룰베이스를 이용한 정풍량 공조기 고장 검출 및 진단 시스템의 실험적 연구

한 도 영†, 김 진*
국민대학교 기계·자동차공학부, *국민대학교 기계공학과 대학원

An Experimental Study on the Rule Based Fault Detection and Diagnosis System for a Constant Air Volume Air Handling Unit

Doyoung Han†, Jin Kim*
Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea
**Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

(Received April 19, 2004; revision received August 18, 2004)

ABSTRACT: The fault detection and diagnosis technology may be applied in order to decrease the energy consumption and the maintenance cost of the air-conditioning system. In this study, an air handling unit fault test apparatus was built and fault diagnosis algorithms were applied to diagnose various faults of an air handling unit. Test results showed the good diagnosis for applied faults. Therefore, these algorithms may be effectively used to develope the real time fault detection and diagnosis system for the air handling unit.

Key words: Fault detection and diagnosis(FDD, 고장 감지 및 진단), Air handling unit(공조기), Building automation system(BAS, 빌딩 자동제어 시스템), FDD algorithm implementation(고장 진단 및 감지 알고리즘 구현)

기 호 설 명

$\dot{m}$: 질량유량 [kg/s]
P : 압력 [mmAq]
T : 온도 [℃]

하첨자

a : 냉수코일
CC : 냉수코일
HC : 온수코일
HUD : 온수코일
in : 입구상태
out : 출구상태
w : 물

† Corresponding author
Tel.: +82-2-910-4675; fax: +82-2-910-4839
E-mail address: dyhan@kookmin.ac.kr

1. 서 론

공조와 관련된 설비가 점점 복잡해짐에 따라 공조 설비의 고장 발생에 대한 운영자의 대처에 많은 어려움이 발생되고 있다. 장비의 정지 등으로 나타나는 급격한 고장의 경우 건물에 설치되어 있는 기존의 제어 시스템으로도 고장의 발생 여부나 고장 종류 등에 대한 감지가 가능하지만

시스템의 노후나 유지 보수 미비 등의 기타 요인으로 인하여 점진적인 성능 저하가 발생하는 경우에는 고장 현상이 급격한 고장으로 발전하기 전까지는 제어 시스템이 자체적으로 제어 기능을 수행하여 시스템의 성능을 유지하기 때문에 고장의 발생과 관련된 현상을 파악하기가 매우 어려운 실정이다. 그러나 급격한 고장의 경우 즉각적인 대응이 가능한데 비하여 점진적인 고장의 경우 장기간에 걸쳐 시스템 설비의 성능이 저하되기 때문에 에너지의 낭비와 시스템 안정성 저하 등을 가져오게 된다.

최근 이러한 문제점을 보완하기 위하여 건물 공조 설비의 고장을 예지해 주고 유지 보수에 대한 필요한 정보를 제공해 줄 수 있는 고장 감지 및 진단 시스템(FDD : fault detection & diagnosis system)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 공조 시스템에 적용될 수 있는 FDD 시스템의 개발을 위하여 미국을 중심으로 국제 에너지 기구 IEA(International Energy Agency)의 Annex 25, Annex 34 등의 활동을 통하여 집중적인 연구가 수행되고 있으며, Peitsman et al.[1,2]은 ARX와 인공신경망을 사용한 블랙박스 모델을 이용하여 공조 시스템의 고장 감지를 시도하였으며, Riemer et al.[3]은 냉동기를 대상으로 시간 급수 방법을 적용한 고장 감지 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 국내의 경우, Lee and Kyong[4,5] 등은 공조기의 고장 감지 및 진단을 위하여 신경망과 패턴인식 기법을 사용한 알고리즘을 제시하였으며, FDD 시스템을 위한 개발 지원 도구로 활용될 수 있는 소프트웨어에 대한 예를 보여주었다. 또한 Han and Lee[6] 등은 곡선 적합 모델을 사용하여 멀티형 냉방기의 응축기 오염과 증발기 오염에 관한 고장을 감지하였으며, Han and Joo[7 9] 등은 공조기를 대상으로 하여 룰베이스를 이용한 FDD 시스템에 대한 시뮬레이션을 이용한 분석을 수행하였고, Han and Kim[10] 등은 이 시스템의 구현 사례를 제시한 바 있다. 하지만 이러한 연구의 대부분은 고장 감지와 진단을 위한 이론을 제시하는 수준으로 실질적인 알고리즘 적용과 시스템의 구현에는 어려움을 보이고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 공조기의 FDD 시스템 개발을 위하여 고장 모사 실험 장치와 FDD 시스템을 구축하고, Han and Joo[9]가 개발한 알고리즘을 적용한 후, 실제 성능 실험을 통하여 개발된 공조기 FDD 시스템의 운전 특성과 성능을 분석함으로서, 개발된 시스템이 공조기를 대상으로 한 고장 감지 및 진단을 적절히 수행할 수 있음을 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 고장 모사 시스템

2.1 고장 모사 실험장치

공조기를 대상으로 한 FDD 시스템의 성능 실험을 위하여 Fig. 1과 같은 고장 모사 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 공조 시스템, 환경 조성 시스템, FDD 및 제어 시스템 등으로 구성되어 있으며 각 시스템의 주요 사양을 Table 1에 나타내었다.

