

베이지스 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

Heung Ju Lee, Young-Soo Chang^{*†} and Byung Ha Kang^{**}

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. FDD algorithm can detect refrigerant leak failure, when 20% amount of charged refrigerant for normal operation leaks from the water chiller. The refrigerant leak failure caused COP reduction by 6.7% compared with normal operation performance. When two kinds of faults, such as a decrease in the mass flow rate of cooling water and temperature sensor fault of cooling water inlet, are detected, COP is a little decreased by these faults.

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

1. 서 론

생활수준의 향상에 따른 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 최적인전과 불필요한 에너지 소비를 방지할 수 있는 고장 검출 및 진단(FDD) 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

80년대 후반 Mckellar는 냉동기의 공통된 고장을 정의하였고, 고장에 따른 증기 압축 사이클의 영향을 조사하여 냉동기의 고장진단의 초석을 마련하였다.⁽¹⁾ 그 후 고장진단에 대한 여러 가지 방법이 제안되었는데, Grimmeliu et al.은 약 20개의 다양한 변수를 측정하여 고장패턴의 크기에 따라 가중치를 주어 고장 진단을 하였지만, 다른 시스템에 제시한 가중치를 적용하기에는 무리가 있다.⁽²⁾ Rossi and Braun은 공냉식 냉동기를 대상으로 고장을 진단하였다. 기준모델을 기반으로 고장을 검출하고, 진단 부분에는 규칙 기반방법(Rule-based method)을 적용하였다.⁽³⁾ 국내에서도 냉동기의 FDD 연구가 진행 되었는데 Han and Ha는 공냉식 냉동기에서 발생하는 일반적인 고장을 모사하여 고장 검출과 진단에 퍼지 및 신경

[†] Corresponding author

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

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

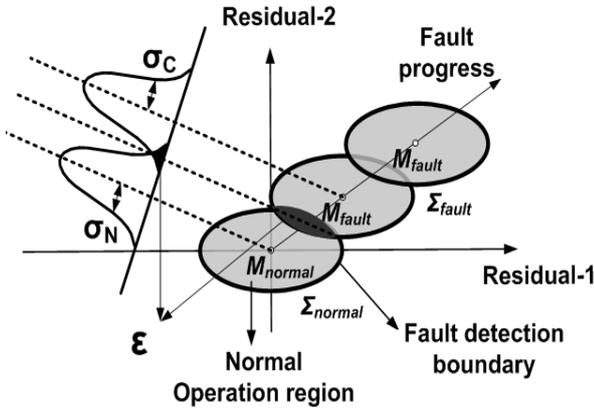


Fig. 1 2-dimensional residual distribution.

망 알고리즘을 적용하였다.⁽⁴⁾ Kim and Kim은 가변속 수냉식 냉동 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 고장 시 발생하는 시스템 영향을 분석하고, 패턴 인식을 통해 고장진단에 사용하는 측정점을 제시하였으나, 고장을 검출하고 판단하는 기준이 불분명하였다.⁽⁵⁾ 많은 연구에서 FDD에 대한 연구가 진행되었지만 적용 대상이 공냉식 냉동기가 대부분이다. 또한 고장 대상이 일반적인 고장에 치중되었고, 센서고장에 대한 실험적 연구가 부족하였다.

본 연구에서는 헬-튜브 방식의 열교환기를 사용한 수냉식 냉동기를 대상으로 고장 검출 및 진단을 실행하였다. 고장 검출 및 진단을 위한 측정점을 결정하기 위하여, 알고리즘에 사용되는 측정인자의 수를 바꿔가며 고장 검출 및 진단을 실행하였고, 고장에 따른 시스템의 성능변화를 분석하였다. 고장 검출 및 진단 알고리즘에는 여러 대상에 적용이 수월하며 고장 검출 및 진단이 비교적 간단한 베이스 분류기를 사용하였다.^{(3),(6)}

