

A NUMERICAL SIMULATION FOR THE PERFORMANCE CHARACTERIZATION OF HEAT SINKS

(Heat Sink의 특성확인을 위한 수치적 Simulation)

Chang Nyung Kim, Sung-il Moon

ABSTRACT

A numerical simulation has been carried out for the performance characterization of heat sinks in electronic equipment. Heat transfer characteristics have been analyzed for various design parameters including the shape of heat sink, thickness of fin base and fin pitches. A commercial program called Flotherm has been employed for the numerical calculation. Optimal design of the heat sink has been pursued which is closely related with the reduction of heat resistance involved in conduction and convection of heat.

1. 서론

고성능의 개인용 컴퓨터의 개발과 함께, 고발열 부품의 냉각이 시스템 설계에서 매우 중요한 위치를 차지하게 되었으며 이로 인하여 전자장비 냉각 분야에 많은 연구가 수행되고 있다. 최근 전자기기는 소형화되는 추세에 있으며, 특히 개별부품의 집적회로에 대한 기술이 크게 발달하여, 경박단소화가 급격히 진행되어 열밀도가 높아지고 있다. 각 chip의 junction 온도(junction에서 최고온도가 나타남)가 구동범위 안에서 10°C 오르면 수명이 반감되므로 제품의 신뢰성과 수명을 향상시키기 위해서 junction 온도를 낮추는 것이 매우 중요하다.

Heat sink는 회로소자로부터 발생하는 열을 원활하게 주위 공기로 방열시키는 장치로 junction으로부터 주위로의 열저항을 감소시켜 junction 온도를 저하시킨다. Junction에서 주위로의 열경로는 크게 주위 공기로의 대류와 board로의 전도로 나뉘는데, board로의 전도에서는 chip case와 board와의 접촉열저항과 확산열저항 등이 중요하다. 한편 주위공기로의 대류에 대하여는 heat sink를 통한 전도열저항과 heat sink 표면에서 주위공기로의 대류열저항을 줄이는 것이 바람직하며 이러한 점이 heat sink 설계에서 고려되어야 한다.

그러나 C. J. M. Lasance[1]은 경계조건에 의해 열저항이 변화하게 되어 열저항이 전기저항의 개념과 완전히 상사되지 않으므로, chip에서 board 방향으로의 열전달을 무시하고 heat sink를 설계할 때 약간의 오차가 있을 수 있음을 지적하였다. 위에서 언급된 1차원적 열흐름 해석과는 달리 R. E. Simous와 R. Schmidt[2]는 heat sink가 풍동에 설치된 경우에 대하여 공기의 풍동입구 속도와

Key words : Pin-fin Heat Sink, Extruded Heat Sink, Convective Heat Transfer, Numerical Simulation

heat sink 주위를 지나는 공기의 bypass 속도에 대하여 근사적인 해석을 수행하였다. 또한, C. Belady[3]은 heat sink가 설치된 풍동에서 열전달에 관한 연구결과를 정리하였으며 PC의 single processor system과 같은 상대적으로 간단한 시스템에서 multiple processor system으로 컴퓨터 산업이 변화하고 있는 단계에서 전자기기의 냉각에 관한 중요성을 강조하였다. Kondo et al.[4]는 impingement cooling 방식을 사용하여 fin이 달린 heat sink의 최적화에 대하여 연구하였으며 Angirasa와 Peterson[5]은 국소 열원을 갖는 채널에서 강제대류에 의한 대류열전달을 연구하였다.

