

〈論 文〉

직접접촉식 액화천연가스 기화기의 특성에 관한 연구

한승탁* · 김종보**

(1993년 6월 25일 접수)

A Study on Characteristics of Direct Contact LNG Evaporator

S. T. Han and C. B. Kim

Key Words : LNG(액화천연가스), Direct Contact Heat Exchanger(직접접촉식 열교환기), Volumetric Heat Transfer Coefficient(체적 열전달계수), Bubble(기포), Eruption(급팽창), Icing(동결), Evaporator(기화기)

Abstract

This study addresses the phenomena of bubbling, icing, eruption, component varieties of the evaporated natural gas, and volumetric heat transfer coefficients obtained during the operation of a proposed LNG evaporator between LNG and water in direct contact. In the present investigation, the explosive and eruption phenomena within the water column were not observed during the entire operation of the heat exchanger. Compared with the natural gas produced by conventional LNG evaporator, the analysis of the gas produced by the direct contact LNG evaporator shows that nitrogen, methane, and ethane components were reduced by 0.002~0.007 mol% (4~14%), 1.6~1.92 mol% (1.9~2.3%) and 0.17~1.28 mol% (1.1~8.4%) respectively, while the moisture content was rather increased by 0.51~0.76 mol%. The maximum volumetric heat transfer coefficient of the direct contact heat exchanger was found to be 21,800 kW/m³ · K.

기 호 설 명

하첨자

- a : 기화기 단면적 (m²)
- C : 비열 (J/kg · K)
- h : 열전달계수 (W/m² · K)
- Pa : 압력 (Pa)
- ρ : 밀도 (kg/m³)
- Q_r : 열전달 총량 (J)
- T : 온도 (°C)
- ΔT_m : 대수평균 온도차 (K)
- U_a : 총 열전달계수 (W/m² · K)
- U_v : 체적 열전달계수 (W/m³ · K)
- V : 체적 (m³)

- g : 가스
- i : 입구
- L : 액화천연가스
- m : 평균
- o : 출구
- p : 압력
- T : 전체
- v : 체적
- w : 물

1. 서 론

*정회원, 한국전력기술(주) 기계기술처

**정회원, 인하대학교 기계공학과

을 수입에 의존하고 있는 것이 현실이다. 이중 석탄과 유류는 연소시 아황산가스(SO_3) 등의 공해물질을 생성하고 원자력은 안전성에 유의하여야 된다. 그러나 액화천연가스(liquified natural gas)는 무공해 청정에너지원으로서 비교적 안전하여 그 수요가 증대되어, 1992년 한국의 수입량은 3.4메가톤(Mton)이었고 2006년에는 약 4배가 넘는 14메가톤을 수입하여 산업용과 가정용으로 사용할 계획이다.⁽¹⁾ 그러나 액화천연가스는 -162°C 의 액체상태로 수입하므로 실수요자에 공급하기 위해서는 가스상태로 기화시켜 공급하여야 한다. 이와 같이 가스로 만들기 위하여 현재 국내의 평택 액화천연가스기지에서는 관(管)내부로 -162°C 의 액화천연가스를 흐르게 하고 관외부로는 $20\sim 30^\circ\text{C}$ 의 해수(海水)를 흐르게 하여 열전달을 이루는 간접접촉식 열교환기를 사용하여 액화천연가스를 0°C 정도의 천연가스로 기화시켜 수요처로 공급하고 있다.^(2,3) 이러한 금속제품의 관을 중간매체로 하여 액화천연가스를 기화시키게 되므로 액화천연가스와 해수간의 온도차가 약 $180\sim 190^\circ\text{C}$ 가 되어 열응력에 의한 재질의 피로현상과 변형 및 해수를 사용하는데에서 오는 염분(鹽分)에 의한 염화부식, 진흙에 의한 부식과 침식 및 미생물 부착에 의한 부식과 열전달장애 등의 문제점이 야기되고 있다. Fig. 1은 이러한 부식이 복합적으로 이루어진 상태를 나타내고 있는 그림이다. 따라서 기존의 간접접촉식 기화기는 이러한 여러가지 문제점을 내포하고 있어 기화기를 유지하고, 보수하는데 비용이 증대되고 운전정지등을 초래하게 되므로 이러한 문제점을 줄이기 위하여 스테인레스강과 같은 고급자재를 사용하게 되며 이에 따르는 초기투자비 및 유지보수비용의 증대를 가져오고 있다.⁽⁴⁾ 따라서 이러한 문제점들을 해결하기위한 노력이 계속적으로 연구개발되고 있으며 그 일환으로 본 연구에서는 액화천연가스와 깨끗한 기화용수(물)를 기화기 내에서 직접접촉시켜 기화시키는 직접접촉식 액화천연가스기화기를 연구하여 기존의 간접접촉식 기화기의 대체 가능성 및 직접접촉식 기화기에서 야기될 수 있는 제반 문제점을 연구하고자 한다. 즉 액화천연가스와 기화용수를 기화기 내에서 직접접촉시 액화천연가스가 기화될때 비등에 의한 기포의 운동특성,^(5,6) 분사노즐 표면에서의 동결(Icing) 문제, 두 유체간의 급격한 온도차에 의한 기화기 내에서의 급팽창현상(eruption phenomena),⁽⁷⁾ 직접접촉 후에 기화된

