

Gas Fuelled Ship용 재기화 시스템의 Eglycol Water

혼합비율에 따른 시스템 특성분석

이윤호¹ · 김유탉[†] · 강호근²

(원고접수일 : 2014년 3월 11일, 원고수정일 : 2014년 6월 24일, 심사완료일 : 2014년 8월 28일)

An analysis on the characteristics of regasification system for gas fuelled ship depending on the mixing ratio of eglycol and water

Yoon-Ho Lee¹ · You-Taek Kim[†] · Ho-Keun Kang²

요약: 최근 대기오염 방지를 위한 각종 규정들이 강화되고, 연료유 가격의 상승으로 인해 LNG(Liquefied Natural Gas)를 선박의 추진연료로 사용하는 Gas Fuelled Ship의 등장은 필연적이게 되었다. 본 연구에서는 Gas Fuelled Ship에서 연료로 사용되는 LNG를 DF(Dual-Fuel)엔진에 공급하기 전 기화 시켜주기 위해 Eglycol water(Ethylene glycol water)를 가열매체로 사용한 재기화 시스템을 구성하고, Eglycol과 물의 혼합비율에 따른 시스템 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

DF엔진으로 공급되는 천연가스의 압력과 온도 그리고 유량이 일정하게 유지될 때 Eglycol의 혼합비율이 증가할수록 Eglycol water의 혼합비율이 낮아지게 되면서 물만을 사용했을 때와 대비하여 1.65배 많은 cycle 유량과 1.54배의 펌프 소요 동력이 요구됨을 확인하였고, vaporizer의 크기를 고정한 후 Eglycol의 혼합비에 따른 DF엔진으로 공급되는 천연가스의 온도 및 vaporizer 출구측 Eglycol water의 온도를 산정하였다.

주제어: 재기화 시스템, 가스추진선, 에틸렌글리콜, 액화천연가스, 기화기

Abstract: Recently, the regulations of the Local and Global for a variety of air pollution prevention has been enhanced by the steep rise in fuel oil prices. So, the appearance of Gas Fuelled Ships became necessary. In this study, we configured a regasification system which uses Eglycol water as a heating medium to evaporate before being supply fuel to the DF engine, then we analysed the system properties according to the Eglycol water mixing ratio. The results were as follows.

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. 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.

Keyword: regasification system, Gas Fuelled Ship, Ethylene glycol, Liquefied Natural Gas, vaporizer

† Corresponding Author: Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: kimyt@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4258

1 Department of Marine System Engineering, Graduate School of Korea Maritime and Ocean University, E-mail: lyh1005@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4862

2 Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: hkkang@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4260

1. 서론



Figure 1: Eco-Nuri of Gas Fuelled Ship [1]

전 세계 교통은 물론 해운분야에서도 저탄소, 인체에 유해한 배기가스 배출의 제한이 활발히 논의되고 있다. 현재 국제해사기구와 정부 당국은 선진국 해역을 중심으로 NOx(질소산화물), SOx(황산화물) 그리고 CO₂(이산화탄소)와 분진 등의 배출규제를 강화하고 있으며, 이에 따라 LNG를 선박의 연료로 추진동력을 발생시키는 Gas Fuelled Ship은 이러한 전 세계적 SOx 배출 규제와 CO₂, 분진 등을 저감하는 가장 현실적인 대안의 하나로 판단되고 있다[2].

Gas Fuelled Ship은 LNG를 연료로 추진 동력을 발생시키는 선박으로 LNG 가격이 선박용 벙커C유 가격에 비해 저렴하고, 가격급등 없이 안정적인 가격 추이를 보이는 장점이 있고[3], 유류를 사용하는 선박에 비해 선박 운항 시 대기 중 오염물질 배출을 큰 폭으로 저감할 수 있다는 장점이 있다[4]. 그리고 소음이 적고 해상에서 유류 누출로 인한 해양오염의 위험이 적다는 큰 장점을 갖고 있다[2].

