

이중관 삼중흐름 열교환에 의한 LNG 기화시스템의 열적 해석

윤 상 국[†]

(원고접수일 : 2003년 6월 9일, 심사완료일 : 2003년 9월 2일)

Thermal Analysis of Double-tube Triple-flow LNG Vaporization System

Sang Kook Yun[†]

Key words : LNG open rack vaporizer(액화천연가스 개방식 기화기), TRIDEX LNG vaporizer (이중관 삼중흐름 LNG 기화기), LPG revaporizer(액화석유가스 재기화기), Sea water desalination unit(해수 담수화 장치)

Abstract

As sea water is being used as only heat source of LNG open rack vaporizer, serious problem has been risen in LNG terminal by the lack of heating energy source for LNG vaporization due to the temperature drop of sea water in winter. In this paper the new double-tube triple-flow(TRIDEX) vaporizer was suggested to solve the problem and the system was thermally analysed. LPG(liquefied petroleum gas) and sea water were introduced as the heat sources for LNG TRIDEX vaporizer. The flow patterns of TRIDEX vaporizer are as follows: LNG flow in the annular space, PG(petroleum gas) flow in the inner tube, and sea water flow in the outside of the double pipe. The overall LNG vaporization system was consisted of TRIDEX vaporizer, LPG vaporizer and PG heater. LPG in TRIDEX was directly dispersed in the sea water desalination unit, so that LPG turns to be gas phase for the reuse in TRIDEX vaporizer. New TRIDEX vaporizer system for LNG evaporation was analysed as much more effective than the present single tube one in the case of colder temperature of sea water in winter.

기호설명

하첨자

H : 엔탈피 [kJ/kg]
 X : 질량분율

b : 부탄
 p : 프로판
 T : 혼합물

[†] 책임저자 (한국해양대학교 공과대학 기계정보공학부) E-mail : rel@mail.hhu.ac.kr, T : 051)410-4363

1. 서론

수도권 지역에 청정연료인 천연가스의 공급을 위하여 액화천연가스(LNG)를 1986년 인도네시아로부터 한국가스공사가 처음 도입한 이래, 2002년 현재는 총 1,100만 톤 이상의 LNG를 도입하여 전국적으로 공급하고 있어 국민의 편의성 제공에 크게 기여하고 있다. 이러한 천연가스의 도입과 공급을 위하여 평택과 인천에 LNG 인수기지가 운영되고 있고 경남 통영에 제 3 인수기지를 건설 중에 있다.

LNG는 매탄을 주성분으로 하는 무색 무취의 -162℃ 극저온 액체로 수요자에게는 난방용이나 도시가스용으로 가스상태로 공급되고 있다. 이를 위해서 LNG는 액체 상태로 펌프에 의해 75kg/cm²까지 상승되고, 해수가 보유하고 있는 열에 의해 기화기에서 가열되어 가스로 변환, 배관을 통하여 공급된다.

Fig. 1은 해수이용 LNG 기화 시스템을 보여주

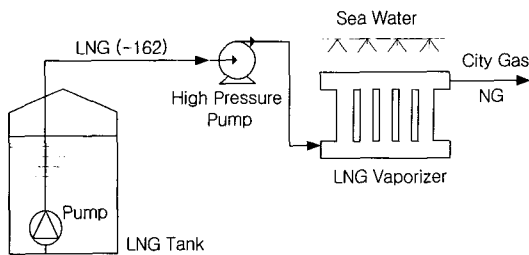


Fig. 1 Current LNG vaporization system.

Table 1 LNG evaporation rate in open rack vaporizer changing with sea water temperature.

Sea water temperature	LNG vaporization rate(Ton/h)	Efficiency of heat exchange
0.5 ℃	22.7	12 %
1.0	45	25
2.0	85	47
3.0	115	64
4.0	135	75
5.0	165	92

며 Table 1은 대표적 LNG 해수기화기의 운전조건을 나타낸 것이다.⁽¹⁾ 표의 운전조건을 보면 LNG기화기에서 기화 후 배출되는 천연가스는 0℃이상의 기체로 유지되어야 하며, 가열원인 해수는 차가운 LNG에 열을 제공하고 약 5℃정도의 온도가 저하되어 바다에 배출된다. 그러므로 원활한 LNG 기화를 위해서는 기화기에 주입되는 해수 온도가 최소한 5℃ 이상으로 유지되어야 한다. 그러므로 제작사의 설계 최저 온도도 이 온도를 기준으로 하고 있다. 그러나 현재 서해안 수도권에 위치한 인천인수기지의 경우 동절기 혹한으로 인하여 해수의 온도가 -1.5℃까지 저하함으로써 LNG기화에 필요한 열량을 충분히 제공하지 못하고 있다.

