

지상용 소형 루프히트파이프 성능에 관한 연구

정원복[†]·부준홍^{*}

Thermal Performance of a Small-scale Loop Heat Pipe for Terrestrial Application

Chung, Won Bok and Boo, Joon Hong

Key Words: Loop Heat Pipe (LHP, 루프히트파이프), Polypropylene Wick (PP, 폴리프로필렌 워), Heat Transport Limit (열이송 한계)

Abstract

A small-scale loop heat pipe with polypropylene wick was fabricated and tested for its thermal performance. The container and tubing of the system was made of stainless steel and several working fluids were used to see the difference in performance including methanol, ethanol, acetone, R134a, and water. The heating area was 35 mm x 35 mm and there were nine axial grooves in the evaporator to provide a vapor passage. The pore size of the polypropylene wick inside the evaporator was varied from 0.5 m to 25 m. The size of condenser was 40 mm (W) x 50 mm (L) in which ten coolant paths were provided. The inner diameter of liquid and vapor transport lines were 2.0 mm and 4.0 mm, respectively and the length of which were 0.5 m. The PP wick LHP was operated with methanol, acetone, and ethanol normally. R134a was not compatible with PP wick and water was unsuitable within operating limit of 100°C. The minimum thermal load of 10 W (0.8 W/cm²) and maximum thermal load of 80 W (6.5 W/cm²) were achieved using methanol as working fluid with the condenser temperature of 20°C with horizontal position.

1. 서 론

우주용으로 개발된 대부분의 루프히트파이프 (Loop Heat Pipe, LHP)는 0.3~5m의 중공크기의 니켈 소결 금속을 워구조물로 사용하고 작동유체로 암모니아를 사용한다. 또한 증발부의 형태는 실린더 형태로서 통상적으로 작동온도 범위는 -20 ~ 100°C이다 [1-4].

지상의 전자장비의 열제어를 위해서는 상대적으로 작은 크기의 LHP가 요구되고 있다. 이를 위해 개발되고 있는 LHP는 0.5m 거리에서 50 ~

100W정도의 열부하를 처리하고 있다[5-6]. Delil 등[7]은 에탄올-니켈 조합으로 120W를, Kobayashi 등[8]은 R134a-테플론 LHP로 수평에 135 W의 열부하를 처리하였다.

본 연구에서 지상용 응용을 위해 저가의 워구조물과 보다 안전한 작동유체를 이용한 소형 LHP에 대한 연구를 수행하였다.

LHP의 워구조물로 폴리프로필렌 (PP)를 선택하였다. Table 1에 PP워의 사양을 정리하였다. PP는 대부분의 저온 범위 히트파이프용 작동유체(물, 알코올, 아세톤 등)와 화학적으로 안정하다. 그러나 프레온과는 화학반응이 일어날 수 있다. PP의 일반적인 한계는 작동온도와 이 때의 압력에 따라 결정된다. Table 1에 표시되는 작동한계는 PP의 형태가 변하지 않는 범위의 온도를 의미한다 [9].

[†] 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원
E-mail : wbchung@mail.hankong.ac.kr
TEL : (02)300-0053 FAX : (02)3158-4429

^{*} 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Table 1 Specification of polypropylene wick

Material	Polypropylene, PP	
Pore Size	0.5 ~ 25 m	
Porosity	0.4 ~ 0.5	
Melting Temperature	1 bar	160 ~ 170°C
Operating Limit	4.5 bar	90 ~ 120°C
	18 bar	48 ~ 65°C
Thermal Conductivity	0.2 W/mK	

저온 범용 작동유체를 이용하여 PP Wick LHP를 제작하였다. 제작한 LHP는 평판형 증발부로 구성되어 있다. 본 논문은 Wick구조물의 증공크기, 작동유체량(비율), 그리고 응축부 온도 변화에 대한 LHP의 성능변화를 알아보았다.

