

# 전자기기에서의 대량열방출의 처리\*

李 在 憲 譯

〈漢陽大學校 機械工學科 教授〉

## 1. 머리 말

100개의 소자가 들어있는 IBM의 열전도 모듈(Thermal Conduction Module, TCM) 하나를 1950년대의 진공관기술로 만들자면 “엠파이어 스테이트”빌딩 만한 덩치가 되어야 할 것이고 또한 이 진공관들을 작동시키는데 필요한 전력은 TCM의 580W에 비하면 엄청난 것이다. 어떻게 생각하면 컴퓨터내부의 열량관리가 과거에 비하여 오히려 간단하지 않는가 할지 모르지만 실제 요즘의 엔지니어들은 전자기기의 냉각때문에 심각한 도전을 받고 있다고 할 수 있다. 예를들어 보자. 54×49cm의 Fujitsu 시스템은 336개의 소자(chip)로 구성되어 있는데 각 소자가 10W를 소비하며 전체적으로 3kW 이상이 된다.

컴퓨터에서는 소형전자장치가 그 기능상으로 보아서 한층 조밀하게 설계되므로 이의 냉각이 큰 문제이다. VLSI(Very Large Scale Integration)에서의 선간 폭은 1μm보다 작아지고 있으

며 앞으로는 1,000 Å 정도로 축소될 전망이다.

이러한 축소에 따라 직접회로의 규모 또한 증대한다. 1958년도의 회로 한개당 한개의 트랜지스터에서 1960년 초기의 소자 한개당 100개 요소(이 요소는 트랜지스터, 다이오드, 저항 또는 콘덴서들을 뜻함)를 포함하게 되었고 1980년에는 이 요소의 수가 100,000개로 증가되었다. 1982년에는 소자밀도(chip-gate density)로 보아서 HP사의 32비트 CPU 소자는 450,000 요소, TI사의 Static RAM은 460,000 요소로 증가되었다. 지난 25년동안 집적회로 구성요소는 TTL(Transistor/Transistor Logic)에서 ECL(Emitter Coupled Logic), NMOS(Negative Metal-Oxide Semiconductors), 가장 최근의 CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)등으로 발전하였으며 이에 따라 회로에 고용되는 요소의 수는 5승으로 증가되었다.

소자가 소모하는 전력은 그 소자 제작기술이 현 단계 소자 고유의 한계에 접근됨에 따라 증가되고 다음 단계의 소자 개발이 이루어짐에 따라 감소된다. 그렇지만 장기적인 안목으로 볼때 소자를 구성하는 각 게이트(gate)의 전력소모의 감소율 보다 소자를 구성하는 게이트 수효가 많아지는 증가율이 엄청나기 때문에 여차피 소자가 소모하는 전력은 증가되기 마련이다.

결과적으로 보면 하나의 소자에서 제거되어야 될 열량은 1960년대 초기의 0.1~0.3W(SSI 소자)로부터 오늘날 보통 1~3W(LSI ECL 소자 및

\* 다음 글은 최근 급속히 성장하고 있는 국내 전자기기 및 컴퓨터 연관 산업체에서 필요한 냉각시스템 기술을 소개하기 위하여 미국 기계학회지 “Mechanical Engineering” (1986년 3월호 pp.36~42)에 발표된 S. Oktay(IBM), R. Hannemann(Digital Equipment Co.)와 A. Bar-Cohen(CDC)의 「High Heat from a Small Package」를 번역한 것이다.

