

### 3차원 등가자기회로방법을 이용한 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 특성 비교

장기봉\*, 진창성\*, 이 주\*, 성하경\*\*, 임태빈\*\*  
 한양대학교 전기공학과\*, 전자부품 연구원 정밀기기연구센터\*\*

#### Characteristic Comparison of 2-Phase Hybrid Stepping Motor using 3D Equivalent Magnetic Circuit Network Method

Ki Bong Jang\*, Chang Sung Jin\*, Ju Lee\*, Ha Kyung Sung\*\*, Tae Bin Im\*\*  
 Dept. of Electrical Engineering, in Hanyang Univ.\*

Div. of Mechatronics Research Center in Korea Electronics Technology institute\*\*

**Abstract** - Hybrid stepping motor(HSM) has very small airgap and teeth. These bring out the saturation in the teeth easily. In this paper, the 3 dimension equivalent magnetic circuit network method (EMCNM) based on the trapezoidal element is used for the accurate and efficient nonlinear analysis of HSM, and the validity of the analysis results by the proposed method is verified by comparison with the experimental results.

#### 1. 서 론

HSM는 회전자에 영구자석을 가지고 있고 고정자와 회전자가 돌극 구조로 되어있어 고 토크와 정확한 위치를 판단 할 수 있기 때문에 산업에서 많이 이용되고 있다. HSM는 작은 치와 작은 공극을 가지고 있기 때문에 치에서 포화 현상이 쉽게 일어난다. 따라서 HSM의 설계 및 해석 과정에서 비선형 특성해석을 해야만 한다. HSM를 해석하기 위하여 일반적으로 널리 사용된 자기회로법은 임의로 자로를 가정하고 집중정수 회로를 사용하여 간단하게 해석적으로 특성을 분석하고 설계에 적용되었다. 하지만 자기회로법은 집중정수를 사용함으로써 축 방향의 자속과 방사 방향의 자속에 대한 정수를 정확하게 얻을 수 없기 때문에 해석 결과의 오차가 매우 커질 수밖에 없을 뿐 아니라 포화현상을 고려하기에 적당치 않다. 게다가 집중정수 회로를 사용하기 때문에 분포적인 특성을 파악 할 수 없다. 그 결과 유한요소법과 같은 분포적인 특성을 해석할 수 있는 3차원 해석법이 필요하게 되었다. 3차원 유한요소법은 컴퓨터의 메모리 양과 계산 시간이 많이 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 HSM를 정확하고 효율적으로 해석할 수 있는 3차원 등가자기회로방법(EMCNM)을 이용하여 해석하였다. 기존에 3D EMCNM은 선형기의 경우에 사각형 요소를 사용하였고, 회전기의 경우에는 부채꼴 요소를 사용하였다. 그러나 이와 같은 요소는 HSM과 같은 복잡한 모터를 해석할 때 큰 오차를 수반하기 때문에 적당하지 않다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해서 새로운 요소인 사다리꼴 요소를 사용하여 해석하였다.

사다리꼴 요소는 복잡한 회전기뿐 아니라 선형기에도 적용할 수 있어 회전기와 선형기를 다른 형상을 사용하여 메쉬하는 번거로움을 피할 수 있다. 사다리꼴 형상을 사용하여 디텐트 토크, 홀딩 토크를 해석하고, 실험과 비교하여 해석에 대한 타당성을 입증하였다.

#### 2. 해석 모델과 3D EMCNM

##### 2.1 해석 모델과 제원

그림 1은 2상 HSM의 기본 구조를 나타내고 있다. 고정자에는 6개의 치를 가진 폴이 8개가 있고, 회전자에는 50개의 치가 있다. 회전자는 N극 폴과 S극 폴로

나누어져 있으며 그 사이에는 축 방향으로 자화된 영구 자석이 있다. 또한 N극 폴과 S극 폴의 치가 반 피치 어긋나 있다.

##### 2.2 3D EMCNM

3D EMCNM은 기계의 3차원 형상을 분포적으로 쉽게 해석하는 방법중의 하나이다. 이 방법은 기존에 자기회로법에 수치적인 해석적인 방법을 더한 해석법이다. 그림 2는 등가자기회로망의 기본 구성도와 자속의 흐름도이다. 식 (1), (2), (3)와 같이 맥스웰 방정식으로 부터 유도된 EMCN은 자기 저항과 기자력(MMF)로 이루어져 있다.

$$\oint H \cdot dL = \int_s J \cdot dS \quad (1)$$

$$\oint B \cdot dS = 0 \quad (2)$$

$$\Phi = P \cdot F \quad (3)$$

여기서  $H, J, B, \Phi, P, F$ 는 각각 자계, 전류 밀도, 자속 밀도, 자속, 퍼미언스 그리고 기자력을 나타낸다.

