

정풍량 공조시스템의 고장검출 및 진단 시뮬레이션

한 동 원, 장 영 수^{*†}, 김 서 영^{**}, 김 용 찬^{***}

고려대학교 기계공학과 대학원, *국민대학교 발효융합학과, **한국과학기술연구원, ***고려대학교 기계공학과

Fault Detection and Diagnosis Simulation for CAV AHU System

Dong Won Han, Young Soo Chang^{*†}, Seo Young Kim^{**}, Yongchan Kim^{***}

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

^{*}Department of Advanced Fermentation Fusion Science and Technology, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

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

^{***}Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received May 25, 2010; revision received August 18, 2010)

ABSTRACT: In this study, FDD algorithm was developed using the normalized distance method and general pattern classifier method that can be applied to constant air volume air handling unit(CAV AHU) system. The simulation model using TRNSYS and EES was developed in order to obtain characteristic data of CAV AHU system under the normal and the faulty operation. Sensitivity analysis of fault detection was carried out with respect to fault progress. When differential pressure of mixed air filter increased by more than about 105 pascal, FDD algorithm was able to detect the fault. The return air temperature is very important measurement parameter controlling cooling capacity. Therefore, it is important to detect measurement error of the return air temperature. Measurement error of the return air temperature sensor can be detected at below 1.2°C by FDD algorithm. FDD algorithm developed in this study was found to indicate each failure modes accurately.

Key words: Fault detection and diagnosis(고장검출 및 진단), HVAC equipment(공조설비), Normalized distance method(표준화 거리 기법), Classifier(분류기)

기 호 설 명

| | |
|--------|----------------------------|
| T | : 온도 [°C] |
| RH | : 상대습도 [%] |
| W | : 소비동력 [kW] |
| dP | : 차압 [Pa] |
| M | : 체적유량 [m ³ /s] |
| C | : 제어신호 [-] |
| $R(k)$ | : k 번째 측정인자의 잔차 |

| | |
|----------|----------------------|
| C_{jk} | : 잔차의 방향성에 대한 상수 [-] |
| $erf(x)$ | : 오류함수 [-] |

그 리 스 문 자

| | |
|----------|---------------------|
| w_j | : j 번째 고장예측확률 [-] |
| Σ | : 공분산 [-] |

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-5731; fax: +82-2-910-5739

E-mail address: yschang@kookmin.ac.kr

1. 서 론

건물의 공조시스템 등 에너지 설비들이 자동화, 복

잡화 그리고 대형화되면서, 공조시스템에 고장이 발생하였을 경우, 고장의 발생위치, 발생원인, 전체 공조시스템에 미치는 영향을 운영자가 판단하기 힘들어져 가고 있다.

공조시스템 송풍기의 운전 정지와 같이 시스템의 기능이 정지하는 갑작스런 고장(Hard failure)은 전기적 릴레이나 알람을 통해서 쉽게 고장을 검출하고 진단할 수 있지만, 송풍기 성능저하나 제어센서의 노후화로 인한 민감도 저하와 같은 점차적인 고장(Soft failure)은 고장이 진행되고 있다라도 제어시스템이 자체적으로 제어기능을 수행하여 시스템의 구동을 유지하기 때문에 고장을 검출하거나 진단하기 어렵다.

이로 인해 전체 건물의 공조시스템의 연간 에너지 사용량이 증가하고 결국 시스템의 손상까지 발생할 수 있다. 따라서 이러한 갑작스런 고장(Hard failure)뿐만 아니라 점차적인 고장(Soft failure)을 적절한 시기에 파악할 수 있는 에너지 진단 방법이 필요하다.⁽¹⁾

공조설비에 대한 고장진단 연구는 1990년대부터 진행되어왔다. 특히 환기설비(Air handling unit)에 대한 연구를 중심으로 진행되어 왔으며, 시스템 제어를 위해 설치된 센서의 고장을 진단하는 기법 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 국내에서도 각 대학과 연구소에서 소형 냉동시스템과 공기조화기의 고장검출 및 진단기법 개발을 위한 이론적, 실험적 연구가 수행되고 있다.⁽²⁻⁴⁾

Peitsman et al.^(5,6)은 ARX(AutoRegressive with eXogenous)와 인공신경망(Artificial Neural Networks)을 통한 공조시스템에 대하여 고장진단을 하였으며, Han et al.⁽⁷⁾은 현장 데이터를 적용한 Fuzzy와 인공신경망 알고리즘을 발표하였다. House et al.^(8,9)은 공조기에 대한 규칙기반기법을 개발하고, 시뮬레이션과 현장실험을 통해 성능을 검증하였다. Yang et al.⁽¹⁰⁾은 온도센서 고장에 대한 순차적인 규칙기반 FDD 알고리즘을 개발하고 실험과 현장평가를 통해 성능을 검증하였다.

일반적으로 공조시스템의 고장진단에 대한 연구는 대상 기기에 고장이 발생하였을 때의 자료를 기반으로 신경망이론이나 퍼지기법 등을 사용한 고장검출 방법이 주로 이루어졌다. 그러나 이러한 방법들은 고장에 대한 많은 자료수집이 선행되어야 하기 때문에 공조시스템이 실제 현장에 설치되어 작동 중인 상태로 있거나, 고장에 대한 자료를 얻을 수 없는 경우에는 실용적이지 못하다. 공조시스템의 제어방법과 허용범위 등을 이용하여 진단 규칙을 설정하고, 시스템의 상태 값이나 제어 값이 정해

진 규칙을 준수하는지의 여부를 판단하여 고장을 검출하는 전문가 규칙 기법은 간단한 방법으로 급격한 고장의 검출에는 유리하지만, 고장진행에 따른 성능저하와 같은 점차적인 고장에 대해서는 진단하기 힘들다.

