

엔드링을 고려한 농형 유도전동기의 2차원 유한요소해석

論 文

48B - 2 - 1

Finite Element Analysis of Squirrel-cage Induction Motor Taking into account the End-ring

河 京 鎬* · 洪 正 杓** · 金 奎 卓*** · 任 泰 彬§
(Kyong-Ho Ha · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim · Tae-Bin Im)

Abstract - This paper proposes an efficient 2D Finite Element Method(FEM) taking into account the end-ring of three phase squirrel-cage induction motors. The parameters of the squirrel-cage induction motor such as conductivity of secondary conductor have an effect on the characteristics of a motor. Especially, if the characteristic analysis is done without considering the end-ring, the good results can not be obtained. Therefore, we calculated a new resistivity of the secondary conductor including the end-ring's resistance to apply the 2D FEM. Then, the performances of the motors are analyzed by using the new resistivity of secondary conductor which contains the end-ring resistivity. The validity of the proposed method is verified by comparing the numerical results with experimental ones.

Key Words : Three phase squirrel-cage induction motor, 2D Finite Element Method, Resistivity of secondary conductor, End-ring resistivity

1. 서 론

유도전동기는 소형 팬에서부터 대형의 견인용 전동기까지 매우 다양한 분야에서 파워용뿐만 아니라 서보용 전동기로서도 광범위하게 이용되고 있으며 이에 관한 설계 및 해석 기법에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 특히 유도전동기를 해석하는 경우 실제 유도전동기 특성에 영향을 미치는 엔드링, 엔드턴, 스큐, 슬롯고조파, 열, 도전율등과 같은 많은 요인들이 고려되지 않기 때문에 해석치는 실측치와 많은 차이를 보인다. 따라서, 적은 비용과 시간의 투자로 특성해석의 신뢰성을 향상시키기 위해 이러한 문제점을 적절하게 해석에 반영할 수 있는 해석기법이 요구된다[1-8].

유도전동기의 대표적인 특성계산법으로는 전동기를 등가 회로로 모델링하여 집중정수회로를 이용하는 방법과 유한요소법과 같은 수치해석기법을 이용하는 방법이 있다. 집중정수회로를 이용하는 방법은 특성계산이 간편하나 정확한 회로정수 산출이 어렵기 때문에 계산 결과에 대한 신뢰성이 떨어지게 된다.

한편 유한요소법과 같은 수치해석기법은 비교적 정확한 해석결과를 기대할 수는 있으나 농형 유도전동기와 같이 엔드링을 갖고 있는 경우에는 3차원으로 모델링하여 해석하기

가 현실적으로 어려운 점이 많다. 유도전동기의 특성은 2차측 도체의 도전을 변화에 따라 민감하게 변화하기 때문에 해석결과의 정확도는 2차측 도체의 도전을 값에 따라 달라지게 된다. 즉 농형유도전동기를 2차원으로 해석할 때 엔드링의 효과를 어떻게 반영하는가가 해석의 정밀도에 큰 영향을 주게 된다.

2차원 유한요소법으로 농형 유도전동기를 해석 할 경우 일반적으로 엔드링을 무시하거나, 엔드링 효과를 고려하기 위하여 각각의 도체바에 유기되는 전압에 대한 전압방정식을 세워 2차원으로 해석하는 방법도 제시되었으나 2차측 도체바의 개수만큼 전압방정식이 필요하기 때문에 번거롭다 [7,8].

본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 2차측 도체에 흐르는 전류와 전력 수수(授受)관계로부터 간단하게 엔드링 부분을 2차측 도체의 도전율에 반영하여 전압을 구동함수로 한 2차원 유한요소 해석을 하였다. 또한, 2.2[kW] 3상 농형유도 전동기를 대상으로 실측결과와 비교하여 해석 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 해석이론

전압원을 구동함수로 하여 2차원 유한요소해석을 하기 위한 해석이론과 2차측 엔드링을 2차측 도체의 도전율 변화로 환산하는 과정은 다음과 같다.

