

〈 논문 〉

# 퍼지 알고리즘을 이용한 시스템 멀티 에어컨의 고장진단 알고리즘 개발

최창식\* · 태상진\* · 김훈모† · 조금남\*\* · 문제명\*\*\* · 김종업\*\*\* · 권형진\*\*\*  
(2005년 6월 27일 접수, 2005년 10월 11일 심사완료)

## Fuzzy Algorithm for FDD Technique Development of System Multi-Air Conditioner

C. S. Choi, S. J. Tae, H. M. Kim, K. N. Cho, J. M. Moon, J. Y. Kim and H. J. Kwon

**Key Words:** System Multi-Air Conditioner(시스템 멀티 에어컨), Fuzzy Algorithm(퍼지 알고리즘), Fault Detection and Diagnosis(FDD, 고장 감지 및 진단)

### Abstract

Fault detection and diagnostic (FDD) systems have the potential to reduce equipment downtime, service costs, and utility costs. In this study, model based algorithm and fuzzy algorithm were used to detect and diagnose various fault at System multi-air conditioner. various fault include the Refrigerant Low charging, Fouling of Indoor Heat Exchanger, Fouling of Outdoor Heat Exchanger. A experimental verification was conducted in the 6HP System multi-air conditioner on an 8-floor building. Test results showed diagnosis result about 78 ~ 90% for given faults. This Study lays the foundation for future work on develop the real-time fault detection and diagnosis system for the System multi-air conditioner.

### 1. 서론

현대인의 생활수준 향상에 따라 주거 및 사무 공간에 대한 고성능, 고급형 공조기의 사용이 점차 확대되고 있다. 이에 따라 건물의 공조 방식도 국내외적으로 개별 공간의 기능과 각 공간 거주자의 요구에 부합하는 개별 공조 방식으로 변화하고 있는 추세이다. 각 개별 공간의 부하에 따라 용량을 독립적으로 조절할 수 있는 용량 가변형

공조 시스템으로 시스템 멀티 에어컨이 도입되었고 이러한 시스템 멀티 에어컨이 중소형 건물에서 적용하는 사례가 많아지고 있다. 상업용 건물의 경우 냉난방 시스템의 고장은 직접적인 경제적 피해를 초래 할 수 있으므로 시스템 고장에 대한 신뢰성 확보는 중요한 문제라고 할 수 있다. 또한 이와 관련하여 멀티형 냉동기에 대한 고장 특성 및 검출을 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다. Braun et al.<sup>(1,2)</sup>은 온도와 습도를 측정하고 통계적인 분석을 통하여 증기 압축식 에어컨의 Rule-based FDD 모델을 연구하였고, 패키지 에어컨에서 자주 발생하는 고장에 대한 특성을 조사하고, 시스템의 성능을 평가 하고 통계적인 Rule-based 고장 검출 모델을 적용하였었다. Han et al.<sup>(3)</sup>은 멀티형 냉방기 고장 모사 장치를 개발한 후 이를 사용하여 냉매 누설, 실내기 팬 고장,

---

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부  
E-mail : kimhm@me.skku.ac.kr  
TEL : (031)290-7500 FAX : (031)290-7666  
\* 성균관대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부  
\*\*\*. 삼성전자 시스템가전사업부

응축기 오염 고장에 대한 특성을 파악하고자 하였으며, 또한 냉방기에 대한 고장 검출을 위하여 다양한 알고리즘을 적용한 연구를 수행하였다.<sup>(4-7)</sup> 본 연구에서는 시스템 멀티 에어컨을 대상으로 냉방기에 발생할 수 있는 다양한 고장 중에서 냉매량 부족 고장, 실내기 오염 고장, 실외기 오염 고장을 대상으로 이들 고장들의 복잡성과 비선형성에 대한 검출 및 진단을 효과적으로 수행할 수 있는 퍼지논리를 이용한 고장 검출 및 진단 시스템을 개발한 후, 현장에 설치된 고장 모사 실험 장치를 통하여 성능 실험을 수행하여 개발된 고장 검출 및 진단 시스템의 유효성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

