

◆특집◆ 진공에 의한 저온 유지 기술과 그 응용

초전도필터 및 적외선검지기 냉각용 극저온냉동기

홍용주*

Cryocoolers for cooling of HTS RF Filter and IR detector

Yong-Ju Hong*

Key Words : Cryocooler(극저온냉동기), Stirling refrigerator(스터링냉동기), Pulse Tube refrigerator(맥동관냉동기), HTS RF filter(초전도 RF 필터), IR detector(적외선검지기)

1. 서론

극저온 냉동기는 고품질의 극저온환경(통상 120K 이하)의 유지를 요구하는 극저온진공펌프(cryopump), 검지기의 냉각 등의 우주, 군사, 에너지 분야, MRI(Magnetic Resonance Imaging), 저온수술(cryosurgery), 종보존(organ preservation) 등의 의료 및 생명공학, 고온초전도 냉각 등 다양한 분야에서 활용도가 증대되고 있다.

최근에는 적외선검지기 및 고온초전도체의 냉각과 관련하여 액체질소온도(77K) 부근의 냉각장치에 대한 수요가 급증하고 있는데, 대표적인 예가 극저온환경에서 동작하는 초전도 RF 필터로, 잡음을 제거함으로써 감도가 향상되고, 주파수 대역내의 사용 효율을 증대시킬 수 있어, 이동무선통신기지국용으로 개발이 진행되고 있는 초전도 RF 필터와 같은 저온센서의 냉각이다. 이러한 응용분야에서 요구되는 극저온냉동기의 필요조건은 (1) 냉각온도, (2) 냉동능력, (3) 신뢰성, (4) 진동, (5) 냉각시간 및 입력전력, (6) 온도제어, (7) 중량 및 설치공간, (8) 비용 등을 들 수 있다.

주로 20~60Hz의 높은 운전주파수로 운전되며, 적외선검지기의 냉각용으로 사용되어온 스텐링(Stirling) 냉동기의 경우 150mW@80K (무게 300g, 소요전력 3W)~18@80K (무게 35Kg, 소요전력 375W)의 냉동능력을 나타내고 있으며, 수 Hz의 낮은 운전주파수로 운전되며 주로 Cryopump 및 액체헬륨(4.2K) cryostat의 복사차폐막(radiation shield)의 냉각을 위해 사용되는 G-M(Gifford-McMahon) 냉동기는 0.5~3W@4.2K (소요전력 1~12kW)을 나타내고 있다. 또한 1단 맥동관(Pulse Tube) 냉동기 0~166W@80K (소요전력 3.42kW), 2단 맥동관 냉동기 0.5W@4.2K (소요전력 6.3kW)의 냉동능력을 나타내고 있어, 이와 같은 적외선검지기 및 초전도 RF 필터 냉각용 극저온 냉동기의 필요조건을 만족하고 있으며, 극저온 냉동기의 소형화, 고효율화, 신뢰성 및 수명 향상을 위한 연구개발이 진행되고 있다.

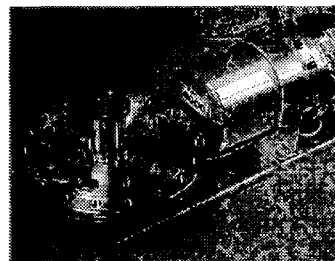


Fig. 1 Stirling refrigerator for telecom application (Leybold Vacuum, Germany)

* 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

Tel. 042-868-7366, Fax. 042-868-7335

E-mail yjhong@kimm.re.kr

소형극저온냉동기 특히, 스텐링냉동기 및 맥동관냉동기의 소형화, 고효율화에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

또한 극저온 냉동기는 입력전력 당 냉동능력이 매우 작기 때문에, 주위로부터의 열침입을 차단하기 위해, 고진공의 진공용기(Dewar) 내에 설치되어야 하며, 이 진공용기를 통한 전도 열손실 및 복사 열손실을 억제하기 위한 용기내 진동도를 유지하기 위한 진공 발생 및 유지기술이 필수적이다.

