

변형 Roebuck 압축기를 이용한 J-T 네온 냉각시스템의 열역학적 설계

정 제 현[†], 정 상 권^{*}

한국과학기술원 기계공학과 대학원, *한국과학기술원 기계공학과

Thermodynamic Design of J-T Neon Refrigeration System Utilizing Modified Roebuck Compression Device

Jeheon Jung[†], Sangkwon Jeong^{*}

Graduated School of Mechanical Eng., Korea Advanced Institute of Science & Technology, Daejeon 305-701, Korea

^{*}Department of Mechanical Eng., Korea Advanced Institute of Science & Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received October 15, 2002; revision received April 16, 2003)

ABSTRACT: This paper describes a modified Roebuck compression device as a potential compression device of a rotating cryogenic refrigeration system in superconducting machine such as generator or motor. The conventional cryogen transfer method from stationary refrigeration system to rotating system can be eliminated by an on-board cryogenic refrigeration system that utilizes well-designed multi-stage modified Roebuck compression device. This paper shows basic thermodynamic analysis of modified Roebuck compression device and its application for compressing neon at 77 K with substantial pressure ratio when the rotor diameter is 0.8 m with rotating speed of 3600 rpm. The device does not require any moving part in rotating frame, but two separate thermal reservoirs to convert thermal energy into mechanical compression work. The high temperature thermal reservoir is atmospheric environment at 300 K and the low temperature thermal reservoir is assumed as a liquid nitrogen bath at 77 K. The concept of the compression device in this paper demonstrates its usefulness of generating high-pressure neon at 77 K for rotating J-T neon refrigeration cycle of superconducting rotor.

Key words: Roebuck refrigerator(Roebuck 냉각기), Roebuck compressor(Roebuck 압축기), Roebuck compression process(Roebuck 압축과정), J-T neon refrigeration cycle(J-T 네온 냉각사이클)

기 호 설 명

A : 관의 단면적 [m^2]
 a : 가속도 [m/s^2]

c_p : 정압비열 [$J/kg \cdot K$]
 h : 엔탈피 [J/kg]
 k : 비열비, c_p/c_v
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 p : 압력 [Pa]
 Q : 총 열전달량 [J]
 q : 단위길이당 열전달량 [J/m]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-869-3079; fax: +82-42-869-3095

E-mail address: propeller@kaist.ac.kr

- R : 기체상수 [J/kg · K]
- r : 회전 중심으로부터의 거리 [m]
- R_p : 압축비
- T : 온도 [K]
- v : 속도 [m/s]

그리스 문자

- α : 각가속도 [rad/s²]
- Ω : 각속도 [rad/s]
- ω : 각속도 [rad/s]

하첨자

- 1 : 관에서 1의 위치에서의 상태
- 2 : 관에서 2의 위치에서의 상태
- 3 : 관에서 3의 위치에서의 상태
- 4 : 관에서 4의 위치에서의 상태
- 5 : 관에서 5의 위치에서의 상태
- 6 : 관에서 6의 위치에서의 상태
- L : 저온의 열원
- H : 고온의 열원
- XYZ : 관성 좌표계
- xyz : 회전 좌표계

1. 서론

일반적으로 냉각시스템에서는 냉매의 압축과정이 필수적이며, 보통의 압축기는 전기에너지를 사용하여 압축과정에 필요한 일을 충당한다. 이러한 압축 일은 열역학적인 측면에서 전기에너지가 아닌 다른 종류의 일로 충당하는 것이 가능하며, 그 다른 종류의 일의 하나로 열(heat)이 가지고 있는 유용에너지(available energy)가 될 수 있다. 따라서 열의 유용에너지로 냉매를 압축하는 압축기를 구성하는 것이 가능하다. 변형 Roebuck 압축기는 고속회전 하에서 열의 유용에너지와 회전에 의한 원심력으로써 냉매를 압축하는 압축기로, 일반적인 냉각시스템에서는 흔히 사용되는 기계적인 압축기에 비해 장점을 가지지 못하지만, 고속으로 회전하는 시스템 내부에서 작동하여야 하는 냉각시스템에서는 구동부가 없기 때문에 안정적으로 동작할 수 있는 장점을 지닌다.

