

탑재형 냉동기를 이용한 고온 초전도 모터 개발 및 회전 실험

Development and rotating test of the high temperature superconducting motor with on-board cryocooler

기태경^{1,*}, 김영권¹, 김희선², 정상권³

Taekyung Ki^{1,*}, Youngkwon Kim¹, Heesun Kim², Sangkwon Jeong³

Abstract: In this paper, the prototype of the HTS motor with an on-board cryocooler, is fabricated and tested. The overall system is composed of the stator with conventional copper winding, the rotor with superconductor, and the rotating cryocooler designed from the on-board concept. The rotor is fabricated as the race-track coil with 2G, YBCO tape and contacts with the on-board cryocooler while being rotated together. An inline-type pulse tube refrigerator is used as the on-board cryocooler. The cryocooler is fabricated from optimal process to satisfy the structure and thermal stability of the on-board system. Each component is integrated according to carefully defined sequence. Specially, a combining method of torque tubes is an important part for sustaining stability of the rotor and the cryocooler. In the rotating test, the HTS motor is successfully operated with 240 rpm of rotating speed when 75 A current is supplied to the superconducting rotor. In this paper, potential problems of the HTS motor system using the on-board cryocooler are proposed and solved, and realistic possibility of this concept is also confirmed.

Key Words: cooling system, HTS, on-board cryocooler, motor.

1. 서 론

초전도 모터는 회전자의 계자 권선(field winding)으로 전기 저항이 0인 초전도 선재를 사용함으로써 기존의 상용 모터보다 공간 활용, 효율성 측면에서 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 초전도 모터는 계자 권선에 사용되는 초전도 선재가 초전도성을 유지하기 위해 극저온 냉각 시스템이 반드시 필요하다는 단점을 가지고 있다.

최근 개발된 YBCO(Yttrium Barium Copper Oxide,

YBa₂Cu₃O₇) 등의 우수한 고온 초전도 재료는 기존 초전도 재료에 비해 초전도 모터로의 적용 가능성이 높지만 적합한 성능을 위해선 여전히 신뢰성 있는 고효율의 극저온 냉각이 필수적이다. 따라서 초전도 모터를 실용화하려는 연구의 일환으로 극저온 냉각 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 현재 사용되고 있는 냉각 방식은 회전자의 냉각을 위해 냉각 시스템이 회전자 외부에 분리되어 있는 냉각 방식이 대부분이다[1]. 이 방식은 회전자와 냉각 시스템 사이에 동적 밀봉장치와 이를 통과하는 저온 유체 공급관으로 이루어진 연결부가 필요함에 따라 불필요한 열손실이 발생하고 전체 시스템을 복잡하게 함으로써 신뢰성에 문제를 일으키는 단점을 가지고 있다.

이러한 점을 해결하기 위한 방안으로 회전자에 직접 냉각 시스템을 탑재하는 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 남중원 등[2]은 회전체 탑재형 냉각 시스템의 축소 모델을 설계 및 제작하여 실제 규모의 냉각 시스템 구현 가능성을 확인하였고, 최재영[3]은 해석적인 방법을 통하여 회전에 따른 영향을 최소화하기 위한 방안을 제시하였다. 하지만 지금까지 그 가능성을 보았을 뿐 실제 시스템에 적용한 연구가 미비한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 탑재형 냉동기를 이용한 고온 초전도 모터의 구현을 위해 회전에 적합한 탑재형 시스템을 고안하였으며 이를 실현시키기 위하여 초전도 회전자 및 냉동기를 탑재형 시스템에 알맞게 설계, 제작하였다. 완성된 탑재형 시스템에 대한 회전 실험이 실시되었으며 이를 통해 그 안정성 및 가능성을 보여 주었다.

2. 설 계

2.1. 탑재형 시스템의 형상 설계

탑재형 냉각 시스템을 이용한 초전도 모터의 설계 시에 가장 중요한 요소는 극저온 환경을 고려한 단순 하면서 회전에 적합한 구조 선정이라고 할 수 있다. 탑재형 냉동기로는 선형 압축기를 이용한 1단 직선형 맥동관 냉동기(single-stage in-line type pulse tube refrigerator)를 선정[4] 하여 두 부분으로 나누어진 고온 초전도 회전자를 냉동기의 저온부 열교환기(cold end heat exchanger)와 직접 접촉을 통해 냉각되도록 하였다. 이를 통해 모든 요소가 회전축을 중심으로 동축으로 연결되면서 회전시 안정성을 가질 수 있게 하였다.

