

Neon을 이용한 역브레이튼 극저온 냉각시스템 엑서지 분석 Exergy Analysis of Reverse Brayton Cryogenic System Using Neon

윤정인* · 손창효** · 고준석*** · 염한길*** · 정한숨**** · 최지후**** · 고득용***** · 이근태*****†
Jung-In Yoon*, Chang-Hyo Son**, Junseok Ko***, Hankil Yeom***, Han-Som Jeong****, Ji-Hoo Choi****, Deuk-Yong Koh***** and Keuntae Lee*****†

(Received 24 August 2020, Revision received 12 October 2020, Accepted 13 October 2020)

Abstract : In this study, the effect on each parameter was analyzed using HYSYS to examine the exergy characteristics of reverse Brayton cryogenic system with neon as refrigerant. The EDF and exergy efficiencies were analyzed with the expander and compressor efficiency, the pressure drop of the load heat exchanger, the characteristics of high and low pressure, and the heat exchanger effectiveness as parameters. As a result, the increase in efficiency of compressor and expander is the overall reduction of exergy. In addition, the pressure drop affects the load heat exchanger performance by reducing the exergy efficiency of the system. The difference between high and low pressure is a parameter increasing the exergy efficiency of the system. The heat exchanger effectiveness is most important parameter to increase exergy efficiency.

Key Words : Cryogenic, Cooling system, Reverse brayton cycle, LNG, HTS cable

*****† 이근태(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2670-2556) :
선임연구원, 한국기계연구원 LNG-극저온기계기술 시험인증센터
E-mail : ktleee@kimm.re.kr, Tel : 055-326-9036
*윤정인(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1099-3435) : 정교수,
부경대학교 냉동공조공학과
**손창효(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2143-0515) : 부교수,
부경대학교 냉동공조공학과
***고준석(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1401-7973) : 책임
연구원, 한국기계연구원 에너지변환기계연구실
***염한길(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8353-9877) : 책임
연구원, 한국기계연구원 에너지변환기계연구실
****정한숨(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4964-4707) : 대학
원생, 부경대학교 냉동공조공학과
****최지후(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2428-4998) : 대학
원생, 부경대학교 냉동공조공학과
*****고득용(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8353-9877) : 책
임연구원, 한국기계연구원 LNG-극저온기계기술 시험인증센터

*****† Keun-Tae Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2670- 2556)
: Senior Researcher, LNG and Cryogenic Technology Center, Korea
Institute of Machinery & Materials.
E-mail : ktleee@kimm.re.kr, Tel : 055-326-9036
*Jung-In Yoon(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1099-3435) :
Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning
Engineering, Pukyong National University.
**Chang-Hyo Son(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2143-0515) :
Associate Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning
Engineering, Pukyong National University.
***Junseok Ko(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1401-7973)
: Principal Researcher, Department of Energy Conversion Systems,
Korea Institute of Machinery & Materials.
***Hankil Yeom(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8353-9877)
: Principal Researcher, Department of Energy Conversion Systems,
Korea Institute of Machinery & Materials.
****Han-Som Jeong(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4964-4707)
: Graduate student, Department of Refrigeration and Air Conditioning,
Pukyong University.
****Ji-Hoo Choi(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2428-4998)
: Graduate student, Department of Refrigeration and Air Conditioning,
Pukyong University.
*****Deuk-Yong Koh(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8353-9877)
: Principal Researcher, LNG and Cryogenic Technology Center, Korea
Institute of Machinery & Materials.

— 기 호 설 명 —

- es : 엑서지 [kW]
- m : 질량 유량 [kg/s]
- Q : 열량 [kW]
- T : 온도 [°C]
- h : 엔탈피 [kJ/kg]
- EDF : 엑서지 파괴 인자 [-]
- W : 순수일량 [kW]
- η : 효율 [-]
- $LMTD$: 대수평균온도차 [°C]
- HEX : 열교환기

하첨자

- loss : 손실
- o : 대기 (Ambient)
- ev : 부하 열교환기
- ac : 방열 냉각기 (After-cooler)
- Exp : 팽창기
- Comp : 압축기
- rbcs : 역브레이튼 극저온 냉각시스템
- c : 냉각능력

