

수치해석에 의한 국부냉방시스템의 온열환경 및 쾌적성 분석

엄태인*, 경남호*, 신기식*

한밭대학교 환경공학과, *한국에너지기술연구원 건축설비연구팀

Numerical Analysis of Thermal Environments and Comfort for Local Air Conditioning System

Tae-In Ohm[†], Nam-Ho Kyung^{*}, Kee-Shik Shin^{*}

Department of Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

^{*}Environment Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received May 3, 2003; revision received March 14, 2003)

ABSTRACT: Numerical simulation using computational fluid dynamics (CFD) is performed to calculate the velocities and temperature profiles of air in adjacent to a worker within the individual local air conditioning system. The calculation domain is the space of \sqcup between walls and a worker in the climate room. The fresh air is supplied from the three different inlets located on the right, left and center wall in the climate room.

In this study, the calculated data of velocities and temperature profiles of air in the nearest the skin of a worker are used to calculate the PMV (Predicted Mean Vote) for evaluation of thermal comfort of a worker in the local air conditioning system. Because the data of velocities temperature profiles of air in adjacent to a worker and the PMV of a worker are the design parameters of the local air conditioning system. The results of calculation show that the fresh air velocity and injection position are closely related to the PMV value. In individual air condition system of \sqcup , the appropriate PMV are obtained when the fresh air velocity and position are 1.0 m/s, throat of a worker and are 1.5 m/s, head of a worker, respectively. The method of numerical calculation is effective to obtain the optimum velocity and position of the fresh air for optimum the PMV and energy saving in individual local air conditioning system.

Key words: Numerical simulation(수치모사), Local air conditioning system(국부공조시스템), PMV(예상온열감), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

기 호 설 명

A_{Du} : 인체의 표면적 [m^2]

f_{cl} : 착의계수

h_v : 대류열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]

M : 인체의 활동상태를 고려한 대사량 [W]

p_a : 대기의 수증기 분압(mmHg)

PMV : 예상온열감

Q_{DIF} : 피부에서 증기확산에 의한 열손실 [W]

Q_R : 복사 열손실 [W]

Q_{RE} : 호흡을 통한 열손실 [W]

Q_{SW} : 땀의 증발에 의한 열손실 [W]

Q_V : 대류 열손실 [W]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1262; fax: +82-42-821-1476

E-mail address: tiohml@hanbat.ac.kr

- t_a : 대기온도[°C]
 t_{cl} : 재실자 의복의 외부 표면 평균 온도[°C]
 t_{mrt} : 평균 방사온도[°C]

그리스 문자

- η : 신체의 효율

1. 서 론

현대인은 하루 일과의 80% 이상을 주택, 사무실, 지하공간 및 각종 교통수단 등의 실내에서 생활하고 있으므로, 실내를 쾌적한 환경으로 유지하는 것은 작업능률의 향상은 물론 건강을 유지하기 위해서도 필수적인 요소이다.⁽¹⁾

인간의 온열환경에 대한 과학적인 연구는 19세기말부터 산업화를 이룩한 유럽과 미국에서 이루어졌다.⁽²⁾ 국내에서는 1970년대부터 한국과학기술연구원, 한국에너지기술연구원, 서울대, 한국과학기술원, 한양대, 연세대 등에서 아파트, 단독주택을 비롯하여 사무실에 대하여 각종 실내 환경인자 측정 및 재실자에 대한 설문조사를 수행하였고, 최근에는 환경기후실을 설치하여 종합적으로 체계적인 온열환경에 대한 연구를 수행하고 있다.⁽³⁾

온열환경이 실내에서 생활하는 인간에게 미치는 복합적인 요소를 정량화한 지표로서 널리 이용되고 있는 것은 ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers)의 신유효온도(New Effective Temperature, ET*)와 ISO(the International Organization for Standardization) 7730의 예상온열감(Predicted Mean Vote, PMV) 및 예상불만족률(Predicted Percentage of Dissatisfied Vote, PPD)이다.⁽⁴⁻⁶⁾

인간이 실내에서 생활하면서 느끼는 물리적인 환경의 영향은 실내의 기류속도, 온도, 습도, 조명 등의 실내적인 요인과 태양복사, 태양 빛과 같이 실외적인 요인이 있다. 또한 인간이 수행하는 작업종류, 건강상태, 신체리듬, 의복 등 감성적인 영향에 의해 쾌적도를 다르게 느낄 수 있으므로 이들 물리적인 영향과 감성적인 영향을 결합한 연구가 이루어지고 있다.⁽⁷⁾ 그러나 현재까지는 이들 연구결과를 실내에 설치되는 냉·난방시스템과 연결하여 최적의 실내환경을 유지할 수

있는 종합적인 연구는 부족하였다고 사료된다.

그러므로 본 연구에서는 실내환경을 평가하는 객관적인 인자와 인간이 느끼는 주관적인 인자를 조합하여 최적의 쾌적도를 얻기 위해 실내에 설치된 냉·난방장치의 기류 분출속도 및 위치에 따라 재실자에 인접한 주위의 위치별 기류속도, 온도분포를 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 이용하여 계산하였고 이들 계산값으로 Fanger가 제시한 PMV 계산식을 이용하여 인체의 위치별 쾌적도를 계산하였다.

2. 열적 쾌적감의 이론적 고찰

2.1 열쾌적 환경조건

인간이 열환경에서 만족감, 쾌적감, 온도감치는 신진대사에 의한 열생산, 주위로 열전달 및 이로 인한 생리학적 적응과 체온에 관련되어 있다.

