Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 26, No. 5 (2014), pp.240-246
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2014.26.5.240

하이브리드 열펌프 열교환기 오염 진단 연구

A Study on Diagnosing Fouling of Heat Exchangers of a Hybrid Heat Pump

신영기(Younggy Shin)†
세종대학교 기계공학과
Department of Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul 134-747, Republic of Korea.

(Received January 20, 2014; revision received April 7, 2014; Accepted: April 9, 2014)

Abstract A fault detector was developed for heat exchangers of a hybrid heat pump (HP) for household. The proposed detector can be applied directly to raw operating data. It is to monitor a tracking error between a measured saturation temperature and its state observer. The observer was estimated from a state-space model simulating dynamics of a heat exchanger. The real hybrid HP was substituted with a dynamic simulator that implemented two-phased heat transfer and was validated by experimental data. And artificial fault data were generated using the simulator. Diagnosing the data showed the following. The residual calculated from the state observer error shows a relatively robust consistency with respect fouling level. The fault detector is practically useful because it detects a threshold fouling beyond which the performance starts to deteriorate significantly.

Key words Heat pump(열펌프), Dynamic model(동특성 모델), Plate heat exchanger(판형 열교환기), Control(제어), R410A(R410A)

† Corresponding author, E-mail: *ygshin@sejong.ac.kr*

기호설명

A : Process 상태공간모델 계수 행렬
$\hat{A}$: 상태관측기 상태공간모델 계수 행렬
d : 외란 변수
e : feedback error
f : forcing function
g : static function
H : feedback gain matrix
h : 엔탈피 $[kJ/kg]$
$\dot{m}$: 질량 유량 $[kg/s]$
MC : 열용량 $[kJ/℃]$
S : 분산, variance
t : 시간 [sec]
T : 온도 [℃]
UA : 총괄열전달 계수 $[kJ/℃]$
u : 입력 변수
x : 상태 변수
y : 출력 변수
Z : 상태변수 계수행렬

하첨자

i : 입구(inlet)
o : 출구(outlet)
r : 냉매(refrigerant)

1. 서 론

에너지 절약을 위한 방안으로서 투입한 일차에너지 대비 효율 120% 달성을 목표로 하는 하이브리드 열펌프가 개발되고 있다. 이러한 효율은 급탕, 냉방 및 난방 수요에 대하여 열펌프와 보일러가 최고 효율로 운전될 수 있는 최적조합 알고리즘에 의해 구현된다.

따라서 부하 수요 및 사용자의 요구사항에 따라 다양한 조합의 운전모드로 구동되어야 하므로 시스템이 복잡해지므로 고장이 발생하기 쉽고 진단하기 어려울 수도 있다. 하이브리드 열펌프는 복잡한 시스템 구성으로 인한 고가의 초기 설비비로 시장 진입이 어려울 수도 있는데 운전 중 빈번한 고장이 발생하고 이에 신속히 대처할 수 있는 실용적인 온라인 방식의 고장진단이 가능하지 않다면 시스템 자체의 신뢰성도 확보되지 않아 상품 경쟁력이 떨어진다.

본 연구는 오염(fouling) 등으로 인하여 주기적인 정비가 필요한 열교환기의 성능을 온라인으로 진단하여 필요한 정비시점을 알려줄 수 있는 진단 알고리즘을 제안하고자 한다. 종래의 연구[1]는 건물용 중앙공조 시스템의 수냉식 열교환기 오염 진단에 대하여 주로 수

ⓒ SAREK

행되었다. 이러한 기존 연구방식의 문제점은 정상상태에서의 열평형 방정식을 기준으로 진단하기 때문에 시험데이터 중 정상상태에 유사한 데이터를 추출하는 필터의 개발이 선행되어야 한다는 점이다. 그러나 본 연구에서 적용하고자 하는 하이브리드 열펌프는 가정용으로서 부하 및 사용자 요구사항이 수시로 변하므로 정상상태 데이터 확보가 용이하지 않다. 따라서 본 연구는 실제 운전데이터를 대상으로 유용한 고장진단 알고리즘을 개발하고자 한다.

고장데이터 발생을 위해서는 실제 장치를 대상으로 고장을 모사해야 하는데 고장의 경우의 수가 많고 이를 구현하기 위한 시간, 비용 및 인력 소요가 크므로 대안으로서 실제와 유사하게 작동하는 동적 시뮬레이터를 대상으로 가상 고장을 발생시킨다. 본 연구에서는 가상 고장으로서 주기적 점검이 필요한 열교환기 오염현상인 실외기 공기측의 이물질에 의한 유로 막힘과 판형 열교환기 물측의 스케일 축적 현상을 각각 유로면적 축소와 열전달계수 성능 저하로 근사시켜 모사한다. 실제 오염과는 다소 차이가 있을 수 있으나 유사한 모의고장을 대상으로 설계하고 평가한 고장 진단 알고리즘은 실제 장치에서의 데이터와 비교 개선을 통해 실용적 진단 수단으로 구현될 수 있을 것이다.

