팁 클리어런스가 스트레이트 휜 히트싱크의 냉각성능에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

김진욱†·김성진*·민정임**·이승규***

Experimental Study on the Effect of Tip Clearance for a Straight Fin Heat Sink

Jin Wook Kim, Sung Jin Kim, Jung Im Min, Seung Gyu Lee

Key Words: Tip clearance(팁 클리어런스), heat transfer(열전달), straight fin heat sink(스트레이트 휜 히트 싱크), thermal resistance(열저항), cooling performance(냉각성능).

Abstract

In this paper, the effect of tip clearance on the cooling performance of the microchannel heat sink is presented under the fixed pumping power condition. For the various types of microchannel heat sink having different size of fin width and channel width, experimental study is conducted. Through the experiment, the tip clearance effect is investigated by increasing tip clearance from zero. As a result, it is shown that cooling performance of heat sink with tip clearance is better than that of heat sink without tip clearance. For the microchannel heat sink with tip clearance, the optimum conditions for cooling performance is also studied.

기호설명

R	열저항
$T_{base,max}$	Heat sink 바닥면 최대 온도
T_{in}	유입되는 유체의 온도
T_b	유체 평균온도
R_{fin}	휜의 열저항
R_{flow}	유동에 의한 열저항
q	발열량
PP	펌핑파워
Q	유량
ΔP	압력강하
h	열전달계수
s	휜과 벽면간 거리
H	휜의 높이

† LG전자 Digital Display 연구소
E-mail : treasure@lge.com
TEL : (02)526-4191 FAX : (02)572-3086
* KAIST 기계공학과
** KAIST 기계공학과 대학원
*** LG전자 Digital Display 연구소

1. 서 론

최근 전자 및 기계 산업의 발전으로 인하여 전자장비는 점차 고성능화, 소형화되고 있다. 그 결과 전자장비의 단위면적당 발열량은 증가하고 있으며 전자제품 내부를 적정 온도로 유지하기 위한 냉각 기술이 중요한 문제로 대두되고 있다.

고발열 전자장비를 효과적으로 냉각하기 위한 방법중 하나로 1981년 Tuckerman과 Pease는 microchannel heat sink를 제안하였다. 그 후 많은 연구자들은 Tuckerman과 Pease가 제시한 모델을 개선하며 각 상황에서 최적화된 heat sink를 제시하였다.

H. Shaukatullah[9]는 heat sink의 윗면이 duct와 맞닿지 않은 환경에서 heat sink의 열성능을 평가하였다. 이 때 대부분의 유동은 상대적으로 유동저항이 작은 bypass부분으로 흘러가 heat sink중 가장 온도가 높은 바닥면을 효과적으로 냉각할 수 없었다. 그러나 heat sink의 윗면이 duct와 맞닿은 환경에 장착된 heat sink는 모든 유체가 fin사이로 흘러 fin을 효과적으로 냉각시킬 수 있음을 제시하였다.

Lau[7], El-Sayed et al.[6], O. N. Sara[4, 5]등은 fin의 끝이 duct의 내벽과 접한 상태, 즉 tip clearance의 변화에 따른 heat sink의 열성능을 연구하였다. 실험은 tip clearance가 channel의 폭보다 큰 영역에서 이루어졌고 그 결과 tip clearance가 냉각성능에 나쁜 영향을 준다고 발표하였다. 또한 이들의 연구는 tip clearance가 channel 폭보다 큰 macro size의 heat sink에 치중하였다. 따라서 microchannel heat sink에서 작은 tip clearance가 존재할 경우의 열성능에 관한 실험적 연구는 아직 이루어지지 않은 실정이다.

Min et al.[3]은 제약조건이 constant pumping power이며 high aspect ratio를 갖는 heat sink에 관한 수치해석을 수행하였다. 이들은 기존의 연구자와는 달리 tip clearance가 channel의 폭보다 작을 때 열성능을 평가하였다. Constant pumping power 조건에서 작은 tip clearance가 존재하면 유체의 압력강하는 감소한다. 그러나 heat sink를 통과하는 유량은 증가하기 때문에 heat sink의 냉각성능이 향상됨을 보여주었다.

