

LNG운반선의 증발기체 재액화 장치의 사이클 해석

진영욱*

Abstract

Cycle analysis has been performed to find out the optimum design point of the BOG re-liquefaction plant. The cycle state, defined by three cycle variables, was mainly described by the three cold temperatures of the three-pass heat exchanger, on which the constraints by the heat exchanger are imposed. The cycle states which are confined within a domain limited by the temperature constraints were the primary issue of this study. The BOG mass within the domain was analyzed first and then the cycle performance was related to the BOG mass afterwards, which enabled us to explain the observed behavior of the cycle performance under the temperature constraints by the heat exchanger. A good cycle performance could be ensured if the two cold Nitrogen temperatures of the three temperatures were placed close together near -140°C while the BOG temperature is kept far above enough, but not too far, from -140°C such that it does not interfere in their optimum temperature range.

Keywords : LNG(Liquid Natural Gas), BOG(Boil-off Gas), Re-liquefaction

1. 서론

최근 원유가격이 급상승하고 청정에너지에 대한 수요가 기하급수적으로 증가함에 따라 전체 에너지 소비에서 천연가스가 차지하는 비중이 급격히 증가하고 있다. 해외에서 생산된 천연가스는 산지의 천연가스 액화 시설에서 완전 액화되어 액화 천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas)의 형태로 LNG선에 저장되어 수송된다. LNG선에서 LNG는 단열된 LNG 저장 탱크에 탑재되어 수송되게 되는데 이때 외부에서부터의 열취득으로 인하여 하루 약 0.15%(200,000 m³급 LNG 저장탱크 기준)가 기화하게 된다.(1) 탱크 내에서 기화되는 가스를 증발기체(boil-off gas, 이하 BOG)라 부른다. 저장 탱크 내의 압력을 유지시키기 위하여 BOG를 외부로 추출하여 주어야 하는데 종래에는 LNG 선의 추진동력인 증기터빈(steam turbine)의 연료로 공급되어 왔다.

* 한국기술교육대학교 기계정보공학부

그러나 최근에는 LNG 선이 대형화되고 LNG 선의 추진 방식이 종래의 증기터빈 방식으로부터 고효율의 디젤엔진 방식으로 변경되고 있어 BOG가 운항 중의 보조연료로 사용될 수 없게 되었다.(2) BOG를 처리하기 위하여 태워버리기도 하지만 각국의 영해 내의 환경 규제가 한층 강화되어 BOG 처리에 대한 새로운 대안이 필요하게 되었고 이러한 요구에 따라 LNG선 내에서 발생된 BOG를 재액화하는 공정이 제안 되었다.

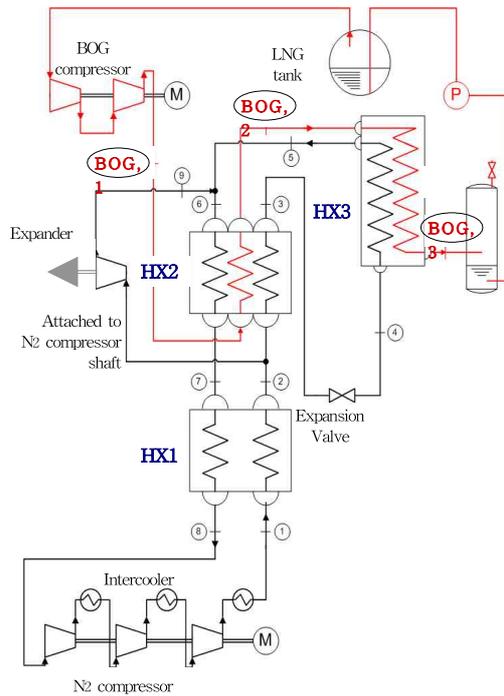


Fig. 1 Schematic of LNG BOG re-liquefaction plant

현재 LNG 선박용 LNG BOG 재액화 장치는 해외 업체들에 의해 개발되어 제작되고 있다. 대표적인 LNG BOG 재액화 장치 업체는 노르웨이의 Hamworthy사(社)로 역 Brayton 질소 냉동 사이클을 이용하여 BOG를 재액화 장치를 개발 하였고 육상 플랜트를 운영하고 있으며 향후 LNG 수송 선박에 탑재될 예정이다. 재액화 시스템의 효율을 높이기 위해서는 질소 냉동 사이클에서 BOG와 열교환하는 팽창기나 팽창 밸브 출구의 온도가 낮아야 한다.(3) 그러나 역 Brayton 사이클의 경우 BOG와 열교환 하는 질소 사이클의 최저 온도는 터보 팽창기에 의해서 얻어지게 되므로 터보 팽창기 출구에서의 액적 발생 조건에 의해 제한된다. 또한 재액화 장치 운전 시 발생할 수 있는 시스템의 부하의 변화는 터보 팽창기 입구 온도의 변화를 초래할 수 있고 이에 따른 터보 팽창기 출구에서의 액적 발생을 막기 위해 시스템 운전 시 정확한 제어가 수반되어야 한다. 따라서 재액화 장치의 효율을 극대화시키고 시스템의 운전성을 향상시킬

