



## 액-가스 열교환기를 적용한 천연가스 액화공정 성능 특성

유선일\*\* · 오승택 · 이호생\* · 이상규\*\* · 최건형\*\* · †윤정인\*

부경대학교 대학원, \*부경대학교, \*\*한국 가스공사  
(2009년 10월 14일 접수, 2009년 12월 31일 수정, 2009년 12월 31일 채택)

## Performance Characteristics of Natural Gas Liquefaction Process using Liquid-gas Heat Exchanger

Sun Il Yoo\*\* · Seung Taek Oh · Ho Saeng Lee\*  
Sang Gyu Lee\*\* · Keun Hyung Choi\*\* · †Jung In Yoon\*

Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Graduate School,  
Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

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

(Received 14. October. 2009, Revised 31. December. 2009, Accepted 31. December. 2009)

### 요 약

본 연구에서는 천연가스 액화 플랜트 산업에서의 핵심 기술인 액화공정 개발을 위해 두 가지 2단 압축 방식의 액화사이클의 성능을 시뮬레이션 하였다. Process1은 케스케이드 액화공정을 기초로 하여 프로판, 에틸렌, 메탄 사이클 모두 인터쿨러가 적용된 것이다. Process2는 위의 공정에 메탄과 에틸렌 사이클 사이에 액-가스 열교환기를 적용하였고, Process3은 위의 공정에 에틸렌과 프로판 사이클 사이에 액-가스 열교환기를 추가로 적용하였으며, 인터쿨러를 적용한 케스케이드 공정과 성능을 비교하였다. Process2의 COP는 Process1보다 14.0% 정도 높게 나타났고, LNG 단위 생산량 당 소비 동력은 11.5% 정도 낮게 나타났다.

**Abstract** - In this paper, two different types of natural gas liquefaction cycle with 2 staged compression were designed and simulated to develop liquefaction process which is the core technology in the Industry of natural gas liquefaction plant. These include the cascade cycle with inter-cooler which is consisted of propane, ethylene and methane cycle. One of these is that liquid-gas heat exchanger is applied to between methane and ethylene cycles, and another is that liquid-gas heat exchanger is added to between ethylene and propane on the above process. Also, these cycles are compared with two staged cascade process using an inter-cooler. The COP of process2 is shown about 14.0% higher than that of process1, respectively. Also, the yield efficiency of LNG improved comparing with process1 with 11.5% lower specific power.

**Key words** : Inter-cooler, Cryogenic, LNG, Cascade, Efficiency, COP

### 1. 서 론

가스전에서 생산되는 LNG (Liquefied Natural Gas)의 비등점은 -162℃ 정도로 메탄이 주성분으로 80% 이상을 차지하고 있으며 에탄, 프로판, 부탄 등

의 화합물로 이루어져 있다. 이러한 천연가스는 우리나라의 1차 에너지원의 14%를 차지하고 있으며, 연간 약 26백만톤을 해외에서 LNG 상태로 수입되어 사용되고 있으며, 이는 친환경 에너지에 대한 요구 등과 맞물려 대체연료로서 수요가 급증하고 있다[1,2]. 그러나 LNG 플랜트 산업에서 가장 핵심 기술인 액화 공정 기술은 몇몇 선진 국가의 특정

†주저자: yoonji@pknu.ac.kr

기업들이 독점하고 있는 실정이다.

천연가스 액화 방식은 기존의 가스전 개발방식에 비해 다음과 같은 이점이 있다. 취급이 용이한 액체를 다룸으로써 가스운반에 따른 원거리 수송문제를 해결 할 수 있으며, 수오지로부터 멀리 떨어져 있는 한계 가스전의 활용이 가능하다.

LNG 액화 공정에 대한 종래 연구에 대해 살펴보면, Phillips사의 D. L. Andress는 Optimized cascade 공정에 관한 일반적 기술을 발표하였으며[3], Kikkawa 등은 예냉각 루프와 팽창기를 적용한 혼합냉매 액화공정을 시뮬레이션 하여 특성을 발표하였다[4]. Terry 등은 여러 가지 액화 사이클의 성능을 해석적으로 비교 분석 하였으며[5], Wen-Sheng Cao 등은 질소와 메탄을 이용한 액화공정을 혼합냉매 공정과 비교 분석하였다[6]. 국내에서 Yoon 등은 케스케이드 공정에 대한 시뮬레이션을 수행하여 몇몇 요소기기의 특성에 따른 성능을 보고하였다[7-10].

