

초저온 액화가스 단일 모듈 기화기의 열변형 구조해석 Structure Analysis on Thermal Deformation of Super Low Temperature Liquefied Gas One-module Vaporizer

박기태 · 이용훈 · 심규진 · 정효민 · 정한식*

G. T. Park, Y. H. Lee , K. J. Shim, H. M. Jeong and H. S. Chung*

Key Words : Liquefied Gas(액화가스), Super Low Temperature(초저온), Thermal Strain(열변형률), Thermal deformation(열변형률), Vaporizer(기화기)

Abstract : Liquefied gas vaporizer is a machine to vaporize liquefied gas such as liquid nitrogen(LN₂), liquefied natural gas(LNG), liquid oxygen(LO₂) etc. For the air type vaporizer, the frozen dew is created by temperature drop (below 273 K) on vaporizer surface. The layer of ice make a contractions on vaporizer. The structure analysis on the heat transfer was studied to see the effect of geometric parameters of the vaporizer, which are length 1000 mm of various type vaporizer. Structure analysis result such as temperature variation, thermal stress and thermal strain have high efficiency of heat emission as increase of thermal conductivity. As the result, Frist, With-fin model shows high temperature distribution better than without-fin on the temperature analysis. Second, Without-fin model shows double contractions better then with-fin model under the super low temperature load on the thermal strain analysis. Third, Vaporizer fin can be apply not only heat exchange but also a stiffener of structure. Finally, we confirm that All model vaporizer can be stand for sudden load change because of compressive yield stress shows within 280 MPa on thermal stress analysis.

1. 서 론

세계의 1차 에너지 수요 중 천연가스의 비중은 1982년도에 20.1%, 1997년말 에는 23.9%로 증가하였고 2010년에는 약 25%이상으로 예상되고 있다. 우리나라의 LNG(Liquified Natural Gas)수입량은 해마다 증가하고 있다. 우리나라의 LNG 인수 기지의 건설 현황은 이미 가동 중인 인천, 평택에 이어 경남 통영에 2002년도에 14만 KL 용량을 3기 완성하였고, 서울 경인 지방의 LNG공급은 인천과 평택에서 담당하며 전라남북도 및 경상남북도에는 통영 기지에서 출발하는 파이프망을 구성하고 있다. 우리나라의 LNG 총 연장 길이는 2,435 km로서 차세대 주 연료로서의 역할이 확실하다.¹⁾⁻⁴⁾

LNG의 냉열을 기화시키는 방법으로는 두 가지가

있다. 하나는 공기보다 열용량이 많아 일시에 많은 양의 LNG를 기화시킬 수 있는 해수를 이용하는 것이며, 두 번째는 소형 LNG위성 기지에서 주로 사용하는 대기의 공기를 이용하는 방식이 있다. 국내에서 사용되는 대기식 기화기의 형상은 튜브(tube)와 길이 방향의 핀(fin)의 조합으로 이루어져 있으며, 이는 일본에서 사용하고 있는 상용 모델로서 상세한 설계 자료의 정보가 국내에서는 부족하다고 할 수 있다. 특히, LNG의 기화기는 초저온의 영역에 노출되므로 기화기 표면에서 수분의 응축 및 서리 착상 등의 영형으로 인해 설계조건이 일반 고온의 열교환기 보다 까다롭다.⁵⁾⁻⁶⁾

따라서 본 연구에서는 대기식 기화기의 여러 가지 형상에 대하여 핀의 높이와 핀의 개수를 변화하여 길이가 1000 mm인 경우에 대하여 초저온의 액화가스인 LN₂를 이용, 작동유체가 진행되는 방향에 대하여 기화기의 재질에 대한 구조해석을 진행하였다. 또한 초저온의 작동유체가 기화기 내부를 유동할 때 기화기의 열에 대한 변형을 비교하여 기초자료를 제시하고자 한다.

