



압력맥동과 가속도의 전달함수를 이용한 압축기의 냉매누설불량분류

Compressor Refrigerant Leakage Defect Classification Using Transfer Function between Pressure Pulsation and Acceleration

김 연 우* · 정 의 봉† · 김 태 훈**

Yeon Woo Kim*, Weui Bong Jeong† and Tae Hoon Kim**

(Received May 29, 2018 ; Revised June 28, 2018 ; Accepted July 6, 2018)

Key Words : Compressor(압축기), Transfer Function(전달함수), Refrigerant Leakage(냉매누설), Defect Classification(불량분류), Frequency Analysis(주파수분석)

ABSTRACT

This paper deals with the fault classification using only the surface acceleration of a failed compressor using the relationship between refrigerant pressure pulsation and compressor surface acceleration of a small refrigerant compressor used in a domestic refrigerator. The relationship between the pressure pulsation of the refrigerant flowing in the suction pipe of the normal compressor and the surface acceleration was expressed as a transfer function, and signal processing was performed on the surface acceleration of the defective compressor. Experiments were conducted to verify the ability of the modified surface acceleration to classify the compressor failure. The fault classification performance of the modified surface acceleration was evaluated using Fisher's discriminant ratio. It was confirmed that the fault classification performance of the modified surface acceleration was excellent in the evaluation results. Using the fault classification method proposed in this paper, efficient refrigerant leakage fault classification can be performed at the compressor mass production stage.

1. 서 론

압축기는 과거부터 지금까지 사람의 생활전반에서 널리 사용되어왔다. 만일 다양한 이유로 압축기의 불량이나 발생된 상태로 판매가 된다면 그 피해는 매우 클 것임이 분명하다. 특히 가정용 소형 냉매압축기의 경우 에어컨이나 냉장고에서 사용되므로 소비자에 대한 브랜드 가치와 밀접한 관계가 있다. 따

라서 압축기 제조사들은 압축기의 효율향상과 더불어 압축기의 신뢰성 향상 및 불량률 저감에 큰 관심을 가지고 있다. 이러한 사회적 요구에 맞추어 과거부터 압축기의 불량관별에 대한 다양한 연구가 진행되어왔다. Lee⁽¹⁾는 공기압축기의 진동특성을 분석하고 그 상태를 진단하는 기법을 연구하였다. Yang⁽²⁾은 가정용 소형냉매압축기의 소음과 가속도를 측정하고 인공지능영역을 활용한 압축기의 고장관별법을 제안하였다. AlThobiani⁽³⁾는 wavelet을 사용하여 산

† Corresponding Author ; Fellow member, School of Mechanical Engineering, Pusan National University
E-mail : wbyeong@pusan.ac.kr

* Member, Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University

** Member, LG Electronics Inc.

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

업용 공기압축기 밸브의 고장을 판별하는 법을 제시하였다. Wang⁽⁴⁾은 압축기 외부로 방사되는 소음에서 압축기 밸브의 거동을 예측하고 이를 실제 실험과 대입하여 압축기 밸브의 고장을 판별하는 기법을 제안하였다. Pichler⁽⁵⁾은 압축기에 가해지는 부하를 제어하면서 얻은 압축기의 방사소음을 2-dim-auto-correlation을 이용하여 압축기 밸브고장을 판별하는 기법을 제시하였다. Shin⁽⁶⁾은 상태기반유지보수기법을 사용하여 산업용 대형압축기의 고장진단을 위한 연구를 수행하였다.

그러나 이러한 연구들은 주로 통제된 실험환경에서 취득한 신호들을 사용한 경우가 대부분이다. 따라서 신호를 취득하기 위한 사전준비작업 및 시간에 제한이 없으므로, 설비와 시간에 제한이 있는 양산라인에서의 전수검사에는 적합하지 않을 수 있다.

