

마이크로채널 내의 FC-72 흐름응축에 관한 수치적 연구

김성민[†]

Numerical Study on FC-72 Condensing Flow in a Micro-Channel

Sung-Min Kim

Abstract. This study concerns flow and heat transfer characteristics of FC-72 condensing flow in a micro-channel. A computational model of condensing flow with a hydraulic diameter of 1 mm is constructed using the FLUENT computational fluid dynamics code. The computed void fraction contour plots are presented for different mass velocities. The smooth-annular, wavy-annular, transition and slug flows are observed with the model, which are quite similar to those observed in a micro-channel experiment. The computed two-phase condensing heat transfer coefficient is compared with previous empirical correlation for two-phase condensation heat transfer in micro-channels.

Key Words : Two-Phase Flow(이상유동), Condensation(응축), Micro-Channel(마이크로채널)

1. 서론

고성능 컴퓨터, 핵융합로, 전기/하이브리드 차량, 로켓 노즐, 항공기 전자기기, 우주 시스템, 고출력 레이저 무기 및 마이크로웨이브 방어체계 같은 현대 기술의 발전을 위해서는 제한된 표면에서 집적된 열부하를 제거하는 기술의 개발이 반드시 필요하다. 마이크로 채널을 이용한 이상 유동 비등열전달은 작동유체의 잠열을 이용하기 때문에, 제한된 표면에서 많은 양의 열에너지를 제거하기에 매우 적합한 방식이다. 그리고 비교적 소형의 냉각수 저장공간이 필요하기 때문에 전체 냉각 시스템의 소형화가 가능하고, 마이크로 채널은 제작이 상대적으로 용이하기 때문에, 다양한 첨단 기계의 냉각에 마이크로채널을 이용한 냉각 시스템이 사용되고 있다¹⁾.

앞서 언급한 첨단 기술의 발전을 위해서는 소형 냉동 사이클이 필요하고, 이때 소형 증발기의 성능에 상응하는 수준의 고성능 소형 응축기를 필요로 한다. 마이크로채널을 이용한 응축 열전달 시스템은 고열유속 냉각을 위한 적합한 방식이다. 마이크로채널에서 응축 열전달은 채널의 직경이 작아질수록 증가하지만, 채널내의 압력강하가 급

격하게 증가할 수 있기 때문에 주의가 필요하다²⁾. 채널에서의 큰 압력강하는 작동유체의 초킹, 압축성 및 플래싱을 일으킬 수 있으며, 시스템의 불안정성이 증가하면 조기 임계 열유속(Premature CHF) 같은 현상이 발생할 수도 있다³⁾. 또한 고열유속으로 인해 작동유체의 드라이어아웃에 의한 채널의 멜트다운이 발생할 수도 있다⁴⁾. 따라서 고성능 마이크로채널 응축기의 설계를 위해 채널내 압력강하와 응축 열전달을 정확하게 예측할 수 있는 예측도구가 필요하며, 최근의 연구는 미니채널 및 마이크로채널에 적용 가능한 일반화된 상관식을 개발하는데 초점을 두었다^{3,4)}.

마이크로채널 응축기의 설계를 위해 정확한 예측도구의 개발도 필요하지만, 액막과 증기코어 경계면의 파동현상, 복잡한 난류 구조 및 흐름응축시 다양한 유동 패턴을 이해하는 것도 중요하다. 본 연구에서는 상용 CFD 프로그램인 ANSYS FLUENT⁵⁾를 이용하여 마이크로채널 내의 흐름 응축시 유동패턴과 열전달 특성을 수치해석적으로 연구하였다.

[†] School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 300 Cheoncheon-dong, Suwon, Korea, E-mail: smkim@skku.edu, Tel: 031-290-7433

2. 수치해석

2.1 지배방정식

응축에 의한 질량전달은 질량소스항인 S_f 와 S_g 를 이용하여 설명할 수 있다. 액체상과 기체상의 질량전달을 포함한 연속방정식은 다음과 같으며⁽⁶⁾, 상용코드인 FLUENT의 Volume-of-Fluid (VOF) 방법⁽⁶⁾을 이용하여 계산하였다.

$$\text{액체상: } \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f) = S_f, \quad (1)$$

$$\text{기체상: } \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{u}_g) = S_g. \quad (2)$$