고부가 가치 사업인 LNG 플랜트 시장에 진입을 하기 위해서는 독자적인 액화공정 라이선스와 EPC (Engineering Procurement and Construction) 기술 개발이 요구된다. 본 연구에서는 LNG 플랜트 시장 진입을 위한 액화 공정 기술 개발의 기초 자료를 제공하고자 액화 공정 사이클중 하나인 Cascade cycle에 액-가스 열교환기를 적용하였을 경우의 성능 특성을 살펴보고자 한다.

## II. 액-가스 열교환기 액화 공정

일반적으로 케스케이드 액화공정은 프로판, 에틸

렌, 메탄을 주 냉매로 사용하는 사이클로 구성되어 있으며, 프로판 사이클에서 약 -40℃, 에틸렌 사이클에서 약 -90℃, 메탄 사이클에서 약 -162℃ 까지 단계적으로 천연가스를 냉각시켜 액화시킨다.

본 연구진은 이 사이클의 효율향상을 위해 모든 사이클에 2단 압축 인터쿨러 방식을 적용한 경우의 성능을 먼저 파악하였다. 즉 압축기는 2단 압축 방식을 적용하며, 응축기 출구 측 액 냉매의 일부를 바이패스 시켜 팽창 시킨 후 메인 열교환기로 유입되는 주냉매 스트림을 인터쿨러에서 과냉각시켜 천연가스를 냉각시키는 방식을 적용하였다. 이 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 인터쿨러 적용시 변화를 살펴보기 위해 각각의 사이클에 인터쿨러를 먼저 적용하여 시뮬레이션 하였다[7].

Fig. 1은 본 연구에서 액화공정의 효율을 더욱 증대시키기 위해 액-가스 열교환기를 메탄 사이클과 에틸렌 사이클 사이에 적용한 것을 나타낸 것이다. 본 공정은 인터쿨러를 통해서 과냉각되어 팽창된 에틸렌 액 냉매의 일부를 바이패스 시켜 메탄의 고단 압축기 토출측 고온의 기 냉매와 열교환 시키는 방식을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다[8]. 또한, 이 공정에 프로판 사이클과 에틸렌 사이클 사이에 액-가스 열교환기 1기를 추가로 적용한 공정 또한 시뮬레이션 하였다[8-10].

## III. 시뮬레이션 조건

본 시뮬레이션에 적용한 천연가스의 조성비는 실공정에서 생산되는 천연가스의 조성비를 사용하

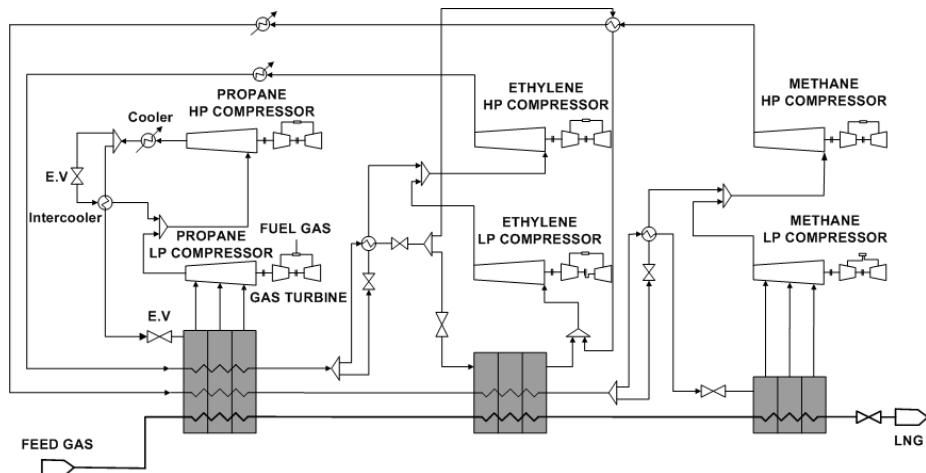


Fig. 1. Cascade process using inter-cooler with liquid-gas heat exchanger.

