

# 초저온 캐스케이드 냉동사이클의 LNG 열교환기 압력강하 특성

윤정인\*, 최광환\*\*, 곽진우\*\*\*, 손창호\*\*\*\*, 백승문\*\*\*\*\*

\*부경대학교 냉동공조공학과(yoonji@pknu.ac.kr), \*\*부경대학교 냉동공조공학과(choikh@pknu.ac.kr),  
\*\*\*부경대학교 대학원(boisvent@naver.com), \*\*\*\*부경대학교 냉동공조공학과(sonch@pknu.ac.kr),  
\*\*\*\*\*부경대학교 대학원(hottock77@empal.com)

## The pressure drop characteristics in LNG heat exchanger of cryogenic cascade refrigeration cycle

J. I. Yoon\*, K. H. Choi\*\*, J. W. Kwag\*\*\*, C. H. Son\*\*\*\*, S. M. Baek\*\*\*\*\*

\*Dept. of Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University(yoonji@pknu.ac.kr)  
\*\*Dept. of Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University(choikh@pknu.ac.kr),  
\*\*\*Graduate School, Pukyong National University(boisvent@naver.com)  
\*\*\*\*Dept. of Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University(sonch@pknu.ac.kr)  
\*\*\*\*\*Graduate School, Pukyong National University(hottock77@empal.com)

### Abstract

Natural gas is converted in to LNG by chilling and liquefying the gas to the temperature of  $-162^{\circ}\text{C}$ , when liquefied, the volume of natural gas is reduced to 1/600th of its standard volume. This gives LNG the advantage in transportation. The pressure dorp 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 of cryogenic cascade liquefaction cycle.

Keywords : 천연가스액화과정(Liquefaction process of natural gas), 압축일량(Compressor work), 캐스케이드 냉동사이클(Cascade refrigeration cycle), 압력강하(Pressure drop), LNG 열교환기(LNG heat exchanger)

### 기 호 설 명

|          |                       |   |   |
|----------|-----------------------|---|---|
| $\kappa$ | : Specific heat ratio | P | : Pressure [kPa]                          |
| s        | : Entropy [kJ/kg · K] | x | : Vapor quality                           |
| h        | : Enthalpy [kJ/kg]    | T | : Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ], [K] |
|          |                       | m | : Mass flow rate [kg/s]                   |

## 1. 서론

현재 우리나라는 LNG 수송선을 이용하여 생산지에서 액화된 천연가스를 수입하고 있으며, 그 사용량은 해마다 급속히 증가하는 추세에 있다. 하지만, 국내의 LNG 액화기술은 아직 초기 단계이다.

최근 들어 국내에서도 가스공사를 중심으로 LNG 액화사이클에 관한 연구가 폭넓게 진행되고 있다. 이 연구의 주요내용은 새로운 천연가스 액화사이클 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 미국이 97%정도를 차지할 정도로 독점하고 있다. 특히 미국이 LNG 액화 플랜트 관련 특허의 약 80%를 차지하고 있는 반면 우리나라는 1.1%에 머물러 있는 실정이다.<sup>1)2)</sup>

LNG 액화사이클과 관련된 종래의 연구를 살펴보면, 우선 Phillips사의 Andress는<sup>3)</sup> Optimized 캐스케이드 공정의 발전사에 대해 광범위하게 기술하고 있으며, Kikkawa 등<sup>4)</sup>은 예냉각 루프와 팽창기를 적용한 혼합냉매 액화공정을 시뮬레이션하여 발표하였다. Terry 등<sup>5)</sup>은 HYSYS를 이용하여 다양한 액화 사이클들을 해석하여 비교 및 분석하였다. 그리고 Cao 등<sup>6)</sup>은 HYSYS를 이용해서 질소와 메탄을 이용한 액화공정에 관해 시뮬레이션 하여 혼합냉매 공정과 비교 및 분석하였다. 국내에서는 Yoon 등<sup>7-10)</sup>이 HYSYS를 이용하여 캐스케이드 공정에 대한 시뮬레이션을 수행하여 Phillips 캐스케이드 액화사

이클의 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 파악하여 천연가스 액화공정에 필요한 LNG 열교환기의 압력강하에 대한 기준을 제시하는데 그 목적이 있다.

