

규칙기반 고장진단 알고리즘의 실험적 연구

양 훈 철[†], 조 수, 태 춘 섭, 장 철 용

한국에너지기술연구원 친환경건물연구센터

A Study of Rule-based Fault Detection Algorithm in the HVAC System

Hooncheul Yang[†], Soo Cho, Choon-Seob Tae, Cheol-Yong Jang

Building Energy Research Center, KIER, Daejeon 305-343, Korea

ABSTRACT: The objective of this study is to develop a rule-based fault detection and diagnosis algorithm and an experimental verification using air handling unit. To develop an analytical algorithm which precisely detects a faulted component, energy equations at each control volume of AHU were applied. An experimental verification was conducted in the AHU at Green Building in KIER. In the experiment conducted in hot summer condition, the rule based FDD algorithm isolated a faulted sensor from HVAC components.

Key words: Fault detection and diagnosis(고장검출과 진단), Rule base(규칙기반), HVAC system(공기조화 시스템), Control(제어)

기 호 설 명

T : 온도, [°C]
 u : 정규화된 코일 밸브 제어 신호(0, 1)

그리스 문자

ϵ : 오차에 의한 허용오차 값
 Δ : 온도상승

하첨자

cc : 냉방코일

co : 외기온도에 대한 모드 변환
hc : 가열 코일
ma : 혼합공기 온도센서
oa1 : 외기 온도센서 1
oa2 : 외기 온도센서 2
od : 외기 차단용 댐퍼
ra : 환기 온도센서
rf : 환기 송풍기
sa : 급기 온도센서
sa,s : 급기 온도센서 설정치
sf : 급기 송풍기
t : 온도 측정

1. 서 론

건물의 에너지 소비절약을 달성하기 위해서는 건물설비의 최적제어와 함께 설비의 성능저하를 유발하게 되는 고장이나 노후에 따른 시스템의

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3214; fax: +82-42-860-3202

E-mail address: yang@kier.re.kr

점진적인 성능 저하를 적절하게 예측 또는 감지하는 알고리즘이 요구된다.

건물자동화 시스템의 핵심기술인 고장검출 및 진단기술은 설비시스템을 최적상태로 유지시킴과 동시에 신뢰성을 향상시킬 수 있으며 설비자체는 물론 제어기, 센서 및 구동기의 고장 및 성능저하에 따른 에너지손실을 막을 수 있는 방법이다.

고장진단에 대한 연구 중 전문가의 지식을 기반으로 하는 규칙기반 고장진단 연구는 Liu and Kelly⁽¹⁾와 Anderson et al.⁽²⁾에 의한 규칙기반방법과 통계적인 방법을 공기조화 시스템의 진단에 적용한 사례가 있다. House et al.⁽³⁾은 공조기를 위한 지식기반 방법을 실제 건물에 적용하여 연구하였다. Han et al.^(4,5)은 퍼지 알고리즘, 신경망 알고리즘을 이용한 고장검출 및 진단에 관한 연구를 수행하였다. Lee et al.⁽⁶⁾은 공조기의 고장을 검출하기 위한 예측방식을 사용하였으며, 신경망 회로의 패턴 인식법을 적용하여 고장진단을 실험적으로 확인하였다. 미국을 비롯한 프랑스, 영국, 핀란드, 독일 등 선진국 10여개 국가는 IEA의 ANNEX 25, 40을 중심으로 연구⁽⁷⁻¹⁰⁾를 수행하여 공조시스템 해석연구, 자동제어기술 연구, 에너지 관리시스템 평가기술 연구, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 이론적인 시스템 최적화 및 자동 고장 진단 및 처리기술 연구 등으로 구분하여 약 20여년에 걸쳐 체계적으로 수행되어 왔으며, 현재는 ANNEX 47의 연구가 준비되고 있다.

본 연구는 전문가 규칙을 기반으로 이루어진 공조기의 고장검출 알고리즘을 개발하고 실제 건물에서의 실증실험을 통해 알고리즘을 검증하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 한국에너지기술연구원의 그린빌딩에 소재한 공기조화기의 주요 요소에 대한 인위적 고장발생 실험을 수행하고 고장검출 알고리즘이 적용된 소프트웨어를 이용하여 알고리즘의 특성을 분석하였다.

