

맥동관 냉동기

정은수
홍익대학교 기계공학과

1. 서론

극저온냉동기(cryocooler)의 새로운 응용 분야는 계속 나타나고 있고, 기존 응용분야의 요구조건들은 종종 변화하고 있다. 이러한 새롭고 또한 변화하는 극저온냉동기에 대한 요구조건들이 최근의 극저온냉동기 발전의 추진력이 되어 왔다. 특정한 응용분야의 요구조건을 만족시키는 극저온냉동기가 없기 때문에 많은 응용분야의 발달이 저해되고 있다. 예를 들어서, 초전도체를 냉각시키는 극저온냉동기에 관련된 문제점들이 모두 해결된다면 초전도체는 현재 광범위하게 사용되고 있을 것이다. 극저온냉동기에 관련된 주요 문제점들은 신뢰성, 효율, 크기, 무게, 진동, 그리고 가격이다.[1] 앞으로 초전도체, 고속 전자부품, 전자-광학기기, 장거리 광통신, 그리고 컴퓨터의 장기적인 발달은 이들의 냉각을 위해 사용할 수 있는 적절한 극저온냉동기의 유무와 냉동기의 신뢰성, 그리고 효율에 의하여 좌우될 전망이다.[2]

맥동관냉동기(pulse tube refrigerator)는 효율은 낮으나 구조적으로 신뢰성이 높다는 장점을 갖고 있기 때문에 처음에는 고신뢰성이 요구되는 인공위성 탑재용 소형 극저온냉동기로 개발되었다. 그러나, 근래 맥동관냉동기의 효율이 기존의 소형냉동기와 동등한 수준으로 향상되었으므로 발열량이 작고 작동온도가 4-150K인 전자부품이나 센서 등의 냉각을 위한 소형 극저온냉동기로 개발되고 있다.[3] 현재 소형 극저온냉동기로는 스텔링냉동기(Stirling refrigerator)와 GM냉동기가 가장 많이 사용되고 있는데, 이 냉동기들은 상온부와 저온부에 2개의 구동부를 갖고 있어서 구조가 복잡하며 장기간 보수없이 사용하기 곤란한 문제점을 갖고 있다. 특히 저온에서 일어나는 변위기(displacer)의 실(seal)과 실린더 사이의 마찰이 이 냉동기들의 신뢰성을 저감시킨다. 맥동관냉동기는 상온에 하나의 구동부를 갖

고 있고 저온측 구동부는 없으므로 구조가 간단하고, 저온측의 진동이 없으며, 평균 압력비도 낮아 장기간 보수가 필요 없는 고신뢰성의 극저온 냉동기로 사용되기에 적합한 장점들을 고루 갖고 있으므로 이의 실용화를 위한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.[4,5]

본고에서는 맥동관냉동기의 작동원리와 종류, 그리고 개발동향 등을 간단히 소개하고자 한다.

2. 맥동관냉동기의 작동원리

맥동관냉동기는 스텔링냉동기(Stirling cryocooler)의 변형이므로 스텔링냉동기의 작동원리를 먼저 이해하면 맥동관냉동기의 작동원리를 쉽게 이해할 수 있다. 그림 1은 스텔링냉동기의 작동원리를 보여준다.[6] 스텔링냉동기는 작동체적의 크기가 피스톤 운동에 따라 변화하는 팽창부(expansion space)와 압축부(compression space), 저온열교환기(cold heat exchanger), 고온열교환기(hot heat exchanger), 그리고 재생기(regenerator)로 이루어져 있다. 먼저 압축부의 피스톤이 오른쪽으로 이동하면 압축부 내의 작동가스는 압축되어 온도가 고온열교환기의 온도 T_H 보다 높아진다.(1-2) 그 다음에 양쪽의 피스톤이 일정한 간격을 유지하면서 오른쪽으로 이동하면 압축부에 있던 작동가스는 고온열교환기 벽의 온도보다 높으므로 고온열교환기를 지나며 외부로 열을 방출한다.(2-3) 또한, 작동가스는 재생기를 지나며 재생기 매트릭스에 열을 전달하며 온도가 낮아져 저온열교환기의 온도 T_C 가 되어 팽창부로 들어간다. 팽창부의 피스톤이 오른쪽으로 이동하면 팽창부 내에 있는 작동가스는 팽창되어 저온열교환기의 온도보다 낮아진다.(3-4) 그 다음에 양쪽의 피스톤이 같은 간격을 유지하며 왼쪽으로 이동하면 팽창부 내부에 있던 작동가스의 온도는 저온열교환기의 온도보다 낮으므로 왼쪽으로 이동하