예를 들면, 일반적으로 냉매압축기의 배관에 흐르는 냉매의 압력맥동은 냉매흡입밸브의 개폐운동에 직접적으로 영향을 받고 있다. 따라서 냉매의 맥동압력의 단순비교, 이를테면 냉매압력맥동의 시간에 따른 변화량을 이용한 고장진단방법은 직관적이고, 신뢰성이 높다. 그러나 냉매맥동신호의 취득을 위하여 압축기를 냉매공급장치에 연결하여야 하고, 압력센서를 삽입하는 등의 큰 어려움이 수반되므로 대량생산라인에서의 전수검사에는 적합하지 않다.

냉장고용 냉매압축기를 대량생산하는 회사의 경우, 연구단계에서는 냉매압력맥동을 사용하여 압축기의 각종 불량을 진단하고 취약점을 개선하는 등의 단계를 거친다. 그러나 양산단계에서는 측정에 용이한 표면가속도신호를 사용하여 불량판별을 수행하고 있다. 그러나 표면가속도신호에는 압축기의 구조적인 특성이 포함되어 측정되므로 시간영역에서 직관적으로 고장을 진단하는 것이 용이하지 않다. 따라서 주파수영역에서 특정 영역의 피크의 변동에 따라 압축기의 불량유무를 판단하는 것이 현실적으로 적용되고 있다. 그러나 여전히 남아있는 압축기의 구조적인 특성으로 인하여 불량검출률은 만족스럽지 못한 수준이다.

냉매압축기에서 측정되는 진동은 압축기 밸브의 개폐운동에서 비롯한 가진력의 영향을 받는다. 따라서 압축기에서 측정되는 냉매의 압력맥동과 압축기의 표면에서 검출되는 표면가속도 사이에는 특정한 관계가 존재한다. 따라서 압축기 시제품에 대하여

미리 한 번만 압력맥동과 표면가속도 사이의 관계를 규명하고, 양산과정에서는 표면가속도만 측정하여 불량판별성능을 향상시킬 수 있다면 제품의 품질관리를 좀 더 쉽게 할 수 있을 것이다.

이 논문에서는 이러한 압축기의 냉매압력맥동과 표면가속도사이의 관계를 전달함수로 표현하고, 이를 바탕으로 압축기의 표면가속도신호만을 이용한 제품의 양산과정에 적합하면서도 신뢰성이 높은 불량분류기법을 제시하고자 한다.

2. 관련 이론

2.1 전달함수를 이용한 수정된 가속도추정

압축기에서 측정되는 냉매압력맥동과 표면가속도는 모두 압축기 흡입밸브의 거동에 기인한다. 흡입밸브에 직접적으로 연결되어 있는 흡입배관 속의 냉매압력맥동에 비하여 압축기 내부의 다양한 구조물을 거쳐서 측정되는 표면가속도는 압축기의 구조적인 특성에 큰 영향을 받아서 측정된다. 또한, 흡입배관의 진동이 포함되어 복잡한 특성을 보인다. 이에 대한 개략도를 Fig. 1에 표현하였다.

따라서 압축기의 표면가속도 신호는 압축기 자체의 구조진동을 포함한 압축기 밸브의 거동과 배관에 흐르는 냉매압력맥동의 진동으로 인한 영향 모두가 포함되어 측정된다고 가정할 경우에 전달함수추정에 사용될 input에 해당하는 신호는 냉매압력맥동 $p(t)$, output에는 표면가속도 $a(t)$ 가 타당하다.

압력맥동신호를 측정하는 단계에서 압력센서의 인입작업과 압축기 작동에 따른 냉매의 불안정성으로 인하여 발생하는 특유의 노이즈를 고려하면, 가속도센서자체의 노이즈보다 매우 크다고 가정할 수 있다.

압력맥동 input noise를 고려한 입출력관계를 도식화하면 Fig. 2와 같으며 다음과 같이 표현할 수 있다⁽⁷⁾.

