

마이크로 채널 디자인에 따른 온 칩 액체 냉각 연구

원용현¹ · 김성동² · 김사라은경^{1,†}

¹서울과학기술대학교 NID융합기술대학원
²서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Study of On-chip Liquid Cooling in Relation to Micro-channel Design

Yonghyun Won¹, Sungdong Kim² and Sarah Eunkyung Kim^{1,†}

¹Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National Univ. of Science and Technology,
232 Gongneung-ro Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

²Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(Received October 19, 2015: Corrected December 23, 2015: Accepted December 24, 2015)

초 록: 전자소자의 다기능, 고밀도, 고성능, 그리고 소형화는 전자 패키지 기술에 초미세 피치 플립 칩, 3D 패키지, 유연 패키지, 등 새로운 기술 패러다임 전환을 가져왔으며, 이로 인해 패키지 된 칩의 열 관리는 소자의 성능을 좌우하는 중요한 요소로 대두되고 있다. Heat sink, heat spreader, TIM, 열전 냉각기, 등 많은 소자 냉각 방법들 중 본 연구에서는 냉매를 이용한 on-chip 액체 냉각 모듈을 Si 웨이퍼에 제작하고, 마이크로 채널 디자인에 따른 냉각 효과를 분석하였다. 마이크로 채널은 딥 반응성 이온 에칭을 이용하여 형성하였고, 3 종류 디자인(straight MC, serpentine MC, zigzag MC)으로 제작하여 마이크로 채널 디자인이 냉각 효율에 미치는 영향을 관찰하였다. 가열온도 200°C, 냉매 유동속도 150 ml/min의 경우에서 straight MC가 약 44°C의 높은 냉각 전후의 온도 차를 보였다. 냉매의 흐름과 상 변화는 형광현미경으로 관찰하였으며, 냉각 전후의 온도 차는 적외선현미경을 이용하여 분석하였다.

Abstract: The demand for multi-functionality, high density, high performance, and miniaturization of IC devices has caused the technology paradigm shift for electronic packaging. So, thermal management of new packaged chips becomes a bottleneck for the performance of next generation devices. Among various thermal solutions such as heat sink, heat spreader, TIM, thermoelectric cooler, etc. on-chip liquid cooling module was investigated in this study. Micro-channel was fabricated on Si wafer using a deep reactive ion etching, and 3 different micro-channel designs (straight MC, serpentine MC, zigzag MC) were formed to evaluate the effectiveness of liquid cooling. At the heating temperature of 200°C and coolant flow rate of 150ml/min, straight MC showed the high temperature differential of ~44°C after liquid cooling. The shape of liquid flowing through micro-channel was observed by fluorescence microscope, and the temperature differential of liquid cooling module was measured by IR microscope.

Keywords: Liquid cooling, Thermal management, Micro-channel, direct cooling

1. 서 론

반도체 집적회로 소자의 온도는 소자의 성능을 좌우하는 가장 중요한 요소 중 하나로 대두되고 있다. 일반적으로 구조가 비교적 간단하고, 저비용으로 제작이 가능하며, 신뢰성이 확보된 공기냉각(air-cooling) 방법은 그동안 널리 사용되어 왔으나, 고성능 고밀도 소자의 높은 전력 밀도 또는 높은 열 유속(heat flu)으로 인하여 차세대

소자의 냉각 방법으로는 점차 부적합해지고 있다. 소자의 냉각방법으로는 thermal interface material(TIM), graphite 과 같은 재료 연구가 활발히 진행되고 있으며,¹⁻³⁾ thermal Si via, heat pipe, heat sink 같은 시스템 연구도 진행되고 있다.^{4,5)} 하지만 대부분의 수동냉각(passive cooling) 방법들은 열 전달 경로 중 열 전도도가 상대적으로 낮은 층(layer)에 의해 열 전달이 제한되고, 이러한 열 전달 장애 요소를 해결하기 위한 방법으로 능동냉각(active cooling)

[†]Corresponding author
E-mail: eunkyung@seoultech.ac.kr

© 2015, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

방법들이 많은 관심의 대상이 되고 있다.