초전도 시스템에서는 초전도 상태의 유지를 위한 저온 냉각이 필수적이며 이에 따라 저온 냉각시스템이 부가적으로 갖추어져야 한다. 초전도 시스템 중 초전도 발전기와 모터는 냉각부가 고속으로 회전하는 특수한 환경에 있으므로 이에 적합하게 회전 냉각부와 외부의 냉각시스템을 연결하는 특별한 연결부를 필요로 한다. 이러한 연결부는 회전자와 저온 냉각시스템 사이의 동적 밀봉장치(dynamic seal)와 이를 통과하는 저온 유체 공급관으로 구성되어 있으며, 회전자의 냉각은 저온 유체가 연결부를 통하여 교환됨으로써 이루어진다.^(1,2) 이러한 구조는 전체 시스템을 복잡하고 비효율적으로 만들기 때문에, 이를 탈피하여 전체 시스템의 구조가 간단하고 유지가 쉬운 회전자 내부형 냉각시스템의 개발이 요구되었다.⁽³⁾ 회전자 내부형 냉각시스템의 하나로 Roebuck 냉각기를 응용한 회전형 헬륨 재응축 시스템⁽⁴⁾에 대한 이론적인 연구가 수행되었는데 회전형 헬륨 재응축 시스템의 이용은 기존의 냉각방식에 비하여 Fig.1과 같은 차이를 가진다. 회전형 헬륨 재응축 시스템은 기본적으로 액체 질소 온도의 고온부와 액체 헬륨 온도의 저온부에서 동작하는 냉각시스템으로, Fig.1의 (b)와 같이 액체 질소에 의한 고온부 열교환기의 냉각으로 회전자 내부에서는 액체 헬륨의 온도를 생성하기

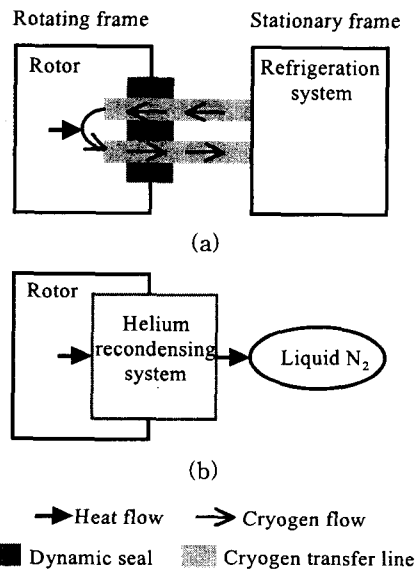


Fig. 1 (a) Conventional refrigeration system and (b) helium recondensing system.

때문에, Fig. 1의 (a)와 같이 액체 헬륨에 의한 직접적 냉각을 취하는 기존의 방식보다 효율적이다. 하지만 이러한 회전자 내부형 냉각시스템의 구현에 있어 현실적으로 회전형 시스템에 적합한 압축기의 부재라는 걸림돌이 있다. 따라서 본 논문에서는 회전형 시스템에 적합한 압축기로 변형 Roebuck 압축기를 소개하고 열역학적 해석을 실시하였으며, 이를 이용한 회전형 J-T 네온 냉각 사이클을 구성하였다.

