

초저온 스텔링 냉동기 성능실험 Performance Test of Stirling Cooler for Ultra-Low Temperature Application

고준석*† · 박지호** · 김효봉*** · 김종우**** · 추상윤***** · 염한길* ·
홍용주* · 인세환* · 박성제*
Junseok Ko*† , Jiho Park** , Hyobong Kim*** , Jongwoo Kim**** ,
Sangyoon Choo***** , Hankil Yeom* , Yong-Ju Hong* ,
Sehwan In* and Seong-Je Park*

(Received 29 November 2021, Revision received 13 December 2021, Accepted 13 December 2021)

Abstract : This paper describes a performance test of Stirling cooler developed for ultra-low temperature application. A Stirling cooler has advantages of low GWP refrigerant, high efficiency and wide operating range compared with conventional ultra low temperature refrigerator. In this research, the Stirling cooler driven by a linear compressor is developed and the cooling performance test is performed at -100°C and -150°C. In cooling performance test, the input voltage is adjusted in the range from 150 to 210 Vrms. With the measured data, it is investigated the dynamic behavior and cooling performance of the developed Stirling cooler. The developed cooler shows 362 W of cooling capacity and 0.480 of COP at -100°C. At -150°C of the cold-end temperature, the cooling capacity and COP are 159 W and 0.186, respectively.

Key Words : Ultra low temperature freezer, Cryo etching, Stirling cooler, Linear compressor, Regenerator

*† 고준석(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1401-7973) :
책임연구원, 한국기계연구원 에너지기계연구본부
E-mail : jsko@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7391
**박지호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5494-9049) :
선임연구원, 한국기계연구원 에너지기계연구본부
***김효봉(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7098-0364) :
책임기술원, 한국기계연구원 에너지기계연구본부
****김종우(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9754-2775) :
기술원, 한국기계연구원 에너지기계연구본부
*****추상윤(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4387-9652) :
선임기술원, 한국기계연구원 에너지기계연구본부
*염한길(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2547-0976),
홍용주(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3215-4202),
인세환(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2341-8509),
박성제(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6903-3853) :
책임연구원, 한국기계연구원 에너지기계연구본부

*† Junseok Ko(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1401-7973)
: Principal Researcher, Energy Systems Research Division, Korea
Institute of Machinery & Materials.
E-mail : jsko@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7391
**Jiho Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5494-9049) :
Senior Researcher, Energy Systems Research Division, Korea
Institute of Machinery & Materials.
***Hyobong Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7098-0364)
: Principal Engineer, Energy Systems Research Division, Korea
Institute of Machinery & Materials.
****Jongwoo Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9754-2775):
Engineer, Energy Systems Research Division, Korea Institute of
Machinery & Materials.
*****Sangyoon Choo(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4387-9652)
: Senior Engineer, Energy Systems Research Division, Korea
Institute of Machinery & Materials.
*Hankil Yeom(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2547-0976),
Yong-Ju Hong(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3215-4202),
Sehwan In(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2341-8509),
Seong-Je Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6903-3853) :
Principal Researcher, Energy Systems Research Division, Korea
Institute of Machinery & Materials.

1. 서 론

최근 COVID-19의 전 세계적인 확산이 지속됨에 따라 감염병에 대한 인류의 공포 지수가 매우 높아지고 있다. 이를 대응해가 위하여 백신 및 치료제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 화이자 백신의 경우 -70°C 이하의 온도에서 유통 및 보관이 요구되는 초저온 콜드체인이 널리 알려지는 계기가 되었다. 감염병 사태 뿐만 아니라 사회가 발전할수록 인간의 삶의 질 향상에 대한 욕구가 커지면서 다양한 질병 치료와 건강한 삶을 위한 다양한 형태의 바이오 연구가 진행 중에 있다. 바이오 연구를 위해서는 DNA, RNA, 단백질, 바이러스, 효소, 혈액 등의 바이오 시료를 안정적으로 보관하기 위한 초저온 냉동고가 필수 장비이다.¹⁻²⁾ 반도체 산업 분야에서도 초고집적화, 고정밀화 추세에 따라 초저온 냉각에 대한 기술 수요가 증가하고 있다. 반도체 식각 장비의 경우 고종횡비 제조 공정을 적용하기 위해 정전척을 초저온으로 냉각하는 공정 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.³⁻⁵⁾

