

능동적 온도 제어를 위한 유체 기둥 열 스위치의 형상에 의한 영향

The geometry effect of liquid column thermal switch for active temperature control

*정수현¹, Wataru Nakayama², Yoshimi Ito³, #이선규⁴

*S. H. Jeong¹, W. Nakayama², Y. Ito³, #S. K. Lee(skyee@gist.ac.kr)⁴

¹ 광주과학기술원, ²Thermaltech International, ³Tokyo Inst. Tech, ⁴광주과학기술원

Key words : Thermal switch, liquid column, Temperature distribution, Thermal resistance

1. 서론

최근 다양한 분야에서 주요 제품의 온도 제어에 대한 관심이 높아지고 있다[1]. Thermal switch는 열전도율을 제어하여 열전달을 제어하는 장치로써 극저온에서 사용하기 위해 Gas-gap switch, bi-metal switch 등이 개발되어 왔으며, 최근에는 다양한 환경에서 사용하기 위한 연구가 진행되는 중에 있다[2, 3, 4, 5]. 본 연구에서는 상온에서 사용가능할 뿐 아니라 국부적인 온도 제어가 가능한 liquid column thermal switch를 설계, 제작하여 그 특성을 파악하였다. Liquid column thermal switch는 고온부와 저온부 사이에 모세관을 설치하고, 고온부와 저온부 사이에 열전도를 높이고자 할 경우에는 유체 기둥을 형성하고(on-state), 열을 차단하고자 할 때에는 유체 기둥을 제거하여(off-state) 그 목적을 달성한다. 본 연구에서는 열 스위치 구동을 원활하게 하기 위한 채널 형상을 설계하고 제작하여 기능을 시험하였다.

2. 채널 형상의 효과

Liquid column thermal switch를 실현하기 위해서는 유체의 정밀한 제어가 필수적이다. 본 논문에서는 스위치 형상 가공을 통하여 제어가 가능한 유체의 임계 접촉각을 구하고 이를 이용하여 유체의 스위치 작동을 용이하게 하였다. 유체의 접촉각은 동접촉각과 정접촉각으로 나뉜다. 정접촉각은 유체가 안정화된 상태의 접촉각이며 동접촉각은 외부의 영향을 받은 유체가 움직일 때의 접촉각이다. 유체 접촉각은 채널 선단의 모서리 부분 형상가공을 통하여 안정화 시키는 것이 가능하다. 그림 3.a는 동접촉각에 도달한 유체 방울이며, 그림 3.b는 동일한 유체 방울이 삼각형 구조물을 만나 접촉각의 기준면 각도가 변화하여 유체가 안정화 된 것을 나타낸 것이다. 이와 같은 형상의 효과를 사용하여 유체를 제어함으로써 열 스위치를 실현할 수 있다.

3. 스위치 작동 원리와 채널의 설계

Thermal switch는 펌핑 채널, 저장 채널, 스위칭 채널, 호흡 채널을 가지며 On 상태를 만들기 위하여 펌핑 채널에서 유체를 공급하면 스위칭 채널에서 유체 기둥이 형성되어 고온부와 저온부를 열적으로 연결하게 된다. 다시 펌핑 채널에서 유체를 흡수하면 유체 기둥은 사라지고 열저항이 높은 Off 상태가 된다(그림 2). 이와 같은 순서로 정상적으로 작동하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다. 먼저 on 상태를 만들기 위해서는 펌핑 채널로부터 공급된 유체가 스위칭 채널의 끝단부터 다음 끝단에 도달할 때까지 순차적으로 유체 기둥을 형성해야 하고 이를 만족시키기 위해 스위칭 채널은 끝단에 유체 파열 구간을 구비해야 한다. 그림 4 과 같이 유체 파열 구간은 스위칭 채널의 다른 부위보다 높은 각도를 가지며, 따라서 유체는 유체 파열 구간에서 가장 먼저 임계 접촉각에 도달하게 되어 스위칭 채널의 끝단에서부터 유체 기둥이 형성되게 된다. Off 상태를 만들기 위해서는 저장 채널의 유체 점착력이 스위칭 채널의 점착력보다 커야 하며, 이를 위해 저장 채널에 친수성 코팅을 하였다.

