

내면가공 핀튜브 흡수기의 열 및 물질전달특성

설원실* · 권오경* · 문춘근* · 정용욱* · 윤정인**

(Characteristics of Heat and Mass Transfer on Inner Ribbed Notched Fin Tube Absorber)

W. S. Seol · O. K. Kwon · C. G. Moon · Y. U. Jeong · J. I. Yoon

Key words : Absorption chiller-heater(흡수식 냉난방기), Absorber(흡수기), Bare tube(평활관), Heat and mass transfer(열 및 물질전달), Lithium Bromide solution(LiBr 수용액)

Abstract

An experimental study of the absorption process of water vapor into lithium bromide solution was performed. For the purpose of development of high performance absorption chiller-heater utilizing Lithium Bromide solution as working fluid, the absorber is the most effective to improve the performance of an absorber because it requires the largest heat transfer area in an absorption chiller-heater system. This paper introduces bare tube and inner ribbed notched fin tube for the absorber of absorption chiller-heaters. Inner ribbed notched fin tube has about 10~20% higher heat and mass transfer performance than bare tube conventionally used in absorbers and the it is expected to perform high heat and mass transfer. This paper will provide important information on the selection of absorber tubes in commercial absorption chiller-heaters.

| | | |
|--------------------------|--|---|
| 기 호 | | G : 질량유량 [kg/s] |
| C : 농도 [wt%] | | G_R : 냉매증기 흡수량 [kg/s] |
| C^* : 평형농도 [wt%] | | h : 대류열전달계수 [kW/(m ² · K)] |
| c_p : 비열 [kJ/(kg · K)] | | L : 전열관 길이 [m] |
| d : 전열관 지름 [m] | | N : 전열관 열수 |
| | | Nu : 누셀트수 |

* 부경대학교 대학원 냉동공조공학과(원고접수일 : 2000년 3월)
 ** 부경대학교 기계공학부 냉동공조에너지 전공

| | | |
|------|-----------|---------------------------|
| Pr | : 프란틀수 | |
| Q | : 교환열량 | [kW] |
| Re | : 레이놀즈수 | |
| T | : 온도 | [°C] |
| V | : 유속 | [m/s] |
| U | : 총괄열전달계수 | [kW/(m ² · K)] |

그리스어

| | | |
|---------|----------|----------------------|
| β | : 물질전달계수 | [m/h] |
| ρ | : 밀도 | [kg/m ³] |
| μ | : 점성계수 | [Pa · s] |

첨자

| | |
|------|----------|
| A | : 흡수기 |
| co | : 냉각수 |
| i | : 입구(내부) |
| m | : 평균 |
| o | : 출구(외부) |
| s | : 흡수용액 |
| T | : 전체 |

1. 서 론

흡수식 냉난방기는 전기 대신에 가스, 오일, 온수, 증기, 폐열원 등을 사용함으로써 여름철의 전력난을 해소할 수 있으며, 작동유체로써 CFC계 냉매대신에 H₂O-LiBr을 사용하기 때문에 환경오염을 방지할 수 있는 큰 장점이 있다. 근래에는 일정한 크기이상의 신축건물에 대해서 냉방에너지로써 가스연료를 사용하도록 규정하고 있기 때문에, 흡수식 냉난방기의 사용이 급증하고 있다.

흡수식 냉난방기는 흡수기, 증발기, 응축기, 재생기, 용액열교환기 등으로 구성되며 이들 구성요소 중 흡수기가 차지하는 비중이 제일 커서 전열면적으로는 약 33%, 체적으로는 약 27%를 차지한다¹⁾. 그러므로 흡수식 냉난방기의 소형·경량화 및 고효율화를 위해서는 흡수기에 대한 특성과약과 이 부분에 대한 성능개선이 매우 중요하다. 따라서 흡수기의 성능향상이 흡수식 냉난방기의 성능향상과 직결되며, 장치의 소형화 및 고효율화를 위해서는 흡수기의 열 및 물질전달특성을 명확히 규명해

야 한다. 그러나 흡수기에서 냉매증기가 흡수될 때에는 발열을 동반한 열이동 및 물질이동이 동시에 일어나기 때문에 열이동만을 고려한 기존의 전열관은 적용의 한계가 있다. 따라서 흡수식 냉난방기의 성능향상을 위해서는 흡수현상에 대한 명확한 특성해석과 더불어 유효한 전열관의 구조를 밝히는 것이 중요한 과제이다.

