



공학석사 학위논문

가스연료선박 및 LNG-FSRU용 재기화 시스템의 가열매체 변화에 따른 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics According to Variations of Heating Media for Regasification Systems of Gas Fuelled Ship and LNG-FSRU



2014년 8월

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

이 윤 호



한국해양대학교 대학원

2014년 06월 23일



본 논문을 이윤호의 공학석사 학위논문으로 인준함

| 목 차 | |
|-----|--|
|-----|--|

| Abstract | iii |
|-----------------|------|
| Nomenclature | vi |
| List of Figures | viii |
| List of Tables | х |

| 1. × | 론 여그 | HI Z | 1 |
|-------------|----------------|-----------------------|-----|
| 1.1 | · 친기 2 연구 | 막 1/8목적 | 4 |
| 2. 지 | 기화 | 시스템 적용 및 작동유체의 특성 | |
| 2.1 | 가스 | 연료선박 | 7 |
| | 2.1.1 | 가스연료선박용 재기화 시스템의 개요 | 12 |
| | 2.1.2 | 가스연료선박용 Gas 엔진의 개요 | 14 |
| | 2.1.3 | 종류 및 구성요소 | ·17 |
| 2.2 | LNG | -FSRU ····· | 21 |
| | 2.2.1 | LNG-FSRU용 재기화 시스템의 개요 | 24 |
| | 2.2.2 | 재기화 시스템의 방식 | 25 |
| | 2.2.3 | 중간열매체의 특성 | 30 |

3. 재기화 시스템의 구성을 위한 특성분석

| 3.1 | 특성분석을 | 위한 | 상태방정식 | 적용 | 35 |
|-----|-------|----|-------|----|----|
|-----|-------|----|-------|----|----|



| 3.2 가스연료선박용 재기화 시스템의 Ethylene glycol과 물의 | |
|--|----|
| 혼합비율에 따른 특성 | 37 |
| 3.2.1 시스템 구성을 위한 조성비 및 초기조건 | 37 |
| 3.2.2 Eglycol과 물의 혼합비에 따른 시스템 특성 | 40 |
| 3.2.3 시스템 해석 결과 | 42 |
| 3.2.3.1 Eglycol과 물의 혼합비율에 따른 cycle 유량 및 pump | |
| 소요동력 분석 | 42 |
| 3.2.3.2 Eglycol과 물의 혼합비율에 따른 천연가스 및 Eglycol | |
| water의 온도 특성 분석 | 44 |
| 3.2.4 가스연료선박용 재기화 시스템의 가열매체에 따른 특성 | |
| 및 고찰 | 46 |
| 3.3 LNG-FSRU용 재기화 시스템의 기화방식에 따른 특성 | 47 |
| 3.3.1 시스템 구성을 위한 조성비 및 초기조건 | 47 |
| 3.3.2 가열매체의 종류에 따른 시스템 특성 | 49 |
| 3.3.2.1 Case 1 : 해수 직접기화방식의 구성 | 49 |
| 3.3.2.2 Case 2 : 에틸렌글리콜을 사용한 기화방식의 구성 … | 50 |
| 3.3.3 시스템 해석 결과 | 51 |
| 3.3.3.1 해수온도에 따른 특성분석 | 51 |
| 3.3.3.2 해수온도차에 따른 특성분석 | 53 |
| 3.3.3.3 기화능력에 따른 특성분석 | 56 |
| 3.3.4 LNG-FSRU용 재기화 시스템의 기화방식에 따른 특성 및 | |
| 고찰 | 58 |
| | |
| 4. 결론 | 60 |
| | |
| 참고문헌 | 62 |
| | |
| 감사의 글 | 64 |



A Study on the Characteristics According to Variations of Heating Media for Regasification Systems of Gas Fuelled Ship and LNG-FSRU

Lee, Yoon Ho

Department of Marine Systems Engineering Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

As emission controls of NOx, SOx, and CO2 have recently and gradually been tightened focusing on the seas of advanced countries, LNG(Liquefied Natural Gas), the environment-friendly fuel, is judged to be one of the most practical alternatives which satisfy global environment emission regulations. And the demand for LNG is expected to continue to increase. There are gas fuelled ships in the shipbuilding field and LNG-FSRU(LNG-Floating Storage and Regasification Unit) in the marine field as the representative method which applied this LNG. They have regasification systems, the core facilities, in common.

This paper is the study on characteristics according to variations of heating media in the regasification systems which are applied to gas fuelled ships and LNG-FSRU. It was composed based on the regasification system rules which are applied to gas-fuelled ships and LNG-FSRU by using HYSYS V8.0. And the following conclusion can be drawn according to the characteristics and vaporization methods to vaporize LNG.



– iii –

- (1) An analysis on the characteristics according to the mixing ratio of Eglycol water of regasification systems for gas fuelled ship
 - 1) When pressure, temperature, and flux of natural gas(NG) which are supplied to DF engines are uniformly kept, the higher mixing ratio of Eglycol is, the lower mixing specific heat of Eglycol water. And the cycle flux and electric power were 1.65 and 1.54 times more required. respectively, than water was used as the heating medium.
 - 2) When water was just used when adjusting the mixing ratio after fixing the size of the vaporizer, the temperature of natural gas which is supplied to an engine and Eglycol water in the outlet of the vaporizer were highest. And the changes that the temperature of natural gas gradually fell as enthalpy of Eglycol water which is supplied to a heat exchanger gets smaller because the higher mixing ratio of Eglycol is, the lower mixing specific heat of Eglycol water is.
 - 3) Basic variables including mass flux according to the mixing ratio of Eglycol water, required electric power of operating fluid pumps, the temperature of natural gas which is supplied to the engine, and the heat exchanger's capacity were drawn from the gotten results.
- (2) An analysis on the characteristics according to changes of heat source temperatures and vaporization functions of regasification systems for LNG-FSRU
 - 1) The seawater flow rate of 4,438ton per ton was, at least, required to regasify LNG of 200tons per hour with seawater of 25°C in the vaporization method which uses it. In case of the vaporization method which uses Eglycol water, the seawater flow rate of 4,428tons per hour was, at least, required when the seawater temperature which is supplied is above 17.05°C. And steam was needed as an additional heat source in the seawater temperature which is lower than 17.05°C.
 - 2) the seawater temperature supplied when vaporization performance is adjusted from 200 tons per hour to 150 and 100 tons can be vaporized with the seawater only in the temperatures of 17.05° , 14.2° , and 11.3° according to vaporization performance. Boiler steam was required as an additional heat source when the seawater temperatures get to be lower than them. It has found that the quantity of boiler steam of 59.51, 44.51, and 29.44tons is required as steam is just used as the heat medium of Eglycol water when the seawater temperatures get to be lower than 5.5°C, the temperature of



natural gas which is delivered to users in land.

- 3) the quantity of required steam and the seawater flow rate were calculated by dividing the vaporization method which uses Eglycol water into the case that the seawater flow rate is fixed so that LNG of maximum 200 tons per hour can be vaporized and the case that the seawater flow rate can be changed according to vaporization performance. the steam quantity of 62.3tons was required to vaporize LNG of 400 tons per hour. And if the seawater quantity can be changed according to vaporization performance, the seawater of 8,855tons and Eglycol water flow rate of 3,164ton per hour were needed when vaporization performance is 400 tons per hour in the same conditions.
 4) Heat sources including changes of the seawater temperatures, changes of the
- temperatures of the inlets and outlets, and the steam quantity and the minimum flow rate of the seawater according to vaporization performance were calculated through the gotten results.

The above results in the study are judged to provide valuable basic data for the shipbuilding and marine fields in the future because there is no any study which drew system design variables according to changes of parameter values in Korea still now. And it is thought that better results can be gotten if studies which design, compare, and analyze systems based on the actual values of plant sites in the future.



Nomenclature

Alphabet

| A | : | Heating Surface | $[m^2]$ |
|----------|---|--|------------|
| В | : | Constant, also known as F_t | |
| с | : | Specific heat | [J/kg · K] |
| C_{ji} | : | Concentration of j in the Inlet Stream | |
| C_{jo} | : | Concentration of j in the Outlet stream | |
| D | : | Constant, also known as Velocity Head Factor | |
| f_T | : | Fully Turbulent Friction Factor | |
| F_{i} | : | Flow Rate of the Feed entering the Bank | |
| F_o | : | Flow Rate of the Product exiting the Tank | |
| F_t | : | Logarithmic Mean Temperature Difference Correction Factor | |
| h | : | Enthalpy | [J] |
| j | : | Component | |
| m | : | Mass flow | [kg/s] |
| P_c | : | Critical Pressure | [Pa] |
| P_o | : | Vessel Pressure (energy per unit mass) | [Pa] |
| Q_h | : | Total Energy Injected in Cycle | [J] |
| R | : | Gas Constant | |
| R_{j} | : | Reaction of Rate of the Generation of Component j | |
| T_c | : | Critical Temperature | [K] |



| T_{c1} | : | Cold Side Inlet Temperature | [K] |
|-----------------|---|---|----------------------|
| T_{c2} | : | Cold Side Outlet Temperature | [K] |
| T_{h1} | : | Hot Side Inlet Temperature | [K] |
| T_{h2} | : | Hot Side Outlet Temperature | [K] |
| T_{high} | : | Inlet Temperature | [K] |
| T_{low} | : | Outlet Temperature | [K] |
| u | : | Internal Energy (energy per unit mass) | |
| U | : | Overall Heat Transfer Coefficient | $[W/m^2 \cdot K]$ |
| V | : | Volume of the Fluid | [m ³] |
| W_{p1} | : | Working Fluid Pump Power | [W] |
| ΔT_{lm} | : | Logarithmic Mean Temperature Difference | [K] |
| ΔP | : | Pressure Drop 1945 | [Pa] |
| ρ | : | Density OF CM | [kg/m ³] |
| $ ho_i$ | : | Density of the Feed entering the Bank | [kg/m ³] |
| $ ho_0$ | : | Density of the Feed entering the Bank | [kg/m ³] |
| w | : | Shaft Work done by ystem (energy per unit mass) | |
| ω_f | : | Deviation Factor | |
| | | | |



– vii –

List of Figures

| Fig. | 1 | Technology of green ship design | • 2 |
|------|----|--|-----|
| Fig. | 2 | Composition of LNG[Producing area: Borneo] | • 3 |
| Fig. | 3 | Define of regasification system | • 5 |
| Fig. | 4 | IMO MARPOL Annex VI - NOx Emission Limits | • 7 |
| Fig. | 5 | Process of Selective Catalytic Reduction(SCR) | • 9 |
| Fig. | 6 | Process of Exhaust Gas Recirculation(EGR) | • 9 |
| Fig. | 7 | Fuel Price of Europe | 10 |
| Fig. | 8 | Eco-Nuri of gas fuelled ship | 11 |
| Fig. | 9 | Diagram of the Fuel Gas Supply System of high pressure for | |
| | | gas fuelled ship | 12 |
| Fig. | 10 | Diagram of the Fuel Gas Supply System of low pressure for | |
| | | gas fuelled ship | 13 |
| Fig. | 11 | Different of LNG-engines available in the market | 16 |
| Fig. | 12 | Schematic of regasification system for high-pressure engines | |
| | | of gas fuelled ship | 17 |
| Fig. | 13 | Construction of gas fuel double wall pipe | 19 |
| Fig. | 14 | Gas fuel supply system of ME-GI engine | 19 |
| Fig. | 15 | Offshore LNG Terminal(LNG-FSRU) | 21 |
| Fig. | 16 | LNG Chain | 22 |
| Fig. | 17 | Process of LNG-FSRU | 22 |
| Fig. | 18 | Schematic of LNG-FSRU process | 23 |
| Fig. | 19 | Schematic of regasification system | 25 |
| Fig. | 20 | Concept of SCV Type | 26 |
| Fig. | 21 | Concept of ORV Type ····· | 27 |
| Fig. | 22 | Concept of IFV Type(Open loop) | 27 |