공조 시스템은 Fig. 2와 같이 공조기의 각 구성요소에 대한 각종 고장을 임의로 발생시킬 수 있는 구조를 가진 정풍량 방식의 공조기, 냉난방 열원을 공급하기 위한 냉동기와 보일러, 공기를 실내로 공급하기 위한 덕트 시스템 등으로 구성되었다. 환기팬, 급기팬, 냉난방 코일, 덕트, 댐퍼

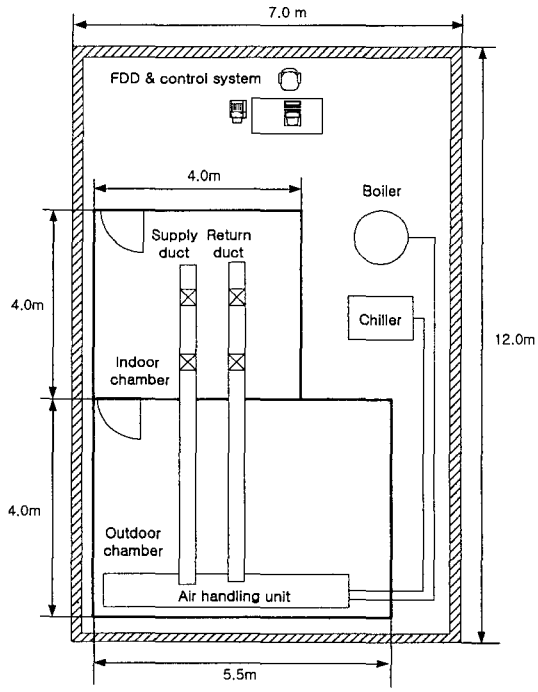


Fig. 1 Test facilities.

Table 1 Specification of test facilities

Air handling system	Air handling unit	Supply fan air flow rate (m^3/h)	6,000
		Return fan air flow rate (m^3/h)	4,000
		Cooling coil capacity (kcal/h)	12,000
		Heating coil capacity (kcal/h)	25,000
		Humidifier capacity (kg/h)	20
	Chiller	Capacity (kcal/h)	8,100
		Motor power (HP)	3
	Boiler	Capacity (kcal/h)	128,784
		Max. fuel consumption (kg/h)	13.9
Environmental chamber system	Indoor chamber	Dimension (W×D×H) (m)	4.0×4.0×2.5
		Control range (℃, %RH)	15~30, 20~90
	Outdoorchamber	Dimension (W×D×H) (m)	5.5×4.0×2.5
		Control range (℃, %RH)	7~35, 20~90
FDD & control system	FDD controller	Input & output module capacity (channel)	24
		Input & output module CPU type (bit)	32
		CPU module capacity (channel)	32
		CPU module CPU type (bit)	32
	AHU controller	Input & output module capacity (channel)	16
		Input & output module CPU type (bit)	16
		CPU module capacity (channel)	16
		CPU module CPU type (bit)	32
	System controller	Operating system	Windows-NT
		CPU type (bit)	32
		Max. control capacity (channel)	200

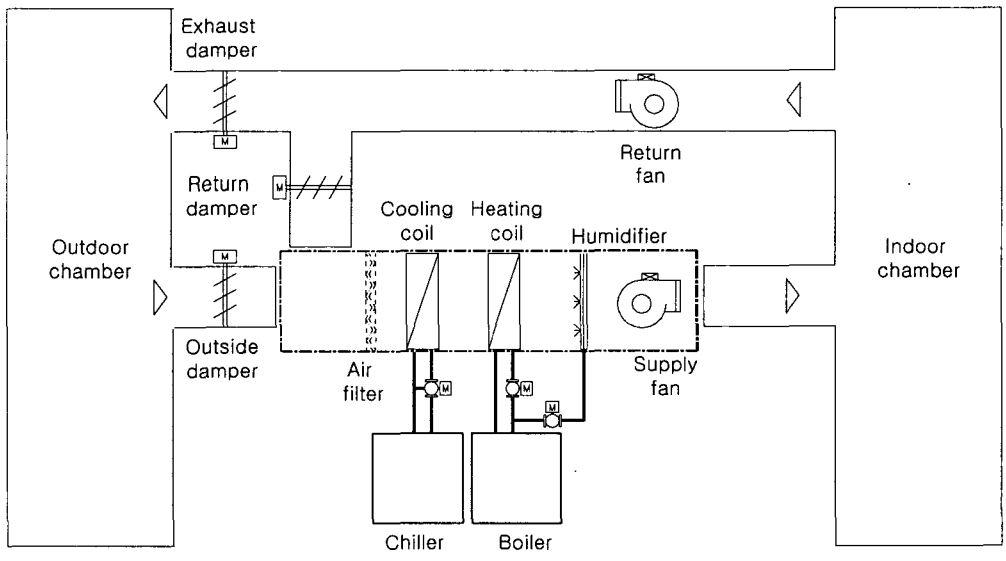


Fig. 2 Air handling system.