◆ 資 料

VLSI CMOS 소자 및 크기는 10 W 이상(VLSI ECL 소자)으로 증가되었다. 같은 20년 동안 논리소자(logic chip)의 크기는 기껏해야 1965년의 1 mm에서 1975년의 3 mm, 1985년의 4~8 mm 정도만 확장되었다. 그러므로 지난 20년동안에 2승크기로 증가된 전력소모는 단위면적당의 요소열량 플럭스(chip-heat flux)로 따지면  $10^6 \text{ W/m}^2$ 이나 된다고 할 수 있다. 이러한 열량부하는 대기권으로 재돌입하는 우주선이 받는 부하보다 크다. 예를들면 5 mm 평방의 소자에서 10 W의 전력소모는  $5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 의 열량 플럭스를 뜻하며 이는 태양 표면에서의 플럭스에 비하여 20분의 1 정도나 된다. 태양표면온도가  $6000^\circ\text{C}$  이상되는 것을 감안하면 소자표면온도가  $100^\circ\text{C}$  정도로 되도록 설계한다는 것이 얼마나 어려운 일인지 짐작될 수 있을 것이다<sup>(1,2)</sup>(그림 1 참조).

이런 정도의 열량 플럭스를 가지는 소자를 실내공기에 방치하는 경우 복사효과를 무시할 경우 자연대류만이 존재하면 이론상 소자표면온도는  $6000^\circ\text{C}$ 를 넘을 것이고 일반기체의 강제대류가 있는 경우  $1000^\circ\text{C}$  정도 액체의 강제대류가 가능한 경우는  $50^\circ\text{C}$  정도가 될 것이다. 계속하

여 소자에 압착되는 구리봉(copper stud)을 통하여 열전도가 가능하면  $30^\circ\text{C}$  정도로 될 수 있을 것이다. 이때에는 구리봉과 소자와의 접촉이 완벽하여야 하며 만약 1 mm 간격을 두고 접촉해 있다면 소자 표면온도가  $600^\circ\text{C}$ 나 될 것이다. 다른 방법 즉 상변화를 동반하는 담금냉각(immersion cooling)의 경우 물속이라면  $30^\circ\text{C}$  정도 혹은 탄화불소속에서 라면  $45^\circ\text{C}$  정도가 될 수 있을 것이다.

열관계 엔지니어들은 열전달기구 즉 자연대류, 강제대류, 전도 및 상변화등의 응용을 이용하여 높은 열량 플럭스를 제거시켜야 하는 문제와 더불어 소자의 온도를 낮게 유지시켜야 하는 문제를 모두 해결하여야 할 것이다. 소자의 작동온도는 이들 고유의 성능뿐 아니라 신뢰도(reliability)를 유지시키는 관전이다. 또한 소자활용의 실패율은 작동온도  $20^\circ\text{C}$  감소에 따라 절반으로 낮아질수 있다. 따라서 계속되는 연구에 의하여 작구성소자의 평균작동온도는 계속 낮아질 것이며 아울러 이 온도의 변동도 단 몇도정도로 줄어든 전망이다.

2. 열저항개념

장치열저항(device thermal resistance)이라는 정의는 여러가지 냉각방법의 상대적인 비교를 위하여 이용된다. 장치열저항은 내부열저항과 외부열저항으로 나누어질 수 있다. 내부열저항은 일반적으로 열량이 발생하는 부위로 부터 어떤 기준위치까지 범위의 온도상승을 소자전체의 열량소비량으로 나눈 량으로 정의된다. 비슷한 방법으로 외부열저항은 앞서의 기준위치에서부터 소자케이스와 인접된 외기 혹은 외부유체까지 범위의 온도상승을 소자전체의 열량소비량으로 나눈 량이다. 간단히 생각하면 하나의 집적회로 몸체는 전기저항회로망과 유사하다<sup>(3)</sup>.

전형적인 소자몸체의 열저항 구성을 그림 2에서 보여준다. 반도체 소자의 얇은 막에서의 발열량은 주위의 보호체를 통해 외기에 의하여 냉각되는 열침(heat sink)으로 전도된다. 이러한