두상이 조합된 운동량과 에너지 방정식은 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$\begin{aligned} \text{운동량: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \\ -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{에너지: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{u}(\rho E + P)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + Q. \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 E [J/kg]는 단위 질량당 에너지를 나타내며 다음 식을 이용하여 얻을 수 있다⁽⁵⁾.

$$E = \frac{\alpha_f \rho_f E_f + \alpha_g \rho_g E_g}{\alpha_f \rho_f + \alpha_g \rho_g}, \quad (5)$$

$$\rho = \alpha_f \rho_f + \alpha_g \rho_g, \quad (6)$$

$$\mu = \alpha_f \mu_f + \alpha_g \mu_g, \quad (7)$$

$$k = \alpha_f k_f + \alpha_g k_g. \quad (8)$$

에너지전달은 질량소스항인 S_f 를 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$Q = h_{fg} S_f. \quad (9)$$

2. 2수치해석방법

응축에 의한 상변화 과정을 모사하기 위해 Lee⁽⁷⁾가 제안

한 상변화 모델을 사용하였다. Lee의 모델은 일정압력과 준열평형상태에서의 질량 전달을 가정하였으며 다음과 같다.

$$S_f = -r_i \alpha_g \rho_g \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}}, \quad (10)$$

$$S_g = r_i \alpha_g \rho_g \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}}. \quad (11)$$

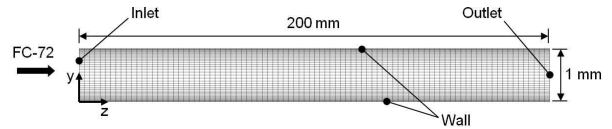


Fig. 1. Grid system

여기서 r_i 는 mass transfer intensity factor⁽⁸⁾라고 알려진 경험상수이며 s^{-1} 의 단위를 갖는다. 계산과정동안 액막의 두께, 온도분포 및 열전달 계수값을 모니터 하였으며, 본 연구의 모든 해석모델에서 $r_i = 30000 s^{-1}$ 값을 사용하였다.

Fig 1은 해석에 사용된 이차원 격자 시스템을 나타낸다. 길이 200 mm이고 수력직경 1 mm인 마이크로 채널이 해석에 사용되었다. 격자 시스템은 모두 82,205개의 노드, 80,160개의 셀로 이루어져 있으며, 벽면에서는 격자셀의 간격이 작으며 증기코어에서는 성긴, 비균일 사면형 격자가 사용되었다. 채널입구에는 과열기체상태의 FC-72가 유입되며, 채널 벽에서의 냉각에 의해 기체상 FC-72의 응축이 일어난다. 채널 벽에서 거칠기 높이, 거칠기 상수 및 접촉각은 0 m, 0.5 및 90°가 각각 사용되었다. 마이크로채널 내 FC-72흐름응축 실험^(9,10)과 비슷한 조건을 만들기위해 열유속값은 $G = 61 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 인 경우 $q'' = 3 \text{ W/cm}^2$, $G = 369 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 인 경우 $q'' = 4.7 \text{ W/cm}^2$ 의 값을 사용하였다.

채널 입구근처에서 연속적인 액막을 생기게 하고 수렴 시간을 줄이기 위해, Lee 등⁽¹¹⁾의 방식을 따라서, 매우 얇고 균일한 두께를 갖는 50 μm 의 액막을 $z = 10 \text{ mm}$ 부터 50 mm까지의 구간에 초기값으로 사용하였다.

FLUENT 프로그램의 pressure-based solver가 사용되었으며, 이상유동 모델로는 explicit VOF 모델이, volume fraction cutoff와 Courant 수는 각각 1×10^{-6} 와 0.25가 사용되었다. Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ 난류모델이 사용되었고⁽¹²⁾, 표면장력 계산을 위해 Continuum Surface Force (CSF) 모델이 사용되었다⁽¹³⁾. 속도와 압력의 coupling을 위해 Pressure Implicit with Splitting of Operators (PISO) 기

법⁽⁴⁾이 사용되었고, 기울기, 압력, 운동량, volume fraction 및 에너지의 이산화를 위해 각각 Least Squares Cell Based, PRESTO, QUICK, Geo-Reconstruct 및 Second order upwind 기법이 사용되었다.