2. 제작 및 실험장치 구성

연구를 위해 제작한 LHP는 액체저장조가 일체형으로 구성된 평판형 증발부, 증기 및 액체 이송관, 그리고 응축부로 구성되어 있다(Fig. 1) 증발부의 외부 크기는 폭 40 mm, 길이 50 mm, 높이 30 mm 이고, 여기에는 액체저장조가 포함되어 있는 상태이다. 증발부 가열 면적은 35 mm x 35 mm이고 가열면에는 9개의 그루브가 길이 방향으로 형성되어 있다. 이곳은 통해 증발부에서 생성되는 증기가 배출된다. 증발부에 삽입한 PP Wick의 두께는 5mm로 가열면의 그루브 표면과의 밀착을 위해서 압축 스프링으로 Wick을 지지하였다.

폭 40 mm, 길이 50 mm 크기 안에 10개의 유로를 가공하여 응축부를 제작하였다. 증기 및 액체 이송관의 내경은 각각 4.0 mm, 2.0 mm이고

Table 2 Thermocouple locations

T_H	히터 표면
$T_{v,e}$	증발부 출구의 증기
$T_{v,c}$	응축부 입구의 증기
$T_{l,c}$	응축부 출구의 액체
$T_{l,r}$	액체저장조 입구의 액체
$T_{v,p}$	증기관 중간 지점의 벽
$T_{l,p}$	액체관 중간 지점의 벽
T_{in}, T_{out}	냉각수 입출구

길이는 0.5 m로 하였다.

온도 측정을 위해서 AWG 30급 (외경 0.25 mm, 오차 0.5°C)인 T형 열전대 10개를 응축부 외부에 부착하였고, 나머지는 Table 2에 정리하였다

3개의 카트리지 전기 히터를 알루미늄 블록에 삽입하여 히터를 제작하였다. 5개의 열전대를 히터표면에 부착하였다.

경사조절이 가능한 시험대에 실험을 위해 제작한 LHP를 설치하였다. 전압조절기로 열부하를 조절하였고, 이때 전력계를 이용하여 입력 열부하를 측정하였다(error 0.5% F.S.). 항온조를 이용하여 응축부에 공급하는 냉각수의 온도와 유량을 조절하였다. 실험은 5 cc/s의 유량에서 진행하였다. 실험하는 동안 열전대에서 측정되는 온도를 자료획득장치를 이용하여 2초마다 기록하였다.

다양한 조건에 대하여 LHP의 성능실험을 수행하였다. PP Wick의 증공크기에 대한 실험을 위해서 4가지의 Wick을 사용하였다. 그 크기는 0.5, 1.0, 20, 그리고 25 μ m이었다. 이 때 Wick의 두께는 모든 경우에 대하여 5 mm 이었다. 작동유체량은 식 (1)에 의해서 결정하였고, 작동유체량 변화는 식 (1)에서 액체 저장조 내부 체적에 대한 액체가 차지

