

# 블로워용 IE3 유도전동기 대체 IE4 동기 릴럭턴스 전동기 고효율 설계 연구

## Study on the High Efficiency Design of IE4 Synchronous Reluctance Motor Replacing IE3 Induction Motor

유 회 총\* · 김 인 건\* · 정 제 명\*\* · 이 주†  
(Huai-Cong Liu · In-Gun Kim · Je-Myung Jeong · Ju Lee)

**Abstract** - In accordance with global energy conservation policies such as MEPS(Minimum Energy Performance Standard), electric motor industry is moving to super-high-efficiency machines and research to develop IE4 (International Energy Efficiency Class4) motors has been launched. In this situation, SynRM (Synchronous Reluctance Motor) has been attracting attention in place of induction motor which hardly provides super premium efficiency. As a result, much research on SynRM is being performed at home and abroad. Also, some products have already been appearing in the market. Compared to induction motor, SynRM has better efficiency per unit area and wider operating range. Although the utilization of control system in synchronous motor results in higher prices, we still need to concentrate on developments of SynRM so as to comply with the new policies. This study demonstrated the electromagnetic design methods of super-premium SynRM while maintaining the frame of existing IE3 induction motor for blower . We documented the design procedures for generating high saliency which is the most essential and mechanical stress analysis is also treated. In conclusion, we proved the validity of our design by manufacturing and testing our SynRM models.

**Key Words** : MEPS, SynRM, Induction motor, MTPA

### 1. 서 론

현재 전동기의 경우 전체 전력 소비량의 60% 이상을 차지하고 있으며, 유도전동기의 경우 전체 전동기사용의 70% 이상을 차지하고 있다[1]. 미국을 비롯한 선진각국에서는 90년대 들어 에너지 절감을 위해 고효율 전동기의 생산 판매를 의무화 하는 최저효율제 (Minimum Energy Performance Standards) 정책을 법률로 제정하여 시행해 오고 있으며, 2016년 10월부터는 프리미엄급(IE3) 유도전동기를 대기업의 경우, 의무적으로 생산하고 판매해야 한다. 향후 몇 년 안으로 프리미엄급 유도전동기가 주를 이룰 것이며 2022년경에는 슈퍼프리미엄급(IE4)의 전동기가 의무화될 예정이다[2].

산업용 분야에서 동력원으로 널리 사용되는 유도전동기는 개발된 지 100년 이상의 역사를 가지고 있으며 그동안 설계, 재료, 가공, 전력변환, 기술 등의 전동기 관련 요소 기술이 향상되었으므로, 전동기의 성능 향상, 경량화, 가격저감 등이 더 높게 실현

되고 있다.

동기형 릴럭턴스 전동기 (Synchronous Reluctance Motor, SynRM)는 구조적으로 회전자에 추가적인 다이캐스팅 작업이 불필요하고 금형으로 프레스 가공하여 적층을 하기 때문에 장기적으로 양산단가를 낮출 수 있는 장점이 있다. 또한 유도전동기의 발생 손실은 1차측 동손, 철손, 2차측 동손, 기계손, 표류부하손실로 나눌 수 있으며, 유도전동기와는 달리 SynRM은 회전자에 권선과 농형 알루미늄 도체 바가 없어 2차측 동손이 발생하지 않는다. 기존 유도전동기 비해 베어링 온도상승 폭이 낮아 베어링 수명도 연장 시킬 수 있다.

SynRM의 설계 시에는 일반적으로 돌극(Salient Pole)차 혹은 돌극비를 크게 하기 위해서는 멀티 자속장벽을 이용하여 설계하는 것이 기본이나 실제 멀티 자속장벽을 하게 되면 기계적인 강성에 취약해지므로 기계적인 강성도 함께 고려하여 설계해야 한다[3-5].

본 논문에서는 블로워용 3.7kW IE3급 유도전동기의 전자기장을 특성분석한 후, 유도전동기의 고정자 프레임 사이즈를 고정시키는 조건으로 슈퍼 프리미엄급 SynRM의 회전자 설계 전반에 대해 다룬다. 회전자 자속장벽을 설정하고 돌극차와 돌극비를 극대화 할 수 있는 방안, 그리고 기계적으로 강성을 만족시키는 모델을 제안하였다. 또한 유도전동기와 출력, 손실 및 효율특성 비교, 분석 한 후 제작 및 시험 결과를 제시하였다.

