

# Low - Global Warming Potential 냉매를 이용한 에틸렌 수송선의 재액화 시스템 성능개선

하성용·최정호<sup>†</sup>  
동아대학교 조선해양플랜트공학과 대학원

## Performance Improvement on the Re-Liquefaction System of Ethylene Carrier using Low-Global Warming Potential Refrigerants

Seong-Yong Ha·Jung-Ho Choi<sup>†</sup>  
Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The development of sail gas has increased the production of ethane as well as natural gas. The decline in the market price for ethane has led to a change in the petroleum-based ethylene production process into an ethane-based ethylene production process and an increase in the ethane/ethylene trade volume. Large-scale ethane/ethylene carrier have been needed due to an increase in long-distance trade from the US, and cargo type change have led to consider a liquefaction process to re-liquefy Boil-Off gas generated during the voyage. In this paper, the liquefaction system of Liquefied Ethane Gas carrier was evaluated with Low-GWP (Low-Global Warming Potential) refrigerant and process parameters, Boil-Off Gas pressure and expansion valve outlet pressure, were optimized. Low-GWP refrigerants were propane (R290), propylene(R1270), carbon dioxide(R744) was considered at two type of liquefaction process such as Linde and cascade cycle. The results show that the optimal pressure point depends on the individual refrigerant and the highest liquefaction efficiency of carbon dioxide (R744) - propane (R290) refrigerant.

**Keywords** : Re-liquefaction(재액화), Low-GWP(낮은 지구온난화 지수), Ethylene(에틸렌)

## 1. 서론

에틸렌은 전 세계 석유 화학 시장의 수요와 공급을 산정하는데 사용되는 석유 화학 제품 중 하나이다. 세계 에틸렌 수요는 향후 3 년간 연평균 2.6% 증가 할 것으로 전망되며, 중국 및 인도와 같은 신흥 국가들은 석유 화학 제품에 대한 수요 증가를 이끌 것으로 예상된다. 최근 미국의 셰일가스 개발로 인해 많은 에탄 기반 에틸렌 크래커가 증설됨에 따라 대항해 운항을 위한 대형 에탄/에틸렌 선박에 대한 필요성이 대두되었다 (Sung & Lee 2015). 국내 삼성중공업에서 87,000m<sup>3</sup> 에탄선박을 수주를 하였다. 기존에 소형 선박 위주였던 에탄/에틸렌 선박이 대형 선박으로 전환 될 것으로 예상된다. 상온에서 기체상태로 존재하는 에탄과 에틸렌은 효율적으로 운송하기 위해서 액화상태로 운반되는데 이때 에틸렌의 물성치를 HYSYS database로 비교해보면 1bar 일 때 -104.3 °C 로 -89 °C 인 에탄 보다 더 낮은 온도에서

액화 된다. 액화 에틸렌은 가스 상태일 때에 비해 1/460의 부피를 가진다. 운송도중 액화에틸렌가스(LEG, Liquefied ethylene gas)가 외부로부터 열을 흡수하여 증발기체(BOG, Boil-off gas)가 발생하게 되고 하루 약 0.2~0.3%가 기화하게 된다 (Li et al., 2012). 탱크 내의 압력과 온도를 유지하기 위해서 발생한 BOG를 처리해야 하는데 경제성을 향상시키기 위해 발생하는 BOG를 재액화시켜 다시 탱크로 넣는다. 이러한 재액화 시스템은 선박운항에서 주 추진 에너지 다음으로 많은 에너지를 사용하여 친환경적일 뿐만 아니라 고효율 시스템을 요구한다. 소형 에탄/에틸렌 선에서는 HCFCs(Hydro-chloro-fluoro-carbons) 혼합냉매인 R404A를 사용하지만 온실효과 가스로 지정되었다 (UN, 1997). 현재 R404A를 대체하면서 에틸렌 액화 시킬 수 있는 대체 냉매와 시스템에 대한 개발이 필요하다.

