

## 고장모사 시뮬레이션을 이용한 터보냉동기의 고장검출 및 진단 알고리즘 개발

한 동 원, 장 영 수<sup>\*†</sup>

고려대학교 기계공학과 대학원, \*한국과학기술연구원

### Development of a Fault Detection and Diagnosis Algorithm Using Fault Mode Simulation for a Centrifugal Chiller

Dong Won Han, Young-Soo Chang<sup>\*†</sup>

*Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

*\*Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea*

(Received May 19, 2008; revision received September 4, 2008)

**ABSTRACT:** When operating a complex facility, 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. In this research, FDD algorithm was developed using the general pattern classifier method that can be applied to centrifugal chiller system. The simulation model for a centrifugal chiller system was developed in order to obtain characteristic data of turbo chiller system under normal and faulty operation. We tested FDD algorithm of a centrifugal chiller using data from simulation model at full load performance and 60% part load performance. In this research, we presented fault detection method using a normalized distance. Sensitivity analysis of fault detection was carried out with respect to fault progress. FDD algorithm developed in this study was found to indicate each failure modes accurately.

**Key words:** Fault detection and diagnosis(고장검출 및 진단), Centrifugal chiller(터보냉동기), Normalized distance method(표준화 거리 기법), Classifier(분류기)

#### 기 호 설 명

<hr style="border: 0.5px solid black; margin-bottom: 5px;"/> <p><math>A</math> : 전열면적 [<math>m^2</math>]  <math>c_p</math> : 정압비열 [<math>J/kg \cdot K</math>]  <math>C_{jk}</math> : 잔차의 방향성에 대한 상수 [-]  <math>D</math> : 직경 [<math>m</math>]  <math>d_X</math> : 표준화 거리 [-]  <math>FF</math> : 관내직경에 대한 파울링 두께의 비  <math>h</math> : 열전달계수 [<math>W/m^2 \cdot K</math>]</p> <hr style="border: 0.5px solid black; margin-top: 5px;"/>	<p><math>i</math> : 엔탈피 [<math>J/kg</math>]  <math>k</math> : 열전도율 [<math>W/m \cdot K</math>]  <math>L_{tu}</math> : 튜브 길이 [<math>m</math>]  <math>\dot{m}</math> : 질량유량 [<math>kg/s</math>]  <math>N_{tu}</math> : 튜브 갯수 [-]  <math>n</math> : 폴리트로픽 지수 [-]  <math>p</math> : 압력 [<math>pa</math>]  <math>\dot{Q}</math> : 열전달률 [<math>W</math>]  <math>R</math> : 잔차 [-]  <math>T</math> : 온도 [<math>^{\circ}C</math>]  <math>v</math> : 비체적 [<math>m^3/kg</math>]  <math>W</math> : 압축일 [<math>W</math>]</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-958-6746; fax: +82-2-958-6709

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

## 그리스 문자

$\varepsilon$	: 유용도
$\eta$	: 효율
$\Sigma_N$	: 무고장 기준모델의 공분산행렬

## 하첨자

<i>chw</i>	: 냉수
<i>cw</i>	: 냉각수
<i>cond</i>	: 응축기
<i>evap</i>	: 증발기
<i>f</i>	: 파울링
<i>i</i>	: 내측
<i>in</i>	: 입구측
<i>o</i>	: 외측
<i>out</i>	: 출구측
<i>p</i>	: 폴리트로픽 과정
<i>sat</i>	: 포화상태
<i>tu</i>	: 관측

## 1. 서 론

건물의 공조설비 시스템이 자동화, 복잡화, 대형화되면서, 열원 및 공조 설비의 에너지 소비량은 기기 성능의 유지보수 정도와 제어방식에 따라 많은 차이를 보인다. 특히 터보냉동기는 전체 공조설비 에너지 소비량 중 많은 비중을 차지하고 있으며 기타 유지보수 비용도 큰 부분을 차지하고 있다.

전체 공조설비가 부적절하게, 또는 성능이 열화된 상태로 지속적인 운전을 할 경우, 전체 건물의 공조설비 시스템의 연간 에너지 사용량이 증가하므로, 이를 적절한 시기에 파악할 수 있는 에너지 진단 방법이 필요하다.<sup>(1)</sup>

공조설비에서 발생하는 고장은 갑작스런 고장(Hard failure)과 점차적인 고장(Soft failure)으로 분류할 수 있다.<sup>(2)</sup> 갑작스런 고장은 압축기 고장이나 전기적 고장과 같이 시스템의 기능이 정지하는 고장을 말한다. 이러한 종류의 고장은 전기적 릴레이나 알람을 통해서 쉽게 고장을 검출하고 진단할 수 있다. 반면, 냉매누설이나 열교환기의 파울링과 같은 점차적인 고장은 검출하거나 진단하기 어려우며, 이로 인해 에너지 손실이 증가하고 결국 시스템의 손상까지 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 점차적인 고장에 대한 고

장검출 및 진단 시스템 개발에 초점을 맞추었다.

