

# 질소냉매 스테링 냉동기의 성능에 관한 실험적 연구

김효봉, 박성제, 홍용주, 염한길, 고득용, 김양훈, 박종호\*  
한국기계연구원, 충남대학교\*

## Experimental Study on the Performance of the Stirling Cryocooler with Nitrogen Refrigerant

Hyo-Bong Kim, Seong-Je Park, Yong-Ju Hong, Han-Kil Yeom, Deuk-Yong Koh, Yang-Hun Kim, Jong-Ho Park\*  
Korea Institute of Machinery & Materials, Chungnam National University\*

hyobong@kimm.re.kr

**Abstract** - The Stirling cryocooler with helium refrigerant has been widely used for the cooling of the infrared detector, and the alternatives of the helium in the Stirling cryocooler are nitrogen and hydrogen gas. In this study, the performance experiment of the small FPF(D-Free Piston and Free Piston) type Stirling cooler and the moving coil type, dual acting linear compressor was performed when the nitrogen and helium is used for the working fluid. The results show that the nitrogen refrigerant has small cooling capacity compared with the helium, but the performance characteristics of the linear compressor does not greatly changed.

### 1. 서 론

스테링 냉동기(Stirling cryocooler)는 1860년 대 A. Kirk에 의해 개발되어진 이래, 주로 적외선 탐상장비에 장착되어 적외선소자를 80K로 냉각시키는 냉각기 및 고진공 펌프(cryopump)로 실용화 되어져 양산되고 있다.

스테링 냉동기는 고온의 압축부(compressor)와 저온의 팽창부(expander) 사이를 재생기(regenerator)로 연결함으로써, 열적 성능이 뛰어나고, 저온의 고압유체가 외부에 일을 하면서 팽창을 하기 때문에 열역학적 효율이 대단히 우수하다. 반면 맥동관(pulse tube) 냉동기 등의 냉동기에 비해 작동형상이 극도로 복잡하고, 변위기(displacer)와 같은 저온부의 구동요소로 인해 냉각부에 진동을 유발하는 단점을 지니고 있다.[1,2,3]

스테링 냉동기의 작동유체는 일반적으로 헬륨이 사용되고 있다. 헬륨은 기존의 증기압축식(vapor compression) 냉동기의 냉매로 활용되는

프레온계 냉매가 오존층에 유해한 영향을 미치는 것과는 달리 지구환경에 친화적인 가스이며, 또한 인체에 무해한 가스이다.

스테링 냉동기의 작동유체로는 일반적으로 수소, 헬륨, 질소 등이 고려될 수 있으며, 질소는 대기 중에 다량 존재하는 가스로, 석유계 부산물로 얻어지고 일부 산유국에서 독점적으로 생산하고 있는 헬륨에 비해, 저가이며, 특히 고압의 환경에서 작동되는 스테링 냉동기의 누설을 줄일 수 있는 점 등의 측면에서 헬륨보다 유리한 점을 지니고 있다. 한편 수소의 경우에는 열역학적 성능은 비교적 우수한 것으로 평가되나, 폭발 등의 위험요소를 지니고 있다. 일본의 경우, 수소 및 질소가 냉장고용 등 저온도차 스테링 냉동기에서 헬륨을 대체할 수 있는 냉매로 인식되어 활발한 연구가 진행되고 있다.[4]

본 연구에서는 적외선 센서 냉각용으로 활용되는 소형 선형압축기형 스테링 극저온 냉동기에서 질소 냉매의 활용 가능성을 타진하고자, 헬륨 및 질소 냉매를 충전하여, 작동유체가 스테링 냉동기의 냉각특성 및 압축기의 운전특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 실험장치 및 방법

이동코일(moving coil) 방식의 선형압축기, 연결관, 재생기(regenerator)를 내장한 변위기, 팽창기(expander)로 구성되어 있으며 주로 적외선 센서의 냉각용으로 사용되어지는 소형 FPF(D-free piston, free displacer) 방식의 스테링 냉동기의 기본 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 헬륨, 질소의 작동유체(working fluid)에 따른 강온특성의 변화를 구하기 위해 Fig. 2와 같은 실험장치를 구성하였다. 본 실험에 사용된 선형압축기의 크기는  $\phi 55\text{mm} \times 120\text{mm}$ (length) 이고, 팽창기 실린더 크기는  $\phi 7\text{mm} \times 70\text{mm}$ (length)이다.

