

Simcenter AMESIM 기반 군용 쉼터-HVAC 시스템 1D 시뮬레이션 및 검증 연구

Simcenter AMESIM Based military Shelter-HVAC System 1D Simulation and Validation Study

김영섭^{1, #}, 장수진¹, 김태윤¹, 김태현¹Young Seob Kim^{1, #}, Su Jin Jang¹, Tae Yoon Kim¹, and Tae Hyun Kim¹¹ LIG 디펜스&에어로스페이스(주) (LIG Defense&Aerospace Co., Ltd.)# Corresponding Author / E-mail: youngseob.kim@ligdna.com, TEL: +82-31-8038-0172

ORCID: 0009-0006-4761-6584

KEYWORDS: Shelter (쉼터), HVAC (냉난방공조), AMESIM (아메심), Modeling (모델링)

Military shelters house various high-power electronic systems that generate significant heat during operation, making effective thermal management essential for ensuring system reliability and operational stability. This study proposes a one-dimensional (1D) modeling approach for analyzing the thermal behavior of a military shelter-HVAC system using Simcenter AMESIM. The model incorporates key thermal components, such as internal heat sources, shelter structures, and HVAC performance characteristics, to accurately represent dynamic thermal behavior under realistic operating conditions. To validate the proposed 1D model, a comparative analysis was performed using three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) simulations with ANSYS Fluent, maintaining identical boundary and operating conditions. The analysis focused on the temporal and spatial variations of the internal air temperature within the shelter. Results showed a strong correlation between the AMESIM model and the CFD simulations. This approach significantly reduces computational costs and modeling complexity compared to traditional CFD-based analyses, while still providing adequate accuracy for system-level thermal performance evaluation. Consequently, the developed AMESIM-based 1D model serves as an efficient and reliable tool for the design and performance assessment of military shelter HVAC systems.

Manuscript received: April 24, 2026 / Revised: June 22, 2026 / Accepted: June 24, 2026
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2026

NOMENCLATURE

HVAC	=	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
C_p	=	Specific Heat
A	=	Heat Transfer Area
h	=	Convective Heat Transfer Coefficient
k	=	Thermal Conductivity
L	=	Wall Thickness or Conduction Length
m	=	Mass
$\dot{Q}$	=	Heat Transfer Rate
t	=	Time
T	=	Temperature

1. 서론

현대 군용 쉼터는 통신, 감시, 정보처리 등 다양한 전자장비가 집적된 시스템으로, 운용 시 상당한 발열이 발생한다. 이러한 내부 발열과 외부 환경 조건이 결합될 경우 쉼터 내부는 급격한 온도 상승 또는 열 불균형 상태에 놓이게 되며, 이는 장비 성능 저하 및 신뢰성 문제를 유발한다. 따라서 군용 쉼터의 안정적인 운용을 위해서는 냉난방공조(Heating, Ventilation, and Air Conditioning, HVAC) 시스템을 기반으로 한 정밀한 열관리 기술이 필수적으로 요구된다.

최근에는 쉘터 및 건물 내부 열환경을 분석하기 위해 다양한 해석 기법이 활용되었다. 대표적으로 전산유체역학(CFD) 기반 해석은 내부 공기 유동 및 온도 분포를 정밀하게 예측할 수 있어 널리 사용되었으며, 환기 조건, 열원 배치, 공조 시스템 설계 등에 따른 영향을 분석하는 데 효과적인 방법으로 활용되었다[1]. 또한, HVAC 시스템의 에너지 사용 특성을 모델링하고 이를 실측 데이터와 비교하여 모델의 타당성을 검증하는 연구가 수행되었으며, 이를 통해 열해석 모델이 실제 환경을 비교적 정확하게 반영할 수 있음을 확인했다[2].

이와 함께, 쉘터 내부 열거동을 해석하기 위해 CFD 해석 결과를 기반으로 단순화된 모델을 구축하거나 Surrogate Model을 활용하는 연구가 진행되었다. 일부 연구에서는 CFD 해석 결과를 활용하여 설계 변수 변화에 따른 영향을 분석하고 최적 설계를 수행하는 방식이 적용되었으며, 이러한 접근은 설계 단계에서의 효율성을 향상시키는 데 기여했다[3].

한편, 기존에 수행된 연구에서는 쉘터 내부 열환경을 평가하기 위해 CFD 기반 열해석과 실험을 통해 환경조절장치의 성능을 검증했으며, Air Duct 적용에 따른 온도 분포 개선 효과를 정량적으로 분석했다[4].

한편, 최근에는 CFD 기반 정밀 해석과 함께, 열관리 시스템을 보다 효율적으로 평가하기 위한 시스템 수준의 1D 모델링 연구도 활발히 수행되고 있다. 이러한 접근은 HVAC 시스템, 차량 열관리, 냉동사이클, 전자장비 열해석 등에서 널리 활용되며, 열저항-열용량 네트워크와 제어체적 기반 모델을 이용하여 전체 시스템의 열수지와 동특성을 비교적 낮은 계산 비용으로 예측할 수 있다는 장점이 있다. 특히 AMESIM, GT-SUITE, Modelica와 같은 플랫폼은 냉동사이클, 열교환기, 공기유동 및 열전달 요소를 통합적으로 모델링할 수 있어, 설계 초기 단계에서의 반복 해석 및 시스템 최적화에 적합한 도구로 활용되어 왔다.

그러나 기존 연구는 주로 건물 HVAC, 차량 열관리, 일반적인 전자 냉각 시스템 등에 초점을 두고 있으며, 군용 쉘터와 같이 다수의 발열 장비, 외기 열부하, 구조체 열전달, 독립형 HVAC 시스템이 동시에 결합된 환경을 대상으로 한 시스템 수준 1D 열모델링 연구는 상대적으로 제한적이다. 또한 1D 모델을 실제 3D CFD 해석과 직접 비교하여 군용 쉘터 내부 열환경 예측의 타당성을 검증한 사례 역시 충분하지 않다.

