

액화수소 운반선의 증발가스 재액화 비율에 따른 재액화 시스템의 설계 및 평가

조옥래* · 이현용** · 류보림*** · † 강호근

*,**한국선급 책임검사원, ***한국해양대학교 대학원 석사과정생, LNG병커링기술센터 연구원,

† 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, LNG병커링기술센터 센터장

Design and Assessment of Reliquefaction System According to Boil Off Gas Reliquefaction Rate of Liquefied Hydrogen Carrier

Wook-Rae Cho* · Hyun-Yong Lee** · Bo-Rim Ryu*** · † Ho-Keun Kang

*,**Senior Surveyor, Korean Register, Busan 46762, Korea

***Master's Course, Department of Marine System Engineering, Graduate School, Korea Maritime & Ocean University, Korea
Researcher, LNG Bunkering Technology Center, Korea

† Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Korea
Director, LNG Bunkering Technology Center, Korea

요 약 : 액화 수소 운반선에서 증발가스의 발생은 불가피하며, 화물탱크 내부의 압력 문제를 피하기 위해 적절한 조치가 필요하다. 이 증발 가스는 선박의 추진연료로 사용 될 수 있으며, 추진에 사용되고 남은 나머지 부분은 재액화 또는 연소시키는 등 효과적으로 관리해야 한다. 본 연구에서는 수소 추진 시스템을 갖춘 160,000m³ 액화 수소 운반선에 최적화된 증발 가스 재액화 시스템을 제안한다. 이 시스템은 수소 압축 및 헬륨 냉매 섹션으로 구성되고, 화물탱크로부터 배출되는 증발가스의 냉열을 효과적으로 활용하여 효율을 증가시켰다. 본 연구에서는 공급 온도 -220℃인 수소 증발가스가 재액화 시스템에 들어가는 상태에서 증발가스의 재액화 비율에 따른 엑서지 효율 및 에너지 소모율 (SEC, Specific Energy Consumption) 분석을 통해 시스템을 평가하였다. 그 결과 재액화 비율 20%에서 4.11kWh/kgLH₂의 SEC와 60.1%의 엑서지 효율을 보여 주었다. 아울러, 수소 압축압력, 수소 팽창기의 입구온도, 공급 증발가스 온도변화에 따른 영향을 확인하였다.

핵심용어 : 수소, 증발가스, 재액화, 액화 수소 운반선, Exergy efficiency, Specific Energy Consumption

Abstract : BOG (Boil Off Gas) generation is unavoidable in the liquefied hydrogen carrier, and proper measures are necessary to prevent pressure problems inside the cargo tank. The BOG can be used as propulsion fuel for ships, and the remaining parts used for propulsion must be effectively managed, such as in the form of reliquefying or burning. This study proposes a BOG reliquefaction system optimized for a 160,000 m³ liquefied hydrogen carrier with a hydrogen propulsion system. The system comprises a hydrogen compression and helium refrigerant section, and increases the efficiency by effectively using the cold energy of the BOG discharged from the cargo tank. In this study, the system was evaluated through the exergy efficiency and SEC (Specific Energy Consumption) analysis according to the rate of the reliquefaction of the BOG while the hydrogen BOG with a supply temperature of -220℃ entered the reliquefaction system. As a result, it showed SEC of 4.11 kWh/kgLH₂ and exergy efficiency of 60.1% at the rate of reliquefaction of 20%. And the parametric study of the effects of varying the hydrogen compression pressure, inlet temperature of the hydrogen expander, and the feed hydrogen temperature was conducted.

Key words : hydrogen, boil off gas, reliquefaction, liquefied hydrogen carrier, exergy efficiency, specific energy consumption

1. 서 론

선박에 디젤엔진이 사용된 이래 약 100년의 시간이 지난 현재, 기후 변화에 따른 환경 규제의 필요성에 대한 국가 간의 인식공유가 확대되고 있다. 선박과 관련한 환경 규제의

강화와 관련 하여 선박의 연비 효율의 개선 및 온실가스 배출을 감축하려는 대응방안으로, 선체 구조의 개선, 선박 속도의 최적화, 화물의 적재 관리, 황산화물 후처리 장치(SOx Scrubber)의 적용 또는 저유황유 사용, 액화천연가스(LNG) 및 액화 수소(LH₂)와 같은 친환경 연료의 사용 등 여러 가지

† Corresponding author : 종신회원, hkkang@kmou.ac.kr 051)410-4260

* 종신회원, wrcho@krs.co.kr 070)8799-8924

** 정회원, leehy@krs.co.kr 070)8799-8553

*** 정회원, ryuborim@g.kmou.ac.kr 051)410-4862

방법이 논의되고 있다.

이러한 상황에서 장기적인 관점으로 볼 때 수소는 최종 사용에 높은 에너지 밀도와 친환경적이고 지속 가능한 에너지를 제공한다는 측면에서 육·해상 구분 없이 미래의 유망한 에너지로 인식되고 있다(Lowesmith et al., 2014).

수소에 관한 관심은 많은 국가에서 지속적으로 증가하고 있으며, 광범위한 연구·개발이 진행되고 있다. 현재 수소에 대한 전 세계 수요는 세계 1차 에너지 소비의 약 2%에 해당하며, 이는 앞으로 더욱 증가할 것으로 예상된다(Verfondern, 2008).

