

# 전류정보를 이용한 가변속냉동시스템의 열교환기 실시간 고장 진단

이 동 규, 정 석 권\*

부경대학교대학원 냉동공조공학과, \*부경대학교 기계공학부

## On-line Fault Detection and Diagnosis for Heat Exchanger of Variable Speed Refrigeration System Based on Current Information

Dong-Gyu Lee, Seok-Kwon Jeong\*

Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Busan, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**ABSTRACT:** This study deals with on-line fault detection and diagnosis for heat exchanger of variable speed refrigeration system. Conventional studies about fault of heat exchanger in refrigeration system have used temperature and pressure information. The temperature and pressure are able to be used valuably for faults detection of constant speed refrigeration system. However in case of variable speed refrigeration system, the temperature and pressure are no longer useful information for fault detection due to compensation effect of feedback controller. While current information is possible to detect faults of variable speed refrigeration system. The current information was detected in an inverter, it was used after transforming rms value. The faults of variable speed refrigeration system are divided into electrical faults and mechanical faults. We performed fault detection and diagnosis about heat exchanger among mechanical faults such as condenser fouling and evaporator fan fouling through some experiments.

**Key words:** Fault Detection and Diagnosis(고장 진단), Variable Speed Refrigeration System (가변속냉동시스템), Current(전류), Heat Exchanger(열교환기)

### 기 호 설 명

- $I_{inv}$  : 인버터 전류 [A]
- $I_{mean}$  : 분 단위의 전류 잔차 평균값 [ $W/m^2K$ ]
- $I_d$  : 실시간 측정 전류 [A]
- $I_e$  : 추정된 전류 [A]
- $I_e$  : 추정된 전류 [A]
- $f$  : 인버터 주파수 [Hz]
- $VO$  : 전자팽창밸브 개도 [Hz]

- $T_a$  : 실내 온도 [ $^{\circ}C$ ]
- $T_{cond}$  : 응축 온도 [ $^{\circ}C$ ]
- $T_{SH}$  : 과열도 [ $^{\circ}C$ ]
- $P_{out}$  : 압축기 토출압력 [bar]
- $P_{in}$  : 압축기 흡입압력 [bar]

### 1. 서 론

냉동사이클은 기본적으로 증발기와 응축기 그리고 압축기와 팽창밸브 및 배관으로 구성되어 냉동·공조 산업 분야에 오래 전부터 이용되어 오고 있다. 최근에는 에너지 절약과 효율 향상을

† Corresponding author  
Tel.: 016-562-9185  
E-mail address: ldgamcl@pknu.ac.kr

위해서 인버터로 구동되는 압축기 모터를 가진 가변속냉동시스템(Variable Speed Refrigeration System, 이하 VSRS)이 점차 증가하고 있다. 또한 실외기 1대에 다수의 실내기를 갖는 멀티에어컨 시스템과 같이 시스템이 복잡해지고, 공조 시스템과 냉동 창고 등이 갈수록 대형화, 자동화가 빠르게 진행되어 해당 시스템의 효율과 성능이 향상되고 있다. 반면에 이러한 경향은 시스템 구성 요소 간의 관계를 복잡하게 만들기 때문에 시스템 일부에서 고장이 발생할 경우, 고장 원인 및 발생 지점 등을 파악하기 어렵다. 특히, 고장이 조기에 발견되지 않은 채 장기간 방치될 경우 이로 인해 전체 시스템 가동을 중단시키는 결과를 초래하여 효과적인 고장 복구 조치가 지연됨으로써 경제적으로 엄청난 손실을 초래할 수 있다. 게다가 시스템 일부에 고장이 발생하면 전체 시스템에 영향을 미쳐서 에너지 사용량이 증가하고 시스템의 신뢰성과 안정성 및 실내 쾌적성이 저하한다. 이들 시스템의 신뢰성과 안정성 및 실내의 쾌적성을 확보하고 에너지를 절약하기 위해서 미리 성능 저하를 적절하게 감지하고 고장 발생시 신속하게 처리 가능한 효율적인 고장 검출 및 진단(Fault Detection and Diagnosis, 이하 FDD)은 매우 중요하다.<sup>(1)</sup>

