

R14와 질소 혼합유체를 사용하는 극저온 열사이편의 과도상태 거동

Transient behavior of cryogenic thermosiphon working with R14 and nitrogen mixture

이지성^{1,*}, 정상권²

Jisung Lee^{1,*}, Sangkwon Jeong²

Abstract: The operational temperature range of thermosiphon is generally limited from the critical point to the triple point of the working fluid to maintain two-phase state. Thermosiphon with mixed working fluid has a potential to widen the operational temperature range. In this study, the physical behavior of mixed working fluid during the transient operation of thermosiphon was analyzed with temperature-mole fraction diagram. The condenser and the evaporator temperature variations were explained by the dew line and the bubble line of the mixture. It is encouraging that the thermosiphon operation commences early with larger fraction of high boiling point component, but the temperature gap between the condenser and the evaporator due to the separation of two components has a negative effect on the efficient cool down process.

Key Words: cryogenic thermosiphon, mixture, transient operation, T-x diagram.

1. 서 론

히트 파이프(heat pipe)는 밀폐된 공간 내에 존재하는 유체가 기액 상변화를 할 때 주고받는 잠열을 이용하는 열전달 기구로 매우 높은 유효 열전도도를 가진다. 히트 파이프는 크게 외부로부터 열을 흡수하는 증발부와 외부로 열을 발산하는 응축부로 나뉘며, 응축부에서 응축된 액체가 중력에 의해 증발부로 이동하는 히트 파이프를 열사이편(thermosiphon)이라 부른다[1]. 열사이편이 정상적으로 작동하기 위해서는 작동 유체가 기체와 액체의 2상(two phase)으로 존재해야 하기 때문에 열사이편의 작동온도 범위는 작동유체의 임계점과 삼중점 사이로 제한된다. 극저온 시스템에서 멀리 떨어져 있는 대상을 냉각할 때 열사이편은 매우 유용한 열전달 기구로 사용되며, 이러한 시스템의 냉각 과정은 크게 과도상태와 정상상태로 구분된다. 과도상태는 냉각대상의 온도가 상온에서 극저온 온도까지 냉

각되는 초기냉각 과정을 의미하며, 정상상태는 냉각대상이 일정한 온도로 유지되면서 증발부에서 응축부로 열을 전달하는 상태를 의미한다.

열사이편의 작동온도 범위는 극저온에서 두 가지 의미를 갖는다. 첫 번째로 열사이편의 최저 작동온도가 낮을수록 작동유체가 동결될 염려가 없어 원하는 온도 범위까지 냉각시키는데 자유롭게 된다. 두 번째로 열사이편의 최고 작동온도가 상온에 가까울수록 냉동기의 높은 냉동용량이 열사이편을 통해 냉각대상으로 전달되므로 초기 냉각시간을 단축시킬 수 있다. 극저온에서 사용할 수 있는 작동유체의 임계점과 삼중점 사이의 온도 범위를 표기한 Fig. 1 을 보면, 상온에서 70 K 정도까지 작동할 수 있는 이상적인 유체는 존재하지 않는다[2].

질소(Nitrogen)와 에탄(Ethane)을 각각 다른 열사이편의 작동유체로 사용하면, 질소만을 사용하는 경우보다 초기 냉각시간이 30% 가량 단축된다는 보고가 있다[3-4]. 이것은 추가된 에탄 열사이편에 의해서 냉동기의 큰 냉동용량을 사용할 수 있었기 때문이다. 열사이편에 혼합유체를 사용하여 작동온도 범위를 넓히게 되면 단일 열사이편에서도 동일한 효과를 기대할 수 있다. 상온 및 고온에서는 혼합물을 작동유체로 사용하여 히트파이프의 어는점을 낮추거나[5-7], 열수송 능력 향상[8-10] 및 열사이편의 임계 열유속 향상[11]을 위한 연구가 수행되었으나, 극저온 영역에서 혼합물을 이용한 연구 사례는 보고된 것이 없다. 본 연구에서는 두 가지 유체의 혼합물을 단일 열사이편의 작동유체로 사용하는 극저온 열사이편의 과도상태에서 혼합유체의 작동 특성 규명을 목적으로 한다. 혼합유체의 경우, 측정된 온도와 압력만으로는 정확한 내부 상황을 예측하는 것이 어렵기 때문에[12] 투명 열사이편을 통한 가시화실험을 수행하였고[13], 본 논문에서는 관찰된 결과를 토대로 T-x (Temperature-mole fraction) 선도 상에서 혼합물의 거동을 분석하였다.

