Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 15, No. 11 pp. 6452-6457, 2014

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.11.6452
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

냉매 R1234yf의 모세관내 유동 특성에 관한 해석적 연구

김대영[1], 박차식[1*]
[1]호서대학교 기계공학과 대학원, [1]호서대학교 기계공학부

Simulation of the flow characteristics of R1234yf flowing through capillary tubes

Daeyeong Kim[1], Chasik Park[1*]
[1]**Graduate School of Mechanical Engineering, Hoseo University**
[1]**School of Mechanical Engineering, Hoseo University**

요 약 최근에 지구온난화 문제로 인하여 R134a 냉매에 대한 규제가 강화되면서 대체냉매로서 R1234yf 냉매가 개발되었다. 냉동사이클에서 팽창장치인 모세관은 유량제어와 압력조절의 역할을 한다. 본 연구에서는 모세관에 흐르는 냉매유동의 지배방정식을 사용하여 R134a와 R1234yf 냉매에 대하여 해석적 연구를 수행하였다. 모세관 길이를 1-4 m로 변화시켰을 때 R1234yf 냉매의 질량유량은 47.0% 감소하였다. 모세관의 직경을 1.3-1.5 mm로 변화시켰을 때 R134a 냉매와 R1234yf 냉매의 질량유량은 각각 117.9%와 121.0% 증가하였다. 모세관 입구의 과냉도를 0-7℃ 변화시켰을 때 R134a 냉매와 R1234yf 냉매의 질량유량은 28.3%와 29.1% 증가하는 것으로 나타내었고, 모세관 입구에서 운전조건을 35-60℃로 변화시켰을 때 R134a 냉매는 31.0%, R1234yf 냉매는 45.4% 증가를 각각 나타내었다.

Abstract R1234yf has been developed as an alternative refrigerant to R134a, which has been associated with global warming. The capillary tubes as expansion valves control the mass flow rate and balance system pressure in the refrigeration cycle. The present numerical model used the governing equations including the law of conservation of mass, momentum, and energy in a capillary tube. The mass flow rate of R1234yf decreased by 47.0% as the capillary tube length was increased from 1 to 4 m. As the inner diameter of the capillary tubes was changed from 1.3 to 1.7 mm, the mass flow rate of R134a and R1234yf increased by 117.9% and 121.0%, respectively. The mass flow rate of the R134a and R1234yf increased by 28.3% and 29.1% with subcooling increasing from 0 to 7℃. In addition, when the inlet temperature of the capillary tubes was changed from 35 to 60℃, the mass flow rate of R134a and R1234yf increased by 31.0% and 45.4%, respectively.

Key Words : Alternative refrigerant, Capillary, Mass flow rate, R1234yf

1. 서 론

초기에 개발된 CFC계 냉매는 안정한 냉매 구비 조건을 갖추고 있어 냉동 공조기기에 널리 사용되었다. 하지만 CFC계 냉매가 오존층 붕괴의 원인으로 밝혀지면서 냉매의 생산 및 사용을 규제하기 위한 몬트리올 의정서가 체결되었다[1]. 이에 따라 오존층 파괴지수(ODP)가 0인 R134a와 같은 HFC계 냉매로 대체되어 현재까지 사용되어 왔다. 그러나 1977년 일본 교토에서 열린 기후변화협에서는 교토의정서를 채택하여 온실가스 배출 감축목표를 설정하였다[2]. 이에 의하면 1차 공약기간인 2008년부터 2012년까지 1990년 대비 5.2% 감축을 결정하여 우리나라도 이에 대한 준비가 절실히 필요한 상황에 직면하였다[3]. 이처럼 지구 온난화 문제로 인하여 R134a 냉

본 연구는 호서대학교 교내연구비지원사업의 연구비 지원(2013-0017)으로 수행되었습니다.
*Corresponding Author : Chasik Park(Hoseo Univ.)
Tel: +82-41-540-5815 email: cspark@hoseo.edu
Received : July 4, 2014 Revised (1st September 17, 2014, 2nd October 27, 2014) Accepted November 6, 2014

