

## 가정용 열펌프 시스템의 정상냉방 운전조건에서 기준모델에 의한 잔차의 통계적 분석<sup>§</sup>

김민성\* · 윤석호\*\* · 백영진\*†

\* 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구본부, \*\* 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부

### Statistical Analysis on Residuals from No-Fault Reference Models of a Residential Heat Pump System in Normal Cooling Operation

Minsung Kim\*, Seok Ho Yoon\*\* and Young-Jin Baik\*†

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

\*\* Energy Plant Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received May 14, 2011 ; Revised September 22, 2011 ; Accepted September 23, 2011)

**Key Words:** Heat Pump(열펌프), Uncertainty(불확실도), Fault Detection and Diagnosis(고장감지 및 진단), Steady-State(정상상태), Statistical Analysis(통계적 분석)

**초록:** 열펌프의 고장감지 및 진단을 위하여 측정값에 대한 분석은 필수적이다. 열펌프의 고장감지는 열전대 등의 온도센서로 수행되는데, 재연성과 센서자체의 오차에 의해 시스템의 정상상태 측정값들은 통상 백색 노이즈의 형태로 존재한다. 고장감지 및 진단시스템을 구축하기 위하여 이상적인 정상상태를 정의하는 기준모델을 추출하게 되는데, 실제 측정값과 모델에 의한 기대값은 수학적 편차, 즉 잔차가 필연적으로 존재하게 된다. 이러한 잔차는 운전조건에 따라 변화하며, 다양한 불확실도를 포함한 확률분포를 갖게 된다. 본 연구에서는 온도센서를 활용하여 정상상태 진단을 수행하고 이를 기반으로 기준모델을 도출하였다. 이후 실측값과 기준모델과의 잔차를 통계적으로 분석하여 고장여부를 판단하는 경계값을 산출하였다. 본 분석에 의하여 열펌프의 고장감지 및 진단시스템의 개발을 위한 불확실도와 경계값을 통계적으로 계산함으로써 진단결과의 확률적 신뢰성을 보장할 수 있는 방법론을 제공하였다.

**Abstract:** To approximate the threshold of the fault detection and diagnosis (FDD) system, validation of the measurements is mandatory. Naturally, the system shows uncertainties due to measuring sensors - mostly thermocouples or RTDs - and due to repeatability. The uncertainty of a thermocouple comes from natural variation or a drift of the thermocouple measurement. Considering the natural variation behaves like zero-mean white noise, its natural variation can be characterized closely by the steady-state standard deviation. However, residuals between measurements and no-fault references in FDD systems show a statistical distribution with various uncertainties. In this paper, steady-state variations of measurement residuals were investigated by utilizing built-in temperature sensors in a heat pump for the model development and the final application.

- 기호설명 -

$a$  : 기준모델 다변수 함수 계수  
 $k$  : 표준신뢰구간  
 $n$  : 이동창 내 샘플 개수  
 $r$  : 잔차  
RH : 상대습도

$t$  : 표준표본변수  
 $T$  : 온도 (°C)  
 $\Delta T$  : 온도차  
 $w$  : 절대습도  
 $x$  : 측정값

그리스문자

$\alpha$  : 위험률  
 $\varepsilon_i$  : 경계값(threshold)  
 $\phi^{(n)}$  :  $n$ 차 다변수 기준모델 특성변수  
 $\mu$  : 표본평균

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회(2011. 5. 12.-13., 롯데부여리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, twinjin@kier.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

$\sigma$	: 표준편차
하첨자	
C	: 응축기 냉매측
CA	: 응축기 공기측
D	: 압축기 토출
DP	: 실내이슬점
E	: 증발기 냉매측
EA	: 증발기 공기측
$i$	: 특성변수 인덱스
ID	: 실내
Model	: 기준모델
MW	: 이동창(moving window)
NF	: 정상운전(no-fault), 무고장상태
OD	: 실외
Repeat	: 재연성
sc, sh	: 과냉도, 과열도
SS	: 정상상태

## 1. 서론

에너지설비의 효율을 높이기 위한 연구는 공학 부문에 있어 중요한 화두이다. 주요 에너지소비 기기인 열펌프에 대한 효율향상을 위한 연구도 지속적으로 추진되어 왔다. 이에 국내외의 많은 연구들이 열펌프의 기본 구성요소와 통합시스템의 효율향상에 심혈을 기울여 왔으며, 현재 상당한 수준의 기술적 성취가 이루어져 왔다.

