

# 다양한 형상을 갖는 액화가스 기화기의 기화특성에 관한 실험적 연구

이용훈\*, 이상철\*, 정효민\*\*, 정한식\*\*†

\*경상대학교 대학원, \*\*경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소

## Experimental Study on the Gasification Characteristics of Liquefied Gas Vaporizer with Various Shape

Yong-Hun Lee\*†, Sang-Chul Lee\*, Hyo-Min Jeong\*\*, Han-Shik Chung\*\*

\*Graduate School, Department of Mechanical and Precision Engineering,  
Gyeongsang National University Tongyeong, 650-160, Korea

\*\*School of Mechanical and Aerospace Engineering, The Institute of Marine Industry,  
Gyeongsang National University, Tongyeong, 650-160, Korea

### Abstract

This paper was studied for optimum design of the used vaporizer at a satellite station. Generally, the cold air is created by temperature drop on the vaporizer surface. In addition, the frost creates ice deposit layer, therefore, heat transfer on vaporizer decreases into the adiabatic condition. By this reason, recent vaporizer system is installed as parallel type, and it takes three times of vaporizer capacity. But this vaporizer system requires much installation costs and restricted by some space. It is very important to solve this problem. This study paper is regarding LN<sub>2</sub> vaporizer where the utilization increases recently. There are three variable conditions which are used in this study research. First, fin lengths of 4000mm, 6000mm, 8000mm and 0, 4, 8 fin types were applied on each vaporizer. Second, we applied four season condition which consist of humidity, temperature and air velocity to the experimental environment. Finally, pressure was applied to get flow rate during experiment. This paper objective is to propose vaporizer type and length data for best performance of vaporizer through experiment.

**Key words** : LN<sub>2</sub>(액화질소), Vaporizer(기화기), Fin(핀), Super low temperature(초저온)

### 기 호 설 명

$V_R$  : Room 내의 풍속 [m/s]

$Q_{LN_2}$  : 액화질소의 유량 [kg/min]

$H_R$  : Room 내의 습도 [%]

$T_R$  : Room 내의 온도 [K]

### 1. 서론

LNG란 액화 천연가스의 약자로서 메탄을 주성분의 천연가스를 냉각, 가압한 것이다. LNG는 -162℃의 액체 상태로 저장되어 운송한 후에 상온

† 정한식(Han-Shik Chung)  
Tel.:+82-55-640-3185, Fax:+82-55-640-3188  
E-mail: hschung@gnu.ac.kr

의 천연가스로 변환하기 위해 다량의 에너지를 소비하여 기화하여야 된다.  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 냉열은 상당히 가치가 있는 것이므로 냉열이 필요한 산업에 활용하는 것이 매우 중요하다. LNG는 거의 기화 후에 에너지원으로 사용하고 있기에 반드시 상온 가까이 온도를 높여야 하며 기화하는 과정에서 증발 잠열이 약  $120 \text{ kcal/kg}$ 과 현열 약  $80 \text{ kcal}$ 를 흡수하며 총  $200 \text{ kcal/kg}$ 의 냉열 에너지를 발생하게 된다. 대부분 기화 공정에서는 이러한 냉열이 버려지게 되고, 상당량의 에너지가 추가로 소비되는 점을 감안할 때, 버려지는 냉열을 이용한다면 엄청난 비용의 에너지를 절감할 수 있다.<sup>1-2)</sup> LNG를 최종 수요처에서 사용할 수 있는 NG로 변환시키기 위한 공정 중에 하나인 대기식기화기는 대규모의 산업단지 등에 소형 LNG 위성 기지를 건설하여 이곳에 LNG를 저장하였다가 필요시 대기의 공기를 이용하여 기화시키는 것이다. 공기의 경우 열용량이 작기 때문에 LNG의 부피가 600배 팽창되므로 주변에 NG를 공급하기가 쉽다. 이를 위해서는 초저온 기화기의 일반적인 특성을 파악하고 대기식기화기를 개발하는 것이 우선 되어야 한다. 대기식기화기는 기화기 외부에 공기 중의 수분이 응결되는 고착 현상이 발생하여 기화 성능이 제대로 발휘되지 못하기 때문에 2 ~ 3개의 기화기를 교환하여 사용하고 있다. 이러한 성능저하 및 중복설비 등의 문제를 해결을 위해 성능해석 및 실험을 통해 설계기술을 최적화하는 것을 목적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>3-4)</sup> 본 연구는 대기식기화기에 관하여 여러 가지 형상에 따른 실험을 수행하였고 각각의 변수를 통하여 실험을 진행 한 후 기화기 type과 길이에 대한 최적의 성능을 가지는 기화기에 대한 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험장치 구성 및 모델