Fig. 2는 해수온도가 저하될 때 해수로부터 제공받을 수 있는 에너지량과 부족에너지를 나타낸다. 해수온도가 동결점 가까이 저하되면 LNG 해수 개방형 기화기(open rack vaporizer)에서의 LNG 기화량이 급격히 감소하고, 만약 과다하게 LNG를 공급한다면 기화기 표면에 해수의 동결이 발생하게 된다. 이는 기화기 튜브에 응력을 증가시켜 휨 현상이 발생하거나 파손의 위험을 주게 된다. 한편 기화기에 LNG공급량의 감소는 동절기 가스 공급의 부족을 초래하게 된다.

현재 이에 대한 대처 방안으로는 부족한 해수 열원 대신에 천연가스 연소식 기화기와 해수가열기를 사용하고 있다. 그러나 천연가스 연소식 기화기는 열원으로 천연가스를 사용하므로 막대한 양의

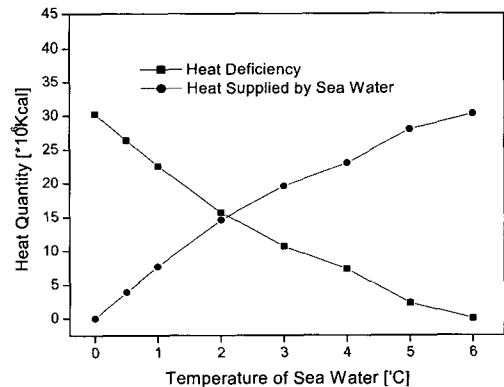


Fig. 2 Energy supplied by sea water changing with sea water temperature.

LNG를 소비하기 때문에 비경제적이며, 해수가 열기 역시 전기 에너지를 이용하여 LNG기화기에 공급되는 많은 양의 해수의 온도를 상승시켜야 하므로 에너지 손실이 크게 된다. 그러므로 해수 온도 저하에 따른 LNG 기화량의 감소에 효과적으로 대처할 수 있는 저렴한 에너지를 이용할 수 있는 방안이 요구되고 있다.

본 논문에서는 해수 온도가 저하되는 동절기에도 해수 에너지를 이용하여 LNG를 기화시킬 수 있는 이중관 삼중흐름 LNG 기화 방식의 시스템을 제시하고, 이 시스템의 열적 해석과 공정 운전 인자들의 영향을 분석하여 시스템의 국산화 개발을 위한 가능성을 검토하고자 한다.

2. 이중관 삼중흐름 LNG 기화 공정

기존의 LNG 기화방식은 해수만을 사용하는 대신에, 본 시스템은 액화석유가스(LPG)의 잠열과

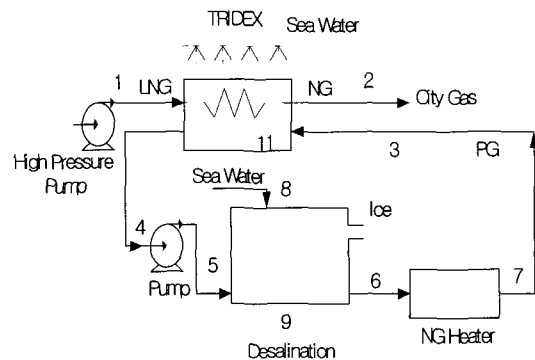
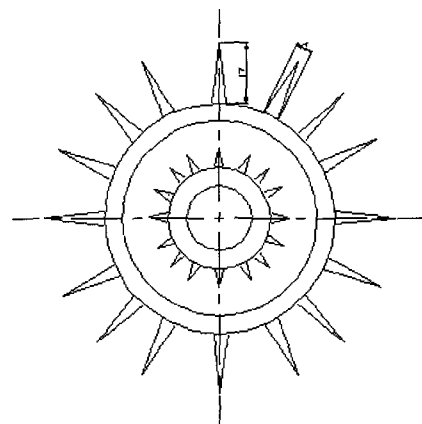


Fig. 3 Schematic diagram of LNG vaporization system with R-290.

현열 그리고 해수의 현열을 이용하는 시스템이다. 즉 LNG를 기화시키는 데 필요한 열량을 해수에서 일차적으로 공급하고 부족한 열량을 석유가스 (petroleum gas)가 제공하는 것이다.

