

# 기동특성 및 효율 향상을 위한 Single-Phase LSPM의 회전자 형상 설계

## Rotor Shape Design of Single Phase LSPM for Improvement of Start-up Characteristics and Efficiency

강민철\* · 조광진\* · 김규탁†  
(Min-Chul Kang · Kwang-Jin Cho · Gyu-Tak Kim)

**Abstract** - In this paper, the design of rotor shape was performed for improvement of start-up characteristics and efficiency in single-phase LSPM. In order to improve the start-up characteristics, shape of rotor aluminium cage bar was changed. Through arrangement of permanent magnets and installation of flux barriers, it was performed torque ripple reduction and efficiency improvement. Cogging torque and back-EMF is calculated by the no-load analysis, start-up time is calculated by the start-up state analysis, efficiency and torque ripple is calculated by steady state analysis. The characteristics of the motor were calculated through FEM.

**Key Words** : LSPM, Start-up Characteristics, Efficiency, Flux Barrier, Air Gap Flux Density

### 1. 서론

IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 다른 모터들에 비해 단위 체적당 토크 및 출력이 높지만 기동 및 운전 위해 부수적으로 제어기가 필요하다는 단점이 있다. 단상 유도 전동기는 저렴한 제작단가와 간단한 구조 및 커패시터를 이용하여 별도의 제어기 없이 기동이 가능한 장점이 있지만 효율이 IPMSM에 비해 떨어지는 단점이 있다[1]. 고효율 전동기의 생산 판매를 의무화 하는 최저 효율제(Minimum Energy Performance Standard)정책이 시행되면서, IPMSM의 단점을 단상 유도기의 장점으로 보완한 LSPM(Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor)이 각광받고 있다. LSPM은 유도 전동기의 회전자에 영구자석을 매입한 구조로써, 기동 상태에서 유도전동기로 기동하여 별도의 제어기 없이 기동이 가능하다. 또한, 정상상태에서 IPMSM으로 동작하여 동기속도로 운전한다. 따라서 유도 전동기와 달리 2차 측 회전자 알루미늄 바에서 전류에 의한 손실이 거의 발생하지 않아 고효율 운전이 가능하여 Fan, Blower, Compressor 등과 같은 산업 전반에서 각광받고 있다[2, 3].

그러나, 영구자석으로 인하여 코깅 토크가 발생하여 기동 특성이 저하됨은 물론 큰 토크 리플이 발생하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 LSPM의 기동 특성 및 효율 향상을 위한 회전자 형상 설계를 FEM(Finite Element Method)을 통해 수행하였다. 회전자 농형 알루미늄 바의 형상 설계를 통하여 코깅 토크 저감과 기동 특성 향상 설계를 수행 하였으며, 자속장벽의 설치와 영구자석의 위치 및 각도 최적화를 통하여 효율 및 토크 리플을 저감 하였다.

### 2. 회전자 설계

#### 2.1 기본모델의 제반 특성 및 FEM 해석 결과

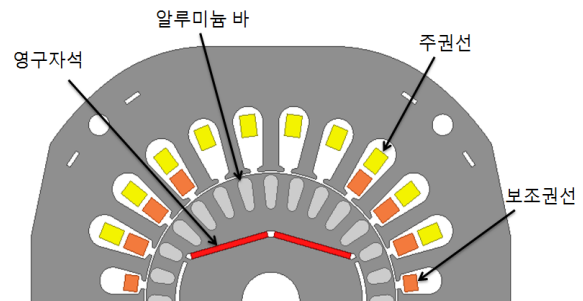


그림 1 기본모델 형상

Fig. 1 Shape of Basic Model

그림 1에 본 논문에 적용된 기본 모델의 형상을 나타내었다. 주권선은 20개의 슬롯에 총 360턴이며, 보조권선은 16개의 슬롯

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,  
Changwon Nat'l University, Korea  
E-mail : gtkim@cwnu.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l University, Korea  
Received : August 18, 2015; Accepted : December 28, 2015

에 총 274턴이다. 기본 모델의 전반적인 제반 특성을 표 1에 요약하여 나타내었다. 표의 주권선과 보조권선의 전류 값은 정격 구동 실험에 의해 측정된 실험치이다.

기본 모델의 FEM 결과와 실험 결과를 비교하였다. FEM 해석은 무부하 특성, 기동 특성, 운전 특성으로 나누어 수행하였다. 무부하 해석을 통해 역기전력과 코깅 토크를, 기동 특성 해석을 통해 기동 시간을, 구동특성을 통해 토크리플 및 입력 전류를 계산하였다.

