

고온초전도 동기 전동기

조영식, 홍정표, 권영길*, 류강식*
 창원대학교, *한국전기연구소

High Temperature Superconducting Synchronous Motor

Young-Sik Jo, Jung-Pyo Hong, Young-Kil Kwon* and Kang-Sik Ryu*
 Changwon National University, *Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper deals with High Temperature Superconducting (HTS) Motor, which have two characteristics: the HTS magnet with iron plates as field coil, and the solid nitrogen (SN₂) as a cryogen. The HTS magnet has iron plates to achieve the maximum current-carrying capacity and the simple shape that can easily be wound and jointed. The HTS magnet with iron plates, magnet optimized current distribution, and initial magnet are presented through 3 Dimensional Finite Element Analysis (3D FEA), manufacturing and testing these magnets. And, it is employed SN₂ for keep the operating temperature of HTS synchronous motor. To make the liquid nitrogen (LN₂) of SN₂, Gas helium (GHe) passes into the heat exchanger and cools its own temperature. Two types of heat exchangers are designed and manufactured to make the SN₂, and each of the temperature characteristics is compared.

Surface Methodology)을 이용하여 최적화 하였으며, 초기 설계된 마그네트에 자성체인 규소강판을 삽입한 것의 자속밀도 분포를 3D FEA와 실험을 통해 구하여 각 각을 비교하였다. 초기 마그네트에 규소강판을 삽입한 목적은, 자성체를 사용하는 경우에 얼마나 많이 B₁을 감소시키는 역할을 하는지 확인하고 이러한 설계방법의 타당성을 검증하여 HTS 마그네트를 설계하는 새로운 방법으로 규소강판을 포함하는 것을 제안하려는 것이다. 일반적으로 사용하는 기체나 액체의 냉매보다 엔탈피가 큰 고체 질소를 사용하여 10K~15K 정도까지 냉각시킨 후에는 다른 냉매의 공급이 없이도 한계운전온도까지 수~수십 시간 유지 가능하다면 좋은 냉각 방법이 될 수 있을 것이다. LN₂를 응고시키기 위해서 나선형과 디스크형의 열 교환기를 설계, 제작하고, 두 종류의 열 교환기 성능을 평가하여 성능이 뛰어난 나선형 열교환기를 채택하였다. 회전자에서 GHe으로 응고된 질소는 극저온의 GHe 공급 없이도 코일을 15K에서 40K까지 약 2시간 30분 유지시켰다.

1. 서 론

미국은 고온초전도 전동기의 상용화를 위한 연구에 많은 노력을 기울이고 있으며, 특히 2000년에 미 해군은 1,000마력급의 고온초전도 전동기를 선박 추진용으로 장착하여 실증 실험에 성공하였으며 향후 25,000마력급의 선박 추진용 고온초전도 전동기를 목표로 활발히 연구하고 있다 [1]. 국내에서는 연세대에서 0.7마력급의 고온초전도 전동기를 제작하였으며, 최근에는 한국전기연구소에서 3마력급의 고온초전도 동기 전동기 개발을 진행하고 있다 [2].

본 연구에서는 계자로 사용하는 고온초전도 마그네트에 발생하는 B₁을 감소시킬 수 있는 방법과 고온초전도 동기용 회전자의 냉매로 액체질소를 기체 헬륨을 사용하여 응고시킨 고체질소를 사용하는 것에 대해 연구하였다.

우선, 고온초전도 마그네트에 발생하는 B₁을 감소시킬 수 있는 방법을 찾기 위하여 고온초전도 선재의 기계적 특성에 따른 I_c 특성을 고려하여 RSM(Response

2. HTS 마그네트와 회전자의 구조

2.1 HTS 마그네트 및 회전자 구조

HTS 마그네트의 설계에 앞서, HTS tape의 용력과 변형률에 따른 임계전류(I_c) 특성실험을 통하여 HTS 마그네트의 최소 굽힘반경은 15 mm, 그리고 권선 시의 최대 인장력은 10MPa로 결정하였다. HTS 마그네트의 초기 형상은 회전자에 삽입 될 것으로 기존의 직사각 형태를 피하고 계단형태를 선택하였으며, 4개의 마그네트를 사용하는 4극기이므로 마그네트의 최대 폭은 각 마그네트를 고정시킬 구조물 설치공간을 제외한 가능한 넓게 설계하였다.

