



이기우 수석연구관
한국에너지기술연구원
페열이용연구센터
kwlee@kier.re.kr

요약

최근의 계속된 칩(Chip)기술의 발전으로 전자부품의 고성능화가 가능해 졌지만, 그에 따라서 부수적으로 전자제품으로부터 발생하는 열로 인한 많은 열적인 문제도 야기되었다.

칩자체의 초소형화와 고성능화는 전자, 통신, 항공 우주, 각종 에너지 시스템들의 소형화가 더욱 가능해졌고, 또한 이러한 시스템들의 열적인 문제를 해결할 장치들도 초소형화하는 제품들이 필요하게 되었다.

따라서 본 기술에서는 초소형 전자기기시스템(Micro-Electro Mechanical System) 기술의 발전에 따라 가공이 가능하게 된 초소형 열교환기(Micro Heat Exchanger)에 관한 기술을 초소형 채널 열교환기(Micro Channel Heat Exchanger), 초소형 관형 열교환기(Micro Tube Heat Exchanger), 그리고 초소형 히트파이프 열교환기(Micro Heat Pipe Heat Exchanger)와 같이 세 가지로 분류하여 그 기술의 현재와 앞으로의 전망을 소개하고자 한다.

1.서론

최근 몇 년간 초소형 전자기기시스템기술의 연구 개발이 빨라지면서 결국 초소형 가공기술들이 많이 개발되고 있다. 이런 기술들은 초소형 모타(Micro Motor), 초소형 센서(Micro Sensor), 초소형펌프(Micro Pump), 초소형 밸브(Micro Valve), 초소형 가스 터빈(Micro Gas-Turbine), 초소형 열교환기(Micro Heat Exchanger), 초소형 채널 방열기(Micro Channel Heat Sink) 등 초소형 기계장치들의 개발을 가능하게 하고 있다. 초소형 전자기기시스템기술에 의한 열교환기의 소형화 특징은 우선 제품의 소형, 경량 및 정교함과 온도에 대한 응답이 빠르고, 구동이 용이하며, 고감도 가능 및 가공비용이 저렴하고, 무엇보다도 시스템이 소형화되어 사용장소의 제약이 작아진다는 것이다.

그 중에서도 초소형 열교환기 기술은 초소형 전자장치, 항공 우주, 의료장치, 재료공학, 생물학분야 등의 중요한 영역에서 많이 응용되고 있다. 특히 최근의 고성능 컴퓨터 기술과 레이저기술의 발전은 칩수준에서 시스템수준에 이르기까지 자체 내에서 발생하는 많은 열적인 문제를 해결하기 위해 이런 초소형 열교환기의 도움이 절실히 필요해지고 있다[1].

항공 우주분야에서 기존의 원거리 우주 탐사용 우주선들은 500~2000kg정도의 무게를 가지고 있지만 앞으로의 우주선들은 향후 5년에서 10년 내에 5~50kg 정도의 무게를 가진 우주선을 개발할 계획으로 알려져 있다[2]. 항공 우주 분야에서의 초소형화 역시 그에 따라 발생하는 많은 열적인 문제를 해결해야만 가능하리라 여겨진다.

앞으로 전자부품에서의 열발생량은 25W/cm² 이상이 될 것으로 예상되고 있다[2]. 이는 기존의 전자부품들의 열발생량의 수배에 해당하는 양으로 향후 더욱 향상된 열전달 장치의 개발이 절실히 필요로 하게 될 것이다.

무엇보다도 최근 몇 년간의 괄목할만한 전자, 통신, 그리고 컴퓨터기술의 발전은 근본적으로 칩의 집적능력의 발전에 그 기반을 둔다고 할 수가 있다.

칩의 계속되는 성능향상에도 나노(Nano)가공기술의 도움으로 오히려 칩자체는 더욱 소형화하는 추세로 가고 있으며, 칩의 초소형화와 고성능화는 당연히 많은 발열량을 동반하게 되어, 열적 문제해결을 위한 기술의 발전을 요구하게 되었다.

최근의 열전달 문제는 칩기술이 적은 면적에서 많은 열을 발생시킴으로써 기존의 열교환기와 달리 적은 면적에서의 열전달을 위하여 초소형 열교환기가 필요로 하게 되었으며, 이의 주된 장점은 우선 단위 체적당 매우 높은 열전달 면적이다.