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

2. 공조시스템 시뮬레이션

2.1 대상 공조시스템

Fig. 1은 일반적인 단일덕트 정풍량 공조시스템(CAV AHU)의 그림이다. 정풍량 공조시스템의 제어는 크게 2가지로 나눌 수 있다.

첫째, 환기덕트에 설치된 온/습도 센서를 이용하여 환기온도와 습도를 측정하고, 측정된 환기온도를 이용하여 냉, 난방코일 유량조절 밸브를 비례 제어하여 설정된 환기온도 범위 내에서 실내온도를 유지하고, 측정된 환기습도를 이용하여 가습밸브를 On/Off 제어를 통해 설정 값 이상의 실내습도 조건을 유지한다.

둘째, 환절기시에는 외기, 배기 그리고 재순환 뱀퍼개도를 엔탈피 제어에 의한 상호 연동 비례 제어하지만, 동·하절기시에는 일정량의 외기를 계속

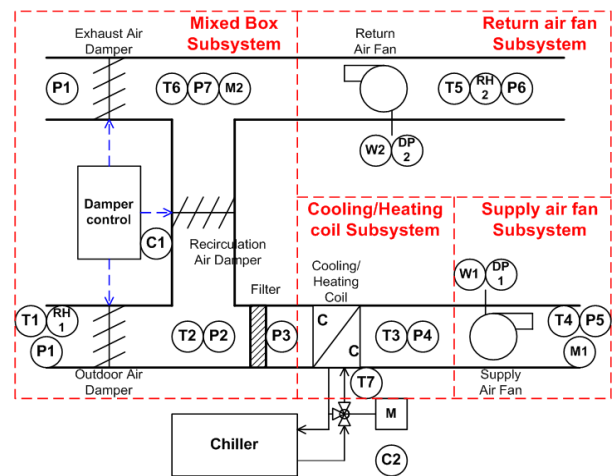


Fig. 1 Schematic diagram of a typical single duct constant air volume air handling unit.

Table 1 Sensor measurements and control signals of CAV AHU system

| Symbols | Measurement points |
|---------|--|
| T1 | Outdoor air temperature |
| T2 | Mixed air temperature |
| T3 | Cooling coil outlet temperature |
| T4 | Supply air temperature |
| T5 | Return air temperature |
| T6 | Return air fan outlet temperature |
| T7 | Cooling(Hot) water inlet temperature |
| RH1 | Outdoor air relative humidity |
| RH2 | Return air relative humidity |
| W1 | Supply air fan electric power consumption |
| W2 | Return air fan electric power consumption |
| C1 | Mixed air damper open rate control signal |
| C2 | Cooling(Heating) coil valve open rate control signal |

도입하여 실내의 공기질을 유지하기 위해서 외기, 배기 댐퍼의 개도를 최소치에 유지하고, 재순환 댐퍼는 최대 개도치를 고정하여 작동한다.

Fig. 1과 같이 단일덕트 정풍량 공조시스템은 크게 4가지 하부 시스템(Subsystem)으로 나눌 수 있다. 첫째, 외기, 배기 그리고 재순환 공기량을 조절하는 혼합댐퍼부, 둘째, 실내온도를 일정하게 유지하기 위한 냉, 난방코일부, 셋째, 일정한 급기유량을 공급하는 급기팬부, 넷째, 일정한 환기유량을 배기하는 환기팬부이다.

Table 1은 공조시스템의 고장검출 및 진단을 위한 측정점을 나타내었다. 고장검출 및 진단을 위한 측정점은 공조시스템에서 일반적으로 얻을 수 있는 온도, 상대습도, 팬 소비동력 그리고 댐퍼 및 코일 밸브 제어신호 등 총 13가지 상태 값 및 제어신호를 선정하였다.

2.2 공조시스템 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 제안한 고장검출 및 진단 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 공조시스템의 시뮬레

Table 2 Simulation model summary and HVAC system operating conditions

| Design parameter | Unit | Conditions |
|--------------------------|------------------|-------------------------------------|
| Typical floor area | m ² | 30×30 |
| Number of floors | - | 15 |
| Internal load density | W/m ² | 35 |
| Ceiling height | m | 4 |
| Window to wall ratio | - | 0.4 |
| AHU type | - | CAV AHU |
| AHU location | - | Seoul, Korea |
| Infiltration | 1/h | 1 |
| Density of occupancy | 1/m ² | 0.2 |
| Outdoor air intake | CMH | 25 |
| AHU operation start time | - | Weekday 08 : 00 Saturday 08 : 00 |
| AHU operation stop time | - | Weekday 18 : 00 Saturday 13 : 00 |

이션을 통해 얻어진 무고장 상태와 고장 상태 데이터를 이용하였다.

공조시스템의 시뮬레이션은 건물부하 계산 프로그램인 TRNSYS⁽¹¹⁾와 공학계산용 프로그램인 EES⁽¹²⁾(Engineering Equation Solver)를 연동하여 무고장 상태와 점차적인 고장 상태를 모사하여 수행하였다.

