

대용량 극저온 고진공펌프용 GM 극저온냉동기 설계 및 실험적 검증 Design and Testing of GM Cryocooler for a Large Capacity Cryopump

김효봉* · 박지호**† · 김종우*** · 추상윤**** · 고준석***** · 염한길*****
· 홍용주***** · 인세환***** · 박성제*****

Hyo-Bong Kim*, Ji-Ho Park**†, Jong-Woo Kim***, Sang-Yoon Choo****, Jun-Seok Ko*****, Han-Kil Yeom*****, Yong-Ju Hong*****, Se-Hwan In***** and Seong-Je Park*****

(Received 9 November 2020, Revision received 9 December 2020, Accepted 10 December 2020)

Abstract : Cryopump, which is the removal of gas from a system by solidification onto a cold space, is an ideal form of ultra high vacuum pump due to its contamination-free operation at its highest pumping speed. With high crossover capability and high throughput, the cryopump can provide clean vacuum environment. Since the cryopump creates a vacuum state by condensation and adsorption mechanisms, a multi-stage cryocooler is imperative. This research focuses on the development of a 2-stage GM (Gifford-McMahon) cryocooler utilized for a large capacity cryopump. By taking simple computation on two different regenerator, it is possible to predict the cooling performance of the GM cryocooler. As a working fluid, helium is supplied by a helium compressor with the electric consumption of 2.4 kW. The operational frequency of GM cryocooler is set to be 1.2 Hz (72 rpm). Although the second stage regenerator has a little bit more thermal loss than expected, the experiment results show that the design methodology is able to adequately explain the thermal characteristic of the GM cryocooler. The developed 2-stage GM cryocooler can exert the cooling power of 40.04 W at 80 K and 5.36 W at 20 K, simultaneously.

Key Words : GM cryocooler, Cryopump, Large capacity, Ultra high vacuum

**† 박지호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5494-9049) :
선임연구원, 한국기계연구원
E-mail : jh8809@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7204
*김효봉(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7098-0364) :
책임기술원, 한국기계연구원
***김종우(ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9754-2775) :
기술원, 한국기계연구원
****추상윤(ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4387-9652) :
선임기술원, 한국기계연구원
*****고준석(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1401-7973),
염한길(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2547-0976),
홍용주(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3215-4202),
인세환(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2341-8509),
박성제(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6903-3853) :
책임연구원, 한국기계연구원

**† Ji-Ho Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5494-9049) :
Senior Researcher, Korea institute of machinery and materials.
E-mail : jh8809@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7204
*Hyo-Bong Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7098-0364) :
Principal engineer, Korea institute of machinery and materials
***Jong-Woo Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9754-2775)
: Engineer, Korea Institute of Machinery & Materials.
****Sang-Yoon Choo(ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4387-9652)
: Senior Engineer, Korea Institute of Machinery & Materials.
*****Jun-Seok Ko(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1401-7973),
Han-Kil Yeom(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2547-0976),
Yong-Ju Hong(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3215-4202),
Se-Hwan In(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2341-8509),
Seong-Je Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6903-3853) :
Principal Researcher, Korea institute of machinery and materials.

1. 서 론

고진공(high vacuum)과 초고진공(ultra high vacuum)환경에서는 진공펌프로부터 오염분자가 작업 공간으로 역류하여 진공환경 내부를 오염시키는 것이 가장 큰 관심사이다. 특히 반도체, 디스플레이, 입자가속기, 핵융합연구, 의료, 국방 및 우주기술 등 첨단 분야에서는 10^{-10} Torr급의 초고진공 분위기와 청정진공환경이 필수적이다.¹⁾ 이러한 분야 이외에도 생산기술의 정밀화 추세로 초고진공펌프의 수요가 증가하고 있지만 국내의 진공펌프 제작기술은 상대적으로 뒤쳐져 있어 거의 대부분을 수입에 의존하는 실정이다. 초고진공펌프는 터보분자펌프(turbo molecular pump, TMP), 극저온 고진공펌프(cryopump)가 대표적이지만, 극저온 고진공펌프의 장점은 다음과 같다.²⁾