그림 1은 설계된 HTS 동기 전동기의 회전자 단면을 보여준다. 액체질소 공급관은 3중관을 사용하여 최내층으로 액체질소를 공급하고, 중간층은 충전 시나 증발에 의해서 나오는 질소가스의 배출구이며, 최외층은 상온과 저온부를 열적으로 단열시키기 위한 진공층으로 구성하였다. 댄퍼는 구리를 사용하여 진공조 속에 하나를 설치하여 외부로부터 침투하는 복사열을 차단할 뿐만 아니라 외부에서 침투하는 시변자속의 침투를 막는 역할을 한다. 댄퍼이외의 회전자 부품은 비자성체인 SUS를 사용하였으며 CGR센서를 사용하여 온도특성을 파악하였다.

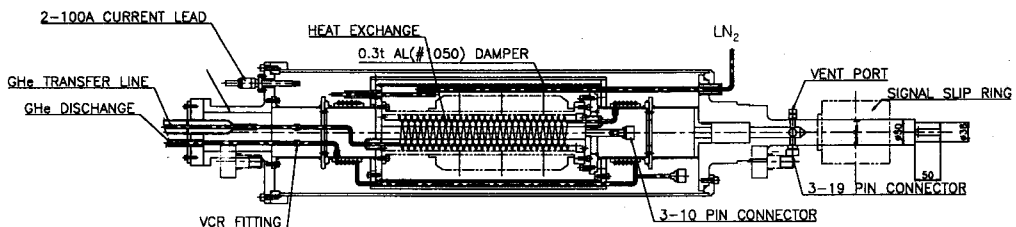


그림 1. HTS 동기 전동기의 회전자 단면

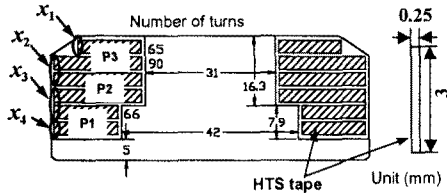


그림 2. 초기 설계된 마그네트와 HTS 테이프 도체의 단면. 그리고 최적화에 사용된 설계변수

표 1 회귀계수의 추정값

계수	추정값	계수	추정값
β_0	-1.6683×10^1	β_{44}	-2.5771×10^{-5}
β_1	1.3802×10^{-2}	β_{12}	1.9281×10^{-4}
β_2	2.3643×10^{-3}	β_{13}	1.3059×10^{-4}
β_3	2.3812×10^{-34}	β_{14}	3.3312×10^{-5}
β_4	1.5505×10^{-3}	β_{23}	4.1469×10^{-5}
β_{11}	-3.9818×10^{-4}	β_{24}	7.5000×10^{-6}
β_{22}	-9.5552×10^{-5}	β_{34}	6.0312×10^{-6}
β_{33}	-6.7333×10^{-5}		

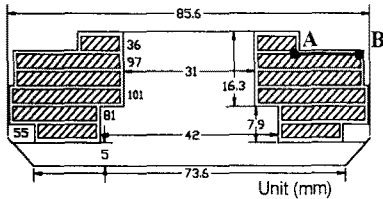


그림 3. 최적화된 마그네트의 단면

그림 2는 초기 마그네트의 단면과 사용된 HTS tape 단면의 치수를 보여준다. 여기서 P1, P2, 그리고 P3는 각 더블 팬케이크 코일의 위치를 나타내며 x_1 , x_2 , x_3 , 그리고 x_4 는 최적화에서 사용된 설계변수이다. 사용된 HTS tape 단면의 치수는 넓은 면의 길이가 3mm, 좁은면이 0.25 mm이고 마그네트 하나에 467턴이 권선되었다. 이 레이스 트랙형의 마그네트에 사용된 도체는 Ag-sheathed Bi-2223 37심으로 P1의 굵기반경은 21.5mm이고 P2와 P3는 16mm이다.

2.2 RSM을 이용한 최적화

RSM은 통계적 근사방법으로서, 설계변수와 출력사이의 관측자료로부터 설계변수와 출력사이의 관계를 근사함수로 규명한다. 일반적으로 이 근사함수는 식(1)과 같이 다항식형태로 가정하고 이 근사함수의 회귀계수는 최소자승법을 이용하여 구한다. 이러한 근사함수를 목적함수 또는 제약함수로 정의하여 최적화 알고리즘을 적용하면 최적해를 쉽게 찾을 수 있다.

본 연구에서 실험계획법의 하나인 중심합성계획을 이용하여 25번의 조합을 구하고 각 조합에 따른 B_{\perp} 에 대한 관측자료로부터 설계변수에 따른 최대 B_{\perp} 값에 대한 식(1)과 같은 근사함수를 구하였다. 그리고 이 근사함수가 나타내는 최대 B_{\perp} 값이 최소인 해를 찾기 위해서 최적화 알고리즘을 적용하였다.