매에 대한 규제가 강화되고 있어 2007년부터 미국 Dupont와 Honeywell가 R134a를 대체 할 수 있는 R1234yf 냉매를 공동으로 개발하여 왔다. Minor and Spatz는 소형 자동차의 공조시스템을 이용하여 R1234yf 냉매는 R134a 냉매에 비해 냉동용량과 에너지 효율은 4-8% 정도 낮은 것으로 나타났지만, 시스템의 최적화를 통해 R1234yf의 성능을 높일 수 있다고 발표하였다[4]. Zilio et al.은 자동차 공조기 조건에서 R134a에 비해 R1234yf의 성능이 2-4% 정도 낮게 나타나는 것으로 발표하였다[5]. 냉매 R1234yf는 약가연성 물질로 독성 및 폭발성이 없고, 오존층 파괴지수는 0이며 지구 온난화 지수는 4인 친환경 냉매이다[6]. Pamela Reasor et al.[7]는 Tube-fin and micro-channel 열교환기를 적용하여 R134a와 열역학적 특성이 유사한 것을 연구하였으며, Cho et al.[8]은 EES V8.688을 이용하여 R134a와 R1234yf의 열역학적 특성을 비교한 바가 있다.

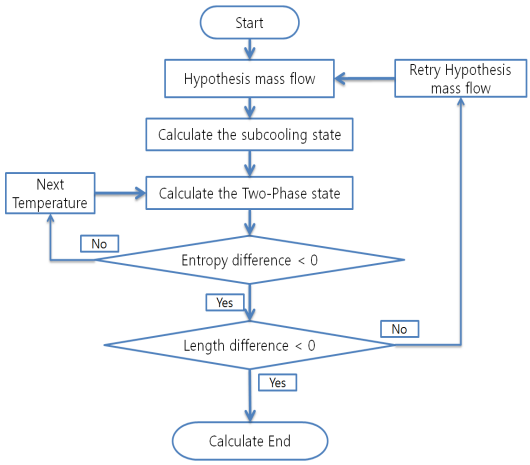
팽창장치 중 모세관은 가장 간단하고 저렴한 부품이다. 모세관은 팽창장치 중 시스템 용량 조절 폭이 다른 팽창 장치에 비하여 매우 적어서 모세관을 사용하는 시스템은 설계점 이외에서는 성능이 다소 떨어지는 단점이 있으므로, 시스템 설계에 있어 모세관 용량 선정은 매우 중요하다.

모세관의 유동특성에 관한 연구는 기존 냉매에 대해서는 이론적인 모델링과 실험에 의한 경험적 상관식 등으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 최근 지구온난화 문제로 규제를 받고 있는 R134a의 대체냉매로 개발된 R1234yf 냉매에 대한 모세관내 유동특성에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 해석적 연구를 통하여, 모세관의 길이 및 운전조건에 따라 R134a와 R1234yf 냉매의 모세관내 유량특성을 비교 분석 하였다.

2. 모세관 모델링 및 해석방법

본 연구에서는 냉매 R134a와 R1234yf의 모세관길이에 따른 냉매의 질량유량 특성을 분석하기 위하여 R134a의 선행 연구에서 수행한 시뮬레이션과 유사한 방법으로 모델링을 수행하였다[9]. R134a와 R1234yf 냉매에 대한 물성치는 EES Ver8.688을 사용하여 구하였다[10].



[Fig. 1] Flow chart of Simulation.

시뮬레이션 방법은 Fig. 1의 순서도에서 나타내었다. 임의의 질량유량을 가정하여 주어진 모세관 입구 상태의 온도, 압력을 고려하여 모세관내 지배방정식인 연속방정식, 에너지방정식 그리고 운동량방정식을 이용하여 모세관 출구방향으로의 미세온도차에 따른 하류지점의 냉매 물성치를 반복 계산하도록 하였다. 과냉도에 의한 액상영역의 모세관 미소 길이를 먼저 계산을 하고, 이상영역부터는 미세 온도를 순차적으로 떨어뜨려 입구와 출구 부분의 냉매의 물성치를 구하여, 압력강하에 의한 미소구간을 구하도록 하였다. 이상영역의 미소길이 구간은 엔트로피의 구배가 0이 되어 초킹조건이 발생할 때까지 계산을 수행하도록 하였다. 이때까지 계산된 액상영역과 이상영역의 미소길이 합이 모세관의 길이이며 설정한 모세관의 길이와 일치하면 시뮬레이션이 종료되도록 하였다. 시뮬레이션이 수렴하지 않을 경우에는 가정한 질량유량을 수정하여 처음부터 다시 계산을 시작하여 시뮬레이션이 수렴하도록 하였다.

