

LNG 열교환기의 압력강하에 따른 천연가스 액화용 초저온 캐스케이드 냉동사이클 특성

윤정인¹ · 최광환² · 손창효[†] · 곽진우³ · 백승문⁴

(원고접수일 : 2012년 5월 18일, 원고수정일 : 2012년 7월 24일, 심사완료일 : 2012년 8월 6일)

Characteristics of Cryogenic Cascade Refrigeration Cycle for Liquefaction of Natural Gas with the Pressure Drop of Heat Exchanger

Jung-In Yoon¹ · Kwang-Hwan Choi² · Chang-Hyo Son[†] · Jin-Woo Kwag³ · Seung-Moon Baek⁴

요 약 : 천연가스는 -160℃까지 냉각 및 액화되어 액화천연가스(LNG)가 되고, 이때 LNG의 체적은 천연가스의 1/600로 줄어든다. 이로 인해 LNG는 수송시에 이점이 있다. 본 연구에서는 천연가스 액화용 초저온 캐스케이드 냉동사이클의 LNG 열교환기내 냉매와 천연가스의 압력강하가 액화사이클에 미치는 영향을 파악한 후, LNG 열교환기 설계시 압력강하에 대한 기준안을 제시하고자 한다. 이를 위해 HYSYS를 이용하여 초저온 캐스케이드 액화사이클 내 LNG 열교환기의 압력강하에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 초저온 액화사이클의 압축일량과 성능계수(COP)의 증가로부터, LNG 열교환기 내의 압력강하는 50 kPa정도를 기준 설계 압력강하로 설정할 수 있음을 알 수 있었다.

주제어 : 천연가스액화공정, 압축일량, 캐스케이드 냉동사이클, 압력강하, LNG 열교환기, 성능계수

Abstract: Natural gas is converted in to LNG by chilling and liquefying the gas to the temperature of -162℃, when liquefied, the volume of natural gas is reduced to 1/600 of its standard volume. This gives LNG the advantage in transportation. In this study, the effects of the pressure drop of refrigerant and natural gas in the LNG heat exchanger of cryogenic cascade refrigeration cycle were investigated and then the design criteria for the pressure drop of refrigerant and natural gas of the LNG heat exchanger were proposed. The pressure drop of the cascade liquefaction cycle was investigated and simulated using HYSYS software. The simulation results showed that the pressure drop in the LNG heat exchanger is set to 50 kPa considering the increase in the compressor work and COP of cryogenic cascade liquefaction cycle.

Key words: Liquefaction process of natural gas, Compressor work, Cascade refrigeration cycle, Pressure drop, LNG heat exchanger, COP

1. 서 론

중동지역의 불안으로 인해 유가 상승의 우려가 고조되고 있는 시점에서, 대체 에너지원으로서 천연가스(Natural gas)에 대한 관심이 어느 때보다 높아지고 있다. 이러한 관점에서 천연가스는 향후 수

십 년 동안 석유를 대체할 유력한 에너지원으로 각광받게 될 것이다. 현재 우리나라는 LNG 수송선을 이용하여 생산지에서 액화된 천연가스를 수입하고 있으며, 그 사용량은 해마다 급속히 증가하는 추세에 있다. 하지만, 국내의 LNG 액화기술은 아

† 교신저자(부경대학교 냉동공조공학과, E-mail: sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-621-6802)

1 부경대학교 냉동공조공학과, E-mail: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

2 부경대학교 냉동공조공학과, E-mail: choikh@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6179

3 (주)LG전자 HA 냉장고사업부 연구기획, E-mail: boisvent@naver.com, Tel: 010-4590-6432

4 부경대학교 대학원, E-mail: hottock77@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

직 초기 단계이다.

