

# 실시간 모델기반 건물 에너지 진단 연구

기후 및 설비운전 신호와 실시간으로 연동한 에너지 시뮬레이션과 실제 데이터의 실시간 비교를 통한 에너지 누설을 진단한다.

본고는 대표적인 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램인 EnergyPlus를 개발하고 관리하는 미국 국립연구소인 LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)과 건물 동적 모델연구에 많은 기여를 하고 있는 UTRC (United Technologies Research Center) 연구진이 발표한 연구결과<sup>(1)</sup>를 정리하여 소개하고자 한다.

## 서론

미국 상업용 건물의 총 에너지 소비량은 미국 전체 에너지 소비량의 약 18%로서  $5.108 \times 10^{12}$  kWh 였다 (2003 CBES database). 미국 에너지부 (DOE), 국제 에너지 기구 (IEA), 기후변화 정부 간 패널 (IPCC) 등은 상업용 건물이 현재보다 70~80% 더 에너지 효율이 향상되어야 한다고 선언하였다. 에너지 효율이 우수한 건물기술들이 소개되고 있지만, 문제는 건물 수명기간 동안 어떻게 건물 에너지 성능을 효율적으로 관리하는가이다. 대부분 건물이 커미셔닝 직후에 의도한 에너지 성능을 유지하지 못한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 꾸준하게 저에너지 소비성능을 유지하는 것이 다양한 에너지 절약선언을 달성하기 위한 핵심이다.

일반적으로 FDD(고장감지 및 진단; Fault Detection and

신영기

세종대학교 기계공학과  
ygshin@sejong.ac.kr

Diagnosis) 기법은 3가지 범주로 분류할 수 있다.

## ① 정량 모델법

질량 및 에너지 보존법칙 기반 모델로서 장비 (팬, 펌프, 칠러 등) 성능 데이터의 다항식 curve-fit으로 모델링하고 고장은 측정치와 모델 출력의 편차로 감지한다. 유의미한 차이는 모델링한 시스템 부품 어딘가에 고장이 있음을 나타낸다.

## ② 정성모델법

규칙기반 시스템과 정성적인 물리적 인과관계가 이에 해당한다.

## ③ 프로세스 이력법

이는 해당 프로세스에 대한 사전 정보를 전제하지 않는다. 이 방법은 분석할 데이터양이 충분히 많을 때 적합하다. 선형 회귀법에 기반한 블랙박스 모델을 적용하여 건물 내 고장감지를 자동으로 수행한다.

현재 위와 같은 고장감지 기법이 폭넓게 활용되지 못하는 장애요인은 다음과 같다.

① 건물 에너지 통합 FDD 시스템이 부재하다. 건물의 주요 설비들은 다소 제한된 FDD 기능을 add-on 방식으로 설비별로 장착하여 각기 독립적으로 운영되고 있다. 하지만 이와 같은 FDD 및 설비제어 기술은 해당 설비 범위 내에서만 최적인 것이며 설비 간의 운전 패턴 및 함수적 상호작용의 특성을 적절히 파악하지 못하고 있고 잘못된 고장 경보 횟수만 증가시키고 있다.

② 기존의 FDD 기법은 가용한 데이터에만 의존하고 설비 또는 시스템 단위의 상호작용의 영향을 반영하지 못하는 단순한 현장 맞춤형 규칙에 기반하고 있다. 이는 FDD 기법의 확장성과 응용능력을 제한한다.

③ 기존의 FDD 기법은 건물제어시스템에 덧

붙이는 사후 (after thought) 추가 모듈로서 수동적 개입과 수작업이 많은 분석을 요한다. 이는 FDD 기법의 역량을 제한하여 실시간으로 가능한 대처 방안들을 제시하지 못한다.

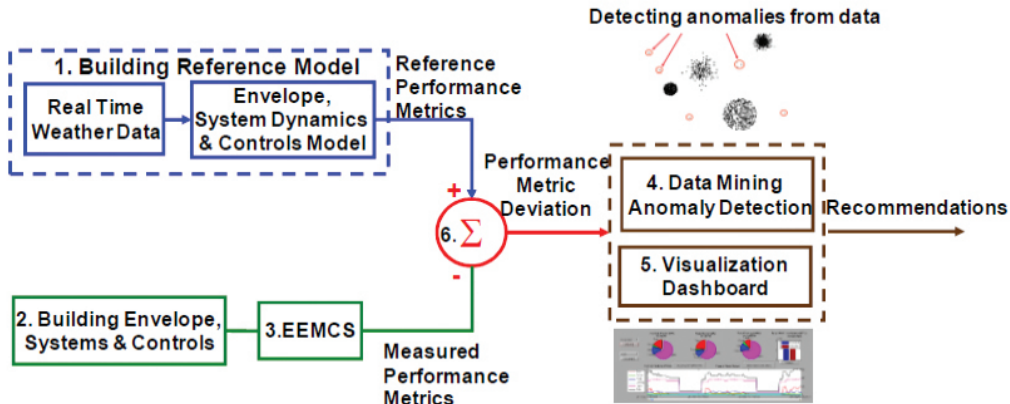
④ 대부분의 FDD 기법은 확장성 (scalable)이 없는데 이는 소수의 전문가가 데이터를 현장 맞춤으로 처리하는 방식에 의존하기 때문에 해당 현장에서의 결과를 관련 산업 전반에 확장하는 것이 불가능한데 기인한다.