Fig. 1은 탑재형 냉동기를 이용한 고온 초전도 모터

¹학생회원 : 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

²정 회 원 : 한국전력연구원 연구원

³정 회 원 : 한국과학기술원 기계공학과 교수

*교신저자 : kingcandy@kaist.ac.kr

원고접수 : 2010년 10월 08일

심사완료 : 2011년 02월 22일

게재확정 : 2011년 02월 22일

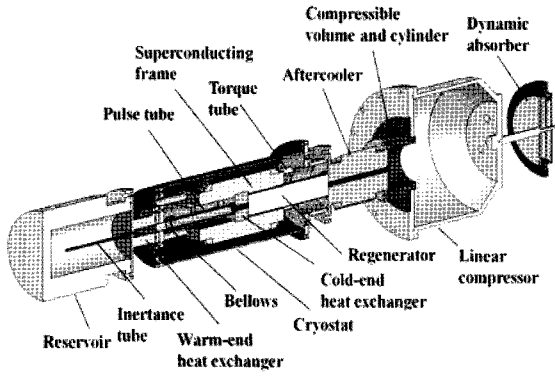


Fig. 1. Schematic diagram of the on-board system.

의 형상을 나타내고 있다. 선형 압축기에서 발생하는 진동은 동흡진기(dynamic absorber)를 통해 감소하며, 맥동관 냉동기의 후냉각기(aftercooler)와 고온부 열교환기(warm end heat exchanger)는 회전에 적합하도록 공랭식 냉각 방식을 이용하는 동시에 저온조(cryostat)의 플랜지와 접착을 통해 추가적인 진도 냉각이 가능하도록 하였다. 냉동기가 극저온 환경을 구현함에 따라, 탑재형 시스템에 열수축으로 발생하는 응력을 해소하기 위해 맥동관(pulse tube) 끝단에 주름관(bellows)을 설치하여 저온조의 플랜지와 결합하게 하였다. 고온 초전도 회전자에서 발생하는 토크를 시스템 전체에 전달하기 위하여 G-10으로 구성된 토크 튜브(torque tube)를 이용해 초전도 회전자와 저온조를 연결하였다. 맥동관 냉동기의 저온부 열교환기에서의 작동 유체의 왕복 질량 유량과 압력 간의 위상차를 조절하는 관성관(inertance tube)은 길이가 다소 길기 때문에 나선형으로 감아 저장소 안에 위치되도록 하였다. 위의 모든 요소는 초전도 시스템에서 발생하는 토크를 부하에 안전하게 전달하기 위한 신뢰성 설계가 이루어져야 한다.

2.2. 고온 초전도 회전자 설계

고온 초전도 회전자는 크기와 구조적인 제한 안에서 최소한의 열저항을 가지며, 균일하고 강한 토크를 발생시킬 수 있는 구조로 설계되어야 한다. 본 연구에 사용되는 선재는 AMSC(American Superconductor Corporation)의 2G(2nd-Generation) YBCO으로 총 50 m를 사용하였다. 기본적으로 탑재형 냉동기의 저온부가 회전축 중앙에 위치하므로, 회전자의 두 극은 분리되어 냉동기의 상, 하에 끼워지게 설계하였다. 초전도 선재의 결합부를 최소화하기 위하여 각 회전자를 더블 팬케이크 코일 형태로 권선되도록 하였으며 두 개의 회전자는 평행 접합 방식[5]으로 연결된다.

