

이상진단시스템 구축을 위한 냉동 사이클 판형 열교환기의 디지털 트윈 구현

도현석*¹, 이승민*², 이병진*³, 허장욱**

Implementation of a Digital Twin of a Refrigeration-Cycle Plate Heat Exchanger for Fault Diagnosis System Development

Hyun Seok Do*¹, Seung Min Lee*², Byung Jin Lee*³, and Jang Wook Hur**

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터사업의 연구결과(IIITP-2026-RS-2024-00438430, 기여율 40%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업(IIITP-2026-RS-2020-II201612, 기여율 40%)과 2026년도 경상북도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)-(지역성장 혁신LAB, 기여율 20%)의 지원을 받아 수행된 결과입니다(2026-rise-15-105)

요 약

본 연구에서는 R-507A 냉매를 사용하는 공랭식 냉동 사이클의 판형 열교환기(PHE, Plate Heat Exchanger)를 대상으로 MATLAB Simulink의 Simscape Two-Phase Fluid 라이브러리 기반 디지털 트윈 모델을 구축하였다. 모델은 압축기·공랭식 응축기·팽창밸브·판형 열교환기로 구성된다. 외부 열부하를 모사하기 위해 가열탱크 온도를 저·중·고부하에 해당하는 24.5, 35, 39°C로 변화시키고, 열교환기 입·출구의 압력·온도 4개 변수를 측정하여 $t = 200 \sim 700$ 초 정상상태 구간에서 평균제곱근오차(RMSE, Root Mean Squared Error)와 범위 정규화 지표(NRMSE/range, Normalized Root Mean Square Error)로 정량 검증하였다. 그 결과 모든 시나리오·변수에서 NRMSE/range가 28.7% 이하로 정합성 기준(30%)을 충족하는 디지털 트윈 모델을 구축하였다.

Abstract

In this study, a digital twin model was developed for a Plate Heat Exchanger (PHE) in an air-cooled refrigeration cycle using R-507A refrigerant, based on the Simscape Two-Phase Fluid library of MATLAB Simulink. The model comprises a compressor, an air-cooled condenser, an expansion valve, and a plate heat exchanger. To emulate external thermal loads, the heating-tank temperature was varied to 24.5, 35, and 39°C, corresponding to low-, medium-, and high-load conditions, and four variables—the inlet and outlet pressures and temperatures of the heat exchanger—were measured. Quantitative validation was then performed over the steady-state interval ($t = 200 - 700$ s) using the Root Mean Squared Error (RMSE) and the range-Normalized Root Mean Square Error (NRMSE/range). As a result, a digital twin model was established in which the NRMSE/range was 28.7% or lower for all scenarios and variables, thereby satisfying the agreement criterion of 30%.

Keyword

refrigeration cycle, plate heat exchanger, digital twin, MATLAB/Simulink

* 국립금오공과대학교 기계공학과
 - ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0001-0179-6720>
 - ORCID²: <https://orcid.org/0009-0000-5084-033X>
 - ORCID³: <https://orcid.org/0009-0006-6793-6200>
 ** 국립금오공과대학교 기계공학과 교수(교신저자)
 - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4718-3540>

• Received: May 26, 2026, Revised: Jul. 13, 2026, Accepted: Jul. 16, 2026
 • Corresponding Author: Jang-Wook Hur
 Dept. of Engineering, Kumoh National Institute of Technology,
 61 Daehak-ro (yangho-dong), Gumi, Gyeongbuk, [39177] Korea
 Tel.: +82-54-478-7399, Email: hhjw88@kumoh.ac.kr

I. 서 론

냉동 사이클은 식품 저장, 데이터센터 냉각, 건물 공조 등 산업 전반에 활용되는 핵심 열역학 시스템이며, 그 성능과 안정성은 열교환기의 동특성에 크게 좌우된다[1]. 열교환기는 냉매와 2차 유체 사이의 열전달이 직접 일어나는 핵심 구성품으로, 사이클 전체의 응답 특성에 결정적인 영향을 미친다[2]. 다양한 열교환기 중 판형 열교환기(PHE, Plate Heat Exchanger)는 다수의 얇은 Brazed plate를 교차 적층한 구조로 단위 체적당 열전달 면적이 매우 높고 컴팩트하면서도 고효율의 열전달이 가능하다는 장점이 있어, 산업용 냉동 사이클의 열교환기로 광범위하게 사용되고 있다[3].

실제 운전 환경에서 냉동 사이클은 외기 온도 변화, 데이터센터 부하 급증 등 다양한 원인의 외부 열부하 환경에 노출된다. 이러한 부하 증가는 판형 열교환기의 Brazed joint의 열피로 균열에 의한 냉매 누설, Superheat 제어 실패로 인한 액냉매의 압축기 유입, 사이클 전체의 운전 효율 저하 등 시스템 전반으로 전파된다[4]. 그러나, 이와 같은 판형 열교환기의 부하 변동 거동을 정상상태 기반의 전통적 해석 모델만으로 정량적인 예측에는 한계가 있어, 최근 디지털 트윈 모델을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다[5].