접수일 : 2007년 5월 29일, 채택확정 : 2007년 8월 20일
정한식(책임저자):경상대기계항공공학과,해양산업연구소
E-mail : hschung@gnu.ac.kr Tel. 055-640-3185
박기태, 이용훈 : 경상대학교 대학원 정밀기계공학과
심규진 : 경상대학교 기계항공공학과
정효민 : 경상대학교 기계항공공학과, 해양산업연구소

2. 열변형성 구조해석

2.1 해석방법

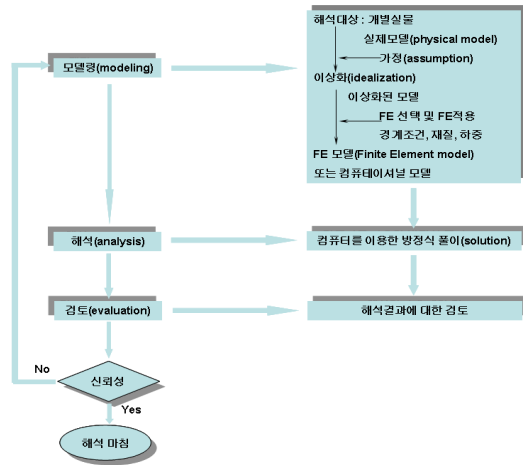


Fig. 1 Processing of finite element method

Fig. 1에는 FEM을 이용한 공학해석 과정을 나타내었다. 첫 번째로 모델링은 유한요소 모델을 얻는 것을 말한다. 해석대상은 해석하고자 하는 실제의 모델에 한정되며 실제의 모델들은 형상, 재질, 경계조건, 하중 4가지의 조합으로 이루어져있다. 이러한 것들을 적절하게 활용하여 이상화를 실시하여 최적화된 모델을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 모델을 FE 모델이라고 한다. FE 모델은 수학모델과 달리 이미 컴퓨터에 수치해법으로 풀 수 있도록 프로그래밍 되어 있는 유한요소를 적용하는 것이기에 이후의 해석과정은 매우 단순하다. 컴퓨터를 이용하여 해석을 진행한 후 해석결과를 검토하고 해석방법이 옳다면 해석을 마치면 되고 만약 해석이 옳바르지 못하다면 다시 모델링에서부터 수정하여 진행하면 된다. 본 장에서는 실험에 적용된 기화기 모델의 1000 mm에 대한 열변형성관련 수치해석을 상용 소프트웨어인 ANSYS Workbench 10.0 을 사용하여 해석을 진행하였다.⁽⁷⁾⁻⁹⁾

2.2 해석모델 및 경계조건

Fig. 2는 해석에 적용된 모델의 형상 및 mesh를 나타낸 것이다. 수치해석에 적용된 모델은 현재 초저온용 액화가스의 기화를 목적으로 상용되고 있는 공기가열식 기화기이다. 재질은 알루미늄(A6063S)으로서 제작되었으며 핀을 가지는 형태와 핀이 없는 형태를 계산 모델로 하였다. Table 1은 해석에 적용된 기화기 모델의 제원을 나타내고 있다. 또한

그림의 오른쪽에는 해석에 적용된 모델의 mesh를 보여주고 있다. FEM을 기본으로 한 구조해석 Software ANSYS Workbench 10.0을 이용하여 격자를 구성한 것이며, ANSYS에서 모델 생성 시 가장 기본 단위가 되는 것은 절점이며 각 절점을 연결하여 선을 생성하고 다시 선에 의해서 면을 생성하는 것인데, CATIA V5를 이용하여 기본적인 모델을 생성하였다. Mesh는 복잡한 형상이 아니기에 전체 모델의 형상에 대해 10 mm로서 동일하게 주었다. Table 2에는 적용한 3가지 Type 모델의 요소 및 절점수를 나타내었다.

