

멀티형 냉방 시스템의 고장 검출 및 진단

최근 들어 멀티형 냉방 시스템에 대한 관심 고조와 함께 효과적인 관리 기법으로써 지능화된 고장 검출 및 진단 기술의 적용 가능성이 부각되고 있다. 이 기법을 멀티형 냉방기에 적용할 경우 국가적으로 에너지 절감 효과를 얻을 수 있고, 소비자에게는 보다 안락하고 쾌적한 환경을, 관리자에게는 유지 보수비용 절감 및 서비스 인력의 효율적 관리와 시스템의 안정성 및 신뢰성을 제공하는 장점을 가지고 있기 때문에 많은 기술적 연구가 진행될 것으로 예상된다.

한도영

개요

최근 마이크로프로세서와 센서 기술에 기반을 둔 자동제어 시스템의 지속적인 발전에 따라 냉동·공조 시스템에 있어서도 실시간으로 고장을 검출하고 진단할 수 있는 고장 검출 및 진단 시스템(FDD: fault detection and diagnosis system) 개발에 대한 가능성이 높아지고 있으며 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히 냉방기의 보급확대로 인해 전체 전력 소비에서 냉방 시스템이 차지하는 비중이 증가하고 있는 현실을 감안할 때 FDD 기술은 냉방 시스템의 고장에 대한 조기 대응이 가능하여 에너지 소비를 줄이는 데 효과적인 기술로서 활용 가능하며, 부가적으로 고장을 미리 감지하고 이에 대한 진단을 수행함으로써 유지 보수비용의 절감, 시스템의 안정성 및 신뢰성 향상, 시스템의 쾌적성 제공 등 여러 가지 장점을 가지고 있다. 이런 특성 때문에 미국 등에서는 냉방 시스템에 대한 FDD 시스템의 개발에 주력하고 있는 실정이지만 국내 관련 연구는 미진한 실정이다.

본 고에서는 멀티형 냉방 시스템을 기준으로 고장 검출 및 진단 시스템에 대한 이론과 적용 기술 등에 대하여 설명하고자 한다.

기술 현황

FDD 기술은 항공산업이나 발전소와 같이 위험성이 내재되어 있는 시스템의 안전장치로써 개발되어 사용되었으나 점차 초기의 목적을 벗어나 다른 분야로까지 확대

되었다. 현재 이 기술에 대한 활용 분야로 냉동·공조 분야에 많은 초점이 맞추어 지고 있다. 특히 지금까지의 고장 검출 및 진단 시스템에 대한 연구는 공조 시스템을 대상으로 진행되어 왔으나 최근 냉동 분야에서도 멀티형 냉방기를 포함하는 시스템 냉방기를 중심으로 연구가 진행될 것으로 예상된다. 현재까지 개발된 FDD 기술은 고장으로부터 초래되는 성능 저하 현상을 주로 사용함으로써 시스템에 상당한 고장이 진행된 후에야 고장을 검출할 수 있는 문제점이 있다. 그러나 현실적으로 에너지 소비 증가와 소비자의 불만 대상은 완전 고장으로 인한 장비의 정지 상태가 아닌 점진적인 고장으로 저효율 상태에서 오랜 기간 운전하였을 경우 발생하는 불필요한 에너지 사용과 그 비용이 문제가 되고 있으며 관리자 측면에서도 서비스 인력 관리의 효율성이 요구되면서 냉방 시스템의 점진적인 노화나 부분적인 고장으로 인한 오작동을 검출하고 진단할 수 있는 지능화된 고장 검출 및 진단 방법의 개발이 요구되고 있다.

고장 검출 및 진단 개념

고장 형태

고장은 정상적인 운전상태를 벗어난 상태로 정의하며 그 특성에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

• 플랜트 고장 (process faults)

플랜트에 나타나는 고장은 다음 두 가지 특성을 가지고 있다. 미지의 고장으로 정의된 고장의 경우 고장이 작용하지 않는 때에는 플랜트가 정상적으로 작동하지만 고장이 작용하는 경우 플랜트의 입력과는 관계없이 출력에 변화를 발생시키는 고

장으로 더해지는 고장(additive fault)이라 하며 여기에는 플랜트의 누수현상과 플랜트에 가해진 부하 등이 포함된다. 플랜트 파라미터가 변하는 고장의 경우 고장이 작용하는 때에 주어진 입력에 대한 출력 결과가 정상상태와 다르게 나타나고 이러한 고장을 곱해지는 고장(multiplicative fault)이라고 하며 여기에 속하는 고장으로 오염에 의한 배관 막힘, 마찰의 증가, 플랜트의 노후와 관련된 고장 등을 들 수 있다.