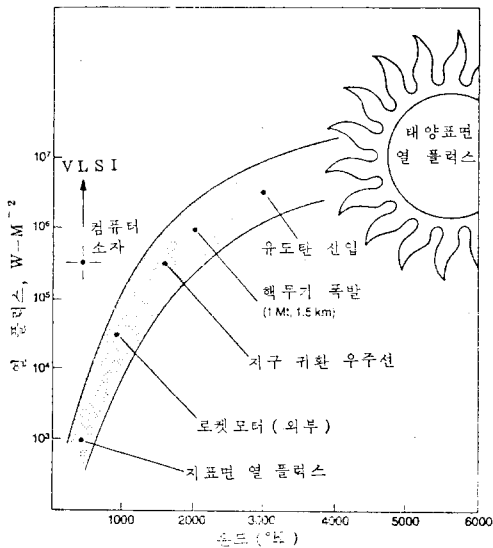


그림 1 작동온도 및 열 플럭스의 비교

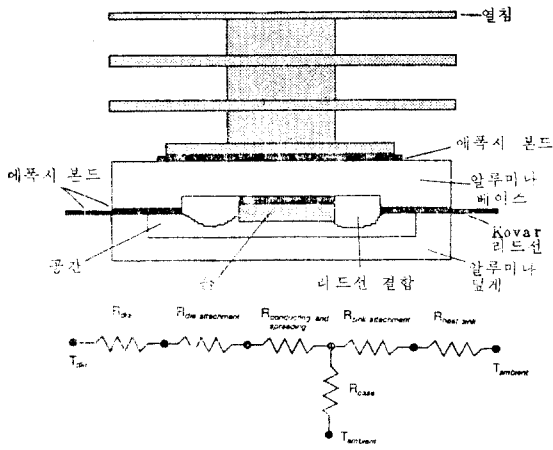


그림 2 전형적인 반도체 패키지의 구성 및 1차원 열저항 회로

속과 소자의 전력으로 표시되는 최대열강도(heat intensity)라는 양이 중요시 되며 이 양들은 채용되는 냉각방법과 연관된다. 그림 3의 뜻은 예를들어 소자의 최대열량소비가  $4\text{ W}$  이고 평균열유속이  $6.2 \times 10^2\text{ W/m}^2$  정도라면 개량형 강제대류공기냉각(advanced forced-air cooling) 방법을 채용하는 것이 좋다는 뜻이다. 그림에서 수직선의 뜻은 평균열유속이 어느 한계 이하이면 소자의 최대전력소비가 상당히 증가되어도 회로기판을 가로지르는 냉각제의 온도상승이 적정수준(여기서는  $20^\circ\text{C}$ ) 이내에 속할 수 있다는 것이다. 여기서 평균열유속의 한계는 직렬식 냉각보다는 병렬식 냉각방법을 채용할때 더욱 커질 수 있다.

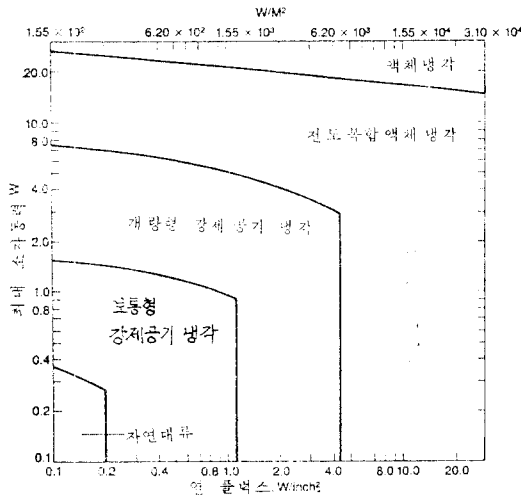


그림 3 각종 냉각방법의 적용

간단한 구조에서 마저도 간과할 수 없는 열량의 누설경로가 있을 수 있다. 또한 전도혹은 접촉저항에 의한 경계열저항이 중요시 될때도 있다. 많은 경우에 몸체에서 냉각제 사이의 저항은 전체 열저항의 절반이상이다.

소형전자장치는 그림 3에서 보는 바와 같은 여러가지 방법으로 냉각되는 열침과 연결되어 있다. 대부분 컴퓨터회로는 전력소모요소들이 평면적으로 배열된 것이 쌓여진 구조를 가지며 전체 소비전력을 전체배열면적으로 나눈 평균열유

### 3. 보급형 성능의 전자기기 냉각

Desk-top 혹은 Mini 혹은 Supermicro 등의 이름이 붙은 컴퓨터는 저렴한 가격으로 상당한 성능을 표방하고 있다. 이러한 보급형장비에 대한 냉각계통은 공학적으로 재미있는 과제이다. 이를 위하여서는 아래 4가지 사항을 고려하여야 한다.