수 있는 대안적인 사이클의 적용이 필요하다. 이러한 역 Brayton 사이클의 단점을 해소하기 위하여 본 연구에서 도입한 시스템은 Claude 질소 냉동 사이클이다. Claude 사이클의 경우 BOG와 열교환을 수행하는 최저 온도는 터보 팽창기에 의해 발생하는 것이 아니라 팽창 밸브를 통하여 얻어지기 때문에 역 Brayton 사이클에 비하여 시스템의 최저 온도를 더욱 낮출 수 있으므로 시스템의 효율을 증대시킬 수 있는 장점이 있으며(4) 터보 팽창기가 작동 조건이 액적 발생 영역에 있지 않기 때문에 더욱 수월한 장치 운용을 할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 LNG 재액화 장치 업계의 선발 주자인 Hamworthy사와는 차별되는 LNG BOG 재액화 시스템을 국산화하여 개발하기 위하여 Fig. 1과 같이 구성된 Claude 질소 냉동 사이클에 근거한 BOG 재액화 시스템을 고안하고 이에 대한 사이클 해석 및 최적화를 수행 하였다.

Table 1 Given conditions for cycle analysis

Cycle location	Temp(°C)	Press (bar)
BOG press., P_{BOG}		3
BOG,1, $T_{BOG,1}$	-57.8	
BOG,3, $T_{BOG,3}$	-160	
N_2 high press, P_H		58
N_2 low press, P_L		14
1, T_1	40	
5, T_5	-146.4	
8, T_8	35	
N_2 -compressor work, $w_c=177.7$ kJ/kg N_2		
Expander efficiency, $\eta_e=85\%$		

2. 해석모델

먼저 해석모델을 위한 BOG 재액화 사이클의 운전 조건을 살펴보자. BOG 사이클과 질소 사이클로 구성되는 BOG 재액화 사이클에서 두 사이클의 질량 유량 비는 압축되는 질소의 질량유량에 대한 액화되는 BOG의 질량유량의 비 m_{BOG} 에 의해 정해진다. LNG 탱크로부터 추출되는 1 bar, -120°C의 BOG는 PBOG=3.0 bar, TBOG=-57.8°C의 과열증기로 압축된 후 HX2로 이동한다. 이후 BOG는 HX2의 1차 냉각과 HX3의 추가 냉각에 의해 TBOG,3=-160°C의 과냉액체로 변환 후 LNG 탱크로 돌아온다. 질소 사이클의 저압과 고압은 각각 PL=14 bar, PH=58 bar이며, 사이클 지점 8의 저압 질소는 3단 압축과 중간 냉각을 거쳐 지점 1에서 T1=40°C의 고압 상태가 되는데 상태 이동에 소요되는 질소 압축기 일은 $w_c=177.7$ kJ/kg N_2 이다. 지점 1의 질소가 지점 2에 도달하

면 두 흐름으로 나뉜다. 팽창기로 유입되는 질소의 질량비를 팽창질량비 r 이라하면 HX2로 흐르는 질소의 질량비는 $(1-r)$ 이 된다. HX3의 출구 온도는 BOG 액화온도 $T_5 = -146.4^\circ\text{C}$ 로, HX1의 T_8 은 T_1 과 5°C 차를 두어 $T_8 = 35^\circ\text{C}$ 로 설정하였다. Table 1에 상기 사이클 지점의 상태를 정리하였으며 BOG의 구성성분은 순수 메탄(Methane)을 가정하였다.

사이클의 성능 인자를 구하기 위해서는 사이클의 열역학 상태가 필요하다. 이를 위한 지배방정식으로는 사이클 기기 각각에 대하여 에너지 보존법칙, 효율 또는 정상적 운전을 보장하기 위한 조건들이 있다. HX1, HX2, HX3 및 혼합부 각각에 대한 에너지 보존은 다음과 같다.

$$h_1 - h_2 + h_7 - h_8 = 0 \quad (1)$$

$$(1-r)(h_2 - h_3) + h_6 - h_7 \quad (2)$$

$$+ m_{BOG}(h_{BOG,1} - h_{BOG,2}) = 0$$

$$(1-r)(h_3 - h_5) + m_{BOG}(h_{BOG,2} - h_{BOG,3}) = 0 \quad (3)$$

$$(1-r)h_5 + rh_9 - h_6 = 0 \quad (4)$$

또한 팽창기 단열효율은 다음과 같이 정의하였고 85%로 가정하였다.