에틸렌 액화 연구에서는 액서지 분석을 통한 사이클 개선을 주로 수행 하였다. Li et al. (2012)은 사이클 내 폐열을 이용한

에냉각기(subcooler)를 추가하여 액서지 개선하였다. Ouadha and Beladjine (2015)은 액화 시스템에 효율적인 냉매를 찾기 위해서 탄화수소 냉매인 프로판, 부탄, i-부탄, 프로필렌을 사용하여 재액화 시스템 액서지 분석을 하였다. 그리고 Lee, et al. (2012)에서 이중 혼합 냉매(DMR, Dual Mixed Refrigerant) 사이클을 수학적 최적화 모델로 정식화하고 최적화 기법을 이용하여 에너지를 최소화 하는 액화 공정의 운전 조건을 도출 하였다.

관련 연구에서는 Lee et al. (2009)은 노르웨이 Hamworthy사의 BOG와 N<sub>2</sub>열 교환 과정이 추가된 역브레이튼 사이클인 Mark III BOG 재액화 시스템에 BOG-BOG 내부 열 교환 시스템을 추가하여 Aspen HYSYS를 이용하여 모사하여 기존의 재액화 시스템과 BOG 단위 질량당 액화에 소요되는 전력을 비교 분석하였다. Bhattacharyya et al. (2008)은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)-프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) 다단 열펌프 시스템을 사용하여 분석하고 최적화를 수행하였다. 이 연구에서는 전체 시스템에서의 최적화를 위해서 가스 냉각기와 증발기의 각각의 총괄 열전달 계수는 K 계수의 비율로 나누어져야 함을 보여주었다. Pigani et al. (2016)은 유럽선 냉장 장치에 적용되는 1단 냉매 시스템, 2단 냉매 시스템, 다단 냉매 시스템에 낮은 Low-GWP 냉매인 R717, R744, R123yf와 R1234ze로 적용하여 현재 사용 중인 R407f 냉매와 COP(coefficient of performance), 체적 용량, 안전 및 환경영향(environmental impact)에 대해 비교 분석하였다.

선행 연구에서는 type C 탱크에 저장된 가압된 에틸렌을 가스를 액화하는 것을 대상으로 하고 있으나 대형 에탄/에틸렌 선박의 화물창은 상압 탱크로 공정 조건이 다르다. 본 논문에서는 차세대 냉매로 대두되고 있는 Low-GWP 냉매인 R290, R1270, R744를 사용하여 상압의 에틸렌 가스를 대상으로 린데 사이클(Linde cycle)과 2단 사이클(two stage cascade cycle)의 효율적인 운전조건을 구하고 비교를 하였다.

## 2. 재액화 시스템

액화 공정 비교를 위하여 극저온 액화용으로 많이 적용된 린데 사이클과 저온 냉동 사이클에 많이 적용되는 2단 사이클을 고려하였다.

### 2.1 린데 사이클 (Linde cycle)

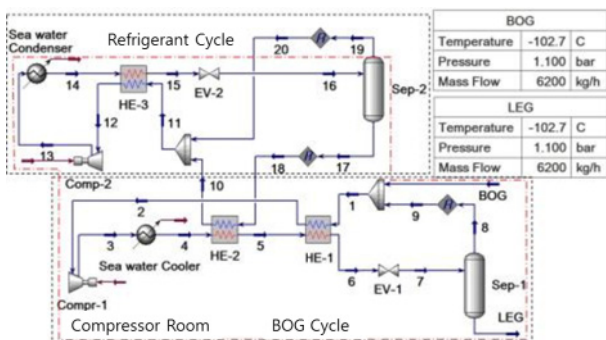


Fig. 1 Process flow diagram of Linde cycle

린데 사이클은 Fig. 1에 나타나 있듯이 해수 냉각기(sea water cooler), 해수 응축기(sea water condenser), 2개의 압축기(comp), 3개의 열교환기(HE), 2개의 팽창 밸브(EV) 그리고 2개의 상 분리기(sep)로 구성된다.

BOG는 Sep-1에서 나온 기체와 합쳐 흐름1로 흐르고 HE-1을 통과하면서 예열되어 Comp-1을 통과하면서 고압상태가 되고 해수 냉각기(sea water cooler)를 지나면서 냉각된다. 냉각된 BOG는 액화냉매와 HE-2에서 열 교환을 통하여 액화에틸렌가스로 액화되고 HE-1을 지나면서 과냉각된다. 과냉각된 액화에틸렌가스는 EV-1에서 감압이 되어 이상기체로 변환되고 Sep-1에서 기체와 액체상을 분리되어 액화에틸렌가스 탱크에 저장된다.