고장진단은 1990년대 부터 공조설비를 대상으로 진행 되어왔다. 특히 공기조화기(Air handling unit)에 대한 연구를 중심으로 진행되어 왔으며, 증기 압축시스템에 대한 연구는 최근에 들어서 시작되었다고 볼 수 있다. 국내에서 몇몇 대학과 연구소에서 소형 냉동시스템과 공기조화기의 고장검출 및 진단기법 개발을 위한 이론적, 실험적 연구가 수행되고 있다.<sup>(3)</sup>

Grimmelius, Woud and Been<sup>(4)</sup>과 Rossi and Braun<sup>(5)</sup>은 왕복동식 압축냉동 시스템에서 통계적인 자료처리 기법을 이용한 고장검출 및 진단방법을 제시하였으며, 고장진단기법에 고장패턴을 이용한 규칙기반(Rule-based)방식을 적용하였다.

일반적으로 증기압축 시스템의 고장진단 시스템에 대한 연구는 대상 기기에 고장이 발생하였을 때의 자료를 기반으로 신경망이론이나 퍼지기법 등을 사용하여 주로 이루어졌다.<sup>(6,7)</sup> 그러나 이러한 방법들은 고장에 대한 많은 자료수집이 선행되어야 하기 때문에 실제 현장에 설치되어 작동 중인 상태로 있거나, 고장에 대한 자료를 얻을 수 없는 경우에는 실용적이지 못하다. 또한 공조설비에서 많은 에너지를 소비하고 있는 터보냉동기에 대한 실용적인 고장검출 및 진단 기술에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 터보냉동기를 대상으로 현장에 적용하여 실용화가 용이한 표준화 거리 기법(Normalized distance method)과 규칙기반법을 이용하여 고장검출 및 진단할 수 있도록 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션 모델을 이용하여 고장검출 및 진단 알고리즘의 성능을 분석하였다.

## 2. 터보냉동기 고장검출 및 진단 알고리즘

## 2.1 고장 검출 및 진단 알고리즘

본 연구에서 개발한 고장검출 및 진단 알고리즘은 Fig. 1과 같이 크게 5가지 단계로 구성되어 있다. 첫째, 터보냉동기가 무고장 상태(No fault state)에서 운전될 때, 터보냉동기로부터 측정인자들의 측정값을 입력 받고, 둘째, 정상상태 판별기(Steady-state detector)를 이용해 고장검출 및 진단에 사용가능한 정상상태인지를 판단하고, 셋째, 무고장 정상상태의 측정값을 이용해서 무고장 기

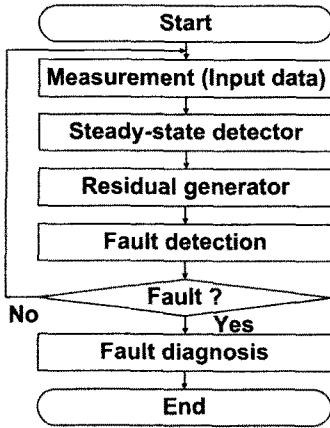


Fig. 1 FDD algorithm flow chart.

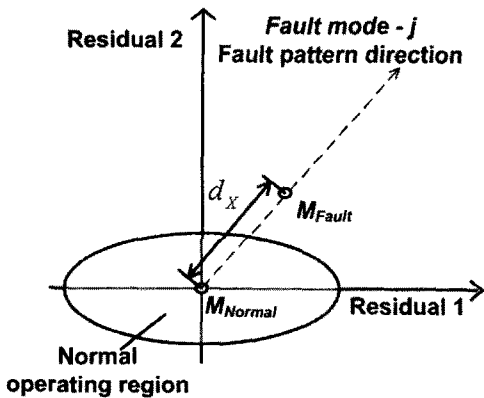


Fig. 2 Normalized distance method for 2-Dimensional case.

준모델(Reference model)을 만들어 현재 측정값과 무고장 기준모델의 값의 차이인 잔차(Residual)를 계산하고, 넷째, 잔차가 어느 허용범위를 벗어나게 되면 고장으로 간주한다. 마지막으로 고장패턴을 이용하여 고장의 원인을 진단하는 순서로 구성되어 있다.

### 2.2 고장 검출 기법

본 연구에서는 표준화 거리 기법(Normalized distance method)을 사용하여 고장을 검출하였다. 여기서, 표준화 거리 기법이란 Fig. 2에서 나타난 것과 같이 무고장 기준모델의 값과 관측 값이 일정거리 이상 떨어져 있으면 고장이라고 진단 내리는 방법이다.

즉, 고장이 발생하여 진행되면 측정인자가 기준 모델 값으로부터 벗어나게 된다. 이것을 이용하여 기준모델 인자값과 현재의 인자값 사이의 표준화 거리를 계산하고, 미리 정해진 표준화 거리를 벗어나게 되면 고장으로 판단하는 기법이다. 표준화 거리는 식(1)과 같이 계산한다.