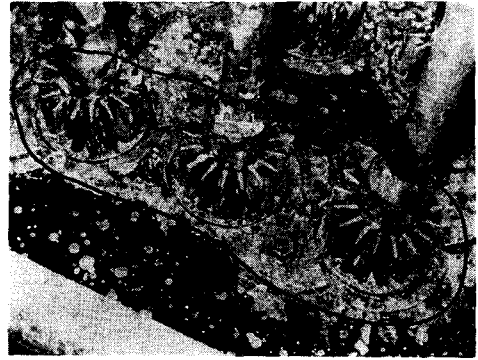


Fig. 1 Erosion, corrosion & pitting in the existing LNG evaporator (Korea Gas Corporation, Pyong-Taek LNG Evaporator)

천연가스의 성분변화 및 직접접촉식 기화기의 체적 열전달계수⁽⁸⁾를 액화천연가스와 기화용수의 공급유량을 변화시키고, 기화기 내의 수위(水位) 및 압력 등의 요소를 변화시키며 그 특성을 연구하고자 한다.

2. 실험방법

Fig. 2는 직접접촉식 액화천연가스 기화기의 실험 계통도이다. 이그림에서 고압의 액화천연가스 용기(1,500 kPa) (1)는 직접접촉식 액화천연가스 기화기(8)로 액화천연가스를 공급하며 이때 액화천연가스의 유량은 유량계(5)에 의해서 측정되고 보조유량계로서 기화된 천연가스는 가스유량계(12)에 의해서 측정된다. 기화기에서의 액화천연가스와 기화용수 및 기화된 가스의 온도는 구리-콘스탄탄열전대(Copper-Constantan thermocouple)에 의해 감지되어 자동온도기록계(9)에 의해 기록된다. 그리고 기화용수는 용수공급펌프(19)에 의해 공급되며 유량조절은 유량조절밸브(21)에 의해 조정되고 유량계(22)에 의해 유량이 측정되어 일정량이 기화기안으로 공급된다. 대기중에 놓인 약 25°C 의 기화용수가 직접접촉식 기화기에서 액화천연가스와 열교환 후 저온이 된 기화용수는 저온수 배출밸브(24)에 의해 배출된다. 가스 및 수분측정기(26)는 기화된 천연가스 내의 가스성분분석과 수분을 측정하게 되고 노즐(27)은 기화된 가스를 연소 혹은 외부로 배출시킨다. 직접접촉식 기화기 내에서 약 -162°C 의 액화천연가스와 약 25°C 의 기화용수가 접할때 급격한 온도차에 의한 급팽창현상이 발생하