Figure 1은 2013년 국내 및 아시아에서 건조된 최초의 Gas Fuelled Ship인 에코누리(Eco-Nuri)호이다. 인천항만공사의 보도자료에 의하면 에코누리호는 운항시간 1,000시간 기준 디젤연료에 비해 NOx는 92%, SOx는 100%, 분진은 99%, CO₂는 23% 감소 성능을 자랑하며, 연료비를 연간 1억원정도 절감할 수 있다고 보고된다[1].

Gas Fuelled Ship의 연료로 사용되는 LNG는 가스전에서 얻어진 천연가스를 저장과 이송을 용이하게

하기 위해서 -163℃의 극저온 상태로 액화시킨 가스를 뜻하는데, 극저온의 LNG를 엔진에 공급하기 위해서는 DF엔진에 요구되는 온도(약20~40℃)까지 상승시켜야 한다[5]. 이때 엔진의 폐열이나 고온의 스팀을 사용해 상온의 천연가스 상태로 만들어주기 위해서는 일종의 열교환기인 vaporizer(기화기)가 필요하고, LNG를 DF엔진으로 보내줄 때 상온의 기체 상태로 다시 기화시켜 공급 해준다하여 재기화 라고 한다.

이러한 Gas Fuelled Ship에 적용되는 재기화 시스템과 관련하여 Lee. 등[6]은 LNG연료추진선박 및 LNG 연료공급시스템에 대한 연구를 수행하였고, Kim. 등[7]은 LNG를 연료로 하는 가스추진선박의 기술동향 및 분석에 대한 연구를 수행하였다.

하지만 종래의 연구들은 재기화에 필요한 여러 특성치의 변화에 대한 연구는 거의 수행되지 않았기 때문에 본 논문에서는 Eglycol water의 혼합비에 따른 여러 특성에 관한 연구를 수행하였다.

시스템설계를 위하여 산업분야의 공정설계 프로그램으로 널리 사용되고 있는 AspenTech사의 HYSYS V8.0을 사용하여 Eglycol water를 가열매체로 사용한 재기화 시스템을 구성하였고, Eglycol water의 공급온도를 유지 해주기 위해 main engine jacket cooling water를 추가열원으로써 사용하였다.

시스템 해석에는 여러 가지 탄화수소 화합물로 이루어진 천연가스의 상평형을 계산하기 위하여 기존의 기체방정식 중 비교적 정확성이 높고 각 성분 간의 상호작용에 대한 관계가 포함되어 있는 Peng-Robinson식을 사용했다. Peng-Robinson 방정식 [6],[12]은 열 해석에서 가장 널리 사용하는 상태방정식이며 다음과 같다.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (1)$$

그리고 이를 기반으로 하여 Eglycol과 물의 혼합비에 따라 cycle 유량 및 작동유체 펌프의 소요 동력 및 DF엔진으로 공급되는 천연가스의 온도와 vaporizer를 통과한 Eglycol water의 온도를 구하고 그 특성을 확인하였다.

2. 재기화 시스템 작동유체의 특성

2.1 LNG의 특성분석

Gas Fuelled Ship용 재기화 시스템은 엔진에 요구되는 압력과 온도 및 유량 조건에 따라 고압방식 재기화 시스템과 저압방식 재기화 시스템으로 나뉘어진다.

본 시스템 특성분석에서는 압력과 온도가 각각 -163°C , $6.2\text{bar}(620\text{kPa})$ 인 LNG를 25°C , $5.5\text{bar}(550\text{kPa})$ 의 천연가스로 기체화 시킨 후 DF엔진으로 공급하는 저압방식 재기화 시스템을 구성하였다.

LNG의 조성비의 경우 산지에 따라 조금씩 차이가 있는데, **Table 1**은 한국가스안전공사에서 제공하는 보르네오산 LNG의 조성비를 보이고, **Figure 2**에서 보르네오산 LNG의 조성비를 가진 -163°C , 6.2bar 의 LNG일 때 -57.47°C 의 임계온도와 64.69bar 의 임계압력을 보이며, 그 이하에서의 bubble point와 임계점 이상일 때 dew point를 나타낸다[8].

