

센서 냉각용 소형 스테링 냉동기 개발 동향

고득용, 박성제, 홍용주, 오군섭
한국기계연구원 열유체환경연구부

1. 서 론

77K 이하의 온도를 발생시키는 극저온 냉동기는 재생형 열교환기를 사용하는 Regenerative 극저온 냉동기와 향류형 열교환기를 사용하는 Recuperative 극저온 냉동기로 구분된다.

적외선 센서 및 저온 센서 냉각용 극저온 냉동기는 (1) 저 진동, (2) 낮은 소요동력, (3) 소형 경량, (4) 충분한 내구성 등의 조건을 만족해야 하므로, 현재까지 이상적인 냉동사이클로서 많은 개발사례가 있는 Stirling 극저온 냉동기가 주로 이용되고 있다.

지금까지 극저온 냉동기의 가장 주요한 응용처로서는 야간 투시경과 미사일 유도를 위한 적외선 센서 냉각 등의 군사적 이용이었다. 이 때 사용되는 적외선 센서의 재료들은 HgCdTe, InSb와 PtSi이고, 약 80K에서 0.1 ~ 1W정도의 냉동 능력이 요구된다. 현재 미국과 유럽 등지의 일부 제작 업체가 이 시장을 점유하고 있으며 매달 수천 개의 냉동기가 공급되고 있다. 약 15년전에는 이러한 군사적 응용들은 수백 시간의 수명을 가지는 closed-cycle 스테링(Stirling)냉동기 또는 매작동시마다 고압가스를 재충전해야만 하는 open cycle Joule-Thomson 냉동기를 사용하였다. 최근의 지난 몇 년간은 더 높은 신뢰성에 대한 필요성에 부응하여 약 5000시간의 수명을 가지는 스테링 냉동기를 개발하게 되었고, 이 장치들은 open cycle Joule-Thomson 냉동기들을 대체하고 있다.

따라서 본 고에서는 신뢰성 높은 적외선 센서 및 저온센서 냉각용 스테링 냉동기의 국외 개발 현황을 알아보고 현재 한국기계연구원에서의 개발 진행 상황을 간략히 소개하고자 한다.

2. 스테링 냉동기의 개요

2.1 냉동기의 요구사항

그림 1은 적외선 검출기 냉각의 조립도이다. 검출기는 이면이 냉각되고 주위로부터의 열 침입을 막기 위해 진공 용기에 넣어진 구성으로 되어 있다. 냉각해야 할 열량은 적외선 검출기의 전기적 발열량, 적외선의 입사열량, 진공단열 성능에 의해 결정되는 것이지만, 통상적으로는 0.3 ~ 2W 정도를 고려하면 충분한 것으로 알려져 있다.

적외선센서 냉각방식으로는 Joule Thomson 냉동기, Gifford-McMahon(GM) 냉동기, Vuilleumier(VM) 냉동기, Stirling 냉동기와 Pulse tube 냉동기 등이 주로 사용되고 있다.

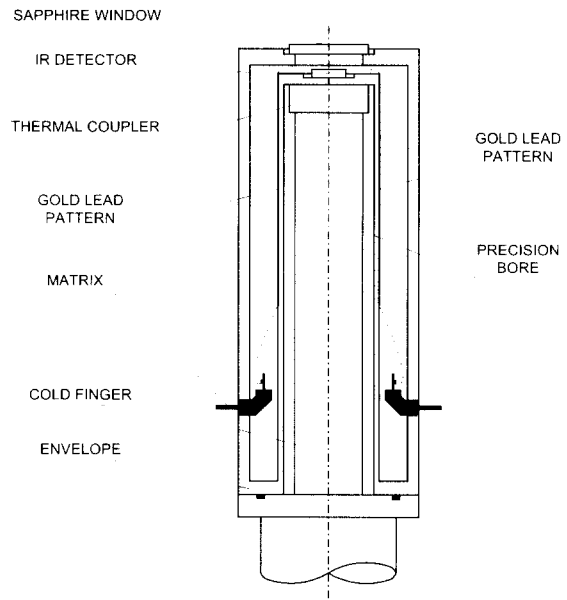


그림 1. Infrared detector cooler assembly

특히 최근에 저온부에 기계적 가동부가 없이 구조가 간단하여 보수가 용이하고, 장시간 운전에 신뢰성이 높으며 제조비용이 저렴한 Pulse tube 냉동기에 대한 적용 가능성이 높으나 스테링 냉동기에 비해 효율이 낮은 단점이 있어 대부분의 적외선 센서 냉각기로

서는 스테링 냉동기가 주류를 이루고 있다. 앞으로의 Pulse tube 냉동기의 연구개발 성과도 주목해볼 만 하다.