현재 산업계에서 적용되는 heat sink는 CPU 등의 chip과 함께 module로 생산되는 경우가 많은데, 기구물, chip의 배열, fan, vent 등을 변경시키면 주위 요건이 변하여 thermal resistance가 변하므로 heat sink의 신뢰성을 확인할 수 없어서 단지 경험에 의존하여 열설계를 수행하는 경우가 많았다. CAE를 통하여 heat sink의 신뢰성과 안정성을 확인하는 것이 바람직하지만 아직 CAE에 대한 인식미약과 비용 등의 문제로 인하여 많은 회사에서 정형화된 heat sink를 사용하는 경우가 많아 효율과 비용 면에서 손실이 생기는 경우가 많다. 실제로 heat sink 시스템 전체를 최적화하기 위해서는 냉각방식, 제작유형, 가공조건, 치수제한 등을 만족시키면서 열전달을 극대화하고 체적 및 중량을 최소화하도록 하여야 한다. 열저항과 자유흐름 속도와의 관계를 실험적으로 측정하기 위하여 풍동이 사용된다. 이 관계가 알려지면 시스템 안에서 heat sink의 성능을 예측할 수 있으며 부품에서의 온도를 예측할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 parameter study가 용이한 수치적 방법을 사용하여 pin-fin heat sink와 extruded heat sink에서의 설계변수들을 확인하고, 설계변수들에 따른 heat sink의 성능에 대하여 탐구한다.

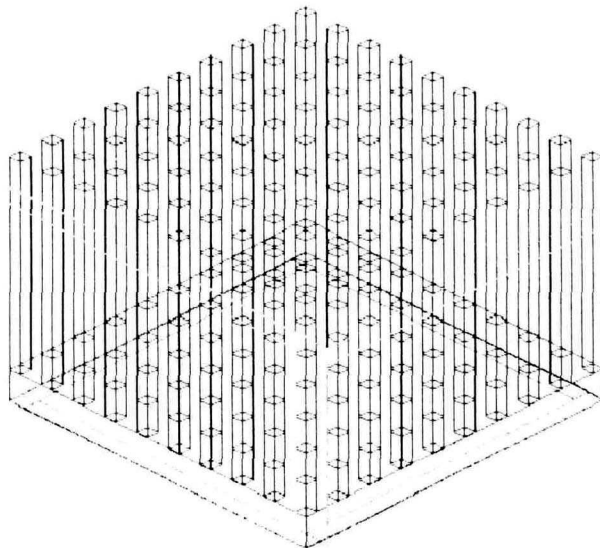


Fig. 1 Configuration of pin-fin heat sink

2. 문제설정

Heat sink로 많이 사용되는 pin-fin heat sink와 extruded heat sink의 대표적인 형태가 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 제시되어 있다. Heat sink는 알루미늄 ($k=169 W/m^{\circ}C$)으로 제작되었으며 각각의 heat sink에서 발산하는 열량은 $5W$ 이다. 이들 heat sink는 Fig. 3에 제시되어 있는 바와 같이 wind tunnel에 설치되어 있다. 풍동은 한 변이 $0.08m$ 인 정사각형 단면을 가지며 입구 공기속도가 $0.0833m/s$ 로서 Reynold수는 $Re=396$ 이어서 층류유동의 형태를 갖는다. 이때 입구 공기의 온도는 $25^{\circ}C$ 이다.

Pin-fin heat sink와 extruded heat sink 내에서의 열전도는 아래의 식에 의하여 지배된다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \tag{1}$$

