

극저온 스테링 냉동기용 선형 압축기 개발

지상우(한국기술교육대 대학원 기계공학과), 임경화(한국기술교육대 제어시스템공학과)
강희석, 강경태(한국생산기술연구원)

A development of linear compressor for a cryogenic stirling cooler

S. W. Ji(Mecha. Eng. Dept., KUT), K. H. Rim(Control system Eng. Dept., KUT)
H. S. Kang, K. T. Kang(Korea Institute of Industrial Technology)

ABSTRACT

A cryogenic stirling cooler is currently under development at Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). Cryocooler has many kinds of types. The stirling cooler is the most appropriate one for under 80K with the trait of long life cycle and small size. The stirling cooler uses helium as a working fluid. Helium is pressurized by the linear compressor which is driven by linear motor. In this paper, the change of pressure and volume is studied by the isothermal analysis method. It is necessary to investigate the optimized pressure to meet the highest COP. The compressor's piston and expander's displacer interact according to the working fluid's pressure level and the phase angle difference. This paper presents the relation between the initial pressure and the work of cryocooler. By that results, we can predict the performance of linear compressor.

Key Words : Cryocooler (극저온 냉동기), Linear compressor (선형압축기), Isothermal analysis (등온 해석), Linear motor (선형모터), COP(성적계수)

1. 서론

극저온이란 77K 이하의 온도를 일컫는 영역으로, 상온에서 나타나는 물리적 현상과는 다른 여러 물리적 특성을 나타낸다. 극저온에 관한 연구는 1908년 네덜란드의 Onnes가 액체헬륨을 진공펌프로 펌핑(pumping)하여 증기압을 내리는 방법을 통해서 1K 영역에 이르게 됨으로서 그 연구가 시작되었다.

극저온 상태에서는 초전도 현상 및 열잡음 감소 등의 효과를 볼 수 있으며 이러한 극저온상태의 특성을 장시간 유지하기 위해서 여러 종류의 냉동기가 연구 개발되고 있다.

극저온 냉동기의 응용범위로서는 야간투시경(night vision) 및 미사일 유도를 위한 적외선 센서의 냉각 등의 군사용 용도 및 의료용 MRI 나 에너지변환(MHD, 핵융합, 초전도발전기) 분야에서도 응용되어 실용화 되었다. 또한 앞으로는 이동통신 무선기지국용 초전도 필터(filter)등의 냉각용으로도 활용될 것으로 예측되고 있다.

현재 선진국을 중심으로 여러 연구기관에서 극저온 냉동기를 개발하여 실용화 하였으나, 국내에서는 극저온 냉동기를 전량 고가로 구입하고 있는

상황으로 현재 국산화 연구가 활발히 진행중이다.

극저온 냉동기는 크게 재생형(regenerative) 열교환기를 사용하는 재생형 극저온 냉동기와 향류형(recuperative) 열교환기를 사용하는 향류형 극저온 냉동기로 구분이 된다. 또한 사이클의 열역학적 구성에 따라서 스테링(stirling) 냉동기, 맥동관(Pulse tube) 냉동기, GM(Gifford-McMahon) 냉동기, 흡착(Sorption) 냉동기, JT(Joule-Thomson) 냉동기 등으로 구분된다.

현재는 구조적으로 신뢰성이 높은 장점을 지닌 맥동관 냉동기에 대해 많은 연구가 진행되고 있으나, 소형 경량 및 충분한 내구성등의 조건을 만족하는 냉동기로서는 stirling 냉동기가 가장 적합한 것으로 판단된다.

2. 스테링 냉동기 작동 및 시뮬레이션

2.1 스테링 냉동기의 작동

스테링 냉동기는 크게 압축기(compressor)부와 팽창기(expander)부로 구분할 수 있다. 압축기에서는 극저온냉각에 필요한 압력차이를 유발시키기 위해

서 압축 작용을 반복하게 되며, 팽창기에서는 팽창 작용에 따라 온도가 감소하여 냉각효과를 나타내게 된다. Fig. 1은 스테링 냉동기의 대략적인 설계도를 보여주고 있다.

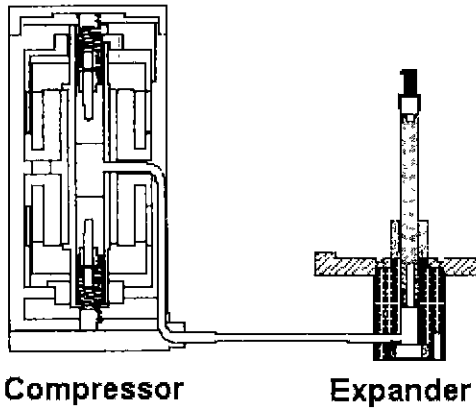


Fig. 1 A simple design of stirling cooler

스테링 냉동기 내부의 해석 및 설계방법은 매우 까다로며 최선의 방법이 알려져 있지 않다. 각 제조 회사별로 이론적 해석방법을 바탕으로 하여 실험적인 방법으로 최적 설계를 한다.

