

# 3차원 FEM 해석에 의한 디스크형 단상 SRM의 시작기 제작과 특성 해석

論 文  
48B-6-5

## Manufacturing Prototype and Characteristics Analysis of Disk type Single Phase SRM by 3D Finite Element Method

李鍾漢\* · 吳永雄\*\* · 林洙生\*\*\* · 李殷雄§

(Jong-Han Lee · Young-Woong Oh · Su-Saeng Lim · Eun-Woong Lee)

**Abstract** - Disk type single phase switched reluctance motor which is a simple robust construction, simple control circuit and low manufacturing cost, has a characteristics of axial and radial flux machines. However, because this DSPSRM has a complicated magnetic circuit, it is difficult to analyze the design characteristics.

In this study, the calculation of design parameter based on the conventional design theory of electric machine and the characteristics analysis by computer simulation was performed. As the DSPSRM has the characteristics of both AFM and RFM, it is difficult to analyze its characteristics by the 2D FEM. 3D FEM was applied in the analysis of energy distribution and approximated calculation of torque characteristics with rotor positions. With analysis results, prototype of DSPSRM is manufactured.

**Key Words** : SRM, disk type single phase switched reluctance motor, 3 dimension FEM, AFM, RFM

### 1. 서 론

최근 산업의 발전과 함께 자동화, 정밀화 등이 추진되면서 각종 부하에 적합한 특수전동기의 개발과 전력전자기술을 이용한 가변속 구동장치의 개발 등이 활발히 이루어지면서 스위치드 리럭턴스 모터 (switched reluctance motor : SRM)의 개발도 이루어지고 있다[1]. SRM의 개발초기에는 스위칭 문제와 이로 인한 불연속 토크의 발생 등 여러 가지 문제점들이 있었으나[2], 전력전자기술의 발달과 컴퓨터를 이용한 전자계 해석 기술 및 회로 설계 기술 등의 발달에 힘입어 이러한 문제점들이 하나 둘씩 해결되면서 현재는 여러 산업 분야에서 실용화를 위한 노력이 진행중이다.

고정자의 각 극을 스위칭 펄스에 의해 순차적으로 여자시킬 때 회전자극과 여자된 고정자극 사이의 자기저항이 최소가 되는 쪽으로 토크가 발생하는 원리를 이용한 SRM은 일반적으로 구조가 간단하고, 견고하며, 또한 제어회로가 간단하여 타전동기에 비해 제작 및 생산적 측면 뿐만 아니라 단위 체적당 토크, 효율, 가변속 구동 등 성능 면에서도 우수한 특성을 갖기 때문에 공장자동화, 가전기기, 전기자동차 등의 구동원으로의 실용화가 가능하다[3].

또한 현재 사용되고 있는 대부분의 회전기기는 방사상의 자속을 이용하는 방사상 자속기기(radial flux machine : RFM)의

형태로 출력을 증가시키기 위해서 축방향 길이를 길게 하여야 하므로 축방향의 길이가 짧아야 하는 응용분야에는 적합하지 못한 단점을 갖는다. 그래서 FDD의 스핀들모터와 같이 축방향 길이를 줄임으로써 같은 용량의 방사상 자속기기보다 효과적인 축방향 자속기기(axial flux machine : AFM)에 대한 관심과 연구가 진행되고 있다[4].

본 연구에서는 단상에 의해 구동이 되고, 축방향이 짧으며, 설치후 보수 유지가 용이하고, 수명이 보장되는 디스크형 단상 스위치드 리럭턴스 모터(disk type single phase switched reluctance motor : DSPSRM)를 특수목적에 적합하도록 설계 제작하여 특성을 해석하였다. DSPSRM의 시작기 제작에 앞서 기존의 전기기기 설계 이론을 근거로 구조적 특징에 맞도록 설계에 필요한 여러 가지 설계파라미터를 산출하고, 유한요소법(finite element method : FEM)을 사용하여 특성을 해석, 설계 파라미터를 조정하여 시작기를 제작하였다. 특히 DSPSRM은 타전동기와 달리 축방향 자속과 방사상 자속이 동시에 존재하므로 3차원 FEM을 사용하여 특성해석을 하였다.