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

여기서,  $d_X$ 는 표준화 거리이고  $R$ 은 잔차이다. 그리고  $\Sigma_N$ 는 무고장 기준모델의 공분산행렬이다.

### 2.3 고장 진단 기법

어떠한 고장이 발생하면 각 측정점의 잔차는 고장의 원인에 따라 고유한 방향으로 이동하게 된다. 만약 Fig. 2와 같이 고장의 진행방향이 결정되면 이를 이용해 고장원인을 진단할 수 있다. 본 연구에서는 Rossi and Braun<sup>(6)</sup>이 제안한 식(2)를 사용하여 고장원인을 진단하였다.

식(2)는 현재 발생된 고장이  $j$ 번째 고장원인에 의한 잔차의 진행방향과 유사할 확률을 계산한 식이다. 고장원인에 대한 예측확률 중 최대값을 가지는 고장이 현재 발생한 고장의 원인으로 진단할 수 있다.

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

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

## 3. 터보냉동기 시뮬레이션 모델

### 3.1 시뮬레이션 모델 대상

Fig. 3은 고장검출 및 진단 알고리즘 적용 대상인 2단 압축 터보냉동기에 대한 개략도이다. 2단 압축 터보냉동기는 응축기, 증발기, 압축기, 이코너마이저(Economizer), 팽창장치(Orifice)로 구성되어 있다. 터보냉동기는 2단 압축 방식으로 응축기 출구의 고압 냉매를 중간단에서 팽창시켜, 냉

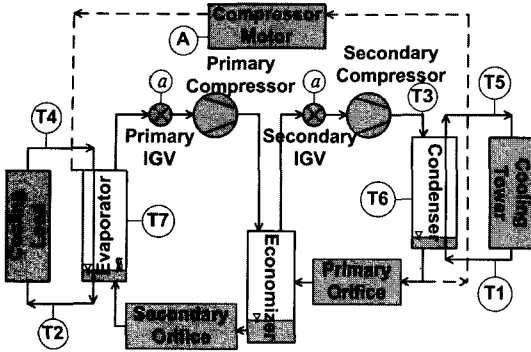


Fig. 3 Schematic of two-stage centrifugal chiller.

매액은 증발기로 보내고, 플래쉬가스는 1단에서 압축된 냉매와 같이 2단 압축기에서 압축하는 사이클로 단단 압축기에 비해 고효율을 얻을 수 있다. 응축기는 2유로(pass)의 다관(Tube)으로 물이 흐르고 다관 외관으로 냉매가 응축된다. 증발기는 1유로의 원통(Shell)으로 구성되어 있는 만액식 다관원통(Shell-tube)형 열교환기이다.

압축기는 원심압축식으로 약 10%의 부분부하 운전까지 조절이 가능한 IGV(Inlet Guide Vane)로 냉동용량을 조절한다. 냉수 출구온도에 따라 IGV 개도를 제어하여 냉동용량을 조절할 수 있다.

### 3.2 시뮬레이션 모델

터보냉동 시스템에 대한 다양한 시뮬레이션 모델들이 연구되어 왔다. Browne and Bansal<sup>(8)</sup>은 열역학적 모델을 이용하여 냉동기의 성능을 정확히 예측할 수 있는 모델을 제안하였고, 오클랜드(Auckland) 대학에 실제 설치되어 있는 여러 종류의 냉동기에 대한 전부하와 부분부하 운전시 실험 데이터를 통해서 모델을 검증하였다.

본 연구에서는 Browne and Bansal의 연구에서 제안된 모델을 이용하여 터보냉동기에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

증발기와 응축기 모델은 일반적인 에너지 식과 유용도-NTU(Effectiveness-NTU)기법을 사용하였으며, 응축온도와 증발온도는 식(3), 식(4)와 같이 표현된다.

$$T_{cond,sat} = T_{cw,i} + \frac{\dot{Q}_{cond}}{\varepsilon_{cond} c_{p,cw} \dot{m}_{cw}} \quad (3)$$

$$T_{evap,sat} = T_{chw,o} + \frac{\dot{Q}_{evap}}{c_{p,chw} \dot{m}_{chw}} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon_{evap}} \right) \quad (4)$$

본 연구에서는 2차 유체 순환유량의 감소에 의한 열전달성능 변화, 부분부하 운전시 냉매측 열전달 성능의 변화, 파울링에 의한 열전달성능의 변화를 고려하기 위하여 식(5)와 같이 총합열전달계수를 계산하였다.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln \frac{D_{tu,i}}{D_{tu,f}}}{2 \pi k_f L_{tu} N_{tu}} + \frac{\ln \frac{D_{tu,o}}{D_{tu,i}}}{2 \pi k_{tu} L_{tu} N_{tu}} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (5)$$

