

## 2단 압축 방식을 적용한 초저온 액화 사이클 특성

오 승 택, 이 호 생\*, 이 경 범\*, 윤 정 인\*, 이 상 규\*\*

부경대학교 대학원, \*부경대학교, \*\*한국가스공사

### Characteristics of cryogenic liquefaction cycle using two stage compression type

Seung-taek Oh, Ho-saeng Lee\*, Gyeong-Beom Yi\*, Jung-in Yoon\*, Sang-gyu Lee\*\*

Graduate School, Dept. of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

\*Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

\*\*KOGAS, Dongchun-Dong, Yeonsu-Gu, Incheon, 406-130, Korea

(Received January 5, 2000; revision received February 10, 2000)

**ABSTRACT:** In this paper, two different types of natural gas liquefaction process are simulated and designed for secure a competitiveness in the industry of natural gas liquefaction plant. These processes are based on basic cascade process, and one of these is improved with two staged intercooler and the other is modified two staged intercooler. These processes are compared characteristics of performance with basic process. COP of cascade process with two staged intercooler and modified two staged intercooler showed about 13.74% and 21.64% higher than basic process, and yield efficiency of modified process improved comparing with the basic process by 25.93% lower specific power, respectively.

**Key words:** Liquefaction(액화), Cryogenic(초저온), LNG(액화천연가스), Cascade(케스케이드)

#### 기 호 설 명

P : Pressure [kPa]  
 V : Specific volume [m<sup>3</sup>/kg]  
 R : Gas constant [J/mol·K]  
 W : Work [kW]  
 a : Constant related to gas species  
 b : Constant related to gas species  
 k : Binary interaction coefficient  
 Z : Compression coefficient

x : Mole fraction

#### 그 리 스 문 자

ω : Acentric factor

#### 상 첨 자

O : Relevant parameter of simple liquid  
 r : Relevant parameter of reference liquid

† Corresponding author

Tel.: +82-51-629-6180; fax: +82-51-629-6180

E-mail address: yoonji@pknu.ac.kr

#### 하 첨 자

i, j : Components

## 1. 서론

천연가스는 메탄, 에탄, 프로판, 부탄 등과 같이 여러 가지 성분들이 혼합되어 있고 메탄이 80% 이상 차지하고 있으며, 약  $-162^{\circ}\text{C}$  정도의 비등점을 가지고 있는 화합물로서, 현재 우리나라의 1차 에너지의 약 14%를 차지하는 주요 에너지원의 하나이다.<sup>(1)</sup> 이러한 천연가스는 무색, 무취, 무독성으로써 청정연료에 대해 부합하는 친환경 에너지이며, 기상의 천연가스를 파이프라인으로 이송하는 기존의 PNG (PipeLine Natural Gas) 방식의 수송 문제의 해결 방안으로 수송이 용이한 액상의 천연가스를 다루는 LNG (Liquefied Natural Gas) 방식의 수송이 점차 확산되고 있는 추세이다.<sup>(2)</sup> 이러한 이유로 인해 LNG 플랜트 사업이 각광 받고 있으나 현재 선진 업체들의 기술 제휴로 독점하고 있어 후발업체들의 사업 진출이 어려운 실정이다.<sup>(3)</sup> 세계 LNG 플랜트 시장을 살펴보면 대부분을 미국과 일본이 차지하고 있으며, 액화 공정 라이선스 점유율은 미국의 APCI가 66%, Phillips가 28%, Shell이 3%, Linde가 3%로 나타나 있으며 미국이 독점하고 있다는 것을 알 수 있다.<sup>(4)</sup> 또한, LNG 플랜트 EPC 시장은 Fig. 1에서 나타난 것과 같이 KBR, JGC, Chiyoda, Bechtel이 전체의 95% 이상을 점유하여 일본과 미국이 독점하고 있는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 LNG 플랜트 시장의 진입을 위한 경쟁력 확보를 위해 Cascade 방식의 액화 공정을 시뮬레이션을 통해 수정 및 보완하여 특성을 분석 하고자 한다.

