



# 회전 속도가 급격히 변화하는 베어링의 양부 검사 기법 개발 및 검사 기준 최적화

양 원 석<sup>1)</sup> · 이 원 표<sup>\*2)</sup> · 이 종 우<sup>3)</sup>

한남대학교 경영학과<sup>1)</sup> · 에스엠인스트루먼트 혁신팀<sup>2)</sup> · 현대모비스 부품품질관리팀

## Development of Inspection Methods for Bearing Faults with a Rapid Change of Rotation Speed and Optimization of Pass/Fail Criteria

Won Seok Yang<sup>1)</sup> · Won Pyo Lee<sup>\*2)</sup> · Jong Woo Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Business Administration, Hannam University, Daejeon 34430, Korea

<sup>2)</sup>Innovation Team, SM Instruments Inc., 20, 1184beon-gil, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34109, Korea

<sup>3)</sup>Parts Quality Control Team, Hyundai Mobis, 17-2, 240beon-gil, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 16891, Korea  
(Received 28 November 2016 / Revised 31 January 2017 / Accepted 28 February 2017)

**Abstract** : We develop an inspection method for bearing faults with a rapid change in the rotation speed and present indexes for the pass/fail inspection. At the end of line, impulse noises generated by the operation of machines and conveyors may distort the inspection results. In this paper, we present robust inspection indexes for bearing faults under impulse noises, by taking into account fault signals having pulse train. Using logistic regression, we optimize the pass/fail criterion for each index and evaluate the performance of the inspection indexes based on the total error rate.

**Key words** : Bearing fault inspection(베어링 불량 검사), Pass/Fail criteria(양부 기준), Variable speed(가변속도), Logistic regression(로지스틱 회귀분석)

### 1. 서 론

자동차 초기 품질 관련 지표인 PPH(Problems Per Hundred Vehicles) 조사 결과에 따르면 잡음/이음이 주요한 품질 문제로 대두되고 있다.<sup>1)</sup> 자동차에서 발생하는 다양한 잡음/이음은 자동차의 감성 품질을 악화시켜 소비자 품질만족도 및 제조사의 브랜드 가치에 악영향을 미친다.

회전체 구성 요소가 많은 자동차에서는 부품의 마찰 감소, 축 정렬, 하중 지지 등을 위해 볼 베어링(Ball bearing)이 널리 사용되고 있다. 베어링이 손상되면 비정상적인 잡음/이음이 발생하며 감성품질 악화시키기 때문에 자동차 제조사에서는 감성품질

향상을 위해 부품 생산라인에서 소음/진동을 측정하여 베어링 손상을 검출하고 있다. 소음/진동 측정 데이터를 이용한 베어링 손상 검출 방법은 수십 년 전부터 연구가 진행되었으며 신호처리 방법에 따라 몇 가지 범주로 구분이 가능하다고 알려져 있다.<sup>2,3)</sup>

자동차 생산라인에서는 소음/진동 측정 데이터를 바탕으로 베어링의 양부(Pass/fail)를 판정하는 검사시스템을 적용한다. 생산라인에서 베어링 양부 판정 오류는 검사 인덱스 성능과 판정기준에 의해서 영향을 받는다. 양부 검사의 정확성을 제고하기 위해서는 유효한 검사 인덱스를 개발하고 양부 판정기준(Criteria)이 최적화되어야 한다. 본 논문에서는 생산라인에서 베어링 양부 검사를 위한 검사 인덱스 개발 사례와 판정기준 최적화 방안을 다룬다.

\*Corresponding author, E-mail: [colis@smns.co.kr](mailto:colis@smns.co.kr)

전통적으로 베어링 불량 검사에는 스펙트럼 분석이 널리 사용된다. 소음/진동 측정 데이터에 대한 스펙트럼 분석 결과에서 베어링 결함 성분의 레벨을 비교하여 양부 판정을 수행한다. 한편, 스펙트럼 분석을 이용하여 베어링의 양부 판정을 수행하는 경우 양부 판정에 오류가 발생할 수 있다.

양부 판정의 오류 원인은 크게 두 가지이다. 첫째, 검사 구간에서 간헐적으로 결함 신호가 발생하는 경우에 과도한 평균을 취하여 측정값이 작게 계산되는 경우 판정 오류가 발생한다. 소음/진동 데이터의 스펙트럼 분석을 위해서는 일반적으로 분석 횟수 증가가 필요하다. 짧은 시간 측정된 데이터에서 분석 횟수를 증가시키기 위해 Fig. 1과 같이 데이터 중첩(Overlap)을 이용한다. 각 구간에서 분석된 스펙트럼 결과를 평균하여 최종 결과로 이용한다.

간헐적으로 불량이 발생하는 경우 이러한 평균 처리에서 고장 성분 레벨이 감소하게 되어 고장 판단을 위한 변별력이 감소된다. 둘째, 생산라인 주변의 기계 설비에서 발생하는 충격성 소음에 의해 판정 오류가 발생할 수 있다. 생산라인은 조립, 성능 시험 등을 위해 여러 공정들이 연결되어 있다. 공정 간에는 물류 이동을 위한 컨베이어 및 케이블 덕트(Duct)등의 시설물이 존재한다. 제품 조립 및 성능

시험을 진행하는 각 공정에서 발생된 충격성 소음은 조립라인 시설물을 통해 다른 공정으로 전파될 수 있다. 충격성 소음은 스펙트럼 분석에 영향을 주어 양부 판정의 정확도에 영향을 준다.

본 논문에서는 베어링 검사 시 양부 판정의 오류를 개선하기 위해 세 가지 검사 인덱스를 개발하였다. 인덱스 1은 베어링 고장 신호의 SNR(Signal to Noise Ratio)를 향상시키기 위해 HFRT(High Frequency Resonance Technique)를 적용하였다. 베어링 고유 주파수 영역에 적용되는 HFRT 기법은 소음/진동 분석에서 널리 사용되는 주파수분석에 비해 SNR을 향상시킬 수 있다.<sup>4,5)</sup> HFRT 기법을 통해 SNR을 향상시킨 후 중첩과정과 스펙트럼 분석을 수행하고 스펙트럼 결과를 기준치와 비교한다. 결과가 기준치를 초과하는 경우에만 최종 인덱스에 반영한다. 인덱스 2는 인덱스 1과 같은 과정으로 진행하면서 결과 값이 기준치를 초과한 횟수를 이용하였다. 인덱스 3은 본 논문에서 제시하는 새로운 방법으로 시간영역에서 고장신호가 주기적으로 발생하는 펄스트레인(Pulse train)이라는 점을 이용한다. 기준 레벨을 초과하는 결함 신호 중 해당 발생 간격을 유지하는 펄스트레인의 개수를 측정하여 검사 인덱스로 이용하였다.

한편, 각 인덱스 별 베어링 불량 검사 결과는 양부 판정 기준에 따라 성능이 변화한다. 베어링 불량 검사 데이터는 표본 데이터이므로 각 인덱스의 적절한 양부 판정기준을 설정하고 인덱스의 성능을 비교평가하기 위해서는 통계적인 분석이 요구된다. 본 논문에서는 로지스틱 회귀분석을 이용하여 충요율을 기준으로 각 검사 인덱스의 최적 양부 판정 기준을 도출하고 인덱스의 성능을 평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 베어링 검사방법 및 문제점을 다룬다. 3장에서는 검사 인덱스를 제시한다. 4장에서는 로지스틱 회귀분석을 활용한 판정기준 최적화와 인덱스 성능평가를 다룬다. 마지막으로 5장에서 간략하게 결론을 다룬다.