흡수기에서의 흡수 및 전열현상에 대한 연구는 일본뿐만 아니라 미국, 유럽 등 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 최근 일본의 경우 기존관에 대한 성능평가 및 신형관에 대한 연구와 관군에 대한 실험 및 해석^{1)~5)} 또한 활발히 이루어지고 있다. 국내의 경우, 실제 사용되는 관의 대부분이 수평관임에도 불구하고⁶⁾, 이에 대한 기존관의 재평가와 고성능 전열관 개발에 관한 연구는 비교적 드물고, 공냉을 위한 수직관에 대한 연구^{7)~10)}가 주류를 이루고 있다.

따라서, 본 연구에서는 실제 국내에서 사용되는 흡수식 장치와 동일한 구조의 냉동능력 7kW급 실험장치를 이용하여 수평관에서의 흡수 열 및 물질전달 촉진에 관한 실험을 수행하였다. 본 연구는 우선 기존에 사용되고 있는 흡수전열관의 열 및 물질전달을 평가하고, 기존 공조용으로 사용되고 있는 전열관을 흡수식 냉온수기의 흡수기 전열관에 적용하여 흡수성능을 평가함으로써 궁극적으로 흡수식 냉난방기의 원가절감, 고성능화 및 컴팩트화를 위한 설계자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로서 실험장치는 흡수기①, 증발기②, 응축기③, 재생기④, 농용액탱크⑤, 희용액탱크⑥, 냉매탱크⑦, 냉각수 탱크⑩, 냉각탑⑪, 히터⑫ 및 온수탱크⑬와 그들을 연결하는 배관으로 구성되어 있다. 시스템내의 진공을 유지하기 위하여 진공펌프가 설치되어 있으며, 기기내의 압력을 알 수 있도록 진공용 압력계가 설치되어 있다. 또한, 흡수기에는 냉각수가, 증발기에는 냉수가 순환될

Table 1 Experimental conditions on horizontal absorber from reference

| Authors | Solution | | | Cooling water | | Remarks |
|------------------------|----------|-------|-------------------|---------------|------------|---|
| | concent. | temp. | flow rate (kg/ms) | temp. | velocity | |
| This study | 60wt% | 45° C | 0.01~0.04 | 32° C | 1.0~1.6m/s | 1 row and 10 stages, helical coil, outside diameter 15.88mm |
| Kawamata ²⁾ | 58wt% | 40° C | 0.008~0.025 | 28° C | 2,000kg/h | 3 rows 8 stages, outside diameter 19mm |
| Furugawa ¹⁾ | 58wt% | 40° C | 0.013~0.042 | 28° C | 1m/s | 1 row and 5 stages, outside diameter 19.05mm |

고, 분리된 냉매는 응축기에서 냉각수에 의해 냉각, 응축되어 냉매 탱크에 저장되게 된다. 농용액은 샘플링 밸브로 취출하여 적정농도가 될 때까지 재생기와 농용액 탱크를 순환시켰다. 응축기로 유입되는 냉각수는 냉각수 펌프를 이용하여 장치 내로 순환되고, 다시 냉각탑에서 냉각된다. 온수는 시험조건 설정과정과 동일하게 온수가열히터로 가열하여 써모스탯으로 온도를 조정하였으며, Table 1은 본 연구에서 사용한 실험조건과 실험결과 처리에 사용된 참고문헌의 실험결과를 비교하여 제시하였다.

3. 실험전열관

본 연구에 사용된 흡수전열관은 평활관(Bare tube)과 내면가공 핀튜브(Inner ribbed notched fin tube)이다. 평활관은 현재 흡수식 냉난방기에 가장 널리 쓰이는 관이며 시중의 것을 그대로 사용하였으며, 내면가공 핀튜브는 관외측에 1inch당 40개의 산을 가지고 핀의 높이는 0.95로 가공·변형하여 관외측 열전달 면적을 증대시켰으며, 관내면은 나선형의 홈을 내어 냉각수측 열전달 촉진을 유도하였다. 각 관의 외경은 15.88mm, 전체길이 400mm, 유효길이 360mm이고, 모든 관이 동일한 치수를 가진다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 전열관의 개략도와 실제 사진을 나타내었다.

