

가변 유량에 따른 판형 열교환기 오염 식별

도현석, 이승민, 허장욱*

금오공과대학교

20210393@kumoh.ac.kr, lsm3236@naver.com, hhjw88@kumoh.ac.kr

Identification of contamination of plate heat exchanger according to variable flow rate

Do Hyunseok, Lee Seungmin, Hur Jangwook*

Kumoh National Institute of Technology

요약

본 논문은 냉동 시스템의 판형 열교환기에서 발생하는 유로 오염 및 폐쇄 현상을 실시간으로 진단하기 위해 압력과 진동 센서를 결합한 고장 진단 기법을 제안한다. 실험은 증발기 입구 측의 가변 유량 제어 밸브를 이용하여 개동률을 100%에서 20%까지 단계적으로 조절함으로써, 실제 현장에서 발생하는 스케일 축적 및 유로 막힘 상황을 물리적으로 모의하였다. 진단의 신뢰성을 확보하기 위해 차압(ΔP)과 진동 신호의 주파수 스펙트럼(Frequency Spectrum)을 핵심 특징값으로 추출하였다. 실험 결과, 유로 폐쇄율이 증가함에 따라 유동 저항 증가로 인해 차압은 비선형적으로 상승하며, 동시에 난류 강도 증가로 인해 진동 에너지가 고주파 대역으로 전이되는 상관관계를 확인하였다. 본 연구는 이 두 가지 물리적 변수의 융합 분석을 통해 단일 센서 진단의 불확실성을 해소하고 예지 정비를 위한 명확한 판단 기준을 제시한다.

I. 서론

본 논문에서는 냉동 및 공조 시스템의 핵심 부품인 판형 열교환기(PHE)의 오염(Fouling) 및 유로 폐쇄를 조기에 감지하기 위한 압력-진동 센서 융합 진단 기법을 제안한다. 판형 열교환기는 좁은 유로 구조상 이물질 침착에 취약하며, 이는 유동 저항 증가와 열전달 효율 저하를 유발하여 시스템 전체의 에너지 소비를 급증시킨다. 그러나 기존의 사후 정비 방식은 고장 발생 후 대처하여 손실이 크고, 단순 압력 모니터링은 초기 오염 감지에 한계가 있다. 이에 본 논문에서는 가변 유량 제어 밸브를 통해 증발기의 막힘 상황을 인위적으로 모사하고, 정적인 '압력 강하'와 동적인 '유동 유발 진동' 데이터를 동시에 분석하고자 한다. 이를 통해 단일 센서의 단점을 보완하고, 실제 오염 정도를 정량적으로 판단할 수 있는 신뢰성 있는 고장 진단 알고리즘을 제시하는 데 목적이 있다.

II. 본론

본 논문에서는 제안된 기법 검증을 위해 냉동 사이클 실험 장치를 구축하였다. 오염 모의는 증발기 입구의 가변 밸브 개동률을 100%(정상)에서 20%(심각한 폐쇄)까지 5단계로 조절하여 수행하였다. 판형 열교환기 내부 유로의 오염 축적은 유효 단면적 감소에 따른 유체 마찰 손실을 유발하며, 이는 식 (1) Darcy-Weisbach 기반의 압력 강하 식으로 설명된다. 이 식에서 차압(ΔP)은 수력 직경(D_h)에 반비례하고 유속(v)의 제곱에 비례하므로, 오염 심화 시 압력은 비선형적으로 급증하게 된다.

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

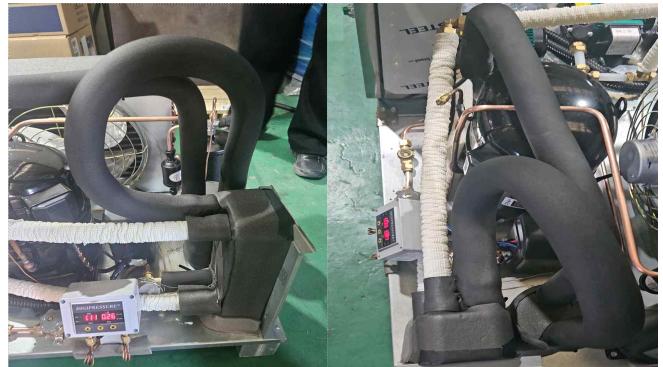


Fig. 1. 판형 열교환기

데이터 수집 시스템은 MATLAB/Simulink 환경으로 구축하였으며, 증발기 입·출구의 압력 트랜스듀서와 배관 표면에 부착된 가속도 센서(Accelerometer) 신호를 실시간으로 동기화하여 획득하였다.

