

100 마력급 고온초전도 전동기의 열적설계에 관한 연구

서무교, 조영식, 손명환, 김석환, 백승규, 권영길
한국전기연구원

A Study on the Thermal Design of the 100 hp High Temperature Superconductin

M. G. Seo, Y. S. Jo, M. H. Shon, S. H. Kim, S. K. Back, Y. K. Kwon
Korea electrotechnology research Institute

Abstract - The rotor thermal analysis consists of determining the heat load to the rotor, sizing the cryogenic system, and ensuring that the HTS rotor will operate at the design goal of 30 K. The heat load to the rotor is due to heat conduction through the torque tubes, current leads, instrumentation, and radiation from the thermal shield and the end caps. Coil operating temperature is determined from the coil losses and the heat transport to the coolant. An FEM thermal conductivity model is developed to allow calculation of heat transport in HTS field coil according to the heat exchanger shape and coolant feeding method. The losses determine the size of the cryocooler.

1. 서론

고온초전도 전동기의 상용화를 위한 연구에 많은 노력을 기울이고 있으며, 특히 2000년에 미 해군은 1,000 마력급의 고온초전도 전동기를 선박 추진용으로 장착하여 실증 실험을 성공하였으며 향후 25,000 마력급의 선박 추진용 고온초전도 전동기를 목표로 활발히 연구하고 있다. 본 연구에서는 100 마력급 고온초전도 전동기에서의 열설계를 위해 회전자 내부로의 열침입의 대부분을 차지하는 토크튜브를 통한 전도열침입량을 해석하고 열침입량을 최소화하며, 열교환기 형상 및 냉매 공급방법에 따른 HTS 계자코일 내에서의 온도구배 및 임계전류의 영향을 살펴보고자 한다.

2. 본론

2.1 HTS회전자의 구조

그림 1은 설계된 HTS 고온초전도 전동기의 냉각구조 및 회전자 단면을 보여준다. 가스헬륨 공급관은 3중관을 사용하여 최대층으로 저온의 가스헬륨을 공급하고, 최외층으로 HTS 계자코일을 냉각한 헬륨배기가스의 배출구이며 이사이의 중간층에 진공단열층을 설치하여 고온부와 저온부를 열적으로 단열시키는 구조로 구성하였다. 토크튜브는 전도열전달을 줄이기 위해 열전도도가 낮은 G-10을 이용하였고 열교환기는 Beryllium copper를 이용하였으며 회전자 및 축을 SUS-304로 구성하였다. 이상과 같은 구조의 회전자를 유한요소 모델링을 이용하여 열해석을 수행하였다. 그림 2는 2D-축대칭 FEM 해석모델로 회전자의 단면 및 냉각구조를 나타내었다. 본 연구에서 사용된 재료의 열전도는 NIST에서 제공하는 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$\log K = a + b(\log T) + c(\log T)^2 + d(\log T)^3 + e(\log T)^4 + f(\log T)^5 + g(\log T)^6 + h(\log T)^7 + i(\log T)^8 \quad (1)$$

2.2 HTS 계자코일의 운전온도 및 토크튜브 형상에 따른 열침입량

HTS 계자코일의 운전온도에 및 토크튜브 형상에 따른 열침입량을 해석하기 위해 그림 2와 같이 2D-축대칭 FEM 해석모델에서 계자코일의 온도를 각각 20K, 25K, 30K, 35K로 가정하여 열침입량을 계산하였다. 그림 3과 4는 토크튜브의 길이를 150 mm, 두께 3 mm인 경우의 계자코일의 운전온도에 따른 열침입량으로 운전온도가 20 K에서 35 K로 변함에 따라 열침입량은 약 1.73 W

표. 1 열전도도에 대한 계수

Coeff.	G-10	Beryllium copper	SUS-304
a	-4.1236	-0.50015	-1.4087
b	13.788	1.93190	1.3982
c	-26.068	-1.69540	0.2543
d	26.272	0.71218	-0.6260
e	-14.663	1.27880	0.2334
f	4.4954	-1.61450	0.4256
g	-0.6905	0.68722	-0.4658
h	0.0397	-0.10501	0.1650
i	0	0	-0.0199

