Regular Paper
J. KIEEME
Vol. 25, No. 10, pp. 830-836, October 2012
DOI: http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.10.830

LED 조명 방열 환경에서 진동형 히트파이프의 작동 특성

방광현[1,a], 김형탁[1], 박해균[1]
[1] 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부

Operational Characteristics of Pulsating Heat Pipes for the Application to the Heat Dissipation of LED Lighting

Kwang-Hyun Bang[1,a], Hyoung-Tak Kim[1], and Hae-Kyun Park[1]
[1] Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

(Received July 30, 2012; Revised August 23, 2012; Accepted August 27, 2012)

Abstract: An efficient cooling system is essential for the electronic packaging such as a high-luminance LED lighting. A special heat transport technology, Pulsating Heat Pipe (PHP), can be applied to the cooling of LED lighting. In this paper, the operational characteristics of the PHP in the imposed thermal boundary conditions of LED lighting were experimentally investigated. The experimental PHP was made of copper tubes of internal diameter of 2.1 mm. The working fluids of ethanol, FC-72, water, acetone and R-123 were chosen for comparison. The results showed that an optimum range of charging ratio exists for high cooling performance; 50% for most of the fluids. Among the five working fluids, water showed the highest heat transfer rate of 260 W. Two distinguished characteristics of pulsating direction were identified. It is also identified that high vapor pressure gradient is one of key parameters for better heat transfer performance.

Keywords: LED, Lighting, Heat dissipation, Pulsating heat pipe

1. 서 론

최근 고유가와 이산화탄소로 인한 지구 온난화 등의 환경 문제가 글로벌 이슈로 떠오르면서 고효율 에너지 시스템 개발에 대한 요구가 한층 높아지고 있는 상황이다. 조명 기술 분야에서도 기존의 조명을 대체할 기술로 친환경, 고효율의 LED 조명 기술이 주목을 받고 있다 [1].

그러나 LED 조명은 발광원이 반도체 소자인 전자부품으로서 기존의 조명에 비해 훨씬 낮은 작동 온도가 요구된다. 이러한 전자 부품의 발열을 충분히 냉각하지 못할 경우 소자의 온도가 상승하여 성능과 수명이 급격히 저하된다. 따라서 LED 조명의 방열 문제의 해결은 전자 부품의 신뢰성을 제고하는 제일 중요한 요소 중의 하나이다 [2]. 특히 본 연구의 대상인 방폭형 LED 조명의 경우 조명기기 내부의 발열체가 주변 외기로부터 격리되어야 하므로 내부의 열을 외부 냉각공기로 효과적으로 수송해야 하는 방열기술이 요구된다.

본 연구에서는 방폭형 LED 조명의 냉각성능 향상을 위해 진동형 히트파이프에 대한 연구를 수행하였다. 진동형 히트파이프 (pulsating heat pipe, PHP)는 여러 번 굽어진 모세관의 내부를 진공상태로 만든 후 작동유체를 부분적으로 주입한 장치이다. 작동 원리는 모세관 다발의 양쪽 끝에 온도차가 존재할 경우

a. Corresponding author; khbang@hhu.ac.kr

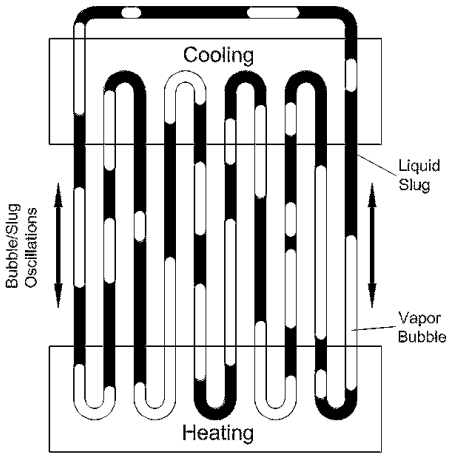

Fig. 1. Schematic of closed-loop type pulsating heat pipe.

