BOG 내부 열교환을 이용한 LNG 선박용 Boil-Off Gas 재액화 시스템

이윤표*, 신유환†*, 이상훈*, 김광호**

한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터*

한국과학기술연구원 지능시스템연구본부**

Boil-Off Gas Reliquefaction System for LNG Carriers with BOG-BOG Heat Exchange

Yoon Pyo Lee*, You Hwan Shin†*, Sang Hoon Lee* and Kwang Ho Kim**

Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology*

Intelligent System Research Division, Korea Institute of Science and Technology**

Abstract

The price increase of natural resources and the worldwide growth of LNG demand led to save the waste of Boil-Off Gas evaporating from cargo tanks of LNG carriers during navigation. As one of the efforts, a BOG reliquefaction system with BOG-to-BOG heat exchanging method was newly devised. This study was also discussed on the process details such as some features and advantages including comparisons with conventional BOG reliquefaction system, non BOG-BOG heat exchange type. The thermodynamic analysis for the system were also performed. Through the cycle simulation, the process efficiency of the BOG reliquefaction system BOG-BOG heat exchange was estimated to be increased up to 21%.

※Keywords: LNG(액화천연가스), Boil-Off Gas(BOG, 증발기체), Reliquefaction(재액화), Reverse brayton cycle(역브레이튼 사이클), BOG-BOG heat exchange(BOG 내부 열교환)

1. 서론

천연가스는 생산지의 천연가스 액화 시설에서 완전 액화되어 액화천연가스(LNG, Liquefied

Natural Gas)의 형태로 LNG선(LNG carrier)에 저장되어 수송된다. LNG선에서 LNG는 단열된 LNG 저장 탱크에 탑재되어 수송되는데, 이때 LNG의 상태는 -160°C 이하의 극저온 상태이며 외부로부터의 열흡수로 인하여 하루 약 0.15% (200,000 m³급 LNG 저장탱크 기준)가 기화하게 된다(Mate and Diaz 2003). 이처럼 탱크 내에서 기화되는

접수일: 2009년 4월 10일, 승인일: 2009년 7월 8일

† 교신저자: yhshin@kist.re.kr, 02-958-5586

가스를 증발기체(BOG, Boil-Off Gas)라고 부른다. BOG의 발생은 저장탱크 내의 압력 상승을 유발하게 되고, 결국 저장탱크의 구조적인 위험을 가져올 수 있으므로, 탱크 내부의 압력을 적절히 유지시키기 위하여 BOG를 외부로 방출시켜야 한다.

기존의 증기터빈(steam turbine) 추진방식의 LNG선박의 경우엔 발생하는 BOG를 선내의 난방, 취사 및 보일러의 연료 등으로 공급하거나, 초과되는 용량은 가스연소장치(GCU, Gas Combustion Unit)를 통해 태워서 소진하였다. 그러나 세계 각국의 산업화로 인한 에너지 사용수요의 증가로 인해 화석연료의 국제가격은 계속적으로 상승하고 있으며, 이는 석유 뿐 아니라 LNG의 가격도 가파르게 상승시켰다. 또한 이러한 수요에 대응하기 위해 새롭게 건조되는 LNG선박들은 대형화 되는 추세에 있으며, 대형화한 선박의 경제적인 운항을 위해 기존의 증기터빈 방식으로부터 보다 효율이 우수한 디젤엔진 방식으로 변경되고 있다(Kim 2005). 이러한 선박의 대형화로 인해 LNG선에서 발생하는 BOG의 양은 기존보다 더 늘어나게 되었지만, 대부분을 GCU를 통해 태워 소진해야 하는 상황에서 BOG의 경제적 이용을 위해 BOG 재액화 장치(Reliquefaction system)가 제안되었다.

더구나 LNG 선박은 일정하게 운항하는 것이 아니라 Loading, Laden Voyage, Unloading, Ballast Voyage 등으로 운항조건이 바뀌게 된다. 이에 따라 BOG 발생량과 엔진에서 필요로 하는 BOG 양의 차이로 인하여 BOG 재액화 시스템의 필요성은 더욱 증가하고 있다.

본 논문은 LNG 선에서 사용되는 BOG 재액화 시스템에 있어서 새로운 개념의 BOG 내부 열교환 방식에 대해 제안하고, 그 주요한 특징들을 열역학적 사이클 관점에서 살펴보고 기존 시스템과의 차별성 등을 비교, 분석하였다.

