

히트 스프레더가 사용된 노트북 PC의 냉각성능에 관한 수치적 연구

노홍구[†] · 임경빈^{*}·박만홍^{**}

(2000년 3월 29일 접수, 2001년 5월 8일 심사완료)

Cooling Performance of a Notebook PC Mounted with Heat Spreader

Hong-Koo Noh, Kyung Bin Lim and Man Heung Park

Key Words : Notebook PC(노트북 컴퓨터), Heat Spreader(히트 스프레더), Cooling Performance(냉각성능)

Abstract

Parametric study to investigate the cooling performance of a notebook PC mounted with heat spreader has been numerically performed. Two cases of air-blowing and air-exhaust at inlet were tested. The cooling effect on parameters such as, inlet velocities in the cases of air-blowing and air-exhaust, materials of heat spreader, and CPU powers were simulated for two cases. Cooling performance in the case of air -blowing was better than the case of air-exhaust.

기호설명

- k : 열전도계수(W/m-K)
또는 난류운동에너지(m^2/s^2)
- p : 압력(N/m²)
- Q_{CPU} : CPU의 발열량(W)
- R_{CPU} : 열저항(W/°C)
- T : 온도(°C)
- T_{CPU} : CPU의 온도(°C)
- T_a : 대기 온도(°C)
- u_{in} : 유입구 속도(m/s)
- Pr : Prandtl 수
- β : 체적팽창계수(1/K)
- ρ : 유체의 밀도(kg/m³)
- μ : 유체의 점성계수(kg/m-s)
- ϵ : 난류운동에너지 소산율(m^2/s^3)

1. 서론

휴대용 컴퓨터인 노트북 PC(Personal Computer)의 이용이 최근 수년간 점차적으로 증가되면서 노트북 PC(이후로 노트북이라 약칭함.)의 성능이 빠른 속도로 발전되고 있다. 노트북의 성능 증가에 비례하여 노트북 내의 CPU(Central Processing Unit)의 발열량이 꾸준히 증가 되어, 과거의 66 MHz 486 급 노트북일 경우에 CPU 발열량은 4 W 정도였으나 현재의 300 ~ 900 MHz Pentium 급의 경우에 10 ~ 18 W, 수년이내의 900 ~ 1500 MHz 급의 경우에는 18 ~ 25 W 정도에 달할 전망이다.⁽¹⁾ 이에 반해 노트북의 크기는 점점 더 작아지는 추세이므로 CPU의 열적 환경은 아주 열악한 상황에 처하게 되어, 여타의 부품온도에 비해 CPU의 온도가 상당히 높아지는 CPU의 고온화(일명 '핫스팟'(hot-spot)이라 함.) 문제가 발생되고 있다. 노트북의 CPU 허용표면온도(limit case temperature), $T_{CPU, limit}$ 는 대략 85°C이며⁽²⁾ 이보다 낮은 온도를 유지하기

[†] 책임저자, 회원, 한국전자통신연구원
E-mail: nhk@etri.re.kr
TEL : (042)860-5132 FAX : (042)860-5804
^{*} 한밭대학교 기계공학부
^{**} 한국전력기술(주)

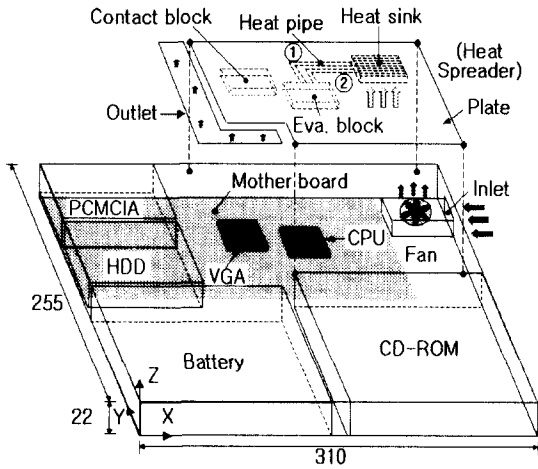


Fig. 1 Numerical model of notebook PC(unit: mm)

위해 CPU의 열을 효율적으로 방열하는 방안에 대한 연구가 필요하게 되었다.

노트북처럼 좁은 공간에서는 히트 스프레더(heat spreader)가 방열모듈로서 효율적이기 때문에, 이를 사용하는 노트북이 늘어나고 있다. 노트북의 CPU 방열에 대한 기존연구⁽²⁻⁵⁾를 살펴보면, Chapman⁽²⁾은 팬싱크를 사용하여 노트북을 냉각하는 연구를 수행하였으며 냉각공기의 유동분포 및 각 부품들의 온도 분포를 조사하였다. Xie와 Aghazadeh⁽³⁾는 히트파이프를 사용할 때, 히트파이프를 키보드에 연결하는 경우, 외부 알루미늄 플레이트에 연결하는 경우, 모니터 스크린에 연결하는 경우, 그리고 바닥면에 연결하는 경우 등 네가지의 히트파이프 열전달 경로에 대해 CPU의 열저항을 계산하였으며 외부 알루미늄 플레이트에 연결하는 경우의 냉각성능이 가장 우수함을 보고하였다. Goto⁽⁴⁾ 등은 힌지 히트파이프를 사용하여 CPU를 냉각하는 실용적인 연구 사례를 발표하였다. 이 경우에 12 W의 CPU 발열량까지 열적인 신뢰도를 가질 수 있음을 보고하였다. Neelakantan과 Addison⁽⁵⁾은 노트북이 놓여지는 테이블의 재질종류가 노트북의 냉각성능에 미치는 영향을 조사하였다. 이와 같이 지금까지의 기존 연구는 노트북 내에 팬싱크 혹은 히트파이프 등을 이용하는 연구가 주류를 이루고 있다. 팬싱크를 쓰는 기존의 연구중에서 유입구에서의 냉각공기 방향과 속

도크기 변화에 따른 연구는 거의 없다. 아울러 히트 스프레더를 냉각모듈로 사용한 경우에 대한 CPU의 냉각성능을 조사하는 기존 연구 또한 아직 드물다. 따라서 본 연구에서는 국내 노트북 개선모델의 냉각성능 증진을 위하여, 수치해석적 방법을 이용하여 히트 스프레더가 사용된 노트북에 관하여 유입구에서의 공기유입(air-blowing) 및 공기배출(air-exhaust) 속도의 크기, 히트 스프레더 재질종류, 그리고 CPU 발열량 등의 파라미터들을 변화시켜 정량적인 자료획득을 목적으로 하는 실용적인 연구를 수행하고자 한다.