결과적으로 열교환기의 열전달 성능을 평가할 수 있는 척도인 총열전달계수(Overall Heat Transfer Coefficient : $U_{total} = Q/[A(T_{hot}-T_{cold})]$)는 초소형 열교환기가 적은 면적과 낮은 온도차에서 많은 열전달 성능을 발휘하게 되므로 상당히 높게 평가되고

있다.

2 초소형채널 열교환기

초소형 열교환기의 기본적인 유형인 초소형 채널 열교환기는 [그림 1]에서 보는 바와 같이 금속성재질인 초박형 구조의 많은 채널들로 구성되어 있으며, 병류와 향류형 열교환기를 이루도록 제작되고 있다.

또는 [그림 2]에 나타난 것처럼 단순히 두 개의 유로를 통하여 향류형태의 열교환기 구조를 갖는 것도 있다. 초소형 채널 열교환기는 적은 면적에서 최대 $2500\text{W}/\text{cm}^2$ 정도의 열교환 능력을 갖고 있으며, 이는 앞으로 전자 부품, 항공우주 등의 분야에서 예상되는 열적 문제를 충분히 해결할 수 있는 능력이 있음을 증명하는 것이다.

초소형 채널 열교환기에 대한 개념은 1981년 Tuckerman과 Pease[3]에 의해 처음으로 소개되었으며, 70°C 보다 낮은 온도치를 유지하기 위하여 $1300\text{W}/\text{cm}^2$ 열유속의 발열량을 초소형 채널 열교환기를 사용하여 발산할 수 있음을 실험을 통하여 입증하였다.

고온과 저온의 유체의 흐름에 따른 초소형 열교환기가 1985년에 Swift 등[4]에 의해 개발되었으며, 횡류(cross flow)형 열교환기 형태로 채널을 구성하였다. 대부분의 초소형 채널 열교환기의 채널구조는 채널의 깊이/넓이의 비가 1보다 적게 설계되어 있다.

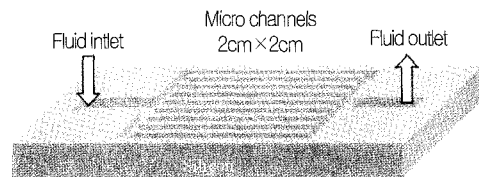
이는 제조 공정상의 한계에 의한 구조일 수도 있으나 열전달계수값을 향상시키기 위한 구조일 수도 있으며, 이는 압력강하를 증가시키게 되므로 채널 설계에 있어서 열전달만이 아니라 유동저항 역시 고려해야 한다.

이전의 연구결과에 따르면 Bier 등 [5]에 의해 최소 0.1mm 의 채널 넓이와 0.078mm 의 채널 깊이를 갖는 초소형 열교환기에서 $22.8\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})$ 의 총열전달계수(Overall Heat Transfer Coefficient)의 성능을 얻은 것으로 보고되어 있으며, 초소형 채널 열교환기 기술은 아직도 지속적인 연구 단계에 있다.

[그림 2]는 1 내지 2mm 의 얇은 유리 또는 스테인레스 판 위에 $200 \times 300\mu\text{m}$ 규격의 유로를 만든 형태로 $50 \sim 150\text{K}$ 의 온도 영역에서 $10 \sim 1000\text{mW}$ 의 열전달이 가능토록 만들어

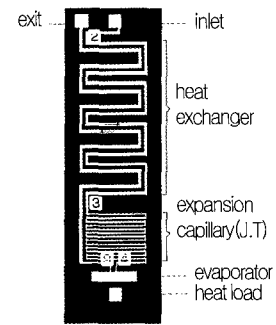
진 열교환기이다. $50 \sim 100\text{mm}$ 의 짧은 길이에 두 유로를 유체가 유동하면서 열교환이 이루어지도록 설계되었으며, 냉동기의 한 구성 부분으로써 개발된 것이다[6].

[그림 3]에 나타난 형태의 초소형 채널 열교환기는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transister)의 냉각을 위하여 설계된 열교환장치로 $50 \times 50\text{cm}$ 의 규격에 초소형채널을 통해 2상류(two-phase flow)의 유동에 의해 열교환이 이루어지도록 설계되었다. 본 설계는 $80\text{ml}/\text{min}$ 의 유량에서 850W 그리고 $216\text{ml}/\text{min}$ 일 때는 2950W 의 열을 전달시킬 수 있는 성능을 가지고 있다[7].