## 2. 베어링 검사방법 및 문제점

### 2.1 검사방법

제품의 사용 환경을 모사하기 위해 제품 축을 회

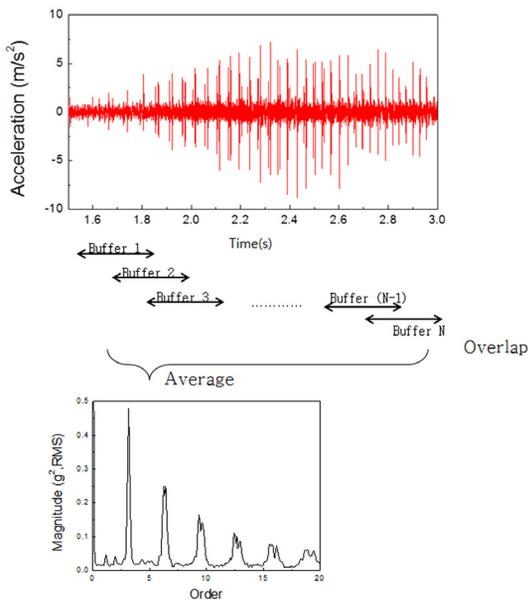


Fig. 1 Spectrum analysis using overlap

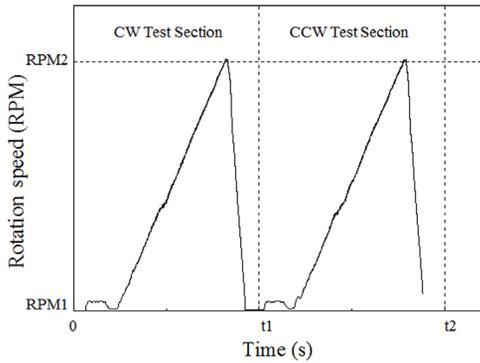


Fig. 2 Test profile

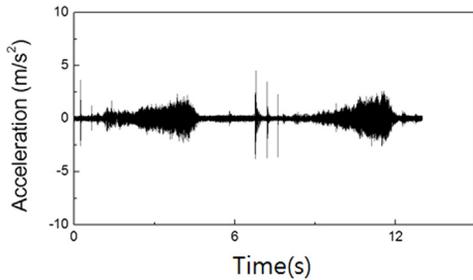


Fig. 3 Example of test data for bearing inspection

전시키면서 Fig. 2와 같은 가변속도 프로파일(Profile) 시험을 한다. 속도 변화와 함께 베어링을 관통하는 축의 한쪽 끝단에서 토크를 제어하면서 부하영역(Load zone)을 형성한다. 측정된 진동 데이터는 Fig. 3과 같이 부하 및 회전 속도 변화에 따라 진동레벨이 변화하는 형상으로 나타난다. 시험은 시계방향으로 5초, 반시계 방향으로 5초 진행한다. 측정 결과 중에서 제품이 자동차에서 사용되는 조건에 맞는 영역을 검사데이터로 추출한다. 검사 영역은 시계방향에서 1.2초, 반시계 방향에서 1.2초이다. 축은 총 55회 회전한다.

## 2.2 기존 검사 방법

Mcfadden과 Smith<sup>5)</sup>는 베어링 손상시 발생하는 진동에 대해 베어링 구성 요소가 지닌 특성 주파수가 주기적으로 공진하면서 발생하는 현상으로 설명하고 신호처리 기법으로 HFRT<sup>4,5)</sup>를 제안했다. HFRT에서는 측정된 진동신호에서 베어링 고장으로 발생하는 공진 신호를 분류하기 위해 필터링과 포락(Envelope) 신호처리를 이용한다. 이렇게 처리된 신

호에 대해 주파수 분석을 수행한 후 베어링 특성 주파수 영역에서 레벨 상승 발생 여부를 확인한다.

회전속도 변화시 발생하는 주파수 성분 변동 방지를 위해 차수분석이 사용된다. 베어링 고장 신호는 축 회전에 따라 주기적으로 발생한다. 축 회전 속도가 변화하면 시간 영역에서 측정된 고장 신호의 발생 시간 간격이 변화된다. 발생 시간 간격이 변화된 측정데이터에 대해 주파수 분석을 수행하게 되면 주파수 성분 변동이 발생한다. 주파수 성분 변화에 대한 분석 오류를 방지하기 위해 시간영역(Time domain)에서 측정된 진동 신호와 축 회전속도를 이용하여 각도영역(Angle domain)으로 리샘플링(Re-sampling) 한 후 주파수 분석을 수행하는 기법을 차수분석(Order spectrum analysis)이라고 한다.

베어링 검사를 위해 Fig. 4와 같이 HFRT와 차수 분석을 조합한 신호 처리를 거쳐 진동신호 분석을 수행한다. 차수분석 결과에서 1~10 차수 밴드합(Band sum)을 검사 인덱스로 정의한다.

## 2.3 기존 검사 방법의 문제점

### 2.3.1 검사 인덱스 오류

Fig. 5는 정상제품 100개, 베어링 불량 제품 100개에 대한 밴드 합(Band sum) 인덱스를 현업에 적용한 결과이다. 판정 기준은 정상 제품 결과의 3시그마(Sigma)를 적용하였다. Fig. 5에서 판정기준 영역에서 중첩이 확인된다. 중첩 영역은 오판정 발생 수량을 의미한다. 오판정 결과를 확인하면 정상제품 7%가 불량으로 판정되었다. 불량제품 10%가 정상제품으로 판정되었다. 양부 오판정은 검사 시스템의 현업 적용여부를 결정하는 아주 중요한 요인이다. 베어링 양부 판정의 오류를 줄이기 위해 검사 인덱스 개선이 필요하다.

Fig. 5에서 확인된 판정 오류를 개선하기 위하여 데이터를 확인한 결과 2가지 원인을 확인할 수 있었다. 첫 번째 오류 원인은 불량 베어링의 신호가 일부 구간에서 간헐적으로 발생하는 경우이다. Fig. 6의 간헐적 불량신호 발생은 정상구간과 불량구간에서 스펙트럼 분석 결과에 차이가 있다. 평균 처리가 이루어진 최종 결과에서는 결함 성분의 스펙트럼 레벨이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