† Corresponding Author : Dept of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

E-mail : Julee@hanyang.ac.kr

\* Dept of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

\*\* Dept of Electronic Engineering, Hanyang University, Korea

Received : December 2, 2015; Accepted : February 11, 2016

## 2. 본 론

2009년 유럽 연합(EU) 집행위원회는 전동기를 출력과 효율에 따라 여러 등급으로 분류하는 EN 60034-30:2009 지침을 시행하였다. 등급은 표준 효율에 해당하는 IE1부터 슈퍼 프리미엄급인 IE4까지로 분류되는데 효율 등급이 한 단계 오를 때마다 손실은 20%가 감소한다. 이 지침은 2015년부터 유럽연합에서 생산되는 모든 전동기는 최소 IE3의 효율 등급을 가질 것이라고 명시하고 있다. 그림 1에 4극, 60Hz 유도전동기에 대한 용량별 분류가 나와 있다.

국내에서는 최적효율제와 같은 강제 의무정책시행을 2011년부터 시작하고 기준을 4단계로 제정했다.

(IE1:표준효율 전동기, IE2: 고효율 전동기, IE3: 프리미엄급 고효율 전동기, IE4: 슈퍼프리미엄급 고효율 전동기)

본 논문에서 다룬 IE3급 유도전동기 해석 모델 사양을 표 1에 나타내었다. 유도전동기의 해석 모델은 그림 2와 같이 선정하였다.

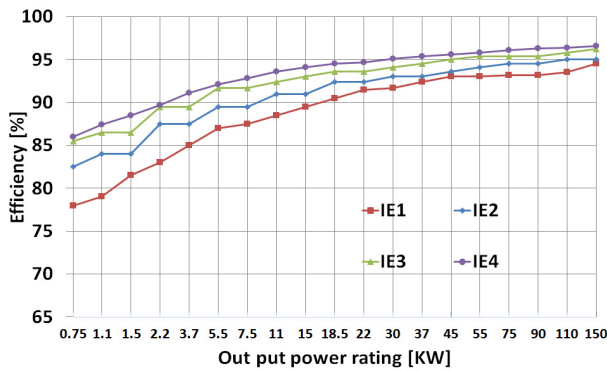


그림 1 IEC 600.4-30 4극60Hz 전동기 효율 기준  
 Fig. 1 IEC 60034-30 efficiency standard for a 4-pole, 60 Hz motor

표 1 유도전동기 해석모델 사양  
 Table 1 Design parameters for Induction motor

		IE3 3.7kW	단위
설계 포인트	토크	20	[Nm]
	속도	1775	[rpm]
설계 제한치	사이즈 외경	190.5/116	[mm]
	고정자/회전자		[mm]
	선간전압	380	[Vrms]
	전류	8.49	[Arms]
회전자	회전자 도체수	28	
고정자	극수/슬롯수	4/36	
	치 당 턴수	57	

## 2.1 IE3급 유도전동기 특성 분석

블로워용 유도전동기는 팬이나 브라켓과 같은 부하와 연결하여 공기를 흐르게 하는 기계적 에너지를 발생시킨다. 블로워 전동기 부하 특성 곡선은 공기 유동속도가 커질수록 요구토크가 증가하는 경향을 보인다. 하지만 일반적인 경우 공기기압이나 공기 질량이 일정하면 요구토크도 거의 일정하며, 요구동력은 블로워용 유도전동기의 회전속도에 비례한다. 전동기의 기계적 출력은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

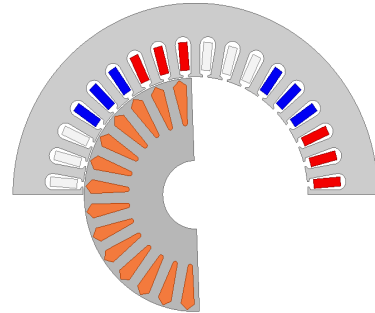


그림 2 IE3급 유도전동기 해석 모델  
 Fig. 2 IE3 Induction motor analysis model

$$P_{Load} = w T_L = \frac{2\pi N}{60} \cdot T_L \quad (1)$$

여기에서  $T_L$ 는 블로워의 부하토크[Nm]; N은 블로워 팬의 분당회전수[RPM]로 표시했다. 축 동력은 전동기의 축이 직결되어 있는 경우 블로워의 기계적 출력과 같다고 본다. 제시한 블로워용 IE3급 유도전동기는 3상 선간 전압 380V의 일정한 크기와 주파수를 갖는 전원이 공급되고 정격부하의 크기 또한 일정한 부하로 결정되므로 본 논문에서는 정격 포인트의 특성을 분석했다.

