

해석적 방법을 이용한 초전도 회전기의 3차원 자기 해석

조영식, 서무교, 백승규, 김석환, 손명환, 권영길, 이정종*, 홍정표*
한국전기연구원, 창원대학교*

3D Magnetic Field Analysis of Superconducting Rotary Machine by Using Analytical Method

Young-Sik Jo, Moo-Gyo Seo, Sung-Kyu Baik, Seog-Whan Kim, Myung-Whan Sohn,
Young-Kil Kwon, Jung-Jong Lee*, Jung-Pyo Hong*
Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon National University*

Abstract - A Superconducting Rotary Machine (SRM) is characterized by an air-cored machine with its rotor iron and stator iron teeth removed. For this reason, the SRM is featured by 3D magnetic flux distribution, which decreases in the direction of axis. Therefore, 3D magnetic field analysis method is required to know about characteristic of magnetic field distribution of SRM. In this paper, 3D flux distribution of SRM is calculation by using analytical method. The magnetic field distribution due to the field coils use of the Biot-Savart equation. The magnetic core is represented by magnetic surface polarities. The paper describes the combined use of above methods for the total computation, and compares analytical method and 3D FEM(Finite Element Method) results.

1. 서 론

초전도 회전기의 연구 개발은, 초기에는 저온초전도체를 이용한 저온초전도 발전기에서 최근 고온초전도 전동기로 진행되고 있다. 국내에서는 1992년 서울대학교의 20kVA급 저온초전도 발전기의 연구를 시작으로 현재는 한국전기연구원에서 100hp급의 고온초전도 전동기를 개발하고 있다. 최근 미국의 AMSC (American superconductor Corporation)에서는 미군함의 추진선으로 사용할 계획으로 25MVA급 고온초전도 전동기를 개발하고 있다 [1]-[3].

대부분의 초전도 회전기는 최외각의 자기철드를 제외하고는 자성체를 사용하지 않고 자기적인 공극의 길이가 매우 커서 축 방향으로 자속밀도가 저감하는 3차원적인 자속분포 특성을 가지고 있다. 따라서 초전도 회전기의 정확한 자장분포 특성을 예측하기 위해서는 3차원 자기 해석이 필수적이다 [4]-[5].

일반적으로 전기기기에서 자계를 분포적으로 해석하는 방법은 크게 수치적인 방법과 해석적인 방법으로 나누어진다. 대부분 전자의 경우에 유한요소법 (Finite Element Method: FEM), 유한차분법(Finite Difference Method: FDM), 경계요소법(Boundary Element Method: BEM) 등이 주로 이용되고 있다. 이와 같은 수치해석 방법에 의한 자기 해석은 높은 정밀도를 갖는 해를 구할 수 있다. 특히 FEM은 해의 정확성과 유용성이 검증되어 전기기기의 해석 및 설계에 주로 사용되는 해석방법이다. 하지만 3차원 해석문제에 FEM을 적용할 경우 3차원 모델링을 위해서 요구되는 선처리 작업과 계산시간, 해석결과를 추출하는 작업에 매우 많은 시간이 소요된다. 하지만 초전도 마그네트의

경우에는 해석적으로 경계의 형상을 간단하게 모델링 할 수 있고, 자기철드를 제외한 모든 매질이 선형이어서 해석의 유도가 그다지 어렵지 않아 정밀한 해를 빠르게 계산할 수 있어서 매우 유용하다.

하지만 초전도 회전기의 경우에 유한한 길이의 자기철드를 수학적으로 모델링하여야 정확한 해석해를 구할 수 있다. 본 논문에서는 자기철드를 표면 자하로 묘사하고 코일에 의한 자계와 자하에 의한 자계를 중첩하여서 전기자 코일에 쇄교하는 자계의 분포를 구하였다. 해석적 방법에 의한 결과의 검증을 위해서 실험 및 3D 유한요소결과와 비교하였다.

2. 고온초전도 회전기

2.1 해석모델

본 논문에서는 한국전기연구원에서 개발하였던 30kVA급 저온초전도 발전기와 현재 개발 진행 중인 100hp급 고온초전도 전동기를 해석모델로 선정하였다. 그림 1은 1998년에 개발되었던 30kVA급 저온초전도 발전기의 단면을 나타낸다. 최 외각의 자기철드를 제외한 모든 구조물의 재료는 비 자성체이고 저온과 고온 덤퍼 두 개를 사용하였으며 액체 헬륨을 사용하여 운전온도를 유지하였다. 표 1은 30kVA급 저온초전도 발전기의 사양을 나타낸다.

그림 2는 고온초전도 전동기의 단면을 나타낸다. 고온초전도체를 사용하여 계자코일을 권선하였으며 최외각의 자기철드만 자성체의 재료를 사용하였다. 복사와 시변자계를 차폐하기 위해서 하나의 덤퍼를 채택하였다. 제작에 사용할 도체의 선정이나 냉각 단열구조에 대한 연구는 진행 중에 있다.

