

초전도 필터 냉각용 선형압축기형 맥동관 냉동기의 실험적 연구

박성제*, 홍용주*, 김효봉*, 고득용*, 엄한길*, 김양훈*, 김종학**
*한국기계연구원, **(주)우영

An Experimental Study of the Pulse Tube Cryocooler with the Linear Compressor

Seong-Je Park*, Yong-Ju Hong*, Hyo-Bong Kim*, Deuk-Yong Koh*, Han-Kil Yeom*,
Yang-Hoon Kim*, Jong-Hak Kim**
*Korea Institute of Machinery & Materials, **WooYoung

sjpark@kimm.re.kr

Abstract - A free piston and free displacer (FPFD) Stirling cryocooler and inertance pulse tube cryocooler for the cooling infrared detector and cryosensor are currently under development at Korea Institute of Machinery & Materials. The pulse tube cryocooler, which has no moving parts at its cold section, is attractive for obtaining higher reliability, simpler construction and lower vibration than in any other small cryocoolers. In recent years, pulse tube cryocoolers have experienced a rapid development with the aim to eventually replace Stirling and Gifford-McMahon cryocoolers in various applications. In this study, operating characteristics of the conventional linear Stirling cryocooler was investigated by experiment. And, inertance pulse tube cryocooler with the commercial linear compressor(Leybold Polar) was designed, manufactured, and tested by the variations of the operating frequency, charging pressure and input power.

1. 서 론

최근에 적외선 센서 및 고온 초전도체 등의 저온센서 냉각과 관련하여 액체질소 온도(77K) 부근의 냉각장치 수요가 급증하고 있다. 특히 이동무선기지국의 초전도 필터 냉각을 위한 극저온 냉동기로서 스텔링 극저온 냉동기와 맥동관 극저온 냉동기의 개발이 국외에서 활발히 진행되고 있다. 이러한 응용분야에서 요구되는 극저온 냉동기는 (1) 냉각온도, (2) 냉동부하, (3) 신뢰성, (4) 진동레벨, (5) 온도제어성, (6) Cooldown 시간 및 입력, (7) 체적, 중량, (8) 설치 환경뿐만 아니라 특히 수명과 가격이 중요한 검토사항으로 되어 있다.

현재 스텔링 극저온 냉동기와 맥동관 극저온 냉동기의 주요 개발업체로서는 미국의 Sunpower, SCT, STI, Hughes 등과 유럽의 Leybold, Thales, AIM, Air Liquide 등과 일본의 Aisin, Sumitomo, Daikin 등이 있으며, 국내에서는 (주)우영이 한국기계연구원과 공동으로 적외선 센서 냉각용 1W급(77K) 스텔링 냉동기를 개발한 경험을 바탕으로 하여 초전도 필터 냉각용으로 6W급(65K) 스텔링 냉동기 및 맥동관 냉동기를 개발하고 있다.

초전도 필터 냉각용 극저온 냉동기의 시장은 가까운 시일 내에 형성되어 급속하게 확대될 것이고, 수량 및 시장 규모는 수천억 원이 넘을 것으로 예상되고 있다. 따라서 국내 업체 및 연구팀에 의한 개발이 지연되면 외국의 극저온 냉동기 생산업체에 국내 시장을 빼앗기게 되어 국내 경제에 막대한 피해를 입힐 것으로 판단된다.

맥동관 냉동기는 팽창부의 변위기 대신에 가스 피스톤에 의해 냉동을 발생하여 진동과 소음 문제는 물론이고, 부가적인 열손실 요소를 제거함으로써 신뢰성과 수명성과 수명이 향상되어 기존의 극저온 냉동기들을 대체하고 있다. 기본적인 맥동관 냉동기의 이론은 1963년에 Gifford에 의해 확립되었으며, 맥동관의 폐관부에 위상차여 기구로서 orifice buffer chamber의 도입으로 성능이 현저히 향상되었다. 그 후 제 2위상기구로서 가변 플러그(제 2피스톤), Double inlet 및 제 2 밸브(4밸브 방식)등이 맥동관의 고온단에 사용되어 최저도달온도 및 냉동특성이 개선되었다.