- (1) Back-streaming이 없어 진공시스템에 영향을 미치지 않음
- (2) 청정 초고진공 환경을 조성하기에 알맞음
- (3) 운전 안정성이 뛰어남

다만, 극저온 고진공펌프는 극저온으로 유지되는 냉각 판(cryoarray)에 기체를 응축이나 흡착하는 방식으로 제거하기 때문에, 극저온 환경을 조성하는 극저온냉동기 기술이 필수적이다. GM 극저온냉동기(Gifford-McMahon cryocooler)은 극저온 고진공펌프에 가장 많이 사용되는 극저온냉동기의 한 종류로서 아래와 같은 장점이 있다.³⁻⁵⁾

- (1) 구성요소가 상대적으로 적어 신뢰도가 높음
- (2) 일반 공조용 압축기를 활용할 수 있어 가격이 상대적으로 낮음 (유분제거를 위해 압축기 시스템 구성 시 추가적인 설비는 추가되어야 함)
- (3) 고압과 저압 간 압력차가 적어 기밀에 대한 부담이 적음
- (4) 다단 또는 재생물질을 변경함으로써 여러 온도영역에 대응할 수 있음

본 연구에서는 극저온 고진공펌프에 적용하기 위한 2단으로 구성되는 GM 극저온냉동기를 개발

하는 것이 목적으로 1단에서의 목표 온도는 80 K, 2단에서 20 K 그리고 냉각능력은 각각 40 W, 4 W이다. 본 논문은 2단 GM 극저온냉동기의 성능 예측을 포함한 개발 내용과 이를 실험적으로 검증하는 순으로 서술되었다.

2. 설계 및 제작

Fig. 1은 2단 GM 극저온냉동기(Gifford-McMahon cryocooler)의 개략도이다. GM 극저온냉동기는 크게 헬륨압축기(helium compressor), 구동장치(drive mechanism), 실린더(cylinder), 변위기(displacer)로 구성되어 있다. 2단 GM 극저온냉동기는 서로 다른 온도를 생성시키는 저온부(cold-end)가 2개 존재하며, 온도 구배를 유지시켜 주는 재생 열교환기(regenerative heat exchanger)인 재생기(regenerator)를 변위기의 내부에 장입하여 구조를 단순화하였다. 1단 저온부에서의 팽창기체 중 일부는 1단 재생기를 통과하여 헬륨압축기로 돌아가고, 나머지는 2단 재생기를 통하여 냉각되어 1단 저온부보다 더 낮은 온도에서 팽창하게 된다. 즉, 각 단 저

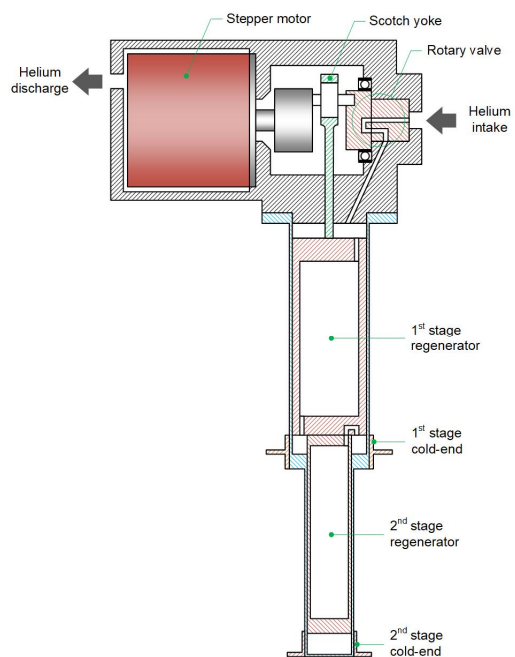


Fig. 1 Schematic diagram of a 2-stage GM cryocooler

온부에서 팽창된 헬륨은 주위로부터 열을 흡수한 후 상온의 헬륨압축기로 돌아가 열을 발산한다. 헬륨압축기에 의해 고압(2.1 MPa)과 저압(0.7 MPa)을 형성하고, 구동장치에 위치하는 로터리 밸브(rotary valve)에 의해 실린더 내부를 고압상태와 저압상태로 제어한다.