인간의 개인적인 차이로 인하여 모든 사람을 만족시킬 수 있는 열환경을 규정한다는 것은 현실적으로 불가능하여 ASHRAE 기준은 적어도 재실자의 80%가 만족할 만한 열환경을 규정하고 있으며, 대부분의 기준치는 실험적 연구에 기초하고 있으므로 실체는 열과 상관없는 인자들에 의하여 불만족도를 증가시킬 수 있다. 실내에서 수직온도차, 불균일한 복사온도, 바닥의 온도, 통풍 등에 의한 비균일한 열환경이 국부적인 불쾌감을 일으킨다. 실험에 의하면 재실자가 느끼는 불만족은 수직온도차와 불균일한 복사온도의 한계는 약 5%, 바닥의 온도는 10%이고, 통풍에 의한 한계는 15%이다.⁽³⁾

의복은 신체의 단열특성을 나타내는 것으로서 열손실과 쾌적감의 중요한 조절수단으로 단열을 clo값으로 정량화 한다. 이 값에서 착의량(I_{cl})은 옷들의 조합에 의한 단열값을 나타내며 전체 단열값에서 각각의 옷들에 의한 영향은 유효단열치(I_{clu})로 표현된다.

열적 쾌적감과 불만족은 열환경에 대한 만족 또는 불만족을 나타내는 것으로서 불만족은 인간의 몸이 덥거나 추울 때 느끼게 되며 쾌적감 한계는 PMV와 PPD 지표에 의해 표현될 수 있다.

ISO에서는 쾌적 열환경의 조건으로 인간이 거주하는 공간에서 PPD가 10% 이하($-0.5 < PMV < +0.5$)일 것을 권고하고 있다. 일반적으로 PMV

와 PPD 지표는 인간의 신체가 느끼는 더위나 추위로 인한 불편감을 나타내는 것이나, 열적 불만족은 인체 특정부분에 국부적인 냉난방에 의해서도 일어날 수 있다.

2.2 인체와 주변환경 간의 열평형 방정식

재실자가 실내에서 감지하는 온냉감은 인체와 주변환경 사이에서 일어나는 열교환 상태에 의해 결정되며, 특히 인체 내에서 생산되는 열량, 즉 대사량(metabolism)은 피부, 호흡기 및 배설기관 등을 통하여 인체의외부와 열교환을 하게 된다. 이때의 열교환 방법은 전도, 대류, 복사를 통한 기본적인 전열형태 외에 호흡, 증발 등을 포함한 종합적인 형태로 나타나며, 인체와 주위환경 간의 열적 불균형은 땀, 떨림, 혈관의 확장 및 수축 등과 같은 인체의 열 자율조절시스템(thermo regulatory system)을 통해 열평형을 유지한다.

인체와 주변환경 간의 열교환은 재실자 인체의 대사량과 주변환경 간의 열교환은 인체의 부위별로 차이가 있으며, 온도가 낮은 부위와 높은 부위간에는 상호 열보완이 이루어지고 있어서 엄격한 의미에서 인체와 주변환경 간의 열교환 현상을 규명하기란 지극히 어려운 일이다.

따라서 이러한 열교환 현상에 대한 분석을 위해서는 인체 전체가 균일한 에너지 분포를 이루고 있으며 등온으로 유지된다는 가정이 필요하다. 이러한 가정 하에서 인체와 주변환경 간의 열평형식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = Q_R + Q_V + Q_{DIF} + Q_{RE} + Q_{SW} \quad (1)$$

인체의 주변에 임의의 환경조건이 주어졌을 경우, 인체는 그 환경조건에 대해서 상기 열평형 상태를 만들기 위해 인체 내의 자율신경조각이 가동된다. 엄격한 의미에서 인체와 주변환경 간의 완전한 열평형 상태는 존재하기 어려우므로, 인체는 항상 열평형 상태를 만들기 위한 과정중에 있다고 볼 수 있다. 따라서 인체와 주변환경 간의 열 불균형량(DQ)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$DQ = M - Q_R - Q_V - Q_{DIF} - Q_{RE} - Q_{SW} \quad (2)$$

DQ 의 값에 따라 재실자 인체의 열적 반응은

다음과 같이 나타난다.

(1) $DQ < 0$ 인 경우 : 출제 느낌, 추위에 대항하는 인체반응이 나타남.

(2) $DQ = 0$ 인 경우 : 열평형 상태임. 따라서 가장 열적으로 쾌적한 상태임.

(3) $DQ > 0$ 인 경우 : 덥게 느낌, 더위에 대항하는 인체반응이 나타남.

따라서 DQ 는 인체의 열 불균형 상태를 알 수 있는 양으로서 인간이 느끼는 열적 쾌적감을 정량화시킬 수 있는 요소가 된다.

3. 수치해석 방법

3.1 수치해석 모델링

재실자 주위에서 직접 신선한 공기를 공급하여 냉난방하는 개인용 국부공조시스템을 구축하여 기류 공급구에서 재실자 위치까지 정밀한 기류 및 온도를 측정하는 것은 현실적으로 많은 시간과 경비를 요구하므로, 이를 해결하기 위하여 전산유체역학에 기초한 컴퓨터 프로그램을 구현하여 자세한 기류 및 온도정보를 얻는 방법을 선택하였다.

수치해석을 위한 실내공간은 Fig. 1에 제시한 바와 같이 실제 실험이 수행되는 5.94(W)×2.46(H)×6.8(L)m 크기를 가지는 인공기후 실험동 환경실험실의 실제 크기이며 국부공조시스템에 유입된 기류의 분출구는 실험실 천장의 중앙부에 3개를 설치하였다. 국부공조공간은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 실내에 L자형 개인 공조공간을 구성하여 모서리에 책상을 삼각형으로 설치하고 전면

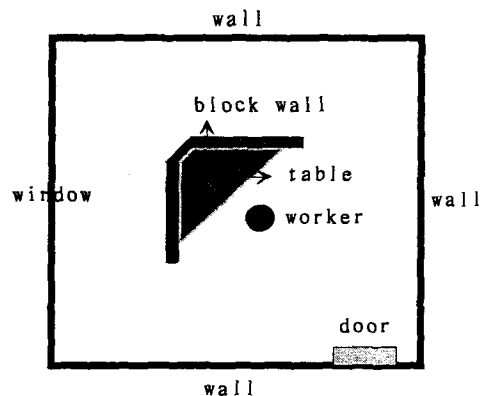


Fig. 1 Plane view of the climate room.

