

액화가스용 대기식 기화기의 외측 열전달 특성에 관한 연구

강승모* · 서동민** · 고동국*** · 최준호* · 박외철* · 임익태***†

*부경대학교 소방공학과, **전북대학교 기계설계공학과, ***전북대학교 기계공학과

A Study on Heat Transfer Characteristics of the Outside Surface of Ambient Vaporizer

Seung Mo Kang*, Dongmin Seo**, Dong Guk Ko***, Jun-Ho Choi*,
Woe-Chul Park* and Ik-Tae Im***†

*Dept. of Fire-fighting Eng., Pukyong National Univ.

**† Dept. of Mech. Design Eng., Chonbuk National Univ.

*** Dept. of Mech. Eng., Chonbuk National Univ.

ABSTRACT

This paper analyzed the heat transfer characteristics on the outer surface of the ambient air vaporizer which received the heat from the air through natural convection by using numerical and experimental methods. The working fluid was a liquid nitrogen. The experimental variables were the length (2,000 mm, 1,800 mm, 1,600 mm) and width of the vaporizer fin and the fluid flow (6.7 m³/h, 7.1 m³/h, 7.5 m³/h). Based on the temperature data from the experiments, the heat transfer coefficient was calculated. Numerical analyses were also conducted in order to find the heat transfer coefficient for the range of Nusselt number which was difficult to get the data from experiments. The correlation equation between Nusselt number and Rayleigh number were suggested using both the experimental and numerical data.

Key Words : Ambient Air Vaporizer, Liquefied Gas, Natural Convection, Heat Transfer Coefficient

1. 서 론

반도체 산업에서 많이 사용되는 고압가스는 수송이나 보관의 편리성을 높이기 위하여 고압으로 압축하여 액체 상태로 제작되어 운반된다. 이러한 액체 상태의 고압가스를 산업체에서 사용할 수 있게 다시 기체 상태로 기화시켜 주는 장치가 기화기이다. 기화시킬 때 사용하는 에너지원에 따라 기화기는 크게 대기식, 온수식, 스팀식 기화기 등으로 분류가 가능하다. 온수식과 스팀식의 경우에는 전기 또는 증기를 이용하는 열 교환 방식으로 액화

가스를 기화시키기 때문에 가스의 사용량이 증가하면 열 에너지 소비가 많고 부식의 위험성도 있다. 하지만 대기의 열을 가지고 기화시키는 대기식 기화기의 경우는 추가적인 에너지 소모도 없고 따로 에너지원이 필요하지 않아 운용비용 및 부식에 대한 부담이 적어 친환경적인 제품이라고 할 수 있다.

본 실험에서 사용된 대기식 기화기 즉, 초저온 액화가스용 기화기는 액화가스의 비점이 매우 낮기 때문에 기화기 표면에 수분 응축과 그 결빙 또는 서리 착상 등의 이유로 기화기 외부 가열 매체와의 열전달이 둔화되고, 기화 효율이 감소하는 문제점이 있다. 또한, 대기식 기화기의 제조는 높은 수준의 기술을 필요로 하지 않아 기

†E-mail: itim@jbnu.ac.kr

화기 제조는 대부분 선진국 제품이나 기존 제품을 모방하여 만들고 있다. 이에 따라 대부분의 제품에서 기화 효율이나 열전달 계수와 같은 열교환기 설계 정보를 정확히 표시하지 않고 있다.

본 연구에서는 기존에 보고[1]한 연구에 이어 대기식 기화기 설계에 필요한 자료를 축적하기 위해서 핀의 폭, 기화기의 길이, 액화 가스의 유량 등의 변화에 따른 기화기의 외측 열전달 특성에 대해 실험 및 수치해석을 진행하였다. 실험과 해석 자료를 이용하여 설계 시 가장 중요한 기화효율 산정에 필요한 외측 열전달 계수를 구하였으며 이를 하나의 상관 식을 제시하였다. 이를 통해 외측 열전달 계수를 높일 수 있으면 최종적으로는 제품의 무게와 부피를 줄여 제품의 단가를 낮출 수 있으므로 더 우수한 제품을 제조할 수 있을 것이다[2,3].