- **센서 고장(sensor faults)**
이 고장은 센서로부터 출력된 측정값과 실제값이 서로 다른 경우를 의미하며 일반적으로 더해지는 고장 특성을 갖는다.
- **구동기 고장(actuator faults)**
구동기의 입력값과 출력값에 차이가 나타나는 현상을 의미하며 일반적으로는 더해지는 고장 특성을 갖지만, 곱해지는 고장의 특성을 갖는 경우도 존재한다.

고장 검출과 진단 구분

- **고장 검출(fault detection)단계**
대상이 되는 시스템에서 고장이 진행되고 있는 상태를 검출하는 단계
- **고장 분리(fault isolation)단계**
고장난 위치를 찾아내는 단계
- **고장 정의(fault identification)단계**
고장의 진행 정도를 찾아내는 단계

여기서 분리와 정의 단계를 하나로 취급하여 진단(diagnosis)단계로 구분하기도 한다. 검출과 분리는 실제 시스템에서 중요하게 고려되고 있지만, 정의 단계는 추가적인 과정이 필요하기 때문에 실제 많이 사용하지 않고 일반적으로 진단 단계라 하면 고장 분리 단계만을 포함한다. 또한 검출과 진단 단계는 보통 서

로 평행하게 연속적인 단계로 진행되지만, 때에 따라서는 고장 검출은 지속적으로 진행되고 고장이 검출될 경우만 진단 시스템이 작동하도록 구성하는 경우도 있다.

검출 성능

고장의 검출 성능은 다음과 같은 기준에 의해 결정된다.

- **고장 민감도(fault sensitivity)**
작은 고장도 검출할 수 있는 기술적 능력
- **검출 속도(detection speed)**
고장이 발생즉시 고장을 검출할 수 있는 기술적 능력
- **검출 강인성(detection robustness)**
노이즈, 외란, 모델 오차 등이 존재하여도 검출 성능이 저하하지 않는 기술적 능력

위의 세 가지 성능은 상호 교환(trade-off) 가능한 특성이 있다. 실제 노이즈, 외란, 모델 오차 등과 같은 부차적인 오차가 동시에 나타나는 경우 어려움이 있으며, 특히 고장과 부차적인 오차사이에 상호 작용이 있을 경우 불확실하고 불완전한 진단이 내려질 수도 있으며 어떤 경우에는 진단이 가능하지 않은 경우도 있다. 다양한 고장이 동시에 존재하는 경우 한가지 고장이 존재하는 경우보다 검출과 진단이 상대적으로 더욱더 복잡하고 어려워진다.

<표 1> 고장유형및 징후

고장유형	고장징후
· 배관 막힘 · 실외기 팬 고장 · EXV 동결	고압 상승 저압 하강
· 냉매 누설	고압 · 저압 모두 하강
· 오일 부족	고압 하강 저압 상승
· 배관 막힘 · 냉매 누설 · 실외 및 실내 팬 고장 · EXV 고장	용량 부족
· 배관 막힘 · 실내 팬 고장 · EXV 고장	과열 부족
· 실외기 팬 고장	과냉 부족

냉방 시스템 고장 유형

냉방기 고장에 대한 현상은 문헌⁽¹⁾ 등을 통해 다양하게 알려져 있으며 유형과 현상에 대한 내용을 간략하게 정리하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

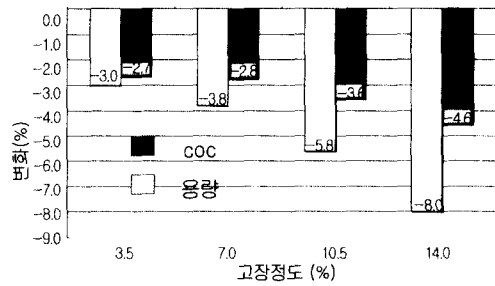
고장 영향

그림 1에서 그림 4까지는 3RT 냉방기의 실험결과로 냉매누설, 압축기 밸브 누설, 응축기 오염, 증발기 오염에 따른 냉방 시스템의 성능과 성적계수의 영향

을 나타낸다⁽²⁾. 실험 결과를 통해 각종 고장으로 인하여 에너지가 과소비 됨을 확인할 수 있다. 더욱이 고장은 다른 고장을 가속화시키는 특징을 가지고 있기 때문에 조기에 고장을 검출하지 못하는 경우 고장의 전파로 인한 피해는 더욱 증가하게 된다.

