

흡수식 냉동시스템의 고장현상 분석과 진단

Fault Symptom Analysis and Diagnosis for a Single-Effect Absorption Chiller

한동원(Dongwon Han)¹, 장영수(Young-Soo Chang)^{2†}, 김용찬(Yongchan Kim)³

¹고려대학교 대학원 기계공학과, ²국민대학교 기계시스템공학부, ³고려대학교 기계공학과

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Korea

²School of Mechanical System Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

³Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Korea

(Received June 4, 2015; revision received September 2, 2015; Accepted: October 15, 2015)

Abstract In this study, fault symptoms were simulated and analyzed for a single-effect absorption chiller. The fault patterns of fault detection parameters were tabulated using the fault symptom simulation results. Fault detection and diagnosis by a process history-based method were performed for the in-situ experiment of a single-effect absorption chiller. Simulated fault modes for the in-situ experimental study are the decreases in cooling water and chilled water mass flow rates. Five no-fault reference models for fault detection of a single-effect absorption chiller were developed using fault-free steady-state data. A sensitivity analysis of fault detection using the normalized distance method was carried out with respect to fault progress. When mass flow rates of the cooling and chilled water decrease by more than 19.3% and 17.8%, respectively, the fault can be detected using the normalized distance method, and COP reductions are 6.8% and 4.7%, respectively, compared with normal operation performance. The pattern recognition method for fault diagnosis of a single-effect absorption chiller was found to indicate each failure mode accurately.

Key words Fault detection and diagnosis(고장검출 및 진단), Absorption chiller(흡수식 냉동기), Normalized distance method(표준화 거리 기법), Classifier(분류기)

† Corresponding author, E-mail: yschang@kookmin.ac.kr

기호설명

C_{jk} : 잔차의 방향성에 대한 상수 [-]
 COP : 성능계수 [-]
 DR_{COP} : COP 감소율 [%]
 d_x : 표준화 거리 [-]
 R : 잔차 [°C]
 T : 온도 [°C]
 y : 고장검출인자 [°C]
 Σ_N : 공분산

하첨자

a : 흡수기
 c : 응축기
 chw : 냉수
 cw : 냉각수
 e : 증발기
 g : 재생기
 i : 유입

m : 측정 값
 o : 토출
 r : 무고장 상태 기준 값

1. 서 론

건물의 공조설비 시스템 등 에너지 설비들이 자동화, 복잡화, 대형화되면서, 열원 및 공조 설비의 에너지 소비량은 기기의 성능과 제어방식에 따라 많은 차이를 보인다. 특히 열원기기는 전체 공조설비 에너지 소비량 중 많은 비중을 차지하고 있으며 기타 유지보수 비용에 대해서도 큰 부분을 차지하고 있다.

전체 공조설비가 부적절하거나 성능이 열화된 상태로 지속적인 운전을 할 경우, 이로 인해 전체 건물의 공조설비 시스템의 연간 에너지 사용량이 증가하므로 이를 적절한 시기에 파악할 수 있는 에너지 진단 방법이 필요하다.⁽¹⁾

공조설비에서 발생하는 고장은 갑작스런 고장(Hard

failure)과 점차적인 고장(Soft failure)으로 분류 할 수 있다.⁽²⁾ 갑작스런 고장은 순환펌프 고장이나 전기적 고장과 같이 시스템의 기능이 정지하는 고장을 말한다. 이러한 종류의 고장은 전기적 릴레이나 알람을 통해서 쉽게 고장을 검출하고 진단할 수 있다. 반면, 냉각수 유량 감소나 열교환기의 파울링과 같은 점차적인 고장은 고장이 진행되고 있더라도 검출하거나 진단하기 어려우며, 이로 인해 에너지 손실이 증가하고 결국 시스템의 손상까지 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 흡수식 냉동시스템의 점차적인 고장에 대한 고장검출 및 진단에 초점을 맞추었다.

일반적으로 고장검출 및 진단 방법은 무고장(No-fault) 상태에서 운전될 때 얻어진 자료를 이용하여 무고장 기준모델(Reference model)을 만들고, 현재 측정값과 무고장 기준모델 값의 차이인 잔차(Residual)를 계산하여 잔차가 어느 허용범위를 벗어나게 되면 고장으로 간주하고, 고장패턴을 이용하여 고장의 원인을 진단하는 순서로 구성되어 있다.

냉동시스템에 대한 고장진단 연구는 소형 냉동시스템과 공기조화기의 고장검출 및 진단기법 개발을 위한 이론적, 실험적 연구가 수행되고 있다.^(3, 4) 고장검출 및 진단기법으로 일반적으로 사용되고 있는 신경망이론이나 퍼지기법 등은 고장에 대한 많은 자료수집이 선행되어야 하기 때문에 실제 현장에 설치되어 작동 중인 상태로 있거나, 고장에 대한 자료를 얻을 수 없는 경우에는 실용적이지 못하다. 또한 흡수식 냉동시스템을 대상으로 하는 연구는 주로 시뮬레이션을 통한 성능분석이나 성능향상 방안에 초점을 맞추고 있다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 흡수식 냉동기를 대상으로 고장모사 시뮬레이션을 수행하였으며, 고장이 발생하였을 때 흡수식 냉동기에 발생하는 고장현상을 분석하였다. 또한 흡수식 냉동기의 고장모사 실험을 통해 얻어진 데이터와 표준화 거리 기법(Normalized distance method)을 적용하였으며, 현장 데이터를 이용하여 고장진행에 따른 고장검출 성능과 고장진단을 수행하였다.