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

Fig 1은 기화기 외측의 자연대류 열전달 특성을 분석하기 위한 실험 장치의 계략도이다. 실험 장치에서 기화기는 알루미늄으로 제작되었으며 외경 0.028 mm인 원형 튜브에 8개의 핀이 부착되어 있다. 8개의 핀 중 4개는 폭이 길며 그 사이 사이에 부착된 나머지의 4개는 폭이 작다. 여기서는 폭이 긴 핀의 폭의 크기에 따라 두 가지 기화기를 각각 KL-175와 KL-125로 칭하였다. 실험에 사용된 가스는 -196°C 의 초저온 액화질소가 사용되었으며, 고압이기 때문에 압력을 조절할 수 있는 압력 조절기를 탱크와 기화기 사이에 설치하여 기화기 내부의 압력을 220 kPa로

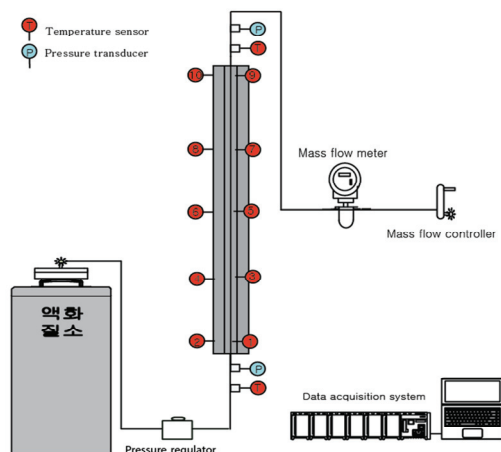


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

일정하게 유지시켰다. 또한 유량조절기(Mass flow controller)를 통해서 설계 유량을 기준으로 유량 변화를 주며 실험을 수행하였으며, 정확한 측정을 위해서 기화기 끝 부분과 질소 가스 출구 사이에 유량계(Mass flow meter)를 설치해 유량을 확인하였다. 기화기 내부에 흐르는 기체의 열량 손실을 구하기 위해서 기화기 입구와 출구에 관 내부 삽입용 K-형 온도센서와 압력계를 설치하였으며, 표면온도를 측정하기 위하여 핀 표면에 T-형 온도센서를 튜브와 핀 부분을 각각 5개의 구간으로 나누어 부착하였다.

2.2 실험방법 및 실험조건

KL-175와 KL-125의 두 기화기에 대해 길이를 2,000 mm, 1,800 mm, 1,600 mm의 세 가지로 변화시켜 총 6가지 경우에 대해 실험을 실시하였다. 작동 유체는 앞에서 언급한 바와 같이 액화질소를 사용하였으며 실험조건과 기화기 종류를 Table 1에 나타내었다. 실험 시 외기 온도는 평균 32°C 이며 습도는 60%이었다. 실험 시작 후 압력 조절기와 유량 조절기를 이용하여 실험조건을 설정한 후 약 90분 정도 지나 기화기 외측 표면 온도가 정상상태에 도달한 후부터 실험 데이터를 기록하였다. 유량을 변화시키는 경우에도 동일한 절차를 거쳐 실험 데이터를 얻었다. 정상상태에 약 20분간 표면 온도를 측정하여 계산에 사용하였다. 측정 데이터의 수집은 데이터 수집기(National Instrument, 9205)와 처리 프로그램(LabView, V.8.0)을 사용하였다.

