

## 직접접촉식 LNG기화기 응용을 위한 칼럼 열교환기 기포특성에 관한 연구

### The Characteristics of Bubbles in a Column Heat Exchanger for the Application of Direct Contact LNG Evaporator

김 성 종\* 한 승 탁\*\* 김 중 보\*\*\*  
S. J. Kim, S. T. Han, J. B. Kim

#### ABSTRACT

In the present investigation, it has been proposed to utilize a direct contact heat exchanger as an evaporator to solve the difficulties such as scaling, corrosion and low thermal efficiencies, associated with the conventional evaporator. Liquified nitrogen was utilized as a working fluid to investigate basic natures of bubble dynamics in the evaporator, and spray nozzles were adopted to inject liquified nitrogen into the spray column with varying flow rates of dispersed phase fluids. Experimentations were carried out in the range of  $6.54 \times 10^{-4}$  kg/s - 0.030 kg/s for dispersed phase flow rates with one, three and five nozzle holes.

Observing the bubble dynamics for the evaporator the feasibility of utilizing a direct contact heat exchanger as a LNG evaporator has been evaluated. The results show that no eruption phenomena was observed in the present investigation with  $LN_2$  and the interface between  $N_2$  bubbles and water was fully turbulent. It is believed that the high injection velocity of  $LN_2$  through the spray nozzles provide good mixing effects for both heat and mass transfers between water and  $N_2$  bubbles. Ice was formed on the surface of the spray nozzle for higher  $LN_2$  flow rates. However, even in this case, it is observed that the ice was detached as soon as it was formed. Under the present experimental conditions, the shapes of  $LN_2$  bubbles were in the spherical-cap region according to the Clift, Grace and Weber Graphs. The height of foam region caused by the breakup of larger bubbles keeps increasing with high injection velocities until it reaches its maximum height.

#### 1. 서 론

천연가스(Natural Gas)는 정제액화할 때 거의 모든 불순물을 제거하기 때문에 메탈농

도가 아주 높게 되어 안정성이 높은 에너지로 불리운다. 이러한 LNG는 소비지와 생산지의 거리가 멀기 때문에 대량수송을 위해 고유열량(1kg 당 10,000~12,000kcal)의 10~15%

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 한국전력기술주식회사

\*\*\* 인하대학교 기계공학과

정도를 액화과정의 연료로 소비해서  $-162^{\circ}\text{C}$  (latm)의 액체연료로 도입하게 되며, 도입기 지에서는 이를 다시 상온의 천연가스로 만들기 위해 1kg당 200kcal 정도의 열을 가하게 된다.<sup>1)</sup>

우리나라에서는 주로 해수가열방식을 이용하여 노출 랙(open rack)식 기화기를 사용하고 있으며 그 원리는 다수의 핀이 붙은 전열관 파넬 외면으로 해수를 낙하막으로써 흐르게 하여 열교환을 시키는 방식이다. 그러나 이 방식은 고유 열전달 저항 뿐만아니라 스케일에 의한 열효과와 감소와 해수에 의한 부식 및 해양생물의 부착 등으로 막대한 유지보수비가 들고 있다.<sup>2)</sup> 본 연구는 위에 지적한 기존 기화기의 문제점을 구조적으로 해결할 수 있는 방법으로서의 직접접촉식 열전달에 의한 기화기방식의 사용 타당성에 대한 기초실험을 수행하였다.

직접접촉식 열교환기는 섞이지 않는 두 작동유체를 직접접촉을 통하여 열교환을 시키는 장치로서 열전달 저항이 감소되고 잠열교환의 효과를 얻을 수 있어 결과적으로는 전체시스템의 열전달율이 급상승하고, 상대적으로 열교환기의 소형화 및 부식, 스케일 퇴적, 보수 유지 등의 문제가 크게 감소하기 때문에 그 개선효과가 크다 하겠다.<sup>3)</sup> 특히 직접접촉식 열교환기를 이용하여 미 캘리포니아주의 이스트메사(East Mesa)시에 건설된 지열에너지를 이용한 500Kwe 출력의 직접접촉 2중사이클의 발전소가 성공리에 시운전되고 있어 이용 가치를 실제로 입증해주고 있다.<sup>4)</sup>

직접접촉식 열교환기는 1960년대 탈염설비에 이용되어 왔으나 1970, 1980년대에는 스케일이나 부식문제가 없는 고효율의 열교환장치로서 관심이 높아지고 있다. 특히 Letan<sup>5,6)</sup> 등은 잘 혼합된 액체 드립에서의 열이 웨이크(wake)의 형태로 대부분 전달됨을 밝히고, 연속유체(continous phase)입구의 급격한 온도하강 현상은 기화기내에서 두 유체가 완전히 혼합된 결과이며 두 유체의 유동률의 영향에 의함을 밝혔다. Clift와 Grace<sup>7)</sup>는 단일 기포, 드립, 입자들에 대한 유체역학, 열전달, 질량

