

작동유체의 과냉도에 따른 매끈한 표면과 마이크로 핀 표면에서의 열전달 촉진에 관한 연구

임태우¹ · 유삼상[†] · 최형식²

(원고접수일 : 2009년 9월 11일, 원고수정일 : 2009년 11월 5일, 심사완료일 : 2009년 11월 10일)

Heat Transfer Enhancement from Plain and Micro Finned Surfaces According to Liquid Subcooling

Tae-Woo Lim¹ · Sam-Sang You[†] · Hyeung-Sik Choi²

요 약 : 화학적, 전기적 안정성을 가진 FC-72 냉매를 사용하여 매끈한 표면과 마이크로 핀 표면 사이의 풀 비등 열전달 성능을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 폭과 높이의 치수가 $100\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$, $150\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ and $200\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 인 세 종류의 마이크로 핀을 실리콘 칩 표면 위에 가공하였다. 실험은 5, 10 and 15 K의 액체 과냉도에서 이루어졌다. 세 종류의 마이크로 핀 중에서 핀 폭이 $200\mu\text{m}$ 인 핀 표면에서 풀 비등 열전달 성능이 더 좋게 나타났다. 또한, 마이크로 핀 표면은 매끈한 표면과 비교했을 때 벽면 과열도가 증가함에 따라 열유속이 급격히 증가하였으며, 열전달도 향상되었다.

주제어 : 액체 과냉도, 마이크로 핀, 벽면 과열도, 풀비등, 열유속

Abstract: Experiments were conducted to evaluate pool boiling heat transfer performance between plain and micro finned surfaces with FC-72, which is chemically and electrically stable. Three kinds of micro fins with the dimension of $100\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$, $150\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ and $200\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ (width x height) were fabricated on the surface of a silicon chip. The experiments were carried out on the liquid subcooling of 5, 10 and 15 K under the atmospheric condition. The micro finned surface with a larger fin width of $200\mu\text{m}$ provided a better pool boiling heat transfer performance. Also, the micro finned surfaces showed a sharp increase in heat flux with increasing wall superheat and a larger heat transfer enhancement compared to a plain surface.

Key words: Liquid subcooling, Micro finned, Wall superheat, Pooling boiling, Heat flux

1. 서 론

최근 과학기술이 급속히 발전하면서 전자기기를 비롯한 많은 장비들이 고집적화 및 고밀도화 되어 감에 따라 단위면적당 발열량이 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 기기 내부에 발생된 열을 효과적으로 외부로 방출시킬 수 있는 기술이 다양하게 개발되고 있다.

특히, MEMS를 이용한 Microengineering 기

술의 발전에 따른 장치의 소형화로 전자 패키지 (electronic packaging)의 집적 밀도 (integration density)는 급속하게 증가되었으며 [1-3], 이로 인해 발생된 고열유속의 열을 효과적으로 외부로 방출시켜 시스템이 안정적으로 작동될 수 있도록 하는 냉각 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 전통적으로 공랭식 냉각방법은 대형 열침 (large heat sink)에서 발생하는 열을 제거하기

[†] 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부, E-mail:ssyou@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4366)

1 한국해양대학교 기관시스템공학부

2 한국해양대학교 기계정보공학부

위해 사용되어 왔으며, 단일 칩에서 제거해야 할 열유속은 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 정도로 나타나고 있다. 그러나 앞으로는 고성능 단일 칩에서 제거해야 할 열유속이 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 을 초과할 것으로 예상되기 때문에 기존의 냉각방법은 새로운 냉각 기술로 대두되고 있는 액체 냉각방식으로 대체될 것으로 예상된다. 특히 유전성 액체(dielectric liquids)를 사용한 직접 액체냉각 방식^[4]은 고성능 전자 장비를 냉각하는 기술 중에 하나로 많은 연구들이 진행되고 있다.

미소전자부품에 대한 직접 액체냉각방식의 주요 문제로는 초기온도과도를 완화시키는 것, 핵비등 열전달을 촉진시키는 것 그리고 임계열유속을 증가시키는 것이라고 볼 수 있다. 열전달 촉진에 관한 연구는 매끈한 표면을 가공하여 다공성 표면[5-6]으로 만들거나, 인위적으로 핵생성 영역(7-10)을 만들으로써 발전되어왔다.

