

◎ 研究論文

## 내면 핀관을 사용하는 열교환기에서 R-22 대체 탄화수소계 냉매의 증발 열전달 특성

홍진우\* · 박승준\* · 노건상\*\* · 구학근\*\* · 오후규\*\*\*

### Evaporating heat transfer characteristics of R-22 alternative hydrocarbon refrigerants at heat exchanger using grooved inner tube

J. W. Hong · S. J. Park · G. S. Rho · H. G. Ku · H. K. Oh

**Key words** : Evaporation(증발), Grooved inner fin tube(내면 핀관), R-290(Propane, 프로판), R-600a(Iso-Butane, 이소부탄)

#### Abstract

In this paper, evaporation heat transfer characteristics at a inner grooved tube were studied using a new natural refrigerants R-290, R-600a and HCFC refrigerant R-22. Experiments were performed in the inner tube with outside diameter of 12.70 mm, having 75 fins with a fin height of 0.25 mm.

The following results were obtained from this research.

On the evaporating heat transfer characteristics, the maximum increment of heat transfer coefficient was found in R-290. Average heat transfer coefficient was obtained the maximum value in R-290 and the minimum value in R-22. It reveals that the natural refrigerant can be used as a substitute for R-22. In the grooved inner tube, 70% of the increment of the heat transfer coefficient was obtained compared to the smooth tube. Comparing the heat transfer coefficient between experimental result and simulation data of other's, the Kandlikar's correlated equation was closely approximated to the author's experimental results in the smooth tube or grooved inner one.

\* 부경대학교 대학원(원고접수일 : 99년 11월)

\*\* 동명대학교

\*\*\* 부경대학교 공대 냉동공조공학과

## NOMENCLATURE

### SYMBOLS

$G$	mass velocity, [kg/m <sup>2</sup> s]
$h$	heat transfer coefficient, [kW/m <sup>2</sup> K]
$m$	mass flow rate, [kg/h]
$Q$	heat capacity, [kW]
$q$	heat flux, [kW/m <sup>2</sup> ]
$x$	quality, [ / ]

### SUBSCRIPTS

$avg$	average
$cal$	calculated
$e$	evaporator
$exp$	experimental
$L$	local
$w$	wall

## 1. 서 론

지구 환경보호를 위하여 냉동·공조장치에서 사용되는 CFC계 물질의 단·중기 대체냉매인 HCFC계 및 장기 대체냉매인 HFC계 냉매는 2020년의 생산·사용 규제 및 대기권에서의 산과 독성물질을 형성하는 것으로 보고되고 있어 안전한 환경 친화성 냉매라 할 수 없다.<sup>1)</sup>

그래서, 냉동·공조용으로 개발되는 대체물질은 무엇보다 지구 환경을 파괴하지 않는 환경 친화성 물질이면서 기존 냉매의 열역학적 성질과 비슷하거나 우수해야 한다. 이상과 같은 관점에서 인공 화합물인 프레온계 냉매 대신에 자연계에 존재하고 있는 자연 냉매에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히, 우수한 열역학적 성질, 광물질 운환유와의 친화성, 경제성 등의 측면에서 탄화수소계 물질인 프로판, 부탄 등이 냉동·공조장치의 대체냉매로서의 사용 가능성에 대한 연구가 증가하고 있으며, 유럽을 중심으로 탄화수소계 냉매의 사용을 권장하는 추세에 있다.<sup>2)~4)</sup>

그러나, 이들 자연냉매를 사용하는 냉동·공조용 열교환기의 전열 특성에 대해서는 그다지 많이

밝혀지지 있지 않을뿐더러 전열관의 형태 등에 의한 특성 규명에 대한 자료는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 자연 냉매 R-290, R-600a를 사용하는 열펌프용 열교환기의 최적 설계를 위해 증발기에서의 열전달특성을 규명하여 자연냉매를 사용하는 열교환기의 기초 설계 자료를 제공하고자 하였다. 이를 위하여 가장 기본적인 열교환기인 수평 평활관에서의 증발 열전달 특성과 전열 촉진관인 내면 핀관에서의 증발 열전달 특성을 비교·검토하였다.