2.3. 열침입량 예측

열침입량의 예측은 탑재형 시스템에 필요한 냉동기의 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 고온 초전도 회전자가 작동과정 중 극저온 상태를 유지하기 위해서는 외부로부터의 열침입을 냉동기를 통해 해소할 수 있어야 한다. 그러므로 열침입량은 냉동기의 냉동용량을 선정하는데 중요한 요소이다. Table 1은 고온 초전도 회전자의 작동 온도를 60 K으로 가정한 상황에서 발생할 수 있는 열유입을 예측한 값을 보여주고 있다. 작동 온도를 60 K으로 가정한 이유는, 앞으로 YBCO 2G 도체의 가격이 하락할 것으로 예상되어 충분한 길이의 권선이 가능해, 현재 사용되고 있는 초전도 모터

Table 1. Estimated heat leak of the rotor.

Torque tube conduction	0.5 W
Molecular conduction	0.35 W
Radiation	0.1 W
Current lead (75 A)	7 W
Total	7.95 W

시스템의 구동에 필요한 자기장을 60 K의 온도에서도 얻을 수 있을 것이라고 판단하기 때문이다.

복사로 인한 열침입량은 겹이복사차폐막(Multi Layer Insulation)을 사용했을 때의 결과이다. 전류 도입선으로 부터의 열침입량은 전류 도입선의 형상이 최적화된 경우의 예측치이며[6], 그 밖에 진공 상태에서의 분자 열전도로 인한 열침입을 고려하였다. 예측된 총 열침입량은 저온부의 온도가 60 K일 때 7.95 W로서 탑재형 시스템에 사용되는 냉동기의 성능은 이 조건을 충분히 만족시킬 수 있어야 한다.

2.4. 탑재를 고려한 맥동관 냉동기 설계

본 연구에 사용되는 탑재형 시스템을 위한 냉동기는 선형 압축기를 사용해야하고, 고정자의 형상에 의해 제한되는 초전도 회전자의 위치와 저온조의 형상을 고려하여 전체 형상이 결정되어야 한다. 또한, 보다 현실적이고 효율적인 냉동기의 설계를 위해 슬릿형 열교환기의 최적화, 나선형 구조의 관성관으로 인해 발생하는 오차와 맥동관 끝단에 위치한 주름관으로 인한 작동유체의 간섭을 고려하였다. 이와 같은 고려사항을 바탕으로 성능해석프로그램[4]을 사용하여 필요한 냉동용량을 가지는 냉동기를 설계, 제작하였다.

2.4.1. 선형 압축기

선형 압축기는 요구되는 냉동기의 성능에 따라 결정이 된다. 현재까지 5 kW 급의 선형모터가 상용화가 된 상태여서 대용량의 탑재형 초전도 모터 시스템에 적용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 60 K에서 8 W 이상의 냉동용량을 가지는 냉동기가 요구되므로 750 W급의 선형모터(1S175M Motor, QDrive)를 사용하여 선형 압축기를 제작하였다. 선형 압축기는 제한 범위 내에서 피스톤의 진폭을 발생시켜 냉동시스템에 필요한 일을 공급할 수 있어야 하며, 이를 위해서 피스톤의 진폭에 대한 제어 시스템이 필요하게 된다. 이는 시스템의 크기를 증가시키는 요소로 본 연구에서는 제어 시스템 없이 피스톤의 안정된 진폭 유지를 위하여 피스톤의 앞, 뒤쪽 부피를 실험적 조정 작업을 통하여 조절하여 안정된 피스톤 진폭을 유지하게 하였다.

2.4.2. 열교환기 설계

열교환기는 냉동기의 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 냉동기의 후냉각기와 고, 저온부의 열교환기 부분에 사용이 되며, 후냉각기와 고온부 열교환기의 경우에는 시스템이 회전을 함에 따라 공랭식으로 냉각이 되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 슬릿 타입의 열교환기를 이용하여 냉동기의 모든 열교환기를 설계하였다[7]. 슬릿 타입의 열교환기는 구리 블록에 EDM(Electrical Discharge Machining)을 이용하여 다수의 슬릿형의 유로를 만드는 것으로 솔더링(Soldering)으로 부착되는 메쉬 타입의 열교환기 보다 접촉 열저항 및 반경 방향의 온도 구배를 줄일 수 있

Table 2. Specification of the on-board cryocooler.