능동냉각 방법 중 마이크로 채널(micro-channel, MC) heat sink에 관한 연구가 가장 활발히 진행되어 왔으며,⁶⁻⁸⁾ 최근 마이크로 채널과 실리콘 관통 비아(through Si via, TSV)를 이용한 온 칩 액체 냉각(on-chip liquid cooling)도 연구되고 있다.⁹⁻¹²⁾ 온 칩 액체 냉각의 경우 높은 제조 가격과 액체 유동을 위한 배선(fluidic interconnection)기술 뿐 아니라 액체가 소자에 직접 접촉되기 때문에 냉매 봉합(sealing)에 대한 신뢰성 문제를 해결해야 한다. 그 중 액체 봉합은 가장 중요한 문제로서 이를 해결하기 위한 방안으로 물 대신에 물보다 열적 성질은 떨어지나, 비저항(electrical resistivity)이 높은 Fluorinert FC-7 (perfluorocarbon liquid)과 같은 유전성 액체(dielectric liquid)를 냉매로 연구하기도 한다.¹³⁾ 마이크로 채널을 이용한 액체 냉각은 마이크로 채널의 구조(geometry)에 따른 영향이 크기 때문에 마이크로 채널의 폭(width), 깊이(depth), 종횡비(aspect ratio), 길이(length), 채널 단면적 형상(channel cross-sectional shape), 등 마이크로 채널의 디자인에 관한 연구 또한 많이 진행되고 있다. 그러나 디자인 연구의 대부분은 전산모사(simulation)에 한정되어 있는 편이다. 일반적으로 마이크로 채널의 길이가 길어지면 압력강하(pressure drop)가 증가하여 열 전달 효과가 떨어지게 되기 때문에 길이를 길게 할 경우 마이크로 채널의 종횡비를 작게 하여야 효과적이라고 한다.⁸⁾ 또한 열 전달은 마이크로 채널 내 냉매의 상(phase) 변화에 영향을 크게 받는다. 단상(single phase)으로 존재하는 냉매의 경우 열 유속이 증가할수록 마이크로 채널 내 냉매 온도가 올라감에 따라 냉매의 점도(viscosity)가 낮아져서 압력강하를 낮추는 경향이 있고, two-phase 변화를 일으키는 냉매의 경우 열 유속이 증가할수록 마찰 압력강하(frictional pressure drop)가 증가하고, 증기(vapor)가 많이 발생하여 압력강하가 증가하는 경향이 있다.¹³⁾ Two-phase 액체 냉각의 경우 냉매의 상 변화가 마이크로 채널의 앞부분에서 급속도로 일어나면 압력강하가 더욱 증가하고, 뿐 만 아니라 마이크로 채널 뒷부분에서 냉매가 흐르지 않아 열 전달이 오

히려 감소하게 되는 것이다. 그러나 최적화된 two-phase 냉각 시스템은 냉매의 기화작용으로 인해 단상 냉각보다 열 전달에 매우 효과적이다. Two-phase 냉각을 최적화시키기 위해서는 냉매의 선택이 매우 중요하며 소자의 최고 온도를 기준으로 two-phase 냉각 현상이 일어나는 냉매를 선택하는 것이 바람직하다.¹¹⁾

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼에 마이크로 채널과 실리콘 관통 비아를 이용한 온 칩 액체 냉각 모듈(module)을 제작하여 시스템의 냉각 효과를 관찰하였다. 특히, 마이크로 채널의 길이 및 굴곡여부에 따른 관찰을 위해서 3종류(straight MC, serpentine MC, zigzag MC)의 마이크로 채널 디자인을 제작하였으며, 각 디자인에 따른 냉각 현상을 분석하였다.