2.1 2차원 유한요소해석

자기벡터포텐셜 \vec{A} 를 계변수로 하고 모든 현상이 정현적으로 변화하며 재질이 등방성일 경우 2차원 유한요소해석을

* 準 會 員 : 昌原大 大 學 院 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

** 正 會 員 : 昌原大 工 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博

*** 正 會 員 : 昌原大 工 大 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

§ 正 會 員 : 電 子 部 品 綜 合 技 術 研 究 所 部 品 研 究 4 팀 室 長 · 工 博

接受日字 : 1998年 7月 6日

最終完了 : 1999年 1月 11日

하기 위한 지배방정식은 식 (1)과 같으며 자기벡터포텐셜 A 는 z 방향 성분이다[9,10].

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) \right) + \sigma(j\omega s A) - J_o = 0 \quad (1)$$

여기서 σ 는 2차측 도체의 도전율, s 는 슬립, J_o 는 고정자 전류이다. 2차측 도체의 저항률 σ 는 엔드링 저항을 고려한 보정된 값을 사용하게 된다.

식 (1)의 자기벡터포텐셜을 근사화하고 Galerkin법으로 정식화하여 계방정식을 구성하면 식 (2)와 같이 된다.

$$[S][A] + [Q_m][I_m] = [0] \quad (2)$$

식 (2)에서 전류 I_m 이 미지수인 경우 고정자 권선의 전압방정식이 필요하게 되며 식 (3)과 같다.

$$V = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + E_m \quad (3)$$

여기서, R_m 은 유한요소 해석영역의 내부저항과 외부저항의 합성저항, L_m 은 권선에서 코일단부의 누설인덕턴스, E_m 은 권선에 유기된 역기전력이다.

식 (3)의 역기전력항을 자기벡터포텐셜로 나타내어 다시 쓰면 아래와 같은 회로방정식을 얻을 수 있다.

$$V = R_m I_m + j\omega L_m I_m + j \frac{\omega N_m l}{3S_m} \sum_{e=1}^{n_s} \Delta^e A_{ie} \quad (4)$$

여기서 Δ^e 는 삼각요소의 면적, N_m 은 권선의 각각 한 슬롯당 턴수, l 은 유효적층폭, S_m 은 권선을 포함한 각 슬롯의 면적이고 n_s 는 슬롯내의 요소수이다. 또한 식 (1)의 우측 세번째 항에서 + 부호는 전류가 흘러 나오는 요소, - 부호는 전류가 흘러 들어가는 요소일 때를 나타낸다.

식 (4)를 행렬로 나타내면 (5)식과 같으며,

$$[F_m]^e [A]^e + [Z_m]^e [I_m]^e = [V]^e \quad (5)$$

식 (2)와 식 (5)로부터 (6)식과 같은 계행렬을 구성하고 경계조건을 적용하여 해석하게 된다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [Q_m] \\ [F_m] & [Z_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [I_m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ [V] \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 엔드링의 저항 환산

2.2.1 엔드링 전류

회전자의 구조와 회전자에 흐르는 전류방향은 그림 1(a)와 같으며, 그림 1(b)는 도봉에 흐르는 전류분포를, 그림 1(c)는 엔드링의 전류분포를 나타낸 것이다.