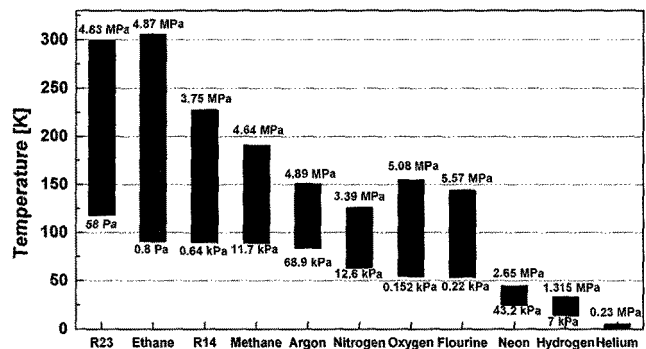


Fig. 1. Temperature span between the critical point and the triple point for various fluids.

¹학생회원 : KAIST 기계공학과 박사과정

²정 회원 : KAIST 기계공학과 교수

*교신저자 : jisungle@kaist.ac.kr

원고접수 : 2009년 09월 24일

심사완료 : 2010년 03월 02일

게재확정 : 2010년 03월 02일

2. 본 론

2.1. 작동유체의 선정

작동유체를 선정할 때 실험의 안전을 위해 독성이나 화재 위험이 없는 유체를 고려하였다. 따라서, 액상으로 존재하는 영역이 중복되면서 열사이펀의 작동온도 범위를 넓힐 수 있도록 R14(CF₄: Tetrafluoromethane)와 질소(N₂: Nitrogen)를 혼합작동유체로 선정하였으며, 각 유체의 임계점과 삼중점은 Table 1 [2]에 표기하였다.

Table 1. Properties of working fluids.

	Critical point		Triple point	
	temperature	pressure	temperature	pressure
CF ₄	227.5 K	3.75 MPa	89.5 K	0.64 kPa
N ₂	126.2 K	3.39 MPa	63.2 K	12.6 kPa

2.2. 실험장치의 구성 및 실험방법

실험장치의 구성은 Fig. 2와 같다. 전체 구성은 GM 냉동기(Model 350 CS, Austin Scientific), 투명 열사이펀, 버퍼탱크(buffer tank), 진공챔버로 구성된다. 외부로부터 유입되는 복사(radiation) 열침입을 최소화하기 위하여 여러 장의 복사열 차폐막(super insulation)을 설치하였다. 냉동기의 저온부와 열사이펀은 1 mTorr (0.133 Pa) 이하로 유지되는 투명한 진공챔버 내부에 위치한다. 끓는점이 높은 성분의 조성이 증가함에 따라 열사이펀의 작동 시점이 빨라지는 것을 확인하기 위하여 본 논문에서는 압력비를 통해 Table 2와 같이 4가지 조성의 혼합유체로 실험을 수행하였다. 버퍼탱크에 혼합유체의 충전이 완료되면 열사이펀으로 주입되는 압력조절기(regulator)를 열어 작동유체를 공급하였고, 열사이펀 내부의 압력을 3기압 정도로 유지시켰다. 냉동기의 저온부와 열사이펀의 응축부, 증발부의 표면에 실리콘 다이오드 센서(DT-670-SD, Lake Shore Cryogenics)를 부착하여 냉각 과정 동안의 온도를 측정하였다. 열사이펀 내부 압력은 열사이펀과 버퍼 탱크 사이에 설치된 압력계(Pressure transducer, Honeywell Sensotec Sensors)를 통해 측정되었고, 혼합 조성을 조절하기 위하여 버퍼탱크에도 압력계(Pressure transducer, Sensys)를 별도로 설치하였다.