Fig. 1은 실험에 사용된 기화기 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 온도, 습도, 풍속은 덕트를 통하여 순환하는 폐회로 형식이며 Control Panel을 통하여 실험이 진행되는 동안 Room 내부를 항상 일정하게 유지할 수 있도록 하였으며, 유량

을 측정하기 위해 시작 시  $\text{LN}_2$ 의 탱크 무게와 종료 시  $\text{LN}_2$ 의 탱크의 무게 변화를 측정할 수 있는 저울을 사용하여 실험을 진행하였다. 데이터를 얻기 위해 관 내부와 Fin의 끝의 온도 변화를 측정하기 위해서는 K-type과 T-type의 열전대를 기화기 모델의 중앙부에 설치하여 1시간 동안 실험을 진행하며 PC 및 Data Logger를 이용하여 6sec마다 Data를 취득하였다. 본 실험에 적용된 기화기는 Kong과 Yi 등<sup>5-6)</sup>에 의한 선행 연구에서 CFD를 이용한 수치해석과 실험을 통해 LNG용 대기식기화기의 열-유동 특성을 연구한 결과 기화기 핀의 두께가 2mm인 경우가 가장 적합하고 핀의 개수는 반경 방향  $90^{\circ}$  간격으로 4개를 설치한 경우가 비교적 우수한 성능을 가진다고 보고하였다. 그리고 수치해석 결과를 근거로 하여 대기식기화기의 배열 특성에 대한 실험 결과 4fin80le, 8fin55le 가장 최적 형상이라고 제시하였다.

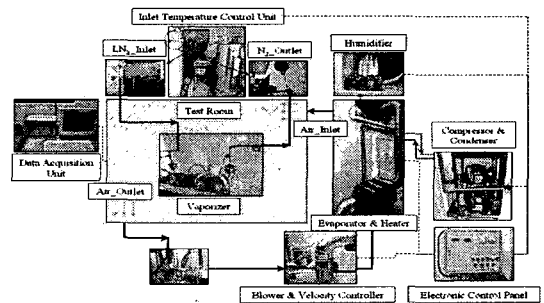


Fig. 1. Various photos of components comprising the vaporizer system.

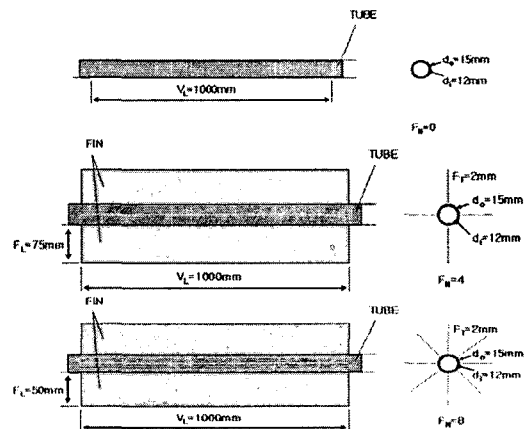


Fig. 2. Schematic diagram of vaporizer.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 기화기 모델에 대한 개략도를 나타내고 있으며, 기화기 길이 및 개수 그리고 배열에 관한 실험 변수는 Fig. 3과 같이 구분하였다. 또한 기화기 길이와 편에 대한 변수는 Table 1에 나타내고 있다.