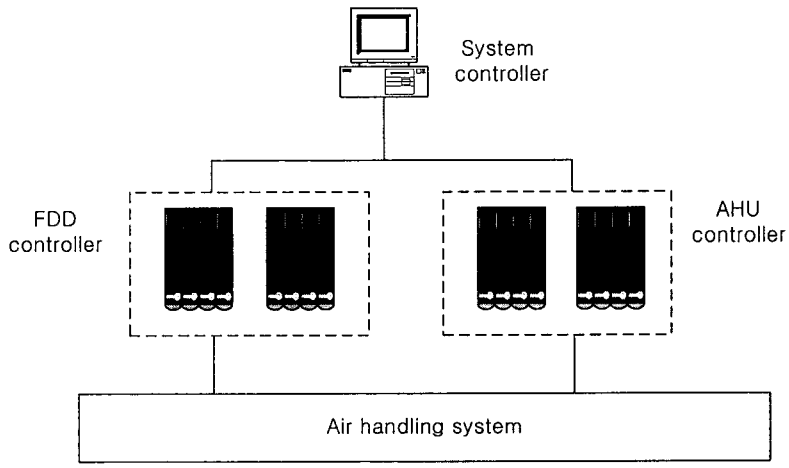


Fig. 3 FDD & control system.

등으로 구성되어 있는 공조기는 실내 급기 온도와 습도를 감지하여 냉난방과 가습 코일의 삼방 밸브 개도를 조절함으로써 설정 급기 온도와 습도를 유지하도록 구성되어 있으며, 외기, 환기, 배기 댐퍼는 외기온도 및 실내공기 상태에 따라 연동 제어되도록 구성되었다.

환경조성 시스템은 공조 시스템의 임의의 온습도 환경을 조성하기 위한 시스템으로서 온도 15~30℃, 습도 20~90% 범위의 제어 성능을 갖는 실내 챔버, 온도 7~35℃, 습도 20~90% 범위의 제어 성능을 갖는 실외챔버 등으로 구성되어 있다.

FDD 및 제어 시스템은 Fig. 3과 같이 고장 감지 알고리즘 구현을 위한 FDD 제어기, 공조 시스템을 제어하기 위한 AHU 제어기, 그리고 시스템을 총괄하는 시스템 제어기로 이루어져 있다. FDD 제어기는 아날로그, 디지털 입출력 기능의 입출력 모듈과 데이터 연산 기능의 중앙처리 모듈로 구성된 전용 제어기를 사용하였고, AHU 제어기는 빌딩 제어에 많이 활용되고 있는 BAS 시스템의 DDC(direct digital controller)를 사용하였으며, 시스템 제어기는 경제적인 여건을 고려하여 윈도우 NT를 기반으로 한 BAS 시스템 제어기에 개발된 각종 알고리즘을 내장하여 사용하였다. FDD 제어기는 고장에 관련된 결함정보를 포함한 실제값을 현장기기로부터 측정하고 이를 연산하여 추론을 위한 정보를 전송하며 시스템 제어기는 전송받은 정보를 사용하여 이를 사용자에게 통보하고 고장 발생에 따른 처리방법 등에 대한 정보를 제공할 수 있는 인터페이스 기능을 수행한다.

2.2 고장 모사 방법

공조 시스템의 FDD 시스템 개발을 위해서는 임의로 고장을 발생시키거나 고장이 발생한 것과 같은 효과를 낼 수 있는 고장 모사 장치의 구성이 필요하다. 이를 위하여 선정된 고장인 급기팬 고장(SFF), 환기팬 고장(RFF), 외기 댐퍼 고장(ODF), 환기 댐퍼 고장(RDF), 배기 댐퍼 고장(EDF), 냉수 코일 누수(CCF), 온수 코일 누수(HCF), 가습기 막힘(HUDF), 온도 센서 감도 저하(TSF), 습도 센서 감도 저하(HSF) 등의 고장을 모사할 수 있도록 공조 시스템의 고장 모사 장치를 설계 하였다. 급기팬과 환기팬의 점진적인 고장을 모사하기 위하여 각각의 팬에 별도의 인버터를 설치하고 회전수를 임의로 조절함으로써 급격한 고장에 의한 팬의 정지는 물론 점진적인 고장에 의한 고장 현상을 구현할 수 있도록 구성하였고, 외기, 환기, 배기 댐퍼의 고장 모사를 위하여 제어 신호를 임의로 입력할 수 있도록 구성한 후 각 댐퍼의 조작 방향과 개도를 조절하여 조작기의 고장 현상을 모사할 수 있도록 하였으며, 코일 누수의 경우에는 냉온수 공급 배관과 환수 배관 사이에 제어가 가능한 삼방 밸브를 설치하여 공급 배관 측의 냉온수 공급량을 적절히 조절함으로써 누수현상을 모사하도록 하였다. 이물질 등에 의한 가습기 노즐의 막힘 현상은 가습기 노즐에 별도의 밸브를 설치하여 밸브의 조작에 의해 가습량을 조절할 수 있도록 구성하였고, 온습도 센서의 감도 저하는 제어 프로그램을 사