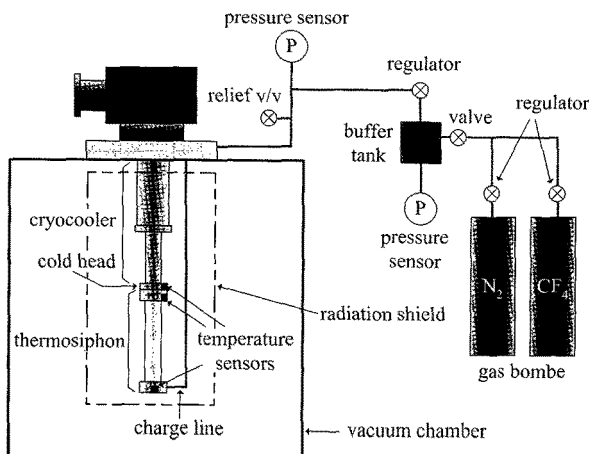


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

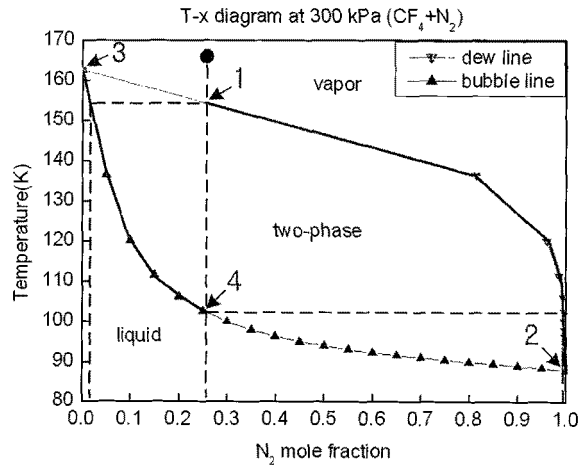
Table 2. Mixture composition.

Case	N ₂ mole fraction (mass fraction)
1	25.9% (10%)
2	35.7% (15%)
3	44% (20%)
4	51.2% (25%)

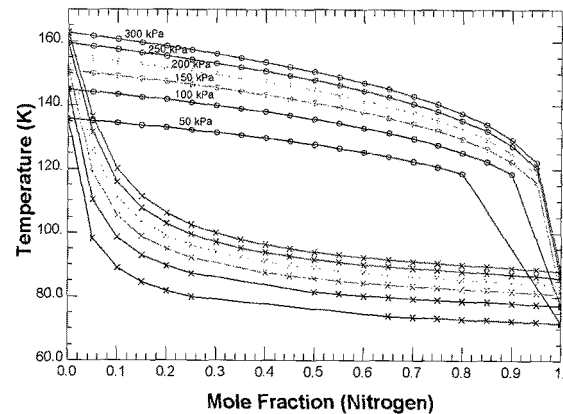
2.3. T-x 선도에서 본 혼합유체의 거동

R14와 질소 혼합물에 대한 T-x 선도를 Peng-Robinson equation [2]을 통해 계산할 수 있다. Fig. 3(a)는 압력이 300 kPa로 일정할 때 질소의 몰분율에 따른 이슬점(dew point)과 끓는점(bubble point)을 나타내는 상평형도이다. 압력이 감소하면 혼합물의 이슬점과 끓는점도 내려가며 그 경향은 Fig. 3(b)와 같다. Fig. 4는 질소의 조성이 25.9%인 혼합유체로 열사이펀을 작동 시켰을 때의 냉각과정 그래프이다. 냉각과정에서 열사이펀의 응축부와 증발부의 온도 변화를 T-x 선도 상에서 조성에 따라 변하는 이슬점과 끓는점으로 설명할 수 있다.