2. 노트북의 수치모델설정

본 연구의 목적이 히트 스프레더가 사용된 기존 노트북의 냉각성능개선에 관한 것이므로, 본 연구의 노트북 수치모델은 히트 스프레더가 사용된 최근의 기존 상업용 노트북을 대상으로 모델화하였으며 이를 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1에 나타난 노트북 형상은 노트북의 액정화면(LCD 화면) 부분이 제외된 노트북 본체부분만을 보여주고 있으며, 이는 본 연구가 노트북 본체의 냉각에 주된 관심이 있기 때문이다. 또한 Fig. 1에 나타난 본체 형상은 기존 노트북 본체상의 키보드(keyboard)를 제거한 형상, 즉 본체 바닥으로부터 히트 스프레더가 위치한 높이까지만을 수치모델영역으로 설정하였다. 이는 노트북의 온도실측결과, 키보드를 제거한 상태에서도 부품들의 온도가 키보드가 존재하는 상태와 거의 동일하였으므로 수치계산상의 용량을 줄이기 위한 하나의 방법이다. 노트북 모델을 둘러싸고 있는 표면 전체 크기는 Fig. 1의 좌표를 참조하여, 310 mm(가로 x 방향) × 255 mm(세로 y 방향) × 22 mm(높이 z 방향)이다. 노트북 내부에 Battery, CD-ROM, HDD, PCMCIA 보드, Mother board, VGA 칩, CPU, 그리고 Fan 등이 Fig. 1과 같이 구성되어 있으며 이들 부품들의 크기, 열전도계수 및 발열량을 Table 1에 나타내었다. Table 1에 보이는 바와 같이 VGA 칩 및 CPU는 작은 체적에 비해 발열량이 크므로 핫스팟의 가능성이 있으

Table 1 Summary of the data for the components

| Component | Dimension (mm×mm×mm) | Thermal Conductivity (W/m-K) | Power (W) |
|-----------|----------------------|------------------------------|-----------|
| Battery | 158×95×22 | 90 | 5 |
| CD-ROM | 145×115×22 | 204 | 5 |
| HDD | 105×70×20 | 204 | 5 |
| PCMCIA | 105×80×20 | 204 | 5 |
| Mother | 250×135×2 | 25 | 5 |
| VGA | 33×33×10 | 18 | 4 |
| CPU | 33×33×10 | 18 | 13 |
| Fan | 30×30×6 | - | - |

Table 2 Summary of elements of the heat spreader

| Element | Dimension (mm×mm×mm) | Material | Thermal Conductivity (W/m-K) |
|---------------|------------------------|----------|------------------------------|
| Plate | 171×66×1+131×49×1 | Al | 204 |
| Contact block | 33×33×9 | Al | 204 |
| Eva. Block | 33×33×9 | Al | 204 |
| Heat pipes | ①: 60×4×2 ②: 50×4×2 | Cu | 5000* |
| Heat sink | 60×40×9 | Al | 204 |

*The value was calculated from experimental data.

며 이를 제어하기 위해 열확산모듈인 히트 스프레더가 사용된다. Fig. 1 에 나타난 바와 같이, 히트 스프레더(heat spreader)는 노트북의 상부표면에 위치되는 알루미늄 플레이트(plate)의 아래면에 접촉블럭(contact block), 증발블럭(evaporator block), 2 개 히트파이프(heat pipe ①과 ②), 그리고 히트싱크(heat sink)가 각각 부착되는 등 총 6 개의 구성요소로 이루어져 있으며 이들의 크기, 재료 및 열전도계수를 Table 2 에 자세히 나타내었다. 접촉블럭은 VGA 칩을 플레이트에 접촉시켜 칩의 열을 플레이트에 전달시키는 역할을 한다. 플레이트는 노트북의 상부 경계면에 인접하여 있으며 본 수치계산에서 하나의 블록으로 모델링되어 플레이트 내의 전도열전달이 계산되게 된다. 증발블럭은 CPU 를 히트파이프의 증발부에 접촉시켜 CPU 의 열을 히트파이프들에 전달하는 역할을 한다. 여기서의 히트파이프는 작동액체가 상변화하는 실제 히트파이프와 동일한 열전도계수를 갖는 고체 파이프로 간주

되었다. 히트파이프들을 거친 열은 히트싱크 및 플레이트에 확산된다. 히트싱크에 확산된 열은 히트싱크 바로 아래에 설치된 팬(fan)에 의해 유입구(inlet, 40 mm×6 mm)로부터 유입된 냉각공기에 의해 제거되어 유출구(outlet, 60 mm×115 mm)로 최종 유출된다. 팬의 형태는 직육면체 마치, 성냥갑 같은 형태로서, 팬의 우측면과 팬의 블레이드가 있는 면은 개방되어 있고 이외의 면들은 모두 막혀 있는 형태이다. 우측면은 노트북의 외표면상의 유입구에 인접되어 붙어 있으며 따라서 유입구로부터 유입된 냉각공기는 모두 팬 내부공간으로 흘러 들어간 후에 기류방향이 수직하게(z 방향) 바뀌어져 히트싱크에 분사되거나 기타의 노트북 내부 방향으로 흐른다. 또한 팬을 뒤집어서 설치하면 노트북 내의 공기가 팬으로 흡입된 후 대기로 배출된다. 전자를 공기유입(air-blowing)의 경우라 하고, 후자를 공기배출(air-exhaust)의 경우로 정하였다. 또한 유출구(outlet)는 그림에 나타난 바와 같이 플레이트 부근에 인접하여 플레이트 높이와 동일한 높이인 z=22 mm 에 위치되어 있다. 플레이트에 확산된 열은 자연대류에 의해 대기로 전달된다.