Haves 등<sup>(2)</sup>은 건물 전체 차원에서 모델기반 성능평가 방법을 연구하였고 그 결과 필요한 입력 데이터 확보를 위해 추가적인 계측이 필요함을 지적하였다. Lee 등<sup>(3)</sup>은 에너지 소비 고장감지를 위해 건물 전체를 모델링하였고 불완전한 시뮬레이션으로 야기된 잘못된 알람과 실제 시스템에서의 고장을 구분할 error threshold를 정의하는 방법론이 필요하다고 결론지었다.

본고에서는 자동화된 모델기반 건물 전체 성능 모니터링 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 제안 시스템에 필요한 일부 센서를 기존 에너지 관리 및 제어 시스템 (EMCS)에 추가하여 성능 데이터를 수집한다. 이 시스템은 이 측정결과를 실시간으로 해당 건물에 대한 표준 시뮬레이션 결과와 비교한다. 제안하는 방법은 주로 큰 문제점에 주목하는데 이들 문제점이란 에너지 사용량 증가를 5% 이상 초래할 수 있는 사항들이다.

## 기술적 접근법

제안하는 기술은 동적 모델기반 건물 성능 모니터링 시스템으로서 물리법칙에 기반하고 설계 목적 또는 이상적 성능을 구현한 표준 모델의 시뮬레이션 결과와 실제 측정결과를 비교한다. 그림 1은 그 개념을 표현한다. 두 데이터의 비교를 통해 준최적 (sub-optimal) 성능의 확인과 정량



[그림 1] 실시간 에너지 진단시스템 구성도

화, 준최적 성능이 구현되는 조건 파악, 대안적 운전방안의 에너지 성능 비교, 그리고 마지막으로 설비 수정운전이 시행된 후의 성능개선을 근거화하는 것이 가능하다.

이 시스템의 6가지 주요 인자는 다음과 같다.

① 건물 표준 모델

건물 외피, HVAC, 조명, 급탕 및 제어 시스템을 모사하는 EnergyPlus 기반 동적 모델을 구축한다. EnergyPlus는 미국 에너지부가 개발한 건물 시뮬레이션 프로그램이다. 이 프로그램은 난방, 냉방, 조명, 환기 과정을 모델링 하며 한 시간 미만의 다양한 time step, 모듈 시스템, 멀티존 공기 유동, 온열감 및 자연 환기 등을 모사할 수 있다. 이 프로그램은 건물 정보 (설계도면 수치, 재질, 지붕과 창 유형, 그늘 형상, 위치 및 방향 등) 및 그 사용 패턴, 내부 열취득, 공조설비 제원 등을 입력으로 받아들여 에너지 흐름, 존 별 온도, 공기 유동 및 온열감 수준을 한 시간 미만 간격으로 수일부터 수년에 걸쳐 시뮬레이션할 수 있다.

설계목적 기준 모델 (design intent baseline model)은 건물의 설계 목표성능을 나타낸다. 건물 정보는 설계도서에서 취한다. 일부 정보가 누

락된 경우에는 현장 실사를 통해 해당 변수를 파악한다. HVAC 운전 시퀀스는 설비관리팀이 현재 설치된 설비의 능력 범위 내에서 구현하고자 하는 목표 성능을 상징한다. 날씨 데이터는 가능하면 현장 백업상에서 수집한다. 설계도서에 명시된 사무실 공간 등의 용도가 변경된 경우에는 실제 사용에 맞게 업데이트한다.

② 건물 외피와 시스템

이는 물리적 건물, 외피, HVAC, 그리고 조명 시스템 - 물리적 플랜트를 나타낸다.

③ 확장 에너지 관리 및 제어 시스템 (EEMCS; Extended EMCS)

본 시스템 적용을 위해 추가된 센서를 포함한 확장형 건물 관리 및 제어 시스템(EEMCS)은 핵심적인 건물 성능 지표를 측정하는 데 사용된다. 추가된 센서는 설비단위의 전력계, 유량계 그리고 열에너지 이송량 계산용 온도센서들이다. 가령 전기 입력과 열 출력의 측정을 통해 칠러 효율을 모니터링할 수 있다. 기존 EMCS에 이들 센서를 영구적으로 추가하면 장기간에 걸쳐 추가적인 성능지표들을 모니터링 할 수 있다.

