

적외선 및 초전도 센서 냉각용 소형저온냉동기의 기술발전 현황

박성제, 남관우*
한국기계연구원, 현대중공업*

1. 서론

극저온에 대한 연구는 1870년대 Linde와 Hampson이 공기를 액화시키고, 20세기 초에 H.K. Onnes가 최후의 영구기체인 헬륨의 액화에 성공(1908년) 하였으며, 그 후 곧 수은의 초전도 현상을 발견(1911년)한 이후 각광을 받기 시작하였다. 주로 Claude Cycle을 이용한 대형 극저온 냉동기가 많은 제작비를 요구하고, 응용되는 분야 또한 자기부상열차와 대형 헬륨액화기와 같이 대형 사업이나 저온공학의 기초연구에 집중되어 있는 반면에 소형 극저온 냉동기는 일반 산업기술에 널리 이용가능하고, 극저온에 대한 개념설립에 용이하다는 관점에서 연구개발의 효과가 크다 하겠다[1].

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[2,3].

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, 이동무선통신 기지국용으로 개발이 진행되고 있는 초전도 RF 필터와 같은 저온 센서의 냉각이다. 이러한 응용분야에서 요구되는 극저온냉동기의 필요조건은 (1) 냉각온도, (2) 냉동능력, (3) 신뢰성, (4) 진동, (5) 냉각시간 및 입력전력, (6) 온도제어, (7) 중량 및 설치 공간, (8) 비용 등을 들 수 있다[4].

표 1에 극저온 냉동기술이 응용되고 있는 산업의 구체적인 제품 및 공정을 분야별로

정리하였다[5].

그림 1은 현재 사용되고 있는 주요한 극저온 냉동기의 종류를 나타내는 그림으로써 열교환기의 종류에 따른 분류와 작동유체의 제어에 따른 분류를 나타내고 있다.

표 1. 극저온 냉동기술의 응용 분야

Industry	Product and process
Electronics	CMOS, GaAs, HEMT, Mixer, Computer, Amplifier, Fast AD-DA Converter
Communication	Superconductor filter
Superconductivity	MRI, SQUID, NMR, SMES, Superconductor cable
Vacuum	Cryopump
Surface treatment	X-ray detector, Cryopump
Military	Infrared detector(HgCdTe, InSb, PtSi), CCD

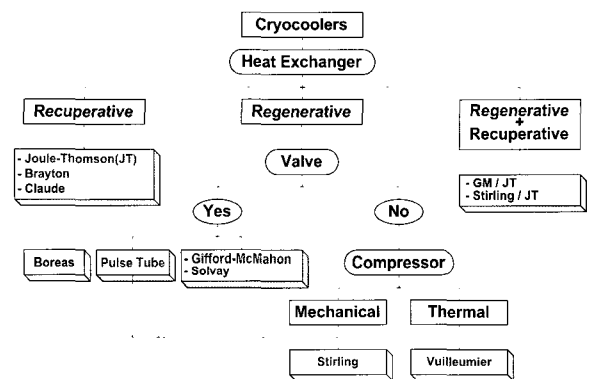


그림 1. 극저온 냉동기의 분류

재열형(recuperative) 열교환기는 두개나 그 이상의 열 수송 매체가 서로 다른 통로를 흐르며 열을 교환하지만 재생형(regenerative) 열교환기는 하나의 통로를 시간 간격을 두고 고온과 저온의 유체가 교대로 흐르며 재생기 재료에 열을 흡수, 방출하

며 열을 교환한다. 재열형 열교환기는 대용량, 10 K 이하의 온도에 주로 사용되고, 재생형 열교환기는 10 K 이상의 소형 냉동기에 주로 이용된다.

본 연구에서는 그림 1에 보여준 여러 가지 타입의 냉동기 중 현재 적외선 센서 및 초전도 센서 냉각용으로 많이 사용되고 있는 스테링 냉동기와 맥동관 냉동기 등의 소형 재생형 극저온 냉동기와 초급속 냉각에 사용되는 Joule-Thomson 냉동기 및 재생열교환기에 대하여 서술하고자 한다.

2. 극저온 냉동기

2.1 스테링 극저온 냉동기

스테링 냉동기는 80K 이하의 낮은 최저도 달온도와 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.