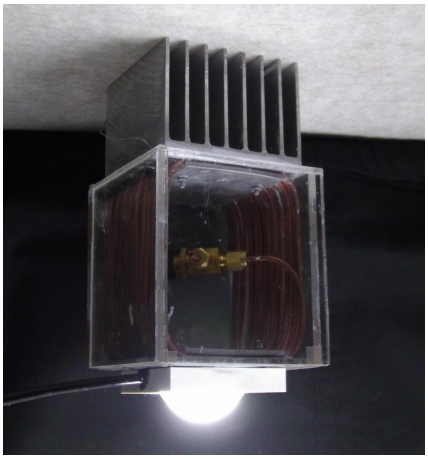

Fig. 2. Construction of 30 W explosion-proof LED light cooling system using pulsating heat pipe [11].

고온 측에서는 작동 유체가 증발하고 저온 측에서는 작동유체가 응축하게 되며 양단의 증발압력과 응축압력의 차이가 작동유체의 진동형태의 왕복유동을 일으켜 고온 측에서 저온 측으로 열이 전달되는 원리이다 [3].

진동형 히트파이프는 크게 밀폐 루프형 (closed loop)과 개방 루프형 (open loop)로 구분되는데 그림 1에 나타낸 것처럼 모세관 다발 양끝이 서로 연결되어 있는 형태가 밀폐 루프형이며 양끝이 연결되어 있지 않는 형태가 개방 루프형이다. 일반적으로 밀폐 루프형이 개방 루프형보다 성능이 우수하다고 알려져 있다. 진동형 히트파이프를 적용한 방폭형 LED 조명 방열장치의 사례는 그림 2와 같다.

Kim et al. [4]은 밀폐 루프형에 대한 유동 현상을 이해하기 위한 연구를 수행하였다. 히트파이프는 1.5 × 1.5 mm 사각의 20개 채널로 만들어졌으며 가열부의 핵 비등에 의해서 생성된 증기가 액체와 함께 빠른 왕복 유동을 하면서 이상 유동 양식이 slug 유동에서 annular 유동에 가까운 slug 유동으로 바뀌는 것이 관찰되었다. 또한 관 개수와 주입 열 유속을 증가시켰을 때 작동유체의 순환과 왕복이 더욱 활성화되고 순환 방향이 정해지면 정상 상태에서는 그 방향이 변하지 않았다. Tong et al. [5] 역시 이와 같은 작동 유체의 순환과 왕복은 내경 1.8 mm, 14개 채널의 장치에서도 확인하였다.

Xu and Zhang [6]의 연구 결과는 2 mm의 6개 관으로 만들어진 장치에 관 벽의 온도를 측정했을 때, 주입 열 유속이 증가할 경우 온도의 주기성을 보인다. 그 이유로 액체와 기체의 분포가 증가된 열 유속에 의해 균일하게 분포하기 때문이라고 설명하고 있다.

관 내경, 열적 조건, 작동 유체, 작동유체의 주입율, 관 개수, 배치 (각도) 형태 등 진동형 히트파이프의 작동과 성능에 영향을 주는 많은 물리적인 변수들이 존재한다. 이러한 변수의 영향을 정확하게 알지 못한다면 적절한 설계를 하는 것은 매우 어려운 일이 될 것이다 [7-9]. 그러나 이러한 변수에 대한 영향은 선행 연구 결과마다 실험과 분석이 다양해서 직접적으로 비교하기 어렵다. 작동유체의 물성치와 장치의 구조에 따라 그 성능이 바뀌기 때문에 최적의 작동유체 주입율의 경우, 20-80 vol.% 내에 존재한다고 알려져 있으며 연구 결과마다 조금씩 다르다.

또한 진동형 히트파이프는 배치 각도에 의해 중력의 영향을 받는 것으로 나타났다. 그래서 구조를 변경하면 중력의 영향을 최소화할 수 있다. 관 내경을 줄이고 관 개수가 늘어나면 중력의 영향이 적다. 그리고 장치를 구동시키기 위한 최소, 최대의 열적 한계도 존재한다. 그러나 각 연구 결과마다 경계조건이 다르기 때문에 그 최적의 관 내경, 관 개수, 열적 한계의 값을 예측하기 어렵다 [10]. Kim [11]은 상향 조명, 즉 발열부가 상부에 위치하는 방폭형 LED 조명에 진동형 히트파이프 냉각장치를 적용한 바 있다.

이처럼 진동형 히트파이프는 지난 10년간 상당한 실험과 이론적 연구가 있었다. 그러나 완전한 설계

방법이나 최적화된 절차는 여전히 부족한 상황이어서 실제 적용한 사례는 아직 적다.

