

온도 프로파일 가시화를 통한 프랙탈 구조 마이크로채널 히트싱크의 열수력학적 특성 최적화

이한솔* · 곽노균†

Direct Visualization of Temperature Profiles in Fractal Microchannel Heat Sink for Optimizing Thermohydrodynamic Characteristics

Hahnsoll Rhee*, Rhokyun Kwak†

Abstract As microchips' degree of integration is getting higher, its cooling problem becomes important more than ever. One of the promising methods is using fractal microchannel heat sink by mimicking nature's Murray networks. However, most of the related works have been progressed only by numerical analysis. Perhaps such lack of direct experimental studies is due to the technical difficulty of the temperature and heat flux measurement in complex geometric channels. Here, we demonstrate the direct visualization of in situ temperature profile in a fractal microchannel heat sink. By using the temperature-sensitive fluorescent dye and a transparent Polydimethylsiloxane window, we can map temperature profiles in silicon-based fractal heat sinks with various fractal scale factors ($a=1.5-3.5$). Then, heat transfer rates and pressure drops under a fixed flow rate were estimated to optimize hydrodynamic and thermal characteristics. Through this experiment, we found out that the optimal factor is $a=1.75$, given that the differences in heat transfer among the devices are marginal when compared to the variances in pumping power. This work is expected to contribute to the development of high-performance, high-efficiency thermal management systems required in various industrial fields.

Key Words : temperature profile(온도 프로파일), heat transfer visualization(열전달 가시화), fractal structure(프랙탈 구조), biomimetics(생체모방기술), Murray's law(머레이 법칙)

1. Introduction

마이크로칩 기술은 괄목할 만한 성장을 이룩하였고, 그 성장속도는 매우 빨라지고 있다. 1965년 인텔의 공동 설립자 무어는 반도체 집적

회로의 성능이 24개월 마다 2배로 늘어날 것이라고 예측하였으며, 이 법칙은 50년 동안 반도체 산업을 지배해왔다. 그러나 이제는 더 이상 반도체산업에서 이 무어의 법칙을 따를 수 없게 되었는데, 그 이유 중 한가지가 마이크로칩의 발열 문제이다¹⁻³⁾. 마이크로칩 기술이 발전할수록 마이크로칩의 집적도는 커지고 있는데, 이에 따라 필연적으로 발열량 또한 함께 증가하고 있다. 이 발열 문제를 해결하기 어려워지면서 무어의 법칙은 자연스레 파기된 것이다. 이러한

† Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Associate Professor
E-mail : rhokyun@hanyang.ac.kr

* Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Ph.D. student

현상은 마이크로칩 냉각 기술이 반도체 산업 발전에 있어 매우 중요하다는 것을 보여준다.

마이크로칩의 발열 문제가 심해짐에 따라 공랭 보다 냉각 효율이 큰 수랭을 마이크로칩 냉각 시스템으로써 채택하는 것을 고려할 필요가 있다. 수랭은 공랭 보다 냉각 효율이 좋음에도 불구하고 마이크로칩의 냉각 시스템으로써 채택되어오지 못했다. 그 이유로는 여러가지가 있는데, 그 중에는 공랭식에 비해 무게가 많이 나간다는 점과 전력 소모가 크다는 점 두 가지가 있다. 여러 연구자들은 3D 마이크로시스템에 수랭식 냉각 시스템을 적용하여 기존의 공랭식 냉각 시스템 보다 냉각 효율이 뛰어나도록 확인하였고, 채널의 형상으로 여러가지를 제시하였다³⁻⁵⁾. 그러나 냉각 시스템의 무게와 전력소모를 최소화하기 위해 열전달량과 냉매의 부피, 채널 내의 압력 강하를 최적화하는 것에 대하여 고려한 연구는 없었다.

본 연구에서는 마이크로칩 수랭식 냉각 시스템의 최적화를 위해 생체모방기술을 적용한다. 동식물의 호흡기관이나 순환기관은 최대한의 물질교환을 위해 표면적을 넓히면서도 유동에 필요한 에너지를 최소화하는 방향으로 진화하였는데, 이를 이론적으로 규명한 것이 머레이 법칙이다⁶⁾. 우리는 이 머레이 법칙을 마이크로칩 냉각 시스템에 적용하였다. 순환기관이 물질교환을 위해 대동맥에서 모세혈관에 이르기까지 작게 나뉘지며 표면적을 넓혔다면, 냉각 시스템에서는 열전달을 위해 이를 모방하는 것이다. 그리하여 우리는 채널들이 냉매의 유동 방향에 따라 3단계에 걸쳐 개수는 두 배로 늘어나고 크기는 작아지는 프랙탈 구조의 마이크로채널 히트싱크 디바이스를 제작하였다.

