

# LNG 선박의 냉열과 해수를 이용한 Cryogenic ORC 적용에 대한 연구

송 영 옥†

(한국해양대학교 보조기계 연구실/(주)펜타텍)

## A Study of Cryogenic ORC Application on the LNG Carriers using Cold Heat and Sea Water

Younguk(Benedict) SONG

(Auxiliary Machine Laboratory of Korea Maritime University/Pentatech Co., Ltd.)

### Abstract

In this study, the amount of cold heat generated from the BOG(Boil-Off Gas) which is evaporated in the cargo tanks of LNGC(LNG Carrier) and LNG(Liquefied Natural Gas) which is vaporized by Re-Gasification unit of LNG FSRU(Floating Storage Re-gasification Unit)s were investigated. To utilize the cold heat from LNG, the Cryogenic ORC system which is operated by R-290 as a working fluid was designed and analyzed. As a result, in the Cryogenic ORC power generation system using BOG, a 100 kW power generation capacity was obtained from 260K LNGC. In the Cryogenic ORC power generation system, a 10 MW power generation capacity was obtained when the 1,500 m<sup>3</sup>/h of LNG vaporized to 1 0°C. By application of Cryogenic ORC system to LNGCs and FSRUs, the energy efficiency of ships can be improved by producing additional power generating capacity and reducing fuel consumption of ships power generator.

**Key words :** BOG, Cryogenic ORC, FSRU, LNG carrier, R-290, Re-gasification

### I. 서론

인류는 석유에너지를 소비하면서 문명을 발전시키고 있고 한편으로는 지구 온난화와 환경 문제로 배기가스 배출과 오존층을 파괴하는 온실가스의 배출을 규제하고 있는 딜레마에 처해 있는 것이 현실이다.

최근 유가의 하락으로 대형 해양유전 프로젝트들의 개발들이 지연되고는 있지만 세계의 에너지 소비량이 줄어든 것이 아니다. 이는 셰일가스 채굴기술의 획기적인 발전으로 기존의 전통적인 원

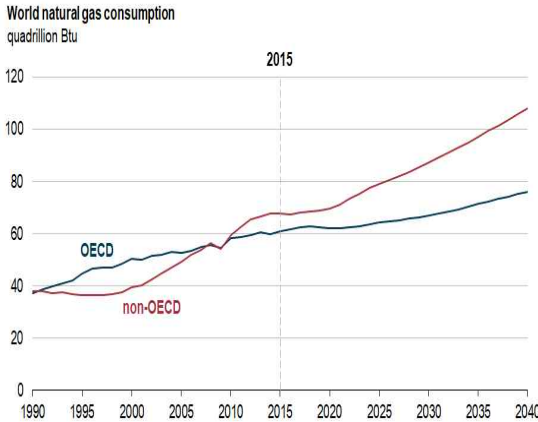
유 생산국인 OPEC(Organization of the Petroleum Exporting Countries) 국가에서 생산하던 가격보다 경쟁력 있는 천연가스를 시장에 공급할 수 있었기 때문이다.

최근 EIA (U.S. Energy Information Administration)에서 발행된 International Energy Outlook 2017에서 세계천연가스의 소비량을 보면 1990년 이후 꾸준히 증가 추세이고, 2015년에서 2040년 사이에 약 43%의 성장을 예상하고 있다.

[Fig. 1]에서 확인할 수 있는 바와 같이 특히 Non-OECD 국가들에서 천연가스 소비량의 증가

† Corresponding author : 051-403-1245, bsong@pentatech.co.kr

세가 뚜렷한 것을 알 수 있다. 천연가스의 수요는 주로 정부주도의 장기적인 발전사업이나 난방 연료 정책에 많이 의존되어있으므로 일본의 후쿠시마 원전사고이후 제기되는 원전의 안전성 문제와 맞물려 앞으로도 꾸준히 소비가 증가하게 될 것으로 예상할 수 있다.



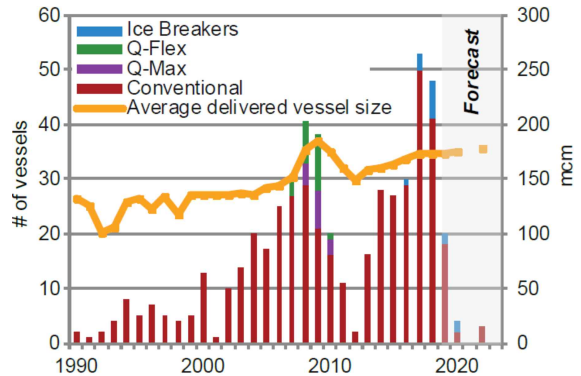
[Fig. 1] World natural gas consumption outlook in reference case (Source: EIA)

천연가스의 운송은 생산지와 소비지가 원거리로 주요 생산지는 중동, 호주, 동남아, 러시아, 아프리카 등이고 주요 소비 국가는 일본, 한국, 인도, 유럽으로 대륙 간의 해상운송수단으로 이루어진다. 메탄(CH<sub>4</sub>)이 주 성분인 천연가스는 산지마다 그 성분에서 약간씩 차이가 있지만 약 -162℃에서 액화상태로 LNG(Liquefied Natural Gas) 전용선박에 의해서 운송되어진다.

