

# 고집적 전자회로의 냉각기술



**윤재호**  
(열공학 연구실 선임연구원)

- '78.2 서울대학교 공과대학 기계공학과 졸업
- '80.2 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
- '80.3-'83.6 삼성중공업(주) 설계1실 근무(과장대리)
- '86.4-'90.3 일본 동경공대 기계공학과(박사)
- '83.7-현재 한국기계연구소 선임연구원



**심성훈**  
(열공학 연구실 선임연구원)

- '85.2 부산대학교 공과대학 기계설계학과 졸업
- '88.2 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
- '88.3-현재 한국기계연구소 선임연구원

## 1. 서론

1958년 회로당 1개의 트랜지스터를 사용하는 것으로부터 진행된 온 반도체의 집적화는 현재 1개의 칩당 약 100만개의 요소를 갖는 초고집적화가 이루어지고 있다. 이러한 집적화는 매 3년마다 4배의 속도로 증가를 계속하고 있으며 서기 2000년에는 현재의 1000배의 기억용량을 갖는 1G 비트 DRAM(Dynamic Random Access Memory)의 생산이 현실화 될 전망이다 [1].

이러한 반도체의 고집적화는 전자장치의 고속화, 경량화 및 소형화를 가능하게 하는 반면, 각요소로부터 발생하는 열을 매우 크게 만든다. 한 예로 5mm×5mm의 VLSI칩으로부터 10W의 열이 발생될 경우, 열유속의 크기는  $5 \times 10^6 \text{W/m}^2$ 가 되며 그림 2에서 보듯이 이것은 로켓트가 대기권에 재돌입할 때의 열부하와 같은 크기이며, 태양표면에서의 열유속의 20분의 1 정도에 해당하는 매우 큰 값이다 [2]. 더우기 열공학적 측면에서 볼 때 그림 2에서 보듯이 열유속은 매우 큰 값을 나타내는 반면, 칩의 최고허용 온도는 100°C 정도의 낮은 온도로 유지돼야 하므로 그 어떤 열기기보다 극히 제한된 조건에서의 열적제어가 요구된다.

이와같이 각 요소로부터 발생하는 막대한 열이 효율적으로 제거되지 못할 경우, 전자부품이 작동온도가 상승하게 되며 그 결과, 부품의 고장률이 증가하고 수명이 짧아지며 안정된 성능을 발휘할 수 없게 된다.

따라서 미국, 일본등을 비롯한 선진국에서는 고밀도 집적회로로 부터 발생하는 열을 제거할 수 있는 다양한 장치 및 기술을 연구·개발하여

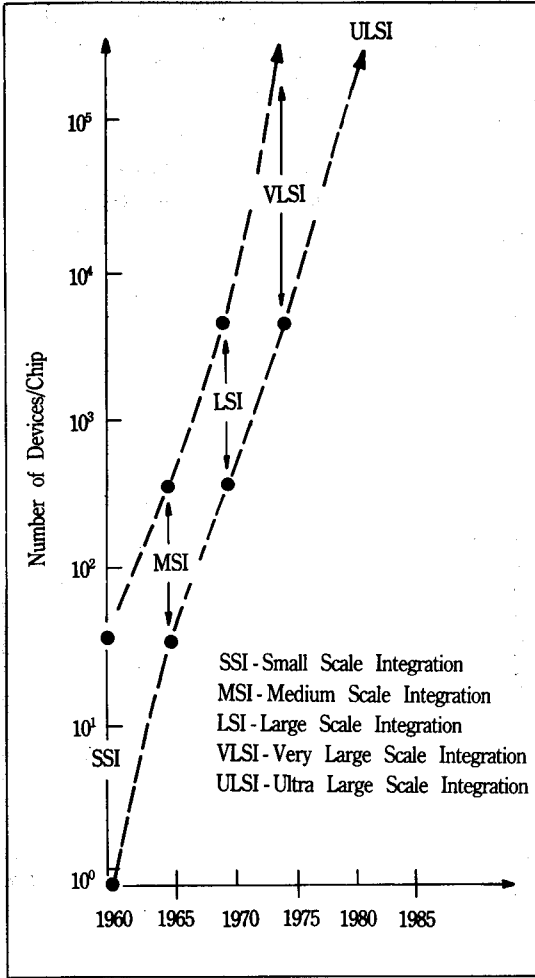


그림 1) 칩 1개당의 요소수 증가 추이

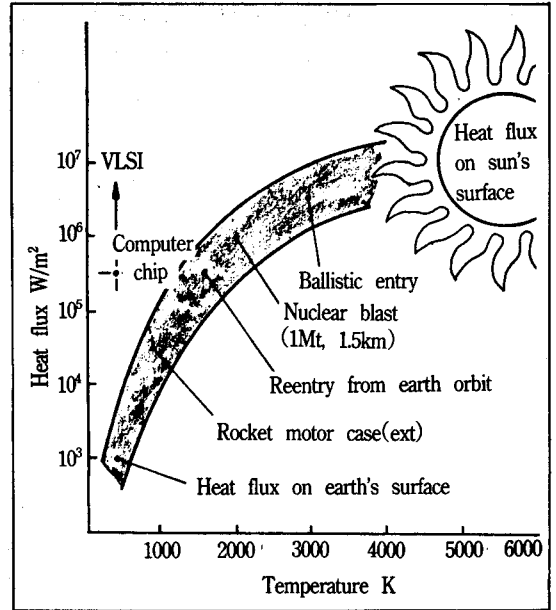


그림 2) VLSI칩에 대한 열유속 및 온도

장치의 소형·고성능화가 성공적으로 이루어져 왔으나 방열밀도의 증대에 따른 냉각기술의 개발없이는 더 이상의 고집적화는 기대 할 수 없는 상황에 이르렀다.