$$\eta_e = \frac{h_2 - h_9}{h_2 - h_{9s}} \quad (5)$$

상기와 더불어 열교환기의 정상적 운전이 사이클 상태에 반영되어야 한다. HX2에서 BOG와 고온 질소가 저온 질소에 의해 냉각되기 위해서는 HX2의 입출구 온도는 다음의 조건을 충족해야 한다.

$$T_6 \leq T_3 \quad (6)$$

$$T_6 \leq T_{BOG,2} \quad (7)$$

$$T_7 \leq T_{BOG,1} \quad (8)$$

여기서 $T_{BOG,2}$ 를 BOG 액화온도 -146.4°C 에서 -110°C 까지 변화시켰다. T_3 와 $T_{BOG,2}$ 그리고 T_2 와 $T_{BOG,1}$ 사이에는 특별한 제한이 없으며, $T_7 \leq T_2$ 는 앞서 HX1에서 T_1 을 T_8 보다 5°C 낮게 설정함으로 인해 자동적으로 만족된다.

사이클의 운전 영역에 대한 제한으로는 팽창기 출구의 액적발생 회피 조건은 다음과 같다. 참고로 14 bar 질소의 포화온도는 -164°C 이다.

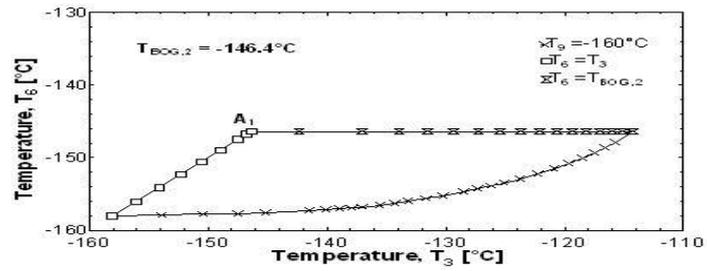
$$T_9 \geq -160^\circ\text{C} \quad (9)$$

방정식 (1)-(5)은 8개의 사이클 변수 $T_2, T_3, T_6, T_7, T_9, T_{BOG,2}, m_{BOG}$, r 을 포함하므로 3개의 사이클 변수에 의해 사이클 상태는 정의되며, 조건 식(6)-(9)의 제한으로 한정된 범위의 사이클 상태만이 허용된다. 따라서 본 연구는 3중 열교환기에서 입출구 온도의 제한이 사이클 상태의 범위에 어떻게 반영되는지 살펴보고, 이에 따른 사이클 성능의 한계, 적정 성능을 위한 입출구 온도의 설정에 대하여 알아보려고 한다.

