

공극자속 측정에 의한 유도전동기 회전자의 Broken Bar 검출기법

(Detecting Method for Broken Rotor Bar of Induction Motor by Measuring Air-gap Flux)

황 돈 하* · 강 동 식* · 이 진 희** · 최 경 호*** · 김 동 희****

(Don-Ha Hwang · Dong-Sik Kang · Jin-Hee Lee · Kyeong-Ho Choi · Dong-Hee Kim)

한국전기연구원* · 포항산업과학연구원** · 경북전문대*** · 영남대학교****

Abstract

In this paper, a new approach for detecting broken rotor bars in a squirrel-cage induction motor is proposed. The air-gap flux variation analysis was done using search coils inserted in stator slots when broken rotor bar occurs. An accurate modeling and analysis of air-gap flux variation in the induction motor are developed using finite-element (FE) software packages, and measurement of the flux are made using search coils. The simulation was done for the induction motor with 380 [V], 5 [HP], 4 Poles, 1,742 [rpm] ratings using the commercial FE analysis tool. The simulation and experiment results can be useful for detecting the broken rotor bar of an induction motor.

1. 서 론

유도전동기는 산업현장에서 핵심적인 동력전달원으로서 가장 많이 사용되고 있기 때문에 안전운전과 신뢰성이 중요하다. 그러나 예기치 못한 유도전동기의 고장 발생 가능성은 항상 존재하고, 유도전동기의 고장은 직접적으로 생산공정의 중단을 야기시켜 생산량 및 품질 저하를 가져오게 되고, 중요 설비의 동력전달을 불가능하게 하여 치명적 상황을 초래할 수 있다[1][2].

유도전동기의 고장원인으로는 진동을 수반하는 베어링 소손, 회전자 편심, 회전자 바(Bar) 등의 고장이 대부분을 차지하고 있으며, 이러한 현상은 또한 Air-gap의 편심에 의한 진동을 유발하게 된다. 따라서 연속적이고 안정된 동력의 공급을 위해서는 진동현상 발생시 초기에 판별하고 대처할 수 있는 신속하고 신뢰성이 높은 진동감시 시스템의 개발이 이루어져야 한다[1-3].

최근에는 유도전동기의 고장예측과 적절한 교체시기 선정을 위한 연구가 많이 이루어지고 있고, 대부분의 연구가 전동기의 고장유형에 따른 감시 및 진단 시스템을 구축하여 전동기의 이상징후를 사전에 예측하는 방법에 관한 것으로서, 고장발생 이전에 적절한 정비 및 교체계획을 수립하기 위함이다[1][3].

그러나 유도전동기의 고장진단을 위한 여러 가지 방법들이 부가적인 장치와 많은 경비가 소요되고, 진동유형 분석이 충분치 않고, 고장원인별 데이터베이스 확보가 미비한 실정이다. 따라서 유도전동기의 이상상태 감시 및 진단기법의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 고

장유형에 따른 전동기의 이론적 해석 및 특성분석과 함께 실험적 데이터베이스 구축이 필수적이다.

본 연구에서는 유도전동기의 회전자 고장 및 진동을 초래하는 회전자 Broken Bar 고장을 운전중에 검출할 수 있는 방법을 제시한다. 회전자가 편심 되었거나 Broken Bar가 발생하게 되면 공극 자속밀도가 변하는 원리를 이용하여, 고정자 슬롯 내에 자속센서를 취부하여 회전자의 자속변화를 모니터링 함으로서 진동 및 Bar 이상상태를 사전에 감지할 수 있게 된다.

