

# 가스엔진구동 멀티히트펌프 고장진단 연구사례

가스엔진으로 구동되는 시스템 열펌프의 제어기 데이터만을 이용하여 시스템 이상을 검출하는 기법 연구결과를 소개한다.

가까운 미래에는 태양광 발전 가격이 충분히 낮아져 일반 건물에 보급될 것으로 예상된다. 이 경우 가용한 에너지원의 이용을 극대화하기 위한 건물에너지 관리시스템(BEMS: Building Energy Management System)이 중요한 산업적 위치와 시장 규모를 갖게 될 것이다. 이 때 각종 공조설비는 상위의 BEMS에 가능한 많은 데이터 서비스를 제공해야 한다. 하드웨어 성능 경쟁이 어느 정도 포화되면 가령 운전 중인 열펌프 시스템의 각종 운전데이터, 실시간 COP를 제공해야 할 뿐만 아니라 신뢰도가 높은 고장진단 정보를 올리는 업체일수록 공조설비 시장 점유율을 높일 수 있다.

이러한 청사진에 비하여 실제 설비업체가 제공할 수 있는 신뢰도 높은 고장진단 기능은 아직 빈약하다고 판단된다. 전기신호에 의해 명확히 파악할 수 있는 고장 이외에 열유체적 성능 열화, 시스템 이상 시 명확한 원인분석과 같은 고차원적인 고장진단에 관한 연구결과는 많지 않다. 그렇다고 학술적인 연구의 측면에서 고가의 냉매 유량 센서 등을 장착하고 진단하는 것은 실제에 응용하기 어려운 방법이다. 따라서 가령 히트펌프가 운전되는데 필요한 제어기의 각종 실시간 데이터만을 분석하여 의도한 고장진단 기능을 확보할 수 있는 가능성을 판단하기 위하여 다음의 두 가지 접근방법을 시도하였다.

## 부하 실시간 추적법

- 냉매 순환량 실시간 예측 - 압축기 제조사의 압축기 토출유량 경험 DB
- 실내기별 설계 풍량과 용량에 의한 공기측 부하 예측
- 냉매측과 공기측 부하 비교에 의한 이상진단

## 신영기

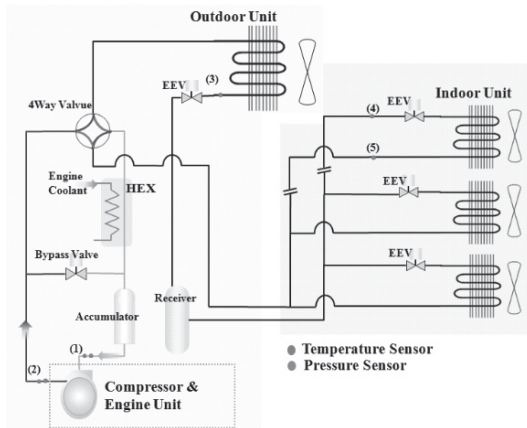
세종대학교 기계공학과  
교수  
ygshin@sejong.ac.kr

### Steady state normal operation DB 비교법

- 정상상태 운전조건 판별기준
- 정상상태 DB 구축
- 비교에 의한 이상 검출

### 진단대상 시스템

그림 1은 복수의 실내기를 갖는 GHP의 간단한 구조를 도시한 것이다. 적용된 GHP(Gas Engine-Driven Heat Pump)는 LS엠트론사 제품으로서 R410a 냉매를 사용하고 엔진동력은 25 마력 급이다. GHP에 연결된 실내기는 10대이고 운전된 총 실내기 용량은 62 kW였다.



[그림 1] 가스엔진 구동형 멀티 열펌프 시스템 개략도

### 부하실시간 추적법

#### 냉매측 난방부하

각 실내기별 팽창밸브의 개도별 유량특성은 다음 식과 무차원화하고 밸브 니들 직경  $d$ 와 압력차  $\Delta p$ 에 의해 밸브 유량을 결정하였다. 실내기별 냉매 유량 합한 후 압축기 토출 유량으로 보정하였다.

$$\pi = \frac{\dot{Q}}{d^2 \sqrt{\Delta p / \rho}} \quad (1)$$

#### 공기측 난방부하

공기 측의 열부하는 다음 식에 의해 계산된다.

$$\dot{Q}_a = UA \frac{T_{a,0} - T_{a,i}}{\ln[(T_{ref} - T_{a,i}) / (T_{ref} - T_{a,0})]} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a c_{pa} (T_{a,0} - T_{a,i}) \quad (3)$$