이와같은 상황하에서 금후 진행될 전자회로의 고집적화에 따른 Bottleneck(장애)는 미세가공기술 보다는 오히려 고집적 전자회로의 냉각문제가 될 것으로 예상되는 만큼, 전자공학과 기계공학과와의 경계영역의 문제인 고집적 전자회로의 냉각기술에 관한 연구는 그 어느때보다도 강하게 요구된다고 하겠다.

## 2. 전자부품의 고장률과 신뢰도

전자부품에 대한 열적설계의 목적은 크게 2가지로 나눌수 있다. 첫째로 열에 의한 부품의 파괴적 손상을 방지하는 것이다. 여기서 파괴적손상이란 직접적으로 열에 의해 유발된 특정요소의 전자적 기능의 완전상실을 뜻한다. 둘째로 적정의 작동 온도를 유지시킴으로써 시스템내의 각각의 요소의 신뢰도를 달성하는 것이다.

왔다. 또한 국내 전자업체도 국제 경쟁력을 갖기 위해서는 모방제작단계에서 벗어나 기본 설계 및 제작단계로 전환해야 하며 독자적인 고집적 전자부품의 개발을 위해서는 효율적인 냉각기술 개발이 선행되어야 할 것이다.

이제 전자공학 기술은 전자공학만의 문제가 아니며 기계, 재료 및 생산과 같은 공학분야에 널리 뿌리를 내린 복합기술 체계라고 할 수 있다. 특히 VLSI의 미세가공기술 개발로 선간폭이 0.1 μm정도까지 축소될 정도로 복합기술체계의 유기적인 협동 연구·개발의 개가는 크다고 할 수 있다. 지금까지 집적회로의 고밀도화를 바탕으로 각종

일반적으로 전자부품의 수명과 고장률과는 그림 3에서 보는 바와 같이 밀접한 관계가 있다. 어떤 전자부품을 사용할 경우, 시간  $t_b$ (Break-in : 시운전)까지는 높은 고장률을 나타내다가 감소한다. 또한 시간  $t_b$ 에서  $t_w$ 까지는 전자부품의 사용가능한 기간이며 고장률은 거의 일정하게 된다. 사용기간이  $t_w$ (Wear-out : 소모)를 지나면 다시 고장률이 증가하게 된다. 실제로 전자부품들은  $t_b$ 시점에서 출하가 되므로  $t_w$ 가 부품의 수명이 된다.

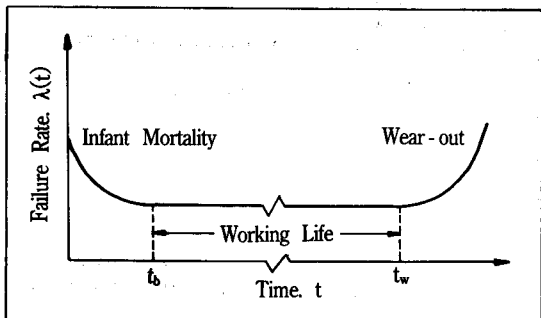


그림 3) 부품의 수명과 고장률의 관계곡선 (일명 "Bathtub Curve"라 부름)

전자부품에 있어서 온도가 고장률에 큰 영향을 끼친다는 것은 주지의 사실이다. 또한 불순물의 확산, 금속간 화합물의 생성, 크리프(Creep)와 같이 전자부품의 고장원인이 되는 많은 요인들을 고려하여 나타내기 위하여 다음과 같은 Arrhenius형 방정식이 사용된다 [4].

$$\lambda(T) = A \exp(-E_a/kT) \dots\dots\dots(1)$$

여기서,  $\lambda$ : 고장률

A: 온도의 함수인 계수

$E_a$ : 활성화 에너지(eV), 일반적으로 0.3~1.5(eV)

$k$ : Boltzmann상수,  $8.617 \times 10^{-5}$ (eV/K)

T: 점점의 절대온도(K)

그림 4는 식(1)을 사용하여 기준온도가 85°C이며

활성화 에너지가 0.8과 1.1eV인 경우에 대한 정규화된 고장률을 나타낸다. 그림에서 보듯이 기준온도보다 작동온도가 10°C증가함에 따라 고장률은 약 2~2.6배 증가하는 것을 알 수 있다.

다음으로 전자부품의 신뢰도와 고장률의 관계를 보면, 우선 신뢰도  $R(t)$ 는 앞서 언급한 신뢰도의 정의를 고려하여

$$R(t) = \frac{\text{시간 } t \text{에서 남아 있는 부품의 수}}{\text{시간 } t=0 \text{에서의 부품의 수}} \dots(2)$$

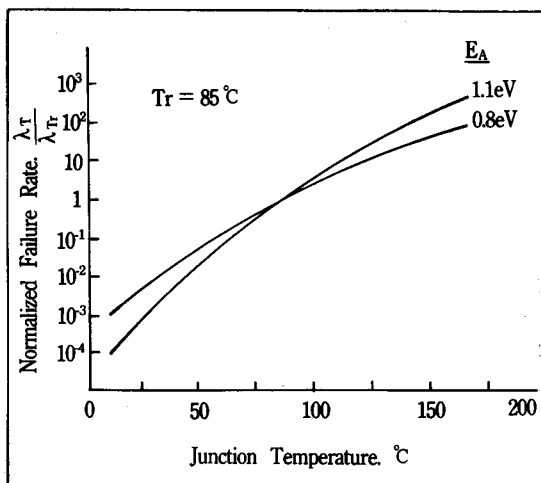


그림 4) 점점온도와 정규화된 고장률과의 관계

로 나타낼 수가 있으며 순간 고장률  $\lambda(t)$ 는

$$\lambda(t) = \frac{\text{시간 } t \text{에서 시간당 고장나는 부품의 수}}{\text{시간 } t \text{에서 남아 있는 부품의 수}} \dots\dots\dots(3)$$

