

비선형회귀모델을 이용한 히트펌프시스템의 열교환기 고장에 대한 고장감지 및 진단에 대한 연구

김학수* · 김민수**

* 서울대학교 기계항공공학부

Fault Detection and Diagnosis (FDD) Using Nonlinear Regression Models for Heat Exchanger Faults in Heat Pump System

Hak Soo Kim* and Min Soo Kim**

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Na'l Univ.

(Received December 22, 2010 ; Revised September 14, 2011 ; Accepted September 21, 2011)

Key Words: Heat Pump(히트펌프), Fault(고장), Detection(감지), Diagnosis(진단), Heat Exchanger(열교환기)

초록: 본 연구에서는 비선형회귀모델을 이용한 히트펌프시스템에서의 고장감지 및 진단 알고리즘을 개발하였다. 히트펌프시스템에 발생할 수 있는 다양한 고장요소 중, 열교환기 고장에 대한 연구를 수행하였다. 해석 식을 바탕으로 제작한 모델을 이용하여 총 4가지 작동 모드(무고장, 증발기 고장, 응축기 고장, 응축기와 증발기 고장)에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 고장감지 및 진단 알고리즘을 개발하기 위해 무고장모드에서의 데이터를 바탕으로 각 열교환기의 과열도 또는 과냉도를 예측할 수 있는 비선형회귀모델을 제시하였다. 고장감지 및 진단 알고리즘은 이 비선형회귀모델을 바탕으로 예측한 열교환기에서의 과열도 또는 과냉도 값과 시뮬레이션 값을 비교하여 그 차이의 정도에 따라 각 열교환기의 고장을 감지 및 진단하도록 하였다.

Abstract: This paper proposed a fault detection and diagnosis (FDD) algorithm using nonlinear regression models, focusing especially on heat exchanger faults. This research concerned four working modes: those with no fault, evaporator fault, condenser fault, and evaporator and condenser faults. This research used no fault mode data to create an FDD algorithm. Using the no fault mode data, correlation functions for predicting the degree of superheat or subcool of heat exchangers (an evaporator and a condenser) were derived. Each correlation function has five inputs and one output. Based on these correlation functions, it is possible to predict the degree of superheat or subcool of each heat exchanger under various working conditions. The FDD algorithm was developed by comparing the predicted value and the simulation value. The FDD algorithm works well in all four working modes.

- 기호설명 -

- IDU : 실내기
- ODU : 실외기
- \dot{m} : Mass flow rate (kg/s)
- sh : 과열도 (°C)
- sc : 과냉도 (°C)
- ref : 냉매

1. 서론

건물의 구조가 복잡해지고 대형건물이 증가함

에 따라 히트펌프시스템 또한 점점 복잡해지고 있다. 이와 더불어 Luis 등⁽¹⁾에 따르면, 미국 내 대형건물에서의 에너지 수요 중, 히트펌프시스템과 관련된 에너지 소비량이 건물 내에서 가장 많은 비중을 차지한다고 한다. 이것은 Fig. 1을 통해 확인할 수 있다. 따라서 건물의 에너지 소비량을 줄이기 위해서는 히트펌프시스템에 대한 효과적인 운영 및 유지보수가 필요하다.

점차 복잡해지는 히트펌프시스템을 효과적으로 운영 및 유지관리하기 위해 시스템의 상태를 정확하게 모니터링하고 분석하는 것에 대한 관심이 증가하고 있다. 이를 위해서는 센서와 분석시스템이 필요하다. 아무리 고가의 센서를 설치하였더라도 분석하는 알고리즘 정립에 어려움이 많기 때

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, minskim@snu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

문에 관리자 개개인이 시스템 전반에 대한 고급 지식을 갖고 있지 않고서는 고장에 적절히 대처하기 힘들다. 때문에 히트펌프시스템의 상태를 정확하게 모니터링하기 위한 센서를 바탕으로 전문가가 분석알고리즘을 제작하여 히트펌프시스템의 작동상태를 정확하게 분석하는 FDD (Fault Detection & Diagnosis)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

