

혼합 작동 유체를 이용한 진동 세관형 히트 파이프의 압력 진동과 열전달 특성에 관한 연구

정현석* · 김정훈** · 김주원*** · 김종수†
(2001년 8월 17일 접수, 2001년 12월 3일 심사완료)

The Study on Pressure Oscillation and Heat Transfer Characteristics of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe Using Mixed Working Fluid

Hyun-Seok Jung, Jeung-Hoon Kim, Ju-Won Kim
and Jong-Soo Kim

Key Words: Oscillating Capillary Tube Heat Pipe(진동 세관형 히트 파이프), Pressure Oscillation
(압력 진동)

Abstract

In this paper, heat transfer and pressure oscillation characteristics on oscillating capillary tube heat pipe(OCHP) according to input heat flux, mixture ratio of working fluid and inclination angle were investigated and were compared single working fluid(R-142b) with binary mixture working fluid(R-142b-Ethanol). OCHP was made to serpentine structure of loop type with 10 turns by drilling the channels of length 220mm, width 1.5mm, and depth 1.5mm on the surface of brass plate. In this study, R-142b and R-142b-Ethanol were used as working fluids, the charging ratio of working fluids was 40(vol.%), the input heat flux to evaporating section was changed from 0.3W/cm² to 1.8W/cm², and mixture ratio of working fluid was R(100%), R(95%)-E(5%), R(90%)-E(10%), and R(85%)-E(15%). From the experimental results, it was found that the effective thermal conductivity of single working fluid was better than that of binary mixture working fluid. But, in case of binary mixture working fluid, critical heat flux was higher than that of single working fluid. And, the higher the mixture ratios of working fluid, the lower heat transfer performance. In case of pressure oscillation, as the inclination angle was lower, pressure wave was more irregular. These phenomena were more serious when the working fluid was binary mixture. Besides, when mixture ratio was higher, saturated pressure was increased, more irregular wave was observed and the mean amplitude was increased. For the same input heat flux, inclination angle and charging ratio, when pressure oscillation has sinusoidal wave, mean amplitude was small, and saturated pressure was low value, the heat transfer was excellent.

기호설명

A : 면적 [m²]
c_o : 비열 [kW/kgK]
f : 진동수 [Hz]
l : 증발부와 응축부 사이의 평균 거리 [m]

P : 압력 [kPa]
Q : 열량 [W]
q : 열유속 [W/cm²]
T : 온도 [°C]

그리스문자

a : 충전율 [vol.%]
ζ : 농도 [wt.%]
θ : 경사각 [°]
λ : 유효 열전도율 [W/mK]
μ : 점성계수 [Ns/m²]

* 삼성전자(주)
** 부경대학교 해양산업개발연구소
*** 부경대학교 대학원
† 책임저자, 회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : kimjs@dolphin.pknu.ac.kr
TEL : (051)620-6442 FAX : (051)611-6368

ρ : 밀도 [kg/m^3]
 σ : 표면 장력 [N/m]

하첨자

c : 단면
 con : 응축부
 e : 에탄올
 eff : 유효
 eva : 증발부
 l : 액체
 m : 냉매 에탄올 혼합물
 r : 냉매
 v : 증기

1. 서 론

히트 파이프는 동력을 사용하지 않고 열을 빠르게 수송하는 대표적인 열전달 기구로서 전자기기의 냉각이나 산업 폐열의 회수 등에 폭넓게 응용되어질 수 있어 에너지 절약적 측면에서 그 응용이 높아질 것으로 기대된다. 진동 세관형 히트 파이프(이하 OCHP)는 일반적인 히트 파이프와는 다르게 내부에 응축부의 작동액을 증발부로 귀환시키는 Wick(wick)을 필요로 하지 않기 때문에 제작 공정 간소화로 제작 비용이 줄어들고, 극세관을 사용하므로 고압에도 견딜 수 있으며, 플렉시블하여 설치 공간의 제약이 작다는 이점도 가지고 있다. 특히, 일정 턴수 이상에서는 상부·수평·하부 가열 모드에서도 정상적인 작동이 가능하다.^(1~3)

이와 같은 OCHP는 대략 1mm 내외의 내경을 가진 긴 세관을 여러 개의 U턴(turn) 구조로 구성한 것으로, 주된 열전달은 기액 슬러그 유동의 진동과 증발 및 응축의 상변화에 의한 잠열 수송에 의해 이루어진다.^(1~9)

그러나, OCHP에 대한 연구는 일본과 한국의 몇몇 연구자들에 의해 이루어지고 있으며, 그 작동 메커니즘에 대해 열전달 특성, 작동 유체의 가시화, 내부 압력 진동 특성, 이론적 해석 등에 대해 여러 각도로 규명되고 있는 초기 단계에 있다. Kim 등⁽¹⁰⁾은 증발부와 응축부 두 지점에 압력계를 설치하여, 내부 압력 진동과 열전달 특성에 관한 실험을 통해, 증발부와 응축부의 압력차, 압

