

초저온 액화가스용 기화기의 열전달 수치해석

이용훈[†]·지명국·박기태·김필환*·정효민·정한식**

Study on the Heat Transfer Numerical Analysis of Supper Low Temperature Liquefied Gas Vaporizer

Yong Hun Lee, Myoung Kuk Ji, Gi Tae Park, Pil Hwan Kim, Hyo Min Jeong
and Han Shik Chung

Key Words: Liquefied gas(액화가스), Supper low temperature(초저온), Vaporizer(기화기)

Abstract

Liquefied gas vaporizer means machine to vaporize the liquefied gas as liquid nitrogen(LN₂), liquefied natural gas(LNG), liquid oxygen(LO₂) etc. In the air type vaporizer, the frozen dew is also created by temperature drop (below 273 K) on vaporizer surface. This problem increases as the time progresses and humidity increases. In addition, the frozen dew gradually becomes frost deposit consequently, heat transfer through vaporizer decreases because frost deposit form adiabatic sheet. Because of this reason, recent vaporizer system is installed as parallel type, this vaporizer system needs more expensive installation costs and more space. This paper was investigated on the heat transfer characteristics of liquefied gas vaporizer with super low temperature and this paper was carried out the numerical about air heating vaporizer with super low temperature. The numerical analysis on the heat transfer was studied on the effect of geometric parameters of the vaporizer, which are length 1000 mm of 4fin75le type vaporizer. 4fin75le means number of fin is 4 and height of fin is 75 mm.

기호설명

F_H : 핀 높이(mm)
 h : 대류열전달계수(W/m²K)
 q : 열유속(W/m²)
 T_{in} : 입구측 온도(K)
 T_{out} : 출구측 온도(K)
 T_a : 대기온도(K)

1. 서론

일반적으로 초저온이라 함은 -50℃ ~ -200℃

의 냉매를 말한다. 이에 해당하는 냉매로서는 LNG, LO₂, LN₂, LCO₂ 등을 들 수 있다. 세계의 1차 에너지 수요 중 천연가스의 비중은 1982년도에 20.1%, 1997년말에는 23.9%로 증가하였고 2010년에는 약 25%이상으로 예상되고 있다. 우리나라의 LNG(Liquified Natural Gas)수입량은 해마다 증가하고 있다.^[1-2] 우리나라의 LNG 인수 기지의 건설 현황은 이미 가동 중인 인천, 평택에 이어 경남 통영에 2002년도에 14만 KL 용량을 3기 완성하였고, 2004년 10월에 다시 2기를 추가 완공 예정으로 있으며 2010년까지는 총 15기를 완성 계획으로 되어 있다. 서울 경인 지방의 LNG 공급은 인천과 평택에서 담당하며 전라남북도 및 경상남북도에는 통영기지에서 출발하는 파이프망을 구성하고 있다. 우리나라의 LNG 총 연장 길이는 2,435km로서 차세대의 주 연료로서의 역할이 확실하다.^[3-4]

[†] 회원, 경상대학교 대학원 정밀기계공학과
E-mail : yhlee95@hotmail.com
TEL : (055)646-4766 FAX : (055)644-4767

* 경상대학교 대학원 정밀기계공학과
** 경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소

여기서 본 연구에서 목적으로 하는 기화기에 대하여 살펴보기로 한다. 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 서리착상 등의 영향으로 인해 설계조건이 일반 고온의 열교환기 보다 까다롭다.^[5-6] 따라서 본 연구에서는 국내에서 주로 사용하는 핀의 개수가 8개이고 핀의 높이가 50 mm인 대기식 기화기 대신 실험을 통하여 얻어진 데이터를 이용하여 핀의 개수가 4개이고 핀의 높이가 75 mm인 기화기의 길이가 1000 mm인 경우에 대하여 초저온의 액화가스인 LN₂를 이용, 작동유체가 진행되는 방향에 대한 열전달 수치해석을 통하여 실험과 비교하고 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 수치해석 모델 및 방법

2.1 수치해석 모델

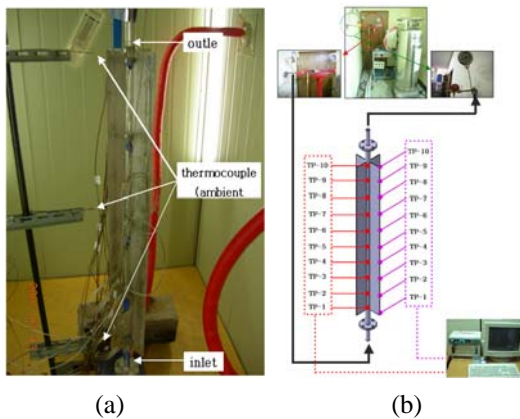


Fig. 1 photograph of experimental setup (a) and Schematic diagram of experimental apparatus (b) for CFD boundary condition.