본 논문에서는 유도전동기의 진동현상을 해석하기 위한 Broken Rotor Bar 상태를 모의한 2차원 유한요소 해석 모델을 제안한다. 또한, 공극의 자속변화를 구하기 위해 고정자 슬롯에 민감도가 높은 자속센서(Search Coil)를 부착하였고, 공극에서의 쇠교자속, 공극 자속밀도, 상전류 파형, 전류 스펙트럼 등의 해석을 통하여 Broken Bar 현상에 따른 유도전동기의 특성변화를 분석하였다. 정상상태와 고장상태의 2가지 경우에 대한 유한요소 해석결과를 비교하였고, 회전자 Broken Bar의 갯수를 다르게 모델링하여 해석함으로써, 공극에서 회전자 자속에 의한 전압파형의 왜곡을 분석하여 진동정도를 판별할 수 있는 방법을 제안한다. 또한, 고장모의 시뮬레이터를 이용한 실험을 통하여 정상 및 고장모의 전동기의 자속센서 출력파형을 비교하였고, 전동기에 취부된 진동센서의 출력을 각각 비교하였다.

본 논문에서의 특성해석 및 고장모의 실험에 사용된 전동기는 4극, 380 [V], 5 [HP], 1,742 [rpm]의 정격의 3상 농형 유도전동기를 대상으로 하였다.

2. 유도전동기의 진동유형

유도전동기와 같은 회전기기는 어떠한 형태이든 일반적인 미세의 진동이 발생할 수 있다. 회전기의 지속적인 미세진동은 기기의 노화나 사용연수에 따라 점차 크게 되고, 궁극적인 손상을 발생시켜 결국에는 기기의 소손으로 이어지는 경우가 많다. 유도전동기의 진동 발생원인은 크게 기계적인 요인과 전기(자기)적인 원인으로 나눌 수 있는데, 기계적인 진동원인으로는 표 1과 같이 회전자의 불균형, 조립시 이상원인, 축의 임계속도에서 운전, 구조물과 공진, 마찰, 잘못된 설치, 열팽창 등이 원인으로 나타나고 있다. 전기(자기)적인 진동원인으로는 극 자속(Flux)의 불균형, 회전자의 Broken Bar 등에 의한 것이 주종을 이루고 있다[2][4].

회전체 진동에 관한 연구가 활발히 이루어지면서 원인별 대응력도 향상되고 있는데, 특히 상시 감시진단 시스템을 구축하여 사고징후의 조기 예측 및 조치로 기기의 교체와 수리가 적기에 이루어짐으로서 불시적인 고장으로 인한 심각한 피해를 감소시키고 있다[1-4].

그러나 전동기의 진동은 한가지 원인으로 시작되더라도 고장현상이 복합적으로 나타나는 경우가 많기 때문에, 전동기의 정확한 진동원인을 분석하기 위해서는 다양한 진동유형에 대한 해석과 분석 자료가 축적되어야만 된다. 그 중에서도 유도전동기 회전자 진동의 대표적인 유형인 회전자 편심과 Broken Bar에 의한 전동기의 진동상태 분석이 중요하다.

특히, 유도전동기 회전자 Bar의 소손은 제작 불량이나 운전조건에 의한 파손 때문에 발생되며, Bar의 부분적인 소손으로 인하여 균등하게 놓여진 Bar에 흐르는 전류가 불균등하게 됨으로서 공극자속의 변화를 초래하고, 결국에는 회전자의 심각한 진동을 발생시키게 된다[2][3].

표 1. 진동의 기계적 요인
Table 1. Causes of vibration

진동원인	비율 [%]
회전자의 불균형	41
기초 또는 설치 불량	13
왕복기관의 관성력 불균일	10
축수부의 유격 또는 마모	9
마찰에 의한 자동진동	9
치차의 결합불량 및 마모	8
공기, 물 등의 맥동과 Surging	4
작업상의 충격, 외부진동 등 기타	6

3. 회전자 Broken Bar 해석모델

3.1. 회전자 Broken Bar 모델링

유도전동기의 회전자 Broken Bar의 경향에 따른 자속변화 해석에 사용된 전동기는 고정자의 슬롯이 36개, 회전자 Bar의 갯수가 28개인 4극, 5 [HP] 농형 유도전동기이고, 유한요소(Finite Element; FE) 해석시간을 고려하여 1/2면만 모델링하였고, 해석에 사용된 프로그램은 상용프로그램인 Maxwell을 이용하였다.