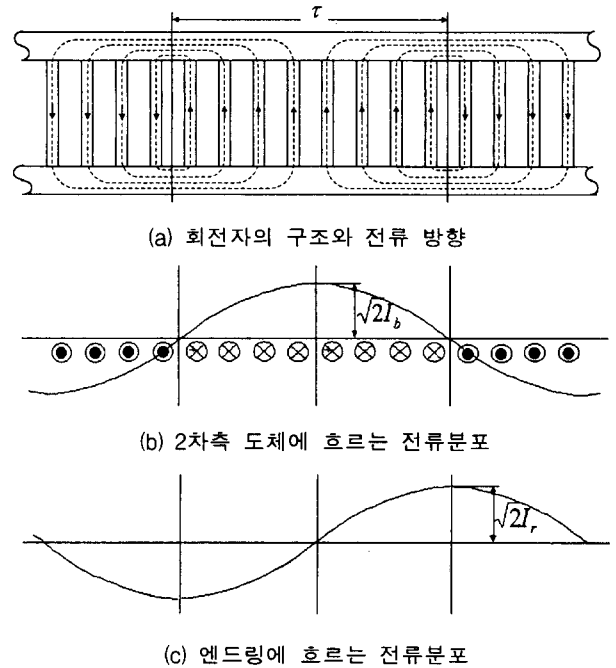


그림 1 농형유도전동기의 회전자에 흐르는 전류분포

Fig. 1 Current distribution in the rotor of the squirrel-cage induction motor

2차측 도체에 흐르는 전류는 엔드링에 모이게 되며, 1극 간격 τ 사이의 전류는 좌우로 나누어져 흐른다. 따라서, 엔드링을 흐르는 전류의 최대치는 2차측 도체의 수를 Z_2 , 극수를 p 라 할 때 엔드링의 최대전류는 1극 간격 사이에 있는 Z_2/p 개의 도체에 흐르는 전류의 합의 반과 같다. 2차측 도체의 전류는 그림 1(b)에 표시한 것과 같이 정현파형태로 분포하므로 엔드링 전류의 평균값은 2차측 도체에 흐르는 전류에 평균을 취한 $(2/\pi) \times \sqrt{2} I_b$ 이다.

즉, 2차측 도체에 흐르는 전류와 엔드링을 흐르는 전류 사이에는 식 (7)-a의 관계가 성립한다[11].

$$\sqrt{2} I_r = \frac{1}{2} \frac{Z_2}{p} \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_b \quad (7)-a$$

따라서 엔드링 전류를 2차측 도체의 전류로 나타내면 식 (7)-b와 같다.

$$I_r = \frac{Z_2}{p\pi} I_b \quad (7)-b$$

여기서 계산된 엔드링의 전류 I_r 과 2차측 도체의 전류 I_b 는 실효치이다.

2.2.2 2차측 도체와 엔드링의 저항 계산

그림 2는 회전자와 엔드링의 구조에서 각부분의 치수에 대한 위치를 설명하기 위한 그림이다.

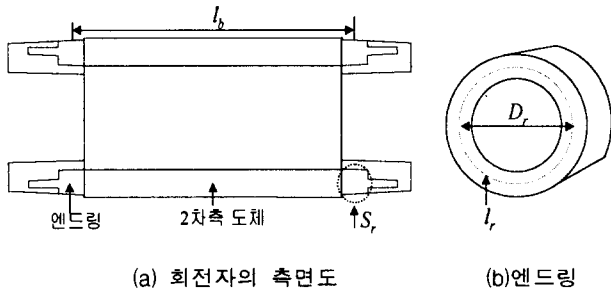


그림 2 회전자의 구조
Fig. 2 Configuration of the stator

회전자 도체의 길이를 엔드링의 중심부까지로 생각하면 도체 1개의 저항 R_b 는 식 (8)과 같다.

$$R_b = \rho \frac{l_b}{S_b} \tag{8}$$

여기서, l_b 는 2차측 도체의 길이, ρ 는 2차측 도체의 저항률, S_b 는 2차측 도체의 단면적이다.

한편, 엔드링 1개의 둘레 길이를 중심부의 직경으로 계산하면 식 (9)와 같다.

$$R_r = \rho \pi \frac{D_r}{S_r} = \rho \frac{l_r}{S_r} \tag{9}$$

여기서, D_r 은 엔드링 중심부의 직경이며, l_r 는 엔드링 둘레의 평균 길이, S_r 는 엔드링의 단면적이다.

한편, 회전자의 동손은 2차측 도체에 의한 저항손과 회전자 양측의 엔드링 저항에 의한 동손으로 식 (10)과 같으며

$$W_2 = Z_2 I_b^2 R_b + 2 I_r^2 R_r \tag{10}$$

식 (10)에 2차측 도체의 전류와 엔드링의 전류 관계식 (7)-b를 대입하여 2차측 동손을 정리하여 다시쓰면 식 (11)과 같다.

$$W_2 = Z_2 I_b^2 \left\{ R_b + 2 \frac{Z_2}{(p\pi)^2} R_r \right\} \tag{11}$$

이제, 2차측 전체의 저항을 도체 하나의 저항으로 환산하기 위해 도체수 Z_2 로 나누면 (12)식과 같이된다.

$$R_2 = R_b + \frac{2Z_2}{(p\pi)^2} R_r \tag{12}$$

따라서, 식 (8), (9)를 식 (12)에 대입하여 저항률로 표현된 2차측 저항은 식 (13)과 같으며, 이 식의 둘째 항은 엔드링의 저항이 2차측 도체에 분산되어 2차측 도체 하나에 포함된 엔드링 저항값이다.

