

Linear compressor 스테링 냉동기 설계에 관한 연구

박성제, 고득용, 홍용주, 김효봉
한국기계연구원

Design of the Linear Compressor Stirling Cryocooler

S.J. Park, D.Y. Koh, Y.J. Hong, H.B. Kim
Korea Institute of Machinery & Materials

sjpark@kimm.re.kr

Abstract - This paper presents operating process and design method on the linear compressor Stirling cryocooler for cooling infrared detector. The free piston-type Stirling cryocooler, which applies 1) the Stirling cycle for refrigeration, 2) linear motors for driving, 3) flexure bearings for support systems, and 4) fine gap for clearance seals, is the most suitable design for a mechanical cryocooler utilized in a night vision environment.

1. 서 론

극저온 냉동기술은 영구가스로 알려졌던 산소, 질소, 헬륨 등의 액화를 목적으로 저온 물리학에서 시작되었다. 그러나 상업적으로 대량 생산이 가능하게 된 것은 야간투시경이나 미사일 유도 시스템과 같은 군사용으로 사용되는 적외선 센서의 극저온 냉각이 필요하게 되면서 부터이다. 이와 같이 군사용으로 개발되기 시작한 극저온 냉동기술은 1980년대 이전에는 주로 미국, 일본 및 일부 유럽국가에서만 독점적으로 개발되었지만 동서 냉전체제의 붕괴와 함께 산업기술로서 전세계적으로 공개되어 초전도, 전기, 전자, 의료 기술 등의 핵심 기반 기술로서 자리를 잡게 되었다. 이에 따라 각 응용 분야별로 다양한 극저온 냉동기가 개발되었으며, 최저도달온도 범위도 다양해져서 Stirling 극저온 냉동기, 맥동관(Pulse tube) 극저온 냉동기 등의 수 10K에서 Gifford-McMahon(G-M)극저온 냉동기, Gifford-McMahon/Joule-Thomson (G-M/J-T) 극저온 냉동기, Joule-Thomson (J-T)극저온 냉동기 등과 같이 액체헬륨온도인 4.2K 이하까지, 심지어 자기냉동 및 핵단열소자에 의해 수 μK 영역의 온도까지 도달이 가능한 실정이다.

지금까지 극저온 냉동기의 가장 주요한 응용은 야간 투시경과 미사일 유도를 위한 적외선 센서 냉각 등의 군사적 이용이었다. 이 때 사용되는 적외선 센서의 재료들은 HgCdTe, InSb와 PtSi 이었고, 약 80K에서 0.1 ~ 1W 정도의 냉동능력이 요구되었다.

적외선이란 파장이 가시광선 보다 길고 마이크로파 보다 짧은 $0.75 \mu m$ 이상의 전자기파(Electromagnetic wave)로서 1800년경 William Herchel경에 의해 발견되었는데 지구상에 존재하는 0K이상의 모든 물체는 그 온도에 해당하는 복사선을 방출한다. 지구상에 존재하는 대부분의 물체는 적외선 범위를 넘지 못하는 복사선을 방사하므로 적외선을 검출하는 소자를 사용함으로써 식별이 가능하다.

현재 미국과 유럽 등지의 일부 제작용체가 이 시장을 점유하고 있으며 매달 수천개의 냉동기가 공급되고 있다. 이 때 사용되는 극저온 냉동기는 효율과 수명 특성이 우수하고, 소형 경량화가 가능한 스테링 냉동기를 주로 사용한다.

본 연구에서는 신뢰성 높은 적외선 센서 냉각용 Linear compressor 스테링 냉동기의 개발을 위해 성능/구조 해석 및 설계에 관한 연구방향을 제시하고자 한다.

2. 스테링 냉동기의 작동 과정

Fig. 1에는 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 냉각핀에 의해 방열된다(등온압축). 또 이 상태에서의 displacer 위

치는 압축과 동반하여 중립점보다 위로 이동하고 있는 상태에 있다.

[2]의 동작은 시스템내의 체적이 최소로 되어 압력이 최대가 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(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.