2.1 변위기 및 재생기

각 단의 변위기는 가공이 용이하고, 극저온환경에서 기계적 강도가 뛰어나며 온도변화에 따른 수축률이 적어야 한다. 극저온냉동기의 특성 상 상온과 저온부의 온도차가 크기 때문에 열전도도를 낮은 소재를 사용하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 위 조건들을 만족시키는 linen phenolic resin을 사용하였다. 1, 2단 모두 변위기와 실린더 내벽과의 기밀성을 유지하기 위해 teflon 재질의 lip-seal 그리고 c-seal을 설치하였다.

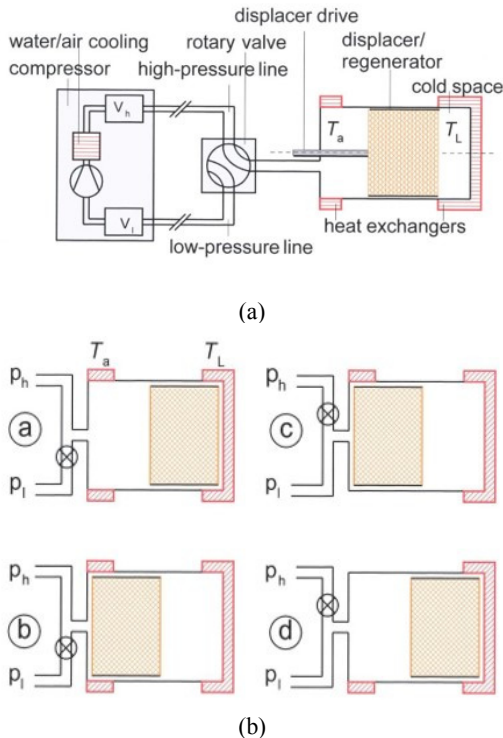


Fig. 2 Schematic diagrams of (a) a GM cryocooler and (b) its cycle (image from <https://en.wikipedia.org/wiki/Cryocooler>)

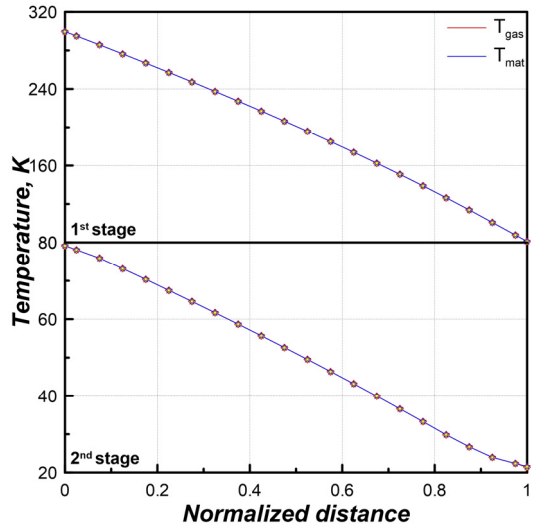
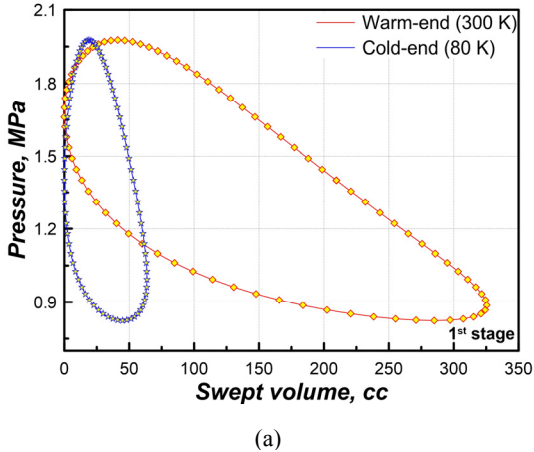
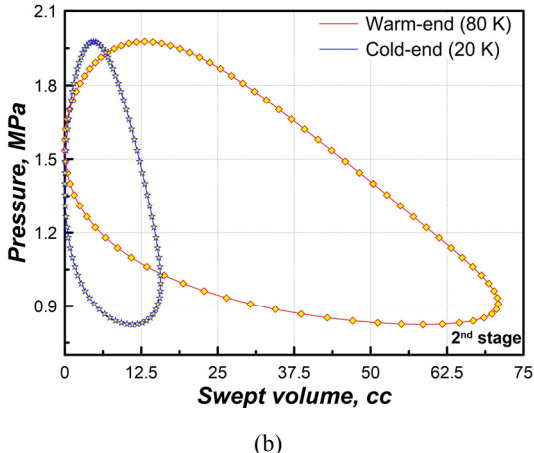