본 연구의 시뮬레이션에 사용된 표준모델건물은 기존의 연구⁽¹³⁾를 통해 작성된 서울 시내에 소재한 사무소 건물로 선정하였으며, Table 2는 표준모델건물의 개요와 공조시스템의 운전조건이다. 표준모델건물의 기준층은 다섯 개의 열적 존(Zone)으로 나누어지며, 방위별로 외벽으로부터 5 m 깊이에 4개의 외주부 존과 내주부 존으로 나누어진다. 총 층수는 15층이며, 전체 15층 건물 중 AHU-1은 1층에서 8층을 공조하며, AHU-2는 9층에서 15층을 공조한 것으로 가정하였다.

표준모델건물에서는 실내 발열밀도의 기준 값으로 35 W/m²를 적용하였고, 재실 및 실내 발열기기 스케줄은 평일 근무시간 오전 9시부터 오후 6시, 토요일은 오전 9시부터 오후 1시까지로 설정하였다. 기상데이터는 대한설비공학회에서 제공하는 서울 지역의 기상 데이터를 이용하였으며, 시뮬레이션 기간은 하절기인 8월 한 달 기간을 수행하였다.

본 연구에 사용된 시뮬레이션 모델은 NIST에서 개발한 HVACSIM+시뮬레이션 프로그램⁽¹⁴⁾에 사용된 모델을 이용하였다.

댐퍼의 입출구 차압은 댐퍼의 위치와 공기유량의

함수로 계산하였으며, 공기유량은 팬의 회전수와 팬의 압력수두계수를 이용하여 계산하였다.

냉수 코일의 경우 건식코일과 습식코일로 구분하여 유용도(effectiveness)-NTU법과 LMHD 식을 이용하여 냉수와 공기의 출구온도를 구하였다.

3. 고장검출 및 진단 알고리즘

3.1 고장검출 및 진단 알고리즘

본 연구에서 개발한 고장검출 및 진단 알고리즘은 Fig. 2과 같이 크게 3가지 단계로 구성되어 있다. 첫째, 공조기가 무고장 상태(No fault state)에서 운전될 때 얻어지는 자료를 이용해서 무고장 기준 모델(Reference model)을 만든다. 둘째, 현재 측정값과 무고장 기준모델의 값의 차이인 잔차(Residual)를 계산하고, 잔차가 어느 허용범위를 벗어나게 되면 고장으로 간주한다. 마지막으로 고장패턴을 이용하여 고장의 원인을 진단하는 순서로 구성되어 있다.

3.2 무고장 기준모델

기존 연구들의 일반적인 고장검출 기법에서는 시스템 제어를 위해 설정하는 설정 값들을 무고장 기준 값으로 사용하여 실제 측정 값과의 잔차를 얻었지만, 이러한 경우 시스템 내 고장발생시 고장검출 및 진단의 민감도가 떨어지는 단점이 있다.

본 연구에서는 공조시스템에 대한 고장검출을 위해 4가지 하부 시스템별 무고장 기준모델을 제안하였다. 여기서 기준모델의 형태는 각 하부 시스템에 영향을 줄 수 있는 공조시스템의 상태 값이나 제어 신호를 독립변수로 선정하고, 독립변수의 변화에 따라 영향을 받아서 민감하게 변하는 상태 값을 종속변수로 선정하여 2차 다항식(Polynomial)으로 구성하였다.

1차 다항식은 기준모델을 통해 얻어진 예측 값의 편차가 크고, 3차 다항식은 예측 값은 정확하지만 계산을 위해 많은 계수를 요구한다. 따라서 본 연구에서는 무고장 상태의 기준모델에 2차 다항식을 이용하였다.

Table 3은 하부 시스템별 무고장 기준모델을 구성하는 종속변수와 독립변수를 정리한 것이다. 종속변수는 대부분 하부 시스템의 출구온도 값을 선정하였으며, 공조시스템 내 압력이나 유량변화에 관한

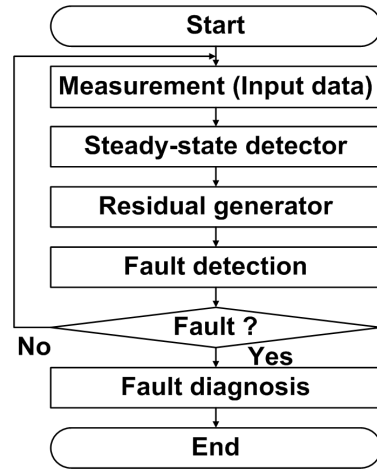


Fig. 2 FDD algorithm flow chart.

Table 3 Dependence and independence variables for no-fault reference model

| Subsystem | Dependence variable | Independence variables |
|----------------------------------|---------------------|------------------------|
| Mixed air damper | T2 | T1, T6, C1 |
| Cooling/ Heating coil | T3 | T2, T7, RH1, RH2, C2 |
| Supply air fan | T4 | T3, W1 |
| Return air fan | T6 | T5, W2 |
| Supply air fan power consumption | W1 | Constant |
| Return air fan power consumption | W2 | Constant |

종속변수로 급기팬과 환기팬의 소비동력을 선정하였다. 정풍량 공조시스템은 무고장시 소비동력은 일정하다.