Table 1: Selected component and composition[10]

Component	Mole fraction[Vol %]
Methane(CH_4)	0.881
Ethane(C_2H_6)	0.05
Propane(C_3H_8)	0.049
Butane(C_4H_{10})	0.018
Pentane(C_5H_{12})	0.001
Nitrogen(N_2)	0.001

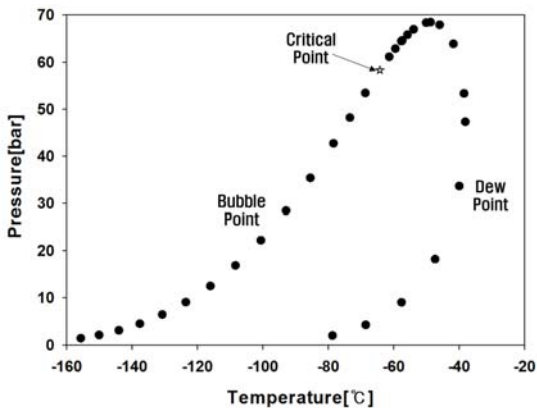


Figure 2: LNG Phase Envelope

Table 2: Design specification of regasification system

Design specification	
LNG supply temperature	-163°C
LNG supply pressure	620kPa
LNG mass flow	0.69kg/s
Eglycol water supply temperature	50°C
Jacket cooling water supply temperature	90°C
Eglycol water pump adiabatic efficiency	85%

Table 2는 시간당 2.5ton 의 LNG를 기화시킬수 있는 재기화 시스템을 구성하기 위한 초기조건을 보인다. DF엔진으로 공급되는 천연가스의 온도와 압력을 기준으로 각 Stream의 온도, 압력, 유량 등의 운전 조건을 입력하여 재기화 시스템을 구성하고, Eglycol과 물의 혼합비율을 조정해보면서 그에 따른 시스템 특성을 분석하였다. Eglycol water 펌프의 효율은 85%로 가정하고 일정하게 고정하였다.

2.2 Eglycol의 특성분석

Eglycol water는 Eglycol에 물을 혼합하여 생성된 유기혼합물로서 두 개의 탄소 각각에 OH가 한 개씩 결합되어 있는 $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ 의 간단한 화학식구조를 가지고 있고, **Table 3**은 Ethylene glycol의 고유특성을 나타낸다.

Eglycol만으로 가열매체로 사용하지 않고 물과 혼합해서 사용하는 이유는 순수한 Eglycol은 어는점이 -12°C 인 반면, 물과 혼합해주면 Eglycol이 물 분자끼리의 수소결합을 방해해서 순수한 Eglycol 보다 더 낮은 어는점을 갖기 때문이다. 그리고 가열매체로 물만을 사용할 경우 비열이 가장 크고 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있으나, 1기압에서 100°C 가 되면 끓게 되고 금속을 부식시키며, 0°C 이하에서는 얼게 되어 체적이 10% 정도 팽창하는 문제가 있다. 그렇기 때문에 Eglycol을 혼합해줌으로써 동결방지는 물론 전해질이 아니기 때문에 녹 발생을 방지해주어서 Eglycol을 물과 혼합하여 사용한다.

Table 3: Properties of Eglycol\

Eglycol specification	
Molecular formula	C ₂ H ₆ O ₂
Molar mass	62.068g/mol
Density	1.1132g/cm ³
Melting point	-12.8℃(260K)
Boiling point	197.3℃(470K)
Viscosity	1.61x(10-2Ns)/m ²