본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 Simcenter AMESIM을 활용한 1차원(1D) 기반 군용 쉘터-HVAC 시스템 모델링 기법을 제안했다. 1D 모델링은 3차원 공간에서의 속도장, 압력장, 온도장을 직접 계산하는 CFD 기반 해석과 달리, 시스템을 구성하는 각 요소를 집중정수(Lumped Parameter) 또는 제어체적(Control Volume)으로 이상화하고, 이들 사이의 질량 및 에너지 전달 관계를 기반으로 전체 시스템의 거동을 해석하는 접근이다. 즉, 쉘터 외벽, 내부 공기, 발열 장비, 열교환기 및 냉동사이클 구성요소를 개별 요소로 분할한 뒤, 각 요소 간의 열저항, 열용량, 질량유량 및 에너지 교환 관계를 연결하여 시스템 수준의 열거동을 예측한다. 이러한 1D 시스템 해석은

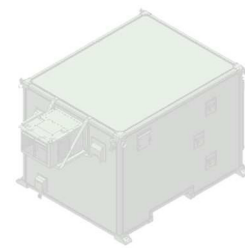


Fig. 1 3D model of the military shelter

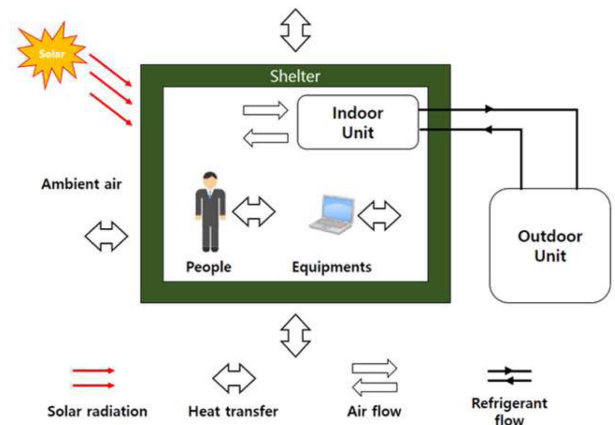


Fig. 2 Schematic view of military shelter 1D model

공간적으로 연속적인 유동장과 온도장을 상세히 해석하는 3D CFD에 비해 국부적인 열분포 예측 능력은 제한적이지만, 계산 시간이 짧고 모델 수정이 용이하여 설계 초기 단계에서의 반복 해석, 운용 조건 변화 검토, 시스템 통합 성능 평가에 유리하다. 또한 전체 시스템을 단일 평균 상태량으로 단순화하는 0D 접근과 비교할 때, 1D 시스템 모델은 구조체 각 면, 내부 열원, 냉동사이클 및 공기 체적 등 기능별 요소를 분리하여 열전달 경로와 에너지 흐름을 보다 구조적으로 표현할 수 있다는 장점이 있다.

제안된 모델은 열용량, 열전달, 공기 유동 및 HVAC 성능을 시스템 수준에서 통합적으로 표현할 수 있도록 구성했으며, CFD 해석 대비 높은 계산 효율성을 확보했다. 또한, 동일한 운용 조건에서 ANSYS Fluent 기반 CFD 해석을 수행하고, 쉘터 내부 온도 결과를 비교하여 모델의 신뢰성을 검증했다.

본 연구에서 대상으로 한 쉘터는 일반적인 표준 군용 쉘터를 기반으로 구성했으며, 내부에는 다수의 발열 장비가 배치되고 HVAC 시스템이 적용된 구조를 가지도록 설정했다. 해당 쉘터의 형상은 Fig. 1과 같으며, 크기는 2,000 mm (W) × 2,000 mm (L) × 2,000 mm (H) 이다. 쉘터 내부 열환경을 제어하기 위해 냉난방 장치를 적용하고 이를 기반으로 열거동을 해석했다. 특히 내부 장비의 발열 조건과 외기 환경을 고려하여 쉘터 내부 온도 유지 특성을 평가하고, 1D 모델과 CFD 해석 결과를 비교함으로써 모델의 적용 가능성을 검토했다.

Fig. 2는 쉘터 내부 열거동과 HVAC 시스템을 포함한 전체 모델의 개략도를 나타낸다. 모델은 크게 쉘터 구조체, 내부 공기 체적, 내부 발열원, 그리고 냉동 사이클 기반 HVAC 시스템으로

구성했다. 쉼터 구조체는 양 측면, 전면, 후면 및 상부 패널로 구분하여 각각 열용량과 열저항을 갖는 요소로 모델링했으며, 외기와외의 대류 및 태양 복사에 의한 열유입이 반영되도록 구성했다. 내부 공기 영역은 단일 제어 체적으로 정의하여 열적 응답을 해석했으며, 내부 장비에서 발생하는 발열은 집중 열원 형태로 적용했다.

HVAC 시스템은 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기로 구성된 냉동 사이클로 구현했으며, 증발기는 쉼터 내부 공기와 직접 열교환이 이루어지도록 연결했다. 이를 통해 냉매 순환에 따른 냉방 효과가 내부 온도 변화에 반영되도록 모델을 구성했다. 또한, 각 구성 요소는 질량 및 에너지 보존 법칙을 기반으로 연계되어 시스템 수준에서의 열수지(Energy Balance)를 만족하도록 설정했다.

이와 같은 모델 구성은 실제 3차원 열유동 현상을 1차원 시스템 모델로 단순화하면서도 주요 열전달 및 에너지 흐름 특성을 효과적으로 반영할 수 있도록 하였으며, 다양한 운용 조건에서의 신속한 성능 예측 및 설계 변수 분석이 가능하도록 했다.

본 연구의 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, 군용 쉼터의 구조체 열전달, 내부 발열 장비, 외기 열부하, 그리고 냉동사이클 기반 HVAC 시스템을 통합한 시스템 수준의 1D 열해석 프레임워크를 구축하였다. 둘째, 쉼터 내부 열환경을 설계 초기 단계에서 신속히 평가할 수 있도록 CFD 대비 계산 부담이 낮은 경량 해석 모델을 제시하였다. 셋째, 동일 조건에서 수행한 3D CFD 해석 결과와의 비교를 통해 내부 평균 온도 및 주요 발열 부위 온도에 대한 예측 성능을 검증함으로써, 제안한 1D 모델의 실용적 적용 가능성을 확인하였다.