[그림 1] 채널형 열교환기의 기본 구조

[그림 4]는 화학반응에 있어서의 온도제어를 위하여 개발된 초소형 열교환기로 열교환기는 8mm 길이, 0.1mm 높이, 그리고 0.5mm 넓이의 채널들이 13채널을 갖는 플레이트 50개로 구성되어 있으며, 최고 500°C 의 화학반응 공정온도에 맞추어 설계되어진 열교환기이다.

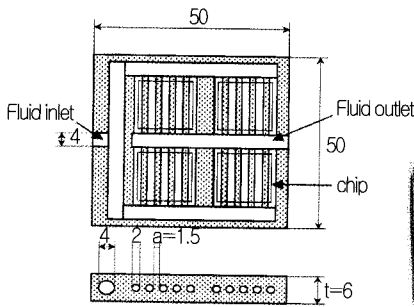


[그림 2] 향류형 초소형 열교환기

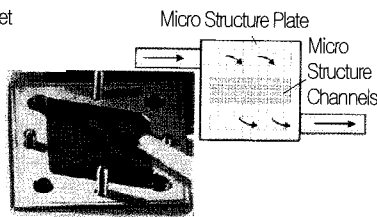
초소형 열교환기의 특징인 높은 면적-체적 비율 때문에 짧은 시간에 고온에 도달하는 시간이 짧다는 것이다. 이런 장점 때문에 많은 초소형 화학반응기(Micro Chemical Reactor)에서 온도 제어용으로 많이 응용되고 있다[8].

[그림 5]에는 횡류(Cross Flow)형 초소형 채널 열교환기를 나타낸 것으로 그루브(groove)를 가진 금속박(metal foil)들을 90° 로 교차하여 만든 구조로서, $100 \times 70\mu\text{m}$ 채널들로 유체와 기체가 서로 교차함으로써 열교환을 하도록 설계되어

있다. [그림 3]의 설계는 최대 200kW의 열전달능력을 가지고 있다[9].



[그림 3] IGBT냉각용 초소형 채널열교환기



[그림 4] 온도제어용 초소형 채널 열교환기

3. 초소형 관형 열교환기

초소형 관형 열교환기는 [그림 6]에서 보는 바와 같이 기존 열교환기의 초소형화라고 할 수 있다. 수백 개의 관들을 적은 공간에 배열시킨 형태로 두 개의 분기

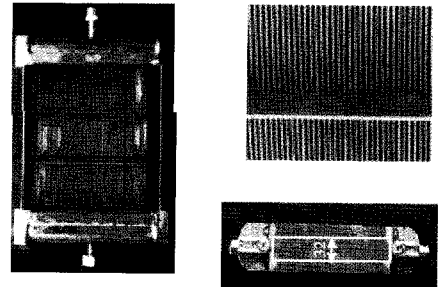


[그림 5] 횡류형 초소형 열교환기

관에 미세관들을 연결시켰으며, [그림 6]의 제품은 초소형 열교환기의 증발부로서 총 270×180×32mm 공간에 외경 0.5mm관 1130개를 113열 10행으로 배열한 형태이며 15℃와 80℃ 사이의 온도차에서 7kW의 열교환 성능을 갖도록 만들어진 제품이다[10].

[그림 7]에서 보는 초소형 관형열교환기는 헬륨 냉동기를 위해 개발된 열교환기로 20K 이하의 온도에서 좋은 성능을 발휘할 수 있도록 스테인레스 스틸재질의 초소형 관들로 만들어진 것이다. 관형

열교환기는 향류형이며 4800개의 0.5mm 직경의 미세관들로 구성된 12개의 요소로 구성되어 있다. 각 요소는 400개의 관들로 구성되어 있으며, 길이는 310mm이다. 각 관들은 2개의 헤더(header)에 연결되어 있으며, 헤더는 각각 다시 유체 입구와 출구관들에 연결되어 있다 [11].



[그림 6] 초소형 관형 열교환기

4. 초소형 히트파이프 열교환기 (Micro Tube Heat Exchanger)

초소형 채널 또는 관형 열교환기는 두 유체간의 열을 교환함으로써, 그를 위한 초소형 펌프, 압축기 등 기계적 순환 계통을 필요로 한다. 그러나 계속되는 전자부품의 초소형화 추세는 이런 기계적인 부품의 차지 공간을 허락하지 않고 있다.

