



LNG 선박에서 천연가스 재액화공정의 재액화량에 관한 연구

고병석 · 김범수 · 이현석 · 강윤진* · 김민섭** · †고재욱

광운대학교 화학공학과, *대림대학 소방안전관리전공, **한국가스안전공사 가스안전연구원
(2010년 2월 3일 접수, 2010년 2월 26일 수정, 2010년 2월 26일 채택)

Study of LNG Reliquefaction Process in LNG Carriers

Byoung Seok Ko · Bum Su Kim · Heon Seok Lee
Yun Jin Kang* · Min Seop Kim** · †Jae Wook Ko

Dept. of Chemical Engineering, Kwang Woon University, Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul, Korea

**Division of HVAC & Fire Engineering, Daelim University College, Bisan-Dong, Dongan-Gu, Anyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea*

***Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation*

(Received 3. February. 2010, Revised 26. February. 2010, Accepted 26. February. 2010)

요 약

LNG선박에서 발생한 기화가스의 처리를 위해 지금까지는 기화가스를 보조연료로 사용하거나 연소시켰지만 선박의 대형화와 디젤엔진의 사용으로 인해 기화가스를 처리할 수 있는 방법이 제한적인 상황이 되었다. 이를 극복하기 위한 방안으로 고안된 재액화공정은 장치비용과 선박의 제한적인 에너지 공급문제 때문에 지금의 형태를 갖게 되었고 3세대 공정까지 기술발전을 이룩했지만 고효율을 위해 계속해서 연구·개발 중이다. 재액화공정의 방식은 크게 Reverse Brayton Cycle System(RBCS)과 Claude Cycle System(CCS)으로 구분된다. 이 연구에서는 두 가지 System을 분석함으로써 이상적인 피드 상태를 도출하고, 장치 설정을 변경하여 재액화 효율을 높이는데 적합한 설정을 결정하기 위해 HYSYS를 사용하였다. 도출된 결과는 고효율 재액화공정의 설계를 위한 자료로 활용이 가능하다.

Abstract - In the past vaporized gases from a carrier were burned or used for fuel. Due to the movement of bigger LNG carriers and using diesel engine, it is limited that ways of depositing vaporized gases from the carrier by the act of environment. For getting over the problem, a reliquefaction process is considered. Even though the reliquefaction process was created to three generation process, it has been researched and developed to optimize the process. Basically the reliquefaction process is compartmentalized into Reverse Brayton Cycle System and Claude Cycle System. This research is focused on the reliquefaction efficiency with the systems and changing equipments arrangement by using HYSYS. The result could be use for a design of a reliquefaction process.

Key words : reliquefaction process, LNG(Liquefied Natural Gas) carrier, vaporized gas, reverse brayton cycle system, claud cycle system

1. 서론

천연가스의 운송방법에는 해상파이프라인, 육상파이프라인, 그리고 액화시켜 LNG선을 이용하여

운송하는 방법이 있다. 이중 천연가스를 대기압 상태에서 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 근처의 낮은 온도로 액화시켜 LNG 선을 이용하는 방법은 액화플랜트 건설에 많은 자본이 소요되지만 운송거리가 길어질수록 BOG(Boil Off Gas)발생으로 인한 손실을 감소시키기 때문에 대부분의 천연가스 운송에 이용되고 있다.

천연가스를 LNG선으로 운반할 때, 화물창에 열이

†주저자:jwko@kw.ac.kr

유입되어 저장된 LNG가 증발하게 된다. 이때 생성된 가스를 BOG라 하며, 이는 화물창의 압력을 높여 구조적인 파괴를 가져와 안전상의 문제가 발생할 수 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 BOG를 연료로 사용하는 다양한 추진시스템이 개발되었다. 그러나 근래에 LNG선이 대형화되고 추진방식이 중래의 증기터빈 방식에서 고효율 디젤엔진으로 대체됨에 따라 BOG가 운항 중의 보조연료로 사용될 수 없게 되었다. BOG를 처리하기 위해 태워버리기도 하지만 환경규제가 한층 강화되어 BOG처리에 대한 새로운 대안이 필요하게 되었다. 이러한 요구에 따라 LNG선 내에서 발생된 BOG를 재액화하는 공정이 제안되었다.

