특집

전자기기 발전 추세에 따른 최근 냉각기술 동향

李 倫 杓, 尹 聖 永

韓國科學技術研究院 機電研究部

I. 서 론

최근 들어 정보가 산업에 미치는 영향은 대단히 크다. 따라서 양질의 정보를 신속하게 공급 받으려는 욕구에 기인하여 정보 및 전자 산업은 급속도로 발달되어져 가고 있다. 이러한 기기에서 시스템의 소형화와 대용량화에 의해 전자 부품이 고집적화 되어 가고 있다.

기기가 동작할 때 발생된 손실은 열의 형태로 방출된다. 이 열이 방출되는 과정에서 주변과의 열전달이 필요하게 되고 이 열전달을 위하여서 온도차이가 발생한다.

기기에서 발생하는 열은 대용량화에 따라 증가하는데 소형화가 되면 면적이 작아지므로 단위면적당 열발생량은 증가하게 되어 있다[1]. 칩의 수명이나 처리속도는 온도에 크게 좌우되기 때문에 칩 허용 온도를 일정온도 이하로 유지시켜야 한다. 이를 위해선 전자기기의 발전추세에 따라 적절한 냉각방법을 적용할 수 있어야 한다.

본 소고에서는 전자기기의 냉각에는 어떤 종류가 있으며 전자기기의 발전추세로 보아 어떤 냉각방법이 적용되고 있는가를 전자분야 종사자에게 소개하는 데 그 목적을 두고 서술하려 한다.

II. 전자기기의 냉각원리

냉각의 기본원리는 다음과 같은 식을 이용하여 설명할 수 있다. 즉 어떤 대상을 냉각할 때 가장 간단한 Lumped Model 을 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉 발열량이 $\ddot{Q}$ 일때 발열체의 온도 T_s, 주변 공기온도를 T_a라 하고 이때 열저항의 합을 $\sum R_i$이라 할 때 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\ddot{Q} = \frac{T_s - T_a}{\sum R_i} \qquad (1)$$

이때 열저항은 $\sum R_i = \frac{1}{hA}$ 의 형태이다. 이 식을 정리하면

$$\ddot{Q} = \frac{T_s - T_a}{\frac{1}{hA}} \qquad (2)$$

이 되고 이 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$T_s = \frac{\ddot{Q}}{hA} + T_a \qquad (3)$$

여기서 발열체의 발열량 $\ddot{Q}$는 정하여진 값이므로 발열체인 전자칩의 온도 T_s를 규정된 온도이하로 낮추기 위하여서는 주변 공기온도 인 T_a를 가급적 낮은 온도로 유지시켜 주거나, 열전달 계수인 h 의 값을 증가시키거나, 열전달 면적 A 를 증가시켜야 한다.

주변 공기온도인 T_a를 낮은 값으로 유지시키기 위하여서는 덥혀진공기를 차가운 공기로 원활히 대체될 수 있어야 한다. 또한 열전달 면적을 증가시키기 위하여서는 주로 냉각핀을 사용한다. 그러나 냉각핀은 면적이 늘어남에 따라 효율이 감소하므로 냉각능력의 증가에는 한계가 있다. 따라서 냉각능력을 더욱 상승시키기 위해선 열전달계수인 h 의 값을 상승시켜야 한다. 이때 열전달 계수는 열전달 형태에 따라서 결정 된다.

III. 열전달 촉진 기술

전자기기의 열전달 촉진기술의 기본 개념은 식 (3) 으로 부터 다음과 같이 정리할 수 있다. 즉

1) 주변 공기온도를 낮게 유지되어야 함.
2) 덥혀진 공기가 차가운 공기로 원활히 대체될 수 있어야 함.
3) fin 효율의 감소없이 열전달 면적을 가급적 넓힐 수 있어야 함.
4) 대상이 되는 전자시스템의 특성에 적합하여야 함.

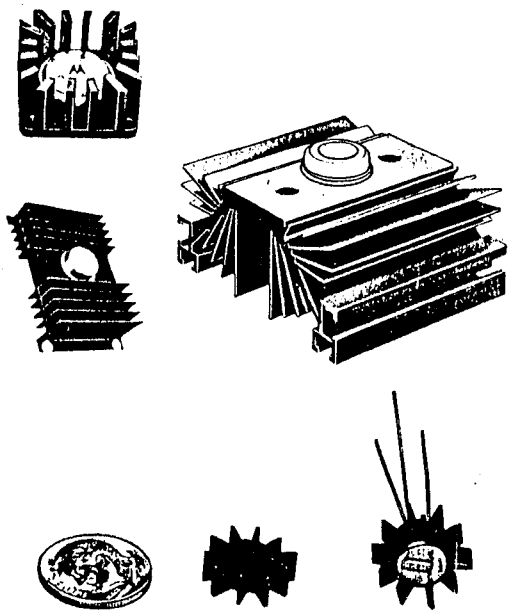
표 1 은 열전달촉진 기술로써 전자 냉각에 적용되었거나 가장 적용 가능한 것들을 나타내었다.[3]

