



## 냉열을 이용한 LNG 증발기체 BOG 재액화 신공정과 기존공정에 관한 비교연구

이동혁 · 장창봉\* · 정상용\*\* · 김정환 · 이현석 · 김범수 · †고재욱  
광운대학교 화학공학과, \*한국산업안전보건공단, \*\*한국가스안전공사  
(2010년 2월 3일 접수, 2010년 2월 28일 수정, 2010년 2월 28일 채택)

### Study on the Comparison of New and Used Reliquefaction System of Boil-Off-Gas by LNG Cold Energy

Dong Hyuck Lee · Chang Bong Jang\* · Sang Yong Jung\*\*  
Jung Hwan Kim · Heon Seok Lee · Bum Su Kim · †Jae Wook Ko

*Dept. of Chemical Engineering, Kwang Woon University*

*\*Korea Occupational Safety and Health Agency*

*\*\*Korea Gas Safety Corporation*

*(Received 3. February. 2010, Revised 28. February. 2010, Accepted 28. February. 2010)*

#### 요 약

LNG (Liquefied Natural Gas)기지의 LNG 저장탱크에서 BOG (Boil Off Gas)가 약 0.5 vol%/day로 자연적으로 생성된다. 이를 회수하기 위해서 기존에는 LNG와 BOG를 1:12의 질량비로 직접 접촉시켜 액화시켰다. 이 공정은 단순하지만 하절기에는 LNG 사용량 저하로 인해 공정운영의 어려움이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 대안된 LNG 냉열을 사용하는 간접접촉방식을 HYSYS를 이용하여 분석해보고 직접접촉방식과 BOG 재액화 효율비교를 통해 분석하여 유리한 공정을 도출하였다.

**Abstract** - BOG(Boil Off Gas) is formed about 0.05 vol%/day from LNG(Liquefied Natural Gas) tanks of LNG receiving terminal. To recycle the BOG using direct contacting, Previously the quantities of LNG and BOG is mixed at the ratio of 11:1 by mass. However simple this process uses, there is the difficulty of processing operation resulted from decrease of using LNG in summer. To complement these shortcomings, Advantages of the process are investigated by comparison of cost and analysis of the indirect contact method using LNG cold energy. It was studied that principles and types of development using LNG cold energy which is abandoned in the carburettor and found how to contact each to find the appropriate cold energy development process. Therefore, in this research, the indirect contact method will be investigated the feasibility of a comparative analysis by using HYSYS.

**Key words** : reliquefaction process, bog, lng, comparative analysis

#### 1. 서론

LNG 기지 내 저장탱크는 LNG를 극저온 상태로 유지하기 위해 단열재를 사용하여 기화를 최대한

억제하나, 외부의 상온에 의한 불가피한 열 유입으로 탱크 1기(100,000 m<sup>3</sup>) 기준으로 약 0.5 vol%/day의 LNG가 BOG로 기화된다. 평택 LNG 기지의 경우 한해 평균 BOG발생량은 30.3 ton/hr로 이는 적지 않은 발생량이다. 평택 LNG 기지의 경우 한해 평균 BOG발생량은 30.3 ton/hr로 이는 적지 않은 발생량으로써, BOG를 회수할 수 있는 BOG 처리공