2. 실험방법

마이크로 채널과 실리콘 관통 비아를 이용한 온 칩 액체 냉각 모듈은 6인치 실리콘 웨이퍼 위에 제작되었다. 딥 반응성 이온 에칭(deep reactive ion etching, DRIE) 공정을 이용하여 마이크로 채널과 실리콘 관통 비아를 형성하였고, 마이크로 채널은 폭 50 μm , 깊이 100 μm 이었으며, Fig. 1에서 보는 것과 같이 3종류(straight MC, serpentine MC, zigzag MC)로 제작하였다. 마이크로 채널의 길이는 각각 0.98 cm, 28.5 cm, 그리고 34.8 cm로 제작되었다. 실리콘 관통 비아의 사이즈는 지름 50 μm (dia), 깊이 100 μm 으로 고정하였다. 마이크로 채널과 실리콘 관통 비아가 형성된 실리콘 웨이퍼는 유리 웨이퍼와 어노딕본딩(anodic bonding)으로 접합하였고, 어노딕본딩은 1000 mbar 가압 상태에서 척(chuck) 온도를 380°C로 하고 전압 1000V를 인가하여 진행되었다. 본딩 후 접합된 웨이퍼는 실리콘 관통 비아가 노출되도록 실리콘 웨이퍼를 연마(grinding)하였고, 칩(chip) 단위로 다이싱(dicing)하여 냉각 모듈을 준비하였다. 냉각 모듈과 내경 1mm의 튜브를 PDMS(polydimethylsiloxane)를 이용하여 연결하였고, 공정 순서는 Fig. 2에 나타내었다.

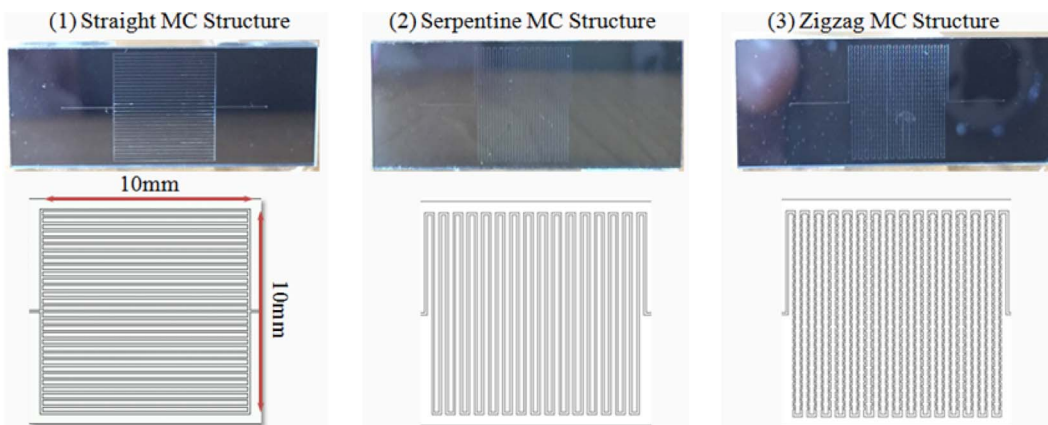


Fig. 1. Micro-channel designs ((a) straight MC, (b) serpentine MC, (c) zigzag MC).

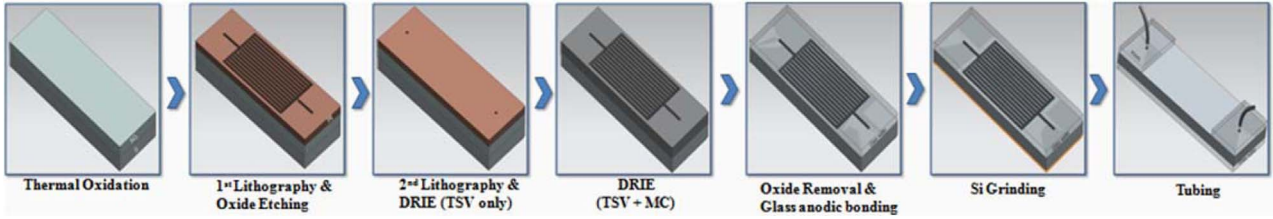


Fig. 2. Process flow of on-chip liquid cooling system.

