

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.4.333

열펌프의 고장감지 및 진단시스템 구축을 위한 실시간 정상상태 진단기법 개발[§]

김민성^{*†} · 윤석호^{**} · 김민수^{***}

* 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구본부, ** 한국기계연구원 에너지플랜트연구실, *** 서울대학교 기계항공공학부

Technology for Real-Time Identification of Steady State of Heat-Pump System to Develop Fault Detection and Diagnosis System

Minsung Kim^{*†}, Seok Ho Yoon^{**}, Min Soo Kim^{***}

* New and Renewable Energy Department, Korea Institute of Energy Research,

** Dept. of Energy Plant, Korea Institute of Machinery and Materials,

** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received December 26, 2009 ; Revised February 9, 2010 ; Accepted February 10, 2010)

Key Words: Heat Pump(열펌프), Fault Detection and Diagnosis(고장감지 및 진단), Steady-State Detector(정상상태 진단기), Moving Window(이동창)

초록: 고장감지 및 진단(FDD) 시스템의 구축의 기초 연구로 정상상태 진단기에 대한 연구를 수행하였다. 정상상태에 대한 진단은 시스템 전체를 관찰하거나 몇몇 필요한 시스템 파라미터를 모니터링 함으로써 가능하다. 최적화된 정상상태 진단기를 이용하면 FDD 시스템에서 필수적인 정상운전 시의 기준모델(no fault reference model)을 자가학습을 통하여 적용할 수 있다. 본 연구에서는 가정용 열펌프가 냉방조건으로 작동할 경우에 대해 이동창을 기반으로 7개의 측정값들에 대한 표준편차를 분석함으로써 정상상태 판정을 내리도록 하였다. 정상상태 진단기의 작동의 여부는 실내부하를 조절함으로써 확인하였다. 본 연구를 통하여 열펌프 등의 증기압축 사이클 시스템에 대하여 이동창을 기반으로 한 정상상태 진단기 개발 방법을 제시하였다.

Abstract: Identification of a steady state is the first step in developing a fault detection and diagnosis (FDD) system of a heat pump. In a complete FDD system, the steady-state detector will be included as a module in a self-learning algorithm, which enables the working system's reference model to "tune" itself to its particular installation. In this study, a steady-state detector of a residential air conditioner based on moving windows was designed. Seven representative measurements were selected as key features for steady-state detection. The optimized moving-window size and the feature thresholds were decided on the basis of a startup-transient test and no-fault steady-state test. Performance of the steady-state detector was verified during an indoor load-change test. In this study, a general methodology for designing a moving-window steady-state detector for applications involving vapor compression has been established.

- 기호설명 -

a : 정상상태 다항함수모델 계수
 k : 이동창 내의 표본데이터 수
 n : 시간 인덱스
 T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 v : 분산

x : 측정값
 \bar{x} : 이동창 평균(moving window average)
 Δ : 변수편차
 $\phi^{(m)}$: m 차 회귀 특성변수(regressional feature)
 ψ : 절대습도 [$\text{kg}_{\text{moist}}/\text{kg}_{\text{air}}$]
 σ : 표준편차

하첨자

A : 공기측
C, E : 응축기, 증발기
D : 압축기 토출부

§ 이 논문은 대한기계학회 2008년도 추계학술대회 (2008. 11. 5.-7., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, minsungk@kier.re.kr

- DP : 이슬점
- i : 특성변수(feature) 인덱스
- ID : 실내측
- MW : 이동창 (moving window)
- NF : 정상운전조건 (no-fault condition)
- OD : 실외측
- RH : 상대습도
- sc, sh : 과냉도, 과열도
- UC : 냉매부족조건 (undercharge condition)

1. 서론

정상상태를 파악하기 위한 연구는 그동안 화학 플랜트 공정제어 분야에 주로 적용되어 왔다.^(1~3) 대상 분야로는 모델분석, 최적화, 고장진단 및 제어 등의 다양하였는데, 항공제어나 원자력 플랜트 제어와 달리 동적운전 상태에서의 신뢰성은 큰 문제가 되지 않기 때문에 정상상태에서 각각의 분석을 수행하기 위한 방편으로 진행된 것이다. 열펌프 분야에서는 시스템의 복잡성으로 인해 동특성 적용이 어려우며, 경제성도 확보하여야 하기 때문에 정상상태에서 고장진단이 수행되는 것이 일반적이다.