- (1) 장비의 온도가 작동가능 범위로 낮게 유지되어야 한다.
- (2) 여러가지 주위환경 조건하에서도 신뢰할 만한 작동이 되어야 한다.
- (3) 장치의 온도변동폭이 어느 한계내에 머물러야 한다.
- (4) 소음이 적절히 규제되어야 한다.

이상적으로 생각하면 자연대류에 의한 냉각방법이 조용하고 신뢰성이 높기 때문에 보급형 장비에서는 이 방법이 가장 솔깃하다. 그러나 이 방법은 그림 3에서 보는 바와 같이 열량 제거능력이 한정되며 다른 성능을 고려하다 보면 자연대류를 방해하는 디자인이 될 수도 있다. 사무용 혹은 가정용 장비는 소형 수평케이스 내에 들어 있을수도 있다. 자연대류 냉각에 가장 효과적이기는 수직으로 배열된 발열소자의 구성일 것이다. 이상적이 아니거나 유동장애물이 있는

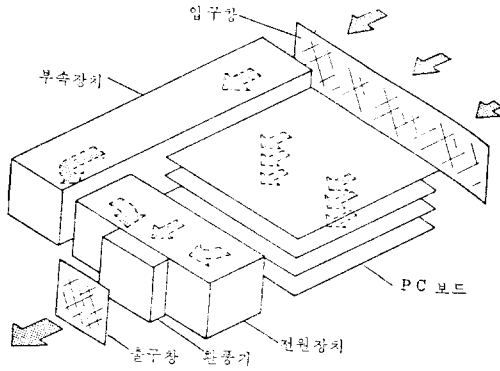


그림 4 퍼스날 컴퓨터에서의 강제공기 냉각

구조 내에서의 자연대류 유동 및 냉각율의 예측은 아직 어려운 문제에 속한다.

퍼스날 컴퓨터(PC:Personal Computer)나 슈퍼 미니 컴퓨터(super-minicomputer)에서는 강제대류 냉각방법이 도입되고 있으며 자연통풍과 비슷하게 공기유동경로 및 압력강하정도가 그리 쉽게 계산되진 못하고 있다. 그림 4에는 보편적인 PC의 내부를 공기 유동통로와 함께 보여 준다. 여기서 온도에 민감한 부분은 공기유동이 도달되는 적당한 위치에 있어야 한다.

요즘의 반도체기술 발달에 따라 대형컴퓨터와 슈퍼 미니컴퓨터 사이의 구별이 모호해지고 있다. 가장 최근의 DEC VAX 8600 기종과 같은 슈퍼 미니컴퓨터가 강제대류 냉각방법을 채용하는 한계라고 볼 수 있으며 아마도 개발될 이런 종류의 컴퓨터에는 요즘의 대형컴퓨터나 초대형 컴퓨터에서 채용하고 있는 냉풍냉각이나 전도조합액체냉각(conduction-coupled liquid cooling)방법이 도입되어야 할 것이다.

#### 4. 고성능 전자기기의 냉각

고성능 기재로서의 컴퓨터능력은 일초에 몇백만 명령을 수행할 수 있는가 하는 MIPS 로써 표시된다. 그림 5에서 보는 바와 같이 소자당 소모전력의 증가는 소모전력당의 MIPS 증가를 동반한다. 단위 MIPS 당의 전력소모가 감소되고 있긴 하지만 MIPS 자체가 계속 증가되고 있으므