이러한 상황에서 미래의 에너지원인 수소를 선박으로 운송하는 것은 대량으로 장거리 운송이 가능하다는 측면에서 실용적인 방법이 될 수 있다. 이때 액화 수소 운반선에서의 증발가스(BOG) 발생은 필수 불가결한 부분이며 이로 인한 화물탱크 내부의 압력 증가에 따른 문제를 피하기 위해 적절한 조치가 필요하다. 이 증발가스를 선박의 추진에 이용할 경우 환경 규제에 대한 한 가지 대응방법이 될 수 있으며, 추진에 사용되고 남은 잔여 증발가스는 재액화 시스템을 통해 관리할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 미래의 유망한 에너지원인 수소의 선박 운송과 관련하여 증발가스의 효율적인 관리를 위하여 아래와 같은 목표를 정하였다.

첫째, 액화 수소 운반선에서 발생하는 증발가스 일부를 선박의 추진 연료로 사용하고 나머지를 재액화 하는 선박용 증발가스 부분 재액화 시스템을 설계 한다.

둘째, 제안된 시스템에 대한 재액화 비율별 엑서지 효율 및 에너지 소모율 확인을 통해 전체 시스템을 평가 하고 각 구성품(Component)의 엑서지 효율 및 엑서지 파괴 결과를 확인하여 성능 개선이 요구되는 구성품을 확인 한다.

셋째, 수소 팽창기의 입구온도, 수소 압축압력, 공급 증발가스 온도 등 주요 조건의 변화에 따른 파라메타 연구를 수행 한다.

2. 수소 증발가스 재액화 시스템 설계

선박을 이용한 액화 수소의 운송과 관련하여 IMO의 'Interim recommendations for carriage of liquefied hydrogen in bulk'에서 증발가스가 LNG보다 특히 수소의 경우 더 큰 문제가 될 수 있음을 알 수 있다(IMO, 2016). 따라서 액화 수소 운반선에서 증발가스를 관리하는 수단을 신중하게 고려해야 한다. 수소의 선박을 통한 운반과 관련하여 액화 수소 운반선은 LNG 운반선과 유사하므로 LNG 운반선의 증발가스 관리에 대한 문헌 검토를 아래와 같이 수행하였다.

LNG 운반선은 선박 설계 및 선박 작동 모드에 따라 선상에서 발생 된 증발가스를 다르게 관리한다. 증발가스는 추진용 연료로써 사용될 수 있고, 추진 장치에 대한 수요를 충족 시키기에 충분하지 않으면 화물탱크의 LNG는 연료로 사용하기 위해 추출 및 기화될 수 있다. 반대로, 증발가스의 양이

추진 장치에 대한 수요를 초과할 때, 과잉의 증발가스는 그 에너지를 사용하거나 재액화하지 않고 GCU에서 연소시킬 수도 있다(Fernández et al., 2017). Choi et al.(2014)는 냉매로 증발가스를 사용하는 오픈 루프 사이클을 갖는 부분 재액화 시스템을 도입했고, 이는 연료를 고압 엔진에 공급하는데 최적화되어 있으며 연료 공급 후 남아있는 증발가스를 재액화 할 수 있다. Tan et al.(2016)은 LNG 운반선의 부분 재액화 시스템의 성능을 다양한 재액화 비율로 연구하였다. Gómez et al.(2015)는 캐스케이드 냉동 사이클을 갖춘 선상 재액화 시스템을 제안하고 조사했다. 여기서 재액화 시스템의 증발가스 압축기는 연료 가스 공급에 사용된다. 또한, 시스템 성능을 향상시키기 위해, 증발가스의 냉열 에너지 회수 및 증발가스 압축열 제거에 해수를 이용한 냉각기가 제안되었다. Tan et al.(2018)은 LNG 운반선을 위한 이중 혼합 냉매 사이클을 사용하는 증발가스 재액화 시스템을 제안하였고 에너지 및 엑서지 분석을 통해 평가했다. 또한, 메인엔진에서의 증발가스 소비로 인한 재액화율이 감소함에 따라 COP 및 엑서지 효율이 증가하고 에너지 소모율이 감소되는 것으로 밝혀졌다. 이러한 가운데 수소액화와 LNG액화를 비교해 볼 때 수소액화에 필요한 최소이론에너지는 3.91kWh/kg(LH₂)인 반면 메탄에는 0.31kWh/kg(LNG)가 필요하다. 이는 수소액화 프로세스가 메탄보다 훨씬 에너지 집약적 프로세스임을 보여 준다(Peschka, 2012).

따라서 LNG 운반선의 액화 시스템에 관한 내용과 함께 육상 수소 액화 시스템을 참조하여 액화 수소 운반선에서의 증발가스 관리를 위한 재액화 시스템을 설계하고 최적화해야 할 필요성이 있다. 이에 따라 육상 수소 액화 시스템에 대한 문헌 검토가 아래와 같이 수행되었다.