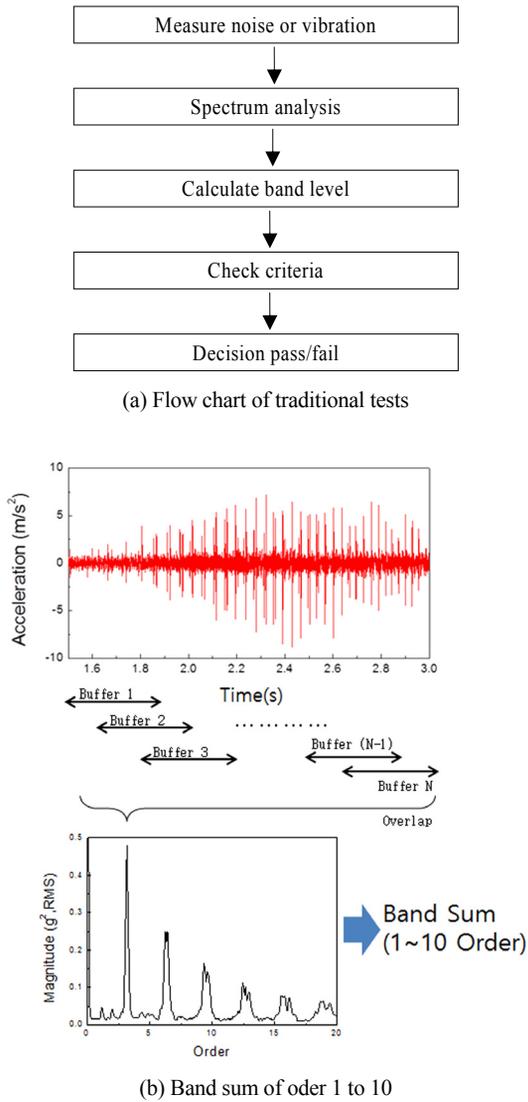


Fig. 4 Traditional test process of bearing faults

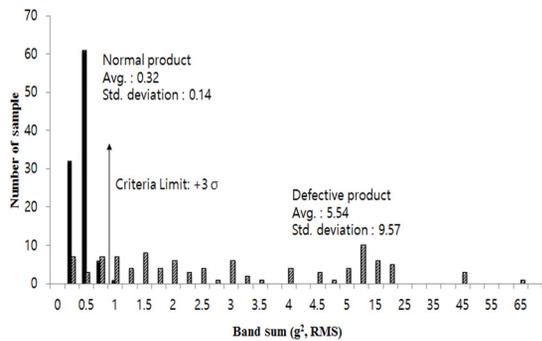
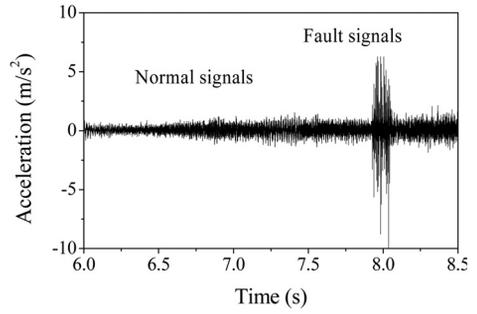
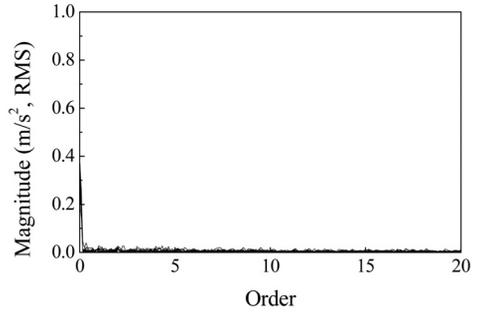


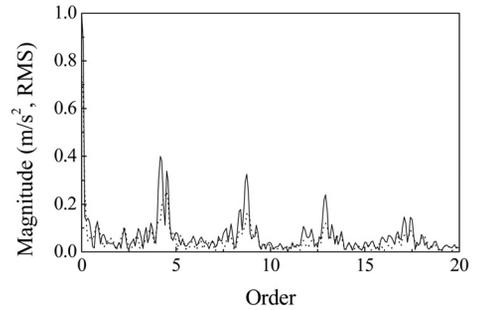
Fig. 5 Test result using a traditional method



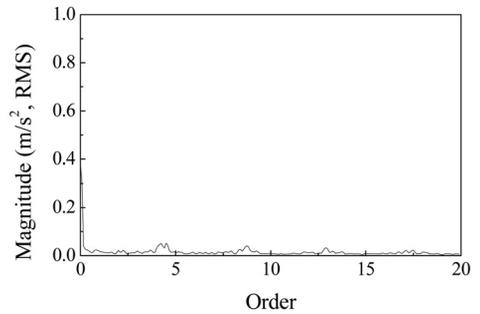
(a) Temporary occurrence of fault signals



(b) Order analysis result of normal signals

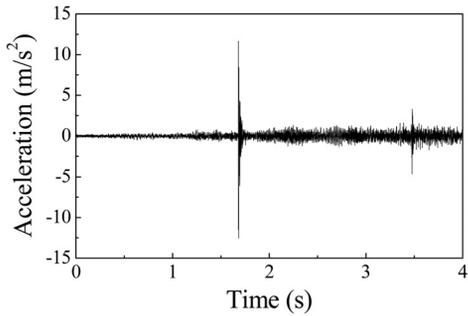


(c) Order analysis result of fault signals

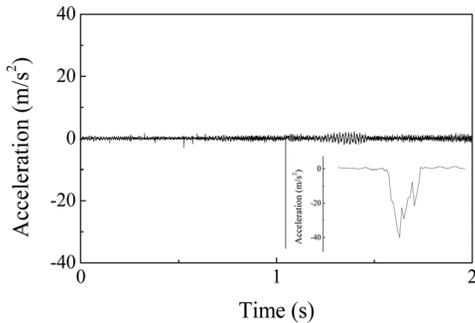


(d) Order analysis result with averaging process

Fig. 6 Result of traditional order analysis with temporary occurrence fault signals



(a) Impulse noise due to impact



(b) Impulse noises due to cable connection errors

Fig. 7 Type of impulse noises

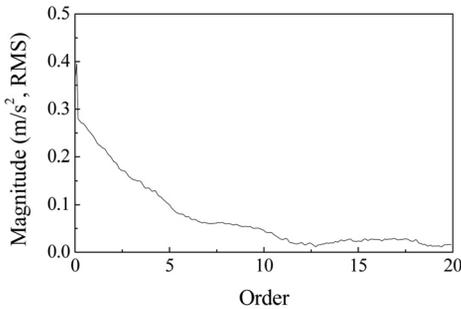


Fig. 8 Order analysis result of impulse noises

두 번째 오류 원인은 주변 기계 및 설비에서 발생하는 충격성 소음이다. Fig. 7과 같은 외부 충격음과 자동 센서 부착 오류에 의해 잡음은 Fig. 8과 같이 스펙트럼 레벨에 영향을 준다.

Fig. 8(a), (b)와 같은 임펄스 형태의 신호는 필터링이 어렵다. 생산라인에서는 주변이나 기구적 환경에 의한 판정 정확도에 영향을 받지 않는 검사 시스템의 강건화가 요구된다. 이러한 이유로 스펙트럼 분석 이외의 검사 인덱스 개발이 필요하다.

### 3. 검사 인덱스 개발

#### 3.1 검사 인덱스 개발 목적

충격성 소음 및 짧은 주기의 고장신호 등으로 인한 검사 오류를 개선하기 위해 검사 인덱스 보완이 필요하다. 베어링 고장 성분만을 보다 정확하게 검사하기 위해서는 측정된 진동 데이터에서 고장 성분을 분석할 필요가 있다. 측정된 진동신호에는 베어링 외의 기계 구성품의 영향이 포함되어 있다. 본 논문에서는 베어링 고장신호만을 추출하기 위한 여러 신호처리 기법 중에서 HFRT 기법을 적용하였다. 베어링 요소별 불량 제품의 특성을 확인하고 HFRT 기법을 바탕으로 차수 분석을 적용하여 검사 인덱스를 개선하였다. 또한, 차수 분석 방법 이외에 시간 영역에서 고장신호가 펄스트레인으로 발생하는 것을 이용하여 새로운 인덱스를 추가로 개발하였다.

#### 3.2 검사 인덱스 개발을 위한 샘플 시험

제품에 설치되어 있는 베어링 중에서 2개 구성품을 검사 대상으로 한다. 검사 대상 베어링을 편의상 A와 B로 구분하였다. Fig. 9와 같은 정상품 결과와 비교하여 불량제품의 차수 분석 결과를 Table 1과 2에 정리하였다. Test result는 차수 분석 시험 결과이고 Characteristic order는 베어링 치수(Dimension) 정보를 이용하여 계산된 고장 차수 성분이다.

Fig. 10 ~ 15는 불량 제품의 진동 측정 데이터를 이용하여 신호처리 및 차수 분석을 수행한 결과이다. 각 그림에서 (a)는 HFRT 기법과 회전영역의 리샘플링 결과이다. (b)는 스펙트럼 분석 결과이다.