본 고에서는 극저온 냉동기 중, 주로 Cryopump, 적외선검지기 및 고온초전도체의 냉각의 용도로 활용되어지고 있는 스테링 냉동기 및 맥동관 냉동기의 작동원리 및 개발동향에 대해 고찰하고자 한다.

2. 극저온냉동기

2.1 스테링냉동기

스테링 냉동기는 80K 이하의 낮은 최저도달온도와 카르노(Carnot) 효율을 달성할 수 있는 연속적인 등온압축, 등적이동, 등온팽창, 등적이동으로 구성된 역스테링 사이클(Fig. 2)을 이용하는 기계식 냉동기로, 높은 이론 성능계수(Coefficient of Performance)를 나타낼 수 있는 극저온냉동기이다.

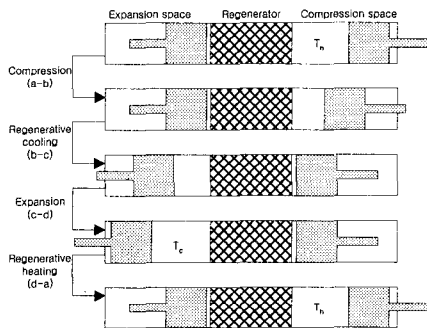


Fig. 2 Ideal Stirling cycle refrigerator

스테링 냉동기는 1860년대 스코틀랜드의 A. Kirk에 의해 개발되어진 이래, 주로 적외선 탐상장비에 장착되어 적외선소자를 80K 이하의 온도로 냉각시키는 냉각기 및 cryopump로 실용화되어져 양산되고 있으며, 특히 극저온냉동기 분야에서 스테링 냉동기는 소형, 경량, 고효율의 장점을 지니고 있다.

일반적으로 적외선검지기 및 초전도 RF 필터 냉각기로 사용되어지는 스테링 냉동기는, 압축기 피스톤을 구동하는 구동모터와 재생기(regenerator),

변위기(displacer) 등으로 구성되는 팽창기(expander)로 구성되어져 있다. 압축기 피스톤을 구동하는 구동모터는 주로 초소형 스테링 냉동기(냉동능력 1W 미만)의 경우 크랭크기구를 이용하여 피스톤을 구동하는 냉동기의 경우 회전모터가 사용되어지고 (Fig. 3), 비교적 큰 냉동능력을 요구하는 스테링 냉동기의 경우(통상 냉동능력 1W 이상) 자유피스톤 (free piston) 방식으로, Fig. 4에 나타낸 바와 같은 선형압축기(linear compressor)가 사용된다.

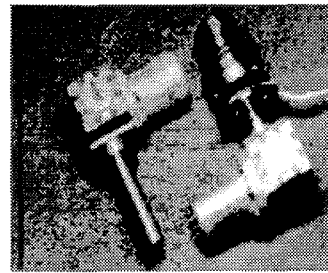


Fig. 3 Rotary type Stirling refrigerator integrated in dewar (Thales Cryogenics, Netherlands)

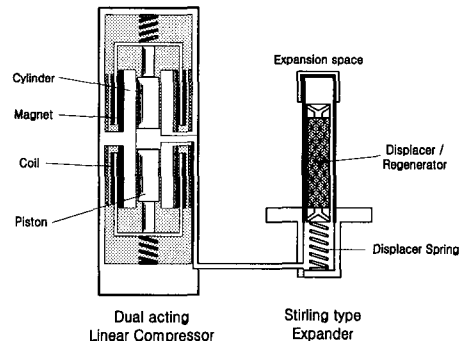


Fig. 4 Schematic diagram of Stirling refrigerator driven by a linear compressor

선형압축기를 채용한 자유피스톤 방식의 스테링 냉동기는 소형화 및 저소음화가 가능하며, 피스톤이 무윤활의 비접촉기구를 사용하기 때문에 높은 신뢰성과 긴 수명이 가능한 장점을 지니고 있어, 최근 군수용 및 민수용 소형 스테링 냉동기(운도영역 : 30~ 100 K, 냉각능력 : 1~10 W)의 주류를 이루고 있다.