전동기해석에 있어서 신뢰성을 갖는 철손성분을 구하기 위해 규소강판의 비선형 특성을 고려하여 유한요소해석을 수행하였다. 특히 회전자에서 국부적으로 왜곡된 자속파형은 기본파와 고조파 성분들로 나눌 수 있으며, 그때 전체 철손은 식 (2)로 나타낸다.

$$W_i = \int_{iron} \sum_n K_e D \cdot (nf)^2 \cdot B_{r,n}^2 + B_{\theta,n}^2 dv + \int_{iron} \sum_n K_h D \cdot (nf)^2 \cdot B_{r,n}^2 + B_{\theta,n}^2 dv \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 주파수이고  $K_e, K_h$  각각 외전류 손실의 계수 및 히스테리시스 손실 계수이다.  $D$ 는 규소강판의 밀도이고,  $B_{r,n}, B_{\theta,n}$ 은  $n$ 차 고조파성분의 반경과 주파수의 자속밀도이다[6]. 유한요소해석을 통해 그림 3에 설계 정격 포인트의 자속밀도분포와 철심철손 분포를 나타내었다. 또한 손실 특성을 나타내고 효율을 표기하였다.

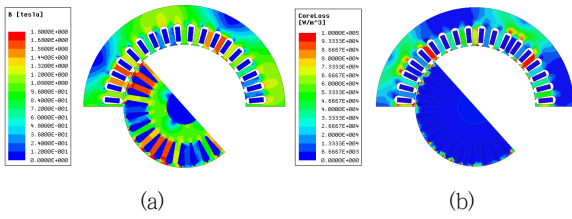


그림 3 정격 포인트 운전 시 유도기 철심 (a) 자속밀도 (b) 철손 분포

Fig. 3 Density distribution with Load (a) flux density (b) core loss density

표 2 3.7kW 유도전동기의 정격 포인트 유한요소 해석결과

Table 2 The calculated result of induction motor performance by FEM at rating point

	IE3 3.7kW	Unit
상전류	8.49	[Arms]
토크	19.55	[Nm]
정격속도	1760	[rpm]
선간전압	380	[Vrms]
철손	84.3	[W]
동손 [고정자 권선]	203.3	[W]
동손 [회전자 도체]	90.5	[W]
기계손	56.2	[W]
효율	89.6	%
역률	0.72	

## 2.2 IE4급 동기형 릴럭턴스 전동기 설계 및 분석

앞서 유도전동기의 발생 손실은 표 2와 같이 나타났다. 고정자 동손은 도체에 전류가 흐름으로써 발생하는 줄열이며 전체 손실의 50%이상 차지하므로 동손을 저감시키기 위해서는 도체 저항의 저감, 혹은 전류당 토크가 최대로 설계하는 방향이 최적 포인트가 된다.

SynRM의 회전자는 돌극 구조를 가진 형태로서 회전자 d축

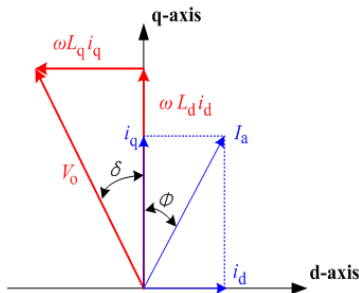


그림 4 SynRM의 페이저도

Fig. 4 SynRM phasor diagram

과 q축의 인덕턴스 차이 때문에 릴럭턴스 토크가 발생하여 구동된다. SynRM의 특성해석을 위해 페이저도는 그림 4에 제시하였고 식 (2)는 SynRM의 토크방정식을 나타낸 것이다.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(L_d - L_q)i_{ds}i_{qs} \quad (3)$$

$$\cos\delta = \frac{V_q}{V_0}, \sin\delta = -\frac{V_d}{V_0} \quad (4)$$

$$\sin\phi = \frac{i_d}{I_a}, \cos\phi = -\frac{i_q}{I_a} \quad (5)$$

$$\cos\phi = \frac{\left(\frac{L_d}{L_q} - 1\right)}{\sqrt{\left(\frac{L_d}{L_q}\right)^2 \frac{1}{\sin^2\phi} + \frac{1}{\cos^2\phi}}} \quad (6)$$

페이저를 사용하면  $I_q$  기준축의 전류위상각  $\phi$  및 Q축 기준축의 전압방향각  $\delta$  는 식 (4)-(5)로 표시할 수 있다.