총합열전달계수는 관내 2차 유체의 대류열저항, 파울링에 의한 전도열저항, 열교환기 관에 의한 전도열저항, 관외 냉매의 대류열저항으로 구성된다. 여기서, 관내 파울링의 두께가 증가하는 것을 관의 내경에 대한 파울링 두께의 증가비로 정의하였고, 파울링으로 인한 관내 유로의 감소는 식(6)으로 계산하고, 관내 전열면적은 식(7)을 이용하여 계산하였다. 파울링 열전도율( $k_f$ )은 3.89 W/m·K로 가정하였다.<sup>(9)</sup>

$$D_{tu,f} = D_{tu,i} \times (1 - FF) \quad (6)$$

$$A_i = \pi \times D_{tu,f} \times N_{tu} \times L_{tu} \quad (7)$$

압축기는 폴리트로픽 효율을 이용하여 모델링하였으며 폴리트로픽 효율은 식(8)과 같이 표현된다.

$$\eta_p = \frac{W_p}{i_{out} - i_{in}} \quad (8)$$

여기서,  $n$ 은 폴리트로픽 지수이고,  $W_p$ 는 단위 질량당 폴리트로픽 압축일이고 식(9)와 같이 계산한다.

$$W_p = \int v dp = \frac{n}{n-1} p_{in} v_{in} \left[ \left( \frac{p_{out}}{p_{in}} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (9)$$

#### 4. 고장모사 시뮬레이션을 이용한 고장검출 및 진단

터보냉동기의 냉방 운전은 일반적으로 6~9월 사이에 이루어지는데, 이 기간 동안 터보냉동기는 전부하(Full load) 운전만 하는 것이 아니다.

따라서 본 연구에서는 전부하에 대한 고장모사 시뮬레이션과 60% 부분부하(Part load) 운전에 대한 고장모사 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과를 이용하여 고장 검출 알고리즘의 성능을 평가하고, 터보냉동기의 성능계수(COP)에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

##### 4.1 시뮬레이션 고장 모사 종류

Table 1은 시뮬레이션 모델을 이용하여 모사된 고장의 종류를 나타내었다. 모사된 고장은 크게 두가지로 구분할 수 있다. 첫째, 냉수/냉각수 유량 감소, 응축기/증발기 파울링 그리고 IGV 개도의 오류와 같은 시스템적 고장과 둘째, 터보냉동기의 중요한 제어점인 냉수 출구나 냉각수 입구의 온도센서 고장으로 인한 제어고장을 모사하여 시뮬레이션 하였다.

Table 1 Simulated fault symptom mode

Simulated fault symptom mode	
Fault mode 1	Decrease in cooling water mass flow rate
Fault mode 2	Decrease in chilled water mass flow rate
Fault mode 3	Condenser fouling
Fault mode 4	Evaporator fouling
Fault mode 5	Failure of IGV open rate
Fault mode 6	Cooling water inlet temp. sensor error (measured at a higher temp.)
Fault mode 7	Cooling water inlet temp. sensor error (measured at a lower temp.)
Fault mode 8	Chilled water outlet temp. sensor error (measured at a higher temp.)
Fault mode 9	Chilled water outlet temp. sensor error (measured at a lower temp.)

냉수와 냉각수 유량 감소 고장은 유로 내 스트레이너와 같은 필터의 막힘으로 인해 발생하거나, 펌프의 노후화나 마모로 인해 발생할 수 있는 고장이다.

응축기와 증발기는 다관원통형 열교환기로 되어 있어 관내로 흐르는 유체의 오염에 따라 파울링이 진행될 수 있으며, 파울링이 발생하면 관의 총합열전달계수가 감소하고, 관 내경이 줄어들어 관내를 흐르는 유량이 감소하는 고장이 발생할 수 있다.

터보냉동기의 용량은 IGV 개도에 의해서 제어되며, IGV 개도는 냉수출구온도에 의하여 열리고 닫힌다. 이러한 IGV의 각도를 조절하는 모터가 오작동이 발생할 경우 냉동시스템 전체에 지속적인 무리를 줄 수 있다.

터보냉동기의 제어점인 냉수 출구와 냉각수 입구의 온도 센서가 노후화되어 실제 온도보다 높거나 낮게 온도를 측정하게 되는 고장이 발생하면, 냉동시스템의 제어점이 변동하여 냉동 시스템이 비정상적으로 작동하게 된다.

##### 4.2 고장모사 시뮬레이션을 이용한 고장 검출

본 연구에서는 Table 1에 설명한 각 고장들에 대해 고장모사 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 중 대표적인 몇 가지 고장의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 각 고장별로 전부하 조건과 부분부하 조건에 대해서 각 인자들의 고장중후 경향과 고장검출의 민감도에 대해서 알아보았다.

각 인자들의 잔차를 표준편차로 무차원화 한 표준화 잔차(Normalized residual)로 나타내었으며, 고장검출 시점에 각 인자들의 고장의 진행정도에 따른 표준화 거리(Normalized distance)를 같이 도시하였다. 본 연구에서는 확률적으로 판별확률이 거의 100%에 가까운 표준화 거리 6을 기준으로 잡고, 표준화 거리가 6이상인 경우 고장으로 판별하였다.