정상상태에 대한 진단은 시스템 전체를 관찰하거나 단순히 몇몇 필요한 시스템 파라미터를 모니터링 함으로써 가능하다. 실험실에서 진행되는 성능실험의 경우 시스템의 성능 측정만이 목적일 경우가 많으므로 특별히 정상상태 진단에 대한 기법을 도입하지 않고 오랜 시간이 지난 후에 데이터를 획득함으로써 정상상태를 확인할 수 있다. 그러나 그 기간이 충분하지 않고 단지 일부 값만을 관찰할 경우 실질적인 정상상태인지를 보장할 수가 없게 된다. 정상상태 기법은 공조설비의 고장진단에 일반적으로 적용되므로 우수한 고장분석을 위해서는 정상상태 진단기를 잘 개발하는 것이 중요하다. 즉 공조설비에 대한 최적화된 정상상태 진단기는 시스템 상태를 스스로 진단하고 정상운전조건시의 시스템 파라미터를 자동적으로 도출함으로써 각각의 설비에 적합한 맞춤형 고장감지 및 진단(fault detection and diagnosis, FDD) 시스템을 구축할 수 있게 될 것이다.

그동안 공조분야의 연구에서 FDD를 목적으로 몇 가지의 정상상태에 대한 진단기법이 제안되었

다.^(4~7) 기존의 연구들은 FDD 시스템 구축에 주목하여 정상상태 진단기(steady-state detector)에 대한 구체적인 연구는 상대적으로 미약하였다.

2. 정상상태 진단 이론

정상상태 진단기는 노이즈 필터의 개념과 유사하다. 시스템이 정상상태가 아닐 경우, 측정값들은 외란의 영향이나 변화과정에 있으므로 불안정하게 된다. 이러한 불안정한 정도를 정량화하기 위한 특성값으로 분산이나 표준편차가 보편적으로 적용되는데, 이러한 대표값들은 임의로 측정된 신호데이터의 분포를 통계적으로 제시해준다는 점에서 유용하다.

Glass 등(1995)⁽⁴⁾는 기하가중분산(geometrically weighted variance)을 이용하여 공조기(air-handling unit)에 대한 정상상태를 진단하였다. 기본 개념으로 오래된 데이터들은 자동적으로 소멸되도록 1보다 작은 소멸계수(forgetting factor)를 시간에 따라 반복적으로 곱하는 방법을 사용하였는데, 이러한 소멸계수는 시스템의 시간상수를 근거로 하여 정하도록 하였다. 또한 디지털화에 용이하도록 회귀(recursive)형태의 공식을 제공하였다. 증기압축 시스템에 대한 일부 FDD 연구에서 이와 같은 정상상태 진단기법을 적용하기도 하였다.^(5,6)

가장 일반적이고 단순한 정상상태 진단기는 Fig. 1에서와 같이 적절하게 정의된 이동창 내부의 데이터에 근거하여 분석하는 방법이다. 이동창은 윈도우 내부의 데이터 중 가장 오래된 값을 다음 시간에 새 값으로 대체하게 되는데, 이는 로우패스필터(low-pass filter)의 개념과 동일하다. Li(2004)⁽⁷⁾는 이동창 기울기(moving window slope)와 이동창 분산(moving window variance)을 루프탑 에어컨(roof-top air conditioner)의 정상상태 진