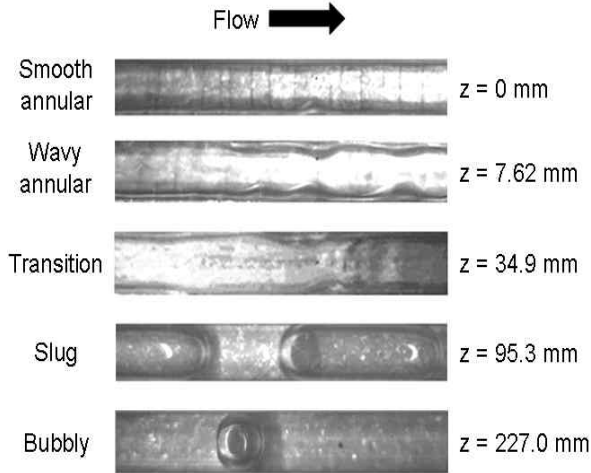


Fig. 2. Representative flow regimes for FC-72 in multi-channel heat sink containing rectangular channels for condensing flow with $D_h = 1.0$ mm and $G = 68$ kg/m²s (adapted from Kim and Mudawar⁽⁹⁾)

3. 결과 및 고찰

Fig 2는 마이크로채널 히트싱크 내의 FC-72 흐름응축 시 채널 입구에서 출구까지 나타난 대표적인 유동패턴을 나타낸다. 채널 입구에서는 매우 얇은 액막이 채널 벽을 따라서 발생하며, smooth-annular 유동이 된다. 더 많은 기체가 응축이 되면서 액막이 두꺼워 지고, 액막과 증기코어 경계면의 강한파동 때문에 wavy-annular 유동 패턴이 생긴다. 하류로 갈수록 액막은 더욱 두꺼워지고 transition 유동이 생긴다. 결과적으로 하류에서 slug 유동이 발생되고, 원통형 기포의 길이가 점차로 줄어들며, 채널 직경에 가까운 구형의 기포로 크기가 줄어든다. 채널의 길이가 충분히 긴 경우, 결과적으로 모든 기포는 응축되며 순수액체유동으로 바뀐다.

Fig 3은 FLUENT 프로그램을 사용해서 얻은 수력직경 1 mm 마이크로채널 내의 void fraction 계산결과를 나타낸다. 여기서 빨간색은 기체상을 파란색은 액체상을 나타낸다. Fig 3(a)에서 보여지듯이 채널 입구에서의 매우 얇은 smooth-annular 유동은 FC-72가 응축이 되면서 액막의 두께가 두꺼워지고 wavy-annular 유동으로 바뀌며 하류에서는 transition 유동이 발생된다. 더 많은 기체상의 FC-72가 액막으로 응축되면서 하류에는 결과적으로 slug 유동이

발생된다. Fig 3(a)의 수치해석 결과를 얻기 위해 사용된 경계조건은 Fig 2의 마이크로채널 실험의 경계조건과 유사하며, 마이크로채널 흐름응축 실험에서 관찰된 대표적인 유동패턴과 유사함을 알 수 있다. 속도가 빠른 경우의 void fraction contour는 Fig 3(b)에 나타나있다. 채널입구에서의 매우 얇은 smooth-annular 유동은 하류로 갈수록 기체가 응축하면서 wavy-annular 유동으로 바뀐다. 상대적으로 기체상 FC-72의 빠른 속도 때문에 액막과 증기코어 경계면에서 droplet entrainment가 발생하며, 하류로 갈수록 entrained droplets의 갯수가 많아진다.

Fig 4는 두 가지 질량속도에서 각각 계산된 응축 열전달 계수의 채널길이방향 변화를 나타낸다. 채널입구에서는 매우 얇은 액막에 의한 annular 유동이 발생하고, 이 지역에서 액막은 매우 작은 전도 저항을 갖게 되며, 결과적으로 매우 큰 열전달 계수 값을 갖는다. 채널하류로 갈수록 응축현상 때문에 액막은 점점 두꺼워지며, 하류에서 transition 및 slug 유동이 발생되고, 열전달 계수는 점차 줄어들게 된다. 질량속도가 큰 경우에는 채널 입구 근처에서 매우 얇은 액막두께를 갖는 annular 유동 뿐만 아니라 출구까지 annular 유동이 지속됨에 따라, 질량속도가 작은 경우보다 큰 열전달 계수 값을 보인다.

