

회전자 바 개방과 회전자 편심에 의한 단상 유도 전동기의 전기 및 기계적 특성 해석

論 文
51B-8-2

Electromechanical Characteristics of a Squirrel Cage Induction Motor due to Broken Rotor Bars and Rotor Eccentricity

朴商振* · 張正煥** · 張健熙*** · 李勇福[§] · 金昌鎬^{§§}
 (Sang-Jin Park · Jung-Hwan Chang · Gun-Hee Jang · Yong-Bok Lee · Chang-Ho Kim)

Abstract - This research investigates the electromechanical characteristics of a single-phase squirrel cage induction motor due to broken rotor bars and rotor eccentricity. Numerical analysis is performed by solving the nonlinear time-stepping finite element equation coupled with the magnetic field equation, circuit equation and mechanical equation of motion. It shows that the asymmetry of magnetic flux due to the broken rotor bars and rotor eccentricity introduce a change in the stator current, torque, speed, magnetic force and vibration of a rotor at the same time. However, even in the existence of rotor eccentricity, a broken rotor bar introduces a dominant change in the magnetic force and rotor displacement, i.e., beating phenomenon in time domain and sideband frequencies in frequency spectra, respectively.

Key Words : Broken Rotor Bar, Dynamic Eccentricity, Sideband Frequency, Squirrel Cage Induction Motor, Static Eccentricity, Time-Stepping Finite Element Method

1. 서 론

산업용으로 가장 많이 사용되는 농형(squirrel cage) 유도 전동기에 있어서 자주 발생하는 결함 중에는 회전자 바의 개방(broken rotor bar), 또는 회전자의 편심(eccentricity of rotor), 즉, static 및 dynamic 편심 등이 있다. 유도 전동기 회전자 바의 개방과 회전자의 편심은 공극(air gap)에서 비대칭적인 자속(magnetic flux)분포를 발생시켜 입력 전류, 토크, 불균형 자기력, 편심, 진동 등의 기전 연성 변수(electromechanical parameter)들에 영향을 주고, 이런 변수들의 변화는 회전자의 파손을 더욱 촉진하며, 또 다른 종류의 기기 손상을 가져올 수 있다. Thomson 과 Thorsen 등은 농형 유도 전동기에서 권선의 전류를 모니터링 함으로써 회전자 바의 개방을 진단하는 실험적인 방법을 제시하였고 [1-2], Bangura 와 Fiser 등은 회전자의 기계적인 운동을 고려하지 않은 상태에서 회전자 바가 개방될 경우, 전자장 수치해석을 통해 권선 전류 또는 토크의 변화를 보고하였다 [3-4]. 또한 Dorrel 등은 유도 전동기에서 회전자 편심의 효과를 자기장에서의 이론적인 해석과 실험으로 보여주었다 [5]. 그러나 이전의 연구는 회전자의 기계적인 운동을 해석에 고려하지 않았거나 기계적 변수를 연구에 포함하지 않았

으며, 더욱이 회전자 바의 개방과 회전자 편심을 동시에 고려하지 않았으므로, 복합적인 이상 신호를 분석할 수 있는 명확한 자료를 제공하지 못한다.

본 연구에서는 농형 구조의 단상 유도 전동기에서 회전자 바가 개방되었을 경우와 회전자에 편심이 발생하였을 경우의 기계 및 전기적인 연성효과를 효과적으로 확인하기 위해 자계 방정식(magnetic field equation), 회로 방정식(circuit equation) 그리고 기계 방정식(mechanical equation)을 결합한 비 선형 시간 차분 유한요소해석을 수행하여, 공극의 자속 밀도 분포, 고정자(stator)의 전류, 토크, 반경 방향 자기력, 회전자의 진동 등의 변수들이 어떻게 변화하는가를 고찰하였다.

2. 해석 방법

농형(squirrel cage) 유도 전동기에 적용되는 자계 방정식은 2차원 좌표계에서 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)을 계 변수로 하여 식 (1) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \\ & = -J_{ext} + \sigma \left(\frac{\partial A_z}{\partial t} - \vec{v} \times \vec{B} - \nabla \phi \right) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 A_z , J_{ext} , \vec{v} , ϕ , σ 는 각각 z 축 방향 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential), 입력 전류 밀도, 회전자의 속도, 전기 스칼라 포텐셜(electric scalar potential), 그리고 회전자 바의 전도율을 나타낸다.

캐패시터(capacitor) 구동형 단상 유도전동기의 주 권선과

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 精密機械工學科 博士課程
 ** 正 會 員 : U. C. Berkeley Post Doctor
 *** 非 會 員 : 漢陽大 工大 機械工學部 副教授 · 工博
[§] 非 會 員 : 韓國科學技術研究院 前任研究員 · 工博
^{§§} 非 會 員 : 韓國科學技術研究院 責任研究員 · 工博
 接受日字 : 2002年 1月 15日
 最終完了 : 2002年 6月 12日

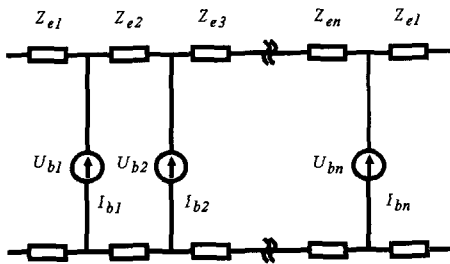


그림 1 회전자의 등가회로
Fig. 1 Equivalent rotor circuit

보조 권선으로 이루어진 고정자의 전압방정식은 식 (2) 로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_s &= I_m R_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + \frac{d\phi_m}{dt} \\ V_s &= I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + \frac{d\phi_a}{dt} + V_c \end{aligned} \quad (2)$$

$$V_c = \frac{1}{C} \int I_a dt$$

여기서 V_s , R_m , R_a , I_m , I_a , L_m , L_a , ϕ_m , ϕ_a 는 각각 주 권선과 보조 권선의 입력 전압, 코일 저항, 입력 전류, 코일 단 부분의 인덕턴스(inductance), 그리고 쇠교 자속 밀도를 나타내며, V_c 는 캐퍼시터 양단에 걸리는 전압을 나타낸다.