점성계수와 마찰계수는 액상영역과 이상영역으로 나누어 기존 문헌의 유동모델을 사용하였다[9]. 이상영역의 점성모델은 식 (1)의 McAdam's et al. 모델을 적용하였고 마찰계수는 액상과 이상영역 모두 식 (2)의 Churchill 상관식을 적용하였다.

$$\frac{1}{\mu}=\frac{\chi}{\mu_g}+\frac{1-\chi}{\mu_f} \tag{1}$$

$$f = 8\left[\left(\frac{8}{Re}\right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}}\right]^{\frac{1}{12}} \quad (2)$$

여기서, $A = \left\{2.457\ln\left[\frac{1}{(7/Re)^{0.9} + 0.27\epsilon}\right]\right\}^{16}$

$$B = \left(\frac{37530}{Re}\right)^{16}$$

이고, μ는 점성계수를 나타내고 Re와 ∈는 레이놀즈수와 상대조도를 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과

Fig. 2는 본 논문 시뮬레이션 결과값의 신뢰도를 분석하기 위해 R134a의 모세관내 질량유량을 실험을 통해 측정한 기존의 Melo et al.[11]과 Dirik et al.[12]의 실험 데이터를 사용하여 본 논문의 시뮬레이션 결과와 비교 하였다. 기존의 실험 데이터와 본 시뮬레이션 결과 값의 평균 오차는 5.7% 이내로 나타났다. Melo et al.의 실험 데이터와 본 시뮬레이션 결과 값과 비교 하였을 경우 -3.7%에서 16.6%의 오차범위 를 나타내었으며, Dirik et al.의 실험 데이터는 -9.3%에서 -1.1% 오차범위를 나타내었다.

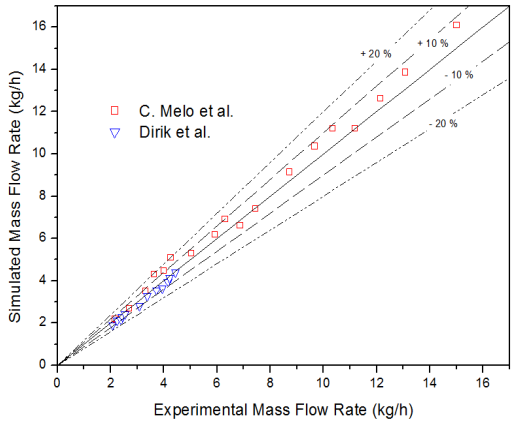
Fig. 3은 응축온도 45℃, 과냉도 3℃, 모세관 직경 1.5mm, 모세관 길이 3000mm 일 경우, R134a와 R1234yf 냉매의 모세관내 압력 강하를 비교한 것이다. R134a 냉매의 압력강하는 56.4%로 나타났고, R1234yf 냉매는 59.5%으로 R134a 냉매에 비하여 R1234yf 냉매가 더 많은 압력강하를 나타내었다.

$$Re = \frac{\dot{m} \times D}{\mu \times A} \quad (3)$$

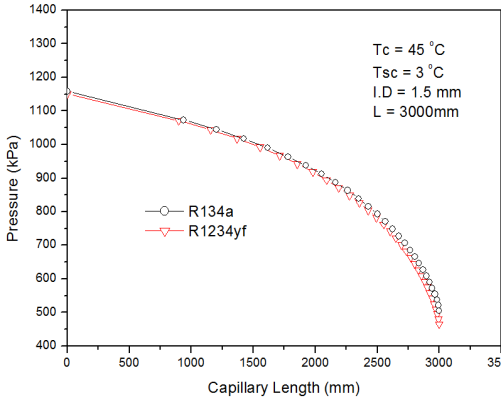
$$V = \frac{\dot{m}}{A \times \rho} \quad (4)$$

$$\triangle L = \frac{2 \times D \times A}{f \times V \times M}(P_i - P_o) - \frac{2 \times D}{f \times V}(V_o - V_i) \quad (5)$$