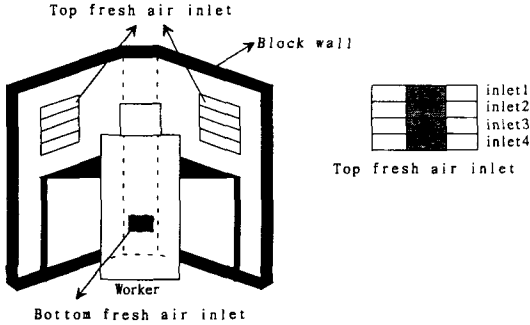


Fig. 2 Schematic diagram of local air conditioning system.

에 재실자가 의자에 앉아 있는 형태로 기류 유입구는 작업공간을 구획하는 시스템 가구의 책상면 상부 칸막이벽 좌우 양측과 칸막이가 겹치는 모서리 아래쪽에 각각 설치하여 모두 3곳에서 유입되도록 하였다.

공간 내에서 기류에 의한 난류유동과 열전달 현상을 해석하기 위하여 사용한 수치해석 방법은 기후동 내에 설치된 국부공조시스템을 대상으로 검사체적에 기초한 유한차분법을 이용하였다. 검사체적 면에서 열류(flux) 계산에 필요한 값을 구하기 위해서 멱법칙보간법(power-law interpolation scheme)을 사용하였고, 난류모델은 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 압력항이 연계된 연속방정식과 운동량방정식을 풀기 위하여 SIMPLEC 알고리즘을 적용하였다. 또한, 반복계산의 수렴성을 고려하여 다중격자(multi-grid)와 이완계수(under-

relaxation factor)를 이용하였다. 3차원 $x-y-z$ 직교 좌표계에서 기류의 운동을 기술하기 위해서는 운동방정식을 정상상태(steady state), 비압축성, 뉴우튼 유체로 가정한다. x, y, z 방향의 속도 u, v, w 에 대한 기류운동의 일반 지배방정식(Navier-Stokes Equation)은 다음과 같다.

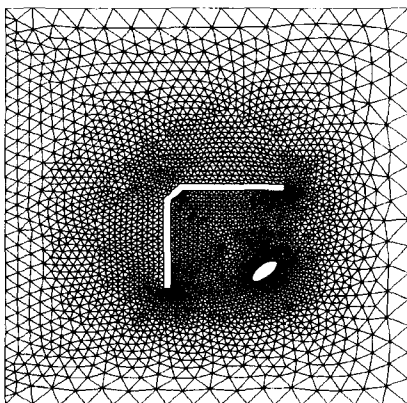
$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u} \bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v} \bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w} \bar{\phi}) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z}) + S_{\phi} \quad (3)$$

위의 식(3)에서 종속변수 $\bar{\phi}$ 는 속도성분 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$, 압력(\bar{p})과 단위질량당의 난류에너지(k) 및 에너지소산율(ϵ)을 나타내고, Γ_{ϕ} 와 S_{ϕ} 는 각각 확산계수 및 생성항을 나타낸다.

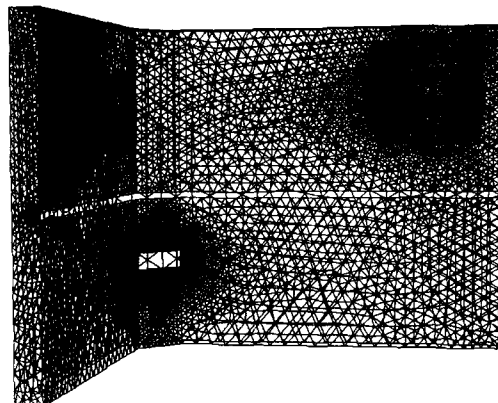
수치해석은 상용 CFD 코드를 사용하였으며, 격자 구성은 전처리 프로그램(pre-processor)를 이용하여 비정렬격자로 204,000개 정도이다. Fig. 3은 전체 실내에 대한 격자 구성과 재실자 및 칸막이 등의 위치를 나타내고 있다.

3.2 경계조건

실내로 유입되는 칸막이 내부 기류온도는 일정하게 유지되고 외부벽은 실내공기에 의해 대류



(a) On the bottom



(b) Partitions and inlets

Fig. 3 Unstructured mesh in the calculation domain.

Table 1 Boundary conditions

Boundary	Conditions
Wall	$u=0, v=0, w=0, \bar{\varepsilon}=0, k=0$
Inlet	$u=w=0, v=v_{in}, T=T_{in}$ $k=(0.1 \cdot v_{in})^2$ $\bar{\varepsilon}=v_{in} k^{1.5}/(0.5 D_h)_{in}$
Outlet	$P=P_{out}$ (pressure boundary)

열전달이 일어나고 칸막이 벽 안에서는 전도열전달이 일어난다. 책상의 상부판은 두께 30mm이고 실내의 모든 벽은 미끄럼이 없는(no slip) 단열면으로 가정하였으며 천장의 기류 유출구는 압력경계조건을 주었으며 이들 경계조건을 Table 1에 제시하였다.

