

# 히트 싱크 부착 전자 부품을 가진 통신 시스템의 냉각 성능 연구

노 홍 구\* · 이 재 현\*\*

(1997년 8월 23일 접수)

## Cooling Performance of an Electronic System Including Electronic Components Mounted with Heat Sink

Hong-Koo Noh and Jae-Heon Lee

**Key Words :** Heat Sink(히트 싱크), Electronic Cooling(전자 냉각), Cooling Performance(냉각 성능)

### Abstract

A numerical study on the cooling performance for electronic components mounted with heat sink in an electronic system has been performed. The model of electronic system consisted with lower and upper modules in which the electronic components mounted with heat sink were arrayed. To find better configuration under a given fan power for effective cooling, the cases called 'No heat sink', 'Both heat sinks', 'Lower heat sinks', and 'Upper heat sinks' were tested. The results showed that the cooling performance in 'Upper heat sinks' was the best among four cases.

#### 기 호 설 명

<p><math>a</math> : 이산화 방정식의 계수 값</p> <p><math>b</math> : 이산화 방정식의 상수 항</p> <p><math>c_p</math> : 정압 비열 [J/(kg·K)]</p> <p><math>k</math> : 열전도 계수 [W/(m·K)]</p> <p><math>K</math> : 압력손실계수</p> <p><math>p</math> : 압력 [N/m<sup>2</sup>]</p> <p><math>\dot{q}''</math> : 벽면으로부터의 열유속 [W/m<sup>2</sup>]</p> <p><math>\dot{q}'''</math> : 단위 체적 당 발열량 혹은 열전달률 [W/m<sup>3</sup>]</p> <p><math>Q_{in}</math> : 냉각 공기의 유입 유량 [l/min]</p> <p><math>R</math> : Residual 값</p> <p><math>Re</math> : 레이놀즈 수</p> <p><math>T</math> : 온도 [°C]</p> <p><math>u, v, w</math> : <math>x, y, z</math> 방향 속도 성분 [m/s]</p>	<p><math>V_{in}</math> : 유입 속도 [m/s]</p> <p><math>\alpha</math> : 열 확산 계수 [m<sup>2</sup>/s]</p> <p><math>x</math> : 난류 운동 에너지 [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]</p> <p><math>\epsilon</math> : 난류 에너지 소산율 [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]</p> <p><math>\rho</math> : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]</p> <p><math>\Phi</math> : 이산화 방정식의 종속 변수</p> <p><math>\varphi_c</math> : 부품표면온도 감소율 [%]</p> <p><math>\mu</math> : 점성 계수 [kg/(m·s)]</p> <p><math>\nu</math> : 동점성 계수 [m<sup>2</sup>/s]</p> <p style="text-align: center;">하첨자</p> <p><math>c</math> : 부품 표면</p> <p><math>nb</math> : 인접 격자점</p> <p><math>p</math> : 중앙 격자점</p> <p><math>s</math> : 고체 영역</p> <p><math>t</math> : 난류 유동</p> <p><math>eff</math> : 유효</p>
---	--

\*회원, 한국전자통신연구원

\*\*회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

## 1. 서론

높은 온도에 매우 취약한 특성을 지닌 전자 통신 시스템의 전자 부품들은 부품 표면의 최대 허용동작온도가 75°C 정도이며,<sup>(1)</sup> 전자 부품 표면이 이러한 최대 허용동작온도를 초과하면 오동작이 발생하므로 부품의 표면 온도를 최대 허용동작온도보다 낮게 유지시켜야 한다. 최근 국내에서 개발되고 있는 광대역 회선분배 시스템(BDCS, Broadband Digital Cross-Connect System) 등과 같은 고속 전송 통신 시스템의 통신용 부품은 높은 열을 발생하므로 부품 위에 히트 싱크를 부착함으로써 부품의 동작 온도를 낮추고 있다.

전자 통신 시스템 내의 전자 부품위에 히트 싱크를 부착할 때에는 통신 시스템의 설계 요구 조건 및 원활한 유지 보수를 위하여 모듈 단위로 히트 싱크를 부착하게 된다. 이와 같이 모듈 단위로 히트 싱크를 부착할 때, 히트 싱크가 부착된 모듈이 통신 시스템 내의 하부쪽에 위치 하는 경우와 상부쪽에 위치하는 경우 및 상하부 모든 곳에 위치하는 경우 등 각 경우에 따른 냉각 특성이 다르게 나타날 것이며 이에 대해 상세히 연구할 필요가 있다.

전자 통신 시스템에서 히트 싱크를 이용한 강제 공냉방식에 대해 수행된 기존 연구로서 Lau와 Mahajan<sup>(2)</sup>은 히트 싱크 핀의 높이와 간격이 변화함에 따른 열 저항치를 실험적으로 구하였으며, Lehmann과 Kosteva<sup>(3)</sup>는 여러 가지 형상의 히트 싱크들에 대해 냉각 성능을 비교한 바 있다. Bailey와 Indquist<sup>(4)</sup>는 냉각 공기 제트가 히트 싱크에 분사되는 경우에 대한 냉각 성능을 연구하였으며, Wirtz와 Chen<sup>(5)</sup>은 히트 싱크 핀 배열에 따른 공기 유량 변화와 냉각 성능에 미치는 영향에 관해 조사하였다. 또한 Lee 등<sup>(6)</sup>은 히트 싱크가 부착된 전자 부품의 수축 및 분산 열저항에 관한 이론적 연구를 보고한 바 있다.

상기 연구들은 대부분 하나의 히트 싱크를 대상으로 히트 싱크 자체의 냉각 성능 개선에 관해 연구된 것들이다. 그러나 전자 통신 시스템 내에 히트 싱크가 각 모듈 단위로 배치되었을 때, 그 모듈의 배치 상황에 따른 히트 싱크의 냉각 효과에 대한 연구 보고는 드물다. 따라서 본 연구에서는 일정한 송풍동력을 가진 통신시스템에서 수치해석적인 방법을 통해 히트 싱크의 배치를 모듈 단위로

변화시켜 이에 따른 냉각 성능을 예측함으로써 전자 통신 시스템의 열설계 개념에 실용적인 도움을 주고자 하였다.

## 2. 모델 및 해석 방법

### 2.1 계산 모델의 설정

Fig. 1에는 전자 부품위에 히트 싱크가 모듈 단위로 배치되어 있는 60 cm(폭,  $x$ 방향)×73.5 cm(높이,  $y$ 방향)×60 cm(깊이,  $z$ 방향) 크기인 통신 시스템의 실제 예를 보여준다. 시스템 내부에는 두 개의 모듈, 즉 상단 모듈과 하단 모듈이 실장되어 있으며 하나의 모듈 내에는 20.3 mm 간격으로 9개의 PCB가 배치되어 있다. 또한 하나의 PCB상에는 12개의 전자 부품이  $y$ 방향으로 하나의 열을 이루며 9.5 mm의 균일한 간격으로 부착되어 있다. 이 전자 부품의 열은 그림에 나타나지 않았지만  $z$ 방향으로(그림의 깊이 방향) 9개의 열을 이루며 9.5 mm의 균일한 간격으로 부착되어 있다. 따라서 하나의 PCB상에는 총 108개(=12개×9개)의 많은 전자 부품이 배치되어 있으며, 각 전자 부품의 머리에는 히트 싱크가 부착되어 있다. 이렇게 전자 부품의 배치가 복잡한 형태로 구성되어 있는 전자 통신 시스템 전체를 수치적인 방법으로 해석하기에는 많은 노고가 따르므로 시스템의 기하학적인 구조를 이용하여 해석 영역을 간략화 할 필요가 있다. Fig. 1에서 PCB들이 각 모듈 내에서  $x$  방향으로 일정한 간격을 두고 주기적으로 배치되어 있

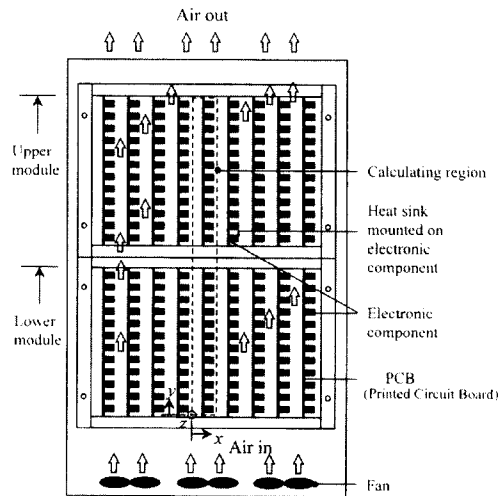


Fig. 1 Typical configuration of electronic system.

