

3차원 등가자기회로방법을 사용한 하이브리드 스텝 모터 특성 해석

\*진창성\* . 전연도\* . 김와성\* . 김윤현\* . 이주\* . 임태빈\*\* . 성하경\*\*  
 한양대학교 전기공학과\* . 전자부품연구원 정밀기기연구센터\*\*

Analysis of HB Type Step Motor using 3D Equivalent Magnetic Circuit Network Method

\*C. S. Jin\*, Y. D. Chun\*, W. S. Kim\*, Y. H. Kim\*, J. Lee\*, T. B. Im\*\*, H. K. Sung\*\*

\*Dept. of Electrical Engineering, in Hanyang University

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

**Abstract** - The permanent magnet in hybrid step motor is magnetized to the axial direction. Accordingly, the 2D analysis method such as 2D finite element method cannot guarantee the analysis accuracy. In this paper, the characteristics of hybrid type step motor are analyzed by using 3D equivalent magnetic circuit network method(3D EMCNM). 3D EMCNM supplements magnetic equivalent circuit by numerical technique using distributive magnetic circuit parameter and 3D EMCNM is used for the accurate and efficient analysis. The validity of the analysis results is confirmed by comparing with the experimental ones.

석에 비해 미지절점수의 증가로 인한 계산시간 및 메모리 증대가 요구되며 회전자 이동시 요소를 재분할 해야 하는 등의 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 하이브리드 스텝 모터의 특성해석을 위하여 3차원 등가자기회로 방법(Equivalent Magnetic Circuit Network method; 3D EMCNM)을 사용하고자 한다[3]. 3차원 등가자기회로방법을 회전기에 적용하여 퍼미언스 계산을 하는 경우 기존의 문헌들은 주로 부채꼴 모양의 요소를 사용하고 있으나 하이브리드 스텝 모터와 같이 고정자와 회전자의 형상이 복잡할 경우 정확한 형상의 모델링이 어려울 뿐 만 아니라 실제 형상과의 차이로 인한 퍼미언스 계산시 오차를 수반하게 된다[4]. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 개선된 사다리꼴 요소를 이용하여 해석을 수행하였으며 자속밀도, 코깁토크, 토크 특성을 살펴보았다.

1. 서 론

최근 디지털 제어의 발달에 따라 펄스 신호에 의해 제어 가능한 하이브리드 스텝 모터는 디스크 드라이브나 프린터를 비롯한 컴퓨터 주변장치와 선반기계 등의 공장 자동화 및 산업용 정밀 서보장치 등의 분야에서 핵심 구동원으로서의 비중이 커지고 있으며 마이크로프로세서의 급속한 발달과 영구자석의 고성능화에 힘입어 하이브리드 스텝 모터의 고정밀화, 소형화, 고토크화가 이루어져 그 사용 범위는 더욱 증가하고 있다 [1].

하이브리드 스텝 모터는 입력펄스 신호에 의해서 권선의 여자전류를 절환하여 입력펄스 신호에 비례하여 일정한 회전을 하는 기기로서 구조적으로 공극이 작고, 고정자와 회전자의 치가 작아서, 치의 끝부분에서 포화가 발생하기 쉬우므로 스텝모터의 설계 및 자체 해석시에 철심의 비선형성을 충분히 고려해야만 한다. 또한 영구자석의 자화가 축방향이므로 해석 단면의 수직방향으로 기하학적, 물리적 성질이 변화하지 않는다는 가정하에 수행하는 2차원 해석은 불가능하며 3차원 해석이 필수적이다.

스텝 모터와 같이 영구자석을 사용하는 기기의 해석은 계자 자극에 의한 유효 자속의 정확한 계산이 중요한 요소가 된다. 이를 해석하는 방법은 주로 가정 자로를 이용한 집중정수적 방법인 퍼미언스법, 그리고 유효요소법과 같은 수치 해석적인 방법이나 나올 수 있다. 퍼미언스법은 영구자석을 포함하는 자기회로에 대해서 자속을 전류로, 기자력을 전압으로 대응시켜 자기회로를 등가적인 전기회로로 보고 해석하는 방법으로 자로를 가정하고 유효자속의 산정에 필요한 파라미터를 집중정수로 계산하므로 계산의 정확도가 떨어지며 기기의 형상과 재질에 의해 결정되는 자기저항의 계산이 복잡해지고, 자성재질의 포화를 고려하기가 어려운 단점이 있다[2].

