

### 3차원 모델링에 의한 디스크형 단상 스위치드 리럭턴스 모터의 해석

이종한\*, 이은웅\*, 김종경\*\*\*, 이동주\*, 윤서진\*  
충남대\*, 원주전문대\*\*\*

### Analysis of Disk type Single-Phase Switched Reluctance Motor by 3D Model

Jong-Han Lee\*, Eun-Woong Lee\*, Jong-Kyum Kim\*\*\*, Dong-Ju Lee\*, Su-Jin Yun\*  
Chungnam National University\*, Wonju College\*\*\*

**Abstract** - The disk type Single-phase Switched Reluctance Motor has advantages of constructional simplicity, robustness and low cost.

In this paper, We analyze the 3-D model of DSPSRM(Disk type Single-Phase Switched Reluctance Motor) by Finite Element Method for finding optimal design model.

#### 1. 서 론

1980년대를 기점으로 본격적으로 개발하기 시작한 스위치드 리럭턴스 모터 (Switched Reluctance Motor : SRM)는 스위칭 기술의 보완, 소음, 토크 리플제거등이 연구되어 오다가 최근에는 전자계 해석기술, 전력전자기술의 발달로 스위칭 문제들의 해결, 실용화를 위한 연구가 진행되고 있다.

SRM은 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자와 회전자 사이의 쇄교자속이 최대가 되도록 작용하는 자기적 성질을 이용하여 토크를 얻는 전동기이다.

일반적으로 SRM은 고정자와 회전자의 수가 다르고 이중 돌극을 갖는 구조로 되어 있으며 타전동기에 비해 구조가 간단하고, 기계적으로 견고하다는 장점을 갖는다.<sup>[1][2]</sup>

본 연구에서는 SRM의 여러 형태중에서 단상전원으로 구동이 가능하고 축방향의 길이를 짧게 할 수 있으며 기동력이 큰 장점을 갖고 있으며 구조상으로 회전자와 고정자의 극수가 같은 디스크형 단상 스위치드 리럭턴스 모터(DSPSRM)에 대해 3차원 모델링을 하고 최적의 설계 모델을 구하기 위해 유한요소법(Finite Element Method : FEM)으로 자기회로를 해석하고자 한다.

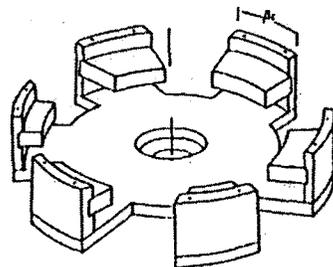
#### 2. DSPSRM의 구조 및 동작원리

##### 2.1 DSPSRM의 구조

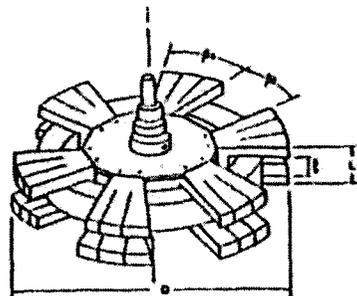
일반적인 형태의 SRM에 대해 DSPSRM이 구조적 차이점과 특징은 다음과 같다.

- 1) 단중 코일에 의한 단상여자
- 2) 회전자를 외부에 고정자를 내부에 배치한 형태
- 3) 고정자와 회전자의 극수가 동일
- 4) 축방향의 자로 형성
- 5) 정지용 자석(parking magnet)에 의한 기동

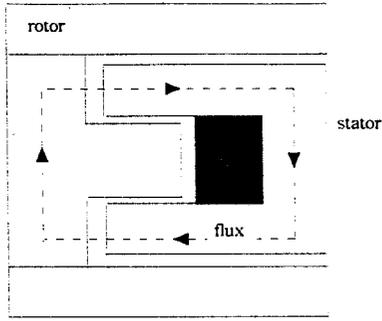
그림 1의 (a)와 (b)는 DSPSRM의 회전자와 고정자의 구성을 나타낸 것이며 그림1(c)는 자로구성을 나타낸 것이다.



