

디지털 트윈 기반 응축기의 외부 오염에 따른 압축기의 열역학적 거동 분석

백지흠^{*1}, 이강민^{*2}, 현유현^{*3}, 허장욱^{**}

Thermodynamic Behavior Analysis of a Compressor under Condenser External Fouling : A Digital Twin Approach

Ji-Heum Baek^{*1}, Gang-Min Lee^{*2}, Yu-Hyeon Hyeon^{*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 연구는 밀폐형 왕복동 압축기의 안정적 운용과 고장 예지를 위해 응축기 외부 오염을 반영한 디지털 트윈 기반 열역학 해석 모델을 제안하였다. MATLAB/Simulink 기반으로 산업용 냉동 사이클을 구현하고, 공기 측 유량 감소, fouling factor 증가, 유효 열교환 면적 감소를 통합 반영하여 오염 조건을 모사하였다. 이를 통해 응축기 오염에 따른 냉동사이클의 성능 변화를 디지털 트윈 환경에서 재현하였으며, 다양한 오염 조건에 따른 압축기 운전 특성을 효과적으로 분석할 수 있음을 확인하였다. 실험 데이터 기반 검증 결과 평균 NRMSE 4.24%의 높은 정합성을 확보하였으며, 응축 성능 저하에 따른 압축비 및 토출 과열도 증가 특성을 정량적으로 확인하였다. 본 연구는 향후 압축기 고장 진단 및 RUL 예측을 위한 기반으로 활용될 수 있다.

Abstract

This study proposes a digital twin-based thermodynamic analysis model for the stable operation and fault prognosis of a hermetic reciprocating compressor under condenser external fouling conditions. An industrial refrigeration cycle was modeled using MATLAB/Simulink, and condenser fouling was quantitatively represented by integrating three physical mechanisms: reduction in air-side mass flow rate, increase in fouling factor, and decrease in effective heat transfer area. The model was validated using experimentally measured temperature and pressure data, showing a high agreement with an average NRMSE of 4.24%. Simulation results confirmed that degraded condenser performance caused increases in compression ratio and discharge superheat, leading to higher thermodynamic loads on the compressor. The proposed approach is expected to provide a practical foundation for future fault diagnosis and Remaining Useful Life (RUL) prediction.

Keywords

digital twin, hermetic reciprocating compressor, thermodynamic load analysis, condenser fouling, fault diagnosis

* 국립금오공과대학교 기계공학부 학사과정
- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0003-4588-5578>
- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0001-7983-7174>
- ORCID³: <https://orcid.org/0009-0008-5385-1278>
** 국립금오공과대학교 기계공학부 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4718-3540>

• Received: May 26, 2026, Revised: Jul. 04, 2026, Accepted: Jul. 07, 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: hhiw88@kumoh.ac.kr

I. 서 론

냉동 사이클의 압축기는 냉각 효율과 에너지 소비를 결정짓는 핵심 요소 중 하나이다. 특히 밀폐형 왕복동 압축기 (Hermetic reciprocating compressor)는 구조가 단순하고 신뢰성이 높아 냉각 장치에 주로 사용되지만, 다양한 고장 위험에 노출되어 있다. 만약 운전 압력비가 설계 범위를 벗어나게 되면, 토출 밸브의 탄화 및 모터 권선의 절연 파괴 등 사이클의 치명적인 손상으로 이어질 수 있다[1]. 따라서 압축기의 상태 변화를 유발하는 외란에 대한 정밀한 분석이 요구된다. 주요 외란 중 하나인 공랭식 응축기의 외부 오염(External fouling)은 핀(Fin) 부위에 퇴적된 이물질로 인해 공기측 열전달 성능을 저하시키고, 이는 응축 압력과 온도의 동반 상승을 초래하여 압축기에 과도한 열역학적 부하를 가한다[2]. 결과적으로 이러한 현상은 기계 장비의 성능 저하뿐만 아니라 갑작스러운 가동 중단을 야기하여 생산 현장에 막대한 경제적 손실을 입히는 원인이 되고 있다.