2. 고장 검출 및 진단 알고리즘

2.1 고장 검출 및 진단의 개요

FDD알고리즘은 다음과 같은 순으로 이루어진다. 알고리즘에 사용되는 데이터들은 정상상태 처리를 통하여 얻어진다. 수냉식 냉동시스템의 주요 제어점인, 냉수 출구온도, 냉각수 입구온도, 압축기 정격 회전속도에 대한 비를 독립변수로서 하여 무고장 상태의 기준모델을 만든다. 기준모델이 만들어지면, FDD알고리즘은 현재 운전상태가 고장인지 아닌지를 판단하는 과정을 수행한다. 먼저 현재 운전상태에서 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 검출 되면 고장진단 분류기에서 고장이 발생한 원인을 찾아낸다.

2.2 무고장 상태의 기준모델

수냉식 냉동시스템의 3가지 독립변수, 냉수 출구온도($T_{chw.o}$), 냉각수 입구온도($T_{cw.i}$), 압축기 회전속도에 대한 비(R_{comp})에 대한 무고장 상태의 기준모델을 식 (1)과 같이 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 고장 검출 분류기

고장 검출 분류기는 대상 시스템이 고장인지 아닌지를 결정하는 분류기이다. Fig. 1에서 고장이 진행되면서 고장 잔차분포는 무고장 상태의 잔차분포와 멀어지는 것을 볼 수 있다. 두 잔차

Table 1 Rules for diagnostic classifier

Fault	$T_{con.o}$	$T_{eva.o}$	$T_{comp.o}$	$T_{chw.i}$	$T_{cw.o}$	T_{con}	P_{comp}	T_{eva}
FM1	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓
FM2	↑	○	○	↑	↑	↑	↑	↑
FM3	↑	○	↑	○	↑	↑	↑	↑
FM4	↑	↓	↑	↓	↑	↑	○	○
FM5	↓	↓	↓	↑	↓	↓	○	↓

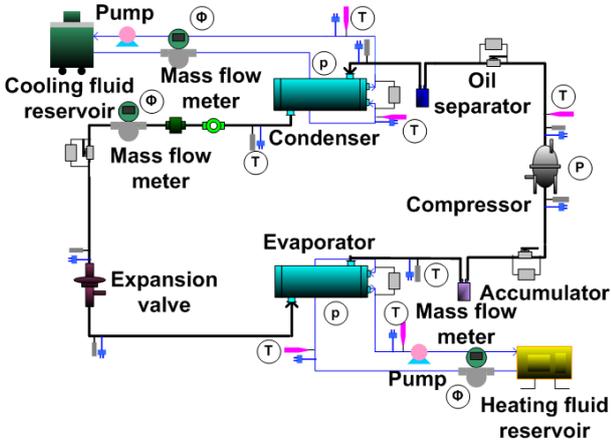


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system.

분포의 교차 면적을 분류오차(Classification error)라고 하며, 분류 오차의 값이 작을수록 무고장 상태와 고장상태가 확실히 분류됨을 의미한다. 따라서 고장 검출 분류기는 분류오차가 정해진 값 보다 작으면 고장이라 검출한다. Fukunaga는 최적선형분류기(Optimal linear classifier)를 사용하여 가우시안 분포에 대한 분류 오차 관계식을 식 (2)과 같이 나타내었다.⁽⁶⁾

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

여기서, ϵ 은 분류오차(Classification error)이며, σ 는 표준편차, s 는 분류에러를 최소화하는 인자, R 은 잔차를 의미한다.

2.4 고장 진단 분류기

고장 진단 분류기란 고장발생 원인을 진단하는 분류기이다. 고장이 진행됨에 따라 잔차는 고유의 방향성을 가지고 변화한다. Table 1은 수냉식 냉동기에서 발생할 수 있는 몇가지 고장들에 대해 고장진단을 할 수 있도록 고장 진행에 따른 잔차의 변화 방향성을 나타낸 것이다. Rossi and Braun⁽³⁾이 제안한 식 (3)는 현재 발생된 고장이 j 번째 고장원인에 의한 잔차의 진행 방향과 유사할 확률을 나타낸 식이다.