소형화된 전자제품에서는 heat sink를 장착할 수 있는 공간의 제약이 심해져 heat sink가 장착되었을 때 tip clearance가 전자제품의 냉각성능에 미치는 영향을 연구하는 것은 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 constant pumping power의 제약조건으로 실험함으로써 tip clearance가 microchannel heat sink의 냉각성능에 미치는 영향을 알아보고 실제 적용가능성을 제시하고자 한다.

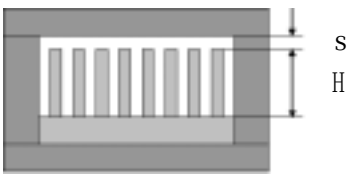

Fig.1 Definition of tip clearance

2. 문제정의 및 실험장치

2.1 문제정의

본 연구에서 다루는 microchannel heat sink의 형상 및 경계조건을 Fig.2에 나타내었다. Heat sink의 윗면과 측면은 단열되었으며, 열은 heat sink의 바닥면으로부터 x축방향으로 heat sink를 통과하는 유체에 의해 외부로 방출된다.

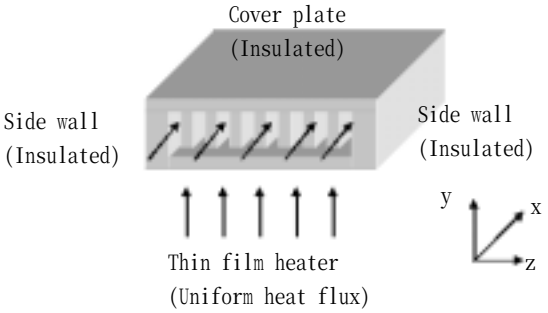

Fig.2 Problem description

본 연구에서는 heat sink의 열성능을 평가하기 위하여 다음과 같이 열저항을 정의하여 사용한다.

$$R = \frac{T_{base,max} - T_{in}}{q}$$

$$= \frac{T_{base,max} - T_b}{q} + \frac{T_b - T_{in}}{q} = R_{fin+R_{flow}} \quad (1)$$

Heat sink의 열성능을 평가하기 위한 제약조건은 constant pumping power이며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$PP = Q \times \Delta P \quad (2)$$

2.2.1 실험장치

본 연구에서는 세 가지의 heat sink를 제작하여 수행하였다. 각 heat sink의 크기는 Table.1 과 같다.

Fig.3은 실험장치의 개략도 및 사진이다. 본 실험의 작동유체는 공기이며 test section으로 유입되는 유량을 측정하고자 Brooks사의 MFC를 사용하였다. Heat sink의 앞단과 뒷단에서 발생하는 압력강하를 측정하기 위하여 Fig.4와 같이 11개의 pressure tap을 부착하였다. Heat sink 상단에 위치한 10개의 pressure tap중 원하는 한 지점과 뒷단에서의 압력차를 측정하기 위하여 solenoid valve switch를 사용하였다.

본 연구에서는 열손실을 최소화하고자 Heat sink base plate의 네 측면을 모두 silicone rubber로

감쌌으며 heat sink의 아래부분에 spacer를 이용하여 공기층을 만들었다. Test section의 외벽에 단열재인 urethane foam과 styrofoam을 부착함으로써 heat sink로부터 주변으로 유출되는 열손실을 최소화하였다. Heat sink바닥면과 heater사이, heat sink의 네 측면에 heat flux sensor를 부착함으로써 heat sink로부터 외부로 방출되는 열손실을 정확하게 예측하였다.

Heat sink의 열저항을 구하기 위하여 heat sink로 유입되는 공기온도와 heat sink바닥면의 온도를 측정하였다. 그리고 heat sink의 바닥면에 4.5mm의 간격으로 6개의 구멍을 가공하고 thermocouple을 부착하였다.

