



공조설비의 고장

(*한국에너지기술연구소)

1. 서론

최근 공조 시스템을 구성하는 에너지 설비들이 복잡화, 다양화됨에 따라 종합적인 에너지 관리시스템이 도입되고 있으며, 자동제어 설비에 필요한 계측기, 구동기 등의 기기와 설비 자체를 항상 최적으로 유지하기 위한 새로운 보전 시스템의 개발이 요구되고 있다. 시스템의 정상적인 유지 보전을 위한 실시간 고장 검출 및 진단 기술은 그동안 선진국에서 안정성이 요구되는 항공우주분야나, 원자력 발전분야 등에서 활발히 연구 개발된 기술이었으나, 최근에는 일반 산업 공정이나 발전소, 자동차, 열 설비 등으로 적용이 확대되고 있다. 이것은 자동화 추세와 일치하는 것으로 자동제어를 필요로 하는 모든 분야로의 확대가 예상되고 있다. 특히, 민수용 에너지 다소비 열설비인 공조시스템이나, 공업로나 보일러 등에 적용될 경우 고장에 따른 에너지 낭비요인을 미연에 방지하여 에너지 관리의 목적인 에너지 절약에 크게 기여할 수 있을 것이다. 공조시스템의 제어기에 사용될 센서에 이상이 있는 경우 연간 에너지 사용량이 30% 이상 증가될 수 있기 때문에[1], 이를 방지하기 위해서 에너지 설비의 자동 이상 검출 및 진단 시스템의 적용이 중요함을 알 수 있다.

고장에 대비하기 위한 유지 보전기술은 시간기준 보전기술과 상태기준 보전기술로 대별될 수 있다[2]. 시간기준 보전은 신뢰성 통계 정보에 기초하여 구한 시간을 기준으로 기기의 수명을 예측, 계획하여 수리 점검 교환 등을 수행하는 방식으로, 공조설비의 부위(unit)나 부품(component), 시스템의 정상적인 유지 보전을 위하여 실제 시스템의 내구성, 구동성 자료에 기인하여 경제적인 관점에서 수명을 평가 처리하는 방식이다[3][4]. 상태 기준 보전은 시스템의 상태 정보에 의존하여 고장을 검출 처리하는 방식이다. 이것이 상태 감시 보전, 모니터에 의한 실시간 보전(Monitored Preventive Maintenance, MPM), 상태 기준 보전(Condition based Preventive Maintenance, CPM)으로 불리어지는 것이다. CPM은 운전자 또는 장치에 의해 정기적인 점검을 수행하여 결함을 발견했을 때에 처리를 하는 방식이며, MPM은 실시

간으로 시스템의 동작 상태나 물리적 성능의 관측결과로 결함이나 고장을 검출하여 조치를 취하는 방식으로 전자 통신 기술과 컴퓨터의 발달에 의해 최근에는 주로 이에 대한 연구가 진행되고 있으며, 현재에는 일반적으로 이 방식이 고장 검출 및 처리를 통한 시스템 보전 기술로 인식되고 있다.

설비의 안정성 및 신뢰도를 향상시켜 에너지 낭비요인을 줄이기 위한 최상의 방법은 고장을 미연에 방지하는 것이다. 이것은 안정성과 신뢰도가 높은 제어 및 구동기 등을 사용하여 고장 발생 확률 자체를 줄이는 고장 회피법을 적용하는 것으로, 정밀제어를 필요로 하지 않으나 다수의 계측기와 제어기, 그리고 구동기가 필요한 공조시스템과 같은 민수용 에너지 설비에는 경제적인 문제로 적용하기가 어려우며, 설비의 성능을 모니터하여 발생된 고장을 신속하게 검출하거나, 예측, 규명하여 처리하는 고장 허용법의 채용이 바람직하다.

공조설비는 에너지 설비 대부분을 포함하는 것으로 열원인 보일러, 칠러(Chiller)는 물론 압축식 히트펌프, 흡수식 히트펌프, 패키지 에어컨, 축열시스템 그리고 최근에는 코제너레이션(Co-generation)시스템도 포함시키고 있다. 이들 단위 설비들이 단일 또는 복합적으로 결합되어 목적하는 에너지 설비가 구성된다. 공조분야는 산업 공조와 일반 공조로 구분될 수 있는데 산업 공조분야에서는 생산장치에서 요구하는 제조환경을 조성하기 위해 고도화, 정밀화, 대규모화가 이루어지고 있으며, 일반공조분야에서는 인텔리전트 빌딩이나, 지적 생산활동의 향상을 위한 쾌적환경의 추구하고 에너지 설비의 영원한 과제인 에너지 절약과 운영비 절감을 위한 정도 높은 제어능력이 요구되고 있다. 이들 기술은 전자, 기술, 제어, 컴퓨터 등 복합화된 기술로 실현되고 있어, 종래 단순한 시스템으로는 운영이나 보전에 별로 문제가 없었던 경미한 결함도 직간접적으로 전체 시스템에 영향을 주는 파급효과가 커지고 있어 이에 대한 새로운 기술이 요구되고 있다.

실시간 자동 고장 진단 시스템의 주목적은 부품, 부위 또는 시스템의 상태를 감시하여 고장의 원인이 되는 결함의 존재를 검출하거나 미리 예측하는 것이다. 이상적으로는, 시스템의 주요 결함이 검출되면, 심각성 분석을 통해 적절한 보수 보전 조치를 취할 수 있도록 지시를 내려야 하나, 현재

까지의 기술로는 고장 진단 시스템은 운전 과정상의 정보를 얻기 위한 도구로서, 운전자에게 고장 판단과 처리를 할 수 있게끔 도움을 주는 정도의 기능으로 인식되고 있으며 경미한 고장이나, 주요 센서의 고장의 경우에 스스로 복구할 수 있는 기술이 개발되고 있는 중이다.