†주저자:jwko@kw.ac.kr

정은 경제적인 측면에서 필수 불가결한 것이다.[3]  
 국내 LNG 기지에서 사용되는 회수공정은 혼합 드럼 내에서 LNG를 BOG와 직접 혼합하여 LNG 냉열을 BOG에 전달함으로써 BOG를 액화시키는 공정으로 이루어졌다. 안정적인 운영을 위해 BOG와 LNG를 1:12의 질량비로 혼합하여 충분히 과냉각시킨 상태에서 혼합드럼방식인 재액화기(recondenser)에 의해 회수되고 있다. 액화과정을 거친 LNG는 압력차 때문에 다시 LNG 저장탱크로 회송이 불가능하므로, 전량 수요처로 공급되어야 한다. 그러나 가스수요가 적은 LNG의 경우 소비처 수요가 재액화기에서 발생하는 LNG 공급양보다 적을 경우도 발생하기 때문에, 이에 대한 수요대비 과잉 공급량에 대한 처리방안뿐만 아니라, BOG 처리공정에 공급되는 LNG 기지에 대한 효율적인 운영이 필요한 실정이다. BOG 재액화에 투입되는 LNG 공급량을 줄이는 방안으로서 주로 제안되고 있는 공정은 열교환기식 BOG 재액화 시스템 방식으로, 이는 한국가스공사 자체뿐만 아니라 외부에서도 현장적용 개선방안으로 제안되어져 왔다. 이 공정의 핵심은 BOG 재액화를 위하여 냉열을 제공

하는 LNG의 양이 질량비율로 거의 1:1 수준이라는 것이다. 이에 대한 분석으로 범용성 화학공정 모사기(General Purpose Chemical Process Simulator)로서 화학공정을 열역학을 이용하여 수학적으로 모델화하고 이를 컴퓨터 하드웨어를 이용하여 실제 정유 및 석유화학공장에서 일어나는 상황을 묘사하는 소프트웨어인 HYSYS를 이용하여 새로운 열교환식 공정을 기존 공정과 분석 비교함으로써 타당성 및 개선 방안을 제시하고자 한다.

## II. 공정개요

### 2.1. 직접접촉 BOG 액화공정

현재 BOG 액화공정은 Fig. 1에서 같이 LNG탱크에서 자연적으로 발생한 BOG를 30 °C, 10 kg/cm<sup>2</sup> 상태로 압축한 후 -155 °C, 15 kg/cm<sup>2</sup> LNG와 혼합드럼에서 혼합되어 -132 °C, 9 kg/cm<sup>2</sup> 상태로 액화시켜 활용하고 있다. 특히 BOG 액화를 위해 저압펌프( $\Delta P=13.8$  kg/cm<sup>2</sup>)에서 토출된 LNG 중의 일부가 냉열 공급원으로서 혼합드럼으로 보내진다. BOG 혼합드럼에서 액화된 LNG는 주 송출라인인 LNG 고압

Table 1. Process flow data of indirect contact BOG liquefaction system.

Name	LNG	BOG	LNG3	NG
Vapour Fraction	0	1	1	0
Temperature (°C)	-155	30	-149.4	0
Pressure (kPa)	1471	103	7355	7735
Molar Flow (kgmole/h)	$4.967 \times 10^4$	3729	$1.272 \times 10^4$	$5.34 \times 10^4$
Mass Flow (kg/h)	$7.0 \times 10^5$	$6.0 \times 10^4$	$2.248 \times 10^5$	$9.676 \times 10^5$

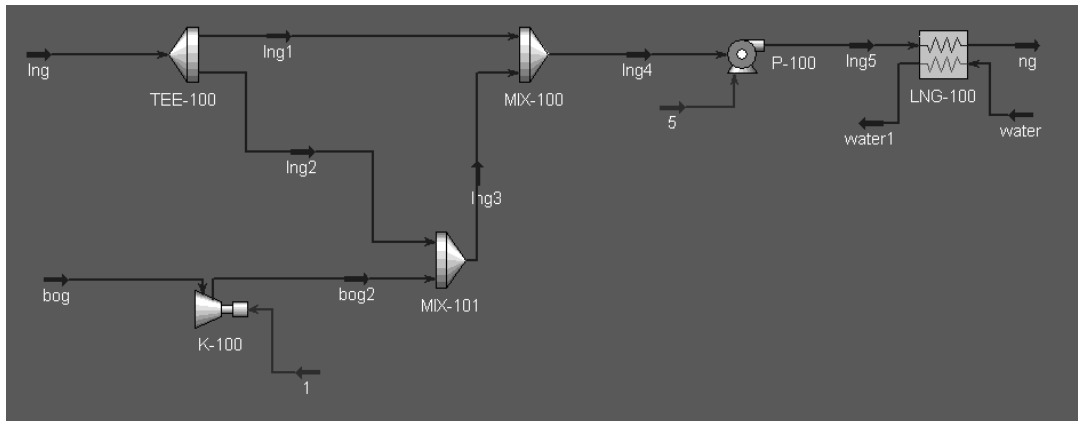


Fig. 1. PFD(Process Flow Diagram) of direct contact BOG liquefaction system.

