

전동기 전류 신호 해석을 통한 유도전동기 베어링 초기고장 검출

우혁재\* · 송명현\* · 강의성\* · 박규남\* · 김경민\*\*  
 순천대학교 \* · 여수대학교\*\*

Induction Motor Bearing Early Failure Detection  
 Via A Motor Current Signal Analysis

Hyeok-jae Woo\* · Myung-hyun Song\* · Eui-sung Kang\* · Kyu-nam Park\* · Kyung-min Kim\*\*  
 Suncheon Nat'l Univ\* · Yosu Nat'l Univ\*\*

**Abstract** - 베어링 고장진단은 대부분 진동센서에 의한 근접 탐침에 의존하고 있어 설치 및 측정 상에 제약이 따른다. 최근 들어 전동기 전류를 이용한 베어링 고장진단의 가능성이 제시되고 있으나 베어링의 초기고장에 대한 연구는 없었다. 본 연구에서는 전동기 전류를 이용하여 베어링 외륜의 초기고장을 검출할 수 있는 기법을 제시하였다. 이 기법은 처리 데이터를 줄이고 신속한 고장검출을 위하여 고장진단 주파수 대역 설정방법을 제시하였으며 유도전동기 베어링 외륜 고장검출 실험을 통하여 이 기법의 유용성을 보였다.

1. 서 론

유도전동기 고장의 원인으로 베어링 고장 비율이 증가되고 있는 추세이다. 이는 고장자와 회전자의 구조가 부분적으로 개선되고 있으나 베어링은 상대적으로 취약한 연결과 더욱 열악해진 환경조건들이 베어링의 수명에 영향을 미치기 때문이다. 여러 상황에서 진동신호 해석은 초기 베어링 초기 고장 검출을 위해 유용하게 사용되고 있으며 결함검출과 관련된 진동신호처리에 많은 연구가 수행되었다. 그러나 진동센서의 사용은 직접적인 근접 탐침에 의존하기 때문에 측정위치에 따라 결과가 다르게 나타나며 기기에 적합하기 위해서는 특별한 기계적인 배열이나 변환기가 요구된다

최근의 연구들은 전동기 전류신호 해석으로 베어링 고장검출이 가능함을 제시하고 있다[1]-[3]. 이는 추가적인 고장진단을 위한 가격부담이 적고 전동기의 신뢰성을 연속적으로 감시할 수 있으며 근접 탐침이 요구되지 않는다는 장점을 갖고 있다. 지금까지 전동기 전류해석에 의한 베어링 고장검출 연구로는 Schoen과 Habetler 등[4]이 전류스펙트럼으로부터 베어링 고장 검출의 가능성을 제시하였고, Eren과 Devaney[5]는 Wavelet을 이용하여 기동전류의 과도상태를 해석함으로써 베어링 고장검출을 시도하였다. Li와 Chow[6]는 베어링에서 발생하는 국부적인 고장진단을 위해 퍼지회색을 이용하였으며 Yang과 Penman[7]는 인공신경망을 이용한 베어링 고장검출을 시도하였다. 그러나 이러한 기법들 대부분은 과도한 베어링 고장을 갖는 전동기에 대한 실험을 하여 고장검출 가능성을 제시하는데 그치고 있으며, 베어링 초기고장에 관련하여 실제 적용 가능한 고장진단 기법은 제시된 바가 없다. 그 이유는 베어링 고장에 의해 발생하는 특성주파수는 전류스펙트럼 상에 매우 미약하고 간헐적으로 나타나며 전동기 회전과 관련된 여러 신호들에 압도되기 때문이다. 특히 베어링 초기 고장

의 경우 검출은 더욱 어렵다.

따라서 본 연구에서는 베어링 초기 고장을 진단하기 위해 전동기 전류신호로부터 베어링 특성주파수의 패턴을 분석하여 검출이 용이한 주파수 대역을 설정함으로써 초기고장에서도 고장의 존재를 유효하게 입증할 수 기법을 제시한다.

2. 유도 전동기 전류신호 해석 및 고장진단 기법

2.1 전류신호 해석

일반적으로 유도전동기의 경우 회전자 지지를 위해 대부분 구름요소 베어링을 사용하고 있다. 구름요소 베어링은 그림 1에서와 같이 구름요소들과 균일한 간격을 유지하고 서로 접촉하는 것을 막기 위한 케이지, 전달경로에서 구름요소의 회전사이에 내륜, 그리고 외륜이라 부르는 두 개의 링의 결합구조로 되어있다. 전형적인 베어링 고장은 양호한 동작조건에서도 피로, 마모, 소성변형에 의해 구성요소에서 국부적으로 발생하며 오염, 부식, 부적절한 윤활 및 설비, 그리고 브리들링과 같은 외적인 요인에 의해 급격히 확산된다. 구성요소에서 발생된 손상은 구름요소가 전달경로를 따라 회전할 때마다 짧은 시간간격으로 주기적으로 충격진동을 발생한다. 이러한 충격진동은 회전기기의 고장과 관계없이 축 회전속도와 베어링의 기하학적 구조, 그리고 베어링 구성요소 각각의 손상과 연관되어 베어링 특성 주파수를 발생시킨다.