역률식은 역률각 ( $\phi + \delta$ ) 을 삼각함수공식으로 전개하여 식 (6)으로 나타낼 수 있다. 식 (6)에서와 같이 돌극차와 돌극비를 증가시키면 토크와 역률이 향상됨을 확인할 수 있다. 하지만 SynRM 이론상 전류위상각은 d축 기준 45도 설정할 때  $I_{ds} \cdot I_{qs}$  이 제일 크지만 d,q축 인덕턴스는 전류 위상각 혹은 전류 값 변화에 따라 철심 자속 포화밀도 변화에 따라 변화하는 것을 고려하여 설계해야 한다. 또한 돌극비만을 고려하여 회전자 형상 설계가 진행된다면, 회전자의 강성 혹은 풍손 문제로 성능을 저하시킬 수 있으므로 이점을 잘 고려하여 설계해야 한다.

IE3급 유도전동기에서 사용하는 회전자 직경과 고정자 직경의 비 (0.608)를 기준으로, 제작 단가 절감을 위해 기존유도전동기의 고정자 스펙을 동일하게 결정하였다.

회전자 자속장벽 형상에 따라 d축과 q축 인덕턴스의 비율이 변화하고 이에 따른 자기저항의 크기변화를 보여 주고 있다. 회전자 형상 설계 시 각각의 변수를 설정하여 해석한다. 주요 설계 변수는 자속장벽(Barrier) 개수, Kw비(자속장벽과 세그먼트의 비), 각 자속장벽의 밀변길이, 자속장벽의 각, 림(rib)두께 브릿지(bridge)두께 등 있다. 기존의 유한요소법을 이용한 설계는 시간이 너무 오래 걸리는 단점이 있었다. 본 논문에서는 이를 단축시키기 위해 Transient 해석이 아닌 회전자 정지 상태로 고려한다. 고정자 A상 권선에 직류 전류를 인가하고, 기자력 방향을 회전자 d축, q축에 각각 정렬하여 이때 발생하는 d축, q축 쇄고 자속량의 비를 이용하여 간편하게 돌극비를 계산한다. 이를 그림 5에 나타내었다. 회전자 돌극비가 목표 스펙을 만족한 후 고정자 권선을 설계한다. 턴수에 따라 역기전력의 크기를 계산하고 이를 이용하여 정격 전압 레벨에 해당하는 권선사양을 결정할 수 있다. 또한 전류밀도 제한을 만족할 수 있는 권선의 선경 설계가 필요하다. 그림 6은 위의 설계 순서도이다.

실험계획법(Design of Experiments)은 모델의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 모델의 최적 조건을 효율적으로 찾아내는 기법이다. 토크와 역률의 최대화를 위해 인덕턴스 차와 인덕턴스 비

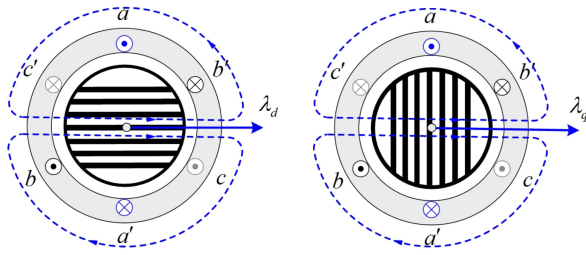


그림 5 돌극비를 계산하기 위해 간편한 쇄교자속 계산법  
Fig. 5 Saliency Ratio calculation method with D-q flux

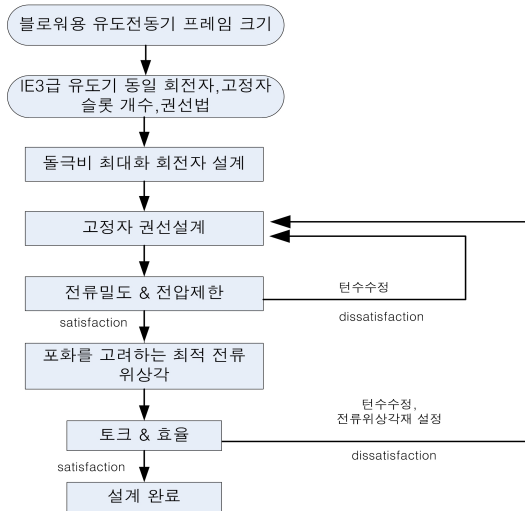


그림 6 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계 순서도  
Fig. 6 The flowchart on an optimal design process of SynRM

를 동시에 높일 수 있는 회전자의 형상을 실험계획법을 사용하여 설계한다.

회전자 설계는 실험 계획법을 이용하여 설계 목적함수와 설계 변수의 인자 및 수준은 표 3에 표시하였다. 설계 파라미터는 5개를 이용하였다. 설계변수 선정이 끝나면, 실험계획법을 이용하여 설계변수를 조합한다. 본 논문에서는 실험계획법 중 Taguchi법을 이용하여 실험을 설계하였다[7].