기존의 냉동시스템은 온도와 압력을 이용하여 주로 열부하에 관한 고장 진단이 행해져왔다. 그러나 VSRS의 피드백제어기의 사용으로 인하여 온도와 압력정보는 고장 진단에 유용하지 않게 되었다. 첫째로 압축기 회전수의 변화로 압축기의 운전환경이 열악하게 되었다. 이로 인해 상불평형, 편심결합등 전기적인 고장의 발생이 빈번

해진다. 전기적인 고장은 온도와 압력정보를 이용하여 진단할 수 없다. 하지만 전기적인 고장은 이미 유도전동기분야에서 전류, 진동, 소음등 다양한 방법을 이용하여 고장 진단이 수행되어 졌고, VSRS에 적용이 가능하다. 둘째로 피드백제어기는 고장 발생후 온도 설정값으로 유지하기 위해서 압축기 회전수와 전자팽창밸브 개도를 변경시킨다. 이에 온도와 압력정보는 보상효과를 일으키고, 고장을 진단하는데 있어 불분명한 정보를 제공하게 된다. 하지만 인버터를 사용한 압축기의 전류는 고장 발생 후 열부하의 변동과 피드백제어기의 보상효과에도 불구하고 고장 검출이 가능하다.<sup>(2)</sup>

냉동시스템에 있어서 열교환기는 냉동능력에 결정적인 영향을 준다. 열교환기의 고장은 COP의 하락을 의미하고 심지어 시스템의 정지를 초래할 수 있다. 따라서 본 논문은 VSRS에서의 기계적인 고장 가운데 응축기와 증발기에 관한 열교환기 고장에 대하여 온도, 압력 정보와 전류 정보를 비교함으로써 전류 정보의 유용성을 입증한다. 그리고 전류 정보를 이용한 고장 진단 알고리즘을 설계하고 이에 대해 검증한다.

## 2. FDD 개요

Fig. 1은 고장 진단의 모식도를 나타낸다. 고장 진단은 고장 검출부와 고장 진단부로 크게 나뉜다. 고장 검출부는 실시간으로 측정되는 전류  $I_e$ 와  $f$ ,  $VO$ 의 정보를 이용한 무고장모델(NFM : No Fault Model)의 추정된 전류  $I_d$ 와 비교하여 잔차(residual) 정보를 생성한다. 잔차 정보의 생

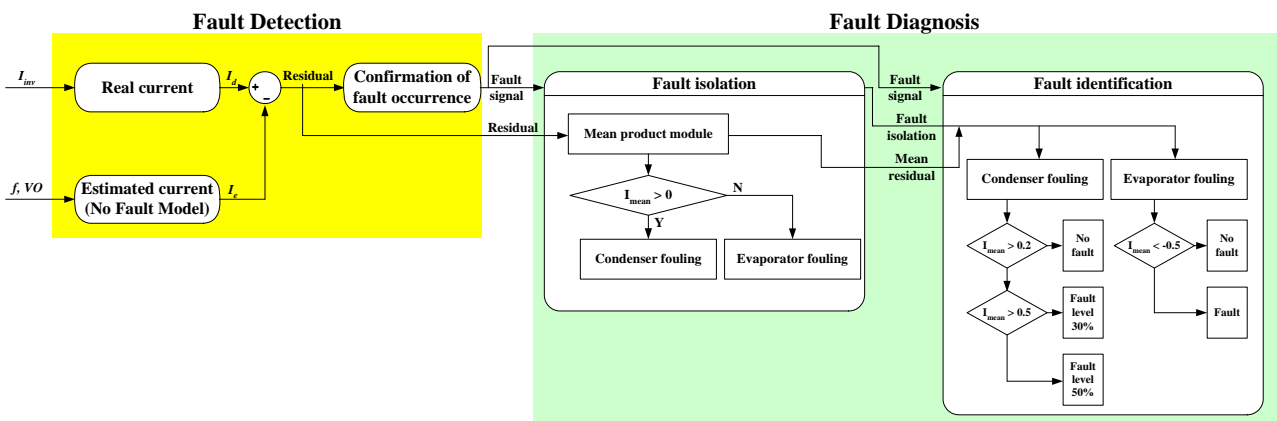


Fig. 1 Schematic Diagram of Fault Detection and Diagnosis

Table 1 Some data of  $I_{rms}$  according to  $f$ ,  $VO$

$f$ [Hz]	$VO$ [%]	$I_{rms}$ [A]
60	80	6.70
	70	6.62
	60	6.58
	50	6.44
50	100	6.93
	90	6.86
	80	6.75
	70	6.72
	60	6.57

성을 위해서 NFM은 필수적으로 필요하다.