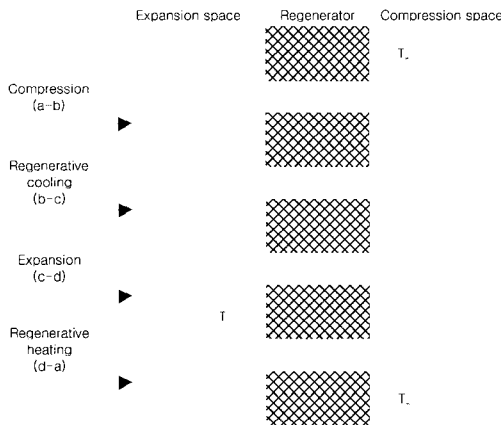


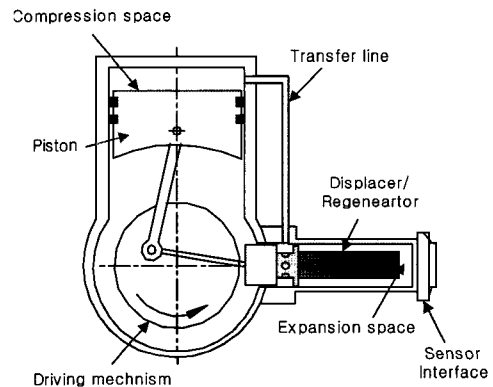
그림 2. 이상적인 스테링 냉동기 사이클

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.

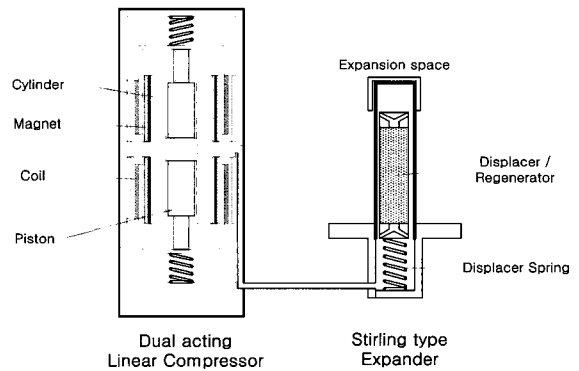
일반적으로 적외선검지기 및 초전도 RF 필터 냉각기로 사용되어지는 스테링 냉동기는, 압축기 피스톤을 구동하는 구동모터와 재생기

(regenerator), 변위기(displacer) 등으로 구성되는 팽창기(expander)로 구성되어져 있다. 압축기 피스톤을 구동하는 구동모터는 주로 초소형 스테링 냉동기(냉동능력 1W미만)의 경우 크랭크기구를 이용하여 피스톤을 구동하는 냉동기의 경우 회전모터가 사용되며, 비교적 큰 냉동능력을 요구하는 스테링 냉동기의 경우(통상 냉동능력 1W 이상) 자유피스톤(free piston) 방식으로, 선형압축기(linear compressor)가 사용된다.

그림 3은 회전일체형 및 분리형 선형압축기 구동 스테링 극저온냉동기의 대표적인 기계구조를 나타내고 있으며, 그림 4는 한국기계연구원에서 개발한 회전일체형 및 분리형 선형압축기 구동 스테링 극저온냉동기의 3-D 도면을 보여주고 있다[6,7,8].

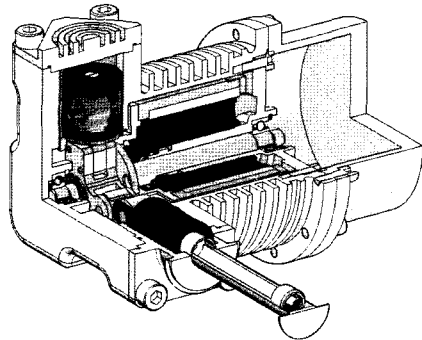


(a) 회전일체형 로터리 압축기 구동

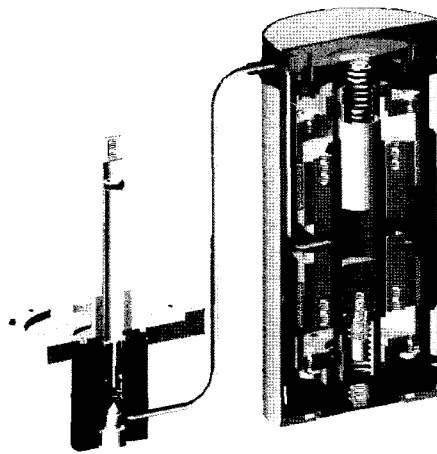


(b) 분리형 선형압축기 구동

그림 3. 스테링 극저온냉동기의 개략도



(a) 회전일체형 로터리 압축기 구동



(b) 분리형 선형압축기 구동

그림 4. 스테어링 극저온냉동기의 3-D 도면
(한국기계연구원)

분리형 선형압축기 구동 스테어링 극저온냉동기는 두개의 피스톤을 대칭적으로 배치하여 압축기의 진동을 억제하고, 선형모터를 채용하여 피스톤에 미치는 측력(side force)을 감소시키는 구조를 채택하고 있는 반면, 회전일체형 스테어링 극저온 냉동기는 압축기 피스톤과 팽창기를 L자형으로 배치하고, 회전모터에 의한 회전운동을 크랭크 기구를 통해 직선운동으로 변환하는 기계구조를 채택하고 있다.