제작된 온 칩 액체 냉각 모듈은 세라믹 히터(ceramic heater)를 열원(heat source)으로 이용하여 냉각 전후의 온도 차(temperature differential)를 측정하였고, 상온에서 300°C까지 테스트하였다. 세라믹 히터의 전원은 별도의 전원 인가 장치를 설치하여 전압 제어를 하였으며, 세라믹 히터로부터 방사되는 적외선을 차단하고, 정확한 IR(infrared) 측정을 위해 카본 흑체(carbon black body)를 시편 표면에 도포하여 온도를 측정하였다. 온도 변화 측정을 위한 IR 측정은 적외선현미경(SC5000, FLIR, USA)을 이용하였다. 그리고 가열 시 마이크로 채널 내 냉매의 흐름과 상 변화는 형광현미경(Eclipse Ti, Nikon, Japan)을 이용하여 관찰하였다. 냉매로는 DI(de-ionized) water를 이용하였으며, 냉매 주입 속도를 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ 부터 150 $\mu\text{l}/\text{min}$ 까지 변화를 주어 주입 속도에 따른 변화를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

액체 냉각 모듈의 가열온도(heating temperature)에 따른 냉각 효과를 Fig. 3에 마이크로 채널 디자인 별로 나타내었다. Serpentine MC와 zigzag MC는 냉매의 흐름과 냉각 현상 분석을 위하여 마이크로 채널 길이를 길게 하여 제작되었다. 마이크로 채널 디자인과 상관없이 가열온도 200°C에서 냉각 전후의 온도 차(temperature differential)가 가장 크게 관찰되었다. 가열온도 200°C에서 가장 큰 온도 차가 나타난 것은 two-phase 냉각 효과에 의한 것으로 설명된다. Figure 4의 형광현미경 분석에 의하면 가열온도 200°C의 경우에서 공기 방울(bubble)과 슬러그(slug)가 발생하면서 two-phase 냉각 현상이 나타났음을 보여

주고 있으며, 이러한 two-phase 냉각은 동일 냉매 질량당 단상 냉각과 비교하여 기화 열이 매우 크기 때문에 냉각 효과의 증가뿐 아니라 냉매의 양도 줄일 수 있는 장점이 있다. 가열온도 100°C의 경우는 마이크로 채널 전체 구간에서 냉매의 흐름이 원활했으며 공기 방울이 전혀 관찰되지 않았다. 즉 단상 냉각 현상이 일어났으며, 열 제거 효과는 200°C의 경우 보다 떨어졌다. 가열온도 300°C에서는 냉매의 기화 점(evaporation point)보다 훨씬 높은 온도로 인하여 대부분의 액체가 마이크로 채널 앞부분에서 빠르게 증발되면서 마이크로 채널의 출구(outlet) 부분으로 갈수록 냉매의 흐름이 제한되었기 때문에 200°C의 경우와 비교하여 열 제거 효과가 떨어졌다. Serpentine MC가 zigzag MC와 비교하여 냉각 전후의 온도 차가 높게 나타났는데, 예로 유동속도가 50 ml/min의 경우 가열온도 100°C, 200°C, 300°C에서 serpentine MC의 온도 차는 각각 ~6°C, ~14°C, 그리고 ~8°C로 관찰되었고, zigzag MC의 온도 차는 ~2°C, ~6.6°C, 그리고 ~1.8°C로 나타났다. Zigzag MC는 마이크로 채널 길이가 serpentine MC보다 약 17.8% 길며, 연속적으로 짧게 굽어지는 디자인이어서 냉매의 흐름이 serpentine MC 보다 매우 느렸기 때문에, 냉매의 기화 현상이 마이크로 채널 앞부분에서 심하게 발생하였고 이로 인해 열 제거 효과가 떨어졌다.