### 2. DSPSRM의 구조

본 연구에서 설계제작한 DSPSRM은 일반적인 SRM과 비교할 때 많은 외형상의 차이점이 있을 뿐 아니라 방사상 자속과 축방향 자속을 함께 이용할 수 있기 때문에 자속이용율을 높일 수 있고 이로 인해 축길이를 짧게 할 수 있다.

DSPSRM의 구조는 크게 고정자극, 회전자극, 권선, 지지기구 등으로 구분되며, 이와 함께 정지용자석(parking magnet), 위치 센서가 필수적으로 사용된다. 그림 1은 DSPSRM의 고정자와 회전자를 나타낸 것이다.

\* 正 會 員 : 忠南大 大學院 電氣工學科 碩士

\*\* 準 會 員 : 忠南大 大學院 電氣工學科 碩士課程

\*\*\* 正 會 員 : 忠南大 大學院 電氣工學科 博士課程

§ 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999년 1월 4일

最終完了 : 1999년 4월 26일

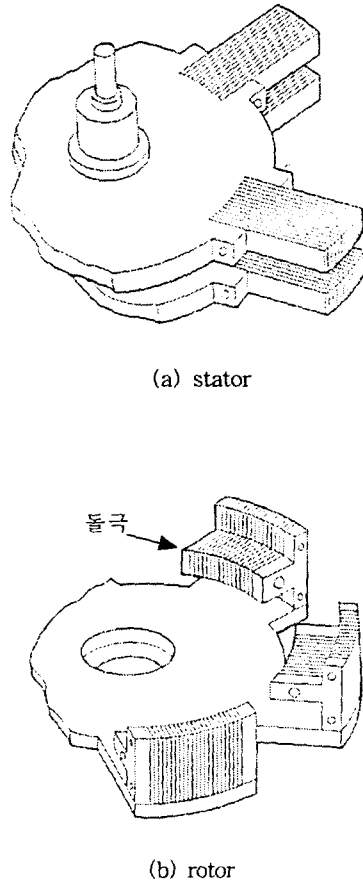


그림 1 DSPSRM의 구조  
Fig. 1 Structure of DSPSRM

고정자극과 회전자극은 대량생산시 다이캐스팅에 의한 제작이 가능하나, 와류손을 감소시키기 위해 규소강판을 적층하여 제작한다. 고정자는 각각 독립적으로 60°의 간격으로 알루미늄 지지대에 배치되어 있는 'c'자 형태로 된 6개의 고정자극으로 구성되어 있고, 회전자도 고정자와 마찬가지로 6개의 'u'자 형태의 회전자극들이 알루미늄 원통 내에 고정되어 고정자의 바깥쪽에서 회전하게 된다. 일반적인 SRM이 서로 다른 고정자/회전자의 극수비를 갖는 것에 비해 DSPSRM은 고정자와 회전자의 극수가 6개로 동일하다. 또한 권선은 각각의 고정자극에 감겨져 있지 않고, 고정자극의 슬롯내에서 6개의 고정자극을 전체적으로 감싸고 있는 형태로 감겨져 있다. 또한 단상 SRM의 가장 큰 문제점인 기동문제를 해결하기 위해 전원이 off된 후에도 일정한 위치에서 회전자가 정지함으로써 다음 기동이 가능하도록 하기 위해 정지용자석을 사용하고, 회전자의 위치를 정확하게 검출하여 정확한 스위칭 동작을 하기 위해 위치센서를 사용하였다. 이와 같은 형태를 갖는 DSPSRM의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- ① 단상여자에 의한 구동
- ② 외륜회전자(outer rotor) : 내축고정자(inner stator)
- ③ 축방향 길이에 대한 회전자의 직경의 비가 높음
- ④ 고정자와 회전자의 극수가 동일
- ⑤ 직경-축방향 자로(radial-axial flux path) 형성

- ⑥ 한 개의 여자권선 사용
- ⑦ 정지용 자석에 의한 기동

그리고, 회전자극의 구조에 있어서 고정자와 쇄교하는 자속의 분포면적을 넓히기 위해 그림 2(a)와 같이 회전자극면에 돌극을 갖도록 설계하였는데 그림 2(b)의 돌극이 없는 구조에 비해 공극의 자속면적을 넓게 할 수 있기 때문에 높은 에너지 밀도를 얻을 수 있고, 암페어 턴수를 줄임으로서 코일에 의한 동손을 줄일 수 있다는 장점을 갖는다.