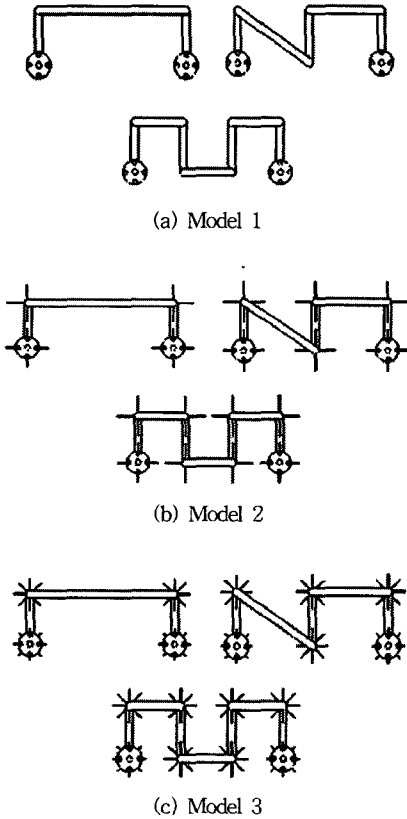


Fig. 3. Geometry of vaporizer models.

Table 1. Specification of Vaporizer arrangement.

Type	Array	Fin length (mm)	Fin height (mm)	Fin thickness (mm)	Fin number
Model1	Finless	2×2	1000×4	-	-
		2×3	1000×6		
		2×4	1000×8		
Model2	4fin80le	2×2	1000×4	80	2
		2×3	1000×6		
		2×4	1000×8		
Model3	8fin55le	2×2	1000×4	55	2
		2×3	1000×6		
		2×4	1000×8		

## 2.2 실험변수

초저온의 작동유체는 일반적으로 위성기지 또는 인수기지에서 사용하는 LNG의 특성과 비슷한 특성을 가지는 LN<sub>2</sub>를 실험에 적용하였다. Table 2에는 실험을 진행하는 동안의 각각의 변수를 나타내었다. Room의 온도는 293 K로 항상 일정하게 유지될 수 있도록 하고 정확한 실험을 위하여 ±0.5로 온도 보정을 하여 사용하였고 유입되는 풍속은 풍속 조절장치를 15% 개방하여 3.5 ~ 4.0 m/s로 덕트 및 배관을 통하여 일정하게 유입되도록 구성하여 실험을 진행하였다. 습도는 초음파 습도계를 사용하여 50%로 일정하게 유지되도록 하고 ±3%로 보정하여 실험을 진행하는 동안 최적의 조건이 되도록 하였다. 압력은 절대압력 1 kg/cm<sup>2</sup>로서 실험하는 동안의 유량을 측정하기 위해서 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 Model 1의 기화기의 시간변화에 따른 길이방향 각 지점의 기화기 내부 작동유체 온도분포를 나타낸 것이다. VAP. Inlet은 기화기 입구로 유입되는 작동유체의 온도를 나타내며 Outlet은 기화기 출구에서의 작동유체의 온도를 나타낸다. 그리고 기화기 1000 mm의 길이를 가지는 기화기 N개를 연결한 것으로서 Model의 경우 1000 mm의 길이를 가지는 기화기의 기본 Module을 4개, 6개, 8개 연결한 것이고, U-Tube를 이용해 연결한 것이다.

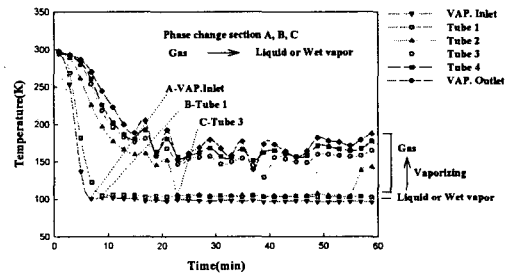
Table 2. Experimental condition of vaporizer.

