

초저온 액화 천연 가스용 기화기 핀의 승온 특성에 관한 수치 해석

Numerical Analysis on the Increasing Temperature Characteristics of Vaporizer Fin for Liquefied Natural Gas with Super Low Temperature

이중섭 · 공태우 · 이효덕 · 정효민 · 정한식

C. S. Yi, T. W. Kong, H. D. Lee, H. M. Jeong and H. S. Chung

Key Words : Vaporizer fin (기화기 핀), Liquefied gas(액화가스), Super low temperature(초저온)

Abstract : This study is numerical analysis on the increasing temperature characteristics of vaporizer fin for liquefied natural gas with super low temperature. Existing LNG vaporizers use the direct contact heat transfer mode where the extreme super low temperature LNG of -162°C flows inside of the tubes and about 20°C air flows on outside of the fin. Recently, the vaporizers with great enhanced performance compared to conventional type have been developed to fulfill these requirements. The vaporizing characteristic of LNG vaporizer with air as heat source has a fixed iced. These characteristic cause a low efficiency in vaporizer, total plant cost and installing space can be increased. The vaporizing characteristics of LNG via heat exchanger with air are analytically studied for an air heating type vaporizer. This study is intended to supply the design data for the domestic fabrication of the thickness and angle vaporizer fin. Governing conservation equations for mass, momentum and energy are solved by STAR-CD based on an finite volume method and SIMPLE algorithm. Calculation parameter is fin thickness, setup angle and LNG temperature. If the vaporization performance of the early stage and late stage of operating is considered, the case of $\phi=90^{\circ}$ was very suitable. In this paper was estimated that the heat transfer was most promoted in case of $\text{THF}=2\text{mm}$.

기호설명

1. 서 론

- ϕ : 핀의 설치각도($^{\circ}$)
- LE_F : 핀의 길이(mm)
- TH_F : 핀의 두께(mm)
- SP_s : 핀의 간격(mm)
- TH_{ICE} : 결빙층 두께(mm)
- T_{IN} : 기화기 튜브내의 온도(CENTIGRADE)
- T_{FIN} : 핀의 온도(CENTIGRADE)
- L_{SP} : 핀과 핀사이의 중심거리(mm)
- T_{SP} : 핀과 핀사이의 중심거리온도
(CENTIGRADE)

LNG(Liquefied Natural Gas)란 메탄(CH_4)을 주성분으로 한 천연가스를 냉각, 가압한 것이다. LNG는 -162°C 의 액체상태로 저장되어 운송한 후에 상온의 천연가스로 변환하기 위해 다량의 에너지를 소비하여 기화하여야 된다. 그러나 -162°C 의 냉열은 상당히 가치가 있는 것이므로, 냉열이 필요한 산업에 활용하는 것이 매우 중요하다. 우리나라에서도 현재 LNG는 다양한 산업의 천연에너지원으로 자리 잡고 있다. LNG의 대부분은 기화 후에 에너지원으로 사용하고 있기 때문에 반드시 상온 가까이 온도를 높여 기화하는 과정에서 증발 잠열이 약 120 Kcal/kg이며, 현열이 약 80 Kcal로서 총 200 Kcal/kg의 냉열 에너지를 발생하게 된다. 대부분의 경우 기화 공정에서는 이러한 냉열이 버려지게 되고, 상당량의 에너지가 추가로 소비된다. 2003년의 수입 예상량 1,800만 톤의 LNG에서 버려지는 냉열을 약 50%로 사용한다고 해도 약 180,000t. 396(TOE)의 에너지를

접수일 : 2005년 4월 19일
 정한식(책임저자) : 경상대학교 기계항공공학부
 E-mail : hschung@gsnu.ac.kr Tel : 055-640-3185
 정효민 : 경상대학교 기계항공공학부
 공태우, 이효덕 : 경상대학교 대학원