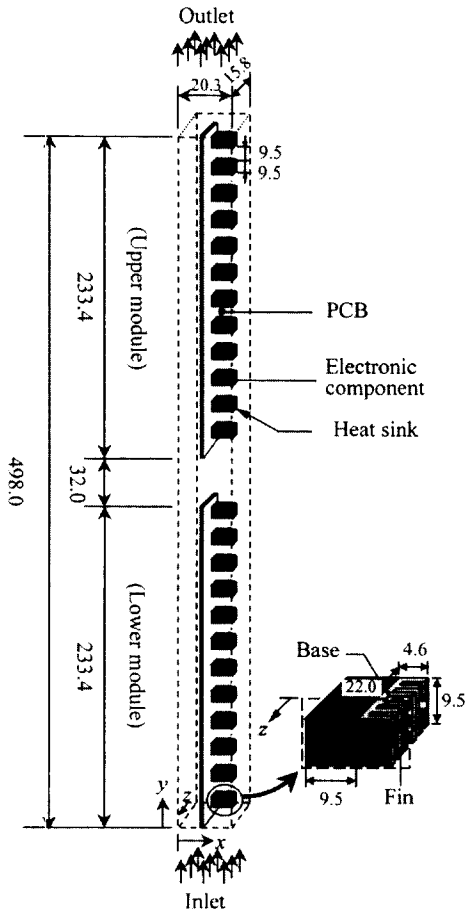


Fig. 2 Detail of calculation region(unit : mm).

는 것을 볼 수 있다. 이러한  $x$ 방향의 주기성을 이용하여 본 연구에서는 그림에 점선으로 둘러싼 영역을  $x$  및  $y$  방향의 수치 계산 영역(calculating region)으로 설정하였다. 또한 이 수치 계산 영역 내에서  $z$ 방향으로 9개의 전자 부품 열이 동일 간격으로 배치되어 있으므로 9개의 전자 부품 열 가운데 한 개 열의 절반만을 선택하여  $z$ 방향의 수치 계산 영역에 포함시켰다. 이 수치 계산 영역의 상세를 Fig. 2에 나타내었으며 그림에 나타낸 모든 크기는 상용 전자 통신 기기의 실제 치수이다. 그림에 보이는 바와 같이 수치 계산 영역의 전체 크기는 좌표 원점으로부터  $x$ 방향으로 20.3 mm,  $y$ 방향으로 498.0 mm, 그리고  $z$ 방향으로 15.8 mm이다.  $y=0$  mm의 유입구에서는 0.64W의 송풍동력에 의한 25°C의 냉각 공기가  $y$ 방향으로 균일한 속도로 유입되어 발열 전자 부품들을 냉각시키면서

$y=498.0$  mm의 유출구로 빠져 나가게 된다. 각 모듈의 높이는 233.4 mm이며 모듈과 모듈 사이의 간격은 32.0 mm로 설정하였다. Fig. 2의 상세도에서 보는 바와 같이 전자 부품은 9.5 mm×9.5 mm×22.0 mm 크기의 직육면체이며 부품당 발열량,  $Q_c$ (약 0.6~1 W 정도)로 일정하게 발열하고 있다. 전자 부품 위에 부착된 세로형(longitudinal type) 히트 싱크는 베이스 위에 주 유동 방향( $y$  방향)으로 세워진 6개의 핀으로 구성되어 있으며 전체 크기는 4.6 mm×9.5 mm×22 mm이다. 또한 히트 싱크의 베이스와 핀의 두께는 각각 1.15 mm와 1.83 mm이며 핀간 간격은 1.83 mm이다.

### 2.2 모듈별 히트 싱크 배치 및 사용 열 물성치

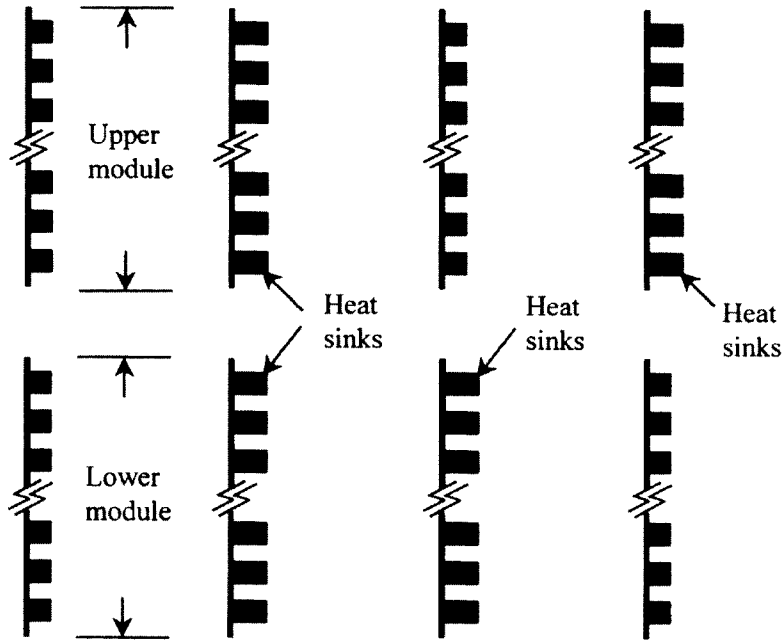
모듈별 히트 싱크 부착의 방식에 따라 나타나는 열적 특성을 비교하기 위해 Fig. 2에서 보인 하부 및 상부 모듈 모두에 히트 싱크가 부착된 형태를 포함하여, 총 네가지의 히트 싱크 부착의 경우들이, Fig. 3(a), (b), (c) 그리고 (d)에 나타낸 바와 같이, 즉 발열 전자부품위에 히트 싱크가 부착 않된 경우(No heat sink), 히트 싱크가 하단 모듈 및 상단 모듈의 전자 부품위에 모두 부착된 경우(Both heat sinks), 하단 모듈에만 부착된 경우(Lower heat sinks) 그리고 상단 모듈에만 부착된 경우(Upper heat sinks)등이 본 연구에서 고려되었다.

또한 수치 계산을 위해 사용된 냉각 공기의 열 물성치는 대기 조건인 25°C, 1기압의 공기에 해당하는 값이며 PCB, 전자 부품 및 히트 싱크의 열 물성치는 통상적인 전자 통신 시스템에서 통용되는 값으로 Table 1에 그 값을 나열하였다.

### 2.3 지배 방정식

본 연구에서 선정된 바와 같은 실제 크기의 PCB에는 대부분 2.5~3 m/s 정도 속도의 공기 유입이 관찰되며, 이러한 경우에는 PCB 간격을 특성 길이로 하는 Reynolds 수가 4000 이상으로서, 유동 영역이 난류에 속한다. 본 수치 계산에서는 난류 유동을 해석하기 위한 난류 모델로서 표준  $k-\epsilon$  난류 모델을 도입하였으며 정상 상태 3차원 난류 유동장 내에 열원이 존재하는 본 연구 모델의 지배 방정식은 다음과 같다.

#### 연속 방정식



(a) No heat sink (b) Both heat sinks (c) Lower heat sinks (d) Upper heat sinks

Fig. 3 Four cases of the heat sink configurations investigated.

Table 1 Thermophysical properties of electronic devices.

Electronic device	Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kg K)	Thermal conductivity (W/m K)	Thermal expansion coefficient (1/K)
PCB	Epoxy glass	1938	879	0.2	15 × 10 <sup>-6</sup>
Electronic component	Ceramic compound	3970	765	0.7	5 × 10 <sup>-6</sup>
Heat sink	Aluminum	2713	883	55	17 × 10 <sup>-6</sup>

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \chi \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서  $\mu_{eff}$ 는 유효점성계수로서 점성계수,  $\mu$ 와 난류점성계수,  $\mu_t$ 의 합을 의미한다.