3.3 고장 검출 기법

본 연구에서는 현재 측정값과 독립변수를 이용하여 얻어진 무고장 기준모델의 값의 차이인 잔차(Residual)를 계산하고, 잔차가 어느 허용범위를 벗어나게 되면 고장으로 간주한다.

본 연구에서는 제안한 표준화 거리 기법을 사용하여 고장을 검출하였다. 여기서, 표준화 거리 기법⁽¹⁵⁾이란 Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 고장이 발생하여 진행된다면 측정인자가 기준모델 값으로부터 벗어나게 되는데, 이것을 이용하여 기준모델 인자값과 현재의 인자값 사이의 표준화 거리를 계산하여 미리

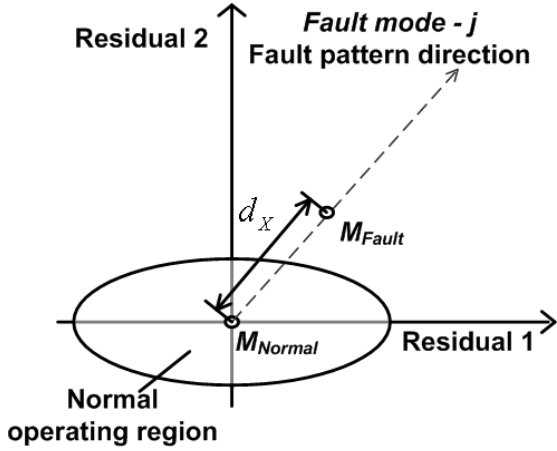


Fig. 3 Normalized distance method for 2-Dimensional case.

정해진 표준화 거리를 벗어나게 되면 고장으로 판단하는 기법이다.

3.4 고장 진단 기법

어떠한 고장이 발생하면 각 측정점의 잔차는 고장의 원인에 따라 고유한 방향으로 이동하게 된다. 만약 Fig. 3과 같이 고장의 진행방향이 결정되면 이를 이용해 고장원인을 진단할 수 있다.

Table 4는 고장이 발생하였을 때 잔차가 이동하는 고유한 방향을 정리한 것이다. 여기서, “↑”로 표시된 것은 측정점의 잔차 방향이 증가하는 경우이며, “↓”로 표시된 것은 측정점의 잔차 방향이 감소하는 경우이며 그리고 마지막으로 “-”으로 표시된 것은 잔차의 방향이 변하지 않거나 예측하기 어려운 경우이다.

본 연구에서는 Rossi and Braun⁽¹⁶⁾이 제안한 식 (1)을 사용하여 고장원인을 진단하였다.

식(1)은 현재 발생된 고장이 j번째 고장원인에 의한 잔차의 진행방향과 유사할 확률을 계산한 식이다. 고장원인에 대한 예측확률 중 최대값을 가지는 고장이 현재 발생한 고장의 원인으로 진단할 수 있다.

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

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.

Table 4 Fault diagnosis pattern table

| | T2 | T3 | T4 | T6 | W1 | W2 |
|---------|----|----|----|----|----|----|
| Fault 1 | - | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| Fault 2 | - | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| Fault 3 | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| Fault 4 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | - | - |
| Fault 5 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | - | - |

Table 5 Simulated fault type

| Fault mode | Simulated fault type | Simulated fault symptom |
|------------|--|---|
| Fault 1 | Mixed air damper stock | Outdoor air and exhaust air damper stock at 10% position, Recirculated air damper stock at 90% position |
| Fault 2 | Mixed air damper stock | Outdoor air and exhaust air damper stock at 30% position, Recirculated air damper stock at 70% position |
| Fault 3 | Mixed air filter plugging | Decreasing rate of mixed air filter area |
| Fault 4 | Return air temperature sensor error (measured at a lower temperature) | Decrease of simulated return air temperature |
| Fault 5 | Return air temperature sensor error (measured at a higher temperature) | Increase of simulated return air temperature |

3.5 시뮬레이션 고장 모사 종류

Table 5는 시뮬레이션 모델을 이용하여 모사된 고장의 종류를 나타내었다. 모사된 고장은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째 댐퍼 고정과 같은 갑작스런 고장, 둘째 필터 막힘과 같은 시스템적 점차적인 고장 그리고 마지막으로 공조시스템의 중요한 제어점인 환기 온도센서의 민감도 저하로 인한 제어고장을 모사하여 시뮬레이션 하였다.

댐퍼 고정은 댐퍼를 구동하는 기기(Actuator)의 노후화나 고장으로 인해 발생할 수 있다. 일반적으로 외기, 배기 그리고 재순환 댐퍼개도는 하나의 구

동기기에 의해 상호 연동하여 증감하며, 환절기에는 외기, 배기 그리고 재순환 댐퍼개도를 엔탈피 제어에 의한 상호 연동 비례 제어하지만, 하절기에는 외기와 배기 댐퍼의 개도는 20%로 고정되고 재순환 댐퍼 개도는 80%로 고정되어 운전된다.

본 연구에서는 환절기에 엔탈피 제어에 의해 작동 되던 댐퍼 구동기기가 노후화나 고장으로 인해 고정되어 버린 상태로 하절기시 운전되는 경우를 모사하였다.

필터 막힘은 혼합공기 내 먼지로 인해 필터가 오염되어 발생할 수 있는 고장이며, 이로 인해 필터의 공기유동 면적이 감소하게 되고 필터 차압이 증가하는 현상을 모사하였다.