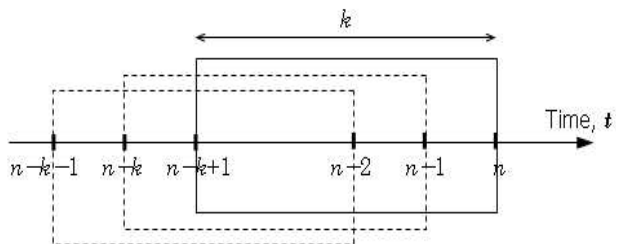


Fig. 1 Moving windows of n sequential data points at k th time

단을 위한 변수로 사용하였다. 본 연구에서는 이동창 표준편차(moving window standard deviation)를 이용하여 정상상태를 진단하도록 하였다. 이동창의 크기와 대상으로 하는 특성값(feature)들의 경계값(threshold)을 최적화할 경우 이동창 표준편차만으로도 고장진단이 가능하다. 이동창에 기반을 둔 방법은 구조가 단순하여 연산부하가 작고 접근이론 자체가 근본적이어 실제 시스템에 적용하기 매우 용이하다.

본 연구의 정상상태 진단기는 회기적으로 표준편차를 계산할 수 있는 알고리즘을 적용하였다.⁽⁸⁾ 현재 시간을 상태 k 로 두면, 가장 최근의 n 개의 샘플데이터에 대한 평균 \bar{x}_k 는 식 (1)로 주어진다.

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=k-n+1}^k x_i \quad (1)$$

현재 상태 k 와 직전 상태 $k-1$ 에서의 n 개의 샘플에 대한 평균값의 차이는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{x}_k - \bar{x}_{k-1} &= \frac{1}{n} \left[\sum_{i=k-n+1}^k x_i - \sum_{i=k-n}^k x_i \right] \quad (2) \\ &= \frac{1}{n} (x_k - x_{k-n}) \end{aligned}$$

식 (2)를 재배열하면 다음의 회귀식과 같다.

$$\bar{x}_k = \bar{x}_{k-1} + \frac{1}{n} (x_k - x_{k-n}) \quad (3)$$

이러한 방법으로 계산된 식 (3)의 좌변항을 이동창 평균이라고 하며, 이는 이동창 내의 최신값과 소멸되는 최초값의 평균편차만큼이 직전 이동창평균과 합으로 나타난다. 이동창 분산과 이동창 표준편차는 각각 식 (4), (5)처럼 정의된다.

$$\begin{aligned} v_k &= \frac{1}{n} \sum_{i=k-n+1}^k (x_i - \bar{x}_k)^2 \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=k-n+1}^k x_i^2 - \bar{x}_k^2 \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= v_{k-1} + \frac{1}{n} (x_k^2 - x_{k-n}^2) - (\bar{x}_k^2 - \bar{x}_{k-1}^2) \\ \sigma_k &= \sqrt{v_k} \quad (5) \end{aligned}$$

정상상태 진단기는 미리 정해진 한계값 안쪽으로 시스템 변수들이 들어오게 되면 정상운전을 판단하게 된다.