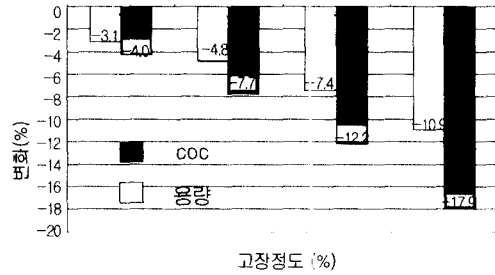
고장 검출 및 진단 방법

고장 검출 및 진단 방법은 크게 모델 기반 방법과 지식 기반 방법으로 분류할 수 있다. 전자는 수학적 모델 결과와 실제 시스템 측정값을 비교함으로써 현재



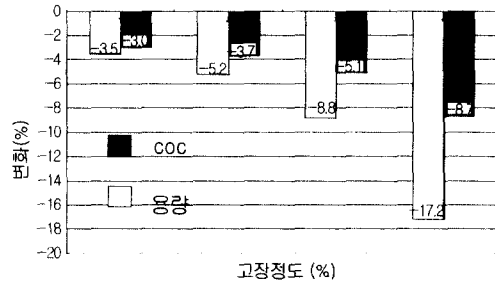
고장건도 (%)	%용량변화	%COP변화
3.5	-3.0	-2.7
7.0	-3.8	-2.8
10.5	-5.6	-3.6
14.0	-8.0	-4.6

[그림 1] 냉매 누설에 따른 영향



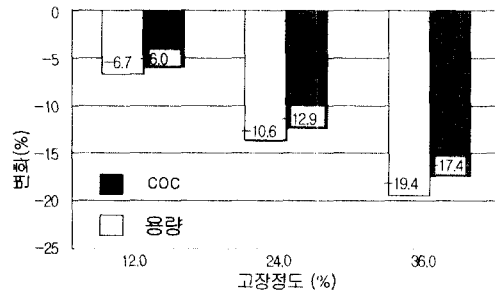
고장건도 (%)	용량변화(%)	COP변화(%)
14	-3.1	-4.3
28	-4.8	-7.7
42	-7.4	-12.2
56	-10.9	-17.9

[그림 3] 응축기 오염에 따른 영향



고장건도 (%)	용량변화(%)	COP변화(%)
5	-3.5	-3
10	-5.2	-3.7
15	-8.8	-5.1
20	-17.2	-8.7

[그림 2] 압축기 밸브 누설에 따른 영향



고장건도 (%)	용량변화(%)	COP변화(%)
12	-6.7	-6
24	-13.6	-12.3
36	-19.4	-17.4

[그림 4] 증발기 오염에 따른 영향

시스템의 운전상태를 파악하는 방법이다. 후자는 경험이나 실험 데이터를 통해 얻은 지식을 사용하여 고장을 검출하는 방법으로 축적된 데이터에 따라 고장 검출의 정도가 다르며, 대상이 비선형 특성이 있거나 모델 구축이 어려운 경우 사용되는 방법이다.

표 2는 고장 검출 및 진단 방법에 따른 특징을 나타낸다.

모델 기반 고장 검출 및 진단

모델 기반 방법에서는 고장 검출 대상의 수학적 모델을 사용한다. 실제 대부분의 시스템은 연속적인 시스템으로 미분 방정식을 통해 묘사되고 있으나 컴퓨터를 사용할 경우 차분 방정식이나 등가의 전달함수를 사용하여 이산화 시스템으로 전환하여 처리할 수 있다. 수학적 모델을 통해 계산된 각종 변수값은 센서를 통한 측정값과 서로 비교하여 잔차(residual)를 구하며 이를 통해 시스템의 고장 유무를 판단할 수 있다. 그러나 고장이 없는 경우라도 부차적인 오차 발생 요인에 의해 잔차가 발생될 수 있으므로 고장을 검출하기 위해서는 실험 혹은 이론으로 잔차의 한계(threshold)값을 설정하여 고장 유무를 판단한다. 고장을 보다 효율적으로 검출하기 위해서 불(boolean) 논리 연산을 사용할 수도 있고 방향성을 고려한 기하학적(geometric) 특성도 고장 검출에 사용할 수 있다. 고장 검출 및 진단의 정확도를 높이기 위해 잔차에 영향을 미치는 노이즈, 외란, 모델 오차 등에 대한 대책이 필요하다. 노이즈의 영향을 줄이기 위해서 노이즈의 특성 및 전달과정에 대한 분석이 선행되어야 하고 필터와 통계적 기술이 사용될 수 있으며 외란의 영향을 최소화하기 위해서 모델이 외란에 강인하도록