히트펌프시스템에서의 FDD 연구는 비정상상태에서의 FDD 연구와 정상상태에서의 FDD 연구로 나눌 수 있다. 대다수의 히트펌프시스템에서의 FDD 연구가 정상상태에서의 FDD 연구이다. 정상상태에서의 FDD 연구는 크게 2가지 부분으로 나눌 수 있다. 하나는 전처리기에 대한 연구이고 다른 하나는 분류기에 대한 연구이다. 분류기가 FDD를 수행함에 있어 핵심적인 역할을 하므로, 대다수의 연구가 분류기에 대한 연구이다. 하지만

전처리기도 FDD를 수행함에 있어 필요한 요소이므로 이에 대한 연구도 필요하다. Kim 등⁽²⁾은 이동창기법을 바탕으로 가정용 에어컨의 정상상태 검출기에 대한 연구를 수행하였다. 즉, 이 연구에서는 분류기에서 사용될 데이터를 수집할 시점인 정상상태를 구분 짓는 알고리즘을 제시하였다. 전처리기와는 다르게 분류기에 대한 연구는 상당히 많이 진행되고 있다. FDD 알고리즘의 개발은 다양한 종류의 FDD 방법을 바탕으로 이루어진다. Zhang 등⁽³⁾은 히트펌프시스템에 대한 FDD 방법 뿐 아니라, 다양한 분야에서 사용되는 FDD 방법에 대한 분류를 제시하였다. 그 내용은 Fig. 2와 같다. 그림을 보면, 다양한 방법으로 FDD 알고리즘을 제작할 수 있음을 알 수 있다. 히트펌프시스템에서의 FDD 알고리즘 개발을 수행한 많은 연구들도 Fig. 2에 나타나 있는 다양한 방법 중 1개 또는 2개 이상의 방법을 사용하여 FDD 알고리즘을 제작하였다. Tassou 등⁽⁴⁾은 증기 압축 사이클에서 인공지능을 이용하여 FDD를 수행하였으며, Lee 등⁽⁵⁾은 베이지 분류기를 이용하여 수냉식 냉동기의 FDD방법에 대한 알고리즘을 제시하였다. Yoon 등⁽⁶⁾의 연구에서는 압축기의 전류정보를 바탕으로 가변속 시스템에서 FDD를 수행하였다. Du 등⁽⁷⁾은 공기조화기의 센서에 대한 다중고장진단에 대한 알고리즘을 패턴인식 기법 중 하나인 Fisher의 선형 판별식을 이용하여 구현하였다.