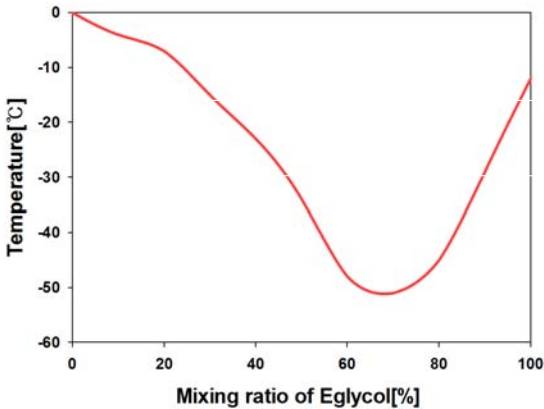


Figure 3: Freezing point depending on the mixing ratio of Eglycol and water

Figure 3은 Eglycol의 혼합비에 따른 물의 어는점 변화를 나타낸 것으로 순수한 물의 경우 0℃에서 얼게 되지만, Eglycol과 섞어서 사용할 경우 혼합비에 따라 어는점이 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Eglycol의 비율이 70%, 물의 비율이 30%가 될 때 Eglycol water의 어는점이 영하 50℃이하까지 낮아지다가 그이상이 되면 어는점이 다시 올라가는 것을 확인할 수 있으며, 순수한 Eglycol의 어는점은 약 -12℃임을 볼 수 있다.

이와 같은 현상은 어는점 내림(freezing point depression)으로 설명할 수 있다.

어는점 내림이란 용질이 녹아 있는 용액의 어는점이 순수 용매일 때보다 낮아지는 물리 현상으로 용액의 증기압이 순수 용매일 때보다 낮아지기 때문에 발생하게 된다.

물에 Eglycol을 넣게 되면 Eglycol의 증기압이 같은 온도에서 물보다 작기 때문에 증기압이 낮아지

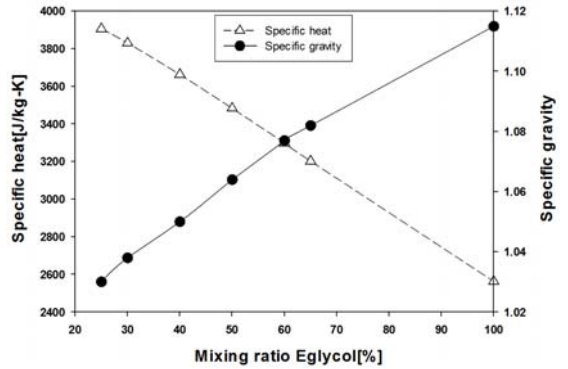


Figure 4: Specific heat and gravity depending on the mixing ratio of Eglycol and water

게 되는데, 용액의 농도가 진해질수록 용액의 삼중점이 내려가게 되면서 고체와 액체의 평형 온도를 낮추어 어는점도 낮아지게 된다. 비휘발성 용질을 녹인 물은 용액의 경우 용액의 어는점은 용액 속에 남아 있는 용질 입자 수에 비례해 낮아지게 된다.

$$\Delta T_f = mK_f \tag{2}$$

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

m = Molal density(mol/kg)

K_f = Freezing point depression constant(°C/m)

상기 식 (2)는 ΔT_f 즉, 어는점 내림온도를 구하는 값으로 molal농도 m 과 molal 어는점 내림상수 값인 K_f 의 곱으로 구할 수 있다[8]. 일정 용매에 대한 1molal 용액에서의 어는점 내림은 용질의 종류에 관계없이 일정한 값을 갖는데, 이를 어는점 내림상수라고 한다. 본 식에서는 열교환시 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, 영하 15℃로도 슬러시현상 없이 충분히 열 교환이 일어날 수 있다고 가정하였다. 이때 필요한 혼합비율을 식 (2)을 사용하여 계산해보면, $\Delta T_f=10℃$, $K_f=1.86℃/m$ 일 때 molal농도 m 은 8.06mol/kg이 된다. 이때 필요한 Eglycol의 혼합비는