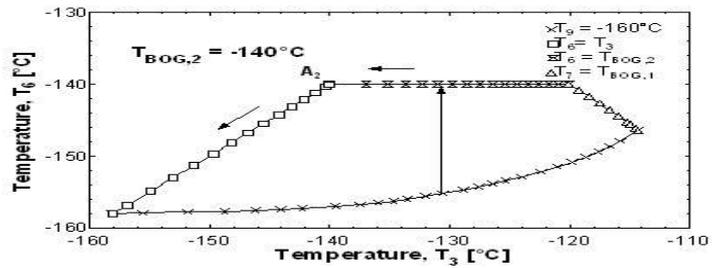
3. 결과 및 고찰

3.1 사이클 상태의 범위

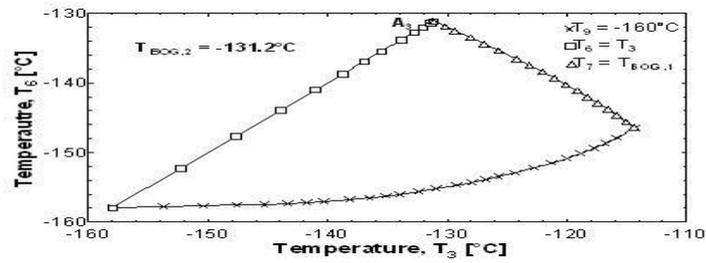
상기 식(1)-(9)에 의해 허용되는 사이클 상태의 범위에 대해서 살펴보고자 한다. HX2의 저온 $T_3, T_6, T_{BOG,2}$ 는 조건 식(6)-(8)을 통하여 사이클 상태의 범위를 직접적으로 제한하는 사이클 변수들이다. Fig. 2(a)-(d)에 이들에 의해 한정된 범위에 놓인 사이클 상태를 나타내었다. 식(1)-(5)에 의해 사이클 상태는 사이클 변수 3개에 의해 기술되므로 $T_{BOG,2}$ 가 주어지면 제한 조건 식(6)-(9) 각각은 Fig. 2와 같이 T_3 와 T_6 의 관계로 나타낼 수 있다. 이들 변수를 좌표로 하는 3차원 도형의 내부가 지배방정식에 의해 허용되는 사이클 상태이다. Fig. 2의 각각은 주어진 $T_{BOG,2}$ 에 대하여 T_3 에 따른 T_6 의 범위를 보여준다. T_6 하단은 $T_{BOG,2}$ 와 무관하게 식(9), 즉 $T_9 = -160^\circ\text{C}$ 선에 의해 제한되나, 상단은 식(6), (7), (8), 즉 $T_6 = T_3$ 선, $T_6 = T_{BOG,2}$ 선, $T_7 = T_{BOG,1}$ 선에 의해 제한되며 이들의 제한은 $T_{BOG,2}$ 에 따라 다르다. $T_{BOG,2}$ 가 -146.4°C 로부터 상승함에 따라 $T_6 = T_3$ 선과 $T_7 = T_{BOG,1}$ 선이 길어짐과 동시에 $T_6 = T_{BOG,2}$ 선은 짧아지는 데 $T_6 = T_3$ 선과 $T_7 = T_{BOG,1}$ 선이 만나는 $T_{BOG,2} = -131.2^\circ\text{C}$ 에서 $T_6 = T_{BOG,2}$ 선에 의한 T_6 상단의 제한은 나타나지 않는다. $-146.4^\circ\text{C} < T_{BOG,2} < -131.2^\circ\text{C}$ 에서 T_6 상단이 $T_{BOG,2}$ 에 의해 제한이 시작되는 사이클 상태를 A1, A2, A3로 나타내었다. Fig. 2(c)의 A3는 식(6)-(8)의 제한이 동시에 작용하는 사이클 상태로서 $T_6 = T_3 = T_{BOG,2}$, $T_7 = T_{BOG,1}$ 을 만족하는데, 이는 $T_{BOG,2} = -131.2^\circ\text{C}$ 에서 나타난다. 이후 $T_{BOG,2}$ 에 따라 $T_6 = T_3$ 선의 고점이 $T_7 = T_{BOG,1}$ 선의 제한으로 낮아지므로 T_6 의 최대치는 -131.2°C 이다. 이후 $T_6 < -131.2^\circ\text{C}$ 는 식(8)의 제한으로 유지되며 사이클 상태 A4는 $T_6 = T_3 < T_{BOG,2}$ 이다. 결국 T_6 상단은 식(6), (7)의 직접적 제한과 식(8)의 지배방정식을 통한 우회적 제한에 의해 윤곽이 결정된다. $T_{BOG,2}$ 에 따른 $T_6 = T_3$ 선의 길이는 $T_{BOG,2} < -131.2^\circ\text{C}$ 에서 식(7)에 의해 길어지나 $T_{BOG,2} > -131.2^\circ\text{C}$ 에서 식(8)의 지배방정식을 통한 우회적 제한에 의해 짧아진다. 추후 사이클 성능과 관련되어 $T_6 = T_3$ 선이 중요한데, $T_{BOG,2}$ 와 T_3 가 주어졌을 때 T_6 상단에서 T_6 와 T_3 는 가장 가까워진다. 이로 인하여 T_6 상단이 도형 내부의 상태보다 우선적 관심이 된다.



