

치환환기되는 실내에 있어서 인체주변의 기류 및 온열환경 특성에 대한 검토

양 정 훈[†]

영남대학교 건축학부

Examination of Airflow and Thermal Environment Characteristic around Human Body in a Room with Displacement Ventilation

Jeong-Hoon Yang[†]

School of Architecture, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

(Received December 12, 2006; revision received February 13, 2007)

ABSTRACT: Recently, the numerical analysis using person shape model for CFD (Computational Fluid Dynamic) has been researched widely for the thermal comfort and inhaled air quality of human body in the indoor environments. The purpose of this research is to examine the characteristic of airflow and thermal environment around human body by the experiment of displacement ventilation that assumes the indoor environment of natural convection. In this study, thermal manikin was used instead of real human body. The Airflow characteristic around human body was measured in precision by PIV (Particle Image Velocimetry). This experimental result will be used as data for CFD benchmark test using person shape model.

Key words: Displacement ventilation(치환환기), PIV, Thermal manikin, Airflow characteristic (기류특성), Thermal environment(온열환경)

1. 서 론

최근 실내 온열 및 공기환경에 있어서 인체의 온열생리량과 쾌적성, 호흡공기질의 평가 등에 인체형상모델을 이용한 수치해석이 폭넓게 이루어지고 있다. 그 예로서 Fig.1에서 나타낸 바와 같이 Murakami et al.⁽¹⁾은 간이 인체형상모델을 개발하여 각종 기류장에 있어서 직립인체 표면의 대류열전달 특성과 오염물질 농도분포에 대하여 CFD를 이용하여 평가하였다. Ozeki et al.⁽²⁾은 Tanabe

et al.⁽³⁾이 개발한 65분할 인체생리모델을 인체형상모델에 도입하여 일사환경에 있어서 인체의 피부 표면온도 등을 예측하였다. Sorensen et al.⁽⁴⁾은 3차원 스캐너에 의해 작성한 인체형상모델을 이용하여 착석상태의 인체주변의 기류성상을 CFD (Computational Fluid Dynamic)에 의해 해석하였다. 또한 Topp et al.⁽⁵⁾은 CSP(Computational Simulation Person)라는 인체형상모델을 개발하여 강제환기가 이루어지는 실내환경에 있어서 인체주변의 기류성상을 평가하였다. Yang et al.⁽⁶⁾은 자연대류장의 실내환경에 있어서 실험용 thermal manikin의 현열발열량과 실온 및 벽체 온도를 획득하여, 이것을 경계조건으로 수치용 thermal manikin(실험용 thermal manikin과 면적 및 크기

