

소 특 집

시스템 냉각기술 동향

김광수, 한재섭, 송규섭

(주)에이팩

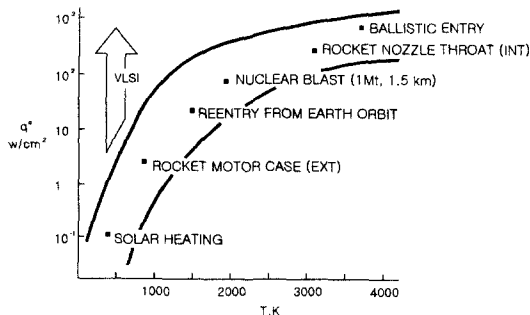
I. 서 본

전자통신 장비들의 고속/고밀도화 실장(electronic packaging) 추세에 따라 사용되는 반도체 부품의 발열량 및 발열밀도가 급격히 증가되고 있다. 지금까지 부품 냉각을 위해서는 공기를 이용한 자연대류 및 강제대류 냉각방식을 채택하여 왔으나, 최근 부품의 발열량 및 발열밀도의 증가로 인해 그와 같은 방식의 냉각성능 한계에 다가왔다.^[1]

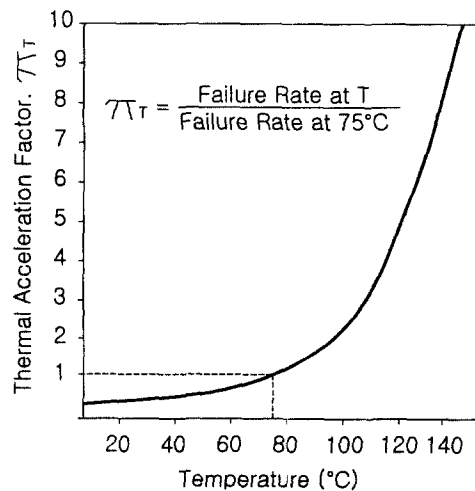
<그림 1>에서와 같이 최근 고집적 회로 칩의 발열밀도는 단위면적(cm²)당 수십 또는 백 W 이상으로 증가되면서 지구 대기권에 재진입하는 우주왕복선의 표면에서 발생하는 마찰열의 밀도와 비슷한 수준이다. 우주 왕복선 표면에서는 표면온도를 1,500°C 정도에서 제어하면 되지만, 동일한 발열밀도 수준에서 전자 부품에서는 일반적으로 75°C 이하에서 제어해야 하기 때문에 냉각문제를 해결하기에 매우 어려운 문제임을 극명

하게 보여 주고 있다. 이보다 더 극단적인 고발열 칩을 사용하는 슈퍼컴퓨터에서는 비전도성 액체(예; 3M사의 FC 계열)에 직접 접촉시켜 냉각시키는 방법도 있으나, 본고에서는 일반적인 전자통신장비에서의 냉각기술에 대해 논하기로 한다.

또 최근 전자통신장비에서는 팬(fan), 블라워(blower) 등을 이용한 강제대류 냉각을 적용할 때 소음 발생이 커져 운용자들에게 열악한 환경이 되고 있다. 그리고 고밀도로 실장함으로써 시스템 내부의 좁은 공간에서 냉각시키기 어려운 경우가 빈번하므로 많은 열을 빠른 시간내에 시스템 밖 또는 내부의 여유 공간으로 이동시켜 냉각시킬 필요가 있다. 이에 대응하는 새로운 고효율 냉각방식으로 Heat Pipe를 적용함으로써 이상의 문제점을 해결하고 시스템의 신뢰성을 제고할 수 있다.^[2,3,4,5]