Table 1. Vaporizers used in the experiments and experimental conditions

Parameter	Value
Vaporizer type	KL-175, KL-125
Vaporizer length (mm)	2000, 1800, 1600
Ambient temperature ($^{\circ}\text{C}$)	32
Mass flow rate (m^3/h)	6.7, 7.1, 7.5

기화기를 통해 외부에서 기체로 전달된 열량은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \dot{m}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \quad (1)$$

여기서 \dot{m} 은 질소의 질량 유량이며 h_{out} 과 h_{in} 은 각각 출구와 입구에서의 엔탈피이다. 엔탈피 값은 온도와 압력을 이용하여 계산하였다. 기화기 외측의 열전달 계수

는 식 (1)을 사용하여 얻은 열량과 측정된 표면온도를 이용하여 다음 식 (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$h = \frac{Q}{A(T_{\infty} - T_s)} \quad (2)$$

여기서 A 는 기화기 외측의 전열 면적이며 T_s 는 측정된 기화기 외측의 평균온도, T_{∞} 는 대기의 온도이다. 외측 표면의 평균온도 T_s 는 기화기를 길이에 따라 구간을 나누고 각 구간에 대해 측정된 값을 사용하여 다음과 같이 평균값을 계산하였다.

$$T_s = \frac{\sum A_i T_i}{\sum A_i} \quad (3)$$

여기서 i 는 측정을 위해 나눈 구간을 나타내며 A_i 와 T_i 는 각각 구간 i 의 면적과 그 구간에서 측정된 온도를 뜻한다.

실험결과를 통해 얻은 열전달계수를 Ra 수의 함수인 Nu 수로 나타내었다. 이때 사용된 Nu 수와 Ra 수의 정의는 각각 다음 식 (4),(5)와 같다.

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (4)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_{\infty} - T_i)L_c^3}{\nu^2} \quad (5)$$

여기서 특성길이 L_c 는 기화기에 대한 기준 연구[4, 5]와 마찬가지로 다음 식을 통해 계산하였다.

$$L_c = \frac{[\pi d_o - nt + 2(2L + t)n]l}{\pi d_o} \quad (6)$$

여기서 d_o, n, t, L, l 은 각각 관의 외경, 핀 수, 핀 두께, 핀 길이 및 관의 길이를 나타낸다. β 와 ν 는 각각 공기의 체적팽창계수와 동점성계수이다.

3. 실험결과

Fig 2는 KL-175 기화기에 대해 길이가 2000 mm, 1800 mm, 1600 mm 그리고 유량이 6.7 m³/h, 7.1 m³/h, 7.5 m³/h일 때의 열전달계수를 나타낸 것이다. 유량이 증가하면 기화기 표면의 온도가 낮아지기 때문에 식 (2)에서 알 수 있듯이 분모

가 커져서 열전달계수 값은 작아진다. 기화기의 길이가 커짐에 따라 열전달계수는 증가하지만 증가 폭은 감소하는데 이것은 실험 중에 발생하는 서리의 영향이 기화기의 길이에 따라 서로 다르기 때문이다. 본 실험에서는 1,800 mm 길이에서는 7.1 m³/h, 7.5 m³/h일 때 그리고 1,600 mm 길이에서는 모든 유량에서 서리가 발생하였다. 그러나 2,000 mm 길이에서는 서리가 발생하지 않았다.

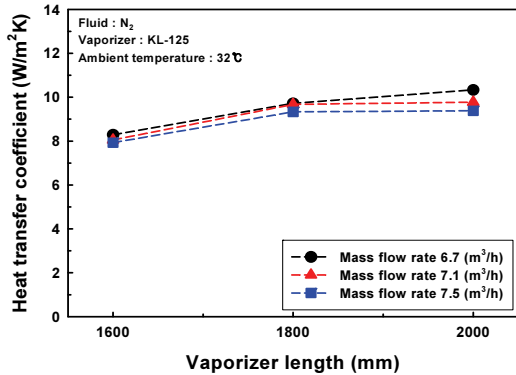


Fig. 2. Heat transfer coefficient for the KL-125 vaporizer according to the length and flow rate.