그러나 새로운 제품의 개발과는 달리 설치된 열펌프의 유지관리에는 많은 노력이 기울여지지 않았음이 부각되고 있다. 미국에서 진행된 조사에 의하면 90%이상의 열펌프에서 고장이나 성능저하가 발견되었으며, 특히 약 60%는 냉매누설과 같은 단순한 유지보수에 의해 수정될 수 있는 오류로 보고하였다.<sup>(1)</sup> 대형 상가에 설치되는 지붕형 에어컨의 경우 평균적으로 설계성능 대비 80%의 수준에서 운전되고 있는 것으로 조사되었다.<sup>(2)</sup>

많은 화학플랜트나 정밀기계, 항공기계 등의 시스템에 비해 상대적으로 열펌프의 진단에 대해서는 연구가 부진하였다. 이는 비록 열펌프가 부분적인 성능저하나 고장에 의해 설계성능을 발휘하지 못한다고 해도 현장에서는 대부분 부분부하 운전 상태일 경우가 많으며, 정격부하운전 상태

라고 할지라도 실제 사용자가 체감하는 쾌적함의 범위가 넓음에 기인할 수 있다. 그러나 미국국립표준연구소(NIST)의 보고에 의하면 공조설비에 대한 적절한 유지보수만 있어도 약 1~2%의 전체 에너지 절감이 가능한 것으로 추정되었는데,<sup>(3)</sup> 이는 공조설비의 보급이 거의 포화수준에 도달한 국내의 시스템을 고려할 때 상당한 에너지를 절감할 수 있음을 시사하고 있다.

최근 이와 같은 노력의 일환으로 열펌프 시스템의 고장감지 및 진단(FDD, fault detection and diagnosis)에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔는데, 열펌프 자체의 복잡성으로 인해 정상상태에서 고장진단이 수행되는 것이 일반적이다.<sup>(2,4)</sup> 비록 동적상태에서 진단이 가능하다고 하여도, 기본적인 동특성의 분석은 전후의 정상상태 변화를 기준으로 분석되는 것이 일반적이므로 정상상태에 대한 분석작업은 매우 중요하다고 하겠다.

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. 몇몇 연구에서 FDD를 목적으로 정상상태 진단기(steady-state detector)가 개발되어 왔는데,<sup>(5-7)</sup> 최적화된 정상상태 진단기는 시스템 상태를 스스로 진단하고 정상운전조건시의 시스템 파라미터를 자동적으로 도출할 수 있다.

그러나 열펌프 시스템과 같이 장시간 운전되고 운전상태의 변화가 시간에 따라 지속적으로 변화될 경우, 시스템의 상태는 완전한 정상상태가 아닌 준정상상태(metastable)의 상태에 가깝게 된다. 현장에서의 고장진단시에는 낮은 수준의 정상상태도 진단에 필요한 상황이 발생하며, 이 경우 고장진단의 신뢰도를 높이기 위해서 현재 시스템에 대한 기댓값(expectation)과의 편차인 잔차(residual)에 대해서도 확률적 분석이 필요하다.

이에 본 연구에서는 냉방운전중인 가정용 열펌프 시스템이 정상운전(no-fault/normal operation)시 정상상태(steady-state)의 측정값을 분석하고 FDD 시스템에 적용하기 위한 잔차의 통계적 접근을 위한 기초자료를 제시할 수 있는 연구를 수행하였다.

## 2. 열펌프 정상상태 모델

### 2.1 정상상태 진단 및 대상 시스템

본 연구에 사용된 정상상태 진단기는 1차원 로우패스필터를 적용한 것으로 가장 일반적이고 단순한 정상상태 진단기이다. 적절한 시간간격을 이동창(moving window)으로 정하고 측정된 값의 평균과 표준편차를 이용하는 방법인데, 시간에 흐름에 따라 가장 오래된 데이터가 새 값으로 대체하는 방식이다.<sup>(7)</sup>

Fig. 1에는 본 연구에서 실험된 열펌프이다. 2.5 RT용량의 R410A를 사용하는 시스템이다.<sup>(3)</sup> 시스템은 실내외의 공기열교환기와 스크롤압축기, 열감응성 팽창변(TXV)로 구성되어 있으며, 실내외의 항온항습실에서 실험하였다.