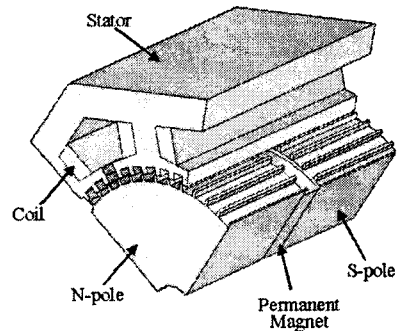


그림 1 2상 HSM의 기본 구조

표 1 해석 모델의 제원

Stator	Number of Pole	8
	Number of Teeth per pole	6
	Number of Phase	2
	Turns per phase	38
Rotor	Inner diameter	13. [mm]
	Outer diameter	21. [mm]
Magnet	Number of Teeth	50
	Outer diameter	12.95. [mm]
Air gap	Permanent magnet thickness	2. [mm]
	Residual flux density	1.2. [T]
	Length	0.05. [mm]

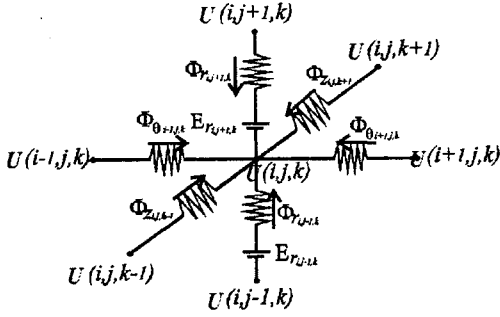


그림 2 등가자기회로망의 기본 구성도와 자속 흐름도

3D EMCN은 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. 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 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_{i,j-1,k} &= P_{i,j-1,k} (U_{i,j,k} - U_{i,j-1,k} + E_{i,j-1,k}) \quad (4) \\ B_{i,j-1,k} &= \Phi_{i,j-1,k} / S_{i,j-1,k} \quad (5) \end{aligned}$$

$U_{i,j-1,k}$  : 요소  $(i, j-1, k)$ 에서 자기스칼라 포텐셜  
 $E_{i,j-1,k}$  : 소스 내부에 해당하는 영구자석과 전기자 권선의 기자력  
 $S_{i,j,k}$  : 두 요소 사이의 단면적

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

$$[P]_{n \times n} \{U\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1} \quad (6)$$

[P] : 퍼미언스 계수 행렬  
 {U} : 절점 자위 행렬  
 {F} : 구동벡터 행렬 (=MMF × Permeance)

### 2.3 퍼미언스 계산

그림 3은 본 논문에서 EMCNM의 사다리꼴 요소를 나타내고 있다. 사다리꼴 요소의 퍼미언스 성분은 식 (7), (8), (9)와 같다.

$$P_x = \mu \frac{lh}{w_2 - w_1} \ln(w_2 / w_1) \quad (7)$$

$$P_y = \mu \frac{l(w_2 - w_1)}{h \ln(w_2 / w_1)} \quad (8)$$

$$P_z = \mu \frac{(w_1 + w_2)h}{2l} \quad (9)$$

### 2.4 부채꼴 요소와 사다리꼴 요소의 비교

그림 4의 (a)와 (b)는 각각 부채꼴 요소와 사다리꼴 요소로 메쉬한 것을 보여주고 있다. 그림 (a)에서 보는 바와 같이 부채꼴 요소는 HSM의 외형에 맞지 않기 때문에 해석할 때 계산상의 오차를 수반하게 된다. 또한 메쉬할 때 요소를 많이 나누게 되면 계산상의 오차는 줄어들게 되지만 계산 시간과 메모리 양이 많이 들게 된다. 그러나 그림 (b)에서 보는 바와 같이 HSM을 사다리

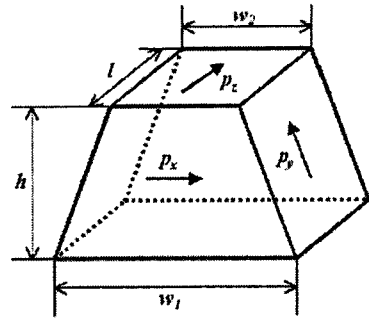
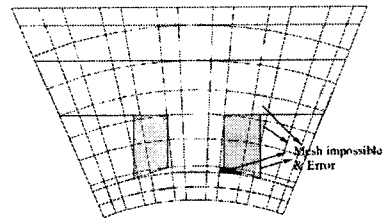
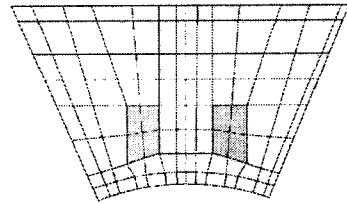


그림 3 사다리꼴 요소



(a) 부채꼴 요소 메쉬



(b) 사다리꼴 요소 메쉬

그림 4 HSM 메쉬한 요소 형상

꼴 요소로 메쉬가 쉬울 뿐 아니라 메쉬의 양도 적게 할 수 있으므로 부채꼴 요소의 단점을 보완할 수 있다.

### 3. 특성 해석과 실험과의 비교

그림 5는 사다리꼴 요소를 이용하여 HSM을 메쉬한 것을 보여주고 있다. HSM의 주기성을 고려하여 반 모델을 선택하였고, 요소 수는 약 70,000개이다.