유효요소법과 같은 수치해석법은 해석모델의 복잡한 형상 및 재질의 비선형성 등의 고려가 가능하여 고정밀도의 해를 얻을 수 있으나 3차원 해석의 경우 2차원 해

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 하이브리드 스텝 모터의 구조를 나타내고 있다. 회전자는 내부에 영구자석을 포함하고 있고 영구자석은 z축 방향으로 자화되어 있다. 회전자 치 수는 50으로 치 피치는 7.2도이다. 회전자의 N극과 S극에서 치는 서로 반피치 간격으로 어긋나 있다. 따라서 회전자의 치수는 N극, S극 모두 합하면 100개가 된다. 고정자에는 8개의 극과 극당 6개의 작은 치를 가지고 있으며 짝수극과 홀수극에는 각각 A, B 2상으로 교대로 배치되어 있다. 표 1은 하이브리드 스텝 모터의 주요 사양을 나타내고 있다.

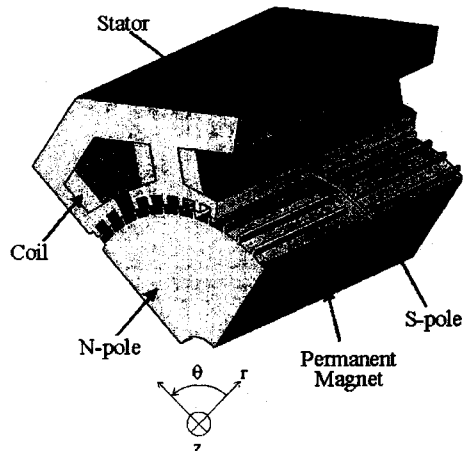


그림 1. 하이브리드형 스텝 모터의 구조

표 1. 해석모델의 제원

구분	제원	
고정자	극수	8
	극당 치수	6
	상수	2
	상당 권수	38
	내경 [mm]	13
	외경 [mm]	21
회전자	적층폭 [mm]	22
	치수	50
영구 자석 (Alnico)	외경 [mm]	12.95
	자석두께 [mm]	2
공극	잔류자속밀도 [T]	1.2
	길이 [mm]	0.05

2.2 3차원 등가자기회로망법

3차원 등가자기회로망법은 기존의 자기회로법에 수직적 기법을 도입하여 퍼미언스를 분포적인 회로정수로 사용함으로써 3차원적 형상을 비교적 쉽게 해석할 수 있는 방법이다. 본 방법에서는 분포정수로 퍼미언스를, 계변수로 자기스칼라 포텐셜을 사용하며 해석모델에 대하여 전체영역을 매질의 종류에 따라 영역을 구분한 후, 영역을 세밀히 요소분할하고, 각 요소의 중점에 절점을 잡고 이를 잇는 등가자기회로망을 구성하게 된다.

그림 2는 임의의 절점 (i,j,k)에 대해 r, z, θ 방향에 따른 3차원 등가자기회로망의 기본적인 구성을 나타내고 있다. 일반적으로 자기회로에서 자속은 자기저항의 역수인 퍼미언스와 기자력, 또는 자위와 자기스칼라 포텐셜과의 곱으로 표현되며 등가자기회로망은 해석모델의 전체영역에 대하여, 각 재질에 따라 적절한 요소로 분할한 후, 각 요소에 대하여 퍼미언스와 기자력으로 연결한다. θ 방향으로의 자속과 자속밀도는 두 절점 (i,j,k)와 (i+1,j,k)사이의 자위가 각각  $U_{i,j,k}$ ,  $U_{i+1,j,k}$  일때, 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[3].

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

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

여기서  $P_{i,j,k}^{\theta}$ 는 θ 방향 두 절점사이의 퍼미언스,  $U_{i,j,k}$ 는 절점 (i,j,k)에서의 자기스칼라 포텐셜,  $E_{i,j,k}^{\theta}$ 는 소스 내부에 해당하는 영구자석과 전기자권선의 기자력이 분포하는 치와 슬롯부의 기자력,  $S_{i,j,k}^{\theta}$ 는 θ 방향 두 절점사이의 단면적이다.

