

액화가스용 기화기의 외측 열전달에 대한 수치해석 연구

서동민*·고동국**·임익태***†

* 전북대학교 대학원 기계설계공학과

*** 전북대학교 공과대학 기계설계공학과

A Numerical Study on Heat Transfer of External Surface of Ambient Evaporators

Dongmin Seo*, Dong Guk Ko** and Ik-Tae Im***†

*Dept. of Mech. Design. Eng., Graduate School, Chonbuk National Univ.

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

ABSTRACT

In this paper, natural convection around the ambient evaporator was numerically studied using commercial computational fluid dynamics software. From the simulations, temperature and velocity fields around the evaporator were found as a function of evaporator size and liquefied gas flow rate. The heat transfer coefficient at the external surface of the evaporator was also calculated from the simulation results. In order to give the heat transfer coefficient for various conditions, correlation between Rayleigh number and Nusselt number was proposed.

Key Words : Ambient air vaporizer, Natural convection, Computational heat transfer, Heat transfer coefficient

1. 서 론

반도체 산업에서 많이 사용되는 작업용 기체는 수송이나 보관의 편리성을 높이기 위하여 고압으로 압축하여 액체 상태로 운반되거나 보관된다. 이러한 고압가스를 반도체 산업을 포함한 산업 현장에서 사용할 수 있게 다시 기체 상태로 만들어 생산 공정에 투입할 수 있게 하는 장치가 기화기이다. 기화기는 기화시키는 방법에 따라 대기식, 온수식, 스팀식 등으로 분류한다. 온수식과 스팀식의 경우에는 전기적 가열 또는 증기를 이용하는 열교환 방식으로 액화가스를 기화시키기 때문에 가스 사용량이 증가함에 따라 열에너지의 소비가 많고 부식에 대한 위험성도 크다. 그러나 주변 공기의 열을 이용하여 액화 기체를 기화시키는 대기식 기화기의 경우에는 열에너지 소모가 적고 따로 에너지원이 필요하지 않아 운용비용 및 부식에 대한 부담

이 적어 친환경적인 제품이라고 할 수 있다.

대기식 기화기의 기화 효율은 기화기를 설계할 때 중요한 변수이다. 그러나 기화기를 사용한 실험에서는 액화가스의 온도가 매우 낮기 때문에 기화기 표면에 수분 응축, 서리 착상 또는 결빙이 발생하여 기화기 외부 매체와의 열전달이 둔화되고, 기화효율이 급격하게 감소하는 문제점이 있다. 또한, 대기식 기화기의 특성상 많은 기술을 요하는 부분이 없어 기화기의 생산과 제조는 대부분 선진국의 기존 제품을 모방하여 만들거나 기화효율이나 열전달계수와 같은 열교환기 설계 정보를 정확히 표시하지 않고 있다.

본 연구에서는 기화기 설계에 필요한 정보를 축적하기 위해서 핀의 길이, 기화기 길이, 작동유체의 유량 등을 변수로 하여 기화기의 외측 열전달 현상에 대해 수치해석을 진행하였다. 이를 통해 최종적으로는 기화기 설계에 필요한 기화효율[1-4] 산정에 필수적인 외측 열전달계수에 대한 데이터를 제공하고자 한다.

†E-mail: itim@jbnu.ac.kr

2. 수치해석

2.1 해석 모델

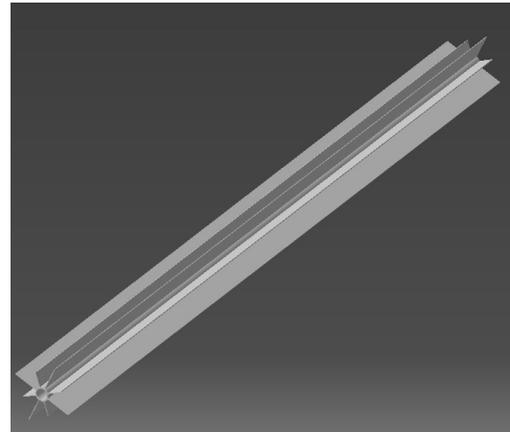
대기식 기화기의 공기 측 열전달 현상에 대해 조사하기 위해 수치해석 영역으로 Fig. 1과 같은 대상을 선정하였다. 해석에서 고려한 대기식 기화기의 길이는 2000 mm, 1800 mm, 1600 mm의 세 가지인데 실제 판매되고 있는 제품을 기준으로 선정하였다. 또 핀의 폭에 따라 폭이 넓은 KL-175 기화기와 폭이 좁은 KL-125 기화기로 구별하였다. Fig. 1의 (a)는 기화기의 형상을 나타내는 3차원 CAD 형상이며 (b)는 기화기의 외측 영역에 대해 설정한 해석 영역이다. 실제 핀에는 열전달을 증가시키기 위하여 핀 표면에 여러 개의 홈이 가공되어 있으나 해석에서는 핀의 형상을 간단히 하였고, 형상의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 해석영역으로 설정하였다. 기화기 외측에서 일어나는 열전달 현상을 해석하는 문제이므로 기화기 외측으로는 짧은 핀 길이의 약 10배가 되는 공기 영역을 해석영역으로 지정하여 충분한 영역이 선정되도록 하였다.[5]