이전의 히트펌프시스템에서의 FDD에 관한 연구를 살펴보면, 대부분의 연구가 히트펌프시스템에 복수의 고장이 발생하였을 경우를 고려하지

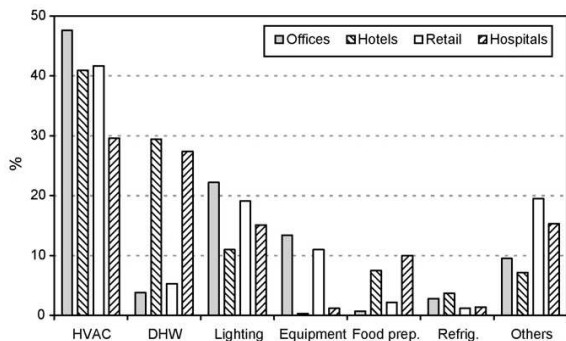


Fig. 1 Energy consumption ratio of each part for different building types⁽¹⁾

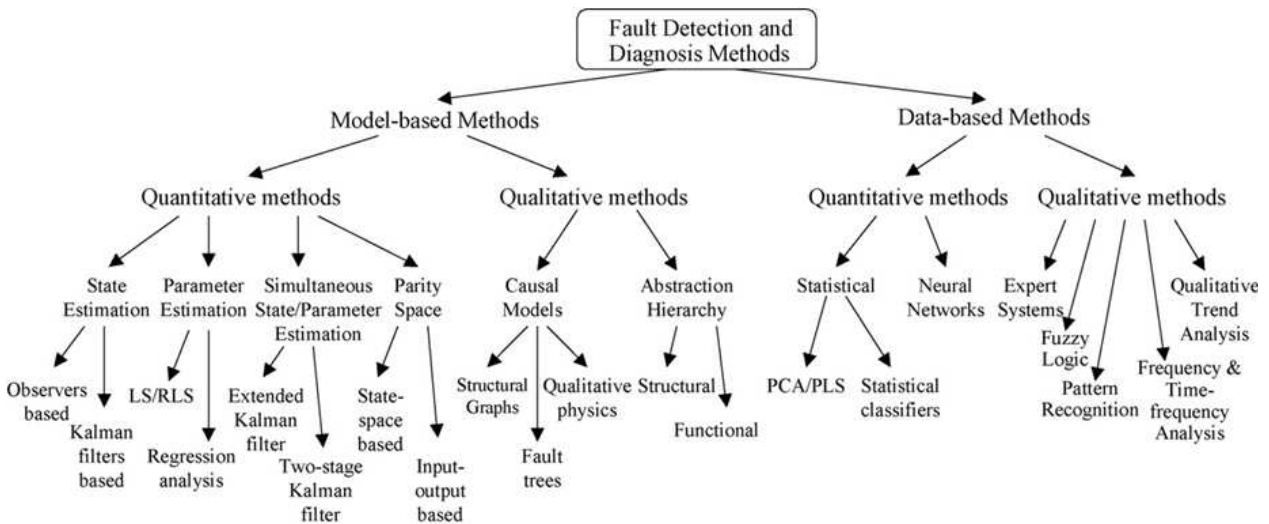


Fig. 2 Classification of FDD methods⁽³⁾

않았다. 히트펌프시스템에서 냉매누수, 열교환기 고장 등은 시간이 지남에 따라 점차 정도가 심해지는 특징을 갖고 있다. 때문에 고장이 동시에 발생할 가능성도 상당히 높은 것으로 알려져 있다. 그렇기 때문에 각 고장이 개별적으로 발생했을 경우 뿐 아니라 여러 부분에서 동시에 고장이 발생했을 경우도 고려하여 FDD 알고리즘을 제작해야 한다.

본 연구에서는 히트펌프시스템을 대상으로 시뮬레이션을 통해 FDD 알고리즘을 개발하였다. 발생할 수 있는 여러 고장인자 중, 많은 연구가 필요한 시스템의 증발기와 응축기 고장에 대한 연구를 수행하였다. 특히 이전에는 다루지지 않았던 열교환기의 다중고장에 대한 연구도 수행하였다. Fig. 2에 나타나있는 다양한 FDD 방법 중, 본 연구에서는 열교환기의 다중고장에 대해서도 고장감지 및 진단을 수행할 수 있는 회귀분석법을 이용하여 FDD 알고리즘을 제작하였다. 즉, 이번 연구에서는 증발기와 응축기의 각 부분의 냉매와 공기의 입·출구 조건을 바탕으로 회귀모델을 제작하고 이를 바탕으로 고장진단 알고리즘을 제작하였다.

2. 고장진단 알고리즘

2.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션을 수행하기 위해 몇 가지 식을 사용하여 히트펌프시스템을 모사하였다. 히트펌프시스템은 크게 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기로 구성되어 있다. 압축기와 팽창밸브의 경우 실험값을 바탕으로 한 상관식을 사용하여 모사하였다. 증발기와 응축기의 경우는 Wang 등^(8,9)이 제시한 공기 대 냉매 열교환기에서의 공기 측과 냉매 측의 열전달 계수를 계산할 수 있는 상관식을 사용하여 모사하였다. 시뮬레이션은 다양한 조건에서 수행되었는데, 실내외 온도 조건 및 압축기 주파수, 흡입공기의 풍량 등의 실험 조건은 Table 1과 같다.