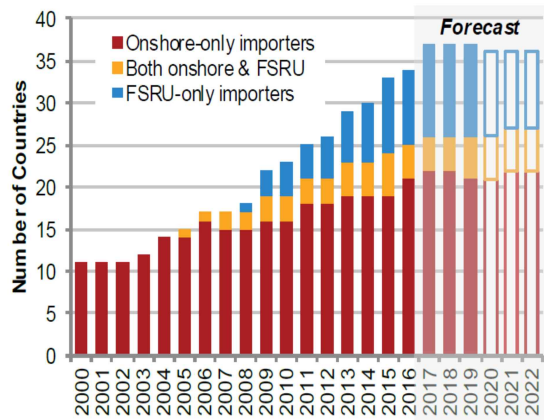
IGU(International Gas Union)에서 발간한 2017 World LNG Report에 의하면 현재 운항중인 LNG 선박은 412척이고 건조중인 선박은 121척이다. [Fig. 2]에서 확인할 수 있는 바와 같이 2000년도 초반부터 LNG 선박의 인도척수가 꾸준히 증가한 것을 알 수 있다.

또한 급격하게 증가하는 LNG 수급시장에서 초기건설에 투자비용이 많이 들어가는 LNG 기화터미널을 대신하여 LNG 선박에 기화장치(Re-Gasification Unit)를 설치하고 화물로 운송하

는 LNG를 해상에서 직접 기화시키고 압축하여 육상으로 천연 가스를 공급하는 LNG FSRU (Floating Storage Re-Gasification Unit)선박이 꾸준히 증가하고 있다. [Fig. 3]에서 FSRU의 증가추세를 확인할 수 있다.



[Fig. 2] Global LNG Fleet by Year of Delivery vs Average Vessel Size (Source: IGU)



[Fig. 3] Rise of FSRUs among Import Market, 2000-2022 (Source: IGU)

본 연구에서는 이러한 LNG선박에서 필연적으로 발생하는 냉열을 조사하고 버려지는 냉열과 해수의 온도차를 이용하여 전기를 생산할 수 있는 유기랭킨사이클(Organic Rankine Cycle;ORC) 시스템을 설계하여 선박의 에너지 효율을 높일 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

## II. CRYOGENIC ORC

### 1. ORC(Organic Rankine Cycle; 유기랭킨 사이클)

일반적인 유기 랭킨 사이클 시스템은 중저온 (70~400℃) 범위의 열원에서 높은 에너지 변환 효율을 얻기 위해 물보다 더 낮은 온도범위에서 증발이 일어나는 냉동기에 사용되는 냉매나 탄화수소 계통의 유기매체를 작동유체로 사용하는 저온 증기 열 동력 사이클로 상대적으로 저온에서 고압의 증기가 얻어지므로 저온 열원을 이용하여 고효율의 동력을 발생시킬 수 있다. 증기 동력 사이클 시스템은 작동유체의 일부 또는 전부가 액상(Liquid phase)과 기상(Vapour phase)으로 상이 변하면서 터빈을 구동하여 열에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 열 동력 기관으로, 다른 열 동력 기관과 달리 열전달 특성이 이상적인 열기관인 카르노 사이클과 유사하다.

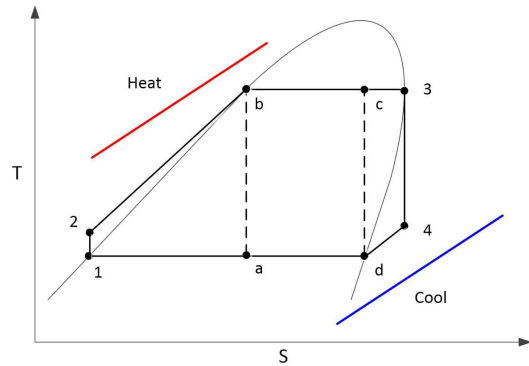
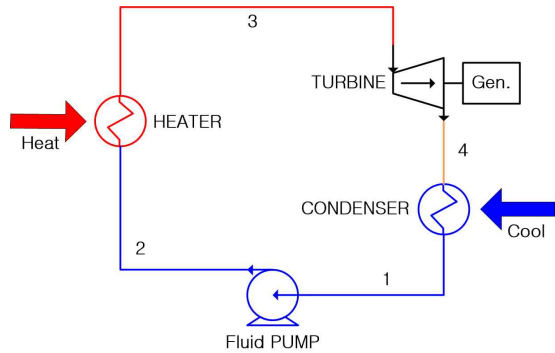
유기 랭킨 사이클 시스템과 기존의 랭킨 사이클 시스템의 차이는 작동 유체에 있으며 그 밖의 원리와 시스템 구성은 차이가 없다. [Fig. 4]는 이상적인 기본 랭킨 사이클 시스템의 구성도와 온도 엔트로피(T-S) 곡선을 나타낸 것으로 T-S 곡선에서 카르노 사이클은 a-b-c-d 과정을 순환하는 반면에 랭킨사이클의 경우 1-2-3-4 과정으로 열교환 과정과 압축팽창 과정으로 구성되어 있다.

유기 랭킨 사이클에서 응축기와 증발기의 온도 그리고 작동유체가 결정되면 작동 유체의 열역학적 물성 값표나 방정식에 의해 각 점의 엔탈피를 구할 수 있으며, 사이클의 입력 열량, 출력 및 시스템 성능은 다음과 같이 계산된다.

