

3차원 등가자기회로망법을 이용한 초전도 전동기의 자속밀도 분포 해석

이정중, 진영우, 김영균, 조영식, 홍정표
 창원대학교 전기공학과

Flux Density Analysis of Superconducting Motor Using 3D Equivalent Magnetic Circuit Network

Jung-Jong Lee, Young-woo Jin, Young-Kyun Kim, Young-Sik Jo, Jung-Pyo Hong
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ.

Abstract - This paper deals with 3 Dimensional(3D) analysis of magnetic flux density of High Temperature Superconducting(HTS) motor using 3D Equivalent Magnetic Circuit Network (EMCN). When the Finite Element Method (FEM) is applied to an analysis of 3D models, it takes much time to the pre-process work required for 3D modeling and to solve the differential equation. Compare with 3D FEM, the result of 3D EMCN by using the magnetic resistance and magnetomotive force is exact and rapid. The accuracy of 3D EMCN is verified by comparing the 3D EMCN analysis with that of 3D FEM in HTS motor.

1. 서 론

최근 국내외적으로 초전도체를 이용한 전동기가 개발되고 있다. 일반적인 초전도 전동기의 경우 계자축과 전기자축으로 나누어지며 전기자축은 대부분 범용 전동기에 사용하는 상도전체를 사용하고, 계자축의 계자자속을 발생하는데 초전도체가 이용된다. 초전도 회전기의 설계는 HTS 나 LTS(Low Temperature Superconductor)를 사용하는 가에 따라 조금씩 차이가 있고, LTS를 이용한 발전기에 대한 연구가 진행되다가 최근에는 일본을 제외한 대부분의 국가에서 HTS를 이용한 개발이 진행되고 있다 [1].

HTS 전동기는 소형, 경량화가 가능하며, 고온초전도체의 안정성이 우수해서 수년 이내로 상용화제품이 가능할 것으로 기대되고 있다. HTS 전동기의 설계는 일반적인 모터와 달리 극저온 냉매를 사용하여 초전도체의 운전온도를 만들어야 하기 때문에 극저온 냉매의 선정이나 유입, 배출구조 및 단열구조를 포함한 열 설계가 매우 중요하며, 이러한 냉각 단열 구조 때문에 자기적인 공극의 길이가 매우 크게되므로, 계자자속이 축방향으로 저장하는 3차원적인 자장 분포를 가진다 [2]. 따라서 전동기 해석시에 많이 사용하는 2차원 전자장해석은 많은 오차를 포함하므로 3차원 해석이 필요하다.

초전도 전동기의 3차원 해석은 3D FEM을 이용하여 정확한 해석을 수행하였으나 3D FEM은 해석시간이 긴 단점을 가진다. 이러한 해석시간을 줄이기 위한 방법으로 3D EMCN이 소개된바 있다 [3]-[4]. 3D EMCN은 등가자기 회로망을 이용하므로 3D FEM에 비하여 짧은 해석시간에 정확한 해를 구할 수 있다. 본 논문에서는 동일한 모델을 대상으로 3D FEM과 3D EMCN의 해석 결과를 비교 검토하여 3D EMCN을 이용한 초전도 전동기의 해석에 대한 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 고온초전도 모터의 단면을 나타내었다. 4극으로 정격출력 100hp으로 설계되었다. 계자 마그네트는 총 1075턴으로 구성된 4개의 더블 팬케이크 코일로 구성되며, 턴당 정격전류는 45.45A이다. 최외각 쉴드(shield)는 철심재질을 사용하였고, 나머지 부분은 비투자율이 공기와 비슷한 재질을 사용하였다. 본 논문에서는 계자 자속의 영향을 알아보기 위하여 그림 2와 같은 해석 해석모델을 설정하였다. 해석 모델은 전체 해석영역의 1/4을 설정하였으며, 자속이 경계면에 수직인 성분만 있는 경계조건을 설정하였다. 초전도 마그네트의 자속 성분을 알아보기 위해서 전기자 권선의 영향은 고려하지 않았다. 또한, 해석모델은 실제 전동기의 Z축 방향길이의 1/2을 모델링 하였다. HTS 전동기의 권선부분의 모델링은 z축 방향의 직선부의 길이가 125mm, 엔드링의 곡면이 75mm로 설정되었으며 z축 방향의 누설 성분을 고려하여 z축 방향의 공기층은 200mm로 설정하였다.