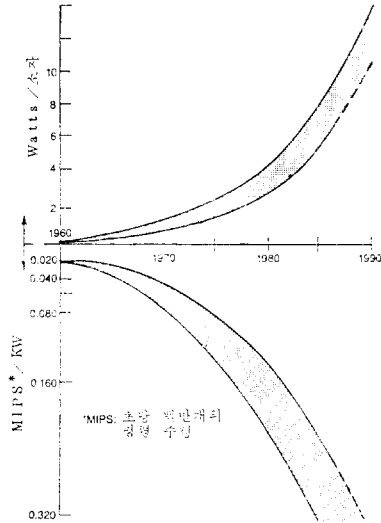


그림 5 MIPS와 소비전력간의 관계

로 소자당 소모전력은 크게 증가되는 추세이다. 고성능전자기기에서의 냉각방법은 최신 복수 소자모듈(multichip module)에서 보는 바와 같이 높은 열유속을 가지는 구성물들이 밀집되면서 더욱 복잡하게 되었다<sup>(2)</sup>. 이의 해결을 위하여서는 당연히 내부열원에서부터 최종열침까지의 열저항을 감소시켜야 할 것이다. 보급형 전자기기에서의 열저항은 100°C/W 정도인 반면 고성능 전자기기에서는 10°C/W 정도밖에 되지 않는다.

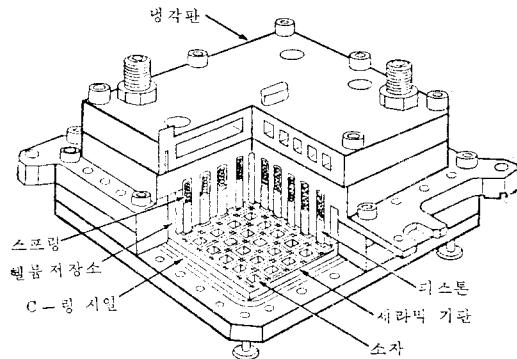


그림 6 IBM 3081 열전도 모듈

● IBM 열전도 모듈(Thermal Conduction Module, TCM)

IBM 3081 TCM에서는 내부열저항을 줄이기 위하여 그림 6에서 보는 바와 같이 접촉표면사이의 열전달 매질로서 헬륨가스를 사용하고 있다. 헬륨가스 분위기내에서 스프링이 부착된 알루미늄피스톤은 각각의 소자에서 발생된 열량을 수냉식 냉각판으로 전달시킨다. 헬륨가스는 모듈내부에 밀봉되어 있으며 냉각판은 피스톤이 장착된 모듈케이스에 나사로 죄어져 있다<sup>(4)</sup>. 이 IBM 3081은 90×90 mm 세라믹받침대 위에서 납완충제(solder-bumped)에 의해 부착된 최대 133개의 소자를 보유하고 있다. 4.7×4.7 mm 되는 각각의 소자는 최대 4 W의 열량을 소모하고 전체 모듈로서는 300 W를 소모한다. 만약 헬륨가스대신 공기가 사용된다면 각소자의 전력소모는 현재의 절반이하로 제한될 것이다. TCM의 성능은 하나의 소자로부터의 열전달 경로에 따르는 열저항을 생각해 봄으로써 설명될 수 있을 것이다. 열원이 납완충제쪽에 있으므로 피스톤으로의 열유동은 대략 1.15°C/W의 열전도 저항을 가진다. 피스톤과 소자가 접촉되어 있긴 하지만 이 접촉면 사이에 헬륨가스가 차있으며 이에 따른 접촉저항으로 3°C/W의 저항이 발생된다. 알루미늄피스톤과 모듈의 실린더 사이에 있는 헬륨가스 공극을 통과하는 열유동은 3.2°C/W의 열저항을 추가시킨다. 마지막으로 모듈케이스와 수냉 냉각판 사이의 열전도에 따르는 1.6°C/W의 열저항이 발생된다. 이로부터 내부저항의 50% 즉 4.2°C/W는 2종류의 헬륨가스공극의 열전도저항에서 기인된다고 할수 있으며 따라서 복수 소자모듈에서는 접촉면에서의 열저항을 제어하는 것이 매우 중요하다.