전달에 대한 일반적인 해석을 통하여 다상유동에 대한 일반적인 관계식을 정리했으며 Re, Eö, M 등의 무차원수로 기포모양에 대한 무차원그래프를 만들었다. 또한 Nakanishi와 Reid<sup>8)</sup>는 여러가지 극저온유체와 온도가 다른 물들을 직접접촉시키는 실험들을 통하여 급속팽창(eruption)현상에 대한 다음의 가설을 발전시켰다. 극저온유체가 빙점이 낮은 상온의 유체와 접했을 때 막비 등이 발생하게 된다. 이때 막과 접하고 있는 유체는 냉각은 되지만 얼지는 않는다고 가정하면 이것은 막비등영역에서 천이영역이나 핵비등영역으로의 이동이 되고 어떤 임계온도차에 도달하여 극저온유체가 인접하고 있는 다른 유체의 표면을 급속히 적시지만 액체-액체이기 때문에 천이영역에 도달하여도 어떠한 핵이나 막이 존재하지 않아 두 유체가 직접접촉하게 되면 순간적인 대량의 열이동이 일어나 극저온유체의 급속한 과열이 뒤따르게 되고 그러한 과열은 급속한 기화를 일으켜 이 기화에 의한 가스의 확장이 압력파를 발생시켜 큰소리를 내며 팽창하게 된다. 즉 급속팽창현상은 그 원인이 천이비등영역의 불안정한 열유속에 기인한 것으로서 극저온유체의 비등점과 순수, 혼합물질의 여부에 따라 발생가능성이 달라진다.

예를들면 이러한 현상을 두 유체 즉 과포화상태의 유체(물)에 비점이 낮은 단일물질 유체(LN<sub>2</sub>)를 직접접촉시키는 경우에 대하여 실험해 보면 격렬한 난류는 발생하지만 급속팽창은 나타나지 않는다고 보고되어 있다.<sup>8)</sup> 그 이유는 LN<sub>2</sub>가 불과 접할 경우 그것은 상압비점이  $-195^{\circ}\text{C}$ 인 LN<sub>2</sub>와 물과의 접촉이므로 전범위에서 막비등영역이 되어 LN<sub>2</sub> 주변에 막이 발생하며 단일 성분이기 때문에 증발을 계속하여도 비점의 변화가 없으므로 급속팽창은 발생하지 않는다. 또한 이 막의 외부에 얼음이 만들어지면 이 얼음이 핵비등시 핵의 생성원이 되기 때문에 Fig.1의 A점쪽에서 온도차가 작게되어 극소열 유속점에 도달하여도 막비등영역에서 천이영역을 거치지 않고 바로 핵비등영역으로 이행하여 과열에 의한 급속팽창은 일어나지 않는다. 그러나 LNG는 메탄, 에탄,

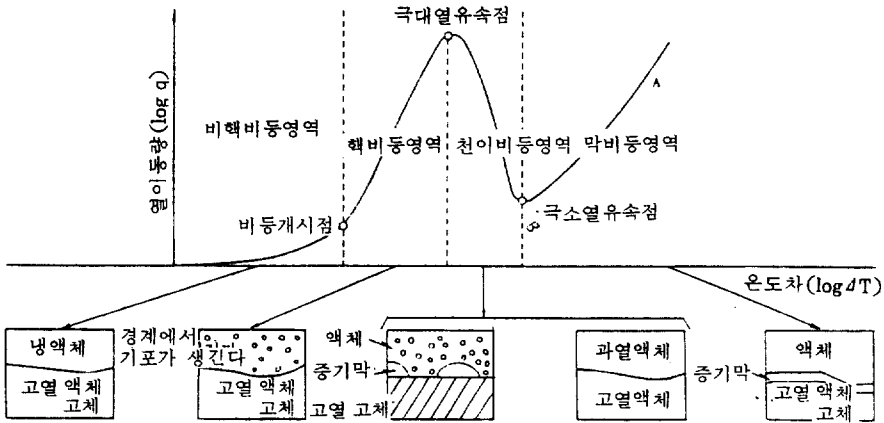


Fig.1 Heat-flux data from an electrically heated platinum wire

프로판 등의 혼합물이므로 초기에 막비등영역에서 비등하고 있어도 비점이 낮은 것부터 증발하기 때문에 상압비점이  $-162^{\circ}\text{C}$ 인 메탄이 먼저 감소하여 혼합물의 비점이 상승하게 되고 또한 물과의 온도차가 점차 줄어들게 되어 최후에는 B점에 도달 액-액접촉의 과열영역으로 들어가게 된다고 알려지고 있다.

따라서 천연가스 기화기의 경우 극저온유체를 물과 직접접촉시키게 되어 있어 큰 온도차에 의한 급속한 기화가 일어나며, 그 결과 기포의 물리적인 급속팽창(eruption) 현상이 일어난다면 기화기 구조물에 충격을 줄 수 있으므로 이에 대한 규명이 필요하게 된다. 또한 기화의 결과 생성되는 가스의 온도가 낮으므로 하단에 설치된 노즐 표면에서의 결빙으로 분사노즐구멍이 막힐 수 있기 때문에 이에 대한 대책이 필요하게 된다. 본 실험의 주요인자로서는 생성가스 기포로 인한 부력과 노즐 분사압력으로 인한 기포의 분사속도이며, 기포의 크기와 기화기내의 기포분포에 대한 동적특성을 연구할 필요가 있다. 이에 본 연구는 기초연구로서 메탄, 에탄, 프로판의 혼합물인 LNG에 비해 취급과 구입이 용이하고, 유사한 저온조건을 지닌 단일 성분인  $\text{LN}_2$ 를 사용하여 필요한 기초실험을 수행하여 그 타당성을 면밀히 검토 분석하여 단계별로 실제 기화기에의 응용까지 접근하려고 하였다.