2. BOG 재액화 시스템

2.1 역브레이튼 사이클(Reverse Brayton Cycle)

BOG 재액화 시스템은 발생한 BOG를 선상에

설치된 액화장치를 통해 다시 LNG상태로 만들어 탱크에 저장하는 것이다. 이러한 BOG 재액화 시스템에는 열역학적으로 팽창기(expander)를 이용한 역브레이튼 사이클(Reverse Brayton Cycle)이 폭 넓게 사용되고 있다(Barron 1985, Haywood 1990).

질소가스를 냉매로 사용하는 일반적인 BOG 재액화 시스템은 Fig. 1과 같이 BOG의 응축 압력을 상승시키기 위한 BOG 압축과정과 BOG 액화에 필요한 극저온 냉열을 얻기 위한 질소 냉동사이클로 구성된다. BOG 재액화 시스템에서 BOG 압축 공정과 질소냉동 공정에 대한 각 회로 사이클의 온도-엔트로피(T-S) 선도를 Fig. 2 (a), (b)에 각각 나타내었다.

LNG선 운항 중에 LNG 화물창 내에서 발생한 BOG는 탱크의 압력을 상승시키게 되고, 상승한 압력이 탱크의 설정 압력보다 커지면 저장 탱크에 연결된 밸브가 열려 저온 저압의 상태(-100℃, 1 bar)로 BOG가 배출된다. 배출된 BOG는 극저온 BOG 압축기에 의해 고압의 과열 상태(Fig. 2의 상태 2b)가 되고, 극저온 열교환기로 구성된 Coldbox 내의 BOG 응축기를 통과하면서 과냉의 액체(4b)로 액화되어 LBOG 분리기(separator)에 저장된다. 저장된 LBOG는 극저온 펌프를 통해 LNG Cargo 탱크로 회수되어 BOG 사이클이 이루어진다.

반면에 극저온 질소 냉동 사이클 장치는 고온 저압의 질소 가스(①)가 3단 압축 및 중간냉각(intercooling) 과정을 통과하면서 압력이 상승되어 고온 고압으로 승압된 후 후냉각(aftercooling) 과정을 거치게 된다(⑦). 고압 질소가 질소 열교환기에서 저온부 질소와 내부 열교환을 통하여 저온 상태로 변하고(⑧) 팽창 터빈(expander)을 지나면서 액화점에 가까운 극저온, 저압 가스(⑨)로 팽창하게 된다. 이렇게 충분히 온도가 낮아진 극저온의 질소는 극저온 열교환기를 통해 BOG를 액화시킨 후(⑩) 다시 되돌아가는 순환 사이클을 이룬다. 이 과정에서 아직 충분히 온도가 낮은 질소는 질소 압축기를 통과한 고온 고압의 질소가스(⑦)와 내부 열교환을 거치면서 온도가 상승하게 되어 질소 사이클이 완성된다.

Fig. 1 Conventional BOG reliquefaction system by Reverse Brayton Cycle

(a) Nitrogen cycle

(b) BOG cycle

Fig. 2 T-S diagram of conventional BOG reliquefaction system

2.2 BOG-N₂ 열교환 Cycle

Fig. 3은 일반적인 BOG 재액화 사이클을 수정하여 Hamworthy사에서 선보인 역브레이튼 사이클을 나타낸 것으로서 사이클 상 BOG와 N₂ 열교환 과정이 추가된 Mark III라는 BOG 재액화 시스템이다(Hamworthy Ltd., 2007). 또한 Fig. 4는 Fig. 3의 각 지점을 T-S 선도 상에 나타낸 것이다.

Fig. 3 BOG reliquefaction system with BOG-N₂ heat exchange

Fig. 4의 (a)는 질소 사이클의 각 상태를 나타낸 것이며, (b)는 BOG 사이클에 대한 각 상태를 각각 나타낸 것이다. 질소 압축기를 통과한 고온 (Fig. 4의 17)의 질소가스 중 일부는 BOG 압축기로 유입되는 저온(-100°C)의 BOG와 열교환하여 BOG의 온도를 거의 상온 상태로 상승시킨 후 BOG 압축기로 유입되게 한다.

BOG는 3단으로 구성된 BOG 압축기를 통과하면서 고온, 고압의 상태가 되고, 팽창기를 통과한 극저온 상태의 질소가스와 열교환을 함으로써 액화상태까지 도달하게 되는 것이다. 특히 BOG 사이클에서 압축과정에서 발생하는 열은 중간냉각기 및 후냉각기를 통하여 회수할 수 있으며, 이때 냉각기의 운용 온도 범위는 바닷물을 냉수로 사용할 수 있는 범위에 해당하게 된다.