디지털 트윈 모델이 산업 현장에서 진단 및 예지 정비 도구로 활용되기 위해서는 부하 변동 조건에서의 PHE 거동을 정량적으로 재현할 수 있어야 하나, 기존 냉동 사이클의 디지털 트윈 관련 연구들은 주로 정상상태 평균값의 재현이나 단일 운전 조건에서의 검증에 초점을 맞춰 왔으며, 부하 변동에 따른 정합성을 다수 시나리오에 걸쳐 정량적으로 검증한 사례는 제한적이다[6].

따라서, 본 연구에서는 디지털 트윈의 가장 초기 단계인 Physics-based simulation 디지털 트윈 모델을 냉동 사이클의 판형 열교환기에 대해 MATLAB Simulink를 기반으로 구축하고, 가열탱크 온도(T_{heat})를 24.5, 35, 39°C로 변화시킨 3가지 운전 조건에서 RMSE(Root Mean Squared Error) 및 NRMSE(Normalized Root Mean Square Error)/range를 통한 정량적 정합성을 검증함으로써, 부하 변동을 동반하는

산업 현장에서의 진단 및 예지 정비를 위한 기반을 제공하고자 한다.

II. 실험 장치 및 방법

실험장치는 그림 1에 나타난 바와 같이 냉매측 회로와 냉각수측 회로의 2개의 폐루프로 구성하였다. 냉매측 회로는 압축기, 공랭식 응축기, 감온식 팽창밸브, 그리고 판형 열교환기로 이루어진 구조이며, 냉각수측 회로는 가열탱크에서 가열된 물이 판형 열교환기에서 냉매에 열을 전달한 뒤 냉각탱크를 경유하여 다시 가열탱크로 회수되는 폐루프이다. 가열탱크에는 전기 히터가 장착되어 열교환기 유입측의 물 온도를 설정값에 맞춰 유지하며, 이를 통해 외부 열부하 조건을 실험적으로 모사하였다.

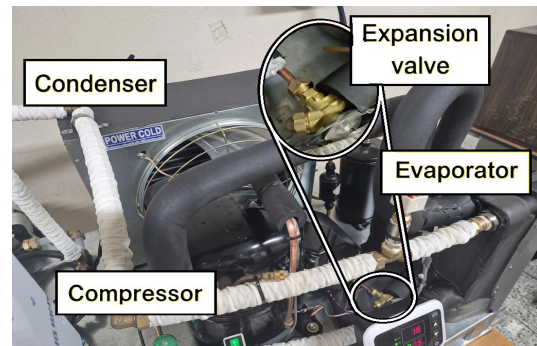


그림 1. 냉동 시스템 실험 장치
Fig. 1. Refrigeration system experimental setup

실험 장치의 주요 사양은 표 1에 나타난 바와 같이 압축기는 Copeland CS20K7ME 모델을 사용하였고, 응축기는 공랭식 Finned-tube 구조이며, 응축기 측 풍량은 운전 조건에 따라 가변적으로 제어되도록 하였다. 그리고 판형 열교환기는 Danfoss B3-014 모델을 사용하였고, 세부 사양은 표 2에 표시한 바와 같으며, 사용 냉매는 R-507A이다.

표 1. 실험장치의 사양
Table 1. Specifications of the experimental apparatus

Category	Specification
Compressor	Copeland CS20K7ME
Condenser	Air-cooled finned-tube
Plate heat exchanger	Danfoss B3-014
Refrigerant	R-507A

표 2. 판형 열교환기의 세부 사양

Table 2. Specifications of the plate heat exchanger

Category	Specification
Model name	B3-014
Heat load (Capacity)	0.5 - 5 kW
Design pressure	30 bar (A type)
Design temperature	-196 to +200 °C
Heat transfer area	0.36 m ²
Plate material	AISI 304 stainless steel
Brazing material	Copper brazed

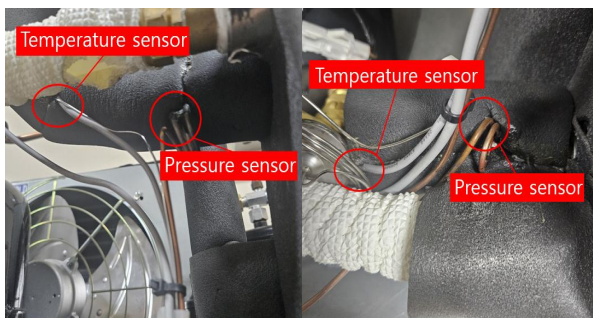


그림 2. 센서 위치 (a) 증발기 입구 (b) 증발기 출구
Fig. 2. Sensor location
(a) Evaporator inlet (b) Evaporator outlet