Fig. 4(a)는 전부하 운전에서의 냉각수 유량 감소에 대한 고장모사 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 모델에서 냉각수 유량을 점차적으로 감소시켜 고장을 모사하였으며, 냉각수 유량이 기준조건에서 6.45% 감소하였을 때 표준화 거리가 6이 되어 고장으로 검출되었다.

Fig. 4(a)에서 나타난 것과 같이 냉각수 유량

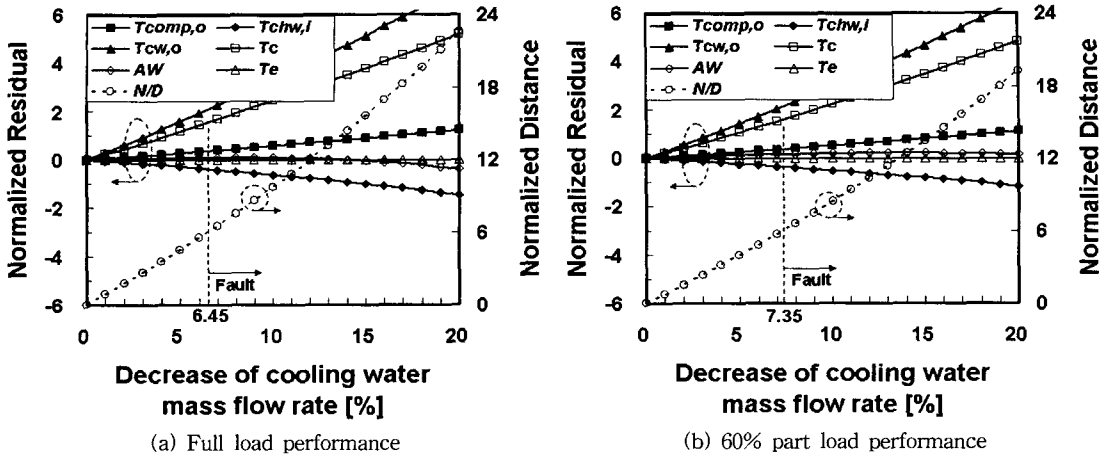


Fig. 4 Fault detection performance when decreased cooling water mass flow rate.

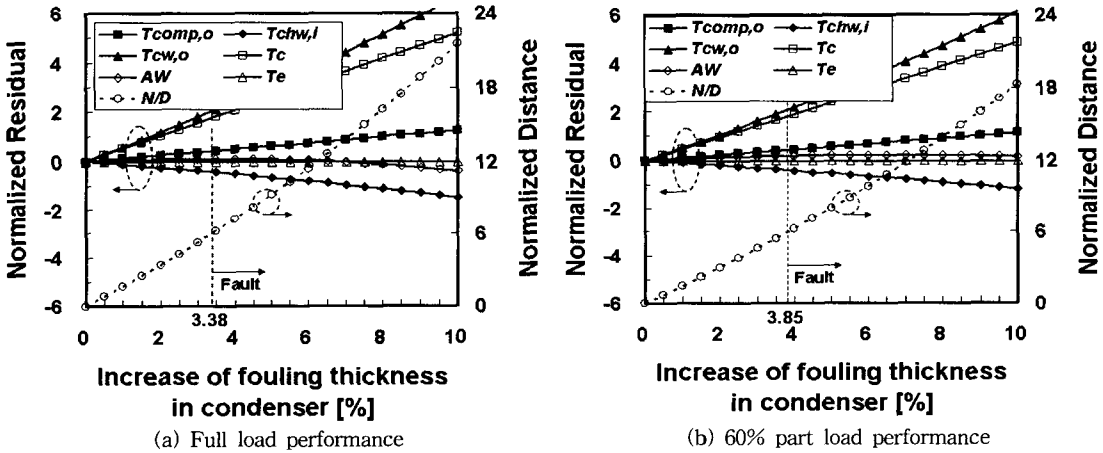


Fig. 5 Fault detection performance when increased condenser fouling.

감소 고장에 대해서 증발온도를 제외한 대부분의 측정인자들이 기준값에서 변화를 보였지만, 고장이 발생한 지점에서 냉각수 출구온도와 응축온도가 기준값으로부터 표준화 거리가 각각 약 2.1과 1.5을 벗어나 냉각수 유량 감소 고장을 검출하는데 중요한 인자가 되는 것을 알 수 있다. 이것은 냉각수 유량이 감소하면서 냉각수의 입출구 온도차가 커지고, 응축기 내 열전달 성능 감소와 냉각수 출구온도의 증가로 응축온도가 증가하기 때문이다. Fig. 4(b)는 60% 부분부하 운전 시에 냉각수 유량 감소 고장에 대한 고장모사 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 전부하 운전시와 비슷한 경향을 보이거나, 전부하 운전시와 비교 고장에 따른 측정

인자의 변화폭이 약 10% 정도 작다. 이에 따라 냉각수 유량이 기준조건에서 7.35% 감소하였을 때 고장으로 검출되었다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 응축기 관내에 흐르는 유체의 오염으로 발생할 수 있는 파울링의 진행에 따른 고장증후를 전부하와 부분부하 운전시에 대해 각각 고장모사 시뮬레이션한 결과이다.