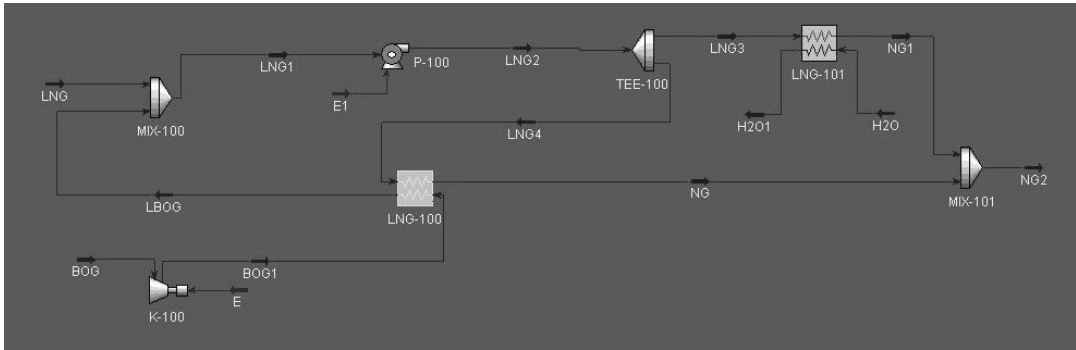


Fig. 2. PFD(Process Flow Diagram) of Indirect contact BOG liquefaction system.

Table 2. Compare LNG consume quantity.

Month	Winter			Summer		
	12	1	2	6	7	8
Quantity (1000ton)	343	261	223	61	61	60

펌프(△P=65.5 kg/cm<sup>2</sup>) 인입 전 배관과 연결되어 고압 펌프로 보내지며, 가압된 LNG는 해수 기화기를 통하여 기화되어 전국 수요처에 공급된다. BOG 재액화기는 현재 평택, 인천 LNG 기지 각각 60 ton/hr 규모이며, 304 스텐리스 스틸 재질로 만들어진 수직용기로 2개 부분으로 분리된다. 상부는 BOG를 재액화하는 기능을 가지며, 하부는 재액화된 LNG를 주 송출라인에 보내기 전 유량조절을 위한 일시 저장(Buffer) 기능을 갖는다. Table 1에 운영조건을 나타내었다[6].

BOG를 포화 상태의 액체로 만들기 위해 냉열 공급원으로 작용하는 LNG의 질량비율은 이론상으로 1:7~1:9 정도이다. 그러나 포화 상태의 액체로 LNG 고압 펌프로 보낼 경우, 전체적으로 고압 펌프 전단의 LNG 온도가 상승하여 2차 펌프 내부에서 LNG 증발에 기인하는 공동화(Cavitation)현상 등 기기에 좋지 않은 문제점이 발생하므로, 공정의 안정적 운영을 위하여 BOG를 포화 상태가 아닌 과냉각 상태로 액화시키기 위해 필요한 BOG와 LNG의 실제질량비율은 1:12.5 정도이다.[8]

이 직접접촉 액화법은 액화된 BOG와 LNG의 순환을 위한 추가동력을 필요로 하게 된다. 또한 BOG 발생량의 액화를 위하여 이론적으로는 7배의 LNG를 순환시켜야 하지만 순환 중 BOG의 추가발생과 완전액화를 위하여 실제순환은 12배 즉 BOG

30톤에 대하여 360톤의 LNG 순환을 필요로 한다. 이와 같이 BOG를 액화시키는데 필요한 LNG의 양이 커서 Table 1과 같이 하절기에는 도시가스 수요가 감소되어 LNG 순환량이 부족하게 되어 BOG의 안정적 처리에 어려움을 내포한다[4].