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

여기서, w_j 값은 고장 예측확률(Class probabilities), $R(k)$ 은 잔차, Σ 는 공분산 행렬을 의미한다. C_{jk} 는 Table 1에서 j 번째의 고장의 k 의 측정인자와, 잔차의 방향이 같을 때 +1의 값이 주어지고, 다를 경우 -1이 주어진다. 그리고 잔차의 변화가 없을 경우 k 번째 항에 1을 주어 고장 확률에 영향을 받지 않도록 하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

냉동기의 고장검출 및 진단 실험을 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 대향류 열교환기이다. 압축기의 회전속도와 증발기와 응축기에서의 냉수, 냉각수의 유량을 조절하기 위하여 각각 인버터를 설치하여 압축기와 펌프의 회전수를 변화시켜 제어하였다. 팽창장치로는 외부 균압관식 팽창밸브를 설치하였다.

온도센서는 정밀도 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 인 T-type 열전대를 관 내부에 삽입하였다. 압력센서를 사용하여 응축기와 증발기의 포화 압력을 측정하였다. 측정된 응축기와 증발기의 포화압력은 포화온도로 환산하여 사용하였다. 물과 냉매의 유량측정에 정확도 $\pm 0.1\%$ 인 코리올리스(Coriolis) 형식의 질량유량계를 사용하였다. 전력계를 설치하여 압축기에서 소비된 전력을 측정하였다.

3.2 무고장 실험

냉동시스템의 주요 제어점인 냉각수 입구온도, 냉수 출구온도, 압축기 회전수에 따라 시스템이 결정되기 때문에, 무고장 정상상태의 기준모델을 만들기 위하여 독립변수로 사용된다. 독립변수를 Table 2에서 나타낸 조건으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 정상상태 실험은 20분 동안 5초 간격으로 데이터를 취득하였다.

3.3 고장 실험

고장실험에 관한 내용은 Table 3에 정리하였

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, [°C]	5/7/9
Cooling water inlet temperature, [°C]	27/29.5/32/34.5
Charged refrigerant [kg]	5

다. 고장 실험은 기준 모델의 실험 조건에서 압축기 회전속도의 비 100%, 냉수출구 온도 7°C, 냉각수 입구온도 32°C에서 무고장 상태에서부터 고장 레벨 6까지 수행하였다.

4. 실험 결과 및 검토

4.1 무고장 실험

기준모델의 오차와 측정오차로 인해 무고장 실험결과도 잔차값이 존재한다. 따라서 무고장 잔차도 확률통계적인 분포를 가진다. 잔차의 가우시안 분포를 가정할 때 표준 편차의 값이 작을수록 기준모델이 측정인자의 무고장 상태 값을 정확하게 예측한다고 할 수 있다. Fig. 3에 냉각수 출구온도에 대하여 무고장 기준모델로부터 구해진 예측값과 무고장 실험 측정값을 비교 하였다.

Table 4 Overview for standard deviation reference model

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

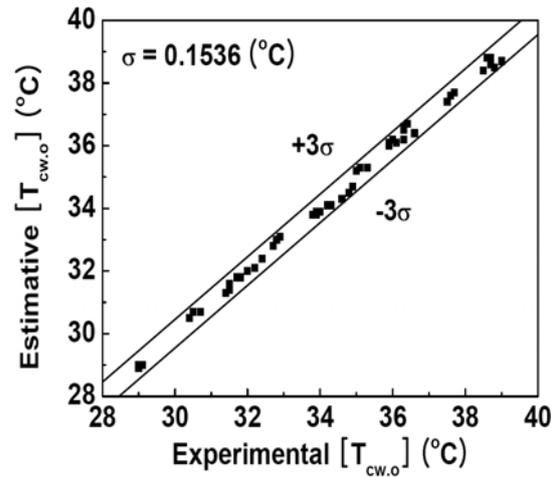


Fig. 3 Scatter plot of the cooling water outlet temperature.