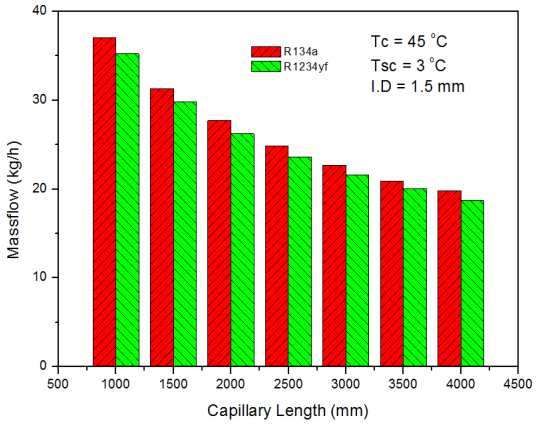
이는 동일한 모세관의 조건에서 R134a 냉매가 R1234yf 냉매보다 질량유량과 점성계수가 크게 나타나고, 식 (3)에서 R1234yf 냉매의 레이놀즈 수가 작아 식(2)의 마찰계수가 커지기 때문이다. 또한, 식 (4)의 냉매의 유속에서 R1234yf 냉매가 R134a 냉매보다 질량유량이 낮지만, R134a 냉매가 R1234yf 냉매보다 밀도가 커서 냉매유속은 R1234yf 냉매가 R134a 냉매보다 빠르게 된다. 즉, R1234yf 냉매가 R134a 냉매보다 레이놀즈 수와 냉매 유속이 크기 때문에 식 (5)에서의 증분길이가 작아져 임의로 설정한 모세관의 길이에 도달할 때 증발온도가 R1234yf가 R134a 보다 낮아지기 때문에 R1234yf 냉매가 R134a 냉매보다 더 많은 압력강하가 나타난다.



[Fig. 2] Comparison of experimental data and simulation results.

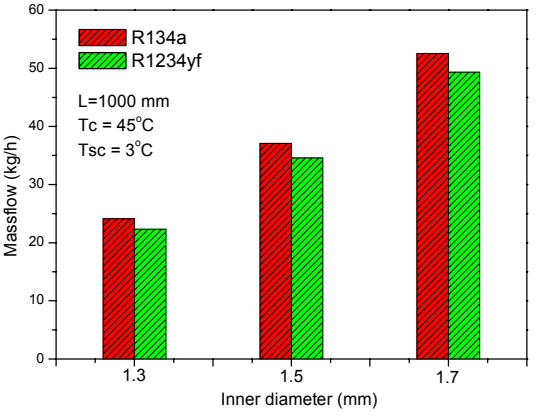


[Fig. 3] Comparison of pressure drop with R134a and R1234yf.



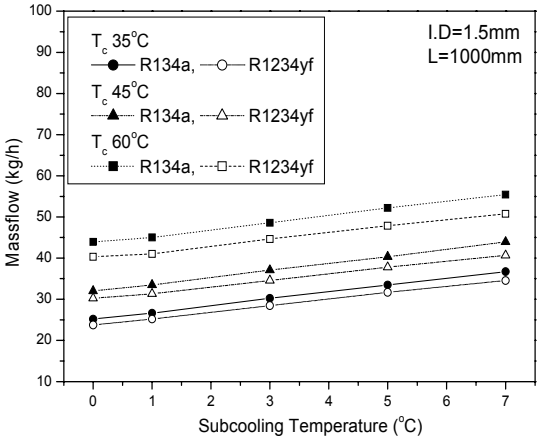
[Fig. 4] Comparison of mass flow rate of R134a and R1234yf with the variation of capillary length.

Fig. 4는 R134a 냉매와 R1234yf 냉매에 대하여 모세관 길이 변화에 따른 질량유량을 나타낸다. 모세관입구에서의 온도는 45℃, 과냉도 3℃, 모세관 내경은 1.5 mm로 고정하고 모세관 길이를 1 m에서 4 m까지 0.5 m씩 증가시키며 시뮬레이션을 실시하였다. 냉매 R134a와 R1234yf는 모세관 길이가 1 m에서 4 m로 증가하면 모세관내의 질량유량은 47.0% 감소하였다. 동일한 조건에서 R134a 냉매가 R1234yf 냉매보다 4.0-5.3%의 질량유량이 더 많이 흐르는 것으로 나타났다. R134a 냉매와 R1234yf 냉매가 포화액체일 경우 R134a 냉매가 R1234yf 냉매에 비해 밀도가 크므로 질량유량은 R134a 냉매가 R1234yf 냉매에 비해 크게 나타나게 된다.



