

스터링 극저온 냉동기(Stirling Cryocooler)

박 성 제
한국기계연구원

1. 서 론

스터링 극저온 냉동기는 80K 이하의 낮은 최저도달온도와 카르노(Carnot) 효율을 달성할 수 있는 역스터링 사이클을 이용하는 기계식 냉동기로, 높은 이론 성능계수(Coefficient of Performance)를 나타낼 수 있는 극저온 냉동기이다.

스터링 냉동 사이클은 1816년 Scotland의 R.R Stirling이 발명한 원동기의 역사이클로 기체를 작동유체로한 외연기관이다. 스텐링 냉동기는 1860년대 스코틀랜드의 A. Kirk에 의해 스텐링 엔진 사이클을 냉동기의 형태로 개발한 이후에 주로 적외선 탐상 장비에 장착되어 적외선소자를 80K 이하의 온도로 냉각시키는 냉각기 및 고진공펌프(cryopump)로 실용화되어 양산되고 있으며, 특히 소형 극저온냉동기 분야에서 스텐링 냉동기는 소형, 경량, 고효율의 장점을 지니고 있다.

스터링 극저온 냉동기의 장점으로

- 1) 밸브를 사용하지 않아 구조가 간단
 - 2) 압축기와 일체형이므로 소형화가 가능
 - 3) 이론효율이 카르노효율과 동일
- 등이 있고 기술적인 문제점으로는
- 1) 압축기가 내장되므로 진동발생
 - 2) 고속회전이므로 sealing의 짧은 수명
- 등이 제기되고 있다. 그러나 스텐링 극저온 냉동기는 뛰어난 냉동효율과 소형화가 가능하다는 등의 장점을 갖고 있어 기존의 G-M 냉동기와 더불어 크라이오펌프용 극저온 냉동기로서 개발되기 시작하여 1950년대 이후에 커다란 상업적인 성공을 거둔 적외선 센서 냉각용으로 군사 및 우주, 천문과측용으로 널리 보급되었고, 최근에는 대형 스텐링 극저온 냉동기를 활용하여 초전도체 냉각용으로 활용되고 있다.

스터링 극저온 냉동기는 현재 어떤 극저온 냉동기보다 많은 생산과 개발 실적을 가지고

있고 여전히 많은 응용분야에서 활용되기 때문에 이 글에서는 소형 스텐링 극저온 냉동기의 구조 및 냉동원리를 알아보고, 기존의 개발동향 및 향후 전망 등에 관해서 서술하고자 한다.

2. 스텐링 극저온 냉동기

그림 1은 스텐링 냉동기의 동작원리를 보여주고 있다. 기본 구성은 (1) 압축부, (2) 냉동부의 실린더, (3) 재생기를 채운 왕복기(displacer), (4) 냉동부와 연결 배관 등으로 이루어진다. 또한 그림에 PV 선도를 나타내었는데, 기본 사이클은 등온압축, 등적과정, 등온팽창, 등적과정의 4행정으로 이루어져 있다.

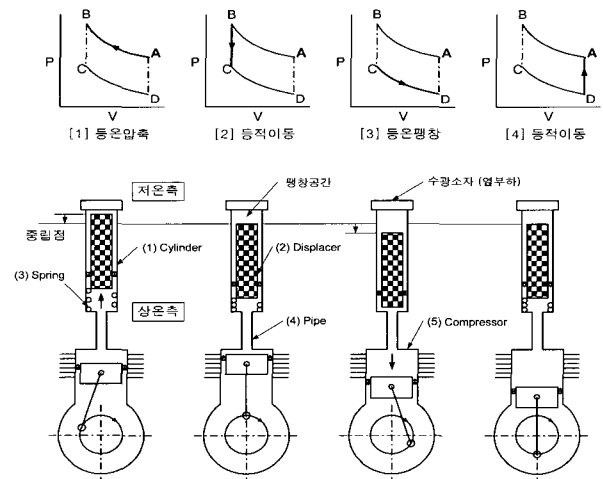


그림 1. 스텐링 극저온 냉동기의 작동과정

[1]의 동작은 시스템 공간내의 헬륨압력을 높이는 압축행정이고, 압축열은 냉각판에 의해 방열된다(등온압축). 또 이 상태에서의 displacer 위치는 압축과 동반하여 중립점보다 위로 이동하고 있는 상태에 있다.