디지털 트윈 모델의 검증을 위해 열교환기 입구 압력(P_{in}), 입구 온도(T_{in}), 출구 압력(P_{out}) 및 출구 온도(T_{out})의 4가지 변수를 측정하였으며, 측정 센서의 설치 위치는 그림 2에 도시한 바와 같다. 외부 열부하 변동에 따른 판형 열교환기의 거동을 분석하기 위해 가열탱크 온도를 24.5, 35, 39°C의 3가지 설정값으로 변화시키며 실험을 수행하였다. 3가지 조건은 외부 열부하의 크기를 저·중·고 3단계로 구분하여 선정하였다. 24.5°C는 가열탱크에 별도의 가열을 가하지 않고 실온 상태로 둔 최소 부하 조건이며, 39°C는 가열탱크 온도가 40°C에 도달할 경우 과도한 열부하로 인해 테스트베드의 정상 운전이 불가능하였으므로 이를 안정적으로 운전할 수 있는 최대 부하 조건으로 설정하였다. 35°C는 이러한 최소·최대 부하의 중간에 해당하는 중간 부하 조건이다. 즉 무가열 기준 조건부터 운전 가능 상한까지의 부하 변동 범위를 균등하게 포함하도록 3개 조건을 선정함으로써, 단일 운전점이 아닌 부하 전

구간에서 디지털 트윈 모델의 적합성을 검증하고자 하였다. 각 시나리오의 총 측정 시간은 약 700초이며, 시동 천이가 완료된 후의 정상상태 구간을 디지털 트윈 모델의 검증 윈도우로 사용하였다.

III. 디지털 트윈 모델 및 검증

3.1 모델 구조

본 연구의 디지털 트윈 모델은 MATLAB Simulink 환경에서 구축하였으며, Simscape Two-phase fluid 라이브러리를 기반으로 한 냉동 사이클 모델이다. 모델은 열역학 보존 법칙을 따르며, 각 구성품의 동적 거동을 미분방정식 형태로 표현하고, 모델의 최상위 구조는 그림 3에 나타난 바와 같다. 모델은 압축기, 공랭식 응축기, 팽창밸브 및 판형 열교환기를 포함하는 표준 Vapor-compression cycle 구조를 따른다. 응축기와 압축기 사이에는 압력과 엔탈피를 측정하는 Sensor 1 블록이 배치되어 사이클의 고압 측 상태가 실시간으로 추적되며, 모델의 입력은 운전 조건 변수(가열탱크 온도, 응축측 풍량 등)이고, 출력은 검증 대상인 열교환기 입·출구의 압력과 온도(out_P_in, out_T_in, out_P_out, out_T_out)이다.

모델에서 핵심 분석 대상인 판형 열교환기와 팽창밸브를 하나의 서브시스템으로 묶어 표현한 것은, 2가지 구성품의 결합 동역학이 사이클 전체의 응답 특성과 안정성을 결정하기 때문이다.

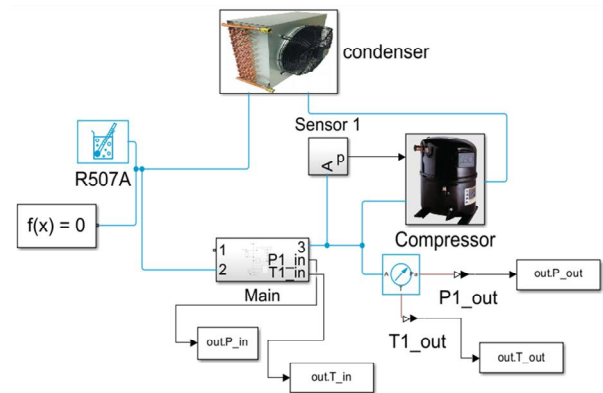


그림 3. 시뮬링크 디지털 트윈 모델
Fig. 3. Simulink digital twin model

냉매로는 R-507A의 물성 테이블을 사용하였으며, 이는 CoolProp 라이브러리에서 사전 계산된 압력-내부에너지 격자 형식으로 모델에 적용된다[7].

판형 열교환기와 팽창밸브로 구성된 서브시스템의 구조를 그림 4에 도시하였다. 실험장치의 팽창밸브는 감온부의 압력 평형에 의해 과열도를 기계식으로 조절하는 감온식 팽창밸브(Thermostatic Expansion Valve, TEV)이지만, 이러한 Sensing bulb 기반의 압력 평형 동작은 정상상태에서 비례-적분 제어와 유사한 과열도 안정화 효과를 가지므로 모델에서는 이를 PI 제어식 등가 모델로 표현하였다.