## 2. 시뮬레이션 및 방법

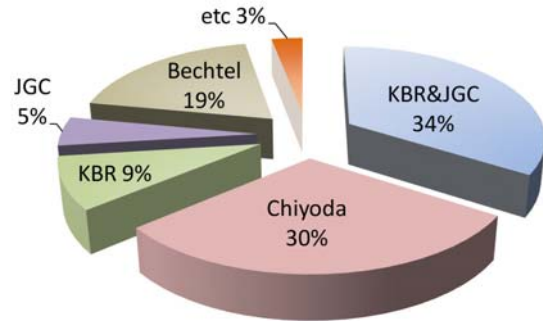


Fig. 1 Market share LNG plant EPC

### 2.1 액화 사이클

본 연구에서는 천연가스 액화 사이클에서 가장 기초가 되는 Cascade 사이클을 Hysys software를 이용하여 시뮬레이션을 수행 하였다. Fig. 2에 Cascade 사이클에 대해 나타 내었다.

Fig. 2에서 나타난 것과 같이 본 사이클은 세 가지 순수 냉매 프로판, 에틸렌, 메탄을 이용하여 천연가스를 프로판 사이클에서 약  $-35^{\circ}\text{C}$ , 에틸렌 사이클에서 약  $-90^{\circ}\text{C}$ , 메탄 사이클에서 약  $-150^{\circ}\text{C}$ 까지 단계적으로 액화 시키는 방식으로 이루어져 있으며, 기존의 Cascade 사이클의 효율을 향상시키기 위하여 2단 압축 인터쿨러 방식에 에탄 사이클의 인터쿨러에서 과냉된 액냉매의 일부를 바이패스시켜 메탄의 고단 압축기 토출측 고

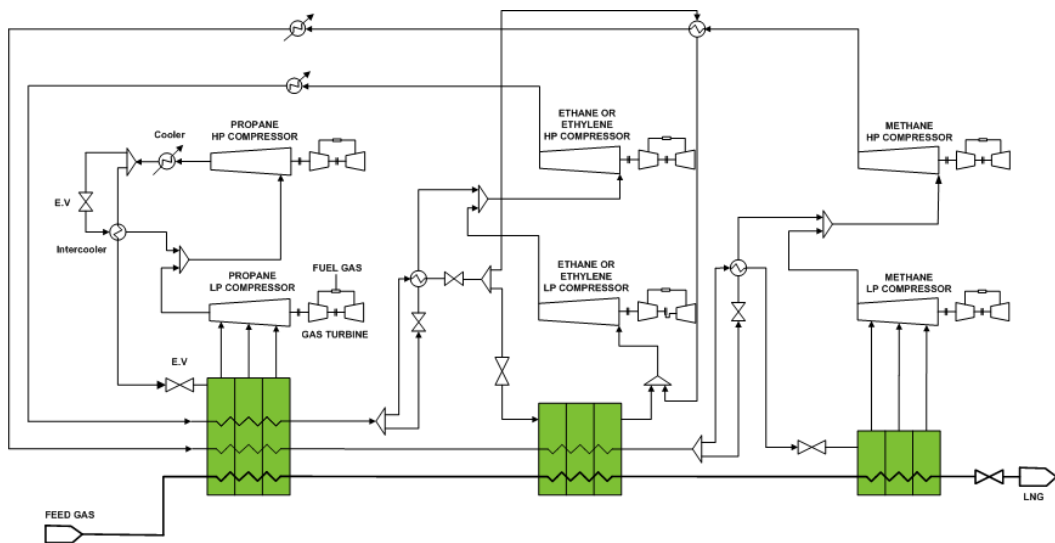


Fig.2 Schematic diagram of simulated cascade cycle

온의 냉매를 예냉을 시키고 프로판과 에탄 사이클 또한 동일한 방식을 적용하여 시뮬레이션 하였다.

## 2.2 시뮬레이션 가정조건

본 시뮬레이션에서 사용하는 천연가스의 조성비는 Nigeria 플랜트에서 생산되어 전처리 공정을 마친 정제된 천연가스로 가정하여, 수분, 이산화탄소, 수은, 중질의 탄화수소계 가스를 제외하고 Normalizing 하여 사용하였다. Table 1에 Feed gas 조성비를 나타 내었다.