1. 서 론

증가하는 전력 수요를 대응하기 위해 액체질소 (-196°C, 77 K)에서 전기적 저항이 거의 없어 기존 전력케이블보다 5~6배 정도 많은 전력을 이송할 수 있는 초전도 케이블이 개발되고 있다.¹⁾

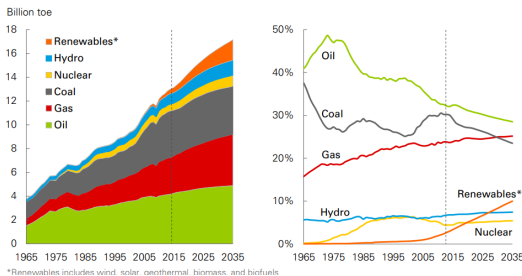


Fig. 1 Outlook for energy consumption

또한 환경규제 심화로 인하여 NOx 및 SOx 배출 규제가 강화됨에 따라 친환경 연료로써 천연 가스의 에너지 비중이 증가하고 있고 이에 Fig. 1 과 같이 2035년에 LNG(-163°C, 110 K)가 주요 에너지원으로 각광 받을 것으로 전망되고 있다.^{2,3)}

초전도 케이블 경우 77 K(-196°C) 이하 상태를 유지하기 위해 액체질소를 초전도 케이블 내부에 순환시키며 상온의 외부 열침입과 전기 통전에 의한 초전도 케이블 내부 열부하로 인해 승온된 액체 질소를 과냉각하기 위한 냉각시스템이 필수적으로 필요하다. 초전도 케이블 상용화를 위해 수km 초전도 케이블 열부하 대응이 가능한 대용량 냉각시스템이 필수적이고 유지보수 및 효율이 우수한 역브레이튼 극저온 냉각시스템이 활발하게 연구되고 있다.^{4,5)}

대기압에서 약 110 K(-163°C)으로 저장되는 LNG 경우 상온 대기에 의한 열침입을 인하여 BOG(Boil Off Gas)가 발생한다. BOG는 LNG 화물창 등의 저장탱크 압력 상승을 야기시켜 저장 탱크의 구조적인 문제를 발생시킬 수 있기에 방출이 필요하다. 연료인 BOG를 가스연소장치(GCU : Gas Combustion Unit)로 소각하는 것은 에너지 손실이고 대기로 방출하는 것은 지구 온난화 문제의 원인이 되기 때문에 BOG를 재액화하며 대용량이고 설치 공간이 적으며 유지보수가 유리한 역브레이튼 극저온 냉각시스템에 대한 관심이 높다.^{6,7)}

역브레이튼 극저온 냉각시스템 및 기자재는 주로 해외선진사인 Linde(독일), Air liquide(프랑스), Cryostar(미국), Taiyo Nippon Sanso(일본)에 의해 Dual turbo-expander process, Turbo-expander process, Open turbo-expander process가 개발되었고 LNG 선박의 BOG 재액화 시스템, 중소규모 육상 LNG 액화플랜트, 초전도 전력기기 냉각시스템 등으로 적용되고 있으며, 국내는 대부분 수입되고 있는 실정이므로 앞으로 많은 연구 개발이 필요한 실정이다.

국내는 J. W. Lee⁸⁾는 2 kW급 역브레이튼 냉동기의 열역학적 사이클 설계를 바탕으로 극저온 터보 팽창기 설계를 연구하였고, M. J. Chung⁹⁾은

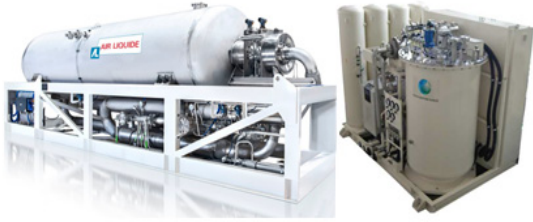


Fig. 2 Reverse brayton cryogenic system(Air liquide and Taiyo nippon sanso)