2. 모델링

2.1 모델링 개요

모델링은 Simcenter AMESIM을 사용하여 수행했으며, 시스템 수준에서의 열거동을 분석하기 위해 정상상태(Steady-state) 조건으로 해석을 진행했다. 외기 온도는 극한 환경 조건을 고려하여 43°C로 설정했으며, 태양 복사에 의한 열부하를 반영하기 위해 쉼터의 양 측면, 전방, 후방 및 상부 면에 대해 복사 열전달 조건을 적용했다. 또한, 쉼터 외벽과 외기 사이의 대류 열전달을 동시에 고려하여 외부 환경에 의한 열유입을 모델링에 반영했다. 본 연구에서 적용한 주요 모델링 조건은 Table 2와 같다.

대상 군용 쉼터의 열해석을 수행하기 위해 쉼터 구조를 1차원(1D) 열 네트워크로 단순화하여 모델링을 수행했다. 쉼터 외벽은 열용량 및 열저항 요소로 등가화하여 표현했으며, 내부 공기는 하나의 제어 체적으로 가정하여 시간에 따른 온도 변화를 해석했다. 내부에는 다수의 발열 장비가 존재하는 것으로 가정했으며, 전체 발열량은 5 kW로 설정하여 열원으로 모델링에

Table 1 Modeling condition

Simulation tool	Simcenter AMESIM
Time variation	Steady
Ambient condition	43°C (Radiation)

반영했다. 여기서 내부 발열량 5 kW는 쉼터 내부에 탑재되는 통신·제어·전원 장비 등의 총 소비전력이 대부분 열로 전환된다고 가정한 시스템 수준의 등가 열부하이다. 즉, 개별 장비의 상세 발열 특성을 모두 반영하기보다는, 실제 운용 시 다수의 전자 장비가 동시에 동작하는 조건에서 발생 가능한 총 열발생량을 대표값으로 단순화하여 적용하였다. 본 연구는 개별 장비의 국부 발열 해석보다는 쉼터 내부 열환경과 HVAC 성능 평가를 목적으로 하므로, 내부 장비군을 단일 등가 열원으로 모델링하였다.

환경조절장치(HVAC 시스템)는 냉동 사이클을 기반으로 구성했으며, 압축기, 응축기, 팽창밸브 및 증발기로 구분하여 각각의 구성요소를 모델링했다. 각 구성요소는 냉매의 상태 변화 및 열교환 특성을 고려하여 정의했으며, 이를 통해 쉼터 내부로 공급되는 냉방 성능을 해석할 수 있도록 구성했다. 특히, 증발기를 통해 생성된 냉기가 쉼터 내부 공기와 열교환을 수행하도록 모델링하여 내부 온도 저감 효과를 분석했다.

2.2 모델링 방법

본 연구에서는 군용 쉼터 내부 열환경을 효율적으로 해석하기 위해 Simcenter AMESIM 기반의 1차원 시스템 모델을 구축했다. 모델은 질량 및 에너지 보존 법칙에 기반한 집중정수계(Lumped Parameter) 방식으로 구성했으며, 쉼터 구조체, 내부 공기 체적, 내부 발열원, 그리고 HVAC 시스템을 통합적으로 고려했다. 쉼터 내부 공기 및 각 구성 요소는 제어 체적으로 정의하여 시간에 따른 온도 변화를 해석할 수 있도록 했다.

쉼터 구조체는 양 측면, 전면, 후면 및 상부 판넬로 구분하여 각각 열저항과 열용량을 갖는 요소로 모델링했다. 외벽에는 외기와외의 대류 열전달과 태양 복사에 의한 열유입을 반영했으며, 내부 공기와의 열교환을 통해 전체 열수지 균형이 유지되도록 구성했다. 내부 공간은 단일 체적으로 가정하여 평균 온도를 해석했으며, 내부 장비 발열은 집중 열원 형태로 적용했다.

HVAC 시스템은 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기로 구성된 냉동 사이클 기반으로 모델링했다. 압축기는 성능 맵과 제어 로직을 통해 동적 응답을 반영했으며, 응축기와 증발기는 열교환 성능을 기반으로 냉매와 공기 간 에너지 교환을 계산하도록 구성했다. 팽창밸브는 등엔탈피 과정을 가정하여 냉매 상태 변화를 구현했다.

이와 같은 모델링 방법을 통해 복잡한 3차원 열유동 현상을 1차원 시스템 수준에서 효과적으로 단순화하면서도, 주요 열전달 및 에너지 흐름 특성을 반영할 수 있도록 했다.

2.2.1 지배방정식

본 연구에서는 군용 쉼터 내부의 열거동을 해석하기 위해 질량 및 에너지 보존 법칙을 기반으로 한 1차원 집중정수계 모델을 적용했다. 쉼터 내부 공기 및 구조체, 그리고 HVAC 시스템은 각각 제어 체적으로 정의되며, 다음과 같은 에너지 보존 방정식 식(1)을 따른다.

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_{gen} \quad (1)$$

여기서, m 은 질량, C_p 는 비열, T 는 온도, $\dot{Q}_{in}$ 및 $\dot{Q}_{out}$ 은 각각 유입 및 유출 열량, $\dot{Q}_{gen}$ 은 내부 발열량을 의미한다.

쉼터 외벽을 통한 열전달은 전도 및 대류, 복사 열전달을 포함하여 식(2)-식(4)과 같이 표현했다.

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{kA}{L}(T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{surf} - T_{air}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \epsilon A(T_{sur}^4 - T_{air}^4) \quad (4)$$

여기서, k 는 열전도도, h 는 대류 열전달 계수, σ 는 스테판-볼츠만 상수, ϵ 은 방사율을 의미한다. 이러한 지배방정식을 기반으로 쉼터 내부의 열수지 균형을 해석했다.

Simcenter AMESIM 기반 1차원 모델에서는 동일한 물리 현상을 시스템 수준에서 해석하기 위해 질량 및 에너지 보존 법칙을 기반으로 한 집중정수 모델을 적용했다. 각 구성요소는 열용량 및 열저항 요소로 등가화했으며, 쉼터 내부 공기와 구조물 간의 열수지 관계를 통해 온도 변화를 계산했다. HVAC 시스템은 냉동 사이클 기반으로 구성하여 냉방 성능이 내부 열평형에 미치는 영향을 반영하도록 했다.