〈표 1〉 전열 촉진 분류 및 방법

1. Passive techniques
Treated surfaces
Rough surfaces
Extended surfaces
Displaced enhancement devices
Swirl flow devices
Additives for liquids
Additives for gases
2. Active techniques
Mechanical aids
Surface vibration
Fluid vibration
Electrostatic or magnetic fields
Injection or suction
3. Compound techniques
Two or more of the above

표 1 에서 수동적인 방법은 열전달 면적을 증가시키거나 전열면의 표면조도를 크게 하는 방법들이다. 이에 비해서 능동적인 방법은 시스템 고유의 진동이나 추가의 동력을 이용해서 전열면을 진동시키거나 주위 유체를 진동 시킴으로써 덥혀진 공기가 쉽게 가열체 주변을 빠져 나가도록 하는 것이다. 그러나 이때 사용하는 진동 에너지 강도가 상당히 높아서 정교한 전자제품에 실용화하는데 어려움이 있다. 실제 예로서 기체의 경우 140db 이상의 에너지 강도가 소요된 실험 결과도 있다.

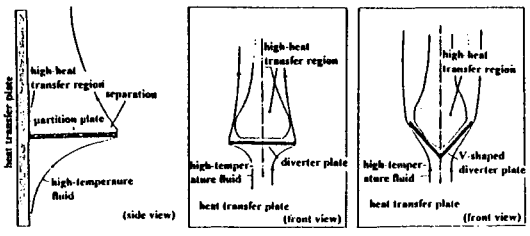
소극적인 방법의 대표적인 것은 공기의 밀도차이에 의한 유동을 이용한 자연대류이다. 자연대류는 소음이 없고 외부로 부터 추가의 전원이 전혀 필요하지 않고 안정성이 가장 높은 냉각 방식이다. 이와 같은 자연 대류에 의한 냉각 방법은 전열 면



〈그림 1〉 전자 제품에 사용된 냉각핀

적을 증가시키기 위해서 주로 핀을 많이 사용하고 있다. 그림 1 은 전자제품에 사용되고 있는 핀들이다. 그러나 그림 1 과 같은 냉각핀에서 하부에서 가열된 공기가 상부의 핀 주위를 덮으므로 실제 냉각성능은 냉각핀의 면적에 비례하지 않는다.

따라서 T.Misumi 와 K.Kitamura 등은 그림 2 와 같은 분기판 (partition plate) 를 이용한 방법을 개발하였다[2]. 즉 하부에서 가열된 공기가 분기판 때문에 상부로 상승하지 못하게 하여 분기판 윗부분의 열전달면에는 차가운 외부공기가 유입되게 된다. 이것은 분기판 윗부분에 식 (3) 의 주변 공기 온도인 T_a 낮게 유지시켜주는 아이디어이다. 이들은



〈그림 2〉 전열촉진 장치

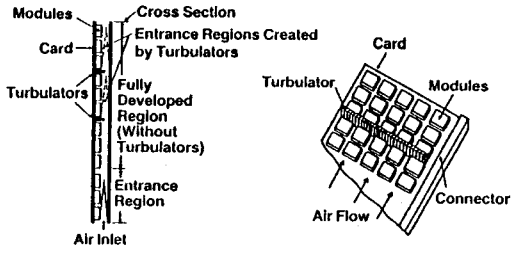
실험을 통해서 이 방법이 기존의 핀 보다 전열 계수가 40% 이상 증가하는 결과를 얻었다고 보고하고 있다.

강제대류는 fan 을 이용하여 가열면 주변의 정체된 공기를 불어냄으로써 낮은 온도의 유입공기가 가열면 주변을 차지하게 하는 것이다. 이 강제대류는 자연 대류에 비하여 전열 성능은 우수하나 fan 이 부착되어야 하는 특성때문에 소음 및 부피가 커지는 단점이 있다. 강제대류는 팬에 의한 진동과 소음이 발생되어 시스템의 안정성이 떨어질 수 있다. 그러나 극저속의 팬에 의한 공기의 유동만으로도 자연대류보다는 월등한 냉각성능이 가능하다.(주 : 전자장치의 냉각을 설계할 때 약간의 공간적 여유가 있으면 매우 저속의 fan 을 도입하는 것은 필자의 판단으로는 빈드시 필요하다고 본다).