Serpentine MC의 길이는 28.6 cm이고, zigzag MC는 34.8 cm로 straight MC보다 마이크로 채널 길이가 각각 29.2배, 35.5배 길게 제작되었다. Straight MC는 Fig. 1에서 보듯이 마이크로 채널 길이가 0.98 cm로 31개의 마이크로 채널을 칩의 가로 길이로 만들어 액체 주입구(inlet)와 출구에 연결한 구조이며, 전 구간에서 단상 냉각 현상

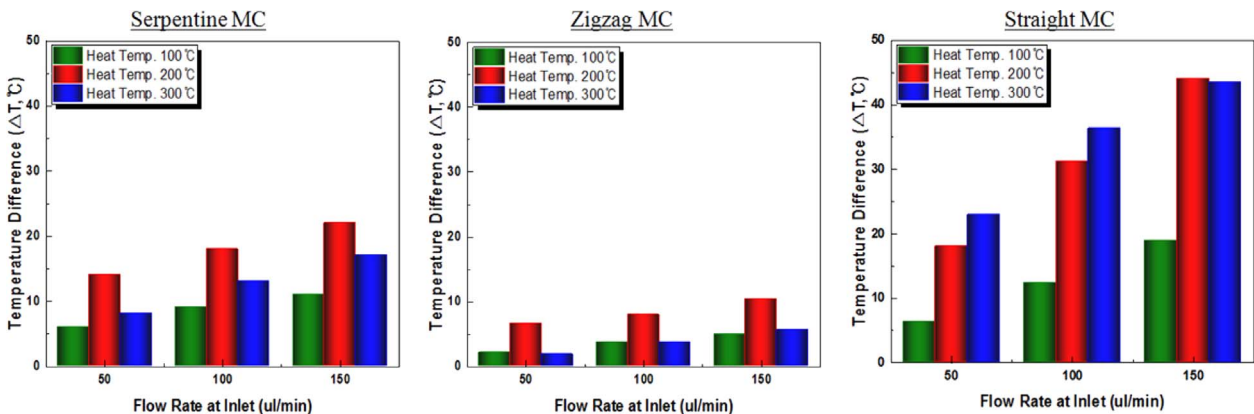
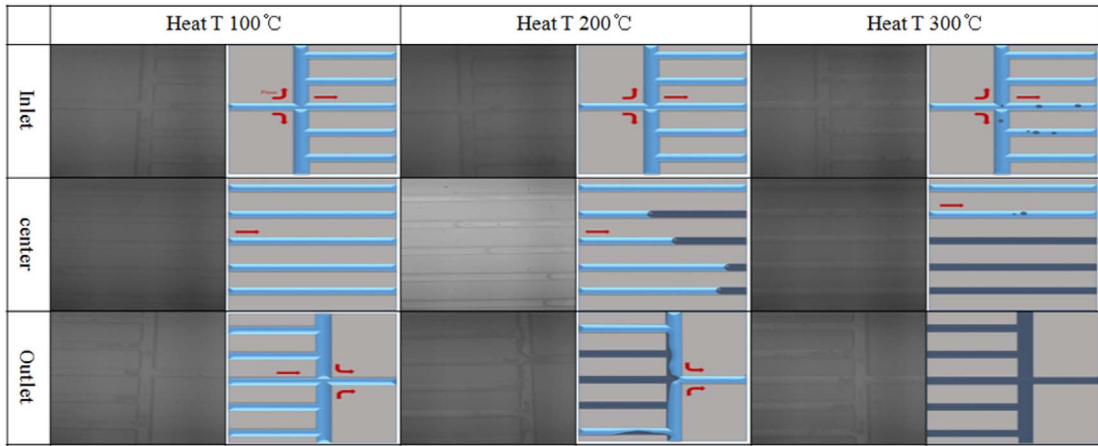
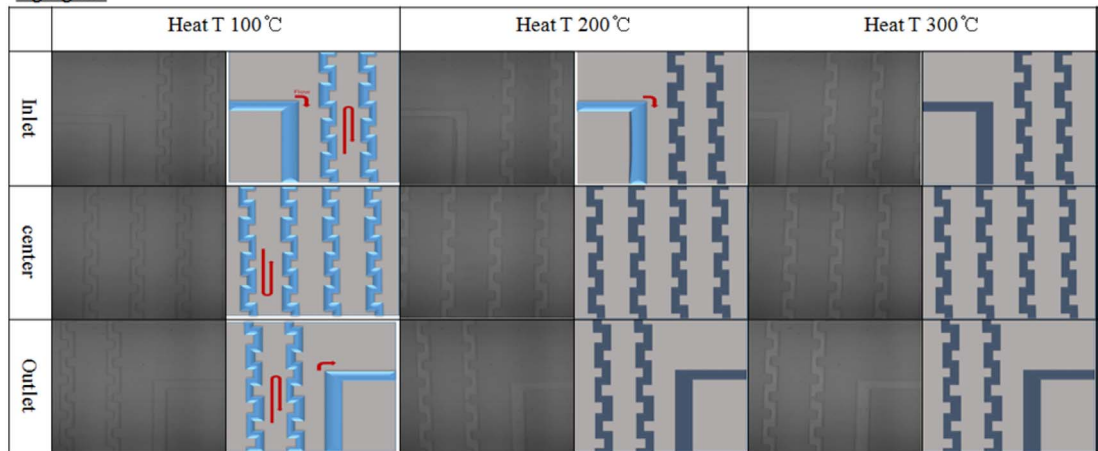