2. 고장현상 시뮬레이션

2.1 시뮬레이션 대상

Fig. 1은 시뮬레이션 대상인 1중 효용 증온수 흡수식 냉동기의 개략도이며, 설계 조건은 Table 1와 같다. 1중 효용 증온수 흡수식 냉동기는 응축기(Condenser), 증발기(Evaporator), 흡수기(Absorber), 재생기(Generator), 용액 열교환기(Solution heat exchanger), 용액순환펌프(Solution pump) 등으로 구성되어 있다.

1중 효용 증온수 흡수식 냉동기의 증발기에서 튜브 위에 살포된 액냉매는 튜브 내를 통하여 흐르는 냉수

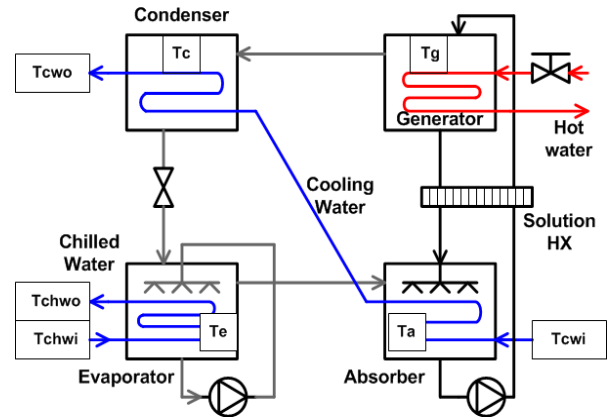


Fig. 1 Schematic diagram of a single-effect absorption chiller.

Table 1 Specification of a single-effect absorption chiller

	Unit	Specification
Capacity	USRT	252
Chilled water	Flow rate	LPM 2,540
	Inlet temperature	°C 12.0
	Outlet temperature	°C 7.0
Cooling water	Flow rate	LPM 5,500
	Inlet temperature	°C 31.0
	Outlet temperature	°C 36.5
Hot water	Flow rate	LPM 1,170
	Inlet temperature	°C 95.0
	Outlet temperature	°C 80.0
Pipe diameter	Chilled water	mm 125.0
	Cooling water	mm 200.0
	Hot water	mm 100.0
Power source	PH/V/HZ	3/380/60

에서 열을 받아서 증발한다. 증발한 냉매증기는 흡수기의 흡수작용으로 흡수기로 들어가서 튜브 외표면에 분무되는 농용액에 흡수된다. 흡수작용 중에 발생한 흡수열은 튜브 내를 흐르는 냉각수로 제거된다. 냉매를 흡수하여 희박해진 희용액은 용액순환 펌프로 용액 열교환기로 보내지며, 용액 열교환기에서는 흡수기에서 보내진 희용액과 재생기로부터 토출된 고온, 고농도 상태의 농용액과 열교환 후 재생기로 보내진다.

재생기에 들어온 희용액은 튜브 내의 증온수에 의하여 가열되고, 비등, 농축되어 농도가 높아져서 고농도가 된다. 농도가 높아진 농용액은 용액 열교환기를 거쳐서 흡수기로 들어가 분무되고, 재생기에서 발생된

냉매증기는 응축기에 들어가 튜브 내를 흐르는 냉각수로 냉각되어 응축된다. 응축된 냉매액은 증발기로 유입된다.

1중 효율 증온수 흡수식 냉동기는 공조기로 공급되는 냉수온도를 측정하여 냉수온도가 설정치로 유지되도록 재생기의 재생열원인 증온수 유량조절 밸브개도를 제어하는 방식을 채택하고 있으며, 이 때 냉수와 냉각수의 유량을 순환하기 위한 펌프는 100%로 정격 가동한다. 순환비(흡수액 농도)제어는 재생기 내 흡수액 수위레벨을 측정하여 On/Off 제어를 통해 일정 수위를 유지하고 있다.

본 연구에서는 고장현상 분석을 위한 측정점을 흡수식 냉동기에서 일반적으로 얻을 수 있는 온도점으로 선정하였다.

2.2 고장모사 시뮬레이션

본 연구에서는 Oak Ridge national laboratory에서 개발한 흡수식 냉동기 시뮬레이션 프로그램인 “ABSIM”을 이용하여 무고장 시뮬레이션과 고장 모사 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2는 “ABSIM” 프로그램⁽⁶⁾ 전체 구조 개략도이다. 시스템 시뮬레이션을 위하여 각 구성요소를 모델링 하였으며, 흡수기, 재생기, 응축기, 증발기 그리고 용액 열교환기의 시뮬레이션은 질량보존식(Mass balance), 에너지 보존식(Energy balance), 그리고 물질보존식(Species balance)을 이용하여 수행되었다.

Table 2는 흡수식 냉동기에서 발생가능성이 있는 몇 가지 종류의 고장 중 시뮬레이션과 실험을 통해 모사한 고장을 나타내었다. 모사된 고장은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 냉각수, 냉수, 온수 유량 감소와 같은 시스템적 고장과 둘째, 흡수식 냉동기의 중요한 제어점인 냉수 출구나 냉각수 입구의 온도센서 고장으로 인한 제어고장을 모사하여 시뮬레이션 하였다.