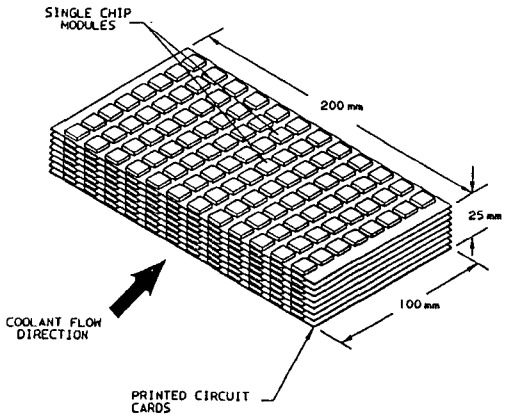
그림 3 은 반도체 칩들이 부착되어 있는 기판에 Turbulator 란 일종의 난류발생장치를 설치한 경우를 나타낸 것이다.[4] 여기서 Turbulator는 기판 주위에 형성된 열경계층을 깨뜨림으로써 앞서 설명한대로 차가운 공기가 열발생부위로 쉽게 유입되게 하는 원리이다. 실험 결과 반도체 칩과 이 주위를 지나가는 공기와의 열저항을 30%에서 50% 정도로 감소시켜서 전자 칩의 냉각 성능을 향상시키는 결과를 얻었다고 보고하고 있다.

(주 : 난류에 효과가 있는 Turbulator 는 자연대류만을 이용한 전자기기에는 부착하지 않기를 바란다. 왜냐면 자연대류에 의한 난류는 열전달촉진과는 관계가 없기 때문이다. 필자도 자연대류를 촉진시키기 위하여 Turbulator 를 설치하여 보았으나 전혀 효과가 없었음.)

그림 4은 냉매의 강제대류 방식에 의한 냉각 방법



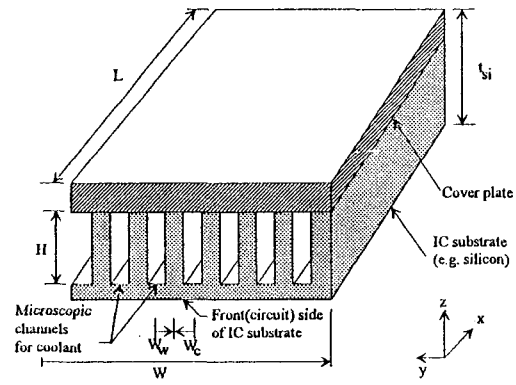
〈그림 3〉 전자기판에 설치된 난류 촉진장치



〈그림 4〉 CRAY-2에 적용된 강제 대류에 의한 냉각 방법

을 보여 주는 것이다.[5] 그림에서 CRAY-2 슈퍼 컴퓨터의 PCBs(Printed Circuit Boards) 상에 설치된 칩으로서 각 칩에서 발생되는 열량은 총 600Watt 에서 700Watt 이며 PCBs 사이를 통과하는 속도는 1.0inch/sec이다. 그리고 사용된 냉매는 FC-77이다.

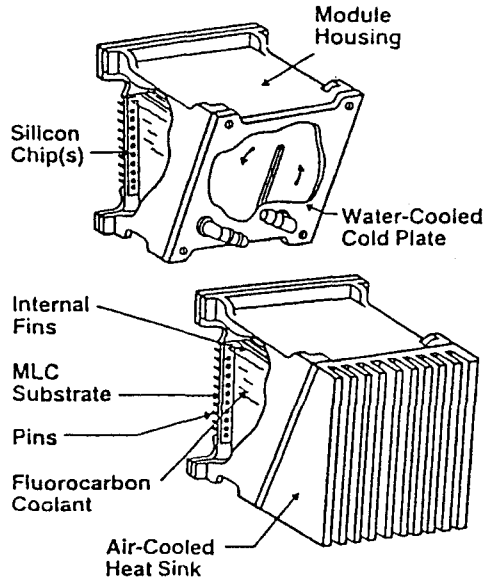
D.B.Tuckerman 과 R.F.W.Pease는 1981 년 마이크로 유로를 이용하여 강제 대류에 의한 전자소자 냉각에 관한 연구를 수행하였다.[6] 그림 5는 Tuckerman 과 Pease 가 처음으로 제안한 Microgroove 를 이용한 냉각법이다. 이들은 작동 유체를 액체를 이용하였으며 냉각 능력은 1000 W/m^{2}로



〈그림 5〉 Microgroove를 이용한 전자 냉각 방법

서 냉각 성능이 높은 결과를 얻었다. 그러나 이들 연구는 마이크로 유로를 통해서 액체를 순환시키는 방법이 매우 어렵고 Microgrove 가 Fouling 에 의하여 쉽게 손상되는 단점이 있다.

그 밖의 전자 냉각 장치에 응용되고 있는 방법으로는 액침냉각, 상변화에 의한 잠열을 이용하는 방법, Jet Impingement 를 이용하는 방법 등이 있다.

