

## A Study on the Design of Single Phase LSPM Considering the Irreversible Demagnetization of Permanent Magnet

鄭大成\* · 高成哲\* · 朴懷濬\*\* · 權三榮\*\* · 李衡雨\*\* · 李柱†

(Dae-Sung Jung · Sung-Chul Go · Hyun-June Park · Sam-Young Kwon · Hyung-Woo Lee · Ju Lee)

**Abstract** - The growth on consideration of energy savings and motor efficiency has caused the LSPM(Line Start Permanent Magnet Motor) to be focused as a substitute for conventional induction motors. A Line start permanent magnet motor able to be driven at synchronous speed is designed based on a single phase induction motor in this paper. The single phase LSPM is identical to the induction motor except a permanent magnet is installed in the rotor. As the permanent magnet influences the characteristics of both transient state and steady state, a design considering both starting and synchronization conditions was used. In this paper, by adopting DOE, a single phase motor has been designed showing high power and smooth start. Also, optimal model is selected by weighting function. And the characteristics demagnetization are analyzed according to the variation of magnet shape. Finally, to verify the design results, a prototype was measured.

**Key Words** : Single phase LSPM, Irreversible demagnetization, DOE, Permanent magnet motor

### 1. 서 론

단상 유도형 동기기는 기존에 가전용으로 널리 사용되고 있는 단상 유도기에 영구자석을 삽입함으로써 과도상태에서는 유도기로 동작하여 기동 토크 및 순시 토크를 발생시키고, 동기속도에서는 영구자석 동기기로 동작하여 슬립에 의한 2차 손실을 줄일 수 있어 가전용 전동기의 고 효율화에 대한 대안으로 널리 개발되고 있다[1],[2]. 단상 유도형 동기기는 단상 유도기와 동일한 고정자권선을 가지며, 영구자석은 회전자에 놓여 바의 안쪽에 위치하게 된다. 고정자의 권선은 주 권선과 보조 권선이 90도의 간격으로 위치되어 있다. 또한 회전자 내의 영구자석의 형상이 전동기의 성능을 결정짓는 요소가 되므로 단상 유도형 동기기에서는 영구자석에 의한 회전자의 최적설계가 그 성능을 좌우한다고 해도 과언이 아니다. 그러나 앞서 언급한대로 대상모델은 여러 가지 현상이 복합적으로 나타나므로 수치 해석적 방법으로 특성을 해석하고 설계하기에는 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 따라서 등가회로를 이용한 방법으로 기초설계를 수행하고 수치 해석적 방법으로 세부설계를 수행하였다[3],[4].

회전자에 삽입되는 영구자석은 과도상태 시 기동토크를 방해하는 토크로 작용하기 때문에 영구자석 사이즈 및 삽입 위치 선정이 상당히 중요하다.

따라서 본 논문에서는 영구자석의 두께, 자극 각도, 삽입 위치 그리고 농형바의 저항을 설계 파라미터로 선정하여 실험계획법을 수행하였다. 또한 실험계획법에 의해 계산된 모델에 가중함수를 적용함으로써 설계 사양의 최적 모델을 구하였다. 90년대부터 성능이 우수한 영구자석 개발로 인해 모터의 콤팩트화, 고효율, 고출력 등이 가능해졌다. 하지만 최근 고유가와 함께 원자재 값이 상승하고 있다. 특히 전동기의 주요 재료인 구리, 철, 희토류계 영구자석 등은 최근 몇 년 사이에 엄청난 가격 상승을 보이고 있다. 따라서 본 논문에서는 가격적인 면을 고려하여 영구자석 최소 사이즈 설계를 진행하였다. 하지만 영구자석의 두께를 줄이게 되면 전기자 반작용에 의해 불가역 감자가 일어 날수 있으므로 최적의 사이즈를 선정하고 영구자석 형상에 따른 감자 특성을 파악함으로써 영구자석 최소 사이즈에서도 감자가 이루어 지지 않는 영구자석 형상에 대해 연구하였다. 또한 제안한 연구의 타당성을 검증하기 위해 모델을 제작하여 해석결과와 실험결과를 비교 검토하였다.

### 2. 본 론

단상 유도 동기 전동기의 등가회로 해석 특성식은 고정자 축의 d-q축의 전압 방정식과 d축과 q축의 쇄교자속, 회전자 축의 전압 방정식과 d축과 q축의 쇄교 자속에 대한 d-q축의 등가 회로를 구성하고 이를 전동기의 운전방정식과 결합함으로써 유도 할 수 있다. 등가 회로 해석 특성 식에서 과도 상태의 각각의 토크 식은 식 (1)과 같이 나타난다.