65 K 과냉 액체질소를 연속 생산하기 위해 헬륨 기체를 냉매로 한 5 kW급 Brayton 냉동사이클 해석과 냉동 및 기계적 효율을 고려한 판-핀 열교환기 최적 길이의 설계를 연구하였으며 H. M. Chang¹⁰⁾은 질소를 냉매로 160 l/h 메탄을 액화하기 위한 역브레이튼 냉동 사이클을 열역학적으로 설계하고 작동 압력과 판-핀 열교환기의 크기 최적 조건을 제시하는 등 연구가 이루어지고 있으나 해외 선진 기업에 비해 기술력이 많이 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서 네온(Neon)을 작동 냉매로 사용한 역브레이튼 극저온 냉각시스템의 엑서지 특성을 분석 및 파악하기 위해 HYSYS¹¹⁾ 프로그램을 이용하여 모사하고 각각의 변수에 대한 영향을 분석하여 역브레이튼 극저온 냉각시스템에 대한 기초 설계 자료를 제공하고자 한다.

2. 역브레이튼 극저온 냉각시스템 장치도 및 성능분석

Fig. 3은 본 연구에 사용된 역브레이튼 극저온 냉각시스템 T-s 선도와 개략도를 나타낸다. 역브레이튼 극저온 냉각시스템은 압축기(단열압축, 1 → 2), After-cooler(압축열 제거, 2 → 3), 열교환기(등압 냉각, 3 → 4), 팽창기(단열팽창, 4 → 5), 부하열교환기(부하열 흡수, 5 → 6), 열교환기(등압 가열, 6 → 1)로 구성된다. 고온 및 고압의 기체와 저온 및 저압의 기체가 서로 열교환을 통해 냉각 및 가열되는 점이 상온 냉각시스템과 가장 큰 차이점이다.

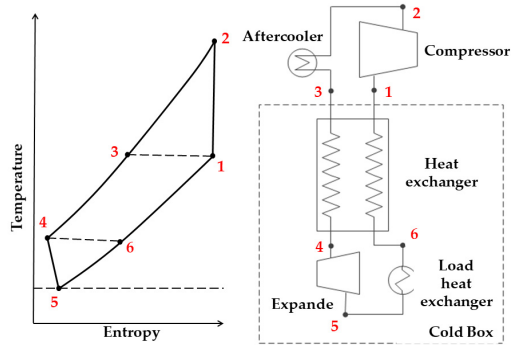


Fig. 3 Schematic and T-s diagram of reverse brayton cryogenic system

본 연구에서는 역브레이튼 극저온 냉각시스템은 압축기와 팽창기는 터보형을 사용하였고 팽창비는 2로 선정하였다. 최대압력이 높을수록 시스템 효율이 좋으나 시장 적용성이 용이할 수 있도록 국내 고압가스 안전법을 고려하여 10.5 MPa로 설정하였다. LNG의 BOG 재액화 및 초전도 케이블의 LN₂ 과냉을 위해서 역브레이튼 극저온 냉각시스템에 적용될 수 있는 냉매는 Neon, Helium, hydrogen이 있지만 높은 시스템 효율과 분자량에 의한 낮은 터보 기계 회전 속도 가질 수 있는 점등을 고려하여 Neon을 작동 냉매로 선정하였다.

네온(Neon)의 열역학적 물성치와 상태 방정식은 HYSYS에서 제공하는 여러 가지 상태 방정식 중에서 Peng-Robinson식을 이용하여 계산하였다.¹²⁾ Table 1은 역브레이튼 극저온 냉각시스템의 엑서지 분석에 필요한 식들을 나타내었다. 역브레이튼 극저온 냉각시스템의 제 2법칙 효율 (Second law efficiency) η_{II} 은 동일한 조건에서 최대 가역 열효율($\eta_{th,rev}$)에 대한 실제 열효율(η_{real})의 비로써 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{real}}{\eta_{th,rev}} = \frac{\eta_{rbcs}}{1 - T_o/T} \quad (1)$$