냉각수와 냉수 유량 감소 고장은 유로 내 스트레이너와 같은 필터의 막힘으로 인해 발생하거나 펌프의 노후화나 마모로 인해 발생할 수 있는 고장이다. 흡수식 냉동기의 용량은 온수밸브 개도에 의해서 제어되며, 온수밸브 개도는 냉수 출구온도에 의하여 열리고 닫힌다. 이러한 온수밸브의 각도를 조절하는 모터가 오작동이 발생할 경우 냉동시스템 전체에 지속적인 무리를 줄 수 있다. 흡수식 냉동기와 냉각탑의 제어점인 냉수 출구와 냉각수 입구의 온도센서가 노후화되어 실제 온도보다 높거나 낮게 온도를 측정하게 되는 고장이 발생하면, 냉동시스템의 제어점이 변동하여 냉동시스템이 비정상적으로 작동하게 된다.

본 연구에서는 Table 2의 고장모사를 위하여 Table 1의 설계조건을 이용하여 해당 유량이나 측정온도만을 1%씩 감소시키면서 고장모사 시뮬레이션을 수행하였다.

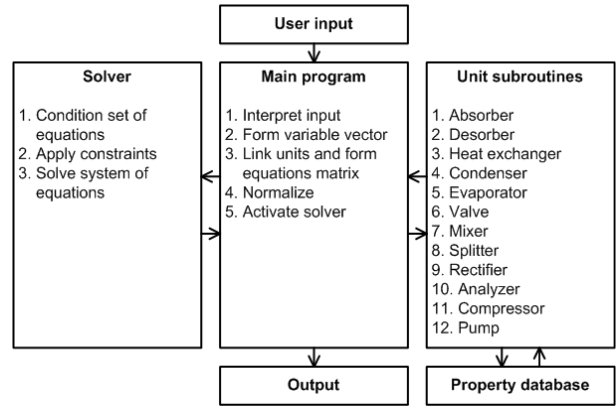


Fig. 2 Structure of ABSIM program.

Table 2 Simulated fault mode for a single-effect absorption chiller

Fault symptom mode	
Fault 1	Decrease of cooling water mass flow rate
Fault 2	Decrease of chilled water mass flow rate
Fault 3	Decrease of hot water mass flow rate
Fault 4	Cooling water inlet temp. sensor error (measured at a higher temp.)
Fault 5	Chilled water outlet temp. sensor error (measured at a higher temp.)

2.3 고장현상 패턴 분석

어떠한 고장이 발생하면 식(1)과 같이 정의하는 각 측정점의 잔차(Residual, R)가 발생한다. 잔차는 고장의 원인에 따라 고유한 방향으로 이동하게 되는데 고장의 진행방향이 결정되면 이를 이용해 고장원인을 진단할 수 있다.

$$R = y_m - y_r \quad (1)$$

냉각수 유량이 감소하면 흡수기에서 열전달 및 흡수 성능이 감소하게 된다. 이에 따라 Fig. 3과 같이 흡수기 용액 출구온도가 증가하고, 냉매 흡수량 감소에 따라 냉매 증발온도와 흡수온도가 증가한다. 그리고 냉각수 유량 감소로 응축기에서 열전달의 저하로 냉매 응축온도는 증가하게 되고, 재생온도와 재생기 냉매 출구온도가 증가하게 된다.

냉수 유량이 감소하면 증발기 열전달 성능이 감소하게 된다. Fig. 4와 같이 증발기 내 열전달 성능이 감소하게 되면 증발온도가 증가하면서 증발기 냉매 증기측 출구온도가 올라가고 증발량이 감소하면서 흡수온도도 증가하게 된다. 이에 따라 시스템 운전조건이 설계

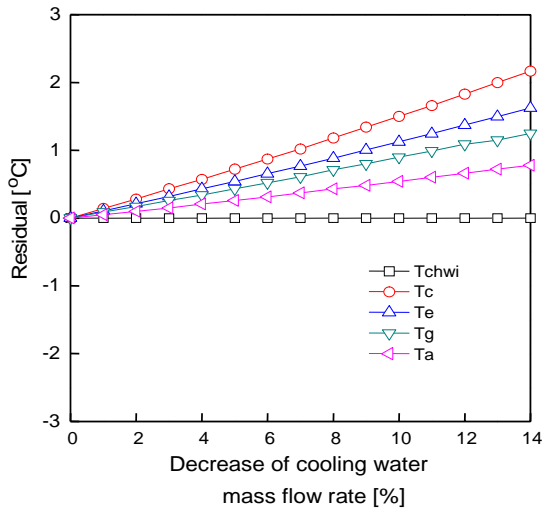


Fig. 3 Residual variation of a fault detection parameter by cooling water mass flow rate decrease.

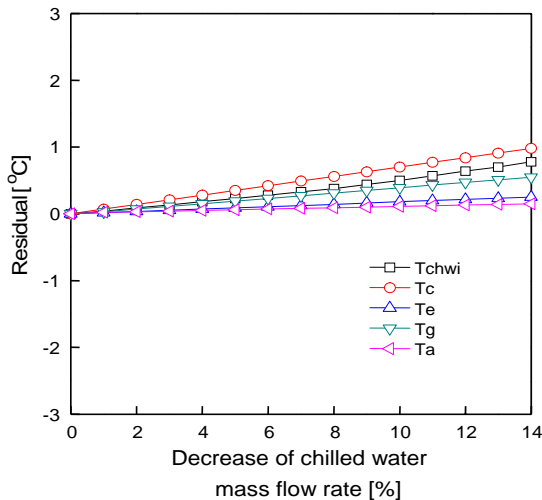


Fig. 4 Residual variation of a fault detection parameter by chilled water mass flow rate decrease.