로 정의된다. 따라서 식(2)와 (3)의 관계로부터 신뢰도  $R(t)$ 와 고장률  $\lambda(t)$ 와는

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) \dots\dots\dots(4)$$

의 관계가 있음을 알 수가 있으며, 그림 3에서와 같이 고장률  $\lambda(t)$ 가 일정한  $\langle \lambda(t) = \lambda \rangle$  구간에 대한

註) 여기서 사용된 신뢰도(Reliability) 또는 신뢰성이란 말은 제2차 세계대전 중에 미국에서 전자장치의 고장 및 수명을 추정하는 수법으로서 도입되었다. 즉, 「어떤 제품이나 부품 또는 시스템이 규정의 조건하에서 정해진 기간동안 제기능을 갖고 수행할 확률」로서 정의된다[3].

신뢰도  $R(t)$ 는

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \dots\dots\dots(5)$$

의 관계로 된다.

### 3. 전자회로의 냉각방식

앞에서 언급했듯이 전자부품이 성능을 유지시키며, 각각의 요소들의 신뢰도를 달성시키기 위해서는, 전자부품을 적정의 작동 온도 범위내에서 냉각을 통한 열적제어를 하여야 한다. 특히 고집적 전자회로의 냉각은 높은 열유속에 비해 비교적 낮은 온도를 유지해야 하므로, 효율적인 열전달 방식을 통해서 발생열이 제거되어야 한다. 그림 5는 여러가지 냉각방식의 응용예를 보인다. 그림에서 보듯이 최대 칩동력 및 열유속에 따라 적절한 냉각방식을 결정할 수 있다. 그러면, 이러한 다양한 냉각방식들의 특징, 응용에 및 그밖의 특수냉각 방식에 대하여 살펴보도록 한다 [6~15].

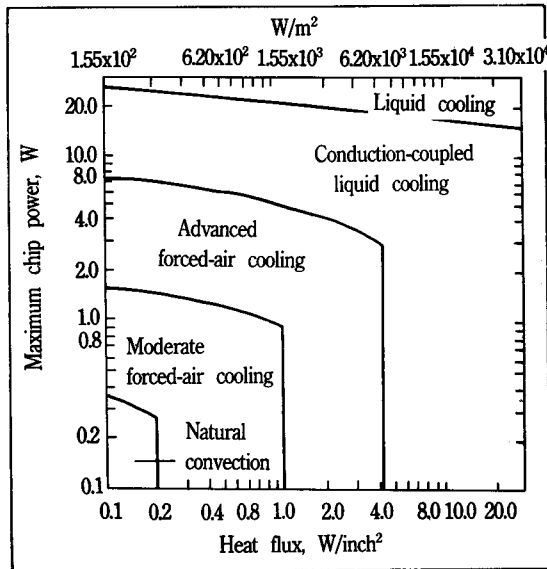


그림 5) 여러가지 냉각방식의 적용예

#### 3.1. 공기냉각방식

공기냉각방식은 가장 널리 사용되어 왔으며

현재도 가장 많이 이용되고 있다. 공기냉각방식은 냉각매체인 공기를 손쉽게 사용할 수 있으며 또한 쉽게 적용할 수 있는데에 최대장점이 있다. 공기 냉각방식은 자연대류방식과 강제대류방식으로 크게 나뉘며, 낮은 칩동력과 낮은 집적도에 대해서는 자연대류 방식이 비교적 큰 규모의 컴퓨터에서는 강제대류방식이 쓰인다.

자연대류방식은 동력소비가 없으며 소음이 없어 매력있는 냉각방식이기도 하나, 열전달률이 낮다는 단점을 갖고 있다. 반면, 강제대류방식은 자연 대류 방식에 비해 열전달률은 크나, 팬이나 블로아 등의 구동력이 요구되며 이들의 구동에 따른 소음이 문제시되는 경우가 종종 발생한다. 현재, 실제 시스템에 사용되고 있는 멀티 칩 모듈형태에 요구되는 냉각능력을 주기 위해서는 내부 및 외부 열저항을 최소화 하여야 한다. 더우기 모듈내의 열응력과 패키지를 통과하는 공기의 유동저항도 줄여야 한다.

Hitachi, IBM, Mitsubishi에서 개발한 공냉식 멀티 칩 모듈은 이러한 사항들을 고려하여 설계된 좋은 예이다.

그림 6에 보이는 Hitachi SiC RAM모듈은 여러 가지 바람직한 특성을 보여준다. 실리콘 회로판과 실리콘 칩 그리고 SiC 세라믹은 열팽창면에서 좋은 짝이 된다. 또한 Heat Sink(방열재)로서는 알루미늄을 사용하였으며, 공기유동에 대해 낮은 저항을 갖도록 설계되어 있다.