Broken Rotor Bar를 모델링하는 방법으로는, Bar의 재질을 변화시켜 정상상태시의 Bar에 비해 도전율을 매우 작게 하여 상대적으로 저항을 크게 함으로서 Bar에 전류가 흐르지 않게 하는 방법과, 1개 Bar에 대하여 주위의 Bar와 연계된 회로를 단절함으로써 전류가 흐르지 않도록 하는 등의 2가지가 있다. 또한, 회전자 Bar의 파손 수량에 따라 일반적으로 공극의 자속밀도가 다르게 나타나므로 본 논문에서는 유한요소 해석을 위해 Bar의 재질을 변화시켜 2차 전류의 흐름을 제한하여 모델링하는 2번째 방법을 적용하였다.

유도전동기의 회전자 Broken Bar에 따른 특성을 구하기 위한 연구로서는, 공극의 자속변화 관찰, 온도측정, 회전자의 속도, 진동, 전류파형 분석 등의 방법이 많이 이용되고 있지만, 본 논문에서는 회전자의 정상상태와 Broken Bar 상태일 때 상전류의 파형과 전류 스펙트럼을 분석하였고, 또한 공극의 자속을 관찰함으로써 특성 변화를 조사하였다. 공극 자속의 관측은 고정자의 슬롯에 서치코일을 설치하여 서치코일에 유기되는 전압의 파형과 주파수 분석을 통하여 실행하였다[5].

그림 1은 유도전동기의 회전자 Broken Bar에 따른 특성을 해석하기 위한 2차원 모델로서, Broken Bar를 1~3개로 각각 설정하고, 각 경우에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. 20 turns, 18 [Ω]의 값을 가지는 서치코일은 FE 프로그램 특성을 고려하여 외부회로로 연결하여 쇠교자속과 유기전압을 각각 구하였다.

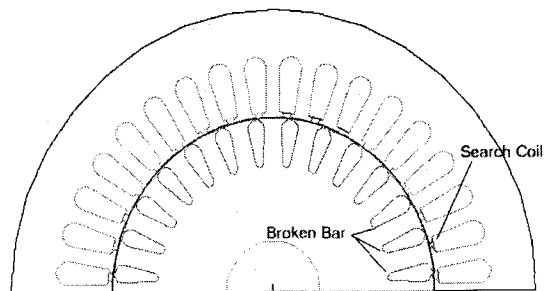


그림 1. Broken Bar 해석모델
Fig. 1. Analysis model of broken bar

그림 2는 Broken Rotor Bar로 인한 전류의 흐름을 나타내고 있다. 수직선은 각각 Bar를 의미하고, k+1번째 Bar가 Broken되었을 때 각각의 Bar에 흐르는 전류는 균형이 깨지면서 k+1 주위의 k와 k+2 Bar에 흐르는 전류가 그림과 같이 큰 루프를 형성하면서 전류가 같아지게 된다. 이러한 Broken Bar의 현상으로 인하여 공극 자속의 불균형이 일어남과 동시에 국부적인 온도 변화, 상전류의 변화를 가져오게 된다.

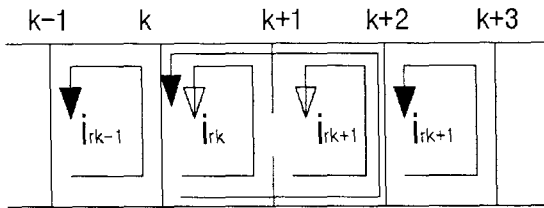


그림 2. Broken Bar에 의한 전류 흐름도
Fig. 2. Current flow for broken bar

3.2. 자속측정을 위한 서치코일

유도전동기 회전자에 Broken Bar에 기인한 진동에 의해 공극에서의 자속변화가 발생하는 것을 검출하기 위하여 본 연구에서는 그림 3과 같은 서치코일을 자체 제작하였다. 서치코일은 자속검출과 제작, 조립 등 다양한 면을 고려하여 기판형식으로 제작하였고, 20 turn, 18 [Ω]의 값을 가지도록 설계되었다. 서치코일의 취부 위치는 고정자 치(Tooth)와 치 사이의 웨지(Wedge) 아래에 부착하는 방식을 채택하였다.