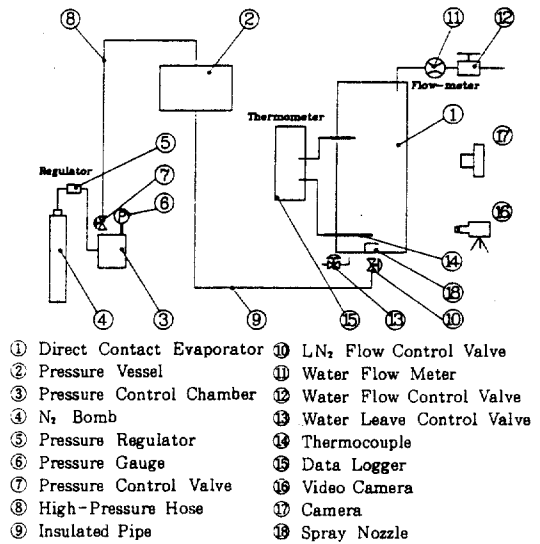


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig.2에 나타내고 있는바와 같으며 직접접촉식 기화기 칼럼,  $\text{LN}_2$  저장탱크, 측정장비로 크게 나눌 수 있다.

기화기 칼럼①은 가시화를 위해 투명한 아크릴관을 썼으며 칼럼하단에는 분사용 노즐⑩

을 설치하여 LN<sub>2</sub>를 분사할 수 있게 하였다. 그리고 노즐 바로 위 상단에는 노즐의 벗어난 N<sub>2</sub>의 온도를 측정하기 위해 직경 0.07mm 짜리의 Copper-Constantan 열전대⑭를 설치하였고 칼럼상단에는 직경 0.3mm짜리 Copper-Constantan 열전대를 설치하여 물의 온도를 측정하였다. 물의 수위를 항상 일정하게 유지하기 위해 칼럼상단과 하단에 각각 물의 유입구와 배출구를 설치하여 유량조절밸브⑫, ⑬로 일정한 수위가 유지되도록 조절하였다. 또한 저장탱크②에는 단열을 위해 1.5mm두께의 스테인레스 스틸(Stainless Steel)로 100mm 두께의 이중벽을 만들어 그 사이에 우레탄 발포제(Foam)를 투입하여 제작하였다. 저장탱크에 들어있는 LN<sub>2</sub>는 기화기내의 수압을 극복할 수 있게 하기 위해 같은 성분인 고압질소를 이용하여 가압해 주었으며 고압질소는 고압질소용기④에서 압력용기③의 압력계⑥로 압력을 확인하면서 배출밸브⑦를 통해 고압호스⑧를 따라 저장탱크로 들어가게 하였다.

저장탱크를 나온 LN<sub>2</sub>는 단열을 위해 내경 6mm의 스테인레스 스틸 파이프를 두께 50mm의 우레탄 발포제(Foam)로 단열시킨 단열파이프⑨를 따라 기화기 하단에 있는 유량조절밸브⑩를 지나 기화기 내부로 들어가게 된다. 노즐을 빠져나온 기포는 열전대를 통해 온도가 측정되어 자동으로 모델 FLUKE2280B인 Data Logger⑮에 기록된다. 또한 기화기내의 기포의 동적특성을 시각적으로 관찰하기 위하여 모델 Panasonic PK-958 비디오 카메라⑯를 사용하였으며, 순간 정지사진을 얻기 위하여 카메라⑰로 동시 촬영하였다.

## 2.2 실험방법

본 실험은 저장탱크②에 극저온 유체(LN<sub>2</sub>)를 넣은 후 고압질소용기의 압력을 사용하여 주어진 압력(0.5kgf/cm<sup>2</sup>, 1.0kgf/cm<sup>2</sup>, 1.5kgf/cm<sup>2</sup>)으로 가압하였다. 그리고 기화기 하단에 설치된 유량조절밸브를 사용하여 LN<sub>2</sub> 분사노즐로의 유입직전에 유량을 조절하여 실험을 수행하였다. 또한 노즐과 단열파이프로 물이 역류하는 것을 막기 위해 분사노즐을 통하여 N<sub>2</sub>

가 나오는 것이 확인된 이후 기화기내로 물을 유입시켰다.

각 실험에 대한 온도측정은 매초 단위로 읽어 Data Logger에 기록되었으며, 비디오 카메라를 이용하여 1/10초 단위로 20초간 촬영한 후 카메라로 정지화면을 얻기 위한 촬영을 하였다. 여기서 사용한 실험조건은 LN<sub>2</sub> 분사압력 0.5, 1.0, 1.5 kgf/cm<sup>2</sup>과 LN<sub>2</sub> 분사노즐 구멍수 1, 3, 5개와 분사노즐 직경 1.5mm 그리고 정지사진을 얻기 위해 카메라 Film ASA1600 과 셔타속도 1/500을 사용하였다.

또한 Grace<sup>7)</sup> 등에 의하면 액체내의 기포상승특성은  $E\hat{o}$ ,  $gd^2(\Delta\rho)/\sigma$ 와  $Re$ ,  $\rho d/\mu$ , 그리고  $M$ ,  $g\mu^4(\Delta\rho)/\rho^2\sigma^2$ 의 그래프로 표현할 수 있으며, 이는 주로 기포의 모양에 대한 일반화된 관계를 나타내고 있다. 즉  $Re$ 와  $E\hat{o}$ 가 높을 때는 구형-캡(spherical-cap)이나 타원-캡(ellipsoidal-cap)의 모양을 형성하지만 높은  $Re$ 와 상대적으로 중간정도의  $E\hat{o}$ 일 때는 타원체를 형성하게 됨을 나타내고 있다.

본 실험에서 유체속의 기포상승속도  $u$ 는 비디오의 느린화면작동을 통하여 기포의 상승속도를 비디오의 1/10초 단위의 내장시계를 이용하여 계산하였다.