Porosity	0.47	0.59	0.63
Fin height(㎜)	1.5	1.5	1.5
Base thickness(㎜)	2	2	2
Fin thickness(㎛)	541	420	378
Channel width(㎛)	459	580	622
Base length(㎜)	25.5	25.5	25.5
Base width(㎜)	25.5	25.5	25.5

Table.1 Size of heat sinks

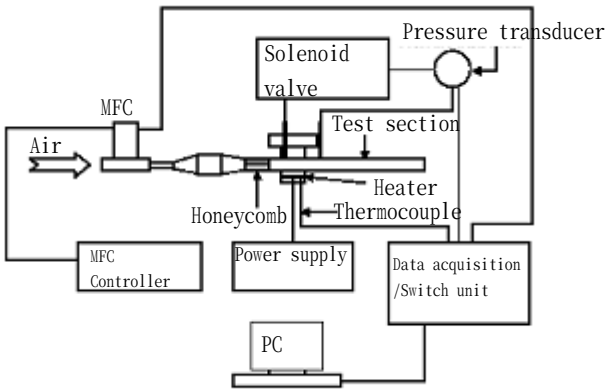

Fig. 3 Experimental apparatus

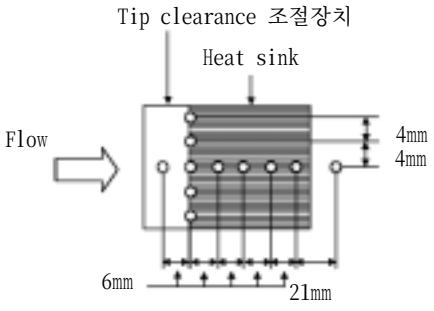

Fig. 4 Pressure tap

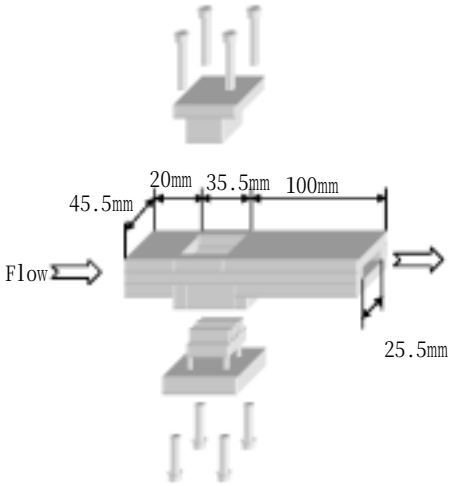

Fig.5 Test section

3. 실험결과

3.1 온도장 검증

본 연구에서는 실험을 통해 측정된 결과를 Icepak을 이용한 수치해석결과와 비교하였다. 측정된 온도와 Icepak을 통해 예측한 값을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Icepak을 이용하여 해석한 결과 porosity가 0.59인 heat sink에 0.5SLM, 1SLM의 유량이 흐를 경우 실험 결과와 5%이내의 error를 보였다.

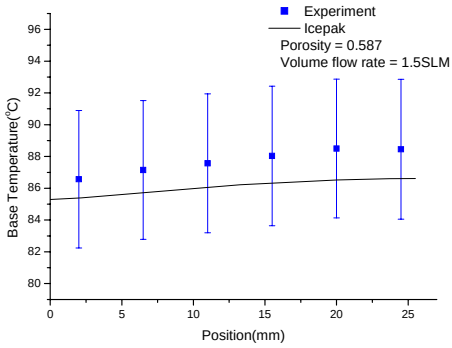

Fig. 6 Temperature of heat sink base plate

Tip clearance를 변화하며 측정한 열저항을 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9에 나타내었다. 실험결과에 따르면 tip clearance가 증가함에 따라 열저항은 감소하며 일정한 tip clearance이후 열저항은 다시 증가함을 확인할 수 있다. Porosity가 0.47, 0.59인 heat sink의 경우 tip clearance가 1mm일 때, porosity가 0.63인 heat sink의 경우 1.05mm일 때 냉각성능이

가장 우수하다. 이러한 경향성은 porosity의 변화에 관계없이 tip clearance가 존재한 heat sink의 냉각성능이 tip clearance가 없는 heat sink의 냉각성능보다 우수함을 의미한다. 즉 냉각성능은 tip clearance가 존재함에 따라 tip clearance가 존재하지 않는 heat sink보다 최대 40% 이상 향상된다.

