Park, HVAC system of large enclosures for sports events, *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, 16(3), 2016.09, pp.24-30.)
- [8] S. Yan, X. Li, Comparison of space cooling/heating load under non-uniform indoor environment with convective heat gain/loss from envelope, *Building Simulation*, 14(3), 2021.06, pp.565-578.
- [9] 최동호, 정성진, 석호태, 대규모 실내경기장의 동계 온열환경 특성 실측조사 -인체부하 미고려 조건-, 한국공간구조학회지, 제7권 제3호, 2007.06, pp.67-77. // (D.H. Choi, S.J. Jeong, H.T. Seok, A study on the indoor thermal environment of the large gymnasium space in winter -Without heat loads from occupancy-, *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, 7(3), 2007.06, pp.67-77.)
- [10] G. Losi et al., Analysis of thermal comfort in a football stadium designed for hot and humid climates by CFD, *Journal of Building Engineering*, 33, 2021.01, 101599.
- [11] P. Sofotasiou, B.R. Hughes, J.K. Calautit, Qatar 2022: Facing the FIFA World Cup climatic and legacy challenges, *Sustainable Cities and Society*, 14, 2015.02, pp.16-30.
- [12] W. Guo et al., Combining EnergyPlus and CFD to predict and optimize the passive ventilation mode of medium-sized gymnasium in subtropical regions, *Building and Environment*, 207, Part A, 2022.01, 108420.
- [13] M. Zofron Afif et al., CFD simulation in naturally ventilated multi-purpose sports hall: Effects to the basketball and badminton matches, *Proceedings of the 16th IBPSA Conference*, 2019.09, pp.629-634.
- [14] W. Lin, X. Liu, T. Zhang, Indoor thermal and humid stratification and statistical distribution in ice arenas, *Journal of Building Engineering*, 67, 2023.05, 106072.
- [15] W. Lin, X. Liu, T. Zhang, Experimental and numerical study of zonal heat and moisture migration inside artificial ice rinks, *Building and Environment*, 245, 2023.11, 110897.
- [16] T. Nishioka et al., Measurement and evaluation of the indoor thermal environment in a large domed stadium, *Energy and Buildings*, 32(2), 2000.07, pp.217-223.
- [17] S. Lestinen et al., Air distribution and indoor climate in a multipurpose arena, *CLIMA 2016 Proceedings of the 12th REHVA World Congress*, 2016.05.
- [18] 윤재욱, 이주희, 인천국제공항 제2여객터미널 대공간의 일사를 고려한 냉방기 실내온도, 기류분포 시뮬레이션 분석 연구, 대한건축학회논문집, 제36권 제8호, 2020.08, pp.119-126. // (J.Y. Yoon, J.H. Lee, The simulation of indoor temperature and air-flow in summer considering solar radiation at the great hall of Incheon International Airport Terminal 2, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 36(8), 2020.08, pp.119-126.)
- [19] 국토교통부, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙(국토교통부령 제1375호), 2024. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Rules on the building equipment standards(Ordinance of the MOLIT), 2024.)