④ 데이터 분석과 이상감지

제안된 알고리즘은 통계 공정제어 (Statistical

Process Control)에 관한 문헌에 근거한 것으로서 측정 및 표준 모델 데이터를 입력으로 받아들이고 모델 예측치에서 측정치가 벗어나는 편차를 통계적으로 처리하여 미리 설정한 범위를 벗어나는 이상을 감지한다. 통계이론을 공정 모니터링에 적용한 것은 시스템에 고장이 없는 경우 데이터 편차는 상대적으로 변하지 않는다는 가정에 근거한 것이다. 이는 실제 데이터가 예측가능하지는 않지만 평균 및 편차와 같은 데이터 변동 특성은 동일 작동조건에 대하여 재현성이 있다는 것을 의미한다. 통계적 특성의 재현성으로 인하여 제어 불능상태를 효과적으로 정의하는 어떤 척도에 대한 임계치 (threshold)가 자동적으로 정해지게 하는 것이 가능하다. 이것이 FDD 모듈에 사용된 잠재적 원리의 핵심이다.

기본적인 접근법은 제어가능 운전 영역을 정의하는 (통계적이든 전문적 경험에 의해서든) 경계의 상한과 하한을 취하여 제어불능을 나타내는 변수를 모니터링하는 것이다. 이 경계를 벗어나는 것은 고장을 의미한다. 만약 다변수 데이터를 취급하는 경우에는 각 변수마다 이렇게 분석을 수행하면 변수들의 상호작용 영향을 파악할 수 없다. 이러한 상호 작용을 반영하기 위해 주성분분석법 (PCA; Principal Component Analysis)을 적용한다. PCA는 데이터 분산을 파악하는데 있어 최적의 차원감소 기법으로서 산업용 시스템 모니터링에 널리 사용된다. PCA로 가공된 기존 데이터의 저차원화 표현은 제어 가능과 제어 불능을 각각 나타내는 이상 점수(anomaly scores)인 Hotelling  $T^2$  통계량과 Q 통계량을 산출하는데 사용된다.

$T^2$  통계량은 관찰벡터의 평균치에 비례하는 제곱 2-norm 이다. 그 비례계수는 PCA로 구한 고유벡터 방향으로의 관찰벡터 성분의 크기이다. 유의미한 레벨의 크기가 정해지면  $T^2$  통계량의

적정 임계치는 자동적으로 정해진다.

Q 통계량도 유사한 척도이며 관찰벡터의 제곱 2-norm으로서 이 norm은 PCA decomposition에서 살아남은 고유벡터에 수직한 방향으로의 관찰벡터 성분들로부터 계산한다. 바꾸어 말하면 이것은 잔차 (residues)의 2-norm이다. 따라서  $T^2$  와 Q 통계량은 상보적이고 켈레이므로 정상 운전범위를 벗어나는 통계적 과정에 대한 좋은 지표이다.

FDD 모듈은 BMS의 온도, 공기유량, 전기소비율과 같은 운전데이터 뿐만아니라 EnergyPlus 시뮬레이션 결과도 활용한다.  $T^2$  와 Q 통계량은 고장감지 및 진단을 목적으로 모델 예측치로부터 측정 데이터의 편차에 기반하여 계산된다.  $T^2$  와 Q 통계량의 기저가 되는 PCA는 다변수 데이터를 다변량 Gaussian 분포로 모델화하지만 이러한 가정은 BMS 측정 데이터나 EnergyPlus 시뮬레이션 데이터 각각에 대해서는 타당하지 않을 수도 있다. 반면에 측정 데이터와 그 조건에 상응하는 EnergyPlus 시뮬레이션 예측 간의 차이를 다변량 Gaussian 분포로 근사될 수 있다고 가정하는 것이 훨씬 합리적이다. 이 점이 측정 데이터나 모델 예측치 자체보다는 그 둘 간의 편차에 대하여 이상 점수를 계산하게 된 동기이다.

### ⑤ 에너지 성능 가시화 창

현재 최고수준의 BMS는 충분히 많은 건물 데이터를 설비 관리자에게 제공한다. 이 건물 데이터는 시스템 및 장비 성능 (온도, 압력, 에너지 소비량 등), 제어기 상태 및 설비 고장 상황을 포함한다. 그러나 서로 연계된 데이터의 복잡성과 엄청난 데이터량으로 인하여 설비 관리자는 건물 운전에 관한 의사 결정하기가 어려워졌다. 그래서 오늘날의 설비관리자는 개인적 직관과 경험에 의존하여 설비운전을 판단한다. 저자들은 설비 관리자가 보다 효과적으로 데이터를 활용하여 개선된 운전 의사결정을 할 수 있도록 대화형 가시

화 창을 개발하고 있다. 에너지 성능 가시화 창은 다음과 같은 기능을 갖는다.