에너지 설비의 실시간 성능감시를 통한 고장 검출 및 진단기술은 90년대 초부터 본격적으로 연구가 시작된 분야로, 단편적인 연구 이외에 건물 설비에 대해 International Energy Agency(IEA)의 ANNEX25분과에서 1991년에서 1996년까지 "Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis"를 주제로 연구를 수행하였으며[5], 계속해서 1996년 9월부터 새로이 ANNEX34를 통해 "Computer Aided Evaluation of HVAC System Performance: the Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques"에 대한 연구를 미국 등 10여개 국가가 공동 수행하고 있다. 선진 10여개 국가가 모여서 연구하는 IEA 관련연구의 목적은 에너지 절약을 위해 에너지 설비의 성능 진단 및, 부품 및 하부 시스템의 고장 진단 방법을 개발하기 위한 것이다. 매년 2회에 걸쳐 연구회의를 개최하여 6개월간의 연구결과가 20편이상의 기술 논문으로 차기 6개월간의 연구계획과 더불어 발표되고 있다[6][7]. 나라별로 미국, 프랑스에서는 인공지능을 이용한 방법과 통계적인 방법이, 네덜란드, 일본과 스위스, 스웨덴 등은 시스템 예측법에 의한 고장진단 방법을, 핀란드 등은 특정 방정식을 이용하는 방법이 그리고 영국에서는 퍼지이론을 이용한 방법과 모델기반 방법 등이 주로 연구되고 있는 등 다양한 고장 검출 및 진단 방법들이 동일 대상을 이용하여 연구되고 있다. IEA ANNEX34 연구분과에서 현재

까지의 기본 연구를 바탕으로 연구 개발된 기술을 평가할 수 있는 기준 및 실제 적용을 위한 기술 개발과 신뢰성 향상을 위한 연구가 진행되고 있다. 이 연구를 통해 그 동안 선진 각국이 개발한 에너지 설비의 자동 고장 진단 및 처리기술을 평가할 수 있는 성능 기준 및 안정성 및 신뢰성 높은 적용 기술이 확립될 것이며 빠른 시일 내에 각국의 에너지설비나, 에너지 사용을 둔 스마트 건물 등에 실제로 적용될 것이다.

2. 운전 최적화와 고장 검출 및 진단

운영 최적화는 정상적으로 시스템이 유지될 수 있도록 하는 보수 보전의 합리화 기술이 전제로 된다. 시스템에 이상이 있는 경우 요구되는 성능이나 제한 조건들을 만족시킬 수 없기 때문에, 최적 운전의 전제조건으로 시스템의 부품이나 부시스템에 고장이 없는 정상 상태가 요구되는 것이다.

자동으로 운영되는 복잡한 시스템을 최적상태로 유지시키기 위해서는 기존의 운전자의 감시와 조작만으로는 현실적으로 실현이 어려우며, 새로운 운전 관리기술이 필요하다. 에너지 시스템의 고장 검출 및 진단 시스템은 시스템의 성능저하를 미리 예측하거나 부품 손상 등을 신속히 검출하여 운영자에게 정보를 제공함으로써 시스템을 항상 최적의 상태로 유지시키기 위한 것이다.

최근 대형, 복합화 되고 있는 에너지 설비들은 대부분 부위와 부품들로 구성된 복잡한 시스템들로 계층적 구조로 나타낼 수 있다. 설비의 복잡성으로 인해 수학적 개념으로 전체 시스템을 최적화하기에는 어려움이 있으며, 계층화된 부분 시스템이 최적으로 운전되는, 그리고 시스템에 고장이 없는 상태로 실제 시스템의 최적화를 고려할 수 있다. 그림 1이 건물의 종합적인 에너지 설비의 최적 운영 개념도이다.

일반적으로 고장은 시스템의 운전을 정지시켜야 하는 상황으로 간주하며, 정상적인 운전은 목표로 하는 결과가 주어 진 허용범위내에 들어가 있는 상태로 간주한다. 결과만을 고려한 이와 같은 정의는 고장 검출 및 진단을 위한 표현으로는 다소 부적절하며 공정의 최적 운전을 위한 좀더 엄격한

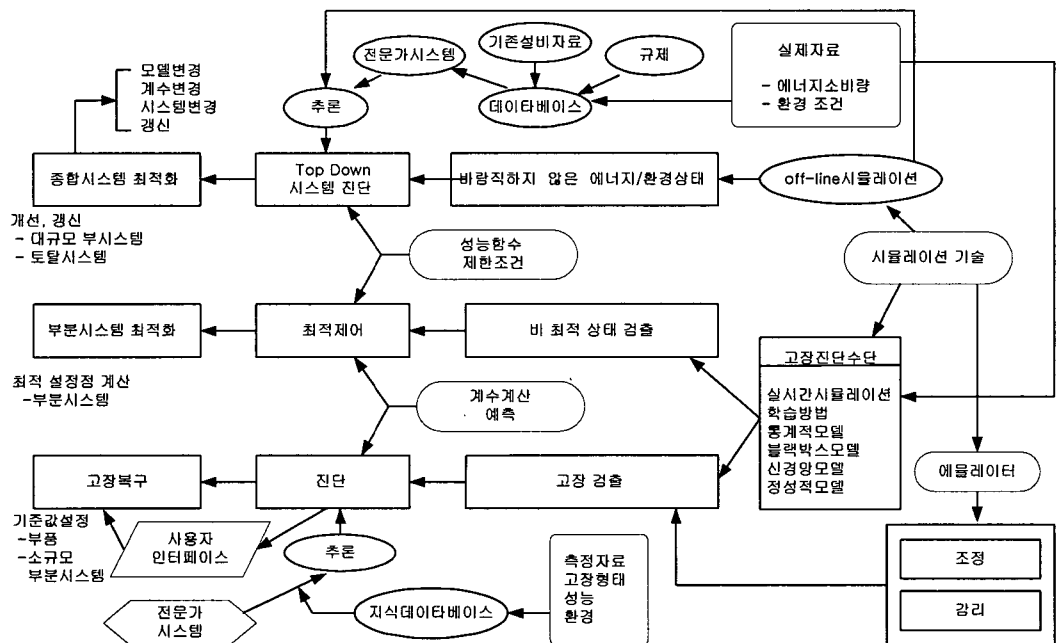


그림 1. 에너지 설비 최적 운영 개념도

요구가 필요하다. 즉, 결과 값이 허용범위에 있어도 운전 상태가 설계된 범위에서 벗어날 경우에도 결함(defect)으로 간주해야 한다. 작은 결함들은 최종 목표 값에 영향을 미치지 않을 수 있는데, 이것은 작은 오차의 경우 자동제어 시스템에 의해 보상되어 정상적으로 작동 될 수 있기 때문이다. 공정이나 부품의 결함을 고장의 범주에 포함시킬 경우 최종 목표 값에 영향을 미치지 전에 미리 결함을 발견하거나 고장을 예측할 수가 있어 전체적인 시스템의 신뢰성을 높일 수 있다. 에너지 설비에 있어서 고장 진단의 중요한 목적의 하나는 결함의 진전도나 발생을 감시하여 그에 의한 손상이나 손실을 최소화시키는 것은 물론 이에 따른 에너지 낭비를 막는 것이다.

