

LNG 기지에서 BOG 액화공정 개선에 관한 연구

김 동 혁 · 하 종 만 · 박 영 · 윤 익 근 · †백 영 순

LNG 기술연구센터

한국가스공사 연구개발원

(2001년 5월 27일 접수, 2001년 8월 25일 채택)

Study on the improvement of BOG recondensation process at LNG receiving terminal

D. H. Kim · J. M. Ha · Y. Park · I. K. Yoon and Y. S. Baek

LNG Technology Research Center

R & D Division, Korea Gas Corporation

(Received 27 May 2001 ; Accepted 25 August 2001)

요 약

LNG(액화 천연가스) 기지의 LNG 저장탱크로부터 자연적으로 발생하는 BOG(증발 천연가스)가 약 0.05 vol%/day로 생성되므로, 이를 회수하기 위해서 혼합드럼 방식의 Condenser에 질량비로 LNG와 BOG를 11 : 1로 혼합시키므로써 -159℃ LNG 냉열을 활용하여 액화 처리하는 공정이다. 이러한 방식의 공정은 단순하지만 에너지 측면에서 비효율적인 것으로 알려졌다. 따라서 본 연구에서는 새로운 열교환식 방식을 제시하고 공정해석 시뮬레이션인 ASPEN PLUS를 이용하여 공정을 비교 분석하여 타당성을 조사하고자 한다.

Abstract - BOG(Boil Off Gas) is formed about 0.05 vol%/day from LNG tanks of LNG receiving terminal. To recycle the BOG using LNG cold energy, the quantities of LNG and BOG is mixed at the ratio of 11 : 1 by mass in the recondenser of mixing drum type. However, this process is inefficient in the view of energy. It is the most necessary for improvement BOG recondensing process to reduce LNG quantities supplying to recondense system. Therefore, this study has aimed to propose heat exchanger type and suggest results through the analysis of ASPEN PLUS simulator and feasibility study.

Key words: LNG, BOG, Heat Exchanger, ASPEN, Recondenser

1. 서 론

가정용 열원으로부터 국내 산업 및 발전용에 이르기까지 수요량이 증가하고 있는 천연가스는 전량 말레이시아, 인도네시아, 호주, 브르네이, 오만에서 수입하여 한국가스공사 평택과 인천 LNG(Liquefied Natural Gas, 액화천연가

스, 이하 LNG) 기지에 저장되고 전국 배관망을 통하여 전국 수요처로 공급되어 진다. LNG는 메탄이 주성분으로서 약 -158℃(1.13 kg/cm²abs)에서 액화되기 때문에 Fig. 1.에서와 같이 수입된 LNG는 극저온 액체 상태로 탱크에 저장되고, 각 수요처에 도달될 수 있게 가압 된 후, 해수기화기 등에서 기화과정을 거쳐, 가스 상태로 파이프를 통해 공급된다.

†주저자 : ysbaek@kogas.re.kr

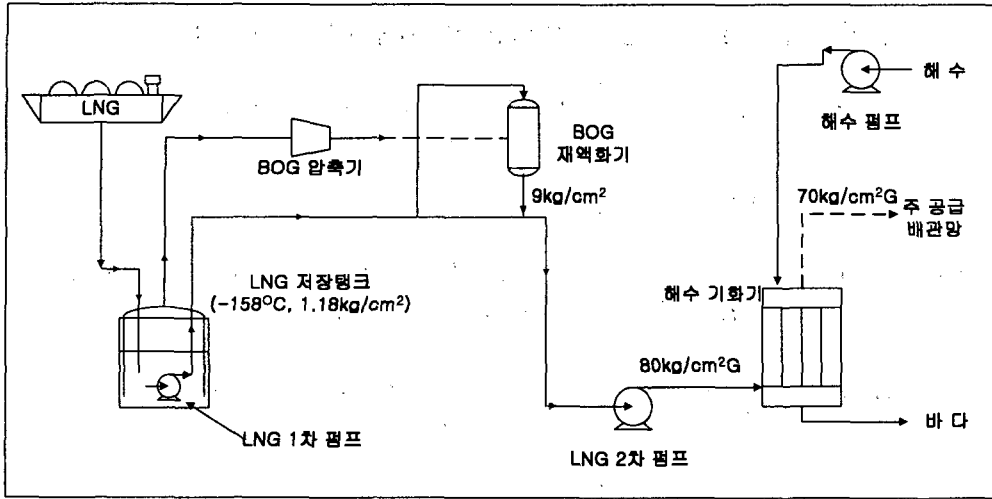


Fig. 1. Schematic diagram of LNG receiving terminal.