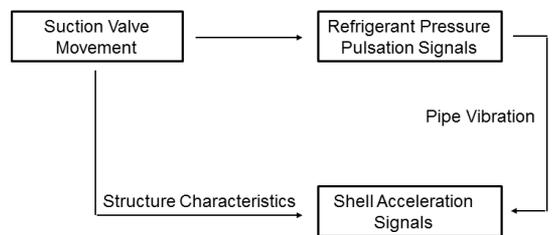


Fig. 1 Acquired signals by suction valve movement

$$\begin{aligned} A(f) &= H(f)U(f) \\ P(f) &= U(f) + M(f) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $U(f)$ 는 압력맥동의 참값이고 $M(f)$ 는 압력 센서의 측정 noise이다. 압력센서 noise의 파워스펙트럼 $S_{mm}(f)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{mm}(f) &= E[(P(f) - U(f))^*(P(f) - U(f))] \\ &= S_{pp}(f) - \frac{1}{H(f)}S_{pa}(f) - \frac{1}{H^*(f)}S_{ap}(f) \\ &\quad + \frac{1}{H^*(f)H(f)}S_{aa}(f) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $S_{pa}(f)$ 는 입력맥동 $p(t)$ 와 압축기표면의 가속도 $a(t)$ 의 cross-spectral density function을 나타내고 $S_{pp}(f)$ 와 $S_{aa}(f)$ 는 auto-spectral density function을 나타낸다. $S_{mm}(f)$ 을 최소화하는 전달함수 $H(f)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial S_{mm}(f)}{\partial H^*(f)} = \frac{S_{ap}(f)}{[H^*(f)]^2} - \frac{S_{aa}(f)}{[H^*(f)]^2 H(f)} = 0 \tag{3}$$

그러므로 압력센서의 noise의 파워스펙트럼을 최소화하는 전달함수 $H_2(f)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$H_2(f) = \frac{S_{aa}(f)}{S_{ap}(f)} \tag{4}$$

정상압축기의 $p(t)$ 와 $a(t)$ 로부터 추정된 주파수 응답함수 $H_2(f)$ 와 불량압축기 가속도신호의 power spectral density(PSD) $S_{aa,measured}(f)$ 로부터 수정된 가속도 신호의 PSD $S_{aa,modified}(f)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{aa,modified}(f) = \frac{S_{aa,measured}(f)}{|H_2(f)|^2} \tag{5}$$

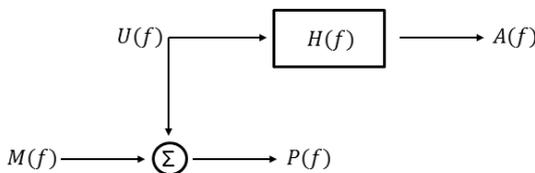


Fig. 2 Schematic of single input-output system with uncorrelated input noise

2.2 Fisher Discriminant Ratio(FDR)

Fisher discriminant ratio(FDR)은 판별의 대상이 되는 군집들 각각의 분산과 평균만으로도 간단히 서로를 정량적으로 구분해 낼 수 있는 유용한 판별기법이다. 군집이 셋 이상일 경우의 일반화된 FDR은 다음과 같이 정의된다⁽⁸⁾.

$$FDR_{Miss} = \sum_i^M \sum_{j \neq i}^M \frac{(\mu_i - \mu_j)^2}{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}, \quad M > 2 \tag{6}$$

여기서 σ 는 분산이고 μ 는 평균을 나타낸다. M 은 군집의 개수이다. 군집 내의 분산이 작고 군집간의 거리가 멀수록 FDR은 큰 값을 가진다. 이는 FDR이 클수록 군집의 분류가 용이함을 나타낸다.

2.3 Features

이 논문에서 제시하는 불량판별성능을 평가하기 위한 인자로 주파수영역에서 회전체나 왕복운동기구의 건전성진단에 널리 사용되고 있는 frequency centerroot-mean-square-frequency(RMSF)와 root-variance-frequency(RVF)을 사용하였다⁽⁹⁾. 이들은 중심주파수와 주파수들의 분포형태와 관련된 인자들로 다음과 같이 정의된다.

$$FC = \frac{\int f \times S(f) df}{\int S(f) df} \tag{7}$$

$$RMSF = \sqrt{\frac{\int f^2 \times S(f) df}{\int S(f) df}} \tag{8}$$

$$RVF = \sqrt{\frac{\int (f - FC)^2 \times S(f) df}{\int S(f) df}} \tag{9}$$

여기서 $S(f)$ 는 각 신호의 PSD이다.