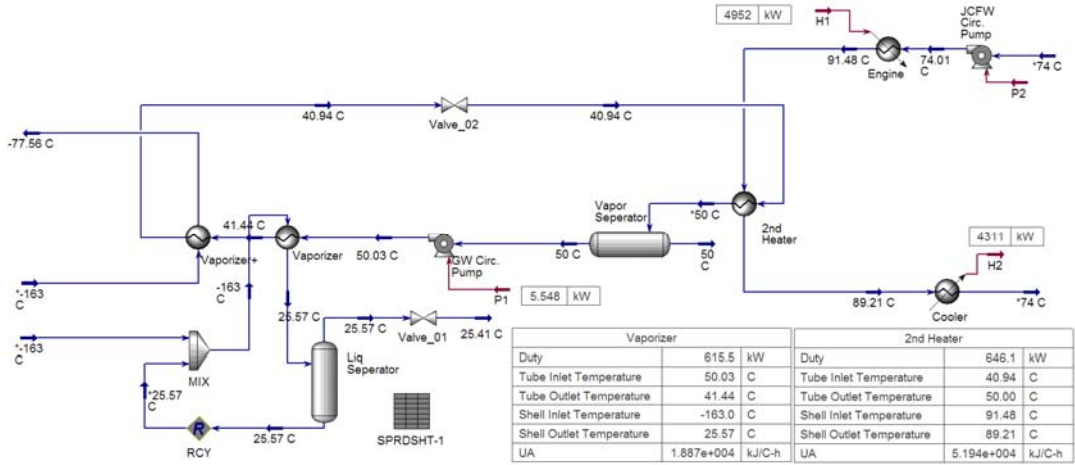


Figure 5: Simulation of LNG regasification system depending on the mixing ratio of Eglycol and water

8.06mol/kg x 62g/mol = 500g/kg이 된다.

$\Delta T_f=10^{\circ}\text{C}$, $K_f=1.86^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 일 때 molal농도 m 은 8.06mol/kg이 된다. 이때 필요한 Eglycol의 혼합비는 8.06mol/kg x 62g/mol = 500g/kg이 된다.

따라서, 물 1kg 당 500g의 Eglycol을 넣어주어야지만 -15°C 의 외부 조건에도 Eglycol water가 얼지 않음을 확인하였고, 이는 물과 Eglycol을 약 6.7 : 3.3으로 섞은 혼합비율과 같다. 그러므로 열 교환하는 작동 유체의 조건에 따라 Eglycol과 물의 적절한 혼합비율을 사용해야 할 것으로 사료된다.

Figure 4는 Eglycol water의 온도 50°C 기준, Eglycol과 물의 혼합비에 따른 비열과 비중의 변화추이를 보인다. 물에 Eglycol의 혼합비가 증가할수록 물보다 비열이 낮고 비중이 큰 Eglycol의 비율이 증가하게 되면서 혼합비열의 감소추이 및 혼합비중의 증가되는 결과를 보인다[9].

2.3 재기화 시스템의 공정설계

Figure 5는 HYSYS를 통해 구성한 Gas Fuelled Ship용 재기화 시스템을 보이며, LNG를 DF엔진에 공급해주기 전, Eglycol water로부터 열을 흡수해 DF엔진으로 공급해준다. DF엔진으로 공급되는 천연가스의 압력을 유지해주기 위하여 필요한 PBU(Pressure Build-up Unit)으로 LNG 저장탱크에서 나온 LNG가 vaporizer를 통해 DF엔진으로 공급되고 PBU 역할을

하는 Vaporizer+를 통해 다시 LNG 저장탱크로 되돌아오면서 저장탱크의 압력을 6.2bar로 일정하게 유지하도록 구성하였다. 그리고 vaporizer에서 LNG와 열 교환으로 인한 Eglycol water의 온도 하강에 대비하여 메인엔진을 냉각하고 나온 jacket cooling water를 사용하여 Eglycol water의 입구 온도를 50°C 로 유지할 수 있도록 하였다. 구성된 재기화 시스템을 바탕으로 하여 Eglycol과 물의 혼합비율을 조정하면서 변화되는 시스템의 특성을 확인했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Eglycol과 물의 혼합비율에 따른 cycle 유량 및 펌프 소요동력 분석

DF엔진으로 일정한 압력과 온도 및 유량의 천연가스가 공급될 때, Eglycol과 물의 혼합비율에 따라 필요한 cycle 유량 및 Eglycol water 펌프의 소요 동력을 구하고자하였다.

Figure 6은 Eglycol의 혼합비 증가에 따른 cycle 유량 및 작동유체 펌프의 소요 동력의 변화를 나타낸다.