LNG 기지 내 저장탱크는 LNG 극저온 상태를 유지하기 위해 단열재를 사용하여 기화를 최대한 억제하나, 외부 상온 온도에 의한 불가피한 열유입으로 탱크 1기(100,000m³) 기준으로 약 0.5 vol%/day의 LNG가 BOG로 기화된다. 평택 LNG 기지의 경우 99년 평균 BOG 발생량은 30.3 ton/hr로 이는 적지 않은 발생량으로, BOG를 대기로 버리지 않고 회수할 수 있는 BOG 처리공정은 경제적인 측면에서 필수 불가결한 것이다. 국내 LNG 기지에서 사용되는 회수공정은 혼합 드럼 내에서 LNG를 BOG와 직접 혼합하여 LNG 냉열을 BOG에 줌으로서 BOG를 액화시키는 공정으로 이루어졌다. 즉 질량비로 BOG와 LNG의 혼합비율은 안정적인 운영을 고려하여 1 : 11로서 충분히 과냉시킨 상태에서 혼합드럼방식인 Recondenser (이하 재액화기)에 의해 회수되고 있다. 액화 과정을 거친 LNG는 압력차 때문에 다시 LNG 저장탱크로 회수가 불가능하므로, 전량 수요처로 공급되어야 한다. 그러나 가스수요가 적은 하절기(특히, 심야시간)의 경우 소비처 수요가 재액화기에서 발생하는 LNG 공급 양보다 적을 경우에도 발생하기 때문에, 이에 대한 수요대비 과잉 공급량에 대한 처리방안뿐만 아니라, BOG 처리공정에 공급되는 LNG량을 감소시킬 방안 등 보다 LNG 기지에 대한 효율적인 운영이 필요한 실정이다. BOG 재액화에 투입되

는 LNG 공급량을 줄이는 방안으로서 주로 제안되고 있는 공정은 열교환기식 BOG 재액화 시스템 방식으로, 이는 한국가스공사 자체뿐만 아니라 외부에서도 현장 적용 개선방안으로 제안되어져 왔다. 이 열교환기식 공정의 목적은 LNG 고압 펌프에서 송출된 고압의 LNG를 사용하여 현 방식보다 LNG 냉열 공급 범위를 상대적으로 넓혀 결국 LNG 공급량을 획기적으로 줄이는데 있다. 따라서, 본 연구에서는 열교환기식 BOG 액화 시스템 방식을 현 공정과 비교를 통한 타당성을 분석하고자 한다. 이 열교환기식 공정의 핵심은 BOG 재액화를 위하여 냉열을 제공하는 LNG의 양이 질량비율로 거의 1:1 수준이라는 것이다. 이러한 공정이 현실성이 있다면, 효과적인 BOG 처리공정으로서 상당히 유리한 것으로, 이에 대한 분석이 요구되는 것은 당연하다. 이에 대한 분석으로 공정 해석 시뮬레이터인 ASPEN PLUS를 사용하여 현 액화공정을 모델링하고 새로운 열교환식 공정을 분석 비교함으로써 타당성을 조사하여 개선 방안을 제시하고자 한다.

2. 분석 조건

본 분석에서 사용한 공정해석 시뮬레이터는 ASPEN PLUS이며, 여기서 사용된 열역학 상태방정식은 천연가스에 가장 적합한 Peng-Robinson

식을 적용하였다. 아래와 같이 나타낸 Peng-Robinson 식에서 P, Pc는 시스템 압력과 임계압력, T, Tc는 시스템 온도와 임계온도, R는 기체상수를 나타내고 있다.

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

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

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c}$$

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

$$x = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

본 연구에서 이용할 LNG 및 BOG의 조성은 아래 Table 1.과 같이 외부에서 제안된 간접 열교환 형태인 열교환기식 공정에서 제시된 조성을 이용하였고, 결과에 대한 일관성을 유지하기 위해 이 조성을 본 연구 분석에 계속 사용하였다.