3. 수치 계산 방법

본 연구에서 설정한 노트북 수치모델에서, 노트북 유입구의 폭(40 mm)을 특성길이라고 하는 Reynolds 수를 산정해 볼 때, 약 3000 ~ 6000 정도로서 난류 유동에 속하며 난류 모델로서 표준 k-ε 난류 모델이 도입되었다.^(6,7) 본 난류 모델을 이용함으로써 수치 계산상의 수렴성, 또한 수치 계산으로부터 획득한 유속 및 온도 등의 값이 실험값과 비교해 볼 때 만족할만한 수준임을 확인하였다. 유동장 내의 밀도변화에 대해 Boussinesq approximation 을 사용하는 비압축성 정상상태 3 차원 난류혼합대류유동의 지배 방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산율방정식 및 에너지방정식 등으로 구성되며 다음의 식 (1)~(7) 과 같다.

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right\} + g_i \beta \rho (T - T_o) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \epsilon - g_j \beta \frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + (C_1 G - C_2 \rho \epsilon - C_3 g_j \beta \frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x_j}) \frac{\epsilon}{k} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\} + S \quad (5)$$

여기서,

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

상기식들에서의 기호 선정은 일반적인 교과서에서의 예를 따랐다. 각 난류 상수는 $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $C_3=0.7$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_T=1.0$ 및 $\sigma_\epsilon=1.3$ 값을 사용 하였다. 식 (2)와 (5)에서 T_o 와 S 는 각각 기준온도와 부품의 단위체적당 발열량을 의미한다.

유입구 속도, u_{in} 및 유입구 온도, T_{in} 의 경계조건은 실제 노트북에서의 통상적인 값(공기유입의 경우; $u_{in} = -1.2$ m/s 및 $T_{in}=24^\circ\text{C}$, 공기배출의 경우; $u_{in}=1.2$ m/s 및 $T_{in}=42^\circ\text{C}$ 정도)을 사용하였다. 유입구 난류운동에너지의 값은 속도의 제곱에 대한 2.5%로 주었고, 유입구 난류운동에너지 소산율의

값은 유입구 단면 폭의 절반(20 mm)을 특성길이 λ 로 사용하여 주었다. 유출구에서는 대기압 상태이므로 대기압의 게이지 압력인 0 Pa의 값을 유출구 단면을 따라 균일하게 부여하였다. 본 수치계산에서는 압력이 ΔP 로서 압력차이값 만이 필요하므로 대기압의 게이지 압력을 이용하여도 압력 및 유동분포를 정확히 계산할 수 있게 된다. 본 연구의 수치계산영역은 노트북을 둘러싼 케이스(히트 스프레더의 외부표면)까지 포함된 영역이다. 케이스의 온도분포를 수치적으로 계산하기 위해, 케이스와 주위 대기사이의 대류열전달 열경계조건을 모델링하였다. 케이스 주위의 대기는 강제유동이 없는 자연대류상황이므로 이 때의 대류열전달 계수 및 대기온도는 각각 $h = 10$ W/m²-K 및 $T_a = 24^\circ\text{C}$ 의 값을 사용하였다.⁽⁸⁾

계산 영역 내에 존재하는 모든 벽면에서는 난류 생성과 소멸이 대략적으로 평형을 이룬다는 가정하에서 유도된 벽함수를 써서 아래에 나타내어진 바와 같이 벽면 최인접 위치에서 벽면에 평행한 방향의 속도 u_R , 온도 T_R , 난류운동에너지 k_R , 그리고 난류운동에너지 소산율 ϵ_R 을 계산하였다. 벽면 최인접 격자점에서의 속도 u_R 은 아래 식과 같이 정의된다.

$$\frac{u_R}{u_*} = y^+ \quad (y^+ \leq 11.5) \quad (8)$$

$$\frac{u_R}{u_*} = \frac{\ln(9.0y^+)}{K} \quad (y^+ > 11.5) \quad (9)$$

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

$$y^+ = u_* y_l / \nu \quad (10)$$

$$u_* = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (11)$$

$$\tau_w = -\mu \left(\frac{\partial u_R}{\partial n} \right)_{wall} \quad (12)$$

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

벽면 최인접 격자점에서의 온도 T_R 은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{T_w - T_R}{T_*} = \sigma y^+ \quad (y^+ \leq 11.5) \quad (13)$$

$$\frac{T_w - T_R}{T_*} = \sigma \left(\frac{u_R}{u_*} + P \right) \quad (y^+ > 11.5) \quad (14)$$

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

$$T_* = \frac{q_w}{\rho c_p u_*} \quad (15)$$

$$P = 9.0(\sigma/\sigma_t - 1)(\sigma/\sigma_t)^{-1/4} \quad (16)$$

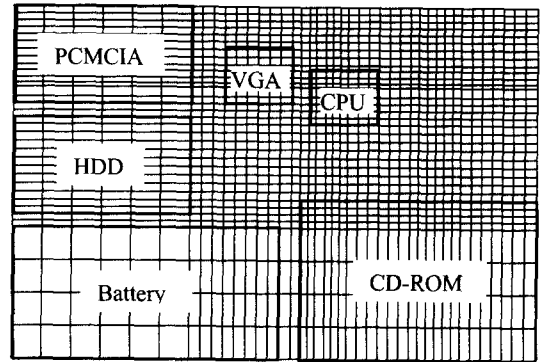
여기서 q_w 는 벽면으로부터의 열유속이고 σ 및 σ_t 는 각각 Prandtl 수 및 난류 Prandtl 수이다.