Target performance	8 W @ 50 K
Compressible volume	φ 57.15 mm, 38.4 mm
Regenerator	φ 31.75 mm, 78 mm, #400 mesh
Pulse tube	φ 12.7 mm, 154 mm
Inertance tube 1	φ 4.76 mm, 0.422 m
Inertance tube 2	φ 6.35 mm, 2.47 m
Reservoir	1000 cc
Charging pressure	3.38 MPa
Frequency	58.65 Hz

고 다양한 형상에 적용할 수 있다는 장점이 있다.

2.4.3. 냉동기 최적 설계

앞에서 결정된 선형 압축기와 열교환기를 포함하는 전체 시스템에 대한 최적화 설계 과정이 진행되었다. 고온 초전도 회전자의 형상은 냉동기의 주요 부분들의 길이를 결정하는 중요한 요소이다. 저온조 안에 위치하는 냉동기의 주요 요소의 총 길이는 고온 초전도 회전자의 길이 보다 더 길어야 하며 저온부 열교환기가 고온 초전도 회전자의 냉각에 효율적인 위치에 존재해야 한다. 이 구속 요건을 만족시키기 위하여 재생기(Regenerator), 저온부 열교환기, 맥동관의 형상에 대한 고려가 진행되었는데, 특히 맥동관의 형상은 끝단의 주름관으로 인한 작동 유체의 반경 방향으로의 유동의 불균형을 최소화하기 위하여 관의 지름을 제한 조건 안에서 최대한 작게 하였다. 또한 매우 작은 곡률 반경을 가지는 나선형 관성관은 직선형 관성관보다 큰 유동 저항을 가진다. 설계 시에는 같은 길이의 관성관에 비해 10% 정도 큰 유동 저항을 가정하여 관성관의 길이를 정하였고, 실험적인 조절 작업을 통하여 최종 결정하였다. 이렇게 결정된 요소를 기반으로 맥동관 냉동기의 에너지 흐름에 따라 각 부위 형상을 성능해석프로그램을 이용하여 결정하였고 이를 Table 2에 나타내었다. 설계 시 맥동관 냉동기의 성능은 탑재형 시스템의 회전자 내부의 열전달에 따른 온도구배와 초전도 선체의 성능 저하를 고려하여 50 K에서 8 W를 목표로 하였다.

3. 탑재형 시스템 제작 및 회전 실험

3.1. 탑재형 냉동기 성능 테스트

Fig. 2는 설계 결과를 바탕으로 제작된 탑재형 맥동관 냉동기를 나타내고 있다. 탑재형 냉동기로서의 적합성을 판단하기 위하여 냉동기 성능 테스트를 실시하였다. 저온부 열교환기에 열저항선과 실리콘 다이오드 온도센서(DT-670, Lakeshore) 2개를 설치하여 최저 도달온도와 냉동용량을 측정하였다. Fig. 3은 측정된 냉동기의 냉동용량과 입력 전력에 대한 카르노 효율을 나타내고 있다. 56 K에서 10 W 이상의 성능을 보이는 것으로 보아 탑재형 냉동기로 충분하다는 것을 알 수 있다. 또한 56 K에서 약 12%의 카르노 효율을 보이고 있어 고효율의 탑재형 맥동관 냉동기가 제작된 것을 알 수 있다(4).

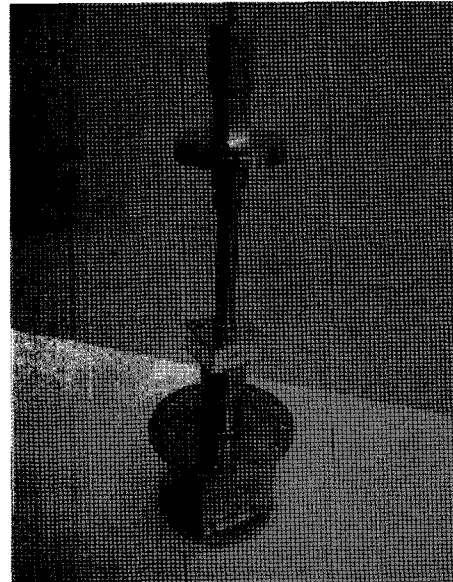


Fig. 2. Configuration of the fabricated on-board cryocooler.