조건으로 고정된 상태에서 증발온도와 흡수온도가 증가하면서 재생온도와 응축온도도 증가하게 된다. 하지만 전체 측정점의 증가폭은 냉각수 유량 감소 고장보다 크지 않다.

온수 유량이 감소하게 되면 재생기에서 열전달 성능이 감소하게 된다. Fig. 5와 같이 재생기 열전달 성능이 감소하면 재생온도가 감소하게 되고 응축온도도 감소하게 된다. 재생열량의 감소로 농용액 농도가 감소하게 되고 냉매 흡수량이 감소하여 증발온도와 재생온도는 증가하게 된다.

냉각수 입구측 온도센서 민감도 저하로 인해 온도가 높게 측정되면 실제 냉각수 입구온도는 낮은 상태

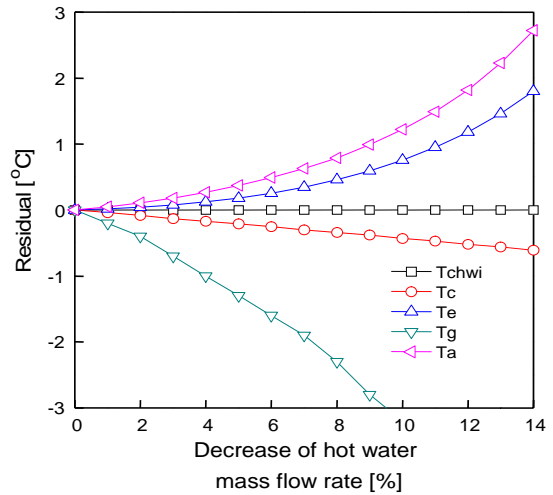


Fig. 5 Residual variation of a fault detection parameter by hot water mass flow rate decrease.

로 유입된다. Fig. 6과 같이 냉각수 입구온도의 감소로 흡수온도는 감소하고 흡수기의 흡수량은 증가하여 증발온도도 감소하게 된다. 냉각수 유입온도가 감소하여 응축온도도 감소하게 되고 이에 따라 재생온도도 감소하게 된다. 냉각수 입구측 온도가 낮게 측정되는 경우는 이와 반대되는 고장패턴을 보이게 된다.

냉수 출구측 온도센서 민감도 저하로 인해 온도가 높게 측정되면 실제 냉수 출구온도는 낮은 상태이다.

Fig. 7과 같이 냉수 출구온도가 감소하면 냉수 입구온도가 감소하고 증발온도와 흡수온도가 감소하게 된다. 이에 따라 시스템 운전조건이 설계조건으로 고정된 상태에서 증발온도와 흡수온도가 감소하면서 재생온도와 응축온도도 감소하게 된다. 냉수 입구측 온도가 낮게 측정되는 경우는 이와 반대되는 고장패턴을 보이게 된다.

Table 3은 앞서 고장모사 시뮬레이션을 통해 얻어진 각 고장의 원인에 따른 측정점인 고장검출인자의 잔차가 이동하는 고유한 방향인 고장패턴을 정리하였다. Table 3에서 “0”으로 표시된 경우는 고장검출인자 잔차의 변화가 없거나 크기 않은 경우이며, “+”이나 “-”로 표시된 경우는 고장진행에 따라 고장검출인자 잔차의 크기가 커지거나 작아지는 경우를 표시하였다.

흡수식 냉동기의 고장패턴은 선행연구를 통해 얻어진 증기식 냉동기의 고장패턴과 유사하였다.⁽⁷⁾

3. 고장검출 및 진단 실험

3.1 고장검출 및 진단 기법

본 연구에서는 고장 검출을 위하여 표준화 거리 기

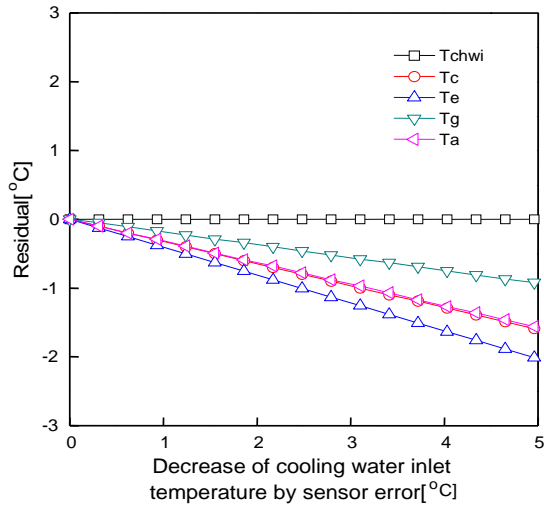


Fig. 6 Residual variation of a fault detection parameter by cooling water inlet temperature decrease.

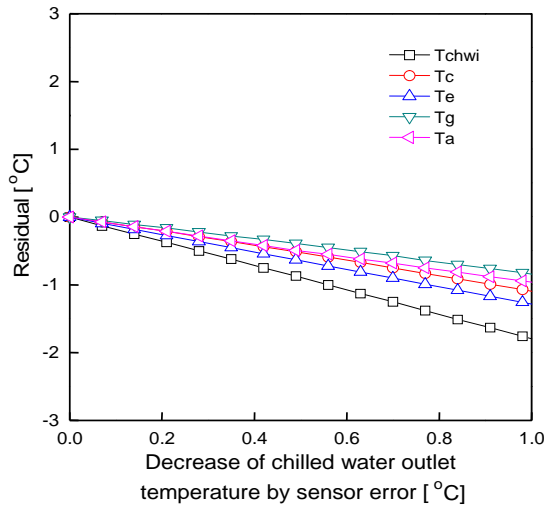


Fig. 7 Residual variation of a fault detection parameter by chilled water outlet temperature decrease.