본 연구에서는 LED 조명의 열적 환경 조건에 맞는 개방 루프형 진동형 히트파이프 방열장치를 설계하는데 필요한 특성을 실험을 통해 고찰하였다.

2. 실험 방법

진동형 히트파이프는 외경 3.18 mm, 내경 2.1 mm의 구리 관을 이용하여 제작되었다. 관 중심 기준 27 mm의 일정한 간격으로 배치된 16개의 구리 관에 열전달 향상을 위해서 휜 (fin)을 브래이징하여 구리 관과 결합하였다. 그리고 휜과 결합된 이 관들은 아크릴로 제작된 각각의 가열부 (heating)와 방열부 (cooling)에 연결하고 단열부 (adiabatic region)에서 최종 결합하였다.

가열부, 방열부, 단열부의 길이는 각각 100 mm, 100 mm, 140 mm이다. 장치 개략도는 그림 3과 같으며 실험 때는 외부로의 영향을 최소화하기 위해서 장치 전체를 단열재로 덮었다. 장치 상부에는 유동특성을 확인하기 위해서 유동 가시화 영역을 만들었는데, 진공용 특수 피팅 (Swagelok, 1/8″ vacuum fitting)을 사용하여 유리관과 연결하였다. 실험장치의 각 제원은 표 1과 같다.

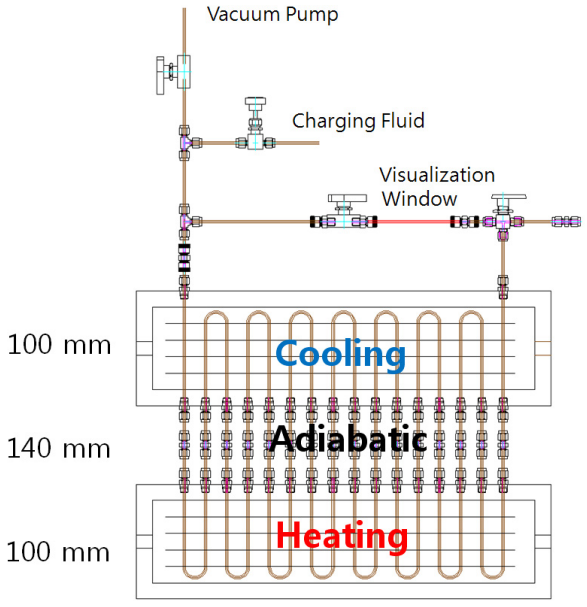

Fig. 3. Schematic of experimental apparatus.

Table 1. Experimental parameters.

Diameter	2.1 mm	
Channel	16 channel (8 turns)	
Incline	90°, (Bottom heat)	
Temperature	Heating 70℃	Cooling 25℃
Working Fluids	Ethanol, FC-72, water, Acetone, R-123	
Charging Ratio	0-70 vol.%	
Water Flow Rate	1 LPM	0.5 LPM

Table 2. Physical properties of saturated fluids at 1 atm.

Properties	Ethanol	FC-72	Water	Acetone	R-123
T_{sat}, ℃	78.3	56.6	100	58.1	27.8
ρ_f, kg/m^3	757	1600	958	749	1457
ρ_g, kg/m^3	1.57	13.43	0.60	2.27	6.47
$c_{P,f}$,kJ/kgK	2.580	1.102	4.217	2.294	1.023
H_{fg}, kJ/kg	960.0	94.8	2257	501.4	170.2
k, W/mK	0.153	0.054	0.68	0.15	0.076
μ_f,mPa·s	0.441	0.425	0.282	0.235	0.404
σ, mN/m	17.46	8.35	58.91	18.79	14.84
D_{crit}, mm	3.07	1.47	5.01	3.20	2.04
dP/dT, kPa/K	1.44	2.65	0.62	2.86	6.35

진동형 히트 파이프의 열적 조건 조성을 위해 두 개의 항온 수조를 이용하여 가열부 아크릴 수조와 방열부 아크릴 수조에 각각 다른 온도의 물을 공급하였다. 적용 온도는 LED 기판 허용 온도를 70℃로 설정하였고 대기 온도를 25℃의 환경이라 가정하였다.