● 미쓰비시 고성능 열전도 모듈(Mitsubishi High Thermal Conduction Module)

그림 7의 수소가스를 이용한 미쓰비시모듈을 보자. 이 모듈에서 사용되는 LSI 소자에서의 열전달은 낮은 열저항을 가지게 하기 위하여 소자의 상부와 하부 양쪽으로의 열유동경로를

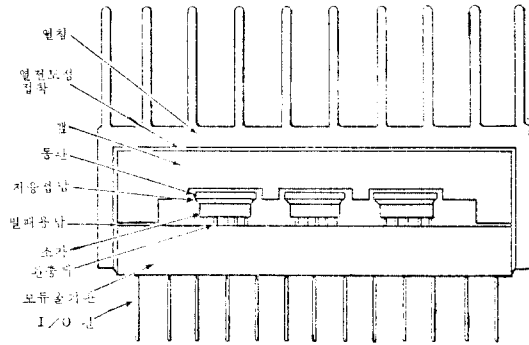


그림 7 미쓰비시 고성능 열전도 모듈

이용한다. 전력소모가 각각 4 W인 9개의 8×8 mm 소자는 납완충층을 사이로 하부세라믹기판에 얹혀하고 13×13×0.25 mm인 상부구리판에 납땜된다. 조립과정중에 이 구리판은 소자를 씌우고 있는 세라믹캡(ceramic cap)에 압착되게 된다. 모듈내부에 수소가스가 채워지고 조립된 모듈은 남이 녹을 정도로 가열된다 이때 모듈이 밀폐되며 아울러 구리열분배판(copper heat spreader)도 밀착된다<sup>(5)</sup>. 모듈을 냉각시킨 후에 수직핀이 부착된 열침이 모듈 상부에 예폭시로 접착된다. 이러한 가열과 냉각과정을 통하면 구리판과 세라믹캡 사이의 공극은 30 마이크론 정도가 된다. 이 모듈의 열전달해석에 의하면 6 m/s의 외부공기 유동의 경우에 약 7°C/W의 총열저항을 나타내었으며 이의 절반정도는 내부열저항인 것으로 밝혀졌다. 계속된 실험에 의하면 압축수소가스가 모듈내부에 채워졌을때 구리판과 세라믹캡사이의 열저항은 0.5°C/W 이하로 나타났다.

● IBM 4381 공냉식 모듈

그림 8에는 소자와 모듈케이스 사이에 한층의 온도풀(thermal paste)을 사용하는 IBM 4381 공냉식 모듈을 보여준다. 이 모듈에는 64 mm 정방형이고 높이가 대략 40 mm되며 6×6 배열의 소자가 내장된다. 4.7×4.7 mm의 소자는 다층세라믹판의 납완충제위에 놓여 있으며 소자위의 세라믹캡과는 0.1~0.35 mm 두께의 온도풀

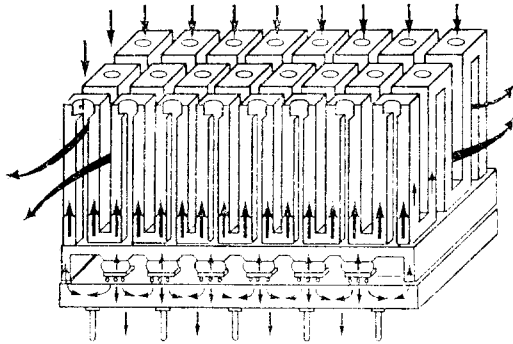


그림 8 IBM 4381 풍냉식 모듈의 단면

의 층이 사용되어 분리된다. 세라믹층은 1.5mm 간격의 밀봉된 밴드 아래에 납-주석땀이 되어 있으며 이 밴드 위에는 25mm 높이의 중공알루미늄핀이 설치되어 있다. 이 핀은 거의 수직인 풍동에서 배출되는 냉각공기에 의하여 냉각된다. 이 열유동계는 20mm 수두 압력으로 초당 211 리터의 공기유량이 소요되는데 이는 소자 한 개당 3.8W 혹은 모듈을 전체적으로 90W 이상의 열량소모가 있는 상황에서 모든 소자가 정격 온도 90°C 이하로 유지되게 한다. 따라서 IBM 4381 모듈에는 소자-공기 간의 열저항이 17°C/W 정도임을 알수 있으며 이량은 내부 및 외부열저항으로 2등분된다<sup>(6)</sup>.