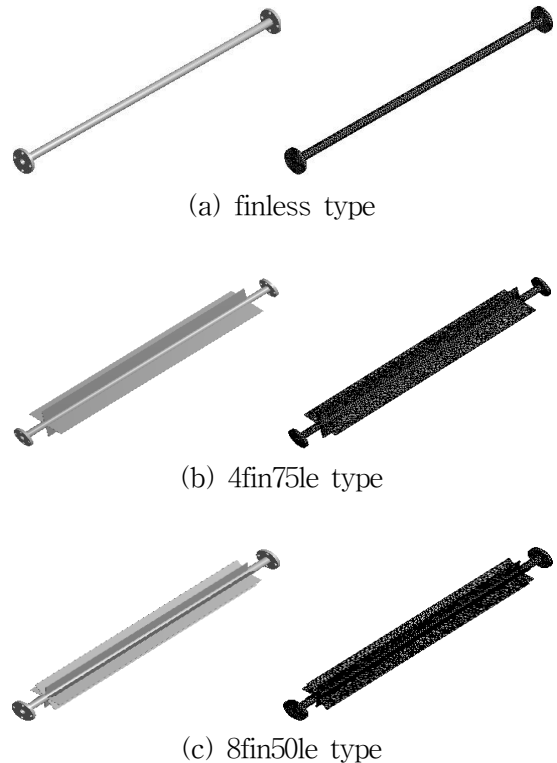


Fig. 2 Geometry and mesh of vaporizer model

Table 1 Specification of analysis model

Parameters	finless	4fin75le	8fin50le
Vaporizer Length(mm)	1000		
Vaporizer mass(kg)	1.26	2.96	3.57
Vaporizer Area(mm ²)	0.455	1.07	1.29
Capacity(Nm ³ /hr)	20×10 ⁶		
in / out diameter(mm)	24 / 30		
fin number(EA)	0	4	8
fin Height(mm)	0	75	50
fin thickness(mm)	2		

Table 2 Number of elements and node for various models

Parameters	finless type	4fin75le type	8fin50le type
Element	7980	21282	31497
Node	15522	42745	63041

Fig. 3에는 구조해석에 적용된 모델에 대한 각각의 구속조건들을 나타내었다. 구속 조건 및 초기조건은 열유동에 관한 수치해석에서 상용 소프트웨어인 star-CD 3.24를 이용하여 계산된 결과 값들을 이용한 것임을 먼저 밝혀 둔다. 모든 적용 모델의 온도는 입구 및 출구 측의 온도를 각각 101.9 K와 107.2 K로 주었으며, 외부 환경 온도를 283.5 K로 동일하게 주었다. 외부 표면에 대한 대류열전달계수 (h_o)는 $4.151 \times 10^{-6} \text{ w/mm}^2\text{K}$, 초저온의 작동유체인 LN₂가 흐르는 내부 표면에 대한 대류열전달계수 (h_i)는 $2.6 \times 10^{-5} \text{ w/mm}^2\text{K}$ 를 적용하였다. 이때의 외부 표면의 온도 조건은 환경 온도와 동일하게 주었으며, 내부의 온도는 97.5 K로 가정하여 해석을 진행하였다. 또한 열변형량을 알기 위해서 입구 측의 플랜지를 구속하였고, 양 쪽의 핀을 X, Y 방향으로 수축 또는 변형이 일어나지 않도록 고정하여 Z 방향으로만 수축 또는 변형이 진행되도록 하였다.¹⁰⁾ 그리고 해석 시 사용된 구속조건 및 재료의 물성치를 Table 3에 나타내고 있다.

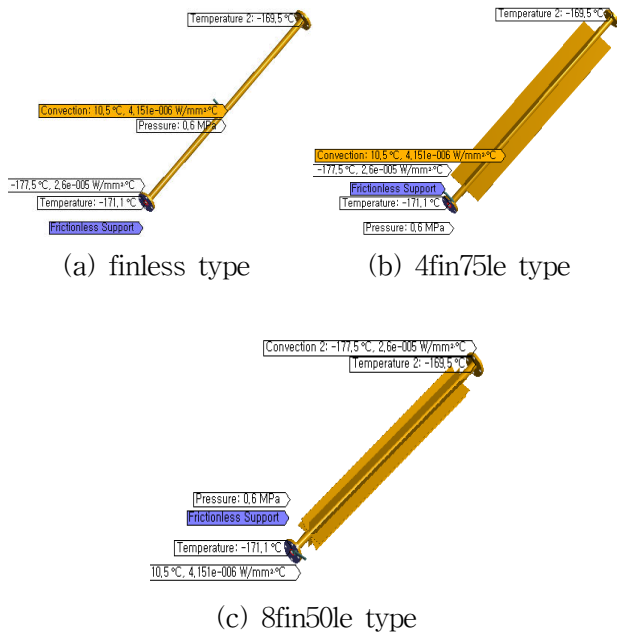


Fig. 3 Environment condition of vaporizer model

Table 3 Material properties applied to structural analysis (Aluminum alloy)