## 2. 액화 사이클과 시뮬레이션 방법

천연가스 액화 사이클에는 여러 가지가 있지만 가장 대표적으로 사용되는 액화공정의 시초라고 할 수 있는 Phillips optimized cascade process가 있다. 그림 1은 본 논문에서 분석하고자 하는  $C_3H_8-C_2H_4-C_1H_4$  (Propane-Ethylene-Methane) 냉매용 캐스케이드 액화사이클의 개략도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 3개의 독립적인 사이클인 프로판 사이클, 에틸렌 사이클, 메탄 사이클로 구성되어 있으며 LNG 열교환기 ㉠에서 ㉢까지는 프로판이, ㉠에서 ㉡까지는 에틸렌이, ㉡에서 ㉢까지는 메탄이 각각 냉매로써 작용하여 천연가스(Feed natural gas)를 액화시킨다. 동시에 3개의 독립된 사이클에서 프로판 사이클의 증발기는 에틸렌 사이클의 응축기 역할을 하며, 에틸렌 사이클의 증발기는 메탄 사이클의 응축기 역할도 한다. 천연가스인 피드가스(Feed gas)는 3개의 LNG 열교환기를 거치면서 단계적으로 온도가 낮아지게 된다. 즉 천연가스는 프로판 사이클에서 약  $-40^{\circ}C$ 까지, 에틸렌 사이클

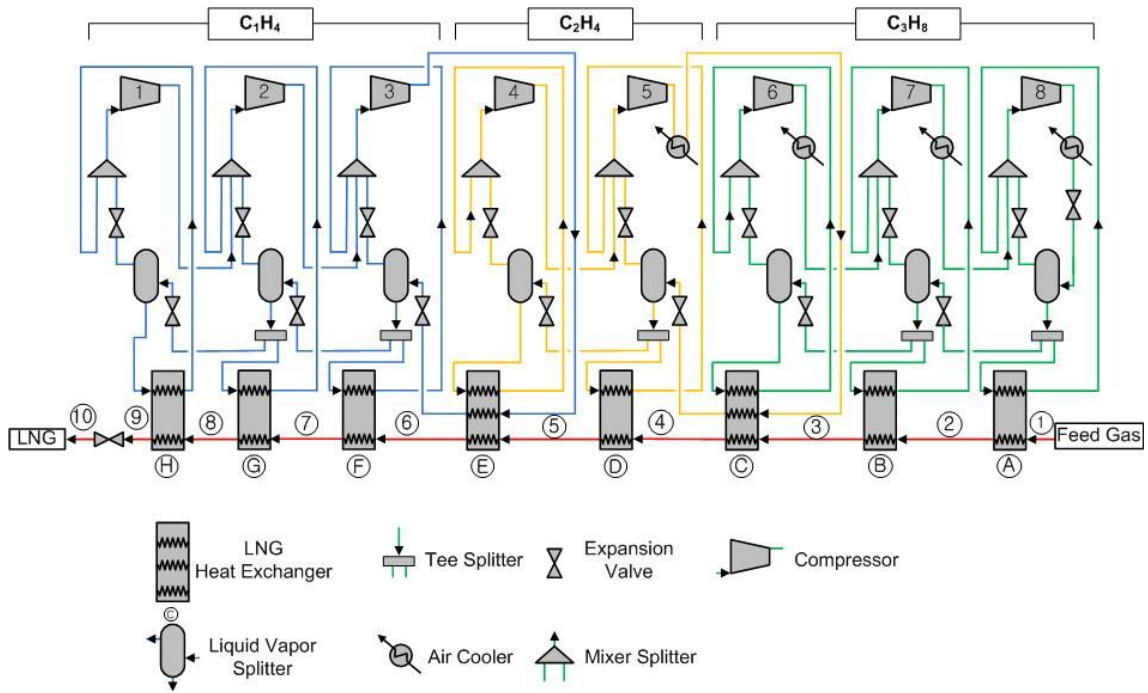


그림 1. Detailed configuration of cryogenic cascade cycle using C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-C<sub>1</sub>H<sub>4</sub>

에서 약 -80℃ 정도까지, 메탄 사이클을 지나고 팽창밸브(⑨-⑩사이)를 거쳐 -162℃ 정도의 액화된 천연가스(LNG)된다. 이때 LNG의 액화율은 팽창밸브에 의해 발생하는 가스가 있으므로 약 90%내외가 된다.

표 1은 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-C<sub>1</sub>H<sub>4</sub>용 초저온 액화사이클내를 순환하는 냉매의 종류, 스트림의 수, 압축기 수, LNG 열교환기의 수를 나타낸 것이다.

