

# 대용량 초저온 스텔링 냉동기 냉각 성능실험 Cooling Performance Test of High Capacity Stirling Cooler for Ultra-Low Temperature Application

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

(Received 15 September 2022, Revision received 18 October 2022, Accepted 18 October 2022)

**Abstract** : This paper describes cooling performance test of a high capacity ultra-low temperature stirling cooler for semiconductor manufacturing process. A stirling cooler has the better efficiency and reliability compare with a conventional vapor-compression refrigerator at ultra low temperature around -100°C. Moreover, it uses helium gas as a refrigerant, of which GWP is zero. In this study, a gamma-type stirling cooler driven by a double-acting linear compressor is developed and tested. From experiments, the developed stirling cooler reaches from room temperature to -100°C within 10 minutes. The cooling capacity and electric input power are measured for a wide range of input voltages, and it shows 0.39 to 1.75 kW of cooling capacity and 0.282 to 0.358 of COP at -100°C of cold-end temperature.

**Key Words** : Ultra low temperature, Stirling cooler, Deep etching, Semiconductor, Linear compressor coefficients

<sup>†</sup> 고준석(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1401-7973) :  
책임연구원, 한국기계연구원 고효율에너지기계연구부  
E-mail : jsko@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7391  
\*박지호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5494-9049) :  
선임연구원, 한국기계연구원 고효율에너지기계연구부  
\*\*김효봉(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7098-0364) :  
책임기술원, 한국기계연구원 고효율에너지기계연구부  
\*\*\*김종우(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9754-2775) :  
기술원, 한국기계연구원 고효율에너지기계연구부  
\*\*\*\*추상윤(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4387-9652) :  
선임기술원, 한국기계연구원 고효율에너지기계연구부  
엄한길(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 고효율에너지기계연구부

<sup>†</sup> Junseok Ko(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1401-7973) :  
Principal Researcher, Innovative Energy Machinery 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, Innovative Energy Machinery Research Division,  
Korea Institute of Machinery & Materials.  
\*\*Hyobong Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7098-0364)  
: Principal Engineer, Innovative Energy Machinery Research  
Division, Korea Institute of Machinery & Materials.  
\*\*\*Jongwoo Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9754-2775)  
: Engineer, Innovative Energy Machinery Research Division,  
Korea Institute of Machinery & Materials.  
\*\*\*\*Sangyoon Choo(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4387-9652)  
: Senior Engineer, Innovative Energy Machinery 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, Innovative Energy Machinery Research  
Division, Korea Institute of Machinery & Materials.

## 1. 서 론

반도체 초고집적화 및 고정밀화 제조 공정을 위해 대용량 초저온 냉각기술에 대한 기술 수요가 증가하고 있다. 반도체 식각 장비에서 고 종횡비(High aspect ratio)를 얻기 위해서는 식각 공정시 발생하는 열을 신속히 제거하기 위해 초저온 냉각기술이 요구된다.<sup>1,2)</sup> 또한 공정에서 발생하는 부생가스 혹은 수분을 제거하기 위한 콜드트랩 장치에도 초저온 냉각기술은 필수이다.

현재까지 반도체 제조공정에서 초저온 냉각기술은 증기-압축 냉각 방식을 기반으로 하는 혼합냉매 혹은 이원 냉동기가 개발되어 적용되어 왔다. 최근에는 냉각온도  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서 약 2 kW의 냉동능력을 보이는 혼합냉매 냉동기를 개발한 연구가 발표된 바 있다.<sup>3,4)</sup>

본 연구는 기존의 증기-압축 방식이 초저온 냉각을 위한 스테링 냉동기 개발 및 냉각성능시험에 관한 연구이다. 스테링 냉동기는 압축공간과 팽창공간에 배치되는 두 개의 피스톤이 주기적으로 왕복 운동을 하고, 그 사이에는 재생 열교환기가 배치되는 구조를 갖는다.<sup>5-6)</sup> 스테링 냉동기는 기체의 팽창에 의한 냉각효과를 이용하기 때문에 냉각온도에서도 기체 상태가 유지되어야 하며, 일반적으로 헬륨이 냉매로 사용된다. 헬륨은 지구온난화 지수(GWP: Global Warming Potential)가 0인 기체로 최근 냉매 규제가 강화되는 추세에도 부합하는 냉매이다. 스테링 냉동기를 초저온 영역에 적용하기 위한 목적으로 냉각온도  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서 200 ~ 350 W의 냉동능력을 갖는 초저온 스테링 냉동기에 대한 연구가 발표된 바 있다.<sup>7)</sup>

반도체 제조공정을 포함한 산업 영역에 적용하기 위해서는 대용량 냉동기가 요구되며, 본 연구에서는  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서 kW급 냉동능력을 갖는 냉동기의 냉각성능 실험 결과를 발표하고자 한다.

