

공조 시스템 내의 분배기 출구관의 삽입깊이에 따른 유량분포연구

A Numerical Study on Refrigerant Distribution according to the Insertion Depth of the Distributor-Outlet Pipes in an Air-Conditioning System

이희원(Hee Won Lee), 박일석(Il Seouk Park)[†]

경북대학교 기계공학부

School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

(Received June 15, 2015; revision received August 7, 2015; Accepted: August 10, 2015)

Abstract Generally, the phase of the refrigerants that circulate in air-conditioning systems is repeatedly changed from liquid to gas and from gas to liquid. In vapor-compression refrigeration, the refrigerant at the inlet of the evaporator is in a gas - liquid two-phase state; therefore, to enhance the heat-transfer performance of the evaporator, the even distribution of the refrigerant across multiple passages of the evaporator is essential. Unlike the distribution of a single-phase refrigerant, multi-phase distribution requires further considerations. It is known that the multi-phase distribution at the outlet of the distributor is affected by factors such as the operating condition, the distributor's shape, and the insertion depth of the outlet pipes; here, the insertion depth of the outlet pipes is especially significant. In this study, for a cylindrical distributor with a 90-degree bend entrance and three outlet pipes, the flow uniformity at the outlet pipes was numerically tested in relation to variations of the insertion depth of the outlet pipes.

Key words Multiphase flow(다상유동), Annular flow(환상류), Flow uniformity(유량균일도), Distributor(분배기), Insertion depth(삽입깊이)

[†] Corresponding author, E-mail: einstein@knu.ac.kr

기호설명

A : 면적 [m^2]
 G : 질량유량 [$kg/m^2 \cdot s$]
 n : 상의 수
 P : 압력 [N/m^2]
 t : 시간 [s]
 u : 속도 [m/s]
 x : 건도 [-]

그리스문자

α : 기공율(체적분율) [-]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 μ : 점성계수 [$kg/m \cdot s$]
 κ : 경계면의 곡률(curvature) [m]

하첨자

v : 기상(vapor)
 l : 액상(liquid)

tot : 전체

1. 서론

공조 시스템 내부의 열교환기는 효율 향상을 위해 다중 유로 구조를 사용하며, 열교환기 앞단에는 다중 유로에 냉매를 균등하게 배분하기 위해 분배기를 적용하고 있다. 공조 시스템의 구조상 작동 유체로 사용되는 냉매는 증발과 응축의 상변화를 동반하며 시스템을 순환하고, 이로 인해 분배기 내부에는 기상과 액상이 공존하는 2상 유동이 나타난다. 분배기 출구에서의 균일한 유량분포는 열교환기의 효율 향상과 내부 배관의 드라이아웃(dry out) 현상을 방지하기 위해 필수적이다. 하지만 2상 유동은 분배기의 형상 및 공조 시스템의 작동조건에 매우 민감하여 분배기 출구에서 불균등한 유량분포가 빈번히 일어나는 편이며, 극한의 경우 냉매가 흐르지 않는 출구배관이 발생하기도 한다.^(1,2) 이에 분배기 내부의 2상 유동 현상을 규명하고 분배기 출구

에서의 유량 균일도를 향상시키기 위해 많은 연구가 이루어져 왔다.

Wen et al.⁽¹⁾은 분배기 입구에 연결되는 튜브의 내부 형상에 따른 분배기 출구에서의 유량분포 및 성적 계수(COP, coefficient of performance)를 실험적으로 연구하였으며, 이를 통해 내부에 마이크로스케일의 나선형 홈이 있는 튜브를 이용할 경우 유량균일도 및 성적 계수가 향상되는 것을 확인하였다. Lee and Lee⁽²⁾와 Kim and Han⁽³⁾은 매니폴드(manifold) 내에 물과 공기의 환상류(annular flow)가 흐를 때, 작동 유체의 유량과 튜브의 삽입깊이가 유량분포에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였다. Aziz et al.⁽⁴⁾은 두 개의 출구배관을 가진 원통형 분배기의 설치 각도에 따른 유량분포를 실험적으로 연구하였다. 작동유체로는 물과 공기를 이용하였으며, 분배기의 설치 각이 지면으로부터 수직에 가까울수록 출구에서의 유량 균일도가 향상되는 것을 확인하였다.

