

고온 초전도 회전자 냉각을 위한 탑재형 맥동관 냉동기 연구

남중원, 정상권
한국과학기술원 기계공학과

Investigation on on-board pulse tube refrigerator for high temperature superconducting rotor

Jungwon Nam, Sangkwon Jeong
Department of Mechanical engineering, KAIST

jwnam@kaist.ac.kr

Abstract - Cryogenic refrigerator system is necessary for cooling the superconducting rotor. Among the various cryogenic refrigerator systems, on-board hybrid pulse tube cryocooler is designed for cooling the superconducting rotor. Hybrid pulse tube cryocooler is composed of pulse tube cryocooler and Stirling cryocooler. This Stirling cryocooler precools the middle point of regenerator to obtain lower temperature at cold part of pulse tube cryocooler. In this paper, only Stirling cryocooler is on-boarded then rotated by motor for various rotating speeds and heat loads at cold part of Stirling cryocooler. Through this experiment, the feasibility of the on-board cryocooler is investigated.

1. 서 론

초전도 발전기는 Fig. 1처럼 회전자의 계자권선에서 구리선 대신 초전도선을 사용한 발전기이다. 전기 저항이 0인 초전도선을 사용하므로 기존의 발전기보다 강한 자계를 얻을 수 있고, 고정자는 철심을 사용하지 않아도 되므로 전기자권선 내의 도체 수를 증가시킬 수 있다. 따라서 초전도 발전기는 같은 크기인 경우 기존 발전기의 2배의 용량을 획득할 수 있으며 같은 용량의 발전기라면 치수가 절반 이하로 줄어들게 되어 소형·경량화가 가능하다. 또한 구리선 대신 초전도선을 사용하므로 저항에 의한 열손실이 적어 효율 상승을 기대할 수 있다. 그러나 고온 초전도 발전기는 고온 초전도 재료의 작동 온도인 25~30 K을 유지하기 위한 극저온 냉각 시스템이 반드시 필요하다는 단점을 가지고 있다.

미국 MIT에서 제작·실험한 초전도 발전기 [1]와 일본의 Super-GM 프로젝트 [2]에서 사용한 냉각 시스템은 회전자와 분리된 상태에서 회전자를 냉각하는 구조였다. 냉각 장치에서 흘러준 극저온 냉매가 연결부를 통해 회전자의 열을 가지

고 되돌아 나오는 방법을 택하였다. 그러나 초전도 발전기의 냉각부는 고속 회전하는 특수한 상황에 있으므로, 회전부와 냉각 시스템 사이에는 동적 밀봉장치와 이를 통과하는 저온 유체 공급관으로 이루어진 특별한 연결부가 필요하다. 그러나 고정되어 있는 냉각 시스템과 회전자를 연결하는 연결부에서 많은 열손실이 발생하고 장시간 운전시 신뢰성에 문제를 일으킨다는 단점이 있다. Zhang 등은 이러한 문제점을 보완하기 위해 냉각 시스템을 회전자에 직접 탑재하여 특별한 연결부가 필요 없도록 하는 방법을 제안하였다 [3]. 이 방법은 냉각 시스템이 회전자와 같이 회전하며 냉각부의 열을 외부로 배출하는 냉각 방법이지만 아직까지 실제로 제작된 적은 없다.

본 논문은 이와 같이 고온 초전도 발전기의 회전자 냉각 시스템을 안정적으로 구현하기 위한 회전형 냉각 시스템의 설계 및 제작에 관한 것이다. 이러한 시스템을 구현하기 위해 스텔링 냉동기와 맥동관 냉동기를 함께 사용한 하이브리드 맥동관 냉동기를 고안하였다. 이를 위해 우선 스텔링 냉동기를 탑재한 후 회전시켜 회전형 냉각 시스템의 타당성과 문제점을 파악하였다.