결감할 수 있다.^{1,4)} LNG를 최종 수요처에서 사용할 수 있는 NG로 변환시키기 위한 공정 중에 하나인 기화기는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로 LNG 보급기지에서 사용하는 기화기의 경우는 대부분 해수를 사용하여 냉열을 LNG로부터 빼앗아 기화시키는 방법이 있다. 이 경우는 공기보다 해수의 경우 열용량(Heat Capacity)이 많아 일시에 다량의 NG를 생산할 수 있다. 그러나 이 과정에서 부피가 600배로 팽창하면서 장거리로 NG를 공급하기 위해서는 중간보급차단기지, 관로망 등의 부대시설이 필요한 단점을 가지고 있다. 두 번째로는 대규모의 산업단지 또는 아파트 단지등에 소형 LNG 위성기지를 건설하여 이곳에 LNG를 저장하였다가 필요시 기화시키는 방법이 있다. 이것을 공온식이라고 부르며, 이 방법의 경우 해수를 사용하지 않고, 대기의 공기를 활용하여 기화시키는 것이다. 따라서 공기의 경우 열용량이 작기 때문에 소량의 NG를 생산한다는 단점이 있다. 그러나 LNG의 부피가 600배 팽창되므로 비교적 편리하게 주변에 NG를 공급하는 시스템으로서 향후 대규모 아파트 단지나 공동 등의 경우 소요되는 에너지원이 집중되는 시스템으로 가기 때문에 이러한 위성기지에서 직접공기로 기화시키는 시스템의 수요가 증가하고 있는 추세이다.^{5,8)} 따라서 본 연구는 위성 LNG 기지에서 공급되는 LNG에 대하여 가열 매체를 공기로 하는 기화기에 대해 기화기 핀의 두께와 핀의 각도에 대한 수치 해석적 연구를 통해 최적의 기화기 핀 형상을 설계하고자 한다.

2. 수치해석 방법

LNG 기화기는 일종의 열교환기로서 흔히 산업에서 널리 사용되고 있는 일반적인 열교환기와 구조적으로 다르다. 따라서 기화의 최적화를 위해서는 LNG의 유량과 대기의 공기상태 그리고 기화기 방열 핀의 형태(핀의 폭, 길이 및 간격)등이 중요하게 된다.^{9,12)} 본 연구에서 계산되는 모델은 Fig. 1과 같은 star fin 형식으로 되어 있으며, 핀의 두께, F_T 는 2mm, 4mm 그리고 6mm로 변화를 주었고, 핀의 설치각도, ϕ 를 45°(핀 개수:8개), 90°(핀 개수 4개), 그리고 120°(핀 개수 3개)로 설정하였다. 계산 모델은 2차원으로 중력이 작용하지 않는 수평면에 대한 수치해석으로 기화기 튜브와 핀은 순수 알루미늄으로 가정하였고, 대기는 공기로 가정하였다. 기화기

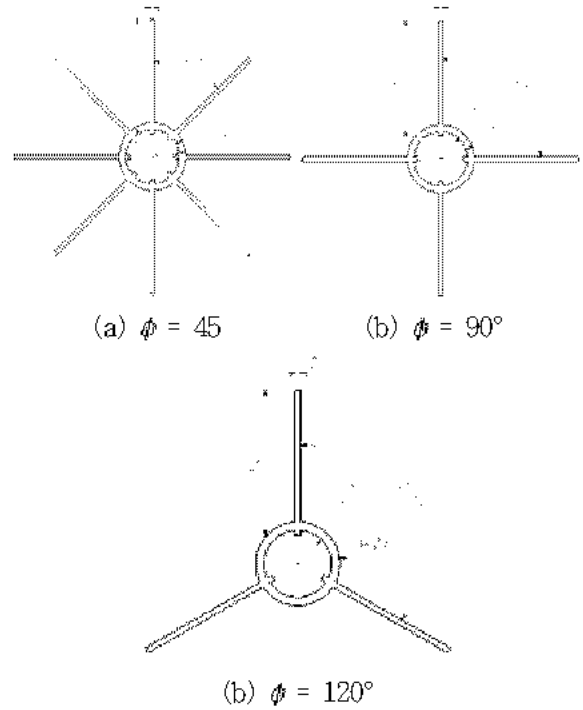


Fig. 1 Geometry of present research vaporizer fin models.

