

## Characteristics Analysis on the Effects of Rotor Eccentricity in Squirrel-cage Induction Motor

金美廷\* · 金炳國\*\* · 曹允鉉† · 黃敦夏\*\*\* · 姜東植§

(Mi-Jung Kim · Byong-Kuk Kim · Yun-Hyun Cho · Don-Ha Hwang · Dong-Sik Kang)

**Abstract** - This paper describes the effects of rotor eccentricity in squirrel cage induction machines. Asymmetric electro-magnetic force caused by the frictional worn bearing, rotor misalignment and unbalanced rotor etc. generates an asymmetrical operation, vibration and electro-magnetic noise. The need for detection of these rotor eccentricities has pushed the development of monitoring methods with increasing sensitivity and noise immunity. In this paper, we focus on investigating the asymmetrical operation considering of unbalanced magnetic pull in squirrel-cage induction motor with 380 [V], 7.5 [kW], 4P, 1,768 [rpm]. The effects of the non-symmetric rotor and magnetic force are simulated by finite element method (FEM) and tested using search coils for measuring the actual air-gap flux.

**Key Words** : Eccentricity, Asymmetric, Unbalanced magnetic pull, Squirrel cage induction motor

### 1. 서 론

유도전동기는 생산 현장에서 주된 동력원으로 자리 잡고 있으며, 구조적인 강점 때문에 산업 전반에 널리 사용되고 있다. 오랜 사용과 운전 조건에 따라 각 요소별로 고장이 발생할 수 있으며, 이를 적시에 발견하지 못하고 방치하는 경우 유도전동기뿐만 아니라 전력 계통 시스템에도 악영향을 야기할 수 있다. 이는 시스템의 전체적인 신뢰도를 떨어뜨리고, 복구를 위한 추가 인력, 재정 및 시간의 손실을 초래한다. 따라서 유도전동기의 조기 고장 검출(fault detection)과 고장 분류(isolation)는 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 이에 따라 공정의 생산성 및 안정성의 향상을 위해 시스템 고장의 검출 및 분류에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1].

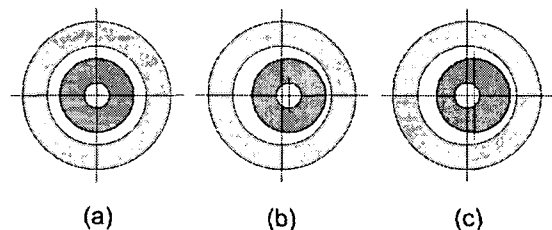
일반적으로 유도전동기의 고장은 내부 권선 결함으로 인한 고정자 권선의 단락이나 개방, 회전자 바 및 엔드링 소손, 회전자와 고정자 사이 공극의 정적, 동적 불평형과 베어링 고장 및 기계적 불균형 등으로 발생한다[2]. 유도전동기의 고장 검출 및 분류를 위한 방법으로는 전동기의 자장(magnetic flux), 진동 신호(vibration signal), 온도 측정(temperature measurement), 적외선 인식(infrared

recognition), 라디오 주파수 방사 모니터링(RF emissions monitoring), 화학적 분석(chemical analysis) 그리고 고정자 전류(line current)를 해석하는 방법 등이 있다[3].

Thomsom과 Thorsen 등은 농형 유도전동기에서 권선의 전류를 모니터링 함으로써 회전자 바의 소손을 진단하는 실험적인 방법을 제시하였고[4-5], Toliyat 등은 유도전동기에서 회전자 편심의 효과를 수학적 해석을 토대로 회전자 전류 또는 토크, 기전력의 변화에 미치는 영향을 연구하였다[6].

