

# 효율 개선을 위한 심구형 유도전동기 회전자 형상에 관한 특성 분석

신동윤\*, 김동호\*\*, 이승원\*, 김광수\*\*\*, 김원호\*  
 가천대학교\*, 한양대학교\*\*, 한라대학교\*\*\*

## Characteristic Analysis of Induction Motor Rotor Shape for Improving Efficiency

Dong-Youn Shin\*, Dong-Ho Kim\*\*, Seung-Won Lee\*, Kwang-Soo Kim\*\*\*, Won-Ho Kim\*  
 Gachon University\*, Hanyang University\*\*, Halla University\*\*\*

**Abstract** - 본 논문은 유도전동기의 Deep Bar 형상에 따른 효율 분석과 고정자, 회전자 슬롯수 조합에 따른 효율 분석을 진행하였다. 높은 기동토크와 고효율을 만족하기 위하여 비례추이를 활용한 심구형 유도전동기를 채택하였다. 설계 사항 중 Deep Bar의 경우, 크기와 형상에 따라 전류와 자속의 변화가 생기게 되어 제작성 및 효율을 고려하여 다양한 형상 중 사다리꼴 형상과 직사각형 형상의 Deep Bar를 비교,분석하였다. 또한 회전자와 고정자의 슬롯수 조합을 비교하여 최적의 조합을 분석하였다. 자기등가회로(Magnetic Equivalent Circuit: MEC) 및 수치해석법을 통해 형상과 슬롯수 조합별 성능을 비교하였으며, 유한요소해석(Finite Element Analysis: FEM)을 통해 본 연구의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서 론

국내 전기에너지 중 전동기를 사용하는 비율은 50%이상을 차지한다. 전동기중 유도전동기는 유지보수가 용이하고 생산단가가 저렴하여 산업계의 다양한 설비들에 광범위하게 사용되고 있다. 전세계적 차원으로 고효율 전동기 설계 기술 사용을 의무화하고 있으며, 최저 효율제정 산업과 가정에서 많이 사용되는 유도전동기에 대한 규제가 강화되고 있다. 따라서 정책의 요구에 충족되는 고효율 전동기 설계를 위해 회전자의 Deep Bar 형상을 연구하였다. 높은 기동토크 및 고효율을 만족시키기 위해 심구형 유도전동기를 선택하였다. 동일 면적의 Deep Bar 경우에도 형상에 따라 전동기의 특성이 달라진다. 또한 회전자와 고정자의 슬롯 수 조합에 따라 특성도 달라진다.

본 연구에서는 15kw급 심구형 유도전동기를 분석모델로 하여 고효율 및 높은 기동토크를 만족하는 회전자 Deep Bar 형상과 최적의 고정자 회전자 슬롯수 조합을 제안한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 Deep bar 형상 설계

<표 1>은 모터의 제원 및 목표사양이며, <그림 1>은 심구형 유도전동기 회전자의 Deep Bar 형상이다. 모델 A는 치 폭이 일정한 사다리꼴 형상이며, 모델 B는 Deep Bar의 폭을 일정하게 설계한 직사각형 형상이다. 유도전동기의 Deep Bar의 경우, 슬립과 주파수에 따라 다음 관계식(1)과 같은 특성을 갖는다.

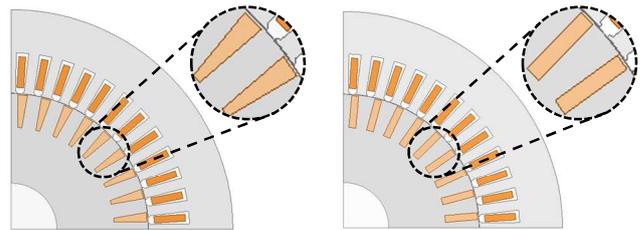
$$f_r = s f_e \quad (1)$$

$f_r$  : 슬립주파수  $s$  : 슬립  $f_e$  : 전기적주파수

이에 슬립이 낮아지면 2차 주파수가 감소하게되어 전체 임피던스에서 저항보다 누설 리액턴스가 차지하는 비중이 작아지므로 전류가 도체 내부까지 흐르게 된다. 전류가 내부까지 흐르게 되면 도체 면적이 증가하는 것과 같기 때문에 2차 저항이 작아지는 특성을 갖게 되어 권선형 전동기의 비례추이 특성과 비슷한 특성이 나타나도록 유도전동기 회전자 형상을 설계하였다.