이 연구에서는 현재 운영 중인 재액화장치를 HYSYS를 사용하여 분석하고 사례연구를 통해 가장 이상적인 피드의 상태를 도출하고, 이를 적용하기 위한 장치의 설정을 통해 재액화되는 BOG의 양을 최대화하는 것을 목표로 한다.

II. Reverse Brayton Cycle System

공정모사를 위한 조건을 Table 1과 같이 설정하고 물성계산을 위한 HYSYS의 상태방정식으로는 Peng-Robinson식을 적용하였다.

Fig. 1에 나타난 RBCS(Reverse Brayton Cycle System)은 비교적 높은 재액화 효율로 현재 가장 많이 사용되고 있는 시스템이다. 3세대 공정의 주요 부분은 BOG-BOG 내부 열교환 시스템으로, 압축기로 유입되는 저온 BOG와 압축기를 통과한 고온의 BOG가 자체 열교환하는 방식이다. 3단으로 구성된 BOG 압축기를 사용하여 압축기의 과열을 억제하고, 더 높은 압력을 형성해 재액화 효율을 높이게 된다. 그러나 유입되는 BOG유량에 따라 냉매로 이용되는 질소의 유량을 적절히 분배하기가

곤란하여 유량에 따른 팽창터빈의 기계적 손상이 수반될 수 있다는 단점이 있다[1].

Fig. 1에 나타난 RBCS 공정도를 HYSYS 프로그램 사용하여 Fig. 2와 같이 모사하고 각각의 장치로 유입되는 피드의 온도와 압력에 따라 재액화되는 BOG의 양을 알아보기 위해 Case Study를 수행하고 Separator부분의 Worksheet를 Table 2에 나타내었다[2].

Table 2의 피드 중 재액화량에 가장 큰 영향을 미치는 피드는 최종적으로 열교환을 끝낸 피드 3-1이었다. 피드 3-1의 온도와 압력의 변화에 따른 피드 To tank의 Mass Flow의 변화가 가장 크게 나타났다.

Fig. 3에 재액화되어 탱크로 다시 유입되는 피드에 대해 Case Study를 통해 온도와 압력에 따른

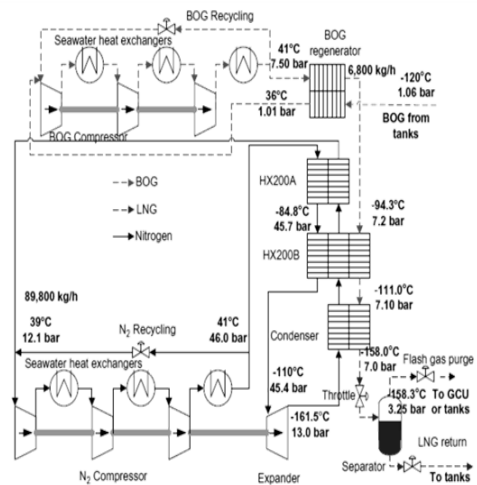


Fig. 1. Reverse Brayton Cycle System.

Table 1. Assumption.

	Composition (mole %)	
	LNG	BOG
CH ₄ (C1)	93.1563	91.46
C ₂ H ₆ (C2)	6.2409	0.01
C ₃ H ₈ (C3+)	0.2786	-
Others	0.3242	8.53
Cargo Capacity	220,000 m ³ membrane	
Mass of BOG	6800 kg/h	

Table 2. Reverse Brayton Cycle System Worksheet.

	3-1	3-2	Flash gas purge	To tanks
Vapor Fraction	0.1257	0.2148	1.0000	0.0000
Temperature(°C)	-139.6	-150.8	-150.8	-150.8
Pressure(kPa)	700.0	325.0	325.0	325.0
Molar Flow (kgmole/h)	398.5	398.5	85.60	312.9
Mass Flow(kg/h)	6800	6800	1680	5120