(a) Rotor



(b) Stator



(c) flux pattern

Fig. 1 Structure of DSPSRM

또한 특성상으로는 그림 1에서 보는 바와 같이 회전자에 돌극을 갖는 구조로 되어 있기 때문에 공극자속면적이 넓어 높은 전력밀도를 얻을 수 있으며, 유효리액턴스를 감소시켰기 때문에 Ampere Turn수를 줄일 수 있고, 이로 인해 코일의 직경을 줄여 동손과 코일의 무게를 줄일 수 있는 장점을 갖는다.

이와 같은 특징을 갖는 DSPSRM은 구조가 타전동기보다 간단하고 견고하기 때문에 유지보수가 쉽고, 고장을 줄일 수 있다. 그리고 축방향 길이를 줄일 수 있는 등의 구조상의 장점이 있어 좁은 장소에서 사용하면 적합하다.

## 2.2 구동원리

그림2에 나타난 DSPSRM의 구성도에서 구동 원리는 고정자의 권선에 전류를 흘려서 자화되면 회전자는 권선의 인덕턴스가 최대가 되고 리액턴스가 최소가 되는 방향으로 이동한다. 회전자와 고정자의 극이 일치하기 전에 고정자 권선에 인가된 전류를 off시키면 회전자의 관성으로 극피치의 1/2이 넘도록 회전했을 때 다시 다음 극의 스위치를 on하도록 고정자극의 여자를 회전방향에 따라 순차적으로 on-off시켜 회전력을 얻는다.

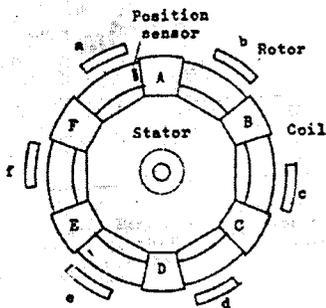


Fig. 2 Operational Principle of DSPSRM

또한 스위치의 on-off주기를 제어하기 위해 회전자와

고정자사이의 위치를 감지하는 위치센서를 사용하고, 회전자가 고정자와 일치하는 위치에서 정지하게 되면 회전력을 얻을 수 없기 때문에 이것을 방지하기 위해서 정지용 자석을 별도로 사용한다.

## 3. DSPSRM의 특성 해석

일반적으로 유한요소법을 적용하여 전동기를 해석할 때는 주로 2차원 유한요소법을 사용했는데 본 연구에서 해석하고자 하는 DSPSRM은 자기회로의 구조가 타 SRM과 다르고 복잡다. 그리고 방사상의 자속과 축방향의 자속이 동시에 존재하고 전류의 방향과 토크의 방향이 같아서 2차원 유한요소법으로 해석하면 에너지분포를 나타내기가 곤란하여 3차원 해석이 불가피하다.

하지만 3차원 유한요소법으로 해석하게 되면 2차원 해석법보다 많은 미지수를 처리해야 한다. 그리고 유한요소법을 적용하기 위해 해석영역을 요소로 분할하는 선과정(Pre-processor)뿐 아니라 유한요소법으로 구한 해석 변수로부터 물리적 양을 계산하거나 그래프로 표현하는 후처리과정(post-processor)이 2차원 해석법에 비해 매우 복잡하다. 본 연구에서는 FEM 소프트웨어 MAGNET5.03을 사용하여 모델링하고 해석하였다.

### 3.1 3차원 모델링

그림 3은 DSPSRM의 1쌍의 여자극중에서 한 개의 극만을 3차원으로 나타낸 것이다.

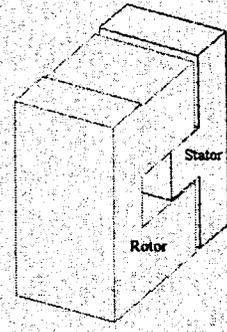


Fig. 3 3D Model of DSPSRM

### 3.2 유한요소 정식화<sup>[3][4]</sup>

전자계의 지배방정식을 얻기 위해 Maxwell 방정식을 사용한다.

변위전류를 무시한 Ampere의 주회법칙은 식(1)과 같다.