또한 머레이 법칙에 따르면 최적의 순환 네트워크는 각 단계의 유동관 반지름 a제곱들의 합은 일정한데, 유동관 내의 유동이 확산 유동인 경우 a=2이고, 층류 유동인 경우 a=3이다⁷⁾. 우리는 머레이 법칙이 냉각 시스템에 적용될 때 냉각 효율에 있어 최적의 a값을 찾기 위해 9가지 경우의 디바이스를 제작하여 실험을 진행하였다.

각 디바이스 간의 냉각 효율을 측정하기 위해 Rhodamine B 형광색소를 이용하여 마이크로채널 내의 온도 프로파일을 가시화하였다. Rhodamine B는 온도에 따라 형광 세기가 변하는 색소로 실시간으로 온도를 유추해내기에 적합하다^[8]. 이를 이용하여 각 디바이스들의 열전달량을 계산할 수 있었으며, 냉각 효율을 비교하기 위해 펌프동력에 대한 열전달량의 비를 나타내는 성능계수 (Coefficient of performance, COP)를 도입하였다.

2. Experiment

2.1 Theoretical background

마이크로 채널 내의 온도 프로파일을 가시화하기 위해서는 높이가 일정한 사각 채널을 사용하는 것이 필요하다. 하지만 머레이 법칙은 순환 네트워크가 원형의 유동관을 가질 때에 대해서 유도된 법칙이기 때문에, 원래의 머레이 법칙을 사각 채널 시스템에 적용하기 힘들다. Emerson et al.는 머레이 법칙을 일반화하여 일정한 높이를 가지면서 정사각형과 직사각형, 사다리꼴의 단면을 가지는 채널로 이루어진 네트워크에도 적용할 수 있게 하였다⁹⁾. 일반화된 머레이 법칙은 채널의 단면 모양과 상관없이 사용할 수 있다. 앞서 언급한 a값을 바꿔가며 실험하기 위해 이 일반화된 머레이 법칙을 변형하여 본 연구에 적용하였다.

$$2^{\frac{3n}{a}} \cdot \alpha_n \cdot (1 + \alpha_n) \cdot Po(\alpha_n) = \alpha_0 \cdot (1 + \alpha_0) \cdot Po(\alpha_0) \quad (1)$$

Po 는 Poiseuille number, 는 채널의 aspect ratio이다. 아래 첨자 0은 모 채널을 뜻하며, $n(n=1,2,\dots,m)$ 은 모 채널로부터 나뉜 채널의 단계를 나타낸다. 이 식을 이용하여 9가지의 a값(a=1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.75, 3, 3.25, 3.5)에 따라 디바이스를 제작하였다.

2.2 Device fabrication

(1)식을 이용하면 각 단계마다의 채널의 너비를

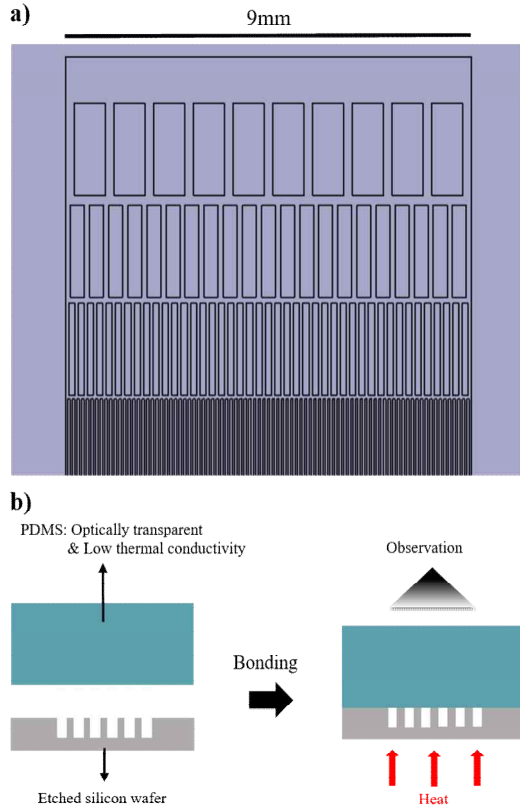


Fig. 1. a) Top view of fractal microchannel heat sink. b) Heat sink device fabrication.