바이오와 반도체 분야에서 초저온 냉각 기술에 대한 수요가 증가하고 있으며, 지금까지는 주로 증기-압축 냉각 사이클에 기반하는 이원 냉동기(Cascade refrigerator) 혹은 혼합냉매 냉동기(MR refrigerator) 방식의 초저온 냉각기가 개발되어 왔다. 증기-압축 냉각 방식은 냉매의 증발 잠열로 냉각 효과를 얻기 때문에 냉매에 따른 작동온도의 제한이 있을 수 있고, 윤활유를 사용하는 냉매용 압축기를 사용하기 때문에 오일 입자의 응고에 의한 시스템 고장의 위험이 높다.

스테링 냉동기는 -150°C 이하의 극저온 냉각을 위해 주로 개발되어 왔으며, 센서 냉각을 위한 수 W급의 냉동기부터 가스 액화/재액화 및 초전도 시스템 냉각을 위한 수 kW급의 다양한 형태의 냉동기로 개발되었다. 스테링 냉동기는 등온압축, 등적냉각, 등온팽창, 등적가열의 열역학 과정으로 구성되는 스테링 사이클(Stirling cycle)로 작동하며, 이론적으로 이상적인 열역학 사이클인 카르노 사이클과 동등한 효율을 갖는다. 두 개의 피스톤

의 왕복운동에 의해 압력변동이 발생하는 압축, 팽창 공간이 존재하고 두 공간 사이에는 기체의 가열과 냉각이 주기적으로 반복되는 재생물질이 배치되는 구조를 갖는다.

스테링 냉동기는 기체의 팽창에 의한 냉각효과를 이용하기 때문에 극저온 냉동기 작동온도에서도 기체 상태를 유지할 수 있는 헬륨을 작동기체로 이용한다. 헬륨은 지구 온난화 지수(GWP: Global Warming Potential)이 0인 냉매로 최근 GWP가 낮은 냉매를 적극적으로 적용 냉동기 개발 추세에도 부합한다. 또한 냉매의 증발온도에 의해 작동온도가 결정되는 증기-압축 냉동기와 달리 스테링 냉동기는 상온부터 최저도달온도 범위의 전 구간에서 냉각이 가능하며, 압축기 운전 변수 조절을 통한 용량제어가 용이한 장점이 있다.⁶⁻⁸⁾ Janssen and Beks(2002)는 일반 가정용 냉동고에 적용을 목적으로 하는 스테링 냉동기를 $-60\sim-10^{\circ}\text{C}$ 저온부 온도에서 성능실험을 수행하였으며, 본 연구에서는 -100°C 이하의 초저온 온도에서 100 W 이상의 냉동능력을 갖는 스테링 냉동기 개발 연구를 수행한다. Kim et al.(2020)은 초저온 냉동고용 스테링 냉동기의 개발 과정에서 재생물질의 영향을 연구한 내용을 발표하였으며, 본 연구에서는 이를 반영하여 개발된 스테링 냉동기의 -100 , -150°C 에서 냉각성능 실험 결과를 발표한다. 본 논문에서는 한국기계연구원에서 개발한 초저온 스테링 냉동기를 작동온도 -100°C 와 -150°C 에서 냉각성능 시험을 수행하며, 작동온도와 입력이 스테링 냉동기의 동특성과 냉각성능에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 냉동기 및 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 개발된 스테링 냉동기의 모습이다. 스테링 냉동기는 압축기, 열교환기, 오일 분리기, 기액 분리기 등 여러 가지 냉동기용 부품들이 배관으로 연결되어 하나의 시스템을 구성하는 증기-압축 방식의 냉동기와 달리 압축기, 열교환기, 팽창기구 등 냉각 사이클 생성을 위한 모든 구성품이 사진과 같이 하나의 유닛으로 제