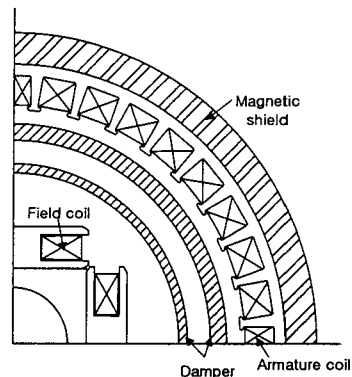


그림 1. 30kVA급 저온초전도 발전기의 단면

표 1 30kVA급 저온초전도 발전기의 사양

정격출력	30kVA	초전도체	NbTi
정격속도	1800 rpm	극수	4
슬롯수	36	입계전류	580A(5T, 4.2K)
상당턴수	72	계자턴수	532
		입력전류	200A

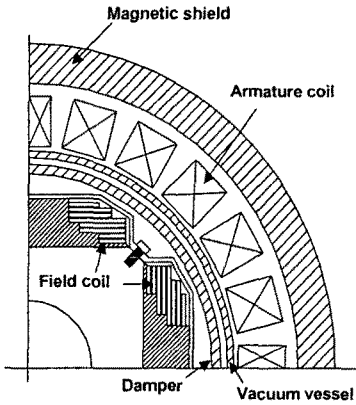
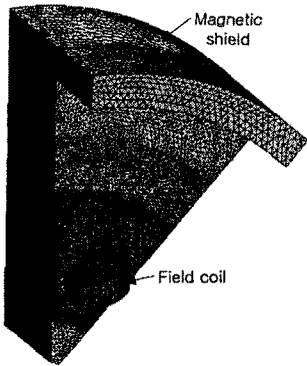
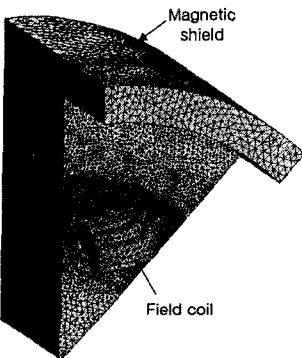


그림 2. 100hp급 고온초전도 전동기의 단면



(a) 30kVA 저온초전도 발전기



(b) 100hp 고온초전도 전동기

그림 3. 3D FEM 요소분할도

2.2 3D FEA 해석모델

3D FEM은 상용 패키지인 MagNet VI를 사용하였다. 그림 3은 (a) 30kVA 저온초전도 발전기, (b) 100hp 고온초전도 전동기의 3D FEM의 요소분할도를 나타낸다. 각 해석모델은 대칭성을 고려하여 전체의 1/16을 채택하였다.

3. 해석적 방법

3.1 기본 이론 및 계산방법

준정상 자계의 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \nabla \times H = J \quad B = \mu H \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad \nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad J = kE \quad (2)$$

만일 와전류가 유도되지 않는다면 식(2)는 무시된다. 따라서 전체 자계는 전류에 의한 자계와 자화된 철심에 의한 자계를 중첩의 원리를 이용해서 더하여 구할 수 있다. 즉

$$H = H_J + H_m \quad (3)$$

여기서, $H_m = -\nabla \phi_m$ 이다.

우변의 첫 번째 항은 Biot-Savart의 법칙을 이용해서 구할 수 있고 우변의 두 번째 항은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \phi_m) = \nabla \cdot (\mu) H_J + \mu \nabla \cdot (H_J) \quad (4)$$

즉 자기 스칼라 포텐셜은 투자율의 변화가 있는 경우에만 값을 가지므로 자기철드의 내면에만 존재함을 의미한다.

자기철드가 단순한 모양의 동심 원 형상을 가지므로 표면 자하를 수학적으로 표현할 수 있다. 실제로 표면 자하는 축 방향으로 유한하지만 무한히 긴 주기분포를 가진다고 가정하고 푸리에 급수로 표현할 수 있다. 여기서 다음 주기와의 거리는 연속해서 존재하는 다른 자기철드의 표면에 의한 영향이 매우 적어질 수 있도록 충분히 크게 하여야 한다.

전 해석영역에서 $\nabla^2 \phi = 0$ 이므로 표면자하는 경계 조건으로 계산할 수 있다. 원통좌표계에서 자기스칼라 포텐셜은 다음과 같이 표현되고

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

변수를 분리법을 이용한 라플라스 방정식의 일반해는 다음과 같이 정리된다.

$$\phi = \cos(p\theta) \cdot \left\{ \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[A I_p \left(\frac{n\pi r}{g} \right) + B K_p \left(\frac{n\pi r}{g} \right) \right] \cdot \cos \frac{n\pi}{g} z \right\} \quad (6)$$

여기서, p 는 극쌍수, g 는 축 방향 주기, r 은 반경, A 와 B 는 상수, I_p 와 K_p 는 각각 수정된 Bessel 함수의 1종, 2종 급수를 나타낸다. 자기철드의 내 반경 R_i 라 할 때, $r < R_i$ 에서는 $B = 0$ 이고, $r > R_i$ 에서는 $A = 0$ 이다.