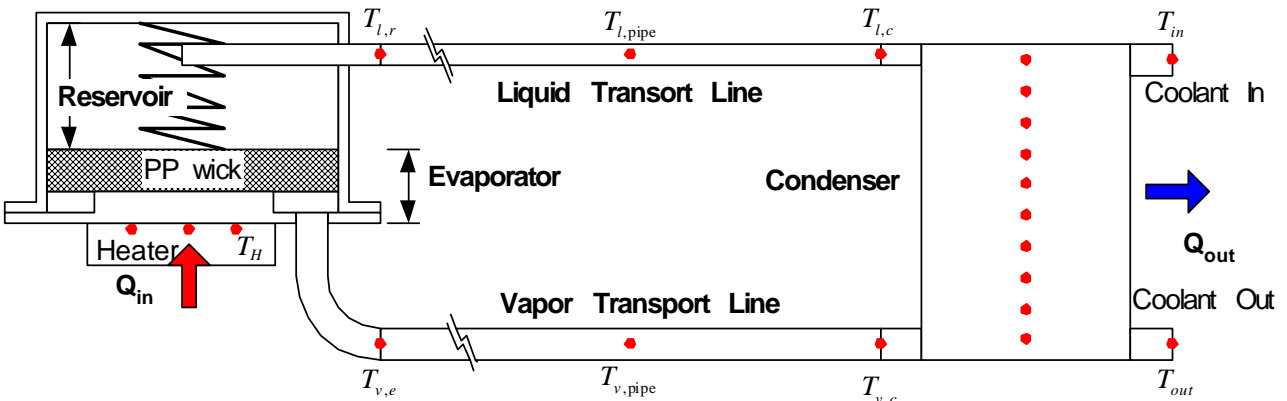


Fig. 1 Schematic of PP wick Loop heat pipe with thermocouple locations

하는 비율을 0.1에서 0.7까지 변화시키면서 실험을 수행하였다.

$$m_{\text{charge}} = \rho_l(\phi V_r + V_l + V_v + V_c + V_w + V_g) + \rho_v[(1-\phi)V_r] \quad (1)$$

where ϕ = fluid charge ratio, liquid ratio in the reservoir

- V_r = volume of the reservoir
- V_l = volume of the liquid transport line
- V_v = volume of the vapor transport line
- V_c = volume of the condenser
- V_w = volume of the wick pore
- V_g = volume of vapor passage in the evaporator

실험은 히터 표면의 온도가 90°C에 도달할 때까지 진행하였다. 이는 PP웍이 고온에 노출되어 변형되는 것을 방지하기 위해서이다. 전체 실험에서 최대 열부하는 한계온도 90°C에 도달하거나 증발부에서 드라이아웃이 발생할 때로 설정하였다. 그리고 최소 열부하는 증발부 증기의 출구 온도 ($T_{v,e}$)와 응축부 증기 입구에서의 온도($T_{v,c}$) 차이가 1°C 미만일 때로 결정하였다. 또한 LHP 성능평가를 위해 열저항 개념을 이용하였고, 그 식은 다음과 같다.

$$R_{\text{th}}[\text{K/W}] = \frac{T_H - T_{\text{in}}}{Q_{\text{input}}} \quad (2)$$

여기서 T_H 는 히터표면의 평균온도이고 T_{in} 은 응축부 냉각기에 공급하는 냉매온도 이다. Q_{input} 은 증발부에 가하는 열부하이다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 작동유체량비율 $\phi=0.5$, 냉각수 온도 20°C에서 메탄올-0.5 μm LHP의 온도 분포를 열부하에 따라 보이고 있다. 5W의 열을 가한 경우 히터 표면은 55°C까지 가열되었다. 이때 히터표면의 온도(T_H)와 증발부 증기 출구 온도 ($T_{v,e}$)의 차이는 2°C 정도 이지만 증기 이송 관의 중간 위치에 있는 외벽 온도 ($T_{v,p}$)와 응축부의 입구 온도 ($T_{v,c}$)는 각각 25°C, 24°C이다. 그리고 액체 저장조의 입구온도는 30°C였다. 온도 분포에서 알 수 있듯이 LHP는 5W에서 시동하지 못하고 있다.

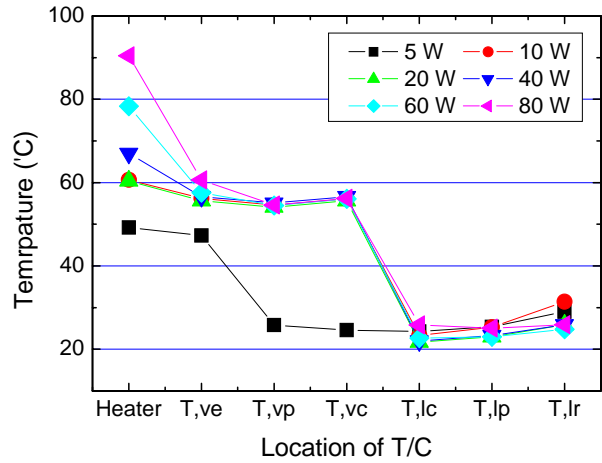


Fig. 2 Steady state temperature distribution of methanol-0.5 μm LHP for $\phi = 0.5$, $T_{\text{in}} = 20^\circ\text{C}$

10W 이상의 열을 가한 경우 증발부 증기 출구와 응축부 증기 입구 사이의 온도차이가 없어지고 있다. 정상적인 작동유체 순환이 이루어지고 있다. 20°C의 냉각 조건에서 메탄올-0.5 μm LHP가 80W까지 정상적으로 작동하고 있다.