[†] Corresponding author

Tel.: +82-53-810-2598; fax: +82-53-810-4625

E-mail address: yangjh@ynu.ac.kr

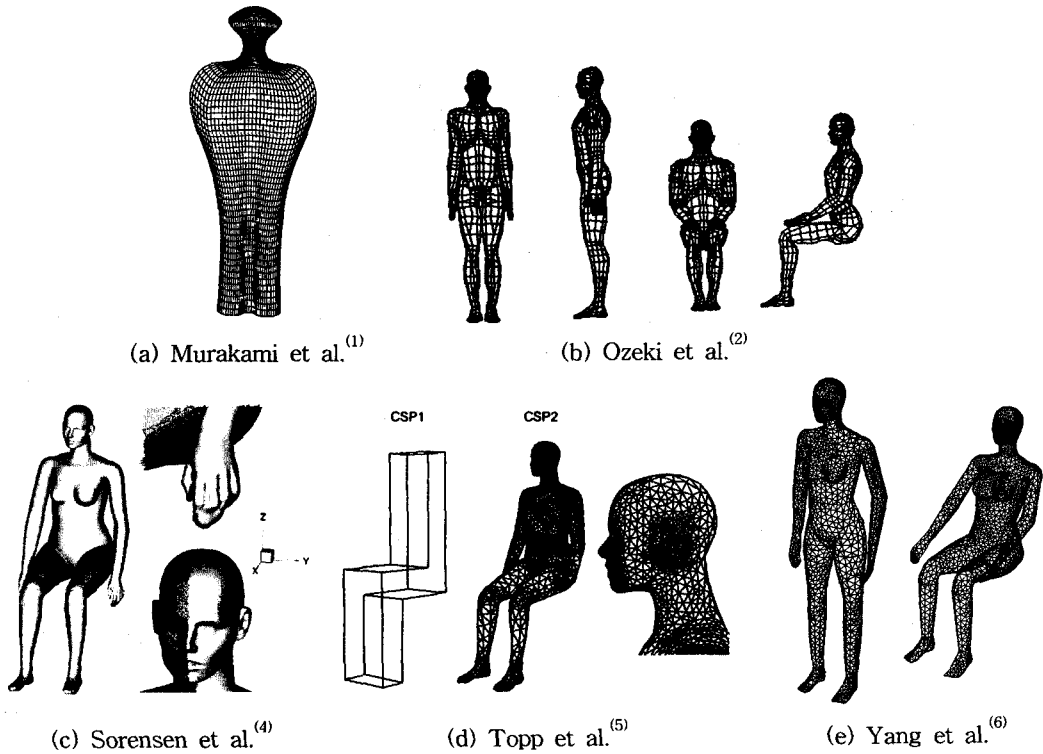


Fig. 1 Cases of human shape model.

가 95% 대응)과 복사계산을 통해 manikin 각 부위의 대류·복사열전달량 및 열전달률을 산출하였다.

상술한 바와 같이 다양한 인체형상모델이 개발되어 독자적인 CFD 및 수치해석기법에 의해 인체 주변의 온열·공기환경의 평가가 이루어지고 있다. 그러나 “CFD 및 수치해석에 있어서 해석목적에 따라 어느 정도의 정교한 인체형상모델을 사용하면 될 것인가”에 대한 기준이 아직 명확하게 설정되어 있지 않다. 이러한 기준을 확립하기 위해서는 강제대류 및 자연대류가 지배적인 각각의 실내환경을 대상으로 실험을 실시하고, 그 결과를 바탕으로 CFD 해석의 벤치마크 시험을 실시할 필요가 있다. 강제대류를 대상으로 한 실험 및 CFD의 벤치마크 시험은 Topp et al.⁽⁵⁾에 의해 상당부분 진행되어 왔다. 그러나 Topp et al.은 인체형상모델의 국소기류에 대하여서는 간과한 채 실 전체의 기류특성을 중심으로 검토하였다.

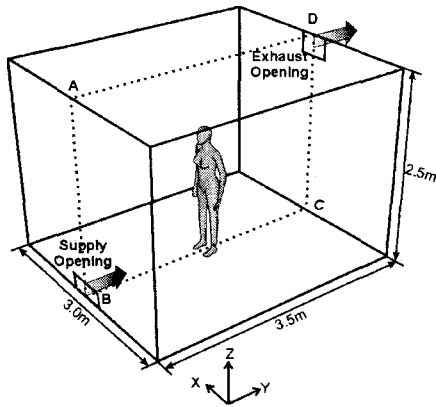
본 논문에서는 자연대류가 지배적인 실내환경을 대상으로 한 치환환기되는 실내에 있어서 실내공

간 및 인체 주변의 기류와 온열환경 특성을 실험을 통해 측정된 결과를 보고한다. 특히 Topp et al.이 간과한 인체 주변의 국소기류 특성을 보다 더 정밀히 검토하기 위하여 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용하여 측정한다. 이러한 실험 결과는 각종 인체형상모델을 이용한 CFD 해석에 있어서 벤치마크 시험용 데이터로서 이용되고, 궁극적으로 CFD 해석기법의 향상에 기여할 것으로 기대된다.

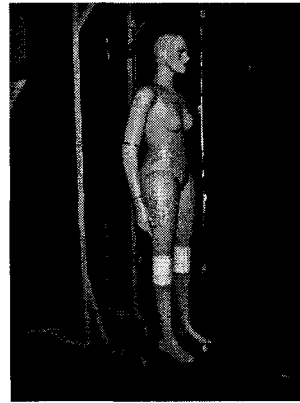
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 대상공간의 구성

본 연구는 자연대류가 지배적인 실내환경에 대하여 치환환기되는 실험실을 구성하여 실험을 실시한다. 실험실은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 3.5 m(W)×3.0 m(D)×2.5 m(H)의 공간으로 형성되어 있다. 실험실 중앙에는 실제 인체를 대신하여 실험용 thermal manikin⁽⁷⁾을 설치한다. 이 manikin



(a) Experimental space



(b) Thermal manikin

Fig. 2 Outline of experimental space using thermal manikin.