3. 정상상태 진단기 개발

3.1 실험장치 및 조건

8.8 kW 공칭용량의 분리형 가정용 열펌프를 설치하고 실험을 수행하였다. 실험장치는 Fig. 2

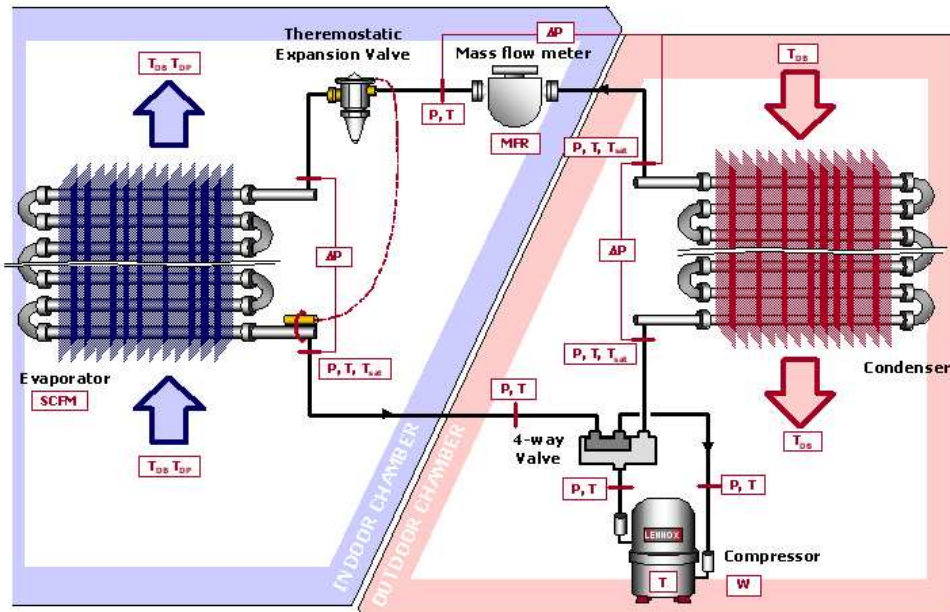


Fig. 2 Schematic diagram of an experimental setup for a residential heat pump in cooling mode

와 같이 실외기 코일, 열팽창밸브, 실내기 코일로 구성되어 있으며, 실내외기 모두 핀-튜브 열교환기 형태이다. 실내기와 실외기 모두 향온향습실에서 설치되었다.⁽⁹⁾ 정상상태 및 기동특성 실험이 수행되었으며, 정상상태 진단기의 성능을 파악하기 위해 실내부하 변동실험도 동시에 수행되었다. Table 1은 실내외 운전조건을 나타낸 것이다. 정상상태 데이터는 시스템이 정상상태에 도달한 지 1시간 뒤에 수집되었으며, 기동특성은 재연성을 확인하기 위해 3회 반복한 결과를 비교하였다. 아울러 고장운전상태에서 정상상태 진단을 파악하기 위한 실험도 수행하였으며, 실내 부하 변동의 급격한 변동에 따른 특성 관찰을 위하여 실내 챔버의 고정히터 작동수를 조정하였다.

3.2 정상상태 진단용 측정변수 선정

본 연구에서 적용한 열펌프 사이클은 단순 증기압축 사이클로 온도-엔트로피(T-s) 선도상에서 Fig. 3과 같이 나타난다. 선도는 고압부와 저압부로 구성되어 있으며, 압력수준은 열원이나 열침의 온도에 따라 변하게 된다.

Table 1 Test types and conditions

Test type		$T_{OD}(^{\circ}C)$	$T_{ID}(^{\circ}C)$	$\psi (-)$
NF	Steady state	27.8	26.7	0.003 ~ 0.018
	Startup	27.8	26.7	
UC	ID load change	35.0	15~35	
		35.0	15~35	

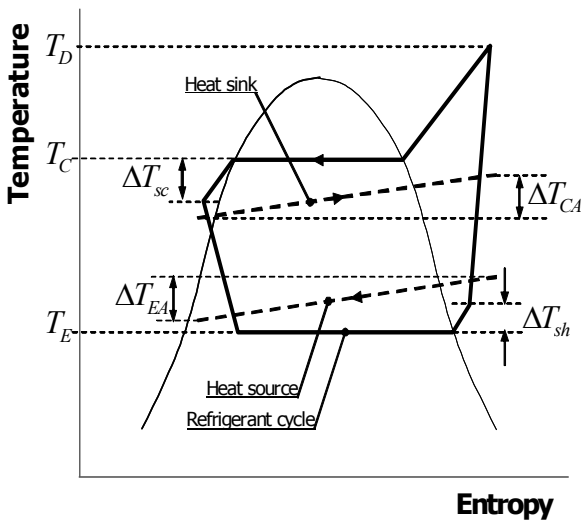


Fig. 3 Typical vapor compression cycle on T-s diagram

운전조건인 실외온도, 실내온도, 실내습도에 따라 시스템의 변화를 대표할 수 있는 특성변수를 Fig. 3에서 제시하였는데, 특성변수에는 냉매 질량유량 등의 값이 포함되는 것이 FDD 과정에서 유리할 것이다. 그러나 센서의 경제성을 감안하여 변수에 포함시키지 않았으며, 대부분 온도센서로 대체할 수 있는 측정값을 특성변수로 선정하였다.