● 히다찌 실리콘카바이드 RAM 모듈을

지금까지의 예에서는 소자의외곽에 여러가지 불

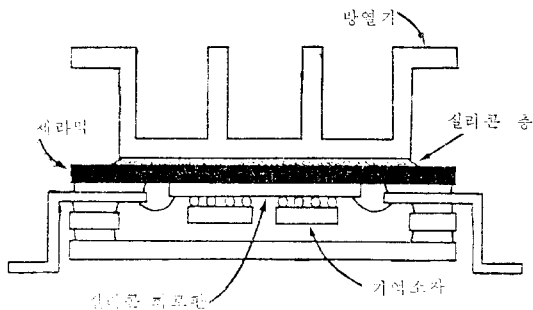


그림 9 히다찌 SiC RAM 모듈을

질을 접촉하여 효과적인 냉각을 시도하였으나 히다찌의 엔지니어들은 그림 9에서 보는 바와 같이 열전도율이 알루미늄의 14배 (270 W/mK)나 되는 실리콘카바이드(SiC)기판을 이용하여 내부 저항을 감소시키고자 하였다. SiC 기판은 금-주석으로 도포된 몇개의 실리콘기판을 달고 있으며 각 실리콘 기판에는 1.9×4mm의 납완충된 소자가 부착되어 있다. 1W 소자에서 발생된 열량은 77개의 납완충체(이중 52개는 단지 냉각기능만 있음)를 통하여 실리콘기판으로 전달하고 이어서 낮은 열저항을 가지는 금-주석 도포를 통하여 SiC 기판으로 전달된다. 4개의 수직핀을 가진 알루미늄 열침은 열강화된 실리콘 고무에 의하여 SiC 기판에 부착되어 있으며 이 열침은 3m/s로 유동하는 주위공기로 열을 전달시킨다. 이 모델의 열저항은 0.025°C/W이다<sup>(7)</sup>.

● NEC SX 액체냉각 모듈을

액체냉각법을 이용한 NEC 회사의 최신 슈퍼 컴퓨터의 각 모듈은 250W의 전력을 소모한다. 그림 10에서 보는 바와 같이 논리소자와 RAM 소자들은 알루미늄-폴리마이드제품의 다층세라믹기판위에 납완충되어 얹혀 있다. 6×6열의 소자에서 발생된 각각의 열량은 가변금속주(adjustable metal stud)에 의하여 수냉식 냉각판으로 전달된다. 각 소자의 발생열량은 5W 정도이다. 내부열저항은 금속주와 소자가 들어 있는 소자주머니(chip carrier) 사이에 존재하는

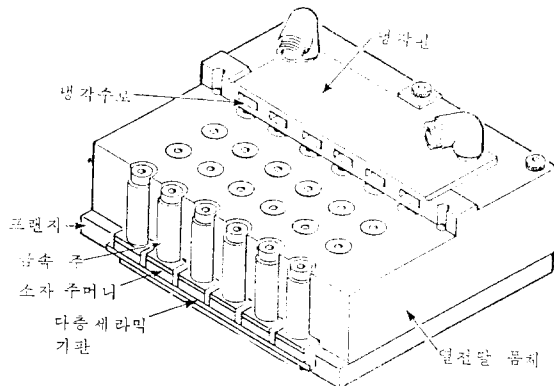


그림 10 NEC SX 액체냉각 모듈을

간격을 작게 함으로써 최소화될 수 있다. 열전달물체(heat transfer block)에 뚫린 구멍에 있는 금속주는 소자주머니와 미소간격접촉을 유지하도록 되어 있으며 일차조정후에 몸체에 고정시킨다. 이어서 몸체를 소자주머니와 분리 시키고 온도도포물(thermal compound)을 소자주머니의 갭에 바르고 나서 재조립한다. 냉각판은 몸체에 볼트이음되며 액체 유출입구를 냉각판에 부착시킨다<sup>(6)</sup>.