기화기 주변에서는 자연대류에 의해 유동이 형성된다. 이 때 기화기 표면이 주변 공기의 온도보다 낮기 때문에 기화기 외측의 공기는 윗부분에서 아래 방향으로 흐른다. 따라서 기화기 위쪽 면은 대기압의 유입 조건을 주었으며, 아래쪽 면과 해석모델의 바깥 면에는 대기압의 유출조건을 주었다. 해석모델의 벽면에는 형상의 대칭성 때문에 대칭(Symmetry) 조건을 설정하였고 핀과 튜브는 벽면(wall)으로 설정하였다. 계산을 위한 격자계는 육각형 요소를 기본으로 사용하여 형상(Hexahedral mesh)하였으며 고체와 유체가 맞닿은 유체의 면에는 조밀한 격자를 생성하였다.

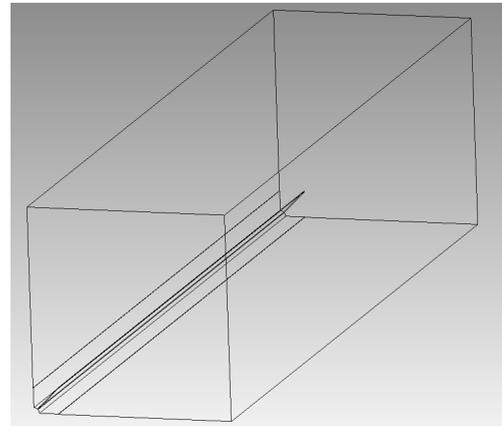
초기 격자를 생성한 후 격자의존성을 확인하였으며 이 때 Relevance를 이용하여 격자 수에 대한 변동해석을 실시하여 최적의 격자를 구하였다. 최종 격자계의 격자 수를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Number of mesh used in the computations for the two evaporators

Vaporizer length (mm)	KL-175 mesh number	KL-125 mesh number
2000	75463	73861
1800	87615	84056
1600	93312	93120



(a)



(b)

Fig. 1. Shape of the air evaporator, (a) 3 dimensional CAD drawing of the vaporizer, and (b) computational domain considering the symmetry.

2.2 해석 조건

대기식 기화기의 외측 자연대류 열전달을 해석하기 위하여 기화기 외부의 유체유동을 3차원 비압축성 정상상태로 가정하였다. 일반적으로 기화기의 실험에서 얻은 Gr 수가 10^9 이상이므로 유동은 난류유동으로 가정하였으며 난류모델로는 가장 널리 사용되는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. $k-\epsilon$ 난류모델을 적용할 때 벽면에 대해서는 Standard wall functions으로 처리하였다. 기화기의 튜브와 핀은 모두 알루미늄으로 만들어졌다. 외측 공기의 밀도, 비열, 열전도도, 점도는 온도에 따라 선형적으로 변화하도록 하였다. 기화기의 표면 온도는 실제 기화기의 표면 온도를 측정하여 그 값을 경계조건으로 주어 해석을 수행하

였다. 해석의 잔차(Residual)가 10^{-5} 이 되면 수렴한 것으로 하였다.

3. 해석 결과

3.1 온도 및 속도 분포

Fig 2는 기화기 표면의 온도분포를 나타내는데 (a)는 기화기 몸체인 관 부분을, (b)는 폭이 긴 핀 부분을 그리고 (c)는 폭이 짧은 핀 부분을 나타낸다. 실험을 통해 얻은 기화기 외측표면의 온도가 경계조건으로 잘 적용되어 길이 방향에 따라 선형적으로 온도가 변하는 것을 볼 수 있다. 기화기의 아래쪽으로 갈수록 극저온 기체의 영향을 받아 낮은 온도가 나타나고 관에서 핀 쪽으로 갈수록 대기와의 열전달로 인해 온도가 높아지는 것을 알 수 있다.