Fig. 3. Temperature measured after liquid cooling at different heating temperatures.

Straight MC



Zigzag MC



Serpentine MC

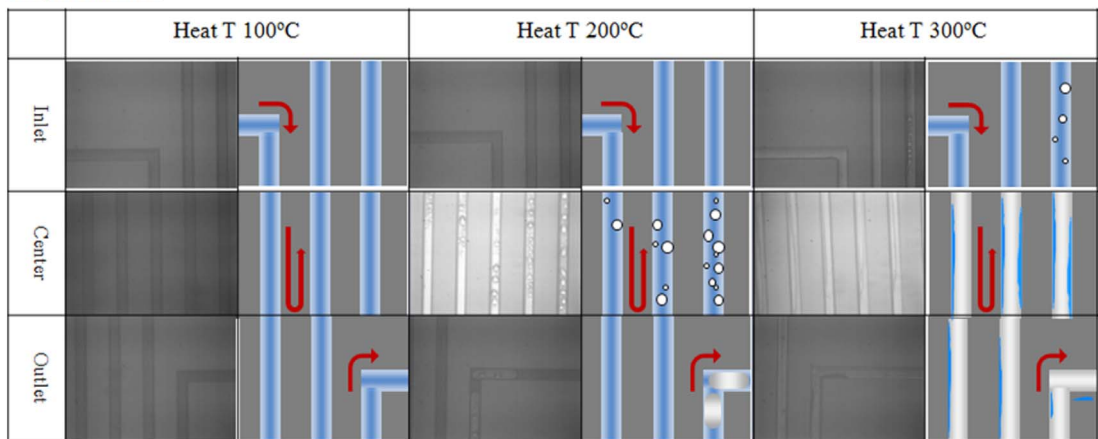


Fig. 4. De-ionized water flowing images through micro-channel (Flow rate at inlet = 100 μ l/min).