난류 운동 에너지 방정식

$$\frac{\partial(\rho \mu_t \chi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial \chi}{\partial x_j} \right) + G - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

여기서  $\Gamma_k$ 는 난류 에너지 확산 계수로서  $\mu_t / \sigma_k$ 이며  $\sigma_k$ 는 난류 에너지 실험 상수이다.

난류 운동 에너지 소산율 방정식

$$\frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{\chi} \quad (6)$$

여기서  $\Gamma_\varepsilon$ 는 난류 에너지 소산율 확산 계수로서  $\mu_t/\sigma_\varepsilon$ 이며  $\sigma_\varepsilon$ 는 난류 에너지 소산율 실험 상수이다. 난류 점성 계수는 계산된 난류 운동 에너지와 난류 운동 에너지 소산율로부터 다음 관계식을 이용하여 얻게 된다.

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho X^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

여기서  $C_\mu$ 는 난류 점성 계수 비례 상수이다. 상기 식들에서 사용된 각 난류 상수는  $C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$ ,  $C_\mu=0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$  및  $\sigma_\varepsilon=1.3$  값을 사용하였다.

에너지 방정식

본 연구의 계산 영역 내부에는 냉각 공기의 유동 부내의 대류 열전달과 PCB, 전자 부품 및 히트 싱크 등 고체 내부의 전도 열전달이 복합되어 있다. 따라서 유체 영역과 고체 영역에서의 에너지 방정식은 다음과 같이 기술될 수 있다.

유체 영역 ;

$$\frac{\partial(\rho C_p \mu_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

여기서  $k_{eff}$ 는 유효 열전도 계수로서 열전도 계수,  $k$ 와 난류 열전도 계수,  $k_t$  합이다. 난류 열전도 계수,  $k_t$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{Pr_t} \quad (9)$$

여기서  $Pr_t$ 는 난류 Prandtl 수이다.

고체 영역 ;

$$a_s \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \left( -\dot{q}''' \right)_s = 0 \quad (10)$$

여기서 하첨자  $s$ 는 고체를 의미한다. 또한  $a_s$ 는 고체의 열확산 계수를 의미하며,  $\dot{q}'''$ 는 전자 부품의 체적이  $V$ 일 때 아래에 정의한 바와 같이 전자 부품의 단위 체적당 발열량을 의미한다.

$$\dot{q}''' = Q_c / V \quad (11)$$

**2.4 경계 조건 및 벡함수 설정**

본 연구에서 설정한 계산 모델의 유동 및 온도 분포를 수치 계산에 의하여 구하기 위해서는 계산 모델의 모든 경계면에 경계 조건이 각각 주어져야

한다. Fig. 2에 나타낸 좌표에서  $x=0$  mm와  $x=20.3$  mm의 경계면은 기하학적으로 주기적인 면에 해당되므로 모든 종속변수에 대해 주기경계조건 (periodic boundary condition)을 부여하였다.

$y=0$  mm인 유입구에서  $T_{in}=25^\circ\text{C}$ 의 냉각 공기는 송풍 동력,  $W$ 가 일정한 상태에서 유입 속도,  $V_{in}$ 으로 유입된다. 여기서의 유입 속도,  $V_{in}$ 의 값은 각 히트 싱크 부착의 경우마다 달라지게 되므로, 각 경우에 대한  $V_{in}$ 의 경계조건 값을 다음과 같이 부여하였다. (7, 8)

$$V_{in} = [W / (KA_{in}^{(n+1)})]^{1/(n+1)} \quad (12)$$

식 (12)에서 송풍 동력,  $W$ 는 본 연구의 실제 계산에서 20.3 mm(유입구의 폭)×15.8 mm(유입구의 깊이)크기의 유입구 면적,  $A_{in}$ 에 대하여 일정한 값, 0.64W로 간주하였으며 이 값은 통신 시스템에서 통상적으로 쓰이는 것이다. 또한  $K$  및  $n$ 은 압력손실계수 및 유량 지수이다. 이 값들은 본 연구에서 고려하는 각 히트 싱크 부착의 경우별로 유입유량 대 압력손실 값을 실험적으로 구하는 과정에서 얻어졌으며 이 값들과 식 (12)를 이용하여 얻은 각 경우별의  $V_{in}$ 의 값, 그리고 각 경우별의 냉각 공기의 유입 유량,  $Q_{in}$ 의 값을 Table 2에 나타내었다. 표를 살펴 보면 유량 지수,  $n$ 의 값은 모든 경우에 대해 거의 일정한 값, 1.8를 나타내었다. 한편 압력손실계수  $K$  및 유입속도  $V_{in}$ 의 값은 No heat sink의 경우를 기준치로 볼 때, Both heat sinks의 경우는 각각 199% 및 80%, Lower heat sinks의 경우는 162% 및 87%, Upper heat sinks의 경우는 150% 및 86% 정도를 각각 나타내었다. 또한 유입 유량  $Q_{in}$ 의 값은 상기의 유입구 면적  $A_{in}$ 의 일정한 값에 각 경우별 유입속도  $V_{in}$ 의 값을 곱한 것이므로, No heat sink의 경우에 대한 각 경우별 유입 유량  $Q_{in}$ 의 비율들이 위의 각 경우별 유입속도  $V_{in}$ 의 비율들과 같다. 따라서 히트 싱크 부착이 많은 경우일수록 압력손실계수 값은 커지고 유입 속도와 유입 유량의 값은 작아짐을 알 수 있다.

유입구의 난류 운동 에너지,  $x_{in}$ 은 유입 속도,  $V_{in}$ 의 10% 정도를 난류 성분으로 가정하였으며 유입구의 난류 운동 에너지 소산율,  $\varepsilon_{in}$ 은 유입구의 폭(20.3 mm)을 특성 길이,  $l$ 을 이용하여 정하였다.  $y=498.0$  mm인 유출구는 시스템의 상부 끝 부분에 위치해 있으며 여기에서의 공기 유동 방향

은 시스템 외부로 빠져나가는 방향이다. 이는 시스템 내부의 공기 압력이 외부보다 상대적으로 높기 때문이다. 즉, 유출구에서 공기 유동이 시스템 내부로 유입되는 역류는 발생하지 않는다. 따라서 유출구에서의 모든 종속 변수의 경계 조건은 Neumann 조건을 사용하였으며, 이러한 조건으로 계산된 유출구에서의 유동 결과에서도 역류는 발생하지 않음을 확인하였다.  $z=0$  mm와  $z=15.8$  mm의 경계면은 기하학적으로 대칭면이므로 모든 종속 변수에 대해 대칭경계조건을 부여하였다. 이상의 각 경계면에서 부여된 경계 조건들을 Table 3에 정리하여 나타내었다.

계산영역내에 존재하는 모든 벽면에서는 아래에 나타내어진 바와 같은 벽함수를 써서 벽면 최인접 위치에서 벽면에 평행한 방향의 속도  $u_R$ , 온도  $T_R$ , 난류 운동 에너지  $\chi_R$ , 그리고 난류 운동 에너지 소산율  $\epsilon_R$ 을 계산하였다.

벽면 최인접 격자점에서의 속도  $u_R$ 은 아래 식과 같이 정의된다.

$$\frac{u_R}{u_*} = \begin{cases} y^+ & (y^+ \leq 11.5) \\ \frac{\ln(9.0y^+)}{K} & (y^+ > 11.5) \end{cases} \quad (13)$$

**Table 2** Values of  $K$ ,  $n$ ,  $V_{in}$  and  $Q_{in}$  for four cases.

Cases	K	n	$V_{in}$ (m/s)	$Q_{in}$ (ℓ/min)
No heat sink	1220	1.8	2.90	55.8
Both heat sinks	2432	1.8	2.33	44.8
Lower heat sinks	1798	1.8	2.51	48.3
Upper heat sinks	1824	1.8	2.50	48.1

여기서  $K$ 는 von Kármán 상수로서 0.435이며,  $y^+$ 와  $u_*$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} y^+ &= u_* y_1 / \nu \\ u_* &= \sqrt{\tau_w / \rho} \\ \tau_w &= -\mu \left( \frac{\partial u_R}{\partial n} \right)_{wall} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $y_1$ 는 벽으로부터 최인접 격자점까지의 거리이고,  $n$ 은 벽으로부터의 수직좌표이다.