최근 들어 국내에서도 가스공사를 중심으로 LNG 액화사이클에 관한 연구가 폭넓게 진행되고 있다. 이 연구의 주요내용은 새로운 천연가스 액화 사이클 개발 혹은 기존 액화사이클의 개선을 통한 고효율화 등이고, 이외에도 LNG 열교환기나 압축기와 같은 요소부품에 대한 실용화 기술이다. 이러한 기술 중에서 새로운 천연가스 액화사이클 개발 기술은 핵심기술로서, 몇몇의 외국 선진 업체들이 독점하고 있다. 특히 우리나라는 해외 플랜트 건설에 있어서도 전처리공정, 주변장치 설계 및 단순 건설 영역에 국한되어 있어, 새로운 액화사이클 개발에 대한 요구가 절실하다. LNG 액화 플랜트 시장은 일본과 미국의 점유율이 97로 독점하고 있다. 특히 미국이 LNG 액화 플랜트 관련 특허의 약 80%를 차지하고 있는 반면 우리나라는 1.1%에 머물러 있는 실정이다[1,2].

LNG 액화사이클과 관련된 종래의 연구를 살펴보면, 우선 Phillips사의 Address 외는 Optimized 캐스케이드 공정의 발전사에 대해 광범위하게 기술하였으며, Terry 외[4]는 HYSYS를 이용하여 다양한 액화 사이클들을 해석하여 비교 및 분석하였다. Qualls 외[5]는 Phillips Optimized 캐스케이드 액화공정의 성능향상을 위한 개선방법에 대하여 발표하였다. Morosuk 외[6]는 캐스케이드 액화공정의 유효일을 분석하였으며, Pop 외[7]는 2단 캐스케이드 액화공정에 대한 비가역성을 분석하였다. Qualls 외[8]는 Phillips Optimized 캐스케이드 공정에 액체 팽창기를 적용하여 J-T 밸브로 팽창할 때보다 열효율이 0.61%, LNG 생산량이 약 7%증가할 수 있다는 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 국내에서는 Yoon 등[9-11]이 HYSYS를 이용하여 캐스케이드 공정에 대한 시뮬레이션을 수행하여 Phillips 캐스케이드 액화사이클의 효율 등을 비교 및 분석하였다. 이러한 연구들은 초저온 사이클의 개선을 통한 효율향상 및 다른 연구자와의 비교 등에 초점이 맞추어져 있다. 하지만 대표적인 요소부품인 열교환기의 성능 중 압력강하가 캐스케이드 액화사이클의 성능에 미치는 영향에 관한 연구는 전무한 실정이며, 이러한 관점의 접근은 최근

국내에서 연구개발을 시작한 초저온 열교환기의 개발에 중요한 지침을 제공할 수 있으리라 생각한다.

따라서 본 연구에서는 HYSYS를 이용하여 초저온 LNG 열교환기의 설계시 냉매와 천연가스의 압력강하가 액화사이클에 미치는 영향을 분석하여 천연가스 액화공정에 필요한 LNG 열교환기의 압력강하에 대한 기준을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 액화사이클과 시뮬레이션 방법

2.1 캐스케이드 액화 사이클

본 논문에서 분석하고자 하는 $C_3H_8-C_2H_4-C_1H_4$ (Propane-Ethylene-Methane) 냉매용 캐스케이드 액화 사이클의 개략도를 **Figure 1**에 나타내었다. 그림에서 3개의 독립적인 사이클 즉, 프로판 사이클, 에틸렌 사이클, 메탄 사이클로 구성되어 있음을 알 수 있으며 프로판 사이클의 증발기는 LNG 열교환기 ㉑에서 ㉓까지, 에틸렌 사이클의 증발기는 ㉑에서 ㉕까지, 메탄 사이클의 증발기는 ㉕에서 ㉗까지 각각 냉매로써 작용하여 Feed gas를 액화시킨다.

