

## Split tube 길이변화에 따른 스테링 극저온 냉동기의 특성에 관한 연구

홍용주\*, 박성제\*, 고득용\*, 김호봉\*, 오군섭\*, 김종학\*\*  
\*한국기계연구원, \*\* (주)우영

### Study of Stirling Cryocooler Performance with different length of split tube

Yong-Ju Hong\*, Seong-Je Park\*, Deuk-Yong Koh\*, Hyo-Bong Kim\*, Koon-Sup Oh\*, Jong-Hak Kim\*\*

\*Korea Institute of Machinery & Materials, \*\*WooYoung

yjhong@kimm.re.kr

**Abstract** - A free piston and free displacer (FPFD) Stirling cryocooler for cooling infrared and cryo-sensor is currently under development at Korea Institute of Machinery & Materials.

In this study, performance tests of stirling cryocooler with different length of split tube were performed to get characteristics of cryocooler.

The Experimental results show the Stirling cryocooler with small volume of split tube has higher cooling power and faster response time.

### 1. 서 론

최근에 적외선 센서 및 고온 초전도체 등의 저온센서 냉각과 관련하여 액체질소 온도(77K) 부근의 냉각장치 수요가 급증하고 있다. 이러한 응용분야에서 요구되는 극저온 발생장치는 (1) 냉각온도, (2) 냉동부하, (3) 신뢰성, (4) 진동 레벨, (5) 온도제어성, (6) Cooldown 시간 및 입력, (7) 체적, 중량, (8) 설치 환경 및 비용 등의 관점에서 충분한 검토가 필요하다.[1]

저온센서용 냉각온도 77K급 극저온 발생장치로는 G-M 극저온 냉동기, 스테링(Stirling) 극저온 냉동기, Joule-Thomson 극저온 냉동기 및 맥동관 극저온 냉동기 등이 있으며, 각 냉동기마다 장·단점이 있다.

본 연구에서는 기존의 극저온 냉동기에 비해 저진동, 낮은 소요동력, 소형 및 경량, 충분한 내구성 등의 장점을 가지고 있는 선형압축기(linear compressor) 구동 스테링 극저온 냉동기를 개발하기에 앞서, 현재 국내 적외선 센서 냉각 수요의 대부분을 차지하고 있는 FPFD(Free Piston and Free Displacer) 스테링 극저온 냉동기의 작동 조건, 작동 과정 및 성능 특성을 정확히 파악하기 위한 연구[2,3,4]

의 일환으로, 스테링 냉동기의 선형압축기와 팽창기를 연결하는 split tube의 길이 변화(체적 변화)에 대한 무부하 실험과 부하 실험을 수행하고, 이에 따른 스테링 극저온 냉동기의 특성 변화를 평가하고자 한다.

### 2. 본 론

FPFD 스테링 냉동기의 개념도는 Fig. 1과 같다. FPFD 스테링 냉동기는 크게 선형 압축기 즉 압축부와 팽창부로 구분되어 있으며, 압축부는 실린더, 서로 반대 방향으로 구동되는 두 개의 피스톤, 코일과 자석 등으로 구성되어 있으며, 팽창부는 왕복기와 그 내부의 재생기, 왕복기 스프링과 팽창실린더 등으로 구성되어 있다.

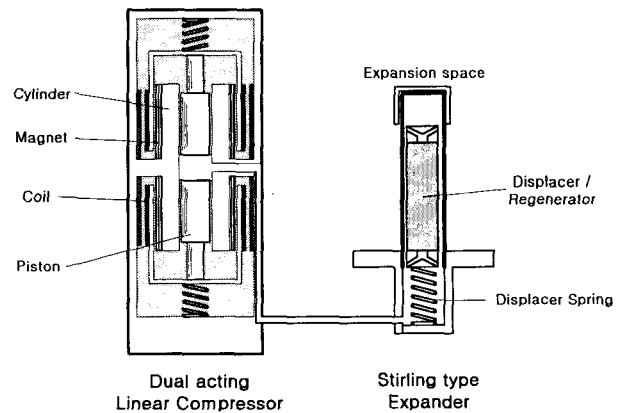


Fig. 1. A FPFD type stirling cryocooler

피스톤은 코일구동방식(moving coil type) 또는 자석 구동 방식(moving magnet type)으로 작동되는 linear motor에 의해 구동되고, 이 피스톤의 구동에 의해 발생된 압력파형은 split tube를 통해 연결된 팽창기내의 왕복기 및 팽창부로 전파된다.