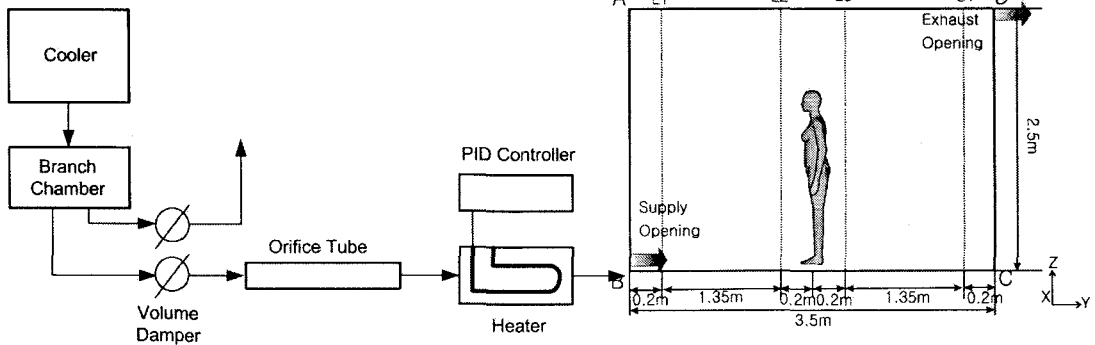


Fig. 3 Outline of experimental setup and places of measurement for air characteristic.

은 표피 하부에는 열선이 배선되어 있어 인체의 대사발열 및 피부 표면온도를 재현할 수 있다. 또한 전신이 16부위(좌우 foot · low leg · thigh · hand · forearm · shoulder, pelvis, chest, back, head) 로 분할되어 있어 각 부위별 현열발열량과 표면온도를 시뮬레이션하고 각각의 물리량을 디지털 데이터로 획득할 수 있다. 본 연구에서는 manikin과 공간과의 열수지를 단순화하기 위하여 manikin의 착의량은 0 clo로 하고, 전신으로부터 76 W(인체대사량 1.2met 중 현열발열량분)가 균일하게 발열되도록 설정한다.

실험실의 치환환기는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 제2종 기계환기를 채택하고 있다. Manikin의 정면 하부에 설치된 취출구로부터 저풍속 냉각공기가 공급되고, manikin 배면 상부에 설치된 배기구로부터 실 상부의 고온공기가 배출된다. 취

출구로부터의 냉각공기는 오리피스관과 PID 제어기에 의해 정밀 제어되어 풍속 0.18 m/s, 온도 21.8°C를 항상 유지하며 공조한다. 이상과 같은 실험조건은 Table 1에 상세히 기술되어 있다.

Table 1 Experimental condition

Supply opening	Size : 0.4 m(W)×0.2 m(H) Velocity : 0.18 m/s Temperature : 21.8°C
Exhaust opening	Size : 0.3 m(W)×0.3 m(H) Free airflow
Thermal manikin	Area : 1.471 m ² Heat generation : 76 W (51.6 W/m ²)
Surrounding wall	Adiabatic

2.2 실험장치 및 결과처리방법

2.2.1 실내 기류속도 및 공기온도 분포측정

실험실 내의 기류속도 및 공기온도의 측정은 Fig. 3의 우측에 나타난 바와 같이 4개소(L1: 취출구측, L2: manikin 전방, L3: manikin 후방, L4: 배기구측)에서 수직분포를 측정한다. 기류속도는 초음파 풍속계(KAIJO사, 풍속계: DA-600, Probe: TR-90AH), 공기온도는 열전대(T-type, ϕ 0.32)를 이용하여 측정하며, L1~L4의 각각에 있어서 풍속은 6개소씩(바닥으로부터 0.1 m, 0.2 m, 0.6 m, 1 m, 1.4 m, 1.72 m: 총 24개소), 온도는 7개소씩(바닥으로부터 0.1 m, 0.2 m, 0.6 m, 1.0 m, 1.4 m, 1.8 m, 2.12 m: 총 28개소) 측정한다. 측정은 실내의 온도분포가 안정된 후, 각 측정점에 대하여 풍속은 3회, 온도는 4회 측정한다. 각 측정 회당 풍속은 5분간, 온도는 6시간 측정하여 산술평균하고 이것을 측정점의 평균 풍속(평균 Scalar 풍속) 및 평균 온도로 한다.