List of Figures

| Fig. | 23 | Concept of IFV Type(Closed loop) | 28 |
|------|------------|---|-----|
| Fig. | 24 | Freezing point of according to the mixing ratio of Eglycol | |
| | | and water | 31 |
| Fig. | 25 | Specific heat and gravity of depending on the mixing ratio of | |
| | | Eglycol and water | 33 |
| Fig. | 2 6 | LNG phase envelope | 38 |
| Fig. | 27 | LNG regasification system depending on the ixing ratio of | |
| | | Eglycol and water | 41 |
| Fig. | 28 | Eglycol water mass flow & energy consumption of working fluid put | mp |
| | | depending on the mixing ratio of Eglycol and water | 42 |
| Fig. | 29 | Engine supply and vaporizer outlet temperature depending on | |
| | | the mixing ratio of Eglycol and water | 44 |
| Fig. | 30 | Duty of heat exchanger and energy consumption of working fluid put | mp |
| | | depending on the mixing ratio of Eglycol and water | 45 |
| Fig. | 31 | Simulation of a vaporization by Sea water | 49 |
| Fig. | 32 | Simulation of a vaporization by Ethylene glycol water | 50 |
| Fig. | 33 | Required steam quantity depending on the supply sea water | |
| | | temperature | 52 |
| Fig. | 34 | Required sea water flow rate depending on the sea water | |
| | | temperature in/out difference | 53 |
| Fig. | 35 | Quantity of heat depending on the sea water temperature | |
| | | in/out difference ····· | 54 |
| Fig. | 36 | Variation of the required mass flow rate and steam quantity for sea wat | er, |
| | | Eglycol, steam(sea water mass flow=constant) | 56 |
| Fig. | 37 | Variation of the required mass flow rate and steam quantity for sea wat | er, |
| | | Eglycol, steam(sea water mass flow≠constant) | 57 |



List of Tables

| Table 1 Properties of Eglycol | 30 |
|---|----|
| Table 2 Design specification of regasification system | 37 |
| Table 3 Selected component and composition of LNG ······ | 38 |
| Table 4 Purpose of design for regasification system | 39 |
| Table 5 Comparison of the prices depending on the mixture ratio | |
| of Eglycol ····· | 43 |
| Table 6 Selected component and composition of LNG ······ | 47 |
| Table 7 Selected component and composition of Eglycol water | 47 |
| Table 8 Design specification of LNG-FSRU | 48 |
| Table 9 Purpose of design for regasification system | 48 |
| Table 10 Required steam flow rate depending on the sea water | |
| inlet temperature | 51 |
| Table 11 Required mass flow of sea water depending on sea water | |
| in/out temperature difference | 55 |
| | |



제1장 서론

1.1 연구 배경

Collection

글로벌 화물운송 시장에서 선박이 차지하는 비율은 그 어떤 수송수단보다 절대적이라고 할 수 있다. 하지만 각종 선박들이 세계 화물의 약 80%를 수송 하면서도 사용하는 에너지는 전 세계 에너지 소비량의 약 2%에 불과하며, 이에 따른 탄소배출량도 3.3% 수준으로 선박은 효율적이며, 친환경적인 수송수단 이라고 할 수 있다.^[1] 하지만 최근 온난화가스의 배출로 인하여 지구온난화현상이 가속화 되어 그 피해가 세계 곳곳에서 나타나게 되면서 전 세계 교통은 물론 해운분야에서도 저탄소, 인체에 유해한 배기가스 배출의 제한이 활발히 논의 되고 있다. 현재 국제해사기구와 정부 당국은 선진국 해역을 중심으로 NOx(질소 산화물)와 SOx(황산화물), CO2(이산화탄소)그리고 분진 등의 배출규제를 강화함에 따라, 친환경 연료인 LNG(Liquefied Natural Gas)의 수요는 계속해서 증가할 것으로 예상되며 현재 배출량 대비 SOx와 분진은 거의 배출하지 않고, NOx는 92%, CO2는 23%까지 저감시킬 수 있다고 기록되어진다. 그 결과 전 세계적인 환경규제를 만족할 수 있는 가장 현실적인 대안의 하나로 판단되고 있다.^[2]

Figure 1은 친환경 선박설계를 위한 기술 현황을 나타내며, 크게 선박설계 기술, 환경보전 기술 그리고 고효율운항 기술 측면으로 나누어진다.^[1]

조파저항이나 와류저항 등을 감소시키기 위한 최적선형 개발 및 SCR(Selective Catalytic Reduction) 및 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 등 배기가스 조절 기술 등 친환경 선박을 설계하는 여러 가지 기술 중에서 친환경 연료를 사용하는 대표적인 방법 중 LNG를 조선분야에 적용한 가스연료선박이 있다.

- 1 -



Figure 1 Technology of Eco friendly marine design^[1]

또한 해양 분야에서는 LNG-FSRU(LNG-Floating Storage and Regasification Unit)가 있고, 본 논문에서는 이들이 공통적 가지고 있는 재기화 시스템 (Regasification System)에 대하여 연구를 수행하였다. LNG를 선박의 추진연료 또는 발전용 및 산업용으로 공급하기 위해서는 재기화 설비를 통해 천연가스 (Natural Gas)로 기체화 시킨 후 공급해주어야 하는데, 현재 재기화 시스템에 대해 국내 조선소에서는 다수의 특허 확보 및 활발한 개발이 이루어지고 있으며, 이는 국내 조선 산업이 세계 LNG 추진 대형 상선 시장의 주도권을 계속 유지 할 수 있는 원동력으로 이어질 것으로 전망되고 있다.

LNG는 가스전에서 채취한 천연가스를 액화시킨 것으로 메탄(CH4)가스가 주성분이고, 약간의 에탄(C12H6) 등의 경질 파라핀계 탄화수소(탄소와 수소의 화합물을 총칭함)를 함유하고 있다. 천연가스를 액화한 것을 LNG라 하며, 우리나라의 경우 천연가스전이 없기 때문에 소비되는 가스 전량을 외국의 수입에 의존하고 있다. Figure 2는 보르네오산 LNG의 조성비를 보이고 85% 이상이 메탄임을 확인할 수 있다. LNG는 무색투명한 액체로 공해물질이 거의 없고,





열량이 높아 대단히 우수한 연료이다. 천연가스는 표준상태(0℃, 1atm)에서 메탄 1kg당 부피는 약 1.4m³이나, 액상에서는 약 2.4ℓ(-162℃, 1atm)로 부피의 차이는 600배 정도의 차이가 있다. 다시 말해, 가스 상태에서의 천연가스를 액화하면 그 부피가 1/600로 줄어들기 때문에 외국에서 수입해 올 경우 액화된 상태로 운반하며, 국내에 저장할 경우에도 LNG저장탱크에 액화된 상태로 저장해서 사용하게 된다. 도시가스나 가스연료선박에서 사용할 때에는 열을 가해 기화시켜 기체 상태로 공급하게 되는데 천연가스의 주성분인 메탄은 공기보다 가벼워(비중 : 0.6) 누출되면 상부로 확산되며 밀폐공간의 경우는 높은 곳에 체류 하여 공기와 혼합되면 폭발성 가스가 되므로 누출되지 않도록 주의해야 한다.^{[3].}

가스연료선박이란 LNG를 연료로 추진 동력을 발생시키는 선박으로 LNG 가격이 선박용 벙커C유 가격에 비해 저렴하고, 가격급등 없이 안정적인 가격 추이를



Figure 2 Composition of LNG[Producing area: Borneo]^[3]



보이는 장점이 있고,^[4] 유류를 사용하는 선박에 비해 선박 운항 시 대기 중 오염 물질 배출을 큰 폭으로 저감할 수 있다는 잇점이 있으며,^[5] 소음이 적고 해상에서 유류 누출로 인한 해상오염의 위험이 적다는 큰 장점을 갖고 있다.^[2] 이러한 가스 연료선박에서 -163℃의 극저온의 LNG를 선박의 추진연료로 사용하기 위해서는 엔진에 요구되는 온도 및 압력까지 상승시켜 상온의 천연가스 상태로 만들어 주어야 하는데, 이때 재기화 시스템이 적용된다.

그리고 최근 일본 후쿠시마 원전 폭발 사건으로 인해 거주 지역 주변에 혐오 시설 및 위험시설의 설립을 반대하는 NIMBY(Not In My Back Yard) 현상이 심해짐에 따라 각 종 위험시설물들은 용지 선정이 힘들어지게 되었고 환경 문제와 안전문제 등의 이유로 해양으로의 이동이 불가피해지면서 등장하게 된^[6] LNG-FSRU 역시 갑판의 Topside에 LNG Carrier로부터 인수받은 LNG를 육상에 있는 소비자에게 공급하기 전 요구되는 온도와 압력으로 기체화 시켜주는 재기화 시스템을 갖추고 있다.

이와 같이 선박용 재기화 시스템의 기술을 이용함으로써 배기가스의 배출규제 대응 및 위험시설물의 부지선정의 어려움 등을 해결할 수 있다.

1.2 연구 목적

선박에 설치 된 재기화 시스템은 LNG가 육상으로 공급되거나 엔진의 연료로 사용되기 위해서 반드시 필요한 중요한 장치이다. 기화란 액체상태의 물질이 에너지를 받아서 잠열을 흡수해 기체로 상변화 하는 과정을 뜻하며, Figure 3은 재기화 시스템의 정의를 보인다. 극저온의 LNG가 열교환기를 통과시 가열매체로 부터 열을 흡수하면서 상온의 천연가스가 되고, 생성된 천연가스를 엔진 또는 육상의 사용처로 공급해 주는 시스템을 보인다.

- 4 -







이러한 가스연료선박 및 LNG-FSRU에 적용되는 재기화 시스템과 관련 하여 국내 에서 연구 발표된 사례로는 다음과 같다.

- 1) 가스연료선박
 - 가. LNG 연료추진선박 및 LNG 연료공급시스템에 대한 연구(이재익, STX)
 - 나. LNG 공급시스템에 대한 연구(2012년, 이재익, 대한기계학회 춘추학술대회)
 - 다. LNG를 연료로 하는 가스추진선박의 기술동향 및 분석(2012년, 김형수 외 2명, 한국마린엔지니어링학회)
 - 라. LNG 연료 추진 선박의 개요 및 현황(2013년, 김형수 외 2명, 해양환경안전학회 추계학술대회)
- 2) LNG-FSRU
 - 가. 열원의 온도 변동을 고려한 부유식 액화천연가스 저장 및 재기화 설비의 최적 설계(2006년, 이수진, 한국과학 기술원)
 - 나. 액화천연가스 재기화공정의 증발가스 압축기 운전 최적화에 관한 연구



(2007년, 정남진, 전북대학교)

다. LNG-FSRU 형 가스복합발전 플랜트 효율 향상(2012년, 정낙신 외 2명, 대한 기계학회 춘추학술대회)

하지만 종래의 연구들은 재기화에 필요한 여러 특성치의 변화에 대한 연구는 거의 수행되지 않았기 때문에 가열매체 변화에 따른 여러 특성에 관한 연구를 수행하였다.