2. 동적 시뮬레이터

2.1 하이브리드 열펌프 시스템 구성

Fig. 1은 겨울철에 급탕 및 바닥난방용 온수를 가열하는 운전모드의 작동을 나타낸다. 압축기에서 토출된 과열냉매는 판형열교환기(PHE)에 유입되고 데워져야 할 온수에 열을 전달한다. PHE에서 응축된 냉매는 팽창밸브(EEV)에서 팽창된 후 실외 증발기에서 대기열을 흡수한다. 증발기에서 과열된 냉매는 압축기로 유입되면서 냉매 사이클을 완성한다. 가열된 온수는 온수 축열탱크에서 급탕이나 바닥난방용 온수와 열교환을 하게 되며 출수온도가 목표값에 미달되는 경우에는 보일러가 가동하여 필요한 열량을 보충한다.

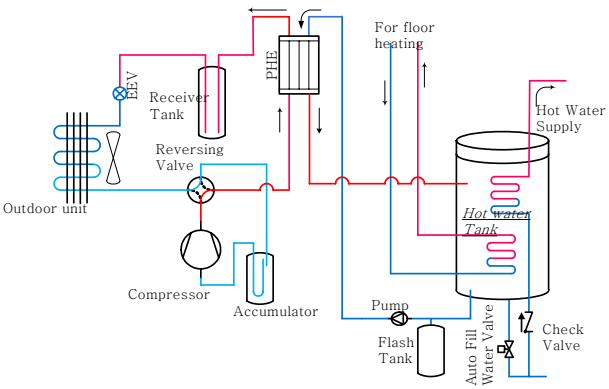

Fig. 1 Hybrid HP for water heating.

Fig. 1을 구현한 시작품의 압축기는 삼성 로터리 압축기 모델 UG8T260FUAJW[2]이다. 이 압축기 냉방용량은 7.766 kW, 행정체적은 25.18 cm^3이다. 압축기는 BLDC 모터로 구동되며 최고속도는 3,480 rpm이다. Table 1은 PHE의 냉매 및 온수측 성능을 나타낸다. 그 외 PHE 성능인 용량은 7 kW, 열전달 면적 2.05 m^2, 대수평균 온도차 3.34°C이다. Table 2는 실외 증발기의 제원을 나타낸다.

2.2 동적 시뮬레이터 모델링

본 연구의 모델은 제어 및 고장진단에 활용할 시뮬레이터를 개발하는 것이므로 동적 거동이 실제와 유사할 수 있는 물리적 모델이어야 한다. 이러한 관점의 동적 모델 개발에 관해 많은 연구가 진행되었으나, 그 중 가장 완성도가 높고 실용적인 연구성과는 Alleyne Research Group의 Thermosys이다.[3, 4] 이 모델은 열교환기의 유로와 열전달 과정을 1차원으로 단순화하되 냉매 상변화에 따른 액체 냉매 점유 길이를 동적으로 모사할 수 있는 방법론을 정립하였다. 실험과의 비교 및

Table 1 Specification of PHE

Item	Unit	Refrigerant	Water
Heat load	kW		
Inlet temperature	°C	70.0	40.0
Condensation temperature	°C	45.0	
Subcooling	K	3.0	
Outlet temperature	°C	41.9	45.0
Flow rate	kg/s	0.03689	0.3350
Number of channels		25	26
Reference temperature	°C	44.95	42.50
Film coefficient	W/m²-°C	3,310	4,500
Channel velocity	m/s	0.0855	0.0822

Table 2 Specification of the evaporator

Item	Value
Frontal area	0.8534 m^2
Outer dimension	W×H×D = 1.4×0.609×0.044 m
No. of row	2
No. of circuit	6
Fin pitch	1.41×10^{-3} m
No. of fin	992 per row × 2rows = 1,984
Fin type	Double wave
Fin thickness	1.5×10^{-4} m
Coil outer diameter	0.01 m
Coil thickness	3.173×10^{-4} m

최적제어 알고리즘의 적용을 통해 개발한 동적 모델의 실용성과 타당성을 오랜 기간에 걸쳐 실험결과와 비교 검증하고 모델을 개선해 왔다. 본 연구는 이와 같은 방법론을 수용하여 개발하고자 하는 하이브리드 열펌프 시스템에 적합하게 모델을 수정하였다. Alleyne Research Group에서 발표되지 않은 냉매 응축기인 판형 열교환기 모델을 개발하였고[5] 본 연구 실험용 압축기에 맞게 압축기 모델도 수정 개발하였다.