관내 파울링 고장이 발생하게 되면, 관내 2차 유체의 유로가 감소하게 되므로, 압력 손실이 증가하게 된다. 본 연구에서는 원심펌프를 사용하여 2차 유체를 순환시키는 시스템으로 가정하였다. Fig. 6에 펌프의 성능곡선과 관내의 압력 손실 곡선을 나타내었다. 펌프 성능곡선은 ASHREA Handbook

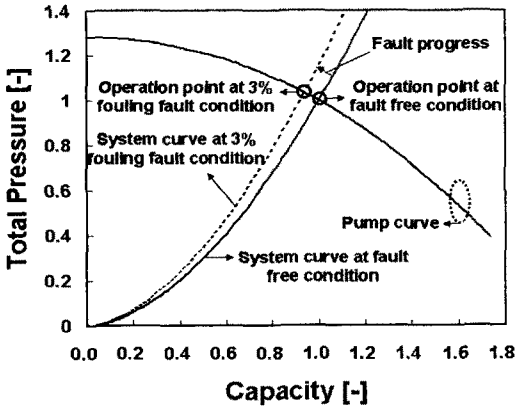


Fig. 6 Schematic of system and pump performance curves.

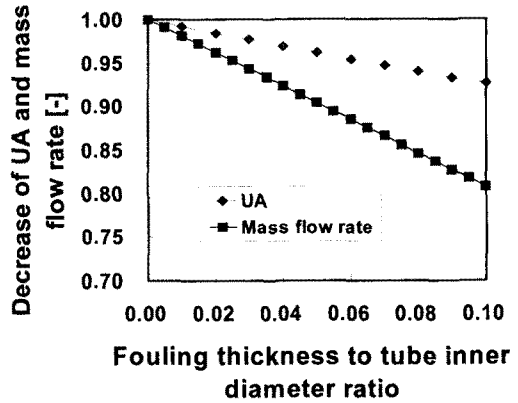
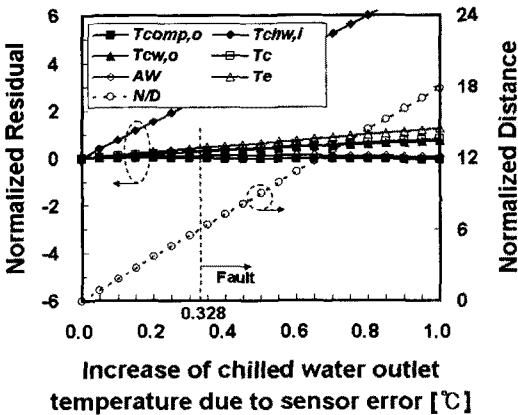
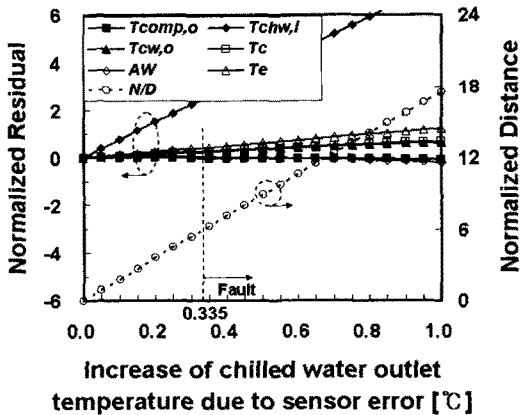


Fig. 7 Decreasing rate of overall heat transfer coefficient and mass flow rate when increased fouling thickness.



(a) Full load performance



(b) 60% part load performance

Fig. 8 Fault detection performance when increased chilled water outlet temp.

에서 제공하는 일반적인 원심펌프의 성능곡선을 이용하였다.<sup>(10)</sup> Fig. 6에서 알 수 있듯이 원심펌프의 성능 곡선은 펌프의 전압이 증가하면 토출유량이 감소하는 특성을 가지고, 시스템 곡선은 시스템의 유량이 증가하면 관내의 압력 손실량은 증가하는 특성을 가진다. 따라서 실제 작동점은 펌프의 성능곡선과 시스템 곡선이 교차하는 지점이다. 관내에 파울링이 발생하여 관내 유로가 감소하게 되면, 같은 유량에서도 압력 손실량은 증가하게 되어, 시스템 곡선은 무고장 상태에 비해 좀 더 기울기가 큰 곡선을 가진다. 이 때 새로운 시스템 곡선과 펌프 성능곡선이 만나는 점이 새로운 작동조건이 된다. 따라서 파울링 두께의 증가에 따

라 2차 유체의 순환 유량은 감소하게 된다.

파울링 두께가 증가하면 관내 유로 직경의 감소에 따라 관내 전열면적이 감소하고, 2차 유체의 순환유량이 감소하여, 대류열전달 계수가 작아지게 된다. 따라서 관내측 열저항이 증가하게 된다. 또한 파울링 두께가 증가하면 파울링에 의한 전도열저항이 증가하게 된다. 결론적으로 총합열전달계수는 파울링 두께의 증가에 따라서 감소하게 된다. 이를 Fig. 7에 나타내었다.