벽면 최인접 격자점에서의 난류운동에너지 k_R , 그리고 난류운동에너지 소산율 ε_R 는 아래 식과 같이 정의된다.

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

$$\varepsilon_R = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{Ky_l} \quad (18)$$

본 연구에서는 PHOENICS V.3.2 를 이용하여 수치해석 하였다. PHOENICS⁽⁹⁾는 유한체적법(finite volume method)에 근간을 둔 Navier-Stokes 방정식 풀이용 상용 프로그램이며 엇갈림(staggered) 격자 방식을 채용하고 있다. Fig. 2 에서 (a) x-y plane 에 나타낸 바와 같이, 본 연구의 격자 분포는 PCMCIA, HDD, Battery 및 CD-ROM 등 오브젝트가 있는 고체영역은 유동 및 온도구배가 작을 것으로 예상하여 격자배치를 성글게 하였으며, 상기 오브젝트 이외의 유동영역에서는 유동 및 온도구배가 클 것으로 예상하여 격자를 조밀하게 배치하였다. 노트북의 바닥부분에 VGA, CPU, 그리고 여타 부품들이 조밀하게 배치되어 있으므로, Fig. 2 의 (b) x-z plane 에 나타낸 바와 같이, z 방향으로 바닥 부분에 조밀하게 배치하였다. 이와 같은 불균일 격자분포방식으로 배치된, 본 연구의 총 격자수는 41(x)×34(y)×18(z)=25092 개로 이루어졌다. 수치 계산에서 격자수에 따른 결과 값의 변화를 조사해 보기 위해 적은 개수의 격자계로부터 점차적으로 격자수를 증가시켜 가면서 조사해보았다. 32(x)×26(y)×15(z)=12480 개의 격자계일 때부터 유동분포의 경향과 온도값의 변화가 작아졌으며, 이보다 더 증가된 41×34×18=25092 개의 격자계 이후



(a) x-y plane



(b) x-z plane

Fig. 2 41×34×18 grid system in present study

부터 유동 및 온도 등 수치계산 값의 변화가 일정해지기 시작하였다. 따라서 본 연구에서는 41×34×18=25092 개의 격자계를 채택하였다. 반복 계산시 속도, 압력, 난류 및 온도 변수의 이완 계수 값은 각각 0.1, 0.3, 0.3 및 0.5 정도를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수치계산조건

노트북에서 냉각특성에 영향을 미치는 요소들은 유입구 속도 등 여러가지일 것이다. 본 연구에서는 유입구에서의 공기유입 및 공기배출 속도의 크기, 히트 스프레더 재질종류, 그리고 CPU 발열량 등의 변화에 관한 파라메타를 수치계산조건으로 선정하였으며, 이러한 조건들은 기존 노트북에서 현실적으로 수용가능한 정도에서 선택된 것들로서 전자적으로 영향을 줄 수 있는 심한 구조변화 등의 조건들은 가급적 피하였다. 유입구에서의 공기 유입 및 공기배출속도의 크기, u_{in} 은 0.6 ~ 2.4 m/s 범위내에서 감소하거나 증가시켰다. 히트 스프레더의 재질종류의 변화로서, 2 절에서 서술된 히트 스프레더의 6 개 요소들 중에서 재질변경이 어려운 두개의 히트파이프를 제외한 나머지 요소들(알

Table 3 Validation for numerical results

| Component | Numerical temperature (°C) | Experimental temperature (°C) |
|-----------|----------------------------|-------------------------------|
| Battery | 36.2 | 33.3 |
| CD-ROM | 44.5 | 42.2 |
| HDD | 53.4 | 52.2 |
| PCMCIA | 53.7 | 52.5 |
| Mother | 55.2 | 54.3 |
| VGA | 59.9 | 58.6 |
| CPU | 67.7 | 66.8 |

루미늄 플레이트 등)을 기존의 알루미늄에서 구리 및 마그네슘의 재질 등으로 변화 시켜보았다. CPU의 열량, Q_{CPU} 는 13 ~ 28 W 범위에서 변화시켰으며 이 열량변화에 따른 노트북의 온도분포 및 냉각성능 등을 조사하였다.

4.2 타당성 검증

본 연구에서 설정한 수치계산방법의 타당성 검증을 위해, 수치모델과 유사한 실제 노트북($u_{in}=1.2$ m/s 인 공기배출의 경우, $Q_{CPU} = 13$ W, 그리고 알루미늄 히트 스프레더 사용)에 대해 온도 실측이 선행되었으며, 이 실측된 실험값과 수치계산된 수치값을 Table 3에 상호 비교하였다. Table 3에 나타낸 각 부품들의 온도 값들은 하나의 부품상에서의 여러 국부온도들을 평균한 값에 해당된다. 표를 살펴보면, 수치값에서 부품들의 온도가 36.2 ~ 67.7°C의 범위에서 분포하며, 실험값에서는 33.3 ~ 66.8°C의 범위에서 분포하였다. 각 부품에서의 수치값은 실험값보다 약 1 ~ 3°C 정도 높으며 실험값에 대한 수치값의 오차는 최소 3% ~ 최대 8% 정도를 나타낸다. 수치값과 실험값의 분포 경향이 거의 유사하며 오차 정도가 작으므로 본 연구의 수치값의 타당성을 믿을 수가 있었으며, 또한 3 ~ 8% 정도의 오차이내로 수치값의 결과를 신뢰할 수 있었다.