정풍량 공조시스템의 제어점인 환기 온도센서가 노후화되어 실제 온도보다 높거나 낮게 온도를 측정하게 되는 고장이 발생하면, 공조시스템의 제어점이 변동하여 공조시스템이 비정상적으로 작동하는 것을 모사하였다.

본 연구에서는 8월 첫째 주를 기준으로 일주일동안 고장모사 시뮬레이션을 수행하였다.

4. 시뮬레이션을 이용한 고장검출 및 진단

4.1 무고장 기준모델

무고장 기준모델 작성을 위한 데이터 수는 기준모델의 민감도와 밀접한 관계가 있다. 데이터 수가 너무 작으면 모델 개발을 위한 시간이 작게 들어 빠른 고장검출을 수행할 수 있지만 기준모델로 예측하는 종속변수의 민감도가 떨어져서 고장검출 오류가 발생할 수 있고, 데이터 수가 너무 많은 경우는 고장검출 민감도는 우수하지만 모델 개발을 위한 시간이 많아 필요해 현장 적용에 실용적이지 못하다.

Fig. 4는 개발기간에 따른 무고장 기준모델의 민감도를 분석한 그림이다. Fig. 4의 X축은 기준모델 개발기간이며, Y축은 시뮬레이션 기간인 8월 한 달 동안에 측정된 종속변수 값과 독립변수를 이용하여 얻어진 무고장 기준모델 값의 차이인 잔차의 표준편차를 나타내었다.

Fig. 4와 같이 2주 동안의 데이터를 이용하여 모델을 개발하였을 때, 모든 종속변수 잔차의 표준편차가 충분히 작아지는 것을 알 수 있으며, 2주 이상의 데이터를 이용하더라도 표준편차의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다.

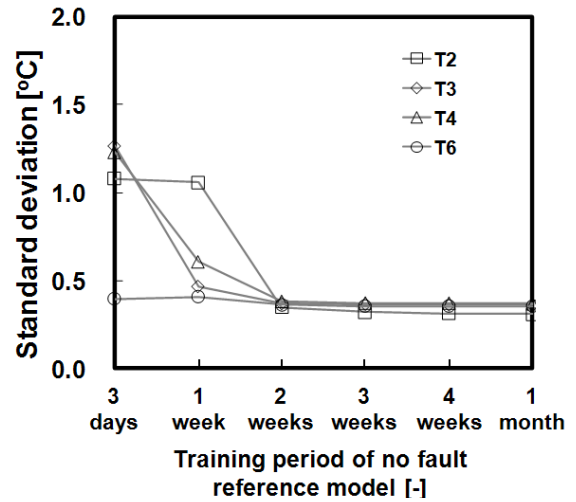


Fig. 4 Sensitivity of no-fault reference model.

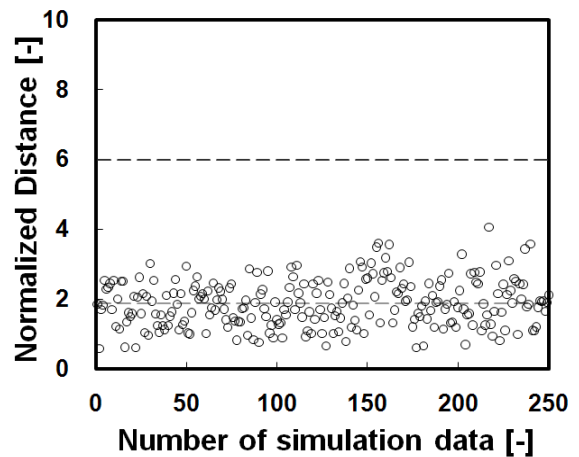


Fig. 5 Normalized distance of no-fault state.

따라서 본 연구에서는 8월 1일에서 8월 14일까지 2주 동안 공조기 운전시간 데이터인 총 110개 데이터를 이용하여 무고장 기준모델을 작성하고 고장검출을 수행하였다.

Fig. 5는 무고장 시뮬레이션을 통해 얻어진 데이터와 무고장 기준모델 사이의 잔차를 이용하여 고장검출을 수행한 것이다. Fig. 5에 표시되어 있는 점선은 표준화거리기법에서 고장검출 경계선이며, 모든 무고장 데이터와 기준모델 사이에 잔차의 표준화거리가 6이하인 무고장 상태로 판별되고 있어서 기준모델의 고장검출에 대한 민감도가 우수한 것을 알 수 있다.

4.2 고장모사 시뮬레이션을 이용한 고장 검출

본 연구에서는 Table 5에 설명한 각 고장들에 대

해 고장모사 시뮬레이션을 수행하였으며, 고장의 시뮬레이션 결과를 Fig. 6~Fig. 8과 Table 6에 나타내었다.

Fig. 6은 Table 5에 설명한 각 고장 중 혼합공기 댐퍼 개도오류나 혼합공기 필터 막힘 고장에 의해 발생하는 공조시스템 내 압력 기울기 선도의 변화를 나타내었으며, Fig. 7은 이러한 고장에 의해 발생하는 공조시스템 내 온도 변화를 나타내었다. Table 6은 고장에 따른 공조시스템 내 압력 변화로 인한 급기팬과 환기팬의 차압, 유량 그리고 소비동력의 무고장 상태 대비 증감을 나타내었다.

