

모세관 길이와 관경 변화에 따른 R-1270의 성능특성

이호생* · 김현우** · 최원재** · 윤정인†

(원고접수일 : 2009년 6월 8일, 원고수정일 : 2009년 7월 13일, 심사완료일 : 2009년 7월 20일)

System Performance for Length and Diameter of Capillary Tube using R-1270

Ho-Saeng Lee* · Hyun-Woo Kim** · Won-Jae Choi** and Jung-In Yoon†

Abstract : Experimental results for performance characteristics of HCs refrigerant R-1270 and HCFC refrigerant R-22 during refrigeration system using capillary tube are presented. The system consists of compressor, condenser, capillary tube, evaporator and peripheral devices. Length and diameter of capillary tube are varied for this investigation. The refrigerant mass flow increased as the diameter of capillary tube increased and the length of capillary tube decreased. A refrigeration capacity and compressor work of R-1270 in same length and diameter of capillary tube showed the higher values than those of R-22. A coefficient of performance showed the highest value when the length and diameter of capillary tube are 105 cm and 1.8 mm in this experimental conditions.

Key words : Capillary tube(모세관), Coefficient of Performance(성능계수), Compressor work(압축일량), R-1270(프로필렌), Refrigeration capacity(냉동능력)

1. 서 론

사람들의 생활수준의 향상으로 인해 냉동공조 산업규모가 확대 되어 냉매에 의한 환경문제가 세계적으로 대두되고 있다. 미국을 비롯한 여러 선진국들은 몬트리올 의정서에 의거하여 CFC계 냉매의 전폐와 HCFC계 냉매 사용량을 동결하게 되었고 2019년 말까지는 완전전폐시키기로 합의 하였다^[1]. 이후 대체 냉매로서 비공비 혼합냉매와 HFC계 냉매가 권장되었으나 오존층을 파괴하지 않는 HFC

계 냉매 또한 지구온난화를 유발한다는 문제점이 밝혀짐에 따라 교토의정서에 의거하여 HFC계 냉매 사용 또한 규제토록 제안되었다^[2].

이에 오존파괴지수(ODP), 온난화지수(GWP), 경제성, 신뢰성, 안전성, 기존설비를 고려하여 새로운 대체냉매인 자연 냉매에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 (H)CFC 냉매 대체용으로는 비점과 성능계수(COP)가 거의 비슷한 프로판, 부탄 등의 탄화수소계 냉매가 적극 검토되고 있는데 비용이 저렴하고 사용이 간편하며 일반적인 광물질

† 교신저자(부경대학교 기계공학부, E-mail: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180)

* 부경대학교

** 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

윤활유와 잘 혼합되지만 단점으로는 가연성 문제를 들 수 있다.

그러나 James의 보고서에 의하면 기존의 냉동기들이 밀폐식 압축기를 채용하고 있으므로 누설의 가능성이 적고, 기존 냉매에 비하여 큰 비체적을 가지므로 탄화수소계 냉매의 충전량이 일반적인 CFC계 냉매의 절반 정도가 되어 가연성에 의한 폭발의 위험은 거의 없는 것으로 밝혀졌다^[3].

지금까지 환경 문제를 유발하지 않는 탄화수소계 냉매에 대한 연구는 국내·외적으로 응축·증발 열 전달 및 이들 열교환기의 압력강하에 관한 연구가 주로 수행되었다. 탄화수소계 냉매용 모세관에 대한 성능특성을 파악한 연구는 드물며 기존 프레온계 냉매의 기초자료를 참고로 사용하고 있는 실정이다.

모세관은 냉동공조 시스템의 산업용 소형 증기 압축식 냉동사이클에서 작동부분이 없어 설치가 간단하며 가격이 저렴하고 운전 중에 높은 신뢰성을 유지하는 장점을 지니고 있다. 그리고 시스템의 압력과 냉매 유량을 조절함으로써 전체 사이클의 평형 유지가 가능하게 하고 시스템 가동 전에 고압부인 응축기와 저압부인 증발기의 압력을 동일하게 유지시켜 초기 기동시 압축소비전력을 감소 시킬 수 있다. 이러한 모세관의 장점 때문에 소규모 밀폐형 압축기를 사용하는 가정용 냉장고, 에어컨, 제습기 등에는 팽창장치로 널리 사용되고 있으며, 이용범위도 점차 확대되어가고 있다^[4].

