

## 해수 2단 공급에 따른 해수식 기화기(ORV)의 LNG 기화 특성 연구

김남국 · †윤상국

한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과  
(2019년 1월 8일 접수, 2019년 2월 16일 수정, 2019년 2월 17일 채택)

### Study on the LNG Vaporization Characteristics of Open Rack Vaporizer(ORV) with Two-way Seawater Supplying System

Nam-Kug Kim · †Sang-Kook Yun

Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, the Graduate School of  
Korea Maritime and Ocean University, Busan, 606-791, Korea

(Received January 8, 2019; Revised February 16, 2019; Accepted February 17, 2019)

#### 요 약

LNG는 주된 기화기인 해수를 이용하는 해수식 기화기를 이용하여 가스 상태로 소비자에 공급되고 있다. 그러나 겨울철 해수 온도가 5℃ 이하로 저하되면 수중 연소식 기화기를 사용하게 되며 이 때 막대한 LNG 기화 소요 비용이 발생하게 된다. 이를 절감하기 위하여 현재의 해수식 기화기의 1단 해수공급을 2단으로 공급하는 공정을 고안하여 그 효과를 분석하였다. 해석 결과, 6m 전열관의 외부에 해수를 2단으로 3m씩 가열할 때 온도가 1.8℃가 저하되어 해수 온도 2.5℃까지도 LNG의 기화온도를 0℃ 이상으로 배출할 수 있는 것으로 해석되었다. 인천 생산기지에 이 공정이 적용된다면 연간 동계 운전비용 절감량은 LNG 11,770 Ton, 절감액은 117.6억 원으로 분석되었다. LNG를 전량 수입하는 국내 여건에서는 해수 2단 공급 공정을 적용한다면 막대한 에너지와 비용을 절감할 수 있는 매우 효과적인 공정이 될 수 있음을 알 수 있다.

**Abstract** - LNG is supplying to consumers as gas phase vaporized by major seawater vaporizer, i.e., open rack vaporizers. But as soon as the temperature of seawater drops below 5°C in winter, the submerged evaporators should be operated and cause a lot of energy consumption because of their natural gas combustion. In order to reduce the consumption amount, in this study new two-way supplying method of seawater instead of the present one-way supplying system is introduced and analysed the technical possibilities and economical savings. The results showed that in case of the temperature of seawater becomes below 2.5°C, LNG can be evaporated using ORV without operating 5 MV. If this system is applied in Incheon LNG terminal, the energy saving reaches 11,770 Ton of LNG as 11,760 million won. By the analysis, the two-way supplying system of seawater in ORV can be the most effective method to be able to save huge amount of energy every year.

**Key words** : LNG, open rack vaporizer, seawater, two-way supplying system, energy saving

#### I. 서 론

LNG는 편리하고 저렴하면서 깨끗하여 세계 교역량이 매년 증가하고 있고, 국내의 이용 물량도

연 3,000만 톤 정도로 매년 증가하고 있다. 우리나라는 천연가스가 생산되지 않아 전량 수입에 의존하고 있으며, LNG 운송은 천연가스를 액화시킨 LNG 상태로 교역되고 있다. 이렇게 도입된 -162℃의 액체 LNG는 한국가스공사 생산기지의 저장탱크에 저장된 후 LNG를 기화시켜 가스 상태로 도시가스와 발전소에 공급되고 있는 것이다. LNG를

†Corresponding author: skyun@kmou.ac.kr  
Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

기화시켜 공급하기 위하여 액체온도인 -162℃부터 0℃까지 온도를 상승시켜야 하며, 1 kg의 LNG를 기화시키는 데 필요한 열량을 보면 1기압 상태의 경우 200 kcal, 고압인 72 bar 경우 약 170 kcal 정도의 열량이 필요하게 된다. 이 상변화 에너지는 물의 약 40%, 통상의 냉동기 냉매의 약 5~7배에 해당하는 매우 큰 열량이다.

이 LNG의 기화에 적용되는 기화장치의 종류에는 해수식 기화기(Open-rack vaporizer, ORV), 수중 연소기(Submerged vaporizer, SMV), 그리고 공랭식 기화기 등이 있다. 해수식 기화기는 해수를 이용하여 LNG를 기화시키는 방식이고, 수중 연소기는 해수식 기화기 효율이 감소하면 천연가스를 연소시켜 LNG를 기화시키는 방식이며, 공랭식은 공기를 사용하여 기화하는 방식이다.