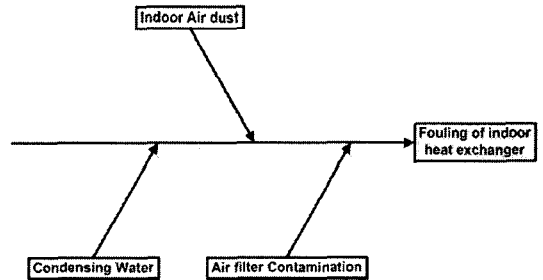
**Table 1** Range of Indoor and Outdoor Temperature for Fault test

Operating Mode	Case	Indoor Temperature		Out door Temperature	
		Dry Bulb (°C)	Wet Bulb (°C)	Dry Bulb (°C)	Wet Bulb (°C)
Cooling	Case 1	21	15	21	15
	Case 2	27	19.5	35	24
	Case 3	32	27.5	43	33

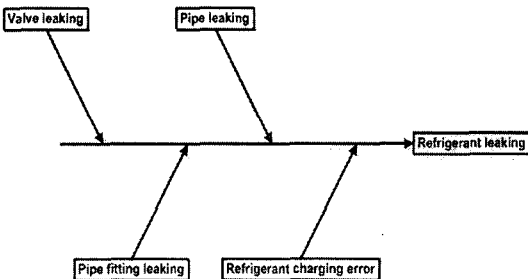
## 2. 고장 실험 장치 및 방법

### 2.1 고장 실험 항목 및 범위

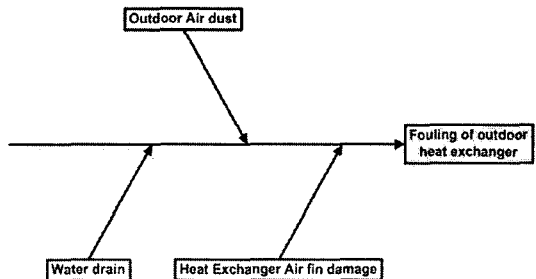
중소형 건물에 사용되는 시스템 멀티 에어컨의 경우 주로 열펌프 형태로 냉난방 운전을 하는 경우가 많다. 따라서 고장 검출 및 진단 알고리즘도 냉방, 난방 운전에 대하여 각각 작성 되어야 한다. 본 연구에서는 냉방 운전 모드에 대하여 고장 실험을 수행 하였으며 Table 1과 같이 실내, 실외 온도 조건을 설정하여 실험을 수행하였다. 또한 실제 현장에서 고장 사례가 많은 냉매량 부족, 실내 열교환기와 실외 열교환기의 오염 고장에 대하여 수행 하였다. 각각의 고장에 대한 Fault Tree를 Fig. 1, 2, 3을 통해 나타내었으며, Table 2와 같이 고장의 정도를 구분하여 고장 실험을 수행 하였다.