본 실험에 사용된 무차원변수  $Re$ 와  $E\hat{o}$  그리고  $M$ 은 다음과 같은 몇 가지 가정하에서 계산되었다. 물의 밀도와 점성계수는 20℃에 해당하는 값을 사용하였으며 LN<sub>2</sub>의 밀도는 온도가 280K일 때의 것을 취했고 표면장력은 물과 공기사이<sup>9)</sup>의 것을 취했다. 기포의 평균 직경은 비디오를 통해 근사적으로 측정된 결과를 사용하였다. 본 실험의 경우 상승 N<sub>2</sub>기포에 대한  $Re$ 의 범위는 12,000~80,000 이고  $E\hat{o}$  수는 약 80~850 사이로서 구형-캡(spherical-cap)영역에 들어가 있으며 Grace<sup>7)</sup>의 표와 비교할 때 Fig.3에 표시된 바와 같다.

본 실험에서 사용한 질량유동률은 이상기체 상태방정식을 써서 근사적인 방법으로 구했다. 압력은 기화기에 부과한 수압을 사용하였으며 기체상수는 30.31(kgfm/kgK)을 사용하였다. 온도는 각 실험에서 측정된 온도들을 사용하였고 부피는 비디오를 통해 노즐 바로 윗부분

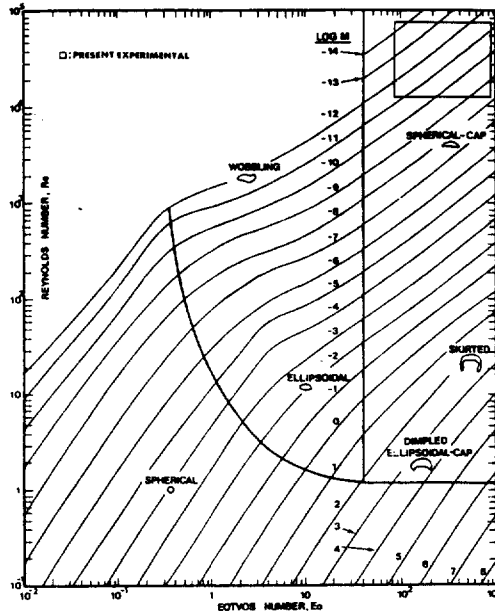


Fig. 3 Shape regimes for bubbles and drops through liquids

에서 측정한 값을 사용하였다. 이상과같은 변수를 사용하여 1초간 노즐을 빠져나오는 기포의 수를 비디오의 느린화면작동을 통하여 세어  $LN_2$ 의 질량유동률을 계산하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 1-Hole 노즐분사 :

Photo.1~3은 높이 950mm, 폭 295mm인 기화기에서 물은 700mm 수위를 유지하게 한 후 기화기 칼럼하향에 설치된 직경 1.5mm 1-Hole 노즐을 사용하여  $LN_2$ 를 0.5, 1.0, 1.5  $kgf/cm^2$ 의 분사압력으로 각각 수중에 상향분사했을 때의 현상을 사진으로 보여주고 있다.

여기서 극저온( $-195^\circ C$ )의  $LN_2$ 가 기화기 칼럼의 물속( $19^\circ C$ )으로 분사될 때 그 기화특성은 3영역으로 나누어짐을 보여주고 있음을 알 수 있다. 첫째는 노즐인접 상단부분의 기포의 자유상승지역(free rising region)으로서 노즐을 빠져나온 직후, 높은 주변압력으로 인한 부피증가와 기포가 노즐구멍으로부터 분리되어 나갈 때 순간적인 부력에 의한 충격으로 기포의 오시레이션(oscillation)운동을 보이고

있다. 둘째로서 난류혼합지역이며 기포와 물의 온도차에 의한 기포의 지속적인 부피증가나 주변기포와의 충돌이나 합체가 발생하는 지역이다. 마지막 단계는 거품지역(foam region)으로서 작은 기포들이 형성되는 지역으로서 확산유체의 유동률의 증가, 확산유체의 온도 및 기화기의 높이에 따라 층의 높이에 따라 층의 높이가 달라지고 있다.

본 실험조건에서의 자유상승지역은 유량이 증가함에 따라 난류와 합체의 영향이 커질 때 상대적으로 줄어들며, 난류지역은 유량의 증가와 더불어 확대되는 경향을 보이고 있으나 온도차에 의한 거품지역의 확대가 발생하는 경우 다시 축소되는 것을 볼 수 있다. 거품지역은 본 실험조건에서 유량의 증가와 더불어 계속 확대되어 나가는 것을 확인할 수 있다. 거품층 확대에 대한 이유는 유량의 증가와 이에 따른 낮은 온도의 생성  $N_2$ 가스는 기포와 물의 접촉면을 불안정하게 하며 기포가 물속에 유입될 때 노즐상단에서 혼합을 촉진하여 발생하는 것으로 사료된다. 사진은 또한 기포의 상승궤적이 수직축을 중심으로 하여 오시레이션운동을 하고 있음을 보여주고 있다. 그 이유는  $Re$ 수 130~500 사이에서 나타나기 시작하는 불안정한 웨이크(wake)가 중심수직축에 대해 기포의 오시레이션을 발생시키기 때문이라고 사료된다.

본 실험조건에서 사용된 무차원변수들의 범위는  $12,000 < Re < 27,000$ ,  $80 < Eo < 370$ ,  $M=10^{-11}$ 이었으며, 이는 Grace의 그래프에서 구형-갭(spherical-cap)의 영역에 들어가나 본 실험에서는 유량의 증가에 따른 기화기내부의 난류증가와 이에따른 거품영역의 확대로 인하여 정확히 확인하기는 힘들었다.