표 2는 기본 모델의 FEM 결과를 요약 정리한 것이다. 입력 전류를 실험치와 비교하였을 때, 오차가 주권선 전류는 0.62(%), 보조권선 전류는 1.37(%로 계산되었다.

표 1 기본모델의 제원

Table 1 The various characteristics of the basic model

정격 속도(rpm)	3,600
정격 토크(kg·cm)	2.48
정격 전압(Vrms)	110
적층 길이(mm)	45
영구 자석	42UH
극/농형 바/고정자 슬롯	2/28/24
주권선 전류(Arms)	0.817
보조권선 전류(Arms)	0.439
주권선 저항(Ohm)	4.11
보조권선 저항(Ohm)	7.03

표 2 기본모델의 FEM 해석 결과

Table 2 FEM analysis results of basic model

코깅 토크(kg·cm)(peak-peak)	0.82	
역기전력(Vrms)	주권선	87.97
	보조권선	71.02
기동 시간(s)	0.315	
입력 전류(Arms)	주권선	0.822
	보조권선	0.433
토크 리플(%)	155.1	

## 2.2. 회전자 형상 설계 수준

LSPM의 회전자 형상 설계를 위한 Flow Chart를 그림 2에 나타내었다. 먼저 기동 특성 향상을 위하여 농형 알루미늄 바의 최적 설계를 수행하였다. 그 다음 영구자석의 위치 및 경사각의 최적화를 수행하였다. 그리고 자속 장벽 설치를 통하여 누설 자속을 저감하여 효율 향상 및 공극 자속 밀도의 왜형을 개선을 통한 토크리플 저감 설계를 진행하였다. 마지막으로 영구자석의 경사각 조절을 통해 최적모델을 선정하였다. 위의 설계는 실험계획법에 의해 수행 하였으며, 기동특성 및 효율향상을 목표로 설정하였다.

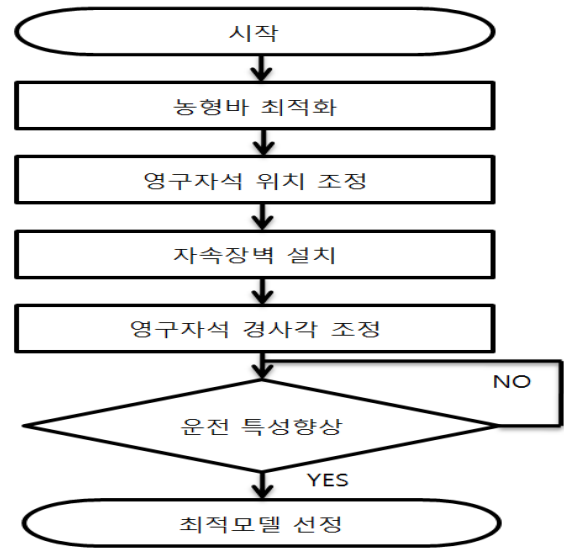


그림 2 회전자 형상 설계 순서도

Fig. 2 Flow Chart of Rotor Shape Design

### 2.2.1 회전자 농형 바 최적화

LSPM의 농형 알루미늄 바는 기동 시, 유도전동기처럼 전류가 흐르면서 기동토크를 발생시켜 LSPM을 기동시킨다. 유도기일 경우, 기동 외에 정격 구동 시에도 전류가 흐르기 때문에 효율을 고려하여 농형 바의 면적을 크게 하지만 LSPM의 경우 기동 시에만 전류가 흐르기 때문에 효율을 고려하면 농형 바의 면적이 클 필요가 없다. 또한, 회전자 기동 특성도체 바의 면적이 줄어들수록 비례추이의 원리에 의해 기동토크가 크게 발생하여 기동 특성이 향상되며, 농형 바의 면적이 클수록 매입된 영구자석이 깊은 곳에 위치하여 공극과의 거리가 멀어져 LSPM의 특성에 악영향을 준다.