구할 수 있고, 이를 이용하여 9가지 경우의 a 값에 대한 채널들의 너비를 계산하였다. 9가지 디바이스 모두 모 채널에서 시작하여 3단계까지 나눠졌다가 다시 3단계를 역으로 거치는 대칭 구조이다. (Fig. 1.(a)) 가장 작은 3단계의 채널은 $50\mu\text{m}$ 로 9가지 디바이스 모두 동일하며, a 값에 따라 상위 단계 채널들의 너비가 결정된다. 모든 채널의 높이는 $100\mu\text{m}$ 로 일정하고 히트싱크의 전체 두께는 $150\mu\text{m}$ 이다. 히트싱크는 MEMS 공정을 통해 실리콘 웨이퍼 (silicon wafer)를 에칭 (etching) 하여 제작하였다. 이후 히트싱크에 부착되는 부분은 Polydimethylsiloxane (PDMS)로 제작되었다. (Fig. 1.(b)) PDMS는 광 투과성과 유연성, 낮은 열전도도로 인해 온도 프로파일 가시화 및 열전달량 측정을 해야 하는 이 실험에 사용되기 적합하다^[10].

2.3 Experimental setup

Fig. 2.(a)는 본 연구에서의 실험과정을 도식화한 것이다. Syringe pump (Fusion 200/4000, Chemyx Inc.)를 이용하여 냉매의 유동을 발생시키고, heating glass (HG-S-Z001, Live Cell Instrument)를 이용하여 디바이스에 열을 가해주었다. 채널 내 압력 강하는 정압 펌프 (PHD ULTRA™ CP Syringe Pump, Harvard Apparatus)와 압력계 (P75 Venous Pressure Transducer, Harvard Apparatus)를 이용하여 측정하였다. 그리고 550nm 파장의 형광 LED를 이용하여 가시화한 온도 프로파일을 현미경 (IX-73, Olympus Co.)으로 관찰하고 이를 EM-CCD 카메라로 촬영하였다. 이때 현미경 렌즈로 Olympus Plan N 2x Microscope Objective를 사용하였다. 2.1에서의 일반화된 머레이 법칙을 바탕으로 9가지의 a 값($a=1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.75, 3, 3.25, 3.5$)을 갖는 디바이스를 제작하여 실험하였다.

2.4 Device operation

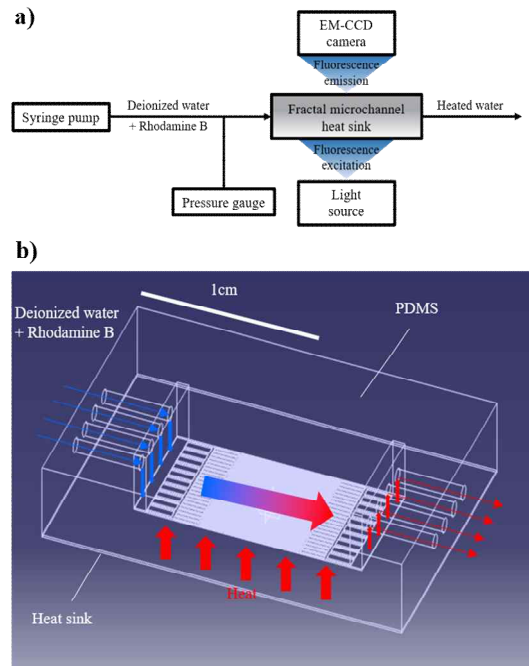


Fig. 2. a) Experimental setup. b) Schematic diagram of coolant flow (DI water + Rhodamine B).