$$T_e = T_i + T_r + T_m \quad (1)$$

여기서  $T_i$ 는 농형바에 의한 유도 토크를 나타내는 식으

\* 正 會 員 : 漢陽大學 大學院 電氣工學科

\*\* 正 會 員 : 韓國鐵道技術研究院

† 교신저자, 正會員 : 漢陽大學 電氣制御生體工學部科  
副教授 · 工博

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

接受日字 : 2008年 6月 11日

最終完了 : 2008年 11月 4日

로 식(2)와 같고,  $T_r$ 는 d축과 q축의 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크로 식(3)과 같다. 또한  $T_m$ 은 영구자석에 의한 토크로 식(4)과 같이 표현된다.[5]

$$T_i = P(L_{md}I_dI_{2d} - L_{mq}I_dI_{2q}) \quad (2)$$

$$T_r = P(L_d - L_q)I_dI_q \quad (3)$$

$$T_m = PL_{md}I_{pm}I_q \quad (4)$$

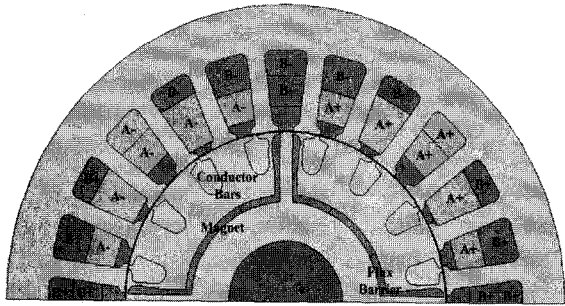


그림 1 단상 LSPM의 구조  
Fig. 1 Structure of the single phase LSPM

2.1 자기회로법을 이용한 파라미터 해석

그림 2는 자기등가 회로를 꾸미기 위해 자속의 path를 나타낸 것이다. 고정자의 투자율은 무한대로 가정했고, 등가회로가 대칭 되기 때문에 한 극에 대해서만 간단하게 나타내면 다음과 같다. 여기서  $R_g$ 는 공극의 reluctance,  $R_r$ 은 회전자 각 자속 path에 대한 reluctance,  $P_m$ 은 자석의 permeance이다. 각 parameter의 값은 주어진 구조에서 자속의 path를 가정하여 구할 수 있었으며, 각 path에 따라 투자율을 고려하여 계산하였다. 그리고  $R_{r1}$ 과  $R_{r5}$ 로 흐르는 자속은 path가 좁아 포화되어 전부 bridge로 누설된다고 가정하였다. 또한 자석의 동작점을 파악하기 위해 permeance coefficient를 사용하였다.[6]

$$PC = \mu_{rec} \frac{1 + P_r R_g}{P_{m0} R_g} \quad (5)$$

위의 가정을 토대로 자기등가 회로를 구성하였으며, 원하는 출력을 내기 위한 공극자속 밀도와 자석의 size를 선정할 수 있었다.

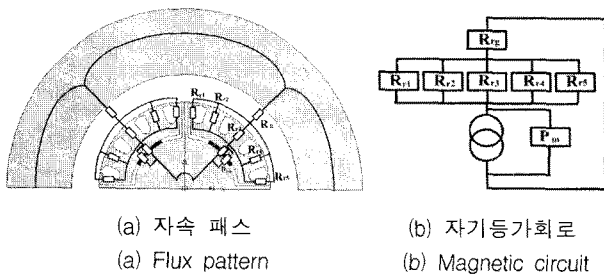


그림 2 단상 LSPM의 자기등가 회로  
Fig. 2 Magnetic circuit of single phase LSPM

2.2 가중함수를 이용한 단상 LSPM rotor 최적설계

본 논문에서 단상 LSPM 설계는 단상 유도기의 부품(고정자, 샤프트, 베어링 등)을 그대로 사용하고 회전자에 삽입될 영구자석을 최적 설계하는 방법으로 진행 하여 가격과 양산성을 고려하였다. 단상 LSPM에 사용되는 영구자석은 기동 시 고정자 전류에 의해 감자의 우려가 있으므로 선형적인 감자 특성을 가지며, 높은 보자력과 잔류 자속 밀도를 갖는 NdFeB를 사용하였다. 표 1은 단상 LSPM의 주요 제원을 나타내고 있다.

단상 LSPM 회전자에 삽입되는 영구자석은 투자율이 공기와 거의 비슷하기 때문에 자기적인 돌극 구조를 가지고 있다. 이런 특성은 구동 시 영구자석에 의한 토크와 릴럭턴스 토크를 동시에 이용할 수 있어 출력 및 효율을 높일 수 있지만 기동 시에는 영구자석의 토크와 릴럭턴스 토크 그리고 코깅 토크 등이 기동에 악영향을 미친다. 따라서 영구자석 설계는 출력뿐만 아니라 기동시간에도 많은 영향을 미치므로 기동시간과 토크를 목적함수로 정하고, 영구자석 두께, 영구자석 각도, 영구자석이 삽입 될 위치 그리고 농형바 저항 등을 설계 변수로 선정, 설계 인자를 2수준으로 하여 이 설계 변수의 조합으로 나오는 해석 모델을 개수를 최소화 하고(DOE), 이렇게 줄여진 모델들을 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

표 1 단상 LSPM의 주요 제원

Table 1 Specifications for single phase LSPM

Specification		
Stator	Input voltage[V]	220
	Rated torque[Nm]	0.34
	Rated speed[rpm]	1800
	Stack length [mm]	45
	Frequency[Hz]	60
Rotor	Number of pole	4
Permanent-magnet (NdFeB)	Residual flux density [T]	1.12
Air gap	Length [mm]	0.15

영구자석의 길이, 두께, 길이 등과 같은 변수들과 관련한 물리적 현상이 복잡하고 변수들 간의 상관관계가 존재한다. 이에 따라 각 변수들 간의 교호작용을 무시할 수 없어 full factorial 을 사용하였다. 선정된 모델들의 해석을 통해 기동시간과 토크에 대한 회귀식을 얻을 수 있었으며 이 회귀식을 통해 본 논문에서는 각 파라미터들의 목적함수에 미치는 영향도를 판별할 수 있었다.