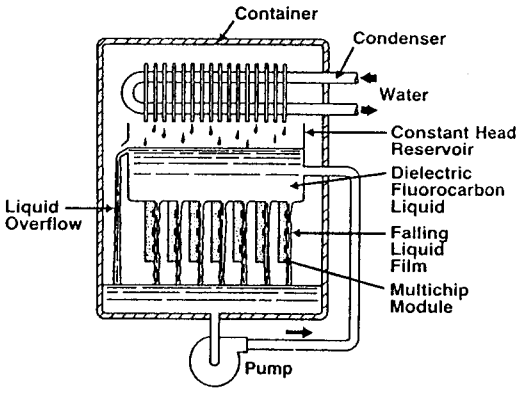


〈그림 6〉 액침(Immersion)을 이용한 전자 냉각 방법

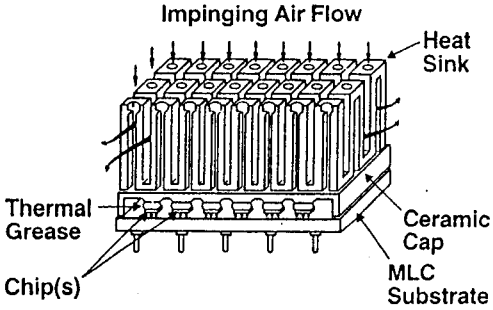
그림 6은 IBM 이 액침냉각 방법으로 전자 냉각을 한 경우를 나타낸 것이다.[7] 그림에서와 같이 액침냉각은 칩과 냉각액이 직접 접촉하여 열전달을 하는 것이므로 냉각 성능이 우수하다.

그림 7은 전자 칩 표면에 펌프를 이용하여 액막을 형성한 다음, 표면에서 발생되는 작동 유체의 증발열에 의해서 냉각하는 방법을 나타낸 것이다.[8] 이 방법은 전자 칩 표면에서 발생되는 작동 유체의 증발잠열을 이용하기 때문에 칩 표면 온도를 균일하게 냉각할 수 있다는 장점이 있다.

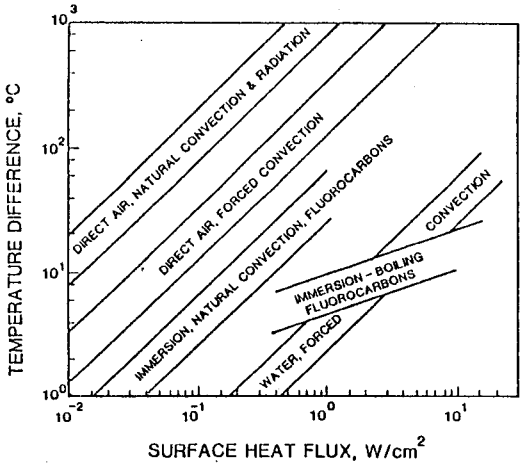
그림 8은 컴퓨터 칩 냉각용으로서 IBM 4381 에 적용한 Impingement 냉각 방법이다.[9] 36개의 칩으로 부터 발생되는 90W 의 열을, 칩 표면에 열



〈그림 7〉 유막(Falling Film)을 이용한 냉각 방법



〈그림 8〉 Impingement를 이용한 전자 냉각 방법



〈그림 9〉 열유속에 따른 열전달 형태

방출용 핀을 설치하여 이 핀에 고속의 공기 제트를 뿜어 줌으로 냉각을 촉진하는 냉각 방법이다.

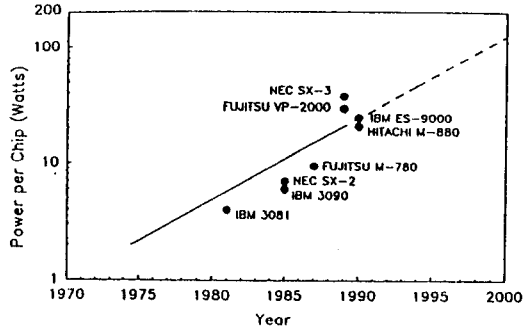
그 외에 유동장 내부에 전기장 또는 자기장을 걸어서 전열을 촉진시키는 방법이 있다. 이 방법의 개념은 전기장 또는 자기장에 의하여 열경계층을 밀어냄으로써 외부의 차가운 공기가 발열부에 가까이 닿게 하는 것이다.

그림 9 는 온도차와 이 경우 적절한 열전달 기법을 나타낸 것이다.[10] 즉 적은 온도차이에서 많은 열 유속을 발산시키기 위해서는 냉각 방법이 자연대류에서 Immersion-Boiling 등으로 바뀌어야 됨을 보여주고 있다. 그러나 각 열전달 기법은 부대장치가 필요하므로 전자기기의 특성에 맞추어 적절한 열전달기법을 채택하여야 한다.