### 2.2 특성변수 선정

Fig. 2에는 본 연구의 증기압축사이클을 온도-엔트로피로피선도에 나타낸 것이다. 운전조건인 실외 온도, 실내온도, 실내습도에 따라 시스템의 변화를 대표할 수 있는 특성변수(features)를 제시하였는데, 특성변수는 센서의 경제성을 감안하여 대부분 온도센서로 정하였다. 냉매측 변수로 증발기 포화온도( $T_E$ ), 과열도( $\Delta T_{sh}$ ), 응축기 포화온도

( $T_C$ ), 압축기 토출온도( $T_D$ ), 과냉도( $\Delta T_{sc}$ )이 있으며 공기측 변수로 증발기 입출구 공기온도 하락치( $\Delta T_{EA}$ ), 응축기 입출구 공기온도 상승치( $\Delta T_{CA}$ )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. 온도 실측에는 모두 0.5°C 오차의 T형 열전대를 이용하였다.

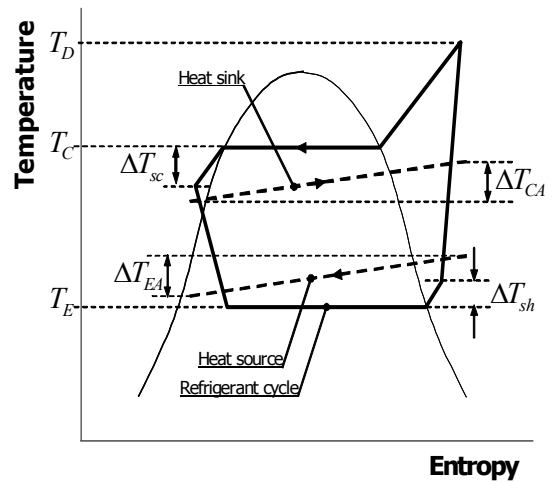


Fig. 2 Temperature-entropy diagram of a vapor compression heat pump system

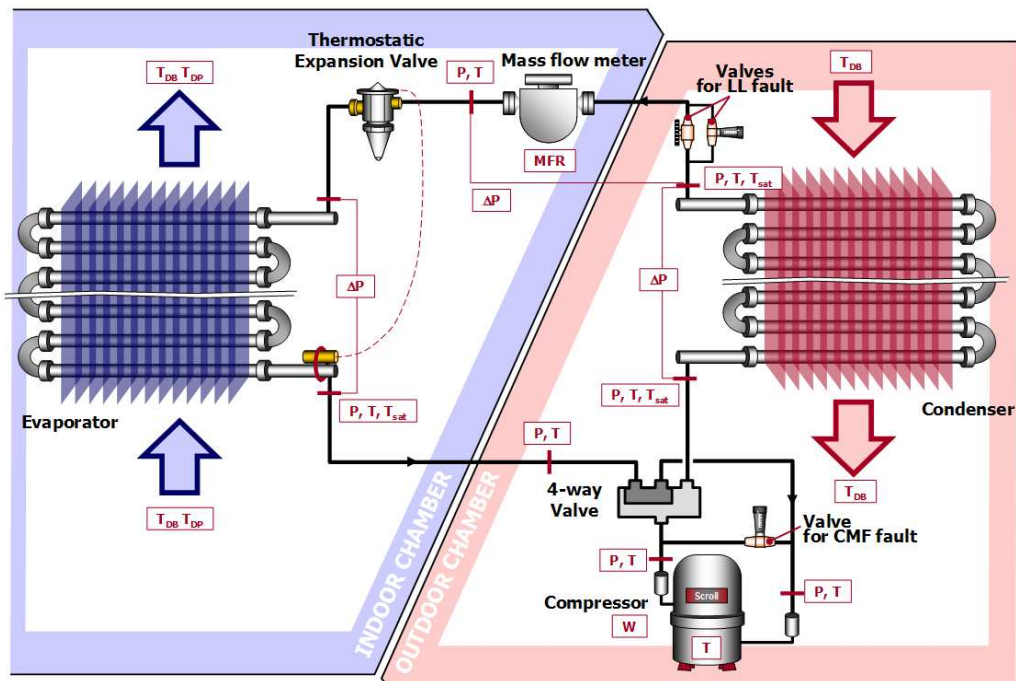


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental setup for a residential heat pump in cooling mode

2.3 정상상태 기준모델

본 연구에서는 실내기와 실외기의 온도를 변화 시키면서 정상상태 진단을 수행하였다. 진단기에서 정상상태로 판정되면 모델을 학습하도록 하였다. 실내온도, 실내이슬점온도, 실외온도를 운전 조건인 독립변수로 하여 7개의 특성값을 식 (1), (2), (3)과 같이 각각 1차, 2차, 3차함수의 다변수 다항함수(multivariate polynomial model, MPR) 형태로 기준모델을 유도하였다.