Table 1은 NFM을 위한  $f$ ,  $VO$ 에 따른  $I_{inv}$ 의 데이터 가운데 일부분을 나타낸다.  $f$ ,  $VO$  변경 후 정상상태에 도달한 시간부터 전류값을 평균하여  $I_{inv}$ 를 구하였다. NFM을 생성하기 위해 Table 1의 데이터에 의해 독립변수를  $f$ ,  $VO$ , 종속변수를  $I_{inv}$ 로 한 선형회귀분석을 수행하였다.

$$Y = 0.683 - 0.007X_1 + 0.01X_2 \quad (1)$$

식 (1)은 NFM을 위한 선형회귀분석의 결과를 나타낸다. 식 (1)의 독립변수  $X_1$ ,  $X_2$ 는 각각  $f$ 와  $VO$ 이고, 종속변수  $Y$ 는  $I_{inv}$ 이다. 그리고 식 (1)의 회귀식은 93.3%의 결정계수를 가졌다. 고장 검출부에서 잔차 정보는 고장 발생 여부의 확인을 위하여 사용된다.

고장 진단부의 고장 식별 알고리즘과 고장 규명 알고리즘은 응축기 오염과 증발기 팬 고장을

열교환기 고장으로 간주하여 설계되었다. 고장 식별과 고장 규명 알고리즘은 고장 검출부에 의한 고장 신호와 분 단위로 평균된 전류 잔차를 이용하여 고장의 위치와 정도를 진단한다.

고장 식별을 위한 전류 잔차 정보의 패턴은 두 가지이다. 응축기 오염의 경우 냉매의 응축 불량으로 인해 증발기 입구의 온도를 상승시킨다. 따라서 과열도가 줄어들게 되고, 그에 따라 압축기의 부하가 증가하게 된다. 압축기 부하의 증가는 역기전력을 감소시키고, 전류는 증가를 한다. 따라서 응축기 오염의 경우는 전류를 증가시켜 잔차정보를 증가시킨다. 한편, 증발기 오염의 경우는 응축기 오염과 상이한 결과를 가져온다. 증발기 오염은 증발기 팬 고장을 모사하였다. 증발기 팬 고장은 증발기 출구 온도를 감소시킨다. 그로 인해 압축기의 부하가 감소하고 역기전력이 상승하여 전류정보가 감소한다. 따라서 증발기 오염은 잔차 정보가 감소하는 결과를 가져온다.

### 3. 실험장치

Fig. 2는 고장 진단을 위한 실험장치도를 나타낸다. 피드백제어로 퍼지제어기를 사용하여 인버터주파수와 전자팽창밸브 개도를 변화시켰다. 인버터는 V/f=const 제어 타입을 사용했다. 피드백제어기로서 퍼지제어기를 사용하였고, 설정 온도와 과열도는 11°C와 6°C로 각각 설정하여 용량제어와 과열도제어를 독립적으로 구현하였다.<sup>(4)</sup>