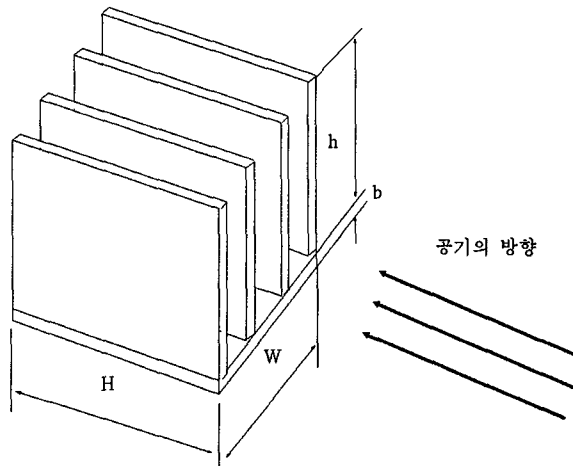


Fig. 2 Configuration of extruded heat sink

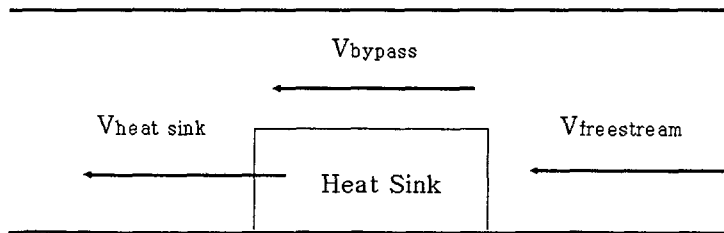


Fig. 3 Schematics of wind tunnel with heat sink

한편, 두 heat sink 주위를 지나는 정상상태, 3차원의 공기 유동에 대하여 아래와 같은 연속방정식, 운동방정식, 에너지방정식을 고려한다.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

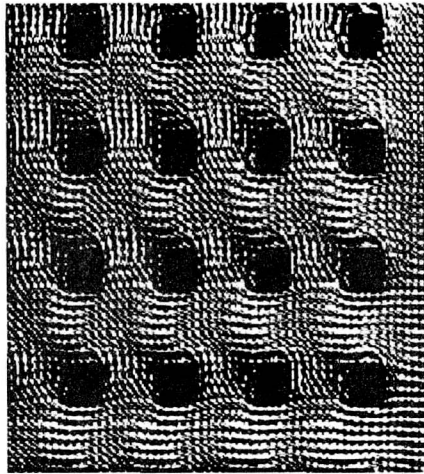
$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

위에서 언급한 바와 같이 각각의 heat sink의 바닥면에서 $Q=5W$ 의 발열이 주어져 있다. 풍동벽과 heat sink 표면에서 속도에 관한 점착조건을 사용하고 풍동벽에서 단열조건을 이용하여 위에서 주어진 지배방정식을 해석하였다. 이때 수치해석은 전자장비 냉각해석 전용 code인 Flotherm에 의하여 수행되었다.

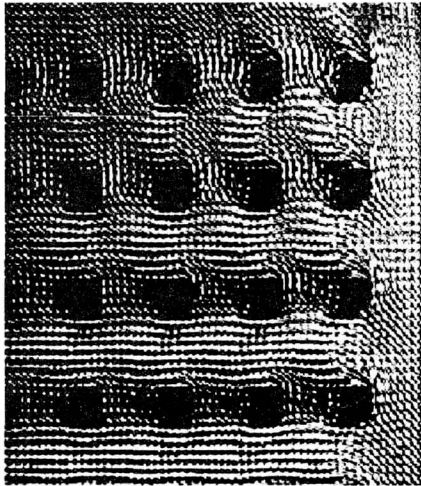
3. Pin-fin 및 extruded heat sink에 대한 고찰

Fig. 1에서 보인 pin-fin heat sink에 대하여 상류에서 접근하는 공기의 방향을 변화시킬 때 이 heat sink의 평균온도를 계산함으로써 heat sink의 성능을 평가하였다. 접근 각도가 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 일 때의 유동의 특성이 Fig. 4에 제시되어 있다. 그림에 나타나 있듯이 접근각도가 0° 일 때에는 공기가 일렬로 늘어선 fin 사이를 용이하게 통과하므로 fin의 표면에서 공기의 속도가 빠르며 와류의 발생이 적어 대류열전달이 잘 일어난다. 한편 접근각도가 커지면 유속이 줄어들며 pin 주위에서 와류가 발생하고 따라서 heat sink를 통과하는 공기의 유량은 감소하여 bypass되는 공기의 유량이 증가한다. 따라서 대류열전달이 억제되어 열저항이 증가한다.