수치해석을 위한 계산조건은 기류온도 18°C, 속도 1.5 m/s, 1.0 m/s일 때 분출구 위치를 바닥으로부터 1.14 m(inlet 2), 1.39 m(inlet 4)에 대하여 실내의 기류 및 열유동 해석을 수행하였다. 이때 분출구에서 공기분출은 수직방향이다.

의복을 입지 않은 재실자가 의자에 앉아 있는 조건으로 피부의 단위면적당 대사량은 58.2 W/m²로 계산하였고 형상은 머리부분을 반경 90 mm, 높이 200 mm의 원기둥, 몸체부분은 두 축의 반지름이 100, 250 mm이고 높이 1.1 m인 타원기둥으로 단순화하여 재실자의 앉은키는 1.3 m이고 책상 높이는 0.9 m이다. 인체의 물성치는 몸의 80% 이상이 수분이므로 밀도와 비열을 각각 1,000 kg/m³, 4,200 J/kg · K이고 피부의 열전도도는 0.3 W/m · K로 정하였다.

3.3 PMV 계산

재실자의 인체는 혈관확장, 혈관수축, 땀분비와 몸의 전열 등에 의하여 환경적인 변수의 큰 범위 안에서 열적인 평형을 유지할 수 있으며, 인체는 매우 제한적인 범위에서 쾌적감을 느끼게 된다. 인체의 불쾌적감의 정도가 크면 클수록 인체의 각종 평형기능들의 부하가 증가하게 되므로 인체의 열적 감각은 대사량과 외부 열전달에 의한 차이의 함수로 표시할 수 있다. 이와 같이 Fanger가 제안한 인체의 열평형에 기초한 예상온열감(PMV)을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$PMV = 0.352 \exp\{-0.042(M/A_{Du}) + 0.032\}$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{M}{A_{Du}}(1-\eta) - 0.35 \left\{ 43 - 0.061 \frac{M}{A_{Du}}(1-\eta) - p_a \right\} \right. \\ & \quad \left. - 0.35 \left\{ 43 - 0.061 \frac{M}{A_{Du}}(1-\eta) - p_a \right\} \right. \\ & \quad \left. - 0.42 \left\{ \frac{M}{A_{Du}}(1-\eta) - 50 \right\} \right. \\ & \quad \left. - 0.0023 \frac{M}{A_{Du}}(44 - p_a) \right. \\ & \quad \left. - 0.0014 \frac{M}{A_{Du}}(34 - t_a) \right. \\ & \quad \left. - 3.4 \times 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 \} \right. \\ & \quad \left. - f_{cl} h_v (t_{cl} - t_a) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식에서 t_{cl} 은 재실자 의복의 외부 표면 평균 온도로서 다음 식과 같이 표현되며, 반복계산에 의하여 구한다.

$$\begin{aligned} t_{cl} = & 35.7 - 0.032 \frac{M}{A_{Du}}(1-\eta) \\ & - 0.18 I_{cl} [3.4 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 \\ & \quad - (t_{mrt} + 273)^4 \} + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \end{aligned} \quad (5)$$

또한 대류 열전달계수 h_v 는 다음 식에 의하여 구한다.

$$\begin{aligned} h_v = & 2.05(t_{cl} - t_a)^{0.25} \\ & \text{for } 2.05(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 10.4\sqrt{v} \quad (6) \\ = & 10.4\sqrt{v} \text{ for } 2.05(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 10.4\sqrt{v} \end{aligned}$$

PMV 계산은 Visual C++를 사용하여 반복계산에 의하여 구하였으며, 본 계산에서는 M/A_{Du} 값을 50 kcal/m²hr를 사용하였고 기후동 실내의 상대습도를 50%로 하여 계산하였다. PMV 계산에서 가장 중요한 값인 의복 표면온도(t_{cl})와 대류 열전달계수(h_v)는 식(5), 식(6)에 의해서 구하며, 이들 식에서 필요로 하는 재실자 인접한 부분의 기류의 속도, 온도 및 평균 방사온도값을 전산유체역학에서 구한 값을 대입하여 반복계산에 의해 의복 표면온도와 대류 열전달계수를 구한 후 식(4)에 대입하여 최종 PMV를 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수치해석 결과

┐자형 칸막이 국부 공조시스템과 재실자 사이에는 높이 0.9m인 책상이 위치하고 이 앞에 재실자가 앉아 있는 형태로서 냉방공기는 칸막이 중앙 하단과 좌우측 상단 벽에서 수직으로 배출된다. 중앙 하단의 공기배출구는 바닥에서 0.37m에 위치하고, 좌우측 배출구는 바닥에서 1.14m (inlet 2), 1.39m(inlet 4)에서 각각 계산하였다.

Fig. 4, Fig. 5는 ┐자 칸막이 좌측 벽의 공기분출구 위치는 재실자 목부분(inlet 2)이고 속도는 각각 1.5, 1.0m/s일 때 인체에 인접한 기류의 속도벡터를 나타낸 것으로서, 재실자 복부 전면에서는 시계방향의 강한 선회유동이 형성되고 등 뒤에서 반시계방향으로 다소 약한 선회유동을 나타

내고 있으며 바닥에서 강한 직선 유동이 형성됨을 나타내고 있다. 이 경우 ┐자 칸막이 중앙 하단에서 분출되는 기류의 영향이 좌측 공기분출구 기류분포에 크게 영향을 미치지 않는다. 또한, 좌측벽의 기류 분출속도 변화에 따른 유동형태는 크게 변화하지 않으며 등 뒤에서 하강하는 기류의 속도가 약간 다른 것을 나타내고 있다.

