

### 3차원 등가자기회로방법을 이용한 하이브리드 스테핑 모터의 비선형 해석

진창성\*, 김 슨\*, 이 주\*, 김영태\*\*

한양대학교 전기공학과\*

원주대학교 전기공학과\*\*

#### Nonlinear Analysis of Hybrid Stepping Motor using 3D Equivalent Magnetic Circuit Network Method

C. S. Jin\*, S. Kim\*, J. Lee\*, Y. T. Kim\*\*

Dept. of Electrical Engineering, in Hanyang Univ.\*

Dept. of Electrical Engineering, in Wonju Univ.\*\*

Abstract - 2D analysis is impossible for Hybrid stepping motor(HSM) and 3D analysis is necessary because the permanent magnet is magnetized to the axial direction. In this paper, the characteristics of HSM are analyzed by using 3D equivalent magnetic circuit network method(3D EMCNM). In addition, the trapezoidal element is introduced for the exact permeance calculation in the complex shape machinery such as HSM. The magnetic saturation of core is considered.

#### 1. 서 론

HSM은 입력 펄스 신호에 의해서 권선의 여자전류를 절환하여 입력펄스 신호에 비례하여 일정한 회전을 하는 기기로서 구조적으로 공극이 작고 고정자와 회전자 치의 크기가 매우 작다[2]. 따라서 HSM은 치 부분에서 포화가 쉽게 일어나며 HSM의 정확한 성능 예측 및 설계를 위해서는 치 부분에서 발생하는 포화를 고려한 비선형 해석이 필수적이다.

일반적으로 많이 사용하고 있는 2차원 유한 요소 해석의 경우 축 방향으로 자화 되어있는 영구자석을 가지면서 회전자의 치가 N극과 S극이 반 피치 어긋나 있는 HSM을 정확히 해석하기 어렵다. 따라서 HSM의 경우 3차원 해석이 필수적이다.

또한 HSM와 같이 영구자석을 사용하는 기기의 해석은 계자 자극에 의한 유효 자속의 정확한 계산이 중요한 요소가 된다. HSM의 성능을 해석하기 위해서 집중정수회로인 등가자기회로법이 많이 사용되고 있다[1]. 하지만 이 방법은 HSM의 자속이 축 방향과 방사방향으로 흐르는 것을 표현하기 힘들고 치의 자기포화 특성을 분포적으로 표현 할 수 없기 때문에 명확한 등가회로를 얻기는 힘들다.

본 논문에서는 사다리꼴 요소를 사용한 3D 등가자기회로방법(Equivalent Magnetic Circuit Network Method : EMCNM)을 사용하여 HSM을 정확하고 효과적으로 해석하였다. 기존의 방법은 선형기인 경우에 사각형 형상을 사용하였고, 회전기인 경우는 부채꼴 형상을 사용하였다. 그러나 이러한 방법을 HSM과 같은 복잡한 기계에 적용하게 되면 퍼미언스를 구할 때 큰 오차를 수반하게 된다. 따라서 이러한 약점을 보완하기 위해서 사다리꼴 형상을 사용하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문에서 해석한 HSM의 구조이다. HSM은 6개의 치로서 구성된 8개의 폴을 가진 고정자와 50개의 치를 가진 회전자 그리고 회전자 중앙에는 축 방향으로 자화된 영구자석을 포함하고 있는 구조로 되어있다. 또한 회전자는 N극과 S극의 치가 반 피치 어긋나 있는 구조로 되어있다. HSM은 고정자에 홀수극과 짝수극에 권선이 감겨 각각 A상, B상으로 통전 되는 2상 스테핑 모터이다.

##### 2.2 3차원 등가자기회로방법

3차원 등가자기회로방법은 기존의 자기회로법에 수치적 기법을 도입하여 퍼미언스를 분포적인 정수회로를 사용하여 3차원 형상을 비교적 쉽게 해석할 수 있는 방법이다.