본 실험에서 측정된 칼럼내부에서의  $N_2$  기포온도는 전반적으로 영상을 기록하고 있으며 그 이유는 Letan<sup>5,6)</sup>에 의해 보고된 바와 같이 기화기 칼럼하단에서의 혼합에 의한 직접 접촉열전달효과 때문이라고 사료되며, 직접접촉열교환기의 높은 효율성을 알 수 있다. 이는 특히 분사운동량에 의해 생성가스가 노즐을 벗어나는 순간 노즐주변 유체를 전단응력에 의해 기포와 같이 상승하도록 난류를 발생시켜

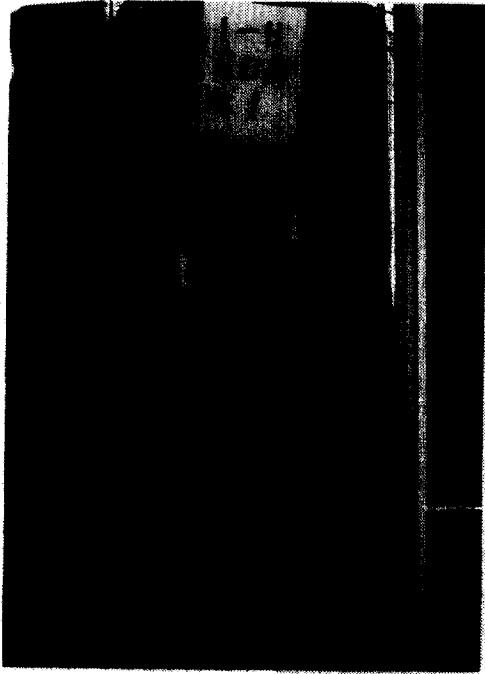


Photo. 1 1-Hole Spray nozzle pressure : 0.5 kgf/cm<sup>2</sup>,  
LN<sub>2</sub> mass flow rate =  $6.54 \times 10^{-4}$  kg/s  
Re<sub>b</sub> = 12,400, E $\hat{\sigma}$  = 82

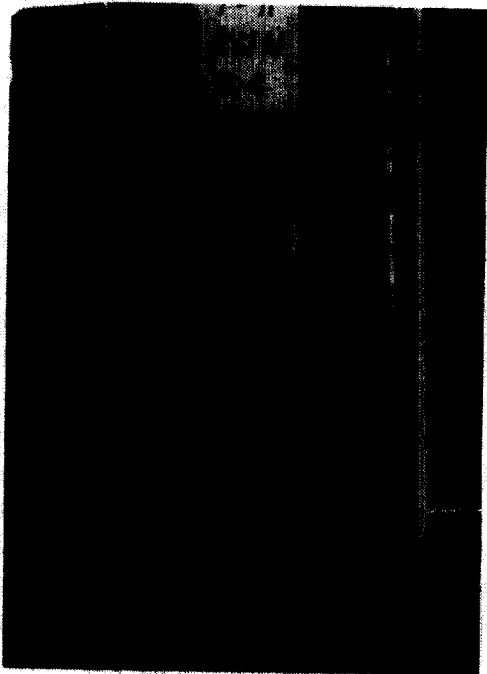


Photo. 2 1-Hole Spray nozzle pressure : 1.0 kgf/cm<sup>2</sup>,  
LN<sub>2</sub> mass flow rate =  $3.85 \times 10^{-3}$  kg/s  
Re<sub>b</sub> = 22,400, E $\hat{\sigma}$  = 267

거품형성지역

난류혼합지역

자유상승지역

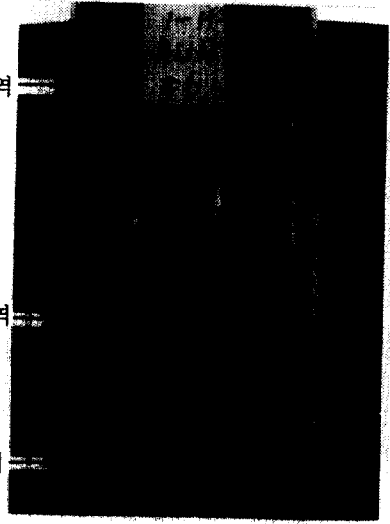


Photo. 3 1-Hole Spray nozzle pressure : 1.5 kgf/cm<sup>2</sup>,  
LN<sub>2</sub> mass flow rate =  $7.13 \times 10^{-3}$  kg/s  
Re<sub>b</sub> = 26,400, E $\hat{\sigma}$  = 370

열전달을 촉진하는 방식에 의해 기포의 온도는 순간적으로 급상승하게 되는 것으로 사료된다.

LN<sub>2</sub>를 사용한 1-Hole의 노즐실험에 대해서는 기화기내의 급속팽창(eruption) 현상은 관찰되지 않았다. 단지 높은 유량일 때의 격렬한 난류 현상만이 관찰되었다. 이는 앞에서 설명한 것처럼 단일성분인 액화질소의 급속팽창 발생가능성이 희박하고 또한 적은 유량의 확산 유체유동을 때문에 노즐구멍을 통하여 분사되는 LN<sub>2</sub>는 액체 드립이 아닌 이미 기화된 기포상태로 노즐을 통해 상향분사됨으로써 수증에서의 비등에 의한 급속한 부피팽창현상이 없었기 때문이기도 하다고 사료된다.