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

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

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

상기의 모델을 기준으로 각 특성변수에 대한 잔차(residual)를 제시할 수 있는데, 식 (4)에서와 같이 측정값에서 기준값의 편차로 정의된다.

$$r_i = x_i - \phi_i \quad (4)$$

잔차가 정의되고 나면 FDD 시스템에서는 고장을 진단하는 경계값과 잔차를 비교하여 고장여부를 판단하게 되는데, 경계값 설정을 위한 불확실도 분석은 다음장에 기술하였다.

3. 잔차 불확실도 분석

3.1 정상상태 변화 및 재현성에 의한 불확실도

FDD 시스템에서 경계값을 구하기 위하여 측정값 및 잔차에 대한 분석은 필수적이다. 보통 시스템에 대한 오류는 대부분 센서의 불확실도와 측정값의 재현성이 부족함에서 기인한다. 특히 온도센서는 외란과 편향성(drift)이 동시에 나타난다.

외란은 편향성이 0인 백색외란(white noise)처럼 거동하는데, 이러한 백색외란은 단순히 정상상태에서 측정된 표준편차  $\sigma_{i,SS}$ 에 의해 정의될 수 있다. 열전대의 편향성은 통상적으로 센서의 보정에 의해 교정되어야 하는데, 본 연구에서는 모니터링과 분석을 위한 센서가 동일하므로 편향성에 대해서는 무시할 수 있다. Table 1은 정상상태의 백색외란을 측정하기 위한 실험조건을 나타내었다.

한편, 재현성을 측정하기 위하여는 동일한 실험조건에서 반복실험을 수행하여야 하는데, 6개월간의 시간에 걸쳐 Table 2와 같은 정상상태 조건에서의 실험을 반복수행하였다.<sup>(3)</sup>

Table 3은 정상상태 표준편차  $\sigma_{i,SS}$ 를,  $\sigma_{i,Repeat}$ 은 반복실험에 의한 재현성 표준편차를 나타낸다. 실험조건 재현의 영향성은 고려하지 않았다. 이후에 각각의 표준편차는 잔차에 대한 전체 불확실도를 계산하기 위해 사용된다.

3.2 기준모델에 의한 불확실도

대부분의 경우 모든 작동조건을 포괄하는 기준 모델을 얻는 것은 비용과 시간이 많이 들어 매우 어렵다. 따라서 고장진단을 위하여는 설치 후에

Table 1 Test condition of steady-state variation of featured sensors

Independent Features	Conditions
Outdoor temp., $T_{OD}$ (°C)	27.8
Indoor temp., $T_{ID}$ (°C)	26.7
Indoor humidity ratio, $w_{ID}$	0.0037 ~ 0.0168

Table 2 Test condition for repeatability tests at steady-state operation

Independent parameter conditions			Repetition time
$T_{OD}$ (°C)	$T_{ID}$ (°C)	RH <sub>ID</sub> (%)	
27.8	21.1	50	9
27.8	26.7	50	11
37.7	21.1	50	8
37.7	26.7	50	10

Table 3 Standard deviation of the selected features

Units (°C)		$\Delta T_{sh}$	$\Delta T_{sc}$	$T_E$	$T_D$	$T_C$	$\Delta T_{CA}$	$\Delta T_{EA}$
Steady-state standard deviation	$\sigma_{i,SS}$	0.124	0.052	0.024	0.058	0.035	0.063	0.058
	Range	0.49	0.22	0.14	0.25	0.17	0.27	0.25
Standard deviation of repeatability tests	$\sigma_{i,Repeat}$	0.101	0.156	0.084	0.280	0.166	0.088	0.111

**Table 4** Net model uncertainties of the features using the 1st, 2nd, and 3rd order multivariate polynomial reference(MPR) models

