

# 거주환경의 쾌적성 연구동향

## - Thermal Manikin과 인체 모델 -

(居住環境の快適性研究動向 -サーマルマネキンと人體モデル-)

출처 : 일본 공기조화 위생공학회 학회지, 2010년 2월 Vol. 84 No. 2 pp. 83~89  
 저자 : Shinichi Tanabe (Waseda Univ.)

번역 : 서 장 후 / 편집위원

조선대학교 건축학부 (seo@chosun.ac.kr)

### 서론

덥고 춥다라는 감각에 영향을 주는 주된 요소는 공기온도, 복사온도, 습도, 기류의 물리적인 4요소와 착의, 대사라는 인간의 2요소이다. 공기온도가 같더라도 바닥이나 벽의 온도가 낮으면 실온이 같아도 춥게 느낀다. 인간이 느끼는 감각에는 많은 요소가 관련되어 있기 때문에, 예전부터 이러한 요소를 하나로 정리하는 방법에 대해서 여러 가지 연구들이 진행되어 왔다. 덴마크의 Fanger에 의한 예상평균 온냉감신고(PMV)<sup>1)</sup>나 미국의 Gagge에 의한 표준 신희효온도(SET\*)<sup>2)</sup>가 1970년 전후에 제안되어 6요소를 포함한 온쾌적성 지표로서 현재에도 폭 넓게 사용되고 있고, PMV는 1984년에 ISO-7730<sup>3)</sup>으로서 국제규격화가 되었다. 전신 온냉감이 중립상태에 있더라도 국부 온냉감에 의해 불쾌함이 존재한다면 쾌적한 상태라고 할 수 없다. ISO-7730, ASHRAE 55에서는 불균일 복사, 드래프트, 상하온도분포, 바닥온도의 국소 불쾌감에 대해서 허용 한계를 나타내고 있다.

그러나, 신체의 일부가 냉각되는 경우나 바람이 신체에 닿는 경우, PMV나 SET\*등의 온열감지표를 이용하는 것이 쉽지 않다. 또한 국소불쾌감은 전신 온냉감이 중립에 가깝다는 전제조건에서 정의가 되기 때문에 가령, 전신이 더운 상태에서 머

리가 냉각되었을 때의 쾌적감에 대해서는 정의하기가 어렵다. 인체는 손발 등의 사지(四肢)부와 구간(軀幹)부를 독립해서 생각할 수 없기 때문에 구간부가 냉각되면 사지의 피부온도는 내려간다.

태스크엔비엔트(Task Ambient) 공조나 자동차 실내 등의 온열환경 평가를 개발할 때, 신체의 일부가 국소적으로 기류에 노출될 때의 쾌적성에 많은 호기심이 생기게 된다. 오피스 등에서 실내의 환경을 양호하고 균일하게 만든다 하더라도 개인 차이가 발생하기 때문에 오피스의 재실자 전원이 만족하는 환경을 조성하는 것은 어렵다. 그렇기 때문에 태스크엔비엔트 공조 시스템은 개인 차이에 대응이 가능하고 재실자의 만족도를 높일 수 있기 때문에 지적 생산성 향상에도 기여할 수 있다. 한편, 전기 자동차나 하이브리드 자동차에서는 난방열원으로서 엔진에서 발생하는 배열뿐만 아니라 전지의 이용 필요성도 나타나고 있다. 효율적인 냉난방을 하기 위해서는 인간 특성을 고려한 연구를 수행하는 것이 아주 중요하게 되었다.