그리고 3개의 독립된 냉동사이클에서 프로판 사이클의 증발기는 에틸렌 사이클의 응축기 역할을 하며, 에틸렌 사이클의 증발기는 메탄 사이클의 응축기 역할도 한다. 천연가스는 8개의 LNG 열교환기를 통과하면서 단계적으로 온도가 낮아지게 된다.

즉 천연가스는 프로판 사이클 증발기(㉑~㉓)에서 약 -40°C 까지, 에틸렌 사이클의 증발기(㉑~㉕)에서 약 -80°C 정도까지, 메탄 사이클의 증발기(㉕~㉗)를 지나고 팽창밸브(㉙-㉛사이)를 거쳐 -162°C 정도의 액화된 천연가스(LNG)로 된다. 이때 LNG의 액화율은 팽창밸브(㉙-㉛사이) 통과시 발생하는 가스로 인해 약 90% 내외가 된다.

세계 곳곳의 가스전에서 추출되는 천연가스의 조성비는 다르기 때문에 HYSYS를 이용하여 초저온 액화사이클을 시뮬레이션 할 경우 그 결과값도 달라진다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 적용되고 있는 나이지리아 가스전의 천연가스 조성비[6]를 HYSYS에 적용하여 시뮬레이션 하였다. 이러한 가정조건은 한국가스공사에서 개발하고자 하는 기준이다.

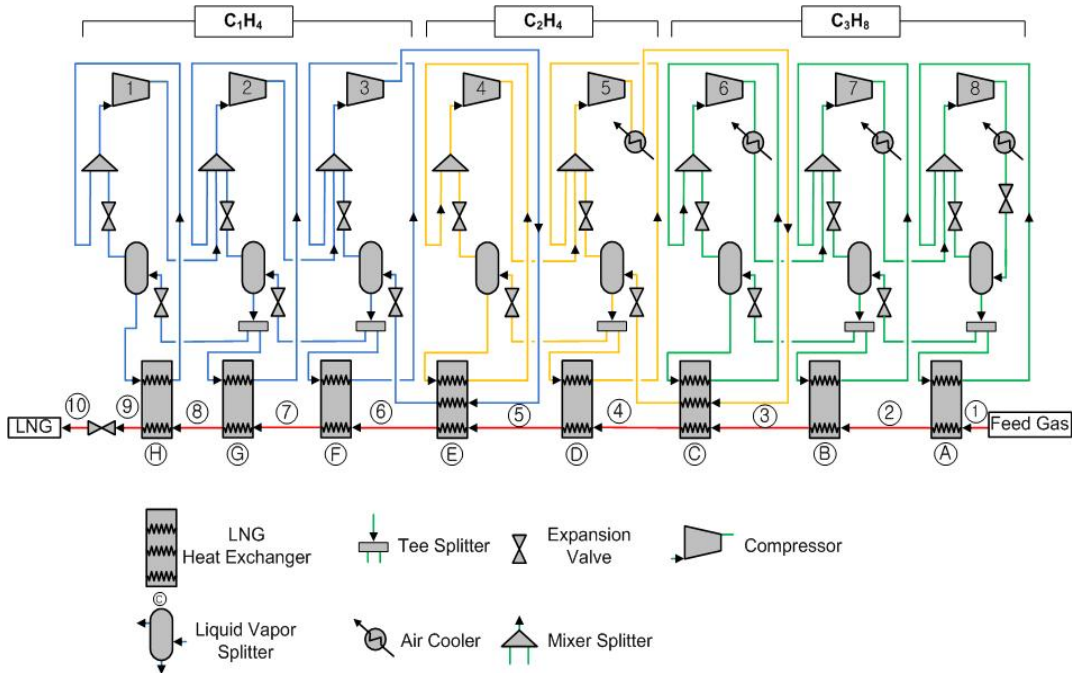


Figure 1: Detailed configuration of cryogenic cascade cycle using C3H8-C2H4-C1H4

2.2 시뮬레이션 가정 조건

Table 1은 HYSYS를 이용하여 시뮬레이션하기 위해서 필요한 가정 조건을 나타낸 것으로, 천연가스의 유량은 트레인 용량 5 MTPA(Million Ton Per Annum)를 기준으로 설정하였고, 이는 한국가스공사에서 개발하고자 하는 기준이다.