Fig. 1의 (a)와 (b) 수치해석에 경계조건을 부여하기 위한 데이터를 얻기 위하여 진행한 실험 장치를 (a)에 나타내었고, (b)는 실험장치의 개략도이다. 열전대는 K-type을 사용하였으며, 기화기 핀과 튜브 끝단에서 101 mm 등 간격으로 각각 설치하였으며, 핀 사이의 공기층 온도를 측정하기 위해 상·중·하로 총 3군데 500 mm 간격으로

기화기 튜브에서 100 mm 떨어진 곳에 설치하였다. 이러한 이유는 수치해석 시 경계조건으로 활용함과 동시에 결과를 비교하기 위함이다. 수치해석 시 사용된 경계조건은 기화기 핀의 온도가 어느 정도 정상상태에 도달한 지점에서의 값을 사용하였고, 실험결과는 Table 1과 같이 평균값으로 정리할 수 있었다. 핀의 개수는 4개, 핀의 높이가 75 mm, 길이가 1000 mm인 이 모델은 현재 국내에 적용중인 상용 모델과는 다소 다르지만 선행 연구에 각 각의 변수들에 대한 실험을 통하여 국내의 상용모델보다 열교환 성능 면에서 우수하다고 입증되었다. 실험에 사용된 기화기 모델의 재료는 알루미늄 합금(A6063S)이지만 수치해석상 순수 알루미늄(pure aluminum)으로 가정하였다.

Table 1 Results of experiment by the 1 - module

measuring positions	values	remark
inlet	101.9 K	room temp. : 283 K
outlet	103.5 K	
ambient	273.69 K	
fin tube surface	122.09 K	
fin end surface	164.06	

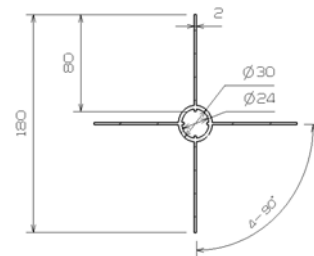


Fig. 2 Geometry of numerical analysis model

Fig. 2는 핀의 개수가 4개인 4fin75le에 대한 기하학적 모델을 나타내고 있다. 여러 기하학적 변수 중에 핀의 개수가 4개인 모델을 수치해석 한 이유는 이미 Yi와 Kong의^[7-8] 선행된 연구결과에서 가장 최적화된 모델로 제시하였기 때문에 추가적인 변수를 두지 않았다. 또한 선행된 실험에서 유입압력에 따른 온도분포는 정상상태가 되면 거의 유사한 경향을 나타내었고, 단지 기화되는 시간이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 한 가지 모델에 국한하여 수치해석을 통해 실험과 온도분포를 비교하고, 수치해석 시 계산되어지는 열 유속과 열전달계수를 확

인하고자 하였다.