벽면 최인접 격자점에서의 온도  $T_R$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{T_w - T_R}{T_*} = \begin{cases} \sigma y^+ & (y^+ \leq 11.5) \\ \sigma \left( \frac{u_R}{u_*} + P \right) & (y^+ > 11.5) \end{cases} \quad (15)$$

여기서  $T_w$ 는 벽면에서의 온도이고,  $T_*$ 와  $P$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} T_* &= -\frac{\dot{q}''_w}{\rho C_p u_*} \\ P &= 9.0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_t} - 1 \right) \left( \frac{\sigma}{\sigma_t} \right)^{-1/4} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,  $\dot{q}''_w$ 는 벽면으로부터의 열유속이고,  $\sigma$  및  $\sigma_t$ 는 각각 Prandtl 수 및 난류 Prandtl수이다.

벽면 최인접 격자점에서의 난류 운동 에너지  $\chi_R$  및 난류 운동 에너지 소산율  $\epsilon_R$ 는 아래 식과 같이 정의된다.

$$\chi_R = \frac{\tau_w / \rho}{C_\mu^{1/2}} \quad (17)$$

$$\epsilon_R = \frac{C_\mu \chi_R^{3/2}}{K y_1} \quad (18)$$

여기서  $y_1$ 는 벽으로부터 최인접 격자점까지의 거리를 의미한다.

**Table 3** Boundary conditions.

Coordinates (mm)	$u$ (m/s)	$v$ (m/s)	$w$ (m/s)	$\chi$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	$T$ (°C)
$x=0$ & $x=20.3$	$u_{x=0} = u_{x=20.3}$	$v_{x=0} = v_{x=20.3}$	$w_{x=0} = w_{x=20.3}$	$\chi_{x=0} = \chi_{x=20.3}$	$\epsilon_{x=0} = \epsilon_{x=20.3}$	$T_{x=0} = T_{x=20.3}$
$y=0$	0	Eq. (12)	0	$(0.1 V_{in})^2 / 2$	$0.09^{(3/4)} \cdot \chi_{in}^{(3/2)} / \ell$	25
$y=498.0$	$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial v}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial w}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \chi}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$
$z=0$ & $z=15.8$	0	$\frac{\partial v}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial w}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \chi}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

## 2.5 수치 해석 방법

본 연구에서는 상용 프로그램인 FLUENT V. 4.2.5<sup>(9)</sup>를 이용하여 수치해석을 수행하였다. FLUENT는 유한체적법(finite volume method)에 근간을 둔 Navier-Stokes 방정식 풀이용 상용 프로그램이며 비엇갈림(non-staggered) 격자 방식을 채용하고 있다. 또한 이 프로그램은 SIMPLE 알고리즘에 의한 반복법을 사용하며 대류항의 처리를 위한 공간 도식(scheme)으로는 멱승 도식(power-law-scheme)을 사용한다.

본 연구의 격자 구성 가운데 유동 입구, 발열 부품 및 히트 싱크 등 속도 및 온도 구배가 클 것으로 예상되는 곳에는 비교적 조밀한 격자를 분포시켰으며 Fig. 2의 수치 계산 모델에 나타난 좌표에서  $x$  방향으로 15개,  $y$  방향으로 187개 그리고  $z$  방향으로 11개로서 총 30855개 격자가 본 연구의 수치 계산 모델에 분포되었다. 이 가운데 하나의 히트 싱크의 격자 구성은  $x$  방향으로 5개(즉, 베이스 부분 1개와 핀 부분 4개),  $y$  방향으로 3개 그리고  $z$  방향으로 6개(각 핀 부분마다 1개씩으로 총 3개, 그리고 핀과 핀 사이의 각 부분마다 1개씩으로 총 3개)로서 총 90개의 격자가 각 히트 싱크에 분포되었다. 본 연구 모델은 강제 대류 열전달 문제에 해당하므로 기본 방정식의 풀이 순서로는 유동장을 먼저 수립시킨 뒤 온도장을 구하였다. 반복 계산시 사용한 하향 이완 계수로는 속도, 압력, 난류 및 온도 변수들에 대해서 각각 0.3, 0.3, 0.2 및 0.5 정도를 사용하였다.

반복 계산시 종속 변수들의 수렴성을 판정하기 위하여 다음과 같은 Residual 값,  $R$ 이 조사되었다.

$$R = \sum_{\text{all domain}} | \sum a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p | \quad (19)$$

여기서 하첨자  $nb$ 와  $p$ 는 각각 인접 격자점과 계산이 수행되는 중앙 격자점을 의미하며  $a$ ,  $b$  및  $\phi$ 는 각각 이산화 방정식의 계수 값, 상수 항 및 종속 변수를 의미한다. 속도 및 난류 변수 값은  $R$  값이  $1 \times 10^{-3}$  이하까지 내려갔을 때 수렴된 것으로 판정하였으며, 온도 값은 해의 정확성을 높이기 위해  $R$  값이  $1 \times 10^{-6}$  이하까지 내려갔을 때 수렴된 것으로 판정하였다. 계산을 수행하기 위해 이용된 컴퓨터의 기종은 Sun Sparc 10 Workstation이며 하나의 계산 경우당 약 8시간 정도의 계산 시간이 소요되었다.

## 3. 결과 및 고찰

앞에서 정한 히트 싱크 부착의 경우들에 대하여, 각 경우마다 하나의 전자 부품당 발열량,  $Q_c$ 를 0.625W, 0.83W 및 1.047W로 33% 씩 증가시키면서 모두 12가지 경우에 대해 계산 영역 내부에서의 전자 부품의 온도 분포를 계산하였다. 여기에서 선정된 하나의 전자 부품당 발열량은 히트 싱크를 이용하는 전자 통신 시스템에서 하나의 전자 부품이 통상적으로 소모하는 발열량에 해당된다.

### 3.1 냉각 성능 평가 방법

본 연구에서는 각 히트 싱크 부착 방식의 경우와 다른 냉각 성능을 상호 비교하는 방법으로써 다음과 같이 부품 단위의 냉각 성능 평가 방법과 시스템 단위의 냉각 성능 평가 방법을 이용하였다.<sup>(10, 11)</sup>

#### 부품 단위의 냉각 성능 평가 방법

전자 통신 시스템의 부품 단위의 냉각 성능을 평가하는 인자로서 부품표면온도  $T_c$ 가 이용된다. 부품표면온도  $T_c$ 는 본 연구에서 다음과 같이 하나의 부품 표면에 분포하는 국부 온도들을 평균한 온도로 정의하였다.

$$T_c = \int_A T dA / \int_A dA \quad (20)$$

여기서  $T$  및  $A$ 는 각각 부품의 표면국부온도 및 부품의 표면적을 의미한다. 전자 통신 시스템에서 부품 단위의 냉각 성능 비교는 부품표면온도,  $T_c$ 를 정량적으로 비교함으로써 판단될 수 있다. 즉, 히트 싱크 부착 여부가 다른 경우들 중에서 동일한 높이(Fig. 2의  $y$  좌표)에 위치한 전자 부품들의  $T_c$ 를 각각 비교하여  $T_c$ 가 낮은 경우가 높은 경우보다 더 우수한 냉각 성능을 가진다고 말할 수 있다.

일반적으로 전자 부품의 표면 온도가 최대 허용 동작온도인 75°C보다 높으면 성능이 열적으로 불안정해 진다고 알려져 있다.<sup>(11)</sup> 이때의 표면 온도란 엄밀하게 볼 때 부품 표면국부온도로 보는 것이 정확한 것이다. 따라서 부품의 표면국부온도들을 평균한 온도인 부품표면온도  $T_c$ 를 표면 온도로 간주하여 최대 허용동작온도와 비교함으로써 냉각 성능의 안정성을 논하는 것은 부품 표면이 국부적으로 불안정한 곳도 안정한 곳으로 간주될 가능성을 안

고 있다. 그러나 대부분의 전자 부품의 표면적이 작아서 최대 부품 표면온도와 부품표면온도  $T_c$ 의 차이가 불과 1°C 이내의 값을 가지므로 부품 표면온도  $T_c$ 를 표면 온도로 간주하여도 타당하며 이렇게 하는 것이 표현상의 간편성을 가질 수 있다고 판단된다.