2. Roebuck 압축기

변형 Roebuck 압축기의 개념은 Roebuck 냉각기⁽⁵⁾의 역 과정에서 도출되었다. Roebuck 냉각기는 Fig. 2와 같이 고속으로 회전하는 U-자형 관을 기본 구조로 한다. 기체가 U-자형 관을 따라 1→2→3→4→5→6의 순서로 흐를 때, 이 기체에는 2→3 과정과 4→5 과정에서 원심력에 의한 압력 변화가 발생한다. 즉, 2→3 과정에서는 기체의 압력이 증가하고 4→5 과정에서는 기체의 압력이 감소한다. 이때 2→3 과정에서 발생하는 압축 열을 제거하여 등온 압축을 형성하고, 4→5 과정에서는 열전달을 차단하여 단열 팽창을 형성하면, 6에서는 1에서보다 압력이 감소하고 온도가 낮은 기체를 얻을 수 있다. 이러한 Roebuck 냉각 과정은 가역 과정이기 때문에, 역 과정이 가능하며 역 과정에서 기체는 단열 압축 후에 등온 팽창을 겪는다. 그 결과로 기체는 초기 입구에서보다 온도와 압력이 모두 상승한다. 본 논문에서 소개하는 변형 Roebuck 압축기는 역 Roebuck 냉각 과정에서 고안되었지만, 이를 그대로 적용하지 않고 최대 압축 효율을 내도록 관의 각 영

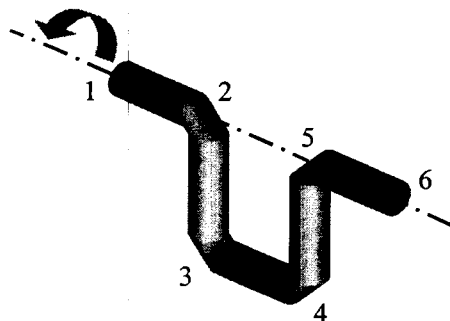


Fig. 2 U-shape tube (basic configuration of Roebuck device).

역에서의 열전달 조건을 변형하여 적용한다.

2.1 회전하는 관 내에서 기체의 압력 변화

Fig. 3과 같이 관성 좌표계(inertial frame) XYZ가 있고 이 좌표계와 원점을 공유하면서 각속도 Ω 로 회전하는 회전 좌표계 xyz가 있을 때, XYZ 좌표계에서 기술한 어느 한 점의 가속도 a_{XYZ} 와 xyz 좌표계에서 기술한 같은 점의 가속도 a_{xyz} 는 식(1)의 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned}
 \vec{a}_{XYZ} = & \vec{a}_{xyz} + \vec{a}_{xyz} \times \vec{r}_{xyz} \\
 & + \vec{\Omega}_{xyz} \times \left(\vec{\Omega}_{xyz} \times \vec{r}_{xyz} \right) \\
 & + 2 \vec{\Omega}_{xyz} \times \vec{v}_{xyz}
 \end{aligned} \quad (1)$$

2→3과 4→5에서 발생하는 기체의 압력 변화를 계산하기 위하여 Fig. 4와 같이 관에 고정된 좌표계와 검사 체적을 잡고 아래의 가정과 함께 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 적용하여 식(2),

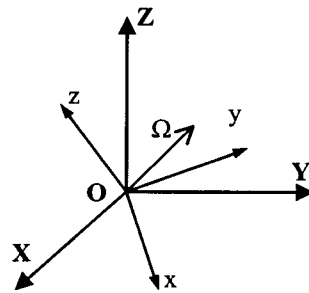


Fig. 3 Rotating coordinate system.

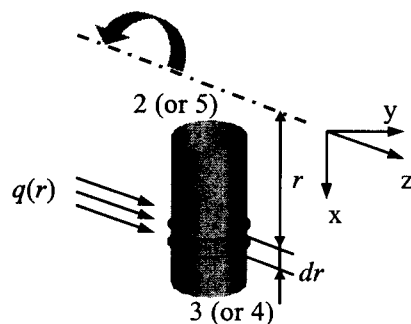


Fig. 4 Rotating tube sections.

(3), (4)를 유도하였다.

- 관에 고정된 좌표계에서 기체의 유동은 1차원 이고 정상 상태에 있다.
- 관 내를 흐르는 기체는 이상기체이다.
- 반경 방향의 속도에 의한 기체의 운동에너지는 매우 작다.
- 중력 효과를 무시할 수 있다.