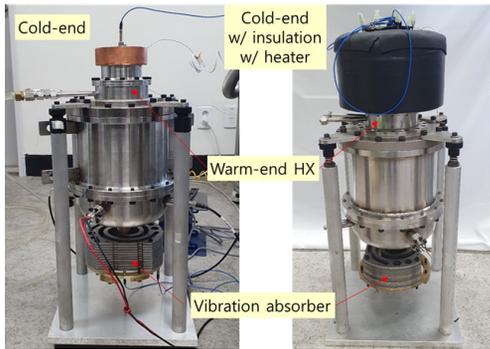


Fig. 1 Photo of developed Stirling cooler

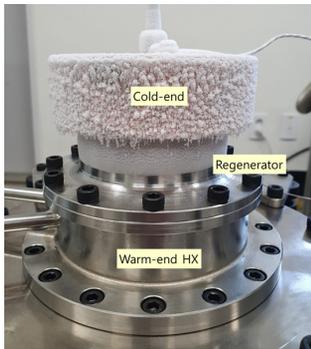


Fig. 2 Frost formation at cold-end of Stirling cooler during operation

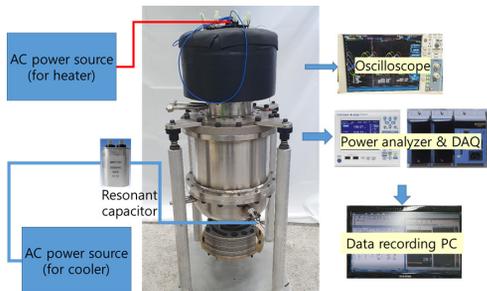


Fig. 3 Experimental setup for cooling performance test of Stirling cooler

작된다. 냉각온도 -100°C 와 -150°C 에서 냉각성능 측정을 위하여 저온부는 그림과 같이 약 50 mm 두께의 단열재를 사용하였다. 저온부에서 흡수한 열과 압축 과정에서 발생하는 압축열을 제거하기 위하여 수냉식 고온부 열교환기가 적용되었고, 내부 피스톤 및 변위기의 왕복 운동에 의해 발생하

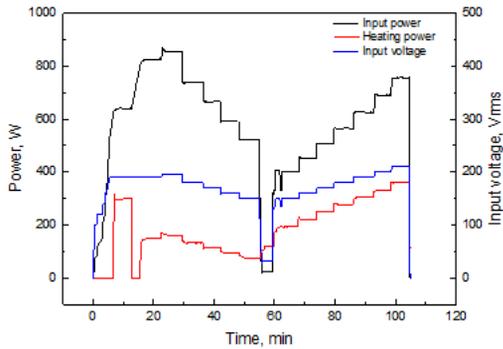
는 진동을 억제하기 위하여 동흡진기(Vibration absorber)가 하단에 설치된다.

Fig. 2는 단열재를 둘러싸기 전 저온부가 대기에 노출된 상태에서 냉동기를 구동하여 저온부에 성애가 생성된 사진이다. 단열재 없이 -100°C 까지 냉각된 상태에서 촬영된 사진으로 저온부(Cold-end)에 더 많은 성애가 생성되고 고온부(Warm-end)에는 성애가 없는 것을 확인할 수 있다. 또한 재생기(Regenerator) 부분은 아래로 내려올수록 성애가 점점 없어지는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 개발된 스텔링 냉동기는 재생기의 길이가 40 mm로 이 구간에서 상온과 -100°C 저온의 온도구배가 형성되는 것을 시각적으로 보여 주는 사진이다.