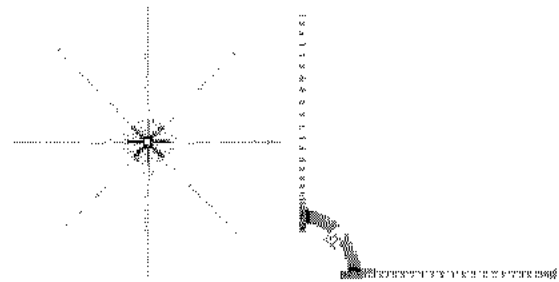


Fig. 2 Grid system for the calculation domain

튜브의 안쪽 면은 항상 일정한 온도가 유지되도록 설정하였다. 또한 공기층은 기화기 핀 길이의 약 9배 정도 확장시켜 등압조건이며, 온도는 20°C, 압력은 대기압으로 설정하였다. 따라서 질량의 유·출입이 없고, 중력을 고려치 않으므로 순수한 온도차에 의해 계산이 수행되어지므로 본 연구에 사용된 지배방정식은 열전도방정식에 의해 계산이 수행된다⁸⁾. 본 연구를 위해 CAD를 이용하여 surface를 생성하였고, 반자동 격자 S/W인 ICEM-CFD를 사용하여 hexahedral 격자를 생성시켜 범용 CFD 코드인 STAR-CD를 사용하여 정상상태로 가정하여 계산하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 계산 격자를 나타내고 있으며, 사용된 격자수는 약 40,000개 정도 소요되었다.

3. 해석 결과 및 토의

Fig. 3은 현재 사용되고 있는 LNG 위성 기지용 기화기의 한 형태이다. 그림에서 보는 것과 같이 기화기 핀 주위에 결빙 층이 두껍게 발생한 것을 알 수 있다. 즉, 기화기 튜브 내에 흐르는 -162°C 의 LNG를 대기가 가열시켜 기화하는 과정에서 핀 주위가 결빙되는 것을 보여주고 있다.

Fig. 4는 기화기 핀의 두께가 2mm일 경우 각도에 따른 기화기 내부 튜브의 온도가 변화할 때의 결빙이 생성되는 위치를 나타낸 그림이다. 본 연구에서 결빙이 시작되는 온도를 0°C 을 기준으로 하였다. 기화기 튜브 내의 온도가 상승할수록 결빙 두께가 감소함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 핀과 핀 사이의 거리가 상대적으로 증가함에 따라 외부의 공기가 가지고 있는 열이 가열되는 접촉 면적이 증가하여 비교적 낮은 온도가 전도되는 것이다.

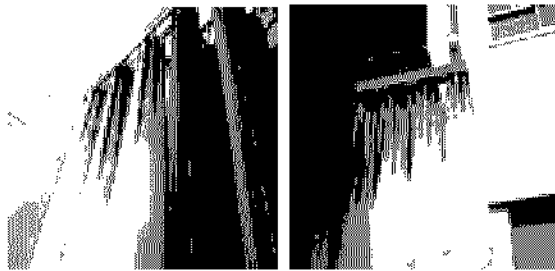


Fig. 3 Photograph of fixed ice by the general vaporizer module.

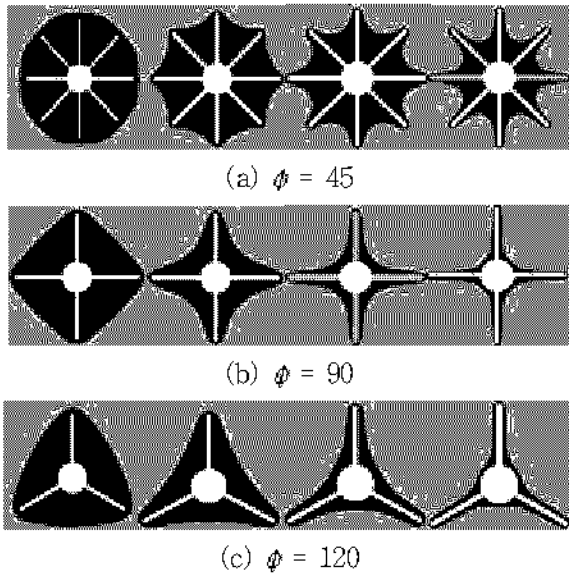


Fig. 4 Comparison of fixed ice thickness for the various models at $TH_F=4\text{mm}$.
 at T_m -162°C -80°C -40°C -20°C