력 진동 파형, 진동수 등과 열전달 성능과의 관계에 대해 발표하였다. 그러나, OCHP의 열전달 성능과 밀접한 관계를 가지고 워이 없이 하부, 수평, 상부 가열 모드에서 작동이 가능하도록 하는 내부 압력 진동에 관한 연구는 아직도 매우 부족한 실정이다. 그리고, 실용화되고 있는 기존의 히트 파이프나 열사이폰 등에서는 2성분의 작동 유체를 이용하여 증발부의 드라이 아웃(dry out) 점을 높이거나 작동 유체의 성능 지수를 좋게 하여 열전달 성능이나 한계 열유속 조건을 높이는 연구가 활발히 진행중이며, 국내에서도 Kwak 등⁽¹¹⁾에 의해 물-에탄올의 혼합 작동 유체를 이용한 2상 밀폐 열사이폰에 대해 높은 열유속 조건에서의 안정 작동에 관한 연구 결과가 보고되었다. 그러나, OCHP의 경우에는 현재까지 혼합 작동에 관련된 연구 결과는 전무하다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 히트 파이프나 열사이폰에서 활발히 진행되는 2성분(binary mixture) 작동 유체를 이용한 OCHP의 전열 성능을 평가하여, OCHP의 내부 압력 진동과 열전달 특성과의 상관 관계를 관찰하고자 하였다. 또한, 순수 작동 유체를 사용한 경우와 혼합 작동 유체를 사용한 경우의 열전달과 내부 압력 진동 특성을 비교하여, OCHP의 전열 성능 향상을 위한 기초 자료를 얻고자 하였다.

2. 혼합 작동 유체의 특성

2.1 작동 유체의 선정

일반적으로 히트 파이프의 열수송 성능은 작동 유체의 열물성에 가장 크게 의존하고 있다. 그러므로, 히트 파이프의 정확한 설계를 위해 작동 유체의 열물성을 통해서 열수송 성능을 예측할 수 있는 평가 지수인 Merit수를 이용하고 있다. 그러나, 기존의 Merit수는 워형 히트 파이프와 열사이폰의 경우에 적용 가능하도록 제시된 것으로, OCHP의 경우에 적용 가능한 기준은 아직까지는 정립되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 저온용(150~750K)으로 사용되고 있는 작동 유체 중에서 열적, 물리적으로 안정 상태에 있으며, 시험부의 재료인 황동, 아크릴, 패키징재 등과 화학 반응을 일으키지 않는 작동 유체인 R-142와 에탄올을 작동 유체로 선정하였다. 특히 R-142와 에탄올은 기존의 OCHP 연구에서 가장 많이 사용되

어진 작동 유체들이며, R-142b는 포화 증기압이 높고 점성 계수가 적은 특성을, 에탄올은 R-142b에 비해 비점이 상당히 높으며 증발 잠열과 표면 장력이 큰 특성을 가지고 있다.

2.2 혼합 작동 유체의 물성치

Fig. 1은 순수 작동 유체의 물성치에 대한 혼합 작동 유체의 물성치의 비율 에탄올의 혼합량에 따라 나타낸 것이다. 혼합 작동 유체의 열역학적 물성치는 다음 식들에 의해 계산된다.

$$\rho_m = \frac{\rho_r \cdot \rho_e}{\zeta \cdot \rho_r + (1 - \zeta) \cdot \rho_e} \quad (1)$$

$$c_{p_m} = (1 - \zeta) \cdot c_{p_r} + \zeta \cdot c_{p_e} \quad (2)$$

$$\mu_m = \mu_r \cdot \exp[\zeta \cdot (\mu_e / \mu_r)^{0.3}] \quad (3)$$

$$\sigma_m = \sigma_r + (\sigma_e - \sigma_r) \cdot \sqrt{\zeta} \quad (4)$$

$$\lambda_m = \lambda_r \cdot (1 - \zeta) + \lambda_e \cdot \zeta - 0.72 \cdot (\lambda_e - \lambda_r) \cdot (1 - \zeta) \cdot \zeta \quad (5)$$

혼합 작동 유체의 열역학적 특성은 Fig. 1에서 볼 수 있는 것과 같이, R-142b 순수 작동 유체에 에탄올의 혼합 비율이 증가함에 따라 표면 장력과 점성 계수는 증가하지만, 액 밀도는 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 열역학적 특성 변화에 따라 OCHP의 내부 유동 양식, 열전달 특성, 압력 진동 특성 등에 상당한 변화가 있을 것으로 예상된다.

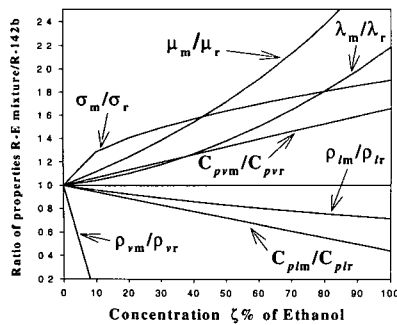


Fig. 1 Relation of thermophysical properties of R-142b-Ethanol against pure R-142b

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 실험에 사용된 실험 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 실험 장치는 시험부, 시험부의 가열/냉각 시스템과 데이터 처리 시스템으로 구성 되어 있다.

시험부의 가열/냉각 시스템 중 가열부는 전압 조절기와 파워 미터로 입열량이 조절되는 평판 히터로 구성하였으며, 냉각부는 순환 항온조를 이용하여 일정한 온도로 냉각된 물이 체적식 유량계를 거쳐 순환하도록 구성되어 있다.

데이터 처리 시스템은 온도와 압력 측정 시스템으로 구분되며, 시험부에서 측정된 온도와 압력 데이터는 각각 데이터 로거를 통해 PC에서 처리된다.

