

베이지 분류기를 이용한 수냉식 냉동기의 고장 진단 방법에 관한 실험적 연구

이 흥 주, 장 영 수^{*†}, 강 병 하^{**}

국민대학교 기계공학과 대학원, *한국과학기술연구원, **국민대학교 기계·자동차 공학부

An Experimental Study on Fault Detection and Diagnosis Method for a Water Chiller Using Bayes Classifier

Heungju Lee, Young-Soo Chang^{*†}, Byung Ha Kang^{**}

Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

^{*}Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

^{**}School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received May 30, 2008; revision received June 30, 2008)

ABSTRACT: Fault detection and diagnosis(FDD) system is beneficial in equipment management by providing the operator with tools which can help find out a failure of the system. An experimental study has been performed on fault detection and diagnosis method for a water chiller. Bayes classifier, which is one of classical pattern classifiers, is adopted in deciding whether fault occurred or not. Failure modes in this study include refrigerant leakage, decrease in mass flow rate of the chilled water and cooling water, and sensor error of the cooling water inlet temperature. It is possible to detect and diagnose faults in this study by adopting FDD algorithm using only four parameters(compressor outlet temperature, chilled water inlet temperature, cooling water outlet temperature and compressor power consumption). Refrigerant leakage failure is detected at 20% of refrigerant leakage. When mass flow rate of the chilled and cooling water decrease more than 8% or 12%, FDD algorithm can detect the faults. The deviation of temperature sensor over 0.6°C can be detected as fault.

Key words: Fault detection and diagnosis(고장검출 및 진단), Water chiller(수냉식 냉동기), Bayes classifier(베이지 분류기)

기 호 설 명

$a_0 \sim a_9$: 기준모델의 계수
 M : 평균 벡터
 P : 소비전력 [kW]
 R : 잔차

R_{comp} : 압축기의 정격 회전속도에 대한 회전속도의 비 [%]
 s : 분류에러를 최소화 하는 측정인자
 T : 온도 [°C]
 Y : 종속변수

그리스 문자

ε : 분류 오차

† Corresponding author

Tel.: +82-2-958-6746; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: yschang@kist.re.kr

- σ : 표준편차
- ω : 고장예측확률
- Σ : 공분산 행렬
- Φ : 유량

하첨자

- chw* : 냉수
- cw* : 냉각수
- comp* : 압축기
- con* : 응축기
- eva* : 증발기
- fault* : 고장 상태
- i* : 입구상태
- j* : *j*번째의 고장
- k* : *k*번째의 측정인자
- meas* : 측정값
- normal* : 무고장 상태
- esti* : 예측값

1. 서 론

생활수준의 향상에 따라 쾌적한 환경을 목적으로, 공조 시스템 분야는 지속적으로 발전을 거듭하였다. 이에 따라 건물의 설비가 더욱 복잡해졌고, 운용자가 시스템을 관리, 유지하기가 어려워졌다. 따라서 운전상황을 감시하여 공조장비의 고장을 조기에 발견하고, 고장원인을 모니터링하여 최적운전과 불필요한 에너지 소비를 방지 할 수 있는 고장검출 및 진단(FDD) 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

공조 분야에서 고장진단 시스템은 에너지 절약과 수리비용 감소 등의 장점으로 지속적으로 연구가 이루어져 왔고, 더불어 본 연구의 대상인 증기 압축시스템에 대한 연구도 함께 진행되었다. 1980년대 후반 Mckellar⁽¹⁾는 냉동기의 공통된 고장을 정의하였고, 고장에 따른 증기 압축 사이클의 영향을 조사하여 냉동기의 고장진단의 초석을 마련하였다. 그 후 고장진단에 대한 여러 가지 방법이 제안되었는데, Grimmelius et al.⁽²⁾은 약 20개의 변수를 측정하여 고장패턴의 크기에 따라 가중치를 주어 고장진단을 하였지만, 제시한 가중치를 다른 시스템에 적용하기에는 무리가 있다. Rossi and Braun⁽³⁾은 공냉식 냉동기를 대상으로 고장을 진단하였다. 기준모델을 기반으로 고장을 검출하고, 진단부분에는 규칙기반 방법(Rule based meth-

od)을 적용하였다. 국내에서도 냉동기의 고장진단에 대한 연구가 진행되었는데 Han and Ha⁽⁴⁾는 공냉식 냉동기에서 발생하는 일반적인 고장을 모사하여 고장검출 및 진단에 퍼지 및 신경망 알고리즘을 적용하였다. Kim and Kim⁽⁵⁾은 가변속 수냉식 냉동 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 고장 시에 발생하는 시스템 변화를 분석하고, 패턴인식을 통해 고장진단에 사용하는 측정점을 제시하였으나, 고장을 검출하고 판단하는 기준이 불분명하다. 많은 연구에서 고장검출 및 진단에 대한 연구가 진행되었지만, 적용 대상이 공냉식 냉동기가 대부분이고, 센서고장에 대한 실험적 연구가 부족하였다.

본 연구에서는 쉘-튜브 방식의 열교환기를 사용한 수냉식 냉동기를 대상으로 고장검출 및 진단 알고리즘을 적용하였으며, 알고리즘에는 여러 대상에 적용이 용이하며, 비교적 간단한 베이지스 분류기를 사용하였다.^(3, 6) 센서고장과 수냉식 냉동기에 발생 가능한 고장을 검출하고 진단하기 위한 측정점을 결정하기 위하여, 측정인자의 수를 바꿔가며 알고리즘에 적용하였다.

2. 고장검출 및 진단 알고리즘

2.1 고장검출 및 진단의 개요

고장검출 및 진단 알고리즘은 다음과 같은 순서로 이루어진다. 알고리즘에 사용되는 데이터들은 정상상태 처리기를 통하여 얻어진다. 수냉식 냉동시스템의 주요 제어점인 압축기 정격 회전속도에 대한 비, 냉수 출구온도, 냉각수 입구온도에 따라 시스템의 상태가 결정되기 때문에, 기준모델