유도전동기에 있어 회전자 편심은 진동 발생의 가장 큰 원인으로 작용하며, 크게 정적 편심(static eccentricity)과 동적 편심(dynamic eccentricity)으로 나눌 수 있다. 정적 편심은 회전자가 회전자 축을 중심으로 회전하지만, 그 축이 고정자 축에서 이탈해 있는 경우로서, 정적 편심에서는 공극의 길이가 위치에 따라 초기에 이미 정해져 운전 시에도 변하지 않는다. 동적 편심은 회전자가 고정자 축과 동일한 축을 중심으로 회전하지만, 그 회전축이 회전자의 축과 동일하지 않은 경우이며, 운전 시 공극이 수시로 변하게 된다[7].

그림 1은 회전자 편심을 나타내었다. 그림 1(a)는 회전자가 정상적인 경우이며 그림 1(b)는 정적 편심, 그림 1(c)는 동적 편심을 나타낸다.



(a) normal (b) static eccentricity (c) dynamic eccentricity

그림 1 회전자 편심

Fig. 1 Rotor eccentricity

† 교신저자, 終身會員 : 東亞大學校 電氣工學科 教授 · 工博

E-mail : yhcho@dau.ac.kr

\* 學生會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 碩士課程

\*\* 正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 正會員 : 韓國電氣研究院 産業電氣研究團 前任研究員 · 工博

§ 正會員 : 韓國電氣研究院 電力設備診斷研究그룹 그룹장 · 工博

接受日字 : 2006年 10月 9日

最終完了 : 2006年 12月 8日

본 논문에서는 380[V], 7.5[kW], 4P, 1768[rpm]의 정격을 갖는 농형 유도전동기의 회전자 편심에 따른 특성 고찰 및 진단 시뮬레이터를 개발하기 위하여 연구하였다. 자기력 특성을 고찰하기 위하여 유한요소 해석으로 수행한 결과를 제시하였다. 편심에 따른 전자기적 특성을 해석함으로써 유도전동기의 편심고장이 전동기의 성능에 미치는 영향을 분석하고, 모의 고장 전동기 테스트를 통하여 해석 결과 값의 신뢰성을 검증하였다.

2. FEM에 의한 불평형 자기력 특성해석

2.1 회전자 편심에 따른 불평형 자기력

그림 2는 유도전동기의 회전자 편심에 따른 불평형 자기력 특성을 고찰하기 위하여 유도전동기의 편심된 공극 구조를 나타낸다. 여기서  $\alpha$ 는 회전자의 각 변위,  $\delta(\alpha, t)$ 는 공극의 길이,  $e$ 는 회전자의 이심 길이,  $R$ 은 고정자 내경,  $r$ 은 회전자 내경이다.

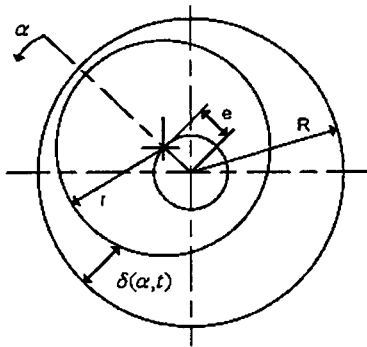


그림 2 편심을 가진 공극  
Fig. 2 Air gap of motor with an eccentric rotor

회전계 이론에서, 각각의 슬롯에 분포되어있는 고정자 권선에 의해 생성되어지는 기자력  $F_m(\alpha, t)$ 은 식 (1)과 같이 고조파의 무한수로 나타 낼 수 있다.

$$F_m(\alpha, t) = \sum_{\nu} \overrightarrow{F_{m_{\nu}}} \sin(\nu\alpha - \omega_{\nu}t - \varphi_{\nu}) \quad (1)$$

여기서  $\omega$ 는 회전각속도,  $\varphi$ 는 상의 초기 위상각이다.