표 2는 최적 모델 선정을 위한 가중 함수 사용 결과를 보여 주고 있다. 표 2를 통해 알 수 있듯이 자석의 두께, 각도, 삽입 위치 등의 설계 파라미터 등은 기동시간과 토크 사이에 trade off 관계임을 알 수 있다. 본 논문에서는 trade off 관계를 어느 정도 고려하기 위해서 기동시간과 토크에 각각 가중 함수를 적용함으로써 최적 모델을 선정할 수 있었다. 식 (6)은 가중 함수를 나타내고 있다.

$$F = \alpha \frac{0.2}{Starting\ time} + \beta \frac{Torque}{0.6} \quad [\alpha + \beta = 1] \quad (6)$$

(기준치 : 기동시간 - 0.2초, 토크 - 0.6[Nm])

표 2 최적모델 선정을 위한 가중함수 사용결과

Table 2 Result of weighting function for optimal model

모델	저항	Design parameter			Result of DOE		Result of weighting function		
		자석길이 [mm]	자석두께 [mm]	자극각도 [deg]	기동시간	토크	α=0.2	α=0.5	α=0.8
1	1	14	1	30	0.160	0.427	0.933	1.052	1.171
2	2	14	1	30	0.175	0.382	0.841	0.954	1.067
3	1	15	1	30	0.235	0.535	1.027	0.961	0.895
4	2	15	1	30	0.195	0.467	0.952	0.980	1.007
5	1	14	2	30	0.212	0.460	0.925	0.932	0.939
6	2	14	2	30	1.185	0.407	0.686	0.948	1.028
7	1	15	2	30	0.280	0.598	0.100	0.955	0.811
8	2	15	2	30	0.290	0.510	0.954	0.855	0.756
9	1	14	1	35	0.225	0.495	0.970	0.940	0.909
10	2	14	1	35	0.240	0.469	0.917	0.886	0.854
11	1	15	1	35	0.235	0.668	1.239	1.094	0.948
12	2	15	1	35	0.220	0.565	1.087	1.021	0.954
13	1	14	2	35	0.260	0.569	1.065	0.954	0.843
14	2	14	2	35	0.280	0.507	0.955	0.865	0.774
15	1	15	2	35	0.520	0.720	1.230	0.913	0.596
16	2	15	2	35	0.360	0.627	1.114	0.905	0.695

가중 함수를 이용하여 기동시간과 토크에 비율을 5:5로 하였을 때와 8:2의 비율로 하였을 때는 모델 11이 최적이었다고 토크에 비율을 둔 2:8의 적합한 모델은 모델 1이 됨을 알 수 있다. 따라서 정상상태에서 토크도 만족하면서 우수한 기동 특성을 갖고 있는 모델 11번을 선정하였고 그림 1에서 보여주고 있다.

2.3 온도를 고려한 영구자석 감자 특성 해석

2.3.1 영구자석 동작점 변화

영구자석 자기회로는 외부의 영향으로 영구자석의 동작점의 변화로 자기회로의 동작 특성이 바뀌게 된다. 이들 원인들 중 영구자석의 감자특성은 크게 3가지로 요약할 수 있다.

첫 번째 요인은 전기자 반작용에 의한 증자 또는 감자 자계가 인가되면 영구자석의 동작점이 바뀌게 된다. 즉, 영구자석의 퍼미언스 계수는 동일하게 유지되면서 외부자계의 증자 또는 감자에 따라 좌우로 평행 이동하게 된다. 그리고 이 외부자계의 영향으로 감자곡선의 굴곡점(knee point)를 지나게 되면 영구자석 원래의 동작점으로 회복되지 못하는 불가역 감자가 발생하게 된다. 두 번째 요인으로 동작 온도가 변화하게 되면 동일한 퍼미언스 계수를 갖고 있는 자기회로의 동작점도 변화하게 된다. 마지막 요인으로 영구자석 전동기의 회전자를 고정자와 분리한 경우와 같이 어떤 원인에 의해 퍼미언스 계수가 변화하면 퍼미언스 계수가 굴곡점을 지나게 되어 불가역 감자가 발생된다[5].

본 논문에서 사용된 NdFeb는 첫 번째와 세 번째 요인에 강한 재질 특성을 갖지만 두 번째 요인인 온도에는 취약한 특성을 갖는다. 또한 온도가 일정 상승한 상태에서 첫 번째 요인인 역자계가 걸리게 되면 불가역 감자가 발생된다. 따라서 영구자석의 최소 두께를 가지면서 열감자와 역자계 감

자를 동시에 고려한 영구자석 형상에 대해 연구를 진행하였다.