- 입력 열량  $Q_{in} = h_3 - h_2$  ..... (1)
- 터빈 출력  $W_{out} = h_3 - h_4$  ..... (2)
- 배출 열량  $Q_{out} = h_4 - h_1$  ..... (3)
- 펌프 일량  $W_{in} = h_2 - h_1$  ..... (4)
- 순수 일량  $W_{net} = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$  .. (5)

효율  $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$  ..... (6)

$$= \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \dots (7)$$



[Fig. 4] T-S Diagram of ORC System

### 2. LNG Cryogenic ORC

메탄(CH<sub>4</sub>)을 주성분으로 하는 천연가스(NG; Natural Gas)는 지구상에서 기체상태로 유전 및 가스전에 매장되어있으며, 끓는점이 약 -162℃이고 임계온도가 -82.5℃이다. 액화상태에서 기체상태의 1/600로 수축하여 운반 및 저장의 목적으로 액화하여 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas)상태로 산지에서 육상탱크에 저장되고, 주로 LNG 운반선에 의하여 운송되어지고 있으며, 수급지에서는 저장탱크에 보관된 LNG를 다시 NG로 기화시켜서 난방연료 등으로 공급하게 된다.

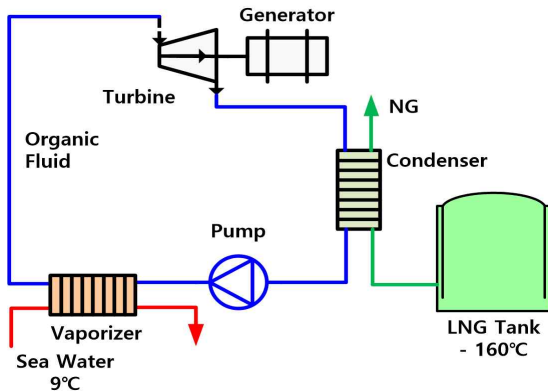
LNG가 극저온에서 상온으로 기화하는 과정에

서 약 840kJ/kg의 냉열을 방출한다. 이때 발생하는 냉열을 효과적으로 활용하기 위한 방안들과 육상의 LNG Re-gasification Plant의 효율을 높이는 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

일반적인 ORC 개념에서는 해수를 냉각수로 사용하지만 Cryogenic ORC에서는 해수를 열원으로 사용하고 LNG를 냉각 열로 사용한다.

[Fig. 5]에서와 같이 작동유체는 해수에 의해서 증발기에서 증발하여 터빈을 구동하고 응축기에서는 LNG의 냉열에 의해서 액화되어 펌프로 순환되어진다. 한편 LNG는 터빈을 구동한 작동유체를 열원으로 하여 기화되어진다.

해외 사례를 보면 일본의 Osaka Gas는 1979년부터 LNG Cryogenic ORC 발전 시스템을 설치하여 30년간 운전하여 적용하고 있고 이산화탄소 배출 감소 효과를 보고 있다. 자료에 의하면 150 ton/h LNG Cryogenic ORC 발전시스템은 연간 15,000 ton의 이산화탄소 배출을 줄이는 효과가 있다.



[Fig. 5] Concept of Cryogenic LNG ORC system

### III. LNG 선박의 CRYOGENIC ORC 적용 가능한 냉열 조사

#### 1. 설계 조건 및 지배방정식

천연가스는 산지마다 메탄 (CH<sub>4</sub>)의 성분비가

차이가 있다. <Table 1>은 일반적인 LNG 선박의 화물창의 설계 기준이 되는 화물 구성비 기준의 사례이다. 본 연구에서는 LNG의 성분 기준을 <Table 1>의 기준으로 적용하였다.

<Table 1> Typical Composition of LNG Cargo

Composition	Mole %
Nitrogen	0.3242
Methane	93.1563
Ethane	6.2409
Propane	0.1758
I-Butane	0.0001
N-Butane	0.0065
I-Pentane	0.0634
N-Pentane	0.0321
Hexanes+	0.0007

시스템의 설계와 해석에는 상용 공정해석 프로그램인 Aspen사의 HYSYS 10.0v를 사용하였으며 상태방정식(Fluid Package)은 Peng-Robinson을 적용하였다.

Peng-Robinson 방정식은 다음과 같이 정의되어진다.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b) + b(V-b)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$a = a_c \alpha \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$a_c = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = 0.077480 \frac{RT_c}{P_c}$$

$$\sqrt{\alpha} = 1 + k(1 - T_r^{0.5})$$

$$k = 0.37464 + 1.5422\omega - 0.26992\omega^2$$

엔탈피 계산은 다음 식(10)으로 계산되어진다.

$$H - H^{IG} = \dots\dots\dots (10)$$

$$PV - RT - \left( a - \left( \frac{da}{dT} \right) T \right) \frac{1}{2\sqrt{2}b} \ln \frac{V+b(1+\sqrt{2})}{V+b(1-\sqrt{2})}$$

엔트로피 계산은 다음 식(11)로 계산되어진다.

$$S - S^{IG} = R \ln\left(\frac{v-b}{RT}\right) - \frac{1}{2\sqrt{2b}} \ln\left(\frac{v+b(1+\sqrt{2})}{v+b(1-\sqrt{2})}\right) \frac{da}{dt} \dots\dots\dots (11)$$

열교환기의 Heat balance는 식(12)와 같이 정의되어진다.

$$\text{Ballance Error} = (M_{\text{cold}}[H_{\text{out}} - H_{\text{in}}]_{\text{cold}} - Q_{\text{leak}}) - (M_{\text{hot}}[H_{\text{in}} - H_{\text{out}}]_{\text{hot}} - Q_{\text{loss}}) \dots\dots\dots (12)$$

총 열전달량은(Duty)은 식(13)과 같이 정의되어진다.