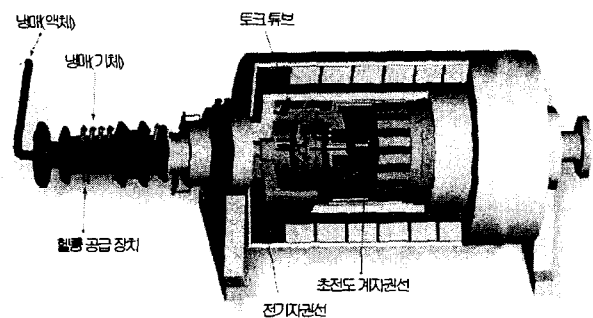


Fig. 1. Schematic diagram of superconducting generator

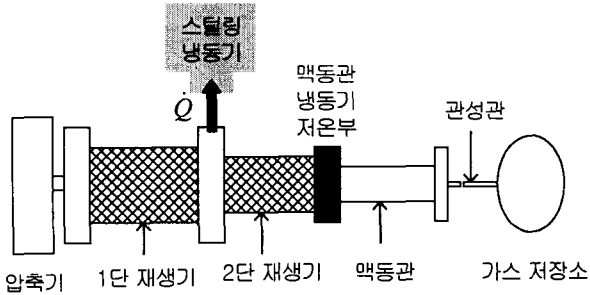


Fig. 2. Schematic diagram of hybrid pulse tube cryocooler

2. 본 론

2.1 하이브리드 맥동관 냉동기의 개념

하이브리드 맥동관 냉동기는 스텔링 냉동기와 맥동관 냉동기를 함께 사용하여 하나의 냉동기처럼 구현한 것으로 더 낮은 온도를 얻기 위해 고안한 것이다. Fig. 2는 하이브리드 맥동관 냉동기의 개념도로서 1 W @ 40 K의 성능을 목표로 설계하였다. 본 연구에 사용되는 맥동관 냉동기의 고온부와 저온부는 각각 300 K과 40 K으로 양단 사이에는 큰 온도차가 존재한다. 이러한 큰 온도차는 재생기에서의 많은 열손실 발생의 원인이 된다. 그러므로 많은 열손실에 의한 맥동관 냉동기 저온부의 냉각 능력 저하를 막기 위해 맥동관 냉동기의 재생기 중간에 스텔링 냉동기를 장착한다. 그렇게 함으로써 스텔링 냉동기의 냉각 능력만큼 맥동관 냉동기의 재생기에서의 열손실을 미리 흡수하여 맥동관 냉동기 저온부의 냉각 능력을 향상시킨다는 것이 기본 개념이다.

2.2 스텔링 냉동기 회전 실험

2.2.1 실험 장치

하이브리드 맥동관 냉동기의 탑재 회전 실험을 하기에 앞서 스텔링 냉동기만을 탑재하여 회전하는 실험을 수행함으로써 탑재형 냉각 시스템의 가능성을 확인해 보고자 하였다.

실험 장치에 쓰인 스텔링 냉동기는 Sunpower사의 CryoTel이며, 155 W의 정격 입력을 필요로 한다. 스텔링 냉동기는 2개의 베어링에 의해 지지되고 모터에서의 회전력을 받아 회전한다. 스텔링 냉동기의 저온부는 진공 용기 안에 있으며 스텔링 냉동기의 저온부에는 온도를 측정하기 위해 실리콘-다이오드(Silicon-diodes) 온도 센서가 부착되어 있다. 또한 스텔링 냉동기의 성능이 저온부의 부하에 의해 어떻게 변하는지를 알아보기 위해 저온부에 열선(Manganin heater)을 감았다. 슬립링(slip-ring)은 회전부와 고정부 사이에 연결된 전력선과 신호선들을 꼬이지 않게 해주는 역할을 하는 것으로, 본 연구에서는 스텔링 냉동기 전력선 1쌍과 온도 신호선 1쌍 그리고 열선 부하선 1쌍이 슬립링을 통해 회전부와 고정부 사이에 연결되었다.

모터의 회전 속도를 조절하기 위해 인버터를

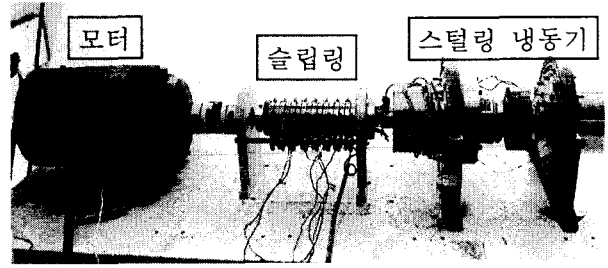


Fig. 3. Experimental apparatus

사용하였으며, 회전체 실험에서의 편심을 최소화하기 위해 진공 용기에 사용되는 밸브는 작은 밀봉 밸브(seal-off valve)를 사용하였다.

2.2.2 실험 결과

Fig. 3의 실험 장치에서 스텔링 냉동기를 구동시킨 후, 모터를 통해 스텔링 냉동기를 회전시킨다. 스텔링 냉동기 저온부에 열부하를 가하지 않은 상태로 무부하 온도를 구하고, 그 후 스텔링 냉동기의 저온부에 일정하게 열부하를 증가시키면 Fig. 4와 같은 모양을 갖는 스텔링 냉동기 저온부의 온도 곡선을 얻을 수 있다.