2.3 상태방정식 및 성능평가 지표

천연가스는 메탄, 에탄, 프로판, 부탄, 질소, 에틸렌 등과 같은 여러 가지 성분들이 혼합되어 있는 혼합물이다.

Table 1: Modeling assumptions of cryogenic cascade refrigeration cycle[12].

Feed gas mass flow	[kg/s]	158.5
Feed gas temperature	[°C]	32
Feed gas pressure	[kPa]	5,000
Liquefaction temperature	[°C]	-162
Air cooler outlet temperature	[°C]	40

따라서 혼합물에 대한 상태방정식은 각 성분 간의 상호작용 관계가 포함되어 있는 Peng-Robinson 식을 적용하였다.

그리고 천연가스 혼합물의 엔탈피와 엔트로피는 Lee-Kesler-Plocker 식을 적용하여 계산하였다.

2.4 열역학적 계산식

본 시뮬레이션에서는 초저온 액화 사이클의 성능을 나타내기 위한 지표들을 사용하고 있는데, 이와 관련된 수식들은 다음과 같다.

$$Q_e = G \cdot (h_{eva,o} - h_{eva,i}) \tag{1}$$

$$W_c = G \cdot (h_{com,o} - h_{com,i}) \tag{2}$$

$$COP = \frac{Q_e}{W_c} \tag{3}$$

여기서, Q_e 는 천연가스로부터 제거되는 열량, W_c 는 압축기에서 소요되는 일량, COP는 초저온 액화 사이클의 성능계수, G는 냉매 순환량, h는 엔탈피를 나타낸다.

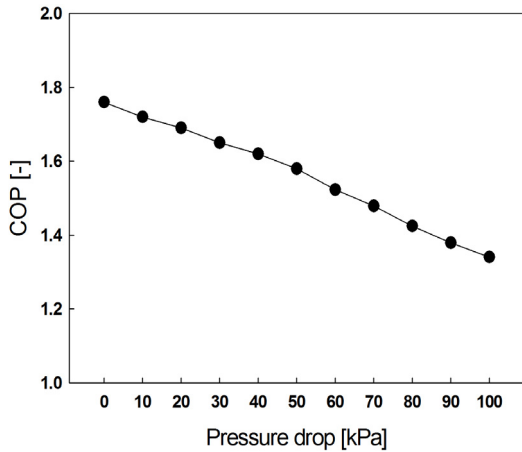


Figure 2: Effect of pressure drop of heat exchanger on COP and specific power.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

식 (1) ~ (3)을 이용하여 LNG 열교환기내 냉매와 천연가스의 압력강하 변화에 따른 초저온 액화사이클의 압축일량과 압력강하를 구하였으며, 그 결과를 Figure 2와 Figure 3에 나타내었다. Figure 2에서 알 수 있듯이, LNG 열교환기내 냉매와 천연가스의 압력강하가 0 kPa일 경우에는 COP는 1.76, 압력강하가 100 kPa일 경우에는 1.42로 평균 23.8%정도 감소하였는데, 이는 압축일량의 증가로 인한 것이라 판단된다.

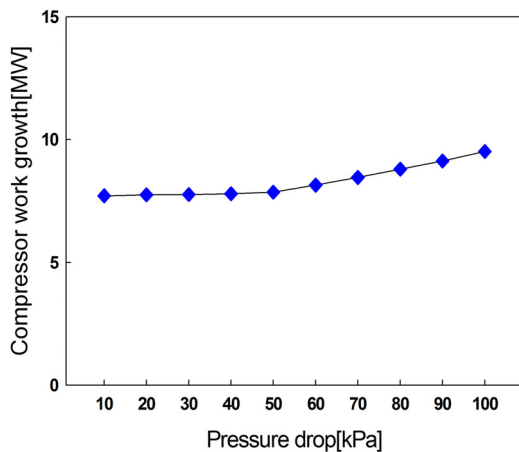


Figure 3: Effect of pressure drop of heat exchanger on the compressor work growth.