분배기 내부 2상 유동에 관한 대부분의 이전 연구들은 실험적 접근 방법을 이용하였으나 최근 다상유동 해석기술의 발전과 고성능 해석 장비 구축으로 수치해석 연구가 활발히 진행되고 있다. Ghosh et al.⁽⁵⁾은 물과 윤활유가 흐르는 U-bend 형태의 튜브에서 fouling 현상에 관하여 수치해석을 수행하였다. Kaushik et al.⁽⁶⁾은 수평 배관의 갑작스런 수축과 팽창이 2상 유동에 미치는 영향에 대해 VOF(Volume of Fluid) 기법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. Li et al.⁽⁷⁾은 여러 가지 분배기의 형상에 관해 VOF 기법을 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 시험자료와 비교하였다.

분배기의 형상 요소가 유동에 미치는 영향에 관해서는 실험적으로 많은 연구가 이루어졌지만 수치해석을 통한 연구는 아직 미비한 상태이다. 이에 본 연구에서는 입구에 90도 휘어진 관이 연결되어 있고 출구 배관이 3개인 분배기에 관하여 출구배관의 삽입깊이를 변화시켜가며 수치해석을 수행하였으며, 이에 따른 분배기 출구에서의 유량분포와 분배기 내부의 압력분포를 확인하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 분배기의 형상 및 작동조건

수치해석에 사용된 분배기의 형상은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1은 입구 측에 90도 휘어진 관이 연결되어 있고 출구배관이 3개인 원통형 분배기를 모델링한 그림으로써, 분배기의 입구배관, 몸통 그리고 출구배관의 지름은 각각 6.5 mm, 22 mm, 5 mm이다. 작동유체는 R22 냉매를 사용하였으며, 분배기의 작동조건은 Table 1과 같다.

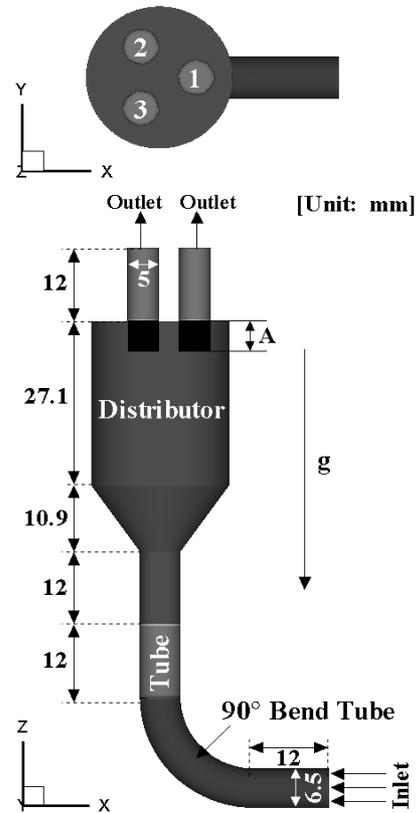


Fig. 1 Numerical modeling of the distributor connected 90° tube.

Table 1 Simulation conditions of the distributor

Working fluid		R22
Density [kg/m ³]	liquid	1243
	vapor	29.69
Surface tension [kg/m-s]		0.0181
Pressure [kPa]		701.7
Quality		0.2
Void fraction		0.9 ⁽⁸⁾

일반적으로 건도(quality)가 0.1 이상인 경우, 2상 유동은 환상류 패턴을 나타내는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾ Fig. 2는 Hewitt and Roberts가 제시한 2상 유동 흐름 패턴(flow pattern)을 나타내고 있다. 여기서 j_l 와 j_v 는 각각 액상과 기상의 공탑 속도(superficial velocity)이며, 각 축은 튜브의 단위 단면적당 단위 시간에 통과하는 액상(X축)과 기상(Y축)의 유량을 나타낸다. 본 연구의 분배기 작동조건은 환상류 영역에 속하는 것을 확인할 수 있다. 이에 본 연구에서는 분배기 입구에서부터 환상류 구조를 구현하기 위해 Fig. 3와 같이 관의 중심에

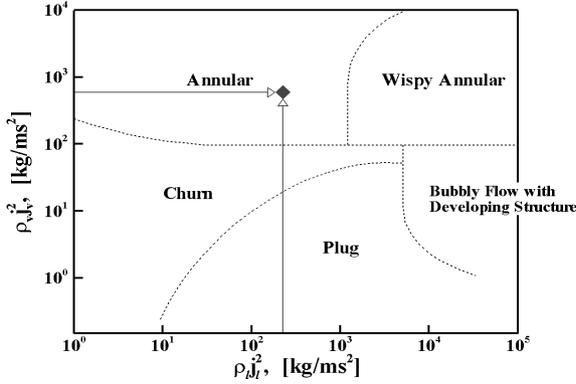


Fig. 2 Two-phase flow pattern map(Hewitt and Roberts, 1969).

