

공조시스템의 열원기기에 대한 고장검출 및 진단 시스템 개발

한 동 원, 박 종 수*, 장 영 수**†

고려대학교 기계공학과 대학원, *한국하니웰(주), **한국과학기술연구원

Development of fault detection and diagnosis system for the heat source apparatus of building air-conditioning system

Dong Won Han, Jong-Soo Park*, Young-Soo Chang**†

ABSTRACT: This paper describes a fault detection and diagnosis (FDD) system developed for the heat source apparatus in building air-conditioning system. As HVAC&R systems in building become complex and instrumented with highly automated controllers, the processes and systems get more difficult for the operator to understand and detect the mal-functions. Poorly maintained, degraded, and improperly controlled equipment wastes an estimated 15% to 30% of energy used in commercial building. When operating a complex facility, FDD system is beneficial in equipment management to provide the operator with tools which can help in decision making for recovery from a failure of the system. Automated FDD for HVAC&R system has the potential to reduce energy and maintenance costs and improves comfort and reliability. Over the last decade there has been considerable research for developing FDD system for HVAC&R equipment. However, they are being made too much of a theoretical study, so only a small of FDD methods are deployed in the field. This study deduced an actual defect source for the heat source apparatus and suggested a low price FDD method which is ready to be deployed in the field.

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

1. 서 론

건물의 공조설비 시스템 등 에너지 설비들이 자동화, 복잡화, 대형화되면서, 열원 및 공조 설비의 에너지 소비량은 기기의 성능과 제어방식에 따라 많은 차이를 보인다. 특히 터보냉동기는 전체 공조설비 에너지 소비량 중 많은 비중을 차지하고 있으며 기타 유지보수 비용에 대해서도 큰 부분을 차지하고 있다.

전체 공조설비가 부적절하거나 성능이 열화된 상태로 지속적인 운전을 할 경우, 이로 인해 전체 건물의 공조설비 시스템의 연간 에너지 사용량이 증가하므로 이를 적절한 시기에 파악할 수 있는 에너지 진단 방법이 필요하다.⁽¹⁾

공조설비에서 발생하는 고장은 갑작스런 고장(Hard failure)과 점차적인 고장(Soft failure)으로 분류 할 수 있다.⁽²⁾ 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 고장이 진행되고 있더라도 검출하거나 진단하기 어려우며,

† Corresponding author
Tel.: +82-2-958-6746; fax: +82-2-958-6709
E-mail address: yschang@kist.re.kr

이로 인해 에너지 손실이 증가하고 결국 시스템의 손상까지 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 점차적인 고장에 대한 고장검출 및 진단 시스템 개발에 초점을 맞추었다.

고장진단은 90년대부터 공조설비를 대상으로 진행 되어왔다. 특히 환기설비(Air handling unit)에 대한 연구를 중심으로 진행되어 왔으며, 증기압축시스템에 대한 연구는 최근에 들어서 시작되었다고 볼 수 있다. 국내에서도 각 대학과 연구소에서 소형 냉동시스템과 공기조화기의 고장검출 및 진단기법 개발을 위한 이론적, 실험적 연구가 수행되고 있다.

Grimmelius *et al.*⁽³⁾과 Rossi and Braun⁽⁴⁾은 왕복동식 압축냉동시스템에 대하여 통계적인 자료처리 기법을 통해 고장 검출 및 진단을 할 수 있도록 제시하고, 고장진단에 대해 고장패턴을 이용한 규칙기반(Rule-based) 방식으로 고장진단을 하였다.

일반적으로 증기압축시스템의 고장진단 시스템에 대한 연구는 대상 기기에 고장이 발생하였을 때의 자료를 기반으로 신경망이론이나 퍼지기법 등을 사용한 고장검출 방법이 주로 이루어졌다. 그러나 이러한 방법들은 고장에 대한 많은 자료 수집이 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 고장검출 및 진단 시스템을 제안하였다.