그림 4는 유한요소 해석시 서치코일에 유기되는 전압을 알기 위한 모델과 자속검출을 위한 외부회로를 나타내고 있다.



그림 3. 자속측정을 위한 서치코일
Fig. 3. Search coil-typed flux sensor

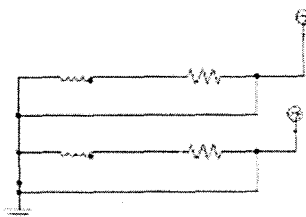


그림 4. 서치코일의 외부회로도
Fig. 4. External circuit line for search coil

4. 유한요소 해석결과

Broken Rotor Bar에 따른 전동기의 특성변화를 분석하기 위하여 정상상태와 Broken Bar 상태의 2가지 경우에 대하여 유한요소(FE) 해석을 수행하였다. 또한, Broken Bar 상태는 Broken된 Bar의 수량을 다르게 하여 해석하고, 정상상태와 Broken Bar 상태에서의 토크 특성, 상전류 파형, 서치코일의 유기전압 및 공극의 자속밀도 변화를 비교 분석하였다. 그림 5는 정상상태시 회전자 1,742 [rpm]에서 0.15 [sec]에서의 쇄고자속을 보여주고 있다.

그림 6과 그림 7은 각각 정상상태와 3개의 Broken Bar 상태에서 토크 특성을 나타낸 것으로서, 정상상태에서는 회전자가 회전하더라도 일정한 토크로 나타나고 있으나, Broken Rotor Bar가 있는 경우에는 토크 특성이 크게 변화되는 것을 볼 수 있다.

그림 8과 그림 9는 각각의 경우에서 상전류 파형을 나타낸 것으로서, 정상상태에서는 시간이 흐름에 따라 파형이 일정하게 나타나고 있으나, Broken Rotor Bar 상태에서는 상전류 파형이 주기성을 갖고 진동하는 것을 볼 수 있다.

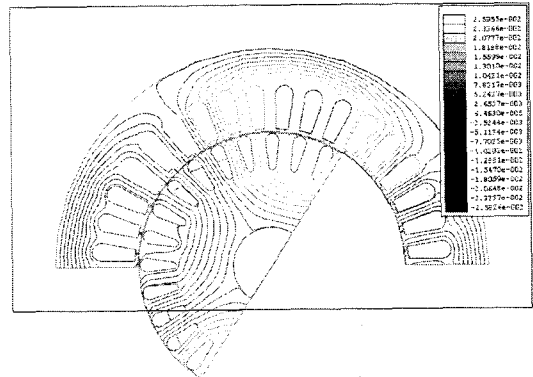


그림 5. 정상상태시의 등가자속선
Fig. 5. Equivalent flux line at normal condition

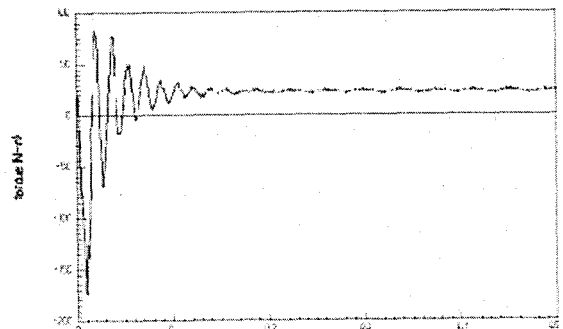


그림 6. 정상상태시의 토크특성
Fig. 6. Torque characteristics at normal condition

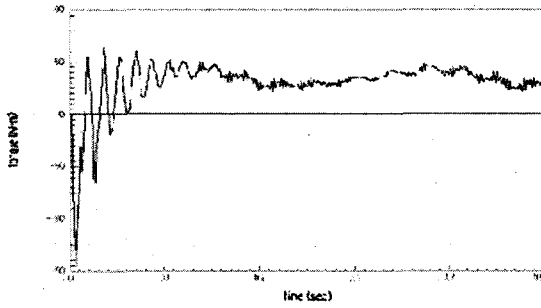


그림 7. Broken bar 3개일 때의 토크특성
Fig. 7. Torque characteristics at 3-broken rotor bar

