

## 회전하는 극저온 시스템의 단열 특성에 관한 실험적 연구

이창규, 정상권  
한국과학기술원

## Experimental Investigation of the Rotating Cryogenic System

Changgyu Lee, Sangkwon Jeong  
KAIST

maradona@cais.kaist.ac.kr

**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.

## 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 증발열은 1 atm에서 20.9 J/g밖에 안되고, 4.2 K의 헬륨 증기가 상온으로 되기까지는 현열 엔탈피가 1542 J/g이나 소요되므로, 액체 헬륨의 증발열만을 초전도 발전기의 냉각에 사용하는 것은 매우 비효율적인 저온 시스템의 설계 방법이다. 그러므로 초전도 회전자를 냉각시킨 헬륨 증기는 토크 튜브와 복사 차폐막 등을 최대한 저온으로 냉각할 수 있도록 설계해야 한다.

본 연구의 목표는 초전도 발전기의 냉각 시스템을 모사한 모의 회전자를 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

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. Fig. 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. 토크 튜브는 안쪽 용기에 회전력을 전달하고 용기를 지지하는데, 튜브의 양 끝은 각각 바깥쪽 용기와 안쪽 용기에 연결되므로 그 온도는 상온과 극저온이 된다. 토크 튜브는 튜브를 통한 전도 열유입을 줄이기 위해 직경이 다른 3개의 스텐레스 스틸 튜브를 이용하여 Fig. 1과 같이 3단으로 구성하였다. 토크 튜브는 모터편과 배출구편에 각각 2개씩 사용했는데, 구조적 안정성과 더불어 안쪽 용기로의 전도 열유입을 2 W 이하로 유지하도록 결정한 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 풀고루 냉각하기 위해 안쪽 플랜지에서 방사상으로 4개 방향으로 나누어 구성했다. 주요 배출 통로의 최종 부분을 회전축 중심에 위치하게 한 것은 구조적인 측면도 있지만, 기존의 연구에서 발견된 회전 속도에 따른 원심력에 의한 대류

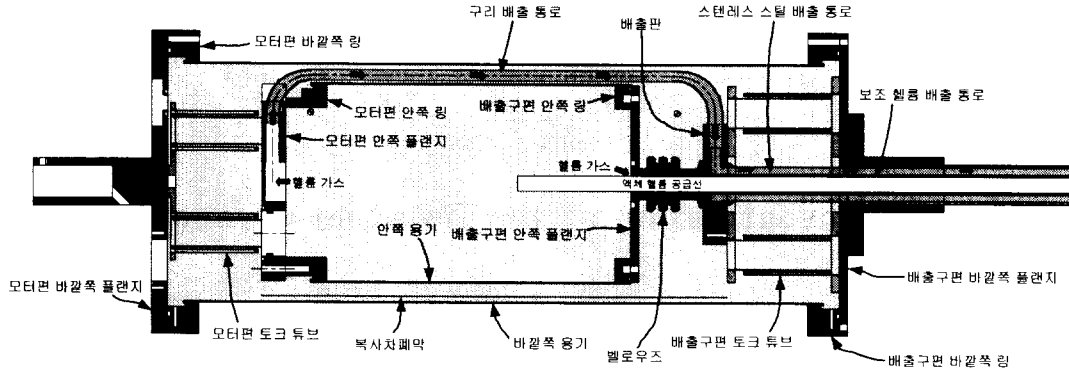


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental rotor

열유입 효과(1)를 상쇄하기 위한 설계 방법이다. Fig. 2는 모의 회전자를 포함한 전체 실험 장치의 구성이다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 모의 회전자 냉각

액체 헬륨의 공급을 통한 모의 회전자의 냉각을 시작하여 액체 헬륨이 축적되는데 걸린 시간은, 냉각 도중 가압을 하여 액체 헬륨을 공급한 빈도에 따라 달라지지만, 대략 50~70 분이였다. 냉각하는 동안 배출 통로 출구의 온도를 측정하였는데, 냉각 초기에는  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이던 것이 점차 낮아져서 냉각이 진행되는 대부분의 시간 동안  $-150\text{~-}160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 유지됨을 관찰하였다.

충분한 냉각이 이루어지고 모의 회전자에 액체 헬륨이 축적되면 단일 특성 실험을 진행하였는데, 회전 중 모의 회전자의 온도 분포를 측정하였다. 각 실험에 대해 모의 회전자 각 부분의 회전 중 온도 분포는 거의 비슷한 값을 나타냈는데, 시스템이 끌고루 냉각되면서 어느 정도 시간이 지나면 정상 상태에 도달하기 때문이다.

#### 3.2 총 열유입

모의 회전자로서의 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 구하였다.

회전 속도를 조절하면서 각 실험에서의 증발률 변화를 관찰하였는데, 회전 중 평균 증발률과 정상 상태에서의 증발률에 대하여 안쪽 용기로의 총 열유입을 계산하였다. Fig. 3은 115 rpm에서의 열유입 측정 실험 결과이다. Fig. 3을 보면 회전을 시작하면 증발률이 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 가속하기 위하여 반경 방향의 원심력을 받아 외부로의 방출이 억제되기 때문인 것으로 사료된다.