1차원으로 가정한 대상 열유체에 대하여 질량 및 에너지 보존 법칙을 적용한다. 길이방향 편미분항은 Leibnitz rule을 적용하여 상미분으로 변환한다. 냉매의 압력, 상의 길이, 유체 온도 등은 시간에 대하여 변하는 일차 미분항을 포함하므로 이들을 상태벡터(state vector) $\boldsymbol{x}$로 한 지배방정식들은 다음과 같은 일반형으로 표현할 수 있다.

$$\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u})\dot{\boldsymbol{x}} = f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) \tag{1}$$

우변의 항 f는 forcing vector로서 질량 보존방정식에서는 질량 출입, 에너지 보존 방정식에서는 해당 검사체적에 출입하는 에너지항을 나타낸다. 상태벡터 $\boldsymbol{x}$의 미분항이 0이 아니므로 동적 거동을 나타내는 식이 된다.

반면에 팽창밸브나 압축기의 경우 시스템의 동적거동이 열용량과 관련된 열전달이 아니라 유체운동과 관련한 압력변화의 영향이므로 시스템 반응속도가 빨라 동적 거동을 별도로 모사할 필요가 없다. 즉 $\boldsymbol{u}$의 변동에 따른 시스템 반응이 동시적으로 발생하므로 시스템 출력 $\boldsymbol{y}$와 제어입력 u의 상관관계는 다음과 같이 근사될 수 있다.[6]

$$\boldsymbol{y} = g(\boldsymbol{u}) \tag{2}$$

식(1), 식(2)는 각각 동적 모델과 정적 모델을 표현한다.

2.3 프로그래밍 및 실험결과와의 비교

증발기 등 요소기기의 상세한 모델 내용은 Shin et al.[4]의 연구결과에 상세히 서술되어 있다. 요소기기별 모델식들을 계산하기 위한 solver로서 Matlab과 SIMULINK를 이용하였다. 실제 장치의 성능과 비교하기 위하여 전절에서 서술한 제원을 동적 시뮬레이터의 입력 데이터로 변환하였다. 냉매는 R410A이다. Fig. 2는 구현된 프