따라서 농형 바의 깊이에 따른 기동 특성을 표 3에 나타내었다. 기본 모델 8(mm)에서 1(mm)씩 줄여 농형 바가 원형에 되는 3.5(mm)까지 해석하였다. 농형 바의 깊이가 가장 작은 3.5(mm)일 때, 가장 기동 시간이 짧았으며, 이 농형 바 면적을 타원형으로 하여 농형 바 사이의 간격을 크게 하여 자기저항을 저감시켰

표 3 농형 바에 따른 기동 특성

Table 3 Start-up characteristics of cage bar

농형바 깊이(mm)	농형바 면적(%)	기동시간(s)
8	100	0.315
7	89	0.270
6	78	0.297
5	65	0.196
4	51	0.171
3.5	43	0.156
4.2	43	0.155

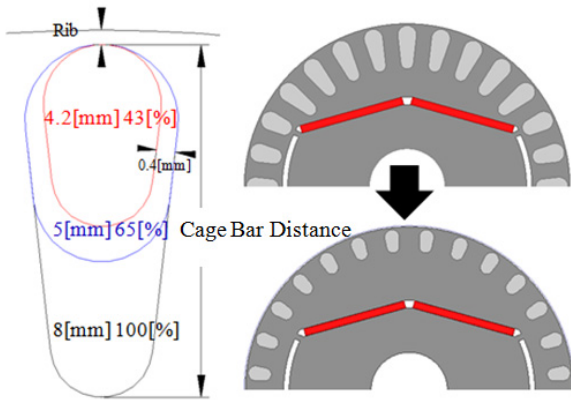


그림 3 최적화된 회전자 농형 바 형상  
Fig. 3 The Optimized Rotor bar Shape

다. 그림 3에 최적화 과정에서의 회전자 바의 형상 변화를 나타내었다. 그림 3에서 보듯이 농형 바의 깊이가 줄어들면 영구자석이 회전자 표면으로 이동 시킬 공간이 크게 확보되는 것을 알 수 있다.

또한, 기본 모델은 자극의 중심에 농형바가 있지만 자극의 중심에 치가 배치되도록 농형바의 배치를 조정하였다. 이는 추후에 자속 장벽 설치와 공극자속 밀도를 정현파에 가깝도록 하기 위함이다.

### 2.2.2 영구자석 위치 조정

농형바가 최적화되어 깊이(면적)가 줄어들면서 영구자석과 도체 바 사이에 여유 공간이 발생하였다. 따라서 누설 자속이 증가하고 정현적인 자속 분포가 되지 않아 역기전력이 감소하게 된다.

따라서, 영구자석의 위치를 최대한 회전자 표면으로 재배치하여 역기전력을 증가시키는 작업을 수행하였다. 그림 4는 영구자석 재배치를 위한 설계 변수다.

표 4는 영구자석의 위치에 따른 역기전력 해석 결과이다. 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 영구자석이 회전자 표면에 가깝게 배치될수록 역기전력이 증가하였다.

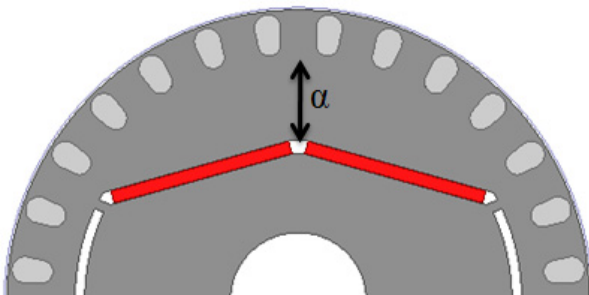


그림 4 영구자석 위치 설계 변수  
Fig. 4 Design Parameter of Permanent magnet Position

표 4 영구자석 위치에 따른 역기전력

Table 4 Back EMF of Permanent Magnet Position

α(mm)	역기전력(Vrms)	
	주권선	보조권선
8.8	67.31	53.52
7.8	74.9	60.5
6.8	81.7	66
5.8	86.3	69.7
4.8	88.5	71.5
3.8	89.2	72.1
0.8	96.3	72.4

### 2.2.3 자속 장벽 설치

그림 5는 영구자석 위치조정 후 영구자석 끝부분에서의 자속 분포를 나타낸 것이다. 이러한 누설자속은 역기전력을 감소시켜 모터의 출력을 저하시킨다. 따라서 자속 장벽 설치를 통하여 누설 자속을 저감시켜야 한다.



