

# 원자력발전소 주제어실의 온도 제어를 위한 CFD 기반의 ROM을 사용한 실시간 열유동 해석

최대경\* · 강승훈\* · 손성만\*, 최청열\*†

## Real-time Thermal Flow Analysis using ROMs of CFD for Temperature Control of MCR of Nuclear Power Plants

Dae Kyung Choi\*, SeungHoon Kang\*, Sung Man Son\*, Choengryul Choi\*†

Key Words : Reduced Order Model (ROM, 차수축소모델), Computational Fluid Dynamics (CFD, 전산유체역학), Main Control Room (MCR, 주제어실), Real-Time Control(실시간 제어), Digital Twin (DT, 디지털트윈)

### ABSTRACT

Digital Twin(DT) technology, which digitally replicates physical systems for simulation, offers significant potential in optimizing complex systems like nuclear power plants. Maintaining accurate real-time temperature control in the main control room (MCR) is critical, but traditional sensors face limitations. This study develops a real-time thermal flow analysis using CFD-based Reduced Order Modeling (ROM) to address these challenges. A virtual MCR and HVAC system were constructed, followed by 3D CFD analysis under various conditions to generate and validate the ROM. The ROM demonstrated near-instant analysis times, enabling real-time thermal distribution monitoring. Future integration of this ROM with MCR HVAC systems is expected to enhance temperature control precision and efficiency, with potential applications across various industries.

### 1. 서론

디지털트윈(Digital Twin) 기술은 현실 세계의 객체나 시스템을 디지털 환경에 정확하게 복제하여 다양한 시뮬레이션을 수행할 수 있게 하는 혁신적인 기술로, 특히 원자력발전소와 같은 복잡한 시스템에 적용 가능성이 높다. 디지털트윈을 통해 현실에서 실행하기 어려운 테스트를 디지털 환경에서 자유롭게 수행하고, 이를 기반으로 실제 시스템의 운영과 관리를 최적화할 수 있다.

디지털트윈의 개념은 초기에는 센서와 데이터 마이닝 기술의 한계로 인해 구현이 어려웠으나, 최근 센서, 사물인터넷(IoT), 빅데이터, 인공지능, 사이버 물리 시스템(CPS, Cyber-Physical Systems) 등 4차 산업혁명 기술의 발전으로 디지털트윈 기술이 급속히 발전하고 있다. 이러한 기술 발전은 디지털트윈을 다양한 산업에서 생산성, 경제성, 안전성을 향상시키는 중요한 기술로 자리매김하게 했다.

원자력발전소의 안전하고 효율적인 운영을 위해서는 다양한 변수를 실시간으로 모니터링하고 제어해야 한다. 그 중에서도 주제어실(MCR, Main Control Room)은 원자력발전소의 핵심 운영 공간으로, 실시간으로 정확한 온도 유지는 매우 중요하다. 주제어실 내에는 온도 센서들이 설치되어 공조 시스템을 통해 온도를 제어하지만, 센서의 오작동이나 위치적 한계로 인해 온도 제어에 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 주제어실 내 3차원 온도 분포를 실시간으로 취득하고, 이를 활용하여 보다 대표성 있는 온도 데이터를 바탕으로 공조 시스템을 제어하는 기술이 필요하다.

3차원 온도 분포 취득은 3차원 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 해석을 통하여 가능하지만, 실시간 온도 분포를 얻는 데는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 CFD 해석 기반의 차수축소모델(ROM, Reduced Order Model)을 활용한 실시간 열유동 해석 기술을 개발하는 것이

\* (주)엘솔텍

† 교신저자, E-mail : crchoi@elsoltec.com

필요하다.

최근 인공지능(AI, Artificial Intelligence), 머신러닝(ML, Machine Learning), 그리고 차수축소모델(ROM, Reduced Order Model)과 같은 최신 기술들이 실시간 열유동현상을 해석하는 데 활발히 적용되고 있다. 이들 기술은 각각의 고유한 특성과 장점을 통해 다양한 분야에서 효율적인 문제 해결을 가능하게 하고 있다. AI는 지능적인 시스템 구축을 위한 목표를 제공하며, ML은 이러한 목표를 데이터 기반 학습을 통해 실현하는 수단을 제공한다. ROM은 복잡한 시스템의 모델링을 단순화함으로써 계산 효율성을 극대화하는 방법론이다. 이러한 기술의 결합은 특히 공학, 과학, 산업 분야에서 혁신적인 해결책을 제시하는 데 큰 기여를 하고 있다.

특히, 축소차수모델(ROM)은 복잡한 시스템의 주요 특성만을 포함하는 저차원 모델을 사용하여 계산 시간을 단축하고 자원을 절약할 수 있는 모델링 기법이다. 고차원 모델이 모든 세부 사항을 포함하는 대신, ROM은 시스템의 복잡성을 줄여 계산 효율성을 높인다. 이 모델링 기법은 유체 역학, 구조 역학, 전자기학 등 다양한 공학 분야에서 주로 활용되며, 시뮬레이션, 최적화, 제어 등의 목적에 유용하게 사용된다<sup>(1~12)</sup>.

본 연구의 최종 목표는 디지털트윈 기술을 활용하여 원자력발전소 주 제어실의 실시간 온도 제어를 위한 CFD 해석 기반의 ROM을 개발하는 것이다(Fig. 1). 본 연구는 다음과 같은 단계로 진행되었다. 첫째, 기존 원자력발전소 자료를 바탕으로 가상의 주 제어실과 HVAC(Heating, Ventilating, and Air Conditioning) 시스템을 설계한다. 이 과정에서는 주 제어실 내 기기와 장치들의 위치, 크기, 발열량, 급기/배기 풍량, 온도 등의 운전조건을 설계한다. 둘째, 다양한 운전조건에서의 3차원 온도 분포를 얻기 위해 3차원 CFD 해석을 수행한다. 마지막으로, CFD 해석 결과를 사용하여 ROM을 생성하고, 그 정확성과 적용성을 평가한다.

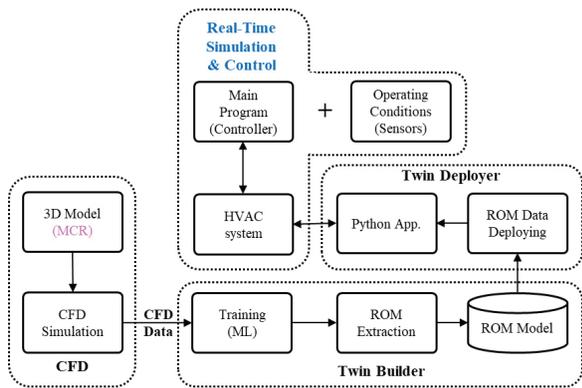


Fig. 1 CFD based ROM generation process

## 2. 원자력발전소 주 제어실

원자력발전소의 주 제어실은 원자로와 관련 시스템의 운전 및 제어를 담당하는 핵심 시설로, 발전소의 안정적이고 효율적인 운영을 보장하는 중심 역할을 한다. 주 제어실의 주요 기능에는 원자로와 관련 시스템의 실시간 모니터링, 제어, 안전 시스템 관리, 그리고 통신 및 협력 기능이 포함된다. 이 시설은 다양한 요소로 구성되어 있으며, 그중 제어 패널은 운전원에게 수동 제어 인터페이스를 제공하고, 모니터링 디스플레이는 실시간 데이터를 시각적으로 제공하여 운전원들이 시스템 상태를 빠르게 파악할 수 있도록 돕는다. 또한, 경보 시스템은 비상 상황 발생 시 시각적 및 청각적 경고를 통해 신속한 대응을 가능하게 하며, 운전석은 여러 개의 모니터와 제어 장치가 포함된 운전원의 근무 공간으로 설계되어 있다. 비상 대응 장비는 사고 발생 시 필요한 장비들이 비치되어 있어 긴급 상황에서의 대응을 지원한다. 주 제어실은 시스템 이중화 설계를 통해 비상 상황에서도 안정적인 운영을 유지할 수 있도록 설계되었다. 주 제어실의 적정 온도 유지는 장비의 원활한 작동과 운전원의 작업 환경을 보장하여 안전한 운영을 위하여 매우 중요하다.