2.2.2 쉼터구조체

2.2.2.1 판넬 조립체 모델링

군용 쉼터는 단열 성능을 갖춘 우레탄 보온재와 내·외부를 감싸는 알루미늄 스킨으로 이루어진 판넬 구조체와, 쉼터의 형상을 유지하고 구조적 강성을 제공하는 프레임 구조체로 구성된다. 프레임 구조체 및 판넬 구조체의 개념도는 Figs. 3(a) 및 3(b)와 같다.

본 연구에서는 시스템 수준에서의 열거동 해석을 목적으로 모델을 단순화하여, 다층 구조로 이루어진 실제 판넬 대신 단열재인 우레탄 재질만을 적용하여 모델링을 수행했다. 적용한 우레탄의 물성치는 Table 3과 같으며, 이를 기반으로 쉼터 외벽의 열전달 특성을 정의했다.

Simcenter AMESIM 기반 1차원 모델에서는 쉼터 구조체를 집중정수 방식으로 표현했다. 쉼터의 양 측면, 전면, 후면 및 상부 면을 각각 하나의 판넬 요소로 정의했으며, 각 판넬은 열용량(Thermal Capacitance)과 열저항(Thermal Resistance)을 갖는

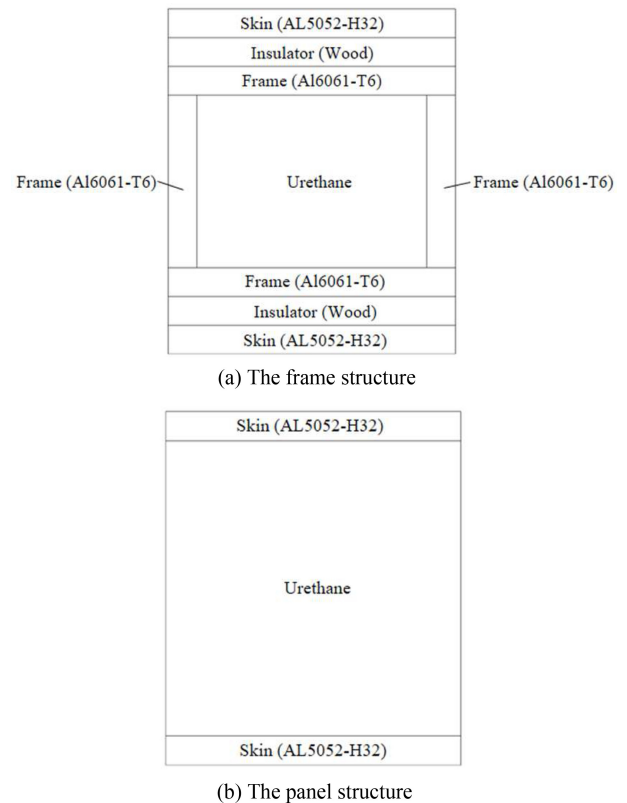


Fig. 3 The frame and panel structure

Table 2 Material properties of shelter

Material	Density [kg/m ³]	Specific heat [J/(kg·K)]	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Remarks
Urethane	48	1,200	0.023	Insulation panel
AL5052	2,680	880	138	Outer/Inner skin

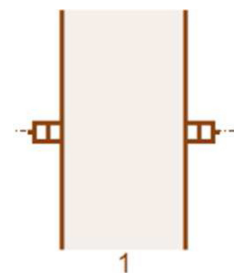


Fig. 4 AMESIM panel structure model

요소로 Fig. 4와 같은 모델을 활용하여 모델링했다. 이를 통해 외기와 내부 공기 사이의 전도 및 대류 열전달이 발생하도록 구성했다.

각 판넬 요소는 외기 측과 내부 공기 측 사이에 위치하도록 설정했으며, 외기 측에는 외기 온도와 태양 복사 조건을 경계조건으로 적용했다. 특히, 태양 복사는 각 면에 대해 열유속 형태로 입력하여 쉼터 외벽으로 유입되는 복사 열부하를 반영했다.

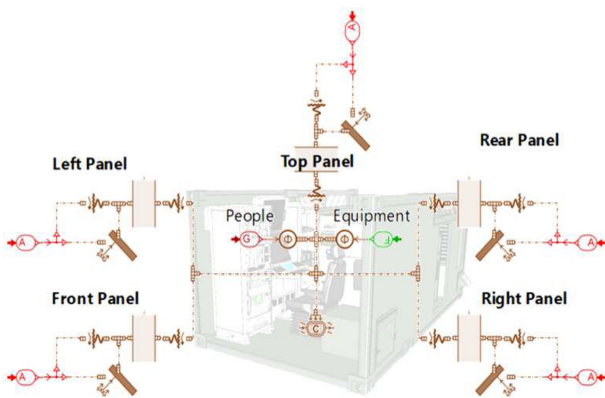


Fig. 5 AMESIM shelter structure model

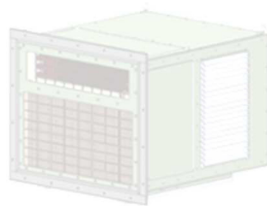


Fig. 6 3D model of the HVAC

또한, 외기와 판넬 외표면 사이의 대류 열전달은 대류 열전달 계수를 이용하여 모델링했다.

2.2.2.2 셸터구조체 모델링

셸터 내부는 하나의 제어 체적(Control Volume)으로 가정하여 단일 공기 노드로 모델링을 수행했다. 내부 공기 노드는 열용량을 갖는 체적으로 정의했으며, 각 판넬 요소 및 HVAC 시스템과 열교환이 이루어지도록 연결했다. 이를 통해 내부 발열체 및 외부 환경 조건에 따른 셸터 내부 온도 변화를 해석할 수 있도록 구성했다.

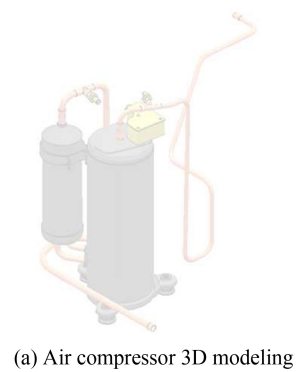
이와 같은 모델링 기법을 통해 실제 3차원 구조를 단순화하면서도, 셸터 외벽을 통한 열유입 및 내부 열축적 현상을 효과적으로 반영할 수 있도록 Fig. 5와 같이 모델링 했다.