도달온도만의 변천만을 살펴보면 1963년에 처음 소개된 이후 맥동관 냉동기의 다단화로 3.6K대의 저온이 얻어졌다. 맥동관 냉동기는 저온부에 가동부가 없기 때문에 다단화 하는데 기술적인 문제가 다른 냉동기에 비해 훨씬 적은데도 기본형 이후의 진전은 1980년대까지 거의 없었다. 이것은 주로 기본형 맥동관 냉동기(Basic pulse tube refrigerator)의 기본효율이 나빴기 때문이다.

한편 1980년대 이후의 맥동관 냉동기는 구조가 기본형 맥동관 냉동기와 비슷하기 때문에 같은 명

칭이 붙었지만 냉동 발생기구는 완전히 달라져 그 효율도 스테링 사이클의 효율과 비슷하게 되었다.

최근의 개발 추세는 주로 고수명, 고효율화, 테이퍼형 맥동관 냉동기 등이다.

본 연구에서는 초전도 필터 냉각용 맥동관 극저온 냉동기의 독자 개발을 위하여 기존에 생산되는 선형압축기형 스테링 냉동기의 특성을 조사하고, 동일한 선형압축기로 inertance tube type 맥동관 냉동 장치를 구성하여 충전압력에 따른 냉동 특성을 평가하므로써 설계에 활용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 스테링 냉동기와 맥동관 냉동기

Fig. 1은 FFPD 스테링 냉동기의 개념도를 보여주고 있다. 스테링 극저온 냉동기는 압축부와 팽창부로 구성되며, 압축부는 내·외부 요크, 실린더, 피스톤, 코일, 스프링과 전류입력단자 등으로 구성되어 있으며, 팽창부는 재생기를 포함한 변위기(displacer), 변위기 실린더, 스프링, 고온부 열교환기 및 저온부 cold end 등으로 구성되어 있으며, 기본 작동과정은 시스템 압력을 높이기 위한 등온 압축과정, 작동가스를 저온부로 이동시키는 등적 과정, 저온부로부터 열을 흡수하는 등온팽창과정과 압축부로 작동가스가 이동하는 등적과정으로 이루어진다.

피스톤은 moving coil type으로 작동되는 linear motor에 의해 구동되고, 이 피스톤은 가스압력을 발생하여 스프링으로 연결된 변위기를 작동한다. 가스 스프링은 변위기와 피스톤에 의한 작동과정이 이상적인 사이클에 가깝도록 조절한다. 냉동은 팽창공간에 연결된 cold end 부근에서 발생하고, 변위기는 피스톤 사이의 공간, split tube내 공간과 변위기의 고온부 공간으로 구성된 압축공간으로부터 팽창공간 사이에 가스 유동을 발생시킨다.

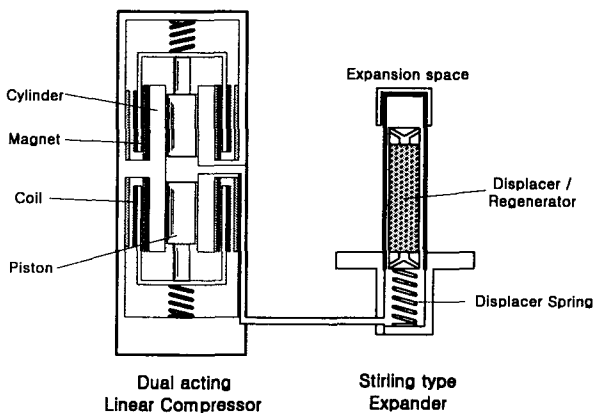


Fig. 1. Schematic diagram of the FFPD type stirling cryocooler

한편 Fig.2는 선형압축기형 inertance tube type 맥동관 냉동기의 개략도를 보여준다. 선형

압축기형 inertance tube type 맥동관 냉동기는 선형압축기, regenerator, 맥동관, gas smoother로 연결된 inertance tube와 buffer로 구성되어 있다. 오리피스 맥동관 냉동기에서 맥동관의 팽창일은 오리피스에 의해 소모된다. 그러나 inertance tube type 맥동관 냉동기에서는 맥동관의 팽창일은 inertance tube내의 가스를 진동시킨다. 이 때 inertance tube는 열음향 엔진에서 처럼 공명기(resonator) 역할을 하게 된다. 즉 정재파(standing wave)와 진행파(progressive wave) 들이 inertance tube에 의해 발생된다. 정재파는 질량과 압력파형 사이의 위상을 변화시키고, 진행파는 팽창일을 열로 변화시킨다. 정재파는 inertance tube내 가스 진동으로부터 발생되고 진행파는 inertance tube를 따른 손실로부터 발생된다.