저온공학 분야 특집

며 외부에서 열을 공급받게 된다.(4-1) 이 과정동안 작동가스는 재생기를 지나며 재생기 매트릭스로부터 열을 받아 고온열교환기의 온도 T_H 가 되어 고온열교환기로 이동한다. 4-1 과정 동안 작동가스가 왼쪽으로 이동하며 재생기에서 받은 열전달량은 2-3 과정 동안 작동가스가 오른쪽으로 이동하며 재생기로 준 열전달량과 같으므로 재생기가 한 사이클동안 받은 열전달은 0이다. 1-2-3-4-1 과정의 한 사이클동안 스텔링냉동기는 저온부에서 열을 받아 고온부로 열을 방출하므로 냉동효과를 얻을 수 있다.

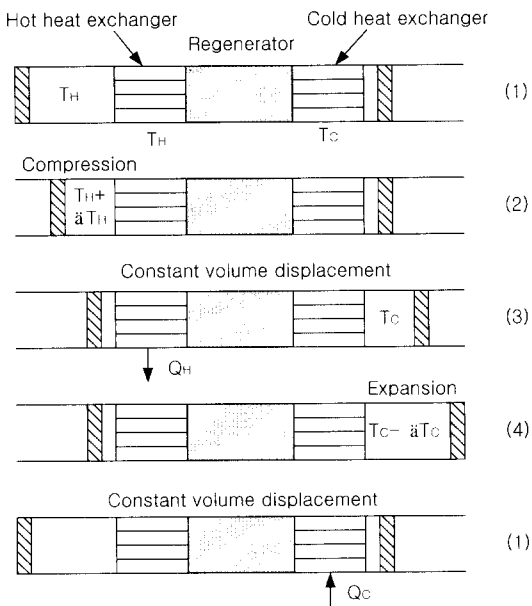
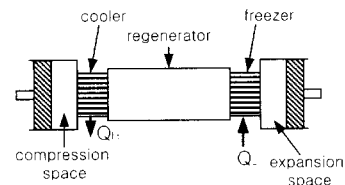


그림 1. 스텔링냉동기의 작동원리

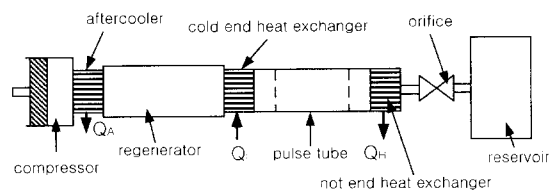
스텔링냉동기의 저온부에 위치한 피스톤은 작동가스를 팽창시켜 온도를 떨어뜨리므로 냉동효과를 발생시킨다. 압력과 속도 사이의 위상차가 없도록 두 피스톤이 왕복운동을 할 때 최대냉동효과를 얻을 수 있다. 이 경우의 압축부 피스톤과 팽창부 피스톤은 약 90° 의 위상차를 갖고 왕복운동한다.[7]

그림 2는 스텔링냉동기와 오리피스 맥동관냉동기(orifice pulse tube refrigerator)의 구조와 대략적인 온도분포를 보여준다. 스텔링냉동기와 오리피스 맥동관냉동기는 시스템 내부의 압력 변화를 발생시키는 압축기를 갖고 있다. 압력 변화에 따라 작동가스는 재생기 내부를 흐르며 열을 교환한다. 여기까지 맥동관냉동기와 스텔링냉동기는 유사하

다. 스텔링냉동기는 저온부에서 구동하는 피스톤을 갖고 있으나, 오리피스 맥동관냉동기에서는 맥동관(pulse tube), 고온열교환기, 오리피스, 저장소의 조합이 스텔링냉동기의 팽창부의 역할을 하는 것을 알 수 있다. 즉, 맥동관 내부에 점선으로 표시한 가상의 가스피스톤이 스텔링냉동기의 팽창부에 있는 피스톤의 역할을 하는 것으로 생각할 수 있다. 스텔링냉동기의 팽창부 피스톤은 외부의 기구에 의하여 강제적으로 압축부 피스톤과 위상차를 갖고 운동하나, 맥동관 내부에 위치한 가스피스톤은 오리피스와 저장소에 의하여 압축기의 피스톤과 위상차를 갖고 운동한다. 유체의 흐름을 전기적으로 유추하면 오리피스는 저항에 해당하고, 저장소는 콘덴서에 해당하며, 가스의 질량유량은 전류에 그리고 맥동관과 저장소 사이의 압력차는 전압차에 해당한다. 전류가 저항을 통과할 때는 전압과 전류 사이의 위상차가 없지만, 저항과 콘덴서가 연결된 회로를 흐를 때는 전류와 전압 사이에 위상차가 발생한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서, 오리피스 맥동관냉동기의 압축부 피스톤과 가상의 가스피스톤 사이의 위상차(맥동관 내부의 압력과 질량유량 사이의 위상차)는 오리피스와 저장소에 의하여 발생한다. 이러한 위상차 발생기는 스텔링냉동기의 적극적인 위상차 발생기(팽창부의 피스톤)에 비하여 냉동효과를 얻는데 필요한 압력과 질량유량 사이의 위상차를 작게 발생시키므로 같은 압력 변화의 진폭에 대하여 스텔링냉동기 보다 훨씬 더 많은 단위 냉동용량당 질량유량이 요구된다.[7]