적외선 센서 냉각용 스테링 냉동기의 생산업체로는 현재 미국의 Hughes, Ball Aerospace & Technologies Corp., BEI, 영국의 Inframetrics, 이스라엘의 Ricor, ICE와 네델란드의 Signaal Usfa 등이 있다.

2.2 스테링 냉동기의 작동과정

그림 2에는 스테링 냉동기의 동작원리를 보여주고 있다. 기본 구성은 (1) 냉동부의 실린더, (2) 축냉기를 채운 displacer, (3) displacer 위치를 중립점에 유지시키는 스프링, (4) 냉동부와 연결 배관, 그리고 (5) 압축부로 이루어진다. 또한 그림에 PV 선도를 나타내었는데, 기본 사이클은 등온압축, 등적과정, 등온팽창, 등적과정의 4행정으로 이루어져 있다.

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

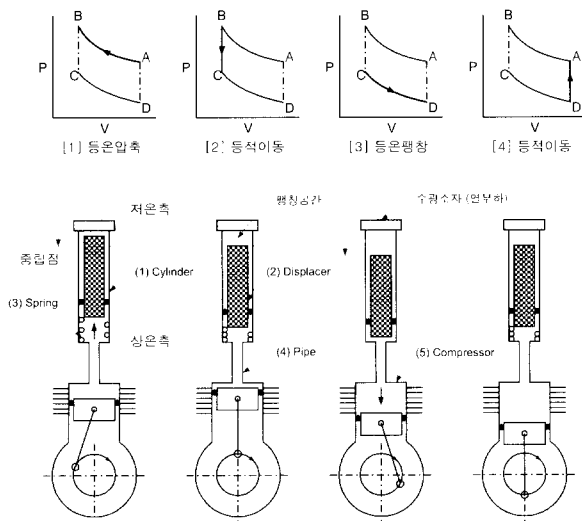


그림 2. Operating process of the Stirling cryocooler

[2]의 동작은 시스템내의 체적이 최소로

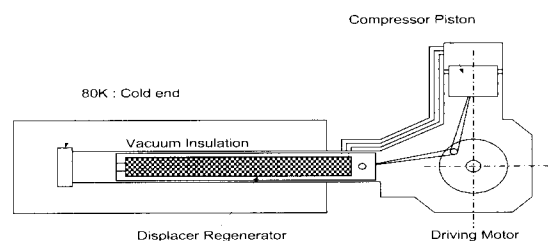
되어 압력이 최대로 되고, 이 시점에서 displacer의 위치는 스프링 작용에 의해 중립점으로 돌아오기 때문에 압축가스는 축냉기를 통과하면서 팽창공간으로 이동한다(등적과정).

[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(등온팽창과정).

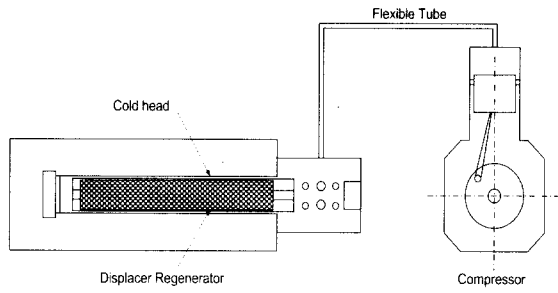
[4]의 동작은 냉각한 가스의 냉열을 축냉기에 주면서 압축부로 돌아옴과 동시에 displacer도 중립위치로 돌아오기 때문에 가스가 이동한다(등적과정). 또한 displacer의 구동은 시스템 공간의 압력 변화와 spring의 작용에 의해 각 행정의 위상 shift의 동작이 최적이 되도록 설계되어 있다.