[2]의 동작은 시스템내의 체적이 최소로

되어 압력이 최대로 되고, 이 시점에서 displacer의 위치는 스프링 작용에 의해 중립 점으로 돌아오기 때문에 압축가스는 축냉기를 통과하면서 팽창공간으로 이동한다(등적과정).

[3]의 동작은 압축 피스톤이 내려가서 시스템 공간내의 압력이 감소하고, 동시에 displacer도 아래로 이동하고 있기 때문에 팽창공간내의 체적이 증가하여 팽창이 일어난다. 그리고 외부로부터의 열을 흡수하여 열평형이 되고자 하기 때문에 열부하를 냉각하게 된다(등온팽창).

[4]의 동작은 냉각한 가스의 냉열을 축냉기에 주면서 압축부로 돌아옴과 동시에 displacer도 중립위치로 돌아오기 때문에 가스가 이동한다(등적과정). 또한 displacer의 구동은 시스템 공간의 압력변화와 spring의 작용에 의해 각 행정의 위상 shift의 동작이 최적이 되도록 설계되어 있다.

이상적인 스테링 냉동기의 사이클은 이와 같은 4개의 열역학적 과정 즉 등온압축과정(A-B), 등적과정(B-C), 등온팽창과정(C-D), 등적과정(D-A)의 반복으로 구성되며, 이 과정들을 통해 행한 주위와의 열전달은 다음과 같다.

- 등온압축과정(A-B)

$$Q_h = T_h \Delta S = P_A V_A \ln \left(\frac{V_A}{V_B} \right) \quad (1)$$

- 등적과정(B-C)

$$Q_{reg,h} = m C_v (T_h - T_c) \quad (2)$$

- 등온팽창과정(C-D)

$$Q_h = T_c \Delta S = P_D V_D \ln \left(\frac{V_A}{V_B} \right) \quad (3)$$

- 등적과정(D-A)

$$Q_{reg,c} = -Q_{reg,h} = m C_v (T_c - T_h) \quad (4)$$

따라서 이상적인 스테링 냉동기 사이클의 성능계수(COP)는 식 (5)와 같이 고온부와 저온부의 온도의 함수로 표현되며, 이는 동일한 온도에서의 카르노사이클의 성적계수와 같게 된다.

$$COP = \frac{Q_c}{W} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (5)$$

스터링 극저온 냉동기를 설계, 제작할 때 고려하여야 할 점은 (1) 냉각온도, (2) 냉동부하, (3) 신뢰성, (4) 진동, (5) 온도 제어성, (6) 냉각 시간 및 입력, (7) 체적, 중량, (8) 설치 환경 및 비용 등의 관점에서 충분한 검토가 필요하다.

특히 스테링 극저온 냉동기의 설계시에 작동 변수는 성능에 커다란 영향을 미치므로 (1) 작동 압력, (2) 작동 주파수, (3) 실린더와 피스톤의 간극, (4) 자석과 코일의 배치, (5) 스프링 상수, (6) split tube, (7) 재생기 등의 설계 및 정밀 가공, 제작은 매우 중요하다.

또한 스테링 극저온 냉동기의 주요한 손실 요인은 다음과 같다.

(1) 정적손실

- 열전도손실
- 대류열손실
- 복사열손실

(2) 동적손실

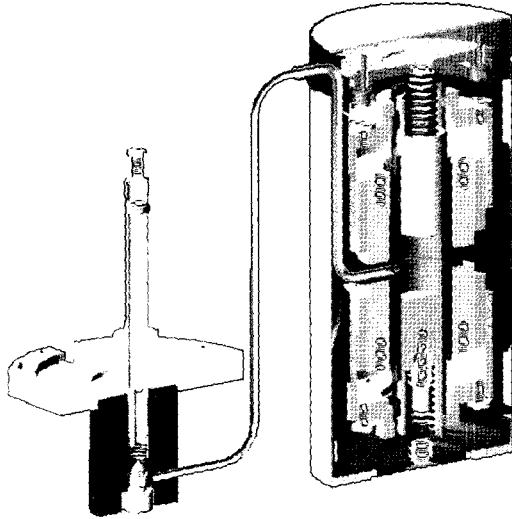
- 셔틀열손실
- 피스톤과 실린더 간극에 의한 부가손실
- 유동손실
- 불완전 열교환에 의한 손실
- 기계마찰손실
- 전기모터손실

스터링 극저온 냉동기는 구조에 따라 압축부와 팽창부가 일체형으로 되어 있는 일체형 스테링 극저온 냉동기와 분리되어 있는 분리형 스테링 극저온 냉동기로 구분되며, 압축기의 형상에 따라서도 크랭크에 의해 구동되는 크랭크식 압축기와 선형 모터(linear motor)에 의해 구동되는 선형 압축기로 구분된다. 특히 압축기의 실린더와 피스톤 사이의 마찰을 최소화 하기 위한 베어링은 여러 가지 형태로 개발되어 가스 베어링, gap 베어링, flexure 베어링 등 다양하다.

