

회전하는 극저온 시스템의 단열 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Investigation of the Rotating Cryogenic System

이창규*, 정상권**

Changgyu Lee*, Sangkwon Jeong**

Abstract : A rotating cryogenic system was designed similar to the cooling system for the rotor of a superconducting generator. The experimental rotor has an inner vessel which simulates the winding space of an actual superconducting rotor, and a torque tube of comparable design. This paper describes the evaluation of the total heat leak into the inner vessel that leads to the study of the heat transfer characteristic of the rotating cryogenic system. To examine the insulation performance of the experimental rotor, temperature was measured at each part of the system at various rotating speeds from 0 rpm to 600 rpm. Total heat leak into the inner vessel was calculated by measuring the boil-off rate of liquid helium. Conduction heat leak to the inner vessel was obtained by the temperature profile of the torque tube and the vent tube, and radiation heat leak was calculated by subtracting the conduction heat leak from the total heat leak. There seemed to be no rotational dependency of total heat leak at least up to 600 rpm.

Key Words: rotating cryogenic system, superconducting generator, experimental rotor, heat leak

1. 서 론

초전도 발전기의 냉각 시스템은 초전도 회전자를 4.2~6 K의 저온으로 유지해야 하므로 효과적인 단열, 헬륨 증기를 이용한 효율적인 냉각, 구조적인 안정성이 매우 중요하다. 액체 헬륨의 증발열(latent heat)은 1 atm에서 20.9 J/g밖에 안되므로 초전도 회전자를 지속적으로 냉각하기 위해서는 액체 헬륨의 꾸준한 공급과 축적이 필요한데, 단열 조건이 적절히 이루어지지 않으면 곤란하다. 4.2 K의 헬륨 증기가 상온으로 되기까지는 현열(sensible heat) 엔탈피가 1542 J/g이나 소요되므로, 액체 헬륨의 증발열만을 초전도 발전기의 냉각에 사용하는 것은 매우 비효율적인 저온 시스템의 설계 방법이다.

* 학생회원 : 한국과학기술원 기계공학과 석사과정

** 정 회 원 : 한국과학기술원 기계공학과 교수

원고접수 : 1999년 11월 27일

심사완료 : 2000년 02월 19일

그러므로 초전도 회전자를 냉각시킨 헬륨 증기는 토크 튜브(torque tube)와 복사 차폐막 (radiation shield) 등을 최대한 저온으로 냉각할 수 있도록 설계해야 한다. 기본적으로 액체 헬륨을 저장 탱크로부터 초전도 회전자로 공급하는데 요구되는 사항은 일반 저온 공급 방법과 비슷하지만, 초전도 발전기의 경우에는 이러한 부분의 설계가 복잡하고 그 결과가 전체 시스템에 미치는 영향이 결정적으로 중요하다. 따라서 액체 헬륨을 이용한 초전도 회전자의 냉각에 관한 연구는 초전도 발전기 및 초전도 모터의 개발에 매우 중요한 의미를 갖고 있다.

기계공학적인 관점에서 초전도 발전기의 실용화에 가장 중요한 것은 회전자로의 열유입(heat leak)을 차단하는 것인데, 열전달 측면에서 많은 연구가 이루어졌다[1]-[4]. 1990년 이후에도 일본을 중심으로 초전도 발전기에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔는데 [5]-[6], 우리 나라는 한국전기연구소에서 1998년에 30 kVA 초전도 발전기를 개발하여 냉각 시험, 회전 시험 등을 마쳤고 지금은 1 MVA 발전기 설계에 필요한 연구를 하고 있다.

본 연구의 목표는 초전도 발전기의 냉각 시스템을 모사한 모의 회전자(experimental rotor)를 직접 설계, 제작하고 그 단열 특성을 분석하는데 있다. 열적, 구조적 설계를 통해 구현한 모의 회전자에 액체 헬륨을 지속적으로 공급·축적하여 초전도 발전기의 냉각 과정에 대한 경험을 습득하고, 모의 회전자로의 총 열유입을 측정하였다. 회전 상태에서 모의 회전자 각 부분의 온도 분포를 통하여 열유입을 구성하는 요소와 각 요소들의 중요성에 대해서도 알아보았다. 그리고 실제 초전도 발전기의 냉각 시스템 설계에 필요한 자료를 제시해 보았다.

2. 실험 장치

2.1 모의 회전자의 구성

액체 헬륨을 원활하게 공급하고 축적할 수 있는 효율적인 단열 시스템을 제작하기 위해 열적, 구조적 측면을 고려하여 모의 회전자 각 부분을 설계하였다. 모의 회전자는 상온으로 유지되는 바깥쪽 용기, 액체 헬륨이 축적되어 극저온 상태인 안쪽 용기, 안쪽 용기를 지지하고 회전력을 전달해 주는 토크 튜브, 헬륨 가스를 외부로 방출하는 헬륨 배출 통로와 복사 차폐막 등으로 구성된다. 그림 1은 각 부분을 조합한 모의 회전자의 개략도이다.