2. 터보냉동기 고장검출 및 진단 알고리즘

2.1 고장 검출 및 진단 알고리즘

본 연구에서 개발한 고장검출 및 진단 알고리즘은 Fig. 1과 같이 크게 3가지 단계로 구성되어 있다. 첫째, 터보냉동기가 무고장 상태(No fault state)에서 운전될 때 얻어지는 자료를 이용해서 무고장 기준모델(Reference model)을 만든다. 둘째, 현재 측정값과 무고장 기준모델의 값의 차이인 잔차(Residual)를 계산하고, 잔차가 어느 허용 범위를 벗어나게 되면 고장으로 간주한다. 마치

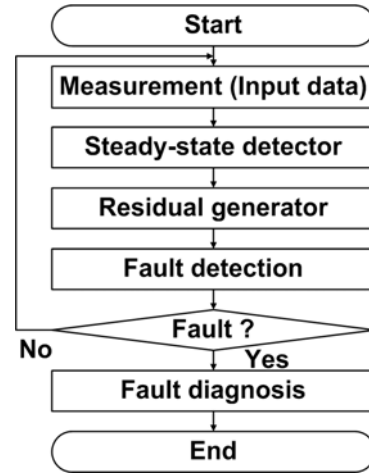


Fig. 1 FDD algorithm flow chart

막으로 고장패턴을 이용하여 고장의 원인을 진단하는 순서로 구성되어 있다.

2.2 고장 검출 기법

본 연구에서는 고장 검출을 위하여 분류오차 기법(Classification error method)과 표준화 거리 기법(Normalized distance method)을 적용하였으며, 고장모사 시뮬레이션과 실험을 통해 고장진행에 따른 고장검출 성능을 확인하고 적용가능성을 검토하였다.

여기서, 분류오차 기법이란 어떤 측정인자의 무고장 상태 잔차분포가 고장이 진행되면서 무고장 상태 잔차분포로부터 멀어지는 새로운 잔차분포가 발생하는데, 이 때 두 잔차분포의 교차면적을 분류오차라고 하며, 분류오차의 값이 작을수록 두 잔차분포가 확실히 분류됨을 의미하므로 분류오차가 정해진 값보다 작으면 고장이라고 판단하는 기법이다. 분류오차는 식 (1)과 같이 계산한다.

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

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

또한, 표준화 거리 기법이란 Fig. 2에서 나타난 것과 같이 무고장 기준모델의 값과 관측값이 일정거리 이상 떨어져 있으면 고장이라고 진단 내리는 방법이다.

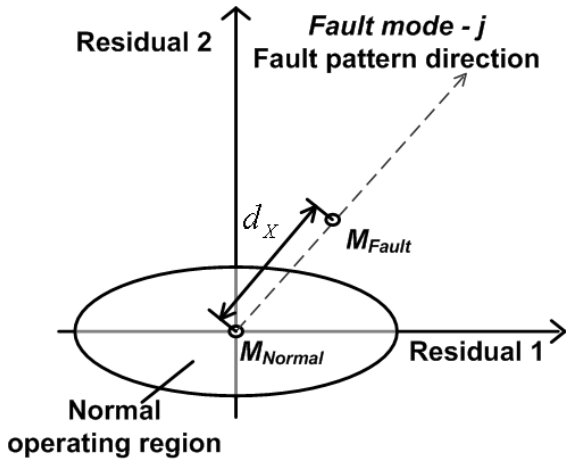


Fig. 2 Normalized distance method for 2-Dimensional case

즉, 고장이 발생하여 진행되면 측정인자가 기준모델 값으로부터 벗어나게 된다. 이것을 이용하여 기준모델 인자값과 현재의 인자값 사이의 표준화 거리를 계산하여 미리 정해진 표준화 거리를 벗어나게 되면 고장으로 판단하는 기법이다. 표준화 거리는 식 (2)와 같이 계산한다.