시험부는 황동판 표면에 길이 220mm, 폭 1.5mm, 깊이 1.5mm의 홈을 파서 미세 유로를 만들고, 이러한 유로가 서펜타인(serpentine) 구조를 갖도록 제작하였다. 그리고, 내부 유동을 관찰할 수 있도록 투명 아크릴을 덮고 볼트로 조여서 밀착시켰다. 또한, 가열부에서의 입열량이 외부로 손실되지 않도록 단열재로 충분히 단열하였다. 실험에 사용된 시험부는 크기가 1.5x1.5 mm, 길이는 220mm이며, 증발부, 단열부, 응축부는 1:1:1의 비율로 구성하였다. 각각 20개 채널의 정사각 채널로 구성된 10턴의 루프형(looped-type) OCHP이며, 시험부 제원을 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 실험 방법

3.2.1 온도 측정

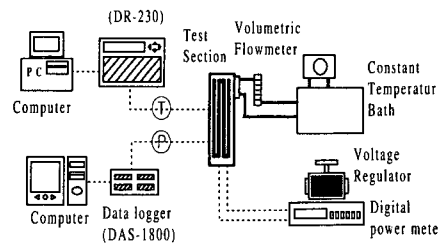


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

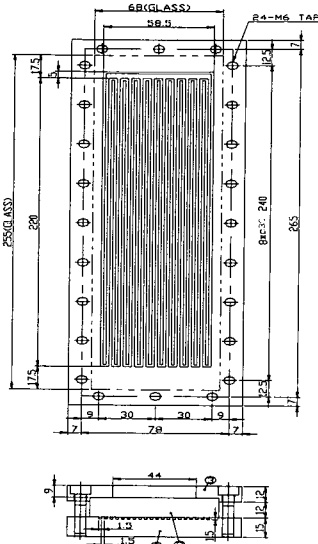


Fig. 3 Specifications of looped type test section with 10 turns

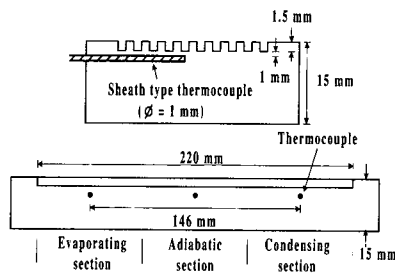


Fig. 4 Location of thermocouples

시험부의 전열면 표면 온도를 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 채널 바닥에서 1mm 아래를 가로질러 시험부의 중앙까지 직경 1.1mm의 구멍을 뚫어 직경 1mm의 피복된 T형 열전대(편차 : $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$)를 각각 증발부, 단열부 및 응축부에 각각 1개씩 삽입한 후 밀봉하였으며, 가공된 구멍과 열전대 사이의 틈에 열전도성이 좋은 실리콘 컴파운드를 주입하여 시험부와 열전대 사이의 접촉 저항을 최소화하였다. 증발부와 응축부에 설치된 열전대 사이의 거리는 146mm이며, 그 중앙 지점에 단열부의 열전대를 설치하였다. 또한, 응축부의 냉각수 온도를 측정하기 위해 입·출구에 2개의 피복된 열전대를 설치하였다.

온도 측정은 데이터 로그(DR-230, Yokogawa Co.)에 의해 이루어졌으며, RS-232C 통신에 의해

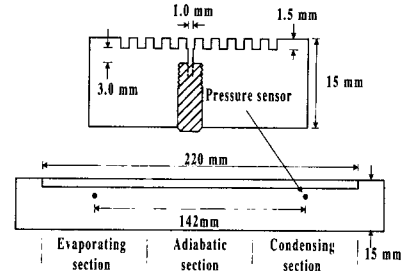


Fig. 5 Location of pressure sensors

PC로 측정값을 실시간으로 받아들였다. 모든 측정은 안정적인 작동 상태에서 측정된 값을 평균하여 사용하였다.

3.2.2 압력 측정

시험부내 포화 압력을 측정하기 위해 Fig. 5와 같이 시험부의 사각 유로에 직경 1mm의 압력공을 뚫고 압력 센서(PDCR-961, Druck Co.)를 증발부 및 응축부에 각각 1개씩 설치하여, 안정화 상태에서 데이터 로그 DAS-1800(Keithley Co.)을 이용하여 초당 100개씩 1,500개의 데이터를 받아 압력 측정에 이용하였다. 압력 센서의 측정 범위는 $0\sim 10(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 이고, 측정 오차는 $\pm 0.2\%$ 이다.

3.2.3 작동액의 봉입

본 실험에서는 특수하게 제작된 시험부에 작동액을 봉입하기 위하여 로터리 및 확산 펌프로 구성된 고진공 시스템을 사용하여 시험부를 1×10^{-3} torr까지 진공시켰다. 또한, 작동 유체의 정확한 봉입을 위하여 97ml 및 10ml의 정밀 냉매 충전 실린더(HPG-10, 96, Taiatsu Co.)를 사용하였으며, 작동 유체로는 순도 99.9%의 에탄올과 냉매 R-142b를 사용하였다.

3.3 실험 조건

Table 1은 실험 조건을 나타낸 것이다. 작동 유체의 봉입량은 40(vol.%)로 하였으며, 단일 작동 유체와 R(85%)-E(15%)의 경우 히트 파이프의 작동 각도의 영향을 보기 위해 90° , 60° , 30° 에서 실험을 행하였다. 그리고, R(90%)-E(10%)와 R(95%)-E(5%)의 경우 작동 각도 90° 에서 실험을 행하여 작동 각도와 냉매의 혼합 비율에 따른 특성들을 비교 분석하였다. 여기서, R은 R-142b, E는 에탄올, L은 루프형을 나타낸다. 또한, α , θ .

