

# 극저온 냉각시스템용 스크롤 압축기 성능실험 Performance Test of Scroll Compressor for Cryogenic Refrigeration System

김종우\* · 박지호\*\* · 김효봉\*\*\* · 추상윤\*\*\*\* · 염한길\*\*\*\*\* · 홍용주\*\*\*\*\* ·  
인세환\*\*\*\*\* · 박성제\*\*\*\*\* · 고준석\*\*\*\*\*†

Jongwoo Kim\*, Jiho Park\*\*, Hyobong Kim\*\*\*, Sangyoon Choo\*\*\*\*, Hankil Yeom\*\*\*\*\*, Yong-Ju Hong\*\*\*\*\*, Sehwan In\*\*\*\*\*, Seong-Je Park\*\*\*\*\* and Junseok Ko\*\*\*\*\*†

(Received 23 November 2021, Revision received 10 December 2021, Accepted 13 December 2021)

**Abstract :** This paper describes the performance test of a helium scroll compressor originally used for Gifford-McMahon (GM) cryocooler. This compressor can also be used for the reverse Brayton cryogenic refrigeration system. In this paper, the performance characteristics of a scroll compressor is experimentally investigated with helium and neon gas to obtain reference data for designing thermodynamic cycle of cryogenic refrigeration system. To maintain constant suction pressure during experiments, an experimental setup contains pressure regulation system which consists of three control valves and gas buffer. Pressures, mass flow rate and power consumption are measured for 400, 450, 500, 550 kPa of suction pressure condition. With experimental measurements, performance characteristics of a helium scroll compressor is investigated. The tested scroll compressor shows the higher isentropic efficiency with helium as a working gas than neon.

**Key Words :** Scroll compressor, Reverse Brayton refrigeration system, Pressure regulation system

\*\*\*\*\*† 고준석(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1401-7973)  
: 책임연구원, 한국기계연구원 에너지기계연구본부  
E-mail : jsko@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7391  
\*김종우(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9754-2775) :  
기술원, 한국기계연구원 에너지기계연구본부  
\*\*박지호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5494-9049) :  
선임연구원, 한국기계연구원 에너지기계연구본부  
\*\*\*김효봉(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7098-0364) :  
책임기술원, 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  
\*Jongwoo Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9754-2775):  
Engineer, Energy Systems Research Division, Korea Institute of  
Machinery & Materials.  
\*\*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.  
\*\*\*\*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

탄소중립 사회로 전환을 위해서는 LNG나 수소와 같은 청정연료 비중의 확대가 요구되고, 이러한 청정 연료의 인프라 구축을 위해서는 극저온 냉각시스템 기술 확보가 필수이다. 극저온 냉각은 필요 냉각용량에 따라 스티어링(Stirling) 냉동기 혹은 GM(Gifford-McMahon) 냉동기와 같은 소형 극저온 냉동기가 사용될 수도 있고, 압축기, 팽창기, 열교환기 조합으로 구성되는 플랜트 규모의 극저온 냉각시스템이 요구된다.<sup>1-4)</sup>

극저온 냉각 및 액화의 가장 기본이 되는 역브레이튼 극저온 냉각시스템은 단열압축, 등압냉각, 단열팽창, 등압가열 과정으로 열역학 사이클을 구성하여 극저온을 생성하는 냉각시스템이다. 77 K(-196℃) 이하의 극저온 냉각을 위해서는 헬륨 또는 네온을 작동기체가 사용된다. 사이클을 시스템으로 구현하기 위해서 등압가열과 등압냉각은 대향류형 극저온 열교환기가 사용되고, 단열팽창은 일반적으로 터보 팽창기가 사용된다. 단열압축을 위해서는 원심압축기, 스크류 압축기, 스크롤 압축기, 왕복동 압축기 등 여러 형태의 압축기가 사용될 수 있다. 원심압축기와 스크류 압축기는 대형 시스템에 적합하고, 스크롤 압축기는 소형 역브레이튼 극저온 냉각시스템에 적용 가능하다. 극저온에서는 오일 입자의 응고에 의한 시스템 파손의 위험이 있기 때문에 내부에 윤활유를 사용하는 스크롤 압축기와 스크류 압축기는 극저온 냉각시스템에 적용하기 위해서는 일반적인 오일 분리 장치가 아닌 별도의 오일제거 시스템이 필수적이다.