법(Normalized distance method)을 적용하였으며, 고장 모사 실험을 통해 고장진행에 따른 고장검출 성능을 확인하고 적용가능성을 검토하였다.

표준화 거리 기법이란 Fig. 8에서 나타낸 것과 같이 무고장 기준모델의 값과 관측값이 일정거리 이상 떨어져 있으면 고장이라고 진단 내리는 방법이다. 즉, 어떠한 고장이 발생하면 각 측정점의 잔차는 고장의 원인에 따라 고유한 방향으로 기준모델 값으로부터 벗어나게 된다.⁽⁷⁻⁹⁾ 이것을 이용하여 기준모델 인자 값과 현재의 인자 값 사이의 각각의 잔차를 표준편차로 나누어

Table 3 Fault pattern table of fault detection parameter

	Tchwi	Tc	Te	Ta	Tg
Fault 1	0	+	+	+	+
Fault 2	+	+	+	+	+
Fault 3	0	-	+	+	-
Fault 4	0	-	-	-	-
Fault 5	-	-	-	-	-

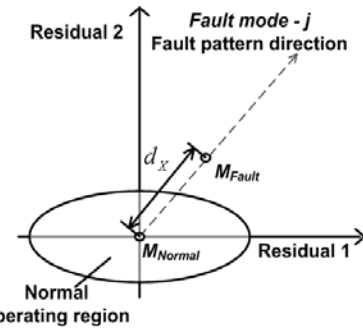


Fig. 8 Normalized distance method for 2-Dimensional case.

표준화 시킨 표준화 거리를 계산하여 미리 정해진 표준화 거리를 벗어나게 되면 고장으로 판단하는 기법이다. 표준화 거리는 식(2)와 같이 계산한다.

$$d_x^2 = R^T \Sigma_N^{-1} R \quad (2)$$

여기서, d_x 는 표준화 거리이고 R 은 잔차이다. 그리고 Σ_N 는 무고장 기준 모델의 공분산행렬이다.

또한 만약 Table 3과 같이 고장의 진행방향이 결정되면 이를 이용해 고장원인을 진단할 수 있다. 본 연구에서는 Rossi and Braun⁽⁸⁾이 제안한 식(3)을 사용하여 고장원인을 진단하였다. 식(3)은 현재 발생된 고장이 j번째 고장원인에 의한 잔차의 진행방향과 유사할 확률을 계산한 식이다. 고장원인에 대한 예측확률 중 최대값을 가지는 고장이 현재 발생한 고장의 원인으로 진단할 수 있다.

$$w_j = \prod_{k=1}^m \frac{1}{2} \left[1 + C_{jk} \operatorname{erf} \left(\frac{R(k)}{\sqrt{2\Sigma_N(k,k)}} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 $R(k)$ 는 k번째 측정인자의 잔차이고, w_j 는 j번째 고장예측확률이다. 그리고 C_{jk} 는 잔차의 방향성에 대한 상수이며, $\Sigma_N(k,k)$ 는 k번째 측정인자의 공분산이다.

3.2 고장모사 대상 및 방법

본 연구에서는 앞서 설명한 고장현상 분석 시물레이션 대상과 동일한 1중 효용 중온수 흡수식 냉동기에 대해 고장검출 및 진단 그리고 에너지 성능평가를 위한 현장실증 시험을 수행하였다.

본 연구의 현장실증 실험에 사용된 1중 효용 중온수 흡수식 냉동기는 건물 냉방을 위한 정풍량 공조시스템에 설치되어 운전 중인 냉동기이며, 주요 사양과 측정점은 Table 1과 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 10개의 온도와 3개의 유량을 포함한 총 13개 측정점에 대해 데이터를 수집하였다. 냉수, 냉각수, 중온수 입출구 온도는 정밀도 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 인 백금저항온도센서(RTD PT100 Ω)를 설치하였고, 냉동기 증발온도, 응축온도, 흡수온도, 재생온도는 정밀도 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 인 T형 열전대(T-type thermocouple)를 설치하였고, 냉수, 냉각수, 중온수 유량은 정밀도 $\pm 1.0\%$ 인 볼텍스 유량계(Vortex flow meter)를 설치하여 측정하였다. 흡수식 냉동기의 운전시간대는 09:00~18:00이며, 9월 4일~24일 중 흡수식 냉동기가 가동된 데이터를 1분 간격으로 수집하였다.

고장모사 실험을 위해 실제 현장에 있는 흡수식 냉동기에 고장을 유발시켜 운전하였을 경우 기기손상 등의 문제가 발생하므로, 본 연구에서는 Table 2에 정리되어 있는 냉각수 유량 감소(Fault 1)와 냉수 유량 감소(Fault 2)만을 고장모사 하였다. 냉각수와 냉수 유량 감소 고장은 냉각수와 냉수 순환배관 밸브 개도를 조절하여 유량을 감소 시켰으며, 냉각수와 냉수 유량을 기준 설계조건에서 5~30% 감소 시켜 고장을 모사하였다.

3.3 실험 데이터를 이용한 고장검출 및 진단

본 연구에서는 현장 실험 데이터를 이용하여 고장의 원인에 따른 고장패턴 분석을 수행하였다. 또한 모델 기반 고장검출 기법을 적용하여 흡수식 냉동시스템의 고장검출을 수행하였다.