Fig 3은 핀의 폭이 더 좁은 KL-125 기화기에 대한 외측 열전달계수를 나타낸 것이다. 기화기의 길이가 길어짐에 따라 열전달계수 값이 증가하는 것은 KL-175의 경우와 유사하다. 그러나 1,800 mm 길이에서 유량이 6.7 m³/h로 작을 때 열전달계수가 다른 경우보다 큰 데 이것은 서리의 영향이 없기 때문이다. 또 2,000 mm에서 유량에 따른 값이 1,600mm와 반대로 나타나는 것 또한 서로 다른 서리의 영향에 의한 것으로 보인다.

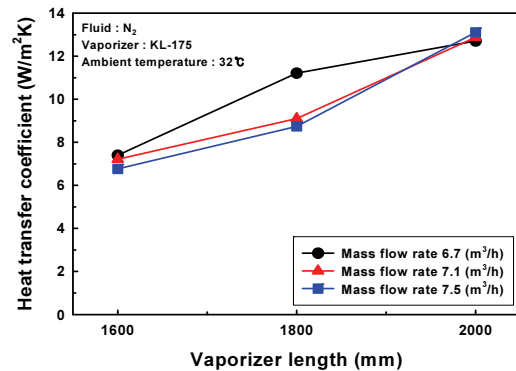


Fig. 3. Heat transfer coefficient for the KL-175 vaporizer according to the length and flow rate.

Fig 4와 Fig 5는 측정된 값을 사용하여 계산한 Ra 수에 따른 Nu 수를 나타낸 것이다. 기화기의 길이가 길어짐에 따라 Ra 수가 증가하고 그에 따라 Nu 수도 증가하는 경향을 나타낸다. 같은 길이에서는 유량이 증가하면 표면과 대기와의 온도차가 커지기 때문에 Ra 수는 약간 증가하지만 값이 감소하기 때문에 Nu 수는 오히려 약간 감소하는 것을 볼 수 있다. KL-175 기화기의 경우에는 핀의 폭이 더 크기 때문에 일부 경우에서 서리가 형성되지 않는다. 서리가 형성되지 않으면 표면의 평균 온도가 더 높기 때문에 서리가 형성되는 경우보다 Ra 수가 작아지게 된다. Fig 5에서 2,000mm의 경우와 1,800mm, 6.7 m³/h의 경우에 대한 Ra 수가 왼쪽에 위치한 것은 이 때문이다.

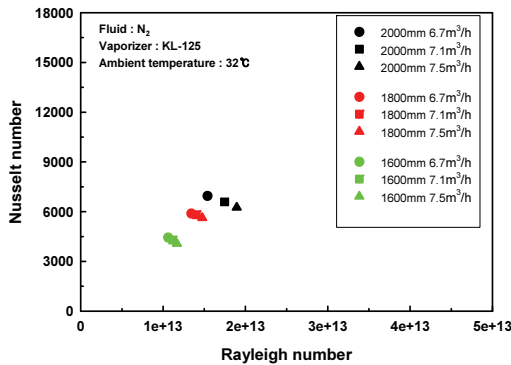


Fig. 4. Nusselt number variation for the KL-125 vaporizer from experiments.

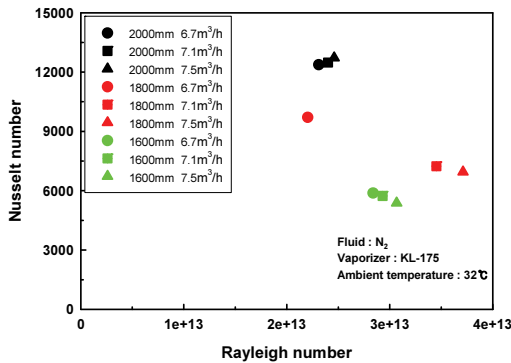


Fig. 5. Nusselt number variation for the KL-175 vaporizer from experiments.