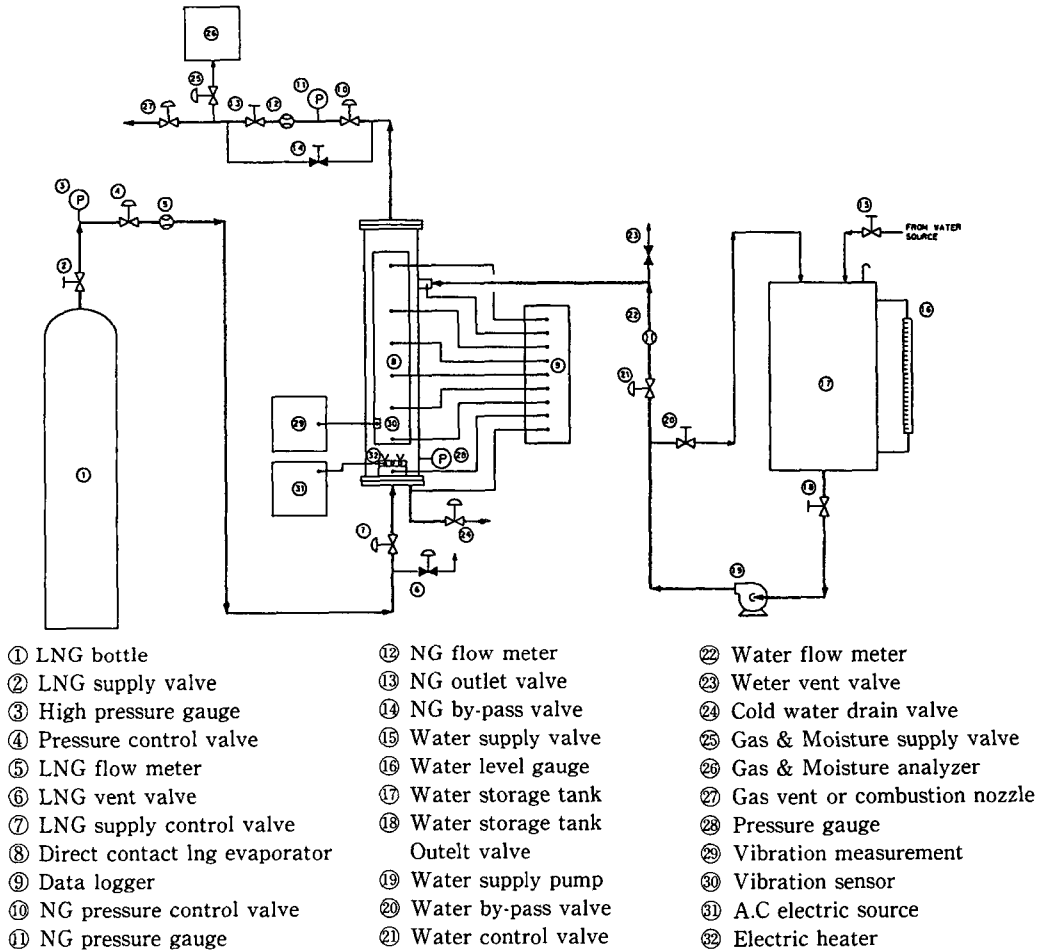


Fig. 2 Experimental set-up for the direct contact LNG evaporator

여 기화기 내의 압력변화가 발생할 것으로 예상하여 이를 측정하기 위한 압력변화감지기(30)를 설치하였으며 이를 기록계(29)에 의하여 자동으로 기록되게 하였다. 액화천연가스 분사노즐 표면의 동결방지를 위하여 전기가열선(32)을 설치하였고 순수한 액화천연가스를 기화기 내로 공급하기 위하여 관내의 가스를 배출시키기 위한 기체배출밸브(6)를 설치하여 순수한 액화천연가스만을 직접접촉식 기화기 내로 공급되게 하였다.

Fig. 3은 액화천연가스 분사를 위한 분사노즐을 나타내고 있으며 구멍직경은 기포의 거동연구에 필요한 직경으로 1.5mm로 가공했으며 구멍수는 각 노즐당 1, 7, 19개를 가공하였다. 액화천연가스 유량조절은 액화천연가스 용기의 출구압력을 조절하여 0.001, 0.007, 0.019 kg/s로 공급했고 기화용수

의 공급은 일정 증가량을 두어 0.05, 0.10, 0.15 kg/s, 기화기내의 수위도 일정한 비율로 증가시켜 0.2, 0.4, 0.6 m, 그리고 기화기 내의 압력은 투

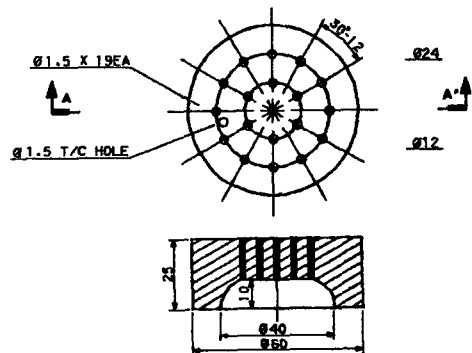
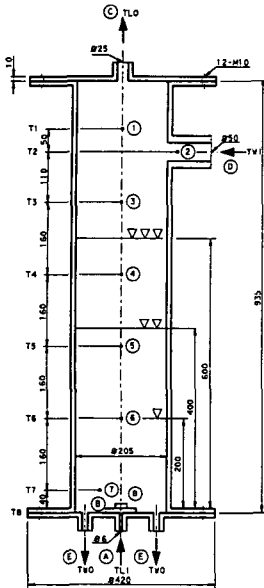


Fig. 3 Evaporator TEFLON nozzle



- Ⓐ LNG inlet, TLI
- Ⓑ LNG injection nozzle
- Ⓒ LNG outlet, TLO
- Ⓓ Water inlet TWE
- Ⓔ Cooled water outlet, TWO

Fig. 4 Dimension of the direct contact LNG evaporator

명아크릴의 강도 및 안전을 고려하여 100, 200, 300 kPa로 변화시켜 각각에 대한 기포의 거동, 동결현상 및 체적열전달계수 변화 등을 비교 연구하였다. Fig. 4는 직접접촉식 기화기의 상세도이며 온도측정을 위한 열전대 설치위치, 수위높이, 기화기의 직경 및 길이를 나타내고 있다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 기화기 내에서의 기포의 거동

순수한 액화천연가스 소량을 구멍 한 개의 직경이 1.5 mm로 가공된 분사노즐을 통해 분사시 Fig. 5와 같은 기포를 형성하면서 상승하였다. 이러한 -162°C 의 초저온 액화천연가스와 기화용수를 직접 접촉시 두 유체간의 접촉면에서 부력과 전단응력에 의해 기포가 형성된다. 이때 기포는 관성력보다는 두 유체간의 접촉면에서 점성과 인장력에 의하여 거의 구형(球形)을 이루며 팽창, 수축하면서 상승하였다. 그리고 노즐구멍 19개인 노즐을 통해 0.019 kg/s의 액화천연가스를 공급시 다량의 기포