<그림 1> 전자부품 대비 기타 발열체의 발열밀도



<그림 2> 운용온도에 따른 부품 고장을 정도

“Electronic Packaging Handbook”에 따른 전자장비의 다양한 고장원인 중 열, 습도 등 열 문제로 인한 고장이 전체의 70% 이상이라고 보고되고 있다.¹⁶⁾ <그림 2>는 전자부품의 운용온도(operating temperature)에 따라 부품의 수명이 단축되는 정도에 관해 나타낸 것이다. 일반적으로 산업용(industrial grade) 전자부품의 운용온도는 75°C 이하이며, 이 온도보다 더 높은 온도에서 시스템을 운용하면 급격히 고장율이 증가됨을 알 수 있다. 이와 같은 고장율을 낮추고 수명을 증대시키기 위해서는 필연적으로 시스템에 대한 냉각설계가 요구된다. 이와 같이 전자제품에 대한 냉각설계시 차별화된 성능 및 높은 신뢰도를 고려한 설계, life cycle에 따른 경제적 가격을 위한 설계, 편리한 유지보수를 고려한 설계, 생산 공정을 감안하여 생산성을 고려한 설계 등이 요구된다.

본 고에서는 전자부품 및 장비 냉각을 위한 열설계(Thermal Management or Thermal Design) 방법을 부품 레벨과 시스템 레벨에서 각각 기술하고, 또 기존에 전자부품 냉각에서 가장 많이 사용되어 왔던 Heat Sink에 대한 열설계 기술을 설명하고자 한다. 그리고 새로운 냉각 기술로 부각되고 있는 각종의 Heat Pipe 기술 및 응용에 대해 소개하고자 한다.

II. 전자장비 냉각방식 종류

전자장비의 구체적인 냉각설계는 냉각방식을 결정하는 것으로부터 시작된다. 부품설계와 회로설계 등 초기단계에서 설계조건을 확인하고 시스템 전체의 냉각방식을 선택하는 것이 중요하다. 냉각방식을 검토할 때 최소한 고려해야 할 항목은 아래와 같다.

- 시스템의 총 발열량
- 시스템의 허용온도
- 시스템의 외형 치수 제한

- 시스템 환경조건(주위온도, 직사 광선의 유무, 고도 등)
- 기타 제약조건

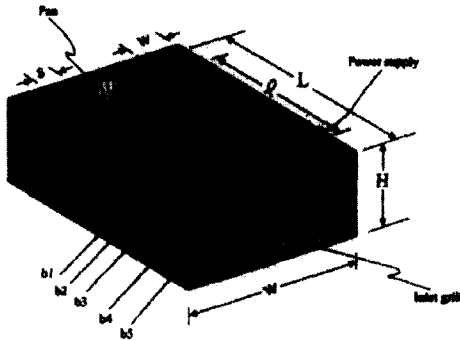
전자장비의 온도조건은 시스템의 설치 장소에 따라 크게 차이가 있고 이를 고려한 냉각설계가 필요하다. 전자장비에서 채택하고 있는 대표적인 냉각방식으로는 자체 발생열에 의한 부력차에 의한 공기 유동으로 냉각하는 자연대류 냉각방식과 팬 및 블로우 등 외부 동력에 의해 공기를 순환시켜 냉각하는 강제대류 냉각방식, 그리고 강제대류 냉각방식의 냉각 용량을 초과하는 발열량에 대해 특수 냉각방식이 있다. 특히, 최근에 주목을 받고 있는 냉각방식으로 파이프내의 액체의 증발열을 이용하는 Heat Pipe에 의한 냉각방식 등을 사용하고 있다. 이들 냉각방식을 종류별로 구분하면 아래와 같다.

- Air Convection Cooling
 - Natural Convection
 - Forced Convection
 - Air Jet Impingement
- Indirect Liquid Cooling
 - Heat Pipe/Thermosyphon
 - TCM(Thermal Conduction Module)
- Direct Liquid Cooling
 - Immersion Cooling/Liquid Jet Cooling
 - Phase Change Cooling
- Others
 - TEC(Thermoelectric Cooler)
 - Cryogenic