2.2.2 인체주변의 기류특성측정

치환환기되는 실내에 있어서 인체주변의 기류특

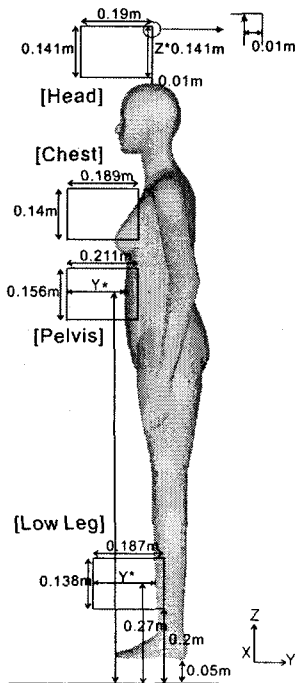


Fig. 4 Interrogation areas by PIV.

Table 2 Measurement parameter for PIV

Image Vectors	1,600(W)×1,186(H) pixels 3,234 (66(W)×49(H))
Time between pulses	5,000 μ s
Time between bursts	1,000 ms
Number of bursts	500

성은 PIV에 의해 정밀 측정한다. PIV 시스템은 FlowMap System Hub(Dantec사, LIFO 1.5 GB), CCD 카메라(Dantec사, FlowSense M2 10 bit), Nd: YAG 레이저(NewWave사, Research Minilase 50 mJ/puls, 15 Hz)로 구성되어 있다. 본 연구에서는, Nd: YAG 레이저 사용에 따른 피험자의 인체손상 등이 우려되므로 실제 인체를 대신하여 thermal manikin을 이용하여 manikin 주변의 기류특성을 측정한다. 추적입자는 Smoke generator(Couburn사, ROSCO 1500, 입자직경: 0.5~60 μ m)를 이용하여 액상입자를 생성시켜 취출구를 통해 실험대상 공간에 공급한다. 공급된 추적입자는 manikin의 열상승류에 의해 manikin 주변으로 유도되어 PIV 측정에 적절한 입자농도를 형성한다.

PIV에 의한 manikin 주변의 기류측정은 Fig. 4에 나타난 4개의 검사영역(사각형으로 표시된 영역: low leg, pelvis, chest, head)에 대하여 실시한다. 각 검사영역에 대하여 Table 2의 측정조건에 준하여 2시각(Δ 5,000 μ s)의 가시화 사진을 연속적으로 500쌍 촬영한다. 2시각의 가시화 사진은 상관법⁽⁸⁻¹⁰⁾에 의해 filtering(adaptive correla-

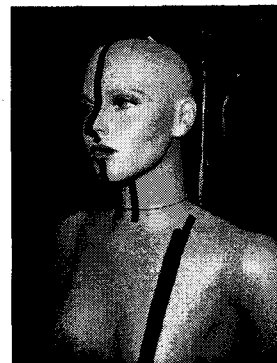


Fig. 5 Surface treatment for preventing laser diffusion in thermal manikin surface.

tion, overlap 25%)하여 500쌍의 순시 속도장을 작성하고, 이것을 통계처리(vector statistics)하여 검사영역 내의 평균 기류속도를 산출한다. 이때의 기류속도는 가시화 사진의 정보에 따르므로 2차원(Y, Z) 풍속 데이터로서 산출된다.

