

LNG선 재액화 시스템의 성능 개선에 관한 연구

오 철† · 송영욱*

† 한국해양대학교 기관시스템 공학부 교수, *한국해양대학교 대학원

A Study on the Improvement of LNGC Re-liquefaction System

Cheol. Oh† · Young-Uk. Song*

*Graduate school of National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

†Division of Marine System engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

요 약 : LNG선의 건조 동향을 보면 2003년을 기점으로 하여 기하급수적으로 증가하기 시작 하였으며, 2008년을 기점으로 하여 그 건조량은 감소하는 추세이나 건조 선박 중 많은 부분이 재액화 시스템이 장착된 대형 LNG선박으로 대형 LNG선은 216K급의 Q-Flex급, 260K급의 Q-Max급이 주를 이루고 있다. 이러한 LNG선박의 대형화는 LNG선의 화물창 보온 설계 기준인 BOR(Boil Off Rate) 0.15%를 기준해서 상대적으로 많은 양의 BOG가 발생하게 되었으며 선박의 주 추진기관의 연료로 사용 하더라도 잉여 가스가 남게 되어 화물탱크의 압력상승을 막기 위해서는 BOG를 재 액화하여 화물탱크로 반송하거나 소각하는 방법 등으로 처리하지 않으면 안 되게 되었다. 이러한 이유로 인하여 206K(206,000m³)급 이상의 대형 LNG 선박에서는 필수적으로 LNG 재액화 시스템을 탑재하도록 설계를 하게 된다. 본 연구에서는 현재 개발되어 운항선에 적용되고 있는 여러 가지 LNG 재액화 시스템의 사이클 성능을 동일한 기기 조건하에서 해석함으로써 각각의 장단점을 비교하여 LNG선박의 설계 및 운항 시 재 액화 시스템의 최적화 방안을 제시하고자 한다.

핵심어 : 액화천연가스 운반선, 보일오프 가스, 보일오프 비율, 재액화 시스템, 컴팬더

Abstract : LNG carriers have, up to 2006, mainly been driven by steam turbines. The Boil-Off Gas from the LNG cargo tanks has so far been used as fuel. This is a costly solution that requires special skills during construction and operation. Alternative propulsion systems offer far better fuel economical efficiency than steam turbines. Instead of previous practice using Boil-Off Gas as a fuel, the Re-liquefaction system establishes a solution to liquefy the Boil-Off Gas and return the LNG to the cargo tanks. This Re-liquefaction of Boil-Off Gases on LNG carriers results in increased cargo deliveries and allows owners and operators to choose the most optimum propulsion system. In this study, thermodynamic cycle analysis has been performed on two type of LNG Re-liquefaction system which was designed and adopted for the Q-Flex(216,000m³) and Q-Max(266,000m³) LNG carrier under construction at Korea ship yards and variable key factor was simulated to compare efficiency, power and nitrogen consumption of each Re-liquefaction system.

Key words : LNG, Boil Off Gas(BOG), Boil Off Rate(BOR), Re-Liquefaction system, COMPANDER, Q-Flex, Q-Max

1. 서 론

최근 세계 천연가스 시장의 수요가 기하급수적으로 증가함에 따라, 해상 운송수단인 LNG선의 건조가 급증하게 되었으며 운송효율을 높이기 위한 많은 노력 끝에 기존의 LNG선박의 추진 방식의 고정관념 틀에서 벗어난 새로운 추진방식의 LNG선 설계가 실현 되었다.

기존에 운항 중이던 LNG선의 설계 개념은 LNG 화물의 특성을 고려하여 화물창에서 발생하는 증발 기체 즉, BOG(Boil Off Gas)를 기관실로 압송하여 보일러의 연료로 사용함으로써 발생되는 스팀으로 터빈을 구동하여 프로펠러를 구동하는 스팀터빈 추진하는 방식이 적용 되었다.

이러한 LNG선의 특별한 제약조건 들은 조선 설계 기술과 조선 기자재 산업의 비약적인 발전과 함께 LNG선 운송 효율의

증가를 위한 노력의 일환으로 여러 가지 방식의 신개념 추진 방식이 일부 선진 조선소와 주요 선주사를 중심으로 시도되어 왔으며, 이러한 노력의 결과로서 모터에 의한 전기 추진 방식과, 일반 상선에 적용되어 지는 Slow Diesel 엔진을 추진기로 적용하는 LNG선이 개발되어 상용화 되었다.