암페어의 법칙(Ampere's law)에 의해 기계 축과 수직을 이루는 평면에서의 자속 밀도 분포를 구하면,

$$\frac{d[b(\alpha, t)\delta(\alpha, t)]}{d\alpha} = \mu_0 R F_m(\alpha, t) \quad (2)$$

정상 유도전동기 일 때 식(2)의 자속밀도 분포를 적분하면 식 (3)이 유도된다.

$$b(\alpha, t)\delta(\alpha, t) = \mu_0 R \sum_{\nu} \frac{1}{\nu} \overrightarrow{F_{m_{\nu}}} \cos(\nu\alpha - \omega_{\nu}t - \varphi_{\nu}) \quad (3)$$

식 (1)에서 분포 함수의 기본 고주파 성분만을 고려하면,

$$F_m(\alpha, t) = -\overrightarrow{F_m} \sin(\alpha - \omega t - \varphi) \quad (4)$$

기본 고주파 성분만 고려하여 자속밀도 분포를 다시 나타내면 식 (5)와 같다.

$$b(\alpha, t)\delta(\alpha, t) = \mu_0 \{ \overrightarrow{F_m} R \cos(\alpha - \omega t - \varphi) + v(0, t) \} \quad (5)$$

여기서  $v(0, t)$ 는 적분 상수이다.

만약 회전자가 편심 되었으면, 공극의 길이  $\delta(\alpha, t)$ 는

$$\delta(\alpha, t) = \delta_0 \{ 1 - \epsilon \cos(\alpha - \omega t - \varphi_{\epsilon}) \} \quad (6)$$

여기서 편심율  $\epsilon$ 은,

$$\epsilon = \frac{e}{\delta_0} = \frac{e}{R-r} \quad (\delta_0 \ll R) \quad (7)$$

$\delta_0$ 은 평균 공극의 길이이다.

공극 퍼머언스  $\Lambda(\alpha, t)$ 는 공극 길이와 역의 관계를 가지며, 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\Lambda(\alpha, t) = \frac{1}{\delta(\alpha, t)} = \sum_{\lambda=0}^{\infty} A_{\lambda} \cos[\lambda(\alpha - \varphi_{\epsilon})] \quad (8)$$

식 (8)에서의 푸리에 계수  $A_{\lambda}$ 는 식 (9)와 같다.

$$A_{\lambda} = \begin{cases} \frac{1}{\delta_0} \frac{1}{\sqrt{1-\epsilon^2}} & (\lambda=0) \\ \frac{2}{\delta_0} \frac{1}{\sqrt{1-\epsilon^2}} \left( \frac{1-\sqrt{1-\epsilon^2}}{\epsilon} \right)^{\lambda} & (\lambda>0) \end{cases} \quad (9)$$

식 (8)을 식 (5)에 대입하면 식 (10)의 방사방향의 자속 밀도 분포로 나타 낼 수 있다.

$$b(\alpha, t) = \mu_0 \Lambda(\alpha, t) \overrightarrow{F_m} R \cos(\alpha - \omega t - \varphi) + v(0, t) \quad (10)$$

불평형 자기력(UMP)는 맥스웰 응력법 (Maxwell stress tensor)에 의해 계산 될 수 있다.

$$F = \oint \frac{b(\alpha, t)^2}{2\mu_0} dS \quad (11)$$

여기서, x와 y방향의 자기력은 회전자 바깥 표면에 걸친 표면 적분에 의해 얻어진다.

$$F_x = \int_0^{2\pi} \frac{b(\alpha, t)^2}{2\mu_0} \sin\alpha R l d\alpha \quad (12)$$

$$F_y = \int_0^{2\pi} \frac{b(\alpha, t)^2}{2\mu_0} \cos\alpha R l d\alpha \quad (13)$$

본 논문에서는 농형 유도전동기의 동적 편심에 대한 수학적 해석 식 (12)와 식 (13)을 유한요소법을 통하여 해석하였다.