3.2. 고온 초전도 회전자 테스트

Fig. 4는 제작 완료된 고온 초전도 회전자를 나타내고 있다. 초전도 회전자의 초전도성을 확인하고 임계 전류를 측정하기 위하여 액체 질소를 이용하여 예냉 실험을 하였다. 두 부분으로 나누어진 회전자를 액체 질소에 넣어 77 K으로 냉각시킨 후, 초전도 권선에 전류를 천천히 인가하였다. 각 회전자는 56 A와 51 A 이상에서 초전도성이 사라지면서 저항이 생겨, 초전도 권선 양단에 전압이 증가됨을 확인하였다. 이는 AMSC의 결과인 125 A에 비해, 선재의 성능이 상당히 저하되었다는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 권선 작업동안에 선재에 발생한 미세하고 무수한 물리적 손상 때문이라고 할 수 있다. 하지만 제작된 탑재형 냉동기가 충분한 냉동용량을 가지고 있어 설정된 75 A의 전류가 인가되어도 초전도성을 유지할 수 있을 것이라고 판단하였다.

3.3. 탑재형 시스템 결함

고안된 탑재형 시스템은 저온조 안에 밀집된 구조를 가지며, 시스템 전체가 정확한 동축성을 유지하도록 조립하는 것은 어려운 과정이다. 따라서 회전성을 고려하여 설계, 제작된 시스템의 각 요소가 효율적인 결

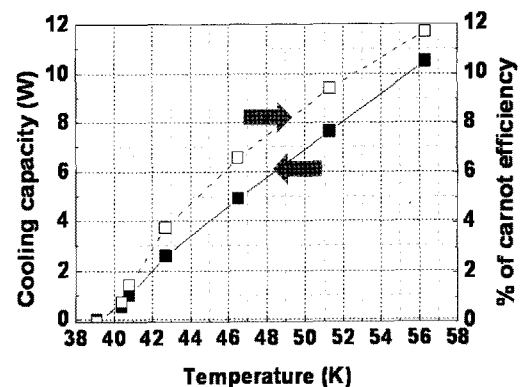


Fig. 3. Cooling capacity and carnot efficiency.

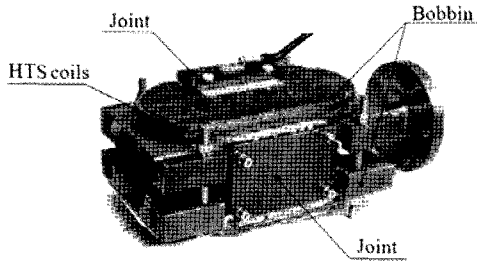


Fig. 4. Configuration of the HTS rotor.

합을 하기 위해 미리 정해진 결합 순서에 따라 모든 조립 과정이 진행되었다.

여기서 가장 중요한 요소는 밀집된 저온조 안에서 토크 튜브의 정확한 결합 및 고정이라고 할 수 있다. 토크 튜브는 고온 초전도 회전자에서 발생하는 회전력을 시스템 전체에 전달하는 일 외에 초전도 회전자를 동축인 위치에 고정하며 냉동기로 전달되는 회전자의 무게 및 토크 힘을 분산시키는 중요한 역할을 한다. 만약 토크 튜브가 정확히 원하는 위치에 결합되지 않거나 시스템이 움직임에 따라 그 위치가 조금이라도 들어지게 되면 고온 초전도 회전자로부터 발생하는 무게 및 토크가 탐재형 냉동기에 가해져서 냉동기의 파손을 일으킬 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 토크 튜브가 시스템에 박음 형식이 아닌 완전 결합이 이루어져야 하며 경우에 따라서 분리가 가능해야 한다. 이를 위해 사용되는 네 개의 토크 튜브를 각각 두 부분으로 나누어 한쪽 방향은 플랜지 형태로 하여 서로 탈부착이 가능하도록 하였고 나머지 방향은 각각 저온조 플랜지와 고온 초전도 회전자에 에폭시(Stycast 2850FT)를 통하여 완전 결합을 하도록 하였다. Fig. 5는 결합이 완료된 토크 튜브를 나타내고 있다. 저온조 플랜지와 초전도 회전자의 토크 튜브 구멍은 적절한 에폭시와의 결합 면적을 가질 수 있게 설계되었으며 토크 튜브를 통해 냉동기와 회전자가 정확히 원하는 위치에 결합됨을 확인한 후에 에폭시를 이용하여 고정하였다.