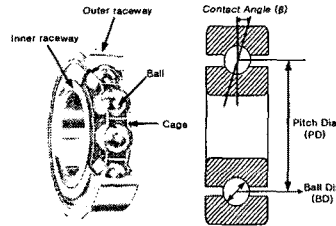


Fig.1. Ball bearing geometry.

베어링에 관련된 고장요소 중 외륜 고장에 관련된 고장 특성주파수( $f_o$ ), 외륜 전달경로 볼 통과 주파수는 식 (1)과 같다[8].

$$f_o = \frac{n}{2} f \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \phi\right) \quad (1)$$

여기서 n은 볼 수, f는 축 회전주파수,  $\cos \phi$ 는 접촉 각이다.

베어링 고장에 의해 발생하는 충격진동이 전동기 전류에 미치는 영향은 공극 편심을 발생시켜 공극 자속밀도의 변화를 가져온다. 이것은 베어링 특성주파수들을 전

류 고조파 상에 발생시키면서 기기의 인덕턴스에 영향을 미치게 된다.

베어링 외륜 고장 특성주파수에 의한 특징적인 전류주파수( $f_{CF}$ )는 다음과 같이 계산되어질 수 있다[9]

$$f_{CF} = |mf_e \pm f_o| \quad (2)$$

여기서  $m = 1, 2, 3, \dots$ ,  $f_e$ 는 전기적 공급주파수,  $f_o$ 는 외륜 고장에 의한 특성주파수이다

## 2.2 고장검출 기법

본 연구에서는 온라인 고장진단 시스템을 구현하는데 있어 고장진단에 필요한 데이터를 간소화함으로써 구현이 용이한 간단한 기법을 제시한다. 먼저 전동기 전류 스펙트럼을 획득하여 평균을 구하고 베어링 결함에 의한 주파수 성분들과 정상상태에서의 주파수 성분과 비교하여 특징적인 차이가 발생하는 주파수 성분을 선정한다. 선정된 주파수 성분으로부터 전부하시 슬립에 의한 영향을 고려하여 고장진단을 위한 주파수 대역을 설정한다. 설정된 주파수 대역에서 획득한 데이터는 고장진단을 위한 여러 알고리즘에 적용되어 빠른 진단을 수행할 수 있다. 제안된 기법의 흐름도를 그림 2에서 보여주고 있다.

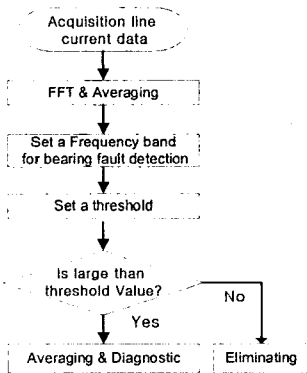


Fig.2. Flowchart of the proposed technique.

## 3. 실험결과 및 토의

베어링 고장진단을 위해 0.75 KW 3상 4극 실험용 모터를 380 V 60Hz를 공급하여 인버터에 의해 구동하였다. 전동기 전류 스펙트럼을 획득하기 위해 Tektronix사의 AM8050 Current Probe Amplifier와 DI사의 DI-2200 FFT Analyzer를 사용하여 500 Hz대역에서 1024/400(SAMP/LINE)으로 측정하였다.

일반적인 베어링고장은 충격에 의한 펄스 신호가 주기적으로 나타나므로 이러한 고장신호가 주기적으로 발생될 수 있도록 축-중단 베어링의 외륜에 드릴로 구멍을 뚫은 것(hole)으로 전동기 전류 스펙트럼에 미치는 영향을 분석하였고 실제 베어링 초기고장 형태에 가깝게 전동펜으로 외륜에 폭 0.42 mm와 0.2 mm의 홈을 내어 초기고장 검출능력을 실험하였다. 실험에 사용된 베어링 사양은 표 1과 같다.

