

Reverse Brayton 사이클과 Claude 사이클 기반 LNG 재액화 공정의 동특성 운전성능 비교

신 영 기[†], 서 정 아, 이 윤 표^{*}
세종대학교 기계공학과, *한국과학기술연구원

Comparison of Dynamic Operation Performance of LNG Reliquefaction Processes based on Reverse Brayton Cycle and Claude Cycle

Younggy Shin[†], Jung-A Seo, Yoon Pyo Lee^{*}

Department of Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul 134-747, Korea

^{*}Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, 136-791, KOREA

(Received July 22, 2008; revision received October 22, 2008)

ABSTRACT: A dynamic model to simulate LNG reliquefaction process has been developed. The model was applied to two candidate cycles for LNG reliquefaction process, which are Reverse Brayton and Claude cycles. The simulation was intended to simulate the pilot plant under construction for operation of the two cycles and evaluate their feasibility. According to the simulation results, both satisfy control requirements for safe operation of brazed aluminum plate-fin type heat exchangers. In view of energy consumption, the Reverse Brayton cycle is more efficient than the Claude cycle. The latter has an expansion valve in addition to the common facilities sharing with the Reverse Brayton cycle. The expansion valve is a main cause to the efficiency loss. It generates a significant amount of entropy associated with its throttling and increases circulation flow rates of the refrigerant and power consumption caused by its leaking resulting in lowered pressure ratio. It is concluded that the Reverse Brayton cycle is more efficient and simpler in control and construction than the Claude cycle.

Key words: LNG(액화천연가스), Reliquefaction(재액화), Reverse brayton cycle(역 브레이튼 사이클), Claude cycle(클로드 사이클), Dynamic model(동적모델)

1. 서 론

LNG(Liquefied Natural Gas) 운반선이 산지인 중동 지역에서 수요지인 한국 등으로 운항하는데 약 한 달 정도의 기간이 소요된다. 이 기간 중 약 -165℃인 LNG는 단열에도 불구하고 열이 유

입되어 기화하게 되며 탱크 내 압력이 상승한다. 압력 상승을 막기 위하여 현재의 LNG 운반선은 기화된 천연가스를 보일러 열원으로 이용하여 선박추진 모터의 전력을 생산하였다. 이 경우 전체 열효율은 약 30%인데 천연가스 가격이 상승함에 따라 기화된 가스를 동력원으로 사용하는 대신 재액화시켜 탱크 내로 순환시키고 선박 추진은 디젤기관을 사용하는 방안이 실용화되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 재액화 아이디어를 처음으로 상용화한 회사는 Hamworthy 사로서 현재 LNG 운반선을 건조

[†] Corresponding author
Tel.: +82-2-3408-3284; fax: +82-2-3408-4333
E-mail address: ygshin@sejong.ac.kr

중에 있다.⁽²⁾

Hamworthy사의 재액화 사이클은 잘 알려진 Reverse Brayton 사이클을 적용한 것이다. 본 연구에서는 Reverse Brayton 사이클 이외에 독자적으로 개발한 Claude 사이클의 타당성을 비교 검토한다. 이 두 사이클의 성능평가를 위한 파이롯트 플랜트가 인천 가스인수기지에 건립 중이며 본 연구는 실제 운전애 앞서 동특성 모사를 통해 각 사이클의 공정제어 및 성능의 타당성을 파악하고자 한다.

2. 공정 사이클 비교

2.1 Reverse Brayton 사이클

Fig. 1은 사이클 구성 및 공정제어를 위한 요소기와 밸브의 배치를 나타낸다. 냉매인 질소는 3단 압축기와 중간 냉각기를 통하여 상온 고압으로 압축된 후 Cold box 내 알루미늄 판형 열교환기인 HX200A와 HX200B를 거쳐 냉각된다. 냉각된 질소는 압축기 측에 연결된 팽창기(Expander)에서 포화상태보다 약간 과열된 $-163^{\circ}\text{C} \sim -168^{\circ}\text{C}$ 범위로 팽창된다. 냉각된 냉매는 응축기로 보내져 LNG 탱크에서 오는 천연가스(BOG; boil-off gas)를 냉각 액화시킨다. 여전히 저온인 냉매는 압축기 입구로 되돌아가는 과정 중에 HX200B와 HX200A에서 팽창기 입구로 가는 냉매와 열교환 하여 상온 근처로 가열된다.