Table 1 Composition of natural gas

Component	Mole fraction [%]
Nitrogen	0.007
Methane	0.82
Ethane	0.112
Propane	0.04
iso-Butane	0.012
normal-Butane	0.009
Total	1

다음은 시뮬레이션에서의 가정조건에 대하여 Table 2에 나타내었다. 천연가스의 유량은 트레인 용량 5MTPA(Million Ton Per Annum)를 기준으로 설정하였으며, 바이패스의 유량은 각 사이클 유량의 15%, 중간압력은 고압의 50%로 설정하였으며, 인터쿨러 입구 측 팽창밸브 출구 압력은 중간압력과 같다고 가정하였다.

Table 2 Assumed condition

Feed gas mass flow [kg/s]	158.5	
Feed gas temp. [°C]	32	
Feed gas pressure [kPa]	5000	
2nd fluid temp. [°C]	Air	40
Refrigerant [-]	Methane, Ethylene, Propane	
Bypass flow rate [%]	15	
Middle pressure [%]	50	

## 2.3 상관식

천연가스는 메탄, 에탄, 프로판, 부탄 등과 같

이 여러 가지 성분들이 혼합되어 있기 때문에 혼합물에 대한 상평형을 계산하기 위하여 각 성분간의 상호작용에 대한 관계가 포함되어 있는 Peng-Robinson 식(1),(2)를 사용 하였으며, 혼합물의 엔탈피와 엔트로피를 계산하기 위해서 Lee-Kesler-Plocker 식(3)을 사용하였다.<sup>(4)</sup>

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

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

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

식(1)은 식(2)와 같이 다시 쓰일 수 있다.

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

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

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

## 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

기본 Cascade 공정과 2단 압축 Intercooler 방식을 적용한 Cascade 공정, Modified Intercooler 방식을 적용한 Cascade 공정의 성능 특성을 비교해 보았다.

Fig. 3에는 바이패스 유량변화에 따른 냉동능력과 압축 일량의 변화를 나타내었고, Fig. 4에는 중간압력에 변화에 따른 냉동능력과 압축 일량의 변화를 나타내었다. 바이패스 유량이 증가함에 따라 냉동능력은 증가하고 압축 일량은 감소하는 것을 알 수 있지만, 본 연구의 목표치인 액화율

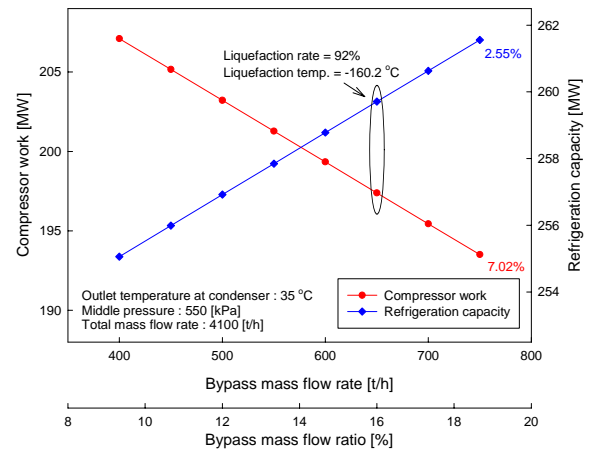


Fig. 3 Determination of bypass flow rate

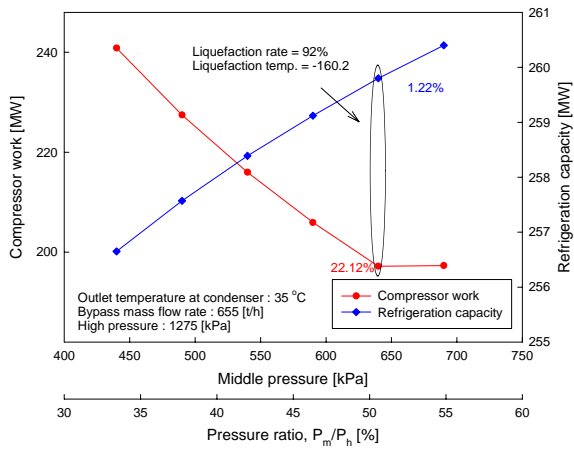


Fig. 4 Determination of middle pressure

92%, 액화온도  $-160^{\circ}\text{C}$ 를 맞추기 위해 Bypass 유량을 15%로 결정 하였다. 중간압력이 상승 할수록 냉동능력은 증가 하고 압축 일량은 감소하지만, 본연구의 목표치 이후로는 압축 일량이 다시 증가하기 시작하기 때문에 중간 압력은 전체 압력의 50%로 결정 하였다.