### Thermal Manikin

인체의 부분 기류나 복사환경의 영향을 정밀하게 평가하기 위해서 Thermal Manikin이 자주 이용되고 있다. 통상적으로 온열환경 평가는 공간 내의 복수 점에서의 공기 온도, 기류 속도 등의 물

리적인 값을 측정하는 것에 의해 이루어진다. 그러나 복수 점에서 측정된 환경물리요소는 중요한 데이터로 사용은 되지만, 이 값들 만으로 불균일 온열환경에서의 인체의 온냉감, 불쾌감을 예측 평가하는 것은 아주 어렵다. 인체가 복사, 기류 등에 불균일하게 부분적으로 노출되는 경우, 인체 형상을 한 온열환경 측정장치인 Thermal Manikin을 이용하는 것은 아주 효과적인 방법이다. Thermal Manikin은 착의 열저항의 측정을 위해 개발되어 측정법의 표준화가 이루어져 있고, 온열환경 평가에 응용할 수 있도록 되어 있다. 자동차 실내의 온열환경 평가법 ISO-14505로서 표준화가 이루어져 있으며, 본 장에서는 Thermal Manikin의 역사와 그 측정원리에 대해 설명한다.

### Thermal Manikin의 역사

Thermal Manikin은 의복 열저항측정을 위해서 만들어진 것으로 인간이 착의상태로 있을 때, 의복의 온열특성을 재현하기 위한 인체모형을 말한다. 최초의 Thermal Manikin은 Belding이 미국육군용으로 제작한 동(銅)제의 분할이 없는 발열체로 알려져 있으며, 그 후 Belding이 분할화 등의 개량화를 하여 일부는 실내환경평가에도 이용하고 있다. 또한 Winslow, Herrington<sup>4)</sup> 등은 그들의 저서에서 입식자세만 가능한 동판제의 Thermal

Manikin을 소개하고 있고, Kerslake 등은 좌식자세가 가능한 Thermal Manikin을 제작하였다. 덴마크 공과대학에서는 Madsen<sup>5)</sup> 이 Thermal Manikin (Henrik: 그림 1)을 제작하여 많은 의복 열저항에 관한 데이터를 수집하였고, 미국 캔사스주립대학의 McCullough<sup>6)</sup> 등은 Thermal Manikin을 이용하여 의복 단열성 값을 측정, 발표하였다.

일본에서는 Toda가 입식자세의 동제 Manikin을 개발하였고, Mihira<sup>7)</sup>가 입식자세의 어깨관절부 회전 가능한 Manikin을 개발하였으며, Tamura<sup>8)</sup>는 피복아래 공기층과 열저항과의 관계에 대해서 연구를 진행하고 있다. 특히 Mihira의 경우 착의 단열성능뿐만 아니라 실내환경 평가를 위한 Manikin을 제작하여, Thermal Manikin을 인체형상을 한 글로브 온도계라고 설정하여 환경평가를 하였다. Tanabe 등은 종래의 흑색 Manikin을 피부색으로 하여 의자에 앉는 것이 가능한 Manikin (그림 2)을 제작하였으며, 이를 이용하여 에어컨 등의 쾌적성 평가에 사용하고 있다.

덴마크 공과대학에서는 3세대의 Thermal Manikin이 Madsen에 의해 제작되어, 착의 상태에서의 열저항 측정뿐만 아니라, 온열환경 측정에도 많이 응용되었다. 2세대의 Thermal Manikin인 Henrik (그림 1)은 내부 발열형이었고, 3세대에는 표면 발열형 Thermal Manikin으로 변화되었



[그림 1] 덴마크 공과대학, Henrik



[그림 2] 흑색 Manikin과 좌식이 가능한 알루미늄 Thermal Manikin

다. 이 3세대 Thermal Manikin<sup>9)</sup>은 당초 덴마크 공과대학에서 제작되었지만, Madsen이 퇴직 후, 대학의 Technician 이던 Trans가 Thermal Manikin 제작회사를 설립하여 세계 각국에 사용되고 있는 Thermal Manikin을 생산하게 되었고,<sup>10)</sup> 이후 CFD 연구자 등의 요구에 의해 호흡기능 등이 추가되었다. 현재 일본 Waseda 대학에서 사용하고 있는 피부표면 발열형 Thermal Manikin은 그림 3과 같다.