바깥쪽 용기는 모터, 슬립링과 연결되어 회전력을 전달 받고 안쪽 용기를 감싸주는 부분이고, 안쪽 용기는 초전도 발전기의 회전자를 모사한 공간이다. 각 용기의 몸체는 스테인레스 스틸 튜브를 사용하여 구성했는데, 구조적 안정성을 고려하여 바깥쪽 용기는 외경

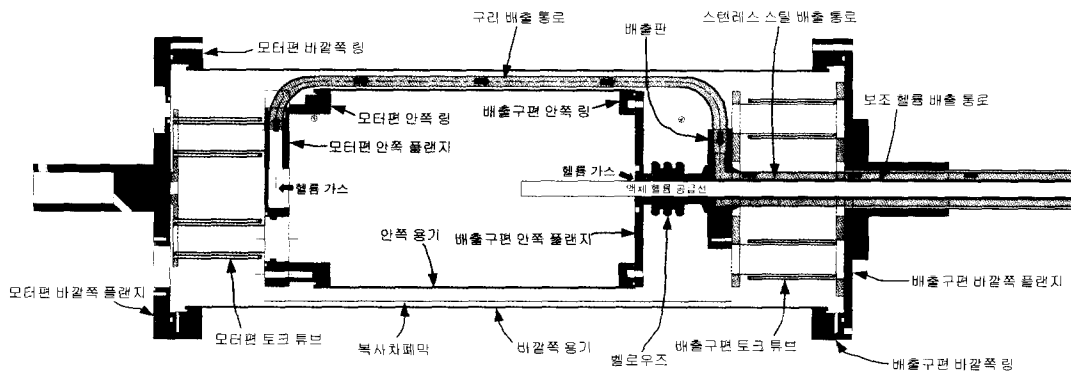


그림 1. 모의 회전자의 개략도
 Fig. 1. Schematic diagram of the experimental rotor

152.4 mm, 두께 1.0 mm, 길이 420 mm인 튜브를, 안쪽 용기는 외경 127 mm, 두께 1.0 mm, 길이 200 mm인 튜브를 사용하였다.

토크 튜브는 안쪽, 바깥쪽 용기와 결합하므로 양 끝 부분의 온도가 상온과 극저온이 된다. 매우 큰 온도차에 의한 전도 열유입을 줄이기 위해, 토크 튜브는 그림 1과 같이 직경 1 inch, 7/8 inch, 3/4 inch인 스텐레스 스틸 튜브를 병렬로 용접 연결하여 3 단으로 구성했다. 이러한 구조는 안쪽, 바깥쪽 용기를 1 개의 튜브로 단순 연결하는 것과 비교하여 열유입 경로의 길이가 3 배이므로, 열유입 크기는 1/3이 된다. 토크 튜브는 모터편과 배출구편에 각각 2 개씩 사용했는데, 구조적 안정성과 더불어 안쪽 용기로의 열유입을 2 W 이하로 유지하기 위한 개수이다.

헬륨 배출 통로는 주요 배출 통로와 보조 배출 통로로 구성하였다. 주요 배출 통로는 복사 차폐막과 토크 튜브를 냉각하여 안쪽 용기로의 열유입을 차단하는 역할을 한다. 주요 배출 통로를 통한 헬륨의 흐름이 원활하지 못해 안쪽 용기의 내부 압력이 높아질 경우, 헬륨 증기가 외부로 곧바로 방출될 수 있도록 보조 배출 통로를 설계하였다. 주요 배출 통로는 구리 배출 통로와 스텐레스 스틸 배출 통로로 구성된다. 구리 배출 통로는 안쪽 용기에서 시작하여 복사 차폐막을 냉각하고 배출판으로 연결되는 부분이고, 스텐레스 스틸 배출 통로는 배출판에서 시작하여 배출구편 플랜지로 연결되는 부분이다. 구리 배출 통로는 복사 차폐막을 끌고루 냉각하기 위해 안쪽 플랜지에서 방사상으로 4 개 방향으로 나누어 3/8 inch 구리 튜브와 90° 구리 엘보우를 사용하여 구성했다.

스텐레스 스틸 배출 통로의 단면은 1/2 inch와 7/8 inch 스텐레스 스틸 튜브 사이의 공간으로서 고리 모양을 이루고 있다. 7/8 inch 스텐레스 스틸 튜브의 고온부쪽 끝 부분은 바깥쪽 플랜지의 1 inch 튜브와 연결되고, 그 사이 공간이 진공 단열되어 스텐레스 스틸 배출 통로를 통한 열유입을 줄이도록 설계하였다. 1/2 inch 스텐레스 스틸 튜브 내부로는 외경 3/8 inch의 액체 헬륨 공급선이 삽입되고, 나머지 공간은 보조 헬륨 배출 통로가 된다. 주요 배출 통로의 끝 부분을 회전축 중심에 위치하게 한 것은 구조적인 측면도 있지만, 원심력에 의한 대류 열유입 효과[2]를 상쇄하기 위한 설계 방법이다.

복사 차폐막은 구리 배출 통로에 납땜하여 차가운 헬륨 가스에 의해 냉각되도록 두께 0.2 mm인 구리울

사용하였다. 모의 회전자를 구성하는 요소들의 연결 부위에서, 연결된 두 물체 사이의 냉각 속도나 온도 차이에 의해 생기는 열적 수축에 의한 응력을 방지하기 위해 벨로우즈를 설치했다.