이상의 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. Tip clearance의 증가에 따른 열저항이 감소하는 경향은 첫째, Tip clearance가 존재함에 따라 fin의 끝에서 유체로 열이 전달될 수 있기 때문에 열전달이 촉진된다.

둘째, constant pumping power의 제약 조건에서 tip clearance가 증가함에 따라 heat sink를 통과하는 유체의 압력강하는 줄어들고 유량은 증가한다. 이 때 heat sink로 유입되는 유체중 일부는 fin 사이로 흐르지 않고 fin의 윗부분으로 흐르게 된다. 따라서 fin의 끝 주변에서 열전달 성능은 향상되는 반면 바닥면 부근의 열전달 성능은 악화된다. 따라서 heat sink바닥면을 식힐 수 있는 최소한의 유체가 유입될 때까지tip clearance가 증가해도 heat sink의 냉각성능은 향상된다. 하지만 tip clearance가 최적값 이상 커지면 대부분의 유체는 윗공간으로 흘러 heat sink의 냉각성능은 악화된다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯 tip clearance가 0mm에서 0.4mm까지 R_{fin} 은 거의 변화가 없다. 이 구간에서는 tip clearance가 존재함에 따라 fin의 끝이 새로운 열전달 면적으로 확보되어 열전달이 촉진된다. 그리고 유체가 fin 사이영역을 이탈함에 따라 열전달 성능이 악화되는데 두 경향성이 비슷하기 때문에 R_{fin} 의 변화는 거의 없다. 그러나 tip clearance가 0.4mm이상이 되면 fin사이를 흐르는 유량은 점차 감소하여 fin근처에서의 h는 더욱 감소한다. 따라서 이 영역에서 R_{fin} 은 증가하는 경향을 볼 수 있다.

R_{flow} 는 R_{fin} 과 반대의 경향을 보인다. Tip clearance가 증가함에 따라 압력강하의 감소분만큼 증가한 유량 때문에 뜨거운 heat sink에서 전달된 열을 방출할 수 있는 유체의 수송능력이 증가한다. 따라서 heat sink를 통과하기 전과 후에서 측정한 유체의 온도차는 감소하며 R_{flow} 는 감소한다.

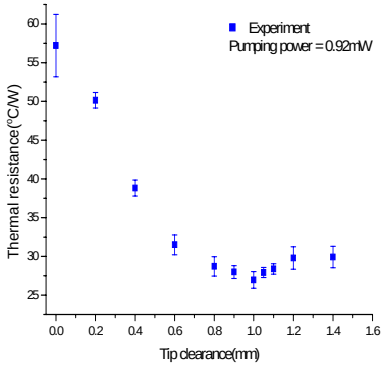

Fig. 7 The effect of tip clearance on the cooling performance of heat sink when porosity is 0.47

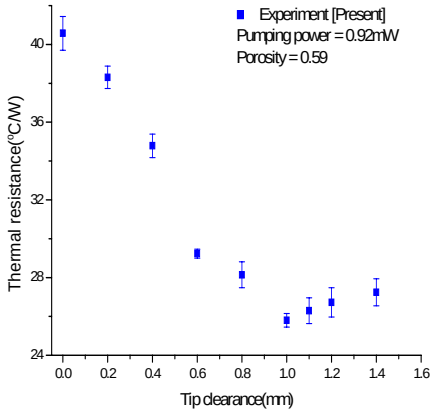

Fig. 8 The effect of tip clearance on the cooling performance of heat sink when porosity is 0.59

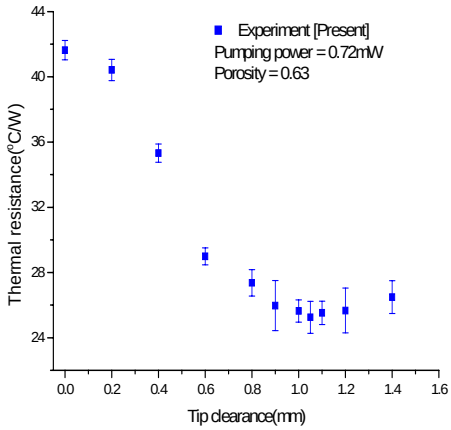

Fig. 9 The effect of tip clearance on the cooling performance of heat sink when porosity is 0.63