반면에 모세관은 시스템의 용량 조절 폭이 다른 팽창장치에 비해 좁아 설계 조건 이외에서는 성능이 현저하게 떨어지는 단점이 있다. 따라서 냉동 시스템에서 적절한 모세관을 선정하고 설치하는 것은 매우 중요하다.

기존 냉매인 프레온에 대한 모세관의 설계자료 및 상관식은 비교적 정립이 잘 되어 있으나^[5] 오존층 파괴 및 지구온난화 등의 환경적인 문제로 인하여 이들 냉매의 사용규제가 가속화되고 있으므로 새로운 대체 냉매를 적용하여 모세관을 최적 설계에 필요한 연구가 필요한 실정이다^{[6]-[7]}.

따라서 본 연구에서는 HCFC계 냉매인 R-22를 기본 작동유체로 한 냉동공조장치를 제작하여 모세

관 관경, 길이에 따른 특성과 최근 관심이 집중되고 있는 자연냉매인 탄화수소계 냉매 중 R-1270(Propylene)의 모세관에 따른 특성을 실험적으로 비교·분석하여 모세관 설계에 따른 시스템 최적화를 통해 보다 효율적인 냉동사이클을 구축하는데 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

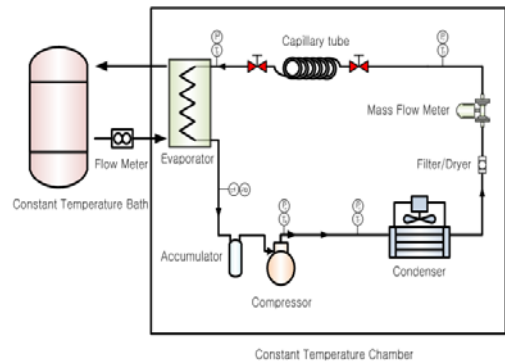


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

본 연구에서는 모세관 관경, 길이 변화에 따른 R-22 냉매와 R-1270 냉매의 성능특성을 알아보기 위해 약 3.0 kW 냉동능력을 발휘하는 기본적인 냉동시스템의 구성요소인 압축기, 응축기, 모세관, 증발기와 기타장치로 구성하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 실험 장치의 개략도와 실제 사진을 나타내고 있다. 사용된 압축기는 왕복동식 압축기로 입구와 출구 측의 압력 센서로 압력을 측정하고 파워미터(Yokogawa사)를 부착하여 각 운전조건에 따라 압축기에서 소요되는 동력을 측정하였다. 응축기는 공랭식이며 증발기는 수냉식을 사용하였다. 시스템의 팽창 장치로는 모세관을 선정하였고 증발기와 응축기, 압축기, 모세관 등 주요 입·출구에는 압력센서와 온도센서를 동일한 부분에 설치하여 실시간으로 데이터 로거(Yokogawa사)를 통하여 데이터를 PC에서 처리하였다. 냉매의 온도 측정을 위해 정밀 수은온도계로 보정하여 오차범위를 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 인 T-type 열전대를 사용하였고, 냉매 유량

측정을 위해 질량 유량계를 응축기 출구측에 설치하였다. 응축기 및 증발기에 공급하는 이차유체의 온도 조절을 위해 항온조와 히터를 설치하였고, 이차유체의 유량 측정을 위해 수유량계를 설치하였다. 장치 배관 및 모든 부분은 고무발포보온재와 보온재 테이프를 사용하여 충분히 단열함으로써 외부와의 열교환이 없도록 하였다.