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

여기서, d_X 는 표준화 거리이고 R 은 잔차이다. 그리고 Σ_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⁽⁴⁾이 제안한 식 (3)를 사용하여 고장원인을 진단하였다.

식 (3)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.

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

여기서 $R(k)$ 는 k 번째 측정인자의 잔차이고, w_j 는 j 번째 고장예측확률이다. 그리고 C_{jk} 는 잔차의

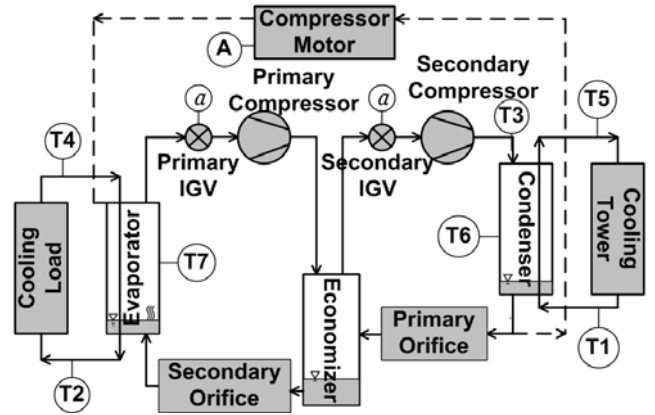


Fig. 3 Schematic of two-stage centrifugal chiller

방향성에 대한 상수이며, $\Sigma_N(k,k)$ 는 k 번째 측정인자의 공분산이다.

3. 고장 검출 및 진단 알고리즘 검증

3.1 FDD 알고리즘 검증을 위한 고장모사 시뮬레이션 모델

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, 냉매액은 증발기로 보내고, 플래쉬가스는 1단에서 압축된 냉매와 같이 2단 압축기에서 압축하는 사이클로 단단 압축기에 비해 고효율을 얻을 수 있다. 응축기는 2 유로(pass)의 다관(Tube)으로 물이 흐르고 다관 외관으로 냉매가 응축된다. 증발기는 1 유로의 원통(Shell)로 구성되어 있는 만액식 다관원통(Shell-tube)형 열교환기이다. 압축기는 원심압축식으로 약 10%의 부분부하 운전까지 조절이 가능한 IGV(Inlet Guide Vane)로 냉동용량을 조절하며, 냉동용량 제어는 냉수 출구 온도에 따라 IGV 개도를 조절한다.

터보냉동시스템에 대한 다양한 시뮬레이션 모델들이 연구되어 왔다. Browne and Bansal⁽⁵⁾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

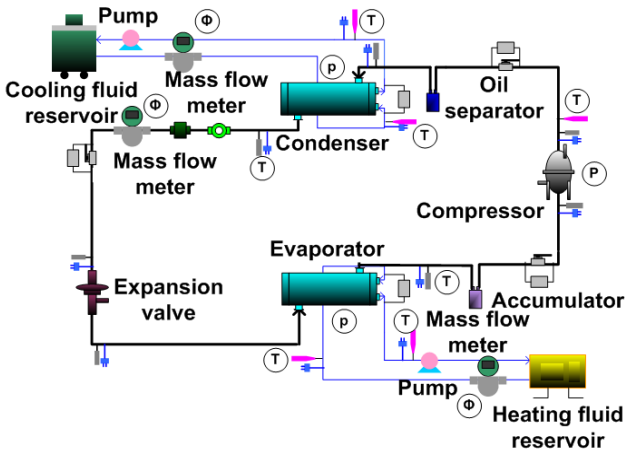


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental system.

실험 데이터를 통해서 모델을 검증하였다.

본 연구에서는 Browne and Bansal의 연구에서 제안된 모델을 이용하여 터보냉동기에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 전부하에 대한 고장모사 시뮬레이션과 60% 부분부하(Part load) 운전에 대한 고장모사 시뮬레이션을 수행하였다.