- 1) 건물 및 HVAC 시스템 레벨에서의 다양한 에너지 관련 수치 가시화
- 2) data mining과 물리법칙 기반 모델링기법을 통합하여 얻은 데이터와 실험데이터 간의 비교
- 3) 근본원인 분석 판단 지원용 에너지 고장 진단과 분류
- 4) 지속적인 에너지 사용 trend 파악

#### ⑥ 통합 소프트웨어 환경

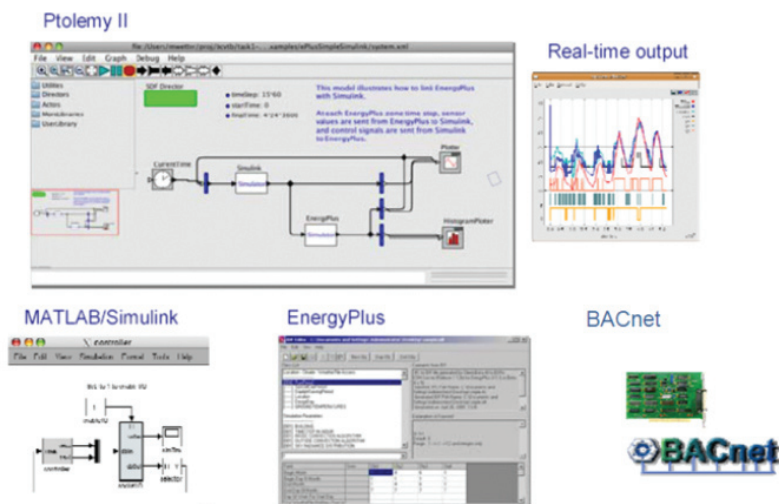
이 환경은 **그림 1**에서  $\Sigma$ 기호로 나타낸 부분으로서 EEMCS 및 표준모델 (표준모델 출력은 실험데이터와 자동적으로 동화되고 실험데이터와 비교되도록 구성되어 있음)과 통합되어 신호 처리과정을 지원한다. 이 소프트웨어 시스템은 건물제어 가상 테스트베드 (BCVTB; Building Control Virtual Test Bed - EnergyPlus를 포함한 다양한 에너지 모델링 소프트웨어 툴과 EEMCS 데이터 통합용 공개 소스 소프트

웨어 플랫폼)위에 구축되었다. BCVTB는 이종 (heterogenous) 모델링과 시뮬레이션 툴을 조합한 공개 소스 소프트웨어 환경인 Ptolemy II를 사용한다. **그림 2**는 BCVTB 스크린 샷을 나타낸다.

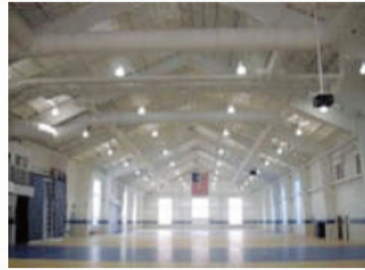
BCVTB는 EEMCS에의 통합 및 Ptolemy II 환경 내에서 코딩 및 신호처리를 가능하게 한다. BCVTB 내 BACnet 모듈은 사용자가 임의의 BACnet 적합 건물관리 시스템에서 실시간으로 건물운전 데이터를 수집하는 것을 가능케 한다. BCVTB에서 EnergyPlus를 실시간으로 구동하기 위해 EnergyPlus와 BCVTB간의 데이터 교환용 외부 인터페이스 객체가 사용된다.

## 사례연구

제안하는 시스템 구현 여부는 기존 건물제어 시스템의 통신 역량에 크게 의존한다. 기존 EMCS가 BACnet, LonWorks, 또는 Modbus과 같은 공개 통신 프로토콜을 지원하는 것이 바람직하다. 이 사례연구에 사용된 건물은 **그림 3**에 시된 Atlantic Fleet Drill Hall으로서 미국 일리노



[그림 2] BCVTB (Building Control Virtual Test Bed) 구성도



[그림 3] Drill Hall building at Great Lakes Naval Station

이주 Great Lakes Naval Station에 위치하고 있다. 이 건물은 체력단련실, 사무실, 강의실 및 행정실을 갖춘 체육관 형식의 2층 건물이다. 건물 연면적은 6,431 m<sup>2</sup> 이고 2007년 10월에 완공되었으며 LEED Gold 인증을 받았다.