Table 1. 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	-

3. 현 혼합드럼식과 열교환식 BOG 액화공정의 개요

현재 BOG 액화공정은 Fig. 2.에서 같이 LNG 탱크에서 자연적으로 발생한 BOG는 30°C, 10

kg/cm² 상태로 압축되어 -155°C, 15 kg/cm² LNG와 혼합 드럼(Recondenser)에서 혼합되어 -132°C, 9 kg/cm² 상태로 액화되어 활용되고 있다. 특히 BOG 액화를 위해 저압펌프(ΔP=13.8kg/cm²)에서 토출된 LNG 중의 일부가 냉열 공급원으로서 혼합드럼으로 보내진다. BOG 혼합드럼에서 액화된 LNG는 주 송출라인인 LNG 고압 펌프(ΔP=65.5kg/cm²) 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 스테레스 스틸 재질로 만들어진 수직 용기로 2개 부분으로 분리된다. 상부는 BOG를 재액화하기 위한 곳이며, 하부는 재액화된 LNG를 주 송출라인에 보내기 전 유량조절을 위한 일시 저장(Buffer) 기능을 갖는다. BOG를 포화 상태의 액체로 만들기 위해 냉열 공급원으로 작용하는 LNG의 질량비율은 1 : 7~9 정도이다. 그러나 포화 상태의 액체로 LNG 고압 펌프로 보낼 경우, 전체적으로 고압 펌프 전단의 LNG 온도가 상승하여 2차 펌프 내부에서 LNG 증발에 기인하는 동공화(Cavitation) 현상 등 기기에 좋지 않은 문제점이 발생하므로, 공정의 안정적 운영을 위하여 BOG를 포화 상태가 아닌 과냉상태로 액화시키는 데 여기서 혼합되는 BOG와 LNG의 질량비율은 1:11 정도이다. 따라서 BOG의 발생량이 30 ton/hr일 경우 액화를 위해 필요한 최소 LNG 공급유량은 330 ton/hr이 된다.

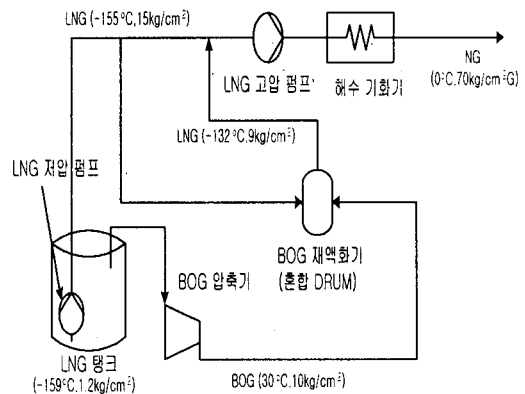


Fig. 2. Process for BOG condensation at LNG receiving terminal.

그러나 Fig. 3에서 제시한 열교환기식 공정은 기존의 액화방식과 달리 간접 열교환 방식에 의해 액화하는 방식으로 현 LNG 생산기지 냉열 공급용 LNG양을 크게 줄임으로 인한 효율적인 공정 개선을 구축하는데 있다. 현 LNG 기지 공정에 비해 열교환기식 공정은 BOG와 LNG의 비율은 열교환기 효율(85%)을 고려하고도 소요되는 LNG를 현격히 줄일 수 있으므로 매우 큰 장점을 갖게 된다. 즉 BOG 압축기에 의해 압축된 BOG(50°C, 15kg/cm²)가 열교환기 Shell 측으로 들어가서, 열교환기 Tube 측의 과냉된 LNG(-154°C, 75kg/cm²)와 열교환된 후, Shell 측에서 나온 액화된 LNG(-145°C, 15kg/cm²)는 LNG 고압 펌프 전단에 공급되며, 반면 Tube 측에서 나온 기화된 천연가스(0°C, 75kg/cm²)는 해수기화기 전단에 공급되어 운전되는 시스템이다.

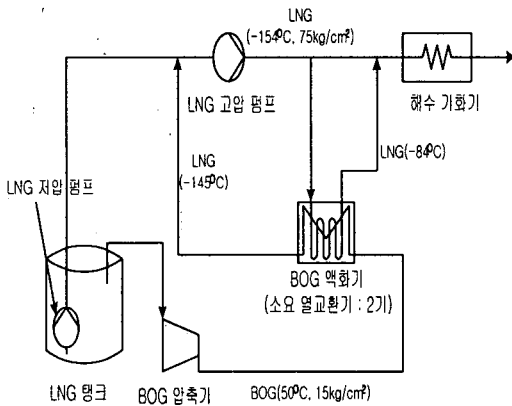


Fig. 3. Outline of new process for BOG condensation.

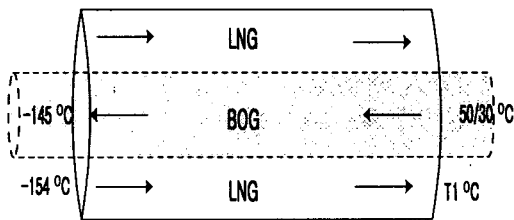


Fig. 4. Temperature condition at entrance and exit of heat exchanger.