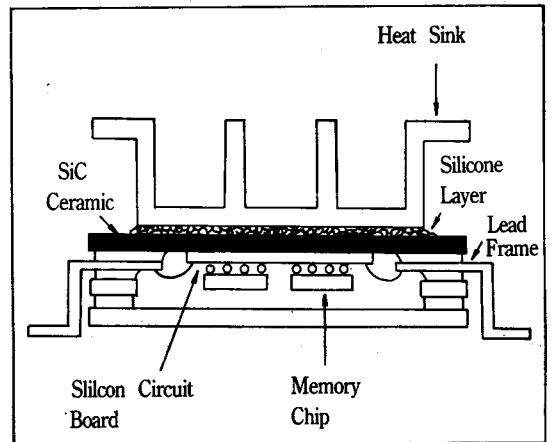


그림 6) Hitachi SiC 멀티 칩 모듈

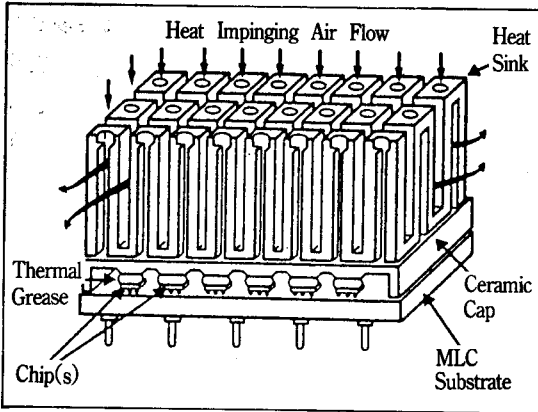


그림 7) IBM 충돌분류에 의한 공냉식 멀티 칩 모듈

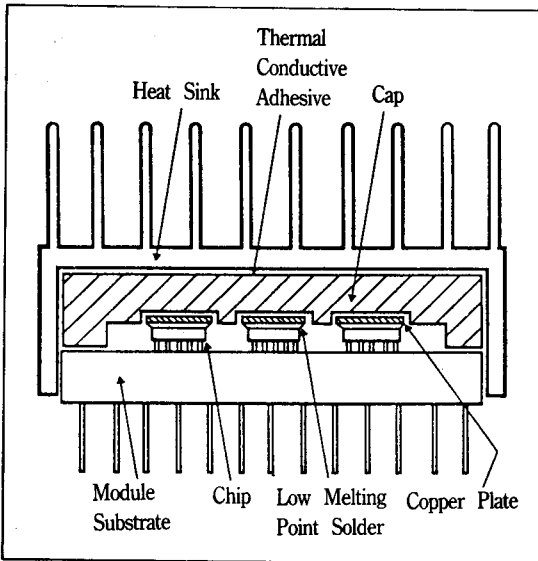


그림 8) Mitsubishi 고열전도 모듈

IBM 4381모듈은 충돌분류 유동방식을 사용한 특수형의 Heat Sink를 사용하고 있다. 즉, 그림 7에서 보는 바와같이 Heat Sink는 다중으로 절단된 환형태로 세라믹 캡에 부착되어 있는 형태로 되어 있다. 이구조는 공기가 쉽게 Heat Sink를 통과하도록 하며, 세라믹캡과 금속 Heat Sink사이의 열적 불균형을 흡수할 수 있도록 한다. 또한 모듈내에서는 Thermal Grease가 각각의 칩과 캡사이에 도포되어 Heat Sink에의 좋은 열적 통로가 되도록 한다.

그림 8에 보이는 Mitsubishi모듈은, 내부 열저

항을 최소화 하기위해 모듈내에 잘 설계된 열적 통로를 사용하였고, 외부 열저항을 최소화하기 위하여 외부 Heat Sink를 설치하였다. 이 모듈은 열분산판을 Soft Solder로 칩의 뒷면에 붙임으로써 내부열저항을 줄이는 방법을 채택하고 있다.

### 3.2. 간접액체(냉각판) 냉각방식

다년간에 걸쳐 공기 냉각방식에 대한 개선방안이 연구되어 왔으나 오늘날 요구되는 고집적 밀도와 높은 열유속을 만족 할 수 없게 된다. 따라서, 수냉 냉각판을 모듈에 사용하는 간접액체 냉각방식의 개발필요성이 높아지게 되었다. 그러면, 본 냉각방식을 채택하여 사용되고 있는 대표적인 몇몇 예를 다음에 보인다.

IBM308x/3090시리즈에 사용되고 있는 TCM (Thermal Conduction Module : 열전도모듈)은 간접액체냉각방식의 예로서 잘 알려져 있으며, 그림 9에 나타낸다. 그림에서 보듯이 TCM은 100여개의 칩을 갖고 있으며, 각각의 칩은 스프링에 의해 가압된 피스톤이 있고, 케이스에는 수냉냉각판이 볼트로써 체결되도록 되어있다. 스프링에 의한 가압 피스톤은 제조상의 오차로부터 야기되는 칩의 위치 및 높이에 대한 변화를 허용할 수 있도록 한다. 그림 10는 칩의 뒷면에서 냉각판에 이르는 열흐름 경로를 나타낸다. 각각의 칩과 피