열교환기 출구의 Thermodynamic sensor에서 측정된 냉매 온도와 Saturation sensor에서 얻은 포화 온도의 차이로 실제 과열도가 산출되며, 이 값과 목표 과열도(SHTarget, 7.8°C) 사이의 오차가 PI(Proportional-Integral) 제어기에 입력된다. 제어기 출력은 팽창밸브의 개도율로 변환되어 사이클의 안정한 과열도 운전이 유지된다.

판형 열교환기의 내부 모델 구조는 그림 5와 같으며, 열교환기는 냉매측 유로와 냉각수측 유로 사이의 열전달을 Plate-wall 결합 구조로 표현하며, 2가지 유체 도메인을 Plate 금속의 열용량과 열전달 계수를 매개로 연결한다. 냉매 측은 Simscape Two-phase fluid 도메인의 Convective heat transfer 블록으로 모델링되었으며, 냉매가 액상에서 기상으로 상변화하는 과정에서 발생하는 비등 거동과 그에 따른 압력과 온도의 동특성이 자동으로 처리된다.

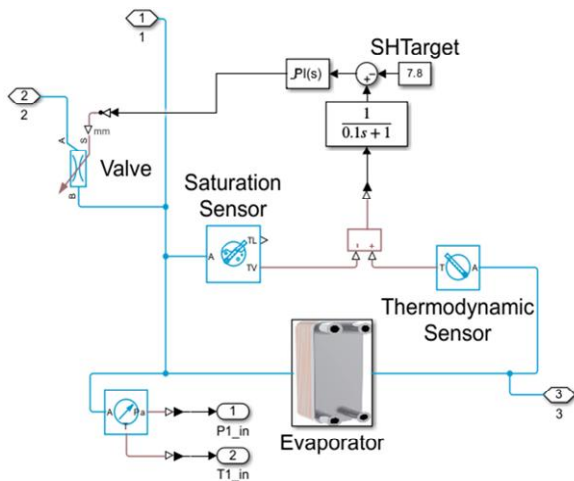


그림 4. 메인 서브시스템 구조
Fig. 4. Main subsystem structure

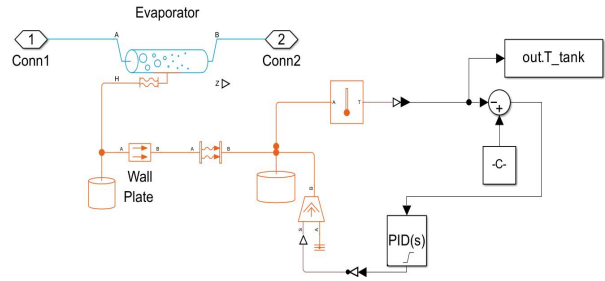


그림 5. 열교환기 서브시스템 구조
Fig. 5. Evaporator subsystem structure

활성 열전달 면적은 Danfoss B3-014 모델의 사양을 반영하여 $A = 0.36 \text{ m}^2$ 로 설정하였다. 냉각수 측은 Thermal liquid 도메인의 단상 유체 블록으로 표현되며, 단상 냉각수 측 대류 열전달 계수는 일반적인 판형 열교환기 내부 유동 조건에 기반하여 $h_{\text{conv}} = 5,500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 설정하였다[8]. 실제 대류 열전달 계수는 냉각수 유량(Reynolds 수)에 따라 변하나, 본 모델에서는 이를 상수로 단순화하였다. 2가지 유체 도메인은 Plate와 Wall 블록을 통해 열적으로 결합되며, 이들 블록은 Plate 금속의 열저항과 열관성을 동시에 표현하였다. 그리고, 부하 가변 시나리오 실험과 동일한 운전 조건을 디지털 트윈 모델 내부에서 자동으로 재현할 수 있도록 구성하였다.

3.2 검증 방법

디지털 트윈 모델의 가상 데이터와 실측 데이터 사이의 정합성을 정량적으로 평가하기 위해 2가지 통계 지표를 사용하였다. 첫째는 평균제곱근오차(RMSE)로써, RMSE는 디지털 트윈 모델의 가상 데이터와 실측 데이터 사이의 점별 차이를 제공하여 평균한 값의 제공근으로 정의되며, 2가지 신호 사이의 절대 오차 척도를 제공하고, 이는 검증에서 활용되는 정합성 지표이다[9]. RMSE는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{sim},i} - y_{\text{meas},i})^2} \quad (1)$$

여기서, n 은 정상상태 윈도우 내의 샘플 수, $y_{\text{sim},i}$ 와 $y_{\text{meas},i}$ 는 각각 i 번째 시점에서의 가상 데이터와 실측 데이터이다.