2.2 고장모사

고장진단을 수행하기 위해 고장모사 시뮬레이션을 수행하였다. 고장모사 시뮬레이션 수행하기 위해 먼저 시스템의 작동모드를 결정하였다. 이번 연구에서 고려한 작동모드는 Table 2와 같다. 정상일 때를 포함하여 총 4가지 모드로 열 교환기

Table 1 Simulation conditions

Parameter	Value
Indoor temperature (°C)	13, 20, 27
Outdoor temperature (°C)	-4.5, 7, 24
IDU air flow rate (CMM)	31
ODU air flow rate (CMM)	190
Compressor frequency (Hz)	20, 43, 67, 90

Table 2 Working modes

Number	Working mode
1	No fault
2	Evaporator fault
3	Condenser fault
4	Evaporator & condenser faults

의 고장이 주 연구 대상이었다. 특히 열교환기의 경우 시간이 지남에 따라 발생하는 소프트 고장의 한 종류이므로 동시에 고장이 발생할 가능성이 높다. 때문에 동시에 고장이 발생할 경우도 고려하여 작동모드를 설정하였다. 각각의 작동모드 일 때 모두 Table 1의 조건을 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 열교환기의 고장모사의 경우 식 (1) 처럼 정상적인 열전달 계수 상관식을 통해 얻은 UA값에 0.7을 곱하여 모사하였다.

$$UA_{fault} = UA_{correlation} \times 0.7 \quad (1)$$

정상일 때의 경우에는 $UA_{correlation}$ 값을 그대로 사용하였다.

2.3 고장진단 알고리즘

고장진단 알고리즘을 개발하기 위해 본 연구에서는 비선형회귀모델을 이용하였다. Fig. 3과 같이 열교환기의 입·출구 변수를 바탕으로 식 (2), 식 (3)과 같은 상관식의 형태를 정하였다.

$$T_{sh} = f(\ln(m_{ref}^*), P_{low}, h_{in}, \ln(CMM^*), T_{air})$$

$$\Rightarrow f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = a_0 + \sum_i a_i x_i + \sum_j a_j x_j^2 \quad (2)$$

Table 3 Coefficients of each equation for heat exchangers

Evaporator				Condenser					
a1	156.1	a8	6.79×10^{-10}	a1	4.31×10^{-5}	a8	-0.0114	a15	0.0485
a2	-0.1517	a9	-8.1255	a2	-0.0014	a9	0.3688	a16	0.002
a3	-0.0003	a10	0.0005	a3	0.0939	a10	-0.4323	a17	0.0048
a4	-51.346	a11	-157.92	a4	0.0311	a11	-0.0007	a18	0.016
a5	1.3062			a5	0.0033	a12	-1.30×10^{-5}	a19	-0.0113
a6	-280.75			a6	2.23×10^{-5}	a13	-0.0005	a20	0.0017
a7	6.02×10^{-5}			a7	-0.0041	a14	0.0005	a21	1.15×10^{-5}

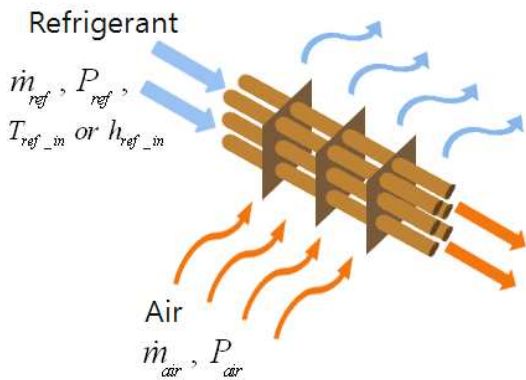


Fig. 3 Input and output variables of Heat exchanger

$$T_{sc} = g(\ln(m_{ref}^*), P_{high}, T_{in}, \ln(CMM^*), T_{air})$$

$$\Rightarrow g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = a_0 + \sum_i a_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ j \geq i}} a_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