Fig. 3에서 냉매측 변수로 증발기 포화온도(T_E), 과열도(ΔT_{sh}), 응축기 포화온도(T_C), 압축기 토출온도(T_D), 과냉도(ΔT_{sc})이 있으며 공기측 변수로 증발기 입출구 공기온도 하락치(ΔT_{EA}), 응축기 입출구 공기온도 상승치(ΔT_{CA})의 7개이다. 비록 상기 7개 변수만으로는 열교환기 내의 압력강하 등 작은 변화에 대한 예측은 어려운 것이 사실이나, 최소의 센서로 시스템 운전상태를 파악하기 위해서는 적절하다고 하겠다. 실제 FDD 시스템에서도 위의 변수만으로도 상당 수의 고장에 대한 예측이 가능하다.⁽⁵⁾

증발기와 응축기의 포화온도는 설치된 압력센서의 측정값을 REFPROP 7⁽¹⁰⁾을 이용하여 온도값으로 변환하였다. 이 경우 온도센서를 직접 이용하는 경우보다 포화온도의 불확실도(uncertainty)는 상당히 줄일 수 있으나 비용 부담이 상대적으로 큰 압력센서를 사용하게 되는 문제점이 있다. 그러나 압력센서의 가격도 정확도에 따라 최근 상당히 하락하고 있으며, 비록 온도센서를 쓸 경우도 냉매가 2상영역으로 추정되는 열교환기의 중간부분에 부착함으로써 실측도 가능하다. 이 경우 불확실도는 증가하나 가격이 우선적인 측면이라면 충분히 고려할 수 있으며, 본 연구에 제시되는 알고리즘을 재적용하면 이에 대한 최적화도 가능하다. 온도 실측에는 모두 T-형 열전대를 이용하였다.

Table 2에는 각 특성변수에 온도센서를 나타내었다. 온도측정에는 0.5°C 오차의 T형 열전대 사

Table 2 Feature variations¹ at steady state

Features	ΔT_{sh}	ΔT_{sc}	2T_E	T_D	2T_C	ΔT_{CA}	ΔT_{EA}
Range(°C)	0.49	0.22	0.14	0.25	0.17	0.27	0.25
σ (°C)	0.124	0.052	0.024	0.058	0.035	0.063	0.058

¹ Temperature accuracy (T-type thermocouple) is $\pm 0.5^{\circ}C$.
² Based on pressure transducer with $\pm 0.25\%FS$ accuracy, temperature accuracy is estimated within $\pm 0.14 \sim 0.24^{\circ}C$