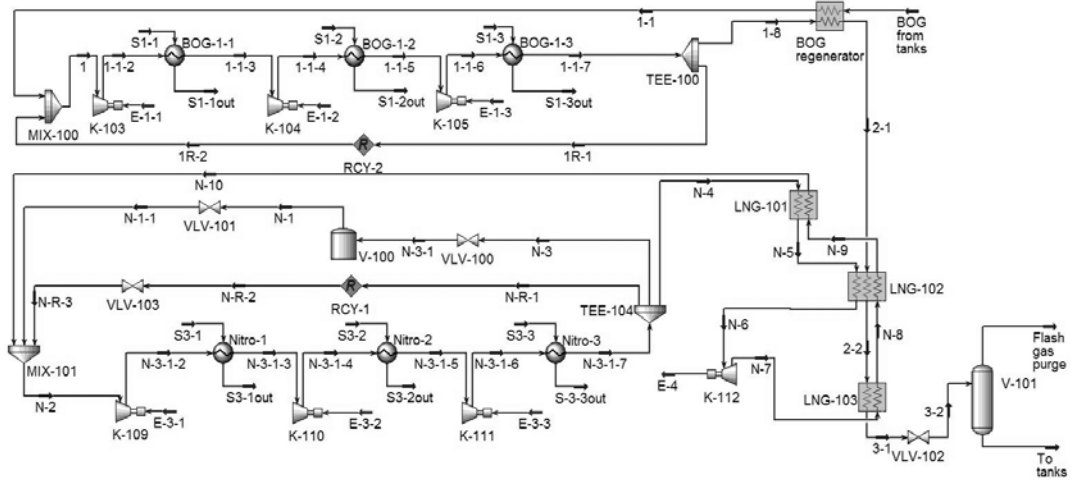


Fig. 2. Reverse Brayton Cycle System PFD.

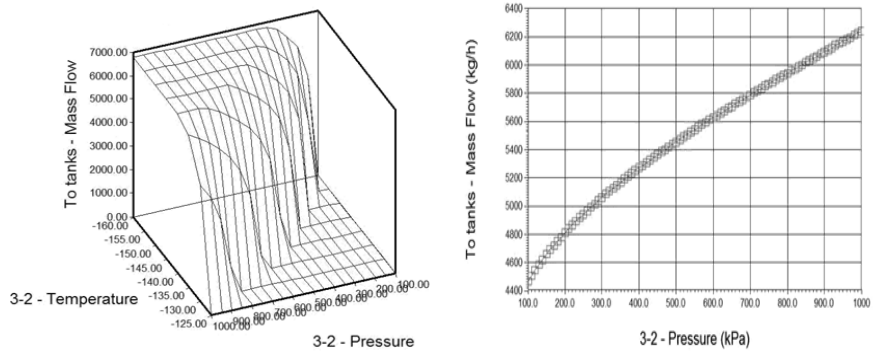


Fig. 3. Result of Reverse Brayton Cycle System Case Study.

재액화량을 나타내었다. 온도보다 압력이 재액화량에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었는데, 온도 제어는 재액화량에 크게 영향을 미치지 않았기 때문에 압력에 따라 적절한 온도조건을 찾는 것이 더 효과적이라고 판단하였다. 이를 통해 허용 압력 범위 내에서 압력에 따른 최적 온도 조건을 찾아 적용하였다.

처음 재액화공정에 유입되는 BOG의 유량은 6800 kg/h이고 RBCS를 통해 재액화되는 양인 피드 To tanks의 Mass Flow는 5120 kg/h로 약 75%의 효율을 보였다.

III. Claude Cycle System

Fig. 4의 CCS(Calude Cycle System)은 냉매를 팽창기로만 냉각하는 RBCS방식과는 달리 BOG 액화에 필요한 유량만 팽창 냉각시키고 나머지 유량은 순환시키는 방식이다. 팽창기의 부담이 적지만 결과적으로 재액화 효율이 낮아 GMS(Gas Management System)에 대형 BOG 탱크가 사용되어야 하는 단점이 있다[3].

Fig. 5에 기본 CCS의 공정도를 HYSYS로 나타내었다[1]. CCS에서 BOG는 단순한 압축공정만을 통과하여 냉매인 질소와 열교환이 이루어지기 때문에 RBCS에 비해 상대적으로 낮은 재액화 효율을

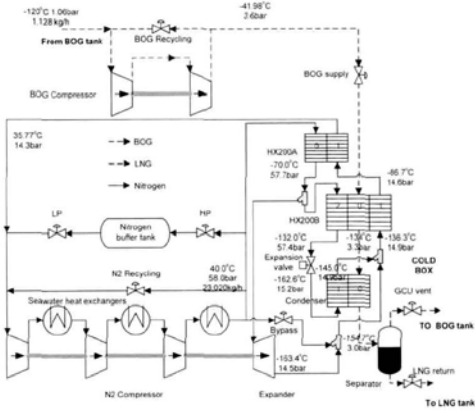


Fig. 4. Claude Cycle System.