선형압축기에 입력전류, 전압을 공급하기 위해

운전주파수의 조절이 가능한 Fujitz사의 AC power supply를 사용하였고, 저온부의 온도를

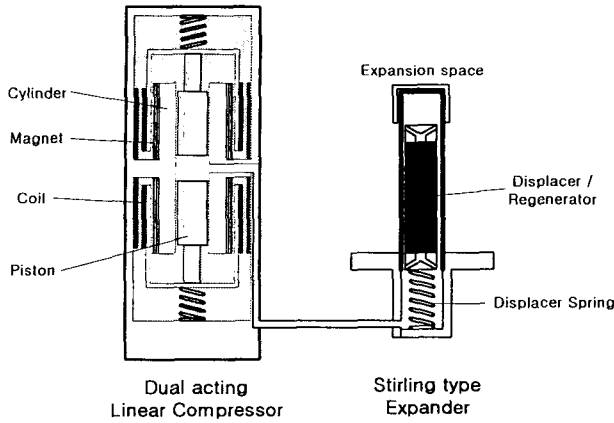


Fig. 1. Small FFPD type Stirling Cryocooler

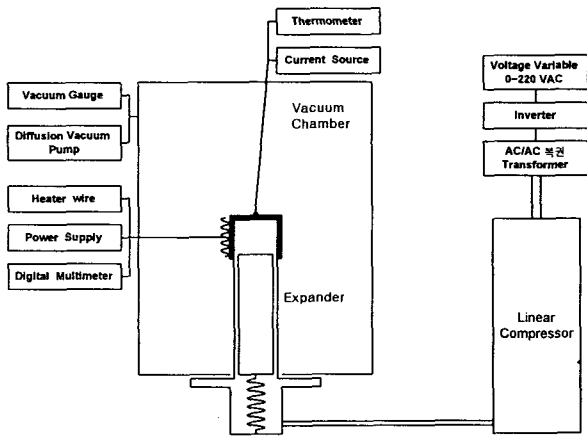


Fig. 2. Experimental apparatus of the Stirling cryocooler

측정하기 위해 silicon-diode 온도센서를 팽창기 저온부에 부착하여 온도변화를 측정하였다. 또한 선형압축기에 의해 생성되는 압력파형을 측정하기 위해 팽창부의 하단에 압력센서를 설치하였으며, 압축기 피스톤의 변위를 측정하기 위해 피스톤의 양단에 선형가동차동변화기(Linear Variable Differential Transformer)를 설치하였다. 측정된 자료는 Labview를 이용하여 수집, 분석하였다. 한편 진공챔버 내 대류의 발생으로 인한 열손실을 방지하기 위해 진공챔버를 터보분자펌프(Turbo Molecular Pump)를 사용하여 약  $10^{-5}$  torr의 진공도로 유지하였다.[5]

## 2.2 실험결과 및 고찰

주로 적외선 센서 냉각용으로 활용되는 소형 스텔링 극저온 냉동기에서 질소 냉매의 활용 가능성을 타진하고자, 헬륨 및 질소 냉매를 충전하여, 작동유체 변경이 스텔링 냉동기의 냉각특성 및 선형압축기의 운전특성에 미치는 영향에 대해서 실험을 하였다. 이때 충전가스는 불순물의 유

입을 억제하기 위해 99.9999%의 고순도 가스를 사용하였다.

### 2.2.1 선형압축기 운전 특성

Fig. 3은 헬륨과 질소의 충전압력의 변화(12, 14, 16, 18  $\text{kgf/cm}^2\text{G}$ )에 따른 선형압축기의 고유진동수를 나타낸 그림으로, 고유진동수의 측정은 스텔링 냉동기 저온부의 온도변화에 의한 영향을 배제하기 위하여 저온부의 온도가 200K일 때 수행하였다. 측정결과 헬륨과 질소 모두 충전압력이 증가함에 따라 가스스프링의 역할이 증가하여, 충전압력 12  $\text{kgf/cm}^2\text{G}$ 에서 약 50Hz에서 18  $\text{kgf/cm}^2\text{G}$ 일 때 약 58Hz로 증가하였다. 한편 질소의 경우에도 헬륨과 거의 유사한 고유진동수를 나타내어, 비열비의 차이에도 불구하고 가스스프링의 효과가 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 4는 초기 냉동기 운전시 일정한 인가전압조건에서, 충전압력의 변화에 따른 헬륨, 질소에 대한 각각의 압력차(고압과 저압의 차)에 대한 특성을, 그리고 Fig. 5에는 전류에 대한 특성을 각각 나타내었다. Fig. 4를 살펴보면 헬륨의 경우가 질소보다 더 큰 압력차가 발생함을 알 수 있다. 또한 Fig. 5에서 헬륨 충전의 경우가 질소의 경우보다 초기 냉동기 운전시 더 낮은 전류가 공급됨을 알 수 있다. 따라서 질소 충전의 경우가 헬륨의 경우보다 동일한 인가전압조건에서 더 큰 입력전력과 약 10~20% 작은 압력차가 생성됨을 알 수 있다.