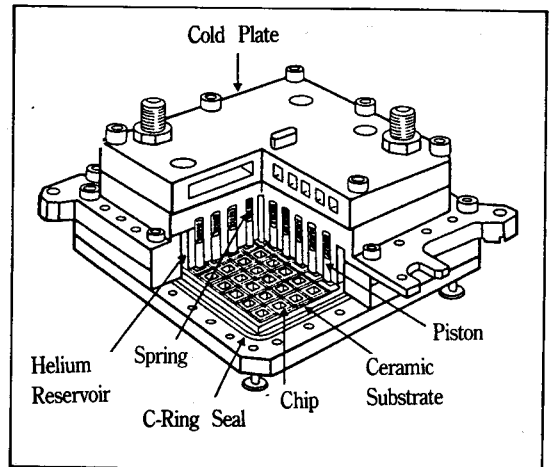


그림 9) 수냉 냉각판을 사용한 IBM TCM

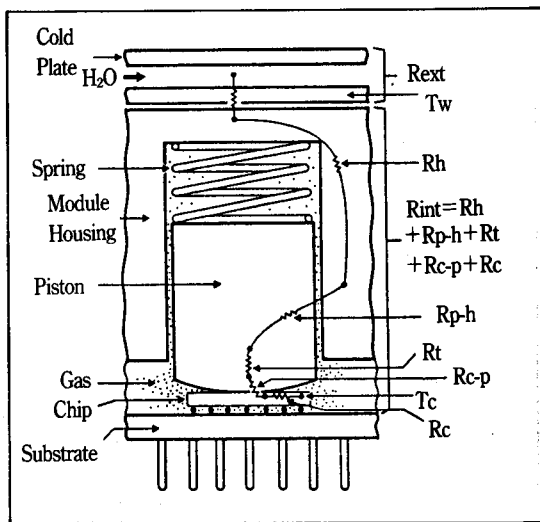


그림 10) IBM TCM에서의 열흐름 경로

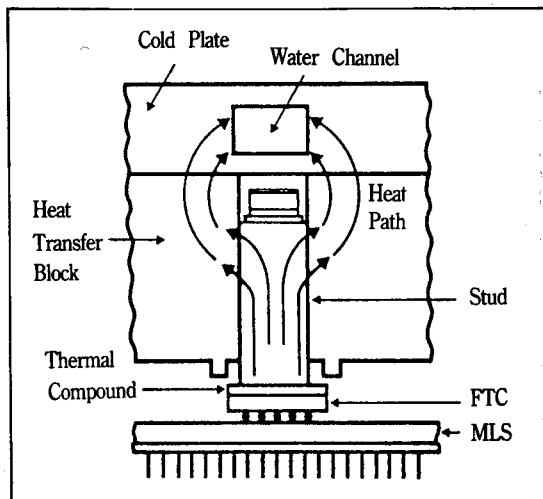


그림 12) NEC LCM에서의 열흐름 경로

밀착되어 있는 냉각 stud를 사용하는 것은 앞서 언급한 IBM의 TCM과 흡사하다.

### 3.3 직접액체 냉각방식

이름 그대로 직접 액체 냉각 방식은 냉각제를 직접 칩 또는 패키지와 물리적인 접촉을 시키는 것이다. 따라서 사용되는 냉각제는 회로지연등의 역효과를 일으키지 않는 절연특성을 갖을 필요가 있다. 또한 사용되는 냉각제는 냉각제가 접촉하는 전자부품재료와 화학적으로 안정해야 한다. 직접 액체 냉각 방식은 다른 냉각방식에 비해 상당히 높은 열전달률을 얻을 수 있어, 전자부품 냉각에의 응용에 관심이 집중되어 왔으며, 특히 최근의 전자부품 고집적도의 가속화와 더불어 더욱 관심을 모으고 있다.

#### 3.3.1. 액체 강제대류 냉각방식

강제 대류 공기냉각방식과 마찬가지로 액체 강제대류냉각도 요구되는 냉각효과를 주기위해서 공급되는 유량에 직접 관계가 있다. 액체는 공기와 비교하여 큰 열전도도와 밀도를 갖기 때문에 공기 냉각방식에서 얻을 수 있는 열전달률 보다 한 Order 큰 값을 얻을 수 있다. 특히 액체의 상변화를 이용한 냉각방식과 비교하여 강제대류 냉각방식은

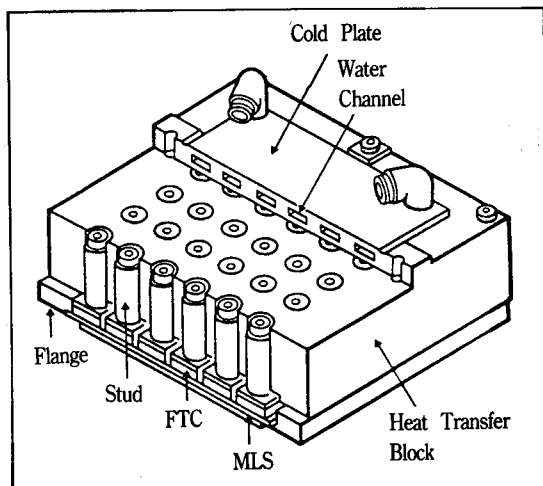


그림 11) NEC의 LCM

스톤사이의 틈새, 각 피스톤과 케이스사이의 틈새에서의 열전도를 이용하기 위하여, 공기보다 약 6배 열전도도가 큰 헬륨가스가 채워져 있다.