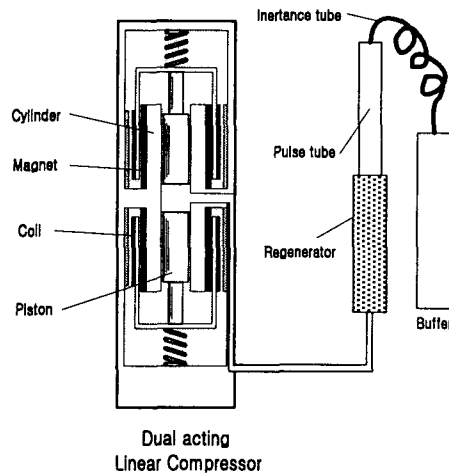


Fig. 2. Schematic diagram of the inertance tube type pulse tube cryocooler

2.2 실험장치

실험에 사용된 스테링 냉동기는 Leybold사의 Polar SC-7 COM 모델로서 팽창기 두 개가 고, 저온부측에 평행하게 연결되어 있으며, 냉동 능력은 77K에서 6W급이다.

Fig. 3은 스테링 냉동기 성능시험장치의 개략도를 보여주고 있다. 진공플랜지에 연결된 스테링 냉동기는 저온부에 온도센서와 히터(heater)를 부착하고, 저온부를 진공용기속에 넣는다. 스테링 냉동기와 조립된 진공용기는 터보분자 진공펌프를 사용하여 약 10^{-5} Torr의 진공도를 유지함으로써 대류에 의한 열손실을 방지하였다.

Dual acting 선형 압축기와 팽창부의 고온부는 방열을 위하여 각각 180W, 100W 용량의 방열핀과 팬(fan)을 부착하여 실온에 근접하도록 유지하였다.

스테링 냉동기 저온부의 온도는 silicon-diode 센서를 부착하여 측정하였고, 저온부의 순수냉동능력 측정 및 온도조절을 위하여 박막 히터(heater: 30Ω)를 저온부에 부착하고 전류를

흘러 일정온도가 유지될 때 전류 및 전압을 측정하여 냉동능력으로 환산하였다.

스터링 냉동기의 작동은 Leybold사의 Polar drive D를 이용하여 선형압축기를 구동하였다.

맥동관 냉동기 성능시험장치는 스테링 냉동기 성능시험장치를 일부 변경하여 구성하였다. 다른 점은 선형압축기를 Fujitz사의 AC power supply를 사용하여 구동하였으며, 충전압력 및 맥동관 고온부의 압력은 PCB사의 piezo type dynamic 압력 센서 및 Kyowa사의 strain gauge type 압력 센서를 사용하여 측정하였다.

또한 작동주파수와 입력전류, 전압, 온도, 압력 및 냉동능력에 관한 자료는 Labview 데이터 처리 프로그램을 이용하여 처리하므로써 신속한 결과 해석이 가능하였다.

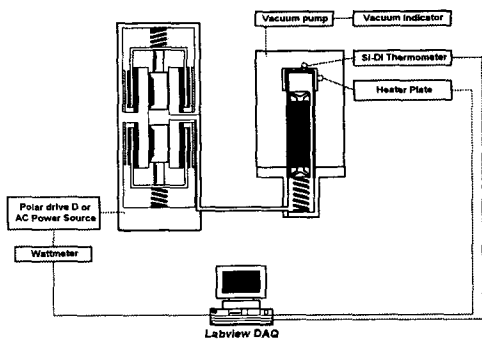


Fig. 3. Experimental apparatus of the Stirling cryocooler

2.3 실험결과 및 고찰

2.3.1 스테링 냉동기

Fig. 4는 Leybold사의 Polar drive D를 이용하여 스테링 냉동기의 설정 온도를 77K로 하였을 때, 냉각 특성과 입력전력의 변화를 보여주고 있다. 77K에 도달하는 시간은 약 8분이 소요되었으며, 설정 온도에 도달할 때까지 입력전력은 약 180W에서 250W까지 선형적으로 증가하였다. 작동주파수는 52Hz 이고, 충전압력은 약 28kg/cm²G 이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 Fig. 4의 작동과정에서 선형압축기에 공급되는 전압과 전류의 변화를 시간이 진행함에 따라 도시하였다. 최대 공급전압은 약 48V이었으며, 스테링 냉동기의 초기 작동시에는 사다리꼴 형태의 전압분포를 보여주고 있고, 저온부의 온도가 설정 온도인 77K에 도달하게 되면 전압의 진폭이 감소하면서 정현파의 전압분포를 보여주고 있다.