## 2. 스테링 냉동기 및 성능시험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 개발된 대용량 초저온 스테링 냉동기이다. 기존의 증기-압축 방식 냉동기

는 압축기, 열교환기, 팽창기구, 기액 분리기, 밸브 등의 부품이 배관으로 연결되는 구조인 반면에, 스테링 냉동기는 압축기, 열교환기, 팽창기가 하나의 유닛으로 구성되는 특징이 있다. 개발된 스테링 냉동기는 두 개의 피스톤이 서로 반대방향으로 왕복운동을 하는 선형압축기로 구동되며, 냉동기 고온부 열교환기와 선형 모터 외부에 설치된 열교환기에 냉각수를 공급하여 냉각사이클에서 발생하는 열을 제거하는 구조를 갖는다. 기

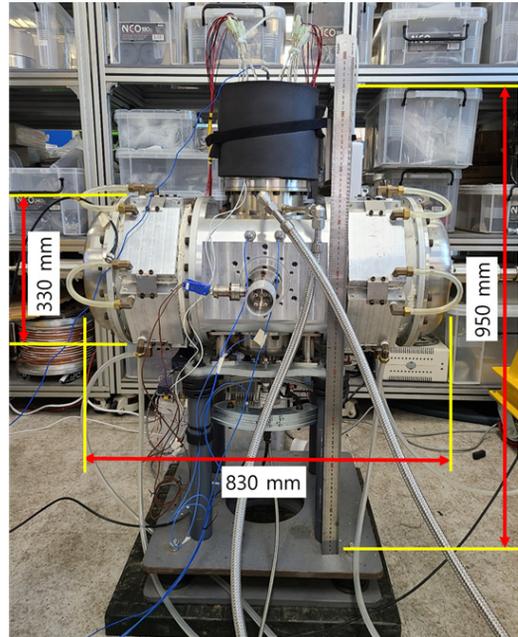


Fig. 1 Photo of developed Stirling cooler

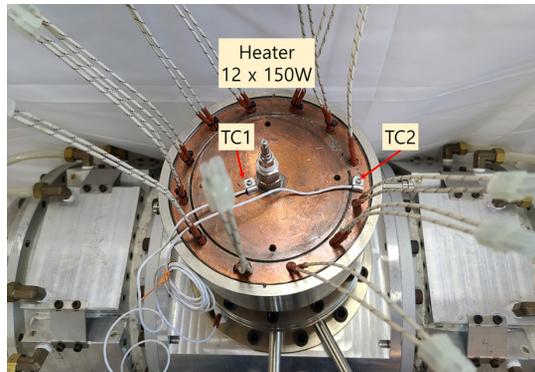


Fig. 2 Installation of temperature sensor and heaters

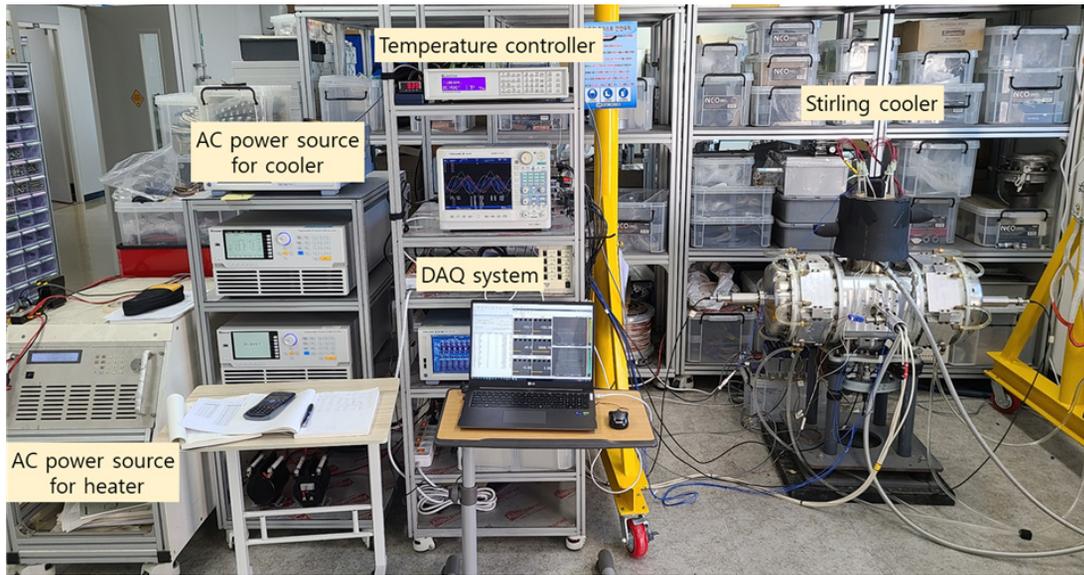


Fig. 3 Photo of experimental apparatus

존 증기-압축 방식 냉동기와 달리 냉각 사이클 구현을 위한 모든 부품이 한 유닛으로 조립되어 그림과 같이 제작된 스테링 냉동기의 크기는 폭, 깊이, 높이가 모두 1 m 이내이다.

Fig. 2는 스테링 냉동기 저온부 헤드에 설치된 온도센서와 히터의 위치를 보여준다. 실험에서는  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서  $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ 의 정밀도를 갖는 RTD 센서(RTD-830, Class A, Omega) 두 개를 저온부 헤드의 중심위치(TC1)와 가장자리(TC2) 위치 표면에 설치한다. 