### 2.2 유한요소법에 의한 해석

유한요소 해석에 사용되는 자계 방정식은 2차원 좌표계에 서 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)을 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \vec{A} \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = -\vec{J}_{ext} + \sigma \left[ \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) + \nabla \phi \right] \quad (14)$$

- 여기서,  $\mu$  : 자기투자율
- $A_z$  : z축 방향 자기 벡터 포텐셜
- $J_{ext}$ : 입력전류 밀도
- $\vec{v}$  : 회전자 속도
- $\phi$  : 전기 스칼라 포텐셜
- $\sigma$  : 도전율

식 (14)의 우변에서 속도 항은 이동 좌표계를 사용하면 상대 속도가 없어진다. 또한 2차축 와전류는 z축에 대하여 대칭으로 가정하여  $\nabla \phi$ 항은 생략하고 2차원으로 다시 전개하면 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{ext} + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \quad (15)$$

자계 방정식에 의해 공극 자속밀도를 나타내면 식 (16)과 같다.

$$B = \sqrt{\left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2} \quad (16)$$

### 2.3 특성해석 및 실험 고찰

본 연구에서는 유한요소해석 상용 프로그램인 Flux 2D를 이용하여 유도전동기를 삼각형 요소, 시간 스텝으로 모델링하였다. 공극은 3개의 층(회전자 공극, 회전 공극, 고정자 공극)으로 분할하였으며, 가운데층인 회전 공극(moving band)에서만 요소를 재분할하는 방법을 사용하여 요소 재분할에

소요되는 시간을 줄였다.

편심을 가진 유도전동기 모델링 시, 3개의 공극 층 중 회전 공극의 중심을 회전자의 중심축과 함께 두면 회전축이 시간에 따라 일정한 정적 편심이 되고, 회전 공극의 중심을 고정자의 중심축과 함께 두면 회전축이 시간에 따라 변하는 동적 편심이 된다.

유도전동기 운전 시 회전자 편심과 같은 고장이 발생하면 공극 자속밀도의 변화로 인하여 각 고정자 슬롯에서의 쇄교 자속이 변하게 된다. 자속 측정을 위해 전동기의 각상별(A, B, C) 최초 입력슬롯에 써치 코일을 삽입하여 유기전압을 측정하였다. 써치 코일의 턴수는 7턴이고 저항은 2.5 [Ω]이다.

실제 테스트에 사용된 유도전동기는 샤프트의 굽힘 현상에 의한 동적 편심을 가지고 있다. 외부에서 프레스 압력을 가해 샤프트에 0.3mm의 편심을 주었다.

유도전동기의 특성 실험을 위해 고장모의 전동기와 부하 전동기, 각각의 구동 인버터 및 2개의 전동기를 기계적으로 연결하는 커플링 부분으로 측정 시스템을 구성하였다. 그림 3은 유도전동기 특성 측정 시스템을 나타내고 있다.

표 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 유도전동기의 제원을 나타낸다.

표 1 유도전동기 제원

Table 1 Specification of induction motor

구분	항목	치수
사 양	정격 출력 [kW]	7.5
	정격 전압 [V]	220/380
	정격 속도 [rpm]	1760
	정격 토크 [Nm]	40
고정자	슬롯 수	36
	외 경 [mm]	220
	내 경 [mm]	150
	극 수	4
회전자	공 극 [mm]	0.5
	외 경 [mm]	149
	적층길이 [mm]	110
	회전자 바	Al

