

GHP 운전시 COV에 의한 정상상태 판별 및 이상검출 방법 연구

신 영 기[†], 오 세 재^{*}, 정 진 희^{*}

세종대학교 기계공학과, ^{*}(주) LG전자 가산R&D 캠퍼스 AE연구소 Chiller그룹

A Study on Steady-State Criterion based on COV and a Fault Detection Method during GHP Operation

Younggy Shin[†], Se-Jae Oh^{*}, Jin-Hee Jeong^{*}

Department of Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

^{*}Chiller Group, LG Electronics, Seoul 153-023, Korea

(Received August 16, 2011; revision received September 28, 2011)

ABSTRACT: Fault detection has to be proceeded by steady state filtering to get rid of transient effect associated with thermal capacity. Coefficient of variance (COV), ratio of standard deviation divided by moving average, was employed as steady-state filter. Engine speed and refrigerant pressures were selected as parameters representing system dynamics. The filtered values were registered as members of steady-state DB. They were found to show good functional relationship with ambient temperature. The relationship was fitted with a second order polynomial and the distribution bounds of the data around the fitted curve were expressed by visual inspection because of varying average and random data interval. Fault data were compared with the steady-state data obtained during normal operation. The fault data were easily isolated from the fault-free one. To make such isolation reliable, tests to construct good DB should be designed in a systematic way.

Key words: GHP(가스구동엔진 열펌프), Heat pump(열펌프), Fault detection(고장검출), Steady-state(정상상태), Fault diagnosis(고장진단)

기 호 설 명

μ : 이동평균
 σ : 표준편차

1. 서 론

건물에서 공조설비가 차지하는 에너지 비중은 약 30~40% 수준이다. 따라서 설비의 이상은 에너지 소비를 증대시키면서 열적 쾌적감을 악화시키므로 실

시간으로 진단하여 해결해야 할 문제이다. 더욱이 고효율 공조설비와 신재생에너지 설비의 도입 그리고 건물의 고층화는 많은 설비들이 서로 복잡하게 연계되어 고장진단을 어렵게 한다.

건물 전체 설비고장 진단은 설비 제조업체별 개별 설비진단 기술의 확립이 선행되어야 가능하다. 본 연구에서는 LG전자(주)에서 개발 중인 GHP(Gas engine-driven heat pump)의 냉난방모드 시험데이터 분석을 통해 도출한 이상검출 알고리즘 연구결과를 서술하고자 한다.

2. 정상상태 및 이상검출 이론

설비이상 진단을 위해서는 외란이나 입력 변동에

[†] Corresponding author
Tel.: +82-2-3408-3284; fax: +82-2-3408-4333
E-mail address: ygshin@sejong.ac.kr

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.

2.1 정상상태 검출

정상상태는 수학적으로 변수의 시간변화율이 0임을 의미하지만 현실에서는 그러한 정상상태는 불가능하고 근사 정상상태를 판별해야 한다. 근사의 의미는 시스템 특성에 따라 다양하게 해석될 수 있기 때문에 정상상태 판별에 관한 이론적 기준은 사실상 없다.

Kim et al.⁽¹⁾은 이동평균 μ 와 $\pm 3\sigma$ threshold 판단법을 적용하였다. 여기서 σ 는 표준편차이다. $\pm 3\sigma$ 의 의미는 데이터에 인위적인 조작(예컨대, 부하 변동)이 없을 때 샘플링 구간 내 데이터의 99.7%가 이동평균값 $\pm 3\sigma$ 범위 내에 존재한다는 것이다. 그러나 이 판단기준은 GHP를 대상으로 한 경우에는 필터 폭(filter window)이 너무 넓어서 관찰자가 인지할 수 있는 비정상 상태의 일부까지도 포함하였다.

