

## 고정자 권선 사양에 따른 10kW급 고속 유도전동기의 전자기적 특성 및 가진력 분석

이지영\*, 장대규\*, 장정환\*  
동아대학교\*

### Electromagnetic Characteristic and Excitation Force Analysis of 10kW High Speed Induction Motor According to Stator Winding Specifications

Ji-Young Lee\*, Dae-Kyu Jang\*, Jung-Hwan Chang\*  
Donga University\*

**Abstract** - 본 논문에서는 권선사양에 따른 10kW급 동 다이캐스팅 고속 유도전동기의 전자기적 특성과 전기기기의 진동을 발생시키는 고정자 치의 가진력을 분석하였다. 회전자 모델과 코일의 점적률은 일정하게 유지하면서 턴 수, 코일단면적, 고정자 슬롯의 형상을 변경하였다. 이에 따라 1, 2차 측 저항과 누설리액턴스 성분이 변화함을 확인하였고, 저항과 누설리액턴스 성분의 변화가 유도전동기의 토크, 자속밀도, 효율 특성 및 고정자 치의 가진력에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

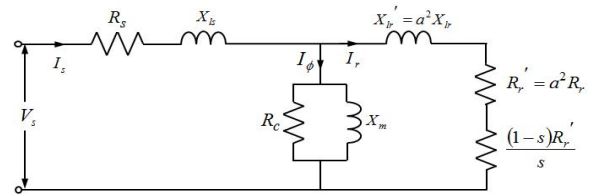
표 2와 그림 1은 각 모델의 권선사양과 고정자 슬롯형상을 나타낸다. 동일한 점적률 조건하에 Model 2는 Model 1과 동일한 슬롯면적에서 권선 직경은 7.5% 감소시키면서 턴수는 12.5% 증가시켰고 Model 3은 Model 1보다 34.3%증가한 슬롯면적에서 권선 직경은 35%, 턴수는 12.5% 증가시켰다. 그 결과 Model 1과 비교하여 Model 2의 고정자측 권선저항은 21.2% 증가하였고, Model 3의 고정자측 권선저항은 4.6% 감소하였다.

#### 1. 서 론

최근 고효율 전기기기의 사용이 권장되면서 동 다이캐스팅 유도전동기와 같은 고효율의 프리미엄급 전동기의 사용이 증대될 것으로 예상되고 있다. 특히 고속 유도전동기는 일반 전동기 대비 소형, 경량, 고효율 성능을 얻을 수 있어 터보기기, 공작기계용 고속 스펀들 시스템 등 다양한 산업 분야에 이용되고 있다. 하지만 전동기가 고속으로 회전하는 경우 진동은 전동기에 치명적인 손상을 줄 수 있을 뿐만 아니라 인명 피해를 줄 수 있는 아주 중요한 문제로서, 고속 전동기 설계에 있어서 전동기의 소음진동 특성은 반드시 고려되어야 한다[1]. 따라서 본 논문에서는 권선 사양에 따른 10kW급 18,000rpm 3상 유도전동기의 전자기적 특성과 전동기 진동의 주요원인인 고정자 치의 가진력을 분석하였다. 등가회로법을 이용하여 권선사양에 따른 토크-속도 특성을 분석하였으며, 정적부하에서의 자속밀도 분포와 전동기 손실 및 효율특성을 유한요소법을 이용하여 분석하였다. 또한 맥스웰 응력 텐서법을 이용하여 치의 표면을 가진하는 반경방향 힘을 계산하여 비교하였다.

#### 2.2 등가회로법을 이용한 토크특성해석

유도전동기의 등가회로는 고정자 측을 기준으로 그림 2와 같이 표현된다. 여기서  $I_r^2 R_r'$ 는 회전자 회로의 동손을 의미하며,  $I_r^2(1-s)R_r'/s$ 는 기계적 출력을 나타낸다.



〈그림 2〉 유도전동기의 등가회로

그림 2의 등가회로에서 철손저항과 자화리액턴스 성분을 좌측으로 이동시켜 등가회로를 간략화하면 상당 출력토크는 식(1)과 같이 표현된다[2].