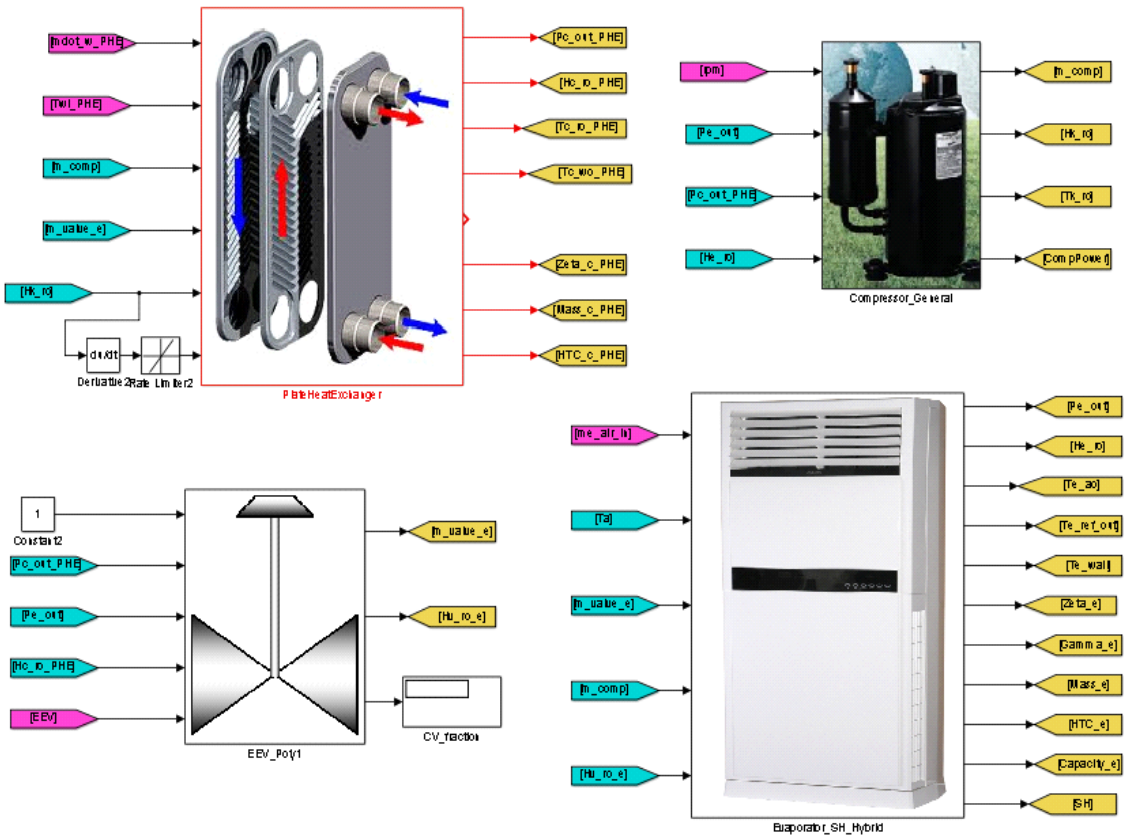

Fig. 2 Hybrid heat pump simulator.

ⓒ SAREK

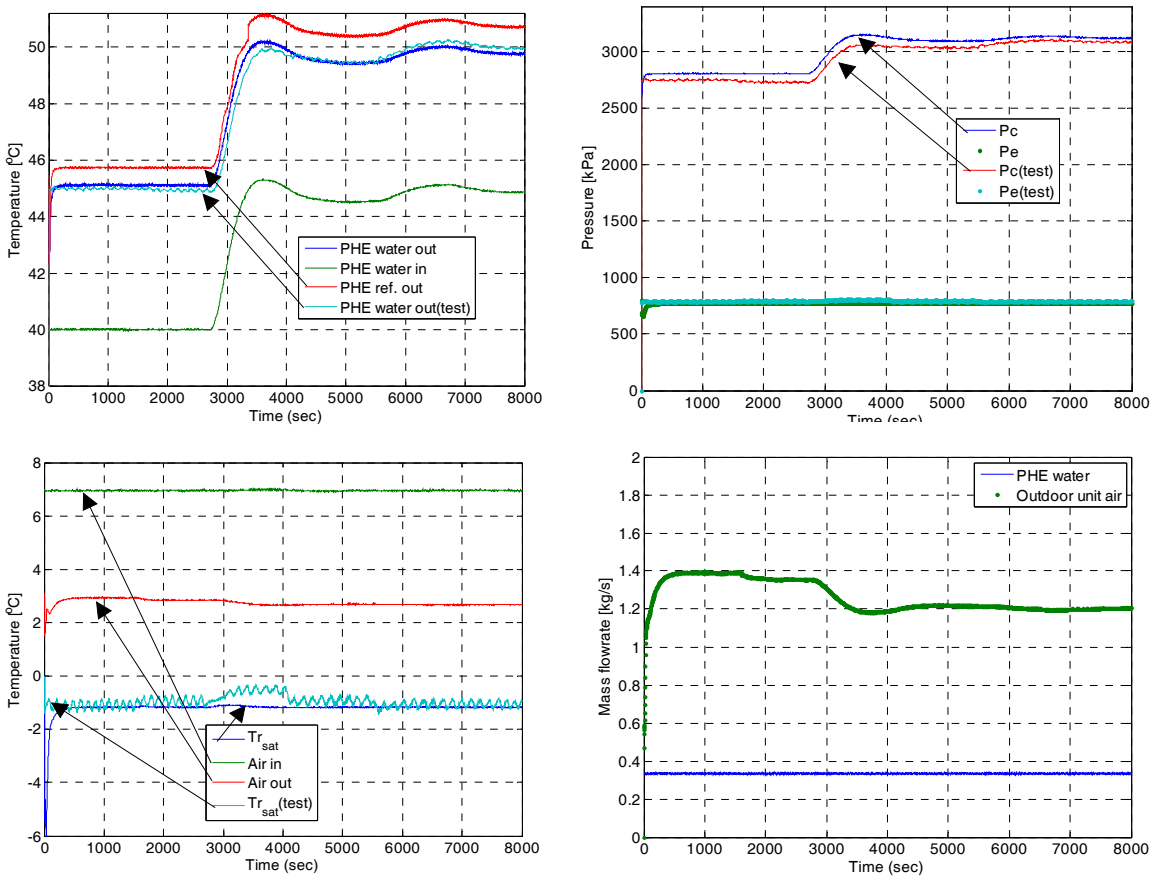

Fig. 3 Comparison of a full load test run with its corresponding simulation result.

