

1MW 급 초전도 모터용 고온초전도 계자코일의 전자기적 특성

백승규, 손명환, 이재득, 이연용, 권영길, 문태선*, 박희주*, 김영춘*, 박관수**
 한국전기연구원 초전도응용연구그룹, 두산중공업(주) 기술연구원*, 부산대학교 전자 전기 정보 컴퓨터 공학부**

Electromagnetic Characteristics of High-temperature Superconducting Field Coil for a 1MW class Superconducting Motor

S. K. Baik, M. H. Sohn, J. D. Lee, E. Y. Lee, Y. K. Kwon, T. S. Moon*, H. J. Park*, Y. C. Kim*, G. S. Park**
 Korea Electrotechnology Research Institute, Doosan Heavy Industries & Construction Co.*, Pusan National University**

Abstract - On the contrary of a conventional motor with very narrow air-gap, it is difficult to calculate the accurate magnetic field distribution and the performance of an air-cored superconducting motor by 2 dimensional analysis, which does not use high permeability material except outer machine shield. This paper aims to do analysis of magnetic field and force distribution from the 3 dimensional modelling of a 1MW class superconducting synchronous motor. Especially, the field coil composed of Bi-2223 high-temperature superconductor and the outer machine shield are modelled by finite element analysis software according to their structures and the self-inductance and Lorentz force are calculated based on the 3 dimensional magnetic field calculation.

1. 서 론

초전도 모터나 발전기는 전기저항이 매우 적은 초전도 계자코일의 높은 전류밀도의 통전 능력으로 기존의 회전기에 사용되는 고투자율의 철심을 사용하지 않고도, 기존의 기기보다 그 크기가 1/2 내지 1/3 정도로 작으며 1 내지 2% 의 높은 효율을 가지게 된다. 이러한 공심형의 구조로 인하여 전기자코일의 리액턴스는 줄어들게 되지만, 계자코일에서 발생하는 자장이 전기자코일과 쇄교되는 정도가 기존의 기기보다 크게 줄어들게 되므로 그만큼 계자에서는 높은 암페어-턴(Ampere-turns)을 필요로 한다. 따라서 철심으로 구성된 슬롯에 삽입된 기존 기기의 계자코일보다 훨씬 높은 자기장이 코일에 직접적으로 작용하고 발생하는 로렌츠 힘(Lorentz force)이 매우 커서 전자기력에 의한 초전도코일의 소손을 방지해 줄 수 있도록 지지 구조를 설계하여야 한다. 본 논문에서는 1MW 급으로 설계된 초전도모터의 계자코일에 의한 자장을 3차원적으로 해석하여, 코일의 저장에너지와 인덕턴스를 산정하고 전자기적인 응력을 해석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석 대상 1MW 급 고온초전도 동기 모터의 구조

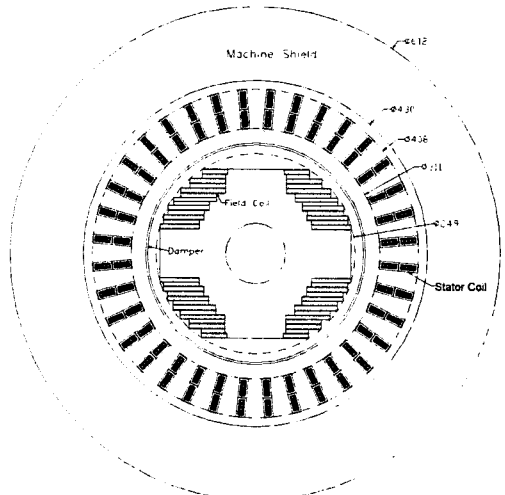
해석하고자 하는 초전도 동기 모터는 표 1과 같은 사양을 가지고 있으며 계자코일에는 Bi-2223 고온초전도 선재를 이용하여 구성이 된다. 계자코일은 내온가스를 액화하여 냉각이 되며, 약 30K 에서 초전도 상태로 150A 의 동작전류를 가지도록 설계되었다. 3차원 자장 해석의 대상이 되는 1MW 고온초전도모터의 구조를 그림 1과 2에 나타낸다. 3600rpm 의 속도로 회전하는 동기모터이므로 계자코일(Field Coil)은 2극으로 구성이 되며 레이스트랙(Racettrack) 형태의 팬케이크 코일(Pancake Coil)들이 적층되어 있는 구조를 갖는다. Bi-2223 테이프형 고온초전도 선재를 이용하여 제작이 되며, 한국을 이루는 13개의 팬케이크 코일의 턴 수와 각 부의 치수를 표 2에 보인다. 기기의 궤외각에 존재하는 기계실드(Machine Shield)는 일반 모터에 사용되는 고투자율의 구조강판으로 구성이 되며, 계자코일과 고정자코일(Stator Coil)에 의하여 발생하는 자장을 차폐시켜 주는 역할을 한다. 기계실드를 제외한 공간은 공기와 같은 투자율을 가지며, 계자코일에 150A 의 동작전류를 흘렸을 때 발생하는 정자장을 해석하고 이에 따른 전자기력과 코일의 인덕턴스 등을 계산하기로 한다.