위와 같은 방법으로 여러 가지 회전 속도와 스텔링 냉동기 저온부에 가해지는 여러 가지 열부하에 대해 반복 실험을 수행하였다. 그 결과로 여러 가지 경우에 대한 스텔링 냉동기 저온부의 온도를 Fig. 5와 Fig. 6에서 확인할 수 있다. Fig. 5는 여러 가지 회전 속도에 대해 스텔링 냉동기 저온부의 열부하와 스텔링 냉동기 저온부의 온도와의 관계를 보여주는 것으로 스텔링 냉동기 저온부에 가해지는 열부하가 증가할수록 스텔링 냉동기 저온부의 온도가 직선 모양으로 상승함을 볼 수 있다. 또한, Fig. 6은 스텔링 냉동기 저온부에 가해지는 여러 가지 열부하에 대해 회전 속도와 스텔링 냉동기 저온부의 온도와의 관계를 보여주는 것으로 회전 속도가 증가할수록 스텔링 냉동기 저온부 온도가 상승함을 알 수 있다. 이는 다음에서 그 이유를 찾을 수 있다.

이상적인 구조를 갖는 스텔링 냉동기라면 회

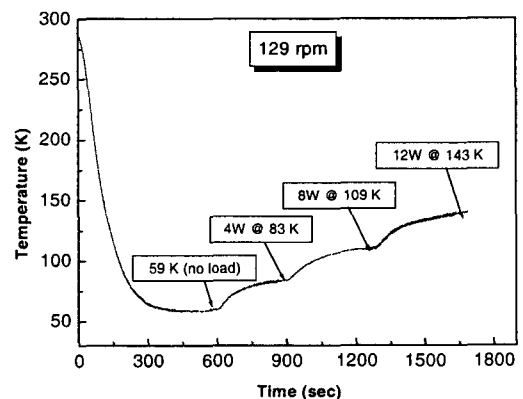


Fig. 4. Cold-part temperature distribution about various heat load

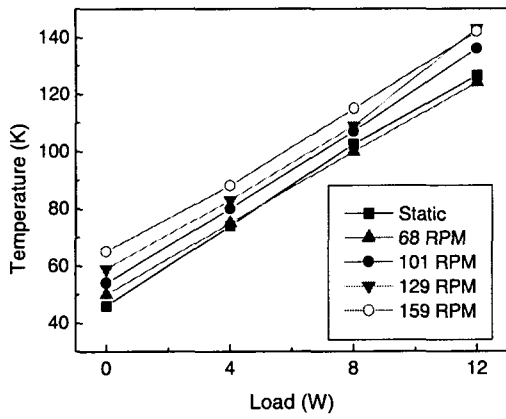


Fig. 5. Relation between heat load and cold-part temperature for various rotating speed

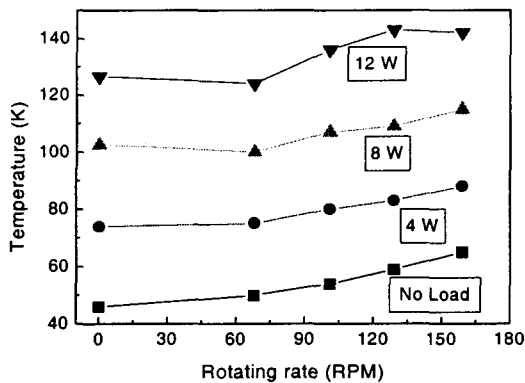


Fig. 6. Relation between rotating speed and cold-part temperature for various heat load

전 속도에 관계없이 일정한 성능이 나와야 한다. 그러나 실험에 사용된 스티어링 냉동기는 근본적으로 가공 상의 문제점이 있었다. 회전 실험시 스티어링 냉동기의 압축기는 Fig. 7과 같이 베어링에 지지되어 부드럽게 회전하지만 팽창부 변위기 부분은 불안정하게 회전하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 전체 장치의 회전축과 스티어링 냉동기의 중심축이 Fig. 7과 같이 어긋나 있으리라 유추할 수 있기 때문으로, 스티어링 냉동기가 고속으로 회전할 경우 스티어링 냉동기의 팽창부 변위기는 불안정한 왕복 운동을 하게 된다. 즉, 회전축에서 떨어져 있기 때문에 생기는 원심력으로 인해 팽창부 변위기가 안정적으로 왕복 운동을 하지 못하고 관벽을 긁는 등의 문제를 야기시키며 이로 인해 회전 속도가 빨라질수록 스티어링 냉동기 성능이 저하된 것이라 판단할 수 있다. 이와 같은 문제는 팽창부 변위기의 중심축을 최대한 전체 장치의 회전축에 맞추는 방법을 통해 수정할 것이다. 압축기의 피스톤은 외부의 전기 입력에 의해 유도 기전력이 발생해 능동적으로 왕복 운동을 한다. 그렇지만 팽창부 변위기는 압축기 피스톤에 의해 수동적으로 움직이기 때문에 편심에