각 경우별 부품표면온도  $T_c$ 들을 이용하여 아래의 식 (21)에 정의된, 부품 높이  $y$ 에서의 부품표면온도 감소율  $\varphi_c$ 를 산정함으로써 Both heat sinks, Upper heat sinks 및 Lower heat sinks 경우의 냉각 성능들이 No heat sink 경우에 비해 얼마나 우수하게 되는가를 정량적으로 알 수 있다.

$$\varphi_{c, \text{Yes}} = (T_{c, \text{No}} - T_{c, \text{Yes}}) / [(T_{c, \text{No}})_y - T_{in}] \quad (21)$$

여기서 하첨자 No는 No heat sink의 경우를 뜻하며 하첨자 Yes는 Both heat sinks, Upper heat sinks 및 Lower heat sinks 경우 중에서 하나를 의미한다.

#### 시스템 단위의 냉각 성능 평가 방법

부품표면온도  $T_c$ 에 의한 냉각 성능 비교는 각 히트 싱크 부착 경우에서의 동일 높이 위치의 부품 표면온도들을 상호 비교함으로써 냉각 성능 우열을 논하므로 이때의 냉각 성능 비교는 부품 단위에서 이루어진다고 볼 수 있다. 이러한 부품 단위의 냉각 성능 비교는 전자통신 시스템 내의 세부적인 비교가 이루어지게 되나 각 히트 싱크 부착 경우의 냉각 성능 우열이 시스템 내에 위치한 부품별로 다르게 되는 경우가 생길 수 있다. 이럴 경우, 전자통신 시스템의 열설계시 히트 싱크 부착 방식 선택의 판단에 있어서 부품 단위의 냉각 성능 비교만으로는 충분치 못하다. 따라서 각 부품 단위의 냉각 성능을 평균한 개념의 시스템 차원의 냉각 성능 비교 방법이 필요하게 되며 이를 위해 시스템 열저항  $R_s$ 가 이용된다. 박중홍과 이재현<sup>(10)</sup>은 시스템 열저항을 이용하여 전자 장비의 배열 구성이 서로 다른 경우들에 대하여 시스템 단위의 냉각 성능을 비교 분석한 바가 있다. 본 연구에서도 시스템내 네 가지 종류의 히트 싱크 부착의 경우들에 대해 시스템 단위의 냉각 성능을 비교 하기 위하여 시스템 열저항  $R_s$ 를 아래와 같이 정의하여 사용하였다.

$$R_s = (T_s - T_{in}) / Q_s \quad (22)$$

여기서  $T_s$ ,  $T_{in}$  및  $Q_s$ 는 각각 시스템 온도, 유

입 공기 온도 및 시스템의 총 발열량을 의미한다. 시스템 온도,  $T_s$ 는 식 (23)에 정의한 바와 같이 시스템 내에 있는 모든 전자 부품 표면 온도,  $T_c$ 를 평균한 것으로서  $T_s$ 를 이용하면 복잡한 온도로 분포되어 있는 시스템 내의 부품 표면 온도들을 하나의 온도로서 표현할 수 있다.

$$T_s = \sum_n T_c / n \quad (23)$$

여기에서  $n$ 은 시스템 내에 있는 전자 부품의 총 갯수를 의미한다.

또한 시스템의 발열량,  $Q_s$ 는 식 (24)에 정의한 바와 같이 시스템내에 있는 전자 부품들의 발열량,  $Q_c$ 를 모두 합한 것이다.

$$Q_s = \sum_n Q_c \quad (24)$$

위에서 정의한 시스템 열저항,  $R_s$ 에 대한 개념을 이용하면, 동일한 시스템 발열량에 대해 시스템 열저항 값이 작을 수록 시스템 온도가 낮아지기 때문에 시스템 단위의 냉각 성능이 좋아진다고 말할 수 있다.

식 (21)에서 정의된 바와 유사하게 시스템 단위에서도 다음과 같이 시스템 열저항 감소율  $\varphi_s$ 를 정의하여 Both heat sinks, Upper heat sinks 및 Lower heat sinks 경우의 시스템 단위의 냉각 성능 우수 정도를 정량적인 값으로 계산해볼 수 있다.

$$\varphi_{s, \text{Yes}} = (R_{s, \text{No}} - R_{s, \text{Yes}}) / R_{s, \text{No}} \quad (25)$$

3.2 히트 싱크 부착 유무에 따른 냉각 성능 비교  
송풍 동력이 일정할 때, 모듈 전체에 히트 싱크가 부착되지 않은 경우인 No heat sink의 경우와 모듈 전체에 부착된 경우인 Both heat sinks의 경우에 대하여 부품 단위의 냉각 성능 비교와 시스템 단위의 냉각 성능 비교가 이루어졌다.

부품 당 발열량,  $Q_c$ 가 0.625W, 0.83W 및 1.047W로 33%씩 증가할 때 시스템 높이,  $y$ 방향에 따른 부품표면온도,  $T_c$ 를 조사하였으며 세 가지의 부품당 발열량 가운데서 0.625W 및 1.047W의 부품당 발열량에서의 결과를 각각 Fig. 4(a) 및 (b)에 나타내었다.  $Q_c=0.625W$ 일 때의 부품표면온도 분포인 Fig. 4(a)를 살펴 보면 No heat sink의 경우에 부품표면온도가 최소 44°C에서 최대 58°C까지 높이  $y$ 에 따라 상승하는 분포를 나타낸다. Both



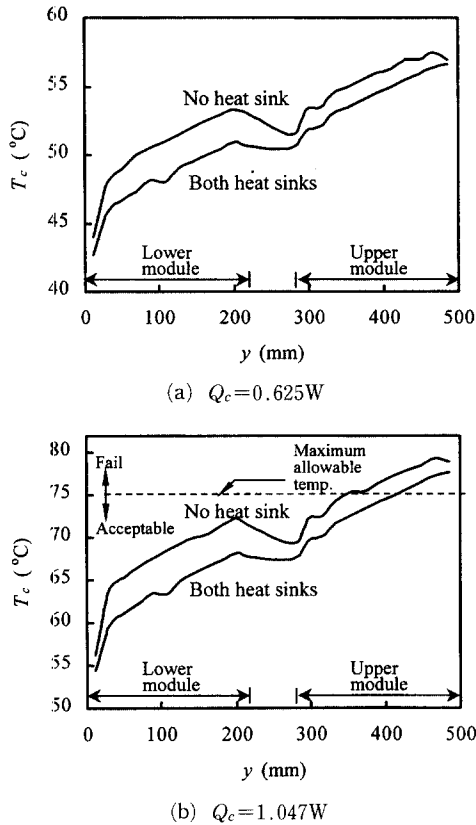


Fig. 4 Comparisons of the surface temperature of electronic components between the cases of No heat sink and Both heat sinks.

heat sinks의 경우에는 부품표면온도가 No heat sink의 경우보다 감소하여 최소 43°C에서 최대 56°C까지  $y$ 를 따라 분포한다. 이러한 온도 분포 경향을 종합하면 히트 싱크 부착에 의해 부품표면온도의 상승이 효과적으로 억제되고 있으며 Both heat sinks 경우의 부품 단위의 냉각 성능이 모든  $y$  위치에서 증가함을 알 수 있다. 또한 그림에서 Both heat sinks의 경우에  $y=110 \text{ mm}$  위치 근방에서의 부품표면온도가 이 위치보다 아래 위치에 있는 부품표면온도와 같은 값으로서 일정하게 유지되는 현상, 즉 일반적인 채널 유동의 냉각 특성과는 약간 상반된 특성을 보이고 있다. 이러한 현상은 히트 싱크 부착에 의해 상당히 복잡한 난류 유동장이 이 위치 근방에서 형성되고 있어서 이에 따른 냉각 특성의 변화 때문인 것으로 보인다. 이러한 현상을 규명하기 위해서는 이 위치 근방에서의 유속, 난류 강도 및 대류 열전달계수 등을 좀 더

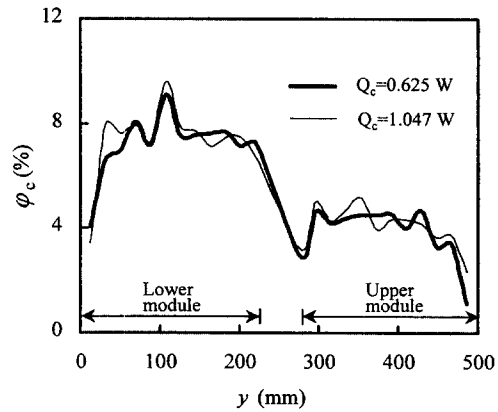


Fig. 5 Cooling performance for the component level in the cases of Both heat sinks.

