

초전도발전기의 냉각시스템 해석

Analysis of the cooling system for a superconducting generator

김 국 원*, 정 태 은**, 신 호 철***
K. W. Kim, T. E. Chung, H. - C. Shin

Key words : Superconducting generator(초전도발전기), Cooling system(냉각시스템), Heat exchanger(열교환기), Porous material(다공성매질)

Abstract

The superconducting winding in rotor of a superconducting generator should be kept at extremely low temperature of 4-5 K to maintain the superconducting state. For this purpose the liquefied helium is used for the coolant and it is very important to analyze and design a cooling system making effective use of the coolant. In this paper, the typical heat exchanger of a superconducting generator with the flow passage is analyzed with regard to the thermal equilibrium. An experimental constant relevant to the flow condition in the flow passage is determined with heat exchange experiments in cryostat. Also a new heat exchanger with porous material is proposed and designed. Results of the numerical analysis for the temperature distributions for the torque tube and the coolant are reported and the efficiency of the heat exchanger is discussed from the viewpoint of amounts of coolant needed.

1. 서론

초전도발전기의 회전자는 재래식 발전기에 비해 그 구조 및 특성에 있어 많이 다르다. 회전자의 양 끝은 토크튜브라고 불리는 얇은 원통에 의해 지지 되는데, 이 토크튜브의 한쪽 끝은 상온부에 연결되며, 다른 한쪽은 액체헬륨의 극저온 상태와 만난다. 즉, 초전도발전기의 경우 회전자의 계자권선이 초전

도선으로 되어 있기 때문에 4-5K의 극저온 상태를 유지해야 하며 이를 위해 액체 헬륨이 공급되고 있다. 이때 토크튜브를 따라서 극심한 온도구배가 발생하게 되며, 이 온도구배의 분포형태에 따라 계자 권선부로의 열유입 정도가 결정된다. 계자권선부로의 열유입이 큰 경우 냉각에 필요한 액체헬륨의 양도 많이 요구되므로 효율적인 냉각 시스템의 설계는 매우 중요한 일이다. 전형적인 초전도발전기의 회전자 구조를 Fig.1에 나타내었다. 회전자의 가장 바깥에 위치한 outer rotor는 흔히 뎀퍼라 불리는 데, 역상 및 고주파 자계로부터 내부를 보호하는 역할을 하며, 진공단열층의 외벽이 된다. 재질로는 동

*LG전자 멀티미디어 연구소

**고동기술원

***서울대학교 기계설계학과

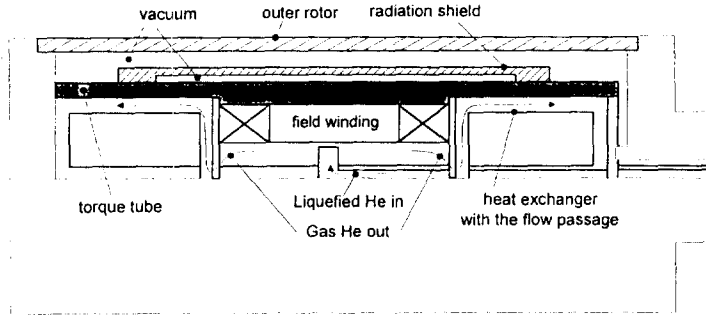
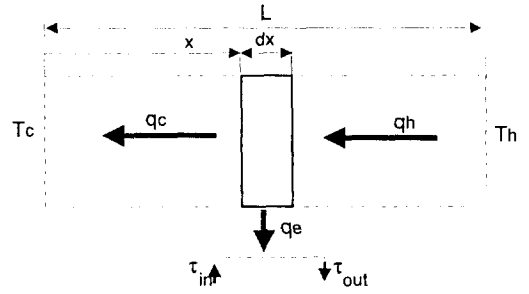


Fig.1 Schematic diagram of a superconducting generator

을 사용한다. 복사차폐막(radiation shield)은 댐퍼와 계자권선부 사이에 설치되며, 양 끝단이 토크튜브에 연결되어 있다. 계자권선부로의 복사 열전달을 줄여주는 역할을 하며, 재질은 동합금이다. 계자권선은 Nb Ti 필라멘트를 꼬아서 동 매트릭스내에 넣은 초전도선을 이용한다. 토크튜브는 보통 스테인레스강으로 만들어지며 계자권선부로 회전력을 전달함과 동시에 전도열을 전달하게 된다.