3. 실험

3.1 실험개요

이 연구에서 제시하는 불량판별성능을 평가하기 위하여 실제 상용화되어 있는 가정용 냉장고 소형냉매압축기의 냉매압력맥동 및 표면가속도 신호를 취득하는 실험을 진행하였다. 냉매압력맥동은 냉매압

축기 외부에서 내부로 인입되는 흡입배관에 구멍을 뚫고 압력센서를 수직으로 삽입하여 흡입배관 내부의 냉매압력맥동 데이터를 얻었다. 압축기 표면가속도는 냉매압축기 상단부 중앙 표면에 가속도 센서를 부착하여 데이터를 얻었다. Fig. 3은 실험에 사용된 상용화된 냉장고용 소형냉매압축기를 나타낸다.

불량분류를 위하여 실험에 사용된 압축기의 종류는 정상압축기와 2종류의 불량압축기로 총 3가지이다. 압축기 불량 형태는 흡입과정에서의 냉매누설 결함과 토출과정에서의 실제 발생한 냉매누설불량을 재연한 제품들을 사용하였다. 흡입 누설불량은 압축기 흡입계통 내부의 흡입밸브 조립과정에서 밸브 포트와 밸브 본체의 센터가 어긋나서 발생한 불량이다. 이 때 발생한 틈으로 인하여 밸브 내부에서 냉매가 일부 정체되어 결과적으로 압축기의 효율을 떨어뜨리는 요인이 된다. 토출 누설불량은 토출 플레이트의 제조공정과정에서 공차가 어긋나거나 금이 발생하여서 생긴 불량이다. 이 때 발생한 틈으로 인하여 밸브 토출부에서 압축기 외부로 냉매가 모두 빠져나가지 못하고, 일부 정체함으로써 압축기 효율 저하를 일으킨다.

실제 냉장고에 장착된 압축기의 작동사이클은 시간에 따라 일정하지 않다. 따라서 이 연구에서는 간이냉매공급장치를 사용하여 실제 냉장고의 냉매순환 사이클 일부를 시간에 따라 일정하게 유지하여, 다수의 압축기들을 동일한 조건하에 두고 실험을 수행하였다. 압축기의 작동주파수는 실제 냉장고에서의 작동주파수인 60 Hz으로 설정하였다.

실험데이터의 취득에 사용된 장비는 LMS사의 LMS test.lab이다. 사용된 압력센서는 KISTLER사의 211B3 제품이고, 가속도센서는 Bruel & Kjaer사의

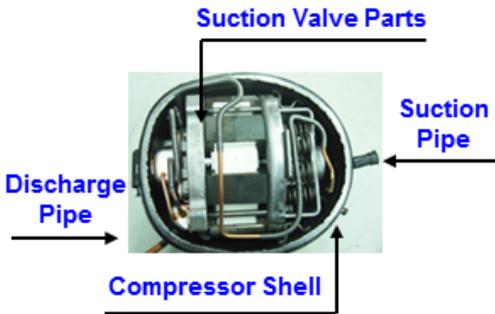


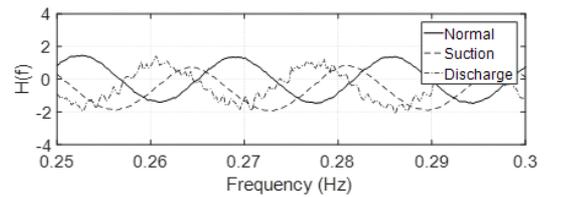
Fig. 3 Refrigerant compressor for experiment

의 A397 제품이다. 흡입배관 냉매압력맥동과 압축기표면 가속도 데이터들은 4.88×10^{-5} 초 간격으로 60초간 취득하였다. 불량종류가 다르고 냉매누설량이 같을 경우를 고려하기 위하여 취득한 데이터들은 rms-normalize하였다.