최대 공급전압시의 사다리꼴 전압 파형은 스테링 냉동기에서 이상적인 공급전압인 step 파형에 근접시키기 위한 것으로 판단된다. Fig. 6의 전류 파형은 최대공급 전압 파형일 때, 사다리꼴의 전압 파형과 유사한 파형을 보여주었으며, 저온부의 온도가 설정 온도인 77K에 도달하게 되면 전류의 진폭이 감소하면서 정현파의 전류 분포를 보여주었다.

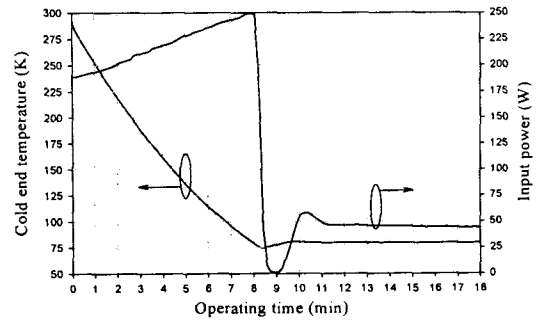


Fig. 4. Cooldown characteristics and variation of the input power(Polar Drive D)

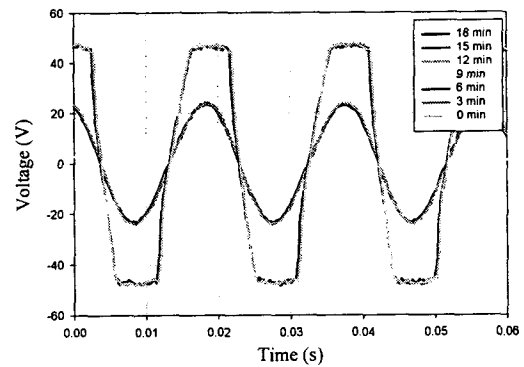


Fig. 5. Variation of the input voltage (Polar Drive D)

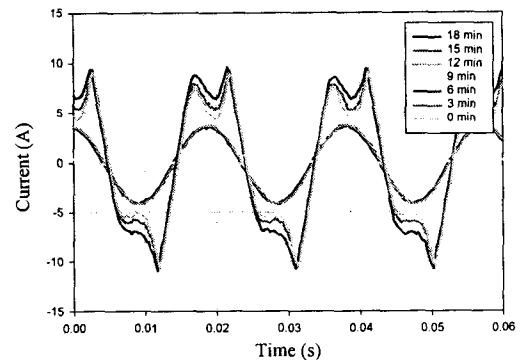


Fig. 6. Variation of the current at the linear compressor(Polar Drive D)

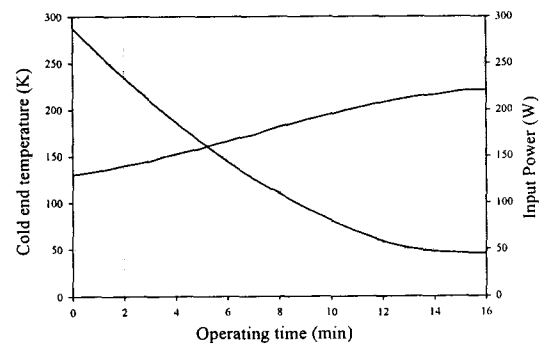


Fig. 7. Cooldown characteristics and variation of the input power (Fujitz power supply)

Fig. 7은 Fujitz AC power supply를 이용

하여 전압 진폭이 48V인 정현파, 작동주파수 52Hz로 선형압축기에 공급하였을 때의 냉각특성과 입력전력의 변화를 보여주고 있다. 77K에 도달하는 시간은 약 11분으로 사다리꼴 공급전압에 비해 약 3분 더 소요되며, 최대 공급전력은 약 220W로서 250W의 사다리꼴 공급전력에 비하여 낮게 공급되었다.