분리형 스테어링 극저온냉동기는 압축기에서 발생된 압력에 의해 변위기의 변위 및 위상이 결정되나, 회전일체형 스테어링 극저온냉동기는 회전모터에 연결된 크랭크 기구에 의해 압축기 피스톤뿐만 아니라 변위기의 변위 및 위상이 제어되는 특징을 지니고 있다. 따라서 회전 일체형 스테어링 극저온냉동기는 분리

형에 비해 압축기와 팽창기를 연결하는 연결관(split tube)의 체적을 최소화할 수 있으나, 압축열이 팽창부에 전달되지 않도록 충분한 방열구조를 가져야 한다.

또한 선형압축기형의 경우 선형압축기 피스톤의 변위를 제어함으로써 냉동기의 용량 제어를 수행하는 반면 회전형의 경우 회전모터의 회전수를 제어함으로써 이를 수행하는 차이점이 있으며, 분리형 스테어링 냉동기가 적외선 검출기와 냉각부를 열적으로 연결하기 위해 fuzz 버튼을 사용하는 반면, 기동 및 휴대용 열상장비의 적외선 검출기 냉각을 위한 극저온 회전 일체형 스테어링 냉동기는 냉각부에 검출기를 부착하기 위한 인터페이스를 채택하고 있다.

선형압축기형 소형 스테어링 극저온 냉동기의 주요 제작사는 네덜란드 Thales Cryogenics, 미국의 TI, Ball Aerospace & Technologies Corp., BEI, 영국의 Hymatic, 이스라엘의 Ricor 등이 있다.

선형압축기를 채용한 자유피스톤 방식의 스테어링 냉동기는 소형화 및 저소음화가 가능하며, 피스톤이 무윤활의 비접촉기구를 사용하기 때문에 높은 신뢰성과 긴 수명이 가능한 장점을 지니고 있어, 최근 군수용 및 민수용

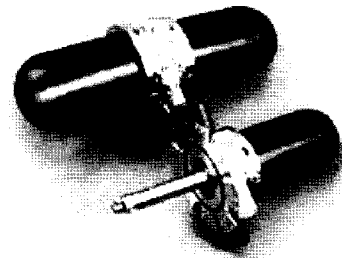


그림 5. 적외선 센서 냉각용 스테어링냉동기
(from Ball Aerospace, USA)

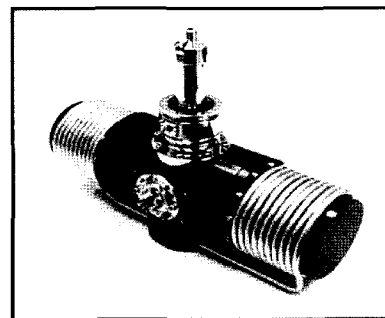


그림 6. HTS RF filter 냉각용 스테어링 냉동기
(RICOR, Israel)

소형 스테링 냉동기(온도영역 : 30 ~ 100 K, 냉각능력 : 1 ~ 10 W)의 주류를 이루고 있다. 스테링 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 스테링 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 스테링 냉동기의 주류가 될 것으로 예측된다.

또한 고효율의 스테링 냉동기를 위해서는 입력전력이 최소화되어야 하며, 따라서 선형압축기 피스톤을 구동하는데 소요되는 힘이 최소가 되는 냉동기의 고유주파수에서 스테링 냉동기가 운전되도록 설계되어져야 한다.

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

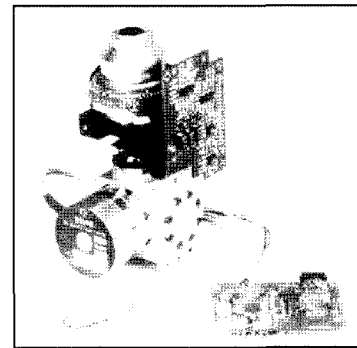
스테링 냉동기의 고효율화를 위해서는 재생기의 열수력 성능의 최적화가 수반되어야 할 뿐만 아니라, 동특성의 최적화가 필수적이다. 스테링 냉동기에 있어서, 냉동능력은 팽창기의 압력과 변위기의 변위에 의해서 결정되며, 최대의 냉동능력을 얻기 위해서는 이들 관계의 최적화가 요구된다.