스테링 냉동기용 선형 압축기의 가장 중요한 사항은 초기 주입압력과 팽창기 부분의 내부의 압력의 변화이다 따라서, 이를 분석하기 위해서는 스테링 사이클에 대한 이해를 할 필요가 있다. 아래의 Fig. 2는 스테링 사이클의 열역학적 특징을 나타내는 압력(P)-부피(V) 선도 및 엔트로피(S)-온도(T) 선도이다

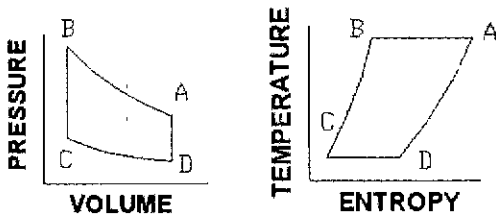


Fig. 2 P-V diagram and T-S diagram for stirling cooler

P-V 선도에서 A에서 B에 이르는 단계가 압축기의 피스톤이 압축작용을 하여 압력을 증가시키는 구간이다. 이 구간에서는 온도가 일정하며 엔트로피가 감소하게 된다 B에서 C에 해당하는 구간은 냉각이 일어나는 구간으로서 압축기의 압력이 감소하게 되며 팽창기 체적이 급격히 증가하게 되어 온

도가 급격히 하강하게 되어 냉각작용을 하게 된다.

각 열역학적 상태에 해당하는 A~D 지점에 대해서 실제 압축기의 피스톤과 팽창기의 피스톤의 움직임을 Fig. 3에 도시하였다 작동유체(working fluid)가 재생기(regenerator)를 거치는 고압의 가스가 통로가 매우 작은곳(밸브, Orifice, Porous plug)등을 지나면서 온도 강하가 생기는 J-T (Joule-Thomson)효과라 불리는 현상이 일어나게 된다 이것은 내부일(internal work)의 가스를 냉각하는데 사용되는 것으로 가스가 팽창할 때 분자들을 격리시키기 때문인 것으로 파악된다.

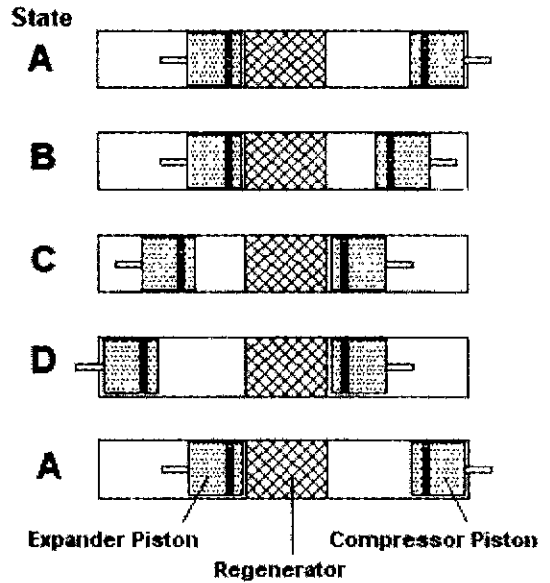


Fig. 3 Compressor and expander piston movement

압축기의 피스톤과 팽창기의 피스톤이 서로 움직이는 방향이 일치하지 않고, 약간의 시간적 차이를 갖고 운동하는 하게 된다. 이것은 스테링 냉동기의 냉동성능의 극대화를 위해서 약 $45 \sim 90^\circ$ 의 최적의 위상차이 α 를 갖고 운동을 하도록 설계되어 있기 때문이다

2.2 스테링 냉동기의 시뮬레이션

위상차 차이 α 와 초기 주입압력을 이용하여 Schmidt의 등온해석(isothermal analysis)을 수행하였다. 이 등온해석은 작동 유체의 온도가 각각 고온(T_H)와 저온(T_L)로 일정하게 유지되는 이상적인 경우에 적용되는 방법으로 시스템내에서 작동체적(working volume)의 수력직경(hydraulic diameter)이 매우 작은 경우에 실제로 등온과정과 비슷한 작동 특성을 나타낸다.

