

< 논문 >

### 형상변화에 따른 초저온 공온식 기화기의 열전달 효과

이상철\* · 신유식\* · 배강열\*\* · 정한식† · 정효민\*\*\*  
(2006년 8월 10일 접수, 2007년 6월 24일 심사완료)

## The Effect on the Heat Transfer According to Geometric Variation of Air-Fin Vaporizer with at Cryogenic Temperature

Sang-Chul Lee, You-Sik Shin, Kang-Youl Bae,  
Han-Shik Chung and Hyo-Min Jeong

**Key Words:** Heat Transfer(열전달), Air Fin Vaporizer(공온식 기화기), Liquefied Natural Gas(액화 천연가스)

#### Abstract

At present time, LNG demand of the world is increasing and the piping line for NG transportation has been already installed in Korea. The air fin vaporizer is, however, required because of the transportation for remotely local areas. This paper numerically investigates on the heat transfer characteristics of relevant geometric variations of air-fin vaporizer which is heated by air not by sea water. This vaporizer must be designed in consideration of both efficiency and economics because air is relatively a little heat source. In this study, the pipe and the longitudinal fins are fundamental geometric considerations. Main parameters of geometry are the number, the thickness, and the length of the fins. Finally, the results of heat transfer effects are investigated with the characteristics of each parameter variation.

———— 기호설명 ————

- A : 전열면적(m<sup>2</sup>)
- E<sub>r</sub> : 오차 값
- F<sub>N</sub> : 핀 개수(EA)
- F<sub>T</sub> : 핀 두께(mm)
- F<sub>L</sub> : 핀 길이(mm)
- h : 대류열전달계수(W/m<sup>2</sup>K)
- N : 유용도, Q<sub>Fin</sub>/Q<sub>Finless</sub>

#### 1. 서 론

현재 한국의 액화천연가스(LNG : Liquefied Natural Gas) 수요는 날로 증가하고 있다.<sup>(1)</sup> LNG 인수기지에서 해수를 통해 LNG를 기화시켜 가정과 산업체에 필요한 도시가스로 공급하고 있지만 LNG 인수기지에서부터 천연가스(NG)를 공급받을 수 있는 거리는 경제적 원칙에 따라 제한되어 있기 때문에 국부적으로 LNG 공급라인이 구축 되지 않는 지역도 아직 남아 있다. 이러한 지역에는 별도의 LNG 탱크로리, 즉 LNG 위성기지를 두어 각 가정 및 수요처에 공급해야한다. LNG 위성기지는 LNG 인수기지와는 달리, 바다 근처가 아니므로 LNG를 공기의 열원을 이용해 기화시킬 수밖에 없다. 물론 LNG 인수기지에서 기화시킨 NG를 현지에서 공급받을 수 있지만 NG의 부피는 LNG의 1/600 정도이기 때문에 빈번한 조달을 요하므로 운송비가 그만큼 증가하게 된다. 따라서 LNG 인수기지에서부터 공급라인을 통해 NG를 공급받

† 책임저자, 경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소  
E-mail : hschung@gnu.ac.kr  
TEL : (055)640-3185 FAX : (055)640-3188

\* 거제대학 메카트로닉스계열

\*\* 경상대학교 항공기부품기술연구소

\*\*\* 경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소

기 어려운 지역에서는 LNG의 기화를 위해 별도의 기화기가 필요하다.<sup>(2-6)</sup>

국내에서 사용되는 공기 가열식 기화기의 형상은 튜브(tube)와 길이 방향의 핀(longitudinal fin)의 조합으로 이루어져 있으며, 이는 일본에서 사용하고 있는 상용모델로서 이에 대한 상세한 설계 자료의 정보가 국내에서는 부족하다. 특히, LNG의 기화기는 초저온의 영역에 노출되므로 기화기 표면에서 수분의 응축 및 서리착상 또는 결빙 등의 영향으로 인한 설계조건이 일반적인 고온의 열교환기 보다 까다롭게 된다. 본 연구와 유사한 선행연구로서 일반적인 열교환기의 형상에 따른 열전달을 향상과 수평 및 수직 평판위의 서리착상에 관한 연구 또는 초저온 시스템의 에너지 저장 등과 같은 연구들이 보고된바 있지만, 실질적으로 초저온 환경에서의 공기 가열식 기화기설계에 접목하기에는 어려움이 많다.

