

# 공기조화설비 고장 감지 및 진단 기법 연구현황

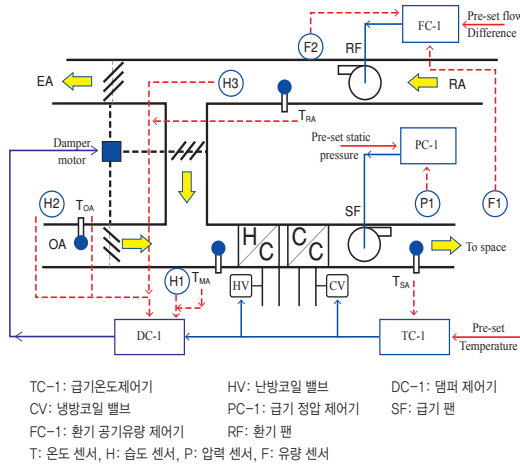
본 원고는 Yuebin Yu, Denchai Woradechjumroen 및 Daihong Yu가 Energy and Buildings 저널 82호 (2014)에 게재한 리뷰논문 “A review of fault detection and diagnosis methodologies on air-handling units”을 참조하여 정리한 것이다.

## 머리말

미국 에너지부에 따르면 건물 공조설비가 상업용 건물 에너지의 약 40%가량을 소비한다고 한다. 그리고 영국의 조사결과에 의하면 건물 HVAC 고장으로 인하여 25~50%의 에너지가 낭비된다고 한다. 이를 사전에 진단하여 초기단계에 대응한다면 15% 미만으로 낭비를 줄일 수 있으나 설비가 복잡해질수록 스마트 기술을 적용하지 않고서는 유지관리가 어려운 상황이다. 이러한 자동화된 온라인 고장진단 시스템은 아직도 초기 단계로서 FDD(Fault Detection and Diagnosis)에 대한 시스템적 이해, 동적 플랜트 모델링 및 제어시스템 기초에 관한 지식이 성숙한 기초위에서만 가능하다.

## 공기조화기 제어 시스템 이해

그림 1은 변풍량 공기조화기의 일반적 구성을 나타낸다. 변풍량 방식에서는 각 존의 터미널로 보내는 공급공기의 온도( $T_{SA}$ )를 제어한다. 이 온도를 제어기 TC-1의 Pre-set 온도와 비교한 후 냉각 또는 난방 코일



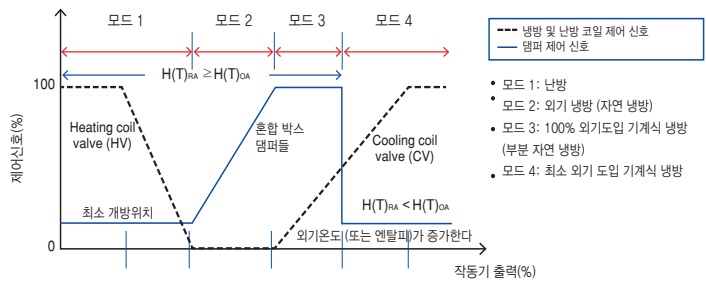
[그림 1] 변풍량(VAV) 공기조화기의 일반적 구성

에 유입되는 혼합공기의 온도( $T_{MA}$ )를 제어하기 위해 TC-1 출력이 DC-1에 연동하여 자동적으로 외기(OA)와 환기(RA)의 댐퍼를 조절하게 한다. 이때 냉방모드(Mode 3 and Mode 4)와 난방모드(Mode 1)에 상응하여 냉난방 코일 밸브들이 그림 2와 같이 댐퍼 제어에 동기화되어 순차적으로 작동하도록 프로그램되어 있다.