$$R_2 = \rho \left(\frac{l_b}{S_b} + \frac{2l_r Z_2}{(p\pi)^2 S_r} \right) \tag{13}$$

식 (13)으로부터 엔드링의 저항을 도체 1개의 저항에 포함하여 나타낼 수 있으며, 유한요소법에 적용하기 위하여 엔드링 저항을 포함한 2차측 도체 1개의 저항률 ρ 를 새로운 저항률 ρ' 의 값으로 표현할 수 있다.

$$R_2 = \rho' \times \frac{l_b}{S_b} = \left(\rho + \frac{S_b}{l_b} \frac{2\rho l_r Z_2}{(p\pi)^2 S_r} \right) \frac{l_b}{S_b} \tag{14-a}$$

$$\rho' = \rho + \frac{S_b}{l_b} \frac{2\rho l_r Z_2}{(p\pi)^2 S_r} \tag{14-b}$$

3. 해석 및 실험결과

해석대상 전동기는 3상농형 유도전동기이며, 제안된 해석방법으로 해석 전동기의 보정된 저항률을 구하여 2차원 유한요소해석한 결과와 실측된 측정 결과를 비교 분석하였다.

3.1 해석대상 전동기

해석대상 전동기의 개략적인 제원은 표 1과 같으며 기계적 공극은 0.5[mm]이다.

2차측은 알루미늄 다이캐스팅되어 있으며, 2차측 도체의 도전율은 도전율계(digital conductivity meter, FM-140, centurion NDT)로 실온(25°C)에서 측정하였으며 해석시에는 정격운전온도를 75°C로 보아 온도 보정을 한 값을 적용하였다. 실온에서 측정된 해석대상 전동기의 2차측 도체의 도전율은 3.132×10⁷ [Ω/m]이며, 식 (15)로부터 정격운전온도로 보정한 도전율은 2.626×10⁷ [Ω/m]이다.

표 1 해석모델의 제원

Table 1 Specification of analysis model

세부 항목	사 양	세부 항목	사 양
상 수	3	정 격 효 율	82.5 [%]
용 량	2.2 [kW]	극 수	4
운전주파수	60 [Hz]	정 격 회 전 수	1720 [rpm]
정 격 전 압	220/380 [V]	정 격 전 류	9.0/5.2 [A]
도 전 율	3.13*10 ⁷ [Ω/m]	적 층 폭	74.6 [mm]
고정자 외경	172.0 [mm]	고정자 내경	110 [mm]
회전자 외경	109.0 [mm]	공 극	0.5 [mm]
고정자 슬롯	36 [EA]	회전자 슬롯	44 [EA]

회전자의 슬롯은 폐슬롯 형태로 세부 치수는 그림 3(a)와 같으며 2차측 도체의 단면적은 $32.38 [mm^2]$ 이다. 또한 고정자에는 동심권으로 권선이 시행되어 있고 슬롯의 형상은 그림 3(b)와 같다. 그림 3(c)는 회전자를 측면에서 본 엔드링 구조와 치수를 나타낸 것으로 엔드링 둘레의 평균길이는 $287.46[mm]$ 이며 엔드링의 단면적은 $128.0 [mm^2]$ 이다.