Yuksel et al.(2017)은 헬륨 냉각 수소 액화 사이클을 기반으로 한 초 임계 수소 액화 공정 (supercritical hydrogen liquefaction process)을 에너지 및 엑서지 분석을 통해 연구했다. 이 연구에서는 수소 및 헬륨 압력의 증가가 엑서지 파괴 및 엑서지 효율에 미치는 영향에 대해 확인하였고, 또한 공정 매개 변수 및 작동조건의 변화에 따른 영향을 조사하여 시스템의 성능을 분석 하였다. Valenti and Macchi(2008)은 수소의 냉각 및 액화를 위해 4개의 헬륨 회복식 줄-브레이튼 사이클(Helium recuperative Joule-Brayton cycles)의 활용을 제안했다. 60bar 및 300K의 수소 공급 조건에서 사이클의 에너지 소모율은 약 5kWh/kgLH₂이고 엑서지 효율은 47.7%로 확인되었다.

위에서 살펴본 바와 같이 LNG 운반선 및 육상의 수소 증발가스 액화 시스템에 대한 다양한 연구가 수행 되었으나, 액화 수소를 선박을 통하여 운반하고 이때 발생하는 증발가스의 부분 재액화에 대한 연구는 수행 된 바 없다. 이에 따라 본 연구에서는 기존 연구의 증발가스 관리 시스템 및 평가 방법을 참고하여 액화수소 운반선의 화물 탱크에서 발생한 증발가스를 부분 재액화 할 수 있는 시스템을 Fig.1과 같이

설계하였다.

본 연구에서는 제안된 시스템에 대해 에너지 및 엑서지 관점에서 분석하였다. 본 연구에 적용된 선박은 4개의 IMO B type prismatic 카고 탱크로 구성된 총 화물 용량 160,000 m³의 액화 수소 운반선으로 액화 수소가 탱크 내에서 1bar의 압력으로 저장되며, 동일한 압력에서 하루 0.3%의 증발가스가 생성된다. 본 연구의 액화 수소 운반선 각 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of liquefied hydrogen tanker in this study

Items	Values
Ship classification	Gas carrier
Cargo tanker capacity	160,000 m ³
Deadweight (DWT)	31,000 ton
Service speed	18 knots
Type of cargo tank	IMO Type B prismatic
Boil-off rate (BOR)	0.3 %/day

본 연구의 수소 증발가스 부분 재액화 시스템은 수소 압축 섹션과 헬륨 냉매 섹션으로 구성되어 있다. 선박 운항 중 액화 수소 탱크 내에서 발생한 증발가스는 탱크의 압력을 상승시키게 되고, 상승한 압력이 탱크의 설정 압력보다 커지면 저장 탱크와 연결된 밸브가 열려 저온 저압(-220℃, 1bar)의 상태로 증발가스가 배출된다. 이 증발가스는 증발가스 간의 열교환이 가능한 열교환기 HEX-1으로 들어간다.

HEX-1을 통과한 증발가스는 압축기 Comp-1, Comp-2 및 Comp-3을 통해 1bar에서 20bar까지 압축되고, 해수를 사용하는 냉각기 CR-1에 의해 40℃로 냉각된다.

압축된 증발가스 스트림 H6은 열교환기 HEX-2로 들어가 연료 가스 스트림 HF3에 의해 다시 냉각된다.

공급된 증발가스 스트림 H1의 냉열은 앞서 설명한 증발가스 간의 열교환기 HEX-1에서 압축 증발가스 스트림 H8과 열 교환을 한다.

압축 및 냉각된 가스 스트림 H9는 연료 공급을 위한 스트림 HF1과 재액화를 위한 스트림 H10의 두 개의 스트림으로 나뉘진다.

열교환기 HEX-3에서 스트림 H10을 냉각시키기 위해, 스트림 HF1이 팽창기 EXP-1에 의해 저온 저압으로 팽창된다.

팽창기 EXP-1 및 열교환기 HEX-3을 통과한 저온의 연료 스트림 HF3은 고압 증발가스 스트림 H6과 열 교환을 한다.

그런 다음 적절한 온도로 예열된 연료 가스 스트림은 전력 생산을 위해 연료 전지 시스템에 공급된다.

한편 열교환기 HEX-3에서 배출된 증발가스 스트림 H11은 액체 상태로 열교환기 HEX-4로 유입되고, 헬륨 회복식 줄-브레이튼 사이클에 의해 냉각된다. 헬륨은 수소보다 임계 온도가 낮고, 열전달 능력이 우수하며 (Valenti and Macchi, 2008) 또한 불활성 가스이기 때문에 냉매로 수소를 사용하는 시스템에 비해 누출로 인한 폭발 위험을 줄일 수 있는 (Yuksel et al., 2017) 장점에 의해 이 냉동 사이클에서는 헬륨을 냉매로 채택하였다.

헬륨 회복식 줄-브레이튼 사이클에서 냉매는 압축기 Comp-4 및 Comp-5에 의해 1bar에서 10bar로 압축된다. 냉각기 CR-2 및 CR-3는 각 압축기에서 나온 고온의 스트림을 40℃까지 냉각한다.

압축된 헬륨 스트림 M5는 열교환기 HEX-5로 유입되어 스트림 M8에 의해 냉각된다.

이후, 냉각된 헬륨 스트림 M6은 팽창기 EXP-2에 의해 저온 저압이 되어 수소 스트림 H11을 냉각시킨다.