이를 예방하고 안정적인 운전을 유지하기 위해 기존에는 주로 주기적인 육안 점검이나 단순 임계치 기반의 알람 방식이 활용되었다. 그러나 실제 산업 현장의 복잡한 노이즈 환경에서 외란에 의한 일시적인 변동과 실제 성능 저하를 명확히 구분하기 어렵다는 한계가 있다[3][4]. 또한, 가동 중인 설비에서 응축기의 오염도를 정량적으로 측정하거나 사이클에 무리를 줄 수 있는 극한의 부하 조건을 직접 실험하는 데에는 물리적 공간의 제약과 고가 장비의 파손 위험 등 경제적 제약이 따른다. 따라서 복합적인 열역학적 거동 변화를 실시간으로 모사하고 예측할 수 있는 고도화된 분석 체계가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 제약을 극복하고 응축기 외부 오염에 따른 압축기의 미세한 거동 변화를 심층적으로 분석하기 위해 디지털 트윈의 초기 구현 단계인 physics-based simulation을 이용한 방법을 제시하였다. MATLAB/Simulink를 활용하여 산업용 냉각 사이클을 정밀하게 모사한 가상 모델을 구축하였으며, 실험으로 획득한 온도 및 압력 데이터를 기반으로 모델의 정합성을 검증한 후, 오염도별 압축비 변화에 따른 부하 데이터의 경향성을 고찰하였

다. 이를 통해 단순히 현재의 상태를 진단하는 수준을 넘어, 압축기의 고장 예측 및 잔여 수명을 정량적으로 평가할 수 있는 핵심 지표를 도출하였다.

II. 실험 장치 및 데이터 수집

2.1 실험 장치

실험 장치의 구성은 그림 1에서 나타난 바와 같이 사이클은 증기 압축 냉동 사이클의 4대 핵심 요소인 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기를 포함하는 폐회로 방식으로 설계되었다.

핵심 변수인 응축기 외부 오염을 나타내기 위해 그림 2와 같이 외부 흡입단에 가변형 차단판을 부착하였다. 차단판에 의해 가려지는 면적을 단계적으로 조절함으로써 응축기로 유입되는 공기 유량을 제한하여, 실제 산업 현장에서 먼지나 이물질에 의해 응축기 성능이 서서히 저하되는 현상을 실험 환경에서 정량적으로 재현하였다.

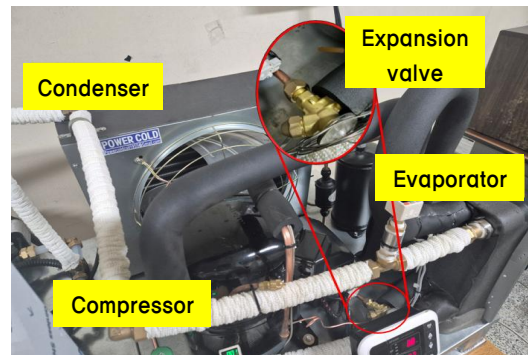


그림 1. 실험 장치 구성
Fig. 1. Experimental setup configuration



그림 2. 가변형 차단판
Fig. 2. Variable blocking plate

냉동 사이클의 핵심 동력을 제공하는 압축기는 표 1과 같은 세부 사양을 가지며, 특히 CS20K7ME-PFV- 101EE는 실제 냉동 공조 사이클에서 흔히 사용되는 장비로, 디지털 트윈 모델 구축을 위한 물리적 기준점으로 사용하였다.

표 1. 압축기 사양

Table 1. Compressor specifications

Category	Specification
Model name	CS20K7ME-PFV-101EE
Compressor type	Hermetic reciprocating
Rated power output	1.5 HP(1.12 kW)
Displacement	39.4 cc/rev
Voltage / Frequency	208~230 V / 60 Hz
Phase	1 Phase
Refrigerant	R507A
RPM	3,500

2.2 데이터 획득

압축기의 성능 및 부하 변화를 분석하는 데 핵심적인 지표인 압축비(π)와 과열도 SH의 계산이 필수적이다. 따라서 압축기의 흡입/토출의 압력 및 온도 데이터를 수집하기 위해 그림 3과 같이 센서를 설치하였다. 취득된 모든 데이터는 LabVIEW에 의해 실시간으로 기록되었으며, 오염에 따른 거동 변화를 확인할 수 있도록 구성하였다[5]. 또한 모든 데이터는 1s의 샘플링 주기로 취득하였다.