2.3.2 140℃ 이상의 온도에서 B-H 곡선의 추정법

모터는 장시간 운전하게 되면 주변 온도와 전류변화에 의해 내부 온도가 100℃ 이상 증가한다. 경우에 따라서는 200℃ 이상으로 증가할 수도 있다. 따라서 설계 시 모터 내부의 온도 상승에 따른 영구자석의 특성 변화를 확인할 필요가 있다. 모터에서 온도에 따라 변화하는 파라미터에는 권선저항, 농형바 저항, 엔드링 저항, 영구자석의 잔류자속밀도, 그리고 영구자석의 굴곡점 등이 있다. 여기서 권선저항은 구리의 온도저항계수를 이용하여 계산하였고, 농형바 저항과 엔드링 저항은 알루미늄의 온도저항계수를 이용하여 구하였다. 영구자석의 잔류자속밀도는 NEOMAX사의 NEOMAX-32H 모델의 B-H Data를 이용하였다. 온도에 따른 영구자석의 B-H 곡선은 140℃까지만 나타났기 때문에, 그 이상의 온도에서의 B-H 곡선은  $B_r$  값의 온도계수와 온도에 따른 감자율 그래프를 통해서 추정하였다. 본 논문에서는 180℃에서 B-H 곡선을 추정하는 방법에 대해 논의하였다.

NEOMAX-32H의 Data Sheet를 보면,  $B_r$ 의 온도계수는 -0.11로 나와 있다. 20℃에서  $B_r$  값이 1.12이므로 온도계수를 통해 180℃일 때의  $B_r$  값을 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta B_r}{\Delta T} \times 100 / B_r(20^\circ\text{C}) = -0.11(\%/^\circ\text{C}) \quad (7)$$

$$\frac{\Delta B_r}{(180^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})} \times 100 / 1.12 = -0.11(\%/^\circ\text{C})$$

$$\begin{aligned} B_r(180^\circ\text{C}) &= B_r(20^\circ\text{C}) + \Delta B_r \\ &= 1.12 - 0.197 \\ &= 0.923 \end{aligned}$$

$$\therefore B_r(180^\circ\text{C}) = 0.923 \text{ T}$$

그림 3은 NEOMAX-32H의 온도에 따른 감자율의 그래프이다. 180°C일 때, 감자율을 보면 Pc=1.0일 때 감자율은 약19%, Pc=2.0일 때 감자율은 약5%이다. 그리고 180°C에서  $B_r$ 값은 0.923T이므로 감자율 19%일 때의  $B_r$ 값은 0.748T이고, 감자율 5%일 때의  $B_r$ 값은 0.877T이다. 그림 4 감자 곡선 상에 리코일 투자율인 1.05의 기울기로 0.748T와 0.877T에서 접선을 긋고, 각각 Pc=1.0과 Pc=2.0에 만나는 점을 표기하고 직선으로 서로 이어주고,  $B_r$ 값이 0.923T일 때의 직선과 만나도록 이어줌으로써 180°C에서의 B-H 감자 곡선을 추정할 수 있다. 추정된 곡선으로부터 굴곡점은  $B$ 값이 약 0.65T인 지점에 위치하는 것을 알 수 있다.

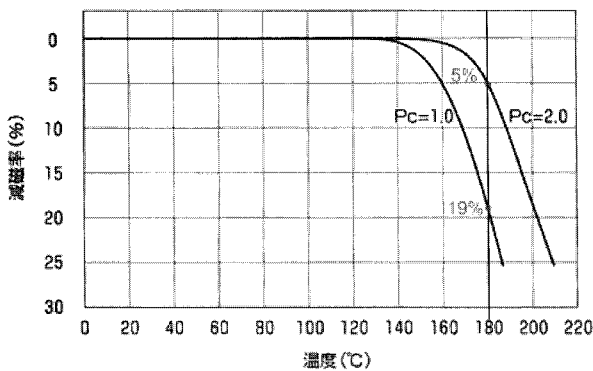


그림 3 NEOMAX-32H의 온도에 따른 감자율  
Fig. 3 Demagnetization ratio of NEOMAX-32H

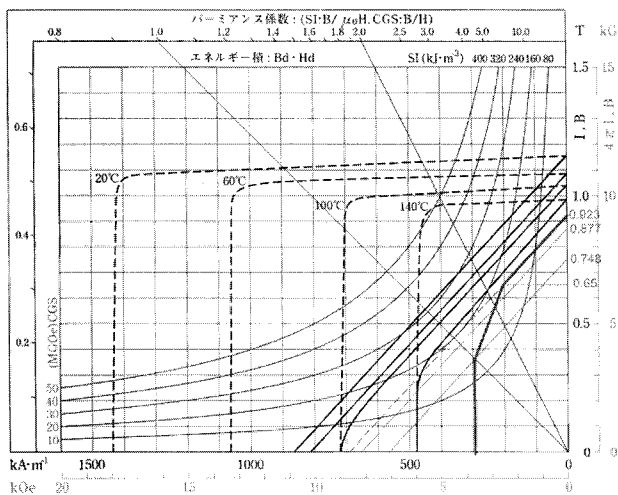


그림 4 180°C에서의 감자 곡선  
Fig. 4 Demagnetization curve at 180°C

### 2.3.3 불가역 감자의 발생

영구자석을 포함하는 자계를 비선형 해석하는 경우는 먼저 영구자석의 잔류 자화량  $M$ 에 대한 근사식이 필요하다.