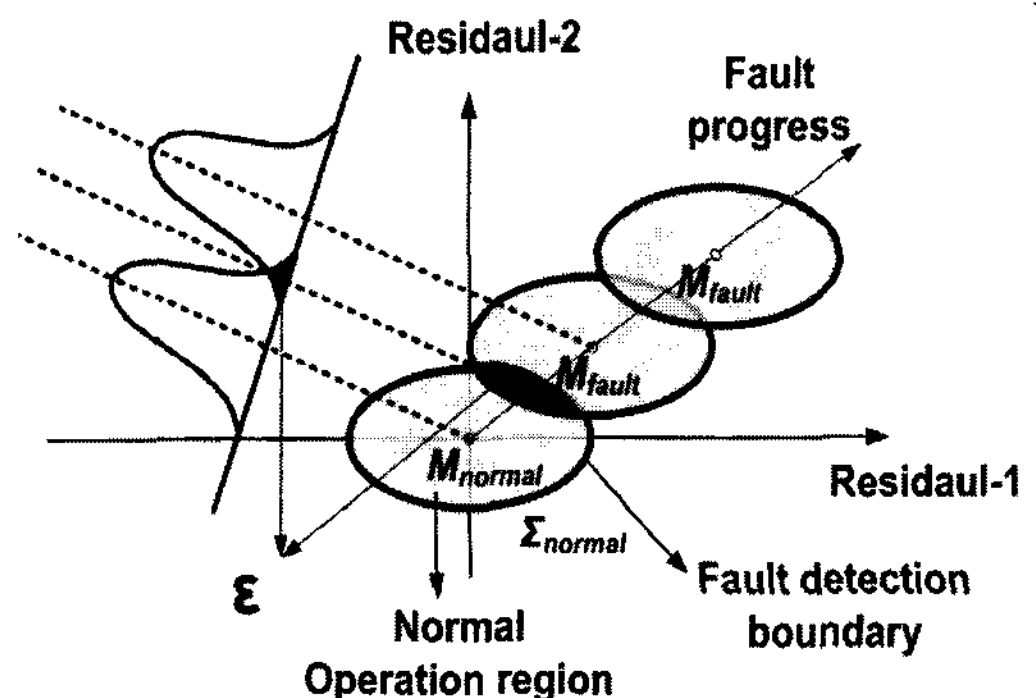


Fig. 1 2-dimensional residual distribution.

의 독립변수(Input)로 이용된다. 무고장 정상상태 실험을 통하여 3가지 독립변수의 작동 조건을 변화시켜, 이에 따라 변화하는 종속변수(Output)들의 값으로 무고장의 기준모델을 만든다. 기준모델이 만들어지면, 고장검출 및 진단 알고리즘은 현재 운전상태가 고장인지 아닌지를 판단하는 과정을 수행한다. 먼저 현재 운전 상태에서 측정된 독립변수의 값을 기준모델에 적용하여 종속변수들의 예측값을 계산한다. 기준모델을 통하여 얻어진 종속변수의 예측값과 실제 측정값의 차인 잔차를 계산한다. 잔차를 이용하여 고장검출 분류기에서 현재 상태가 고장인지 아닌지를 판별하고, 만일 고장이 검출되면 고장진단 분류기에서 고장이 발생한 원인을 찾아낸다.

2.2 무고장 상태의 기준모델

수냉식 냉동시스템의 제어점인 3가지 독립변수(Input)는 냉수 출구온도($T_{chw.o}$), 냉각수 입구온도($T_{cw.i}$), 압축기의 정격 회전속도에 대한 비(R_{comp})이다. 3가지 독립변수에 대하여, 1차 또는 3차식을 적용할 수 있지만, 1차식은 기준모델을 통한 예측값의 편차가 크고, 3차식은 정확하지만 많은 계수를 요구한다. 본 연구에서는 무고장 상태의 기준모델에 2차 다항식을 이용하였고, 식(1)에 나타내었다. 기준모델에 의해 계산되는 종속변수(Output)는 Table 1에 나타내었다.

$$Y = a_0 + a_1 T_{chw.o} + a_2 T_{cw.i} + a_3 R_{comp} + a_4 T_{chw.o} T_{cw.i} + a_5 T_{cw.i} R_{comp} + a_6 R_{comp} T_{chw.o} + a_7 T_{chw.o}^2 + a_8 T_{cw.i}^2 + a_9 R_{comp}^2 \quad (1)$$

2.3 고장검출 분류기

고장검출 분류기는 대상 시스템이 고장인지 아닌

지를 결정하는 분류기이다. Fig. 1에 측정인자의 변수가 2차원일 때, 분류기의 모습을 도식적으로 나타내었다. 타원모양의 잔차의 분포는 가우스 분포(Gaussian distribution)를 따른다고 가정하였다. 타원안의 점은 동일한 집합이라고 생각할 수 있다. 고장이 진행되면서 고장 잔차 분포는 무고장 상태의 잔차분포와 멀어지는 것을 볼 수 있다. 두 잔차분포의 교차 면적을 분류오차(Classification error)라고 하며, 분류오차의 값이 작을수록 무고장 상태와 고장상태가 확실히 분류됨을 의미한다. 따라서 고장검출 분류기는 분류오차가 정해진 값보다 작으면 고장이라 검출한다. Fukunaga⁽⁶⁾는 최적선형분류기(Optimal linear classifier)를 사용하여 가우시안 분포에 대한 분류오차 관계식을 식(2)와 같이 나타내었다.

$$\epsilon = s \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{-v_0}{\sqrt{2\Sigma}}\right) + (1-s) \operatorname{erfc}\left(\frac{V^T R + v_0}{\sqrt{2\Sigma}}\right) \quad (2)$$

여기서 ϵ 은 분류오차이며, Σ 는 공분산 행렬, s 는 분류에러를 최소화하는 인자, R 은 잔차를 의미한다.

2.4 고장진단 분류기

고장진단 분류기란 고장발생 원인을 진단하는 분류기이다. 고장이 진행됨에 따라 잔차는 고유의 방향성을 가지고 변화한다. Table 1은 수냉식 냉동기에서 발생할 수 있는 몇 가지 고장들에 대해 고장진단을 할 수 있도록 고장 진행에 따른 잔차의 변화 방향성을 나타낸 것이다. Rossi and Braun⁽³⁾이 제안한 식(3)은 현재 발생된 고장이 j 번째 고장원인에 의한 잔차의 진행 방향과 유사할 확률을 나타낸 식이며, 각 측정인자(k)에 해당하는 예측확률들의 곱으로 표현된다.