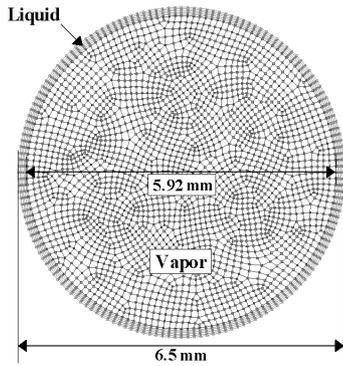


Fig. 3 Schematic of the inlet geometry.

는 기상(vapor)이, 벽면에는 액상(liquid)이 유입되도록 모델링하였으며, 이때, 기공율(α)은 식(1)에 나타난 Cioncolini et al.⁽⁸⁾의 경험식을 이용하여 계산되었다.

$$\alpha = \frac{hx^n}{1 + (h-1)x^n}; \quad (1)$$

$$h = -2.129 + 3.129(\rho_v \rho_l^{-1})^{-0.2186}$$

$$n = 0.3487 + 0.6513(\rho_v \rho_l^{-1})^{0.5150}$$

여기서, α 는 기공율, x 는 건도 그리고 ρ_v 와 ρ_l 는 각각 기상과 액상의 밀도를 나타내며, 본 연구에서는 식(2)와 같이 분배기 입구에서의 기상 면적 비율이 기공율과 같도록 하였다.

$$\frac{A_v}{A_{tot}} = \alpha \quad (2)$$

여기서, A_{tot} 는 배관의 총 단면적, A_v 는 기상의 단면적을 나타낸다.

2.2 지배방정식

본 연구에서는 분배기 내부 2상 유동의 기-액 경계면을 추적하기 위해 Eulerian-Eulerian 접근법에 기반을 둔 VOF(Volume of Fluid) 기법을 사용하였다. 환상류의 경우, 기상과 액상 간의 경계가 뚜렷하기 때문에 VOF 기법이 효과적인 것으로 기대되며, 본 연구에서는 자유 표면의 체적분을 변화를 추적하기 위해 다음의 체적분 보존식을 적용하였다.

$$\frac{\partial(\alpha \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \rho_l \vec{u}_l) = 0 \quad (3)$$

여기서, α_l 과 \vec{u}_l 는 각각 액상 체적분율과 속도 벡터를 나타내며, 비정상항을 포함한 식(3)는 암시적(implicit) 방법으로 해석하였다. 해석 셀 내부 모든 상의 체적분율은 다음의 식(4)을 만족하며,

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4)$$

여기서, n 은 상의 수, α_q 는 유동장 내 각 상의 체적분율을 나타낸다.

해석영역 내 유동장은 식(5)와 같이 단일 운동방정식을 계산함으로써 구해졌으며, 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5)$$

여기서, P 는 압력, μ 는 점성계수 그리고 \vec{g} 는 중력가속도를 나타내며, \vec{F} 는 기상과 액상의 경계면의 표면장력으로써 식(6)와 같이 계산되었다.

$$\vec{F} = \sigma_{vl} \frac{\rho \kappa_v \nabla \alpha_v}{(1/2)(\rho_v + \rho_l)} \quad (6)$$

식(5)와 식(6)에서 사용된 체적 평균 밀도와 점성은 아래와 같이 기공율을 이용하여 계산되었다.

$$\rho = \rho_v \alpha + \rho_l (1 - \alpha) \quad (7)$$

$$\mu = \mu_v \alpha + \mu_l (1 - \alpha) \quad (8)$$

수치해석을 위하여 상용 CFD 소프트웨어인 Fluent 6.3.26을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 격자 의존도 확인

본 해석에 들어가기에 앞서 격자 의존도를 확인하기 위해 90도 휘어진 관이 연결되어 있지 않은 분배기에 대해 수치해석을 수행하였다(Fig. 1 참조). 격자수는 약 290,000~579,000까지 변경시켜가며 수치해석을 수행하였으며, 해석시간 간격(time step size)은 0.0001초를 사용하였다.