심층적으로 조사해 보는 것이 필요하다고 사료된다.

$Q_c = 1.047 \text{ W}$ 일 때의 부품표면온도 분포인 Fig. 4(b)를 살펴 보면 두 경우 모두 높이에 따른 증가 성향은  $Q_c = 0.625 \text{ W}$ 일 때와 유사하다. 그러나 No heat sink의 경우와 Both heat sinks의 경우 모두에서 상부 모듈쪽에서의 부품표면온도가 최대 허용동작온도 ( $T_{\max} = 75^\circ\text{C}$ )보다 높게 나타나서 전자 부품이 열적으로 불안정함을 보였다. 부품의 열적 불안정이 발생하는 위치는 No heat sink의 경우에 대략  $y = 370 \text{ mm}$ 이며 Both heat sinks의 경우에는 대략  $y = 410 \text{ mm}$ 이다. 즉, 모듈 전체에 히트 싱크를 부착함으로써 히트 싱크가 부착되지 않은 경우보다 부품 불안정 시작 위치가 약간 높아져 부품 불안정 영역이 다소 작아졌음을 알 수 있다.

Both heat sinks 경우의 부품 단위 냉각 성능 증가율을 정량적으로 고찰해보기 위해, 0.625 W 및 1.047 W의 부품 당 발열량에 대한 각  $y$ 위치에서의 부품표면온도 감소율  $\phi_{c, \text{Both}}$ 의 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서  $Q_c = 0.625 \text{ W}$ 일 때를 살펴 보면, 하단 모듈에서  $\phi_{c, \text{Both}}$ 가  $y$ 를 따라 증가하다가  $y = 100 \text{ mm}$  근방에서 최대치를 이룬 후 감소하는 분포를 나타내며 평균 8%의 값을 가진다. 상단 모듈에서  $\phi_{c, \text{Both}}$ 가  $y$ 를 따라 증가 혹은 감소하다가  $y = 486 \text{ mm}$ 에서 최소치로 떨어지는 분포를 이루며 평균 2%의 값을 가진다. 하단 모듈에서의  $\phi_{c, \text{Both}}$  값의 분포가 상단 모듈보다 크므로 하단 모듈에서 히트 싱크에 의한 냉각 성능 증대의 역할이 더 크게 나타난다고 말할 수 있다.  $\phi_{c, \text{Both}}$ 의 값을  $y$  전

Table 4 Comparison of the system thermal resistance between No heat sink and Both heat sinks.

$R_s$ (°C/W)	No heat sink			Both heat sinks		
	$Q_c=0.625$ W	$Q_c=0.83$ W	$Q_c=1.047$ W	$Q_c=0.625$ W	$Q_c=0.83$ W	$Q_c=1.047$ W
	3.7	3.7	3.7	3.5	3.5	3.5

체를 따라 평균한 값은 약 5%가 되므로 히트 싱크를 부착함으로써 부품 단위의 냉각 성능을 전체적으로 평균 5% 정도 증대시킬 수 있다고 말할 수 있다. 아울러 그림에서  $Q_c=1.047$ W일 때의  $\varphi_{c, Both}$ 의 분포가  $Q_c=0.625$  W일 때의  $\varphi_{c, Both}$ 의 분포와 거의 유사함을 보인다. 따라서 발열량 증가에 따른  $\varphi_c$ 의 변화는 미소함을 알 수 있다.

히트 싱크 유무에 따라서 세 가지 종류의 부품당 발열량에 대한 시스템 열저항  $R_s$ 의 변화를 Table 4에 비교하였다. 표에서 No heat sink 및 Both heat sinks 경우의 시스템 열저항  $R_s$ 가 세 가지 종류의 부품당 발열량에 관계없이 일정한 값을 가지며 Both heat sinks 경우의 시스템 열저항  $R_s$ 가 No heat sink의 경우보다  $0.2^\circ\text{C}/\text{W}$  정도 감소함을 보인다. 식 (25)에 의해 Both heat sinks 경우의 시스템 열저항 감소율  $\varphi_{s, Both}$ 의 값을 구해보면 약 5% 정도가 되며 이 값은 부품 단위의 냉각 성능을  $y$ 에 대해 전체적으로 평균한 값과 같다. 따라서 송풍 동력이 일정한 상태에서 모듈 전체에 히트 싱크를 부착함으로써 냉각 성능이 본 연구의 발열량 범위내에서 약 5% 정도 증가한다고 말할 수 있다.

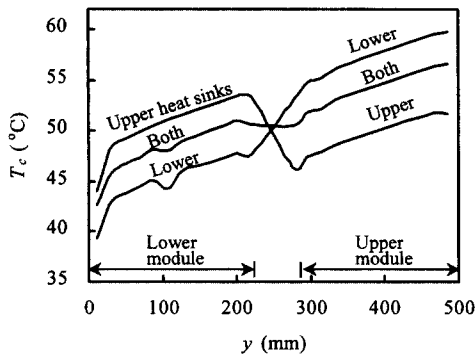
### 3.3 하단 모듈 혹은 상단 모듈에만 히트 싱크 부착된 경우의 냉각 성능 비교

앞 절에서 나타난 바와 같이 Both heat sinks의 경우, 모듈 전체에 히트 싱크가 부착되므로 부품의 열전달 면적은 증가되지만 냉각 공기의 압력 손실이 증가하여 채널 내로의 유입 유량이 감소하므로 Fig. 4(b)에서 나타난 바와 같이 1 W 정도의 부품당 발열량에 대해서 상단 모듈 일부분에서 최대 허용 동작온도를 초과 하며 시스템 전체적으로 겨우 5% 정도의 냉각 성능 증가 등 히트 싱크 부착에 따르는 냉각 성능 향상이 크지 않았다. 이와 같이 히트 싱크 부착으로 인해 열전달 증가와 유량 감소라는 상반된 논리가 발생하므로 상단 혹은 하단 모듈중 어느 하나의 모듈의 히트 싱크들을 제거하여 유량 감소를 줄임으로써 냉각 성능을 보다 좋게 하는 모듈별 히트 싱크 부착의 개선 방안을 살펴 보고자

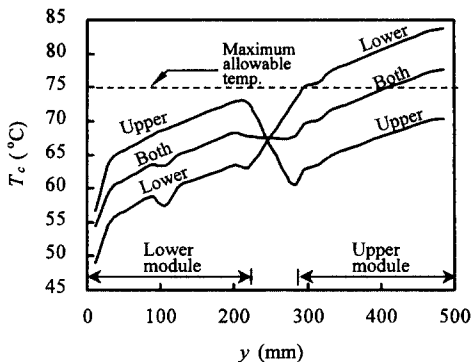
한다. 그러면 어느 모듈의 히트 싱크를 제거하는 것이 더 나은 방안일까? 이를 위해 Both heat sinks의 경우와 하단 모듈에만 히트 싱크가 부착된 경우인 Lower heat sinks의 경우, 그리고 상단 모듈에만 히트 싱크가 부착된 경우인 Upper heat sinks의 경우 등 세 경우에 대하여 송풍 동력이 일정할 때, 부품 단위의 냉각 성능 비교와 시스템 단위의 냉각 성능 비교가 이루어졌다.

두 가지 종류의 부품 당 발열량에 대하여 모듈별 히트 싱크 부착 여부에 따른 시스템 높이( $y$ ) 방향으로의 부품표면온도  $T_c$ 를 각각 Fig. 6(a) 및 (b)에 나타내었다.  $Q_c=0.625$  W 일 때의 부품표면온도 분포인 Fig. 6(a)를 살펴 보면 하단 모듈에서, Lower heat sinks의 경우에는 상단 모듈에 히트 싱크가 부착되지 않았으므로 Both heat sinks의 경우에 비하여 시스템 전체의 유동저항이 감소하여 냉각 유량이 많아지므로 Both heat sinks의 경우보다 부품표면온도가 더 낮은 분포를 보인다. Fig. 4(a)의 Both heat sinks의 경우에서와 같이 여기에서도  $y=110$  mm 근방에서의 Lower heat sinks의 경우와 Both heat sinks의 경우에 부품표면온도가 이 위치보다 아래 위치에 있는 부품표면온도에 비해 낮아지는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 히트 싱크 부착에 의해 상당히 복잡한 난류 유동장이 이 위치 근방에서 형성되고 있어서 이에 따른 냉각 특성의 변화 때문인 것으로 보인다. Upper heat sinks의 경우에는 Both heat sinks의 경우에 비하여 송풍량은 증가되나 하단 모듈에 히트 싱크가 부착되지 않았으므로 Both heat sinks의 경우보다 부품표면온도가 더 높게 분포되었다.