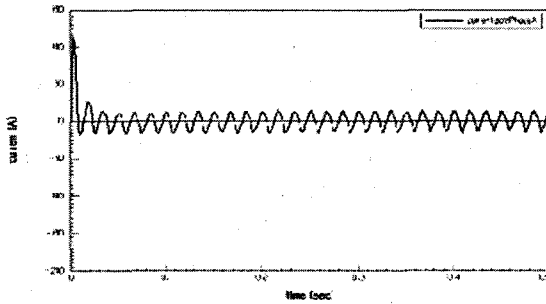


그림 8. 정상상태시의 상전류 파형
Fig. 8. Waveform of phase current at normal condition

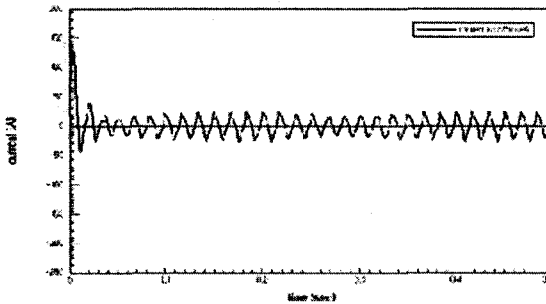


그림 9. Broken bar 3개일 때의 상전류 파형
Fig. 9. Waveform of phase current at 3-broken rotor bar

대값은 정상상태와 비슷하나 회전자의 위치에 따라서 전압파형의 찌그러짐 현상이 두드러지게 나타남을 볼 수 있다.

그림 14와 그림 15는 각각 정상상태와 3개가 Broken Bar일 때의 공극 자속밀도를 나타낸 것으로서, 대체적으로 정상상태에서는 자속밀도가 높은 반면 Broken Bar일 때는 낮게 나타났다. 특히, Broken Bar가 위치해 있는 150~180° 부분에서는 그림 15에서와 같이 공극 자속밀도가 심하게 변화된 것을 볼 수 있다. 또한, 대칭성이 보이지 않고, Broken Bar 지점은 고정자의 Tooth에 의한 자속밀도 변화를 크게 받지 않고, 크기도 작은 값에서 크게 변하지 않음을 볼 수 있다.

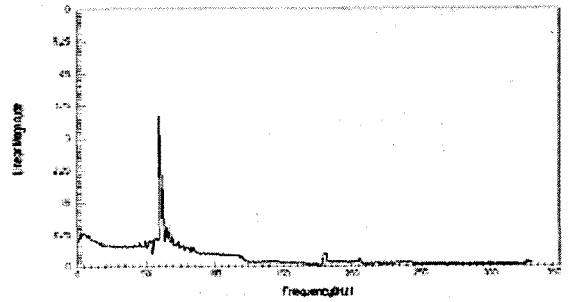


그림 10. 정상상태시에서 상전류 스펙트럼
Fig. 10. Spectrum of phase current at normal condition

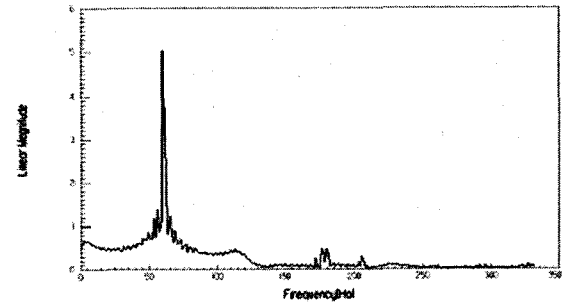


그림 11. Broken bar 3개일 때의 상전류 스펙트럼
Fig. 11. Spectrum of phase current at 3-broken rotor bar

그림 10과 그림 11은 각각 정상상태와 3개의 Broken Bar 상태에서 상전류의 스펙트럼을 나타낸 것으로서, 모두 60 [Hz]에서 가장 큰 값을 보여주고 있다. 그러나 Broken Bar의 경우에는 60 [Hz] 전후의 주파수 대역에서 다양한 성분이 나타남을 볼 수 있다. 또한, 그림 11에서와 같이 Broken Rotor Bar일 때에는 170~180 [Hz] 부근에서 큰 주파수 스펙트럼 분포를 보이고 있다.