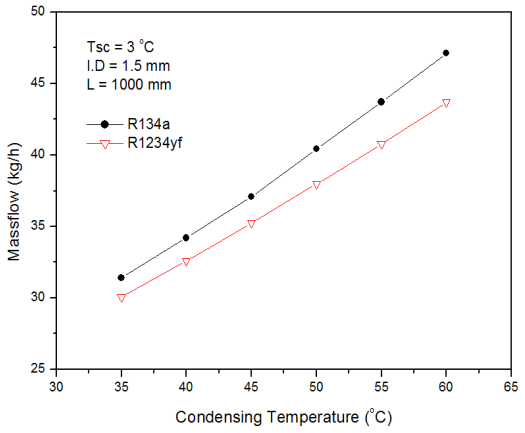
[Fig. 5] Comparison of mass flow rate of R134a and R1234yf with the variation of capillary inner diameter.

Fig. 5는 R134a 냉매와 R1234yf 냉매에 대하여 모세관의 내부직경 변화에 따른 질량유량을 나타낸다. 모세관 입구에서의 온도는 45℃, 과냉도 3℃, 모세관 길이를 1000 mm로 고정하고 모세관 내경을 1.3 mm에서 1.7 mm까지 0.2 mm씩 증가시키며 시뮬레이션을 실시하였다. 모세관의 직경을 증가시키면 모세관 내부에서의 저항이 줄어들어 모세관 내부를 흐르는 냉매의 질량유량은 증가하게 되는데, R134a 냉매는 117.9%, R1234yf 냉매는 121.0% 각각 증가하였다.



[Fig. 6] Comparison of mass flow rate of R134a and R1234yf with the variation of subcooling temperature.

Fig. 6는 R134a 냉매와 R1234yf 냉매의 과냉도 변화에 대한 질량유량을 나타낸다. 모세관의 길이 1 m, 모세관의 직경 1.5 mm으로 고정하고, 응축온도 35, 45, 45℃에 대하여 과냉도가 0-7℃로 증가시키며 시뮬레이션을 실시하였다. 과냉도가 증가할수록 냉매의 질량유량은 전체적으로 선형적인 증가추세를 나타내었다. 과냉도가 0℃에서 7℃로 변화할 때, 질량유량은 R134a 냉매의 경우 28.3% 증가하였고, R1234yf 냉매의 경우에는 29.1% 증가하였다. 동일한 조건에서 R134a 냉매는 R1234yf 냉매보다 약 5-6% 정도 냉매의 질량유량이 더 많이 흐르는 것으로 나타났다. 과냉도가 증가함에 따라 과냉상태의 냉매는 모세관을 통과하는 동안 상대적으로 높은 밀도로 인해 질량유량은 증가하게 된다.



[Fig. 7] Comparison of mass flow rate of R134a and R1234yf with the variation of condensing temperature.

Fig. 7은 R134a 냉매와 R1234yf 냉매의 모세관 입구에서의 온도변화에 대한 질량유량을 나타낸다. 모세관 입구에서의 온도를 35℃에서 60℃로 5℃씩 증가시키고, 모세관의 길이 1 m, 과냉도 3℃ 조건에서 시뮬레이션을 실시하였다. 모세관 입구 온도가 35℃에서 60℃로 증가할 때, R134a 냉매의 경우는 31.0%, R1234yf 냉매의 경우는 45.4%의 증가를 나타내었다. 동일한 조건에서 R134a 냉매가 R1234yf 냉매보다 4.4-7.8%의 질량유량이 더 큰 것으로 나타내었다. 이는 모세관 입구에서의 온도가 증가함에 따라 모세관 입출구에서의 압력차가 증가하여 질량유량이 증가하기 때문이다.

3. 결 론

본 논문은 R1234yf 냉매의 모세관 내의 유동특성을 분석하고자 R134a 냉매의 선행 연구의 실험 데이터를 통하여 시뮬레이션의 신뢰도를 보이고 모세관 길이와 내경 그리고 운전조건 변화에 따른 질량유량 변화를 고찰하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) R134a 냉매가 R1234yf보다 점성계수와 질량유량이 크기 때문에 동일한 운전조건에서 R1234yf 냉매가 R134a 냉매보다 압력강하가 많이 일어난다. 모세관의 길이가 3m일 경우 R134a 냉매는 56.4%, R1234yf 냉매는 59.5%의 압력강하가 일어난다.