**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

**Table 2.** Simulation conditions.

Feed gas mass flow	[kg/s]	158.5	
Feed gas temperature	[°C]	32	
Feed gas pressure	[kPa]	5,000	
2nd fluid temperature	[°C]	Water	30
		Air	40
Bypass flow rate	[%]	15	
Middle pressure rate	[%]	50	

**Table 3.** Type of processes.

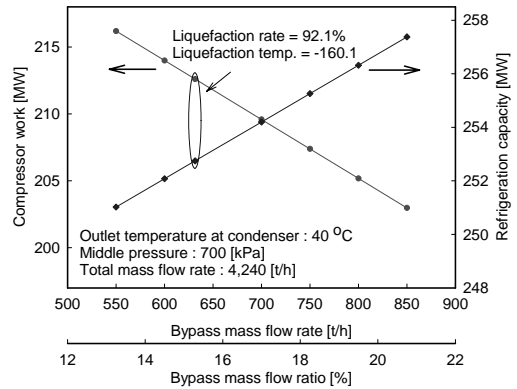
Type	Inter cooler	Liquid - gas heat exchanger(C1-C2)	Liquid - gas heat exchanger(C2-C3)
Process 1	○		
Process 2	○	○	
Process 3	○	○	○

였으며, 전처리 공정을 마친 정제된 천연가스로 가정하여 수분, 이산화탄소, 수은, 중질의 탄화수소계 가스를 제외하고 평균화하여 사용하였다. 피드가스 조성비는 Table 1에 나타내었으며, 시뮬레이션 적용 조건을 Table 2에 나타내었다.

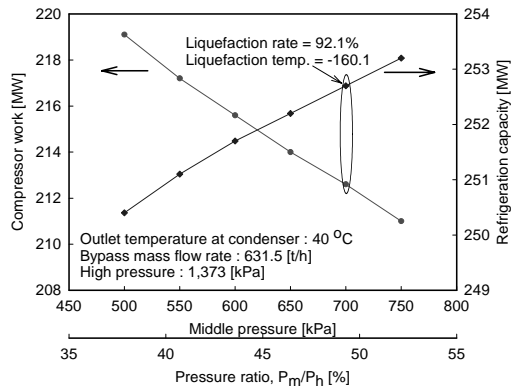
천연가스의 유량은 트레인 용량 5 MTPA (Million Ton Per Annum)를 기준으로 설정하였으며, 바이패스 유량은 각 사이클 유량의 15%, 중간압력은 고압의 50%로 설정하였으며, 인터쿨러 입구 측 보조 팽창밸브 출구 압력은 중간압력과 같다고 가정하였다. Table 3에 각 시뮬레이션의 적용방식을 표로 나타내었다.

#### IV. 결과 및 고찰

시뮬레이션을 수행하기 앞서, 인터쿨러 적용의 타당성을 증명하기 위해 프로판 사이클에 인터쿨러를 적용하여 바이패스 유량과 중간압력 변화에 따



**Fig. 2.** Compressor work & refrigeration Capacity as bypass mass flow rate.



**Fig. 3.** Compressor work & refrigeration Capacity as middle pressure.

른 능력 변화에 대해 시뮬레이션 하였다. Fig. 2는 바이패스 유량변화에 따른 냉동능력과 압축일량 변화에 대해 나타내었고 Fig. 3은 중간압력 변화에 따른 냉동능력과 압축일량 변화에 대해 나타내었다 [10]. Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 것과 같이 바이패스 유량의 증가와 중간압력의 상승에 따라 과냉각도가 증가하여 압축일량은 감소하며 냉동능력은 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 바이패스 유량이 15%, 중간압력이 50% 이상부터는 냉매가 비등점 이하까지 과냉각되며, 바이패스 유량이 15%, 중간압력이 50% 이하부터는 본 연구의 목표 액화율인 92%보다 저하된다. 이러한 이유로 압축일량이 최소가 되며 냉동능력이 최대가 되는 액화율 92%로 이상일 때의 지점으로 바이패스 유량은 15%, 중간압력비는 50%로 결정하였다.