2.2 전체 시스템의 구성

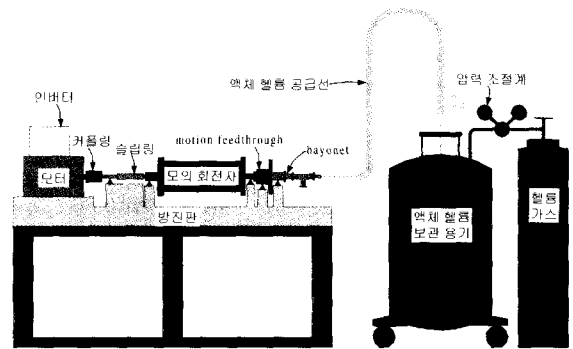


그림 2. 실험 장치의 개략도
 Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus

모의 회전자 각 부분의 진공 밀폐 성능을 확인한 후, 내부에 센서를 설치하고 조립을 완료하여 전체 시스템을 구성했는데, 그림 2와 같다. 모의 회전자 내부에 그림 3과 같이 22 개의 탄소 저항 온도 센서와 1 개의 액체 헬륨 레벨 센서(AMI liquid helium level sensor)를 설치하여 온도 분포와 액체 헬륨 축적 높이를 측정하도록 했다. 액체 헬륨 레벨 센서는 액체 헬륨 축적 높이가 0.5 inch일 때 0%, 2.5 inch일 때 100%를 나타내도록 설치하였다.

진공 밀폐 성능이 확인된 바깥쪽 용기, 안쪽 용기, 배출판 부분, 안쪽 플랜지 부분을 연결하여 모의 회전자를 조립하였다. 복사 차폐막 주위로는 다층 단열재(Oxford superinsulation NRC-2)를 3 바퀴 감아서 단열하였다. 그림 4는 바깥쪽 용기를 제외한 모의 회전자 연결 상태를 나타낸다. 안쪽, 바깥쪽 용기 사이의 진공도는 모의 회전자의 단열 성능을 가늠하는 중요한 요소이므로 모의 회전자의 조립 과정에서 실험 장치의 세척을 병행하였다.

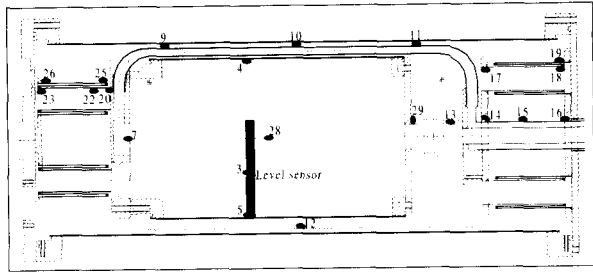


그림 3. 센서 설치 위치
Fig. 3. Position of the sensors

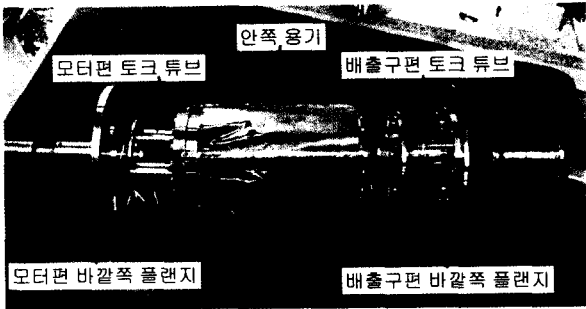


그림 4. 모의 회전자의 내부 조립 상태
Fig. 4. Assembled inner vessel of the experimental rotor

3. 실험 결과

3.1 실험 방법

모의 회전자 내부로 액체 헬륨을 공급하기 위해 액체 헬륨 보관 용기와 고압의 헬륨 가스통을 연결하였다. 가스통 압력 조절계의 2 차 계지를 조절하여 보관 용기에 압력을 가하면, 액체 헬륨 공급선 양단의 압력차에 의해 헬륨을 공급할 수 있다. 헬륨의 증발률을 측정하기 위해 bayonet의 끝에 질량 유량계를 연결하였다. 탄소 저항 온도 센서의 신호는 슬립링을 통하여 레코더에 연결하고, 액체 헬륨 레벨 센서의 신호는 레벨 미터(AMI model 110A liquid helium level meter)로 연결하여 출력하였다. 그림 5는 준비가 완료된 실험 전경이다.

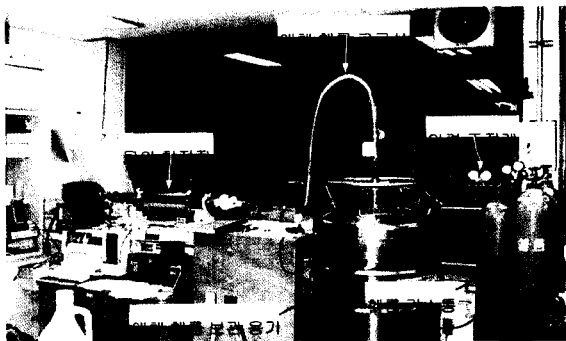


그림 5. 실험 전경
Fig. 5. Complete view of the experimental apparatus

진공 펌프 시스템을 사용하여 모의 회전자 내부를 5×10^{-5} torr의 진공 상태로 만들고, 액체 헬륨 공급선을 보관 용기 내부로 삽입하여 모의 회전자를 냉각

하기 시작했다. 시스템을 끌고루 냉각하기 위해 모의 회전자를 115 rpm으로 회전시키면서 냉각하였다. 전체 시스템이 냉각되어 액체 헬륨이 축적되기 시작하면 본격적인 단열 특성 실험을 진행하였다. 실험 변수는 회전 속도와 액체 헬륨 레벨이었다.