(단, $m_{ref}^* = \frac{\dot{m}_{ref}}{1kg/s}$, $P = [kPa]$, $h = [kJ/kg]$,
 $CMM^* = \frac{CMM}{1m^3/min}$, $T = [K]$)

식 (2)와 식 (3)을 바탕으로 공기와 냉매의 다양한 입구 조건에 따른 열교환기의 성능을 예측 할 수 있다. 실제 시뮬레이션을 통해 과열도와 과냉도를 측정하고 이 측정값이 식 (2), 식 (3)을 통해 예측한 값과 비교하여 값의 차이가 많이 나면, 고장으로 판단하는 방식으로 알고리즘을 제작하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

3.1 비선형회귀모델

무고장모드에서 얻은 데이터를 바탕으로, 이 데

이터를 가장 잘 표현하는 식 (2)와 식 (3)의 최적의 계수를 구하였다. 최적의 계수를 구하기 위해서 이차 계획법이라는 알고리즘을 사용하였다. 이차 계획법 알고리즘의 형태는 식 (4)와 같다.

목적함수 : $\min_x \frac{1}{2} x^T H x + f^T x$
 제약조건 : $Ax \leq B$
 $A_{eq} x = b_{eq}$
 $lb \leq x \leq ub \quad (4)$

이 알고리즘은 1개의 목적함수와 3개의 제약조건으로 구성된다. 이 알고리즘은 주어진 제약조건을 만족하는 범위에서 목적함수에서의 H와 f행렬이 주어졌을 때, 목적함수를 최소로 하는 x행렬을 구하는 알고리즘이다. 이 알고리즘을 바탕으로 회귀모델의 계수를 구하기 위해서는 먼저 회귀모델의 식 형태를 정한다. 그 후, 정해진 식에 주어진 데이터를 대입하여 행렬 H와 f를 구하고 이 값을 이 알고리즘에 대입하여 풀면 각 식에서의 최적의 계수를 구할 수 있게 된다. 이러한 방식으로 식 (2)와 식 (3)의 최적의 계수 조합을 구하였다. 그 결과는 Table 3과 같다. 최적의 계수를 구함으로써, 다양한 운전조건에서 히트펌프의 각 열교환기의 과열도 및 과냉도의 예측이 가능한 기준모델을 완성하였다.

3.2 고장진단

각각의 작동모드에서 Table 1의 조건을 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 무고장과 증발기 고장모드에서는 총 24개의 데이터를 얻었