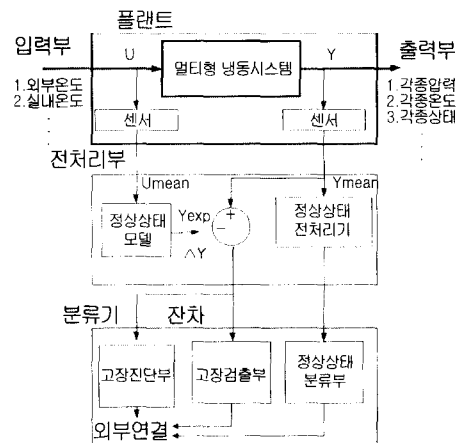
〈표 2〉 고장 검출 및 진단 방법

모델 기반 방법(model-based FDD)	지식 기반 방법(knowledge-based FDD)
<ul style="list-style-type: none"> 정확한 수학적 관계식 필요 고장 검출 및 진단 정확도 높음 온라인 적용 난점 비선형 특성이 존재하는 시스템에 부적합 기우 관계, 파라미터 추정법 등 	<ul style="list-style-type: none"> 전문가의 경험 및 실험을 통한 현상 중시 고장 검출 및 진단의 정확도 비교적 높음 온라인 적용유리 비선형 특성이 존재하는 시스템에 적합 퍼지이론, 전문가 시스템, 신경망 이론 등

설계하여야 하며 모델 오차를 최소화하기 위해 최적화 기법이 사용될 수 있다.

모델 기반 FDD에서 일반적으로 사용되는 방법은 크게 네 가지로 분류한다.

- 칼만 필터(kalman filter) 방법
칼만 필터를 통해 예측된 값으로 잔차를 구한다. 계산된 잔차값이 정해진 한계값을 벗어나면 고장 상태로 검출한다.
- 진단 관측기(diagnostic observer) 방법
예측 기능을 갖는 관측기의 출력값을 잔차값 계산에 사용함으로써 고장을 검출한다. 이 경우 관측기의 극점(Pole) 위치를 변화시킴으로써 고장에 대한 응답 특성을 변화시킬 수 있다.
- 기우 관계(parity relation) 방법
입력과 출력 관계가 일관성을 갖는 모델을 잔차 발생에 사용한다. 잔차값과 한계값의 비교를 통해 고장과 무고장의 페러티가 부여되며 페러티의 결과에 따라 고장 유무를 검출한다.
- 파라미터 추정(parameter estimation) 방법
고장이 없는 경우에 대한 플랜트의 기준 모델을



[그림 5] 모델 기반 FDD 구성

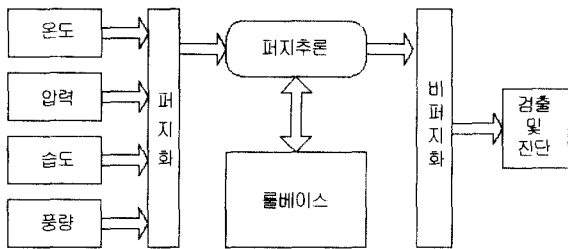
구한 후 플랜트의 파라미터를 온라인으로 확인한다. 기준 모델과의 편차 확인을 통해 고장을 검출하고 진단할 수 있다. 이 방법은 다른 모델 기반 방법보다 신뢰할 수 있지만 많은 연산과정을 필요로 한다.

그림 5는 모델 기반 방법의 전형적인 고장 검출 및 진단 시스템의 구성을 나타낸다. 그림에서 보듯이 크게 세 단계로 구분하며, 첫 단계는 실제 대상 시스템과 각종 센서가 포함된 플랜트를 나타내며, 정상상태 모델과 정상상태 운영을 판단하는 전처리 단계, 마지막으로 발생한 잔차를 통해 고장 여부 및 종류를 판별하는 분류기 단계로 나타낼 수 있다.