Fig. 3 Average temperature distributions of working fluid(helium) and regenerative material for two different stages

GM 극저온냉동기의 사이클을 Fig. 2에 나타내었으며, 다음 ①~④와 같이 설명할 수 있다. ① 변위기가 저온부에 위치한 상태에서 고압헬륨이 유입되어 변위기의 고온부에 채워지고, 이때 변위기가 고온부로 이동하면서 고압헬륨은 재생기를 통과한다. ② 고압헬륨이 재생기를 통과하면서(온도가 낮아지고) 부피가 축소하므로, 고압헬륨이 추가적으로 더 유입된다. ③ 고압헬륨이 가득 차 있는 상태에서 변위기가 고온부에 도달할 때 고압밸브가 닫히고, 저압배기밸브가 열린다. ④ 변위기의 저온부에 위치한 고압헬륨은 압력차에 의해 팽창하고, 동시에 변위기가 저온부로 이동하면서 저압헬륨은 재생기에 의해 가열된다. 즉, 재생기는 헬륨의 열을 빼앗거나 주는 동시에 이의 고온부와 저온부 사이의 온도구배를 적절하게 유지시키는 역할을 한다. 따라서 재생기는 GM 극저온냉동기의 성능을 결정짓는 가장 중요한 요소이며, 이의 형상 결정과 적절한 재생물질(regenerative material)의 선정이 가장 중요하다. 따라서 재생기의 효율을 높이기 위해 각 단의 동작온도 영역에서 체적비열(volumetric specific heat)이 높은 재료를 재생물질로 사용해야 한다. 1단은 80 K 부근에서



(a)



(b)

Fig. 4 Pressure-volume (PV) diagram for the both cold-ends at the cyclic steady-state

비열이 높은 인칭동(phosphor bronze, Cu_{0.948}Sn_{0.5}Ph_{0.02})재질의 mesh, 2단은 20 K 부근에서 비열이 높은 납(lead, Pb_{0.95}Sb_{0.05})구슬을 사용하였다. 팽창과정만 놓고 봤을 때, 고립된 공간에서 고압과 저압이 교반되면서 등 엔트로피(isentropic expansion)과정에 의해 냉각효과를 얻는다고 볼 수 있다. 즉, 헬륨이 고압상태로 유입되거나, 저압상태에서 빠져나가게 될 때 압력과 유량간의 위상차가 발생하지 않는다는 점에 착안하여 재생기를 설계할 필요가 있다. 재생기 성능예측을 위해 REGEN 3.3을 사용하였으며, GM 극저온냉동기가 충분히 냉각된 정상상태이기 때문에 각 재생기