3.2 모의 회전자 냉각

그림 6은 모의 회전자 각 부분의 냉각 곡선을 가지화한 것인데, 각 탄소저항(CR)의 번호는 그림 3의 것과 일치한다. 냉각을 시작하여 액체 헬륨이 축적되는데 걸린 시간은, 냉각 도중 가압을 하여 액체 헬륨

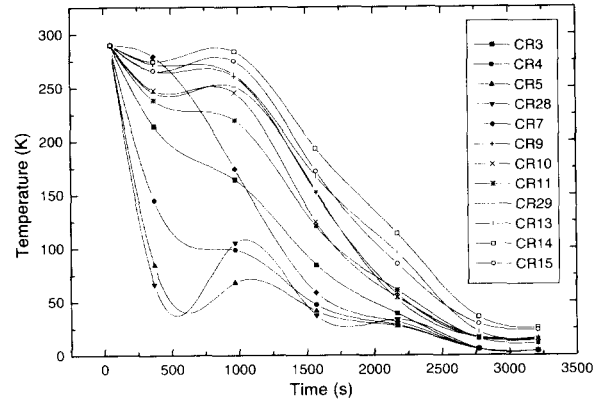


그림 6. 모의 회전자의 냉각 곡선
Fig. 6. Cool-down curve of the experimental rotor

을 공급한 빈도에 따라 달라지지만, 대략 50~70 분이였다. 냉각하는 동안 배출 통로 출구의 온도를 측정하였는데, 냉각 초기에는 -70°C 이던 것이 점차 낮아져서 냉각이 진행되는 대부분의 시간 동안 $-150 \sim -160^{\circ}\text{C}$ 로 유지됨을 관찰하였다.

충분한 냉각이 이루어지고 모의 회전자에 액체 헬륨이 축적되면 단열 특성 실험을 진행하였는데, 회전 중 온도 분포를 측정하였다. 그림 7은 전형적인 모의 회전자 각 부분의 회전 중 온도 분포를 나타낸다. 회전 중에는 액체 헬륨이 안쪽 용기 벽면을 모두 냉각하므로 벽면(CR3~CR5)의 온도는 4.2 K 부근으로 유지됨을 볼 수 있다. 회전 중 구리 배출 통로(CR9~CR11)의 온도 분포는 9~16 K, 스텐레스 스틸 배출 통로(CR14~CR15)의 온도 분포는 19~26 K으로 나타났다. 각 실험에 대해 회전 중 온도 분포는 거의 일정하게 나타났는데, 시스템이 끌고루 냉각되면서 어느 정도 시간이 지나면 정상 상태에 도달하기 때문이다.

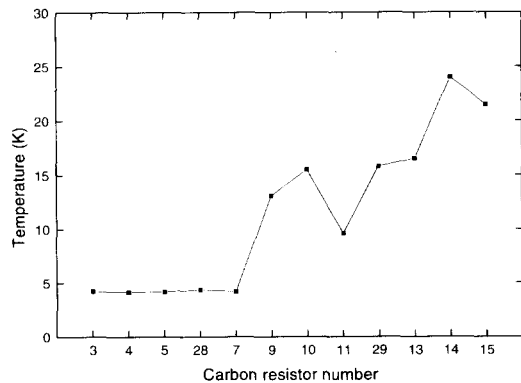


그림 7. 회전 중 모의 회전자의 온도 분포
Fig. 7. Temperature distribution of the experimental rotor at rotating state

3.3 총 열유입

모의 회전자로의 총 열유입을 측정하기 위해 열유입 측정 실험을 하였다. 열유입 측정 실험은 안쪽 용기에 액체 헬륨을 축적하고, 모의 회전자를 임의의 속도로 회전시킨 뒤, 레벨에 따라 일정 시간이 지난 뒤 정상 상태에 도달하면 정지하는 방식으로 진행되었다. 각 실험에서 헬륨의 증발률을 관찰하여 안쪽 용기로의 총 열유입을 계산했는데, 실험에서 얻은 헬륨의 증발률과 1 atm에서의 증발열을 곱하여 아래와 같이 구하였다.

식 (1)에서 Q 는 총 열유입, \dot{m} 은 헬륨의 증발률, h_{fg} 는 헬륨의 증발열이다. 안쪽 용기 내부의 압력은

$$Q = \dot{m}h_{fg} \quad (1)$$

1 atm보다 1 psi 정도 높은 108 kPa로 유추되었는데, 두 압력에서의 증발열 차이는 매우 작으므로 그냥 1 atm에서의 증발열을 사용하였다.

회전 속도를 조절하면서 각 실험에서의 증발률 변화를 관찰하였는데, 회전 중 평균 증발률과 정상 상태에서의 증발률에 대하여 안쪽 용기로의 총 열유입을 계산하였다. 그림 8은 115 rpm에서의 열유입 측정 실험 결과이다. 그림 8을 보면 회전을 시작하면 증발률

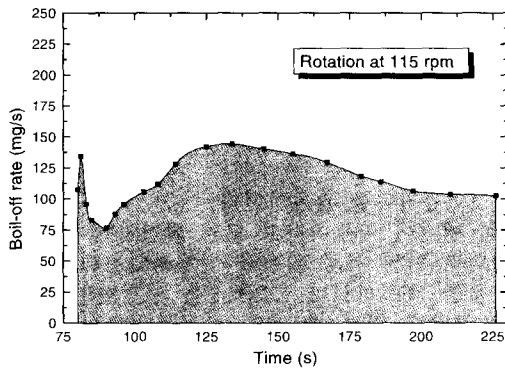


그림 8. 열유입 측정 실험(115 rpm)
Fig. 8. Heat leak measurement(115 rpm)

이 갑자기 증가하고, 최저점을 통과한 뒤 어느 정도 시간이 지나면 정상 상태에 도달하는 것을 볼 수 있다. 초기에 증발률이 갑자기 증가하는 것은 정지 상태에서 액체 헬륨이 안쪽 용기의 아랫 부분만을 냉각하여 용기 윗 부분의 온도가 높아졌으므로 액체 헬륨의 초기 증발률이 크기 때문이다. 정상 상태에 도달하기 이전에 증발률이 최저점을 통과하는 현상은 정지해 있던 헬륨 가스가 회전 가속(spin-up)하기 위하여 반경 방향의 원심력을 받아 외부로의 방출이 억제되기 때문인 것으로 사료된다. 추가 실험을 통해 초기 냉각이 충분히 이루어진 경우에 대해서는 그림 8과 같은 변화를 보이지 않고 증발률이 곧바로 정상 상태 값에 도달함을 확인할 수 있었다.