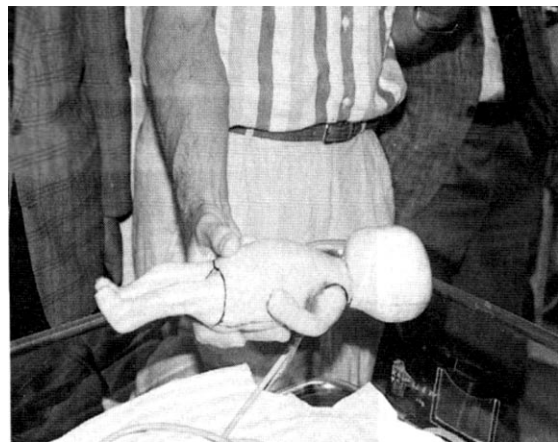
Wyon<sup>11)</sup> 등은 Thermal Manikin을 자동차 분야의 온열환경 평가에 이용하였다. 북유럽에서 트럭 내

부의 공기온도 등 온열환경 평가를 위해서 볼츠만이라고 불리는 운전수 형태의 Thermal Manikin을 이용하였다.

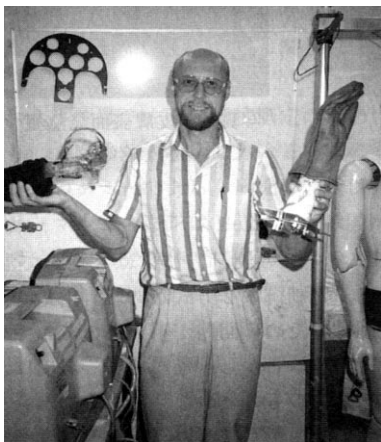
한편, 스웨덴의 Holmér 교수는 성인 형상의 Thermal Manikin 뿐만 아니라, 손의 형상만을 제작한 Thermal Manikin, 유아 형상의 Thermal Manikin 등 다양한 용도와 형상의 Thermal Manikin을 개발하고 있다. (그림 4, 5) 핀란드에서는 20여년 전 발한 Thermal Manikin을 개발하였으나, 연구 내용과 관련된 학술 논문이 적고, 기



[그림 3] 피부표면 발열형 Manikin (덴마크 제품)



[그림 4] 신생아 Manikin



[그림 5] 손 형상의 Manikin (사진 중앙은 Holmér 교수)



[그림 6] 피부표면 발열형 Manikin (머리부 와이어링 작업 도중)

술적으로 어려운 점이 많아 기술 개발이 다소 늦어지고 있는 듯 하다. 미국에서는 군 관련 연구소나 캔사스 주립대학에서 Thermal Manikin을 사용하고 있으며, 현열형 Thermal Manikin이나 발한 Manikin이 판매되고 있다.

### 구조와 기능

Thermal Manikin의 발열은 ① 피부표면 발열방식, ② 셀 내표면 발열방식, ③ 내부공기 가열방식 등 크게 3가지로 나뉘어진다. ②, ③의 발열방식의 경우 동 혹은 알루미늄과 같이 열전도율이 소재가 셀에 사용된다. 위의 3가지 방법은 각각의 장단점이 있지만, 시간 응답성이 좋은 이유로 피부표면 발열방식이 최근 많이 이용되고 있다. 피부표면 발열방식의 경우, 외표면의 전열선 와이어링에 고도의 기술이 요구되지만, 정상상태 도달 시간이 짧은 장점이 있다.

Thermal Manikin 머리 부분의 와이어링 작업 도중의 상태는 그림 6과 같다. 4 mm 두께의 유리섬유로 보강된 폴리에스테르 셀에 0.3 mm  $\phi$ 의 니켈 전선이 2 mm 이하의 간격으로 전선에 감겨져 있고, 0.1 mm에서 십 분의 수 mm정도의 도료 커버가 전선에 설치되어 있다. 전선 보호를 위해서 도료의 두께를 아주 얇게 하기 때문에 측정된 온도는 거의 피부온도와 같다고 간주한다.

각 부위는 각각의 제어, 계측 시스템을 내장하고 있고 제어계측용 컴퓨터에서의 컨트롤 시그널에 의해 각 부위에 필요한 전력량이 펄스의 형태로 공급된다.