GM(Gifford-McMahon) 극저온 냉동기 구동을 위해 사용되는 헬륨 스크롤 압축기는 극저온에 적용이 가능하도록 흡착탑(Adsorber)을 포함한 오일제거 시스템을 갖추고 있어서 별도의 추가장치 없이 역브레이튼 극저온 냉각시스템에 적용 가능한 장점이 있다. 하지만 이를 위해서는 냉각사이클 작동압력에서 압축기가 공급할 수 있는 유량 특성 데이터가 요구된다.

본 연구에서는 GM 극저온 냉동기 구동에 사용

되는 헬륨 스크롤 압축기의 성능 특성 데이터를 확보하기 위한 실험 연구를 수행한다. 특히, 압력비 변화에도 흡입압력을 고정할 수 있도록 제어 밸브로 압력제어 시스템을 적용하며, 헬륨과 네온의 두 가지 작동기체에 대한 성능 실험을 수행하여 흡입압력 및 작동기체에 따른 스크롤 압축기의 성능특성을 고찰하고자 한다.

## 2. 실험장치 구성

본 연구에서는 GVT(현, 크라이오에이치앤아이)사의 HC80 헬륨압축기에 대한 성능실험을 수행하였다. HC80 헬륨압축기는 6마력 용량의 스크롤 압축기와 오일분리장치 및 흡착탑(Adsorber)과 함께 구성된다. Fig. 1은 단순하게 구성된 압축기 성능실험 장치의 개략도이다. 압축되어 토출된 기체는 유동저항을 부여하기 위한 밸브에서 감압되고 다시 압축기로 흡입되어 순환하는 구성이다. 작동기체는 헬륨이며, 압축기 충전압력을 1.2 ~ 1.7 MPa



Fig. 1 Schematic diagram of simple scroll compressor test setup

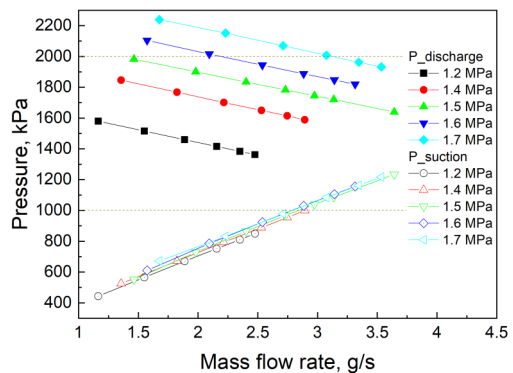


Fig. 2 Measurement of suction/discharge pressure as mass flow with simple test setup

로 변화시키며 흡입 및 토출 압력과 유량을 측정 한 결과는 Fig. 2와 같다. 일정 충전압력에서는 밸브 개도가 증가할수록 유량이 증가하고, 흡입압력의 증가와 토출압력의 감소가 유량에 거의 선형적인 관계로 나타난다. 유량과 흡입압력의 상관관계는 충전압력에 크게 영향을 받지 않는 반면에, 충전압력이 증가할수록 동일한 유량에서 토출압력이 증가하는 경향이 확인된다. 이 실험 장치로는 충전압력이 결정되면 밸브 개도만이 실험변수가 되어 흡입압력과 토출압력이 동시에 변화하여 역브레이튼 극저온 냉각시스템의 사이클 압력 조건에서 성능 특성을 명확하게 파악하기 어려운 단점이 있다.