장치는 가열부가 아래에 놓이도록 수직 (90°) 배치하였다. 관 내부는 진공 펌프를 이용하여 진공 상태로 만든 후에 작동 유체를 장치의 내부의 전체 체적에 대한 유체의 체적비 0-70 vol.%를 주입하였다. 이때 사용한 작동유체는 ethanol, FC-72, water, acetone, R-123이다. 작동유체의 주요 물성치는 표 2에 정리하였다.

진동형 히트파이프의 열 전달 능력을 계산하기 위해서 열전달량 q는 다음의 열평형 식을 사용하여 계산하였다.

$$q = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \tag{1}$$

유량측정은 로타미터 (Dwyer, Series RM, accuracy 3% at 21.1℃)를 사용하여 1 LPM과 0.5 LPM을 실험에 적용하였다. 열전달량을 정확하게 계산하기 위해 가열부 적용 온도 70℃의 유량은 유량 보정 과정을 거쳤다.

온도 측정은 T-type 열전대를 사용하여 측정하였으며, labview data logger (national instrument, SCXI-1102)로 지시 및 저장하였다. 가열부 및 방열부에 공급되는 물의 입·출구 온도는 정상상태에 이르렀을 때의 값을 열전달량 계산에 사용하였다. 또한 작동 특성을 확인하기 위해 단열부 관 중 6곳의 벽 온도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열량 계산 및 에너지 평형

측정된 유량 및 온도를 통해 얻어진 열전달량 q의 보다 정확한 계산 결과 값의 신뢰성을 위해 에너지 평형 식 (energy balance)을 적용하였다. 이 과정에서 가열부에서 대기로의 열 손실이 고려되었다. 에너지 평형 식을 만족하기 위해서는 장치에 가한 가열량 q_h은 방열량 q_c과 같아야 한다.

$$q_h = q_c \tag{2}$$

작동 유체를 주입하지 않은 조건 (0 vol.%)의 실험을 통해 25℃ 방열부에서의 외부 손실은 거의 없다고 가정하면 ($q_{c,loss} \fallingdotseq 0$) 구리 관에 의해 전도된 열량과 가열부에서의 손실 열량을 알 수 있다. 따라서 가열량 q_h과 방열량 q_c에 대한 최종 식은 다음과 같다.

$$q_h = q_{h,\,\Delta T} - (q_{h,\,\Delta T-0\%} - q_{cond}) \tag{3}$$

$$q_c = q_{c,\,\Delta T} \quad where,\ q_{cond} = q_{c,\,\Delta T0} \tag{4}$$

계산 결과, 가열량 q_h과 방열량 q_c의 오차는 5% 이내로 나타났다. 최종 사용된 열전달량 q는 가열량과 방열량 값의 평균을 사용하였다.

3.2 작동유체와 주입율에 따른 영향

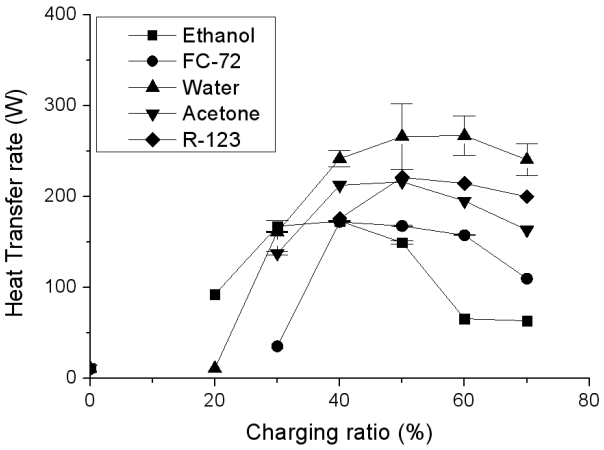

Fig. 4. Effect of working fluid and charging ratio on heat transfer rate.

가열부 70℃, 방열부 25℃, 1 LPM의 고정된 환경 조건에서 작동유체는 5가지 경우로 ethanol, FC-72, water, acetone, R-123을 사용하였다. 작동유체는 0-70 vol.% 범위로 주입하여 실험하였다.

작동유체와 주입율에 따른 방열량을 그림 4에 나타내었다. 먼저 주입율을 보면 각 유체마다 상대적으로 높은 방열량을 보이는 주입율 범위가 존재했다. Water와 R-123의 경우 50-60 vol.%, FC-72, acetone의 경우 40-50 vol.% 그리고 ethanol의 경우 30-40 vol.%에서 높은 방열량을 보였다. 이 주입율 범위에서 물이 가장 높은 약 260 W를 보였다. 다음으로 R-123과 acetone이 약 220 W, FC-72와 ethanol이 약 150 W로 순서를 보였다.