4.3 노트북 내의 유동 및 온도 분포

Fig. 1에 나타낸 본 연구의 수치모델이 3차원 형태이고 내부에 PCMCIA, HDD, Battery 및 CD-ROM 등 복잡한 오브젝트들이 많이 존재하고 있

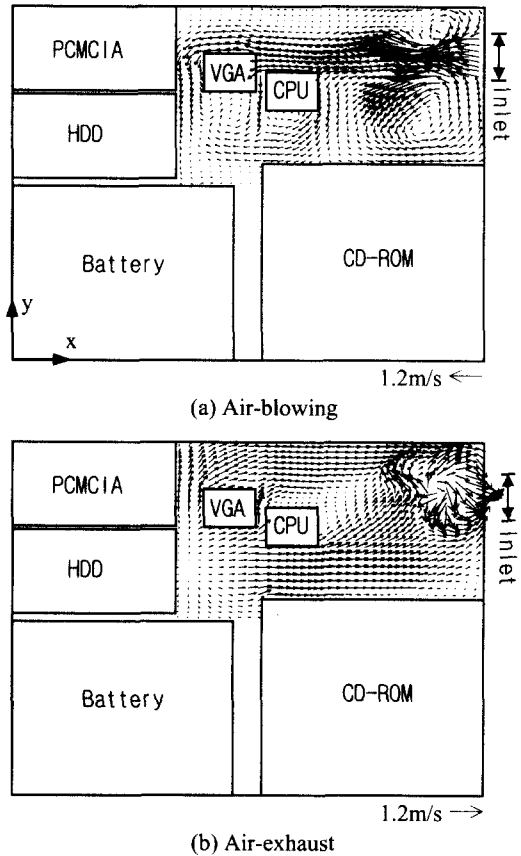


Fig. 3 Air-flows at $z=5.5$ mm in notebook ($u_{in}=1.2$ m/s and $Q_{CPU}=13$ W)

어, 내부 전체의 유동이나 온도 분포를 3차원적으로 표현하기가 어려우므로 공기유입의 경우와 공기배출의 경우에 대해 유동 및 온도분포특성이 가장 잘 대비되는 하나의 평면(x-y plane)을 각각 대표적으로 선정하여 두 경우에 대해 상호 비교하면서, 유동 및 온도 특성이 CPU의 냉각성능에 미치는 영향을 논의하고자 하며 이를 Fig. 3 및 4에 각각 나타내었다. 먼저, 노트북 내부 전체에서의 공기흐름을 살펴보기 위해 공기유입의 경우 및 공기배출의 경우에 대해 각각의 유동분포를 Fig. 3에 나타내었다. 이 때의 유입구 속도 u_{in} 은 두가지 경우 모두 1.2 m/s 크기이며, $z=5.5$ mm 인 x-y 평면에서의 속도벡터분포를 그림에 표시하였다. 그림에서 $z=5.5$ mm 위치에서 PCMCIA, HDD, Battery 및 CD-ROM 등 오브젝트들이 위치하는 영역은

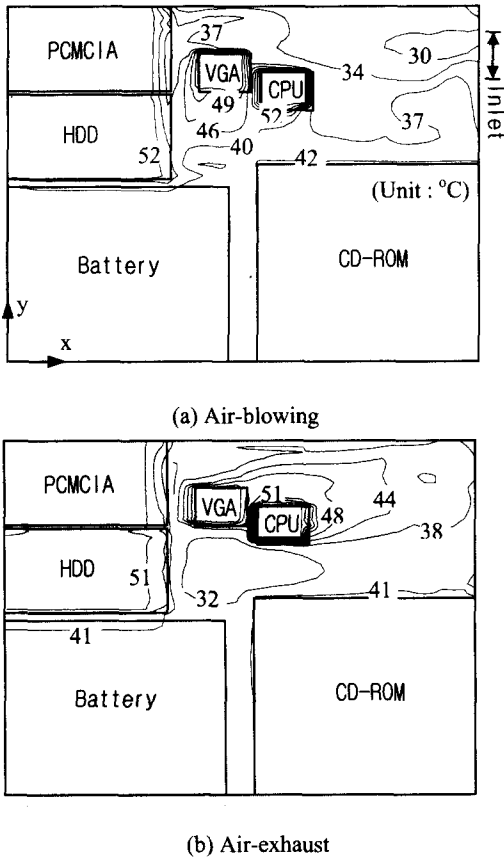


Fig. 4 Temperature distributions at $z=8\text{mm}$ in notebook ($|u_{in}|=1.2\text{m/s}$ and $Q_{CPU}=13\text{W}$).

고체영역이며 유동이 존재하지 않아 속도 벡터가 그려지지 않았다. 아울러 Battery 와 CD-ROM 사이의 유동 공간에서도 유동이 거의 정지해 있으므로 속도 벡터가 그려지지 않았다. 그림의 (a)공기유입의 경우를 살펴보면 유입구로부터 유입된 공기가 유입구에 인접한 팬 영역으로 빨려 들어가는 빠른 기류를 형성하는 것을 볼 수 있다. 이 기류는 그림에 나타나지는 않았지만 기류 상부에 위치한 히트싱크로 분사되게 되므로 히트싱크의 냉각에 기여하게 되며 이는 결국 CPU 의 냉각에 상당한 도움을 줄 것으로 판단된다. 이후, 공기는 평균 0.9m/s 크기로 VGA 및 CPU 등의 부품들을 향해 흘러가는 유동으로 주류를 이루고 있으며, Battery 주변은 아주 미약한 유동장이 형성되고 있음을 볼 수 있다. 반면, CD-ROM 주변은 재순환 유동을 이룬다. 이 재순환 유동은 CD-ROM 주변의 열방출에