1중 효용 중온수 흡수식 냉동기의 운전특성은 냉수, 냉각수, 중온수의 유량과 유입온도에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서 냉수와 냉각수의 유량은 순환 펌프의 정격운전으로 인해 일정하고, 중온수 입구온도도 거의 일정한 온도로 공급되고 있으므로, 3가지 변수인 냉수와 냉각수 입구온도, 중온수 유량에 의해 시스템의 무고장 상태 기준 모델을 개발 할 수 있다.

그러나 유량측정이 온도측정에 비해 어려우므로, 중온수 유량변화로 인해 재생온도가 변하고, 이로 인해 흡수기의 성능 변화, 냉동용량의 변동이 발생하는 것을 고려하여 중온수 유량변화를 대신하는 독립변수로 냉각수 출구온도를 선정하였다. 그리고 냉수 입구온도 대신에 냉동기의 주요 제어점인 냉수 출구온도를 독립변

수로 선정하였다. 따라서 본 연구에서는 흡수식 냉동기의 냉수 출구온도(Tchwo), 냉각수 입구온도(Tcwi), 냉각수 출구온도(Tcwo)를 독립변수($x_1 \sim x_3$)로 선정하여 식(4)와 같이 2차 다항식(Polynomial) 형태의 무고장 상태 기준 모델을 개발하였다.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1x_2 + a_5x_2x_3 + a_6x_3x_1 + a_7x_1^2 + a_8x_2^2 + a_9x_3^2 \quad (4)$$

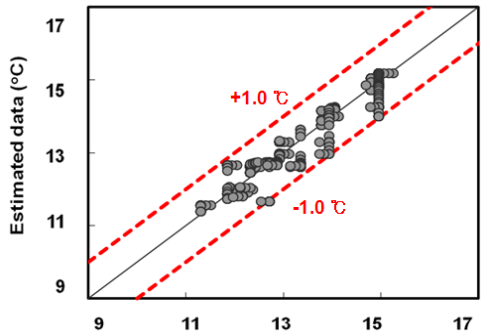
Fig. 9(a)~Fig. 9(c)는 식(4)를 이용하여 개발된 무고장 모델과 실험 데이터를 비교하여 무고장 기준 모델의 정확도를 분석하였다.

Fig. 10은 식(2)를 이용하여 무고장 현장 데이터의 표준화 거리를 나타내었다. 본 연구에서는 고장판단 표준화 거리 기준을 기존 연구⁽⁸⁾와 선행 연구^(7, 9)를 통해 사전에 선정하였다. 기존 연구에서는 무고장과 고장 잔차 분포의 교차면적인 분류오차(Classification error) 관계식을 적용하여, 측정 잔차 분포의 분류오차 값이 0.001보다 작으면 고장으로 간주하였다. 선행 연구에서는 무고장과 고장 잔차 들이 정규분포라고 가정 하였을 때, 분류오차 값 0.001에 해당하는 표준화 거리를 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 고장판단 기준을 선행 연구를 통해 얻어진 표준화 거리 6으로 선정하였으며, 측정된 데이터의 표준화 거리가 6을 벗어나면 고장으로 판단하였다. Fig. 10과 같이 모든 무고장 현장 데이터의 표준화 거리가 6 이하로 분포하고 있어서 무고장으로 잘 판단되고 있다.

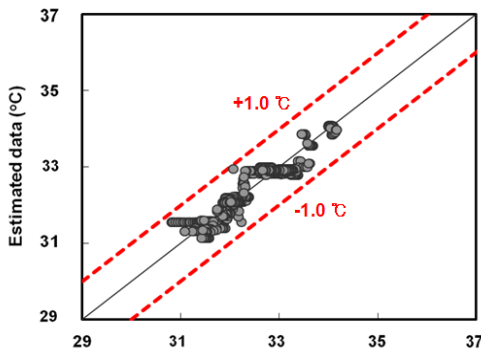
Fig. 11~Fig. 12는 고장 모사 실험 데이터를 이용하여 고장검출을 수행한 결과 이다. 왼쪽 Y축은 각 종속변수들의 모델과 측정값 사이의 잔차를 표준편차로 나누어 표준화 시킨 값이며, 오른쪽 Y축은 고장을 검출하기 위한 표준화 거리를 나타내었다. X축은 고장의 진행정도를 나타내었다. 그림에서 표시된 점선은 고장으로 최초 간주되는 고장의 진행정도를 나타낸 것이다.

Fig. 11은 냉각수 유량감소 고장에 대한 고장모사 실험 결과이다. Fig. 11의 실험 결과와 Fig. 3의 시물레이션 결과를 비교해보면, 냉각수 유량감소 고장을 검출하는데 가장 주요한 고장검출인자는 증가폭이 가장 큰 응축온도로 판단되며, 냉수 유입온도를 제외한 모든 고장검출인자들이 고장진행에 따라 증가하고 있으며, 또한 재생온도가 변화하지 않는 것은 재생온도의 증가폭이 낮고 실험 측정 오차로 생각된다. 냉각수 유량감소 고장검출은 냉각수 유량이 19.3% 정도 감소하였을 때 최초 고장으로 검출 할 수 있었다.