2. 고장검출 및 진단 알고리즘

고장검출과 진단을 위한 알고리즘으로 최근 전문가 진단규칙이 보편화되고 있다. 규칙기반 방법은 고장을 분류함에 있어 동작지수와 결정치사이의 관계인 규칙을 이용한다. 이를 위하여 설비의 제어방법과 허용범위 등에 의해 진단 규칙을 설정하고 상태 값이나 제어 값이 정해진 규칙을 준

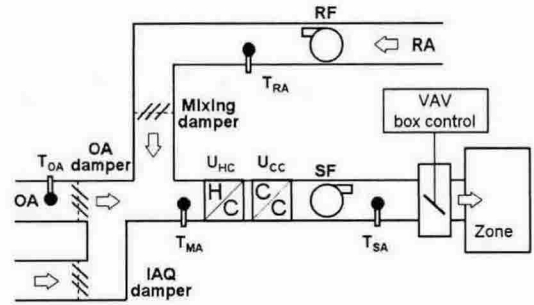


Fig. 1 Schematic diagram of AHU in Green building.

수하는지의 여부를 판단하여 고장을 검출할 수 있다. 규칙기반 고장진단 알고리즘은 모델기반 고장진단 알고리즘과 달리 특정 시스템에 대해서만 적용되는 모델이 아니라 일반적이고 복잡한 시스템에서도 적용이 가능한 장점이 있다.

고장검출과 진단을 위해 사용한 전문가 규칙은 난방코일, 냉방코일을 비롯한 일반적인 공조 설비와 제어기가 장치된 가변풍량 또는 정풍량 공조기를 위한 것이다.

Fig. 1은 그린빌딩 공기조화기의 개략도를 나타낸다. 공조기의 온도제어기는 급기 송풍기 후단의 덕트에서 공급되는 급기온도를 설정값으로 조절하게 된다. 외기는 공조기로 흡입되어 실내로부터 공급되는 환기와 혼합되어 혼합공기를 형성한 후 냉·난방코일부에서 가열·냉각되어 온도가 제어된다. 각 사무실의 공급측에는 가변풍량조절 댐퍼가 설치되어 있다.

공조기의 운전모드는 외기온도와 외기댐퍼의 개도 및 냉난방코일의 운전여부를 이용하여 4가지 모드로 구분할 수 있다.

냉방부하가 증가하게 되면 외기 댐퍼가 완전히 열려 정지하게 되고 기계적 냉방모드인 모드 3으로 전환된다. 공조기가 기계적 냉방모드로 운전되면 냉방코일 밸브의 조절에 의해 냉각 설정점이 유지되며, 난방코일 밸브는 닫히게 된다. 모드 3은 외기댐퍼가 100% 열린 상태에서 기계적 냉방이 이루어진다. 본 연구의 고장진단 실험은 모드 3에서 수행되었으며 규칙에 사용된 관계식을 만족하는 경우에는 고장으로 판단한다.

$$T_{oa} > T_{co} + \epsilon_t \quad (1)$$

$$|T_{oa} - T_{ma}| > \epsilon_t \quad (2)$$

$$T_{sa} > T_{ma} + \Delta T_{sf} + \epsilon_t \quad (3)$$

$$T_{sa} > T_{ra} - \Delta T_{rf} + \epsilon_t \quad (4)$$

$$|u_{cc} - 1| \leq \epsilon_{cc} \text{ and } T_{sa} - T_{sa,s} \geq \epsilon_t \quad (5)$$

$$T_{sa} - T_{sa,s} < \epsilon_{sa} \quad (6)$$

식(1)은 외기를 이용한 냉방모드임을 평가한다. 식(2)는 급기온도와 혼합공기온도 사이의 온도차가 크게 나타나면 두 센서 중에서 고장난 신호가 나타남을 표현한다. 식(3)은 냉방코일을 지난 급기온도가 혼합공기온도보다 높은 온도를 표현할 수 없음을 나타내는 고장검출식을 나타낸다. 식(4)는 급기온도와 환기온도의 고장검출식으로 환기온도가 급기온도보다 낮은 경우를 나타낸다. 식(5)는 냉각코일의 동작신호에 대한 검출식을 나타낸다. 식(6)은 급기온도가 급기온도 설정값보다 낮게 나타나는 센서의 고장을 나타낸다.