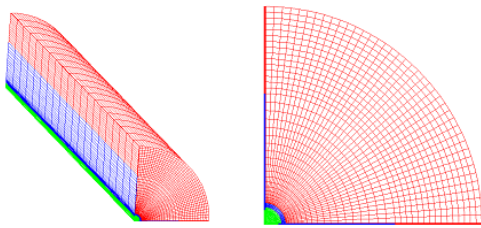


Fig. 3 Grid system of numerical analysis model

Fig. 3은 4fin75le에 대한 계산 격자를 나타내고 있다. 내부에 LN₂가 흐르고, 여기의 냉열이 알루미늄 핀으로 열전달 된다. 또한 핀으로 열전달된 냉열은 대기와 최종 열전달이 이루어지는 모델로 구성되어 있다. 따라서 대류→전도→대류로 계산되어지는 conjugate heat transfer 문제이다. LN₂가 지나가는 부분의 격자수는 15,700개가 소요되었고, 순수 알루미늄으로 정의된 solid부분은 10,800개가 소요되었다. 그리고 공기층은 31,000개로 총 57,500개가 소요되었다. 해석모델은 대칭을 이루고 있기 때문에 생성된 격자는 1/4만큼 생성시켰으며, 그 경계는 주기조건을 부여하여 전체 모델을 해석하는 효과를 주었다. 그 이유는 유동방향이 대칭을 이루고 있어 계산 시간 및 메모리를 절약할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

2.2 수치해석 방법

2.2.1 기본방정식

공기식 초저온용 기화기 주위의 유체유동을 해석하기 위해 비압축성 정상상태로 가정하였고, 표준 난류모델을 사용하여 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였다. 수치계산에 사용된 지배방정식은 아래의 식과 같다. 본 연구에 사용된 난류모델은 비교적 계산이 간단하며, 격자수의 절약 등 여러 가지 측면에서 공학적으로 그 가치가 인정되어 폭넓게 사용되고 있는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 대류항은 유동방향을 고려하고 상류쪽의 값을 반영하기 위해 풍상차분법(Upwind differencing scheme)을 사용하였다. 또한 압력항의 처리는 Patankar가 제시한 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

2.2.2 경계조건

지배방정식을 풀기 위해 사용된 경계조건은 기화기 관으로 저온의 LN₂ 기체가 입구로 유입되고, 출구로 유출된다는 가정을 하였다. 이때 유입

되는 LN₂의 압력은 절대압력으로 200 KPa로 유입되며, 유입온도는 101.9 K로 설정하였다. 또한 유출되는 LN₂의 압력은 대기압으로 절대압력 100 KPa로 유출되며 유출온도는 103.5 K로 설정하였다. 이러한 압력과 온도 경계조건은 실험을 통해 취득된 데이터를 근거로 사용하였다. 기체상태의 LN₂가 유입되면 순수 알루미늄으로 가정한 고체영역으로 열전달이 이루어지게 된다. 또한 기화기 외부의 공기는 대기압 하에 280 K로 일정한 온도로 유지된다고 가정하였다. 이러한 근거는 기화기 핀 1개의 module에 대하여 실험을 통해 취득한 값을 사용하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

Fig. 4는 중력방향은 -Z 방향으로 수직으로 세워진 기화기에 대한 온도분포를 정성적으로 나타내고 있다. 전반적인 온도분포를 확인해 보면 기화기 관부분이 관 내부의 냉열로 인해 온도가 낮은 것을 확인할 수 있으며, 핀 부분으로 이동할수록 대기와의 열전달로 인해 온도가 상대적으로 높은 것을 볼 수 있다. 본 연구의 경우 앞서 설명된바와 같이 단일 모듈로 출구는 대기로 방출되는 시스템이다. 따라서 세트로 구성된 기화기에 비해 상대적으로 내부 압력강하가 크게 발생하므로 기화기 입구 부근에 비등되어 고착되는 결빙 층이 상대적으로 얇게 생성된다.

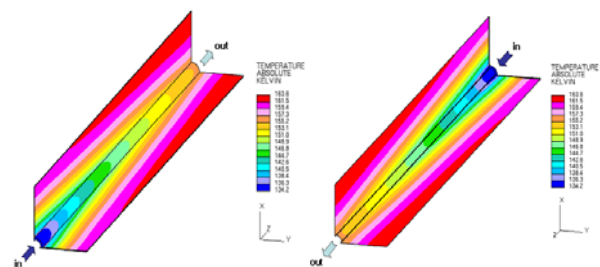


Fig. 4 Temperature contours of 4fin75le.