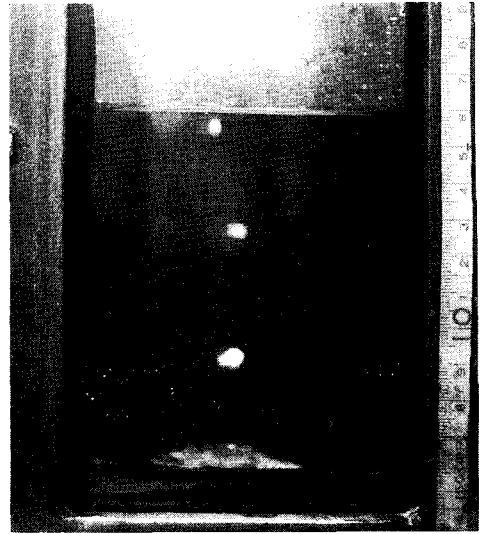


Fig. 5 Single LNG bubble in the water column

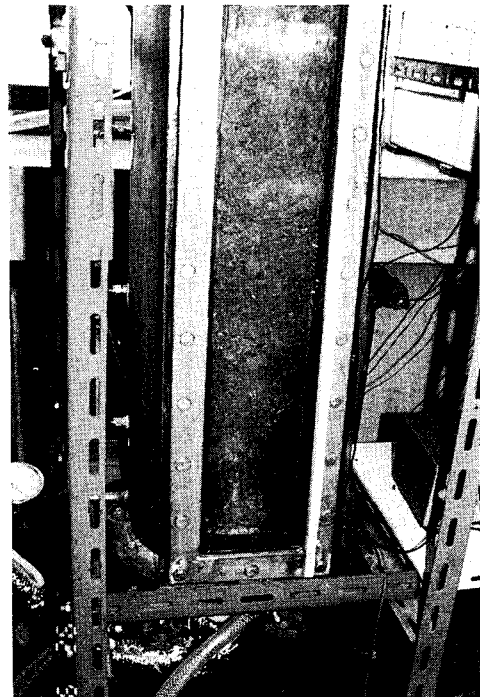


Fig. 6 Multi LNG bubble in the water column

가 Fig. 6과 같이 기화기 내부전체에 고루 분포되며 상승하였다. 이와 같이 기포가 기화기안에서 고루분포되며 상승한다는 것은 열전달 가능면적을 최대한으로 증진시키는 효과를 가져와 액화천연가스의 기화를 촉진하고 있는 것이다. 이러한 다량의

기포모양은 순수타원형과는 달리 일그러진 여러모양의 유사타원형 기포가 하나 혹은 그 이상의 기포가 혼합되면서 상승하였다.

3.2 분사노즐 표면에서의 동결현상 및 기화기 내에서의 온도분포

액화천연가스를 직접접촉식 기화기 내에서 기화시킬때 액화천연가스의 유량을 0.001~0.007 kg/s로, 기화용수 공급량을 0.05~0.15 kg/s로 공급시에는 액화천연가스 분사노즐 표면에서의 결빙현상은 없었다. 그러나 액화천연가스 공급량을 증가시켜 0.007~0.019 kg/s로 공급시, Fig. 7과 같이 모자(cap)형 결빙현상이 액화천연가스 분사노즐표면에 형성되어 노즐구멍을 막아 액화천연가스의 분사를 방해하였다. 따라서 이러한 결빙현상을 방지하기 위하여 분사노즐 표면에 25W 용량의 전기가열선을 Fig. 8과 같이 설치한 후 액화천연가스 공급량을 0.007~0.019 kg/s로 공급할 때는 노즐표면에 결빙현상이 거의 생기지 않았으며 소량의 결빙현상이 형성될 때는 액화천연가스의 공급량을 줄이고 기화용수인 물의 공급량을 증가시키면 용이하게 제거되었다. 그러나 본 실험조건 하에서의 기화기가 액화천연가스를 최대로 기화시킬 수 있는 최대용량

의 액화천연가스량 0.06 kg/s를 공급시에는 노즐표면에 심한동결현상이 발생했다. 이러한 동결방지를 위하여 전열선의 배치를 더욱 조밀하게 하여 동결현상의 제거에 세심한 배려가 있어야 되며 이는 국부적인 동결현상이고 표면에서 이탈하여 용수 중으로 확산되어 소멸된다는 점을 감안할때 쉽게 제거