Fig. 3은 시스템도 그리고 Table 2는 정상상태의 운전을 해석한 결과를 보여준다. 시스템 도에서 보면 먼저 LNG는 이중관 삼중흐름 기화기(Fig. 3의 1~2)에서 해수와 석유가스(PG)로부터 열을 흡수하여 0℃로 기화되어 도시가스로 공급된다.



	Middle tube	Core tube
Fluid	LNG	LPG

Fig. 4 Cross section of TRIDEX vaporizer.

본 연구에서 고안한 이중관 삼중흐름 기화기의 대표적 구조는 Fig. 4와 같으며, 환상공간의 관에 LNG가 하부에서 상부로 흐르면서 관의 최외부에 적하되는 해수로부터 열을 흡수하고, 부족한 잔여 열은 중간 내부관을 흐르는 PG로부터 제공 받는

Table 2 Typical operation conditions of TRIDEX system.

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
Fluid	LNG	NG	PG	LPG	LPG	PG	PG	NG	S.W.	S.W.	S.W.	S.W.
T(℃)	-158	0	20	-60	-55	-10	40	15	0	-1.5	0	-1.5
ΔH (kJ/kg)	703.9		620.7		450.6		172.6	-	-		-	
Flowrate (Ton/H)	1	1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.96	48	48	48	48
P(kg/cm ²)	75	75	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

구조를 갖는 것이다. 이 때 과열가스 상태의 PG는 현열과 잠열을 LNG에 제공하면서 온도가 강하되어 과냉상태인 LPG가 된다. 이 LPG는 해수 담수화 장치(5~6)에 주입되어 얼음을 생성하면서 잠열을 흡수하여 기체인 PG로 변한다. 해수 담수화 장치에서 기화된 PG는 가열기(6~7)에서 60℃로 가열된 후 TRIDEX에 다시 순환된다.

본 공정의 장점은 겨울철 해수 온도 저하에 따른 LNG 기화량 감소 현상과, 기화기 표면에 얼음이 생성되는 문제를 해결할 수 있다. 또한 LNG 기화를 위한 가열식 기화기의 연료인 천연가스 소비량을 크게 절감시킬 수 있게 된다.

이 시스템의 단점으로는 시스템이 복잡하고 초기 시설 투자비가 연소식 기화기에 비교할 때 상대적으로 크게 되는 것을 들 수 있다.

3. 기화기의 내부 지점별 온도구배

Fig. 5는 정상적인 해수온도에서의 현재의 고압 해수 기화기의 지점별 온도 구배로 기화기 외부에 적하되는 해수는 15℃에서 10℃로 방출되고, LNG는 -160℃ 액체에서 0℃ 기체로 변화된다. LNG의 기화과정에서 곡선으로 온도가 상승하는 것은 메탄, 에탄, 프로판 등이 함유된 다성분 유체이기 때문이며, 약 -40℃ 정도에서 변곡점이 형성되는 것은 잠열에서 현열 영역으로 바뀌기 때문이다.

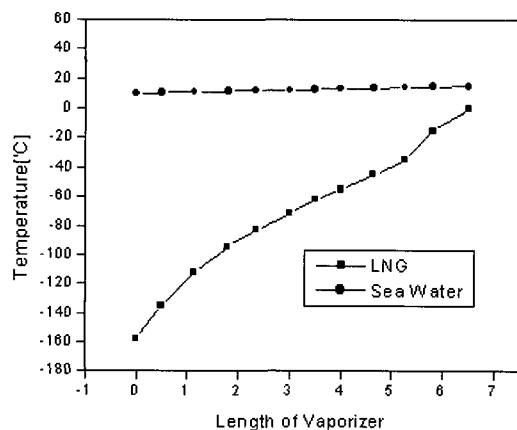


Fig. 5 Temperature distribution of LNG and sea water in vaporizer.

Fig. 6은 해수 온도가 저하되어 0℃이하가 될 때의 본 TRIDEX 시스템을 적용한 기화기의 온도 구배를 해석한 그림이다. 열원인 해수는 0℃로 주입되어 -1.5℃로 방출되고 주 열원인 PG는 40℃의 가스로 주입되어 -60℃의 액체상태의 LPG로 배출된다. 순수 프로판의 온도변화 곡선은 열교환기 약 0.75 부근에서 LNG와 접촉하는 핀치점 (pinch point)을 갖고 있다. LPG와 LNG의 원활한 열교환을 위하여는 기화과정 온도변화 곡선이 서로 접촉하는 핀치점이 없도록 설계되어야 한다. 순수 프로판에 부탄을 적정량 혼합함으로써 핀치점을 피할 수 있으며, 또한 온도변화 곡선이 핀치점에서 이격될수록 열전달이 원만하게 이루어지므로 본 연구에서는 프로판 80%, 부탄 20%를 대표적 혼합물로 설정하였다. 이의 온도변화곡선을 보면 프로판과 부탄의 혼합물질이므로 LNG의 기화곡선과 동일하게 경사진 온도 상승곡선을 갖게 된다.