여기서 η_{rbcs} 는 역브레이튼 극저온 냉각시스템 열효율, T_o 는 주위 온도, T_H 는 구성기기 토출

Table 1 Balance equation of exergy loss and exergy destruction factor for each component of reverse brayton cryogenic refrigerant system

| Equipment | Exergy loss (Δex_{loss}) [kW] | Exergy destruction factor(EDF) |
|--|--|---|
| Load heat exchanger (Evaporator) | $\Delta ex_{loss, ev} = m \times (ex_1 - ex_2) + Q_{ev} \times \frac{(1 - T_o/T)}{T}$ $Q_{ev} = m \times (h_6 - h_5)$ | $EDF_{ev} = \Delta ex_{loss, ev} / W$ |
| After-cooler | $\Delta ex_{loss, ac} = m \times (ex_1 - ex_2) - Q_{ac} \times (1 - T_o/T)$ $Q_{ac} = m \times (h_3 - h_2)$ | $EDF_{ac} = \Delta ex_{loss, ac} / W$ |
| Heat exchanger | $\Delta ex_{loss, HEX} = \sum_{i=1}^n m_i \times (ex_{i, in} - ex_{i, out})$ | $EDF_{HEX} = \Delta ex_{loss, HEX} / W$ |
| Expander | $\Delta ex_{loss, exp} = m \times (ex_1 - ex_2) - W_{exp}$ $W_{exp} = m \times (h_5 - h_4)$ | $EDF_{exp} = \Delta ex_{loss, exp} / W$ |
| Compressor | $\Delta ex_{loss, comp} = m \times (ex_1 - ex_2) + W_{comp}$ $W_{comp} = m \times (h_2 - h_1)$ | $EDF_{comp} = \Delta ex_{loss, comp} / W$ |
| Exergy(ex) = (h - h _o) + T _o × (s - s _o) T _o : Ambient temperature(25°C), T : Each component outlet temperature h _o : Ambient Enthalpy, s _o : Ambient Entropy W : Total Expander work - Compressor work | | |

온도이다.

제 2법칙 효율을 계산하는 식은 엑서지 파괴인자(EDF, Exergy destruction factor)로부터 구할 수 있다.¹³⁾

$$\eta_{II} = \frac{1}{1 + EDF_{total}} \quad (2)$$

여기서 EDF_{total} 은 Table 1에서 나타낸 것과 같이 역브레이튼 극저온 냉각시스템 주요 기차재에 대한 엑서지 파괴인자(EDF)를 모두 합한 값이다.

본 연구에서의 역브레이튼 극저온 냉각시스템 성능 분석 범위를 Table 2에 나타내었다. 엑서지 분석 범위는 역브레이튼 극저온 냉각시스템의 일반적인 운전 조건이다. 다른 운전 조건이 기준 값일 때 냉동능력은 약 2.1 kW@77 K이며, 이때 질량 유량은 0.174 kg/s이다. Table 2의 운전 조건과 분석 범위를 Table 1 수식에 적용하여 계산된 결과 값을 토대로 역브레이튼 극저온 냉각시스템의 엑서지 효율에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

3. 결과 및 토론

3.1 팽창기 효율의 영향

Fig. 4는 팽창기 효율 변화에 따른 역브레이튼 극저온 냉각사이클의 엑서지 효율과 엑서지 파괴인자(EDF)의 변화를 나타낸 것이다. 팽창기 효율이 증가할수록 엑서지 효율이 약 3% 증가하였다.