이 제품에 관한 정확한 실험결과가 발표되지 않았지만 대충 소자와 냉각수사이의 총열저항은 5°C/W이다. 비교적 낮은 이 값은 내부 및 외부 열저항이 중요한 열적인 문제 즉 접촉 및 공극열저항 그리고 재질과 열전달형식을 주의깊게 고려함으로써 크게 줄어들 수 있다는 사실을 증명하는 것이다.

액체냉각이라는 말이 나온 김에, Clay 연구소에서 Cray-2 슈퍼컴퓨터의 냉각을 위하여 담금냉각(immersion cooling)방법을 도입하였다는 것을 지적하고 싶다. 이 경우 각 구성물은 저용점, 불활성, 전기부도체인 액체에 직접 담그어진다. 침수냉각방법을 도입한 Cray-의 연구진들은 고성능 3차원 냉각회로 모듈을 이용하였다<sup>(9)</sup>.

### 5. 냉각기술의 미래를 위한 제언

한층높은 MIPS율과 이에 부수되는 소자 및 장치로 부터 높은 열플럭스를 가지는 다음 세대의 컴퓨터는 새로운 어려움을 표출시킬 것이다. 비록 새로운 이론이 요구되는 것은 아니지만 몇몇 열전달분야에 관한 기초적인 연구가 요구된다. 이를테면 실리콘소자와 같이 고도로 연마된 표면에서의 비등 현상 같은 것은 좀 더 연구되어야 할 과제이다. 또한 전자기기의 냉각을 위하여 응축열전달과 저온열전달 분야도 더 많은 연구가 필요하다. 예를 들면 갈륨-비소 FET(Gallium-Arsenide Field-Effect Transistor) 같은 종류는 거의 0°C에 가까운 작동온도를 요구하고 있다.

열접촉저항의 중요성은 압력변화에 따르는 비

탄성접촉영역의 이해를 요구한다. 더불어 비등방성 비균일물질의 열전도 상관관계에 관한 연구는 전자기기 냉각계통 설계에 도움을 줄 수 있을 것이다.

보급형 기기에서의 전력소모가 증가 될수록 열침등과 같은 확장표면(extended surface)의 이용은 더욱 일반화 될 것이다. 현재 이러한 문제의 전도문제부분을 해석할 수 있는 방법이 있긴 하지만 공기층의 열전달계수를 결정하는 방법은 아직 찾기 힘들다. 그러므로 좀더 향상된 해석방법과 시뮬레이션이 요구된다.

일반적인 해석프로그램(FEM 또는 FDM)은 복잡하고 난해하기 때문에 약간 쉬운 프로그램 즉 전도뿐 아니라 대류와 비등현상도 모두 해결할 수 있는 간편한 프로그램이 필요하다. 자연대류 및 강제대류에서의 정확한 공기유동해석 프로그램들은 전자기기에 볼 수 있는 복잡한 조건들을 다룰 수 있어야 될 것이며 광범위하게 확장된 기본자료와 상관관계는 유동의 속도, 압력 강하 및 열전달계수를 예측하는데 도움을 줄 수도 있을 것이다.

마지막으로 새로운 실험기술들이 요구된다. 즉 초저속유동, 열전달계수의 직접측정, 반도체부품 온도의 현장측정 그리고 적외선 혹은 광학적 방법에 의한 유동측정등을 위한 기술개발이 절실히 요구된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Oktay, S., "Electronic Package Cooling", Second Annual International Electronics Packaging Conference, San Diego, Calif., Nov. 15~17, 1982
- (2) Bar-Cohen, A., "Thermal Management of Air-and Liquid-cooled Multichip Modules", 23rd ASME/AIChE Heat Transfer Conference, Denver, Colorado, Aug. 4~7, 1985
- (3) Hannemann, R.J., "Microelectronic Device Thermal Resistance", *ISHM Technical Monograph No. 6984-003*, International Soc-