용하여 센서의 출력 신호를 조작함으로써 급격한 고장이나 점진적인 고장에 대한 모사가 가능하도록 구성하였다.

3. 고장 감지 및 진단 알고리즘

3.1 FDD 알고리즘 구성

Han and Joo[9]의 논문에서 자세히 서술된 FDD 알고리즘은 시스템에 고장이 발생하게 되면 같은 조건에서 미리 예측된 무고장 상태값과 실제 측정값과의 차이인 잔차의 범위를 확인하여 무고장으로 설정된 오차 범위에 있으면 무고장으로 감지하고, 고장의 오차 범위 내에 있으면 고장으로 감지한후 룰베이스화된 각 변수의 증가 혹은 감소 상태를 통하여 고장의 종류를 감지하고 잔차의 크기에 따라 고장의 정도를 진단하도록 구성되어 있다. 각종 고장의 종류에 따라 사용된 룰베이스를 Table 2, 3에 보여주고 있으며 고장의 감지를 위해 급기팬 출구 공기 압력($P_{SFa,out}$), 급기팬 출구 공기 유량($\dot{m}_{SFa,out}$), 냉수코일 입구 삼방밸브 밸브 제어 신호($S_{CC,in}$), 냉수코일 입구 공기 온도($T_{CCa,in}$), 급기팬 출구 공기 온도($T_{SFa,out}$), 온수코일 입구 공기 온도($T_{HCa,in}$), 온수코일 입구 밸브 제어 신호($S_{HC,in}$), 가습기 입구 밸브 제어 신호($S_{HUD,in}$), 가습기 출구 절대 습도($H_{HUDa,out}$)를 감지 변수로 사용하였다. 고장의 진단을 위해 감지 변수의 잔차를 사용하였다. 잔차는 예측값과 측정값의 차이를 의미하며 감지 변수에 대한 잔차 범위를 10%에서 50%까지 10% 단계별로 고장을 적용한 후 선정하였다. 감지 변수 중 외기온도에 의해 영향을 받는 $S_{CC,in}$, $T_{CCa,in}$, $T_{HCa,in}$, $S_{HC,in}$, $S_{HUD,in}$는 외기조건에 따라서 예측값이 변화하므로 저온에서 고온까지 2℃ 간격으로 외기 온도를 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였으며[8,9] 외기 온도 변화에 따른 파라미터의 곡선 적합 모델을 1차식으로 설정하였다.

Table 2 Rule bases for cooling mode

Faults	SFF	RFF	ODF	RDF	EDF	CCF	TSF	
							−	+
$P_{SFa,out}$	↓	↑	↓	↑	↑	-	-	-
$\dot{m}_{SFa,out}$	↓	↓	↓	↑	↓	-	-	-
$S_{CC,in}$	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↑
$T_{CCa,in}$	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	-
$T_{SFa,out}$	-	-	-	-	-	-	↑	↓

3.2 FDD 알고리즘 적용

공조기에 대한 FDD 알고리즘을 구현하기 위하여 제어기에 적용될 알고리즘을 Fig. 4와 같이 구성하였다. 그림에서와 같이 먼저 냉방 혹은 난방 모드를 구분 한후 공조 장비가 가동하게 되면 장비의 기동후 최초 30분간은 초기 과도상태로 판단하여 고장을 검출하지 않도록 하였으며, 시스템이 정상상태에 도달하게 되면 고장 감지 및 진단 알고리즘이 작동되도록 구성하였다. 고장 감지에서는 룰 베이스로 선정된 변수 위치의 센서를 통하여 매 10초 간격으로 데이터를 측정한 후 과거 6개의 데이터를 이동 평균(M_data(i))하여 미리 지정된 예측값 혹은 설정값(Er(k))과 비교하며, 두 값의 오차인 잔차가 무고장으로 설정된 오차범위 내에 존재하면 무고장(F(i)=0)으로 감지하고, 오차범위를 넘어설 경우에는 각 모드별 룰 베이스와 비교하여 측정된 값의 증감 패턴이