표 1은 회전 속도에 따른 각 실험에서 측정된 증발률에 대한 열유입을 계산한 결과이다. 각 실험의 초기 조건을 비슷하게 만들기 위해 회전 직전 액체 헬륨의 레벨을 일정하게 유지했다. 평균 증발률에 의한 열유입은 2.3~3.5 W의 분포를 보였는데, 실험의 초기조

표 1. 총 열유입

Table 1. Total heat leak

실험 번호 (회전 속도)	평균 열유입 (W)	정상 상태 열유입 (W)
실험1 (115 rpm)	3.42	3.00
실험2 (115 rpm)	3.02	2.95
실험3 (230 rpm)	2.37	2.96
실험4 (290 rpm)	3.16	3.28
실험5 (405 rpm)	2.60	3.32
실험6 (581 rpm)	3.46	3.19

건에 따라서 증발률의 변화 과정이 달라지므로 값의 차이가 생긴 것이다. 하지만 정상 상태에서의 열유입은 2.95~3.32 W로 비교적 일정한 값을 나타냈고, 이 때 안쪽 용기의 벽면과 중심부 헬륨 가스의 온도는 4.2 K 부근으로 유지됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 회전 속도와 총 열유입은 최소한 581 rpm까지는 무관한 것으로 나타났다. 모의 회전자의 설계에 있어서 회전 속도에 비례하는 배출 통로로의 대류 열유입[2]을 차단하기 위해 헬륨 배출 통로의 출구 부분을 축 중심에 설치했는데, 실험 결과도 이러한 설계에 따른 예상과 일치하였다.

회전 상태에서 액체 헬륨의 레벨이 높아질수록 안쪽 용기의 많은 부분이 액체 헬륨으로 채워지는데, 이것은 곧 액체 헬륨을 이용하여 4.2 K으로 냉각해야 하는 부분이 늘어난다는 것을 의미한다. 따라서 레벨이 높아질수록 헬륨의 증발률이 커질 것이고, 열유입이 늘어나는 것처럼 보이게 된다. 특히 안쪽 용기의 양쪽 플랜지는 복사 차폐막이나 다층 단열재가 없는 상태이므로, 상온부로부터의 복사 열유입을 모두 전달받아 레벨에 따른 증발률 변화에 큰 영향을 줄 것이다. 581 rpm으로 회전할 때 레벨에 따른 정상 상태 열유입을 측정해 보았는데, 액체 헬륨 축적 높이가 안쪽 용기 반경의 20~50 %로 변할 때 3.5~4.5 W의 값을 나타냈다.

3.4 전도와 복사 열유입

모의 회전자 각 부분의 온도 분포를 바탕으로 토크 튜브, 배출 통로를 통한 안쪽 용기로의 전도 열유입을 구하였다. 모의 회전자의 내부는 고진공으로 유지되기 때문에 대류에 의한 열유입은 무시할 수 있으므로, 총 열유입에서 전도 열유입을 제외한 값을 복사 열유입으로 생각하였다.

그림 9와 그림 10은 모터편 토크 튜브와 배출구편 토크 튜브의 온도 분포와 구간별 전도 열유입을 나타낸 그림이다. 모터편 토크 튜브의 구간별 전도 열유입은 저온 구간으로 갈수록 증가하여 1.04 W가 되는데, 이것은 복사에 의한 열이 토크 튜브를 통하여 안쪽 용기로 유입되기 때문이다. 구간별 전도 열유입 계산에 사용된 식은 아래와 같다. 여기서 T_h 는 고온부의 온도, T_c 는 저온부의 온도, A 는 전도 열유입 면적, L 은 저온부와 고온부 사이의 거리, k_h 와 k_c 는 각각 고온부와 저온부 온도에서의 열전도도이다.

$$Q = k_{mean}A \frac{T_h - T_c}{L} \quad (2)$$

$$k_{mean} = \frac{k_h + k_c}{2} \quad (3)$$

모터편 토크 튜브와 안쪽 플랜지는 끼워맞춤 방식으로 연결되는데, 연결 부분의 열 접촉 저항을 계산해 보았다. 열 접촉 저항은 다음 식(7)을 사용하여

$$R''_{t,c} = \frac{T_h - T_c}{Q} \quad (4)$$

구했는데, 토크 튜브의 저온부 10 mm가 안쪽 플랜지 구멍에 삽입되고 원주 방향으로의 튜브 온도 분포는 토크 튜브 구조의 대칭성으로 그 온도가 선대칭(axisymmetric) 분포를 보인다고 가정하여, 40 K으로 일정하다고 생각하였다. 안쪽 플랜지의 온도는 15 K, 유입되는 전도 열전달량은 토크 튜브의 저온부에서 계산된 1.04 W를 사용했는데, 이 때 열 접촉 저항은 $0.014 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 로 계산되었다. 열 접촉 저항으로 인해 토크 튜브 저온부 끝의 온도는 15 K보다 25 K 높아지게 되었고, 결과적으로 안쪽 용기로의 전도 열유입을 줄일 수 있게 되었다.