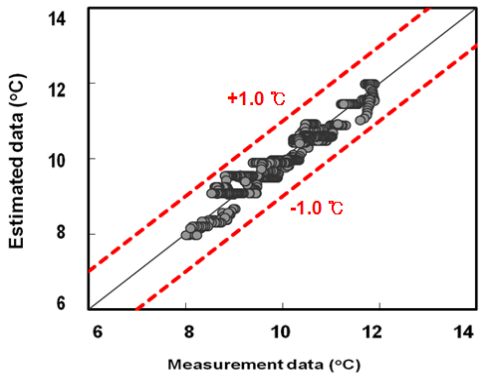
Fig. 12는 냉수 유량감소 고장에 대한 고장모사 실험 결과이다. Fig. 12의 실험 결과와 Fig. 4의 시물레이션 결과를 비교해보면, 냉수 유량감소 고장을 검출하는데 주요한 고장검출인자는 냉수 입구온도와 응축온도이며,



(a) Chilled water inlet temperature



(b) Condensing temperature



(c) Evaporating temperature

Fig. 9 Comparison of experimental results with predicted values by no-fault reference model.

고장검출인자의 변화폭이 시뮬레이션에 비하여 크게 보이는 것은 각 고장검출인자의 잔차를 표준편차로 나누어 표준화 잔차(Normalized residual)로 나타내었기 때문이다. 냉수 유량감소 고장검출은 냉수 유량이 17.8% 정도 감소하였을 때 최초 고장으로 검출 할 수 있었다.

Fig 13은 최초 고장으로 검출되었을 때 흡수식 냉동

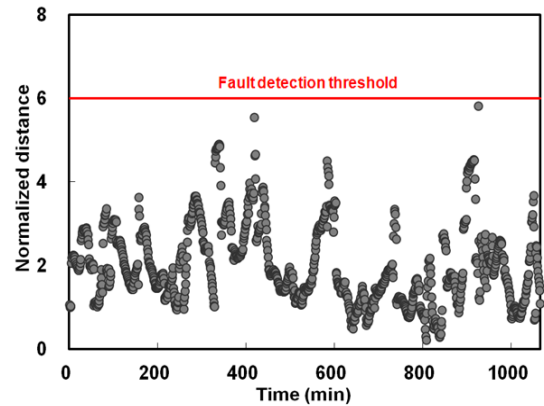


Fig. 10 Normalized distance for no-fault experimental data.

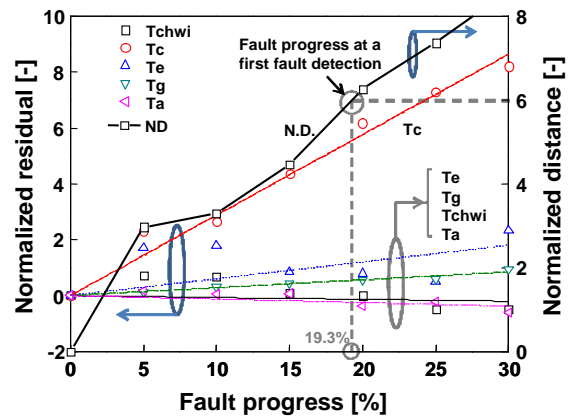


Fig. 11 Fault detection when cooling water mass flow rate decrease.

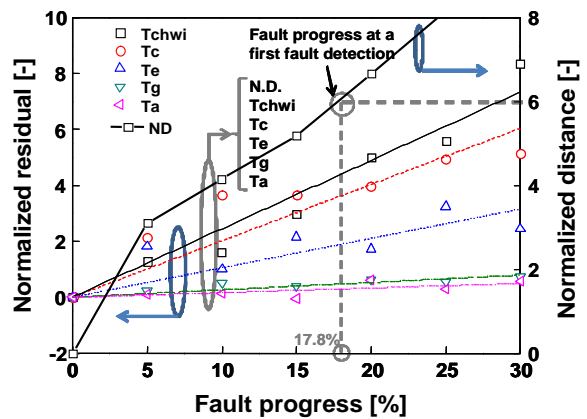


Fig. 12 Fault detection when chilled water mass flow rate decrease.

기의 COP 감소율(DR_{COP})을 나타낸 것이다. COP 감소율은 식(5)와 같이 계산한다.

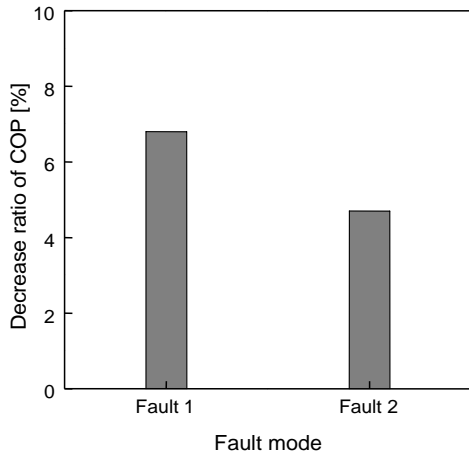


Fig. 13 Decrease ratio of COP at a first detection.

Table 4 Fault diagnosis class probabilities at a first fault detection

Fault mode	Class probabilities				
	1	2	3	4	5
1	0.3547	0.0126	0.0024	0.0023	0.0004
2	0.0956	0.4123	0.0024	0.0000	0.0000

$$DR_{COP} = \frac{|COP_m - COP_r|}{COP_r} \times 100 \quad (5)$$

Fig. 13과 같이 2가지 고장이 점차적으로 진행되다가 최초 고장으로 검출되었을 때, 무고장 상태의 흡수식 냉동기 COP보다 6.8, 4.7% 감소하였다. 이는 기존 연구⁽⁴⁾를 통해 조사된 것과 같이 부적절하거나 성능이 열화된 상태로 지속적으로 사용되는 냉동시스템의 연간 에너지 소비량 증가율이 15~30%인 것을 감안하면 조기에 고장을 검출하고 진단하는 것이 중요한 것을 알 수 있다.