Fig. 6, Fig. 7은 앞의 Fig. 4, Fig. 5와 동일한 공기 분출속도 1.5, 1.0m/s로 위치가 재실자 머리 상부에 위치할 때 재실자에 인접한 기류의 속도벡터를 나타낸 것으로서, 재실자 등 뒤에서 선회유동은 거의 형성되지 않고 상부로 향하는 수직 유동이 강하게 일어나고 있다. 이것은 분출구 위치가 목 부근에 위치할 경우와 비교하여 재실자와 충돌하는 유동이 약해진 반면 머리 상부에서 통과하는 기류가 크기 때문에 재실자 등 뒤에서 부압이 크게 작용하지 않기 때문이다. 또한 재실

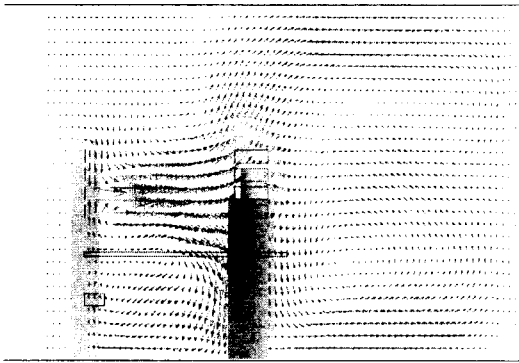


Fig. 4 Velocity vector on the plane of $x=0.0$ m (Inlet 2 : 1.5 m/s, level of the left inlet).

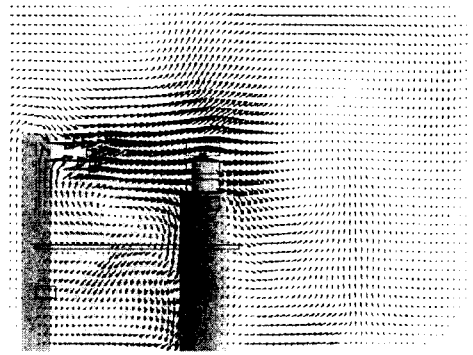


Fig. 6 Velocity vector on the plane of $x=0.0$ m (Inlet 4 : 1.5 m/s, level of the left inlet).

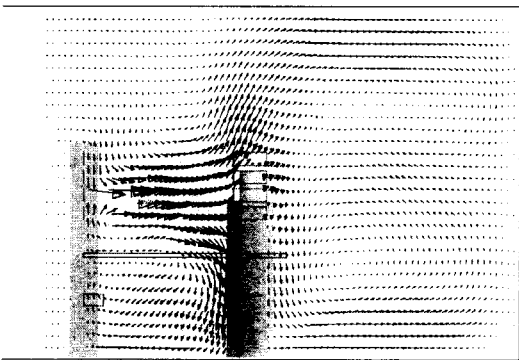


Fig. 5 Velocity vector on the plane of $x=0.0$ m (Inlet 2 : 1.0 m/s, level of the left inlet).

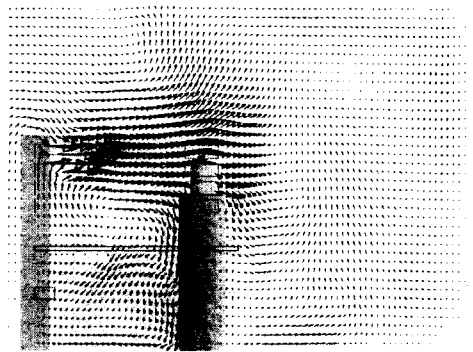


Fig. 7 Velocity vector on the plane of $x=0.0$ m (Inlet 4 : 1.0 m/s, level of the left inlet).

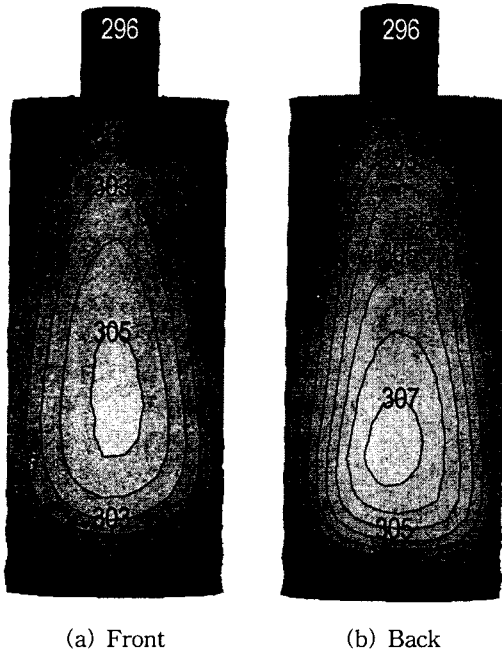


Fig. 8 Predicted temperature distribution on human skin (Inlet 2 : 1.5 m/s, Unit : K).

자 전면에서는 L자 칸막이 중앙분출구와 좌측벽 분출구 사이의 간격이 증가하여 가슴 부분과 하반신 부분에서 상이한 유동 형태를 나타내고 있다.

이와 같이 약간의 공기분출구 위치의 변화와 작은 기류 분출속도 변화에 따라 재실자 주위에서 유동은 크게 변화하는 것을 볼 수 있으며, 이들 변화가 결국 재실자 몸 주위의 온도변화를 크게 야기하게 되어 재실자의 쾌적감을 상당히 다르게 느끼게 하는 원인이 된다.

Fig. 8은 L자 칸막이 좌우측 벽과 중앙 하단에서 공기 분출속도가 모두 1.5 m/s이고 좌우측 벽의 분출구 위치가 재실자 목부분(inlet 2)일 때의 재실자 몸의 피부에 가장 가까운 기류 온도분포를 나타낸 것이다. 전면에서는 허리 부근의 기류 온도가 305°K(32°K)로 가장 높고 가슴 부분은 301~302°K(28~29°K)를 나타내며 머리 부분이 296°K(23°K)로 가장 낮다. 뒷면에서는 무릎 아래 부분에서 307°K(34°K) 높은 온도분포를 나타내고 상부 등 뒤에서는 300~304°K(27~31°K)를 나타내고 있다. 이 그림에 나타난 바와 같이 재실자 몸 전체의 인접한 부분에서 기류의 온도차이가 크지 않음을 알 수 있다.