냉동은 팽창공간에 연결된 cold end 부근에

서 발생하고, 왕복기는 피스톤 사이의 공간, split tube내 공간과 팽창기의 고온부 공간으로 구성된 압축공간과 팽창기의 저온부 공간의 압력 차에 의해 구동된다.

### 2.1 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 스테링 냉동기는 A사의 FPF type이며, 선형 압축기 크기는  $\phi 55\text{mm} \times 120\text{mm}$  (length) 이고, 팽창기 실린더 크기는  $\phi 7\text{mm} \times 70\text{mm}$  (length)이다.

Fig. 2는 스테링 냉동기 성능시험장치의 개략도를 보여주고 있다. 주위로 부터의 열침투를 차단하기 위해 팽창기의 cold end를 진공 용기 내에 설치하였으며, 실험에 사용된 진공용기는 길이 160mm, 내경 80mm, 두께 5mm의 스테인레스강으로 제작하였다. 진공플랜지에 연결된 스테링 냉동기는 저온부에 온도센서와 열선(heater wire)을 부착하고, 진공용기 외벽으로 부터의 복사 열손실을 방지하기 위하여 super-insulation을 수십겹 감은 뒤, 저온부를 진공용기속에 넣는다. 스테링 냉동기와 조립된 진공용기는 로타리 진공펌프를 사용하여 약  $10^{-2}\text{Torr}$ 의 진공도를 유지함으로써 대류에 의한 열손실을 방지하였다.

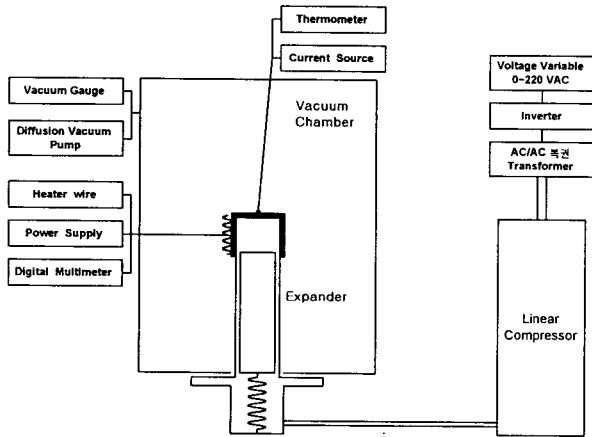


Fig. 2. Experimental apparatus of the Stirling cryocooler

스테링 냉동기 저온부의 온도는 silicon-diode 센서를 부착하여 측정하였고, 저온부의 순수냉동능력 측정 및 온도조절을 위하여  $9.5\Omega$ 의 망가닌 열선을 저온부에 감고 전류를 흘려 일정 온도가 유지될 때 전류 및 전압을 측정하여 냉동 능력으로 환산하였다. 또한 압축기 셀, 연결관, 왕복기 고온부와 대기에 열전대 T type을 부착하여 온도변화를 측정하였다.

또한 작동주파수와 입력전류, 전압의 조절은 Fujitz사의 AC power supply를 사용하였으며, 실험에 사용된 스테링 냉동기의 코일에는 입력전류 및 전압에 각각 4A, 10.2V의 한계가 있기 때문에 그 이상 넘지 않도록 조절 하였다.

스테링 냉동기의 성능시험시 선형압축기의 작

동주파수는 50Hz로 고정하였고, 다른 4가지 split tube를 제작하여 split tube의 체적비가 A사의 기존 제품에 비해 0.92, 1.25, 1.50, 1.75인 경우에 대해 압축기 및 왕복기의 동작 특성을 구하기 위해 고유주파수를 측정하였고, 무부하 운전 상태의 최저도달온도 및 온도 강하 특성 및 부하실험을 수행하였다.

### 2.2 실험결과 및 고찰

FPFD 스테링 냉동기는 운전주파수에 따라 최저도달온도가 크게 영향을 받으며, 냉동능력, 입력전력 등의 작동 특성에 큰 변화가 발생하는 특징을 가지고 있으며, 최적의 운전주파수는 피스톤 및 왕복기의 기계적스프링 및 가스스프링에 의해 결정되는 스테링 냉동기의 고유진동수 ( $\omega_n = \sqrt{(k_{spring} + k_{gas})/m}$ ) 즉 선형압축기의 고유진동수 및 왕복기의 고유진동수에 의해 결정된다.[5]

Fig. 3 및 4는 운전주파수를 변화시켜 가면서 스테링 냉동기 입력전력 및 냉동능력 측정하여 구한 선형압축기 및 왕복기의 고유진동수를 나타내고 있다.