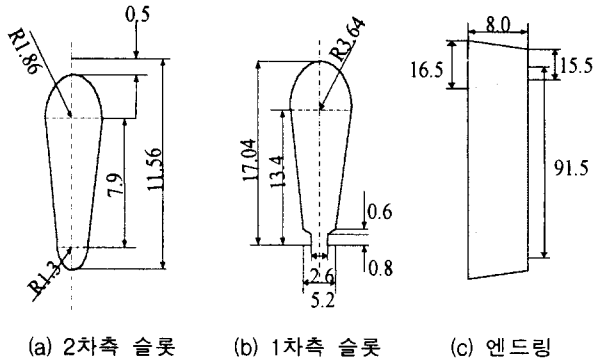


그림 3 고정자/회전자 슬롯 및 엔드링 치수
Fig. 3 Dimension of the slot and end-ring

이제, 식 (14)-b을 이용하여 2차측 도체의 저항률을 보정하면 $\rho'/\rho = 1.543$ 이며 2차원 유한요소해석시에 실질적으로 적용되는 저항률 ρ' 은 2차측 도체의 저항이 54.3[%] 정도 증가되는 효과를 갖게된다. 따라서 측정된 2차측 도체의 도전을 $3.132 \times 10^7 [C/m]$ 는 식 (15)과 (16)의 일련의 수식을 통하여 $75^\circ C$ 에서 엔드링을 고려하여 환산된 2차측 도체의 도전을 $1.702 \times 10^7 [C/m]$ 로 보정된다.

$$\sigma_{75} = \frac{234.5 + T_{25}}{234.5 + T_{75}} \sigma_{25} \quad (15)$$

$$= \frac{234.5 + 25}{234.5 + 75} \times 3.132 \times 10^7 = 2.626 \times 10^7 [C/m]$$

$$\sigma' = \frac{1}{\rho'} = \frac{1}{\rho_{75} \left(1 + \frac{S_b}{l_b} \frac{2l_r Z_2}{(p\pi)^2 S_r}\right)} \quad (16)$$

$$= 2.626 \times 10^7 \times \frac{1}{\left(1 + \frac{32.38}{74.6} \times \frac{2 \times 287.46 \times 44}{(4 \times \pi)^2 \times 128}\right)}$$

$$= 1.702 \times 10^7 [C/m]$$

3.2 특성시험기의 구성

전동기의 특성은 다이نام메타를 이용하여 측정하였으며, 전체적인 시험기의 구성은 그림 4와 같다.

전원이 인가된 피측정 전동기를 다이نام메타로 서서히 브레이크하는 매순간 피측정 전동기의 축에 걸리는 유효분

토크 성분을 검출하여 측정된 토크와 회전속도의 수치를 DCP 301 control unit로 전달하며, 동시에 피측정 전동기의 전압, 전류, 전력 등을 파워 메타로 측정하여 측정된 파라메타를 ITD 132 interface로 전송한다. 측정된 제반 물리량들은 A/D변환기인 RTI를 통하여 PC로 전달된다.

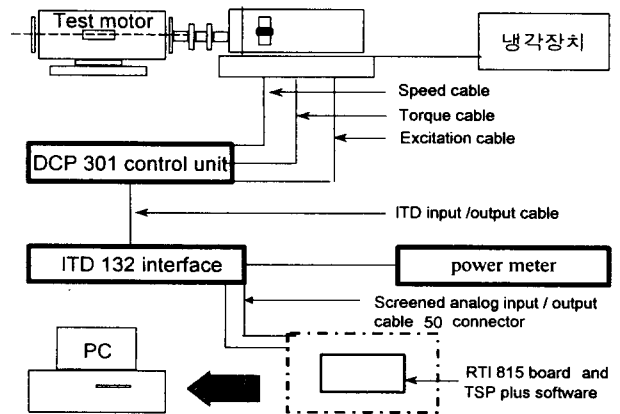


그림 4 다이نام메타 시험설비 구성도

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus of the dynamometer

3.3 해석결과

자기벡터포텐셜 A 를 계변수로 하고 전압을 구동함수로 하는 2차원 유한요소해석을 하였다. 대상 전동기는 4극이며 해석모델은 자기적인 대칭성을 고려하여 1극만을 해석영역으로 하였다.

정격회전속도(1720[rpm])에서의 등포텐셜분포를 그림 5(a)에 나타내었다. 그림 5(b)는 정격속도에서 공극 자속밀도 분포를 나타내며 평균 자속밀도는 약 $0.7[T]$ 이다.

그림 6은 전동기의 엔드링을 고려한 유한요소해석의 결과와 고려하지 않은 유한요소해석 결과를 슬립의 변화에 따라 실측치와 비교한 그림이다. 그림에서 도트는 실험치를 나타내며 실선은 엔드링을 고려하지 않은 해석치, 실선과 도트의 연결선은 엔드링을 고려한 유한요소해석 결과이다. 특성해석 결과의 양상으로부터 실측치가 엔드링을 고려하지 않은 결과보다는 엔드링을 고려한 특성해석 결과와 잘 부합됨을 알 수 있다.