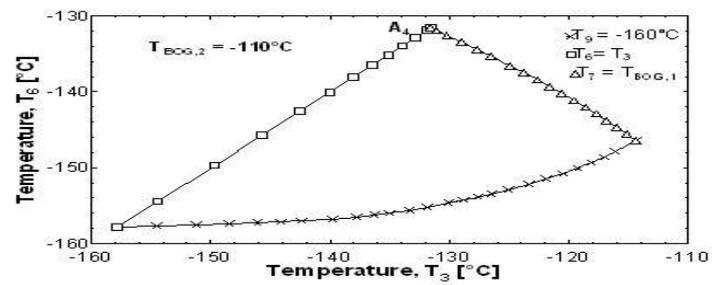
(a) $T_{BOG,2} = -146.4^\circ\text{C}$



(b) $T_{BOG,2} = -140.0^\circ\text{C}$



(c) $T_{BOG,2} = -131.2^\circ\text{C}$



(d) $T_{BOG,2} = -110.0^\circ\text{C}$

Fig. 2 Domain of cycle states

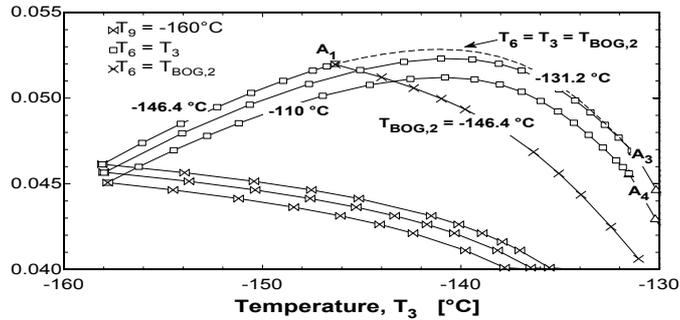


Fig. 3 Upper and lower limits of BOG mass

Fig. 2의 경계 상태를 따라 mBOG을 구하고 사이클 상태를 T3, mBOG, $T_{BOG,2}$ 로 나타내면 Fig. 3과 같다. TBOG,2에 따른 mBOG범위의 변화를 볼 수 있도록 하나의 도표에 나타내었다. Fig. 2와 마찬가지로 mBOG 하단은 TBOG,2와 무관하게 T9=-160°C선에 의해 제한되며 T6=TBOG,2선의 상단 제한 또한 TBOG,2에 따라 다르다. 즉, $-146.4^{\circ}\text{C} < T_{BOG,2} < -131.2^{\circ}\text{C}$ 에서 T6=TBOG,2선이 상단에 나타나지만 TBOG,2=-131.2°C에서는 없어지며 T7= TBOG,1선 이후 T6=T3선의 상단 제한이 곧바로 이어진다. Fig. 3의 점선은 T6=T3=TBOG,2선을 나타내는 데 Fig. 2의 A1, A2, A3을 잇는 사이클 상태들로서 $-146.4^{\circ}\text{C} < T_{BOG,2} < -131.2^{\circ}\text{C}$ 의 T6=TBOG,2선은 점선과 만난 후 추가 상승여부를 가늠한다. 다음 3.2절에서 이를 자세히 살펴볼 것이다.

3.2 BOG 양

Fig. 2의 T_6 상단의 사이클 상태가 Fig. 3에서 mBOG상단에 나타나는 과정을 살펴보고자 한다. 추후 사이클 성능이 BOG 양과 직접 관련되므로 이에 대한 이해는 사이클 상태에 따른 사이클 성능을 파악하는데 도움을 준다.

3.2.1 BOG양과 팽창기 일

이를 위하여 단위 압축 질소 질량당 팽창기 일 w_e 와 BOG양 mBOG의 관계가 필요한데 이는 사이클 지점 1에서 지점 8에 이르는 검사체적에 대한 에너지 보존으로부터 얻을 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w_e - m_{BOG}(h_{BOG,1} - h_{BOG,3}) = h_1 - h_8 \quad (10)$$

여기서 h_1 , h_8 , $h_{BOG,1}$, $h_{BOG,3}$ 는 일정하므로 w_e 는 단일 사이클 변수 mBOG에 의존하며 이들은 서로 비례한다. 식(10)에 의해 mBOG의 사이클 변수에 따른 거동을 위해 w_e 를 추적해도 무방하다. 팽창기 일 w_e 은 다음과 같다.

$$w_e = (P_H - P_L)rv_{avg} \quad (11)$$

여기서 v_{avg} 은 평균 비체적으로 다음과 같이 표시된다.

$$v_{avg} = \frac{1}{P_H - P_L} \int v \, dP$$

v_{avg} 는 팽창기 입출구의 온도 T_2 , T_9 에 의존한다. 식(5)의 팽창기 효율에 의해 T_2 와 T_9 은 서로 비례관계 수준으로 연관되므로 v_{avg} 는 T_9 에 의존한다고 할 수 있다. T_9 를 위해 식(4)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$h_9 = h_5 + \frac{1}{r}(h_6 - h_5) \quad (12)$$

또한 mBOG을 위하여 식(3)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$m_{BOG} = \frac{(1-r)(h_5 - h_3)}{h_{BOG,2} - h_{BOG,3}} \quad (13)$$

식(13)의 분자는 HX3으로 유입되는 저온 질소가 공급하는 냉열 양 $q_c = (1-r)(h_5 - h_3)$ 이다. 식(12)와 (13)에서 h_5 는 T_5 가 BOG 일정한 액화온도를 유지하므로 일정하다.

3.2.2 $T_6 = T_{BOG,2}$ 선의 mBOG

Fig. 4에 $T_{BOG,2} = -140^\circ\text{C}$ 인 경우 사이클 상태의 범위를 나타내었다. Fig. 4(a)는 사이클 변수를 r , T_3 , $T_{BOG,2}$ 과 r , T_6 , $T_{BOG,2}$ 로 하였으며 Fig. 4(b)는 r , T_2 , $T_{BOG,2}$ 과 r , T_7 , $T_{BOG,2}$ 로 하였다. Fig. 2와 Fig. 3의 관계는 Fig. 4를 매개로 설명될 수 있다.