## 2. 실험 장치 및 데이터 정리

### 2.1 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치의 개략도로서, 물을 열원으로 하는 가장 기본적인 증기 압축식 열펌프 사이클이다. 실험에 사용한 압축기는 R-22용 2기통 왕복동식이며, 흡입 배관에는 전기 히터(electric heater)를 설치하여 압축기로 흡입되는 냉매 가스의 온도가 일정하게 유지될 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용된 내면 핀관의 상세도로서, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 실험에서 사용된 증발기는 2중관형 대향류 열교환기이다.

열교환기의 내관은 외경 12.70mm, 핀 높이가 0.25 mm, 관의 저면 두께 0.40mm, 핀 수 75개, 핀의 나선각 18°, 핀의 정각 40°인 내면 핀관이고, 외관은 내경 45mm, 외경 50mm인 PVC관이다. 시험구간은 각각 길이 350mm인 6개의 시험구간과 길이 1,130mm인 2개의 과열구간을 설치하였다. 열교환기를 비롯한 장치 전체를 글래스울로 충분히 방열하여 외기와의 열교환을 무시할 수 있도록 하였다.

실험에 사용한 냉매는 R-22와 이를 대체할 것으로 판단되는 R-290(propane, 순도 99.5%), R-600a(iso-butane, 순도 99.5%)이다. 자연냉매의 증발 열전달 특성을 규명하기 위한 측정된 실험 데이터는 냉매 포화압력과 포화온도가 30분 이상 평형상태를 유지하는 정상상태에서의 냉매 온도 및 유량, 열원수 온도 및 유량, 관내벽 온도 등이

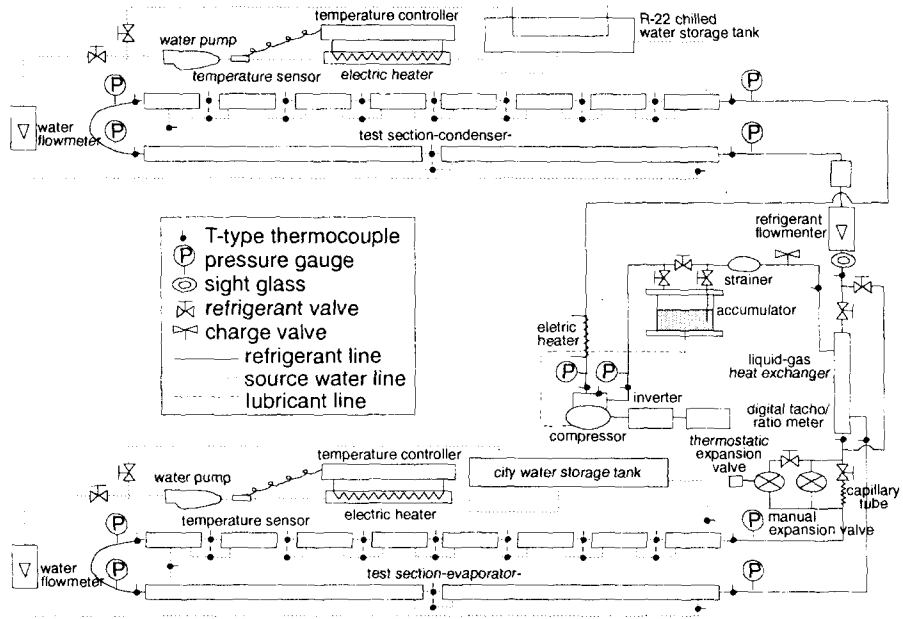


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

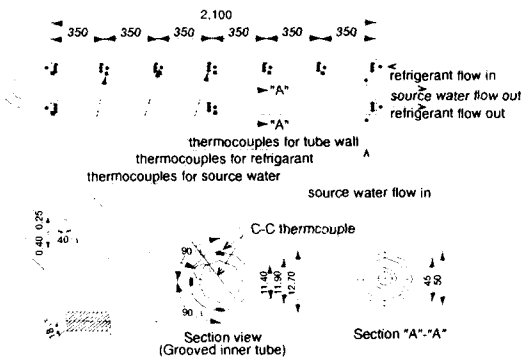


Fig. 2 Detail of evaporator of grooved inner tube.

다. 측정된 데이터의 출력신호는 콘트롤 유니트와 데이터 변환기로 입력되어 데이터 처리장치 RS-232C를 통해 컴퓨터로 저장되었다. 주요 실험조건은 냉매유량 5~78 kg/h, 증발온도 -15~10 K이다.