최근 Honda는 FC-72의 비등열전달에 관한 마이크로 핀의 영향을 연구하였다[11]. 실리콘 칩에 가공된 마이크로 핀에서의 열유속은 핵비등 영역에서 벽면 과열도가 증가함에 따라 뚜렷한 증가를 나타내었으며, 임계열유속에서의 벽면 온도는 85°C 이하였다. 또한 Honda는 FC-72의 비등 시 마이크로 핀 두께의 영향에 대해서 더 많은 연구를 하였다[12]. 핀 크기는 10×60 , 20×60 , 30×60 and $50 \times 60 \mu\text{m}^2$ (thickness \times height)이고, 핀 피치는 두께의 두 배였다. 가장 큰 임계 열유속을 나타낸 마이크로 핀의 크기는 액체 과냉도를 증가 시킴에 따라 감소하였다.

대부분의 실험적 연구는 포화상태에서 이루어졌으나, 액체 과냉도의 영향을 다룬 연구도 상당히 많이 있다[13-14].

본 연구에서는 발열체 표면의 열을 외부로 효과적으로 방출시키기 위해 발열부 표면인 실리콘 웨이퍼(Si wafer)에 MEMS 기술을 이용하여 마이크로 핀을 제작하였으며, 작동유체의 과냉도에 따라 매끈한 표면과 마이크로 핀 표면에서 발생하는 비등열전달 성능을 비교·분석하고자한다.

2. 실험장치 및 방법

Figure 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실

험수조는 비교적 열에 잘 견디고 투명한 polycarbonate로 제작하였고 실험수조의 크기는 $20 \times 20 \times 30(\text{cm})$ 이다. 실험유체의 온도는 수중용 카트리지히터를 설치하여 조절하였으며, 유체온도의 분포를 고르게 하기 위해 Fan을 설치하였다. 그리고 온도 측정을 위해 K-Type 열전대를 실리콘 웨이퍼 밑 표면에 2개, 위 표면에 1개 polycarbonate판 위에 1개, 그리고 주변 유체의 깊이에 따라 3개, 총 7개의 열전대를 설치하여 측정된 온도의 값을 구하였다.

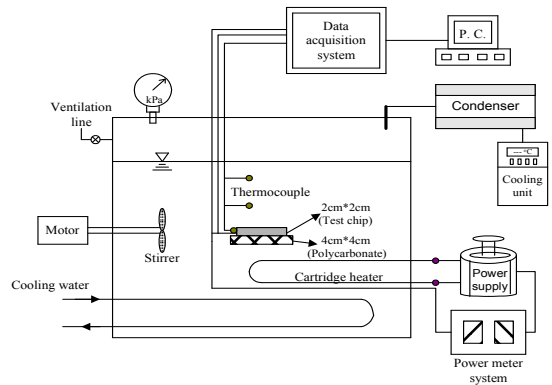


Figure 1: Schematic diagram of experimental apparatus

Figure 2는 측정된 온도를 PC에서 읽어 저장하는 사진을 보여주고 있다. 실험수조 상단부분은 양면테이프로 이중패킹작업을 하여 최대한 열이 밖으로 빠져나가는 것을 방지 하도록 하였으며 압력게이지를 장착하여 실험수조의 압력을 측정하였다. 또한 실험수조 외부로의 열전달을 최소화하기 위해 단열재를 사용하였다.



Figure 2: Schematic picture of experimental apparatus

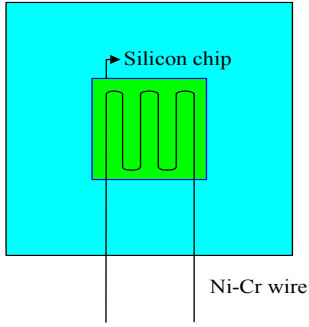


Figure 3: Test section

Table 1: Experimental condition

Parameter	Value
Working fluid	FC-72
Boiling point	56°C
Subcooling	5, 10, 15K
Wall superheat	0~40K

작동유체는 절연성과 화학적으로 안정성이 있는 FC-72를 사용하였다. FC-72에 대한 성질을 보면 비등점이 56 ° (1atm)이며 밀도가 1680kg/m³이고 비열이 1100J/kg·K 그리고 열전도도가 0.057W/m·K이다. 독성이 없으며, 플라스틱과 금속물질 등에 잘 용화되는 성질을 가지며 인체에 무해한 환경 친화적인 액체이다. 이러한 특성 때문에 전기실험용등의 용도로 많이 쓰이고 있다.