표 3 설계 목적함수와 설계 변수의 인자  
Table 3 Object functions and design variables

설계 목적함수	설계 변수
Max (Ld-Lq) & Max(Ld/Lq)	1. 자속장벽 개수
	2. 세그먼트의 두께
	3. 자속장벽 두께
	4. 안쪽 자속장벽, 회전자까지 위치
	5. 자속장벽과 세그먼트 두께의 비

인덕턴스 차와 인덕턴스 비가 구해지면, 설계변수가 목적함수에 얼마나 영향을 미치는지 알 수 있는 Main Effect 분석을 통해 각각의 변수들의 중요도를 판단할 수 있다. 그림 7은 인덕턴스 차와 인덕턴스 비 각각의 Main Effect Plot을 나타낸다. 그림 7의 나타나는 결과를 분석해 보면 먼저 인덕턴스 차와 비를 동시에 향상시켜주는 변수는 영향이 큰 순으로 '자속장벽 개수', '자속장벽과 세그먼트의 두께비', '자속장벽 두께' 3개이다.

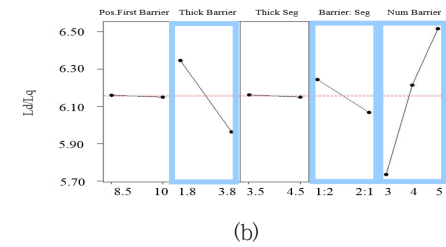
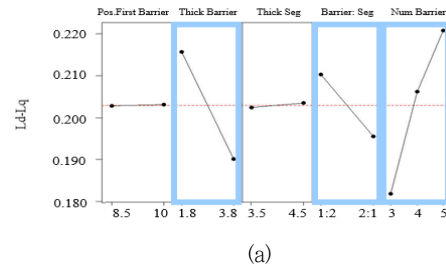


그림 7 목적함수에 대한 Main Effect Plot (a) 인덕턴스 차 (b) 인덕턴스 비  
Fig. 7 Main effect plot by DOE (a) inductance difference (b) inductance proportion




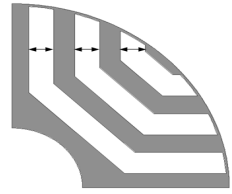

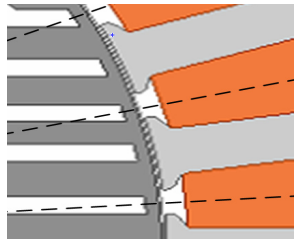
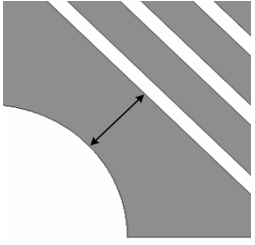
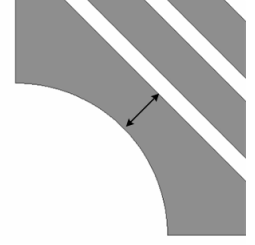



'자속장벽의 수'는 클수록 좋으나 토크와 역률에는 영향력이 가장 중요한 인자이며 제작 요구를 만족시키는 한에서 수가 많을수록 좋다. '자속장벽의 두께'는 설계목적함수에도 중요한 인자이며 자속장벽이 1.8mm 보다 커지면 q속 자속과 세그먼트의 포화 사이에 자속이 포화되는 것을 알 수 있다. '안쪽 자속장벽의 위치', '세그먼트의 두께'는 인덕턴스에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

표 4와 같이 회전자 설계를 바탕으로 IE4 효율등급을 만족하도록, 쇄교자속에 의한 역기전력을 2D 유한요소법을 통하여 계산하고 마지막으로 세그먼트 두께는 공정의 편이를 위해 같게 설계하였다. 최종 설계된 회전자의 주요 치수를 표 6에 정리하였다. 설계된 IE4급 SynRM 및 IE3급 유도전동기의 정격포인트 특성을 비교하면 최적설계 SynRM 모델의 돌극비를 최대화시키므로 출력밀도는 유도전동기 보다 크다. 따라서 유도전동기보다 고정자 동손이 감소했다.