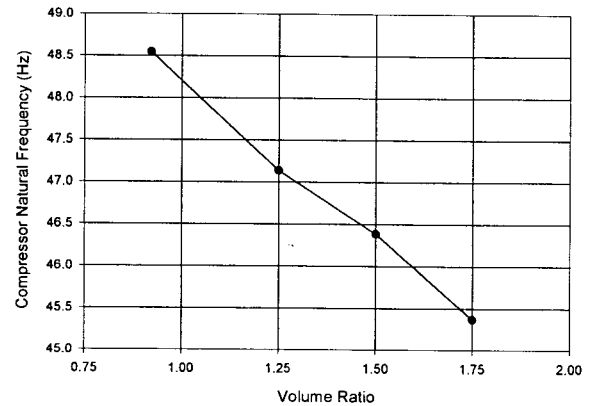


Fig. 3. Natural frequency of compressor

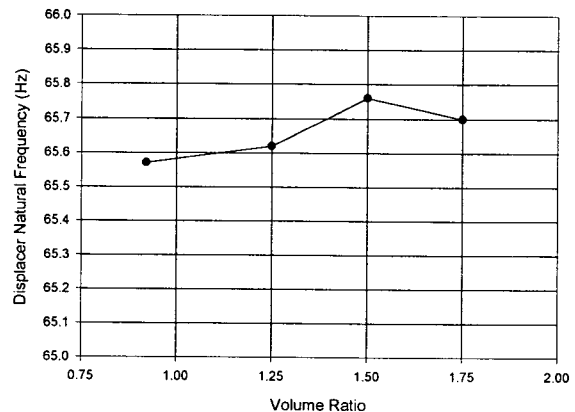


Fig. 4. Natural frequency of displacer

체적비의 증가에 따라 선형압축기의 고유진동수는 약 48.5Hz에서 45.5Hz로 감소하는 경향

을 나타내고 있으며, 이는 체적비가 증가함에 따라 압축기의 압축공간이 증가하여 압축비가 감소하여, 피스톤 양단의 압력차에 의해 결정되는 가스 스프링의 역할이 감소하기 때문으로 판단된다. 반면 왕복기의 고유진동수는 체적비의 변화에도 큰 영향없이 약 65.7Hz로 나타났다. 이는 왕복기의 경우 내부의 다공성 물질로 구성된 재생기를 통과하면서 발생하는 작동유체의 유동 압력강하에 의해 왕복기 양단의 압력차가 결정되고, 체적비의 변화에도 왕복기 양단의 압력차는 크게 변화하지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 무부하 운전시, 운전주파수 50Hz로 구동하였을 때 스테링 냉동기 cold tip에서의 온도 강하 특성이다. 온도측정은 냉동기 운전개시 후 15분 동안 수행하였으며, 측정결과 스테링 냉동기 운전 개시후 급격한 cold tip의 온도 강하가 발생하였으며, 약 6분 후에는 안정화된 온도를 나타내었다. 한편 체적비의 변화에 따른 온도강하특성 변화로는 체적비 0.92의 경우 가장 빠른 응답특성을 나타내고 있으며, 체적비가 증가할수록 초기 온도 강하율이 다소 낮게 나타나, 운전개시후 2분을 전후해서 체적비에 따라 약 25K의 온도차가 발생하였다.

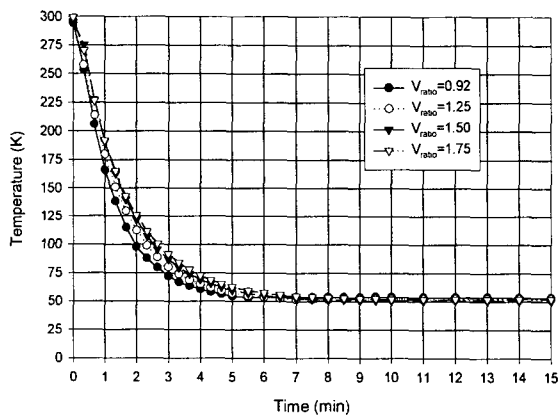


Fig. 5. Cooldown characteristics of stirling cryocooler with different volume ratio