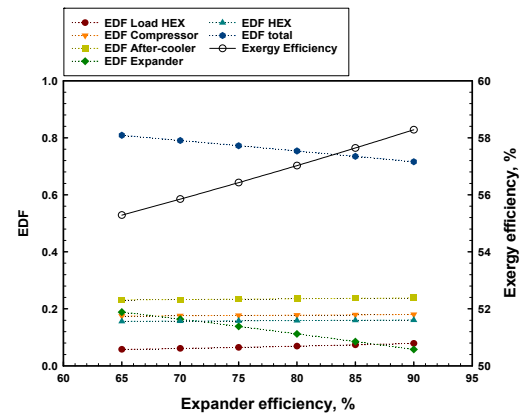


Fig. 4 Exergy efficiency and EDF with Expander efficiency

Table 2 Analysis range of reverse brayton cryogenic cycle proposed in this study

| Design parameter | Values | Unit |
|---|-------------------------------------|------|
| Working refrigerant | Neon | - |
| Mass flow rate | 0.174 ($Q_c = 2.1$ kW) | kg/s |
| After-cooler outlet | 308.1 | K |
| Load heat exchanger outlet temperature | 77 | K |
| Expansion ratio | 2 | - |
| Compressor efficiency | 50, 55, 65, 70, 75*, 80, 85, 90 | % |
| Expander efficiency | 50, 55, 65, 70, 75, 78*, 80, 85, 90 | % |
| Heat exchanger effectiveness | 0.91, 0.98 ~ 1 | - |
| After-cooler pressure drop | 0.01, 0.02, 0.03*, 0.04, 0.05 | MPa |
| Low side pressure drop of heat exchanger | 0.01, 0.02, 0.03*, 0.04, 0.05 | MPa |
| High side pressure drop of heat exchanger | 0.01, 0.02, 0.03*, 0.04, 0.05 | MPa |
| Pressure drop of load heat exchanger | 0.01, 0.02, 0.03*, 0.04, 0.05 | MPa |
| High pressure | 0.95, 1.00, 1.05* | MPa |
| Low pressure | 0.3, 0.4, 0.495*, 0.5, 0.6, 0.7 | MPa |

* Reference value

주요 기자재의 엑서지 파괴 인자의 값을 비교해 보면 After-cooler의 EDF가 가장 높았으며 이는 After-cooler의 냉각수와 냉매의 LMTD가 매우 크기 때문이다. 팽창기의 효율이 증가하면서 팽창기의 EDF가 크게 감소하는데, 그 이유는 팽창기의 효율이 증가함에 따라 엔트로피 증가폭이 많이 감소하기 때문으로 판단된다. 다른 주요 기자재의 EDF 변화는 작으며 모든 EDF를 합한 EDF_{total} 이 감소하기 때문에 엑서지 효율이 증가한다.

3.2 압축기 효율의 영향

압축기 효율 변화에 따른 역브레이튼 극저온 냉각사이클의 엑서지 효율과 엑서지 파괴 인자(EDF)의 변화를 Fig. 5에 나타낸다. 압축기 효율이 증가할수록 엑서지 효율이 약 2.5% 정도 증가하였으며, 이는 주요 핵심 기자재들의 EDF를 모두 합친 EDF_{total} 이 감소하기 때문이다. 주요 기자재 엑서지 파괴 인자를 비교하면 After-cooler EDF가 가장 높았고 압축기의 효율이 증가할수록 부하 열교환기, 팽창기, 열교환기의 EDF는 증가하나 After-cooler와 압축기의 EDF는 감소한다. 이러한 이유는 압축기 효율 증가가 압축기 전후단 엔트로피 차를 크게 감소시켜 엑서지 효율

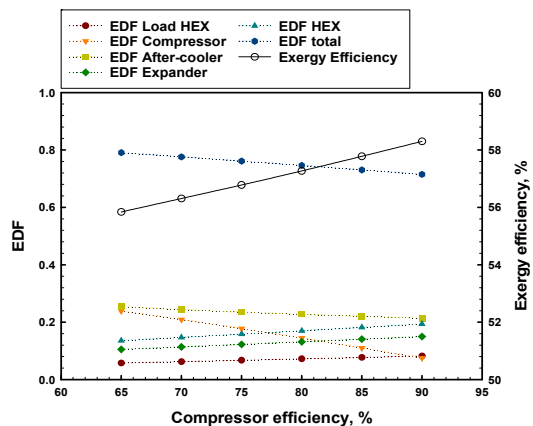


Fig. 5 Exergy efficiency and EDF with Compressor efficiency

을 증가시켰다. 그로 인해 순수 일량(W)이 감소함에 따라 부하 열교환기, 팽창기, 열교환기의 EDF가 소폭 상승했지만 압축기 EDF가 크게 감소하여 전체적인 EDF가 감소됨에 따라 전체 엑서지 효율은 증가한다.