SynRM 모델의 단위 전류당 최대 토크는 토크 곡선과 전류 제한 원의 접점에서 나타나며 이 접점은 토크식에 따라 전류 위상각 45°에서 나타난다. 하지만 설계된 IE4 SynRM 모델은 그림 9(a) SynRM 철심 자속 분포와 같이 위상각 45°에서 회전자

표 4 설계 목적함수와 설계 변수의 인자

Table 4 Object functions and design variables

자속장벽의 수		자속장벽의 두께	
			
<p>자속장벽 수가 너무 적으면 q축 자속이 많이 흐르게 된다. 자속장벽 수가 많아지면 세그먼트가 얇아져 포화의 우려가 있고, 회전자의 기계적인 구조(강성) 때문에 제한을 받게 된다.</p>		<p>자속장벽이 두꺼우면 q축 자속이 감소하며 q축 인덕턴스가 감소하게 된다. 하지만 자속장벽수와 마찬가지로 자속장벽이 너무 두꺼워지면 회전자 기계적인 구조 때문에 고속운전 시 비산이 발생 될 수 있다.</p>	
세그먼트의 두께		안쪽 자속장벽의 위치	
			
<p>고정자 치에 세그먼트를 맞추기 위해 회전자 밖으로 갈수록 세그먼트의 두께를 점점 줄이면 더 많은 자속을 받을 수 있고 토크리플을 줄일 수 있으나, 설계가 복잡하고 제작이 어렵다.</p>		<p>가장 안쪽 자속장벽의 위치에 따라 세그먼트의 길이가 변화하게 된다. 이는 회전자 크기와 자속장벽 두께 개수에 따라 제한 될 수 있다.</p>	
자속장벽과 세그먼트의 두께비			
			
<p>자속장벽이 두꺼우면 q축 자속은 감소하지만 세그먼트가 얇아져서 포화되기 쉽다. 반면 자속장벽이 얇은 경우 q축 자속은 증가하지만 세그먼트가 두꺼워져 d축 자속도 증가한다.</p>			

d축 자로가 포화되면서 전류위상각은 q축으로 이동되어 자속분 전류가 감소하지만, d축 자로의 포화가 줄어들어, 결과적으로 약 계자제어가 아닌 공극의 쇄교자속량이 증가하는 단위전류당 최대 토크(MTPA) 제어법이 이루어지게 된다[8]. 이는 그림 8과 같다. IE3급 유도전동기와 SynRM의 철손은 동일속도에서 철심의 자속 밀도에 비례한다. SynRM에서는 구조상 회전자 최대 돌극비를 만들기 위해, 회전자 자속장벽 구조가 최적설계 되어야하며, 자속장벽의 사이즈 크기가 유도전동기 회전자 슬롯의 면적보다 크기 때문에 SynRM 철심의 자속밀도가 유도전동기 보다 크다. 따라서 유도전동기의 철손보다, SynRM 철손이 크게 나타난다. 그림 9(b)에 SynRM 철심의 철손 분포도 제시하였다. 그렇지만 SynRM은 회전자에 권선이 없고, 농형 알루미늄 도체바 없으므로 2차측 동손이 발생하지 않는다. 설계 최종결과에서 SynRM의 효

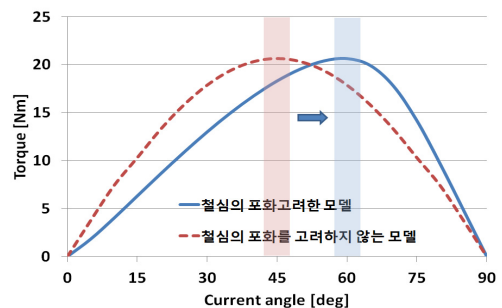


그림 8 철심의 포화 영향에 따른 단위 전류당 최대 토크 (MTPA) 전류 위상각 이동

Fig. 8 Magnetic saturation on Maximum torque per ampere current vector variation

표 5 설계 목적함수와 설계 변수의 인자

Table 5 Object functions with 2D-FEM analysis results

모델링		IE4 3.7kW SynRM	Unit
SynRM 설계	극수	4	
	자속장벽 수	5	
	자속장벽의 두께	1.8	mm
	세그먼트의 두께	4.5	mm
	안쪽 자속장벽 위치	9.5	mm
	자속장벽과 세그먼트 두께비	1.8/4.5	
	치 당 턴수	52	
	전기강판 재질	S18 (50PN470)	
유한요소 해석	상전류	8.2	[Arms]
	토크	20.3	[Nm]
	정격속도	1800	[rpm]
	선간전압	<380	[Vrms]
	철손	96.06	[W]
	동손 [고정자 권선]	177.51	[W]
	동손 [회전자 도체]	-	
	기계손	56.2	[W]
	전류 위상각	60	deg
	효율	92.05	%
	역율	0.75	

율은 92.05%로 유도전동기보다 2% 이상 증가시켜 IE4 규격을 만족하도록 설계하였다.