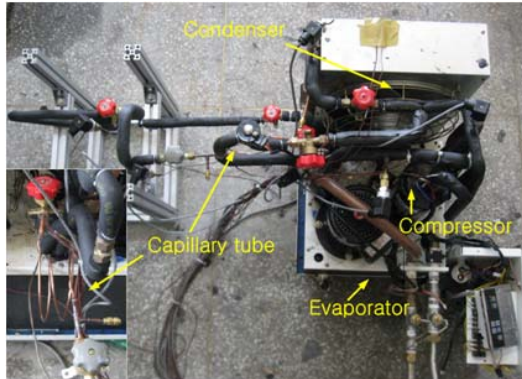


Fig. 2 Photograph of experimental apparatus

2.2 실험조건 및 방법

본 실험 조건은 Table 1 에서와 같이 작동유체로 규제 대상 냉매인 R-22와 이를 대체할 것으로 판단되는 자연냉매 R-1270 냉매를 사용하여 같은 조건하에서 진행하여 그 특성을 비교해 보았다. 냉수는 항온조를 설치하여 24℃의 일정한 부하를 공급하였고, 외기온도는 30℃로 챔버를 이용하여 응축기가 일정하게 열교환 할 수 있도록 하였다. 내경 1.8mm 모세관 표준모델의 기준을 모세관 단품 실험을 통해 결정하였다. 단품 실험을 위한 실험 장치의 구성은 압축기와 압축기로 전원을 공급하기 위한 전원 공급장치, 압축기 토출쪽과 모세관으로 연결되는 부분에 갑작스런 팽창과 압력 불균형을 줄이기 위한 머플러, 그리고 고온에 대비한 냉각장치를 따로 장착하고 온도를 균일하게 유지하였다. 모세관 입·출구에 압력 게이지와 열전대를 장착하여 압력 및 온도를 측정하였다. 모세관 단품 실험에서 사용한 냉매는 편이상 공기로 하였다. 실험 방법은 모세관을 충분히 길게 하고 일정하게 잘라가며 모세관 출구가 충분히 안정화 되는 때까지

기다린 후 압력과 온도를 측정하였다. 이렇게 결정된 모세관 표준 관경· 길이를 기준으로 모세관 관경은 각각 (1.6 · 1.8 · 2.0mm), 길이는 각각 (85 · 105 · 125cm)로 총 9종류의 모세관을 제작하여 한 실험이 끝나면 모세관 양쪽에 밸브를 설치하여 교체하며 실험하였다. 냉매 충전량은 먼저 R-22냉매(관경1.8mm, 길이105cm) 일 때 실험 장치에 주입하여 실험하였고, R-1270은 R-22와 표준조건 일 때 냉매포화온도와 과열도를 기준으로 냉매 충전량을 결정하였다. 장치를 가동한 후 냉매의 포화온도 및 압력을 관찰 하면서 30분 이상 평형 상태로 유지되는 정상 상태가 되었을 때 필요한 데이터 (온도, 압력, 유량 등)를 계속하였다. 또한 온도, 압력, 유량 및 전력량 등은 Yokogawa사의 MX-100 모델을 사용하여 PC에 저장하는 동시에 모니터에서 각 측정값을 실시간 확인할 수 있도록 하였고 이렇게 수집한 데이터는 PC에 저장하여 데이터 해석을 위한 프로그램을 이용하여 분석하였다.

Table 1 Experimental condition

Parameter		Value
Refrigerant		R-22, R-1270
Capillary tube	I· D [mm]	1.6, 1.8, 2.0
	L [cm]	85, 105, 125
Chamber temperature [℃]		30
Chilled water temperature [℃]		24