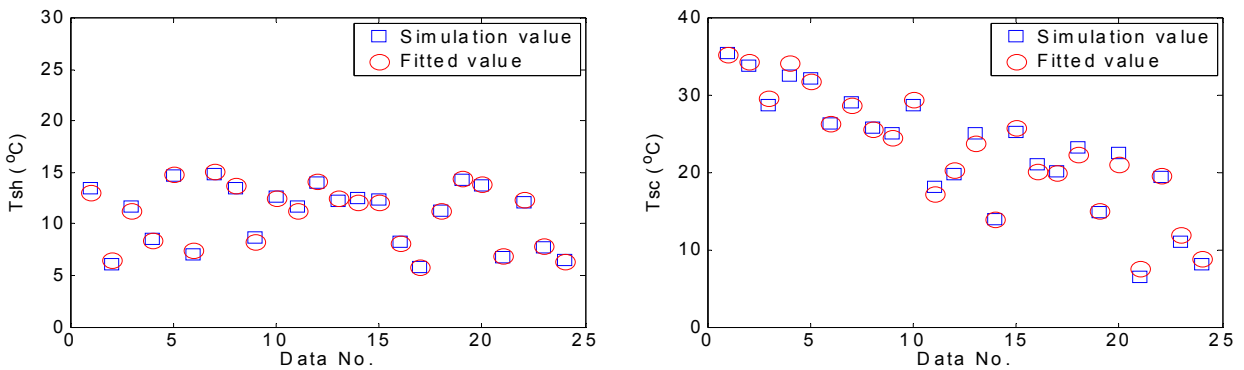


Fig. 4 Simulation and fitted value of no fault mode

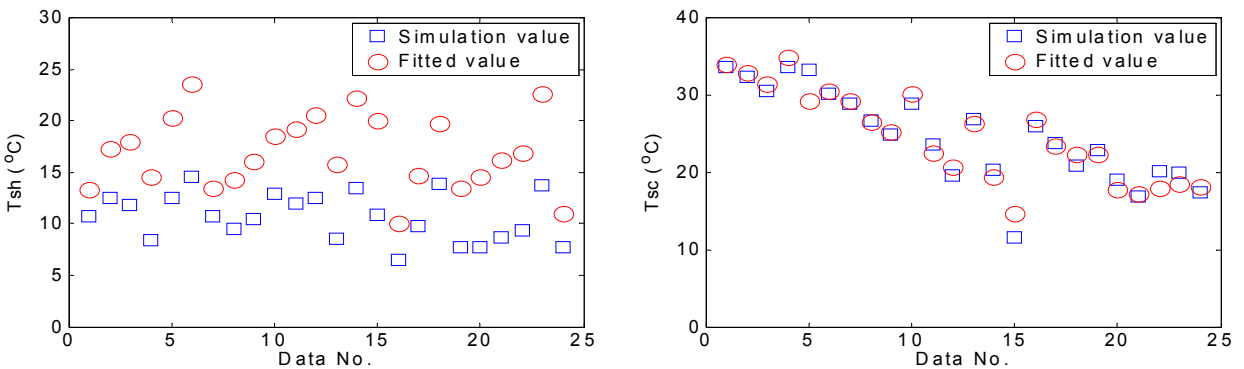


Fig. 5 Simulation and fitted value of evaporator fault mode

고, 응축기 고장과 증발기와 응축기 고장모드에서는 총 16개의 데이터를 얻을 수 있었다. 각 데이터에서 얻은 값들 중, 기준모델 (식 (2) 및 식 (3))의 입력변수에 해당하는 데이터를 기준모델에 대입하여 계산한 과열도와 과냉도 값과 실제 시뮬레이션을 통해 얻은 과열도와 과냉도 값을 비교해보았다. 그 결과는 Fig. 4 ~ Fig. 7과 같다. 여기서 기준모델을 통해 계산한 값은 Fitted value로 표현하였고 시뮬레이션을 통해 얻은 값은 Simulation value로 표현하였다. Fig. 4를 보면, 무고장모드에서는 기준모델을 바탕으로 계산을 통해 얻은 증발기에서의 과열도 값과 응축기에서의 과냉도 값이 시뮬레이션을 통해 얻은 과열도 및 과냉도 값과 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 이는 시스템에 아무런 고장이 발생하지 않았으므로 기준 모델을 통한 예측 값과 실제 시뮬레이션 값이 유사한 것으로 볼 수 있다. Fig. 5를 보면, 증발기 고장모드에서는 응축기에서의 과냉도의 경우는 기준모델을 이용하여 계산한 값과 시뮬레이션 값