<표 1> 모터 제원 및 목표 사양

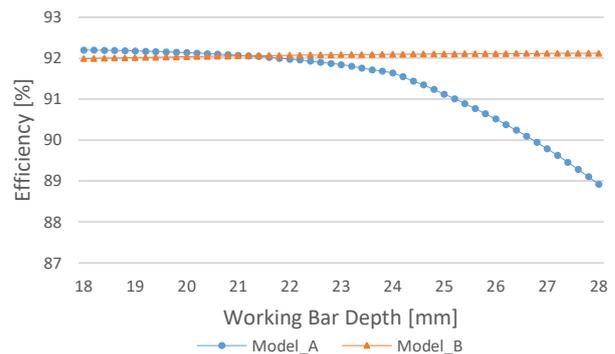
Parameter	Value	unit	
Stator Outer Diameter	250	mm	
Stack length	156.6	mm	
Pole	4	-	
Slot(Stator / Rotor)	48/36,40,44	-	
Deep Bar Material	Copper	-	
Target Parameter	Power	15000	W
	Torque	80	Nm
	Efficiency	90 ↑	%



<모델 A>

<모델 B>

<그림 1> 회전자 Deep Bar 형상



<그림 2> Deep Bar 형상별 효율 특성 비교

정격운전시의 효율 특성을 보기위해 Deep Bar 형상을 비교,분석하였다.

<그림 2>는 모델 A와 B가 동일 사이즈일 때 Deep Bar 길이에 따른 효율이다. 동일한 조건을 비교하기 위하여 Deep Bar의 폭은 5.2mm로 고정하였고 길이는 18~28mm로 설정하였다. Deep Bar 길이가 21.2mm까지는 모델 B의 효율이 더 높으나, 샤프트에 인접한 부분의 치 폭이 점점 좁아지게 되어 효율이 감소하게 되고 자기포화가 발생 이후에는 전류가 급증하여 효율이 급격하게 감소한다. 반면 모델 A는 Deep Bar의 길이가 길어져

도 치 폭이 일정하므로 자기포화가 발생하지 않고, 길이가 증가함에 따라 효율이 증가한다. 두 가지 형상 중 치 폭이 일정한 모델 A의 사다리꼴 형상을 슬롯수 조합 모델로 선정하였다.

## 2.2 슬롯수 조합 결정

모델 A의 고정자, 회전자 슬롯수 조합을 비교하기 위해 고정자를 48슬롯으로 고정하고, 슬롯 조합에 따라 전동기의 특성이 달라지기 때문에 회전자 슬롯을 36, 40, 44 슬롯조합으로 선정하였다.

최적 슬롯수 조합을 선정하기 위해 각 회전자 슬롯수를 해석을 진행하였다. <표 2>는 각 슬롯 별 최고 효율 모델의 결과이다. 해석결과를 바탕으로 제작성과 효율을 고려하여 36슬롯 회전자 형상을 채택하였다.

<표 2> 슬롯 수에 따른 최적모델 효율 비교

Parameter	36 slot	40 slot	44 slot	unit
RotatingSpeed	1756.58	1756.40	1756.21	rpm
Torque	81.55	81.55	81.54	Nm
RatedCurrent	26.23	26.34	26.54	Arms
OutputPower	14712.484	14714.76	14714.32	W
Efficiency	92.09	92.09	92.06	%

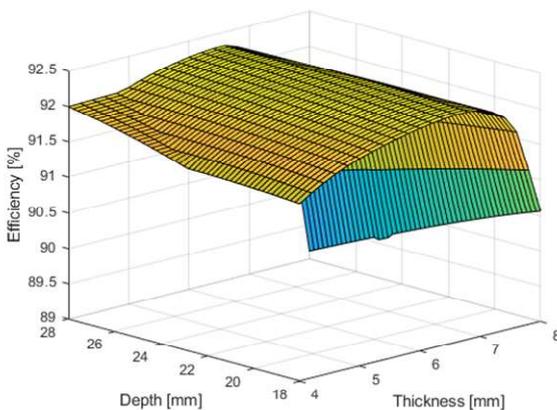
## 2.3 최적 Deep Bar 사이즈 결정

36슬롯 Deep Bar의 폭을 4mm~8mm, 길이를 18mm~28mm까지 범위를 두어 MEC로 해석을 했다. <그림 3> Deep Bar의 길이와 폭에 따른 효율이다. 효율은 치 길이의 영향보다 치 폭의 영향에 더 민감하게 변화하며, 이는 식 (2)의 관계에 의해 자로의 단면적이 큰 영향을 미치기 때문이다.