Fig. 3에서는 액화율 약 92%, 액화온도  $-160^{\circ}\text{C}$  일 때, 냉동능력, 압축 일량, 성능계수를 각 사이클별로 비교 해 보았다. 전체적으로 변형된 사이클의 냉동능력은 8.2 ~ 9.9%가량, 압축 일량은 19.3 ~ 25.9%가량 감소하고 성능계수는 13.7 ~ 21.6% 가량 증가 하는 것을 알 수 있는데, 이는 Bypass된 액상의 냉매가 주 냉매를 과냉 시켜줌으로써 냉매 순환량이 감소하게 되어 압축 일량이 감소하게 되고, 이러한 냉매 순환량 감소에 의해 냉동능력은 감소하지만 냉동능력 감소율에 비해 압축 일량의 감소율이 크기 때문에 COP는 증가 하게 된다.

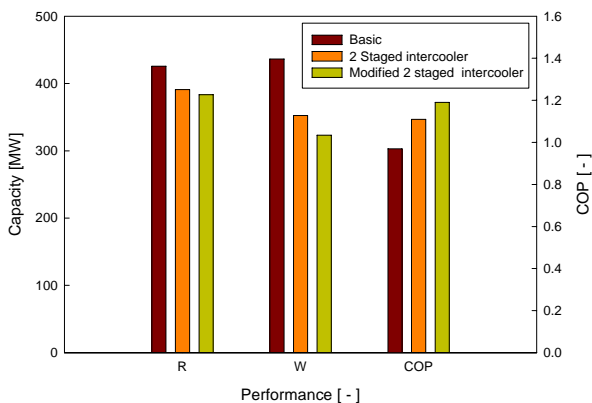


Fig. 5 Comparison of performance

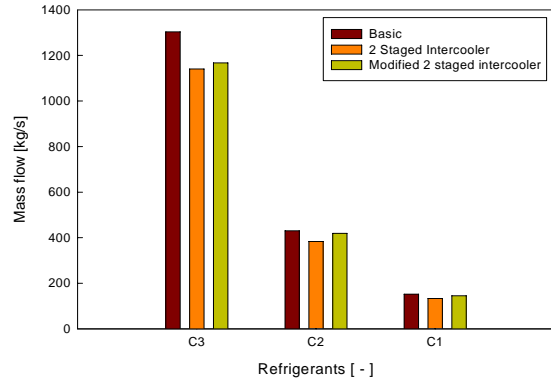


Fig. 6 Comparison of refrigerant mass flow

Fig. 3는 각 사이클의 냉매 순환량 변화를 비교 해 보았다. 기존 Cascade 공정에 비해 두 가지 변형된 공정의 냉매 순환량이 약 2.6 ~ 12.8%까지 감소하지만 Modified Intercooler 공정이 Intercooler 공정 보다 냉매 순환량이 2.4 ~ 9.4% 가량 크게 나타났다. 이는 에틸렌-메탄 열교환기를 추가함으로써 Bypass 유량이 증가 되며, 이에 따라 에틸렌의 증발기로 유입되는 냉매 순환량이 감소하게 되므로 전체적인 냉매 순환량이 증가 하게 된다. 반면에 과냉의 증가로 인해 압축기 입구 온도가 낮아지므로 압축기의 과열 압축을 방지하여 압축 일량은 감소하며 전체적인 능력 또한 향상된다고 판단된다.