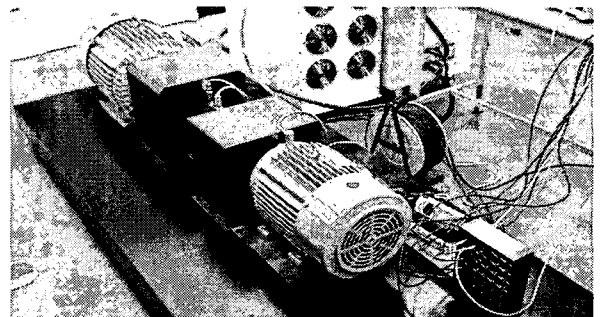


그림 3 유도전동기 특성 측정 시스템

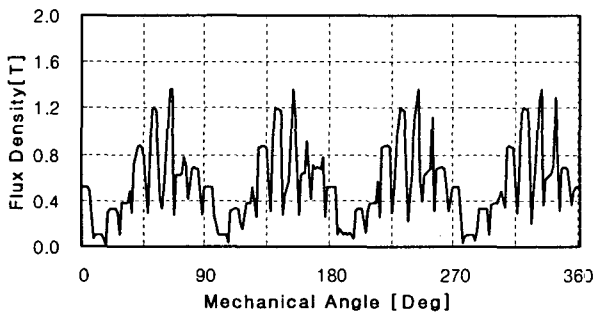
Fig. 3 Experimental system for induction motor

회전자의 편심으로 인해 공극의 자속밀도는 비대칭 구조를 가지게 된다. 그림 4는 정격속도 1768 [rpm], 0.24 [s]에서의 공극 자속밀도를 나타낸다. 정상모델 (a)의 공극 최대 자속 밀도는 1.4 [T]로 1주기 동안에 일정한 최대값을 가지

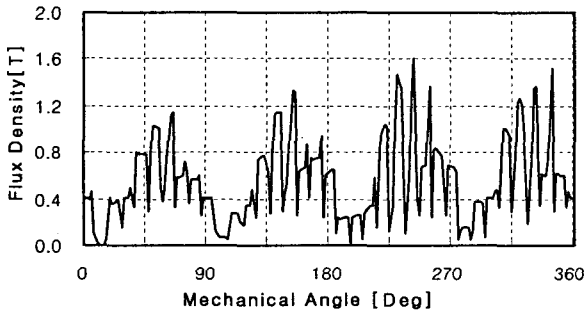
게 되지만, (b)와 같이 편심 되었을 경우는 공극 자속밀도가 편심 된 공극(210°)에서 1.6 [T], 그 반대쪽(30°) 공극에서는 1.2 [T]로 양쪽 공극에서 0.4 [T]의 차이를 보이고 있다.

회전자 바에 유기되는 전압은 공극의 자속에 의해 발생하므로 그림 5에서 비대칭 자속으로 인해 유기 전압 리플이 심하게 나타남을 볼 수 있다.

그림 6은 정격부하 시 정상 전동기 고정자 전류와 편심된 부분의 고정자 전류를 비교하고 있다. 편심된 회전자 부근의 자속밀도는 권선의 유기전압에 영향을 주고, 이는 다시 권선 전류에 영향을 미치게 된다. 회전자 편심을 가진 전동기의 전류 피크치가 약 3 [A] 정도 큼을 볼 수 있다.



(a) normal model



(b) eccentricity model

그림 4 1,768 [rpm], 0.24 [s] 일 때 공극 자속밀도  
Fig. 4 Flux density of the air gap at 1,768 [rpm], 0.24 [s]

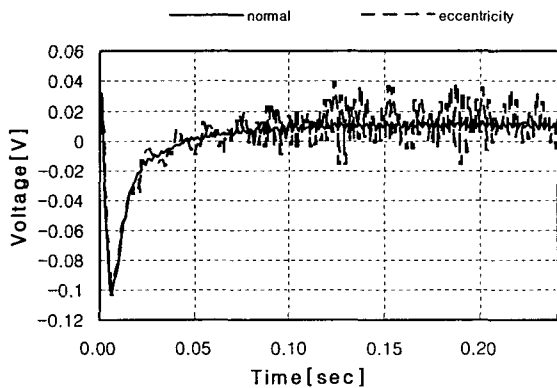


그림 5 정격부하 기동 시 회전자 바의 유기전압  
Fig. 5 Induced rotor bar voltage at rated load start up