규칙에 사용되는 변수들의 값은 디지털제어기로 제어되는 대부분의 공조기에서 획득할 수 있다. 규칙을 사용할 경우에는 고장의 크기, 측정의 정확성, 허용오차의 크기 등이 고장검출에 영향을 미칠 수 있다. ϵ_t , ϵ_f , ϵ_{cc} , ϵ_{oa} , ϵ_{sa} , ΔT_{min} 와 같은 설정값은 규칙을 평가하는데 사용되며 전문가가 정한다. 건물에 설치되어 있는 산업용 센서들은 고장검출을 위한 충분한 정확도를 가지고 있으므로 본 연구나 추 후 적용될 수 있는 일반 공조 설비의 경우에도 실험실용 정밀센서나 고가의 계측기 사용은 요구되지 않는다.

Table 1은 고장을 검출하는 순서를 나타낸다. 공조시스템으로부터 측정된 데이터들은 이동평균법으로 필터링하여 측정값의 신뢰도를 높인다. 다음으로 외기온도센서의 고장을 판단하기 위해서 T_{oa1} 의 신호를 T_{oa2} 신호와 비교하여 그 값의 차이가 한정값 이상이면 외기온도센서 고장으로 판단한다. 측정되는 외기온도의 신호가 고장신호라고 판단되면 이를 진단하여야 한다. 이 후 외기온도에 적합한 운전모드를 결정한다. 각 운전모드에서는 모드에 적합한 규칙들을 적용하여 고장검출을 수행한다. 고장의 원인으로 판단되는 요소는 운전자에게 보고하여 진단하도록 한다.

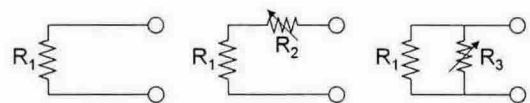
3. 실험방법

Table 1 Process of the FDD approach.

Step	Process
step 1	Acquisition interface: Transfer data from building management system to FDD database
step 2	Data filtering: Elimination inconsistent values and filter data with a moving average window
step 3	FDD rule application: Estimation of outdoor sensor fault
step 4	Mode estimation: Estimation of operating modes
step 5	Threshold estimation: Estimation of FDD thresholds
step 6	FDD rules application: Apply FDD rules
step 7	Diagnosis application: Suggest fault causes

그린빌딩은 5층 규모의 에너지절약형 건물로서 전체면적이 6,165 m²이다. 총 냉방용량은 34 냉동톤이며 총 4대의 공기조화기 중 36,000 CMH 용량의 가변풍량형 공조기를 사용하여 하절기 조건에서 센서의 고장을 발생시키고 각 부위의 신호를 측정된 후 고장진단 알고리즘을 이용하여 고장을 검출하는 방법으로 실험을 수행하였다. 주요 측정지점은 T_{sa} , T_{ma} , T_{ra} , T_{oa1} , T_{oa2} , u_{cc} , u_{hc} , u_{od} 이다. 공조기로 공급되는 냉수온도는 7℃이며 난방에 사용되는 온수온도는 80℃이다. 각 사무실로 공급되는 공기는 가변형 댐퍼에 의해 온도가 조절되며 운전조건은 모드 3을 사용하였다. 데이터 수집은 건물제어시스템으로 운영되는 Honeywell사의 S-9000을 사용하였다.

본 연구는 그린빌딩 공조시스템의 고장을 모사하는 인자로 급기온도센서, 혼합온도센서, 환기온도센서를 선정하였다. 온도센서의 고장은 Fig. 2와 같이 온도측정용 축온저항체(Pt 1,000 ohm RTD)에 10 ohm과 100 kΩ의 가변저항기를 직렬과 병렬로 연결하여 실제온도보다 높거나 낮은 데이터를 수집하였다. 데이터는 매 1초마다 측정하였으며 각 실험조건은 1일간 유지하였다. 공조