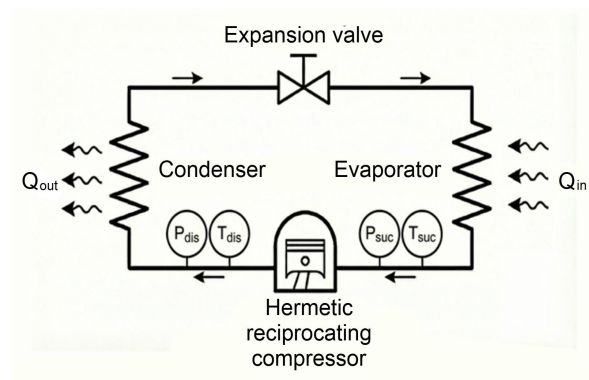


그림 3. 냉동 사이클의 센서 배치 개략도

Fig. 3. Schematic diagram of sensor placement in the refrigeration cycle

실험은 외부 환경의 간섭이 최소화된 실내 실험실에서 동일한 일자 및 동일한 장소에서 연속적으로

수행하여 환경 변화에 따른 영향을 최소화하였다.

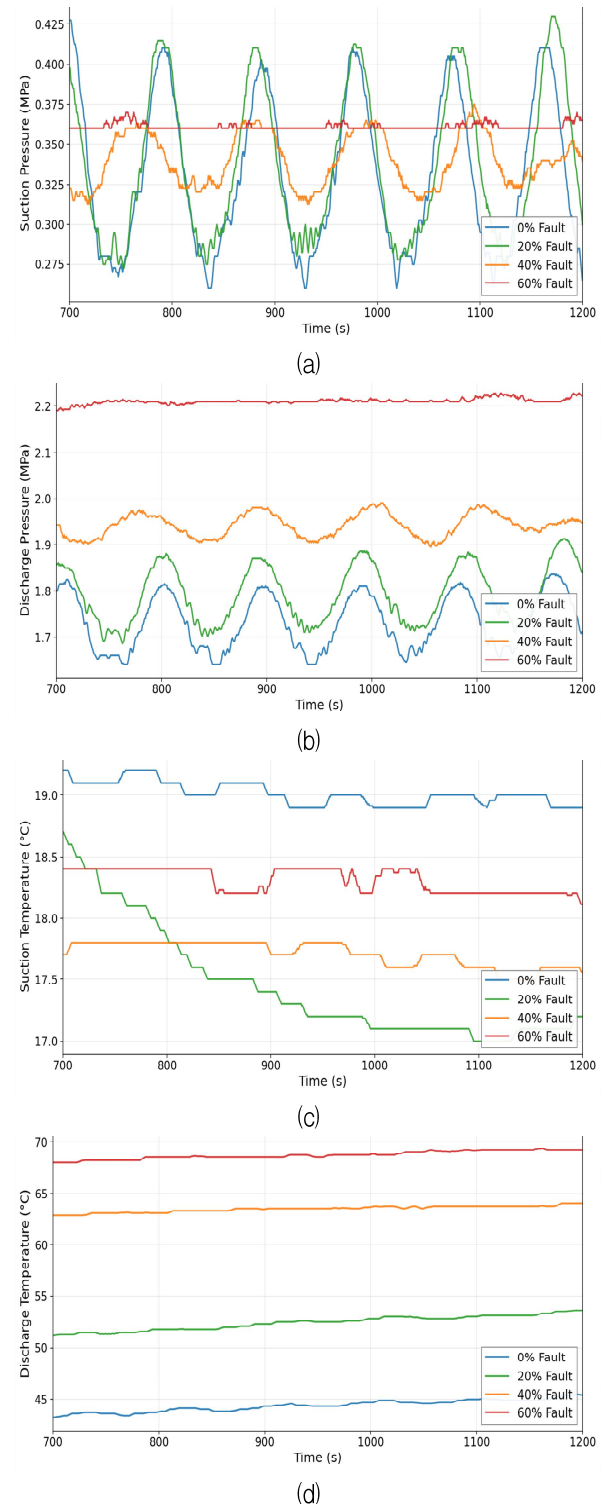


그림 4. 0~60% 오염도에 따른 실험 측정 데이터
(a) 흡입 압력, (b) 토출 압력 (c) 흡입 온도 (d) 토출 온도
Fig. 4. Experimental measurement data according to 0~60% operation rate

(a) Pressure_suction, (b) Pressure_discharge,
(c) Temperature_suction, (d) Temperature_discharge

연구의 주요 변수인 응축기 외부 오염은 Case 1(0%)을 기준으로 20%씩 단계적으로 증가시켜 최대 Case 4(60%)까지 진행하였다. 이러한 변동은 응축기가 압축기로부터 나오는 고온·고압의 가스를 냉각시키는 것을 방해하여 정상보다 높은 압력 및 온도의 가스가 압축기로 들어가게 만든다. 이에 따라 압축기는 높은 고온 및 고압의 가스를 토출하는 부하를 받게 되며, 이를 그림 4의 (a)~(d)에 나타내었다.