PIV 측정에 있어서 Nd : YAG 레이저 시트광을 manikin에 직접 입사시킬 경우, manikin 표면에 고휘도의 산란광이 형성되어 추적입자의 정밀한 추적을 방해하고 PIV 측정에 심각한 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 manikin을 무광택의 흑색 테이프로 표면처리하여 산란광을 최대한 억제시키고 manikin 표면 근방의 입자추적의 정확도를 향상시킨다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실내 기류속도 및 공기온도분포 측정결과

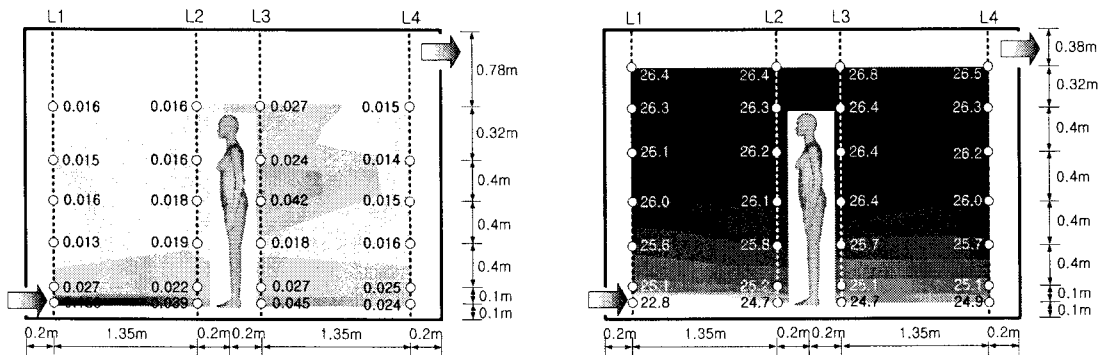
실내 기류속도 및 공기온도분포의 측정결과를 Fig. 6에 나타낸다. 실험실 바닥 부근의 취출구로부터 공급된 냉각공기는 manikin 방향으로 진행되면서 급격한 속도저하가 발생하여, manikin의 foot 부위 부근에서는 취출기류속도(0.18 m/s)의 약 22%인 0.04 m/s까지 하강하였다. 바닥 부근 이외의 전공간에 있어서는 0.02 m/s 이하의 정온한 기류분포를 나타내었다. 단, manikin의 back 부위 부근의 국소적인 기류속도 상승은, manikin을 지지하기 위한 지지대의 영향으로 판단된다. 난류강도(Figure 생략)에 있어서 취출구 주변은 약 26%가 형성되었고, manikin 주변은 35~50%,

그외의 공간에서는 50~60% 정도의 난류강도가 형성되었다. 즉, 취출구와 manikin의 열상승류의 영향을 받는 공간은 그렇지 않은 공간에 비하여 상대적으로 기류속도의 변동이 적음을 알 수 있다.

실내의 공기온도분포에 있어서 취출구 주변은 22.8°C로 취출온도에 비하여 약 1°C 상승하였으나 manikin 발 근방에서는 약 24.7°C로 급격한 온도상승이 나타났다. 실내는 전반적으로 정온한 기류환경이 형성되어 있고, manikin의 열상승류를 제외하고는 유체의 구동력이 매우 미비하다. 이로 인해 실내는 온도층층이 형성되어 취출구 부근 이외의 공간에서는 상하 온도차가 약 2°C 발생하였다.

3.2 Thermal manikin의 표면온도분포 측정결과

전신이 16부위로 분할되어 있고 76 W로 균등 발열(51.6 W/m²)되는 thermal manikin에 있어서 각 부위별 표면온도분포를 Fig. 7에 나타낸다. 취출냉각공기의 영향으로 좌우 foot 부위는 약 30.5°C의 저온이 형성되었다. 좌우 foot 주변에 공급된 냉각공기는 manikin의 발열에 의해 열상승류가 형성되면서 manikin 주변으로 유도되고, 상반신으로 유송되었다. 이 과정에서 공급된 냉각공기가 가열됨으로 인해 manikin과 주변공기와의 대류열교환이 저하된다. 그 결과 상반신으로 올라갈수록 manikin의 표면온도는 약 32.8°C까지 상승하였다. 취출구와 manikin은 실험실에서 공간적인 대칭위치에 설치되어 있기 때문에 manikin 좌우부위의 표면온도는 상호 대칭성이 잘 나타났다.



(a) Distribution of air velocity [m/s]

(b) Distribution of air temperature [°C]

Fig. 6 Air characteristic in room.