Coldbox 내의 극저온 열교환기를 통해 열교환되는 열의 유출입을 살펴보면, 압축된 질소가

(a) Nitrogen cycle

(b) BOG cycle

Fig. 4 T-S diagram of BOG reliquefaction system with BOG-N₂ heat exchange

함유하고 있는 열량 Q_{N1} 중의 일부는 BOG 압축기 입구에 위치한 BOG 열교환기를 통해 저온의 유입 BOG가 함유하고 있는 열량 Q_{B1} 과 열교환하고, 열량 Q_{N1} 의 나머지는 팽창기를 거쳐 회수되는 저온의 질소와 열교환하게 된다.

이 시스템은 앞 절에서 언급한 기존의 시스템에 비해 BOG 압축기가 담당해야 할 일은 증가하는 반면, 질소 사이클에서 질소 압축기가 담당할 일이 감소되어 기존의 시스템에 비해 전체적으로 약 20% 정도 시스템 효율이 향상되는 효과가 있다

(Mate and Diaz 2003). 그러나 Hamworthy에서 고안한 Mark III 시스템은 유입 BOG의 상태 및 유량에 따라 BOG 열교환기에서 열교환을 이루는 질소가스의 유량을 질소 사이클로부터 적절히 분배되도록 조절해야하므로 시스템 제어가 복잡해지는 등 문제가 있다. 또한 BOG의 유입 압력은 약 1 bar 정도이지만 BOG와 열교환하는 질소가스의 압력은 약 50 bar 정도로 서로 큰 압력차를 가지게 된다. 따라서 BOG 열교환기의 구조적인 면에서 불리한 면이 있으며, 경제성이 떨어질 수 있다. 이러한 큰 압력차는 적용 열교환기의 종류에도 제약을 받게 되어 플레이트 열교환기 사용에 어려움이 있다.

3. BOG-BOG 내부 열교환 시스템

일반적으로 Cargo 탱크에서 증발하는 BOG의 온도는 약 -100°C 정도로 매우 낮기 때문에 이 상태에서 바로 극저온 열교환기를 통해 BOG를 액화시키기는 상대적으로 용이한 면이 있다. 그러나 이러한 기존의 사이클에서 사용할 BOG 압축기는 극저온용이어야 함으로 경제적인 면에서나 시스템의 유지, 보수 관점에서는 매우 불리하다.

이러한 기존 시스템에 비해 Hamworthy사의 Mark III 시스템은 단점을 비교적 많이 극복한 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 앞 장에서 서술한 바와 같이 여러 개선이 필요한 점이 보인다. 본 연구에서는 이러한 개선점을 극복하고 보다 효과적인 재액화 시스템을 제안하고(Korea Patent 2008), 그 액화 방법에 대해 고찰하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 제안하는 BOG 재액화 시스템에 대한 개략도를 나타낸 것이며, 시스템의 열역학적 사이클에 대한 T-S 선도는 Fig. 6에 나타내었다. Hamworthy사의 Mark III 시스템과 비교해 볼 때 가장 큰 차이를 보이는 특징은 BOG 압축기로 유입되는 저온의 BOG를 BOG 압축기를 통과한 고온, 고압의 BOG와 자체 열교환을 시킴으로써 상온 상태까지 온도를 상승시켜 BOG 압축기로 유입되게 하는 것이다. 즉, BOG 압축기로 유입되는 BOG(Fig. 6의 (31b) 지점)는 압축된 이후의 BOG와 자체 열교환하여 대기온도인 약

Fig. 5 BOG reliquefaction system with BOG-BOG heat exchange

(a) Nitrogen cycle

(b) BOG cycle

Fig. 6 T-S diagram of BOG reliquefaction system with BOG-BOG heat exchange

40℃까지 온도를 상승시킨다. 일단 40℃까지 온도가 상승된 BOG는 3단으로 구성된 BOG 압축기에 의해 압축 및 중간냉각 등을 거치게 되는데, 이때 각 단의 압축기 출구에서의 온도는 약 +100℃까지 상승하게 되어 바닷물이나 대기를 이용하여 중간냉각 및 후냉각이 가능하게 된다.

일단 압축, 냉각된 BOG(38b)는 앞서 서술한 바와 같이 유입되는 BOG와 자체 열교환하여 온도가 (39b) 지점까지 낮아진다. 이후 터보팽창기를 통과한 극저온 질소가스와 열교환하게 되고, 마침내 액화점까지 온도는 강하게 되는 것이다. 일단 액화된 BOG(LBOG)는 기존 재액화 시스템과 동일한 과정을 통해 LBOG 분리기에 저장된 후 Cargo 탱크로 회수된다.