Table 1 Rules for diagnostic classifier

	Tcon.o	Teva.o	Tcomp.o	Tchw.i	Tcw.o	Tcon	Pcomp	Teva
FM1	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓
FM2	↑	○	○	↑	↑	↑	↑	↑
FM3	↑	○	↑	○	↑	↑	↑	↑
FM4	↑	↓	↑	↓	↑	↑	○	○
FM5	↓	↓	↓	↑	↓	↓	○	↓

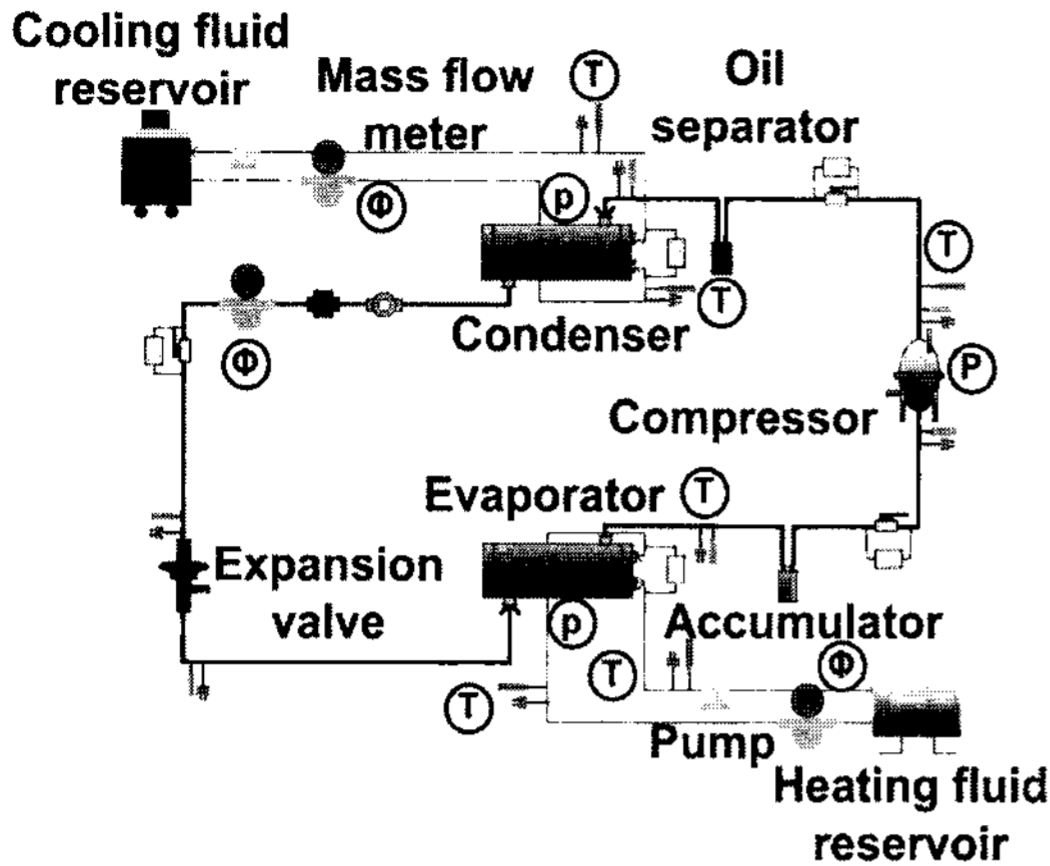


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system.

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

여기서, w_j 는 j 고장의 확률(Class probabilities), $R(k)$ 은 잔차, Σ 는 공분산 행렬을 의미한다. Table 1에서 j 고장의 k 번째 측정인자의 잔차 방향이 증가하는 경우(\uparrow) C_{jk} 는 1이고, 감소하는 경우(\downarrow) -1, 잔차의 방향을 예측하기 어려운 경우(\circ)에는 0이다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

냉동기의 고장검출 및 진단을 위해서 본 실험에서 사용한 수냉식 냉동시스템을 Fig. 2에 나타내었다. 압축기는 정격용량 1.25HP인 3상 밀폐형 왕복동식으로서, 냉매는 R-22를 사용하였다. 증발기와 응축기는 쉘-튜브 방식의 열교환기이다. 압축기의 회전속도와 증발기와 응축기에서의 냉수, 냉각수의 유량을 조절하기 위하여, 각각 인버터를 설치하여 압축기와 펌프의 회전수를 변화시켜 제어하였다. 팽창장치로는 외부 균압관의 정온식 팽창밸브를 설치하였다.

고장을 검출하고 진단하기 위해 시스템 각 부분의 상태량을 측정하기 위한 센서를 부착하였다. 온도센서는 정밀도 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 인 T형 열전대를 관 내부에 삽입하였다. 압력센서를 사용하여 응축기와 증

Table 2 Operating conditions for no-fault test

Parameters	Values
Cooling water mass flow rate [kg/min]	9.08
Chilled water mass flow rate [kg/min]	7.15
Compressor rotation speed ratio to nominal rotation speed [%]	40/60/80/100
Chilled water outlet temperature, [$^\circ\text{C}$]	5/7/9
Cooling water inlet temperature, [$^\circ\text{C}$]	27/29.5/32/34.5
Refrigerant charge [kg]	5

발기의 포화압력을 측정하였으며, 측정된 응축기와 증발기의 포화압력은 포화온도로 환산하여 사용하였다. 물과 냉매의 유량측정에 정확도 $\pm 0.1\%$ 인 코리올리스(Coriolis) 형식의 질량 유량계를 사용하였다. 전력계를 설치하여 압축기에서 소비된 전력을 측정하였다.

3.2 무고장 실험

본 연구에서 무고장 기준모델에 사용할 3가지 독립변수를 Table 2에서 나타낸 조건으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 정상상태에서 20분 동안 5초 간격으로 데이터를 취득하였다.

3.3 고장 실험

본 연구에서 모사된 고장은 냉매 누출, 냉각수, 냉수 순환유량 감소, 냉각수 입구온도 센서 고장을 포함한 총 5가지 종류이다. 센서의 고장은 냉동기의 주요 제어점인 냉각수 입구온도 센서가 고장이 발생하였다고 가정하였다. 냉각수 입구 온도가 실제 온도보다 높거나 낮게 측정되면 냉동 시스템의 운전에 영향을 미치게 된다. 각 고장에 대한 원인, 고장모사 방법, 고장정도에 관한 내용은 Table 3에 정리하였다. 고장 실험은 기준 모델의 실험 조건에서, 압축기 회전속도의 비 100%, 냉수 출구온도 7°C , 냉각수 입구온도 32°C 에서 무고장 상태에서부터 고장 레벨 6까지 수행하였다.