Fig. 4와 같은 관 내를 유동하는 기체는 코리올리(Coriolis) 가속도와 구심 가속도를 가진다. 코리올리 가속도는 식(1)의 우변 네번째 항으로 유동과 수직한 방향으로 기체의 압력구배를 형성하고, 구심 가속도는 식(1)의 우변 세번째 항으로 유동과 동일한 방향으로 기체의 압력구배를 형성한다. 따라서 1차원 유동의 가정은 코리올리 가속도의 크기가 구심 가속도의 크기에 비하여 상대적으로 작은 경우에 성립한다. 변형 Roebuck 압축기의 운전조건에서는 코리올리 가속도의 크기가 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 1차원 유동의 가정이 적용될 수 있었다.

$$\rho v A = \dot{m} = \text{constant} \quad (2)$$

$$-A dp - r \omega^2 \rho A dr = d(v \rho v A) \quad (3)$$

$$\dot{m} d \left(h + \frac{v^2}{2} + \frac{r^2 \omega^2}{2} \right) = q(r) dr + \rho A dr \times 2v\omega \times r\omega \quad (4)$$

운동량 보존식인 식(3)에서는 코리올리 가속도에 의한 영향이 무시된 반면, 에너지 보존식인 식(4)에서는 코리올리 가속도에 의한 일의 항이 우변의 두번째 항으로 포함되어 있다. 코리올리 가속도에 의한 일은, 2→3 과정에서는 기체의 압축시 회전축을 통하여 공급해 주어야 하는 일을, 4→5 과정에서는 기체의 팽창시 회전축을 통하여 나오는 일을 나타낸다. 두 일은 서로 대칭적이기 때문에 Fig. 2와 같은 구조에서 서로 상쇄되어 외부적으로 드러나지 않는다. 앞의 세 식을 이상기체 상태방정식을 이용하여 정리하면 아래의 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{r \omega^2 dr}{RT - v^2} + \frac{v^2}{RT - v^2} \frac{dT}{T} + \frac{v^2}{RT - v^2} \frac{dA}{A} = \frac{dp}{p} \quad (5)$$

$$\frac{c_p}{R} \frac{dT}{T} - \frac{1}{RT} \frac{q}{\dot{m}} dr = \frac{dp}{p} \quad (6)$$

식(5)는 $v^2/RT \ll 1$ 이라는 앞의 세번째 가정을 도입하면 식(7)로 표현된다.

$$\frac{r \omega^2 dr}{RT} = \frac{dp}{p} \quad (7)$$

즉, 어떠한 주어진 열전달량 $q(r)$ 에 대하여 식(6)과 식(7)을 이용하여 기체의 압력 변화를 계산할 수 있다. $q(r)$ 이 가장 이상적인 경우로, 관이 등온인 상태와 단열인 상태일 때 압력 변화를 계산하면 다음과 같다.

먼저 2→3 과정에서 관이 등온인 경우 기체의 압력 변화와 열전달량은 각각 식(8)과 식(9)와 같다.

$$\ln \frac{p_3}{p_2} = \frac{(r_3^2 - r_2^2) \omega^2}{2RT_2} \quad (8)$$

$$Q = \int_{r_2}^{r_3} q(r) dr = \frac{\dot{m}(r_3^2 - r_2^2) \omega^2}{2} \quad (9)$$

반면 2→3 과정에서 관이 단열인 경우 기체의 압력 변화와 온도 변화는 각각 식(10)과 식(11)과 같다.

$$T_3 - T_2 = \frac{(r_3^2 - r_2^2) \omega^2}{2c_p} \quad (10)$$

$$\frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{k}{1-k}} = \left[1 + \frac{(r_3^2 - r_2^2) \omega^2}{2c_p T_2} \right]^{\frac{k}{1-k}} \quad (11)$$

4→5 과정에서의 결과는 2→3 과정의 결과에 하첨자 2를 4로, 하첨자 3을 5로 교체한 것과 동일하다.