응축기 파울링 고장의 경우 전부하 운전시에는 고장진행이 3.38%에서 고장이 검출되었고, 부분부하 운전시에는 3.85%에서 고장이 검출되었다.

Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 냉수 출구온도 센서 고

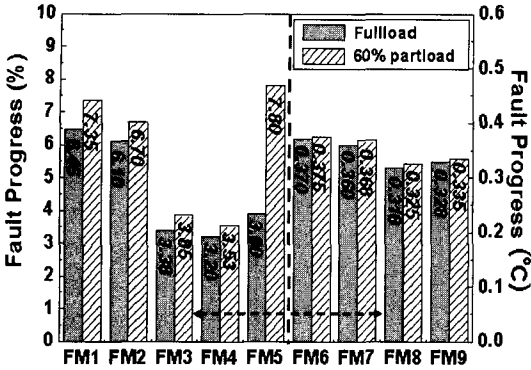


Fig. 9 Fault progress at a first fault detection.

장에 대한 고장검출을 나타내었다. 냉수 출구온도는 냉동 시스템에서 용량 제어의 기준 값이므로 매우 중요한 측정값이다. 따라서 시스템을 제어하는 온도 센서의 고장검출 역시 중요하다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)의 경우, 온도 센서가 실제 냉수 출구온도 보다 낮은 온도로 측정하는 고장을 모사하였다.

냉수 출구온도를 실제 보다 낮게 측정하므로 실제로는 설정된 냉수 출구온도보다 높은 온도에서 운전하게 된다. 따라서 냉수 출구온도의 측정 오차 증가에 따라 냉수 입구온도가 급격히 증가하는 경향을 보이게 된다. 다른 측정인자들은 냉수 입구온도의 변화에 비해 상대적으로 변화의 폭이 작다. 냉수 출구온도 센서가 고장인 경우도 전부하 운전과 부분부하 운전시 측정인자의 변화 경향이 비슷하고 고장이 검출되는 고장 진행정도

도 비슷한 경향을 보였다.

Fig. 9는 각 고장에 대하여 처음으로 고장검출이 되는 고장의 진행정도를 나타내었다. 대부분의 고장이 발생하여 진행정도가 약 8%가 되기 전에 고장을 검출하는 것으로 보이며, 5번째 종류의 고장인 IGV 개도 오류 고장의 경우를 제외 하고, 부분부하 운전시보다 전부하 운전에서 민감도가 평균 약 0.6% 정도 높은 것을 알 수 있다. 이 결과로 보아 전부하와 부분부하 모두 표준화 거리 기법을 사용한 고장검출 알고리즘으로 고장검출이 가능하였다.

4.3 고장모사 시뮬레이션을 이용한 고장진단

Table 2는 특정한 고장모사 시뮬레이션 결과를 식(2)를 사용하여 9가지의 고장모드에 대한 고장예측 확률을 나타낸 것이다. 9가지 고장에 대해서 각각 고장모사 시뮬레이션을 수행하여, 고장검출이 되는 시점에서의 고장예측 확률을 나타내었다.

Table 2의 다섯 번째 행에 정리되어 있는 값은 IGV 고장(Fault mode 5)이 발생하였을 때 9가지 모드에 대해 고장이라고 예측할 수 있는 확률을 나타낸 것이며, 분류예측값 중에 다섯 번째 값이 0.099로 가장 큰 값을 가지므로 IGV 고장으로 잘 분류하고 있다.

고장진단에 사용한 분류확률기법은 측정인자의 고장증후 경향이 유사한 경우 고장모드별 분류확률값이 비슷하게 나타났다. 예를 들어, 냉각수 유량 감소, 응축기 파울링 고장 그리고 냉각수 입구

Table 2 Fault diagnosis class probabilities at a first fault detection

Fault Mode	Class probabilities								
	Fault Mode 1	Fault Mode 2	Fault Mode 3	Fault Mode 4	Fault Mode 5	Fault Mode 6	Fault Mode 7	Fault Mode 8	Fault Mode 9
1	0.093	0.030	0.093	0.030	0.000	0.000	0.093	0.000	0.030
2	0.000	0.038	0.000	0.038	0.000	0.025	0.000	0.000	0.038
3	0.097	0.028	0.097	0.028	0.000	0.000	0.097	0.000	0.028
4	0.000	0.043	0.000	0.043	0.000	0.022	0.000	0.000	0.043
5	0.011	0.000	0.011	0.000	0.099	0.043	0.011	0.100	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.062	0.104	0.000	0.062	0.000
7	0.084	0.033	0.084	0.033	0.000	0.000	0.084	0.000	0.033
8	0.014	0.000	0.014	0.000	0.038	0.000	0.014	0.075	0.000
9	0.000	0.067	0.000	0.067	0.000	0.012	0.000	0.000	0.067



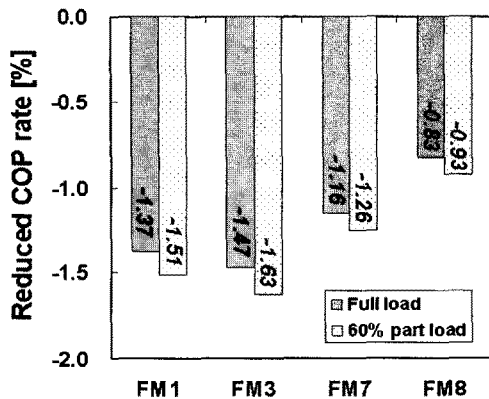


Fig. 10 Reduced COP at a first fault detection.