Table 3 Operating conditions for fault tests

Fault Mode		Cause	Implementation	Fault Level
Refrigerant leak	FM1	Refrigerant leak over a long period	Removal of refrigerant	4/8/12/16/20/24 (%)
Decrease in mass flow rate of the chilled water	FM2	Block in strainer, decline in pump performance	Decrease in mass flow rate of the chilled water	2/4/6/8/10/12 (%)
Decrease in mass flow rate of the cooling water	FM3		Decrease in mass flow rate of the cooling water	2/4/6/8/10/12 (%)
Sensor fault of the cooling water inlet temperature (low temperature)	FM4	Sensor error	Increase in inlet temperature of the cooling water	32.2/32.4/32.6/32.8 /33/33.2 (°C)
Sensor fault of the cooling water outlet temperature (high temperature)	FM5		Decrease in inlet temperature of the cooling water	31.8/31.6/31.4/31.2 /31/30.8 (°C)

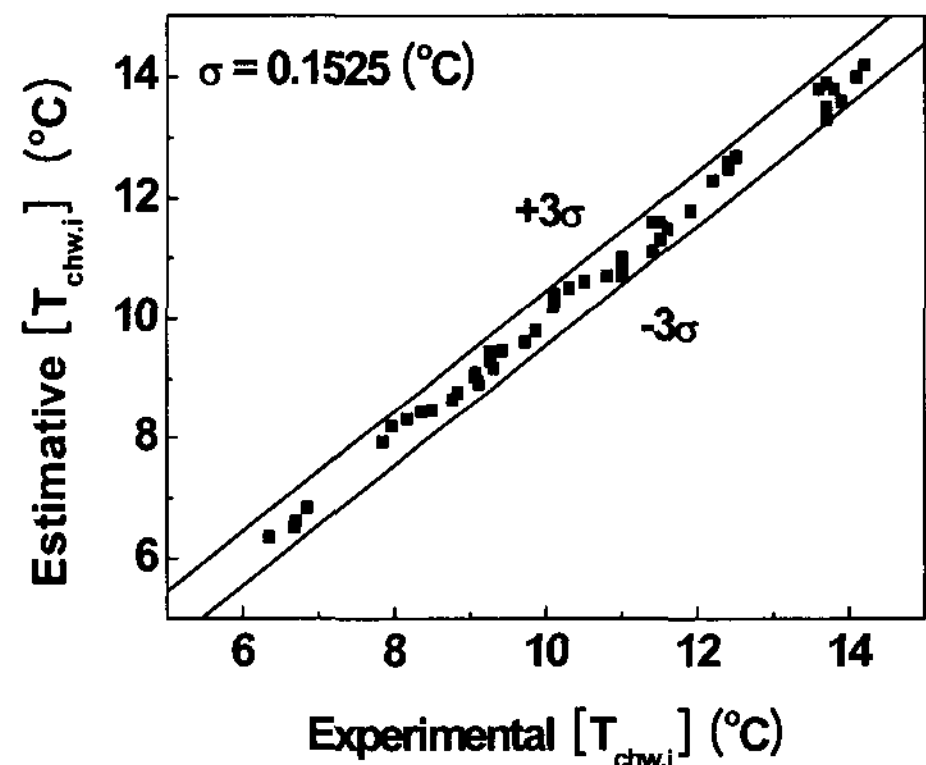
4. 실험 결과 및 고찰

4.1 무고장 실험

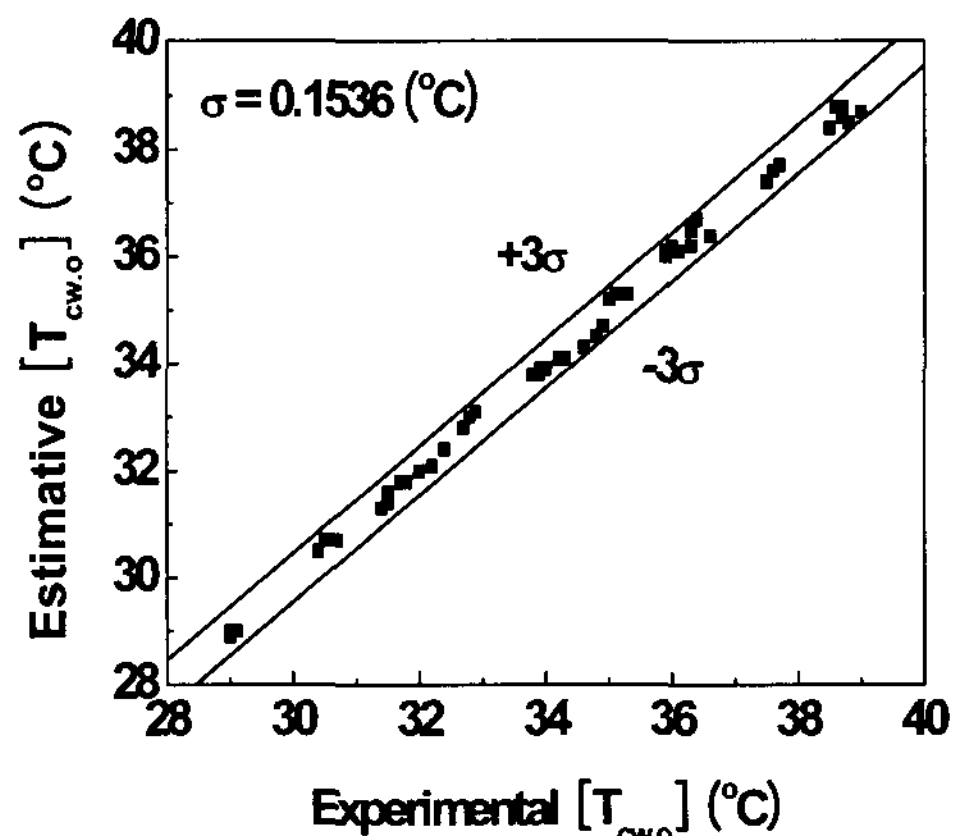
기준모델의 오차와 측정 오차로 인해 무고장 실험결과도 잔차값이 존재한다. 따라서 무고장 잔차도 통계적인 분포를 가진다. 잔차가 가우시안 분포를 따른다고 가정할 때, 표준편차(σ)의 값이 작을수록 기준모델이 측정인자의 무고장 상태값을 정확하게 예측한다고 할 수 있다. Fig. 3의 (a), (b)는 냉수 입구온도와 냉각수 출구온도의 무고장 기준모델로부터 구해진 예측값과 실험 측정값을 비교한 그림이다. 모든 분포가 표준편차의 3배 안으로 분포하므로, 기준모델이 비교적 정확하게 현재 측정값을 예측한다는 것을 알 수 있었다. Table 4에 무고장 상태 실험을 통해 얻은 종속변수의 표준 편차를 나타내었다. Fig. 4에 무고장 정상상태 데이터들의 분류오차의 분포를 나타내었다. 본 연구에서는 분류오차 값이 0.001보다 작을 때, 고장으로 분류하였다. 무고장 정상상태 데이터의 분류오차는 그보다 큰 영역인 0.01안에 분포하였다.

Table 4 Overview for standard deviations of reference model

Parameter	$T_{con.o}$	$T_{eva.o}$	$T_{com.o}$	$T_{chw.i}$
σ	0.5809	0.2940	1.3204	0.1525
Parameter	$T_{cw.o}$	T_{con}	P_{comp}	T_{eva}
σ	0.1536	0.2335	0.0111	0.8266



(a) Chilled water inlet temperature



(b) Cooling water outlet temperature

Fig.3 Scatter plot of two parameters.