따라서 본 연구에서는 공기 가열식 LNG 기화기의 최적 설계를 목표로 우선, 열교환기의 형상적 설계파라미터로 핀의 개수, 두께 및 길이의 변화가 공기 가열식 초저온 기화기의 열전달에 미치는 영향에 대한 수치해석을 통하여 기초적인 설계자료를 도출하는데 의미가 있다.

## 2. 수치해석 모델 및 방법

### 2.1 수치해석 모델

Fig. 1은 현재 국내에서 사용되고 있는 공기 가열식 기화기의 상용모델로서 수직 길이방향으로 설치된 기화기의 2차원 수평단면을 나타낸 개략도이다. 내부에

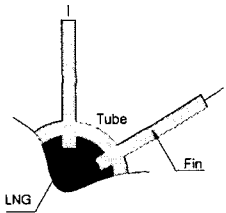


Fig. 1 Schematic diagram of commercial air fin vaporizer

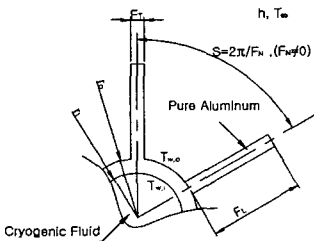


Fig. 2 Schematic diagram of vaporizer geometry for numerical analysis

는 축방향의 홈(axial groove)이 파여져 있지만 본 연구에서는 내부의 축방향의 홈의 영향에 대해서는 배제하였으며 기화기의 재료는 알루미늄합금 A6063S이지만 수치해석상 순수 알루미늄(pure aluminum)으로 가정하였다. 그리고 Fig. 2의 개략도는 수치해석 모델로서 Fig. 1의 형상을 단순화하여 나타낸 것이며, Fig. 3은 핀 개수에 따른 기화기의 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 4는 계산모델의 격자 시스템을 나타낸 것으로 격자는 ICEM-CFD 상용코드를 이용하여 생성하였다. 계산 모델마다 핀의 개수 및 두께, 길이가 동일하지 않기 때문에 격자수는 약 4,000~25,000개 정도이다.

### 2.2 수치해석 방법

본 수치해석에서는 2차원 정상상태의 열전도 방정식을 적용하여 전도에 관해서만 계산하였다. 따라서 계산 알고리즘은 SIMPLE을 사용하였으며, 계산 정밀도를 높이기 위해 잔차값이  $10^{-7}$  이하가 되어야 수렴하도록 하였다. 그리고 수치해석 기법은 중심차분법(Central Differencing Scheme)을 사용하여 계산하였다.

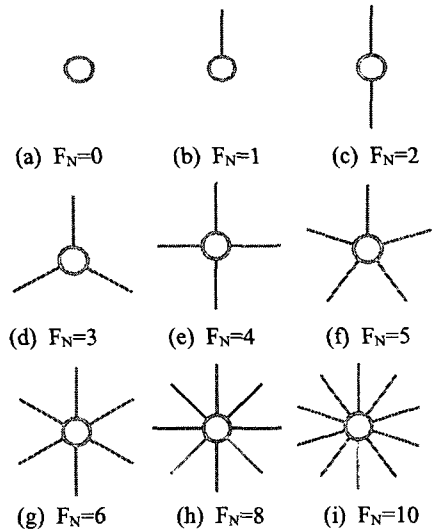


Fig. 3 Numerical models of vaporizer

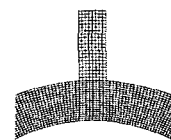


Fig. 4 Grid system of numerical models

2.2.1 지배방정식 및 경계조건

수치해석에 사용된 지배방정식은 정상상태의 2차원 원통좌표계로서 식 (1)과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (k \frac{\partial T}{\partial \theta}) + s = 0 \quad (1)$$