전기추진 방식은 선박의 발전기 엔진에 화물창에서 발생하는 BOG를 연료와 경유를 혼용으로 사용할 수 있는 DF(Dual Fuel)엔진을 발전기 엔진으로 적용함으로써 발전기에서 발생하는 전기로 주 추진 모터를 제어하는 추진 방식 이다.

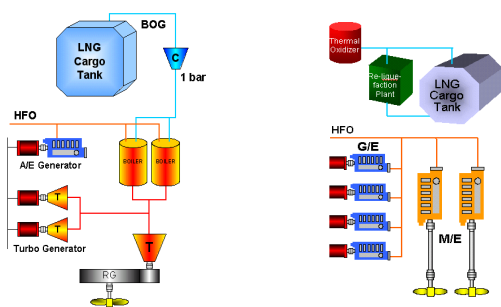
Slow Diesel 추진 방식은 일반 상선에 적용하는 저속 엔진을 주 추진기 엔진으로 사용하며 병커C유를 연료로 적용함으로써 화물창과 엔진룸을 별도로 분리하여 운항 중 화물창에서 발행하는 BOG는 컴프레서(Compressor) 룸에 설치된 재액화 시스템을 이용하여 화물창으로 회수하는 방식이다.

† 교신저자 : 오 철(중신회원), ohcheol@hhu.ac.kr 051)410-4268

* 송영욱(정회원), yu06.song@gmail.com 010)5136-5892

이러한 전기 추진 방식이나 재액화 시스템이 적용되는 경우, 비상 시 발생하는 BOG를 대기 방출 없이 소각처리 할 수 있는 GCU(Gas Combustion Unit)를 엔진룸 케이싱에 설치하여 종래의 스팀 터빈선에서 잉여 스팀을 Dump하는 기능을 대체하고 있으며, 재액화 시스템의 경우에는 Off Spec.가스 즉, 화물에 N2와 같은 불응축 가스가 많은 경우에도 이를 소각하여 처리하게 된다.

Fig. 1에서 재액화 시스템을 설치하고 Slow Diesel엔진을 쌍축으로 배치한 추진 방식의 기본적인 개념도를 종래의 스팀 터빈 추진 방식과 비교하여 확인 할 수 있다.



a) Steam turbine type b) Slow diesel type
Fig. 1 The concept of LNG propulsion system

LNG선의 건조 동향을 보면 2003년을 기점으로 하여 기하급수적으로 증가하기 시작 하였으며, 2008년을 기점으로 하여 그 건조량은 감소하는 추세이나 건조선박의 대부분이 재액화 시스템이 장착된 대형 LNG선박으로 대형 LNG선은 216K급의 Q-Flex급, 260K급의 Q-Max급이 주를 이루고 있다. 이러한 LNG선박의 대형화는 LNG선의 화물창 보온 설계 기준인 BOR(Boil Off Rate) 0.15%를 기준해서 상대적으로 많은 양의 BOG가 발생하게 되었으며 선박의 주 추진기관의 연료로 사용하더라도 잉여 가스가 남게 되어 화물탱크의 압력상승을 막기 위해서는 BOG를 재 액화하여 화물탱크로 반송하거나 소각하는 방법 등으로 처리하지 않으면 안 되게 되었다. 이러한 이유로 인하여 206K(206,000m³)급 이상의 대형 LNG 선박에서는 필수적으로 LNG 재액화 시스템을 탑재하도록 설계를 하게 된다.

현재 한국에서 건조하고 있는 LNG선박에 적용되는 LNG 재액화 시스템은 H사 와 C사에서 설계, 제작하여 공급하고 있다.

본 연구에서는 현재 개발되어 운항선에 적용되고 있는 여러 가지 LNG 재액화 시스템의 사이클 성능을 동일한 기기 조건하에서 해석함으로써 각각의 장단점을 비교하여 LNG선박의 설계 및 운항 시 재 액화 시스템의 최적화 방안을 제시하고자 한다.

2. LNG선용 재액화 시스템

LNG 화물창은 외부의 열 침입을 막기 위하여 보온을 실시하나 완전히 차단 할 수 없으므로 BOG가 발생하게 되며, BOR를 0.15%/day를 기준으로 설계를 하게 된다.