**Fig. 2** Fouling of indoor heat exchanger Fault Tree



**Fig. 1** Refrigerant leaking Fault Tree



**Fig. 3** Fouling of outdoor heat exchanger Fault Tree

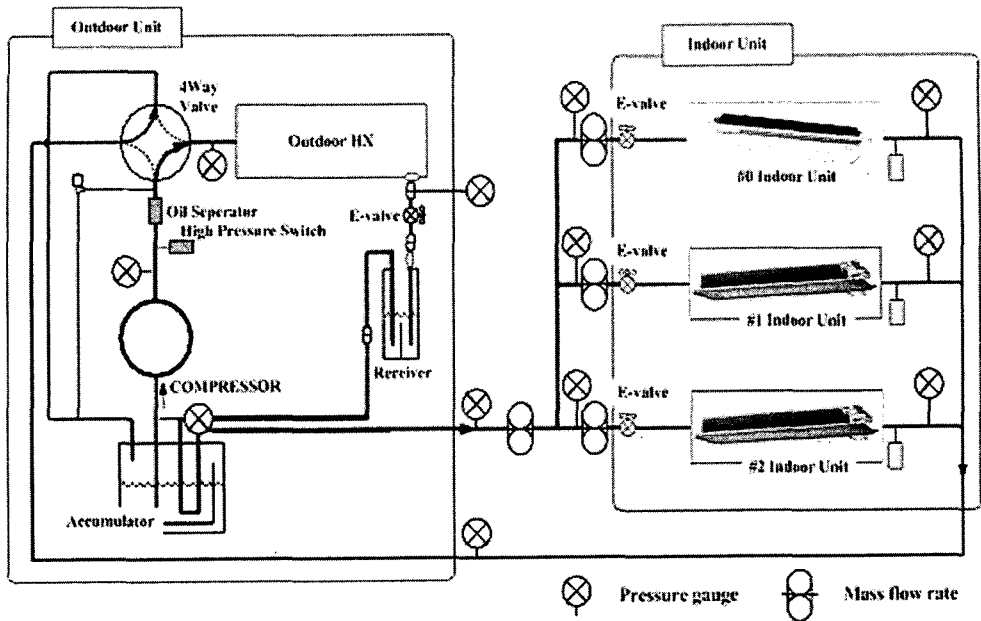


Fig. 4 Schematic diagram of test system

Table 2 Fault list and degree of fault for test

Fault	Degree of Fault
Refrigerant leakage	20%, 40%, 60%, 80%
Fouling of indoor heat exchanger	20%, 40%, 60%, 80%
Fouling of outdoor heat exchanger	20%, 40%, 60%, 80%

2.2 고장 실험 장치

고장 실험은 설정한 실내·외 온도 조건을 일정하게 유지 시켜 주기 위하여 실내기 와 실외기를 각각 향은 향습 챔버내에 설치 시스템의 온도, 압력 및 유량을 측정하였다. 압력 및 유량 측정점은 Fig. 4와 같이 압축기 입출구, 실외기 및 실내기 입출구 측에 압력계를 설치하였다. 또한 각 실내기 별로 유량계를 설치하였으며, 실외기 출구 측에서도 유량을 측정함으로써 고장 상태 시 시스템의 실내기에서 냉매 유량의 분배 상태를 확인하고자 하였다. 실내, 실외 열교환기의 입출구점에 압력계를 설치하여 각 지점의 냉매의 상태를 구하고자 하였다. 열전대에서 측정되는 기전력과 함께 압력 및 유량 데이터를 자료처리 장치에 의해 계측하여 2초 간격으로 기록하였다.

2.3 고장실험 방법

냉매량 부족 고장의 경우 적정 냉매량에 대하여 주입 냉매량을 조절하여 시스템을 운전하여 시스템의 특성을 파악 하고자 하였다. 실내 및 실외 열교환기 오염의 경우 핀 튜브 열교환기 전면적을 고장율에 비례하여 공기가 통하지 못하도록 막음으로써 시스템의 고장 상태를 모사하였다. 고장 조건에서 시스템의 정상 상태(기동 후 1800초 후) 데이터를 얻기 위하여 고장 상태로 설정 된 시스템을 가동하여 1시간 이상 운전을 한 뒤 시스템의 압력 및 온도가 정상 상태를 유지 하거나 일정한 패턴을 반복할 때까지 시스템을 운전 하였다. 이때 시스템의 정상 상태 구간 및 일정 패턴의 반복 구간에 대하여 5~10분간의 데이터를 처리하여 정상 상태 데이터로 사용하였다.

### 3. 고장 검출 및 진단 시스템

#### 3.1 고장 검출 시스템

고장 상태와 비교하기 위한 비교장 상태의 기준을 작성하기 위하여 비교장 상태로 운전한 시스템에 대하여 Fig. 5에서와 같이 기동 후 1800초 이후의 정상 상태 운전 Data를 이용하였다. 기동 1800초 이후 Data를 식 (1)과 같이 Curve Fitting을 하여 구한 식을 이용하여 표준 모델로 사용하였다. 이는 표준 상태의 실험과 고장 상태 실험 시 칼로리미터를 이용하여 실내의 온도를 일정하게 유지하여 실험 중 일부 구간에서 온도의 변동으로 인한 영향을 줄이기 위해서 이와 같은 방법을 사용하였다. 식 (1)에서 입력 변수에 해당하는  $X_1, X_2, \dots$  은 Table 3과 같이 각 출력 변수 별로 영향을 줄 수 있는 인자를 선정하여 Curve fitting을 수행 하였으며 Curve fitting Model 일부를 Table 4에 나타내었다. 그 결과 Table 3과 같이 실제 실험 Data와 Curve Fitting한 수식의 결과와의 잔차(Residual)를 구할 수 있었다. 이를 고장 실험 Data에 적용하여 최대 잔차 값의 범위를 벗어나는 인자에 대하여 고장 검출 인자로 선정하였으며 그예는 Table 5에 나타내었다. 이렇게 선정된 고장 검출 인자에 대하여 고장 실험을 진행하여 정상 상태 구간에서 표준 편차 값을 구하고 Fig. 6과 같이 평균값에 대하여  $\pm 3\sigma$  값을 취하여 고장 검출 범위를 구하였다. 이 과정에서 표준 편차 값이 0.5보다 작은 온도, 압력 인자에 대해서는 표준 편차 값을 0.5°C 와 0.5 bar로 표준 편차 값을 수정 하였다. 즉 고장 항목별 고장 검출 인자들이 선정된 고장 검출 범위 내에 모두 들어 오게 되면 고장의 종류가 검출 되는 알고리즘이다.