그림 5 영구자석의 누설 자속  
Fig. 5 Leakage flux of permanent magnet

자속 장벽은 영구자석 끝부분과 농형바를 연결하여 설치하였다[5]. 그림 6은 영구자석 끝부분과 연결된 농형바에 따른 회전자 형상과 공극 자속 분포를 나타낸 것이다. 자속장벽이 어떤 농형바와 연결됨에 따라서 공극 자속 밀도의 왜형률이 크게 달라진다[6]. 표 5는 자속 장벽에 따른 무부하 해석과 공극 자속 밀도

표 5 자속장벽에 따른 무부하 해석

Table 5 No-Load Analysis of Barrier shapes

	역기전력(Vrms)		코깅토크 (kg · cm) (peak-peak)	왜형률 (%)
	주권선	보조권선		
-	96.30	72.38	1.33	52.84
(1)	109.08	88.09	1.22	36.84
(2)	108.90	97.91	1.22	31.30
(3)	105.48	85.13	1.14	31.31

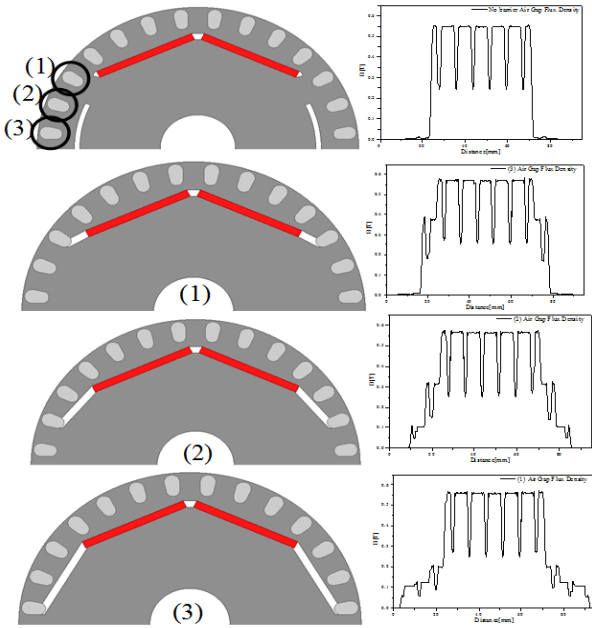


그림 6 자속 장벽에 따른 회전자 및 공극 자속 밀도  
 Fig. 6 Rotor and air gap density according to Flux barrier

의 왜형률을 계산하여 정리하였다.

자속장벽에 의해서 누설자속이 크게 저감되어 역기전력이 증가하였다. 또한 공극자속의 왜형률도 20(%) 가량 개선되었다. (2)와 (3)위치의 바와 연결되도록 자속장벽을 설치하면 연결한 바의 위치는 다르지만 왜형률은 거의 같게 계산되었다. 그러나, (3)은 (2)에 비해 공극자속이 자극의 끝부분에도 발생하여 정현적인 분포에 가깝게 된다. 따라서, 코깅토크 저감 및 자속의 정현적인 분포를 위해 위치 (3)의 바와 연결되도록 자속 장벽을 설정하였다.

### 2.2.4 영구자석 경사각 조절

그림 7는 영구자석의 경사 각도를 변화를 위한 설계 변수를  $\beta$ 로 나타내었다. 영구자석의 경사각 변화를 통하여 공극자속밀도의 분포를 정현파에 가깝게 분포시키는 작업을 수행하였다.

영구자석 경사 각도 변화에 따른 무부하 특성을 그림 8에 나

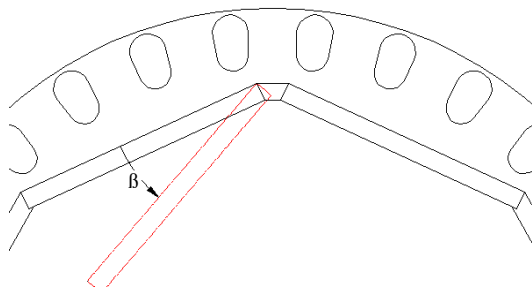


그림 7 영구자석 경사각  
 Fig. 7 Inclination Angle of permanent magnet

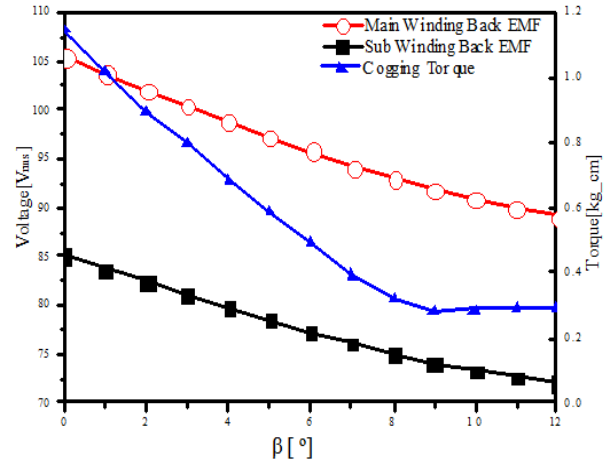


그림 8 영구자석 경사각에 따른 무부하 특성  
 Fig. 8 No-Load Characteristics of PM Inclination Angle