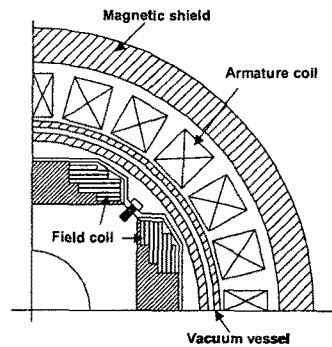


그림 1. HTS 전동기의 단면도

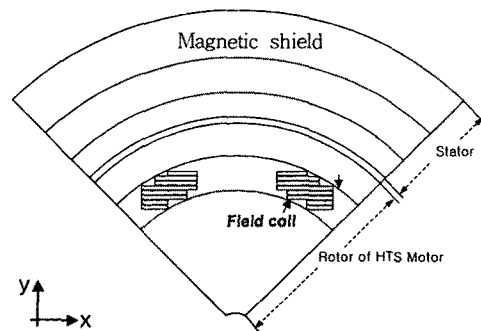


그림 2. HTS 전동기 해석 모델

표 1. 100hp HTS 전동기의 제원 및 사양

정격 출력	100 (hp)	정격 속도	1800 (rpm)
극수	4	정격 전류	45.45 (A)
임계 전류	40 (A) (77 (k))	운전 온도	30 (K)

2.2 해석 방법

EMCN에서는 해석모델을 전체영역에 대하여 적절한 요소로 분할하여 육면체로 구성된 등가자기회로망을 구성한다. 그림 3은 해석영역을 퍼미언스와, 기자력으로 등가자기회로망을 구성하여 기본적인 등가자기회로망의 자속흐름도를 임의의 절점 (i, j, k) 에 대하여 나타내었다. 수식(1)은 자기회로에서 기자력 평행의 법칙을 나타내었다. 수식(2)는 그림 3에서와 같이 두 절점 (i, j, k) 와 (i_1, j_1, k_1) 사이의 자기퍼미언스와 두 절점 사이의 기자력을 이용하여 각 영역의 자속량을 나타낸 절점방정식이다. 식(3)은 식(1)과 식(2)를 이용하여 임의의 절점 (i, j, k) 에 대하여 (i_1, j_1, k_1) 의 방향으로 흐르는 자속밀도를 유도한 식이다.

$$F = \Phi \cdot R \quad (1)$$

$$\Phi_{1,i,j,k} = P_{1,i,j,k} (F_{i,j,k} - F_{i_1,j_1,k_1} + E_{1,i,j,k}) \quad (2)$$

$$B_{1,i,j,k} = \frac{\Phi_{1,i,j,k}}{A_{1,i,j,k}} \quad (3)$$

여기서, F 는 기자력, Φ 는 자속, R 는 자기저항, $\Phi_{1,i,j,k}$ 는 절점 (i, j, k) 와 (i_1, j_1, k_1) 사이의 자속을 나타내며, $F_{i,j,k}$ 는 절점 (i, j, k) 의 기자력에 해당하는 미지값, $P_{1,i,j,k}$ 는 (i, j, k) 에서 (i_1, j_1, k_1) 방향으로의 두 절점사이의 퍼미언스, $A_{1,i,j,k}$ 는 (i, j, k) 에서 (i_1, j_1, k_1) 방향으로의 두 절점사이의 단면적, $E_{1,i,j,k}$ 는 외부에서 인가되는 권선의 기자력 또는 영구자석의 기자력 값이다.

해석 영역의 모든 절점에 대하여 한 절점에서의 자속의 유출입량은 불변이라는 자속의 연속조건을 적용하여 조합함으로써 식(5)와 같은 계수행렬을 구성하게 된다.

$$\sum_{n=1}^6 \Phi_n = \Phi_{1,i,j,k} + \Phi_{2,i,j,k} + \Phi_{3,i,j,k} + \Phi_{4,i,j,k} + \Phi_{5,i,j,k} + \Phi_{6,i,j,k} = 0 \quad (4)$$

$$[P]_{n \times n} \{U\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1} \quad (5)$$

여기서, $[P]$ 는 퍼미언스 계수행렬, $\{U\}$ 는 절점기자력 행렬, $\{F\}$ 는 구동벡터를 나타내었다.