초전도 발전기에 있어 외부로부터의 열 유입은 고정자와 회전자의 온도차에 의해 생기는 복사열과 토크튜브를 통한 전도열이 있다. 복사열의 차폐를 위해서 설치하는 복사 차폐막은 복사열의 일부만 계자권선부로 전달되게 하고 나머지는 토크튜브로 전도되게 한다. 이 전도열을 차단하기 위해, 계자권선을 냉각하고 기화된 헬륨가스를 토크튜브로 보내 열교환을 이루게 한다. 이러한 열교환장치로는 단순 유로방식에서 최근에는 토크튜브 내측에 나선형 유로를 설치하거나 토크튜브 내부에 물결무늬의 헬륨가스 경로를 설치하는 방안 등⁽¹⁾이 이용되기도 한다.

본 연구에서는 초전도발전기의 전형적인 열교환장치인 유로방식에 대해 수치해석을 수행하였다. 유로 내에서의 열전달계수를 결정하기 위해 저온조에서의 열교환실험을 수행하였으며, 이를 이용하여 토크튜브 및 헬륨가스의 온도 분포를 계산할 수 있었고 열평형의 관점에서 냉각에 필요한 헬륨가스의 양을 구할 수 있었다. 또한 보다 효과적이고 새로운 방안으로 다공성 매질을 이용한 열교환장치를 제안



- q_h : conductive heat from the hot part
- q_c : conductive heat to the cold part
- q_e : convective heat by the coolant
- T_c : temperature of the torque tube
- T_h : temperature of the hot part
- τ : temperature of the coolant
- x : displacement from the cold part
- L : total length from the cold part to the hot part

Fig.2 Control volume in the torque tube

하였으며 수치해석을 통해 유로방식과 그 효율성을 비교하였다.

2. 열교환부 온도해석

2.1 모델링

해석을 위한 기본 가정은 다음과 같다.

- (1) 토크튜브는 두께가 비교적 얇고, 원주상으로 대칭을 이룬다.
- (2) 토크튜브의 저온부는 액체 헬륨 온도(4.2K)를, 고온부는 상온(300K)을 유지한다.

(3) 토크튜브의 외부는 진공부로 단열되어 있고, 내부로는 헬륨 가스가 가득 차서 지나간다.

따라서, 토크튜브에 대해 근사적으로 축방향으로의 1차원 해석이 가능해진다. 저온부의 끝단으로부터의 임의의 거리 x 만큼 떨어진 요소를 검사 체적으로 잡으면 Fig.2와 같다.

2.2 열평형방정식과 경계조건

정상상태에서 열평형방정식은 냉매인 헬륨의 대류에 의해서만 냉각이 이루어지므로 다음과 같은 열평형방정식이 적용된다.

$$k(T) \cdot A \cdot \frac{d^2T}{dx^2} - h(\tau) \cdot U \cdot (T - \tau) = 0 \quad (1)$$

$$h(\tau) \cdot U \cdot (T - \tau) - \dot{m}_g \cdot C_p(\tau) \frac{d\tau}{dx} = 0 \quad (2)$$

- 여기서 $k(T)$: 토크튜브의 열전도도
- A : 토크튜브의 단면적
- $h(\tau)$: 냉매의 열전달계수
- U : 유로의 둘레
- \dot{m}_g : 냉매의 유량
- $C_p(\tau)$: 냉매의 비열
- T : 토크튜브의 평균온도
- τ : 냉매의 평균온도

한편 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T(x=0) &= 4.2K \text{ (액체헬륨의 비등점)} \\ T(x=L) &= 300K \text{ (상온)} \\ \tau(x=0) &= 4.2K \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 L 은 토크튜브의 길이이다.