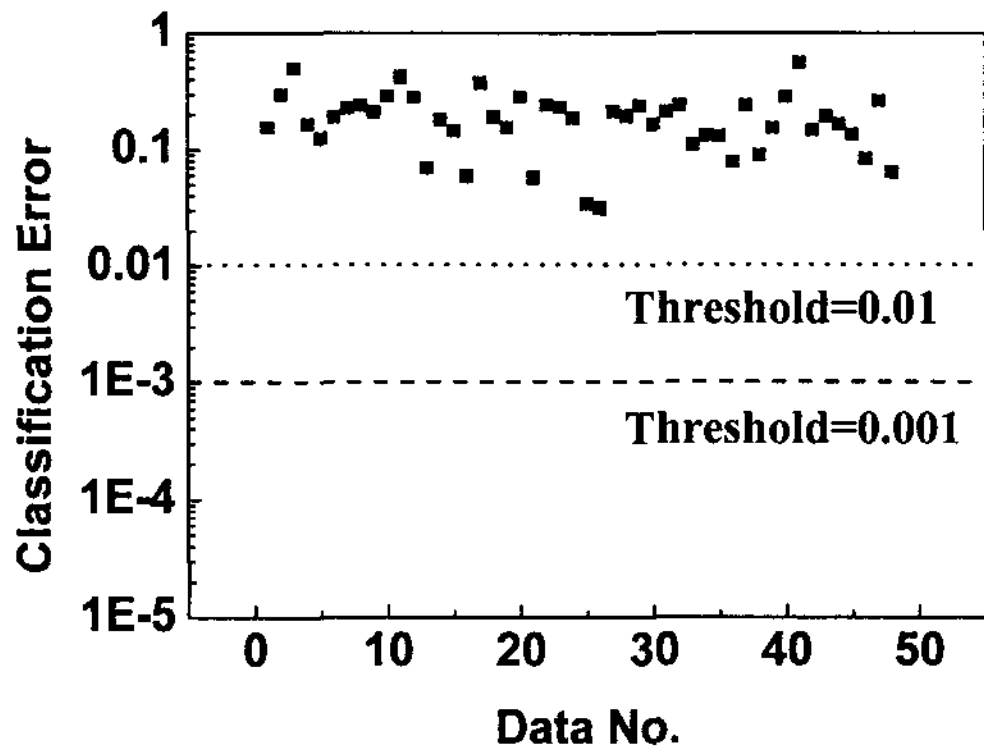
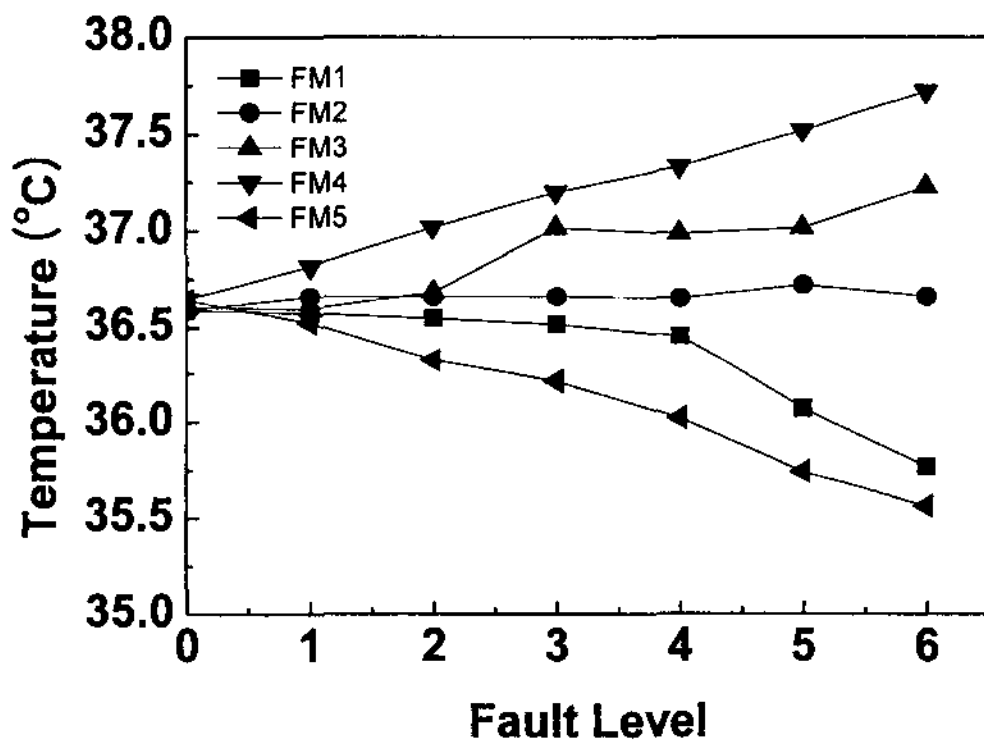
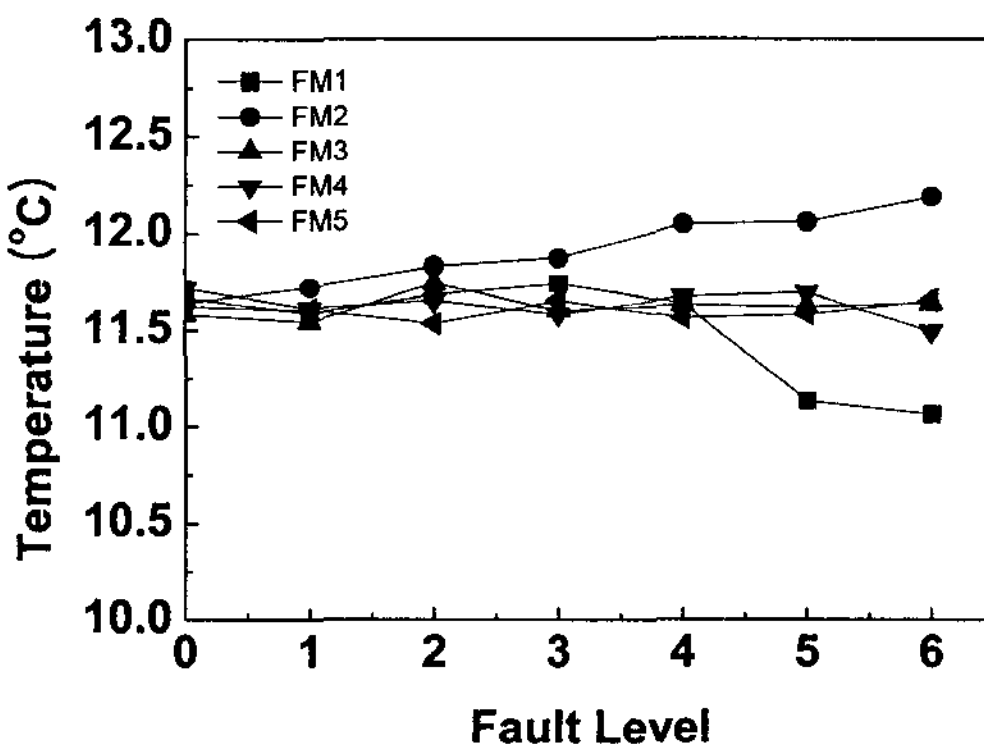


Fig. 4 Scatter plot of classification error for the steady state.