Table 1 Test conditions

Specifications	10turns(L)				
	Working fluid	R(100%)	R(85%)- E(15%)	R(90%)- E(10%)	R(95%)- E(5%)
Charging ratio(vol.%)	α	40			
Input heat flux(W/cm ²)	q	0.3, 0.6, 0.9, 1.2	0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8	0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8	0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8
Inclination angle(°)	θ	90, 60, 30	90, 60, 30	90	90

q 는 각각 작동 유체의 체적 봉입량 비율, 작동 각도, 증발부의 열유속을 나타낸다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 열전달 특성

여기서는 실험 결과에서 얻어진 열전달 성능을 유효 열전도율로 나타내었다. 일반적으로 열전도율은 물질의 고유 물성치로서 순수 물질인 경우, 온도의 함수로서 결정된다. 예를 들어, 순동의 열전도율은 400K에서 약 393(W/mK)이다. 그러나, 동관-물 히트 파이프의 열전도율은 동의 몇 십배 혹은 몇 백배 높다. 히트 파이프의 열전도율은 고정된 값이 아니라 적용 조건에 따라 달라지는 계수적 의미를 가진다. 다시 말하면, 유효 열전도율이 용기의 재질 및 형상, 작동 유체의 종류 및 봉입량, 증발부 및 응축부에서의 열유속 그리고 작동 각도 등에 따라 달라질 수 있다는 의미이다. 유효 열전도율 λ_{eff} 는 식 (6)과 같이 나타내었다.

$$\lambda_{eff} = \frac{l \cdot Q}{A_c \cdot (T_{eva} - T_{con})} \quad (6)$$

여기서, Q 는 증발부에서 응축부로 전달된 열량으로 응축부의 냉각수 입출구 온도차에 의해 얻어진 열량이다. A_c 는 히트 파이프내 작동 유체의 전체 유로 단면적으로, $45 \times 10^{-6} \text{m}^2$ 이다. 그리고, T_{eva} 및 T_{con} 는 각각 증발부와 응축부에서 측정된 외벽면 온도들의 시간 평균 표면 온도이다. 이때, 유효 열전도율에 대한 불확실성은 Kline과 Mc-Clintock의 방법⁽¹²⁾을 이용하여 산정하였으며, 오차 분석 결과 4.68~20.34%의 오차를 나타내었다.

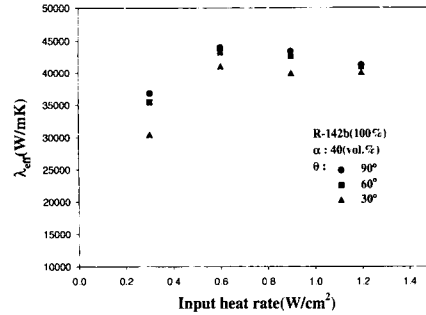


Fig. 6 Variation of effective thermal conductivity to inclination angle with a single working fluid [R(100%)]

특히, 저 열유속인 0.3W/cm^2 과 0.6W/cm^2 에서 높은 오차를 나타내었다.

4.1.1 순수 작동 유체의 열전달 특성

Fig. 6은 R-142b를 작동 유체로 하여 봉입량 40(vol.%)에서 작동 각도를 30° , 60° , 90° 로 변화시켰을 때, 입열량 증가에 따른 유효 열전도율의 변화를 나타낸 것이다.

각 조건에서 최대 열전달 성능을 나타내는 최적 열유속 조건이 있음을 확인할 수 있었고, 최대 열유속 조건은 0.6W/cm^2 으로 거의 동일하게 나타났다. 특히 최대 열유속 조건 이후에도 유효 열전도율의 변화가 완만한데, 이는 작동액의 증발부 귀환이 위에 의존하는 것이 아니라 내부 순환에 의해 이루어지므로 증발부의 국소적인 드라이 아웃이나 모세관 한계, 비산 한계 등을 어느 정도 극복하는 것으로 볼 수 있다.

작동 각도 변화에 따른 유효 열전도율은 90° 에서 가장 높고, 60° , 30° 의 순서였다. 작동 각도 30° 의 경우 저열유속 조건에서 다른 두 조건에 비해 상대적으로 낮은 유효 열전도율을 나타내며, 90° 와 60° 는 비슷한 유효 열전도율을 나타내었다. 그러나, 열유속이 높아짐에 따라 이러한 차이는 줄어들었으며, 열유속 1.2W/cm^2 의 조건에서는 작동 각도에 따른 열수송 능력의 차이가 거의 보이지 않았다.

4.1.2 혼합 작동 유체의 열전달 특성

Fig. 7은 R(85%)-E(15%)의 혼합 작동 유체를 사용하여 증발부에 가해지는 열유속에 따른 유효 열전도율의 변화를 나타낸 것이다.

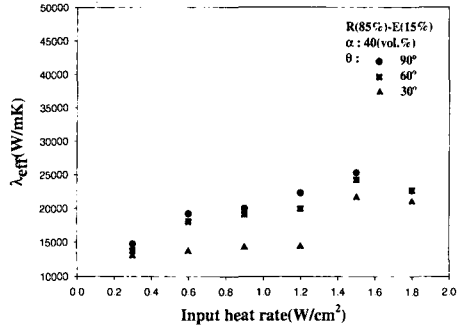


Fig. 7 Variation of effective thermal conductivity to inclination angle with a binary mixture working fluid [R(85%)-E(15%)]