Fig. 6는 결합된 탐재형 시스템을 나타내고 있다. 고정자로는 상용 5.5 kW AC 동기모터 (AC synchronous motor)의 고정자를 사용하였고 선형 압축기와 저장소 외부에 배어링을 설치하여 시스템이 원활하게 회전을 할 수 있게 하였다. 탐재형 시스템의 저온부 온도를 파악하기 위하여 고온 초전도 회전자와 냉동기에 실리콘 다이오드 온도 센서를 설치하였으며 회전자의 퀘칭(quench) 유무를 판단하기 위하여 초전도 회전자 각 부분의 전압을 측정하였다. 모든 센서 신호는 블루투스(bluetooth)를 이용하여 무선으로 측정되었고 회전자와 냉동기에 공급되는 전원은 슬립 링

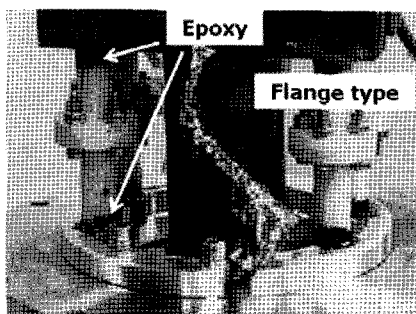


Fig. 5. Combination of the torque tube.

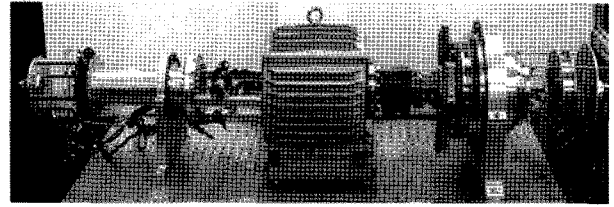


Fig. 6. HTS motor with on-board cryocooler.

(slip-ring, Mercotac)을 통하여 공급되어 회전 상황에 무리가 없게 하였다.

3.4. 실험 결과

시스템 저온조의 진공도가 10^{-3} torr 이하로 유지된 후 탐재형 냉동기의 작동을 시작하였다. Fig. 7은 시스템의 초기 냉각 과정을 보여주고 있다. 5시간의 냉각 시간을 가진 후 고온 초전도 회전자의 온도가 59 K를 유지했을 때 회전 실험을 실시하였다. 고온 초전도 회전자의 온도와 전압 상태가 실시간으로 체크되면서 회전자에 전류가 75 A까지 인가되었다. Fig. 8은 전류의 인가가 종료될 때까지, 회전자와 냉동기 저온부의 온도 변화를 나타내고 있다. 냉동기의 저온부는 57 K, 회전자는 61 K 까지 온도가 상승하였다. 이는 접촉 열 저항이 존재한다는 것을 고려하여도 냉동기의 냉각 성능과 비교를 해보았을 때, 실제 탐재형 시스템에 유입된 열은 예측된 열침입량보다 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 열침입량을 보다 정확하게 예측하기 위한 보완 과정이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 퀘칭이 나타나지 않았음을 확인한 후, 인버터(FR-E520-5.5K, Mitsubishi)를 통하여 고정자에 교류 전류가 인가되면서 탐재형 시스템의 작동이 시작되었다. 회전 실험 동안 탐재형 시스템의 회전 주파수는 240 rpm으로 측정되었으며 탐재형 시스템의 안정성을 확인하였다.

4. 결 론

효율적으로 초전도 회전자를 냉각하기 위한 탐재형 냉동기를 이용한 초전도 모터 시스템이 고안 및 제작되었다. 2G YBCO를 이용하여 두 개로 분리된 고온 초전도 회전자가 제작되었고, 이를 이용한 탐재형 시스템이 효율적인 냉각과 원활한 회전을 위해 설계 및 제작되었다. 회전 및 탐재를 고려하여 선형 압축기를 이용한 1단 맥동관 냉동기가 예측된 열유입량에 따라 설계 및 제작되었으며 성능테스트가 실시되었다. 각기