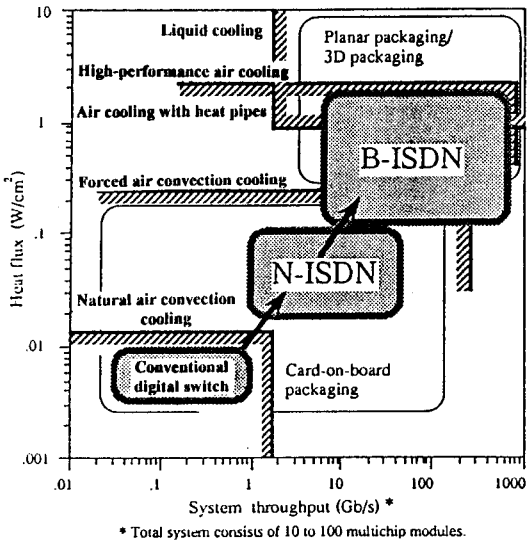
IV. 최근 전자기기 발전에 따른 냉각기법

그림 10은 대표적인 전자칩의 발열량을 나타낸다. 즉 80 년 초에 개발된 IBM 3081 의 경우 4W 정도였으나 90년도로 들어서면서 IBM ES-9000 의 경우 20W 이상으로 증가하고 있는 경향을 알 수 있다.[11] 그림 10 의 점선으로 부터 예상하듯이 전자칩의 발열량 증가는 지수형태로 증가할 추세이다.

그림 11은 최근 급격히 주목을 받는 통신시스템의 열유속에 따른 가능한 냉각방법을 나타낸것이다.[12] 협대역 종합 정보 통신망(N-ISDN)은 모듈의 열 유속이 100W/m² 내지 1,000W/m² 이다. 이 경우 공기를 이용한 자연 대류 냉각 방법이나 저 유속 강제대류 냉각 방법으로 냉각이 가능하다.



〈그림 10〉 칩당 발열량 증가 추세

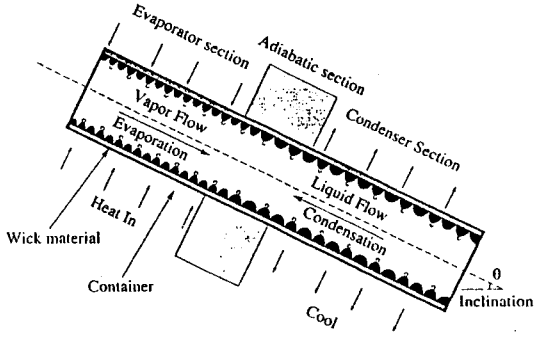


〈그림 11〉 통신 시스템에서 모듈의 열유속

하지만 화상 전송 등을 목표로 하고 있는 광대역 종합정보통신망(B-ISDN)의 경우는 처리율이 협대역 정보 통신망의 경우보다 10배 내지 100배가 큰 1,000Gbps 가 예상되고 열 유속은 20,000W/m²까지 달할것으로 예상된다. 따라서 새로운 Packing 방법과 냉각 방법이 요구된다.

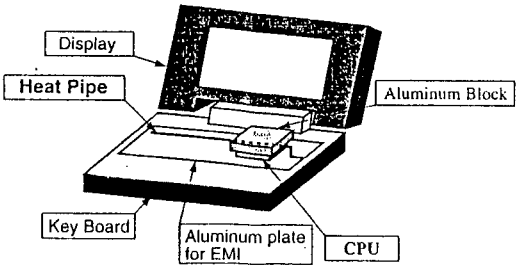
전자기기의 냉각은 단순히 발열량과 냉각성능 뿐아니라 전자기기의 packing 방법을 고려하여야만 한다. 최근 Packaging 방법은 회로의 집적도를 높여 회로선 간의 신호 전파 지연을 최소화 할 뿐 아니라 전자파 발산을 감소시킬 수 있기 때문에 MCM(Multi Chip Module) 방법을 채택하고 있다. 이와 같은 MCM방법을 사용하는 광대역 정보 통신망 교환 시스템은 모듈의 열 유속이 1,000W/m²에서 10,000W/m²로 증가하고 있다. 따라서 협대역 종합 정보 통신망 교환 시스템보다 열유속이 10배정도 높아져 냉각에 있어서 고성능 공기 냉각 방법이나 액체 냉각을 이용한 방법을 사용해야 한다. 더욱이 3차원 Packing 방법을 채택하게 될 차세대 종합정보통신망의 경우는 모듈의 열유속이 100,000 W/m²이 넘을 것으로 예상된다. 따라서 이 모듈에 대한 냉각 방법의 연구가 필요하다.

최근 전자분야 발전의 또하나의 동향은 소형화, 경량화이다. 예를 들면 과거 대형 컴퓨터의 용량과 버금가면서도 소형, 경량인 노트북 PC 의 출현이다. 이와 같은 소형, 경량화를 이루기 위하여 최근 다시 주목되는 냉각기술은 자연대류이다. 그러나 앞서 서술하였듯이 자연대류는 냉각성능이 극히 미미하므로 방열판으로 열전달면적이 넓혀주어야 한다. 그러나 넓은 방열판은 중량이 문제될 뿐 아니라 열원으로 부터 멀어질수록 온도가 떨어지므로 냉각효율이 저하된다. 이런 관점에서 노트북 PC 의 선두주자인 대만 및 일본에서는 Heat Pipe 를 냉각판 대용으로 사용하려는 연구가 활발하며 이미 제품이 선보이고 있다.