한편 압축공간에서 발생하는 압력파형과 선형압축기 피스톤의 변위 파형간의 위상차의 경우 압력 파형이 변위보다 선행하고, 질소 및 헬륨을 충전했을 때 충전압력 14  $\text{kgf/cm}^2\text{G}$ 에서 41.5도 및 31.6도, 16  $\text{kgf/cm}^2\text{G}$ 에서 41.6도 및 34.0도로 나타나, 질소 충전시 더 큰 위상차가 발생하였다. 이는 압축기 피스톤과 실린더 사이의 간극을 통과하는 누설유량이 커질수록, 압력 파형과 피스톤 변위 파형의 위상차가 증가하는 흥 등의 해석결과[6]와 비교해보면 질소충전의 경우가 헬륨 충전시보다 간극을 통한 누설유량이 작다는 것을 알 수 있다.

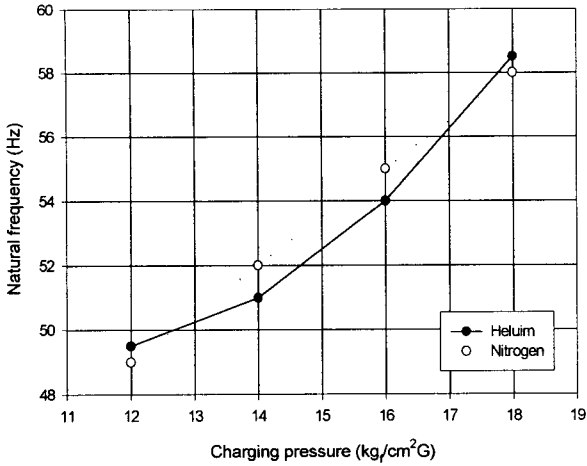


Fig. 3. The natural frequency of the linear compressor

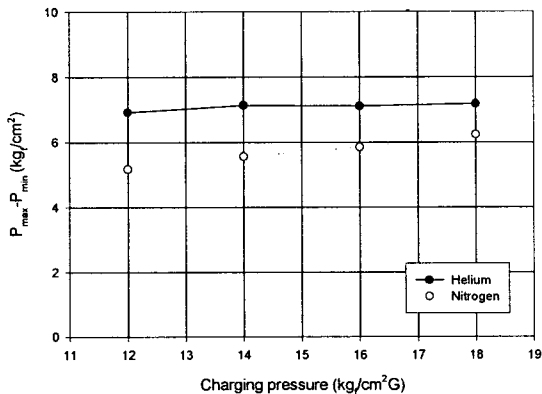


Fig. 4. The characteristic of the pressure difference

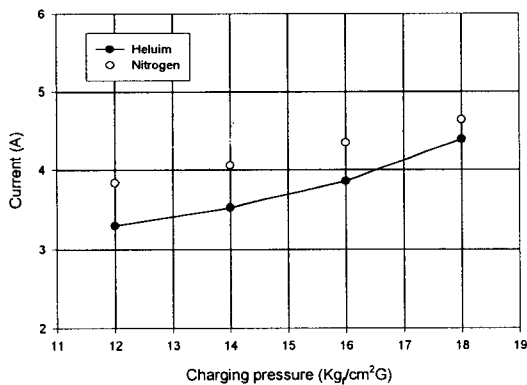


Fig. 5. The characteristic of the input RMS current

### 2.2.2 강온특성 및 최저도달온도

스터링 냉동기의 운전주파수를 50Hz로 하였을 때 일정한 인가전압 조건에서, 저온부(cold end tip)에서의 헬륨충전과 질소충전시의 충전압력 변화에 따른 온도강하 특성을 Fig. 6 및 Fig. 7에 각각 나타내었다. 온도측정은 냉동기 운전개시 후 각각 10분 동안 수행하였다.