Table 3 Rule bases for heating mode

Faults	SFF	RFF	ODF	RDF	EDF	HCF	HUDF	TSF		HSF	
								−	+	−	+
$P_{SFa,out}$	↓	↑	↓	↑	↑	-	-	-	-	-	-
$\dot{m}_{SFa,out}$	↓	↓	↓	↑	↓	-	-	-	-	-	-
$T_{SFa,out}$	↓	↓	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-
$T_{HCa,in}$	-	-	-	-	-	-	-	↑	↓	-	-
$S_{HC,in}$	↓	↓	↑	↑	↑	↑	-	↑	↓	-	-
$S_{HUD,in}$	↓	↓	↓	↑	↓	-	↑	-	-	↑	↓
$H_{HUDa,out}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↓

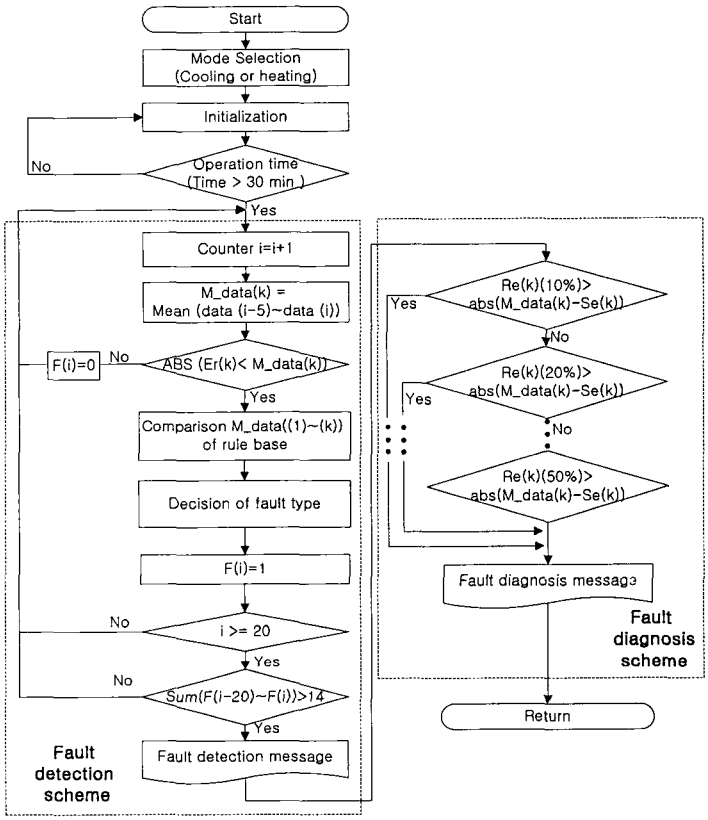


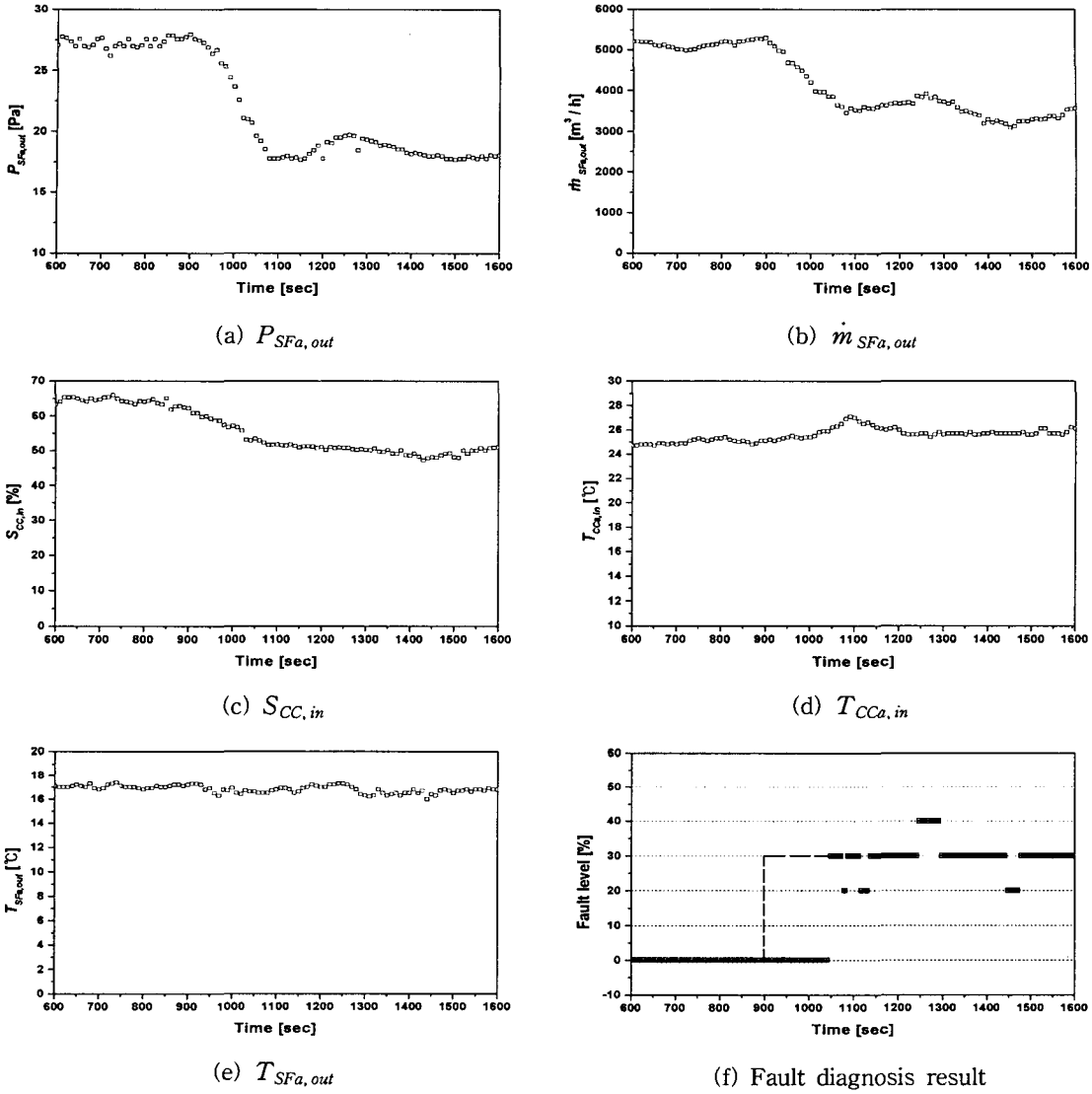
Fig. 4 FDD algorithm application.