최적운영이나 성능 진단은 톱다운(Top-down)이나 보텀업(Bottom-up)방식으로 접근할 수 있다. 에너지 소비와 같이 전체 설비의 성능을 시작으로 하여 점점 자세한 성능을 파악하는 방법이 톱 다운방식이며, 자세하게 고장 등의 세부 결과에서 시작되는 접근 방법을 보텀업 방식이라 한다. 톱다운 접근 방식에서는 전체 시스템 수준에서 관측되고 있는 현상들이 그대로 성능지수들로 사용되며, 계속 성능이 감시되는 상태이므로 시동 순간부터 전체 시스템 차원에서 바람직하지 않는 상태들이 발견 될 수 있다. 이런 측면에서는 보텀업 접근 방식보다는 톱다운 방식이 전체 시스템 성능 감시에 좀더 자연스러우며, 시스템 수준에서 고장의 발견에 적합하다. 건물 전체 수준의 에너지 사용 문제를 검출하기 위해 냉방모드의 경우 다음과 같은 종합적인 에너지 사용량이 이용될 수 있다[8].

- 전체 건물의 전기에너지 사용량
- 전체 건물의 열에너지 사용량
- 냉방을 위한 칠러(Chiller)에서의 에너지 사용량
- 칠러 이외의 공조시스템에서의 에너지 사용량

이들 측정 변수의 예측값과 실제값을 비교하여 전체 에너지 사용량 측면에서 문제를 찾아낼 수 있다. 여기서 칠러와 공조시스템은 가장 중요한 에너지 사용원이기 때문에 별도로 취급할 필요가 있다. 톱다운 방식에서 문제가 되는 것은 오차가 관측된 후 많은 부속 시스템과 부품 중에서 고장을 규명해야 하는 점이다. 이것이 종합적인 성능을 중심으로 시스템을 관측하는 톱다운 방식의 단점으로, 통계 및 중요도에 따른 추론으로 원인을 규명해야 한다. 보텀업 접근은 각각의 부품이나 부분 시스템 수준의 운전상태 검사를 기본으로 한다. 이들 부분 시스템의 상태는 전체 시스템 측면에서 전부 관측할 필요는 없으나, 전체적인 시스템 성능에 큰 영향을 미칠 수 있는 부품의 우선 순위를 정해, 고장이 발생하였을 때 검사할 필요가 있다.

그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 시뮬레이션이나 기존 설비의 운전자료를 통해 미리 확보된 지식 기반은 톱다운이나 보텀업 접근 방식 모두 운전 상태를 파악하는데 매우 중요하다. 톱다운 방식에서는 추론 과정을 설계하는데 사용될 수 있으며, 보텀업 방식에서는 관측해야 할 가장 중요한

부품과 공정을 선정하는데 사용될 수 있다. 이런 기초 지식 없이 시스템 상태를 파악하려면 방대한 양의 계산과 추론을 필요로 하게 된다.

3. 설비의 고장 분석

고장 검출 및 진단기술을 개발하기 위해서는 우선적으로 발생 가능한 고장의 종류 및 중요도를 파악해야 한다. 이 과정에서 전문가의 지식을 이용하는 것이 하나의 효과적인 방법이 될 수 있다. 여기서 파악된 결과는 진단을 위한 규칙 생성 및 훈련을 위한 지식 기반으로 사용할 수 있다. 공조시스템 중대형 건물에 많이 사용하는 단일 덕트 가변풍량 방식 공조기를 예로 들면, 부분별로 발생할 수 있는 고장은 100여개 이상이다. 고장 중 중요도를 결정하기 위해 우리나라와 실정이 유사한 일본을 중심으로 조사한 자료를 정리한 예가 표 1이다[5]. 가변 풍량 공조기에서의 가장 중요한 고장을 찾기 위한 조사 결과는 관점에 따라 중요하다고 여겨지는 고장 종류가 달라질 수 있어 객관적으로 중요 고장을 선정하기는 어려우나 댐퍼 및 VAV 박스등 제어를 위한 구동기에 관련된 고장이 일반적으로 많이 나타나는 것을 알 수 있다. 일반 공조시스템의 경우 고장이 인체에 치명적인 영향을 미치지 않으므로 안정성 보다는 다음과 같은 사항이 우선되어야 한다.

- 가) 에너지 소비를 증가시키는 비효율적인 운전 상태를 조기에 발견할 수 있어야 한다.
- 나) 환경 요인을 저하시킬 가능성을 가능한 빨리 예측할 수 있어야 한다.
- 다) 자주 발생하는 고장이나, 운전자에 의해 발견이 어려운 고장을 자동으로 검출할 수 있어야 한다.