회전자는 Fig. 1 에 나타난 것과 같이 회전자 바가 엔드 링(end-ring)에 연결된 다상(multi-phase) 회로로 모델링 되었다. n 번째 회전자 바의 전류는 회로해석에 의하여 식 (3) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{b_n} = \frac{U_{b_{n+1}} - U_{b_n}}{2Z_{e_n}} + \frac{U_{b_{n-1}} - U_{b_n}}{2Z_{e_{n-1}}} \quad (3)$$

여기서 U_b , I_b , Z_e 는 각각 회전자 바에 유기한 전압, 전류, 엔드 링의 임피던스(impedance)를 나타낸다.

단상 유도 전동기의 자계 방정식 (1) 은 식 (2) 와 (3) 의 고정자 및 회전자 전압 방정식이 연성된 계 행렬방정식을 구성하도록 되어 있다.

자계에서 발생하는 토크와 자기력으로 인한 회전자의 운동은 회전자를 강체로 가정하여 뉴턴(Newton)의 방정식으로부터 표현되어질 수 있다. 병진 운동을 고려한 3자유도의 운동 방정식은 Fig. 2 에서와 같이 x , y , θ_z 방향에 대하여 식 (4) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m \ddot{x} + k_x x &= F_{mag_x} + me \cdot \dot{\theta}_z^2 \cos \theta_z \\ m \ddot{y} + k_y y &= F_{mag_y} + me \cdot \dot{\theta}_z^2 \sin \theta_z \\ I \ddot{\theta}_z &= T - T_L \end{aligned} \quad (4)$$

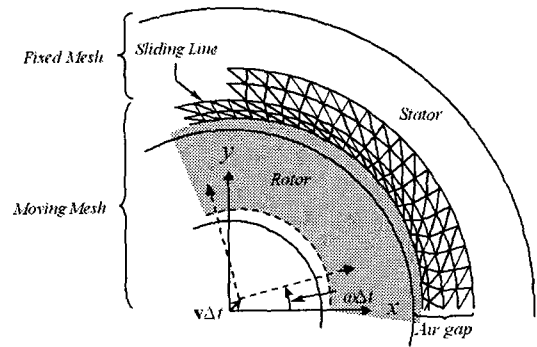


그림 2 이동 메쉬와 회전자의 위치 결정
Fig. 2 Moving mesh and rotor position determination

여기서 m , I , T_L , me 는 각각 회전자의 질량, 회전자의 질량 관성모멘트, 부하 토크, 편심량을 나타낸다. 베어링의 강성 k 는 힘의 평형과 기구학적 적합성에 의하여 계산되어졌으며[6], 자기력 F_{mag} 와 토크 T 는 다음 식 (5) 로 표현되는 맥스웰 응력법(Maxwell stress tensor)에 의하여 계산되어졌다.

$$\begin{aligned} F_{mag} &= \frac{1}{2\mu_0} \oint (B_r^2 - B_\theta^2) dA \\ T &= \frac{1}{\mu_0} \oint B_r B_\theta dA \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 B_r , B_θ , μ_0 는 각각 반경 방향, 접선 방향의 자속 밀도, 그리고 공극의 투자율(permeability)을 나타낸다.

유도 전동기의 기전 연성계 해석을 위하여, 비 선형 시간 차분 유한요소법에 의해 자기장 해석을 수행하고 자기력과 토크를 맥스웰 응력법에 의해서 계산한다. 주어진 전기·기계적인 가진력을 회전자의 운동 방정식에 적용하여 Runge-Kutta법에 의해 비 선형 미분 방정식을 계산한다. 여기에서 회전자의 운동 방정식은 회전자의 회전 방향과 반경 방향의 새로운 위치를 결정하고 자기장 해석을 위한 유한요소들은 이동 요소 기법(moving mesh technique)에 의하여 다시 배치되어진다. 요소(mesh)의 이동은 Fig. 2 에 보여진 것과 같이 회전자와 회전자에 이웃한 공극의 가운데 부분에서 이루어지며, 이동되어지는 요소는 공극의 sliding line 을 따라서 접선 방향으로 이동한 후 반경 방향으로 다시 이동하게 된다. 이러한 일련의 과정은 회전자의 속도가 일정해지고 주 권선 및 보조 권선의 전류, 발생 토크, 회전자 바 양단의 전압, 회전자의 변위 등의 모든 변수들이 각각의 일정한 주기를 가지고 파형이 계속하여 반복되는, 정상 상태(steady state)에 도달할 때까지 계속되어진다.

유도 전동기의 회전자 결합을 진단하기 위해 캐퍼시터 구동형 단상 유도전동기(permanent split capacitor motor)를 해석 모델로 선정하여, 위에서 제안한 방법을 적용하였다. 해석 전동기의 세부 사양은 Table 1 과 같다.

전자장 수치해석을 위한 유한 요소는 삼각형 요소를 사용

표 1 해석 전동기의 세부 사양

Table 1 Specification of a motor

Symbol	Description	Value
P	Power	2.1 kW
V	Input voltage	220 V
f	Supply frequency	50 Hz
p	Number of pole pair	1
n	Number of rotor bar	33
T_L	Rated load torque	7.848 N·m
C	Capacitance	40 μ m
m	Mass of rotor	3.0359 kg
k_x, k_y	Stiffness of bearing	4.752e7 N/m

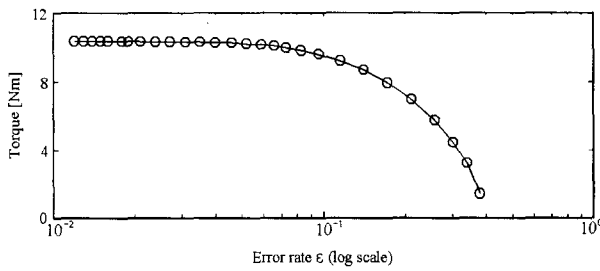


그림 3 에러율 변화에 따른 토크의 변화
Fig. 3 Variation of torque due to error rate

하였으며, 전체 노드(node)와 요소(element) 수는 각각 6,558 개와 13,007 개이다. 공극은 2,880 개의 요소를 가지며, 반경 방향으로 720 개의 요소를 갖는 4 개의 층으로 분할하였다.

개방 회전자 바는 다른 정상적인 회전자 바에 비하여 상대적으로 낮은 전도율을 부과하여 해석을 수행하였다.