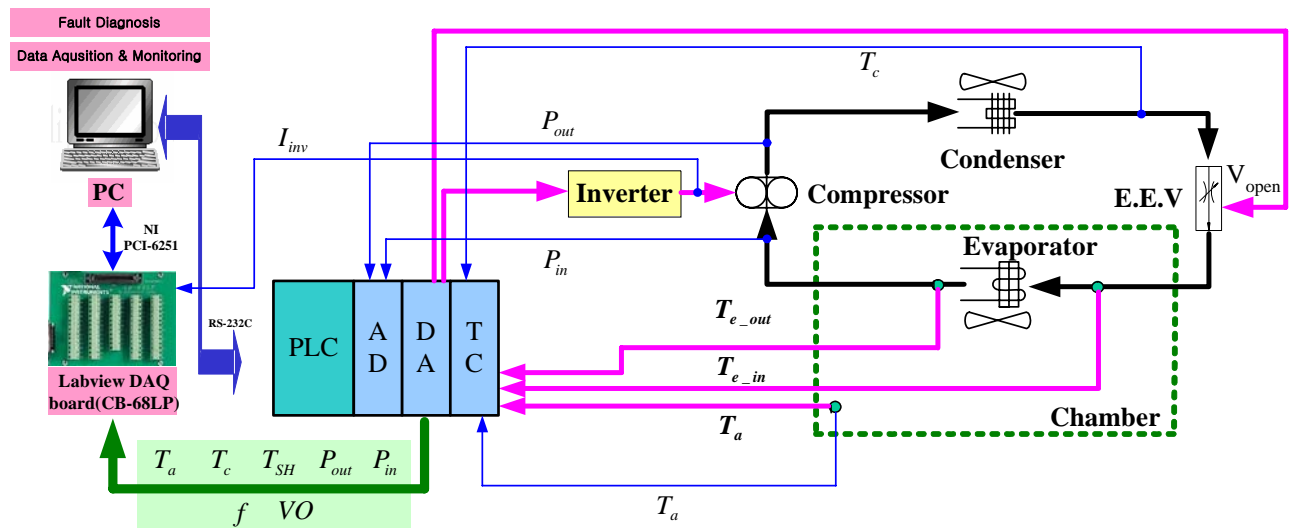


Fig. 2 Composition of experimental equipment for FDD in VSRS

측정된 전류  $I_{inv}$ 는 인버터의 출력인  $u, v, w$  중 한 상에 CT(Current Transformer)를 연결하여 측정하였고, 측정 온도는  $T_a, T_{cond}, T_{SH}$ 로서 T형 열전대를 사용하여 측정하였으며, 압력은  $P_{out}, P_{in}$ 으로서 압력센서를 이용하여 측정하였다.

제어기의 구현을 위해 PLC(Programmable Logic Controller)를 사용하였고, PLC의 열전대모듈에 의해 측정된 온도와 압력은 수치화시켜 DA 변환기의 전류 출력으로 NI terminal board로 전송하였다. 또한 CT를 통하여 NI terminal board로 전송된 전류정보는 저역 통과 필터와 고역 통과 필터를 이용하여 인버터에 의한 리플 정보를 최소화시키고 전류 파형의 실효값을  $I_{inv}$ 의 값으로 설정했다.  $f$ 와 VO는 PLC에서 계산된 지령값으로서 NFM에 의해 추정된 전류 계산에 이용되었다.

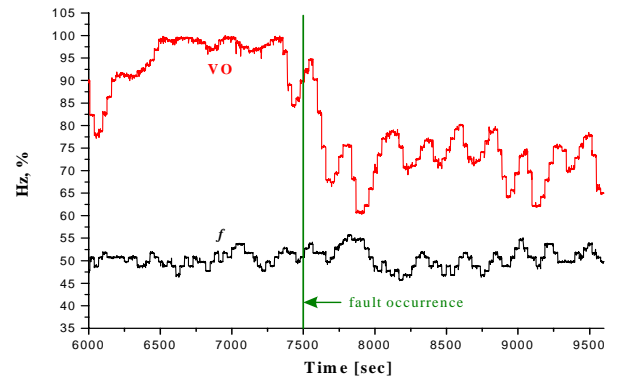
## 4. 실험결과

### 4.1 VSRS의 FDD에서의 전류정보의 이점

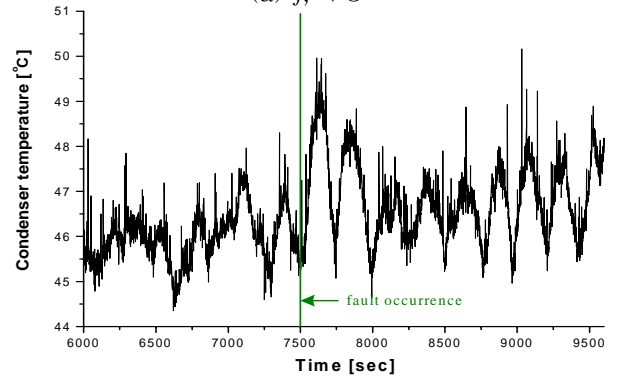
VSRS에서는 피드백제어기를 사용한다. 피드백 제어기는 실내 온도와 과열도를 일정하게 유지하도록 설계되었다. 응축기 전열면적이 감소되면 온도와 압력이 변하게 된다. 이 때 실내 온도와 과열도 역시 변하게 된다. 피드백제어기는 이들 두 값을 일정하게 유지하기 위하여 인버터 주파수와 전자팽창밸브 개도를 변화시킨다. 이는 실내 온도와 과열도만을 일정하게 유지시키는 것이 아니라 다른 온도와 압력 정보에도 보상효과를 일으킨다. 피드백제어기의 보상효과를 확인하기 위해 응축기 전열면적 30%를 7500초 시점에 감소시켰다.