2.2 변형 Roebuck 압축기

Fig. 2의 기본 구조를 가지는 Roebuck 장치에서 1→2→3→4→5→6의 순서로 기체가 유동할 때, 관벽 마찰에 의한 압력 강하를 고려하지 않는 경우 ($p_1 = p_2, p_3 = p_4, p_5 = p_6$) 압력 변화는 2→3

과 4→5 영역에서만 발생한다. 2→3에서는 압력 상승이, 그리고 4→5에서는 압력 강하가 일어나며 압력 변화량은 앞 절에서 설명한 바와 같이 구할 수 있다. 이때 만약 2→3에서의 압력 상승량이 4→5에서의 압력 강하량보다 크면, Roebuck 장치를 통과한 기체는 실질적으로는 압력 증가를 겪는다. 즉, Roebuck 장치는 기체의 압력을 증가시키는 압축기의 역할을 한다. 변형 Roebuck 압축기는 이러한 기본 원리로 동작한다. 2→3과 4→5에서 기체의 미소 압력 변화량 dp/p 는 식(7)에서와 같이 기체의 온도에 반비례하기 때문에, 2→3 과정이 낮은 온도에서 진행되고 4→5 과정이 높은 온도에서 진행되면 압력 상승량이 강하량보다 크게 된다. 이때 2→3과 4→5에서 필요한 저온과 고온의 형성은 외부 열원과 열전달을 통하여 이루어져야 한다. 저온 열원의 온도를 T_L 이라고 하고 고온 열원의 온도를 T_H 라고 하면, 2→3 과정은 T_L 에서 진행되고 4→5 과정은 T_H 에서 진행되는 경우, 가장 효과적인 압축이 이루어진다. 이와 같은 경우 입구와 출구의 압력비는 식(8)에 의하여 식(12)로 결정된다.

$$\frac{p_6}{p_1} = \exp \left[\frac{(r_3^2 - r_2^2) \omega^2}{2R} \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right) \right] \quad (12)$$

2→3과 4→5 과정이 T_L 과 T_H 에서 이루어지기 위해서는, 그 이전 과정에서의 충분한 냉각과 가열로 기체의 온도가 이미 T_L 과 T_H 로 도달하여야 한다. 이때 냉각과 가열은 열원과 열전달을 통하여 이루어질 수도 있고, 냉각이 필요한 관의 영역과 가열이 필요한 관의 영역이 서로 재생 열 교환하여 이루어질 수도 있다. 변형 Roebuck 압축기에서는 T_L 인 기체가 1로 유입되어 다시 T_L 로 6에서 방출되어야 한다고 가정하면, 1→2에서 열전달이 차단되고, 2→3에서 저온 열원과 열전달을 통하여 T_L 에서 압력 상승이 일어나고, 3→4에서 T_H 로 가열되고, 4→5에서 고온 열원과 열전달을 통하여 T_H 에서 압력 강하가 일어나고, 5→6에서 다시 T_L 로 냉각되는 경우가 가장 이상적인 작동이 된다. 이 경우 Fig.5와 같은 T-s 선도를 가진다.

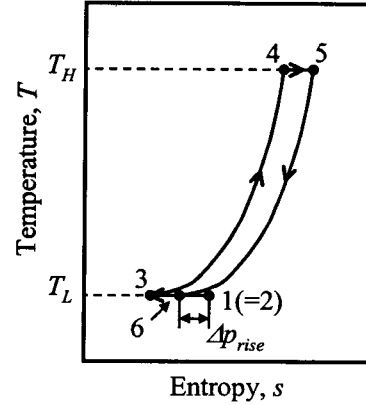


Fig. 5 T-s diagram of modified Roebuck compression process.

Table 1 Ratio of final to initial pressure

Radial distance r_3 (m)	Rotational speed ω (rpm)	
	1800	3600
0.4	1.064	1.284
0.5	1.105	1.491
0.6	1.157	1.791

본 논문에서는 네온을 냉매로 하여 아래과 같은 가정 하에서 식(12)를 적용하여 입구와 출구에서의 압력비를 계산하고 그 결과를 Table 1에 표기하였다.