Fig. 4에는 각 사이클의 LNG 단위 질량당 소요 에너지, Fig. 5에는 소요 에너지 LNG 생산량을 각각 나타내었다. 기본 공정에 비해 소요 에너지는 19.3% ~ 25.9% 가량 감소하였고, Modified Intercooler 공정의 소요 에너지가 가장 크게 감소하였다. LNG 생산량은 14.1% ~ 24.4% 가량 증가 하였으며, 이 또한 Modified Intercooler 공정의 생산량이 가장 크게 증가 하

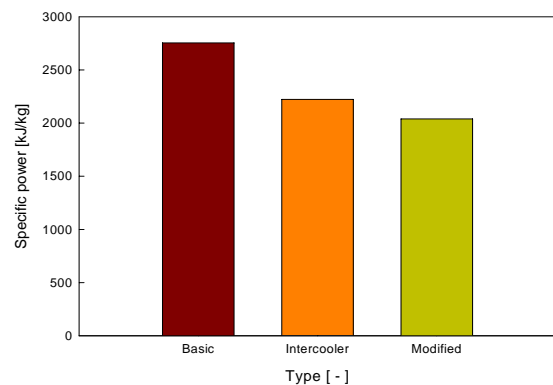


Fig. 7 Comparison of specific power

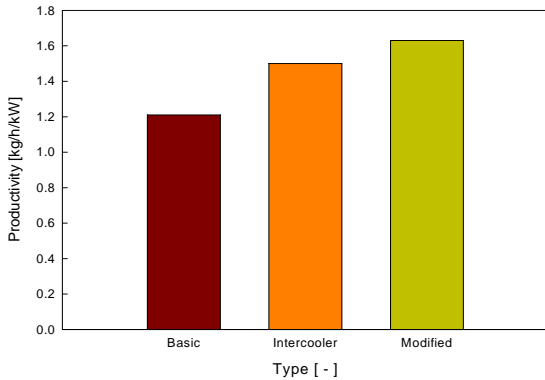


Fig. 6 Comparison of productivity

였다. 이러한 결과에 사용된 소요 에너지는 본 공정도에 나타나있는 각각 압축기의 소요 동력을 합산한 값이며, 소요 에너지가 가장 낮게 나타난 Modified Intercooler 공정이 효율적으로 가장 뛰어나다고 판단된다. 또한, 본 시뮬레이션에서는 기본 Cascade 개념을 간략하게 공정화 하여 시뮬레이션을 수행했기 때문에 폐열 회수등을 위한 열교환기 및 기타 장치들이 추가되는 실제 공정에 적용한다면 본 시뮬레이션 결과 보다 더 큰 에너지 절감을 기대 할 수 있다고 판단된다.

#### 4. 결 론

(1) 동일한 액화 온도와 동일한 액화율 일 때, 기존의 Cascade 공정 보다 Intercooler 공정의 성능은 13.74%, Modified Intercooler 공정의 성능은 21.64% 향상되었다.

(2) 전체적인 냉매 순환량은 기존의 Cascade 공정보다 Intercooler 공정이 약 11% ~ 12.8%, Modified Intercooler 방식 Cycle이 약 2.6 ~ 10.4% 까지 감소하였다.

(3) 천연가스 단위 질량당 소요 에너지는 기존 공정에 비해 Intercooler 공정이 19.26% 감소하였으며, Modified Intercooler 공정이 25.93%로 가장 크게 감소하였다.

(4) 소요 동력당 LNG 생산량은 기존 Cycle에 비해 Intercooler 공정이 14.13%, Modified Intercooler 공정이 24.4% 증가 하였다.

#### 후 기

본 연구는 국토해양부 가스플랜트 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

1. 이상규, 최건형, 양영명, 2009, LNG 액화플랜트의 기술 및 개발 현황, 한국냉동공학학술대회, Vol. 3, pp. 65 - 68.
2. B. C. Price, 2003, Small-scale LNG facility development, Hydrocarbon processing, January, pp. 37-39.
3. 오승택, 이호생, 윤정인, 이상규, 2007, LNG 액화 사이클 개발현황, 설비저널, Vol. 38, No. 3, pp. 13-17.
4. 양영명, 이상규, 2009, LNG 액화플랜트 기술개발 추진계획, 한국 가스학회 춘계학술 발표회 논문집, pp. 229-233
5. Wen-sheng Cao et. al., 2006, Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction process in skid-mounted package, Applied Thermal Engineering, Vol 26, pp. 898-904