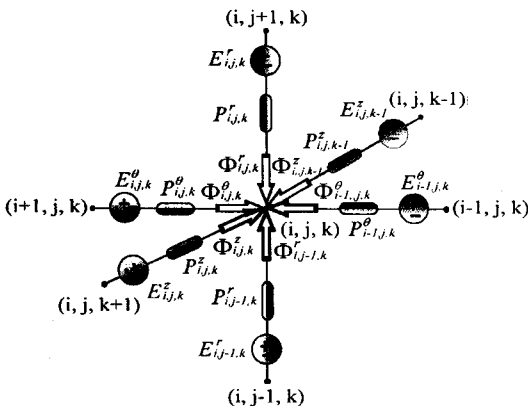


그림 2. 3차원 등가자기회로망의 구성과 자속흐름도

임의의 절점에 대하여 각 방향의 자속식을 구성한 후 해석 영역의 모든 절점에 대하여 “한 절점에서 자속의 유출입 양은 불변”이라는 자속의 연속조건을 적용하여, 조합하면 식 (3)과 같은 미지절점수 만큼의 대수방정식인 행렬식으로 표현할 수 있다.

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

여기서, [P]는 퍼미언스 계수행렬, {U}는 절점자위행렬, {f}는 구동벡터(기자력 × 퍼미언스)를 나타낸다. 퍼미언스 계수행렬 [P]는 절점수가 n이면 n×n 대칭행렬로서 주대각 성분은 구하고자 하는 절점과 인접한 6개의 절점 사이에 존재하는 퍼미언스의 합으로 구성되며 이산도(sparsity)가 3차원 유한요소법 보다 좋다. 따라서 행렬 계산시 소요되는 메모리가 감소하고 계산시간이 작은 장점을 가지고 있다[3].

2.2 퍼미언스의 계산

퍼미언스는 자기저항의 역수로 각 요소의 중앙에 위치한 절점들 사이의 자로 길이와 단면적과 재질정수에 의해 계산되는 값이다. 회전기의 경우, 기존의 등가자기회로망법은 부채꼴 요소를 주로 사용하고 있으나 형상이 복잡해질 경우 정확한 형상의 모델링이 어려울 뿐만 아니라 이로 인해 퍼미언스 계산시 오차가 크게 발생할 수 있으므로 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 논문에서는 사다리꼴 요소를 제안하였다. 그림 3은 사다리꼴 요소를 나타내고 있으며 이로부터 계산되는 퍼미언스의 x, y, z 성분은 아래 식과 같다.

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

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

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

여기서, μ는 투자율, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>는 사다리꼴 요소의 아랫변과 윗변의 길이, h는 사다리꼴 요소의 높이, l은 사다리꼴 요소의 폭이, x는 사다리꼴 요소의 미소체적까지의 길이이다.

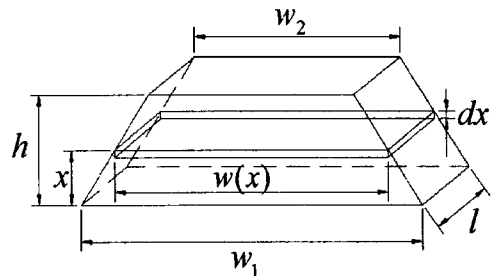


그림 3. 퍼미언스 계산을 위한 사다리꼴 요소

3. 해석 결과

그림 4는 해석 모델의 요소분할도를 나타내고 있다. 요소수 및 절점수는 218,400이다. 대칭성을 고려하여 4극분만을 해석영역으로 하였다. 그림 5는 해석모델을 7.2도 회전하였을 경우 선형해석시의 N극에서의 자속밀

도 분포를 나타내고 있고, 그림 6, 7은 7.2도 회전시 N극에서 공극 중심부분의 자속밀도( $B_r$ ,  $B_\theta$ ) 분포 특성을 나타내고 있다. 7.2도 회전시에 1번 극과 5번 극이 회전자와 정렬되므로 이 부분에서의 자속밀도 값이 정렬되지 않은 극보다 큰 것을 알 수 있다.