먼저, 압축기의 체적 변화와 팽창기의 체적 변화에 관한 식을 다음과 같이 1 차 조화함수 (harmonic function)로 나타낼 수 있다.

$$V_{EXP} = \frac{V_E}{2}(1 - \cos \theta), \quad V_{COMP} = \frac{V_C}{2}\{1 - \cos(\theta - \alpha)\}$$

내부의 체적변화에 따른 압력(P)의 변화는 전체질량 (m_{tot})에 대해서 아래와 같이 정리가 된다. 여기서 R 은 기체상수이며, V_R 는 재생기의 체적이다

$$P = \frac{m_{tot}R}{S - C \cos(\theta - \beta)} \dots \dots \dots (1)$$

$$S = \frac{V_E}{2T_L} + \frac{V_R \ln(T_H/T_L)}{T_H - T_L} + \frac{V_C}{2T_H} \dots \dots \dots (2)$$

$$C = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{V_h}{T_L} + \frac{V_C}{T_H} \cos \alpha\right)^2 + \left(\frac{V_C}{T_H} \sin \alpha\right)^2} \dots \dots \dots (3)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{V_C}{T_H} \sin \alpha}{\frac{V_E}{T_L} + \frac{V_C}{T_H} \cos \alpha} \right) \dots \dots \dots (4)$$

위의 식들은 열재생기(heat generator)의 온도가 유체가 흐르는 방향으로 저온(T_L)으로부터 고온(T_H)까지의 온도 변화가 선형(linear)변화를 하고 있다는 가정으로부터 얻어졌다 이에 따른 실제 압축기의 체적과 팽창기의 체적변화는 $\alpha = 90^\circ$ 일 때 Fig 4 와 같다

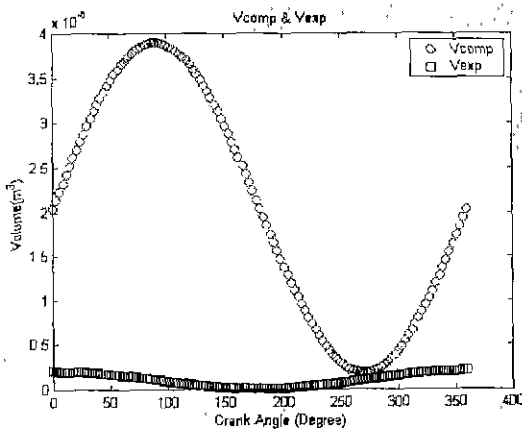


Fig 4. Vcomp and Vexp changes

실제 압축기의 체적과 팽창기의 체적차이가 매우 크므로 수행하는 일(work)의 크기도 비교해 볼 수가 있다. 체적의 차이가 큰 압축기가 훨씬 많은 양의 일을 함을 알 수 있는데, 1MPa 의 조건으로 수행한 일을 비교한 결과가 Fig. 5 로 나타나 있다

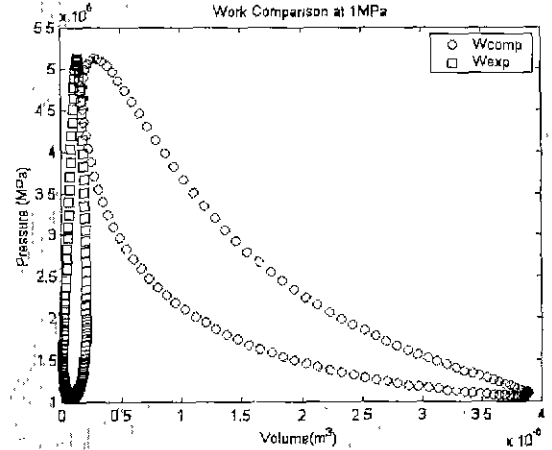


Fig. 5 Work comparison at 1 MPa Helium charging

고온과 저온부에서의 일 또는 열의 전달량을 계산하기 위해서 식 (1)에서의 일 또는 열의 전달량을 구하기 위해서는 압력의 변화에 관한 식(1)의 P 를 각각의 체적 변화에 따른 적분을 수행하면 된다

$$W_{EXP} = \oint PdV_{EXP} = \pi m_{tot} R V_E \frac{1}{C} \left(\frac{S}{\sqrt{S^2 - C^2}} - 1 \right) \sin \beta$$

$$W_{COMP} = - \oint PdV_{COMP} = m_{tot} R V_C \frac{1}{C} \left(\frac{S}{\sqrt{S^2 - C^2}} - 1 \right) \sin(\alpha - \beta)$$

여기서, W_{COMP} 는 기체가 외부에서 받는 일이기 때문에 적분기호에 음의 기호(-)가 적용되었다 위 두식으로부터 성적계수(COP)를 구할 수 있다 여기서 식(4)의 β 를 이용하면 이상적인 사이클을 구성하는 카르노(cardnot) 사이클의 구성하는 냉동기의 성적계수와 관련하여 비교할 수 있다. 스테링 냉동기의 성적계수는 아래와 같이 구한다.

$$COP = \frac{W_{EXP}}{W_{COMP} - W_{EXP}} = \frac{V_E \sin \beta}{V_C \sin(\alpha - \beta) - V_E \sin \beta}$$