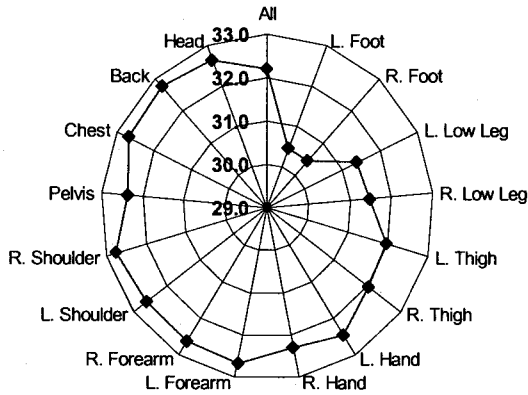


Fig. 7 Skin temperature of thermal manikin (°C).

전신의 평균 표면온도는 약 32.2°C로 형성되었다.

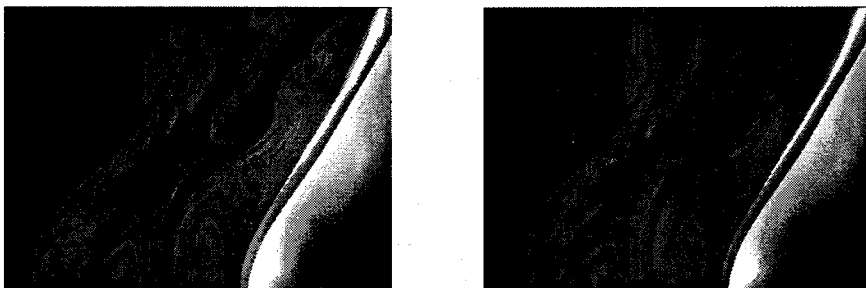
3.3 PIV에 의한 인체 주변기류의 측정결과

Fig. 4에 나타난 4개의 검사영역에 대하여 PIV를 이용하여 manikin 주변의 기류특성을 측정하였다. Fig. 8은 chest 부근에 있어서 2시각(Δ5,000 μs)의 가시화 사진을 측정한 사례를 나타낸다. manikin의 표면처리에 의해 laser 시트광의 산란이 억제되어 chest 주변의 입자가 명확히 촬영되었음을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 4개의 검사영역에 대하여 각각의 Y, Z 방향의 평균 scalar 풍속을 나타낸다. 취출구로부터 thermal manikin의 foot 부위로 공급된 냉각 공기는 manikin의 열상승류에 의해 상반신으로 유송되면서 가열되었다. 이 과정에서 열상승류의 시발점이 low leg 부위에서는 manikin과 주변공

기와의 경계층이 약 25 mm 정도 형성되었고, 열상승류의 기류속도는 약 0.08 m/s로 나타났다. 반면 pelvis, chest 등 상반신으로 올라갈수록 열상승류의 경계층 두께는 약 100 mm까지 발달되고, 최대 0.16 m/s의 기류속도를 나타냈다. Head 주변은 상반신의 전방위로부터 공급된 열상승류가 집결되는 영역으로서 경계층이 매우 두껍게 형성되었다. 열상승류에 있어서 chest 부위를 경유하여 안면부위에서 상승하는 기류는 0.04~0.12 m/s의 풍속분포를 나타내었다. 반면 back 부위를 경유하여 head 뒷부분으로 상승하는 열상승류는 최대 0.2 m/s까지 풍속분포를 나타내었다. 이러한 결과는 manikin의 안면부가 복잡한 형상(manikin의 턱의 굴곡, 코의 돌출, 안구 주변의 후퇴 등)을 형성함에 따라 표면의 형상저항 및 마찰저항이 head 뒷부분보다 크게 작용하여 열상승류의 풍속저하를 야기시킨 것으로 사료된다. 또한 head 부위의 정곡점 주변에는 열상승류의 박리가 발생하여 0.02~0.1 m/s의 상대적으로 낮은 풍속분포를 나타내었다.