타내었다. 경사가 커질수록 코깅 토크는 감소하여  $\beta=9^\circ$  이후 거의 변화가 없는 양상을 보이는 반면, 역기전력은 각도가 증가할수록 꾸준히 감소하는 양상을 보였다.

그림 9는 영구자석 경사각에 따른 운전 특성을 나타낸 그래프이다. 주권선의 입력 전류는 경사각이 증가할수록 증가하나, 보조 권선의 전류는 변화가 거의 없다. 토크리플의 경우,  $\beta=5^\circ$ 에서 최소가 되며, 더 이상 감소하지 않았다. 따라서 토크리플도 저감하면서 동손을 고려하여 입력전류가 가장 적은 영구자석의 경사각이 초기 모델보다  $5^\circ$  더 큰 모델을 최적 모델로 선정하였다.

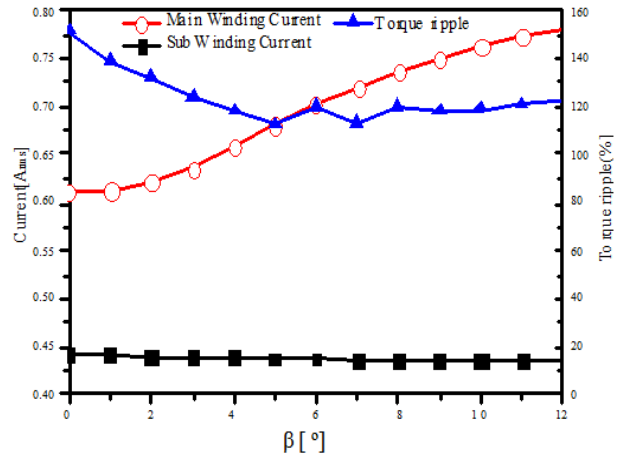


그림 9 영구자석 경사각에 따른 운전 특성  
 Fig. 9 Operating Characteristics of to PM Inclination Angle

그림 10은 최적 모델의 자속 밀도 분포와 Flux line을 나타낸 것이다. 농형바와 영구자석 사이의 포화와 베리어와 농형바 사이의 포화로 인해 자속이 극의 끝부분으로 갈수록 공극자속이 적게 발생하였다. 따라서 공극 자속 밀도의 분포는 더욱 정현파에 가까운 분포를 가지게 되었다.

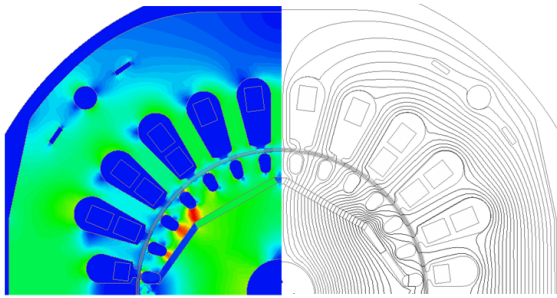
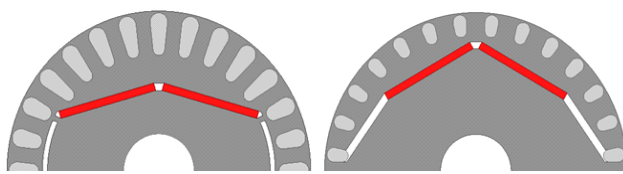


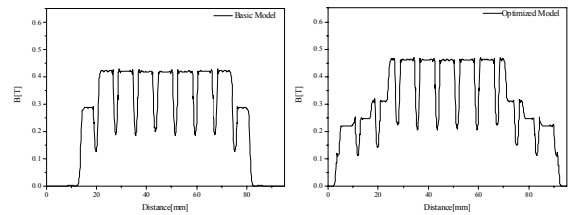
그림 10 최적 모델의 Flux Line과 자속 밀도 분포  
 Fig. 10 Flux line and flux density of optimized model