DF엔진으로 공급되는 천연가스의 온도와 압력 유량을 일정하게 고정하였기 때문에 Eglycol water의 공급되는 열량은 혼합비에 관계없이 항상 일정해야 하지만 Eglycol의 혼합비가 증가할수록 혼합

비열이 감소하기 때문에 동일한 열량을 공급하기 위해서는 그만큼 더 많은 질량유량이 요구된다. 그리고 질량유량이 증가함에 따라 작동유체 펌프의 소요동력도 같이 증가하게 된다. 물만을 사용하였을 경우 cycle 유량과 펌프 소요 동력은 각각 12.5kg/s, 4.2kW가 요구되었고 Eglycol을 사용할 경우 물을 사용했을 경우와 대비하여 1.65배의 cycle 유량이, 1.54배의 펌프 소요 동력이 더 요구되었다.

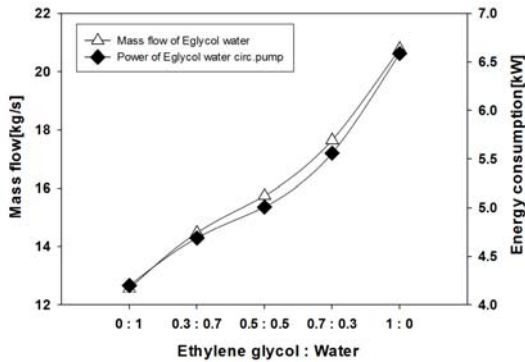


Figure 6: Eglycol water mass flow & energy consumption of working fluid pump depending on the mixing ratio of Eglycol and water

3.2 Eglycol과 물의 혼합비율에 따른

천연가스 및 Eglycol water의 온도 특성 분석
 재기화 시스템에서 vaporizer 및 2nd heater의 열교환기 크기를 고정하고, 엔진으로 공급되는 천연가스의 압력과 유량 그리고 Eglycol water의 cycle유량이 일정하게 유지될 때, Eglycol의 혼합비에 따라 DF엔진으로 공급되는 천연가스의 온도변화를 비교하였다. Figure 4에서 보인 결과와 같이 Eglycol의 혼합비가 증가할수록 Eglycol water의 혼합비열이 감소하게 되면서 Figure 7과 같이 열교환기로 공급되는 Eglycol water의 엔탈피가 작아지게 되어 공급되는 온도가 점점 감소되는 추이를 확인했다.

vaporizer를 통과하는 Eglycol water의 온도는 Figure 9에 보이는바와 같이 Eglycol water의 입구온도와 유량을 고정하였기 때문에, 입구온도 50℃를 유지하기 위해서 더 큰 열 낙차가 요구됨을 확인하였다.

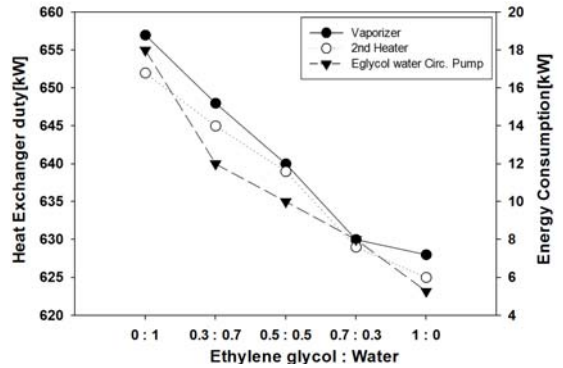


Figure 7: Engine supply and vaporizer outlet temperature depending on the mixing ratio of Eglycol and water

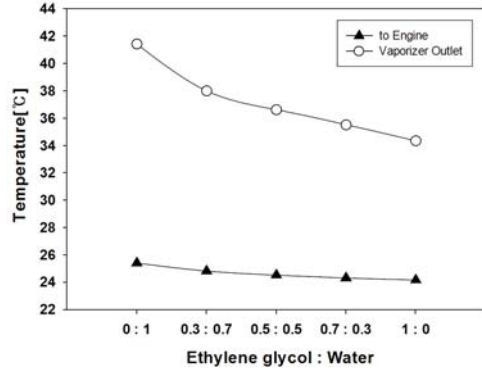


Figure 8: Duty of heat exchanger and energy consumption of working fluid pump depending on the mixing ratio of Eglycol and water