모든 분포가 표준편차의 3배 안으로 분포하므로 기준모델이 비교적 정확하게 현재 측정값을 예측한다는 것을 알 수 있었다. Table 4에 무고장 상태 실험을 통해 얻은 데이터를 기준모델에 적용시켜구한 종속변수의 표준 편차(σ)를 나타내었다.

4.2 고장모사 실험

Fig. 4는 고장을 모사하였을 때, 고장수준에 따

Table 3 Operating conditions for fault tests

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

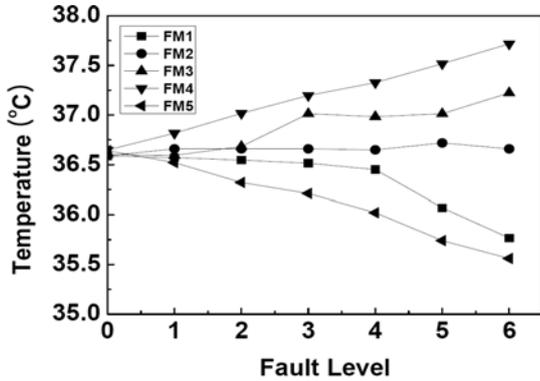


Fig. 4 Effect of fault level on the cooling water outlet temperatures of various.

큰 냉각수 출구온도의 상태변화를 나타낸 그림이다. 냉각수 출구온도는 센서고장이 발생하였을 때 가장 변화의 폭이 컸다. 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(○)은 잔차의 방향이 일정하지 않거나 변화가 없는 3가지 경우로 표현하였다.

4.3 고장 검출 결과

Fig. 5는 4개의 측정인자를 사용한 경우, 고장이 진행함에 따른 각 고장들의 분류오차 값을 나타내었다. 사용된 측정인자는 Table 5에 나타내었다. 4개의 측정인자를 사용한 경우에도 모두 고장검출의 경계선인 0.001보다 작은 영역에서 고장을 검출할 수 있었다. Fig. 6은 고장을 검출하였을 때 고장정도를 나타낸 그림이다. 냉수 유량감소 고장의 경우 고장이 6% 진행되었을 때, 고장이 검출되었고, 냉각수 입구센서 고장은 측정오차가 0.6°C를 초과하여 고장이 검출 되었다.

4.4 고장 진단 결과

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	$T_{comp,o}, T_{chw,i}, T_{cw,o}, P_{comp}$

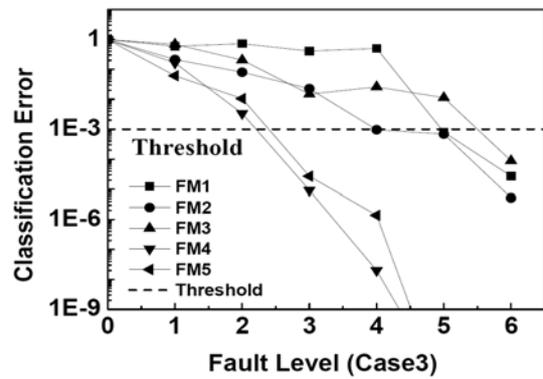


Fig. 5 Classification error for various fault modes.

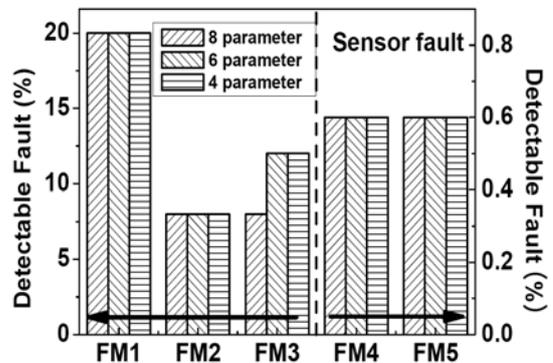


Fig. 6 Detectable level of faults.