로그램을 나타낸다. Fig. 3은 전절에서 서술한 시험장치로 시험한 결과와 Fig. 2의 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 압축기는 3,480 rpm으로 일정하고 약 3,000초 근처에서 PHE에 유입되는 온수온도만 40℃에서 45℃로 변화시킨 것이 이 시스템에 가해진 외란 또는 과도 상태 조건이다.

실험결과와 직접 비교를 위해 7℃ 근처인 외기온도, PHE 온수입구 온도 및 유량은 시계열 시험데이터를 시뮬레이터에 직접 반영하였고 냉매 저압은 실험결과를 동일하게 추종하도록 제어하였다. 그 결과 각 요소기기에서 나타난 출력을 비교한 것으로서 냉매 고압, PHE 출수온도 등이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 정상상태에서 출력을 비교한 결과 실험과 시뮬레이션 간의 오차는 2% 이내였다. 그 외, 그래프로 제시하지 않았으나 압축기 동력, 난방능력, COP, 압축기 토출 냉매 온도 등도 3% 이내의 일치를 나타내었다. 이 결과를 근거로 시뮬레이터가 실제 시험장치의 운전을 양호한 수준으로 모사하고 있다고 판단한다. 동일한 모델을 실험결과와 비교하여 위와 유사한 수준의 일치를 나타낸 예는 Li 등의 논문[3]에서도 확인할 수 있다.

3. 고장 모사

핀 변형, 이물질 누적 등에 의한 공기 유효면적과 연관된 증발기 오염을 모사하기 위하여 공기측 및 대응 냉매측 유효면적을 무고장시 면적의 60%, 45%, 30%로 축소하였다. 오염이 없다면 유효면적이 그대로 100%일 것이므로 유효면적이 줄어든 만큼 오염도가 증가한 것으로 유효면적과 오염도의 합이 100%가 되도록 정의하였다. 따라서 오염도 관점에서는 각각 40%, 55% 및 70%에 해당한다. Wu et al.[7]도 유사한 방법으로 실외기 오염 시험을 수행하였다. 판형 열교환기의 경우는 물측에 축적되는 스케일에 의한 열전달 계수가 주요 성능 저하 원인이다.[7] 스케일에 의한 성능 저하를 모사하기 위하여 PHE 모델의 물측 대류열전달 계수를 초기 상태 대비 60%, 40% 및 20%로 하였으며 이는 오염 수준 40%, 60% 및 80%로 각각 정의하였다.