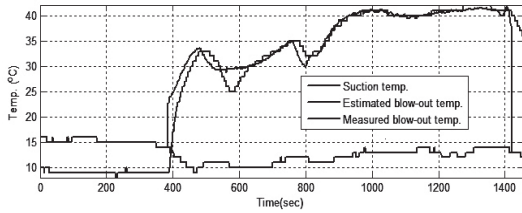
제어기로부터 냉매액관온도  $T_m$ 와 공기 흡입온도  $T_{a,i}$ 를 알 수 있으나, 공기토출온도  $T_{a,0}$ 와  $UA$ 도 알아야 한다. 실내기 능력은 KS 시험기준에 따라 측정되고(KSB ISO 15042) 이 때 강풍 시의 풍량이 알려져 있으므로 식(3)에서 실내기 출구공기온도  $T_{a,0}$ 이 계산된다. 이 값을 식(2)에 대입하여  $UA$ 를 구한다. 실제 운전 시에는 식(2)의 로그항 때문에  $T_{a,0}$ 의 계산이 어려우므로 대체식이 필요하다. 다음의 열교환기 유용도  $\varepsilon$ 식을 적용하여 해결한다.

$$T_{a,0} = \varepsilon (T_{ref} - T_{a,i}) + T_{a,i} \quad (4)$$

실내기 냉매 응축 시 냉매측 열용량이 공기측 보다 매우 크므로 유용도는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$\varepsilon = 1 - e^{-UA / \dot{m}_a c_{pa}} \quad (5)$$

그림2는 공기 토출온도의 실측치와 식(3)의 예측치의 비교를 나타내며 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 일치하지 않는 부분은  $UA$ 값을 알 수 있는 강풍운전 영역이 아니어서 토출온도를 추정하지 않은 데 기인한다. 공기측 부하 측정에 의한 부하추정방법은  $UA$ 가 출고 시의 성능을 유지한다는 가정 하에서 얻어진 것이다. 현장에서는 흡입필터와 열교환기 표면에 이물질이 퇴적되어 풍량이 줄고 대류 열전달 특성이 열화되므로 공기측 부하추정법은 출고시의 신제품 성능 대비 사용 중인 제품의 성능이 얼마나 저하되었는지 판단하는 근거가 될 수 있다.

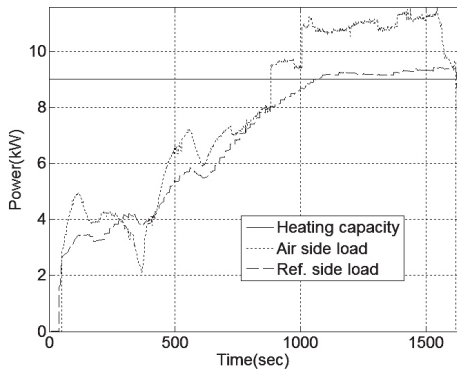


[그림 2] 측정 및 시뮬레이션 토출공기온도 비교 (1번 실내기)

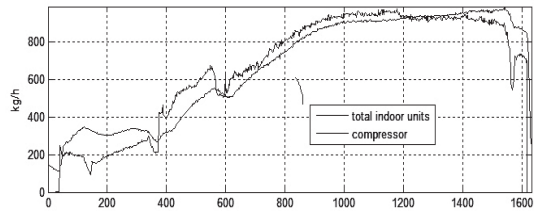
### 실시간 부하추정법 검증과 응용

압축기의 능력, 입력, 토출유량, 토출온도는 제조사의 데이터의 성능곡선모델을 사용하여 추정하였다. 그림 3은 실내기 4에서의 냉매측과 공기측 부하 추정결과를 비교한 것이다. 대체로 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그림 4는 전체부하에 대한 비교를 나타낸다. 결과에 의하면 압축기 토출유량과 실내기별 합산유량이 경향 및 크기에 있어 좋은 일치를 보여주고 있다. 부하의 경우도 유사한 경향을 나타낸다.