2.3 수치해석방법

주어진 열평형방정식은 각 계수들이 온도의 함수로 주어지며, 토크튜브와 냉매의 온도를 함께 풀어야 하는, 이차 연립미분방정식의 비선형 경계치 문제로 귀착된다. 열평형방정식의 계수인 열전도도, 열전달계수 등은 실제 자료들을 근사화 한 온도의 함수로 주어진다. 먼저 초기의 온도구배를 가정한 후, Runge-Kutta 법에 의하여 초기치 문제(initial value problems)를 풀고,⁽²⁾ 사격법에 의하여 초기

온도구배의 오차를 감소시켜 나가면서 경계치를 만족할 때까지 계산을 반복 수행한다. 경계치 문제가 풀리면 다시 저온부로 유입된 열량과 냉매의 증발에 필요한 열량이 같아질 때까지 냉매의 유량을 조절해가며 반복 계산하여, 최종적으로 경계치와 열평을 만족시키는 해를 구한다.

Fig.3은 이상의 내용으로 작성된 해석 프로그램의 흐름도를 나타낸다.

2.4 유로 내 열전달계수의 결정

초전도발전기에서 냉매가 흐르는 관은 이중관구조이며, 토크튜브의 길이가 직경에 비해 충분히 큰 경우가 아니므로 이 경우에 대한 열전달의 실험식을 구해야 한다. 실험식의 모델은 다음식으로부터 출발한다.⁽³⁾

$$Nu = C_{exp} Re^m Pr^n \quad (4)$$

여기서 m, n 은 실험에 의해 결정되는 상수이다. 누셀 수, Nu (Nusselt number)와 레이놀즈 수, Re (Reynold number)는 다음과 같이 표시된다.

$$Nu = \frac{h \cdot de}{k} \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot U_s \cdot de}{\mu} \quad (6)$$

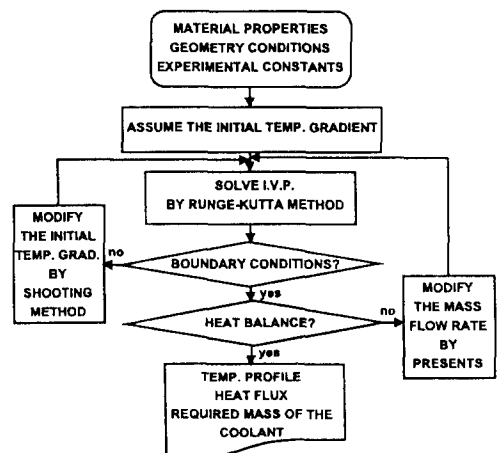


Fig.3 Flow chart of temperature analysis program

여기서 ρ : 냉매의 밀도
 μ : 냉매의 점도
 U_a : 냉매의 평균 유속

de 는 관의 유효직경을 나타내며 다음과 같이 정의된다.⁽⁴⁾

$$de = 4 \cdot \frac{\text{wetted flow area}}{\text{wetted perimeter}} = \frac{d_o^2 - d_i^2}{d_o} \quad (7)$$

여기서 d_o : 토크튜브의 외경
 d_i : 토크튜브의 내경

토크튜브 내를 흐르는 냉매의 열전달계수는 유동 조건과 관련된 실험상수를 포함한 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$h(\tau) = \frac{k(\tau)}{de} C_{exp} \left\{ \frac{\rho(\tau) U_a de}{\mu(\tau)} \right\}^{0.8} Pr(\tau)^{0.3} \quad (8)$$

여기서 $k(\tau)$ 는 냉매의 열전도도이며, 온도의 함수이다.⁽⁵⁾ 열전달계수를 온도, 유동 조건과 관련된 항으로 분리하여 정리하면 다음과 같다.