Fig. 3 (a)는 응축기 오염을 모사한 전열면적 30% 감소에 따른 인버터 주파수와 전자팽창밸브 개도를 나타낸다. 고장 모사 후 증발기 입구 온도가 급격히 상승하고, 과열도가 급격히 떨어졌다. 그 결과 피드백제어기에 의해 전자팽창밸브의 개도는 줄어들게 되었다. 인버터 주파수 역시 변화하는 실내 온도를 설정 온도로 유지하기 위해 변화하는 것을 볼 수 있었다.

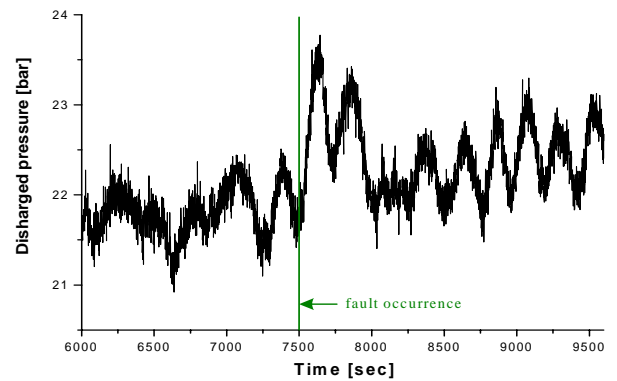
Fig. 3 (b)는 응축기 오염에 따른 응축 온도를 나타낸다. 응축 온도만을 제시한 이유는 응축기 오염에 따라 가장 큰 영향을 받는 온도는 응축



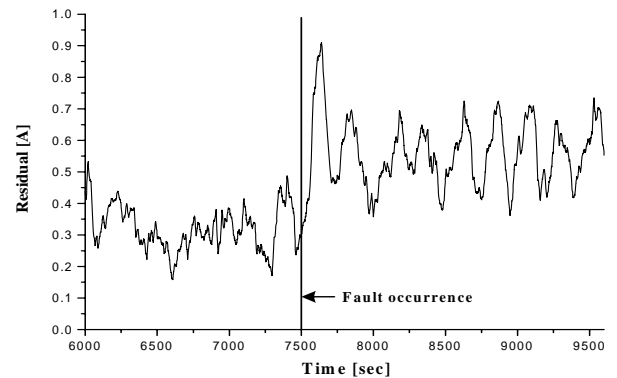
(a)  $f, VO$



(b) Condenser temperature



(c) Discharged pressure



(d) Residual

Fig. 3 The results according to condenser fouling

온도이고, 실내 온도와 과열도는 피드백제어기의 제어대상으로서 계속적으로 변화하기 때문에 고장 진단을 위한 정보로는 의미가 없기 때문이다. 고장 모사 후 응축기는 외부와 열교환을 충분히 하지 못해 응축 온도가 상승하였다. 하지만 피드백제어기의 보상효과로 인하여 그 값이 큰 폭으로 진동하였다. 그리고 8000초 이후에는 고장 전의 온도와 비교하여 큰 차이가 없었다. 또한 온도 정보의 경우 주변 환경에 따라 민감하게 변하므로 Fig. 3 (b)의 결과로써 VSRS의 고장 진단을 위한 온도정보는 신뢰성을 확보하기 힘들다는 것을 알 수 있다.

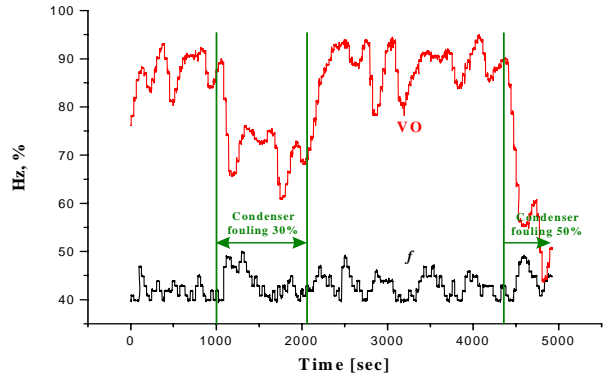
Fig. 3 (c)는 응축기 오염에 따른 압축기 토출압력을 나타낸 것이다. 압축기 흡입압력의 경우 고장 전과 후의 변화가 미미하였다. 하지만 압축기 토출압력은 응축기 오염에 대하여 민감하게 반응하였다. 고장 모사 후 압축기 토출압력은 상승하였으나 응축 온도와 마찬가지로 8000초 이후에는 일정수준으로 유지되는 것을 볼 수 있었다. 압력정보 역시 주변환경에 따라 민감하게 변하므로 VSRS의 고장 진단을 위한 신뢰성을 확보하기 힘들다.