최적 룰 베이스로 구성된 고장별 패턴 중 어느 하나와 일치하게 되면 시스템은 고장(F(i)=1)으로 감지하게 된다. 무고장 설정 범위를 벗어났으나 최적 룰 베이스의 어떠한 고장과도 일치하지 않게 되면 '알 수 없는 고장'으로 감지하게 된다. 노이즈 등에 의한 오고장 감지의 가능성을 배제하기 위하여 고장 감지 경보 시기는 최초 고장 감지 후 총 20개의 데이터 중 2/3 이상인 14개 이상의 데이터가 고장으로 감지될 때 고장 감지 경보를 발생시키도록 하였다. 고장 경보 발생 후 시스템은 고장 진단 모드로 전환되며 이동 평균값에서 예측값 혹은 설정값(Se(k))을 빼고 이 값을 감지된 고장의 잔차와 비교하게 되며 각 변수가 모두 정해진 잔차(Re(k)) 범위 내에 속하게 되면 그 잔차에 해당하는 고장 진단 결과를 발생시키도록 하였는데 예를 들어 정상상태값을 기준으로 무고장 허용오차 범위에서 10%까지의 고장은 10% 고장으로 진단하게 되며, 11%에서 20%의 고장은 20% 고장으로 진단하도록 구성하였다. 고장 진단의 정확도는 임의의 정도의 고장을 발생시킨 총 시간 중에서 고장 진단 결과가 주어진 고장의 정도를 정확하게 감지하는 시간의 비율을 기준으로 계산하였다.

4. 실험 결과

개발된 FDD 시스템의 성능을 검증하기 위하여 고장 모사 실험 장치를 이용하여 각종 고장에 대한 성능 실험을 수행하였으며 그중 냉방의 경우 급기팬의 고장 중 30% 부분 고장, 난방의 경우 가습기 막힘 중 40%의 부분 고장에 대한 결과를 제시하였다.

Fig. 5의 (a)~(f)는 냉방시 급기팬 30% 부분 고장에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. 실외 온도 32℃, 실내 온도 24℃를 유지하면서 시험 시작 후 900초 후에 급기팬의 회전수를 30% 줄여 정상 상태의 70%로 운전하였다. 그림에서와 같이 고장 발생 후 $P_{SFa,out}$, $\dot{m}_{SFa,out}$, $S_{CC,in}$은 감



(a) $P_{SFa,\,out}$ (b) $\dot{m}_{SFa,\,out}$

(c) $S_{CC,\,in}$ (d) $T_{CCa,\,in}$

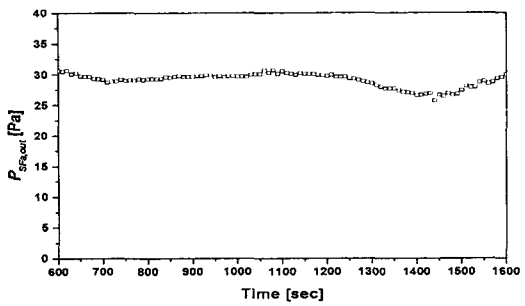
(e) $T_{SFa,\,out}$ (f) Fault diagnosis result

Fig. 5 Results for the supply fan degradation.