Table 3. Claude Cycle System Basic Work-sheet.

	6	v	8	9	v2
Vapor Fraction	0.5909	1.0000	0.0700	0.0000	1.0000
Temperature(°C)	-148.9	-148.9	-158.3	-158.3	-158.3
Pressure(kPa)	300.0	300.0	144.8	144.8	144.8
Molar Flow (kgmole/h)	398.5	235.4	163.0	151.6	11.41
Mass Flow(kg/h)	6800	4163	2637	2441	195.4

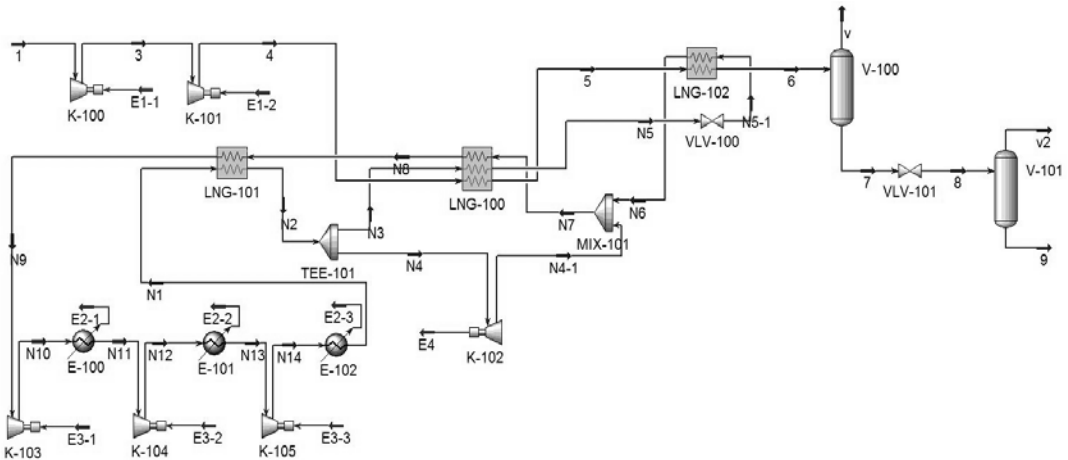


Fig. 5. Claude Cycle System Basic PFD.

보인다. Worksheet를 통해 재액화되는 양이 2441 kg/h로 약 36%임을 Table 3에서 확인할 수 있다.

IV. Modification of Claude Cycle System and Result

4.1. 시나리오

Case 1 : Fig. 6에 나타난 Case 1에서는 기본 CCS 공정에서 재액화 효율을 높이기 위해 BOG가 유입되는 피드 도입부에 BOG-BOG 열교환 부분을 추가하였다[4]. 또한 각 피드마다 최적 조건을 적용시킬 수 있도록 Case Study를 수행하였다. 재

액화량에 가장 큰 영향을 미치는 피드는 최종적으로 열교환을 마친 피드 6임을 확인하였고, 그 결과는 Fig. 8에 나타난 것과 같다. 이를 통해 재액화량은 온도보다 압력에 더 의존하는 것을 확인할 수 있었다.

Case 2 : 피드 6에서 압력을 높이기 위해 압축기를 도입하면 피드의 온도도 상승하기 때문에 효율적인 압력제어가 어렵다고 판단하여 온도를 낮추는 방법을 택하였다. Case 2는 도출된 피드의 상태를 맞추주기 위해 Fig. 7에서 보여주는 것과 같이 Case 1 공정에 극저온 냉각기를 추가하였다.