불리하며 이는 유입구의 위치를 적절하게 조절함으로써 다소 해소될 수 있을 것이다. 그림의 (b)공기배출의 경우에는 (a)공기유입의 경우와 반대의 흐름이 주류를 이루고 있으며 크기는 평균 0.8m/s 정도이다. 그림에서 와류가 발생되고 있는 곳은 팬이 있는 곳이기 때문이며, 이후 유입구를 통해 공기가 대기로 배출된다. (b)공기배출의 경우에는 노트북 내부의 공기가 팬이 있는 곳으로 흘러드는 유동을 가지므로 팬의 상부에 있는 히트싱크에 분사되는 기류를 형성하지 못하며 따라서 (a)공기유입의 경우보다는 CPU 의 냉각에 불리하게 됨을 짐작할 수 있다.

이어서 노트북 내에서의 전반적인 온도분포의 상태를 공기유입의 경우 및 공기배출의 경우에 대하여 조사하였으며, $z=8\text{mm}$ 인 $x\text{-y}$ 평면에서의 등온선을 Fig. 4 에 나타내었다. 이 때의 수치계산조건은 $|u_{in}|=1.2\text{m/s}$, $Q_{CPU}=13\text{W}$, 그리고 알루미늄 히트 스프레더가 사용된 조건이다. 그림의 (a)공기유입의 경우를 살펴보면, 온도가 유입구 부근에서 VGA 및 CPU 등의 부품쪽으로 갈수록 점차적으로 높아지는 분포를 이루고 있음을 볼 수 있으며 이러한 온도 분포 형태는 유입구에서 노트북 내부로 흘러들어가는 냉각공기 유동형태의 영향 때문이다. 각 부품의 평균온도는 Battery: 38.4°C , CD-ROM: 43.2°C , HDD: 54.1°C , PCMCIA: 53.5°C , VGA: 57.8°C , 그리고 CPU: 62.2°C 정도를 나타낸다. (b)공기배출의 경우에는 VGA 및 CPU 등의 부품에서 유입구쪽 방향의 온도구배가 다른 방향보다 비교적 작은 구배를 이루고 있음을 볼 수 있으며 이는 노트북 내부에서 유입구로 공기가 흘러나가는 유동형태의 영향 때문이다. 각 부품의 평균온도는 Battery: 37.8°C , CD-ROM: 42.6°C , HDD: 52.5°C , PCMCIA: 52.4°C , VGA: 60.8°C , 그리고 CPU: 66.0°C 정도를 나타낸다. 이들 부품중에서 CPU 온도 등이 공기유입의 경우보다 다소 높으므로 공기배출의 경우가 다소 불리한 CPU 냉각특성을 나타낸다고 말할 수 있다.

4.4 부품의 냉각 성능

유입구에서의 유입 및 배출 속도 크기변화에 따른 부품의 냉각특성 데이터는 노트북 설계시에 환

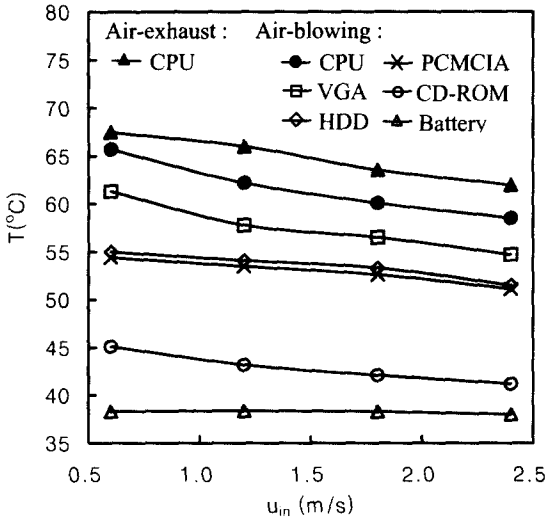


Fig. 5 Component temperatures for various inlet velocity ($Q_{CPU}=13\text{ W}$)

Table 4 Thermal resistances for various inlet velocity in two cases

| Case | | u_{in} (m/s) | | | | Average |
|--|-------------|----------------|-----|-----|-----|---------|
| | | 0.6 | 1.2 | 1.8 | 2.4 | |
| R_{CPU} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) | Air-blowing | 3.2 | 2.9 | 2.8 | 2.7 | 2.9 |
| | Air-exhaust | 3.3 | 3.2 | 3.0 | 2.9 | 3.1 |

의 소비동력 선정자료로서 이용될 수 있다. 이를 위해, 속도 크기변화에 따른 부품의 온도변화를 Fig. 5에 나타내었다. 수치계산조건은 $Q_{CPU}=13\text{ W}$ 및 알루미늄 히트 스프레더가 사용된 조건이다. 그림의 공기유입의 경우에는 0.6~2.4 m/s 범위에서 속도 크기가 증가할수록 CPU의 온도 T_{CPU} 는 65.7~58.5 $^{\circ}\text{C}$ 범위에서 선형적인 비율로 감소하였으며, 공기배출의 경우에서도 67.7~62.1 $^{\circ}\text{C}$ 범위에서 선형적인 비율로 감소하였다. 공기유입의 경우가 공기배출의 경우보다 CPU의 온도가 2~4 $^{\circ}\text{C}$ 정도 낮고 속도증가에 따른 T_{CPU} 의 감소의 폭도 점차 늘어남을 볼 수 있다. 그러므로 공기유입의 경우가 CPU의 냉각에 더 유리하며 속도의 크기를 증가할수록 CPU의 냉각이 우수해진다고 말할 수 있다. 또한 공기유입의 경우에 대하여 VGA, HDD,