Table 5에 설명한 각 고장 중 Fault 1과 같은 고장이 발생하게 되면, Fig. 6과 같이 외기댐퍼 개도가 10% 더 닫히게 되면서 상대적으로 재순환 댐퍼가 10% 더 열리게 된다. 이에 따라 재순환 댐퍼의 압력 강하는 줄어들고 혼합공기압(P2)은 무고장 상태보다 증가하는 것을 알 수 있고, 혼합공기압의 증가로 공조기 내 모든 압력이 전반적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 6과 같이 혼합공기압의 증가로 급기팬의 입구와 출구압은 증가하였지만, 시뮬레이션 결과로 급기팬의 차압(DP1)은 무고장 상태에 비해 감소하였고, 급기유량(M1)은 증가하는 경향을 보였다. 또한 환기팬도 입구(P6)와 출구(P7)의 차압(DP2)은 감소하였고, 환기유량(M2)은 증가하는 경향을 보였다.

Table 4의 고장패턴 테이블과 같이 급기유량과 환기유량은 증가하였지만, 급기팬과 환기팬의 소비동력(W1, W2)은 급기팬과 환기팬의 차압에 영향을 더 받아 각각 감소하였고, 이에 따라 Fig. 7과 같이 급기팬과 환기팬의 출구온도(T4, T6)도 감소하는 경향을 보였으며, 냉각코일(Cooling coil) 출구온도(T3)는 급기유량의 증가로 인해 증가하는 경향을 보였다.

댐퍼개도가 변하게 되면, 외기도입유량과 재순환 유량이 변하게 되어 혼합공기온도(T2)도 변하게 된다. Fault 1번의 경우, 외기도입유량이 줄고 재순환 유량이 증가하게 되므로, Fig. 7과 같이 재순환온도가 외기온도보다 낮은 경우는 혼합공기온도는 재순환온도로 근접하여 감소하게 될 것이고, 재순환온도가 외기온도보다 높은 경우는 혼합공기온도는 증가하게 될 것이다. 따라서 혼합공기온도는 고장 발생 원인에 따른 일정한 패턴을 보이지 않게 되며, Table 4와 같이 외기댐퍼 개도가 크거나 작게 고정되는 고장에 대해서 고장에 따른 고장패턴을 알 수 없는 변수가 된다.

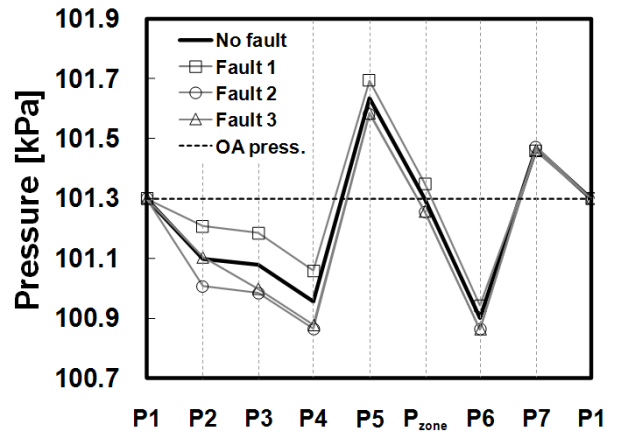


Fig. 6 Pressure gradient diagram of fault type.

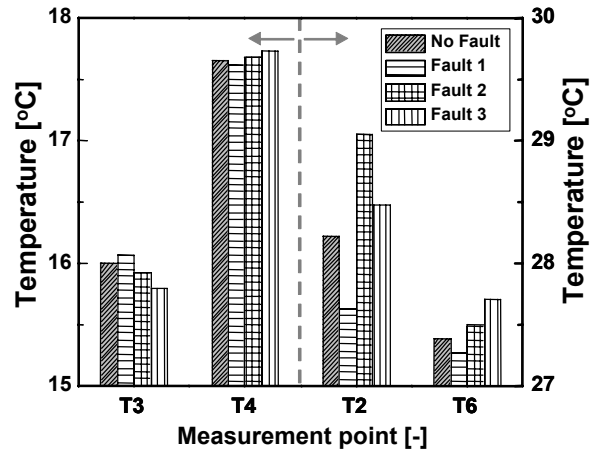


Fig. 7 Temperature change diagram of fault type.

Table 6 Change pattern of properties

| | Fault 1 | Fault 2 | Fault 3 |
|-----|---------|---------|---------|
| DP1 | ↓ | ↑ | ↑ |
| M1 | ↑ | ↓ | ↓ |
| W1 | ↓ | ↑ | ↑ |
| DP2 | ↓ | ↑ | ↑ |
| M2 | ↑ | ↓ | ↓ |
| W2 | ↓ | ↑ | ↑ |

Table 5에 설명한 각 고장 중 Fault 2와 같은 고장이 발생하면, Fig. 6과 같이 외기댐퍼 개도가 10% 더 닫히게 되면서 상대적으로 재순환 댐퍼가 10% 더 닫히게 되고, 혼합공기압(P2)은 재순환댐퍼 차압이 증가하여 무고장 상태보다 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 Table 4에서와 같이 혼합공기온도(T2)를 제외한 모든 종속변수들이 Fault 1과 반대의 고

장패턴을 보이게 된다.