적외선 카메라에 적합한 대표적인 형식으로서는 그림 3(a)와 같은 압축 부분과 냉동부가 크랭크 기구로 연결된 일체형과 그림 3(b)와 같이 flexible 배관으로 분리된 형태의 split 형이 있지만 최근에는 수광소자에 대한 압축기의 진동이나 전기적인 영향을 저감할 수 있는 split형이 주류를 이루고 있다.

스테링 냉동기는 주로 우주용 또는 군사용으로 개발되어 왔기 때문에 고신뢰도와 수명이 항상 해결되어야 할 문제로 남아 있었다. 이에 대한 해결책으로 최근에는 linear drive compressor를 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.



(a) Integrated type



(b) Split type

그림 3. Types of the Stirling cryocooler

3. 스테링 냉동기의 국외 개발 현황

3.1 우주 개발용 스테링 냉동기

우주 개발용 스테링 냉동기에 관한 연구는 주로 미국과 유럽에서 진행되고 있으며 최근에는 일본에서도 자체 우주개발 사업을 위하여 스테링 냉동기의 개발에 박차를 가하고 있다.

3.1.1 US Air Force Philips Laboratory

Hughes사에서는 US Air Force Philips Laboratory(USAF PL)의 지원하에 PSC(Protoflight Spacecraft Cryocooler)와 SSC(Standard Spacecraft Cryocooler) 모델을 개발하였는데, 각각 three finger tangential flexure와 Spiral flexure clearance seal을 채용한 single stage 스테링 냉동기이며 냉동기 형식은 Oxford type이고 냉동능력은 60K에서 3W, 냉동능력비 입력은 30W/W이다(그림 4).

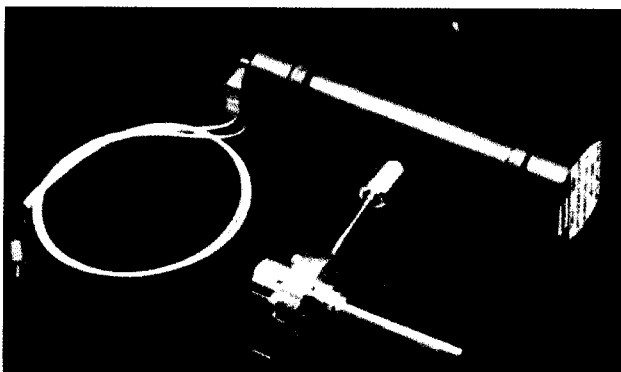


그림 4. Hughes사의 스테링 냉동기

또한 Ball Aerospace사에서는 AFSMC/ SMTS(Space and Missile Tracking System)용으로 35K에서 0.4W, 60K에서 0.6W의 2단 스테링 냉동기를 개발하였다(그림 5). 이 냉동기의 수명은 5년이며, 입력은 100W이다.

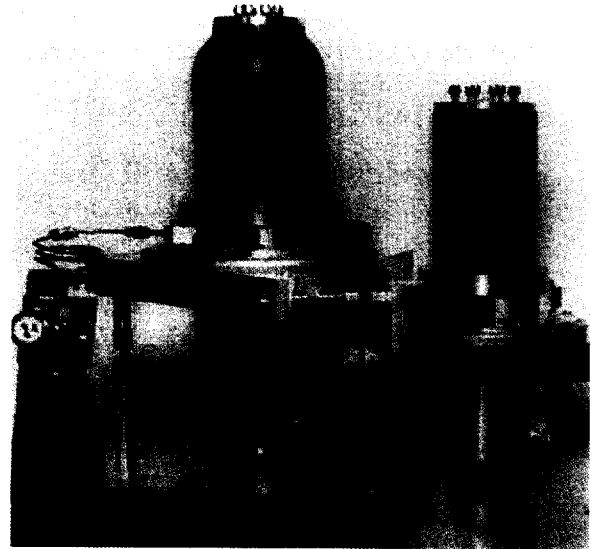


그림 5. Ball Aerospace사의 스테링 냉동기

3.1.2 NASA

NASA에서는 30년 이상 고수명의 극저온 냉동기를 개발하기 위하여 연구를 진행하여 왔다. 1970년대에 PL(Philips Laboratory)에서 개발한 냉동기가 NASA의 주도하에 개발되었는데 성능과 수명은 만족되었지만 Magnetic bearing을 사용하여 무게가 무거워 채택되지 않는 않았다.