따라서 자속밀도  $B$ 를 독립 변수로 하는 함수로 이를 근사화 시킨다. 영구자석의 자기 특성은 일반적으로 그림 5와 같은 감자 특성 곡선이므로 이로부터 다항식이나 지수함수에 의한 근사방법, 3차보간식에 의한 근사방법 또는 수치 근사법을 적용하여  $H=f(B)$ 를 구하여 다음과 같은  $M-B$  곡선의 근사식을 유도한다.

$$\begin{aligned} M &= B - \mu_0 H = B - \mu_0 f(B) \\ &= h(B) \end{aligned} \quad (8)$$

이 식(8)를 비선형 해석법인 Newton-Raphson법을 이용하여  $M_{rx}, M_{ry}$ 에 다음과 같이 적용한다.

$$M_{rx} = h_1(B_x) \quad (9)$$

$$M_{ry} = h_2(B_y) \quad (10)$$

여기서  $M_{rx}, M_{ry}$ 는 각각 영구자석의 잔류 자화량  $x, y$  성분이고,  $B_x, B_y$ 는 자속 밀도의  $x, y$ 성분을 나타낸다.

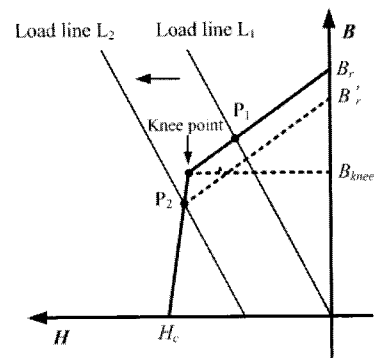


그림 5 감자 특성 곡선  
Fig. 5 Demagnetization curve

영구자석의 불가역 감자는 다음과 같은 절차로 발생한다. 그림 5에서 외부 자계에 의해 영구자석의 동작점이  $P_1$ 에서 굴곡점(Knee point) 이하인  $P_2$ 로 이동되었을 경우에는 가해진 외부 자계를 제거하더라도 영구자석의 잔류자속밀도가 초기의  $B_r$ 로 되돌아가지 못하고 이보다 작은  $B_r'$ 을 갖게 된다. 따라서 불가역 감자가 발생하게 되고 영구자석의 자화량  $M$ 이 감소한다.

따라서 불가역 감자는 영구자석 내부의  $B$ 값이 굴곡점(knee point)에서의  $B$ 값 이하로 나타날 경우 발생한다. 또한 불가역 감자는 영구자석 전체가 아닌 그림 6처럼 주로 모서리 부분에서 발생한다.

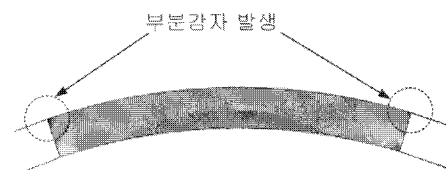


그림 6 부분감자 발생 부분  
Fig. 6 Region of part demagnetization

2.3.4 영구자석 형상을 고려한 감자 특성 해석

일반적으로 사용되는 모터는 모터 주위 온도가 120℃를 넘지 않는다. 하지만 차량용 하이브리드 자동차에 탑재되는 모터의 경우 모터 주위 온도가 180℃ 가까이 올라간다. 따라서 최악의 환경에서 사용되는 모터라면 120℃ 이상의 온도에 따른 감자 특성을 예측할 수 있어야 한다.

모터에서 내부 온도가 140℃, 150℃, 160℃, 170℃, 180℃, 200℃ 각각의 온도에 따른 권선저항, 농형바 저항, 엔드링 저항, 영구자석 잔류자속 밀도 등을 온도에 따라 계산한 후 유한 요소법을 이용하여 해석하였다. 해석 결과 140℃에서는 불가역 감자가 발생되지 않았지만 그 이상이 되면 불가역 감자가 일어나는 것을 알 수 있었다.

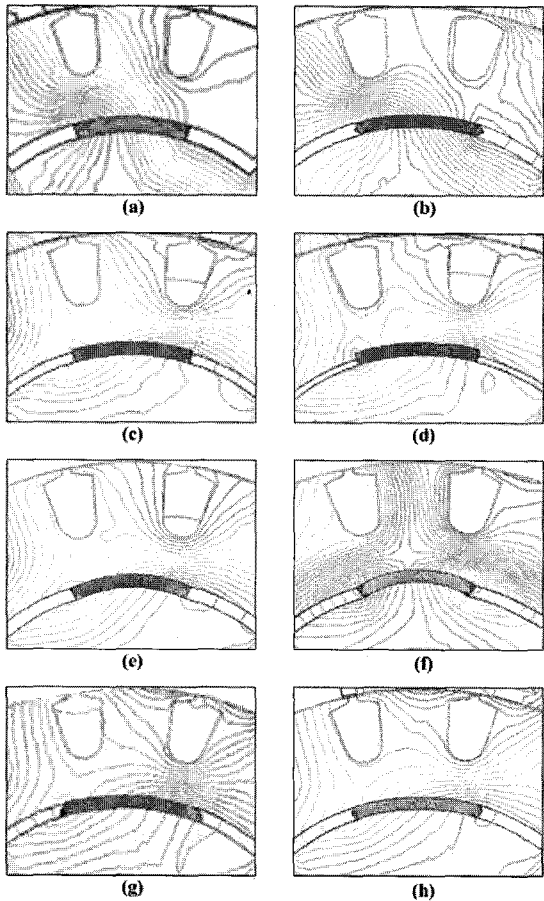


그림 7 영구자석 형상에 따른 자속(무하시)  
Fig. 7 Magnetics flux pattern due to magnet shape

본 논문에서는 150℃에서도 불가역 감자가 일어나지 않는 형상에 대해 연구하였다. 그림 7은 영구자석 형상에 따른 감자 특성을 보여 주고 있다. 기본 모델인 (a)모델과 모서리가 삼각형 형태를 가지는 (b)모델은 불가역 감자가 일어났으며 베리어 두께를 0.25[mm], 0.5[mm] 로 설계하여 영구자석이 철심부분으로 매입되게 설계한 (c), (d)모델도 부분적으로 감자가 일어나는 것을 확인하였다. 모델 (e), (f)는 영구자석 극호에 따른 모델을 보여주고 있으며 이 모델 또한 불가역 감자가 일어났다. 대부분의 감자는 영구자석 모서리에서 발생하는 것을 확인하였다. 이에 감자가 일어나는 부