모두의 저온부에서의 압력비를 3이 아닌 2.4로 가정하였다.⁶⁾ Fig. 3은 재생기 축 방향으로의 온도분포를 나타낸 것이며, 두 단 모두 목표로 하는 온도범위에서 거의 선형적인 온도분포를 가지고 있는 사실을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)와 (b)는 각각 1단과 2단의 양단에서의 PV(pressure-volume) 선도를 나타낸 것이며, 각 단의 고온부에서의 PV 선도 내측의 넓이는 압축일(compression work), 반대로 저온부에서는 팽창일(expansion work)을 의미한다. 순수 팽창일(gross expansion work)에서 재생기 손실을 제외한 값이 냉각능력(cooling capacity)이 되며, 1단과 2단 저온부에서 각각 42 W, 7.5 W로 예측할 수 있었다.

2.2 실린더

실린더는 고온부 온도가 300 K 그리고 각 저온부 온도가 80 K, 20 K로 온도차에 의한 열 변형이 거의 없는 재질을 사용해야 한다. 이러한 특성을 갖는 재료로 스테인리스강을 사용하고, 구조적 건전성을 위해 welding 및 brazing이 되는 부분을 제외하고는 전도 열전달을 최소화하기 위해 벽 두께를 최소화하여 설계하였다.

Table 1 Specifications of the designed 2-stage GM cryocooler

First (80 K) stage	Cylinder	O.D: 58.7 mm, L: 218 mm
	Displacer	Linen phenolic resin
Second (20 K) stage	Regenerator	Material: phosphor bronze, Cu _{0.948} Sn _{0.5} Ph _{0.02} (mesh form) Mass: 388 g
	Cylinder	O.D: 28.9 mm, L: 137 mm
Driving mechanism	Displacer	Linen phenolic resin
	Regenerator	Material: lead, Pb _{0.95} Sb _{0.05} (sphere form) Mass: 161 g
Helium compressor	Scotch yoke / Rotary valve (Rotational speed: 72 rpm)	
Designed cooling capacity at 1.2 Hz	Electric input: 2.4 kW First stage: 42 W@ 80 K Second stage: 7.5 W@ 20 K	

2.3 구동장치

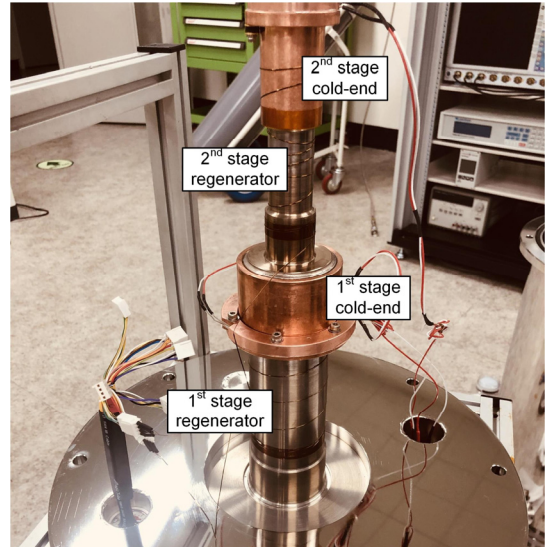
구동장치는 실린더로 유입되는 헬륨의 압력을 제어하는 로터리밸브와 변위기의 상하운동을 가능케 하는 스카치 요크(scotch yoke)로 구성되어 있다. 앞서 설명한 것과 같이, GM 극저온냉동기가 이상적으로 동작하려면 재생기를 통과하는 헬륨의 유동이 펄스파형(pulse waveform) 형태로 반복되어야 바람직하지만, 실제 상황에서는 구현하기가 어렵기 때문에 로터리밸브의 개도와 개폐시점의 위상각을 조절해야 한다.