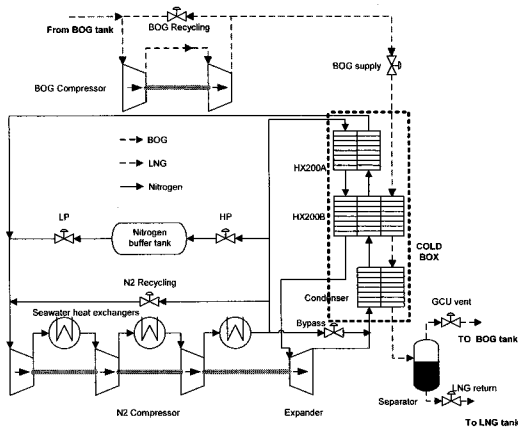


Fig. 1 Reverse Brayton cycle.

2.2 Claude 사이클

Fig. 2는 Claude 사이클 구성을 나타낸다. Reverse Brayton 사이클과의 차이점은 BOG 액화에 필요한 유량만큼만 팽창밸브로 분기하여 팽창 냉각시키고 나머지 유량은 팽창기로 보낸다. Reverse Brayton 사이클은 팽창기만으로 냉각하므로 BOG 유량 변화에 따라 적정 냉매순환량 확보를 위한 팽창기 출구 과열도 제어가 매우 민감하지만 Claude 사이클은 상대적으로 안정적이다.

3. 공정제어

공정제어는 설비의 기동, 정지 및 BOG 부하변동에 대응한 최적운전을 안정적으로 수행해야 한다. 제어의 목표는 과도운전영역에서 요소기에 무리를 주지 않으면서 BOG를 최소의 에너지로 액화시키는 것이다. 재액화 설비제어와 관련하여 해결해야 할 주요 과제는 다음과 같다: 1) 판형 열교환기 열응력 발생 최소화, 2) 팽창기 출구 과열도 제어, 3) 최소 동력에 의한 BOG 액화.

위의 과제 해결을 위한 구체적인 구속조건은 다음과 같다. 단열된 Cold box 내에 설치되는 판형 열교환기는 선박 내 제한된 공간 문제와 고효율 특성 때문에 선정되었으나 brazing 방식이기 때문에 열응력에 취약한 단점이 있다. 따라서 플랜트용 판형열교환기를 제조하는 업체들은 열교환기의 안전 사용을 위하여 ALPEMA(Brazed Aluminum Plate-Fin Heat Exchanger Manufacturer's

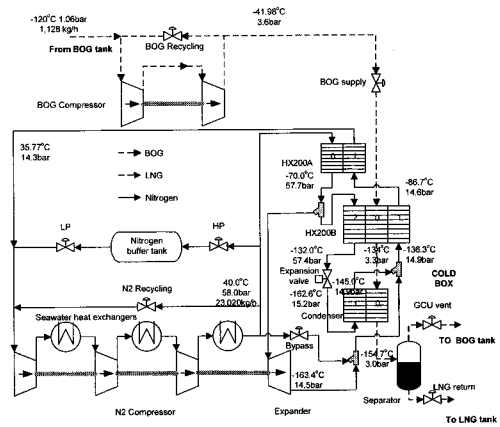


Fig. 2 Claude cycle.

Association) 규정을 만들었으며 공정제어와 관련하여 준수해야 할 기본 사항은 다음과 같다.⁽³⁾

- 1) 열교환기 온도 변화율은 분당 2℃를 넘지 않아야 한다.
- 2) 대향류간 허용 최대온도차는 50℃이내이다.
- 3) 이상유동 또는 주기적 온도변동이 있는 유체간 온도차는 20~30℃이내이다.

팽창기 출구에서는 터빈 날개를 보호하기 위해 질소의 응축이 일어나지 않아야 하므로 과열도가 최소 2~3℃ 이상은 확보되도록 제어해야 한다. 운항 중 BOG 발생량은 수시로 변할 수 있기 때문에 냉각해야 할 BOG 유량에 따라 냉매순환량을 최적으로 줄여 소비동력을 최소화해야 한다.

3.1 제어 알고리즘

초기 기동 시에는 설비가 상온조건에 있으므로 ALPEMA 규정에 따라 분당 2℃의 기율기로 냉각시키기 위한 예냉구간이 있다. 이 구간에서는 냉매 사이클만 작동하며 온도 기율기를 제어하기 위하여 Fig. 1의 팽창기 출구 저온냉매와 압축기 출구의 고온 냉매를 혼합하는 Bypass 밸브의 개도제어가 중요하다. 예냉은 아이들 구간에 해당하는 온도(약 -120℃)에 도달하면 종료되는데 아이들 영역은 BOG의 공급 없이 냉매 사이클만으로 낮출 수 있는 최저온도 구간이다. 이때의 팽창기 출구온도는 과열도 허용 최저온도에 해당한다. BOG가 공급되기 시작하면 부하운전이 시작되는데 BOG 유량에 따라 열교환기 온도를 제어하면서 냉매순환량을 서서히 증가시켜야 한다.