엔드링 저항을 보정하였을 경우 2차측 도체의 저항은 54.3[%]정도 증가하였기 때문에 효율, 역율은 엔드링을 고려하지 않은 특성보다 더 큰 양상을 보이며 1차측 입력전류는 저항의 증가로 엔드링을 고려하지 않은 전류보다 슬립 전 영역에서 감소함을 그림 6(b)에서 알 수 있다. 엔드링을 고려하지 않은 경우 전동기는 슬립 0.2에서 최대 토크값을 나타내는 반면 엔드링을 보정한 해석 결과는 슬립 0.3에서 최대 토크를 가지고 기동시 토크가 보정전 보다 높다. 이러한 결과는 엔드링 저항을 2차측 도체의 저항률에 반영함으로써 저항의 증가에 의한 토크의 비례추이 현상을 나타내고 있다.

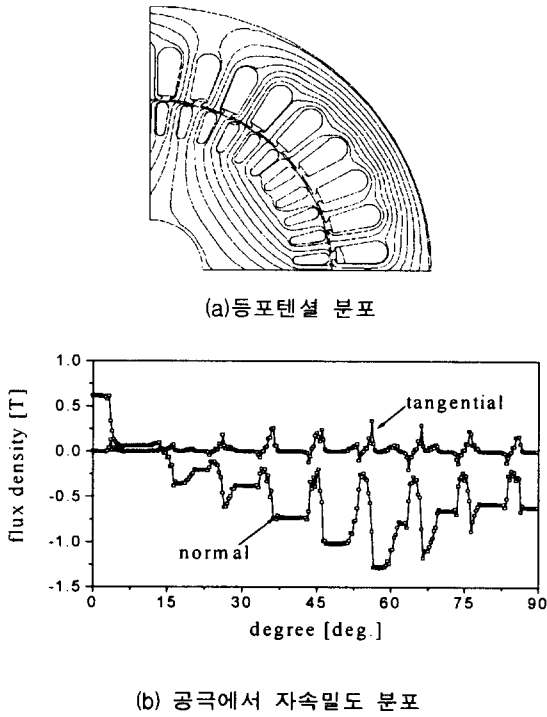


그림 5 정격회전시 등포텐셜 분포와 공극 자속밀도
 Fig. 5 Equi-potential distribution and airgap flux density at rated speed

유도전동기의 임의 속도에서 해석결과와 실험치를 비교해 보면 다음과 같다. 정격속도 1720[rpm](슬립 0.044)에서 보정 전·후의 전류는 각각 12.56[A], 9.13[A]로 엔드링 보정 후 전류가 감소하였으며 이 때 실험치는 9.75[A]이다. 효율은 보정전 87.07[%]에서 보정 후 86.8[%]로 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

다이나모메타 장비를 이용하여 슬립의 변화에 따라 토크를 측정하기 위하여 유도전동기의 부하를 서서히 증가시키며 매순간 제반 물리량을 측정한다. 그러나 최대 토크를 발생하는 슬립영역을 넘으면 아주 빠른 시간에 전동기의 속도가 슬립 1(정지상태)로 떨어지게 된다. 즉, 전동기의 최대 토크 발생 이후에 측정되는 토크는 다이나모메타에서 가해주는 브레이킹 힘이 측정됨에 따라 보정된 저항의 값에 비하여 슬립 0.4에서 최대 발생 토크가 나타난다. 실제 최대 토크는 다른 물리량의 양상으로부터 슬립 0.2와 0.3 사이에서 발생함을 알 수 있다. 그리고 전동기의 기동상태인 슬립 1에서 보정전 발생토크는 16.67[Nm], 보정후 23.53[Nm]이었으며, 실험치의 기동토크인 24[Nm]와 비교하면 엔드링을 고려하여 보정한 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

한편, 다이나모메타를 이용하여 측정되는 토크는 기계손과 철손분 손실이 빠진 전동기가 발생하는 유효분 토크 값이다. 그러므로 유한요소법으로 산출된 해석결과와 토크에서 기계손과 철손 성분을 포함한 이 두 손실 양을 빼주어야 한다. 대상 전동기의 손실은 다음과 같은 과정으로 산출하였다. 무부하 시험을 통하여 유효분 손실을 측정하였으며, 이 값은 동손과 철손, 기계손을 포함하므로 동손분의

값을 빼주면 고정손과 기계손을 얻을 수 있다. 측정결과 철손과 기계손은 115.6[W]로써 이 값을 유한요소해석의 결과에서 빼주어 유효출력을 계산하였다.