Fig. 4은 각 출구에서의 배출 유량 비율을 나타낸 그래프로써, 1초에서 4초까지 총 3초간 각 출구들로 배출된 유량의 평균값을 계산한 뒤, 전체 유량으로 정규화하였다. 그 결과, 분배기 내부의 격자수가 약 441,000 개 이상인 경우 더 이상의 격자의존도를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서는 90도 곡관이 연결되어 있는 분배기에 대해 총 970,000개의 격자를 이용하여 이후의 해석을 수행하였다.

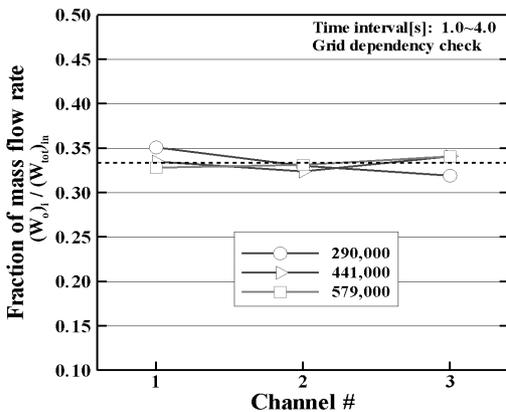


Fig. 4 Grid dependency check.

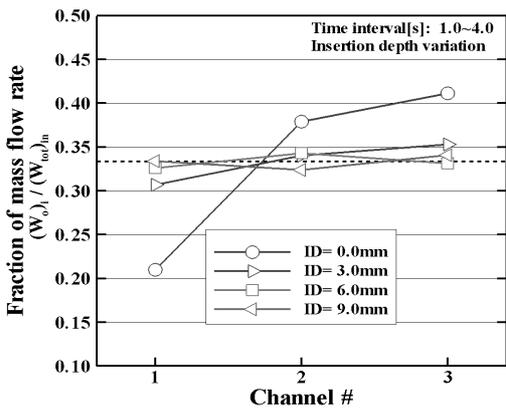


Fig. 5 Fraction of the mass flow rate according to the insertion depth.

3.2 수치해석

본 연구에서는 분배기 출구 배관의 삽입깊이를 0~9 mm까지 변경하며 수치해석을 수행하였다(Fig. 1 'A' 참조). Fig. 5는 출구 배관의 삽입깊이에 따른 각 출구에서의 배출 유량 비율을 나타낸 그래프이다. 출구 배관의 삽입이 없는 경우, 90도 배관을 지나면서 받은 원심력의 영향으로 외벽으로 치우친 대다수의 액상이 2번과 3번 출구로 배출되면서 1번 출구에 비해 배출 유량 비율이 높은 것을 확인할 수 있다. 하지만 출구 배관이 삽입될 경우 상대적으로 균일한 유량분포가 나타나는 것이 확인되었으며, 이는 원심력에 의해 2번과 3번 출구 측으로 치우쳐 분배기 외벽을 흐르던 액상이 출구로 바로 흘러나가지 못하고 삽입된 출구 배관과 충돌하면서 원심력 방향 운동량이 상실되기 때문이며, 6 mm 이상의 삽입깊이에서는 거의 균일한 유량분포가 나타나는 것이 확인되었다.

Fig. 6은 분배기 내부의 기공률 0.5인 기-액 경계면의 분포를 나타낸 그림으로써, 분배기 입구에서 환상류 형태로 유입된 기상과 액상의 냉매가 곡관을 지나면서 원심력에 의해 바깥쪽 벽면으로 밀도가 큰 액상이 치우치는 현상을 보이고 있다. 삽입깊이가 0 mm인 경우, 벽면을 타고 흐르던 액상이 출구로 바로 배출되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 출구배관을 분배기 내부로 삽입할 경우, 액상 냉매가 바로 배출되지 못하고 분배기 내부에 축적되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 Fig. 7을 통해 자세히 확인할 수 있다. Fig. 7은 주유동 방향 여러 위치에서 분배기 내부 단면의 액상분포를 나타내는 그림으로써, 삽입깊이가 깊어질수록 분배기 내부의 액상분포가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

공조시스템이 작동하는 동안 분배기 내부는 냉매에 의해 지속적으로 압력이 가해지는데, 큰 내부압력 혹은 내부압력의 불균일 분포는 분배기의 국소 피로 파손을