화물창에서 발생하는 BOG는 베이프 돔(Vapour dome)을 통해 BOG 컴프레서에 의해 재액화 시스템으로 압송되어지며 비등점이 -196℃의 질소(N₂)를 냉매로 하는 냉동 사이클로 구성된 재액화 시스템의 열교환기에서 냉각되어 액화되어져서 화물창으로 반송되어 진다. 만약 재액화 시스템의 작동 불능 상태가 되면 BOG는 폭발 위험이 있는 상태로 대기 방출 되는 것을 방지하기 위하여 GCU에서 소각하여 대기 방출하게 된다.

LNG선 재액화 시스템의 기본적인 구성 개념은 Fig. 2 와 같이 구성된다.

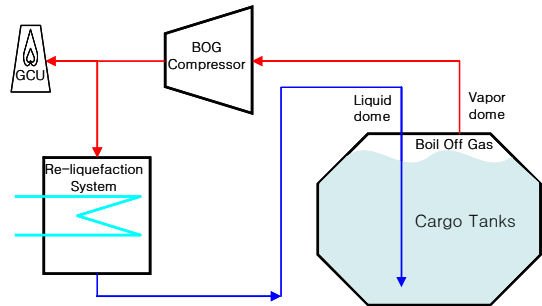


Fig. 2 Basic concept of Re-liquefaction system

3. LNG선 재액화 시스템 이론 해석

3.1 사이클 해석모델

본 연구에서는 각기 다른 사이클의 재액화 시스템을 비교하기 하여 다음과 같은 동일한 조건을 시스템 해석에 적용하였다. 단, 시스템 구성의 차이로 인한 압력 강하의 차이로 인한 차이는 전체 시스템에 미치는 영향이 미세하므로 무시하였으며, 조건은 다음과 같이 적용하였다.

- 1) 재액화 시스템의 냉매의 성분은 N₂(97%) 와 O₂(3%)로 일 반적인 LNG선의 질소 발생장치(N₂ Generator)에서 공급 되는 질소 사양 조건으로 적용하였다.
- 2) BOG 주요 성분은 CH₄ 93.156mol%, N₂ 0.324mol%, C₂H₆ 6.240mol%와 기타 탄화수소로 적용 하였다.
- 3) 재액화 컴프레서의 1단 컴프레서 입력부의 온도와 압력은 -38.7℃/14.0bar를 기준으로 하였으며, 또한, 각 컴프레서의 압축비는 95℃로 설정하였으며 냉각기 후단의 온도는 40℃를 기준으로 설정 하였다.
- 4) 팽창터빈(Expander) 후단의 팽창 온도는 액적이 생기지 않는 -163℃로 설정 하였으며 모든 경우에 동일한 조건을 적용하였다.
- 5) 컴프레서와 팽창터빈의 단열효율은 75%로 설정하였다.

3.2 재액화 시스템 사이클 해석

3.2.1 재액화 시스템 사이클 A

H사의 LNG 재액화 시스템은 역 브레이튼(Brayton) 사이클로 구성되어지며 크게 질소 사이클과 BOG 사이클로 나누어진

다. N₂ 사이클은 N₂ 냉매를 3단 컴프레서의해 압축하며 각 각의 컴프레서에 의해 단열 압축된 BOG는 청수 냉각기에 의하여 단열 냉각되어진다. 이후 3중 열교환기에서 1차로 냉각되어 지고 팽창터빈을 거쳐 약-163℃로 단열 팽창되며 콜드 박스(Cold box)에서 BOG 가스와 열 교환하여 LNG를 재액화 하게 된다.

3단 컴프레서는 동력의 효율을 높이기 위하여 1,2단 컴프레서를 동일 축으로 구동하며, 3,4단은 컴프레서와 팽창터빈의 축을 연결하여 동력을 회수하게 된다. 이를 통틀어서 N₂ 컴팬더(Compander)라 부른다.

사이클 구성도는 Fig. 3과 같으며, 내부 사이클의 온도와 압력분포는 Fig. 4, Fig. 5와 같다.

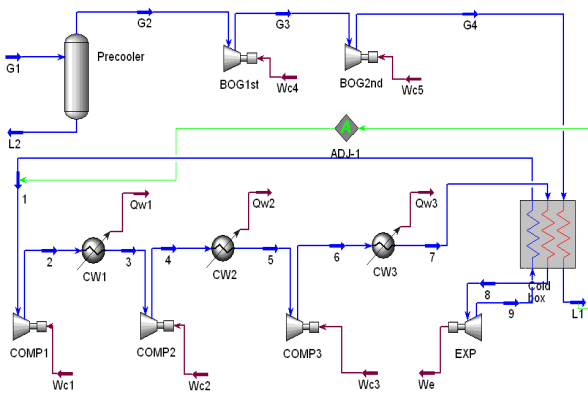


Fig. 3 Process cycle model (Type A)

BOG 사이클은 화물창에서 증발되는 LNG 증발 기체를 프리쿨러(Pre-cooler)와 2단 BOG 컴프레서를 거쳐 4.5bar까지 압축하여 Cold Box로 압송하게 되며 이때, Cold Box를 통과하면서 약 -160℃의 LNG로 액화되어 화물창으로 반송되게 된다.