열교환기 HEX-4에서 배출된 스트림은 고압 상태에서 탱크 화물 온도에 가깝게 냉각되고, 단상 습식 팽창기(single phase wet expander) EXP-3을 통해 1bar로 팽창된다. 높은 엔트로피 생성 및 비가역성으로 인해 J-T (Joule-Thomson) 팽창을 피해야 하는 반면, 고효율의 발전이 바람직하기 때문에 습식 팽창기를 선택하였다(Yuksel et al, 2017).

마지막으로 팽창기 EXP-3의 토출 스트림은 분리기 V1로 들어간다. 액화 수소 스트림은 카고 탱크로 복귀되고 분리된 수소 가스 스트림은 탱크에서 발생한 증발가스와 다시 합쳐진다.

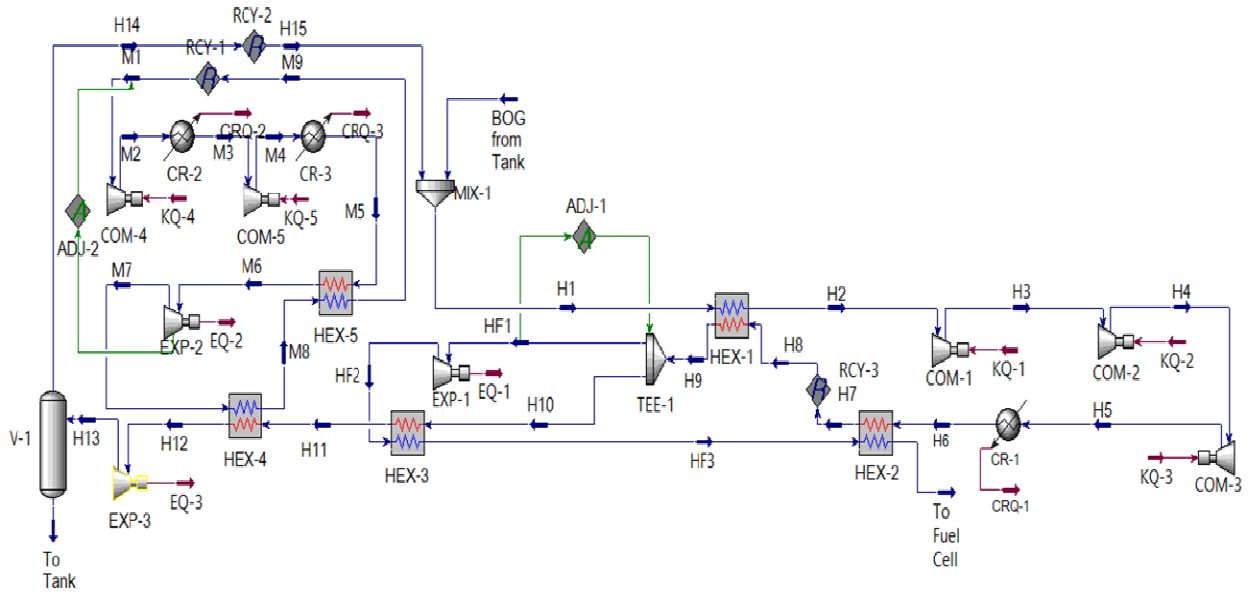


Fig. 1 Design of the re-liquefaction system for liquefied hydrogen tanker

3. 에너지 소모율 및 엑서지

본 연구에서 제안한 증발가스 재액화 시스템의 시뮬레이션은 ASPEN-HYSYS 소프트웨어에 의해 수행되었다.

열역학적 시스템 분석은 다음과 같은 일반적인 가정을 기반으로 하여 수행되었다.

- 1) 액화 수소는 화물탱크에 1bar, -253℃로 저장되고 동일한 압력에서 증발가스가 생성된다.
- 2) 증발가스의 총 질량 유량(mass flow rate)은 1,400kg/h로 설정되며, 이는 총 용량 160,000 m³ 액화수소 운반선에서 하루 0.3 %의 증발이 일어날 때의 증발 속도와 같다.
- 3) 증발가스가 발생하여 화물탱크에서 재액화 시스템으로 이송 중 헤더 파이프를 통한 열 유입으로 인해 재액화 시스템으로 유입되는 증발가스 온도는 -220℃가 된다.

3.1 에너지 소모율

본 연구에서는 에너지 소모율의 분석을 통해 전체 시스템의 성능을 평가하였다. 높은 에너지 소모율은 공정의 에너지 효율이 낮음을 나타낸다. 에너지 소모율은 에너지 소비를 연료로 사용된 것을 제외한 재액화 수소의 질량으로 나눈 것으로 다음과 같이 정의된다(Vatani et al, 2014).

$$SEC(kWh/kg_{LH2}) = \frac{W_n}{m_{Re-liquefied.H2}} \quad (1)$$

수소의 최소 액화 에너지가 3.91kWh/kg인 반면, 메탄 및 질소의 에너지는 각각 0.31kWh/kg 및 0.21kWh/kg이기 때문에 수소 액화 시스템에 관한 연구에서 에너지 소모율을 줄이는 것은 가장 중요한 요소 중 하나이다(IMO, 2016).

3.2 엑서지 분석

엑서지는 기준이 되는 환경과 상호 작용하면서 이 환경과 평형 상태에 도달할 때 스트림으로부터 얻을 수 있는 유용한 에너지의 최대량으로 정의된다(Tsatsaronis, 2007).