(a) 스텔링냉동기



(b) 오리피스 맥동관냉동기

그림 2. 스텔링냉동기와 오리피스 맥동관냉동기

3. 맥동관냉동기의 종류

1963년 Gifford와 Longsworth[8,9]에 의하여 고안된 맥동관냉동기는 기본형 맥동관냉동기(basic pulse tube refrigerator)로 불리는데, 그 구조는 그림 2의 오리피스 맥동관냉동기에서 오리피스와 저장소가 없는 형태이다. 이 맥동관냉동기는 작동가스와 관벽 사이의 열전달에 의하여 압력과 질량유량 사이의 위상차가 발생한다.

기본형 맥동관냉동기는 1960년대 중반에 처음 소개된 이후 그 구조의 단순함과 고신뢰성 때문에 많은 관심을 끌었으나, 효율이 낮고 냉동용량이 작아서 널리 사용되지 않았다.

1984년에 Mikulin 등[10]은 오리피스 맥동관냉동기를 개발하여 맥동관냉동기 발전에 큰 전기를 마련하였다. Mikulin 등에 의하여 소개된 오리피스 맥동관냉동기는 오리피스가 맥동관과 고온열교환기 사이에 있었고 오리피스의 개폐도 조절할 수 없었다. Radebaugh 등[11]은 Mikulin의 맥동관냉동기를 개량하여 그림 2와 같이 오리피스를 고온열교환기와 저장소 사이에 설치하고, 최적조건을 얻기 위하여 오리피스의 개폐를 조절할 수 있는 니들밸브(needle valve)를 사용하였다. 1989년에 중국의 Liang 등[12]은 1단(single stage) 오리피스 맥동관냉동기에서 최저 온도 49K를 얻었다.

오리피스 맥동관냉동기는 기본형 맥동관냉동기에 비하여 냉동온도와 냉동용량을 크게 향상시켰지만 스텔링냉동기나 GM냉동기에 비하여 작동유체 단위질량유량당의 냉동용량은 여전히 작다. 따라서, 같은 냉동용량을 얻기 위해서는 오리피스 맥동관냉동기의 재생기를 통과하는 작동유체의 질량유량은 스텔링냉동기나 GM냉동기의 재생기를 통과하는 작동유체의 질량유량보다 많아야 한다. 재생기를 통과하는 질량이 증가할수록 재생기의 효율이 낮아져 재생기 손실이 커지고, 압축기의 기계적 손실도 커지므로 냉동기의 전체 효율은 낮아진다. 그 이유는 재생기를 통과하는 작동가스의 일부만이 냉동효과를 얻는데 기여하고 나머지는 냉동효과에 기여하지 못하기 때문이다. 즉, 오리피스 맥동관냉동기에서는 냉동효과에 기여하지 못하는

작동가스도 재생기를 통과하여야 하므로 재생기를 통과하는 단위 질량유량당의 냉동용량이 스텔링냉동기나 GM냉동기에 비하여 낮고 최저 냉동온도를 높게 한다.[13]

이중입구 맥동관냉동기(double inlet pulse tube refrigerator)는 위에서 설명한 오리피스 맥동관냉동기의 단점을 해결하기 위하여 압축기를 나오는 작동유체가 모두 재생기를 통과하여 맥동관으로 이동하지 않고 그림 3과 같이 작동가스의 일부가 고온열교환기를 통하여 직접 맥동관의 고온부로 가게 한 것이다. Zhu 등은 1단 이중입구 맥동관냉동기에서 최저온도 42K를 얻었다.[13]

다중 바이패스 맥동관냉동기(multi-bypass pulse tube refrigerator)는 이중입구 맥동관냉동기의 성능을 더 향상시키기 위하여 그림 4와 같이 맥동관의 중간부와 재생기의 중간부 사이를 관으로 연결하고 유량을 조절할 수 있도록 밸브를 설치한 맥동관냉동기이다. 재생기를 통과하는 작동가스의 일부가 직접 맥동관으로 가게 되므로 가스 피스톤 내부의 질량은 감소한다. 그러나, 이 방법은 압축비를 증가시키고 가스 피스톤의 진폭을 크게 하므로 냉동용량의 증대와 맥동관냉동기에서 얻을 수 있는 최저온도를 낮출 수 있다.[14,15] Wang 등은 1단 다중 바이패스 맥동관냉동기를 이용하여 최저온도 23.8K를 얻었고, 냉동온도 77K에서 냉동용량 3.6W를 얻었다.