둘째는 측정 데이터의 범위로 정규화된 NRMSE/range로써, NRMSE/range는 RMSE를 실측 데이터의 변동 범위(최댓값과 최솟값의 차)로 나누어 백분율로 표현한 무차원 지표로, 변수의 크기나 단위에 무관한 정합성 비교를 가능하게 한다[10]. NRMSE/range는 식 (2)와 같이 계산된다

$$NRMSE/range = \frac{RMSE}{y_{meas,max} - y_{meas,min}} \times 100[\%] \quad (2)$$

본 연구에서 범위 기반 정규화를 채택한 이유는 RMSE를 무차원 백분율로 정규화하는 방식은 분모로 사용하는 척도에 따라 구분되며, 평균값으로 정규화한 CV-RMSE(Coefficient of Variation of the RMSE)와 변동 범위(최댓값과 최솟값의 차)로 정규화한 NRMSE/range가 대표적이다. 두 지표는 모두 동일한 RMSE를 정규화한 무차원 지표로 분모만 서로 다르다. 본 연구에서 NRMSE/range를 채택한 이유는 평균 기반 정규화인 CV-RMSE가 변수의 평균이 0 근처일 때 분모가 작아져 지표가 발산하는 한계를 가지기 때문이다. 실제로 측정 변수 중 열교환기 출구 온도가 0°C 부근에서 변동하므로 평균 기반 정규화는 부적합하며, 범위 기반 정규화는 압력과 온도 모두에 일관되게 적용할 수 있다.

정합성 합격 기준으로는 보정 모델 검증 표준인 ASHRAE Guideline 14-2014에서 시간 단위(hourly) 데이터에 대해 제시한 CV-RMSE 30%를 적용하였다[10]. CV-RMSE와 NRMSE/range는 분모만 다른 동일 계열의 정규화 지표이므로, 본 연구에서는 변수에 일관되게 적용 가능한 NRMSE/range에 동일한 30% 수준을 정합성 기준으로 사용하였다. 특히 평균값이 큰 압력 채널에서는 변동 범위가 평균보다 작아 NRMSE/range가 CV-RMSE보다 오히려 큰 값으로 산출되므로, NRMSE/range 30% 기준은 ASHRAE의 CV-RMSE 기준에 비해 완화된 수준이 아니다. 또한 본 검증 신호는 정상상태에서도 한계 사이클 진동을 포함하므로, 평균과 진폭이 정확히 재현되더라도 순간 위상 차이에 의해 점별 정규화 오차가 본질적으로 크게 산출된다. 이를 고려할 때

NRMSE/range가 30% 미만이면 정상상태의 정합성이 확보된 것으로 평가하였다.

디지털 트윈 모델의 가상 데이터와 실측 데이터의 비교는 시동 천이가 완전히 종료된 후의 정상상태 구간에서 수행하였다. 디지털 트윈 모델 동작 후 $t = 200$ 초부터 $t = 700$ 초까지의 500초 구간을 정상상태 윈도우로 정의하였으며, 이 윈도우는 시스템 안정화 천이가 완전히 종료된 후의 구간이다. 또한 이 구간은 각 시점에서 디지털 트윈 모델의 가상 데이터와 실측 데이터가 동일 시간축 상에서 비교되며, 2가지 지표는 정상상태 윈도우 내의 모든 샘플에 대해 산출된다.

IV. 검증 결과 및 고찰

3가지 시나리오의 정상상태 구간에서 실측 데이터(파란선)와 디지털 트윈 모델의 가상 데이터(빨간선)를 비교한 결과를 그림 6에 나타내었다. 각 패널은 열교환기 입·출구의 압력과 온도의 시계열 데이터를 표시하며, 패널 우상단에 RMSE와 NRMSE/range 값을 함께 표기하였다.

$T_{heat} = 35^{\circ}\text{C}$ 조건에서는 실측 데이터와 디지털 트윈 모델의 가상 데이터가 평균 동작점, 진폭, 그리고 한계 사이클의 위상까지 거의 완벽하게 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 모델이 중간 부하 영역에서 사이클의 동특성을 정확히 재현함을 의미한다.

또한, $T_{heat} = 39^{\circ}\text{C}$ 조건에서는 한계 사이클의 진폭이 가장 크게 나타나는데, 디지털 트윈 모델이 이 확대된 진폭을 정확히 재현하며, 평균 동작점 또한 잘 일치한다.

마지막으로, $T_{heat} = 24.5^{\circ}\text{C}$ 조건은 저부하 영역으로, 한계 사이클의 진폭이 측정 분해능 수준에 근접하는 Noise-dominated 영역이다. 이 조건에서 디지털 트윈 모델은 평균 동작점과 진폭 통계를 정확히 재현하였다.

본 모델은 35°C를 동작점으로 선형화한 모델이 아니라 Simscape Two-Phase Fluid 기반의 비선형 물리 모델로, 동작점 이탈에 따른 선형화 오차는 발생하지 않는다.