따라서 자화된 철심에 의한 자계는

$$H_m = -\nabla\phi$$

$$= -\left(\frac{\partial\phi}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial\phi}{\partial\theta} + \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) \quad (7)$$

이다.

그러므로, 경계조건을 대입하여 라플라스 방정식 일반해의 상수를 결정하면 H_m 을 구할 수 있으므로 전체 자계의 분포를 구할 수 있다.

4. 해석결과 및 검토

4.1 저온초전도 발전기의 해석 및 실험결과 검토

그림 4는 30kVA급 저온 초전도 발전기의 반경에 따른 3D FEM과 해석적 방법에 의한 자속밀도의 반경방향 성분(B_r)을 도시한 것이다. 도시한 해석결과는 자극의 중심인 각 $\pi/2$ 에서의 값을 z 축의 변화에 따라 보여준다. 3D FEM과 해석적 방법에 의한 결과를 비교하면 반경에 관계없이 약 2%정도의 차이로 매우 정확한 해석결과라 할 수 있다.

그림 5는 저온초전도 발전기의 선간전압에 대한 3D FEM, 해석적 방법, 실험에 의한 결과를 비교한 것이다. 실험결과와 비교하여 3D FEM은 약 7%, 해석적 방법에 의한 결과는 약 4%로 차이를 보였다. 3D FEM의 경우는 요소수의 제약에 의한 오차로 보여지며, 해석적 방법의 경우는 제작에 따른 오차에 의한 차이로 판단된다.

4.2 고온초전도 전동기의 해석결과 검토

그림 6은 전기자 중심 반경 180mm에서 자극의 중심인 각 $\pi/2$ 에서의 B_r 을 z 축의 변화에 따라 해석한 결과를 도시한 것이다. 고온초전도 전동기에 대한 3D FEA의 결과와 해석적 방법에 의한 결과는 약 3%정도 차이가 있어 매우 유사하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 초전도 회전기의 자계 분포를 빠르고 정확히 계산할 수 있는 해석적 방법에 대하여 연구하였다. 해석적 방법을 사용한 계산 결과는 저온초전도 발전기의 3D FEM 결과와 실험결과와 비교 검토를 통해서 해의 정밀도를 검증할 수 있었다. 또한 현재 개발 중인 고온초전도 전동기에 적용하여 해석적 방법과 3D FEM의 결과를 비교하여도 3%정도의 적은 차이를 나타내어 이를 이용한 자계 계산의 유용성을 확인 할 수 있었다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

(참 고 문 헌)

- [1] 권영길, 조영식, "초전도 기술의 산업응용 및 연구현황", 대한전기학회 학회지, 제50권 9호, pp. 32-38, 2001
- [2] 윤용수 외 5, "고온초전도동기모터의 전기적 손실에 따른 회전자의 유로 설계에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 98-100, 1998
- [3] www.amsuper.com
- [4] Young-Sik Jo, et al., "An Approach to the Shape Optimum Design of Superconducting Synchronous Generator", IEEE Trans. on Applid. Supercon., Vol. 10, No. 1, 2000
- [5] B.Bodner, et al., "3-Dimensional Magnetic Field Calculation for an Arrangement of S.C. Coils with an Outer Magnetic Core", IEEE Trans. on Magn., Vol. 28, No., 2, 1992

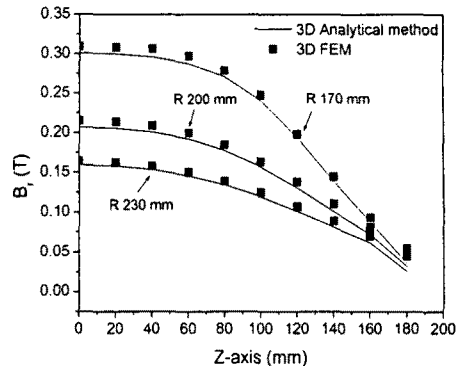


그림 4. 3D FEA와 해석적 방법에 의한 결과

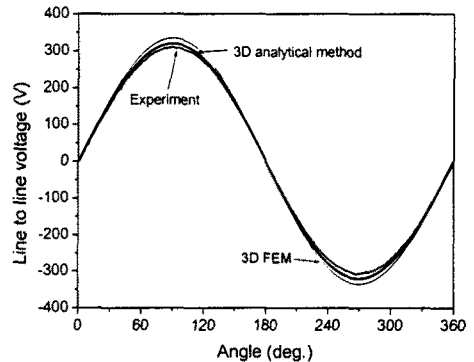


그림 5. 해석 및 실험결과

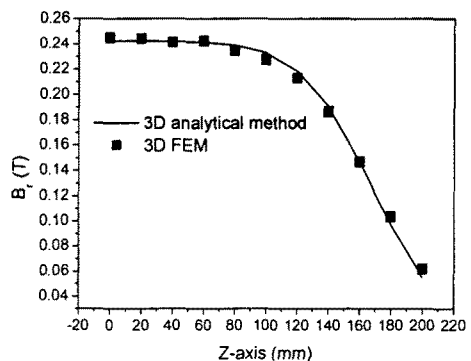


그림 6. 3D FEA와 해석적 방법에 의한 결과