<표 1> 해석 대상 고온초전도 동기 모터의 설계 사양

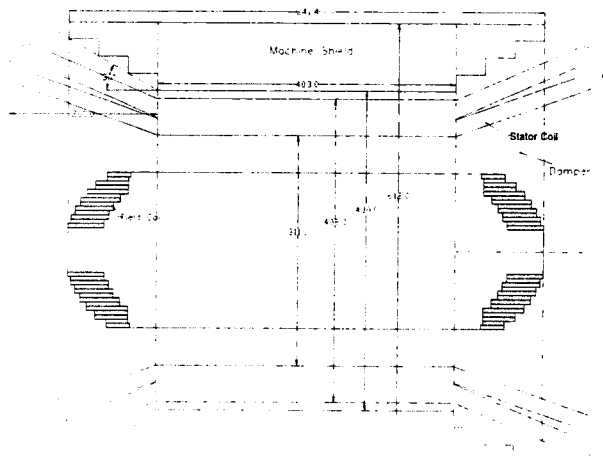
정격용량	1MW	동기리액턴스	0.13pu
정격속도	3600rpm	전기자 슬롯수	36
주파수	60Hz	전기자 코일 턴 수	48/상
극수	2극	전기자도체 전류밀도	7.8A/mm ²
정격 단자전압	3300V	전기자코일 동기인덕턴스	3.525mH/상
정격 역기전력	3263V	전기자코일 자기인덕턴스	2.35mH/상
정격 역률	0.997(lag.)	전기자코일 저항	0.094Ω/상
계자 동작전류	150A	전기자 냉각방식	수랭식
계자도체 전류밀도	115A/mm ²	계자코일 양단전압	0.1V 이하
계자코일 턴 수	3348	설계 효율	97.77%

<표 2> 고온초전도 계자코일의 극당 팬케이크 코일 구성

팬케이크 코일 이름	코일 위치	코일 턴 수	직선부 길이	곡선부 내반경	곡선부 외반경
SP#13	최상부	90	403mm	35mm	66.9mm
DP#12	상부 두 번째	82	403mm	38mm	66.9mm
DP#11	상부 세 번째	126	403mm	38mm	82.2mm
DP#10	상부 네 번째	126	403mm	38mm	82.2mm
DP#09	상부 다섯 번째	159	403mm	38mm	93.7mm
DP#08	상부 여섯 번째	127	403mm	49mm	93.7mm
DP#07	하부 일곱 번째	153	403mm	49mm	102.6mm
DP#06	하부 여섯 번째	126	403mm	58mm	102.6mm
DP#05	하부 다섯 번째	146	403mm	58mm	109.7mm
DP#04	하부 네 번째	129	403mm	64mm	109.7mm
DP#03	하부 세 번째	144	403mm	64mm	115.1mm
DP#02	하부 두 번째	127	403mm	70mm	115.1mm
DP#01	최하부	139	403mm	70mm	119.2mm