III. 디지털 트윈 모델 설계

3.1 시스템 구조 및 순환 로직

실제 사이클의 거동을 정밀하게 모사하기 위해 MATLAB/Simulink를 활용하여 디지털 트윈 모델을 설계하였다. 사이클은 그림 5와 같이 구성하였으며, 냉동 사이클의 4대 요소를 모두 반영하였다. 각 모듈은 실험 장치의 물리적 사양을 모사하도록 설계되었으며, 압축기의 일반적인 운전 압력을 경계 조건으로 하여 초기 시스템이 발산하는 것을 방지하였다. 각 구성 요소에서 계산된 압력과 온도 등의 상태량은 연결 포트를 통해 연속적으로 전달되며, 이를 바탕으로 냉매의 열역학적 거동이 계산된다. 이러한 설계를 통해 외부 외란에 의한 시스템의 비선형적인 반응을 정밀하게 관측하고, 실제 사이클의 거동을 가상 환경에서 합리적으로 재현할 수 있도록 하였다.

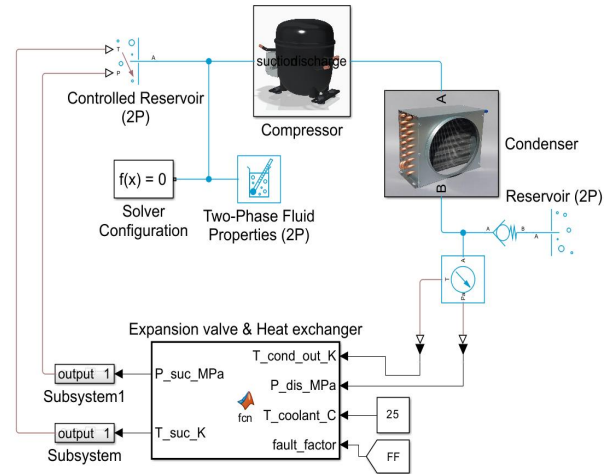


그림 5. 디지털 트윈 시스템의 전반적인 구조 및 순환 논리
Fig. 5. Overall architecture and circulation logic of the digital twin system

3.2 압축기 서브시스템 구성 및 모델링

실제 압축기의 동작을 물리적으로 시연하기 위해 그림 6과 같이 Simscape Two-Phase 라이브러리의 용적식 압축기(PDC, Positive Displacement Compressor) 블록을 기반으로 압축기 서브시스템을 구성하였다. PDC 블록은 압축기의 분석적 효율 모델을 내장하고 있어 물리적 거동을 신뢰성 있게 재현할 수 있으며, 슬라이더-크랭크 매커니즘을 함께 배치하여 사이클의 시각적 가동성을 동시에 확보하였다. 입력된 흡입 측의 압력-온도 상태량과 회전 각속도를 바탕으로 실시간 사이클의 상태량을 계산하며, 최종적인 토출 측 상태량을 결정하였다.