Model uncertainties, $\sigma_{i,Model}$ (°C)	$\Delta T_{sh}$	$\Delta T_{sc}$	$T_E$	$T_D$	$T_C$	$\Delta T_{CA}$	$\Delta T_{EA}$
1 <sup>st</sup> order MPR model	0.557	0.244	0.549	0.799	0.179	0.150	0.581
2 <sup>nd</sup> order MPR model	0.328	0.197	0.147	0.319	0.047	0.040	0.131
3 <sup>rd</sup> order MPR model	0.197	0.133	0.123	0.250	0.029	0.019	0.071

**Table 5** Test conditions for reference model tests

Independent Features	Conditions
Outdoor temp. (°C)	27.8, 32.2, 35.0, 37.8
Indoor temp. (°C)	15.3 to 33.9
Indoor humidity ratio	0.0037 to 0.0168

기준모델을 학습하게 된다. 정상상태 오차와 재현성 오차와는 달리 모델 불확실도에 의한 오차는 수학적 모델의 불확실도에 기인한다. 모델이란 실제 현상을 수학적 근사식으로 표현한 것으로 어떤 모델이라도 이러한 불확실도는 존재하게 된다. 이 때, 수학적 모델의 불완전성을 고려하여 모델 불확실도를 정의하는 것이 가능한데, 모델 불확실도는 기준모델과 노이즈 필터링된 현재 측정값의 평균편차(average bias)를 기준으로 모델표준편차  $\sigma_{i,Model}$  를 정의하였다. Table 4는 1, 2, 3차 다항함수 기준모델에 대한 모델표준편차를 나타낸다.

기준 모델 개발을 위한 실험조건은 Table 5에 표시하였다. 실외온도를 27.8, 32.2, 35.0, 37.8°C로 유지하고 각각의 조건에서 8개의 부하조절용 히터를 ON/OFF하여 실내온도와 습도는 가변하였다. 이 경우 히터 가변 초기에는 시스템의 정상상태가 일시적으로 깨어지게 되는데, 2.3절에 설명된 정상상태 진단기에 의해 해당 운전조건은 필터링된다. Table 5에 제시된 실험영역은 히트펌프의 적용처 및 사용자 특성을 고려하여 최대한 넓게 운전영역을 설정하였으며, 이는 고장진단시에 넓은 진단범위를 담보할 수 있다.

실제 정상상태 표준편차( $\sigma_{i,SS}$ )와 모델표준편차는 각각의 잔차를 독립적으로 증폭시키므로 두 불확실도 간에는 상호간의 교호효과(joint effect)가 없는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 두 변수간의 공분산(covariance)는 0이 되며, 정상운전에서의 표준편차  $\sigma_{i,NF}$  는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\sigma_{i,NF} = \sqrt{\sigma_{i,SS}^2 + \sigma_{i,Model}^2} \tag{5}$$

식 (5)에서의 정상상태 표준편차( $\sigma_{i,SS}$ )는 한 측정값에 대한 값을 의미한다. 이동창평균을 적용하였을 경우에 이동창 내의 샘플의 개수  $n$ 에 따라 표준편차는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{i,SS}|_{MW} = \frac{\sigma_{i,SS}}{\sqrt{n}} \tag{6}$$

모델표준편차는 이동창의 크기에 상관없이 동일하므로 이동창평균에 대한 불확실도는 다음 식으로 정의된다.

$$\sigma_{i,NF}|_{MW} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{i,SS}}{\sqrt{n}}\right)^2 + \sigma_{i,Model}^2} \tag{7}$$

표에서  $\sigma_{i,SS}$  는 과열도에 대해 가장 높은 값을 가지며,  $\sigma_{i,Model}$  의 경우 압축기 토출온도가 가장 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 과열도는 기체상태로 존재하여 정상상태의 온도변화가 큰 것으로 예상할 수 있다. 그러나 압축기 토출온도의 경우는 압축기 자체의 높은 열관성으로 인해 극히 완만한 온도상승 시에도 정상상태로 판단하게 되는데,<sup>(7)</sup> 이로 인해 발생하는 모델의 오차가 크게 나타나기 때문이다.

#### 4. 경계값의 결정

앞의 소절에서 정의한 각각의 불확실도를 이용하여 신뢰도에 근거한 경계값(threshold)를 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon_t = \sqrt{\left(k_1 \frac{\sigma_{i,SS}}{\sqrt{n}}\right)^2 + (k_2 \sigma_{i,Model})^2 + (k_3 \sigma_{i,Repeat})^2} \tag{8}$$

이 때  $k_1, k_2, k_3$ 는 각각의 불확실도에 대한 신뢰구간을 정의하게 되는데, 해당하는 불확실도의 분포모델에 따라 결정된다.