Drill Hall HVAC 시스템은 4개의 공기 측 하위 시스템과 2개의 개별 물 측 하위 시스템으로 구성된다. 체력단련실은 냉난방 능력을 갖춘 2개의 변풍량 AHU를 구비하고 있다. 2층의 체력단련실에는 한 개의 VAV AHU가 설치되어 있다. 설비 운전은 체력단련 공간의 재실 여부에 따른다. 천공형 라이너와 드럼 루버를 갖춘 이중벽 철판 덕트 시스템이 공간 내에 공기를 분배한다. 사무실과 행정실 면적은 온수로 재열되는 VAV 터미널 유닛을 갖춘 VAV AHU로 처리한다. 냉수 시스템은 정속형 일차 펌프와 가변속 2차 펌프를 갖춘 2개의 110톤 공랭식 로터리 스크류 방식 칠러로 구성된다. 난방은 스팀을 온수로 변환하는 열교환기를 통해 기존 캠퍼스 스팀 시스템으로부터 공급된다. 온수는 유닛 히터, VAV 박스 재열 코일, 그리고 AHU 난방코일에 공급된다. 모든 주요 설비를 모니터링하기 위해 DDC를 분산 배치하였다. 건물 전기 및 물 사용량은 DDC 시스템으로 기록한다. 일사계, 통풍식 건습구 온도계, 풍속 및 풍향계를 포함한 현장 백엽상은 지붕에 설치되어 있다. 열량계 (급수 및 환수 온도, 물 유량계)는 칠

러, 2차 측 냉수 루프 그리고 온수 루프에 설치되었다. 전기 부하, 플러그 부하 및 개별 칠러 전력 또한 sub meter로 검침하였다. 이러한 센서와 계량은 기존 건물 EMCS에 통합되었다.

### EnergyPlus 표준 모델

EnergyPlus로 작성한 모델의 HVAC 시스템 구조는 공급 측과 수요 측으로 구분된 공기측과 물측 루프로 연결된 일련의 모듈로 구성되었다. 모델의 크기와 계산시간을 관리 가능한 수준으로 유지하기 위해 건물 도면을 반영할 때 조닝을 단순화하였다. 동일한 VAV 박스로 연결된 모든 방은 한 개의 존으로 통합하였다. 건물 모델은 30개의 공조구역 (체력단련실, 1층과 2층 각각에 대하여 12, 12, 그리고 6개의 존 설정)으로 구성하였다. 일부 존은 건물 내 물리적 사무실과 일대일 대응하지만, 그 외 존은 유사한 에너지 사용 및 요구 조건 하에 있는 인접한 여러 개의 방을 합한 것이다. 각 존은 해당 룸의 열용량 (가령, 내부 벽, 가구, 책 등)을 나타내는 내부질량 (internal mass) 을 포함한다.

EnergyPlus 모델의 거동을 파악하기 위해 광범위한 감도 해석과 불확실성 해석이 수행되었다. 그 결과 설비의 연간 전력소비량이 가장 큰 영향을 미치는 상위 3개의 입력 변수는 체력단련실

용 AHU 공급 공기온도 설정값, 칠러 표준 COP 그리고 체력단련실 조명 스케줄이었다. 그리고 설비 전력 피크수요에 가장 큰 영향을 미치는 상위 3개의 입력변수는 칠러 최적 부분부하율, 칠러 표준 COP 그리고 AHU 공급공기온도 설정 값이었다.

## 실시간 성능 모니터링과 에너지 진단 시스템 모델

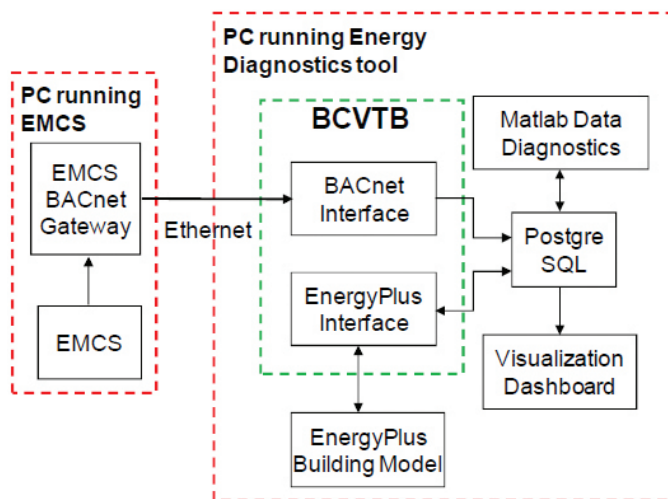
전체적인 시스템 구성도는 그림 4와 같다.

