

고효율 혼합 냉매 천연 가스 액화 공정에 대한 고찰

백 승 환[†], 황 규 완, 정 상 권
KAIST, 기계공학과

Analysis of high efficiency natural gas liquefaction cycle with mixed refrigerant

Seungwhan Baek[†], Gyuwan Hwang, Sangkwon Jeong
Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, 305-701, Korea

ABSTRACT: The new concept for liquefaction of natural gas has been designed and simulated in this paper. Conventional liquefaction cycles are usually composed with Joule-Thomson valves at lower temperature refrigerant cycle. The new concept of natural gas liquefaction is discussed. The main difference with conventional liquefaction process is the presence of the turbine at low temperature of MR (mixed refrigerant) cycle. The turbine acts as expander but also as an energy generator. This generated energy is provided to the compressor which consumes energy to pressurize refrigerants. The composition of the mixed refrigerant is investigated in this study. Components of the refrigerant are methane, propane and nitrogen. Composition for new process is traced with Aspen HYSYS software. LNG heat exchangers are analyzed for the new process. Heating and cooling curves in heat exchangers were also analyzed.

Key words: liquefaction (액화), mixed refrigerant (혼합 냉매), natural gas (천연 가스), heat exchanger (열교환기)

———— 기 호 설 명 ————

- P : pressure
- V : specific volume
- R : gas constant
- W : work
- a : constant related to gas species
- b : constant related to gas species
- k : binary interaction coefficient
- x : mole fraction

그 리 스 문 자

- ω : acentric factor

상첨자

- 0 : relevant parameter of simple liquid
- r : relevant parameter of reference liquid

하첨자

- i, j : components
- comp : compressor
- exp : expander
- net : net

[†] Corresponding author
Tel.: +82-42-350-3079; fax: +82-42-350-8207
E-mail address: vitalcom@kaist.ac.kr

1. 서론

에너지 고갈에 따른 천연가스의 수요가 늘어남에 따라서 세계적인 LNG의 생산 수요 역시 증가하고 있다. 효율적인 LNG 생산에 필수적인 극저온 액화공정에 대한 고찰은 이전부터 이루어져왔다.⁽¹⁾ 액화공정이 발달함에 따라 용량에 따른 효율을 분석하기도 하며⁽²⁾ 특히, 혼합 냉매의 팽창 방법에 따른 액화 공정의 개발 역시 떠오르는 문제이다.⁽³⁾ NG (natural gas : 천연가스) 를 해안 이 아닌 추출지에서 직접 액화시키는 공정에 대한 고찰도 있었다. 특히 액화 공정의 효율을 개선시키기 위하여 J-T 밸브가 아닌 다른 종류의 팽창기를 사용하기도 하는데, 터빈이 그 좋은 예이다. 터빈은 작동유체를 팽창시킴과 동시에 일을 얻을 수 있으며, 그 일을 압축기에 전달을 할 수 있다. 본 논문에서는 터빈을 이용한 천연가스 액화공정을 위한 냉매 조성과 디자인을 제시하려 한다.

2. 디자인

2.1 액화공정 디자인

유입되는 천연 가스의 온도를 낮추기 위하여 4개의 열교환기가 액화공정에 적용이 되었다. 2개의 기체/액체분리가 적용된 냉매 순환 사이클에는 2개의 J-T 밸브가 적용되었으며 최저 온도 팽창부에서 터빈을 장착함으로써 J-T 밸브를 대체하였다.

천연 가스의 조성은 문헌⁽³⁾을 참고하여 Table 1 과 같이 정하였다.

Fig. 1 과 같이 공정 모사 소프트웨어인 Aspen HYSYS 를 이용하여 flowsheet 를 작성하였다.

Table 1 Composition of natural gas

Component	Mole fraction.
C1	0.93
C2	0.06
C3	0.01
N ₂	0

Table 2 Boundary conditions of the flowsheet

stream /component	Boundary condition	Value
15	Pressure (kPa)	160
16	Temp (K)	230
18	Quality	1
18	Pressure (kPa)	250
19	Pressure (kPa)	150
21	Temp (K)	280
LNG in	Temp (K)	300
	Mass flow (kg/h)	10
LNG 1	Temp (K)	230
HEXs	Pressure drop (kPa)	50 : MR 100 : NG
LNG 101	Min. Temp Approach (°C)	2.5
LNG 102		
LNG 103	dT for MR (°C)	3
V-100	Quality	0.65
V-101	Quality	0.55