로터리밸브와 변위기를 구동하기 위해 최대 토크는 9 N·m hybrid stepper 모터를 사용하였고, 모터의 원활한 냉각을 위해 헬륨압축기로 흘러 들어가는 저압헬륨이 모터 내부를 가로질러 흐를 수 있도록 유로를 배치하였다. 모터의 축에 연결된 캠의 회전운동에 의해 변위기가 상하운동을 하게 되는데, 이러한 기구를 스카치 요크라 한다. 모터의 축과 로터리 밸브는 동일한 축선에 놓여 있어, 변위기의 상하운동과 로터리 밸브의 개폐는 특정한 위상각을 가지며 구동된다. 본 연구에서 설계된 GM 극저온냉동기의 사양을 Table 1에 정리하였으며, Fig. 5는 제작된 GM 극저온냉동기의 시제품의 모습이다.

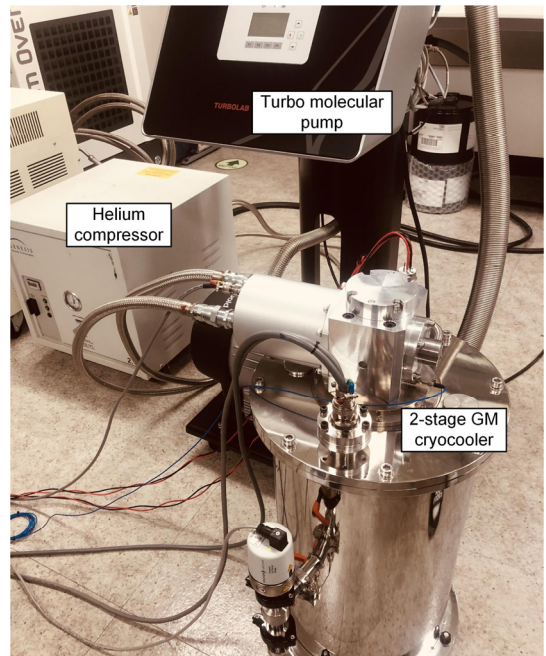
3. 실험

3.1 성능시험 장치

GM 극저온냉동기의 1, 2단 저온부에는 실리콘 다이오드 온도센서(DT-670A, Lakeshore)를 부착하였고, 온도모니터(Model 218S, Lakeshore)를 사용하여 신호를 처리하였다. 동시에 냉각능력을 측정하기 위해 카트리지 히터를 설치하였으며, 히터에 공급되는 전력을 측정하기 위해 전력계(WT333E, Yokogawa)를 사용하였다. 헬륨압축기로 공급되는 전력 또한 함께 측정하였다. 흡기 및 배기시의 실린더 내부의 압력은 피에조 압력계(601A, Kistler)와 컨디셔너(5165A, Kistler)를 사용하였으며, 디지털 오실로스코프(DLE4038, Yokogawa)를 사용하여 기록하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Developed 2-stage GM cryocooler

3.2 성능시험 방법

GM 극저온냉동기를 헬륨압축기와 연결하기 전에 실린더 내부의 수분이나 불순물을 제거하였다. 먼저 실린더 내부를 진공환경으로 조성한 후, 초

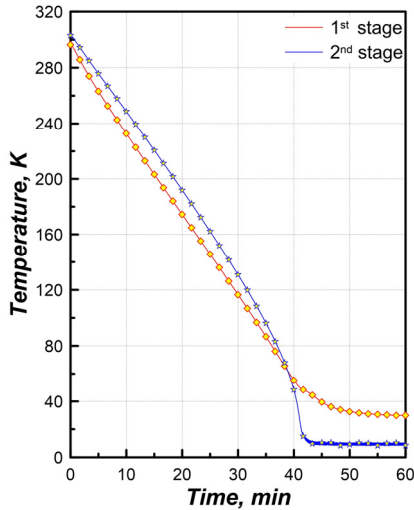
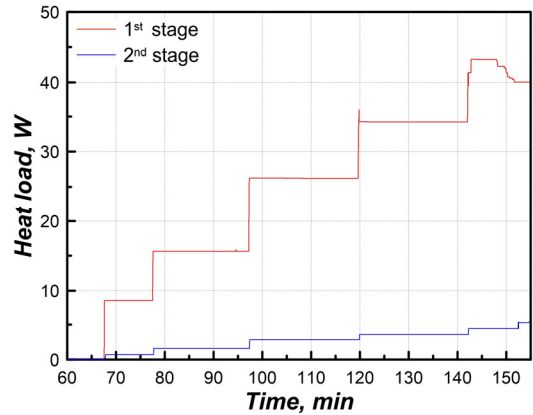