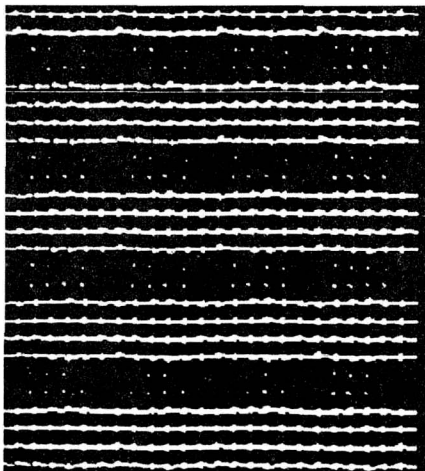
상류공기 접근각도가 0° 일 때 Fig. 2에서 보인 extruded heat sink의 경우가 pin-fin heat sink의 경우보다 대류열전달이 더 잘 되어 대류열저항이 작아진다. 그 이유를 살펴보면 heat sink를 공기가 통과할 때 발생하는 압력강하가 작으며, 와류의 발생이 없고, 또 fin의 lateral 방향으로의 열전도성이 좋아 전체적이 대류열전달이 증가하여 때문이다. (반면에 pin-fin heat sink의 경우에 열원에서 먼 곳에 있는 pin에서의 열전도의 양은 상대적으로 작게 된다.) 그러나 상류공기의 접근방향이 extruded heat sink의 fin의 방향과 일치하지 않는 경우에는 열저항이 급격히 증가하므로 상류공기 접근방향을 예측하기 어렵거나 접근방향이 경우에 따라서 달라지게 되는 경우에는 pin-fin heat sink를 사용하는 것이 일반적으로 유리하다.



(c) angle of 45



(b) angle of 30



(a) angle of 0

Fig. 4 Flow patterns for different approaching velocity vectors in pin-fin heat sink

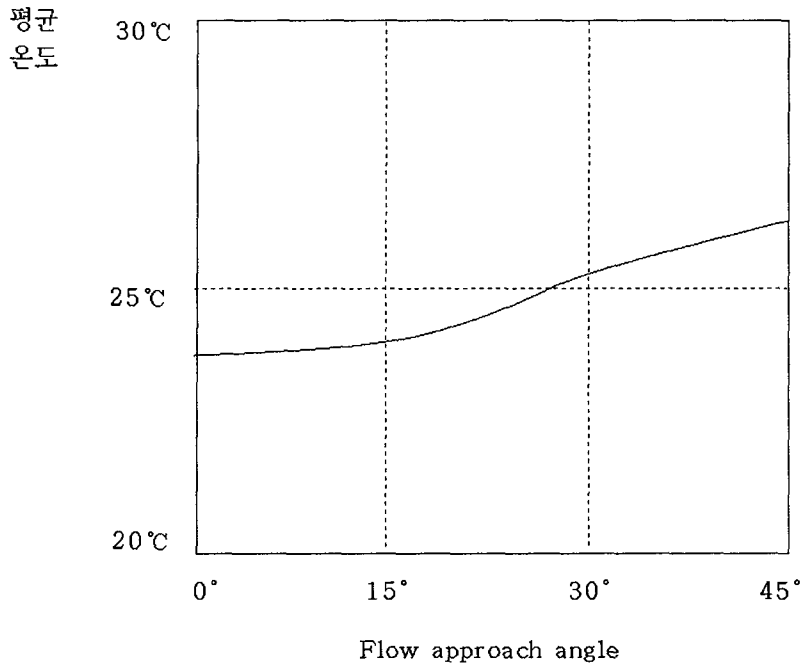


Fig. 5 Variation of mean temperature of heat sink with the change of approaching velocity vector

Pin-fin heat sink에서 상류공기 접근각도에 따른 heat sink의 전체 평균온도가 Fig. 5에 제시되어 있다. 상류 공기 접근 각도가 $0^\circ \sim 20^\circ$ 의 영역에서는 평균 heat sink의 온도가 크게 변화하지 않고 있지만 20° 이상의 각도에서는 대류열전달이 활발하지 못하여 heat sink 평균온도가 높아진다.