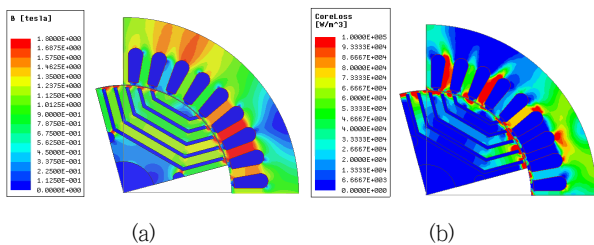


그림 9 정격 포인트 운전 시 SynRM 철심 (a) 자속밀도 (b) 철손분포

Fig. 9 Density distribution with Load (a) flux density (b) core loss density

### 3. 실험결과 비교

그림 10(a)는 최종 설계 된 SynRM의 기본적인 고정자 구조를 보여주며, 그림 10(b) 회전자 철심의 형상, 그림 10(c)는 외함을

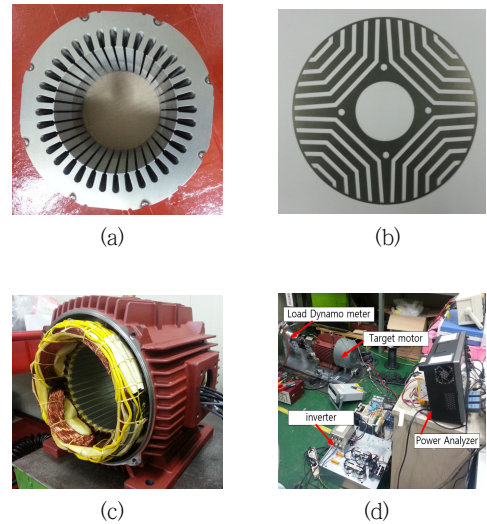


그림 10 동기형 릴럭턴스 전동기 제작 및 시험 순서도

Fig. 10 Rotor and stator of conventional model in SynRM and eperiment setup

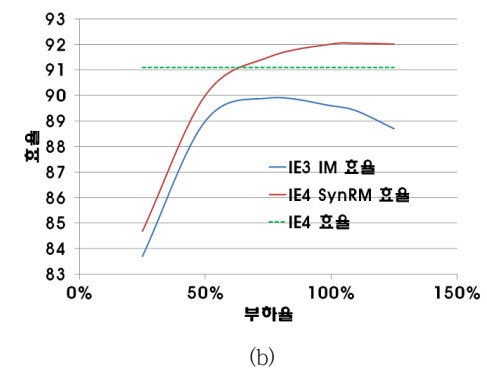
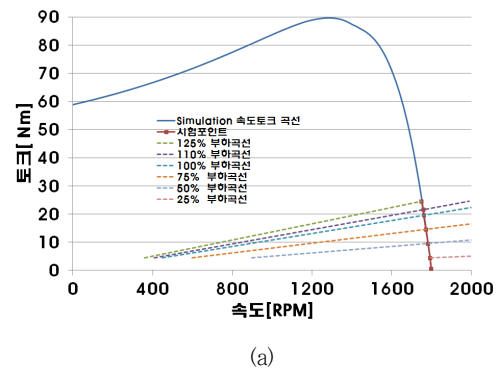


그림 11 (a) 블로워용 유도전동기 및 속도/토크 곡선 (b) 기존 IE3 유도전동기 및 설계된 IE4 SynRM 부하율에 따른 효율 비교

Fig. 11 (a) induction motor load curve and torque curve (b) efficiency compare with IE3 induction motor and IE 4 SynRM

포함한 제작모델, 그림 10(d)는 부하시험 세팅을 보여준다.

시험을 통한 유도전동기와 SynRM의 부하율에 따른 효율 비교를 표 6에 나타내었다. 또한 유도전동기의 속도/토크 및 부하 곡선은 그림 11(a)에 나타내었다. 유도전동기의 부하율 당 토크 데이터와 일정하게 SynRM을 구동하여 비교 분석하였으며 이는 벡터제어 인버터를 사용하였다. 단위전류당 최대토크 (MTPA) 제어를 통해 각 부하별 운전시 전류 위상각을 확인하였다. 고정자 전류를 증가시키면 철심이 포화되고 결국 최대토크를 발생시키는 전류 위상각이 45°부터 q축 방향(90°)으로 이동하게 된다. 그림 11(b)를 보면 과부하시 IE3급 유도전동기는 슬립의 영향이 있기 때문에 동기속도(1800rpm)에서 최대토크 포인트 이동하여야 한다. 따라서 고정자 동손이 더 크게 증가하고, 효율이 빨리 떨어지게 된다. 하지만 IE4 SynRM은 MTPA 제어를 통해 IE4 효율등급 이상으로 유지가 가능하다.