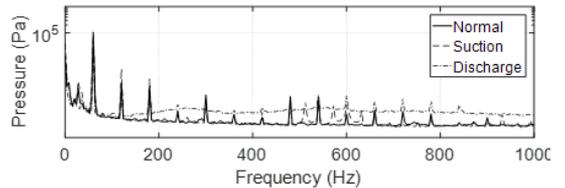
3.2 실험데이터

실험에서 취득한 냉매압력맥동과 표면가속도의 신호 일부분을 다음의 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4(a)와 (b)를 살펴보면 모든 제품의 압력맥동 신호에서 60 Hz의 성분이 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 토출밸브누설불량 압력맥동신호

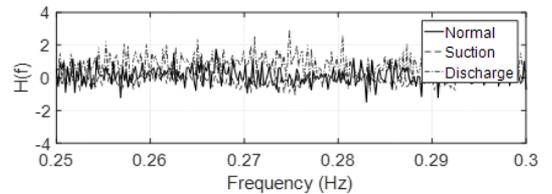


(a) Time domain data

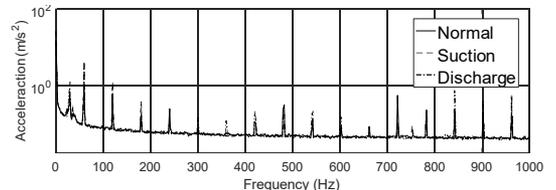


(b) Frequency domain data

Fig. 4 The pressure pulsation signal measured in the experiment



(a) Time domain data



(b) Frequency domain data

Fig. 5 The shell acceleration signal measured in the experiment

에서 다른 두 신호보다 고주파성분이 좀 더 두드러지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5(a)를 살펴보면 모든 제품의 표면가속도신호에서 고주파신호가 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)와 비교해서 살펴보면, 60 Hz 성분이 비교적 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4 및 Fig. 5에서 압력맥동신호와 표면가속도신호 모두 작동주파수인 60 Hz와 harmonics에서 대부분의 피크가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 압력맥동신호보다 표면가속도 신호가 고주파성분이 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3.3 신호처리

실험을 통하여 추정된 전달함수와 이를 통하여 추정된 $S_{aa,modified}(f)$ 을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 전달함수에 따른 결과의 비교를 위하여 $H_1(f)$ 전달함수($H_1(f); S_{pa}(f)/S_{pp}(f)$)를 동시에 표시하였다.

압축기 불량종류별 냉매압력맥동신호, 표면가속도신호를 각각 1초간격으로 60분할하여 FC, RMSF,

RVF를 구한 결과를 Figs. 8, 9와 같이 나타낸다.

Figs. 8, 9에서 (a)는 FC, (b)는 RMSF이고 (c)는 RVF를 나타내며 식 (4)~(6)에 정의되어 있다. 수직축은 아래부터 흡입불량, 정상, 토출불량 3종류의 압축기에서 측정한 분류결과를 나타내며, 수직축의 눈금은 아무런 의미를 갖지 않는다.

Fig. 8에 나타낸 냉매압력맥동신호를 이용한 분류결과를 보면 토출불량은 feature의 구분이 잘 되지만 흡입불량신호는 정상신호와 feature값이 근접해 있어서 분리성능이 그다지 좋지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9에 나타낸 압축기 표면가속도신호를 이용한 분류결과를 보면 모든 feature의 값이 겹쳐서 나타나며 흡입불량신호뿐만 아니라 토출불량신호도 정상신호와 구분이 어려움을 알 수 있다. 그러므로 압축기 표면가속도신호를 직접 이용한 지표들은 분류능력이 거의 없음을 확인할 수 있다. 압력맥동신호가 가속도신호보다 분류성능이 더 우수하지만 대량생산라인에서 압력맥동측정이 곤란하므로 측정이 간편한 가속도신호를 이용하기 위한 신호처리기술이 필요하다.

Figs. 10, 11은 압축기표면에서 측정한 가속도신호를 각 전달함수를 이용하여 수정한 modified acceleration signal을 주파수영역에서 분류한 것을 표현한 것이다.

Fig. 10은 전달함수를 이용한 결과이고, Fig. 11은 $H_2(f)$ 전달함수를 이용한 결과이다. 흡입배관누설불량과 정상제품만을 고려할 경우, 전달함수를 이용하는 것보다 전달함수를 이용한 불량분류성능이 좀 더 우수함을 알 수 있다. 그러나 토출배관누설불량과 정상제품만을 고려할 경우 오히려 전달함수를 이용하는 것보다 전달함수를 이용한 불량분류성능이 조금 더 잘 구분되는 것을 확인할 수 있다.