본 연구에서는 주 제어실 내부의 온도 분포를 3차원 CFD 해석을 통해 취득하기 위해 먼저 기존 원자력발전소 주 제어실 자료를 참고하여 가상의 주 제어실을 설계하였다. 이 주 제어실에는 디스플레이 장치, 컴퓨터, 모니터, 캐비닛, 서버, 프린터 등 다양한 발열기와 HVAC 시스템(Supply Diffuser와 Return/Exhaust Grille 등), 조명 등이 포함된다. 천장에는 압력, 온도, 습도 조절을 위한 38개의 Supply Diffuser들과 24개의 Return/Exhaust Grille들이 설치되어 있다. 이러한 설비들은 주 제어실의 온도와 공기 흐름을 조절하는 데 중요한 역할을 한다. 주 제어실의 설계기준온도는 21.1 °C에서 25.0 °C 사이로 유지되도록 설정되어 있으며, 이는 장비와 운전원의 최적의 작업 환경을 보장하기 위함이다.

## 3. CFD 해석

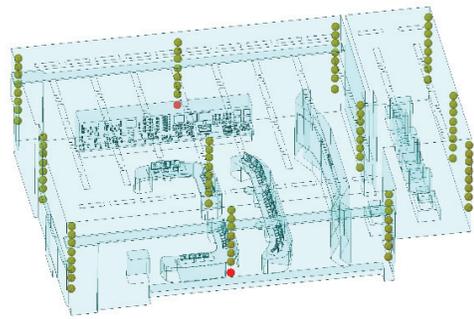
주 제어실 내의 다양한 운전조건 하에서의 3차원 온도 분포를 얻기 위해 3차원 CFD 해석을 수행하였다. 이를 위하여 주 제어실에 대한 3차원 CAD 제작, 유동해석 영역 추출, CFD 해석 격자 생성을 하였다. 이 격자에 다양한 해석조건을 부과하여 CFD 해석을 수행하여 다양한 운전조건에 따른 주 제어실 내의 온도분포를 얻었다.

### 3.1 CFD 해석 모델 및 조건

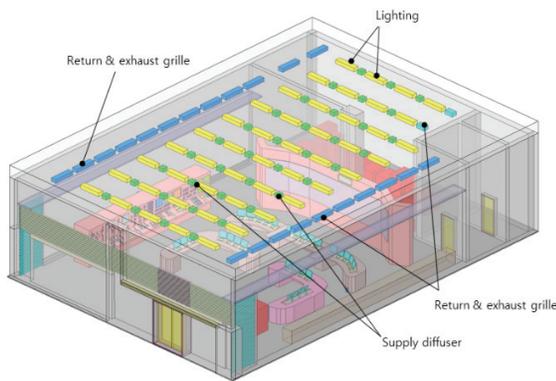
기존 원자력발전소의 주 제어실 자료를 참고하여 가상의 주 제어실을 설계하였다(Fig 2). 이를 활용하여 유동해석 영



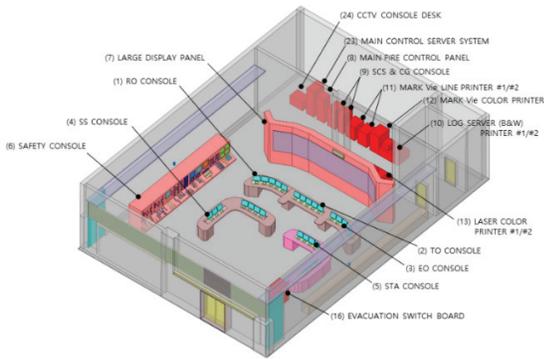
(a) Image of MCR



(a) Fluid domain (red: sensor, yellow: monitoring)



(b) Supply diffusers and return/exhaust grilles

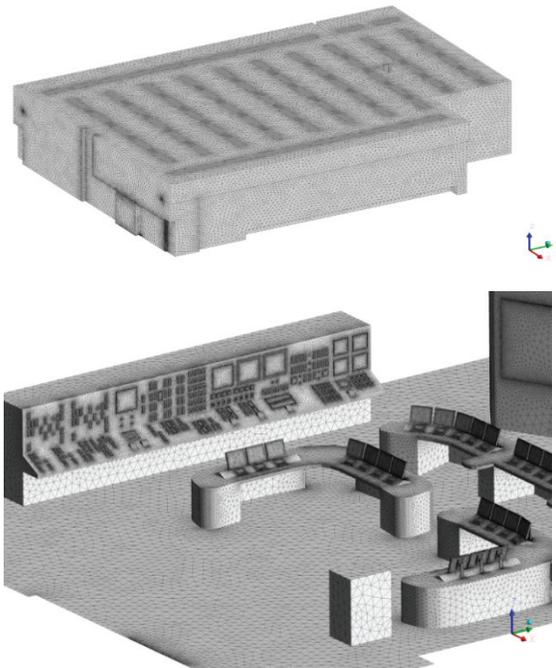


(c)

Fig. 2 Virtual main control room (MCR)

역 축출, CFD 해석 격자생성을 하였다(Fig 3). 격자 민감도 과정을 거쳐 최종적으로 해석에 사용된 격자는 8,991,000개 이다. 격자 제작 시, 물리량의 변화가 클 것으로 예상되는 HVAC 근처와 발열기기 인근 영역에는 보다 조밀한 격자를 배치하여 해석의 정확성을 높였다.

CFD 해석조건 수립을 위하여 먼저 기준이 되는 Supply Diffuser들과 Return/Exhaust Grille들에서의 풍량과 온도, 벽체들을 통한 전열량, 기기/장비의 발열량, 그리고 추가적인 열 부하를 결정하였다(Table 1), 이를 바탕으로 각 항목 별 변동폭을 결정하고, CFD 해석 시 적용할 항목 별 변동



(b) Mesh system

Fig. 3 CFD fluid model and mesh system

수량과 변동 값을 결정하였다. 이를 조합하여 총 96개의 CFD 해석 조건을 수립하였다. Supply Diffuser들의 유량은 20,732에서 24,650 CMH 범위로 설정하여 2개의 조건이 선정되었고, 공급 공기의 온도는 10.0 °C에서 30.0 °C까지 9개의 조건이 선정되었다. Return/Exhaust Grille들의 유량은 Supply Diffuser들과 동일한 범위에서 선정되었다.

벽체들을 통한 전열량은 인접 격실의 조건을 고려하여 바닥, 동쪽, 서쪽, 남쪽, 북쪽, 천장의 전열량은 각각 5.1 kW, 0.9 kW, 6.5 kW, 0.3 kW, -0.2 kW, 6.7 kW로 고정되었다. 이들의 합을 벽면 전열량이라 칭한다. 장비/기기(I&C Equipment)의 열 부하는 변동 범위가 있으며, 30.2 kW를 기준값(설계값)으로 24.7 kW~42.7 kW(설계값의 82 %에서 141 %)의 범위에서 7개를 선정하였다. 전기 부하는 고정된 3.3 kW로, 운전원들에 의한 열 부하는 0.6 kW로 고정하였다. 이들의 합을  $H_{s1}$ (Heat load I)이라 칭한다. 추가적인 열

Table 1 Design values and various operating conditions (CFD analysis cases)