4. Extruded heat sink에서 설계변수의 영향

Extruded heat sink에서 열방출에 미치는 설계변수들의 영향을 분석하기 위하여 Fig. 2와 같이 heat sink를 풍동에 설치하고 상류 공기 접근 각도를 0° 로 고정하였다.

4-1. Heat sink의 너비(W)와 높이(H)의 비의 영향

흔히 사용되는 chip은 정사각형의 case를 가지고 있으나, 방열판에 다수의 chip을 일렬로 설치하여 heat sink를 장착한 경우에는 heat sink의 너비와 높이의 비가 변할 수 있다. 이러한 비의 값의 변화가 heat sink의 열방출 능력에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 heat sink의 pitch는 4.88mm, base의 두께 b는 3.5mm로 설정하고 서로 다른 흰높이 h에 대하여, H/W 의 비의 변화에 따른 heat sink의 평균온도를 계산하였다. 여기에서 두개의 heat sink는 동일한 질량을 갖는다.

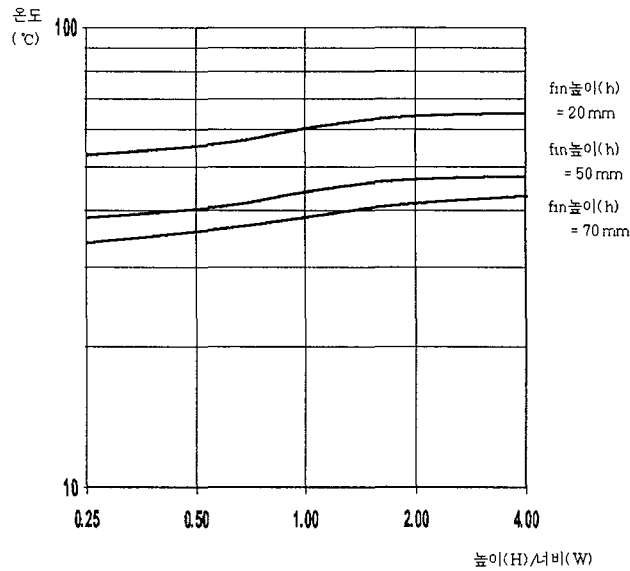


Fig. 6 Variation of mean temperature of heat sink with the change of H/W ratio

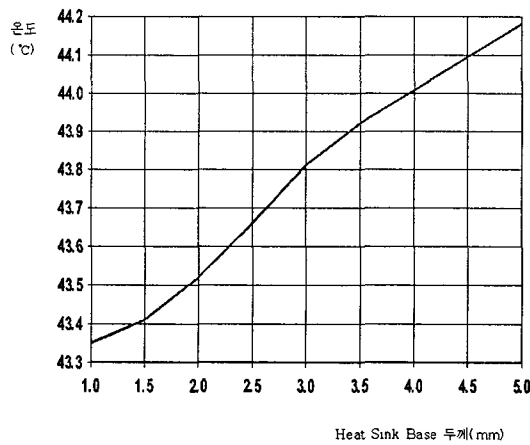


Fig. 7 Variation of mean temperature of heat sink with the change of the base thickness of heat sink

Fig. 6에 보인 바와 같이 H/W 의 비가 작아지면 sink의 평균온도가 하강하고 있다. 즉 공기의 유동속도에 직각 방향으로 놓인 너비 W 의 값이 커지고 높이 H 가 작아질수록 냉각효과가 크다는 것을 알 수 있다. 이는 대류열전달계수가 각 fin의 선단에서 거의 무한대의 값을 가지므로 열전달이 촉진되기 때문이다. 한편 fin 높이 h 의 변화에 대한 효과를 고려할 때 흰높이 h 가 커지면 대류열전달이 증가되어 열방출의 효과가 증가하지만 다른 기구물들과 간섭할 가능성이 크기 때문에 실제의 경우에서 fin 높이를 크게 설정하는 데에는 어려움이 많다.