위와 같이 구성된 식(5)의 계수행렬에 경계조건을 부여한 뒤 미지절점의 기자력값을 구하여 절점방정식으로 부터 해석영역 각 부분의 자속과 자속밀도를 계산한다.

2.3 요소 분할도 및 경계조건

그림 4는 해석 모델의 요소 분할도를 나타내었다. 해석 모델의 전체 요소 개수는 57888개, 전체 절점 개수는 62086개이다. 해석모델의 단면은 전체단면의 1/4부분으로 경계면에는 자속이 경계면에 수직인 성분만 있는 경계조건을 설정하였다.

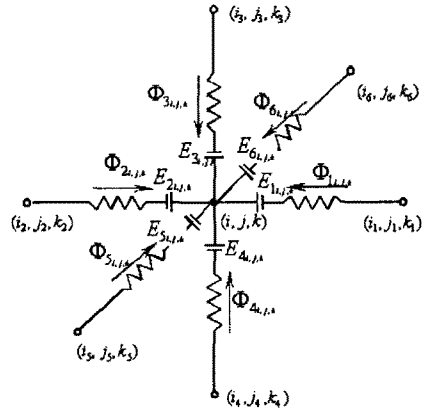


그림 3. EMCN의 구성 및 자속의 흐름도

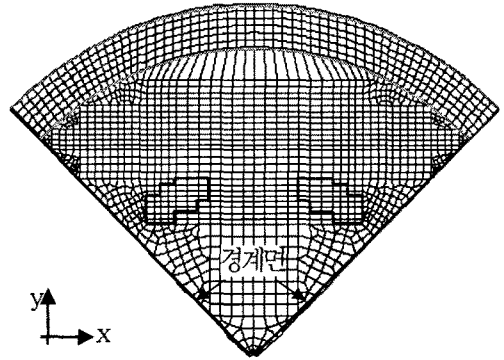


그림 4. 요소 분할도 (축방향 길이=400mm)

2.3 해석 결과

그림 5~7은 3D EMCN을 통해 산정한 자속의 흐름도와 공극에서의 3차원적인 자속밀도 분포를 나타내었다. 그림5는 z축 좌표 60mm인 x-y평면에서의 B_x, B_y 성분을 이용한 자속 밀도의 벡터분포를 나타내었다. 그림 6은 $y=147mm$ 로 동일한 위치에서 x-z평면상의 x 방향의 자속밀도인 B_x 성분의 3차원적인 공극자속 밀도 분포를 나타내었으며, 그림 7은 그림 6에서와 동일한 평면에서 y방향의 자속밀도인 B_y 성분을 나타내었다. 그림 5와 6에서 알 수 있듯이 HTS 전동기의 공극 자속밀도 분포는 z축 방향에 따라 저감하는 3차원적인 분포를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 8~10에는 3D EMCN과 3D FEM의 해석결과를 비교한 것이다. 그림 8에서는 3D EMCN과 3D FEM의 해석결과를 $y=147mm, z=60mm$ 에서 x축의 변화에 따른 B_x 성분의 자속 밀도를 비교하였고, 그림 9에는 그림 8과 동일한 좌표에서 B_y 성분의 자속 밀도를 비교하였다. 그림 10은 $x=3mm, y=147mm$ 에서 z축의 변화에 따른 B_z 성분의 자속 밀도를 비교하였다. 그림 8~10의 공극자속 밀도에 대한 3D EMCN의 해석 결과와 3D FEM의 해석 결과는 서로 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 3D EMCN과 3D FEM에서 계산된 자기저장 에너지는 각각 226J, 223J로서 비슷한 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과에서 3D EMCN의 해석 결과의 정확도를 3D FEM의 해석 결과와 비교하여 검증하였다.