BOG 유량 증가에 따른 냉각부하의 증가로 팽창기 출구온도가 상승하게 되면 이를 과열도 제어 범위로 낮추기 위해 냉매 질소가 충전되어 있는 버퍼탱크 양단에 설치된 고압밸브(HP)와 저압밸브(LP)의 개도를 조절하여 냉매 순환루프로 공급되는 양을 증가시킨다. Reverse Brayton 사이클의 경우 BOG 유량증가에 의한 냉각부하는 팽창기 출구 과열도에 직접적으로 영향을 미치므로 어떤 크기의 BOG 부하에 대해서도 팽창기 출구 과열도만 유지하면 자동적으로 최적의 냉매 순환량이 피드백 제어에 의해 찾아지게 되어 있다. 반면에 Claude 사이클은 팽창기 출구가 아닌 응축기 입구 냉매온도를 제어한다. HX200A를 떠나

는 냉매는 T자 분지관에 의해 일정 유량비율로 나누어지게 되어 있으며 BOG 부하에 따라 HP와 LP 개도를 제어하면 팽창밸브로 BOG 부하처리에 필요한 유량이 흐르게 되어 있다.

4. 공정 시뮬레이션

공정 모사에 필요한 주요 요소기기는 열교환기, 압축기, 팽창기, 밸브 및 압력용기이다. 이들에 대한 자세한 모델링 과정은 Shin et al.이 발표한 바⁽⁴⁾ 있으므로 본 연구에서는 생략한다. 물성치 계산이 중요하므로 NIST의 Refprop libraries⁽⁵⁾를 인터페이스하여 사용하였고 프로그램 언어는 객체지향형 언어인 Microsoft사의 Visual C++를 사용하였다.

5. 시뮬레이션 결과

5.1 Reverse Brayton cycle

Fig. 3~Fig. 7은 Reverse Brayton 사이클의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 3에서 점선으로 표시된 Target 온도는 ALPEMA 규정의 온도 기율기 (분당 2℃)를 따른 목표온도로서 응축기 입구의 냉매 질소가 추종해야 하는 온도이다. 예냉기간인 초기의 약 4,500초 동안 팽창기 출구와 응축기 내 냉매의 온도가 유사한 온도기율기를 따르고 있다. 초기에 목표온도에서 다소 벗어나는 부분은 압축기 운전과 Bypass 밸브 개도제어의 불일치와 관련된 부분으로서 실제 시험운전에서 개선하거나 분당 2℃의 기율기를 완화하여 개선할 수 있다. 4,500초에서 5,000초까지는 아이들 영역을 나타내며 약 -120℃의 일정 목표온도를 유지하고 있다. 그 이후는 부하운전 구간으로 BOG가 재액화 설비에 공급되기 시작한다.

BOG 유량거동은 Fig. 4에 표시되어 있다. Fig. 1의 압축기를 떠난 냉매는 열교환기 온도 하강 기율기 제어를 위해 일부는 바이패스 밸브를 통해 흐르고 나머지는 열교환기를 거쳐 팽창기로 유입된다. 분기된 냉매는 팽창기 출구에서 합쳐져 적정 온도가 되어 응축기로 유입된다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 예냉기간에는 온도 기율기 제어를 위해 바이패스량이 서서히 감소하다가 정격부하운전 구간이 되면 거의 0으로 감소한다. 바이패스

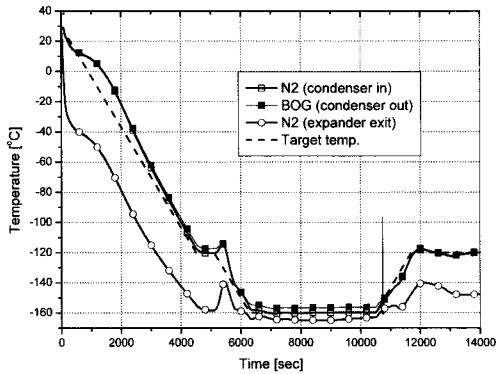


Fig. 3 Temperature control(Reverse Brayton).