유체의 온도와 발열부의 온도는 K-type 열전대를 사용하여 온도를 측정하였으며, 측정된 자료는 데이터 수집 장치(data acquisition system)를 사용하여 PC에 저장하였다. 마이크로 핀의 발열부에 공급되는 발열량은 DC 전원 공급기를 이용하여 조절하였으며 Figure 3에 나타나 있다. 시험부가 정상상태가 되었다고 판단되면 데이터를 저장한 다음 전압을 올려 다음 실험을 수행하였다. Figure 4은 본 연구에서 제작된 마이크로 핀의 형상을 나타낸다.

시험편에 공급되는 열유속은 DC 전원 공급기를 이용하여 전압과 전류를 조절하면서 실험을 수행하였다. 수조 내 실험유체의 온도는 카트리지 히터를 사용하여 일정한 과냉도($\Delta T_{sub} = \text{Boiling point}$

- Liquid Temp.) 5, 10, 그리고 15K를 유지하도록 하였다. 수조내 불응축 가스는 배출구를 통해 배출되며, 증발된 작동유체는 밖으로 빠져나가 응축기에서 응축된다. 발열부와 실험유체의 온도는 열전대를 장착하여 각 부분의 온도를 측정하였다. 온도 측정에 대한 불확실성은 ± 0.5K로 평가되었고, 열유속은 2W/cm²에서 약 8%의 불확실도를 나타내었다.

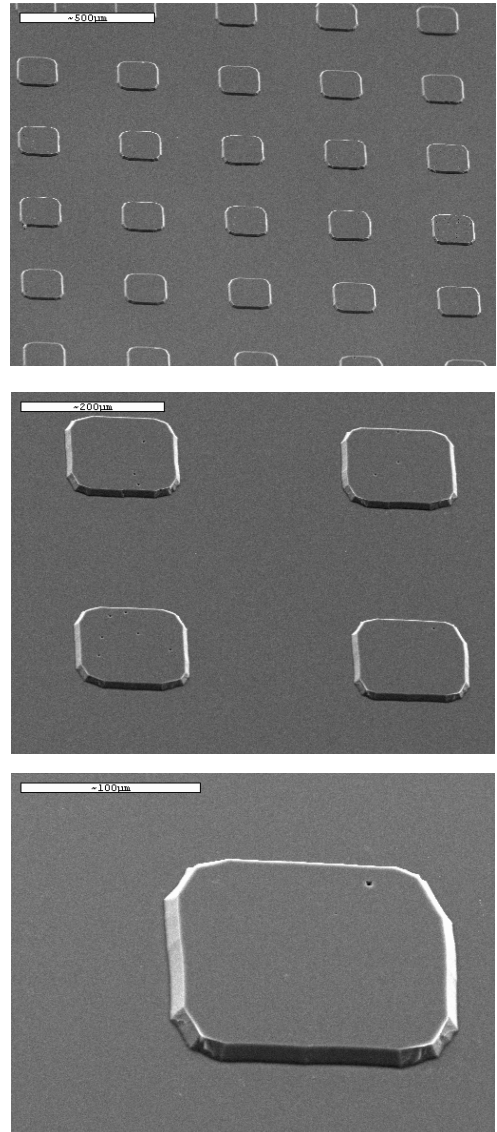


Figure 4: SEM view of silicon chips with micro fins

본 실험조건은 Table 1에서와 같이 과냉도 5K, 10K, 15K에서 수행되었다. 수조 안의 유체는 앞서 설명한 FC-72를 사용하였고 이 유체는 56°C에서 비등이 일어나므로 마이크로 핀의 온도는 이 유체의 비등점인 56°C 일 때부터 측정을 시작한다. DC 전원 공급기에서 전류는 그대로 둔 다음 전압을 서서히 증가시켰고 전압의 범위가 한계에 달하면 전류를 올려 다시 전압을 올리는 과정을 선택하였다.

한 개의 매끈한 표면의 발열체와 마이크로 핀이 부착된 세 개의 표면을 준비 하여 과냉도에 따라 열전달 특성이 어떻게 달라지는 지 고찰하였다. 마이크로 핀 하부의 표면에 두 개의 열전대를 놓았고 표면이 부착되어 있는 P/C에 한 개의 열전대 그리고 깊이에 따라 온도를 체크하는 세 개의 열전대, 그리고 마이크로 핀 상부의 표면에 온도를 체크하는 한 개의 열전대로 총 7개의 열전대를 사용하였다. 깊이에 대한 온도를 측정하는 것은 수조 내의 온도가 균일한지 알아보기 위한 것이고, P/C평판의 온도를 체크하기 위한 것은 DC 전원 공급기에서 전류를 공급하였을 때 마이크로 핀 표면에서 열이 발생하였을 때 그것이 P/C평판에 까지 영향을 미치는 지를 알아보기 위해 열전대를 부착하였다. 수조안의 온도를 동일 온도로 맞추기 위해 수조 안의 프로펠러로 강제유동을 일으켰다.