그림 12와 그림 13은 각각 정상상태와 3개의 Broken Bar인 경우에 대한 고정자 슬롯에 삽입된 서치코일에서 유기되는 전압파형을 나타내고 있다. 정상상태에서는 그림 12와 같이 최대값이 1.285 [V]로 거의 일정하게 나타나고 있으나, 그림 13의 Broken Bar인 상태에서는 최

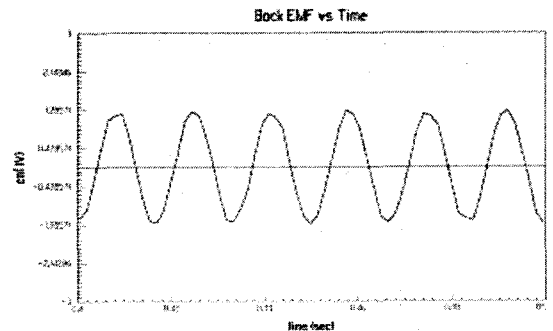


그림 12. 정상상태일 때의 서치코일 유기전압
Fig. 12. Induced voltage of search coil at normal condition

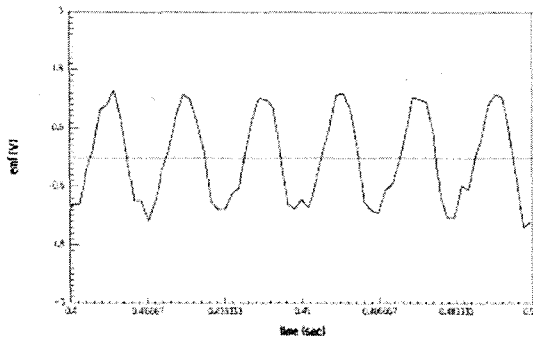


그림 13. Broken Bar 3개일 때의 서치코일 유기전압
Fig. 13. Induced voltage of search coil at 3-broken rotor bar

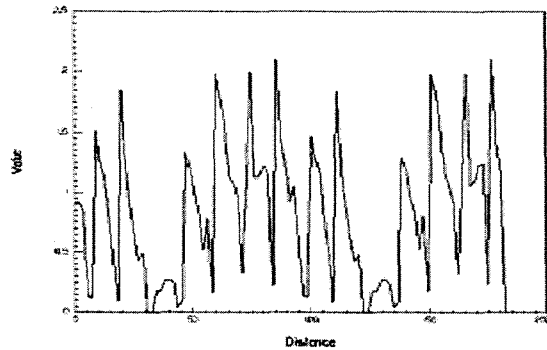


그림 14. 정상상태일 때의 공극 자속밀도
Fig. 14. Air-gap flux density at normal condition

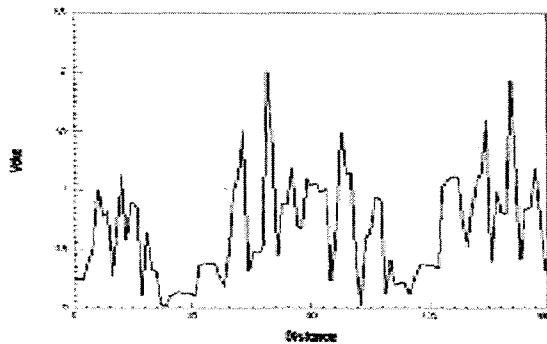


그림 15. Broken Bar 3개일 때의 공극 자속밀도
Fig. 15. Air-gap flux density at 3-broken rotor bar

5. 실험결과

5.1. 실험장치

유도전동기의 회전자 진동실험을 위해서 정상 전동기와 회전자 Broken Bar 등을 모의한 여러 가지 전동기를 제작하여 부하 및 속도를 가변시키면서 자속센서 및 가속도 센서의 출력을 측정하였다.

그림 16은 실제 제작한 정상 및 고장모의 유도전동기를 보여주고 있고, 부하전동기와 속도가변을 위한 인버터를 포함하여 고장모의 시뮬레이터를 그림 17과 같이 구성하였다.