중심 위치의 TC1 센서는 내부 작동 기체의 온도에 근접하는 값을 나타내며, 냉각부하에 따른 저온부 헤드의 온도 편차를 확인하기 위하여 TC2 센서를 설치한다. 스테링 냉동기의 냉동능력 측정을 위한 열부하를 인가하기 위하여 240 V, 150 W 용량의 카트리지 히터 12개가 사용된다. 따라서, 냉동능력 측정 시험에서 인가할 수 있는 열부하는 최대 1,800 W이다.

Fig. 3은 구성된 냉각성능 시험 장치의 모습이 다. 스테링 냉동기는 단상 교류 전원으로 구동되며, 이를 위하여 교류전원 공급기(61609, Chroma)가 사용된다. 한 대의 교류전원 공급기의 용량이 6 kVA로 제한된 이유로 본 연구에서는 동일한 모델 두 대를 병렬 연결하여 구성한다.

저온부 헤드에 설치되는 히터로의 전력은 교류 전원 공급기(61605, Chroma)로 공급되며, 공급되는 전력량은 극저온 온도제어기(340, Lakeshore)의 제어신호에 의해 조절된다. 온도제어기는 TC2 온도를 측정하여 설정값  $-100^{\circ}\text{C}$ 로 유지되도록 PID 제어를 통해 출력 신호를 발생한다. 스테링 냉동기와 히터로 투입되는 전력은 전력 분석기(WT1800, Yokogawa)로 측정하며, 냉각 시험 중 저온부 헤드 온도는 데이터 수집장치(MX100, Yokogawa)에 기록된다.

스테링 냉동기에 단상 교류전류가 인가되면 두 개의 피스톤이 서로 반대되는 방향으로 왕복운동을 하며 맥동압력이 형성되고, 이로 인해 변위기 또한 왕복운동이 일어난다. 개발된 스테링 냉동기의 작동주파수는 45 Hz로 피스톤과 변위기 또한 동일한 주파수로 왕복운동이 일어난다. 교류전원 공급기의 설정 전압을 변경하면 피스톤 및 변위기의 변위도 변하게 되고, 이로 인해 냉각성능이 영향을 받는다. 본 연구에서는 교류전원 공급기의 전압을 140 ~ 310 Vrms 범위에서 변화시키며, 냉동능력, 입력전력 및 효율 등을 측정한다.