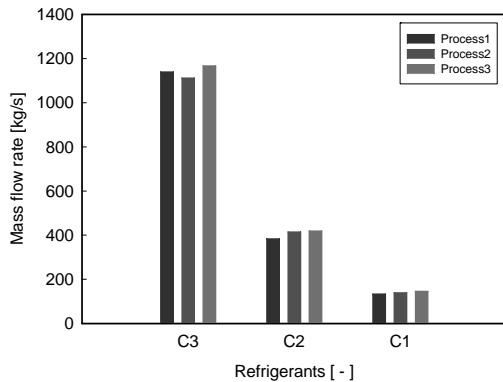


Fig. 4. Comparison of refrigerant mass flow rate.

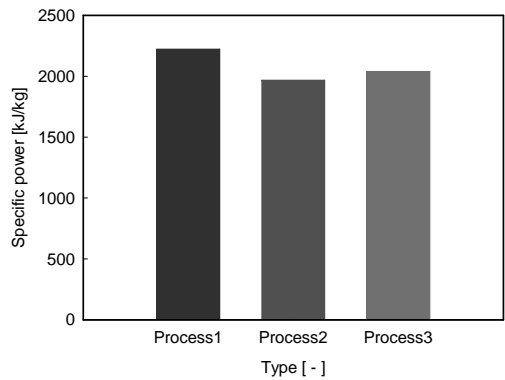


Fig. 6. Comparison of specific power.

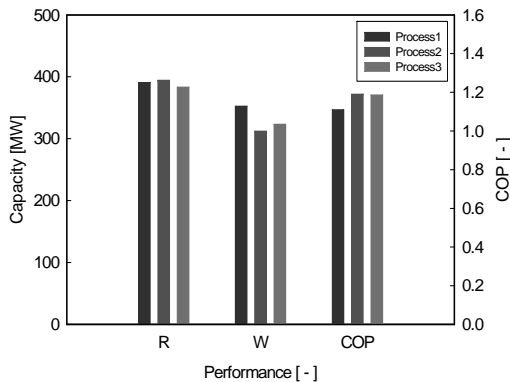


Fig. 5. Comparison of performance.

인터쿨러만 적용한 공정을 Process 1, Process 1에서 에틸렌과 메탄 사이클 사이에 액-가스 열교환기를 적용한 공정을 Process 2, Process 2에서 프로판과 에틸렌 사이에 액-가스 열교환기를 추가로 적용한 공정을 Process 3이라고 칭하여 이 세 가지 공정의 성능에 대해 비교 분석하였다. Fig. 4는 각각의 공정에 대한 냉매 순환량 변화를 비교 한 것이다. Process 1에 비해 Process 2의 프로판 냉매만 2.4% 정도 감소하였고 에틸렌과 메탄은 8.2%와 4.4% 증가하였으며, Process 3의 냉매 모두 2.3~9.4% 증가 하였다. 이는 액-가스 열 교환기를 추가함에 따라 바이패스 유량이 증가 되며, 각 사이클의 증발기로 유입되는 냉매 순환량이 감소하게 되므로 전체적인 냉매 순환량이 증가하게 된다. 반면에 과냉의 증가로 인해 압축기 입구 온도가 낮아지므로 압축기의 과열 압축을 방지하여 압축 일량은 감소하며 전체적인 능력 또한 향상된다고 판단된다.

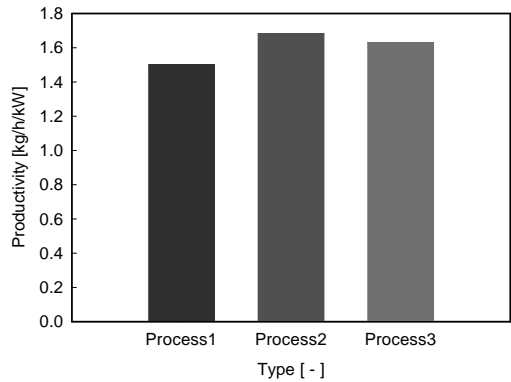


Fig. 7. Comparison of productivity.