### 2.2 데이터 처리

본 연구에서 사용한 R-22와 그 대체 냉매인 R-290, R-600a의 열물성값 계산은 REFROP (version 5.0)를 이용하였다. 실험에서 측정된 냉

매유량, 열원수량, 온도 및 압력으로부터 시험 소 구간 z에서의 건도 x는 다음과 같이 계산하였다.

$$x = x_{in} + \frac{\pi \cdot d_i}{m_{ew} \cdot i_{fg}} \cdot \int_{z_{in}}^{z_{out}} q \, dz \quad (2-1)$$

여기서, 열유속 q와 증발열량 Q<sub>e</sub>는 각각 다음 식으로 계산하였다.

$$q = \frac{Q_e}{\pi \cdot d_i \cdot \Delta z} \quad (2-2)$$

$$Q_e = m_{ew} \cdot c_{pc} \cdot (T_{ew,out} - T_{ew,in}) \quad (2-3)$$

여기서, m<sub>ew</sub>는 열원수량, c<sub>pc</sub>는 열원수 비열, T<sub>ew,in</sub>, T<sub>ew,out</sub>는 각각 소구간에서의 열원수 입·출구 온도이다.

증발 열전달특성을 규명하기 위한 건도, 열유속 등의 계산에 필요한 증발열량은 냉매의 엔탈피차에 의한 계산 방법과 열원수의 온도차에 의한 계산 방법이 있다. 냉매의 엔탈피차로 구한 증발열량을 사용하는 것이 이상적일 수 있으나, 계산의 편의상 본 연구에서는 냉각수의 온도차로 구한 증발열량을 이용하였다. 이러한 계산의 타당성을 검토하기 위하여 식 (2-4)의 냉매 엔탈피차로 구한 증발열

량  $Q_{e,exp}$ 와 식 (2-5)의 열원수 온도차로 구한 증발열량  $Q_{e,cal}$ 을 비교한 결과, 열평형은 약  $\pm 10\%$  이내에서 일치하고 있음을 알 수 있었다.

$$Q_{e,exp} = m_{ref} \cdot (i_{in} - i_{out}) \quad (2-4)$$

$$Q_{e,cal} = m_{ew} \cdot c_{pc} \cdot (T_{ew,out} - T_{ew,in}) \quad (2-5)$$

시험구간내에서의 관주방향 국소열전달계수  $h_{e,L}$  및 관길이방향 평균열전달계수  $h_{e,avg}$ 는 식 (2-6)과 식 (2-7)로 계산하였다.

$$h_{e,L} = \frac{q_{e,L}}{(T_{wi,L} - T_{sat})} \quad (2-6)$$

$$h_{e,avg} = \frac{\int_{z_{in}}^{z_{out}} h_{e,L} dz}{n} \quad (2-7)$$

여기서,  $n$ 은 증발 열전달이 일어나고 있는 소구간의 개수이고, 각 소구간의 내관 내표면 온도  $T_{wi,L}$ 은 실험에서 측정된 내관 외표면 온도에서 식 (2-8)을 이용하여 계산하였다.

$$T_{wi,L} = T_w - \frac{Q_{e,sub} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi \cdot k_w \cdot \Delta z} \quad (2-8)$$

여기서,  $T_w$ 는 관의 상, 하, 측부의 외표면 온도를 평균한 벽면 온도,  $d_o$ 와  $d_i$ 는 내관의 외경과 내경이다. 또  $k_w$ 는 동관의 열전도율이다.

### 3. 증발 열전달 특성

#### 3.1 건도 및 열유속 분포

Fig. 3은 증발기 무차원 관길이에 따른 열유속  $q$ 와 건도  $x$ 의 변화를 나타낸 것이다. 앞서 밝힌 바와 같이 장치는 압축기를 사용하는 열펌프이므로 증발기 입구에서의 냉매 건도는 팽창 밸브를 거쳐 포화액이 아니라 건도 0.1~0.2 정도의 상태로 증발기로 유입되고 있다.