Fig. 5는 LN₂가 지나가는 기화기 관 내부 중심에서의 온도분포를 실험과 수치해석을 비교한 것이다. 실험의 경우 총 250 mm 간격으로 총 5개의 열전대를 설치하여 기화기 내부의 LN₂ 온도를 측정된 결과이다. 측정 시간은 약 20분 경과된 후 거의 일정한 온도로 유지되었기 때문에 정상상태로 판단하였고 그 시점의 결과를 취득하여 비교하였다. 실험과 수치해석 결과는 정성적으로 볼 때 다소 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 기

화기 길이방향으로 평균 온도는 실험일 경우 약 102.40 K이며 수치해석의 경우 약 103.32 K로 나타났다. 이때 실험과 수치해석 사이의 온도차가 약 0.92 K로 거의 유사한 경향을 보이고 있었다. 실험과 수치해석에서 출구가 입구에 비해 다소 높은 온도분포를 나타내고 있었고, 이는 기화기 핀과의 열전달로 인해 온도가 상승한 것이다.

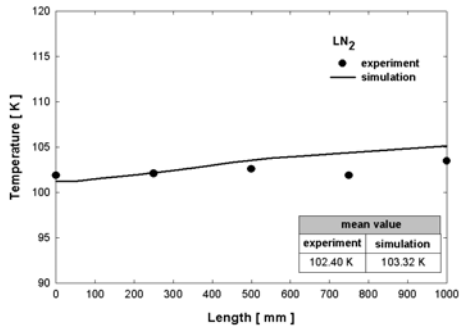


Fig. 5 Comparison of working fluid temperature between experiment and simulation result.

Fig. 6은 기화기 관에서 수직방향으로 약 100 mm 떨어진 지점에서 기화기 핀과 핀 사이의 대기온도를 나타내고 있다. 입구가 하부에 있기 때문에 냉열이 하부에 영향을 끼치는 것으로 판단되며, 출구가 있는 상부 쪽에는 기화기를 거치면서 온도가 하부에 비해 다소 높게 나타남을 알 수 있었다. 실험의 경우 평균 온도는 약 273.89 K이며 수치해석의 경우 약 274.44 K로 약 0.55 K 정도의 미미한 차를 보였다.

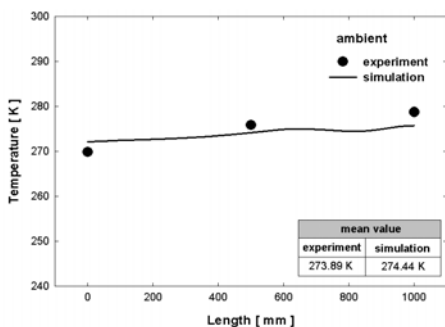


Fig. 6 Comparison of surrounding temperature between experiment and simulation result.

Fig. 7은 기화기 관 외부 핀과 핀 중심에서의 온도분포를 나타낸 결과이다. 기화기의 재질을 알루미늄인 관계로 열확산계수가 다른 금속에 비해 상대적으로 크기 때문에 기화기 관 외부까지

열전달이 잘 이루어지게 된다. 따라서 실험과 수치해석의 경우 정성적 및 정량적으로 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 실험의 경우 평균 온도는 약 122.09 K로 나타났다.

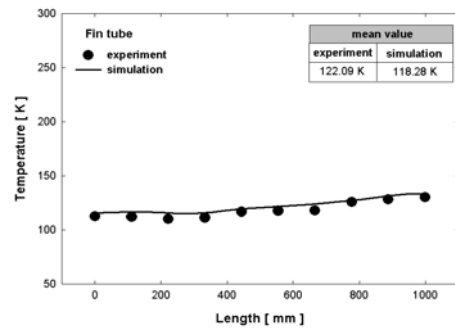


Fig. 7 Comparison of fin tube temperature between experiment and simulation result.

Fig. 8은 기화기 핀 끝단의 중심에서의 온도분포를 나타내고 있다. 실험의 경우 200 mm 지점까지 수치해석에 비해 온도분포가 다르게 나타나는데 이는 수치해석 시 대기층을 기화기 핀까지만 격자를 생성시켰고 그 면에 대기조건과 대기 온도 280 K로 균일하다고 가정하였기 때문에 수치해석 결과가 다소 높게 나타났다. 그러나 기화기를 지나면서 실험값과 유사한 경향으로 계산됨을 확인할 수 있었다. 전체적인 평균온도는 실험의 경우 약 164.02 K이며 수치해석의 경우 약 167.22 K으로 약 3.2 K의 온도차가 발생함을 알 수 있었다.