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (2)$$

$R_m$ : 자기저항  $\mu$ : 투자율  $A$ : 단면적  $l$ : 길이

MEC 결과를 통해 36슬롯 회전자 Deep Bar 형상은 길이 24.2mm, 폭 5.2mm에서 최고 효율임을 확인하였고, 이를 최적 모델로 선정하였다.



<그림 3> 3차원 Deep bar 효율 특성

<표 3> 최적모델 MEC 결과

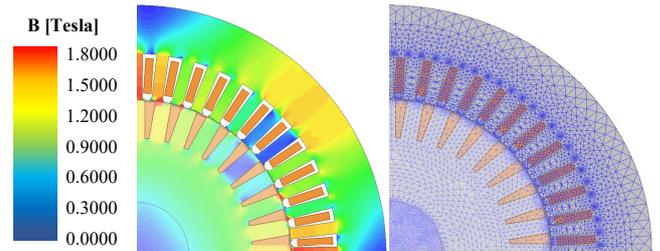
Depth	Thickness	Iron Loss	Core Loss	Efficiency
23.6mm	5.2mm	135.37kW	378.25kW	92.09%

## 2.4 최종모델 분석

제안된 Deep Bar 형상 모델 성능의 타당성 검증을 위해 FEM 해석을 수행하였고, MEC와의 해석결과를 <표 4>에 비교하였다. <그림 4>는 최적 모델의 자속밀도이다.

<표 4> MEC 및 FEM 해석 결과 비교

Parameter	MEC	FEM	unit
Rotate Speed	1756.58	1748.70	rpm
Torque	81.55	81.75	Nm
Current @Rated Speed	26.23	26.18	Arms
Output Power	14712.48	14999	W
Efficiency	92.09	92.23	%



<그림 4> FEM 해석 및 Plot Mesh

## 3. 결 론

본 논문에서는 심구형 유도 전동기의 회전자 형상과 슬롯수 조합에 따른 효율 특성을 분석하였다. 높은 기동토크와 고효율을 만족하기 위하여 비례추이를 활용한 심구형 유도전동기를 채택하였으며 자기포화를 고려하여 치 폭이 일정한 형상을 채택하였다. 또한, 제작성을 고려하여 36슬롯 회전자 형상을 선정하였다. 자기등가회로(MEC)로 해석을 진행하였으며, 유한요소해석(FEM)을 통해 본 연구의 타당성을 검증하였다.

본 논문은 고효율 전동기가 요구되는 설비 및 산업계에서 유도 전동기의 설계 시 도움이 될 것으로 예상된다.

### 감사의 글

본 연구는 2020년도 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(NO.20182020109570)

### [참고 문헌]

- [1] 김동호, 김광수, 송시우, 양인준, 이승원, 신동윤, 김원호 "이중농형 유도전동기 회전자 WorkingBar의 고효율 설계 프로세스의 관한 연구", 대한전기학회, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1088-1089, 2019.714712.484
- [2] 이승원, 김동호, 김원호 "고효율 설계를 고려한 이중농형 유도전동기 Working Bar 형상에 따른 특성 분석", 한국철도학회, 철도저널 제22권 6호, 237 - 238, 2019.11
- [3] 이재현, 이장규, 정상용, "차량용 유도전동기 회전자바의 형상에 따른 특성 비교분석". 대한전기학회, 대한전기학회 학술대회 논문집, 114-115, 2016.7
- [4] 김광수, 김미정, 함상환, 이주. (2010). 동다이크스팅을 이용한 프리미엄 효율 유도전동기 설계 연구. 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, (), 3137-3141.