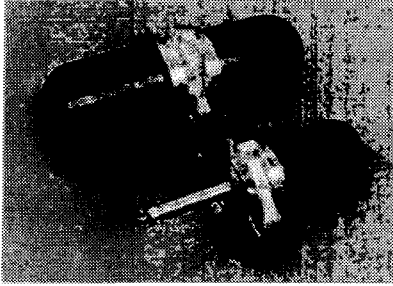


Fig. 5 Stirling refrigerator for cooling of infrared detector (from Ball Aerospace, USA)

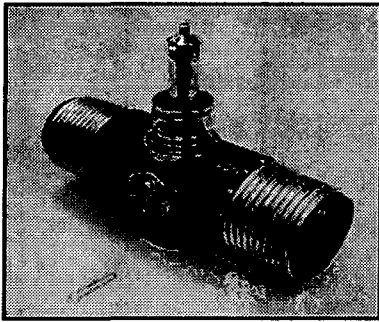


Fig. 6 Stirling refrigerator for cooling of HTS RF filter (from RICOR, Israel)

스터링 냉동기의 선형압축기는 실린더, 피스톤, 코일, 자석, 스프링 등으로 구성되어 있으며, 구동 방식에 따라 이동코일(moving coil)형과 이동자석(moving magnet)형으로 분류되며, 피스톤의 왕복운동을 통해 압축공간에서 압력 파형을 생성하여 팽창기의 고온부와 연결된 연결관(split tube)을 통해 팽창기로 압력 파형을 공급한다. 생성된 압력 파형의 크기는 극저온 냉동기의 성능을 결정하는 주요한 인자로 작용한다. 또한 선형 압축기 피스톤의 마모, 전류도입선의 피로로 인한 절단, 스프링의 피로 파괴, 누설(leakage), outgassing으로 인한 작동유체의 오염(contamination) 등은 스텐링 냉동기의 내구성 및 신뢰성을 결정하는 주요한 인자로, 선형압축기의 수명(Operating life 및 shelf life)을 향상시키기 위해 flexure bearing 및 outgassing을 억제하기 위한 이동자석형 선형압축기가 제안되어 졌고, 향후에는 스텐링 냉동기의 주류가 될것으로 예측된다.

또한 고효율의 스텐링 냉동기를 위해서는 입력전력이 최소화되어야 하며, 따라서 선형압축기 피

스톤을 구동하는데 소요되는 힘이 최소가 되는 냉동기의 고유주파수에서 스텐링 냉동기가 운전되도록 설계되어야 한다.

한편 스텐링 냉동기의 고유주파수는 피스톤의 직경, 압축기의 행정거리, 압축기와 팽창기를 연결하는 연결관의 크기, 재생기의 크기, 구동부의 질량, 작동유체의 충전압력 등의 여러 인자에 의해 결정된다.

스터링 냉동기의 고효율화를 위해서는 재생기의 열수력성능의 최적화가 수반되어야 할 뿐만 아니라, 동특성의 최적화가 필수적이다. 스텐링 냉동기에 있어서, 냉동능력은 팽창기의 압력과 변위기의 변위에 의해서 결정되며, 최대의 냉동능력을 얻기 위해서는 이들 관계의 최적화가 요구된다. Fig. 7은 대표적인 적외선 검지기용 선형압축기 구동 스텐링 냉동기(입력전력 40W)의 냉각특성을 나타낸 그림으로, 운전개시 후 저온부가 77K에 도달하는데 까지 소요되는 시간으로 약 2분 정도이다.

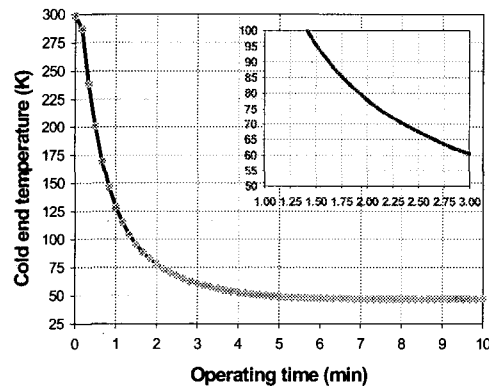


Fig. 7 Typical cool-down performance of the Stirling refrigerator driven by a linear compressor

스터링 냉동기는 냉각온도, 냉동능력, 신뢰성 등 여러 측면에서 적외선검지기 및 고온초전도체의 냉각용 극저온 냉동기의 필요요건을 만족시키고 있어, 군사용, 민수용의 적외선 검지기 냉각용으로 활용되고 있으며, 이동통신용 초전도 RF 필터 냉각을 위한 유력한 후보의 하나이다.