각각의 장단점을 보면 해수식 기화기는 자연에너지인 해수의 온도를 사용하므로 기화비용이 적게 소요되는 장점이 있는 반면, 겨울철 해수 온도가 낮은 지역에서는 공급 천연가스의 온도를 0℃까지 상승시킬 수 없게 되어 기화 효율이 급격히 감소하는 문제를 갖는다. 이런 경우 가스화 된 천연가스를 연소시켜 LNG를 기화시키게 되며 이 기화기가 수중 연소기이다. 이 기화기는 연소 효율은 높으나 천연가스의 소비 비용이 크게 발생하는 문제가 따른다. 한편, 공랭식 기화기는 공기와 LNG의 열교환으로 물을 이용한 기화기보다 쉬어 배 이상의 전열면적이 소요되며, 겨울철에 대기온도의 저하로 유입되는 공기의 가열과 증발기 표면의 얼음 성장을 방지하기 위한 공기 중에 포함된 수분의 제거, 빠른 공기 유속 유지 등의 문제를 보유하고 있다. 그러므로 대량의 LNG를 기화시키기 위한 우선적인 방법은 해수식 기화기를 통하여 해수가 보유한 자연에너지를 최대한 효과적으로 이용하는 것이 될 것이다. ORV의 연구로는 열전달 향상을 위한 전열 해석연구와 안전에 관한 연구가 주를 이루며[1-4], 오사카 가스는 ORV의 해수 이용 효율을 향상시키기 위하여 전열관 내부에 추가 전열관을 가설한 슈퍼 ORV를 적용하고 있으나[5], 이는 구조적으로 복잡하고 동계 하부 전열관에 얼음이 성장하게 되면 내부와 외부 전열관의 응력이 크게 작용할 것으로 판단된다.

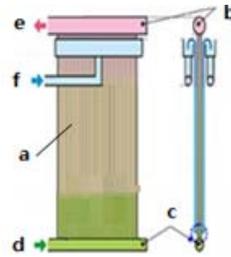
본 연구에서는 이 해수에너지를 최대한 이용하기 위하여, 현재의 ORV 공정인 1단식 해수공급 시스템에 해수를 2단으로 공급하는 공정을 적용하였으며, 이 공정의 전열 현상을 해석하여 기술적 가능성과 공급기지에 적용할 때의 경제적인 효과를 분석하였다.

## II. 공급기지 ORV의 LNG 기화공정 개요

### 2.1. 공급기지 해수식 기화기의 구조

Fig. 1은 ORV 열교환 판넬의 그림으로 해수는 상부에서 하부로 적하되고 LNG는 하부에서 상부로 흐르면서 기화된다. ORV 1기당 LNG 기화용량은 180 T/h이고, 기화 튜브의 길이는 6m이며, 하나의 전열관을 기준하면 해수유량은 0.7205 kg/s, 해수 온도차는 5℃가 발생하게 된다. LNG 질량유량은 0.01563 kg/s, -156℃, 72 bar가 0℃로 가열되어 배출된다[6].

겨울철 해수 온도가 저하되면 전열관 하부에 얼음이 생성되고 열전달 효율이 크게 감소하게 되며, 이 얼음이 상부로 성장하게 되면 전열관의 파손 발생 우려가 있어 LNG 공급량을 감소시키면서 성장하지 않도록 운전하여야 한다. 또한 겨울철 해수의 온도가 5℃ 이하로 저하되면 기화되어 배출되는 천연가스의 온도를 0℃ 이상으로 유지하기 위하여 Table 1과 같이 해수식 기화기의 LNG의 공급량을 급격히 감소하게 된다. 이 감소하는 양은 천연가스를 연소시켜 LNG를 기화시키는 SMV를 가동하게 되는 것이다.



a : Heat exchanging tubes, b : Upper header, c : Lower header, d : LNG, e : NG, f : Seawater

Fig. 1. Structure of current LNG open rack vaporizer.