Fig. 3 (d)는 응축기 오염에 따른 전류 잔차를 나타낸 것이다. 전류는 압축기의 부하의 크기에 따라 변화하게 된다. 압축기의 부하는 곧 냉매의 상태와 직결되므로 전류 잔차는 고장 모사 후 상승하고, 온도와 압력과 마찬가지로 보상효과에 의해 일정한 값으로 수렴한다. 하지만 고장 전과 후의 차이가 명확한 것을 알 수 있다. 대략 고장 전후의 평균값은 0.2~0.3[A] 차이가 나지만 전류 정보는 주변 환경에 의해서 쉽게 변하는 성질이 아니므로 충분히 신뢰성을 가질 수 있다.

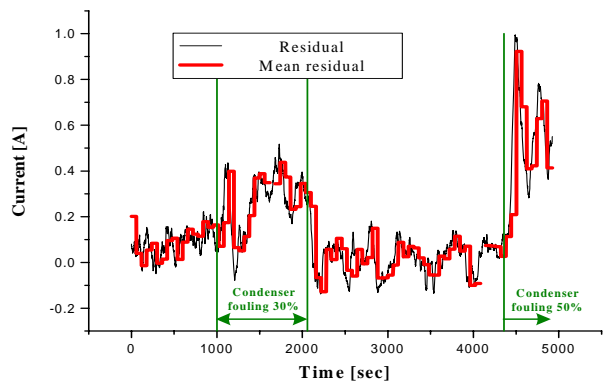
#### 4.2 전류정보를 이용한 VSRS의 열교환기 고장 진단 실험 결과

Fig. 4은 전류정보를 이용한 VSRS의 응축기 오염에 대한 고장 진단 결과이다. 1000~2050초, 4400~4900초에 응축기 전열면적 30%, 50%를 각각 감소시켰다.

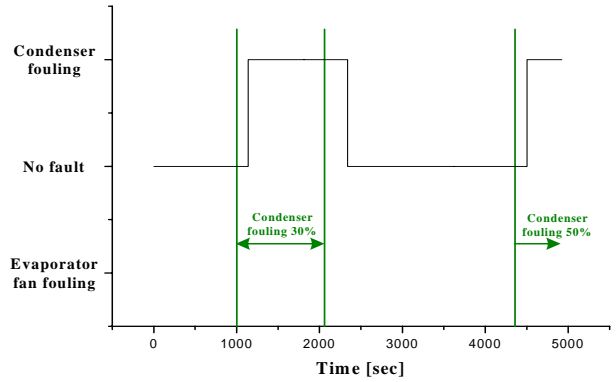
Fig. 4 (a)는 인버터 주파수와 전자팽창밸브 개도의 변화를 나타낸다. 고장의 정도가 클수록 전자팽창밸브 개도가 급격히 감소하고 감소량이 커짐을 알 수 있었다.



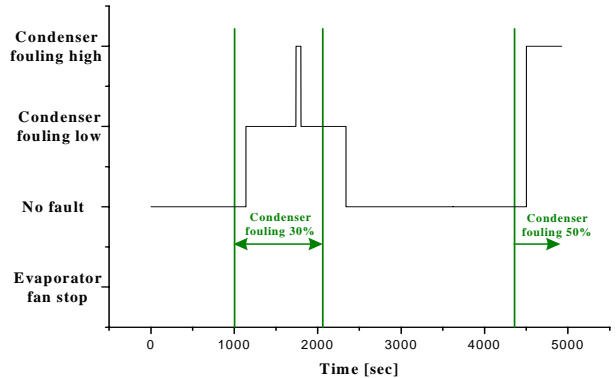
(a) f, VO



(b) Residual



(c) Result of fault isolation



(d) Result of fault identification

Fig. 4 On-line FDD result of VSRS corresponding to condenser fouling

Fig. 4 (b)는 전류 잔차와 분 단위의 전류 잔차 평균값을 나타낸다. 고장의 정도가 커짐에 따라 전류 잔차의 크기가 커짐을 알 수 있었고, 그에 따라 고장 진단에 이용될 전류 잔차 평균값 역시 커짐을 알 수 있었다.