수치해석에서 기화기 내부의 작동유체는 LNG 대신 LN2를 작동유체로 가정하였다. 이는 실제 LNG의 사용은 안전상 설비허가의 어려움 때문에 사용하지 못하기 때문이다. 따라서 수치해석 모델에 대한 경계조건으로서 내벽면은 일정한 벽면온도 77K로 주어졌으며, 수직 기화기의 수평단면이므로 중력의 영향이 없다. 또한 외부 벽면에서의 경계처리는 대류경계조건으로 대기 온도를 293K로 하고 평균대류열전달계수  $h=1000W/m^2K$ 로 가정하였다. 실제 LN2를 이용한 실험에서 기화기 내부의 벽면온도가 77K인 경우 외부벽면 온도는 약 79K~80K 정도를 유지된다. Fig. 5의 가상 수치해석에서와 같이 내부벽면 온도 77K, 대류열전달계수  $10^1 \sim 10^6 W/m^2K$ 를 적용했을 경우  $10^1 \sim 10^3 W/m^2K$ 의 범위에서는 내부벽면 온도와 외부벽면 온도의 차가 거의 일정함을 볼 수 있고,  $10^3 W/m^2K$  이상에서는 내외부벽면의 온도차가 크게 나타난다. 따라서 기화기 표면에서의 대류열전달계수 값을  $10^3 W/m^2K$ 로 적용하여 수치해석을 진행하였다.

2.2.2 수치해석 파라메타 및 경계 값

Table 2는 수치해석 형상적 변수들과 경계에서의 적용 값들을 나타낸 것이다. 튜브의 내경과 외경은 12:15로 고

Table 1 Parameters for numerical analysis

Geometric parameters				Boundary value			
$r_i$	$r_o$	$F_N$	$F_T$	$F_L$	$T_{w,i}$	$T_\infty$	$h$
[mm]	[mm]	[EA]	[mm]	[mm]	[K]	[K]	[W/m <sup>2</sup> K]
				30			
		0		35			
		1		40			
		2	1	45			
		3	(2)	(50)			
(12)	(15)	(4)	3	55	(77)	(293)	(1000)
		5	4	60			
		6	5	65			
		8		70			
		10		75			
				80			

정하고 핀의 개수, 두께 및 길이를 형상적 변수로 두었다. 그리고 기화기의 형상적 변수가 아닌 내부 벽면 및 대기 온도와 대류열전달계수의 값들은 Table 2에 나타난 바와 같다. 그리고 형상적 변수들에 대한 수치해석에 있어서 기준조건은 Table 2의 괄호 안에 있는 값이며, 이 값들을 기준으로 핀의 개수, 두께 및 길이의 변화에 따른 영향에 대하여 수치해석 하였다.

2.2.3 온도에 따른 열전도를 함수식의 적용

Table 3은 순수 알루미늄의 온도에 따른 열전도율을 나타낸 것이다. 200K 이상의 온도에서는 열전도율의 변화가 작지만 100K일 때는 열전도율의 증가량이 아주 크다는 것을 알 수 있다. 그러므로 이 온도범위 내에서 열전도율의 변화가 클 경우 일정한 열전도율보다 온도에 따른 열전도율 함수식을 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 100K일 때의 열전도율 302W/mK와 200K 또는 300K에서의 열전도율 237W/mK, 그리고 온도에 관한 열전도율 함수  $k=f(T)$ 를 각각 적용했을 때 대류열전달계수를 매개변수로  $F_N=0$ 의 모델에 대하여 외부벽면의 온도를 비교하였다. Fig. 5는  $10^1 W/m^2K \leq h \leq 10^6 W/m^2K$ 의 대류열전달계수 범위 내에서 일정한 열전도율과 온도의 함수인 열전도율을 적용하였을 때  $F_N=0$ 의 모델의 외부벽면 온도를 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 Standard는  $k=f(T)$ 를 적용한 경우의 대류 열전달 계수에 따른 외부벽면의 온도분포이다.

Table 2 Thermal conductivity of pure aluminum according to temperature

Temperature T(K)	100	200	300	400	500	600	800
Thermal conductivity k (W/mK)	302	237	237	240	236	231	218

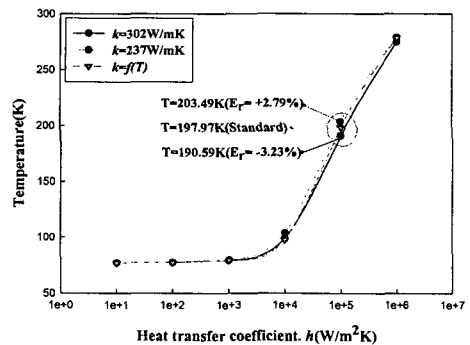


Fig. 5 Graph of numerical data on outside wall temperature according to thermal conductivity at  $10^1 W/m^2K \leq h \leq 10^6 W/m^2K$