Table 1. Current LNG evaporation rate of ORV with seawater temperature in winter

| Temperature of seawater (℃) | 5℃ or above | 4    | 3    | 2    | 1    |
|-----------------------------|-------------|------|------|------|------|
| Evaporation rate (T/h)      | 180         | 149  | 98   | 74   | 50   |
| Evaporator efficiency (%)   | 100         | 82.8 | 54.4 | 41.1 | 27.8 |

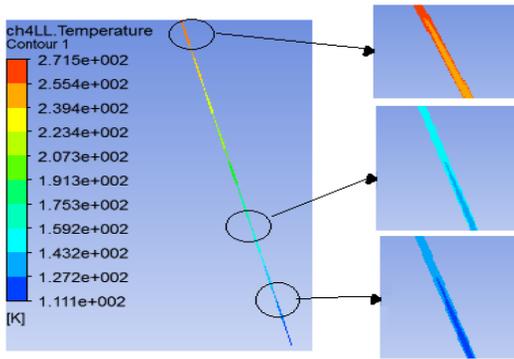


Fig. 2. LNG evaporation phenomena inside tube.

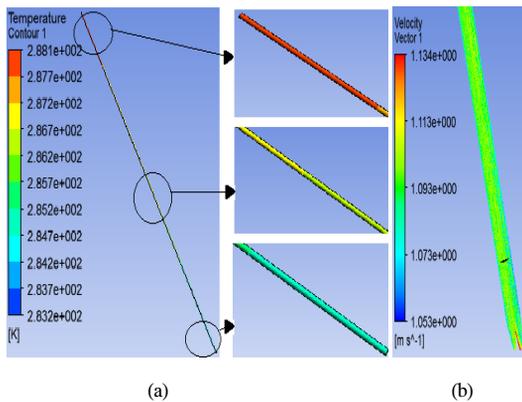


Fig. 3. Temperature and velocity profile of seawater in current ORV.

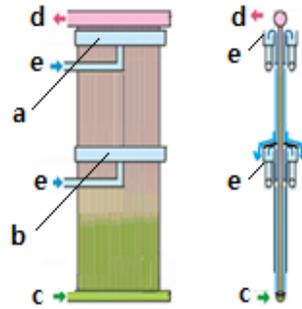
### 2.2. 해수식 기화기 6m 전열관의 전열 해석

Fig. 2는 6m 전열관의 내부를 흐르는 LNG의 상변화 전열해석이다. 해석에 의하면 LNG가 주입되는 LNG관 하부에서는 액체, 그리고 중간 단에서는 액기 혼합인 2상 흐름, 상부에서는 기체 천연가스가 가열되어 0℃로 배출된다.

Fig. 3은 튜브 상부에서 적하되는 해수의 온도와 속도 구배를 나타낸다. Fig 3(a)는 상부 15℃의 해수가 4.9℃ 만큼 저하되어 10.1℃ 정도로 배출되는 것을 나타낸다. Fig 3(b)는 튜브 하부의 해수 속도로 대략 10 m/s 정도가 된다.

### 2.3. 해수식 기화기 해수 2단 공급식 구조

Fig. 4는 새로이 고안한 2단 해수 공급식 ORV의 구조를 나타낸다. 6m 전열관의 내부에는 LNG가 하부에서 상부로 흐르고, 관 외부에는 상부와 중간부에 상



a : Upper head of seawater, b : Lower head of seawater, c : LNG, d : NG, e : Seawater

Fig. 4. Two-way supplying system of seawater in ORV.

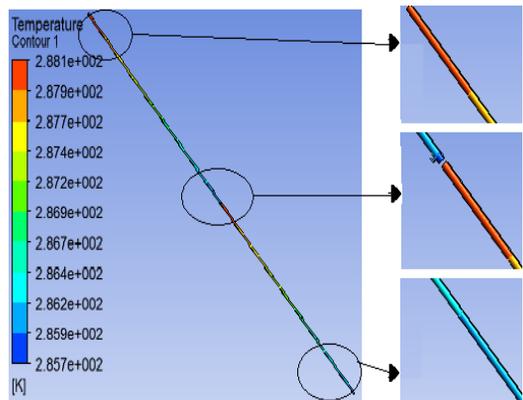


Fig. 5. Temperature profile of two-way seawater supplying system in ORV.