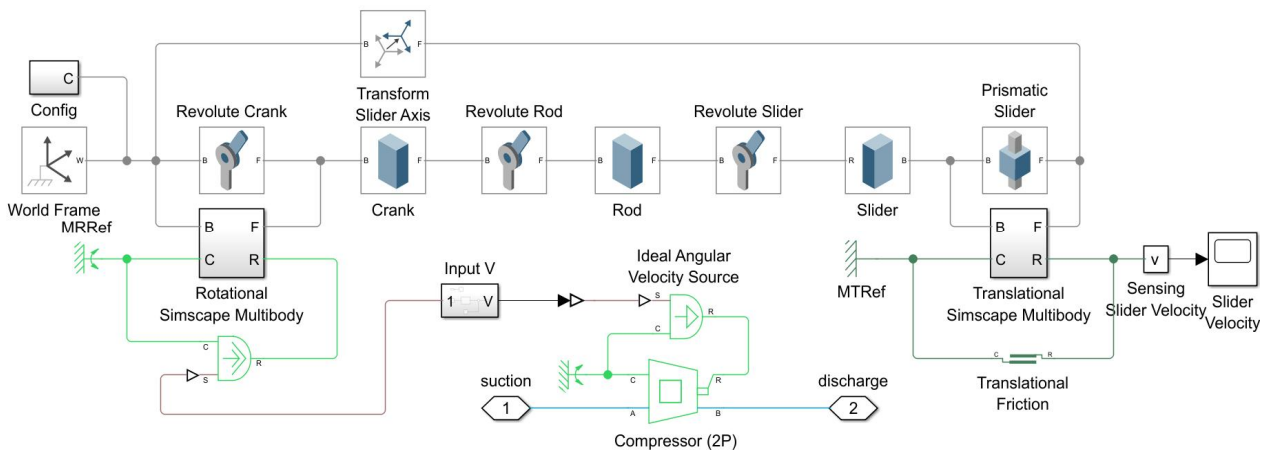


그림 6. 압축기의 내부 구성 및 하위 시스템 레이아웃
Fig. 6. Internal configuration and sub-system layout of compressor

열역학 모델로는 폴리트로픽 압축 관계식을 채택하였으며, 폴리트로픽 지수(n)는 응축기 외부 오염도(0/20/40/60%)에 따른 실험 결과를 반영하여 각각 1.055, 1.075, 1.090, 1.105로 설정하였다. 이를 통해 압축비 증가에 따른 비가역적 발열 효과를 반영하였다[6][7]. 이때 압축비(P_2/P_1)와 토출 온도(T_2) 및 폴리트로픽 지수의 관계식은 식 (1)과 같다[8].

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}, 1 : suction, 2 : discharge \quad (1)$$

3.3 응축기 외부 오염 외란

응축기 외부 핀 막힘에 의한 결함은 실제 차단판 실험을 정량적으로 모사하기 위해 3가지 물리적 메커니즘을 통합하여 모델에 반영하였다. 첫째, 공기측 질량 유량은 Rate source의 파라미터를 단계적으로 제어하여 차단판에 의한 유량 감소를 구현하였다. 둘째, 공기측 열저항 증가는 실험 결과를 기반으로 응축기의 Fouling factor를 오염도에 따라 $0.1 \sim 2.5 \text{ K} \cdot \text{m}^2 / \text{kW}$ 범위에서 변동시켜 차단판이 핀 표면에 형성한 부가적 열전달 저항을 표현하였다.

셋째, 유효 열교환 면적 감소 또한 실험 결과를 기반으로 응축기의 Fin surface area를 $30 \sim 18 \text{ m}^2$ 에서 감소시켜 차단된 영역이 실효적으로 열교환에 영향을 미치지 못하는 효과를 모사하였다. 이와 같은 3가지 파라미터는 Callback 보간 함수를 통해 0/20/40/60% 오염 단계별로 자동 산출되며, 단순 유량 제한 방식만으로는 포착하기 어려운 압축비 가속 및 토출 온도 상승 거동을 정량적으로 재현할 수 있게 하였다.

IV. 모델 정합성 검증

설계한 디지털 트윈 모델의 신뢰성을 확보하기 위해, 수렴 영역 구간(850~1100s)에서 측정값과 시뮬레이션 값의 시계열 비교를 결함 단계별로 정리하였다. 압축기 입구와 출구의 온도 및 압력에 대한 정량 유사도 평가를 위해 NRMSE를 활용하였으며 [9], 이는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\bar{y}} \times 100(\%) \quad (2)$$