### 3. 2 3-Hole 노즐분사 :

Photo. 4~6은 같은 기화기내의 하향에 직경 1.5mm 3-Hole 노즐을 설치하여 LN<sub>2</sub>를 0.5, 1.0, 1.5 kgf/cm<sup>2</sup>의 분사압력으로 각각 수증으로 상향분사했을 때의 현상을 사진으로 보여주고 있다. 이때도 1-Hole 노즐분사와 같이 기화기 칼럼내부의 기화특성이 3영역으로 나누어짐을 알 수 있으며 3-Hole 노즐에 의한 유량의 확대도 1-Hole 노즐에 비해 자유상승

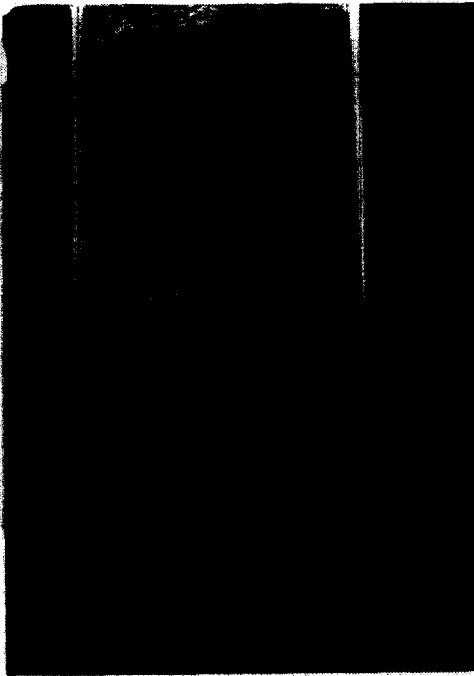


Photo. 4 3-Hole Spray nozzle pressure :0.5 kgf/cm<sup>2</sup>,  
LN<sub>2</sub> mass flow rate =  $1.14 \times 10^{-3}$  kg/s  
Re<sub>b</sub> = 14,900, E $\hat{\sigma}$  = 118

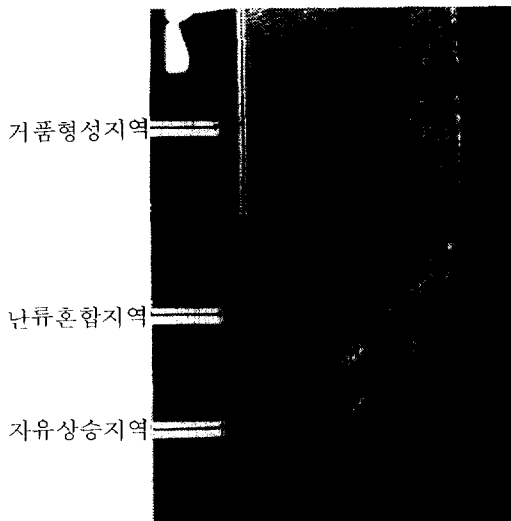
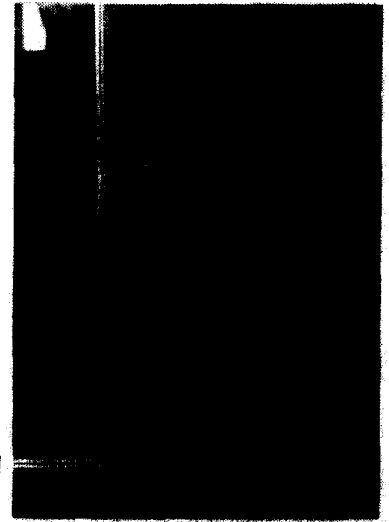


Photo. 5 3-Hole Spray nozzle pressure :1.0 kgf/cm<sup>2</sup>,  
LN<sub>2</sub> mass flow rate =  $6.17 \times 10^{-3}$  kg/s  
Re<sub>b</sub> = 24,800, E $\hat{\sigma}$  = 330



결빙발생

Photo. 6 3-Hole Spray nozzle pressure :1.5 kgf/cm<sup>2</sup>,  
LN<sub>2</sub> mass flow rate =  $9.76 \times 10^{-3}$  kg/s  
Re<sub>b</sub> = 29,800, E $\hat{\sigma}$  = 475

지역이 좁아졌음을 사진을 통해 알 수 있다. 또한 1-Hole 노즐과 같이 유량의 증가와 더불어 거품영역이 확대됨을 알 수 있다.

그러나 이 실험에서는 Photo.6에서 보는바와 같이 노즐상단에 얼음이 발생하였으며 이것은 노즐의 구멍수가 많아짐에 따라 확산유체의 유동률이 증가하고 물과 접촉하는 노즐표면이 따라서 낮은 온도를 갖게되면서 발생하는 것으로 기포의 기화기내에서의 운동에 변화를 주고 있다. 즉 노즐상단에 발생된 얼음이 확산유체의 진로를 막으면서 난류를 일으켜 거품영역이 기화기 전체로 확대되는 것을 볼 수 있다. 이는 거품영역이 기화기내의 난류특성과 깊은 관련이 있음을 증명하는 것이다. 노즐표면에 생성된 얼음은 노즐압력을 더 높였을 때 노즐표면으로부터 떨어져 나가는 것이 관찰되었으며 이는 높은 분사운동량이 얼음을 표면으로부터 수중으로 분리되게 촉진하는 현상으로 설명된다. 이 실험에서도 유량이 증가함에 따라 N<sub>2</sub>의 온도가 전반적으로 하강하고 있음을 알 수 있으나 N<sub>2</sub> 기포 온도는 직접 접촉 열교환의 높은 효율에 의한 온도의 상승으로 영상을 기록하고 있다.