3.3 부하 열교환기 압력강하의 영향

Fig. 6은 부하 열교환기 압력강하의 변화에 따른 역브레이튼 극저온 냉각사이클의 엑서지 효율과 엑서지 파괴 인자(EDF)의 변화를 나타낸 것이다. 부하 열교환기의 압력강하가 증가할수록 엑

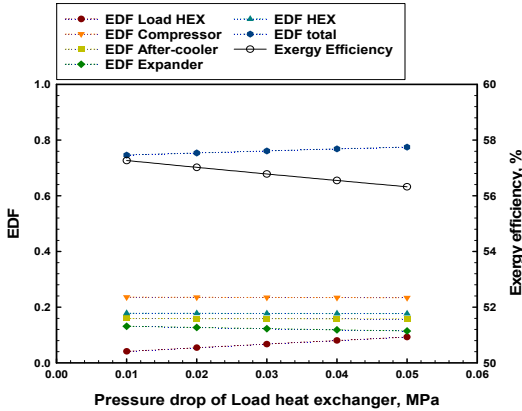


Fig. 6 Exergy efficiency and EDF with pressure drop of Load HEX

서지 효율이 약 1% 정도 감소한다. 또한 주요 기자재의 엑서지 파괴 인자(EDF)의 값을 비교해보면, 압축기의 EDF가 가장 높았으며 부하 열교환기의 EDF가 가장 낮았다. 부하 열교환기의 효율이 증가하면서 부하 열교환기의 EDF는 증가했으나 다른 기자재들의 EDF에는 뚜렷한 변화 양상을 보이지 않았다. 이는 부하 열교환기의 압력 강하가 증가할수록 부하 열교환기 전·후단의 온도차가 증가하게 되며 이로 인해 부하 열교환기 EDF와 순수일량(W)이 증가한다. 이에 따라 전체 EDF는 증가하게 되므로 엑서지 효율은 감소한다.

3.4 저압축 압력의 영향

저압축 압력 변화에 따른 역브레이튼 극저온 냉각사이클의 엑서지 효율과 엑서지 파괴 인자(EDF)의 변화를 Fig. 7에 나타낸다. 저압축 압력이 증가하면서 엑서지 효율이 미세하게 증가하다가 크게 감소하는 경향을 볼 수 있고, 0.4-0.5 MPa에서 엑서지 효율 최대값을 갖는다. 또한 주요 기자재의 엑서지 파괴 인자(EDF)값을 비교해보면 저압축 압력이 증가함에 따라 After-cooler의 EDF는 크게 감소하나 압축기와 팽창기 EDF는 증가한다. 이러한 이유는 저압축 압력이 증가함에 따라 압축기와 팽창기의 입·출구 압력차가 작아져

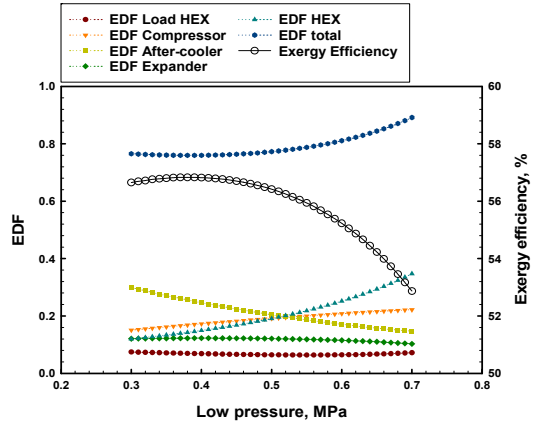


Fig. 7 Exergy efficiency and EDF with Low pressure

서 압축기 경우 압축일량이 감소한다. 그로 인해 압축기 토출 온도가 낮아지나 유량이 증가하기 때문에 After-cooler의 EDF가 감소한다. 또한 팽창기는 압력차가 감소할수록 팽창 효율 및 팽창일량이 급격하게 감소하며 그로 인해 순수일량(W)이 증가하고 엑서지 효율은 급격하게 감소한다.

3.5 고압축 압력의 영향

Fig. 8은 고압축 압력 변화에 따른 역브레이튼 극저온 냉각사이클의 엑서지 효율과 엑서지 파괴 인자(EDF)의 변화를 나타낸 것이다. 고압축 압력이 증가하면서 엑서지 효율이 약 0.5%로 조금 증가하였다. 또한 주요 기자재의 엑서지 파괴 인자(EDF)값을 비교해 보면, After-cooler의 EDF가 가장 높으며 부하 열교환기의 EDF가 가장 낮다.