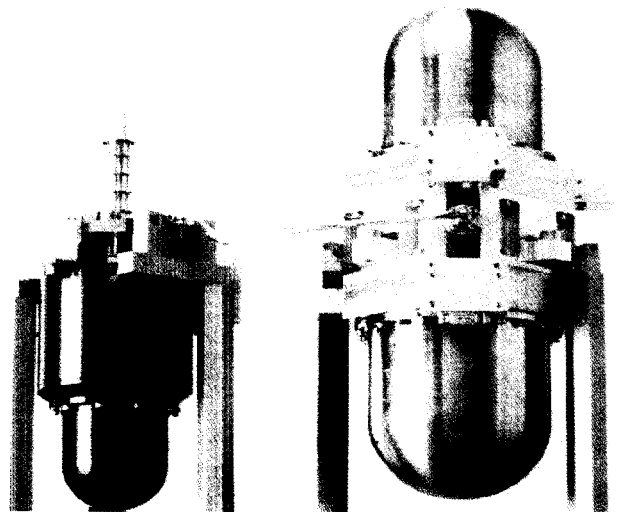


그림 6. 1단 스테링 냉동기

저온공학 분야 특집

1980년대 중반에는 영국의 Oxford 대학에서 Flexure bearing이 개발되어 1986년에 NASA에서 EOS(Earth Observing System)용으로 Magnetic bearing 대신에 flexure bearing을 채택한 스테링 냉동기에 대한 연구가 본격적으로 이루어졌다. 1992년 이후에는 Ball Aerospace사를 통하여 1단과 2단 스테링 냉동기를 개발하고 있다. 그림 6은 Ball Aerospace사에서 개발한 1단 스테링 냉동기를 보여주고 있다.

3.1.3 Lockheed Missile and Space

Lockheed Missile and Space사에서 SCRS(Space Cryogenic Refrigerator System)용으로 65K에서 2W, 80K에서 2W의 1단 스테링 냉동기를 개발하였다.

그림 7은 SCRS 스테링 냉동기를 보여주고 있으며, 그림 8은 80K에서 2W의 스테링 냉동기를 보여주고 있다.

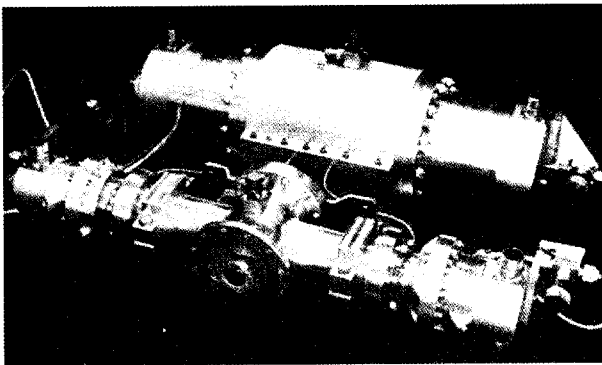


그림 7. SCRS 스테링 냉동기

3.1.4 MMS(영국)

MMS(Matira Marconi Space) - 1994년까지 British Aerospace Systems 사 - 는 유럽의 우주개발사업용 스테링 냉동기를 개발하여 공급하고 있는데 그동안 공급된 응용처는 다음과 같다.

- (1) MIPAS(Mishelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounder) : Germany
- (2) ODIN(Astronomy/aeronomy mission satellite) : Sweden
- (3) MOPITT(Measurement Of Pollution In The Troposphere instrument) : for Canadian Space Agency on the USA's EOS platform