		Unit	Design	Range	No. of Selected Operating Conditions [EA]	No. of Combined Operating Conditions for CFD [EA]	
Supply Diffuser	Flow rate	[CMH]	24,650	20,732~24,650	2	96	
	Temperature	[°C]	20	10.0~30.0	9		
Return/Exhaust Grille		Flow rate	[CMH]	24,650	20,732~24,650		2
Heat Load	Wall (Transmission)	Floor	[kW]	5.1	Fixed		1
		East	[kW]	0.9	Fixed		1
		West	[kW]	6.5	Fixed		1
		South	[kW]	0.3	Fixed		1
		North	[kW]	-0.2	Fixed		1
		Ceiling	[kW]	6.7	Fixed		1
	Hs1 (Heat Load I)	I&C Equip.	[kW]	30.2	24.7 kW~42.7 kW (82 %~141 %)		7
		Elect. Load	[kW]	3.3	Fixed		1
		Operator	[kW]	0.6	Fixed		1
	Hs2 (Heat Load II)	Add. Heat	[kW]	0	0.0 kW~20.0 kW	3	
SUM			53.4	47.9 kW~85.9 kW	-	-	

Table 2 Represented CFD analysis cases

Case	Supply Diffuser		Heat Load					Total [kW]
	Flow rate [CMH]	Temp. [K]	Hs1 (Heat Load I)				Hs2 (Heat Load II)	
			Wall [kW]	I&C Equip. [kW]	Elect. Load [kW]	Operator [kW]	Add. Heat [kW]	
01	24,650	303.15	19.3	30.2	3.3	0.6	0	53.4
			53.4					
06	24,650	290.65	19.3	30.2	3.3	0.6	0	53.4
			53.4					
52	20,732	295.65	19.3	30.2	3.3	0.6	0	53.4
			53.4					

부하(H<sub>s1</sub>, Heat load II)는 0 kW에서 20 kW 범위에서 3개를 선정하였다.

주제어실 내 다양한 운전조건에서의 온도분포를 취득하기 위하여 이들을 조합하여 총 96개의 CFD 해석 조건을 수립하였다. Table 2에 대표적인 해석 Case들의 해석 조건을 나타내었다.

### 3.2 CFD 해석 기법

주제어실 내의 다양한 운전조건 하에서의 3차원 온도 분포를 얻기 위해서 Table 1에 나타낸 것과 같이 다양한 운전조건 시나리오 총 96개에 대한 CFD 해석을 수행하였다. 주제어실 내의 공기의 흐름과 온도분포를 얻기 위해 지배방정식으로 연

속방정식, 운동량 방정식(Navier-Stokes Equation), 에너지 방정식을 사용하였고, 난류유동 특성을 고려하기 위하여 난류 모델로서 가장 일반적으로 널리 사용되는 standard k-ε 모델을 사용하였다<sup>(12,13)</sup>. CFD 해석은 ANSYS FLUENT를 사용하여 각각의 시나리오에 대하여 정상상태 해석을 수행하였다. 온도에 따른 공기의 밀도변화는 Boussinesq Approximation을 사용하였다.

Supply Diffuser들에는 Velocity Inlet으로 설정하였고, Return/Exhaust Grille들에 대해서는 1개는 Pressure Outlet으로 설정하고, 나머지는 Outflow(MCR을 빠져나가는 부호를 가지는 Velocity Inlet) 조건을 적용하였다. 주제어실 벽들, 바닥, 천정, I&C Equip.와 Elect. Load에 대한 열 부하는 Wall Heat Flux로 적용하였고, Operator와 Add. Heat은 해

당 영역에 Volume Heat Source로 부과하여 처리하였다. 해석 시 2개의 온도센서 위치들과 94개의 모니터링 위치들에서의 속도, 온도, 압력을 모니터링하였으며, Return/Exhaust Grille들에서 유량과 온도를 모니터링하였다.

ANSYS FLUENT에서 Pressure-Velocity Coupling으로는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 각 방정식들의 차분화 기법(Spatial Discretization Scheme)으로는 2<sup>nd</sup> Order Upwind Scheme이 사용되었다<sup>(12,13)</sup>. 수렴 기준은 모든 변수들의 Residual이  $10^{-3}$  이하가 되도록 설정하였다.

### 3.3 CFD 해석 결과

주제어실 내의 다양한 운전조건 하에서의 3차원 온도 분포

를 얻기 위해서 Table 1에 나타난 것과 같이 다양한 운전조건 시나리오 총 96개에 대한 CFD 해석을 수행하였다. 이중 Case 01에 대한 주제어실 내부에서의 공기의 흐름과 온도분포를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 Supply Diffuser들을 통하여 공기가 공급되는 것과 수평 단면에서의 속도벡터들을 보여준다. 주제어실 내 위치에 따른 속도 차이가 존재하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4(b)는 속도와 온도로 색상화된 유선(Streamlines)을 보여주며, 주제어실 내 매우 복잡한 공기 흐름을 상세하게 나타내고 있다. 유선을 통하여 공간 내 소용돌이 및 재순환 구역을 포착하여, 열 쾌적성 및 공기질에 영향을 미칠 수 있는 영역을 식별할 수 있다. Fig. 4(c)는 공간 내 온도 분포를 보여준다. 색상 맵은 온도 변화를 나타내며, 파란색은 더 낮은 온도를, 빨간색은 더 높은 온도를 나타낸

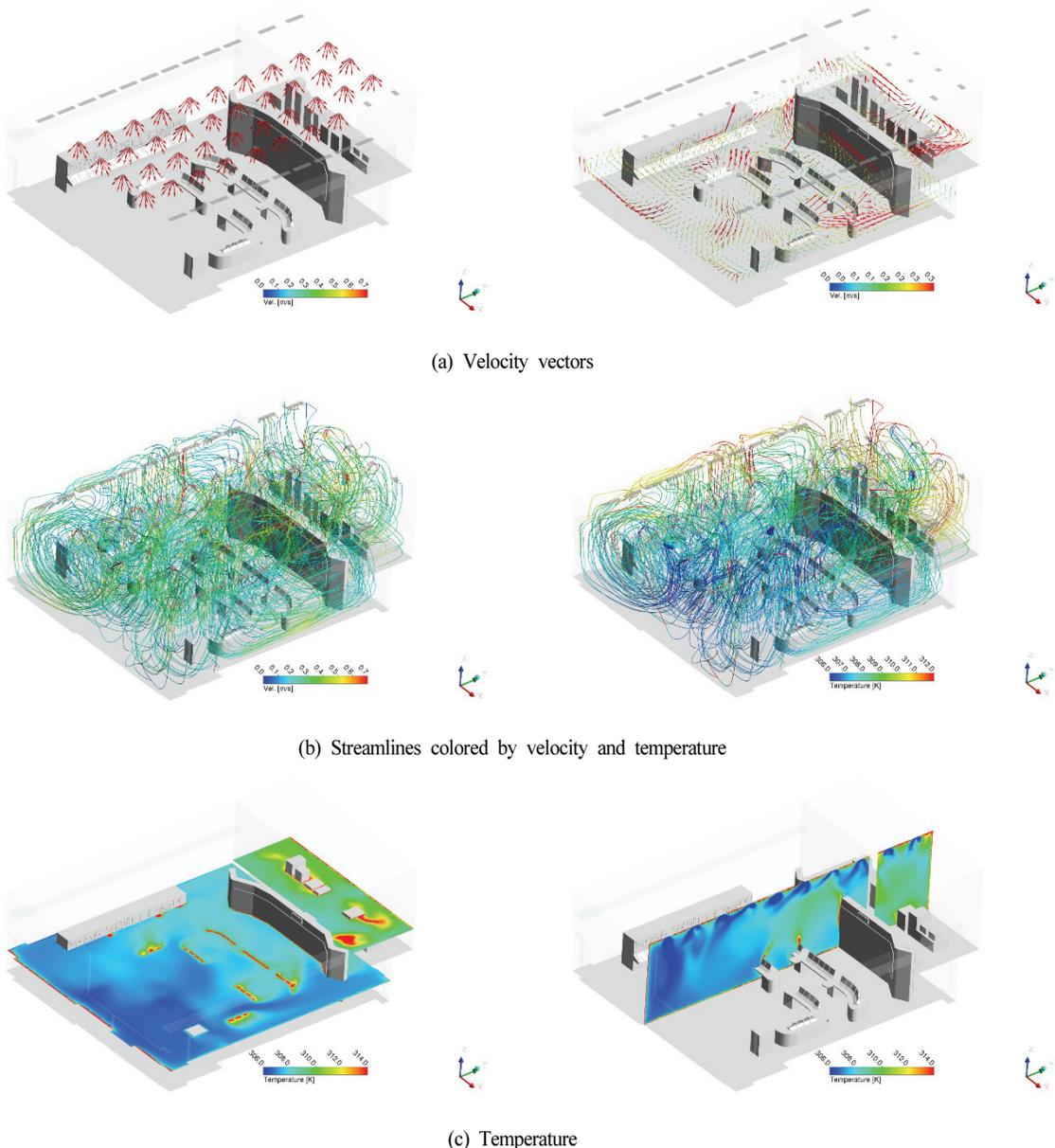
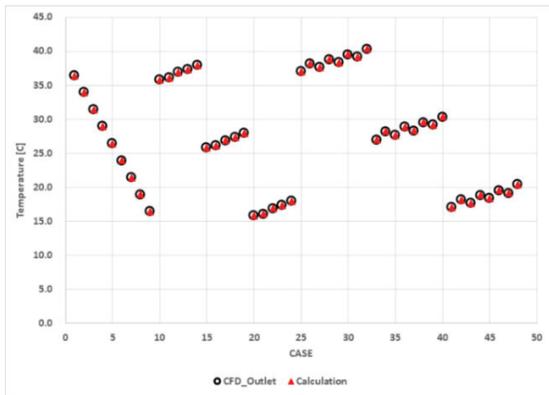