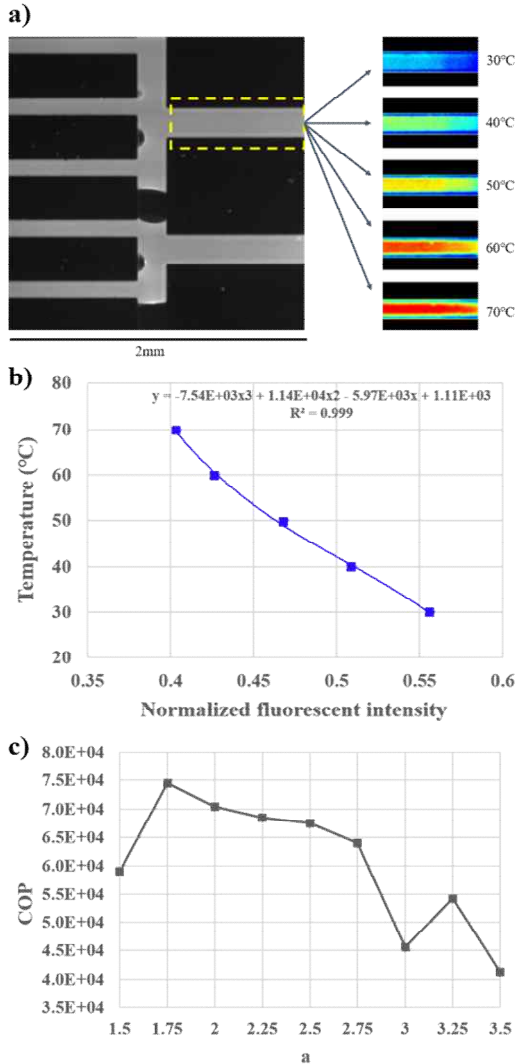


Fig. 3. a) Temperature mapped images of microchannel heatsink's exit when its temperature is 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C for $a=3$. b) Calibrated relationship between temperature of the coolant and its fluorescent intensity. c) Experimentally obtained COP for different devices.

Fig. 2.(b)는 디바이스 내 냉매의 유동을 도식화한 것이다. 열원인 heating glass의 온도는 $70^{\circ}\text{C}(\pm 0.8^{\circ}\text{C})$ 로 일정하게 유지한다. Heating glass는 온도 센서가 내장되어 있어 특정 온도 설정시 온도가 일정하게 유지된다. 디바이스 입구로

부터 상온(26.7°C)의 냉매가 $2\text{ml}/\text{min}(\pm < 0.35\%)$ 의 유량으로 들어가고, 냉매는 채널을 지나며 히트싱크를 냉각시킨다. 냉매의 온도는 출구로 나갈 때까지 지속적으로 상승한다. 냉매는 Rhodamine B 0.1mM 수용액이며, 형광 LED로 Rhodamine B에 대응하는 파장을 가하여 이를 현미경을 통해 관찰하고 온도 프로파일을 가시화를 확인할 수 있었다. 냉매의 형광 세기는 유동을 촬영한 이미지를 ImageJ 프로그램으로 분석하여 측정하였고, 이와 동시에 압력 게이지를 통해 압력 강하를 측정하였다.

3. Experiment Result

3.1 Temperature profile

냉매가 히트싱크로부터 받는 열전달량을 계산하기 위해서는 측정된 형광 세기를 실제 온도 값에 대응시킬 수 있어야 한다. 우리는 냉매의 Rhodamine B로 인해 나타나는 형광 세기와 실제 온도가 3차 다항식의 관계를 가진다고 가정하였다^[8]. 히트싱크의 온도가 30°C , 40°C , 50°C , 60°C , 70°C 일 때 각각의 채널 내부를 촬영하였다(Fig. 3.(a)). 이때 냉매는 흐르지 않는 상태이고, 충분한 시간 동안 디바이스를 가열하여 디바이스와 heating glass의 온도가 동일해져 형광 세기의 변화가 미미할 때 그 값을 측정하였다. 또한 디바이스 내 형광세기 측정 위치를 열전달량 측정 실험 시와 동일하게 설정하여 실제 실험과의 오차를 최소화하였다. 이 값들을 3차 다항식으로 fitting하여 나타내었다(Fig. 3.(b)).

3.2 Experiment Result

온도와 형광세기 간의 관계식으로 각 디바이스들의 출구 온도(T_{out})를 알 수 있었고 이를 통해 다음과 같이 COP를 도출해내었다^[11].

$$\dot{Q} = C_p \cdot \dot{m} \cdot (T_{out} - T_{in})$$

$$P = \Delta P \cdot \dot{V}$$

$$COP = \frac{\dot{Q}}{P}$$

여기서 \dot{Q} 는 냉매가 받은 열전달률, C_p 는 물의 정압 비열, \dot{m} 는 질량 유량이며, T_m 은 입구온도이다. 또한 P 는 펌프 동력, ΔP 은 압력 강하이며, \dot{V} 은 체적 유량이다. 이를 통해 Fig. 3.(c)의 그래프를 도출해낼 수 있었으며, 최적점은 $a = 1.75$ 임을 알 수 있었다.