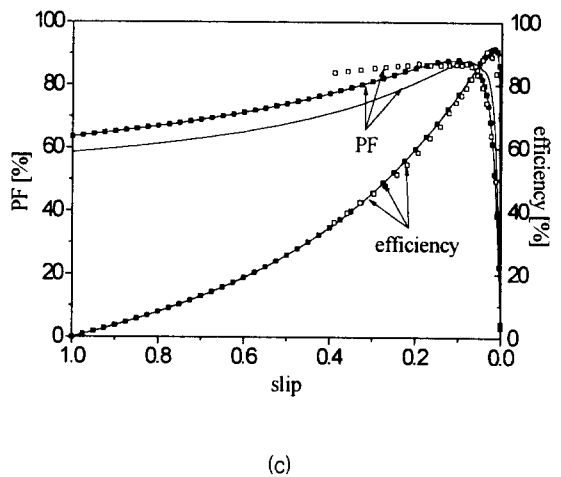
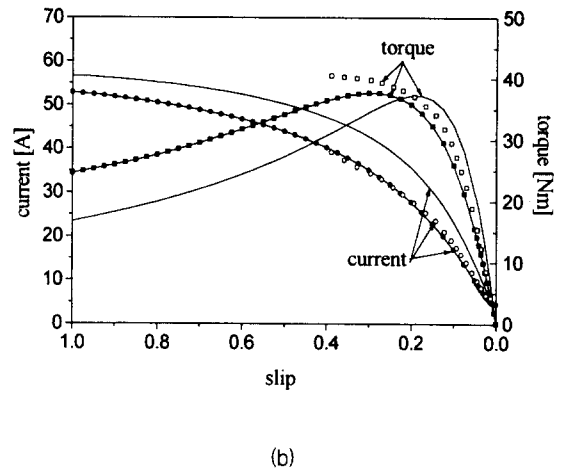
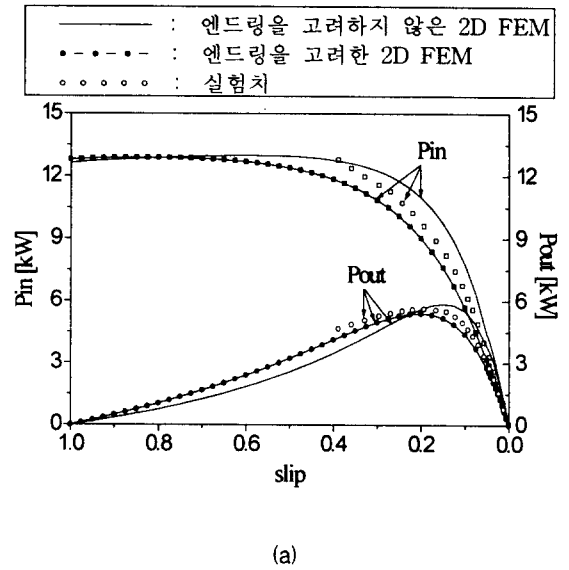


그림 6 슬립변화에 따른 특성해석 비교
 Fig. 6 Comparison of the characteristics according to slip

표 2는 정격속도 1720[rpm]에서 전동기의 제반 특성 해석 결과를 실험치와 비교한 것이다. 이 표로부터 엔드링의 반영 유·무에 따라 유한요소해석에 의한 두 해석 방법의 결과는 큰 차이를 보인다. 엔드링을 고려하여 해석한 결과와 실측치를 비교하면 실험치의 전류가 해석결과 보다 약간 크게 나타나기 때문에 입력과 출력도 약간 큰 값을 가지며 효율과 역율은 실험치와 근사함을 알 수 있다. 따라서 엔드링을 고려하지 않은 유한요소법의 결과보다는 보정후의 결과가 실험치에 근접하므로 본 논문에서 제안된 방법이 타당함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 3상 농형 유도전동기를 2차원 유한요소법으로 해석할 경우 간단한 방법으로 엔드링을 고려한 2차측 도체의 보정된 저항률을 사용하면 신뢰성 높은 해석결과를 얻을 수 있을 것이다.