이러한 재액화 시스템의 냉동 사이클로서의 성능계수 COP는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$COP = \frac{\text{저온에서 뽑아낸 열량}}{\text{가해진 일량}} = \frac{q_{abstracted}}{W_i} \quad (1)$$

$$= \frac{h_1 - h_9}{(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) + (h_6 - h_5)}$$

$$q_{abstracted} = h_1 - h_9 = 227.7 \text{ kJ/kg}$$

$$W_i = (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) + (h_6 - h_5) = 172.9 \text{ kJ/kg}$$

따라서, COP는 1.317이다.

여기서 재액화 시스템의 효율을 비교하기 위하여 BOG가 LNG로 액화되며 빼앗기는 열량(q_L)과, 컴팬더에서 가해진 일로 재액화 시스템의 효율(η)을 다음과 같이 정의 하였다.

$$\eta = \frac{q_L}{W_c - W_e} \quad (2)$$

W_c 는 각 컴프레서에서 압축되어지는 총 동력 소비량이고, W_e 는 팽창터빈으로부터 회수되는 동력이 이며, q_L 은 kW로 환산하였다.

$$W_c = W_{C1} + W_{C2} + W_{C3} = 6,215 \text{ kW} \quad (3)$$

$$W_e = 1,081 \text{ kW}$$

$$q_L = q_{G1} - q_{L1} = 1,371 \text{ kW}$$

$$\eta = 0.2670$$

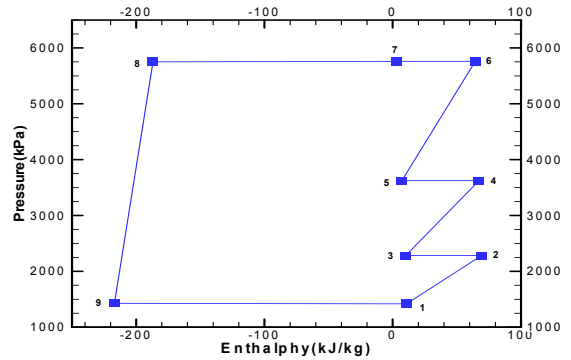


Fig. 4 Pressure and Enthalpy in the cycle (Type A)

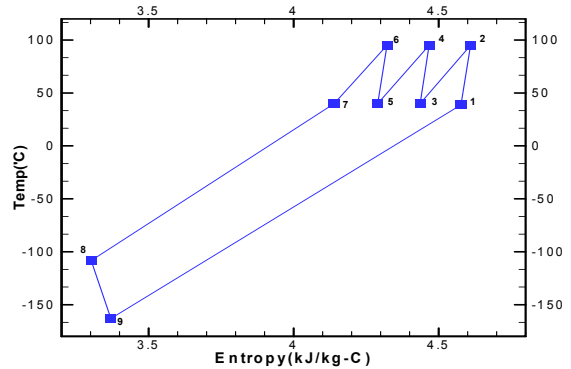


Fig. 5 Temp. & Entropy in the cycle (Type A)

LNG 선박에서 복잡한 재액화 시스템의 성능을 평가하기 위하여 단순히 성능 계수 비교하는 것 만 으로는 시스템의 전체 성능을 평가하기 어렵다. 따라서 시스템의 주요 성능 변수인 BOG와 N₂의 질량 유량비(λ)와 BOG 컴프레서의 동력 소비량을 포함한 시스템 전체 동력 소비량(W_t)을 고려하여야 하며 다음과 같이 계산되어진다.

$$BOG/N_2 \text{의 질량 유량비}(\lambda) \quad (4)$$

$$= \frac{BOG \text{ Flow}}{N_2 \text{ Flow}} = 5.11\%$$

$$W_t = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 - W_e$$

$$= 5,424 \text{ kW}$$

3.2.2 재액화 시스템 사이클 B

C사의 LNG 재액화 시스템은 H사의 재액화 시스템과 같이 역 브레이크 사이클의 구성이며, 3중 열교환기인 콜드 박스를 사용 하지 않고 열교환기를 별도로 분리하여 향류 열교환기, 과열저감냉각기(De-superheater)와 BOG 콘덴서(Condenser)로 분리 하였다. 이로 인해 3중 열교환기의 과도한 열용력에 의한 피로도를 감소하고자 하는 노력을 하였다.