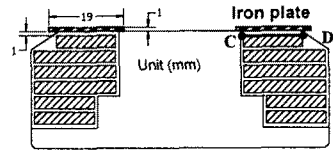


그림 4. 규소강판이 포함된 초기 마그네트

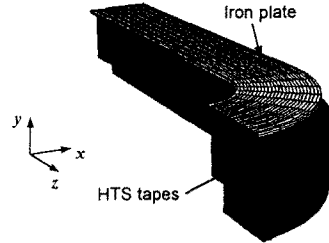


그림 5. 3D FEA 요소분할도

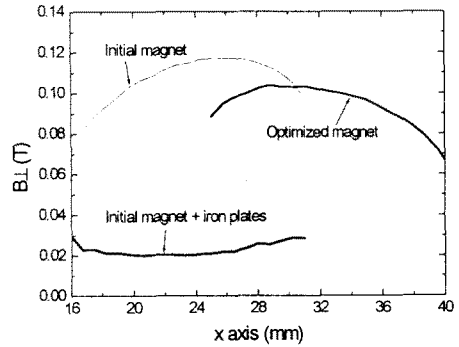


그림 6. 선분 A-B, C-D에서의 3D FEA 결과

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

여기서, x_i , x_j 는 설계변수로서 각 팬케이크 코일의 층간 코일 턴수를 두께로 환산한 것으로 그림 2에 나타내었으며 β_0 , β_j , β_{jj} , 그리고 β_{ij} 는 회귀계수로서 표 1과 같다. 본 논문에서 최대 B_{\perp} 값이 최소인 해를 찾기 위해서 식(1)을 목적함수로 정의하였다. 그리고 전체 코일 턴수가 467턴이 되도록 식(2)와 같이 등호제약함수를 정의하였으며, 식(3)~식(6)은 설계변수의 상한 및 하한의 한계 값을 나타낸다. 그리고 비선형 제약 문제를 풀기위해서 최적화 방법 중의 하나인 순차이차계획법(Sequential Quadratic Programming)을 사용하였다. HTS 마그네트의 제작한계로부터 제약은 다음과 같이 정의된다.

$$H(x) = \frac{x_1 + 2x_2 + 2x_3 + x_4 - 109.1}{0.25} - 467 \quad (2)$$

$$24.6 \leq x_1 \leq 32.6 \quad (3)$$

$$34.35 \leq x_2 \leq 42.35 \quad (4)$$

$$34.35 \leq x_3 \leq 42.35 \quad (5)$$

$$29.1 \leq x_4 \leq 37.1 \quad (6)$$

그림 3은 최적화된 HTS 마그네트의 단면을 나타내며 선분 A-B는 B_{\perp} 의 최대치가 발생하는 곳의 위치를 표시한다. 최적화된 마그네트는 초기 설계된 마그네트에 비해 다소 제작하기 복잡한 구조가 됨을 알 수 있다.

2.3 규소강판을 사용한 HTS 마그네트

그림 4는 초기 HTS 마그네트에 규소강판을 포함한 것을 나타낸다. 규소강판은 SE18C를 사용하였으며 크기와 위치는 그림 4와 같다.

규소강판의 자기포화특성을 고려하여 HTS 마그네트의 자속밀도 분포를 구하는 것은 매우 힘들기 때문에 3D FEA를 이용하였다. 그림 5는 3D FEA를 수행하기 위한 해석모델로 대칭조건을 고려하여 전체의 1/4로 선정하였으며 HTS 마그네트의 정자계 해석시 계변수는 자기스칼라 포텐셜을 사용하였다.

그림 6은 초기 모델, 최적화된 모델, 그리고 초기 모델에 규소강판을 포함시킨 마그네트에 15A를 여자 시 그림 3과 그림 4의 선분 A-B, C-D에서의 3D FEA 결과이다. HTS 마그네트에서 B_{\perp} 이 집중되는 부분인 선분 A-B, C-D에서의 자속이 자기저항이 적은 규소강판으로 밀집되면서 HTS tape 도체에 채교하는 자속이 현격히 줄어들었다.

2.4 HTS 마그네트의 I-V 실험결과

제작된 마그네트의 I-V 실험에서 전류는 0.5A/sec로 인가하였으며 실험 결과는 그림 7과 같다. 각 마그네트 P3에서의 HTS tape 도체 길이는 초기 마그네트는 70 m, 그리고 최적화된 마그네트는 68 m이다. 초기 마그네트, 최적화된 마그네트, 그리고 초기 마그네트에 규소강판을 사용한 것의 임계전류는 각각 10A, 12A, 그리고 15A이다.