4.1 정상상태 불확실도 신뢰구간  $k_1$ 의 결정

본 해석에서는 사전에 정의된 이동창을 기준으로 데이터를 분석하므로,  $n$ 개의 표본평균을 갖는 정규분포의 형태를 가진다. 이 때 표준표본변수  $t$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$t = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i / \sqrt{n}} \tag{9}$$

$\mu_i$ 는 이동창에서의 평균을 나타낸다. 이 경우, 표준표본평균  $t$ 는 자유도가  $n-1$ 인 스튜던트  $t$ -분포(Student's  $t$ -distribution)를 갖는다.  $x_i = \mu_i$ 일

때의 신뢰도가  $1-\alpha$ 일 때, 자유도  $n-1$ 에서의 양측검정 신뢰구간  $t_{\alpha/2, n-1}$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P\left(x_i - \mu_i < t_{\alpha/2, n-1} \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \tag{10}$$

이동창에서의 샘플 개수가 10이고 99%의 신뢰도( $1-\alpha = 0.99$ )로  $t$ 값을 추정할 때,  $t_{0.005, 9}$ 는 3.25이다. 이는 정규분포의 2.58보다 큰 값을 나타낸다. 식 (9)에서 신뢰구간  $k_1$ 를 구할 수 있다. Table 6은 이동창의 크기가 5, 10인 경우 신뢰구간을 나타내었다.

$$k_1 = t_{\alpha/2, n-1} \tag{11}$$

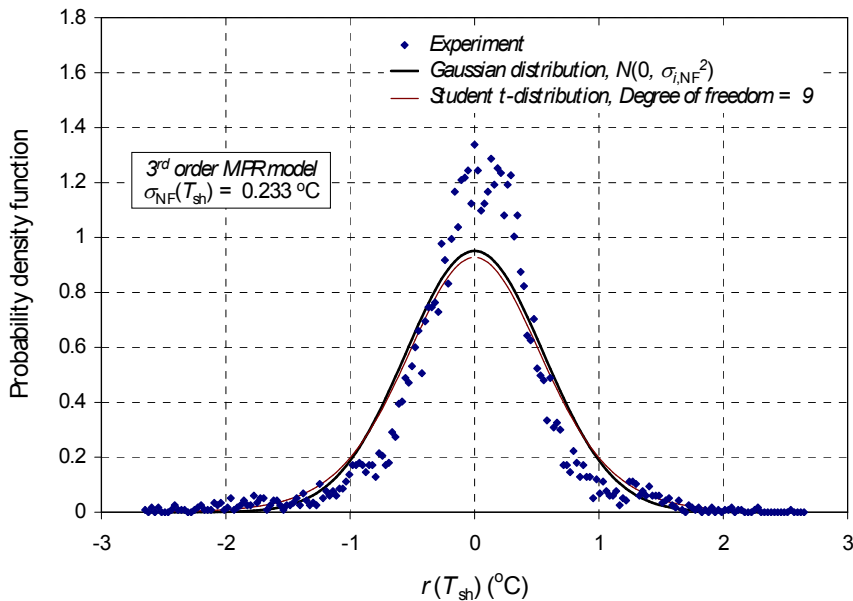
**Table 6** Two-sided confidence intervals with degrees of freedom of four and nine

$1 - \alpha$ (%)	80.0	90.0	95.0	99.0
$\alpha/2$ (%)	10.0	5.0	2.5	0.5
$t_{\alpha/2, 4}$ <sup>1</sup>	1.533	2.132	2.776	4.604
$k_1 = t_{\alpha/2, 9}$ <sup>2</sup>	1.383	1.833	2.262	3.250

<sup>1</sup> 5 sample moving window  
<sup>2</sup> 10 sample moving window

4.2 모델 불확실도 신뢰구간  $k_2$ 의 결정

Fig. 3에서는 과열도에 대한 3차원 다항함수 기준모델에 의한 잔차의 분포를 나타낸다. 그래프에서 보이는 바와 같이 정규분포 가정이 어느정도 잔차의 분포와 유사한 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 잔차는 중심부에 좀 더 좁게 집중되어 분포되어 있으나, 주변부의 분포도 상당히 남아 있는 것으로 파악되어 정규분포가 확률을 낮게