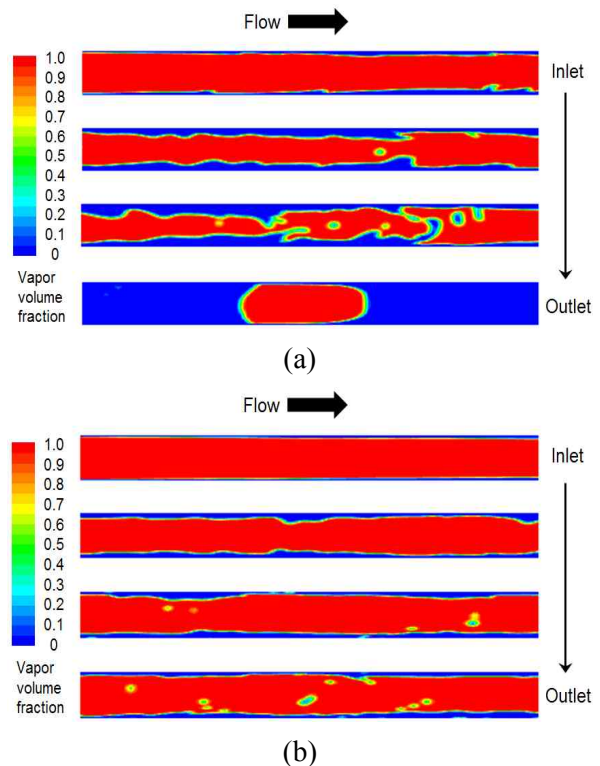


Fig. 3. Computed void fraction contour plots for FC-72 condensing flow with $D_h = 1.0$ mm for (a) $G = 68$ kg/m²s and (b) $G = 100$ kg/m²s

61 kg/m²s and $q'' = 3 \text{ W/cm}^2$, and (b) $G = 369 \text{ kg/m}^2\text{s}$ and $q'' = 4.7 \text{ W/cm}^2$

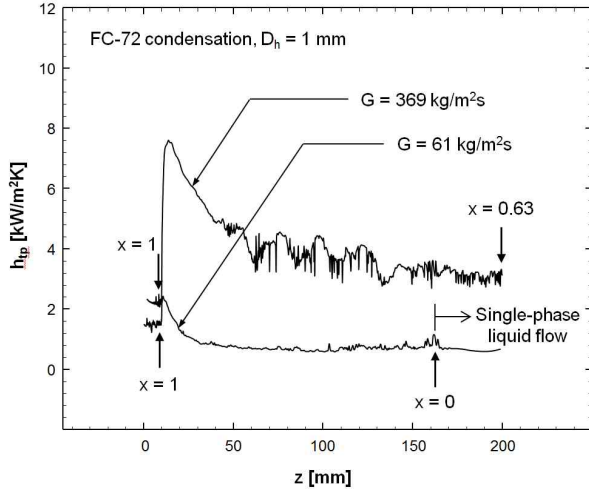


Fig. 4. Computed two-phase heat transfer coefficient for different mass velocities

Table 1. Universal condensation heat transfer correlation for mini/micro-channels in both single and multi-channel configurations⁽⁴⁾

<p>For annular flow (smooth-annular, wavy-annular, transition) where $We^* > 7 X_u^{0.2}$:</p> $\frac{h_{tp} D_h}{k_f} = 0.048 Re_f^{0.69} Pr_f^{0.34} \frac{\phi_g}{X_u}$ <p>For slug and bubbly flows where $We^* < 7 X_u^{0.2}$:</p> $\frac{h_{tp} D_h}{k_f} = \left[\left(0.048 Re_f^{0.69} Pr_f^{0.34} \frac{\phi_g}{X_u} \right)^2 + \left(3.2 \times 10^{-7} Re_f^{-0.38} Su_{go}^{1.39} \right)^2 \right]^{0.5}$