한편 회전일체형 스테링 극저온냉동기의 제작사인 독일 AIM, 네덜란드 Thales Cryogenics, 이스라엘 Ricor, 미국 FLIR, Carleton사 등은 소형화, 고 효율화와 더불어 수명증대에 연구를 집중하고 있는 상황이다.

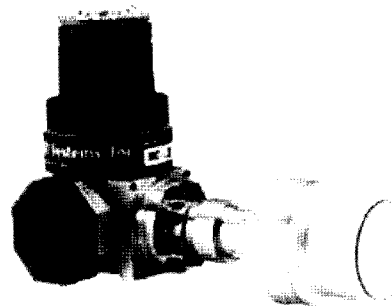
그림 7은 이스라엘 Ricor사의 적외선 검출기와 결합된 회전일체형 스테링 극저온냉동기로, 휴대용 적외선 카메라용으로 개발된

중량 260g, 냉동능력 0.17W급의 냉동기이다. Ricor사는 수명 향상을 위해 모터와 제어를 냉동기와 분리하여 고압의 헬륨에 노출되지 않도록 함으로써 5,000시간 이상의 MTTF를 보고하고 있으며, Ricor사의 주요한 개발사항은 다음과 같다.

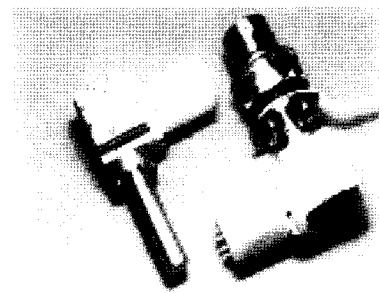
- 금속 간극 Seal 적용
- 피스톤 세라믹 코팅 기술
- 분리형 모터 채용
- 변위기 유연링크 채용
- 특수 베어링 채용
- 금속재질 헬륨 누설 방지기구 도입



(a) Ricor사, K560



(b) FLIR사, MC-3



(c) Thales사, RM2-7i

그림 7. 소형 회전일체형 스테링 극저온 냉동기 개발동향

FLIR사는 고온초전도 응용장치 및 QWIP(Quantum Well Infrared Photoconductor) 냉각용 회전일체형 스테링 극저온냉동기를 개발하여, 중량 300g, 최대냉동능력 0.445W, 자사의 시험기준에 의한 실증 MTTF 8,000시간을 보고하고 있으며, 냉동능력 0.39 ~ 0.65 W급(중량 275 ~ 470g, 입력전력 5~14W)의 소형 회전일체형 스테링 극저온냉동기를 개발한 바 있다. FLIR사의 주요한 개발사항은 다음과 같다.

- BLDC 모터 효율 개선
- 일체형 팽창기 개발
- 압축기 및 팽창기 간극 최소화
- 압축기 피스톤 유연링크 개발
- 재생기(laminated screen) 효율개선
- 낮은 충전압력 및 압축비 채용
- 금속재질 헬륨 누설 방지 기구 도입

이상과 같이 압축기/팽창기의 간극, 피스톤/변위기 구동 메커니즘, 누설 제어기구 등의 개선을 통해 회전일체형 스테링 극저온냉동기의 성능향상을 도모하고 있음을 알 수 있다.

스테링 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 극저온 냉동기

맥동관 냉동기는 스테링 냉동기 및 G-M 냉동기와는 달리 냉동을 생성하는 저온부에 변위기가 없고, 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 여

러 가지 장점을 지닌 극저온 냉동기이다.

맥동관 냉동기는 1963년 Gifford와 Longswoth에 의해 기본형 맥동관 냉동기(Basic Pulse Tube Refrigerator)가 처음으로 고안되어졌으나, 기본형 맥동관 냉동기는 최저도달온도가 124 K에 불과하고, 열효율이 낮을 뿐만 아니라 냉동능력이 작아, 큰 주목을 받지 못하였다[9].

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.

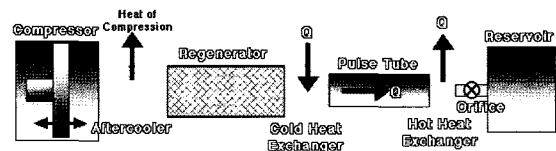


그림 8. 맥동관 냉동기의 개략도

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 선형압축기를 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.