냉매의 종류와 관의 종류에 상관없이 증발기 출구로 갈수록 건도는 거의 선형적으로 증가하고 있다. 이는 팽창 밸브를 지난 직후인 증발기 입구 영역에서는 액의 비율이 크기 때문에 열전달이 빠르게 일어날 수 없지만 증발이 진행되면서 증기량이

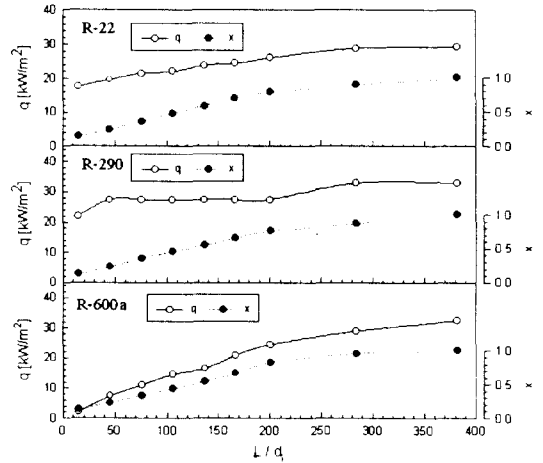


Fig. 3 Variation of the heat flux and quality in the evaporator.

많아지고 이에 따라 관벽 표면을 덮은 액막이 얇아지면서 질량 유속이 증가하고 열저항이 감소하여 열전달을 촉진시키기 때문에 판단된다. 그러나, 증발이 거의 완료되면 액막이 없어지고 증기가 지나치게 증가하여 열전달이 감소하게 됨으로서 건도의 증가는 둔해진다. 이러한 현상은 열유속의 변화에서도 확인할 수 있으며, 즉 증발기 입구에서부터 증발이 거의 완료될 때까지는 열유속이 거의 선형적으로 증가하다가 증기가 관내 대부분을 차지하면서 갑자기 감소한다.

#### 3.2 국소 증발 열전달

Fig. 4는 냉매 건도 변화에 따른 R-22, R-290, R-600a의 국소 증발 열전달을 정리한 것이다.

R-22의 경우, 질량 유속이 약 3.3배 정도 증가하였지만 열전달 계수는 약 1.6~2.1배 정도로 증가하고 있다. 그러나, 증가폭은 증발이 진행되면서 거의 일정하지만 약간씩 감소하고 있다. R-290의 경우에는 질량 유속은 약 3.4배 증가하였지만, 열전달 계수는 약 1.7~3.5배 정도로 증가하고 있다. 그러나, 증가폭은 R-22와 마찬가지로 증발이 진행되면서 거의 일정하지만 약간씩 감소하고 있다. 그러나, R-22와 거의 동일한 질량 유속의 증가비임에도 불구하고 열전달 계수의 증가폭은 R-22보다 다소 크게 나타나고 있다. R-600a의 경우에는, 질량 유속이 약 4.8배 정도 증가하였지

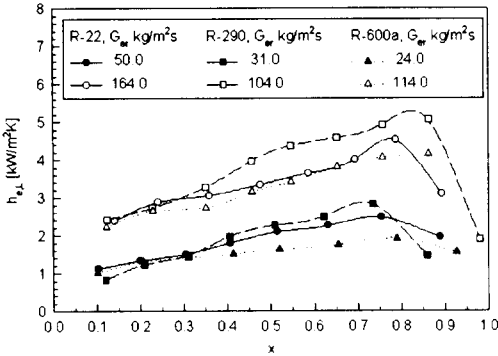


Fig. 4 Comparison of local heat transfer coefficients to quality.

만 열전달 계수는 약 1.9~2.7배 정도로 증가하고 있다. 이와 같이 R-600a는 R-22에 비해 질량 유속의 증가가 큼에도 불구하고 열전달 계수의 증가는 거의 같은 정도로 나타나고 있으므로 열전달 계수의 증가는 다소 둔한 것으로 판단할 수 있다. 증가폭은 증발의 진행과 무관할 정도로 아주 낮은 정도를 제외하고는 거의 일정하게 나타나고 있다.