흡입압력을 고정한 조건에서 압축기 성능실험을 진행하기 위하여 Fig. 3과 같이 시스템을 구성하였다. 세 개의 제어밸브가 사용되는데, 주밸브(CV-131)는 수동으로 개도를 조절하여 유동저항을 부여하는 역할을 한다. 보조밸브(CV-132,

CV-133)는 흡입압력( $P_s$ )이 설정값보다 높으면 CV-132 밸브가 열려서 버퍼로 기체가 이동하고, 설정값보다 낮으면 CV-133이 열려서 버퍼로부터 기체가 유입되는 방식으로 제어된다. 즉, 두 개의 보조밸브와 버퍼체적은 압축기 순환루프의 충전압력을 자동적으로 조절해 주는 역할을 담당한다. 흡입과 토출에서 압력과 온도는 압력센서(FP5000, Honeywell)와 열전대(T-type)로 측정하며, 유량 측정을 위하여 질량유량계(CMFS050M, Emerson)가 설치되었다. 설치된 압력센서와 열전대, 질량유량계의 정밀도는 각각 0.1%,  $\pm 1.0^\circ\text{C}$ , 0.25%이며, 측정값으로부터 도출되는 엔탈피는 1.0% 이내의 오차를 포함한다. 제어밸브는 공압으로 작동하며 제어기(TK4H, Autonics)로부터의 제어신호로 제어된다. 압축기 소비전력은  $\pm 0.5\%$ 의 정밀도를 갖는 전력계(PR300, Yokogawa)를 이용하여 측정한다. 전력계 측정 오차에 의한 등엔트로피 효율의 오차는 1.0% 이내이다.

### 3. 실험결과 및 토의

헬륨과 네온의 두 가지 작동기체를 이용하여 실험을 수행하였으며, 각각의 기체에 대해 흡입압력은 400, 450, 500, 550 kPa로 제어하면서 측정하였다. 흡입압력이 고정된 조건에서 토출압력이 1,000 ~ 2,000 kPa 범위에서 형성되는 조건으로 주밸브(CV-131) 개도를 조절하며 실험을 진행하였다.

Fig. 4는 작동기체를 헬륨으로 하며 흡입압력을 550 kPa로 고정한 조건에서의 측정 결과를 보여 준다. 주밸브의 개도를 수동으로 변화시키는 시점에서 흡입압력의 변화가 발생하기 때문에 설정값으로 유지되도록 보조밸브의 개도가 자동적으로 조절되며 설정값을 만족한 상황에서 보조밸브가 모두 닫히게 된다. 따라서 Fig. 4(b)와 같이 주밸브 개도가 변화하는 시점에서 흡입압력이 소폭 변동한 후에 다시 설정값인 550 kPa로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 주밸브의 개도가 증가할수록 토출압력은 감소하고 버퍼 체적의 압력은 증가하는 것으로 나타난다. 이는 압축기의 충전압력을 감소

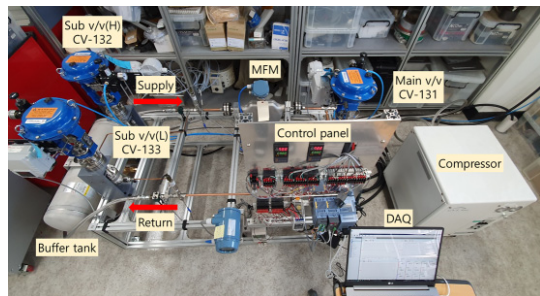
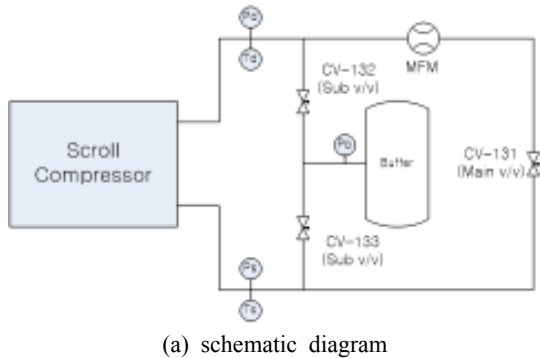
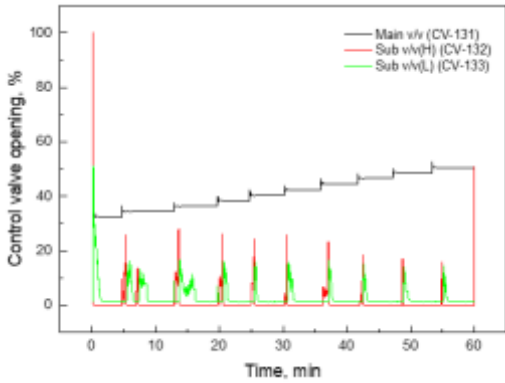
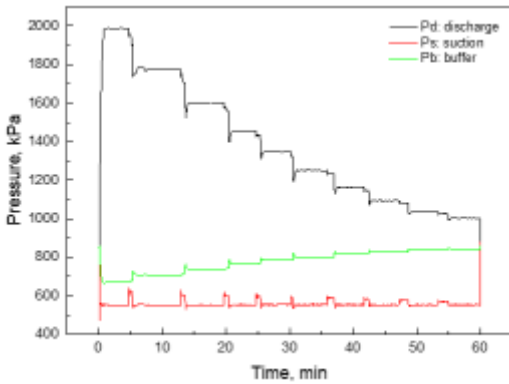