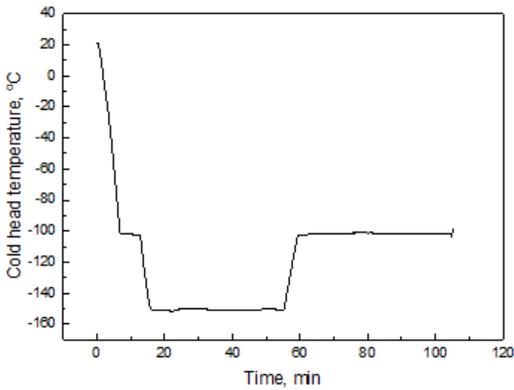
Fig. 3은 스텔링 냉동기의 냉각성능 및 동특성을 측정하기 위한 실험장치 구성을 보여 준다. 스텔링 냉동기 구동을 위한 전력은 교류전원 공급기(EC1000SA, NF)에 의해 공급되며, 교류전원 공급기와 냉동기 사이에는 역률보상을 위한 커패시터가 연결된다. 저온부 헤드에는 열부하를 인가하기 위한 전기히터가 설치되며, 별도의 교류전원 공급기(EC1000SA, NF)로 히터에 전력을 공급한다. 스텔링 냉동기 운전 중 공급 전원의 전압, 전류, 피스톤과 변위기의 가속도, 팽창공간의 동압력 등의 파형은 오실로스코프(DLM4000, Yokogawa)에 기록된다. 피스톤과 변위기의 변위는 가속도 센서(353B15, PCB)로부터 측정되는 가속도 파형 측정 데이터로부터 도출된다. 동압력 센서는 112B05(PCB) 모델이 사용된다. 저온부 헤드의 온도는 -100°C 에서 $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ 의 정밀도를 갖는 RTD 센서(RTD-830, Class A, Omega)로 측정되어 데이터로거(MX100, Yokogawa)에 기록된다. 냉동기 소비전력과 열부하 인가를 위한 히터 투입 전력은 전력계(WT500, Yokogawa)로 측정한다.

3. 실험 결과 및 토의

개발된 스텔링 냉동기는 내부에 2.5 MPa의 압력으로 헬륨이 충전되며, 60 Hz의 작동주파수를 갖는다. 냉각성능실험은 무부하 조건에서 Fig. 4(a)



(a) input power, heater power and input voltage

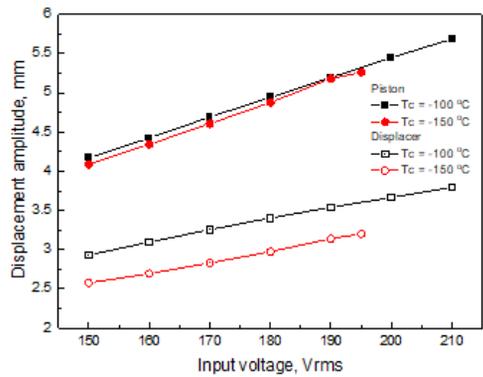


(b) cold-end temperature

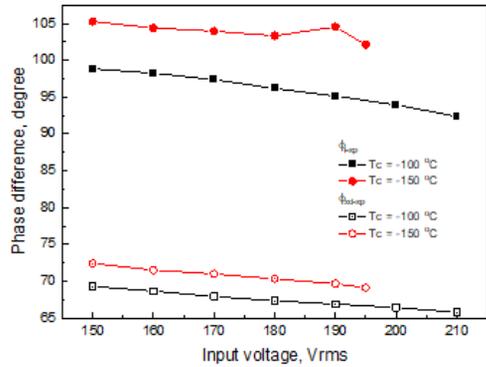
Fig. 4 Experimental measurement of Stirling cooler