이를 정량적으로 알아보기 위하여 각 데이터의 FDR을 구하였고 이를 Table 1에 나타냈다.

냉매압력맥동신호가 FDR지수에서 다른 신호에 비하여 비교적 높은 것을 확인할 수 있다. 특히 RVF의 경우 타 지표에 비해 월등히 높은 것을 알 수 있다. 표면가속도의 FDR의 경우에는 다른 지표에 비하여 매우 낮은 값을 가지고 있다. 이는 육안으로 확인한 바와 같이 FDR지표에서도 표면가속도로는 불량분류가 어렵다는 것을 알려준다. 전달함수를 이용한 지표들의 경우 전체적으로 냉매압력맥동의 FDR보다 낮으나 표면가속도의 FDR보다는 높은

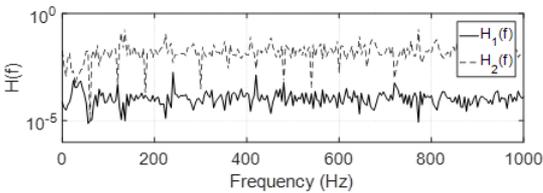
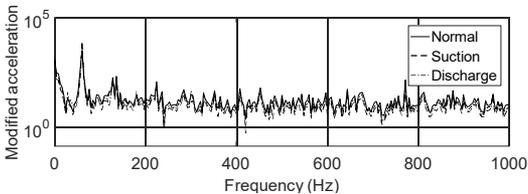
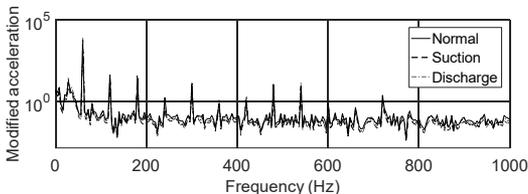


Fig. 6 Estimation of transfer function between acceleration and pressure pulsation

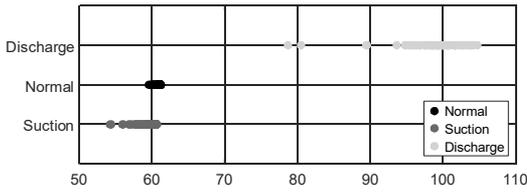


(a) Modified acceleration signal with $H_1(f)$

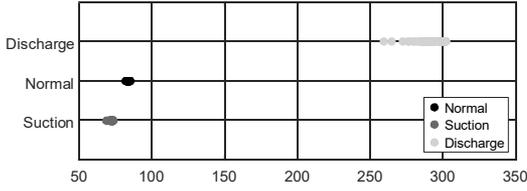


(b) Modified acceleration signal with $H_2(f)$

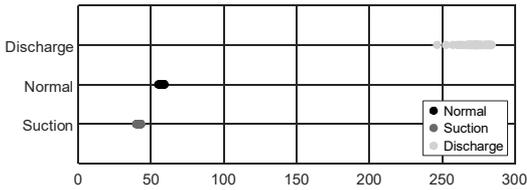
Fig. 7 Estimation of modified acceleration signals



(a) FC

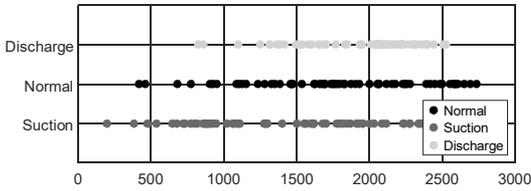


(b) RMSF

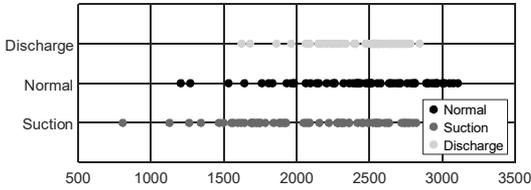


(c) RVF

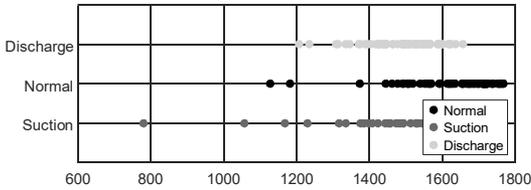
Fig. 8 Fault classification using pulsating pressure