분을 등갈게 깎아서 설계한 (g), (h)모델은 부분 감자가 일어나지 않음을 확인하였다. 하지만 단상 유도형 동기 전동기의 절연등급은 E종으로 최대 절연온도는 120℃가 되고, 이것은 감자가 발생하기 전에 절연이 파괴가 되어 전동기로서 역할을 하지 못한다는 것을 의미한다. 그러므로 공정, 가격 및 자속을 효과적으로 사용하지 못하는 새로운 모델을 적용하지 않고 본래의 기본 모델(a)을 사용하여 설계 하였다.

2.4 최적 모델의 해석 및 실험 결과 고찰

2.4.1 부하에 따른 특성

그림 8은 정상 상태의 조건을 비교하기 위하여 단상 LSPM은 부하 토크 0[Nm]로 기동, 유도기는 0.1[Nm]로 기동 시킨 후 0.4초 마다 부하 토크를 0.1[Nm] 씩 증가 시켰을 때의 속도 특성을 나타내고 있다. 그림에서 나타나는 속도의 진동은 부하를 증가시키에 따라 나타나는 과도현상으로 각 단계의 해석은 과도현상이 안정화되는 지점까지 수행하였다. 부하를 증가 시켰을 때 초기에는 크게 속도가 변동 하지만 농형 bar가 동기기의 댄퍼 역할을 하기 때문에 안정된 운전 속도를 유지하면서 운전하는 것을 볼 수 있다. 부하를 증가 시키게 되면 부하 토크는 증가 하게 되고 부하각 90도가 되면 최대 토크를 발생 시킨다. 하지만 부하각 90도를 넘게 되면 동기 이탈이 발생한다.

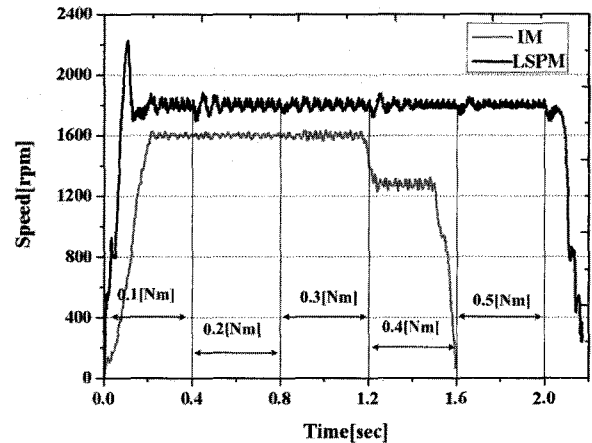
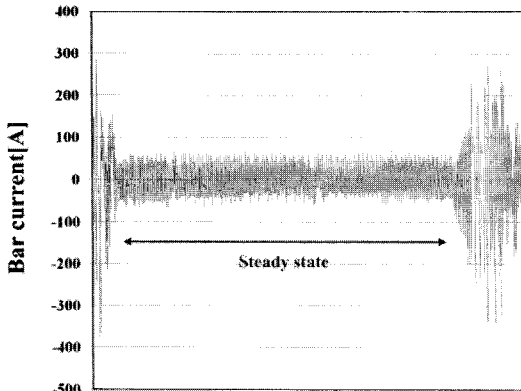


그림 8 부하에 따른 속도 특성  
Fig. 8 Speed Characteristic due to load

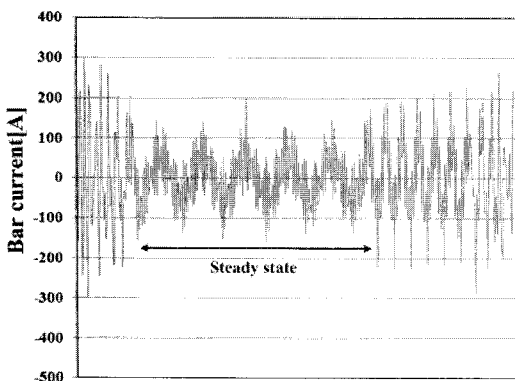
그림 8에서 보는 것과 같이 부하 토크 0.6[Nm]에서는 동기 이탈이 발생하는 것을 확인 하였으며 최대 토크는 0.55[Nm]이다. 유도기의 경우는 부하토크 0.38[Nm]정도에서 정격 속도(슬립속도 1600rpm)를 내지 못하고 떨어지는 것을 확인 할 수 있다.