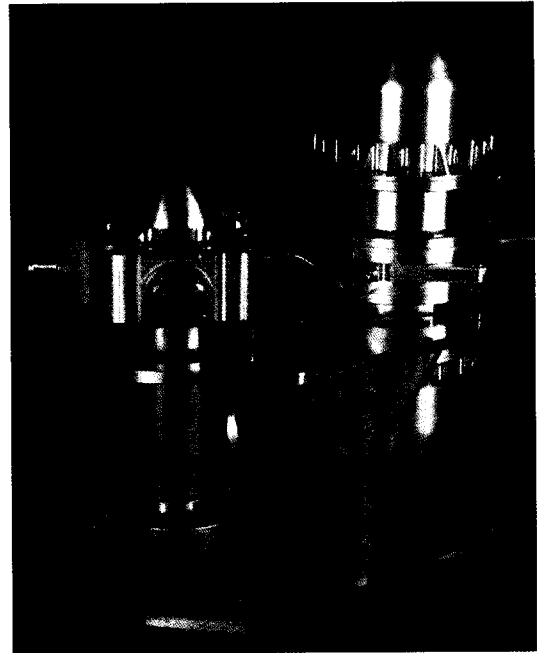


그림 8. 80K에서 2W의 스테링 냉동기

- (4) AATSR(Advance Along Track Scanning Radiometer) : European ENVISAT platform
- (5) HELIOS2(French military application for Aerospatiale)
- (6) FIRST(Far Infra-Red Space Telescope)
 - for European Space Agency(ESA)
 - Horizon 2000 space science program
 - sub-mili and far infrared exploration
 - shield cooling at 65K, 20K(2 stage)
 - Stirling cryocooler precooling.4.2K J-T cryocooler

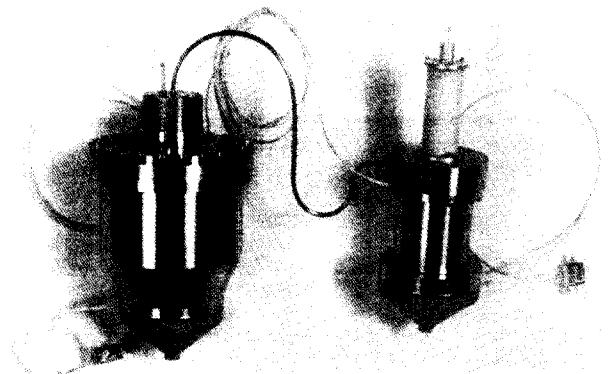


그림 9. MMS 스테링 냉동기

그림. 9는 MMS에서 개발한 50K - 80K

용 스테링 냉동기를 보여주고 있다.

3.1.5 Hitachi(일본)

Hitachi에서는 일본의 우주개발사업용으로 1986년 이후에 BBM1, BBM2 등의 모델로 스테링 냉동기들을 개발하고 있다. 스테링 냉동기의 수명은 50,000시간, 냉동능력은 70K에서 5W를 목표로 하고 있다. 그림 10은 Hitachi사의 BBM2 스테링 냉동기를 보여주고 있다.

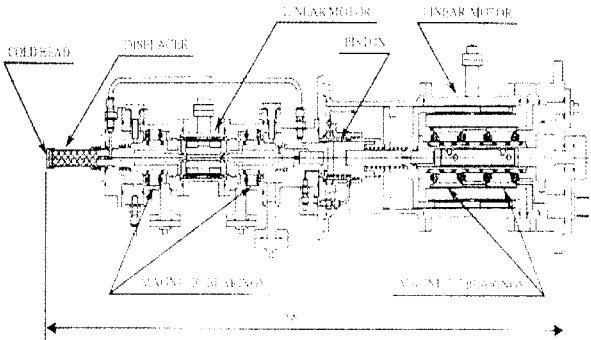


그림 10. BBM2 스테링 냉동기

3.2 군사용 스테링 냉동기

군사용 스테링 냉동기는 미국의 DOD (Department Of Defence)의 주도하에 주로 개발되어 왔으며, Rotary type의 스테링 냉동기의 1세대와 Linear type 스테링 냉동기의 2세대로 구분된다.