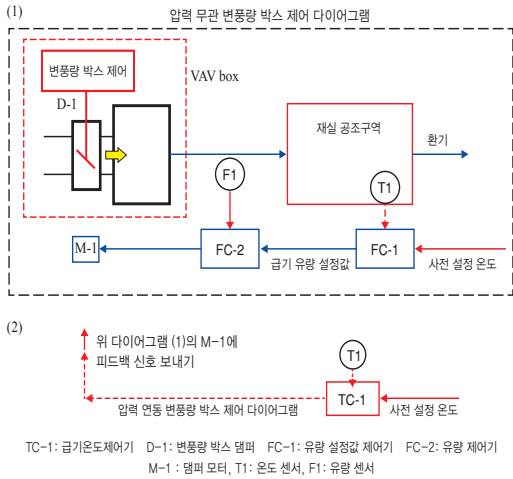
그림 2에서 난방모드(Mode 1)의 경우  $T_{SA}$ 를 유지하기 위해 보일러에서의 온수 공급량을 조절하는 HV가 제어된다. 반면에 CV는 닫히고 혼합박스 댐퍼들(OA, RA, EA 댐퍼들)은 최소 외기유입만 허용하도록 작동된다. 외기온도가 올라가면 Mode 2로 전환된다. 이 경우 HV, CV는 닫히고 믹싱 댐퍼들이  $T_{SA}$ 를 유지하기 위해 제어된다. 외기온도가 지속적으로 상승시 결국에 가서 OA, EA 댐퍼가 완전히 개방되고 RA 댐퍼가 완전히 닫힌 상황에 도달하게 된다. 그러면 이러한 외기 냉방이 더 이상 가능하지 않으므로 CV가 열림과 동시에 기계식 냉방모드로 트러거 된다.

다음은 압력제어기 PC-1과 유량제어기 FC-1에 관한 사항이다. 변풍량 방식은 탈설계조건에서 PC-1을 작동하여 부하 변동에 맞게 급기 팬(SF)을 조절할 수 있다. PC-1은 급기팬 속도를 조절하여 급기 정압을 설정값에 맞춘다. 그 결과 급기팬과 환기팬(RF)의 유량이 달라져 혼합박스 댐퍼 동작에 영향을 미칠 수 있다. 이 유량 차이를 일정하게 유지하기 위해 급기와 환기 측에 각각 유량센서 F1, F2를 두고 이들 센서 입력으로 환기팬의 속도를 FC-1이 제어한다. 정풍량 방식은 변풍량 방식처럼 DC-1, TC-1을 포함하지만 PC-1과 FC-1은 사용하지 않는다. 이는 정풍량 방식에서 급기팬 풍량이 일정하므로 환기팬 풍량도 일정한 유량으로 자동 고정되기 때문이다.

멀티 존 공조시 각 존의 VAV 박스가 급기 덕트에 연결된다. VAV 박스는 존의 온도제어를 위해 박스를 통과하는 공기온도와 유량을 제어한다. 이 박스는 두 가지 유형의 메커니즘으로 구분된다(그림 3 참고). 첫째는 압력무관 VAV 박스로서 유량 설정 제어기(FC-1)와 유량 제어기(FC-2)로 구성된다. FC-1은 T1으로 측정된 냉방부하 변동에 상응하여 공급유량 설정값을 계산한다. 만약 공급유량이 F1으로 감지한 정압변동에 기인하여 변한다면 F1의 측정유량과 FC-1의 설정값은 해당 존의 공기 요구유량을 맞추기 위해 댐퍼(D1) 개도를 조절하는 FC-2의 입력으로 사용된다. 이러한 방식의 VAV



[그림 2] 작동모드의 순차제어 로직



TC-1: 급기온도제어기 D-1: 변풍량 박스 댐퍼 FC-1: 유량 설정값 제어기 FC-2: 유량 제어기  
M-1: 댐퍼 모터, T1: 온도 센서, F1: 유량 센서