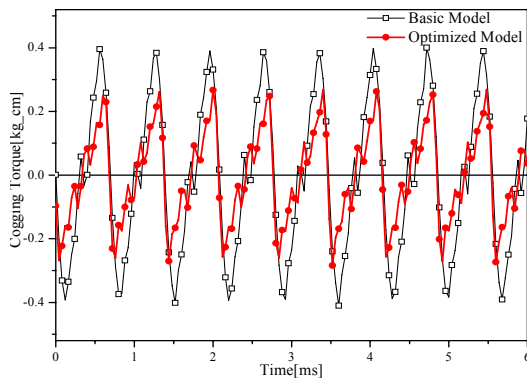
기존 모델                      최종 모델  
 (a) 회전자 형상

### 3. 기본 모델과 최적 모델의 특성 비교

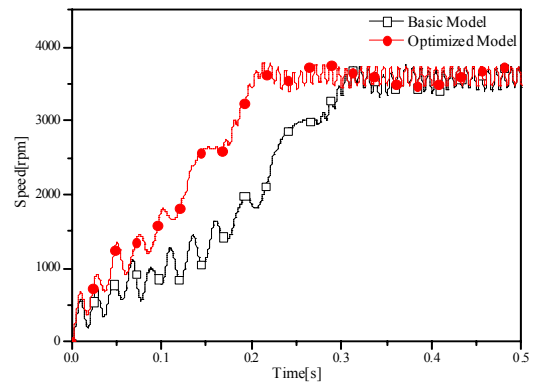
그림 11은 기본 모델과 제안 모델의 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 회전자 형상 변화를 통하여 공극자속밀도의 왜형률이 개선되었고 기본과의 크기가 증가하였다. 코깅토크는 (kg·cm) (peak-peak)단위로 0.82에서 0.58로 0.24[kg·cm] (peak-peak) 저감되었으며, 회전자 슬롯의 최적화를 통해 기동시간이 0.102(s) 단축되었다. 또한, 입력 전류는 주권선에서 0.14(A)저감되었고 토크크리플은 42(%)저감 되어 전반적인 모든 특성이 향상되었다. 기본모델과 최종모델의 특성을 비교하여 표 6에 나타내었다.



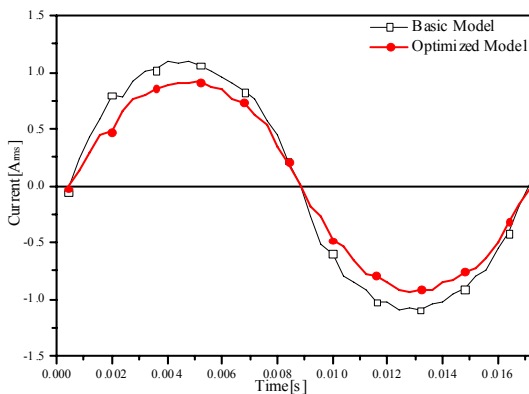
기존 모델                      최종 모델  
 (b) 공극 자속 밀도 분포



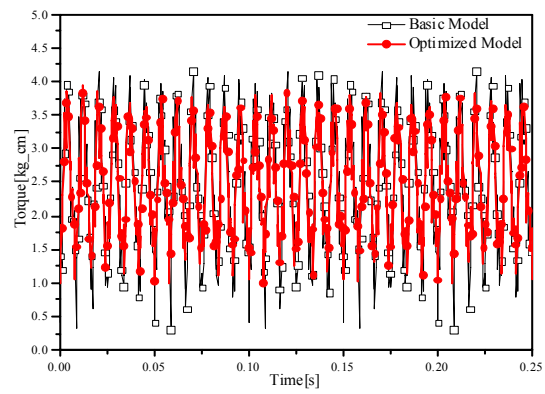
(c) 코깅 토크



(d) 기동 시간



(e) 주권선 입력 전류



(f) 토크크리플

그림 11 특성 비교  
 Fig. 11 Comparison of Characteristics



표 6 기본 모델과 최종모델 특성

Table 6 Characteristics of basic model and optimized model

특성	기본모델	제안모델	
코깅토크(kg·cm)(peak-peak)	0.82	0.58	
기동시간(s)	0.315	0.213	
입력 전류(Arms)	주권선	0.822	0.682
	보조권선	0.433	0.438
토크리플(%)	155.1	113.1	
공극자속밀도 왜형률(%)	32.51	25.44	

표 7은 기본 모델과 최적모델의 효율을 계산하여 비교한 결과이다. 실험의 경우 입력과 출력으로 효율을 계산하였고, FEM 결과는 손실 분리법에 의해서 효율을 계산하였다. 따라서 기본모델의 실험결과와 FEM 결과에서 효율이 약 2(%)가량의 오차가 있다.