냉매는 냉매 사이클에서 순환을 하면서 BOG를 액화시킨다. 냉매는 흐름 18에서 액체 상태로 HE-2를 통과하여 BOG를 액화시키고 냉매는 기화되고 Sep-2에서 나온 기체와 합쳐 HE-3을 지나면서 예열되어 Comp-2로 들어가 고온 고압 상태가 된다. 그리고 해수 열교환기를 지나 냉매가 액화 되고 HE-3을 지나면서 과냉각되어 EV-2에서 줄-튕슨 효과로 온도를 떨어뜨리고 Sep-2에서 액상은 BOG의 액화로 사용된다.

### 2.2 2단 사이클(two stage cascade cycle)

린데 사이클의 단점은 냉매와 공정 대상물의 끓는점 차이가 크면 클수록 많은 압축 동력 일을 요구한다. 2단 사이클은 복수의 냉매를 이용하여 액화를 위한 각 냉매 사이클의 동력 일을 줄이고 압축기의 압축률이 낮은 장점이 있는 반면에 장비수가 많아지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 1단에는 이산화탄소를 냉매로 적용하였다. 연소성 특징을 가지는 탄화수소계 열 냉매와 다르게 이산화탄소는 대표적인 자연 냉매로 상대적으로 구성 장비 가격이 탄화수소계열 장비 대비 1/3~1/5로 저렴하다. 1단의 주요 장비를 기존의 위험구역(hazardous area)인 압축기실에서 비 위험구역(non hazardous area)인 모터실로 이동하여 설치하고 격벽으로 구성을 한다면 가격을 상당히 낮출 수 있다. 장비의 가격에 큰 영향을 미치는 공정 변수는 물성치, 동력, 용량으로 볼 수 있다. 2단 사이클의 경우 장비수가 증가하여 공간을 많이 차지할 수는 있으나, 상대적으로 낮은 압축비와 저가의 압축기 사용이 가능하므로 가격적으로는 경쟁력이 있다.

2단 사이클은 Fig. 2에 나타나 있듯이 해수 냉각기(sea water cooler) 2개와 해수 응축기(sea water condenser), 3개의 압축기(comp), 3개의 열교환기(HE), 3개의 팽창 밸브(EV) 그리고 3개의 상 분리기(Sep)로 구성하였다. 각 냉매별 효율을 비교하기 위해서 Sep-1에서 동일한 액화에틸렌가스가 배출되게 하였다.

냉매는 2단에서 순환을 하면서 이산화탄소를 액화시킨다. 이산화탄소는 임계온도(critical temperature)가 31.1℃로 해수 응축기로 액화가 불가능하여 2단에서 사용할 수 없다. 냉매는 흐름 26에서 액체 상태로 HE-3을 통과하여 이산화탄소를 액화시키고 냉매는 기화되면서 온도가 올라가고 Sep-3에서 나온 기체와 합쳐 Comp-3로 들어가 고온 고압 상태가 된다. 그리고 해수 응축기를 지나 냉매가 액화 되어 EV-2를 지나면서 줄-튕슨 효과로

온도를 떨어뜨리고 Sep-3에서 기체와 액체상을 분리한다.

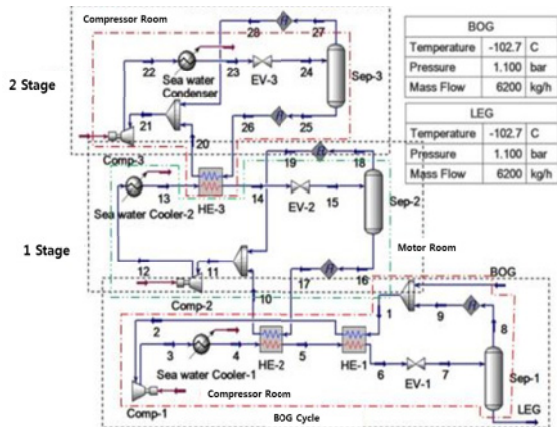


Fig. 2 Process flow diagram of Two stage Cascade cycle

이산화탄소는 1단에서 순환을 하면서 BOG를 액화시킨다. 이산화탄소는 흐름 17에서 액체 상태로 HE-2를 통과하여 BOG를 액화시키고 이산화탄소는 기화되면서 온도가 올라가고 Sep-2에서 나온 기체와 합쳐 Comp-2로 들어가 고온 고압 상태가 된다. 그리고 해수 열교환기-2를 지나 이산화탄소의 온도를 낮추고 HE-3을 지나면서 액화되어 EV-2에서 줄-튐슨 효과로 온도를 떨어뜨리고 Sep-2에서 기체와 액체상을 분리한다.