와 같이 입력 전압을 천천히 상승시키면서 저온부 헤드 온도 목표 온도에 도달하도록 하며, 목표 온도에 도달하면 저온부 온도를 일정하게 유지하도록 전기히터에 전력을 투입한다. 이 때 투입된 히터 전열량이 냉동기의 냉동능력이다. 냉각성능 측정은 -150°C 와 -100°C 순서로 진행되었으며, 각각의 온도에서 60 Hz 교류전원의 전압 조절 범위는 150~195 Vrms, 150~210 Vrms이다. Fig. 4(b)는 저온부의 온도변화를 보여 준다. 무부하 조건에서 상온부터 -100°C 까지 냉각되는 데는 약 7분이 소요되어 스테링 냉동기의 빠른 초기냉각 특성을 확인할 수 있다. 두 가지 작동온도 조건에서 입력 전압을 변화시키며 저온부 온도를 일정하게 유지되는 정상상태에서 파형 측정이 이루어졌다.

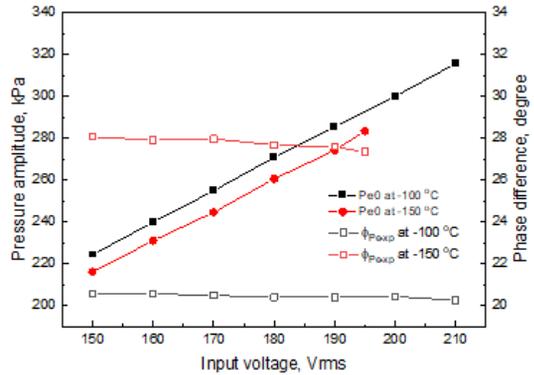
Fig. 5(a)는 피스톤과 변위기의 진폭 변화를 보여 준다. 입력전압이 증가할수록 피스톤과 변위기



(a) displace amplitude of piston and displacer



(b) phase difference of piston and displacer



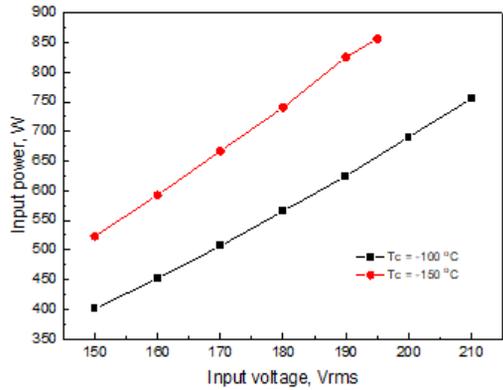
(c) pressure at expansion space

Fig. 5 Experimental results of measured waveforms in operation of Stirling cooler

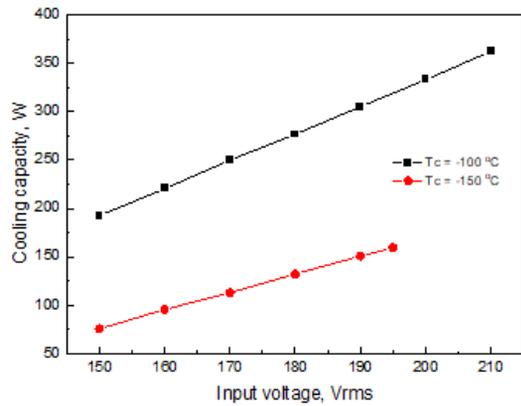
의 진폭도 증가하는데, 피스톤 변위는 작동온도에 영향을 받지 않는 반면에 변위기의 변위는 -150°C 에서 더 작은 진폭이 형성된다. 저온부 온도가 낮