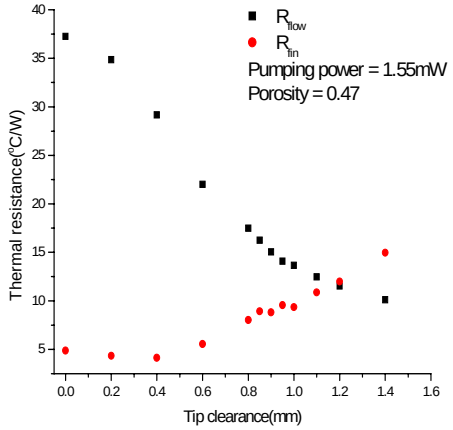

Fig. 10 Thermal resistance of heat sink

4. Tip clearance를 갖는 heat sink의 적용 가능성

4.1 Channel폭의 변화에 따른 heat sink 냉각성능 비교

Channel폭이 heat sink의 냉각성능에 미치는 영향을 확인하고자 channel 폭이 다른 세 가지 heat sink의 실험결과를 비교한다. Channel폭의 변화에 따른 실험결과는 Fig 11과 같다. Channel폭이 증가함에 따라 fin사이를 흐르는 유체의 유동저항은 감소한다. 따라서 동일한 tip clearance가 존재할 때 channel폭이 증가함에 따라 fin사이를 통과하는 유량은 증가한다. 따라서 tip clearance가 더 증가할 때까지 유체는 바닥면 주변으로 충분히 흐르기 때문에 channel 폭이 작은 heat sink보다 큰 지점에서 tip clearance의 최적값이 존재한다

4.2 Pumping power의 변화에 따른 heat sink 냉각성능 비교

Pumping power의 변화에 따른 heat sink의 냉각성능을 Fig 12에서 비교하였다. Porosity는 0.63이며 0.72mW와 0.92mW의 pumping power에서 측정한 열저항을 나타냈다.

그림에서 알 수 있듯 pumping power가 증가함에 따라 냉각성능은 향상되지만 tip clearance의 최적값은 감소한다. 동일한 heat sink에서 pumping power의 증가는 heat sink를 통과하는 유량이 증가함을 의미한다. 따라서 heat sink에서 전달된 열을 수송할 수 있는 능력이 커져 냉각성능이 향상된다.

동일한 tip clearance가 존재할 때 pumping power가 증가할수록 fin사이에서의 유동저항도 커진다. 따라서 fin사이를 흐르는 유량은 감소한다. 그러나 작은 pumping power로 유체가 유입될 경우 fin사이의 유동저항이 더 증가할 때까지 fin사이로 유체는 충분히 흐를 수 있다. 따라서 pumping power가 감소함에 따라 tip clearance의 최적값은 증가한다

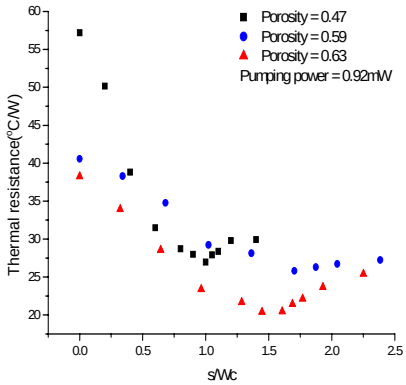

Fig.11 Cooling performance varying s/Wc

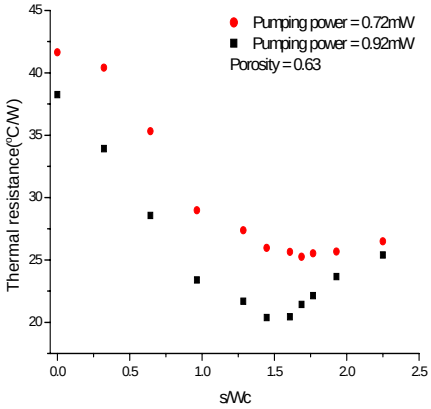

Fig.12 Cooling performance varying pumping power

5. 결론

본 연구에서는 constant pumping power 의 제약조건에서 microchannel heat sink의 열성능에 중요한 영향을 주는 인자인 fin의 두께, channel간격, tip clearance를 변화시키며 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 tip clearance는 microchannel heat sink의 냉각성능을 향상시킴을 확인하였다.