시스템이 정상 작동하는 경우 수학적 모델을 통해 구해진 결과와 측정을 통한 측정값의 차이, 즉 잔차는 "정상"으로 나타나지만 시스템에 이상이 발생한 경우 해당되는 부분은 "고장"으로 나타난다. 고장의 검출은 대상 시스템에서 고장과 관련되어 있는 각종 파라미터의 잔차를 비교함으로써 가능하며, 고장의 진단은 파라미터 사이의 상호 작용이 존재하기 때문에 일반적으로 어려우며 특히 복잡한 고장일 경우 고장 진단이 더욱 어려울 것으로 예상된다.

지식 기반 고장 검출 및 진단

지식 기반 방법에는 퍼지(fuzzy)이론을 사용하는 경우와 신경망(neural network)이론을 사용한 방법이 있다. 때로는 신경망 이론을 사용하는 경우 학습을 통해 모델이 형성되기 때문에 모델 기반 방법으로 분류하기도 한다.



[그림 6] 퍼지 시스템

퍼지 이론을 이용한 방법

그림 6은 지식 기반 방법으로 퍼지이론을 사용한 시스템의 구성을 나타낸다. 퍼지 방법을 사용하는 경우 다음과 같이 네 단계로 구성된다.

- 퍼지화
FDD에 사용되는 입력값으로 시스템의 고장 정보를 정확하게 파악할 수 있는 온도, 압력 등과 같은 물리량을 멤버십(membership)을 통해 퍼지화시킨다.
- 룰 베이스 구축
고장과 그 현상을 정의하는 부분으로 다양한 실험 및 조사를 통해 고장과 관련된 정보를 데이터 베이스화 한다. 무고장에 대한 정보와 다른 고장에 대한 정보를 포함함으로써 발생하는 다양한 고장을 정확하게 검출하고 진단할 수 있으며 전문가의 경험도 이 부분에 포함될 수 있다. 일반적인 룰 베이스의 구성은 다음과 같다.

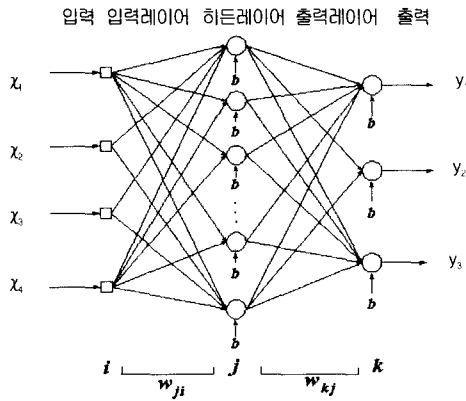
$R^i : IF \text{입력}_i \text{이 조건}_i \text{이고}/\dots$
 $\text{입력}_m \text{이 조건}_m \text{이면}$
 $\text{출력}_n \text{는 결과}_n \text{이다.}$

여기서 조건(premise)에 포함되는 값은 입력의 상태에 대한 정보가 포함되며 결과(consequence)부분은 그에 따른 출력을 나타낸다.

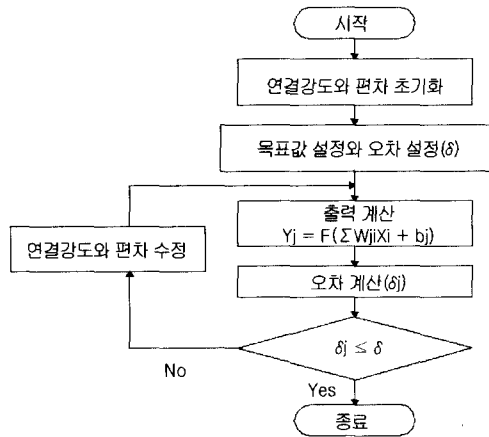
- 추론 방법
퍼지 물간의 관계를 계산하는 단계로 일반적으로 min-max 방법을 많이 사용하지만 추론 방법의 선택에 따라 동일한 입력에 대해서도 서로 다른 결과가 나올 수 있다.
- 결과의 표현
추론 과정을 통해 얻은 결과를 실제 사용자가 사용할 수 있도록 표현되는 과정으로 FDD의 경우 고장의 종류 또는 고장의 진행 상태를 나타낼 수 있다.