Thermal Manikin의 제어 방법은 크게 온도 일정제어와 공급전력 일정제어로 구분된다. 공급전력 일정방식에서는 온도제어를 위한 회로가 필요 없기 때문에 Thermal Manikin의 제작이 간단하지만 노출되는 환경에 의해 피부온도가 실제 인체의 온도와 차이가 있기 때문에 광범위한 환경 조건에서의 적용이 용이하지 않다. 또한 온도 일정제어의 경우, 실제 인체와 비교했을 때 피부 온도와의 편차가 발생하는 데, 여기에서 소개하는 Thermal Manikin은 온도 일정제어법을 기본으로 하지만, 설정 온도와 공급 전력량 사이의 수렴 조건식을 이용한다.

### 환경과의 열교환과 제어

Thermal Manikin을 이용한 제어는, 주변 환경과 인간과의 열교환을 기초로 하고 있다. 인체의 열평형은 식(1)과 같다. 피부 표면에서의 열손실은 식(2)와 같이 현열 항( $Q_t$ )과 잠열 항( $E_s$ )으로 나누어진다. 현열 손실은 식(3)과 같이 복사 열손실( $R$ )과 대류 열손실( $C$ )로 구분된다.

기계적 일량이 0이며, 정상상태에서는 인체의 대사량( $M$ )과 전열 손실량( $Q_m$ )은 동일하다고 간주한다.

$$Q_m = M = Q_s + Q_{res} \quad (1)$$

$$Q_s = Q_t + E_s \quad (2)$$

$$Q_t = R + C \quad (3)$$

피부 표면에서의 현열 손실량( $Q_t$ )은 전열 손실량( $Q_m$ )에서 호흡에 의한 열 손실량( $Q_{res}$ )과 피부 표면에서의 증발열 손실량( $E_s$ )을 뺀 값으로 얻을 수 있다.

$$Q_t = Q_m - Q_{res} - E_s \quad (4)$$

호흡에 의한 열 손실량, 피부 표면에서의 증발열 손실량은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 기계적 일량은 0으로 가정한다.

$$Q_{res} = 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P_a) + 0.0014 M (34 - t_a) \quad (5)$$

$$E_s = 3.05 \times 10^{-3} (5733 - 6.99M - P_a) + 0.42 (M - 58.15) \quad (6)$$

식(5)에서는 공기온도가 포함되어 있고, Thermal Manikin의 제어 시, 공기온도를 알 필요가 있기 때문에 공기온도는 20°C로 고정한다. Fanger에 의하면 열적 중립상태에 있는 인체의 대사량과 평균 피부온도의 관계는 식(7)과 같다.

$$t_s = 35.7 - 0.028 Q_m \quad (7)$$

본 Thermal Manikin은 발汗을 하지 않기 때문에 잠열 손실은 고려하지 않는다. 그래서 전열 손실량과 피부표면에서의 현열 손실량의 관계로서 수증기압 1.5 kPa때의 관계를 이용하였다. 따라서 땀이 나는 환경에서의 Thermal Manikin의 피부온도는 실제 인체의 평균 피부온도와 같지 않을 가능성이 있다. 본 Thermal Manikin에서는 환경과

의 열교환에 대한 수렴 값을 이용하여 피부온도를 결정한다.

$$Q_m = 1.96 Q_r - 21.56 \quad (8)$$

식(8)을 식(7)에 대입하면 다음과 같다.

$$t_s = 36.4 - 0.054 Q_r \quad (9)$$

Thermal Manikin의 각 부위 피부온도는 식(9)를 기본으로 이용하여 제어된다.

### Thermal Manikin에 의한 등가온도( $t_{eq}$ )의 산출

피부표면 열저항 값을 임의의 값으로 고정하고, 실제의 Thermal Manikin의 열손실을 대입하면 열손실에 근거로 한 환경온도를 구할 수 있으며, 이 환경온도를 Thermal Manikin에 의한 등가온도( $t_{eq}$ )라고 부른다. 피부온도 일정형 Thermal Manikin의 경우, Wyon이 EHT를 제안하였고, EHT와 구별하기 위해서  $t_{eq}$ 라고 나타낸다.