시스템 해석을 위해 AspenTech사의 공정설계프로그램인 HYSYS V8.0을 이용 하여 가스연료선박용 재기화 시스템과 LNG-FSRU용 재기화 시스템의 설계를 하고, 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- 1) 가스연료선박용 재기화 시스템의 Eglycol water 혼합비에 따른 특성
- 가. DF엔진으로 공급되는 천연가스의 압력과 온도, 유량이 일정하게 유지될 때, 혼합비에 따른 Cycle 유량 및 Pump 소요동력 산정
- 나. 기화기의 크기를 고정했을 때, 혼합비에 따른 DF엔진으로 공급되는 천연가스 온도 및 기화기 출구측 Eglycol water의 온도
- 다. 얻어진 결과를 통해 혼합비에 따른 질량유량과 작용유체펌프의 소요동력 및 엔진으로 공급되는 천연가스의 온도, 열교환기 용량 등의 기본변수 도출
- 2) LNG-FSRU용 재기화 시스템의 열원온도 및 기화방식에 따른 특성
- 가. 기화방식 중 해수를 가열매체로 적용한 Open loop와 중간열매체를 가열 매체로 적용한 Closed loop에 대한 재기화 시스템 설계
- 나. 해수온도의 하강시 기화방식에 따라 필요한 해수의 유량 및 steam이 요구되는 시점 분석
- 다. 기화성능 변화에 따라 요구되는 해수의 유량 및 steam의 양 산정
- 라. 얻어진 결과를 통해 해수온도의 변화 및 해수 입·출구 온도 변화, 기화 성능에 따른 Steam의 양과 해수 최소유량 등 가열원 산정

Collection

제 2 장 재기화 시스템 적용 및 작동유체의 특성

2.1 가스연료선박

가스연료선박은 기존 선박의 연료인 중유, 디젤유를 사용하는 대신 보다 청정한 에너지원인 천연가스를 주 연료로 사용하여 추진하며, 이 가스연료를 액화된 LNG 형태로 저장하여 운항한다. 최근 선박의 온실가스 및 각종 대기오염 물질에 대한 배출 규제강화 및 유가상승 등 다음과 같은 이유로 인하여 청정에너지인 LNG를 선박의 연료로 사용하려는 움직임이 강하게 일고 있다.



Figure 4 IMO MARPOL Annex VI - NOx Emission Limits^[1]



- 7 -

IMO(International Maritime Organization : 국제해사기구)에서는 오는 2021년 부터 대기오염방지 3차 규제 장치인 TierIII를 발효시켜 신규건조 선박들은 질소산화물(NOX)을 Tier I 에 비해 80%가량 줄인 kwh당 1.96~3.4g으로 감축시켜야 한다. Figure 4는 IMO에서 공표한 Tier I,II,III의 질소산화물 배출기준을 보이며, 점차 강화되는 규제에 따라 현재 엔진기술사들은 IMO TierIII 규제를 회피하기 위한 기술개발에 주력하고 있으며, 세계보건기구(WHO)가 디젤엔진의 배기 가스를 발암물질로 지정하기도 해 선박용 배기가스 저감설비에 대한 선주사들의 관심이 높아 앞으로 많은 수요가 예상된다. 그리고 지난해부터는 이산화탄소 총량규제 제도인 EEDI(Energy Efficiency Design Index : 에너지효율설계지수)를 시행하고 있다. EEDI는 1톤의 화물을 해상에서 1마일 수송할 때 나오는 이산화탄소 배출량을 의미하는데 IMO 규제안에 따르면 총 톤수 400GT 이상의 선박의 EEDI를 2015년까지 10%, 2020년 20%, 2025년 30%까지 감축해야 하며, 이를 충족하지 못한 선박은 운항이 전면 금지된다. 또한 올해는 해운시장의 수요가 늘어날 것으로 전망됨에 따라 운임경쟁이 갈수록 치열해 질 것이라는 점에서 업계는 저렴한 연료를 사용하는 것이 불가피해 보인다.^[1]

이러한 규제강화에 따라 배기가스를 저감하는 대표적인 설비로는 SCR방식과 EGR방식이 있다. SCR방식은 암모니아 또는 우레아(urea)를 환원제로 사용하는 선택적 촉매 저감법으로 질소산화물은 촉매 앞부분의 배기가스에 공급된 암모니아와 반응하여 질소산화물을 질소와 물로 분해하는 방식이다.^[5] SCR 촉매는 복잡성과 큰 부피, 안정성의 문제, 그리고 암모니아/우레아 분사제어의 문제를 가지고 있으나 질소산화물의 배출을 향후의 배기규제 이하의 수준으로 저감시킬 수 있는 유일한 촉매기술로 인정받고 있다. EGR 역시 질소산화물 발생 억제법의 일종으로 배기가스의 일부를 연소용 공기에 혼합시켜 산소 농도를 감소시키고, 급격한 화염 온도의 상승을 방지하여 질소산화물의 생성을 방지하는 방식이다.

d Collection



Figure 5 Process of Selective Catalytic Reduction(SCR)^[5]



Figure 6 Process of Exhaust Gas Recirculation(EGR)^[5]

- 9 -





Figure 7 Fuel Price of Europe^[7]

하지만 재순환의 가스양이 과다해지면 연소가 불안정해지며 그 한계 조절에 문제가 되는 단점이 있다. 이러한 가운데 LNG 추진선박은 기존 선박보다 이산화탄소 배출량 23%, 질소산화물 25%, 황산화물 95% 감소효과가 있으며, 가격 측면에서도 LNG가 벙커유보다 저렴해 연료비를 크게 줄일 수 있다. Figure 7에서 기존 선박에서 사용하는 벙커C유 및 MDO(Marine Diesel Oil)와 LNG의 가격을 유럽/아시아 지역에 따라 비교하여 나타내었다. MDO와 비교하였을 때 LNG는 40~60% 더 저렴한 가격을 보이고 있고 이산화탄소의 배출량은 23% 정도 저감 되었다.^[5]

Figure 8은 2013년 국내에서 건조된 세계 6번째 최환경선박인 에코누리호이다. 국내 및 아시아에서 건조된 최초의 가스연료선박인 에코누리호(LOA: 39m, 수선간장: 35.5m, 폭: 8m, 만재흘수: 2.2m, 총톤수: 260톤, 정원57명, LNG탱크: 20㎡, 속도: 15knot)는 연간 1,000시간 운항기준 결과 디젤연료에 비해 NOx은 92%, SOx은 100%,

-10 -





Figure 8 Eco-Nuri of gas fuelled ship^[6]

분진은 99%, CO2는 23% 감소성능을 자랑한다. 온실가스인 이산화탄소 저감량은 연간 100ton으로 이는 소나무 2만 그루를 심는 효과에 해당한다. 그리고 연료비 절감효과(연간 1천 시간 운항 기준)도 연간 1억 원을 절감할 수 있다는 장점을 가지고 있다.^[7] 이와 같이 가스연료선박은 현재 IMO의 EEDI 등 환경규제 등을 충족하면서도 운항비의 20%를 차지하는 연료비를 절감할 수 있기 때문에 규제에 대한 가장 현실적인 대안 중 하나로 판단되고 있다.^[6]



- 11 -

2.1.1 가스연료선박용 재기화 시스템의 개요

가스전에서 얻어진 천연가스를 저장과 이송을 용이하게 하기 위해서 -163℃의 극저온 상태로 액화시킨 LNG를 선박의 엔진에 공급하기 위해서는 엔진에 요구되는 온도(약 20~40℃)까지 상승시켜야 한다. 이때 엔진의 폐열이나 고온의 steam을 사용해 상온의 천연가스 상태로 만들어주기 위해서는 일종의 열교환기인 기화기(Vaporizer)가 필요하고, LNG가 기화기를 통과하면서 상온의 천연가스 로 바뀐 후 엔진으로 공급된다.^[7]

Figure 9는 각 Maker별 고압방식 연료가스공급 장치를 보인다.



Figure 9 Diagram of the Fuel Gas Supply System of high pressure for gas fuelled ship^[7]





Figure 10 Diagram of the Fuel Gas Supply System of low pressure for gas fuelled ship^[7]

Figure 10은 각 Maker별 저압방식 연료가스공급 장치를 보인다. 엔진으로 공급되는 천연가스의 압력, 온도, 유량 조건에 따라 각 Maker에 따라 조금씩 차이가 보이나 LNG를 기화시켜 엔진으로 공급하는 원리는 동일하다.

1945



2.1.2 가스연료선박용 Gas 엔진의 개요

세계 최초로 건조되는 천연가스 추진 컨테이너 선박에 국내 기술진이 독자 개발한 고압 천연가스 연료 공급장치(FGSS: Fuel Gas Supply System)를 처음 으로 설치한다. 미국 나스코(NASSCO) 조선소에서 건조된 3,100TEU급 컨테이너선은 유명 선박 엔진 제작사에서 개발한 ME-GI(MAN Electronic GAS-Injection engine)가 세계최초로 탑재된다.^[8]

천연가스를 연료로 사용하게 된 상선은 초기에는 LNG Carrier에서 BOG(Boil Off Gas)를 처리하기 위한 것이였으나, LNG의 주기관이 증기터빈기관에서 디젤 엔진기관으로 변화하면서 가스디젤엔진이 이용되고 있다. 하지만 국제유가상승과 온난화 현상으로 인해 전 세계적인 환경규제로 인해 모든 산업 분야에서 청정 에너지로의 전환이 요구되면서 LNG 운반선 이외의 선박에서도 가스디젤엔진의 이용이 지속적으로 검토되게 되었다. 가스연료선박에서는 요구되는 선박의 크기 및 종류에 따라 고압 가스분사방식 엔진과 저압 분사방식 엔진으로 나누어진다.

고압가스분사방식인 GD(Gas-Diesel) 엔진은 공기를 압축시키고 압축행정 말기에 고온의 압축공기에 연료를 분사하는 엔진작동 사이클인 디젤사이클의 원리에 의하여 작동된다. 최소 액체연료유 운전모드인 Gas모드에서는 먼저 소량(5%)의 액체연료유인 파일럿 연료를 직접 실린더 내에 분사하여 디젤엔진과 동일한 방법으로 자연착화 시킨 후 파일럿 연료 분사직후에 가스를 높은 압력으로 분사하여 연소한다. 액체연료와 가스의 혼합기는 압축과정 중 연소실에서 분사 되기 때문에 높은 분사압력이 요구되어지고 4행정 가스디젤엔진은 350bar, 2행정기관은 250bar정도의 가스압력이 요구되는데 고압가스분사의 경우 대형 2행정 사이클에서 사용되고 있다.

그리고 저압가스분사방식인 DF(Duel-Fuel) 엔진은 압축, 폭발, 팽창, 배기의

- 14 -



사이클을 반복하는 가솔린기관의 열효율과 출력을 생각할 때 기본이 되는 사이클인 오토 사이클의 원리에 의하여 작동하며 이론 공연비 14.6:1에 대해 희박 혼합비 16:1 이상인 희박연소(lean burn combusion)가 가능하다. 그리고 가스압력은 5bar 정도인데 그 이유는 압축 시작 전 흡입 기간에 흡입밸브 이전에서 공기와 혼합이 이루어지기 때문이다.