Fig. 4(a)와 Fig. 2(b)에 $T_3 (> T_{BOG,2})$ 를 일정하게 유지할 때 사이클 상태의 범위를 나타내었다. Fig. 4(a)의 화살표에서 알 수 있듯이 T_3 하단, 즉 $T_6 = T_{BOG,2}$ 선의 상태들은 주어진 T_3 에서 r 을 최소로 하며 동시에 T_6 와 T_3 차를 최소로 한다. 또한 식(13)에 의해 mBOG를 최대로 한다. 이를 Fig. 2(b)에서 살펴보면 주어진 T_3 에서 T_6 와 T_3 차를 최소로 하기위하여 T_6 를 높이면 mBOG가 증가하나, T_6 가 $T_{BOG,2}$ 보다 낮아야 하는 조건으로 인하여 $T_6 = T_{BOG,2}$ 선이 T_6 의 상승 한계로 작용한다. 따라서 Fig. 5에서 $T_6 = T_{BOG,2}$ 선이 $T_3 (> T_{BOG,2})$ 에 따른 mBOG상단에 위치한다.

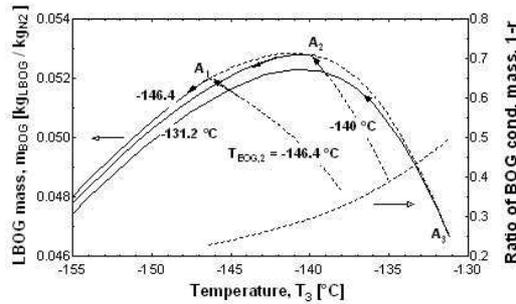


Fig. 5 Upper limits of BOG (thin solid line: T6=T3, thin broken line: T6=TBOG,2, thick broken line: T6=T3=TBOG,2)

이제 Fig. 4(a)에서 T6=TBOG,2선을 따라 r이 커지는 방향으로 사이클 상태를 이동시켜보자. vavg는 식(12) 또는 Fig. 4(b)의 T2 상단으로부터 r에 반비례하여 서서히 감소함을 알 수 있다. 따라서 식(11)의 we는 r에 비례하여 증가하므로 사이클 상태 T6=T3=TBOG,2에서 we, 즉 mBOG는 최대가 된다. 또한 T6와 T3차는 r에 따라 줄어들며 최종적으로 0이 된다. 결국 Fig. 2(b)에서 T6=TBOG,2선을 따라 T6와 T3차가 줄어드는 방향, 즉 T3하락 방향으로 상태를 이동시키면 mBOG는 증가한다. Fig. 5는 이를 나타낸다.

결과적으로 T6와 T3 차를 줄이면 mBOG는 증가하는데, T6를 TBOG,2까지 높일 수 있었고 T3 또한 TBOG,2까지 낮춰 T6와 T3 차가 0인 상태에 도달할 수 있었다. 비록 T6=T3에 도달할 수 있었지만 TBOG,2의 제한으로 인해 T6=T3=TBOG,2에서 mBOG의 일차적 최대가 얻어졌다. Fig. 5의 점선은 이를 나타낸다.

3.2.3 T6=T3선의 mBOG

Fig. 4(a)에서 T6=TBOG,2선에 이어 T6=T3선을 따라 r이 커지는 방향으로 사이클 상태를 이동시켜보자. Fig. 2에서 사이클 상태는 T3 하락방향으로 이동함에 따라 T6와 T3 차는 0이나 T6=T3와 TBOG,2차는 벌어진다. mBOG의 변화를 살펴보기 위하여 식(13)의 qc를 미분하면 다음과 같다.

$$dq_c = (h_5 - h_3)d(1-r) + (1-r)d(-h_3) \quad (14)$$

r 증가에 따라 mBOG는 상기 식의 두 항으로 인한 요인에 따라 변한다. 첫 항은 BOG 응축기로 유입되는 질소량 감소에 따른 냉열 양의 감소로서 항상 마이너스이지만 둘째 항은 T3 하락에 따른 BOG 응축기 입구의 엔탈피 감소로서 항상 플러스이다.

T6=T3선을 따라 r이 매우 커지면 (1-r)이 매우 작으므로 마이너스 요인의 영향력이 크다. 즉 BOG 재액화가 소량의 저온 질소에 의존하게 되므로 소폭의 질소량 감소에도

냉열 양의 감소폭은 커진다. 특히 T_3 가 낮으면 이는 심화된다. 또한 T_3 하락에 따른 플러스 요인은 질소량이 적으므로 제한적이다. 따라서 $T_{BOG,2}$ 와 무관하게 $dq_c < 0$ 가 되므로 $mBOG$ 는 감소한다. 결국 Fig. 2의 $T_6=T_3$ 선에서 T_3 가 매우 낮을 때, T_3 하락 방향으로 상태가 이동하면 $mBOG$ 는 $T_{BOG,2}$ 와 무관하게 감소한다. 이를 Fig. 5에서 볼 수 있다.