Fig. 7 Icing cap formation on the LNG injection nozzle surface



Fig. 8 Electric heating wire on the LNG injection nozzle surface

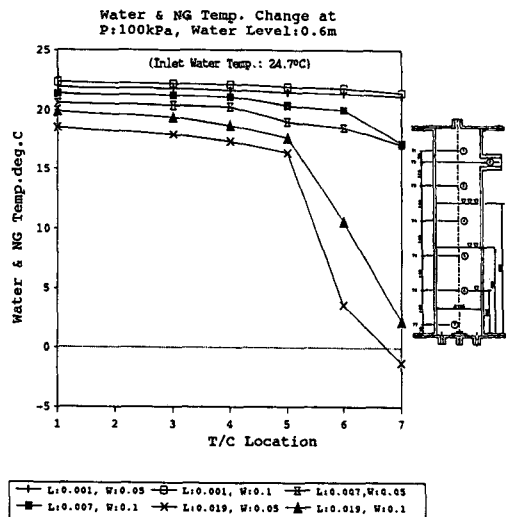


Fig. 9 Water and NG temperature with various conditions at 100 kPa

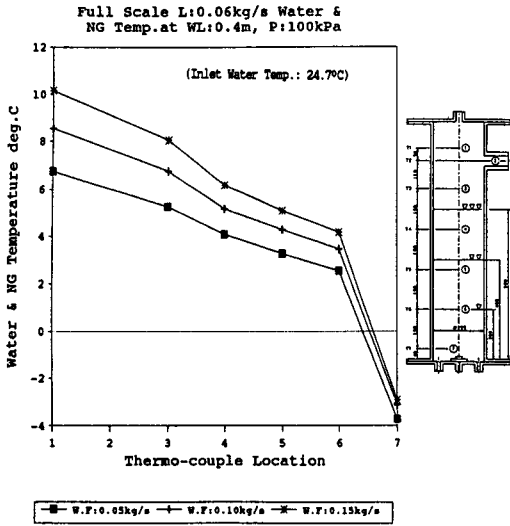


Fig. 10 Water and NG temperature on the full scale condition

될 수 있는 현상이라고 생각된다. 그리고 향후 연구시에는 동결현상이 적게 형성되는 노즐의 모양이나 생성시 기계적으로 쉽게 제거하는 방안이 연구되어야 할 것이다.

또한 Fig. 9는 대기압 하에서 기화기 내의 수위 0.6 m, 액화천연가스의 유량 0.001, 0.007, 0.019 kg/s, 기화용수의 유량을 0.05, 0.1 kg/s로 변화시킬때, 기화기 내에서의 온도분포를 나타내고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 기화기 내의 온도에 가장 큰 영향을 주는 것은 액화천연가스의 유량이며 액화천연가스 유량 0.019 kg/s, 기화용수 공급량 0.05 kg/s일 때 열전대(T/C) 7번의 온도가 -2°C 인 것은 노즐표면에서의 동결로 인한 온도를 나타내고 있다. 그리고 대기압 하에서 기화기 최대용량인 액화천연가스 공급량 0.06 kg/s, 기화기내 수위 0.4 m에서 기화기 내의 온도분포도는 Fig. 10과 같다. 그림에서와 같이 노즐표면에서의 온도(T7)가 -3~-4°C인것은 노즐 표면에서 동결현상이 발생한 것을 나타내고 있으며 기화용수의 공급량을 0.05~0.15 kg/s로 증가함에 따라 기화기 내에서의 온도는 조금씩 증가하였다.

3.3 급팽창현상

극저온인 -162°C의 액화천연가스와 약 25°C의 기화용수가 접하여 액화천연가스를 기화시킬 때 약

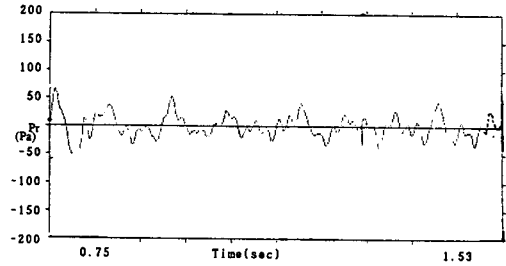


Fig. 11 Bubble pressure fluctuations in the water column for the LNG flow rate of 0.001 kg/s

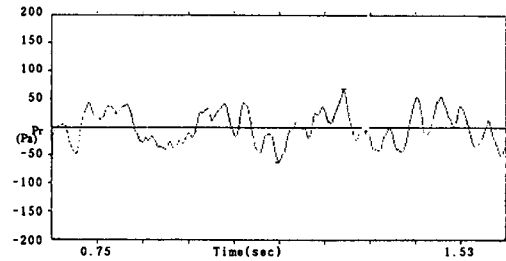


Fig. 12 Bubble pressure fluctuations in the water column for the LNG flow rate of 0.007 kg/s

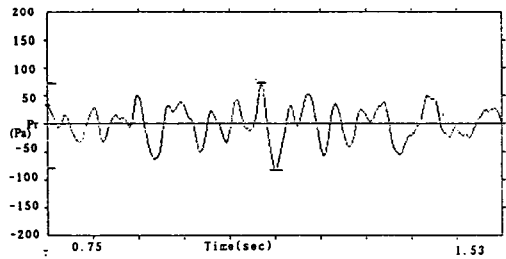


Fig. 13 Bubble pressure fluctuations in the water column for the LNG flow rate of 0.019 kg/s