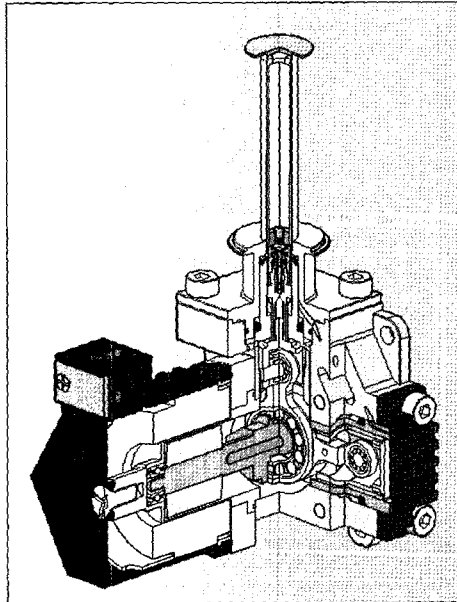
그림 2는 분리형과 일체형 스테링 극저온 냉동기를 보여주고 있다.

분리형 스테링 극저온 냉동기는 선형 압축기(linear compressor), 팽창부, 및 가스 연결 라인으로 구성되어 있으며, 일체형 스테링 극저온 냉동기는 압축피스톤과 팽창기의 방향이 L자형으로 주로 배치되고, 회전형 압축

기는 BLDC 구동모터, 회전운동을 직선 운동으로 변화하면서 압축 피스톤과 변위기(displacer)의 위상을 조절하기 위한 크랭크 기구 및 베어링, 압축 피스톤, 압축열을 주위로 방출하기 위한 방열부로 구성되어 있다.



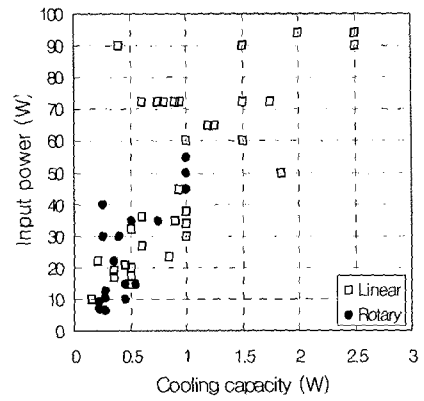
(a) 분리형 스테링 냉동기(선형압축기형)



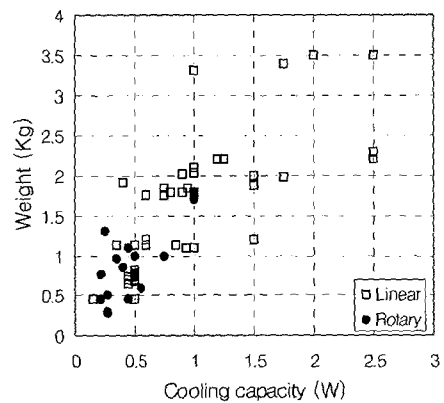
(b) 일체형 스테링 냉동기(회전형)

그림 2. 스테링 냉동기의 구성

그림 3은 2002년 ICEC(International Cryogenic Engineering Conference)에서 발표된 CILTEC의 극저온냉동기 데이터베이스에 근거한 소형 스테링 극저온냉동기의 냉동능력별 입력 전력 및 중량을 나타낸 그림이다.



(a) 입력전력



(b) 냉동기 중량

그림 3. 스테링 극저온냉동기의 특성

3. 연구 개발 동향

1950년대 적외선검출기의 개발 이래, 스테링, Vuilleumier, Gifford-McMahon, Solvay 등 다양한 형태의 극저온냉동기들이 개발되었다. 이와 같은 극저온냉동기의 개발에 있어서 충분한 냉동능력을 발휘할 수 있는 소형, 경량, 전력소모, 수명, 저소음, 전자기간섭 등은 주요한 개발 목표로 자리 잡고 있다.