(a) Cooling water outlet temperature

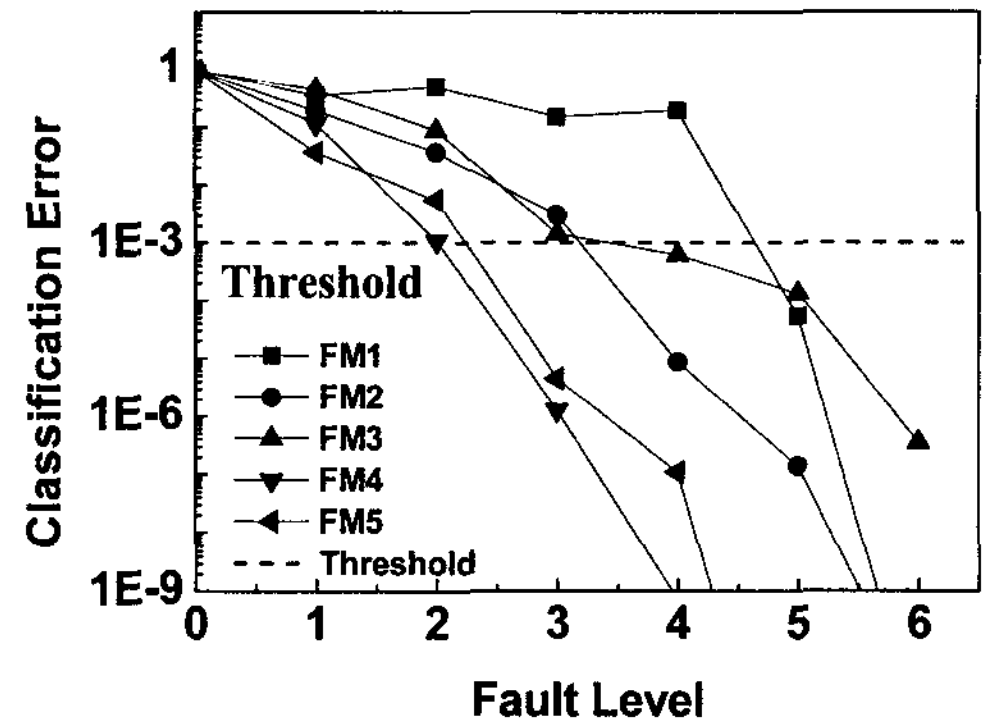


(b) Chilled water inlet temperature

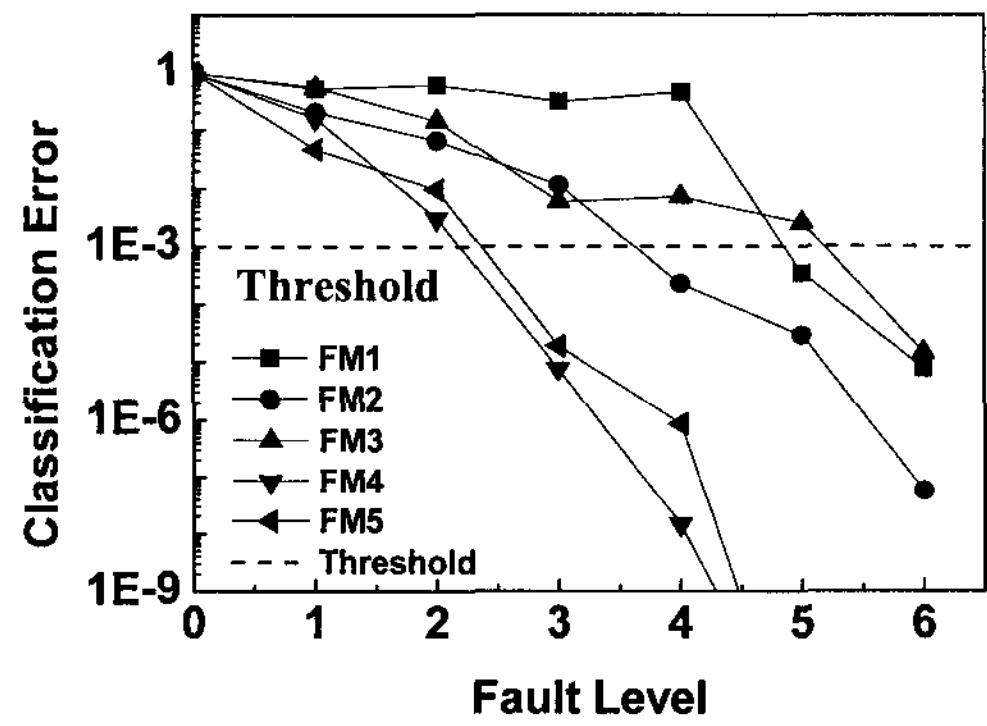
Fig. 5 Effect of fault level on parameters for various fault modes.