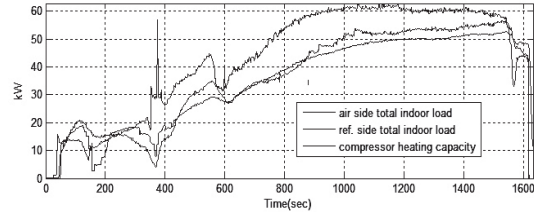
이러한 결과를 토대로 실내기 1번의 공기흡입 필터에 대한 고장진단을 수행하였다. 시험기기는 공장에 설치된 관계로 먼지가 많아 흡입필터가 상당부분 막혀 있었다. 그림 5는 실내기의 냉매측과 공기측 부하 비교를 통해 진단한 사례이다. a)에서는 필터 막힘으로 인해 냉매측으로의 부하 전열량이 작지만 공기측은 설계용량과 유사하게 출력된



[그림 3] 운전 중 냉매측과 공기측에서 추정된 난방부하 비교 (Heating capacity는 해당실내기 설계용량)



a) 추정 냉매순환량 비교



b) 추정 난방부하 비교

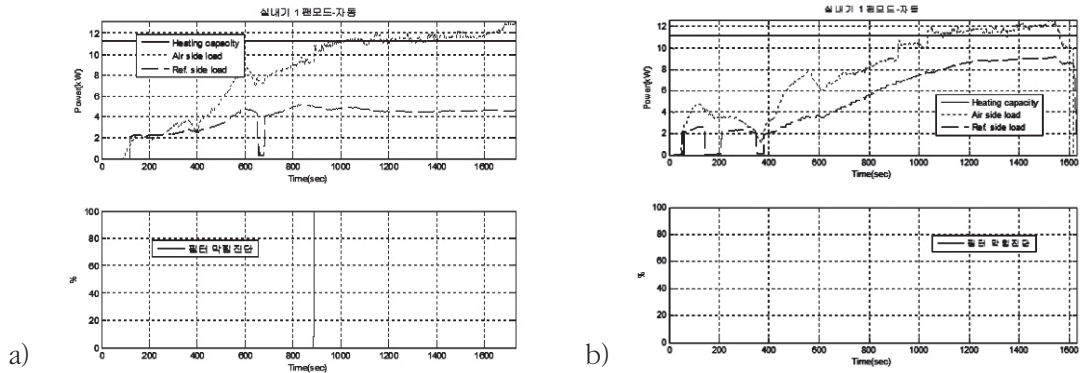
[그림 4] 추정된 냉매순환량과 난방부하

다. 그 이유는 공기측의 경우 막힘이 없는 신품기준 성능을 가정한 것이 때문이다. 이렇게 냉매측과 공기측 부하가 일정 비율이상이 되면 필터 막힘을 진단하게 하였고 b)에서는 필터 청소 후 다시 측정한 결과이다. 모델오차로 인해 차이는 있으나 두 부하가 비교적 일치하고 있다. 이러한 예시를 통해 실시간 부하추정법으로 고장이 잦은 공기흡입 필터 상태를 online으로 점검할 수 있음을 알 수 있다.

### 정상상태 데이터에 의한 이상검출 방법

설비이상 진단을 위해서는 외란이나 입력 변동에 따른 구성요소들의 열용량에 의한 과도응답 과정이 제거된 정상상태(steady-state) 운전이 전제되어야 한다. 따라서 정상상태 판별기준을 확립하여 정상상태 기준 하에서 수집된 데이터를 근거로 해당 설비의 이상 유무를 판단하는 이상검출 알고리즘을 개발해야 한다.

정상상태는 수학적으로 변수의 시간변화율이 0임을 의미하지만 현실에서는 그러한 정상상태는 불가능하고 근사 정상상태를 판별해야 한다. 근사의 의미는 시스템 특성에 따라 다양하게 해석될 수



[그림 5] 실시간 부하추정법에 의한 흡입 필터 막힘 진단

있기 때문에 정상상태 판별에 관한 이론적 기준은 사실상 없다.

본 연구에서는 내연기관의 공회전 안정성 (idle stability)이나 연소 안정성 판단용으로 활용하는 식 (6)과 같이 정의된 COV (coefficient of variation)를 적용하였다.