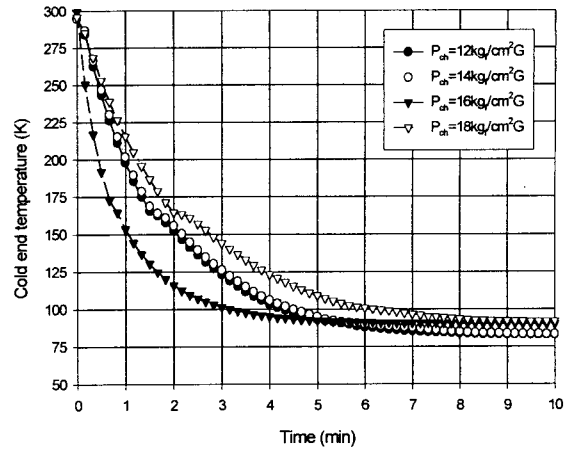


Fig. 6. Cool-down characteristics of Stirling cryocooler with helium

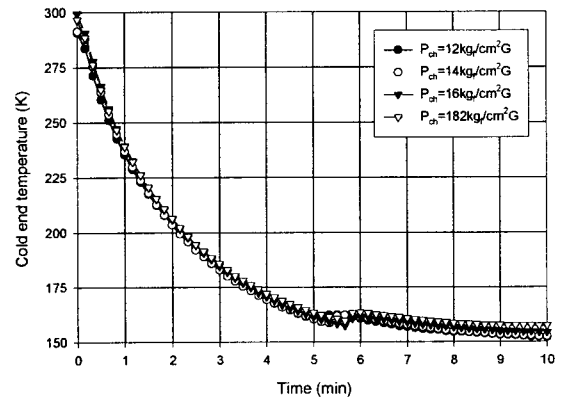


Fig. 7. Cool-down characteristics of Stirling cryocooler with nitrogen

헬륨 충전의 경우, 충전압력이 16 kg/cm²G 일 때 가장 빠른 강온특성을 나타내었으며, 이때 저온부 온도가 100K에 도달할 때까지 소요된 시간은 약 3분으로 나타났다.

한편 질소 충전시에는 충전압력에 따른 강온특성의 변화가 거의 발생하지 않았으며, 약 3분의 시간 경과 후에 저온부의 온도가 약 180K 정도에 도달하였다. 이와 같은 강온특성은 질소 충전시가 헬륨의 경우보다 냉동능력이 매우 작기 때문에 판단되며, 이는 본 연구에서의 스텐링 냉동기가 헬륨 가스를 충전하였을 때를 기준으로 설계되어, 질소 충전시 작동유체의 열물성치 차이로 인하여 재생기의 비효율성(ineffectiveness)이 헬륨의 경우보다 크게 증가하기 때문으로 판단된다.

또한 스텐링 냉동기의 작동유체가 헬륨에서 질소로 바뀌는 경우, 변위기와 팽창기 실린더 사이의 간극의 누설유량의 변화와 간극을 통과하는 유체의 열물성의 차이로 인해 마찰특성이 변화할 것으로 예측된다. 이는 소형 FPDF형 스텐링 냉동기가 재생기 양단의 압력차에 의해서 구동되고, 마찰특성에 따라 변위기의 동특성이 크게 변화하는 점을 고려할 때[7,8], 이로 인한 영향도 무시할 수 없을 것으로 예측된다.