철심부는 비선형 B-H 특성을 갖고 있으므로 각 시간 step에서 식 (6) 으로 정의되어지는 에러율 ϵ 을 이용하여 수치해의 수렴 정도를 확인할 수 있다.

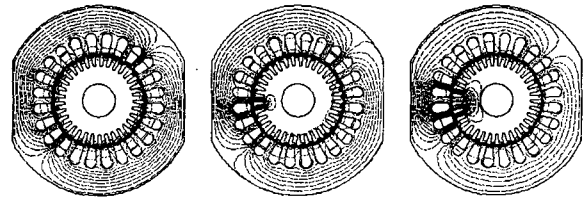
$$\epsilon = \frac{|H_{k-1} - H_k|^2}{H_k^2} \quad (6)$$

여기서 H_k 는 k 번째 시간 step에서 철심 요소의 magnetic field intensity 합이다. Fig. 3 은 회전자 바가 개방된 경우, 자기력이 최대 값을 가지는 시간 step에서 토크의 값이 에러율 ϵ 에 따라서 어떻게 수렴해가고 있는지를 보여주고 있으며, 본 해석 모델에서는 정확성과 수렴성을 보장할 수 있도록 에러율 ϵ 을 0.03 으로 선정하여 수치해석을 수행하였다.

3. 해석 결과

3.1 회전자 바의 개방에 의한 효과

Fig. 4 는 정상, 1 개, 3 개의 개방된 회전자 바를 가지는



(a) normal (b) 1 broken bar (c) 3 broken bars

그림 4 회전자 바의 개방에 따른 자속 밀도 분포
Fig. 4 Magnetic flux distribution for normal, 1, and 3 broken bars

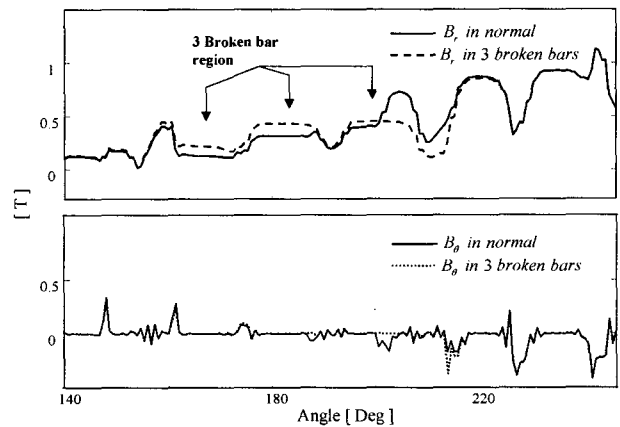


그림 5 공극에서 반경 방향과 접선 방향의 자속 밀도
Fig. 5 Radial and tangential flux density along air gap

경우의 자속 분포를 각각 나타내고 있다. 개방된 회전자 바 부근에서 비대칭적 자속 분포를 관측할 수 있다. Fig. 5 는 정상적인 경우와 3 개 회전자 바가 개방된 경우, 공극을 따르는 자속 밀도를 비교하고 있다. 개방된 회전자 바 부근에서 접선 방향 자속 밀도 B_θ 보다는 반경 방향 자속 밀도 B_r 값이 훨씬 두드러지게 변화함을 볼 수 있다.

개방된 회전자 바 부근의 자기 포화는 권선의 역기전력에 영향을 주고, 이는 다시 권선 전류에 영향을 미치게 된다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 정상 회전자 바와 1 개, 3 개의 개방된 회전자 바가 발생하였을 경우에 시간 영역과 주파수 영역에서의 주 권선 전류의 변화를 각각 보여주고 있다. Fig. 6 에서 보듯이 개방된 회전자 바의 개수가 증가할수록 맥놀이 (beating) 현상의 증가가 관측되고 있으며, Fig. 7 로부터 50[Hz] 의 기본 주파수 f 주변에 새로운 주파수 성분 (sideband frequencies)들이 생성되는 것을 알 수 있다. 이는 양과 음의 방향의 회전자 기자력(mmf)에 의해 발생되어지며, 식 (7) 과 같이 나타낼 수 있다[1-2].

$$f_{sf} = (1 \pm 2sn)f, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

$$s = 1 - \frac{f_1}{f}$$

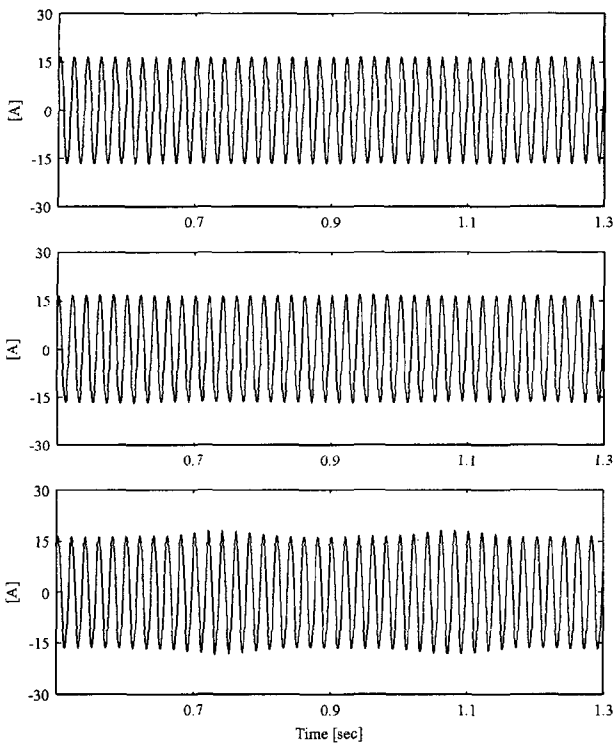


그림 6 정상, 1개, 3개의 바가 개방된 경우 주 권선 전류
 Fig. 6 Stator winding current for normal 1 broken and 3 broken bars