(a) FC

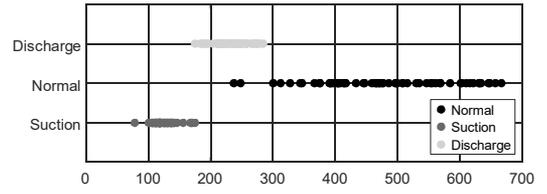


(b) RMSF

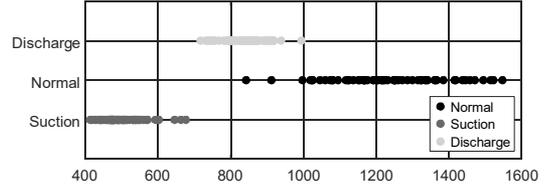


(c) RVF

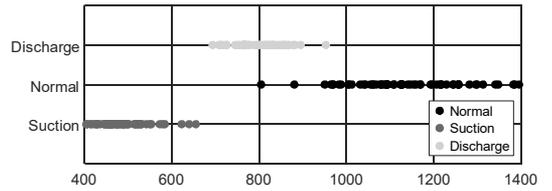
Fig. 9 Fault classification using shell acceleration



(a) FC

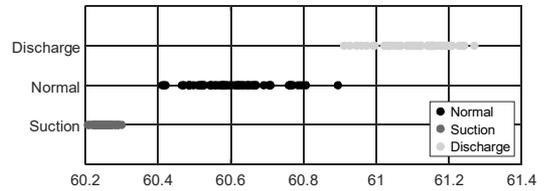


(b) RMSF

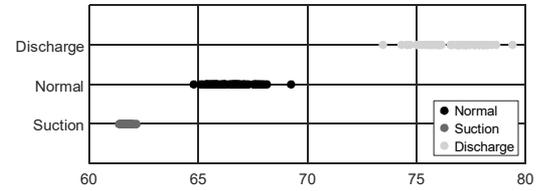


(c) RVF

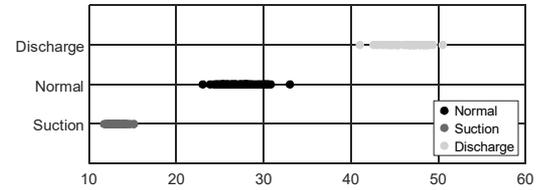
Fig. 10 Fault classification using modified acceleration signal with $H_1(f)$



(a) FC



(b) RMSF



(c) RVF

Fig. 11 Fault classification using modified acceleration signal with $H_2(f)$

Table 1 Fisher discrimination ratio of signals

Variable	FC	RMSF	RVF
Pulsating pressure	126.2	1307.0	1910.6
Shell acceleration	0.8	0.7	0.9
Modified acceleration with $H_1(f)$	27.3	41.5	44.2
Modified acceleration with $H_2(f)$	130.8	215.1	330.9

수치를 보이고 있다. 특히 앞서 정성적으로 비교한 결과와 마찬가지로 $H_2(f)$ 를 이용한 분류의 경우가 가장 좋은 결과를 보여주는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

가정용 소형압축기 밸브의 냉매누설은 배관내부의 압력맥동에 직접적인 영향을 주므로, 압력맥동신호를 이용하면 밸브의 냉매누설불량분류에 있어서 매우 유리하다. 그러나 양산라인에서 압력맥동신호를 측정하여 밸브불량을 분류하는 것은 신호측정에 추가적인 작업이 요구되고, 이에 따른 시간 소모와 노이즈 발생에 대한 대책이 필요하므로 전수검사에 효과적이지 않다. 반면에 압축기 셸 표면의 가속도 신호는 측정이 용이하지만 압축기 구조특성이 포함된 신호가 측정되므로 밸브불량분류에 사용되기에 적당하지 않다. 이러한 어려움을 해결하기 위하여 이 연구에서는 압력맥동신호와 셸 표면가속도 신호 사이의 전달함수를 이용하여 압축기 셸 표면에서 측정되는 가속도 신호를 개선하는 신호처리절차를 제시하였다.