그림 2는 등가자기회로망의 기본적인 구조와 자속 흐름도이다. 3차원 등가자기회로망은 임의의 한 요소의 중앙과 인접하고 있는 요소의 중앙을 연결하여 망을 만든다. 이 때 임의의 한 요소의 중앙과 인접한 요소의 중앙은 자기저항의 역수인 퍼미언스와 기자력으로 연결된다.  $\theta$ 방향으로의 자속은 임의의 한 요소  $(i, j, k)$ 와 인접한 요소  $(i, j-1, k)$  사이에 자위가 각각  $U_{i,j,k}$ ,  $U_{i,j-1,k}$  일 때, 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다[3], [4].

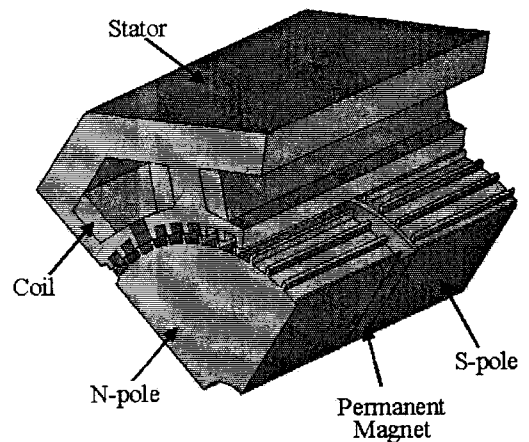


그림 1. 하이브리드형 스테핑 모터의 구조

$$\Phi_{i,j,k}^{\theta} = P_{i,j,k}^{\theta} (U_{i,j,k} - U_{i,j-1,k} + E_{i,j,k}^{\theta}) \quad (1)$$

$$B_{i,j,k}^{\theta} = \Phi_{i,j,k}^{\theta} / S_{i,j,k}^{\theta} \quad (2)$$

- $P_{i,j,k}^{\theta}$  :  $\theta$ 방향 두 절점사이의 퍼미언스  
 $U_{i,j,k}$  : 요소  $(i, j, k)$ 에서의 자기스칼라 포텐셜  
 $E_{i,j,k}^{\theta}$  : 소스 내부에 해당하는 영구자석과 전기자 권선의 기자력  
 $S_{i,j,k}^{\theta}$  :  $\theta$ 방향의 두 요소 사이의 단면적

임의의 요소에서 자속은 연속이기 때문에 모든 절점에 대해 다음 식 (3)과 같은 대수 방정식인 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$[P]_{n \times n} \{U\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1} \quad (3)$$

- $[P]$  : 퍼미언스 계수 행렬  
 $\{U\}$  : 절점 자위 행렬  
 $\{F\}$  : 구동벡터 행렬(=MMF  $\times$  Permeance)

### 2.3 퍼미언스 계산

HSM을 해석하는 데는 정확한 퍼미언스 계산이 중요하다. 기존의 3D EMCNM에서는 선형기인 경우에 사각형 형상 사용하고 회전기인 경우에 부채꼴 형상을 사용하였다. 그러나 이 형상들은 특정 기기에 한정이 되어 있을 뿐 아니라 HSM같이 복잡한 기기는 큰 오차를 수반하게 된다. 따라서 본 논문에서는 선형기와 회전기를 모두 해석할 수 있고 복잡한 기기도 큰 오차를 수반하지 않는 사다리꼴 형상을 사용하였다.