세계 곳곳의 가스전에서 추출되는 천연가스의 조성비는 다르기 때문에 HYSYS를 이용하여 초저온 액화사이클을 시뮬레이션할 경우 그 결과값도 달라진다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 적용되고 있는 나이지리아 가스전의 천연가스 조성비<sup>11)</sup>를 HYSYS에 적용하여 시뮬레이션 하였다. 천연가스의 유량은 트레인 용량 5 MTPA(Million Ton Per Annum)를 기준으로 설정하였다. 이러한 가정조건 및 트레인 용량은 한국가스공사에서

표 1. Details the number of devices with cryogenic cascade refrigeration cycle.

|                              | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> cycle | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> cycle | C <sub>1</sub> H <sub>4</sub> cycle |
|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Refrigerant                  | Propane                             | Ethylene                            | Methane                             |
| Number of stream             | 25                                  | 18                                  | 27                                  |
| Number of compressor         | 3                                   | 2                                   | 3                                   |
| Number of LNG heat exchanger | 3                                   | 2                                   | 3                                   |

개발하고자 하는 기준이다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

LNG 열교환기내 냉매와 천연가스의 압력강하 변화에 따른 초저온 액화사이클의 COP

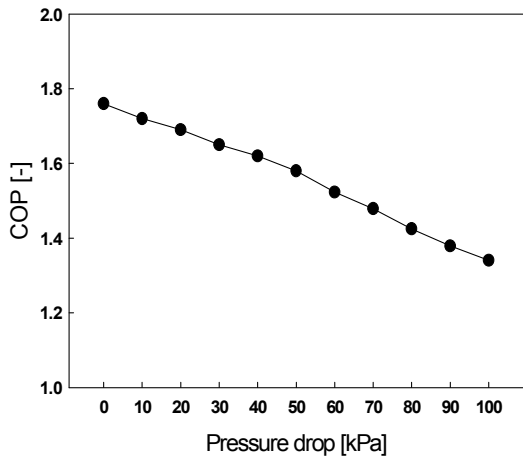


그림 2. Effect of pressure drop of heat exchanger on COP and specific power

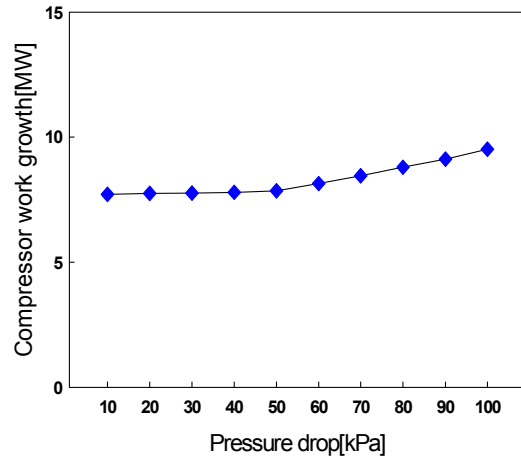


그림 3. Effect of pressure drop of heat exchanger on the compressor work growth

의 결과를 그림 2에 나타내었다. COP는 1.76에서 1.34로 평균 23.8%정도 감소하였는데, 이는 압축일량의 증가로 인한 것이라 판단된다.

그림 3은 LNG 열교환기내 냉매와 천연가스의 압력강하 변화에 따른 압축일량 증가량을 나타낸 것이다. LNG 열교환기내 냉매와 천연가스의 압력강하가 증가할수록 압축일량은 선형적으로 증가하였다. LNG 열교환기내 압력강하가 50 kPa까지는 약 7.85 MW정도에서 압축일량 증가가 거의 없지만, 50 kPa이후부터는 완만하게 증가하였다.

LNG 열교환기내 압력강하가 50 kPa이상부터는 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 kPa정도로 설계되어 있다고 판단된다.

표 2는 프로판, 에틸렌, 메탄사이클을 지나는 피드가스의 상태량 변화를 나타낸 것이다. 표 2의 결과값은 LNG 열교환기내 냉매와

천연가스의 압력강하를 50 kPa정도로 가정하여 나온 것이다. 피드가스의 온도는 305.2 K부터 시작하여 프로판 사이클의 예냉과정을 거치며 248.5 K로 낮아졌고 에틸렌 사이클의 상변화 과정을 거치며 183.5 K로 되었다. 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 표 2의 건도로부터 알 수 있듯이, 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.

그림 4는 표 2의 결과값을 바탕으로 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.