본 논문에서는 고장 판별을 위해 두 가지 핵심 특징값을 추출하였다. 첫째는 유체 역학적 막힘을 나타내는 차압(ΔP)으로, 유로가 좁아질수록 입·출구 압력차가 커지는 원리를 이용하였다. 둘째는 진동 신호의 주파수 분석이다. 유로 폐쇄 시 발생하는 난류와 불규칙한 유동 소음을 포착하기 위해 가속도 센서 신호를 FFT(Fast Fourier Transform) 처리하고, 고주파 대역의 에너지 변화를 관찰하였다. 실험 결과, 밸브 개동률이 낮아질수록 차압(ΔP)은 비선형적으로 상승하여 물리적 폐쇄 정도를 명확히 나타냈다. Fig. 3에서는 확인된 바와 같이, 차압이 상승하는 구간에서 진동 스펙트럼의 고주파 성분이 뚜렷하게 증가하는 상관관계가 확인되었다. 이는 압력 센서가 '막힘의 양'을 정량화하는 동안, 진동 센서는 유동 특성 변화를 통해 '이상 징후'를 감지하는 상호 보완적 역할을 수행함을 입증한다.

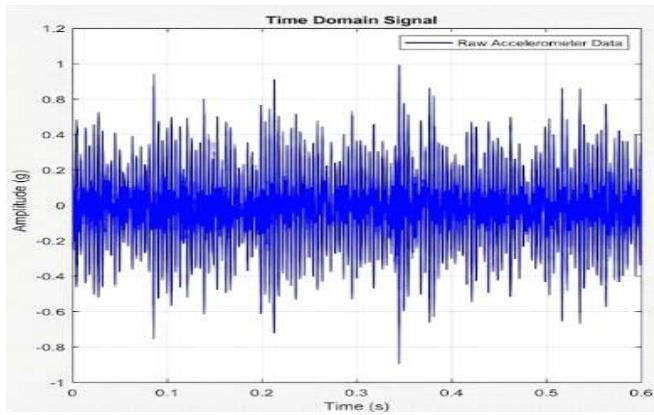


Fig. 2. 진동데이터

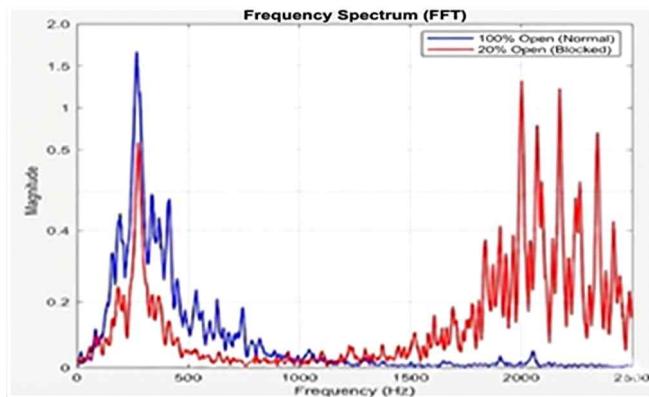


Fig. 3. FFT분석

Table 1. 가변 유량 제어에 따른 판형 열교환기 압력 강하 측정 결과

밸브 개동률	입구 압력	출구 압력	차압
100%	2.50	2.38	0.12
80%	2.55	2.37	0.18
60%	2.65	2.30	0.35
40%	2.85	2.05	0.80
20%	3.20	1.70	1.50