3-Hole의 경우 사용된 무차원변수들의 범위는  $15,000 < Re < 30,000$ ,  $120 < E\hat{o} < 480$ ,  $M=10^{-4}$  이었으며 이는 Grace의 그래프에서 구형-캡의 영역에 들어가고 있다. 이 경우에도  $N_2$  기포가 기화기상단으로 상승할 때 오시레이션운동을 하고 있으며, 이 실험에서도 기포의 급속팽창현상은 관찰되지 않았으며, 이에 대한 설명은 1-Hole의 경우와 같은 것으로 사료된다.

### 3.3 5-Hole 노즐

Photo.7~9는 같은 기화기조건에서, 하향에 설치된 5-Hole 노즐을 통하여  $LN_2$ 를 0.5, 1.0, 1.5  $kgf/cm^2$ 의 분사압력으로 수중으로 상향분사했을 때의 현상을 사진으로 보여주고 있다.

사진은 1-Hole노즐, 3-Hole노즐과 같이 기화기 칼럼내부의 기화특성이 3영역으로 나누어짐을 보여주고 있으며 노즐구멍수의 증가에 따른 유량의 증가와 노즐탈출 직후의 기포간의 합체현상으로 기포의 크기가 다른 두 분

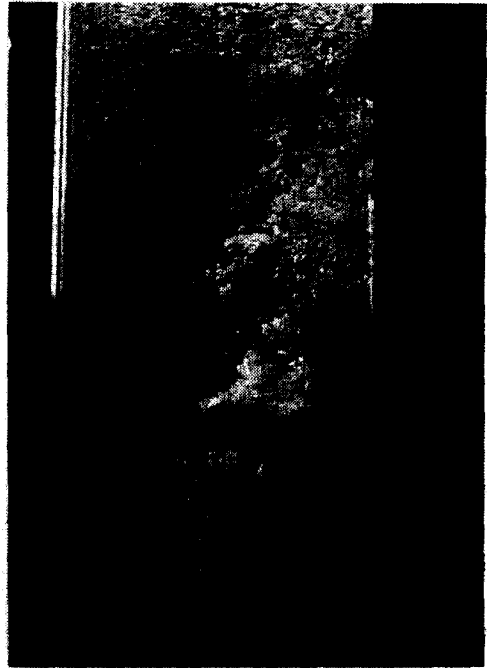


Photo. 8 5-Hole Spray nozzle pressure : 1.0  $kgf/cm^2$ ,  
 $LN_2$  mass flow rate = 0.011  $kg/s$   
 $Re_b = 59,600$ ,  $E\hat{o} = 475$

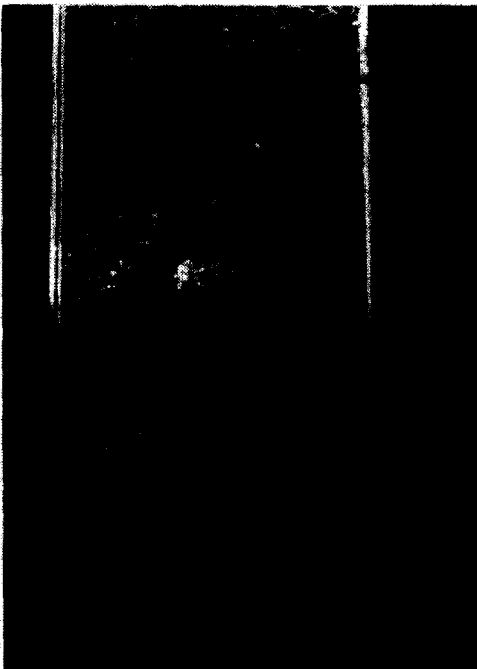


Photo. 7 5-Hole Spray nozzle pressure : 0.5  $kgf/cm^2$ ,  
 $LN_2$  mass flow rate =  $4.73 \times 10^{-3}$   $kg/s$   
 $Re_b = 24,800$ ,  $E\hat{o} = 330$

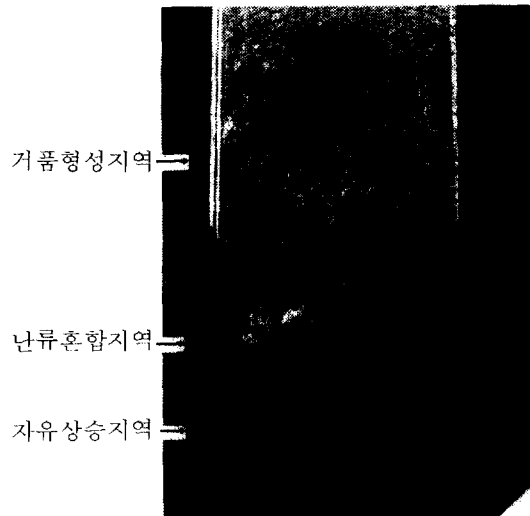


Photo. 9 5-Hole Spray nozzle pressure : 1.0  $kgf/cm^2$ ,  
 $LN_2$  mass flow rate = 0.03  $kg/s$   
 $Re_b = 79,500$ ,  $E\hat{o} = 844$



사노즐의 경우와 비교하여 크며 이러한 합체에 따른 난류의 생성이 기포와 물간의 혼합을 촉진시켜 분사초기부터 자유상승지역과 난류지역이 거의 동시에 나타나고 거품영역은 확대되고 있음을 알 수 있다. 본 5-Hole 실험에서는 분사유량에 대한 거품영역이 기화기하단에서 30cm 정도 떨어진 부근에서 형성되기 시작함을 알 수 있으며 이는 확산유체의 유량이 어느 한계를 넘으면 거품층 높이에 한계가 생기는 것으로서 유량증가로 인하여 자유상승지역이 일정높이까지 생성되기 때문이라고 사료된다.