고압축 압력이 증가하면서 After-cooler를 제외한 기자재들의 EDF는 소폭 감소한다. 그 이유는 고압축 압력이 증가함에 따라 압축기와 팽창기의 입·출구 압력차가 커지는데 압축일량의 변화보다 팽창기의 일량이 미소하게 더 감소하여 결과적으로 순수일량(W)이 감소한다. 즉, 엑서지 효율을 구하는 식에서 순수일량 감소와 전체 EDF 증가로 인하여 엑서지 효율은 감소한다.

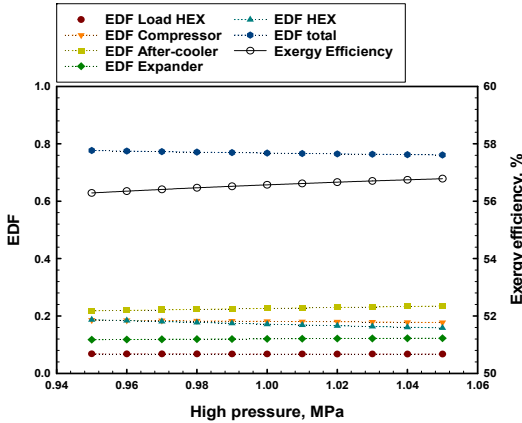


Fig. 8 Exergy efficiency and EDF with High pressure

3.6 열교환기 유용도의 영향

Fig. 9는 열교환기 유용도 변화에 따른 역브레이튼 극저온 냉각사이클의 엑서지 효율과 엑서지 파괴 인자(EDF)의 변화를 나타낸 것이다. 열교환기 효율이 증가할수록 열교환기의 EDF가 급격하게 감소하기에 전체 EDF는 감소하였고 이러한 영향으로 엑서지 효율은 약 19.8 % 정도 증가하였다. 열교환기 유용도가 0.96인 경우 팽창기 입·출구 온도는 각각 86.94 K, 68.92 K이고, 0.99인 경우는 80.53 K, 63.8 K으로 나타났으며, 열교환기 유용도가 증가함에 따라 열전달량 증가로 팽창기

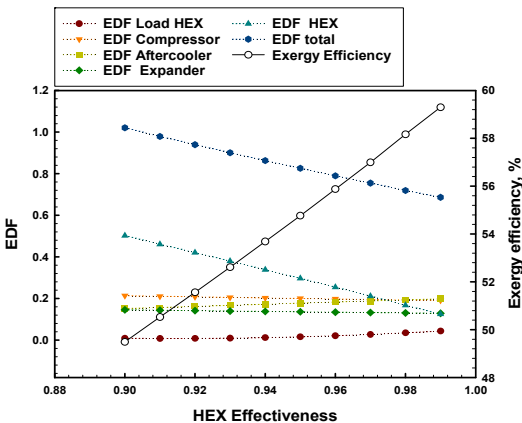


Fig. 9 Exergy efficiency and EDF with HEX effectiveness

입·출구의 온도가 낮아졌고 팽창기 입·출구의 엔탈피 차가 순수일량(W)의 변화량에 비해 크게 감소하여 팽창기의 EDF는 소폭 감소하였다. 나머지 기자재 경우의 순수일량(W)과 EDF가 소폭 증가하였으나 열교환기 유용도가 증가함에 따라 열교환기 내 엔트로피 변화가 크게 감소하여 전체 EDF는 크게 감소하였고 엑서지 효율은 크게 상승하는 것을 나타내었으며, 이러한 이유로 열교환기 유용도가 역브레이튼 극저온 냉각시스템에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4. 결론

지금까지 본 논문에서 역브레이튼 냉동기 시스템의 엑서지 효율에 미치는 시스템의 고압과 저압, 압력강하, 압축기와 팽창기의 효율변화의 인자들에 대해 살펴보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 압축기와 팽창기의 효율 증가는 전·후단의 엔트로피 차이를 줄이며 이러한 비가역의 감소는 전체 엑서지 효율 증가에 큰 영향을 주는 것으로 확인할 수 있었고 부하 열교환기 압력 강하가 증가 할수록 엑서지 효율이 감소함을 알 수 있었다.

2) 시스템의 고압과 저압은 차이가 클수록 팽창 일량의 증가로 인한 순수일량이 감소하게 되며 이는 시스템 엑서지 효율을 크게 높일 수 있는 인자임을 확인할 수 있었다.