- 저온의 열원은 액체 질소(77 K)이고 고온의 열원은 상온의 대기(300 K)이다.
- 이 온도 범위에서 네온은 이상기체의 성질을 만족한다.
- $r_2 = 0.1$ m이다.

Table 1에서 보는 바와 같이 출구와 입구에서의 압력비는 그리 크지 않기 때문에, 한 번의 압축 과정으로 이루어진 변형 Roebuck 압축기는 충분한 압축 성능을 발휘하지 못 한다. 다단의 압축 과정은 이러한 단점을 극복한다. 한 번의 압축 과정이 R_p 의 압력비를 내는 경우, N 번의 연속 압축 과정은 $(R_p)^N$ 의 압력비를 낼 수 있다. 다단의 구조로는 Fig.6과 같은 축대칭 구조가 바람직하다. 이러한 구조에서 변형 Roebuck 압축기는 압축 단수에 상관없이 일정한 축방향 길이를 가지며 축대칭인 온도 분포를 가진다.

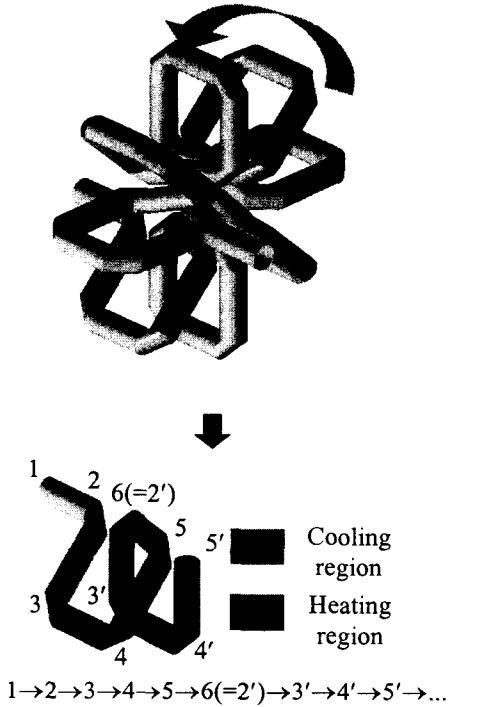
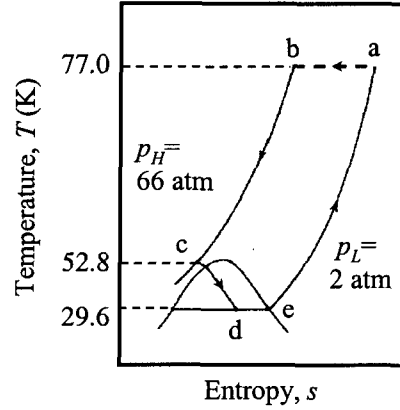


Fig. 6 Structure for multi-stage modified Roebuck compression device.

3. J-T 네온 냉각시스템

본 절에서는 변형 Roebuck 압축기의 응용으로, 고온 초전도 냉각용 회전자 내부형 J-T 네온 냉각시스템의 열역학적 설계를 수행하였다. 냉각시스템이 작동하는 회전자의 지름은 0.8 m로, 그리고 회전속도는 3600 rpm으로 가정하였으며, 저온의 열원은 77 K의 액체 질소로, 그리고 고온의 열원은 300 K의 대기로 가정하였다. 이러한 경우 Table 1을 참조하면 한 번의 압축 과정으로 발생시킬 수 있는 압력비는 1.284이고, 따라서 14번의 연속 압축 과정으로는 33의 압력비를 발생시킬 수 있다. 여기서, 압축 단수인 14는 최적화 과정이나 공학적 근거를 통하여 얻어진 결과가 아닌, 단순히 높은 압축비를 얻기 위하여 임의로 정한 수이다. J-T 네온 냉동시스템에서 압축기의 압축비와 J-T 팽창 과정 후 네온의 온도를 고려한 경우 적절한 저압부의 압력은 2 atm이 되며, 따라서 고압부의 압력은 66 atm, 그리고 J-T 팽창 과정 후 네온의 온도는 29.6 K이 된다. 이러한 작동 조건을 가지는 J-T 네온 냉동사이클은 Fig. 7