열부하가 10W에서 80W로 변화하는 동안 히터의 온도(T_H) 29°C 상승하였다(61 ~ 90°C). 이때 증발부 증기 출구 온도($T_{v,e}$)는 5°C (56 ~ 61°C)만큼 증가하였다. 80W의 열부하 범위에서는 LHP의 작동온도에 영향을 크지 주지 못하였다. 중공 크기가 다른 웍을 이용한 경우에도 이와 유사한 경향을 보였다.

Fig. 3은 웍의 중공크기가 최대 열부하 및 열저항에 끼치는 영향을 보이고 있다. 0.5, 1.0, 20 및 25 μm 의 중공크기에 대한 결과이다. 중공크기가 25 μm 에서 0.5 μm 으로 감소하면서 최대 열부하

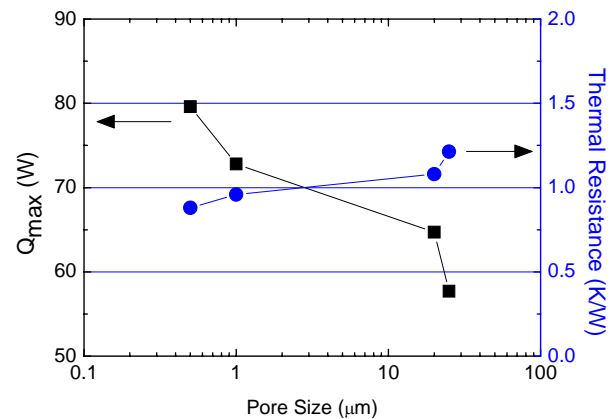


Fig. 3 Q_{max} and R_{th} for pore size of PP wick (methanol LHP for $\phi = 0.5$, $T_{\text{in}} = 20^\circ\text{C}$)

는 45%정도 증가하였다. 동시에 열저항은 33% 정도 감소하였다.

Fig. 4는 작동유체량비율(ϕ)이 최대열부하 및 열저항에 미치는 영향을 보이고 있다. 이 결과는 냉각 온도 20°C 에서 메탄올-1.0 μm LHP로 실험한 결과이다.

$\phi=0.1$ 인 경우 최대 열부하는 67W이었고 열저항은 1.0 K/W였다. 작동유체량이 $\phi=0.4$ 가 될 때까지 증가하면서 LHP의 성능이 향상되고 있다. 양이 더욱 많아지면서 최대 열부하는 감소하고 있고 열저항은 증가하고 있다. 가장 좋은 성능이 작동유체량 비율 $\phi=0.4$ 에서 나타났으며 이때의 열부하는 75 W이었고 열저항은 0.9 K/W. 그림에서 보이는 바와 같이 작동유체량 비율 $\phi=0.1$ 에서 0.7범위에서는 열저항의 변화가 거의 없었다.

냉각 온도(T_{in})가 10, 20, 및 30°C 일 때 작동유체의 종류를 달리하면서 0.5 μm 중공크기의 PP웍 LHP로 성능실험을 수행하였다. 5종류의 작동유체를 이용하였고, 작동유체량은 편의상 $\phi=0.5$ 일 때로 정하였다.