엑서지 분석은 본 연구에서 소개된 시스템의 각 구성품에 대한 엑서지 파괴 및 엑서지 효율을 측정하기 위해 적용되었다.

식 (2) 는 1bar, -220℃의 수소 증발가스가 공급되어, 1bar, -253℃로 액화될 때의 엑서지 효율과 에너지 소모율 사이의 관계를 나타내고 또한 이론적인 최소 에너지 소비를 계산하는 데 사용된다.

$$SEC(kWh/kg_{LH2}) = \frac{(e)_{Re-liquefied.H2} - (e)_{Boil-off.H2}}{\eta_{ex}} \quad (2)$$

4. 시스템 분석

4.1 엑서지 및 에너지 소모율 분석 결과

본 연구에서 제안한 수소 증발가스 부분 재액 시스템은 그 재액화 비율을 조정하며 엑서지 및 에너지 관점에서 평가하였다.

Table 2는 재액화 비율의 증가에 따른 엑서지 효율의 변화

및 에너지 소모율의 변화를 나타낸다. 결과는 화물탱크에서 생성된 증발가스의 20%가 재액화될 때, 엑서지 효율이 최댓값인 60.1%를 달성하고 에너지 소모율은 4.1kWh/kgLH2의 최솟값에 도달함을 보여 준다. 이러한 재액화 비율별 엑서지 효율 및 에너지 소모율의 변화를 통해 연료량, 즉 제안된 시스템에서의 냉매의 역할을 하는 증발가스 양이 증가함에 따라 시스템 효율이 높아진다는 것을 알 수 있으며 이를 통해 증발가스의 냉열을 이용한 증발가스간의 열교환 개념이 효율에 큰 영향을 주는 시스템의 주요 요소임을 확인 할 수 있다.

Table 2 Exergy efficiency and specific energy consumption

Re-liquefaction ratio (%)	Exergy efficiency (%)	SEC (kWh/kg)
20	60.1	4.112
30	58.7	4.207
40	52.3	4.728
50	44.2	5.593
60	39.4	6.267
70	36.6	6.751

시스템의 각 구성품의 엑서지 효율 및 파괴는 Fig. 2와 같다. 결과는 팽창기 EXP-2에서 엑서지 효율이 18%로 가장 낮음을 확인할 수 있다. 팽창기 EXP-3 및 팽창기 EXP-1은 각각 두 번째, 세 번째로 효율이 낮은 구성품임을 알 수 있다. 특히, 작동온도가 낮을수록 팽창기의 엑서지 효율이 낮음을 확인할 수 있으며, 이는 낮은 온도에서의 엔트로피 생성이 더 높기 때문이다(Sadaghiani et al, 2017).

압축기에서도 이러한 작동온도와 효율의 관계가 설명된다. 수소 압축기 Comp-1에 비해 높은 작동온도의 Comp-3의 경우 효율이 86%로 Comp-1에 비해 11% 효율이 높음을 확인할 수 있다.

한편 열교환기 HEX-2와 냉각기 CR-2를 제외한 열교환기와 냉각기는 80% 이상의 엑서지 효율을 보였다. HEX-2와

CR-2의 효율이 다른 열교환기와 냉각기보다 낮은 것은 스트립 사이의 큰 온도 차이 때문이다. 이는 엑서지 파괴의 결과에서도 나타난다. 따라서 이러한 스트립간의 온도 차이를 줄이면 전체 시스템 엑서지 파괴를 효과적으로 줄이고 시스템 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

또한, 수소 팽창기 EXP-1의 엑서지 효율이 습식 수소 팽창기 EXP-3의 엑서지 효율보다 근소하게 높은 가운데, 엑서지 파괴 또한 높은 것으로 나타났다. 이는 구성 요소 성능을 보다 합리적인 방식으로 평가하기 위해 에너지 효율과 에너지 파괴를 동시에 고려해야 한다는 것을 의미한다(Vatani et al, 2014). 결론적으로 각 구성품의 엑서지 파괴값 및 엑서지 효율 각각의 확인을 통해 성능 개선여지가 큰 구성품을 확인할 수 있다.

4.2 파라메타 분석

4.2.1 수소 팽창기 입구온도 변화

수소 팽창기의 입구온도가 공정 성능에 크게 영향을 미치기 때문에(Valenti & Macchi, 2008) 수소 팽창기의 입구온도가 재액화 시스템의 엑서지 효율 및 에너지 소모율에 미치는 영향을 분석하고 Fig. 3 및 4에 나타내었다.

Fig. 3은 수소 팽창기의 입구온도가 -248℃일 때 엑서지 효율이 최대임을 보여 준다. 아울러 에너지 소모율의 경우 반대로 해당 조건에서 최소임을 알 수 있었다.

여기서 주목할 부분은 팽창기 입구온도를 상승시켰을 때 효율이 상승하고 에너지 소모율은 감소하는 경향을 나타내다가 -248℃ 이후 효율은 감소하고 Fig. 4에서 보는 바와 같이 에너지 소모율이 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 이것은 증발가스가 비교적 따뜻한 온도에서 팽창될 때, 유체의 일부가 증기로 다시 변환되어 공급 증발가스 스트림과 합쳐져 수소 팽창기의 일을 증가시킨다는 사실에 의해 설명될 수 있다. 이러한 결과를 통해 최적의 팽창기 입구온도에 대한 관리가 필요하다는 것을 알 수 있다.