Type	Length	Velocity (m/s)	Initial LN <sub>2</sub> weight(kg)	Final LN <sub>2</sub> weight(kg)	Variation of LN <sub>2</sub> (kg)	Flowrate (kg/min)
finless	4000	3.5	210.7	187.8	22.9	≈0.38
	6000	3.5	179.4	156.8	22.6	≈0.37
	8000	3.8	156.6	133.2	23.4	≈0.39
4fin80le	4000	3.6	218.8	188.5	30.3	≈0.5
	6000	3.5	158.8	134	24.8	≈0.41
	8000	4	216.1	197.1	25	≈0.41
8fin55le	4000	3.7	185.3	163.5	21.8	≈0.36
	6000	3.8	210.1	185.4	24.7	≈0.41
	8000	3.5	190.7	163.7	27	≈0.45

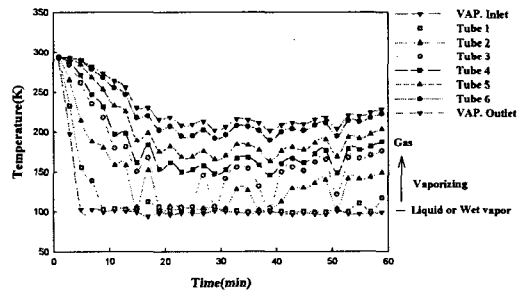
Tube N은 각 기화기 기본 Module의 길이방향에 대한 순번을 나타낸 것으로서 N번째 기화기 기본 Module 즉, 기화기 각 1000 mm 구간마다의 중간 지점 작동유체온도를 나타낸다. 따라서 범례는 기화기의 길이 방향에 관한 온도정보를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 Model 1의 4000 mm 기화기이며 1 시간 동안 기화기 내부 작동유체의 온도분포를 나타낸 것이다. 실험 시작 시에 LN<sub>2</sub>의 온도분포를 나타낸 것이다. 실험시작 시에 LN<sub>2</sub> 탱크 밸브를 개방하게 되면 기화기 내부로 LN<sub>2</sub>가 유입되므로 급속히 냉열이 전달되어 온도가 감소한다. LN<sub>2</sub> 탱크 내부로부터의 공급 압력은 절대압력으로 약 12 ~ 16 kgf/cm<sup>2</sup>이지만 본 실험에서는 압력 조절 밸브에 의해 기화기 입구의 압력을 3 ~ 5 kgf/cm<sup>2</sup>의 범위로 유지하였고, 이때 기화기의 출구의 압력은 1.5 ~ 2 kgf/cm<sup>2</sup>로 유지되었다. 탱크로부터 기화기로 유입되는 LN<sub>2</sub>는 단열 처리된 중간 연결라인을 거쳐 기화기 입구로 유입되므로 기화기 입구 전까지 단열팽창이 이루어진다. 따라서 실제 탱크내의 LN<sub>2</sub>온도보다 기화기 입구의 온도가 더 낮게 된다. 기화기 입구의 LN<sub>2</sub>의 유입온도는 시간에 따라 급격하게 감소하여 약 8분 후 96 K에 도달하는 것을 볼 수 있다. 96 K의 액체상태일 때 LN<sub>2</sub>의 절대압력을 p-h 선도에서 찾아보면 약 5 kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 절대압력을 가질 때의 온도임을 알 수 있다. 실험 시작 초에는 기화기 내부의 작동유체의 온도는 모두 기체 상태이다. 하지만 시간의 경과에 따라 기화기의 길이방향으로 냉열이 전달되어 약 8분 후에는 기화기 입구에서 모두 액상으로 통과하고 안정정인 온도분포를 보인다. 기화기 입구 이후에는 LN<sub>2</sub>가 기화되어 가스의 유동만 있지만 약 10분경과 후에는 Tube 1까지 액상이 도달하고, 20분경과 후에는 Tube 2까지 LN<sub>2</sub>가 도달되는 것을 볼 수 있다.