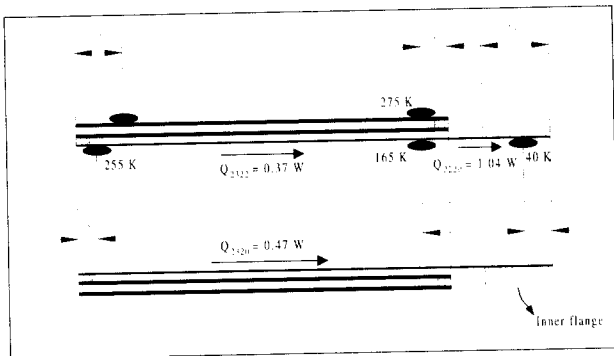


그림 9. 모터편 토크 튜브를 통한 열유입
Fig. 9. Motor side torque tube heat leak

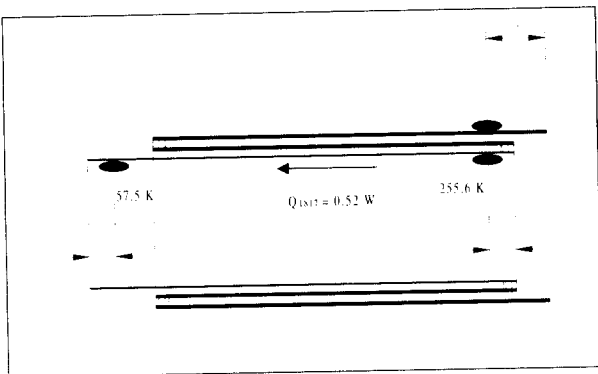


그림 10. 배출구편 토크 튜브를 통한 열유입
Fig. 10. Vent side torque tube heat leak

구리 배출 통로와 스텐레스 스틸 배출 통로, 보조 배출 통로의 벨로우즈 부분에 대하여 온도를 측정하고, 안쪽 용기로의 전도 열유입을 계산하였다. 배출통로 각 부분의 온도는 여러 번의 실험 결과를 평균한 값을 사용했다. 그림 11~13은 각각의 헬륨 배출 통로를 통한 전도 열유입을 나타내는데, 구리 배출 통로와 보조 배출 통로를 통한 안쪽 용기로의 총 열 유입은 0.1 W보다 작음을 알 수 있다. 헬륨 배출 통로 내부로 차가운 헬륨 가스가 열유입 방향과 반대로 흐르기 때문에, 배출 통로를 통한 열유입은 매우 작다.

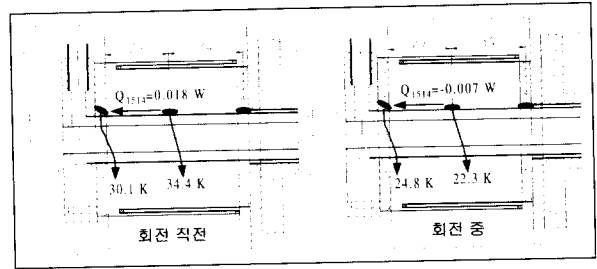


그림 11. 스텐레스 스틸 배출 통로를 통한 열유입
Fig. 11. Stainless steel vent line heat leak

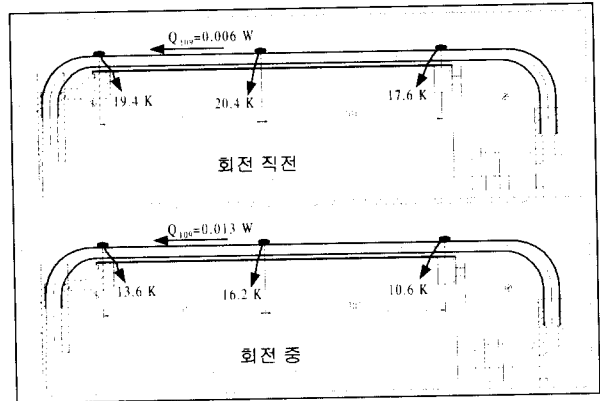


그림 12. 구리 배출 통로 열유입
Fig. 12. Copper vent line heat leak

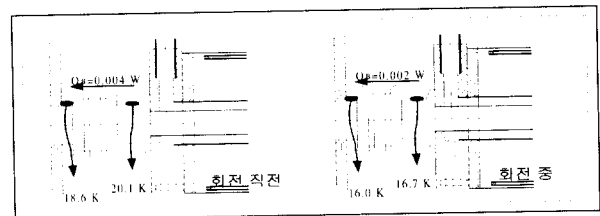


그림 13. 보조 헬륨 배출 통로 열유입
Fig. 13. Emergency helium vent line heat leak

안쪽 용기로의 전도 열유입은 모터편 토크 튜브 2 개를 통한 2 W, 헬륨 배출 통로를 통한 0.1 W를 합하여 2.1 W 정도임을 알 수 있었다. 총 열유입은 액체 헬륨 레벨에 따라 3~4.5 W이므로, 복사에 의한 열유입은 0.9~2.4 W의 크기를 가질 것이다. 이렇게 예상된 복사 열유입에 대해, 모의 회전자를 구성하는 물질의 방사율을 적절하게 가정하여, 그것이 타당한 값인지 확인해 보았다. 극저온의 안쪽 용기와 상온인 바깥쪽 용기 사이의 복사 열유입을 계산하기 위해 아래와 같은 식(8)을 사용하였다. 식 (5)에서 σ 는 스

$$Q = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R_{1-2}} \quad (5)$$

$$R_{1-2} = \frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} + \frac{1}{A_1} + 2\frac{1-\epsilon_s}{A_s\epsilon_s} + \frac{1}{A_s} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2} \quad (6)$$