3. 결과 및 고찰

열유속과 열전달계수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$q'' = IV/A = h \times (T_{wall} - T_{bulk})$$

$$h = \frac{q''}{(T_{wall} - T_{bulk})}$$

여기서, q'' 는 단위면적당 열유속(W/cm^2)이며, I 는 전류, V 는 전압, 그리고 A 는 발열부 표면의 전열면적을 나타낸다. 열유속 및 열전달계수는 작동 유체(T_{bulk})의 온도와 발열부(T_{wall})내 열전대의 평균온도를 측정하여 계산된 온도로 평가하였다.

Figure 5는 본 연구에서 얻어진 실험결과와 동일 조건하에서 실험이 이루어진 Rainey and You^[15]의 실험결과와 서로 비교한 것이다. Figure 5는 표면 면적이 $4cm^2$ 인 매끈한 발열체를 수조내에 수평상

태로 놓이게 한 후 수조내의 작동유체가 포화온도와 5K차이가 될 때 과열도에 따른 열유속을 나타낸 것이다. Rainey and You의 실험은 포화온도에서 실험한 자료이고 이번 실험결과는 과냉도 5K일 때의 실험결과로써 약간의 차이가 있으나 그림에 나타난 바와 같이 실험결과와 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 전체적인 경향으로는 Rainey and You의 실험결과 값이 과냉각도 5K 일 때로 가정을 하고 계산하였을 때 10% 이내의 오차로 유사한 경향을 잘 보이고 있어 본 실험의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

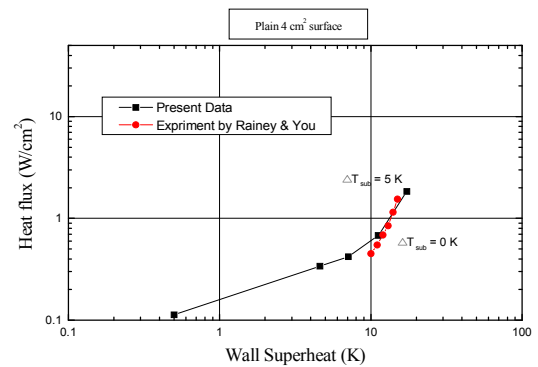


Figure 5: Comparison between present data and Rainey and You

Figure 6-9는 $\Delta T_{sub}=0, 5, 10, 15K$ 에서 3종류의 마이크로 핀과 매끈한 표면에 대하여 벽면 과열도에 따른 열유속의 변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 벽면과열도가 10K가 넘으면 열유속이 급격히 증가한다는 것을 알 수 있으며, 마이크로 핀이 매끈한 표면의 발열체보다 벽면

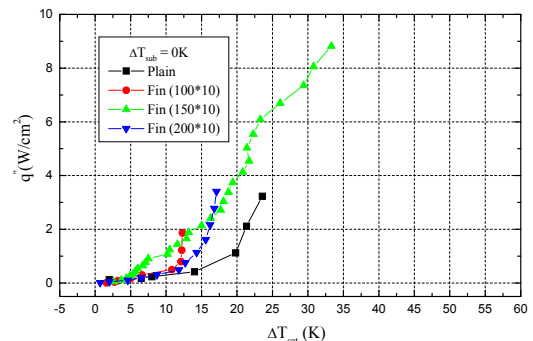


Figure 6: Variation of heat flux with respect to wall superheat

과열도가 감소하고 열전달 성능이 증가한 것으로 나타났다. 이것은 매끈한 표면에 비해 전열면적이 증가하였을 뿐만 아니라 핀과 핀사이에서 기포성장이 더욱 활발하여 이상(two phase) 대류열전달이 증가한 것으로 사료된다.