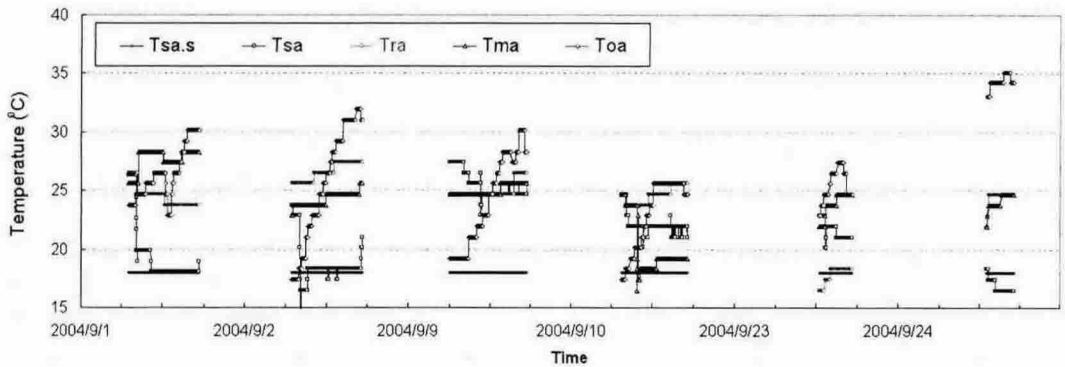


(a) Normal (b) Positive error (c) Negative error

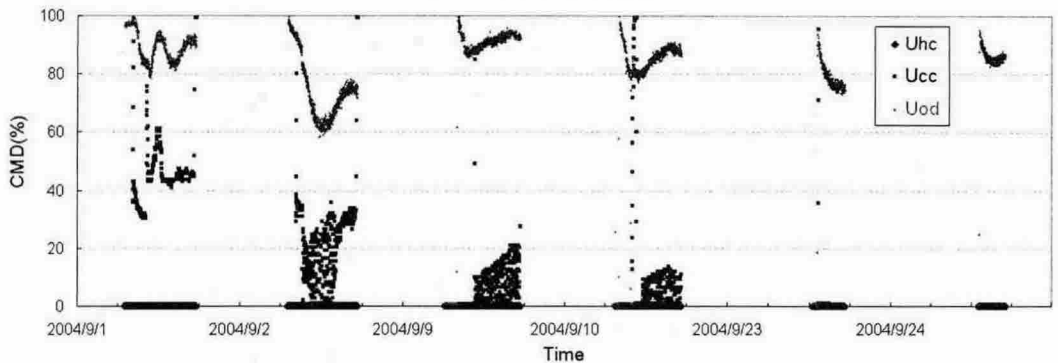
Fig. 2 Electrical circuit making sensor faults in Resistance Temperature Device.

Table 2 Experimental conditions in mode 3.

Case	Mixed air fault	Returned air fault	Supplied air fault	Mixed air fault	Returned air fault	Supplied air fault
Fault condition	$T_{ma}=+3^{\circ}\text{C}$ shift	$T_{ra}=+2^{\circ}\text{C}$ shift	$T_{sa}=+3^{\circ}\text{C}$ shift	$T_{ma}=-5^{\circ}\text{C}$ shift	$T_{ra}=-5^{\circ}\text{C}$ shift	$T_{sa}=-5^{\circ}\text{C}$ shift
Experimental Setup	Connect 15 Ohm to T_{ma}	Connect 10 Ohm to T_{ra}	Connect 15 Ohm to T_{sa}	Connect 100k Ω to T_{ma}	Connect 100k Ω to T_{ra}	Connect 100k Ω to T_{sa}
Date	9/01/2004	9/02/2004	9/09/2004	9/10/2004	9/23/2004	9/24/2004



(a) Temperature plot



(b) Command plot

Fig. 3 Temperature and command plot of fault detection experiment in mode 3.

기가 근무시간대에만 운전됨에 따라 데이터도 동일한 시간대에 측정하였다. 고장진단 실험조건은 4절의 Table 2와 같다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험결과

모드 3의 실험은 Fig. 3과 같이 외기덤퍼가 열

린 조건에서 냉방코일 밸브가 온도조건에 따라 운전 데이터가 획득된다. 모드 3 상태의 실험은 급기온도가 +3K, -5K만큼 왜곡된 값을 갖는 고장모사 조건, 혼합공기온도센서가 +3K, -5K만큼 왜곡된 값을 갖는 고장모사 조건 및 환기온도센서가 +2K, -5K만큼 왜곡된 값을 갖는 고장모사조건에서 수행하였다.