요구되는 건물 성능 데이터는 기존 EMCS를 통하여 수집되고 BACnet 게이트웨이를 거쳐 에너지 진단시스템에 전달된다. BCVTB 내에는 제안하는 함수적 요구조건을 달성하는데 필요한 2개의 모듈이 있다. BACnet 모듈은 Ethernet 통신망과 EMCS BACnet 인터페이스로부터 적절한 건물 성능 데이터를 취득하는데 사용된다. 샘플링 주기는 5분이다. 그 다음 데이터는 PostgreSQL 데이터베이스에 전달된다. EnergyPlus 모듈은 BCVTB와 최적 건물성능을

나타내는 외부 EnergyPlus 모델 간의 통신을 수행한다. EnergyPlus 시뮬레이션 time step은 15분이다. EnergyPlus 모듈은 적절한 실시간 데이터(가령, 날씨 데이터)를 받고 외부 EnergyPlus 표준모델을 실행시킨다. EnergyPlus 시뮬레이션 결과는 PostgreSQL database에 다시 넘겨진다. 이 데이터베이스의 데이터에 대하여 Matlab Data Diagnostic 툴을 데이터 마이닝과 이상 감지 기법에 적용하여 건물 고장을 파악한다. 가시화 패널은 실시간 건물 성능 데이터뿐만 아니라 그 결과를 보여주는 사용자 인터페이스이다. BCVTB, EnergyPlus 건물 모델, Matlab Data Diagnostic 그리고 데이터베이스 관련 소프트웨어가 모두 백그라운드로 운용되면서 사용자에게는 보이지 않아야 한다.

## 에너지 진단 결과

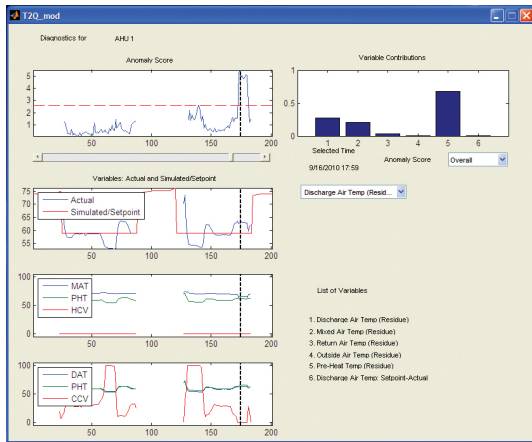
제안한 에너지 진단 툴을 2010년 4월부터 체력단련실에 설치하였다. 해당 시설은 잘 유지되었고 에너지 관점에서 많은 개선이 이루어져 왔



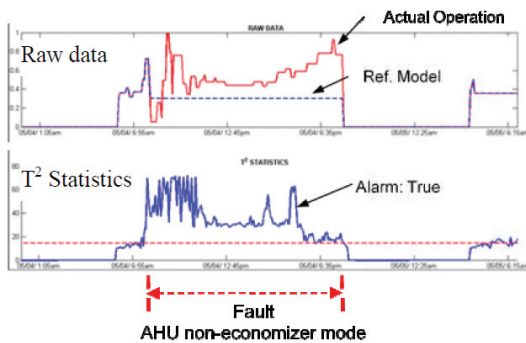
[그림 4] 에너지 진단 시스템 구성도

다. 그럼에도 불구하고 이번에 개발한 프로그램 틀을 적용한 결과 체력단련실의 조명과 제어의 변경 및 기타 최적화를 포함한 일련의 개선 필요성이 지적되었다. 현재, 이상 점수와 임계치는 이

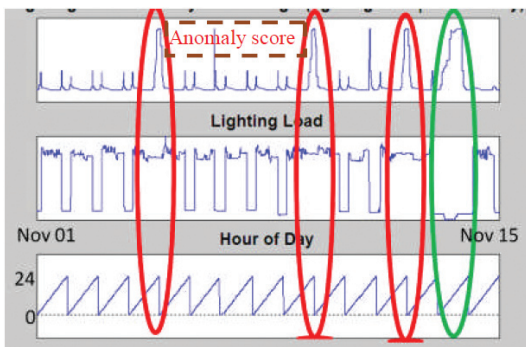
전 30일부터의 데이터를 분석하여 계산된다. 달리 말하면, 분석에 사용된 데이터는 30일 슬라이딩 윈도우에서 나오므로 임계치는 시간에 따라 변할 수 있다.



[그림 5] 잠재적 센서 바이어스 이상 진단



[그림 6] 이코노마이저 고장



[그림 7] 조명 고장

## 잠재적 센서 바이어스

그림 5는 다음 절에서 논의할 가시화 창에 표시된 AHU 내 이상을 보여준다. 이 고장에서 가장 드러난 부분은 난방코일 출구 공기온도의 실측 및 시뮬레이션 결과의 차이이다. 이 이상은 난방코일 직후에 설치된 온도센서의 잠재적 센서 바이어스에 해당한다. 다른 데이터 분석을 통해서도 이 온도센서가 drifting하고 있음을 확인하였다.