응축부가 냉동기에 의해 상온에서부터 냉각되기 시작하여, 온도가 혼합물의 이슬점(Fig. 3(a) 및 Fig. 4의 1번: 155.8 K)에 이르게 되면 응축이 시작된다. 응축이



(a)



(b)

Fig. 3. T-x diagram for N₂-CF₄ mixture (a) at 300 kPa (b) from 300 kPa to 50 kPa.

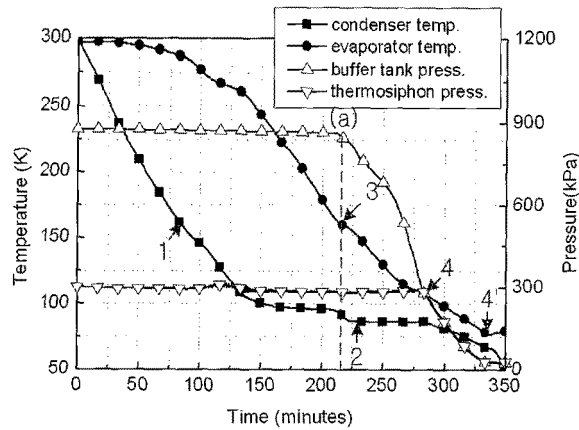


Fig. 4. Cool down history of thermosiphon (N₂ mole fraction 25.9%).

일어나기 전에는 모두 기체 상태이므로 열사이펀 내에서 조성의 변화가 없지만, 응축이 시작되는 순간부터 기체영역과 액체영역에서의 조성이 변하게 된다. 처음 응축하여 생긴 응축물의 조성은 Fig. 3. (a)의 1번에서 수평선을 그었을 때 끓는점(bubble line)과 만나는 점이 된다. 따라서 응축된 액체는 R14의 조성이 매우 높은 상태이다. 응축된 액체는 단열부의 벽면을 타고 내려가면서 또는 증발부로 직접 떨어지면서 증발하게 되고, 이것은 단열부와 증발부를 냉각시키는 역할을 한다. 냉각이 진행되는 동안 열사이펀의 응축부와 증발부의 온도가 다르기 때문에 균일한 온도에서의 상평형을 적용할 수 없다. 응축물이 증발되는 과정을 세분하여 보면 Fig. 5와 같다. 증발부의 온도는 상온에 가까운 온도로 응축된 액체에 비하여 매우 높기 때문에 응축된 액체는 증발부로부터 열을 받아 온도가 상승한다. 온도가 상승하게 되면 액체 중 일부가 증발하게 되고, 남아있는 액체의 조성은 상승된 온도에서 수평선을 그었을 때 끓는점(bubble line)과 만나는 점이 된다. 따라서 남아있는 액체에서 R14의 조성은 증가하게 된다. 이후에 다시 온도가 상승하면 일부는 증발하고 일부는 액체로 남는 과정을 반복하며, 이때 남은 액체의 R14 조성은 더욱 증가하게 된다. 이러한 과정을 거치게 되면 최종적으로 응축된 액체는 순수한 R14만 남게 된다. 증발부가 계속 냉각되어 증발부의 온도가 R14의 포화온도(Fig. 3(a) 및 Fig. 4의 3번: 161.4 K)에 이르게 되면 마지막에 남은 순수한 액체 R14가 완전히 증발하지 않고 증발부내에 머무르게 되어 증발부에 액체가 쌓이게 된다. 이때 열사이펀 내부의 압력이 감소해야 하는데, 투명 열사이펀의 경우 압력조절기로 열사이펀 내부 압력을 일정하게 유지하였기 때문에 버퍼 탱크의 압력 감소로 나타나며, 이것은 Fig. 4의 (a) 지점에서 확인할 수 있다. 이후에 증발부의 온도가 더 내려가게 되면 액체내의 질소 조성이 조금씩 증가하게 되어, 혼합물의 끓는점(Fig. 3(a) 및 Fig. 4의 4번)으로 수렴하게 되고, 열사이펀 내부에 있던 기체가 대부분 액화되어 압력이 매우 낮아지게 되면 최종적으로 초기 혼합 조성에 해당하는 혼합물의 끓는점(Fig. 4의 4번)으로 수렴하게 된다. 압력이 300 kPa로 일정할 때 T-x 선도 상에서 보면 증발부 액체의 조성은 Fig. 3(a) 3번에서 시작하여 4번으로 점차 이동하게 된다.