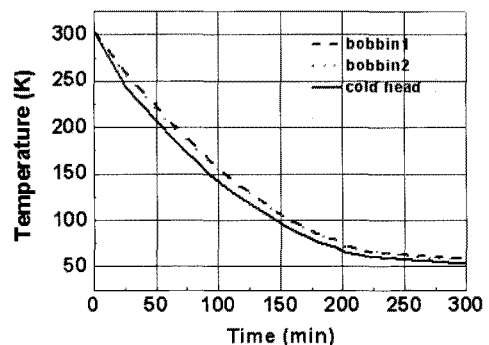


Fig. 7. Cool-down curve of on-board system.

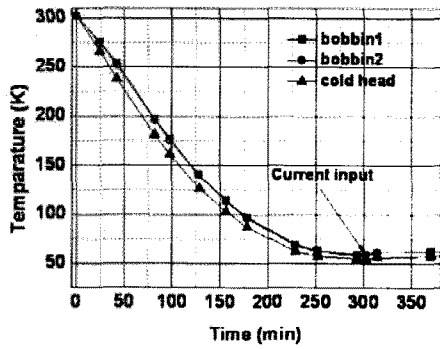


Fig. 8. Temperature curve of on-board system in supplying 75 A current.

제작된 요소들의 적합성이 판단된 후, 고안된 탑재형 시스템으로 결합되었다. 고온 초전도 모터는 75 A로 회전자에 전류가 인가된 상태에서 240 rpm의 회전 주파수를 유지하였고 회전하는 동안의 안정성 또한 확인할 수 있었다. 본 연구는 탑재형 냉동기를 이용한 초전도 모터 시스템의 제작에 발생할 수 있는 문제들을 제기하고 그 해결 방안을 제시하였으며, 그 실현 가능성을 보여주고 있다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0018918).

참고 문헌

[1] Y. K. Kwon, M. H. Sohn, S. K. Baik, E. Y. Lee, J. M. Kim, T. S. Moon, H. J. Park, Y. C. Kim, K. S. Ryu, "Development of a 100 hp synchronous motor with HTS field coils". IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.15, no.2, pp. 2194-2197, 2005.

[2] J. Nam, S. Jeong, H. Kim, J. Jung, Y. Kwon, "Investigation of On-Board Hybrid Pulse Tube Cryocooler for High Temperature Superconducting Rotor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, pp. 2190-2193, 2005.

[3] 최재영, "회전하는 맥동관 냉동기의 맥동관에 대한 2차원 모델 해석", 석사학위 논문, 한국과학기술원, 2007.

[4] T. Ki and S. Jeong, "Stirling-type pulse tube refrigerator with slit-type heat exchangers for HTS superconducting motor", Cryogenics (Available online).

[5] M. H. Shon, S. W. Kim, S. K. Baik, Y. S. Jo, M. G. Seo, E. Y. Lee, Y. K. Kwon, "Joint resistance between two parallel high Tc superconducting tapes", IEEE transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 1764-1767, 2003.

[6] H. M. Chang and S. W. Van Sciver, "Thermodynamic optimization of conduction-cooled HTS current leads", Cryogenics, vol. 38, no. 7, pp. 729-736, 1998.

[7] T. Ki and S. Jeong, "Optimal design of the pulse tube refrigerator with slit-type heat exchangers", Cryogenics, vol. 50, no. 9, pp. 608-614, 2010.

저자 소개



기태경(奇兌京)
1981년 6월 15일생, 2008년 한양대학교 기계공학부 졸업, 현재 KAIST 대학원 기계공학과 석, 박사 통합과정.



김영권(金永權)
1978년 12월 2일생, 2004년 연세대학교 기계공학과 졸업, 2006년 KAIST 대학원 기계공학과 석사과정 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 박사과정.



김희선(金熹宣)
1986년 8월 13일생, 2008년 KAIST 기계공학과 졸업, 2010년 동 대학원 기계공학과 석사과정 졸업(공학석사), 현재 한국전력연구원 연구원.



정상권(丁常權)
1962년 8월 16일생, 1985년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1987년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992년~1995년 MIT-Plasma Fusion Center 연구원, 현재 KAIST 기계공학과 교수.