제약조건이 constant pumping power일 때 tip

clearance가 증가함에 따라 압력강하는 감소하며, heat sink를 통과하는 유량은 증가하기 때문에 heat sink의 냉각성능은 향상된다. 그러나 tip clearance가 과도하게 커지면 fin의 윗 공간으로 많은 유체가 지나가므로 heat sink를 효과적으로 냉각시킬 수 없어 냉각성능은 악화된다. 따라서 tip clearance가 최적화된 heat sink의 냉각성능은 tip clearance가 존재하지 않는 heat sink에 비하여 향상됨을 예측할 수 있다.

연구결과 tip clearance가 존재하는 microchannel heat sink는heat sink의 형상과 pumping power에 관계없이 tip clearance가 존재하지 않는 heat sink보다 냉각성능이 향상됨을 확인하였다. Tip clearance의 최적값은 heat sink의 형상과 작동환경에 따라 달라진다. Pumping power가 작을수록, channel폭이 클수록 tip clearance의 최적값은 증가한다.

이상의 연구결과를 바탕으로 향후 전자제품 냉각용 heat sink를 설계할 때 적절한 tip clearance를 제공하면 냉각성능을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

(1) Ho Chul Ryu, 2001, "Compact modeling of a pin fin heat sink through experiment investigation", Master thesis, pp. 5-8.

(2) Kim, Duckjong, 2003, "Analysis of heat and fluid flow in microstructures for high power dissipation using a porous medium approach", Doctoral dissertation, pp. 13-19.

(3) Jung Yim Min, Seok Pil Jang, Sung Jin Kim, 2004, "Effect of Tip clearance on the cooling performance of a microchannel heat sink", Int. J. Heat and Mass Transfer. pp. 1099-1103.

(4) O. N. Sara, 2003, "Performance analysis of rectangular ducts with staggered square pin fins", Energy Conversion and Management, Vol. 44, pp. 1787-1803.

(5) O. N. Sara, S. Yapici, M. Yilmaz, 2001, "Second law analysis of rectangular channels with square pin-fins", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No.5, pp. 617-630.

(6) Saad A. El-Sayed, Shamloul M. Mohamed, Ahmed M. Abdel-latif, Abdel-hamid E. Abouda, 2002, "Investigation of turbulent heat transfer and fluid flow in longitudinal rectangular-fin arrays of different geometries and shrouded fin array", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.26, pp. 879-900.

(7) KEI S. Lau and Roop L. Mahajan, 1989, "Effects of tip clearance and fin density on the performance of heat sinks for VLSI packages", IEEE Transaction on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 757-765.

(8) E. M. Sparrow, D. S. Kadle, 1986, "Effect of Tip-to-shroud clearance on turbulent heat transfer from a shrouded, longitudinal fin array", Journal of Heat Transfer, Vol. 108, pp. 519-524.

(9) H. Shaukatullah, Wayne R. Storr, Bernt J. Hansen, Michael A. Gaynes. 1996, 12th IEEE Semi-Therm Symposium, "Design and optimization of pin fin heat sinks for low velocity applications", pp. 151-163.

(10) D. B. tuckerman and R. F. W. Pease, 1981, "High performance heat sinking for VLSI", IEEE Electron Device Letters, Vol. EDL-2, No.5, pp. 126-129.

(11) S. J. Kim, D. Kim, 1999, "Forced convection in microstructures for electronic equipment cooling", Journal of Heat Transfer, Vol. 121, pp. 639-645.

(12) Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York

(13) Blevins, 1992, Applied fluid dynamics handbook, Krieger.

(14) Bejan, 1995, Convective heat transfer, Willey