Properties	Value
Density	$2.77 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Poisson's Ratio	0.33
Tensile Yield Strength	280.0 MPa
Tensile Ultimate Strength	310.0 MPa
Young's Modulus	71,000.0 MPa
Thermal Expansion	$2.3 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Specific Heat	875.0 J/kg·°C
Relative Permeability	1.0
Resistivity	$5.7 \times 10^{-5} \text{ Ohm}\cdot\text{mm}$

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 4에서 Fig. 10은 앞에서 정의된 방정식과 구속조건, 초기조건들을 적용하여 수치모델을 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하여 온도 변화와 열응력, 변형량 등을 해석한 결과를 나타내었다. Table 4는 구조해석을 통하여 기화기 각각의 모델에 대한 해석결과 값을 도출 하여 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 4는 온도 분포의 결과를 보여주고 있다. fin이 없는 경우보다는 fin을 가지는 경우의 온도 분포가 높게 나옴을 알 수 있다. 이는 고체표면으로부터 대류에 의한 열 제거율의 증가가 fin이라고 하는 확장 표면을 사용하여 열 전달 표면을 증가시킴으로써 얻는 효과이다. 즉, 대류율은 표면적에 비례하기 때문에 표면적을 확대하게 되면 방출되는 열량을 증가시킬 수 있음을 보여준다. 또한 열전도율이 높을수록 열방출이 잘 됨을 확인 할 수 있는 것이다. 동일한 조건에 따른 열교환량은 fin을 가지는 경우가 fin을 가지지 않는 경우보다 약 75 K ~ 80 K 정도 높게 형성됨을 알 수 있었으며 결과적으로 열교환량은 열교환 면적 즉, fin의 有·無에 따른 영향이 대류열전달 계수의 영향보다는 더욱 크게 작용함을 알 수 있었다. 또한 fin의 유효면적에 따른 열교환 정도를 살펴보면 4fin과 8fin의 경우는 Table 1에서 알 수 있듯이 거의 차이가 없으며 해석결과 또한 마찬가지로 8fin인 경우가 약 2 K 정도가 높게 나옴을 알 수 있다. 결과적으로 본 연구의 기화기 모델의 열방출 및 경제성 측면을 고려하면 가장 유리하다고 사료 된다.