2.2.3 냉난방공조

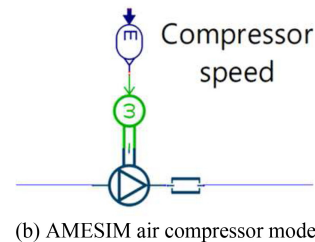
본 연구에서는 군용 셸터 내부의 열환경을 제어하기 위해 냉동 사이클 기반의 HVAC 시스템을 구성하여 모델링을 수행했다. HVAC 시스템은 압축기, 응축기, 팽창밸브 및 증발기로 구성했으며, 각 구성요소는 Simcenter AMESIM 라이브러리를 활용하여 냉매의 상태 변화와 열교환 특성을 반영하도록 모델링했다. Fig. 6은 실제 HVAC 형상을 보여준다.

2.2.3.1 압축기 모델링

압축기는 냉매를 저압 상태에서 고압 상태로 압축하는 요소로, AMESIM의 Compressor 모델을 사용하여 구현했다. 압축기는 입력된 회전수 또는 성능 맵을 기반으로 냉매의 압력과 온도를



(a) Air compressor 3D modeling



(b) AMESIM air compressor model

Fig. 7 Air compressor comparison with 3D and AMESIM modeling model

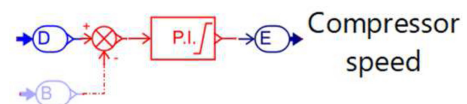


Fig. 8 Air compressor speed control model

상승시키도록 설정했으며, 압축 과정에서 발생하는 엔탈피 증가를 고려하여 냉매 상태를 계산했다. 또한, 압축기의 효율은 등엔트로피 효율을 기준으로 정의하여 실제 운전 조건을 반영했다. 여기서 Fig. 7은 실제 압축기 구성품과 이를 1D 시스템 모델에서 구현한 AMESIM 요소 간의 대응 관계를 개념적으로 나타낸 것이다. 즉, Fig. 7(a)의 물리적 압축기 형상을 CFD 해석에 직접 사용한 것이 아니라, 해당 장치가 수행하는 압축 기능을 Fig. 7(b)와 같은 AMESIM 압축기 모델로 치환하여 시스템 수준 모델에 반영하였음을 보여준다.

2.2.3.1.1 압축기 속도

본 연구에서는 HVAC 시스템의 압축기 속도를 제어하기 위해 Fig. 8과 같이 PI (Proportional-integral) 제어 기반의 제어 로직을 모델에 구현했다. 압축기 제어는 단순한 목표 온도 추종 방식이 아닌, 셸터 내부의 열부하 변화에 능동적으로 대응할 수 있도록 설계했다. 이를 위해 셸터 내부 공기 온도와 목표 운용 온도 간의 편차를 기반으로 제어 입력을 구성하되, 외기 조건 및 내부 발열량 변화에 따른 동적 응답 특성을 반영할 수 있도록 했다.

구체적으로, 제어기는 셸터 내부 온도와 기준 온도 간의 오차를 입력으로 받아 압축기 회전수를 조절하며, 적분 항을 포함하여 정상상태 오차를 최소화하도록 구성했다. 또한, 과도한 제어

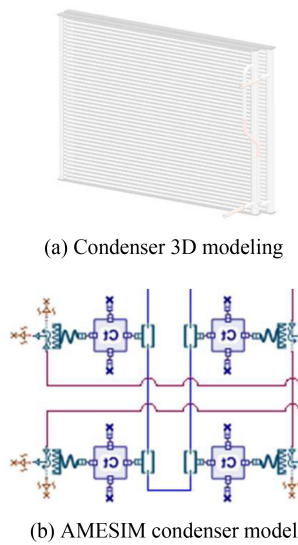


Fig. 9 Condenser comparison with 3D and AMESIM modeling model

입력으로 인한 시스템 불안정성을 방지하기 위해 압축기 회전수의 상·하한을 설정하고, 응답 지연을 고려한 제어 파라미터 튜닝을 수행했다.

이와 같은 제어 구조를 통해 냉방 부하 변화에 따른 압축기 출력이 연속적으로 조절되도록 하였으며, 시스템 수준에서의 열수지 균형을 유지하면서도 안정적인 온도 제어 성능을 확보했다. 특히, 급격한 외기 온도 상승 및 내부 발열 증가 조건에서도 과도한 진동 없이 목표 운용 범위 내에서 온도를 유지하는 것을 확인했다.

2.2.3.2 응축기 모델링

응축기는 고온·고압의 냉매가 외부 공기와 열교환을 통해 열을 방출하고 액체 상태로 변화하는 열교환기로, AMESIM의 Heat Exchanger 모델을 사용하여 구현했다. 응축기에서는 냉매와 외기 사이의 열전달을 고려했으며, 열전달 계수 및 열교환 면적을 기반으로 냉매의 응축 과정을 모델링했다. 이를 통해 냉매가 포화 액체 상태로 변화하도록 구성했다. Fig 9는 실제 응축기 구성품과 이를 1D 시스템 모델에서 구현한 AMESIM 열교환기 요소 간의 대응 관계를 나타낸다. 본 연구에서 응축기의 3D 형상은 CFD 해석의 직접 압력으로 사용되지 않았으며, 외기와의 열교환 및 냉매 응축이라는 기능을 중심으로 단순화하여 AMESIM 열교환기 모델로 구현하였다.