$h=10^3\text{W/m}^2\text{K}$ 까지는 대류열전달 온도분포가 서로 비슷하지만  $h=10^4\text{W/m}^2\text{K}$ 에서는  $k=f(T)$ 가 100K일 때의 열전도를 302W/mK의 외부벽면 온도에 잘 일치하고  $h \geq 10^5\text{W/m}^2\text{K}$ 에서는 200K 또는 300K일 때의 열전도를 237W/mK의 온도분포에 잘 일치한다. 특히,  $h=10^5\text{W/m}^2\text{K}$ 에서는  $k=f(T)$ 와 일정한 열전도를 적용의 온도분포차이가 가장 크게 나타남을 볼 수 있다. 따라서 본 수치해석에서는 순수 알루미늄의 열전도율을 온도의 함수로 나타내어 적용하였다. 순수 알루미늄의 온도에 관한 열전도율 함수식은 다음과 같다.

$$k = f(T) = 598 - 5.059T + 0.027T^2 - 7.383e^{-3}T^3 + 1.056e^{-7}T^4 - 7.667e^{-11}T^5 + 2.222e^{-14}T^6$$

[if,  $0 < T \leq 800$ ] (2)

2.2.4 엄밀해와 수치해석의 비교

Fig. 6은 수치해석의 값들의 수렴정도를 확인하기 위하여 외부벽면의 수치해석 온도 값과 이론계산에 의한 온도 값을 서로 비교한 것이다. 수치해석 및 이론 계산은  $F_N=0$ ,  $T_{w,i}=77\text{K}$ ,  $T_\infty=293\text{K}$ ,  $k=237\text{W/mK}$ 에 관하여 수행되어 졌으며, 대류열전달 계수  $h$ 를 매개 변수로 하였다. 그림에서 보는 것과 같이 수치해석에 의한 외부벽면 온도분포  $T_n$ 과 이론적 계산에 의한 온도 값  $T_e$ 가 아주 잘 일치하고 있음을 보여준다.

3. 결과 및 고찰

3.1 핀 개수 변화의 영향

Fig. 7은 기화기의 핀 개수 변화에 따른 핀 길이 방향의 온도분포를 나타낸 것이다.

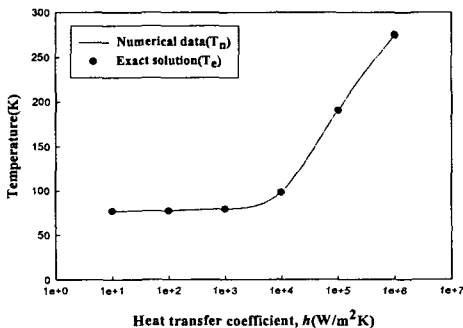


Fig. 6 Comparison between numerical data and exact solution on outside wall temperature according to heat transfer coefficient at  $k=237\text{W/mK}$

$F_N=0$ 은 핀이 없는 경우이며,  $1 \leq F_N \leq 10$ 은 핀이 존재할 경우를 나타낸다. 핀이 없는 경우와 핀이 있는 경우의 온도 증가 기울기를 비교해 보면, 핀이 있는 경우의 반경 길이에 대한 온도증가 기울기가 훨씬 크게 나타난다. 따라서 핀이 가지는 열전달 효과는 대단히 크게 작용함을 알 수 있다. 하지만 핀의 개수 증가에 대한 핀 중앙 길이방향의 온도분포는 동일하게 나타났다.

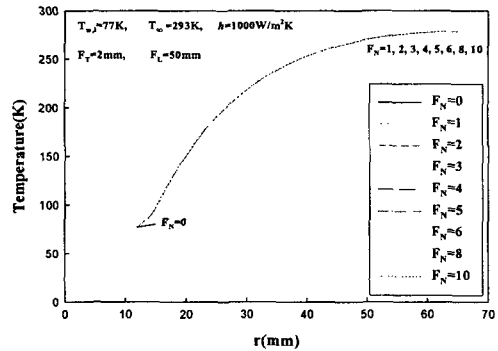


Fig. 7 Temperature distributions of fin center radius according to increase of  $F_N$