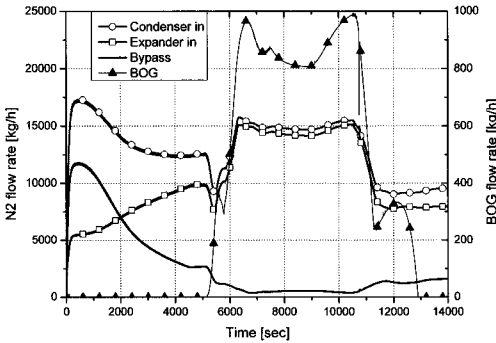


Fig. 4 Mass flowrate(Reverse Brayton).

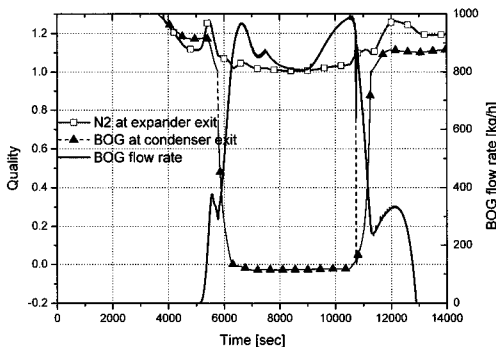


Fig. 5 Vapor quality(Reverse Brayton).

스량의 증가는 효율감소의 원인이 되므로 가능한 한 줄여야 한다. BOG가 공급되기 시작하는 부분 부하 운전 초기에는 BOG 유량의 급격한 증가 때문에 유체 온도들이 목표온도를 벗어나는 경향을 보이고 있으며 개선을 위해서는 BOG 유량을 보다 완만한 기울기로 공급할 필요가 있다. 초기의 유량의 급격한 영역을 제외하면 유체의 온도들은

목표온도를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 팽창기 출구의 과열도와 응축기 출구 BOG 액화 성능을 나타낸다. y축은 전체 질량 증기체의 질량 비율인 건도(quality)에 해당하며 Refprop 프로그램⁽⁵⁾에서 출력된 값으로서 이상영역인 0과 1사이의 값 이외에도 해당 프로그램은 과냉도에 비례하여 음수로 표현하고 과열도에 비례하여 1보다 큰 값을 표시하여 상변화의 정도를 연속적으로 판단할 수 있게 하고 있다. 팽창기 출구 냉매는 건도 1.0 근처까지 접근하고 있으며 실제 제어에서도 가장 중요하고 감시가 요구되는 부분이다. 건도가 1.0보다 많이 커질수록 성능이 저하되어 설비용량이 커져야 하므로 높은 효율을 위해서는 팽창기 출구 건도를 가능한 한 1.0 근처로 제어해야 한다. 응축기 출구 BOG의 건도는 0.0이므로 유지되어 약간 과냉된 액화천연가스가 배출됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 설비의 COP(Coefficient of performance)를 나타내고 COP의 정의는 다음과 같다.

$$COP = \frac{BOG \text{에서 제거된 열량}}{\text{압축기 동력} - \text{팽창기 동력}} \quad (1)$$

Fig. 6에 의하면 COP는 BOG 유량과 연동하여 변하고 대략 0.2 근처임을 알 수 있다. 낮은 COP는 냉매가 40°C 근처의 고온에서 -170°C 근처의 극저온까지 변하고 냉매가 기상을 유지하고 있는 사이클 특성과 연관이 있다. 이는 열역학 사이클 해석을 수행한 Moon 등의 연구결과⁽⁶⁾에서도 유사한 값을 보인다.

Fig. 7은 냉매 압축기 및 BOG 압축기 전후의 냉매 압력을 나타낸다. 부하운전 영역에서 냉매 고압과 저압은 각각 약 4,800 kPa과 1,250 kPa을 나타낸다.

5.2 Claude cycle

Fig. 8~Fig. 12는 Claude cycle의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 열교환기 내 온도추종 성능은 Reverse Brayton 사이클의 경우와 유사하다. BOG 액화 및 팽창기 출구 건도의 경우에도 유사한 성능을 나타낸다. 반면에 설비의 성능을 나타내는 COP의 경우 Reverse Brayton 사이클에 비해 열악함을 알 수 있다. Fig. 11의 COP는 Reverse Brayton cycle의 경우와 마찬가지로 BOG 유량에

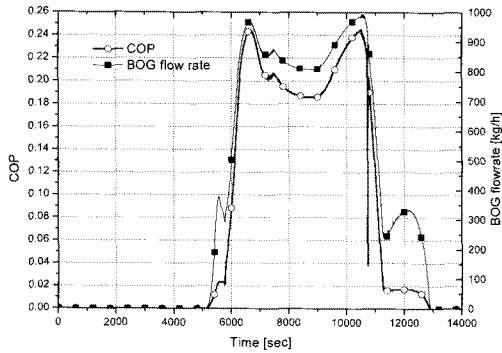


Fig. 6 COP(Reverse Brayton).