이 매우 유사한 반면, 증발기에서의 과열도의 경우 기준모델을 이용하여 계산한 값과 시뮬레이션 값이 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이 이유는 열교환기에 고장이 발생했을 경우, 무고장모드일 때를 바탕으로 제작한 기준모델을 이용하여 계산되는 과열도 값에 비해 열교환기의 성능이 저하로 인해 실제 시뮬레이션을 통해 얻은 과열도 값이 작아지기 때문이다. Fig. 6을 보면, Fig. 5의 결과와 유사한 것을 볼 수 있다. 이 경우는 응축기 고장모드이기 때문에 증발기와 관련된 과열도의 경우 기준모델을 바탕으로 계산한 값과 시뮬레이션 값이 비슷한 반면, 응축기와 관련된 과냉도의 경우 시뮬레이션 값이 기준모델을 바탕으로 계산한 값에 비해 상대적으로 작은 값이 나왔다. 이는 응축기 고장으로 인해 응축기의 성능이 떨어져 무고장모드일 때를 바탕으로 제작한 기준모델을 통해 계산한 과냉도보다 실제 시뮬레이션 값이 더 낮게 나온 것이다. Fig. 7의 증발기와 응축기 고장모드를 살펴보면, 과열도와 과냉도 모두 기준모

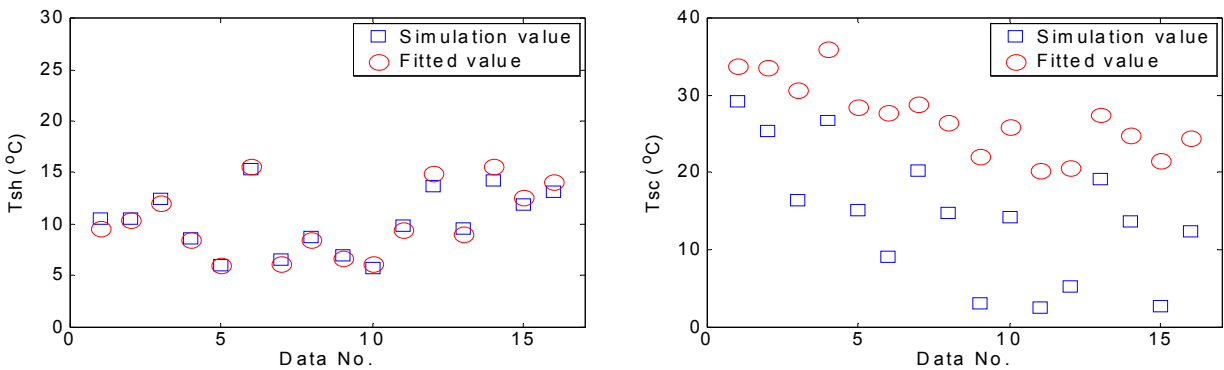


Fig. 6 Simulation and fitted value of condenser fault mode

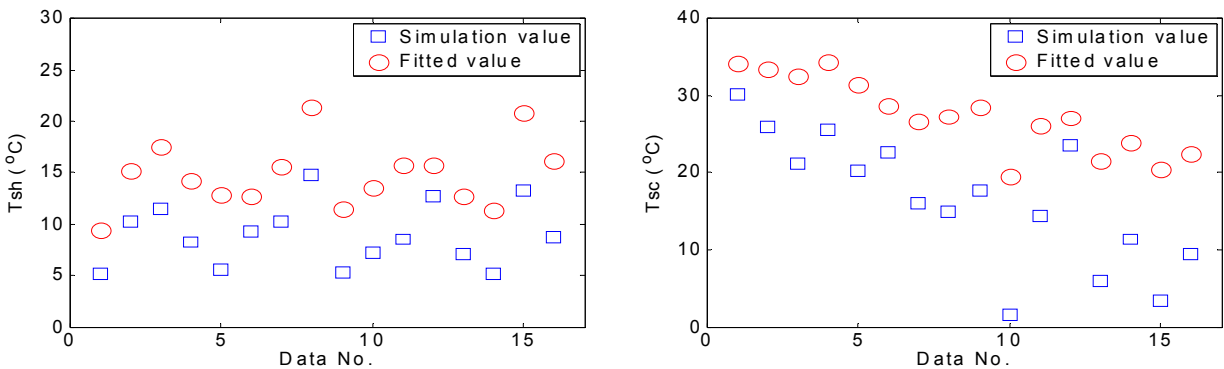


Fig. 7 Simulation and fitted value of evaporator and condenser faults mode

델을 바탕으로 계산된 값보다 시뮬레이션 값이 더 낮게 나온 것을 볼 수 있다. 이 이유는 위의 Fig. 5과 Fig. 6에 대해 설명했던 이유와 마찬가지로 응축기와 증발기 모두 고장으로 인해 기능이 떨어져 열교환이 제대로 이루어지지 않아 무고장일 때 바탕으로 제작한 기준모델을 통해 계산한 과열도, 과냉도 값보다 실제 시뮬레이션을 통해 얻은 과열도, 과냉도 값이 낮게 나온 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 비선형회귀모델을 이용하여 히트펌프시스템에 대한 고장진단에 관한 연구를 수행하였다. 히트펌프시스템을 구성하는 각 요소에 대해 개별적인 접근이 가능한 비선형회귀모델을 통해 냉매 측과 공기 측의 다양한 입구 조건에 따른 열교환기의 출구조건인 과열도 및 과냉도를 예측한 결과 상당히 정확한 예측이 가능함을 보았다.

열교환기의 출구조건 (과열도 또는 과냉도) 에

대한 예측이 가능한 회귀모델을 바탕으로, 임의의 작동조건에서의 열교환기의 출구조건 계산 값과 시뮬레이션 값과 비교함으로써 열교환기에 대한 고장 감지 및 진단이 가능함을 보았다. 또한 회귀모델을 바탕으로 열교환기에 대한 고장진단 알고리즘을 제작 할 경우, 열교환기에서 2가지 부분이 동시에 고장이 발생하였을 때에도 모든 고장에 대해 동시에 고장 감지 및 진단이 가능함을 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 WCU, 도약연구지원(구NRL)사업 그리고 BK21의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Luis, P. L., Ortiz, J. and Christine, P., 2008, "A Review on Buildings Energy Consumption Information," *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 3, pp. 394~398.