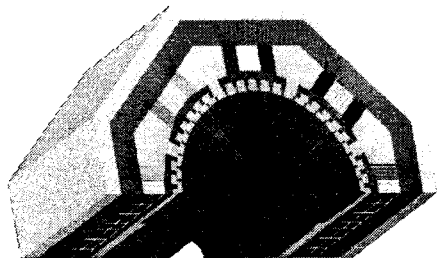


그림 5 해석 모델의 메쉬

#### 4. 결 론

본 논문에서는 3D EMCNM 이용하여 2상 HSM의 특성에 대해서 알아보았다. 3D EMCNM은 3D FEM에 비해 컴퓨터 메모리의 양과 계산 시간이 적다는 잇점이 있다. 또한 부채꼴 요소를 사용한 것보다 오차를 줄일 수 있는 사다리꼴 요소를 사용함으로써 복잡한 구조의 HSM을 해석하였다. 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 실험치와 비교하였고 비선형 해석이 실험치와 거의 일치함을 알 수 있었다.

이러한 결과로써 사다리꼴 형상을 사용한 3D EMCNM 해석이 복잡한 기계의 해석에 유용함을 입증하였다.

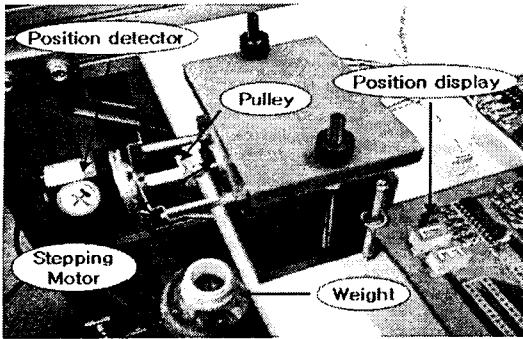


그림 6 실험 장치의 구성

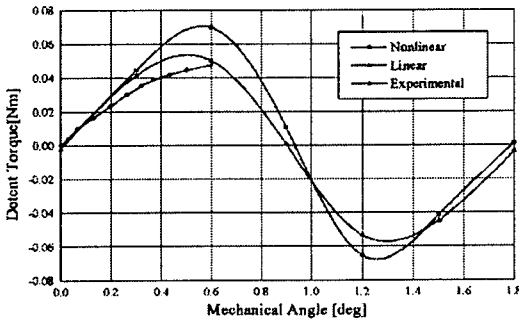


그림 7 디텐트 토크

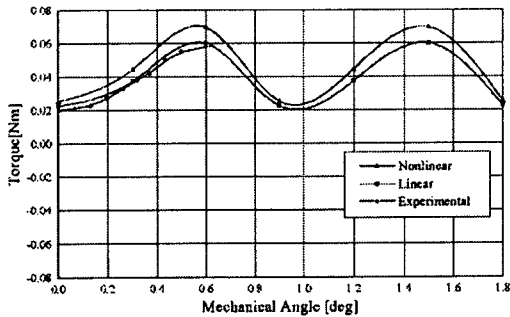


그림 8 홀딩 토크

HSM의 디텐트 토크와 홀딩 토크를 구하기 위하여 그림 6과 같이 실험 장치를 구성하였다. 이 실험 장치의 해상도는 0.036도이고 실험 장치 특성상 단지 1/4 주기만 실험이 가능하여 해석 결과와 1/4 주기만 비교하였다.

그림 7은 디텐트 토크의 선형 해석, 비선형 해석 그리고 실험 결과와의 비교를 나타내고 있다. 포화를 고려한 비선형 해석과 실험 결과가 비슷함을 알 수 있다.

그림 8은 홀딩 토크의 해석 결과와 실험 결과의 비교를 나타내고 있다. 여자된 전류는 양의 방향의 토크를 증가시키는 반면 음의 방향의 토크를 줄인다. 그림 8에서 여자된 전류는 3A 이고 이 결과 역시 비선형과 실험치가 비슷함을 알 수 있다.

디텐트 토크와 홀딩 토크의 결과로 보아 치에서 포화가 일어나는 HSM은 비선형 해석을 해야만 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원(과제번호: M1-0011-0021)지원으로 수행되었습니다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] C. Cuo, "Magnetic circuit and formulation of static torque for single-stack permanent and variable reluctance step motors," Theory and Application of Step Motors, West Publishing Co. 1974.
- [2] N. Matsui, M. Nakamura and T. Kosaka, "Instantaneous torque analysis of hybrid stepping motor," *IEEE Trans on Industry Applications*, vol. 32, no.5, pp. 1176-1182, 1996
- [3] J. Hur, Y. D. Chun, J. Lee and D. S. Hyun, "Dynamic analysis of radial force density in brushless DC Motor using 3 dimensional equivalent magnetic circuit network method," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 3142-3145, September 1998
- [4] Takahashi Kenjo, *Stepping motors and their microprocessor controls*, Oxford University Press, 1994