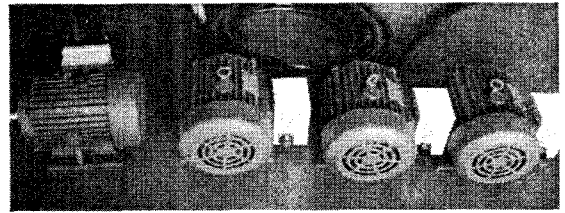


그림 16. 시험용 유도전동기
Fig. 16. Induction motors for experiments

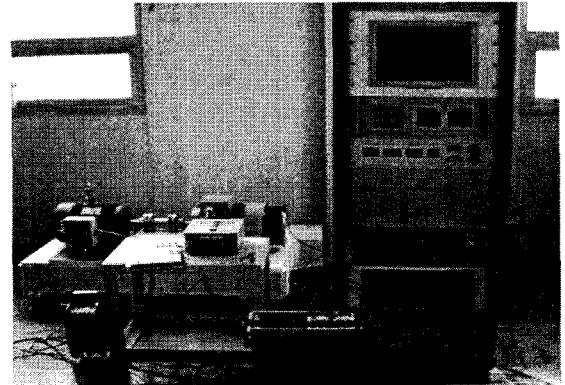


그림 17. 실험장치의 구성
Fig. 17. Experimental setup

5.2. 실험결과

그림 18과 그림 19는 각각 정상 전동기와 회전자 Broken Bar 모의 전동기의 서치코일에서 유기되는 전압파형과 FFT 분석 결과를 나타내고 있다. 서치코일 유기전압은 그림 12와 그림 13에 나타난 유향요소 해석결과와 유사한 특성을 나타내고 있고, FFT 분석에 의한 주파수 특성은 2개의 전동기가 서로 다른 것을 볼 수 있다.

그리고 Broken Rotor Bar에 의한 유도전동기의 진동현상을 정상 전동기와 비교하기 위하여 상용 진동센서인 ACS-01 가속도계를 전동기에 취부하여 회전자의 진동신호를 분석하였다. 그림 20과 그림 21에 각각 나타난 정상 전동기와 Broken Bar 전동기의 진동파형과 FFT 분석결과를 보면, 파형의 형태 및 주파수 특성이 고장이 발생하면 상이하게 됨을 볼 수 있다.

그러므로 고장자 슬롯에 서치코일을 삽입하여 공극의 자속을 측정함으로써 회전자 Broken Bar의 검출이 가능하다는 것을 알 수 있고, 회전자 진동 및 Broken Bar 등의 On-line 모니터링 시스템을 개발하는 데 있어 유용한 방법임을 증명하였다.

또한, FE 해석에 의한 모의실험 결과와 자속센서에서의 측정결과가 유사하므로 회전자 고장과 관련된 데이터베이스 구축을 통하여 유도전동기의 고장진단 알고리즘을 개발하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

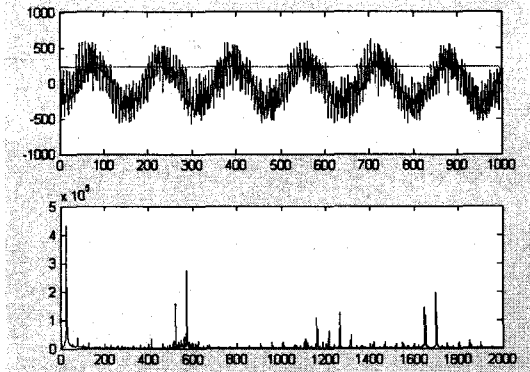


그림 18. 정상전동기의 서치코일 유기전압(上)과 FFT 결과(下)
 Fig. 18. Induced voltage(top) and FFT result (bottom) on search coil in normal motor