2.2 맥동관 냉동기

맥동관 냉동기는 스텐링 냉동기 및 G-M 냉동기와는 달리 냉동을 생성하는 저온부에 변위기가 없

고, 상대적으로 낮은 운전 압력비와 충전압력, 또한 다양한 냉각조건에 대해 적용이 가능한 장점으로 인하여, 기존의 극저온냉동기의 수요를 대체할 수 있을 것으로 기대되어져, 미국, 일본, 중국 등을 중심으로 활발한 연구개발이 진행되어지고 있다.

또한 맥동관 냉동기는 저온부의 구동기구가 없기 때문에, 상대적으로 단순한 구조를 지니고 있어, 정밀한 가공 및 조립기술이 요구되지 않을 뿐만 아니라, 높은 신뢰성을 확보할 수 있으며, 낮은 진동수준, 저렴한 제작단가 등 스테링 냉동기 및 G-M 냉동기에 비해 여러 가지 장점을 지닌 극저온 냉동기이다. Table 1은 G-M 냉동기, 스테링 냉동기, 맥동관 냉동기, Joule-Thomson (throttle) 냉동기의 수명을 비교한 결과로, 맥동관 냉동기는 40,000시간 이상의 긴 수명과 높은 신뢰성을 나타냄을 알 수 있다.

Table 1 Statistics in distributions of maintenance intervals or specified lifetimes

	G-M	PTR (G-M)	PTR (Stirling)	Stirling	throttle
number of coolers	47	11	7	81	3
average (hrs)	14,400	15,900	44,700	14,200	7,000
standard deviation	7,000	5,800	26,300	22,800	3,500
statistical percentage > 1 year	79	89	91	59	31

맥동관 냉동기는 1963년 Gifford와 Longsworth에 의해 기본형 맥동관 냉동기(Basic Pulse Tube Refrigerator)가 처음 고안되어졌으나, 기본형 맥동관 냉동기는 최저도달온도가 124 K에 불과하고, 열효율이 낮을 뿐만 아니라 냉동능력이 작아, 큰 주목을 받지 못하였다.

또한 1980년대 LANL의 Wheatley 등에 의해 높은 주파수(500~1000Hz)의 공진을 이용한 열음향 냉동기(Thermoacoustic Refrigerator)가 고안되어졌으나, 이 역시 최저도달온도가 195 K에 불과해, 극저온냉동기로 주목 받지 못하였다.

1984년 Mikulin에 의해 고안되어진 오리피스 맥동관 냉동기(Orifice Pulse Tube Refrigerator, OPTR)

는 맥동관 냉동기를 스테링 및 G-M 냉동기와 비교할만한 극저온냉동기로 인식되게 한 시초라 할 수 있으며, 오리피스 맥동관 냉동기는 이후 개선을 거듭하여 1990년에는 최저도달온도가 33K에 도달하였다.

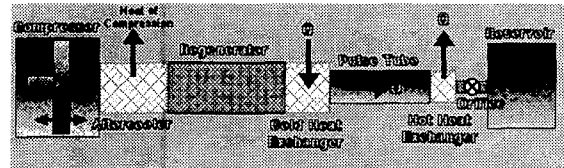


Fig. 8 Schematic diagram of orifice Pulse Tube refrigerator

1990년 Zhu 등에 의해 고안된 이중구멍형 맥동관 냉동기(Double inlet Orifice Pulse Tube Refrigerator)는 오리피스 맥동관 냉동기의 열효율을 크게 개선하였으며, 이와 같은 맥동관 냉동기의 비약적인 발전에 힘입어, 1994년 미국 TRW사에서는 적외선 센서의 냉각을 위해 선행압축기를 채용한 우주용 소형 맥동관 냉동기(냉동능력 0.5W@80K, 입력전력 17W)를 개발한바 있다.