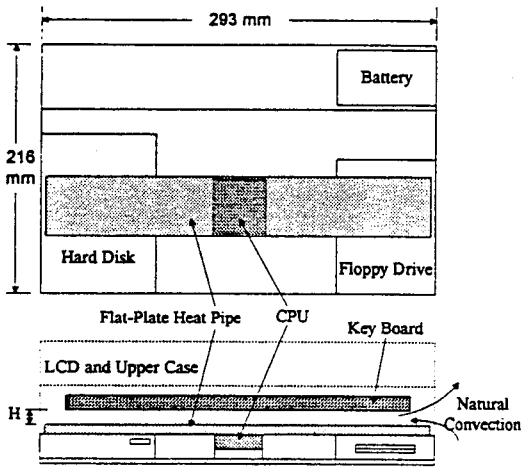


〈그림 12〉 히트 파이프 구조

히트 파이프는 그림 12와 같이 밀폐된 용기내 작동유체가 증발 및 응축을 통하여 열을 전달하는 열전달기기이다. 즉 증발부에서 흡수된 열이 작동유체를 증발시키고 이때 발생된 내부의 압력차로 인하여 증기는 단열부를 지나서 응축부로 이동하게 된다. 응축부에서는 외부로 열을 방출하면서 증기 상태의 작동 유체는 응축하게 된다. 이러한 일련의 과정을 지나면서 Heat Pipe 전체의 온도가 균일해질수 있다. 결국 Heat Pipe 는 증기의 증발-응축과정을 통하여 Heat Pipe 전체의 온도가 가열부나 냉각부에 관계없이 거의 균일하게 됨으로써 열효율 100%에 근접하는 방열판이 되게 된다. 그림 13은 히트 파이프를 이용하여 노트북 컴퓨터의 중앙 처리 장치(CPU)를 냉각한 경우의 개념도이다.[12] 즉 CPU 에서 발생한 열은 Heat Pipe 를 따라 외부로 방출하게 된다. 그림 14는 대만에서



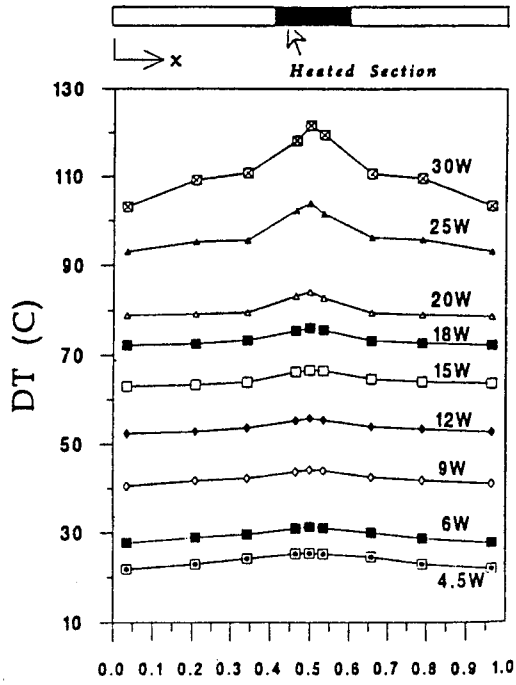
〈그림 13〉 히트 파이프를 이용한 노트북 PC 의 CPU 냉각법(일본)



〈그림 14〉 방열판으로 Heat Pipe 를 적용한 노트북 PC (대만)

개발한 Heat Pipe 가 장착된 노트북의 구조이다.[13] 즉 Heat Pipe 를 방열판의 형태로 제작하여 CPU 에 접착함으로써 자연대류를 이용한 냉각을 수행하는 것이다. 그림 15는 이때 Heat Pipe 의 온도분포를 나타낸 것이다. 여기서 온도차는 주변공기와 측정부위의 온도차로서 20W 의 발열량에서 주변공기와의 온도차는 약 75 ℃ 를 유지하고 Heat Pipe 의 축방향을 따라 온도분포가 3℃ 이내로 유지됨을 보여주고 있다. 표 2는 기존의 방열판과 Heat Pipe 를 이용한 노트북 PC 를 비교한 것이다.

알루미늄방열판의 경우 주변공기와 칩과의 온도차가 최대 56.2℃ 이나 Heat Pipe 를 사용하는 경우 52.8℃ 로 낮출수 있음을 보여주고 있다. 이 경우 사용된 칩은 Intel 486 DX2 CPU 이며 66MHz 이다. 이때 열발생량은 6W 이다.