혼합공기온도센서 고장모사 실험결과(9/1/2004, 9/10/2004)는 공조기가 정상적으로 운전되는 상태

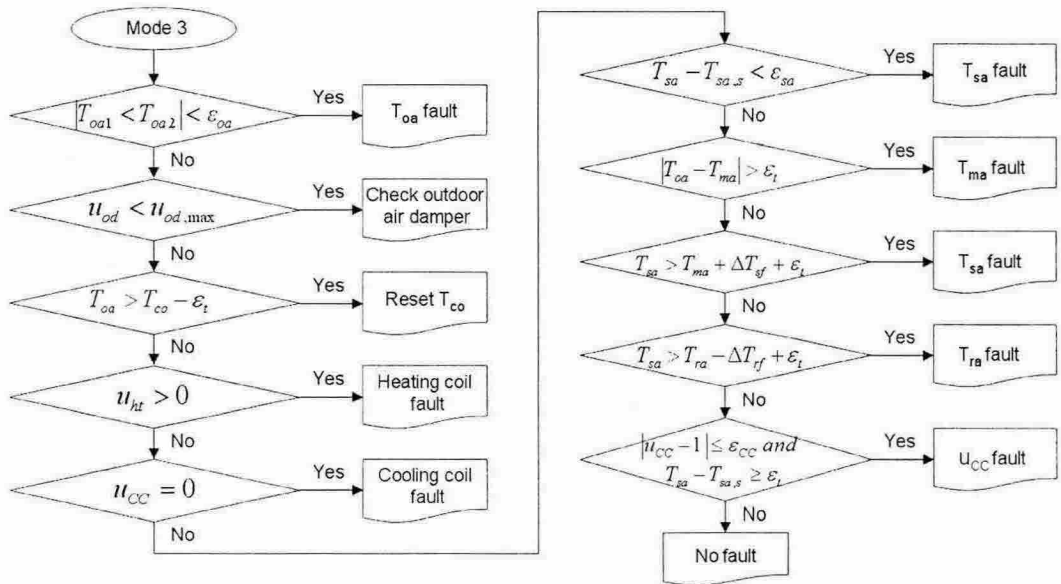


Fig. 4 Fault detection flowchart in mode 3.

에서 혼합공기온도가 환기온도보다 크거나 작은 왜곡된 신호를 보여준다. 환기온도센서 고장모사 실험결과(9/2/2004, 9/23/2004)는 공조기가 정상적으로 운전되는 상태에서 환기온도가 혼합공기온도보다 크거나 작은 왜곡된 신호를 보여준다. 급기온도센서 고장모사 실험결과(9/9/2004)는 급기온도 값이 +3K만큼 증가된 값을 유지함에 따라 $T_{sa,s}$ 조건을 만족하지 않는 것으로 판단하고 외기온도가 상승함에 따라 냉방코일이 운전하는 것을 보여준다. 급기온도센서 고장모사 실험결과(9/24/2004)는 외기온도가 상승하였음에도 불구하고 $T_{sa,s}$ 조건을 만족한 것으로 판단한 급기온도센서의 데이터로 인해 제어기가 냉방코일을 운전하지 않음을 나타낸다. 모드 3의 실험결과, 실험일수가 경과함에 따라 외기온도가 낮아지고 냉방코일의 개도도 점차 작아짐을 알 수 있다.

4.2 단일고장검출 알고리즘을 이용한 분석

단일고장검출 알고리즘은 식(1-6)과 같은 고장진단 관계식을 이용하여 공조기의 구성요소 중 고장난 요소를 구체적으로 검출하여 진단할 수 있는 고장검출방식이다. 본 연구에서 실험된 모드 3에 대한 고장진단 알고리즘의 순서도는 Fig. 4와 같다.