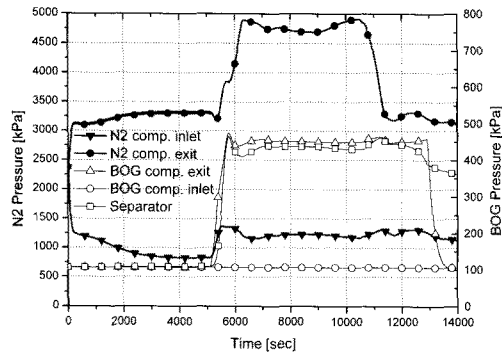


Fig. 7 Pressure(Reverse Brayton).

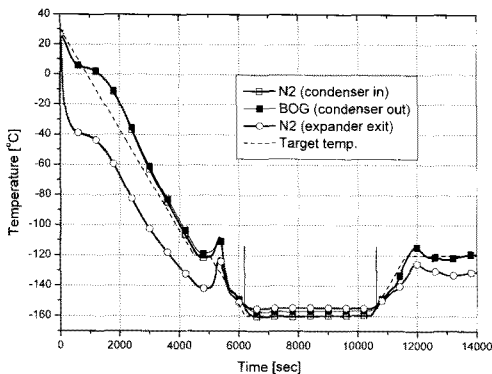


Fig. 8 Temperature control(Claude).

비례하는 특성을 나타냄을 알 수 있다. 이는 Fig. 9에서 질소 냉매순환량은 부하운전 구간에서 상대적으로 일정하여 동력소비는 일정한 반면에 액화에 필요한 BOG 유량이 변동하고 있기 때문에 COP가 영향을 받는 것이다. BOG는 BOG 출구압력과 Separator 내 압력과의 차이에 의해 열교환

기를 흐르게 되는데 Fig. 12에서 보는 바와 같이 BOG 출구압력은 상대적으로 일정하게 제어되는 반면에 Separator 내의 압력이 일정 값을 유지하지 못하고 약간 변동하고 있기 때문이다. 제어성능 개선이 요구되는 부분이다. Claude cycle은 Reverse Brayton 사이클과 설비를 공유하면서 팽창밸브가 추가된 것임에도 불구하고 질소 냉매 순환량과 냉매 고압을 비교해 보면 Claude 사이클은 각각 20,000 kg/h, 4,000 kPa을 나타내는 반면 Reverse Brayton 사이클은 각각 15,000 kg/h, 4,800 kPa을 나타낸다. 이러한 차이는 근본적으로 팽창밸브의 존재에 기인한다. Claude 사이클에서는 팽창 냉각을 위해 냉매 순환량의 약 1/3을 팽창밸브로 흐르게 하는데 이는 고압부에서 저압부로 냉매가 새는 역할과 유사하다. 그 결과 압축기는 충분히 고압까지 상승하지 못하게 되고 일정한 속도로 회전하는 터보 압축기는 낮은 압력비로 인하여 많은 유량을 흘리게 된다. 이는 과도한 동력손실을 유발하여 COP가 Reverse Brayton 사이클보다 열악하게 되는 결과를 초래하였다.

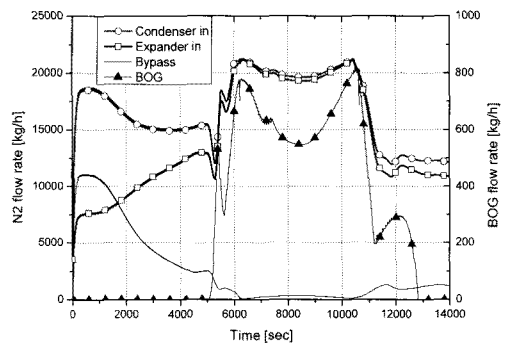


Fig. 9 Mass flow rate(Claude).