3.3 유동 특성

단열부 벽 6곳의 온도계와 방열부 위쪽에 설치된 유리관의 유동 가시화 영역을 통하여 유동 형태를 파악하였다. 이렇게 파악된 유동은 2가지 큰 특징을 확인할 수 있었다.

첫 번째 특징은 왕복 유동을 하고 있지만 방향성을 갖는 것이다. 70℃, 25℃, 1 LPM, FC-72, 50 vol.% 실험에서 41.6초 동안 유동가시화 영역에서 그 유동을 확인해보면 약 45회의 불규칙한 왕복운동이 있었고 전체적인 시간을 보면 반 시계방향으로 26.8초, 시계방향으로 14.8초 동안 이동하여 결과적으로 유동은 시계방향으로 12초 간 더 긴 시간을 유동하였다.

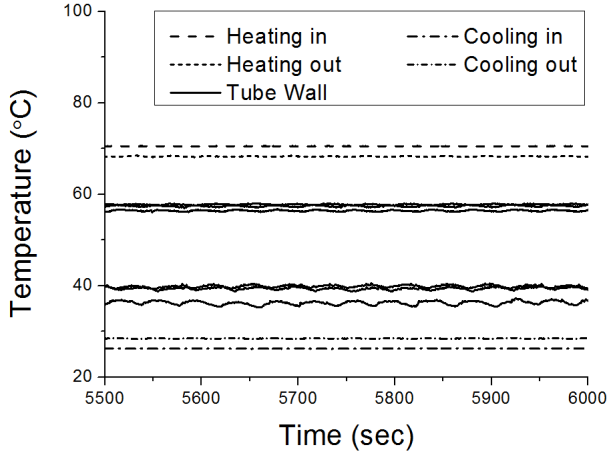

Fig. 5. Typical steady-state temperature signals (FC-72, 50%).

그림 5는 70℃, 25℃, 1 LPM, FC-72, 50 vol.% 조건의 실험에서 입·출구 온도와 벽 온도를 나타낸 그림이다. 벽의 온도를 확인해보면 관 6개 중에서 홀수 관에서 상대적으로 낮은 온도 약 38℃가 측정되고, 짝수 관에서는 그보다 높은 온도 약 56℃가 측정되었다.

유동 가시화와 벽 온도의 결과를 봤을 때, 지배적인 유동은 순환이지만 국부적인 왕복 유동이 존재한다. 선행연구 [4,6]에서도 확인할 수 있는 결과지만 이를 칭하는 순환 (circulation)이라는 용어가 적절하지 않다고 판단되어 본 논문에서는 이와 같은 특징을 갖는 유동을 directional pulsating mode로, 이 외 방향성이 없는 왕복유동을 regular pulsating mode라고 정의하였다.

표 2에서 나타나는 D_{crit}값은 진동형 히트파이프의 작동이 적절하게 이루어질 수 있는 임시적인 기준 값으로 중력과 표면장력 간의 관계를 내는 bond 수에서 유도되었다 [3].

$$D_{crit} = 2\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}} \quad (5)$$

본 연구에서 사용한 작동유체 중 물에서만 directional pulsating mode가 나타나지 않았다. 그 이유로 물의 경우 다른 유체들보다 표면장력 (σ)값이 매우 커서 D_{crit}값이 큰 점을 주시할 수 있다. 결국 물은 표면장력의 영향에 의해 유동 저항이 크기 때문에 directional pulsating mode가 나타나지 않았다고 볼 수 있다.