이들의 결과로부터 R-290은 R-22에 비해 질량 유속의 영향을 다소 받지만, R-600a의 경우에는 R-22에 비해 질량 유속의 영향을 그다지 크게 받지 않는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.3 평균 증발 열전달

Fig. 5는 본 실험 조건에서 냉매 질량 유속에 따른 R-22, R-290, R-600a의 평균 증발 열전달 계수를 나타낸 것이다. 전체적인 경향은 냉매의 질량 유속이 증가할수록 평균 증발 열전달 계수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또 동일 질량 유속 범위에서 평활관일 경우 R-290의 평균 증발 열전달 계수가 R-22의 평균 열전달 계수보다 약 50% 정도 증가함을 알 수 있다. 그러나 R-600a는 질량 유속이 매우 적어 직접적인 비교는 곤란하지만, 그 경향을 따라 보면 R-22보다 약 20% 정도 높을 것으로 보여진다. 그리고 내면 핀관인 경우에는 R-290 및 R-600a의 평균 증발 열전달 계수가 R-22의 평균 열전달 계수보다 증가하고 있는데, R-22에 비해 R-290은 약 60%, R-600a는 약 15% 정도 높게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 R-290

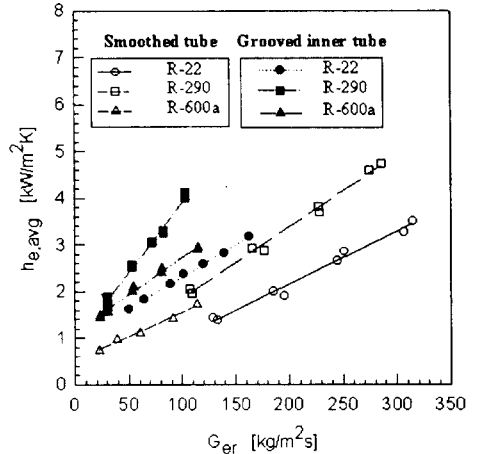


Fig. 5 Comparison of average heat transfer coefficient as refrigerant mass velocity.

및 R-600a가 열전달 계수면에서 R-22의 대체 냉매로서의 가능성이 있음을 알 수 있다. 또한 내면 핀관에 의한 증가를 보면 R-22는 약 70%, R-290은 약 100%, R-600a는 약 70% 정도의 증가를 보여, 어느 냉매나 내면 핀관에 의한 열전달의 증가 효과가 큰 것으로 나타나고 있다.

### 3.4 증발 열전달 상관식과의 비교

증발기나 응축기 등의 열교환기를 설계하는 데 있어서 열교환의 크기 및 형상 등을 결정하기 위한 하나의 방안으로 무차원 열전달 상관식을 이용하여 열전달 계수를 예측하는 것은 매우 중요하다. 특히, 대표적인 증발 열전달 계수 상관식에는 Shah의 상관식<sup>5)</sup>, Gungor-Winterton의 상관식<sup>6)</sup>, Kandlikar의 상관식<sup>7)</sup> 등이 있는데, 그 중에서 Kwon의 연구<sup>8)</sup>에 따르면 R-22를 비롯한 자연냉매의 증발 열전달 특성과는 Kandlikar의 상관식이 가장 잘 일치하는 것으로 보고되고 있다.

Fig. 6은 실험에서 얻어진 R-22 및 R-290의 증발 열전달 계수와 Kandlikar의 상관식에 의한 증발 열전달 계수를 비교하였다. Kandlikar의 상관식에 의한 결과는 평활관의 결과에 전열 면적 증가비(=1.54)를 곱하여 구하였다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 고·저전도 영역을 제외하면 대체적으로 ±40%의 범위에서 일치하고 있다. 그리고 이 결과에서 Kandlikar 상관식

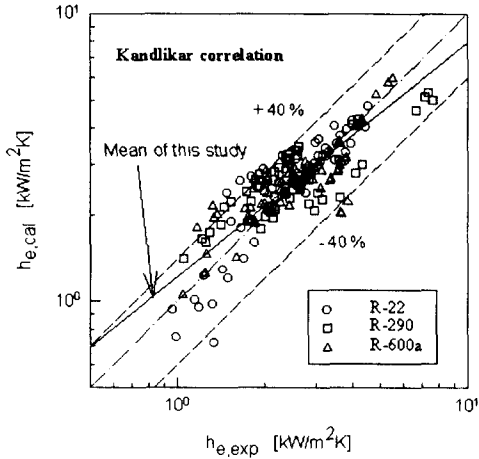


Fig. 6 Comparison of heat transfer coefficients with Kandlikar's correlation.