$t_{eq}$ 는 실제의 환경에서의 Thermal Manikin의 열손실과 같은 양의 열손실이 생기는 균일 온열환경 일 때의 작용온도라고 정의한다. 여기서 균일환경이라는 것은 공기온도와 평균 복사온도가 같고, 정온 기류, 상대습도 50%, 상하 온도분포가 없는 온열환경을 의미한다. 등가온도는 식(9)에 근거하기 때문에 등가온도가 36.4°C를 넘는 경우는 등가온도로서 의미를 가지지 않지만, 발열량이 0이 되더라도 Thermal Manikin의 피부 표면온도는 계속 하며, 이 피부온도는 공기온도와 복사온도의 합의 평균인 작용온도가 된다.

전신에 대해서:

$$t_{eq} = t_s - 0.155 (I_{cl} + I_a / f_{cl}) Q_r = t_s - 0.155 I_t Q_r \quad (10)$$

신체 각부위에 대해서:

$$t_{eqi} = t_{si} - 0.155 (I_{cli} + I_{ai} / f_{cli}) Q_{ri} = t_s - 0.155 I_{ti} Q_{ri} \quad (11)$$

열 저항값과 측정에 의해 구한 열손실, 피부온도를 식 (10), (11)에 대입하는 것에 의해 어떤 착의 기준  $t_{eq}$ 를 얻을 수 있다. 여기서,  $I_{cl}$ 은 기준 착의량,  $I_a$ 는 공기층의 열저항,  $f_{cl}$ 은 착의 면적비를 나타낸다.

### 인체의 형태계수 수치해석

인체의 주위와의 복사 열교환을 해석하기 위해서는 인체의 형태계수를 알아야 할 필요가 있다. 또한, 일사를 인체가 직접 받는 경우에는 인체와 주위 표면과의 형태계수 평가와 함께 지향성이 강한 직달 일사가 인체의 어떤 부위에 비추어 지는가를 정확히 파악할 필요가 있다. 기존에는 인체와 주위공간과의 형태계수 산출을 위해 사진촬영법 등의 실험적 수법이 이용되었으나, 취급의 번잡함 등 여러 가지 불편함이 발생하였다. 최근에는 인체 형상에 대해서 일사취득량 분포, 주위 표면과의 형태계수의 정량적 평가를 간단히 할 수 있는 수치 시뮬레이션이 제안되고 있다.

Ozeki<sup>12)</sup> 등은 인체의 표면을 4396개의 미소(微小)사각형으로 분할하고 인체 미소면  $i$ 와 주위 공간 미소면  $j$ 와의 형태계수  $F_{ij}$ 를 미소면 간의 차폐를 고려해서 수치적분법에 의해 산출하였다. Ozeki 등에 의해 개발된 모델은 초기 모델이나, 이 모델을 이용한 산출결과는 Underwood, Fanger 등이 사진촬영법을 이용해서 구한 유효 복사면적, 형태계수와 상당히 좋은 상관성이 확인되었다. 인체 모델을 수치유체해석이나 뒤에서 설명하는 수치체온조절 모델과 연성하는 것에 의해 상세한 복사환경을 고려한 열적 쾌적성 시뮬레이션이 가능하다.

### 인체모델

수치유체해석(CFD)의 발전과 함께 실내환경의 열적 쾌적성에 관한 수치 인체 모델을 이용한 해석 연구가 증가하고 있다.<sup>13)</sup> 인체의 체온 조절계 모델의 연구는 1940년대 초기부터 1960년대 후반까지는 주로 아날로그 컴퓨터를 이용하였다. 1970년경에는 아날로그 컴퓨터에서 디지털 컴퓨터로 바뀌었으며 보다 상세하고 복잡한 모델이 제안되고 있다. 표 1은 인체모델의 예를 나타낸다.