제시한 신호처리절차를 검증하기 위한 실험을 진행하였고, 검증결과에서 압축기 밸브불량분류를 위한 feature로는 RVF가 FC나 RMSF보다 유리함을 확인하였다.

RVF지표에 대한 FDR값은 $H_1(f)$ 전달함수 사용시 44.2이지만, $H_2(f)$ 전달함수를 사용하면 330.9로 압축기 밸브불량분류성능을 향상시킬 수 있었으며, 육안으로도 분류가 가능할 만큼의 우수한 성능을 나타냈다.

시제품에 대한 배관내 압력맥동과 압축기 셸 표면의 가속도 사이의 전달함수는 미리 1회 측정해두면 양산라인에서는 가속도 신호만 측정하여 이 연구의 절차에 따라 냉매누설불량분류성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

이 연구의 방법을 이용하면 양산단계에서 압축기 밸브의 불량분류가 용이해지고 제품의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다. 실용화를 위해서는 정상 및 불량 압축기에 대한 충분한 데이터의 축적이 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- (1) Lee, J. H., Kim, B. S., Gu, D. S., Kim, H. J. and Choi, B. G., 2008, Vibration Analysis and Diagnosis of Air-compressor, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 984~989.
- (2) Yang, B. S., Hwang, W. W., Kim, D. J. and Tan, A. C., 2005, Condition Classification of Small Reciprocating Compressor for Refrigerators Using Artificial Neural Networks and Support Vector Machines, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 19, No. 2, pp. 371~390.
- (3) AlThobiani, F. and Ball, A., 2014, An Approach to Fault Diagnosis of Reciprocating Compressor Valves Using Teager-Kaiser Energy Operator and Deep Belief Networks, Expert Systems with Applications, Vol. 41, No. 9, pp. 4113~4122.
- (4) Wang, Y., Xue, C., Jia, X. and Peng, X., 2015, Fault Diagnosis of Reciprocating Compressor Valve with the Method Integrating Acoustic Emission Signal and Simulated Valve Motion, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 56, pp. 197~212.
- (5) Pichler, K., Lughofer, E., Pichler, M., Buchegger, T., Klement, E. P. and Huschenbett, M., 2016, Fault Detection in Reciprocating Compressor Valves Under Varying Load Conditions, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 70, pp. 104~119.
- (6) Shin, K. H., 2017, Development of Damage Indexes for Condition Monitoring of Rotating Machinery Using Vibration Signals and Its Application to a Large Centrifugal Compressor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp. 915~923.
- (7) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 2011, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, John Wiley

and Sons, Vol. 729, pp. 185~187.

(8) Mika, S., Ratsch, G., Weston, J., Scholkopf, B. and Mullers, K. R., 1999, Fisher Discriminant Analysis with Kernels, In Neural Networks for Signal Processing IX, Proceedings of the IEEE Signal Processing Society Workshop, pp. 41~48.

(9) Jeon, B. C., Jung, J. H., Youn, B. D., Kim, Y. W. and Bae, Y. C., 2015, Datum Unit Optimization for Robustness of a Journal Bearing Diagnosis System, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 16, No. 11, pp. 2411~2425.



Yeon Woo Kim received M.S. degrees from Pusan National University in 2016 and he is currently majoring in noise and vibration in Pusan National University. He especially is interested in diagnostics and prognostics.



Weui Bong Jeong received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University in 1978 and from KAIST in 1980, respectively. He then received his Ph.D. degree from Tokyo Institute of Technology in 1990. Dr. Jeong is currently a professor at the department of mechanical engineering at Pusan National University in Busan, Korea. His research interests are in the area of the measurement and signal processing, finite/boundary element analysis of noise and vibration, fluid-structure interactions and acoustic-structure interactions.



Tae Hoon Kim received his B.S. and M.S. degrees from Changwon University in 2003 and M.S. degree from Pusan National University in 2005, respectively. He is currently a Principal Researcher at LG electronics Co., Changwon, Korea.