$$COV = \frac{\sigma}{|\mu|} \quad (6)$$

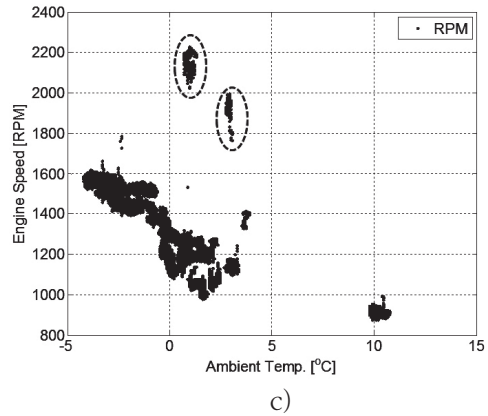
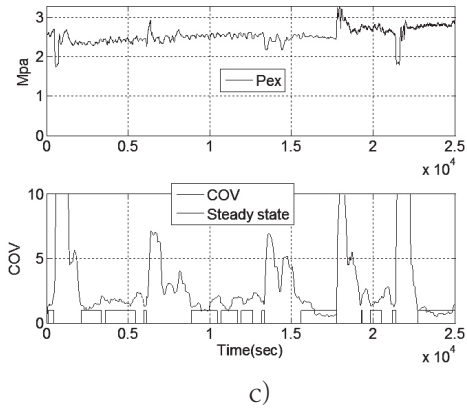
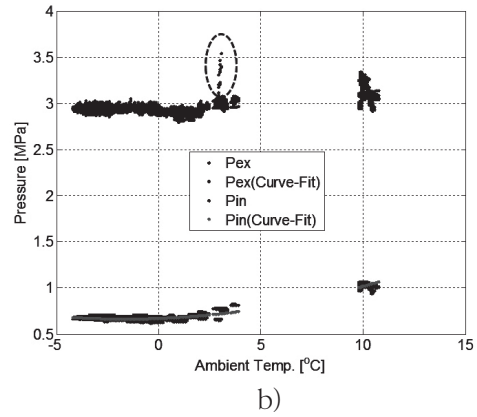
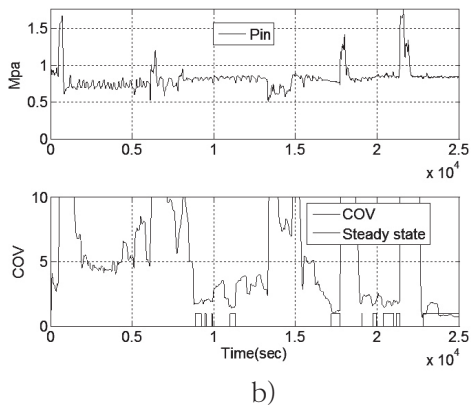
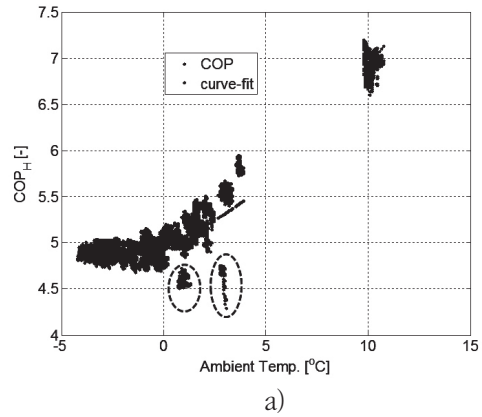
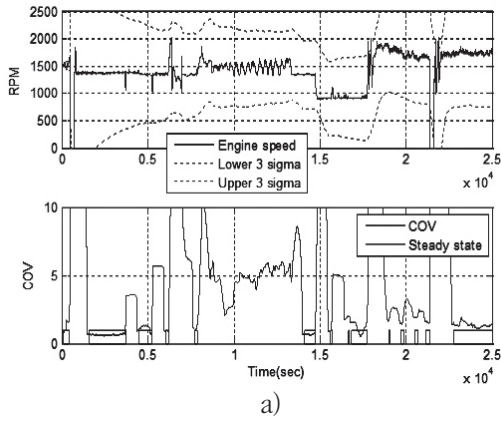
COV를 택한 이유는 무차원화되어 있어 모니터링 변수 별 특성을 한 개의 정량적인 값으로 표현할 수 있고, 운전조건이나 상태에 따라 표준편차가 변하므로 COV threshold 값을 설정하여 정상상태 수준을 관리할 수 있기 때문이다.

이상검출 방법은 크게 신호 분석법과 신호 및 모델이용 분석법이 있으나, 이들 이론은 공조설비를 포함한 모든 시스템에 대한 일반방법론이다. 이들 방법론은 과도상태 (transient state) 데이터까지 포함한 경우로서 대개 선형 또는 근사 선형 시스템을 대상으로 하고 있다. GHP는 비선형적으로 거동하기 때문에 적용가능한 방법론은 신호 분석법 중에서 정상 상태 데이터의 경향 검출 (trend checking)에 해당하며 이는 일정 threshold 범위를 벗어나면 이상이 있는 것으로 판단하는 직관적이고 간단한 방법이다. GHP의 정상상태 데이터들

의 상관관계는 물리적 모델로 예측이 불가능하거나 매우 복잡하다. 대안으로서 무고장 정상상태에서 얻어진 시험데이터를 추적하여 데이터베이스로 구축하고 변수들 간의 trend를 찾아내어 경험식으로 표현한다. 경험식 주변으로 분포된 무고장 데이터의 신뢰구간 (confidence interval)을 경험적으로 설정하여 이 구간을 벗어나는 정도에 따라 이상 여부를 검출한다.