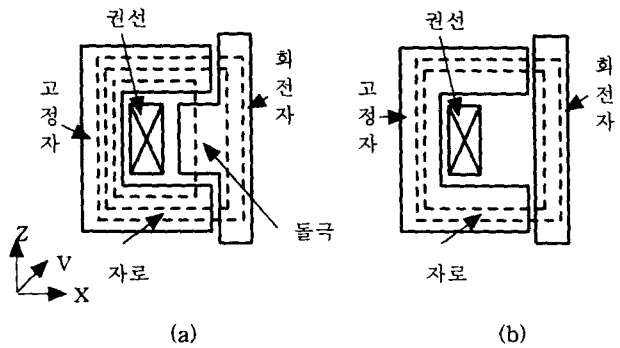


그림 2 회전자 형태에 따른 자속경로  
Fig. 2 Flux path for rotor shape

이상과 같이 DSPSRM은 구조적으로 간단하고, 견고하며 유지보수가 쉽고, 축방향 길이를 줄일 수 있는 장점이 있기 때문에 좁고, 체적을 줄이고자 하는 장소와 지속적인 관리가 곤란한 장소에 설치하기에 적합한 전동기이다.

### 3. 설계 파라미터의 산출

#### 3.1 DSPSRM의 설계사양

일반적으로 전기기기를 설계할 때에는 출력, 극수, 상수, 회전자 및 고정자의 구조적인 요인과 응용분야의 특수성에 따른 요구사항을 고려하여야 한다.

본 연구의 DSPSRM은 구조적으로 일반 전기기기와 전혀 다른 형태를 갖기 때문에 기존의 설계 방법만을 적용할 수는 없지만 보편적인 설계이론을 참조하고[5], DSPSRM의 외형상의 장점과 동작상의 특수성을 고려하여 표 1과 같은 시작기 제작에 필요한 설계사항을 설정하였다.

표 1 DSPSRM의 설계 사양  
Table 1 Design specification of DSPSRM

Item	Notation/Unit	Value
Output	P [W]	40
Torque	T [Nm]	1.53
Speed	n [rpm]	250
Rated Current	V [V]	24
Windings	N [turns]	50
Stator Poles	Nr	6
Rotor Poles	Ns	6

3.2 3차원 FEM의 지배방정식

전류원이 존재하는 해석모델에서 자계  $H$ 와 전류 밀도  $J$ 의 관계는 Ampere 주회 법칙의 미분형 식 (1)과 같고, 정자계에서 자속밀도의 발산은 식(2)로 정의된다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

전류 연속성으로부터 전류 벡터포텐셜  $K$ 를 정의하면 식 (3)과 같다.

$$J = \nabla \times K \quad (3)$$

식 (3)을 식 (1)에 대입하여 정리한 벡터량을 새로운 자기스칼라포텐셜  $\Omega^*$ 로 정의하면 식(4)가 얻어진다[6].

$$H - K = -\nabla \Omega^* \quad (4)$$

식(4)를  $H$ 로 나타내어 식(2)에 대입하면 지배방정식 식(5)를 얻는다.

$$\nabla \cdot \mu(K - \nabla \Omega^*) = 0 \quad (5)$$

이 지배방정식을 정식화하기 위해 Galerkin법을 이용하여 각 요소에 대한 잔차  $R_{ei}$ 를 구하면 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} R_{ei} &= \int_v [N_i \nabla \cdot \{\mu(K - \nabla \Omega^*)\}] dV \\ &= \int_v [\nabla \cdot \{N_i \mu(K - \nabla \Omega^*)\}] dV \\ &\quad - \int_v [\{\mu(K - \nabla \Omega^*)\} \cdot \nabla N_i] dV \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $N_i$ 는 형상함수이다.