[그림 3] (1) 압력무관 VAV 박스의 제어 알고리즘  
(2) 압력 연동 VAV 박스의 피드백 제어 신호

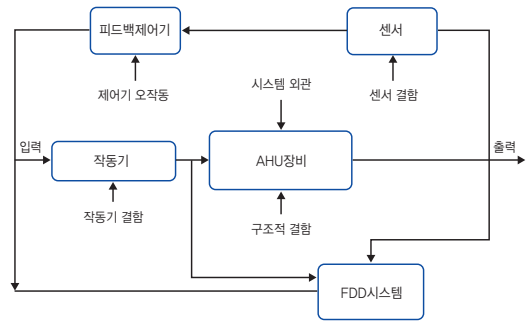
박스는 존에 과냉이 발생했을 경우 일반적으로 보조열원으로 재열코일과 함께 사용된다. 둘째 방식은 압력연동형으로서 그림 3(1)의 FC-1, FC-2 대신 온도제어기 TC-1을 이용한다. 이 경우 댐퍼 D1은 냉방부하 변동을 측정하는 온도센서 T1을 이용하는 온도제어기 TC-1으로 직접 제어된다.

## 공기조화기 시스템 고장

그림 4는 AHU의 FDD를 위한 일반 시스템 구성을 나타낸다. 이 FDD에서는 4가지의 고장 발생원들이 시스템적으로 결합되어 고장 위치와 원인을 지시하도록 되어 있다. 센서 및 피드백 제어기와 관련된 고장은 한 가지 유형으로 묶는데 그 이유는 제어기는 개인값이 적절히 설정되어 있다면 일반적으로 안정성이 보장되어 제어기 오작동은 주로 센서 고장에 의해 유발되기 때문이다.

### 공기조화기 장비 고장

그림 4에서 AHU 장비 고장의 원인에는 시스템 외란과 구조적 결함의 두 가지 발생원이 있다. 첫째



[그림 4] AHU 고장진단 시스템 구성

원인은 시스템 외란인데 예로써 팬에 공급되는 전압 변동을 들 수 있다. 공조부하 크기에 따라 팬 풍량을 제어하는 경우 제어로직은 AHU 내 열교환기 출구 공기온도 등의 동적 거동에 관한 물리적 모델에 기반하여 수립된다. 그런데 물리적 모델이 단순하여 전압공급 변동이 미치는 영향을 고려하지 못해서 전압 변동에 따른 풍량 변동이 심하여 제어가 불안정한 상황이 될 수 있다면 이는 시스템 외란에 의한 고장에 해당될 수 있다. 둘째 고장원인은 구조적 결함으로서 장비 자체의 오작동을 포함한다. 만약 덕트에서 공기누설이 있다면 불충분한 냉난방 또는 침입공기량의 증가와 같은 시스템 고장이 발생할 수 있다. 열교환기 표면 오염에 의한 시스템 성능변화도 이에 해당한다. 표 1은 장비고장의 대표적인 사례를 정리한 것이다.

<표 1> AHU 장비 대표적 고장 유형

장치	대표적 고장
팬	압력 강하량 증가
	급기 및 환기 팬 고장
	모터 효율 감소
	벨트 미끄러짐
덕트	공기 누설
난방코일	fouling에 의한 능력감소
냉방코일	fouling에 의한 능력감소
예열코일	fouling에 의한 능력감소

## 공기조화기 작동기 고장

댐퍼 작동기 등이 고장 나고 곧바로 감지되지 않는 경우 AHU의 성능이 허용범위 이상으로 악화되는 현상으로 나타나므로 시간이 경과하면 곧 감지할 수 있다. 작동기의 고장은 AHU 성능에 직접적인 영향을 미치는데 예로써 외기 댐퍼가 고착되어 움직이지 않는 경우를 가정해보자. 이때 온도제어기 성능이 저하되어 제어응답 시간 및 안정화 시간이 길어지며 외기냉방을 하지 않고 기계식 냉방을 하게 되어 에너지 낭비를 초래한다. 표 2는 작동기의 대표적 고장 유형을 보여준다.