그러나 이 그림의 상단 모듈쪽을 살펴 보면, Lower heat sinks의 경우에는 하단 모듈을 지나면서 더워진 공기가 히트 싱크가 부착되지 않은 상단 모듈로 흐르기 때문에 Both heat sinks의 경우보다 더 높은 부품표면온도를 보인다. Upper heat sinks의 경우에는 Both heat sinks의 경우에 비하여 증가된 송풍량 때문에 Both heat sinks의 경우보다 부품표면온도가 더 낮게 분포되었다.



(a)  $Q_c=0.625\text{W}$



(b)  $Q_c=1.047\text{W}$

Fig. 6 Comparisons of the surface temperature of electronic components.

$Q_c=1.047\text{W}$ 일 때의 부품표면온도 분포인 Fig. 6(b)에서도 세 가지의 히트 싱크 부착 방식에서의 부품표면온도 특성이 유사하다. 그러나 부품 당 발열량이 이전보다 크므로 상단 모듈의 일부 구간에서 Lower heat sinks의 경우와 Both heat sinks의 경우에 부품표면온도가 최대 허용동작온도를 넘는 열적 불안정성이 보인다. 그러나 Upper heat sinks의 경우는 이러한 불안정이 발생하지 않음을 볼 수 있다. 따라서 부품 당 발열량이 1 W 정도일 때, Lower heat sinks의 경우보다 Upper heat sinks의 경우를 취함으로써 시스템 전체에서 부품의 열적 불안정을 피할 수 있음을 알 수 있다. 아울러, 전자 통신 시스템의 설계 온도인 75°C 이하를 유지시키는 데 요구되는 송풍 동력은 부품 당 발열량이 1 W 보다 작을 때에는 Both heat sinks, Lower heat sinks 및 Upper heat sinks의 모든 경우에 대해 통신 시스템에서 통상적으로 이용하는 0.64W 정도

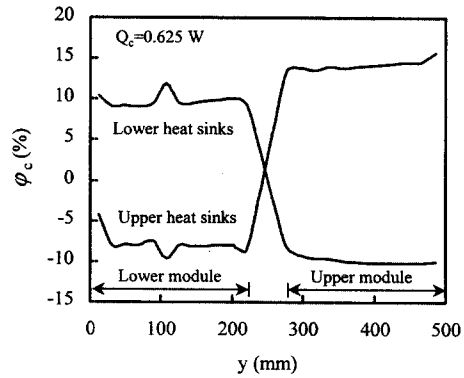


Fig. 7 Comparison of Cooling performance for the component level :  $Q_c=0.625\text{W}$ .

이런 되고, 부품 당 발열량이 1W 근방에 이르게 될 때에는 Upper heat sinks의 경우에는 0.64W 정도로서 설계 온도 이하를 유지시키는 것이 가능하나 Both heat sinks 및 Lower heat sinks의 경우에는 0.64W 이상의 송풍 동력이 요구된다.

3.2 절에서  $\phi_{c, \text{Both}}$ 의 논의와 같이 여기에서도 부품 단위의 냉각 성능의 정량화를 위해, 0.625W의 부품 당 발열량일 때 Upper heat sinks 및 Lower heat sinks 경우의 각  $y$ 위치에서의  $\phi_c$ 의 분포를 Fig.7에 나타내었다. 그림에서 하단 모듈쪽을 살펴 보면, Lower heat sinks 및 Upper heat sinks 경우에서 부품표면온도 감소율  $\phi_c$ 의 평균 값이 각각 약 22% 및 -0.6%으로서 Lower heat sinks 경우의 부품 단위의 냉각 성능이 상당히 우수해짐을 알 수 있다. 여기서 음수의  $\phi_c$ 값은 냉각 성능이 No heat sink 경우보다 더 나빠짐을 의미한다. 반면에, 상단 모듈쪽에서는 Lower heat sinks 및 Upper heat sinks 경우에서  $\phi_c$ 의 평균 값이 각각 약 -7% 및 18%으로서 냉각 성능이 Lower heat sinks 경우에 상당히 감소하며 Upper heat sinks 경우에는 상당히 증가함을 알 수 있다. Lower heat sinks 및 Upper heat sinks의 각 경우에서  $\phi_c$ 의 값을  $y$ 전체를 따라 평균한 값은 각각 7% 및 9%이므로 Upper heat sinks의 경우가 가장 우수한 부품 단위의 냉각 성능을 가짐을 알 수 있다.

Lower heat sinks의 경우와 Upper heat sinks의 경우에 대하여 세 가지 종류의 부품 당 발열량에 따라 시스템 열저항  $R_s$ 의 변화를 Table 5에 비교하였다. 표에서 시스템 열저항  $R_s$ 를 살펴 보면, 세 가지 종류의 부품 당 발열량에 대해 Upper

**Table 5** Comparison of the system thermal resistance between Lower heat sinks and Upper heat sinks.

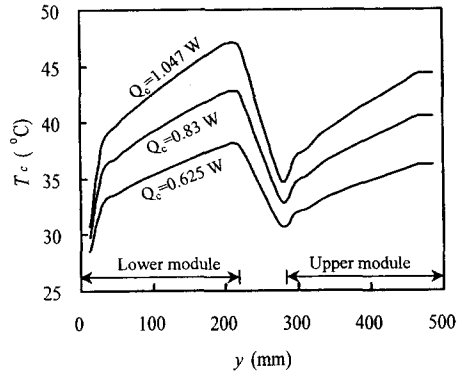
$R_s$ (°C/W)	Lower heat sinks			Upper heat sinks		
	$Q_c=0.625$ W	$Q_c=0.83$ W	$Q_c=1.047$ W	$Q_c=0.625$ W	$Q_c=0.83$ W	$Q_c=1.047$ W
	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4

heat sinks의 경우가 Lower heat sinks의 경우보다 0.1°C/W정도 감소하였으며 Table 4에 나타난 No heat sink의 경우와 Both heat sinks의 경우보다도 더 작다.

식 (25)에 의해 Upper heat sinks 및 Lower heat sinks 경우의 시스템 열저항 감소율  $\varphi_s$ , Upper 및  $\varphi_s$ , Lower 값을 구해보면 각각 8% 및 5%가 된다. 따라서 Upper heat sinks 경우의 시스템 단위의 냉각성능이 가장 우수함을 알 수 있다.

부품 단위 및 시스템 단위의 냉각 성능을 종합적으로 고려해 볼 때, Upper heat sinks의 경우가 Both heat sinks의 경우보다 4% 정도 부품 단위의 냉각 성능이 증가하며 시스템 단위의 냉각성능이 Both heat sinks의 경우보다 3% 증가하였다. 그리고 본 연구의 발열량 범위에서 부품의 열적 불안정이 발생하지 않았다. 따라서 20.3 mm(유입구의 폭)×15.8 mm(유입구의 깊이) 크기의 유입구의 면적에 대한 유입 유량이 45 l/min~56 l/min의 범위, 그리고 부품 당 발열량이 0.6W~1W 정도의 범위 내에서, 모듈이 상하로 적층되는 전자 통신 시스템에서 냉각 성능을 높이기 위해 모듈별로 히트 싱크를 부착할 때에는 상단 모듈에만 히트 싱크를 부착하는 것이 하단 및 상단 모듈에 모두 부착한 경우보다 더 좋은 방안임을 알 수 있다. 이러한 결과는 상기의 유입 유량과 발열량에서 송풍 동력이 일정한 전자 통신 시스템의 경우에서 적용될 수 있다. 그러므로 보다 광범위한 유입 유량과 발열량에 대하여 상기 결과의 적용 여부를 알기 위해, 유입 유량과 발열량의 변화에 따른 히트 싱크 부착된 전자 통신 시스템의 냉각 특성에 대한 향후 연구가 필요하다.