N₂ 사이클에서 3단으로 압축되어진 질소 가스는 향류 열교환기에서 1차 냉각 되어 진 후 팽창터빈을 거쳐 단열 팽창하며 BOG 콘덴서에서 BOG와 열 교환하여 재액화를 시키고 여기서 나오는 냉매는 다시 과열저감 냉각기 와 중간 냉각기(Intercooler)에서 열 교환 하게 된다.

BOG 사이클에서는 화물장에서 발생한 BOG는 BOG 컴프레서에 의해 압축되어 지며, 과열저감냉각기와 BOG 콘덴서를 거쳐 재액화 되어 진다. BOG 컴프레서에서는 1단 압축 후 중간 냉각기를 거치면서 질소냉매에 의해 냉각되어지며 2단 컴프레서의 입구온도를 낮추어 운전 부하를 낮춤으로써 효율을 높이고 BOG 온도 상승 시에도 BOG 컴프레서 후단의 온도 상승에 대한 문제점을 줄였다.

사이클 구성도는 Fig. 6과 같으며, 내부 사이클의 온도와 압력분포는 Fig. 7, Fig. 8과 같다.

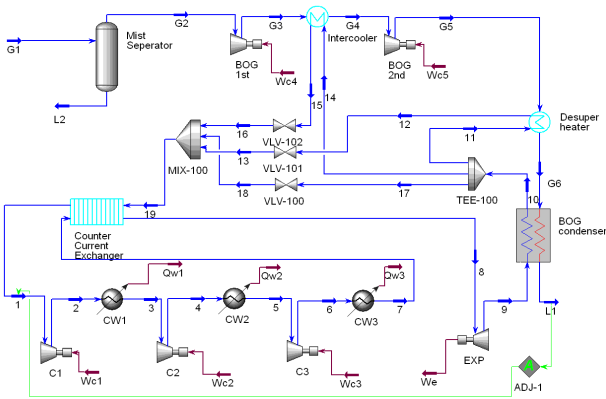


Fig. 6 Process cycle model(Type B)

마찬가지로 재액화 시스템의 냉동 사이클로서의 성능계수 COP는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$COP = \frac{\text{저온에서 뽑아낸 열량}}{\text{가해진 일량}} = \frac{q_{abstracted}}{W_i} \quad (5)$$

$$= \frac{h1 - h9}{(h2 - h1) + (h4 - h3) + (h6 - h5)}$$

여기서 q_L은 질소냉매가 열 교환 하는 중간 냉각기와 과열저감 냉각기 그리고 BOG 콘덴서에서 빼앗기는 열량이고, 가해진 일량은 컴프레서가 질소 냉매를 압축 하는 과정의 열량으로 다음과 같다.

$$q_{abstracted} = h1 - h9 = 227.8 \text{ kJ/kg} \quad (6)$$

$$W_i = (h2 - h1) + (h4 - h3) + (h6 - h5) = 172.9 \text{ kJ/kg}$$

따라서 COP는 1.318이다.

마찬 가지로 재액화 시스템의 효율(η)과 주요 성능 변수인 BOG와 N₂의 질량 유량비(λ)와 BOG 컴프레서의 동력 소비량을 포함한 시스템 전체 동력 소비량(W_t)을 확인하였다.

$$W_C = W_{C1} + W_{C2} + W_{C3} = 6,227 \text{ kW} \quad (7)$$

$$W_e = 1,067 \text{ kW}$$

$$q_L = (q_{C3} - q_{C4}) + (q_{C5} - q_{C6}) + (q_{C6} - q_{L1}) = 1,353 \text{ kW}$$

$$\eta = 0.2622$$

$$\text{BOG/ N}_2\text{의 질량 유량비}(\lambda)$$

$$= \frac{\text{BOG Flow}}{\text{N}_2 \text{ Flow}} = 5.10\%$$

$$W_t = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 - W_e = 5,432.6 \text{ kW}$$