**Fig. 3** Comparison of the distributions of the  $T_{sh}$  residuals from no-fault steady-state data and 3rd order MPR model based on the model root mean square error; Gaussian distribution, student t-distribution, and the calculated distribution from the test data

예측하는 것을 알 수 있다. 실질적으로 주변부의 분포가 신뢰구간의 설정에 더 중요한데, 스튜던트  $t$ -분포가 더 잘 주변부를 예측함을 알 수 있다. 실제 이동창의 샘플수가 정규분포를 형성할 만큼 많지 않은 경우가 대부분이므로 스튜던트  $t$ -분포를 적용하는 것이 논리적으로도 타당하다.

식 (13)에서는 각 특성변수들이 99%의 신뢰구간을 갖는 범위를 나타낸 것인데, 정규분포의 값보다 모두 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다.

Table 7에는 신뢰도( $1-\alpha$ )에 따른 모델의 신뢰구간을 나타내었다.

$$\text{Gaussian: } -2.58 < \frac{r_i}{\sigma_{i,NF}} < 2.58 \quad (12)$$

$$\text{Experiment: } -3.37 < \frac{r(T_{sh})}{\sigma_{NF}(T_{sh})} < 3.37 \quad (13a)$$

$$-3.03 < \frac{r(T_{sc})}{\sigma_{NF}(T_{sc})} < 3.03 \quad (13b)$$

$$-2.96 < \frac{r(T_E)}{\sigma_{NF}(T_E)} < 2.96 \quad (13c)$$

$$-2.65 < \frac{r(T_D)}{\sigma_{NF}(T_D)} < 2.65 \quad (13d)$$

$$-2.63 < \frac{r(T_C)}{\sigma_{NF}(T_C)} < 2.63 \quad (13e)$$

$$-2.64 < \frac{r(\Delta T_{CA})}{\sigma_{NF}(\Delta T_{CA})} < 2.64 \quad (13f)$$

$$-3.22 < \frac{r(\Delta T_{EA})}{\sigma_{NF}(\Delta T_{EA})} < 3.22 \quad (13g)$$

Fig. 3에서 가장자리의 확률분포가 적용하는 산포가  $t$ -분포보다 높은 값을 갖는 것을 알 수 있는데, 경계값을 결정하기 위하여는 이를 고려하여 적절히 넓은 산포를 고려하는 것이 바람직할 수 있다.

**Table 7** Two-sided confidence interval of the seven features for the 3rd order MPR model

$1-\alpha$ (%)		75.0	97.5	99.5
$k_1 = t_{\alpha/2, n-1}$	$\Delta T_{sh}$	1.00	2.26	2.96
	$\Delta T_{sc}$	0.93	2.22	3.37
	$T_E$	1.10	2.06	2.65
	$T_D$	1.15	1.96	2.63
	$T_C$	1.03	2.03	3.03
	$\Delta T_{CA}$	1.14	1.95	2.64
	$\Delta T_{EA}$	0.95	2.16	3.22

**Table 8** Two-sided confidence intervals of Gaussian distribution

$1-\alpha$ (%)	75.0	80.0	90.0	95.0	99.0	99.9
$k_3 = g_{\alpha/2}$	1.156	1.282	1.645	1.960	2.576	3.291

4.3 재현성 불확실도 신뢰구간  $k_3$ 의 결정

임의의 변수에 대한 반복측정은 정규분포를 따르게 된다. 이에 반복적으로 측정된 잔차는 Table 8의 신뢰구간을 추종하게 되며, 신뢰구간은 식 (14)와 같이 결정할 수 있다.

$$k_3 = g_{\alpha/2} \quad (14)$$

4.4 경계값의 결정

4.1절에서 4.3절까지에서 정의된 신뢰구간  $k_1, k_2, k_3$ 를 이용하면 경계값  $\epsilon_i$ 를 구할 수 있다. 먼저 고장진단을 위한 신뢰도를 설정하고 동일한 과정을 거친 후 식 (8)을 적용하면 해당 신뢰도의 경계값을 구할 수 있다.