표 1. 전문가에 의해 선정된 공조기의 주요 고장 10가지

	고장이나 증상	결함 (Defect)
1	급기온도가 너무 높거나 낮다.	난방이나 냉방 코일 제어밸브 고장
2	부적절한 댐퍼 열림	댐퍼의 제어신호 이상이나 기계적인 고장
3	비정상적인 송풍기 회전 속도	급기관 압력계의 성능 저하
4	실내온도가 너무 높다.	과도한 실내부하 (과도한 실내인원)
5	실내온도가 너무 높거나 낮다.	VAV 유닛 고장
6	실내온도가 너무 낮다.	VAV 유닛의 재열코일 오염
7	AHU로부터의 소음	송풍기의 베어링 마모
8	비효율적인 운전	VAV 간섭에 의한 유량제어의 부조화
9	비효율적인 운전	창문개방
10	실내온도가 너무 높다.	창문을 통한 태양열 투과를 블라인드를 통해 차단시키지 않음

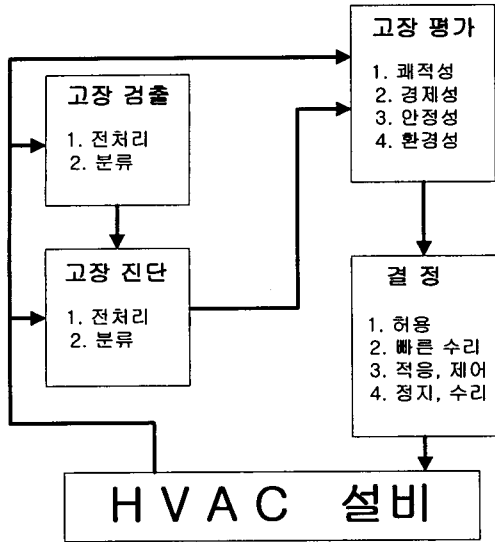


그림 2. 고장 검출 및 조치를 위한 과정

4. 고장 진단과 처리를 위한 단계

HVAC(Heating ventilation and Air-conditioning) 시스템을 위한 종합적인 공정의 감시 운영 체계는 기존의 방법과 마찬가지로 그림 2와 같이 고장 검출, 진단, 평가, 그리고 결정의 4단계로 구분하여 나타낼 수 있다.

고장 검출 과정을 단순하게 표현하면 측정 가능한 변수나, 예측 가능한 변수가 정상상태의 허용 범위를 벗어나는 것을 검사하는 것으로 나타낼 수 있다. 만약 허용범위를 초과하면 고장 메시지를 출력하게 된다. 이와 같은 기능은 고장 검출을 위한 모니터링이라 한다. 필요할 경우 이 단계에 이어 원인이나 위치를 찾을 수 있는 진단 과정이 수행된다. 다음 단계가 고장 평가로 이것은 발생한 고장이 시스템이나 공정에 얼마나 큰 영향을 미칠 것인가를 평가하는 것이다. 고장의

정도가 파악되면, 다음 단계로 조치를 취해야 한다. 고장 평가 결과 허용할 만한 경우이면 운전은 당분간 정상적으로 계속될 수 있으며, 허용 범위를 넘어선 경우에는 시스템을 즉시 정지시키고 고장 부위를 제거시켜야 한다.

그림 3은 고장 검출에서 처리를 위한 각 단계와 종합적인 감시제어 시스템 구성을 나타낸 예이다. 고장 검출 및 처리 과정이 폐환 제어와 같은 방법으로 구성되는 것을 볼 수 있다. 그러나 폐환 제어와는 달리 시스템 상태에 따라 시간 지연이 필요하다. 즉 운전변환, 정지, 고장 제거 등은 많은 시간 지연이 필요한 프로세스이다. 그림 1과 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 고장 검출에서 처리를 위해서는 실제 운전 경험과 시뮬레이션 등에 의한 축적된 지식의 사용이 필수적인 것을 알 수 있으며 일단 축적된 지식에 의해 전처리되어 구해진 잔차와 같은 성능지수들은 기존에 개발되어 있는 일반적인 고장 검출이나 진단방법을 사용할 수 있으므로 여기서는 고장 검출과 진단 방법에 대해서는 깊이 있게 다루지 않았다.

4.1 고장 검출 및 진단

이 단계에서 관측 상태값을 이용하여 설비의 정상/비정상 상태를 판단하고(고장 검출), 고장의 위치와 원인 그리고 발생 시점(고장진단) 등을 분석하게 된다. 고장 검출과 진단을 위한 시스템은 일반적으로 독립적으로 구성될 수 있다. 두 개의 시스템은 서로 정보를 교환할 수 있으며, 제어기와도 정보를 교환할 수 있어 필요할 경우 고장 검출 및 진단을 위한 확인 신호를 감시 프로세스에 보낼 수도 있다. 고장 검출과 진단 과정은 일반적으로 전처리(Pre-processor)와 분류(Classification)의 두 과정으로 나누어 고려할 수 있다. 측정된 자료는 전처리과정에서 분류가 용이한 성능 지수들로 변환되며, 이론적인 모델들이 잔차를 생성하기 위하여 사용될 수 있다. 즉 기준식들은 사용하여 상태변수의 변화값, 모델 계수 변화값을 생성하여 분류에 이용하는 것이다. 시스템 고장 진단을 위한 전처리와 분류기술 연구는 각 분야에서 다양하게 연구 개발되었으며 여기서는 구체적인 방법에 대한

것은 다루지 않았으며 간단한 설명만을 하였다. 검출과 진단을 위한 2단계 과정은 다시 세분될 수 있는데 대표적인 방법만을 고려하면 다음과 같다.

4.1.1 전처리

단순 처리:

시간 변화분 산출, 단위 변환, 정규화, 평균값 산출

모델 기반 처리:

- 성능 지수에 따른 분류
- 상태변수 예측, 계수 예측, 특성량 산출

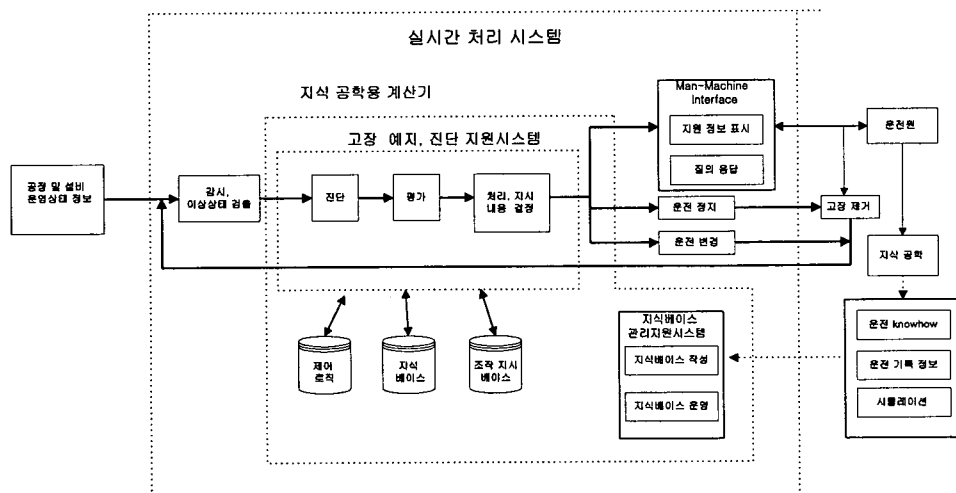


그림 3. 에너지 설비 고장 검출 및 처리 시스템 예

- 모델 구조에 따른 분류
 - : 물리적 모델, 블랙박스 모델, 정성적 모델
- 모델 동특성에 따른 분류
 - : 정적 모델, 선형, 동적 모델, 비선형 동적 모델

4.1.2 분류기

Knowledge-based Classifier
Association-based Classifier

측정과정에서 성능지수가 생성되면 이들 지수들을 이용하여 쉽게 분류를 수행할 수 있다. 분류기는 이들 성능 지수를 이용하여 고장 검출이나 진단을 수행하는 것이다. 해석적 모델들은 관측과정에서 가장 유용하게 사용될 수 있는 도구이다. 상태 변수 잔차와 모델 계수 변화는 프로세스 모델로부터 구할 수 있는 중요한 성능지수이다. 특성식을 이용하여 특성값을 산출할 수 있다. 이들 성능지수들에 의해 분류가 좀더 쉽고 정확해질 수 있다.

프로세스 모델은 물리적인 모델과 블랙박스모델로 구할 수 있다. 물리적 모델은 시스템을 특성을 이론적으로 해석한 것으로 모델 자체에 물리적 의미를 포함하고 있어 고장진단에 유리하다. 블랙박스 모델은 단순하게 관측결과를 예측할 수 있는 가장 단순한 형태의 식을 사용하는 것으로 식 자체가 물리적 의미를 함유하고 있지 않지만, 계산이 단순하다는 장점이 있어 공조 시스템의 고장 검출에도 적용되고 있다 [9][10]. 복잡한 건물 공조 시스템에 있어서 경제적인 제약에 의해 측정 센서의 수가 적어 상세한 측정자료를 얻기 어렵고, 복잡성으로 인해 시스템을 정량적으로 해석하기도 어려울 경우, 정성적인 모델에 의해 특징을 추출하여 고장을 검출하는 방법이 효과적으로 사용될 수 있다[11]. 일반적으로 물리적 모델은 비선형 동적식으로 표현되는데, 계산의 편의상 정적상태나 선형모델로 단순화시키게 된다. 정적 모델은 공정 상태 변수가 일정할 경우 사용할 수 있다. 이런 상태는 입력의 변화가 시스템의 동특성보다 느릴 경우 나타날 수 있다.

고장 검출과 진단의 두 번째 단계는 분류이다. 측정과 전처리에서 산출된 성능지수를 이용하여 검출과 진단을 수행하는 과정이다. 지식 기반에 의한 분류기가 일반적으로 사용될 수 있는데, 대표적인 방법으로는 규칙기반 시스템과 패턴 인식 방법이 있다. 규칙기반 시스템은 IF THEN과 같은 규칙을 이용하여 분류를 추론하게 된다. 패턴 인식방법은 주어진 지식을 신경망이나 통계적 방법으로 훈련에 의해 인식시킨 후 유사한 패턴을 분리해내는 방법이다. 일단 전처리가 끝난 후의 변수들 위해서는 일반적인 분류방법들이 사용될 수 있다. 공조기의 고장 검출 및 진단에 사용된 분류방법은 다음과 같다[12][13].

- 가. K-Nearest Neighbor Classifier
- 나. Fuzzy K-Nearest Neighbor Classifier
- 다. K-Nearest Prototype Classifier
- 라. Fuzzy K-nearest prototype Classifier
- 마. Artificial Neural Network Classifier

- 바. Rule-based Classifier
- 사. Bayes Statistical Classifier

그림 4는 단위 지역내의 전체 학교의 난방시스템의 운전 상태를 중앙의 컴퓨터를 이용하여 감시 진단하도록 프랑스 CSTB에서 개발하여 사용한 프로그램, EMMA(Energy Management at the Municipal level)의 처리 예이다. EMMA는 전처리 과정에서 평균값과 특정시간대의 상태값을 추출하여 분류에 사용하였다. 분류를 위해서 전산해석을 통한 데이터베이스 구성과 IF-THEN 규칙과 신경망을 연구하였으며 EMMA 프로그램을 위해서는 규칙기반이 채용되었다. EMMA 프로그램은 CSTB와의 연구계약에 의해 프랑스의 Montpellier 지역에 적용하기 위해 개발되었으며, 1997년에는 새로운 수정된 프로그램이 Limoges에 적용되었다[14]. EMMA 프로그램에서도 알 수 있는 바와 같이 전처리 과정에서 시스템 특성에 따른 필요한 정보를 추출하는 것이 매우 중요한 것을 알 수 있으며 전처리에 따라 전체적인 고장 검출 및 진단의 효율성이 좌우될 수 있다.