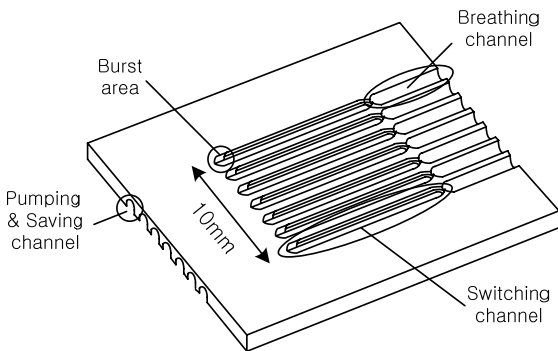


Fig. 1 Liquid column thermal switch

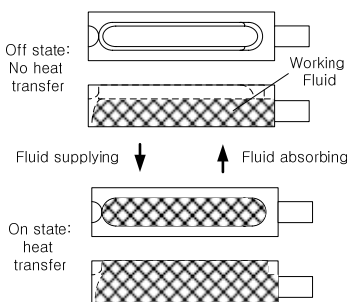


Fig. 2 Operation principle

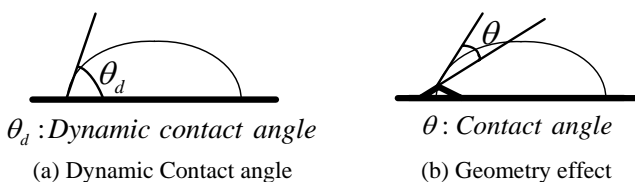


Fig. 3 Contact angle

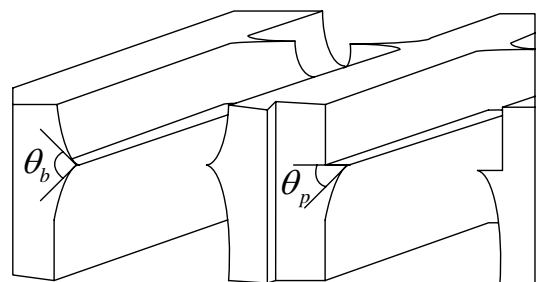
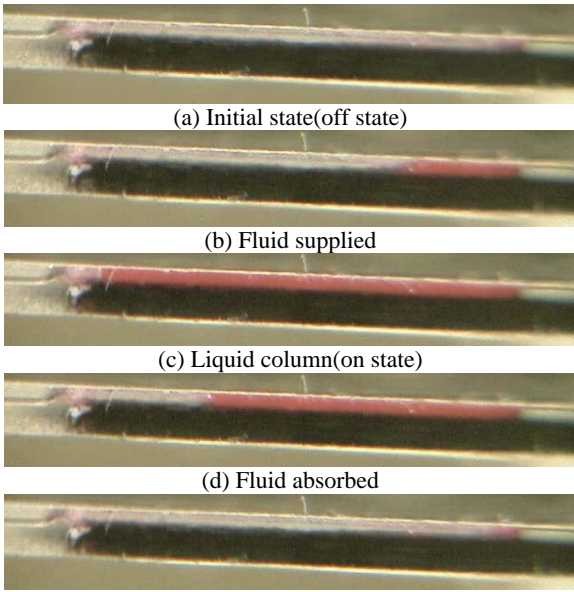