BOG 내부 열교환 방법에 대한 효과는 전체 BOG 재액화 시스템을 구성하는 각 장치들의 가격면에서 큰 몫을 차지하는 BOG 압축기의 가격을 기존 시스템에 비해 크게 낮출 수 있다는 것이다. 그 이유는 Hamworthy사의 Mark III 시스템에서 이미 설명한 바와 같다. 또한 열교환기 형태에 있어서는 BOG-N₂ 열교환의 경우 50 기압과 1 기압의 큰 압력차이 때문에 플레이트형 열교환기를 사용하기 어려우나 BOG와 BOG의 내부 열교환의 경우 압력차가 8 기압 이내로 플레이트형 열교환기 사용이 가능할 것으로 생각된다.

4. 기존 재액화 방식과 BOG 내부 열교환 방식의 사이클 비교

기존의 재액화 방식과 BOG 내부 열교환 방식에 대해 비교하기 위해 개략적인 열역학적 사이클을 Fig. 7(a) 및 (b)에 각각 나타내었다. 여기서 (a)는 기존 시스템을, (b)는 BOG 내부 열교환 방식을 표시하였다.

BOG 내부 열교환이 없는 시스템의 경우, 질소 냉동사이클에 의해 방출하여야 할 BOG의 열량은 Fig. 7(a)에서 Q_{M1} 에 해당한다. BOG 상호간의 내부 열교환이 이루어지는 시스템의 경우는 Fig. 7(b)에서 유입되는 BOG가 받아들이는 열량은 Q_2 이고, 압축된 BOG가 방출한 열량은 Q_3 에 해당하며, 두 값은 자체 열교환 방식이므로 서로 동일하다.

Fig. 7 Comparison of two BOG reliquefaction cycles

$$Q_2 = Q_3 \quad (1)$$

또한 앞에서 이미 설명한 바와 같이 내부 열교환에 의하여 온도가 상온으로 상승하였으므로 BOG 압축기를 거치면서 상승한 BOG 온도는 바닷물을 이용한 중간냉각 방식으로 충분히 냉각시킬 수 있게 되고, 이때 바닷물로 방출되는 열량은 Q_4 에 해당한다. 최종적으로 유입되는 BOG가 가지고 있는 열량 중 Q_3 과 Q_2 는 내부 열교환에 의하여 상쇄되며, Q_4 는 바닷물에 의해 방출할 수 있으므로 BOG 액화를 위해 극저온 질소 냉동사이클이 담당하여야 최종적인 열량은 Q_{D1} 이 된다. 따라서 극저온 질소 냉동사이클이 담당하여야 할 열량은 BOG 내부 열교환 방식이 기존 방식보다 훨씬 적다.

$$Q_{M1} > Q_{D1} \quad (2)$$

BOG 간의 상호 내부 열교환을 수행하지 않고 극저온 상태에서 BOG를 압축하게 되면 압축 후의 BOG 온도는 약 -40°C 정도 되는데, 이 온도는 바닷물로 냉각을 할 수 없는 온도가 되므로 전체 시스템에서 질소 압축기와 BOG 압축기에 투입된 일과 기체 BOG와 액체 BOG와의 내부에너지 차를 모두 극저온 질소 사이클이 감당하게 된

다. 또한 압축과정에서 발생하는 열을 방출할 수 있는 과정은 질소 압축기 중간 냉각과정 한 곳뿐이다.

그러나 BOG 내부 열교환을 수행하면 BOG 압축 후의 온도가 바닷물로 냉각할 수 있을 정도로 충분히 높아지므로 전체 시스템에서 열량을 방출할 수 있는 곳이 질소 사이클의 압축된 이후와 BOG 압축 후 두 군데가 된다. 따라서 극저온 질소 냉동사이클이 감당하여야 할 열량이 그만큼 줄어들 수 있음을 짐작할 수 있다. 이것은 동일한 열량을 방출시키기에 있어 해수펌프 작동을 통한 냉각 방식과 질소 냉동사이클을 구동시켜 냉각하는 방식 간의 필요 동력에서 큰 차이를 보이기 때문이다.

5. BOG-BOG 재액화 공정 모사

BOG-BOG 열교환 방식의 성능검정을 위하여, 공정 모사 전용패키지인 HYSYS(Aspen Tech. Inc., 2006) 시스템을 이용하였다. Fig. 8은 BOG-BOG 열교환 방식의 성능해석을 위한 공정도를 나타낸 것이다. 구체적인 모사 대상은 LNG 실선의 Laden Voyage 모드이며, 이때 BOG 발생량은 $5,738 \text{ kg/h}$ 이다.