을 사용했을 때 R-22에서 보다 R-290과 R-600a에서 큰 편차를 보인다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

지구 환경을 보호한다는 측면에서 HCFC계인 R-22를 대체할 만한 자연 냉매로서 R-290과 R-600a를 수열원 열펌프 장치의 냉매로 사용했을 때의 증발 열전달 특성을 규명하고자 하였다. 내면 핀관으로 증발기를 제작하여 R-22, R-290, R-600a에 대한 증발 열전달 특성 실험에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

내면 핀관에서 증발 열전달 계수는 질량 유속이 증가할수록 증가하였다. 그러나, 열전달 계수 증가 폭은 증발이 진행될수록 다소 감소하였고, R-290의 열전달 계수 증가율이 가장 크게 나타나 증발시에는 질량 유속의 영향을 다소 받고 있음을 알 수 있었다.

평균 증발 열전달 계수는 R-290이 가장 크게 나타났다고, R-22가 가장 작게 나타났으며, 동일 질량 유속일 경우 R-290, R-600a를 사용하고자 하는 열펌프용 증발기의 크기가 R-22를 사용하는 경우보다 작아짐을 알 수 있었다. 또한 내면 핀관을 사용하였을 때의 열전달 계수 증가율은 어느 냉매나 70% 이상을 나타내어 내면 핀관에 의한 효과가 있

었음을 알 수 있었다. 또한, 실험 데이터는 평활관이나 내면 핀관 모두에서 Shah, Gungor-Winterton, Kandlikar의 상관식들과 ± 40%의 범위에서 일치하였고, 그 중에서 Kandlikar의 상관식이 가장 근접하는 것을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Ebner, T. and Halozan, H., 1994, Testing the Available Alternative-An Examination of R-134a, R-152a and R-290, IEA HPC Newsletter, Vol. 12, No. 1, Sittard, The Netherlands.
2. Kruse, H., 1993, European Research and Development Concerning CFC and HFC Substitution, AHRAE/NIST Refrigerant Conference, pp. 41~54.
3. Kim, M.S., Mulroy, W. J. and Dididon, D. A., 1993, An Experimental Evaluation of the Flammability and Performance Potentials of Two Azeotropic Refrigerant Mixtures, Transport Phenomena in Thermal Engineering, pp. 446~451.
4. James, R. W. and Missenden, J. F., 1992, The Use of Propane in Domestic Refrigerators, International Journal of Refrigeration, Vol. 15, No. 2, pp. 95~100.
5. Shah, M. M., 1982, Chart Correlation for Saturated Boiling Heat Transfer Equations and Further Study, AHRAE Transaction, Vol. 88, pp. 185~196.
6. Gungor, K. E. and Winterton, R. H. S., 1986, A General Correlation for Flow Boiling in Tubes and Annuli, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 29, pp. 351~358.
7. Kandlikar, S. G., 1987, A General Correlation for Saturated Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer inside Horizontal and Vertical Tubes, ASME Winter Annual Meeting, pp. 14~18.
8. Kwon, O. B., 1997, Performance Characteristics of Water Sources Heat Pump Using HCFC22 Alternative Refrigerants, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Pukyung University.

저 자 소 개



**홍진우(洪鎭佑)**  
1972년생. 1995년 부산수산대학교 공대 냉동공학과 졸업. 1998년 동대학원 냉동공학과 졸업(석사). 현재 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 박사과정 재학중



**구학근(具學根)**  
1960년생. 1987년 부산수산대학교 공대 냉동공학과 졸업. 1989년 동대학원 냉동공학과 졸업(석사). 1994년 동대학원 냉동공학과 졸업(박사). 현재 동명대학교 가스냉동과 부교수 재직중



**박승준(朴承俊)**  
1971년 12월생. 1996년 여수수산대학교 냉동공학과 졸업. 1998년 부경대학교 대학원 냉동공학과 졸업(석사). 현재 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 박사과정 재학중



**오후규(吳厚圭)**  
1948년 12월생. 1975년 부산수산대학교 공대 식품공학과 졸업. 1977년 동대학원 냉동공학과 졸업(석사). 1983년 일본 와세다대학교 기계공학과 졸업(박사). 현재 부경대학교 공대 냉동공조공학과 교수 재직중.



**노건상(盧建尙)**  
1966년 6월생. 1990년 부산수산대학교 공대 냉동공학과 졸업. 1992년 동대학원 냉동공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 냉동공학과 졸업(박사). 현재 동명대학교 가스냉동과 전임강사 재직중