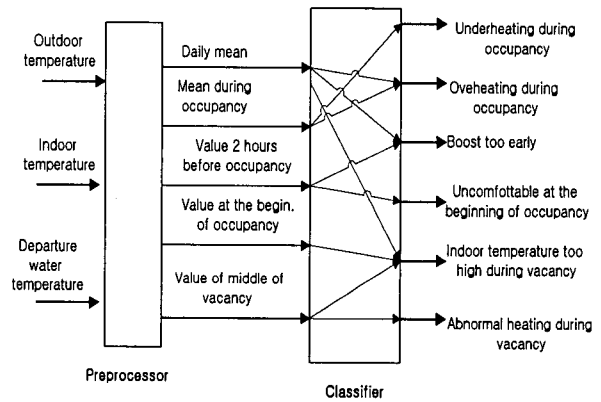


그림 4. EMMA의 고장 검출 및 진단 방법

고장진단은 성능지수의 시간별 주요 성능의 변화를 이용하여 고장을 미리 파악하는 예지 진단과 실시간으로 계측자료를 이용하여 분류하는 단순 고장진단으로 구분될 수 있다. 예진 진단은 계속 시스템의 성능을 검사하여 수명을 예측하기 때문에 시간 기준 보전방법과는 차이가 있다. 진단의 효율화를 위해서 예지진단과 단순 고장진단을 분리하여 처리할 수도 있다. 즉 제어가 이루어지는 주간에는 단순 진단을 그리고 시스템이 정지하거나 부하가 적은 야간에는 주간에 측정된 자료를 이용하여 예지진단을 수행할 수 있다. 열교환기에 발생하는 스케일 등에 의한 성능 저하나 기기 마모 등은 운전 상태의 경향에 기초하여 고장에 이르기 전에 예지 진단을 통해 결함을 미리 발견하여 적절한 조치를 취할 수 있으며, 운전 상태를 상시 감시하여 예지 진단으로는 대응할 수 없는 돌발적인 고장은 단순 고장 진단 과정에서 처리할 수 있다. 진단의 결과는 정도에 따라 정상, 주의, 고장 등으로 나타낼 수 있으므로 적절한 전처리를 통해 단순 고장진단 과정에서 결함의 진행에 따른 정상 상태에서 벗어나는 정도를 예지 진단할 수도 있다.

4.2 평가

그림 2와 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 평가는 검출 및 진단의 다음 단계로, 결합이나 고장의 정도 및 전체 시스템에 미치는 효과를 파악하게 된다. 진단 과정에서도 결합의 심한 정도를 원인과 더불어 분류할 수 있으며, 이 경우에는 진단 결과가 평가의 자료가 된다.

전체적으로 시스템에 미치는 파급 효과가 큰 급격한 손상은 평가가 단순하나, 성능저하와 같이 초기에 효과가 적은 결합은 전체 시스템 운영에 미치는 효과가 적어 평가가 어려우며, 장기적인 측면에서 예측과 예방 조치가 필요하다. 고장에 따른 전체 시스템에 미치는 영향은 고장이 발생한 부위나, 부품의 중요도와 일치한다. 시스템 계통상 상위 수준의 부품 고장은 우선적으로 처리해야 할 중요 고장으로 판단될 수 있다.

평가를 위한 기준으로는 에너지 사용량, 환경 저해, 안정성 등 여러 가지가 있을 수 있으며, 이들 값이 주어진 허용 범위를 벗어날 경우 조치를 취하게 된다. 평가 과정의 일부는 이미 고장 검출에서 사용되고 있는데, 이것은 경보를 위한 허용값의 결정에 적용되고 있다. 경보의 한계값은 일반적으로 프로세스의 상태를 통계적인 방법으로 분석하여 결정하는데, 그림 2와 같이 경제적 요인과 환경요인으로도 기준을 정할 수 있다.

4.3 결정 및 조치

고장 발견후 보수를 위한 결정과 조치는 일부를 제외하고는 자동으로 처리하기 어려운 과정으로, 일반적으로 컴퓨터를 이용한 처리과정은 검출에서 평가까지로 한정되며, 처리과정인 결정 및 조치는 운영자의 판단 및 결정에 따르게 된다. 그러나 센서고장에 따른 복원은 진단 결과에 따라 자동으로 처리될 수 있다.

결정은 고장의 원인과 위치가 진단되고, 심한 정도가 평가되었을 때, 감시되는 프로세스의 운전 상태를 어떻게 해야 할 것인가를 정하는 것으로, 위험 수준인 고장들의 정보와, 프로세스 상태 정보들을 기초로 이루어진다.

고장 평가후 1)시스템 정지후의 고장 제거와, 2)경미한 경우 운전의 설정 상태 등을 바꾸는 조치가 취해질 수 있다. 고장의 정도가 심해 제거할 필요가 있는 경우에는 시스템을 정지시키게 되며, 시스템에 미치는 효과가 적어 당분간 운전이 가능한 경우나, 설정값 변경 등이 필요한 경우 운전모드를 바꾸게 된다.

컴퓨터에 의한 결정은 최소한 운전자의 결정을 위한 보조 정보로 사용될 수 있어야 하며, 운영자는 고장 진단의 결과와 운전 상황 등을 파악하여 최종 조치 결정을 내리게 된다. 이를 위해서는 너무 많은 정보가 운전자에게 공급되어서는 안되며 관련된 신뢰성 있고 일관된 정보가 간결하게 전달되어야 한다.

4.4 센서 고장 복원

고장 허용 HVAC 시스템에 대한 기술 개발은 고장 검출과 진단에 비해 많이 이루어지지 않고 있는 상태이다. 공조기에서 실내 온도센서의 고장이 발생한 경우 순환 공기의 온도센서를 이용한 실내 온도제어에 대한 기술과[15] 냉난방을 위한 히트펌프에서 자동 제어에 필요한 센서가 손상되어 운영범위에서 완전히 벗어났을 경우 미리 정해진 운영모드로 작동되도록 하는 기술이 발표되었다[16]. 그러나 이들 기술은 센서에 완전한 손상이 있을 경우에만 검출이 가능한 것으로 실제로 일어날 가능성이 높은 성능저하나 편차등의 경우는 적용이 어렵다.