그림 3은 사다리꼴 형상을 나타내고 있고 식(4), (5), (6)는 가 방향의 퍼미언스를 나타내고 있다.

$$P_x = \mu \frac{lh}{w_2 - w_1} \ln(w_2 / w_1) \quad (4)$$

$$P_y = \mu \frac{l(w_2 - w_1)}{h \ln(w_2 / w_1)} \quad (5)$$

$$P_z = \mu \frac{(w_1 + w_2)h}{2l} \quad (6)$$

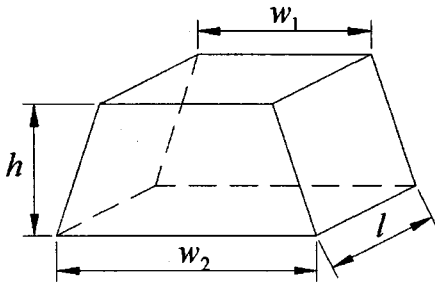


그림 2. 퍼미언스 계산을 위한 사다리꼴 요소

### 2.4 비선형 해석

그림 3은 비선형 해석 알고리즘을 나타내고 있다. 비선형 해석 방법은 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 직접 수렴 판정법을 사용하여 비선형 해석을 하였다. 직접 수렴 판정법 중에서도 자위를 사용하여 판정하는 방법과 자속 밀도를 사용하여 판정하는 방법이 있다. 식 (7)과 식 (8)은 각각 자위와 자속 밀도를 사용하여 판정하는 식을 나타내고 있다.

$$|U^{k+1} - U^k| < ERR \quad (7)$$

$$|B^{k+1} - B^k| < ERR \quad (8)$$

- $U^k$  : k번 째 해석시 모든 요소의 자위의 합  
 $B^k$  : k번 째 해석시 모든 요소의 자속 밀도의 합

### 2.5 해석 및 결과

그림 4는 HSM의 요소 분할도를 나타내고 있다. 요소의 개수는 75600개이고, 모터의 주기성을 고려하여  $B_r, 180^\circ$  모델로 해석하였다.

그림 5은 HSM의 자속 밀도 분포 특성을 나타내고 있다. 고정자의 치와 회전자의 치가 정렬된 부분에서 자속밀도가 크게 나타나고 있다.

그림 6과 7은 각각 공극에서의 자속 밀도 ( $B_r, B_\theta$ ) 분포를 나타내고 있다.

그림 8은 맥스웰 응력법을 사용해서 HSM의 코깅 토크의 특성을 나타내고 있다. 코깅 토크의 주기는  $1.8^\circ$ 로서 이론치와 잘 일치하고 있으며 최대 토크는 0.32(Nm)이다.