이에 대한 개선방안으로 본 연구에서는 내연기관의 공회전 안정성(idle stability)이나 연소 안정성 판단용으로 활용하는 식(1)과 같이 정의된 COV(coefficient of variation)를 적용하였다.⁽²⁾

$$COV = \frac{\sigma}{|\mu|} \quad (1)$$

COV를 택한 이유는 다음의 세 가지이다.

- 1) 무차원화되어 있어 모니터링 변수 별 특성을 한 개의 정량적인 값으로 표현할 수 있다.
- 2) $\pm 3\sigma$ threshold 판별법은 정상상태 판별 범위가 너무 넓고 고정되어 있어 시스템 별 특성을 반영할 수 없다(Fig. 1(a) 참고).
- 3) 운전조건이나 상태에 따라 표준편차가 변하므로 COV threshold 값을 설정하여 정상상태 수준을 관리할 수 있다.

2.2 이상검출 이론

이상검출 방법은 크게 신호 분석법과 신호 및 모델이용 분석법이 있으나,⁽³⁾ 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 정상상태 데이터의 경향 검출(trend checking)에 해당하며 이는 일정 threshold 범위를 벗어나면 이상이 있는 것으로 판단하는 직관적이고 간단한 방법이다. GHP의 정상상태 데이터들의 상관관계는 물리적 모델로 예측이 불가능하거나 매우 복잡하다. 대안으로서 무고장 정상상태에서 얻어진 시험데이터를 축적하여 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.

3. 실험결과 및 분석

3.1 시험 조건

개발 중인 GHP 시제품 2호기를 전북 익산시에 소재한 LG전자 공장에 설치하였다. R410a 냉매를 사용하며 엔진은 25마력이다. 냉방운전이 실시된 일시는 2010년 7월 12, 15일, 9월 16, 27, 29, 30일, 10월 5, 6일이었고 시험일마다 운전시간은 다르지만 대략 7시간이었다. 난방운전이 실시된 일시는 2010년 1월 29일, 2월 2일, 2월 3일, 3월 11일이었고 동일 날짜에 여러 번 운전한 데이터들도 포함되어 있다.

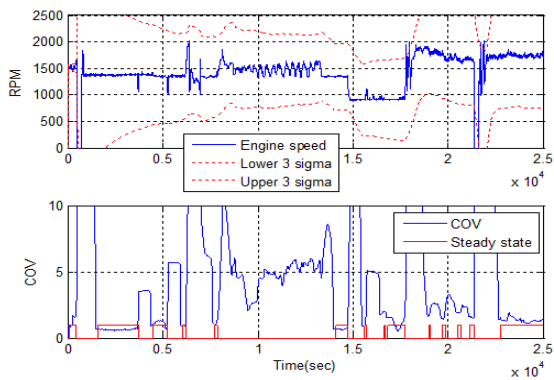
3.2 정상상태 판별

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 2초 마다 샘플링되었고, 이동평균 구간은 10분으로 하였으며 정상상태는 엄격한 조건을 적용하기 위해 COV 2% 이내로 정하였다. Fig. 1은 7월 15일 12시부터 진행된 시험결과에 대하여 변수별 COV와 정상상태 판정결과를 나타낸다. Fig. 1에서 붉은 색 그래프의 1은 정상상태, 0은 비정상상태를 의미한다.