4. 열 및 물질전달에 대한 해석

열교환기의 대수평균온도차 ΔT_{lm} 은 식(1)과 같이 정의하였다.

Fig. 2 Specification of test tubes

| Type | Appearance | Photo | Dimensions |
|-------------------------------|------------|-------|---|
| Bare Tube | | | do= 15.88 di= 14.05 L=400 |
| Inner ribbed notched fin Tube | | | do= 15.88 di= 13.88 pitch= 40/inch L=400 |

$$\Delta T_{lm} = \frac{\{(T_{Asi} - T_{Acoo}) - (T_{Aso} - T_{Acoi})\}}{\ln\{(T_{Asi} - T_{Acoo}) / (T_{Aso} - T_{Acoi})\}} \quad (1)$$

냉각수로 전달되는 열량 Q는 식(2)으로부터 구하였다.

$$Q = G_{cw} \cdot c_{pw} \cdot (T_{cwo} - T_{cwi}) = U \cdot A_T \cdot \Delta T_{lm} \quad (2)$$

관내의 냉각수측 대류열전달계수 h_i 는 평활관의 난류 열전달계수를 구하는 데 일반적으로 많이 사용되는 다음의 Dittus-Boelter식을 이용하여 산출하였다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = \frac{h_i L}{\lambda} \quad (3)$$

흡수용액측의 관외열전달계수 h_o 는 식(4)로부터 구할 수 있으며 이때 전열관 벽의 열저항은 무시하였다.

$$h_o = 1 / (1/U - d_o / (d_i \cdot h_i)) \quad (4)$$

그리고 단위 길이 당 액막유량 γ_s 는 식(5)와 같이 정의하였다.

$$\gamma_s = G_s / (2 \cdot L \cdot N) \quad (5)$$

냉매증기와 흡수용액 사이의 냉매 물질이동 저항으로 증기공간과 기·액 계면간의 저항은 무시하고, 기·액 계면과 흡수용액 사이의 저항만을 고려하였다. 또한 유하액막에서 기·액 계면은 장치내의 압력과 평형을 이루고 있다고 가정하여, 기·액 계면의 평형농도(C*)와 유하액막의 농도(C)의 대수평균농도차 ΔC_{lm} 을 식(6)과 같이 정의하였다.

$$\Delta C_{lm} = \frac{\{(C_{Asi}^* - C_{Asi}) - (C_{Aso}^* - C_{Aso})\}}{\ln\{(C_{Asi}^* - C_{Asi}) / (C_{Aso}^* - C_{Aso})\}} \quad (6)$$

그리고 냉매증기 흡수량 G_R 은 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$G_R = G_S \cdot (C_{Asi} / C_{Aso} - 1) \quad (7)$$

이상의 상태값들을 이용하여 식(8)과 같이 물질전달계수를 구하였다.

$$\beta = G_R / (\rho_m \cdot \Delta C_{lm} \cdot A_T) \quad (8)$$

여기서, ρ_m 은 평균용액밀도로서 식(9)로부터 구하였다.

$$\rho_m = (\rho_{Asi} + \rho_{Aso}) / 2 \quad (9)$$

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 3과 Fig. 4는 용액유량 변화에 따른 각 전열관의 열유속 및 열전달계수 특성을 나타낸 것이다.

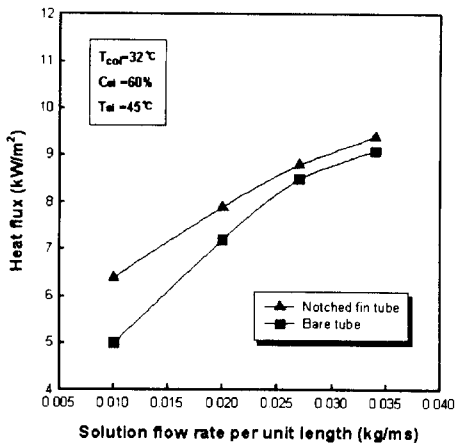


Fig. 3 Variation of heat flux on solution flow rate

이때 용액의 온도는 흡수기 입구의 농도와 흡수기 내 압력에 의한 평형조건으로 조정하여 각각 실험하였다. 실험 전열관 모두 실험범위 내에서 용액유량 증가에 따라 열유속 및 관외 열전달계수가 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 용액유량이 증가할수록 용액과 전열관의 접수면적이 증가하여 열전달이 촉진되었기 때문이라 생각된다.