메탄올, 아세톤 및 에탄올을 작동유체로 사용한 PP 웍 LHP는 정상적으로 작동하였다. 그러나 R134a와 물은 PP웍 LHP에 적합하지 않았다. 메탄올과 아세톤의 경우 최소 열부하는 10W이었고, 에탄올은 이보다 높은 열부하에서 시동하였다. R134a를 사용한 LHP는 초기에 정상적으로 작동하다가 작동온도가 높아지면서 성능이 저하되었고, 결국 작동을 멈추었다. 가열된 웍이 R134a와 화학반응을 일으켜 변형이 되었기 때문이다. 작동유체로 물을 사용한 경우 히터의 표면

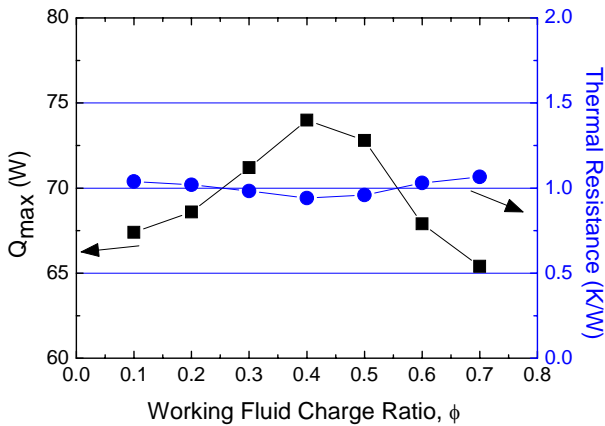


Fig. 4 Q_{max} and R_{th} for working fluid charge ratio (methanol-1.0 μm LHP for $T_{in} = 20^\circ\text{C}$)

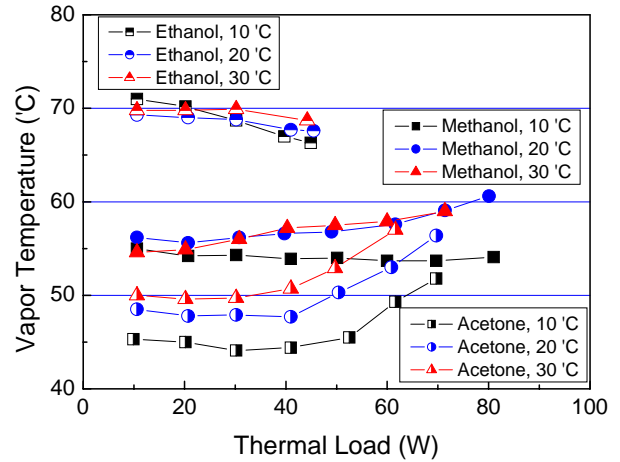


Fig. 5 Vapor temperature variation of the 0.5 μm LHPs for different heat sink temperatures.

온도가 90°C에 도달하는 동안 작동유체 순환이 이루어지지 않았다.

에탄올 및 아세톤의 정상 상태에서의 온도분포는 Fig. 2의 메탄올 LHP와 유사하였다.

Fig. 5는 열부하에 따라 정상적으로 작동한 3종류의 작동유체에 대한 증기온도 ($T_{v,e}$)의 변화를 보이고 있다. 냉각 온도 $T_{in}=30^\circ\text{C}$ 일 때 메탄올 LHP의 $T_{v,e}$ 는 냉각온도가 20°C 일 때와 거의 유사한 분포를 보이고 있으며, 열부하가 증가하면서 온도가 미소하게 상승하였다. 냉각 온도 $T_{in}=10^\circ\text{C}$ 인 경우에는 열부하가 증가함에 따라 $T_{v,e}$ 가 미소하게 감소하는 경향을 보였다.

에탄올의 경우 열부하가 증가함에 따라 냉각온도와 무관하게 $T_{v,e}$ 가 감소하는 경향을 보였다. 아세톤의 경우 40 W까지는 $T_{v,e}$ 가 일정하게 유지되었고, 이후 열부하가 증가하면서 온도가 선형적으로 증가하였다. 3 종류의 정상 작동한 작동유체 중에서 냉각온도 변화에 따라 $T_{v,e}$ 가 가장 크게 변한 것은 아세톤이었다. 전반적으로 에탄올을 이용한 LHP의 작동온도가 가장 높은 작동온도에서 분포하였으며, 이때의 온도는 70°C 정도이었다. 메탄올 LHP는 에탄올 LHP보다 15°C 정도 낮은 온도 영역에서 분포하였고, 아세톤은 전체 작동 범위서 가장 낮은 온도분포를 보였다.