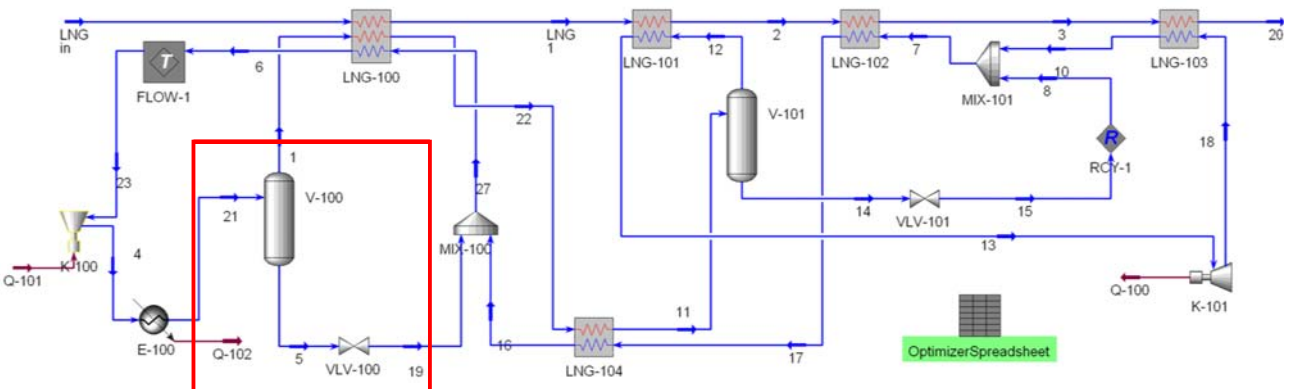


Fig. 1 Structure of natural gas liquefaction cycle

경계조건은 Table 2 에 표시되어 있다. 액화 공정을 모사하기 위하여 NG 사이클과 MR (Mixed refrigerant : 혼합 냉매) 사이클의 시작 지점에 대한 경계조건을 주었다.

2.2 지배 방정식

시뮬레이션에 사용된 기체, 액체의 상태 방정식은 PR (Peng-Robinson) 식과 LKP (Lee-Kesler-Plöcker) 식이 사용되었다.⁽⁴⁾

Peng-Robinson 식은 탄화수소 성분과 성분의 상호작용에 대한 관계가 포함되어 있어 상평형을 계산할 때 쓰인다. 본 논문에서는 냉매가 단일 물질이 아닌 탄화수소의 혼합 물질로 이루어져 있어서 이 관계식을 사용하였다.

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

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - k_{ij})$$

$$b = \sum_{i=1}^N x_i b_i$$

Peng-Robinson 식은 식(2) 와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Z^3 - (1-B)Z^2 + (A-2B-3B^2)Z - (AB-B^2-B^3) = 0 \quad (2)$$

$$A = \frac{aP}{(RT)^2}$$

$$B = \frac{bP}{RT}$$

Z는 압축 계수이며, A와 B는 기체의 상태와 관련되는 계수들이다.

LKP 식은 극성을 띄지 않는 혼합물에 관련되어 사용될수 있는 식이며, 혼합물에서의 엔탈피와 엔트로피를 계산할 수 있는 식이다. 본 논문에서는 천연 가스와 혼합냉매가 모두 혼합물의 성질을 띄고 있으므로 LKP 식을 사용하였다.

$$Z = Z^{(0)} + \frac{\omega}{\omega^{(r)}} (Z^{(r)} - Z^{(0)}) \quad (3)$$

Table 4 Mixed refrigerant composition test

	C1	C3	N2	Quality @ 21	Temp(°C) @ 19
Case1	0.1	0.5	0.4	0.6650	-7.6840
Case2	0.1	0.6	0.3	0.5070	-8.1320
Case3	0.2	0.5	0.3	0.6540	-9.8810
Case4	0.2	0.6	0.2	0.4870	-10.8110
Case5	0.3	0.5	0.2	0.6410	-12.0440
Case6	0.3	0.6	0.1	0.4610	-13.5360
Case7	0.4	0.5	0.1	0.6260	-14.2120

2.3 혼합 냉매의 조성 결정

혼합 냉매의 조성에 따라 액화 공정의 성능이 크게 좌우된다. 본 연구에서는 액화 공정의 일부분을 테스트 하여 혼합 냉매의 조성을 결정하였다. Fig. 1의 붉은색 사각형 부분에서 21번 stream의 조건을 3000 kPa, 280K 로 상태 정의를 한 후에 C1, C3, N₂의 혼합 조성에 따른 19번 stream의 온도를 Table 4와 같이 관찰하였다. 19번 stream은 J-T 밸브에 의해 팽창된 온도이므로, 낮은 온도를 지날수록 혼합 냉매의 조성이 액화공정에 적합하다는 것을 의미한다.