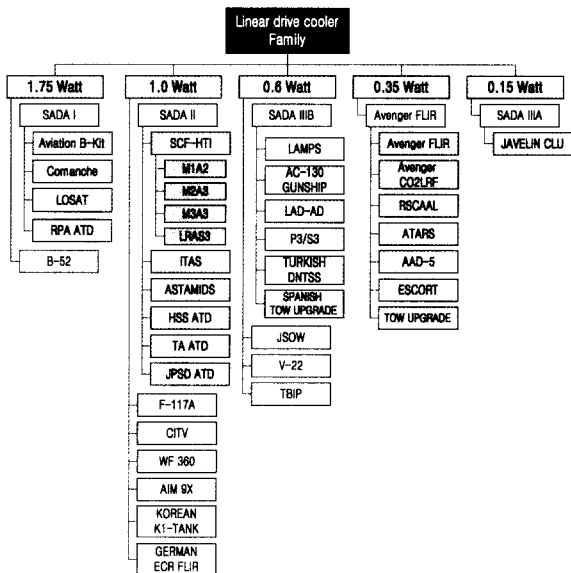


그림 11. DOD Family of Stirling cryocooler

2세대에서의 Thermal imaging system 개발은 SADA(Standard Advanced Dewar System)로 명명되며, 냉동능력에 따라 5개 분류로 나누어 진다. 그림 11은 DOD의 linear type 스테링 냉동기의 분류 군을 보여주고 있다.

3.2.1 BEI

BEI사에서는 clearance seal과 pneumatically driven displacer, linear drive motor를 채용한 0.15W - 5W/78K의 스테링 냉동기를 개발하고 있다. 그림 12는 BEI사의 스테링 냉동기를 보여주고 있다.

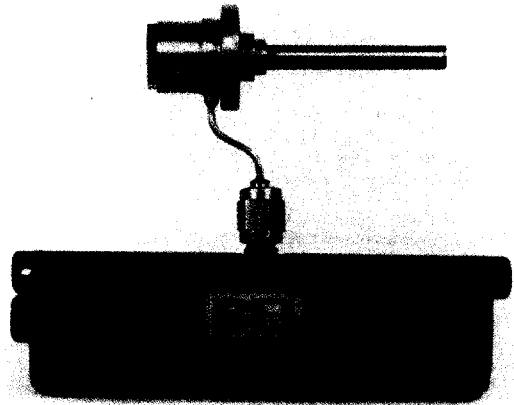


그림 12. BEI사의 스테링 냉동기

3.2.2 TI(Texas Instruments)

TI사에서는 STRV-2(Space Test Reseach Vehicle #2)에서의 focal plane 냉각 및 적외선 냉각용으로 77K에서 1W의 스테링 냉동기와 MWIR(Mid-Wave InfraRed)용 80K 스테링 냉동기를 개발하고 있다. 그림 13은 TI사에서 생산되는 스테링 냉동기들을 보여주고 있다.

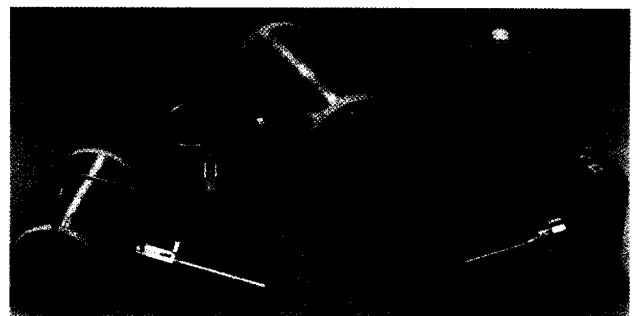


그림 13. TI사의 스테링 냉동기

3.2.3 Ricor(Israel)

이스라엘의 Ricor사에서는 적외선 센서 냉각용으로 0.25W - 1W/77K의 Rotary type과 linear drive type의 스테어링 냉동기를 생산하고 있다(그림 14).

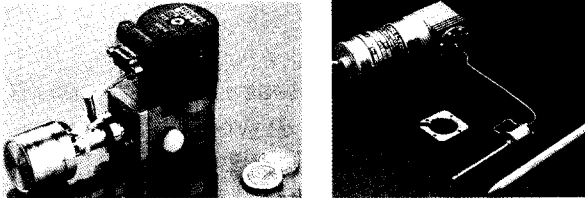


그림 14. Ricor사의 스테어링 냉동기

3.2.4 Signaal Usfa(네델란드)

네델란드의 Signaal Usfa사에서는 적외선 센서 냉각용으로 0.25W - 2W/77K의 스테어링 냉동기를 생산하고 있다.