표 2 정격시의 특성비교(1720[rpm])

Table 2 Comparison of the characteristics at rated speed

	보정전 (FEM)	보정후 (FEM)	실험치	단 위
정격전류	12.56	9.13	9.75	[A]
1차 입력	4.10	2.88	3.26	[kW]
발생토크	19.82	13.88	15.31	[Nm]
출 력	3.57	2.50	2.76	[kW]
효 율	87.07	86.80	84.66	[%]
역 율	85.00	82.33	79.71	[%]

4. 결 론

본 논문에서는 3상 농형 유도전동기를 2차원 유한요소해석 할 경우 엔드링을 고려할 수 없는 문제를 해결하기 위하여 엔드링의 저항을 회전자 도체의 저항률로 환산하여 해석하는 방법을 제시하였다. 제안된 방법으로 산출한 해석대상 전동기의 2차측 도체의 저항률이 54.3[%] 증가하였으며, 또한 제시된 방법에 의한 전압원 구동 유한요소해석 결과와 실측치의 특성해석 결과를 비교 검토하여 만족 할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

제안된 해석기법은 2차원 유한요소해석으로도 엔드링의 영향을 고려하여 빠르고 정확한 해석이 가능하므로 유한요소법을 이용한 설계와 특성해석 연구에 유용한 방법으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] 김영중, 임달호, “농형회전자의 엔드링을 고려한 유도전동기 자계의 2차원 동특성 수치해석 방법,” 대한전기학회 논문지, Vol. 41, No.9, 1992.
 [2] 임달호, 홍정표 외 3인, “자성 왜지를 사용한 유도전동기의 특성해석,” 대한전기학회 하계학술대회, 1994.
 [3] F. Bouillault and A. Raz, “Eddy current due to statues teeth in synchronous machine rotors,” IEEE Trans. Vol. MAG-20, pp.102-107, 1984.

[4] B. I. Kwon and B. C. Park et al, “Analysis of axially non-uniform loss distribution in 3-phase induction motor considering skew effect,” Proc. of IEEE CEFC '98, pp.225, 1998.
 [5] T. Nakata, N. Takahashi and K. Fujiwara, “Physical meaning of grad ϕ in eddy current analysis using magnetic vector potential,” IEEE Trans, Vol. Mag-24, No. 1, pp. 178-181, 1988.
 [6] T. W. Preston, A. B. Reece and P. S. S. Angha, “Induction motor analysis by time stepping technique,” IEEE Trans, Vol. Mag-24, No. 1, pp. 471-474, 1988.
 [7] E. Vassent, G. Meunier and A. Foggia, “Simulation of induction machines using complex magnetodynamic finite element method coupled with the circuit equations,” IEEE Trans, Vol. MAG-27, No. 5, pp. 4246-4249.
 [8] D. Shen and G.Meunier, “Modelling of Squirrel cage Induction Machines by the Finite Element Method Combined with the Circuits Equations,” Proc. of International Conference on Evolution and Modern Aspects of Induction Machines, pp384-388, 1991.
 [9] 任達鎬, 電氣系の有限要素法, 東明社, 4版, 1995.
 [10] S. J. Salon, Finite Element of Electrical Machines, Kluwer Academic Publishers,1995 .
 [11] 竹内壽太郎, 新版電氣機器設計學, オーム社, 1版, 1974.

저 자 소 개



하 경 호(河京鎬)
 1972년 5월 19일생. 1997년 창원대 전기공학과 졸업. 1997년~현재 동 대학교 전기공학과 석사과정



홍 정 표(洪正杓)
 1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수



김 규 탁(金奎卓)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수. 1996년~1997년 일본 부稻田大 客員研究員



임 태 빈(任泰彬)

1957년 3월 6일생. 1979년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년~1987년 금성정밀 중앙연구소 연구원. 1987년~1992년 한국씨보(주) 기술연구소 연구실장. 1993년~1995년 삼성전기(주) 정밀기전사업 연구실장. 현재 전자부품 종합기술연구소 부품 연구4팀 연구실장.