Fig. 8은 Fig. 7의 작동조건에서 입력전압과 입력전류의 변화를 보여주고 있다. 온도가 낮아짐에 따라 냉동기 시스템 전체의 압력이 낮아지고, 또한 피스톤 양단 사이의 압력차가 감소하여 시스템 공급전압에서 피스톤 속도에 의한 전압이 낮아져 코일에 흐르는 전류는 증가하게 되고, 전압과 전류의 위상차가 감소하게 된다.

Fig. 9는 공급전압의 파형에 따른 % Carnot COP를 비교한 그림이다. 사다리꼴의 전압 파형이 정현파의 전압 파형보다 % Carnot COP가 높게 나타났다.

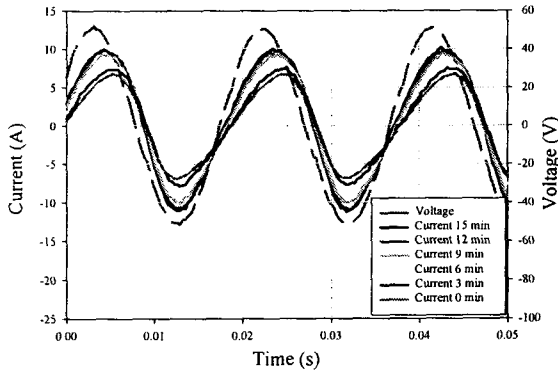


Fig. 8. Variation of the input voltage and current(Fujitz power supply)

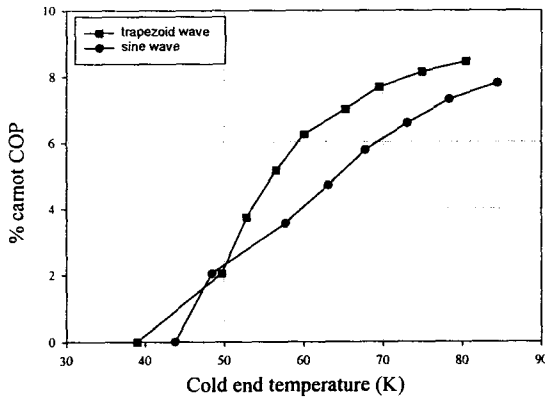


Fig. 9. Percent Carnot COP in the trapezoid and sine wave input voltage

2.3.2 맥동관 냉동기

Fig. 10은 inertance 맥동관 냉동기의 충전압력(20kg/cm²G, 26kg/cm²G, 32kg/cm²G)에 따른 냉각특성의 변화를 보여주고 있다. 작동주파수는 35Hz이며, 재생기는 SUS mesh (#400)으로 길이 70mm, 외경 25.4mm이다.

또한 맥동관의 크기는 12.7mm(dia.) × 80mm(length)이며, inertance tube의 크기는 1.8mm(dia.)×1.9m(length)이고, buffer의 체적은 0.3liter이다. Cooldown 시간과 최저도달온도는 충전압력이 높을수록 빠르고, 낮았다.

Fig. 11은 cold end부의 온도에 따른 공진주파수의 변화를 보여주고 있다.

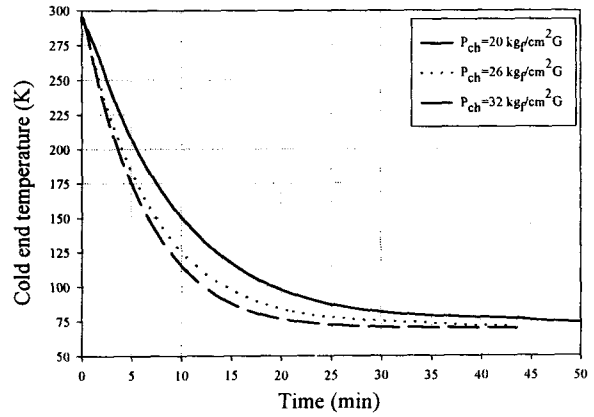


Fig. 10. Cooldown characteristics of the inertance pulse tube cryocooler(35Hz)

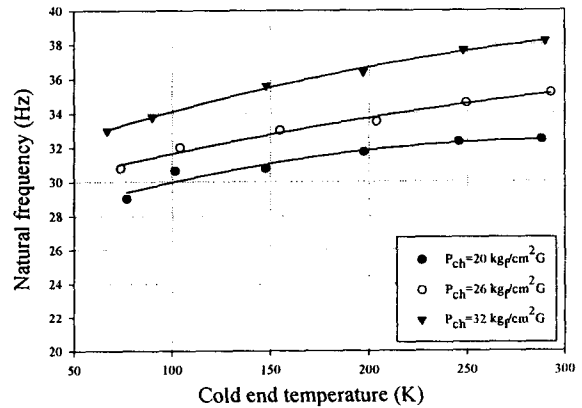


Fig. 11. Resonant frequency of the pulse tube cryocooler with cold end temperature