Fig. 5은 일반적으로 냉각 온도가 증가하면서 증기온도가 증가하는 것을 보이고 있다.이 때, 최대 열부하와 열저항이 미소하게 감소하는 경향을 보였고, 이는 작동유체 종류와 무관하였다. 이 결과가 Fig. 6에 정리되어 있다.

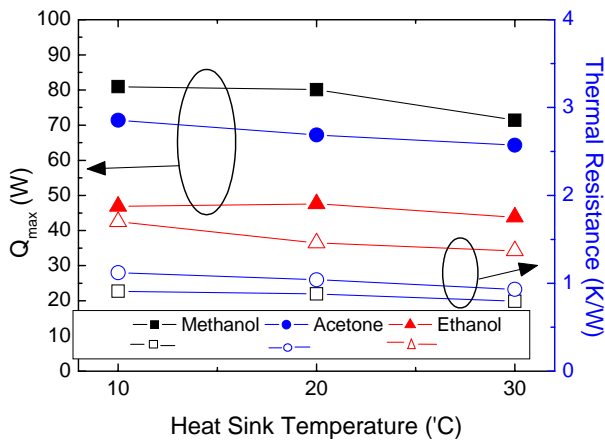


Fig. 6 Q_{max} and R_{th} of the $0.5\mu m$ LHP for different heat sink temperature

아세톤 LHP의 증기 온도 ($T_{v,e}$)가 가장 낮게 분포하였지만 성능이 가장 우수하지는 않았다. Fig. 6에 나타나 있는 바와 같이 메탄올 LHP인 경우가 열부하를 가장 많이 처리할 수 있었고, 이 때 열저항은 가장 낮게 분포하였다. 메탄올 LHP의 Q_{max} 는 아세톤 LHP에 비하여 20% 높고 에탄올에 비해서는 80% 더 높았다. 열저항은 아세톤의 경우보다 20%, 에탄올의 경우 보다 50% 낮은 분포를 보였다.

Fig. 7은 중력 영향에 따른 증기 온도 ($T_{v,e}$) 변화를 보이고 있다. 메탄올- $0.5\mu m$ LHP를 이용한 실험결과로 냉각온도는 $20^{\circ}C$ 이었다. 중력 보조 모드 (-10 cm)인 경우 최대 열부하는 95 W로 수평모드보다 15W증가하였고, 증기 온도($T_{v,e}$)는 열부하 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 역구배 모드(+5 cm)인 경우 최대 열부하는 50W로

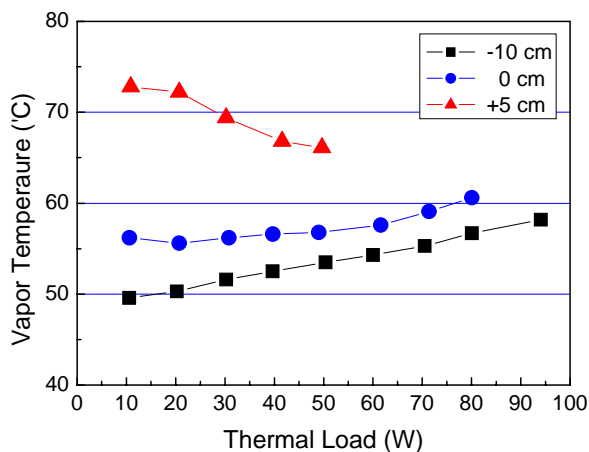


Fig. 7 The vapor temperature variation of the methanol- $0.5\mu m$ LHP for gravity effect

중력보조 모드 경우보다 절반정도의 수준이었다. 열부하가 증가함에 따라 증기 온도 $T_{v,e}$ 가 감소하는 경향을 보였다.