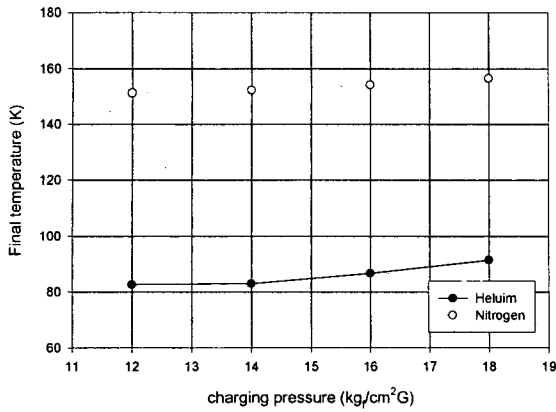


Fig. 8. No load temperature of Stirling cryocooler with helium and nitrogen

Fig. 8은 운전개시 후 10분 후의 저온부 도달 온도를 나타낸 그림이다. 질소 충전시 및 헬륨 충전의 두 경우 모두 충전압력에 변화에도 큰 차이 없이 비슷한 도달온도를 나타내었으나, 질소 충전의 경우, 극저온냉각의 용도로 활용하기에는 부족한 150K 이상의 온도로 나타났다. 또한 헬륨 충전시에도 본 연구에서의 최저도달온도는 기존의 연구결과(9, 10, 11)에 비해 다소 높은 값으로 나타났으며, 이는 재생기 및 변위기 동특성의 차이로 인한 것으로 판단된다.

따라서 질소 가스를 작동유체로 활용하는 스텔링 냉동기의 성능을 개선하여, 적외선 센서의 냉각 등의 용도로 활용하기 위해서는 재생기의 효율 증대를 위한 최적화 및 저온부의 구동부 개선이 요구된다.

### 3. 결 론

소형 선형압축기형 스텔링 극저온 냉동기에서 질소 냉매의 활용 가능성을 타진하고자, 헬륨 및 질소 냉매를 충전하여, 선형압축기 및 냉동기의 성능 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 헬륨 냉매용으로 설계된 재생기 및 팽창기 등 스텔링 냉동기의 주요 구성품의 변화없이 질소 냉매를 충전할 때, 헬륨의 경우 보다 낮은 냉동능력 및 높은 최저도달온도를 나타내어, 적외선센서 냉각 등 기존의 헬륨 충전 소형 스텔링 극저온 냉동기의 활용분야에서 적용하기에는 부적합한 성능을 나타내었다.

(2) 그러나 선형압축기의 충전압력 변화에 따른 고유진동수 및 운전특성은 질소의 경우 헬륨일 때와 거의 유사하다.

(3) 질소 냉매가 헬륨에 비해 선형압축기의 실린더와 피스톤 사이의 간극을 통한 작동유체의 누설양이 작다.

(4) 질소를 냉매로 활용하는 스텔링 냉동기의 성능을 개선하기 위해서는, 재생기의 효율 증대를 위한 최적화 및 저온부 구동부의 개선이 요구된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Ray Radebaugh, "Cryocoolers", Workshop on Cryogenic Refrigeration Technology presented on oct. 15-16 at Korea Institute of Machinery & Materials, 1996
- [2] 고득용 외, "센서 냉각용 소형 스텔링 냉동기 개발 동향", 초전도와 저온공학, 제2권 제2호, pp. 11-18, 2000
- [3] S. A. Collins and etc., "Adaptive Vibration Cancellation for Split-Cycle Stirling Cryocoolers", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 39, pp. 1375-1384, 1994
- [4] 大高敏男 等, "低温度差小型 スタリン冷凍機の性能特性に関する研究", 日本機械學會論文集(B編), 67卷 656号, pp. 1049-1057, 2001
- [5] 박성제 외, "충전압력 및 작동주파수 특성연구에 의한 스텔링 냉동기 개발", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 55 - 61, 2001
- [6] 홍용주 외, "선형압축기 실린더 간극이 압축특성에 미치는 영향에 관한 이론적 연구", 2001년도 한국초전도·저온공학회 학술대회논문집, pp. 149-152, 2001
- [7] A. K. De Jonge, "A Small Free-Piston Stirling Cryocooler", American Chemical Society, pp. 1136-1141, 1979
- [8] B. J. Huang and H. Y. Cen, "Computer-Aided Design of Split-type Stirling Refrigerator", ICEC16/ ICMC Proceedings, pp. 385-388
- [9] 박성제 외, "선형 압축기형 스텔링 극저온 냉동기의 설계, 제작에 관한 연구", 대한설비공학회 하계학술발표회논문집, pp. 234-238, 2001
- [10] 박성제 외, "스텔링 극저온 냉동기의 성능향상에 관한 연구", 대한설비공학회 동계학술발표회 논문집, pp. 89-93, 2001
- [11] 김효봉 외, "작동주파수와 연결관 길이 변화가 스텔링 냉동기의 성능에 미치는 영향", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 55-61, 2001