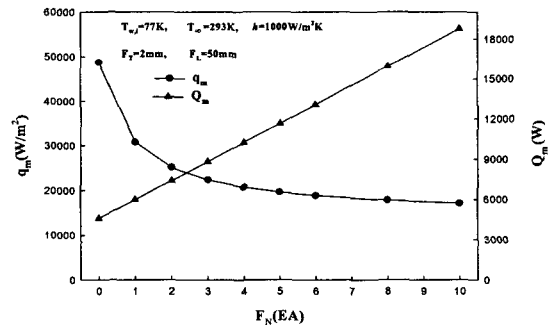


Fig. 8 Mean value on heat flux and heat transfer rate of vaporizer outside surface according to increase of  $F_N$

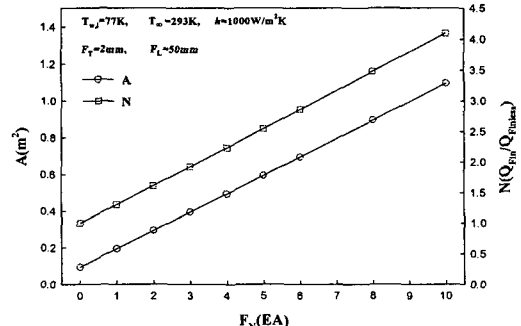


Fig. 9 Fin effectiveness and heat transfer area of vaporizer outside surface according to increase of  $F_N$

일반적으로 핀 개수의 증가는 열전달 효과를 상승시키지만 핀의 개수가 많으면 핀과 핀 사이의 열적 간섭에 의해 역효과를 가져올 수 있다. 하지만 본 수치해석의 범위에서는 열적 간섭에 의한 영향까지 고려하지 않았다.

Fig. 8은 핀 개수의 증가에 따른 기화기 외부 벽면에서의 평균 열 유속과 열전달량을 나타낸 그래프이며, Fig. 9는 기화기 핀의 개수증가에 따른 열전달면적과 유용도를 나타낸 것이다. 핀 개수의 증가는 핀의 면적 증가를 가져온다. 따라서 열 유속은 단위면적당 열량을 나타내므로 핀 개수 증가에 의해 감소하게 된다.

하지만 평균 열 유속이 감소함에도 평균열전달량은 핀 개수 증가와 함께 증가함을 보이고 있다. 이는 평균 열 유속이 감소하더라도 기화기 전열면적이 증가하기 때문에 평균열전달량도 함께 증가하는 것이다. 따라서 열적 간섭이 없는 영역 내에서 핀의 개수 증가는 전열면적을 증가시킴으로 전체의 열전달량을 증가시킨다. 전열면적의 증가로 인한 열전달량이 함께 증가한다면 좋지만 기화기에서 핀 개수의 적절한 선정은 언제까지나 경제성 및 효율적인 측면을 고려해야 한다.

### 3.2 핀 두께변화의 영향

Fig. 10은  $F_N=4$ 이고  $F_L=50\text{mm}$ 의 핀 길이를 가지는 기화기의 핀 두께 변화에 따른 핀 중앙 반경 방향의 온도 분포를 나타낸 것이다. 핀 두께가 증가함에 따라 기화기 핀 끝단의 온도가 감소함을 볼 수 있다. 이는 핀의 두께 증가가 기저부의 면적을 증가시킴으로서 나타난 현상으로 길이 방향에 대한 핀 중앙의 온도분포가 낮게 분포하면 핀 둘레 표면의 온도 또한 낮게 분포한다. 따라서 핀 효율이 증가하게 되어 열전달량은 증가하게 된다. 일반적으로 핀과 핀 사이의 열적 간섭을 받지 않는 범위에서

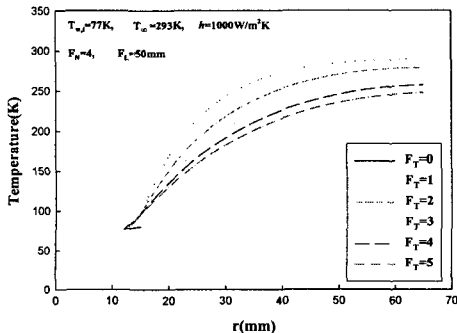


Fig. 10 Temperature distributions of fin center radius according to increase of  $F_T$

핀의 두께 증가는 핀 효율을 증가시킨다. 또한 핀의 설계 시 핀 길이변화에 따른 핀 끝단부의 온도 변화가 없는 지점까지의 길이 확장은 열전달량을 증가시키고, 핀의 두께가 증가할수록 핀 끝단의 온도가 감소하므로 필요에 따라 핀의 길이 확장이 요구되어진다.