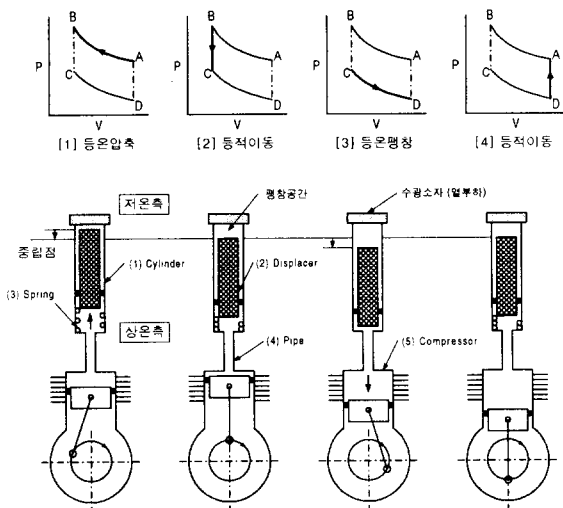


Fig. 1 Operating process of the Stirling cryocooler

3. 스텐링 냉동기의 설계

3.1 설계 개요

냉동기로서 요구되는 사양을 Table 1에 나타내었다. 냉동 사이클에 사용된 스텐링 사이클의 효율은 이상적으로는 카르노 사이클의 효율과 같고 여러 냉동 사이클중에 가장 높다. 77K에서 0.75W의 냉동능력은 운용 초기의 값이고 운용 수명은 5000시간 이후의 냉동능력은 20%정도 내려가는 것으로 상정하고 있다.

냉동기에 요구되는 항목과 요구항목을 만족하는 최적구조를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 구동기구로서는 윤활유등 극저온에서 고화되는 물질이 작동공간에 없는 Oil-free화가 용이한 구조가 바람직하다. 모터는 냉동능력을 가변할 수

있는 구동주파수 제어나 구동력 제어 등이 가능, 작동가스의 누설이 없는 밀폐구조, 내구성이 높은 급전부 구조가 적당하다. 지지구조 및 베어링은 비접촉 방식, 가동부인 피스톤과 팽창기를 실린더 중심에 유지하는 방식, 고강성이 요구된다. 제어성에 관해서는 냉각면 온도를 일정하게 유지하기 위한 냉동능력 제어, 최대냉동능력을 내는 피스톤과 팽창기의 진동위상차 제어, 냉각면의 진동을 제어하는 제진 제어 등이 바람직하다.

이상의 요구를 만족하는 최적구조로서 구동계를 리니어 진동 액츄에이터로 분류되는 리니어 모터, 지지계를 Flexure bearing으로 구성한 Free piston형 스텐링 냉동기를 채택하였다. 또한 seal부를 fine gap seal로 하기 때문에 oil-free가 실현된다. 냉동능력의 제어를 위해 압축기의 변위를 조절할 수 있도록 리니어 모터의 입력 전압을 가변하는 방식을 사용한다. 리니어 모터의 형식은 피스톤 응답성이 좋은 moving coil type으로 한다.

Table 1 Performance of cryocooler

Items	Specifications
Refrigerating cycle	Stirling cycle
Cooling power	0.75W at 77K
MTTF	5,000hr
COP	0.03
Cooldown time	5min.
Configuration	Split linear