테판-볼츠만(Stefan-Boltzman) 상수, T_1 은 안쪽 용기의 온도, T_2 는 바깥쪽 용기의 온도이다. 식 (6)에서

ϵ_1 과 ϵ_2 는 안쪽과 바깥쪽 용기 표면의 방사율, ϵ_s 는 복사 차폐막 표면의 방사율이고, A_1, A_2, A_s 는 각각 안쪽 용기, 바깥쪽 용기, 복사 차폐막의 복사 열전달 단면적이다.

복사 열유입을 계산하기 위해 극저온, 상온에서 스테레스 스틸과 구리의 방사율을 가정했는데, 방사율을 표면의 조건에 따라 연마 매우 좋음(highly polished), 연마 좋음(polished), 보통(as received, slightly polished), 산화됨(oxidized)의 4 가지로 나누어 열유입을 구하였다[9]-[10]. 표 2는 방사율에 따른 복사 열유입을 계산한 결과인데, 양쪽 플랜지 부분을 제외한 튜브의 옆면을 통한 복사만을 고려하였다. 안쪽과 바깥쪽 용기 표면 온도는 각각 4.2 K, 300 K으로 가정했다.

표 2. 방사율에 따른 복사 열유입

Table 2. Radiation heat leak at different emissivities

스테인레스 스틸 용기	구리 복사 차폐막	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_s	R_{1-2} (mm ⁻²)	Q (W)
연마 매우 좋음	연마 좋음	0.05	0.15	0.015	1282	0.36
연마 좋음	연마 좋음	0.1	0.3	0.015	1172	0.39
연마 매우 좋음	보통	0.05	0.15	0.05	529	0.87
연마 좋음	보통	0.1	0.3	0.05	420	1.10
연마 매우 좋음	산화됨	0.05	0.15	0.2	286	1.60
연마 좋음	산화됨	0.1	0.3	0.2	178	2.58

모의 회전자의 스테레스 스틸 안쪽 용기와 바깥쪽 용기 표면은 버핑(buffing) 처리하였고, 구리 복사 차폐막은 특별한 표면 처리 없이 납땀하는 과정에서 약간 산화되었다. 이러한 점을 고려하여 안쪽, 바깥쪽 용기와 복사 차폐막의 표면 상태를 각각 연마 좋음, 보통과 산화됨의 중간 정도로 가정하면 이 때의 복사 열유입은 1.10~2.58 W임을 알 수 있다. 다층 단열재에 의한 복사 열유입 감소 효과는, 단열재의 방사율을 적절하게 가정하면(0.06) 80 % 정도로 계산된다. 이러한 결과를 바탕으로 안쪽 용기의 옆면을 통한 열유입을 계산하면 0.66~1.55 W이다.

안쪽 용기의 플랜지를 통한 복사 열유입은, 안쪽과 바깥쪽 플랜지 사이의 복사 열전달만을 고려하여 수평 평판(parallel flat plate)으로 가정하고, 플랜지의 표면 상태를 보통이라고 가정하면 1.44 W로 계산된다. 배출구편의 경우 배출관에 의해 배출구편 안쪽 플랜지로의 복사 열유입이 대부분 차단될 것으로 생각되므로, 안쪽 용기의 플랜지를 통한 열유입은 대략 그 절반인 0.7 W로 예상했다. 이러한 대략적인 방사율 가정을 통한 계산 결과 안쪽 용기로의 복사 열유입은 1.36~2.25 W로 나타났고, 총 열유입에서 전도 열유입을 제외하여 구한 값과 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 만약 표면 상태에 대한 가정이 적절하다면, 총 열유입에서 전도 열유입을 제외하여 얻은 복사에 의한 열유입이 타당한 값이라고 말할 수 있다.

3.5 기타 관찰 사항

실험을 시작하기 전에 모의 회전자 내부의 진공은 5×10^{-5} torr로 조성하였다. 방사율을 이용한 복사 열전달의 타당성 해석을 비롯하여, 단열 성능에 대한 분

석의 신뢰성을 가지기 위해서는 초기 진공도가 실험이 끝나는 시점까지 유지되는지 확인해야 했다. 따라서 실험을 종료하고 안쪽 용기의 온도가 20~30 K인 시점에서 모의 회전자 내부의 진공도를 측정하였는데, 이 때 모의 회전자 내부 진공도는 2.58×10^{-4} torr임을 구할 수 있었다. 안쪽 용기가 4.2 K으로 냉각되면 크라이오 펌핑 효과에 의해 진공도가 더 향상될 것으로 추측되었는데, 실험 과정에서 크라이오 펌핑 효과로 예상되는 현상을 관찰하였다. 모의 회전자를 냉각할 때, 안쪽 용기의 온도가 20 K 부근으로 떨어지는 시점까지는 바깥쪽 용기의 표면에 이슬이 맺히는 것을 관찰할 수 있었다. 이슬이 맺히는 이유는 바깥쪽 용기 표면이 약간 냉각되기 때문인데, 안쪽 용기에 액체 헬륨이 축적되기 시작한 이후에는 바깥쪽 용기에 이슬이 형성되지 않았다. 만약 토크 튜브의 전도 열전달이나 복사 열전달에 의해 바깥쪽 용기가 냉각된 것이라면, 안쪽 용기의 온도가 20 K일 때와 4.2 K인 경우에 모두 이슬이 형성되어야 한다. 하지만 안쪽 용기의 온도가 4.2 K인 경우에는 이슬이 맺히지 않았고, 따라서 분자 전도(molecular conduction)에 의한 열전달이 이슬의 생성에 영향을 미친 것으로 예상할 수 있다. 20 K에서 열을 전달하던 분자들이 4.2 K에서는 안쪽 용기 표면에 응축하여 더 이상 열전달을 할 수 없게 된 것이다.