Fig. 6 First- and second-stage temperatures of the 2-stage GM cryocooler at the initial cooling

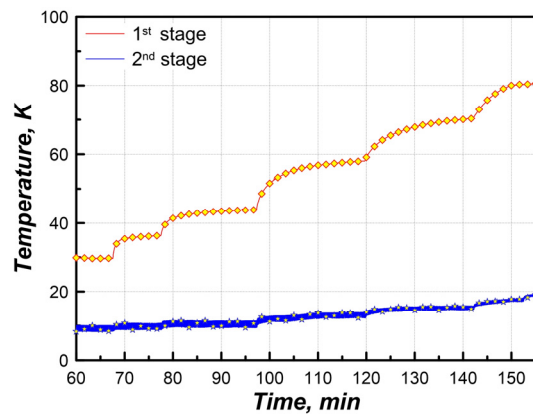
고순도(N60) 헬륨을 사용하여 2.1 MPa로 가압한다. 시간이 충분히 흐른 후 순간적으로 대기압에 가깝도록 내부의 헬륨을 배기하고, 이 과정을 10 회 정도 반복하였다. 이와 같이 실린더 내부의 불순물을 제거한 다음, GM 극저온냉동기의 정상 운전압력인 1.4 MPa로 실린더를 가압하고 헬륨압축기와 연결 후 헬륨압축기를 구동하였다. 동시에 구동장치의 모터에 펄스신호를 인가하여 GM 극저온냉동기의 설계 운전주파수인 1.2 Hz로 동작하도록 72 rpm으로 회전하도록 하였다.

3.3 결과 및 토론

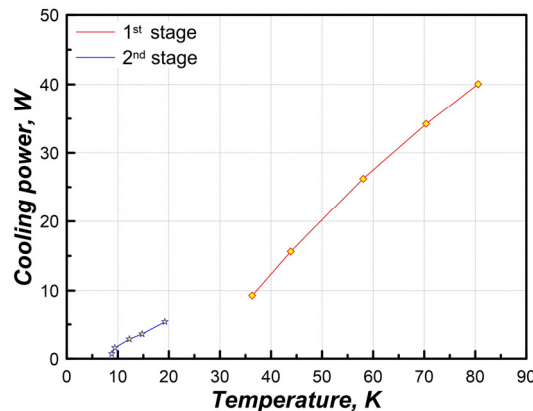
Fig. 6은 GM극저온냉동기를 구동한 후 온도변화를 나타낸 것이다. 전원을 공급한 후 60분 이내에 각 단에서 최저도달온도로 수렴하는 것을 확인할 수 있으며, 1단은 29.8 K, 2단은 8.4 K를 기록하였다. Fig. 7(a)은 GM 극저온냉동기의 온도가 안정화된 후 카트리지 히터에 공급되는 전력을, Fig. 7(b)은 열 부하에 따른 각 단의 온도변화를 나타낸 것이다. 최종적으로 각 단의 정상온도에 따른 정상 열 부하를 Fig. 7(c)에 나타내었으며, 이는 개발한 2단 GM 극저온냉동기의 냉각능력이다. 1단의 목표 온도인 80 K에서 40.04 W, 2단의 목표 온도인 20 K에서 5.36 W의 냉각능력을 기록



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 (a) Heater profile supplied to the first and second stages, (b) the corresponding temperature and (c) cooling capacity with respect to the temperature at each stage