다음으로 예연소실식 저압가스분사방식(micro-pilot, DF engine)은 예연소실 내부에서 1% 정도의 액체연료유를 분사밸브에 의해 분사하여 착화시키고, 주연소실 내부에서의 희박혼합기 가스에 의해 착화된다. 이와 같은 방식의 가스기관은 열효율과 출력이 크게 향상되어 디젤엔진의 성능과 동일하게 된다. 현재 소형, 중형 디젤기관에서 사용되고 있으며, 대형 2행정 사이클 기관에서도 사용이 검토 중에 있으며, 가스연료의 공급은 실린더 내에 고압(350bar)으로 분사하거나 흡기관에 저압(5bar)으로 분사한다.^[8]

Figure 11은 현재 LNG를 사용하는 엔진들의 행정 사이클 및 적용되는 연료에 따라 요구되는 압력 및 성능 등의 차이점을 보인다.



| Single fuel(LNG) | Dual fuel capacity (LNG or MDO) | Multi-fuel capacity (LNG, MDO or HFO) |
|---|--|---|
| Otto cycle | Combined Otto/Diesel cycle | Diesel cycle |
| Low gas-pressure supply, 4~5 bar | Low gas-pressure supply, 4~5 bar | High-pressure gas-injection, 300~350 bar |
| High energy efficiency and lower emission than a diesel engine | Flexible and has back-up fuel | Need NOx-reduction techniques to meet IMO Tier III |
| Emits methane, but that is limited by design and combustion process control | Emits methane, and that is hard to limit by combustion process control | No methane emissions, and 30% GHG reduction compared to HFO |
| Sensitive to gas quality | Sensitive to gas quality | Not sensitive to gas quality |
| Not suitable for retrofitting of existing engines | Possible to retrofit in existing engines | Suitable for conversion of existing engines, simple process |
| | | |

Figure 11 Different of LNG-engines available in the market [8]

- 16 -



2.1.3 종류 및 구성요소

가스연료선박용 재기화 시스템은 엔진으로 공급되는 압력과 온도, 유량에 따라 고압방식 재기화 시스템과 저압방식 재기화 시스템으로 나누어진다. 구성요소는 크게 차이가 없지만 고압방식은 저압방식과 달리 엔진으로 300bar, 40℃ 이상의 천연가스가 공급되기 때문에 압력상승을 위한 고압펌프가 추가로 구성된다.

Figure 12는 고압방식 재기화 시스템의 도식도를 나타내고 연료저장탱크, 저압 펌프, 고압펌프, 기화기로 구성되어 있다. LNG가 저장된 탱크에서 저압펌프를 통과 후 고압펌프로 전달되면서 200~350bar의 압력으로 승압되고 이후 고압용 기화기를 통해 40℃ 이상의 온도로 상승하여 천연가스로 기화되게 된다.^[9]



Figure 12 Schematic of regasification system for high-pressure engines of gas fuelled ship^[9]



고압방식 재기화 시스템의 경우 에너지 효율이 높다는 장점이 있지만 고압의 가스압력을 생성해야하기 때문에 별도의 고압펌프가 추가로 설치된다. 엔진으로 공급되는 천연가스의 온도는 Eglycol water의 유량에 의해 조정되고 압력은 고압방식의 경우 고압펌프에 의해, 저압방식의 경우 저압펌프 또는 PBU (Pressure Build-up Unit)에 의해 조정이 가능하다.

현재 운항중인 대부분의 대형 상선은 추진효율이 높고 큰 힘을 낼 수 있는 2행정 대형 디젤 엔진을 추진기관으로 사용하고 있다. 따라서 대형 상선에서 LNG를 연료로 사용하기 위해서는 가스를 연소할 수 있으며 추진효율이 높은 2행정 이중연료 대형 엔진이 반드시 필요하다. 이러한 조건을 만족하는 엔진이 1990년대 초반에 개발되었으나 이 엔진은 가스연료를 최대 300bar(대기압의 약 300배)의 높은 압력으로 공급받아야 한다는 특징이 있다. 이를 위해 개발 초기 단계에는 가스 상태의 연료를 고압으로 압축하여 공급하는 장치가 고려되었다. 그러나 이 장치는 매우 큰 에너지를 소모할 뿐만 아니라 장비의 부피가 매우 커서 선박용으로 사용하기에 적절치 못하다는 평가를 받아왔다. 이에 대우조선해양은 가스 압축기 대신 액체상태의 LNG를 250~320bar의 고압으로 먼저 가압한 후 기화시켜 엔진에 공급하는 장치를 개발하였다. 이 장치는 부피, 비용 뿐 아니라 가스연료 공급에 필요한 에너지를 가스 압축기의 5~10% 수준으로 줄일 수 있는 이점이 있다. 가스연료공급 장치의 개발에 의해 이중 연료 대형 엔진이 선박의 엔진으로써 가치를 평가받기 시작했으며 LNG 연료 추진 대형 상선의 실현 가능성을 보여주게 되었다. 또한 LNG에서 필연적으로 발생하는 자연증발 가스도 가스연료 공급 장치 내에서 LNG를 이용하여 재응축 시킴으로써 별도의 재액화 장치나 가스 연소장치를 통한 에너지 낭비 없이 효과적으로 처리할 수 있는 기술을 개발하였다. 초대형 상선의 경우 연료저장 효율을 이유로 가압용기를 사용하지 않기 때문에 증발가스에 민감할 수밖에 없어 이 기술이 향후 매우 요긴하게 사용될 것으로 전망된다.^[9]





Figure 13 Construction of gas fuel double-walled pipe^[9]



Figure 14 Gas fuel supply system of ME-GI engine^[9]

- 19 -



하지만 고압장치를 사용하므로 가스의 유출에 대비해 이중배관이 넓은 범위에 설치되는데 고가기자재가 삽입되어 비용의 증가를 가져온다. Figure 13은 이중배관의 구조를 보이며, Figure 14는 ME-GI engine용 연료공급장치 시스템 내 이중배관이 적용되는 구역을 나타낸다.

저압방식 재기화 시스템의 경우 엔진으로 4~5bar, 20~30℃내의 천연가스가 공급되므로 고압펌프가 없이 저압펌프만으로도 시스템 구성이 가능하고 저장탱크가 Type C인 경우 저압펌프가 없이 PSU가 설치되어 있어 저장 탱크내부 압력을 엔진으로 공급되는 압력보다 높게 유지함으로써 엔진으로 약 5bar의 천연가스 공급이 가능하게 한다. 이와 같이 저압방식의 경우 고압펌프 등의 추가구성이 필요하지 않아 시스템을 비교적 간단하게 구성할 수 있다는 장점을 가지고 있다.





2.2 LNG-FSRU

최근 LNG를 사용하는 화력발전소가 증가함에 따라 등장한 LNG 해상 부유식 인수터미널인 LNG-FSRU가 등장하였다. LNG-FSRU는 천연가스 재기화 시설물을 육상에서 떨어진 해양에 설립되기 때문에 육상터미널에 비해 항구 시설 및 부지, 그리고 환경, 안전에 대한 인프라가 필요 없고 경제적이라는 이점들을 갖고 있다.^[10]

Figure 15는 바다에 반영구적으로 계류되어 있는 LNG-FSRU의 개념도를 보여준다. LNG Carrier를 통해 인수받은 LNG를 육지에 있는 소비자에게 공급해주기 위해서는 소비처에 요구되는 온도와 압력으로 기체화 시켜주기 때문에 가스연료선박과 마찬가지로 재기화 설비가 필요하다.



Figure 15 Offshore LNG Terminal(LNG-FSRU)^[11]





Figure 16 LNG Chain^[10]



Figure 17 Process of LNG-FSRU

Figure 16은 LNG Chain으로 기존에서 가스전에서 채취한 천연가스를 전처리 공정과 액화기지의 액화공정을 통해 액화천연가스인 LNG를 만들어 주고, LNG 수송선에 의해 생성된 LNG를 육상인수기지로 전달해주게 된다. 육상기지에서는 인수받은 LNG를 재기화 설비를 통해 상온의 천연가스로 재기화 시킨 후 육상의 가스사용처로 공급해주는데 이 기능을 LNG-FSRU가 대신하게 된다.

Collection

Figure 17은 LNG-FSRU가 육상인수기지 대신 적용된 후 처리공정의 상태를 나타 낸다. 기존에는 육상에서 재기화 설비(저장탱크, 압축기, 액화장치, 고압펌프, 기화 장치)를 통해서 가스사용처로 공급해 주었다.

하지만 LNG-FSRU가 적용되면 LNG수송선은 육상기지로 LNG를 공급하지 않고 LNG-FSRU로 LNG를 수송해주면 LNG-FSRU 내에 육상기지와 동일한 재기화 설비를 갖추고 있어서 플랜트 내에서 LNG를 재기화 한 후 육상으로 공급해주게 된다.

LNG를 해상에서 재기화 한 뒤 육상으로 공급하기 때문에 안정성 및 NIMBY 현상의 해결은 물론 육상기지의 경우 건설비용이 10억달러, 공사기간은 약 5년 이상이 소요되었지만 LNG-FSRU는 건설비용이 약 3억달러, 공사기간은 약 3년으로 매우 효율적이고 경제적이라 할 수 있다.^[12]



Figure 18 Schematic of LNG-FSRU process

- 23 -


Figure 18은 LNG Carrier로부터 인수받은 LNG를 육상의 소비자에게 공급하기 위한 과정을 나타낸다. Recondenser는 고압펌프로 공급하는 LNG Buffer Tank 및 저장 탱크에서 발생하는 BOG를 재액화하는 역할을 한다.^[12]

Recondenser를 나온 LNG는 다단 원심 펌프인 고압펌프를 통해 고압으로 승압하여 고압으로 송출하는 이유는 압축하여 부피 감소 및 효율 증대를 위한 목적에 있으며 공급관리소에서 인수받은 천연가스는 화력발전소 및 지역난방 그리고 지구 정압기, 지역 정압기를 통해 소비지에 필요한 압력으로 감압 후 소비자에게 전달된다. 고압펌프를 통해 고압으로 승압된 LNG는 기화기를 통과하는데, 재기화 장비 중 기화기는 가장 고가인 장비로 극저온 및 고압에 견딜 수 있고 부식이 없는 재질로 만들어 진다. 기화기를 통과 후 천연가스가 되고 고압배관을 통해 육상의 공급관리소로 전달된다.

2.2.1 LNG-FSRU용 재기화 시스템의 개요

Figure 19는 LNG 기체화에 필요한 재기화 시스템의 일례로 Eglycol을 사용한 재기화 시스템의 도식도를 나타낸다. Eglycol의 온도를 유지하기 위해서 해수와 스팀보일러의 열원을 추가로 사용하였고 평소에는 해수만으로 Eglycol의 온도를 유지하다가 지역 및 계절 등의 요인으로 인한 해수온도의 하강 시 스팀보일러에서 나오는 Steam을 동시에 사용하여 LNG를 재기화 시키는 방식을 나타낸다.^[12]





Figure 19 Schematic of regasification system^[12]

현재 경제적이고 설치의 간편화 그리고 플랜트공사 기간의 단축을 위하여 재기화 장비의 Module화 사업을 추진 중에 있다고 보고된다.^[12]

2.2.2 재기화 시스템의 방식

LNG를 천연가스로 재기화 시키는 과정에서 사용하는 기화방식의 종류에는 크게 SCV(Submerged Combustion Vaporizer), ORV(Open Rack Vaporizer) 그리고 IFV(Intermediate Fluid Vaporizer) Type으로 나누어진다.^[13]

Figure 20은 연소기화방식(SCV Type)의 개념으로 수조에 물이 채워있고 여기에 LNG가 공급되는 열교환기가 들어있다. Fuel Gas와 공급되는 공기에 의하여 연소하여 수조의 물이 따뜻해지면 고온의 온도에 의하여 수조에 잠겨있는 LNG는 천연가스로 바뀌게 된다.