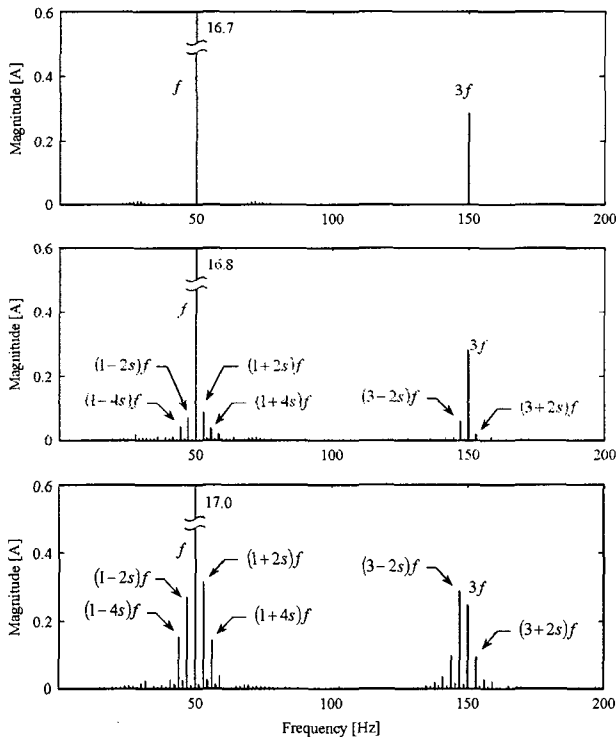


그림 7 정상, 1개, 3개의 바가 개방된 경우 주 권선 전류의 주파수 분석
 Fig. 7 Frequency spectra of stator winding current for normal 1 broken and 3 broken bars

여기서, f 와 s 는 기본 입력 주파수와 슬립률(slip ratio)을 나타낸다. Fig. 7 의 주파수 분석을 확대한 그림에서 보면, 1 개 및 3 개 바가 개방된 상태에서 sideband 주파수 성분이 발생하는 것을 알 수 있다. 한편, sideband 주파수 성분은 주 권선 뿐만 아니라 보조권선 전류, 캐퍼시터 양단의 전압 등에서도 공통적으로 나타나게 되며, 그 성분들은 주 권선 전류와 마찬가지로 식 (7) 로 나타낼 수 있다. 그러나 전류에서의 sideband 주파수의 크기는 3 개 회전자 바가 개방된 경우라 할지라도 기본 주파수 f 의 크기에 비교하면 약 2 % 이내의 상대적으로 작은 값이고, 1 개 회전자 바가 개방된 경우에 있어서는 sideband 주파수 성분들의 변화가 매우 미소하므로, 발생한 sideband 주파수가 회전자 바의 개방으로 인한 것인지를 판별하기가 쉽지 않다. 그러므로, 권선 전류에 의해 회전자 바의 개방을 진단하는 것은 효과적인 방법이 아니다.

Fig. 8 은 3 개 회전자 바가 개방된 경우의 속도에 대한 그림이다. 단상 유도 전동기의 특성상 발생 토크는 입력 주파수의 두 배인 기본 주파수 $2f$ 성분을 발생시키기 때문에, 회전자의 속도에도 그대로 영향을 준다. 슬립률은 정상, 1개 바 개방, 3개 바 개방에 대하여 각각 2.7%, 2.8%, 2.9%로 증가하였으며, 이는 회전자 바의 개방으로 인해 2차 저항이 증가하여 부하특성이 변화하고 평균토크가 저하되었기 때문이다. 개방된 회전자 바 부근의 비대칭적 자속 분포는 토크에서도 sideband 주파수 성분들을 발생시킴을 알 수 있다. Table 2 는 정상, 1 개 바 개방, 3 개 바 개방 상태의 각각의 속도에서 sideband 주파수의 성분을 나타내고 있다.

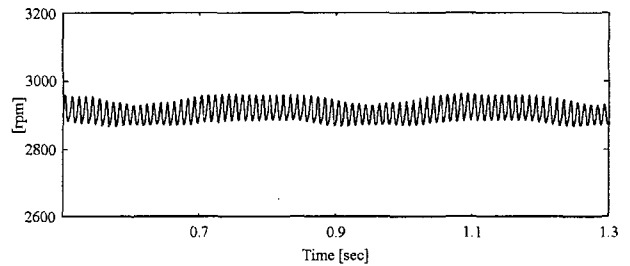


그림 8 3개 바가 개방된 경우 회전자 속도
 Fig. 8 Rotor speed for 3 broken bars

표 2 정상, 1개, 3개의 바가 개방된 경우 회전자 속도의 주파수 성분 및 크기

Table 2 Frequency and amplitude of rotor speed for normal, 1, and 3 broken bars

Frequency component	Normal		1 broken bar		3 broken bars	
	Freq. [Hz]	Amp. [rpm]	Freq. [Hz]	Amp. [rpm]	Freq. [Hz]	Amp. [rpm]
$2sf$	2.7	0.038	2.8	3.123	2.9	11.32
$(2-2s)f$	97.3	0.372	97.2	0.869	97.1	3.848
$2f$	100.0	34.95	100.0	34.98	100.0	35.12
$(2+2s)f$	102.7	0.372	102.8	0.201	102.9	2.311

회전자 바가 개방되었을 경우, $2sf$ 의 주파수 성분이 비교적 크게 변화하였지만, 전체적으로 보았을 때 기본주파수에 비하여 sideband 주파수의 크기는 상대적으로 작은 값을 알 수 있다.

Fig. 9는 정상, 1개, 3개의 회전자 바 개방에 대한 x 방향 자기력의 변화를 나타내고 있으며 절대 좌표 $x-y$ 는 Fig. 2에 나타낸 것과 같다. 정상적인 전동기에서의 자기력은 자속 분포의 대칭성 때문에 힘의 균형을 유지하고 있지만, 회전자 바가 개방되었을 경우 비대칭적인 자기 분포가 생기면서 자기력에는 불균형이 발생한다. Fig. 9에 보여진 것과 같이 자기력은 전류나 속도와는 달리 1개의 회전자 바가 개방된 경우에도 두드러지는 맥놀이 현상을 보이고 있다. 이것은 Fig. 5에 보여진 것과 같이 자기력이 자속 밀도 B_r 값의 제곱에 비례하기 때문이다.

Fig. 10은 정상, 1개, 3개의 회전자 바 개방에 대한 회전자의 x 방향 변위를 나타내며, Fig. 11은 3개 바 개방 경우의 주파수 분석을 나타낸다. 자기력의 가진 성분이 모델로 사용된 회전자의 첫번째 고유주파수인 629 [Hz]보다 저주파 영역에 분포하기 때문에, 회전자의 공진은 발생하지 않는다. 그러므로 회전자 변위는 자기력의 분포와 거의 동일한 형상을 가지게 되어 역시 뚜렷한 맥놀이 현상을 보인다. y 방향 자기력 및 변위의 경우에는 x 방향 성분과 매우 유사한 파형을 가지게 되며, 90 [deg.]의 위상차를 가지게 되므로, 마찬가지로 뚜렷한 맥놀이 현상을 관측할 수 있다.