그림 8, 9는 맥스웰 응력법을 사용하여 구한 코깅 토크 및 토크 특성을 나타내고 있다. 코깅 토크의 주기는 1.8로서 이론치와 잘 일치하고 있으며, 최대토크값은 0.4 [Nm]이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 영구자석이 축방향으로 자화되어 있는 하이브리드 스텝모터를 3차원 등가자기회로방법을 이용하여 해석하였다. 퍼미언스 계산을 위해서 부채꼴 요소를 사용하는 경우, 하이브리드 스텝 모터와 같이 고정자와 회전자의 치 형상이 복잡한 모델은 퍼미언스의 계산시 많은 오차가 수반되므로 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 사다리꼴 요소를 이용한 해석을 수행하였으며 공극 자속밀도, 코깅토크 및 토크 특성을 분석하였다. 본 연구에서 제시된 사다리꼴 요소를 사용한 3차원 등가자기회로방법은 복잡한 형상을 가지는 기기의 3차원 해석에 유용할 것으로 사료된다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Takashi Kenjo, Akira Sugawara, "Stepping Motors And Their Microprocessor Controls". 2nd, 1992.
- [2] B. C. Cuo, "Magnetic circuit and formulation of static torque for single-stack permanent magnet and variable reluctance step motors," Theory and Application of Step Motors, West Publishing Co. 1974.
- [3] 허진, "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, pp. 1432-1439, 1994.

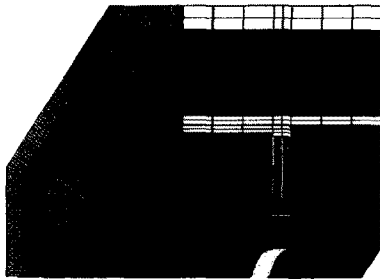


그림 4. 하이브리드 스텝 모터의 요소 분할도

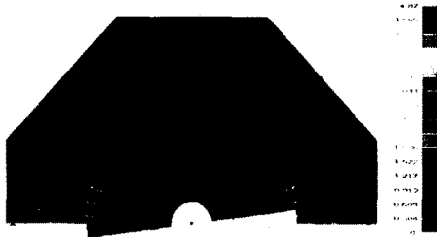


그림 5. 7.2도 회전시 자속밀도 특성

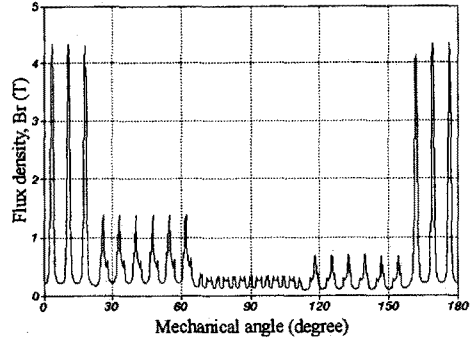


그림 6. 7.2도 회전시 공극에서의 자속밀도 분포( $B_r$ )

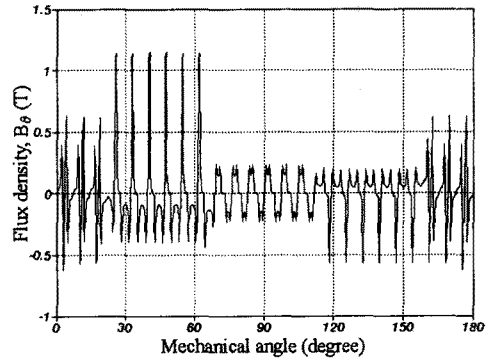


그림 7. 7.2도 회전시 공극에서의 자속밀도 분포( $B_\theta$ )

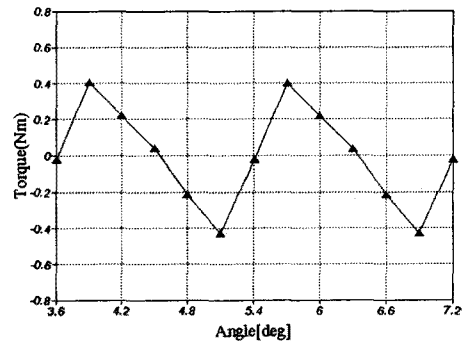


그림 8. 코깅토크 특성

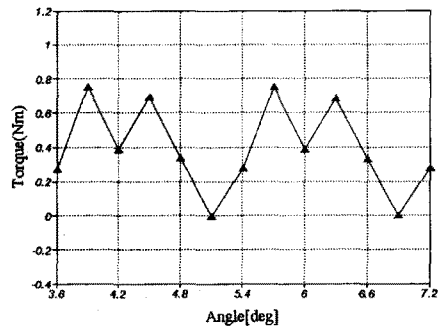


그림 9. 토크 특성