Figure 20 Concept of SCV Type^[13]

연소기화방식의 경우 높은 열효율을 가지고 있고 적은 접지면적을 차지 한다는 장점을 가지고 있지만 연소시 발생하는 Exhaust gas에 의하여 질소산화물을 배출하게 되고 수조에 물로 인해 수처리를 해주어야 한다.

Figure 21는 해수기화방식(ORV Type)의 개념으로 Tube로 LNG가 공급되면 상단의 물이 뿌려지며 천연가스로 기화시켜준다. 그리고 열교환을 마친 물은 바다로 배출되게 된다.^[15]





Figure 21 Concept of ORV Type^[13]

마지막으로 중간열매체기화방식(IFV Type)의 개념으로 해수를 가열매체로 적용한 open loop방식과 중간열매체를 적용한 closed loop방식으로 나누어진다.



Figure 22 Concept of IFV Type(Open loop)^[13]

- 27 -





Figure 23 Concept of IFV Type(Closed loop)^[13]

Figure 22는 IFV 기화방식 중 open loop방식을 보인다. open loop방식은 LNG가 열교환기를 통과하면서 해수로부터 열을 흡수하게 되고 상온의 천연가스가 되어 가스 사용처로 공급된다. 그리고 LNG로부터 열을 빼앗긴 해수는 바로 바다로 배출되게 된다.

이러한 기화방식은 LNG를 기화시키기 위한 열원으로 해수만을 사용하기 때문에 주로 펌프의 동력만 필요하여 운전비가 낮고 관외 열 전달율이 크며, 설계 시 비교적 간단하게 시스템 구축이 가능하다는 장점을 갖추고 있다. 하지만 적도지방과 같은 해수의 온도가 4계절 동안 거의 일정한 지역에서 채용이 가능하고 열교환을 마치고 나온 저온의 해수가 주변해수의 온도를 하강하게 만들어 생태계 파괴를 가지고 오는 단점을 가지고 있다.

Figure 23은 IFV 기화방식 중 closed loop방식을 보인다. 중간열매체를 적용한 closed loop방식은 LNG가 기화기를 통과하면서 중간열매체로부터



열을 흡수하여 상온의 천연가스가 되어 천연가스를 생성하는 방식은 open loop와 동일하지만 열교환을 마친 Eglycol은 선외로 배출되지 않고, 2차열원인 해수와 보일러스팀에 의하여 다시 LNG와 열교환하기 전의 초기온도로 유지되면서 순환하게 되는 방식이다. 중간열매체인 Eglycol을 사용한 기화방식의 경우 해수를 사용하는 open loop 기화방식에 비해 시스템의 구성이 다소 복잡해질 수 있으나, 날씨 및 지역에 상관없이 적용할 수 있는 장점을 갖고 있다.^[12]





2.3.3 중간열매체의 특성

재기화 시스템에서 적용되는 대표적인 중간열매체로는 Eglycol과 Steam이 있으며 특징은 다음과 같다.

2.3.3.1 Eglycol water(Ethylene glycol water)

Eglycol water는 Eglycol에 물을 혼합하여 생성된 유기혼합물로써 두 개의 탄소 각각에 OH가 한 개씩 결합되어 있는 C2H6O2의 간단한 화학식구조를 가지고 있고, Table 1은 Eglycol의 고유특성을 나타낸다.

Eglycol만으로 가열매체로 사용하지 않고 물과 혼합해서 사용하는 이유는 순수한 Eglycol은 어는점이 - 12℃인 반면, 물과 혼합해주면 Eglycol이 물 분자 끼리의 수소결합을 방해해서 순수한 Eglycol 보다 더 낮은 어는점을 갖기 때문이다. 그리고 가열매체로 물만을 사용할 경우 비열이 가장 크고 쉽게 구할 수 있다는

| Eglycol specification | | | |
|-----------------------|---|--|--|
| Molecular formula | C2H6O2 | | |
| Molal mass | 62.068(g/mol) | | |
| Density | $1.1132(g/cm^3)$ | | |
| Melting point | -12.8°C(260K) | | |
| Boiling point | 197.3 ℃(470K) | | |
| Viscosity | $1.61 \times 10^{-2} (N_{\rm S}/{\rm m}^2)$ | | |

 Table 1 Properties of Eglycol^[14]





Figure 24 Freezing point of depending on the mixing ratio of Eglycol and water^[14]

장점이 있으나, 1기압에서 100℃가 되면 끓게 되고 금속을 부식시키며, 0℃이하에서는 얼게 되어 체적이 10% 정도 팽창하는 문제가 있다. 그렇기 때문에 Eglycol을 혼합해 줌으로써 동결방지는 물론 전해질이 아니기 때문에 녹 발생을 방지해주어서 Eglycol을 물과 혼합하여 사용한다.

Figure 24는 Eglycol의 혼합비에 따른 물의 어는점 변화를 나타낸 것으로 순수한 물의 경우 0℃에 얼게 되지만, Eglycol과 섞어서 사용할 경우 혼합비에 따라 어는점이 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 순수한 Eglycol의 어는점은 약 -12℃ 이지만 Eglycol의 비율이 70%, 물의 비율이 30%가 될 때 Eglycol water의 어는점이 -50℃이하까지 낮아지다가 그 이상이 되면 어는점이 다시 올라가는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 어는점 내림(freezing point depression)으로 설명할 수 있다. 어는점 내림이란 용질이 녹아 있는 용액의 어는점이 순수 용매

- 31 -



일 때보다 낮아지는 물리 현상으로 용액의 증기압이 순수 용매일 때보다 낮아 지기 때문에 발생하게 된다. 물에 Eglycol을 넣게 되면 Eglycol의 증기압이 같은 온도에서 물보다 작기 때문에 증기압이 낮아지게 되는데, 용액의 농도가 진해 질수록 용액의 삼중점이 내려가게 되면서 고체와 액체의 평형 온도를 낮추어 어는점도 낮아지게 된다. 비휘발성 용질을 녹인 묽은 용액의 경우 용액의 어는점은 용액 속에 남아 있는 용질 입자 수에 비례해 낮아지게 된다.^[14]

 $\Delta T_f = mK_f$

(1)

여기서, ΔT_f = Freezing point depression Temp'(°C)

m = Molal density(mol/kg)

K_f = Freezing point depression constant($^{\circ}C/m$)

상기 식(1)은 ΔT_f 즉, 어는점 내림온도를 구하는 값으로 molal농도 m과 molal 어는점 내림상수 값인 K_f 의 곱으로 구할 수 있다. 일정 용매에 대한 Imolal 용액에서의 어는점 내림은 용질의 종류에 관계없이 일정한 값을 갖는데, 이를 어는점 내림상수라고 한다.^[15] 본 식에서는 열교환 시 공급되는 LNG의 온도는 - 163℃의 극저온으로 Eglycol과 물의 혼합비를 어는점이 가장 낮은 7:3으로 섞어줄 수 있겠지만, Eglycol water의 유량을 고려하여 어는점을 - 50℃ 이하까지 내리지 않고, -15℃로도 슬러시현상 없이 충분히 열 교환이 일어날 수 있다고 가정하였다. 이때 필요한 혼합비율을 (1)식을 사용하여 계산해보면, $\Delta T_f=10℃$, $K_f=1.86℃/m$ 일 때 molal농도 $m \in 8.06$ mol/kg이 되고, 이때 필요한 Eglycol의 혼합비는 8.06mol/1kg x 62g/mol = 500g/kg이 된다. 따라서 물 1kg 당 500g의 Eglycol을 넣어주면 -15℃의 외부 조건에도 Eglycol water가 얼지 않음을 확인하였고, 이는 물과 Eglycol을 약 6.7 : 3.3으로 섞은 혼합비율과 같다.





Figure 25 Specific heat and gravity of depending on the mixing ratio of Eglycol and water^[16]

1945

그러므로 열 교환하는 작동유체의 조건에 따라 Eglycol과 물의 적절한 혼합 비율을 사용해야 할 것으로 사료된다. Figure 25는 작동유체온도 50℃ 기준, Eglycol과 물의 혼합비에 따른 비열과 비중의 변화추이를 보인다. Eglycol의 혼합비가 높아질수록 비열은 조금씩 감소하고, 용액의 비중은 반대로 증가하는 추이를 확인 하였다.^[14]



2.3.3.2 Steam(보일러 스팀)

일반적으로 Steam이란 물이 열량을 흡수하여 기체화 된 상태로, LNG의 가열 매체로 사용되는 Eglycol의 온도하강에 대비하여 보일러 Steam을 이용해 Eglycol의 온도를 유지할 수 있도록 구성된다. 증기가 가진 열량은 현열(물이 해당압력 하에서 상변화 없이 끓는점 상태까지 도달하는데 필요한 열량)과 잠열(포화온도 상태의 물이 기체로 상변화 하는데 필요한 열량), 그리고 이 둘을 합한 총열량인 전열이 있는데 Steam 열교환기를 통한 가열에는 잠열이 열량으로 사용된다.





제 3 장 재기화 시스템 구성을 위한 특성분석

3.1 특성분석을 위한 상태방정식 적용

시스템 해석에는 물리적 특성 및 상거동 특성 등의 해석을 위하여 기존의 기체 방정식 중 비교적 정확성이 높고 각 성분 간의 상호작용에 대한 관계가 포함 되어 있는 Peng-Robinson식을 사용하였으며, 식은 다음과 같다.^[17]

$$P = \frac{RT}{V-b} \qquad a \qquad (2)$$

$$c = a_{c}\alpha$$

$$a_{c} = 0.45724 \frac{R^{2} T_{c}^{2}}{P_{c}}$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_{c}}{P_{c}}$$

$$\sqrt{\alpha} = 1 + \kappa (1 - T_{r}^{0.5})$$

$$\kappa = 0.37464 + 1.5422\omega_{f} - 0.26992\omega_{f}^{2}$$

$$T_{r} = \frac{T}{T_{c}}$$

- 35 -



 P_c = Critical pressure[Pa]

 T_c = Critical temperature[K]

R = Gas constant

 ω_f = Deviation factor

시스템 해석에 필요한 열교환기의 총 열량은 다음 식을 이용하였다.[17]

$$Q = UA \Delta T_{lm} F_t \tag{3}$$

여기서,
$$U = \text{Overall heat transfer coefficient}[W/m^2 \cdot K]$$

$$F_t$$
 = Logarithmic Mean Temperature Difference
correction factor

 $A = \text{Heating surface}[\text{m}^2]$

 ΔT_{lm} = Logarithmic Mean Temperature Difference[K]

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h_2} - T_{c_2}) - (T_{h_1} - T_{c_1})}{\ln[(T_{h_2} - T_{c_2})/(T_{h_1} - T_{c_1})]}$$

여기서, T_{h1} = Hot side inlet temperature[K]

 T_{h2} = Hot side outlet temperature[K]