$$Q = UA \Delta T_{LM} F_t \dots\dots\dots (13)$$

- $U =$  overall heat transfer coefficient
- $A =$  surface area available for heat transfer
- $\Delta T_{LM} =$  log mean temperature difference(LMTD)
- $F_t =$  LMTD Correction Factor

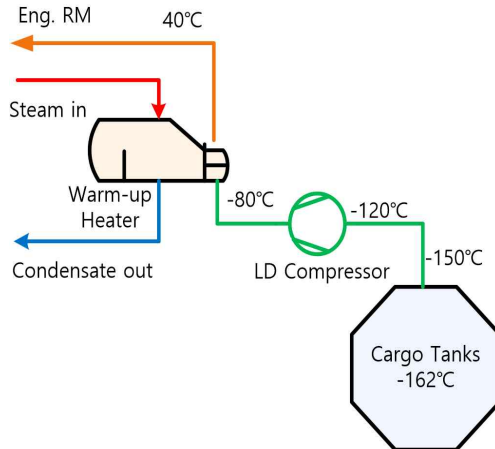
## 2. LNG 선박의 BOG

LNG선의 화물창에서 외부의 열 침입으로 증발하는 가스를 Boil Off Gas(BOG)라고 한다. LNG선 화물창의 종류나, 화물창의 면적, 보온을 적용하는 방법에 따라 차이가 있으나, LNG 선박의 화물창의 Daily Boil Off Rate(BOR) 설계기준은 일반적으로 0.15% (per day) 이다.

BOR의 설계 기준은 순수 메탄(CH<sub>4</sub>)을 기준으로 하여 비중(Specific density)은 425 kg/m<sup>3</sup>이다. LNG 선박의 크기는 화물의 부피를 입방미터(M<sup>3</sup>)로 구분한다. 따라서 설계기준으로 하면 138K급의 LNG선박에서 하루 발생하는 BOG 발생량은 총 87,975 kg/day, LNG가 기화되어지고 시간당 3,666 kg/h가 기화된다. 200K급의 LNG선박에서는 127,500 kg/day, 5,313 kg/h이고, 260K급에서는 165,750 kg/day, 6,906 kg/h의 LNG기화되어진다.

LNG 선박에서 이렇게 화물창에서 발생하는 BOG는 선박의 추진 장치의 연료로 사용되어진다. 따라서 전통적인 LNG선박의 추진 장치로는

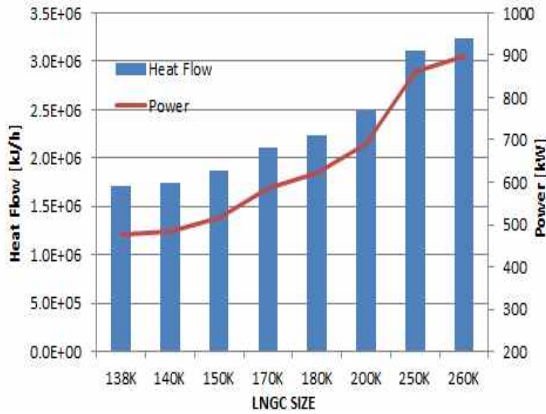
천연가스 연소를 쉽게 할 수 있는 보일러와 스팀 터빈의 조합으로 적용이 되었고, 근래에는 선박 디젤 엔진기술의 발달로 천연가스와 디젤을 사용하는 이중연료 발전기와 전기모터의 조합 또는 직접 2행정 디젤엔진인 기관에 연료로 적용하는 엔진이 개발되어 적용되고 있다.



[Fig. 6] BOG process of typical LNG carrier.

어떤 추진 방식이 적용되더라도 LNG 화물창에서는 끊임없이 BOG가 발생하게 된다. [Fig 6]에서와 같이 전형적인 LNG선의 설계개념을 보면 화물창에서 기화된 LNG는 VAPOR 배관을 통해서 기체상태로 LD(Low Duty)컴프레서로 들어간다. 이때의 설계 온도는 -120°C이고 배출되는 온도는 -80°C이다. LD컴프레서에 의해서 압축된 기체는 연료로 공급하기 위하여 스팀으로 가열되는 Warm-Up Heater에서 약 40°C의 온도로 가열되어 엔진룸으로 공급되어진다. 스팀을 만들기 위해 보일러에 추가연료가 소비되어지는 것이다.

[Fig. 7]은 -150°C의 BOG를 40°C로 가열하는데 소요되는 열량을 선박의 크기에 따라 확인 한 결과이다. 138K LNG선에서는 1.715x10<sup>6</sup> kJ/h, 476 kW가 소요되고 260K LNG선에서는 3.231x10<sup>6</sup> kJ/h, 646 kW가 소요된다.



[Fig. 7] Heat flow BOG from LNG tanks

본 연구에서는 이렇게 필연적으로 LNG 화물창에서 발생하는 BOG로부터 냉열을 이용하여 Cryogenic LNG ORC를 적용하여 추가 전력을 생산하는 발전시스템을 설계하여 선박의 에너지 효율을 높이는 방안을 제시하고자 한다.

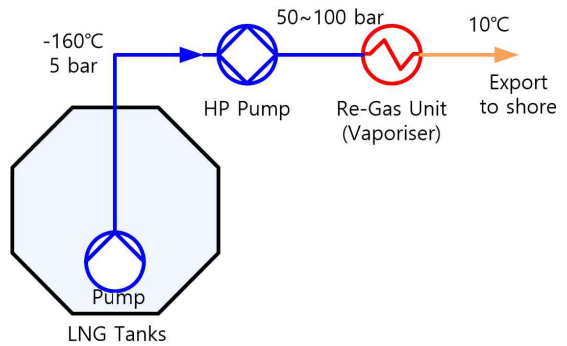
### 3. LNG RE-GASIFICATION SYSTEM

LNG FSRU의 건조는 불과 17년 전인 2001년부터 시작되었다. 현재는 26척의 LNG FSRU가 운용중이고, 2025년까지 약 50척의 LNG FSRU가 운용될 예정이다.