따라서 초소형 히트 파이프 열교환기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

히트파이프는 밀폐된 용기내에서 작동 유체를 주입한 후 진공배기한 것으로 작동 유체의 증발과 응축이 별도의 외부동력없이 잠열을 이용하여 열을 전달하는 기구이다. 히트 파이프의 기본적인 원리는 [그림 8]에서 보는 바와 같이 밀폐된 용기내에 다공성 모세관 워크(Porous Capillary Wick)을 만들고 증발부에 열을 가하게 되면 작동유체는 증발부로 부터 증기 형태로 응축부로 이동하게 된다.

이 증기는 응축부에서 증발잠열을 히트파이프 외부로 전달하고 액체로 응축되어 히트파이프 벽면의 모세

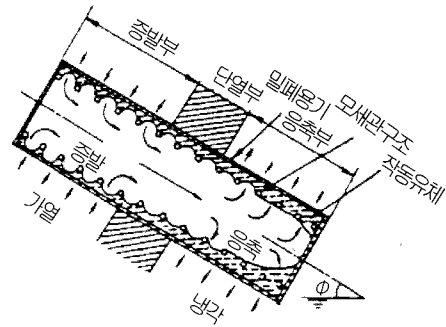
관력에 의해 다시 증발부로 되돌아오게 되며, 이런 작동유체의 순환에 따라 히트파이프는 지속적인 열전달 능력을 발휘하게 된다.

히트파이프는 기본적으로 워이 없이 증력에 의해 응축된 액체가 되돌아오는 열사이폰(Thermosyphon)형태가 있다. 또는 루프(loop) 형태로 액체의 순환이 파이프의 루프를 따라서 계속 순환되는 루프 타입 히트파이프(Capillary Loop Heat Pipe)와 워이 구조가 없는 루프형 열사이폰(Loop Thermosyphon)이 있다.

히트파이프의 장점은 무엇보다도 다른 기계적요소가 수반되지 않는 간단한 구조를 가지면서도 내부의 작동 유체의 상변화 현상에 따라 적은 열전달 면적과, 적은 온도차에서도 많은 열을 전달시킬 수 있다는 점이다.

초소형 히트파이프에 대한 연구는 앞에서 언급했듯이 다른 초소형 열교환기와 마찬가지로 고열 발생 전자부품의 냉각용으로 많은 연구와 제품개발이 진행되어 가고 있다.

특히 최근에는 항공우주용으로 루프형 히트파이프에 대한 연구가 많이 행해지고 있는 실정이다. 이는 기존의 단순 워이(wick)식 히트파이프보다 루프형 히트파이프가 열적 성능 면에서 월등히 우수한 능력이 있기 때문에 계속되는 전자부품의 소형화와 고성능화 추세에 맞추어, 워이를 가진 루프형 히트파이프의 연구가 많이 진행되고 있다.



[그림 8] 히트파이프의 작동 원리

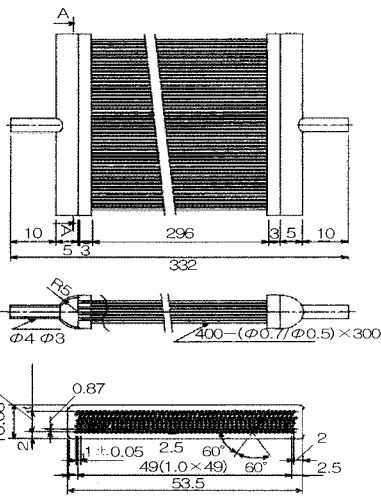
또한, 전자부품 및 전자기기의 소형화에 따른 공간의 부족은 단순한 히트파이프보다는 루프형이 더욱 효과적이기 때문이다. 또한 초소형 전자기기시스템기술을 응용한 초소형 열교환기의 개발은 전자부품 기술의 빠른 성장과 고밀도의 MCM(Multichip Module)기술의 개발과 빠른 발전속도에 더불어 많은 연구 개발 및 실제 상용품들로 등장하고 있다 [12, 13].

특히 휴대폰, PDA, 그리고 IMT 2000같은 휴대용 화상전화, 휴대용 통신 및 컴퓨터장비들의 초소형화는 향후 많은 열적 문제에 직면하게 될 것이며, 기존에 나와 있는 초소형 열교환기와 방열기술도 더욱 정밀하고 소형화된 기술이 요구될 것이다.