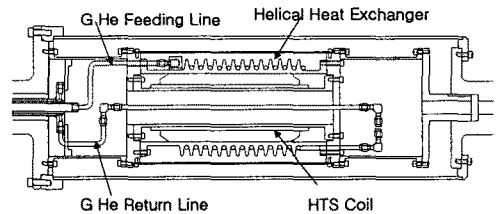


그림. 1 HTS 전동기의 냉각구조 및 회전자 단면

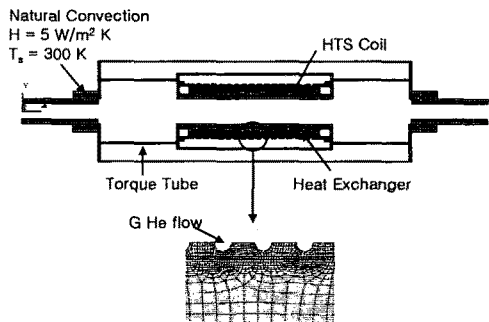


그림.2 2D-축대칭 FEA 요소분할도 및 경계조건

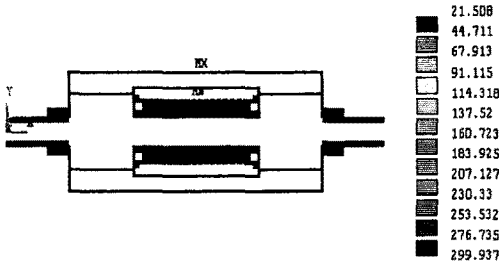


그림. 3 회전자 내부온도분포 해석결과

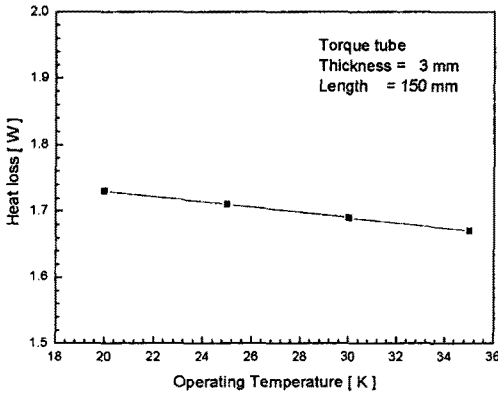


그림.4 HTS 계자코일의 운전온도에 따른 전도 열침입량

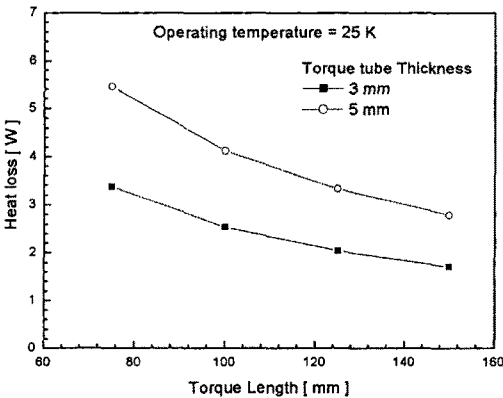


그림.5 토크튜브 길이 및 두께에 따른 전도열침입량

에서 1.67 W로 해석되었다. 그림 5는 계자코일의 운전온도를 25K로 가정하고 토크튜브의 길이 및 두께에 따른 열침입량을 계산한 결과로 토크튜브를 통한 전도 열침입은 토크튜브의 길이 및 두께에 따라 큰차이를 보이고 있다. 따라서 고온초전도 전동기의 설계시 전동기 크기 및 냉동기용량등을 고려해서 최적의 토크튜브를 설계할 수 있다.

2.3 냉매유량, 열교환기 형상 및 냉매주입방법에 따른 HTS 계자코일내의 온도분포
토크튜브를 통한 전도열침입량 해석결과를 바탕으로 열교환기 형상 및 냉매주입방법에 따른 HTS 계자코일내