3) 열교환기 유용도는 압축기 및 팽창기 일량을 감소시킴으로 매우 큰 엑서지 효율 증가 경향을 나타냈고 역브레이튼 극저온 냉각시스템 성능에 열교환기 유용도가 가장 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

역브레이튼 극저온 냉각시스템은 극저온 영역에서 사용되므로 일반 냉동 시스템과 다르게 효율이 낮아 엑서지 분석을 통한 최적화가 필요하다. 본 시스템의 엑서지 효율을 향상시키기 위해서는 구성되는 주요 기자재의 엑서지 파괴를 파악해야 하며 이러한 분석은 역브레이튼 극저온 냉각시스템 최적 설계에 중요한 기초 자료가 될 것이라 판단된다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 주요사업의 지원에 의한 것입니다.

Author contributions

J. I. Yoon; Conceptualization, Investigation, Writing - original draft, J. S. Ko; Methodology, H. K. Yeom; Project administration, D. Y. Koh; Validation, H. S. Jeong; Visualization, J. H. Choi; Data curation, C. H. Son; Writing-review & editing, K. T. Lee; Writing-review & editing, Supervision.

References

1. S. J. Lee, S. Y. Kang, M. W. Park, D. Y. Won, J. U. Yoo and H. S. Yang, 2020, "Performance Analysis of Real-Scale 23 kV/60 MVA Class Tri-Axial HTS Power Cable for Real-Grid Application in Korea", *Energies* 2020, 13, 2053. (<https://doi.org/10.3390/en13082053>)
2. J. I. Yoon, 2013, "Effect on Heat Exchangers Efficiency on Performance of Cryogenic Refrigeration Cycles", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 58-63
3. B. Dudley, 2017, "BP Energy Outlook", *British Petroleum*, London, England, pp. 14-15.
4. A. K. Dhillon and P. Ghosh, 2020, "Performance characteristics map using exergy analysis of reverse Brayton cryocooler for HTS applications: Selection, Optimization, Design and Operational guidelines", *Cryogenics*, Vol. 106, 103024. (<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.103024>)
5. H. M. Chang, C. W. Park, H. S. Yang, S. H. Sohn, J. H. Lim, S. R. Oh, and S. D. Hwang, 2012, "Thermodynamic design of 10 kW Brayton cryocooler for HTS cable", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1434, Issue 1, pp. 1664-1671. (<https://doi.org/10.1063/1.4707099>)
6. S. K. Kochunni and K. Chowdhury, 2019, "LNG boil-off gas reliquefaction by Brayton refrigeration system - Part 1: Exergy analysis and design of the basic configuration", *Energy* 2019, Vol. 176, pp. 753-764.
7. H. S. Son, and J. K. Kim, 2020, "Energy-efficient process design and optimization of dual-expansion systems for BOG (Boil-off gas) Re-liquefaction process in LNG-fueled ship", *Energy* 2020, Vol. 203, 117823. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117823>)
8. J. W. Lee, C. H. Lee, H. S. Yang and S. H. Kim, 2016, "Design of Thermodynamic Cycle and Cryogenic Turbo Expander for 2 kW Class Brayton Refrigerator", *KEPCO Journal of the Electric Power and Energy*, Vol. 2, No. 2, pp. 299-305. (<https://doi.org/10.18770/KEPCO.2016.02.02.299>)
9. M. J. Chung, W. S. Jung, H. M. Chang, 2009, "Thermal System Design of Brayton Refrigeration Cycle for Production of Subcooled Liquid Nitrogen at 65K", *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 231-234.
10. H. M. Chang, M. J. Chung, M. J. Kim and S. B. Park, 2009, "Thermodynamic design of methane liquefaction system based on reversed-Brayton cycle", *Cryogenics*, No. 49, pp. 226-234.
11. Aspen HYSYS. Version 8.0, Aspen Technology Inc, 2013.
12. D. Y. Peng and D. B. Robinson, 1976, "A new two-constant equation of state", *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 15, No. 1, pp. 59-64.
13. Z. Shengjun, W. Huaixin and G. Tao, 2011, "Performance comparison and parametric optimization of subcritical organic rankine cycle(ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation", *energy* 2011, Vol. 88, No. 8, pp. 2740-2754.