내면가공 핀튜브의 경우 평활관보다 용액유량에 따라 다소 차이가 있지만 전체적으로 평활관보다 10~30%정도 향상된 열유속 및 열전달계수를 나타내고 있다. 이것은 관형상변화에 의해 용액의 접수면적이 커지고, 용액의 체류시간 증가 및 용액층 교란작용의 증대에 따른 열전달 상승으로 판단된다. 용액유량에 따라 내면가공 핀튜브는 용액유량이 0.01kg/ms에서 평활관보다 30%이상 열유속과 열전달계수가 증가하였지만, 용액유량이 증가할수록 그 증가폭은 급격히 작아짐을 알 수 있다. 이것은 용액유량이 증가할수록 내면가공 핀튜브의 액막저항이 증가하기 때문에 증가율이 둔화되며, 평활관의 경우에도 다량의 용액에서는 전열관이 충분히 용액에 접수되기 때문에 열유속 차가 그만큼 감소한다고 판단된다. 평활관의 경우는 Table 1에 나타낸 것과 같이 본 연구와 비슷한 조건에서 실험한 Furugawa⁽¹⁾ 및 Kawamata⁽²⁾의 실험결과와 비교해 보았을 때 정성적으로 비교적 잘 일치함을 알 수 있을 수 있었다. 참고문헌과의 차이

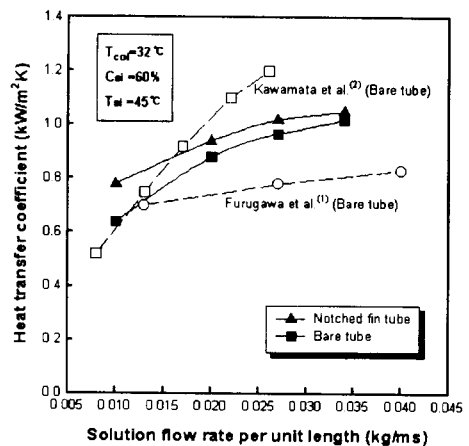


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient on solution flow rate

를 보이는 것은 참고문헌과 실험조건의 차이에 의한 것이라 생각된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 용액유량 변화에 따른 각 전열관의 흡수질량유속과 물질전달계수의 특성을 나타낸 것이다. 용액유량이 증가함에 따라 열유속 및 열전달계수의 특성과 마찬가지로 두 전열관 모두 물질유속과 물질전달계수가 증가함을 알 수 있다. 평활관과 비교해 보았을 때 내면가공 핀튜브는 용액유량에 따라 약 10~20%정도까지 높은 물질전달성능을 나타냈다. 이것은 흡수용액이 내면가공 핀튜브 관길이 방향의 산부분으로부터 오버플로하여 끝부분으로 흘러들면서, 액막표면 근처에 분포하는 회용액층과 전열관 표면 근처에 분포하는 농용액층을 교란하여 농도구배를 증가시켜 물질이동을 촉진시키기 때문이라 생각된다. 평활관의 물질전달계수를 Furugawa⁽¹⁾ 및 Kawamata⁽²⁾의 실험결과와 비교해 보았을 때 실험조건의 차이에 의해 정량적인 차이를 보이지만 정성적으로는 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 흡수기 관내 유속에 의한 총괄 열전달계수 및 질량유속 특성을 각 전열관에 따라 나타낸 것이다. 두 전열관 모두에서 냉각수 유속이