Fault 3과 같은 고장이 발생하면, Fig. 6과 같이 혼합공기가 통과하는 필터의 전면적이 감소로 혼합공기압(P2)과 혼합공기필터 출구압(P3) 사이의 차압은 급격히 증가하고, 급기 되는 유량도 감소하게 된다. 따라서 공조기 내 상태는 외기덤편 개도가 30%로 고정되었을 때와 유사한 현상을 보이지만, 혼합공기온도(T2)는 환기팬 출구온도의 영향을 받아 증가하므로, 혼합공기 덤편개도 고장과 분류할 수 있는 중요한 인자가 된다.

Fig. 8은 정풍량 공조시스템의 제어점인 환기온도를 측정하는 센서의 민감도 저하에 대한 고장모사 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 환기온도를 측정하는 센서의 민감도가 저하되어 실제 값보다 낮게 측정하는 고장을 모사하여 그 결과를 나타내었다. Fig. 8에서 위쪽 부분에 원과 함께 왼쪽 방향으로 화살표가 된 선들은 혼합공기온도를 의미하며, 아래쪽 부분에 원과 함께 오른쪽 방향으로 화살표가 표시된 선들은 급기온도를 말한다. 여기서 점선은 무고장 상태에서의 혼합공기온도와 급기온도를 나타내었으며, 실선은 센서의 민감도 저하 고장 상태에서의 혼합공기온도와 급기온도를 나타내었다.

Table 4의 고장패턴 테이블과 같이 센서고장은 급기와 환기유량이나 압력분포에 영향을 주지 않으므로 급기팬과 환기팬의 소비전력인 W1과 W2의 변화는 없지만, 환기온도가 낮게 측정되면 냉수코일 밸브는 실제 제어해야 하는 개도보다 적게 열리게 된다.

이에 따라 냉각코일 출구온도(T3)와 급기온도(T4)는 상승하게 되고, 급기온도의 상승은 환기온도와 환기팬 출구온도(T6)의 상승을 가져온다. 환기팬 출구온도의 상승으로 혼합공기온도(T2) 역시 상승하게 되어 재순환되는 공기온도의 상승은 결국 급기온도를 더욱 높이는 결과를 유발하게 된다.

반면 환기온도를 측정하는 센서의 민감도가 저하되어 실제 값보다 높게 측정하는 고장의 경우는 실제 값보다 낮게 측정하는 고장과는 반대 현상을 보이게 된다.

Fig. 9는 각 고장에 대하여 처음으로 고장검출이 되는 고장의 진행정도를 나타내었다. 점선을 기준으로 왼쪽은 혼합공기 필터 막힘 고장이 진행되어 최초 고장검출 되었을 때의 필터 차압이며, 오른쪽은 환기온도 센서 민감도 저하 고장이 진행되어 최초 고장검출 되었을 때의 고장진행 정도이다.

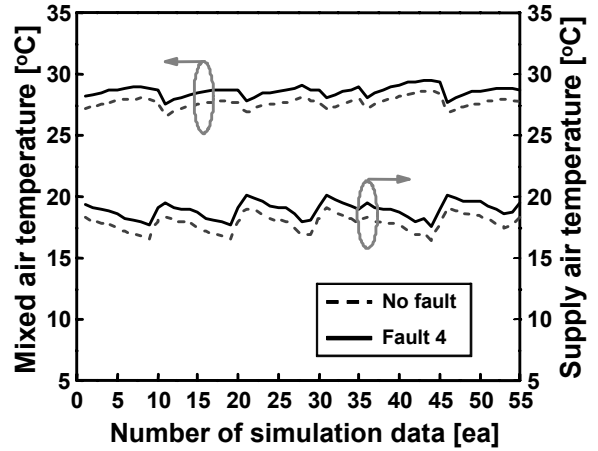


Fig. 8 Change of FDD parameter property when return air temperature sensor measure at a lower temperature.

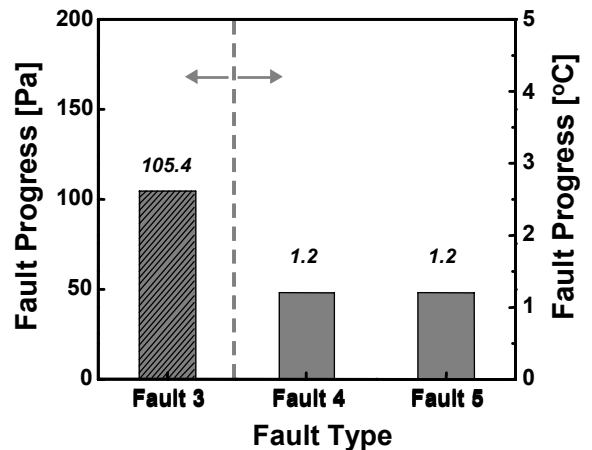


Fig. 9 Fault progress at a first fault detection.

혼합공기 필터 막힘 고장(Fault 3)의 경우, 본 연구에서는 초기 필터 차압을 약 22 Pa로 가정하여 고장을 점차적으로 진행시켰으며, Fig. 9와 같이 필터 차압이 약 105 Pa에서 최초 고장으로 판별하였다.

이것은 일반적으로 실제 현장에서 사용되는 차압 검출 알람 설정 값이 약 490 Pa인 것에 비해 고장 진행에 따라 초기고장에서 고장을 진단 할 수 있다. 또한 환기온도 센서 민감도 저하 고장의 경우도 민감도가 ±1.2°C이내에 고장을 검출 할 수 있어서 표준화거리기법이 모든 고장검출에 대해 매우 민감함을 알 수 있었다.