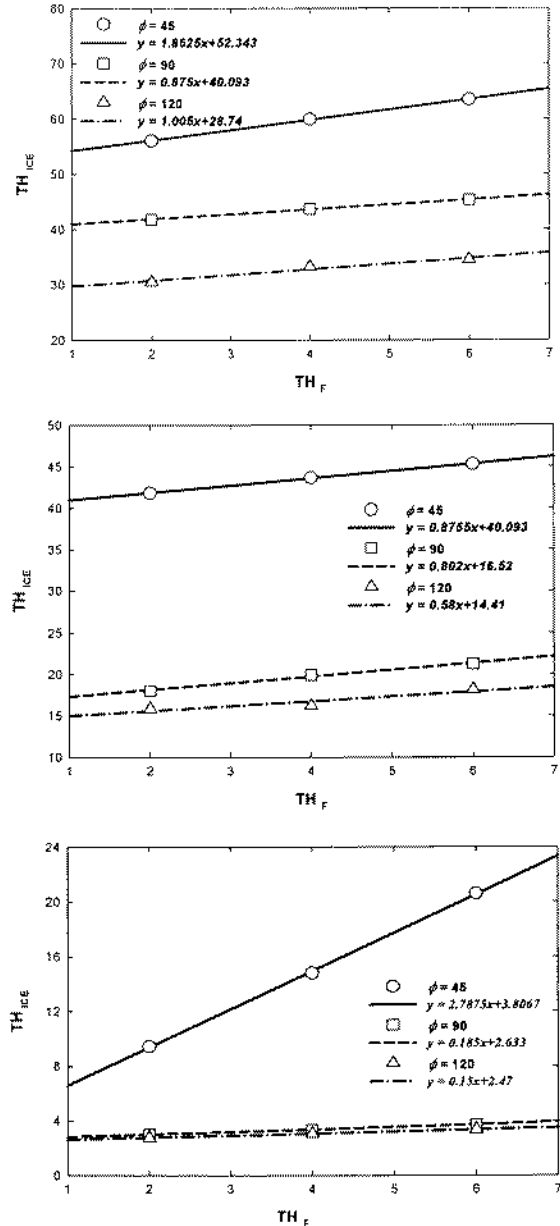


Fig. 5 Comparison of fixed ice thickness for the various fin thickness and angles.

이러한 결과는 Fig. 5에 나타난 결과에 보여주고 있다. 종축은 핀의 두께를 나타내고 횡축은 결빙 층의 두께는 나타내며, 핀과 핀 사이에서의 최대 결빙 층 두께를 측정 한 결과 값이다. 핀의 두께가 증가할수록 결빙 층의 두께는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 각도가 45° 인 경우 핀과의 간격이 좁기 때문에 핀과 핀 사이의 냉열이 공기로 열전달이 촉진되었기 때문에 핀 주위의 공기는 비교적 두꺼운 결빙 층을 이루고 있다. 그러나 각도가 90° 와 120° 는 핀과 핀 사이의 간격이 45° 에 비해 크기 때문에 결빙 층이 얇은 것으로 판단된다. 또한 내부의 온도

가 상승할수록 결빙 층의 두께 차이는 감소하는 경향을 알 수 있었다. 튜브의 내부온도가 -162°C 이고, 핀의 두께가 2mm인 경우 튜브로 유입되는 평균 열유속이 45도일 경우는 -57.04W/m^2 이 공급되고, 90° 일 경우는 -436.61W/m^2 그리고 120° 일 경우는 -489.91W/m^2 로 열량이 증가하기 때문에 기화기 튜브 근처의 결빙 층 두께가 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 6과 7의 결과와 같이 각도가 증가할수록 핀으로 전달되는 열유속이 증가됨에 따라 Fig. 5의 결과와 같은 결빙 층이 생성됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 6의 결과에서 각도가 45° 일 경우 핀의 양 모서리 부분에서의 열유속이 감소하는 것을 발견할 수 있었다. 이것은 Fig. 4의 결과에서 보여주는 것과 같이 핀과의 간격이 좁기 때문에 핀 주위의 결빙 층이 두꺼워 핀으로 전달되는 열량이 감소함에 따른 것으로 판단된다.

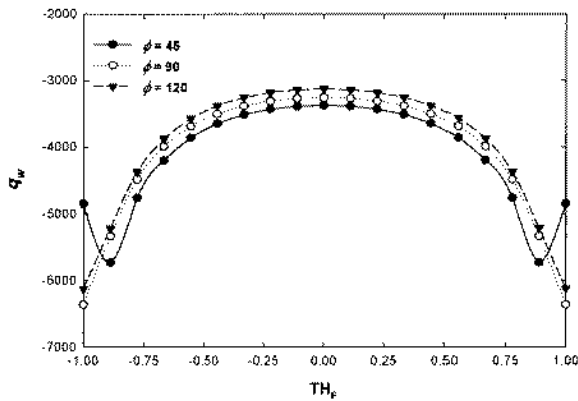


Fig. 6 Comparison of heat flux for the various angle at the fin end wall at $T_{IN} = -162^{\circ}\text{C}$, and $TH_F=2\text{mm}$