동일한 액화율, 액화온도에 대한 각 공정의 성능을 Fig. 5에 나타내었다. 먼저 냉동능력에 대해 살펴 보면, Process 1에 비해 Process 2는 0.96% 증가하며, Process 3은 1.9% 감소하였다. Process 2는 에틸렌의 냉매 일부로 메탄의 고온 고압 상태의 냉매를 예냉 각 시켜줌으로써 냉동능력이 증가하며, Process 3은 프로판 냉매의 일부로 에틸렌의 고온 고압의 냉매를 예냉 각 시키는 반면에 냉동능력의 지배적인 영향을 미치는 프로판 냉매의 일부를 바이패스시킴으로써 증발기로 유입되는 냉매의 유량이 감소하기 때문에 냉동능력이 저하되었다고 판단 할 수 있다. 압축일량은 Process 2가 11.44%, Process 3이 8.26% 감소하였다. Process 2와 3의 압축일량이 모두 감소 하지만 Process 3의 압축일량은 Process 2보다 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 위에서 언급했듯이 액-가스 열교환기 추가로 인해 프로판의 증발기로 유입되는 프로판 냉매의 유량이 감소되며 이로 인해 프로판의 냉매 공급량이 증가하게 된다. 따라서 압

축일량이 증가 한다고 판단된다. COP는 장치의 성능계수를 의미하며 압축일량당 냉동능력을 나타낸 것으로서 Process 2의 성능이 13.99%로 가장 높게 나타났다.

Fig. 6은 LNG 단위 생산량 당 소비 동력을 나타내었으며, Fig. 7은 단위 소비동력 당 LNG 생산량을 나타내었다. 단위 LNG 생산량 당 소비 동력은 Process 2가 11.44%로 가장 크게 감소하였으며, 단위 소비동력 당 LNG 생산량 또한 Process 2가 1.68%로 가장 크게 증가하였다. 이로 인해, Process 2의 성능 및 효율이 가장 뛰어나다고 판단 할 수 있다.

### V. 결 론

본 연구에서는 LNG 케스케이드 액화공정중 액가스 열교환기를 적용한 경우의 시스템 성능특성을 파악하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. Process 2의 프로판 냉매만 24%정도 감소하였고 나머지 냉매 모두 2.3~9.4% 증가하였다.

2. Process 2의 냉동능력은 Process 1에 비해 증가하고 Process 3의 냉동능력은 감소하며, Process 2와 3의 압축일량은 모두 감소하였다. Process 2의 COP가 13.99%로 가장 높게 나타났다.

3. 소비동력은 Process 2와 3 모두 감소하였으나 Process 2가 11.44%로 가장 크게 감소하였으며 LNG 생산량 또한 Process 2가 1.68%로 가장 크게 증가하였다.

본 연구에서는 Process 2의 성능이 가장 뛰어난 것으로 나타났으며, 이 결과들을 추후 액화공정 성능 및 효율 개선 연구에 활용할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 가스플랜트 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 사용기호

C1	: 메탄	[-]
C2	: 에틸렌	[-]
C3	: 프로판	[-]
COP	: 성능계수	[-]
P <sub>h</sub>	: 압축기 고단축 압력	[kPa]
P <sub>m</sub>	: 압축기 저단축 압력	[kPa]
R	: 냉동능력	[MW]
W	: 압축일량	[MW]

### 참고문헌

- [1] 김용웅, 천연가스 이야기, 설비저널, Vol. 31, No. 9, pp. 27-30, 2002
- [2] 오승택, 이호생, 윤정인, 이상규, LNG 액화사이클 개발현황, 설비저널, Vol. 38, No. 3, pp. 13-17, 2007
- [3] D. L. Andress, 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 춘계학술대회 논문집, pp. 250-254, 2009
- [10] 오승택, 이호생, 이경범, 윤정인, 이상규, 2단 압축 방식을 적용한 초저온 액화 사이클 특성, 대한설비공학회 하계 학술발표대회 논문집, pp. 109, 2009