조성 테스트 결과 Case7 의 C1:C3:N₂=0.4:0.5:0.1 의 경우가 본 액화공정에 가장 적합하다는 것을 알 수 있다.

3. 결과 및 해석

3.1 시스템 압력과 성능 분석

앞 절에서 혼합 냉매의 조성을 적용한 액화 공정에서의 시스템 압력과 혼합 냉매의 유량에 따른 천연 가스의 액화율과 시스템에 들어가는 일을 관찰 하였다.

시스템의 압력의 정의는 압축기의 이용 후 증가한 혼합 냉매의 압력을 나타내고, 천연가스의 입구에서의 압력 또한 혼합 냉매의 높은 압력과 같도록 설정을 하였다.

Fig. 2 에서 볼 수 있듯이, 같은 시스템 압력에서는 혼합 냉매의 양이 증가할수록 천연가스의

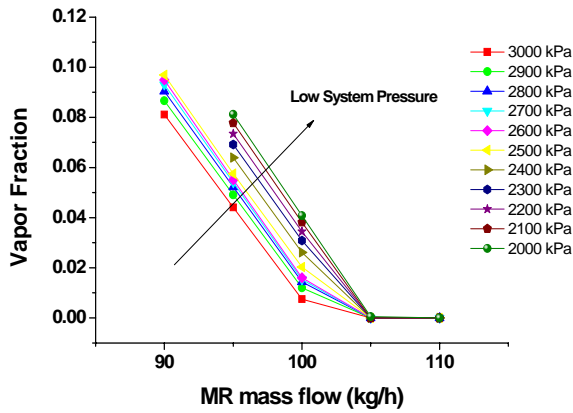


Fig. 2 Vapor fraction of NG @ stream 20 with MR mass flow and system pressure

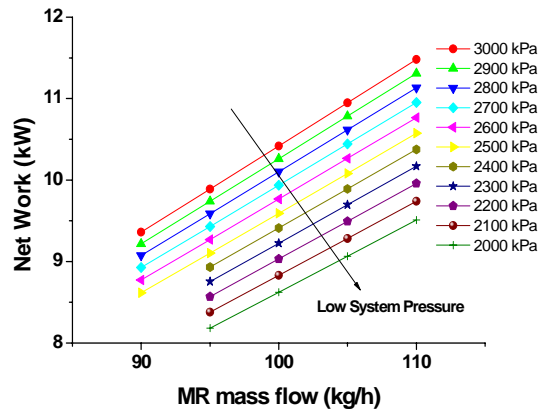


Fig. 3 Net work liquefaction cycle with MR mass flow and system pressure

Heat exchanger load variation

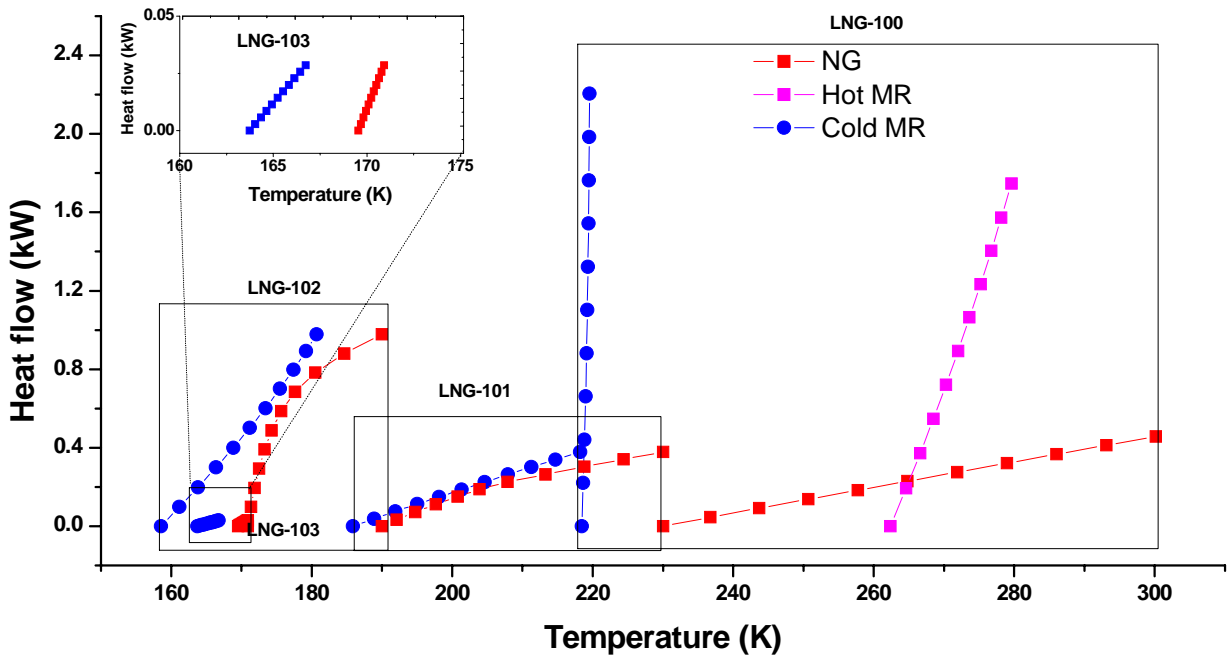


Fig. 4 Heat exchange load variation as a function of temperature of the flows in heat exchangers

액화가 더 잘 되는 것을 알 수 있다.

이는 같은 압력에서 혼합 냉매의 양이 많아질수록 비열이 상대적으로 증가하는 것과 같은 영향을 나타내기 때문이다. 하지만 시스템의 압력이 낮아질수록 많은 혼합 냉매의 양이 필요하다는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 압력의 증가가 상대적인 비열의 증가와 비슷한 영향을 나타내는 것으로 추측할 수 있다.

Fig. 2 의 결과로서는 시스템의 압력이 높고

혼합 냉매의 양을 증가시키는 것이 천연가스의 액화율을 높이겠지만 이는 Fig. 3 에서 보듯이 시스템에 부하가 커진다. Net work는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$W_{net} = W_{comp} - W_{exp} \quad (4)$$

시스템의 압력이 높아질수록 W_{comp} 가 증가하지만, W_{exp} 는 감소하는 경향이 있다. 즉, 시스템

의 압력이 증가할수록 터빈에서 다시 사용할 수 있는 일이 줄어들어 전체적으로 에너지 소비가 많아지게 된다.