## 센서 및 피드백 제어기 고장

제어기 성능은 전적으로 센서 출력에 의존한다. 만약 온도 센서가 실제값보다 2℃ 이상 높은 값으로 드리프트(drift)하면 냉방부하 증가로 인하여 공조구역을 과냉시키므로 에너지 낭비가 초래된다. 표 3은 대표적인 고장사례를 나타낸다.

〈표 2〉 AHU 작동기 대표적 고장 유형

장치	대표적 고장
외기, 급기 및 환기 댐퍼	댐퍼 고착 또는 잘못된 개도로 작동
	완전개방 및 완전밀폐 개도에서 공기누설
코일 밸브 (HV, CV, PV)	밸브 고착 또는 잘못된 개도로 작동
	완전개방 및 완전밀폐 개도에서 유체누설

〈표 3〉 센서 및 제어기 대표적 고장 유형

장치	대표적 고장
온도센서	출력 offset, discrete or drift
습도센서	출력 offset, discrete or drift
유량센서	출력 offset, discrete or drift
압력센서	출력 offset, discrete or drift
모터 속도 조정	불안정한 응답
냉난방 밸브 시퀀스	불안정한 응답
유량 차이 유지	팬 속도가 고정되어 변동하지 않음
정압 제어	불안정한 응답
존 온도 제어	불안정한 응답

## AHU용 FDD 시스템이 갖추어야 할 바람직한 특성

AHU용 FDD 시스템이 다음의 10가지 특성을 충족할 수 있다면 가장 바람직하지만 실제로 이를 모두 충족시키는 것은 현실적으로 불가능하다. 이 항목들은 개발할 FDD 접근법의 장점과 한계를 시스템적으로 평가하기 위한 기준으로 활용될 수 있다.

- 1) 신속한 감지와 진단
- 2) 고립성(Isolability)

다른 고장원인들로부터 분리해낼 수 있는 고립된 특성의 정도를 나타낸다. 진단을 위해 다양한 진단 모델들을 시스템에 적용하는데 이 때 모델 불확실도가 고장진단을 위한 잔차(residual)에 중첩되어 나타난다. 이 불확실도 제거와 고립성 향상은 서로 상반관계에 있어서 적절한 트레이드오프(trade-off)가 요구된다.

- 3) 강인성(Robustness)

진단시스템은 외란이나 모델 불확실성에 대하여 강인해야 하며 적절한 임계치를 설정하여 노이즈에 의한 빈번한 알람 발생을 막아야 한다.

- 4) 새로운 고장 파악능력(Novelty Identifiability)
- 시스템이 고장인지 아닌지 고장이라면 알려진 고장인지 아니면 새로운 고장원인인지를 파악하는 능력을 의미한다. PCA(Principal Component Analysis, 주성분 분석)가 이러한 기능을 갖추고 있으며 방대한 원시 데이터에서 핵심적인 정보와 관련된 데이터만 추출해내는 차원 단순화 능력이 있다.

- 5) 오차 추산 능력

이는 적용한 고장진단 시스템의 오차정도를 추산할 수 있게 하는 능력으로서 사용자가 진단결과에 대한 신뢰성을 높이는 데 활용될 수 있다.

6) 적응성

진단 대상 시스템은 경년변화로 인하여 특성이 변할 수 있으나 FDD 논리는 초기 제품에 맞추어져 있어 경년변화에 적응하지 못할 수 있다. 회귀형 인자파악법(Recursive Parameter Identification Methods)등은 이런 특성을 갖출 수 있다.

7) 설명기능

고장을 감지했을 때 어떤 고장인지 설명 기능을 추가하여 빌딩 관리자가 고장원인과 해결 방법을 빨리 파악할 수 있게 해야 한다.