LNG FSRU는 육상에 LNG 탱크와 기화설비를 건설하는데 소요되는 경제적인 비용, 환경문제 및 민원 문제를 동시에 충족하기 때문에 더욱 빠르게 성장하고 있다.

LNG FSRU는 LNG 선박을 기초로 하여 LNG 양하지 터미널의 육상플랜트에서 적용되는 기화기의 기술이 접목된 선박이다. 기화기는 선박에 최적화하여 선수에 모듈 형식으로 탑재되어진다.

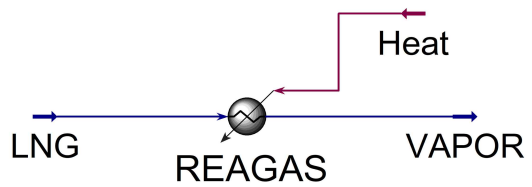
[Fig. 8]은 LNG FSRU의 개념도이다. 일반적인 LNG선과 동일하게 선적지에서 LNG 화물을 선적하고 양하지 에서는 LNG를 선박 자체에 설치되는 기화기(Re-Gasification Unit)를 이용하여 기화시켜서 별도의 터미널의 저장탱크나 기화장비 없이 직접 천연가스를 육상으로 공급할 수 있다.



[Fig. 8] Concept of LNG Re-gasification system

[Fig. 8]의 개념도에서와 같이, 화물창에서 공급되는 LNG는 육상터미널의 수급조건에 따라 High Pressure Booster Pump로 약 50bar에서 약100bar 승압되어 기화기로 공급되어지고 기화기에서 약 10°C의 온도로 기화되어 육상으로 공급되어진다.

LNG를 기화시키는 방법으로는 개방형(Open Loop)이나 폐쇄형(Closed Loop)시스템이 이용되어진다. 개방형시스템에서는 해수를 직접 열교환기의 열 교환 매체로 사용하여 LNG를 기화시킨다. 폐쇄형 시스템은 선박의 보일러에서 발생하는 스팀으로 Glycol Water(부동액)을 가열하여 열매체로 이용하여 LNG를 기화시킨다. 개방형 시스템은 해수가 극저온의 LNG에 의해 동결될 수 있는 위험이 있으므로 주로 해수온도가 높은 해역에 위치한 설비에 적용하는 것이 유리하다.



[Fig. 9] Heat flow calculation model of LNG Re-gasification

[Fig. 9]는 Open Loop에서 LNG를 기화시키는 데 필요한 Heat flow를 계산하기위한 시스템 모델이다. 해석결과 -155°C, 120bar 가압된 상태에서



1,500 m<sup>3</sup>/h의 LNG를 10℃의 NG로 기화시키는데 소요되는 열량은 5.403x10<sup>8</sup> kJ/h, 150 MW이다.

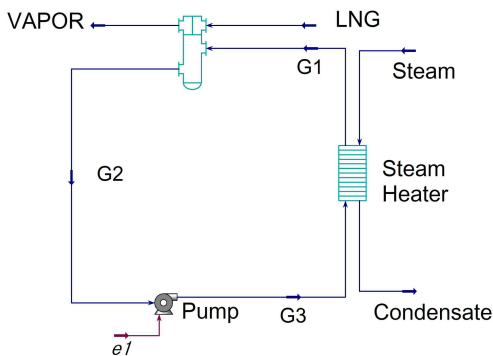
해수로 직접 가열하는 개방형 시스템을 적용하게 되면 열교환기의 입구와 출구에서 해수의 설계온도 조건에 따라 소요되는 해수의 유량이 결정된다. <Table 2>에서 입구 측의 온도를 20~30℃ 조건으로 하고, 출구 측의 온도를 15~20℃로 설계하였을 때 소요되는 해수의 유량을 확인할 수 있다.

해수온도가 높고 열교환기 성능이 높을수록 적은양의 해수로 LNG를 기화시킬 수 있다. 단, 해수가 응결되는 위험을 감소시키기 위해서는 충분한 설계 마진을 두는 것이 중요할 것이다.

<Table 2> Seawater flow calculation result

Inlet (°C)	Outlet (°C)	Flow (m <sup>3</sup> /h)
30	15	8,314
25	15	12,418
20	15	24,715
30	20	12,467
25	20	24,814

Glycol Water를 간접 열매체로 사용하여 LNG를 기화시키는 Closed Loop 시스템에서는 열원으로 선박의 보일러에서 발생하는 스팀을 열원으로 사용한다.



[Fig. 10] Closed loop Re-gasification system configuration of LNG FSRU

[Fig. 10]은 LNG의 조건은 [Fig. 9]와 동일한 조건으로 하고, 부동액을 중간 열매체로 이용하고, 스팀을 열원으로 하는 폐쇄형 시스템을 설계한 것이다. 스팀의 공급조건을 170℃ 7bar의 압력으로 하였을 때 226,029 kg/h의 스팀이 공급되어야 하고, Glycol Water는 90℃로 가열되어 LNG와 열 교환하는 조건으로 해석결과 Glycol Water의 용량은 2,885 m<sup>3</sup>/h의 유량이 필요하다.