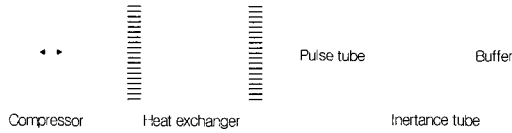


그림 9. 관성관형 맥동관 냉동기

맥동관 냉동기는 냉각을 발생시키는 압력원에 따라 크게 스테링형, G-M형, 열음향 구동형으로 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 냉각용등에서 액체헬륨, 액체질소 등의 한계(Cryogen) 또는 G-M 냉동기를 대체하여, 활용되고 있다[10].

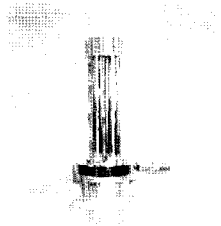


그림 10. G-M type 맥동관 냉동기 (Iwatani, Japan)

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.

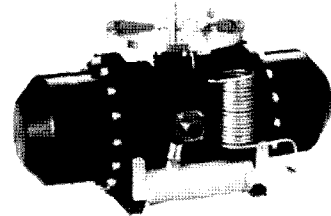


그림 11. 관성관형 Stirling type, 맥동관 냉동기(Aisin Seiki Co., Japan)

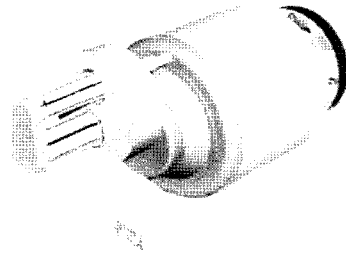


그림 12. Stirling type, U-type 맥동관 냉동기(Sunpower, Inc, USA)

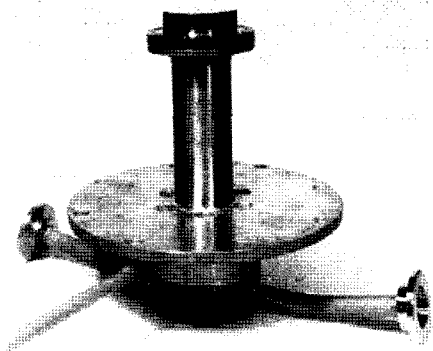
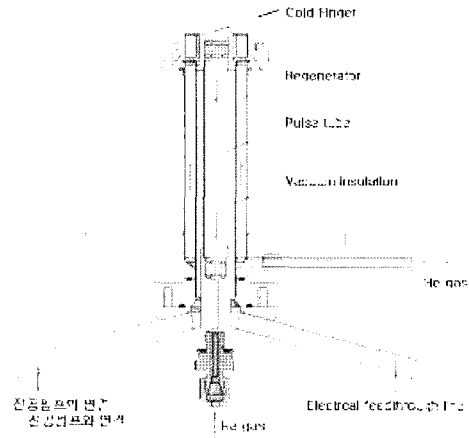


그림 13. 동축형 관성관형 맥동관 냉동기 (한국기계연구원)

스터링형 맥동관 냉동기는 고신뢰성의 선형 압축기가 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.

2.3 Joule-Thomson 극저온 냉동기

Linde-Hampson 사이클 또는 J-T 사이클을 이용한 J-T 냉동기는, 중대형의 액화 사이클뿐만 아니라, 짧은 냉각시간, 단순한 구조, 소형 등의 장점을 지니고 있어, 소형 및 초소형의 이동통신, 적외선감지장치(infrared detector), 열 추적 카메라(thermal camera), 미사일 유도장치(missile homing head and guidance system)의 냉각이나 극저온 수술용으로 주로 개발, 사용되어지고 있다. J-T 냉동기는 압축된 냉매를 단열된 오리피스스를 통해 배출할 때 발생하는 J-T 효과를 이용한 냉동기로, G-M 냉동기의 경우 4~15 K, 스테링 냉동기가 50~80 K의 작동온도 범위를 가지는 반면 J-T 냉동기는 냉매에 따라 다양한 온도범위에 대해 적용 가능한 장점을 지니고 있다. 그림 14는 J-T 극저온 냉동기의 개략도를 보여주고 있다.