Fig. 6, 7은 split tube 체적비의 변화에 대한 스테링 냉동기의 최저 도달온도 및 cold tip의 온도가 75K에 도달하기까지 소요되는 시간으로, 온도 강하 특성의 경향과는 달리 체적비가 1.5인 경우가 약 50.5K로 가장 낮은 최저 도달 온도를 나타냈으나, 체적비에 따른 도달온도 차이는 3K정도로 나타나, 큰 차이가 발생하지 않았다.

cold tip의 온도가 75K에 도달하기 까지 소요되는 시간은 체적비가 0.92의 경우 3분 미만으로 나타났으며, split tube 체적비의 증가에 따라 증가되어, 체적이 약 1.9배 증가할 때 34%의 도달시간이 증가되었다.

따라서 스테링 냉동기의 빠른 응답특성을 위해서는 압축공간을 구성하는 선형압축기의 압축

구조의 최적화 및 압축기와 팽창기를 연결하는 split tube의 길이의 최소화가 중요한 인자인 것으로 판단된다.

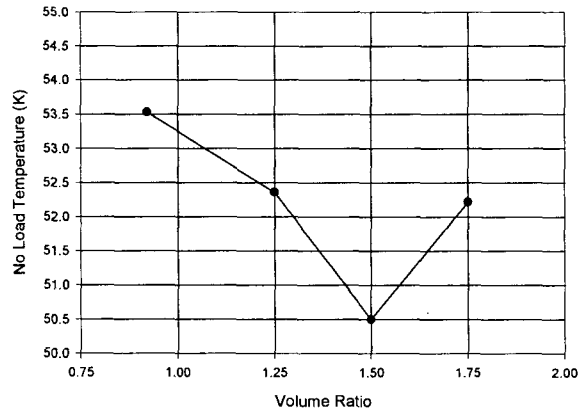


Fig. 6. No load temperature at cold tip

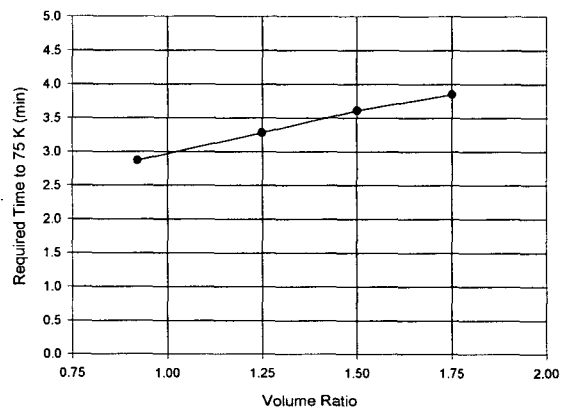


Fig. 7. The required time to reach at 75K

Fig. 8은 부하운전 실험을 통해 구한 스테링 냉동기의 냉동능력 선도이다. cold tip에 가해지는 열부하가 증가함에 따라 cold tip의 온도는 대략 선형적으로 상승되며, split tube 체적비가 작아질수록 동일한 cold tip 온도에서의 냉동능력이 커지는 경향을 나타내고 있어, 체적비가 작은 경우 즉 선형 압축기에 의해 압축되는 압축공간의 체적이 작은 경우의 스테링 냉동기의 냉각 특성이 우수한 것으로 나타났다.

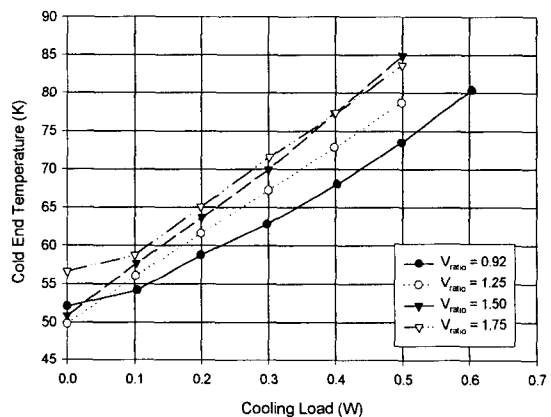


Fig. 8. Cooling power characteristics

Fig. 9는 cold tip의 온도가 75, 80K인 경우에 대한 스테링 냉동기의 냉동능력으로, 체적비가 0.92의 경우 냉동능력이 0.5W를 상회하나 점차 체적비가 증가함에 따라 냉동능력이 감소하여 체적비 1.75의 경우 0.4W 미만으로 나타났다.