4.2 고장모사 실험

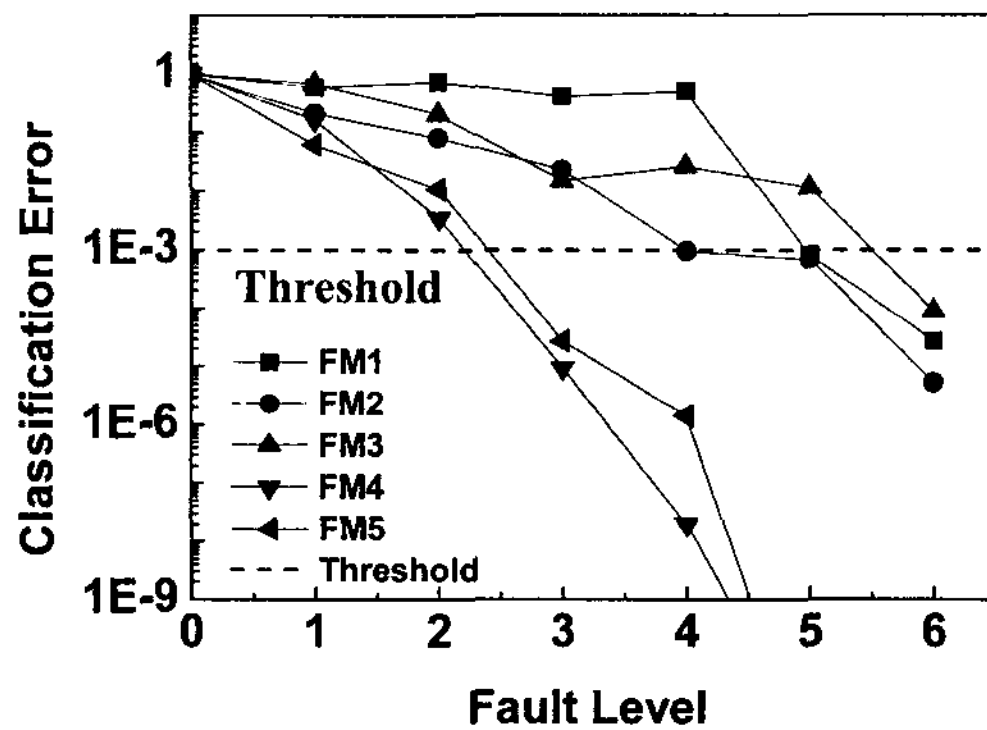
Fig. 5의 (a)와 (b)는 고장을 모사하였을 때, 고



(a) 8 parameters



(b) 6 parameters



(c) 4 parameters

Fig. 6 Classification error for various fault modes.

장 진행에 따른 냉각수 출구, 냉수 입구온도의 상태변화를 나타낸 그림이다. 냉각수 출구온도는 센서고장이 발생하였을 때 가장 변화의 폭이 컸으며, 냉수 입구온도의 경우 냉매 누출과 냉각수 유량감소 고장에 민감하게 반응하였다. 이 밖에 다른 고장에 대해서도 가장 민감하게 반응하는

측정인자들이 각각 존재한다. 측정인자들의 변화로 인하여 발생하는 잔차의 패턴을 Table 1에 나타내었다. 화살표(↑)는 잔차가 증가, 화살표(↓)는 감소, 원(O)은 잔차의 방향을 예측하기 어려운 3가지 경우로 표현하였다.

4.3 고장검출 결과

Fig. 6의 (a), (b), (c)는 고장진단에 사용한 측정인자의 수를 변화시킨 경우, 고장이 진행함에 따른 각 고장들의 분류오차 값을 나타내었다. 사용된 측정인자의 종류는 Table 5에 나타내었다. Fig. 6에서 무고장 상태에서의 분류오차 값은 1에 가까운 값이지만 고장이 진행될수록 급격히 감소하여 0으로 근접한다. 사용된 측정인자가 감소하면서 분류오차 값은 동일한 고장정도에서 약간 증가하였지만, 4개의 측정인자를 사용한 경우에도 모두 고장검출의 경계선인 0.001보다 작은 영역에서 고장을 검출할 수 있었다. Fig. 7에 고장을 검출하였을 때 고장정도를 나타내었다. 냉수 유량의 경우, 무고장 상태의 적정 유량보다 8% 감소하였을 때 고장이 검출되었고, 냉각수 입구 온도 센서의 고장은 측정오차가 0.6 °C를 초과하는

Table 5 Parameters used in each case

Case	Parameters
Case1	$T_{con.o}, T_{eva.o}, T_{comp.o}, T_{chw.i}, T_{cw.o}, T_{con}, P_{comp}, T_{eva}$
Case2	$T_{comp.o}, T_{chw.i}, T_{cw.o}, T_{con}, P_{comp}, T_{eva}$
Case3	$T_{comp.o}, T_{chw.i}, T_{cw.o}, P_{comp}$

Table 6 Fault detection and diagnosis results for refrigerant leak

Fault Level(%)	Classification error	Diagnosis	Class probabilities				
			FM1	FM2	FM3	FM4	FM5
0	9.87E-01		0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
4	5.91E-01		0.09	0.03	0.05	0.08	0.04
8	7.20E-01		0.09	0.04	0.04	0.04	0.08
12	4.09E-01		0.07	0.04	0.03	0.03	0.11
16	5.00E-01		0.20	0.01	0.01	0.03	0.08
20	7.99E-04	Leak	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00
24	2.71E-05	Leak	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00

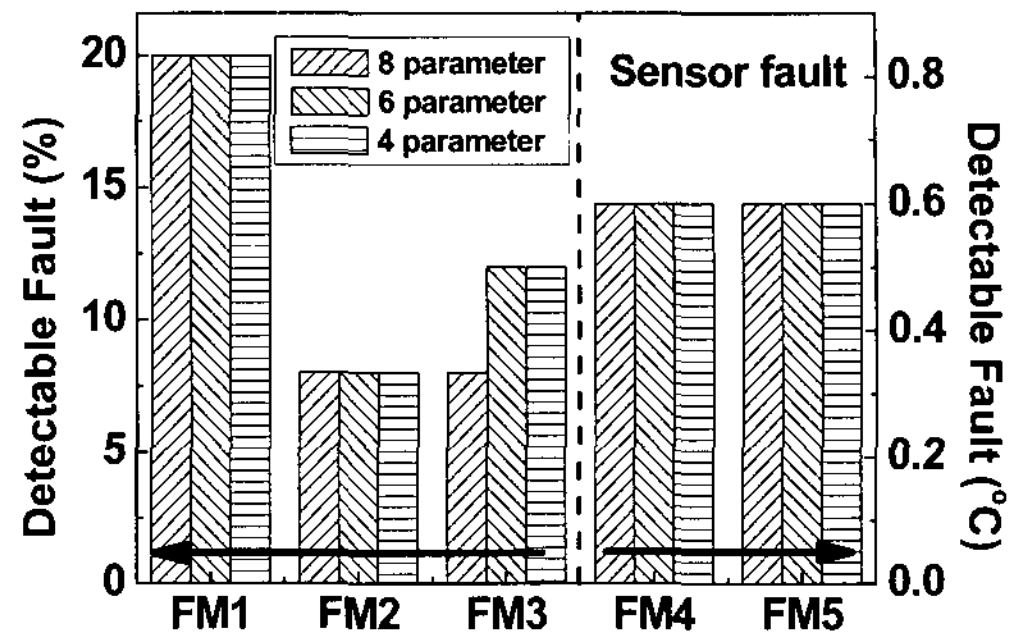


Fig. 7 Detectable level of faults.

경우 고장이 검출되었다. 8개의 측정인자를 사용했을 경우, 냉각수 유량은 8% 감소하였을 때 고장이 검출되었지만, 6개, 4개를 사용했을 경우, 12% 감소되어야 고장이 검출되었다. 이것은 고장 검출에 사용된 측정인자 중 응축기 출구온도, 증발기 출구온도의 유무의 차이이다. 나머지 고장의 경우에는 모두 같은 수준에서 고장이 검출되었다.