3. 회전자의 온도특성

3.1 열 교환기

LN_2 를 응고시키기 위해서 나선형과 디스크형의 열 교환기를 설계, 제작하였다. 재질은 열전도도가 좋은 동(C1100)을 사용하였고, 나선형 열 교환기는 높은 열전도율을 얻기 위해서 보빈의 주위로 핀을 부착하여 열교환되는 단면을 최대로 하였다. 그림 8은 나선형 열교환기의 설계 단면을 보여준다. 그림 9는 디스크형 열교환기의 설계단면으로 내부의 디스크 형태는 헬륨의 흐름에 와류를 일으키기 위하여 홀을 내부와 외부 교대로 만들었다. 비교실험을 통해 검토한 결과, 나선형 열교환기의 성능이 우수하여 나선형 열교환기를 채택하였다.

3.2 회전자의 온도특성

회전자의 온도특성 실험을 위하여 진공조의 진공은 1.2×10^{-6} Pa까지 유지했으며 내부의 각 지점에 CGR 센서를 부착하였다. 그림 10은 회전자의 온도특성 실험의 결과를 나타낸다. 사용된 GHe는 약 180리터로 시간당 약 10.3리터를 공급하였으며 GHe를 공급한 뒤 약 17시간 30분 뒤의 코일의 온도는 14K이었고, 40K까지 도달하는 시간은 약 2시간 30분이었다.

4. 결론

본 논문에서는 초기 마그네트와 최적화된 마그네트, 그리고 초기 마그네트에 규소강판을 사용한 것을 3D FEA와 실험을 통해 비교하였고, 또한 고온초전도 동기전동기의 회전자 냉매로 고체질소를 검토하였다. 먼저,

최대 B_{\perp} 가 발생하는 P3에서의 임계전류는 초기 마그네트에 규소강판을 사용한 것이 초기 마그네트에 비해 5A(50%) 증가하여 HTS 마그네트 설계의 좋은 방법이 가능함을 확인하였으며, 고체질소를 사용한 회전자는 14K의 온도까지 냉각된 뒤에 다른 냉매의 공급없이 40K까지 2시간 30분간 유지되었다.

(참고 문헌)

- [1] <http://dd21.crane.navy.mil/>
- [2] 윤용수의, "고온초전도 동기 모터의 전기적 손실에 따른 열전달 특성 해석", 대한전기학회논문지 제47권 10호 pp1597~1604, 1998

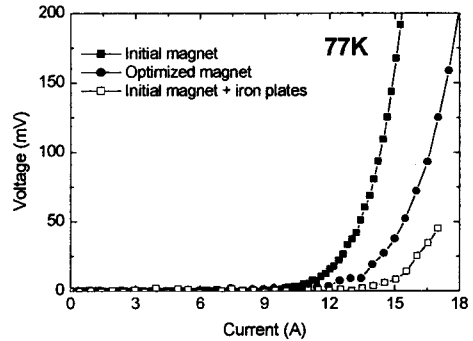


그림 7. P3에서의 I-V 실험결과

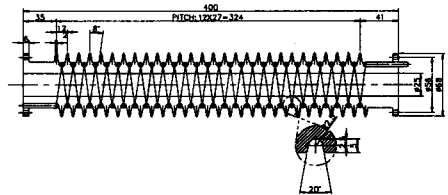


그림 8. 나선형 열 교환기의 단면

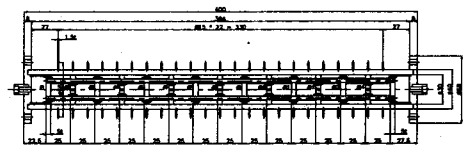


그림 9. 디스크형 열 교환기의 단면

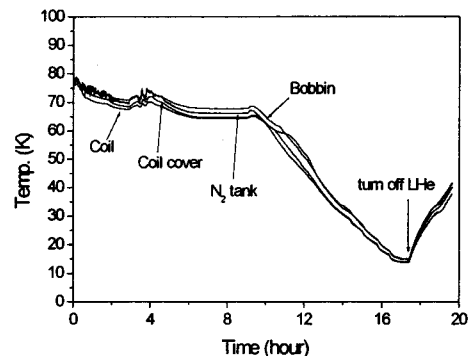


그림 10. 고체질소를 사용한 회전자의 온도특성