응축이 시작되면서 응축부 주변과 벽면에 R14의 조성이 매우 높은 액체가 형성됨에 따라 기체부분의 조성은 초기 혼합 조성에 비해 R14의 조성이 점차 감소

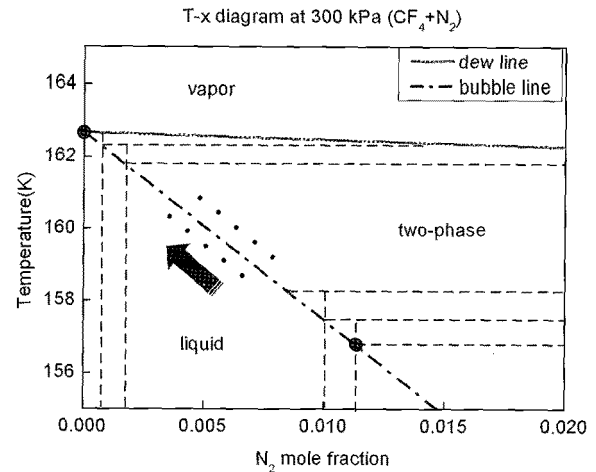


Fig. 5. Concentration movement of mixture liquid droplet when the droplet fall down to the evaporator.

하는 방향으로 변한다. 이러한 조성의 변화는 열사이펀의 내부 압력이 3기압 정도로 낮게 유지되었기 때문에 더 강하게 나타난다. 이후에 증발부 바닥에 액체 R14가 쌓이게 되면, 기체로 존재하는 영역은 R14의 농도가 매우 얇아져서 순수한 질소의 조성에 가까워진다. 따라서 열사이펀의 작동이 시작된 후 응축부의 온도는 초기 혼합조성에 해당하는 이슬점(Fig. 3(a) 및 Fig. 4의 1번)에서 시작하여 최종적으로 질소의 포화온도로 수렴하게 된다. 압력이 300 kPa로 일정할 때 T-x 선도 상에서 보면 기체영역의 조성은 Fig. 3(a)의 1번에서 시작하여 2번으로 이동하게 된다.

열사이펀은 응축부에서 응축이 일어나면서 작동하기 시작한다. 따라서 R14의 조성이 높아질수록 혼합물의 이슬점도 높아지게 되어 열사이펀의 응축이 빨리 시작되는 것을 확인하였다. 하지만 본 절에서 분석한 T-x 선도 상에서의 이슬점과 끓는점을 따르는 거동은 다른 조성에서도 모두 동일하게 성립하며, 실험결과와도 잘 일치함을 확인하였다.