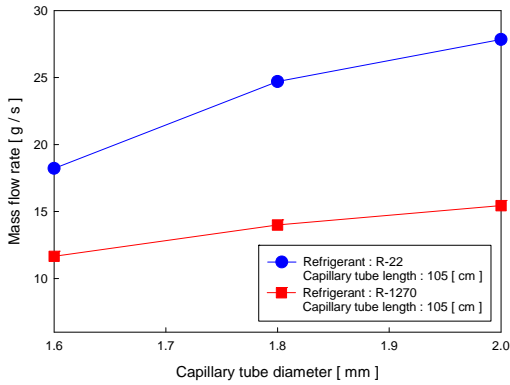
3. 실험결과 및 고찰

3.1 냉매 질량유량의 변화

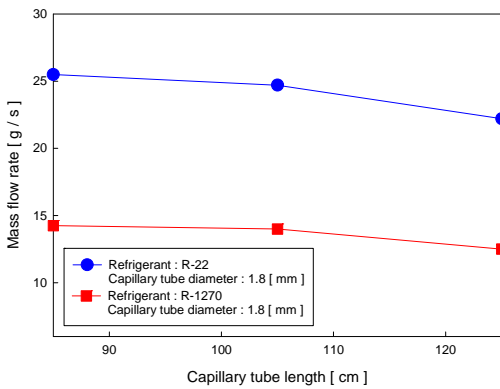
Fig. 3(a)는 모세관 길이가 105 cm 일 때 모세관 관경 변화에 따른 냉매 질량유량의 변화를, Fig. 3(b)는 모세관 관경이 1.8 mm일 때 모세관 길이 변화에 따른 두 가지 작동유체의 질량유량의 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 두 가지 냉매 모두 모세관 관경이 증가할수록 냉매 질량유량은 증가하고, 모세관 길이가 증가할수록 냉매 질량유량은 감소하고 있다. 이는 모세관 관경이 감소하고, 길이가 증가할수록 시스템 내의 저항의 증가

로 냉매 질량유량이 감소하는 것으로 판단된다. 탄화수소계 냉매인 R-1270은 R-22에 비해 모세관 길이 및 관경 변화에 따라 평균 약 36~44.5% 작은 냉매 순환량을 나타내고 있으며, 탄화수소계 냉매는 동일 용량의 시스템에서 R-22에 비해 높은 비체적으로 인해 적은 냉매순환량을 나타냄을 알 수 있다.

은 값을 나타내고 있다. R-1270은 동일 냉매온도에서 R-22에 비해 높은 압력을 나타낸다. 또한, 탄화수소계 냉매는 R-22에 비해 낮은 증기밀도 및 높은 열전도도로 인해 관내 유동시 높은 압력강하를 나타내게 된다. 이로 인해 그림에서와 같이 R-22에 비해 높은 압력강하를 보이게 된다고 판단된다.



(a) Diameter of capillary tube



(b) Length of capillary tube

Fig. 3 The variation of mass flow rate

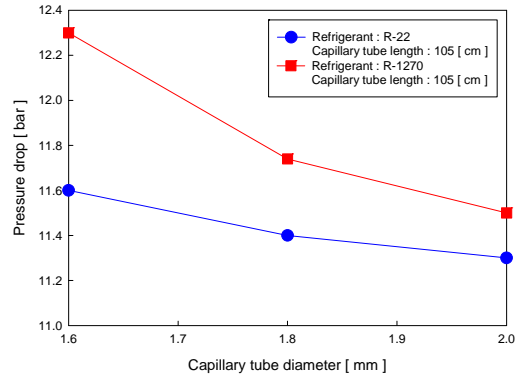


Fig. 4 The variation of pressure drop

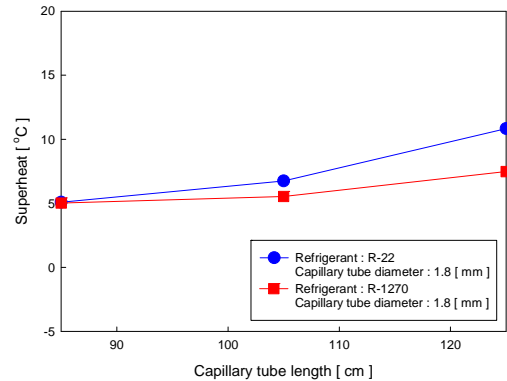


Fig. 5 The variation of superheat

3.2 압력강하의 변화

Fig. 4는 모세관 길이가 105 cm 일 때 모세관 관경 변화에 따른 시스템의 고·저압 차의 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 모세관 관경이 증가할수록 모세관내 압력강하는 감소하고 있다. R-1270은 R-22에 비해 평균 약 1.7~5.7% 높

3.3 과열도의 변화

Fig. 5는 모세관 관경이 1.8 mm 일 때 모세관 길이 변화에 따른 두 가지 냉매의 과열도 변화를 나타내고 있다. 두 가지 냉매 모두 모세관 길이가 증가할수록 냉매 순환량의 감소로 인해 과열도가 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. R-1270은 R-22보다 동일 모세관 길이에서 평균 약 1.4~31% 낮은 과열도를 나타내고 있다. 시스템 내 과

열도의 증가는 냉동능력을 증가시키지만 압축기 토출가스 온도를 상승시키고 소요동력을 증가시켜 시스템 신뢰성 및 효율을 감소시키는 요소가 된다. 따라서 R-1270이 R-22에 비해 모세관 길이에 따른 낮은 과열도로 인해 시스템 측면에서 유리하다고 할 수 있다.