4.3 고장모사 시뮬레이션을 이용한 고장진단

Table 7은 특정한 고장모사 시뮬레이션 결과를 식

Table 7 Fault diagnosis class probabilities at a first fault detection

| Fault Mode | Fault 1 | Fault 2 | Fault 3 | Fault 4 | Fault 5 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 0.3547 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0008 | 0.0236 |
| 2 | 0.0001 | 0.2108 | 0.0669 | 0.0045 | 0.0045 |
| 3 | 0.0000 | 0.2108 | 0.3547 | 0.0236 | 0.0008 |
| 4 | 0.0001 | 0.0397 | 0.0669 | 0.1253 | 0.0002 |
| 5 | 0.0024 | 0.0075 | 0.0024 | 0.0002 | 0.1253 |

(1)을 사용하여 5가지의 고장모드에 대한 고장예측 확률을 나타낸 것이다. 5가지 고장에 대해서 각각 고장모사 시뮬레이션을 수행하여, 고장검출이 되는 시점에서의 고장예측 확률을 나타내었다.

Table 7의 다섯 번째 행에 정리되어 있는 값은 환기온도 센서 민감도 저하 고장(Fault 5)이 발생하였을 때 5가지 모드에 대해 고장이라고 예측할 수 있는 확률을 나타낸 것이며, 분류예측 값 중에 다섯 번째 값이 0.1253으로 가장 큰 값을 가지므로 환기온도 센서 민감도 고장으로 잘 분류하고 있으며, 다른 고장 원인도 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 실용화가 용이한 표준화 거리 기법과 규칙기반법을 이용하여 공조시스템에 대한 고장검출 및 진단 알고리즘을 제안하였다.

특히 고장검출 및 진단 알고리즘에 사용된 무고장 기준모델을 4가지 각 하부 시스템에 관계된 상태 값이나 제어신호로 구성하여, 공조시스템 내 발생하는 고장에 대한 검출 및 진단의 민감도를 높였다. 또한 무고장 기준모델의 민감도를 높이기 위해 2주 동안 공조기 운전시간 데이터를 이용하여 무고장 기준모델을 작성하고, 고장검출을 수행하였다.

본 연구에서는 제안한 고장검출 및 진단 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 기존 연구를 통해 작성된 표준모델건물 내 정풍량 공조시스템을 대상으로 무고장과 고장상태 시뮬레이션을 수행하였다. 모사된 고장의 종류는 댐퍼 고정, 혼합공기 필터 막힘 그리고 환기센서 고장을 포함한 총 5가지이며, 모든 고장에 대해서 표준화거리기법으로 고장검출이 가능하며, 민감도도 우수한 것을 알 수 있었다.

분류확률기법을 이용한 고장진단은 고장모드별 분류확률 값이 해당 고장에서 가장 큰 값을 제시하

여, 모든 고장의 원인을 잘 진단 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행하는 2008년도 에너지자원기술개발사업(과제번호 : 2008-E-BD11-P-01)과 2010년도 국민대학교 교내 연구비를 지원 받아서 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. Han, D. and Ha, S., 2000, A study on the fault detection and diagnosis method for the air conditioner, Proceedings of the SAREK, pp. 1408–1412.
3. 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.
4. Lee, W. Y. and Kyong, N. H., 2001, Fault detection and diagnosis for an air-handling unit using artificial neural networks, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 1288–1296.
5. Peitsman, H. C. and Bakker, V. E., 1996, Application of black-box models to HVAC system for fault detection, ASHRAE Transactions, Vol. 102, No. 1, pp. 628–640.
6. Peitsman, H. C. and Soethout, L. L., 1997, ARX models and real-time model-based diagnosis, ASHRAE Transactions, Vol. 103, No. 1, pp. 657–671.
7. Han, C. Y., Xiao, Y. and Braun, C. J., 1999, Fault detection and diagnosis of HVAC systems, ASHRAE Transactions, Vol. 105, No. 1, pp. 568–578.
8. House, J. M., Vaezi-Nejad, H. and Whitecomb, J. M., 2001, An expert rule set for fault

- detection in air-handling units, ASHRAE Transactions, Vol. 107, No. 1, pp. 858-871.
9. Schein, J., Bushby, S. T., Castro, N. S. and House, J. M., 2006, A rule-based fault detection method for air handling units, Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 1485-1492.
 10. Yang, H., Cho, S., Tae, C. S. and Zaheeruddin, M., 2008, Sequential rule based algorithms for temperature sensor fault detection in air handling unit, Energy Conversion and Management, Vol. 29, pp. 2291-2306.
 11. SEL(Solar Energy Lab.), Trnsys 16 User's Manual, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, U. S. A.
 12. F-Chart Software, EES Manual, 2001, Version 6.20.
 13. Seok, H. T. and Kim, K. W., 2001, Thermal performance evaluation of design parameters and development of load prediction equations of office buildings, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 9, pp. 914-921.
 14. Clark, D. R. and May, Jr. W. B., 1985, HVAC SIM+ building systems and equipment simulation program-user guide, NBSIR 85-3243, NIST.
 15. Han, D. W. and Chang, Y. S., 2008, Development of a fault detection and diagnosis algorithm using fault mode simulation for a centrifugal chiller, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 10, pp. 669-678.
 16. 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.