또한 내부 열교환이 없는 기존 방식과

Fig. 8 HYSYS flowsheet for process simulation on BOG reliquefaction system with BOG-BOG heat exchange

BOG-BOG 열교환 방식과의 비교를 위하여 두 방식의 사이클 공정을 HYSYS를 이용하여 각각 모사, 비교하였다.

BOG 내부 열교환이 없는 경우, BOG 사이클 내에서는 BOG 압축을 위해서 238 kW의 동력이 필요하지만, BOG 내부 열교환이 있는 경우에는 Table 1에 정리한 바와 같이 동력이 809 kW로 증가하게 된다. 이는 BOG 간의 내부 열교환을 통해 온도가 상승하게 되고, 이로 인해 BOG의 비체적이 상승하기 때문이다.

Table 1 Comparison of performance for BOG reliquefaction system

Utility	Non BOG-BOG HX	BOG-BOG HX
BOG Cycle [kW]	238	809
N ₂ Cycle [kW]	5368	3595
Total Work Input [kW]	5606	4404
Specific Work [kWh/kg]	0.976	0.767
%	100	78.6

그러나 전체 시스템에서 가장 큰 전력이 소요되는 극저온 질소 냉동 사이클에 대해 압축과정에서 투입되는 동력은 BOG 내부 열교환이 없는 경우에는 5,368 kW가 소요되는데 반하여 BOG 내부 열교환이 있는 경우는 3,595 kW로 낮아진다. 따라서 BOG 압축과 극저온 질소 사이클 모두를 포함한 동력은 BOG 내부 열교환이 없는 경우 5,606 kW이지만 BOG 내부 열교환의 경우 4,404 kW로 크게 감소한다.

결과적으로 BOG 단위 질량당 액화에 소요되는 전력은 BOG 내부 열교환이 없는 경우 0.976 kWh/kg이지만, BOG 내부 열교환의 경우에는 0.767 kWh/kg로 크게 줄어든다. 즉 유입되는 BOG와의 열교환에 의하여 기존 방식대비 약 78.6%의 전력으로 동일한 양의 BOG를 액화할 수 있게 되는 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 BOG-BOG 내부 열교환 방식을 이용한 새로운 개념의 BOG 재액화 시스템을 제안하였다. 제안된 방식에 대한 여러 특성들을 고

찰하고, 열역학적 사이클 등을 분석, 평가하였다. 또한 내부 열교환이 없는 기존 방식과의 비교와 공정 모사 등을 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. BOG 내부 열교환 방식은 내부 열교환이 없는 기존 재액화 방식에 비해 약 21%의 소비전력 감소가 가능하다.

2. BOG-N₂ 열교환 방식에 비해, BOG 내부 열교환 방식은 열교환기 내부에서 열교환하는 두 유체 간의 압력차가 작아 BOG 열교환기 설계 및 제작시 구조적으로 유리하며, 경제적이다. 또한 이러한 상대적으로 작은 압력차는 플레이트형 열교환기를 채택함에 있어 보다 유리하다.

3. BOG 내부 열교환 방식은 동일한 사이클 내에서 자체 열교환하므로 BOG 양에 관계없이 BOG-N₂ 열교환 방식에 비해 상대적으로 제어가 용이하다.

4. BOG 내부 열교환 방식을 이용한 재액화 시스템은 BOG-N₂ 열교환 방식처럼 BOG가 상온상태로 유입, 압축되므로 고가의 극저온 압축기가 아닌 일반적인 상온 압축기를 사용할 수 있어 경제적이며, 바닷물을 이용한 중간냉각이 가능하다.

후 기

본 연구는 국토해양부 가스플랜트 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Aspen Technology Inc., 2006, HYSYS 2006 Manual.
- Barron, R.F., 1985, Cryogenic System, 2nd ed., Oxford University Press: New York.

- Hamworthy Ltd., 2007, LNG systems for marine application, Hamworthy Brochure (<http://www.hamworthy.com/>).
- Haywood, R.W., 1990, Analysis of Engineering Cycles, 3rd ed., Pergamon Press: New York.
- Kim, H.S., 2005, Economical analysis on the size and propulsion system of LNG carrier, Technical Trend of The Gas Industry, KOGAS, Vol. 17, pp. 69-76.
- Korea Patent, 2008, LNG BOG Reliquefaction Apparatus and Method, Publication No.: 2008-0057461 (date: June 25, 2008), Application No.: 2006-0130784 (date: Dec. 20, 2006).
- Mate, O.M. and Diaz, A.M., 2003, Reliquefaction systems for marine application, World Maritime Conference 17, San Francisco, pp. 1-15.

< 이 윤 표 >

< 신 유 환 >

< 이 상 훈 >

< 김 광 호 >