$$k(\tau) = C_{exp} \times \bar{h}(\tau) \times U_a^{0.8} / de^{0.2} \quad (9)$$

$\bar{h}(\tau)$ 는 온도와 관련된 항이고, $U_a^{0.8} / de^{0.2}$ 는 유동 조건과 관련된 항이다. 온도와 관련된 항은 유동 조건과는 무관하므로 $k(\tau) \times \mu(\tau)^{-0.8} \times Pr(\tau)^{0.3}$ 의 값들을 근사화시키면 대류와 관련된 헬름의 열전달계수는 다음과 같은 온도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$h(\tau) = C_{exp} \times [305.3 + 82.3 \times \ln(\tau)] \times \rho^{0.8} \times U_a^{0.8} / de^{0.2} \quad (10)$$

한편, 토크튜브에서 가스 헬륨이 가득 채워진 상태로 흘러간다고 가정하면 평균 유속은 유량에 의하여 구해진다.

$$U_a = \frac{4 \dot{m}_g}{\rho \pi de^2} \quad (11)$$

식(11)을 식(10)에 대입하여 정리하면 열전달계수의 최종식은 다음과 같이 구해진다.

$$h(\tau) = C_{exp} \times [305.3 + 82.3 \times \ln(\tau)] \times \left(\frac{4 \dot{m}_g}{\pi} \right)^{0.8} \times \frac{1}{d_i^{1.8}} \quad (12)$$

실험을 통하여 토크튜브에 대한 실험상수가 결정되면 이중관 구조의 유동 상태를 고려한 식(12)을 이용하여 대류 열전달과 관련된 열전달계수를 구할 수 있다.

2.5 열교환 실험

토크튜브 내의 유동과 관련된 실험상수를 결정하기 위해 질소가스를 냉매로 하는 열교환 실험을 수행하였다. 실제 초전도발전기에는 헬륨가스가 사용되나 앞절에서 언급하였듯이 열전달계수를 온도와 유동에 대해 각각 분리하는 방법을 취하였고, 본 실험은 유동조건과 관련된 유로 내 실험상수를 찾는 것이기 때문에 손쉽게 구할 수 있는 질소가스를 냉매로 사용하였다. 실험은 저온에서의 열교환을 다루는 것으로 대기(외부환경)는 일반적인 경우와 달리 열원(heat source)으로 작용하므로 온도차에 의한 외부로부터의 복사열을 차단하기 위하여, 열교환 실험은 진공벽으로 외부와의 열교환이 차단되고 여러 개의 복사열차폐막이 설치된 저온조(cryostat) 안에서 실시하였다.

실험과 관련된 장비들을 Table 1에 나타냈다. Fig.4는 실험에서 사용된 열교환기 모형을 나타내

Table 1 Equipment of heat exchanger experiment

● Linquid Nitrogen Tank	Taylor-Wharton Company
● Cryostat	Cryosab Company
● Thermocouple	J-type
● Multi-channel Digital Recorder	OMEGA Technologies Company

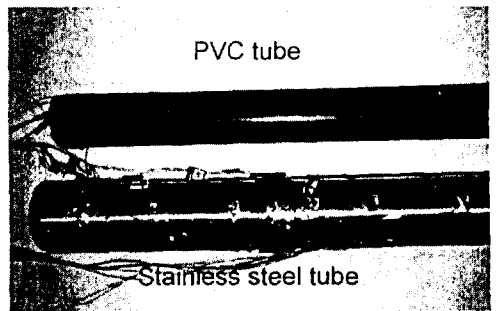


Fig.4 Heat exchanger for experiment

는데, 스테인레스 관 내부에 PVC(polyvinyl chloride)관을 끼워서 이중관 사이로 냉매를 흘려 보낸다. 이 냉매가 고온부에서의 전도열을 흡수하면서 열교환을 이루는 방식이다.