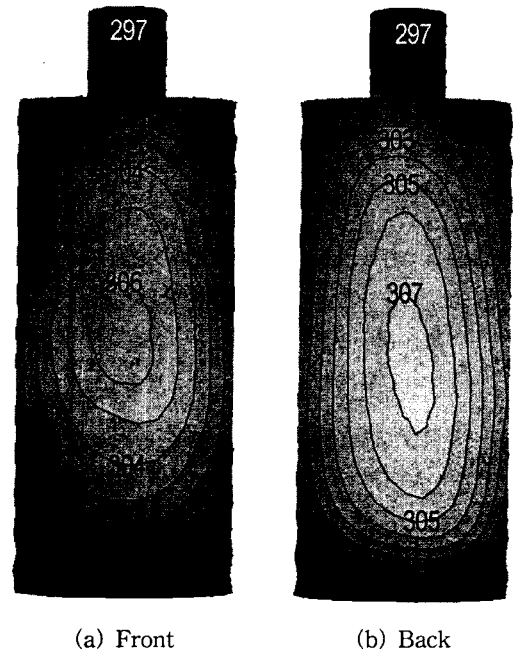
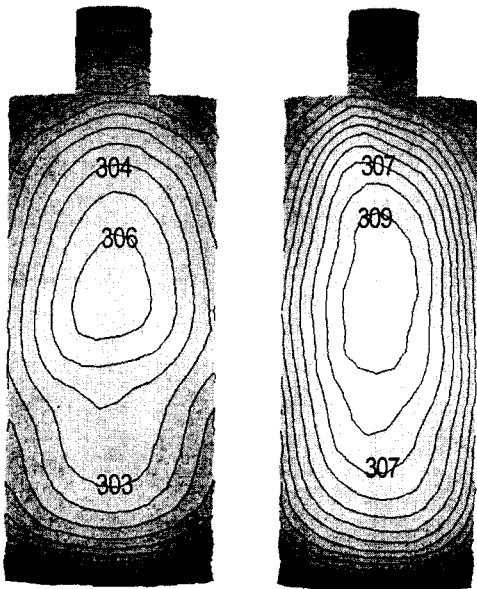


Fig. 9 Predicted temperature distribution on human skin (Inlet 2 : 1.0 m/s, Unit : K).

Fig. 9는 L자 칸막이 좌우측 벽의 공기 분출속도는 1.0 m/s이고 중앙 하단에서 분출속도는 1.5 m/s이며 좌우측 벽의 분출구 위치가 재실자 목부분(inlet 2)일 때 재실자에 인접한 기류의 온도분포를 나타낸 것이다. 전면에서는 복부 부근의 온도가 306°K(33°K)로 가장 높고 가슴 부분은 302~304°K(29~31°K)를 나타내며 머리 부분이 297°K(24°K)이다. 뒷면에서는 하복부 부분에서 307°K(34°K) 높은 온도분포를 나타내고 상부 등뒤에서는 302~306°K(29~33°K)를 나타내고 있다. Fig. 8과 비교하면 L자 칸막이 좌우측의 공기 분출속도가 변화하면서 재실자 인접한 기류의 온도분포가 크게 변화함을 알 수 있다.

Fig. 10은 L자 칸막이 좌우측 벽과 중앙 하단에서 공기 분출속도가 모두 1.5 m/s이고 좌우측 벽의 분출구 위치가 재실자 머리 상부(inlet 4)일 때의 재실자 몸의 전면과 뒷면의 기류 온도분포를 나타낸 것이다. 전면에서는 허리 부근의 기류 온도가 306°K(33°K)로 가장 높고 가슴 부분은 301~305°K(28~32°K)를 나타내며 머리 부분이 296°K(23°K)로 가장 낮다. 재실자의 뒷면에서도 허리 부분에서 309°K(36°K) 가장 높은 온도분포를



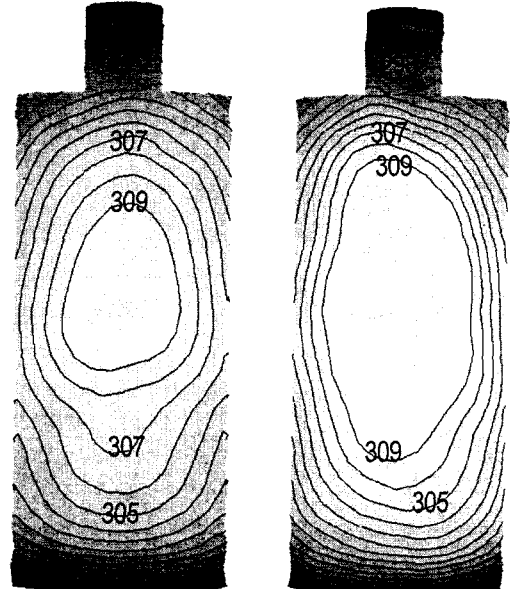
(a) Front (b) Back

Fig. 10 Predicted temperature distribution on human skin (Inlet 4 : 1.5 m/s, Unit : K).