Fig. 4 CFD results of Case 01

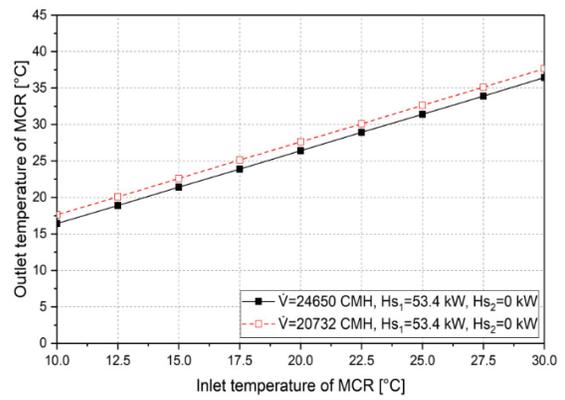
다. 이를 통하여 공간 내 열 쾌적성 조건을 평가하고, 과열 또는 냉각이 불충분한 영역을 식별할 수 있다.

Fig. 5은 이론 계산값과 CFD 결과 비교, 급기 공기유량, 급기온도, 및 열 부하의 영향을 포함한 여러 조건에서의 출구온도 변화를 그래프로 나타내었다. 이론값은 MCR로 공급되는 공기량과 MCR 내부의 발열량을 기반으로 MCR 출구에서의 평균 온도를 계산한 값이다. 먼저, Fig. 5(a)는 이론 계산값과 CFD 결과를 비교한 그래프로, 각 case에 대해 이론적인 계산값과 CFD 결과가 거의 동일하게 나타났다. 이는

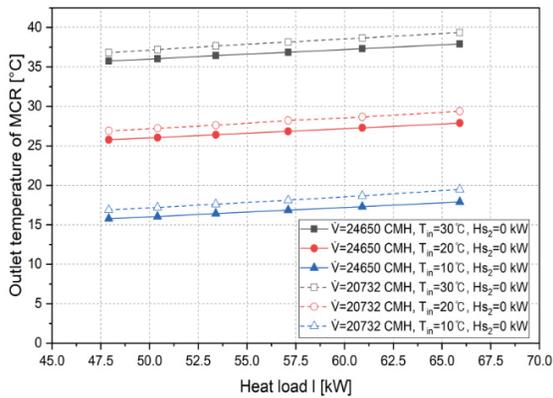
CFD 결과가 이론적인 모델의 결과와 잘 일치함을 보여주며, 본 연구에서 사용된 CFD 해석 방법의 타당성을 입증한다. Fig. 5(b)는 급기 공기유량에 따른 MCR 출구 온도의 변화를 나타내고 있다. 급기 공기 유량이 24,650 CMH와 20,732 CMH일 때, 각각의 열 부하 조건에서 급기 온도에 따라 출구 온도가 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 공기 유량이 증가할수록 출구 온도는 다소 낮아지는 양상을 보이며, 이는 급기 공기 유량이 열 제어 성능에 중요한 역할을 함을 보여준다. Fig. 5(c)는 급기 유량 별 Heat load I에 따른 출구 온



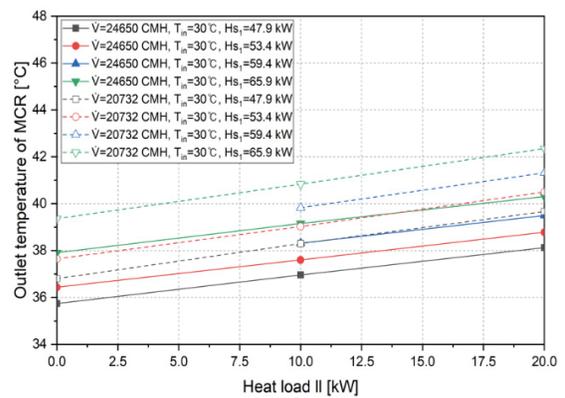
(a) Theoretical vs. CFD



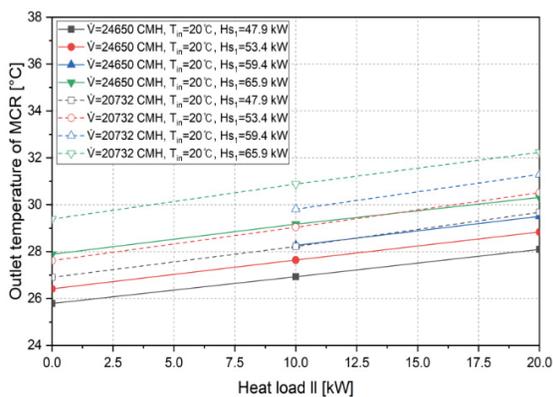
(b) Supply air temperature effect



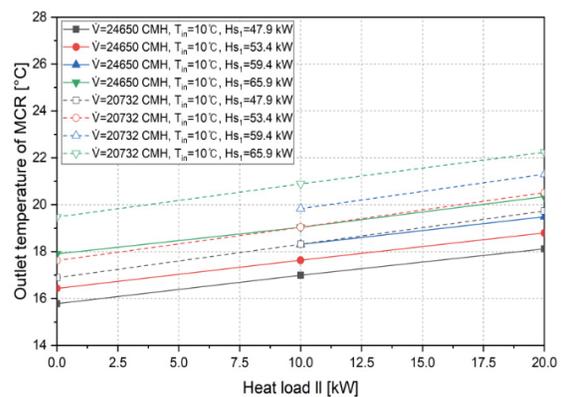
(c) Heat load I effect



(d) Heat load II effect,  $T_{in}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$



(e) Heat load II effect,  $T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$



(f) Heat load II effect,  $T_{in}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 Comparison of outlet average temperature according to various operating conditions

도의 변화를 보여준다. 이 그래프에서는 열 부하가 증가할수록 출구 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 급기 온도가 낮아질수록 출구 온도 역시 낮아지는 경향을 나타내며, 이는 급기 온도가 출구 온도에 미치는 영향이 크음을 나타낸다. Fig. 5(d)는 급기 온도 30 °C에서 Heat load II에 따른 출구 온도의 변화를 나타낸다. 열 부하가 증가함에 따라 출구 온도도 상승하는 경향을 보였으며, 이때의 급기 유량에 따른 차이가 출구 온도에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 다양한 열 부하 조건에서 출구 온도가 어떻게 변화하는지를 이해하는 데 중요한 데이터를 제공한다. Fig. 5(e)는 급기 온도 20 °C에서 Heat load II에 따른 출구 온도를 나타낸다. 30 °C에서의 결과와 유사하게, 열 부하가 증가함에 따라 출구 온도가 상승하였다. 그러나 30 °C의 급기 온도에 비해 전반적인 출구 온도는 낮게 나타났으며, 이는 낮은 급기 온도가 냉각 효율을 높이는 데 효과적임을 보여준다. 마지막으로, Fig. 5(f)는 급기 온도 10 °C에서 Heat load II에 따른 출구 온도의 변화를 나타낸다. 이 그래프에서는 급기 온도가 10 °C로 가장 낮은 조건에서 출구 온도가 가장 낮

게 나타났다. 이는 급기 온도를 낮추는 것이 출구 온도를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 보여주는 결과로 해석될 수 있다. 종합적으로, 본 연구의 분석 결과는 급기 온도, 급기 공기 유량, 및 열 부하가 MCR의 출구 온도에 중요한 영향을 미친다는 점을 명확히 하였다. 특히, 이론 계산값과 CFD 결과의 일치도는 본 연구에서 사용된 해석 방법의 신뢰성이 높음을 보여주는 결과이다.