신경망을 이용한 방법

그림 7⁽³⁾은 일반적인 신경망의 구성을 나타내며 그림에서 보듯이 각각의 입력이 입력층(input layer), 중간 과정인 은닉층(hidden layer), 결과를 전달하는 출력층(output layer)으로 구성된다. 신경망의 주요 구성요소는 뉴런과 이들의 상호 연결하는 활성화함수(activation function)로 구성되며 다른 뉴런들로부터의 입력에 가중치를 고려하여 처리한 후 그 결과를 다른 뉴런으로 보낸다. 신경망 회로의 특징은 인간의 뇌와 유사하게 많은 정보가 동시에 입력되어



[그림 7] 신경망 구성



[그림 8] 역전파 알고리즘

도 병렬로 처리가능하기 때문에 빠르고 정확한 결과를 얻을 수 있다.

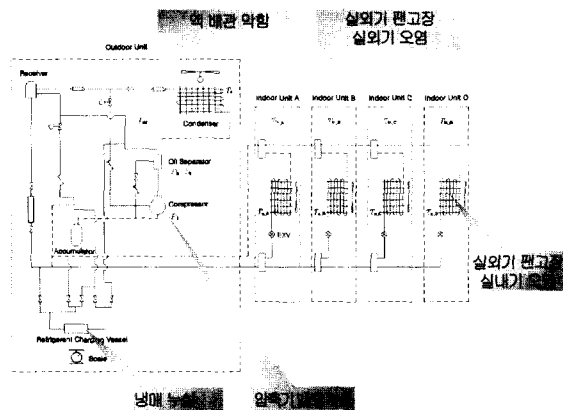
그림 8은 학습에 자주 사용되는 역전파 알고리즘의 진행 과정을 나타낸다. 먼저 연결강도와 바이어스를 초기화한 후 목표값과 허용 오차를 설정한다. 활성화 함수를 사용하여 출력값을 계산한 후 오차 δ_j 를 계산하고 허용오차 δ 이하가 되도록 연결강도와 바이어스를 변화 시켜가며 학습을 반복한다. 출력값이 허용 오차 이하로 수렴하면 학습은 멈추게 된다. 허용 오차 범위는 시스템에 따라 선택되며 학습 시간을 결정하는 주요 요인이 된다. 학습과정에서 출력값은 목표값이라고 하며 허용오차 범위 내로 수렴된다.

고장 검출 및 진단 모사 시스템

고장 모사 대상으로 멀티형 냉방기를 선택한 경우 그림 9와 같으며 시스템에 발생하는 고장은 냉매누설, 실외기 및 실내기 팬 고장, 실외 및 실내 열교환기 오염, 압축기 밸브 누설 등이며 이러한 고장은 냉동기 성능을 저하시키며 때에 따라서는 시스템 내부에 치명적인 결함을 주거나 시스템을 정지시킨다. 고장 모사 방법은 다음과 같다.

- 냉매누설

냉매누설은 밀폐된 시스템 내부에서 어떤 원인에 의해 냉매가 누설되는 현상을 말한다. 이 고장의



[그림 9] 고장 모사 장치 및 고장 유형

모사는 냉매보관 용기를 시스템에 따로 설치하여 냉매를 일정량 제거함으로써 누설실험을 모사할 수 있다.

• 실외기 및 실내기 팬 고장

실외기 및 실내기 팬 고장은 모터나 팬의 성능저하를 의미하며 이 경우 인버터를 사용하여 모터의 회전수를 제어하거나 열교환기로 유입되는 풍량을 변화시켜 고장을 모사할 수 있다.

• 실외 및 실내 열교환기 오염

열교환기 오염은 먼지와 같은 이물질에 의해 열교환기 전열 면적이 감소되는 현상을 말한다. 모사 방법으로 최초 오염이 없는 경우의 열교환 면적을 측정한 후 전체 열교환 면적을 일정비율 차단함으로써 고장을 모사할 수 있다.

• 압축기 밸브 누설

압축기 밸브가 마모되어 밸브에 누설이 발생하면 압축기의 체적효율이 감소되고 고압과 저압의 압력 차가 감소되어 시스템에 큰 무리를 준다. 압축기 밸브 누설의 경우 시스템의 고압과 저압의 연결부에 밸브를 설치하여 모사할 수 있다.