전체적으로 R(85%)-E(15%) 혼합 작동 유체의 유효 열전도율은 R-142b 순수 작동 유체에 비해 1/3 정도 낮은 값을 나타내었다. OCHP는 작동액이 부프내 순환에 의해 증발부로 귀환되는 메카니즘을 가지고 있으므로, 상대적으로 모세관력이 크고 동점성 계수가 큰 에탄올이 혼합되므로써 유체의 유동 마찰 저항이 커져 작동액의 축방향 진동과 부프내 순환이 활발하게 이루어지지 않아 전체적으로 순수 작동 유체의 경우보다 유효 열전도율이 낮게 나타난 것이라 생각된다. 특히, 작동 각도가 30° 일 때 순수 작동 유체의 경우와 비교하면, 90° 와 60° 에서 더욱 낮은 값을 나타내는 것도 이러한 현상을 잘 설명해 주고 있다. 하지만, 열유속이 증가함에 따라 작동 각도 30° 에서 유효 열전도율이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 높은 열유속에서는 에탄올의 마찰 저항을 이겨낼 만큼의 구동력이 발생하거나, 에탄올 역시 어느 정도의 2상 유동을 일으킬 조건에 이른 것이 아닌가 생각된다. 유효 열전도율의 변화와는 달리 한계 열유속은 비점이 높고 증발 잠열이 큰 에탄올이 섞임으로써, 순수 작동 유체의 0.6W/cm²에 비해 2배 이상 높은 값인 1.5W/cm²에서 나타났다.

4.1.3 혼합 비율에 따른 열전달 특성

Fig. 8은 R-142b와 에탄올의 혼합 비율을 바꾸어 가며, 입열량에 따른 열적 특성을 관찰한 것이다. 실험은 이전 연구에서 가장 좋은 열전달 성능을 보인 작동 유체 충전량 40(vol.%), 작동 각도 90° 에서 R(100%), R(95%)-E(5%), R(90%)-E

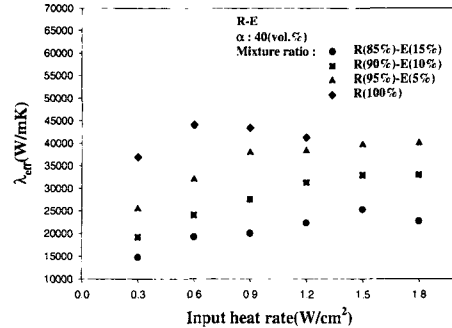


Fig. 8 Variation of effective thermal conductivity to mixture ratio

(10%), R(85%)-E(15%)로 이루어졌다. 전체적인 열적 특성은 순수 작동 유체의 경우가 가장 높은 유효 열전도율을 나타내었다. 그러나, 혼합 작동 유체의 경우 한계 열유속이 순수 작동 유체에 비해 높은 수치를 나타내었다. 즉, 가장 낮은 열적 특성을 보이는 R(85%)-E(15%)의 경우, 1.5W/cm²에서 한계 열유속을 가지는데, 이는 순수 작동 유체 R(100%)의 0.6W/cm²와 비교해서 2배 이상 높은 값을 나타내고 있다.

혼합 작동 유체 중 R(95%)-E(5%)의 유효 열전도율이 가장 높았으며, 열유속 1.5~1.8W/cm²에서 순수 작동 유체의 열적 특성에 거의 근접하는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고, 한계 열유속은 1.8W/cm²으로, 순수 작동 유체 R(100%)의 0.6W/cm²에 비해 2배 이상 증가하였다. 그러나, 혼합 비율이 높아질수록 유효 열전도율은 낮아지는 경향을 보였으며, R(85%)-E(15%)의 경우 열유속 1.5W/cm² 이후는 다른 조건들에 비해 급격히 떨어지는 경향을 보였다. 에탄올은 R-142b에 비해 상당히 높은 온도에서 증발하는 작동 유체이므로, 내부에 에탄올의 충전율이 높아지면 R-142b의 충전율이 낮아지게 되고, 높은 열유속 조건에서도 에탄올의 경우는 적은 양만이 2상 유동을 일으킨다. 에탄올은 R-142b에 비해 상당히 높은 온도에서 증발하는 작동 유체이다. 따라서, 에탄올의 혼합 비율이 높아질수록 2상 유동에 의한 잠열 수송은 적어져 전체적인 열전달 성능이 떨어진다고 생각되어진다.

순수 작동 유체의 경우 증발부에 가해지는 열유속이 높아질수록 증발부 하단에서 기포의 성장과 함께 증발부 쪽은 드라이 아웃이, 응축부 쪽

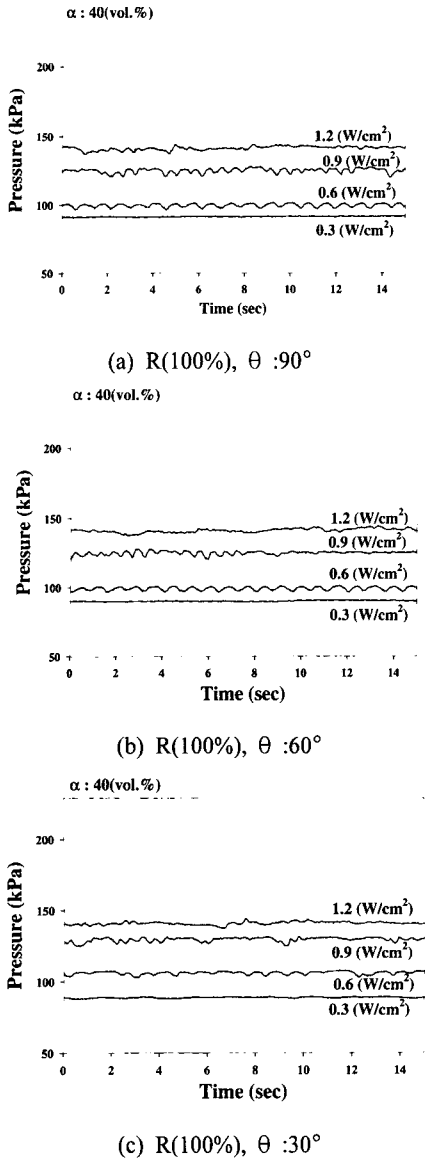


Fig. 9 Pressure oscillation of working fluid to inclination angle with a single working fluid