부와 동일량, 동일온도의 해수가 유입되어 LNG를 가열하는 구조이다. 이 때 상부의 해수는 중간단의 해수와 혼합되지 않고 분리되어 적하된다. 이는 동결기 해수 온도가 Table 1과 같이 5℃ 이하로 저하되어 2.5℃에 이르기까지 LNG 기화율이 100% 유지될 수 있는 방식이 되는 것이다.

이 때 상부 해수 공급부와 중간부의 해수 공급부가 동결이 초래되는 현상은 물리적으로 발생하지 않게 된다. 그 이유는 해수 공급 헤더부로 지속적으로 해수가 공급되어지며, 상부와 중간부의 유입해수는 전열관과 접촉하는 순간 체류하지 않고 적하되기 때문에 해수 동결온도인 -3℃에 도달되지 않기 때문이다. 이는 현재 상부 해수 공급부가 동결되지 않는 현상으로 도 판단하여 볼 수 있는 것이다.

**2.4. 해수 2단 공급식 3m-3m관의 전열 해석**

Fig. 5는 6m 전열관의 외부에 적하되는 해수가 2단으로 3m씩 가열할 때, 하부단의 해수의 온도변화와 유속을 해석한 것이다. Fig. 5는 온도가 2.4℃가 저하되는 것으로 겨울철 해수 온도가 2.5℃로 저하되어도 기화되는 LNG의 온도를 0℃ 이상으로 배출할 수 있음을 보여준다. 해수의 배출속도는 4.2m/s 정도가 된다.

**III. 동계 인천공급기지 비용절감 분석**

**3.1. 해수식 기화기 가동 시간 분석**

Fig. 6은 국립해양조사원이 측정한 인천 생산기지 연안의 2018년 동계 일평균 해수온도를 나타낸 것이다[7]. 해수 온도가 5℃ 이하가 되는 기간은 2017년 12월 13일부터 2018년 3월 15일까지 91일간으로 푸른색 구간이 된다. 이 기간에는 ORV의 기화율이 감소한 만큼 SMV를 가동하여야 하며, 적색 구간이 보상이 요구되는 온도 구간이 된다. 이에 소요된 총 열량은 ORV 기화량 감소에 따른 SMV의 LNG 처리량을 수식화하여 SMV의 LNG 연소량을 산정하였다.

Fig. 7은 해수온도가 5℃ 이하일 때 ORV 180 T/h 1기를 기준한 SMV가 공급하여야 하는 시간당 LNG 유량을 나타낸 것이다. 이 곡선을 수식으로 표현하면 식(1)과 같으며, 여기서 T는 해수온도(℃), y는 SMV의 LNG 기화 처리량(T/h)이 된다.

$$y = 1.2917 T^4 - 13.435 T^3 + 42.347 T^2 - 71.251 T + 169.34 \quad (1)$$

Fig. 8은 인천 공급기지의 2018년 동계 3개월 동안 공급하는 LNG량 500만 톤을 기준하여 식 (1)을 이용, 산정한것으로 SMV를 가동하여 LNG를 공급한 양은 65.2%인 3,260,726 Ton이며, ORV의 기화량

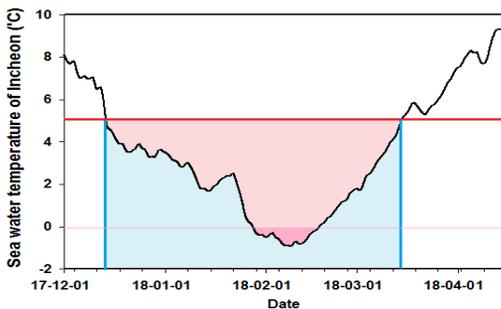


Fig. 6. Winter seawater temperature of Incheon in 2018.