Table 4는 특정한 고장모사 실험 결과를 식(3)을 이용하여 Table 2의 5가지 고장에 대해서 고장검출이 되는 시점에서의 고장예측 확률을 나타낸 것이다.

Table 4의 첫 번째 행에 정리되어 있는 냉각수 유량 감소 고장이 발생하였을 때 5가지 고장모드에 대해 고장이라고 예측할 수 있는 확률을 나타낸 것이며, 분류 예측 값 중에 첫 번째 값이 0.3547로 가장 큰 값을 가지므로 냉각수 유량 감소 고장으로 잘 분류하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 흡수식 냉동기에 발생 할 수 있는 몇 가지 고장에 대해 고장모사 시뮬레이션을 수행 하였으

며, 고장의 종류에 따라 흡수식 냉동기에서 발생하는 고장현상을 분석하였다. 또한 흡수식 냉동기의 고장모사 실험을 통해 얻어진 데이터를 이용하여 고장검출과 진단을 수행하였다.

- (1) 냉수 유량 감소 고장과 냉각수 유량 감소 고장의 경우, 고장이 발생하였을 때 잔차의 가장 큰 변화를 보이는 고장검출 인자는 응축온도였으며, 두 고장의 종류를 분류할 수 있는 주요 인자는 냉수 입구온도이다. 하지만 냉수 유량 감소 고장의 경우, 전체 측정점의 증가폭은 냉각수 유량 감소 고장보다 크지 않다.
- (2) 온수 유량 감소 고장의 경우, 온수 유량 감소로 인한 재생기의 열전달 성능이 감소하게 되고 농용액의 농도 감소로 고장진행에 따라 잔차의 가장 큰 변화를 보이는 고장검출 인자는 재생온도이다.
- (3) 흡수식 냉동기의 제어점인 냉수 출구온도와 냉각수 입구온도 센서의 민감도 저하로 인해 모든 고장검출 인자의 잔차는 감소하였으며, 두 고장의 종류를 분류할 수 있는 주요 인자는 냉수 입구온도이다.
- (4) 무고장 현장 데이터를 이용한 고장검출 기준모델을 개발하였으며, 이 때 사용된 모든 무고장 데이터의 표준화거리가 6 이하로 분포하고 있어서 무고장으로 잘 판단하였다.
- (5) 냉각수 유량 감소 고장의 경우 냉각수 유량이 19.3%정도 감소하였을 때 최초 고장으로 검출 할 수 있었으며, 냉수 유량 감소 고장의 경우 냉수 유량이 17.8%정도 감소하였을 때 최초 고장으로 검출 할 수 있었다.
- (6) 냉각수 유량 감소 고장의 경우 무고장 상태의 흡수식 냉동기 COP보다 6.8% 감소하였을 때, 냉수 유량 감소 고장의 경우 무고장 상태의 흡수식 냉동기 COP보다 4.7% 감소하였을 때 각각 최초 고장으로 검출 하였다.
- (7) 고장예측 확률법을 이용한 고장진단에서 5가지 고장에 대한 분류 예측 값 중 각 고장에 대한 고장예측 확률이 가장 큰 값으로 나타나서 고장의 원인에 대한 진단이 가능하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 인력자원개발 프로그램(No.20134010200580)과 산업통상자원부 에너지기술평가원의 에너지자원기술개발사업(No. 20132010101780, 건물용/산업용 열에너지 네트워크 적용 단위 시스템 개발)의 지원으로 수행 되었습니다. 또한 본 연구는 교육부와 한국연구재단의 BK21 플러스 사업(31Z20130012959)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Katipamula, S. and Brambley, M. R., 2005, Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems-a review, part I, HVAC&R Research, Vol. 11, No. 1, pp. 3-25.
2. Matthew, C. C., Braun, J. E., and Groll, E. A., 2002, A survey of common faults for chillers, ASHRAE Transaction, pp. 819-825.
3. Han, C. Y., Xiao, Y., and Braun, C. J., 1999, Fault detection and diagnosis of HVAC systems, ASHRAE Transactions, Vol. 105, No. 1, pp. 568-578.
4. House, J. M., Vaezi-Nejad, H., and Whitecomb, J. M., 2001, An expert rule set for fault detection in air-handling units, ASHRAE Transactions, Vol. 107, No. 1, pp. 858-871.
5. Park, C. W., 2008, The study on high efficiency cycle characteristics of the absorption chiller, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 10, pp. 662-668.
6. Grossman, G., 1998, ABSIM-Modular simulation of absorption systems user's guide and reference, Oak ridge national laboratory.
7. Lee, H., Chang, Y. S., and Kang, B. H., 2008, An Experimental study on fault detection and diagnosis method for a water chiller using bayes classifier, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 508-516.
8. Rossi, T. M. and Braun, J. E., 1997, A statistical, rule-based fault detection and diagnostic method for vapor compression air conditioner, Int. J. of HVAC&R Research, Vol. 3, No. 1, pp. 19-37.
9. Han, D. and Chang, Y. S., 2008, Development of a fault detection and diagnosis algorithm using fault mode simulation for a centrifugal chiller, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 10, pp. 669-678.