본 연구에 있어서 head 부위 상부의 최대기류속도인 0.2 m/s는 Hayashi et al.⁽¹¹⁾이 thermistor 풍속계를 이용한 실인체의 head 상부 측정치와 약 0.05 m/s, thermal manikin(현열발열량 63.3 W/m²으로 설정)의 측정치와 약 0.1 m/s의 차이가 발생하였다. 이러한 차이는 본 연구와 Hayashi et al.의 연구에 있어서 thermal manikin 및 실인체 각각의 발열량 차이가 다소의 영향을 주었기 때문으로 생각한다. 그러나 무엇보다도 thermistor 풍속계(유효측정 최저 기류속도 : 0.05 m/s)와 PIV와의 계측정확도 차이에서 비롯된 것으로 판단된다.



(a) Camera 1 (in 0 s)

(b) Camera 2 (in Δ5,000 μs)

Fig. 8 Visualization photograph in 2 times interval.

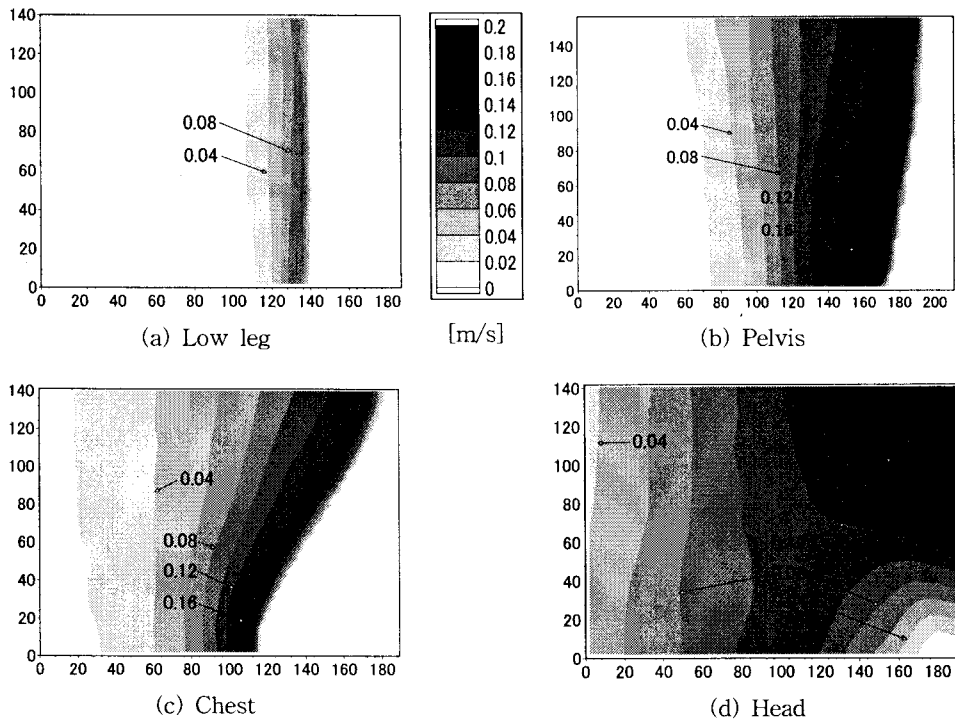


Fig. 9 Air velocity around thermal manikin [m/s] (graph unit is mm).

상술한 바와 같이 정확도 높은 PIV 측정에 의한 실험결과는 향후 인체형상모델을 이용한 CFD 해석에 있어서 벤치마크 시험용 데이터로서 충분한 신뢰도가 확보되었다고 사료된다.

4. 결 론

자연대류가 지배적인 실내환경을 대상으로 한 치환환기되는 실내에 있어서 실내공간 및 인체 주변의 기류환경 및 온열환경 특성에 대하여 실험을 통해 조사하였다. 실험은 실제 인체를 대신하여 인체의 온열생리를 재현할 수 있는 thermal manikin을 이용하여 공간 내의 기류속도와 공기 온도분포를 측정하였다. 또한 manikin 주변의 기류특성에 있어서는 PIV를 이용하여 면밀히 측정하였다. 이러한 실험결과는 각종 인체형상모델을 이용한 CFD 해석에 있어서 benchmark test용 데이터로 이용할 수 있다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 실험실 바닥 부근의 취출구로부터 풍속 0.18 m/s로 공급된 냉각공기는 thermal manikin 방향

으로 진행되면서 급격한 속도저하가 발생하였다. 바닥 부근 이외의 전공간에 있어서는 0.02 m/s 이하의 정온한 기류분포를 나타냈다.