액화수소 운반선의 증발가스 재액화 비율에 따른 재액화 시스템의 설계 및 평가

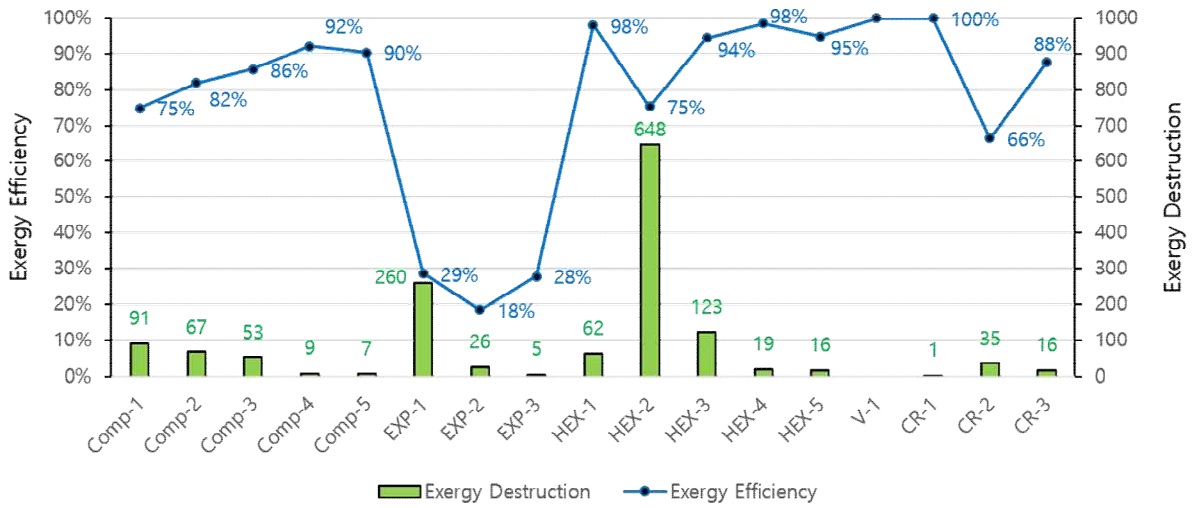


Fig. 2 Exergy efficiency and destruction of each component

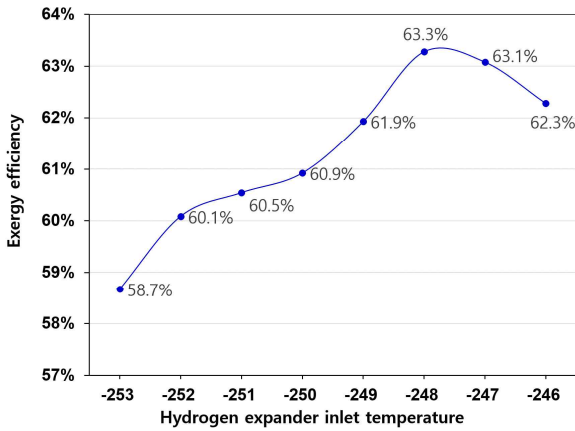


Fig. 3 Exergy Efficiency of varying Expander inlet temperature

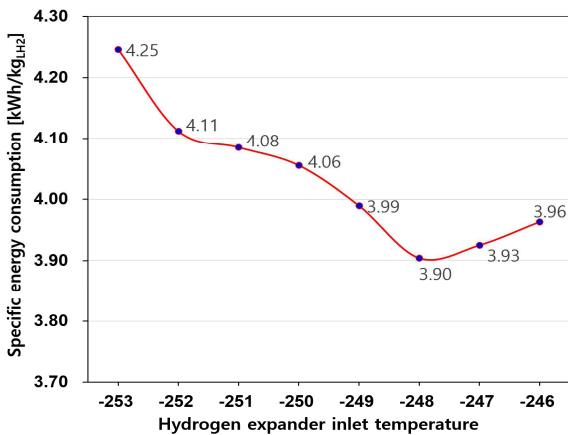


Fig. 4 SEC of varying Expander inlet temperature

4.2.2 수소 압축압력 변화

수소 압축압력의 변화에 따른 수소 재액화 시스템의 엑서지 효율 및 에너지 소모율에 대해 그 결과를 Fig. 5 및 6에 나타내었다.

Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 압력이 20bar에서 60bar로 증가함에 따라 엑서지 효율은 약 60%에서 39%로 감소하고, Fig. 6의 에너지 소모율은 4.11kWh/kgLH₂에서 6.36 kWh/kgLH₂로 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 각 구성품의 엑서지 파괴를 통해 설명될 수 있다. 수소 압축압력이 증가함에 따라 수소 온도가 상승하고 이에 따라 냉각기와 열교환기에서 엑서지 파괴가 증가하게 되어 결론적으로 전체 시스템의 효율 감소 및 에너지 소모율의 증가를 가져온다. 이를 통해 수소 압축압력의 관리가 필요함을 확인할 수 있다.