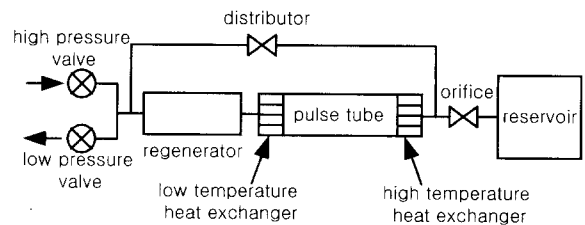


그림 3. 이중입구 맥동관냉동기

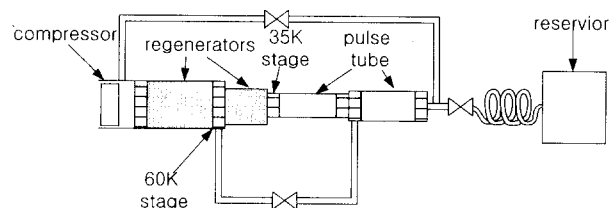
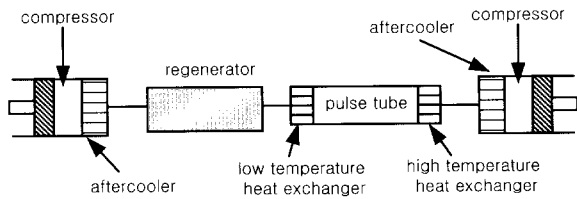
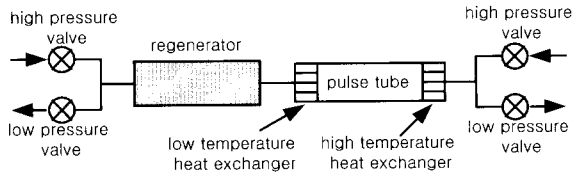


그림 4. 다중 바이패스 맥동관냉동기



(a) Two-piston type 맥동관냉동기



(b) Four-valve type 맥동관냉동기

그림 5. 기타 맥동관냉동기

그림 5는 two-piston type 맥동관냉동기와 four-valve type 맥동관냉동기를 보여주는데, 이것들도 이중입구 맥동관냉동기와 같이 재생기를 통과하는 질량유량을 감소시키면서 맥동관내의 작동유체를 압축 팽창시켜 작동유체 단위질량당의 냉동용량을 높이고자 하는 형태이다. Two-piston type 맥동관냉동기는 스텔링냉동기와 같이 양쪽에 피스톤이 있으나, 스텔링냉동기의 압축부 피스톤은 고온에서 작동하고 팽창부 피스톤은 저온에서 작동하는 데 비하여, two-piston type 맥동관냉동기의 피스톤들은 모두 고온에서 작동하므로 냉동기의 수명을 저하시키는 저온마찰을 피할 수 있다. Four-valve type 맥동관냉동기에서는 최저 냉동온도를 30K 이하까지 얻었으며 냉동온도 55K에서의 냉동용량은 10 Watt였다.[16,17]

그림 4에 보여진 오리피스와 저장소 사이의 가늘고 긴 관, 즉 관성관(inertance tube)을 이용하여 압력과 속도 사이의 위상차를 조절하는 맥동관냉동기도 개발되고 있다. 관성관은 전기회로의 인덕턴스(inductance)와 같은 역할을 하므로 압력이 질량유량을 앞서게 하는데, 오리피스와 관성관을 직렬로 연결하면 맥동관냉동기의 압력과 속도 사이의 위상차가 극저온냉동기 중 가장 효율이 높은 스텔링냉동기의 압력과 속도 사이의 위상차에 접근하게 된다. 관성관의 길이를 길게 하면 유동저항이 증가하므로 저장소에 연결된 오리피스를 제거할 수도 있다. 관성관을 사용한 냉동기는 오리피스

맥동관냉동기에 비하여 단위질량유량당 냉동능력이 크게 향상되는데, 성능향상 효과는 주파수가 높거나 냉동용량이 큰 맥동관냉동기에서 현저하게 나타난다.[3,18]