한편 1994년 Kanao 등에 의해 고안된 관성관 맥동관 냉동기(Inertance Pulse Tube Refrigerator, IPTR)는 오리피스 맥동관 냉동기의 오리피스를 관성관으로 대체한 방식으로, 고주파수의 스테링형 맥동관 냉동기에 있어서 맥동관에서 압력과 질량유량의 관계를 관성관을 통해 최적화하여, 오리피스 맥동관 냉동기 보다 개선된 성능 및 대용량화가 가능한 장점을 지니고 있어, 초전도 RF 필터의 냉각용으로 적합한 냉동기로 평가받고 있다.

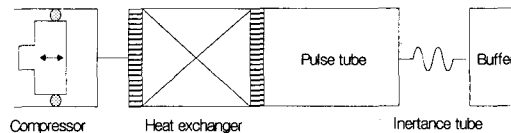


Fig. 9 Schematic diagram of inertance Pulse Tube refrigerator

맥동관 냉동기는 냉각을 발생시키는 압력원에 따라 크게 스테링형, G-M형, 열음향구동형으로 나눌 수 있으며, 수 Hz의 저주파로 운전되는 G-M형 맥동관 냉동기는 2~200 K의 넓은 냉각온도 범위에

대해 적용이 가능하다.

G-M형 맥동관 냉동기는 고·저압을 조절하는 밸브를 장착하며, 기존의 G-M 냉동기용 급유방식 헬륨압축기를 사용하기 때문에 높은 신뢰성 측면의 장점을 지니고 있으나, 큰 설치공간 및 설치 방향의 제한성과 특히 낮은 냉각효율의 문제점을 지니고 있으나, 다단화가 용이하고, 냉각부 구조가 간단하기 때문에, Cryopump, 의료용 MRI 자석 냉각용 등에서 액체헬륨, 액체질고 등의 한제(Cryogen) 또는 G-M 냉동기를 대체하여, 활용되고 있다.

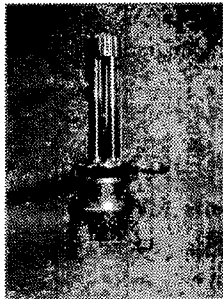
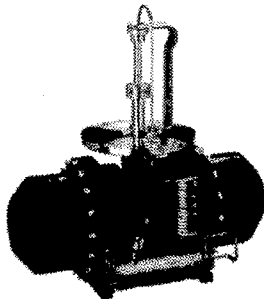


Fig. 10 G-M type, Pulse Tube refrigerator (Iwatani, Japan)

한편 수십 Hz의 고주파로 운전되는 스테링형 맥동관 냉동기는 주로 스테링 냉동기의 활용분야인 77 K 부근의 냉각온도(40~200 K)에 적용되어지며, 압축기에 밸브가 없는 구조를 채택하고 있어 G-M형에 비해 설치공간 및 설치방향의 제한이 작고, 스테링 냉동기와 대등한 높은 효율의 장점을 지니고 있다.



11 Stirling type, inertance Pulse Tube refrigerator (Aisin Seiki Co., Japan)

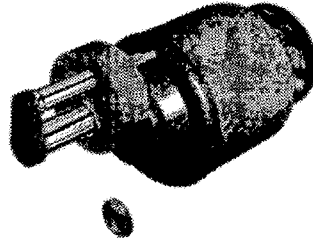


Fig. 12 Stirling type, U-type Pulse Tube Refrigerator (Sunpower, Inc, USA)

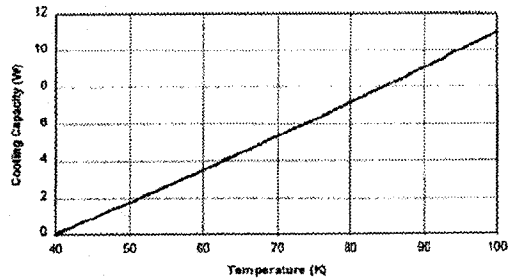


Fig. 13 Cooling capacity of Pulse Tube refrigerator (from Sunpower, Inc, USA)