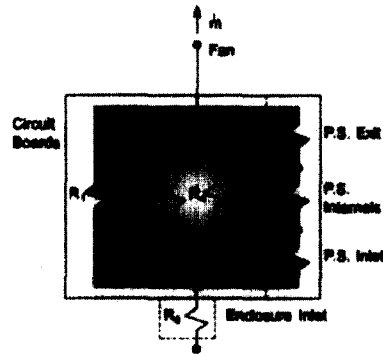
III. 전자장비 냉각설계

1. 시스템 레벨 냉각설계

지금까지 개발된 대부분의 전자장비는 주기판(main board)에 다수의 PCB가 부착되고, 측면에는 전원부가 실장되는 <그림 3>과 같은 전형



〈그림 3〉 강제대류냉각형 합체



〈그림 4〉 공기유동/압력 상사회로

적인 패키징 방식을 취하고 있다. 또 교환기와 같은 대형 통신시스템도 실제 형상은 다르지만 〈그림 3〉과 같은 모듈 다수를 상부로 적층한 구조라고 보면 크게 틀리지 않을 것이다.

이와 같은 전자장비의 냉각해석을 위해 전자패키징 엔지니어 또는 수치해석 전문가들은 전용해석 코드를 이용하여 냉각설계를 수행하려고 한다. 그러나 대표적인 전자장비 냉각해석 전용 코드인 “Flotherm”과 같은 소프트웨어의 가격은 1억원 이상이며, 그 사용법을 익히는데도 상당한 인력과 시간을 투자하여야 한다. 더구나 중소기업에서는 이와같은 금전적, 시간적 투자를 거의 할 수 없으므로 해석적인 방법(analytic solution)을 이용하는 것이 가장 유리하며, 또 복잡한 시스템 구조가 아니면 어느 정도 정확히 예측할 수 있다.¹⁷⁾ 해석적인 방법 중 지금까지 사용된 방법으로는 시스템내 전체 발열량과 시스템 임피던스, 팬 특성곡선 등을 이용해 시스템 전체 레벨에서 강제대류냉각 열설계를 수행해 왔다. 여기서는 좀더 세밀하게 해석하기 위해 시스템으로 유입하는 공기량을 각 PCB가 형성하는 채널의 유동저항을 이용하여 전체 유량을 분배하고, 실제 보드의 온도상승을 예측하는 해석적 방법을 사용하고자 한다.

〈그림 3〉과 같은 시스템을 고려할 때, 합체 전면 하부로 유입된 냉각공기 유량은 합체 뒷면 중앙에 부착된 팬에 의한 흡입력으로 5개의 PCB가 형성하는 유동채널과 합체 우측에 배치된 전

원부로 분산 유입된다. 이들의 각각 유입 유량을 결정하기 위하여 〈그림 4〉와 같이 전기적 회로와 상사(analogy)한 저항회로를 구성하여 각각에서의 유동저항을 구한다.

- $R_1 \sim R_5$: PCB 사이에서의 공기유동 저항
- R_6 : 유입구에서 유동저항
- R_7, R_8, R_9 : Power Supply의 입구, 내부, 출구에서의 유동저항

여기서 유동저항은 다음과 같은 식에서 유도된다.

○ $R_1 \sim R_5 : \Delta P = \lambda \frac{l}{p} \frac{1}{2} \rho V^2$

○ $R_6 : \Delta P = C_p \frac{1}{2} \rho V^2,$

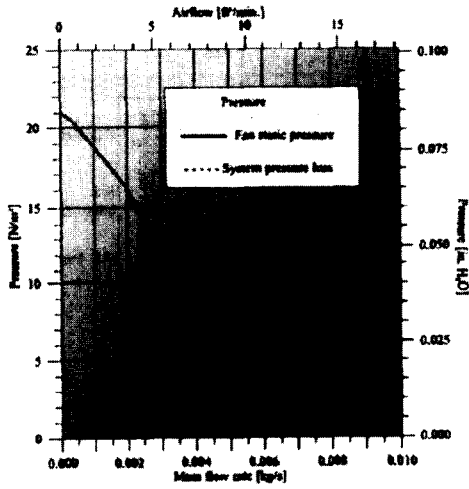
$$\Delta P = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{1}{2} \rho V^2$$

- R_7, R_8, R_9 : 상기와 동일한 방법으로 각각 계산함.

○ $\Delta P = Rm^2$

상기 식들을 마지막 식에서와 같이 난류 채널 유동에서의 유량과 압력강하의 관계식의 형태로 바꿀 때, 유동저항 R을 구할 수 있다.