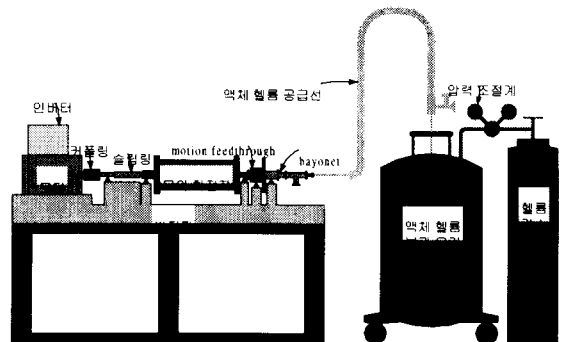


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus

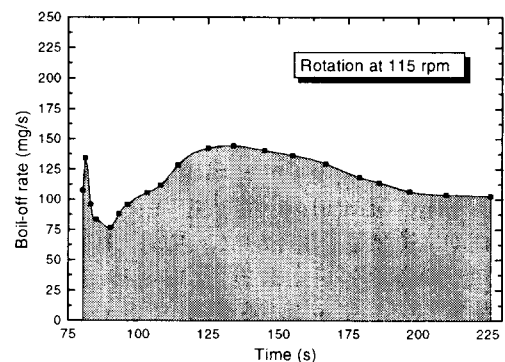


Fig. 3. Heat leak measurement(115 rpm)

회전 속도에 따른 각 열유입 측정 실험에서 실험의 초기 조건을 비슷하게 만들기 위해 회전 직전 액체 헬륨의 레벨을 일정하게 유지했다. 실험 결과 정상 상태에서의 열유입은 회전 속도에 따라서 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 통로의 대류 열유입(1)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 채워지는 데, 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.

### 3.3 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.

Fig. 4는 모터편 토크 튜브의 온도 분포와 구간별 전도 열유입을 나타낸다. 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. 모터편 토크 튜브와 안쪽 플랜지는 끼워맞춤 방식으로 연결되는데, 연결 부분의 열 접촉 저항으로 인해 토크 튜브 저온부 끝의 온도는 높아지고, 안쪽 용기로의 전도 열유입이 감소하게 된다.

구리 배출 통로와 스테인레스 스틸 배출 통로, 보조 배출 통로의 벨로우즈 부분에 대하여 온도를 측정하고, 안쪽 용기로의 전도 열유입을 계산하였다. 배출 통로 각 부분의 온도는 여러 번의 실험 결과를 평균한 값을 사용했는데, 구리 배출 통로와 보조 배출 통로를 통한 안쪽 용기로의 총 열유입은 Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 0.1 W 보다 작음을 알 수 있다. 헬륨 배출 통로 내부로 차가운 헬륨 가스가 열유입 방향과 반대로 흐르기 때문에, 배출 통로를 통한 열유입은 매우 작다.

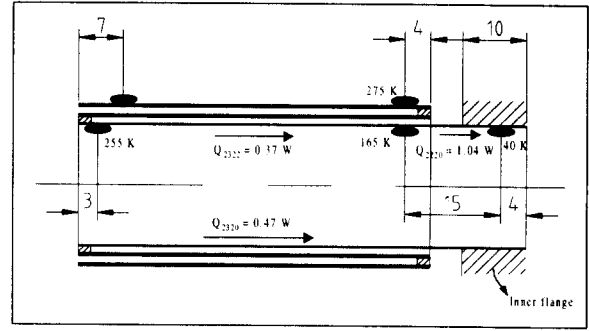


Fig. 4. Motor side torque tube heat leak

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 아래의 식(2)을 사용하였다.

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

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

복사 열유입을 계산하기 위해 극저온, 상온에서 스테인레스 스틸과 구리의 방사율을 가정했는데, 방사율을 표면의 조건에 따라 연마 매우 좋음, 연마

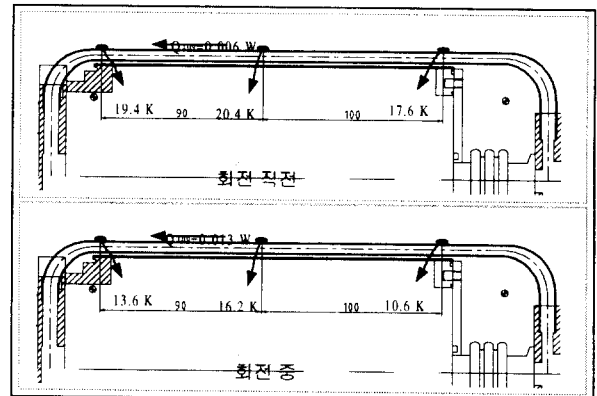


Fig. 5. Copper vent line heat leak

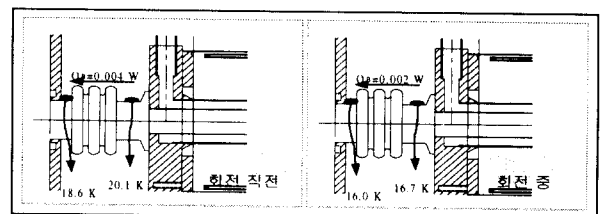


Fig. 6. Emergency helium vent line heat leak

좋음, 보통, 산화됨의 4 가지로 나누어 열유입을 구하였다(3)-(4). Table 1은 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.

모의 회전자의 스테레스 스틸 안쪽 용기와 바깥쪽 용기 표면은 버핑 처리하였고, 구리 복사 차폐막은 특별한 표면 처리 없이 납땜하는 과정에서

Table 1. Radiation heat leak at different emissivities

스테인레스 스틸 용기	구리 복사 차폐막	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_s$	$R_{1,2}$ (mm <sup>2</sup> )	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

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 가정(0.06)하면 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 평판으로 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.

#### 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 전도 열유입 감소 요인은 찾을 수 없다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] L. Sobel, "Experimental results of a high speed rotating liquid helium system", M.S. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 1980.
- [2] M. F. Modest, "Radiative heat transfer", McGraw-Hill, pp. 257-258, 1993.
- [3] 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.
- [4] R. Siegel, J. R. Howell, "Thermal radiation heat transfer", McGraw-Hill, 2nd ed., pp. 833-835, 1981.