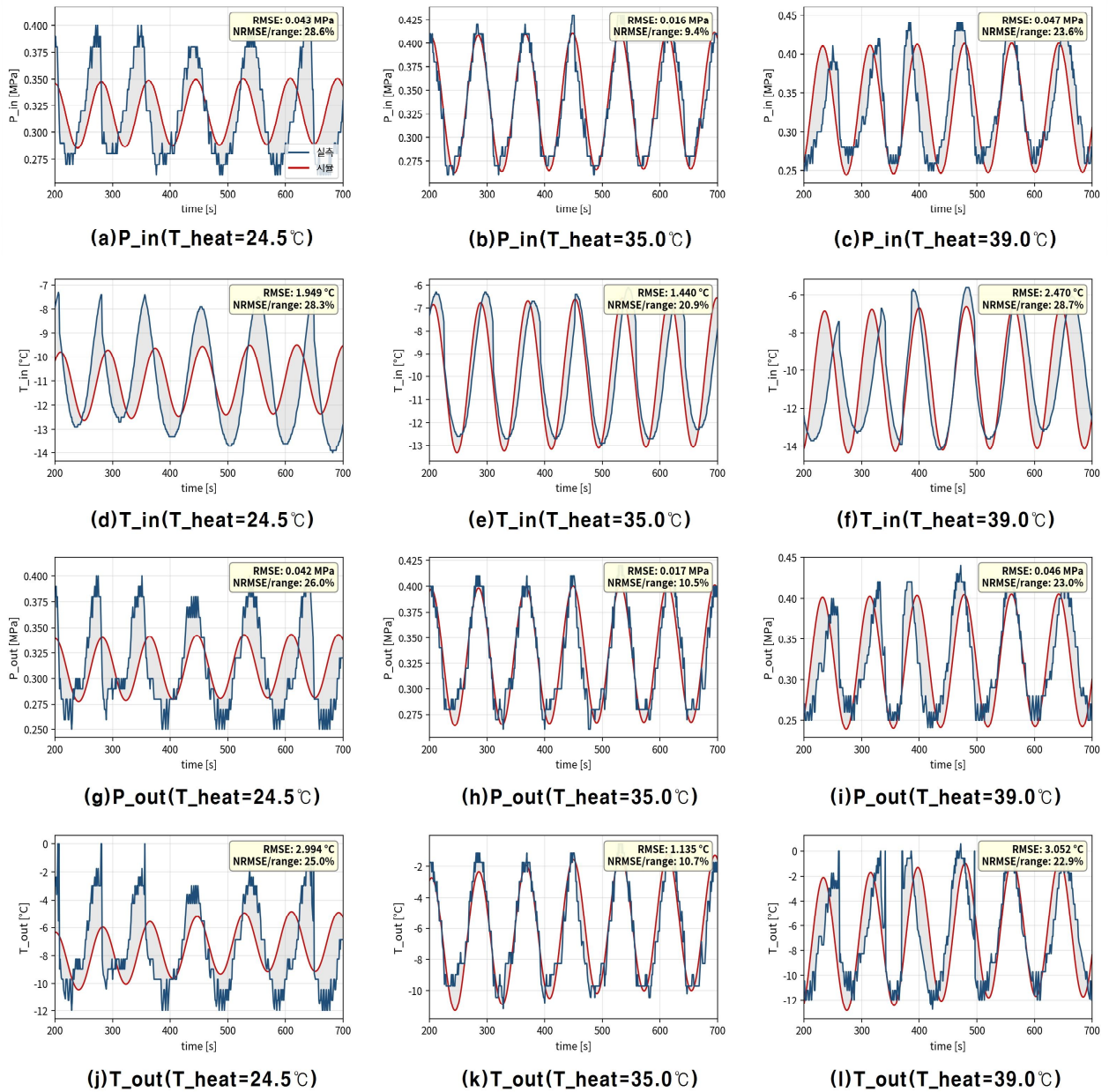


그림 6. 3가지 운전 시나리오에서 실측과 디지털 트윈 모델의 출력 비교

Fig. 6. comparison of measured data and digital twin output across three operating scenarios

39 $^{\circ}\text{C}$ 고부하 조건에서 상대적으로 큰 오차는 앞서 상수로 단순화한 냉각수 측 대류 열전달 계수의 영향이 진폭이 가장 큰 운전점에서 점별 오차로 확대된 결과로 해석된다. 24.5 $^{\circ}\text{C}$ 저부하 조건에서는 한계 사이클의 진폭이 3가지 조건 중 가장 작아(표 3) 정규화 분모가 작으므로, 절대 오차가 동일하더라도 NRMSE/range가 상대적으로 크게 산출된다. 다만 2가지 조건 모두 평균 동작점과 진폭 통계가 정확히 재현되었으며, 모든 조건 및 변수에서 NRMSE/range

도 28.7% 이하로 진단 목적의 정합성 기준을 충족한다. 따라서 해당 오차 수준은 한계 사이클을 포함하는 신호를 점별 지표로 평가할 때 예상되는 범위이며, 모델은 모든 부하 구간에서 정합성을 확보한 것으로 판단된다.