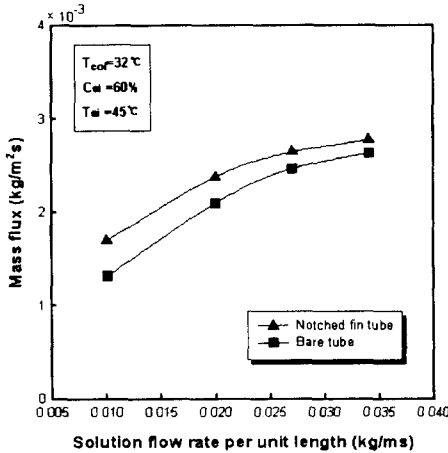


Fig. 5 Variation of mass flux on solution flow rate

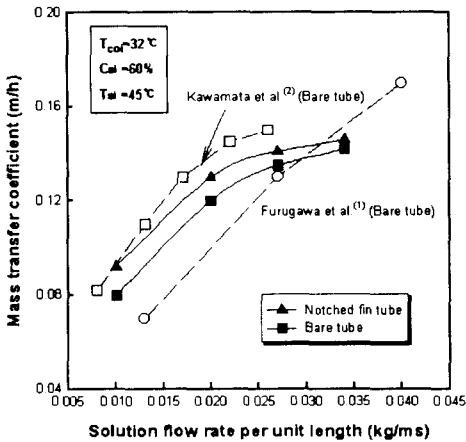


Fig. 6 Variation of mass transfer coefficient on solution flow rate

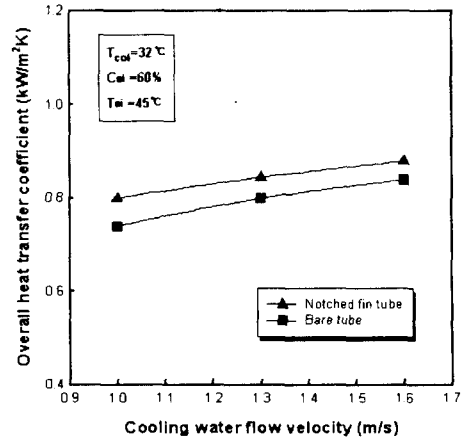


Fig. 7 Variation of overall heat transfer coefficient on cooling water flow velocity

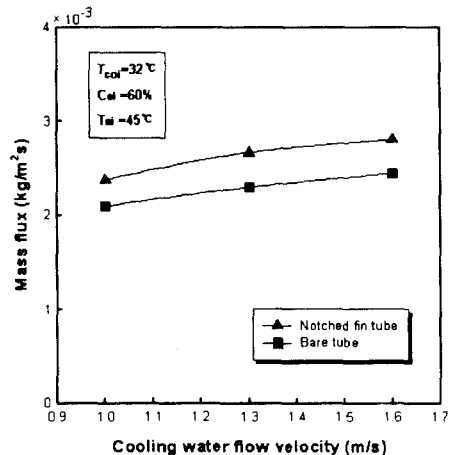


Fig. 8 Variation of mass flux on cooling water flow velocity

증가함에 따라 총괄 열전달계수 및 질량유속이 증가함을 알 수 있었으며, 내면가공 핀튜브가 평활관보다 10%내외의 성능향상을 나타내었다. 이러한 증가현상은 두 전열관 모두에서 냉각수 유속의 증가로 인하여 흡수기 관내의 열전달율을 촉진시키므로 관외측의 용액이 가지고 있는 흡수열을 보다 빠르게 제거할 수 있기 때문이다. 또한 관내측 냉각수 유속의 증가는 냉각수와 용액의 온도차를 크게 하고 용액의 평균온도를 내려가게 하며 용액의 온도저하는 용액의 포화증기압을 감소시키게 되어 냉매의 수증기압과의 증기압 차가 크게되어 결론적으로 흡수열량을 증대시킴으로써 총괄 열전달계수 및 질량유속은 증가하리라 판단된다. 그러나 냉각수 유속의 증가는 전열관의 내구성과 부식 및 냉각수 펌프가 커지는 문제를 동반할 수 있으므로 적절한 유속 이상으로 높이지 않는 것이 좋을 것이라 생각된다.

6. 결 론

흡수식 냉난방기의 흡수기용 고성능 전열관 개발을 위하여 평활관, 내면가공 핀튜브에 대한 실험을 통하여 열 및 물질전달 특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 내면가공 핀튜브의 경우 평활관보다 용액유량에 따라 다소 차이가 있지만 전체적으로 평활관에 비해 열전달에서 약 10~30%, 물질전달에서 약 10~20%정도 향상된 성능을 나타내어 흡수 전열관으로 충분한 효과가 있음을 확인할 수 있었다.
- (2) 두 전열관에서 용액유량을 증가시킬수록 열 유속, 열전달계수, 흡수 질량유속, 물질전달 계수 등이 증가함을 알 수 있었으며, 그 증가 비율은 액막저항의 증가로 인하여 점차 감소하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 관내 냉각수 유속의 증대는 총괄 열전달계수, 흡수 질량유속의 성능 향상에 영향을 미쳤으나, 냉각수 유속의 증가는 전열관의 내구성과 부식 및 냉각수 펌프가 커지는 문제

를 동반할 수 있으므로 적절한 유속 이상으로 높이지 않는 것이 좋을 것이라 생각된다.