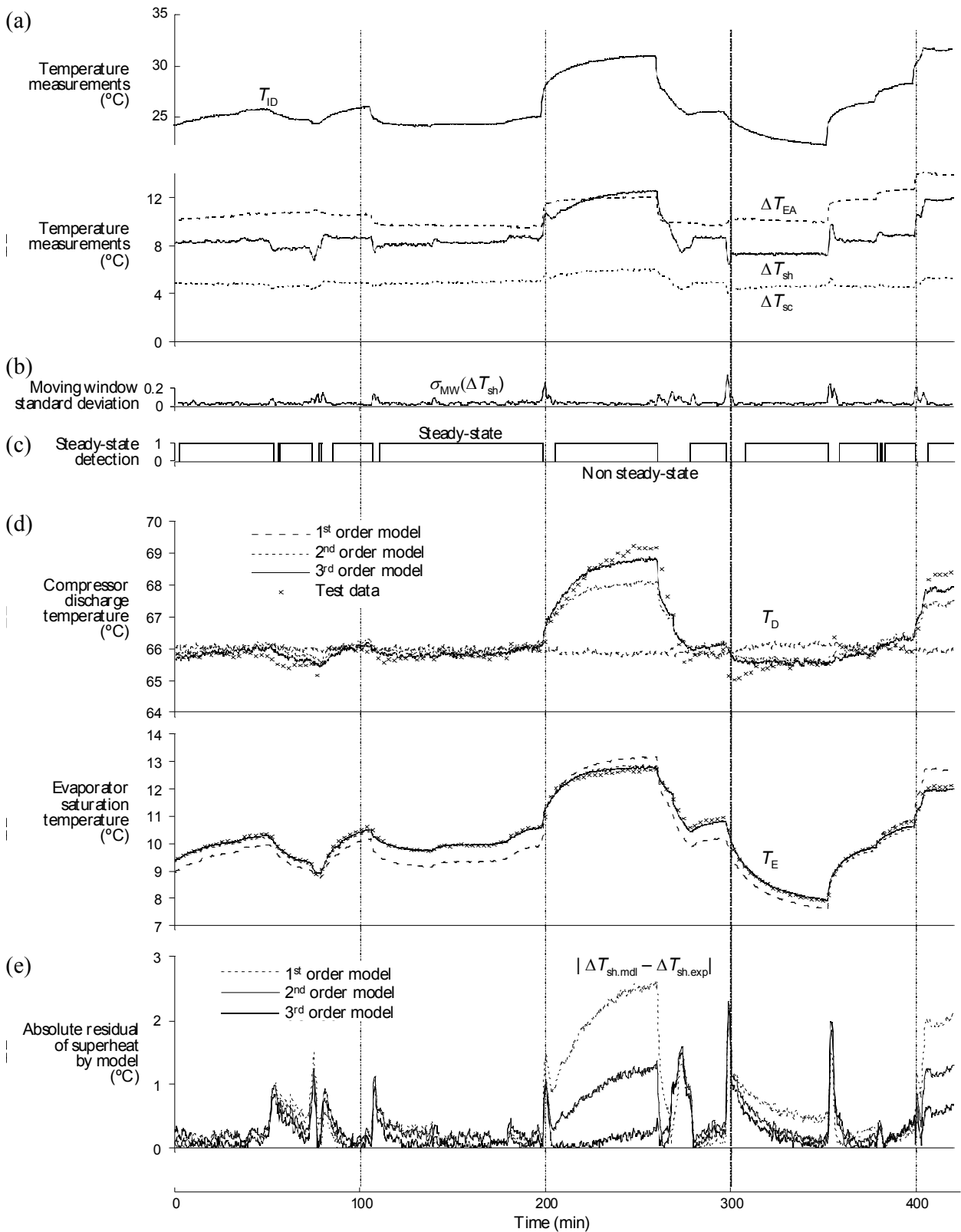


Fig. 4 Performance of MPR models to predict features during a sample operation period (a) T_{ID} , ΔT_{EA} , ΔT_{sh} , and ΔT_{sc} (b) Moving window standard deviation of ΔT_{sh} (c) Steady-state identification; (d) MPR model of 1st, 2nd, and 3rd order tracking real-time measurements of T_D and T_C (e) Absolute residuals of ΔT_{sh} by MPR models

용하였으며, 압력측정은 최대 3,450 kPa, 정밀도 $\pm 0.25\%$ FS의 절대압계를 사용하였다. 압력을 온도로 환산할 경우의 정밀도는 R410A 기준으로 10~40°C의 포화온도범위에서 $\pm 0.14 \sim 0.22^\circ\text{C}$ 이다.

3.3 경계값(threshold)의 선정

각 변수에 대한 경계값은 정상상태의 성능을 제한하는 중요한 변수이다. 경계값이 작을수록 정상상태 진단기의 정밀도는 상승하지만, 많은 유용한 데이터가 손실될 수 있다. 실제로 변수의 불확실도는 온도에 따른 영향성이 있기 때문에 경계값을 작게만 설정하는 것은 이러한 영향성에 따라 데이터를 수집하는 범위를 지나치게 제한하는 오류를 범할 수 있다. 반면에 과도하게 큰 값을 적용한다면 정상상태와 크게 떨어진 상태가 포함될 경우가 있는데, FDD 시스템 자체의 신뢰성을 떨어뜨릴 우려가 있다. 따라서 적절한 크기의 경계값을 선정하는 것이 비정상 운전상태를 걸러내고 아울러 효율적인 FDD 시스템을 구축하는데 효과적이다.