은 액의 진동만이 일어나며, 작동액의 내부 순환이 원활히 이루어지지 않아 유효 열전도율이 떨어지게 된다. 그러나, R(95%)-E(5%), R(90%)-E(10%)의 경우에는 적절한 양의 에탄올이 혼합되어지므로 증발하지 않는 에탄올은 일종의 격막이나 체크 밸브의 역할을 담당하게 되어, 내부 작동액의 지속적인 한쪽 방향 순환에 도움을 주게 된다.

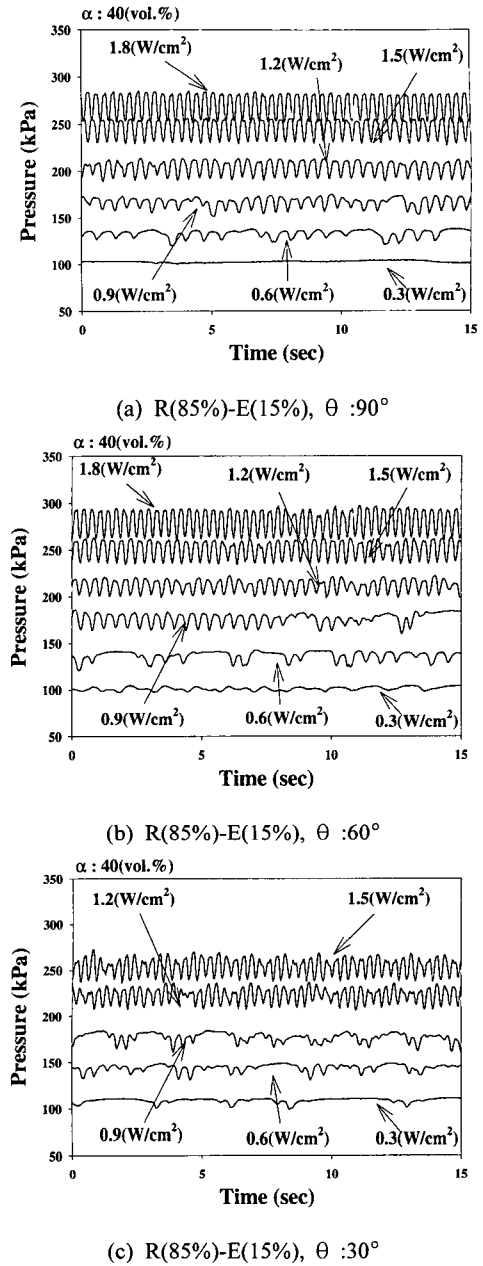


Fig. 10 Pressure oscillation of working fluid to inclination angle with a binary mixture working fluid

다. 이러한 역할은 응축부에 모여 있는 작동액을 증발부로 공급하게 되므로 전체적인 열적 성능 향상에 도움이 된다.

4.2 압력 진동 특성

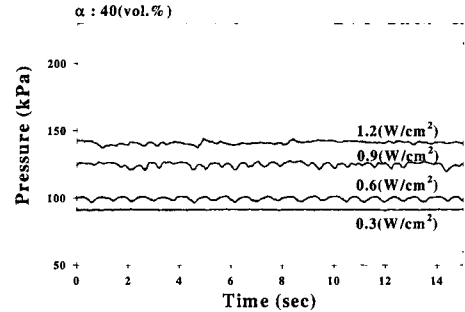
OCHP는 작동액의 증발과 응축에 따른 축방향 진동에 의해 열을 수송하고 관내 순환에 의해 작동액을 증발부로 귀환시키는 특성을 가지고 있다. 그러므로, 히트 파이프 내부는 항상 입력이 평형을 이루는 상태가 아니라 끊임없이 변화하는 상태가 된다. 즉, 한 채널의 국소 압력 변동이 전체 채널이 U자형의 구조를 가지고 연결되어 있으므로 해서 바로 옆 근접 채널로 전파되어지며, 나아가 전체 채널에도 영향을 미치게 되는 것이다. 따라서, 히트 파이프 내부 압력의 변동은 열 수송 성능과 깊은 상관 관계를 가진다.

4.2.1 순수 작동 유체의 압력 진동 특성

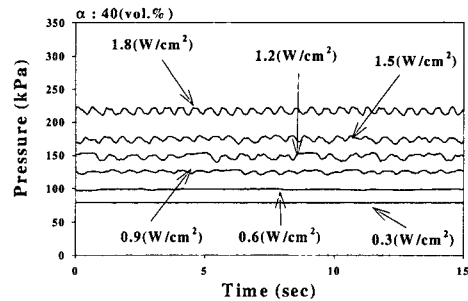
Fig. 9는 순수 작동 유체 R(100%)를 사용한 OCHP에 봉입량을 40(vol.%)로 하여 작동시켰을 때, 작동 경사 각도에 따른 증발부의 포화 압력을 열유속 변화에 따라 나타낸 것이다. 입열량이 증가함에 따라, 히트 파이프 내부의 포화 압력은 증가하였으며, 동일 입열량 조건에서는 작동 각도 90°가 포화 압력이 가장 낮았다. 이는 작동 각도 90°에서 다른 조건들에 비해 히트 파이프 내부의 기액의 진동과 순환이 원활히 일어났다는 것을 의미하며, 이로 인해 전체 채널에서 압력이 균등하게 분배되고 증발부와 응축부의 온도차가 적어져 포화 압력이 낮아졌다. 순수 작동 유체의 경우 가장 열전달 특성이 좋았던 증발부 입열량 0.6W/cm²에서 파형이 정현파의 형상을 가지고 안정화된 모습을 관찰할 수 있었다.