### 3. 실험결과 및 토의

Fig. 4는 냉각성능 시험 중 저온부 헤드의 온도 이고, Fig. 5는 상온부터 -100℃까지 냉각되는 초기 냉각 과정의 온도를 확대한 결과이다. 스테링 냉동기 구동을 위한 전력을 서서히 증가시키며 냉각이 시작된다. 운전 시작 후 약 9분 시점에 제어온도가 설정값인 -100℃에 가까워지면 히터에 전력이 투입되기 시작하며 온도제어가 이루어진다.

저온부 헤드 온도가 -100℃에 도달한 이후에는 냉동기로 인가되는 전압을 조절하면서 각각의 조건에서 온도제어를 위해 투입되는 히터 전력을 측정한다. Fig. 6은 교류전원 공급기에서 설정한 전압 변화와 그에 따른 전류 변화를 보여준다. 설정 전압은 140 ~ 310 Vrms 범위에서 냉동능력이 측정된다. 실험의 전압 범위에서 전류는 7.8 ~

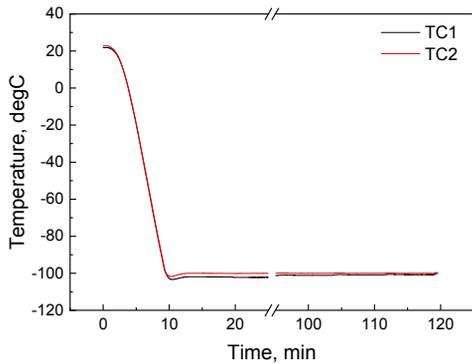


Fig. 4 Cold-end temperature during test

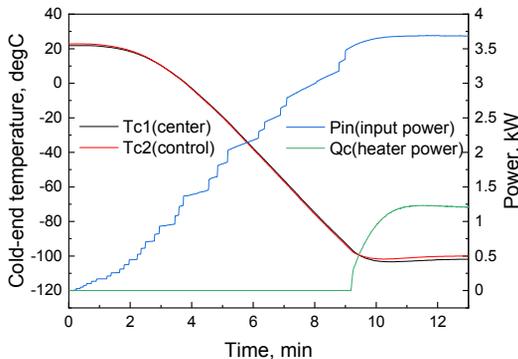


Fig. 5 Initial cool-down curve

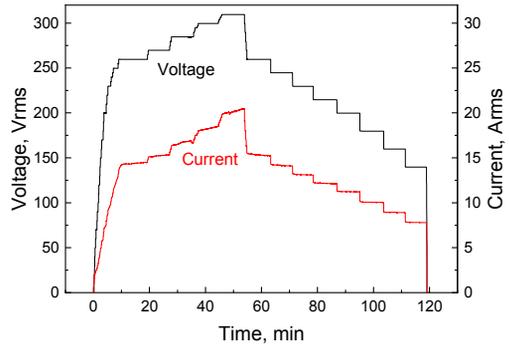


Fig. 6 Voltage and current to Stirling cooler

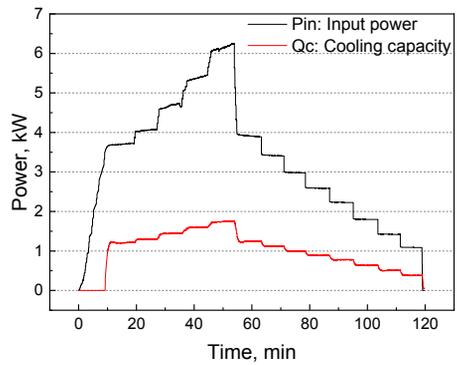


Fig. 7 Input power and heat load

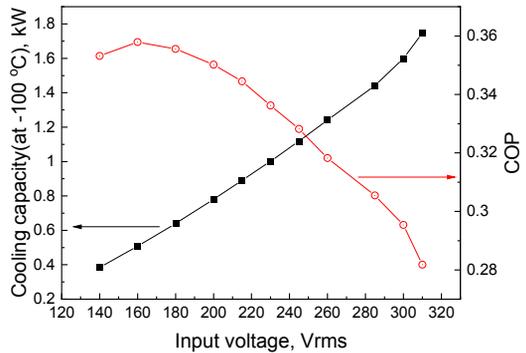


Fig. 8 Cooling capacity and COP at -100℃

20.3 Arms가 인가되는 것으로 측정된다. Fig. 7은 냉각시험 중 스테링 냉동기와 부하 히터에 투입된 전력을 측정된 결과이다. 스테링 냉동기와 히터에 투입된 전력은 각각 냉동기의 입력 전력과 냉동능력을 의미하며, 측정 결과로부터 냉동기의

성능계수(COP)를 계산한다.