3.2 FDD 알고리즘 검증을 위한 수냉식 냉동시스템 실험장치

Fig. 4는 고장검출 및 진단 알고리즘 검증을 위한 실험에 사용한 수냉식 냉동시스템을 도시화하였다. 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 이용하였고, 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 질량 유량계를 사용하였다. 전력계를 설치하여 압축기에서 소비된 전력을 측정하였다.

3.3 고장 모사 종류

Table 1은 터보냉동기에 발생가능성이 있는 몇 가지 종류의 고장 중 시뮬레이션과 실험을 통해 모사한 고장을 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.

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 관 내 흐르는 유량이 감소하는 복합적인 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.

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.)

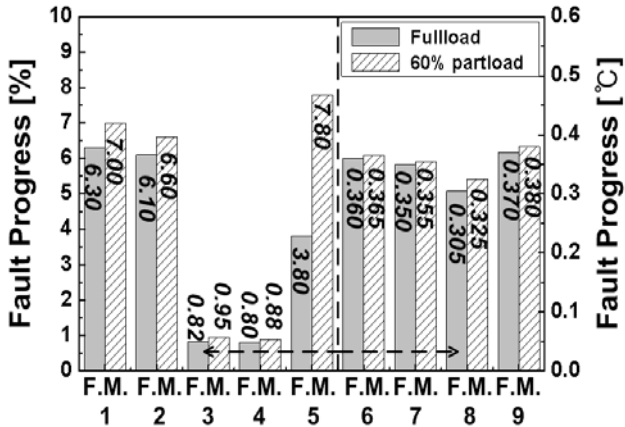


Fig. 5 Fault progress at a first fault detection

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

3.4 고장모사 시뮬레이션을 이용한 고장 검출 알고리즘 검증

Fig. 5은 각 고장에 대하여 처음으로 고장검출이 되는 고장의 진행정도를 나타내었다. 대부분의 고장이 발생하여 진행정도가 약 10%가 되기 전에 고장을 검출하는 것으로 보이며, 5번째 종류의 고장인 IGV 개도 오류 고장의 경우를 제외하고, 부분부하 운전시보다 전부하 운전에서 민감도가 평균 약 0.8% 정도 높은 것을 알 수 있다. 이 결과로 보아 전부하와 부분부하 모두 고장검출 알고리즘으로 고장검출이 가능하였다.

3.5 고장모사 시뮬레이션을 이용한 고장진단

Table 2는 특정한 고장모사 시뮬레이션 결과를 식 (3)을 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 0.103로 가장 큰 값을 가지므로 IGV 고장으로 잘 분류하고 있다. 고장의 종류에 따라 2가지 고장 증후가 유사하여, 분류예측값이 같은 것도 있다. 측정인자의 고장증후 경향이 유사한 경우 고장모드별 분류확률값이 비슷하게 나타나는 2~3가지의 고장진단 후보군을 제시하였다.

4. 고장 검출 및 진단 시스템 개발

Fig. 6은 공조시스템의 고장 검출 및 진단 시스템에 대한 개념도와 현재 개발된 터보냉동기에 대한 고장 검출 및 진단 시스템 시작품을 나타냈었다. 공조시스템의 고장 검출 및 진단 시스템은 하위 감시반(Local FDD)과 상위 감시반(FDD controller)으로 구성되어 있으며, 하위 감시반에서는 각 기기로부터 측정인자를 상위 감시반으로 보내는 역할과 고장의 유무를 판단하는 고장 검출부의 역할을 담당하고 있고, 상위 감시반은 무고장 기준 모델을 만들기 위하여 필요한 측