3.4 냉동능력의 변화

Fig. 6은 모세관 길이가 105 cm 일 때 모세관 환경 변화에 따른 두 가지 작동유체의 냉동능력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 두 가지 냉매 모두 모세관 환경이 증가할수록 시스템 내 냉매 순환량의 증가로 냉동능력이 증가함을 알 수 있고, R-1270이 R-22에 비해 평균 약 1.1~9.1% 높은 값을 나타내고 있다. 이는 R-1270이 R-22에 비해 단위 냉매순환량당의 증발 엔탈피가 크고, 높은 열전도도로 인해 냉매 순환량 증가에 따른 열전달 향상치가 크고 그로 인해 높은 냉동능력을 나타낸다고 판단된다.

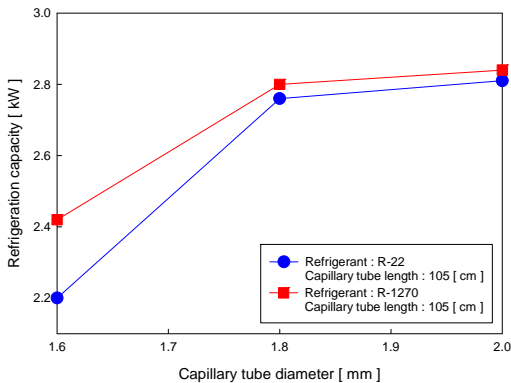


Fig. 6 The variation of refrigeration capacity

3.5 압축일량의 변화

Fig. 7은 모세관 길이가 105 cm 일 때 모세관 환경 변화에 따른 두 가지 작동유체의 압축일량의 변화를 나타내고 있다. 압축일량은 장치가 평형상태에서 운전되는 동안 압축기 입력전류와 전압으로 산출하였다. 그림에서와 같이 모세관 환경이 증가할수록 냉매 순환량의 증가로 두 가지 냉매 모두

압축일량이 증가하고 있다. R-1270은 R-22에 비해 평균 약 0.5~4.3% 낮은 값을 나타내고 있으며, 이는 냉매 순환량, 증발온도 및 비열비 등 열물성값의 차이로 인한 영향이라 판단된다.

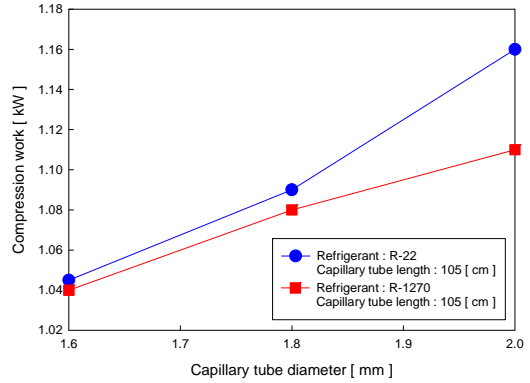


Fig. 7 The variation of compressor work

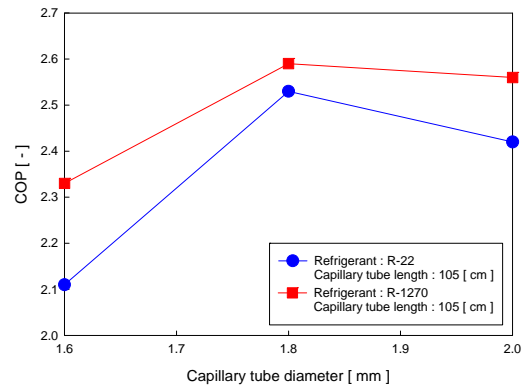


Fig. 8 The variation of COP

3.6 성능계수의 변화

Fig. 8은 모세관 길이가 105 cm 일 때 모세관 환경 변화에 따른 두 가지 작동유체의 COP의 변화를 나타내고 있다. 두 가지 냉매 모두 모세관 환경이 1.8 mm일 때 가장 높은 COP를 나타내고 있다. 성능계수는 냉동능력을 압축일량으로 나누어 얻어진 값이다. 모세관 환경이 증가할수록 냉매 순환량이 증가하게 되어 냉동능력이 증가하지만 압축일량 또한 증가하게 된다. 본 연구의 실험조건에서는 모세관 환경이 1.8 mm일 때 압축일량에 대한

냉동능력의 비가 가장 높은 값을 나타내어 그림과 같은 결과를 나타내었다.