또한 위의 결과로부터, COP는 서로가 반비례 관계에 있음을 알 수 있었다.

Figure 3은 LNG 열교환기 내 냉매와 천연가스의 압력강하 변화에 따른 압축일량 증가량 추이를 나타낸 것이다. LNG 열교환기 내 냉매와 천연가스의 압력강하가 증가할수록 압축일량은 선형적으로 증가하였다. LNG 열교환기내 압력강하가 50 kPa까지는 약 7.85 MW 정도에서 압축일량 증가가 거의 없지만, 50 kPa 이후부터는 완만하게 증가하였다.

LNG 열교환기내 압력강하가 50 kPa 이상부터는 전체 LNG 열교환기가 8개이므로 그 합은 400 kPa가 된다. 이에 메탄사이클의 세번째 압축기에서 압력의 변위는 400 kPa이므로 이를 감당할 수 있는 범위를 초과하는 것으로 보인다. 이러한 결과 때문인지 LNG 열교환기의 구조상 문제인지는 정확하게 알 수 없지만, 실제 나이지리아 가스전에서 사용하고 있는 LNG 열교환기내 압력강하는 50 kPa 정도로 설계되어 있다고 추정된다.

Table 1의 결과값은 LNG 열교환기내 냉매와 천연가스의 압력강하를 50 kPa정도로 가정하여 나온 것이다. Feed gas의 온도는 305.2 K부터 시작하여 프로판 사이클의 예냉과정을 거치며 248.5 K로 낮아졌고 에틸렌 사이클의 상변화 과정을 거치며 183.5 K로 되었다.

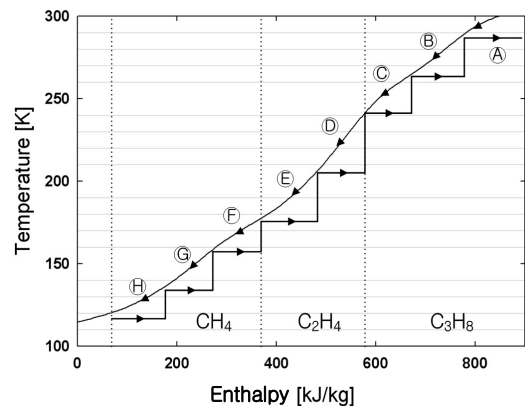


Figure 4: Temperature difference between feed gas and refrigerants of LNG heat exchangers.

그리고 메탄 사이클의 과냉과정을 거치며 123.8 K까지 냉각된다. 마지막 LNG 열교환기의 다음에 설치되어 있는 팽창밸브의 역할은 저장 탱크의 압력인 약 120 kPa을 맞추기 위한 것이다. 그리고 ①~④ 구간까지는 냉매 증기 상태로 유지되면서 예냉되고, ④~⑥ 구간까지는 액과 증기가 공존하는 상태(이상류 상태)를 나타내었다. 그리고 ⑥ 이후로는 냉매액 상태를 유지하며 점차 온도가 낮아졌으며, ⑨~⑩ 구간은 팽창밸브를 통과하면서 액의 일부가 냉매증기로 변화되었음을 알 수 있다.

Figure 4는 각각의 LNG 열교환기내의 엔탈피 변화에 따른 냉매와 천연가스의 온도변화 관계를 나타낸 것이다. LNG 열교환기내 냉매와 천연가스는 대향류이므로 천연가스는 오른쪽에서 왼쪽으로 흐르고, 냉매온도는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐른다.