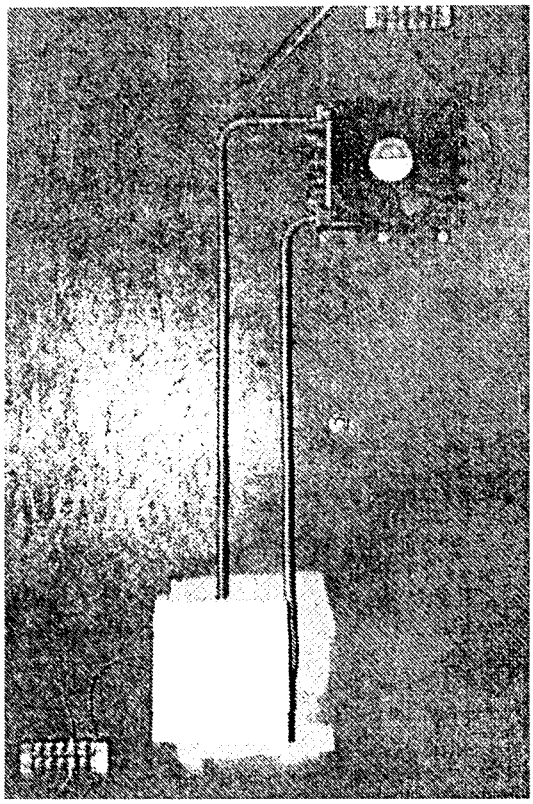


〈그림 15〉 Power Level 에 따른 알루미늄-아세톤 Heet Pipe 의 열적특성

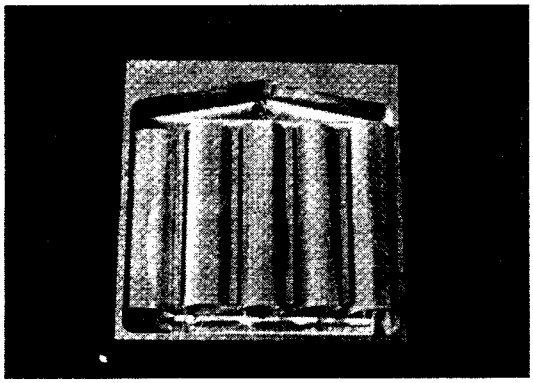
〈표 2〉 노트북 PC, NP-746(486 DX2-66 CPU)의 CPU온도강화에 관한 실험적 결과

Test Condition	H (mm)	DT (C)	Note
without heat pipe or aluminum plate	5.5	62.0	Fully cnclesed
	5.5	49.4	Partially opened
w/aluminum plate	1.5	56.2	Fully enclosed
	1.5	43.4	Partially opened
w/heat pipe	1.5	52.8	Fully enclosed
	1.5	41.9	Partially opened

국내에서도 히트 파이프를 이용한 전자기기의 냉각은 에너지기술연구소, KIST 등에서 수행되고 있다. 이[14] 등은 열 부하가 5.0W/cm^2 인 광대역 종합 정보 통신망 시스템에 사용할 히트 파이프에 관한 연구를 수행하였다. 그림 16은 이[14] 등이 제

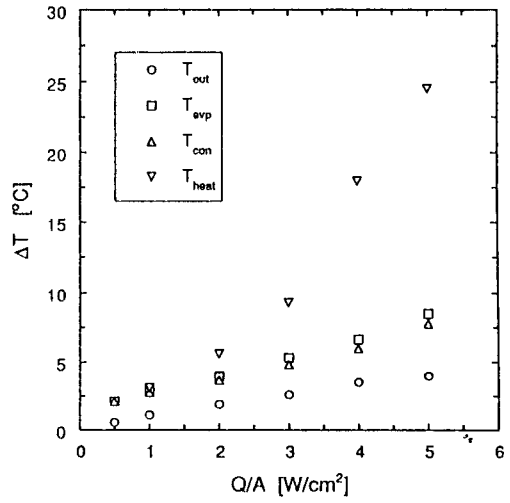


〈그림 16〉 Multi Chip 냉각용 분리형 히트 파이프 열교환기



〈그림 17〉 증발부와 위크 구조

작한 Multi Chip 냉각용 분리형 Heat Pipe 를 나타낸 것이다. 그림 17은 열전달을 증가시키고 증발부의 온도분포를 균일하게 하기 위하여 증발부



〈그림 18〉 열유속의 변화에 따른 온도상승

에 300Mesh/inch 의 위크를 넣은 증발기를 나타낸 것이다. 그림 18은 주위 온도가 23.0℃ 일 때 실험한 결과로서 단위 면적 당 칩에서 발생되는 열량 변화에 대해서 칩의 온도 상승을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 전자 칩에서 발생되는 열유속이 5.0W/cm² 일 때 주위 온도보다 25℃ 이내로 칩의 온도가 유지되는 것을 보여주고 있다.