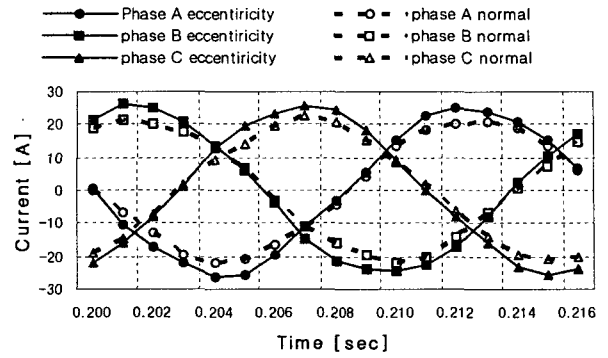
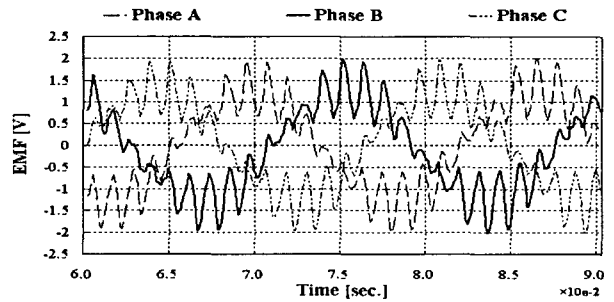


그림 6 정격부하 정상상태 고정자 전류 비교  
Fig. 6 Comparative stator current

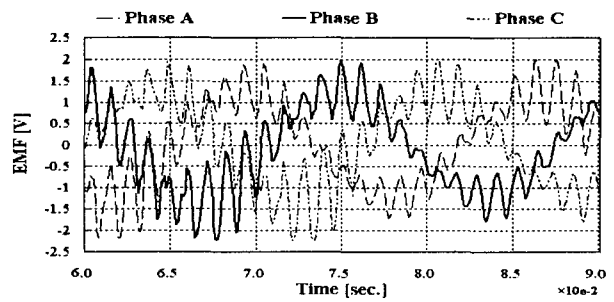
그림 7은 실제 유도전동기의 정상 모델과 편심 모델의 정상상태 유기전압을 보여준다. 동적 편심일 경우에는 자속이 주기성을 가지고 계속 변화하기 때문에 한 지점에서만 유기전압을 검출하였다. 정상 모델의 유기전압은 최대치 2 [V]로 나타남을 볼 수 있으나 편심 모델의 유기전압 파형을 보면 공극의 길이가 최소인 지점에서 약 -2.2 [V], 최대인 지점에서 약 -1.7 [V]가 유기됨을 볼 수 있다.

그림 8은 실제 유도전동기의 고정자 슬롯에 삽입한 써치 코일에서의 유기전압 파형이다. 정상 모델의 유기전압은 최대치 1.5 [V]로 나타남을 볼 수 있으나 편심 모델의 유기전압 파형을 보면 -2 [V]까지 유기됨을 볼 수 있다.

유한 요소법에 의한 결과 파형과 실험을 통해 얻은 결과 파형의 상이함은 시간의 샘플링의 차이로 해석된다.