Fig. 4 (c)와 (d)는 고장 식별과 고장 규명 결과를 각각 나타낸다. 고장 식별 결과 고장 모사 후 정확하게 고장을 식별해 내었다. 그리고 고장 규명 결과 역시 고장 모사 후 정확하게 고장의 정도를 판별해 내었다. 하지만 1740초에 한 번 오진을 한 것을 볼 수 있으나 고장 진단의 안정화를 위한 필터설계로 쉽게 해결될 수 있다.

Fig. 4의 결과로서 VSRS의 응축기 오염에 대해 전류정보를 이용하여 고장 진단이 가능함을 알 수 있었다.

Fig. 5은 전류정보를 이용한 VSRS의 증발기 팬 고장에 대한 고장 진단 결과이다. 1150초에 증발기 팬 고장을 모사했다.

Fig. 5 (a)는 인버터 주파수와 전자팽창밸브 개도의 변화를 나타낸다. 증발기 팬 고장 이후 증발기 출구 온도 감소에 의한 과열도 감소로 전자팽창밸브 개도가 줄어들고 실내 온도의 상승에 따라 인버터 주파수가 상승함을 알 수 있었다.

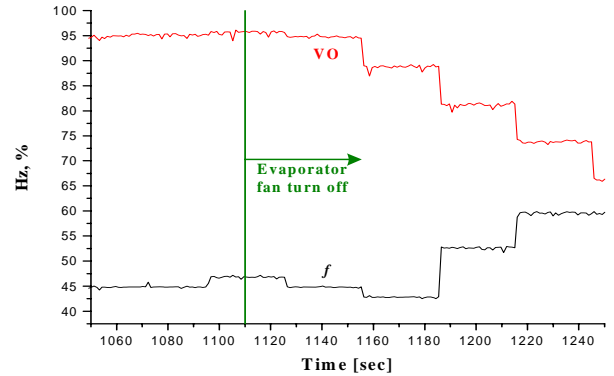
Fig. 5 (b)는 전류 잔차와 분 단위의 전류잔차 평균값을 나타낸다. 증발기 팬 고장의 경우 전류 잔차는 급격한 하락을 보였다. 이는 온도와 압력 정보보다 빠른 정보를 제공함으로써 시스템 손상을 최소화할 수 있다.

Fig. 5 (c)와 (d)는 고장 식별과 고장 규명 결과를 나타낸다. 증발기 팬 고장의 경우 냉동시스템에 큰 무리를 주어 계속적으로 실험을 진행할 수 없었다. 그러나 짧은 시간에도 전류 정보는 고장의 위치와 발생 여부를 정확하게 파악할 수 있음을 알 수 있었다.

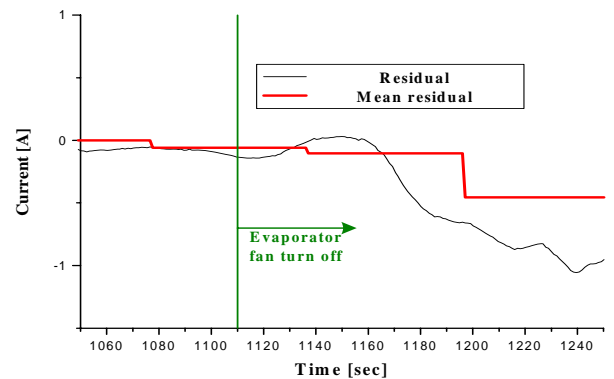
Fig. 5의 결과로서 VSRS의 증발기 팬 고장에 대해서도 전류정보를 이용하여 고장 진단이 가능함을 알 수 있었다.