NEC SX슈퍼컴퓨터에서 사용되 LCM (Liquid Cooled Module : 액체 냉각모듈)은 냉각판 냉각 방식을 사용하고 있는 또하나의 좋은 예이다. LCM은 세라믹 기판위에 FTC(Flipped Tab Carrier)로 붙여진 36개의 칩을 내장하고 있다. 그림 11과 12에서 보는 바와 같이 수냉냉각판에 의해 냉각되는 케이스에 열을 전달하기 위해 각각의 FTC와

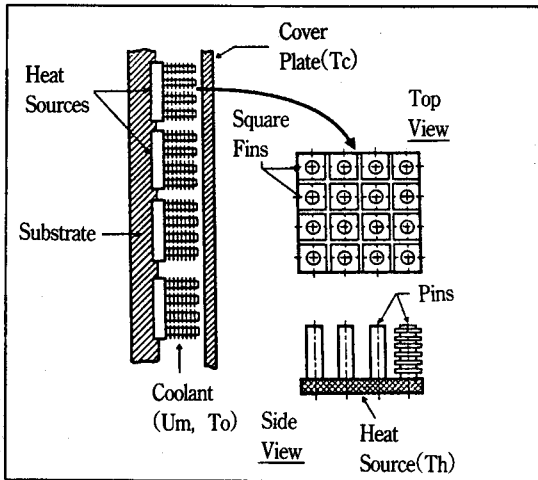


그림 13) 흰불은 핀배열을 갖는 액체 강제대류 냉각방식의 한 예

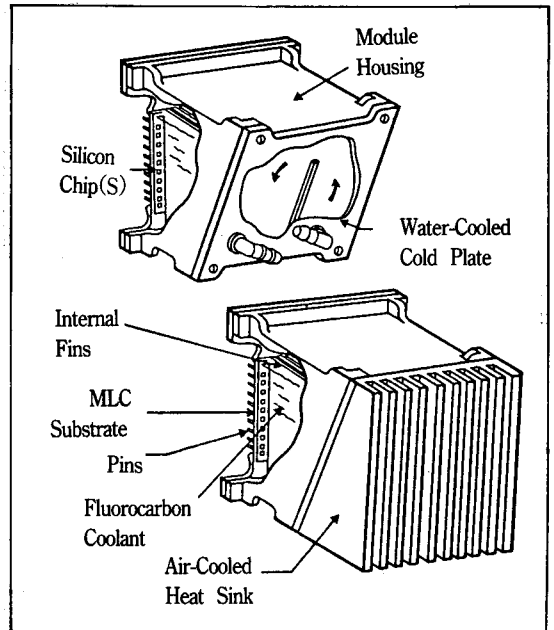


그림 14) 공냉 및 수냉식 냉각판을 갖는 LEM

액체의 입구온도를 조절함으로써 직접 온도조절이 가능하며, 또한 냉각제의 증기를 응축할 필요도 없다. Cray-2 슈퍼 컴퓨터도 특정부분에서 국부적인 비등이 일어나는 강제대류 액체 냉각방식을 사용하고 있다. 그림 13은 흰 불은 핀 배열을 갖는 전자부품에서의 FC(Fluorocarbon)를 이용한 강제대류 냉각방식의 한 예를 보인 것이다. 이러한 핀을 사용하지 않은 경우에 비해서 약 10배의 열전달 효과가 있다는 연구결과도 보고되고 있다.

### 3.3.2. 액체 상변화 이용 냉각방식

좀 더 높은 열전달률을 얻기 위하여 Pool비등 방식, 강제유동 비등방식 등의 상변화현상을 이용한 냉각방식을 생각할 수 있다. IBM에서 개발된 LEM(Liquid Encapsulated Module)은 Pool비등현상을 이용한 한 예이다. 그림 14에서 보듯이, LEM팩키지는 모듈내에서 Pool비등에 의해 칩들을 냉각할 수 있도록 설계되었고, 모듈 뒷면에 공냉식 또는 수냉식 냉각판을 설치하게 되어있다. 이러한 방식에서 예상되는 바와 같이 팩키지내에 있는 콘덴서가 취할 수 있는 모듈 또는 기관의 부하에는 한계가 있다. 이러한 한계는 그림 15에서 보는 바와 같은 강제유동 비등방식을 이용하여 극복할

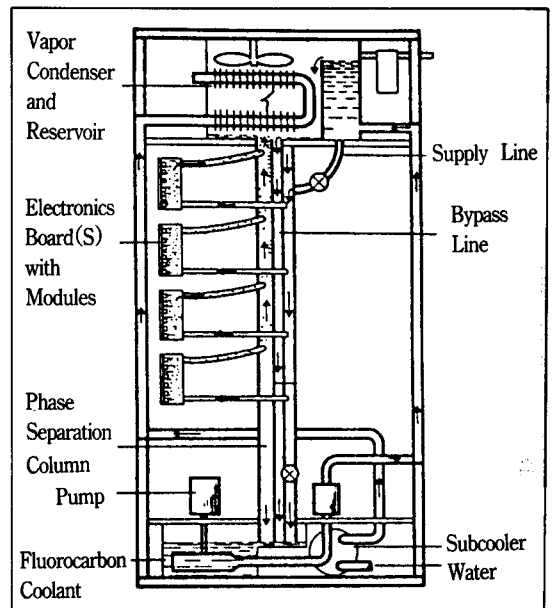


그림 15) 중력이용 과냉각 강제유동비등 시스템

수가 있다. 이 시스템에서는 칩을 비등시키며 고온의 액체와 증기를 씻어내기 위해서 저속의 과냉각 액체가 연속적으로 공급된다.

비등 열전달은 높은 열전달률을 주지만 전자 시스템 냉각에 응용하는데에 문제가 없지는 않다. 당면하는 문제의 하나는 온도의 Overshoot 또는 Hysteresis이다. FC액체는 이러한 경향이 있으며, 실리콘과 같은 매끄러운 표면에서는 거의 확실하게 이러한 현상이 일어난다. 더우기 최근의 칩의 발열밀도는 거의 FC액체에 대한 Burn-out점 부근에 와있다. 따라서 좀 더 신뢰성있는 비등개시 및 Burn-out점의 확장에 대한 연구가 좀 더 이루어져야 할 것이다.