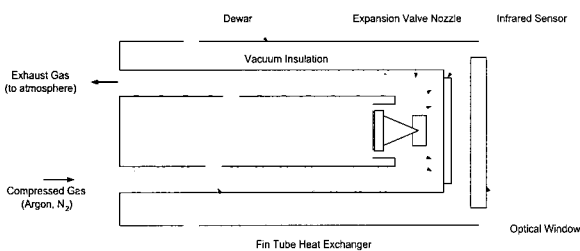


그림 14. Joule-Thomson 냉동기의 개략도

2.4 재생기 연구 동향

적외선 센서 및 초전도 필터용 극저온 냉동기에 적용되는 재생기는 압축기와 더불어 냉동기의 성능을 좌우하는 핵심 부품이다. 재생기는 단위 체적당 전열 면적이 매우 큰 다공성 매질(porous medium)로 구성되어 있으며, 압축기의 압축 공간과 팽창부의 팽창 공간을 열적으로 분리하는 역할을 수행한다. 즉, 압축기에서 압축된 작동 유체가 재생기 내부를 지나가면서 재생 물질에 열을 일시적

으로 저장하고, 팽창 공간에서 팽창된 차가운 작동 유체에 열을 다시 주는 순차적인 방식을 취한다. 이렇게 되면, 상온의 가스에서 전달 매개체인 재생 물질을 통하여 저온의 가스로 열이 전달되는데, 결국 재생기의 열교환 과정은 대향류 열교환기(counterflow heat exchanger)와 유사하다. 하지만, 대향류 열교환기는 상온의 가스와 차가운 가스가 서로 다른 통로를 지나며 정상 상태(steady state)의 열교환이 발생하지만, 재생기는 하나의 통로를 상온의 가스와 저온의 가스가 주기적으로 지나가며, 재생 물질과 비정상(unsteady) 열교환이 이루어진다는 차이점이 있다[1]. 따라서 재생기는 왕복 유동과 맥동 압력이 혼재하고, 무작위적인 구조를 갖는 다공성 매질과 가스 사이에 비정상 열전달이 발생하므로, 해석 및 실험에 고난이도의 기법이 필요하다.

고효율의 재생기를 설계하려면 다음과 같은 특징들을 모두 고려해야 한다.

- * 공극 체적의 최소화
- * 압력 강하 손실의 최소화
- * 전열 면적의 최대화
- * 축방향 열전도 손실의 최소화
- * 재생 물질 비열(heat capacity)의 최대화

여기서, 두 번째와 세 번째 특징은 서로 상충되므로, 적당한 최적 조건을 찾아야 한다. 또한, 작은 공극 체적은 냉동기의 성능 관점에서 보았을 때, 압축기의 소요 동력을 감소시킬 수 있으므로 바람직하다. 마지막 세 가지의 특성들은 재생기의 비유용도(ineffectiveness)와 밀접한 관계가 있다. 여기서, 비유용도는 열효율의 반대 개념으로서, 저온 냉동기용 재생기는 대개 2% 이내의 값을 갖는다. 위와 같은 설계 조건들을 만족시키기 위하여 80K 부근에서 작동하는 재생기에 대한 연구는 크게 두 가지의 주제로 나뉘어 진행되어 왔다.

첫째, 새로운 형상에 초점을 맞춘 고효율 재생기에 관한 연구이다. 80K 영역에서는 금속의 비열이 작동 가스인 헬륨에 비해 매우 크므로, 재생 물질의 비열을 크게 하는 것 보다는 전열 면적을 극대화하면서 압력 강하 손실을 작게 하는 것이 매우 중요하다. 이러

한 조건을 만족시키는 재생기는 평행판(parallel plate) 형상의 재생기로 알려져 있는데, 기존의 망(screen) 재생기와 비교하여 마찰 계수는 약 1/4, 공극률은 0.3~0.4(망 재생기는 약 0.7)로 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만, 평행판 재생기는 실제 제작상의 어려움으로 인하여 발생하는 단면에서의 유동 불균일 문제와 축방향의 과도한 열전도 손실 때문에 기존의 재생기를 대체하는데에 어려움이 있다[12, 13]. 최근에는 평행판 형상의 장점을 잘 살린 평행선(parallel wire) 재생기가 개발되었는데, 가는 선 다발(bundle)이 유동 방향과 나란히 놓여 있는 형태이다(그림 15) [14, 15]. 측정된 평행선 재생기의 마찰계수는 망 재생기에 비해 1/3~1/5로 감소하였고, 평행판 형상보다 제작이 훨씬 용이함을 알 수 있었다. 이밖에도 형상을 개선하는 연구뿐만 아니라, 비금속 재료를 이용하여 재생기를 개발한 경우도 있었다. 이것은 4K용 재생기에서 비열을 크게 하는 재료 연구와 달리, 냉동기의 특수한 작동 환경[16] 또는 신뢰성을 높이기 위한 목적[17]으로 연구되었다. 향후에 평행선 재생기를 적용한 냉동기의 성능 시험과 축방향의 열전도 손실을 줄일 수 있도록 비금속 재료를 평행선 재생기에 적용하는 방안에 대해 지속적인 연구를 진행할 필요가 있다.