190°C의 온도차가 두 유체사이에 발생하며 액화천연가스가 기화기 내에서 기화시 부피증가로 인하여 유체 내에서 파동압을 형성하게 된다. 이러한 유체 중의 파동압을 측정된 결과 Fig. 11과 같이 대기압 하의 기화기에서 수위 0.6 m, 액화천연가스 공급량 0.001 kg/s, 기화용수량 0.15 kg/s일때 기화기 내의 내부 파동압변화는 ±60 Pa의 미압이 측정되었고, 동일 조건하에서 액화천연가스 공급량을 0.007 kg/s로 증가시, ±65 Pa, 0.019 kg/s로 증가시, ±80Pa의 파동압이 측정되었다. Fig. 12, 13은 이러한 조건하에서 측정된 파동압이다. 그림에서도 알 수 있듯이 급격한 압력변동 없이 비교적

일정한 모양의 압력파동을 이루고 있어 급팽창에 의한 급격한 압력변동 현상은 측정되지 아니하였다. 만일 급팽창 현상이 일어났다면 요란한 소리와 급격한 물의 약동현상이 관측될 것이며 예리하고 급격한 수압력변동이 측정되었을 것이다. 그러나 이러한 현상이 유관에 의한 관측이나 계측기에 의한 측정 모두에서도 측정되지 아니하였으므로 본 실험조건 하에서 액화천연가스와 기화용수의 직접접촉식 기화기 내에서의 급팽창 현상은 측정되지 아니했다.

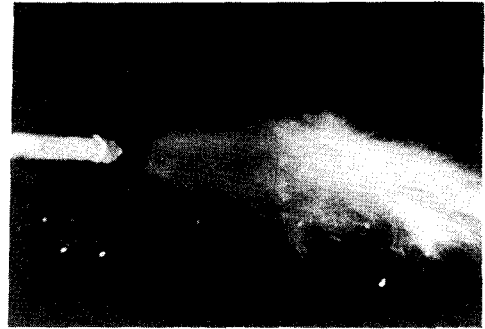


Fig. 14 Combustion flame of NG produced

3.4 기화 후의 천연가스 성분변화

액화천연가스의 유량을 0.001, 0.007, 0.019 kg/s로 변화시키고 기화용수 공급유량을 0.05, 0.10, 0.15 kg/s로 공급하면서 기화기 내의 수위를 0.2, 0.4, 0.6 m로 변화시켰을때 액화천연가스와 기화용수를 직접접촉에 의하여 기화시켜 생성된 천연가스의 성분변화를 측정분석한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1에서 보는 바와 같이 질소(N₂), 메탄(CH₄),

에탄(C₂H₆)의 성분은 각각 0.002~0.007 mol% (4~14%), 1.6~1.92 mol% (1.9~2.3%), 0.17~1.28 mol% (1.1~8.4%)로 감소했으나 수분함량은 0.51~0.76 mol%로 증가하였다. 이러한 소량의 수분함량은 연소에 장애를 초래하지 않는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ Fig. 14는 본 실험에서 생성된 천연가스에 대한 연소화염 모양이다. 본 연구에서는 단순한 연소시험만 실시한 결과 연소에 아무런 문제가 없다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 가스 내의 수분은 그 양이 적을지라도 천연가스를 장거리로 수송시 수송관의 부식을 가려올 우려가 있으므로 천연가스 내의 수분을 최대한 제거하기 위하여 수분분리기(moisture separator)를 설치할 경우 약 99%까지 제거된다.⁽¹¹⁾ 한편 기화기가 액화천연가스를 기화시킬 수 있는 최대용량(0.06 kg/s)을 공급할 때의 천연가스 성분변화를 보면 질소는 조금도 변화없고 메탄, 에탄의 성분은 각각 0.32 mol%(0.4%), 0.11 mol%(0.7%)로 줄어들었으나 수분함량은 2.35 mol%로 크게 증가하고 천연가스 출구노즐까지 수분의 이송(water carry over)현상이 있었다. 특히 기화기 내의 수위, 0.6 m에서는 비등현상과 수분이송 현상이심하여 기화기의 수위를 0.4 m 이하로 줄여야 했다. 그러나, 천연가스의 수분함유 문제는 실용화 하는데 있어, 수분분리기의 설치로 제거가 가능하다.

Table 1 LNG major components (unit : mole%)

LNG flow rate (kg/s)	Water column height (m)	N ₂ (mol %)	CH ₄ (mol %)	C ₂ H ₆ (mol %)	H ₂ O (mol %)
Standard*		0.05	82.07	15.16	0.0
0.001	0.2	0.047	80.47	14.20	0.51
	0.4	0.045	80.29	14.02	0.54
	0.6	0.043	80.15	13.88	0.57
0.007	0.2	0.047	80.40	14.03	0.53
	0.4	0.046	80.25	13.98	0.55
	0.6	0.044	80.20	13.92	0.56
0.019	0.2	0.048	80.47	14.99	0.60
	0.4	0.047	80.42	14.43	0.71
	0.6	0.046	80.36	14.00	0.76
0.06**	0.4	0.05	81.75	15.05	2.35