4-2. Heat sink base 두께의 영향

Heat sink의 base의 두께의 영향을 알아보기 위하여 fin pitch를 4.88mm, 환 두께를 1mm, heat sink의 너비 W와 높이 H를 각각 40mm, fin의 높이 h를 50mm로 고정시킨 채 heat sink base 두께 b를 변화시키면서 heat sink의 평균온도를 계산하였다. 이 결과가 Fig. 7에 나타나 있는데 위에서 계산된 영역에서 살펴볼 때 base의 두께가 얇을수록 heat sink의 평균온도가 낮다는 것을 알 수 있다. 그러나 heat sink의 가공성과 기계적 강도를 고려하여 base의 두께는 대체로 1.5~3mm로 설정하는 것이 바람직하다고 알려져 있다.

4-3. Fin pitch 및 fin 두께의 영향

Heat sink의 pitch의 변화에 따른 heat sink의 평균온도가 Fig. 8에 제시되어 있다. 여기에서 heat sink의 너비 W와 높이 H는 각각 40mm, base 두께 b는 3.5mm, fin 높이 h는 50mm이다. 이 그림에서 fin pitch가 4.5~5mm 사이에서 heat sink 평균온도가 가장 낮은 것을 알 수 있다. Fin pitch가 최적 fin pitch보다 클 경우에는 heat sink의 표면적의 감소로 인하여 대류열전달이 크게 감소하며, 반대로 fin pitch가 최적 fin pitch보다 작은 경우 fin과 fin 사이를 통과하는 유체의 마찰저항으로 공기의 속도가 줄어들어 대류열전달이 활발히 일어나지 못하게 된다. 위에서 얻은 결과를 살펴볼 때 heat sink에서 fin pitch는 3~6mm로 설계하는 것이 타당하다. 한편 fin pitch를 적절히 선정하면 fin의 두께가 heat sink의 열방출에 미치는 영향은 미약하므로 heat sink의 가공성을 고려하여 약 1mm로 설계하는 것이 통상적이다.

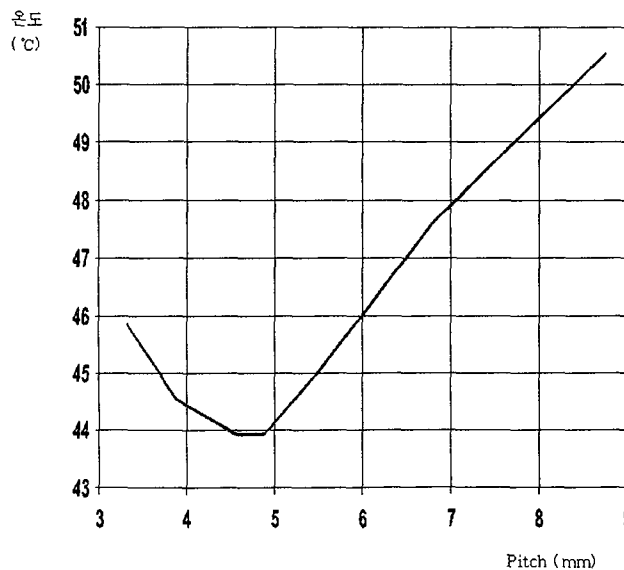


Fig. 8 Variation of mean temperature of heat sink with the change of fin pitch

5. 결론

전자장비의 heat sink에 대한 설계를 열방출의 관점에서 연구하였으며 전자 장비에서의 냉각문제 전용의 상용 code인 Flotherm을 사용하여 수치계산을 수행하였다. Heat sink에서의 설계 parameter에 대한 연구결과는 아래와 같이 요약될 수 있다.