Fig. 11에서 핀의 두께 증가에 대한 기화기의 평균 열 유속과 열전달량을 보면 핀의 개수 변화에 대한 평균 열 유속은 감소하는 반면, 핀의 두께가 증가함에 따라 평균 열 유속의 증가를 가져왔다.

실제적으로 동일 조건에서의 핀 두께 증가는 기화기 핀 둘레 면적의 변화에 크게 영향을 주지 않으며, 핀 두께의 증가가 평균 열 유속의 증가를 가져오기 때문에 Fig. 11에 나타난 평균열전달량과 Fig. 12의 유용도가 함께 증가함을 보인다. 핀의 길이가 동일할 때 핀 두께의 증가는 열전달량을 증가 시키므로 핀의 두께가 증가하면 이에 상응하는 핀의 길이를 줄여도 동일한 열전달량을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

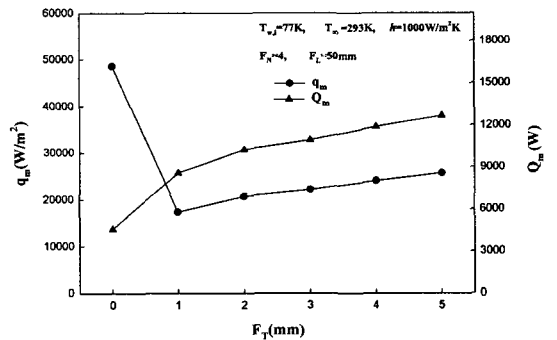


Fig. 11 Mean value on heat flux and heat transfer rate of vaporizer outside surface according to increase of  $F_T$

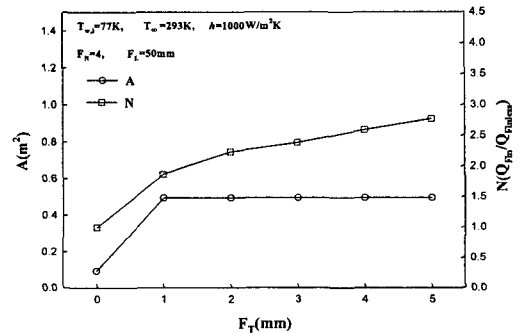


Fig. 12 Fin effectiveness and heat transfer area of vaporizer outside surface according to increase of  $F_T$

3.3 핀 길이변화의 영향

Fig. 13에서 핀 길이가 변화할 때 핀 중앙 반경 방향의 온도분포를 나타낸 것이다. 핀 길이가 증가할 때 온도분포도 함께 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고 핀의 길이 증가분에 대한 핀 끝단의 온도차는 길이가 길어질수록 감소하여 해석 범위 내에서 핀 길이가 75mm와 80mm의 핀 끝단 온도차는 거의 동일하게 나타남을 볼 수 있다. 따라서  $F_N=4$ 이고  $F_T=2mm$  기화기 모델에서는 핀의 길이가 최대 80mm정도 까지는 핀의 효과가 있을 것으로 판단되며, 그 이상부터는 길이가 길어져도 핀 끝단의 온도가 293K의 대기온도와 동일하게 되어 핀으로서의 효과가 크게 작용되지 않을 것으로 생각된다.

Fig. 14에서는 핀 길이의 증가에 대한 기화기 표면의 평균 열유속과 열전달량을 나타내며, Fig. 15는 핀 길이의 증가에 대한 기화기표면의 열전달면적 및 유용도를 나타낸다. 핀의 길이 증가함에 따라 대하여 열 유속은 면적의 증가로 인해 점차 감

소되며 열전달 및 유용도는 점차적으로 증가함을 보인다. 또한 핀 길이 변화에 대한 평균 열유속 및 열전달량의 감소 및 증가 기울기는 점차적으로 작아지는 경향을 보이고 있다. 따라서 핀 끝단의 온도가 293K가 되는 핀의 최소 길이부터 핀 길이가 증가할수록 전열면적이 증가함으로 평균 열 유속은 감소하겠지만 평균열전달량 및 유용도는 거의 일정한 값을 가질 것으로 예상된다.

4. 결론

(1) 기화기 핀 개수가 증가할 때 전열면적을 증가시킴으로 인해 평균 열 유속이 감소하는 반면 평균열전달량은 증가하고, 핀 개수에 따른 중앙 반경방향의 온도분포는 핀 개수에 상관없이 거의 일정하였다.