그림 9는 부하에 따른 bar에서의 전류 특성을 보여 주고 있다. 그림 9(a)에서 처음 기동 시에는 유도 토크에 의해 기동이 이루어지기 때문에 유도기 특성처럼 기동전류가 상당히 높게 나타나고 있으며 동기기처럼 정상상태에 도달하게 되면 안정된 전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 하지만 동기 이탈이 발생하게 되면 기동전류보다 더 큰 전류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 9(b)는 유도기 바에서 흐르는 전류를 보여주고 있다. 단상 LSPM에 정상상태보다 2배 이

상의 전류가 흐르고 있다. 이는 일정 슬립 속도를 내기 위해 농형바에 흐르는 2차 전류가 된다.



(a) 단상 LSPM  
(a) Single phase LSPM



(b) 단상 유도기  
(b) Single phase IM

그림 9 부하에 따른 bar의 전류 특성

Fig. 9 Bar current due to load

2.4.2 실험결과 고찰

그림 10과 11은 본 논문의 타당성을 검증하기 위해 제작된 모델과 실험 장치들을 보여주고 있다. 단상 LSPM은 기동 시 유도 토크(식 2)에 의해 기동이 이루어지고 정상상태에 도달하게 되면 릴럭턴스 토크(식 3)와 마그네틱 토크(식 4)에 의해 동기속도로 회전한다. 따라서 제어기가 필요 없는 동기기기기 때문에 보조권선에 2.5[uF] 커패시터를 연결하고 상용 전원 220[V]를 인가하여 실험하였다.

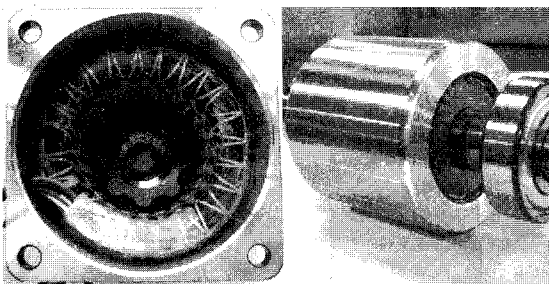


그림 10 설계된 단상 LSPM의 고정자와 회전자

Fig. 10 Prototype of single-phase LSPM

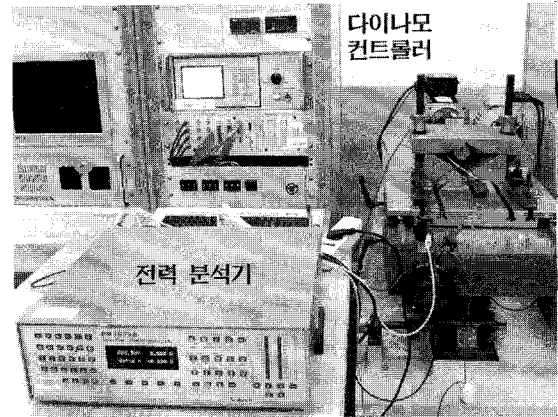


그림 11 단상 LSPM 실험 장치

Fig. 11 Experimental set-up for single phase LSPM

그림 12는 시뮬레이션과 실험의 역기전력을 나타내고 있다. 그림 12에서 보는 것 과 같이 시뮬레이션 결과와 실험 결과는 비교적 잘 맞는다. 역기전력은 다이내모 미터를 정격속도 1800rpm으로 회전시키고 주권선에 오실로스코프의 프로브를 연결하여 역기전력을 측정하였다.

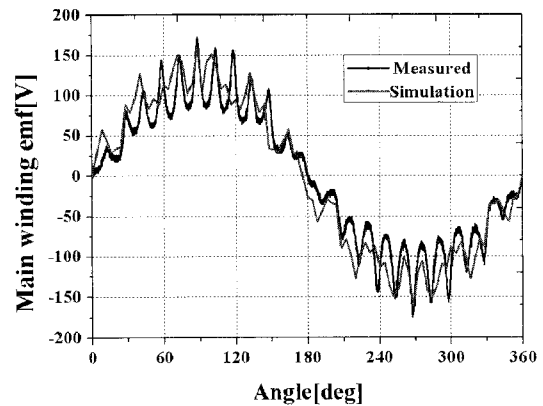


그림 12 주 권선에서의 역기전력(실험-해석)

Fig. 12 EMF of main winding

그림 13은 무 부하 상태에서의 기동특성을 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과와 실험결과는 잘 맞는다. 속도를 측정하는데 있어 엔코더를 모터에 부착하고 엔코더에서 나오는 디지털 신호를 DSP로 신호 연산을 한 뒤 D/A 컨버터를 통해 오실로스코프로 측정하였다. 과도상태에서 정상상태로 진입 할 때에 큰 오버슈트가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 회전자 초기 위치 따라 차이가 있으며 동기화에 진입 할 때에 영구자석에 의해 발생하는 breaking torque의 영향 때문이다. 이 breaking torque는 회전자의 초기 위치에 따라 양의 값일 수도 있고, 음의 값일 수도 있다. 양의 값이 작용 할 때는 오버슈트가 발생하며, 음의 값이 작용 할 때는 오버슈트가 없이 동기화에 진입한다.

표 3에 단상유도기와 단상 LSPM의 특성을 비교하였다. 본 논문에서 설계된 단상 LSPM은 전반적으로 유도기에 비해 좋은 특성을 보여 주고 있지만 고가의 영구자석을 사용하였기 때문에 유도기 제작비용에 10~15%정도 추가 비용이

들어간다. 따라서 가격적인 면에서는 유도기가 장점을 갖고 있다.