데이터 분석 결과 정상상태 판별에 중요한 변수는 엔진속도, 냉매 고압 및 저압으로 선정되었다. 엔진속도는 냉난방 부하의 크기에 비례하므로 부하변동을 판별하기 쉽고, 냉매 압력은 시스템 이상 유무가 직접적으로 반영될 것으로 판단하였기 때문이다. 데이터는 2초마다 샘플링 되었고, 이동평균 구간은 10분으로 하였으며 정상상태는 엄격한 조건을 적용하기 위해 COV 2% 이내로 정하였다. **그림 6**은 7월 15일 12시부터 진행된 시험결과에 대하여 변수별 COV와 정상상태 판정결과를 나타낸다. 그림에서 COV 1은 정상상태, 0은 비정상상태를 의미한다. 최종적인 정상상태 데이터는 보수적인 기준으로 선정되었는데 **그림 6**의 각 변수 별 정상상태의 교집합을 해당 데이터의 정상상태로 간주하였다.

**그림 7**은 난방 시의 정상상태를 나타낸다. 그림에서 동그라미 점선으로 표시된 부분은 시스템 이



[그림 6] COV에 의한 정상상태 편별 a)엔진속도, b)냉매고압  
c) 냉매저압

[그림 7] 정상상태 데이터(난방) a)COP, b)냉매압,  
c)엔진속도

상에 해당하는 부분이다. 고장의 원인은 지면관계 상 생략한다. 점선을 제외한 나머지 데이터는 시스템에 문제가 없을 때 얻어지는 데이터이다.

COP는 압축기 입출구 및 응축기 출구에서 측정된 냉매 온도와 압력으로부터 얻은 엔탈피로부터 계산한 것이다. 다양한 변수들의 상관도를 조사

한 결과 외기온도의 영향이 컸다. COP는 같은 외기온도에서도 부하의 크기에 따라 데이터 분산이 상대적으로 크다. 간격이 일정한 시계열의 데이터와 달리 정상상태 판별조건을 만족한 데이터들은 외기온도에 대하여 간격 및 분포가 무작위이므로 외기온도별 표준편차를 구하기가 용이하지 않다. 또한 본 연구에 수록된 정상상태 데이터가 모든 부하와 온도 범위를 대표하고 있지 않기 때문에 신뢰성 있는 무고장 데이터의 2차 다항식과 신뢰구간을 구하려면 열환경 챔버에서 계획된 시험에 의해 필요한 데이터를 확보해야 한다.

평균값 자체가 외기온도에 대하여 변하고 데이터 간격이 불규칙하므로 이동평균 기준의 표준편차 계산이 복잡하므로 그래프 상에서 평균값 주위로의 데이터 분산 경계를 시각적으로 판단하는 것이 단순하고 명확해 보인다. 가령 **그림 7**에서 COP는 평균값 주변으로  $\pm 0.5$ , 냉매 압력들은  $\pm 0.2$  정도의 변동 폭을 보이고 있다. 따라서 이 폭을 넘어 서면 시스템에 이상이 있을 확률이 높은 것으로 판단하는 것이다.

### 맺음말

GHP 운전데이터를 대상으로 고장진단을 시도해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 냉매 순환량과 부하계산 모델을 이용하여 간접적으로 계산하는 실시간 부하추적법은 고장진단에 필요한 많은 정보를 주는 유용성이 있으나 아직 정밀도 개선이 필요하다. 또한 도입된 가정과 모델들이 다소 단순화된 측면이 있기 때문에 이를 정당화하기 위한 추가의 기초연구가 필요하다. 그러나 고장진단의 시대적 필요성을 감안할 때 실시간 부하 추적법의 가능성과 실용성은 인지해야 한다.

정상상태 데이터 비교법도 이상검출에 유용한 지표를 제공하기는 하지만 고장이 없는 정상상태 변수들간의 상관성을 밝히는 연구가 추가적으로 진행되어야 한다. 또한 정상상태를 추출하고 관리하기에는 현재의 제어기 연산 및 메모리 성능이 부족하기 때문에 하드웨어 개선과 병행하여 실용적인 알고리즘 개발연구가 진행되어야 한다. 