은 34.8%인 1,739,274 Ton이 된다. 이를 위한 SMV의 LNG 연소량은 32,607 Ton이 되며, 이는 연 326억 원으로 추정된다. SMV의 LNG 연소량과 비용의 기준은 LNG 100 Ton/h 기화 공급시 LNG 1 Ton/h 연소가 필요하며, LNG 1 Ton의 가격은 1백만 원으로 하였다. 이는 전적으로 해수 온도만을 기준하여 기화기 효율을 100%로 산정한 것으로 실제 효율과 대기 온도 등을 고려하면 보다 많은 양이 사용될 것이며, 이 양은 매년 천연가스 수요 증가와 동시에 증가하게 된다.

**3.2. 해수 2단 공급 공정 적용시 절감 비용분석**

Table 2는 해수온도가 2.5℃ 이하가 될 때 ORV의 공급량 감소에 따른 SMV의 가동량이며, Fig. 9는 이를 도표로 나타낸 것이다. 이를 수식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$y = -10.267 T^3 + 45.8 T^2 - 113.53 T + 158 \quad (2)$$

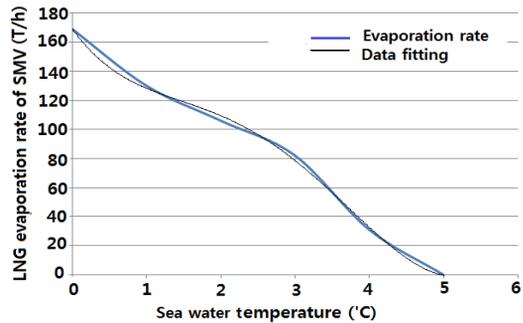


Fig. 7. Current LNG evaporation rate of SMV with seawater temperature in winter.

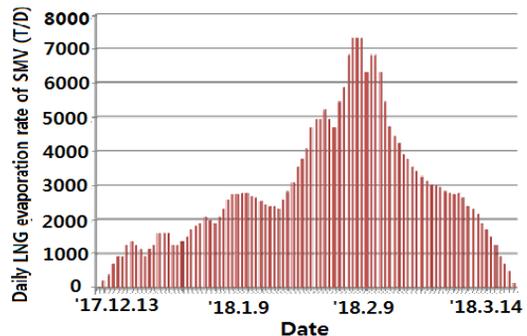


Fig. 8. Current daily LNG evaporation rate of SMV in Incheon terminal.

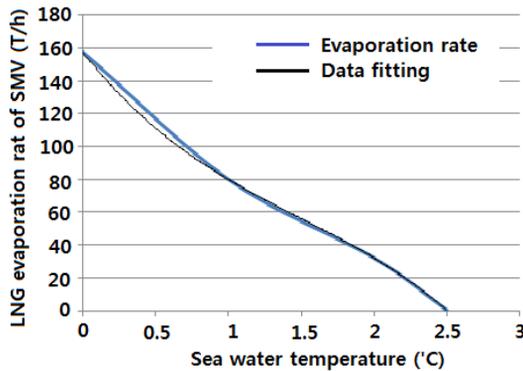


Fig. 9. LNG evaporation rate of SMV with two-way seawater supplying system.

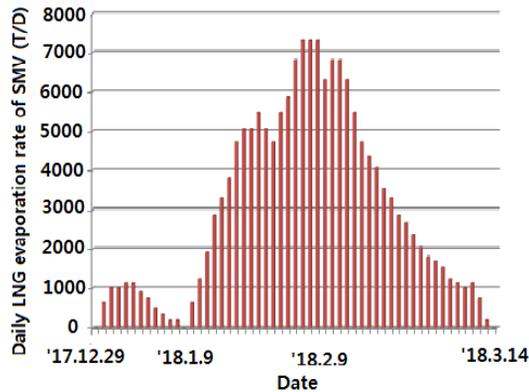


Fig. 10. Daily LNG evaporation rate of SMV with two-way seawater supplying system in Incheon terminal.

Fig. 10은 해수온도가 2.5℃ 이하일 때인 2017년 12월 27일부터 2018년 3월 14일까지 54일간을 ORV 해수 2단 공급 공정을 적용할 경우, SMV 처리 유량은 41.7%인 2,083,700 Ton, ORV로는 58.3%인 2,916,300 Ton을 공급하게 된다. 이 기간 동안 SMV가 연소하는 LNG의 양은 20,837 Ton, 비용은 208.3억 원으로 SMV 운전비용 절감량은 11,770 Ton, 연간 절감액은 117.6억 원이 된다. 이 역시 해수 온도만을 기준한 것으로 실제 효율을 고려하면 보다 많은 금액이 절감될 것이며, 이는 매년 절감 효과를 제공하게 된다.