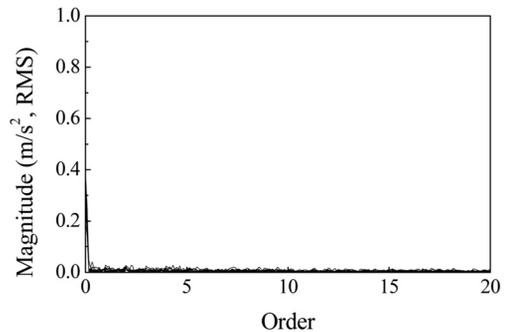


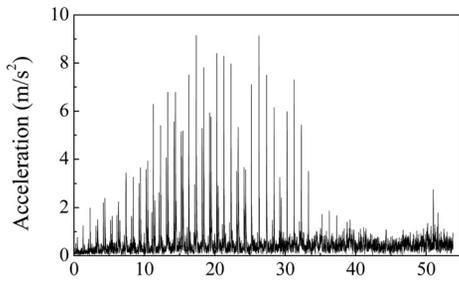
Fig. 9 Order analysis result of normal product

Table 1 Test result of bearing “A”

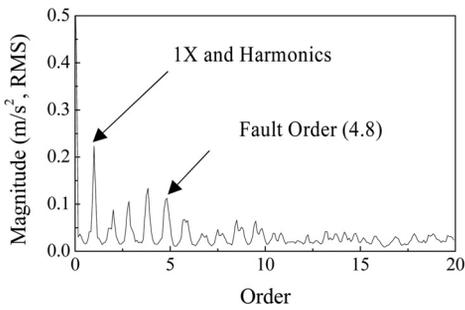
Item	Inner	Outer	Ball
Test result	4.8 and 1X harmonics	3.1 and harmonics	2.1 and harmonics
Characteristic order	4.88	3.12	2.16

Table 2 Test result of bearing “B”

Item	Inner	Outer	Ball
Test result	4.4 and harmonics	2.95	1.8 and 1X harmonics
Characteristic order	4.43	2.57	1.76



(a) Measured data

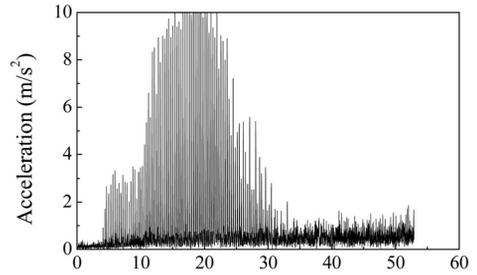


(b) Order analysis result

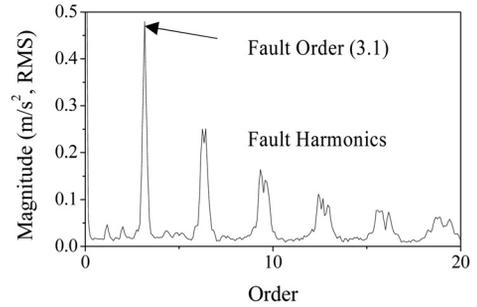
Fig. 10 Test result of defective bearing “A” inner race

Fig. 10(a)에서 베어링 불량에 의해 주기적 공진이 발생함을 확인할 수 있다. 공진은 1회전 간격으로 발생한다. (b)에서는 축 회전 성분(1X), 배수 성분, 그리고 베어링 내륜 손상 성분(4.8 차수)이 확인된다.

Fig. 11(a)에서는 불량 신호가 0.3회전 간격으로 발생한다. (b)에서는 베어링 손상 성분(3.1 차수)과 조화(Harmonic)성분이 확인된다.

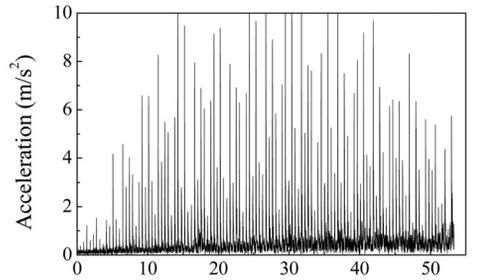


(a) Measured data

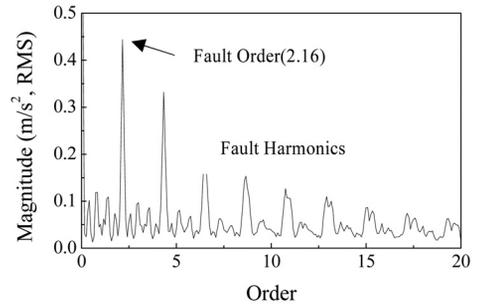


(b) Order analysis result

Fig. 11 Test result of defective bearing “A” outer race

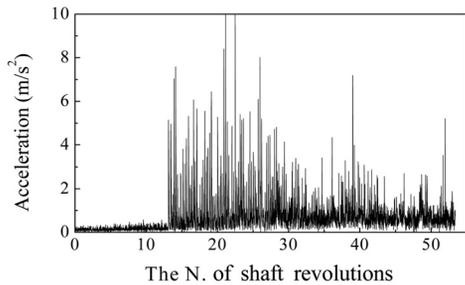


(a) Measured data

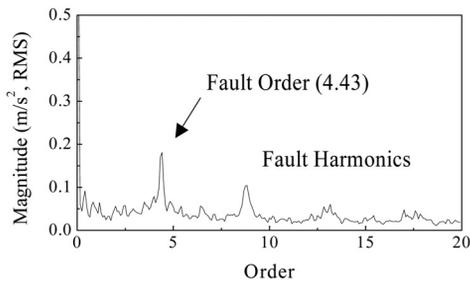


(b) Order analysis result

Fig. 12 Test result of defective bearing “A” ball

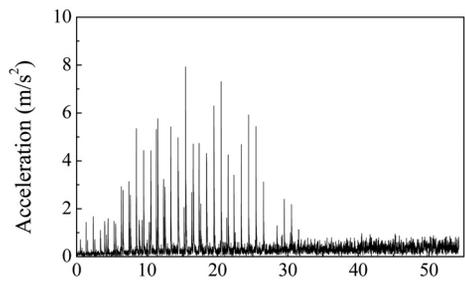


(a) Measured data

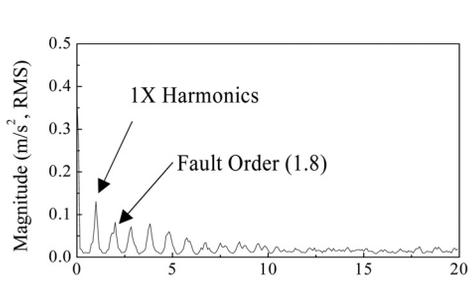


(b) Order analysis result

Fig. 13 Test result of defective bearing “B” inner race

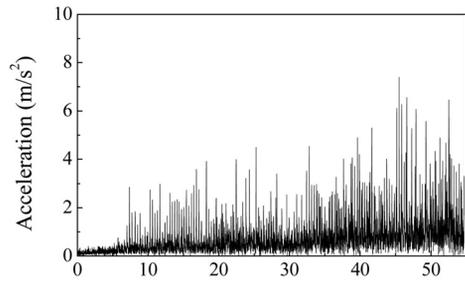


(a) Measured data

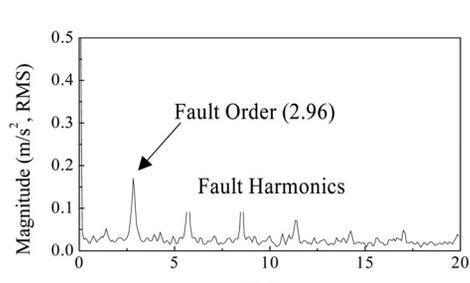


(b) Order analysis result

Fig. 15 Test result of defective bearing “B” ball



(a) Measured data



(b) Order analysis result

Fig. 14 Test result of defective bearing “B” outer race

Fig. 12(a)에서는 불량 신호가 0.5회전 간격으로 발생한다. (b)에서는 고장 성분(2.16 차수)과 조화

성분이 확인된다.