4. BOG 액화 공정 분석결과 및 토론

4.1. 열교환식 BOG 액화공정의 Heat duty

앞서 제시한 열교환기식 액화공정은 LNG와 BOG 온도와 압력 조건에 따라 달라지므로 Fig. 4에 현기지 공정조건에서의 열교환기 입·출구 온도를 설정하여 LNG 온도변화에 따른 BOG 온도변화를 ASPEN PLUS를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

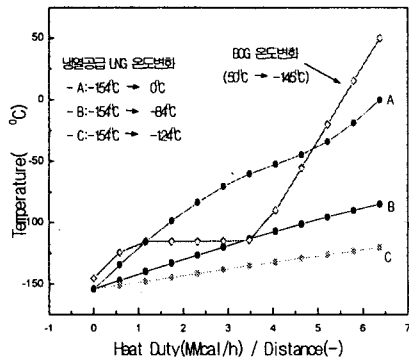


Fig. 5. Temperature profile of LNG and BOG and heat duty in heat exchanger.

먼저 BOG 초기온도 50°C에서 LNG, BOG와 Heat duty 분석결과를 Fig. 5에 나타냈듯이 LNG 냉열을 활용할 수 있는 양이 한계가 있다. 즉 LNG 출구온도가 -84°C 이상에서는 열교환기 내에서 고온측(BOG)과 저온측(LNG)이 온도 역전에 의해 그 역할이 뒤바뀌는 Temperature crossover 현상이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 Temperature crossover 현상이 발생하더라도 열교환기는 작동되나 열교환 효율이 상당히 떨어지고, 기기의 안전성 문제가 제기되어 사실상 열교환기 제작은 불가능하며, 운전조건을 변화시키지 않은 상태에서 이 현상을 피할 수 있는 방법은 여러 개의 열교환기를 직렬 또는 병렬로 적절히 조합하여 문제를 해결하는 방법이 있으나, 열교환기 배열방법, 초기투자비 및 공간확보 등 많은 문제를 내포하고 있다. Fig. 4에서 열교환기식 공정을 나타낸 것은 그래프 A로 Temperature crossover 현상은 BOG가 기체에서 액체로의 상변환 과정에 기인함을 알 수 있다. 그래프 B, C에서와 같이 열교환기 냉열 공급 LNG의 출구온도를 내릴 경우

Temperature crossover 현상을 피할 수 있음을 볼 수 있다.

Fig. 6.은 초기 BOG 온도를 30℃의 경우 LNG와 BOG의 온도와 heat duty 변화를 나타냈다. Temperature cross 현상은 LNG 출구온도 -97℃에서 일어난다. 이는 초기 BOG 온도가 높을수록 LNG 냉열 활용 효율이 낮아진다.

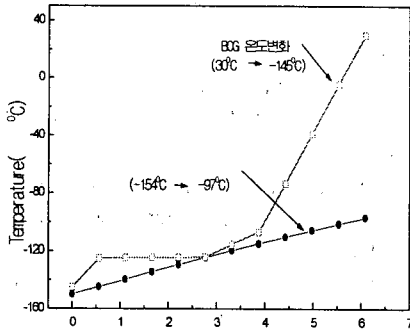


Fig. 6. Temperature profile of LNG and BOG and heat duty in heat exchanger at initial temperature 30℃ of BOG.

4.2. LNG 기지 운전조건에서 BOG 액화공정 비교분석

본 절에서는 BOG 처리공정에 대한 새로 제안된 열교환기식과 인수기지에서 사용중인 혼합드럼식에 대한 공정을 비교분석 하고자 하였다. 공정 비교분석을 위해서 BOG 및 냉열 공급용 LNG의 인입 조건은 LNG기지의 운전 조건을 적용하였으며, 따라서 혼합드럼식과 열교환기식 각각의 운전방식에 대한 BOG 1kg을 액화 하기 위해 필요한 최소한의 냉열 공급용 LNG 소요량을 분석하였다. 이들에 대한 운전 상태는 BOG 측의 혼합 Drum식에서 30℃, 10kg/cm² 에서 -125℃, 9kg/cm² 으로 바뀌며, 열교환기식에서는 30℃, 10kg/cm² 에서 -145℃, 10kg/cm²으로 바뀐다. 한편 LNG 측의 혼합 Drum식에서 -155℃, 15 kg/cm² 에서 -125℃, 9 kg/cm² 으로 바뀌며, 열교환기식에서는 -154℃, 80 kg/cm² 에서 -97℃, 80 kg/cm²으로 바뀐다. 이런 상태에서 BOG 1 kg을 액화시키기 위해 소요되는 최소한의 LNG 양은 혼합드럼식의 경우 약 7.86 kg이며, 85% 효율에서 열교환기식은 5.54 kg으로 소요되는 것으로 분석되었다.