열교환실험시, 시간에 따른 온도변화가 없을 때를 정상상태로 잡았고, 이 때의 관과 냉매의 온도를 나타내었다. 실험에 사용된 질소가스의 플란틀 수는 0.7~0.8의 값을 나타내며, 레이놀즈수는 $10^3 \sim 10^4$ 사이에 있으므로, 냉매의 열전달계수를 나타내는 식(4)를 적용할 수 있다. 측정된 값과 온도해석 프로그램에서 수치적으로 구한 값을 비교하여 관 내의 유동조건과 관련된 실험상수의 값을 Fig.5에서와 같이 0.04로 산출하였다. 이로서 초전도 발전기의 토크튜브 내의 열교환과 관련된 온도분포 및 열량의 계산이 가능하게 되었다.

3. 다공성매질을 이용한 열교환 장치

3.1 다공성 매질

다공성 매질은 구상의 금속 분말을 소정의 입도로 분류하여 원하는 형태로 소결하여 제조한다. 소결금속으로 이루어진 다공성 매질은 3차원의 기공을 가지며 기계적 및 열적 충격에 강하고 가공성이나 용접성이 우수하며 공극율, 기공크기 등을 조절할 수 있으므로 매우 다양한 용도로 사용된다. 주로 급격한 온도 변화가 발생하는 유체를 취급하는 분

야에 널리 사용되는데, 다음과 같은 작용을 한다.

(1) 여과작용 : 가스나 유체로부터 미세물질 또는 불순물을 제거한다.

(2) 소음감소 : 종이나 펠트보다 기계적 강도가 더 크고 안정성 있는 음향저항기로 사용된다.

(3) 분배작용 : 가스나 유체의 분산을 조절한다.

본 연구에서처럼 열교환기의 용도로 사용될 경우, 냉매가 소결 금속의 입자와 입자 사이를 통과하면서 열접촉 면적이 증가되어 열교환 효과가 보다 향상되리라 예상된다.

Fig.6은 구리 다공성 매질의 표면을 JEOL JSM-35 Scanning Electron Microscope로 100배 확대하여 촬영한 것이다.

3.2 다공성 열교환장치 설계

토크튜브 냉각을 위해 다공성 매질을 설치하여 열교환부를 만드는 경우, 열유입량의 대부분을 다공성 매질에서 흡수한다. 따라서 열교환 효과를 높이기 위해서는 다공성 매질의 두께를 늘리는 방안 또는 다공성 매질을 여러 개 설치하는 방안을 생각할 수 있는데, 두 경우 모두 헬륨가스가 다공성 매질을 통과할 수 있는 허용압력에 의해 좌우된다.

Handley와 Hegg는 실험을 통해서, 임의로 적층된 구 입자 구조의 다공성 매질을 통과하는 기체의 압력강하, ΔP 를 유도하였다.⁽⁶⁾

$$\Delta P = \frac{f \cdot l \cdot G^2}{2 \cdot D_s \cdot \rho} \tag{13}$$

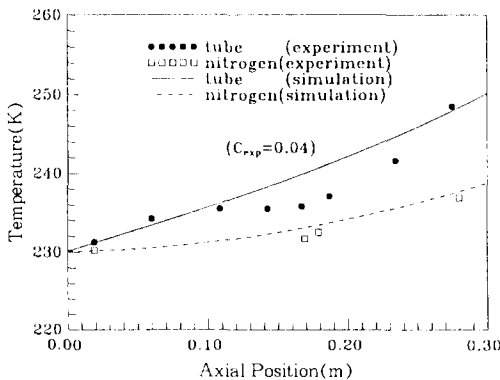


Fig.5 Experimental results and simulation at steady state

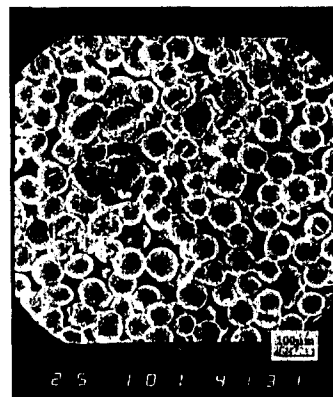


Fig.6 Porous copper(×100)