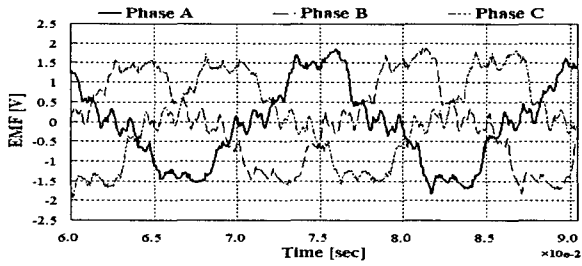


(a) normal model

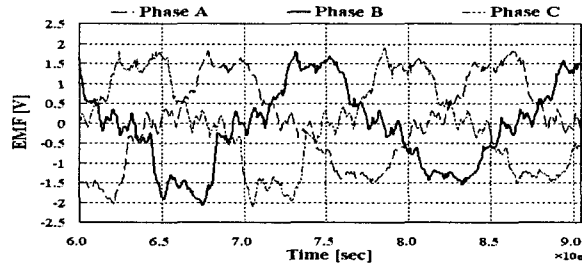


(b) eccentricity model

그림 7 써치 코일 유기전압  
Fig. 7 Induced voltage at the search coil



(a) normal model



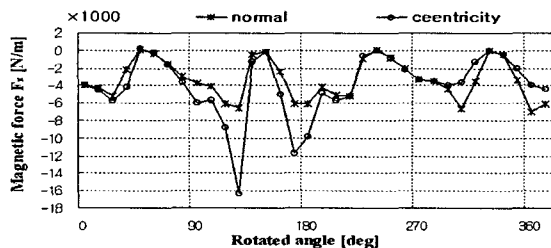
(b) eccentricity model

그림 8 써치 코일 유기전압 측정파형

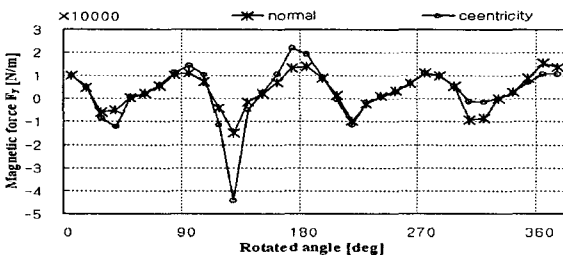
Fig. 8 Measured induced voltage at the search coil

그림 9는 1,768 [rpm] 일 때 공극 중 한 점(52.9, 73.45)에서의 자기력을 나타내었다. 정상 모델에서는 회전자가 1주기 동안 x축 방향에서 최대 6 [kN/m], y축 방향에서 최대 10 [kN/m]의 일정한 자기력을 가지지만, 편심이 발생한 경우는 그림 4 (b)에서 보여 지는 것과 같이 비대칭 공극 자속분포로 인해 자기력의 불평등이 일어남을 볼 수 있다. 따라서 이러한 자속밀도의 비대칭이 자기력에 영향을 미치게 되고 기계적 진동과 소음, 더 나아가 고장을 야기하게 된다.

그림 10은 0~0.1 [s] 동안 유도전동기의 진동을 측정된 값이다. 편심 모델이 비대칭 자기력에 의해 정상 모델보다 진동이 더 심화됨을 볼 수 있다.