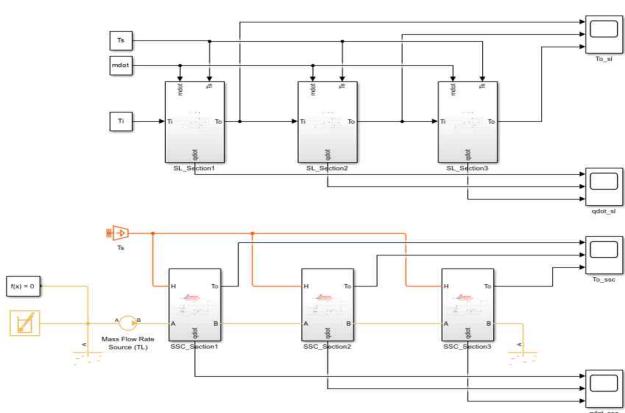


Fig. 4. 열교환기 시뮬링크 블록도

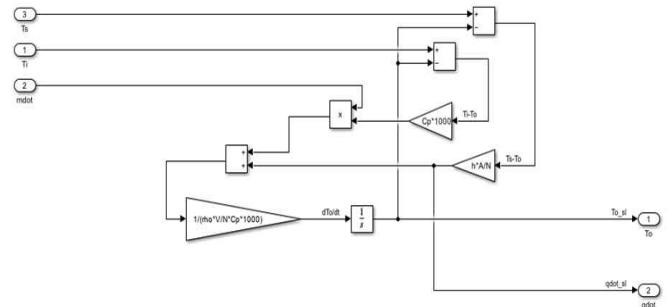


Fig. 5. 열교환기 시뮬링크 블록도 SL Section

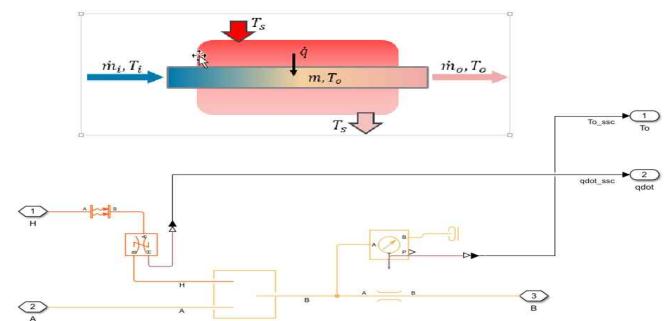


Fig. 6. 열교환기 시뮬링크 블록도 SSC Section

III. 결론

본 논문에서는 가변 유량 제어를 이용한 판형 열교환기 오염 모의 실험을 통해 압력과 진동 센서 융합 기반의 고장 진단 유효성을 연구하였다. 연구 결과는 다음과 같다. 첫째, 가변 밸브를 통한 유량 제어는 실제 열교환기 내부의 유로 폐쇄 현상을 묘사하는 데 매우 효과적이었으며, 이를 통해 다양한 고장 데이터를 확보할 수 있었다. 둘째, 차압(ΔP)은 유로 막힘의 물리적 양을 정량적으로 대변하는 반면, 진동 주파수 분석은 유동의 동적 특성 변화를 반영하여 초기 고장 감지에 유리함을 확인하였다. 셋째, 이 두 센서의 데이터를 융합함으로써 단일 센서 사용 시 발생할 수 있는 오진단 가능성을 최소화하고, 신뢰성 높은 예지 정비 시스템 구축의 토대를 마련하였다. 향후 연구에서는 축적된 압력-진동 데이터를 머신러닝 모델에 학습시켜 자동으로 오염도를 판정하는 지능형 진단 알고리즘으로 발전시킬 계획이다.

참고 문헌

- [1] O. P. Arsenyeva, P. O. Kapustenko, L. L. Tovazhnyansky, and G. L. Khavin, "Accounting for fouling in the design of plate heat exchangers," Applied Thermal Engineering, vol. 46, pp. 1-7, 2012.
- [2] S. N. Kazi, "Fouling and fouling mitigation on heat exchanger surfaces," in Heat Exchangers – Basics Design Applications, InTech, 2012.
- [3] R. D. Blevins, Flow-Induced Vibration, 2nd ed., New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [4] R. B. Randall, Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications, Chichester: John Wiley & Sons, 2011.