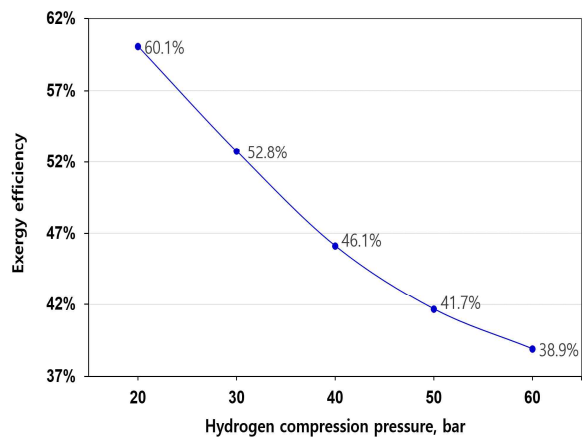


Fig. 5 Exergy Efficiency of varying Hydrogen compression pressure

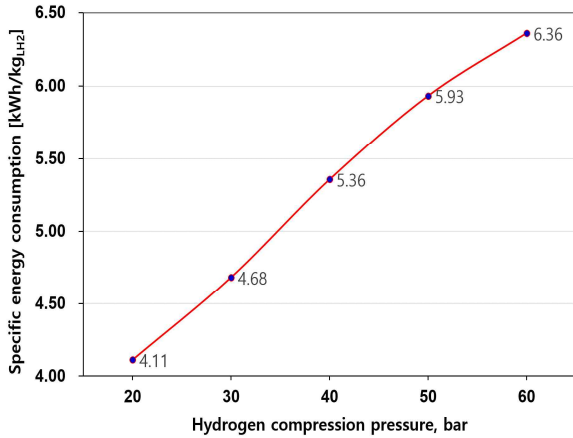


Fig. 6 SEC of varying Hydrogen compression pressure

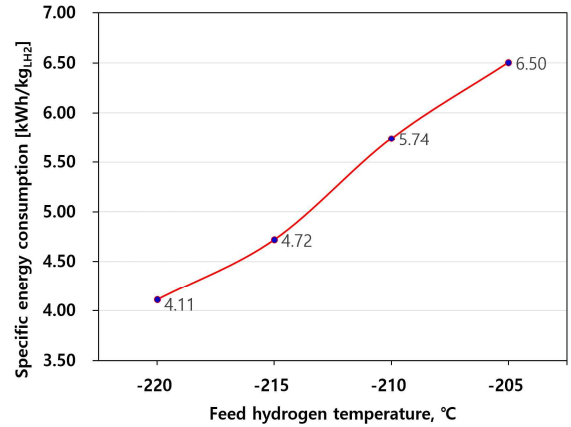


Fig. 8 SEC of varying BOG feed temperature

4.2.3 증발가스 공급 온도변화

재액화 시스템으로 들어가는 증발가스는 각 화물탱크에서 재액화 시스템으로 이송되는 동안 헤더 파이프를 통한 외부 열 유입에 의해 가열된다. 따라서 공급되는 수소 증발가스의 온도변화에 대한 시스템의 엑서지 효율 및 에너지 소모율의 변화를 확인하였다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 공급 온도를 -220°C에서 -205°C로 증가시키면 시스템의 엑서지 효율은 약 60%에서 약 39%로 낮아진다. 반대로 Fig. 8의 에너지 소모율의 경우 -220°C 조건의 4.11kWh/kgLH₂에서 -205°C에서는 약 58% 증가한 6.50kWh/kgLH₂로 나타난다.

이러한 결과는 공급 증발가스와 압축기에서 배출된 증발가스가 만나는 열교환기 HEX-1에서의 효율적인 열 교환이 시스템 성능에 큰 영향을 준다는 것을 의미한다(Fig. 1 참조). 결론적으로, 전체 시스템 성능을 향상시키기 위해서는 시스템 구성 요소의 효율을 향상시키는 것뿐만 아니라 효과적인 단열 시스템을 적용하여 헤더파이프를 통한 열 유입을 최소화하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

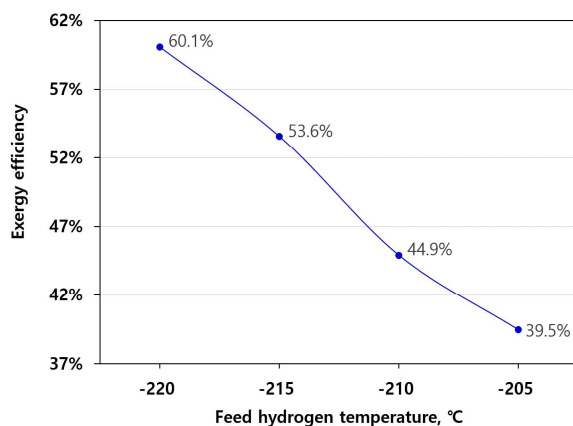


Fig. 7 Exergy Efficiency of varying BOG feed temperature

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 미래의 유망한 에너지원인 수소의 선박 운송과 관련하여 액화수소 운반선에서 발생하는 증발가스의 일부를 선박의 추진 연료로 사용하고 나머지를 재액화 하는 선박용 증발가스 부분 재액화 시스템을 설계 하였다.

제안된 시스템에 대해 재액화 비용별 엑서지 효율 및 에너지 소모율 확인을 통하여 전체 시스템 평가 하였고, 그 결과 제안된 시스템에서 냉매의 역할을 하는 연료량이 증가함에 따라 시스템 효율이 증가한다는 것을 알 수 있었다.