2.2.3.3 팽창밸브 모델링

팽창밸브는 고압의 액체 냉매를 저압 상태로 감압시키는 요소로, AMESIM의 Expansion Valve 모델을 사용하여 구현했다. 팽창 과정은 등엔탈피(Isenthalpic) 과정으로 가정했으며, 밸브 개도 또는 유량 계수를 통해 냉매 유량이 제어되도록 설정했다. 이를 통해 냉매의 압력 강하와 함께 온도 감소가 발생하도록 모델링했다. Fig. 10은 실제 팽창밸브와 이를 1D 시스템 모델에서 구현한 AMESIM 팽창밸브 요소 간의 대응 관계를 개념적으로

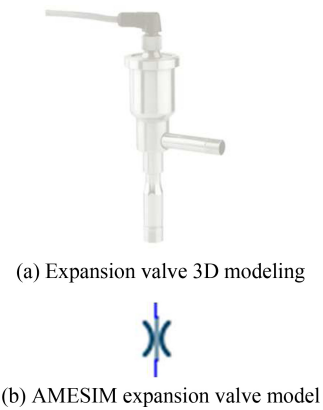


Fig. 10 Expansion valve comparison with 3D and AMESIM modeling model

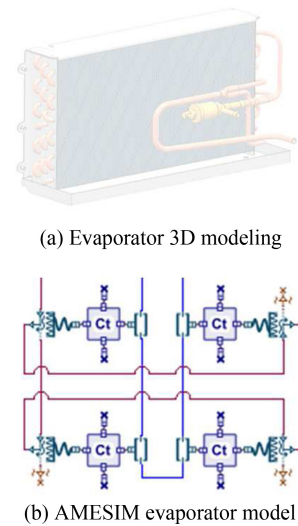
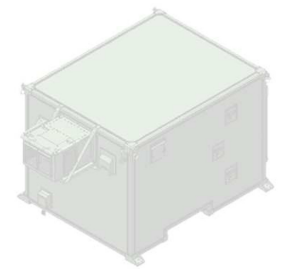


Fig. 11 Evaporator comparison with 3D and AMESIM modeling model

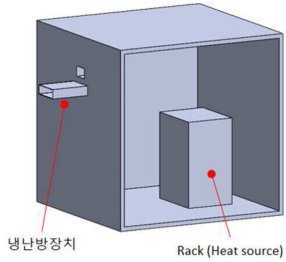
보여준다. 즉, 실제 밸브의 상세 형상을 반영한 것이 아니라, 냉매의 감압 및 유량 제어 기능을 중심으로 저차원 모델에 적합하도록 단순화하여 구현하였다.

2.2.3.4 증발기 모델링

증발기는 저온·저압의 냉매가 셀터 내부 공기와 열교환을 수행하며 기화되는 열교환기로, AMESIM의 Heat Exchanger 모델을 사용하여 구현했다. 증발기에서는 셀터 내부 공기와 냉매 간의 열전달을 고려했으며, 이를 통해 내부 공기의 열이 냉매로 전달되어 냉방 효과가 발생하도록 구성했다. 특히, 증발기는 셀터 내부 공기 노드와 직접 연결하여 내부 온도 저감 효과가 모델에 반영되도록 했다. Fig. 11은 실제 증발기 구성품과 이를 1D 시스템 모델에서 구현한 AMESIM 열교환기 요소 간의 대응 관계를 나타낸다. 본 연구에서는 증발기의 상세 3D 형상을 직접 해석에 사용하는 대신, 셀터 내부 공기와 냉매 간 열교환 기능을 중심으로 단순화하여 시스템 모델에 반영하였다.



(a) Military shelter 3D modeling



(b) Shelter Simulation Modeling (Simplified)

Fig. 12 Military shelter modeling comparison with simplified simulation modeling

한편, Figs. 7 및 9-11에 제시된 각 HVAC 구성요소의 형상은 1D 시스템 모델에서 물리적 구성요소와 AMESIM 요소 간의 대응 관계를 설명하기 위한 것이며, 3D CFD 해석에는 직접 사용되지 않았다. CFD 해석은 Fig. 12에 나타난 쉘터 내부 유동 도메인과 냉기 유입/유출 경계조건을 기반으로 수행하였다. 즉, 본 연구에서는 각 구성품의 기하학적 상세 형상보다는 시스템 수준에서의 기능과 열역학적 역할에 초점을 맞추어 저차원 모델을 구성하였다.

이와 같이 구성된 HVAC 시스템은 폐루프(Closed-loop) 냉동 사이클을 형성하도록 연결했으며, 각 구성요소 간 냉매 유동 및 상태 변화를 연속적으로 계산하도록 설정했다. 이를 통해 쉘터 내부 발열 및 외부 열유입 조건에 대해 HVAC 시스템이 제공하는 냉방 성능을 해석할 수 있도록 했다.

3. 열해석

3.1 해석 개요

본 연구에서는 Simcenter AMESIM 기반 1차원 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 ANSYS Fluent를 활용한 3차원 열유동 해석을 수행했다. CFD 해석은 쉘터 내부 공기 유동 및 온도 분포를 보다 상세하게 고려할 수 있도록 구성했으며, AMESIM 모델과의 비교를 통해 모델의 정확도를 평가하고자 했다.

해석 모델은 AMESIM에서 적용한 조건과의 일관성을 확보하기 위해 동일한 쉘터 형상 및 운용 조건을 기반으로 구성했다. 실제 쉘터의 복잡한 형상을 단순화하여 내부 공간을 중심으로 한 해석 도메인을 구성했으며, 쉘터 외벽은 일정 두께를 갖는

Table 3 Simulation condition

Simulation tool	ANSYS fluent
Time variation	Steady
Flow regime	Standard k-epsilon / k-ε standard wall function
Ambient condition	43°C (Radiation)

Table 4 Boundary condition of HVAC

Cooling capacity [BTU/h]	Outlet temperature [°C]	Flow rate [m³/min]	Flow velocity [m/s]
12,000	18	9.22	7.15

고체 영역으로 모델링했다. 또한, 내부 발열 장비는 총 발열량이 동일하도록 체적 열원(Volume Heat Source) 형태로 단순화하여 적용했다. Fig. 12(a)는 기존 쉘터의 3D 모델링을 보여주며, 이를 ANSYS Fluent 해석을 진행하기 위해 형상 단순화를 진행하여 Fig. 12(b)와 같은 형상으로 해석을 진행했다.