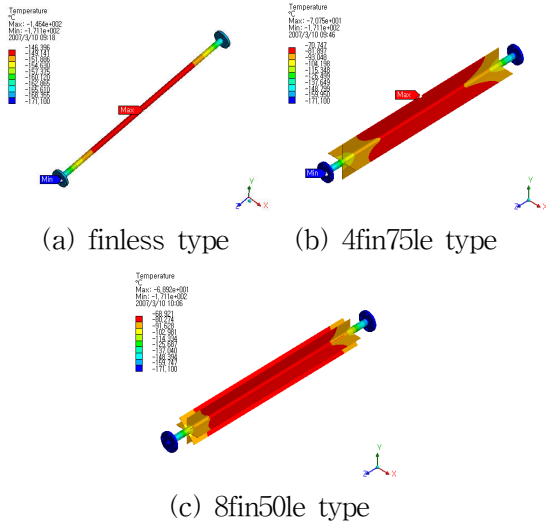


Fig. 4 Temperature contours of vaporizer model

Fig. 5는 기화기 모델의 열유속(Heat flux)에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 열유속은 단위 면적당의 에너지량을 나타내는 것이기에 면적이 증가하면 에너지량도 비례하여 증가하는데 그림에서 알 수 있듯이 finless의 경우보다 fin을 가지는 경우가 열유속이 높게 나타남을 확인할 수 있다. 본 연구에 사용된 4fin의 경우 fin의 높이가 75 mm 이고 8fin의 경우에는 50 mm여서 상대 비교가 어려우므로 4fin의 fin 높이를 50 mm, 8fin의 fin 높이를 75 mm로 하여 해석한 결과를 비교하였을 때 8fin이 4fin 보다 열유속이 높은 것을 확인할 수 있었다. (b) 4fin75le의 경우가 (c) 8fin50le 보다 열유속이 높게 형성되고 있는데 이것은 전도 열유속의 영향보다 대류 열유속의 영향이 기화기 성능에 크게 작용하여 발생하는 현상으로 생각되어 진다. 이는 8fin의 경우 4fin에 비하여 fin의 개수가 2배 증가하면서 fin과 fin 사이의 조밀도가 높아져 공기의 유동이 원활하지 못해 열교환된 공기가 신속하게 빠져 나가지 못하고 정체되어 열교환 전 공기와 열교환 후의 공기 간의 2차 열교환이 발생하여 상대적으로 열교환량이 감소하여 나타나는 현상으로 생각 할 수 있다.

Table 4 Results from structural analysis

Parameters	finless	4fin75le	8fin50le
	out	out	out
Temperature[℃]	-146.4	-70.7	-68.9
Heat Flux(W/mm ²)	0.146	0.258	0.181
Elastic Strain(mm/mm)	0.865	0.196	0.122
Stress[Mpa]	6.141	13.907	8.645
Z-axis Direction Deformation[mm]	4.544	2.893	2.759
Total Deformation[mm]	4.547	2.897	2.763

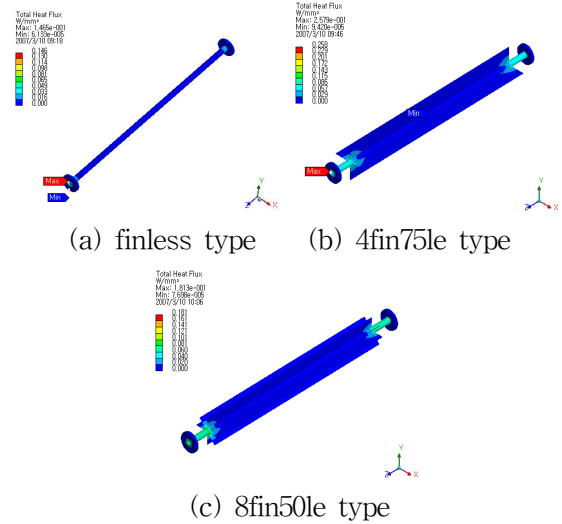


Fig. 5 Total heat flux contours of vaporizer model

Fig. 6은 수치해석에 적용된 모델에 대한 각 각의 열변형률을 나타낸 것이다. 열변형률은 재료에 작용하는 외부의 하중이 열일 경우에 발생하는 변형률을 의미하는 것으로 재료는 온도가 변하면 팽창 또는 수축을 하게 되며, 이로 인해 재료에는 열변형률이 발생하는 것이다. 하지만 열변형으로 인한 응력은 발생하지 않는다. 그림에서 보면 fin이 없는 기화기 모델은 fin을 가지는 기화기 모델에 비해 약 2배의 열변형률을 보이고 있다. 이는 fin이 기화기의 변형을 방지하는 Stiffener의 역할을 수행하고 있기 때문인 것으로 사료되며, fin이 4개인 경우보다 fin이 8개인 경우가 열변형률이 가장 작은 것으로 해석되었다. 하지만 그 수치가 극히 작은 차이를 보이고 있다. 따라서 본 해석의 대상인 기화기 모델은 fin을 가지거나 가지지 않은 모델 모두 열변형률을 무시