Table 9(a)와 Table 9(b)는 각각 이동창의 크기

**Table 9** Feature thresholds at different confidence levels for two sample sizes

(a) Moving window of 5 samples

Threshold of the features	$\Delta T_{sh}$	$\Delta T_{sc}$	$T_E$	$T_D$	$T_C$	$\Delta T_{CA}$	$\Delta T_{EA}$
50 % credibility, $\epsilon_{i,0.50}$ (°C)	0.130	0.134	0.092	0.243	0.082	0.064	0.086
95 % credibility, $\epsilon_{i,0.95}$ (°C)	0.496	0.411	0.323	0.755	0.237	0.187	0.271
99 % credibility, $\epsilon_{i,0.99}$ (°C)	0.735	0.574	0.424	0.983	0.313	0.248	0.373

(b) Moving window of 10 samples

Threshold of the features	$\Delta T_{sh}$	$\Delta T_{sc}$	$T_E$	$T_D$	$T_C$	$\Delta T_{CA}$	$\Delta T_{EA}$
50 % credibility, $\epsilon_{i,0.50}$ (°C)	0.131	0.134	0.092	0.243	0.082	0.064	0.086
95 % credibility, $\epsilon_{i,0.95}$ (°C)	0.504	0.413	0.324	0.756	0.239	0.192	0.274
99 % credibility, $\epsilon_{i,0.99}$ (°C)	0.758	0.579	0.426	0.987	0.317	0.265	0.383

가 5개와 10개일 때 50%, 95%, 99% 신뢰도를 가질 때의 경계값을 나타낸다. 신뢰도 변화에 따른 경계값의 크기 변화는 크게 나타났으나, 이동창의 크기에 따른 차이는 작게 나타났다. 이는 정상상태에서 변동성이 모델이나 재연성 불확실도에 비해 상대적으로 작기 때문이며, 이는 모델의 불확실도를 개별적으로 고려하지 않으면 경계값의 결정이 임의적으로 이루어질 수 있다는 점을 반영한다. 이는 Fig. 3에서 확인한 바를 통하여도 알 수 있는데, 모델의 불확실도를 제대로 분석하지 않을 경우에는 진단상의 오류가 발생할 가능성이 커진다. 이에 본 연구에서 산출한 경계값 설정방법이 FDD 시스템 개발에 있어 중요한 역할을 할 수 있음을 알 수 있다.

향후 적용을 위하여는 모델의 불확실도의 분포로 인한 진단오류와 이에 의한 경제적인 손실을 최소화하는 것이 필요하다. 이를 위하여 결정된 경계값에 적절한 안전율을 적용하는 것이 진단상의 오류를 줄일 수 있는 현실적 방법이 될 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 FDD 시스템에 적용하기 위하여 기준모델에 의한 측정값의 잔차에 대한 통계적 분석을 수행하였다. 특성변수에 대한 정상상태를 분석하였다. 백색외란과는 달리 정상상태 불확실도, 재현성 불확실도, 모델 불확실도의 3개의 영향을 분석하였으며, 해당 불확실도를 독립적으로 가정하고 이로부터 주어진 신뢰도에 대한 신뢰구간과 경계값을 유도하였다.

잔차의 분포는 일반적인 정규분포나 스튜던트  $t$ -분포 등과는 차별화 되었는데, 잔차의 크기가 클 수록 확률을 낮게 예측하여 진단상의 오류가 발생할 가능성이 높았다. 이에 실제 FDD 시스템을 구축하는 과정에서 모델 불확실도에는 신뢰구간 값을 넓게 할당하는 것이 바람직하다. 본 분석에 의하여 열펌프의 고장감지 및 진단시스템을 개발하기 위한 경계값 및 진단결과의 확률적 신뢰성을 측정할 수 있는 통계적 접근법을 제공하였다.

## 참고문헌

- (1) Proctor, J., 2004, "Residential and Small Commercial Central air Conditioning; Rated Efficiency isn't Automatic," Presentation at the Public Session. *ASHRAE Winter Meeting*, Jan. 26, Anaheim, CA.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Rossi, T. M., 1995, Detection, Diagnosis, and Evaluation of Faults in Vapor Compression Cycle Equipment, Ph.D. Dissertation, Purdue Univ., West Lafayette, IN, USA.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Kim, M., Yoon S. H., Payne, W. V. and Domanski, P. A., 2010, "Development of the Reference Model for a Residential Heat Pump System for Cooling Mode Fault Detection and Diagnosis," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 7, pp. 1481~1489.