가열매체로 물만을 사용할 경우 비열이 가장 높아 동일출력 대비 더 적은 양으로도 천연가스의 온도유지가 가능하나 어는점이 0℃인 물은 극저온인 LNG와 열교환시 얼어버리는 슬러싱(slushing)현상을 초래할 수 있기 때문에 가열매체인 Eglycol water가 얼지 않는 선에서 어는점내림 계산을 통해 외부조건에 알맞은 Eglycol의 혼합비를 결정하는 것이 중요할 것으로 판단된다. 본 논문의 조건에서는 -163℃, 6.2bar, 0.69kg/s의 LNG를 기화하기 위해서는 Eglycol과 물을 3:7 비율로 혼합하여도 슬러싱현상 없이 시스템이 유지되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 Gas Fuelled Ship용 재기화 시스템을 구성하고 LNG를 천연가스로 재기화하기 위해 가열매체로 사용하는 Eglycol water의 혼합비에 따른 특성분석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

DF엔진으로 공급되는 천연가스의 압력과 온도 그리고 유량이 일정하게 유지될 때 Eglycol의 혼합비율이 증가할수록 Eglycol water의 혼합비열이 낮아지게 되면서 물만을 사용하였을 경우 cycle 유량과 펌프 소요 동력은 각각 12.5kg/s, 4.2kW가 요구되었고 Eglycol을 사용할 경우 물을 사용했을 경우와 대비하여 1.65배의 cycle 유량이, 1.54배의 펌프 소요 동력이 더 요구됨을 확인하였다. 그리고 vaporizer의 크기를 고정한 후 Eglycol의 혼합비에 따른 DF엔진으로 공급되는 천연가스의 온도 및 vaporizer 출구측 Eglycol water의 온도를 산정하였다.

참고문헌

- [1] Incheon Port Authority, <http://www.icpa.or.kr>, Accessed February 5, 2014 (in Korean).
- [2] J. H. Kim, "Introduction of LNG propulsion line with market changes direction and shipping services," Journal of Korea Maritime Institute, vol. 3, no. 2, pp. 103-119, 2013 (in Korean).
- [3] J. G. Im, H. J. Jhun, T. I. Kim, U. K. Lee, and J. H. Kim "Future ship and advent of its business model," Journal of Korea Maritime Institute, vol. 2011, no. 12-4, pp. 1-189, 2011 (in Korean).
- [4] DSME, "Development of LNG fuelled propulsion system for conrainerships and tankers," vol. 2011, no. 10, 2011 (in Korean).
- [5] DSME, "Green ship and development of maritime transfortation," vol. 2011, no. 10, 2011 (in Korean).
- [6] J. I. Lee, "Development and application of OTS for LNG fuelled ship," Proceeding of the Society of Naval Architects of Korea autumn Meeting, pp. 227-229 (in Korean).
- [7] H. S. Kim, K. P. Kim, and D. H. Kim "A status of LNG fuelled ship" Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, vol. 2013, no.11, pp. 247-249, 2013 (in Korean).
- [8] T. L. Brown, H. E. LeMay, and J. B. E. Bursten, Properties of the Solution, General Chemistry, the Central Science 8th Edition, Nokmun-Dang, p. 500, 2007.
- [9] S. J. Kim, K. I. Nam, and J. S. Kim, "Analysis on design concept of LNG regasification system," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 2012, no. 5, pp. 1680-1683, 2012 (in Korean).
- [10] Korea Gas Safty Corporation, <http://www.kgs.or.kr>, Accessed February 19, 2014 (in Korean).
- [11] <http://www.EngineeringToolBox.com>, Accessed March 12, 2014 (in Korean).
- [12] A. S. Dave, J. M. Lee, Y. K. Yeo, S. C. Lee, and S. Y. Moon, Process Desing Using HYSYS, A-Jin Publisher, 2008 (in Korean).