이제 Fig. 4(a)의 $T_6=T_3$ 선에서 r 이 작을 때 $mBOG$ 가 어떻게 변하는지 알기위하여 $T_6=T_3=T_{BOG,2}$ 의 사이클 상태에서 dq_c 를 살펴보자. 식(14)의 dq_c 가 T_3 와 $(1-r)$ 에 의존하므로 사이클 상태 $T_6=T_3=T_{BOG,2}$ 의 T_3 에 따른 $(1-r)$ 을 Fig. 5에 나타내었다. $T_{BOG,2}(=T_3)$ 가 -146.4°C 에서 -140°C 사이의 낮은 범위일 때 $(1-r)$ 또한 작음을 알 수 있다. 따라서 마이너스 요인이 강하게 작용하여 $dq_c < 0$ 가 되고 $mBOG$ 는 감소한다. 반면 -140°C 에서 -131.2°C 사이의 상대적으로 높은 $T_{BOG,2}(=T_3)$ 에서 $(1-r)$ 또한 크다. 플러스 요인의 영향력이 커지는 반면 마이너스 요인은 약해지므로 $dq_c > 0$ 가 되고 $mBOG$ 는 증가한다. 결국 Fig. 2(b)의 사이클 상태가 A_2 에서 T_3 하락 방향으로 이동하면 $mBOG$ 의 증감은 $T_{BOG,2}$ 에 따라 다르다. $T_{BOG,2}$ 가 -140°C 보다 작으면 감소하나, -140°C 보다 크면 증가한다. 하지만 양자 모두 최종적으로 감소한다. Fig. 5는 이를 나타낸다.

결과적으로 BOG 응축기 입구 온도인 $T_{BOG,2}$ 가 -140°C 보다 낮을 때 $T_{BOG,2}$ 와 $T_6(=T_3)$ 차를 줄이면 $mBOG$ 가 증가하는데 $T_6(=T_3)$ 는 식(7)의 제한으로 $T_6=T_3=T_{BOG,2}$ 선까지 높일 수 있다. 반면 $T_{BOG,2}$ 가 -140°C 보다 높으면 $T_{BOG,2}$ 와 $T_6(=T_3)$ 차를 늘리면 $mBOG$ 는 증가하는데 $T_6=T_3=-140^\circ\text{C}$ 부근에서 $mBOG$ 의 최대가 얻어지며 이는 $T_{BOG,2}$ 와 무관함을 보인다.

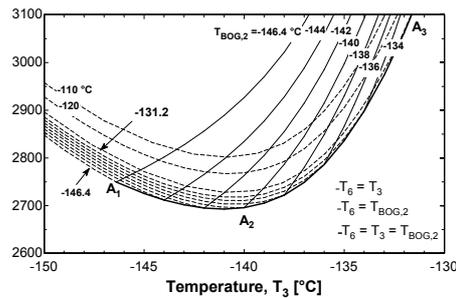


Fig. 6 Lower limits of specific liquefaction work (thin solid line: $T_6=T_{BOG,2}$, thin broken line: $T_6=T_3$, thick solid line: $T_6=T_3=T_{BOG,2}$)

3.3 사이클 성능

사이클 성능은 3단 압축기에서 w_c 의 일을 받은 1 kg의 질소가 지점 1에서 지점 8까지 이동하는 동안 달성한 $mBOG$ 와 w_e 에 의해 평가된다. 이를 위한 지표로서 비 액화

일 w_s 가 있으며 이는 단위 BOG당 소모된 순 일로서 다음과 같이 표현된다.

$$w_s = \frac{w_c - w_e}{m_{BOG}} \quad (15)$$

여기서 m_{BOG} 와 w_e 는 식(10)에 의해 서로 연관되므로 w_s 는 (16)과 같이도 표현될 수 있다.

$$w_s = \frac{w_c - (h_1 - h_8)}{m_{BOG}} - (h_{BOG,1} - h_{BOG,3}) \quad (16)$$

즉 식(16)에 의해 최소 w_s 의 사이클 상태는 최대 m_{BOG} 의 사이클 상태와 동일하며 적정 사이클 성능을 제한하는 요인은 앞서 m_{BOG} 의 상단을 제한하는 요인과 동일하다는 것을 알 수 있다.