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

여기서 H : 자계의 세기 [A/m],

J : 전류밀도 [A/m<sup>2</sup>]

공극에서 자속밀도 B는 식(2)의 관계가 성립한다.

$$B = \mu_0 H \quad [Wb/m^2] \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

여기서,  $\mu_0$ 는 진공중의 투자율 [H/m]

$\nu$ 는 자기 저항률 [m/H]

그리고 자기 벡터 포텐셜은 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

$$B = \nabla \times A \quad (4)$$

식(2),(4)를 식(1)에 대입하여 지배방정식을 다음의 식(5)와 같이 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \nu (\nabla \times A) = J \quad (5)$$

지배방정식(5)에 Galerkin법을 적용하면 식(6)을 얻을 수 있다.

$$R_i = \int_v N_i [\nabla \times \nu (\nabla \times A)] dv - \int_v N_i J dv \quad (6)$$

여기서  $N_i$ 는 형상함수이다. 해석영역을 유한개의 사면체로 분할하고 근사화시킨후 식(6)에 대입하여 정리하면 식(7)과 같은 요소행렬로 표현할 수 있다.

$$[K][A] = [F] \quad (7)$$

### 3.3 자속분포 해석

그림 4는 DSPSRM을 3차원으로 모델링한 그림 3에서 한 개의 극만을 가지고 요소분할한 그림이다. 3차원 해석은 2차원에 비해 컴퓨터의 용량등의 제한사항으로 인해 충분히 많은 요소로 분할하지는 못하였다.

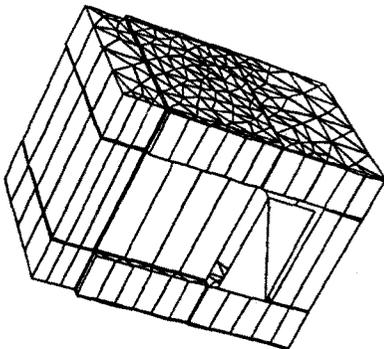


Fig. 4 Finite Element

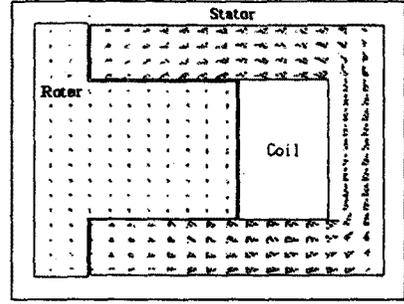


Fig. 5 Flux Distribution

그림 5는 3차원으로 모델링한 DSPSRM에 대해 X-Y방향에 대한 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 그림 5에서의 자속밀도분포는 DSPSRM의 회전자와 고정자가 일치된 위치에 있을 때, 즉 릴럭턴스가 최소일 때의 자속밀도분포이므로 2차원에서의 자속밀도분포와 차이가 거의 없다.<sup>[1]</sup>

## 4. 결 론

회전자와 고정자의 극수가 같은 DSPSRM은 축방향의 길이가 작아서 협소한 장소에 설치할 수 있으며 기동력이 크게 요구되는 부하에 적합하다. 그래서 본 연구에서는 이러한 DSPSRM의 구조와 동작원리를 정리하였다.

그리고 DSPSRM의 구조는 간단하지만 2차원 해석보다 3차원 해석이 요구되는 구조를 가지고 있어 3차원 유한요소법(3D-FEM)으로 정식화하여 자속분포를 구하였다.

앞으로 좀더 많은 요소분할을 통하여 공극부분의 자속밀도와 토오크를 구하여 보다 자세히 DSPSRM을 해석하여 시작기를 구성하기 위한 설계자료를 얻어야한다.

## [참 고 문 헌]

- [1] C.C.Chan, "Single-Phase Switched Reluctance Motor", IEE Proc., vol.134, Pt.B, No.1, pp.53-56, January, 1987
- [2] H.R.Bolton, et al., "Low-Cost Reluctance drive system for low-power, low speed application", IEE Conf., Publ.179, pp199-102, September, 1979
- [3] 河瀬, 三浦, 大立, "三次元有限要素法を用いたSRモータのトルク特性解析", 平8電気學會産業應用部門 全國大會, No. 282, 1976
- [4] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1987
- [5] Y.Kawase, T.Yamaguchi and Y.Hayashi, "Analysis of Cogging Torque of Permanent Magnet Motor by 3-D Finite Element Method", IEEE Trans. on Mag., vol.31, No.3, pp.2044-2047, 1995