4. 스테어링 냉동기의 국내 개발 현황

4.1 스테어링 냉동기의 구조

국내 스테어링 냉동기의 개발 현황은 1999년 이전에는 전무하여 전량 수입에 의존하였는데, 1999년에 한국기계연구원에서는 국내 처음으로 적외선 센서 냉각용으로 1W/77K Linear drive type 스테어링 냉동기의 개발을 시작하였다. linear drive type 스테어링 냉동기는 linear motor로 구동되는 Free piston free displacer 냉동기로서 열해석에 앞서 구조적인 형상설계와 구조해석이 이루어져야 한다.

스테어링 냉동기의 구동기구는 크게 rotary type과 linear type으로 나뉘는데, linear type은 rotary type에 비하여 반경 방향으로의 힘이 적게 작용하기 때문에 piston과 cylinder사이의 마찰에 따른 손실이 감소하므로 수명이 길어지는 장점을 지니고 있어, 현재 많이 사용되고 있다. linear type중에서도 piston의 구동방식에 따라 moving magnet type과 moving coil type이 있는데, moving coil type이 기술적 난이도가 낮아 생산비용이 적게 들기 때문에 군사용의 범용 스테어링 냉동기는 moving coil type을 선호하는 경향이 있다. 그림 15는 스테어링 냉동기의 구동기구에 따른 수명과 기술적 난이도를 나타낸 그림이다.

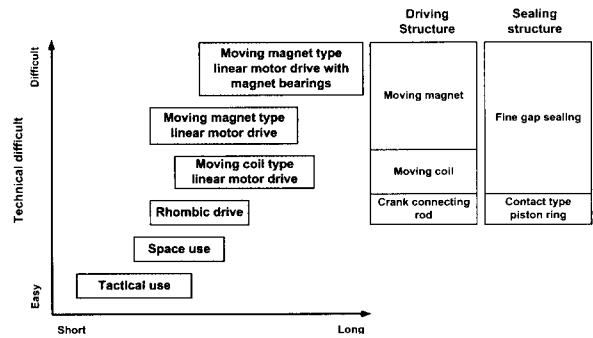


그림 15. 스테어링 냉동기의 수명과 기술적 난이도

Items	Requirements	Optimum structure
Driving mechanism	Oil free	Free piston type
Motor	Controllability of frequency, force, etc.	Linear motor
	Hermetic seal	
Bearing	Non-contacting	Flexure bearing
	High centering accuracy	
	High stiffness	
Control	Cooling power	Fine gap seal
	Piston/displacer displacement	
	Vibration	
	displacement control	

그림 16. 스테어링 냉동기의 구조

따라서 본 연구팀에서 채택한 스테어링 냉동기의 구조는 그림 16과 같이 linear motor를 이용한 free piston type으로 flexure bearing과 fine gap seal에 의해 구동되도록 하였다.

4.2 스테어링 냉동기의 설계

스테어링 냉동기의 설계는 열해석과 구조해석을 통해 핵심부품의 재료와 크기를 결정하여 제작한 뒤, 성능시험으로 사양과 비교하므로써 설계를 완성한다. 그림 17은 설계 흐름도를 보여주고 있다.

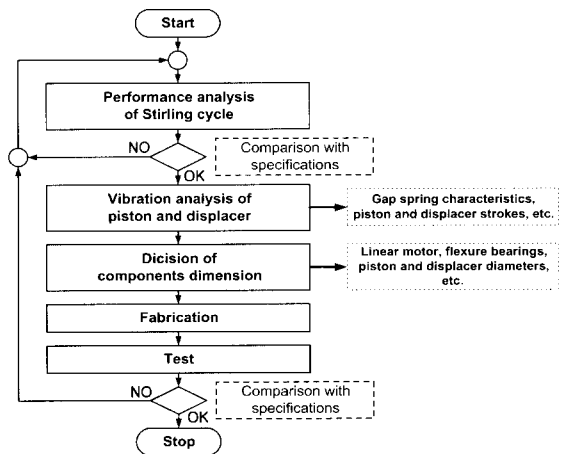


그림 17. 설계 흐름도

4.3 스테링 냉동기의 제작

본 연구팀은 스테링 냉동기의 완전한 설계에 앞서 기존의 스테링 냉동기의 역설계를 통하여 스테링 냉동기를 제작하였다. 그림 18은 제작된 스테링 냉동기의 3차원 도면을 보여주고 있다.