하였다. 1단의 경우 재생기 설계결과와 실험결과가 5% 이내의 오차로 거의 유사함을 확인할 수 있었다. 반면에, 2단의 실험결과를 살펴보면 설계치의 70% 정도의 냉각능력을 나타냄을 확인할 수 있는데, 이는 재생기 설계 시 고려했던 손실보다 실제로 훨씬 더 많은 손실이 발생하는 것이 아니라, 2단 재생기를 통과하면서 압력강하가 발생하기 때문이다. 계산의 단순화를 위해 2단 재생기에서의 압력강하를 고려하지 않고 각 단의 저온부에서 모두 동일한 압력비인 2.4를 고려한 것이 오차의 주된 원인이라고 볼 수 있다. 구동장치의 회전속도를 60 rpm으로 할 경우에는 2단의 최저도달온도가 7.3 K로 더 낮아지는 것을 확인할 수 있었지만, 냉각능력은 72 rpm 대비 88% 수준으로 감소하는 경향을 보여 본 연구 논문의 주제를 벗어나서 언급하지 않았다.

4. 결 론

본 논문에서는 대용량 극저온 고진공펌프 적용을 위한 2단 GM 극저온냉동기의 설계, 제작과 냉각성능시험 결과를 정리하였다. GM 극저온냉동기의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 재생기의 간단한 계산을 통해 이의 성능을 예측하고, 구성 부품을 제작하여 실험적으로 검증하였다. 본 연구에서 개발한 2단 GM 극저온냉동기의 특징은 아래와 같다.

1) GM 극저온냉동기의 동작 주파수는 1.2 Hz(72 rpm)이며, 상온기준 고압 2.1 MPa, 저압 0.7 MPa 압력조건에서 동작한다. 정상상태에서의 압축기의 소모 전력은 2.4 kW이다.

2) 압력과 유량의 위상차가 발생하지 않는 GM 극저온냉동기의 등 엔트로피 팽창과정을 고려하여 간단한 재생기 계산 모델을 통해 2단 GM 극저온냉동기의 성능을 예측하였다.

3) 개발된 2단 GM 극저온냉동기는 1단(80 K)에서 40.04 W, 2단(20 K)에서 5.36 W를 기록하였다.

후 기

이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20011337).

Author contributions

H. B. Kim; Experiments, Writing original draft. J. H. Park; Design, Experiments, Writing review&editing. J. W. Kim; Fabrication. S. Y. Choo; Fabrication. J. S. Ko; Validation. H. K. Yeom; Validation. Y. J. Hong; Validation. S. H. In; Validation. S. J. Park; Validation.

References

1. J. Yoon, C. Son, J. Ko, H. Yeom, H. Jeong, J. Choi, D. Koh and K. Lee, 2020, "Exergy analysis of reverse Brayton cryogenic system using neon", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 24, pp. 63-70. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.5.063>)
2. H. J. Munding, H. U. Hafner, M. Mattem-Klosson, H. H. Klein and U. Timm, 1992, "A new cryopump with a very fast refrigeration", Vacuum, Vol. 43, pp. 545-549. ([https://doi.org/10.1016/0042-207X\(92\)90074-7](https://doi.org/10.1016/0042-207X(92)90074-7))
3. G. Prast, 1963, "A Philips gas refrigerating machine for 20 K", Cryogenics, Vol. 3, pp. 156-160. ([https://doi.org/10.1016/0011-2275\(63\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0011-2275(63)90004-3))
4. R. Radebaugh, 2009, "Cryocoolers: the state of the art and recent developments", Journal of Physics: Condensed Matter, Vol. 21, Art. No. 164219. (<https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/16/164219>)
5. H. J. M. ter Brake and G. F. M. Wiegnerinck, 2002, "Low-power cryocooler survey", Cryogenics, Vol. 42, pp. 705-718. ([https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(02)00143-1))
6. J. M. Pfothenauer, R. Z. Wang and F. K. Miller, 2019, "Regenerator design optimization: results from REGEN 3.3", Cryogenics, Vol. 87, pp. 77-84. (<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.11.009>)