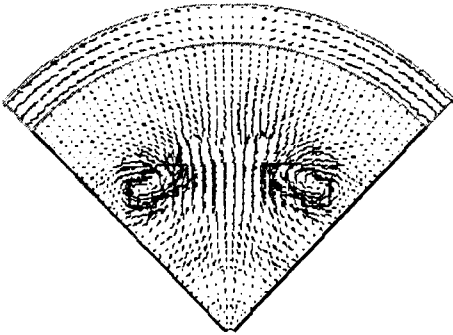


그림 5. 자속 흐름도

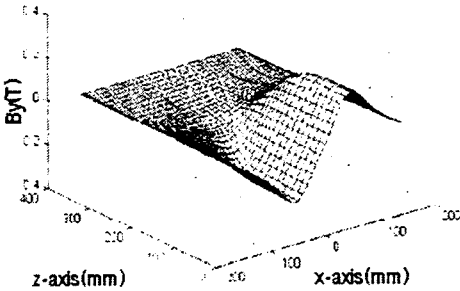


그림 6. $y = 147\text{mm}$ 에서 B_x 성분

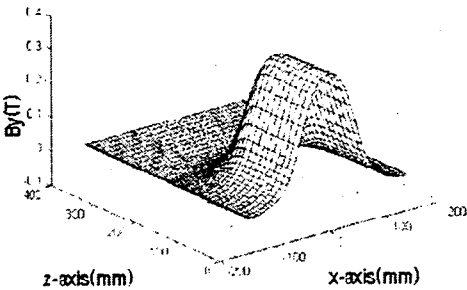


그림 7. $y = 147\text{mm}$ 에서 B_y 성분

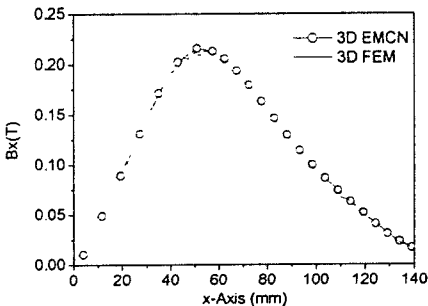


그림 8. x축 위치에 따른 B_x 성분
($y = 147\text{mm}, z = 60\text{mm}$)

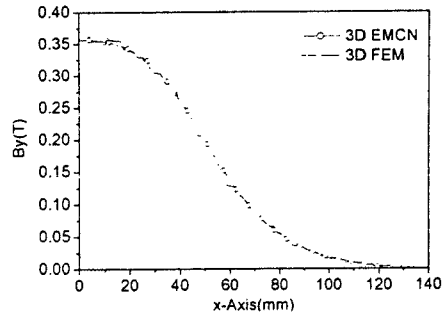


그림 9. x축 위치에 따른 B_y 성분
($y = 147\text{mm}, z = 60\text{mm}$)

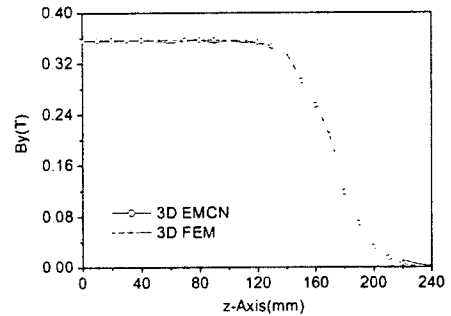


그림 10. z축 위치에 따른 B_y 성분
($x = 3\text{mm}, y = 147\text{mm}$)

3. 결 론

본 논문에서는 HTS 전동기를 대상으로 3D EMCN을 이용한 3차원 해석을 수행하여 3D FEM 해석결과와 비교 검토하였다. 각각의 해석 결과에서 자속의 흐름, 공극에서의 자속밀도 및 자기저장에너지의 값이 서로 일치함을 확인하였다. 따라서, HTS 전동기의 해석에 많은 해석 시간을 필요로 하는 3D FEM을 대신하여 짧은 해석시간으로 정확한 해를 도출하는데 3D EMCN을 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Tixador and H. Daffix, "Conceptual Design of an Electrical Machine with Both Low and High T_c Superconductors", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 7, No. 4, pp. 3858-3865, 1997
- [2] Y.S. Jo, et al., "Advanced Design Approach to the High Temperature Superconducting Magnet", Cryogenic, Vol. , pp. 27-33, 2001
- [3] J. Hur, I. S. Jung and D. S. Hyun, "Lateral Characteristic Analysis of PMLSM Considering Overhang Effect by 3 Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network Method," IEEE Trans. on Magn., Vol. 34, No. 5, pp. 3528-3531, 1998.
- [4] 임달호, 홍정표, "3차원 등가자기회로방법에 의한 영구자석 모터의 자계해석", 대한전기학회논문지, Vol.43, No.9, pp 1432-1439, 1994.