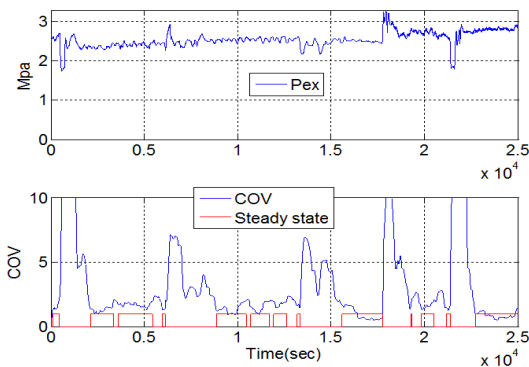
3.3 냉방운전 정상상태 데이터 분석

3.3.1 무고장 데이터

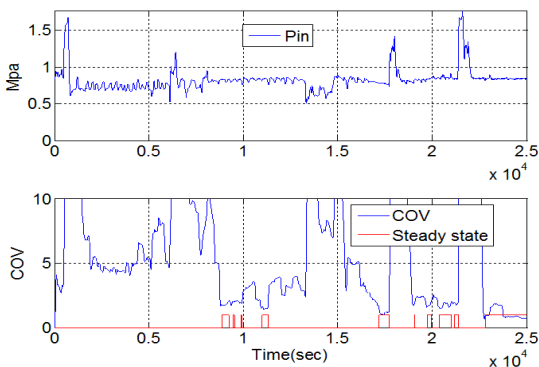
최종적인 정상상태 데이터는 보수적인 기준으로 선정되었는데 Fig. 1의 각 변수 별 정상상태의 교집합을 해당 데이터의 정상상태로 간주하였다. Fig. 2는 문제가 있다고 판명된 10월 6일의 데이터를 제



(a)



(b)

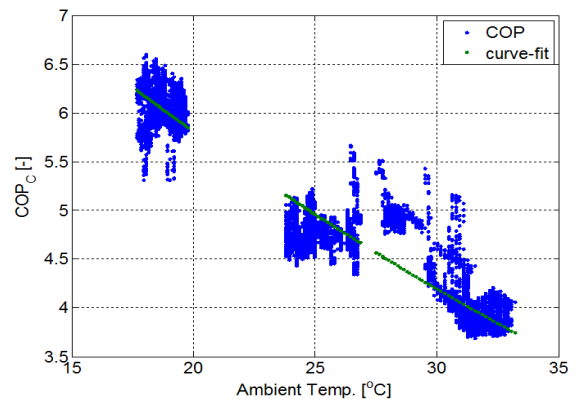


(c)

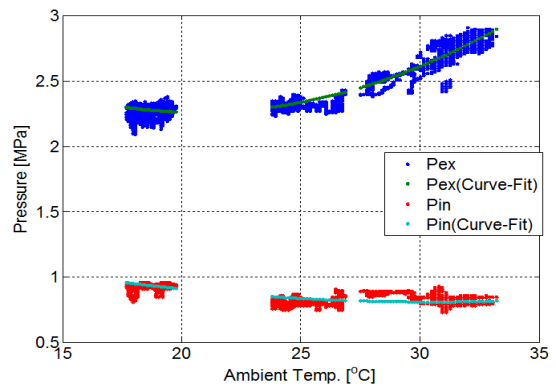
Fig. 1 COV and state status of (a) engine speed and pressures at compressor (b) exit (c) inlet.

외하고 날짜 별로 수집한 정상상태 데이터를 COP 및 냉매압력에 대하여 나타낸 것이다. COP는 압축기 입출구 및 응축기 출구에서 측정된 냉매 온도와 압력으로부터 찾은 엔탈피로부터 계산한 것이다. 다양한 변수들의 상관도를 조사한 결과 외기온도의 영향이 컸다. Fig. 2(a)의 COP는 같은 외기온도에서도 부하의 크기에 따라 데이터 분산이 상대적으로 크다. Fig. 2의 그래프에 표기된 curve-fit은 2차 근사다항식을 적용하였다.

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.



(a)



(b)

Fig. 2 Steady state data and curve-fits (a) COP (b) refrigerant pressures.

평균값 자체가 외기온도에 대하여 변하고 데이터 간격이 불규칙하므로 이동평균 기준의 표준편차 계산이 복잡하므로 그래프 상에서 평균값 주위의 데이터 분산 경계를 시각적으로 판단하는 것이 단순하고 명확해 보인다. 가령 Fig. 2에서 COP는 평균값 주변으로 ± 0.5 , 냉매 압력들은 ± 0.2 정도의 변동 폭을 보이고 있다. 따라서 이 폭을 넘어서면 시스템에 이상이 있을 확률이 높은 것으로 진단하는 것이다.