BOG는 Sep-1에서 나온 기체와 합쳐 흐름1로 흐르고 HE-1을 통과하면서 예열되어 Comp-1을 통과하면서 고압상태가 되고 해수 열교환기-1을 지나면서 온도를 내린다. 그리고 HE-2를 통과하여 액화에틸렌가스로 액화되고 HE-1을 지나면서 과냉각하여 EV-1에서 줄-튐슨 효과로 온도를 떨어뜨리고 Sep-1에서 기체와 액체상을 분리되어 액화에틸렌가스 탱크에 저장된다.

### 3. 성능분석

다양한 냉매 및 액화 시스템의 비교를 위해 시스템에 대한 경계 조건 및 가정이 동일해야 한다. 본 논문에서는 BOG 조건은 1.1bar, 6200 kg/h기준으로 정하였으며, 이는 87,000m<sup>3</sup> 액화에틸렌가스 운반선의 하루 0.3%의 BOG가 발생하는 조건이다. (Li et al., 2012)액화 에틸렌은 공급 조건과 동일한 압력으로 탱크로 되돌아간다.

#### 3.1 냉매 선택

최근 지구 온난화 가능성이 낮은 자연 냉매가 대체 냉매로 고려되고 있다. 각 공정에 고려된 냉매는 현재 사용 중인 R404A와 플랜트에서 에틸렌 액화에 적용중인 프로판(R290), 프로필렌(R1270), 그리고 친환경 냉매로 인식되고 있는 이산화탄소

(R744)를 고려하였다. 각 냉매의 특성은 ASHRAE 34를 참고하였으며 Table 1에 나타내었다.

지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential)은 대기 중 온실 가스가 지구 온난화에 얼마나 영향을 미치는지를 측정하는 상대적인 지수이다. 이산화탄소 1kg과 비교할 때 특정기체 1kg이 지구 온난화에 얼마나 영향을 미치는지를 나타내며, 100년을 기준으로 이산화탄소의 온난화 효과를 1로 볼 때 ASHRAE 34에서는 메탄 21, R-22 1,810, R-134a가 1,430으로 언급하고 있다.

Table 1 Properties of the refrigerants

	R404A	R290	R744	R1270
Chemical formula or blend composition	R125/143a/134a (44/52/4)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
Normal boiling point[ °C]	-46.5	-42.0	-78.4	-48.0
Critical temperature[ °C]	72.1	96.7	31.1	92.4
Global warming potential (100 year)	3,922	3.3	1	1.8
Latent heat of vaporization (at 1,013bar)[ kJ/kg]	200	428	574	342

### 3.2 공정 모델링 및 가정

공정 분석을 위한 상태 방정식은 가벼운 탄화수소 해석에 많이 사용되는 팅-로빈슨(Peng-Robinson)식을 이용하였다. 각 상태에서의 물성치는 HYSYS에서 계산된 특성 값을 이용하였고, 이는 Table 1에 제공된 값과 유사한 결과를 보였다. 시스템의 열역학적 분석을 위해 다음 가정을 기반으로 수행하였다.

- i. 압축기의 등엔트로피 효율: 0.75
- ii. 열교환기의 minimum approach: 3 °C로 가정
- iii. 해수 열교환기와 응축기의 배출 온도: 40 °C로 가정
- iv. 장비에서의 압력 손실 무시

### 3.3 최적화 방법

사이클의 응축 압력은 상기 가정으로 부터 각 냉매가 40 °C에서 액화 될 수 있는 포화압력으로 설정하였다. 각 냉매의 40 °C에서 응축 압력을 Table 2에 나타내었다. 이산화탄소는 40 °C일 때 초임계유체이므로 고려 대상에서 제외하였다.