온도센서 고장으로 인한 냉각수 온도 상승의 경우는 고장발생에 대해 일어나는 고장 증후가 유사하여 고장 모드별 분류 예측값이 동일하게 나타났다.

#### 4.4 고장에 따른 시스템 성능감소

공조시스템 전체로 보았을 때 고장이 발생하여 진행됨에 따라 시스템의 성능이 저하되지만, 터보냉동기만을 보았을 때는 모든 고장에 대해서 성능계수(COP)가 감소하는 것은 아니다. 예를 들어, 냉수 출구온도 센서의 고장으로 냉수 출구온도가 높아지는 고장의 경우, 냉수가 공조기에서 높은 온도로 공기와 열교환이 되어 건물 내 공조 시스템의 사용자는 불편함을 느끼게 되지만, 터보냉동기만을 보았을 때는 성능계수는 증가하는 현상을 보이게 된다.

따라서 본 연구에서는 공조 시스템에 영향을 미치지 않는 조건에서, 터보냉동기의 성능계수 감소를 관찰할 수 있는 냉각수 유량 감소, 응축기 파울링, 냉각수 입구 온도 센서가 높은 온도로 측정하는 오류 그리고 냉수 출구 온도센서가 낮은 온도로 측정하는 오류 고장의 경우에 대해 고장에 의한 성능감소를 Fig. 10에 나타내었다.

표준화 거리 기법을 사용하여 위 4가지 고장에 대해 모두 성능계수 감소량이 2% 미만에서 고장을 검출할 수 있어 고장검출 성능은 좋은 것으로 판단되며, 전부하 운전시에 고장검출 민감도가 높기 때문에, 부분부하에 비해 성능 저하가 작은 시점에서 고장을 검출할 수 있는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 실용화가 용이한 표준화 거리 기법과 규칙 기반법을 이용하여 터보냉동기에 대한 고장검출 및 진단 알고리즘을 제안하였다. 전부하와 부분부하 운전시 모든 고장에 대해서 고장의 진행정도가 8% 미만에서 고장검출이 가능하며, 부분부하에 비해 전부하 운전시에 고장검출 민감도가 조금 더 높은 것을 알 수 있었다.

터보냉동기의 성능계수 감소를 관찰할 수 있는 4가지 고장에 대해 처음 고장이 검출되는 시점에서 성능계수 감소량은 2% 미만이었으며, 전부하 운전뿐만 아니라 부분부하 운전시에도 고장검출이 가능한 것을 알 수 있었다.

고장진단에 사용한 분류확률기법은 측정인자의 고장증후 경향이 유사한 경우 고장 모드별 분류 확률값이 비슷하게 나타나는 2~3가지의 고장진단 후보군으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행하는 2008년도 에너지자원기술개발사업 『공조설비 성능진단 및 통합형 제어관리시스템 개발』 과제의 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

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. Comstock, M. C., Braun, J. E. and Groll, E. A., 2002, A survey of common faults for chillers, ASHRAE Transaction, Vol. 108, No. 1, pp. 819-825.
3. Kim, M. S. and Kim, M. S., 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.
4. Grimmeli, H. T., Woud, J. K, and Been, G., 1995, On-line failure diagnosis for compres-

- sion refrigeration plant, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 18, No. 1, pp. 31-41.
5. 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.
  6. Lee, W. Y., Chang, K. C. and Ra, H. S., 2000, Performance evaluation of a reciprocating chiller, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, pp. 1127-1132.
  7. Castro, N.S., 2002, Performance evaluation of a reciprocating chiller using experimental data and model predictions for fault detection and diagnosis, *ASHRAE Transactions*, Vol. 108, No. 1, pp. 889-903.
  8. Browne, M.W. and Bansal, P.K., 1998, Steady-state model of centrifugal liquid chillers, *Int J. Refrig.*, Vol. 21, No. 5, pp. 343-358.
  9. Ramachandran, E., Raji, P., Ramachandran, K. and Nataraiian, S., 2006, Photoacoustic study of the thermal properties of calcium carbonate—the major constituent of pancreatic calculi, *Crystal Research and Technology*, Vol. 41, No. 1, pp. 64-67.
  10. The ASHREA Handbook CD, 2000, HVAC Systems and Equipment, Chepter 39, Centrifugal Pumps.