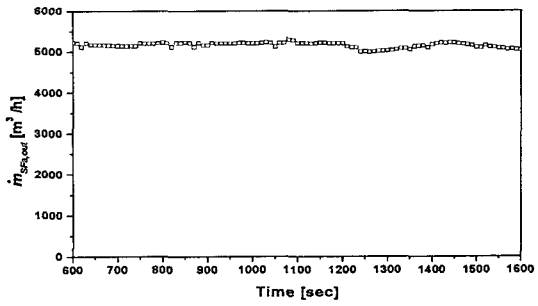
소하고 $T_{CCa,\,in}$은 상승하였으며, $T_{SFa,\,out}$는 현상을 유지하는 경향을 나타내고 있으며 고장 발생 후 140초가 경과된 이후부터 고장이 감지되어 고장 진단의 정확도가 89.9%임을 알 수 있다.

Fig. 6의 (a)~(h)는 난방시 가습기 40% 부분 막힘에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. 실외 온도 8℃, 실내 온도 25℃로 유지하면서 시험 시작 900초 후에 가습 밸브 개도를 40% 줄여 정상 상태의 60%로 운전하면서 고장을 모사하였다. 그림에서와 같이 $S_{HUD,\,in}$은 증가하고 $P_{SFa,\,out}$, $\dot{m}_{SFa,\,out}$, $T_{SFa,\,out}$, $T_{HCa,\,in}$, $S_{HC,\,in}$, $H_{HUDa,\,out}$는 현상을 유지하는 경향을 나타내고 있으며 고장 발생 후 140초가 경과된 이후부터 미리 지정된 고장의 정도인 40%로 고장이 감지되어 고장의 정확도가 94.5%가 됨을 알 수 있다.

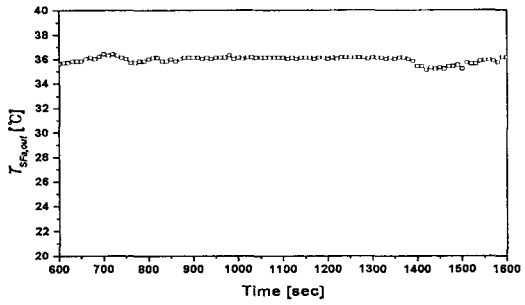
냉방시와 난방시 각종 부분 고장에 대한 실험 결과를 Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다. 고장의 종류로서 Table 2와 Table 3에 제시된 각종 고장을 적용하였으며 부분 고장의 정도는 10에서 50%로 지정하여 고장의 종류별로 5회의 실험을 수행하



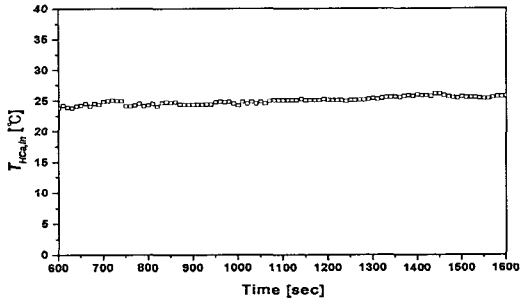
(a) $P_{SFa,\,out}$



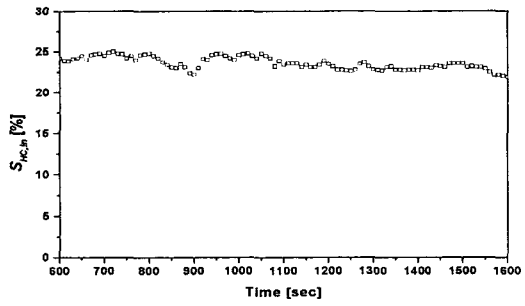
(b) $\dot{m}_{SFa,\,out}$



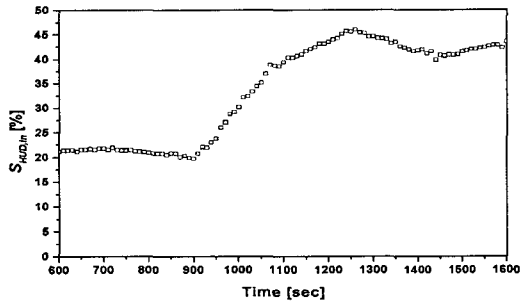
(c) $T_{SFa,\,out}$



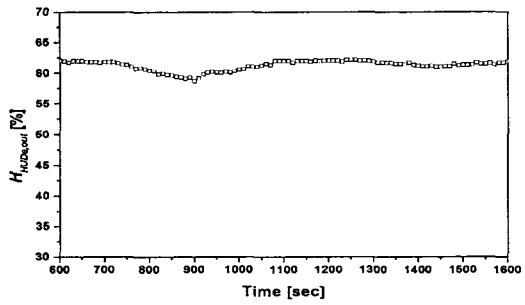
(d) $T_{HCa,\,in}$



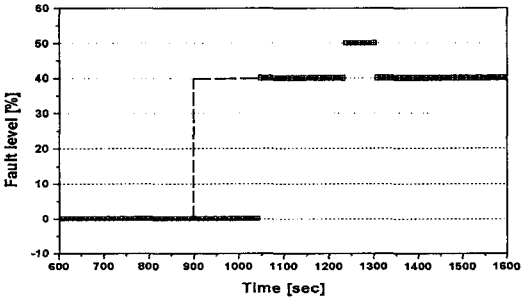
(e) $S_{HC,\,in}$



(f) $S_{HUD,\,in}$



(g) $H_{HUDa,\,out}$



(h) Fault diagnosis result

Fig. 6 Results for the humidifier nozzle clogging.