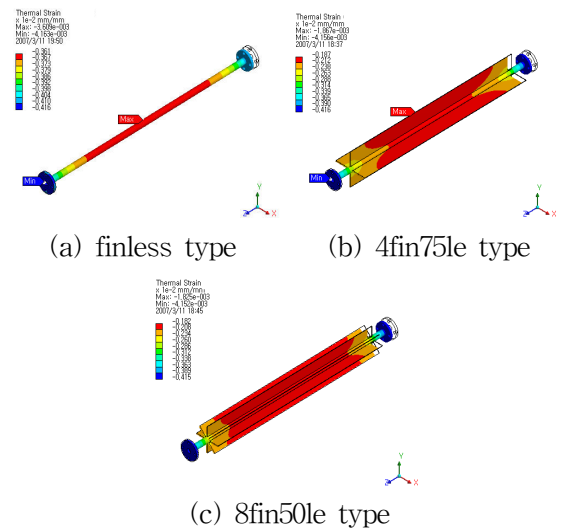


Fig. 6 Thermal strain contours of vaporizer model

해도 될 만큼 작은 양이므로 모든 모델이 열에 의한 변형에 대해서는 안전하다는 판단을 할 수 있다.

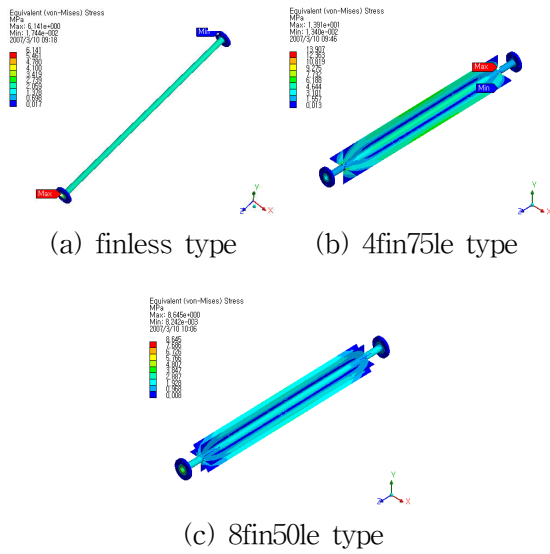


Fig. 7 Equivalent stress contours of vaporizer model

Fig. 7은 열에 대한 기화기 모델에 작용하는 열응력을 해석한 결과를 나타내고 있다. Table. 3의 기화기 모델의 재료 물성 치에서 보듯이 압축 및 인장 항복 강도가 280 Mpa로서 해석 결과의 (a) finless : 6.141 (b) 4fin75le : 13.907 (c) 8fin50le : 8.645로서 세 가지 모델 모두 열응력이 항복강도 내에 존재하여 그 크기는 아주 작게 나타남을 볼 수 있다. 따라서 어떠한 형태의 기화기 모델을 사용하더라도 갑작스런 부하(초저온의 온도)의 증감에도 충분히 견딜 수 있음을 알 수 있었다.

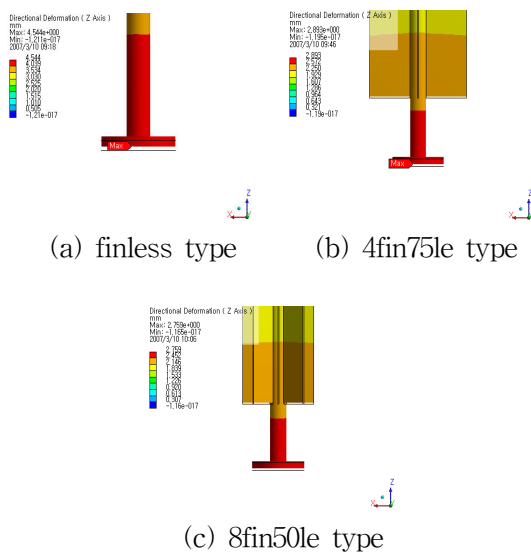


Fig. 8 Detail of x-axis directional deformation contours of vaporizer model

Fig. 8은 열 방출에 의한 기화기 모델의 변형량을 작동유체의 진행방향에 대해서 해석한 결과이다. (a) finless의 경우는 약 4.5 mm의 수축을 보이고 있으며, (b) 4fin75le와 (c) 8fin50le은 각각 약 2.9 mm 와 2.8 mm의 수축을 보이고 있다. 핀이 없는 경우보다 핀을 가지는 경우가 약 1.8배 정도 수축이 적게 됨을 알 수 있었다. 여기서 핀이 없는 경우보다 핀이 존재하는 경우 수축량이 줄어드는 이유는 핀이 열교환에도 적용되지만 구조물의 Stiffener 역할도 동시에 담당하는 것을 알 수 있다. 또한 fin의 개수 증가는 수축량에 크게 영향이 미치지 않음을 알 수 있었다.