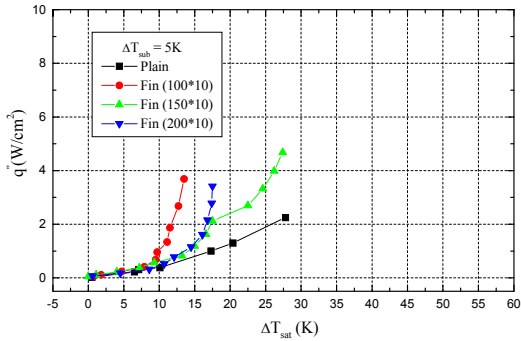


Figure 7: Variation of heat flux with respect to wall superheat

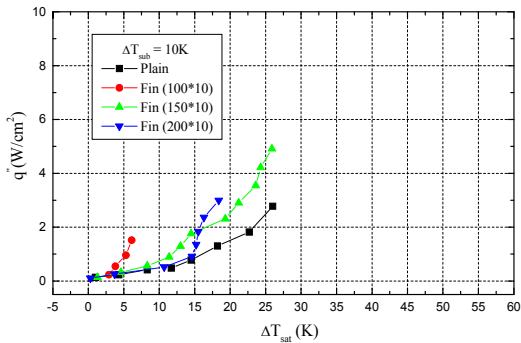


Figure 8: Variation of heat flux with respect to wall superheat

Figure 10은 마이크로 핀 150× 10에 대한 과냉도의 영향을 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 과냉도가 증가하여도 비등열전달에 미치는 영향은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 이것은 과냉된 액체의 경우 표면에 생성된 기포가 주위의 과냉 액체의 영향으로 냉각되어 기포 성장에 방해가 되어 기포가 활발히 생성되지 못하기 때문이며, 핵비등 열전달보다 단상 자연 대류 열전달이 지배적인 영향을 미치는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 핀 높이(10μm)를 고정한 후 핀 길이 변화에 대한 결과를 도출하였으나 보다 정확한 결과를 도

출하기 위해서는 핀 높이를 현재보다 크게 변화시켜 여러 가지 핀 높이에 대한 실험이 필요할 것으로 사료된다.

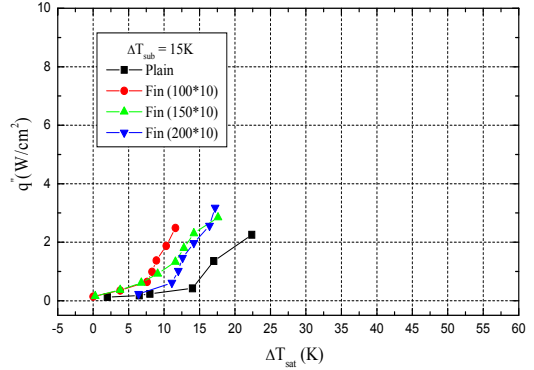


Figure 9: Variation of heat flux with respect to wall superheat

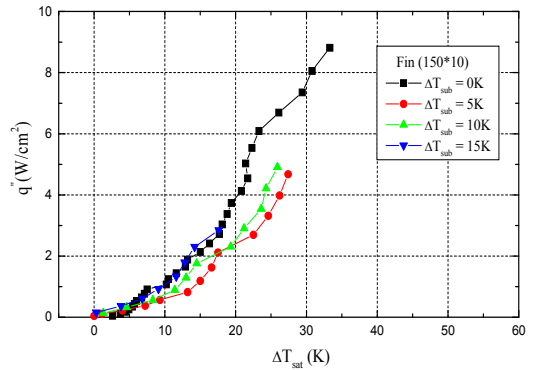


Figure 10: Variation of heat flux with respect to subcooling

4. 결 론

본 연구에서는 매끈한 표면과 마이크로 핀 표면에 대해 작동유체의 과냉도에 따른 비열전달 성능을 살펴보았다.

1. 본 실험의 신뢰성을 확인하기 위해 매끈한 표면에서 얻어진 실험결과를 Rainey and You가 실험으로부터 얻은 결과와 비교하였으며, 10% 이내에서 비교적 잘 일치하였다.
2. 작동유체의 과냉도에서 벽면 과열도에 따른

열유속은 매끈한 표면보다 마이크로 핀 표면에서 열유속 값이 더 크다는 것을 알 수 있었으며, 벽면 과열도 10K 이상에서는 열유속이 급격히 증가 하였다.