이렇게 LNG FSRU의 Re-Gasification 시스템에서 LNG를 기화시킬 때 버려지는 열에너지를 이용하여 Cryogenic ORC 발전 시스템을 적용하면 선박의 에너지 효율을 높여 친환경 요구사항을 충족 할 뿐만 아니라 선박의 시스템을 단순하게 구성할 수 있을 것이다.

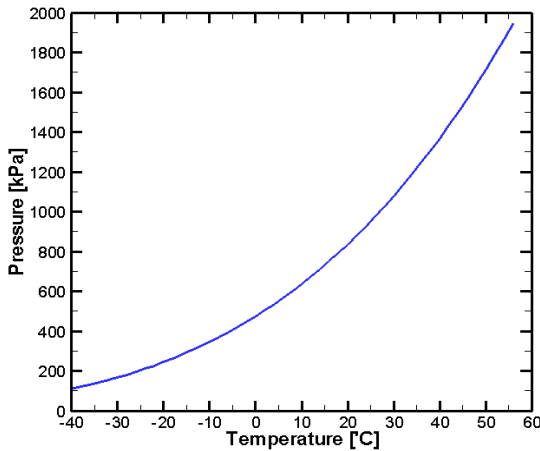
## IV. LNG 선박의 CRYOGENIC ORC 시스템 설계 및 해석

### 1. ORC 작동유체

Cryogenic ORC에 적용되는 작동유체로는 실제 육상플랜트에서 사용되어지고 있는 R-290(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)를 선정하였다. R-290은 냉매로 사용되는 프로판으로 지구온난화지수(Global Warming Potential; GWP)가 3.3으로 낮고 녹는점이 -187.7℃로 응결의 우려가 없고, 끓는점이 -42℃로 R-404A등의 대체 냉매로 사용되어진다. [Fig. 11]에서 프로판의 포화증기압 곡선에서 확인할 수 있는 바와 같이 25℃에서의 압력이 약 9.5 bar로 터빈을 설계하기에도 용이하다.

냉매인 R-290이 인화성이 높은 프로판 가스라는 인식으로 폭발의 위험성을 우려하는 부분이 있을 수 있겠으나, 이는 일반적인 선입견일 수 있다. 본 연구자의 경험으로 CONOCO PHILIPS에서 발주하여 2003년 건조된 세계최대 크기의 LPG FSO의 화물 냉각시스템에 냉매로 R-290을 냉매로 사용하여 성공적으로 시운전을 수행하였고, 현재까지 안전하게 운용 중에 있다. 또한, 일

본 LNG 기화 터미널의 사례와 같이 30년간 안전하게 운전되고 있다. 설비자체가 위험화물인 천연가스를 운용하는 장비이므로 안전관련 이슈는 보다 철저히 관리되어야 할 것이다.



[Fig. 11] Saturation pressure and Temperature chart of R-290(Propane)

## 2. BOG ORC 발전 System

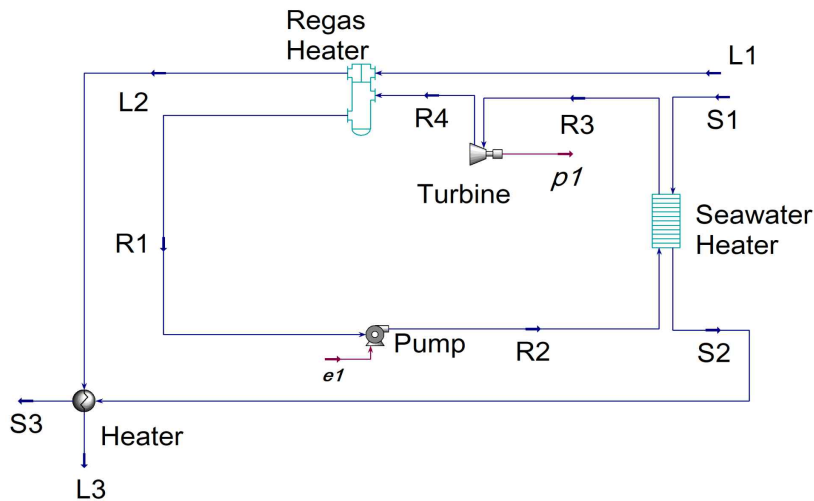
앞에서 확인한 LNG 선박에서 발생하는 BOG를 냉각 열로 사용하고 해수를 기화기의 열원으로 이용하는 ORC 발전시스템의 적용을 위하여

[Fig. 12]와 같이 설계하였다.

다음은 260K LNG선의 BOG를 기준으로 설계하고 해석한 결과이다.

화물창으로부터 발생하는 BOG(L1)의 온도는 -150°C로 정의하고 해수의 온도(S1)는 30°C로 정의하였다. BOG ORC 시스템의 최고 출력운전 조건이 될 것이다. BOG가 Re-Gasification Heater의 출구(L2)로 배출되는 온도는 열원으로 사용되는 작동유체 R-290의 끓는점을 고려하여 -45°C로 설정하였다. -45°C로 배출되는 BOG는 다시 해수에 의해서 가열되어 출구(L3)에서 20°C로 엔진룸으로 공급되어진다.

한편 작동유체 사이클에서 R-290은 30°C의 해수에 의해서 해수 열교환기에서 기화되어진다. 출구 측(R3)의 온도를 25°C에서 포화기체로 설정하고, 해수의 출구 측(S3) 온도는 27°C로 정의하였다. 해수에 의하여 증발된 R-290은 터빈을 구동하여 전력을 생산한다. 터빈출구 측(R4)에서 R-290은 -150°C의 BOG에 의하여 냉각되어 출구 측(R1)에서 -42°C로 액화되어진다. 액화된 R-290은 펌프에 의해서 가압되어 기화기로 다시 순환되어지며 순환 사이클을 형성한다. 이때 터빈에서 발생하는 전력은 100 kW이다.