<그림 1> 해석 대상 1MW 고온초전도모터의 횡단면(mm 단위)



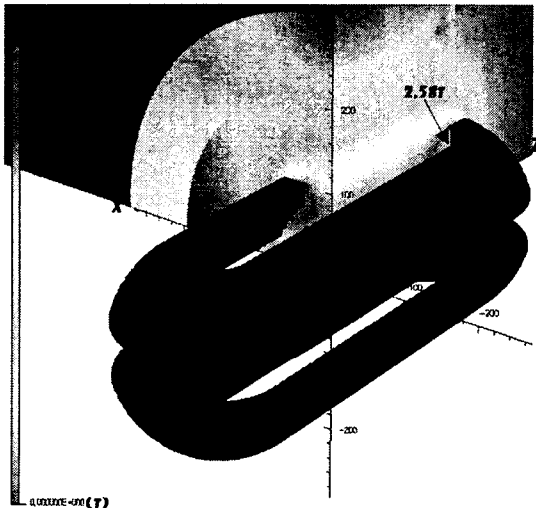
<그림 2> 해석 대상 1MW 고온초전도모터의 종단면(mm 단위)

2.2 1MW 급 고온초전도 모터의 3차원 정자장 해석

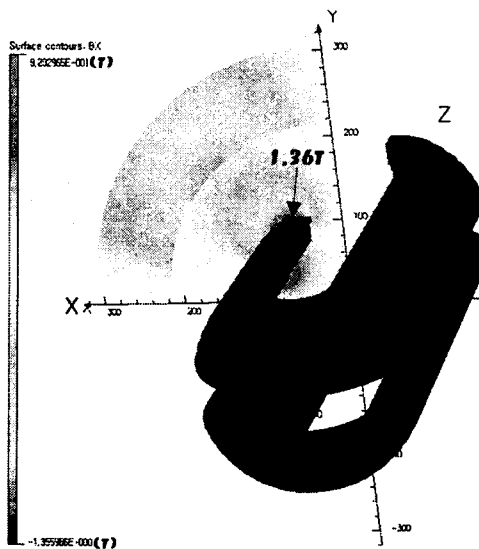
해석을 위해 사용된 유한요소해석 프로그램은 VECTOR FIELDS 사의 OPERA-3d 이며, 그림 1과 2와 같은 자성체의 기계 실드가 존재하는 구조에 대해서 계자코일에 150A 을 통전시켰을 경우 발생하는 자장을 3차원적으로 해석하였다[1]. 기계실드에 사용되는 자성체의 B-H 곡선은 일반적인 모터에 사용되는 재료의 값으로 선정하였다. 그림 3에서와 같이 자속밀도의 최대값은 2.58T 이었으며 레이스트랙형의 고온초전도 코일의 곡선부 안쪽에서 발생하였다. 발생하는 정자장에 의해서 저장되는 에너지는 식 (1)에 의해서 계산되며, 전체 영역의 1/8 인 해석 영역에서 4566J 이었다. 따라서 계자코일에 150A 을 통전하여 발생하는 전체 저장에너지는 자장의 대칭성에 의하여 해석 영역에 저장되는 에너지의 8배인 34,440J 이며 식 (2)을 이용하여 계자코일의 인덕턴스를 구하면 3.061H 이었다[2]. 또한, 해석 영역에 존재하는 계자코일의 받는 로렌츠 힘(Lorentz force)은 X 방향으로 115,273N, Y 방향으로 -82,846N, Z 방향으로 34,087N 이었다. Y 방향이 음(-)의 값을 갖는 것은 반대 측의 극에 해당하는 계자코일과의 인력에 의한 것이며, X 방향과 Z 방향의 로렌츠 힘은 코일의 바깥쪽으로 작용하게 되므로 모두 양(+)의 값을 갖는다.