압력의 변화에 따라 계산된 W_{comp} 와 W_{exp} 를 연속적으로 출력하였다 초기 충전압력이 높을수록 수행하는 일의 양이 크다는 것을 예측할 수 있었고, 여러 충전 압력에 대한 시뮬레이션 결과를 통하여 적정 충전 압력을 예측할 수 있다. Fig. 6은 압력의 변화에 따른 수행한 일을 비교한 것이다

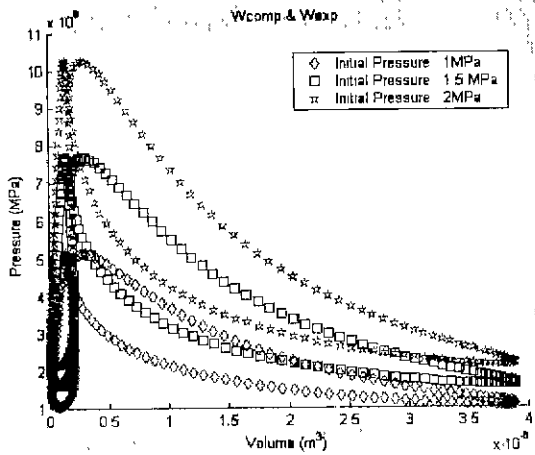


Fig. 6 W_{comp} and W_{exp} compare to initial pressures

압축기가 한 주기동안 변화하는 과정을 식(1)을 통해서 예측할 수 있으며, 이때에 최대 압력을 예측함으로써 내부 설계시 안전도 및 유출방지(sealing)기술의 적용 정도를 예측할 수 있다 초기 헬륨의 충전 압력의 크기를 증가시켜가며 시뮬레이션한 결과가 Fig 7에 나타내었다. 최대압력은 초기 주입 압력의 약 4~5 배까지 증가하는 것을 확인할 수 있다.

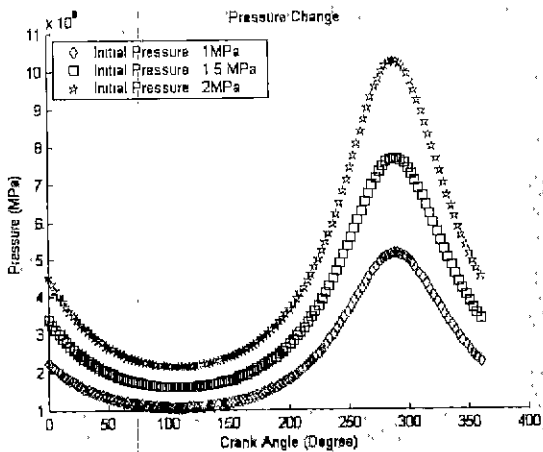


Fig. 7 Pressure changes by the initial pressures

3. 결론

극저온 스테링 냉동기의 작동원리연구와 시뮬레이션을 수행함으로써 극저온 스테링 냉동기용 선형 압축기에 필요한 여러 중요인자 가운데 가장 크게 영향을 미치리라 예상되는 초기 충전압력에 따른 작동 특성을 예측할 수 있었다.

(1) 초기 헬륨 충전압력에 따라서 수행하는 일의 크기가 변화하는 양을 계산함으로써 실제 제작할 극저온 냉동기의 용량 W (watt)에 따른 적절한 초기 충전압력을 예측할 수 있었다.

(2) 선형압축기 작동시의 최고 작동 압력을 예측함으로써 실제 제작시에 필요한 압축기 내부 부품의 내압 성능 및 냉동 성능에 관계된 설계사항을 시뮬레이션 결과를 통해 검토 할 수 있었다.

(3) 이론적으로 극저온 스테링 냉동기용 선형압축기 내부 작동 압력변화는 초기 주입 압력대비 약 4~5 배에 해당하는 최고 작동압력을 나타내는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. YJ Hong, S.J. Park, D.Y Koh, K.S Oh, "A simple analysis of split-type free piston and free displacer Stirling cryocooler". Korea-Japan Joint Workshop on Applied Superconductivity and Cryogenics, pp.22, 2000.
2. D.M. Berchowitz. "Maximized performance of Stirling cycle refrigerators," IIF-IIR Sections B and E, Oslo, Norway, 1998
3. 김영인, 장호명. "극저온 냉동기(II)," 공기조화 냉동공학회지, 제 19 권, 제 1 호, pp.7-12, 1990.
4. 이금배, 백일현, "SQUID 냉각장치용 극저온 시스템 개발," 공기조화 냉동공학회지 제 18 권 제 2 호, pp.121-129, 1989.
5. 박성제, 홍용주, 고득용, 김효봉, 오군섭, 염한길, 김중학, "충전압력에 따른 KIMM-E1 스테링극저온 냉동기에 관한 연구," 한국 초전도 저온공학회 학술대회 논문집, pp 33-36, 2001.