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_s} \frac{V_s^2}{(R_s + R_r'/s)^2 + (X_s + X_r')^2} \frac{R_r'}{s} \quad (1)$$

식(1)에서 고정자 측으로 환산된 회전자 저항  $R_r'$ 과 회전자 누설리액턴스  $X_r'$ 는 권수비  $a$ 의 제곱에 비례하고, 고정자 누설 리액턴스  $X_s$ 는 고정자 권선의 턴수에 비례한다. 따라서 고정자 권선의 턴수 증가는 고정자 누설 리액턴스  $X_s$ 를 증가시킬 뿐만 아니라 권수비 증가로 인해 회전자 저항  $R_r'$ 과 회전자 누설리액턴스  $X_r'$ 도 함께 증가시킨다. 그 결과 식(1)의 상당 출력토크는 턴수의 증가에 의해 감소된다. 또한 고정자 권선 저항의 증가는 상당 출력토크를 감소시키는 요인이 될 수 있다.

등가회로법이 적용된 상용 소프트웨어인 Maxwell Rmxport를 이용하여 각 해석모델의 토크-속도 특성을 해석하였고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

#### 2. 10kW급 고속 유도전동기 해석

##### 2.1 해석 모델

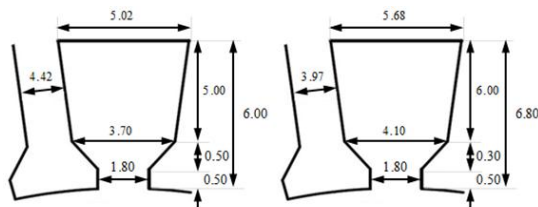
표 1은 10kW급 고속 유도전동기의 기본 사양을 나타낸다. 권선사양에 따른 유도전동기의 특성 변화를 분석하기 위해 유도전동기의 기본 사양은 동일한 조건에서 권선 사양과 고정자 슬롯 형상에 따라 3가지 모델을 선정하였다. 이 때 권선 사양은 턴수와 권선 직경을 변경하였으며, 고정자 슬롯 형상은 치 폭과 요크 폭을 변경하였다.

〈표 1〉 10kW급 동다이캐스팅 고속 유도전동기의 사양

Item	Spec	Item	Spec
No. of Phase	3	Output Power[kW]	10
Pole	4	Input Voltage[V]	350
Stator Slot	24	Frequency[Hz]	600
Rotor Bar	30		

〈표 2〉 10kW급 동다이캐스팅 고속 유도전동기의 권선 사양

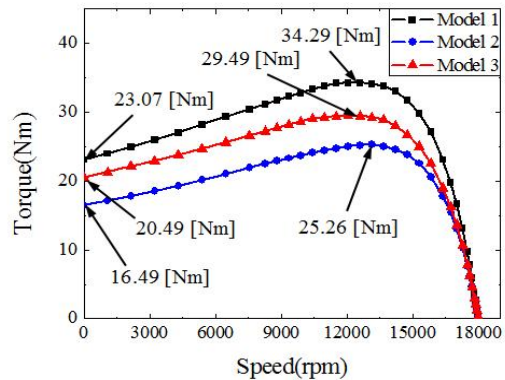
Item	Model 1	Model 2	Model 3
Cond. per Slot	16	18	18
No. of Strands	3	3	2
Wire Dimension[mm]	0.43	0.40	0.57
Stator Resistance[Ω]	0.26	0.33	0.25
Fill Factor	40.5	40.43	40.43



(a) Model 1,2

(b) Model 3

〈그림 1〉 고정자 슬롯의 형상



〈그림 3〉 권선사양에 따른 토크-속도 곡선

Model 1의 기동토크와 최대토크는 각 23.07과 34.29Nm로 비교 모델 중 가장 높은 값을 가진다. 이에 반해 Model 2는 고정자 권선의 턴수와 저항이 모두 증가하여 해석 모델 중 가장 낮은 토크 특성을 가짐을 알 수 있다. Model 3의 경우, Model 2와 비교하여 고정자 권선의 턴수는 동일하지만 고정자 권선의 저항이 감소하여 Model 2보다 개선된 토크 성능을 가진다.