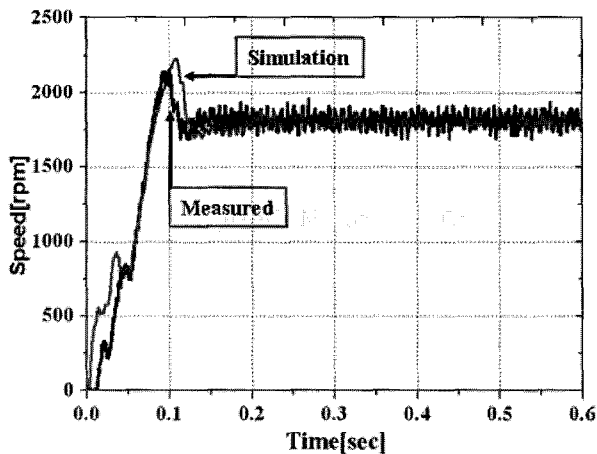


그림 13 무부하시 기동 특성 비교(실험-해석)  
Fig. 13 Simulation and measured speed-time responses

표 3 단상 유도기와 단상 LSPM의 특성 비교  
Table 3 Characteristic of single phase LSPM and IM

구분	단상유도기	단상 LSPM
부하토크 0.1[Nm]일때		
기동시간[sec]	0.1	0.235
최대토크[Nm]	0.38	0.55
정격시 효율[%]	62	70.8
영구자석 사용량[g]	0	11.6

### 3. 결 론

본 논문에서는 고 효율화 요구에 부응할 수 있는 단상 LSPM을 설계 하였다. 기초 설계와 세부 설계는 자기동기 회로와 유한 요소법을 이용하여 진행하였으며 실험 계획법과 가중 함수를 적용하여 최적의 모델을 설계 하였다. 실험 계획법과 가중 함수를 이용한 방법이 trade off관계를 형성 하는 모델 설계에 유용함을 확인 하였다. 또한 최적의 영구 자석 사이즈를 설계 했을 때 영구자석 형상에 따라 열과 역 자계에 강한 특성을 갖는 영구자석 형상을 제시하였다. 그리고 기동 특성 향상을 위한 파라미터에 대해 언급하였으며 단상 유도기와 의 특성을 비교 검토하였다. 끝으로 본 설계 의 타당성을 검증하기 위해 실험을 하였으며 실험결과는 잘 맞았다. 본 연구의 결과로부터 동기화가 가능한 영구자석의 두께, 위치에 따른 동특성을 예측할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

[1] Andrew M. Knight and Catherine I. McClay, "The Design of High-Efficiency Line-Start Motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 36, no. 6, pp.1555-1562, Novemver/December 2000.  
[2] T.J.E Miller, "Single-phase permanent-magnet motor

analysis.", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-21, NO.4, pp.651-658, May 1985.

[3] Kazumi Kurihara and M.Azizur Rahman. "High Efficiency Line-Start Interior Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEE Trans. Ind. Applicant. vol. 40, no.3, pp.789-796, May/June, 2004.  
[4] M.A.Rahman and A.M. Osheiba, "Performance fo a large line-start permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. Energy Conversion, vol.5, no.1, pp.211-217, 1990.  
[5] 권순호, " 영구자석 매입형 단상 유도동기전동기의 기동 특성 개선을 위한 회전자 바 형상 설계", 한양대학교 석사 학위논문, 2004. 02.  
[6] 홍정표, 허진, 電子部品 Technical Series, 소형모터 기술, "영구자석의 종류 및 동작 특성".

## 저 자 소 개



### 정 대 성 (鄭大成)

1977년 4월 10일생. 2004년 한경대 전기 공학과 졸업. 2006년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2006년 ~ 현재 동 대학원 박사과정

Tel : 02-2220-0349

E-mail : jungds61@hanyang.ac.kr



### 고 성 철 (高成哲)

1981년 7월 6일생. 2004년 한양대 전기전 자공학부 졸업. 2006년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2006년 ~ 현재 동 대학 원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2220-0349

E-mail : huhspia@hotmail.com



### 박 현 준 (朴 煥 濬)

1957년 6월 24일 생. 1981년 홍익대 전기 공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2003년 동 대학원 전기정 보제어공학과 졸업 (공박). 1996년 장영 실상 수상. 1997~ 현재 한국철도기술연 구원 수석연구원.

Tel : 031-460-5401

E-mail : hjpark@krri.re.kr



**권삼영 (權三榮)**

1962년 8월 22일생. 1984년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~ 현재 한국철도기술연구원(책임연구원).

Tel : 031-460-5425

E-mail : sykwon@krri.re.kr



**이형우 (李衡雨)**

1998년 한양대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 미국 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(공박). 2004년 미국 Cornell Univ. 이론응용역학과 객원 연구원. 2005년 한양대학교 BK사업단 계약교수. 2006년~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원.

Tel : 031-460-5426

Fax : 031-460-5459

E-mail : krhwlee@krri.re.kr



**이주 (李柱)**

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1988년~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공박). 1997년 한국철도기술연구원 선임 연구원. 1997~ 현재 한양대 공대 전기제어생체공학부 부교수

Tel : 02-2220-0342

E-mail : julee@hanyang.ac.kr