여기서 l : 다공성 매질의 통과길이

ρ : 기체의 밀도

D_s : 다공성 매질을 구성하는 구 입자의 직경

G : 자유유동 면적당 유동률

$$G = \frac{\dot{m}_g}{A_{ff}} \quad (14)$$

\dot{m}_g : 기체의 유량

A_{ff} : 자유유동 면적

$$A_{ff} = \frac{\Phi \cdot V_0}{l} \quad (15)$$

Φ : 공극율

V_0 : 다공성 매질의 총부피

f : 마찰계수

레이놀즈수, Re 는 다공성 매질에 대하여 다음과 같이 새롭게 정의된다.

$$Re = \frac{D_s \cdot G}{\mu} \quad (16)$$

여기서 μ 는 기체의 점도를 나타낸다.

이 식에서 볼 때 압력강하는 다공성 매질의 두께, 공극율 그리고 다공성 매질을 통과하는 기체온도의 함수임을 알 수 있다. 다공성 열교환장치를 설계함에 있어서, 위의 압력강하식을 이용하여, 공극율과 다공성 열교환기의 두께를 변수로 하고 다공성 열교환기를 통과하는 헬륨가스의 온도를 100K로 가정했을 때 발생하는 압력강하를 Fig.7에 나타냈다. 제작의 편의성 등을 고려하여 두께 및 공극율을 각각 80mm, 30%로 선정하였고 이 경우 헬륨가스의 압력강하는 0.125atm이 된다. Table 2는 계산에 사용된 유량 및 제원을 나타낸다.

Table 2 Parameter values for numerical simulation

Parameter	Value
mass flow rate, \dot{m}_g (kg/s)	8.6×10^{-5}
outer diameter of torque tube, d_o (m)	0.126
inner diameter of torque tube, d_i (m)	0.12
diameter of particles composing a porous material, D_s (m)	0.1×10^{-3}

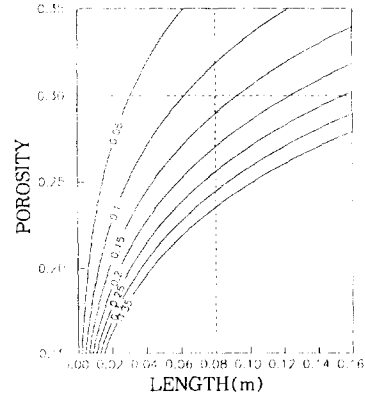


Fig.7 Pressure drop of helium gas at 100 K; numbers on the line are pressure drop in atm

3.3 다공성 열교환장치에서의 열평형방정식 및 열전달계수

다공성 열교환장치는 기존의 유로장치 중앙부에 다공성 매질을 적용한 것으로 냉매가 유로장치를 지날 때의 열교환형태에 대해서는 식(1),(2)를 그대로 적용할 수 있으며, 다공성매질을 통과할 때는 열전달계수의 값을 바꾸어주어야 한다. 즉, 다공성 매질에서의 열평형방정식은 다음과 같다.

$$k(T) \cdot A \cdot \frac{d^2T}{dx^2} - h_c(\tau) \cdot U \cdot (T - \tau) = 0 \quad (17)$$

$$h_c(\tau) \cdot U \cdot (T - \tau) - \dot{m}_g \cdot C_p(\tau) \frac{d\tau}{dx} = 0 \quad (18)$$

여기서 h_c 는 다공성 매질에서의 열전달계수이다.