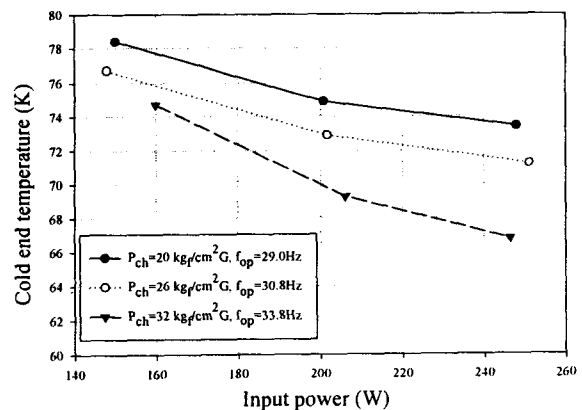


Fig. 12. No load temperature of the cold end with the input power

cold end부의 온도와 충전압력이 높아짐에 따라 공진주파수는 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 입력전력에 따른 cold end부의 최저도달온도의 변화를 보여주고 있다. 각 충전압력에서의 작동주파수는 최저도달온도에서의 공진주파수로 하였다. cold end부의 최저도달온도는 입력전력과 충전압력이 증가할수록 낮다는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

초전도 필터 냉각용 맥동관 극저온 냉동기의 독자 개발을 위하여 기존에 생산되는 선형압축기형 스테링 냉동기의 특성을 조사하고, 동일한 선형압축기로 inertance tube type 맥동관 냉동장치를 구성하여 냉동특성에 관한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 선형압축기형 스테링 냉동기에서 공급전압의 파형에 따른 % Carnot COP를 비교한 결과 사다리꼴의 전압 파형이 정현파의 전압 파형보다 % Carnot COP가 높게 나타났다.

(2) 선형압축기형 inertance 맥동관 냉동기는 충전압력이 높을수록 cooldown 시간은 빠르고, 최저도달온도는 낮았다.

(3) 선형압축기형 inertance 맥동관 냉동기의 공진주파수는 cold end부의 온도와 충전압력이 높아짐에 따라 증가한다는 것을 알 수 있었다.

(4) Cold end부의 최저도달온도는 입력전력과 충전압력이 증가할수록 낮다는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 1999년도 민군겸용기술개발사업(99-DU-04-A-02)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박성제 외, "Linear Compressor 스테링 냉동기 설계에 관한 연구", 2000년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 81-84, 2000
- [2] 고득용 외, "센서 냉각용 소형 스테링 냉동기 개발 동향", 초전도와 저온공학, 제2권 제2호 pp.11-18, 2000
- [3] 김효봉 외, "작동주파수와 연결관 길이 변화가 스테링 냉동기의 성능에 미치는 영향", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 55-61, 2001
- [4] 박성제 외, "충전압력 및 작동주파수 특성 연구에 의한 스테링 냉동기 개발", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 62-68, 2001
- [5] 박성제 외, "선형압축기형 스테링 극저온 냉동기의 설계, 제작에 관한 연구", 대한설비공학회 하계학술발표회 논문집, pp. 234 - 238, 2001
- [6] 홍용주, 박성제, 김효봉, 고득용, 김종학, 유병진, "스테링냉동기의 선형압축기 운전특성에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 49-54, 2001
- [7] A.K. De Jonge, "A Small Free-Piston Stirling Refrigerator", American Chemical Society, pp.1136-1141, 1979
- [8] Zhu, S.W., et al., "Phase shift effect of the Long Neck Tube for the Pluse Tube Refrigerator", Cryocoolers 9, NewYork, p. 269, 1997
- [9] Seitoku, Y., et. al., "소형 냉동기의 이동체 통신에의 응용", 일본 저온공학, Vol. 31, No. 12, p.636.
- [10] Martin, J.L., Corey, J.A., Martin, C.M., "A pulse Tube cryocooler for Telecommunications Applications", Cryocooler 10, 1998