마지막으로 구조해석을 통하여 기화기의 모델별 길이의 변화에 따라 변화량을 예측하기 위하여 각각의 모델의 길이별 변화량은 길이가 1000 mm인 경우와 마찬가지로 길이가 증가하고 온도 차가 증가함에 따라 변형량은 증가, 변형률은 감소함을 알 수 있었고, 핀을 가지는 경우가 핀이 없는 경우보다 1.8배 ~ 1.9배 정도 적게 변형됨을 알 수 있었다.

Table 5 Results from correlation of 8fin50le type (each length)

finless type model				
Length	ΔT	Correlation		
		a	b	c
	$\Delta T=0$	0 (변형량 없음)		
1000 mm	$\Delta T=23$	-0.087	1.569	1.830
2000 mm	$\Delta T=73$	-0.157	2.871	3.307
3000 mm	$\Delta T=123$	-0.228	4.104	4.785
4000 mm	$\Delta T=173$	-0.297	5.367	6.257
5000 mm	$\Delta T=183$	-0.368	6.637	7.738
6000 mm	$\Delta T=193$	-0.438	7.908	9.221
7000 mm	$\Delta T=203$	-0.509	9.181	10.704
8000 mm	$\Delta T=213$	-0.578	10.431	12.161

Table 6 Results from correlation of 8fin50le type (each length)

4fin75le type model				
Length	ΔT	Correlation		
		a	b	c
	$\Delta T=0$	0 (변형량 없음)		
1000 mm	$\Delta T=23$	-0.057	1.041	1.214
2000 mm	$\Delta T=73$	-0.094	1.699	1.981
3000 mm	$\Delta T=123$	-0.132	2.387	2.784
4000 mm	$\Delta T=173$	-0.170	3.069	3.579
5000 mm	$\Delta T=183$	-0.207	3.745	4.368
6000 mm	$\Delta T=193$	-0.246	4.456	5.197
7000 mm	$\Delta T=203$	-0.279	5.109	5.948
8000 mm	$\Delta T=213$	-0.324	5.585	6.829

Table 7 Results from correlation of 8fin50le type (each length)

8fin50le type model				
		Correlation		
Length	ΔT	a	b	c
	ΔT=0	0 (변형량 없음)		
1000 mm	ΔT=23	-0.055	1.004	1.171
2000 mm	ΔT=73	-0.095	1.723	2.009
3000 mm	ΔT=123	-0.135	2.439	2.844
4000 mm	ΔT=173	-0.157	2.822	3.292
5000 mm	ΔT=183	-0.192	3.474	4.051
6000 mm	ΔT=193	-0.227	4.098	4.778
7000 mm	ΔT=203	-0.260	4.690	5.468
8000 mm	ΔT=213	-0.299	5.394	6.290

Fig. 9는 핀이 없는 기화기 모델 1000 mm에 대한 변형량을 나타낸 것이며, 각각의 적용계수는 Table 5부터 Table 7까지 나타내었다. 식(1)은 온도 차이에 따른 길이의 변형량(ε_T)을 나타내기 위하여 사용된 2차 보간식이다. 여기서 A, B, C는 길이의 변형에 적용되는 계수(Correlation)이다.

$$\epsilon_T = AL^2 - BL - C \quad (1)$$

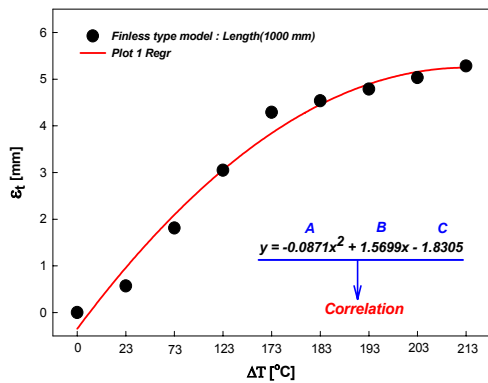


Fig. 9 Quadratic interpolation equation apply to variation of length according to temperature different

4. 결 론

1) 온도 변화와 열응력, 변형량 등을 해석한 결과 열전도율이 높을수록 열방출이 잘되며, 핀을 가지는 경우가 핀을 가지지 않는 경우보다 온도가 약 75 K ~ 80 K 정도 높게 형성되고, 열교환량은 열교환 면적에 따른 비교에서 4fin75le의 경우가 우수하다고 할 수 있다.