Micro 히트파이프는 [그림 9]에서 보듯이 일반적으로 전형적인 관형 히트파이프가 아닌 삼각 혹은 사각구조로 코너가 날카로운 각 구조를 갖는 것으로 알려져 왔으며, 그에 대한 연구가 계속 되어 왔다. 그림은 전형적인 마이크로 히트파이프를 배열함으로써 초소형 히트파이프형 열교환기를 구성하도록 Murakami[12]에 의해서 연구개발된 것이다.

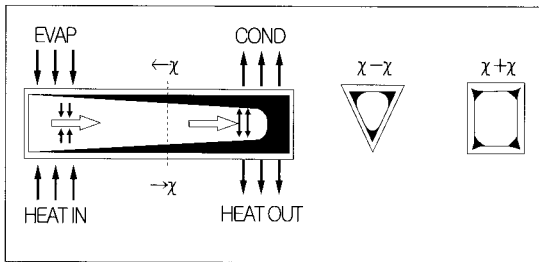
[그림 10]에 보는 마이크로 히트파이프의 배열형태의 히트파이프는 460mm×15mm×2mm의 판구조물에 삼각 채널을 만들어서 히트파이프들을 배열한 구조이다. 최근의 마이크로 히트파이프의 연구는 삼각 또는 사각구조와는 달리 새로운 구조를 찾으려는 경향으로 연구 또는 제품개발을 하고 있다.

이는 초소형 전자기기시스템기술의 계속된 발전으로 가능하게 된 것이며, 워이(wick)구조 또한 기존의 전형적인 워이

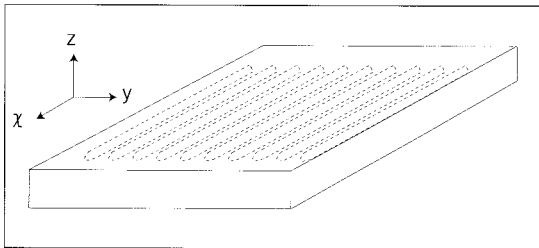


[그림 9] 헬륨 냉동기용 초소형 관형 열교환기

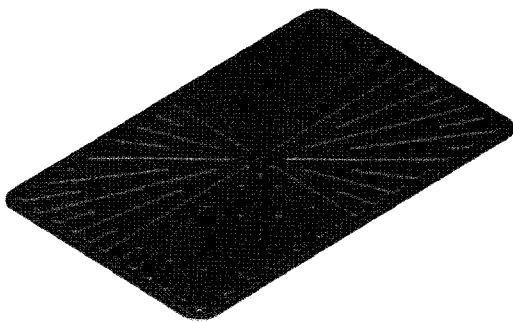
조를 탈피해서, 모세관력을 감소시키지 않으면서도 고성능의 열전달 능력이 있는 초 미세 구조를 만들려는 노력이 진행되고 있다.



[그림 9] 전형적인 Micro 히트파이프



[그림 10] Micro 히트파이프 이용 열교환기



[그림 11] 초소형 평판형 히트파이프 열교환기(25W/cm²)

이러한 노력은 [그림 11]에서 보는 초소형 평판형 히트파이프에서 그 경향을 찾을 수 있으며, 향후 차세대

휴대용 통신장비의 열적인 문제를 해결하기 위해 개발된 제품으로 초소형 전자기기시스템기술을 이용해 만들어진 초소형 열교환장치이다.

500 μ m의 두께에 최고 40cm의 크기까지 조절할 수 있으며, 그림에서 보는 설계는 71mm 정사각형의 제품에 두 개의 얇은 박막과 중간에 워구조 필름들을 겹쳐 만든 제품이다.

5. 결론

열교환기 기술은 에너지를 사용하는 기기에는 필수적으로 사용되는 요소이며, 기기의 고용량과 함께 크기는 소형화하는 흐름에서 이제는 장비의 고급화와 대용량화추세에 맞추어 열교환기의 초소형화도 필수적인 기술로 등장하고 있다.

열교환기를 초소형화 할 수 있는 기술로 초소형 채널 열교환기, 초소형 관형 열교환기, 그리고 초소형 히트파이프 열교환기에 대한 선진국에서의 현재 개발되고 있는 기술을 소개하였다.