Figure 4를 통해 알 수 있듯이, 캐스케이드 액화방식의 특성상 냉매의 온도곡선은 천연가스의 온도곡선과 동일한 기울기를 가지면서 열교환이 되지 않음을 알 수 있다. $C_3H_8-C_2H_4-C_1H_4$ 캐스케이드 액화사이클에서 LNG 열교환기내 압력강하는 50 kPa정도로 설계해야함을 알 수 있었으며, 이 압력강하값은 앞으로의 연구에서도 기본 설계값으로 활용가능하리라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 $C_3H_8-C_2H_4-C_1H_4$ 를 사용하는 초저온 캐스케이드 액화사이클의 LNG 열교환기의설계시 냉매와 천연가스의 압력강하가 액화사이클에 미치는 영향을 파악한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

우선 LNG 열교환기내 냉매와 천연가스의 압력강하 증가로 인해 COP는 1.76에서 1.34로 평균 23.8%정도 감소한다. 그리고 LNG 열교환기내 압력강하는 50 kPa보다 더 클 경우에 압축일량이 대폭 증가한다. 이런 이유로 LNG 열교환기 설계시 액화사이클의 효율을 고려하여 열교환기 내 압력강하는 50 kPa로 설정하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 따라서 LNG 열교환기내 압력강하가 일정한 값 이상에서 압축일량의 증가가 커지는 것을 감안한다면 LNG 액화사이클의 열교환기 내 압력강하

기준값을 제시하는데 지침이 될 수 있으리라 판단된다.

후 기

이 논문은 2010학년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었음.(PS-2010-016)

참고문헌

- [1] Gas Plant Agency's detailed plan of Korea Gas Corporation, 2008 (in Korean).
- [2] S. T. Oh, H. S. Lee, J. I. Yoon, et al., "The state of the arts of LNG liquefaction cycle," The Sarek Journal, vol. 38, no. 3, pp. 13-17, 2007 (in Korean).
- [3] D. L. Address. The Phillips Optimized Cascade LNG Process a Quarter Century of Improvement, The Permission of the Institute of Gas Technology, 1996.
- [4] L. Terry. "Comparison of liquefaction process," LNG Journal vol. 21, no. 3, pp. 28-33, 1998.
- [5] Qualls, Philip Hunter, "A Novel approach taking the Phillips optimized cascade LNG process into the future," AIChE Spring National Meeting 2003, pp. 1-29, 2003.
- [6] Wen-sheng Cao, et al. "Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction process in skid-mounted packages," Applies Thermal Engineering, vol. 26, pp. 898-904, 2006.
- [7] Tatiana Morosuk, Mohad Nazri Bin Omar, geoget satsaronis and Rolanda Naw, "Advanced exergetic analysis of a refrigeration system for liquefaction of natural gas," Proceedings of the 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS), pp. 1-40, 2010.
- [8] Horatiu Pop, Michel Feidt, Cristian Gabriel Alionte et al., "Optimization of conventional

irreversible cascade refrigeration systems,”
U.P.B. Sci. Bull., vol. 71, iss. 4, pp. 1-12,
2009.

- [9] Qualls, Anthony P. Eaton, “Liquid Expander in the phillips optimized cascade LNG process,” LNG14, pp. 38-44, 2004.
- [10] S. T Oh, H. S. Lee, J. I Yoon et al., “Simulation of LNG liquefaction cycle using two stage intercooler,” The Korean Institute of Gas, 2009 Spring annual conference, pp. 225-228. 2009(in Korean).
- [11] H.S. Lee, S. T. Oh, J. I Yoon et al., “Analysis of cryogenic refrigeration cycle using two stage intercooler,” 5th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids, pp. 40-41, 2009.
- [12] Jin Woo Kwag, Won Jae Choi, Jung In Yoon et al., “Comparison of performance on the natural gas liquefaction process using intercooler,” ICCHT2010, p. 18, 2010.