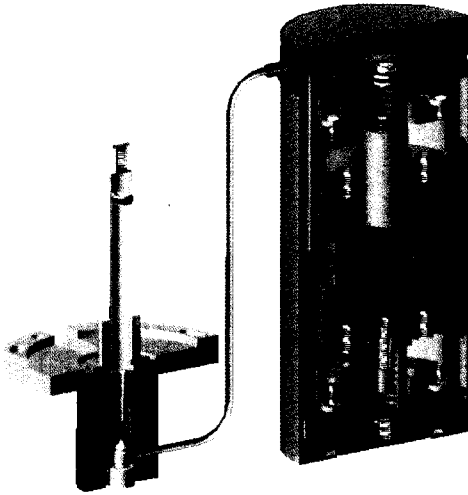


그림 18. 스테링 냉동기의 3차원 도면

4.4 스테링 냉동기의 성능시험장치

스테링 냉동기의 성능을 시험하기 위하여 piston과 displacer의 변위와 압축, 팽창공간에서의 압력, coldhead에서의 온도 및 냉동능력을 측정하도록 구성하였고, 성능시험한 결과는 열해석 및 구조해석을 위한 기초 설계자료가 된다. 그림 19는 스테링 냉동기의 성능시험장치의 개략도를 보여주고 있다.

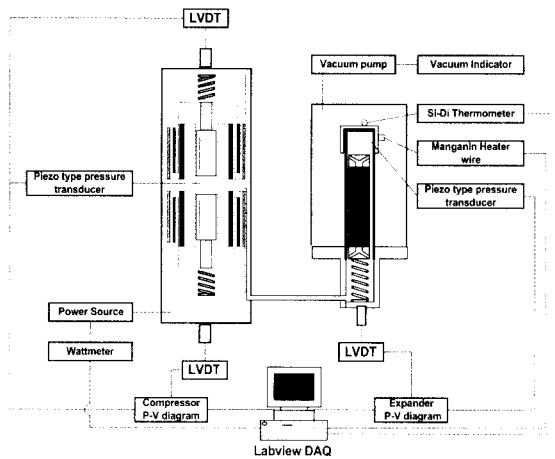


그림 19. 스테링 냉동기의 성능시험장치

5. 결 론

극저온 냉동 산업은 최근의 초전도 산업의 발전과 함께 없어서는 안될 중요한 기술로서 자리를 잡았다. 특히 적외선 센서와 저온 센서 및 이동통신 무선통신국용 초전도 필터 등의 냉각용으로 활용되는 스테링 냉동기는 국외에서 약 50년 이상 개발되어온 기술로서 국내의 자체 개발이 없으면 전량 고가로 수입해야할 상황이기 때문에 국내 저온공학 연구자들의 많은 관심이 요구되는 분야이다.

참고문헌

- [1] Walker, G., "Cryocoolers Part I, II", Plenum Press, New York and London, 1983..
- [2] "Cryocoolers 8", International Cryocooler Conference, 1994.
- [3] "Cryocoolers 9", International Cryocooler Conference, 1996.
- [4] "Cryocoolers 10", International Cryocooler Conference, 1998.
- [5] 박성제, 고득용, "적외선 소자 냉각용 극저온 냉동장치", 한국기계연구원, 기계와 재료, Vol. 10, No. 2, p. 92, 1998.

저자이력



고득용

1959년 2월 12일생, 1982년 한양대 기계공학과 졸업, 1985년 동 대학원 기계공학과 졸업 (석사), 1985년~현재 한국기계연구원 선임연구원



박성제

1962년 12월 13일생, 1986년 부산대 기계공학과 졸업, 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1991년~현재 한국기계연구원 선임연구원

저온공학 분야 특집



홍용주

1968년 3월 19일생, 1990년 고려대 기계공학과 졸업, 1992년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1992년~현재 한국기계연구원 선임연구원



오군섭

1945년 8월 25일생, 1975년 한양대 기계공학과 졸업, 1983년 해양대학교 기계공학과 졸업(석사), 1992년 한양대학교 졸업(공박), 1976년~현재 한국기계연구원 책임연구원