그림 6의 상반부 그래프는 2010년 5월 4일에 작동 중인 AHU의 외기 도입률을 EnergyPlus 표준모델의 시뮬레이션 결과와 비교하였다. T2 통계량 기반 이상 점수 (청색선)가 하반부에 표시되어 있다. 이상 점수가 임계치(적색선)를 초과할 때마다, 잠재적 고장이 표시된다. 한 개의 변수(외기도입률)만 이상 점수 계산에 사용되었기 때문에 기여도 가중치 그래프는 표시되지 않았다. 이코노마이저가 작동하지 않는 모드에서는 유입외기는 전체 공급공기량의 50% 정도이고 이는 약 13,590 CMH이다. 설계기준에 따르면 건물물은 배기 보충과 건물 양압 유지를 위해 10,190 CMH의 공기량이 필요하다. 따라서 이코노마이저가 작동하지 않는 모드에서 외기도입률을 줄여 냉난방 에너지를 절감할 여력이 있다. 이는 EnergyPlus 모델 예측에 의하면 난방 계절에 연간 스팀 소비량을 약 30% 절감할 수 있다.

## 조명 고장

그림 7은 2010년 11월 1일부터 15일까지 부



재 시간의 조명으로 인해 확인된 고장을 보여준다. 2010년 6월부터 조명전력 데이터는 훈련용 데이터로 사용되었다. 맨 위의 그래프는 이상 점수를 나타낸다. 중간 그래프는 실제 조명전력 소비량을 보여준다. 붉은 선으로 표기된 기간은 부재 시간에 조명이 켜진 시간에 해당한다. 켜져 있어야 할 시간에 조명이 꺼진 경우는 초록색 선으로 표기된다.

## 가시화 창

그림 8은 대화형 사용자 인터페이스 예를 보여준다. 인터페이스는 3개의 창으로 구성된다.

- ① 분석용 데이터 (붉은 박스 내)
- ② 에너지 사용 (녹색 박스 내)
- ③ 시스템 정상-이상 (청색 박스 내)

사용자 인터페이스의 상단부는 에너지 사용 데이터를 가시화하기 위한 것이다. 선택한 시간 구간에서 에너지 사용이 부하영역 (조명, 전기 플

러그 부하, 냉각, 팬 등)별로 어떻게 분산되어 있는지를 보여주는 5가지 가시화 항목이 있다.

1) 첫 번째 파이 차트는 주어진 임의 시점에서의 에너지 분포를 표시한다.

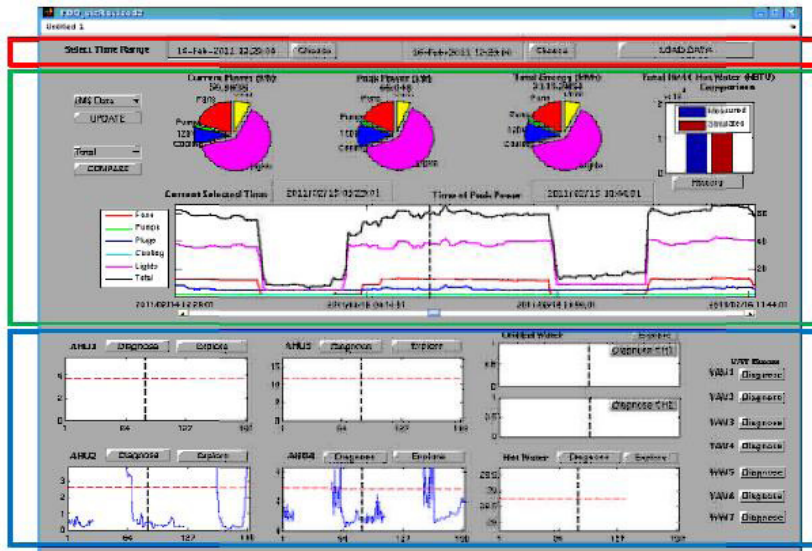
2) 두 번째 파이 차트는 선택한 시간구간 중 피크 총전력량 발생 시점에서의 에너지 분포를 도시한다.

3) 세 번째 파이차트는 선택한 시간구간에 걸친 전체 에너지 사용 분포를 도시한다.