LNG 선박에서 천연가스 재액화공정의 재액화량에 관한 연구

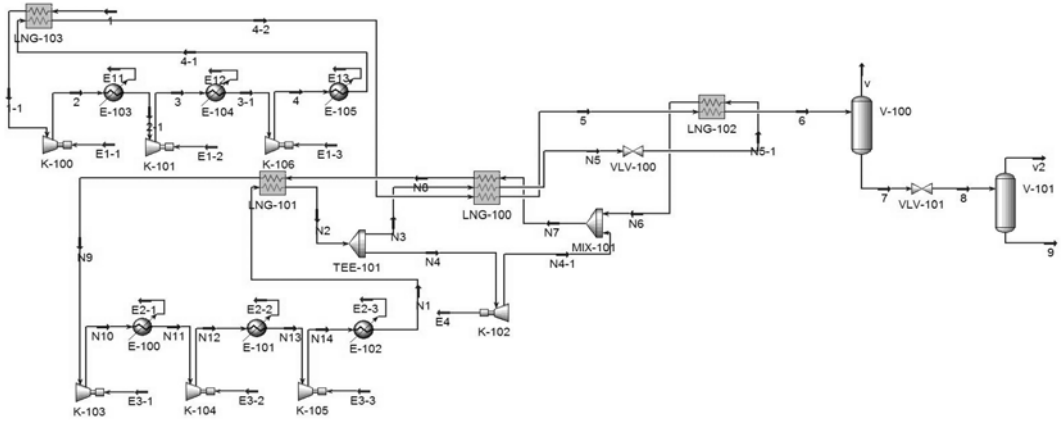


Fig. 6. Claude Cycle System Case 1 PFD.

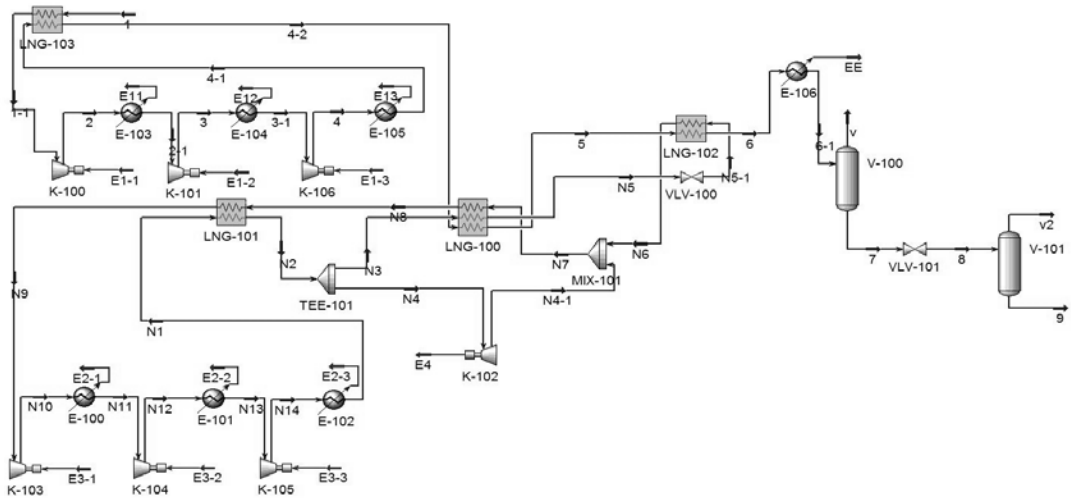


Fig. 7. Claude Cycle System Case 2 PFD.

Table 4. Claude Cycle System Case 1 Worksheet.

	6	v	8	9	v2
Vapor Fraction	0.2071	1.0000	0.0871	0.0000	1.0000
Temperature(°C)	-139.2	-139.2	-149.1	-149.1	-149.1
Pressure(kPa)	650.0	650.0	325.0	325.0	325.0
Molar Flow (kgmole/h)	398.5	82.54	315.9	288.4	27.51
Mass Flow(kg/h)	6800	1596	5204	4691	513.0

Table 5. Claude Cycle System Case 2 Worksheet.