공명식 맥동관냉동기(resonant pulse tube refrigerator)는 열음향냉동기(thermoacoustic refrigerator)라고도 불리는데, 기본형 맥동관냉동기와 같이 표면열 펌핑에 의하여 냉동효과를 얻는다. 일반적인 맥동관냉동기는 피스톤의 진폭은 크나 피스톤이 움직이는 속도는 느린 반면 공명식 맥동관냉동기는 피스톤이 움직이는 진폭은 매우 작으나 피스톤의 진동수가 매우 크므로 냉동기 내부에 공명이 일어난다. Wheatley[12]는 공명관에 열교환기를 도입하여 가스열교환기 사이의 열전달의 이완시간과 피스톤의 주기가 거의 같도록 한 공명식 맥동관냉동기를 개발하였는데 그 구조는 그림 6에 나타내었다. 평균압력이 1MPa, 압력의 진폭이 평균압력의 0.034, 진동수가 516Hz일 때 최저온도는 195K였다. 이 냉동기는 전기음향 동력변환장치(electroacoustic power transducer)에 의하여 구동되는데, 음향기에 사용되는 스피커의 작동원리에 의하여 구동된다.

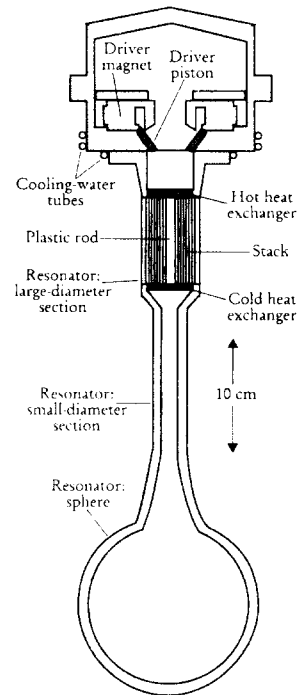


그림 6. 공명관식 맥동관냉동기

압력변화를 발생시키는 방법에 따라 맥동관냉동기는 스텔링형과 GM형으로 나눌 수 있다. 스텔링형은 스텔링냉동기의 압축부와 같이 피스톤의 왕복운동에 의하여 압력변화가 일어난다. GM형은 그림 3과 같이 고압가스와 저압가스에 연결된 밸브 2개가 교대로 개폐하여 맥동관 내부의 압력변화를 발생시킨다.

1단 맥동관냉동기에서 얻을 수 있는 최저온도는 한계가 있고, 또한 냉동온도가 낮아질수록 효율이 감소하기 때문에 80K 이하의 냉동온도를 얻기 위해서는 다단(multiple stage) 맥동관냉동기를 사용하고 있다. 1988년에 중공의 Zhou 등은 2단 오리피스 맥동관냉동기에서 32K를 얻었고, 미국의 TRW에서는 2단 맥동관냉동기를 사용하여 26K를 얻었다.[5]

위에서 언급한 다중 바이패스 맥동관냉동기는 1단 맥동관냉동기의 간단한 형태를 갖고 있지만 기능면에서 보면 일종의 2단 맥동관냉동기로 생각될 수 있는데, Zhou와 Han[20]은 중간 오리피스를 사용하면 냉동온도가 59K에서 33K로 낮아진다는 것을 보였다.

4. 맥동관냉동기의 개발동향

최근의 맥동관냉동기의 개발방향은 냉동온도가 4.2K 이하인 소용량 냉동기의 개발과 냉동온도는 그다지 낮지 않지만 냉동용량을 크게 한 대용량 맥동관냉동기의 개발로 크게 나눌 수 있다. 또한, 고효율화, 경량화, 그리고 상온구동부를 없애기 위한 연구들도 수행되고 있다.

1994년 Matsubara와 Gao[21]는 3단 맥동관냉동기를 사용하여 최저온도 3.6K를 얻었고, Thummes 등[22]은 액체질소로 예냉한 2단 맥동관냉동기에서 2.07K를 얻었다. 현재 여러 실험실에서 2단 맥동관냉동기를 이용하여 15K를 얻고 있다. 이러한 2단 맥동관냉동기들은 현재 cryopump에 사용되는 GM냉동기들을 대체할 잠재력을 갖고 있다.[1]

맥동관냉동기의 구동부분인 압축기나 솔레노이드밸브를 제거하여 움직이는 부분이 전혀 없는 맥동관냉동기를 개발하려는 연구도 진행되고 있다. 이러한 맥동관냉동기들은 열