2) 핀의 有, 無의 영향이 대류열전달계수의 영향 보다는 크게 작용하며, 열방출에 의한 기화기 모델의 변형량은 핀이 없는 경우에는 4.5 mm, 핀이 있는 경우 2.8~2.9 mm의 수축이 이루어짐을 알 수 있었다.

3) 열변형률은 핀을 가지는 않는 모델의 경우 핀을 가지는 모델보다 약 2배의 열변형률을 보였으며, 길이에 대하여 열변형률이 0.5 % 미만으로 설계 시 고려하지 않아도 된다고 할 수 있다.

4) 핀의 有, 無가 열교환에도 적용되지만 구조물의 Stiffener의 역할도 하고 있다고 생각되어진다.

5) 해석 모델의 재료에 대한 압축 및 인장 항복 강도는 280 Mpa로서 finless : 6.141, 4fin75le : 13.097, 8fin50le : 8.851로서 모든 기화기 모델의 열응력은 항복강도 내에 존재하므로 갑작스런 부하(초저온)의 증감에도 충분히 견딜 수 있다.

6) 열변형성 검증 실험을 통하여 구조해석과 실험의 결과가 동일함을 알 수 있었고, 검증을 통해 실험을 하지 않고도 길이와 온도에 따라 변형을 예측할 수 있는 관계식을 $\ell_1(\uparrow), \Delta t(\uparrow) \Rightarrow \ell'(\uparrow)$, $\ell_1(\downarrow), \Delta t(\downarrow) \Rightarrow \ell'(\downarrow)$ 얻을 수 있었다.

7) 온도 차이에 따른 길이의 변화량을 나타내기 위하여 사용되는 2차 보간식 $\epsilon_T = AL^2 - BL - C$ 과 Correlation(계수)을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업, 경상대학교 2단계 BK21 사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, G. S., Chang, Y. S., and Ro, S. T., 1995, "Thermodynamic Analysis of the Extraction Process and the Cold Energy Utilization of LNG", *Korean Journal of Air- Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 7, No. 1 pp. 120~131.
2. Kim, Y. S., Cho, C. H., Kim, Hyo., Lee, J. H., and Mok, Y. I., 1994, "A Study on the Calculation of Basic Thermodynamic Properties of LNG/NG", *Energy Eng. J.*, Vol.3, No.2, pp. 256~264.

3. 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.
4. Hong, S. H., 1995, "Present Status and Prospect of LNG Storing Tank", *Journal of KWS*, Vol. 13, No. 3, pp. 1~7.
5. Choi, K. I. and Chung, H. M., 2000, "Analysis of a cryogenic Nitrogen-Ambient Air Heat Exchanger Including Frost Formation", *SAREK*, Vol. 12, No. 9, pp. 825~834.
6. Park, J. S. and H. M. Chang, 1997, "Analysis and Design of LNG Open Neck Vaporizer", *SAREK*, Vol. 9, No. 2, pp. 189~197.
7. 2006. 청문당, 최종근. CAE 엔지니어를 위한 유한 요소법.
8. 2002. 태성에스엔이, 김지용, ANSYS 열전달해석.
9. Cho. M. G, Lim. J. I, Song. J. I, 2000. Thermal stress analysis of STS Label with Finite Element Method. RIST 研究論文, 第 14卷, 第 4 號, pp. 483~488.
10. K. S. Kim, Y. S. Kim and J. R. Cho, 2006. Structure Analysis of a High-Pressure LH2 Storage Tank for Vehicles. 2006 16th Korea ANSYS User's Conference. pp. 37~42.