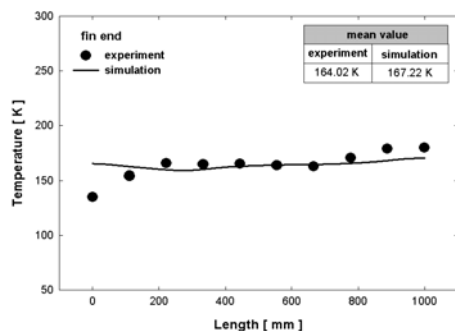


Fig. 8 Comparison of fin end temperature between experiment and simulation result

Fig. 9는 열 유속과 열전달계수를 해석 결과로부터 취득하기 위한 지점을 표시한 그림이다. 기화기 내-외부 각각 3군데 지점을 선정하였다.

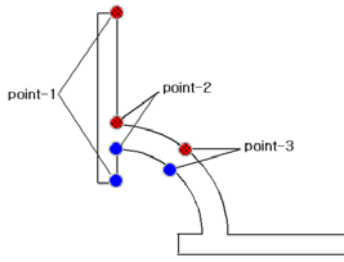


Fig. 9 Points of obtain data from simulation.

Fig. 10과 Fig. 11는 Fig. 9에서 지정한 위치에서의 기화기 내부와 외부에 대한 열 유속을 나타내고 있다. 열 유속은 단위시간당 열의 이동량을 나타내는 척도로서 식(1)과 같이 푸리에(Fourier)법칙에 의해 정의될 수 있다. 따라서 온도구배의 정방향과 역방향에 대한 기준으로부터 부호가 양(+)의 값과 음(-)값으로 표시된다. 그러나 본 연구에서는 열 유속의 방향은 무시하고 모두 양(+)의 값으로 취해 기화기 표면에서의 열 유속을 나타내었다.

$$\ddot{q} = -k\left(\frac{dT}{dx}\right) = -k\left(\frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}\right) = h(T_2 - T_3) \quad (1)$$

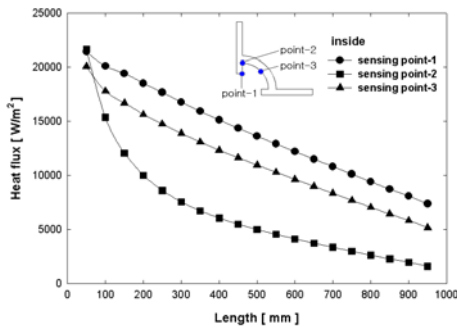


Fig. 10 Comparison of heat flux for various sensing point at vaporizer inside.

Fig. 10의 결과에서 우선 정성적으로 볼 때 입구 부분에서 가장 낮은 온도가 유입되기 때문에 기화기 내부에서 외부로 빠져나가는 열 유속이 가장 크게 나타났고 반면 출구로 향할수록 열 유속이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 point-2 지점의 경우 열전달이 가장 둔화되는 지점으로 열 유속이 가장 낮게 나타났으며 길이방향으로 진행할수록 큰 폭의 기울기를 가지면서 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 반면 Fig. 11과 같이 외부 쪽에서 흡입되는 열 유속의 분포를 보면 마찬가지로 입구 쪽 부근에서 열 유속이 가장 높은 것을 확인

할 수 있다. 이는 유입되는 LN₂와 대기와의 온도차 기울기가 가장 큰 지점이기 때문에 열전달이 활발하게 이루어지고 있음을 의미한다. 특히 point-3과 같이 기화기 관에서의 열 유속이 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있는데 내부 쪽의 point-2 지역의 경우 열전달의 둔화로 인해 외부 쪽 point-2와의 열 교환이 비교적 작기 때문이다. 이는 기화기 핀과 연결되는 지점이기 때문에 흡수되는 대기의 열이 기화기 핀 쪽으로 퍼졌기 때문에 국부적으로 많은 열 교환이 원활하지 못하기 때문이다.

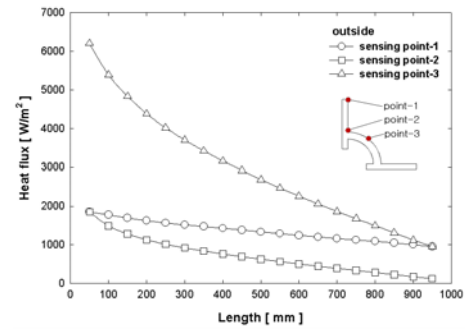


Fig. 11 Comparison of heat flux for various sensing point at vaporizer outside.