2.4. R14와 질소 혼합유체의 열사이펀내 거동

R14와 질소 혼합유체의 열사이펀 내 거동을 Fig. 6에 정리하였다. 응축이 시작되기 전에는 모두 기체상태로 존재하다가 응축부의 온도가 혼합유체의 이슬점에 도달하면 응축이 시작되어 R14의 조성이 매우 높은 액체가 응축부에 형성되고, 증발부에 떨어지자마자 증발한다(a). 증발부가 냉각되어 온도가 R14의 포화온도에 이르게 되면 증발부 바닥면에 순수한 액체 R14가 쌓이게 된다(b). 이후에 증발부의 온도가 더 하강하게 되면 증발부에 존재하는 액체에서 질소의 조성이 조금씩 증가한다(c). 이때부터 증발부 바닥면의 액체는 R14와 질소 혼합물로 이루어지고, 증발부의 온도는 혼합물의 끓는점이 된다. 냉각이 계속 진행되면 증발부의 액체 조성이 초기 혼합물의 조성으로 수렴하게 되고 응축부의 기체영역에서 질소의 조성이 매우 높아지게 된다(d). 이후에 증발부의 온도가 혼합물의 동결점에 이르게 되면 고체 입자가 형성되기 시작한다. 흥미로운 사실은 증발부에서 동결이 나타날지라도 R14의 몰분율이 56% 이하일 경우, R14가 동결되어 증발부 바닥면으로 조용히 가라앉게 되고, 열사이펀은 남은 액체에 의해 계속 작동하는 것을 관찰하였다(e). 이후에 응축부의 온도가 질소의 삼중점에 이르게 되면 응축부

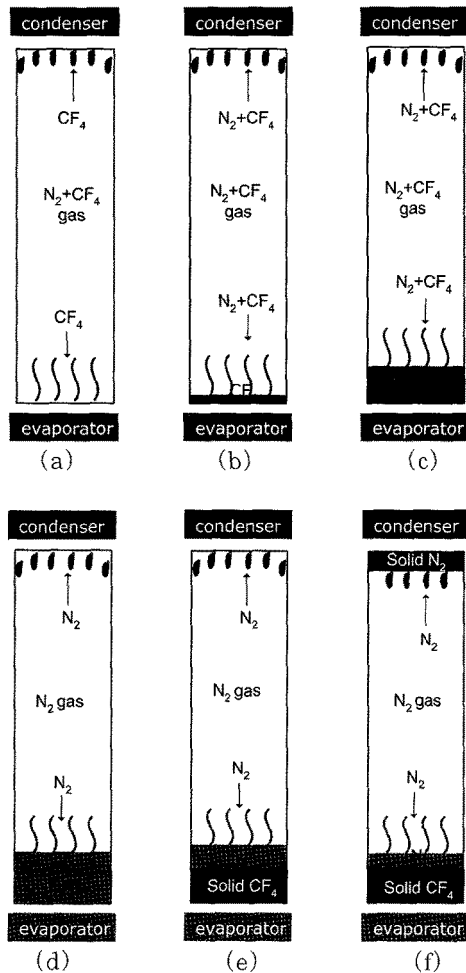


Fig. 6. Internal state of thermosiphon with R14 and Nitrogen mixture working fluid.

의 표면에도 고체가 형성되어 열사이펀의 작동이 멈추게 된다(f).

3. 결 론

혼합물의 열사이펀내 거동을 T-x 선도 상에서 분석하여 온도와 조성이 어떻게 변하는지 확인하였다. 질소에 R14가 혼합되었을 때 혼합물의 이슬점(dew point)에서 응축이 시작되어 열사이펀의 작동시점이 앞당겨 진다. 반면에 비등점이 높은 R14가 먼저 액화되어 증발부에 머물 때, 응축부의 기체영역은 비등점이 낮은 질소의 조성이 증가하여 응축부와 증발부 사이의 온도차를 유발하게 된다. 또한 증발부에 R14와 질소가 혼합되어 액체 상태로 존재하는 동안 증발부의 온도는 혼합물의 끓는점으로 유지된다. 이때, 응축부의 온도는 질소의 포화온도를 유지하기 때문에 이 역시 응축부와 증발부 사이의 온도차를 유발하게 된다. 응축부와 증발부 사이의 온도차가 발생하게 되면 냉동기와 냉동대상간의 온도차가 증가한다는 것을 의미하고, 이것은 과도상태의 냉각효율을 떨어뜨리게 된다. 본 논문에서 밝힌 혼합물의 물리적 거동은 혼합물을 사용하는 열사이펀에서 나타나는 현상과 작동특성을 설명할 수 있는 중요한 자료가 될 것으로 기대된다. 한편, 혼합유체를 사용하는 열사이펀이 시스템의 초기 냉각시간에 미치는 전체적인 영향을 파악하기 위해서는 냉각 대상의