(2) 동일 핀 개수와 길이에 대한 기화기 핀 두께의 증가는 기화기 핀의 전체적인 온도분포를 감소시킴으로 인해 평균 열 유속을 증가시켜 평균 열전달량의 증가를 가져온다. 또한 핀 두께를 핀 길이에 대한 온도편차가 0이 될 때 까지 확장하면 열전달량도 함께 증가할 것으로 예상된다.

(3) 핀 길이가 증가함에 따라 핀 중심반경방향의 온도분포도 함께 증가하고, 핀의 길이 증가분에 대한 핀 끝단의 온도차는 길이가 길어질수록 감소하여 해석 범위 내에서 핀 길이가 75mm와 80mm의 핀 끝단 온도차는 거의 동일하게 나타났다. 따라서 핀 개수가 4이고 두께 2mm인 기화기 모델에서는 핀의 길이가 최대 80mm정도 까지는 핀의 효과가 있을 것으로 판단된다.

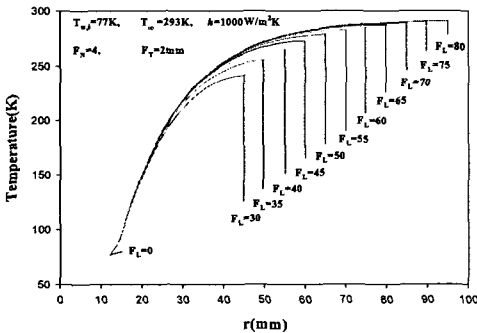


Fig. 13 Temperature distributions of fin center radius according to increase of  $F_L$

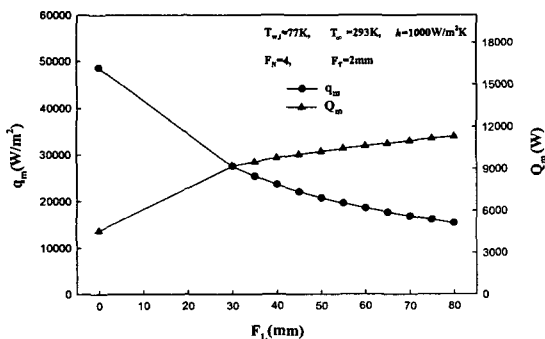


Fig. 14 Mean value on heat flux and heat transfer rate of vaporizer outside surface according to increase of  $F_L$

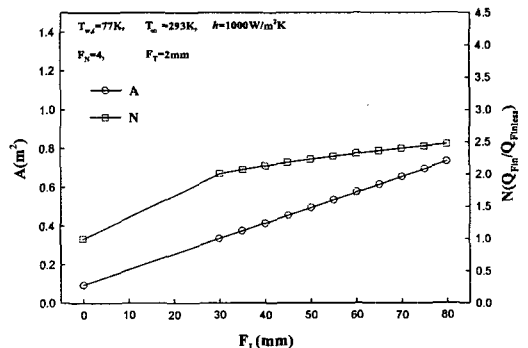


Fig. 15 Fin effectiveness and heat transfer area of vaporizer outside surface according to increase of  $F_L$

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지역혁신인력양성사업과 경상대 2단계 BK21 사업의 지원에 의하여 연구 되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Han, J. M. and Han, Y. S., 1993, "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.
- (2) Yoon, J. I., 2001, "Trends of Research and Development of LNG Cold," *Journal of the KSPSE*, Vol. 5, No. 4, pp. 5~10.
- (3) Lee, G. S., Chang, Y. S. and Ro, S. T., 1995, "Thermodynamic Analysis of the Extraction Process and the Cold Energy Utilization of LNG," *Air-Conditioning and Refrigerating Engineering*, vol.7, No.1, pp. 120~131.
- (4) Lee Kwan-Soo, Lee Tae-Hee and Kim Woo-Seung, 1994, "Condition on the Frost Formation in a Vertical Plate at a Low Temperature," *Transactions of KSME(B)*, Vol. 18, No. 12, pp. 3305~3311.
- (5) Yang Dong-Keun and Lee Kwan-Soo, 2004, "Modeling for Frost Growth on a Cold Plate," *Proceeding of the KSME 2004 Spring conference*, pp. 1546~1551.
- (6) Kim Ji-Dong, 2005, "The future of LNG and latest technology : LNG Vaporizer," KISTI, Report of the technical trend Analysis.