$$Y = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_1^2 + C_3 X_2 + C_4 X_2^2 + \dots \quad (1)$$

#### 3.2 고장 진단 시스템

본 연구에서는 고장 진단 알고리즘을 개발을 위해 퍼지 알고리즘을 구성하였으며 신뢰성 확보

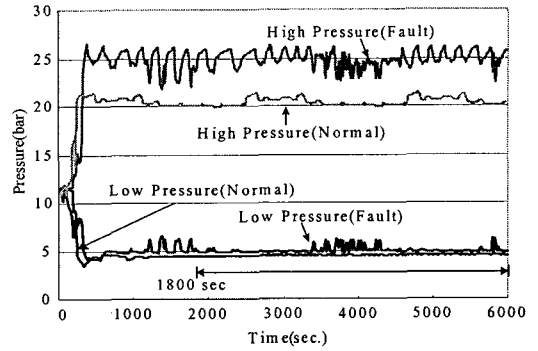


Fig. 5 Transient variation of high pressure and low pressure in normal condition and fault condition

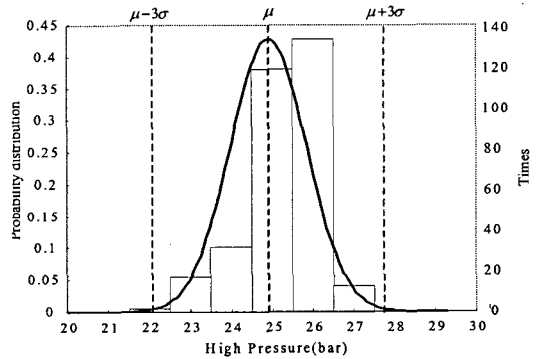


Fig. 6 Probability distribution of high pressure as normal condition

Table 3 Relation of input variables and out variables

Y	$X_1, X_2, \dots$	Residuals
Loading Duty EEV Step EvapIn Temp.	Room Temp. Outdoor Temp.	$\pm 0.1$ $\pm 12.3$ $\pm 1.2^\circ\text{C}$
EvapOut Temp.	Room Temp. Outdoor Temp. EEV Step EvapIn Temp.	$\pm 3^\circ\text{C}$
Cond Mid Temp. Discharge Temp. Subcool Temp. Low Pressure High Pressure	Room Temp. Outdoor Temp. Loading Duty	$\pm 1.0^\circ\text{C}$ $\pm 2.3^\circ\text{C}$ $\pm 0.9^\circ\text{C}$ $\pm 1.3^\circ\text{C}$ $\pm 3.6\text{bar}$
Suction Temp.	Room Temp. Outdoor Temp. EvapOut Temp.	$\pm 3^\circ\text{C}$

**Table 4** Curve fitting Model

$$Y = C_0 + C_1X_1 + C_2X_1^2 + C_3X_2 + C_4X_2^2 + C_5X_3 + C_6X_3^2$$

$X_1 = \text{Room Temp}, X_2 = \text{Outdoor Temp}, X_3 = \text{LoadingDuty}$

Y	Cond Mid Temp.	Discharge Temp.	Subcool Temp.	Low Pressure	High Pressure
$C_0$	-128.43	0.988	-123.62	-130.21	-128.37
$C_1$	-0.786	1.503	-2.031	-0.568	-0.791
$C_2$	1.234	4.541	0.803	-0.036	0.216
$C_3$	0.0221	-0.025	0.047	0.014	0.019
$C_4$	-0.047	-0.062	0.003	0.001	0.003
$C_5$	-6.421	-6.64	-6.181	-6.511	-6.418
$C_6$	0.678	0.667	0.691	0.674	0.679