(2) 모세관의 길이가 1 m에서 4 m로 증가할 때 냉매 R134a와 R1234yf의 각각 47.0% 감소하는 추세를 나타내었으며, 동일한 운전 조건에서는 포화 온도에서의 밀도가 R134a 냉매가 R1234yf 냉매보다 크므로 4.0-5.3%의 질량유량이 더 큰 것으로 나타났다.

(3) 모세관의 직경이 1.3 mm에서 1.5 mm로 증가할 때 냉매 R134a와 R1234yf의 냉매의 질량유량의 각각 117.9%와 121.0% 증가하였다.

(4) 모세관 입구에서의 과냉도가 0℃에서 7℃로 증가하는 경우 과냉상태의 냉매가 모세관을 통과하는 동안 상대적으로 높은 밀도를 나타내므로 질량 유량이 R134a 냉매는 28.3%, R1234yf 냉매는 29.1%로 각각 증가를 나타내었으며, 또한 동일한 운전조건에서는 R134a 냉매가 R1234yf 냉매보다 약 5-6% 정도 질량유량이 더 큰 것으로 나타났다.

(5) 모세관 입구에서의 온도가 증가할수록 모세관 입출구에서의 압력차가 증가하여 R134a 냉매는 31.0%, R1234yf 냉매는 45.4%의 질량유량 증가를 나타내었으며, 동일한 운전 조건에서는 R134a 냉매가 R1234yf 냉매보다 4.4-7.8%의 질량유량이 더 큰 것으로 나타났다.

References

[1] Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, Final Act, United Nations Environment Programme, 1989.

[2] J. Jetter, “Evaluation of alternatives for HFC-134a Refrigerant in motor vehicle air conditioning”, Proceedings of the international conference on ozone protection technologies, washington DC., USA, pp. 845-854, 1996.

[3] Gloval environmental change report, “A brief analysis of the kyoto protocol”, Vol. 4, No. 24, 1997.

[4] B. Minor, M. Spatz, “HFO-1234yf low GWP refrigerant update”, Proceedings of international refrigeration and air conditioning conference at purdue, West lafayette, Indiana, USA, 2349, 2008.

[5] C. Zilio, J. S. Brown, A. Cavallini, “Simulation of R-1234yf performance in a typical automotive system”, 3rd IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Boulder, CO, USA, IIR 1280, 2009.

[6] J. Han, J. Lee, M. Lee, S. Jeon, "An Experimental study on the optimization of the performance characteristics of HFO-1234yf in a household freezer/refrigerator", Proceedings of Sarek conference, pp. 1135-1138, 2011.
[7] P. Reasor, V. Aute, R. Radermacher, "Refrigerant R1234yf Performance Comparison Investigation", International Refrigeration and Air Conditioning Conf., at Purdue, West Lafayette, IN., Pager No. 2300. 2010,
[8] H. Cho, C. Park, "Characteristics of thermodyn- amic properties for new refrigerant R1234yf", The Journal of Research Instititute for Engineering & Technology 30, pp. 29-33, 2011.
[9] C.S. Park, Y.H. Jang, Y.C. Kim, Y.S. Lee, "An emppirical correlation of refrigerant flow rate through coiled capillary tubes", Transctions of the KSME B, Vol. 31, No. 1, pp. 91-98, 2007.
[10] Engieering Equation Solver Ver.8.688, F-Chart software, 2010.
[11] C. Melo, R.T.S. Ferreira, C. Boabaid Neto, J.M. Goncalves, M.M. Mezavila, "An experimental analysis of adiabatic capillary tubes", Applied Thermal Engineering, Vol. 19, pp.669-684, 1999.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00062-3
[12] E. Dirik, C. Inan, M.Y. Tanes, "Numerical and experimental studies on adiabitic and non-adiabatic capillary tubes with HFC-134a", International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, pp. 274-277, 1994.

박 차 식(Chasik Park) **[정회원]**

- 1991년 2월 : 고려대학교 기계공학과 (공학사)
- 1997년 8월 : 고려대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 8월 : 고려대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학부, 부교수

<관심분야>
냉동공조, 신재생에너지

김 대 영(Daeyeong Kim) **[준회원]**

- 2013년 2월 : 호서대학교 자동차공학과 (공학사(자동차공학심화))
- 2013년 3월 ~ 현재 : 호서대학원 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>
냉동공조, 신재생에너지