4. 수치해석

4.1 해석모델

실험을 통해 측정하기 어려운 영역의 Ra 수와 Nu 수의

관계를 얻기 위해서 수치해석을 진행하였다. 기화기의 길이는 2,000 mm, 1,800 mm, 1,600 mm로 실험과 동일하게 하였으며, 그 중 2,000 mm인 기화기 모양과 해석에 사용한 격자계를 Fig 6 (a)와 (b)에 나타내었다. 실제 핀 표면에는 전열면적의 증가 등을 위해 요철이 형성되어 있으나 해석에서는 핀의 표면이 매끄럽다고 가정하였다. 해석은 형상의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 해석영역으로 선정하였다. 핀 외측의 공기영역은 폭이 좁은 핀을 기준으로 핀 폭의 10배까지의 충분한 영역을 해석대상으로 지정하였으며 해석결과를 통해 그 타당성을 확인하였다. 기화기의 표면은 대기보다 온도가 낮기 때문에 자연대류에 의해 표면에서 냉각된 공기가 아랫방향으로 흐른다. 따라서 기화기 위쪽 면은 대기압의 유입 조건(pressure inlet)을 주었으며, 아래쪽 면과 핀에서 먼 바깥 면에는 대기압 유출조건(pressure outlet)을 주었다. 해석모델에서 1/4로 자른 면에는 대칭조건을 부여하였으며, 핀과 튜브 표면은 벽면으로 설정하였다.

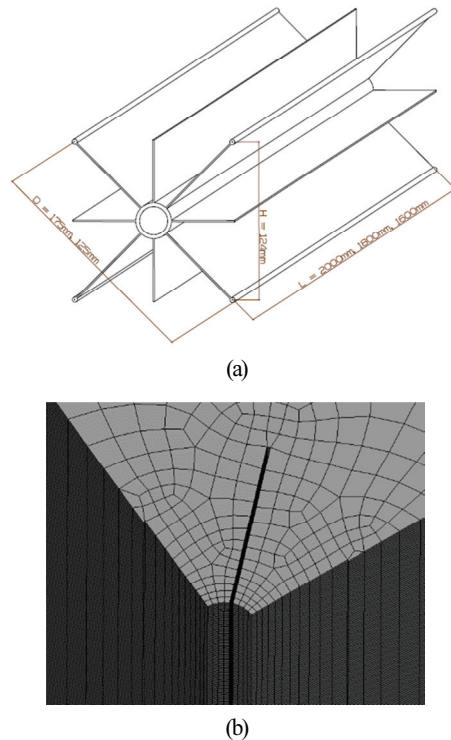


Fig. 6. (a) Design of a vaporizer, (b) a partial view to the grid system used in the computations.

해석을 위한 격자계는 육면체 요소로 구성하였으며 핀과 튜브 표면 근처에 격자를 밀집시켜 급격한 온도변화

와 속도변화를 나타낼 수 있도록 하였다. 격자의 수를 변화시키면서 해를 구하여 비교하는 격자계 테스트를 수행하였으며 그 결과 최종적으로 사용한 격자수는 Table 2와 같다. 기화기 길이가 길수록, 핀의 폭이 클수록 더 많은 수의 격자가 사용되었다.

Table 2. Computational grids used in the calculations

Vaporizer length (mm)	Number of element	
	KL-175	KL-125
1600	75463	73861
1800	87615	84056
2000	93312	93120

4.2 해석조건

자연대류에 의한 기화기 외부 공기의 유동은 비압축성 정상상태로 가정하였다. 실험을 통해 얻은 Gr 수가 109 이상이므로 유동을 난류로 간주하여 k-ε 난류모델을 사용하였다. 이때 벽면에 대해서는 Standard wall functions을 적용하였다. 기화기 핀과 튜브는 알루미늄으로 간주하여 상수의 물성치를 주었으며, 기화기가 길이에 따라 온도가 다르기 때문에 외측 공기 측의 밀도, 비열, 열전도도, 점도를 온도에 따라 선형적으로 변화하도록 하였다. 기화기 표면의 온도는 실험을 통해 얻은 온도 조건을 주어 해석을 수행하였다. 해석결과의 잉여량은 기존 연구[6, 7]를 참고하여 10⁻⁵로 설정하였다.