### 3.4. 그밖의 특수 냉각방식

이상에서 설명한 전자회로의 냉각방식 이외에도, 현재는 그 응용도가 낮으나 특수목적, 특정장비 및 차세대 컴퓨터 등의 냉각기술로서 연구·개발되고 있는 냉각방식에 대해서 간단히 살펴본다.

#### 3.4.1. 히트파이프이용 냉각방식

열을 전달하는 여러가지 방법중에서 히트 파이프는 많은 분야에 이용되어 왔다. 히트파이프를 이용하는 주요이유로는 ① 매우높은 동력밀도 ② 정확한 등은 제어능력 ③ 소형이며 경량 ④ 소음이 거의 없음 ⑤ 형상을 특수용도에 맞출 수 있음 등의 장점이 있기 때문이다.

히트 파이프의 기능은 작동유체의 연속적인 순환이 있어야 가능하며, 이러한 작동유체의 순환을 방해하는 몇가지 제한이 있다. 즉, ① 모세관 한계 ② 비산한계 ③ 비등한계 ④ 음속한계 ⑤ 동결한계 등이다.

최근 전자기기에서의 히트파이프 응용이 더욱 일반화 되었다. Feldmanis 등 [16]은 종래의 열전도방식과 히트파이프를 사용하여 PCB(Printed Circuit Board)에서의 온도분포를 비교하였다. 그 결과 히트파이프를 적용함으로써 PCB를 통한 온도구배를 감소시켰으며, 온도를 상당히 낮출 수 있었다고 보고하고 있다.

#### 3.4.2. Thermoelectric(熱電現象)에 의한 냉각방식[6]

한가지 특수한 냉각방식으로서 열전현상을 이

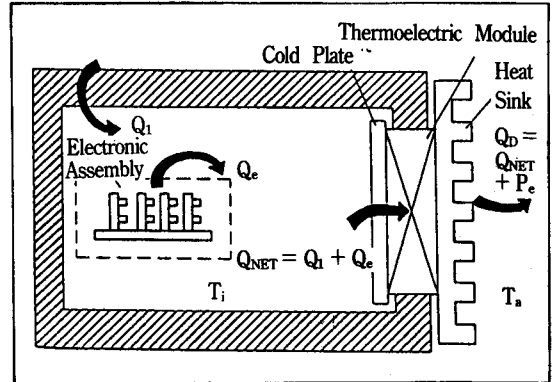


그림 16) 열전모듈에 의한 전자기기의 냉각방식

용한 냉각방식을 들 수가 있다. 열전현상은 어떤 물질 양단에 열과 전류를 흘렸을때 상호작용에 의해 영향을 주는 것을 말한다. 즉, 온도차를 줌으로써 전력을 발생하기도하며, 전류를 통과 시켜줌으로써 냉각이나 가열의 목적에 사용될 수 있다.

이러한 원리를 이용한 냉각방식은 종래의 냉각방식과는 달리 기계적인 구동 부분이 없으며, 소음이 없고, 소형·경량이며, 빠른응답성 및 정확한 온도제어가 가능하다는 장점이 있어 외국에서는 이미 비디오 카메라용 CCD(Charged Coupled Device)소자, 우주탐사선 및 핵잠수함 등의 첨단장비에 대한 냉각에 응용되어 왔다. 그러나, 성적계수와 냉각부하가 낮으며, 열전재료의 비싸다는 단점이 있다. 그림 16은 주위온도 Ta보다 낮은 내부온도 Ti로 정확히 온도 제어를 하기 위해 사용된 열전 모듈의 한 예를 나타낸다.

#### 3.4.3. Microchannel 냉각방식

Microchannel 냉각의 개념은 Tuckerman 등 [17]에 의해 제안되었다. Microchannel은 실리콘 기판(L=W=1mm)의 한쪽면을 높이 H=300μm, Channel 폭 Ww=50μm의 형상을 화학적 에칭에 의해 만들어진다. 통과하는 물의 시간당 유량은 10cm<sup>3</sup>/s이며 압력강하는 350kPa이었으며 Channel내에서는 층류유동을 유지하였고, 열저항은 0.09°C/W의 상당히 낮은 값을 나타내었다. 또한 물의 온도 상승을 71°C까지 허용할 경우 열유속은 790W/cm<sup>2</sup>의 매우



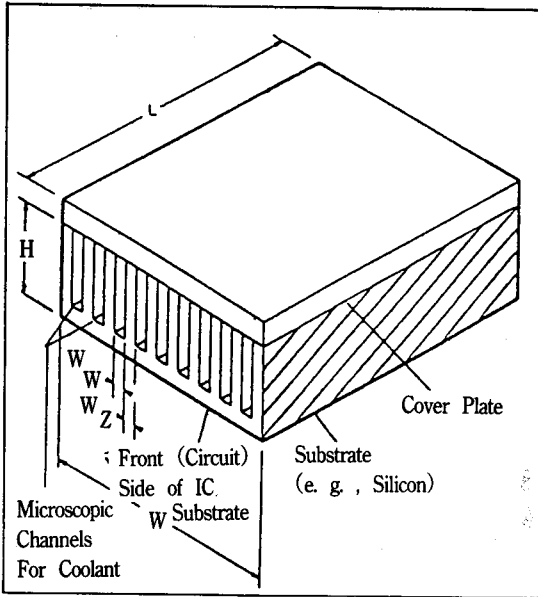


그림 17) Microchannel 냉각방식의 예

큰 값을 나타내었다. 그러나 이렇게 낮은 열저항과 높은 열유속을 나타내지만 이에 못지 않게 높은 펌프동력이 요구되므로 이들의 상호관계에 대한 체계적인 연구 및 검토가 필요하다. 또한 칩에의 Microchannel 가공을 대신한 열전도도가 큰 알루미늄이나 구리와 같은 분리되는 Heat Sink에의 Microchannel 가공등이 고려 되어야 할 것이다. 그림 17은 Microchannel 냉각방식의 한 예를 보인다.