## 4. ROM 생성 및 검증

### 4.1 차수축소모델

본 연구에서는 원자력발전소 주 제어실의 다양한 운전 조건에 따른 내부 유동 및 온도 분포를 CFD 해석을 통해 취득하고, 이 데이터를 이용하여 ML 모델을 학습시켜 시스템의 저차원 표현인 ROM을 생성하여 효율적인 해석 및 예측하였다.

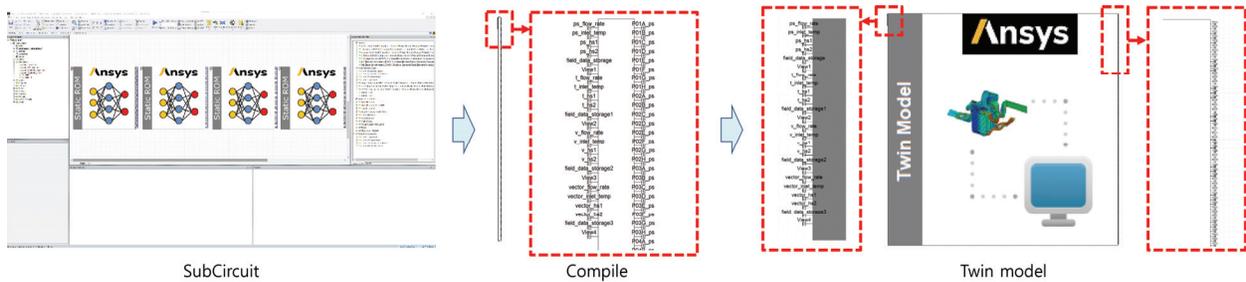


Fig. 6 Process of creating the Twin model incorporating four parameter order reduction models

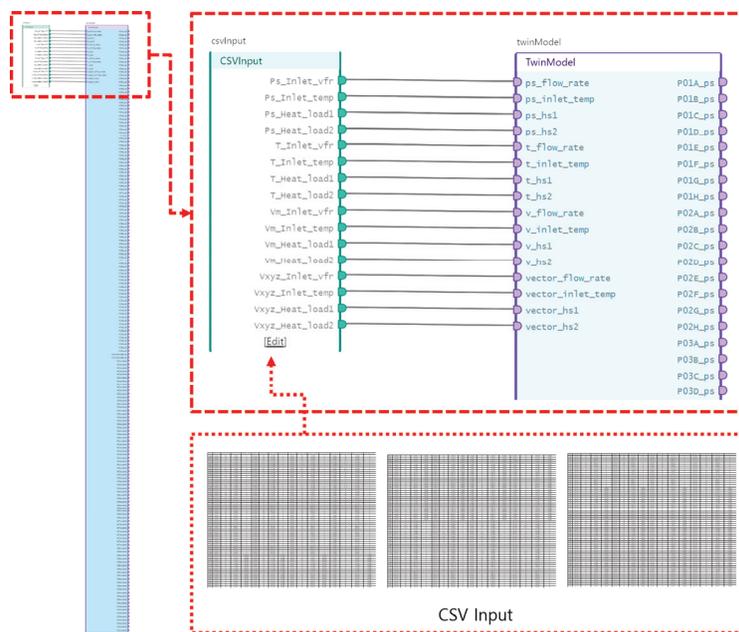


Fig. 7 Modeling the system in the ANSYS Twin Deployer

## 4.2 ROM 생성

주 제어실의 CFD 해석결과를 사용하여 차수축소모델 (ROM)을 개발하였다. ROM을 만들기 위하여 상용 소프트웨어인 ANSYS Twin Builder를 사용하였으며, Static ROM Builder를 사용하였다. Static ROM Builder는 특정 매개변수 값 집합에 대한 해석 해를 실시간급으로 근사할 수 있다. Static ROM은 Singular Value Decomposition(SVD)<sup>(14)</sup>를 사용하여 솔루션을 압축하고 보간 방법<sup>(15)</sup>과 결합하여 매개변수 범위 내에서 값을 재계산한다.

주 제어실의 열유동을 평가하기 위해 입력변수는 주 제어실의 공조시스템을 통해 공급되는 공기의 풍량과 온도, 장비

및 격실의 발열량으로 총 4개의 매개변수가 사용되었다. Static ROM의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 학습 데이터로 사용될 CFD 해석 case를 구성할 때, 해석 매개변수의 최대/최소 범위를 포함하고, 매개변수 별로 10개 이상의 데이터(CFD 해석 case)를 사용해야 하며, 특정 해석 조건에서 과도한 양의 학습 데이터 사용을 지양해야 한다<sup>(16)</sup>. 본 연구에서 해석하고자 하는 주 제어실은 내부에 다양한 장비가 설치되어 복잡한 형태의 유동이 형성될 것으로 예상되므로, 각 매개변수 별로 권장되는 학습 데이터 수 10개에 비하여 충분히 많은 약 24개의 CFD 해석 결과를 학습 데이터로 사용하였다. Static ROM을 생성하기 위하여 Table 1에 나타난 총 96개의 CFD 해석 case 중 94개 case를 학습 데이터로 사용