[Fig. 12] System configuration of Cryogenic ORC(for BOG & Re-Gasification)



<Table 3> Properties of stream from BOG cryogenic ORC designed for 260K LNGC

Property	Unit	L1	L2	L3	R1	R2
Vapor Fraction		0.89	1	1	0	0
Temperature	°C	-150.0	-45.0	20.0	-42.0	-41.4
Pressure	bar	1.2	1.18	1.16	1.033	9.749
Mass Flow	kg/h	6906	6906	6906	4792	4792
Actual Flow	m <sup>3</sup> /h	2974	2974	2974	8.26	2974
Enthalpy	kJ/kg	-4863	-4567	-4431	-2915	-2913
Entropy	kJ/kg·C	8.43	10.32	10.82	4.10	4.102

Property	Unit	R3	R4	S1	S2	S3
Vapor Fraction		1	1	0	0	0
Temperature	°C	25	-39.6	30.0	27	25.8
Pressure	bar	9.549	1.133	2.5	2.0	1.5
Mass Flow	kg/h	4792	4792	1.84x10 <sup>5</sup>	1.84x10 <sup>5</sup>	1.84x10 <sup>5</sup>
Actual Flow	m <sup>3</sup> /h	2974	2974	183.2	182.8	182.6
Enthalpy	kJ/kg	-2415	-2490	-15866	-15879	-15884
Entropy	kJ/kg·C	5.841	5.922	3.053	3.010	2.993

<Table 3>에서 시스템을 구성하는 각 유체의 상태를 확인할 수 있다.

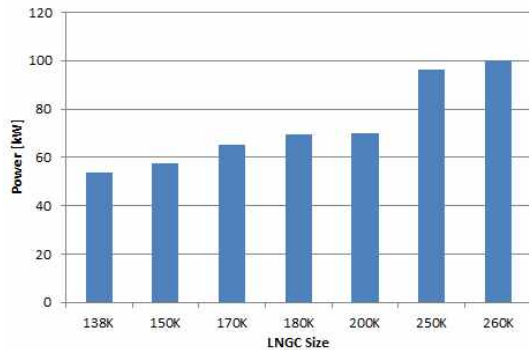
[Fig. 13]은 선박의 사이즈별로 0.15%/day BOG 발생량을 기준으로 Cryogenic ORC 발전시스템을 적용하여 생성 가능한 전력을 해석한 결과이다. LNG 선박에서 BOG를 이용하는 Cryogenic ORC 발전시스템을 적용하면 연료 사용을 목적으로 가열하는 불필요하게 소비되는 열에너지를 절감할 수 있을 뿐만 아니라 추가적으로 에너지를 생성할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 3. Re-Gasification ORC system

Re-Gasification ORC의 시스템 구성도는 [Fig. 12]에서 BOG ORC 시스템을 설계한 것과 동일하게 적용된다. 작동유체도 동일하게 R-290이 적용되어 진다.

Re-Gasification unit으로 들어가는 LNG의 조건은 [Fig. 9]에서 설정했던 조건과 동일한 조건으로 정의하였다. LNG의 온도는 -155°C, 120 bar

가압된 상태이고, 유량은 1,500 m<sup>3</sup>/h로 정의하고 최종 기화되어 공급하는 온도는 10°C로 설정하였다.



[Fig. 13] The results of BOG ORC power system for different size of LNG carriers.

다음은 LNG FSRU에서 Re-gasification 시스템에 Cryogenic ORC 발전시스템을 적용하여 설계한 결과이다.

LNG 사이클에서는 -155°C, 120bar로 가압된 LNG가 Re-gas Heater로 들어가고 작동유체인

송영욱

R-290에 의해서 가열되어 출구 측(L2)에서의 온도는 -50℃로 가열되고 다시 해수에 의해서 10℃로 기화된다.

한편 작동유체 사이클에서 R-290은 30℃의 해수에 의해 해수 열교환기에서 기화되어진다. 출구 측(R3)의 온도를 25℃에서 포화기체로 설정하고, 해수의 출구 측(S3)의 온도는 27℃로 정의하였다. 해수에 의하여 증발된 R-290은 터빈을 구동하여 전력을 생산한다. 터빈출구 측(R4)에서 R-290은 -155℃의 LNG에 의하여 냉각되어

Re-gas Heater 출구 측(R1)에서 -42℃로 액화되어진다. 액화된 작동유체는 펌프에 의해서 가압되어 해수기화기로 다시 순환되어지며 순환 사이클을 형성한다. 이때 터빈에서 발생하는 전력은 10,688 kW이다.

LNG FSRU에서 Re-gasification 시스템에 Cryogenic ORC 발전시스템을 적용하면 10 MW급 발전기와 맞먹는 전력을 생성하여 선박의 에너지 효율을 높이고, 연료를 절감할 수 있음을 확인할 수 있다.