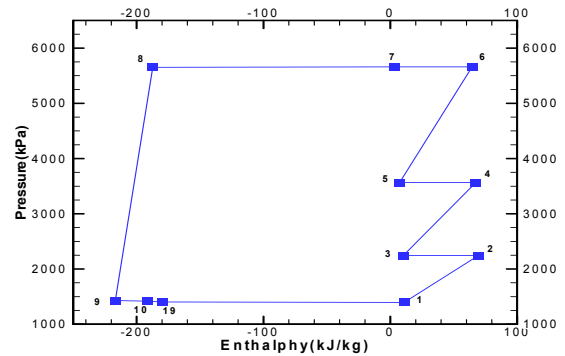


Fig. 7 Pressure and Enthalpy in the cycle(Type B)

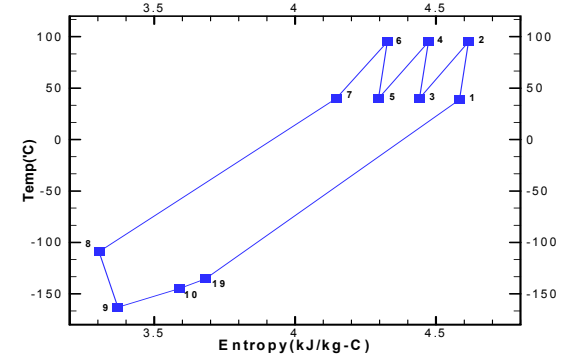


Fig. 8 Temperature & Entropy in the cycle(Type B)

4. LNG 재액화 시스템의 해석결과 고찰

사이클 내의 주요 변수에 대한 영향을 확인하기 위하여 다음과 같은 주요 변수를 조정하였다.

- 1) BOG 유입 온도
- 2) BOG 질량 유량(Mass flow)
- 3) 팽창터빈 효율
- 4) 냉각수(Cooling water) 온도

C사의 재액화 사이클은 BOG 컴프레서사이의 중간 냉각기 및 BOG 콘덴서 전단의 과열저감 냉각기를 적용하였으므로, 사이클 내부의 주요 변수를 조정하더라도 각각의 냉매 유량에 따라 변수가 많은 발생하므로 단순비교가 어려워지며, 이는 기본 사이클에 부가적으로 냉매의 흐름을 활용하는 것이므로, BOG 온도를 제외한 다른 변수의 비교를 위해서는 중간 냉각기와 과열저감 냉각기를 제외한 단순 모델(Type C)을 적용하여 비교하였다.

4.1 BOG의 온도에 따른 영향

BOG의 온도에 따른 각 모델별 해석 결과를 보면, 기본적으로 BOG의 온도가 낮으면 낮을수록 전체 재액화 시스템의 Power는 절감 되는 것을 확인 할 수 있었으며, 또한 BOG의 온도가 낮을수록 BOG/N₂의 비율 즉, 냉매 유량인 N₂의 질량 유량이 줄어들을 모든 해석 모델에서 확인 할 수 있었다.

해석 모델에서 모든 기기의 성능을 동일 조건으로 설정하여 해석하였으므로 BOG 온도 변화에 따른 시스템 효율은 일정하게 유지 하는 것을 확인 할 수 있다.(Fig. 9)

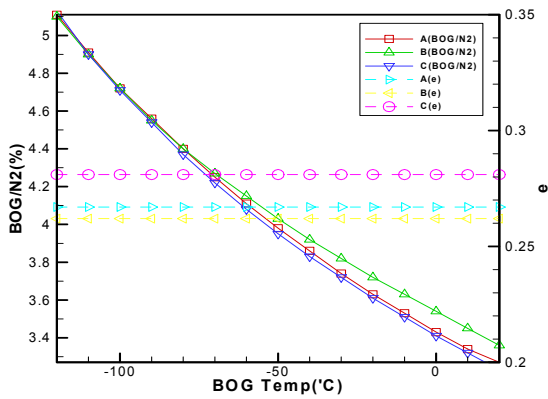


Fig. 9 Variation of BOG temperature

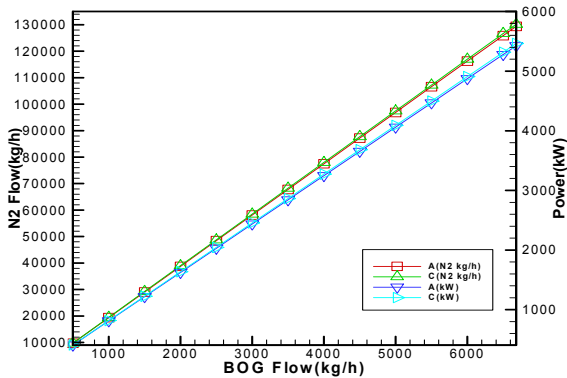


Fig. 10 Variation of BOG flow

4.2 BOG 질량 유량(Mass flow)에 따른 영향

BOG의 질량 유량에 따른 각 모델별 해석 결과를 보면, 기본적으로 BOG의 질량 유량에 따라 시스템의 주요 성능 변수를 좌우하는 동력 소비량 및 냉매인 N₂ 질량 유량은 BOG 질량 유량에 정비례하여 감소함을 확인 할 수 있다. (Fig. 10)