음향엔진(thermoacoustic engine)을 사용하여 맥동관냉동기의 작동가스를 구동하는 방식을 취하고 있다. 열음향엔진은 공명식 맥동관냉동기의 원리를 반대로 이용하는 것으로 외부에서 열을 가하여 관벽의 온도구배를 매우 크게 하면 관내의 가스는 자발적으로 음향학적인 진동을 하는데 이것을 열음향학적 구동장치(ThermoAcoustic Driver)라고도 부른다. 이 열음향학적 구동장치를 압축기 대신 사용하여 맥동관냉동기 내의 가스를 진동시키는 냉동장치를 열음향학적 구동 맥동관냉동기(TADPTR, ThermoAcoustic Driver Pulse Tube Refrigerator)라고 부르는데, 움직이는 부분이 없으므로 부품이 정밀할 필요가 없고, 비교적 저가로 만들 수 있으며, 장기간 보수의 필요없이 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다.[4,23] 미국의 Tektronix Corporation은 전자부품 냉각용으로 열음향엔진에 의하여 구동되는 오리피스 맥동관냉동기를 개발하였는데, 냉각온도는 150K이며 열음향엔진에서 오리피스 맥동관냉동기로 500W의 음향일이 전달된다. Cryenco Inc.에서는 산업용 및 상업용으로 천연가스를 액화하기 위하여 대형 맥동관냉동기를 개발하였는데, 이 맥동관냉동기도 열음향엔진에 의하여 구동된다.[24]

맥동관냉동기는 현재 Cryomech 등 몇 개의 회사에서 시판되고 있다. Cryomech사의 맥동관냉동기는 최저온도가 2.7K이다. 2단 냉동기의 경우 2단은 10K 이하의 냉동온도를 공급하며, 1단은 쉬일드(shield), 리드(lead), 그리고 지지물을 30-80K로 냉각시킨다. 20,000 시간동안 보수가 필요 없으며, 냉동온도 4K와 65K에서의 냉동용량은 각각 0.5W, 30W이다.

맥동관냉동기는 효율이 높고 스텔링냉동기에 비하여 많은 장점을 갖고 있으므로 오존

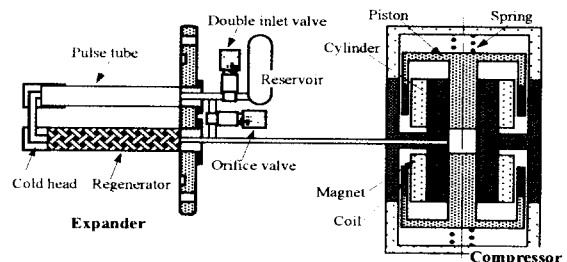


그림 7. SQUID 냉각용 분리형 맥동관냉동기

층 파괴와 온실효과 관측용 위성인 지구관측 시스템(EOS, Earth Observing System) 위성에 사용되는 중요한 계기인 대기 적외선 음향기(AIRS, Atmospheric InfraRed Sounder) 냉각용 냉동기로 채택되었다.[1] 또한, 차세대 대기 음향기로 JPL에서 검토되고 있는 IMAS(Integrated Multispectral Atmospheric Sounder)의 무게와 동력을 감소시키기 위한 맥동관냉동기도 TRW에서 개발되었는데, 이 냉동기는 55K에서 0.5W의 냉동용량을 갖는다.[25]

미국의 AFRL(Air Force Research Laboratory)에서는 우주용으로 사용될 맥동관냉동기의 개발을 거의 10년 동안 진행하고 있다. 현재의 주안점은 이 기술을 공학적인 모델 하드웨어에서 우주선에 탑재가능한 차세대 냉동기로 발전시키는 것이다. 이 기술들은 BMDO(Ballistic Missile Defense Organization), 미공군의 SBIRS(Space Based Infrared System), 그리고 국방성의 다른 위성관측 프로그램에 사용될 것이다. 현재 TRW에서 3종류의 1단 맥동관냉동기를 납품받아 장기간 성능시험을 하고 있는데, 2개는 냉동온도가 35K이고 하나는 60K이다. 이 연구의 목표는 맥동관냉동기의 성능과 신뢰성을 이미 성숙된 기술인 스텔링냉동기와 필적하도록 하는 것이다.[26]

그림 7은 고온초전도체 SQUID 냉각용 맥동관냉동기를 나타낸다. 이 냉동기는 저온부의 진동과 자기소음(magnetic noise)을 줄이기 위하여 선형모터(linear motor)가 냉동기 본체에서 분리되어 있다. 소요동력이 60W일 때의 최저온도는 57K이고, 냉동온도 80K에서의 냉동용량은 0.65W이다.[27]