**표 6** IE3 유도전동기 및 IE4 SynRM 부하율에 따른 효율 계산

**Table 6** IE3 induction motor and IE4 SynRM performance with different load curve

	IE3 3.7kW 유도전동기					
부하율[%]	25	50	75	100	110	125
토크[Nm]	4.45	9.55	14.55	19.55	21.55	24.55
전류[A]	4.85	5.80	7.02	8.49	9.12	10.10
속도[rpm]	1792	1782	1771	1760	1757	1749
효율[%]	83.7	89	89.9	89.6	89.4	88.7
전류위상각[deg]	-	-	-	-	-	-

	IE3 3.7kW SynRM					
부하율[%]	25	50	75	100	110	125
토크[Nm]	4.85	9.94	14.70	20.16	22.28	24.64
전류[A]	3.5	5	6.4	8.2	8.8	9.5
속도[rpm]	1800	1800	1800	1800	1800	1800
효율[%]	84.6	90.0	91.5	92.0	92.0	92.0
전류위상각[deg]	46	50	56	60	62	62

#### 4. 결 론

본 논문은 블로워용 3.7kW IE3급 유도전동기를 대체하기 위한 고정자 동일 사이즈에 IE4급 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자 구조를 적용하는 설계법을 제안하였다. 토크와 출력을 최대화하기 위해 유한요소 해석을 통해 돌극비의 최적점을 찾아 회전자 형상을 결정하여 IE4급 동기형 릴럭턴스 전동기를 설계하였다.

IE4급 동기형 릴럭턴스 전동기 모델을 제작하고 시험을 통해, 목표 효율을 달성함으로써 제작된 동기 릴럭턴스 전동기가 유도전동기를 대체할 수 있는 슈퍼프리미엄급의 효율 이상을 달성하

였음을 보였다.

추가적으로 회전자 강성 안전율을 높이고, 차등 자속장벽 적용, 양산을 위한 회전자 급형의 추가적인 설계 방안이 남아있다. 따라서 추후에는 위와 같은 사항 등을 고려하여 슈퍼프리미엄급 SynRM을 개선 설계 할 예정이다. 또한 동일한 사이즈에 돌극비를 더욱 향상시키면서 높은 출력밀도를 가지는 모델의 설계 및 벡터제어 필요 없는 자기동 가능형 IE4급 Line Start-SynRM도 같이 연구할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원 (15RTRP-B083384-03-000000)에 의해 수행되었습니다.

#### References

- [1] Y. D. Chun D. H. Koo, "Technical trend of High efficiency MEPS in Korea", The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers. Vol. 25, NO. 6, pp. 26-37 2011.
- [2] Anibal De Almeida "European Ecodesign Lot 30: newideas for advanced MEPS", 2014.
- [3] H. C. Liu, H. J. Lee, S. Y. Oh, G. H. Ryu, H. S. Hong, S. J. Kim, J. Lee, "Decrease torque ripple for super premium SynRM using barrier arrangement design", Electrical Machinery & Energy conversion system society annual spring conference 2013.
- [4] I. Boldae "Reluctance Synchronous Machines and drives", pp. 46-47.
- [5] Masayuki Sanada "Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor Using an Asymmetric Flux Barrier Arrangement", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 40, NO. 4, JULY/AUGUST, pp. 1076-1082 2004.
- [6] J. H. Ahn, S. Y. Jung, "Numerical design characteristics of induction motor considering voltage and current source", Electrical Machinery & Energy conversion system society annual spring conference 2013.
- [7] W. H. Kim "A Study on the Optimal Design Method of Synchronous Reluctance Motor for the High Torque and Power Factor", Hanyang university 2007.
- [8] Huai-Cong Liu, In-Gun Kim, Tae-chul Jeong, Ju Lee, "Magnetic Saturation and Iron Loss Influence on Max Torque per Ampere Current Vector Variation of Synchronous Reluctance Machine", EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition pp. 1-6.

## 저 자 소 개



### 유 회 총 (Huai-Cong Liu)

1988년 8월 29일생. 2012년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2012년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 석박사 통합 과정.



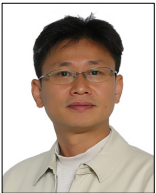
### 김 인 건 (In-Gun Kim)

1984년 8월 9일생. 2011년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2013년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 박사과정.



### 정 제 명 (Je-Myung Jeong)

1955년 6월 10일생. 1978년 서울대학교 전자공학과졸업(학사). 1980년 한국과학기술원 전자공학과 졸업(석사). 1980~1993년 ETRI 연구원. 1992년 North Western 대학교 전기공학과 졸업(박사). 1994년~현재 한양대학교 융합전자공학과 교수.



### 이 주 (Ju Lee)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.