외륜과 내륜이 동일한 두께를 갖는다고 가정하면 유효 지름(Pitch diameter)은 60mm이다. 따라서 베어링 외륜 고장 특성주파수는 식 (1)에 의해  $f_o = 91.47$  Hz로 예측할 수 있다. 그러므로 식 (2)에 의해 전류 스펙트럼에서 외륜 고장의 영향은 공급주파수의 배수만큼 천

이되어 나타난다. 그림 3에서는 베어링 고장에 관련된 주파수 특성을 분석하기 위해 외륜 고장(hole)을 갖는 전동기에서 획득한 20 Sets의 평균데이터를 정상상태와 비교해서 보여주고 있다.

Table. 1 Specification of Ball Bearing.

Bearing number	6204Z
Outside diameter	47 mm
inside diameter	20 mm
Ball Diameter(BD)	7.93 mm
Contact Angle( $\beta$ )	0°
Ball number	8

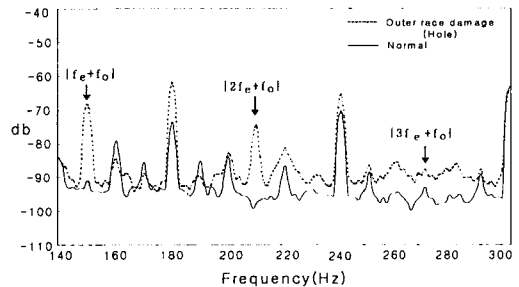


Fig.3. Averaging Stator Current Spectrum of unloaded induction motor with a hole in the outer race of the shaft-end bearing(140-300 Hz).

베어링 외륜 고장에 의한 주파수 성분은 예측된 주파수  $|f_e + f_o|$ 와  $|2f_e + f_o|$ 에서 전류변화가 일어나고 있으며 특히  $|2f_e + f_o|$ 는 전동기 회전에 관련된 주파수 성분과 관련이 적으므로 고장검출에 중요한 주파수 성분으로 확인되었다.

그림 4에서는 고장의 정도에 따라 특성주파수 성분의 변화를 확인하기 위해 베어링 외륜에 0.42 mm의 홈을 낸 베어링을 장착한 전동기로부터 획득한 20Sets의 평균데이터를 정상상태 평균데이터와 비교한 결과를 보여주고 있다. 고장이 상대적으로 적은 경우 베어링 고장에 의한 주파수 특성은 과도한 고장에 비해 상대적으로 약하게 나타나고 있지만, 여전히  $|2f_e + f_o|$ 에서 구분 가능한 전류변화를 확인할 수 있다. 따라서 고장정도가 적은 경우에도  $|2f_e + f_o|$ 에서 고장검출이 가장 용이함이 입증되었다.

부하상태에서 슬립의 영향을 고려하기 위해 정격 부하 속도 1690 RPM(28.16 Hz)에서 외륜 고장 특성주파수를 구하였다. 정격 전 부하의 경우 베어링 외륜 고장 특성 주파수는 식(1)에 의해  $f_o = 90.8$  Hz로 예측되어진다. 따라서 약 0.7 Hz 정도의 차이가 나타나지만 다양한 전동기들의 여러 특성들을 고려하여 약 10 Hz의 대역폭을 갖는 베어링 고장검출 주파수 대역을 설정하였다.

그림 5에서는 설정된 외륜 고장진단 주파수 대역에서 전류스펙트럼을 자세히 보여주고 있다. 결과로부터 베어링 외륜 고장의 정도가 고장진단 주파수 대역의 진폭에 영향을 미치고 있지만 고장 특성주파수 위치는 변화가 없고 정상상태와 명확하게 구분됨을 알 수 있다. 그림 6에서는 실제 초기고장 형태에 가깝게 홈을 낸 베어링을 이용하여 고장 정도에 따른 진폭의 변화를 보여주고 있다. 진폭의 변화는 고장 정도에 따라 비례적으로 증가하

고 있고 정상상태와 여전히 구분 가능함을 알 수 있다. 그림 6에서는 부하에 의한 슬립이 베어링 외륜 고장에 따른 특성주파수에 미치는 영향을 확인하기 위해서 0.2 mm의 흠을 낸 베어링을 장착한 전동기의 전 부하(1690 RPM)와 무 부하(1798 RPM)에서 출력 파형을 평균한 결과를 보여주고 있다. 베어링 외륜 고장에 의한 특성 주파수는 전 부하로 운전한 경우 무 부하일때 비해 실제 실험에 의한 결과로는 약 1.8 Hz 정도의 진상된 특성을 보이고 있으며 전류 진폭의 변화가 더 커짐을 알 수 있다. 또한 결과 파형으로부터 부하에 의한 슬립이 발생한 경우에도 설정된 고장진단 주파수 대역에서 고장특성 주파수 성분이 정확히 검출 가능하였다. 지금까지 결과로부터 고장진단 주파수 대역 설정의 유효성을 입증할 수 있었으며 설정된 주파수 대역에서 획득한 데이터로서 고장검출을 빠르게 수행할 수 있다.