표 7 기본 모델과 최종모델 효율

Table 7 Efficiency of basic model and optimized model

	기본 모델 (실험)	기본 모델 (FEM)	최종 모델 (FEM)
주권선 전류(A)	0.817	0.822	0.682
보조권선전류(A)	0.439	0.433	0.438
동손(W)	-	4.096	3.26
철손(W)	-	4.435	4.74
기계손(W)	-	0.243	0.243
손실(W)	-	8.774	8.243
출력(W)	91.609	91.609	91.609
입력(W)	102.602	-	-
효율(%)	89.286	91.259	91.745

기본모델과 최종모델의 FEM 결과와 비교하였을 때, 철손은 다소 증가했지만, 입력 전류 감소로 인하여 동손이 더 크게 줄어 효율이 약 0.5(%) 상승 하였다. 이는 자속 장벽을 통한 누설자속의 저감과 공극자속밀도의 증가 및 왜형률 개선이 효율을 향상시킨 것이다.

#### 4. 영구자석 감자 해석

그림 12는 본 논문에 적용한 LSPM의 42UH 영구자석의 감자 특성 곡선이다. 영구자석의 온도가 140도 이상부터 불가역 감자가 발생한다. 하지만 본 논문에 적용한 LSPM은 Air compressor 용으로써 고 140도 이상의 고온에서 구동하지 않으므로 온도에 의한 감자는 고려하지 않았다.

단 LSPM의 경우, 기동시 큰 기동전류에 의해 발생하는 자계로 인해 영구자석이 불가역 감자가 발생할 수 있다. 따라서 기동시 영구자석의 감자해석을 수행하였다. 기동시간은 약 0.2~0.3초 내외이므로 온도는 상온으로 설정하였다.

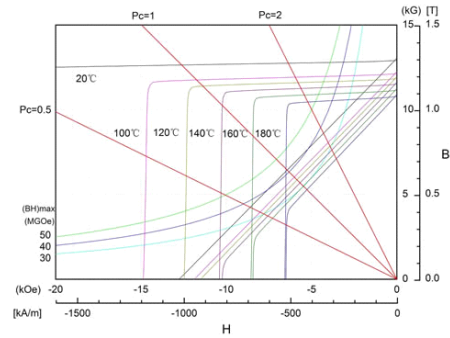


그림 12 42UH의 감자 특성 곡선

Fig. 12 Demagnetization Characteristic Curve of 42UH

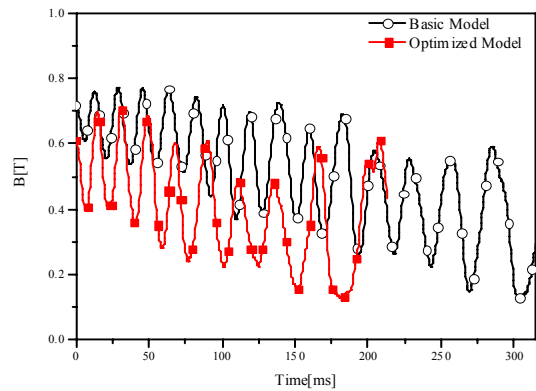


그림 13 기동시 영구자석의 최소 자속 밀도

Fig. 13 Minimum Flux Density of Permanent Magnet at Start-Up

그림 13은 기본모델과 최적모델의 기동시 감자에 의한 영구자석의 최소 자속밀도를 그래프로 나타낸 것이다. 기동 시간이 서로 다르지만, 기본모델의 경우, 영구자석 내에서 최소 자속 밀도가 0.3032[s]에서 0.1286[T], 최적모델의 경우 0.184[S]에서 0.1271[T]로 계산되었다.