3.4.4. Joule-Thomson 냉각방식

비 이상기체의 단일 팽창에 의한 Joule-Thomson (J-T) 냉각효과는 극저온을 만들기 위해 오래전 부터 잘 알려진 기술이다. 그러나 이방법은 가장 사용하기는 쉬우나, 가장 효율이 낮은 방법의 하나로 알려져 왔다. 그러나 최근에는 복합 사이클의 이용, 다단팽창, 특수혼합가스 사용등의 연구개발로 효율이 상당히 개선되고 있다.

최근 실리콘소자에 의해 달성되는 성능의 한계를 넘어서 초고속화를 달성하기 위해 액체질소온도(77K)에서 작동하는 갈륨비소등의 소자 또는 액체 헬륨온도(4K)에서 작동하는 초천도소

자등에 관하여 차세대 컴퓨터의 개발과 더불어 연구가 진행되고 있는 것은 주지의 사실이며, 이들에 대한 냉각문제는 소자의 계산기에의 응용이 구체화되면서 더욱더 관심이 높아지고 있다. 또한 고속, 고신뢰도 및 noise특성 때문에 최첨단 전자장비 중에는 적외선 추적센서와 같이 특정기구나 칩을 아주 낮은 온도로 유지해야만 하는 경우가 많이 있다. 이러한 냉각을 Selective(선택적) 또는 Spot(특정부분) 냉각방식이라 부르며, 의료, 화학, 기계분야의 측정기기에 많이 응용되고 있다. 이상과 같이 극저온의 이용분야는 매우 넓으며, 간단하면서도 정확한 온도제어가 가능한 J-T 냉각방식에 대한 폭넓은 연구·개발이 더욱더 절실히 요구된다고 하겠다.

4. 결 론

이상과 같이 고집적 전자회로의 냉각기술에 대하여, 현황, 실제 적용에 및 특수냉각방식등에 대하여 살펴보았다. 이후 전자회로의 고집적화는 계속 추진될 예정이며, 발열밀도의 증대에 대응할 수 있는 냉각기술의 개발없이는 전자 공업의 발전은 생각할 수 없는 상황이 될 것이다. 따라서 기존의 냉각방식의 기술적 향상은 물론 새로운 냉각방식에 대한 연구·개발이 필요하며, 특히 새로운 냉각방식에 대한 평가는 온도 및 열유속 뿐만아니라 신뢰성, 경제성등을 고려한 종합적인 방법으로 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Morimoto, M. , Microfabrication for VLSI, J. of JSME, 92-853 (1989).
- [2] Oktay, S. , Hannemann, R. and Bar-Cohen, A. , High Heat from A Small Package, Mechanical Engineering, Mar. (1986).
- [3] Yokobori, T. , Reliability and Liability, J. of JSME, 90-827(1987).
- [4] Hannemann, R. , Electronic System Thermal Design for Reliability, Trans. IEEE, R26-5(1977).

- [5] Chu, R. C. and Simons, R. E. , Heat Transfer in Electronic Equipment, U. S.-Japan Heat Transfer Joint Seminar (1985).
- [6] Uemura, K. and Nishida, I. , Application and High Performance Technique of Thermomodule, Energy and Resources, 11-4 (1990).
- [7] Ogiso, K. , Recent Trends in Electronic Equipment Cooling, U. S.-Japan Heat Transfer Joint Seminar (1985).
- [8] Chu, R. C. , Heat Transfer in Electronic Systems, Proc. 8th IHTC Vol.1(1986).
- [9] Yeh, L. T. , Future Thermal Design and Management of Electronic Equipmint, U. S.-Japan Heat Transfer Joint Seminar(1985).
- [10] Incropera, F. P. , Convection Heat Transfer in Electronic Equipment Cooling, ASME, J. of Heat Transfer, Vol.110(1988).
- [11] Song, T. H. and Bang S. Y. , Performance of a Conduction Cooling Module, ASME J. of Heat Transfer (1990), at press.
- [12] Oktay, S. , Departure from Natural Convection (DNC)in Low-Temperature Boiling Heat Transfer Encountered in Cooling Micro-Electronic LSI Devices, Proc. 7th IHTC Vol.4(1982).
- [13] Little, W. A. , Microminiature Refrigration, Rev. Sci. Instrum. 55-661(1984).
- [14] Little, W. A. Advances in Joule-Thomson Cooling, J. of Cryogenics Paper EA-01(1988).
- [15] Nakayama, W. , Large Problem of Heat Transfer in Electronics Technology, News of Heat Transfer Society of Japan. , 25-96(1986).
- [16] Feldmanis, C. , Cooling Techniques and Thermal Analysis of Circuit Board Mounted Electronic Equipment, ASME HTD, Vol.29(1982).
- [17] Tuckerman, D. B. and Pease, R. F. , Ultrahigh Thermal Conductance Microstructures for Cooling Integrated Circuits, IEEE Paper CH1781-4(1982).