8) 모델링 요구사항

FDD에 적용된 모델링 방법의 수는 적을수록 구현하기 쉽다. 규칙기반이나 이력 데이터를 이용하는 진단법은 모델을 필요로 하지 않지만, 에너지보존 등 물리법칙을 이용한 경우에는 모델 변수튜닝이 필요하다.

9) 저장 및 연산 능력

실시간 고장진단 기능의 경우 연산 및 저장 능력의 확보가 요구된다.

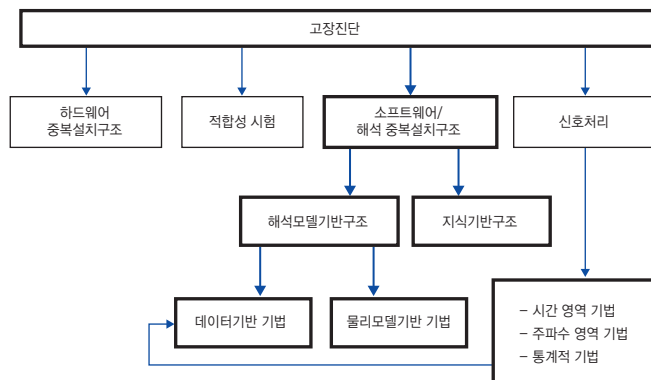
10) 다중 고장 검지능력

동시에 발생한 고장들을 검지하기 위한 가장 어렵고도 중요한 기능 중 하나이다. 이러한 기능 충족을 위해 UIO(Unknown Input Observer,

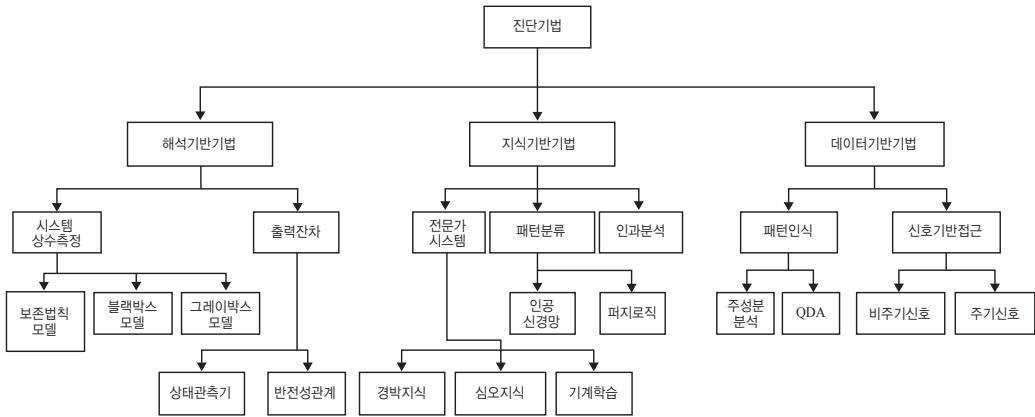
미지입력 관측기) 방식이 있으며 자동제어의 상태방정식 형태로 표현된다. 연구사례들은 있으나 AHU에 적용된 바는 없다.

### AHU 고장진단 알고리즘 분류

그림 5의 4가지 분류 유형은 1970년대에 구축되었다. 하드웨어 중복설치방식은 동일한 센서를 중복으로 설치하여 비교를 통해 고장을 진단하는 방법으로서 정확하기는 하지만 하드웨어 추가 비용으로 인해 사용하지 않는다. 이후 컴퓨터 기술의 발달로 세 번째의 소프트웨어에 의한 방법이 각광을 받게 되었다. 두 번째의 적합성 시험은 기본 물리법칙에 위배되는 사항이 있는지 확인하여 진단하는 방식으로서 이 또한 소프트웨어의 발달로 인해 물리법칙을 소프트웨어 안에 구현하여 대체하게 되었다. 마지막의 신호처리는 센서로 측정된 물리량들의 정상상태 데이터를 추출하는데 주안점이 주어져 있다. 분석 모델 기법에는 데이터기반 방법과 물리모델 기반 방법이 있다. 물리모델 기반은 보편적으로 생각할 수 있는 방식으로서 질량 및 에너지 보존 법칙 모델을 적용하여 이상 진단에 활용하는 것이다. 반면에 데이터기반 방식은 빌딩에서 수집되는 방대한 양의 데이터에서 PCA(주성분