나타내고 상부 등 뒤에서는 302~308°K(29~35℃)로 온도기울기가 크게 나타나고 있다. 이것은 재실자의 대사량이 모든 피부에서 일정하게 계산한 결과로 기류의 속도가 이 부분에서 약하기 때문에 전도열전달의 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 L자 칸막이 좌우측 벽의 공기 분출 속도는 1.0 m/s이고 중앙 하단에서 분출속도는 1.5 m/s이며 좌우측 벽의 분출구 위치가 재실자 머리 상부(inlet 4)일 때 재실자 인접한 기류의 온도분포를 나타낸 것이다. 전면에서는 복부 부근의 넓은 영역에서 온도가 309°K(36℃)로 높게 분포하고 있으며 가슴 부분은 304~308°K(31~35℃)를 나타내며 머리 부분이 296°K(23℃)이다. 재실자 뒷면에서는 종아리에서부터 등 뒤까지 넓은 부분에서 309°K(36℃)로 높은 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 11과 비교하면 L자 칸막이 좌우측의 공기 분출속도가 변화하면서 재실자의 고온 영역부분이 광범위하게 증가하고 온도기울기도 크게 증가한 것을 볼 수 있다.

재실자 피부에 인접한 기류의 온도분포를 종합해 보면 공기분출구 위치가 L자 칸막이 중앙 하단과 좌우측에서는 재실자 목 부분에 있을 때 비



(a) Front (b) Back

Fig. 11 Predicted temperature distribution on human skin (Inlet 4 : 1.0 m/s, Unit : K).

교적 균일한 온도분포를 나타낸 반면, 좌우측 공기분출구가 재실자 머리 상부에 위치할 경우는 재실자에 인접한 기류의 고온 영역이 넓고 온도기울기도 크게 나타나고 있다.

4.2 쾌적감 계산결과

Fanger가 제시한 재실자의 예상온열감(PMV)은 C++ 프로그램을 이용하여 인체에 인접한 기류속도, 기류온도, 평균 방사온도 및 상대습도를 입력값으로 하여 계산한 것으로서 PMV의 범위는 $-1.302 \leq PMV \leq 3.451$ 이다. 이들 PMV값은 인체의 위치에 따라 차이를 보이고 있으며 대체적으로 인체의 후면에서 큰 값을 나타내고 있는데 이것은 후면에서 기류의 속도가 줄어들고 온도가 높기 때문이다. 또한 PMV 계산에는 중요한 변수인 의복 표면온도와 대류 열전달계수를 구하는데 필요한 재실자 인체 인접한 부분의 기류의 속도, 온도 등의 값은 전산유체역학에서 구하여 사용하였다.

냉방공기의 분출구는 L자 칸막이의 중앙부 하단과 좌우측 칸막이의 중앙부에서 재실자의 목 부분과 머리 높이에 설치된 분출구의 높이에 따라

수직으로 분출될 때 인체 주위의 온도, 속도값을 이용하여 PMV값을 계산하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 냉방공기의 분출구가 칸막이 좌우측에서 재실자의 목 부분과 머리 높이에서 온도 18℃, 기류속도 1.5, 1.0 m/s로 분출될 때 PMV값

은 재실자의 몸 위치에 따라 상당한 차이를 나타내고 있다. 우선 재실자 목 부분 공기분출구(inlet 2)에서 냉방공기가 속도 1.5 m/s, 온도 18℃로 분출될 때 재실자의 목 부분에서 재실자 전면과 후면은 PMV가 $-0.448 \leq PMV \leq 2.674$ 로 재실자의 목

Table 2 Velocity, air temperature, PMV on the human body according to cold air velocity and position variation

	Human body position		Air velocity (m/s)	Air temperature at near skin of worker (°C)	PMV
· Position of cold air injection : Low · Velocity : 1.5 m/s · Temperature : 18℃	Throat	Front	0.25	25.5	-0.697
		Back	0.15	25.5	-0.448
		Side	0.50	25.0	-1.302
	Belly	Front	0.30	31.5	1.641
		Back	0.15	32.5	2.114
		Side	0.40	26.	-0.743
	Knee	Front	0.25	32.0	1.869
		Back	0.10	34.0	2.674
		Side	0.40	27.0	-0.321
· Position of cold air injection : Low · Velocity : 1.0 m/s · Temperature : 18℃	Throat	Front	0.22	26.5	-0.248
		Back	0.15	26.3	-0.158
		Side	0.35	26.0	-0.672
	Belly	Front	0.25	33.0	2.269
		Back	0.10	34.0	2.674
		Side	0.35	28.0	0.156
	Knee	Front	0.20	31.5	1.703
		Back	0.10	33.5	2.498
		Side	0.40	28.5	0.315
· Position of cold air injection : Top · Velocity : 1.5 m/s · Temperature : 18℃	Throat	Front	0.23	26.0	-0.461
		Back	0.10	26.0	-0.103
		Side	0.60	26.5	-0.744
	Belly	Front	0.25	33.0	2.269
		Back	0.10	36.0	3.384
		Side	0.35	28.5	0.363
	Knee	Front	0.25	30.0	1.074
		Back	0.10	31.5	1.550
		Side	0.40	27.5	-0.109
· Position of cold air injection : Top · Velocity : 1.0 m/s · Temperature : 18℃	Throat	Front	0.20	27.0	-0.017
		Back	0.10	27.5	0.411
		Side	0.35	27.0	-0.259
	Belly	Front	0.20	36.0	3.451
		Back	0.10	36.0	3.384
		Side	0.30	33.0	2.257
	Knee	Front	0.20	34.0	2.671
		Back	0.10	35.0	3.028
		Side	0.30	30.0	1.028

부분과 허리 전면은 쾌적한 조건이나 허리 뒤와 종아리 부분에서 예상온열감이 낮은 상태이다.