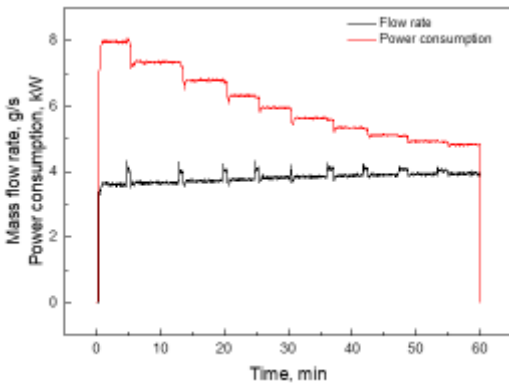
Fig. 3 Experimental setup for compressor test with fixed suction pressure condition



(a) control valve opening



(b) pressure



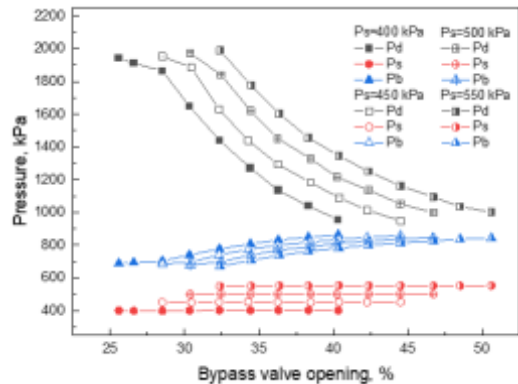
(c) mass flow rate and power consumption

Fig. 4 Experimental measurement of operating parameters

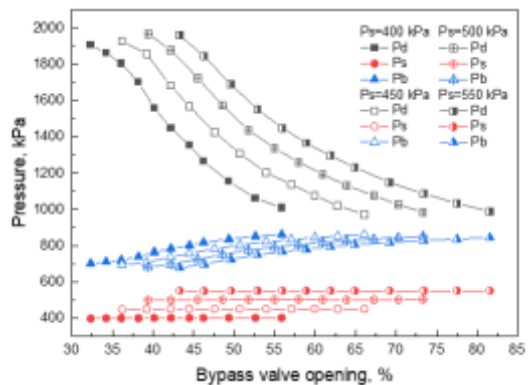
시키는 효과로 나타나며, 구성된 실험장치를 이용하여 충전압력을 조절할 필요 없이 고정된 흡입

압력 조건에서 압축기 성능실험을 수행할 수 있음을 보여 주는 결과이다. Fig. 4(c)는 압축기 유량과 소비전력 변화를 보여 주는 결과이다. 주밸브의 개도가 증가하여 유동저항이 감소함에도 불구하고 흡입압력을 유지하는 조건에서는 유량변화가 크게 나타나지 않음을 보여 주며, 토출압력 감소로 인한 압력비 감소로 압축기 소비전력이 감소하는 것으로 나타난다.

헬륨과 네온의 두 가지 작동기체에 대하여 흡입압력을 400, 450, 500, 550 kPa로 고정된 조건에서 실험한 데이터를 주밸브 개도에 따른 흡입, 토출, 버퍼체적 압력 변화는 Fig. 5에 흡입과 토출의 압력비 변화에 따른 소비전력, 질량유량, 등엔트로피 효율 결과는 Fig. 6에 나타내었다.