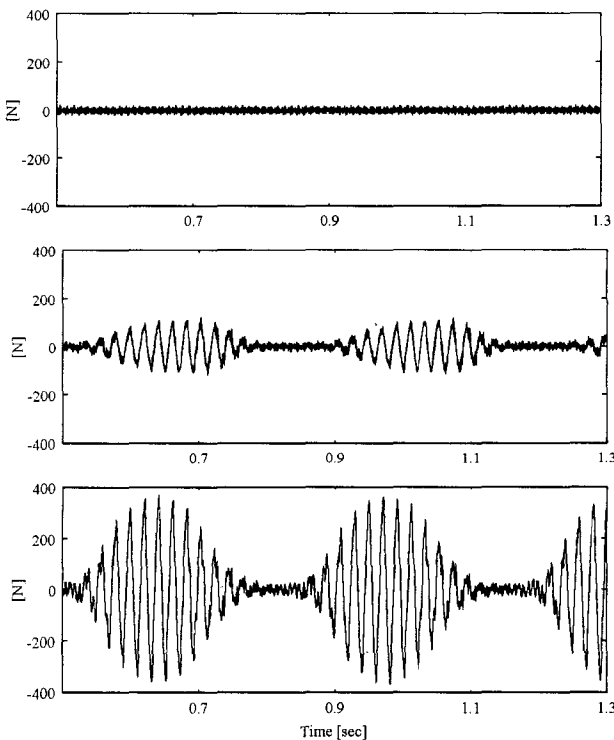


그림 9 정상, 1개, 3개 바가 개방된 경우 x 방향 자기력
 Fig. 9 Magnetic force F_x for normal, 1, and 3 broken bars without rotor eccentricity

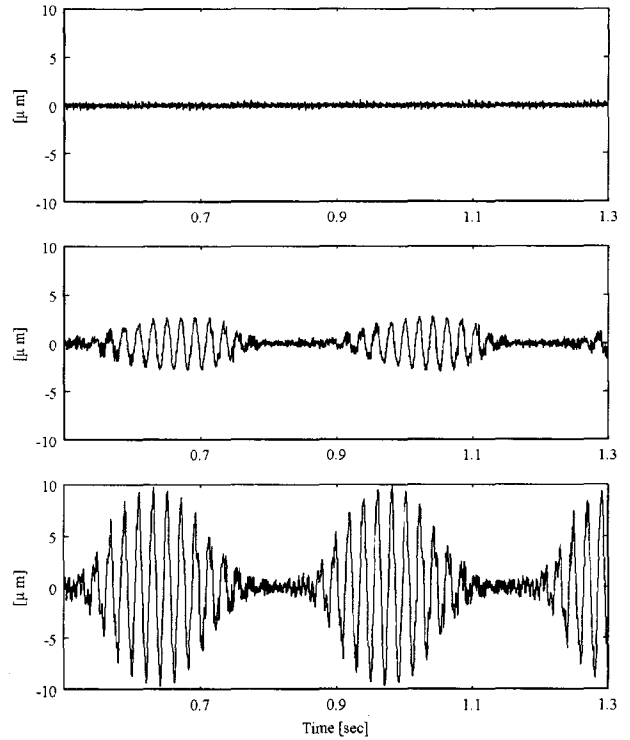


그림 10 정상, 1개, 3개 바가 개방된 경우 x 방향 회전자 변위

Fig. 10 Rotor displacement for normal, 1, and 3 broken bars without rotor eccentricity

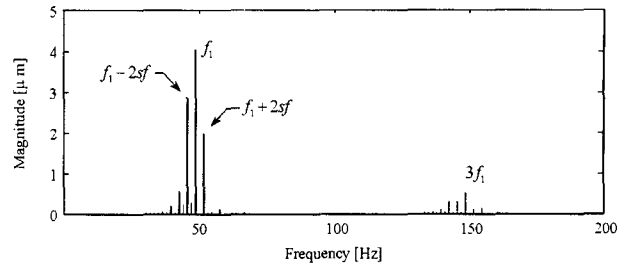


그림 11 3개 바가 개방된 경우 x 방향 회전자 변위의 주파수 분석

Fig. 11 Frequency spectra of the rotor displacement for 3 broken bars without rotor eccentricity

Fig. 11을 보면, 자속 분포가 회전자의 매 회전마다 반복되기 때문에, 기본 주파수는 회전자의 회전 주파수인 f_1 으로 나타남을 알 수 있다. sideband 주파수 성분들은 $f_1 \pm 2nsf$ 의 구성을 가지며, 이는 양의 방향과 음의 방향의 회전자 기자력이 $2sf$ 의 주파수 차이를 가지기 때문이다[2]. Table 3은 이 sideband 주파수의 각 성분 크기를 나타내고 있으며, 입력 전류나 속도의 경우보다 주파수 성분의 변화가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

표 3 정상, 1개, 3개의 바가 개방된 경우 x 방향 회전자 변위의 주파수 성분 및 크기

Table 3 Frequency and Amplitude of rotor displacement for normal, 1, and 3 broken bars

Frequency component	Normal		1 broken bar		3 broken bars	
	Freq. [Hz]	Amp. [rpm]	Freq. [Hz]	Amp. [rpm]	Freq. [Hz]	Amp. [rpm]
$f_1 - 4sf$	43.3	3.64e-3	43.1	1.07e-1	42.6	6.59e-1
$f_1 - 2sf$	46.0	1.22e-3	45.8	9.14e-1	45.6	2.92
f_1	48.7	1.97e-3	48.6	1.15	48.5	3.93
$f_1 + 2sf$	51.4	7.62e-4	51.4	5.23e-1	51.5	1.98
$f_1 + 4sf$	54.1	2.53e-3	54.2	6.11e-2	54.4	8.89e-2