Fig. 4 Cross section of burst area



(e) Initial state(off state)
Fig. 5 Liquid column control

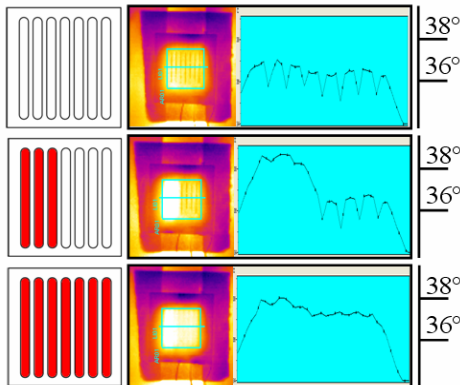


Fig. 6 Experiment result

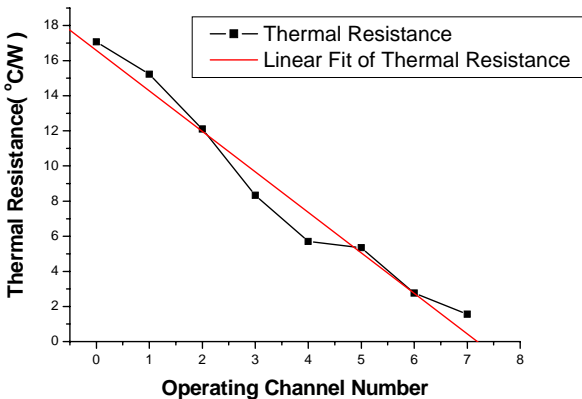


Fig. 7 Thermal resistance

4. 유체 기둥 제어

제작한 스위치는 물을 작동 유체로 사용하여 유체 제어 실험을 수행하였다. 그림 5는 유체 기둥의 생성과 제거를 순서대로 나타낸 것이다. 스위치 하단부에 검게 보이는 부분은 친수성 코팅을 한 부분이다. 초기에 유체는 저장 채널에 채워져 있다가, 펌핑 채널에서 계속 유체가 공급됨에 따라 burst area에서부터 유체 기둥이 형성된다. 펌핑 채널에서 물을 흡수하면 유체 기둥은 스위칭 채널에서 제거되게 된다.

5. 온도 분포 및 열 저항 측정

물을 작동 유체로 사용하여 제작한 스위치의 열저항 측정 실험을 수행했다. 총 7개의 채널을 순차적으로 on 상태를 만들면서 스위치 상면의 온도 분포와 평균 열저항을 측정했다. 스위치 상면과 하면의 온도는 각각 IR camera와 열전대를 사용하여 측정하였으며 열류는 열류 센서를 사용하여 측정하였다. 채널의 상면 온도는 그림 6의 온도 그래프와 같이 Off 상태일 때에는 주변보다 낮은 온도 상태에서 On 상태가 되면 주변보다 높은 온도로 변화한다. 그림 7은 평균 열저항을 측정한 그래프로 On 상태의 채널수를 증가시킬 때마다 평균 열저항이 거의 선형적으로 감소하고 있는 것을 볼 수 있다.

6. 결론

Liquid column thermal switch를 설계, 제작하였고 이를 이용하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

Liquid column thermal switch의 채널 형상과 친수성 코팅을 활용하여 유체 기둥을 안정적으로 제어할 수 있었다. 유체 기둥이 빈틈없이 형성되도록 하기 위하여 스위칭 채널의 끝단에 burst area 구비하였다. 유체기둥을 효율적으로 제거하기 위해서는 저장 채널에 친수성 코팅을 하여 높은 유체 점착력을 갖도록 하였다.

다음으로 제작된 스위치의 온도 제어 특성을 파악하였다. On 상태의 채널 수를 증가시키면서 스위치 상면의 온도 분포와 열저항을 측정하였다. 스위칭 채널의 on-off 상태에 따라 스위치 상면의 온도분포가 달라지는 것을 확인하였고, on 상태의 스위칭 채널이 증가함에 따라 전체 열저항이 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Sunil S. Murthy, Yogendra K. Joshi, Wataru Nakayama, "Single Chamber Compact Two-Phase Heat Spreaders With Microfabricated Boiling Enhancement Structures", IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, VOL. 25, NO. 1, MARCH 2002
2. M. Prina, J.G. Kulleck, R.C. Bowman Jr., "Assessment of Zr-V-Fe getter alloy for gas-gap heat switch", Journal of alloys and Compounds 330-332(2002) 886-891
3. Fernando H. Milanez, Marcia B.H. Mantelli, Kenji Uchino, "Theoretical and experimental study of a bi-metallic heat switch for space applications", International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 4573-4586
4. H.M. Chang, H.J. Kim, "Development of a thermal switch for faster cool-down by two-stage cryocooler", Cryogenics 40 (2000) 769-777
5. J.Cho, T.Wiser, C.Richards, D.Bahr, R.Richards, "Fabrication and characterization of a thermal switch", Sensors and Actuators A Physical xxx (2006) xxx-xxx