Fig. 8은 설정 전압 140 ~ 310 Vrms 범위에서 측정된 냉동능력과 COP 결과를 보여준다. 냉동능력은  $-100^{\circ}\text{C}$  냉각온도에서 0.38 ~ 1.75 kW로 측정되며, Fig. 7에 나타난 바와 같이 입력전력은 1.09 ~ 6.20 kW가 측정된다. 이로부터 계산된 냉동기의 COP는 0.282 ~ 0.358로 확인된다. 다만, 본 논문의 실험에서는 150 Vrms 전압 조건에서 COP가 최대가 되며, 전압이 증가할수록 COP가 감소하는 경향이 나타난다. 이는 전압이 증가할수록 공진 운전 조건에서 멀어지는 효과에 의한 것으로 판단된다. 스테링 냉동기는 입력 전압이 증가할수록 피스톤 변위와 맥동압력의 크기가 증가하여 기체 스프링 효과가 크게 나타나는 경향이 있다.<sup>7)</sup> 본 연구에서 제작된 스테링 냉동기는 150 Vrms 전압 조건에서 공진 운전에 가깝고, 전압이 증가할수록 피스톤 변위와 입력 전류 사이의 위상이 감소하

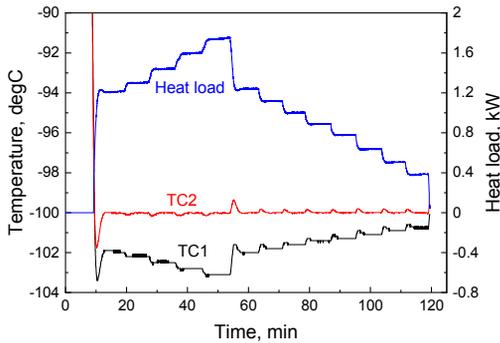


Fig. 9 Cold-end temperature and heat load

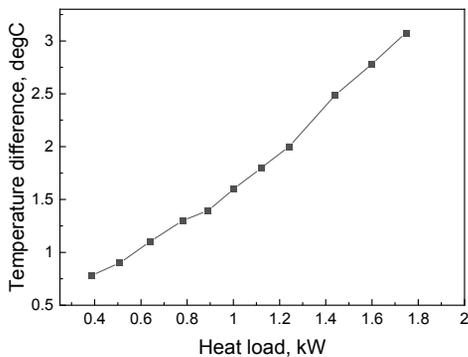


Fig. 10 Temperature difference in cold-end as amount of heat load

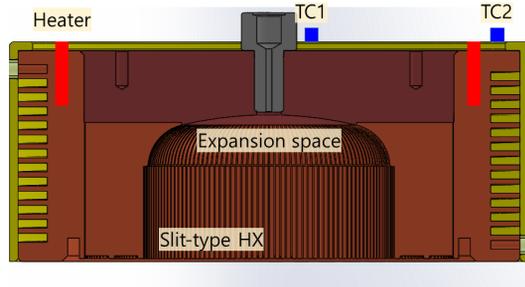


Fig. 11 Cross-section of cold head

여 공진 운전 영역을 벗어나기 때문에 Fig. 8과 같은 결과가 나타나는 것으로 판단된다. 스테링 냉동기의 스프링 강성 및 피스톤 질량 변경을 통해 공진 조건을 조절한다면 전압이 높은 조건에서 COP가 최댓값을 갖도록 개선이 가능하여 보다 높은 냉동능력을 보여줄 것으로 기대된다.