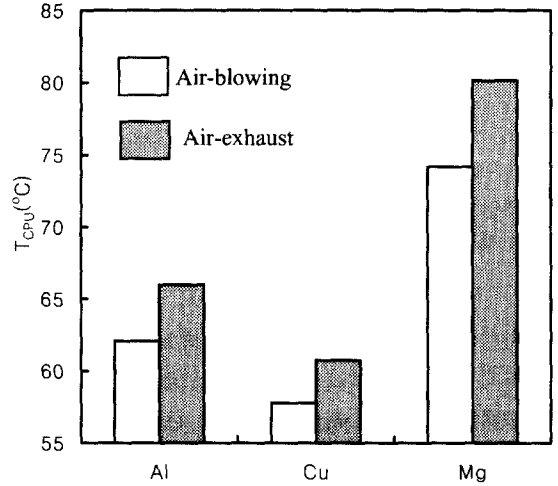


Fig. 6 Comparison of CPU temperatures for various heat spreader materials ($|u_{in}|=1.2\text{ m/s}$ $Q_{CPU}=13\text{ W}$)

PCMCIA, CD-ROM 및 Battery 등 주요부품의 온도 변화를 조사하여 그림에 함께 나타내었다. 속도 크기가 증가할수록 VGA: 61.3~54.7 $^{\circ}\text{C}$, HDD: 55.0~51.5 $^{\circ}\text{C}$, PCMCIA: 54.4~51.1 $^{\circ}\text{C}$, 그리고 CD-ROM: 45.1~41.2 $^{\circ}\text{C}$ 등의 범위에서 각 부품의 온도들이 선형적인 비율로 감소함을 보였다. 이와 반면에 Battery는 38.3~38.4 $^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 속도 크기가 증가하여도 온도변화없이 거의 일정한 경향을 보였다. 이는 Fig. 3에서도 논의되었듯이 Battery 주변이 아주 미약한 유동장을 형성하는 곳으로서 속도 크기 증가의 영향을 별로 받지 못하는 곳이기 때문이다.

아래식과 같이 열저항을 정의하여⁽⁷⁾ CPU의 냉각성능을 Table 4에서 정량적으로 논의 하였다.

$$R_{CPU} = (T_{CPU} - T_a) / Q_{CPU} \tag{19}$$

여기서 R_{CPU} , T_a 및 Q_{CPU} 는 각각 CPU 열저항, 대기 온도 및 CPU 열량을 의미한다. 열저항과 냉각성능은 서로 상반된 관계에 있으므로 CPU 열저항, R_{CPU} 가 낮을수록 CPU의 냉각성능이 우수해진다. Table 4에서 속도가 증가할수록 열저항값이 감소하며 공기유입의 경우가 공기배출의 경우보다 평균 7%정도 열저항이 작으므로 공기유입의 경우가

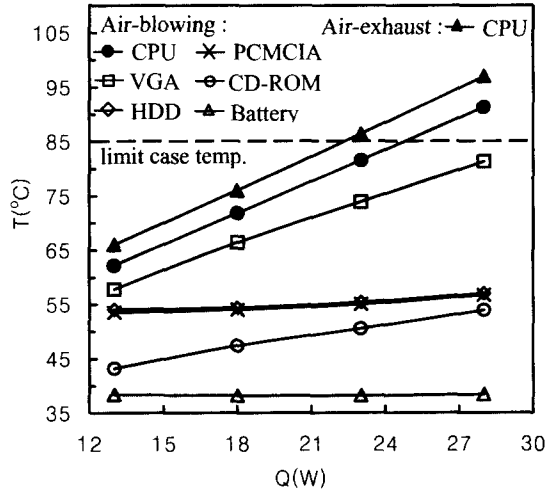
Table 5 Thermal resistances for various materials of heat spreader

| Case | | Materials of heat spreader | | | Average |
|--------------------------------|-------------|----------------------------|-----|-----|---------|
| | | Al | Cu | Mg | |
| R_{CPU} ($^{\circ}C/W$) | Air-blowing | 2.9 | 2.6 | 3.9 | 3.1 |
| | Air-exhaust | 3.2 | 2.8 | 4.3 | 3.5 |

냉각성능이 다소 우수하며 유입속도의 크기를 증가시키므로써 성능이 증대된다고 말할 수 있다.

수치계산조건을 $u_{in}=1.2$ m/s 및 $Q_{CPU}=13$ W 으로 하여, 히트 스프레더의 재질변화에 따른 CPU 의 냉각특성을 조사하였으며 이를 Fig. 6 에 나타내었다. 그림을 살펴보면, 구리재질 히트 스프레더의 T_{CPU} 가 가장 낮은 값을 가지므로 CPU 의 냉각에 가장 유리하다고 말할 수 있다. 이와 관련한 CPU 의 열저항값을 Table 5 에 표시하였다. 공기유입의 경우, 알루미늄재질, 구리재질 및 마그네슘재질의 히트 스프레더가 각각 2.9, 2.6 및 3.9 의 열저항값을 가지며 세가지 재질의 평균값은 3.1 정도이다. 알루미늄재질과 구리재질 히트 스프레더의 열저항값들은 평균값보다 낮으며 마그네슘재질은 평균값보다 높아짐을 알 수 있다. 따라서 CPU 냉각성능 증진의 측면에서 히트 스프레더의 재질로서 알루미늄 혹은 구리를 이용하는 방안이 추천되고 마그네슘은 피하는 것이 좋다. 나아가 상기의 열저항값들을 정량적으로 계산해 볼 때, 구리를 사용하는 것이 알루미늄을 사용하는 것보다 약 12% 정도의 냉각성능을 촉진시킬 수 있음을 알 수 있다. 표의 공기배출의 경우에서는, 재질변화에 따른 열저항의 크기들은 공기유입의 경우보다 다소 크나 열저항의 감소경향은 유사하다.