이들 저항의 연결방법에 따라 다음과 같이 누적이 되며, 이들 전체를 합한 저항이 시스템 저항이 된다.



〈그림 5〉 팬 특성곡선과 시스템 임피던스 곡선

- 직렬 연결 : $R = R_1 + R_2$
- 병렬 연결 : $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

전체 총합 저항을 구한 후, 〈그림 5〉에서의 팬 특성곡선과 시스템 저항(임피던스)의 교차점을 구하면 총 냉각공기 유입량을 구할 수 있다. 이들을 각각 저항에 대해 분산하면 시스템내 각 부분에서의 공기 유량을 구할 수 있으며, 이들 유량으로 각 부위의 온도상승을 예측할 수 있다.

2. 부품 레벨 열설계

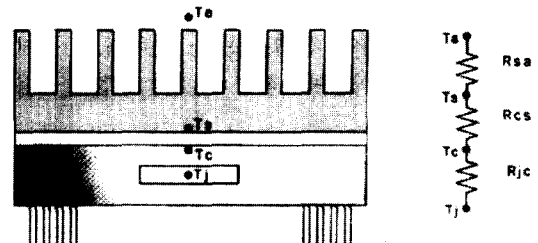
전 절에서와 같이 시스템레벨의 열설계를 수행하여 과열되는 부분의 보드를 선정 후, 부품 레벨의 냉각설계를 수행하는 것이 일반적이다. 먼저 부품의 발열량이 어느 정도인지 파악하고, 그 부품 주위를 지나는 공기의 유속을 측정 또는 예측하여 부품 표면의 공기온도 상승을 구한다. 이때 단일 부품에 대한 발열 및 온도상승을 예측하는 것은 알면 대류 열전달 상관관계식(Nu-Re Correlation)을 사용하면 쉬운 일이지만, 동일한 보드내에 여러 개의 부품이 존재할 경우, 해당 부품의 자체 발열에 의한 온도 상승뿐만 아니라 하부 부품에서 발생한 열이 상부로 전달되어 해당 부품의 온도가 상승되는, 즉, 열후류(thermal

wake) 현상이 발생한다. 이 경우 중첩법(superposition)을 이용하여 계산하는 방법이 있으나, 불균일한 발열과 채널내 부품의 형상에 따라 계산이 매우 복잡해 진다. 이와같이 이론적으로 구하거나 수치해석 코드를 이용하여 해당 부품표면의 온도상승을 구했을 때, 부품 Spec.의 온도조건보다 상승하게 되면 Heat Sink를 부착하거나 Heat Pipe 냉각모듈을 적용하여야 한다. 그러나 일반적으로 해당 부품의 발열량만으로도 Heat Sink 부착 여부를 결정할 수 있고, Heat Sink 선정은 제조사의 카탈로그를 참조하여 선정할 수 있으며, 자세한 사항은 다음 절에서 언급하고자 한다. 또 고발열 부품에 Heat Sink를 부착하여도 냉각이 불가능할 경우 또는 부품 상부에 Heat Sink를 부착할 공간이 없어 다른 여유공간에서 냉각하여야 할 경우, Heat Pipe 적용을 검토할 수 있으며, 이들에 대한 자세한 사항은 다음 장에서 기술하고자 한다.

1. Heat Sink 열설계

히트싱크(Heat Sink)란 냉각 매질(공기, 물 등)과의 전열면적을 넓히기 위해 알루미늄, 구리 등 열전도성이 좋은 재료를 이용하여 핀(fin) 형상으로 압출 또는 기계 가공한 방열 부품이다. 주로 고발열 전자부품에 부착하여 냉각효율을 높이기 위해 사용되며, 그 선정 방법이나 부착방법은 매우 중요하다.

〈그림 6〉은 전자부품 상부에 Heat Sink를 부착하였을 때 부품 발열량(Q)에 따른 접합온도(T_j : Junction temperature), 부품 케이스 온도(T_c), Heat Sink 온도(T_s), 그리고 외부 공



〈그림 6〉 Heat Sink에서의 열저항(thermal resistance)

기온도(T_a)를 나타낸 것이며, 각 열전달 부분에서의 열저항(thermal resistance)을 전기적 상사회로로 나타낸 것이다. 여기서 각 부분에서의 열저항을 식으로 나타내면 다음과 같다.