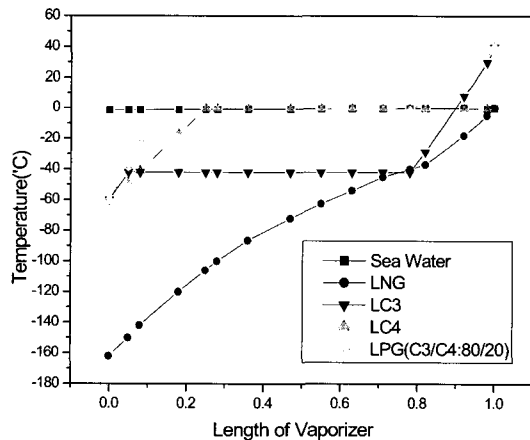


Fig. 6 Temperature distribution of liquefied propane (LC3), liquefied butane (LC4), LPG, LNG and sea water in vaporizer.

4. TRIDEX 시스템 열해석

4.1 TRIDEX LNG기화기의 기화 공정

Fig. 3의 시스템도에서 삼중흐름 이중관식 (TRIDEX) LNG 기화기의 소요열량(① → ②)

은 -158°C , $75\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 액체 LNG 단위 kg이 0°C NG기체로 변화하는 데 필요한 열량으로 $168.4\text{ kcal}/\text{kg}$ 가 된다.

Fig. 6의 프로판/부탄 조성비 80:20인 경우의 가열원인 LPG와 해수의 제공열량을 보면, LPG 제공열량은 LNG 소요량의 87.7%로 $147.8\text{ kcal}/\text{kg}$ 이고 해수 제공 열량은 12.3%가 된다.

이 열량을 제공하기 위한 PG의 상태변화는 PG 기체(40°C , $2\text{kg}/\text{cm}^2$) → 액화 잠열영역 ($-21.3^{\circ}\text{C} \sim -11.6^{\circ}\text{C}$) → 과냉(-60°C) 상태가 된다. 각 상태에서의 PG 성분중 프로판과 부탄의 에너지량은 과열기체에서 포화기체로의 에너지, 기화잠열 그리고 포화액에서 과냉액체까지의 에너지가 합하여진 총열량이며, 두 성분에 따른 혼합 에너지는 식 (1)과 같다. 프로판과 부탄이 혼합된 성분에 따라 혼합율(mixing rule)이 변화되므로 정밀한 산정을 위하여 혼합율은 ASPEN Plus를 사용하여 산정하였다.

$$\Delta H_T = m (X_p \Delta H_p + X_b \Delta H_b) \quad (1)$$

여기서 m 은 두성분의 혼합되어 이상적 혼합특성에서 벗어나는 비이상성을 나타낸다.

이 PG의 제공 열량을 이용하여 LNG를 기화시키기 위한 순환유량을 보면 LNG 1Ton/h 당 거의 동일하게 $0.997\text{Ton}/\text{h}$ 이 흐르게 된다. 한편 해수의 제공열량은 LNG 소요열량의 12.3%로 해수 온도변화(겨울) : $0.5^{\circ}\text{C} \rightarrow -1.5^{\circ}\text{C}$ 로 LNG 동일량을 기준할 때 해수 유량 $48\text{Ton}/\text{h}$ 가 필요하게 된다.

4.2 LPG의 재가열 공정

액화석유가스(LPG) 재가열 공정은 자연에너지를 최대한 활용하여 가열을 하기 위한 단위 공정으로 구성한다. 자연에너지 활용으로는 해수가 보유한 열을 간접접촉 이용하는 방법과 직접접촉시켜 LPG를 가열하는 방법이 있을 수 있다. 간접접촉 방법은 LPG가 보유하고 있는 냉열(저온 에너지)을 이용하는 산업을 설치하거나 현재의 LNG 기화방식과 동일하게 열교환기를 이용하여 해수를 가열하는 방법이 있을 수 있다. 냉열을 이용하는

방식은 LPG가 보유한 저온 에너지를 냉동냉장창고, 아이스링크 등에 제공하고 다시 가열되어 PG로 기화되는 방법이다. 이 방식을 적용하기 위해서는 대규모의 부지가 요구되므로 실용성이 낮은 방식으로 판단된다. 또한 현재의 해수이용 기화방식은 겨울철 해수온도가 극히 낮아 -1.8°C 이하가 되면 기화기 표면에 얼음이 생성, 성장되며 열교환 효율이 심히 저하되므로 적용이 불가능한 방식이다.