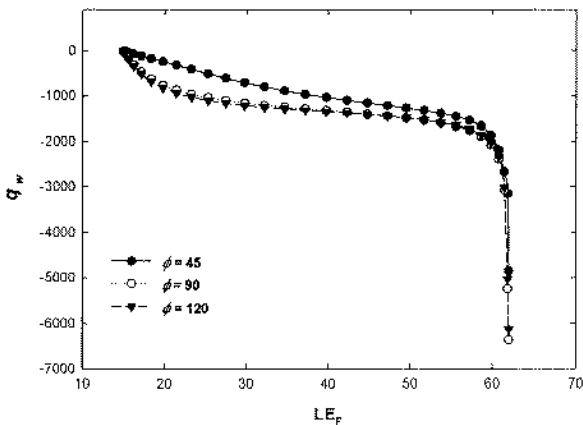


Fig. 7 Comparison of heat flux for the various angle at the fin side wall at $T_{IN} = -162^{\circ}\text{C}$, and $TH_F=2\text{mm}$

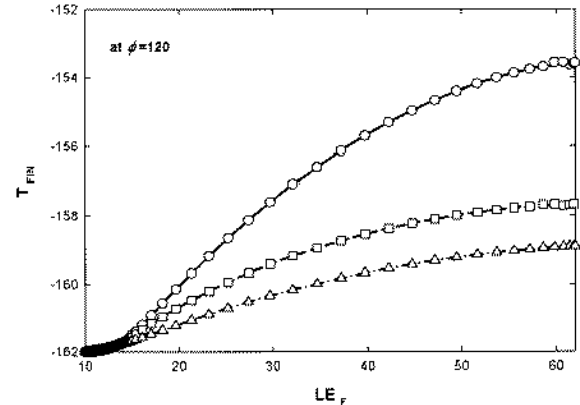
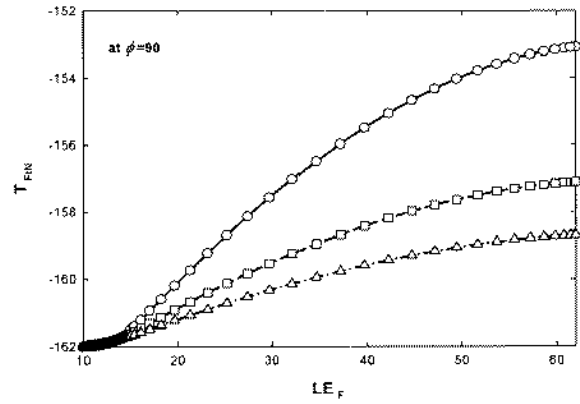
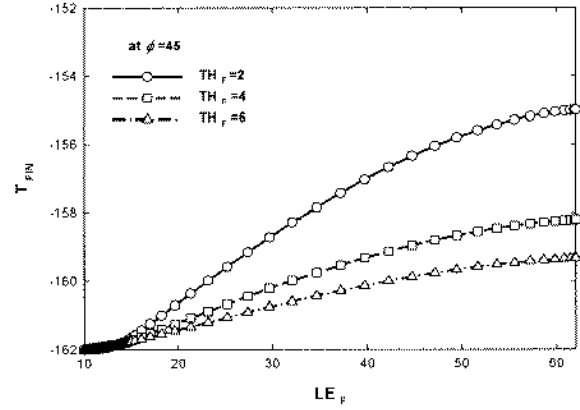


Fig. 8 Comparison of fin temperature for the various models at $T_{IN} = -162^{\circ}\text{C}$

즉 열전달이 다른 각도일 때에 비해 열전달이 촉진되어 핀 주위의 온도분포가 낮아짐에 따라 결빙 층이 증가함을 알 수 있다. 전반적으로 핀의 모서리 부분에서 중심으로 이동할수록 대기에서 공급되는 열유속이 증가함을 알 수 있었고, 핀의 모서리 부분에서 집중되는 열유속을 균일하게 분포 시키기 위한 대안으로서 모서리부분에 곡률을 주어 핀 끝에서 일정한 열을 공급받을 수 있도록 설계변 경이 요구된다.