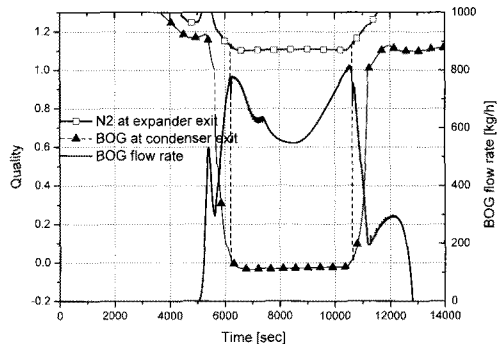


Fig. 10 Vapor quality(Claude).

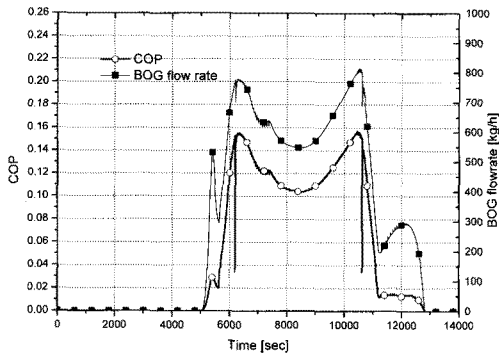


Fig. 11 COP(Claude).

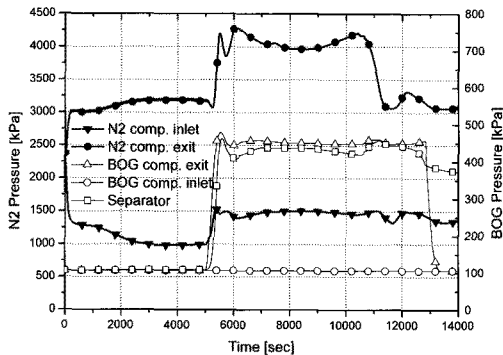


Fig. 12 Pressure(Claude).

6. 결론

인천 가스인수기지에 건설 중인 파이롯트 플랜트의 천연가스 재액화 설비의 공정 사이클에 따른 운전특성을 예측하기 위하여 공정 모사 동특성 모델을 개발하고 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

Reverse Brayton 사이클과 Claude 사이클 모두 알루미늄 판형 열교환기 온도제어 및 천연가스 액화에 요구되는 운전성능을 만족하나 COP 측면에서 Reverse Brayton 사이클이 우수하다. Claude 사이클의 성능이 열악한 이유는 팽창밸브로 분기되는 냉매량의 역서지 손실 및 압력손실로 인하여 냉매 압축기가 감당해야 할 동력소비가 증가하기 때문이다. 또한 팽창밸브의 추가 증설 및 냉매 분기로 인하여 시스템이 복잡해지고 제어 알고리즘도 복잡해져 운전의 불안정성이

Reverse Brayton 사이클에 비해 증가하는 것으로 판단된다. 천연가스 재액화 설비에서는 냉매인 질소의 기체영역 저온을 활용하여 운전 목적을 달성하고 있으므로 Reverse Brayton 사이클이 유리하였으나 Claude 사이클은 팽창장치 후단에서의 포화영역을 활용해야 하는 다른 설비에서 유리할 수 있으므로 사이클 성능은 용도에 따라 평가되어야 한다.

후 기

본 연구는 부품소재 기술개발 사업의 일환으로 지원되었다.

참고문헌

1. M. Küver, C. Clucas and N. Fuhrmann, 2002, Evaluation of propulsion options for LNG carriers, 2002, The 20th International Conference and Exhibition for the LNG, LPG and Natural Gas Industries(GASTECH 2002).
2. Hamworthy Ltd., 2007, LNG systems for marine application, Hamworthy Brochure.
3. ALPEMA, 2000, The Standards of the Brazed Aluminium Plate-Fin Heat Exchanger Manufacturers' Association(ALPEMA), 2nd ed., ALPEMA.
4. Y. Shin and Y.P. Lee, 2009, Design of a boil-off natural gas reliquefaction control system for LNG carriers, Applied Energy, Vol. 86, No. 1, pp. 37-44.
5. E.W. Lemmon, M.O. McLinden and M.L. Huber, 2006, REFPROP(Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties). NIST Standard Database 23, Version 7.1, Physical and Chemical Division; National Institute of Science and Technology.
6. J.W. Moon, Y.P. Lee, Y.W. Jin, E.S. Hong and H.M. Chang, 2007, Cryogenic Refrigeration Cycle for Re-Liquefaction of LNG Boil-Off Gas, International Cryocooler Conference, Boulder, CO., USA.