경계값을 정하기 위하여, 3시간 가량 고도의 정상상태로 유지된 값들을 1시간 동안 모니터링 하였다. 이 값들은 실내의 운전조건이 고정된 상태에서 기동 후 3시간 뒤에 기록되었다. 수집된 자료로부터 분석된 표준편차를 기준으로 경계값을 설정하였으며, 과열도의 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. Table 2에는 각 변수에 대한 정상상태에서의 표준편차를 정리하여 나타내었다.

이러한 표준편차를 이용하여 정상상태 진단기의 경계값을 제시하게 되는데, 각 분포가 정규분포임을 가정할 경우 정상상태의 표준편차 값의 99% 정도의 영역 이내에 표준편차가 들어올 경우 정상상태로 가정하도록 하였다.

3.4 정상운전시의 기준모델 선정

정상상태 진단기를 이용하여 정상상태가 판정되고 난 후, 모델을 학습하도록 하였다. 실내의 온도를 임의대로 변경시키면서 3일동안 데이터를 학습시켰는데, 이 때의 학습조건에 맞는 값으로 선정된 운전조건들을 바탕으로 다음 식의 다항함수 형태로 모델을 제시하였다. 이 때, 실내온도, 실내이슬점온도, 실외온도를 독립변수의 형태로 7개의 특성값을 함수화 시키도록 하였다. 식 (6a), (6b), (6c)는 각각 1차, 2차, 3차 다항함수 형태의

기준값(multivariate polynomial reference, MPR)에 대한 예측값을 산정하기 위한 기준 모델(no-fault model)이다.

$$\phi_i^{(1)} = a_0 + a_1 T_{OD} + a_2 T_{ID} + a_3 T_{DP} \quad (6a)$$

$$\phi_i^{(2)} = \phi_i^{(1)} + a_4 T_{OD}^2 + a_5 T_{ID}^2 + a_6 T_{DP}^2 + a_7 T_{OD} T_{ID} + a_8 T_{ID} T_{DP} + a_9 T_{DP} T_{OD} \quad (6b)$$

$$\phi_i^{(3)} = \phi_i^{(2)} + a_{10} T_{OD}^3 + a_{11} T_{ID}^3 + a_{12} T_{DP}^3 + a_{13} T_{OD} T_{ID} T_{DP} + a_{14} T_{OD}^2 T_{ID} + a_{15} T_{OD} T_{ID}^2 + a_{16} T_{ID}^2 T_{OD} + a_{17} T_{ID}^2 T_{DP} + a_{18} T_{DP}^2 T_{OD} + a_{19} T_{DP}^2 T_{ID} \quad (6c)$$

상기의 모델을 기준으로 잔차(residual)를 제시할 수 있는데, 측정값에서 기준값의 편차로 정의된다. Fig. 4에 실제 측정된 변수들 중 독립변수의 변화에 따른 정상상태 진단 상황을 나타내었다. Fig. 4(a)는 실내온도, 과열도 및 과냉도, 증발기 공기온도 하락치 변화에 대한 실시간 측정된 그래프를 나타내었다. Fig. 4(b)에는 과열도에 대한 이동창 표준편차를 나타내는데, 변화가 급격히 일어날 경우에 그 값이 상대적으로 크게 나타나며, 이 때 Fig. 4(c)에서와 같이 정상상태 진단기는 0의 값을 반환하게 된다. 이후 Fig. 4(a)의 값들이 일정범위 이내에서 안정화되면 정상상태로 진단하고 1의 값을 반환한다.