Fig 3은 기화기 주변의 속도 분포를 나타내는 그림이다. 기화기 표면에 근접한 영역에서는 비교적 빠른 유동이 형성되며 핀이 끝나는 지점에서는 연직 하방으로 약 5.0 m/s 이상의 빠른 유동이 형성됨을 볼 수 있다. 기화기 표면에서 조금 떨어진 영역에서는 연속 방정식을 만족시키기 위해 연직 상방의 유동이 형성된다. 그러나 이 유동은 비교적 넓은 영역에 걸쳐 일어나므로 유동 속도는 그리 크지 않다.

Fig 2와 Fig 3에 나타낸 바와 같은 해석 결과를 바탕으로 기화기 표면에서의 열전달 계수를 계산하였다. Fig 4는 수치해석을 통해 얻은 열전달 계수를 이용하여 얻은 Nu 수를 Ra 수의 함수로 나타낸 것이다. 여기서 사용한 Nu 수와 Ra 수의 정의는 아래 식과 같다.

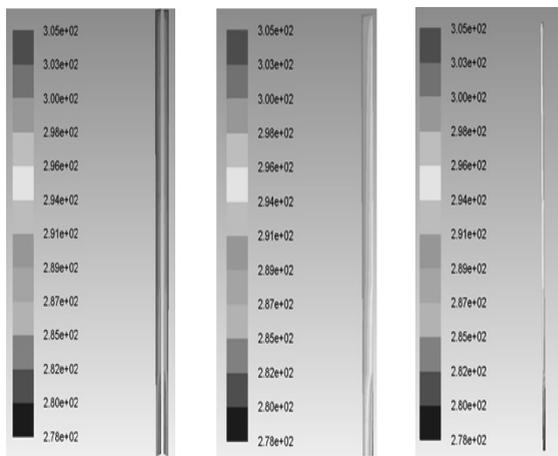


Fig. 2. Temperature of the evaporator surface, (a) Tube, (b) Wide fin and (c) narrow fin.

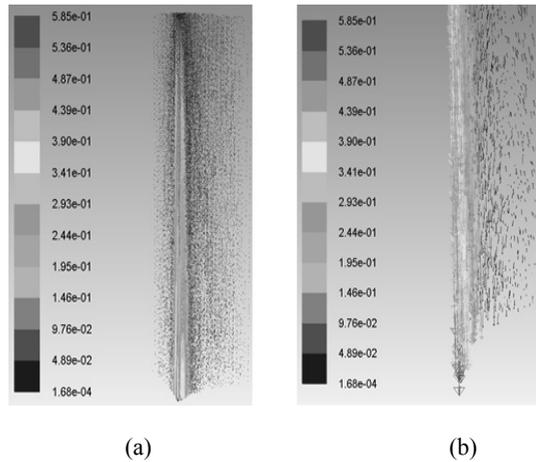


Fig. 3. Velocity vectors for KL-175 evaporator, (a) Entire view and (b) Enlarged view to the bottom edge.

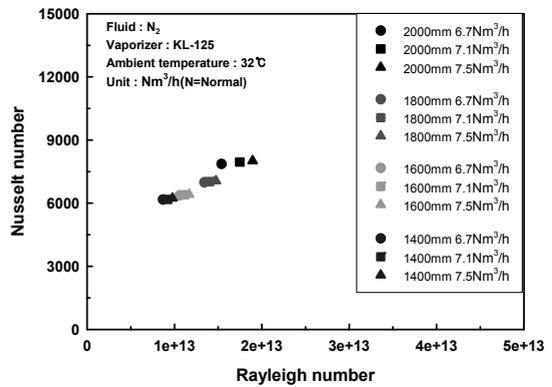


Fig. 4. Nusselt number as a function of Ra number for KL-125 evaporator.