최근 주요한 스테링 극저온 냉동기의 제작사인 AIM, Thales Cryogenics, Ricor, FLIR 사 등은 소형화, 고효율화와 더불어 수명증대에 연구를 집중하고 있는 상황이다.

소형 스테링 극저온 냉동기에서의 주요 연구개발 항목은 다음과 같다.

- BLDC 모터 또는 선형 모터의 효율 개선 및 신뢰성 향상

- 피스톤 및 왕복기 코팅 기술
- 팽창기 구조(단면적 최소화를 통한 전도 열손실 저감) 개선
- 압축기 및 팽창기 간극 최소화
- 압축기 피스톤 유연링크 채택으로 기계 손실저감 및 경량화
- 재생기(laminated screen) 효율개선
- 낮은 충전압력 및 압축비 채용
- 금속재질 헬륨 누설 방지 기구 도입

또한 스테링 극저온 냉동기는 주로 우주와 군사의 목적으로 개발되어 왔기 때문에 고신뢰도와 수명이 항상 해결해야할 문제로 남아 있었다. 이에 대한 해결책으로 선형 구동 압축기(linear drive compressor)를 이용한 Oxford형 극저온 냉동기가 개발되었다. Oxford형 스테링 냉동기에서는 모든 dynamic seal이 비접촉의 gap sealing을 사용하고, displacer는 소형 linear motor에 의해 공기역학적으로 작동되므로 수명이 매우 증가되었다.

4는 DOD의 linear type 스테링 냉동기의 분류군을 보여주고 있다.

우주용 극저온 냉동기의 개발은 그동안 대체로 20K 이하의 온도, 21K - 54K 온도, 55K - 99K 온도 및 100K 이상의 온도 영역으로 구분되어 개발되어 왔다. 2002년부터 NASA에서는 유럽의 Planck 우주선을 위한 20K 극저온 냉동기와 ACTDP(Advanced Cryocooler Technology Development Program)를 통해 6 - 18K 극저온 냉동기를 개발하고 있다. 일본에서는 1991년 ASTRO-F를 시작으로 하여 우주용 극저온 냉동기(20K)를 자체 개발하여 탑재하고 있다. 대표적인 천문우주 분야 개발용 극저온 냉동기 개발 계획은 SMILES(Super-conducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder, 1993 - 2008)과 SPICA(Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics, 2003 - 2012) 등으로 다양한 온도범위의 극저온 냉동기를 개발할 계획으로 있는데 주로 스테링 냉동기를 대상으로 하고 있다.

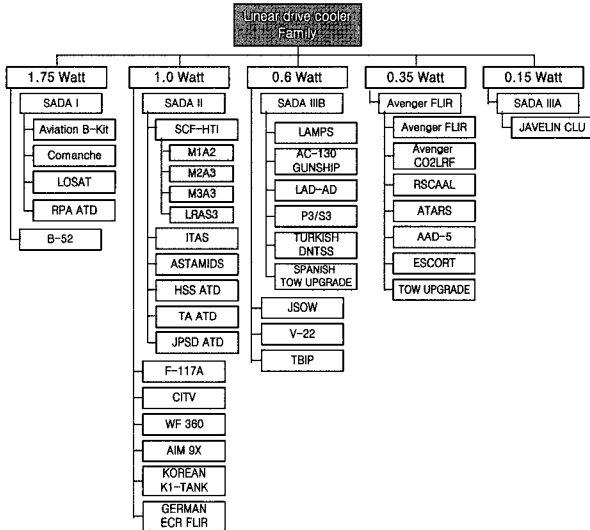


그림 4. 스테링 냉동기의 DOD family

군사용 스테링 냉동기는 미국의 DOD (Department Of Defence)의 주도하에 주로 개발되어 왔으며, Rotary type의 스테링 냉동기의 1세대와 Linear type 스테링 냉동기의 2세대로 구분된다. 2세대에서의 Thermal imaging system 개발은 SADA(Standard Advanced Dewar System)로 명명되며, 냉동 능력에 따라 5개 분류로 나누어 진다. 그림

4. 스테링 극저온 냉동기의 전망

최근 초전도 산업 및 정밀 센서 산업 등의 발전으로 120K 이하의 저온 발생에 대한 요구가 급증하고 있다. 특히 그 중에서 고온 초전도 및 적외선 센서 등의 급속한 발전으로 액체질소 포화온도인 77K 냉동기는 중요한 역할을 담당하고 있다. 77K의 저온을 발생할 수 있는 소형 극저온 냉동기로서는 여러 가지 냉동사이클이 사용되고 있지만 스테링 극저온 냉동기와 맥동관 냉동기가 주로 활용되고 있다. 하지만 상업적으로는 스테링 극저온 냉동기의 활용이 두드러진다.