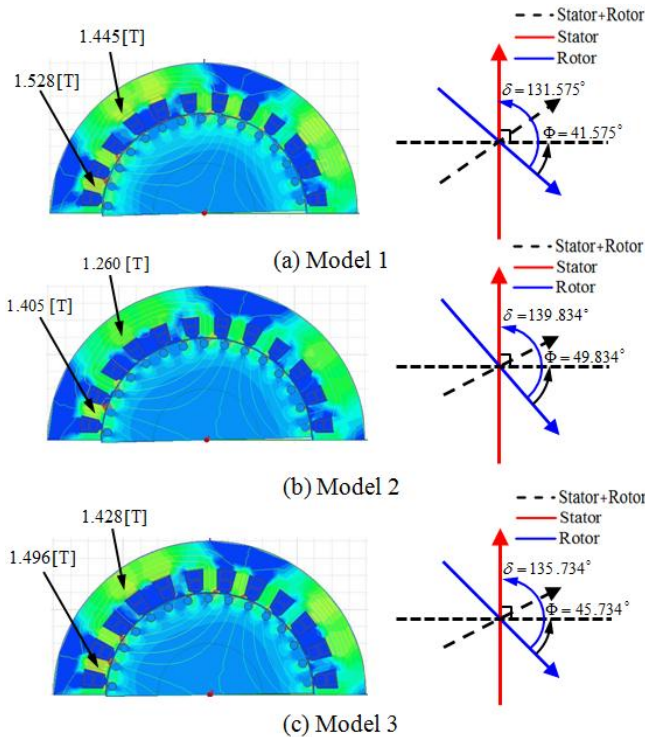
### 2.3 유한요소 해석

#### 2.3.1 공극 자속밀도

표 3은 정격부하 조건에서의 유한요소 해석결과를 나타내고, 그림 4는 각 모델의 자속밀도 분포와 반경방향 공극 자속밀도의 벡터도를 나타낸다. 공극 자속밀도의 벡터도는 정상상태에서의 합성자계 벡터와 도체바를 공기 영역으로 해석했을 때 구해지는 고정자 회전자계 벡터의 관계에 의해 도시되었다. 표 3에서 알 수 있듯이 정격부하 조건에서 Model 2와 3은 Model 1보다 높은 기자력이 인가되지만 Model 2와 3의 공극 자속밀도의 기본파 성분 크기가 각각 0.70T, 0.71T로 Model 1에 비해 Model 2은 12.5%, Model 3은 11.3% 감소하는 특성을 보였다. 이는 Model 2와 3에서 회전자측 누설인덕턴스 증가로 인해 고정자측 자계와 회전자측 자계 사이의 위상이 증가한 결과로 판단된다[3]. 이로 인해 그림 4와 같이 고정자 요크와 치의 자속밀도 최대값이 Model 2와 Model 3에서 감소되었다.

〈표 3〉 FEM 해석결과

Item	Model 1	Model 2	Model 3
Rated current[A]	22.42	21.23	21.30
MMF[AT]	179.38	191.32	191.73
Rated torque[Nm]	5.39	5.42	5.41
Rated speed[rpm]	17730	17648	17655



〈그림 4〉 자속밀도 분포와 공극 자속밀도 벡터도(Scale 0.6~1.7 T)

#### 2.3.2 손실 및 효율

유한요소해석을 이용하여 각 모델의 손실과 효율을 계산하였고, 그 결과는 표 4에 나타내었다. Model 1과 비교하여 Model 2의 고정자측 동손은 14.4% 증가하였고, Model 3의 동손은 13.6% 감소하였다. 회전자측 동손은 슬립이 증가하는 Model 2와 Model 3에서 크게 발생하였지만, 철손은 슬립의 증가에 의한 공극합성자속의 감소로 Model 2와 Model 3에서 각각 18.55%, 12.99% 감소하였다. 그 결과 Model 1에 비해 Model 2의 효율은 0.22% 감소했지만 Model 3의 효율은 0.65% 상승하였다.