Lockheed Martin에서도 1994년부터 우주선 탑재용 맥동관냉동기의 개발을 시작하였다. 이 회사에서는 냉동온도 60K에서 냉동용량 2W의 목표를 갖는 Mark III 맥동관냉동기를 성공적으로 개발하였는데, 압축기 소요동력이 100W이고 실제일은 53W인 경우에 냉동온도 60K, 80K, 100K에서 냉동용량은 각각 2.4W, 4.7W, 7.0W이다. 모터의 효율이 비교적 낮음에도 불구하고 이 냉동기의 전반적인 효율은 60K 이상에서 지금까지 발표된 다른 1단 냉동기들의 효율

과 비슷하거나 더 높았다. 이 회사는 Mark III의 개발에 사용된 기술을 이용하여 DARPA(Defense Advanced Research Project Agency)의 지원을 받아 고온초전도체 위성통신용으로 압축기 소요동력이 15W이고 냉동온도 65K에서 냉동용량 0.3W인 소형 맥동관냉동기도 개발하였으며, 압축기 소요동력이 175W이고 냉동온도 77K에서 냉동용량 9.66W인 대형 맥동관냉동기도 개발하였다.[28]

작동온도가 다른 복수의 검파기(detector)의 냉각, 검파기와 광학기기의 동시냉각, 또는 지지물과 전기 리드에 의한 손실들을 줄이기 위하여 냉동온도가 여러 개인 우주선용 극저온 기기들의 사용이 점차 증가하고 있다. Lockheed Martin에서는 미공군의 지원을 받아 35K에서 냉동용량 0.32W, 56K에서 냉동용량 0.6W를 동시에 공급하는 2단 다중입구 맥동관냉동기를 개발하였다.[29]

Superconducting Core Technologies에서는 이동통신 기지국용 맥동관냉동기를 개발하고 있다. SCT의 모든 수신기는 탑 위에 설치되도록 설계되어 있다. 1세대 시스템은 분리형 GM냉동기를 사용하는데, 헬륨이송관이 지상에 위치한 압축기와 탑 위에 놓인 수신기의 저온부를 연결하는 방식이다. 이 회사는 이러한 분리형 시스템을 시스템 전체가 탑 위에 설치되는 방식의 2세대 시스템으로 대체하기 위하여 공냉형 맥동관냉동기를 개발하고 있다. 설계목표인 냉동온도 70K에서 냉동용량 5W, 수명 5년 이상, 가 공비 \$600/W를 달성하면 유사한 냉동용량과 수명을 갖는 다른 시스템들에 비하여 성능 대비 가격의 비가 더 높을 것으로 예상하고 있다.[30]

5. 결 론

맥동관냉동기는 저온 구동부가 없으므로 고신뢰성, 저진동, 설계 자유도의 향상 등의 장점을 갖고 있어서 최근에 맥동관냉동기에 대한 관심이 증대하고 있다. 외국에서는 맥동관냉동기의 효율을 높이려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 열음향엔진과의 결합을 통하여 구동부가 전혀 없는 열원구동 냉동기로 개발되고 있다. 맥동관냉동기를 실용화하

는데 가장 큰 문제점이었던 효율도 소형 극저온냉동기로 널리 사용되고 있는 스텔링냉동기와 GM냉동기와 동등한 수준으로 향상되었으므로 멀지 않은 장래에 이러한 냉동기들을 대체할 가능성이 높다. 현재 선진국에서는 맥동관냉동기의 실용화를 위해서 시제품을 제작하여 성능과 신뢰성 향상을 위한 연구가 진행되고 있는 단계이고 응용분야도 점차 넓어지고 있다.