Table 2. Optimum structure of cryocooler

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	

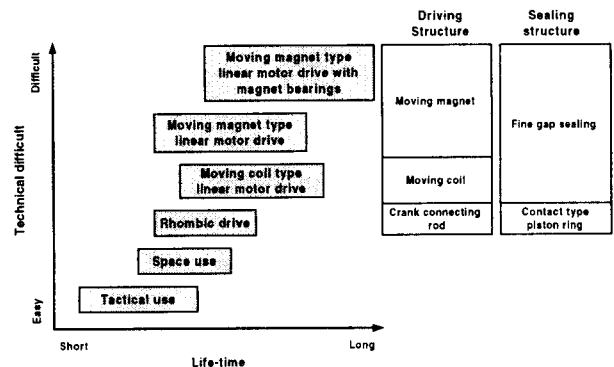


Fig. 2 Technical difficulty of Stirling cryocooler

각종 스테링 냉동기의 수명과 기술적 난이도의 관계를 추정할 결과를 Fig. 2에 나타 내었다. 기존 기술을 적용할 수 있는 crank connecting rod 기구를 가진 냉동기에 비해 리니어 모터에 의해 구동되는 free-piston형 냉동기는 피스톤계의 진동 제어 등의 기술적 난이도는 높지만, 실린더에 작용하는 반경방향으로의 힘이 저하하기 때문에 가동부의 마모등이 개선되어 수명이 증가하는 장점이 있다. Free piston type 중에서도 moving coil type은 기술적 난이도와 수명의 측면에서 경제적으로 제작하기 가장 적합한 구조로 볼 수 있다.

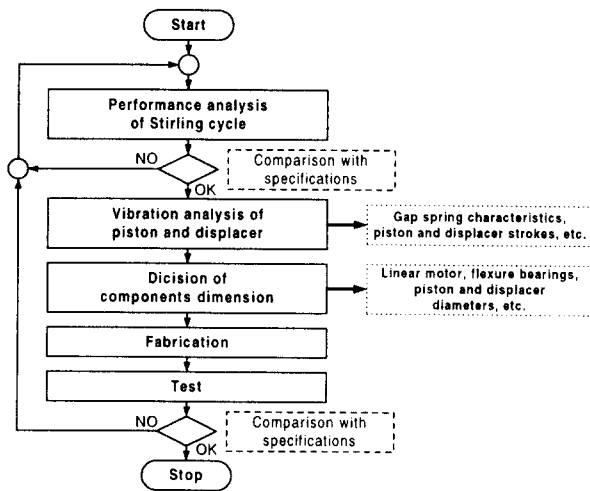


Fig. 3 Design diagram

Free piston 형 스테링 냉동기의 설계는

(1) 냉동능력을 기초로 한 열역학적 검토에 의한 각부 크기와 주파수, 행정등의 구동 조건의 결정

(2) 구동 조건을 만족하기 위한 진동계의 검토에 의한 피스톤 및 팽창기의 구동력 결정

(3) 결정한 구동력을 얻기 위한 리니어 모터 사양 및 리니어 모터에서 발생하는 반경방향 힘을 지지하는 베어링계 사양 결정

의 순서로 검토한다. 본 설계 순서를 정리하여 Fig. 3에 나타내었다. 이 중에서 특히 중요한 부분은 free piston형 특유의 설계 항목인 (2)의 진동계 검토이다. 가스 스프링을 이용한 피스톤계의 진동 해석에서는 피스톤과 실린더 사이의 간극이나 작동공간내의 댐핑 특성등의 영향을 파악하는 것이 매우 어렵다.

3.2 성능 해석 및 기본 설계

3.2.1 성능 해석

스테링 냉동기의 성능 해석 방법은 크게 5가지로 나눌 수 있다.

- (1) Ideal Stirling cycle
 - isothermal and constant volume

- process
 - void volume zero
 - piston and displacers with a discontinuous motion
 - perfect regeneration
 - no pressure drops
- (2) Zeroth-order analysis
 - use experience data
 - $Q_R = 10^{-4} \text{ pfVT}_r$ for large Stirling cryocoolers
 - $\text{COP} = C (T_r / (T_c - T_r))$
- (3) First-order analysis
 - isothermal and constant volume process
 - perfect regeneration
 - piston and displacers with sinusoidally motion
 - instantaneous pressure is the same throughout the system
 - no leakage
 - no temperature gradients in the heat exchangers
 - mechanical friction effects are ignored
 - mechanical friction effects are ignored
 - ideal gas equation
- (4) Second -order analysis
 - First-order analysis with various parastic losses
 - process compression and expansion could be between isothermal and adiabatic
- (5) Third-order analysis
 - modelling the simultaneous energy and fluid and fluid flows occurring in the cooler
 - solving equation for the conservation of mass, mometum, and energy for particular nodes of the cooler

3.2.2 기본 설계

스테링 냉동기 시스템에서의 압력 변화는 아래의 식으로 표현된다.