Fig. 7은 핀의 길이방향에 대한 열유속에 대한 결과이다. 기화기 튜브 내에는 -162°C 라는 비교적 큰 냉열이 존재하기 때문에 핀의 시작되는 부분에서는

주위 대기와의 온도차가 아주 크게 발생한다. 따라서 열전달이 아주 빠르게 진행됨에 따라 열유속이 급격하게 감소하게 된다. 그러나 핀의 길이 방향으로 갈수록 튜브 보다는 비교적 열전달이 둔화되기 때문에 열유속이 증가하여 핀 끝단의 모서리 부분에서는 열유속이 급격하게 증가하였다.

Fig. 8은 기화기 핀의 두께에 따른 온도 분포를 나타내고 있다. 핀의 두께가 증가할수록 핀 끝에서의 온도가 낮게 분포하였다. 핀의 두께가 증가할수록 Fig. 5의 결과처럼 결빙 층이 두꺼워지게 된다.

따라서 대기에서 공급되는 열량이 감소하게 되어

열전달이 둔화되는 결과를 초래하게 됨으로 결국 핀에서의 온도는 낮아지게 되는 것이다. 또한 핀의 두께가 2mm인 경우가 가장 대기과 열전달이 활발하게 이루어짐으로 온도상승의 폭이 가장 크게 나타났다. 따라서 결빙 층의 두께가 가장 얇게 생성되는 것으로 사료된다. 핀의 설치 각도에 따라서 핀에서의 온도분포는 각도가 증가할수록 증가됨을 알 수 있었다. 핀의 수가 감소됨에 따라 핀으로서 공급되는 열량이 증가될 것이고, 이로 인해 핀과 대기와의 열전달이 활발하게 이루어짐에 따라 전반적으로 핀에서의 온도상승이 발생된 것으로 사료된다. 즉, 가해지는 열유속이 두께가 감소할수록 증가되기 때문이다. 따라서 Fig. 5의 결과에서 나타나는 것과 같이 결빙 층의 두께가 감소하게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 핀과 핀 사이의 중간부분에서의 대기 측의 온도분포를 나타내 있다. 각도가 45°일 경우는 핀 사이의 간격이 좁기 때문에 핀의 두께가 증가할수록 핀으로 열을 많이 빼앗게 된다. 따라서 공급되는 열유속이 감소하게 됨에 따라 온도가 감소하는 것으로 판단된다. 또한 핀의 두께가 2mm일 경우 각도 변화에 따라 핀 사이에서의 온도분포가 달라짐을 알 수 있었다. 각도가 증가함에 따라 튜브 근처에서 온도가 급상승하다가 핀 사이의 간격이 커지면서 완만한 온도 상승이 발생하였다. 이는 Fig. 7의 결과에서 나타나듯이 핀의 길이에 따라 핀에 공급되는 열량이 증가하였기 때문에 온도상승이 발생하는 것으로 해석된다. 또한 튜브 내의 온도를 변화시켰을 때는 60mm인 지점에서 각각 -5.65°C, 0.79°C, 6.53°C, 12.05°C, 14.76°C로 나타나 -162°C일 경우에 핀 주변 전체가 결빙할 수 있는 조건 됨을 알 수 있었다. 이는 대기과 핀 사이에서의 열전달이 활발해지기 때문에 결빙 층이 두터워진다. 역으로 살펴보면, 핀으로 공급되는 열량이 감소하기 때문에 장시간 사용 시 LNG를 기화시키는데 부적합한 요인으로 작용할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 사용 초기의 기화 능력은 우수하나 후기로 접어들면서 급격하게 기화능력이 감소함에 따라 비효율적인 핀의 배열이 될 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서 제안하고자 하는 핀의 개수는 4~5개 정도를 가진 구조가 적합한 모델로 사료된다.

본 해석은 정상상태일 경우에 대한 가정이므로 시간에 따른 핀 끝에서의 온도분포를 확인하기 위해 Fig. 10과 같은 밀폐된 공간에 -192°C의 액화질소로 사용하였고, 온도 측정은 T-type의 열전대를 사용하여 기화기 핀 끝의 온도 변화를 관찰하였다.