Table 2 Condensing pressure of the refrigerants

	R404A	R290	R1270
Condensation pressure at 40 °C [bar]	19.1	13.8	16.6

시스템의 최적화를 위한 목적 함수는 BOG 단위질량을 액화시키는데 필요한 소요동력 (SEC, Specific Energy Consumption) 을 최적화하였으며 관련 식은 다음과 같다.

$$SEC = \frac{W}{\dot{m}_{BOG}} = \frac{\sum P_{comp}}{\dot{m}_{BOG}} \quad (1)$$

$\dot{m}_{BOG}$ 은 탱크로부터 발생하는 가스의 질량유량(kg/s),  $P_{comp}$ 는 압축기의 소요 동력이다. 공정의 주요소요 동력인 압축기의 일량을 결정하는 주요 공정 변수는 식 2에서와 같이 압력비와 질량 유량이다.

$$P_{poly} = \dot{m} Z_c R T_1 \left( \frac{k}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2)$$

$\dot{m}$ 은 질량유량(kg/s),  $Z_c$ 는 평균압축인자, R은 기체상수 ( $kJ/kg\cdot K$ ),  $T_1$ 은 입구기체온도(K),  $p_1$ 은 입구압력(kPa),  $p_2$ 은 출구압력(kPa), k는 비열비를 나타낸다.

냉매의 질량유량은 BOG를 액화시키기 위해 필요한 에너지에 의해 구해지며 아래와 같은 상관관계가 있다.

$$\dot{Q}_{BOG} = \dot{m}_{BOG} (\Delta H_v + C_p \Delta T)_{BOG} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_R = \dot{m}_R (\Delta H_v + C_p \Delta T)_R \quad (4)$$

$\dot{Q}$ 는 열에너지유량( $kJ/s$ ),  $\dot{m}$ 은 질량유량(kg/s),  $\Delta H_v$ 는 증발잠열( $kJ/kg$ ),  $C_p$ 는 비열( $kJ/kg\cdot K$ ),  $\Delta T$ 는 온도변화를 의미한다.

액화시켜야할 에틸렌 BOG의 양은 정해져 있으므로 식3의 액화시켜야할 열에너지( $Q_{BOG}$ )는 일정하다. 따라서 냉매의 증발 압력에 따라서 냉매의 질량유량( $\dot{m}_R$ )은 냉매의 증발잠열( $\Delta H_v$ )과 비열( $C_p$ ), 온도변화( $\Delta T$ )에 의해 결정된다.

줄-튐슨 효과에 의한 온도 감소는 압력 차에 비례하나, 과도한 압력차는 압축기의 일량을 증가시키고 밸브 후단의 기-액 분율(Vapor fraction)을 증가시켜 과도한 순환유동을 발생시킨다. 그러나 압력차가 적으면 냉매의 끓는점이 상승하여 요구되는 열량을 만족시키기 위해서 질량유량이 증가하게 되고 이는 일량을 증가시킨다. 따라서 주어진 공정에 대한 최적의 압력이 존재하게 된다.

시스템별 최적화를 수행한 후, 압축기의 가격을 비교하였다 (Seider et al., 2003).

$$C_B = e^{\{7.2223 + 0.80[\ln(P_C)]\}} \quad (5)$$

$$C_P = F_{Drive} F_{Mat} C_B \quad (6)$$

$C_B$ 는 제품의 원가,  $P_C$ 는 소요동력(Hp),  $C_P$ 는 장비가격(\$),  $F_{Drive}$ 는 동력생성방법에 대한 계수로 방법에 따라 각각 1 (Electric motor), 1.15 (Steam), 1.25 (Gas turbine)을 나타내며,  $F_{Mat}$ 는 압축기의 재질에 대한 계수로 재질별로 각각 1.0 (Carbon steel), 2.5 (SUS)를 사용한다.

식 (5)는 소요동력의 지수형태의 특징을 가지고 있다. 따라서 각 압축기의 소요 동력이 균등하게 배분이 될수록 가격적인 이점이 있다. 식 (6)은 압축기의 축 동력 방법과 재질에 따른 가격변화를 나타낸다. 본 연구에서 동력원은 전기 모터로 통일을 하였으며 -40°C 이하의 재질은 SUS를 적용하였다. 언급된 압축기의 가격 산정 식은 개념설계 단계에서 가격 유추 시에 통상적으로 사용되는 식으로 정확도가 약±30%를 가진다. 따라서 정확한 가격을 나타내지는 못하지만 방향성을 유추하는 데에는 적절하다.