5. 해석결과

Fig 7은 수치해석을 통해 구한 KL-125 기화기에 대한 Ra 수와 Nu 수에 대한 그래프이다. 기화기의 길이가 증가함에 따라 Ra 수가 증가하며 Nu 수도 증가한다. 길이가 고정된 경우에는 유량이 증가하면 기화기와 공기 사이의 온도 차이가 커지기 때문에 Ra 수가 약간 증가하는 것을 볼 수 있다. 2,000 mm 길이의 경우 유량 7.5 m³/h에서 Nu 수가 8013으로 가장 큰 값을 나타내었다.

Fig 8은 KL-175 기화기에 대한 수치해석 결과이다. 핀의 폭이 더 크기 때문에 특성길이가 증가하여 KL-125 기화기에 비해 Ra 수가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 길이가 2,000 mm일 때와 1,800 mm, 유량 6.7 m³/h의 결과가 다른 데이터에 비해 왼쪽에 위치한 것은 실험과 마찬가지로 서리의 영향을 받지 않는 표면 온도 때문이다. 즉 실험에서 얻은 온도분포를 이용하였기 때문이다.

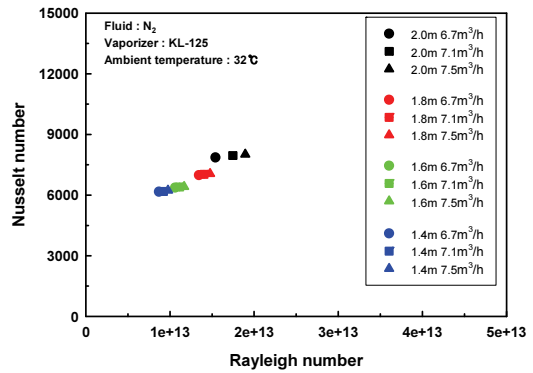


Fig. 7. Nu number variation with Ra number for the KL-125 vaporizer obtained from numerical simulations.

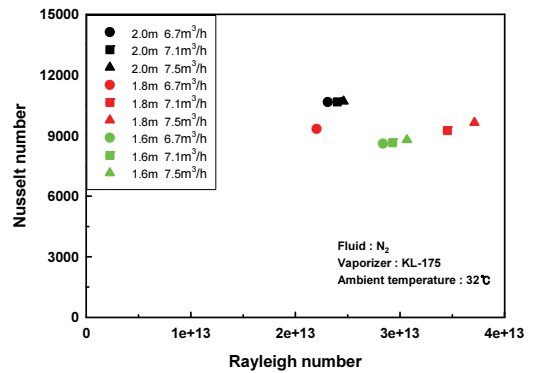


Fig. 8. Nu number variation with Ra number for the KL-175 vaporizer obtained from numerical simulations.

Fig 9는 실험결과와 수치해석 결과 및 이를 이용하여 구한 상관식의 그래프를 나타낸다. 수치해석을 통해 얻은 결과는 실험에 비해 서리의 영향이 잘 고려되지 않으므로 Nu 수의 분포가 실험보다 변동 폭이 더 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 서리의 영향을 받는 경우에 대해서 수치해석 시 실험에서 측정된 표면 온도를 경계조건으로 사용하기 때문에 Nu 수가 실험값보다 높게 나타나는 경향을 보였다. 이것은 실험에서는 서리가 형성될 경우 식 (2)의 Q가 표면온도와 함께 변하는 반면 수치해석에서는 서리의 영향에 따른 Q의 변화를 고려할 수 없기 때문이다. 수치해석과 실험 결과를 모두 포함한 상관식을 구하였으며 이 식은 다음과 같다.

$$Nu = 0.2873Ra^{0.3331} \tag{7}$$

이는 8.682×10¹² < Ra < 3.711×10¹³의 범위에서 구한 것이다.