<Table 4> Properties of stream from LNG Re-Gasification cryogenic ORC designed for LNG FSRU

Property	Unit	L1	L2	L3	R1	R2
Vapor Fraction		0	0	1	0	0
Temperature	℃	-155.0	-50.0	10	-42.0	-41.4
Pressure	bar	120	119.5	119	1.03	10.05
Mass Flow	kg/h	6.678x10 <sup>5</sup>	6.678x10 <sup>5</sup>	6.678x10 <sup>5</sup>	6.188x10 <sup>5</sup>	6.188x10 <sup>5</sup>
Actual Flow	m <sup>3</sup> /h	1500	2708	5712	1067	1066
Enthalpy	kJ/kg	-5279	-4872	-4606	-2915	-2913
Entropy	kJ/kg·C	4.63	7.03	8.095	4.10	4.103

Property	Unit	R3	R4	S1	S2	S3
Vapor Fraction		1	1	0	0	0
Temperature	℃	25	-28.9	30.0	27	25.3
Pressure	bar	9.55	1.53	2.5	2.0	1.5
Mass Flow	kg/h	6.188x10 <sup>5</sup>	6.188x10 <sup>5</sup>	2.374x10 <sup>7</sup>	2.374x10 <sup>7</sup>	2.374x10 <sup>7</sup>
Actual Flow	m <sup>3</sup> /h	29898	1.777x10 <sup>5</sup>	23649	23596	23566
Enthalpy	kJ/kg	-2415	-2476	-15866	-15879	-15886
Entropy	kJ/kg·C	5.841	5.926	3.053	3.010	2.985

V. 결론

본 연구에서는 LNG 선박에서 이용 가능한 냉열로 화물창으로부터 필연적으로 발생하는 증발가스인 BOG와 LNG FSRU의 기화장비인 Re-Gasification 시스템에서 발생하는 열량을 조사하고, 확인된 냉열과 해수의 온도차를 이용하여 작동유체를 R-290으로 하는 Cryogenic ORC 시스

템을 설계하고 생산할 수 있는 전력을 확인 하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. LNG선에서 발생하는 BOG를 이용하여 Cryogenic ORC 발전시스템을 설계하고 해석한 결과, 138K급의 LNG선박에서는 54kW, 260K급의 LNG 선박에서는 100kW의 전력을 생산할 수 있다.

BOG는 화물창에 LNG를 선적하면 자연적으로

발생하므로, 운항중 추가 전력을 상시 생성할 수 있을 뿐만 아니라 불필요하게 BOG를 가열하는데 소요되는 연료를 절감하여 선박의 에너지 효율을 높일 수 있을 것이다.

2. LNG FSRU에 적용되는 Re-gasification 시스템에 Cryogenic ORC 시스템을 적용하여 설계하고 해석한 결과 1,500 m<sup>3</sup>/h의 LNG를 10℃로 기화시키는 조건에서 10,688 kW의 전력을 생산할 수 있다.

FSRU의 LNG Re-gasification 시스템에 Cryogenic ORC 시스템을 적용하면 10 MW 발전기와 맞먹는 전력을 생성하여 선박의 에너지 효율을 높일 수 있을 것이다.

## References

- 2017 World LNG Report, Internation, IGU (International Gas Union), [www.igu.org/news/igu-releases-2017-world-lng-report](http://www.igu.org/news/igu-releases-2017-world-lng-report)
- Aspen HYSYS Thermodynamics COM Interface (2009). Aspen Technology, Inc,
- Brian Songhurst(2017). "The outlook for Floating Storage and Regasification Units(FSRUS)", (July 2017), The Oxford Institute for Energy Studies.
- Cryogenic power generation system recovering LNG's cryogenic energy and generating power for energy and CO<sub>2</sub> emission savings. [www.osakagas.co.jp/en/rd/technical/1198907\\_6995.html](http://www.osakagas.co.jp/en/rd/technical/1198907_6995.html)
- Han Sung-Yong(2004). "The World's First, Dual FSO/Condensate",The International Society of Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, May 23~28.
- International Energy Outlook(2017). EIA (U.S. Energy Information Administration), [www.eia.gov/ieo](http://www.eia.gov/ieo)
- Joel V. Madison(2012). Liquefied Propane Gas, the Preferred Working fluid for Cryogenic Power Cycles", Ebara International Corporation, 5th Global Technology Conference (GTC-2012).
- Kumar S. · Kwon H. T. · Choi K. H. · Lim W. S. · Cho J. H. · Tak K. J. & Moon I.(2011). "LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development," Applied Energy, Vol. 88, 4264~4273.
- Lee K. H. & Won S. H.(1989), "Development and practical application of ORC for waste heat recovery (I), Korea Institute of Energy Research
- Marco Astolfi · A. M. Fantolini · G. Valenti · S. D. Rinaldis · L. D. Inglese, & E. Macchi(2017). "Cryogenic ORC to Enhance the Efficiency of LNG Regasification Terminals" ScienceDirect, IV International Seiminar on ORC Power Systems, ORC2017, 13-15 Sept. 2017, Milano, Italy.
- Refrigerants Environmental Data(2018). Ozone Depletion and Global Warming Potential, Linde Gases AG, [www.linde-gas.com/refrigerants](http://www.linde-gas.com/refrigerants), Accessed Jan, 30.
- S. Poles & M. Venturin(2015). Numerical simulation of an Organic Rankine Cycle, Open Source Engineering, [www.openeering.com/node/80](http://www.openeering.com/node/80)
- Song Y. U. & OH C.(2012). "A study on the ship's ORC power system using seawater temperature difference", Journa of e-navigation, Vol.36 5th, 349~355
- Toshiro Otsuka(2016). "Evolution of an lng Terminal: Senboku Terminal of Osaka Gas", 23rd World Gas Conference, Amsterdam.

• Received : 05 February, 2018

• Revised : 19 March, 2018

• Accepted : 27 March, 2018