Fig. 13(a)에서는 공진 영역 불량 신호가 0.25회전 간격으로 발생한다. (b)에서는 4.43 차수 성분과 배수 항목인 조화성분 레벨 상승이 발생한다.

Fig. 14(a)에서는 공진 영역 불량 신호가 0.33회전 간격으로 발생한다. (b)에서는 2.95 차수 성분과 배수 항목인 조화성분 레벨 상승이 발생한다.

Fig. 15(a)에서는 공진 영역 불량 신호가 1회전 간격으로 발생한다. (b)에서는 축회전 성분(1X)과 배수 항목인 조화성분 레벨 상승이 발생한다. 예상 고장 차수 부근에서 1.8 차수 성분의 레벨 상승이 발생한다.

시험결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, HFRT 기법과 차수 분석을 적용한 결과 고장 성분과 조화 성분에서 진동 레벨 상승이 발생한다. 일부 불량 유형 제품에서는 축 회전 성분(1X)과 조화성분 레벨 상승이 발생한다. 둘째, 베어링 구성품 불량에 의한 진동 데이터는 축 회전에 따라 특정 간격으로 발생하는 특성이 있다. 요소별 발생 주기를 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Fault period of bearing components

Item	Inner fault period	Outer fault period	Ball fault period
“A” Bearing	1	0.3	0.5
“B” Bearing	0.25	0.33	1

### 3.3 검사 인덱스

#### 3.3.1 검사 인덱스 개발 개요

Fig. 16은 충격성 소음이 유입된 정상제품, 베어링 불량제품, 간헐적으로 불량신호가 포함된 불량제품의 차수 분석 결과이다. 단, 간헐적 불량신호가 포함된 차수 분석 결과는 고장 신호 발생 영역 결과만을 반영하였다. Fig. 16을 보면, 베어링 불량이 발생한 경우 정상 및 충격성 소음이 발생한 경우에 비해 고장 성분의 스펙트럼 크기가 높게 나타난다.

Fig. 17(a)는 간헐적으로 불량이 발생한 제품의 진동 데이터이다. 진동 데이터에 기존 검사 방법을 이용한 1~10차수 밴드 합 결과는 Fig. 17(b)와 같다. 총 2.5초에 대한 차수 분석을 위해 중첩기법이 적용된다. Fig. 17(b)에서 Buffer No는 중첩영역에 대한 구간 번호이다. Fig. 17(b)와 같이 불량 구간에서 검사 인덱스 값이 크게 상승한다.

Fig. 16과 Fig. 17로부터 다음과 같은 검사 인덱스 개선 방안을 검토하였다. 첫째, 고장 성분 이외의 성분이 검사 인덱스에 반영되면 충격성 소음이 발생한 경우 검사 인덱스 결과에 많은 영향을 받는다. 둘째, 고장 신호가 간헐적으로 발생하는 경우에는 평균치리에 의해서 검사 인덱스 결과가 낮아진다. 셋째, 짧은 시간 측정된 진동데이터 차수 분석은 Fig. 16,

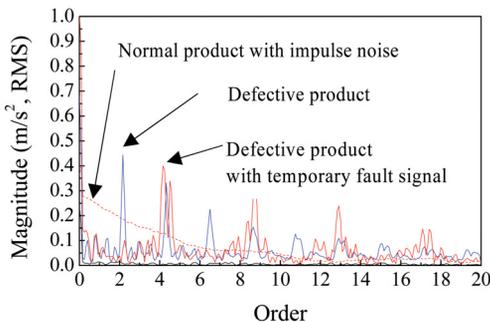
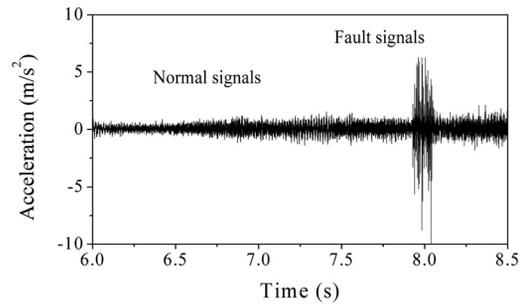
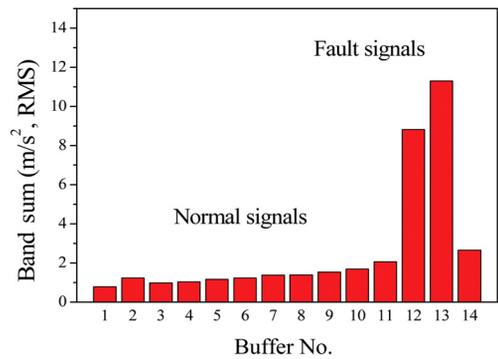


Fig. 16 Order analysis results



(a) Temporary occurrence of fault signals



(b) Band sum of order from 1 to 10

Fig. 17 Result of temporary occurrence signal by traditional tests

Fig. 17과 같이 충격성 소음이나 평균치리에 의한 레벨 감소 현상과 독립적이지 않다. 따라서 스펙트럼 분석 이외의 새로운 검사 방안이 필요하며, 본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 인덱스 1, 2, 3을 제안한다. 각 인덱스에 대한 세부적인 내용은 3.3.2절, 3.3.3절 그리고 3.3.4절에서 다룬다.

#### 3.3.2 인덱스 1

Fig. 17(b)와 같이 Fault signals에 해당하는 Buffer 데이터만을 이용하여 양부 판정을 하게 되면 간헐적으로 불량이 발생한 경우의 오류를 개선할 수 있다. 인덱스 1은 기존 검사 방법에서 검사 밴드를 고장 성분과 조화성분 영역으로 조정된 후에 기준을 초과한 경우에만 인덱스 결과에 반영하도록 하였다. Fig. 18과 같이 베어링 고장 성분 영역만을 인덱스에 반영하면 베어링 불량과 관계가 없는 차수영역 결과를 제외할 수 있다.

3.2절의 시험 결과를 바탕으로 베어링 구성 요소의 불량 검사 밴드를 고장성분 영역과 조화성분 영역을 포함하도록 설정하였다. 밴드 I은 1차 고장 영

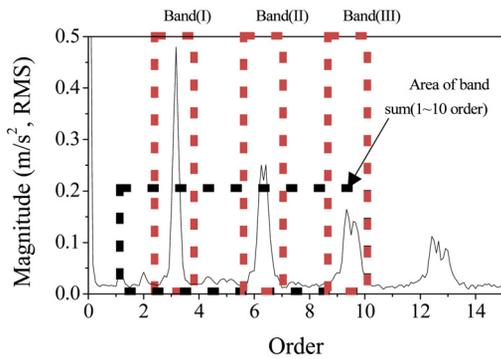


Fig. 18 Concept of fault bands

Table 4 Inspection bands of bearing “A”

Item	Band I	Band II	Band III
Inner	3.0~3.5	6.0~7.0	9~10.5
Outer	4.5~5.0	9.0~10.0	13.5~15.0
Ball	1.8~2.3	3.6~4.6	5.4~6.9

Table 5 Inspection bands of bearing “B”

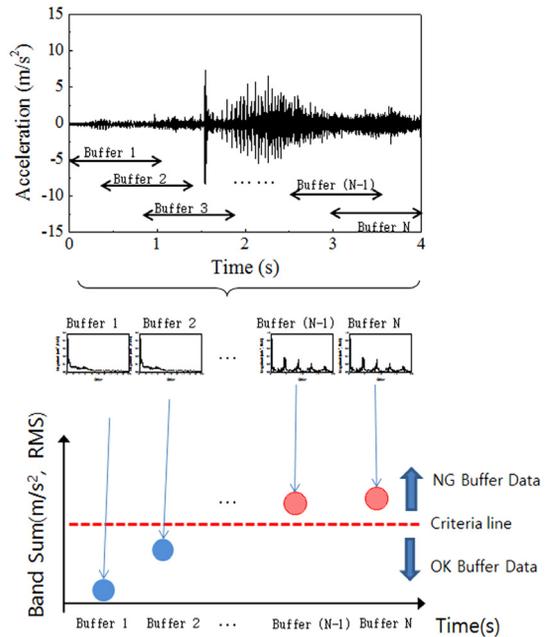
Item	Band I	Band II	Band III
Inner	2.35~2.82	4.7~5.64	7.05~8.46
Outer	4.2~4.7	8.4~9.4	12.6~14.1
Ball	3.3~3.8	6.6~7.6	9.9~11.4

역, 밴드 II와 III은 밴드 I의 조화 영역으로 선정하였다. 베어링 종류별, 구성요소별 검사 밴드 설정 정보를 Table 4와 Table 5에 정리하였다.