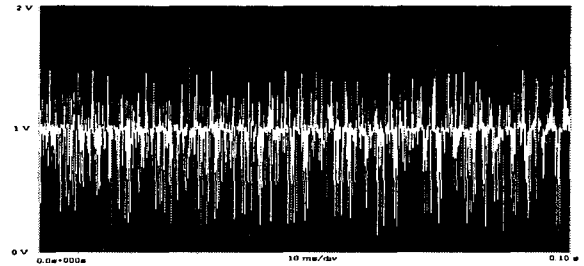
(a) x-axis direction



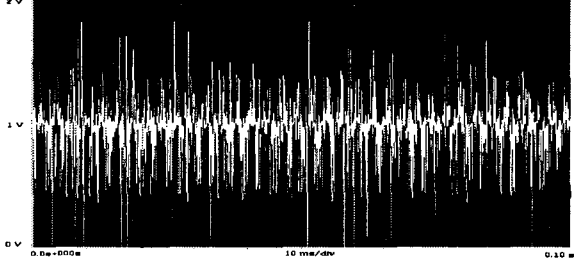
(b) y-axis direction

그림 9 1,768 [rpm]일 때 공극의 한 점에서의 자기력

Fig. 9 Magnetic force at the one point in the airgap



(a) normal model



(b) eccentricity model

그림 10 진동 측정 파형

Fig. 10 Measured waveform of vibration

### 3. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 3상 농형 유도전동기에 있어서 회전자의 동적 편심에 따른 특성 고찰 및 진단 시뮬레이터 개발을 위하여 전자기적 현상을 연구하였다. 편심으로 인하여 공극 자속밀도의 분포 차이가 발생함에 따라 자속밀도의 불균형, 회전자 바 유기전압의 변화, 입력전류의 변화와 불평형 자기력이 발생함을 확인하였고, 고장모의 유도기의 실험을 통하여 해석에 의해 일어난 유기전압과 같은 비대칭 유기전압이 생김을 확인하였다. 이로 인해 유도전동기의 회전자 진동을 유발함을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 해석결과를 통하여 회전자 고장감시 알고리즘 개발의 기반이 될 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 논문은 산업자원부의 지역혁신인력양성사업 주관과 한국전기연구원 기본연구사업의 위탁으로 수행된 연구결과임.

### 참 고 문 헌

- [1] Don-Ha Hwang, et al., "A Method for Dynamic Simulation and Detection of Air-gap Eccentricity in Induction Motors by Measuring Flux Density", IEEE CEFC 2006, Miami, USA, Paper No. PA7-7, April 30th - May 3rd 2006.
- [2] 황돈하 외, "유도전동기의 회전자 진동에 따른 공극의 자속변화 해석", 2004 대한전기학회 전기기기 및 에너지

지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, pp. 62~64, 2004.

- [3] Subhasis Nandi et al, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review", IEEE Trans. on Energy conversion, Vol. 20, No 4, pp. 719-729, 2005.
- [4] W.T. Thosom and M. Fenger, "Industrial Application of Current Signature Analysis to Diagnose Faults in 3-Phase Squirrel Cage Induction Motors", Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp. 205-211, 2000.
- [5] O.V. Thorsen and M. Dalva, "Method of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors", ETEP, Vol. 8, No. 5, pp. 383-395, 1998.
- [6] H.A. Toliyat, et al., "A Method for Dynamic Simulation and Detection of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No. 4, pp. 910-918, Jul./Aug. 1996.
- [7] D.H. Hwang, et al., "Analysis of a Three Phase Induction Motor under Eccentricity Condition", IEEE IECON 2005, North Carolina, USA, pp. 2609~2613, Nov. 6-10, 2005.
- [8] 황돈하, 外, "유도전동기의 편심에 의한 회전자 진동 해석", 2005. 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 1201~1203, 2005. 7. 18-20.
- [9] A. Tenhunen, et al., "Spatial Linearity of Unbalanced Magnetic Pull in Induction Motors during Eccentric Rotor Motions", 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2002), Bruges, Belgium, Vol. 1, pp. 330-335, Aug. 25-28, 2002.

저 자 소 개



**김미정 (金美廷)**

2006년 2월 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2006년~현재 동아대 일반 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 051-200-6952

Fax : 051-200-7742

E-mail : mjkim82@donga.ac.kr



**김병국 (金炳國)**

2000년 2월 부경대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 8월 동아대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 051-200-6952

Fax : 051-200-7742

E-mail : byongkuk@daum.net



**조윤현 (曹允鉉)**

1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986~1987년 삼성종합기술원 전자기연구소 연구원. 1991년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990~1995년 한국전기연구원 선임연구원. 1995~현재 동아대 공대 전기공학과 교수

Tel : 051-200-7742

Fax : 051-200-7742

E-mail : yhcho@dau.ac.kr



**황돈하 (黃敦夏)**

1991년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1993년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단연구그룹 선임연구원.

Tel : 055-280-1544

Fax : 055-280-1547

E-mail : dhhwang@keri.re.kr



**강동식 (姜東植)**

1983년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 책임연구원, 2005년~현재 한국전기연구원 전력설비진단연구그룹 그룹장.

Tel : 055-280-1573

Fax : 055-280-1547

E-mail : dskang@keri.re.kr