3.3.2 시스템 불안정 데이터

시스템 불안정은 시스템이 COV 2% 이내의 정상 상태에 이르지 못한 채 지속적으로 요동하는 현상을 뜻한다. 이러한 현상은 10월 6일에 발생하였다. 이 때 외기온도는 $12^{\circ}\text{C} \sim 22^{\circ}\text{C}$ 범위로서 가스엔진의 지속적 운전에 필요한 최소 냉방부하보다 작으므로 운전의 유지를 위해 인위적인 냉방부하 공급이 필요하다.

GHP 시스템 구조를 나타내는 Fig. 3에서 냉각수 판형열교환기 (HEX)는 실내기를 떠나 압축기로 가는 냉매에 추가의 열을 공급한다. 냉각수는 80°C 이고 냉매는 10°C 미만이므로 큰 온도 차로 인하여 과열되기 쉽고 냉각수 유량 또한 조절이 용이하지 않은 결과 과열도가 일정하게 유지되지 못하고 적정값 주변에서 큰 폭으로 요동(hunting)하는 현상이 발생한다. 이러한 요동은 제어를 안정화하려는 엔진속도의 변동으로 나타난다. 그 결과 10월 6일 0시 41분부터 19시간 동안 기록된 Fig. 4의 데이터는 정상 상태에 한 포인트도 포함되지 않았다. 이러한 관찰은 COV가 제어 불안정 등에 의한 시스템 요동을 감지

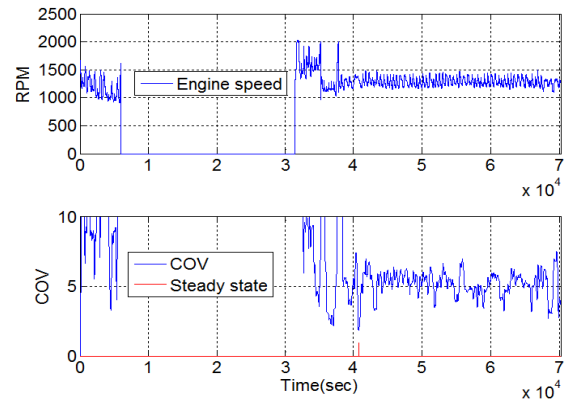


Fig. 4 Unstable engine fluctuations.

하는 수단으로도 활용될 수 있음을 의미한다. 즉 운전시간 중 정상상태 시간이 차지하는 비중이 일정 비율 이하인 경우 시스템 불안정으로 간주한다.

3.3.3 고장 데이터

앞 절의 시험에 이어 10월 6일 20시 11분부터 진행된 추가적인 시험에서도 정상 상태에 도달하지 못하였으나 시험자가 인위적으로 극한시험을 위해 모든 실내기의 팽창밸브를 수동 개방하여 운전한 결과 냉매순환량이 급격히 증가하고 냉매 고압과 저압이 증가하는 상황이 발생하였다. 이 상황에서의 데이터는 COV 2% 이하의 정상 상태로 인식되어 Fig. 5의 붉은 점선 원으로 표기된 데이터로 나타났다. Fig. 2와 Fig. 5의 비교를 통해서 고장 데이터를 쉽게 파악할 수 있다. 이는 무고장 데이터의 신뢰구간을 벗어나는 정상 상태 데이터는 시스템 이상을 의미함을 예시한다.