(a) helium

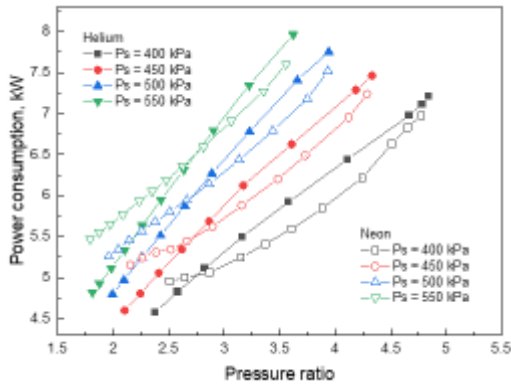


(b) neon

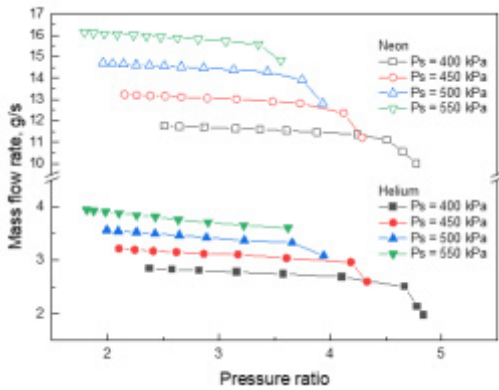
Fig. 5 Pressure variation as main valve opening

Fig. 5와 같이 주밸브의 개도가 증가할수록 고정된 흡입압력 조건에서는 토출압력이 감소한다. 이 때, 버퍼 체적의 압력은 증가하는 것으로부터

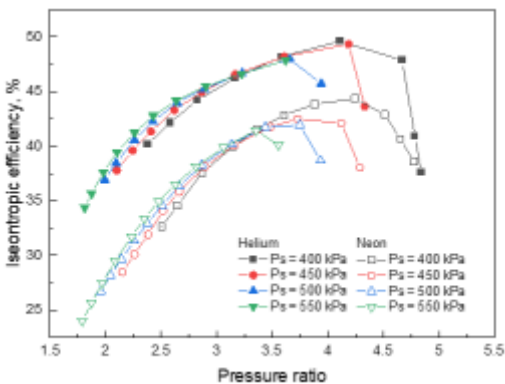
순환루프의 작동기체 양은 감소하는 것으로 판단할 수 있다. 이는 버퍼가 없는 시스템에서 충전압력이 감소하는 것과 동일한 효과를 의미한다. 헬륨의 경우에는 밸브 개도가 25~50% 범위에서 실험이 수행된 반면, 동일한 압력 범위에서 네온의 경우에는 30~80%의 밸브 개도가 요구되었다. 헬륨과 네온의 비중은 각각 0.138과 0.697로 네온의 비중이 헬륨에 비해 약 5배 크기 때문이다. 제어되는 흡입압력이 낮을수록 버퍼 압력은 높게 형성되고, 밸브 개도가 작은 범위에서 운전되는 것으로부터 순환 루프의 작동기체의 양이 적음을 알 수 있다.



(a) power consumption



(b) mass flow rate



(c) isentropic efficiency

Fig. 6 Experimental results with variation of pressure ratio and working gas

Fig. 6(a) 압력비에 따른 소비전력 변화이다. 헬륨에 대해서는 압력비에 선형적으로 비례하며 흡입압력이 높을수록 비례 기울기가 증가하는 경향이 나타난다. 네온의 경우에는 헬륨과 비교할 때 선형보다는 기하급수적으로 증가하는 경향이 나타난다. 실험 조건에서는 낮은 압력비 구간을 제외하고는 전반적으로 헬륨을 사용하는 경우에 동일한 흡입압력 및 압력비 조건에서 더 많은 전력을 소비하는 것으로 나타났다. Fig. 6(b)는 압축기에서 공급하는 질량유량 측정 결과이다. 흡입압력이 고정된 조건에서는 압력비가 증가하더라도 질량유량의 변화는 크게 발생하지 않는 것으로 확인된다. 압력비가 특정 수치 이상으로 증가하면 질량유량이 급격히 감소하며, 흡입압력이 높을수록 더 작은 압력비에서 이러한 현상이 나타난다. 이는 압축기의 용량을 초과하는 전력을 소비하는 경우에 급격한 효율 저하가 발생하는 것으로 생각할 수 있으며, Fig. 6(a)의 결과로부터 소비전력이 7 kW 부근에서 이러한 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