본 연구의 실험에서는 Fig. 2와 같이 저온부 헤드에 두 개의 온도 센서가 설치된다. 스테링 냉동기는 내부의 기체가 팽창하며 냉열을 발생하고 외부로부터 열을 흡수하는 원리로 작동하는데, 흡수하는 열량에 따라 저온부 헤드의 온도 편차는 중심부분(TC1)과 가장자리(TC2)에 설치된 두 온도센서의 Fig. 9의 측정 결과로 확인된다. 중심부에 설치된 TC1은 바깥쪽에 설치된 TC2보다 항상 낮게 나타나며, 제어온도로 이용되는 TC2는 설정값인  $-100^{\circ}\text{C}$ 로 안정적으로 유지된다. 정상상태 값으로부터 투입되는 히터 열량 대비 온도편차는 Fig. 10과 같이 거의 비례하여 증가하는 것으로 확인된다. 저온부 헤드를 열전도도가 매우 우수한 무산소동으로 제작했음에도 불구하고, 1.75 kW의 열량 조건에서는 3.1 K의 온도차가 발생한다. Fig. 11은 제작된 스테링 냉동기의 저온부 헤드 단면 형상을 보여준다. 피스톤과 변위기의 왕복운동에 의해 팽창공간 내부 기체는 팽창하며 온도가 낮아진다. 히터에서 발생한 열은 전도 열 전달과 슬릿 형상의 열교환 구조를 통한 대류 열 전달에 의해 온도가 낮아진 팽창공간 내부 기체로 전달된다. Fig. 11의 내부 구조에서 팽창공간 윗면은 거의 평면 구조로 되어 있기 때문에 슬릿 형상의 측면에 비해 열전달이 거의 이루어지지

않는다. 이러한 이유로 저온부 헤드 중심부에 설치된 TC1 센서는 내부 기체의 온도에 가깝다. 대용량 스테링 냉동기를 초저온 냉각시스템에 활용하는 경우 저온부 헤드에서의 온도 편차가 고려되어야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초저온 산업 및 제조공정에 활용을 목적으로 하는 대용량 스테링 냉동기를 제작하여 냉각온도  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서 냉각성능 시험을 수행하였다. 상온에서 운전을 시작하여 10분 이내에  $-100^{\circ}\text{C}$ 에 도달하며, PID 온도 제어를 통해 매우 안정적으로 온도 제어가 가능함을 확인하였다. 스테링 냉동기는 용량 제어가 가능하며, 본 연구의 실험에서는 1.09 ~ 6.20 kW의 입력 전력에 대해 냉각온도  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서 0.38 ~ 1.75 kW의 냉동능력이 측정되었으며, 이에 따른 COP는 0.282 ~ 0.358로 확인되었다. 본 논문은 kW급 대용량 스테링 냉동기의 냉각성능을 보여주는 데 의미가 있다.

#### 후 기

본 연구는 에너지기술개발사업-산업기술혁신사업과 한국기계연구원 기본사업의 지원으로 수행되었습니다.

#### Author contributions

J. Ko; Experiments, Writing original draft, J. Park; Design, H. Kim; Design, J. Kim; Fabrication, S. Choo; Fabrication, H. Yeom; Validation, Y. J. Hong; Validation, S. In; Validation, S. J. Park; Project leader, Writing review & editing.

#### References

1. 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)
2. R. Dussart et al., 2014, "Plasma cryogenic etching of silicon: from the early days to today's advanced technologies", *Journal of Physics: Applied Physics*, Vol. 47, 123001. (DOI:10.1088/0022-3727/47/12/123001)
3. J. H. Choi et al., 2020, "Performance Characteristics of Joule-Thomson Cycle with Non-Flammable 5-component Mixed Refrigerants", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 92-97. (DOI:10.9726/kspse.2020.24.6.092)
4. J. I. Yoon et al., 2021, "Ultra-low temperature chillers for semiconductor manufacturing process", *Advancements Towards Sustainability of HVAC & R Systems*. (DOI:10.5772/intechopen.98547)
5. 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.
6. M. B. Ibrahim and Jr. R. C. Tew, 2011, "Stirling Converter Regenerators", Boca Raton, pp. 51-52.
7. J. Ko et al., 2021, "Performance Test of Stirling Cooler for Ultra-Low Temperature Application", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 25, No. 6, pp. 71-77. (DOI:10.9726/kspse.2021.25.6.071)