3.4 난방 운전 정상 상태 데이터 분석

Fig. 6은 난방 시의 정상 상태를 나타낸다. 그래프에서 무고장 데이터의 신뢰구간을 벗어나는 시스템 이상에 해당하는 데이터는 붉은 점선으로 표시하였다. 이론적인 경향과 유사하게 난방 COP가 외기온도에 대하여 큰 상관성을 보여주고 있다. COP 거동은 냉매 저압 거동과 유사함을 알 수 있으며 이는 증발온도가 높을수록 COP가 증가하는 일반적인 관찰과 일치한다. 외기온도가 낮을수록 엔진속도가 높아지는 이유는 증가된 난방부하를 처리하기 위해 냉매순환 속도가 비례해서 증가해야 하기 때문이다. 시스템 이상에 해당하는 붉은 점선 원을 보면 1°C 와 3°C 근처에서 무고장 신뢰구간을 벗어난 데이터

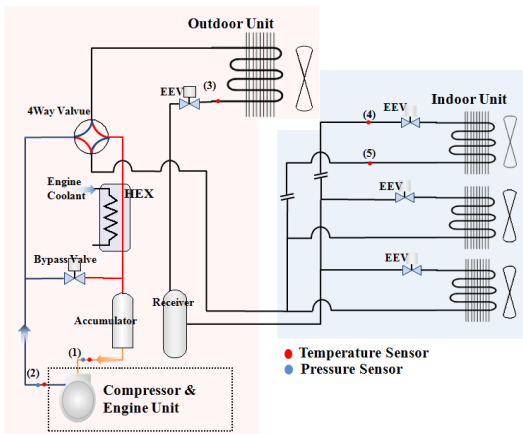
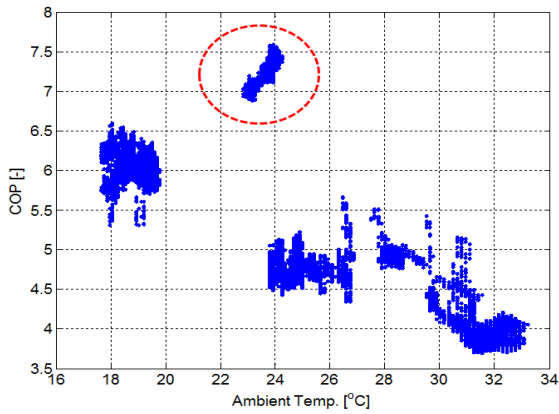
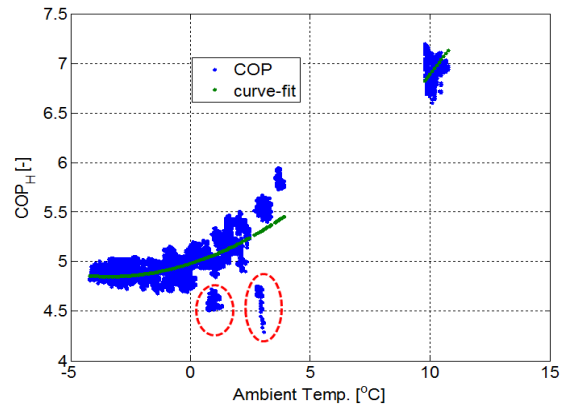


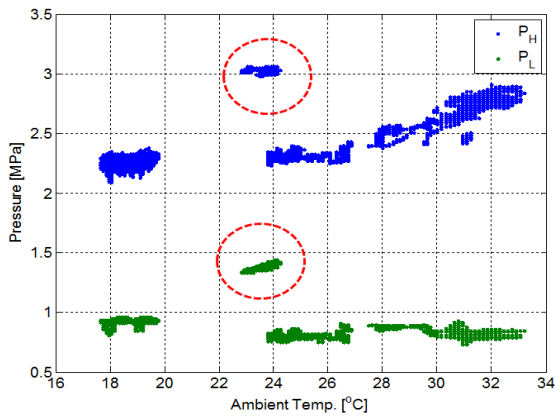
Fig. 3 Schematic of a gas engine-driven heat pump.