아울러 각 구성품의 엑서지 효율 및 엑서지 파괴를 확인한 결과 구성 요소의 성능을 보다 합리적인 방식으로 평가하기 위해서 에너지 효율과 에너지 파괴를 동시에 고려해야 하며 이에 따라 엑서지 파괴 값이 큰 열교환기 HEX-2와 엑서지 효율이 낮은 팽창기 EXP-2가 우선적으로 성능 개선이 요구되는 구성품임을 확인 할 수 있었다.

마지막으로 파라메타 연구 결과, 팽창기 입구온도가 -24.8°C일 때 최고의 효율을 보였고 이에 따라 최적의 팽창기 입구온도에 대한 관리가 필요하다는 것을 확인 할 수 있었다. 아울러 수소 압축압력과 증발가스 공급온도를 증가시키에 따라 엑서지 효율은 감소하고 에너지 소모율은 증가함을 확인 할 수 있었다. 이에 따라 수소 압축압력의 관리가 필요함을 알 수 있었고, 증발가스의 냉열이 유지 될 수 있는 단열 시스템을 적용하여 헤더파이프를 통한 열 유입을 최소화하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 2020년도 수소 선박 안전기준개발사업[수소 선박 누출 예방 및 피해경감 기준개발, No. PJT201293]과 LNG 병커링 핵심기술 개발 및 체계구축사업[LNG 병커링 기자재 시험평가 및 시험기술 개발, No.10085629]의 지원을 받아 수행한 연구임.

Nomenclature

	Symbols
W_n	Net required power
\dot{m}	Mass flow rate
e	Mass exergy
η_{ex}	Exergy efficiency
	Abbreviations
BOG	Boil-off gas
BOR	Boil-off rate
COP	Coefficient of performance
COMP	Compressors
CR	Coolers
DWT	Deadweight
EXP	Expanders
GCU	Gas Combustion Unit
HEX	Heat exchangers
IMO	International Maritime Organization
LH ₂	Liquefied hydrogen
LNG	Liquefied natural gas
SEC	Specific energy consumption
SOx	Sulfur Oxides
V	Separators

References

- [1] Choi, D. K., Kang, J. K., Moon, Y., Jung, J., Kwon, O. and Kim, N. S.(2014). "Hybrid FGS system with partial Re-liquefaction unit for MEGI propelled LNG carrier.", In Gastech conf.
- [2] Fernández, I. A., Gómez, M. R., Gómez, J. R. and López-González, L. M.(2017), "H₂ production by the steam reforming of excess boil off gas on LNG vessels." *Energy Conversion and Management*, 134, pp. 301-313.
- [3] Gómez, J. R., Gómez, M. R., Bernal, J. L. and Insua, A. B.(2015), "Analysis and efficiency enhancement of a boil-off gas reliquefaction system with cascade cycle on board LNG carriers.", *Energy Conversion and Management*, 94, pp. 261-274.
- [4] International Maritime Organization (IMO)(2016), Interim recommendations for carriage of liquefied hydrogen in bulk. Resolution MSC. 420(97).
- [5] Lowesmith, B. J., Hankinson, G. and Chynoweth, S.(2014), "Safety issues of the liquefaction, storage and transportation of liquid hydrogen: An analysis of incidents and HAZIDS.", *Int J Hydrogen Energy*, 39, pp. 20516-20521.
- [6] Peschka, W.(2012), *Liquid hydrogen: fuel of the future*, Springer-Verlag Wien: New York.
- [7] Sadaghiani, M. S., Mehrpooya, M. and Ansarinasab, H.(2017), "Process development and exergy cost sensitivity analysis of a novel hydrogen liquefaction process.", *Int J Hydrogen Energy*, 42, pp. 29797-29819.
- [8] Tan, H., Shan, S., Nie, Y. and Zhao, Q.(2018), "A new boil-off gas re-liquefaction system for LNG carriers based on dual mixed refrigerant cycle.", *Cryogenics*, 92, pp. 84-92.
- [9] Tan, H., Zhao, Q., Sun, N. and Li, Y.(2016), "Enhancement of energy performance in a boil-off gas re-liquefaction system of LNG carriers using ejectors.", *Energy Conversion and Management*, 126, pp. 875-888.
- [10] Tsatsaronis, G.(2007), "Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics.", *Energy*, 32, pp. 249-253.
- [11] Vatani, A., Mehrpooya, M. and Palizdar, A.(2014), "Energy and exergy analyses of five conventional liquefied natural gas processes.", *Int J Energy Research*, 38, pp. 1843-1863.
- [12] Valenti, G. and Macchi, E.(2008), "Proposal of an innovative, high-efficiency, large-scale hydrogen liquefier.", *Int J Hydrogen Energy*, 33, pp. 3116-3121.
- [13] Verfondern, K.(2008), *Safety considerations on liquid hydrogen*, vol. 10, Forschungszentrum Julich GmbH: Julich.
- [14] Yuksel, Y. E., Ozturk, M. and Dincer, I.(2017), "Analysis and assessment of a novel hydrogen liquefaction process.", *Int J Hydrogen Energy*, 42, pp. 11429-11438.

Received 08 June 2020

Revised 09 July 2020

Accepted 15 July 2020