이 실험도 3-Hole 노즐분사와 같이 결빙이 발생하였으며 확산유체의 유량의 증가에 따른 물과 접촉하는 노즐표면의 냉각에 의하여 발생하고 있으며, 분사압력상승에 의하여 노즐표면에서 떨어져 나가는 것이 비데오를 통하여 확인되었다. 이는 전술한 바와 같이 높은 분사운동량이 노즐주변 유체의 유동을 활발히 유도하여 얼음이 표면에 부착되어 있지 않고 수중으로 떨어져 나가는 현상이라 할 수 있다.

5-Hole의 실험에 사용된 무차원변수 범위는  $25,000 < Re < 80,000$ ,  $330 < E \hat{O} < 850$ ,  $M = 10^{-4}$  이었으며 Grace의 그래프에서 구형-캡의 영역에 들어가고 있다.  $N_2$ 의 온도는 전반적으로 영상을 기록하고 있으며  $N_2$ 의 온도는 전술한 바와 같이 생성가스가 노즐을 벗어나는 순간 노즐주변 유체중에서 난류를 발생시키며, 이에 따라 열전달이 촉진되어 영상의 온도에 빠르게 도달하는 것으로 사료된다.

이 실험에서도  $N_2$ 기포가 상승할 때 오시레이션운동이 보이고 있으며 1-Hole 노즐분사, 3-Hole 노즐분사와 비슷한 양상을 보이고 있다. 또한 이 경우에도, 기포의 급속팽창현상은 관찰되지 않았다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 직접접촉식 LNG기화기 개발을 위한 기초연구로서, 비교적 취급이 용이하며 안전한 극저온의  $LN_2$ 를 그 확산유체로 사용하여 직접접촉식 열교환기내부에서의 기포의 동적특성을 연구하였다. 실험에 사용된

확산유체 유동률의 범위는  $6.4 \times 10^{-4} - 0.030$  kg/s 이었으며 노즐의 구멍수를 하나, 셋, 다섯으로 변화시키면서 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 분사압력과 분사노즐구멍수에 따른 확산유체의 유량증가는 난류와 기포합체(bubble coalesce)에 의한 혼합을 촉진시켜 결과적으로 거품영역을 확대시키게 된다.

2. 확산유체의 유량이 일정치를 넘어서면, 초기의 기포 자유상승지역이 일정한 높이까지 형성되며, 그 이후 거품영역의 높이는 일정한 한계를 넘지 않는다.

3. 노즐구멍수의 증가에 따른 유량의 증가는 기화기내부의 물과 접촉한 노즐표면을 급속히 냉각시켜 그 결과 노즐표면에서의 결빙이 이루어진다. 그러나 분사압력의 증가로 주위 유체의 유동을 활발히 유도하여 노즐상단에 형성되는 즉시 수중으로 떨어져 나가는 것을 알 수 있다.

4. 본 실험조건에서는 대부분 기화기내에서 얼음이 발생하지 않았으며 이는 난류에 의한 혼합효과가 활발하기 때문으로 풀이된다.

5. 본 실험을 통해서 극저온유체와 물의 접촉에 따른 기포의 급속팽창(Eruption)은 발생하지 않았으며 이는 앞에서 언급한대로  $LN_2$  ( $-195^\circ C$ )와 물( $19^\circ C$ )과의 접촉에서는 막비등에서 천이영역을 거치지 않고 핵비등영역으로 이행하여 극저온유체의 과열이 발생하지 않았기 때문으로 풀이된다.

6. 본 실험조건에서의 무차원변수들은 기화기내의 기포들이 Grace의 그래프에서 구형-캡(spherical-cap)의 영역에 해당되는 것으로 나타났다. 그러나 본 기화기내에서는 확산유체의 유량증가에 따른 거품영역의 확대로 큰 기포상태로 존재하지 않고 작은 기포로 분리되어 기화기내에 존재한다.

#### 참 고 문 헌

1. LNG편람 상권, 1985. 한국가스공사, pp. 130~135.
2. 한국가스공사 5년사, 1988. 한국가스공사, pp. 284~285.

3. 김노수외, 1988. "폐열회수 시스템 실무 기술", 에너지관리공단, pp.323~326.
4. Golafshami, M. and Jacobs, H. R., 1989. "Stability of a Direct Contact Spray Column Heat Exchanger", *Journal of Heat Transfer*, Vol.111. pp.767~772.
5. Letan, R. and Kehat, E., 1965. "Mixing Effects in a Spray-Column Heat Exchanger", *AICHE Journal*, Vol.11. No.5. pp.804~808.
6. Letan, R. and Kehat, 1967. "The Mechanics of a Spray Column", *AICHE Journal*, Vol.13. No.3. pp.443~449.
7. Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978. "Bubbles, Drops, and Particles", Academic Press.
8. Nakanishi, E. and Roid, R. C., 1971. "Liquid Natural Gas-Water Reactions", *Chemical Engineering Progress*, Vol.67. No.12. pp.36~41.
9. Letich, A. M. and Baines, W. D., 1989. "Liquid Volume Flux in a Weak Bubble Plume", *J. Fluid Mech.*, Vol.205. pp.77~98.