- (2) Kim, M., Yoon, S. H., Domanski, P. A. and Payne, W. V., 2008, "Design of a Steady-State Detector for Fault Detection and Diagnosis of a Residential Air Conditioner," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 31, No. 5, pp. 790~799.
- (3) Zhang, Y. and Jiang, J., 2008, "Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems," *Annual Reviews in Control*, Vol. 32, No. 2, pp. 229~252.
- (4) Tassou, S. A. and Grace, I. N., 2005, "Fault Diagnosis and Refrigerant Leak Detection in Vapour Compression Refrigeration Systems," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, No. 5, pp. 680~668.
- (5) 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. 5, pp. 508~516.
- (6) Yoon, J. S. and Jeong, S. K., 2006, "On-line FDD for a Variable Speed Refrigeration System Based on Current Information Analysis of a Compressor," *Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference*, pp. 434~439.
- (7) Du, Z. and Jin, X., 2008, "Multiple Faults Diagnosis for Sensors in Air Handling Unit Using Fisher Discriminant Analysis," *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 12, pp. 3654~3665.
- (8) Wang, C. C., Chi, K. Y. and Chang, C. J., 2000, "Heat Transfer and Friction Characteristics of Plain Fin-and-Tube Heat Exchangers, Part I: New Experimental Data," *International Journal of Heat and Mass transfer*, Vol. 43, No. 15, pp. 2681~2691.
- (9) Wang, C. C., Chi, K. Y. and Chang, C. J., 2000, "Heat Transfer and Friction Characteristic of Plain Fin-and-Tube Heat Exchangers, Part II: Correlation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 15, pp. 2693~2700.