식(6)의 우변 첫항에 대해 Gauss 정리를 사용하여 정리하면 식 (7)과 같고, 경계조건을 적용하면 식(7)은 "0"이 되므로 잔차  $R_{ei}$ 는 식(8)이 된다.

$$\int_v [\nabla \cdot \{N_i \mu(K - \nabla \Omega^*)\}] dV = \int_s N_i \{\mu(K - \nabla \Omega^*)\} \cdot ndS \quad (7)$$

$$R_{ei} = \mu \int_v [\nabla \Omega^* \cdot \nabla N_i] dV - \mu \int_v [K \cdot \nabla N_i] dV \quad (8)$$

일차식으로 근사화시킨 자기스칼라포텐셜  $\Omega^*$ 을 식(8)에 대입하고 모든 요소에 대해 적용하면 식(9)와 같은 행렬식이 얻어진다.

$$[R] = \mu[S][\Omega^*] - [F] = 0 \quad (9)$$

여기서,  $[S]$ 는 계수행렬이고,  $[F]$ 는 구동벡터이다.

3.3 DSPSRM의 3차원 해석모델

DSPSRM의 구조가 각각의 회전자극과 고정자극에 대해 공간적으로 주기성을 갖기 때문에 주기경계조건을 주어 한 주기에 해당되는 영역만을 해석하여 전체의 특성을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 표1의 설계사양을 이용하여 6개의 고정자극과 회전자극 중에서 여자인 2개의 고정자극과 이 사이에 놓인 한 개의 회전자극에 대해서 주기경계조건을 주었으며, 또한 회전자극의 위치에 따라 고정자극과 정렬된 위치( $\tau=0$ ), 어긋난 위치( $\tau=30$ ) 그리고 고정자극과 정렬된 위치에서 각각  $15^\circ$ ,  $45^\circ$  일 때 등 4가지 위치에 대해 각각 3차원 해석 모델을 설정하였다. 그림 3은 3차원 모델링에 사용된 기준평면과 요소분할도를 나타낸 것이고, 표2는 3차원 모델의 구성요소를 나타낸 것이다.

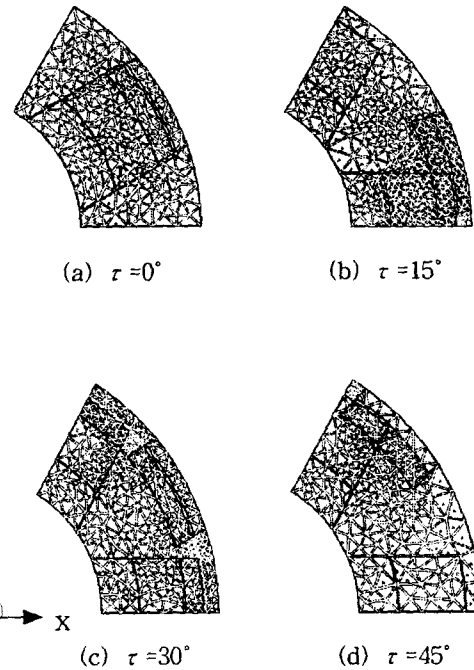


그림 3 회전자 위치에 대한 기본평면과 요소분할도  
Fig. 3 Base planes and meshes for rotor positions

표 2 요소분할 세부 사항

Table 2 Mesh Division Result

	$\tau=0^\circ$	$\tau=15^\circ$	$\tau=30^\circ$	$\tau=45^\circ$
No. of bricks	6441	10710	10152	6084
No. of tetrahedric	21033	35370	32616	19692
No. of nodes	4062	6728	6227	3841

3.4 자속밀도 분포 해석

상용 소프트웨어인 Magnet 5.2를 사용하여 얻은 DSPSRM의 자속밀도 분포는 실제 시작기의 제작에 따른 최적 설계파라미터의 산출과 DSPSRM의 구동 및 제어회로를 위한 매우 기본적인 자료로써 복잡한 자기회로에서 발생하는 포화현상과 회전자의 위치에 따른 자속밀도의 변화를 해석함으로써 토오크의 예측과 구동시 특성을 향상시킬 수 있는 자료를 얻게 된다.

본 연구에서는 회전자 위치의 각각에 대해 입력조건을 50,100,150,200,250,300[AT]으로 하여 해석하였고, 그림 4는 해석결과에 의한 자속밀도분포를 나타낸 것이다. 고정자가 회전자와 완전히 일치된 경우에는 고정자극에서 나온 자속이 공극을 지나 회전자극에 도달할 때까지 고른 자속분포를 보이므로 최대 인덕턴스를 갖게 되며 결국 자계에너지가 최대인 상태가 되고, 어긋난 위치에서는 회전자극이 고정자극과 고정자극 사이의 가운데 놓이는 위치에서 2개의 고정자극 자속이 회전자극과 공유되어 최소 인덕턴스가 됨을 확인할 수 있었다.