스테링형 맥동관 냉동기는 수 만시간의 수명(MTTF or MTBF)과 높은 신뢰성의 선형압축기가 개발됨에 따라, 신뢰성 및 수명이 크게 향상되었고, 냉각부의 소형화를 위한 맥동관 및 재생기 성능 최적화에 대한 지속적인 연구개발이 진행되고 있다. 따라서 머지 않은 장래에 맥동관 냉동기가 적외선 검지기, 초전도 RF 필터의 냉각용으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 결론

고품질의 극저온 환경의 생성 및 유지는 고품질 대용량 정보통신, 의료진단, 초전도 및 고집적반도체 제조공정 등의 차세대 유망 산업 분야에서 필수적인 요소로 자리 잡고 있으며, cryopump, 민수용 및 군수용의 적외선 검지기 및 초전도 RF 필터의 효과적 냉각을 위해 보다 높은 신뢰성과 수명, 고효율의 극저온 냉동기에 대한 수요는 점차 증대될 것으로 기대된다. 스테링 냉동기 및 맥동관 냉동기는 짧은 역사에도 불구하고, 다양한 분야에서 기존

의 한계 및 극저온 냉동기를 대체하여 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

참고문헌

1. Walker, G. and Bingham, E., R., "Low-Capacity Cryogenic Refrigeration," Clarendon Press, 1994.
2. Radebaugh, R., "Advances in Cryocoolers," Proceedings of the 16th ICEC and ICMC, pp. 33-43, 1997.
3. Shiraishi, M., "Research and development status of cryocooler and its applications in Japan," IIR 한국 위원회 A1(저온물리학, 저온공학), 2000.
4. S. J. Park, Y. J. Hong, H. B. Kim, D. Y. Koh, J. H. Kim, B. K. Yu, K. B. Lee, "The effect of operating parameters in the Stirling cryocooler," Cryogenics 42(6-7), pp. 419-425, 2002.
5. Deuk-Yong Koh, Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Hyo-Bong Kim, Kwan-Soo Lee, "A Study of the linear compressor characteristics of the Stirling cryocooler," cryogenics 42(6-7), pp. 427-432, 2002.
6. Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Hyo-Bong Kim, Deuk-Yong Koh, "Study on the cooling performance of free piston Stirling cryocooler," Presented at the ICEC19, Grenoble, France, 2002 (will be published).
7. Ter Brake, H. J. M., "State-of-the-art review on low-power cryocoolers," Presented at the ICEC19, Grenoble, France, 2002 (will be published).
8. Gifford, W. E., Longworth, R. C., "Puls-tube refrigeration," Trans. ASME, pp. 264-268, 1964.
9. Mikulin, E. I., Tarasov, A. A., and Shkrebynock, M. P., "Low temperature expansion pulse tube," Adv. Cryo. Eng. Vol. 29, pp. 629, 1984.
10. Zhu, S., Wu, P., and Chen, Z., "Double inlet pulse tube refrigerator: an important improvement," Cryogenics Vol. 30, pp. 514-520, 1990.
11. Wheatley, J., Hofler, T., Swift, G. W., and Migliori, "Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engine," Am. J. Phys., Vol. 53, pp. 147, 1985.
12. Kanao, K., Watanabe, N., and Kanazawa, Y., "A miniature pulse tube refrigerator for temperature below 100K," Cryogenics, Vol. 34(ICEC Supplement), pp. 167-170, 1994.
13. Unger, R. Z., Wood, J. G., "Performance comparison of M77 Stirling cryocooler and proposed pulse tube cryocooler," Adv. in Cryogenics, Vol. 45, pp. 539-544, 2000.
14. Matsubara, Y., "Pulse Tube Cryocooler for Electronic Applications," IEICE Trans. Electron, Vol. E85 C, No. 3, pp. 742-745, 2002.