을수록 저온부 기체의 밀도가 증가하기 때문에 팽창 PV일이 적게 전달되는 것을 의미한다. 스테링 냉동기는 상온부터 무부하 최저도달온도까지 전 구간에서 운전이 가능하나, 저온부 온도가 높을수록 작은 입력에도 변위기의 진폭이 크게 형성된다. 때문에, 스테링 냉동기는 상온에서 운전을 시작할 때에는 입력 전압을 서서히 증가시키는 운전 로직이 요구된다. Fig. 5(b)는 입력 전류와 피스톤 변위 사이(ϕ_{i-xp}), 변위기와 피스톤 사이의 위상차(ϕ_{xd-xp}) 변화를 보여 준다. 스테링 냉동기는 전류와 피스톤 변위 사이의 위상차는 90°인 공진 조건에서 $\pm 15^\circ$ 범위에서 운전되도록 설계되며 측정결과는 개발된 냉동기가 정상 범위에서 설계변수가 선정되었음을 보여 준다. 입력전압이 증가할수록 ϕ_{i-xp} 는 점점 감소하여 공진 조건에 가까워지는 것을 확인할 수 있으며, -150°C 실험에서는 -100°C의 결과보다는 공진 조건에서 더 떨어진 영역에서 운전된다. 이는 Fig. 5(c)의 그래프에서 나타나듯이 낮은 온도에서 더 작은 압력진폭이 형성되고 압력과 피스톤 변위 사이의 위상차(ϕ_{Pe-xp})가 더 크게 형성되기 때문이다. 압축 공간에서 압력파형에 의해 작용하는 가스힘은 피스톤이 진동운동을 하는 데 있어서 스프링 효과와 감쇠효과로 작용하는데 스프링 효과의 감소를 유발하기 때문이다. 변위기와 피스톤 변위의 위상차(ϕ_{xd-xp})는 일반적으로 스테링 냉동기의 설계 범위인 60 ~ 80° 범위에서 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 입력전압이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다.

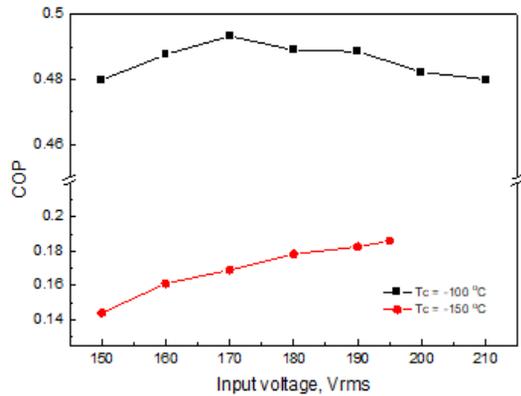
스테링 냉동기의 입력전력, 냉동능력, 효율 결과는 Fig. 6에 정리하였다. 동일한 입력전압에 대해서 저온부 온도가 낮은 조건에서 더 큰 입력전력이 공급되는 것을 확인할 수 있다. 스테링 냉동기 초기 냉각 과정에서 전압을 일정하게 유지하더라도 저온부 온도가 낮아질수록 전류와 전력이 증가하는 것과 같은 현상이다. Fig. 6(b)는 냉동능력 측정 결과이다. 입력전압이 증가할수록 냉동능력 또한 선형적으로 증가한다. 저온부 온도 -100°C와 -150°C에서 최대 냉동능력 기준 50 ~ 100%