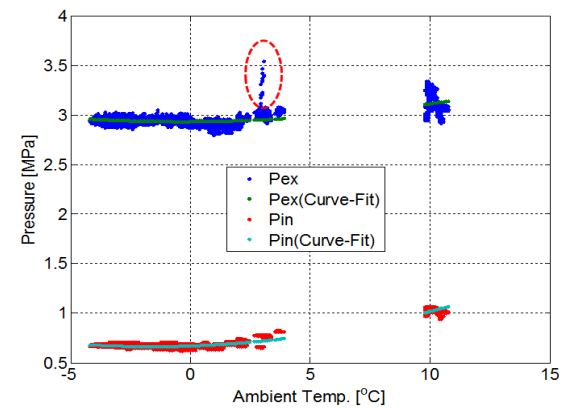
(a)



(a)



(b)



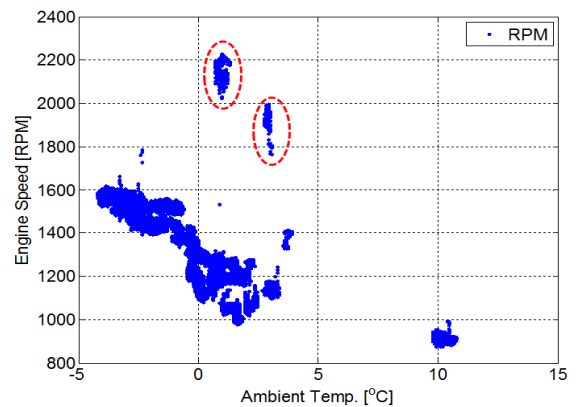
(b)

Fig. 5 Fault and normal data : (a) COP (b) Refrigerant pressures.

가 관찰된다. 이들 데이터는 엔진속도에서 특히 두드러지게 나타나고 냉매압력의 경우에는 3°C에 대해서만 고압에서 나타난다.

1°C 근처의 붉은 원은 2월 20일 20시 28분에 운전이 시작된 데이터에서 관찰되었으며 Fig. 7의 최초 750 초 구간에 해당한다. 이 영역에서 외기온도는 1°C 근처이고 압축기 입구(Evaporator exit) 냉매온도는 외기보다 낮은 영하의 온도로서 실내에 난방열을 공급하고 있다. 액체로 응축되는 응축기 출구(Condenser exit) 냉매온도는 10°C 근처를 유지하여 정상적인 운전이 이루어지고 있다. 따라서 Fig. 6(a)에서는 무고장 영역을 벗어난 것처럼 보이지만 실제로는 더 많은 시험데이터를 수집하면 무고장 데이터 범위에 포함되어야 할 부분이다. 이는 Fig. 6(b)의 냉매 압력에서도 무고장 영역을 벗어나지 않는 점에서도 확인할 수 있다.

3°C 근처의 붉은 원에 해당하는 데이터는 Fig. 8의 붉은 점선 원 부분에 도시되어 있다. 엔진속도는 2,000



(c)

Fig. 6 Steady state data (heating mode)
(a) COP, (b) refrigerant pressures,
(c) engine speed.

rpm을 유지하고 있었는데 원인을 알 수 없는 시스템 이상에 의해 냉매고압이 3.0 MPa에서 3.5 MPa까지 갑자기 증가하였다. 압력이 급상승하자 엔진 속도가 줄면서 멈추었는데 정상상태를 판정하는 COV가 이동평균 데이터에 근거하므로 후행성으로 인해

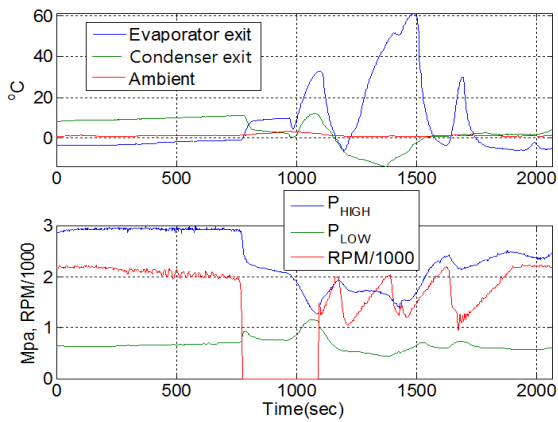


Fig. 7 Test data logged from 20 : 28 on Feb. 20th.