**Table 5** Fault detection variables of Fault Type

Fault	Fault detection variable
Refrigerant leakage	Evap Out Temp. - Evap In Temp.
	Discharge Temp.
	Suction Temp.
	Cond Temp. - Subcool Temp.
	Low Pressure
	High Pressure
Fouling of indoor heat exchanger	Evap In Temp.
	Evap Out Temp.
	Evap Out Temp. - Evap In Temp.
	Discharge Temp.
	Suction Temp.
	High Pressure
Fouling of outdoor heat exchanger	EEV Step
	Discharge Temp.
	Cond Temp. - Subcool Temp.
	Loading Duty
	Low Pressure
	High Pressure

**Table 6** Rulebase Example by Refrigerant leakage 60%

Fault detection variable by Refrigerant leakage	Experimental data	Membership Function
Room Temp: 26°C, Outdoor Temp: 36°C		
Evap Out Temp. - Evap In Temp.	7 ~ 8 °C	M
Discharge Temp.	107 ~ 109 °C	M
Suction Temp.	19 ~ 20 °C	S
Cond Temp. - Subcool Temp.	5 ~ 6 °C	M
Low Pressure	3.4 ~ 3.6 bar	B
High Pressure	17.6 ~ 17.8 bar	M

**Table 7** Rulebase Example by Refrigerant leakage 80%

Fault detection variable by Refrigerant leakage	Experimental data	Membership Function
Room Temp: 26°C, Outdoor Temp: 36°C		
Evap Out Temp. - Evap In Temp.	5 ~ 6 °C	M
Discharge Temp.	103 ~ 105 °C	M
Suction Temp.	24 ~ 26 °C	B
Cond Temp. - Subcool Temp.	4 ~ 5 °C	M
Low Pressure	4.1 ~ 4.3 bar	PB
High Pressure	17.8 ~ 18.1 bar	M

를 위하여 전문가 시스템 구현 전문 프로그램<sup>(8)</sup>을 이용하여 퍼지 로직을 구성하였다. 퍼지 로직의 입력변수로는 Table 5의 고장 항목별 고장 검출인자 와 실내 및 외기 온도를 변수를 사용하였다. 입력 변수들의 멤버쉽 설정은 각 고장 항목별 고장실험을 통해 얻은 Data를 바탕으로 설정하였으며 이 후 실외 온도에 변화를 주어 추가 실험을 진행함으로써 멤버쉽 함수의 튜닝작업

을 진행하였다. 입력 멤버십 중 NS(Negative Small)는 상당히 적은 고장일 경우, S(Small)는 적은 고장일 경우, M(Middle)은 중간 정도의 고장일 경우, B(Big)는 큰 고장일 경우이고, PB(Positive Big)는 아주 큰 고장일 경우를 의미한다. 고장 실험을 통해 얻은 Data를 바탕으로 인자들의 규칙관계를 설정하였으며 Table 6, 7과 같은 룰베이스를 작성하였다. 퍼지룰의 추론방법으로는 Mamdani 방법을 사용하였고, 역퍼지화 방법은 무게중심법을 사용하였다.<sup>(9)</sup>

3.2.1 냉매량 부족 고장

냉매량 20%, 40% 충전 후 시스템 기동 시 자기 보호 에러로 인하여 기동 후 약 240초 후 정지하게 된다. 실내기의 전동변 개도 또한 170 Step으로 유지된 상태로 정지하게 되며, 압축비의 증가로 압축기 토출 온도(Discharge Temp)가 급격히 상승하게 되어 130℃ 이상까지 상승하게 된다. 냉매량 60%의 경우 증발기를 통과하는 냉매량의 부족으로 출구의 온도가 상승하게 되고 냉매량 부족으로 저압축이 내려감에 따라 압축비가 증가하여 압축기의 토출 온도가 증가하는 현상을 보였다. 또한 실내 전동변 개도 또한 증발기 출구 온도가 상승함에 따라 과열도 제어로 개도가 증가하는 경향을 보였다. 냉매 순환량이 감소함에 따라 증발기의 입출구 온도차가 약 5 ~ 10℃ 정도 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 7, 8 Fi는 냉매량 부족 고장에 대한 입력 변수의 멤버십을 일부 나타내고 있으며 Fig. 9는 퍼지 룰베이스 일부분을 나타내고 있다.