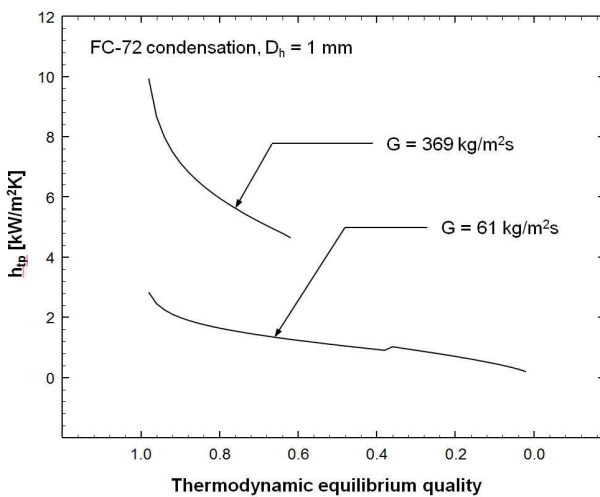


Fig. 5. Predictions of universal condensation heat

transfer correlation for mini/micro-channels⁽⁴⁾

현재 수치해석모델에 의한 계산결과의 신뢰성을 조사하기 위해 미니채널 및 마이크로채널에 적용 가능한 일반화된 응축 열전달 계수 상관식(2)을 이용해서 얻은 응축 열전달 계수 결과와 비교하였다. Table 1에는 일반화된 응축 열전달 계수 상관식이 정리되어 있다. Fig 5는 질량속도가 증가하면 응축 열전달 계수가 증가하는 것을 보여주며, 두가지 질량속도의 경우 모두 수치해석 모델에 의해 얻어진 열전달 계수값과 비슷한 경향을 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로채널 내의 흐름응축시 나타나는 유동 및 열전달 특성을 CFD프로그램인 ANSYS FLUENT를 이용하여 수치해석적으로 연구하였다. 마이크로채널 흐름응축 실험에서 관찰되는 유동패턴인 smooth-annular, wavy-annular, transition 및 slug유동을 수치해석 결과에서도 확인할 수 있었다. 또한 수치해석 모델에 의해 얻어진 응축 열전달 계수 값은, 마이크로채널에 적용 가능한 일반화된 응축 열전달 계수 상관식을 이용해서 얻은 값과 비슷한 경향을 보였다.

Reference

- 1) Kim, S.M., Mudawar, I., 2014, "Review of databases and predictive methods for heat transfer in condensing and boiling mini/micro-channels flows," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.77, pp.627-652.
- 2) Kim, S.M., Mudawar, I., 2014, "Review of databases and predictive methods for pressure drop in adiabatic, condensing and boiling mini/micro-channels flows," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.77, pp.74-97.
- 3) Kim, S.M., Mudawar, I., 2012, "Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for adiabatic and condensing mini/micro-channel flow," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.55, pp.3246-3261.
- 4) Kim, S.M., Mudawar, I., 2013, "Universal approach to predicting heat transfer coefficient for condensing mini/micro-channel flow," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.56, pp.238-250.
- 5) ANSYS FLUENT 12.1 in Workbench User's Guide.

- ANSYS Inc., 2009, Canonsburg, PA.
- 6) Hirt, C.W., Nichols, B.D., 1981, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary," *J. Computational Physics*, Vol.39, pp.201-225.
 - 7) Lee, W.H., 1980, A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling, in: T.N. Veziroglu, ed., *Multiphase transport fundamentals, reactor safety, applications*, vol. 1, Hemisphere Publishing, Washington, DC.
 - 8) Sun, D.-L., Xu, J.-L., Wang, L., 2012, "Development of a vapor-liquid phase change model for volume-of-fluid method in FLUENT," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol.39, pp.1101-1106.
 - 9) Kim, S.M., Mudawar, I., 2012, "Flow condensation in parallel micro-channels - Part 1: Experimental results and assessment of pressure drop correlations," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.55, pp.971-983.
 - 10) Kim, S.M., Mudawar, I., 2012, "Flow condensation in parallel micro-channels - Part 2: Heat transfer results and correlation technique," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.55, pp.984-994.
 - 11) Lee, H., Kharangate, C.R., Mascarenhas, N., Park, I., Mudawar, I., 2015, "Experimental and computational investigation of vertical downflow condensation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.85, pp.865-879.
 - 12) Menter, F.R., 1994, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA J.*, Vol.32, pp.1598-1605.
 - 13) Brackbill, J.U., Kothe, D.B., Zemach, C., 1992, "A continuum method for modeling surface tension," *J. Computational Physics*, Vol.100, pp.335-354.
 - 14) Issa, R.I., 1985, "Solution of the implicitly discretized fluid flow equations by operatorsplitting," *J. Computational Physics*, Vol.62, pp.40-65.