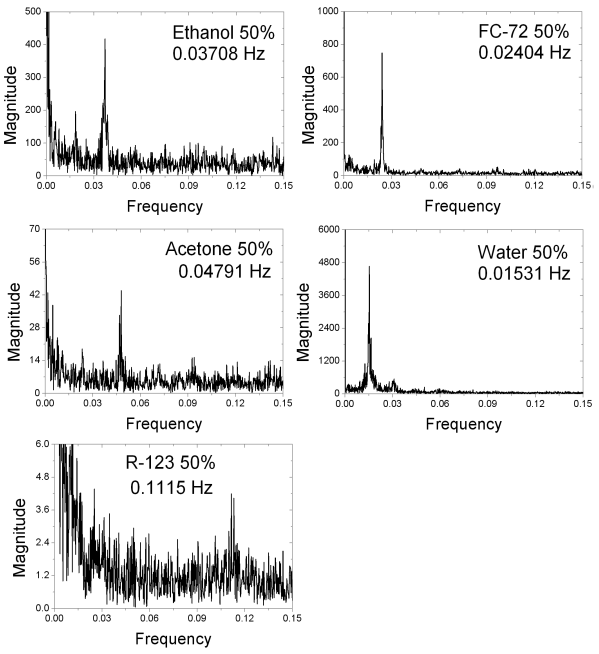

Fig. 6. FFT analysis of temperature signals (50 vol.%).

두 번째 특징은 관의 벽 온도의 주기성이다. 선행연구 Xu and Zhang [6]에서도 온도의 주기성이 보였다. 그 주기성의 이유로 장치 내부에서 균일하게 분포된 기체와 액체로 인해 온도의 주기성이 발생한다고 발표하였다. 그러나 벽 온도의 주파수 분석을 검토해 본 결과, 약간 다른 이유가 존재했다.

벽 온도의 주기의 존재 유무를 확인하기 위해 주파수 분석 (fast fourier transform, FFT)을 실시한 결과, 그림 6에서 보는 것처럼 각 작동 유체마다 특정 주파수를 확인할 수 있었다. 그 주파수 범위는 0.01에서 0.125 Hz 사이에 존재하였다 (한 주기 당 8초에서 100초 사이).

그림 6에서 FC-72의 주파수 0.02404 Hz의 41.6초에 해당하는 한 주기를 유동 가시화를 통해 확인해본 결과, 약 25초 동안은 기체가 지배적인 semi-annular flow가, 다시 약 16초 동안은 액체가 지배적인 slug flow가 나타나면서 이 두 가지 이상 유동양식의 조합이 41.6초의 주기로 반복되고 있음을 확인할 수 있었다. 유동 속도가 상대적으로 빨랐던 R-123을 제외하고는 이러한 유동양식의 조합에 의한 벽 온도 신호의 주기성은 나머지 유체에서도 확인되었다.

3.4 작동 유체의 유동 속도와 열전달량의 관계

진동형 히트파이프의 가시화 부분의 길이와 기포 하나가 그 구간을 통과 시간을 이용하면 각 유체 간의 대략적인 유동 속도를 계산하였다. 유동 속도는 R-123이 가장 빠르고 다음이 acetone, ethanol, FC-72, water의 순서로 나타났다.

이 결과를 바탕으로 열전달량, 압력 비 $(dP/dT)_{sat}$, 유동 속도의 관계를 살펴보았고 그 결과는 그림7에 나타내었다. 압력 비 $(dP/dT)_{sat}$은 70℃와 25℃의 온도 차에 각각의 포화 압력 차에 대한 비이다. Water를 제외하고는 모든 유체는 장치 양단의 압력비가 높으면 유동 속도도 높고 그에 따라 높은 열전달량을 보였다. 결국, 높은 압력 비를 갖는 작동 유체는 장치의 열전달량을 상승시킬 수 있다. 작동 유체 간의 매우 다양한 물성치로 인해 직접적인 비교는 어려우나, ethanol과 acetone을 비교해봄으로써, 압력 비와 열전달량의 관계를 확인할 수도 있다. Ethanol과 acetone의 물성치를 비교해보면 표면 장력과 밀도가 비슷하여 D_{crit}이 각각 3.07 mm과 3.20 mm이다. 비열과 증발 잠열 값은 비슷하거나 오히려 ethanol이 크다. 그러나 압력 비를 살펴보면 acetone이 2.86 kPa/K로 ethanol 1.44 kPa/K 보다 그 값이 약 2배 정도 더 높다. 열전달량도 acetone이 약 220 W로 ethanol 약 150 W 보다 높다. 따라서 높은 압력 비는 장치의 작동과 성능에 있어서 매우 중요한 요소라고 할 수 있다.