Tube 3의 온도를 보면 약 150 K 이상의 온도분포를 나타내고 있다. 실험에서 기화기 내의 절대압력 범위는 1.5 ~ 2 kg/cm<sup>2</sup>이므로 150 K를 가지는 Tube 3은 가스임이 틀림없다. 따라서 4000 mm인 Fig. 4(a)의 경우 Tube 2와 Tube 3 사이에서 액화 가스가 기체 상태로 기화가 이루어짐을 알 수 있다. 실험 20분경과 후 VAP. Inlet에서 Tube 2까지는 액상으로 흐르며 Tube 3, Tube 4 및 VAP. Outlet에는 기체 상태로서 흐른다. 액상일 때와 기상일 때

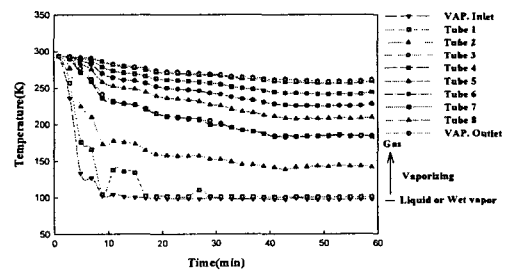
의 온도분포를 비교해보면 액상일 때는 일정한 온도 분포를 보이지만 기체 상태의 경우에는 매우 거친 온도분포를 보인다. 이는 액상의 기화과정에서 극심한 난류가 발생하고 이와 함께 내부 압력이 변화 한다는 것을 알 수 있다. 그 이후에도 Tube 3과 Tube 4는 함께 액상과 기상으로 천이를 반복하지만 약 40분 이후에는 차츰 액상에서 벗어남을 볼 수 있다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 마찬가지로 기상의 온도분포는 시간경과에 따라 불규칙적으로 변하고 있다.



(a)  $V_R=3.5$  m/s and  $Q_{LN_2}=0.38$  kg/min.



(b)  $V_R=3.5$  m/s and  $Q_{LN_2}=0.37$  kg/min.



(c)  $V_R=3.8$  m/s and  $Q_{LN_2}=0.39$  kg/min.

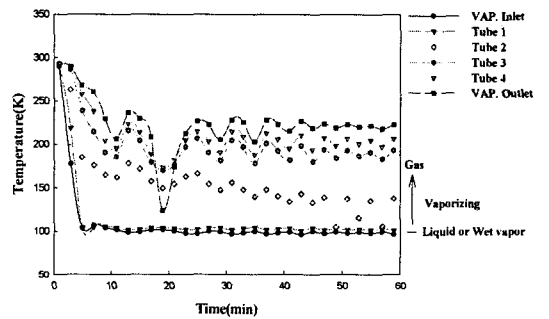
Fig. 4. Temperature distributions of the working fluid inside vaporizer with Model 1 according to time variation at  $T_R=293$  K,  $H_R=50\%$  and  $P_1=3 \sim 5$  kgf/cm<sup>2</sup>