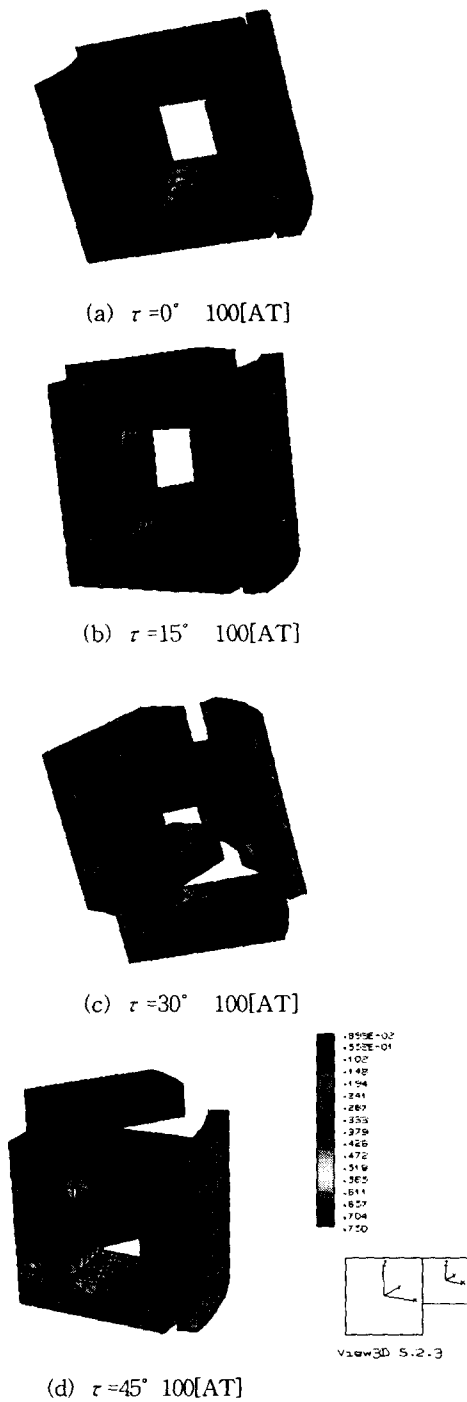


그림 4 회전자 위치에 따른 자속밀도 분포  
Fig. 4 Flux density distribution for rotor positions

3.5 DSPSRM의 설계파라미터 산출

DSPSRM의 동작과 제어에서 가장 큰 영향을 미치는 극호비는 일반적인 SRM의 설계원리에 따라 고정자 극과 고정자 극 사이의 극호와 고정자 극호의 비  $\beta_i/\beta_s$ , 고정자극과 고정자극 사이의 극호와 회전자 극호의 비  $\beta_i/\beta_r$ 를 각각 1.3, 1.4로 결정하였다.

또 단위체적당 출력을 증가시킬 수 있으며 작은 기자력으로 도 필요로 하는 공극 자속을 얻을 수 있고, 토오크 특성을 변

화시킬 수 있는 회전자의 돌극길이를 축방향 자속의 양을 고려하여 설정하였으며, 권선이 여자되었을 때 고정자 철심의 각 부분에서 심한 포화현상이 발생하여 효율적인 자속이용률이 떨어지지 않도록 고정자의 자기회로를 설계하였다. 그림 5와 같은 설계과정과 FEM해석 과정을 반복 수행하여 표3과 같이 설계사양에 적합한 설계파라미터를 산출하였다.