본 연구의 노트북 모델과 같이 CPU 의 냉각모듈로써 기존의 알루미늄 히트 스프레더가 사용될 때에 어느 정도의 CPU 열량까지 CPU 가 열적으로 안정하게 동작될 수 있는 가를 조사하여 Fig. 7 에 나타내었다. CPU 가 열적으로 안정하게 동작될 수 있는 판별기준은 노트북의 CPU 허용표면온도 (limit case temperature), $T_{CPU, limit}$ (대략 $85^{\circ}C$)로 하였다. 그림을 살펴보면, 공기유입의 경우에는 CPU

**Fig. 7** Component temperatures for increase of CPU power ($u_{in}=1.2$ m/s)

발열량이 최대 25 W 까지 가능하며 공기배출의 경우에는 최대 22 W 까지 가능하다. 또한 공기유입의 경우에 대하여 VGA, HDD, PCMCIA, CD-ROM 및 Battery 의 온도변화를 조사하여 그림에 함께 나타내었다. VGA 의 온도는 CPU 열량이 증가할수록 $67.8\sim 81.3^{\circ}C$ 범위내에서 CPU 의 온도와 유사한 증가율을 보이며, 이는 VGA 가 히트스프레더에 접촉되어 있어서 CPU 열량 증가의 영향을 직접적으로 가장 많이 받기 때문인 것으로 판단된다. HDD: $54.1\sim 57.0^{\circ}C$, PCMCIA: $53.5\sim 56.7^{\circ}C$, 그리고 Battery: $38.2\sim 38.4^{\circ}C$ 등의 범위에서 CPU 열량증가에 따라 각 부품의 온도들이 미소하게 증가하였다. CD-ROM 은 $43.2\sim 53.9^{\circ}C$ 의 범위에서 온도 증가율이 HDD, PCMCIA 및 Battery 보다 다소 크게 나타났으며, 이는 CD-ROM 주변의 냉각공기 재순환유동으로 인해 냉각에 불리한 지역이기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

노트북 내에서, 히트 스프레더가 이용될 때, 공기유입의 경우와 공기배출의 경우 등 두 경우에 대하여 유입 및 배출속도의 크기, 히트 스프레더 재질, 그리고 CPU 발열량 등이 변화함에 따라 CPU 의 냉각 성능 등을 조사하는 파라메트릭한

연구가 수행되었으며 이에 대한 연구결과의 요약은 다음과 같다.

(1) 공기유입의 경우에는 유입구로부터 유입된 냉각공기가 CPU 및 VGA의 냉각모듈인 히트 스프레더 및 히트싱크 등에 팬에 의해 충돌분사되는 유동이 발생하므로 CPU 및 VGA의 부품 냉각에 공기배출의 경우보다 상대적으로 유리하다. 반면에 PCMCIA, HDD 및 CD-ROM 등의 부품 주변에는 CPU 및 VGA 부품 냉각으로 인한 다소 더워진 기류가 형성되므로 공기배출의 경우보다 상대적으로 냉각이 불리하게 된다.

(2) 공기유입의 경우가 배출의 경우보다 대략 7% 정도 더 우수한 CPU의 냉각성능을 갖으며 유입속도의 크기를 증가시킴으로써 성능이 증대된다.

(3) 히트 스프레더의 재질로서 통상적으로 사용하는 알루미늄을 구리로 대체하면 약 12%의 냉각성능을 더 촉진시킬 수 있다. 본 연구에서 얻은 이러한 정량적인 데이터는 새로운 노트북 모델을 설계할 시에 알루미늄 스프레더 재질을 구리로 대체할 경우에 증가되는 비용만큼 실질적인 효과를 거둘 수 있을지의 판단 여부를 설계자에게 제시하는 자료가 될 수 있을 것이다.

(4) 알루미늄 스프레더 및 1.2 m/s의 속도크기에 대해, CPU의 최대가능발열량은 공기유입의 경우에 25 W, 공기배출의 경우에는 22 W 정도이다.

참고문헌

- (1) Azar, K., 1999, "The History of Power Dissipation," *Electronics Cooling*, Vol. 6, No. 1, pp. 42~50.
- (2) Chapman, C., "Beat the Heat in Notebooks," *Article of Aavid Thermal Products, Inc.*, pp. 1~5.
- (3) Xie, H. and Aghazadeh, M., 1996, "The Use of Heat Pipes in the Cooling of Portables with High Power Packages," *Technical memo of Thermacore Inc.*, pp. 1~16.
- (4) Goto, K., Mochizuki, M., Saito, Y. and Nguyen, T., 1996, "CPU Cooling by Using Hinge Heat Pipe," *33rd National Heat Transfer Symposium of Japan*.
- (5) Neelakantan, S., and Addison, S., 1999, "Modeling the Effect of a Table," *FLOTHERM User News*.
- (6) Przekwas, J. and Habchi, D., 1993, "Fan Induced Cooling Airflow in a Model Computer Box," *ASME Winter Annual Meeting*, 93-WA/EEP-27, pp. 1~9.
- (7) 노홍구, 이재현, 1998, "히트싱크부착 전자부품을 가진 통신시스템의 냉각성능연구," *대한기계학회논문집 B 권*, 제 22 권 제 2 호, pp. 253~266.
- (8) 이회진, 박현섭, 김찬중, 1999, "열전냉각기를 이용한 광통신 모듈의 냉각성능해석," *대한기계학회추계학술대회논문집 B*, pp. 309~315.
- (9) Rosten, H. I. And Spalding, D. B., 1990, *Phoenics Training Course Notes CHAM TR/300*, CHAM.