3. 과냉도가 0~15K 일때 벽면 과열도에 대한 열유속의 변화는 모든 과냉도에 대하여 유사한 경향을 나타내었다. 이것은 생성된 기포 주위의 과냉 액체의 영향으로 생각되어 기포 성장에 방해가 되었기 때문이며, 핵비등 열전달보다 단상 자연 대류 열전달이 지배적인 영향을 미치는 것으로 사료된다. 또한 보다 정확한 결과를 도출하기 위해서는 핀 높이를 현재보다 크게 변화시켜 여러 가지 핀 높이에 대한 실험이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITA-2009-C1090-0903-0007)

참고문헌

- [1] Mohamed Gad-el-Hak, MEMS Design and Fabrication Taylor & Francis, 2006.
- [2] Maluf, N. An Introduction to microelectromechanical system engineering, Artech House, 2000.
- [3] 최재성, 반도체 소자 공정기술, 청문각, 2006.
- [4] Nadim Maluf, An Introduction to Microelectromechanical System Engineering, Artech House, Inc, 2000.
- [5] J. P. O'Connor, S. M. You and J. Y. Chang, "Gas saturated pool boiling heat transfer from smooth and microporous surfaces in FC-72", Trans. ASME J. Heat Transfer 118, pp. 662-667, 1996.
- [6] K. N. Rainey, S. M. You and S. Lee, "Effect of pressure, subcooling, and dissolved gas on pool boiling heat transfer from microporous, square pin-finned surfaces in FC-72", Int. J. Heat Mass Transfer 46, pp. 23-25, 2003.
- [7] T. M. Anderson, and I. Mudawar, "Microelectronic cooling by enhanced pool boiling of a dielectric fluorocarbon liquid", ASME J. Heat Transfer 111, pp. 752-59, 1989.
- [8] U.P. Hwang, K.F. Moran, "Boiling heat transfer of silicon integrated circuits chip mounted on a substrate", Heat Transfer Electron. Equip. ASME HTD 20, pp. 53-9, 1981.
- [9] N. K. Phadke, S. H. Bhavnani, A. Goyal, R. C. and Jaeger, J. S. Goodling, "Re-entrant cavity surface enhancements for immersion cooling of silicon multichip packages", IEEE Trans. Comp. Hybrids Manufact. Technol. 15, pp. 815-22, 1992.
- [10] H. Kubo, H. Takamatsu, and H. Honda, "Effects of size and number density of microreentrant cavities on boiling heat transfer from a silicon chip immersed in degassed and gas dissolved FC-72", J. Enhanced Heat Transfer 6, pp. 151-60, 1999.
- [11] H. Honda, H. Takamatsu, and J. J. Wei, "Effect of the size of micro-pin-fin on boiling heat transfer from silicon chips immersed in FC-72", Proceedings of 12th International Heat Transfer Conference, Grenoble, France, vol. 4, pp. 75-80, 2002.
- [12] H. Honda, H. Takamatsu, and J. J. Wei, "Boiling of FC-72 on silicon chips with Micro-Pin-Fins and submicron-scale roughness", Trans. ASME J. Heat Transfer, vol. 124, pp. 383-390, 2002.

- [13] I. Mudawar, and T. M. Anderson, "High flux electronic cooling by means of pool boiling-part II: Optimization of pool boiling surface geometry", Heat Transfer Electron. ASME HTD Electron. A35-49, 1989.
- [14] J. P. O'Connor, S. M. You, and J. Y. Chang, "Gas saturated pool boiling heat transfer from smooth and microporous surfaces in FC-72", Trans. ASME J. Heat Transfer 118, pp. 662-667, 1996.
- [15] K. N. Rainey, and S. M. You, "Effects of heater size and orientation on pool boiling heat transfer from microporous coated surfaces" Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 2589-2599, 2001.

저 자 소 개



임태우(林兌禹)

1995년 부경대학교 기관공학과 공학사, 1997년 부경대학교 기관학과 공학석사, 2002년 큐슈대학 기계공학과 공학박사, 현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 조교수.



유삼상(柳三相)

1990년 미국 University of Wisconsin-Madison 기계공학과 석사, 1994년 미국 Iowa State University 기계공학과 박사, 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수. 전공은 시스템 동역학 및 제어공학으로 자동차 동역학 제어, 로봇 제어 및 수중 로봇의 제어에 대한 연구를 수행.



최형식(崔炯植)

1989년 5월 미국 University of South Carolina 기계공학과에서 석사, 1993년 2월 North Carolina State University 기계 및 항공 공학과 박사, 협조로봇의 제어, 보행로봇 개발, 수중 운동체 시스템 연구 및 공장자동화에 대한 연구를 수행.