(2) 실험실은 21.8℃의 냉각공기가 공급되었고 manikin은 전신에 76 W로 균일하게 발열을 하였다. 이러한 조건에서 실내는 전반적으로 정온한 기류환경이 형성되어 manikin의 열상승류를 제외하고 유체의 구동력이 미비함에 따라 공간 내에 온도성층이 형성되었다. 그 결과 취출구 주변을 제외하고 전공간에 있어서 상하 온도차가 약 2℃ 발생하였다.

(3) 취출냉각공기의 영향으로 manikin의 foot 부위는 약 30.5℃의 표면온도를 나타내었으나 열상승류의 영향으로 manikin 상반신에는 약 32.8℃까지 온도가 상승하였다. 전신의 평균 표면온도는 약 32.2℃가 형성되었다.

(4) Manikin 주변의 기류 특성을 조사하기 위하여 PIV를 이용하여 4개의 검사영역(low leg, pelvis, chest, head)을 측정하였다. 측정결과, low leg 부위는 열상승류의 경계층 두께가 약 25 mm, 기류속도가 약 0.08 m/s로 형성되었다. 반면 상반

신(pelvis, chest)으로 올라갈수록 경계층 두께는 100 mm까지 발달되었고, 기류속도는 최대 0.16 m/s가 되었다. 또한 head 주변에는 기류속도가 최대 0.2 m/s로 형성되었다.

후 기

본 연구는 2006년도 영남대학교 신입교원정착 연구비의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Murakami, S., Kato, S. and Zeng, J., 1997, Flow and temperature fields around human body with various room air distributions, CFD study on computational thermal manikin-Part1, ASHRAE Transactions, Vol.103 (1), pp. 3-15.
2. Ozeki, Y., Hiramatsu, T. and Tanabe, S., 2004, Comparison of skin surface temperature between subjective experiments and numerical predictions by using a modified 65MN thermoregulation model under solar radiation, J. Environ. Eng., AIJ, No. 581, pp. 29-36.
3. Tanabe, S., Nakano, J. and Kobayashi, K., 2001, Development of 65-node thermoregulation-model for evaluation of thermal environment, J. Environ. Eng., AIJ, No. 541, pp. 9-16.
4. Sorensen, D.N. and Voigt, L.K., 2003, Modeling flow and heat transfer around a seated human body by computational fluid dynamics, Building and Environment, No. 38, pp. 753-762.
5. Topp, C., Nielsen, P.V. and Sorensen, D.N., 2002, Application of computer simulated persons in indoor environmental modeling, ASHRAE Transactions, Vol.108(2), pp. 1084-1089.
6. Yang, J.H., Kato, S., Hayashi, T. and Murakami, S., 2004, Measurement of convection heat transfer coefficients with using an experimental and computational thermal manikin in indoor environments, J. Environ. Eng., AIJ, No. 584, pp. 33-40.
7. Tanabe, S., Arens, E.A., Bauman, F.S., Zhang, H. and Madsen, T.L., 1994, Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature, ASHRAE Transaction, Vol. 100(1), pp. 39-48.
8. The Visualization Society of Japan, 2002, The Handbook of PIV, Morikita Publishing.
9. Zhu, S., Hyashi, T., Kato, S. and Murakami, S., 2004, Investigation of flow field in human's respiration area in a calm environment by visualization experiment and numerical analysis, J. Environ. Eng., AIJ, No. 583, pp. 37-42.
10. Yang, J.H., Kato, S., Chikamoto, T. and Omori, T., 2005, Examination of personal air-conditioning system covering wide area of task region, Transaction of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, No. 96, pp. 21-29.
11. Hayashi, T., Murakami, S., Kato, S., Takahashi, S., Zeng, J. and Sakuma, K., 1998, Study on computational thermal manikin (Part 14) Measurement of flow and temperature fields around real human body and thermal manikin, Technical Papers of Annual Meeting The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, pp. 985-988.
12. Hwang, T.G. and Doh, D.H., 2005, Analysis of airflow in a room with panoramic PIV, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 12, pp. 1154-1160.