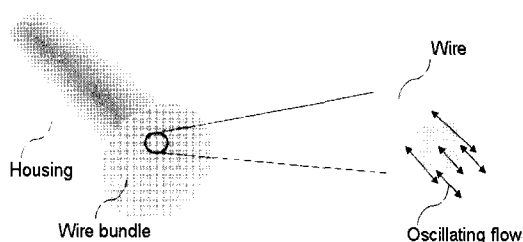


그림 15. parallel wire 재생기의 개략도 (한국과학기술원)

둘째, 재생기의 압력 강하 손실 및 열해석에 관한 연구이다. 재생기의 공극은 기하학적으로 복잡하고 무작위적(randomly)인 구조를 가지고 있기 때문에, 공극 내부에서 유동장과 온도장을 구하기 위하여 2차원 또는 3차원 Navier-Stokes 방정식과 에너지 보존식의 해를 구하는 것이 사실상 불가능하다. 따라서 마찰 계수(friction factor)와 틈새 열

전달 계수(interstitial heat transfer coefficient)같이 실험적으로 얻은 경험 계수들을 도입하여 해석하는 것이 일반적인 방법이다. 여기서, 경험 계수의 적절한 유도와 적용이 해석의 정확성에 많은 영향을 주기 때문에 적절한 경험 계수를 얻기 위해 많은 연구자들이 노력하여 왔다. 지금까지 왕복 유동 및 맥동 압력이 복합적으로 작용하는 저온 냉동기에서 경험 계수는 정상 유동 하에서 얻어진 것이 대부분이었고, 이에 대한 검증도 많이 이루어 지지 않았다. 최근에 들어서야 비로소 본격적으로 맥동 압력 및 왕복 유동 조건에서 마찰 계수에 대한 연구가 수행되었다[18, 19, 20]. 더 나아가, 마찰 계수 이외에 Breathing 계수라는 것을 새롭게 도입하여 해석의 정확성을 한층 높인 진일보한 연구 결과도 제시되었다[11, 21]. Breathing 계수는 다공성 매질에서의 질량 확산(mass dispersion) 효과를 고려한 무차원 변수로서, 압력 강하 및 유량 파형의 위상각을 정확히 예측 가능하도록 하는 계수이다. 또한, 극저온 환경에서는 상온에서 측정된 마찰 계수를 적용할 수 없다는 것이 밝혀졌는데[11], 상온에서 극저온 환경을 구현하는 간편한 실험 방법[11]을 이용하여 마찰 계수를 구한 결과가 제시되었다. 이상과 같이, 압력 강하 손실의 해석에 관한 연구는 최근에 들어서 어느 정도 일정 수준에 도달한 상태라고 볼 수 있다.

열전달 계수에 관한 연구는 재생기의 비유용도를 예측하는 데에 중요한 역할을 하는데, 아직까지 정상 유동에서 측정된 열전달 계수를 적용하는 것에서 벗어나지 못하고 있는 상황이다. 앞으로 실험에 비중을 두어서 왕복 유동 및 맥동 압력에서 적용 가능한 열전달 계수 모델을 개발하는 연구가 진행된다면 좋을 것이다. 또한, 앞서 제시된 마찰 계수와 Breathing 계수를 적용하여 스텔링 냉동기의 동특성 해석에 적용하는 것도 경험 계수들의 타당성을 좀더 확보하는 데에 도움이 될 것이다.