참고문헌

- (1) 古川雅裕, 佐木直榮, 金子敏之, 野世溪精, “吸收冷溫水機の吸收器用熱促進管”, 日本冷凍協會論文集, Vol. 10, No. 2, pp. 219~226, 1993.
- (2) 川又治, 大谷忠男, 石塚伸明, 宮內德雄, “吸收冷凍機の吸收器用高性能熱管の開発”, 日本電線, No. 8, pp. 57~62, 1985.
- (3) Naoyuki Inoue, “Practical studies on absorbers in Japan”, Refrigeration Engineering Division EBARA Corporation, pp. 1~19, 1988.
- (4) 永岡義一, 西山教之, 坂和浩, 中村誠, “吸收冷溫水機の高性能に關する研究開發(第3報)—吸收器・蒸發器の高性能化—”, 東京カス株式會社技術研究所研究報告, 第31號, 1987.
- (5) N. Isshiki, K. Ogawa, N. Sasaki, Y. Funato, “R & D of CCS(Constant Curvature Surface) tubes for absorption heat exchangers”, Proceedings of Absorption Heat Pump Conference '91, Tokyo, Japan, pp. 377~382, 1991.
- (6) 설원실, 권오경, 윤정인, “LiBr/H₂O계 흡수기의 흡수촉진에 관한 실험적 연구”, 공기조화·냉동공학 논문집, Vol. 10, No. 5, pp. 581~588, 1998.
- (7) 윤정인, 오후규, 柏木孝夫, “스프링 삼입형 유하액막식 흡수기의 열 및 물질전달 특성”, 대한기계학회 논문집, 제19권, 제1호, pp. 1501~1509, 1994.
- (8) 조현철, 김종보, 정시영, 강상우, 이춘식, “LiBr계 용액을 사용한 수직관 흡수기의 열 및 물질 전달에 관한 연구”, 공기조화·냉동공학 논문집, 제7권, 제2호, pp. 196~206, 1995.
- (9) 엄기찬, 柏木孝夫, 서정운, “수직관내를 흘러내리는 액막식흡수기의 흡수 및 열전달 특성(제1보, 흡수특성)”, 공기조화·냉동공학 논문집, 제5권, 제1호, pp. 1~9, 1993.
- (10) 엄기찬, 柏木孝夫, 서정운, “수직관내를 흘러내리는 액막식흡수기의 흡수 및 열전달 특성(제2보, 열전달 특성)”, 공기조화·냉동공학 논문집, 제5권, 제4호, pp. 257~264, 1993.

저 자 소 개



설원실(薛元實)

1959년 4월생 1984년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업 1990년 동 대학원 졸업(석사) 1999년 동 대학원 수료(박사과정) 2000년 3월~현재 동명대학 건설환경 계열 강의 전담 교수



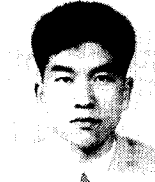
정용욱(鄭容旭)

1971년생 1997년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업 2000년 부경대학교 대학원 냉동공학과 졸업(공학석사)



문춘근(文春根)

1971년생 1997년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업 1999년 부경대학교 대학원 냉동공학과 졸업(공학석사) 현재 동 대학원 냉동공조공학과 박사과정



권오경(權五卿)

1969년생 1992년 여수대학교 냉동공학과 졸업 1994년 부경대학교 대학원 냉동공학과 졸업(공학석사) 2000년 동대학원 냉동공학과 졸업(공학박사)



윤정인(尹政仁)

1962년생 1988년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업 1990년 부산수산대학교 대학원 냉동공학과 졸업(공학석사) 1995년 동경 농공대 대학원 졸업(공학박사) 현재 부경대학교 기계공학부 냉동공조에너지전공 조교수