하지만 순간 위상의 일치도는 다른 두 시나리오 대비 낮게 나타났다. 이는 저부하 영역에서 한계 사이클이 단순 Sinusoidal 형태에서 벗어난 비대칭 거동을 보이는 물리적 특성에 기인하는 것으로 해석된다.

표 3. 시나리오별 실측 사이클 진폭 (표준편차)

Table 3. Measured cycle amplitude (std) per scenario

Variable	24.5°C	35°C	39°C
P_in	0.044	0.052	0.059
T_in	2.030	2.310	2.680
P_out	0.043	0.047	0.058
T_out	3.040	3.110	3.880

표 4. 시나리오별 정합성 지표(200 ~ 700s)

Table 4. Scenario-specific Consistency Metric(200 ~ 700s)

T_heat	Variable	RMSE	NRMSE/range [%]
24.5°C	P_in	0.043	28.6
	T_in	1.95	28.3
	P_out	0.042	26.0
	T_out	2.99	25.0
35°C	P_in	0.016	9.4
	T_in	1.44	20.9
	P_out	0.017	10.5
	T_out	1.14	10.7
39°C	P_in	0.047	23.6
	T_in	2.47	28.7
	P_out	0.046	23.0
	T_out	3.05	22.9

3가지 운전 시나리오($T_{\text{heat}} = 24.5, 35, 39^\circ\text{C}$)에 대해 정상상태 윈도우($t = 200\sim 700\text{s}$) 내에서 산출한 RMSE와 NRMSE/range를 표 4에 정리하였다. NRMSE/range는 모든 시나리오 측정 변수에서 합격 기준인 30% 미만을 충족하였으며[10], 최댓값은 $T_{\text{heat}} = 39^\circ\text{C}$ 조건의 열교환기 입구 온도에서 28.7%로 나타났다. 시나리오별로 보면 중간 부하 조건인 $T_{\text{heat}} = 35^\circ\text{C}$ 에서 가장 낮은 NRMSE/range가 관측되었으며(P_{in} 9.4%, P_{out} 10.5%, T_{out} 10.7%), 이는 중간 부하 영역에서 가장 우수한 정합성을 보임을 의미한다. 고부하 조건인 $T_{\text{heat}} = 39^\circ\text{C}$ 에서는 22.9~28.7%, 저부하 조건인 $T_{\text{heat}} = 24.5^\circ\text{C}$ 에서는 25.0~28.6%의 범위를 보였다. RMSE 기준으로 압력 채널은 모든 시나리오에서 0.05 MPa 이하, 온도 채널은 3.1°C 이하의 절대 오차를 표시하였다.

3가지 시나리오의 실측 데이터를 통계적으로 비

교한 결과를 표 3에 정리하였다. 한계 사이클의 진폭과 측정 변수의 표준편차는 가열탱크 온도 상승에 따른 판형 열교환기 부하에 비례하여 증가하는 추세를 보였다. 열교환기 입구 압력의 표준편차는 T_{heat} 이 24.5, 35, 39°C 로 증가함에 따라 각각 0.044, 0.052, 0.059 MPa로 확대하였고, 입구 온도도 2.03, 2.31, 2.68°C 로 동일한 경향을 보였으며, 출구에서도 유사한 현상이 확인되었다. 이와 같이 디지털 트윈 모델은 부하 의존 진폭 변조를 모든 시나리오에서 재현하였으며, 이는 부하 변동을 동반하는 실제 운전 환경에서 본 모델이 진단 도구로 활용될 수 있음을 시사한다.

V. 결 론

본 연구에서는 R-507A 냉매를 사용하는 공랭식 냉동 사이클의 판형 열교환기에 대해 가열탱크 온도 변화에 따른 디지털 트윈 모델을 생성하고 정합성을 검증하였다. MATLAB Simulink 환경에서 Simscape Two-Phase Fluid 라이브러리를 기반으로 압축기, 공랭식 응축기, 팽창밸브, 그리고 판형 열교환기로 구성된 냉동 사이클 모델을 구축하였으며, 가열탱크 온도(T_{heat})를 24.5, 35, 39°C 로 변화시킨 3가지 부하 조건에 대해 RMSE와 NRMSE/range를 통한 정량적 정합성 검증을 수행하였다.