그러나 아직까지 국내에서의 열교환기의 연구현황은 기존기술에 의존하는 정도이고 초소형 열교환기와 관련한 기술의 개발은 중요성을 인정하면서도 연구개발은 미흡하다고 할 수 있다. 따라서 초소형 열교환기와 관련된 기술중에서 우선 전자기기의 소형 및 고성능화추세에서 기초기술의 개발과 이용도의 개발이 국내에서도 시급히 요구되고 있다고 할 수 있다.

초소형 전자기기시스템 기술은 1980년대초에 처음 소개된 이후로 우리나라에는 1990년대 후반에 서서히 연구되기 시작한 신기술분야로 아직 그 기반과 기술이 절대 부족한 시점에 있다.

초소형 열교환기의 제작기술은 우선 그 부속품들의 초소형과 초정밀 가공을 위한 기반기술의 연구가 시급히 필요한 것으로 여겨진다.

초소형 채널 가공기술 및 초소형 히트파이프 제작기술은 아직까지 우리나라에서 연구 단계에 머물러 있는 상황으로 그 제작 자체가 단순히 열유체 관련 분야에서 뿐만 아니라, 가공 및 제조공정의 신기술이 함께 병

행 되어야하는 복합적인 연구분야이다.

앞으로의 전자, 통신, 의료장비, 그리고 항공 우주분야 등은 국가적으로도 장기적인 안목에서 집중 육성하고 있는 분야이므로, 이 분야에서의 초소형 장치 개발의 추세에 맞추어 초소형 열교환 장치의 필요성이 절실히 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Jiang, Pei~Xue et al., "Thermal-Hydraulic Performance of Small Scall Micro Channel and Porous Media Heat Exchanger", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 1039~1051, 2001.
2. Birur, G.C., Sur, T.W., Paris, A.D., Shakkottai, P., Green, A.A., and Haapanen, S.I., "Micro/nano spacecraft thermal control using a MEMS-based pumped liquid cooling system," SPIE Micromachining and Microfabrication, October 21~24 2001.
3. Tuckerman, D. B and Pease, R. F. W., "High Performance Heat Sinking for VLSI," IEEE Electron. Device Lett EDL2, pp. 126~129, 1082
4. Swift, G. W. et al., "Micro Channel Fluid Flow Heat Exchanger and Method of Fabrication," US Patent 4, pp. 516~632, 1985.
5. Bieret al., "Manufacturing and Testing of Compact Micro Heat Exchanger with High Volumetric Heat Transfer Coefficients," Micro Structure, Sensors and Actuators, ASME DSC 19, pp. 189~197, 1990.
6. Pradeep, S., Narayanan, and G., Venkatarathnam, "Analysis of Performance of Heat Exchangers used in Practical Micro Miniature Refrigerator," Cryogenics, Vol. 39, pp. 1999, 1999.
7. Gillot, C., Bricard, A., and Scheffer, C., "Single and Two-phase Heat Exchangers for Power Electronic Components," Int. J. of Therm. Sci., Vol. 39, pp. 826~832, 2000.
8. Heinichen, H. et al., "Using A Micro Heat Exchanger as Diagnostic Tool for the Process Optimization of a Gas Phase Reaction, Micro.tec. 2000, Hannover, Germany, 2000.
9. BRANDNER, J.; FICHTNER, M.; SCHYGULLA, U.; SCHUBERT, K., "Improving the efficiency of micro heat exchangers and reactors," Irven, R. [Hrsg.] Microreaction Technology : 4th Internat. Conf.; IMRET 4 ; AIChE Spring Nat.Meeting, Atlanta, Ga., March 5~9, 2000 ; Topical Conf. Proc. S.244~49 New York, N.Y., 2000
10. Shiro, Ikuta, "Basic Research toward development of flow-rate self-controlled micro heat exchanger", CALSONIKANSEI Corp. 기술보고서, 2000.
11. Saji, N. et al., "Development of a compact laminar flow heat exchanger with stainless steel micro tubes," Physica, C 354, pp. 148~151, 2001.
12. Groll, M. et al., "Thermal Control of Electric Equipment by Heat Pipes," Rev. Genie Therm, Vol. 37, pp. 323~352, 1998.
13. Gromoll, B., "Micro Cooling Systems for High Density Packaging," Rev. Genie Therm, Vol. 37, pp. 781~787, 1998. e