### 3.4 결과

기존의 액화 시스템에 대한 최적화는 고정된 BOG 압력 조건에서 최적화를 수행하였다. 본 논문에서는 Aspen HYSYS를 사용하여 팽창 밸브 출구 압력과 BOG 압축기의 출구 압력을 변경하여 대상 냉매에 대한 공정을 최적화하였다.

Fig. 3 은 린데 사이클에서 프로판(R290), 프로필렌(R1270) 냉매에 대한 EV-2 출구 압력 변화에 따른 SEC의 변화를 나타내며, 이를 통해 냉매에 따라 다른 최적의 팽창 밸브 출구 압력을 가지는 것을 확인 할 수 있다. EV-2 출구 압력이 결정되면 BOG의 압축 압력은 HE-2의 가정에 의해 자동적으로 결정이 된다.

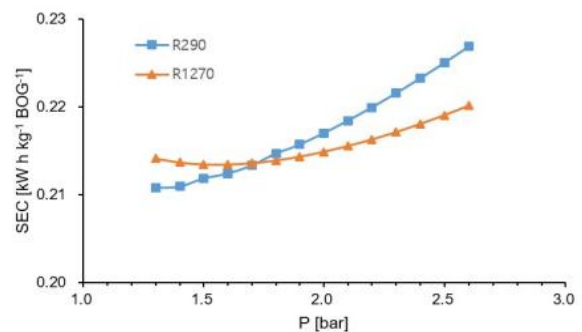


Fig. 3 Specific energy consumption in Linde cycle with variation of Expansion Valve-2 outlet pressure

R290의 결과는 EV-2 출구 압력이 낮을수록 더 낮은 온도의 냉매 생성되고 이는 Comp-1의 요구일량 감소 및 냉각용량 감소시킨다. 그러나 R1270의 결과에서처럼 EV-2 출구 압력이

더 낮아지면 출구 단에서 발생하는 기체의 양이 증가하여 냉매로 사용되는 액체의 양이 줄어든다. 이는 냉각용량의 감소로 나타나게 되고 이를 보완하기 위하여 전체 냉매의 유량이 증가하여 압축기의 소요일량이 증가하게 된다. 각 냉매에 대해서 SEC가 최소가 되는 EV-2 출구 압력은 R290과 R1270에서 각각 1.3 bar, 1.6bar 이다.

Table 3 Simulation results for Linde cycle

Refrigerant	R290	R404A	R1270
Specific energy consumption [kWh/kg BOG]	0.211	0.224	0.214
$P_{EV-2}$ [bar]	1.3	1.3	1.6
$P_{Comp-1}$ [bar]	17.6	15.5	17.2
$P_{Comp-2}$ [bar]	13.8	19.1	16.6
$P_{Comp-1}$ ratio	16.0	14.1	15.6
$P_{Comp-2}$ ratio	10.6	14.7	10.4

성능 비교를 위하여 기존에 사용하던 냉매인 R404A도 반영된 시스템의 SEC와 운전 조건을 Table 3에 나타내었다. 결과는 R290의 SEC가 가장 좋게 나오며 기존 R404A대비 약 6%의 성능 개선 효과를 나타낸다.

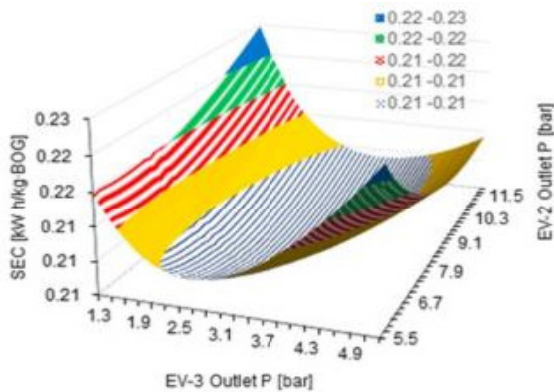


Fig. 4 Two stage Cascade cycle, Variation in specific energy consumption, with Expansion Valve-2 outlet pressure and Expansion Valve-3 outlet pressure

이산화탄소(R744)-프로판(R290), 이산화탄소(R744)-프로필렌(R1270)으로 구성된 2단 사이클을 바탕으로 최적화를 수행하였다. 1단에서는 이산화탄소를 적용하고 Comp-2가 비 위험구역(non hazardous area) 장비가 되게 운전압력을 냉매나 BOG의 운전 압력보다 높게 유지하였다.