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \tag{1}$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_\infty - T_s)L_c^3}{\nu^2} \tag{2}$$

여기서 h , L_c , k 는 각각 열전달 계수, 기화기의 특성 길이[6, 7] 및 기체의 열전도율을 나타내며 g , ρ , ν 는 각각 중력 가속도, 기체의 밀도 그리고 기체의 동점성 계수를 나타낸다. T_s 와 T_∞ 는 기화기의 표면 온도와 공기의 온도를 나타낸다. Fig. 4를 보면 Nu 수는 Ra 수가 증가함에 따라 증가한다. 또 유량이 증가함에 따라서 외측 열전달 계수가 증

기화기 때문에 Nu 수가 증가하며 기화기의 길이 2000 mm, 유량 7.5 m³/h 일 때 Nu 수는 8013으로 가장 높은 값을 가지게 것으로 나타났다. 기화기 길이 1400 mm에서는 특성길이의 영향으로 인해 Nu 수는 6164로 해석에서 고려한 기화기 중 가장 낮은 Nu 수 값을 가졌다.

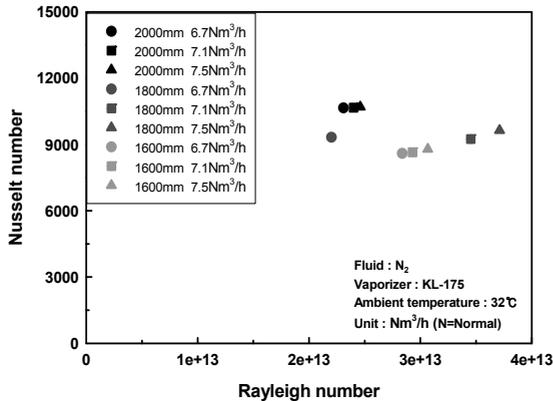


Fig. 5. Nusselt number as a function of Ra number for KL-175 evaporator.

Fig 5는 수치해석을 통해 얻은 KL-175 기화기의 외측 열전달계수를 이용하여 구한 Nu 수를 나타낸다. 유량이 증가할수록 외측 열전달계수가 증가하기 때문에 Nu 수도 증가하는 경향을 보이고 있다. 외측 열전달계수는 비슷하지만 특성 길이의 영향으로 기화기 길이가 길수록 Nu 수도 증가하였다.

수치해석을 통해 얻은 Nu 수와 Ra 수의 관계를 접합 곡선(Curve fitting)을 구해 수식으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$Nu = 0.190 Ra^{0.349} \quad (3)$$

이 관계식을 이용하여 본 해석 범위에서 벗어나는 Ra 수에 대해서도 외측 열전달 계수를 추정할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 통해 극저온 기체의 기화를 위한 대기식 기화기 외측의 온도 분포와 유동을 해석하였다. 또 해석 결과를 이용하여 Nu수의 거동에 대해 분석하였으며 그 결과 얻은 결론은 다음과 같다. 유량이 증가함에 따라 기화기 표

면 온도가 감소하기 때문에 공기와의 온도 차이가 커져서 외측 열전달계수가 증가하고 그에 따라 Nu 수도 증가한다. 또한 기화기의 길이가 길어짐에 따라 특성 길이가 증가하기 때문에 Nu 수는 증가한다. 수치해석 결과를 바탕으로 자연대류 상태의 대기식 기화기에 대해 외측 열전달 계수를 산정할 수 있는 상관식을 얻었다.

참고문헌

1. 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.
2. K. Sugano, Aug. LNG Vaporizers, Research and Development, Kobe Steel Engineering Reports, 56, No. 2 (2006).
3. 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, 9.2 (2005.5): 99-105.
4. Sang Chul Lee, Yong Hun Lee, Han Shik Chung, Hyo Min Jeong, Chan Kyu Lee, Byong Ho Lee. "Heat Transfer Characteristics According to Geometric Parameters of Cryogenic Vaporizer Using Air Heat Source." Journal of Mechanical Science and Technology spring annual, (2006.6): 2366-2371.
5. Won Gook Lee, Seok Ho Rhi, Kye Bock Lee. "Prediction of the frost Layer growth in LNG air vaporizer" International Journal of Research Institute of Industrial Science and Technology, 26.1 (2012): 67-71.
6. Pil-Hwan Kim, Chul-Pyo Kim, hyo-Min Jeong, Han-Shik Chung, Yong-Hun 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, 20.10 (2008.10): 679-688.
7. Yong Hun Lee, Myoung Kuk Ji, Gi Tae Park, Pil Hwan Kim, Hyo Min Jeong, Han Shik Chung. "Study on the Heat Transfer Numerical Analysis of Super Low Temperature Liquefied Gas Vaporizer." Journal of Mechanical Science and Technology spring annual, (2007.5): 1552-1557.

접수일: 2017년 3월 21일, 심사일: 2017년 3월 25일,
계재확정일: 2017년 3월 25일