### 2.2. 간접접촉 BOG 액화과정

Fig. 2에서 제시한 간접접촉 공정은 기존의 액화 방식과 달리 간접 열교환 방식에 의해 액화하는 방식으로 냉열 공급용 LNG양을 크게 줄여 효율적인 공정으로 개선하는데 있다[5].

직접접촉공정에 비해 열교환기식 공정에서는 열교환기 효율(85%)을 고려하고도 소요되는 LNG를 현격히 줄일 수 있으므로 매우 큰 장점을 갖게 된다. 즉 BOG 압축기에 의해 압축된 BOG(30 °C, 15 kg/cm<sup>2</sup>)가 열교환기 Shell 측으로 들어가서, 열교환기 Tube측의 과냉된 LNG(-145 °C, 75 kg/cm<sup>2</sup>)와 열교환 된 후, Shell 측에서 나온 액화된 LNG(-130 °C, 15 kg/cm<sup>2</sup>)는 LNG 고압 펌프 전단에 공급되며, 반면 Tube 측에서 나온 LNG는(0 °C, 75 kg/cm<sup>2</sup>)는 해수기화기에서 기화되어 나온 LNG와 섞여서 공급되어 운전되는 시스템이다. Table 2에 운영조건을 나타내었다.

## III. 비교연구

### 3.1. 분석조건

분석에서 사용한 공정해석 시뮬레이터는 HYSYS이며, 여기서 사용된 열역학 상태방정식은 천연가스에 가장 적합한 Peng-Robinson 식을 적용하였다. 아래와 같이 나타낸 Peng-Robinson 식에서 P, P<sub>c</sub>는 시스템 압력과 임계압력, T, T<sub>c</sub>는 시스템 온도와 임계온도, R은 기체상수를 나타내고 있다[1][2].

**Table 3.** Compositions of LNG and BOG.

Components	Composition (mol%)	
	LNG	BOG
Methane	89.86	99.6
Ethane	6.40	0.2
Propane	2.22	0.05
iso-Butane	0.47	-
n-Butane	0.55	-
iso-Pentane	0.04	-
n-Pentane	0.02	-
Nitrogen	0.19	0.05
Carbon dioxide	0.25	-

**Table 4.** LNG quantities for condensation of BOG 1kg.

Method		LNG quantities(Kg)
Direct Contact BOG liquefaction system		12
Indirect Contact BOG liquefaction system	85% (Heat exchange efficient)	4.80
	100% (Heat exchange efficient)	4.08

**Table 5.** Data of Operating Status.

구분	BOG측		LNG측	
	유입	배출	유입	배출
혼합드럼식	30℃	-132℃	-145℃	-132℃
	10kg/cm <sup>2</sup>	9kg/cm <sup>2</sup>	15kg/cm <sup>2</sup>	9kg/cm <sup>2</sup>
열교환기식	50℃	-130℃	-145℃	-90℃
	15kg/cm <sup>2</sup>	10kg/cm <sup>2</sup>	15kg/cm <sup>2</sup>	15kg/cm <sup>2</sup>

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

여기서,  $a(T) = 0.45724R^2 \frac{T^2}{P_c} a(T)$  (2)

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

$$\sqrt{a} = 1 + x(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}}) \quad (4)$$

$$x = 0.37464 + 1.54226w - 0.26992w^2 \quad (5)$$

연구에서 이용할 LNG 및 BOG의 조성은 Table 3과 같다.

### 3.2. 분석결과

이 절에서는 직접접촉 BOG 액화공정(혼합드럼식)과 간접접촉 BOG 액화공정(열교환식)에 대한 비교분석을 실시하고자 한다. 공정 비교분석을 위해서 BOG 및 냉열 공급용 LNG의 인입 조건은 LNG 기지의 운전조건을 적용하였으며, 따라서 혼합드럼식과 열교환기식 각각의 운전방식에 따라 BOG 1 kg을 액화하기 위해 필요한 최소한의 냉열 공급용 LNG 소요량을 분석하였다.