3.2.2 실내기 오염 고장

실내 열교환기의 오염의 경우 전반적으로 오염 정도에 비례하여 고저압이 감소하는 결과를 보였다. 이는 실내기 측 열교환량이 부족함에 따라 시스템의 증발 압력의 저하로 인하여 시스템의 전반적인 압력이 저하된 것으로 판단된다. 실내 열교환기의 오염에 따라 실내기의 출구측 온도 (Evap Out Temp) 또한 변화가 있을 것으로 예상되었지만, 과열도 제어에 따라 그 영향이 크지 않았다.

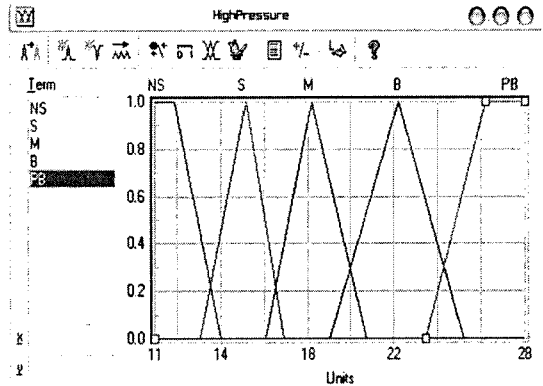


Fig. 7 Membership for High Pressure (Refrigerant leakage)

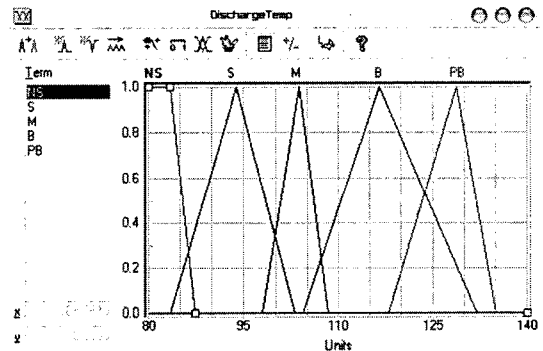


Fig. 8 Membership for Discharge Temp (Refrigerant leakage)

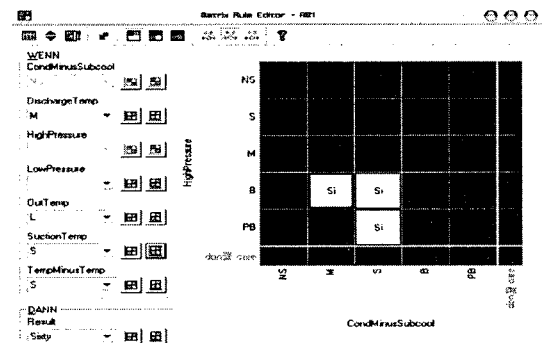


Fig. 9 Rulebase for Refrigerant leakage

3.2.3 실외기 오염 고장

실외 열교환기 오염 경우 응축기 역할을 하는 실외 열교환기에서 방열량이 감소함에 따라 시스

템의 온도 및 압력이 전체적으로 상승하는 경향을 보였다. 특히 실외 온도 43℃ 조건에서는 고압측 압력이 25bar 이상 상승하는 경우가 발생함에 따라 압력 상승을 방지하기 위하여 압축기의 운전율을 낮추는 현상을 보였다. 또한 실내 전동변의 개도가 약 150 Step (30%)으로 열린 상태로 운전 되었다.

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서 개발된 고장진단 알고리즘의 신뢰성을 평가하기 위하여 성균관대학교 종합연구동에 설치된 6HP 멀티 시스템 에어컨을 이용하여 항목별 고장에 대한 실험을 수행하여 알고리즘의 검증 작업을 시행하였다. 실험은 실제 동작환경과 유사한 환경을 만들기 위하여 Fig. 10과 같은 외기조건하에서 진행 되었다. 고장의 발생 조건으로는 초기 30분은 비고장 상태로 운전하였으며 30분 간격으로 고장의 정도를 20%씩 변화 시켜 가며 실험을 진행하였다. 실험결과를 입력데이터로 고장 진단 프로그램 적용하여 고장진단 알고리즘의 신뢰도 검증에 활용하였다. 고장 진단 프로그램은 Fig. 11 과 같은 순서로 작동하게 된다. Fig. 12는 냉매량 부족 고장 테스트 결과로서 고장이 적용된 10시부터 12시까지 매 2분 간격으로 고장진단을 수행한 결과 총 60회의 고장진단 중 47회가 허용오차  $\pm 3\%$  내에서 진단되는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 13은 실내 열교환기 오염에 대한 고장 진단 알고리즘을 적용한 결과이다. 고장이 적용된 13시부터 15시까지 매 2분 간격으로 고장진단을 수행한 결과 총 60회의 고장진단 중 54회가 허용오차  $\pm 3\%$  내에서 진단되는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 14는 실외 열교환기 오염에 대한 고장 진단 알고리즘을 적용한 결과이다. 고장이 적용된 16시부터 18시까지 매 2분 간격으로 고장진단을 수행한 결과 총 60회의 고장진단 중 53회가 허용오차  $\pm 3\%$  내에서 진단되는 것을 확인 할 수 있었다.