3.2 회전자 바의 개방과 회전자 편심의 효과

실재의 전동기는 회전자의 불평형 질량으로 인한 dynamic 편심과 회전자 축의 잘못된 고정으로 인한 static 편심을 포함하고 있으며, 이들은 동시에 복합적으로 작용하고 있다. 또한 전동기의 이상 동작 시, 편심량 크기의 여부를 알 수 없으므로, 전동기의 이상 증상이 회전자 바의 개방 때문인지, 혹은 회전자 편심의 문제인지를 판별하기가 쉽지 않다. 본 해석에서는 단상 유도 전동기의 회전자 바의 개방과 회전자의 static 및 dynamic 편심으로 인한 전기적·기계적인 변수들의 특성 변화를 효과적으로 고찰하기 위해 회전자 바의 개방뿐만 아니라, 회전자에 static 또는 dynamic 편심이 존재하는 경우와 회전자 바의 개방과 편심이 동시에 존재하는 경우에 대하여 수치해석을 각각 수행하였다. 한편 회전자 바 개방의 경우와 마찬가지로, 회전자의 static 또는 dynamic 편심이 입력 전류, 토크 등의 전기적인 변수에 미치는 영향은 자기력 및 회전자의 변위에 비하여 상대적으로 뚜렷한 변화가 발견되지 않았으므로 연구의 내용에 포함하지 않았다.

3.2.1 회전자의 static 및 dynamic 편심의 효과

본 해석 모델의 공극은 0.55[mm] 이며, Fig. 12 는 회전자에 0.11[mm] 의 static 편심이 존재하는 경우, 즉 회전자 중심으로부터 20% 의 static 편심이 있는 경우의 회전자 변위와 그 주파수 성분을 나타내고 있다. Static 편심이 있는 경우에는 반경 방향 자기력에서 전원 주파수의 두 배 주파수 $2f$ 를 가지는 불평형 자기력을 발생시키게 되며, sideband 주파수를 발생시키지는 않는다.

Fig. 13 은 회전자에 dynamic 편심이 존재하는 경우의 회전자 변위와 그 주파수 성분을 나타내고 있다. 회전자의 불평형 질량은 0.002[kg·m] 으로 가정하였다. 원심력으로 인한 dynamic 편심은 회전자의 변위에서 회전 주파수인 f_1 과 그의 odd harmonics를 만들어내며, 각각에 회전자 바가 개방되었을 경우와 동일한 sideband 주파수 성분을 발생시키는 것으로 알려져 있다[5]. 그러나 해석결과, sideband 주파수 성분이 검출되었지만 회전자 바 개방의 경우보다 그 크기가 상대적으로 작다. 따라서 dynamic 편심이 존재하는

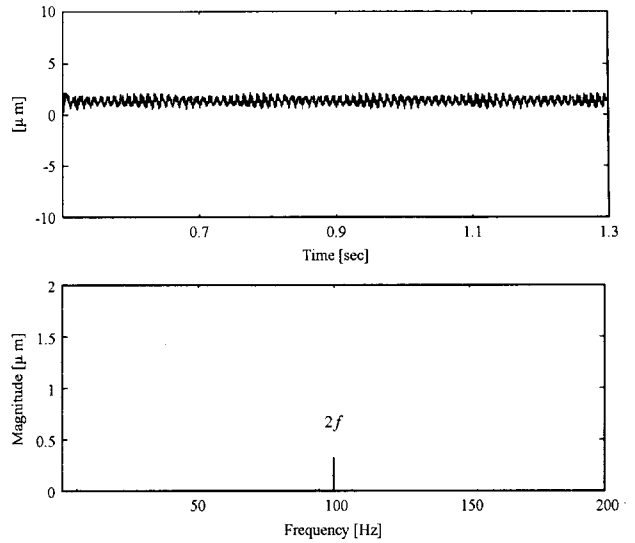


그림 12 Static 편심이 존재하는 경우 x 방향 회전자 변위와 주파수 분석($f_1 = 48.7$ Hz)

Fig. 12 Rotor displacement and its frequency spectra in the case of static eccentricity($f_1 = 48.7$ Hz)

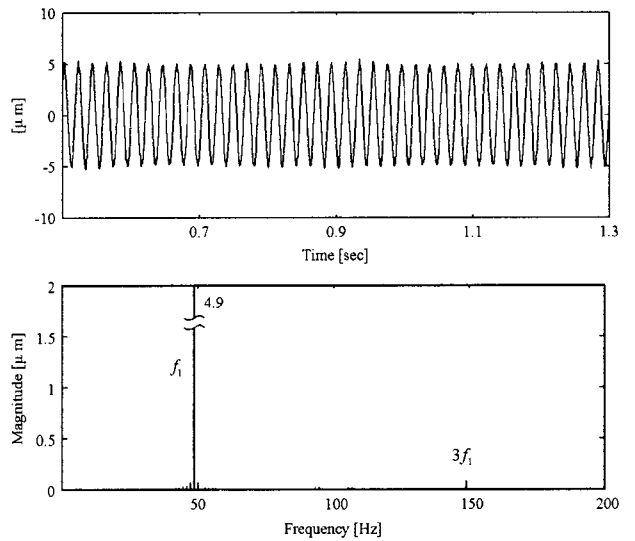


그림 13 Dynamic 편심이 존재하는 경우 x 방향 회전자 변위와 주파수 분석($f_1 = 48.7$ Hz)

Fig. 13 Rotor displacement and its frequency spectra in the case of dynamic eccentricity($f_1 = 48.7$ Hz)

경우 f_1 성분의 증가만으로도 충분히 dynamic 편심 여부를 판단할 수 있다.