일반적으로 센서고장의 경우 고장 진단후 센서의 고장으로 판별이 난 경우 물리적으로 중복된 센서나 이론적인 중복성을 이용하여 주요 센서의 고장을 복원시킬 수 있으며 공조시스템 경우 경제적인 이유로 다수의 계측 센서를 사용해야 하는 물리적인 중복성보다는 관련된 다른 계측기의 측정값을 이용한 이론적인 복원 방법이 바람직하다. 이를 위해서는 측정값사이의 연관성이 파악되어야 한다. 그림 5는 공조기의 센서와 제어신호를 이용하여 각 신호간의 연계성을 도시한 예로서, Ri는 각 신호에 의한 관계식이다 관계식은 이론적인 모델식이나, 특성방정식으로 유도될 수 있으며, 이것이 어려울 경우 회귀식과 같은 통계적인 실험식으로도 유도될 수 있다. 그림 5에서는 중앙 공조기의 센서 신호의 관련성을 11개의 관계식으로 나타낸 것으로 사용 측정 센서는 13개이며 제어신호는 5개이다. 예로서 R1은 급기온도 제어시스템을 대표하는 관계식으로 급기온도를 예측할 경우 다음과 같은 일반식으로 나타낼 수 있다.

$$T_{s,es} = F(T_m, H_i, Q_s, P_s, U_{cc}, U_{hc}, U_p)$$

$$R1 = T_s - T_{s,es}$$

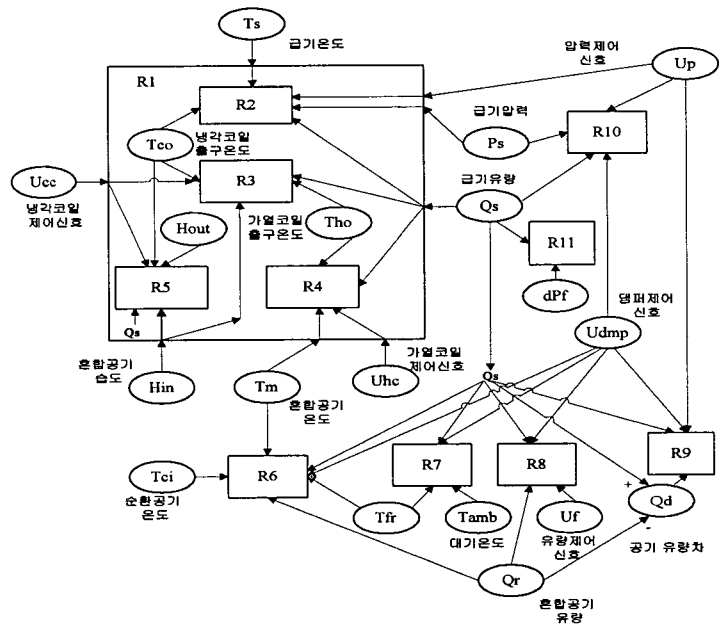


그림 5. 공조기의 센서와 제어신호 관계

여기서 $T_{s,es}$ 는 예측값이며, T_s 는 실제값이다. T_m , H_i , Q_s , P_s 는 각각 혼합공기온도, 혼합공기 습도, 급기 유량, 급기 압력이며, U_{cc} , U_{hc} , U_p 는 각각 냉각코일 제어신호, 난방코일제어신호, 그리고 습기송풍기 제어신호이다. R 은 실제값과 예측값의 차이인 잔차이다. 일반적으로 측정신호만으로 관계식을 유도하는 것이 일반적이거나 공조기의 경우 측정기가 많지 않아 주어진 측정값만으로는 관계식 유도가 어려워 그림 5에서는 제어신호도 같이 사용하였다. 이 경우 측정신호와 관계식의 결과를 이용하여 센서의 고장은 물론 제어기와 구동기의 고장도 검출 진단할 수 있어야 한다. 진단 결과 제어기의 궤환센서의 고장으로 판별된 경우 센서의 값을 예측하여 이 값을 제어기의 입력신호로 사용하여 센서를 복원시킬 수 있다[17].

5. 시스템 구현

고장 검출 및 진단 시스템의 개발 목표는 정상적인 운전 제어만을 위한 에너지관리 시스템에 고장 검출 및 진단 기능을 소프트웨어나 하드웨어적으로 추가하여 시스템 운영의 신뢰성 및 안정성 확보는 물론 고장에 의한 에너지 낭비 및 운영비 증가를 막을 수 있는 운영시스템을 구축하기 위한 것이다. 현실적으로 고장 진단 및 처리 시스템을 구현시키기 위해서는 에너지 관리 시스템의 일부로 포함시키는 것과 에너지 관리시스템과 별도로 병렬로 구성하여 제어 및 감시를 위한 정보를 공유하는 방법을 고려할 수 있다. 첫 번째 방식은 에너지 관리시스템 기능의 하나로 고장 진단 소프트웨어가 추가되는 것이다. 사용자 인터페이스와 추론을 기존의 관리시스템과 감시제어 소프트웨어로 실현하는 것으로, 고장 검출 및 진단을 기존의 고장 경보 기능의 확장으로 간주할 수 있다. 다른 방식으로는 에너지 관리를 위한 자동제어시스템과 고장 검출 및 진단을 위한 감시제어 시스템을 독립적으로 구성하는 것으로 시스템간의 인터페이스에 의해 정보는 서로 공유한다. 이 방식은 기존 에너지관리 시스템이 설치되어있는 상태에서 추가로 고장 검출 및 진단 시스템을 도입할 경우나, 진단을 위해 처리해야할 정보량과 처리 용량이 방대하여 별도의 시스템으로 운영하는 것이 유리할 경우 사용될 수 있다. 복수의 독립적인 설비를 관리하기 위해서는 현장과 중앙제어실의 역할을 분담하여 현장의 PC에서 자료 측정과 간단한 규칙에 의한 고장 검출을 담당하고 검출된 자료를 중앙의 호스트 컴퓨터로 전송하여 인공지능 등을 이용한 고장 진단과 판단, 결정을 수행한 후 결과를 다시 현장으로 보내는 구조로 구성할 수도 있다.

고장 검출 및 진단을 위한 기본적인 방법은 설비에 관계없이 동일한 것이나 구체적인 적용에 있어서는 제어기와는 달리 범용시스템을 이용하기가 어렵다. 이것은 앞서도 언급한 바와 같이 선처리 과정에서의 특징 추출이 고장 검출 및 진단 시스템의 성능을 좌우할 수 있기 때문이다. 공조설비를 비롯한 에너지 설비는 대상이 방대하여 일률적으로 고장 진단을 위한 최적의 방법을 제시하기가 곤란하며 설비별

특성에 따라 다양하고 복합적으로 구성된 설비와 같이 진단 시스템도 복합적으로 구성되어야 할 것이다.