2단에서 EV-3 출구 압력이 높아지면 Comp-3의 일량은 감소하지만, 1단에서의 응축압력이 높아지게 되므로 Comp-2의 일량이 증가하게 된다. 이와 같이 한 사이클에서 과도한 일을 하지

않도록 구성된 각각의 사이클에서의 일이 균등하게 배분이 되어야 전체 시스템의 효율이 향상되게 된다. 최적화를 위한 공정 변수로는 EV-2 출구 압력, EV-3 출구 압력을 조절하여 총 SEC를 구하였으며 결과는 Fig.4에 도시하였다.

2단 사이클에서 R744-R290, R744-R1270 냉매를 사용하였을 때 최적의 EV-2, EV-3 출구 압력은 R744-R290은 8.1bar, 2.6bar이고 R744-R1270은 7.7bar, 3.2bar 이다.

Table 4 Simulation results for Two stage Cascade cycle

Refrigerant	R744-R290	R744-R1270
Specific energy consumption [kWh/kg BOG]	0.205	0.206
$P_{EV-2}$ [bar]	8.1	7.7
$P_{EV-3}$ [bar]	2.6	3.2
$P_{Comp-1}$ [bar]	13.5	13.0
$P_{Comp-2}$ [bar]	22.5	22.2
$P_{Comp-3}$ [bar]	13.8	16.6
$P_{Comp-1}$ ratio	12.3	11.8
$P_{Comp-2}$ ratio	2.8	1.5
$P_{Comp-3}$ ratio	5.3	5.2

각 냉매에서 최적화된 결과물을 table4에 나타내었다. 전반적으로 2단 사이클의 성능이 린데 사이클보다 우수한 성능을 보였다. 1단의 압력이 가장 높게 결정이 되었는데, 이는 R744가 불활성 가스이므로 BOG 사이클이 2단보다 운전압력을 임의로 높게 설정하여 누설과 같은 비상시를 고려하여 설정되었다. 또한 각 사이클의 압축비도 적게 나와 가격적인 면에서 린데 사이클 대비 경쟁력이 있을 수 있다. 2단 사이클의 냉매에 따른 성능의 차이는 대동소이 하나 Comp-1의 압축비는 R744-R1270이 좋게 나왔다.

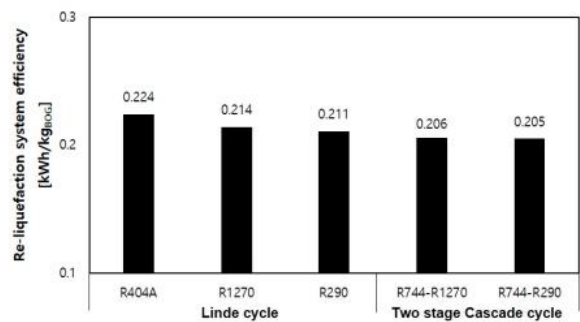


Fig. 5 Specific energy consumption of refrigerant

냉매별 SEC을 비교를 Fig. 5에 나타내었다. 본 논문에서 검토한 액화에틸렌가스 재액화 시스템에서 기존 액화 공정과 유사한

린데 사이클에서는 R290 냉매가 가장 우수한 성능을 나타내고 있다. 그러나 냉매가 탄화수소계열로 전환되면서 장비의 가격 상승을 야기한다. 2단 사이클에서는 R744-R290 냉매를 사용했을 때 효율이 가장 좋게 나왔으며, 기존에 사용하던 R404A를 사용한 린데 사이클 보다 약 9%의 SEC를 줄일 수 있었다. 린데 사이클 R290냉매와 비교 시 SEC 차이가 약 3%로 2단 사이클인 R744-R290냉매가 더 좋은 성능을 가지지만 사이클 내에 들어가는 장비 수가 늘어난다. 하지만 2단 사이클을 사용하면 단위 압축기의 압축비가 적고 1단은 불활성 가스로 구성이 되므로 가격 적 이점이 있다.