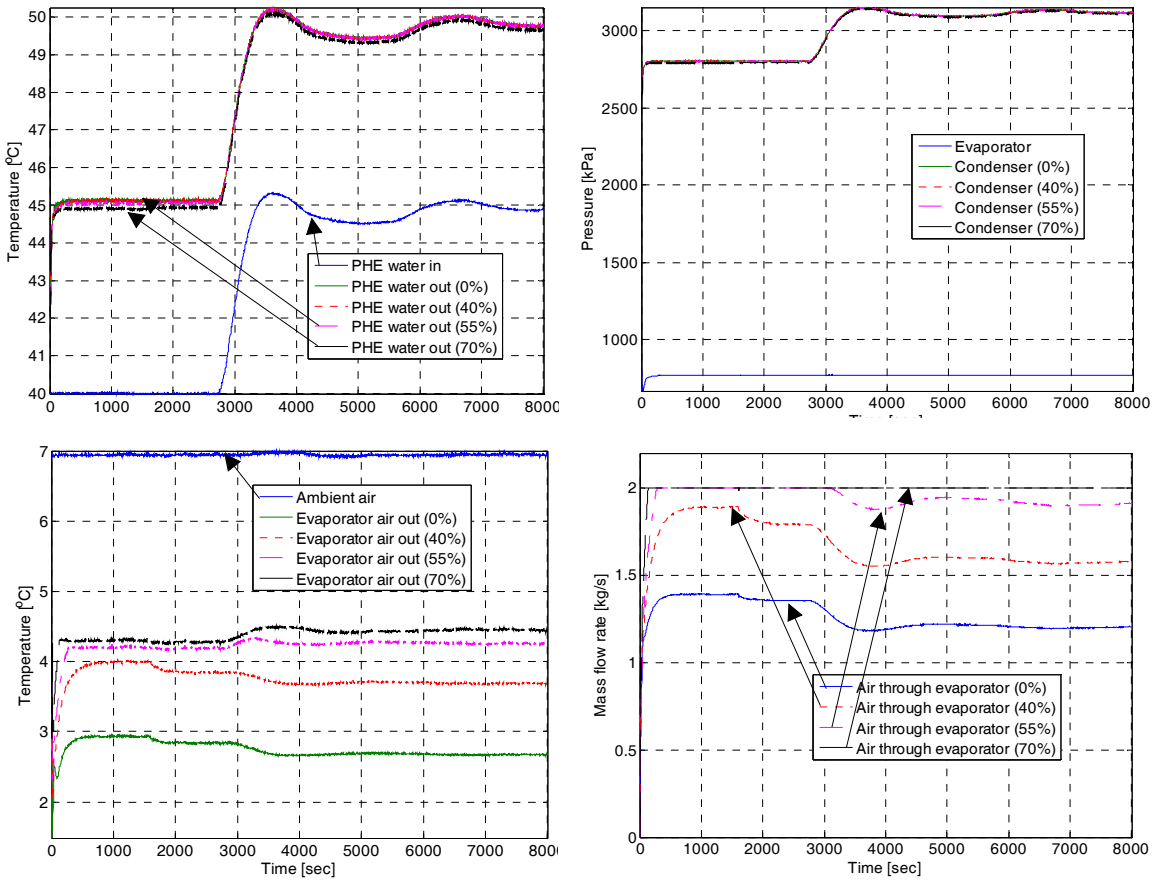

Fig. 4 Comparison of a simulation result according to evaporator fouling level.

Fig. 4는 실외 증발기에 적용한 오염 크기에 따른 주요 변수의 거동 비교를 나타낸다. 결과에 따르면 냉매 압력이나 온수 온도는 거의 변하지 않고 증발기 통과 공기 유량과 출구온도가 영향을 받는다. 통과 공기유량의 경우 냉매저압을 일정하게 유지하기 위한 피드백 제어의 결과 오염 증가에 따라 풍량이 증가하지만 최대 용량인 2 kg/s 이상으로는 늘어날 수 없어 포화되고 있음을 볼 수 있다.

판형 열교환기의 경우에는 오염의 영향이 잘 나타나지 않는다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 냉매 고압측에서 오염 수준이 80%일 때만 압력이 상승한 차이가 나타나고 그 외 다른 변수들에서는 특별히 주목할만한 변화가 나타나지 않아 지면관계상 생략하였다.

4. 고장 진단

4.1 고장진단 모델

Fig. 4와 Fig. 5에서 나타난 오염의 영향을 감지하기 위한 지표가 필요하다. 본 연구에서는 상태공간(state space) 모델에 기반한 상태관측기(state observer) 개념을 적용하였다. Fig. 6은 상태관측기 개념을 나타낸다. Fig. 6에서 Process는 실제 장치로서 열교환기가 이에 해당한다. 상태관측기는 상태공간 모델로 표현된 동적 모델로서 process의 제품 초기성능을 모사하도록 관련 계수행렬을 결정하였다. 다음 식(3), 식(4)는 실제 장치의 상태공간 표현이고 식(5), 식(6)은 상태관측기의 상태공간 표현이다.

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{D}\boldsymbol{d}(t) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) \tag{4}$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t) = \hat{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{x}(t) + \hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{u}(t) + \hat{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{d}(t) + \boldsymbol{H}\boldsymbol{e}(t) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{e}(t) = \boldsymbol{y}(t) - \boldsymbol{C}\hat{\boldsymbol{x}}(t) \tag{6}$$

상태공간 모델 구성을 위해 열교환기에 적용하는 물리적 구속조건은 다음의 에너지 보존방정식이다.

ⓒ SAREK

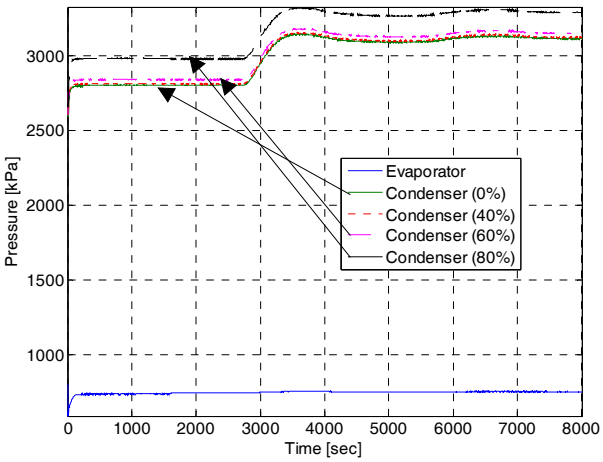

Fig. 5 Comparison of a simulation result according to PHE fouling level.