Fig. 4(d)에는 1차, 2차, 3차원 다항모델의 압축기 토출온도 및 증발기 포화온도에 대한 평가 예측성능을 제시한 것이다. 모델의 차수가 높을수록 정밀도가 높아지는 것을 알 수 있는데, 증발기 포화온도는 비록 1차원 모델이라도 비교적 잘 추종하는 것을 볼 수 있으며 2차원 모델이면 충분히 잘 예측할 것으로 예상된다. 그림에서 확인할 수 있듯이 증발기 포화온도가 압축기 토출온도보다 운전조건에 대한 선형성이 상대적으로 우수함을 알 수 있다. Fig. 4(e)에는 전체 7개 특성변수 중 가장 비선형성이 큰 과열도에 대한 잔차를 나타내었다. 전체 과열도의 수준이 7°C 정도 임을 고려할 때 그 편차가 모델에 따라 상당히 큼을 알 수 있으며, 3차원 모델로 적용하는 것이 바람직할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 FDD 시스템 구축을 위한 기본

작업으로 가정용 열펌프가 냉방조건으로 작동할 경우에 대해 정상상태 진단기를 개발하였다. 이 동찰을 기반으로 7개의 측정값들에 대한 표준편차를 분석함으로써 정상상태 판정을 내리도록 하였다. 정상상태 진단기를 이용하면 FDD 시스템의 적용에 있어 가장 어렵게 생각되는 정상운전시의 기준모델(no fault reference model)의 개발에 적용될 수 있다. 이를 위하여 신뢰성 있는 정상상태 진단기의 개발은 매우 중요하며, 이러한 작업이 충실히 뒷받침 되어야만 신뢰성 있는 FDD 시스템이 구축될 수 있을 것이다.

본 논문에서 제시된 일련의 프로세스는 FDD 과정에 있어 일련의 예비작업(preprocessing)으로 분류될 수 있는데, 현재 후속연구로 정상상태 진단기를 포괄한 전체 FDD 시스템의 구축을 진행하고 있다. 향후 운전특성이 다를 것으로 예상되는 난방운전에 대하여 동일한 방법론을 확대, 적용할 예정이다.

후 기

본 연구는 미국국립표준기술연구소(NIST)의 Piotr A. Domanski 박사와 W. Vance Payne 박사의 도움으로 수행되었으며 이에 감사드린다.

참고문헌

- (1) Mahuli, S. K., Rhinehart, R., Riggs, J. B., 1992, "Experimental Demonstration of Non-Linear Model-Based in-Line Control of pH," *J. of Process Control*, Vol. 2, No. 3, pp. 145~153.
- (2) Cao, S., Rhinehart, R., 1995, "An Efficient Method for on-Line Identification of Steady State," *J. of Process Control*, Vol. 5, No. 6, pp. 363~374.
- (3) Jiang, T., Chen, B., He, X., and Stuart, P., 2003, "Application of Steady-State Detection Method Based on Wavelet Transform," *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 569~578.
- (4) Glass, A. S., Gruber, P., Roos, M., and Tödtli, J., 1995, "Qualitative Model-Based Fault Detection in Air-Handling Units," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 15, No. 4, pp. 11~22.
- (5) Rossi, T. M., 1995, "Detection, Diagnosis, and Evaluation of Faults in Vapor Compression Cycle Equipment," Ph.D. Dissertation, Purdue Univ., West Lafayette, IN, USA.
- (6) Breuker, M. S., Braun, J. E., 1998, "Evaluating the Performance of a Fault Detection and Diagnostic System for Vapor Compression Equipment," *Int. J. of HVAC&R Research*, Vol. 4, No. 4, pp. 401~425.
- (7) Li, H., 2004, "A Decoupling-Based Unified Fault Detection and Diagnosis Approach for Packaged Air Conditioners," Ph.D. Dissertation, Purdue Univ., West Lafayette, IN, USA.
- (8) Kim, M., Payne, W. V., Domanski, P. A., and Yoon, S. H., 2008, "Design of a Steady-State Detector for Fault Detection and Diagnosis of a Residential Air Conditioner," *Int. J. of Refrigeration*, Vol. 31, No. 5, pp. 790~799.
- (9) Kim, M., Payne, W. V., Domanski, P. A., and Hermes, C. J. L., 2006, "Performance of a Residential Heat Pump Operating in the Cooling Mode with Single Faults Imposed," NISTIR 7350, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.
- (10) REFPROP version 7.0, 2002, "Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties," NIST Standard Reference Database 23, Gaithersburg, MD 20899, USA.