반면, 해수에 LPG를 직접 접촉시켜 LPG를 PG로 기화시키는 방법은 해수 담수화 공정을 들 수 있다. 해수 담수화 방식에는 증발법, 역삼투압법, 냉동법 등이 있으며, 이 중 냉동법에는 부탄을 사용하는 미국 Struther사의 부탄냉동법, R-114를 사용하는 AVCO crystalex법 등이 상용화되어 있다.^(2,3) LPG는 부탄과 프로판의 혼합물로 부탄냉동법과 동일한 특성을 갖는 매체로써 이 냉동 담수화법에 의해 재가열될 수 있게 된다.

담수화 장치에서 LPG의 상태는 과냉액체에서 저온기체로의 가열 기화가 이루어진다. 각 상태에서의 LPG 성분중 프로판과 부탄의 에너지량은 LNG기화기의 열산정과 동일하며, LPG 단위 1kg당 총 기화 소요열량은 142.5kcal 가 된다.

이 LPG에 의해서 생성되는 얼음의 양은 순수 열량만을 비교할 때 LPG 1kg당 1.8kg의 얼음이 생성된다. 또한 이러한 얼음의 생성은 제철소 등의 하절기 공업용수의 부족을 해결할 수 있거나, 슬러리 형태의 아이스를 제조하여 지역 냉방에 적용할 수도 있는 장점도 지닌다.

4.3 NG 연소식 PG 가열공정

냉동에 의한 해수 담수화 장치를 거쳐 나오는 -20°C 의 PG가스는 온수 가열기에 의하여 20°C 의 과열기체로 가열된다.

이 때 PG의 가열 필요열량은 $10.6\text{ kcal}/\text{kg}$ PG이 된다. 이를 가열하기 위한 연소기의 천연가스 연소 소비량은 $0.96\text{ Nm}^3/(\text{LPG톤})(\text{hr})$ 로 겨울철 2개월간 운전을 기준하여 20만 Nm^3 로 NG 1 Nm^3 당 도매가 400원을 기준하면 약 0.8억원이 소요된다. 이를 현재의 천연가스 연소식 수증연소 LNG기화기의 소비량과 비교할 때 동일 LNG량

기화 기준으로 약 4%에 해당한다.

5. 결 론

본 연구에서는 고압 LNG기화기에서 겨울철 해수온도가 저하함에 따라 기화기 기화 효율이 극히 낮아 LNG 기화량이 감소하는 문제를 해결하기 위하여 TRIDEX기화시스템을 고안하였고 시스템의 해석 결과는 다음과 같다.

(1) TRIDEX시스템을 적용하여 LNG를 자연 에너지인 해수와 보조 열원인 액화석유가스를 이용하여 LNG를 효과적으로 기화시킬 수 있다.

(2) LNG 기화 공정에서 해수온도 0.5℃ 기준할 때 LNG 1Ton/h을 기화시키기 위한 PG량은 거의 동일하게 0.997Ton/h이며, 해수는 48Ton/h이다.

(3) LPG의 재기화 공정은 자연에너지 이용 방법인 해수담수화법을 이용할 수 있으며, 이 때 LPG 1Ton당 1.8Ton의 열을 생산할 수 있다.

(4) PG 가열 공정은 현재의 수증연소 LNG기화기의 방식과 비교할 때 4%에 불과한 에너지 절약형 기화 시스템이다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

- [1] 가스생산기술수첩, 1997, 한국가스공사, pp.43~81.
- [2] Spiegler, K.S., and Laird, A.D., 1980, Principle of Desalination, 2nd Ed., Academic Press.
- [3] 고 석 문 외, 1985, 한국건설기술연구소, pp. 343~397.

저 자 소 개



윤상국 (尹相國)

1955년생, 1977년 성균관대학교 화학공학과 졸업, 1982년 연세대학원 화학공학과 졸업(공학석사), 1989년 영국 사우드햄프턴대학교 초저온공학과 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 냉동공조 에너지 전공 부교수.