또한, 동일한 위치에서 냉방공기 분출속도가 1.0 m/s일 때는 재실자 전면, 후면 및 측면 모두 PMV가 $-0.672 \leq PMV \leq 2.674$ 로 나타나고 있으나, 목 부분과 허리 및 무릎의 측면에서는 $-0.672 \leq PMV \leq 0.315$ 로 쾌적한 조건으로 비교적 전체 범위에서 쾌적한 상태를 나타내고 있다.

칸막이 좌우측의 높이가 재실자 머리 부분(inlet 4)이고, 냉방공기 분출속도가 1.5 m/s일 때 재실자 목 부분 전체와 무릎 부분 전면과 측면에서는 PMV가 $-0.744 \leq PMV \leq 1.074$ 로 쾌적한 상태이나 복부에서는 PMV가 높게 나타나고 있다. 동일한 조건에서 냉방공기 분출속도가 1.0 m/s일 때 재실자 목 부분에서는 PMV가 $-0.259 \sim 0.411$ 로 쾌적한 범위이나 나머지 부분에서는 PMV가 1.028~3.451로 예상온열감이 떨어지고 있다.

이상의 PMV 계산결과를 종합해 보면 칸막이 좌우측 냉방공기 분출구가 재실자 목 부분(inlet 2)일 때 인체 부분별 PMV값이 쾌적범위에 많이 존재하므로 쾌적감은 높은 것으로 판단되며 반면 냉방공기 분출구가 재실자 머리 부분의 상단(inlet 4)에 위치할 경우는 재실자의 허리 부분에 PMV값이 높게 나타나 불쾌감이 국부적으로 존재하게 된다.

또한, 냉방공기 분출구가 L자 칸막이 중앙 하단과 좌우측 칸막이의 재실자 머리 부분 하단(inlet 2)에서 냉방공기속도가 1.0 m/s일 때와 좌우측 냉방공기 분출구가 재실자 머리 부분 상단(inlet 4)에서 냉방공기속도가 1.5 m/s일 때 인체 부분별 PMV값이 쾌적범위에 목, 허리 및 무릎 부분에 고르게 각각 4곳씩 존재하므로 이들 조건이 쾌적조건임을 알 수 있다.

5. 결 론

개인용 국부 냉방시스템 개발에 필수적인 재실자 주위의 기류 및 온도 분포해석을 위하여 인공기후동 내부에 설치한 공조시스템에 대하여 전산유체역학(CFD)을 이용하여 L자 형태로 구성된 개인 공조시스템에 재실자가 위치하고 칸막이 벽 3곳의 냉방공기 배출구에서 일정한 속도와 온도로 신선한 기류가 유출될 때 재실자 주위의 기류속도와 온도분포를 계산하였다. 재실자가 느끼는

쾌적감은 기류속도와 온도에 밀접한 관계를 가지고 있으므로 재실자 주위의 이들 자료는 개인 공조시스템을 설계하는 데 매우 중요한 자료이다. 또한 전산유체역학에서 구한 재실자 인체 주위의 속도 및 온도분포를 Fanger가 제시한 예상온열감(PMV) 계산에 이용하여 인체 주위에서 냉방공기에 의한 예상온열감을 계산하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) L자 형태의 국부냉방시스템에서 신선한 기류의 분출구가 재실자 목부분의 좌·우측과 중앙부의 무릎 근처에 존재하여 재실자 주위에서 급격한 기류 변화로 인하여 전면과 후면에서 온도편차가 존재하고 복부에서는 온도가 높아서 예상온열감이 다른 부분에 비교하여 떨어지고 있다.

(2) L자 칸막이 좌우측 냉방공기 분출구가 재실자 목부분(inlet 2)이고 냉방공기 분출속도가 1.0 m/s일 때와 분출구가 재실자 머리 부분(inlet 4)이고 냉방공기 분출속도가 1.5 m/s일 때 쾌적범위에 각각 4곳씩 존재하므로 본 국부냉방장치에서는 이들 조건이 쾌적조건이라 판단된다.

(3) 이상의 연구결과를 기초로 향후 신선한 기류의 배출온도, 방향 및 속도 등을 변화시켜 재실자가 최적 쾌적감을 느낄 수 있는 조건을 확보하여 에너지 절약형 국부냉방시스템 개발에 기여할 수 있다.

참고문헌

1. Lee, C. H., Bae, G. N., Choi, H. C. and Lee, C. S., 1994, Characteristics of Thermal Environments and Evaluation of the Comfort in Office Building in Summer, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 206-217.
2. KAIST, 1993, Study on the Method of Evaluation of the Comfort in Indoor Environment, MOST.
3. KAIST, 2001, Development of Personal Air Conditioning Technology, MOST.
4. ASHRAE, 1981, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-1981.
5. ASHRAE, 1992, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE

Standard 55-1992.

6. ISO, 1984, Moderate Environments—Determination of the PMV and PPD indices and Specification of the conditions for the Thermal Comfort—, ISO Standard 7730.
7. Yoon, C. S. and Yoo, B. H., 1996, A Covariance Structure Model for the Evaluation of Comfort in Indoor Environment Based on the Residents' Personal Opinions, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 12, No. 10, pp. 43-53.
8. Kubo, H. and Isoda, N., 1997, Cooling Effects of Preferred Air Velocity in Muggy Conditions, Building and Environment, Vol. 32, No. 3, pp. 211-218.
9. Faulkner, D., Fisk, W. J., Sullivan, D. P. and Wyon, D. P., 1999, Ventilation Efficiencies of Task/Ambient Conditioning Systems with Desk-mounted Air Supplies, Indoor Air.
10. Jeong, K. B. and Kim, J. J., 1999, Individual Air Distribution Control System on Partition Panel at Personal Task Area, Indoor Air, pp. 410-415.
11. ISO, 1984, Moderate Environments—Determination of the PMV and PPD indices and Specification of the conditions for the Thermal Comfort—, ISO Standard 7730.