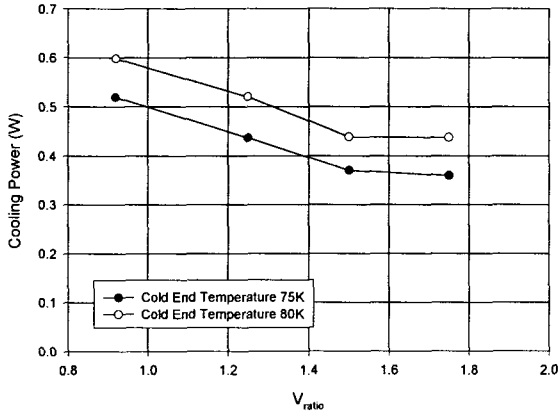


Fig. 9. Cooling power at same temperature with different volume ratio

Fig. 10은 부하실험을 통해 구한 냉동능력 및 냉동기 입력전력 특성을 나타내는 그림으로, 1W의 냉동능력을 얻기 위해 스테링 냉동기에 공급되어야 하는 입력전력을 나타낸다. 1W의 냉동능력을 얻기 위한 입력전력은 cold tip의 온도가 낮을수록 체적비의 변화에 따라 큰 차이를 나타내고 있으나, cold tip의 온도가 높을수록 그 차이가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 한편 체적비가 증가할수록 입력전력은 증가하는 것으로 나타났다.

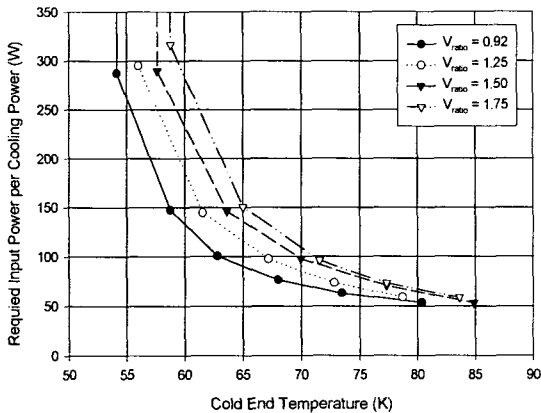


Fig. 10. The required input power of cooler to get cooling power (1W)

### 3. 결 론

FPPD 스테링 냉동기의 선형 압축기와 팽창기를 연결하는 split tube의 길이비(체적비)가 0.92, 1.25, 1.50, 1.75인 경우에 대해 압축기 및 왕복기의 고유진동수 특성, 무부하 및 부하

운전실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 체적비의 증가에 따라 선형 압축기의 고유진동수는 감소하나 왕복기의 고유진동수는 일정한 값을 나타낸다.

(2) 스테링 냉동기 cold tip의 온도는 냉각 운전 초기 급격한 강하가 발생하여 약 6분 이후에는 안정화되며, 체적비가 작을수록 빠른 응답 특성을 나타낸다.

(3) 체적비가 작을 수록 동일한 cold tip온도에서 큰 냉동능력이 나타내며, 입력전력이 감소한다.

(4) 따라서 스테링 냉동기의 빠른 응답특성 및 큰 냉동능력을 위해서는 압축공간을 구성하는 선형압축기의 압축 구조의 최적화 및 압축기와 팽창기를 연결하는 split tube의 길이의 최소화가 중요한 인자이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 박성제 외, "Linear Compressor 스테링 냉동기 설계에 관한 연구", 2000년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 81-84, 2000
- [2] 고득용 외, "센서 냉각용 소형 스테링 냉동기 개발 동향", 초전도와 저온공학, 제2권 제2호 pp.11-18, 2000
- [3] Seong-Je Park, etc., "An Experimental Study of Split-type Free Piston and Free Displacer Stirling Cryocooler", Korea-Japan Joint Workshop on Applied Superconductivity & Cryogenics, 2000
- [4] Yong-Ju Hong, etc., "A Simple Analysis of Split-type Free Piston and Free Displacer Stirling Cryocooler", Korea-Japan Joint Workshop on Applied Superconductivity & Cryogenics, 2000
- [5] 박성제 외, "스테링 냉동기의 주파수 특성에 의한 성능평가에 관한 연구", 한국기계연구원 연구논문집, 제30권 1호, pp. 25-32, 2000