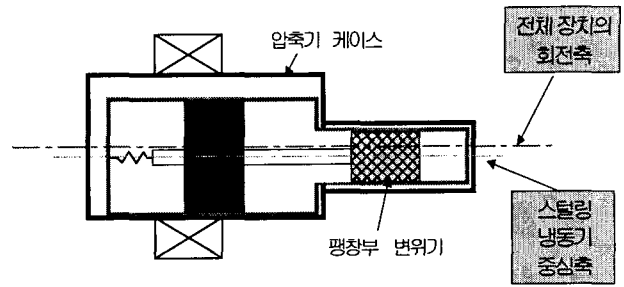


Fig. 7. Schematic diagram of Stirling cryocooler having an eccentric factor

의한 원심력의 영향을 압축기 피스톤보다 많이 받는다. 이런 이유로, 편심에 의한 원심력에 민감한 팽창부 변위기를 최대한 전체 장치의 회전축에 맞추어 회전에 따른 스티어링 냉동기의 성능 저하를 어느 정도 억제할 것이다.

2.3 맥동관 냉동기 설계

회전형 냉각 시스템의 최종 목표인 하이브리드 맥동관 냉동기의 탑재 실험을 위해 앞서 실험한 스티어링 냉동기를 부착할 맥동관 냉동기를 설계·제작해야 한다. Fig. 2와 같은 기본 개념으로 제작을 하는데 회전 실험이라는 특수한 상황에 맞게 편심이 생기지 않도록 구조적으로 변형을 해야 한다. Fig. 8과 같이 맥동관 냉동기와 스티어링 냉동기의 회전축을 일치시키기 위해 맥동관 냉동기의 1단 재생기와 2단 재생기 사이를 'c'자형으로 구부려 1단 재생기와 2단 재생기 사이에 스티어링 냉동기의 저온부가 접촉하도록 한다. 또한 구부러진 1단 재생기로 인한 편심을 최소화 하기 위해 1단 재생기의 질량에 상응하는 금속을 회전축에 대칭을 이루도록 반대편에 부착한다. 맥동관 냉동기 각 부분의 설계는 단열 모델 해석을 통해 이루어질 것이다[4].

3. 결 론

본 논문에서는 스티어링 냉동기를 회전체에 직접 탑재한 후 회전시키는 실험을 수행함으로써 초전도 발전기의 회전자 냉각 방법으로 냉동기를 직접 탑재하는 시스템에 대한 가능성을 확인하였다. 하이브리드 맥동관 냉동기의 탑재 성능 실험

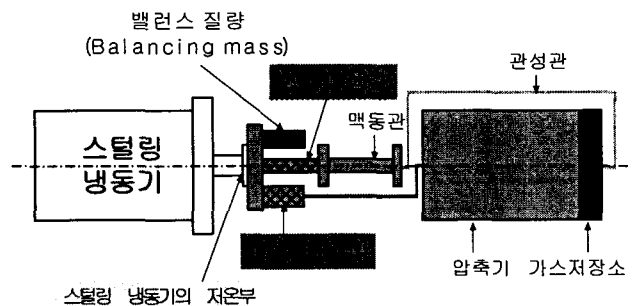


Fig. 8. Schematic diagram of hybrid pulse tube cryocooler for rotating state

을 위해 스텔링 냉동기가 부착될 맥동관 냉동기를 설계·제작해야 한다. 이를 위해 개선된 단열 모델 해석을 사용하여 맥동관 냉동기의 각 부분을 설계한 후 회전체에 적합한 구조로 제작할 예정이다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단 [2001-008-04-02] 및 한국과학재단 (KOSEF)의 지원을 받는 연소기술 연구센터 (CERC)의 도움으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] J. L. Smith, Jr., J. L. Kirtley, Jr., S. Sunder and S. Umans, "Performance of MIT 10 MVA Superconducting Generator Rotor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 5, No. 2, pp. 445-448, 1995

[2] T. Ohara, H. Fukuda, K. Shimizu, R. Shiobara, M. Ohi, A. Ueda, K. Itoh and H. Taniguchi, "Development of 70 MW class superconducting generators", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 2, pp. 2232-2239, 1991

[3] B. X. Zhang, D. I. Driscoll, B. A. Shoykhet and A. A. Meyer, "Cryocooler Integration with High Temperature Superconducting Motors", Cryocoolers 9, pp. 943-948, 1997

[4] 남중원, 남관우, 정상권, "소형 맥동관 냉동기의 단열 해석 및 성능 실험", 한국 초전도 저온 공학회 2003년도 학술대회 논문집, pp. 28-32, 2003