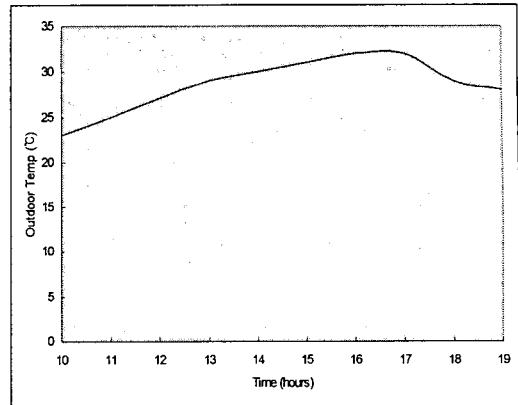


Fig. 10 Outdoor temperature at summer

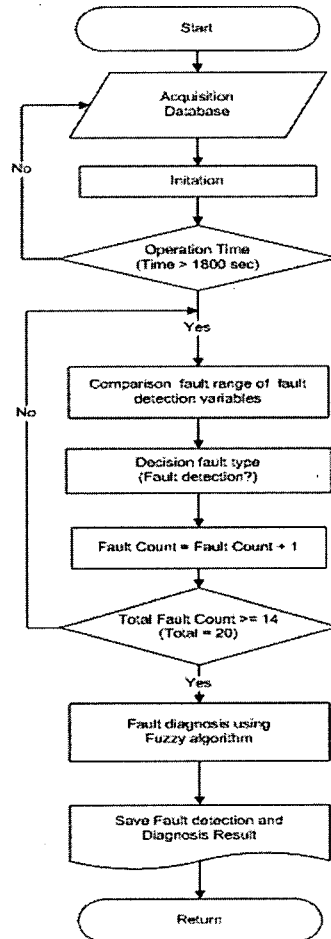


Fig. 11 Fault detection and diagnosis Program Algorithm

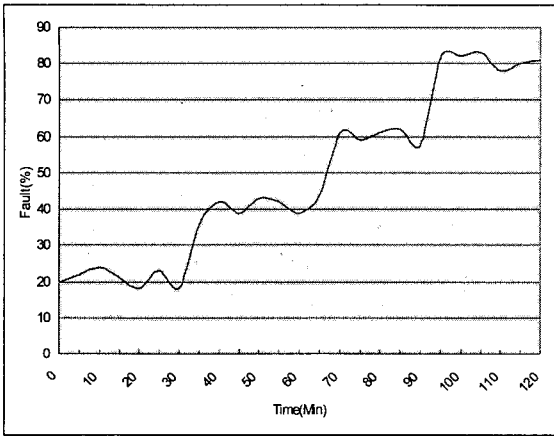


Fig. 12 Refrigerant leakage diagnosis

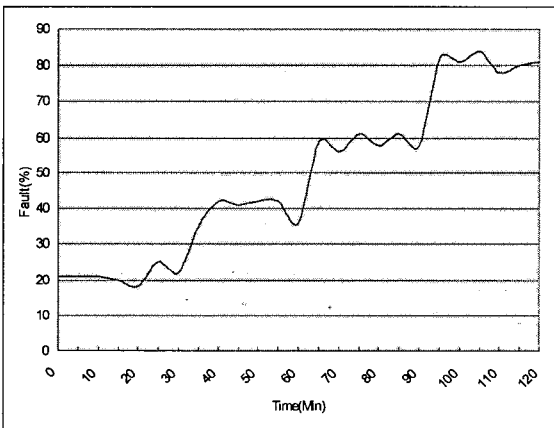


Fig. 13 Fouling of indoor heat exchanger diagnosis

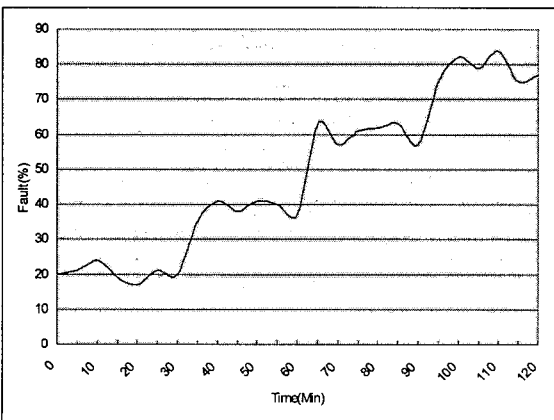


Fig. 14 Fouling of outdoor heat exchanger diagnosis

### 5. 결론

본 연구를 통해 멀티 시스템 에어컨의 냉방 운전 시 발생 될 수 있는 다양한 고장 중 냉매량 고장, 실내기 오염, 실외기 오염 고장에 대해 효과적으로 고장 검진 및 진단을 할 수 있는 고장 진단 시스템을 개발하였다. 비고장 실험과 고장 실험을 통해 얻어진 Data를 바탕으로 수학적 기법을 적용하여 각 고장별 고장 검출 인자 및 고장 검출 범위를 설정하여 고장 검출 시스템을 구성 하였으며 고장 진단을 위해 퍼지로직을 사용하여 20%, 40%, 60%, 80% 의 단계별로 고장의 정도를 검출 할 수 있는 고장 진단 시스템을 개발하였다. 또한, 작성된 알고리즘의 정확성을 확인하기 위하여 성균관대 종합연구동에 설치되어 있는 6HP 멀티 시스템 에어컨을 이용하여 고장 실험을 수행하였고 그 결과를 작성된 알고리즘에 적용하였다. 그 결과 약 78 ~ 90% 정도의 정확도를 나타내었다. 향후, 다양한 실내 외 온도 조건의 데이터 추가 및 알고리즘의 수정·보완 작업을 통해 멀티 시스템 에어컨의 실시간 고장 진단이 가능할 것으로 예상된다.

### 후 기

본 연구는 성균관대학교 미래가전연구센터(과제번호: 2003-0656-200) 연구비에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Rossi, T. M. and Braun, J. E., 1997, "A Statistical, Rule-Based Fault Detection and Diagnostic Method for Vapor Compression Air Conditioners," *International Journal of Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigerating Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 19~37.
- (2) Breuker, M. S. and Braun, J. E., 1998, "Common Fault and Their Impacts for Rooftop Air Conditioners," *ASHRAE HVAC&R Research*, Vol. 4 No. 3.