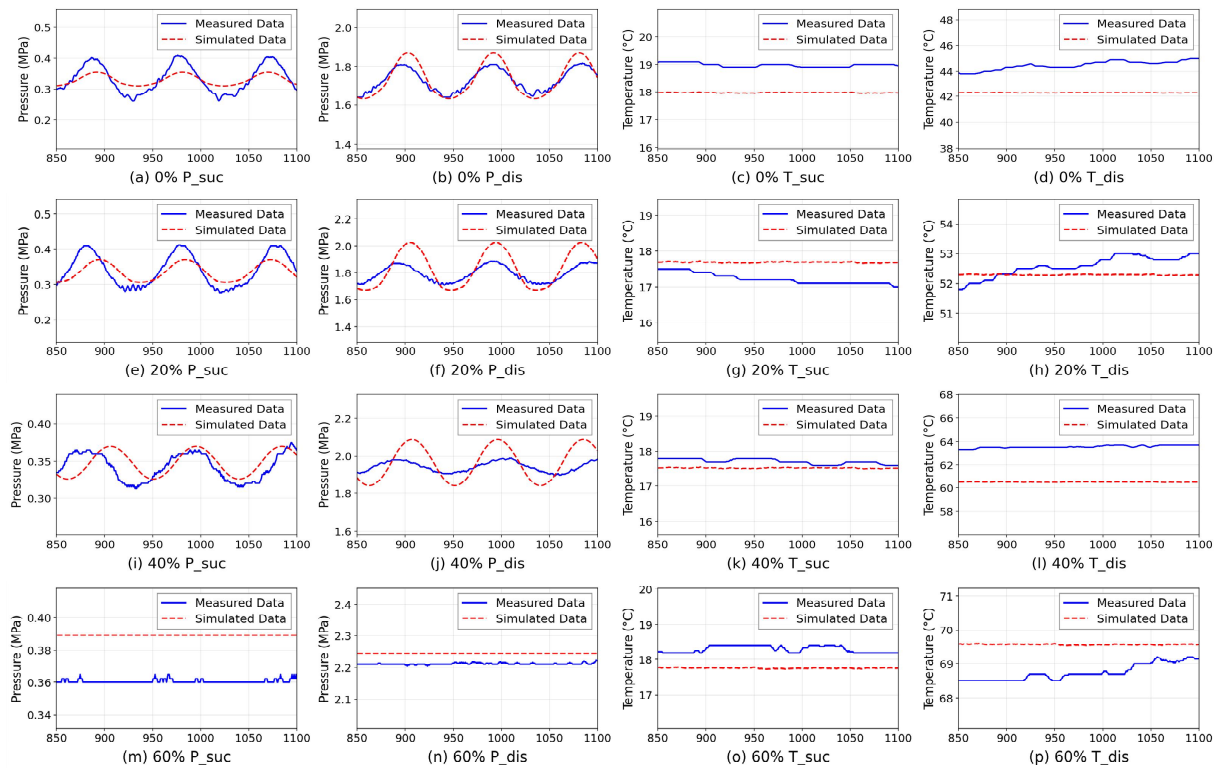


그림 7. 응축기 외부 핀 오염 수준(0~60%)에 따른 주요 지표의 정량적 변화
Fig 7. Quantitative variations of key indicators according to condenser external fin fouling levels

그림 7과 표 2에서 확인할 수 있듯이 전체 16개 변수 항목의 평균 NRMSE는 4.24%로 도출되었으며, P_{suc}/dis , T_{suc}/dis 에 대한 평균 모두 10% 이내의 우수한 정합성을 보였다. 특히 결함 진단의 핵심 지표인 토출 측 변수(P_{dis} , T_{dis})는 평균 3% 수준의 정확도로, 주요 지표에 대한 높은 재현성을 확인하였다. 본 연구는 정상상태에서 디지털 트윈 모델 재현성 검증을 목적으로 수행되었으며, 이에 정합성 평가는 수렴 영역을 대상으로 실시하였다.

표 2. 응축기 외부 핀 오염 수준에 따른 주요 지표의 NRMSE

Table 2. NRMSE of key indicators according to condenser external fin fouling levels

Key indicators	0%	20%	40%	60%
P_{suc}	8.90%	8.63%	5.32%	7.87%
P_{dis}	2.08%	5.29%	4.05%	1.56%
T_{suc}	5.33%	2.83%	1.14%	2.97%
T_{dis}	4.95%	0.85%	4.83%	1.26%

V. 결 론

본 연구에서는 냉동 사이클의 안정적 운용과 고장 예지를 위해, 밀폐형 왕복동 압축기를 대상으로 응축기 외부 오염(0/20/40/60%)을 단계적으로 모사할 수 있는 디지털 트윈 모델을 MATLAB/Simulink 기반으로 구축하였다. 특히 공기측 질량 유량 제한, Fouling factor, 유효 열교환 면적 감소의 3가지 물리적 메커니즘을 통합적으로 반영하여, 단순 유량 제한 방식만으로는 재현이 어려운 비선형적 부하 거동까지 정량적으로 모사할 수 있었다. 모델 정합성 검증 결과 전체 16개 변수의 평균 NRMSE는 4.24%였으며, 특히 결함 진단의 핵심 지표인 토출 압력과 온도가 모든 오염 단계에서 $\pm 3\%$ 이내로 일치하여, 실험적으로 직접 관측하기 어려운 운전 조건에서도 신뢰할 수 있는 데이터 추출 기반을 확보하였다.