*LNG components produced from Pyong-Taek plant

**Full scale LNG injection case.

3.5 체적 열전달계수

체적 열전달계수는 아래와 같은 식을 근거로 하여 기화기 내에서 측정된 온도와 액화천연가스 및 기화용수 유량 등을 대입하여 산출하였다. 액화천연가스와 기화용수간의 총 열전달량⁽⁸⁾은 액화천연가스가 짧은시간에 가스로 변하므로

$$\begin{aligned}
 Q_T &= U_a V_T \Delta T \\
 &= h_{ga} V_T (T_{go} - T_{Li}) \\
 &= h_{wa} V_T (T_{wi} - T_{wo})
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, 총체적 열전달계수는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{U_a} = \frac{1}{h_{ga}} + \frac{1}{h_{wa}} \tag{2}$$

한편 체적 열전달계수는 아래식과 같다.

$$U_v = \frac{Q}{V \cdot \Delta T_m} \tag{3}$$

여기서, V 는 기화기의 체적이고 ΔT_m 은 대수평균 온도차를 나타내며 대수평균 온도식은 다음과 같은 식으로 산출할 수 있다.

$$\Delta T_m = \frac{(T_{NGo} - T_{LNGi}) - (T_{wi} - T_{wo})}{\ln \left[\frac{(T_{NGo} - T_{LNGi})}{(T_{wi} - T_{wo})} \right]} \tag{4}$$

그러므로, 체적 열전달계수 식은⁽⁸⁾

$$U_v = \frac{Q_L \rho_L C_{pL} \Delta T}{(\pi/4 D^2 L) \Delta T_m} \tag{5}$$

로 나타낼 수 있다. Fig. 15는 기화기 내압 100 kPa, 액화천연가스 유량 0.019 kg/s의 일정상태에서 기화기 수위를 0.2, 0.4, 0.6 m로 변화시키고, 온도가 약 25°C로 일정한 기화용수의 유량을 0.05, 0.10, 0.15 kg/s로 공급할 때의 체적 열전달계수를

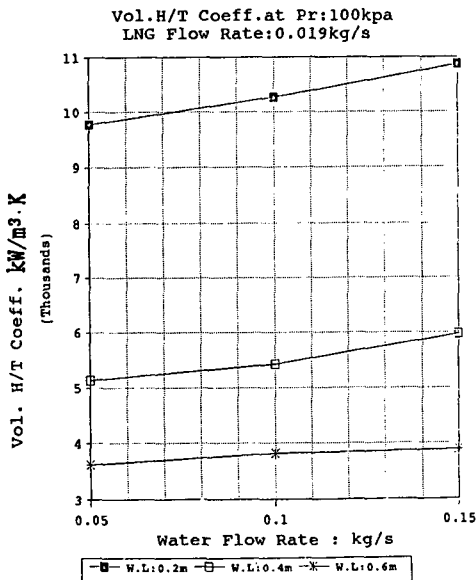


Fig. 15 Volumetric heat transfer coefficients vs water flow rate change for different water level

나타내고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 체적열전달 계수는 약 3,700~10,900 W/m³·K였으며 기화용수의 공급량이 많을수록 체적 열전달계수는 조금씩 증가하였다. Fig. 16은 수위 0.6 m, 기화용수

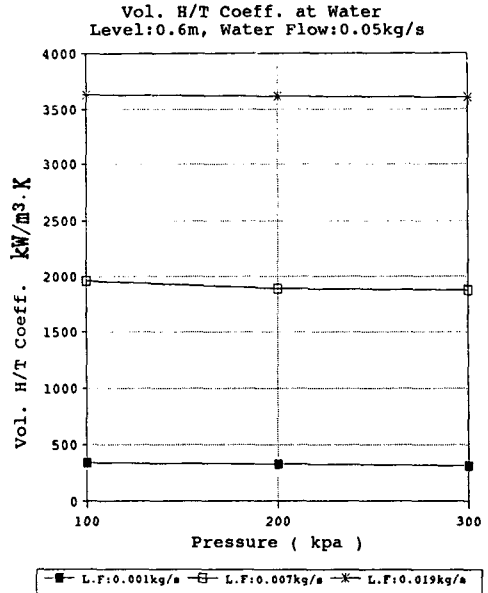


Fig. 16 Volumetric heat transfer coefficients vs pressure change for different water level

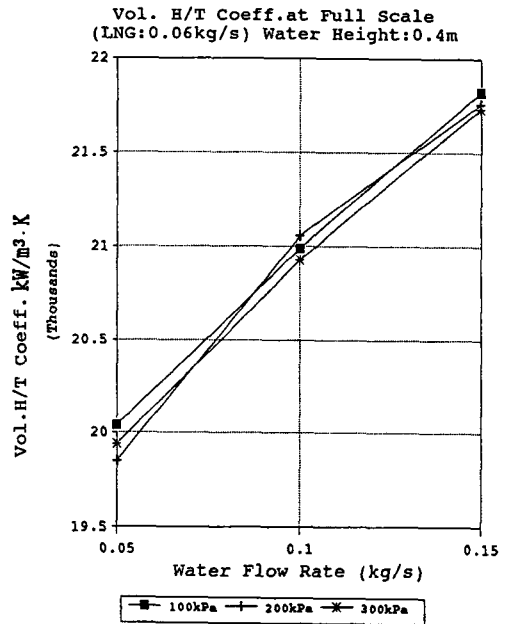


Fig. 17 Volumetric heat transfer coefficients vs water flow rate for different pressures at full scale test

유량 0.05 kg/s의 일정상태에서 액화천연가스 유량을 0.001, 0.007, 0.019 kg/s로 변화시키고 기화기 내의 압력을 100, 200, 300 kPa로 상승시킬 때의 체적 열전달계수이다. 그림에서도 알 수 있듯이 체적 열전달계수는 약 $400 \sim 3,600 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 였으며 압력에 따른 체적 열전달계수는 큰 변화없이 거의 일정하게 나타나고 있다.