본 연구에서는 천연가스의 액화율과 액화공정에 소비되는 에너지의 비율을 최적화하는 과정은 포함되지 않았다. 하지만 천연가스의 액화율을 최고로 하며, 에너지 소비를 최소로 하는 관점에서 살펴보면 본 공정의 시스템 압력은 2500 kPa, 혼합 냉매의 양은 100 kg/h 부근에서 운전이 되어야 한다는 것을 추측할 수 있다.

3.2 열교환기 분석

본 공정에 쓰이는 열교환기에서 성능을 알아보기 위하여 Fig. 4 와 같이 온도와 열유량을 도식화 하였다. 천연가스의 온도가 상온에서 230K까지 떨어지는 첫 번째 열교환기 (LNG-100) 에서는 많은 양의 열이 혼합 냉매로부터 천연가스로 유입되는 것을 알 수 있다. 세 번째 열교환기 (LNG-102) 에서는 천연가스가 액화가 되면서 선이 곡선 모양을 띠는 것을 관찰 할 수 있다. 상변화 과정에서는 열교환기의 성능 향상이 한계를 지니고 있다.

네 번째 열교환기 (LNG-103)이 세 번째 열교환기 안에 포함되어 있는 과정은 J-T 밸브와 터빈의 출구 압력의 영향으로 판단된다. 15번 stream의 출구 압력이 10번 stream의 출구 압력보다 낮아 7번 stream의 혼합 냉매의 온도가 18번의 온도보다 낮게 되는 현상으로 판단된다.

4. 결 론

천연가스 액화 공정을 터빈을 첨가하여 구성을 진행하였다. 혼합 냉매의 양은 J-T 밸브 출구단의 온도가 낮아지는 조성을 찾아 액화 공정에 적용을 하였다. 터빈이 적용된 액화 공정에서는 시스템의 압력과 냉매의 유량이 천연가스의 액화율에 긴밀한 관계를 보였다. 공정에 쓰인 4개의 열교환기 중 첫 번째 열교환기에서 열유량이 많이 이동되는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. ROA-2007-000-20062-0).

참고 문헌

1. N.G. Kirillov, Analysis of modern natural gas liquefaction technologies, 2004, Chemical and Petroleum Engineerin, Vol. 40, pp 7-8.
2. Wen-sheng Cao, Xue-sheng Lu, Wen-sheng Lin, An-zhong Gu, 2006, Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction process in skid-mounted packages, Applied thermal engineering Vol. 26, pp. 898-904
3. M.A. Barclay, C.C. Yang, Offshore LNG: The perfect starting point for the 2-phase expander?, 2006, Offshore technology conference
4. Aspen HYSYS simulation basis, 2006, Aspen Tech Ltd. Cambridge MA, USA