1960년경부터 1970년대 전반에는 Wyndham과 Atkins 모델, Wissler 모델<sup>14)</sup>, Gagge의 2-node 모델, Stolwijk와 Hardy 모델, Stolwijk 모델<sup>15)</sup> 그리고 Smith 모델<sup>16)</sup> 등이 제안되어 있다. Smith 모델에서는 생체 내 전열을 유한요소법을 이용해서 해석하고 있으며 이 Smith 모델을 발전시킨 것이

<표 1> 수치 인체 모델의 예

제안자	발표년도	특징
Wyndham and Atkins	1960 1968 1969	하나의 원주로 인체를 대표하며 core, muscle, tissue, skin의 4개 층으로 나누어져 있다.
McDonald and Wyndham	1950	Core와 skin의 2절점으로 인체를 나타낸다. 전기회로와의 상이성을 이용한 해법을 사용하였다.
Wissler	1961	머리, 몸통, 양팔, 양다리 등 총6개의 원주로 인체를 나타낸다. 각 원주는 균질한 매체로 취급을 하고 정상상태에서의 온도분포를 구하고 있다.
Stolwijk and Hardy	1966	3개의 원주로 인체를 표현하며, 머리와 사지를 나타내는 원주를 core, skin의 2절점으로 몸통을 나타내는 원주를 core, muscle, skin의 2절점으로 나누고 있다.
Gagge et al.	1971 1986	하나의 구로 인체를 나타내면 skin과 core의 2절점으로 나눈다
Stolwijk	1971	6개의 부위로 인체를 나눈다. 머리는 구로, 나머지 부분은 5개의 원주로 표현한다. 각 부위를 core, muscle, fat, skin의 4절점으로 나눈다.
Kawashima	1971	인체를 core, shell 심장 및 대혈관, 내부 소혈관, 외부 소혈관의 5절점으로 나타낸다.
Smith	1991	15개의 원주로 인체를 나타낸다. 각 원주의 온도분포를 구할 수 있다. 혈관 망을 모델화하고, 혈관 내의 압력을 간이적인 방법으로 구하여 혈류량을 결정한다. 피부 표면 근방의 혈관 두께가 온도에 의해 변화되어 혈류조절반응의 표현이 가능하다.
Takemori et al.	1995	Smith 모델을 기본으로 하며, 피부혈류 반응에 대해서 AVA를 고려한 모델을 도입하고 있다.
Fials	1999	한랭환경에서 서열환경을 평가하는 인체 모델 UTCI의 표준으로서의 사용이 검토되고 있다.
Tanabe et al.	1991 2001 2002	16개의 부위로 나누고 있고, 60 MN, COM, JOS, REAL로 개량한 인체모델을 개발하였다.
Yokoyama et al.	2000 2001 2002	16개의 원주로 인체를 표현하며, 각 원주의 온도분포를 구할 수 있다. 각 원주를 피부, 지방, 내장 등의 복수 층으로 나누어, 온도 분포를 구한다.
Sakoi et al.	2003	Smith 모델을 기초로 하여 CFD, 복사 해석의 연성이 가능하다.

Takemori et al.에 의한 모델로 체온조절에 있어서 중요하게 지적되고 있는 동정맥문함(AVA)을 고려하고 있다. Fu 모델<sup>17)</sup>은 Smith 모델을 개량한 것으로 착의의 비정상 열전달을 고려한 모델이다.

일본에서는 Kawashima에 의해 인체제어 모델 연구, Yokoyama에 의해 생체 내 열이동에 관한 연구가 진행되고 있다. Katayama는 Yokoyama모델을 기초로 재구축 개발하여 16분할 한 2개층 인체 열모델을 자동차 실내 온열환경 평가에 적용하고 있다. Takada는 Trans-mod 모델과 동일 모델을 개발하여 착의 내에 축적하는 수분이 인체 열수지에 미치는 영향을 검토하고 있다. Tanabe는 지금까지 65 MN<sup>18)</sup>, 3DM, COM 및 JOS를 제안하였다. 65 MN은 Stolwijk 모델을 기본으로 한 모델로 인체를 16 부위 분할함으로써 불균일 열환경에