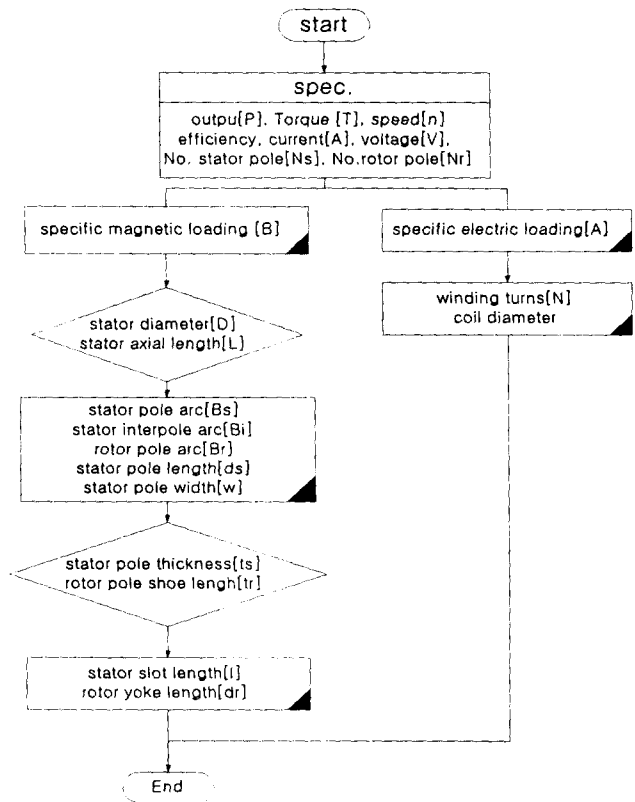


그림 5 설계과정에 대한 플로우 차트  
Fig. 5 Flow chart of Design Processing

표 3 설계파라미터 설정 [7]

Table 3 Determine of Design Parameter

Item	Notation	Value/unit
Ratio of Pole arcs	$\beta_i/\beta_s, \beta_i/\beta_r$	1.3, 1.4
salient pole length of rotor	t	8 [mm]
stator diameter	D	180 [mm]
stator axial length	L	46 [mm]
stator slot length	l	26 [mm]
airgap	g	1 [mm]

#### 4. 시작기의 제작

앞장의 설계과정을 거쳐 산출한 설계과라미터를 바탕으로 DSPSRM의 시작기를 제작하였다.

우선 6개로 구성된 고정자극과 회전자극은 S18의 규소강판을 방전가공(wire cutting)에 의해 가공한 뒤 적층하였다. 각 극을 개별적으로 적층하여야 하고 또한 원호모양으로 적층하여야 하기 때문에 방전가공단계에서 약간의 여유분을 두고 규소강판을 가공하여 조립한 후 2차가공을 통해 정밀도를 높였다. 각각의 고정자극을 고정시키는 지지기구는 모터의 전체 중량과 회전자의 회전시 관성을 줄이기 위해 재질은 알루미늄을 사용하였고, 특히 회전자의 각 극을 고정시켜주는 상하의 커버에는 무게의 경감과 동시에 통풍의 문제점을 동시에 해결할 수 있도록 6개의 송풍구를 뚫었다. 또한 DSPSRM의 여자권선은 지름 0.13mm의 에나멜 동선을 사용하여 50회 감아 권선작업을 하였다.

본 연구의 시작기에는 기동시 항상 회전자가 일정위치에서 정지할 수 있도록 회전자의 커버에 영구자석을 부착하였으며, 기동전류, 기동토크 등을 고려하여 위치를 조절할 수 있도록 하였다. 하지만 영구자석에 의한 기동장치는 DSPSRM의 구동시 토크 리플의 원인이 될 수 있기 때문에 사용시 영구자석의 재질과 크기를 고려하여야 한다. DSPSRM에 인가되는 전원을 스위칭 하기 위해서는 회전자의 위치를 정확하게 인식하여야 하므로 본 연구에서는 토크 리플, 속도변화에 따른 스위칭 조건의 변화 등을 고려하여 2개의 홀센서를 사용하였다.

그림 6은 완성된 DSPSRM의 외형을 나타낸 것이다.

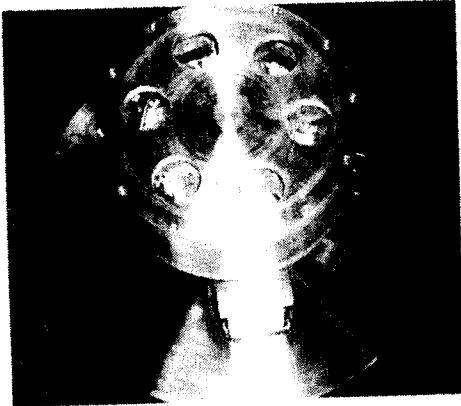


그림 6 완성된 DSPSRM  
Fig. 6 Manufactured DSPSRM

#### 5. 자기수반에너지에 의한 토크 특성 해석

앞 절에서 얻은 FEM을 이용하여 식 (10)에 의해 자기수반에너지  $W$ 를 얻을 수 있다. 또한 가상변위의 원리에 의해 각변위  $\theta$ 에 대한 토크를 식 (11)로 구할 수 있다.