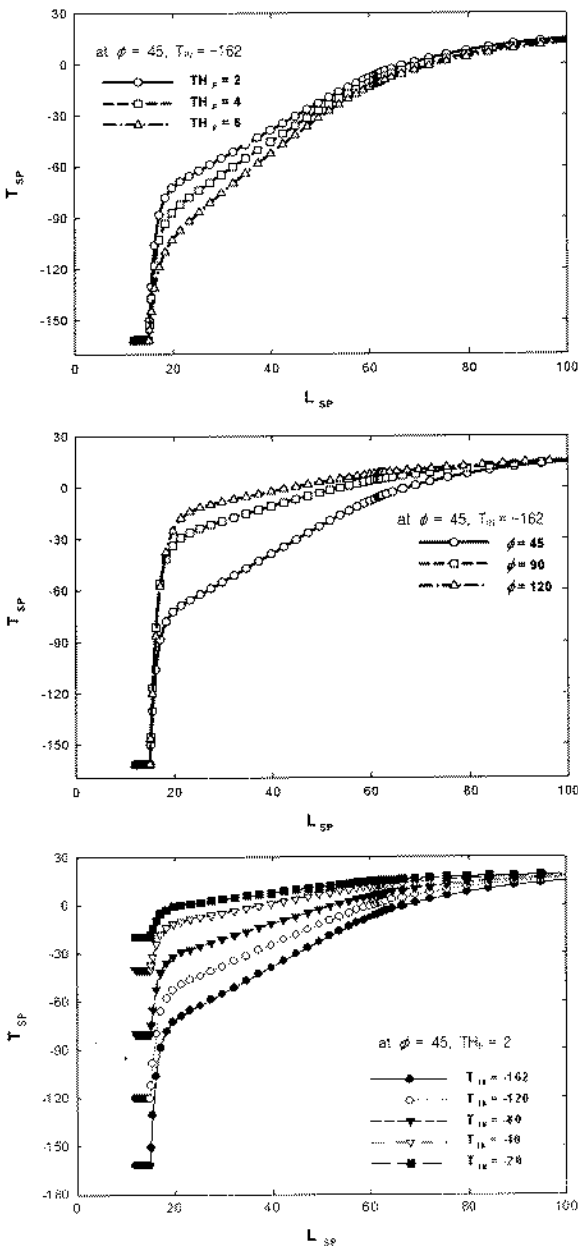


Fig. 9 Temperature distributions of between the fin space.

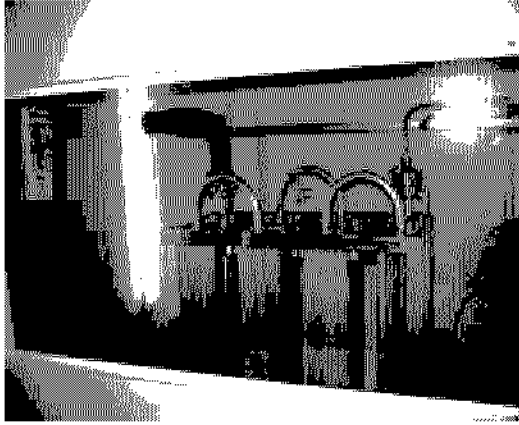


Fig. 10 Photograph of experimental setup of vaporizer fin model for temperature measurement on the fin end.

이 때 실험실의 평균 온도분포는 약 20℃였고, 습도는 약 43%였다. 실험에 사용된 기화기의 재질은 A6063S으로 열전도성이 아주 우수한 모델이다. 그러나 수치해석에 사용된 기화기의 재질은 순수 알루미늄일 때를 가정하였고, 시간간격은 음해법을 사용하여 0.0001초로 설정하여 8초까지 계산을 수행하였으며, 계산에 사용된 모델은 2차원으로 격자수는 약 20,000개 정도 소요되었으며, Fig.11과 같이 비정상 상태일 경우에 대해 핀의 두께가 2mm일 때 실험과 수치해석의 결과를 비교할 수 있었다. 실험 결과에서 핀 끝에서의 0℃까지 도달하는데 약 6.5초의 시간이 소요되었다. 즉, 초기 열전달이 아주 활발하게 진행된 결과이다. 또한 계산을 통해 0℃까지 도달하는데 약 5초의 시간이 소요되어 실험의 결과와 비교할 때 약 1.5초의 단축되는 결과가 나타났다. 그러나 전반적으로 비교할 때 실험과 계산에서의 온도분포는 정성적으로 잘 일치하고 있었다.