Handley와 Heggs가 실험을 통해 유도한 임의로 적층된 구 입자 구조의 다공성매질에 대한 콜베른 J 계수, J_{ff} 는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$J_{ff} = \frac{h_c \cdot Pr^{0.3}}{G \cdot C_p} = 0.255 \times (\Phi \cdot Re)^{-1/3} \quad (19)$$

반경 R 인 다공성 원관에 대하여 콜베른 J 계수는 다음과 같다.

$$J_{ff} = 0.255 \times \frac{\dot{m}_g^{2/3} \cdot C_p \cdot \mu^{1/3}}{(\pi R^2)^{2/3} \cdot D_s^{1/3} \cdot \Phi \cdot Pr^{2/3}} \quad (20)$$

식(20)에서 볼 수 있는 바와 같이 다공성 매질에서의 열전달계수는 공극율이 떨어질수록, 구 입자의 직경이 작아질수록 증가한다는 것을 알 수 있다.

4. 수치해석을 통한 성능비교

단순 유로방식과 다공성 매질을 이용한 방식에 대해 수치해석을 통하여 각각의 성능을 검토하였다. 수치해석시 헬륨가스의 비열은 대부분의 온도범위에서 5200J/kg-K로 일정하므로⁽⁶⁾ 이 값을 이용하였고, 발전기에 공급되는 액체헬륨의 양은 37l/hr로 정하였다. 토크튜브의 내·외경은 Table 2에 나타난 값과 같으며, 전체 길이는 0.18m이다. 토크튜브의 열전도도는 다음 식으로 근사시켜 사용하였다.⁽⁵⁾

$$k(T) = -11.4262 + 4.5480 \times \ln(T + 8.134) \quad (21)$$

Fig.8은 유로방식에서 계산된 토크튜브와 헬륨가스의 온도분포를 나타낸다. 토크튜브의 온도분포는 4.2K에서부터 300K까지 완만한 온도구배를 보이고 있으며, 헬륨가스의 경우 계자권선부와 만나는 부분에서의 4.2K에서 시작해 토크튜브부를 나올 때 20.56K의 온도를 보이고 있다. 계자권선부를 4.2K로 유지시키는 최소한의 액체헬륨량을 열평형의 관점에서 계산하면 7.112l/hr의 액체헬륨이 필요하다. Fig.9는 다공성 열교환장치에 대한 토크튜브와 헬륨가스의 온도분포를 보이고 있다. 토크튜브의 온도분포는 마찬가지로 완만한 경사를 이루지만 다공

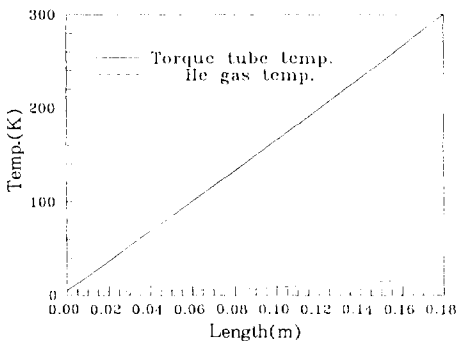


Fig.8 Temperature profile of the torque tube and the helium gas for the heat exchanger with flow passage

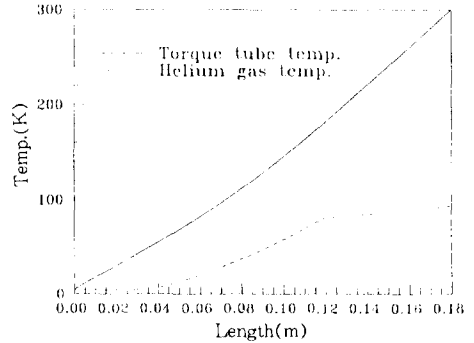
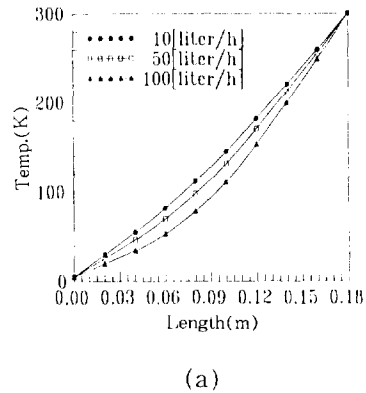
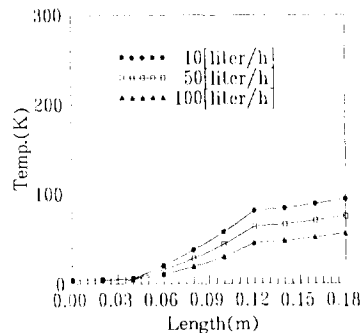