을 보였다. Straight MC는 Table 1에서 보듯이 유동 속도 50 ml/min의 경우 가열온도 100°C, 200°C, 300°C에서 냉각 전후의 온도 차가 각각 ~6.2°C, ~18°C, 그리고 ~22°C로 나타났으며, zigzag MC 보다는 현저히 높은 열 제거 현상을 보였다. 이는 zigzag MC가 길이가 길어서 칩으로부터 열을 흡수한 상태로 냉매가 흐르는 구간이 길어졌을 뿐 아니라, 연속적으로 굽어진 구조로 냉매가 원활하

게 흐르지 못하였기 때문이다. 또한 높은 온도에서는 흐름이 원활하지 못하고 느린 냉매가 마이크로 채널 앞부분에서 심한 기화 현상을 일으키고 중간 이후의 마이크로 채널 구간에서는 채널 벽으로만 흘렀기 때문이다. Serpentine MC와 비교하여서는 100°C와 200°C 경우에는 열 제거 효과가 약간 높았으나, 300°C 경우에는 현저히 증가함을 보였다. Serpentine MC가 약 29.2배 이상 마이

Table 1. Temperature differential after liquid cooling at inlet flow rate 50 ml/min

Micro-channel Type	Heat T at 100°C	Heat T at 200°C	Heat T at 300°C
Serpentine MC	6°C	14°C	8°C
Zigzag MC	2°C	6.6°C	1.8°C
Straight MC	6.2°C	18°C	22°C

크로 채널 길이가 길어짐에도 불구하고 100°C와 200°C에서 열 제거 정도가 straight MC와 비슷하게 나타난 것으로 볼 때 마이크로 채널 길이가 길어도 효과적인 two-phase 냉각을 이용하면 길이가 짧은 단상 냉각보다 소자 냉각에 훨씬 효과적일 수 있음을 확인하였다. 하지만 300°C의 경우에는 마이크로 채널 길이가 길면 two-phase 현상이 마이크로 채널 앞 부분에서 심하게 발생하고 마이크로 채널 중간 이후부터는 냉매의 흐름이 현저히 줄어들기 때문에 오히려 길이가 짧고 단상 냉각을 보이는 straight MC가 효과적으로 나타났다. 액체 냉각 모듈의 냉각 효과를 높이기 위해서는 소자의 최고 온도를 기준으로 two-phase 냉각 현상이 일어나는 냉매를 선택하는 것이 바람직하나, 마이크로 채널 길이가 너무 길면 two-phase 현상이 마이크로 채널 앞부분에서 발생하여 오히려 칩의 열 제거에는 효과적이지 못할 수 있다.

또한 Figure 3에서 보듯이 냉매의 유동 속도가 증가할수록 냉각 전후의 온도 차는 더욱 증가하였고, 가열 온도 200°C에서 유동속도 150 ml/min의 경우 serpentine MC와 straight MC는 냉각 전후의 온도 차가 각각 ~22°C와 ~44°C로 측정되었다. 이는 유동속도 50 ml/min의 경우와 비교하여 각각 1.6배와 2.4배 높은 값이다. 하지만, 냉매의 유동속도를 높이는 것은 바람직하지 못하다. 높은 유동속도는 마이크로 채널 내 압력을 높여 냉매의 리크(leak)가 발생할 수 있는 신뢰성 문제를 야기시키며, 또한 냉매를 주입시키는 pumping power가 상승하여 시스템 가격을 높이기 때문이다. Straight MC 구조에서 주입구 부분과 가장 멀리 연결된 마이크로 채널의 경우, 즉 칩 가장자리에 가까운 마이크로 채널의 경우, 마이크로 채널 내 냉매의 흐름이 주입구 부분과 바로 연결된 칩 중앙 부분의 마이크로 채널 내 흐름보다 약간 느렸으며, 냉매 자체가 잘 전달되지 못하는 경우도 관찰되었다. 액체 냉각 시스템의 열 제거 효과를 높이기 위해서는 마이크로 채널의 길이, 소자의 온도, 그리고 냉매(기화 점, 점도)의 선택이 복합적으로 최적화되어야 하겠다.