또한 검증된 모델을 통해 응축 성능 저하가 압축비 상승 및 토출 측 과열도 누적으로 이어지는 열적 악순환 메커니즘을 정량적으로 규명하였으며, 이는 사이클의 점진적 열화 과정에 대한 물리적 해석을 가능하게 한다. 도출된 압축비와 과열도 지표는

토출 밸브 손상 및 모터 권선 열화와 같은 실제 고장 메커니즘의 사전 징후로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

다만 본 연구에서는 응축기 오염에 따른 열역학적 거동 및 주요 상태 변수의 재현에 중점을 두었으며, 압축기 효율, COP 및 소비전력 변화에 대한 정량적 분석은 수행하지 않았다. 또한 모델의 계산 효율과 경량화를 위해 정상상태 열역학 모델과 압축기 흡입부의 피드백 함수로 구성하였다. 이에 따라 제어기 동작에 따른 과도 응답 특성은 반영되지 않았으며, 흡입 압력(P_{suc})에서는 다른 변수보다 상대적으로 큰 오차가 발생하였다. 향후에는 압축기 효율, COP 및 소비전력과 같은 성능 지표를 추가적으로 분석하고, 본 디지털 트윈 모델로부터 도출된 핵심 지표를 입력값으로 하는 딥러닝 기반 RUL(Remaining Useful Life) 예측 알고리즘을 개발하여, 데이터 부족 환경에서도 대응이 가능한 예지 정비 기술을 완성하고자 한다.

References

- [1] X. Li, et al., "A p-V Diagram Based Fault Identification for Compressor Valve by Means of Linear Discrimination Analysis", *Machines*, Vol. 10, No. 1, Art. no. 53, Jan. 2022. <https://doi.org/10.3390/machines10010053>.
- [2] N. Solanki, A. Arora, and S. C. Kaushik, "Effect of Condenser Fouling on Performance of Vapor Compression Refrigeration System", *Research in Journal of Thermodynamics*, Vol. 2015, pp. 1-8, Oct. 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/756452>.
- [3] S. Katipamula and M. R. Brambley, "Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems—A Review, Part I", *HVAC&R Research*, Vol. 11, No. 1, pp. 3-25, Jan. 2005. <https://doi.org/10.1080/10789669.2005.10391123>.
- [4] M. Mehrabi and D. Yuill, "Fouling and Its Effects on Air-cooled Condensers in Split System Air Conditioners (RP-1705)", *Science and Technology for the Built Environment*, Vol. 25, No. 6, pp.

784-793, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1605197>.

- [5] B. A. Qureshi and S. M. Zubair, "The Impact of Fouling on the Condenser of a Vapor Compression Refrigeration System: an Experimental Observation", *Int. J. Refrigeration*, Vol. 38, No. 1, pp. 260-266, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.08.012>.
- [6] P. Stouffs, M. Tazerout, and P. Wauters, "Thermodynamic Analysis of Reciprocating Compressors", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 40, No. 1, pp. 52-66, Jan. 2001. [https://doi.org/10.1016/S1290-0729\(00\)01187-X](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(00)01187-X).
- [7] E. W. Lemmon, "Pseudo-pure Fluid Equations of State for the Refrigerant Blends R-410A, R-404A, R-507A, and R-407C", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 24, No. 4, pp. 991-1006, Jul. 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1025048800563>.
- [8] Y. A. Çengel and M. A. Boles, "Thermodynamics: An Engineering Approach", 9th ed., McGraw-Hill Education, 2019.
- [9] D. Coakley, P. Raftery, and M. Keane, "A Review of Methods to Match Building Energy Simulation Models to Measured Data", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 37, pp. 123-141, Sep. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>.

이 강 민 (Gang-Min Lee)



2021년 3월 ~ 현재 :

국립금오공과대학교 기계공학부
학사과정

관심분야 : 기계공학, 디지털 트윈

현 유 현 (Yu-Hyeon Hyeon)



2020년 3월 ~ 현재 :

국립금오공과대학교 기계공학부
학사과정

관심분야 : 설계공학, 디지털 트윈

허 장 욱 (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

저자소개

백 지 흠 (Ji-Heum Baek)



2021년 3월 ~ 현재 :

국립금오공과대학교 기계공학부
학사과정

관심분야 : 디지털 트윈, CBM+