	6	6-1	v	8	9	v2
Vapor Fraction	0.2071	0.0021	1.0000	0.0892	0.0000	1.0000
Temperature(°C)	-139.2	-149.0	-149.0	-158.3	-158.3	-158.3
Pressure(kPa)	650.0	571.0	571.0	255.3	255.3	255.3
Molar Flow (kgmole/h)	398.5	398.5	0.828	397.6	362.2	35.49
Mass Flow(kg/h)	6800	6800	18.73	6781	6005	775.9

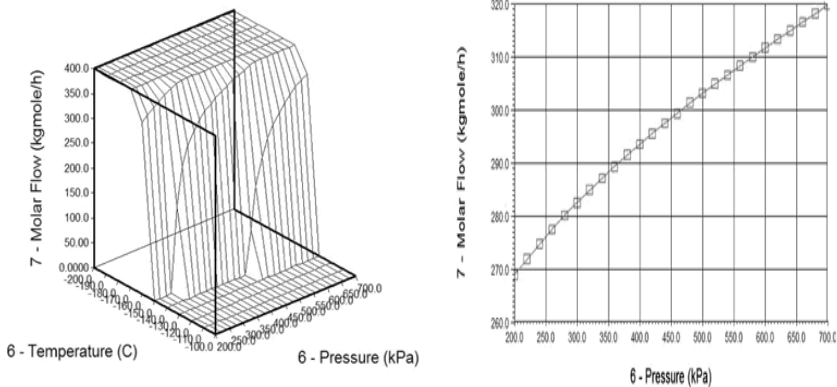


Fig. 8. Result of Claude Cycle System Case 2 Case Study.

Table 6. Comparison of reliquefaction.

Reliquefaction Process Type	Reliquefaction(kg/h)
Reverse Brayton Cycle System	5120
Claude Cycle System Basic	2441
Claude Cycle System Case1	4691
Claude Cycle System Case2	6005

4.2. 결과

Case 1 : 기본 CCS 공정에서 2441 kg/h가 재액화 되었으나, 1차 수정 후 재액화량이 4691 kg/h로 효율이 69%로 증가한 것을 확인할 수 있었다.

Case 2 : 최종 수정 모델인 Case 2의 경우 재액화된 BOG의 양이 6005 kg/h로 약 88%가 재액화 되었으며 Case 1과 비교해 재액화 효율이 크게 증가하였음을 Table 5에서 확인할 수 있다.

Table 6에서 각 공정형태 별 재액화량을 비교한 결과 최종적으로 수정된 CCS Case 2의 경우가 재액화량이 가장 많음을 알 수 있다.

V. 결론

RBCS의 재액화량은 5120 kg/h로 기본 CCS보다 재액화 효율이 높아 가장 많이 이용되는 시스템이다. Case Study를 통해 분석한 결과 6800 kg/h의 BOG발생량 중 재액화 효율은 RBCS의 경우 5120 kg/h, 기본 CCS는 2441 kg/h, CCS Case 1과 CCS Case 2는 각각 4691 kg/h, 6005 kg/h로 측정되었고, CCS Case 2가 가장 높은 효율을 보이는 것을 확인

하였다. 이 연구에서는 LNG 및 장치의 가격을 고려한 경제성 평가는 배제하였지만, 이러한 문제는 향후 에너지 가치 상승과 기술 발전에 따라 충분히 극복 가능한 문제라고 판단하였다. 이를 토대로 본 연구가 제어성능이 더 우수한 CCS 방식의 보급에 기여할 수 있기를 기대해본다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지 안전연구단”의 연구 결과입니다(세부과제번호: 2007-M-CC23-P-02-1-000).

참고문헌

- [1] Y. G. Shin, J. A. Seo and Y. P. Lee, "Comparison of Dynamic Operation Performance of LNG Reliquefaction Processes based on Reverse Brayton Cycle and Claude Cycle", The Society Of Air Conditioning And Refrigerating Engineering Of Korea, **20**(12), pp 775-780, (2008).
- [2] Y. G. Shin and Y. P. Lee, "Design of a boil-off natural gas reliquefaction control system for LNG carriers", Applied Energy, **86**, 37-44, (2009).
- [3] J. H. Choi, H. S. Yoo, K. N. Yoo, A. Heo, D. Y. Lee and S. K. Lyu, "Third Wave of Gas Management System in LNG Carrier-VaCo System", Special Issue of the society of Naval

Architect of Korea, pp 89-93, (2007).
[4] Y. P. Lee, Y. H. Shin, S. H. Lee and K. H. Kim, "*Boil-Off Gas Reliquefaction System*

for LNG Carriers with BOG-BOG Heat Exchange", Journal of the Society of Naval Architects, **46**(6), pp 444-451, (2009).