Fig. 19(a)와 같이 측정된 진동데이터는 데이터는 오버랩을 통해 N회 차수 분석이 가능하다. 각 차수 분석 결과들을 Buffer 1~Buffer N 데이터라고 하고 이를 이용하여 Fig. 18과 같은 밴드 레벨을 산출한다. 산출된 레벨을 기준과 비교하여 NG 그룹과 OK 그룹으로 분류한다. NG로 분류된 그룹의 인덱스 결과 총합을 이용하여 최종 양부 판정을 한다. 인덱스 1의 도출 프로세스를 정리하면 Fig. 19와 같다.

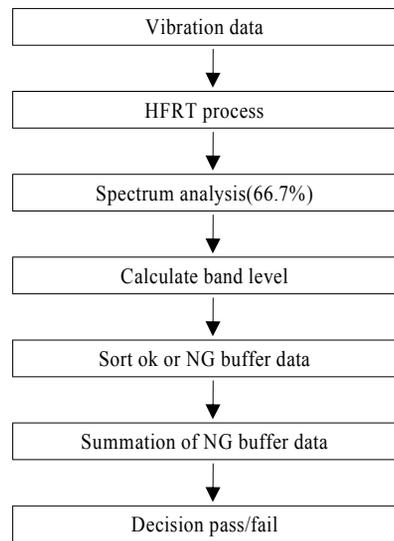
3.3.3 인덱스 2

인덱스 2에서는 Fig. 20(a)와 같이 인덱스 1과 같은 신호처리 과정을 진행한다. 인덱스 1은 NG 그룹 데이터의 밴드레벨의 총합을 적용한 반면, 인덱스 2에서는 NG 발생 회수를 적용하였다. 인덱스 2의 도출 프로세스를 정리하면 Fig. 20과 같다.



(Summation of NG buffer data)

(a) Overview of index 1

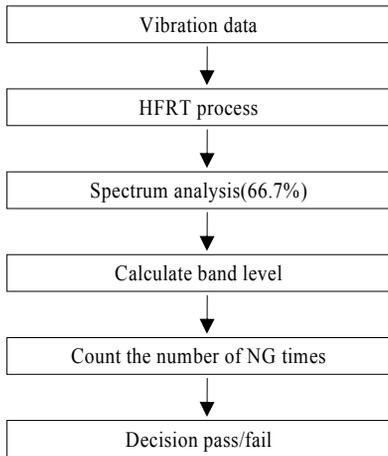
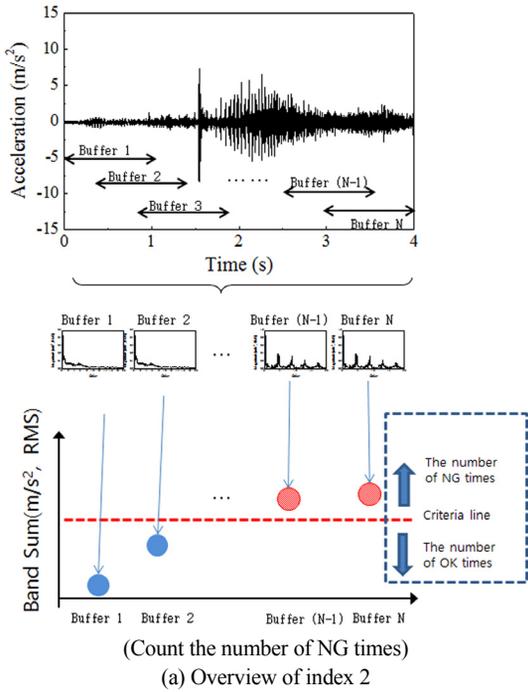


(b) Flow chart of index 1 processing

Fig. 19 Signal processing of index 1

3.3.4 인덱스 3

베어링 불량신호는 3.2절의 샘플 시험 결과와 같이 축 회전을 따라 주기적으로 발생하는 펄스트레인 특성을 갖는다. Fig. 21은 이러한 펄스트레인의 특성에 대한 예시이다.



(b) Flow chart of index 2 processing

Fig. 20 Signal processing of index 2

Fig. 22와 같은 고장 신호의 발생 주기와 크기를 이용한 인덱스를 개발하였다. 정상 제품에 비해 진동 크기가 크면서 주기성을 지닌 신호의 발생을 확인하는 방법이다. Fig. 22(a)에 Level criteria와 Periodic criteria로 표현하였다. 진동 레벨이 기준을 초과한 시점을 산출한다. 기준 초과 신호 발생 시간 차이를 이용하여 베어링 불량에 지닌 주기성을 확인한다.

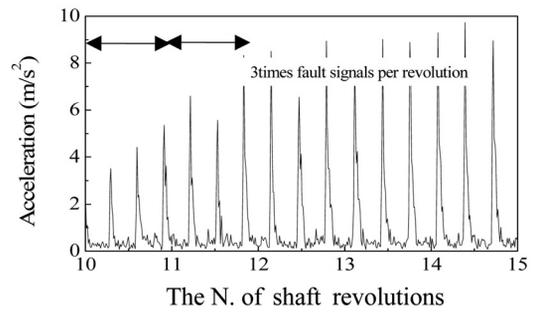
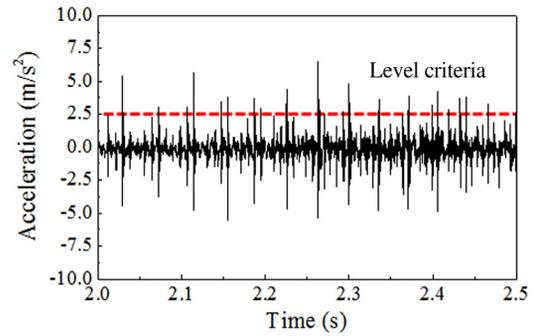
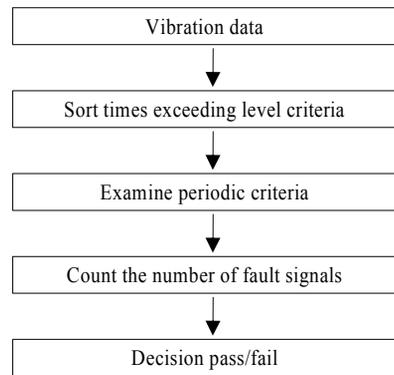


Fig. 21 Characteristic of pulse train with bearing fault signals



(a) Overview of index 3



(b) Flow chart of index 3 processing

Fig. 22 Signal processing of index 3

두 가지 조건을 만족하는 경우 베어링 고장 신호로 간주 한다.