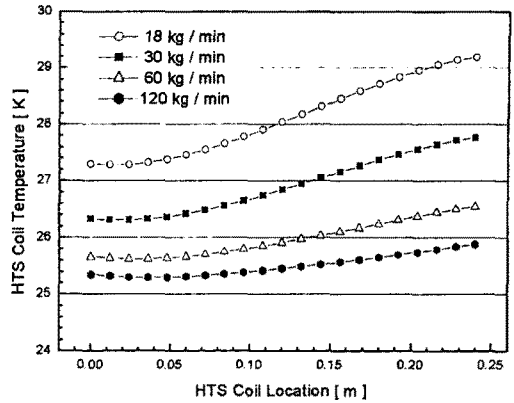


그림. 6 헬륨가스유량에 따른 HTS 계자코일내부의 온도분포 해석결과

의 온도분포를 해석하였다. 전체열손실에서 토크튜브를 통한 열손실이 70 ~ 80%를 차지하므로 토크튜브를 통한 열손실에 1.3배하여 전체열손실을 가정하였고, HTS 계자코일냉각에 필요한 가스헬륨량을 산정하였다. HTS계자코일냉각에 필요한 헬륨가스의 양을 18 ~ 120 kg/min으로 변화하고 이에따른 헬륨가스의 출구 온도는 다음식을 이용하여 계산하여 HTS 계자코일내에서 선형분포하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (2)$$

헬리컬튜브내에서의 열전달계수는 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$h = 0.023 c_p G Re^{-0.2} Pr^{-2/3} [1 + 3.5(D_e/D_h)] \quad (3)$$

그림 6은 헬륨가스의 유량을 18 ~ 120 kg/min으로 변화시켰을때의 HTS계자코일 내부의 온도분포를 해석한 결과로 헬륨가스의 유량이 18 kg/min일 때 27.3 ~ 29.2 °C의 분포를 나타내며, 120 kg/min일 때 25.4 ~ 25.9 °C의 온도분포를 나타내었다.

그림 7과 같이 HTS 계자코일내의 온도분포를 해석한 결과 열교환기의 피치를 고정할 경우 헬륨가스의 입구와 출구의 온도차로 인해 HTS 계자코일내에서 온도편차가 생긴다. 따라서 이러한 편차를 줄이기 위해 헬리컬 튜브의 피치를 가변할 경우 HTS 계자코일내의 온도편차를 피치를 고정한 경우에 비해 약 0.5 K 정도 줄일 수 있었다. 그러나 실제 열교환기 제작에 있어서 열전달 측면에서 가능한 한 열교환기내 많은 수의 헬리컬 튜브를 설치하는 것이 유리하기 때문에 헬리컬 튜브의 피치가 변하는 것은 실제 제작상 및 열전달면에서 불리할 것으로 사료된다.

헬륨주입구를 HTS 계자코일 전단에 설치할 경우 배출구에서의 온도상승으로 계자코일내 온도 불균이 일어나

므로 이러한 온도불균일을 줄이는 또다른 방안으로 헬륨 주입구를 HTS계자코일 중심에서 주입하여 양끝단에서 배출 할 경우를 해석하였다. 이때 헬륨주입구에서 액체 헬륨이 분배되므로 식(3)에서 분배된 유량에 의해 계산된 열전달 계수를 해석에 적용하였다.

그림 8은 헬리컬 튜브의 배치방법 및 가스헬륨의 주입 조건에 따른 HTS계자코일내 온도분포를 나타낸것이고, 그림 9는 열전달 해석결과를 바탕으로 NST사의 HTS 선재를 기준으로 온도에 따른 임계전류비를 비교한 결과이다.