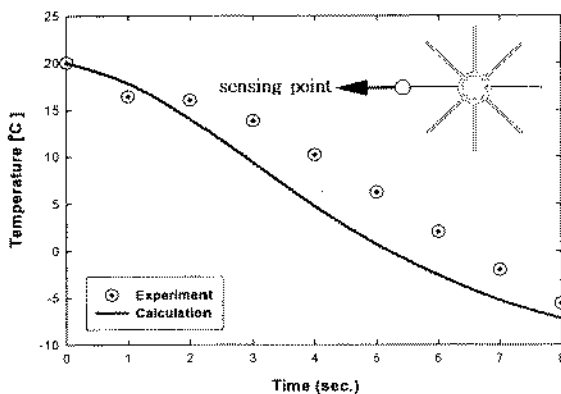


Fig. 11 Comparison on the experiment and numerical results of fin end at $T_N = -162^\circ\text{C}$.

5. 결 론

LNG용 기화기 개발에 대한 기술 축적 및 설계자료를 도출하기 위해 기화기 핀의 두께와 설치 각도 및 LNG 온도를 변화시켜 수치해석적 연구를 수행하였다. 핀의 수가 증가함에 따라 대기와의 열전달이 촉진되어 결빙 층의 두께가 증가하지만, 결빙 층 때문에 대기에서 공급되는 열량이 기화기 핀으로 전달되는 양이 급격히 감소하여 기화능력이 떨어질 것으로 예측되었다. 따라서 운전 초반 기화능력과 운전 중반 기화능력을 고려하면 각도가 90° 즉, 핀 수가 4개인 경우가 가장 적합한 것으로 나타났다. 또한 핀의 두께 2mm인 경우가 대기와 열전달이 가장 활발하게 이루어짐을 확인하여 본 연구에서는 핀의 두께 2mm가 가장 적합한 것으로 평가되었다. 핀 끝단에서의 온도분포는 실험과 계산의 결과가 잘 일치하고 있었다. 따라서 수치해석적 연구를 통해 설계변경이 가능할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신인력양성사업, 차세대핵심환경기술개발사업, 경상대학교 NURI와 BK21 지역대학육성사업단 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. G. S. Lee, Y. S. Chang, and S. T. Ro, 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. Y. S. Kim, C. H. Cho, Hyo. Kim, J. H. Lee, and Y. I. Mok, 1994, "A Study on the Calculation of Basic Thermodynamic Properties of LNG/NG", Energy Engg. J, Vol. 3, No. 2, pp. 256 ~ 264.
3. J. M. Han, Y. S. Han, 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. S. H. Hong, 1995, "Present Status and Prospect of LNG Storage Tank", Journal of KWS, Vol. 13, No. 3, pp. 1~7.
5. K. H. Lee, H. S. Jeon, 1995, "Status and Prospect of Site Welding Technology for LNG Storage Tank", Journal of KWS, Vol. 13, No. 3, pp. 8~17.
6. J. G. Kim, Y. M. Kim, C. S. Kim, 1997, "A Study on Unsteady Temperature Distribution Analysis of Moss Type LNG Carrier by Insulation System", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 159~168.
7. Jin-Rae Cho, Jin-Kyu Lee, Jeong-Mok Song, Suk-Ho Pard, Joong-Nam Lee, "Free Vibration Analysis of Aboveground LNG-Storage Tanks by the Finite Element Method", KSME International Journal, Vol. 14, No. 6, pp. 633~644, 2000.
8. Y. G. Kim, I. K. Jun, I. S. Yoon, and Y. W. Lee, S. H. Hong, C. K. Kim, 1995. "Finite Element Analysis of Membrane for LNG Storage Tank", Transactions of KSME, Vol. 18, No. 10, pp. 2797~2804.
9. J. W. Kim, 2000, "A LNG Pressure Vessel Design", Journal of KWS, Vol. 18, No. 4, pp. 28~37.
10. J. K. Kim, C. S. Kim, D. S. Kim, and I. S. Yoon, 2000, "Fatigue Crack Growth Behavior of Membrane Material for LNG Storage Tank at Low Temperatures", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 14, No. 1, pp. 23~28.
11. S. C. Lee, C. S. Kim, K. Y. Bae and K. P. Choi, S. C. Han, H. M. Jeong, 2004. "Heat Transfer Characteristics on the Protection Material of LNG Transport Pipe", Journal of Korea Association of Small Business Innovation Research, Vol. 3, No. 4, pp.53~60.
12. H. S. Chung, M. J. Hyo, C. S. Yi, T. W. Kong, K. Y. Bae, 2004, "Numerical Analysis on the Exterior Thermal and Fluid of LNG Vaporizer", Journal of KASBIR, Vol. 4, No. 4, pp. 33~39.