3. 결 론

고품질의 극저온 환경의 생성 및 유지는 고품질 대용량 정보통신, 의료진단, 초전도 및 고집적반도체 제조공정 등의 차세대 유망

산업 분야에서 필수적인 요소로 자리 잡고 있다. 이에 따라 보다 신뢰성 높고, 고효율의 극저온냉동기에 대한 수요는 점차 증대될 것으로 기대된다. 스텔링 냉동기 및 맥동관 냉동기는 짧은 역사에도 불구하고, 다양한 분야에서 기존의 한계 및 극저온 냉동기를 대체하여 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

참고문헌

- [1] Ray Radedaugh, "Introduction to Cryocoolers", Proceedings of Third Workshop on Military & Commercial Application for Low-Cost Cryocoolers at San Diego, 2001
- [2] Walker, G., Cryocoolers Part I, II, Plenum Press, New York and London, 1983.
- [3] Hiroyasu Ogiwara, "低温工学概論", 東京電氣大學出版局, 1999
- [4] Graham Walker, "Miniature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold Electronics", Clarendon Press, 1989
- [5] 초전도·저온공학 Hand book, 일본 Ohm 사, 사단법인 저온공학 협회편, 1994.
- [6] S.J.Park, Y.J.Hong, H.B.Kim, K.B.Lee, "An Experimental Study on the Phase Shift between Piston and Displacer in the Stirling Cryocooler", Current Applied Physics, Vol.3, pp.449 - 455, 2003.
- [7] S.J.Park, etc., "The effects of operating parameters in the Stirling cryocooler", Cryogenics, Vol.42, No. 6, pp.419, 2002.
- [8] D.Y.Koh, etc., "A study on the linear compressor characteristics of the Stirling cryocooler", Cryogenics, Vol.42, No. 6, pp.427, 2002.
- [9] Radebaugh, R., Zimmerman, D. R. Smith and Louie, B., "A Comparison of three types of Pulse Tube Refrigerators : New Methods for reaching 60K", Adv. in Cryogenic Engineering, Vol. 31, pp. 779, 1985
- [10] S.J.Park, etc., "An Experimental Investigation of the G-M type Pulse Tube Refrigerator", Journal of KIASC, Vol.6, No. 2, pp.40, 2004.
- [11] 남관우, "극저온 냉동기용 재생기의 압력강하 특성에 대한 연구 및 고효율 재생기의 개발", KAIST 박사학위논문, 2004.
- [12] W. C. Rawlins and K. D. Timmerhaus, Measurement of the performance of a spiral wound polyimide regenerator in a pulse tube refrigerator, Advances in Cryogenic Engineering, 37B, pp. 947-953, 1992.
- [13] A. Hofmann, S. Wild and L. R. Oelrich, Parallel flow regenerator for pulse tube cooler application, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 43, pp. 1627-163, 1998.
- [14] Kwanwoo Nam and Sangkwon Jeong, Novel regenerator design and its experimental characteristics, Proceedings of International Cryogenic Engineering Conference (ICEC20), Beijing, China, 2004. 5, In press.
- [15] Kwanwoo Nam and Sangkwon Jeong, "Development of parallel wire regenerator for cryocoolers", Cryogenics, submitted.
- [16] H.Z. Dang, Y.L. Ju, J.T. Liang, J.H. Cai, M.G. Zhao and Y. Zhou, Performance of Stirling-type non-magnetic and non-metallic co-axial pulse tube cryocoolers for high-Tc SQUIDs operation, Cryogenics, Vol. 45, pp. 213-223, 2005.
- [17] S. Jeong, K. Nam and S. Choi, Study of Random Wire Type Regenerators for Stirling Cryocoolers, Advances in Cryogenic Engineering 49B, pp. 1154-1160, 2004.
- [18] Y. Ju, Y. Jiang and Y. Zhou, Experimental study of the oscillating flow characteristics for a regenerator in a pulse tube cryocooler, Cryogenics, Vol. 38, No. 6, pp. 649-656, 1998.
- [19] S. Choi, K. Nam and S. Jeong, "Investigation on the pressure drop characteristics of cryocooler regenerators under oscillating flow and pulsating pressure condition", Cryogenics, Vol. 44, pp. 203-210 (2004).
- [20] T. P. Roberts and P. V. Desai, Working

fluid state properties measurements in medium and high frequency cryocoolers, *Advances in Cryogenic Engineering*, 49B, pp. 1146-1153, 2004.

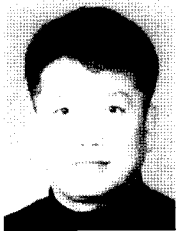
- [21] Kwanwoo Nam and Sangkwon Jeong, "Novel flow analysis of regenerator under oscillating flow with pulsating pressure", *Cryogenics*, submitted.



남관우(南寬祐)

1973년 10월 25일생, 1996년 고려대 공대 기계공학과 졸업, 2004년 KAIST 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원

저자이력



박성제(朴聖濟)

1962년 12월 13일생, 1985년 부산대학교 공대 기계공학과 졸업, 2004년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 열유체공정기술 연구부 선임연구원