[그림 5] 고장진단 방법 분류



[그림 6] AHU에 적용할 진단기법의 구체적 분류

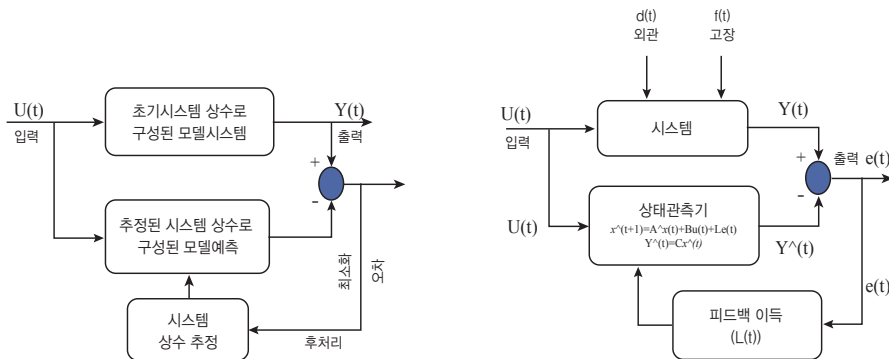
분석)기법 등에 의해서 원인이 되는 주성분만 찾아 내어 분석과 진단을 용이하게 하려는 것이다.

고장진단 방법을 학문적으로 더 구체적으로 분류하면 그림 6과 같다. 크게 분석기반, 지식기반 및 데이터기반 진단방법으로 나눌 수 있다. 분석기반은 시스템 변수 추정과 출력 잔차 방식으로 나눌 수 있다. 시스템 변수 추정방법은 공장 출하 초기의 시스템 변수와 현재 진단해서 추정한 변수와 차이를 보고 고장진단을 하는 것으로서 가령 열교환기의 전열계수를 추정할 수 있다면 이 방법에 해당한다. 그 추론 방법은 질량 및 에너지 보존법칙을 적용하는 방법, 그레이 박스, 블랙박스 기법이 있다. 그레이 박스는 단순화된 물리모델을 적용하면

서 실제 플랜트의 출력 데이터에 데이터 회귀분석 기법을 응용한 방식이다. 출력 잔차 기법은 상태관측기 이용법과 반전성 관계가 있는데 이들 간의 차이는 출력의 구조로 파악한다.

### 분석기반 방법

그림 7은 대표적인 고장진단 모델인 파라미터 추정법과 상태관측기 기법의 차이를 보여준다. 파라미터 추정법은 측정한 입력과 출력에 대하여 모델 출력과의 오차가 최소가 되도록 물리모델의 파라미터를 찾는 방법이다. 이렇게 구한 파라미터가 정상운전 시의 파라미터와 일정 크기 이상의 차이를 내면 고장으로 진단하는 것이다. 반면에 상태관



[그림 7] (a) 파라미터 추정법 (b) 상태관측기 기반 진단법

측기 기법은 파라미터 자체를 수정하는 것이 아니라 오차를 줄이기 위하여 비례제어 피드백 항을 상태 공간식에 더해준다. 이렇게 하면 모델 자체의 불확실도가 있어도 피드백에 의해 모델 출력이 실제 출력을 추종하게 되지만 실제 플랜트에 고장이 있는 경우에는 오차를 추종한다 해도 근원 오차가 큰 관계로 추종된 오차도 비례해서 증가하게 된다. 따라서 이 오차 크기가 고장진단 임계치를 넘어서면 고장으로 진단한다. 반전성 관계는 상태관측기와 유사하나 더 간단하고 대수식 형태로 표현된다. 반전성 기반 잔차 행렬을 통해 고장유형을 파악하기 쉬운 장점이 있다.