이들에 대한 운전상태는 Table 5와 같다.

이런 상태에서 BOG 1 kg을 액화시키기 위해 소요되는 최소한의 LNG양은 혼합드럼식의 경우 약 12 kg이며, 85% 효율의 열교환기식에서 4.8 kg 인 것으로 분석되었다. 각 조건에서 BOG 액화에 소요되는 LNG량을 분석한 결과는 Table 2와 같다. 열교환기의 냉열 공급 LNG 출구온도 감소로 인해 소요량이 증가되며, 열교환기 효율에 따라 4.08~4.80 kg 정도 요구된다.

## IV. 결론

LNG 기지 내 자연발생하는 BOG를 액화하기 위해서 기존의 직접접촉 액화공정과 간접접촉 액화공정을 비교해 보았다. 현재의 LNG직접접촉 공정은 BOG 발생량의 7배인 시간당 210톤의 LNG순환이 이론적으로 요구되고 있고 실재는 열손실 등에 의해 12배의 LNG가 순환되고 있다. 이로 인하여 흡수탑에서 액화된 BOG와 LNG를 2차 펌프 전에 주입하기 위한 LNG 재순환 펌프의 동력이 크게 소요된다. 송출량 300톤을 기준으로, 간접접촉 액화공정을 적용하여 연간 절감되는 펌프 동력은 보면 약 1.5x10<sup>6</sup> kW이다. 간접접촉 액화방식은 시간당 30톤의 BOG 액화를 위해서 40톤의 고압 LNG 순환만을 필요로 한다. 또한 LNG냉열 이용량을 보면, 시간당 LNG 40톤을 기준하여 연간 5,571억kcal가 된다. 즉 간접접촉 액화공정은 순환동력의 절감뿐만 아니라 하절기 천연가스 수요의 감소에 대처할 수 있으므로 인수기지 운전의 안정성과 경제성을 제공하는 효과적인 처리공정으로 판단된다.

### 사용기호

$P$  : Pressure [Pa]  
 $T$  : Temperature [K]  
 $P_c$  : Critical Pressure [Pa]  
 $T_c$  : Critical Temperature [K]  
 $R$  : Gas constant [ $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ]  
 $v$  : Volume [ $m^3$ ]  
 $w$  : Acentric factor  
 $a$  : Peng - Robinson constant  
 $b$  : Peng - Robinson constant

### 감사의 글

이 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지 안전연구단”의 연구 결과입니다(세부과제번호: 2007-M-CC23-P-02-1-000).

### 참고문헌

- [1] J. Heestand, C. W. Shipman and J. W. Meader, "A predictive model for rollover in stratified LNG tanks", *AIChE J*, **29**, pp 199-207 (1983).
- [2] K. Nasrifar and M. Moshfeghian, "Vapor-liquid equilibria of LNG and gas condensate mixtures by the Nasrifar- Moshfeghian equation of state", *Fluid Phase Equilibria*, **200**, 203-216 (2002)
- [3] 이동혁, 하중만, 박영, 윤익근, 백영순, "LNG 기지에서 BOG 액화공정 개선에 관한 연구", 한국가스학회지, **5**(3), 23-28, (2001)
- [4] 신명욱, "액화 천연가스 탱크의 증발가스 발생량과 안전성에 관한 모사 연구", 서울대학교 공학석사 학위논문 (1999).
- [5] John R. Howell, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, SI ver., McGraw-Hill. (2005).
- [6] Warren L. McCabe, *Unit Operations of Chemical Engineering*, 5<sup>th</sup> ed, McGraw-Hill, (2001)
- [7] H. S. Kim, "Economical analysis on the size and propulsion system of LNG carrier", Technical Trend of The Gas Industry, KOGAS, **17**, pp 69-76 (2005).
- [8] 김용갑, "중장기 발전용 천연가스 적정 요금 체계 연구", 한국가스공사[공편], 2004