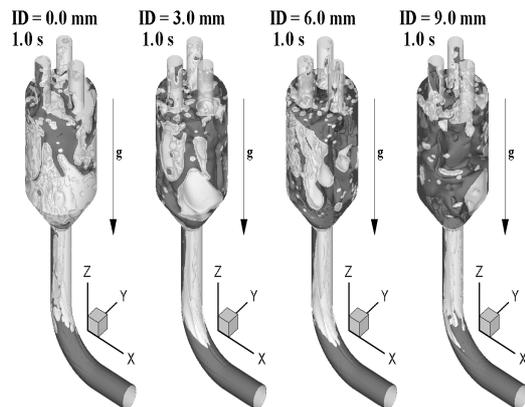


Fig. 6 Void fraction of the air according to the insertion depth.

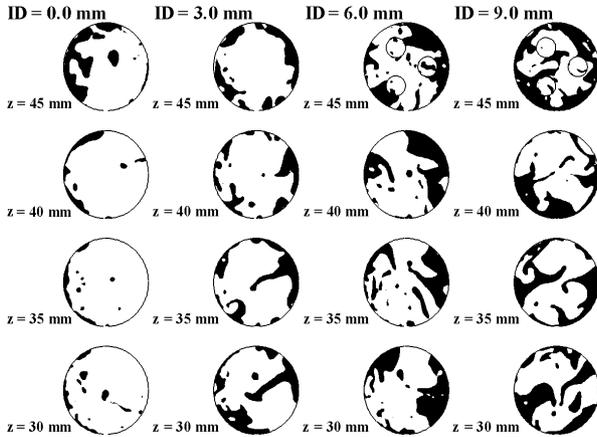


Fig. 7 Void fraction of the cross section.

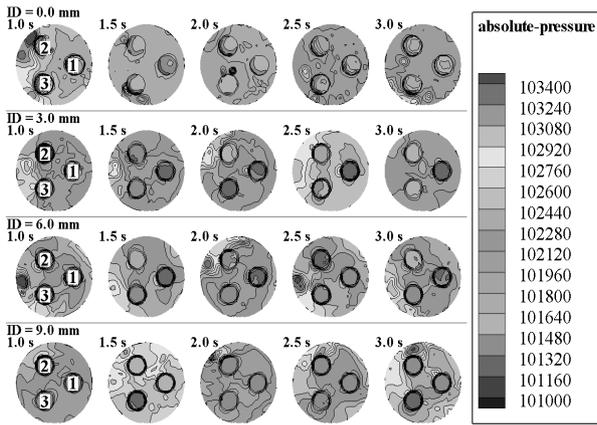


Fig. 8 Pressure contour of the cross section ($z = 50$ mm).

일으킬 가능성이 있기 때문에 안전설계 측면에서 분배기 상단면에서 압력의 크기와 분포를 확인하는 것이 요구된다. Fig. 8은 시간에 따른 원통형 분배기의 상단 ($z = 50$ mm)에 가해지는 절대압력분포를 나타낸 그림이다. 삽입깊이가 0 mm인 경우, 곡관의 영향으로 한쪽 벽면으로 치우쳐 유입된 액상 냉매가 2번과 3번 출구 측 벽면에 높은 압력을 형성되는 것을 확인할 수 있으나, 액상 냉매가 배출되기 시작하면서 상단에 가해지는 압력이 전체적으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 삽입깊이가 깊어질수록 분배기 상단에 가해지는 전체적인 압력이 커지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 분배기 내부로 유입된 냉매가 출구 배관의 삽입으로 바로 배출되지 못하고 분배기 내부에 축적된 후 배출되기 때문이다. Fig. 9는 출구 유량분포의 표준편차와 분배기 상단에 가해지는 절대압력의 평균값을 나타내는 그래프이다. 유량분포의 표준편차와 분배기 상단면의 압력 평균값은 각각 다음의 식(9)~식(10)을 이용하여

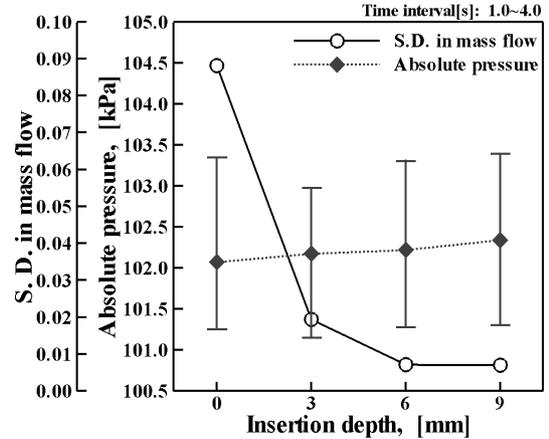


Fig. 9 Standard deviation and absolute pressure according to the insertion depth.