4.2.2 혼합 작동 유체의 압력 진동 특성

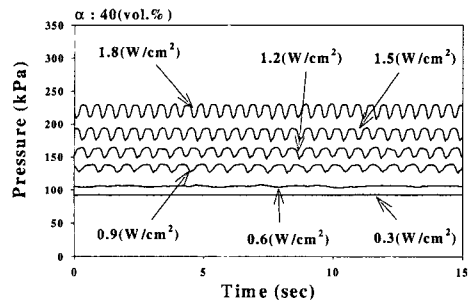
혼합 작동 유체는 서로 다른 특성을 가진 작동 유체의 혼합이므로 각각의 유체가 가진 특성들이 내부의 압력 진동에 서로 다른 영향을 미쳐, 좀더 복잡한 양상을 띄었다. Fig. 10은 혼합 작동 유체 R(85%)-E(15%)의 경우, 입열량에 따른 증발부의 포화 압력을 나타낸 것이다. 순수 작동 유체의 경우에는 저열유속에서 파형의 안정성이 뚜렷하였으나, 혼합 작동 유체의 경우에는 저열유속에서 파형이 불규칙하며 이러한 현상은 작동 경사 각도가 낮아질수록 더욱 심하였다. 증발부에 가해지는 열유속이 적으면 핵비동에 의해 발생하는 증기 발생량이 적어지고, 내부 작동액의 진동과 순환을 일으키는 구동력이 작아져 에탄올



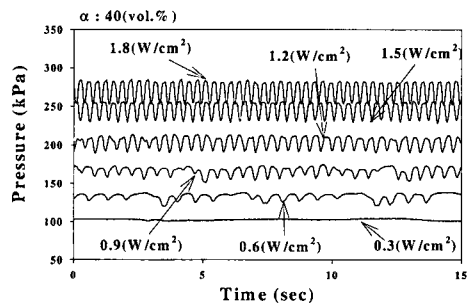
(a) R(100%), $\theta : 90^\circ$



(b) R(95%)-E(5%), $\theta : 90^\circ$



(c) R(90%)-E(10%), $\theta : 90^\circ$



(d) R(85%)-E(15%), $\theta : 90^\circ$

Fig. 11 Pressure oscillation of working fluid to mixture ratio

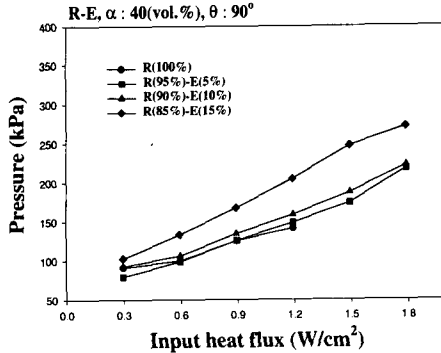


Fig. 12 Saturated pressure of working fluid to input heat flux

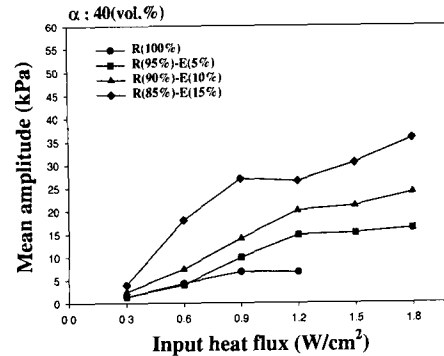


Fig. 13 Mean amplitude of pressure wave to input heat flux

의 마찰 저항에 좀더 많은 영향을 받으므로 파형이 정현파 형상을 띄다가 불규칙한 형상을 띄는 현상이 반복 관찰되었다. 특히, Fig. 10(c)의 작동 각도 30°의 경우 다른 두 조건에 비해 높은 열유속에서도 파형의 불안정 특성이 두드러져, 진폭이 좁아졌다 넓어졌다 하며 작동액의 진동과 내부 순환이 지속적이지 않고 단절되는 특이한 현상을 관찰할 수 있었다.

4.2.3 혼합 비율에 따른 압력 진동 특성

혼합 작동 유체의 경우, 각각의 혼합 비율에 따라 저비점 냉매인 R-142b와 고비점 냉매인 에탄올의 봉입량이 틀려진다. 따라서, 상대적으로 저비점 냉매가 낮은 열유속에서 증발과 응축을 반복하여 작동액의 축방향 진동과 내부 순환의 구동력을 일으키게 되지만, 에탄올은 2상 유동을 하지 않고 긴 액 칼럼의 형태로 내부를 순환하게 되어 현열 수송의 일부만 담당하게 된다. 그러므로, 에탄올의 혼합 비율에 따라 내부의 압력 변동의 패턴은 달라지게 되는데, Fig. 11은 동일 작동 각도인 90°에서 작동 유체의 혼합 비율에 따른 내부 압력 변동을 나타낸 것이다. 포화 압력의 경우 순수 작동 유체가 동일 열유속에서 가장 낮은 수치를 보였으며, 혼합 작동 유체는 에탄올의 혼합 비율이 낮을수록 동일 열유속에서 포화 압력이 낮았다. 압력 파형의 경우, 전체 실험 조건에서 거의 유사한 정현파의 형상을 보였다. 하지만, 순수 작동 유체의 경우는 저열유속에서도 파형의 규칙성이 보이나, 혼합 작동 유체의 경우는 저열유속에서 압력 파형의 불규칙성이 두드러지며, 열유속이 증가할수록 정현파에 가까워졌다.