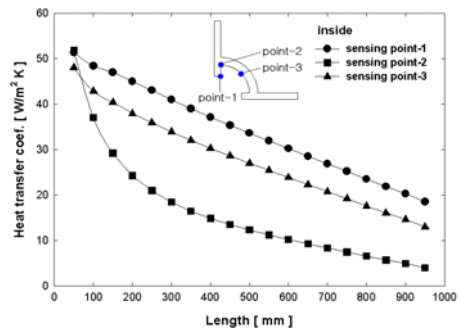


Fig. 12 Comparison of heat transfer coefficient by the various sensing point at vaporizer inside.

Fig. 12는 설명된 Fig. 9와 같은 지점에서의 기화기 내부에 대한 열전달 계수를 정량적으로 나타내고 있다. 열전달 계수와 열 저항은 역수관계이므로 열전달 계수가 크면 열 저항이 낮아져 열전달이 활발하게 이루어지기 위해서는 열이 전달될 때 저항이 낮아야 되기 때문이다. 기화기 내부에서의 열전달이 가장 활발한 쪽은 입구 측이며, 가장 둔화되는 쪽은 출구측이 된다. 열 유속과 마찬가지로 가장 열전달이 가장 활발한 지점은 point-1

지점이며, 가장 둔화된 지점은 point-2지점이 된다.

Fig. 13은 기화기 외부에 대한 열전달 계수를 나타내고 있다. 외부의 경우 LN₂를 기준으로 볼 때 기화기의 경우 알루미늄의 경우 밀도가 공기에 비해 크기 때문에 열용량이 크지만 공기는 밀도가 낮기 때문에 열용량이 상대적으로 작다. 따라서 -100 K 부근은 냉열이 알루미늄을 통과해 대기 측으로 방출될 때 즉, 대기의 공기는 기화기에 열을 공급할 때 낮은 열용량 때문에 일종의 단열효과가 발생하게 된다. 따라서 열 저항이 클 수밖에 없으며, 이로 인해 열전달이 둔화되어 열전달 계수가 낮아지게 된다.

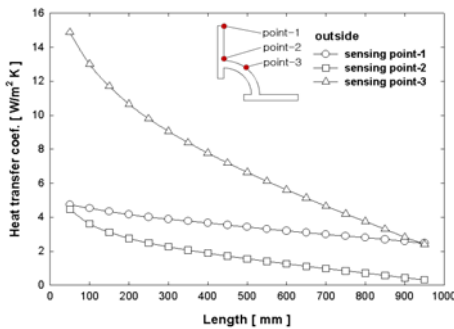


Fig. 13 Comparison of heat transfer coefficient for various sensing point at vaporizer outside.

4. 결론

(1) 실험과 수치해석 결과는 정성적으로 볼 때 다소 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 기화기 길이방향에 대한 온도분포 비교에서는 실험과 수치해석에서 0.92 K, 대기 온도 비교에서는 약 0.55 K 정도, 전체적인 평균온도는 약 3.2 K의 온도차가 미미하게 발생함을 알 수 있었다.

(2) LN₂를 기준으로 한 열 유속 분포는 기화기 외부인 핀과 관에서는 기화기 내부에 비해 상대적으로 열 유속이 작은 것을 확인할 수 있었다. 기화기 내부의 경우 101.9 K로 온도 기울기가 커지고 열교환량이 크기 때문에 열 유속이 크게 증가되지만, 기화기 외부는 대기의 공기가 가지는 열용량이 적기 때문에 열 유속이 작게 나타남을 알 수 있었다.

(3) LN₂를 기준으로 한 열전달 계수는 열 유속이 큰 기화기 내부에서의 열전달 계수가 높게 나타났다. 다음으로 기화기 관과 LN₂ 유입구 부근의 기화기 핀에서 다소 높은 열전달 계수 분포를 보

이고 있었다. 온도 차가 급격하게 이루어질 때는 공기층이 단열재의 역할을 하여 열전달을 방해한다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.