또한 이러한 조건에서의 BOG 액화에 소요되는 LNG량을 분석한 결과를 table 2.에 나낸 것으로 열교환기의 냉열 공급 LNG 출구온도 감소로 인해 소요량이 증가되며, 열교환기 효율에 따라 4.71~5.54 kg 정도 요구된다.

Table 2. LNG quantities required for condensation of BOG 1kg.

METHOD		LNG quantities(Kg)
혼합드럼식		7.86
열교환식	열교환 효율: 85%	5.54
	100%	4.71

열교환기식이 혼합드럼식에 비해 LNG 소요량이 적은 것은 Fig. 6.에서와 같이 냉열을 활용할 수 있는 공급 범위가 상대적으로 넓기 때문이다.

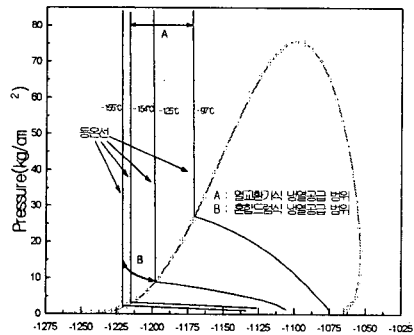


Fig. 7. P-H Line at entrance and exit of BOG condenser.

열교환기식의 경우 LNG 소요량은 주어진 조건에서 열교환기 내 Temperature crossover 현상이 발생하지 않는 최소한의 양이며, 이때 Fig. 7.과 같이 LNG 기지 운전조건을 고려시 열교환기 출구에서의 LNG 온도가 -97℃임을 알 수 있다.

5. 결 론

LNG 기지 내 LNG Tank로부터 자연발생되는 BOG를 액화하기 위해서 사용되는 혼합 드럼방식에서 열교환기 방식으로 공정을 변경하였을 때, BOG 액화시 냉열 공급용으로 사용되는 LNG 소요량에 관한 전산 시뮬레이션 한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열교환기식 공정에 의해 많은 냉열을 얻기 위해서는 LNG와 BOG 온도와의 Temperature crossover 현상을 피해야 할 것이며, LNG 기지 운전조건에서 냉열 공급용 LNG 온도를 -154°C 에서 -97°C 까지의 온도차($=\Delta T$)인 약 57°C 냉열 활용이 가능하다.
- (2) 현 LNG 기지에서 사용중인 혼합 드럼식의 경우 BOG 1kg 액화를 위해 소요되는 최소 냉열 공급용 LNG양은 7.86 kg으로 나타났으며, 반면 제안된 열교환기식 공정에서는 소요되는 약 5.54 kg (열교환기 효율 85% 고려)로 나타났다. 이는 열교환기식이 냉열 활용이 넓게 활용할 수 있기 때문이다.

따라서 열교환기식이 혼합 드럼식에 비해 냉열 공급용 LNG 소요량을 줄일 수 있으나, 현 공정을 제안공정으로의 변경시 초기투자비 및

기존공정 대체에 따른 기회비용 상실 등을 고려하여 적용되어야 할 것으로 보여진다. 한편 열교환기식 공정의 운전조건을 변경시키지 않는 상태에서 열교환기들을 적절히 조합하여 Temperature crossover 현상을 피할 수 있는 방법도 연구할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 한국가스공사 평택생산기지, "운전지침서(프로세스설비, A권)", 1997
2. 한국가스공사 평택생산기지, "운전지침서(2차 확장 설비)", 1998
3. Tractebel engineering International, Pyongtaek LNG terminal-Recondensing system Technical note, 1997
4. Warren L. McCabe, "Unit Operations of Chemical Engineering", 5th ed., McGraw-Hill, 1995
5. John R. Howell, "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", SI ver., McGraw-Hill
6. Aspen Tech. Inc., Aspen Plus User Guide vol. 1~3, ver. 10.1, 1999
7. Aspen Tech. Inc., Aspen Plus Unit Operation models, ver 10.1, 1999
8. Aspen Tech. Inc., Aspen Plus Physical property data, ver 10.1, 1999