먼저 접합부(junction)와 케이스 사이의 열저항은 다음 식으로 표시되며, 이 값은 각 부품에 따라 반도체 제조회사에서 명확히 제시하고 있다.

$$R_{jc} = (T_{jc})/Q = (T_j - T_c)/Q$$

또 동일한 조건으로 케이스와 Heat Sink, Heat Sink와 냉각공기 사이의 열저항은 다음과 같다.

$$R_{cs} = (T_{cs})/Q = (T_c - T_s)/Q$$

$$R_{sa} = (T_{sa})/Q = (T_s - T_a)/Q$$

R_{cs} 는 부품표면과 Heat Sink 사이의 접촉 열저항을 의미하며, 이는 접촉면을 채우는 물질로서 Thermal Grease, Thermal Tape, Thermal Bond, Thermal Paste 등 여러 재질에 따른 열저항 특성을 구할 수 있다. 최종 전체 열저항 R_{ja} 는 상기 3개의 열저항의 합으로 나타낼 수 있다.

$$R_{ja} = R_{jc} + R_{cs} + R_{sa} = (T_j - T_a)/Q$$

상기 식을 이용하여 Heat Sink를 선택하기 위해서는 다음과 같은 Heat Sink 열저항을 구해야 한다.

$$R_{sa} = (T_j - T_a)/Q - R_{jc} - R_{cs}$$

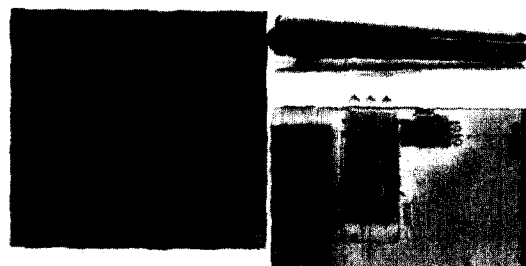
여기서 T_j , Q , R_{jc} 는 반도체 제조회사에서 제공하고, T_a 와 R_{cs} 는 사용자가 결정할 수 있는 요소이다. 접촉 열저항 R_{cs} 는 접촉표면 조건, 평탄도, 접촉압력, 접촉면적, 접촉재질 및 두께 등에 따라 달라진다. 윗식에서 구한 Heat Sink 열저항 R_{sa} 를 이용하여 Heat Sink 제조사의 자료로 Heat Sink를 선정할 수 있다.

IV. Heat Pipe 응용분야

Heat Pipe는 파이프 내부의 상변화(phase change)를 이용하여 동일 크기 구리의 수백배 이상의 열전도 특성을 가지며 그 응용범위가 매우 넓다. 본 절에서는 Heat Pipe 기술 자체에 대한 설명은 피하고 Heat Pipe의 초열전도 특성을 이용하여 전자부품 냉각에 응용하고 있는 분야 중 대표적인 노트북 PC, 데스크탑 PC, 옥외통신장비 냉각모듈 등에 대해 언급하고자 한다.

1. 노트북 PC CPU 냉각

노트북 PC와 같이 초박판형 패키징을 추구하는 분야에서는 냉각문제가 일찍부터 중요한 이슈로 대두되고 있다. Pentium급 CPU가 출시되기 전 기존의 노트북 PC에는 CPU 상부에 Heat Sink를 부착하거나 샷시 측면에 소형 팬을 부착하는 것으로 냉각성능을 충분히 만족하였으나, Pentium II급 이상의 CPU에서는 CPU당 발열량이 10W 이상으로 증가하고, 패키징 공간의 제한성 때문에 Heat Pipe를 적용한 냉각이 불가피하게 되었다. 현재 Pentium IV급에서는 냉각문제가 더욱 어려워지고 있으며, Fan에 의한 소음 또한 큰 장애로 대두되고 있다. 현재 30W 이상의 CPU 발열량을 처리하기 위해서는 <그림 7>과 같이 Heat Pipe에 의해 CPU의 열을 흡수하여 샷시 가장자리까지 열을 이동시키고 많은 전열면적을 확보한 후, 소형 팬에 의해 외부로 방출시키는 구조를 취한다. 노트북 PC의 초슬림화