계산되었다.

$$S.D. = \left(\left(\sum_{i=1}^n (W_{o,i} - W_{uniform})^2 \right) / n \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n P_i |A_i| \quad (10)$$

분배기 내부의 평균 압력의 크기와 함께 분배기 내부에 작용하는 공간적 압력 편차를 비교하기 위해 분배기 내부의 최대, 최소 압력을 Fig. 9의 그래프에 같이 나타내었다. 앞서 언급되었듯이 유량균일도는 6 mm 이상의 삽입깊이에서 거의 균일한 유량분포가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 분배기 상단면에 가해지는 절대압력의 경우, 삽입깊이가 깊어질수록 평균절대압력이 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 삽입깊이가 0 mm인 경우 압력 평균치가 최소압력에 치우쳐 있는 것을 확인할 수 있고, 본 연구의 해석 케이스들 중 가장 큰 최대-최소 압력 차를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 증기압축식 공조시스템의 증발기 전단에 적용되는 냉매분배기 내부 기-액 2상 유동에 관하여 수치해석하였다. 전단에 90도 곡관이 연결된 원통형 분배기 내부에서 기-액 2상 냉매의 분배 유동에 대하여 VOF 기법을 이용하여 기-액 경계면 변화를 추적하고 다중유로 열교환기로의 분배 특성에 대해 연구하였다. 분배기 출구배관의 삽입깊이변화에 따른 분배기 출구에서의 유량분포와 분배기 상단면의 압력분포를 관찰하였다. 그 결과, 분배기 출구배관을 일정 수준 분배기

내부로 삽입하는 것이 유량균일도 향상과 압력분포 측면에서 유리함을 확인할 수 있으며, 본 연구에서는 출구 배관의 삽입깊이가 6 mm인 경우 유량균일도와 압력 분포 측면에서 가장 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 LG전자 RAC 연구소의 지원으로 수행되었으며 관련자들에게 감사사를 표합니다.

References

1. Wen, M. Y., Lee, C. H., and Tasi, J. C., 2008, Improving two-phase refrigerant distribution in the manifold of the refrigeration system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 2126-2135.
2. Lee, J. K. and Lee, S. Y., 2004, Distribution of two-phase annular flow at header-channel junctions, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 28, pp. 217-222.
3. Kim, N. H. and Han, S. P., 2008, Distribution of air-water annular flow in a header of a parallel flow heat exchanger, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 977-992.
4. Aziz, A., Miyada, A., and Sugino, F., 2012, Distribution of two-phase flow in a distributor, *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 7, pp. 41-55.
5. Ghosh, S., Das, G. and Das, P. K., 2011, Simulation of core annular in return bends-A comprehensive CFD study, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 89, pp. 2244-2253.
6. Kaushik, V. V. R., Ghosh, S., Das, G., and Das, P. K., 2012, CFD simulation of core annular flow through sudden contraction and expansion, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 86/87, pp. 153-164.
7. Li, G., Frankel, S., Braun, J. E., and Groll, E. A., 2012, Application of CFD models to two-phase flow in refrigerant distributors, *HVAC&R Research*, Vol. 11, pp. 45-62.
8. Cioncolini, A. and Thome, J. R., 2012, Void fraction prediction in annular two-phase flow, *Int. Journal of Multiphase Flow*, Vol. 43, pp. 72-84.
9. Parvareh, A., Rahimi, M., Alizadehdakhel, A., and Alsairafi, A. A., 2010, CFD and ERT investigations on two-phase flow regimes in vertical and horizontal tubes, *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 304-311.
10. Sandra, C. K. De S., Geraldine J. H., and Guy, B. M., 2008, CFD modeling of all gas-liquid and vapor-liquid flow regimes predicted by the Baker chart, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 138, pp. 349-357.
11. *Fluent 6.2 User's Guide*. Fluent Inc., Lebanon, USA, 2006.