- 36 -



 T_{c1} = Cold side inlet temperature[K]

 T_{c2} = Cold side outlet temperature[K]

3.2 가스연료선박용 재기화 시스템의 Eglycol과 물의 혼합비율에 따른 특성

3.2.1 시스템 구성을 위한 조성비 및 초기조건

본 시스템 특성분석에서는 압력과 온도가 각각 -163℃, 6.2bar인 LNG를 25℃, 5.5bar의 천연가스로 기체화 시킨 후 DF엔진으로 공급하는 저압방식 재기화 시스템을 구성하였으며, Table 2는 시간당 2.5ton의 LNG를 기화시킬 수 있는 재기화 시스템을 구성하기 위한 초기조건을 보인다.^[14]

1945

Table 2 Design specification of regasification system

| Design specification | | | |
|---|-------------|--|--|
| LNG supply temperature | -163 °C | | |
| LNG supply pressure | 6.2bar | | |
| LNG mass flow | 0.69kg/s | | |
| Eglycol water supply temperature | 50 ℃ | | |
| Jacket cooling water supply temperature | 90 °C | | |
| Eglycol water pump adiabatic efficiency | 85% | | |



| Component | Mole fraction[Vol %] |
|----------------|----------------------|
| Methane(CH4) | 0.881 |
| Ethane(C2H6) | 0.05 |
| Propane(C3H8) | 0.049 |
| Butane(C4H10) | 0.018 |
| Pentane(C5H12) | 0.001 |
| Nitrogen(N2) | 0.001 |

Table 3 Selected component and composition of LNG^[14]



Figure 26 LNG phase envelope^[14]

- 38 -



| Gas Fuelled Ship criteria and object of system design | | | | |
|---|-----------------------------------|--|--|--|
| Equation of state Peng-Robinson equation | | | | |
| Type of regasification | IFV type | | | |
| Heating medium | Eglycol, M/E jacket cooling water | | | |
| Eglycol / Water mixture ratio | 3:7 | | | |

Table 4 Purpose of design for regasification system

LNG의 조성비는 산지에 따라 조금씩 차이가 있는데, Table 3은 한국가스안전 공사에서 제공하는 보르네오산 LNG의 조성비로 약 88%가 메탄으로 이루어져 있다. Figure 26에서 Table 3의 조성비를 갖춘 LNG가 - 163℃, 6.2bar의 조건일 때 - 57.47℃의 임계온도와 64.69bar의 임계압력을 보이며, 그 이하에서의 bubble point와 임계점 이상일 때 dew point를 나타낸다.^[14]

Table 4는 시스템 설계 기준 및 목적을 보인다. 이를 통하여 DF엔진으로 공급되는 천연가스의 온도와 압력을 기준으로 각 Stream의 온도, 압력, 유량 등의 운전조건을 입력하여 재기화 시스템을 구성하고, Eglycol과 물의 혼합비에 따른 Cycle 유량 및 pump 소요동력 등의 설계변수를 도출하였다.



3.2.2 Eglycol과 물의 혼합비에 따른 시스템 특성

Figure 27은 HYSYS를 이용해 구성한 Gas Fuelled Ship용 재기화 시스템을 나타내며 LNG를 DF엔진에 공급해주기 전, Eglycol water로 closed loop를 만들어서 기체화 시키는 시스템을 보인다. 그리고 기화기에서 LNG와 열교환 으로 인한 Eglycol water의 온도 하강에 대비하여 메인엔진을 냉각하고 나온 90℃의 jacket cooling water를 사용하여 Eglycol water의 입구 온도를 50℃로 유지할 수 있도록 하였다. DF엔진으로 공급되는 천연가스의 압력을 유지해주기 위하여 필요한 PBU으로 LNG 저장탱크에서 나온 LNG가 vaporizer를 통해 DF엔진으로 공급되고 PBU를 통해 다시 LNG 저장탱크로 되돌아오면서 저장탱크의 압력을 6.2bar로 일정하게 유지하도록 구성하였다. 그리고 구성된 재기화 시스템을 바탕으로 하여 Eglycol과 물의 혼합비율을 조정하면서 변화되는 시스템의 특성을 확인하였다.













3.2.3 시스템 해석 결과

3.2.3.1 Eglycol과 물의 혼합비율에 따른 cycle 유량 및 pump 소요동력 분석

DF엔진으로 일정한 압력과 온도 및 유량의 천연가스가 공급될 때, Eglycol과 물의 혼합비율에 따라 필요한 cycle 유량 및 작동유체 펌프의 소요 동력을 구하고자 하였다. Figure 28은 Eglycol의 혼합비 증가에 따른 cycle 유량 및 작동유체 펌프의 소요 동력의 변화를 나타낸다. Eglycol의 혼합비가 증가함에 따라 Eglycol water의 혼합비열이 낮아지고, 유동성이 떨어지게 되면서 요구되는 cycle의 유량과 펌프의 소요 동력은 점점 증가함을 확인하였다. 물을 사용하였을 경우 cycle 유량과 펌프 소요 동력은 각각 12.5kg/s, 4.2kW가 요구되었고, Eglycol을 사용할 경우 물을 사용했을 경우와 대비, 1.65배의 cycle 유량이 1.54배의



Figure 28 Eglycol water mass flow(▲) & energy consumption(◇) of working fluid pump depending on the mixing ratio of Eglycol and water

- 42 -



| | Eglycol(30%) | Eglycol(70%) |
|---|--------------|--------------|
| Total power[kW] | 1,299.23 | 1,286.11 |
| Mass flow of Eglycol water[kg] | 15,520 | 44,352 |
| Total price[US dollar based on Feb. 2014] | 28,122 | 80,366 |

Table 5 Comparison of the prices depending on the mixture ratio of Eglycol

펌프 소요 동력이 더 요구되었다. 이를 바탕으로 시간당 2.5ton의 천연가스를 일정 하게 생산한다는 가정 하에 Eglycol의 혼합비가 30%일 때와 70%일 때의 초기 비용을 비교해 보았다.

Eglycol 혼합비가 30%일 때 필요한 총 동력은 1299.23kW이고, 이것은 kWh에 대한 가격과 현재 환율을 고려했을 때 약 \$695 이다. 혼합비가 70%일 경우 필요한 총 동력은 1286.11kW이고 동일한 방법으로 계산하면 \$688 임을 확인할 수 있다. 필요한 cycle 유량 중 Eglycol의 중량비가 30%라고 가정한다면 시간당 15,520kg의 유량이, 70%인 경우 44,352kg의 유량이 필요하다. 시중에서 판매되는 Eglycol 가격기준 비교해보면 Eglycol의 혼합비가 30%와 70%인 경우 각각 \$28,122, \$80,366로 혼합비가 30%에 대비하여 2.8배의 비용이 증가하게 된다. 이와 같이 Eglycol의 혼합비가 올라갈수록 요구되는 소요 동력은 증가하게 되나, 혼합되는 Eglycol의 가격이 상대적으로 크게 증가 하게 되면서 Eglycol의 중량비가 30% 일 때 대비, 70%일 때 약 2.8배 많은 초기비용이 들게 된다.^[14]





3.2.3.2 Eglycol과 물의 혼합비율에 따른 천연가스 및 Eglycol water의 온도 특성 분석

Figure 29 Engine supply and vaporizer outlet temperature depending on the mixing ratio of Eglycol and water

Figure 29는 재기화 시스템에서 기화기 및 2nd heater의 열교환기 크기를 고정 하고, DF엔진으로 공급되는 천연가스의 압력과, 유량 그리고 Eglycol water의 cycle유량이 일정하게 유지될 때, Eglycol의 혼합비에 따라 DF엔진으로 공급되는 천연가스의 온도변화를 보인다. Eglycol의 혼합비가 높아질수록 Eglycol water의 혼합비열이 낮아지기 때문에 열교환기로 공급되는 Eglycol water의 엔탈피가 작아 지게 되면서 공급되는 온도가 점점 감소되는 추이를 확인하였다. 기화기를 통과 하는 Eglycol water의 온도는 Eglycol water의 입구온도와 유량을 고정하였기 때문에, 입구온도 50℃를 유지하기 위하여 더 큰 열 낙차가 요구됨 을 확인하였다.^[14]

- 44 -





Figure 30 Duty of heat exchanger and energy consumption of working fluid pump depending on the mixing ratio of Eglycol and water

Figure 30은 동일조건에서의 혼합비에 따른 각 열교환기의 용량 및 작동유체 펌프의 소요동력 변화를 나타낸다. 혼합비에 증가할수록 전달되는 열량은 감소 하게 되어 열교환기 용량(●,▲) 펌프의 소요동력(▽) 모두 감소하는 추이를 확인하였다.

이와 같이 성능면에서 가열매체로 물만을 사용하였을 경우가 비열이 커서 더 효율적이라 판단이 가능하나 어는점이 0℃로 LNG와의 열교환시 얼게 되는 슬러싱(Slushing) 현상이 발생할 수 있으므로 LNG의 유량에 따른 Eglycol과의 적절한 혼합비가 요구된다.^[14]

- 45 -



3.2.4 가스연료선박용 재기화 시스템의 가열매체에 따른 특성 및 고찰

가스연료선박용 재기화 시스템에서 가열매체인 Eglycol water의 혼합비에 따라 다음과 같은 특성을 확인할 수 있었다.^[14]

- DF엔진으로 공급되는 천연가스의 압력과 온도, 유량이 일정하게 유지될 때, Eglycol의 혼합비율이 증가할수록 Eglycol water의 혼합비열이 낮아지게 되면서 물을 가열매체로 사용했을 때와 비교하여 1.65배 많은 cylce 유량과 1.54배 많은 소요 동력이 요구되었다.
- 2) 기화기의 크기를 고정한 뒤 혼합비율 조정 시 물만을 사용했을 때 엔진 으로 공급되는 천연가스의 온도 및 기화기 출구 측 Eglycol water의 온도는 가장 높았으며, Eglycol의 혼합비가 높아질수록 Eglycol water의 혼합비열은 낮아지기 때문에 열교환기로 공급되는 Eglycol water의 엔탈피가 작아지게 되면서 천연가스의 온도가 점차 하강하는 추이를 확인하였다.
- 3) 얻어진 결과를 통해 Eglycol water 혼합비에 따른 질량유량과 작동유체 펌프의 소요동력 및 엔진으로 공급되는 천연가스의 온도, 열교환기 용량 등의 기본변수를 도출할 수 있었고, 향후 실제 실험값을 기반으로한 시스템 설계 및 결과값을 비교분석한 연구가 추가된다면 보다 더 나은 실험결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.