6. 결 론

가까운 장래에 공조설비를 비롯한 에너지 설비의 에너지 및 운영비 절감은 관리기술에서 찾게될 것이다. 에너지 설비가 대형화되면서 종합적인 설비의 운영체계를 일반적인 운전자가 이해하기가 점점 어려워지고 있어 컴퓨터를 이용한 자동화 시스템이 도입되고 있으나 고장 진단 기술을 포함한 유지 보전 기술이 적용되지 않고 있어 설비 운영상의 문제점이 제기되고 있다. 설비를 항상 최적상태로 유지시키기 위해서는 자동제어를 통한 성능 제어는 물론 에너지의 주요 낭비요인이 되는 성능저하 및 고장을 검출하여 처리할 수 있는 시스템의 도입이 필요하다.

에너지 설비에 실시간 진단 기술을 통한 보전 기술을 도입할 경우 1) 고장 및 노후화에 따른 성능저하와 부적절한 작동 등, 비효율적인 요인을 초기에 발견하여 에너지 낭비를 막을 수 있으며, 2) 고장이나 성능저하로 인한 실내 환경 및 기타 필요한 환경의 저하를 조기에 발견하여, 항상 적절한 환경을 유지시킬 수 있으며, 3) 상태파악을 위한 실제로 필요한 측정값만을 선택하여 과도한 측정장비로 인한 비용을 절감할 수 있으며, 4) 고장 부위의 발견 및 성능저하 부위의 예측에 의해 운전 보수 계획을 합리화시킬 수 있어 유지 보수비를 절감시킬 수 있으며, 5) 초기에 설비의 이상을 발견하여 이로 인해 파급될 수 있는 설비의 손상 및 재해를 미연에 방지할 수 있는 장점이 있어, 경제적인 적용 기술의 개발을 통한 보급확대가 요망되고 있다. 기존의 에너지 관리시스템의 일부분으로 고장 검출 및 진단 시스템을 구현할 경우 경제성은 물론 에너지 관리시스템 자체의 부가가치와 성능 향상에 따른 보급확대로 국가적으로도 에너지 절약에 크게 기여할 수 있을 것이다.

에너지 설비의 상태 감시와 이상 검출 및 진단 기술은 경제적으로 에너지 사용량 및, 물 사용량, 그리고 유지 보수비의 절감효과를 얻을 수 있으며, 사회적으로는 삶의 질 향상과, 생활의 안정성을 증대시킬 수 있는 기술로 앞으로 지속적인 연구 개발을 통해 적용을 확대시켜야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Kao, James Y. "Sensor Errors - Their Effects on Building Energy Consumption", ASHRAE Journal, Dec. pp 42-45, 1983.
- [2] Akira Takakusagi, "Analytical Study on Preventive Maintenance of Air-Conditioning System", Journal of Archi. Plann. Environ. Engng., AIJ, No.430, pp. 45-53, 1991.
- [3] Akira Takakusagi, "Theoretical Study on Evaluation of Renewable Plan of Air-Conditioning System", Journal of Archi. Plann. Environ. Engng., AIJ, No.435, pp. 23-31, 1992.

- [4] Akira Takakusagi, "Investigation on Reliability and Maintainability of Air-Conditioning Equipment.", Journal of Archi. Plann. Environ. Engng., AIJ, No.436, pp. 1-9, 1992.
- [5] Juhani Hyvarinen, "Fault Detection and Diagnosis, Building Optimization and Fault Diagnosis Source Book, ISBN952-5004-10-4, 1996.
- [6] Juhani Hyvarinen, "Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis, Technical papers of IEA Annex 25, ISBN952-5004-11-2, 1996.
- [7] Oliver Pernot, Technica papers of IEA 34 meeting at Boulder, 1997
- [8] Dodier, R. H. , "Detecting Whole Vuilding Energy Problems", ASHRAE Trans, V.105, Pt. 1, 1999.
- [9] Harunori Yoshida, T. Iwami, H. Yuzawa, and M. Suzuki, " Typical faults of Air-Conditioning Systems and fault Detection by ARX model and Extended kalman Filter", ASHRAE Trans. V.102, Part 1, 1996.
- [10] H.C. Peitsman, V.E. Bakker, " Application of Black-Box Models to HVAC Systems for Fault Detection", ASHRAE Trans., V.102, Part 1, 1996.
- [11] Fusachika Miyasaka, " A fault Ddetection Method for Air-Conditioning System by Stocastic Qualitative reasoning Using Field Data", IEA ANNEX25 meeting at Oxford, 1955
- [12] Bezdek, J. C. and S. K. Pal, Fuzzy Model for Pattern Recognition - Methods That Search for Structures in Data. IEEE Press, 1992.
- [13] Won-Yong Lee, J.M. House, Dong-Ryul Shin, " Classification Techniquies for Fault Detection and Diagnosis of an Air Handling Unit", IEA ANNEX34 meeting at Boulder, Sept.,1997
- [14] Viser, J.C. H. Vaezi-Nejad, and P. Corrales, "A Fault Detection for Schoo; Buildings", ASHRAE. Trans. V.105, Pt.1, 1999
- [15] Russ, R.M. et al., "Fault-Tolerant HVAC Sytem", US patent 5,706,190, 1998
- [16] Bahel V., et al., "Heat Pump Motor Optimization and Sensor Fault Detection", US Patent 5,630,325,1997
- [17] Won-Yong Lee, J.M. House, and Dong-Ryul Shin " Fault Diagnosis and Temperature Sensor Recovery for an Air-Handling Unit", ASHRAE Trans., V.103, Part 1, 1997.

저 자 소 개



이원용 (李元龍)

1960년 4월3일생. 1983년 한국항공대학 항공기계공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(석사). 1991년 동대학원 기계공학과졸업 졸업(공학). 1993년 10월-1994년 12월 미국 국립표준기술연구원 객원연구원. 1985년 이후 한국에너지기술연구소에서 근무