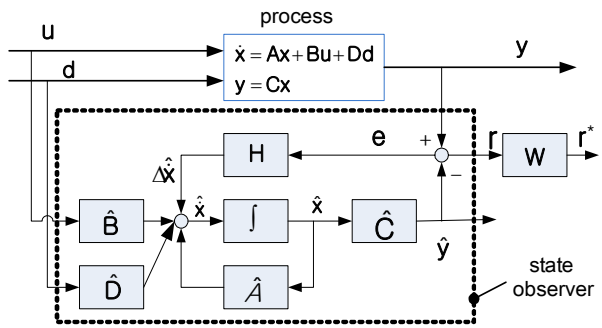

Fig. 6 Process and state observer.

$$MC\frac{d\hat{T}_r}{dt} = (h_{r,i} - h_{r,o})\dot{m}_r + UA(\overline{T_x} - \hat{T}_r) + He \quad (7)$$

State observer : $\hat{x} = \hat{T}_r$ (8)

Input : $u = \dot{m}_r$ (9)

Disturbance : $d = \overline{T_x} = (T_{x,i} + T_{x,o})/2$ (10)

Error : $e = T_r - \hat{T}_r$ (11)

식에서 필요한 열용량 MC, UA는 열교환기 제원으로부터 구하였고 엔탈피차 $h_{r,i} - h_{r,o}$는 냉매 물성프로그램 Refprop으로부터 구하였다. 모델 오차 $e(t)$ 자체는 부호가 존재하여 절대값 비교가 어려우므로 분산 $S(t)$를 다음과 같이 정의하였다.

$$S(t) = e(t)^2 = (T_r(t) - \hat{T}_r(t))^2 \quad (12)$$

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 Fig. 4와 Fig. 5의 실외 증발기와 판형열교환기에 대하여 무고장시와 오염 수준간에 계산한 오차와 분산 거동을 나타낸다. 이는 Fig. 4와 Fig. 5에

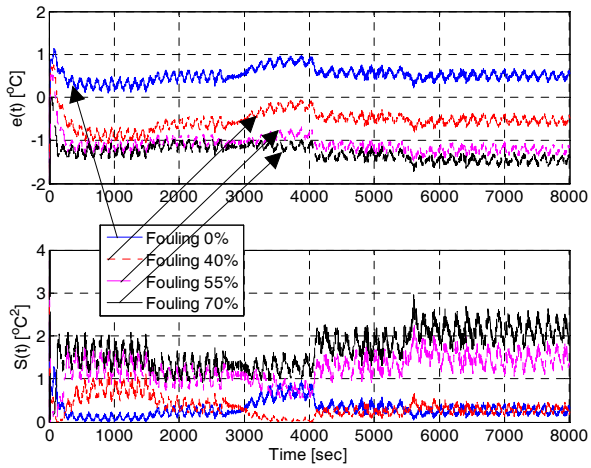

Fig. 7 Error and residual of the state observer(the evaporator).

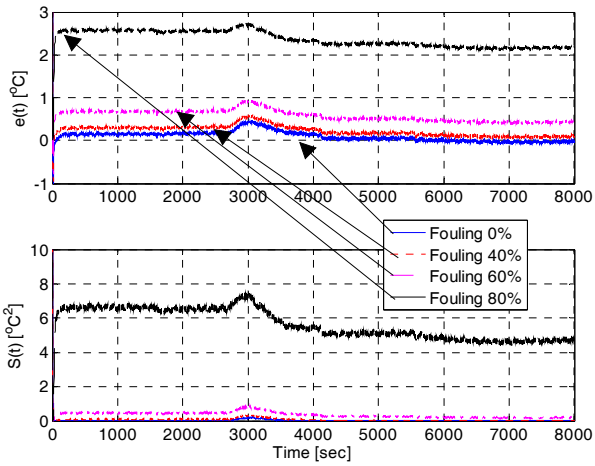

Fig. 8 Error and residual of the state observer(the plate heat exchanger).

서 관찰된 현상을 무고장시의 냉매포화온도와 오염 정도에 따른 냉매 포화온도간의 차이로 환산한 것이다. Fig. 4와 Fig. 5에서 관찰된 바와 유사하게 실외증발기에서 오염 수준이 40%인 경우는 무고장과 차이가 없으나 55% 이상에서는 유의미한 차이가 나타나고 있어 고장진단이 가능하다. 판형열교환기의 경우는 오염 수준이 80% 수준일 때만 유의미한 분산이 관찰되고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8의 시계열 데이터를 운전시간 8,000초에 대하여 평균한 분산을 정리한 결과는 Fig. 9와 같다. 이와 같이 오염 수준에 대하여 냉매 포화온도가 비선형적 거동을 보이는 이유는 냉매의 상변화 열전달과 관계가 있다고 판단된다. 증발기와 응축기에는 2상 영역 이외에 과열 및 과냉 구역이 있기 때문에 오염에 의해 열저항이 증가한 경우에는 2상영역이 넓어져 면적 감소 등에 의해 부족한 열전달량을 보상할 수 있다.