3.3 LNG-FSRU용 재기화 시스템의 기화방식에 따른 특성

3.3.1 시스템 구성을 위한 조성비 및 초기조건

-157.9℃, 104bar의 LNG를 시간당 200ton 기화할 수 있는 재기화 시스템을 구성하였으며, Table 4, 5는 본 연구에서 적용된 LNG와 Eglycol water의 조성 성분을 나타낸다.

| Component | Mole fraction[Vol %] |
|----------------|----------------------|
| Methane(CH4) | 0.881 |
| Ethane(C2H6) | 0.05 |
| Propane(C3H8) | 0.049 |
| Butane(C4H10) | 0.018 |
| Pentane(C5H12) | 0.001 |
| Nitrogen(N2) | 0.001 |

Table 6 Selected component and composition of $\text{LNG}^{[12]}$

Table 7 Selected component and composition of Eglycol water^[12]

| Component | Mole fraction[Vol %] |
|-------------------------|----------------------|
| Eglycol(C2H6O2) | 0.3 |
| Water(H ₂ O) | 0.7 |



| Design specification | |
|---|---------|
| Vaporization capacity[ton/h] | 100~400 |
| Pump adiabatic efficiency[%] | 75 |
| Natural gas temperature [$^{\circ}$ C] | 5.5 |
| Ethylene glycol water temperature[$^{\circ}C$] | 17.05 |
| Sea water temperature in/out diff.[$^{\circ}C$] | 7 |

Table 8 Design specification of LNG-FSRU^[12]

Table 6은 시간당 200ton의 LNG를 기화시킬 수 있는 재기화 시스템을 구성 하기 위한 초기조건을 보인다.

| Table | 9 | Purpose | of | design | for | regasification | system |
|-------|---|---------|----|--------|-----|----------------|--------|
| | | | | | | | |

| LNG-FSRU criteria and object of system design | | | |
|---|----------------------------------|--|--|
| Equation of state | Peng-Robinson equation | | |
| Type of re-gasification | IFV type | | |
| Heating medium | Eglycol, Sea water, Boiler steam | | |
| Eglycol / Water mixture ratio | 3:7 | | |

Table 9는 LNG-FSRU용 재기화 시스템의 설계 기준 및 목적을 보인다. 재기화 방식은 육상기지의 경우 열교환시 Tube 벽에 Eglycol의 슬러싱 현상을 방지해 주기위하여 해수 기화방식을 적용하지만 경사나 기울임에 취약하고 접지면적이 커서 LNG-FSRU에 적용하기는 어렵기 때문에 중간열매체 기화방식을 적용 하였다. 이를 통하여 해수온도의 변화 및 해수 입·출구 온도의 변화 그리고 기화 성능에 따른 해수의 최소유량 및 steam의 양 등 가열원을 산정하였다.^[12]

Collection

3.3.2 기화방식에 따른 시스템 특성

3.3.2.1 Case 1 : 해수 직접기화방식의 구성

Figure 31은 IFV 기화방식 중 해수를 가열매체로 적용하여 시간당 200ton의 LNG를 기화할 수 있는 open loop형 기화방식이다.

해수온도 하강에 대비하여 스팀보일러의 steam을 추가 열원으로 사용하였으며, -157.9℃, 104bar의 LNG를 5.5℃의 천연가스로 기화시키기 위해서 25℃의 해수를 시간당 4,438ton의 유량으로 공급되도록 open loop를 구성하였다. 그리고 해 수온도의 하강에 대비하여 174.5℃의 보일러 steam을 추가열원으로 사용하여 closed loop를 갖춘 재기화 시스템을 설계하였다.^[12]



Figure 31 Simulation of a vaporization by Sea water^[12]

- 49 -



3.3.2.2 Case 2 : Eglycol water를 사용한 기화방식의 구성

Figure 32는 Figure 35과 동일한 IFV 기화방식 중 중간열매체로 Eglycol water를 적용한 closed loop 기화방식이다.

Case 1의 기화방식의 조건과 동일하게 -157.9℃, 104bar의 LNG를 5.5℃의 천연가스로 기화시키기 위하여 17.05℃, 2.5bar의 Eglycol water가 시간당 1,582ton 공급되도록 closed loop를 구성하고, Eglycol water의 온도를 유지해 주기 위해서 해수와 보일러 steam을 추가열원으로 사용하였다.^[12]



Figure 32 Simulation of a vaporization by Ethylene glycol water^[12]

- 50 -



3.3.3 시스템 해석 결과

3.3.3.1 해수온도에 따른 특성분석

Eglycol water을 사용한 기화방식에서 공급되는 해수의 온도가 하강함에 따라 보일러의 steam이 추가열원으로 필요할 때, 해수 온도별 필요한 steam의 양을 기화성능에 따라 비교분석하였다. Table 10은 LNG 기화성능을 시간당 200ton, 해수유량을 시간당 3,500ton으로 고정하였을 때 해수온도 하강에 따른 해수 입·출구 온도차 및 그에 따라 요구되는 steam의 양을 나타내었다.

Figure 33은 해수온도의 하강에 따른 LNG 기화성능별 요구되는 Steam의 양을 보인다. 시간당 200ton의 LNG를 기화하는 경우 해수온도가 17.05℃까지는 해수만 으로 시간당 200ton의 LNG를 5.5℃의 천연가스로 기화가 가능했지만, 해수온도가 더 낮아지게 되면 보일러 steam이 추가열원으로 필요하기 시작했다.

1945

| Sea water inlet temperature[°C] | Sea water in/out temperature difference[°C] | Required steam quantity[ton/h] |
|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| 17 | 4.9 | 0.4571 |
| 15 | 4 | 11.29 |
| 13 | 3.1 | 22.13 |
| 11 | 2.4 | 31.77 |
| 9 | 1.4 | 42.62 |
| 7 | 0.5 | 53.47 |
| 5.5 | 0 | 59.5 |

Table 10 Required steam flow rate depending on the sea water inlet temperature







Figure 33 Required steam quantity depending on the supply sea water temperature

그리고 5.5℃ 이하가 되면 육상으로 공급되는 천연가스의 온도를 5.5℃로 설계 하였기 때문에 해수는 더 이상 열매체로서의 기능을 상실하게 되었고 시간당 59.5ton의 steam의 양이 필요하였다. 동일한 조건으로 LNG의 기화성능을 시간당 각각 150ton, 100ton으로 조정해본 결과 150ton의 경우 14.2℃ 이상에서 기화성능이 100ton인 경우 11.3℃ 이상의 해수온도에서는 해수만으로 LNG 기화가 가능 하였다. 그 이하의 온도에서는 steam이 추가 열원으로 필요하였고 스팀만으로 Eglycol water의 온도를 유지하기 위해서 기화성능이 시간당 150ton의 경우 44.5ton의 steam이, 시간당 100ton의 기화성능의 경우 29.4ton의 steam이 필요함을 확인하였다.^[12]

- 52 -



3.3.3.2 해수온도차에 따른 특성분석

Case 1과 Case 2의 기화방식에서 LNG와 해수의 열교환시 해수의 입·출구 온도차에 따라 요구되는 해수의 최소유량을 구하였다.

특성분석을 위해 LNG의 온도와 압력, 유량의 입구조건을 -157.9℃, 104bar, 200 ton/h, 출구조건을 5.5℃, 100bar으로 고정하였다. 그리고 해수의 입구온도를 25℃로 설정한 후 출구의 온도를 조정하면서 온도차에 따라 요구되는 해수의 최소 유량을 확인하였다. Figure 34는 기화성능별 해수의 입·출구 온도차에 따라 필요한 최소 해수유량의 추이를 보인다.



Figure 34 Required sea water flow rate depending on the sea water temperature in/out difference

Collection



Figure 35 Quantity of heat depending on the sea water temperature in/out difference

시간당 200ton의 기화성능을 갖춘 기화기의 경우 해수의 온도차가 13℃인 경우 2,395ton/h의 해수유량이 필요했고, 150ton, 100ton의 기화성능의 경우에는 각각 시간당 1,796ton, 1,197ton의 해수가 필요함을 확인하였다. 일반적인 열교환기 설계 시 해수의 입·출구 온도차를 5~7℃로 적용하는데 Figure 34의 결과를 바탕으로 열교환기 설계시 온도차에 따른 해수의 최소유량을 확인할 수 있었다. Figure 35는 해수의 입·출구 온도차에 따라 해수에서 Eglycol water로 전달 되는 열량을 보인다. 온도차가 클수록 Eglycol water로 더 많은 열량을 전달해 줄 수 있기 때문에 공급되는 해수온도가 동일하다고 가정하였을 때 더 적은 해수의 유량으로도 Eglycol water의 온도를 유지할 수 있음을 확인하였다.^[12]

Collection

Table 11은 기화성능이 시간당 200ton일 때, Case 1과 Case 2에 요구되는 해수의 최소유량을 보인다. Case 2의 결과를 확인하기 위해 Eglycol water의 압력과 온도, 유량을 고정하였으며, Case 1과 Case 2의 해수유량 차이를 비교해본 결과 해수를 사용하는 기화방식이 Eglycol water를 사용하는 기화 방식 보다 시간당 최대 22ton, 최소 6ton의 해수유량이 더 요구되었다.

Table 11 Required mass flow of sea water depending on sea water in/out temperature difference^[12]

| Sea water temperature | Case 1 | Case 2 |
|-----------------------|------------|---------|
| in/out difference[°C] | [ton/h] | [ton/h] |
| 13 | 2,395 | 2,389 |
| 11 | 2,829 | 2,822 |
| 9 | 3,455 | 3,477 |
| 7 | 4,438 | 4,428 |
| 5 | 1945 6,200 | 6,188 |
| 3 BH | 10,280 | 10,270 |



3.3.3.3 기화능력에 따른 특성분석

시간당 200ton의 LNG를 기화성능을 갖춘 재기화 시스템에서 기화능력을 시간당 100ton에서 400ton까지 100ton 단위로 조정했을 때 필요한 해수와 Eglycol water, 그리고 200ton의 기화성능을 초과하게 될 경우 필요한 보일러 steam의 양을 구하였다.^[12] Figure 36은 해수유량이 기화성능 200ton/h에 맞도록 4,428ton/h으로 고정되어 있을 때 필요한 Eglycol water와 보일러 steam의 량을 나타낸다. Eglycol water의 온도와 압력을 고정하였기 때문에 시간당 100ton의 LNG 기화 시 시간당 790.9ton의 Eglycol water의 유량이 필요했고, 기화성능이 높아질수록 유량은 일정하게 증가되어, 시간당 400ton의 LNG 기화 시



Figure 36 Variation of the required mass flow rate(○,●) and steam quantity(◆) for sea water, Eglycol, steam(sea water mass flow=constant)^[12]

- 56 -





Figure 37 Variation of the required mass flow rate(\bigcirc, \bigcirc) and steam quantity(\diamondsuit) for sea water, Eglycol, steam(sea water mass flow \neq constant)^[12]

3,164ton/h의 Eglycol water 유량이 필요함을 확인하였다.^[27] 200ton/h의 기화 성능에 맞추어 해수유량을 고정하였기 때문에 200ton/h 초과 시 더 이상 유량이 증가하지 않았고, Eglycol water의 온도를 유지하기 위해 보일러 steam의 양이 증가하기 시작하였다. 250ton/h의 기화성능을 유지하기 위해 시간당 15.53ton의 steam이 필요했고, 400ton/h의 기화성능 시 시간당 62.3ton의 보일러 steam이 필요하였다.^[12]

Figure 37은 Case 2에서 해수의 유량을 고정하지 않았을 경우 기화성능을 시간당 100ton부터 400ton까지 조정하였을 때 필요한 해수 및 Eglcol water, 보일러 steam의 양을 나타낸다. 기화성능이 시간당 200ton 이하일 경우는 해수유량을 고정한 값과 동일한 유량을 얻을 수 있었고 기화성능이 200ton을 초과하게 되어도

- 57 -



steam은 필요하지 않았고, 해수유량이 증가하여 Eglycol water의 온도를 유지해 주었다. 기화성능이 시간당 250ton일 경우 시간당 5,535ton의 해수유량이 필요했고, 기화성능이 400ton까지 높아지면 시간당 8,855ton의 해수유량과 3,164 ton의 Eglycol water의 유량이 요구됨을 확인하였고, 기화성능에 따라 필요한 해수유량 및 Eglycol water의 유량을 산출하였다.^[12]