단열 시스템의 적절성에 대한 검토를 하기 위하여 안쪽 용기의 내부 압력을 확인하였다. 안쪽 용기 내부의 압력은 액체 헬륨 보관 용기의 내부 압력보다 1 psi 정도 큰 것으로 확인되었는데, 보관 용기의 압력을 1 psi 정도 높여줄 때 액체 헬륨이 공급되었기 때문이다. 액체 헬륨 보관 용기의 내부 압력을 정확하게 알 수는 없지만, 보관 용기의 밸브를 열어주어 내부 압력을 낮춘 직후 밸브를 다시 닫은 상태에서 가압하였기 때문에, 내부 압력이 1 atm 부근이라고 생각할 수 있다. 따라서 안쪽 용기의 압력은 대기압에서 1 psi 정도가 높은 수준이고, 헬륨 배출 통로의 면적도 충분하다는 결론을 내릴 수 있다.

4. 결 론

1) 본 연구에서는 초전도 발전기의 냉각 시스템을 모사한 모의 회전자를 직접 설계하고 제작하였다. 모의 회전자의 단열 특성을 확인한 결과, 액체 헬륨 레벨이 용기 반경의 20~50 %일 때 3~4.5 W인 것으로 나타났다.

2) 안쪽 용기로의 열유입의 대부분은 토크 튜브를 통한 전도 열유입과 복사 열유입이 차지했다. 배출 통로를 통한 열유입은 차가운 기체 헬륨의 냉각 능력으로 인해 0.1 W로 계산되었는데, 기체 헬륨의 냉각 능력을 고려하지 않을 경우에 비해 90 % 감소한 값이다. 이러한 결과로 볼 때 헬륨 배출 통로의 효율적인 설계가 전체 시스템의 단열 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3) 모의 회전자 실험 결과로 미루어 볼 때, 실제 초전도 발전기에서는 토크 튜브를 통한 전도 열유입이 단열 성능을 좌우하는 가장 중요한 요소가 될 것이다. 모의 회전자의 복사 차폐막과 각 용기의 표면 상태가 매우 좋은 것은 아니었으므로 실제 초전도 발전기에서는 표면 상태를 개선하여 복사 열유입을 효과적으로

감소시킬 수 있으나, 토크 튜브는 회전력을 전달하고 시스템을 지지하기 위해 어느 정도의 강성과 면적을 유지해야 하기 때문에 특별한 진도 열유입 감소 요인은 찾을 수 없다.

감사의 글

본 연구는 한국 전기연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

참고 문헌

[1] A. Bejan, "Improved thermal design of the cryogenic cooling system for a superconducting synchronous generator", Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 1974.

[2] L. Sobel, "Experimental results of a high speed rotating liquid helium system", M.S. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 1980.

[3] S. Sunder, "The study of axial convection heat leaks in rotating cryogenic machines", M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 1993.

[4] O. Tsukamoto, M. Furuse, T. Takao, N. Tamada, S. Fuchino, I. Ishii, and N. Higuchi, "Transient heat transfer characteristics of liquid helium in centrifugal acceleration field", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 43B, pp.1489-1496, 1997.

[5] J. L. Smith, Jr., J. L. Kirtley, Jr., S. Sunder, and S. Umans, "Performance of MIT 10 MVA superconducting generator rotor", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 5, No. 2, pp. 445-448, 1995.

[6] K. Yamaguchi, M. Takahashi, R. Shiobara, and K. Kimura, "Development of a 70 MW class superconducting generator", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 7, No. 2, pp. 527-530, 1997.

[7] F. P. Incropera, D. P. De witt, "Fundamentals of heat and mass transfer", Wiley, 3rd ed., pp. 86-88, 1990.

[8] M. F. Modest, "Radiative heat transfer", McGraw-Hill, pp. 257-258, 1993.

[9] J. A. Clark, J. R. Howell, D. P. Jordan, F. Kreith, C. L. Tien, "Advances in heat transfer", Academic Press, Vol. 5, pp. 473-475, 1968.

[10] R. Siegel, J. R. Howell, "Thermal radiation heat transfer", McGraw-Hill, 2nd ed., pp. 833-835, 1981.

[11] A. Senthil Kumar, M. V. Krishna Murthy, S. Jacob, S. Kasthuriengan, "Thermal performance of multilayer insulation down to 4.2 K", presented at 1999 Cryogenic Engineering Conference, Montreal, Canada, 1999.

저자 소개



이창규(李昌圭)

1975년 10월 31일 생, 1997년 한국과학기술원 기계공학과 졸업, 현재 동대학원 기계공학과 석사과정



정상권(丁常權)

1962년 8월 16일 생, 1985년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 MIT 기계공학과 졸업 (공학박사), 1992년~1995년 MIT Plasma Fusion Center 연구원, 현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수