4. 요 약

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼에 마이크로 채널을 이용한 칩 레벨 액체 냉각 모듈을 제작하고, 마이크로 채널 길이와 구조에 따른 냉각 효과를 분석하였다. Serpentine MC와 zigzag MC의 경우 가열 온도 200°C에서 two-phase 냉각 현상으로 냉각 전후의 온도 차(temperature differential)

가 크게 관찰되었고, serpentine MC가 zigzag MC와 비교하여 냉각 전후의 온도 차가 높게 나타났다. Straight MC의 경우 zigzag MC 보다는 현저히 높은 냉각 효과를 보였으며, serpentine MC와 비교하여서는 100°C와 200°C에서는 열 제거 효과가 약간 높았고, 300°C에서는 현저히 높았다. 마이크로 채널 길이가 길어도 효과적인 two-phase 냉각을 이용하면 길이가 짧은 단상 냉각보다 냉각 효율을 높일 수 있으나, 기화점보다 높은 온도일 경우 짧은 길이의 마이크로 채널을 이용하여 단상 냉각을 유도하는 것이 효과적이다. 액체 냉각 모듈의 냉각 효과를 높이기 위해서는 냉매 선택 및 마이크로 채널의 길이와 구조를 최적화시키는 것이 중요하다고 하겠다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(과제번호: 2015-0607).

References

1. A. J. McNamara, Y. Joshi, and Z. M. Zhang, "Characterization of nanostructured thermal interface materials: A review", *Int. J. Therm. Sci.*, 62, 2 (2011).
2. Jun Xu and Timoth S. Fisher, "Enhancement of thermal interface materials with carbon nanotube arrays", *Int. J. Heat and Mass Trans.*, 49(9-10), 1658 (2006).
3. Sara N. Paisner, "Nanotechnology and methematical methods for high-performance thermal interface material", *Global SMT & Package*. 36 (2008).
4. J. Ayala, A. Sridhar, V. pangracious, D. Atienza, and Y. Leblebici, "Through silicon vias-based grid for thermal control in 3D chips", *Social Infromatics and Telecommunications Engineering*, 90 (2008).
5. B. Goplen and S. Sapatnekar, "Thermal Via Placement in 3D ICs", *International symposium on physical design*, 167 (2005).
6. G. Upadhya, M. Munch, P. Zhou, J. Hom, D. Werner, and M. McMaster, "Micro-scale liquid cooling system for high heat flux processor cooling applications", *IEEE STMM.*, 116 (2006).
7. J. Li and G. P. Peterson, "Geometric optimization of a micro heat sink with liquid flow", *IEEE Trans. Comp. Packag. Tech.*, 29(1), 145 (2006).
8. X. Wei and Y. Joshi, "Optimization Study of Stacked Micro-Channel Heat Sinks for Micro-Electronic Cooling", *IEEE Trans. on Comp. Packag. Tech.*, 26(1), 55 (2003).
9. N. Khan, L. H. Yu, T. S. Pin, S. W. Ho, V. Kripesh, D. Pinjala J. H. Lau, and T. K. Chuan, "3-D Packaging With Through-

- Silicon Via (TSV) for Electrical and Fluidic Interconnections”, *IEEE Trans. Comp., Packag., and Manuf. Tech.*, 3(2), 221 (2013).
10. B. Dang, M. S. Bakir, and J. D. Meindl, “Integrated thermal-fluidic I/O interconnects for an on-chip microchannel heat sink”, *IEEE EDL*, 27, 117 (2006).
 11. M. Park, S. Kim, and S. E. Kim, “Study of Chip-level Liquid Cooling for High-heat-flux Devices”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 22(2), 27 (2015).
 12. M. Park, S. Kim, and S. E. Kim, “TSV Liquid Cooling System for 3D Integrated Circuits”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(3), 1 (2013).
 13. T. Harirchian and S. V. Garimella, “Microchannel size effects on local flow boiling heat transfer to a dielectric fluid”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 51, 3724 (2008).