Table 5 Compressor cost estimation for cycle

Refrigerant	Compressor cost [₩]
R290	1,270,900
R1270	1,276,600
R404A	1,283,000
R744-R290	1,270,000
R744-R1270	1,267,600

Table 5에서 식(5),(6)을 사용하여 각 냉매별 압축기들의 재료비를 계산한 결과 값이다. 결과는 고려 대상 압축기 가격의 총합은 냉매에 따라 큰 변화가 없는 것으로 나타난다. 다만 시스템과 같이 장비 수가 많으면 가격의 상승요인이 되지만, 각 압축기의 압축비 감소로 인한 가격 감소와 상쇄되어 총 가격의 변화는 무의미 한 것으로 유추된다. 본 연구에서는 압축기만을 고려했고 가격 산정의 신뢰도가 높지 않다. 신정 가격의 신뢰도 상승을 위해서 열교환기 종류 선정은 기본설계를 수행한 후 CAPEX 고려한 비교 연구가 필요하다.

### 4. 결론

본 연구에서는 액화에틸렌가스를 재액화 시키는 시스템에 각 Low-GWP 냉매를 사용하여 Aspen HYSYS 시뮬레이션을 통해 팽창 밸브의 출구 압력을 조절 하여 최적화를 수행하였다. 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) 팽창 밸브 출구 압력을 변수로 하여 각 시스템의 최적의 운전 점을 도출하고 비교하였다.
- 2) R744-R290 2단 사이클이 기존의 R404A냉매를 사용한 린데 사이클에 비해 약 9%, R290 대비 약 3%의 SEC를 줄일 수 있지만 2단 사이클이 린데 사이클보다 더 많은 장비가 들어간다.
- 3) 압축기에 대한 비용 예측(Cost estimation) 결과는 압축비가 낮고 불활성 가스를 활용한 2단 사이클이 린데 사이클과 비슷하게 형성되나 열교환기, 분리기의 비용과 설치 면적, CAPEX, 과 OPEX등을 고려한 추가적인 연구가 필요하다.

### References

Bhattacharyya, S., Mukhopadhyay, S. & Sarkar, J., 2008. CO<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> cascade refrigeration-heat pump system: Heat exchanger inventory optimization and its numerical verification. *International Journal of Refrigeration*. 31, pp.1207-1213.

Lee, J.C., Cha, J.H., Roh, M.I., Hwang, J.H. & Lee, K.Y., 2012. Determination of the optimal operating condition of dual mixed refrigerant cycle of LNG FPSO topside liquefaction process. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(1), pp.33-44.

Lee, Y.P., Shin, Y.H., Lee, S.H. & Kim, K.H., 2009. Boil-off gas reliquefaction system for LNG carriers with BOG-BOG heat exchange, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(4), pp.444-451.

Li, Y., Jin, G. & Zhong, Z. 2012. Thermodynamic analysis-based improvement for the boil-off gas reliquefaction process of liquefied ethylene vessels. *Journal of Chemical Engineering Technology*. 35, pp.1759-1764

Ouahda, A. & Beladjine, B.M., 2015. Exergy analysis of an ethylene bog re-liquefaction system. *The 24<sup>th</sup> IIR International Congress of Refrigeration ICR2015*, Yokohama, Japan, August 2015.

Pigani, L., Boscolo, M. & Pagan, N., 2016. Marine refrigeration plants for passenger ships: Low-GWP refrigerants and strategies to reduce environmental impact. *International Journal of Refrigeration*. 64, pp.80-92.

Seider, WD., Seader, J.D. & Lewin, DR., 1999. *Product and process design principles: synthesis, analysis, and evaluation*. Wiley, New York.

Sung, D.W. & Lee, J.W., 2015. New low price oil era, refining-chemicals industry outlook. *The Export-Import Bank of Korea*, Vol. 2015-The study on the priority task-03. pp.1-5.

United Nations (UN), 1997. *Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change*. Kyoto, Japan.



하성용

최정호