식(16)를 이용하여 Fig. 3의 경계 상태를 따라 w_s 를 구하고 사이클 상태를 T_3 , w_s , $T_{BOG,2}$ 로 나타내면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에 대한 설명은 식 (16)의 w_s 와 m_{BOG} 의 관계에 의하여 Fig. 5와 동일하다. 즉 T_3 에 따른 w_s 하단 선에 Fig. 5의 굵은 점선이 위치하며 사이클 상태 A2, 즉 $T_3=T_6=T_{BOG,2}=-140^\circ\text{C}$ 에서 사이클은 최대 성능을 나타낸다. $T_{BOG,2}$ 가 이 온도 보다 낮으면 $T_{BOG,2}$ 에 따른 w_s 의 저점은 $T_3=T_6=T_{BOG,2}$ 선에서 나타나지만, 높으면 $T_3=T_6=-140^\circ\text{C}$ 선에서 나타나며 w_s 의 저점은 $T_{BOG,2}$ 에 따라 높아진다. 이는 Fig. 7의 등 액화에너지 선도에서도 볼 수 있다. Fig. 8은 최대 성능을 나타내는 사이클 상태 $T_3=T_6=T_{BOG,2}=-140^\circ\text{C}$ 의 T-s 선도이다.

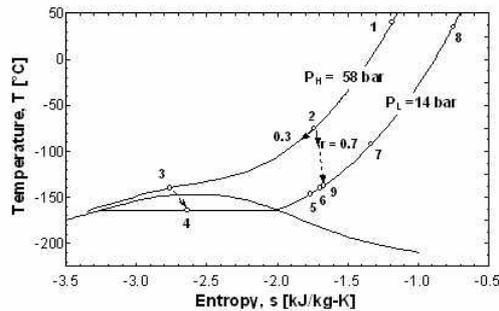


Fig. 8 T-s diagram of the BOG re-liquefaction cycle ($T_3=T_6=T_{BOG,2}=-140^\circ\text{C}$)

Fig. 6은 $-146.4^\circ\text{C} < T_{BOG,2} < -140^\circ\text{C}$ 범위에서 $T_6 \leq T_{BOG,2}$ 조건이 w_s 하단에 작용하여 최적 성능을 위한 T_3 의 범위가 제한됨을 보여준다. 이를 피하고 보다 넓은 범위의 T_3 에서 사이클이 양호한 성능을 나타내기 위해서는 $T_{BOG,2}$ 를 -140°C 이상 -131°C .

2℃ 수준까지 높게 설정할 필요가 있다. 하지만 너무 높으면 사이클 성능의 저하 요인이 된다. T6와 T3는 가능한 근접시키고 -140℃ 또는 그 이하로 낮출 때 적정 성능이 얻어진다.

4. 결 론

BOG 재액화 플랜트의 최적 설계를 위한 사이클 상태를 찾기 위하여 열역학 해석을 수행하였다. 사이클 상태는 3개의 사이클 변수에 의해 정의될 수 있었으며, 3중 열교환기의 저온 측 온도 3개를 주요 사이클 변수로 하였다. 열교환기로서 충족되어야 할 조건들이 이들 온도의 상대적 고저를 제한하는 데 이에 의해 사이클 상태의 범위는 한정된다. 한정된 범위의 사이클 상태에서 BOG양의 거동을 살펴보고 사이클 범위의 제한으로 인한 BOG양의 한계를 구하였다. 또한 사이클의 성능 지표인 비 액화 에너지가 대체할 수 있는 사이클 변수임을 이용하여 사이클 성능과 3중 열교환기의 저온 측 온도의 관계를 설명할 수 있었다.

사이클이 넓은 온도 범위에서 양호한 성능을 나타내기 위해서는 3중 열교환기의 저온 측 저압과 고압 질소의 온도차를 가능한 줄이고 이들 온도를 최적치 -140℃ 부근으로 설정함이 필요했다. 반면 BOG 온도는 이 보다 높게 유지해야 하지만 -131.2℃보다 높아지면 BOG 온도에 의한 사이클 성능의 저하가 우려된다.

5. 참 고 문 헌

- [1] Mate, O. M. and Diaz, A. M., 2003, Reliquefaction systems for marine applicaiton, World Maritime Conference 17, San Francisco, pp. 1-15.
- [2] H. S. Kim, 2005, Economical analysis on the size and propulsion system of LNG carrier, Technical Trend of The Gas Industry, KOGAS, Vol. 17, pp 69-76.
- [3] Barron, R. F., 1985, Cryogenic system, Second Edition, Oxford University Press, New York, pp. 357-362
- [4] Haywood, R. W., 1990, Analysis of Engineering cycles, Third Edition, Pergamon press, New York, pp. 152-168.