(a) input power



(b) cooling capacity



(c) COP

Fig. 6 Experimental results of input power, cooling capacity and efficiency

범위에서 입력전압의 조절만으로 용량 조절이 가능함을 보여 주는 결과이다. 측정된 입력전력과

냉동능력으로부터 냉동기의 COP를 계산한 결과는 Fig. 6(c)에 나타내었다. 저온부 온도 -100°C 조건에서는 0.48 ~ 0.493 범위로 큰 변화는 없고 170 Vrms 입력전압에서 최대 COP를 보여 주었다. 저온부 온도 -150°C 에서는 입력전압이 증가할수록 COP도 증가하며 -100°C 결과에 비해 상대적으로 더 큰 변화폭을 보여 준다. 저온부 -150°C 실험에서도 입력전압을 더 증가시키면 최대 COP 조건이 나타날 것으로 예상되지만, 개발된 스테링 냉동기에 적용된 선형모터의 전류 입력 제한 조건에 근접하여 195 Vrms까지만 실험을 수행하였으며, 측정된 COP는 0.144~0.186이다. 카르노 효율로 표현하면 저온부 온도 -100°C 와 -150°C 에서 각각 35.9~36.7%, 20.8~26.9%로 환산된다. 낮은 작동온도에서 열손실 증가로 인한 카르노 효율 저하로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 최근 초저온 기술에 대한 수요가 증가하고 있는 바이오와 반도체 제조공정에서 적용이 가능한 초저온 스테링 냉동기를 개발하여 저온부 온도 -100°C 와 -150°C 에서 냉각성능 시험을 수행하였다. 냉각성능시험에서는 냉동기 내부의 동특성과 입력전력, 냉동능력 및 효율의 냉각성능 특성을 측정하는 실험을 수행하였다.

스테링 냉동기의 동특성 측정 결과, 입력전압에 대한 피스톤 변위 진폭은 작동온도에 영향을 받지 않으나, 압력진폭 및 위상차들은 작동온도 변화에 따른 저온부 기체 밀도 변화로 인한 영향을 받는 것으로 나타났다. 스테링 냉동기의 설계에서 설계 변수 선정에 참고할 수 있는 결과이다.

작동온도가 낮을수록 동일한 입력전압에서 소비전력이 증가하는 것이 확인되었으며, 냉동능력은 입력전압에 비례하여 증가하였다. 저온부 온도 -100°C 에서 냉동능력과 냉동기 효율(COP)은 각각 192~362 W, 0.48~0.493이었으며, -150°C 에서는 75~159 W, 0.144~0.186의 성능 결과를 보였다.

본 논문은 초저온 냉각 시스템에 적용될 수 있는 수 백 W급 냉동능력을 갖는 스테링 냉동기 성

능의 현재 개발 수준을 보여 주는 데 의의가 있다.

후 기

본 연구는 에너지기술개발사업-산업기술혁신사업과 한국기계연구원 기본사업의 지원으로 수행되었습니다.

Author contributions

J. Ko; Writing original draft, J. Park; Investigation, H. Kim; Investigation, J. Kim; Investigation, S. Choo; Investigation, H. Yeon; Validation, Y. J. Hong; Validation, S. In; Validation, S. J. Park; Project administration.

References

1. W. B. White, 2011, "Sustainable High Technology Cooling Systems are Meeting the Need for Energy-Efficient Ultra Low Refrigeration", International Pharmaceutical Industry, Vol. 4, Issue 4, pp. 104-106.
2. D. M. Berchowitz and Y. Kwon, 2012, "Environmental Profiles of Stirling-Cooled and Cascade-Cooled Ultra-Low Temperature Freezers", Sustainability, Vol. 4, pp. 2838-2851. (DOI:10.3390/su4112838)
3. A. Rezvanov, et al., 2017, "Cryogenic etching of porous low-k dielectrics in CF₃Br and CF₄ plasmas", Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol. 35, 021204. (DOI:10.1116/1.4975646)
4. M. W. Pruessner, et al., 2007, "Cryogenic etch process development for profile control of high aspect-ratio submicron silicon trenches", Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol. 25, 21. (DOI:10.1116/1.2402151)
5. R. Dussart, et al., 2014, "Plasma cryogenic etching of silicon: from the early days to today's

- advanced technologies", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 47, No. 12, 123001. (DOI:10.1088/0022-3727/47/12/123001)
6. M. Janssen and P. Beks, 2002, "Measurement and Application of Performance Characteristics of a Free Piston Stirling Cooler", *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Paper 539.
7. M. B. Ibrahim and Jr. R. C. Tew, 2011, "Stirling Converter Regenerators", Boca Raton, pp. 51-52.
8. H. Kim, et al., 2020, "Development of Stirling Cooler for Ultra Low Temperature Freezer", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 67-74. (DOI:10.9726/kspse.2020.24.6.067)