

응축기 폐쇄 기반 압축기 부하 데이터 분석 연구

백지흠, 이강민, 현유현, 허장욱*

국립금오공과대학교 기계시스템공학부, *국립금오공과대학교 기계공학과

20210550@kumoh.ac.kr, gangsky4@kumoh.ac.kr, urauim254@kumoh.ac.kr *hhjw88@kumoh.ac.kr

A Study on Analysis of Compressor Load Data Based on Condenser Blockage

Baek Ji Heum, Lee Gang Min, Hyeon Yu Hyeon, Hur Jang Wook*

Department Of Mechanical Systems Engineering, Kumoh National Institute of Technology,

*Department of Mechanical Engineering, Kumoh Institute National of Technology

요 약

본 연구는 응축기 막힘이 왕복동 압축기에 가하는 기계적 부하를 정량적으로 분석하기 위해 Matlab Simulink 기반의 디지털 트윈 시스템을 구축하였다. 육안 점검 위주의 기존 관리 한계를 극복하고자 흡입 및 토출 압력을 독립 변수로 설정하여 압축기 부하를 모사했으며, 응축기 폐쇄율 증가에 따른 배압 상승이 소비 전류와 토크 부하의 급격한 비선형적 증가로 이어짐을 실증하였다. 이러한 압력 기반 분석 데이터는 제조사의 설비 매뉴얼과 일치하는 유효한 고장 유형에 해당하며, 향후 실제 시스템의 고장 진단 및 예측(PHM) 기법 고도화의 핵심 기반으로 응용하고자 한다.

I. 서론

냉동 사이클의 압축기는 순환을 시킬 뿐 아니라 냉매 기체를 고온·고압으로 압축하여 시스템 전체의 냉동 능력을 결정하는 절대적인 기초가 된다. 따라서 압축기의 성능 유지 및 관리 상태는 냉동 시스템의 운전 효율과 직결되므로 굉장히 중요하다. 특히 실외에 설치되는 응축기의 외부 오염 물질에 의한 환기구 막힘은 압축기에 지속적이고 치명적인 부하를 가하는 주된 요인 중 하나이다. 그러나 현재 산업 현장에서 이루어지는 응축기 관리의 대부분 육안 점검에 의존한 주기적인 세척이나 오염 제거와 같은 사후 조치 수준에 머물러 있다. 이러한 방식은 외부 환기구의 가시적인 청결 상태를 개선할 수는 있으나, 압축기의 누적 부하와 내부 열화 상태를 정량적으로 파악하기에는 한계가 명확하다. 본 연구에서는 이러한 위험을 해소하고 선제적인 건전성 관리를 실현하기 위해, Matlab Simulink를 통해 가상 시스템을 구축한다. 이를 통해 응축기 막힘이라는 외부 변수가 압축기 내부 부하에 미치는 영향을 분석하고, 향후 고장 예측 및 신뢰성 높은 유지보수 알고리즘을 개발하기 위한 기초 데이터를 마련하고자 한다.

II. 본론

냉동 사이클에서 분석하고자 하는 핵심 장치는 산업용 냉동 및 공조 시스템에서 널리 사용되는 1.5HP급 밀폐형 왕복동 압축기이다. 왕복동 압축기는 피스톤의 직선 왕복 운동을 통해 가스 냉매를 물리적으로 압축하여 토출하는 방식으로, 스크롤 방식에 비해 압축비 변화에 따른 기계적 부하 변동이 민감하게 나타나 고장 진단 및 분석 연구에 적합하다. 대상 압축기는 Fig. 1과 Table 1을 통해서 외형과 상세 사양을 제시하였다[1].

본 연구에서는 Simulink 환경에서의 분석 효율성을 높이기 위해 압력 데이터만을 독립 변수로 설정하여 정량화하였다. 압축기의 입·출구단 형상은 저압의 냉매가 유입되는 흡입 포트와 고압으로 가압된 냉매가 나가는 토출 포트 구성되며, 각 포트에서의 압력 변화를 모니터링하여 압축기가 수행하는 실제 일의 양을 추정하도록 하였다.

앞서 정의한 압축기의 물리적 거동은 흡입 압력과 토출 압력의 상관관계를 통해 설명된다. 왕복동 압축기에서 피스톤의 냉매를 압축할 때 필요한

토크(Torque) 부하는 두 지점의 압력 차이, 즉 압축비(P_d/P_s , 토출 압력/흡입 압력)에 비례한다. 따라서 응축기 환기구가 막히게 되면 응축기에서의 토출 압력이 상승하게 되고, 이는 압축기에 부하를 가하는 원인이 되는 것이다[2].



Fig. 1. Compressor in refrigeration cycle

Table 1. Compressor Specification

Category	Specification
Model	CS20K7ME-PFV-101EE
Compressor type	Hermic reciprocating
Rated power output	1.5 HP (1.12 kW)
Voltage/Frequency/Phase	208-230 V / 60 Hz / 1 Phase
Refrigerant type	R-507
RPM	3,500
Max. operating pressure	31 bar

디지털 트윈 상에서는 이러한 물리적 특성을 반영하여, 응축기 폐쇄율을 토출 압력 가변 파라미터로 설정한 데이터 추출 구조를 설계하였다. 이를 구현하기 위해 Fig. 2와 같이 Simulink 기반의 동적 모델을 구성하였으며, 해당 모델은 응축기 폐쇄율 변화에 따른 토출 압력 변동을 입력으로 받아 압축기의 운전 거동을 시간 영역에서 모사하고, 그에 따른 기계적 응답을 추출할 수 있도록 설계되었다. 추출 데이터는 정상 운전 상태의 기준 압력 데이터와 응축기 막힘 시나리오별 압력 변동 데이터를 포함하며, 이를 통해 압축기가 수행해야 하는 총 일의 양의 변화를 실시간으로 계산한다. 이러한 구조는 복잡한 열역학적 변수를 배제하고도 압축기의 기계적 부하 상태를 명확히 지표화할 수 있다는 장점이 있다.