3.2.4 LNG-FSRU용 재기화 시스템의 기화방식에 따른 특성 및 고찰

LNG-FSRU용 재기화 시스템에서 해수를 사용한 open loop 기화방식과 closed loop 기화방식에서 열원온도 및 기화성능 변동에 따라 다음과 같은 특 성을 확인할 수 있었다.^[12]

- 해수를 사용하는 기화방식에서 25℃의 해수로 시간당 200ton의 LNG를 재기화 시키기 위해서는 시간당 최소 4,438ton의 해수유량이 필요하였고, Eglycol water를 사용하는 기화방식의 경우 공급되는 해수의 온도가 17.05℃ 이상에서는 시간당 최소 4,428ton의 해수유량이 요구되었고, 그 이하의 해수온도에서는 steam이 추가열원으로 필요하였다.
- 2) 기화성능을 시간당 200ton에서 150ton, 100ton으로 조정하였을 때, 공급 되는 해수온도가 기화성능에 따라 각각 17.05℃, 14.2℃, 11.3℃의 온도 에서는 해수만으로도 기화가 가능하였고, 해수온도가 이보다 더 낮아지게 되면 보일러 steam이 추가열원으로 요구되었다. 해수온도가 육상의 소비처로 전달되는 천연가스의 온도인 5.5℃보다 낮게 되면 steam만이 Eglycol water의 가열매체로 사용되어 시간당 59.51ton, 44.51ton, 29.44ton의 보일러 steam의 양이 필요함을 확인하였다.
- 3) Eglycol water를 사용한 기화방식에서 시간당 최대 200ton의 LNG가 기화





할 수 있도록 해수유량을 고정한 경우와 해수의 유량을 기화성능에 따라 바뀔 수 있는 경우로 나누어 요구되는 steam의 양과 해수의 양을 산출하였다. LNG를 시간당 400ton 기화시키기 위해서는 시간당 62.3ton의 steam의 양이 요구되었고, 해수의 양이 기화성능에 따라 바뀔 수 있을 경우 동일한 조건에서 기화성능이 시간당 400ton일 때 시간당 8,855ton의 해수와 3,164ton의 Eglycol water의 유량이 필요하였다.

4) 얻어진 결과를 통해 해수온도의 변화 및 해수 입·출구 온도 변화, 그리고 기화성능에 따른 Steam의 양과 해수 최소유량 등 가열원을 산정할 수 있었다. 현재 공개되지 않은 비공개 자료를 시뮬레이션 결과값과 내부적으로 검증한 결과 약 2% 내외의 설계오차를 확인하였으며, 본 논문의 값의 차이가 실제 실험값과 크게 차이가 없을 것으로 사료된다.




제 4 장 결론

본 논문은 가스연료선박 및 LNG-FSRU용 재기화 시스템의 가열매체 변화에 따른 특성을 확인하기 위한 연구로, HYSYS V8.0을 이용하여 가스연료선박과 LNG-FSRU에 적용된 재기화 시스템을 구성하고, LNG를 기화시키기 위한 가열매체의 변화에 따라 다음과 같은 특성을 알 수 있었다.

MARITME

- (1) 가스연료선박용 재기화 시스템의 Eglycol water 혼합비에 따른 특성
 - DF엔진으로 일정한 압력과 온도 및 유량의 천연가스가 공급될 때, Eglycol의 혼합비율이 증가할수록 Eglycol water의 혼합비열은 감소하게 되었고 유동성이 떨어지게 되면서 요구되는 cycle 유량과 펌프 소요동력은 점점 증가함을 확인 하였다. 물만을 사용하였을 때 대비 Eglycol을 사용할 경우 1.65배의 cycle 유량이, 1.54배의 펌프 소요 동력이 요구됨을 확인하였다.
 - 2) 기화기의 크기를 고정하였을 때, Eglycol의 혼합비가 증가할수록 Eglycol water의 혼합비열은 낮아지기 때문에 열교환기로 공급되는 Eglycol water의 엔탈피가 작아지게 되었다. 물만을 가열매체로 사용할 경우 엔진으로 공급되는 천연가스의 온도 및 기화기 출구 측 Eglycol water의 온도는 가장 높았으며, Eglycol의 혼합비가 증가할수록 Eglycol water의 혼합비열은 낮아지기 때문에 열교환기로 공급되는 Eglycol water의 엔탈피가 작아지게 되면서 천연가스의 온도가 점차 하강하는 추이를 확인하였다.
 - 3) 얻어진 결과를 통해 Eglycol water 혼합비에 따른 질량유량과 작동유체펌프의 소요동력 및 엔진으로 공급되는 천연가스의 온도, 열교환기 용량 등의 기본 변수를 도출하였다.



(2) LNG-FSRU용 재기화 시스템의 기화방식에 따른 특성

- 해수를 사용하는 open loop 기화방식에서 25℃의 해수로 시간당 200ton의 LNG를 재기화 시키기 위해서는 시간당 최소 4,438ton의 해수유량이 필요 하였고, Eglycol water를 사용하는 closed loop 기화방식의 경우 공급되는 해수의 온도가 17.05℃ 이상에서는 시간당 최소 4,428ton의 해수유량이 요구 되었고, 그 이하의 해수온도에서는 steam이 추가열원으로 필요하였다.
- 2) 기화성능을 시간당 200ton에서 150ton, 100ton으로 조정하였을 때, 해수만으로 LNG의 기화가 가능한 시점의 해수온도를 산정하였고, steam이 추가 열원으로 필요한 시점, 그리고 steam만을 사용하였을 경우 기화성능에 따라 필요한 steam의 양을 확인하였다.
- 3) Eglycol water를 사용한 closed loop 기화방식에서 시간당 최대 200ton의 LNG가 기화할 수 있도록 해수유량을 고정한 경우와 해수의 유량을 기화성능에 따라 바뀔 수 있는 경우로 나누었을 경우 기화성능이 시간당 200ton보다 초과 되는 경우 필요한 해수 및 Eglycol, steam의 양을 산정하였다.
- 4) 얻어진 결과를 통해 해수온도의 변화 및 해수 입·출구 온도 변화, 그리고 기화성능에 따른 Steam의 양과 해수 최소유량 등 가열원을 산정하였다.

현재 Parameter 값의 변화에 따라 시스템 설계변수를 도출한 연구는 전무한 것으로 보고되고 있기 때문에, 향후 조선소의 실제 실험결과 등의 관련 자료를 확보하고 이를 바탕으로 시스템 설계 결과와 비교분석한 연구를 수행해나갈 예정이다.



참고문헌

- Choi, W.J., 2014. Technology Assessment and Economic Analysis of Green Ships Fuelled by Liquefied Natural Gas(LNG). *Graduate school of Korea Maritime and Ocean University*, 2014.02.
- [2] Kim, J.H., 2013. "Introduction of LNG propulsion line with market changes direction and shipping services," *Journal of Korea Maritime Institute*, Vol.3 No.2, 2013 pp 103-119.
- [3] Korea Gas Safty Corporation, <u>http://www.kgs.or.kr</u>
- [4] Im, J.G, Jhun, H.I, Kim, T.I, Lee, U.K, & Kim. J.H., 2011. Future Ship and Advent of its Business Model, *Journal of Korea Maritime Institute*, Vol.2011 No.12-4, 2011 pp 1-189.
- [5] http://ko.wikipedia.org/wiki[Accessed 17 Feb 2014]
- [6] Incheon Port Authority, http://www.icpa.or.kr[Accessed 2 Mar 2014]
- [7] DSME, Development of LNG Fueled Propultion System for Conrainerships and Tankers, 2011.
- [8] Jang, H.S., 2014. A Study on the Prediction of NOx Emission for Marine Gas Engines, Graduate school of Korea Maritime and Ocean University, 2014.02.
- [9] DSME, 2010. Green Ship and Development of Maritime Transfortation, 14,10,2010.
- [10] Lee, S.J., 2005. Optimal Design of LNG FSRU under Fluctuation in Temperature of Heat Source, *Graduate school of Korea Advanced Institute of Science and Technology*, 2005. 12. 26.

Collection

- [11] Oh, S.D., Correspondent , Construction Technology News, http://www.ctman.kr/paper/newsno=3701
- [12] Lee, Y.H, Kim, Y.T, & Kang, H.G., 2014. An Analysis on the Characteristics of Regasification System for LNG-FSRU depending on the Changes in Performance with Vaporization and Temperature of the Heat Source, *Journal of the Korean society of Marine Engineering* [under examination]
- [13] http://www.dnv.co.kr[Accessed 21 Dec 2013]
- [14] Lee, Y.H, Kim, Y.T, & Kang, H.G., 2014. An Analysis on the Characteristics of Regasification System for Gas Fuelled Ship According to the mixing ratio of Egycol and water *Journal of the Korean society of Marine Engineering* [under examination]
- [15] Theodore, L. Brown, H, Eugene. LeMay, Jr, & Bruce, E. Bursten., Properties of the solution General Chemistry, the central science 8th Edition, nokmun-Dang, pp 500.
- [16] http://www.Engineering ToolBox.com[Accessed 8 Nov 2013]
- [17] Aspen HYSYS Operation Guide (1,2)
- [18] <u>http://www.krs.co.kr</u>[Accessed 2 Apr 2014]



감사의 글

5년간의 승선생활을 마치고 회사생활을 하던 중 한국해양대학교와 인연이 닿아 시작했던 대학원 생활은 어느새 제 생활의 전부가 되었습니다. 부족한 저에게 석사생활을 잘 마칠 수 있도록 힘이 되어주신 고마운 분들이 많이 계십니다.

먼저 저의 지도교수님인 김유택 교수님, 제가 힘들 때 고민도 들어주시고 좋은 일에는 누구보다 먼저 기뻐해주시던 스승님께 머리 숙여 감사의 말씀을 올립 니다. 그리고 인생에 도움되는 말씀도 많이 해주시고 논문을 쓰는데 많은 도움을 주신 강호근 교수님과 부족한 논문을 세심하게 다듬어 완성도를 높이기 위해 가르침을 주신 임태우 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

유동에너지연구실에서 보낸 시간동안 항상 저에게 웃으시며 파이팅을 외쳐 주신 태진형님, 문오형님, 힘들때마다 힘을 실어주던 도엽이형, 용석이형에게 고마운 마음을 전합니다. 그리고 연구실에서 함께 동고동락했던 종권이와 상원이, 학근이, 보형이 그리고 제 인생에서 빼놓을 수 없는 친구인 기성이, 효성이, 세균이 모두에게 더불어 감사의 마음을 전합니다.

1945

그리고 대학교에서부터 늘 닮고 싶었던 저의 은사님이신 존경하는 최부홍 교수님께도 감사의 말씀을 전합니다.

마지막으로 사랑하는 우리가족들, 존경하는 우리 아버지, 사랑하는 우리 엄마, 내가 늘 미안하고 많이 아끼는 사랑하는 우리누나, 착한 제 반쪽 지현이에게 이 모든 영광을 바칩니다.

새로운 출발선에 선 지금 앞으로도 제게 주신 은혜 잊지 않고 멋지고 당당 하게 앞으로 나아가겠습니다. 모두 너무 감사드립니다.

> 2014년 7월 1일 유동에너지실험실에서 이 윤 호 올림



Collection