## 5. 결론

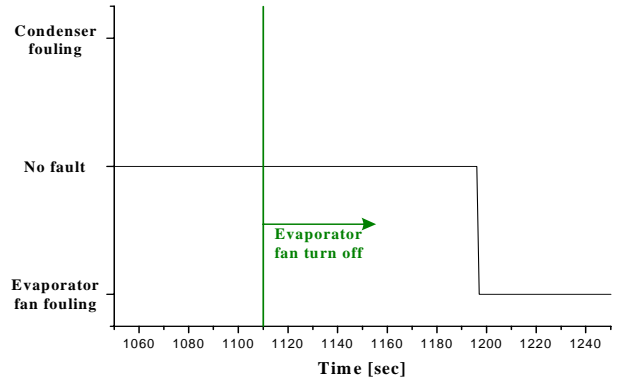
기존에는 냉동시스템의 열교환기에 대한 고장 진단을 위해 온도와 압력 정보를 이용해 왔으나, 최근 가변속냉동시스템의 등장으로 온도와 압력 정보만으로는 정확한 고장 진단이 어렵게 되었



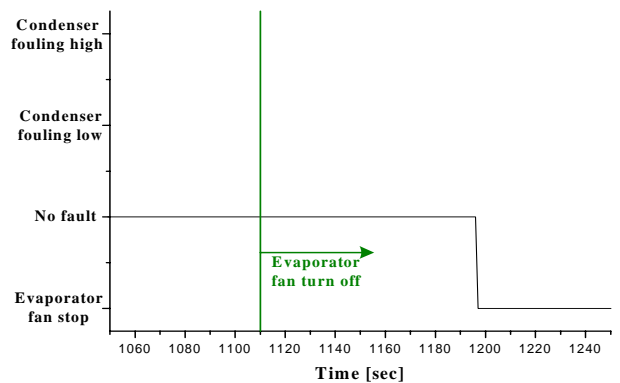
(a) f, VO



(b) Residual



(c) Result of fault isolation



(d) Result of fault identification

Fig. 5 On-line FDD result of VSRS corresponding to evaporator fan fouling

다. 이에 가변속냉동시스템의 열교환기에 대한 실시간 고장 진단에 전류 정보의 활용을 제안하였고, 고장 진단 알고리즘을 소개한 후 그 타당성을 실험으로써 검증하였다.

- (1) 가변속냉동시스템의 응축기 오염을 모사하여 고장진단에 온도와 압력정보보다 전류 정보가 유용함을 보였다.
- (2) 열교환기 고장에 대하여 전류정보를 이용한 고장진단 알고리즘을 보였다.
- (3) 가변속냉동시스템의 응축기 오염과 증발기 팬 고장에 대한 전류정보를 이용한 실시간 고장진단 결과를 보였다.

가변속냉동시스템의 고장 진단에 있어 전류 정보의 활용성은 여기에 그치지 않을 것이다. 온도와 압력 정보를 참조하여 열교환기외의 기계적인 고장까지도 전류 정보는 활용될 수 있다. 뿐만 아니라 온도와 압력 정보로는 불가능한 전기적인 고장도 전류를 이용하면 진단이 가능하므로 가변속냉동시스템의 고장 진단에서 전류 정보는 충분한 가치를 가질 수 있을 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. D. G. Lee, D. G. Koh and S. K. Jeong, 2006, On-line FDD of Condenser Fouling in a Variable Speed Refrigeration System Based on Current Information, Proceed of KSPSE, pp. 150-155
2. J. S. Yoon and S. K. Jeong, 2006, On-line FDD for a Variable Speed Refrigeration System Based on Current Information Analysis of a Compressor, Proceed of SAREK, pp. 434-439
3. T. G. Paek, J. S. Ryu and K. S. Lee, 2002, Real-time FDI Schematic for AC Motor Control Systems, Proceed of IEEE, pp. 77-81.
4. Li Hua, D. W. Lee, S. K. Jeong and J. I. Yoon, 2006, Fuzzy Control with Feedforward Compensator of Superheat in a Variable Speed Refrigeration System, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 369-379.
5. D. Y. Han and H. H. Lee, 2002, Partial Fault Detection of an Air-conditioning System by using the Model-based Method with Data Preprocessing, Proceed of SAREK, pp. 295-300.
6. M. S. Kim and M. S. Kim, 2005, Studies on the Performance Variation of a Variable Speed Vapor Compression System under Fault and Its Detection and Diagnosis, Proceed of SAREK, Vol. 17, No. 1, pp. 47-55.
7. H. I. Shin, S. H. Lee, C. H. Woo, S. J. Kang, H. B. Kim and K. B. Woo, 1997, A Study on Fault Detection and Diagnosis of Induction Motor by Clustering and Fuzzy Fault Tree, Proceed of IIEEK, pp. 173-176.
8. Jafar Zarei and Javad Poshtan, 2006, Bearing fault detection using wavelet packet transform of induction motor stator current, Tribology International, Vol. 40, No. 5, May 2007, pp. 763-769.