이러한 불규칙한 온도분포는 기화지점의 변화에 의해 액상의 영역으로 변할 때 온도가 감소하고 기상으로 변할 때 온도가 증가하는 경향에 영향을 받아 Tube 3과 Tube 4의 온도분포 증감과 함께 변화한다. VAP. Inlet과 Tube 1, Tube 2에서는 액상이 존재하며 부분적으로 액화가스의 증발이 일어나 일정한 온도를 유지하지만 기화기 Tube 길이변화에 따라 압력차이가 일어날 수 있으므로 열 교환에 의한 온도차보다도 압력차에 의한 온도차가 발생할 수 있다. 만약 액상에서 온도가 상승하게 되면 열 교환에 의한 것이며 온도가 감소하게 되면 압력의 영향으로 나타난 결과이다. Fig. 4(b)의 최종 출구단의 기화가스 온도는 210 K ~ 220 K로서 4000 mm 보다 높은 가스온도를 보이고 있다. Fig. 4(c)는 Model 1의 8000 mm 기화기이며 기화기 내부의 각 지점에서의 작동유체온도를 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이 Fig. 4(a), (b)는 비교적 가스의 온도가 일정하게 선형적인 분포를 보이고 있다. Fig. 4(c)의 경우 Tube 2까지 작동유체가 액상으로 흐르고, Tube 3부터 기상으로 기화기 내부를 유동한다. Fig. 4(c)의 경우 출구단의 가스온도는 약 260 K 이상으로서 Model 1 중 가장 높은 가스온도를 나타냈다. 따라서 Finless 기화기의 용적이 증가할수록 기화기 출구의 가스 온도는 증가하며, 약 0.39 kg/min의 공급유량에서 Tube 3부터는 100% 가스로 토출됨을 알 수 있었다. 기화기의 길이가 증가함에 따라 출구단의 최종 가스의 온도는 그만큼 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 기화기 출구의 가스 온도의 상승은 길이가 길어질수록 전열면적의 증가로 인해 나타난 것이다.

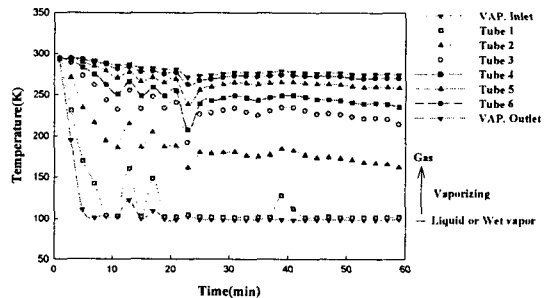
Fig. 5는 기화기의 Model 2에 대하여 시간경과에 따른 각 지점에서의 작동유체 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 Model 2의 4000 mm 기화기이며 유입되는 LN<sub>2</sub>의 온도는 Model 1과 동일하다. 하지만 기화기 내부에서 Model 1 기화기의 경우 길이변화에 관계없이 Tube 3부터 기상으로 유동하지만 Fig. 5(a)는 Tube 2에서부터 거의 기상으로 유동함을 알 수 있다. 이는 Model 1 보다 Model 2는 핀의 부착으로 인해 전열면적이 증가하므로 그만큼 열전달을 촉진시키기 때문이다. Fig. 5(a)의 경우 출구 측의 가스온도는 약 200 K ~ 225 K로서 Model 1 기화기의 Fig. 4(b)와 비슷

한 양상을 보이고 있다. Fig. 5(b)는 Model 2 기화기의 각 지점에서 시간경과에 따른 내부 작동유체 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 5(b)인 경우에도 Tube 2에서 완전한 100%의 가스로 변화되며, 가스의 불규칙한 온도분포의 변위는 Fig. 5(a)보다 둔화된 것으로 나타난다. 최종 출구의 가스온도는 270 K ~ 280 K로서 거의 상온에 도달함을 확인할 수 있었다.

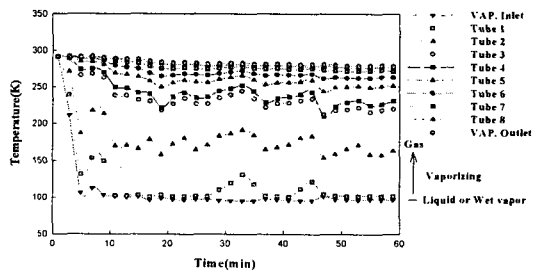
Fig. 5(c)는 기화기의 각 지점에서 시간경과에 따른 내부 작동유체 온도분포를 나타낸 것으로서



(a)  $V_R=3.6$  m/s and  $Q_{LN_2}=0.5$  kg/min.