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} \vec{B} \cdot \vec{H} dv \quad (1)$$

$$L = \frac{2W_H}{I^2} \quad (2)$$

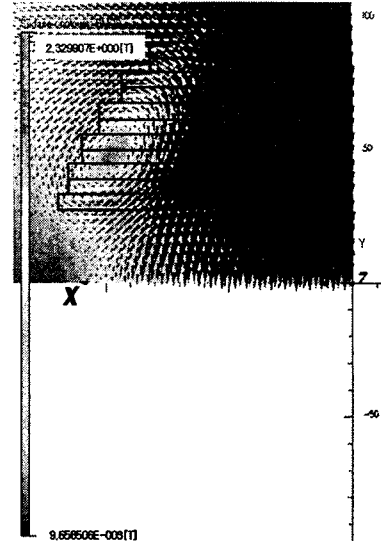


<그림 3> 계자코일 150A 여자시 자속밀도 분포



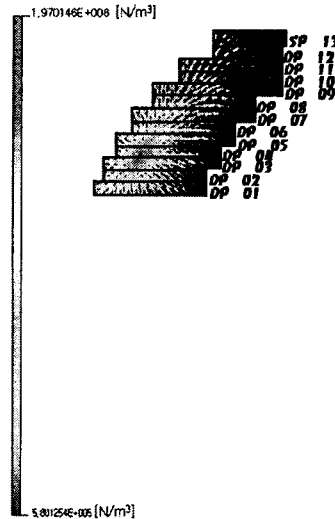
<그림 4> 계자코일 150A 여자시 X 방향 자속밀도 분포

테이프 형태의 고온초전도 선재는 선재 면에 작용하는 자장의 각도에 따라 그 임계전류가 영향을 받으며 각도가 수직에 가까울수록 임계전류가 낮아진다. 코일의 임계전류를 가장 크게 저하시키는 선재면 수직방향 자장성분은 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 코일의 직선부에서는 X 방향으로 나타나며, 그 최대값은 코일의 축방향 중심부인 Z=0 평면에서 1.36T 으로 코일의 상부에 나타난다.



<그림 5> X-Y 평면에서 계자코일에 발생하는 자장 분포(Z=0)

계자코일의 축방향 중심 위치(Z=0)에서 X-Y 평면에 의한 코일의 한쪽 횡단면(S-극)을 그림 5에 보여주며, 13개의 고온초전도 팬케이크가 적층된 공간에 그림에 표시된 벡터의 크기와 방향으로 자장이 발생한다. 발생한 자장에 의해서 코일의 단면에 로렌츠 힘의 분포는 코일의 전류밀도 \vec{J} 와 이에 작용하는 자장 \vec{B} 의 벡터적으로 볼 수 있으며 그림 6과 같이 나타난다.(여기서, \vec{J} 의 방향은 +Z 축 방향) $\vec{J} \times \vec{B}$ 의 분포를 통하여 계자코일의 한 극에 작용하는 로렌츠힘은 반대쪽 극과 인력으로 작용하는 성분과 코일의 바깥쪽으로 작용하는 성분이 지배적임을 알 수 있다.



<그림 6> X-Y 평면에서 계자코일이 받는 $\vec{J} \times \vec{B}$ 분포(Z=0)

3. 결 론

3차원 유한요소해석을 통하여 1MW 급 고온초전도 동기모터의 계자코일의 자기인덕턴스와 로렌츠 힘을 계산하였다. 고온초전도 계자코일에 작용하는 자장을 성분별로 해석하여 코일의 임계전류를 가장 크게 저하시키는 코일의 선재 면에 수직한 성분의 분포를 구할 수 있었으며, 코일 내부에 작용하는 로렌츠 힘의 분포를 알 수 있었다. 본 해석을 통하여 설계된 초전도 계자코일에는 발생하는 전자기력에 대응할 수 있는 외부 지지구조를 반드시 사용하여야 함을 알 수 있었다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술 개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

[참 고 문 헌]

- [1] "OPERA-3d Reference Manual", Version 8.0, March 2001
- [2] William H.Hayt, JR., "ENGINEERING ELECTROMAGNETICS", 5th edition, pp.297~300, 1989