3.2.2 회전자 바의 개방과 회전자 편심의 효과

Fig. 14 는 1 개의 회전자 바가 개방됨과 동시에 회전자의 중심으로부터 20% 의 static 편심이 존재하는 경우의 회

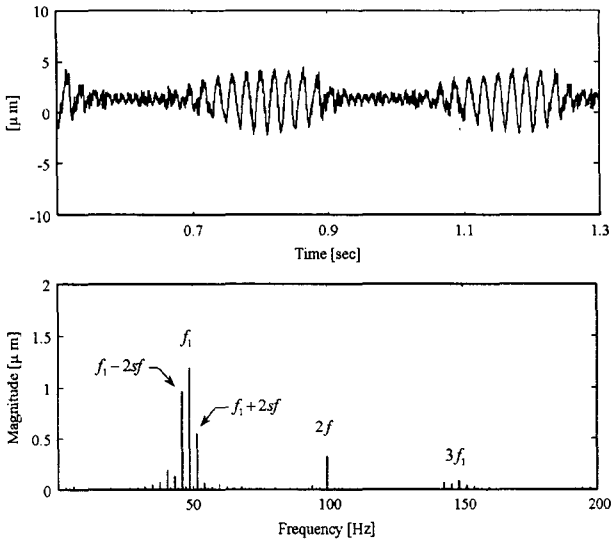


그림 14 1 개 개방 바와 static 편심을 가지는 경우 x 방향 회전자 변위와 주파수 분석 ($f_1 = 48.6$ Hz)

Fig. 14 Rotor displacement and its frequency spectra in the case of a broken bar and static eccentricity of a rotor ($f_1 = 48.6$ Hz)

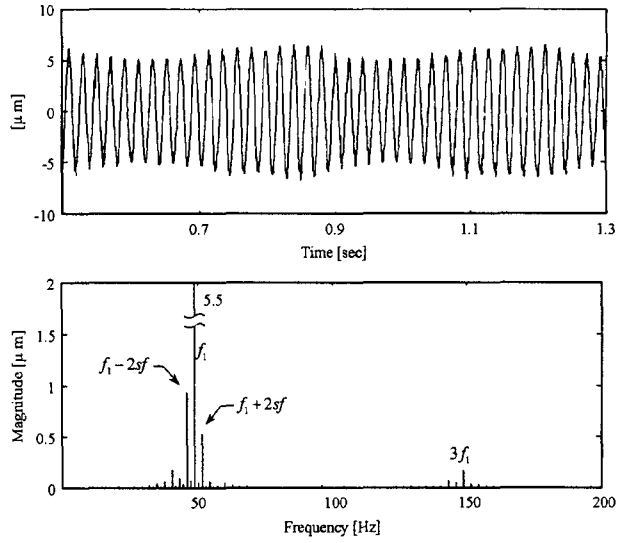


그림 15 1 개 개방 바와 dynamic 편심을 가지는 경우 x 방향 회전자 변위와 주파수 분석 ($f_1 = 48.6$ Hz)

Fig. 15 Rotor displacement and its frequency spectra in the case of a broken bar and dynamic eccentricity of a rotor ($f_1 = 48.6$ Hz)

전자의 변위의 변화를 보여주고 있다. 회전자 바의 개방의 영향으로 회전자의 회전 주파수 f_1 과 그 sideband 주파수가 생성되었으며 static 편심에 의한 $2f$ 성분이 동시에 생성되었다. 그러나 static 편심 자체는 회전자 바의 개방이 생성하는 sideband 주파수 성분에는 거의 영향을 미치지 않았으며, 이는 static 편심과 회전자 바의 개방이 회전자의 진동 성분에서 서로 독립적으로 해석되어 질 수 있다는 것을 보여준다.

Fig. 15 는 회전자에 1 개 바의 개방과 동시에 dynamic 편심이 존재하는 경우의 회전자의 변위와 그 주파수 성분을 나타내고 있다. 회전자의 불평형 질량은 $0.002[\text{kg} \cdot \text{m}]$ 으로 가정하였다. Dynamic 편심은 마찬가지로 회전자의 변위에서 회전 주파수인 f_1 과 그의 odd harmonics를 만들어냈으며, dynamic 편심만 존재하는 경우보다 그 sideband 성분의 변화가 두드러진다. 즉, dynamic 편심은 f_1 성분을 증가시키고, 회전자 바의 개방은 sideband 성분을 증가시키기 때문에 이 두 가지 효과는 비교적 명확히 구분되어질 수 있음을 나타낸다.

Fig. 16 은 1 개의 회전자 바가 개방된 경우에 static 및 dynamic 편심이 동시에 존재하는 경우의 회전자 변위의 변화를 보여주고 있다. 불평형 질량은 $0.002[\text{kg} \cdot \text{m}]$ 으로 가정하였으며, static 편심은 마찬가지로 20% 로 가정하였다. 주파수 분석에서 알 수 있듯이, dynamic 편심은 f_1 성분을 증가시키고, static 편심은 $2f$ 성분을 증가 시켰으며, 회전자 바의 개방은 f_1 성분의 주변에 비교적 큰 sideband 성분을 생성하였다. 그러므로 회전자 바의 개방, static 편심 그리고 dynamic 편심이 동시에 존재하는 경우에 f_1 , $2f$ 및 sideband 주파수 성분을 관찰함으로써 회전자 결함을 명확

히 판별할 수 있음을 알 수 있다. Table 4 는 지금까지 수행한 해석 결과에서의 각각의 주파수 성분의 변화를 나타내고 있으며, 회색 네모안의 수치는 각 경우 주요한 주파수 변화를 나타내고 있다.

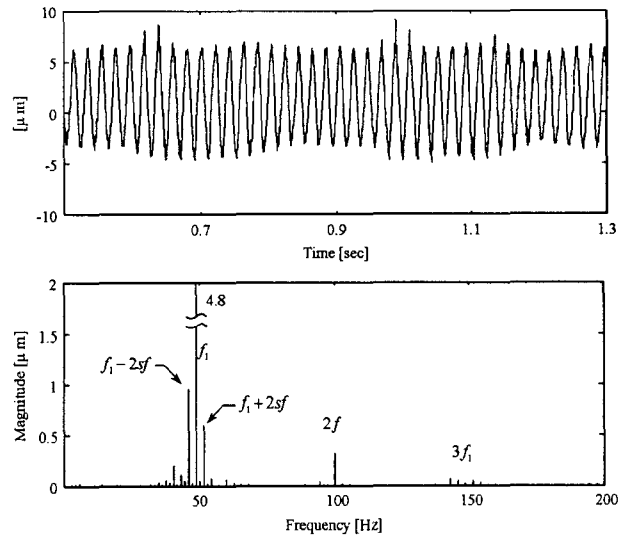


그림 16 1 개 개방 바, static 편심 및 dynamic 편심을 가지는 경우 x 방향 회전자 변위와 주파수 분석 ($f_1 = 48.6$ Hz)