전자 통신 시스템 내의 냉각 공기의 온도 분포는 시스템의 냉각 설계시에 적정한 송풍 팬 선정 등에 자료로써 활용할 수 있다. 이를 위해, Upper heat sink의 경우에 대해 세 가지 종류의 부품당 발열량별로  $y$ 에 따른 히트 싱크 부근( $x=17.5$  mm 및  $z=4.6$  mm)에서의 공기 온도 분포를 Fig.8에 나타내었다. 본 연구에서 Upper heat sink의 경우가



**Fig. 8** Distributions of the air temperature in the cases of Upper heat sinks( $x=17.5$  mm and  $z=4.6$  mm).

가장 효율 좋은 방식으로 선정되었으므로, 이 방식이 전자 통신 시스템의 냉각 설계시에 활용성이 높을 것이며 이와 같은 맥락에서 Upper heat sink의 경우의 공기 온도 분포 자료 또한 필요하다고 판단된다. 그림을 살펴 보면, 하단 모듈에는 히트 싱크가 부착되지 않으므로 높아진 부품의 온도로부터의 영향을 받아 주위의 공기 온도의  $y$ 에 따른 증가율이 세 가지 부품 당 발열량 모두에서 크게 나타난다. 그리고 동일한  $y$ 에서 0.625W의 부품 당 발열량에서 0.83W의 부품 당 발열량으로 증가할 때, 공기 온도가 평균 3°C 정도로 증가하며 또한 0.83W의 부품 당 발열량에서 1.047W의 부품당 발열량으로 증가할 때도 유사하다.

이와 반면에, 상단 모듈에서는 히트 싱크가 부착되므로 부품의 온도가 하단 모듈보다 낮으며 이렇게 상대적으로 낮은 부품 온도의 영향을 받아 주위의 공기 온도가 하단 모듈 보다 세 가지 부품 당 발열량 모두에서 낮게 분포한다. 각 부품 당 발열량별로 공기 온도 분포의 범위는 0.625W, 0.83W 및 1.047W의 부품 당 발열량에 대해 각각 28.5°C~38.0°C, 29.7°C~42.7°C 및 30.8°C~47.0°C를 나타낸다.

본 연구의 수치 모델에 대해 계산된 모든 결과가 냉각 설계의 자료로써 활용되기 위해, 검증될 필요

Table 6 Verification of present study.

y (mm)	$\Delta T_c$ (°C) (Present study)	$T_c$ (°C) (Park and Lee <sup>(10)</sup> )
30	10.3	7.5
90	14.5	11.3
150	18.0	13.8
200	19.1	14.9
300	20.0	15.5
350	24.1	20.3
410	25.0	23.7
470	26.0	26.0

가 있다. 이를 위해, PCB 및 발열 전자부품의 크기, 그리고 부품 발열량 등이 본 연구의 경우와 유사한 상태에서 실험적 연구를 수행한 박종홍과 이재현<sup>(10)</sup>의 연구에 대해 본 연구에서 수치 계산하였으며 두 결과 ( $V_{in}=3.55\text{m/s}$  및  $Q_c=0.625\text{W}$ )를 Table 6에서 비교하였다. 표에 나타난 바와 같이 본 연구의 부품표면온도의 상승치,  $T_c$ (부품표면온도,  $T_c$ 와 유입구 공기 온도,  $T_{in}$ 의 차이 값)이 박종홍과 이재현<sup>(10)</sup>의 연구보다 전체  $y$ 에 대해 평균 3°C 정도 높게 분포하였으며 박종홍과 이재현<sup>(10)</sup>의 연구보다 평균 15% 정도의 오차를 가졌다. 이러한 오차는 박종홍과 이재현<sup>(10)</sup>의 실험장치 내에 있는 각종 기구물 등의 실제 상황을 수치 모델로 완전히 묘사하기 어려운 수치해석적 한계에 의한 것으로 생각된다. 그러나 표에 나타난 본 연구의 온도 값과 박종홍과 이재현<sup>(10)</sup>의 온도 값들이  $y$ 에 따라 분포되는 경향이 유사하며 두 연구간의 오차 정도가 크지 않다. 그러므로 이러한 비교를 통해 볼 때, 본 연구의 수치 해석 방법에 의한 결과는 최대 15% 정도의 오차 범위 이내에서 타당성을 가진다고 말할 수 있다.

#### 4. 결 론

히트 싱크가 부착되는 전자 통신 시스템의 효율적 냉각 방안에 관한 수치적 연구가 수행되었다. 전자 통신 시스템의 모델은 히트 싱크가 부착된 전자 부품이 설치된 하단 모듈 및 상단 모듈로 구성되었다. 계산 조건으로서 No heat sink의 경우,

Both heat sinks의 경우, Lower heat sinks의 경우 및 Upper heat sinks의 경우 등 네 가지 경우가 고려되었다. 각 경우가 가지는 냉각 성능을 상호 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 송풍 동력이 일정한 상태에서 모듈 전체에 히트 싱크를 부착함으로써 히트 싱크가 없는 경우보다 냉각 성능이 약 5% 정도 증가하였다.

(2) 상단 모듈에만 히트 싱크를 부착한 경우는 모듈 전체에 히트 싱크 부착한 경우보다 부품 단위의 냉각성능은 약 4% 정도 증가하였고 시스템 단위의 냉각 성능이 약 3% 정도 증가하였다. 특히 본 연구의 발열량 범위에서 부품의 열적 불안정이 발생하지 않으므로 모듈 전체에 히트 싱크 부착한 경우의 냉각 성능을 개선하기 위한 효율적인 냉각 방식으로 볼 수 있다.

#### 후 기

이 연구의 일부는 한국 과학 재단 지정 티보 동력 기계 연구 센터의 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 김원태, 1996, "ISDN 정보통신 시스템에서의 열관리 및 전자부품실장 냉각기술," 대한기계학회지, Vol. 36, No. 4, pp. 351~364, ISSN 1225-5955.
- (2) Lau, K. S. and Mahajan, R. L., 1989, "Convective Heat Transfer from Longitudinal Fin Arrays in the Entry Region of Turbulent Flow," *Int. J. of Electronic Packaging*, Vol. 111, pp. 213~219.
- (3) Lehmann, G. L. and Kosteva, S. J., 1990, "A Study of Forced Convection Direct Air Cooling in the Downstream Vicinity of Heat Sinks," *Transactions of the ASME*, Vol. 112, pp. 234~240.
- (4) Bailey, D. A. and Lindquist, S. E., 1993, "Improved Heat-Transfer Rates for Impingement Cooling Fins," *Advances in Electronic Packaging ASME*, EEP-Vol. 4-2, pp. 819~826.
- (5) Wirtz, R. A. and Chen, W., 1993, "Longitudinal Fin Heat Sink Performance in Arrays of Low

- Profile Electronic Packages," *Advances in Electronic Packaging ASME*, EEP-Vol. 4-2, pp. 809~817.
- (6) Lee, S., Song, S. and Moran, K. P., 1995, "Constriction/Spreading Resistance Model for Electronics Packaging," *ASME/JSME Thermal Engineering Conference*, Vol. 4, pp. 199~206.
- (7) 김효경 譯, 1995, 空氣調和, 동명사, 改訂 3 版, pp. 210~211.
- (8) 박종홍, 이재현, 1996, "전자장비 냉각용 송풍 장치 설계기술," *대한기계학회지*, Vol. 36, No. 4, pp. 324~337, ISSN 1225-5955.
- (9) Fluent Inc., 1995, *User's Guide*, Version 4.3, Lebanon.
- (10) 박종홍, 이재현, 1996, "전자장비 캐비닛의 냉각특성에 관한 실험적 연구," *대한기계학회논문집(B)*, 제 20권 제7호, pp. 2356~2366.
- (11) 박종홍, 노홍구, 김광수, 김원태, 임예섭, 1991, "다수의 발열보드를 탑재한 캐비닛에서의 강제대류 냉각특성에 관한 실험적 연구," *대한기계학회 '91년도 추계학술대회 논문집*, pp. 616~619.