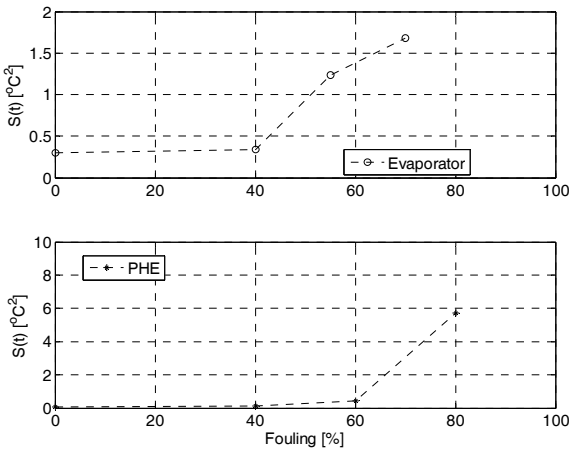

Fig. 9 Behavior of the residuals according to fouling level.

Fig. 9에서 이러한 열전달 보상이 가능한 오염 수준에서는 분산 변화가 거의 없는 것으로 나타나고, 일정 오염 수준 이상이 되면 2상 영역 열전달 보상이 더 이루어질 수 없어 냉매 온도가 변하여 Fig. 9의 분산 증가로 나타나게 되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

온수 가열용 판형 열교환기를 구비한 하이브리드 열펌프 시운전 결과와 유사한 동적 성능을 나타내는 동적 시뮬레이터를 개발하였다. 이 시뮬레이터를 이용하여 증발기와 응축기의 오염 수준에 따른 고장 데이터를 생성하였고 이러한 고장을 진단할 수 있는 방안으로서 상태공간 모델 기반의 상태관측기를 적용하여 그 오차 및 분산을 분석하였다. 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분산은 열펌프의 과도운전 구간에서도 일정 크기 이상의 오염 수준에 대해서는 오염과 상관성이 있는 유의미한 차이를 나타내었다.
(2) 상기의 결과를 통하여 상태관측기 분산은 열펌프가 정상상태 조건이 아니어도 오염 진단이 가능할 수 있는 가능성을 제시하였다.
(3) 냉매 포화온도를 상태관측기로 적용한 결과 웬만한 오염에 대해서도 열교환기 내 2상 열전달이 유지되어 분산변화가 둔감하다.
(4) 그러나 2상 열전달이 확보되지 않아 냉매온도가 변하고 열펌프 전체 성능에도 영향을 미치게 되는 더 높은 오염 수준에서는 분산에 의한 진단이 가능하므로 유용한 고장진단 수단이 될 수 있다.
(5) 다만 현재의 연구결과는 실제와 유사한 동적 모델에 근거한 것이므로 본 연구에서 도출된 고장진단법은 실험적 검증과정을 거칠 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20122010100010).

Reference

1. Cui, J. and Wang, S., 2005, A model-based online fault detection and diagnosis strategy for centrifugal chiller systems, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 44, pp. 986-999.
2. Suzhou Samsung Electronics Co., 2013, Rotary compressor specification sheet(Model : UG8T260FUAJW).
3. Li, B. and Alleyne, A. G., 2010, A dynamic model of a vapor compression cycle with shut-down and start-up operations, International Journal of Refrigeration, Vol. 33, pp. 538-552.
4. McKinley, T. L. and Alleyne, A. G., 2008, An advanced nonlinear switched heat exchanger model for vapor compression cycles using the moving-boundary method, International Journal of Refrigeration, Vol. 31, pp. 1253-1264.
5. Shin, Y. G., Kim, J. H., and Yoo, B. J., 2013, Dynamic modeling and simulation of a hybrid heat pump, Korean Journal of Air-Condtioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 7, pp. 406-412.
6. Shah, R., Alleyne, A. G., Bullard, C. W., Rasmussen, B. P., and Hrnjak, P. S., 2003, Dynamic modeling and control of single and multi-evaporator subcritical vapor compression systems, ACRC TR-216.
7. Wu, X. and Cremaschi, L., 2012, Thermal and chemical analysis of fouling phenomenon in condensers for cooling tower applications, Proceedings, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue.

ⓒ SAREK