$$W = 2 \int_s \left( \frac{1}{2} \nu B^2 \right) ds - \frac{1}{\nu_0} \int_s (HdB) ds \quad (10)$$

여기서  $\nu$ : 자기저항률,  $\nu_0$ : 진공중 자기저항률

$$T(\theta) = + \frac{dW}{d\theta} \quad (11)$$

따라서, FEM 해석결과로부터 회전자 위치에 따른 각각의 자기수반에너지의 변화는 그림 7과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 회전자가 정렬된 위치와 어긋난 위치에서 자기수반에너지의 극대, 극소값을 갖고, 또한 30° 위치를 중심으로 대칭을 이룰 수 있다.

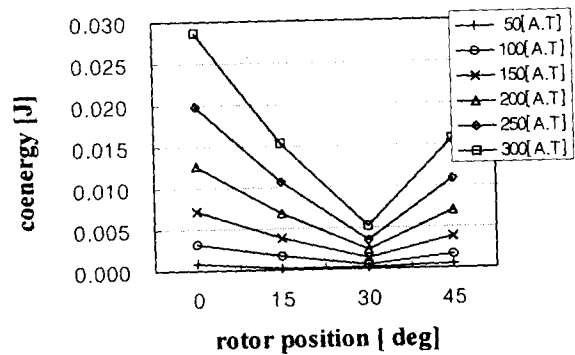


그림 7 회전자 위치에 대한 자기수반에너지의 변화  
Fig. 7 Characteristic of Magnetic Co-energy for rotor positions

그리고, 일반적인 SRM에서와 같이 회전자극이 정렬된 위치에서 어긋난 위치까지 이동할 때 발생하는 에너지의 분포가 정현적이라고 가정한다면 에너지분포와 이에 따른 토크의 분포는 0°에서 60° 사이를 한 주기로 하여 변화하게 되고,  $p$ 극기의 식 (12)와 식 (13)을 사용하여 근사화시킴으로서 특성을 예측할 수 있다.