인덱스 3은 다음과 같은 장점을 지닌다. 첫째, 설비 충격음은 단발성 소음이기 때문에 주기성을 지닌 연속 신호 조건을 만족할 수 없다. 둘째, 간헐적 고장 신호가 발생하여도 그 발생 횟수에 대한 기준으로 양부 검사 판정 제어가 가능하다. 셋째, 인덱스 3은 스펙트럼 분석을 하지 않기 때문에 스펙트럼 분석에서 나타나는 충격성 소음 및 평균치리에 의한 레벨 감소 현상이 발생하지 않는다. 인덱스 3의 도출 프로세스를 정리하면 Fig. 22와 같다.

### 3.4 시험 결과

본 논문에서는 정상 535개, 불량 194개, 그리고 외부소음이 있지만 정상인 82개의 베어링 제품에 대해 인덱스 1, 2, 3을 적용하였다. 각 인덱스를 적용한 시험결과를 히스토그램으로 나타내면 Fig. 23 ~ 25와 같다. 각 그림에서 가로축은 인덱스 값이고 세로축은 제품의 개수이다.

Fig. 23 ~ 25에서 정상제품과 불량제품 간에 인덱스의 중첩 구간이 발생하며 이는 오판정을 초래할 수 있다. Fig. 23에서 인덱스 1은 대략적으로 인덱스 값이 1과 9사이에서 정상제품과 불량제품의 중첩이 존재한다. Fig. 24에서는 인덱스 2의 값이 5와 10사이에서, Fig. 25에서는 인덱스 3의 값이 6과 9사이에서 중첩이 발생한다. 아울러 중첩된 구간의 샘플 수량은 인덱스 3이 가장 작게 나타난다.

Fig. 23 ~ 25의 베어링 시험 결과를 보면, 대략적으로 인덱스 1과 2에 비해 인덱스 3에서 중첩구간

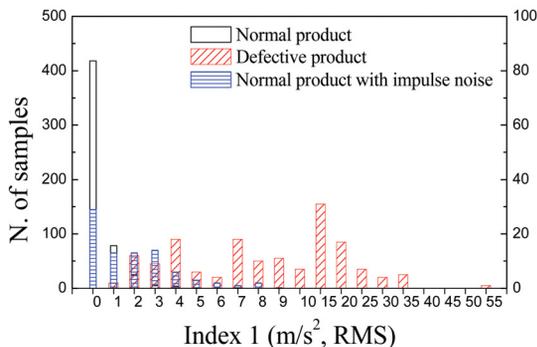


Fig. 23 Test result of index 1

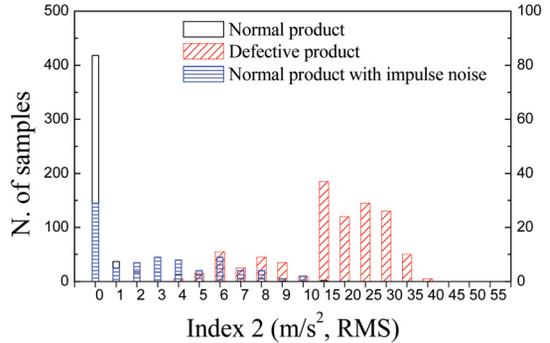


Fig. 24 Test result of index 2

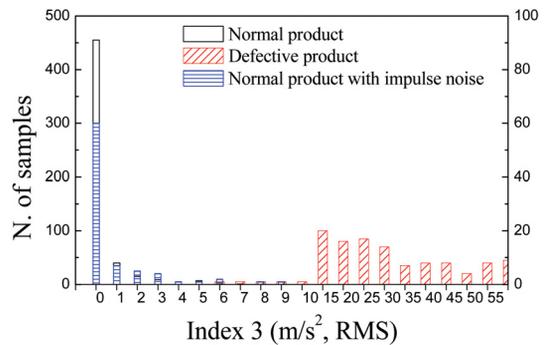


Fig. 25 Test result of index 3

및 해당구간의 표본수가 작으므로 인덱스 3이 인덱스 1과 2보다 우수함을 알 수 있다. 아울러, 인덱스 3은 외부소음이 존재하는 경우에도 베어링의 양부 판정에 효과적임을 알 수 있다.

검사의 오판정 수준은 판정기준에 따라 변화하게 된다. 따라서 4장에서 통계적인 분석을 통해 판정기준에 대한 최적화를 수행하고 검사 인덱스에 대한 성능 평가를 다룬다.

## 4. 로지스틱 회귀분석을 활용한 판정 기준 최적화 및 인덱스 평가

로지스틱 회귀분석은 종속변수  $Y$ 가 0과 1의 이진 변수일 때 적용하는 회귀분석 방법이다. 로지스틱 회귀분석에서는 독립변수  $X$ 가 주어졌을 때 종속변수  $Y$ 의 조건부 확률값을 추정할 수 있기 때문에 데이터마이닝의 분류(Classification)에 활용된다.<sup>6)</sup> 로지스틱 회귀분석은 분포에 대한 가정이 없으므로 적용

범위가 넓고 실제 자료 분석에서 널리 이용된다.<sup>7)</sup>

본 논문에서는 James 등<sup>6)</sup>과 박창이 등<sup>7)</sup>을 참고하여 로지스틱 회귀분석을 활용한 분류를 수행한다. 총오류율을 기준으로 각 인덱스의 최적 양부검사 판정 기준을 도출하고 인덱스를 평가한다. 아울러 인덱스를 조합한 양부검사 기준을 제시한다.

검사 결과를 나타내는 종속변수  $Y$ 를 다음과 같이 나타낸다.

$$Y = \begin{cases} 1, & \text{불량} \\ 0, & \text{정상} \end{cases}$$

인덱스  $k$ 의 값을 나타내는 독립변수를  $X_k$ 라 표기한다. 주어진  $X_k$ 에 대해 검사 결과가 불량일 확률을  $p(X_k)$ 라 하자. 여기에서  $k=1,2,3$ 이다.

$$p(X_k) = P(Y=1|X_k) \tag{1}$$

로지스틱 회귀분석에서 식 (1)의  $p(X_k)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\log\left(\frac{p(X_k)}{1-p(X_k)}\right) = \beta_{k,0} + \beta_{k,1}X_k \tag{2}$$

식 (2)에서 모수(Parameter)  $\beta_{0,k}$ 와  $\beta_{1,k}$ 의 최대우도(Maximum likelihood) 추정치는 수치적인 방법으로 산정할 수 있다. 각 인덱스별로  $\beta_{0,k}$ 와  $\beta_{1,k}$ 의 추정치는 Table 6과 같다.

Table 6 Parameter estimation result

Index	Estimates
Index 1	$\beta_{1,0} = -3.82135, \beta_{1,1} = 1.03487$
Index 2	$\beta_{2,0} = -5.79369, \beta_{2,1} = 0.74671$
Index 3	$\beta_{3,0} = -9.7827, \beta_{3,1} = 1.2509$

식 (2)를 변형하면 다음을 얻는다.

$$p(X_k) = \frac{e^{\beta_{k,0} + \beta_{k,1}X_k}}{1 + e^{\beta_{k,0} + \beta_{k,1}X_k}} \tag{3}$$

식 (3)에  $X_k$ 값과 Table 6의  $\beta_{0,k}$ 와  $\beta_{1,k}$ 를 대입하면  $p(X_k)$ 를 계산할 수 있다.  $X_k$ 에 대한 검사결과 예측치와 기준치(Threshold)를 각각  $\hat{Y}_k$ 과  $\delta_k$ 로 표기하자. 식 (4)와 같이  $p(X_k)$ 가  $\delta_k$ 보다 크면 검사결과를 불량으로 예측한다.

$$\hat{Y}_k = \begin{cases} 1, & p(X_k) > \delta_k \\ 0, & p(X_k) \leq \delta_k \end{cases} \tag{4}$$

양부 판정 오류율은 총오류율(Total error rate), FP 오류율(False positive rate), FN오류율(False negative rate)로 구분된다. 총오류율은 참값을 잘못 분류할 확률이다. 즉, 참값  $Y$ 와 예측치  $\hat{Y}_k$ 가 다른 비율이다. FP오류율은 참값이 0인데 1로 잘못 분류할 확률이다. 즉,  $Y$ 가 0인데  $\hat{Y}_k$ 가 1인 비율이다. FN오류율은 참값이 1인데 0으로 잘못 분류할 확률이다. 즉,  $Y$ 가 1이나  $\hat{Y}_k$ 가 0인 비율이다.