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	0.108	0.025	0.108	0.025	0.000	0.000	0.108	0.000	0.025
2	0.000	0.040	0.000	0.040	0.000	0.024	0.000	0.000	0.040
3	0.101	0.027	0.101	0.027	0.000	0.000	0.101	0.000	0.027
4	0.000	0.038	0.000	0.038	0.000	0.024	0.000	0.000	0.038
5	0.010	0.000	0.010	0.000	0.103	0.046	0.010	0.102	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.057	0.097	0.000	0.057	0.000
7	0.083	0.032	0.083	0.032	0.000	0.000	0.083	0.000	0.032
8	0.014	0.000	0.014	0.000	0.044	0.000	0.014	0.087	0.000
9	0.000	0.075	0.000	0.075	0.000	0.010	0.000	0.000	0.075

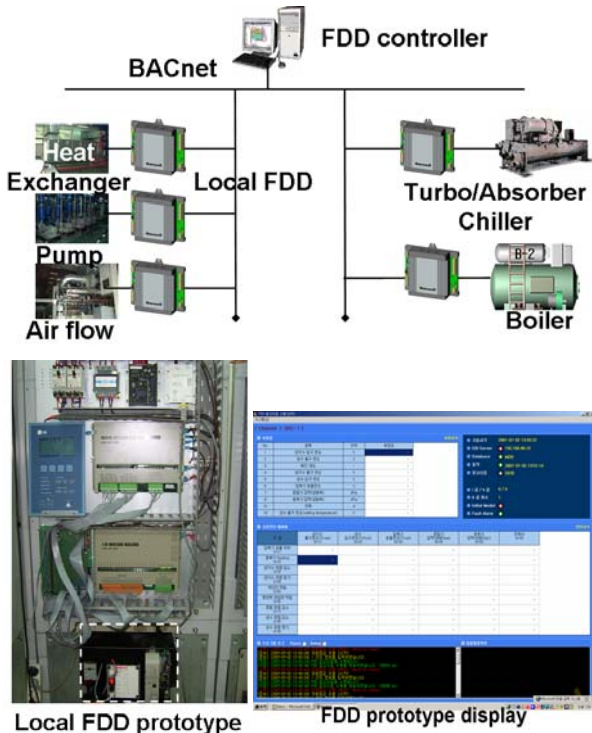


Fig. 6 Concept of FDD system for building air-conditioning system

정인자를 저장하고 무고장 기준 모델을 만들어 하위 감시반에 전달하며, 고장이 발생할 때 어떠한 고장인지 판단하는 고장진단부를 담당하고 있으며 BACnet을 통해 중앙통제 감시반으로 필요한 정보를 전달하는 기능을 맡고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 실용화가 용이한 고장검출 기법들과 규칙기반법을 이용하여 터보냉동기에 대한 고장검출 및 진단 알고리즘을 제안하였다. 전부하와 부분부하 운전시 모든 고장에 대해서 고장의 진행도가 10%미만에서 고장검출이 가능하여 전부하 운전뿐만 아니라 부분부하 운전시에도 고장검출이 가능한 것을 알 수 있었으며, 부분부하에 비해 전부하 운전시에 고장검출 민감도가 조금 더 높은 것을 알 수 있었다. 고장진단에 사용한 분류확률기법은 측정인자의

고장증후 경향이 유사한 경우 고장모드별 분류확률값이 비슷하게 나타나는 2~3가지의 고장진단 후보군을 제시하였다.

고장 검출 및 진단 알고리즘을 탑재한 터보냉동기의 고장 검출 및 진단 시스템 시제품을 개발하였다. 향후 현장의 터보냉동기에 설치하여 검증실험을 통한 고장 검출 및 진단 시스템의 보완 작업이 수행할 것이다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행하는 2006년도 에너지자원기술개발사업(과제번호: 2006-E-BD11-P-03)의 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. Matthew, C. C., Braun, J. E. and Groll, E. A., 2002, A survey of common faults for chillers, ASHRAE Transaction, pp. 819-825.
3. Grimmeliuss, H. T., Woud, J. K, and Been, G., 1995, On-line failure diagnosis for compression refrigeration plant, International Journal of Refrigeration, Vol. 18, No. 1, pp. 31-41.
4. 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.
5. 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.