4. 결론

폴리프로필렌(PP)웍을 이용한 소형 루프히트파이프에 대한 성능 실험을 통해 워크구조물의 중공크기, 작동유체량, 작동유체 종류, 그리고 응축부 온도에 대한 성능 실험을 수행하였고, 최대 열부하 및 열저항으로 성능을 평가하였다.

메탄올 $0.5\mu m$ LHP의 최대 열부하는 80 W ($6.5 W/m^2$), 열저항은 $0.8 K/W$ 이었다. 웍의 중공크기가 $25\mu m$ 에서 $0.5\mu m$ 로 감소하면서 최대 열부하는 45% 증가하였고, 열저항은 33% 감소하였다.

작동유체량 비율이 $\phi=0.4$ 일 때 최상의 성능을 보였다. 그러나 $\phi=0.1$ 에서 0.7 사이의 범위에서 열저항 변화는 미미하였다

PP웍 LHP의 작동유체로 메탄올, 아세톤 및 에탄올은 적합하였고, R134a 및 물은 적합하지 않았다. 이 중 메탄올이 가장 좋은 성능을 발휘하였다.

중력영향을 보면 역구배인 경우 수평상태보다 최대 열부하가 38%나 감소하였다.

참고문헌

- (1) Maidanik, Yu.F., 1999, "State-of-the-art of CPL and LHP Technology," Proc. of 11th IHPC, Tokyo, Japan, K-II.
- (2) Meyer, R., Muller, R., Beckmann, K., Goncharov, 1993, K.A., Kotlyarov, E.Yu., and Maidanik, Yu.F., "Investigation of the Heat Transfer Performance of a Capillary Pumped Ammonia Loop under Gravity," SAE Transactions - Section 1, Journal of Aerospace, SAE No. 932304, pp. 1698-1699
- (3) Baker, C.L., Bienert, W.B., and Ducao, A.S., 1998, "Loop Heat Pipe Flight Experiment," SAE Transactions - Section 1, Journal of Aerospace, SAE No. 981580, pp. 373-378.
- (4) Sudakov, R.G., Maidanik, Yu.F., Ochterbeck, J.M., and Choi, S.W., 2002, "Development and Investigation of an Ammonia Reversible Loop

- Heat Pipe," Proc. of 12th IHPC, Moscow, Russia, pp.177-181.
- (5) Bienert, W.B., Krotiuk, W.J., and Nikitkin, M.N., 1999, "Thermal Control With Low-power, Miniature Loop Heat Pipes," SAE Transactions - Section 1, Journal of Aerospace, SAE No. 1999-01-2008, pp. 520-524.
- (6) Pastukhov, V.G., Maidanik, Yu.F., and Chernyshova, M.A., 1999, "Development and Investigation of Miniature Loop Heat Pipes," SAE Transactions - Section 1, Journal of Aerospace, SAE No. 1999-01-1983, pp. 483-487.
- (7) Delil, A.A.M., Baturkin, V., Friedrichson, Yu., Khmelev, Yu., and Zhuk, S., 2002, "Experimental Results of Heat Transfer Phenomena in a Miniature Loop Heat Pipe with a Flat Evaporator," Proc. of 12th IHPC, Moscow, Russia, pp.126-133.
- (8) Kobayashi, T., Ogushi, T., Haga, S., Ozaki, E., Fujii, M., 2003, "Heat Transfer Performance of a Flexible Looped Heat Pipe Using R134a as a Working Fluid: Proposal for a Method to Predict the Maximum Heat Transfer Rate of FLHP, " Heat Transfer-Asian Research, Vol. 32 No. 4, pp. 306-318.
- (9) Wateman, N.A., and Ashby, M.F., 1997, The Materials Selector, Vol. 3, 2nd ed., Chapman & Hall, London, UK