표 2. Properties of feed gas at each locations of C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-C<sub>1</sub>H<sub>4</sub> cycle

|               | ①     | ②     | ③     | ④     | ⑤     | ⑥     | ⑦     | ⑧     | ⑨     | ⑩     |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T<br>(K)      | 305.2 | 293.7 | 270.7 | 248.5 | 212.2 | 183.5 | 164.7 | 141.2 | 123.8 | 114.7 |
| P<br>(kPa)    | 5000  | 4950  | 4900  | 4850  | 4800  | 4750  | 4700  | 4650  | 4600  | 120.9 |
| x             | 1     | 1     | 1     | 1     | 0.88  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.08  |
| $\kappa$      | 1.462 | 1.495 | 1.589 | 1.748 | 2.172 | 2.806 | 1.998 | 1.769 | 1.652 | 1.013 |
| h<br>(kJ/kg)  | 876   | 809   | 750   | 668   | 597   | 310   | 150   | 89    | 29    | 0     |
| s<br>(kJ/kgK) | 8.569 | 8.447 | 8.27  | 8.038 | 7.43  | 5.904 | 5.492 | 4.959 | 4.512 | 4.606 |

그림 4를 통해 알 수 있듯이, 캐스케이드 액화방식의 특성상 냉매의 온도곡선은 천연가스의 온도곡선과 동일한 기울기를 가지면서 열교환되지 않음을 알 수 있다.

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-C<sub>1</sub>H<sub>4</sub> 캐스케이드 액화사이클에서 LNG 열교환기내 압력강하는 50 kPa정도로 설계해야함을 알 수 있었으며, 이 압력강하값은 앞으로의 연구에서도 기본 설계값으로 활용가능하리라 판단된다.

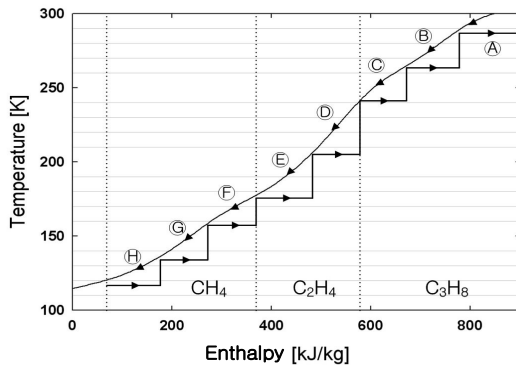


그림 4. Temperature difference between feed gas and refrigerants of LNG heat exchangers

#### 4. 결론

본 연구에서는 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-C<sub>1</sub>H<sub>4</sub>를 사용하

는 초저온 캐스케이드 액화사이클의 LNG 열교환기의 설계시 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 감소함을 보였다.

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.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

1. 가스플랜트 사업단 상세 기획 . 2008. 04. 28
2. 오승택, 이호생, 윤정인, 이상규, LNG 액화사이클 개발현황, 설비저널, Vol. 38, No. 3, pp. 13-17, 2007
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. Yoshitugi Kikkawa et. al. Development of Liquefaction Process for Natural Gas. Journal of Chemical Engineering of Japan. Vol. 30. No. 4. pp. 625-630. 1997
  5. L. Terry. Comparison of Liquefaction Process. LNG Journal 21. No. 3. pp. 28-33. 1998
  6. Wen-sheng Cao et. al. Parameter Comparison of Two Small-scale Natural Gas Liquefaction Process in Skid-mounted Packages. Applies Thermal Engineering. No. 26. pp. 898-904. 2006
  7. 오승택, 김현우, 이호생, 이경범, 윤정인, 이상규, 2단 인터쿨러를 적용한 LNG 액화 사이클 시뮬레이션. 한국 가스학회 춘계 학술발표회 논문집. pp. 225-228. 2009
  8. H.S. Lee. S. T. Oh. H. W. Kim. J. I. Yoon. G. B. Yi. S. G. Lee. Analysis of Cryogenic Refrigeration Cycle using Two Stage Intercooler. 5th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids. pp. 40-41. 2009
  9. 이호생, 오승택, 김현우, 최원재, 윤정인, 이상규, 팽창기를 적용한 초저온 액화공정 특성 비교. 한국 동력기계공학회 춘계 학술대회 논문집. pp. 250-254. 2009
  10. Jin Woo Kwag, won Jae Choi, Seung Taek Oh, Jung In Yoon, Sang Gyu Lee, Keun Hyung Choi, "Comparison of Performance on the Natural Gas Liquefaction Process using Intercooler", ICCHT2010, pp.18, 2010.
  11. 유선일, 천연가스 액화를 위한 초저온 캐스케이드 공정에 관한 연구, 부경대학교 박사학위 논문, p.33, 2011