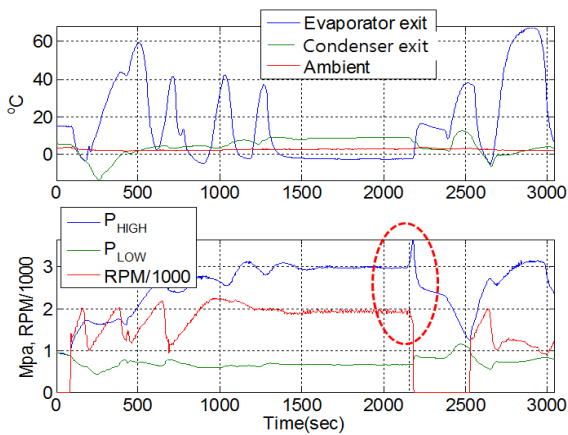


Fig. 8 Test data logged from 15 : 16 on Feb. 20th.

2,000 rpm에서 1,800 rpm으로 저하하는 과정까지는 정상상태로 인식되어 Fig. 6(c)에서 두 번째 점선 원 부분을 나타내고 있다. 이러한 냉매압의 급상승은 COP 저하를 초래하여 Fig. 6(a)의 두 번째 원으로 표기되어 있다. Fig. 6(b)의 냉매저압에서는 이상현상이 보이지 않은 이유는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 냉매 고압의 급상승 시기에도 냉매저압은 정상을 유지하고 있고 엔진이 꺼진 후에야 엔진 정지 결과로 급상승하였기 때문이다.

불과 20~30초 동안 발생한 냉매고압의 이상급등은 압축기 출구의 냉매 유로가 어떤 이유에 의해 심하게 막혀서 비롯되었으며 저압부분은 증발기 및 어큐뮬레이터 내부에 축적된 액냉매의 증발로 인해 그 반응이 늦어진 것으로 판단된다.

4. 결 론

GHP 냉난방모드 현장 운전데이터를 대상으로 COV 기반 이상검출 분석기법을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정상상태 판별기준으로 적용한 COV 2%는 시각적으로 관찰한 데이터의 정상상태와 높은 상관성을 나타내었다. 반면에 $\pm 3\sigma$ threshold 판별법은 필터 대역이 너무 넓어 비정상 상태까지 포함하였다.
- (2) 이상상태 검출을 위한 전제조건인 정상상태 데이터 DB는 시스템 성능에 지배적인 변수들인 냉매 고압, 냉매 저압 및 엔진속도에 대하여 각각 COV 필터를 적용하여 얻은 교집합으로 구축하였다.
- (3) 정상상태 데이터 DB는 외기온도에 대하여 함수관계를 보였으며 냉매압력은 COP 및 엔진속도보다 운전부하의 영향이 적었다.
- (4) 정상상태 DB 중 COP와 냉매 압력은 외기온도에 대하여 2차 다항식으로 근사되며 다양한 시험조건의 무고장 데이터를 축적하여 얻어진 신뢰구간 폭을 경계선으로 하면 이상검출에 활용할 수 있다.
- (5) 제안된 정상상태 및 이상검출 알고리즘은 설비 내에 별도의 전용 프로세서를 구비하여 처리하거나 메모리에 저장 후 서버로 보내 처리하는 실용화 방안을 고려할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(과제번호 : 2006E CM11P2910-22-3-010).

참고문헌

1. Kim, M., Yoon, S H., Domanski, P. A., and Payne, W. V., 2008, Design of a steady-state detector for fault detection and diagnosis of a residential air conditioner, Int. J. of Refrig., Vol. 31, pp. 790-799.
2. Heywood, J. B., 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill.
3. Isermann, R., 2006, Fault Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance, Springer.