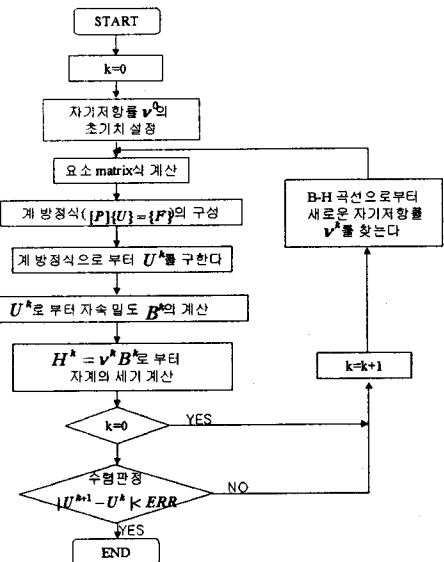


그림 3. 직접 수렴 판정법 비선형 해석 알고리즘

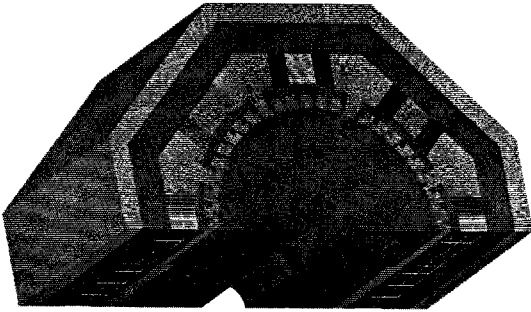


그림 4. 하이브리드 스텝핑 모터의 요소 분할도

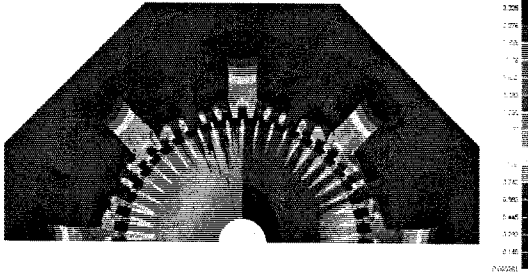


그림 5. 자속 밀도 특성

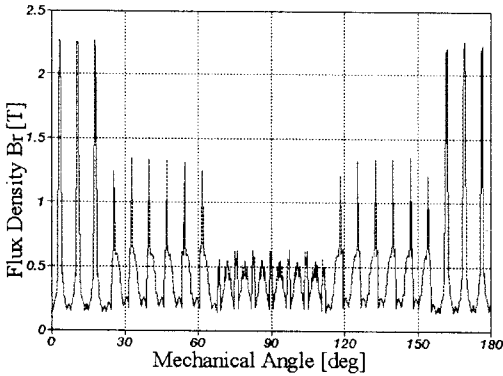


그림 6. 공극 자속에서 자속 밀도 분포 ( $B_r$ )

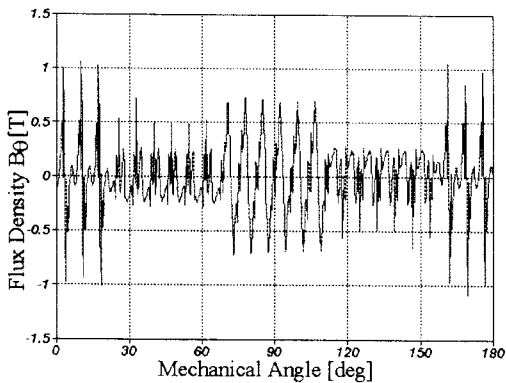


그림 7. 공극 자속에서 자속 밀도 분포 ( $B_\theta$ )

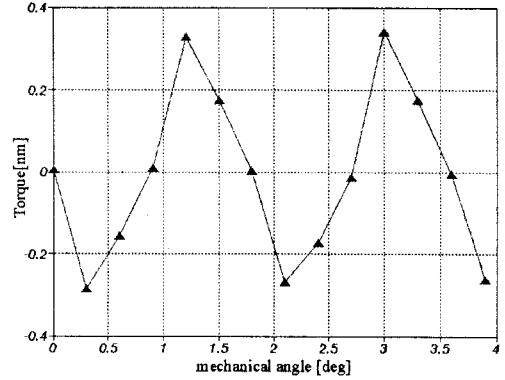


그림 8. 코깅 토크 특성

### 3. 결 론

본 논문은 HSM를 3D EMCNM으로 비선형 해석하였다. 퍼미언스 계산을 위해서 부채꼴 요소를 사용하는 경우 HSM의 작은 치와 복잡한 형상 때문에 큰 오차를 수반하게 되기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해서 사다리꼴 형상을 사용하였고, 또한 HSM은 구조상 포화가 일어나기 쉽기 때문에 비선형 해석을 수행하였으며 공극 자속밀도, 코깅 토크 특성을 분석하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] C. Cuo, "Magnetic circuit and formulation of torque for single-stack permanent magnet and reluctance step motors," Theory and Application of Motors, West Publishing Co. 1974.
- [2] Takashi Kenjo, Akira Sugawara, "Stepping Motor Their Microprocessor Controls", 2nd, 1992.
- [3] 허 진, "3차원 정자계 해석을 위한 등가자기회로방법에 관한 연구," 박사학위 논문, 한양대학교, 1998.
- [4] 임달호, 홍정표, "3차원 등가자기회로방법에 의한 영구자석 모터의 자계해석," 대한전기학회논문지, vol. 43, no. 9, 1432-1439, 1994.