열용량 및 냉동기의 냉동용량 특성 변화, 그리고 다른 종류의 혼합유체를 적용하는 경우에 대한 추가연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(No. R0A-2007-000-20062-0)

참고 문헌

- [1] L. S. Piro and I. L. Piro, "Industrial two-phase thermosyphons," Begell house, 1997.
- [2] REFPROP, NIST Standard Reference Database 23, Version 8.0, 2007.
- [3] Prenger F. C., Hill D. D., Daney D. E., Daugherty M. A., Green G. F., Chafe J., Heiberger M., and Langhorn A., "Heat pipes for enhanced cooldown of cryogenic system," Cryocoolers, vol. 9, pp. 831-839, 1997.
- [4] Prenger F. C., Hill D. D., Daney D. E., Daugherty M. A., Green G. F., Chafe J., Heiberger M., and Langhorn A., "Performance of cryocooler shunt heat pipes," Advances in Cryogenic Engineering, vol. 43, pp. 1521-1528, 1998.
- [5] 정의국, 부준홍, 정원복, "2성분 혼합물을 작동유체로 사용하는 태양열 집열기용 히트파이프의 실험적 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 제2권, pp. 13-18, 2003.
- [6] 정의국, 정원복, 부준홍, "중온범위에서 2성분 혼합물을 작동유체로 사용하는 히트파이프의 열성능 연구," 대한설비공학회 하계학술발표대회, 제2권, pp. 887-892, 2004.
- [7] 정의국, 부준홍, "물-에탄올 혼합물을 작동유체로 하는 태양열 집열기용 히트파이프의 작동특성," 한국태양에너지학회 춘계학술대회 논문집, pp. 182-187, 2006.
- [8] Raffaele S., Nicola di F., Raimondo F., Yoshiyuki A., "Heat pipes with binary mixtures and inverse Marangoni effects for microgravity applications," Acta Astronautica, vol. 61, pp. 16-26, 2007.
- [9] Raffaele S., Yoshiyuki A., Raimondo F., "Comparative study of heat pipes with different working fluids under normal gravity and microgravity conditions," Acta Astronautica, vol. 63, pp. 24-34, 2008.
- [10] Nicola di F., Raffaele S., Yoshiyuki A., "New alcohol solutions for heat pipes: Marangoni effect and heat transfer enhancement," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 51, pp. 6199-6207, 2008.

- [11] A. Nuntaphan, J. Tiansuwan, T. Kiatsiroat, "Enhancement of heat transport in thermosyphon air preheater at high temperature with binary working fluid: A case study of TEG-water," *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, pp. 251-266, 2002.
- [12] 김영권, 이지성, 정상권, 이지성, "N₂와 CF₄ 혼합물을 작동유체로 하는 극저온 열사이펀에 대한 실험적 연구," *설비공학논문집*, 21권, 9호 pp. 505-512, 2009.
- [13] Lee J., Jeong S., Ko J., Kim Y., Jung S., Han Y., "Transparent cryogenic thermosiphon using N₂ and CF₄ mixture as the working fluid," *Superconductivity and Cryogenics*, vol. 11, no. 2, pp. 37-40, 2009.

저 자 소 개



이지성(李智星)

1981년 11월 26일생, 2007년 부산대학교 기계공학부 졸업, 2009년 KAIST 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정.



정상권(丁常權)

1962년 8월 16일생, 1985년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1987년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992년-1995년 MIT-Plasma Fusion Center 연구원, 현재 KAIST 기계공학과 교수.