그림 14는 국부적으로 영구자석이 자속밀도가 최소가 되었을

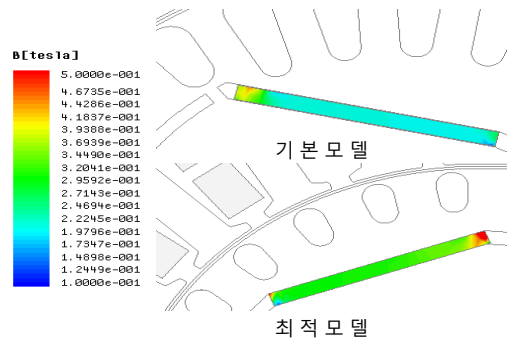


그림 14 기동시 감자에 의한 영구자석의 자속 밀도

Fig. 14 Flux Density of Permanent Magnet by Demagnetization at Start-Up

때, 영구자석의 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 영구자석에 국부적으로 크게 감자현상이 발생한다. 하지만 기동시간 0.2~0.3[s] 동안 영구자석의 온도가 140도 이상 상승하지 않기 때문에 영구자석 감자의 영향을 없음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 Single Phase LSPM의 기동특성 향상과 효율 향상을 위한 회전자 형상 설계를 수행하였다. 기동 특성 향상을 위해 농형 바의 형상을 최적화 하였다. 농형 바의 면적을 줄여 유도기의 비례추이 원리를 이용하여 기동토크를 증가시켜 기동 특성을 향상시켰다. 농형 바의 깊이(면적)가 감소하므로 영구자석 배치에 대한 자유도가 높아졌으며, 영구자석의 위치를 회전자 표면에 보다 가깝게 재배치하였다. 또한, 효율 향상을 위해 자속장벽을 회전자에 설치하여 누설 자속을 저감시켰으며, 영구자석의 각도를 조절함으로써 공극자속밀도를 보다 정현적인 분포가 되도록 하였다. 실험계획법을 통하여 최적 모델을 도출하였으며, 기본 모델 대비 코깅토크가 0.24[kg·cm]이 저감되었음을 확인하였으며, 기동시간은 0.315[s]에 0.213[s]로 0.1[s] 단축되었다. 주권선의 입력 전류는 0.82[Arms]에서 0.68[Arms]로 저감되었으며, 토크리플은 155.1[%]에서 113.1[%]로 42[%] 저감되었음을 확인하였다. 효율은 91.26[%]에서 91.7[%]로 0.5[%] 가량 향상되었음을 유한요소 해석을 통하여 확인하였다.

### 감사의 글

본 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업(2015H1C1A1035824)의 지원을 받아 수행된 연구임

### References

- [1] Won-Ho Kim, Ki-Chan Kim, Seung-Joo Kim, Dong-Woo Kang, Sung-Chul Go, Hyung-Woo Lee, Yon-Do Chun, and Ju Lee, "A Study on the Optimal Rotor Design of LSPM Considering the Starting Torque and Efficiency", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 3, pp. 1808-1811, 2009.
- [2] Marcic T, Stumberger B, Stumberger G, Hadziselimovic M, Virtic P and Dolinar D, "line-starting Three- and single-phase interior permanent magnet synchronous motor-Direct comparison to induction motors", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, No. 11, pp. 4413-4416, 2008.
- [3] Aliabad A.D, Mirsalim M and Ershad N.F, "Line-Start Permanent-Magnet Motors: Significant Improvements in Starting Torque, Synchronization, and Steady-State Performance", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 12, pp. 4068-4069, 2010.
- [4] H. Nam, K. H. Ha, J. J. Lee, J. P. Hong, and G. H. Kang, "A study on iron loss analysis method considering the harmonics of the flux density waveform using iron loss curves tested on Epstein samples," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, pp. 1472-1475, 2003.
- [5] Dae-Sung Jung, Seung-Bin Lim, Jin-Hun Lee, Sang-Hoon Lee, Hyung-BinLim and Youn-Hyun Kim, "A Study on the Design and the Characteristics in Single-phase Line-start Permanent Magnet Motor", ICEMS International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 878-881, 2007.
- [6] Qin Fen Lu and Yun Yue Ye, "Design and Analysis of Large Capacity Line-Start Permanent-Magnet Motor", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 11, pp. 4418-4419, 2008.

## 저 자 소 개



### 강민철 (Min-Chul Kang)

1989년 1월 21일생. 2014년 창원대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : kmc1457@naver.com



### 조광진 (Kwang-Jin Cho)

1987년 6월 13일생. 2015년 창원대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : chokwangjin@cwnu.ac.kr



### 김규탁 (Gyu-Tak Kim)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~2000년 일본 稲田大 客員研究員. 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수

Tel : 055-213-3635

Fax : 055-263-9956

E-mail : gtkim@changwon.ac.kr