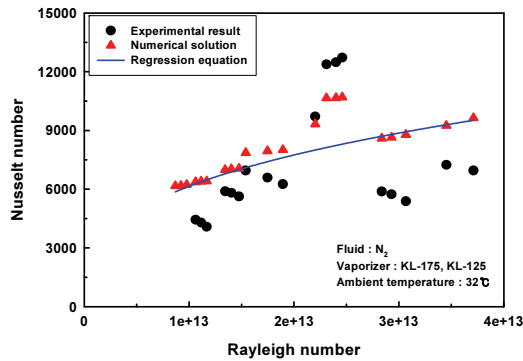


Fig. 9. Nu number with Ra number for a vaporizer KL-125 and KL-175.

6. 결 론

본 연구는 실험을 통해 얻은 기화기 외측 표면의 온도 데이터를 이용하여 수치해석을 진행하여 핀의 길이에 따른 기화기 KL-175와 KL-125의 길이와 유량의 변수를 주어 다음과 같은 결과 값을 얻을 수 있었다.

(1) 실험의 경우 기화기 KL-175 기화기의 경우 성에의 영향을 받지 않을 경우 유량이 증가함에 따라 기화기 표면 온도가 감소하지만 대기를 통해 얻는 열량 값 증가가 더 크기 때문에 외측 열전달계수가 증가하였고, KL-125 기화기와 같이 서리의 영향을 받을 경우 성에로 인해 대기온도와의 차이가 커져 외측 열전달계수가 감소하는 반대의 경향을 확인하였다. 또한 기존의 대기식 기화기의 외측열전달계수는 $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 이었지만 다음 실험을 통하여 얻은 외측열전달계수의 값은 최대 $12.76 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 높은 값을 얻을 수 있었다.

(2) 실험을 통해 얻은 온도 데이터를 이용하여 수치해석을 진행하여 다음과 같은 자연대류 상태의 대기식 기화기의 높은 외측열전달계수를 산정할 수 있는 상관식을 얻을 수 있었다. 이는 대기식 기화기 제작에 있어 기화효율 산정에 필수적인 높은 열전달계수를 산정할 수 있는 설계 정보를 제공할 것이다.

참고문헌

1. D. Seo, D. G. Ko, I.-T. Im, "A numerical study on heat transfer of external surface of ambient evaporators," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 116-119, (2017).
2. Y. H. Lee, G. T. Park, G. H. Lee, P. H. Kim, H. M. Jeong, H. S. Chung, "A Study on Heat Exchange Performance of liquefied Gas Vaporizer at Super Low Temperature," *The Korea Society for Power System Engineering*, (2007.11): 229-234.
3. K. Sugano, LNG Vaporizers, Research and Development, Kobe Steel Engineering Reports, 56, No. 2, (2006).
4. T. W. Kong, S. B. Yi, S. C. Lee, H. M. Jeong, H. S. Chung, "Study on the Working Characteristics of Vaporizer for Super Low Temperature Liquefied Gas," *The Korea Society for Power System Engineering*, Vol. 9, pp. 99-105, (2005).
5. S. C. Lee, Y. H. Lee, H. S. Chung, H. M. Jeong, C. K. Lee, B. H. Lee, "Heat Transfer Characteristics According to Geometric Parameters of Cryogenic Vaporizer Using Air Heat Source," *Proceedings of Spring Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 2366-2371, (2006).
6. W. G. Lee, S. H. Rhi, K. B. Lee, "Prediction of the frost Layer growth in LNG air vaporizer," *International Journal of Research Institute of Industrial Science and Technology*, Vol. 26, pp. 67-71, (2012).
7. P.-H. Kim, C.-P. Kim, H.-M. Jeong, H. S. Chung, Y.-H. Lee, "Study on the Comparison of Heat Exchange Performance of Liquefied Gas Vaporizer at Super Low Temperature," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 20, pp. 679-688, (2008).

접수일: 2017년 10월 17일, 심사일: 2017년 12월 19일,
게재확정일: 2017년 12월 22일