(b)  $V_R=3.5$  m/s and  $Q_{LN_2}=0.41$  kg/min.

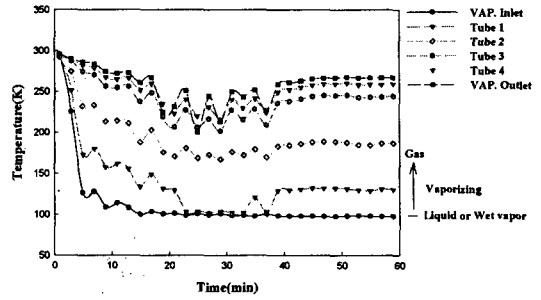


(c)  $V_R=4.0$  m/s and  $Q_{LN_2}=0.41$  kg/min.

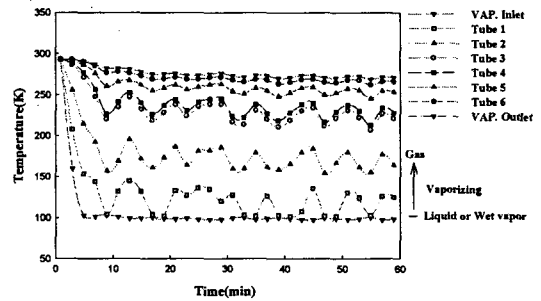
Fig. 5 Temperature distributions of the working fluid inside vaporizer with Model 2 according to time variation at  $T_R=293$  K,  $H_g=50\%$ , and  $P=3 \sim 5$  kgf/cm<sup>2</sup>.

역시 Tube 2부터 기화기 Tube 내에서 기상으로 흐름을 알 수 있다. 전체적인 온도분포의 경향은 Fig. 5(b)와 비슷하며 최종 출구 가스온도인 VAP. Outlet의 온도분포를 보면 약 280 K 이상의 온도분포를 보이고 있다. 따라서 Fin을 가지는 기화기 Model 2, 3의 경우가 Fin이 없는 기화기 Model 1보다 월등히 기화성능이 우수하며, 기화기 내의 액상으로 유동하는 구간이 짧아지고, 기상으로 유동하는 구간이 길어짐을 알 수 있다.

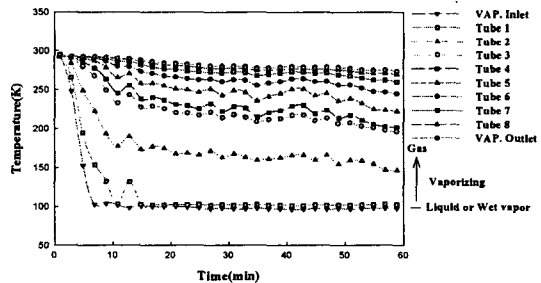
Fig. 6은 Model 3에 대한 시간경과에 따른 각 지점에서의 작동유체 온도분포를 나타낸 것이다. Model 3은 Model 2와는 달리 핀의 수가 2배 많고 길이가 1/3만큼 축소된 것이다. Fig. 6(a)는 Model 3의 4000 mm인 경우에 대한 시간 변화에 따른 각 지점에서의 기화기 내부 작동유체 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 Tube 1에서는 실험 시작 후 23분부터 37분까지 액상으로 흐르지만 다시 기상으로 변화하였다. 이것은 Model 2의 기화기의 액상이 존재하는 영역이 짧아진 것이다. 하지만 본 실험 조건에서 공급되는 유량이 Model 2의 실험보다 비교적 작게 나타났기 때문에 정확한 기화성능에 대한 비교는 공급유량별 대비로 판단해야 할 것이다. 전체적인 온도분포 특성은 다른 실험과 유사하며, 최종 출구의 가스온도는 약 200 K ~ 268 K 정도의 온도분포를 가진다. Fig. 6(b)는 Model 3의 6000 mm 일 때의 온도분포를 나타낸 것으로 길이가 4000 mm일 때의 Fig. 6(a)와 마찬가지로 Tube 1부터 액상과 기상이 반복 변화되면서 유동하는 것을 볼 수 있었고 기상의 불규칙적인 온도 증감의 변위는 길이가 기화지점으로부터 벗어날수록 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 기화과정에 발생하는 극심한 난류와 압력의 변화의 영향이 길이가 늘어남으로 인해 감소되기 때문으로 보인다. 기화기 출구가스의 온도는 약 270 K ~ 280 K의 분포를 보이고 있다. Fig. 6(c)는 Model 3의 8000 mm일 때의 온도분포를 나타낸 것으로 Fig. 6(a) 및 (b)와는 다르게 Tube 2에서부터 기상으로 작동유체가 유동을 하고 있다. 이것은 기화기 자체의 성능보다 각 실험 시 내부로 공급되는 LN<sub>2</sub>의 유량과 외부 풍속 및 습도, Room 온도가 조금씩 다르기 때문에 나타난 결과라고 할 수 있다. 하지만 각 기화기 모델의 기화성능은