4.4 고장진단 결과

Table 6에 4개의 측정인자를 사용한 경우 냉매 누출의 증가에 대한 고장검출 및 진단의 결과를 나타내었다. Table 6에서 냉매는 20% 누출되었을 때 고장이 검출되었고, 고장수준이 증가하면서 냉매 누출의 고장예측확률 값은 0.99값을 가져 명확하게 구분되었다. Table 7에는 5가지 고장에 대하여 고장이 검출될 때의 고장진단 결과를 비교하였다. 4가지 측정인자를 사용한 경우에도 고장이 분류됨을 볼 수 있다. 냉각수 유량 감소와 냉각수 입구 온도센서가 실제온도보다 낮게 측정되는 고장에서는 다른 고장에 비해, 고장예

Table 7 Fault diagnosis results for detectable level of applicable faults

Fault Mode	Detectable Level	Classification error	Diagnosis	Class probabilities				
				FM1	FM2	FM3	FM4	FM5
FM1	20%	7.99E-04	FM1	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00
FM2	8%	6.88E-04	FM2	0.00	0.21	0.11	0.00	0.11
FM3	12%	8.80E-05	FM3	0.00	0.21	0.34	0.20	0.00
FM4	-0.6℃	9.31E-06	FM4	0.00	0.10	0.17	0.20	0.00
FM5	+0.6℃	2.70E-05	FM5	0.03	0.00	0.00	0.00	0.17

측확률 값이 비슷하였다. 이는 Table 1에서 볼 수 있듯이, 고장에 따른 측정인자들에 대한 고장패턴 경향이 유사함에 따른 결과이다.

4.5 고장에 따른 시스템 성능감소

Fig. 8에는 냉매의 누설, 냉각수 유량 감소, 온도센서의 고장 시 시스템의 성능계수의 변화를 나타내었다. 냉매는 적정 충전량의 20% 누출되었을 때 고장이 검출되었고, 이 때 성능계수는 약 6.7% 감소하였다. 냉각수 유량은 12% 감소하였을 때, 센서의 고장은 측정오차가 0.6℃를 초과하는 경우 각각 고장이 검출되었고, 이때 성능계수는 각각 1.2%, 1.7%로 감소하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 수냉식 냉동기의 고장 모사 실험을 통하여 베이지스 분류기를 사용한 고장검출 및 진단 알고리즘의 성능을 검증하였다.

(1) 본 연구의 베이지스 분류기를 적용한 알고리즘

을 이용하여 고장모사 실험의 결과로부터 고장을 검출하고 그 원인을 진단할 수 있었다.

(2) 본 연구에서 모사한 수냉식 냉동기의 고장에서, 제안한 최소 4가지의 측정인자(압축기 출구온도, 냉수입구온도, 냉각수 출구온도, 압축기 소비전력)를 사용하여 고장검출 및 진단이 가능하였다.

(3) 4가지 측정인자를 사용한 경우, 냉수와 냉각수는 유량이 각각 8%, 12% 감소하였을 때 고장이 검출되었고, 냉매는 적정 충전량의 20%가 누출되었을 때 고장이 검출되었고 성능계수는 6.7%로 감소하였다. 센서고장의 경우에는 측정오차가 0.6℃를 초과하는 경우 고장이 검출되었다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행하는 2006년도 에너지 자원 기술개발사업(2006-E-BD11-P-03)으로 이루어졌으며, 이에 감사하는 바입니다.

참고문헌

1. McKellar, M. G., 1987, Failure diagnosis for a household refrigerators, MS thesis, Purdue University, Indiana, USA.
2. Grimmeliuss, H. T., Would, J. K. and Been, G., 1995, On-line failure diagnosis for compression refrigeration plants, Int. J. of Refrigeration, Vol. 18, No. 1, pp. 31-41.
3. Rossi, T. M. and Braun, J. E., 1997, A statistical, rule-based fault detection and diagnostic method for vapor compression air conditioners, HVAC&R Research, Vol. 3, No. 1, pp. 19-37.
4. Han, D. and Ha, S., 2000, A study on the fault

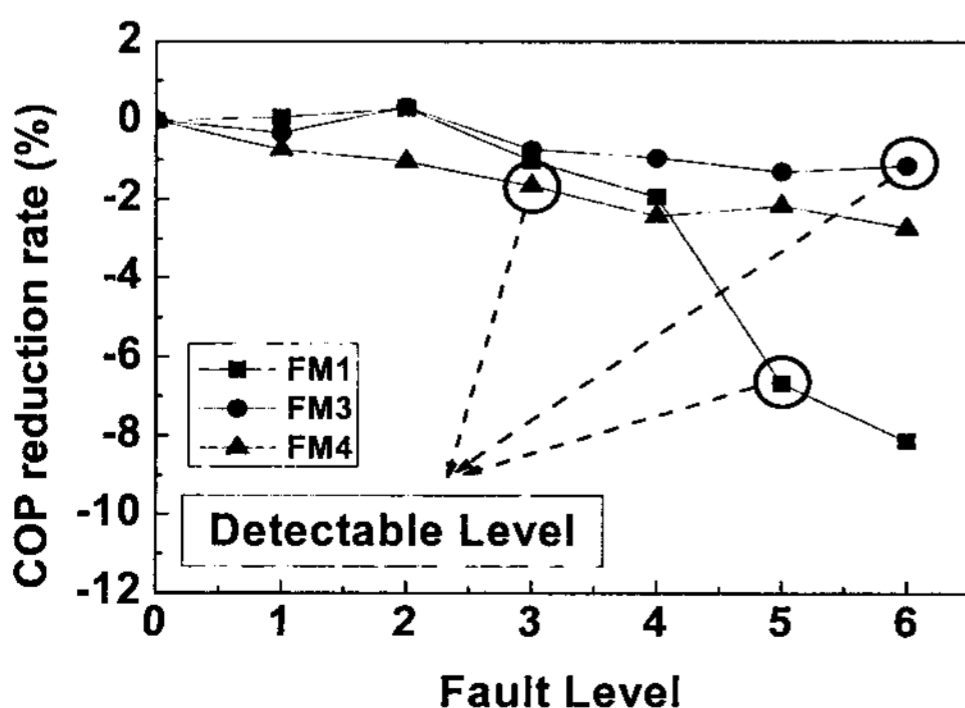


Fig. 8 The comparison of COP reduction rate for various fault modes.

- detection and diagnosis method for the air conditioner, Proceedings of the SAREK 2000 Summer Annual Conference, pp. 1408-1412.
5. Kim, M. and Kim, M., 2005, Studies on the performance variation of a variable speed vapor compression under fault and its detection and diagnosis, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 47-55.
 6. Fukunaga, K., 1990, Introduction to statistical pattern recognition, 2th ed., Academic Press, San Diego, pp. 131-141.