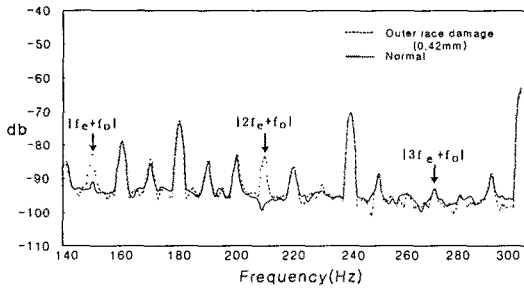


Fig.4. Averaging Stator Current Spectrum of unloaded induction motor with a scratch in the outer race of the shaft-end bearing(140-300 Hz).

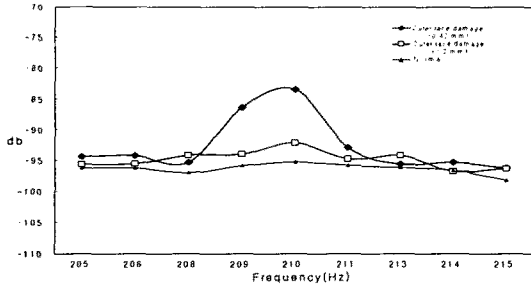


Fig.5. Averaging Stator Current Spectrum of unloaded induction motor with a scratch in the outer race of the shaft-end bearing (205-215 Hz).

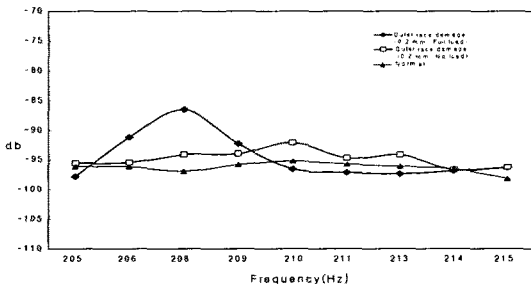


Fig.6. Averaging Stator Current Spectrum of unloaded(□) and loaded(◆)induction motor with a scratch in the outer race of the shaft-end bearing (205-215 Hz).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유도전동기의 고장자 전류신호 해석에 의한 베어링 외륜 초기고장 진단기법을 제시하였다. 이 기법은 고장진단 주파수 대역을 설정하여 비교적 적은 데이터만으로 빠르게 초기고장을 검출할 수 있으며, 또한 고장신호가 간헐적으로 발생하는 초기고장에서도 유효하게 고장진단에 적용될 수 있다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] M. E. Steele, R. A. Ashen, and L. G. Knight, An electrical method for condition monitoring of motors, in *Int. Conf. Elec. Mach.-Design and Applicat.*, July 1982, no. 213, pp. 231-235.
- [2] G. B. Khan and J. Stein, Induction motor fault detection via passive current monitoring, in *Proc. Int. Conf. Elec. Mach.*, Aug. 1990, pp. 13-17.
- [3] -, Methods of motor current signature analysis, *Elec. Mach. Power Syst.*, vol. 20, no. 5, pp. 463-474, Sept. 1992.
- [4] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, and R. G. Bartheld, "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring..", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 31, no 6, pp. 1274-9, Nov/Dec 1995.
- [5] Eren, L. Devaney, M.J. Motor bearing damage detection via wavelet analysis of the starting current transient, *Instrumentation and Measurement Technology Conf.* vol. 3, pp 1797 - 1800, May, 2001, pp. 1797 - 1800
- [6] Li, C. J., and Wu, S. M., 1989. On-line Detection of Localized Defects in Bearings by Pattern Recognition Analysis, *ASME J. Eng. Ind.*, pp. 331-336.
- [7] Da-Ming Yang and James Penman, Intelligent Detection of Induction Motor Bearing Faults Using Current and Vibration Monitoring, *Proceedings of COMADEM 2000*, Houston, Texas, USA, 3-8 December, 2000.
- [8] K.G. Boving(Ed.), *NDE Handbook*, London: Butterworth, 1989.
- [9] Caryn M. Riley, Brian K. Lin, Thomas G. Habetler and Gerald B. Kliman, Stator Current Harmonics and Their Causal Vibrations: A Preliminary Investigation of Sensorless Vibration Monitoring Applications, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35, no. 1, Jan/Feb. 1999, pp. 94-99.