특히, 파형의 진폭은 순수 작동 유체에 가까워질수록 좁아졌으며, 에탄올의 혼합 비율이 높아지면서 파형은 조밀해지고 진폭이 커지며, 급격한 압력의 증감으로 인해 파형의 아랫 부분과 윗 부분이 뾰족해지는 불안정한 특성을 보였다. OCHP는 열수송의 대부분을 차지하는 2상 유동에 따른 작동액의 축방향 진동과 적절한 작동액을 증발부로 귀환시키는 내부 순환이 상호 보완이 이루어져야 정상적으로 작동하게 되는데, 에탄올의 혼합 비율이 높아질수록 증발하지 않은 에탄올이 긴 액 칼럼을 형성하여 내부를 순환하게 되므로, 압력 진동 파형이 불규칙하게 되거나 진폭이 커지게 되어 열수송 능력이 떨어지게 된다. Fig. 12와 Fig. 13에 입열량에 따른 내부 포화 압력과 평균 진폭을 비교하였다.

5. 결론

전자기기 냉각이나 폐열 회수 등 에너지 절약 측면에서 그 활용도가 매우 높은 진동 세관형 히트 파이프(OCHP)에 대해 혼합 작동 유체를 사용한 OCHP와 단일 작동 유체를 사용한 OCHP의 내부 압력 진동과 열전달 특성을 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 내부 유동 양식은 활발한 기-액 진동과 함께 채널간 순환의 발생으로 전체 작동액이 한쪽 방향으로 이동하는 듯한 웨이브 파형을 관찰할 수 있었으며, 에탄올의 혼합 비율이 높은 작동 유체의 경우 간헐적인 기-액 순환의 단절 현상이 보였다.

(2) 순수 작동 유체와 혼합 작동 유체 모두 작동 각도 90° 에서 가장 높은 유효 열전도율을 보였다.

(3) 혼합 작동 유체의 경우, 에탄올의 혼합 비율이 높아질수록 순수 작동 유체에 비해 유효 열전도율은 낮아졌으나, R(95%)-E(5%)의 경우, 순수 작동 유체의 유효 열전도율에 근접하여 폭넓은 열유속대에 적용 가능하였다.

(4) 에탄올의 혼합 비율이 높아질수록 내부 압력의 급격한 변동에 따른 압력 파형의 불규칙성과 진폭의 증가 등이 관찰되었다.

(5) 압력 파형이 정현파의 형상을 가지며, 동일 열유속에서 내부 압력이 낮고, 진폭이 적을수록 좋은 유효 열전도율을 나타내었다.

후 기

이 논문은 1998년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-1998-001-E00315).

참고문헌

- (1) Akachi, H., 1994, "Loop Type Serpentine Capillary Tube Heat Pipe," *Proceeding of Annual Conference of JSME*, pp. 606~611.
- (2) Akachi, H., Polasek, F. and Stulc, P., 1996, "Pulsating Heat Pipes," *Proceedings of 5th Int. Heat Pipe Symposium*, Melbourne, pp. 208~217.
- (3) Gi, K., Izumi, T. and Maezawa, S., 1998, "Heat Transfer Characteristics of Looped Oscillating Heat Pipes," *35th National Heat Transfer Symposium of Japan*, Vol. 2, pp. 519~520.
- (4) Faghri, A., 1995, *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis, Washington D. C., pp. 625~671.
- (5) Peterson, G. P., 1994, *Heat Pipes*, John Wiley & sons, Inc., New York.
- (6) Nishio, S., 1999, "Oscillatory-Flow Heat-Transport Device," *11th International Heat Pipe Conference*, Vol. 3, pp. 39~49.
- (7) Kim, J. S., Lee, W. H., Lee, J. H., Jung, H. S., Kim, J. H. and Jang, I. S., 1999, "Flow Visualization of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe," *Proceeding of Thermal Engineering Conference of KSME*, pp. 65~70.
- (8) Lee, W. H., Jung, H. S., Kim, J. H. and Kim, J. S., 1999, "Flow Visualization of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe," *11th International Heat Pipe Conference*, Vol. 2, pp. 131~136, Tokyo.
- (9) Lee, W. H., Kim, J. H., Kim, J. S. and Jang, I. S., 1999, "The Heat Transfer Characteristics of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe," *2nd Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*, Vol. 3, pp. 1713~1718, Pisa, Italy.
- (10) Kim, J. S., Jung, H. S., Lee, W. H. and Ko, S. B., 2000, "The Study on Pressure Oscillation and Heat Transfer Characteristic of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe," *Proceedings of Thermal Engineering Autumn Conference of KSME*, pp. 142~148.
- (11) Kwak, H. Y., Yoon, H. Y., Yu, C. K. and Kang, Y. H., 1998, "Operating Characteristics of a Two-Phase Closed Thermosyphon with a Binary Mixture," *The 2nd Heat Pipe Workshop Korea*, pp. 147~153.
- (12) Holman, J. P., 2001, *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill Com.