Table 6에 5가지 고장에 대하여 고장이 처음 검출될 때의 진단 결과를 비교하였다. 고장 예측 확률(Class probabilities)이 클수록, 고장이 발생

Table 6 Fault detection and diagnosis for 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	0.60	0.27	0.00	0.15
FM3	12%	8.80E-05	FM3	0.00	0.43	0.68	0.40	0.00
FM4	-0.6°C	9.31E-06	FM4	0.00	0.20	0.34	0.41	0.00
FM5	+0.6°C	2.70E-05	FM5	0.03	0.00	0.00	0.00	0.34

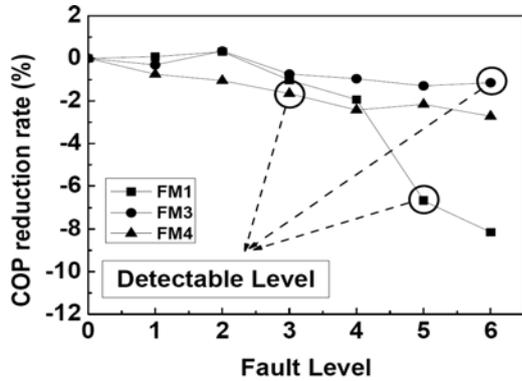


Fig. 7 The comparison of COP reduction rate for various fault modes.

했을 확률이 높아 고장으로 진단됨을 의미한다. 4가지 측정인자를 사용한 경우에도 고장이 분류됨을 볼 수 있다. 하지만 냉각수 유량감소와 냉각수 입구 온도센서의 고장 중 측정 온도가 실제 온도보다 낮은 두 고장에서는 다른 고장에 비해, 고장 예측확률 값이 비슷하였다. 이는 Table 1에서 볼 수 있듯이, 고장에 따른 측정인자들에 대한 고장패턴 경향이 유사함에 따른 결과이다.

4.5. 고장에 따른 시스템 성능감소

Fig. 7에는 냉매의 누출, 냉각수 유량감소, 온도 센서의 고장시 시스템의 성능 계수(COP)의 변화를 나타내었다. 냉매의 누출 고장 시에는 20% 고장 수준에서 고장이 검출되었고, 이 때 성능계수의 감소는 약 6.7% 이었다. 냉각수 유량감소, 센서의 고장 중 측정온도가 실제온도보다 낮은 고장에 대해서 12%, 0.6℃ 고장 수준에서 각 고장이 감지하였으나, 냉매 누출에 비해 성능계수는 많이 감소하지 않음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 수냉식 냉동기의 고장 모사 실험을 통하여 베이스 분류기를 사용한 FDD알고리즘이 고장을 검출하고 진단하는지를 검증하였다.

(1) 본 연구에서 적용한 고장의 경우, 제안한 최소 4가지의 측정인자(압축기 출구온도, 냉수입구온도, 냉각수 출구온도, 압축기 소비전력)를 사용하여도 고장 검출 및 진단이 가능하였다.

(2) 냉수의 유량이 감소하는 경우, 가장 작은 고장수준인 6%일 때 고장이 검출되었고, 냉매의

누출고장의 경우 고장률 20%에서 검출되었다. 센서고장의 경우에는 측정오차가 0.6℃를 초과하는 경우 고장이 검출되었다.

(3) 냉매 누출 고장의 경우, 고장 검출 시에 성능계수 감소율이 6.7%로 가장 커 고장 검출에 대한 민감도를 높여야 함을 알 수 있었다. 냉각수 유량감소, 센서고장 중 측정온도가 실제온도보다 낮을 때에는 고장검출 시점에서 성능계수의 감소는 크지 않았다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행하는 2006년도 에너지 자원 기술개발사업(2006-E-BD11-P-03) 으 로 이뤄 졌으며, 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 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.