식 (4)의 기준치  $\delta_k$ 에 따른 인덱스 1, 2, 3의 오류율 분석결과는 Fig. 26 ~ 28과 같다. Fig. 26 ~ 28에서 기준치가 증가함에 따라 FP오류율은 감소하고, FN오류율은 증가하며, 총오류율은 U자 모양의 오목한 형태를 보인다.

총오류율, FP오류율, FN오류율 중에서 무엇을 기준으로 최적 검사를 설계할 것인가는 산업 및 검사 종류에 따라 상이하다. 본 연구에서는 일반적으로 적용되는 총오류율을 기준으로 각 인덱스별 최적 기준치를 탐색한다.

Fig. 26 ~ 28에서 각 인덱스별로 총오류율이 최소화 되는 최적기준치와 총오류율을 분석하면 Table 7을 얻는다. 인덱스 1은  $\delta_1 = 0.28$ 일 때 총오류율이 5.30 %로 최소화된다. 인덱스 2는  $0.37 \leq \delta_1 \leq 0.71$

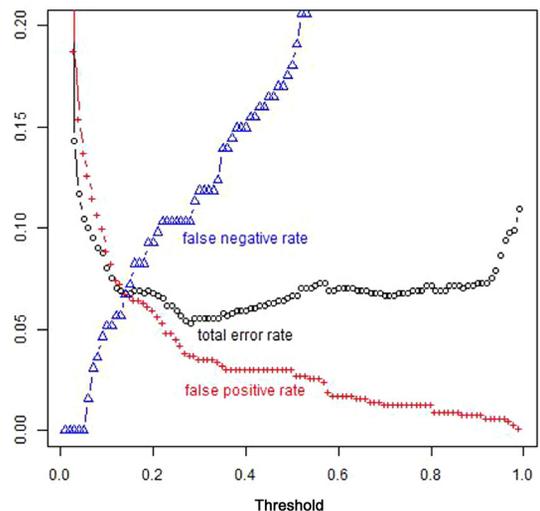


Fig. 26 Error rates of index 1

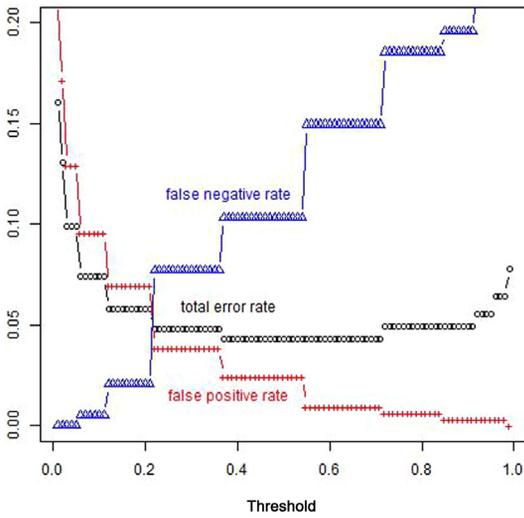


Fig. 27 Error rates of index 2

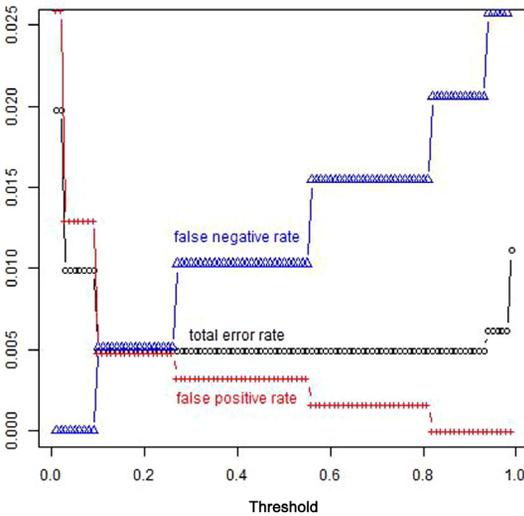


Fig. 28 Error rates of index 3

Table 7 Optimal threshold and minimum total error rates

Indexes	Optimal threshold	Total error rate
Index 1	$\delta_1 = 0.28$	0.0530
Index 2	$0.37 \leq \delta_2 \leq 0.71$	0.0432
Index 3	$0.10 \leq \delta_3 \leq 0.93$	0.0049

에서 총오류율이 4.32 %로 최소화된다. 마지막으로 인덱스 3은  $0.10 \leq \delta_3 \leq 0.93$ 일 때, 총오류율이 0.49 %로 최소화된다. 따라서 인덱스 1, 2, 3 중에서 인덱스 3의 총오류율 최소값이 가장 작으므로 인덱스 3

의 검사 성능이 인덱스 1과 2에 비해 우수하다고 간주할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 생산라인의 소음/진동 검사 시스템에서 환경적 요인으로 발생하는 소음에 의한 오관정을 줄일 수 있는 베어링 검사 인덱스를 개발하였다. 베어링 고장 검출을 위해 SNR을 향상시키기 위해 HFRT 기법을 응용한 검사 인덱스를 제시하였다. 아울러, 시간영역에서 베어링 고장 신호가 축회전을 따라 주기적으로 발생하는 특성을 이용하여 검사 인덱스를 개발하였다. 본 논문에서는 로지스틱 회귀분석을 적용하여 검사 인덱스의 판정 기준을 최적화하고 인덱스의 양부 판정 성능을 평가하였다. 로지스틱 회귀분석결과 인덱스 3의 검사 성능이 인덱스 1과 2에 비해 우수하다고 분석되었다. 로지스틱 회귀분석과 같은 통계 분석 기법을 활용한 판정 기준 최적화 및 인덱스 평가는 생산라인에서 양부 검사의 신뢰도 향상에 기여할 것으로 여겨진다.

### References

- 1) J. K. Kim, K. H. Lee and Y. H. Kim, The 2007-2011 White Paper on Korean Automobile Quality, Marketing Insight, pp.42-50, Seoul, 2011.
- 2) C. -S. Park, Y. -C. Choi and Y.-H. Kim, "Micro Faults of a Hub Bearing Equipped with an Automobile Using Minimum Variance Cepstrum," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.963-970, 2005.
- 3) N. Tandon and A. Choudhry, "A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings," Tribology International, Vol.32, No.8, pp.469-480, 1999.
- 4) P. Shakya, A. K. Darpe and M. S. Kulkarni, "Vibration-based Fault Diagnosis in Rolling Element Bearing: Ranking of Various Time, Frequency and Time-frequency Domain Data-based Damage Identification Parameters," International Journal of Condition Monitoring, Vol.3, No.2, pp.53-62, 2013.

- 5) P. D. Mcfadden and J. D. Smith, "Vibration Monitoring of Rolling Element Bearings by the High-frequency Resonance Technique - a Review," Tribology International, Vol.17, No.1, pp.3-10, 1984.
- 6) G. James, D. Witten, T. Hastie and R. Tibshirani, An Introduction to Statistical Learning, Springer, New York, 2013.
- 7) C. I. Park, Y. D. Kim, J. S. Kim, J. W. Song and H. S. Choi, Data Mining Using R, Kyo-woosa, Seoul, 2011.