등엔트로피 효율은 흡입과 토출에서 측정 한 온도, 압력 데이터로부터 결정되는 엔탈피, 엔트로피와 소비전력 측정결과를 이용하여 식 (1)을 이용하여 계산된다. 여기에서,  $h_{1s}$ 는 흡입부의 엔탈피,  $h_{2s}$ 는 등엔트로피 과정으로 토출압력이 형성될 때의 엔탈피,  $P_{input}$ 은 측정된 압축기 소비전력이다.

$$\eta_{isentropic} = \frac{h_{2s} - h_1}{P_{input}} \quad (1)$$

Fig. 6(c)와 같이 압력비가 증가할수록 등엔트로피 효율도 증가하다가 질량유량이 급격히 감소하는 압력비 조건에서 급격한 효율 저하가 나타난다. 특히, 등엔트로피 효율은 흡입압력보다는 압력비에 의해 결정되는 것이 특징이며, 헬륨을 사용하는 경우에 네온보다 더 높은 효율을 보이는 것으로 나타났다. 실험에 사용된 스크롤 압축기는 압력비가 1.8~4의 범위에서 사용이 가능할 것으로 판단되나, 압력비에 따른 효율 변화가 크기 때문에 적용하는 시스템의 압력조건 선정에 참고할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 GM 극저온 냉동기에 사용되는 헬륨 스크롤 압축기의 성능실험을 수행하였으며, 특히, 압력제어 시스템을 적용하여 흡입압력을 고정한 조건에서 성능실험을 수행하였다. 역브레이튼 극저온 냉각시스템에 적용을 고려하여 헬륨과 네온을 작동기체로 이용하였다.

스크롤 압축기의 흡입압력이 고정된 조건에서는 밸브 개도에 따른 질량유량 변화는 크지 않으며, 압력비가 감소하며 소비전력이 감소하는 운전 특성이 확인되었다.

압축기의 등엔트로피 효율은 흡입압력에는 크게 영향을 받지 않으며, 작동기체 종류와 압력비에 의해 결정되는 것이 확인되었다. 압력비가 1.8~4의 범위에서는 압력비가 증가할수록 효율 또한 증가하지만, 그 이상의 압력비에서는 압축기의 용량 초과로 인하여 급격한 효율 저하 및 급격한 유량 감소 현상이 나타났다. 헬륨을 사용하는 경우에 네온보다는 더 높은 등엔트로피 효율을 얻을 수 있는 것으로 확인되었다.

본 연구에서 사용된 스크롤 압축기는 역브레이튼 극저온 냉각시스템을 포함한 다양한 형태의 극저온 시스템에 적용이 가능하며, 본 연구의 실

험 결과는 헬륨 스크롤 압축기의 운전 조건을 선정하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 한국기계연구원 기본사업 및 기계산업핵심기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### Author contributions

J. Kim; Writing original draft, J. Park; Investigation, H. Kim; Investigation, S. Choo; Investigation, H. Yeom; Validation, Y. J. Hong; Validation, S. In; Validation, S. J. Park; Validation, J. Ko; Writing review & editing.

#### References

1. C. Gondrand, et al., 2014, "Overview of Air Liquide Refrigeration Systems between 1.8 K and 200 K", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 59A, pp. 949-956. (DOI:10.1063/1.4860807)
2. H. Hirai, et al., 2012, "Neon Turbo-Brayton Cycle Refrigeration for HTS Power Machines", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 57, pp. 1672-1679. (DOI:10.1063/1.4707100)
3. H. Hirai, et al., 2014, "Development of a Turbine-Compressor for 10 kW class Neon Turbo-Brayton Refrigerator", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 59A, pp. 1236-1241. (DOI:10.1063/1.4860847)
4. J. I. Yoon, et al., 2020, "Exergy Analysis of Reverse Brayton Cryogenic System Using Neon", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 63-70. (DOI:10.9726/kspse.2020.24.5.063)