### 지식기반 방법

대규모 시스템의 경우, 해석적 기법 적용을 위한 수학적 모델에 필요한 정보를 얻기 어렵고 가능해도 시간과 비용이 많이 들기 때문에 대안으로서 지식기반 방법을 이용한다. 이 기법은 인과관계 모델, 시스템에 대한 자세한 서술, 전문가 지식 또는 대표적인 고장징후 등에 관한 정성적 모델에 기반한 방법이다. 이 중 세 가지 기법이 AHU에 적용된 바 있는데 전문가 시스템, 고장유형 분류 및 인과관계 분석(Causal Analysis)이다. 인과관계 분석에서는 음향방향성그래프를 이용하는데 이는 에너지 보존 등을 고려하지 않고 설비의 고장과 관련된 시스템 가동을 인과관계적으로 도식화한 것이다. 두 번째는 전문가 지식에 의한 추론 시스템이다. 이 접근법은 세 가지 유형으로 분류된다: (1) IF-THEN 룰로 추론하는 경박 지식 전문가 시스템, (2) 함수적 추론 또는 에너지 보존 룰에 기반한 심오 지식 전문가 시스템, 그리고 (3) 기계학습방법으로 구분된다.

### 데이터기반 방법

이 기법은 많은 차원의 데이터를 관심 있는 영역

의 낮은 차원 데이터로 변환하는 기술과 관련이 있다. 가령, 중대형 건물의 HVAC 시스템은 피드백 제어에 적용되는 많은 센서로 구성되어 있다. 이 센서 출력들이 드리프트나 오프셋 등으로 문제를 일으키면 이 방법은 엉뚱한 결과를 낼 수 있는 단점이 있다. 즉 모든 센서가 정상일 때 유효한 방법이다. 두 그룹의 데이터 기반 방법이 있다. 첫 번째는 신호 기반 FDD이다. 과도상태 신호에 적용한 웨이블릿(Wavelet) 변환기법을 AHU 시스템의 고장진단을 위해 주성분분석(PCA)과 결합하여 연구한 사례가 있다. 두 번째 기법인 FDD 기반 다변수 통계기법에서는 PCA가 방대하게 적용되었다. 이 기법의 문제점은 데이터 간의 물리적 또는 인과적 관계를 활용하지 못한다. 그 결과 이 기법은 고장 진단보다는 감지에 더 적합하다. 이 한계를 극복하기 위해 PLS(Partial Least Squares : 부분 최소자승법), CVA(Canonical Variate Analysis : 표준형 변량분석) 등 패턴인식 기법을 PCA에 연계한 연구들이 진행되고 있다.

### 맺음말

물리적 모델에 기반한 분석기반 기법은 일상적인 설비운전 시의 에너지 절약과 예방적 유지관리에 의한 시스템 효율 향상을 위해 지능형 건물에너지 시스템에서 괄목할만한 주목을 받았다. 그리고 이 기법은 다른 기법들과 혼합한 하이브리드 기법의 개발과의 연계에서도 중요한 역할을 한다. 그러나 이 분석기반 기법도 드물게 적용되고 있는 실시간 FDD 시스템에서는 아직 초보단계이다.

건물에서의 에너지 설비 고장감지 및 진단은 매력적인 주제이지만 시스템의 다양성과 복잡성 때문에 모든 HVAC 시스템에 보편타당하게 적용될 수 있는 기법은 아직 없다. 그러나 기술의 필요성과 수요는 지속적으로 증가하고 있으므로 꾸준한 관심이 필요하다.

### 참고문헌

1. Yuebin Yu, Denchai Woradechjumroen and

Daihong Yu, A Review of Fault Detection and Diagnosis Methodologies on Air-handling Units, Energy and Buildings, 82, 2014. 