- (1) Extruded heat sink와 pin-fin heat sink에 대하여 fin 사이의 공기유동 속도 벡터가 fin에 평행하도록 하는 것이 heat sink에서의 열저항을 줄이는 좋은 방법이다. 그러나 공기유동 속도벡터의 방향을 예측하기 곤란하거나, 이 방향이 heat sink에 대하여 경사져 있을 경우에는 extruded heat sink보다는 pin-fin heat sink를 사용하여 열 방출을 증가시킬 수 있다.
- (2) 같은 질량의 재료로 extruded heat sink를 설계할 때 heat sink의 너비와 폭, base, fin pitch 등이 고려해야 할 설계 parameter들이다. 열원에 접해 있는 같은 면적을 base로 하는 heat sink에서 너비에 대한 높이의 비의 값이 작을수록 heat sink의 평균 온도는 감소하였다.
- (3) 일반적으로 fin 높이는 다른 기구물과의 공간적 간섭 때문에 구속조건이 많으며 fin 두께의 영향은 미미하다. heat sink의 열방출성능에 큰 영향을 미치는 fin pitch는 3~6mm로 설계하는 것이 바람직하다.

시스템이 복잡해질수록, 설계자들은 system level에 더욱 집중하도록 요구되며 heat sink의 성능 확인에는 덜 집중하게 된다. 그러므로 단순하며, 반복실험으로 얻을 수 있는 data가 필요할 것이다. 이 때 성능확인을 위한 시험은 적용의 문제와는 별도의 문제이어야 한다. 컴퓨터 산업이 단순한 시스템(single processor를 사용하는 시스템)에서 더욱 복잡한 시스템(multiple processor와 다른 중요 부품을 포함하고 있는 시스템)으로 옮겨가고 있으므로 전자 부품에 사용되는 다양한 heat sink에 대한 특성확인이 빠른 시일 안에 이루어져야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] C. J. M. Lasance, "Thermal resistance an oxymoron", ElectronicsCooling (1997), Vol. 3, No. 2.
- [2] R. E. Simons and R. R., Schmidt, "A Simple method to estimate heat sink air flow bypass", ElectronicsCooling (1997), Vol. 3, No. 2.
- [3] C. Belady, "Standardizing heat sink characterization for forced convection", ElectronicsCooling (1997), Vol. 3, No. 3
- [4] Y. Kondo, M. Behnia, W. Nakayama, and H. Matsushima, "Optimization of Finned Heat Sinks for Impingement Cooling of Electronic Packages", Journal of Electronic Packaging (1998), Vol. 120 , No. 3
- [5] D. Angirasa and G. P. Peterson, "Forced Convection Heat Transfer Augmentation in A Channel with A Localized Heat Source Using Fibrous Materials", Journal of Electronic Packaging (1999), Vol. 121 , No. 1
- [6] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere (1980)
- [7] W. J. Minkowycz et al. , Handbook of Numerical Heat Transfer, Wiley Interscience (1988)

저자 소개

김창녕

1979년 서울대학교 기계공학과 졸업

1981년 서울대학교 대학원 기계공학과 졸업

1989년 미국 University of California, Los Angeles 기계공학과 졸업

현 재 경희대학교 기계산업시스템공학부 교수

관심분야 기계공학 현상에 대한 시뮬레이션

문성일

1996년 경희대학교 기계공학과 졸업

현 재 경희대학교 대학원 석사과정

관심분야 기계공학 현상에 대한 시뮬레이션

Fig. 1. Configuration of pin-fin heat sink

Fig. 2. Configuration of extruded heat sink

Fig. 3. Schematics of wind tunnel with heat sink

Fig. 4. Flow patterns for different approaching velocity vectors
in pin-fin heat sink
(a) angle of 0
(b) angle of 30
(c) angle of 45

Fig. 5. Variation of mean temperature of heat sink
with the change of approaching velocity vectors

Fig. 6. Variation of mean temperature of heat sink
with the change of H/W ratio

Fig. 7. Variation of mean temperature of heat sink
with the change of the base thickness of heat sink

Fig. 8. Variation of mean temperature of heat sink
with the change of fin pitch

College of Mechanical and Industrial System Engineering,
Kyunghee University

Graduate School, Kyunghee University