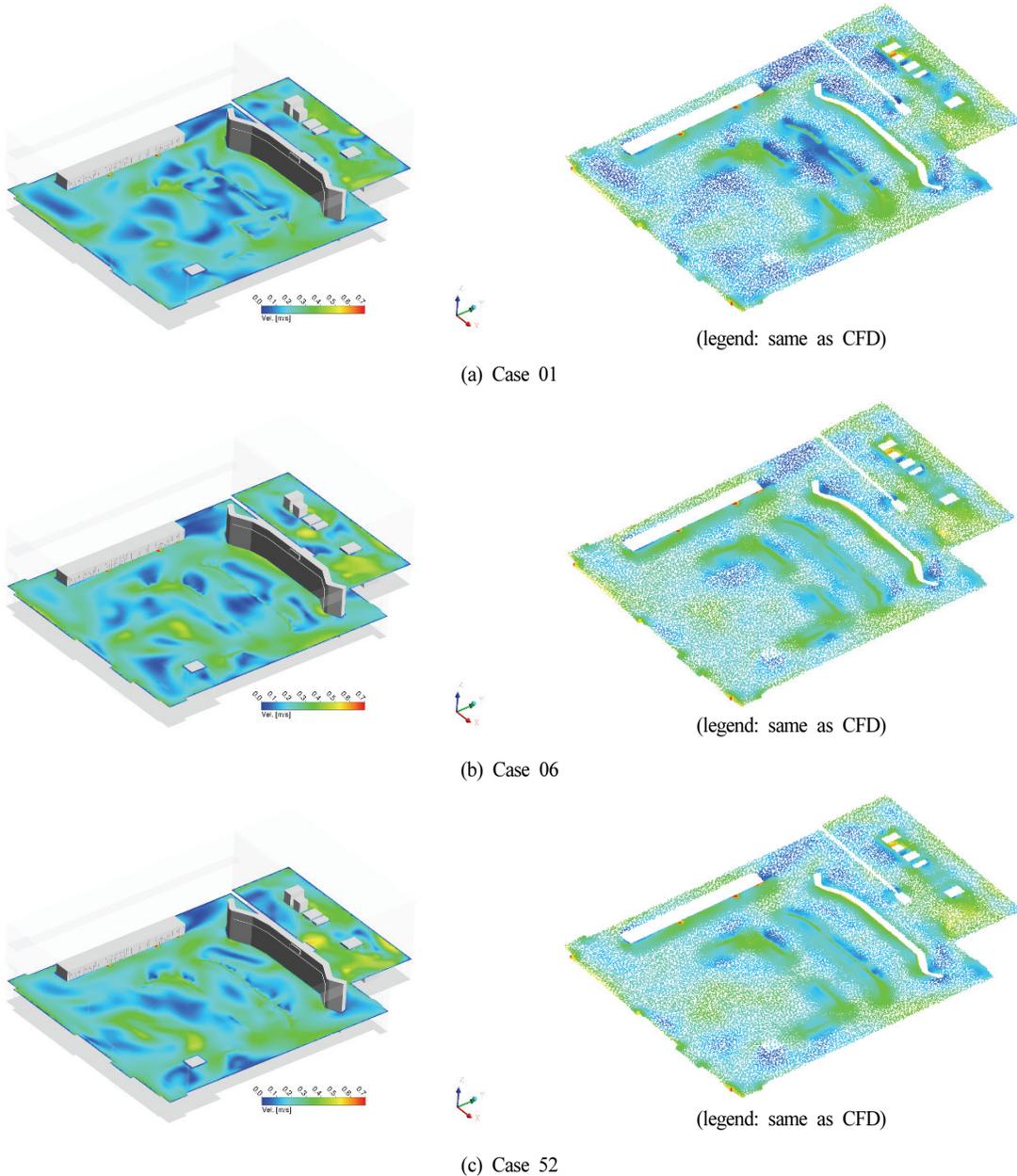


Fig. 8 Comparison of velocity distribution (left: CFD, right: ROM)

하였으며, 나머지 2개 case는 개발된 ROM 모델의 검증에 위한 데이터로 활용되었다. Static ROM 생성 시 CFD 해석 결과 중 압력, 온도, 유속 및 벡터가 매개변수로 사용되었다. 각각의 매개변수 별로 ROM을 생성하였으며, reduction 및 leave one out RMS error가 최적화되는 모드로 14차 모드를 적용하였다. 이 때 ROM의 온도의 평균 상대 오차는 0.35 %로 나타났다. Static ROM을 생성할 때 사용된 총 포인트는 8,991,000개이며, Static ROM의 해석 결과를 CFD 해석 결과와 비교하기 위하여 CFD 해석과 동일한 위치에 96개의 모니터링 지점을 추가하였다. 생성된 4개의 Static ROM의 계산 시간은 1초 이하 수준으로 CFD 해석에 비하여 매우 빠른 계산 속도를 보였다.

입력변수에 따라서, 4가지 매개변수(압력, 온도, 유속, 벡터) 결과를 동시에 계산하기 위하여 Fig. 6과 같이 각각의 매개변수 별로 ROM을 생성한 후, 4가지 매개변수를 통합한 Twin 모델을 생성하였다. 향후 연구에서는 차수축소모델을 통하여 계산된 결과를 가시화 소프트웨어와 연동할 계획이기 때문에 Twin 모델을 파이썬(Python) 코드 형태로 추출하는 과정도 추가적으로 수행되었다. ANSYS Twin Builder에서 생성된 각 매개변수에 대한 ROM이 하나로 통합된 Twin 모델을 ANSYS Twin Deployer를 사용하여 파이썬 코드를 생성할 수 있다. ANSYS Twin Deployer에서 Fig. 7과 같이 시스템 모델링을 수행하였다. CFD 해석 case와 같이 96개의 조건을 적용하여 해석을 수행한 후 해석된 결과를 이용하여

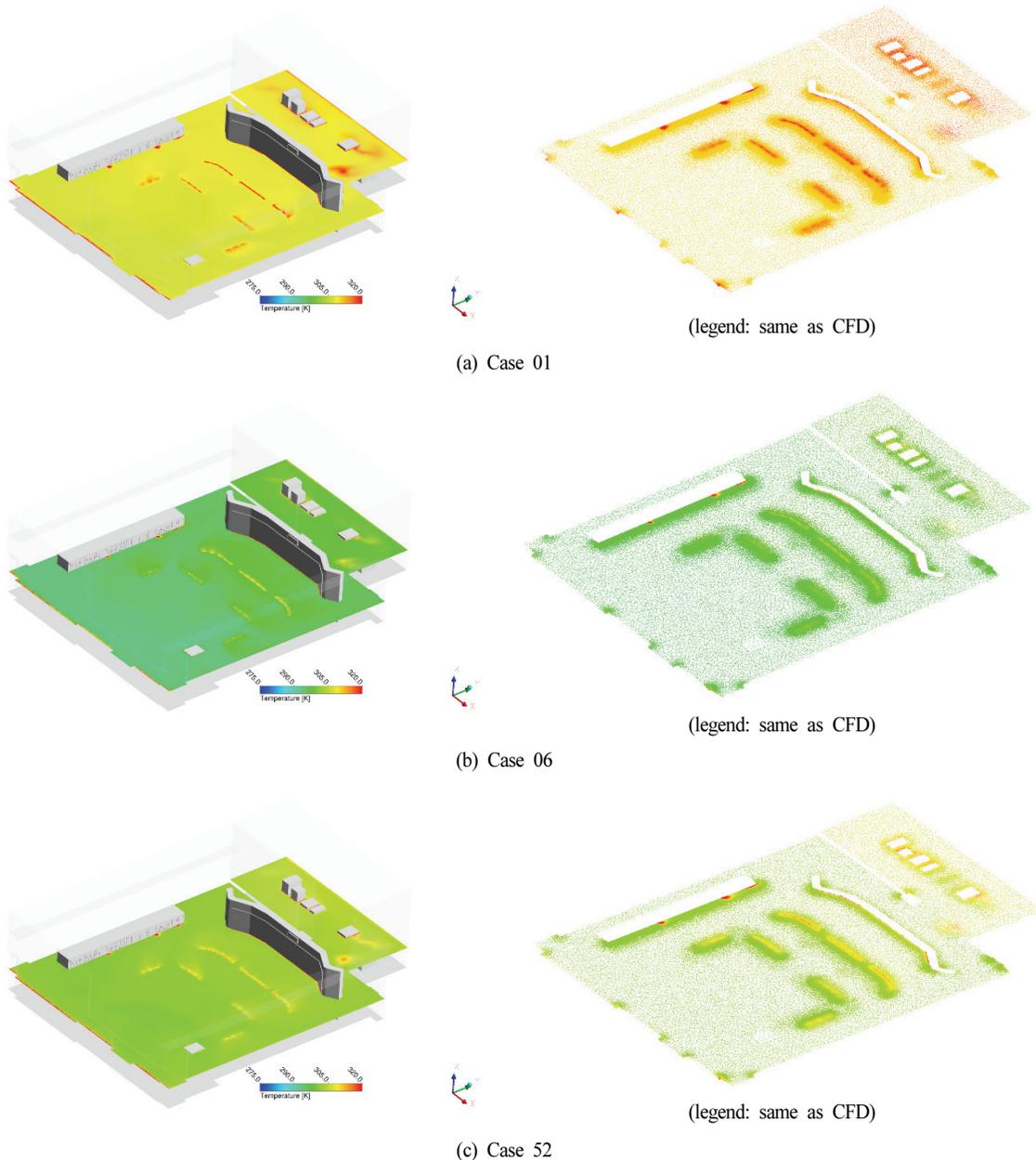


Fig. 9 Comparison of temperature distribution (left: CFD, right: ROM)

파이썬 코드를 생성하였다.