모든 시나리오와 측정 변수에 대해 NRMSE/range가 28.7% 이하로 정량적 정합성 기준(30%)을 충족하였으며, 절대 오차도 압력 채널은 0.05 MPa 이하, 온도 채널은 3.1°C 이하의 RMSE를 유지하였다. 또한, 시스템의 평균 동작점은 T_{heat} 변화와 거의 무관하게 유지되는 반면, 한계 사이클의 진폭은 부하에 비례하여 단조 증가하는 특성이 확인되었으며, 디지털 트윈 모델은 이러한 부하 의존 진폭 변조를 모든 시나리오에서 정확히 재현하였다.

본 연구의 의의는 단일 운전 조건이 아닌 다수의 부하 조건에 걸쳐 판형 열교환기의 거동을 정량적으로 검증함으로써, 부하 변동을 동반하는 실제 운전 환경에서 디지털 트윈 모델이 시스템 진단 및 예지 정비 도구로 활용될 수 있는 기반을 제시한 점에 있다.

향후 연구로는 부하 가변 Transient 시나리오에 대한 추가 검증을 수행하고, 디지털 트윈 기반의 실시간 이상 진단 알고리즘으로 응용 범위를 확장하고자 한다.

References

- [1] X. D. He, S. Liu, and H. H. Asada, "Modeling of Vapor Compression Cycles for Multivariable Feedback Control of HVAC Systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 119, No. 2, pp. 183-191, Jun. 1997. <https://doi.org/10.1115/1.2801231>.
- [2] S. I. Choi, M. K. Ji, D. C. Lee, H. M. Jeong, and H. S. Chung, "A Study on the Characteristics of Refrigerating System According to the Condensation and Evaporation Load", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 44-49, Jun. 2013. <https://doi.org/10.9726/kspse.2013.17.3.044>.
- [3] Z. H. Ayub, "Plate Heat Exchanger Literature Survey and New Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Refrigerant Evaporators", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 3-16, Sep. 2003. <https://doi.org/10.1080/01457630304056>.
- [4] S. A. Tassou and I. N. Grace, "Fault Diagnosis and Refrigerant Leak Detection in Vapour Compression Refrigeration Systems", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, No. 5, pp. 680-688, Aug. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.12.007>.
- [5] M. Bilka, I. Gritsuk, A. Holovan, O. Volska, I. Honcharuk, M. Kohutiar, and M. Krbata, "Digital Twin-Based Assessment and Forecasting of Marine Plate Heat Exchanger Performance Under Variable Operating Conditions", *Machines*, Vol. 14, No. 5, Art. no. 497, Apr. 2026. <https://doi.org/10.3390/machines14050497>.
- [6] N. I. Ibrahim, C. Vering, N. Giannetti, M. Kim, Sholahudin, T. Storek, D. Müller, and K. Saito, "State-of-the-art of the Digital Twin Concept in HVAC+R Systems for Thermal Management of Buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 229, Art. no. 116601, Apr. 2026. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116601>.
- [7] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, and V. Lemort, "Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-source Thermophysical Property Library CoolProp", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 53, No. 6, pp. 2498-2508, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1021/ie4033999>.
- [8] T. S. Khan, M. S. Khan, M.-C. Chyu, and Z. H. Ayub, "Experimental Investigation of Single Phase Convective Heat Transfer Coefficient in a Corrugated Plate Heat Exchanger for Multiple Plate Configurations", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 8-9, pp. 1058-1065, Jun. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.021>.
- [9] P. J. Martínez, C. Llorca, J. A. Pla, and P. Martínez, "Experimental Validation of the Simulation Model of a DOAS Equipped with a Desiccant Wheel and a Vapor Compression Refrigeration System", *Energies*, Vol. 10, No. 9, Art. no. 1330, Sep. 2017. <https://doi.org/10.3390/en10091330>.
- [10] ASHRAE, "ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings", American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA, 2014. https://handbook.ashrae.org/Handbooks/A19/IP/a19_ch08/a19_ch08_ip.aspx.

저자소개

도 현 석 (Hyun Seok Do)



2021년 3월 ~ 현재 :
국립금오공과대학교 기계공학부
학사과정
관심분야 : 디지털 트윈, CBM+

이 승 민 (Seung Min Lee)



2021년 3월 ~ 현재 :
국립금오공과대학교 기계공학부
학사과정
관심분야 : 기계공학, 디지털 트윈

이 병 진 (Byung Jin Lee)



2020년 3월 ~ 현재 :
국립금오공과대학교 기계공학부
학사과정
관심분야 : 설계공학, 디지털 트윈

허 장 옥 (Jang Wook Hur)



1995년 9월 : 일본 동경공대
기계물리공학과(박사)
2006년 1월 ~ 2011년 12월 :
방위사업청 체계종합 총괄담당
2012년 3월 ~ 2012년 8월 : 탄약사
기술관리처장
2012년 9월 ~ 현재 :

국립금오공과대학교 기계공학부 교수
관심분야 : CBM+, 디지털 트윈, RAM-C, 신뢰성공학