물의 경우는 압력비도 작고 D_{crit}값이 5.01 mm로 표면 장력에 의한 영향이 커서 관에 대한 저항이 증가하여 움직임이 가장 느렸다. 그러나 다른 작동유체에 비해 물의 경우 2배 이상의 높은 비열과 증발 잠열을 갖고 있기 때문에 가장 높은 열전달량을 보였다.

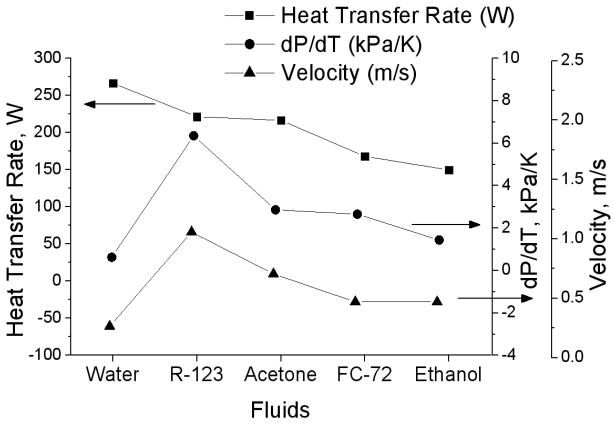

Fig. 7. Relations between heat transfer rate, (dP/dT), and velocity of working fluid.

4. 결 론

LED 조명과 같은 전자 부품은 그 성능과 수명을 유지하기 위해서는 우수한 방열 성능이 필수적이다. 적절한 방열을 위한 방안으로, 다양한 장점을 갖고 있는 진동형 히트파이프 (pulsating heat pipe, PHP) 기술을 선정하였다. 그러나 지난 20년 간 많은 실험적 수치적 연구가 있었음에도 적절한 설계 방법이나 과정이 부족한 상황이다.

본 연구에서는 LED 조명 환경에 해당하는 열적 조건에서 밀폐형 루프 형태의 진동형 히트파이프의 특성 파악을 위한 실험적 연구가 수행되었다.

실험에 이용된 진동형 히트파이프는 내경 2.1 mm의 동관 8개의 turn 만들어졌으며 작동 유체는 ethanol, water, acetone, R-123을 선택하여 주입율의 변수를 적용하여 비교하였다. 열원으로는 실제 LED 조명보다는 각 실험마다 동일한 가열 및 냉각 온도조건을 제공하기 위해 물을 이용한 대류열전달 조건을 설정하였다.

실험 결과, 작동 유체마다 약간의 차이는 있지만 높은 방열량을 보이는 특정 주입율 범위가 존재 하였으며 대부분의 유체가 약 50% 주입율이 최적이었고 물이 최대 성능을 보였다. 장치 내부 유동은 2가지 flow mode와 함께 벽 온도의 주기성을 확인하였다. 작동 유체와의 그 물성치 관계를 고려해 본 결과, 압력비가 크면 열적 성능도 크게 나타나는 경향을 보였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구 결과로 수행되었음 (NIPA-2012-C1090-1221-0015).

REFERENCES

[1] M. S. Yoon, *Bulletin of KIEEME*, **21**, 21 (2008).
[2] M. H. Shin, *Physics & High Technology*, 16 (2008).
[3] M. Groll and S. Khandekar, *Proc. Int. Conf. on Energy and the Environment* (Shanghai, China, 2003) p. 723.
[4] J. S. Kim, N. H. Bui, J. W. Kim, J .H. Kim, and H. S. Jung, *KSME International Journal*, **17**, 1507 (2003).
[5] B. Y. Tong, T. N. Wong, and K. T. Ooi, *Appl. Therm. Eng.,* **21**, 1845 (2001).
[6] J. L. Xu and X. M. Zhang, *Heat Mass Transfer*, **41**, 685 (2005).
[7] P. Charoensawan, S. Khandekar, M. Groll, and P. Terdtoon, *Applied Thermal Engineering*, **23**, 2009 (2003).
[8] S. Khandekar, N. Dollinger, and M. Groll, *Appl. Therm. Eng.,* **23**, 707 (2003).
[9] H. Yang, S. Khandekar, and M. Groll, *Appl. Therm. Eng.,* **28**, 49 (2008).
[10] Y. Zhang and A. Faghri, *Heat Transf. Eng.,* **29**, 20 (2008).
[11] H. T. Kim, *M. S. Thesis*, Korea Maritime University (2012).