Fig. 17은 본 실험에서 사용한 기화기가 기화시킬 수 있는 최대량의 액화천연 가스량, 0.06 kg/s를 기화시키고 기화기내 압력을 100, 200, 300 kPa, 기화용수량을 0.05, 0.1, 0.15 kg/s로 변화시킬 때의 체적 열전달계수를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 기화기 최대용량에서의 체적 열전달계수는 약 $21,800 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ 였으며 역시 압력에 따른 변화는 거의 없었다.

4. 결 론

본 액화천연가스의 직접접촉식 기화기연구는 액화천연가스의 분사노즐 수량의 변화(1, 7, 19개)와 기화기 내의 압력변화(100, 200, 300 kPa)와 액화천연가스의 유량변화(0.001, 0.007, 0.019 kg/s) 및 기화용수 유량변화(0.05, 0.10, 0.15 kg/s)에 따른 기포의 거동, 동결현상, 기화 후 천연가스 성분변화 및 체적열전달계수를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기포의 모양은 원형과 타원형이면서 기화기 상부로 갈수록 기포의 성장이 크고 고른분포를 이루고 있어 전열면적을 크게 증가시켰다.

(2) 액화천연가스 분사노즐 표면에서의 동결현상은 액화천연가스 유량이 0.001~0.007 kg/s에서는 발생하지 않았으나 0.007~0.019 kg/s로 공급시에는 동결현상이 발생하여 분사노즐 표면에 25 W 용량의 전기가열선을 설치하여 동결현상을 방지하였다.

(3) 칼럼 내에서, 천연가스의 기화시 급팽창에서 야기되는 소음은 감지할 수 없었으며 기화기 내에서의 파동압은 약 $\pm 60 \sim 80 \text{ Pa}$ 의 미압이 측정되어 기화기 설계에 참조할 사항이라고 본다.

(4) 기화된 후의 천연가스 성분변화는 질소, 메탄, 에탄이 각각 0.002~0.007 mol%(4~14%), 1.6~1.92 mol%(1.9~2.3%), 0.17~1.28 mol%(1.1~8.4%)로 줄어들었으며 수분의 함량은 0 mol% 에서 0.51~0.76 mol%로 증가하였다.

(5) 기화기 내의 내부압력 변화에 따른 체적열전달계수변화가 거의 일정한 것은 액화천연가스가 비압축성 유체이며 기포에 의한 열전달도 저압인 경우 압력의 영향이 그다지 크지 않음을 알 수 있었다. 그리고, 본 실험조건 하에서 직접접촉식 기화기의 최대체적열전달계수는 $21,800 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ 로서 이는 기존의 간접접촉식 기화기와 비교시 약 3~4 배이상 향상된 값이다.

참고문헌

- (1) 한국가스공사, 1992, "한국가스공사의 소개," pp. 2~3.
- (2) 한국가스공사, 1985, "평택 LNG 인수기지 플랜트 개요," pp. 13~65.
- (3) 한국가스공사, 1985, "LNG 편람," pp. 73~80, 630~645.
- (4) Boehm, F. and Kreith, F., 1986, "Direct Contact Processes Promise High Performance, Low Cost," *ASME Mechanical Eng.*, Vol. 108, No. 3, pp. 78~81.
- (5) Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic Press, pp. 22~23.
- (6) Crowe, C. T., 1982, "Numerical Models for Dilute Gas Particle Flows," *Journal of Fluids Engineering*, No. 3, pp. 297~303.
- (7) Nakanishi, N. and Reid, R. C., 1971, "Liquid Natural Gas Water Reactions," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 67, No. 12, pp. 36~41.
- (8) Kreith, F. and Boehm, R. F., 1988, *Direct-Contact Heat Transfer*, pp. 25~39, 335~342.
- (9) Lekic, A. and Ford, J. D., 1980, "Direct Contact Condenser of Vapor on a Spray of Subcooled Liquid Droplets," *Int., J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 1531~1536.
- (10) Jordan, J. R., Litter, A. N. and Williams, A., 1986, "The Effect of Water Addition on Combustion Processes in Natural Gas Flames," *Journal of Institute of Energy*, pp. 222~224.
- (11) Lerner, B. J. and Samuel, G. W., 1986, *High Tech. Mist Elimination in Multi Stage Evaporator*, Plant & Operations Progress, Vol. 5, No. 1, pp. 52~56.