$$h_a = 143.1 \text{ J/g} \quad h_b = 125.8 \text{ J/g}$$

$$h_c = h_d = 73.6 \text{ J/g} \quad h_e = 90.9 \text{ J/g}$$

Fig. 7 T-s diagram of J-T neon refrigeration cycle.

과 같다. 냉동 용량은 17.3 J/g을 가지며 이는 회전자의 냉각과 고온 초전도 권선에서 발생하는 교류 손실(AC loss)을 충당하는 데 사용될 수 있다.

변형 Roebuck 압축기에서는 압축 일로 액체 질소가 소비된다. 2→3 과정과 5→6 과정에서 네온을 냉각하는데 사용된다. 2→3 과정에서 필요한 냉각량은 식(9)에 의하여 네온 1 g당 10.7 J이며, 따라서 14번의 연속 압축 과정에서는 149.2 J이 된다. 이는 액체 질소 0.75 g의 증발 잠열에 해당한다. 5→6 과정에서 필요한 냉각량은 네온 1 g당 300 K과 77 K에서의 엔탈피 차이인 241 J이며, 따라서 14번의 연속 압축 과정에서는 3374 J이 된다. 이는 액체 질소 7.4 g의 증발 잠열과 증발된 질소가 77 K에서 300 K에 도달하기 위한 엔탈피에 2→3 과정에서 증발한 0.75 g의 질소가 300 K에 도달하기 위한 엔탈피를 합한 양에 해당한다. 즉, 1 g의 네온을 압축하기 위하여 총 8.19 g의 액체 질소가 소비된다.

4. 결 론

초전도 발전기나 모터의 회전자 냉각에 있어, 회전자와 냉각시스템 간의 저온 유체 전달 방식을 탈피한 회전자 내부형 냉각시스템의 구성이 요구되고 있다. 이러한 회전자 내부형 냉각시스템 구성에 있어 가장 결정적인 문제는 고속 회전 하에서 안정적으로 작동할 수 있는 압축기의 부

재이다. 본 논문에서는 이에 대한 해결 방안으로 변형 Roebuck 압축기를 제시하였고, 이를 이용한 J-T 네온 냉각시스템의 열역학 설계를 수행하였다. 설계된 J-T 네온 냉각시스템은 29.6 K에서 네온 1 g당 17.3 J의 냉동 용량을 내며 액체 질소 8.19 g을 소비한다. 따라서 변형 Roebuck 압축기를 이용한 회전자 내부형 냉각시스템은 충분히 효과적으로 회전자 냉각에 적용될 수 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술사업(과제번호 : 99-DU-04-A-02) 및 BK21 사업의 지원에 의한 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Yamaguchi, K., Takahashi, M., Shiobara, R. and Kimura, K., 1997, Development of a 70 MW class superconducting generator, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 527-530.
2. Aized, D., Gamble, B. B., Sidi-Yekhlef, A., Voccis, J. P., Driscoll, D. I., Shoykhet, B. A., and Zhang, B. X., 1999, Status of the 1,000 hp HTS motor development, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 1197-1200.
3. Zhang, B. X., Driscoll, D. I., Shyokhet, B. A. and Meyer, A. A., 1997, Cryocooler integration with high temperature superconducting motors, Cryocoolers 9, pp. 943-948.
4. Jeong, S. and Lee, C. G., 1999, Rotating helium-recondensing system using Roebuck refrigerator, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 464-471.
5. Roebuck, J. R., 1945, A novel form of refrigerator, J. Applied Physics, Vol. 16, May, pp. 285-295.