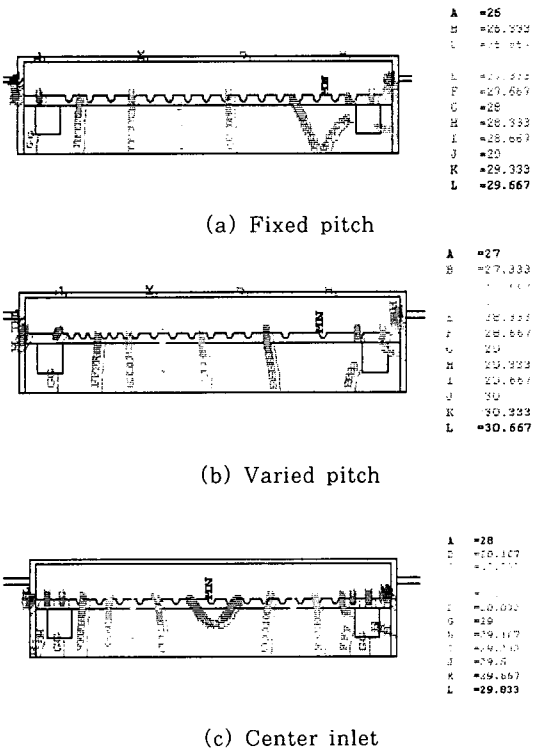


그림. 7 헬리컬 코일 배치 및 GHe 주입구조건에 따른 HTS코일내의 온도분포

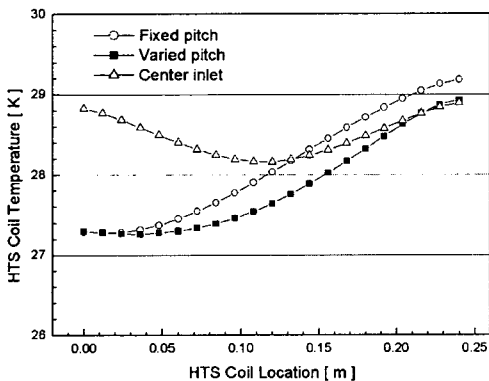


그림.8 헬리컬 코일 배치 및 GHe 주입구조건에 따른 HTS계자코일내의 온도분포

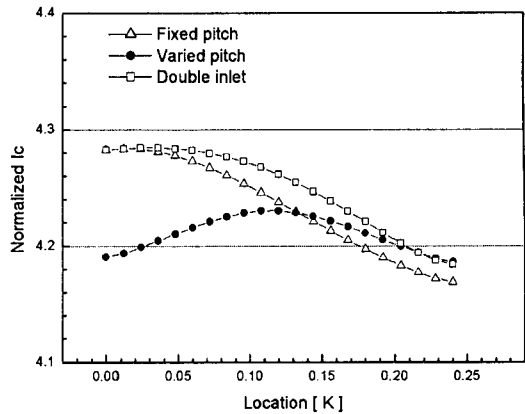


그림.9 헬리컬 코일 배치 및 GHe 주입구조건에 따른 온도구배에 따른 HTS계자코일내의 임계전류분포

다. HTS 계자코일 제작시에 초전도선재의 접합등이 존재하므로 이는 열원으로서 발열부가 된다. 따라서 헬륨을 전단에서 공급할 경우 HTS계자코일의 전단부의 온도가 상당히 낮게 분포하므로 이와같은 초전도 선재의 접합부분을 전단부에 모두 배치하여 접합에서 발생하는 발열을 효과적으로 흡수할 수 있으므로 전체적인 HTS 계자코일의 효율을 높일 수 있을 것으로 사료된다. 이에 반해 HTS계자코일 중심부에서 헬륨을 공급할 경우 전체적인 온도불균일은 상당히 줄일 수 있으나 계자코일 내에서 평균온도는 거의 차이가 없고 또한 실제 열교환기 제작이 상당히 어렵고 또한 불균일한 유동분배로 인한 온도불균일이 발생할 것으로 사료된다.

3. 결 론

100마력급 고온초전도 전동기에서의 토크튜브를 통한 전도열침입 해석 및 냉매유량, 냉매공급방법 및 열교환기형상에 따른 HTS계자코일의 내부온도분포 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유한요소법을 이용하여 100마력급 고온초전도 전동기에서 토크튜브를 통한 전도열침입 해석을 통해 운전온도에 따른 열침입량을 해석하였다.
- (2) 토크튜브의 두께 및 길이에 따른 전도열침입량은 1.7 ~ 5.5 W로 해석되었다.
- (3) 냉매유량, 열교환기 형상 및 냉매공급방법에 따른 HTS계자코일 내부온도분포를 해석하였다.

(참 고 문 헌)

[1] R.F. Schiferl et. al. "Development status of a 125 horsepower superconducting motor", *Advances in Cryogenic Engineering* Vol.42 pp 977 ~ 984, 1998
 [2] K. Sharad, et. al. "Conceptual design of a high Temperature Superconducting Generator", *IEEE Trans. on applied superconductivity*, Vol. 9, No.2, pp 1237 ~ 1240, 1999
 [3] W. Nick, G. Nerowski, et. al. "380 kW Synchronous Machine with HTS Rotor windings-Development at Siemens and First Test Results", *IEEE Trans. on energy Conversion*, Vol. 7, No.4, pp 777 ~ 786, 1992

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.