모드 3에서 급기온도가 +3K, -5K만큼 왜곡된 값을 갖는 고장모사 결과는 Fig. 4의 모드 3 상태의 고장진단 알고리즘에 있는 식(3, 4, 6)에 의해 고장으로 판단된다. 혼합공기온도센서가 +3K, -5K만큼 왜곡된 값을 갖는 고장모사 실험에서는 외기온도와 혼합공기온도간의 차이가 큰 구간에 대해 식(2, 3)을 이용하여 고장으로 판단된다. 다만 외기온도센서의 부착위치가 건물외부의 덕트 내에 존재함에 따라 외기온도와 혼합공기온도간의 차이가 크게 나타나면서 식(2)를 부분적으로 만족하지 못하는 경우도 발생한다. 이는 공조기의 온도센서 부착위치가 공조시스템 분석에 있어 얼마나 중요한가를 알려주는 좋은 사례이다. 환기온도센서가 +2K, -5K만큼 왜곡된 값을 갖는 고장모사 실험에서는 T_{sa} 가 정상상태라면 식(4)를 만족하게 되어 고장으로 판별된다.

특정모드에서 특정규칙의 고장이 발생하는 것은 규칙을 구성하는 요소들 중 어느 것이라도 고장의 원인이 될 수 있음을 의미한다. 따라서 공조기의 관리자는 제안된 모든 요소를 검토해야 하는 불편함이 존재한다. 본 연구에서 제안된 고장검출 알고리즘은 단일고장 부위를 상세하게 지적하기 때문에 관리자가 고장요소 부위만 점검하면 되므로 시간적, 인적 낭비를 줄일 수 있는 장점이 존재한다.

5. 결론

본 연구에서는 전문가 규칙을 기반으로 이루어진 고장검출 및 진단 알고리즘과 그린빌딩 공조기의 주요 요소에 대한 인위적 고장발생 실험을 수행하여 고장진단 알고리즘의 특성을 분석하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서 고안된 규칙기반 방식의 단일 고장검출 고장검출 및 진단 알고리즘을 이용하면 디지털제어기로 제어되는 건물들의 공조기 신호를 이용하여 고장의 원인을 구체적으로 검출할 수 있기 때문에 관리자의 시간적, 인적 낭비를 줄일 수 있는 장점이 있다.

(2) 공조기의 운전 중 고장원인을 구체적으로 검출하기 위해서는 공조기의 외기온도 측정부에 두 개의 외기온도센서를 사용하여 고장요소가 아닌 부분에 대한 고장여부를 판단한다. 외기온도센서의 고장이 없다고 판단되면 다른 요소와 관련된 관계식을 이용하여 공조기의 요소에 대한 고장여부를 판단할 수 있다.

후 기

본 연구는 NRL의 재정적 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Liu, S. T. and Kelly, G. E., 1989, Rule-based diagnostic method for HVAC fault detection, Proceeding of building simulation 89, Vancouver, pp.319-324.
2. Anderson, D., Grave, L., Reinert, W., Kreider, J. F., Dow, J., and Wubbrna, H., 1998, A quasi-real-time expert system for commercial building HVAC diagnosis, ASHRAE Transactions, 95, pp. 954-960.
3. House, J. M., Lee, W. Y., and Shin, D. R., 1999, Classification techniques for fault detection and diagnosis of an air-handling unit, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 1087-1097.
4. Han, D., and Ha, S., 2000, Fault detection and diagnosis of air-conditioning system by using curve fitted type fuzzy algorithm, Proceeding of the SAREK Winter Annual Conference, pp. 302-307.
5. Han, D., and Hwang, J., 2003, The practical fault detection of an air-conditioning system by the neural network algorithm using normalized input data, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 159-165.
6. Lee, W. Y., House, J. M., Park, C., and Kelly J. E., 1996, Fault diagnosis of an air-handling system unit using artificial neural network, ASHRAE Transaction, Vol. 102, pp. 540-549.
7. Hyvarinen, J., 1993, Static and characteristic curves, Technical research center of finland, IEA, Annex 25.
8. IEA, 1996, Building optimization and fault diagnosis source book, IEA ANNEX 25.
9. Castro, N. S., 2003, ANNEX 40 collaboration : Developing of FDD_AHU for retro-commissioning the ARIA building, NIST report.
10. Castro, N. S., 2003, IEA ECBCS ANNEX 40 -Commissioning of building HVAC systems for improved energy performance, NIST report.