### 4.3 ROM 검증

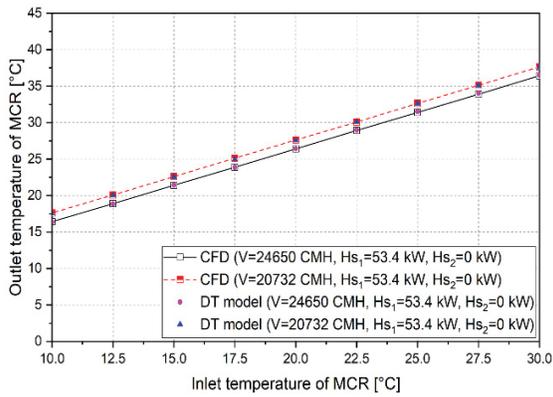
ROM의 해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 CFD 해석과 Twin Deployer에서 수행된 ROM 해석의 결과를 비교하였다.

Case 01, Case 06, 그리고 Case 52의 속도 분포를 비교한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 좌측의 CFD 결과에서는 공간 내 공기 유동의 속도 변화가 명확하게 나타나며, 특정 위치에서는 상대적으로 높은 속도가 나타났다. 우측의 ROM

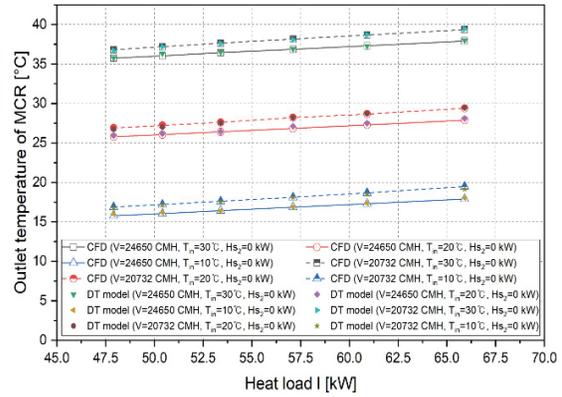
결과 또한 CFD 결과와 유사한 유동 분포를 보였다.

Fig. 9는 Case 01, Case 06, 그리고 Case 52의 온도 분포를 비교한 결과를 보여준다. Fig. 9(a) 좌측의 CFD 결과에서는 공간 내 다양한 온도 분포가 명확하게 드러나며, 발열기 기 인근에서 상대적으로 높은 온도가 나타났다. 우측의 ROM 결과도 검증 데이터(Fig. 9(b)와 9(c))를 포함하여 CFD 결과와 매우 유사한 경향을 보였다.

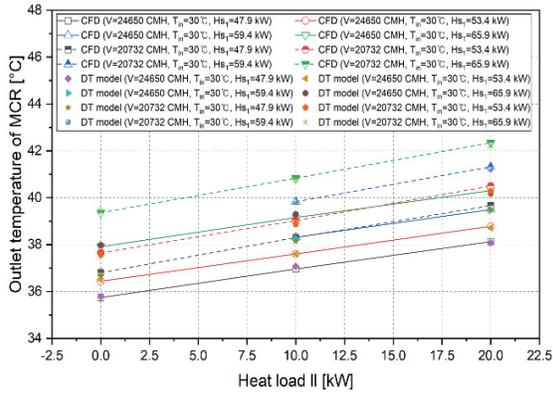
Fig. 10에 주제어실에 공급되는 공기 온도 및 열 부하에 따른 CFD와 ROM에서의 MCR 출구 온도 결과를 비교하여 나타냈다. Fig. 10(a)에 MCR로 공급되는 공기 온도에 따른



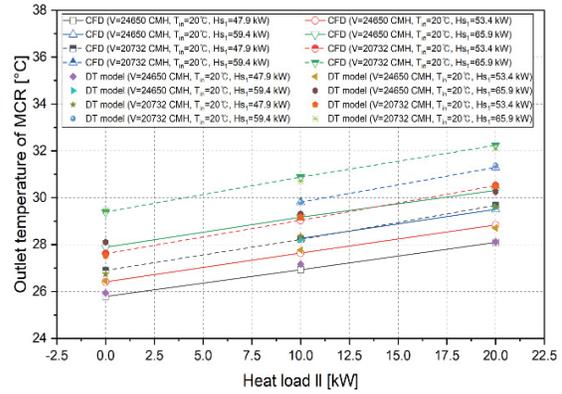
(a) Supply air temperature effect



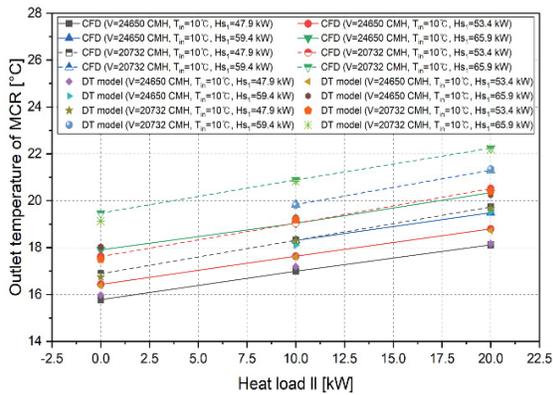
(b) Heat load I effect



(c) Heat load II effect,  $T_{in}=30^{\circ}\text{C}$



(d) Heat load II effect,  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$



(e) Heat load II effect,  $T_{in}=10^{\circ}\text{C}$

Fig. 10 Comparison of CFD analysis and ROM results

Table 3 Comparison of CFD and ROM results at 96 monitoring points

Case No.	Result Category		CFD (A)	ROM (Twin Deployer) (B)	Difference at Monitoring Points (A-B)
Case 06	Static Pressure [Pa]	Average	0.542	0.567	-0.025
		Minimum	0.219	0.216	-0.108
		Maximum	0.818	0.892	0.052
	Temperature [K]	Average	298.0	296.7	1.313
		Minimum	294.1	294.2	-1.5
		Maximum	315.9	304.7	17.7
	Velocity Magnitude [m/s]	Average	0.176	0.269	-0.093
		Minimum	0.013	0.053	-0.419
		Maximum	0.457	0.641	0.069
Case 52	Static Pressure [Pa]	Average	-0.108	-0.030	-0.078
		Minimum	-0.529	-0.468	-0.136
		Maximum	0.392	0.473	-0.030
	Temperature [K]	Average	304.1	302.8	1.254
		Minimum	299.9	300.6	-0.8
		Maximum	322.4	310.7	18.2
	Velocity Magnitude [m/s]	Average	0.183	0.248	-0.065
		Minimum	0.010	0.056	-0.447
		Maximum	0.473	0.650	0.176

Table 4 Comparison of CFD and ROM results

Case No.	Result Category	Location	CFD (A)	ROM (Twin Deployer) (B)	Difference	
					(A-B)	(A-B)/A*100 [%]
Case 06	Absolute Pressure [Pa]	Outlet	101,325	101,325	0.102	0.0
		All domain	101,326	101,326	-0.115	0.0
	Temperature [K]	Outlet	298.5	297.0	1.5	0.5
		All domain	295.9	298.0	-2.1	-0.7
	Velocity Magnitude [m/s]	Outlet	0.901	0.876	0.025	2.8
		All domain	0.237	0.237	0.000	0.1
Case 52	Absolute Pressure [Pa]	Outlet	101,325	101,325	0.041	0.0
		All domain	101,325	101,325	0.051	0.0
	Temperature [K]	Outlet	304.1	303.2	0.8	0.3
		All domain	301.8	304.0	-2.2	-0.7
	Velocity Magnitude [m/s]	Outlet	0.732	0.706	0.027	3.6
		All domain	0.231	0.232	0.000	-0.2

MCR의 출구 온도를 나타냈다. 공급 공기 온도가 증가할수록 출구 온도도 선형적으로 상승하는 경향이 CFD와 ROM 결과가 잘 부합되는 결과를 보였다. Fig. 10(b)에 Heat load I에 따른 영향, Fig. 10(c)부터 Fig. 10(e)까지는 Heat load II와 공급 공기 온도에 따른 영향을 CFD와 ROM 결과를 비교하여 나타냈다. Heat load가 증가함에 따라서 MCR 출구 온도가 선형적으로 증가하며, MCR 공급 공기 온도가 감소됨에 따라서 MCR 출구 온도가 감소하는 경향은 근소한 차이는 있지만 CFD와 ROM 결과가 유사한 경향을 보이는

것으로 나타났다.