V. 맺음말

전자 장치들이 소형화, 대용량화 그리고 고집적화 되어 감에 따라서 여기서 발생되는 열유속, 즉 단위면적당 발생열량도 이에 따라서 증가되고 있다. 앞서 서술한 바와 같이 냉각기술에는 냉각성능만을 따질 때는 다양한 기술등이 있다. 그러나 기기의 특성에 따라 Fan 의 소음이 민감한 영향을 미치기도 하고 특성상 Imersion Cooling 과 같은 특수한 냉각기법을 적용할 수 없는 것도 있다. 또한 노트북 컴퓨터와 같이 소형, 경량 무동력의 냉각기술이 요구되는 경우도 있다.

전자칩의 열방출경로에는 다양한 열전달 형태가 결합되고 이 중 가장 열저항을 크게 유발시키는 열

저항이 전체 온도상승을 주도한다. 그러나 그 열저항을 줄이기 위하여 열전달기구를 도입할 때 전체 열전달저항의 합은 오히려 증가할수도 있다. 따라서 전체 열전달 경로의 시각에서, 앞서 서술한 다양한 열전달 기법들을 결합하여야 한다. 이를 위하여서는 설계단계부터 전자전문가와 냉각전문가가 밀접한 토의를 거쳐 적절한 디자인을 채택하여야 한다.

참 고 문 헌

[1] R.E.Simons, "Thermal management of electronic package," Solid State Technology, Oct. 1983.

[2] T.Misumi and K.Kitamura, "Heat transfer enhancement of natural convection and development of high-performance heat transfer plate," JSME(Part B), Vol. 543, No. 57, 1991.

[3] A.D.Kraus, A.Bar-Cohen "Thermal analysis and control of electronic equipment," McGraw-Hill, NY, 1983.

[4] R.C.Chu and R.E.Simons, "Thermal management of large scale digital computers," Intl. J. for Hybrid Microelectronics, Vol.7, No.3, pp.35-43, Sep., 1984.

[5] R.D.Danielson, N.Krajewsi, and J.Brost, "Cooling a superfast computer," Electronic Packaging and Production, pp.44-45, Jul. 1986.

[6] D.Tuckerman, and F.Pease, "High performance heat sinking for VLSI," IEEE Electron Device Letters, Vol. EDL-2, No. 5, pp.126-129, 1981.

[7] N.G.Aakaul, R.C.Chu, and R.E.Simons, Liquid encapsulated air cooled module," U. S. Patent 3,741,292, Jun., 1973.

[8] I.A.Mudawar, T.A.Incropera, and F.P. Incropera, "Microelectronic cooling by fluorocarbon liquid films," Proceedings of the International Symposium on Cooling Technology for Electronic Equipment, pp.304-357, Honolulu, HI, Mar. 17-21, 1987.

[9] R.G.Biskeborn, J.L.Horvath, and E.B. Hultmark, "Integral cap heat sink assembly for the IBM 4381 processor," Proc. Fourth Annual Int. Elec. Packing Conf., pp.468-474, 1984.

[10] G.P. Peterson, A. Ortega, " Thermal control of electronic equipment and devices," Advanced Heat Transfer Vol. 20, pp. 184.

[11] T.Kishimoto, Thermal management of multichip modules for telecom applications, Hybrids, Vol.6, No.4, pp.20-26, 1990.

[12] "Fujikura's micro heat pipes for cooling CPU," Fujikura Ltd., 1996.

[13] J.Y. Sun C.Y.Wang," The development of flat plate heat pipes for electronic cooling", Proc. of 4th International Heat Pipe Symposium, pp.121~131, 1994.

[14] Y.P.Lee, S.Y. Yoon, et al., "The R&D of heat pipe exchanger for multi chip cooling," KIST Report, 1995.

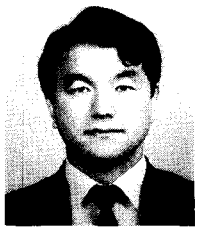
저 자 소 개

李 倫 杓

1957年 3月 19日生
1981年 2月 서울대 기계공학과 졸업 학사
1985年 2月 서울대 대학원 기계공학과 석사
1989年 2月 서울대 대학원 기계공학과 박사(상변화 전공)

1981年～1982年 군복무
1985年 3月～1989年 3月 서울대 공과대학 정밀계측실 조교
1989年 5月～1990年 5月 캐나다 오타와대 Post Doc
1990年 5月～현재 한국과학기술연구원 기전연구부

주관심분야 : 상변화 응용기술, Heat Pipe 응용기술



尹 聖 永

1963年 2月 27日生
1986年 영남대학교 기계공학(학사)
1989年 한양대학교 기계공학(석사)

1989年 8月～1996年 4月 한국과학기술연구원, 기전 연구부