$$W = W_{avg} + W_p \cos(p\theta) \quad (12)$$

여기서,  $W_{avg} = W_{min} + W_p$

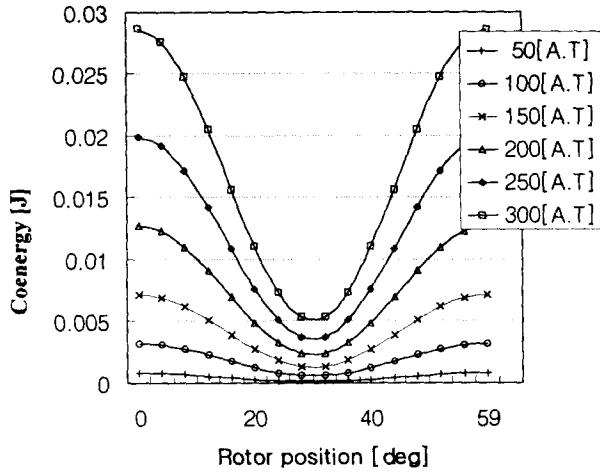
$$W_p = \frac{(W_{max} - W_{min})}{2}$$

$$T(\theta) = -pW_p \sin(p\theta) \quad (13)$$

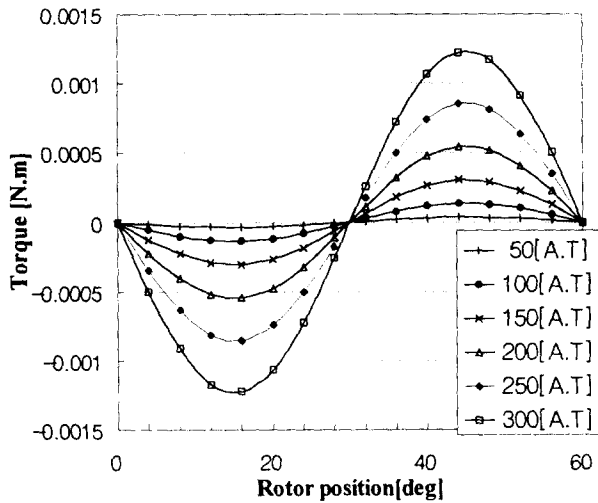
그림 8은 이상과 같이 얻은 각각의 여자전류에 대한 근사화된 자기수반에너지와 토크의 분포곡선을 나타낸 것이다. 그림 8에서 토크특성이 회전자의 위치에 따른 자기수반에너지의 변화에 의해 구해지고 또한 여자전류의 변화에 의해 변화됨을 확인할 수 있고, 회전자가 고정자와 일치될 때 인가전원을 off 시키면 공극에 저장된 에너지가 전원에 환원되는 과정에서 잔류 전류가 남게되어 발생하는 부토크를 제거하기 위한 스위칭 조건을 구할 수 있다.

참고 문헌

- [1] P.J.Lawrenson, "Variable-speed switched reluctance motors", IEE, Proc.Vol.127.No.4,pp.253-265 July 1980
- [2] 이은웅, 이종한, 조현길, 김성현, "디스크형 단상 스위치드 리럭턴스 모터의 기본설계", 대한 전기학회 추계학술대회 논문집, pp.9-11, 1996.11
- [3] J.H.Lee, E.W.Lee, D.J.Lee, "Approximated torque characteristics of disk type single phase SRM by 3D modeling", ICEE, Kyung-Joo, pp. 13-16,1998.7
- [4] Wai S. Leung, James C.C.Chan, "A New Design Approach for Axial Field Electrical Machines", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99, No.4, July/Aug. 1980
- [5] C.C.Chan, "Single-phase switched reluctance motors", IEE Proc.,Vol.134,Pt.B, No.1, pp.53-56, January 1987
- [6] P.Silvester, "Three-Dimensional Magnetostatic Field Analysis of Electrical Machinery by the Finite-Element Method", IEEE Trans. Power Apparatus and system Vol. PAS-100 No.8, p. 4007 Aug.1981
- [7] R.Krishnan, "Design Procedure for Switched reluctance motors", IEEE, Tran on industry application. Vol.24,No.3 pp.456-461,may/June 1988



(a) 전류 변화에 따른 자기수반에너지 변화 예측



(b) 전류 변화에 따른 토크 변화 예측  
그림 8 전류 변화에 따른 특성 변화 예측

Fig. 8 Prediction of characteristic for current

6. 결론

구조가 간단하고 견고하며 축방향 길이를 짧게 할 수 있고 유지보수가 어려운 곳에 적합한 DSPSRM의 시작기 제작에 앞서 DSPSRM의 특수성을 고려하고 기존의 전기기기 설계이론을 참조하여 설계파라미터를 산출하여 시작기를 제작하였다. 복잡한 자기회로를 해석하기 위해 3차원 FEM 해석과정을 이론적으로 정립하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 자로의 자속밀도 포화를 이루지 않는 범위에서 회전자의 위치변화에 따른 특성을 해석하였다. 또한 회전자 위치변화에 따른 토크 특성을 근사적으로 구함으로써 DSPSRM의 토크 특성이 회전자의 위치각과 입력전류에 의해 결정됨을 밝혔다.

본 연구결과를 바탕으로 앞으로 최적의 설계파라미터의 산출과 토크 리플을 감소시키기 위한 자기회로 구성 그리고, 구동드라이브의 설계 및 제작, 제특성 시험장치 등을 개발한다면 실용화를 이룰 수 있을 것이다.

본 논문은 한국학술진흥재단의 자유공모과제 지원 (1997.10 - 1998.9)에 의하여 수행되었음.

저 자 소 개



이 종 한 (李鍾漢)

1970년 3월 29일생. 1993년 충남대 전기공학교육과 졸업. 1999년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 천안공업고등학교 전기과 교사

Tel : 0417-568-0798



오 영 응 (吳永雄)

1976년 4월 30일생. 1998년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 042-821-7601



임 수 생 (林洙生)

1973년 2월 24일생. 1995년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 042-821-7601

이 은 응 (李殷雄)

전기학회 논문지 제48B권 제 3호 참조

Tel : 042-821-5652

E-mail : ewlee@hanbat.chungnam.ac.kr