머레이 법칙에 따르면 a 가 커질수록 상위단계 채널의 너비가 작아져 압력강하가 증가하고, 표면적이 넓어지므로 열전달량 또한 높아져야 한다. 실제 실험 결과에서 압력강하는 a 가 커짐에 따라 압력 강하도 증가하므로 이론과 부합한다고 할 수 있지만, 열전달량의 경우에는 그렇지 않아, a 의 최적점이 1.75라는 결과가 도출되었다.

4. Conclusion

본 연구는 마이크로 히트싱크 설계에 머레이 법칙을 적용하여 열전달 효율성을 극대화하는 방안을 탐색하였다. 이를 위해, 다양한 a 값을 가진 마이크로 히트싱크 디바이스들에 대해 열을 가했을 때의 열전달량을 온도 프로파일 가시화 기법을 통해 측정하고, 산출된 COP(성능계수)를 비교 분석함으로써, $a = 1.75$ 에서 최적의 열전달 효율을 나타내는 것을 확인하였다. 본 연구팀은 초기에 a 값이 큰 디바이스가 더 높은 열전달량을 보일 것으로 예상했으나, 실제 실험 결과는 이러한 가정과 다른 결과를 나타냈다. 이는 마이크로 채널 내부의 표면적과 디바이스와 heating glass 사이의 접촉 면적이 작고, heating glass의 온도가 충분히 높지 않아 각 디바이스의 온도 차가 미미하여 열전달량 측정 오차가 커진 것이 원인으로 예상된다.

추가 연구에서는 마이크로 채널 내부의 표면적과 디바이스 크기를 최적화하고, 더 높은 온도 조건에서 실험하여 디바이스 간의 열전달량을 극대화 하는 것이 필요하다. 또한 이를 통해 각각의 디바이스의 온도에 대한 관계식을 재조

정하며, Rhodamine B와 PDMS 간의 non-specific binding이 최소화될 수 있는 방안을 강구함으로써, 실험 결과의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다. 이러한 접근은 생체모방 기술을 활용하여 현대 마이크로칩 기술에서 발생하는 발열 문제를 해결하는 데 중요한 기여를 할 수 있을 것이며, 향후 마이크로 히트싱크 기술의 발전 방향에 대한 중요한 시사점을 제공한다. 이를 통해, 다양한 산업 분야에서 요구되는 고성능, 고효율의 열 관리 시스템 개발에 기여할 것으로 예상된다.

REFERENCES

- 1) T.N. Theis, H.-S.P. Wong, The end of Moore's law: A new beginning for information technology, *Computing in science & engineering*, 19 (2017) 41-50.
- 2) R.R. Schaller, Moore's law: past, present and future, *IEEE spectrum*, 34 (1997) 52-59.
- 3) Y. Deng, J. Liu, Hybrid liquid metal-water cooling system for heat dissipation of high power density microdevices, *Heat and mass transfer*, 46 (2010) 1327-1334.
- 4) E. Kreutz, N. Pirch, T. Ebert, R. Wester, B. Ollier, P. Loosen, R. Poprawe, Simulation of micro-channel heat sinks for optoelectronic microsystems, *Microelectronics Journal*, 31 (2000) 787-790.
- 5) A. Zou, R. Chuan, F. Qian, W. Zhang, Q. Wang, C. Zhao, Topology optimization for a water-cooled heat sink in micro-electronics based on Pareto frontier, *Applied Thermal Engineering*, 207 (2022) 118128.
- 6) C.D. Murray, The physiological principle of minimum work: I. The vascular system and the cost of blood volume, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 12 (1926) 207-214.
- 7) X. Zheng, G. Shen, C. Wang, Y. Li, D. Dunphy, T. Hasan, C.J. Brinker, B.-L. Su, Bio-inspired

- Murray materials for mass transfer and activity, *Nature Communications*, 8 (2017) 14921.
- 8) D. Ross, M. Gaitan, L.E. Locascio, 0.00010125, *Analytical chemistry*, 73 (2001) 4117-4123.
- 9) D.R. Emerson, K. Cieslicki, X. Gu, R.W. Barber, Biomimetic design of microfluidic manifolds based on a generalised Murray's law, *Lab on a Chip*, 6 (2006) 447-454.
- 10) H. Rhee, R. Kwak, Induced-charge membrane capacitive deionization enables high-efficient desalination with polarized porous electrodes, *Water Research*, 244 (2023) 120436.
- 11) J. Marcos, M. Izquierdo, E. Palacios, New method for COP optimization in water-and air-cooled single and double effect LiBr-water absorption machines, *International journal of refrigeration*, 34 (2011) 1348-1359.