$$P_c = P_m + C_y y + C_x x + C_{pc} V + C_{dc} u \quad (1)$$

$$P_e = P_m + C_y y + C_x x + C_{pe} V + C_{de} u \quad (2)$$

$$P_e - P_c = (C_{pe} - C_{pc}) V + (C_{de} - C_{dc}) u = C_{pp} V + C_{dd} u \quad (3)$$

여기서 P_m = 평균압력
 y = 피스톤 위치
 x = 팽창기 위치
 v = 피스톤 속도
 u = 팽창기 속도

P_c = 압축부 압력
 P_e = 팽창부 압력
 $C_y, C_x, C_{pc}, C_{dc}, C_{pe}, C_{de}$ = 상수

냉동능력(Q_{eo})과 입력(N_p)은 아래와 같다.

$$Q_{eo} = n \int PdV_d = -n\pi C_y x y S_d \sin \phi_{dr} \quad (4)$$

$$N_p = n \int PdV_p = -n\pi C_x x y S_p \sin \phi_{dr} \quad (5)$$

여기서 n = 작동주파수
 S_d = 팽창부 단면적
 S_p = 압축부 단면적
 dV_d = $S_d dx$
 dV_p = $S_p dy$
 ϕ_{dr} = 피스톤과 팽창기의 위상차

또한 팽창기와 피스톤의 운동은 아래의 식으로 나타내어 진다.

$$M_d a + (P_e - P_c) S_d + C_{vd} u = 0,$$

$$M_d a + C_{dx} S_d + C_{vd} u = -C_{pp} S_d v \quad (6)$$

$$M_p s + (P_c - P_m) S_p + B_g l_v i + C_{vp} v = 0 \quad (7)$$

여기서 M_d = 팽창기의 질량
 M_p = 피스톤의 질량
 a = 팽창기 가속도
 s = 피스톤 가속도
 B_g = magnetic field in the gap
 l_v = 간극에서의 와이어 길이
 i = 코일에서의 전류
 C_{vd} = 팽창기 스프링 상수
 C_{vp} = 피스톤 스프링 상수

3. 결 론

적외선 센서 냉각용 냉동기로서 냉동사이클을 스텔링 사이클, 구동계를 리니어 모터, 지지계를 Flexure bearing, seal을 fine gap으로 선정하여 77K에서 0.75W의 냉동능력을 가지는 스텔링 냉동기의 성능 해석 및 설계 방법에 관하여 고찰 하였다. 성능 해석은 기본 설계를 위해 활용하기 때문에 실제 제작된 스텔링 냉동기의 성능과는 많은 차이가 있을 것으로 예상되나 성능 시험을 통해 주요한 설계 인자를 재설정하여 앞으로 다양한 응용분야에 활용되는 스텔링 냉동기 용 설계 기법으로 활용할 계획으로 있다.

(참 고 문 헌)

[1] A.K. De Jonge, "A small Free-Piston Stirling Refrigerator", American Chemical Society, 1979.

[2] A.K. De Jonge and A. Sereny, "Analysis and optimization of a linear motor for the compressor of a cryogenic refrigerator, Adv. Cryog. Eng., 27, 284-292, 1982.

[3] K.G.Narayankhedkar, K.G., etc., "Analysis of linear motor for electromagnetically driven cryocooler", Proc. Int. Conf. on Cryogenics, 284-292, 1988.

[4] Jewell, C. and Jones, B.G., "Mechanical coolers: An option for space cryogenic cooling applications" ESA bulletin, No. 62, 79-85, 1990.

[5] 福田民雄외, "우주용 스텔링 냉각기의 개발", 일본저온공학, 27:3, 70-78, 1992.

[6] 박성제, 고득용, "적외선 소자 냉각용 극저온 냉동장치", 한국기계연구원 기계와 재료, Vol. 10, No. 2, p. 92, 1998.

[7] 박성제 외, "저온센서 냉각용 맥동관 냉동기의 평가", 공기조화 냉동공학회 '98 동계학술 발표회 논문집, p.84, 1998.