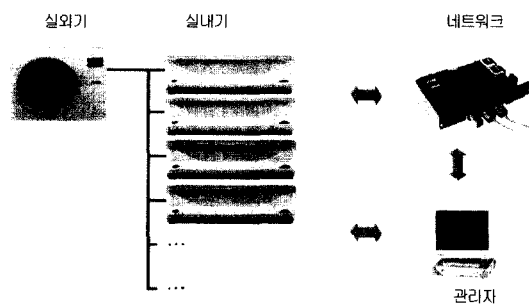
추가적으로 각종 센서와 제어기 성능 저하도 포함될 수 있으며 시스템이 히트 펌프로 운용되는 경우 방향 전환 밸브(reversing valve)나 전자 팽창 밸브 등의 고장을 포함시킬 수 있다. 더욱이 시스템이 멀티형인 경우 다수의 실내기가 존재하기 때문에 복수대의 실내기 고장이 발생하는 경우에 대한 검출 방법에 대하여 심도 있는 연구가 필요하게 된다.

맺음말

고장 검출 및 진단 시스템은 최근 개발되기 시작한 기술로서 냉방 시스템의 경우 실제 제품의 적용까지는 많은 연구와 투자가 필요할 것으로 예상된다. 본 고에서는 멀티형 냉방 시스템을 대상으로한 고장 검출 및

진단 시스템의 개념 및 개발 방향에 대해 언급하였다. 모델 기반 방법은 수학적 모델 자체의 정확성에 따라 검출 성능에 영향을 받아 비선형 특성이 강한 경우 모델의 부정확성 때문에 검출 및 진단의 어려움이 예상되나 대체적으로 간단하고 때에 따라 정확한 검출이 가능한 장점을 가지고 있다. 지식 기반 방법은 검출의 정확도가 모델 기반에 비해 떨어지고, 많은 실험 데이터가 요구되나 시스템에 대한 다양한 정보 특히 정량적인 정보를 효과적으로 사용할 수 있으며 비선형 특성이 존재하는 경우에 효과적으로 적용할 수 있는 장점이 있다.

냉매의 손실, 열교환기의 오염과 같은 점진적인 고장은 일반적으로 느리게 진행되기 때문에 정확도가 개선된 검출 및 진단 방법이 요구되며, 한 가지 고장은 시스템의 다른 고장을 유발하기 때문에 두 가지 이상의 고장에 대한 효과적인 검출 및 진단 방법의 개발이 또한 요구된다. 멀티형 냉방기는 다수의 실내기를 갖고 있기 때문에 일대일 방식의 고장 검출 및 진단 방법에 비해 더욱 정교한 방법이 요구되며 외란이나 노이즈에 대해 보다 강건하도록 설계되어야 한다. 특히 다양한 고장을 검출하기 위해서 시스템의 상태를 파악 할 수 있는 많은 센서가 요구되지만 초기 가격 상승을 유발하므로 다양한 실험을 통하여 구축된 데이터 베이스를 활용하여 고장 검출에 효과적인 파라미터를 선택하여 센서의 설치를 최소화 할 수 있는 설계가 요구된다. 냉방 시스템의 고장 검출 및 진단 시스템을 실제 시스템에 적용하기 위하여 실용화에 대한 연구 개발이 향후



[그림 10] 고장 검출 및 진단 시스템

진행될 것으로 예상되며 특히 최근 인터넷과 통신 기술의 발전으로 그림 10과 같이 원격지에서 고장 검출 및 진단 시스템과의 연결을 통해 관리자는 다양한 고장 정보를 활용하여 서비스 제공과 제품의 성능을 개선할 수 있으며 소비자는 다양하고 신속한 서비스를 제공받을 것으로 예상된다. 특히 온라인으로 연결된 통신망을 통해 건물 냉방 시스템의 예방적 관리는 물론 건물에서 발생하는 문제를 직접 해결할 수 있는 기술도 개발될 것으로 예상된다.

참고 문헌

1. Kangley, B. C., 1980, Air conditioning and refrigerating troubleshooting handbook, Prentice-Hall, pp. 10-193.
2. Breuker, M. S., and Braun, J. E., 1998, Common faults and their impacts for rooftop air conditioners, HVAC&R Research, Vol. 4, No. 3, pp. 303-318.
3. Han, D., and Yoon, T., 2000, Partial fault response of multi-type air-conditioner, Proceedings of the SAREK, pp. 319-323. (주)