였으며 각 시험의 고장 감지의 정확도를 산술 평균하였다. 실험 결과 그림에서와 같이 고장 진단의 정확도는 냉방의 경우 86.5%, 난방의 경우 88.2%를 보여준다.

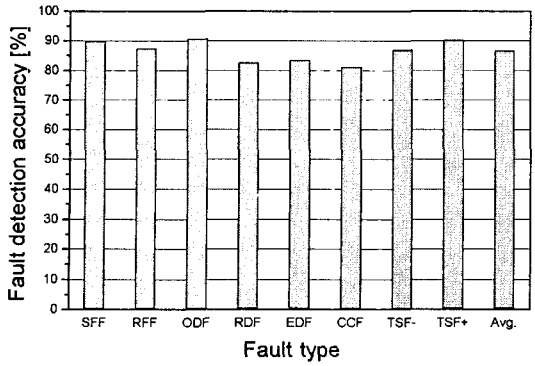


Fig. 7 Results for the cooling mode.

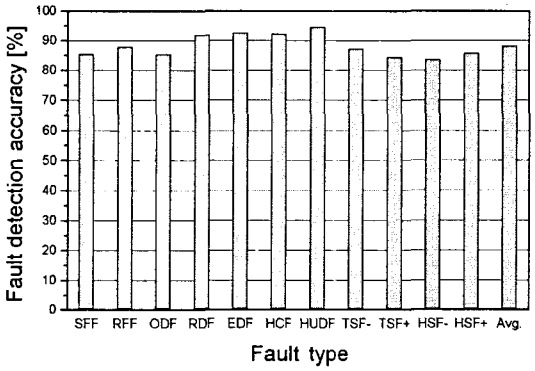


Fig. 8 Results for the heating mode.

5. 결 론

공조기를 대상으로 한 FDD 시스템 개발을 위하여 공조 시스템, 환경 조성 시스템, FDD 및 제어 시스템으로 구성된 고장 모사 실험 장치를 개발한 후 FDD 시스템에 고장 감지 및 진단 알고리즘을 구현하였다. 고장 모사 실험 장치를 사용하여 냉방의 경우 급기팬 고장, 환기팬 고장, 각종 댐퍼 고장, 냉수 코일 누수, 온도 센서 감도 저하와 난방의 경우 급기팬 고장, 환기팬 고장, 각종 댐퍼 고장, 온수 코일 누수, 가습기 막힘, 온도 센서 감도 저하, 습도 센서 감도 저하에 대한 고장 모사 실험을 수행하였다.

각종 고장에 대한 성능 시험 결과 고장 진단의 정확도가 냉방의 경우 평균 86.5%, 난방의 경우 평균 88.2%로 나타나 개발된 고장 감지 및 진단 시스템이 공조기에 발생할 수 있는 여러 가지 부분 고장 검출 진단에 유효하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Peitsman, H. C. and Bakker, V. E., 1996, Application of black-box models to HVAC systems for fault detection, ASHRAE Transactions, pp. 628-640.
2. Peitsman, H. C. and Soethout, L. L., 1997, ARX models and real-time model-based diagnosis, ASHRAE Transactions, pp. 657-671.
3. Riemer, P. L., Mitchell, J. W. and Beckman, W. A., 2002, The use of series analysis in fault detection and diagnosis methodologies, ASHRAE Transactions, 2002, V. 108, Pt. 2.
4. Lee, W. and Kyong, N., 2001, Fault detection and diagnosis for an air-handling unit using artificial neural network, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 12, SAREK, pp. 1288-1296.
5. Lee, W. and Kyong, N., 2002, Utilization of test shell for fault detection and diagnosis, Proceedings of the SAREK, pp. 1463-1467.
6. Han, D. and Lee, H., 2001, Partial fault detection of the air-conditioning system by using curve fitting model, Proceedings of the SAREK, pp. 670-674.
7. Han, D. and Joo, M., 2000, Dynamic models of the air handling unit for the development of real time fault detection and diagnosis system, Proceedings of the SAREK, pp. 201-207.
8. Han, D. and Joo, M., 2001, Rule bases for the development of the real time fault detection and diagnosis system of the air handling unit, Proceedings of the SAREK, pp. 659-664.
9. Han, D. and Joo, M., 2002, Fault detection & diagnosis of an air handling unit based on rule bases, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 7, SAREK, pp. 552-559.
10. Han, D. and Kim, J., 2002, An experimental study on the rule based fault detection and diagnosis system of air handling unit, Proceedings of the SAREK, pp. 399-404.