경계조건은 AMESIM 모델과 동일하게 설정했다. 외기 온도는 43°C로 적용했으며, 쉘터 외벽의 양 측면, 전면, 후면 및 상부 면에 태양 복사에 의한 열유속 조건을 부여했다. 또한, 외벽 외표면에는 외기와외의 대류 열전달을 고려하여 대류 열전달 계수를 적용했다. 내부 공기와 외벽 사이에는 전도 및 대류 열전달이 동시에 발생하도록 설정하여 외부 환경에 의한 열유입을 반영했다. 이와 같은 본 연구의 해석 조건은 Table 4와 같다

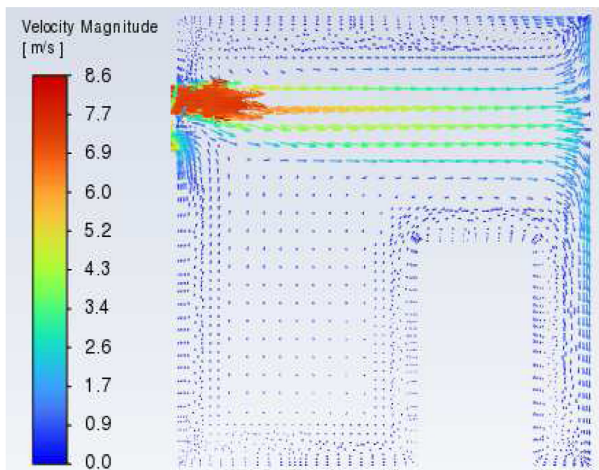
HVAC 시스템의 냉방 효과는 CFD 해석에서 직접적인 냉동 사이클 모델링 대신, 증발기 출구에 해당하는 위치에 냉기 유입 경계조건(Inlet Boundary Condition)을 부여하는 방식으로 구현했다. 이때, 유입 공기의 온도 및 유량은 AMESIM 모델에서 계산된 냉방 성능을 기반으로 설정하여 두 해석 간 일관성을 유지했다. 이와 같은 HVAC 경계 조건은 Table 5와 같다

유동 해석은 비압축성 정상상태 조건에서 수행했으며, 난류 유동을 고려하기 위해 표준 k-ε 난류 모델을 적용했다. 공간 이산화는 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 기반으로 수행했으며, 압력-속도 결합은 SIMPLE 알고리즘을 사용했다. 또한, 해석의 수렴성을 확보하기 위해 잔차(Residual)가 10^{-5} 이하로 감소할 때까지 반복 계산을 수행했다.

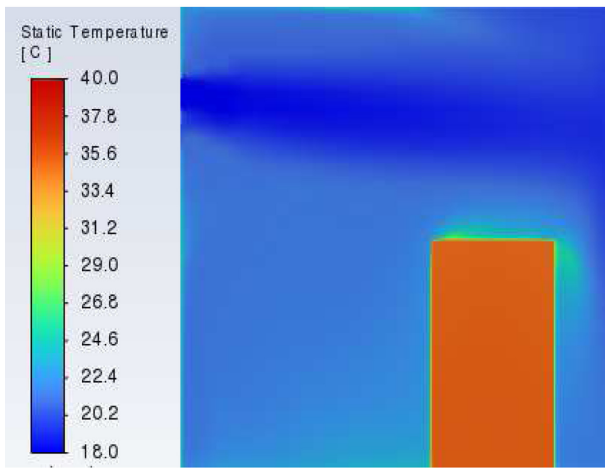
이와 같은 CFD 해석을 통해 쉘터 내부 온도 분포 및 평균 온도를 도출했으며, 이를 AMESIM 1D 모델 결과와 비교하여 모델의 신뢰성을 평가했다.

3.2 해석 결과

본 연구에서는 군용 쉘터 내부의 열유동 특성을 분석하기 위해 ANSYS Fluent를 활용한 정상상태 해석을 수행했다. 난류 모델로는 표준 k-ε 모델과 Standard Wall Function을 적용했으며, 쉘터 내부 유동은 난류 유동으로 가정하여 해석을 진행했다. 또한 외기 조건은 43°C로 설정하고, 쉘터 외벽에 태양 복사 열전달을 고려하여 복사 조건을 경계조건으로 적용했다. 해석 결과,



(a) Velocity magnitude



(b) Static temperature

Fig. 13 Simulation result of ANSYS fluent

셸터 내부 공기의 유속은 Fig. 13(a), 평균 온도는 Fig. 13(b)와 같이 22.7°C로 나타났으며, 이는 HVAC 시스템에 의해 내부 열 환경이 안정적으로 제어되고 있음을 의미한다. 또한 내부 발열이 집중되는 랙 장치의 평균 온도는 35°C로 나타났으며, 이는 발열원 주변에서 국부적인 온도 상승이 존재함을 보여준다. 그러나 해당 온도 수준은 장비의 정상 운용 범위 내에서 유지되는 것으로 판단된다. 온도 분포를 분석한 결과, 냉기 유입부를 중심으로 상대적으로 낮은 온도 영역이 형성되었으며, 발열 장비 주변에서는 온도 구배가 발생하는 경향을 확인했다. 이는 공기 유동에 따른 열전달과 내부 발열 조건이 복합적으로 작용한 결과로, HVAC 시스템이 전체적인 온도 균일도 확보에 효과적으로 기여하고 있음을 나타낸다. 이와 같은 CFD 해석 결과는 셸터 내부 열환경의 공간적 분포를 정밀하게 평가할 수 있으며, 이후 AMESIM 기반 1D 모델과의 비교를 통해 모델의 신뢰성을 검증하는 데 활용했다.

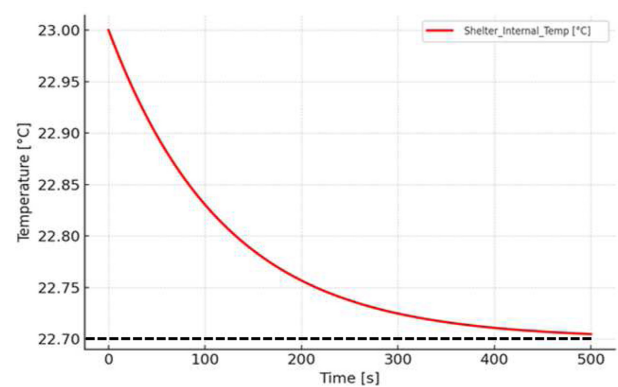


Fig. 14 Simulation result of shelter temperature

4. 해석 결과 비교

본 연구에서는 Simcenter AMESIM 기반 1D 시스템 모델과 ANSYS Fluent 기반 3차원 CFD 해석 결과를 비교하여 모델의 신뢰성을 검증했다. 두 해석은 동일한 외기 조건, 내부 발열량 및 셸터 형상을 적용하여 수행했으며, 시스템 수준의 열응답 특성이 일관되게 반영되는지 확인하고자 했다.