구축된 디지털 트윈 시스템을 통해 응축기 폐쇄율 단계별(0%~100%) 압축기 운전 데이터를 추출하여 비교 분석이 가능하다. Table 2와 Fig. 3이 이를 나타낸 것이다. 데이터 분석의 핵심은 응축기 막힘으로 인해 상승한 토출 압력이 압축기의 소비 전력(Power) 및 기계적 부하에 미치는 영향력을 정량적으로 대조하는 데 있다. 분석 결과 Fig. 3과 같이 흡입 압력이 일정한 상태에서 응축기 폐쇄로 인해 토출 압력이 상승할수록 압축기의 소비 전류는 증가하고, 유량은 감소하는 경향을 확인하였다. 이러한 유량 감소는 식(1)과 식(2)에 의해 압축비와 연관된다. 즉 응축기 폐쇄로 인해 압축비가 커지게 되며, 이는 앞에서 언급했듯 압축기에 가해지는 부하가 커짐을 의미한다. 이 과정에서 증가하는 소비 전력 또한 압축기에 가해지는 기계적 부하가 증가함을 시사한다. 이를 통해 디지털 트윈을 통해 추출한 압력 기반 데이터는 응축기 오염에 따른 압축기의 과부하 상태를 물리적 근거로 예측할 수 있는 유효한 지표임을 확인하였다[3-4].

$$\eta_v = 1 - C \left[\left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{1/n} - 1 \right] \quad (1)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot V_{disp} \cdot f \cdot \eta_v \quad (2)$$

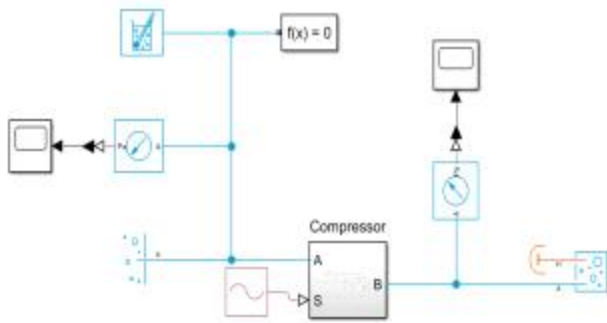


Fig. 2. Matlab simulink model

Table 2. Discharge pressure according to condenser closure ratio (예시)

응축기 폐쇄율(%)	토출 압력(P_d , bar)	비고
0	18.2	설계 기준점
20	19.5	초기 오염 발생
50	22.8	가시적 부하 증가
80	26.4	위험 수준
100	-	시스템 정지 권고

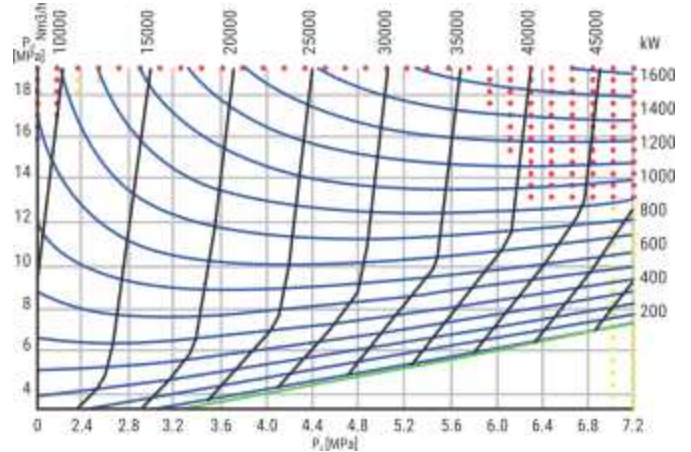


Fig. 3. Relationship between increased discharge pressure and compressor power consumption(예시)

III. 결론

본 연구에서는 냉동 사이클의 핵심 부품인 왕복동 압축기를 대상으로 응축기 막힘이 기계적 부하에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위한 Matlab Simulink 기반의 디지털 트윈 시스템을 구축하였다. 기존의 육안 점검 방식이 가진 한계를 극복하기 위해 압력 데이터만을 독립 변수로 설정하여 분석 효율성을 극대화하였으며, 가상 시나리오 분석을 통해 응축기 폐쇄율 증가에 따른 토출 압력 상승이 압축기의 소비 전류와 토크 부하를 급격히 증가시킨다는 사실을 확인하였다. 향후 본 모델을 실제 테스트 베드와 비교 검증하여 정밀도를 고도화함으로써, 산업 현장의 돌발 고장을 예방하고 유지보수 효율을 높이는 고장 진단 및 예측(PHM) 알고리즘의 기초 자산으로 활용하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] Emerson Climate Technologies, "Application Guidelines for Copeland™ Reciprocating Compressors," Application Engineering Bulletin AE4-1303, 2022, (<https://climate.emerson.com>)
- [2] Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (1982). Refrigeration and Air Conditioning(2nd ed.). McGraw-Hill Education, pp. 185-191.
- [3] Kim, M. S., et al., "A Study on the Performance of a Refrigeration System with Condenser Blockage," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 16, No. 12, pp. 8154-8160, 2015.
- [4] D. B. Jani, M. L. Gupta, and M. S. Kasotiy, "Investigation on performance of a reciprocating compressor using performance maps," International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS), Vol. 4, No. 6, pp. 125-131, 2017.