(a)  $V_R=3.7$  m/s and  $Q_{LN_2}=0.36$  kg/min.



(b)  $V_R=3.8$  m/s and  $Q_{LN_2}=0.41$  kg/min.



(c)  $V_R=3.5$  m/s and  $Q_{LN_2}=0.45$  kg/min.

Fig. 6 Temperature distributions of the working fluid inside Model 3 vaporizer with according to time variation at  $T_R=293$  K,  $H_R=50\%$  and  $P_i=3 \sim 5$  kgf/cm<sup>2</sup>

LN<sub>2</sub> 공급유량과 기화과정에서의 열량의 변화를 비교함으로써 정확한 기화성능 비교가 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

(1) 초저온 액화가스 기화기의 내부 유동은 극심한 난류에 의한 압력변화에 의해 기화구간에서 온

도의 불규칙적인 온도분포특성을 보이며 기화구간은 특정영역에 국한 되어 있는 것이 아니라 공급유량 및 압력 변화 등에 의해 좌우된다.

(2) 핀이 없는 경우에는 Tube 2와 Tube 3 사이에서 액화가스가 기화되지만 핀이 있는 경우 전열면적의 증가로 인해 Tube 1과 Tube 2 사이에서 기화가 일어난다.

(3) 기화기의 길이가 길어질수록 기화기의 최종 출구의 가스온도는 상승하며 Fin이 있는 8000 mm의 경우 약 280 K 이상의 가스온도 분포가 나타났다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지역혁신인력양성사업, 해양수산부 KSGP 사업과 경상대학교 2단계 BK21 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Han, J. M. and Han, Y. S., "Review on Welding Technology and Welded Joint Strength of GT Membrane Type LNG Carrier," Journal of the Korean Welding Society, Vol.11, No.4, pp. 24-35, 1993.
- Hong, S. H., "Present Status and Prospect of LNG Storage Tank," Journal of KWS, Vol.13, No.3, pp. 1-7, 1995.
- Kim, N. J., Kim, C. B., Yun, S. M., and Han, S. T., 1994, "A Study on Boiling Characteristics of Direct Contact LNG Evaporator," SAREK, Winter Conference, pp. 380-385.
- Park, J. S. and Chang, H. M., 1997, "Analysis and Design of LNG Open Neck Vaporizer," SAREK, Vol.9, No.2, pp.189-197.
- Kong, T.-W., 2006, "Study on the Air Vaporizer for Liquefied Gas with Super Low Temperature," A Doctor's Thesis, Department of Mechanical and Precision Engineering Graduate School, Gyeongsang National University.
- Lee, S. C., Kong, T. W., Yi, C. S., Jeong, H. M., and Chung, H. S., 2006, "Optimum Design of Vaporizer Fin with Liquefied Natural Gas by Numerical Analysis," KSME Int. J. Vol.20, No.4, pp.546-553