서의 적용이 가능하게 되었다. 그러나 혈액 순환에 의한 열교환을 1차원 열교환으로 간이화하였기 때문에 수치해석의 결과가 실제 인간의 피부온도 분포와 다른 경우가 발생하였다. 3 DM은 Fu모델을 개량한 모델이며 혈관계 및 호흡기계를 상세하게 고려하여 체내 온도분포의 상세한 예측이 가능하다. COM은 사지 혈류 모델과 외부 물체와의 열전도를 포함한 모델이며, JOS는 상세한 혈류 경로와 AVA 혈류, 피부표면 정맥을 고려한 것으로 특히 서열환경에서의 피부온도 예측이 개선되었다.

### 결론

이상과 같이 온열환경의 최근 연구동향으로서 Thermal Manikin의 역사, 구조, 기능을 정리하였

으며 인체모델의 개발 과정 등에 대해 살펴보았다.

## 참고문헌

1. P. O. Fanger: Thermal Comfort (1970), Danish Technical Press
2. A. P. Gagge, A. P. Fobelets and L. G. Berglund: A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions 92 (1986), pp. 709-731
3. ISO-7730: Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (1995)
4. L. E. A Winslow and L. P. Herrington: Temperature and Human Life (1949), Princeton Univ. Press, pp. 132-144
5. T. L. Madsen: Description of Thermal Mannequin for Measuring the Thermal Insulating Capacity of the Clothing, Report No. 48 (1976), Technical University of Denmark
6. E. A. McCullough, B. W. Jones and J. Huck: A comprehensive data base for estimating clothing insulation, ASHRAE Transactions 91 (1985), pp. 29-47
7. 三平和雄ら:サーマルマネキンに関する研究, 人間工学誌 13-2(1977) pp. 47-53
8. 田村照子ら:サーマルマネキンによる被服の熱に関する研究,文化女子大研究紀要 18 (1985) pp. 221-229
9. S. Tanabe et al.: EVALUATION OF THERMAL ENVIRONMENTS WITH A SKIN-SURFACE-TEMPERATURE-CONTROLLED THERMAL MANIKIN, Journal of architecture, planning and environmental engineering. Transactions of AIJ, 448 (1993) pp. 1-8
10. PT Teknik: <http://pt-teknik.dk/>
11. D. P. Wyon, S. Larsson, B. Forsgren and I. Lundgren: Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin, SAE (1989) pp. 1-11
12. Y. Ozeki et al.: EVALUATION ON EFFECTIVE RADIATION AREA OF HUMAN BODY CALCULATED BY A NUMERICAL SIMULATION, Journal of architecture, planning and environmental engineering. Transactions of AIJ, 525 (1999) pp. 45-51
13. S. Tanabe et al.: Evaluation of Thermal Comfort Using Combined Multi-node Thermoregulation (65 MN) and Radiation Models and Computational Fluid Dynamics (CFD), Energy and Buildings, 34 (2002) pp. 637-646
14. E. H. Wissler: A Mathematical Model of the Human Thermal System, Bulletin of Mathematical Biophysics, 26 (1964) pp. 147-166
15. J. A. J Stolwijk: Mathematical Model of Thermoregulation, Physiological and Behavioral Temperature Regulation (1970) Chapter 48, Charles C. Thomas Pub., pp. 703-721
16. C. E. Smith: A Transient, Three-Dimensional Model of the Human Thermal System (1993) KSU, Dissertation.
17. G. Fu: A Transient, 3-D Mathematical Thermal Model for the Clothed Human (1995) KSU, Dissertation.
18. S. Tanabe et al.: DEVELOPMENT OF 65-NODE THERMOREGULATION-MODEL FOR EVALUATION OF THERMAL ENVIRONMENT, Journal of architecture, planning and environmental engineering. Transactions of AIJ, 541 (2001) pp. 9-16. 