정량적인 비교를 위하여 검증 데이터인 두 개의 해석 case(Case 06, Case 52)에 대한 CFD와 ROM의 결과를 비교하여 Table 3과 Table 4에 나타냈다. 96개의 모니터링 지점에서 주요 매개변수에 대하여 비교하였을 때, Case 06에서는 평균적인 차이는 압력 -0.025 Pa, 온도 1.313 K, 유속 -0.093 m/s 수준이며, Case 52에서는 압력 -0.078 Pa, 온도 1.254 K, 유속 -0.065 m/s 수준으로 나타났다(Table 3). 또한 Case 06과 Case 52의 해석 영역 전체 평균 및 MCR 출구

평균 결과를 비교하였을 때 최대 오차 3.6 % 수준으로 ROM의 해석 결과는 CFD 해석 결과와 매우 유사한 것으로 평가되었다(Table 4).

다양한 조건 하에서 CFD와 ROM의 결과를 비교한 상기의 결과들을 통하여 두 모델 간의 정확도와 신뢰성을 확인할 수 있었다. 이러한 비교 분석은 HVAC 시스템 설계 및 최적화에 중요한 인사이트를 제공하며, 두 모델의 활용 가능성을 확인하는 근거가 된다. 상기 결과들을 종합적으로 보았을 때 본 연구에서 개발된 CFD 해석 기반의 ROM은 CFD 해석 결과와 차이가 크지 않은 것을 확인하였으며, ROM의 해석 시간은 1 초 이내 수준으로 CFD 해석(CPU 24 코어 기준, 12시간)에 비하여 현저히 짧기 때문에 실시간 급으로 주 제어실의 열유동 분포 취득이 가능한 것이 확인되었다.

## 5. 결 론

디지털트윈(Digital Twin) 기술은 현실 세계의 객체나 시스템을 디지털로 정확하게 재현하여 다양한 시뮬레이션을 수행할 수 있게 하는 혁신적인 기술로, 원자력발전소와 같은 복잡한 시스템에서도 높은 적용 가능성이 있다. 디지털트윈을 통해 현실에서는 실행하기 어려운 테스트를 디지털 환경에서 자유롭게 수행하여 다양한 결과를 도출하고, 이를 기반으로 실제 시스템의 운영 및 관리를 최적화할 수 있다.

원자력발전소의 주 제어실은 중요한 시스템과 장비를 모니터링하고 제어하는 중앙 허브로서, 실시간으로 정확한 온도를 유지하는 것이 매우 중요하다. 그러나, 기존의 온도 센서는 오작동이나 한정된 위치로 인해 정확한 온도 파악에 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 CFD 해석 기반의 차수모델 축소(ROM)을 사용한 실시간 열유동 해석 기술을 개발하고자 하였다.

이를 위하여 연구는 다음과 같은 단계로 진행되었다. 첫째, 기존 원자력발전소 자료를 참고하여 가상의 주 제어실과 공조 시스템을 구축하였다. 주 제어실 내 기기와 장치들의 위치, 크기, 발열량, 급기/배기 풍량, 온도 등의 운전 조건을 설계하였다. 둘째, 다양한 운전 조건 하에서의 3차원 온도 분포를 얻기 위해 3차원 CFD 해석을 수행하였다. 셋째, CFD 해석 결과를 바탕으로 ROM을 생성하고, 마지막으로 이를 검증하였다. 이런 일련의 과정을 거쳐 CFD 해석 기반의 차수축소모델을 사용한 실시간 열유동해석 기술을 개발하였다. 다양한 조건 하에서 CFD와 ROM의 결과를 비교한 결과들을 통하여 두 모델 간의 정확도와 신뢰성을 확인할 수 있었다. 또한, ROM의 해석 시간은 1초 이내 수준으로 CFD 해석(CPU 24 코어 기준, 12시간)에 비하여 현저히 짧기 때문에 실시간 급으로 주 제어실의 열유동 분포 취득이 가능한 것이 확인되었다. 향후, 개발된 ROM을 원자력발전소 주 제어실의 공조 시스템과 결합할 예정이다. 이러한 기술은 주

어실 내 온도 제어의 정확성과 효율성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대되며, 또한 다양한 산업 분야에서도 실시간 온도 제어와 관련된 여러 응용 가능성을 제공할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 2022년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [S3323979]

## References

- (1) Jeong Sam Han., 2006, "Efficient Vibration Simulation Using Model Order Reduction," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 30, No. 3, pp. 310~317.
- (2) Jeong Sam Han., 2011, "Efficient Modal Analysis of Prestressed Structures via Model Order Reduction," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. Vol. 35, No. 10, pp. 1211~1222.
- (3) Jaehun Lee and Maenghyo Cho., 2017, "An Enhancement of the Interpolation-Based Parametric Reduced Order Model by Using the Mode Selection Method," Proceedings of KSME 2017 Annual Conference.
- (4) Kim Han-Seok., 2020, "ROM(Reduced Order Model)을 이용한 Heatsink 열 해석 설계 기법," KIPE Magazine. Vol. 25, No. 4, pp. 44~49.
- (5) Won Tae Kang, Young Gun Heo, Seok Heum Baek, Dong Hwa Lee., 2022, "Introduction to Ansys Twin Builder ROM for Digital Twin," 2022 한국유체기계학회 동계학술대회 논문집.
- (6) Won Tae Kang, Young Gun Heo, Seok Heum Baek, Dong Hwa Lee., 2023, "Development of ROM to Predict Performance of Centrifugal Pump by Using Ansys Hybrid Digital Twin Model Twin," 2023 KSFM Fall Conference.
- (7) Ki Nam Ryu, Sung Dae Kim, Jae Seop Ryu and Chae Yoon Bae., 2023, "Thermal Analysis Method for Switchgear System Using Interconnected ROMs," 대한기계학회 2023년 학술대회.
- (8) Seunghoon Kang, Dae Kyung Choi, Sungman Son, Jeungyoub Kim, Choengryul Choi., 2023, "Development of MCR HVAC ROM model for simulation-based digital twin system," Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting.
- (9) S.H. Kang, D.K. Choi, S.M. Son, #C.R. Choi., 2023, "Development of ROM Model for Digital Twin System to Apply to Unity 3D Model," KSPE Fall conference 2023.
- (10) Vladyslav Pluihin, Maria Sukhonos, Ihor Biletskyi, Sergiy Plankovskyy, Yevgen Tsegelnyk., 2024, "Implementation

- features of local and remote technical objects digital twins,” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1376.
- (11) Seunghoon Kang, Sungman Son, Dae Kyung Choi, Choengryul Choi., 2024, “Development of MCR HVAC Simulator for Digital Twin,” Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting.
- (12) ANSYS FLUENT Theory Guide.
- (13) ANSYS FLUENT User’s Guide.
- (14) Carlberg, et al., 2013, “The GNAT Method for Nonlinear Model Reduction: Effective Implementation and Application to Computational Fluid Dynamics and Turbulent Flows,” Journal of Computational Physics, Vol. 242, pp. 623~647.
- (15) Ben Salem M., et al., 2018, “Automatic Selection for General Surrogate Models,” Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 58, No. 2, pp. 719~734.
- (16) ANSYS, Inc., Twin Builder Help, Release 2023R1, January 2023, Canonsburg, PA, USA.