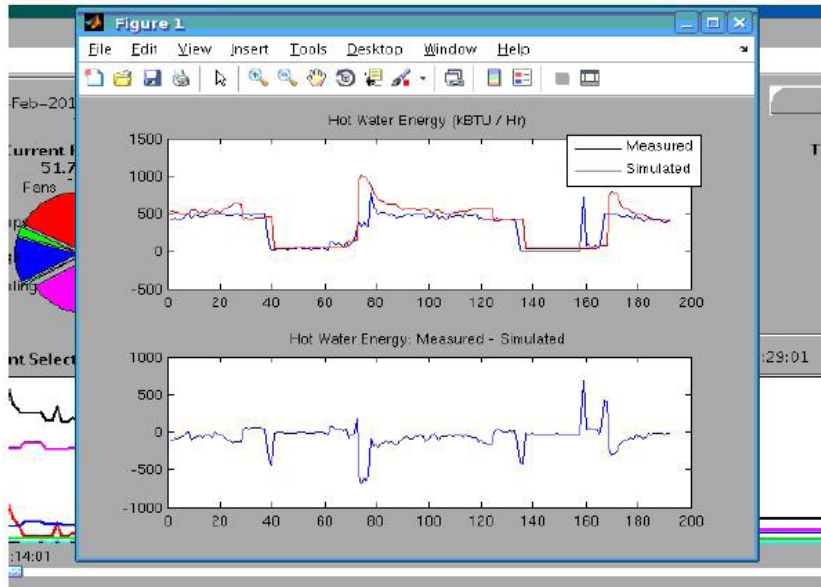
4) 선 그래프는 선택한 시간구간 전체에 걸친 전력 분포 시간 이력을 나타낸다.

5) 바 차트는 선택한 시간구간 중 HVAC 온수에 소비된 총에너지양을 나타낸다.

분석할 데이터는 다음의 두 종류이다: (a) BMS로 계측한 실시간 데이터와 (b) EnergyPlus 시뮬레이션 모델 출력. 사용자가 가시화하고자 하는 데이터를 BMS 데이터와 시뮬레이션 모델 데이터 중 선택할 수 있는 풀다운 메뉴가 있다. 사용자는 또한 부하영역(조명, 전기 플러그 부하,



[그림 8] 에너지 사용과 성능 모니터링용 가시화 창



[그림 9] 실측과 모델의 온수 소비량을 보여주는 그래프

냉각, 팬 및 전체) 중 선택할 수 있고 모델 데이터와 BMS 데이터의 비교를 가시화할 수 있다. 일단 선택이 되면 그림 9에서와같이 선택한 속성에 대한 비교를 보여주는 그래프 창이 열린다.

## 시스템 정상-이상 점수

사용자 인터페이스 (그림 8)의 하단부는 이상 점수 전용으로서 각 하위 시스템 (냉수 계통, 온수 계통, AHU, 변풍량 박스)의 건강상태를 감시한다. 각 하위 시스템에는 상위 시스템 건강에 연관된 이상점수(청색)를 보여주는 그래프가 달려 있다. 또한, 수학적으로 계산된 임계치는 붉은색으로 표시된다. 만약 이상 점수가 임의 시점에서 임계치를 넘으면 비정상 사건이 발생한 것으로 본다. 이상 점수는 시스템이 작동 중일 때만 계산되고 시스템이 작동하지 않으면 이상 점수는 표시되지 않는다.

## 하위시스템 Drilldown - 진단

사용자 인터페이스는 이상 점수와 임계치를 보여준다. 그리고 화면은 또한 이상 점수(그림 6에 참고)를 계산하는데 사용된 개별 변수들의 기여도를 그래프로 보여준다. 이는 이상을 일으키는 있어 각 변수들의 역할에 대하여 사용자 판단하는데 도움을 준다. 변수의 기여도를 파악하기 위해 사용자가 선택한 시간구간 내를 탐색하도록 슬라이더 기능이 제공된다. 사용자 인터페이스는 또한 사용자가 풀다운 메뉴에서 원하는 변수를 선택하고 해당 센서의 BMS 데이터 시간 이력, 시뮬레이션 모델 데이터, 그 둘 사이의 차이를 볼 수 있게 해준다.

## 참고문헌

1. Zheng O'Neill1, 2011, Madhusudana Shashanka1, Xiufeng Pang, Prajesh

Bhattacharya, Trevor Bailey, and Philip Haves, REAL TIME MODEL-BASED ENERGY DIAGNOSTICS IN BUILDINGS, Proceedings of Building Simulation, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November.

2. Haves, P., Salisbury, T., Claridge, D. and Liu M. 2001, Use of Whole Building Simulation in On-Line Performance Assessment: Modeling

and Implementation Issues. Proceedings of 7th International IBPSA Conference Building Simulation 2001, Aug 13-15, Rio de Janeiro.

3. Lee, S. Uk, Painter, F. L. and Claridge, D. E. 2007, Whole-Building Commercial HVAC System Simulation for Use in Energy Consumption Fault Detection. ASHRAE Transactions, v113, part2: 52-61. 