<그림 7> 노트북 냉각모듈 및 패키징 형상

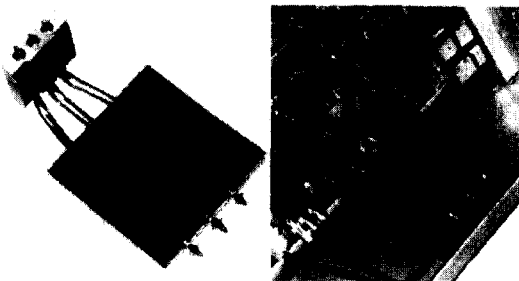
설계의 가장 큰 장애 중의 하나인 냉각문제를 해결하기 위해서는 Heat Pipe를 이용한 냉각모듈 개발에 더 많은 노력이 요구된다.

2. 데스크탑 PC CPU 냉각

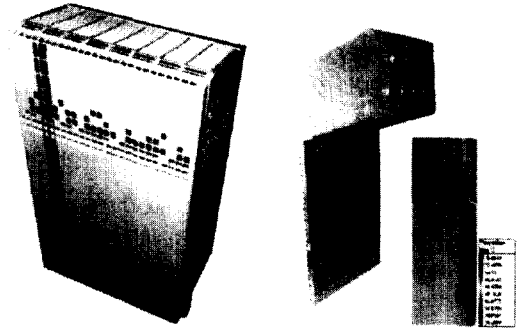
〈그림 8〉은 데스크탑 PC CPU용 Heat Pipe 냉각모듈 및 실제 국산 PC내에 패키징된 상태를 나타낸 것이며, 이는 세계 최초로 데스크탑 PC에 Heat Pipe 냉각모듈을 채용한 경우이다. Heat Pipe 모듈은 국내 모기업에서 개발한 것으로, 이와 같은 방식을 채택함으로써 기존 Heat Sink 냉각방식에 비해 소음은 8 dBA 감소되고, 무게는 43% 감소시킬 수 있다. 또 CPU의 열을 샴시까지 끌고 와서 기존의 시스템 내부의 고온 공기를 배출시키는 팬을 이용하여 동시에 밖으로 배출시키는 방식이므로 팬 사용을 하나 줄일 수 있다. 이와 같은 방식은 최근 여러 업체에서 개발이 진행되고 있는 일체형(compact) PC에서도 탁월한 효과를 나타내고 있다.

3. 옥외용 통신합체 냉각

통신시스템용 옥외 합체는 PCS 등 이동통신 시스템이 본격화되면서 매우 많은 기지국과 중계기 장비를 옥외에 설치하게 되었으며, 옥외용 합체는 시스템 냉각을 위해 외부 공기를 도입하게 되면 먼지, 습기 등이 같이 유입되므로 완전 밀폐된 상태에서 시스템을 냉각시키는 방법을 개발하여야 한다. PCS 기지국 설치 초기에는 합체내의 열을 빼내기 위해 에어컨 장치를 설치하기도 하였으나, 결로현상, 정전시 대책 부재, 유지보수



〈그림 8〉 데스크탑용 냉각모듈 및 패키징 형상



〈그림 9〉 이동통신 중계기 냉각모듈

문제 등으로 현재는 거의 사용하지 않고 있다. 그 이후 판형 열교환기, Heat Pipe형 열교환기 등을 개발하여 대체 적용하고 있다.

〈그림 9〉는 이동통신 중계기에 Heat Pipe를 적용하여 합체 내벽에 RF 증폭기와 같은 고발열 모듈을 직접 Heat Pipe 증발부에 부착하여 밖으로 열을 빼내는 구조이다. Heat Pipe에 의해 열만 밖으로 빼내어 핀(fin)에 의해 많은 전열면적을 부여함으로써 특별한 고발열인 경우를 제외하고는 팬을 사용하지 않고 자연대류 냉각방식으로 처리할 수 있다.¹⁰⁾ 이 방법은 현재 상용화가 완료되어 많은 시스템이 옥외 전주에 설치되어 운용되고 있다.