참고문헌

1. Radebaugh, R., "Advances in Cryocoolers," Proc. ICEC 16/ICMC, 1996.
2. Garret, S.L. and Hofler, T.J., "Thermoacoustic refrigeration," ASHRAE Journal, December, pp. 28-36, 1992.
3. Richardson, R.N., "Pulse Tube Refrigerator-an Alternative Cryocooler?," Cryogenics, Vol. 26, pp.331-340, 1986.
4. Radebaugh, R., "A Review of Pulse Tube Refrigerator," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 35, pp. 1191-1205, 1990.
5. Radebaugh, R., Zimmerman, J., and Smith, D.R., "A Comparison of Three Types of Pulse Tube Refrigerators : New Methods for Reaching 60K," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 31, pp. 779-789, 1986.
6. Swift, G.W., "Malone refrigeration," ASHRAE Journal, November, pp. 28-34, 1990.
7. Kittel, P., Kashani, A., Lee, J.M. and Roach, P. R., "General Pulse Tube Theory," Cryogenics, Vol. 36, No. 10, pp. 849-857, 1996.
8. Gifford, W.E. and Longworth, R.C., "Pulse Tube Refrigeration," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 10, pp. 69-79, 1963.
9. Gifford, W.E. and Longworth, R.C., "Pulse Tube Refrigeration Progress," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 10, pp. 69-79, 1965.
10. Mikulin, E.I., Tarasov, A.A., and Shkrebyonock, M.P., "Low Temperature Expansion Pulse Tubes," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 29, pp. 629-637, 1984.
11. Storch, P.J. and Radebaugh, R., "Development and Experimental Test of An Analytical Model of the Orifice Pulse Tube Refrigerator," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 33, pp. 851-859, 1988.
12. Liang, J., Zhou, Y., and Zhu, W., "Development of A Single-stage Pulse Tube Refrigerator," Cryogenics, 1989.
13. Zhu, S., Wu, P., and Chen, Z., "Double inlet pulse tube refrigerators :an important improvement", Cryogenics, Vol. 30, pp. 514-520, 1990.
14. Cai, J.H., Wang, J.J., Zhu, W.X. and Zhou, Y., "Experimental analysis of the mulit-bypass principle in pulse tube refrigerators," Cryogenics, Vol. 34, No. 9, pp. 713-715, 1994.
15. Wang, C., Wang, S.Q., Cai, J.H. and Yuan, Z., "Experimental study of mulit-bypass refrigerator," Cryogenics, Vol. 35, No. 9, pp. 555-558, 1995.
16. Matusbara, Y. and Miyake, A., "Alternative Methods of the Orifice Pulse Tube Refrigerator," Proc. Fifth Intl. Cryocooler Conf., p. 127, 1988.
17. Matusbara, Y., Kaneko, M., and Miyake, A., "Conceptual Design of Modified Pulse Tube Refrigerator," Proc. Intl. Conf. Cryogenics and Refrigeration, International Academic Publishers, Beijing, China, p.102, 1989.
18. Gardner, D.L. and Swift, G.W., "Use of inertance in orifice pulse

- tube refrigerators," *Cryogenics*, Vol. 37, No. 2, pp. 117-121, 1997.
19. Wheatley, T. and Cox, A., "Natural Engines," *Phys. Today*, Vol. 38, No. 8., 1985.
 20. Zhou, Y. and Han, Y.J., "Pulse tube refrigerator research," *Proc. Int'l Cryocooler Conf.*, p. 147, 1993.
 21. Matsubara, Y. and Gao, J.L., "Multi-stage pulse tube refrigerator for temperatures below 4K," *Cryocoolers 8*, Plenum Press, p. 345, 1995.
 22. Thummes, G., Bender, S. and Heiden, C., "Nitrogen precooled multi-stage pulse tube refrigerator reaching 2.1K," *Proc. ICEC16/ICMC*, 1996.
 23. Swift, G.W., "Thermoacoustic Engines," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 84, No. 4, pp. 1145-1180, 1988.
 24. Swift, G.W., "Thermoacoustic Engines and Refrigerators," *Physic Today*, July, pp. 22-28, 1995.
 25. Chan, C.K., Nguyen, T., Colbert, R., Raab, J., Ross, R.G., and Johnson, D.L., "IMAS pulse tube cooler development and testing," *Cryocoolers 10*, pp. 139-147, 1999.
 26. Davis, T.M., Reilly, J., Tomlinson, F.L. B.J., "Air force research laboratory cryocooler technology development," *Cryocoolers 10*, pp. 21-32, 1999.
 27. Hiratsuka, Y., Kang, Y.M. and Matsubara, Y., "Development of a 1 to 5W at 80K Stirling pulse tube refrigerator," *Cryocoolers 10*, pp. 149-155, 1999.
 28. Kotsubo, V. Olson, J.R. and Nast, T.C., "Development of a 2W at 60K pulse tube cryocooler for spaceborne operation," *Cryocoolers 10*, pp. 157-161, 1999.
 29. Olson, J.R. Kotsubo, V. Champagne P.J. and Nast, T.C., "Performance of a two-stage pulse tube cryocooler for space application," *Cryocoolers 10*, pp. 163-170, 1999.
 30. Martin, J.L., Corey, J.A. and Martin, C.M., "A pulse tube cryocooler for telecommunications applications," *Cryocoolers 10*, pp. 181-189, 1999.

저자이력



정은수 (鄭恩洙)

1959년 2월 5일생, 1981년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1983년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사), 1991년 M.I.T. 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 홍익대학교 공과대학 기계공학과 부교수