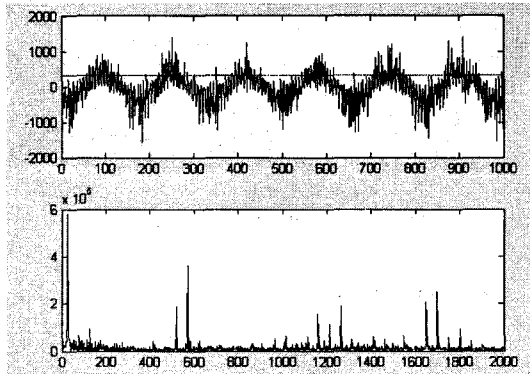


그림 19. Broken bar 전동기의 서치코일 유기전압(上)과 FFT 결과(下)
 Fig. 19. Induced voltage(top) and FFT result on search coil in broken bar motor

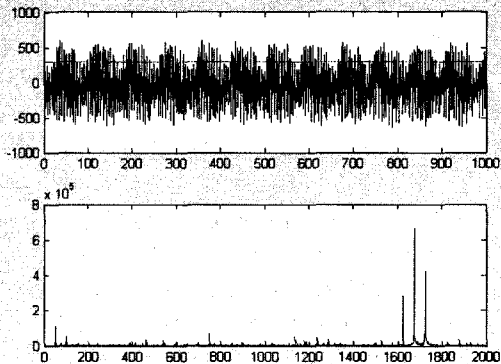


그림 20. 정상 전동기의 가속도 센서 진동신호(上) 및 FFT 결과(下)
 Fig. 20. Vibration waveform(top) and FFT result(bottom) of the normal motor

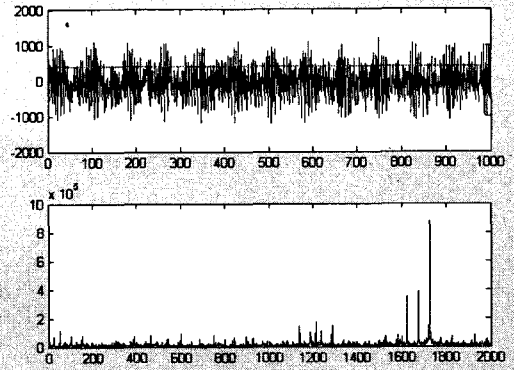


그림 21. Broken bar 전동기의 가속도 센서 진동 신호(上) 및 FFT 결과(下)
 Fig. 21. Vibration waveform(top) and FFT result(bottom) of the normal motor

6. 결론

본 논문에서는 유도전동기의 회전자에서 발생하는 고장 중에서 Broken Rotor Bar를 전동기의 운전중에 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 회전자의 Broken Bar 상태를 2차원적으로 모델링 하였고, 회전자의 진동 및 Broken Bar에 의한 자속변화를 구하기 위해 고정자 슬롯에 Search Coil 형태의 자속센서를 부착하여 공극에서의 쇄교자속, 공극 자속밀도, 토크특성, 유기전압, 상전류 파형, 전류 스펙트럼 등을 해석하였다. 또한, 정상 및 Broken Bar 고장모의 전동기를 이용한 자속센서 및 가속도(진동) 센서의 출력파형을 비교하였다. 이를 통하여 정상상태 및 Broken Rotor Bar 현상에 따른 유도전동기의 제반 특성변화의 분석과 정상 및 고장상태를 판별할 수 있음을 증명하였다. 본 논문의 결과는 유도전동기 회전자의 편심, Broken Bar, 베어링 고장 등의 이상상태를 운전중에 감시할 수 있는 모니터링 시스템 개발에 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] P. Vas, Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, Oxford: Clarendon Press, 1993.
- [2] A.H. Bonnett, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 28, No. 4, pp. 921-936, 1992.
- [3] G.B. Kliman, et al., "Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4, pp. 873-879, Dec. 1988.
- [4] R.F. Walliser and C.F. Landy, "Determination of Inter-bar Current Effects in the Detection of Broken Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, pp. 152-158, March 1994.
- [5] D.H. Hwang, et al., "A Study on Dynamic Simulation and Detection of Air-Cap Eccentricity in Induction Machines", Proceedings of the IEEE ISF 2005, Dubrovnik, Croatia, Vol. 2, pp. 867-870, June 20-23, 2005.