### 3.3. 해수 2단 공급 공정 적용시 설비비 분석

해수온도가 2.5℃ 이하가 될 때 ORV에 해수를 2단

Table 2. LNG evaporation rate of ORV with two-way seawater supplying system in winter

| Sea water temperature (°C) | 4   | 3 | 2.5 | 2   | 1   |
|----------------------------|-----|---|-----|-----|-----|
| ORV Evaporation rate (T/h) | 180 |   |     | 148 | 100 |
| SMV Evaporation rate (T/h) |     |   | -   | 32  | 80  |

으로 공급하기 위하여 해수펌프와 해수 취수 및 공급 시설이 추가로 필요하게 된다. 해수펌프는 시간당 1만 m<sup>3</sup>, 1기에 10억 원 정도로 9기가 소요되어 90억 원이 된다. 반면, SMV는 13기가 필요하게 되고 1기당 70여억 원 정도로 910억 원이 소요되어 막대한 비용의 절감을 예측할 수 있다. 해수펌프 운전비로는 시간당 1만 m<sup>3</sup>의 펌프를 기준할 때 1,100 kWh로 3개월에 총 1.8억 원이 소요되어, 매년 해수 2단 공급에 의한 에너지 절약 효과에 비교하면 매우 미약함을 알 수 있다.

또한, 해수펌프 이외에 해수취수 및 공급 배관 등의 설비가 필요할 것이나 이의 비용 역시 SMV의 절감액에 비하면 미약한 시설비용이 소요될 것으로 판단된다.

## IV. 결론

본 연구에서는 겨울철 해수 온도 저하와 함께 발생하는 막대한 LNG 기화 비용을 절감하기 위하여 고안된 것으로, ORV에 해수 에너지를 최대한 사용하기 위하여, 현재의 1단식 해수공급을 2단으로 공급하는 공정을 적용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 6m 전열관의 외부에 해수를 2단으로 3m씩 공급하여 가열할 때 배출되는 해수온도는 1.8℃가 저하되었으며, 해수 온도 2.5℃ 이하에도 LNG의 기화온도를 0℃ 이상으로 배출할 수 있는 것으로 해석되었다.
- (2) 인천 공급기지 동계 운전비용 절감량은 연간 LNG 11,770 Ton이며 절감액은 117.6억 원이 된다.
- (3) 추가 설비비용으로 SMV는 910억 원이 소요되는 반면, 해수펌프 설비비는 90억 원 정도가 되었다.
- (4) 본 연구에 의하면 동절기도 해수 2단 공급 공정을 국내 적용한다면 LNG를 전량 수입하는 국내 여건에서는 막대한 에너지와 비용을 절감할 수 있는 것으로 분석되었다.

## REFERENCES

- [1] Houde S., Shurong Y., Jianling F. and Xing W., "Numerical Analysis on Rib-tubes of Seawater Open Rack Vaporizer with the Spoiler Lever", *Polish Maritime Research*, **24**, 14-21, (2017)
- [2] Pan J., Li R., Tao L., Wu G. and Deng Z., "Thermal Performance Calculation and Analysis of Heat Transfer Tube in Super Open Rack Vaporiser", *Applied Thermal Engineering*, **93**, 27-35, (2016)
- [3] Ganesh P. and Amlan D., "Design Approach of Shell and Tube Vaporizer for LNG Regasification", *JJMIE*, **12**(2), 109-116, (2018)
- [4] Eisentrout, B., Wintercorn, S., and Weber, B., "Study focuses on six LNG regasification systems.", *LNG journal*, 21-22, (2006)
- [5] Yamazaki K., Shimokawatoko T., Yamasaki K. and Takata M., Development of a New Type of Open Rack LNG Vaporizer, International Conference on LNG, 12th, B.2.1-B.2-10, (1998)
- [6] Gas Production Technology Booklet, Korea Gas Cooperation, 65-70, (1997)
- [7] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, "Report of Real-time Korea Oceanographic Observations", 2017.12-2018.3.