비교 결과, 셸터 내부 평균 온도 및 주요 발열 부위인 랙 장치의 온도 분포에서 두 해석 결과가 유사한 경향을 보였다. AMESIM 모델은 CFD 해석에서 나타난 전체적인 온도 수준과 변화 경향을 Fig. 14와 같이 높은 재현성을 보였으며, 특히 내부 평균 온도 및 발열 집중 영역에서의 온도 예측 정확도가 높은 수준으로 나타났다. 이는 1D 모델이 공간적 분포를 단순화했음에도 불구하고, 주요 열전달 메커니즘과 에너지 균형을 효과적으로 반영하고 있음을 의미한다.

또한, 두 해석 결과 간의 정량적 일치도를 평가하기 위해 셸터 내부 평균 온도를 비교한 결과, CFD와 AMESIM 모두 정상 상태 평균 온도가 22.7°C로 나타났다. 이는 제안한 1D 모델이 셸터 내부 평균 열환경을 정확하게 예측할 수 있음을 보여준다. 이러한 결과를 통해 AMESIM 기반 1D 모델은 시스템 수준에서 CFD 해석 결과를 효과적으로 대체할 수 있는 신뢰성 있는 저차원 해석 도구로 활용 가능함을 확인하였다.

추가적으로 동일한 해석 조건에서 계산 소요 시간을 비교한 결과, AMESIM 기반 1D 모델은 약 3 min 이내에 수렴한 반면, Fluent 기반 3D CFD 해석은 약 4 h의 계산 시간이 소요되었다. 이는 제안한 1D 모델이 CFD 대비 약 80배 수준의 계산 시간 절감 효과를 가질 수 있음을 보여주며, 반복적인 설계 변수 검토가 필요한 초기 설계 단계에서 높은 활용 가능성을 시사한다.

따라서 본 연구에서 구축한 AMESIM 기반 모델은 복잡한 3차원 CFD 해석을 수행하지 않고도 셸터 내부 열환경을 신속하게 예측할 수 있으며, 설계 초기 단계에서의 반복 해석 및 성능 평가에 효과적으로 활용될 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 군용 쉼터 내부 열환경을 효율적으로 해석하기 위해 Simcenter AMESIM을 활용한 1차원 시스템 모델을 구축하고, ANSYS Fluent 기반 3차원 CFD 해석과의 비교를 통해 모델의 신뢰성을 검증했다. 쉼터 구조체의 열전달 특성과 내부 발열 조건, HVAC 시스템의 냉동 사이클을 통합적으로 반영함으로써 실제 운용 환경을 고려한 열해석 모델을 구현했다.

AMESIM 모델은 쉼터 내부 공기 영역을 단일 체적으로 단순화했음에도 불구하고, 주요 열전달 메커니즘과 에너지 균형을 효과적으로 반영했으며, CFD 해석 결과와 비교했을 때 내부 평균 온도 및 발열 집중 영역에서 유사한 경향을 나타냈다. 또한 두 해석 결과의 정상상태 평균 온도를 비교한 결과, CFD와 AMESIM 모두 22.7°C로 동일한 결과를 보여 구축된 1D 모델의 신뢰성을 확인하였다.

이를 통해 기존의 3차원 CFD 해석 대비 해석 시간과 계산 비용을 크게 절감하면서도 설계 초기 단계에서 요구되는 열환경 예측 정확도를 확보할 수 있음을 확인했다. 특히 다양한 운용 조건에 대한 반복 해석이 요구되는 군용 쉼터 설계 과정에서, 본 모델은 신속한 성능 평가 및 설계 변수 분석을 위한 효과적인 도구로 활용 가능함을 확인했다.

다만, 본 연구에서 제안한 1D 모델은 쉼터 내부 공기 영역을 단일 체적으로 단순화하고, 내부 발열 장비를 등가 열원으로 가정하였으며, 정상상태 조건을 기반으로 해석을 수행하였다는 한계를 가진다. 따라서 쉼터 내부의 국부적인 온도 분포, 유동에 따른 공간적 열편차, 장비 운용 조건 변화에 따른 과도 열응답 특성은 충분히 반영하지 못한다. 이에 따라 본 연구의 결과는 군용 쉼터의 평균적 열환경과 HVAC 시스템의 시스템 수준 성능을 설계 초기 단계에서 신속히 평가하기 위한 목적에 우선적으로 적용될 수 있으며, 보다 정밀한 국부 열환경 분석이나 실제 운용 조건 기반의 상세 해석을 위해서는 3D CFD 및 실험 검증과의 연계가 필요하다.

향후에는 다양한 외기 조건 및 복합 열부하 조건을 반영한 모델 고도화와 함께, 비정상 운용 조건에 대한 해석 기능을 확장하고, AI 기반 예측 기법과 연계하여 실시간 성능 예측 및 최적 설계 자동화로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Yang, Y., Yang, H., Li, Q., Zhang, L., Dong, Z., (2023), Simulation study on airflow organization and environment in reconstructed fangcang shelter hospital based on CFD, Buildings, 13(5), 1269.
2. Lee, D. S., Iacocca, M., Joshi, Y. K., (2021), Energy usage modeling for heating and cooling of off-grid shelters, Journal of Building Engineering, 35, 102054.

3. Mukhtar, A., Ng, K., Yusoff, M., (2018), Passive thermal performance prediction and multi-objective optimization of naturally-ventilated underground shelter in Malaysia, Renewable Energy, 123, 342-352.
4. Kim, Y. S., Kwak, Y. C., Jung, J. Y., Ra, Y. E., (2026), Thermal analysis study for the design of shelter environmental control system, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 43(3), 283-290.



Young Seob Kim

M.S. Research Engineer, Mechanical Engineering systems R&D, LIG D&A. His research interest is precision engineering.
E-mail: youngseob.kim@ligdna.com



Su Jin Jang

M.S. Research Engineer, Mechanical Engineering systems R&D, LIG D&A. Her research interest is precision engineering.
E-mail: sujin.jang@ligdna.com



Tae Yoon Kim

B.S. Research Engineer, Mechanical Engineering systems R&D, LIG D&A. His research interest is precision engineering.
E-mail: taeyoon.kim@ligdna.com



Tae Hyun Kim

B.S. Research Engineer, Mechanical Engineering systems R&D, LIG D&A. His research interest is precision engineering.
E-mail: taehyun.kim@ligdna.com