〈표 4〉 손실 및 효율

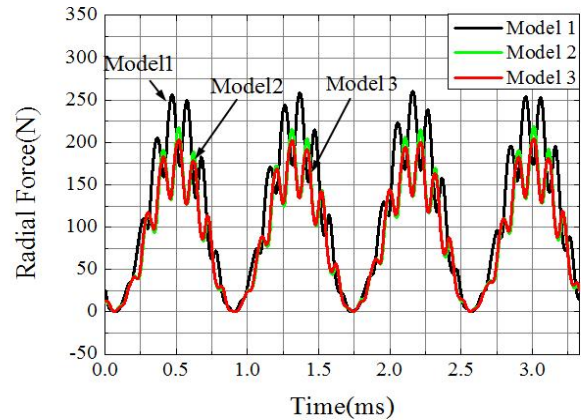
Item	Model 1	Model 2	Model 3
Core loss[kW]	0.30	0.25	0.26
Stator winding loss[kW]	0.38	0.44	0.33
Rotor winding loss[kW]	0.20	0.23	0.23
Rated efficiency[%]	91.87	91.65	92.42

#### 2.3.3 반경방향 가진력

전기기기에서 발생하는 진동의 주요원인은 공극 자속밀도에 의해 발생하는 반경방향 가진력이다[4]. 반경방향 가진력은 식 (2)의 맥스웰 응력 텐서법에 의해 계산될 수 있다.

$$\sigma_r = \frac{1}{2\mu_0}(B_r^2 - B_t^2) \quad (2)$$

여기서  $\mu_0$ 는 공기의 투자율,  $B_r$ 과  $B_t$ 는 각각 반경방향 및 접선방향 자속밀도를 나타낸다. 그림 5는 기계각 1주기 동안 고정자 치 하나에 가해지는 반경방향 가진력의 파형을 나타낸 것으로 Model 2와 3의 기본파 성분이 Model 1보다 각 20%, 21% 감소하였고, 나머지 고조파들의 크기도 전체적으로 감소함을 보였다. 이를 통해 고정자 권선의 턴수의 증가가 진동의 주요원인인 반경방향 가진력을 감소시킴을 확인하였다.



〈그림 5〉 치 표면에 가해지는 반경방향 가진력 (기계각 1주기)

### 3. 결론

본 논문에서는 권선 사양에 따른 유도전동기의 전자기적 특성과 고정자 치의 가진력을 비교하였다. 동일한 슬롯면적에서 고정자 권선의 턴수가 증가하면 고정자측 저항과 회전자측 저항 및 누설리액턴스 성분이 증가하여 기동토크 및 최대토크가 감소되는 특성을 보였다. 하지만 회전자측 누설리액턴스 성분의 증가로 합성자계가 감소하게 되어, 철손 및 고정자 치에서 발생하는 전자기적 가진력이 감소되었다. 또한 고정자 코어의 자속밀도 포화 특성이 개선되어, 치폭과 요크의 폭을 줄임으로써 슬롯 면적 증가 및 고정자 저항 저감이 가능함을 확인하였다. 고속 유도전동기에서 턴수를 증가시켰을 경우 진동 특성이 개선될 것으로 예측되며, 이는 추후 강제 진동 해석 및 실험을 통한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

#### [참고 문헌]

- [1] 홍도관, 최재학, 김동준, 우병철, 구대현, “고속 유도전동기의 도체바 수 및 슬롯수 조합에 따른 강제 진동해석”, 한국소음진동공학회 추계학술대회, pp. 185-188, 2014
- [2] SH Kim, “DC, AC, BLDC motor control”, BogDoo publishing company, pp.137-141, 2010
- [3] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, JR, Stephen D. Umans, “Electric Machinery”, McGraw-Hill publishing company, pp. 311-313, 2005
- [4] Jacek F. Gieras, hong Wang, Joseph Cho Lai, “Noise of Polyphase Electric Motors”, Taylor&Francis publishing company, pp. 5-46, 2005