Fig. 16 Rotor displacement and its frequency spectra in the case of a broken bar, static and dynamic eccentricity of a rotor ($f_1 = 48.6$ Hz)

표 4 회전자 바의 개방, static 및 dynamic 편심이 존재하는 각각의 경우에 대한 x 방향 회전자 변위의 주파수 성분 크기

Table 4 Frequency and Amplitude of rotor displacement for a broken rotor bar, static and dynamic eccentricity

Fault Condition	$f_1 - 2sf$	f_1	$f_1 + 2sf$	$2f$
1 broken bar	9.14e-1	1.15	5.23e-1	1.79e-3
Static ecc.	2.50e-3	3.75e-3	1.20e-3	3.28e-1
Dynamic ecc.	3.44e-2	4.87	7.28e-3	3.22e-3
1 broken bar and Static ecc.	9.62e-1	1.19	5.50e-1	3.30e-1
1 broken bar and Dynamic ecc.	9.36e-1	5.46	5.30e-1	3.57e-3
1 broken bar, Static and Dynamic ecc.	9.57e-1	4.79	6.00e-1	3.29e-1

4. 결 론

본 연구에서는 단상 유도 전동기에 있어서 회전자 바의 개방과 회전자의 편심으로 인한 기계적, 전기적 변수들의 특성 변화에 대하여 고찰하였다. 전동기는 기계 및 전기적 시스템이 서로 연성되어 있기 때문에, 결함 발생은 시스템의 전기적 특성 뿐 아니라 기계적 특성에도 동시에 영향을 미치게 된다. 회전자 바의 개방은 공극을 따라서 비대칭적인 자속 분포를 발생시키며, 이는 전류와 토크, 속도, 자기력과 회전자 변위 등의 기전 연성 변수들에서 맥놀이 현상과 sideband 주파수를 발생시켰다. 그러나, 가장 큰 변화는 자기력과 회전자 변위에서 관측되었으며, 회전자 변위가 회전자 바의 개방을 판별하는 가장 효과적인 변수임을 확인하였다. 회전자의 static 편심은 회전자의 변위에서 입력 주파수의 두 배인 $2f$ 성분을 만들어 냄을 확인하였으나, 이는 회전자 바의 개방 및 dynamic 편심과 연성 효과를 나타내지는 않았다. 한편, 회전자의 dynamic 편심은 회전자 바의 개방과 유사하게 회전자의 변위에서 회전자의 회전 주파수와 그 odd harmonics 를 발생시킴과 동시에 각각의 성분에서 sideband 주파수를 발생시키지만, 그 high harmonics와 sideband 주파수 성분들은 회전자 바의 개방이 만들어내는 주파수 성분의 크기에 비하여 상대적으로 작은 크기를 가짐을 확인하였다. 즉, 회전자 바의 개방은 회전자 변위에서 sideband 주파수를 발생시키는 가장 큰 요인이며, static 및 dynamic 편심의 영향은 sideband 주파수의 변화보다는 $2f$ 와 f_1 성분에서 각각 두드러짐을 확인하였다. 해석 결과는 농형(squirrel cage) 구조의 회전자를 가지는 유도 전동기의 결함을 판별하는데 유용한 자료를 제공할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] William T. Thomson and Mark Fenger, "Industrial Application of Current Signature Analysis to Diagnose Faults in 3-Phase Squirrel Cage Induction Motors," *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2000*. Conference Record of 2000 Annual, pp. 205-211, 2000.
- [2] O.V. Thorsen, and M. Dalva, "Method of condition monitoring and fault diagnosis for induction motors," *ETEP*, vol. 8, No. 5, pp. 383-395, Sep/Oct. 1998.
- [3] J.F. Bangura, and N.A. Demerdash, "Diagnosis and characterization of effects of broken bars and connectors in squirrel cage induction motors by a time-stepping coupled finite element state space modeling approach," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, No. 4, pp. 1167-1175, Dec. 1999.
- [4] Rastko Fiser and Stanislav Ferkolj, "Magnetic field analysis of induction motor with rotor fault," *COMPEL*, vol.17, pp.206-211, 1998.
- [5] David G. Dorrell, William T. Thomson, and Steven Roach, "Analysis of Airgap Flux, Current, and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Airgap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, NO. 1, pp. 24-34, Jan/Feb. 1997.
- [6] G.H. Jang and D.K. Jung, "Analysis of the Dynamic Characteristics of Ball Bearing in 3.5" HDD Spindle Motor," *IMCSD Proceedings, Twenty-fifth Annual Symposium*, pp. 167-174, 1996.

저 자 소 개



박 상 진 (朴 商 振)

1974년 2월 22일생. 1999년 한양대 기계공학부 졸업. 2001년 한양대 정밀기계공학과 졸업(석사). ~현재 동 대학원 정밀기계공학과 박사과정
 Tel : 02-2299-5685,
 Fax : 02-2292-3406
 E-mail : sjpark@ihanyang.ac.kr



장 정 환 (張 正 煥)

1968년 5월 1일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2001년 한양대 정밀기계공학과 졸업(공학박). ~현재 U.C. Berkeley Post Doctor.

Tel : 02-2299-5685,

Fax : 02-2292-3406

E-mail : cjhwan@hanmail.net



이 용 복 (李 勇 福)

1961년 12월 16일생. 한양대 기계공학과 졸업. 1990년 한양대 기계공학과 졸업(석사). 1997년 한양대 기계공학과 졸업(공학박). ~현재 KIST 트라이볼로지연구센터 선임연구원

Tel : 02-958-5663, Fax : 02-958-5659

E-mail : lyb@kist.re.kr



장 건 희 (張 健 熙)

1961년 2월 5일생. 1984년 한양대 기계공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사), 1993년 U.C. Berkeley 기계공학과 졸업(공학박). 1986년~1989년 한국통신 사업지원단 전임 연구원. 1993년~1994년 Quantum corporation, design

engineer, 1994~현재 한양대학교 기계공학부 부교수

Tel : 02-2290-0431, Fax : 02-2292-3406

E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr



김 창 호 (金 昌 鎬)

1954년 3월 18일생. 한양대 기계공학과 졸업. Texas A&M(석사). Texas A&M(공학박). ~현재 KIST 트라이볼로지연구센터 책임연구원

Tel : 02-958-5652, Fax : 02-958-5659

E-mail : kimch@kist.re.kr