V. 맺음말

지금까지 전자장비의 냉각기술 및 그 동향에 대해 부품 및 시스템 레벨에서 검토하였으며, Heat Sink와 Heat Pipe기술에 대해 논하였다. 일반적인 전자장비에서와 같이 다수의 보드로 구성된 경우, 먼저 시스템 레벨에서 열설계를 수행한 후 특정 높은 온도 부분에 대해 보드 및 부품레벨에서 열해석을 수행하여야 한다. 열해석, 즉, 냉각설계의 궁극적인 목표는 시스템내의 Hot Spot 부분이 발생하지 않도록 하는 것이라고 해도 과언이 아니다. 또 점차 컴팩트화되어 가는 시스템 패키징 추세에서 기존에 사용되어 왔던 Heat

Sink로 구현할 수 없는 시스템의 냉각문제에 대해, 높은 열전도 특성과 온도 균일성을 갖는 Heat Pipe를 이용하여 적용할 수 있는 전자장비 및 부품 냉각분야는 더욱 증가될 것이다.

H.B., Han, J.S., Cooling Performance of a Heat Sink with Embedded Heat Pipes, Proceedings of the 6th Int. Heat Pipe Symposium, pp.345~351, 2000

참 고 문 헌

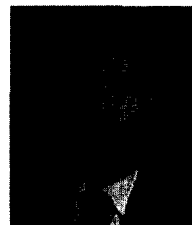
- [1] Bar-Cohen, A., "State-of-the Art and Trends in the Thermal Packaging of Electronic Equipment," J. of Electronic Packaging, Vol. 114, pp.257~270, 1992
- [2] 김광수, 김원태, 송규섭, 이기백, "고발열 전자부품 냉각용 써모사이폰의 냉각특성에 관한 연구," 공기조화냉동공학논문집, 제10권, 제2호, pp.137~146, 1998
- [3] Kim, K. S., Park, J. M., and Song, K. S., "Development of Thermosyphon for Cooling of High Power Electronic Components in Telecommunication System," Proceedings of 4th International Symposium on Microelectronics and Packaging, pp.111~121, 1998
- [4] Eguchi, K., Mochizuki, M., Mashiko, K., Goto, K., Saito, Y., Nagaki, Y., Takamiya, A., Nguyen, T., Cooling of CPU Using Micro Heat Pipe, Fujikura Co., Technical Note, Vol. 9, pp.64~68, 1997
- [5] Kim, K. S., Moon, S. H. and Choi, C. G., Cooling Characteristics of Miniature Heat Pipes with Woven-Wired Wick, 11th Int. Heat Pipe Conf., Tokyo, Japan, Vol. 1, pp.20~25, 1999
- [6] Michael Pecht, Handbook of Electronic Packaging Design, Marcel Dekkel, Inc., 1991
- [7] Internet Site : www.electronics-cooling.com/Resource
- [8] Kim, K.S., Won, M.H., Son, K.H., Kim,

저 자 소 개



金 廣 秀

1985년 2월 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1987년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1998년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1987년 2월~1989년 8월 : 한국핵연료(주) 근무, 1989년 9월~1999년 7월 : 한국전자통신연구원 근무 (팀장), 1999년 7월~현재 : (주)에이팩 근무 (부설연구소장), <주관심 분야: Electronic Packaging, Electronic Cooling>



韓 在 燮

1988년 2월 한밭대학교 기계설계공학과 졸업(학사), 1999년 2월 : 한밭대학교 대학원 기계설계공학과 졸업(석사), 1983년 3월~1999년 7월 : 한국전자통신연구원 근무 (선임연구원), 1999년 7월~현재 : (주)에이팩 근무 (생산본부장), <주관심 분야: Electronic Packaging, Electronic Cooling>



宋 圭 燮

1981년 2월 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1993년 8월 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1983년 3월~1999년 7월 : 한국전자통신연구원 근무 (실장), 1999년 7월~현재 : (주)에이팩 근무 (대표이사), <주관심 분야: Electronic Packaging, Electronic Cooling>