- (3) Han, D. Y. and Yoon, T. H., 2000, "Partial Fault Response of Multi-Type Air-Conditioner," *Proceedings of the SAREK*, pp. 319~323.
- (4) Han, D. Y. and Lee, H., 2002, "Partial Fault Detection of Air-Conditioning System by Neural Network Algorithm Using Data Preprocessing Method," *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration*, Vol. 14, No. 7, pp. 560~566.
- (5) Han, D. Y. and Lee, H., 2002, "Partial Fault Detection of Air-Conditioning System by Using the Model-Based Method with Data Preprocessing," *Proceedings of the SAREK*, pp. 295~300.
- (6) Han, D. Y. and Hwang, J. U., 2003, "The Partial Fault Detection of an Air-Conditioning System by the Neural Network Algorithm Using Normalized Input Data," *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration*, Vol. 15, No. 3 pp. 159~165.
- (7) Glass, A. S., Gruber, P., Ross, M. and Todtli, J., 1995, "Qualitative Model-Based Fault Detection in Air-Handling Units," *IEEE Control Syst. Mag.*, Vol. 15, No. 4, pp. 11~22.
- (8) <http://www.fuzzytech.com>
- (9) Dexter, A. L., 1993, "Fault Detection in Air-Conditioning System Using Fuzzy Models," *IEEE Colloquium Two Decades of Fuzzy Control - Part 2*, Digest No. 1993/118.
- (10) Dexter, A. L. and Benouarets, M., 1997, "Model-Based Fault Diagnosis Using Fuzzy Matching," *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS-PART A: SYSTEMS AND HUMANS*, Vol. 27, No. 5.