4. 결 론

모세관 길이와 환경 변화에 따른 R-22와 대체냉매로 기대되는 탄화수소계 냉매인 R-1270을 적용하여 시스템의 성능특성을 실험적으로 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 모세관 길이 및 환경 변화에 따른 두 가지 냉매의 냉매 순환량을 비교한 결과, 모세관 환경이 증가하고, 길이가 감소할수록 증가하였고, R-1270은 R-22에 비해 모세관 길이 및 환경 변화에 따라 평균 약 36~45% 작은 냉매 질량유량을 나타내었다.

(2) 모세관 길이가 105 cm 일 때 모세관 환경 변화에 따른 시스템의 고·저압 차는 모세관 환경이 증가할수록 감소하였고, R-1270은 R-22에 비해 평균 약 2~6% 높은 값을 나타내고 있다. R-1270은 동일 냉매온도에서 R-22에 비해 높은 압력을 나타내었다.

(3) 모세관 환경이 1.8 mm 일 때 모세관 길이 변화에 따른 두 가지 냉매의 과열도를 비교한 결과 모세관 길이가 증가할수록 냉매 순환량의 감소로 인해 과열도가 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

(4) 모세관 길이가 105 cm 일 때 모세관 환경 변화에 따른 두 가지 작동유체의 냉동능력은 모세관 환경이 증가할수록 증가하였고, R-1270은 R-22에 비해 우수한 물성치로 인해 평균 약 1 ~ 9% 높은 값을 나타내었다.

(5) 모세관 길이가 105 cm 일 때 모세관 환경 변화에 따른 R-1270의 압축일량은 R-22에 비해 평균 약 0.5~4% 낮은 값을 나타내었다.

(6) 모세관 길이가 105 cm 일 때 모세관 환경 변화에 따른 R-1270의 COP는 전 실험범위에서 R-22에 비해 높은 값을 나타내어 성능계수 측면에서 봤을 때 충분히 R-22를 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2008학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK 2008-035)

참고문헌

- [1] Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, 1989, Final Act, United Nations Environment Programme.
- [2] Global Environmental Change Report, A brief analysis of the Kyoto protocol, Vol. IX, No. 24, December, 1997.
- [3] James. R. W. and Missenden. J. F., "The use of propane in domestic refrigerators. International Journal of Refrigeration", Vol. 15. No. 2, pp. 95-100, 1992.
- [4] Hong, K. S., Hwang, I. N. and Min, M. K., "The Effect of Oil on Refrigerant Flow through Capillary Tubes," Trans. of the Sarek. Vol. 12, No. 9, pp 791-801, 2000.
- [5] 최중민 등 2인, "대체냉매를 적용한 일반화된 모세관의 유량예측 상관식", 설비공학논문집, Vol. 15, No. 9. pp. 744-750, 2003.
- [6] Lee, H. S., Yoon, J. I., Kim, J. D., and Predeep Bansal, "Evaporating heat transfer and pressure drop of hydrocarbon refrigerant in 9.52 and 12.70 mm smooth tube", International Journal of Mass and Heat Transfer, Vol. 48, No. 12, pp. 2351-2359, 2005.
- [7] Yoon, J. I., Lee, H. S., Lee, K. B., Kim, J. D., and Predeep Bansal, "Condensing heat transfer characteristics of hydrocarbon refrigerants in 9.52 and 12.70 mm smooth tube", Heat Mass Transfer, Vol. 42, No. 6, pp. 144-149, 2005.

저 자 소 개



윤정인(尹政仁)

1995년 Tokyo University of A&T 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 기계공학부 교수, 한국마린엔지니어링학회 편집이사, 대한설비공학회 편집이사, 한국동력기계공학회 편집이사



이호생(李虎生)

2006년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업(공학박사), 2007년 The University of Illinois, ACRC, post-doc 현재 부경대학교 기계공학부 전임연구원



김현우(金炫佑)

2009년 동의대학교 기계공학과 졸업(학사), 현재 부경대학교 냉동공조공학과 석사 과정 중



최원재(崔員宰)

2009년 부경대학교 냉동공조공학전공 졸업(학사), 현재 부경대학교 냉동공조공학과 석사 과정 중