Fig.9 Temperature profile of the torque tube and the helium gas for the heat exchanger with porous material



(a)



(b)

Fig.10 Temperature distribution along the torque tube and of helium gas with different mass flow:(a) torque tube; (b) helium gas

성 열교환장치가 설치된 부분에서 약간 온도가 감소하는 경향을 보인다. 헬륨가스의 경우 다공성 열교환 장치가 설치된 부분에서 냉매인 헬륨과의 열교환이 많이 이루어져 온도구배가 급격히 상승함을 보이고 있다. 토크튜브를 빠져 나오는 헬륨가스의 온도가 92.70K이므로 유로방식에 비해 전도열을 더 많이 흡수하였음을 알 수 있다. 열평형의 관점에서 계산된 최소한의 필요량은 5.5791/hr이다. 액체 헬륨 소비량의 관점에서 유로방식에 비해 더 효과적임을 알 수 있다. 본 연구 대상인 초전도발전기의 열교환장치에 있어서 가장 중요한 점은 필요한 냉매의 양을 최소로 하는 것이므로 냉각에 필요한 액체헬륨의 양은 열교환기의 효율성을 판단하는 기준으로 사용될 수 있다. 즉, 냉매의 소비량이 적을수록 열교환기의 효율성이 좋다고 할 수 있다. 기존의 유로방식에 비해 다공성 열교환장치는 약 22%의 액체헬륨을 절감할 수 있다.

Fig.10에서는 공급되는 헬륨의 양을 변화시킬 때 토크튜브 및 헬륨가스의 온도분포를 보이고 있다. 유량이 증가할수록 토크튜브 저온부의 온도구배는 감소하게 되는데 이는 계자권선부로의 전도열이 감소함을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1) 초전도발전기의 가장 중요한 부분 중의 하나인 열교환장치에 대해 기존의 유로방식에 대한 열적모델링을 수행하였고, 유로 내의 냉매 유동에 관련된 실험상수를 결정하기 위하여 저온조에서의 열교환 실험을 수행하였다. 열평형의 관점에서 토크튜브부와 냉매의 온도분포를 계산하였으며 또한 냉각

에 필요한 냉매의 유량을 구할 수 있었다. 특히 열평형의 관점에서 계산된 냉매의 소요량은 열교환장치의 효율성을 판별하는 기준이 될 수 있으며, 본 연구결과는 새로운 열교환기의 설계에 이용될 수 있다.

2) 보다 효과적인 방법으로서 다공성매질을 이용한 열교환장치를 제안하였으며, 다공성매질을 통과하는 기체의 압력강하를 고려하여 형상을 결정하였다. 수치해석결과 기존의 유로방식에 비해 다공성매질을 이용할 경우 약 22% 액체헬륨량을 감소시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Bejan, A. 1974, "Improved thermal design of the cryogenic cooling system for a superconducting synchronous generator", Ph. D thesis, M.I.T.
2. Maron, M. J. 1982, Numerical Analysis, Macmillan Pub. Co., Inc.
3. Holman, J. P. 1981, Heat Transfer, McGraw-Hill, Inc.
4. Clark, J. A. 1968, "Cryogenic Heat Transfer", Advances in Heat Transfer, Vol. 5, pp. 325~518.
5. Barron, R. F. 1985, Cryogenic Systems, Oxford University Press.
6. Handley D. and Heggs, P. J. 1968, "Momentum and heat transfer mechanisms in regular shaped packings", Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 46, pp.251~264.