4.3 팽창터빈 효율에 따른 영향

팽창터빈 효율에 따른 영향을 보면 팽창터빈의 효율의 증가에 따라 시스템의 효율 및 동력 소비량 과 N₂ 질량 유량에 직접적인 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

기본적인 팽창터빈의 효율은 50%~90% 사이를 변경하며 결과를 확인하였으며 이는 팽창터빈의 팽창 효율을 높여주는 가이드 베인(Guide vane)을 조정하는 것과 같을 수 있다. 즉, 효율이 높은 재액화 시스템을 설계하고 제작하기 위하여서는 고효율 팽창 터빈의 설계 및 생산능력이 필수 요소임을 확인 할 수 있다.(Fig. 11)

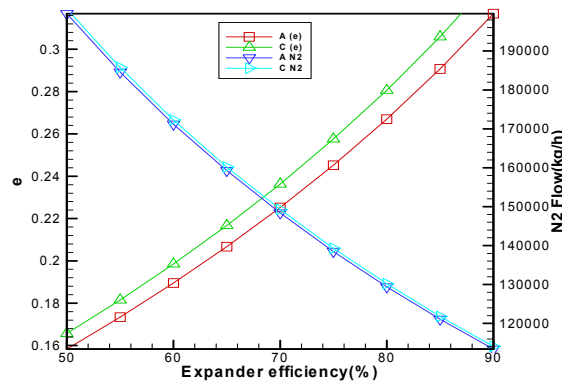
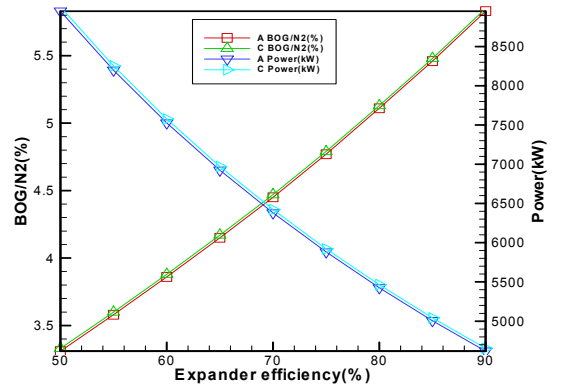


Fig. 11 Variation of turbine efficiency

본 해석에서는 팽창 터빈의 효율 만 변수로 지정하였으나 이러한 결과는 컴프레서에도 동일하게 적용될 것이므로 고효율의 컴프레서 설계 및 생산 능력이 중요한 변수 가 될 수 있을 것이다.

4.4 냉각수의 온도에 따른 영향

냉각수의 온도 조건은 냉각기를 지난 후단의 온도를 조정하

여 20℃ 부터 60℃까지 변화를 주면서 해석을 하였으며 이는 외적인 요인인 냉각수의 온도뿐만 아니라 냉각기인 열교환기의 성능에 대한 변수라고 할 수 있다.

냉각수의 온도 변화는 시스템의 주요 변수인 N₂ 질량 유량 및 동력 소비량에 급격한 변화를 가져오게 되며, 시스템의 효율에도 중요한 영향을 미치는 것을 확인 하였다. 즉, 냉각수가 낮으면 낮을수록, 냉각기의 열교환기 성능이 좋으면 좋을수록, 시스템 효율은 급격하게 상승하였으며 동력 소비량과 N₂ 질량 유량은 급격하게 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

H사의 모델과 C사의 단순모델을 비교하여보면 냉각수의 온도가 낮아짐에 따라 C사의 단순모델의 시스템 효율이 약간 높게 상승하는 것을 확인할 수 있으나 큰 차이점을 발견 할 수는 없었다.(Fig. 12)