특히 최근에 의료분야에서의 체열 진단, 건물 이상 및 반도체 제조 공정중의 제품 이상 등의 감지와 군사용 또는 야간 감시용 열영상 장비에 널리 활용되고 있는 적외선 센서 냉각용 스테링 냉동기에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 스테링 냉동기는 분리형과 일체형이 있으며, 분리형 중에서도 압축기 피스톤이 크랭크에 의해 구동되는 유형과 선형으로 구동되며 코일 스프링과 가스 구동력에 의해 작동하는 선형압축기형이 있다.

로타리 압축기를 이용한 스테링 극저온 냉

동기에 대해서는 1950년대부터 Philips, Thales Cryogenics, Ricor, FLIR 등이 선도적으로 경량화, 수명향상, 고효율화에 대한 연구를 진행하여 왔는데, 우리나라에서도 2003년부터 열상장비용 스테링 극저온 냉동기 개발을 시작하여 2008년 상용화를 목표로 연구가 진행되고 있다.

또한 선형압축기를 이용한 소형 스테링 냉동기에 대해서는 1980년대부터 미국(Hughes, TRW 등)과 영국(Oxford 대학, Hymatic 등), 네델란드(Philips, Thales 등) 등에서 많은 연구 결과가 있지만, 국내에서는 1999년부터 민군겸용기술개발사업을 통해 적외선 센서 냉각용 선형압축기형 스테링 극저온 냉동기 개발을 시작한 단계이다.

스테링 극저온 냉동기는 생명유지장치, 생명과학에도 응용되었지만 무엇보다 지상이나 인공위성을 통한 천체관측, 지구관측 그리고 우주물리 등에 활발히 이용되고 있다. 최근에는 우리나라에서도 국가전략기술지도(NSTRM) 상의 중요 목표 중의 하나인 대형 적외선 우주 망원경을 성공시키기 위한 다양한 기술적 노력들이 전개되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 국내 연구기관과 업체가 공동으로 우주용 적외선 냉각시스템을 개발하고 있다. 하지만 대부분의 우주개발계획으로는 센서 냉각용 극저온 냉동기 특히 고가의 스테링 극저온 냉동기에 대해 전량 수입할 계획으로 되어있다.

따라서 향후 우주개발계획의 중요성과 독자개발 능력을 고려하면 고신뢰성 스테링 극저온 냉동기에 대한 국내 개발 계획을 착수할 시점이라 보고 있으며, 우선 응용 온도별로 80K영역의 스테링 극저온 냉동기와 10K영역의 스테링/J-T 극저온 냉동기에 대한 기초연구의 착수가 시급하다.

참고문헌

[1] G. Walker, "Cryocoolers : Part I, II", Plenum Press, New York and London. (1983)
 [2] R.Radebaugh, "Prospect for small cryocoolers", Proc. ICEC-9, Kobe, Japan, pp.761-765, (1982)
 [3] G. Walker, "Miniature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold

Electronics", Clarendon Press, Oxford, (1989)

[4] S.J.Park, etc., The effect of operating parameters in the Stirling cryocooler, Cryogenics, Vol.42, (2002)
 [5] D.Y.Koh, etc., A study on the linear compressor characteristics of the Stirling cryocooler, Cryogenics, Vol.42, (2002)
 [6] Walker, G. And Bingham, E.R., Low Capacity Cryogenic Refrigeration, Oxford University Press, Oxford, (1994)
 [7] Israel Urieli, David M. Berchowitz, "Stirling Cycle Engine Analysis", Adam Hilger Ltd., (1984)
 [8] Davey, G., "Review of the Oxford Cryocooler", Adv. Cryog. Eng., Vol. 35, pp.1423-1430, (1990)

저자이력



박성제 (朴聖濟)

1981-1985년 부산대학교 기계공학과, 1986-1988년 부산대학교 기계공학과, 2001-2004년 부산대학교 기계공학과, 현재 한국기계연구원 책임연구원