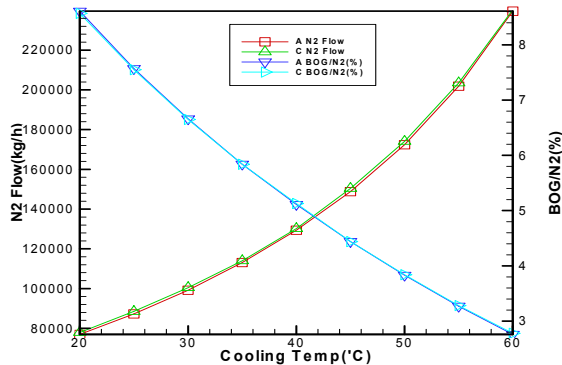
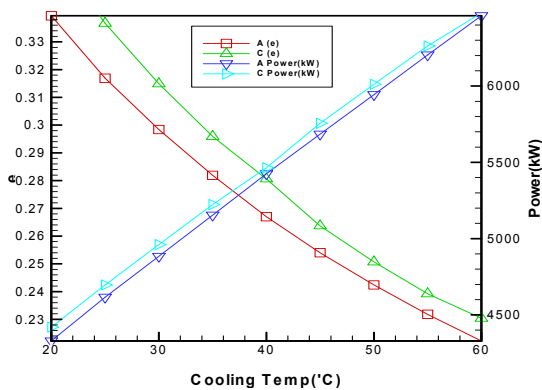


Fig. 12 Variation of cooling water temperature

일반적으로 선박에서 냉각수는 해수를 사용하게 되나 재액화 시스템은 해수에 직접 접촉 시 기기에 치명적인 손상을 초래할 수 있으므로 청수를 해수와 1차 냉각을 실시한 후 재 냉각을 실시하게 되는데, 이러한 조건은 해수온도가 낮은 지역을 향하는 LNG 선박의 경우에 냉각기 출구의 온도 설정을 낮게 함으로써 운항 상의 이득을 볼 수 있을 것이다.

5. 결 론

현재 개발되어 LNG선박에 탑재되어 운항 중인 LNG 재액화

시스템의 열역학적 사이클을 동일 한 해석 모델 조건하에서 열역학적 해석을 수행하고 여러 가지 성능 변수를 제어하면서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 전체적인 재액화 시스템의 성능을 대표하는 COP, 시스템의 효율, N₂의 질량 유량, BOG와 N₂의 질량 유량비 및 동력 소비량 등을 비교 점검 결과 재액화 시스템의 성능에 중요한 영향을 주는 변수로는 BOG 온도와 유량, 컴프레서와 팽창터빈의 효율 및 냉각수의 온도 등을 확인 할 수 있었다.

2) 효율이 높은 LNG선의 재액화 시스템을 개발하기 위하여서는 고효율의 컴프레서 및 팽창터빈의 설계 및 생산능력이 필수적으로 수반되어야만 하며, 열교환기의 효율을 높일 수 있는 방안을 강구하는 것이 중요하다.

3) 운항 중에 해수 온도가 낮은 해역을 향해할 때에는 냉각수의 온도설정을 낮게 유지함으로써 높은 효율로 재액화 시스템을 운전하여 운항 상의 이득을 볼 수 있다.

4) 극지용 LNG선 이나 북해지역의 LNG FPSO(부유식 생산 저장 하역설비)등의 개발 시에는 해수 및 대기 온도의 낮은 이점을 이용하여 냉각기 후단의 온도를 보다 낮은 온도로 설계하여 시스템의 전체 효율을 올릴 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김태국(2000), "열시스템 설계 및 시뮬레이션", 인터비전
- [2] 백중훈, 장호명(1994), "터보팽창기를 이용한 2단 팽창 Claude 냉동사이클 해석", 공기조화*냉동공학논문집 제6권 제2호, pp.130~139.
- [3] 산업자원부(1998), "LNG선용 탱크의 열설계 및 제작기술", pp.1~10.
- [4] 진영욱, 문정우, 이윤표, 장호명(2007), "LNG 증발기체의 재액화 사이클에 대한 열역학 해석", 설비공학논문집 제19권 제7호, pp.485~490.
- [5] Peter, G. N.(2007), "The next generation of Large LNG carriers for long distance and harsh environments", ConocoPhillips, Gastech.
- [6] Weisend, J. G. II(1998), "Handbook of Cryogenic Engineering", Taylor & Francis. pp.281~283.
- [7] Yeo, D. G. (2007), "Propulsion Alternatives for Modern LNG arriers, Samsung heavy industries", Gastech.

원고접수일 : 2009년 10월 9일
 심사완료일 : 2009년 11월 30일
 원고채택일 : 2009년 12월 1일