

## 투과계수를 고려한 의복과 인체 사이의 공기층에서 자연대류 특성

지 명 국<sup>†</sup>, 배 강 열, 정 효 민\*, 정 한 식\*, 추 미 선\*\*

경상대학교 대학원 정밀기계공학과, \*경상대학교 수송기계공학부 · 해양산업연구소, \*\*경상대학교 의류학과

### Natural Convection for Air-Layer between Body Skin and Clothing with Considering Coefficient of Permeability

Myoung-Kuk Ji<sup>†</sup>, Kang-Youl Bae, Hyo-Min Jeong\*, Han-Shik Chung\*, Mi-Seon Chu\*\*

Department of Precision Mechanical Engineering Graduate School, Gyeongsang National University,  
Tongyeong 650-160, Korea

\*Department of Transport Vehicle Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

\*\*Department of Clothing and Textiles, Gyeongsang National University, Chinju 660-701, Korea

(Received August 20, 2001; revision received November 5, 2001)

**ABSTRACT:** This study presents the numerical analysis of natural convection of a micro-environments with air permeability in the clothing air-layer. As a numerical model the clothing air layer of shoulder and arm were adopted. Finite volume method for two-dimensional laminar flow was used for the analysis of flow and thermal characteristics of velocity, temperature and concentration in the air layer between body and clothing. As temperature boundary conditions, a body skin has a high temperature with 34°C and the environmental temperatures are 5, 15 and 25°C for various permeability coefficients. The distributions of concentration, temperature and velocity are shown that two large cells form at horizontal and vertical air layer, respectively. As the temperature difference between body skin and environment decreases, the heat transfer is decreased rapidly.

**Key words:** Microenvironment(미환경), Clothing(의복), Concentration(농도), Coefficient of permeability(투과계수), Air-permeability(통기성)

#### 기 호 설 명

$C$  : 농도 [ $g/m^3$ ]

$D$  : 확산계수 [ $m^2/s$ ]

$g$  : 중력가속도 [ $m^2/s$ ]

$h$  : 열전달계수 [ $kcal/m^2h^\circ C$ ]

$\lambda$  : 난류에너지 [ $m^2/s^2$ ]

$K$  : 투과계수 [ $m^2$ ]

$L$  : 피부표면길이 [ $m$ ]

$T$  : 온도 [ $^\circ C$ ]

$\Delta T$  : 온도차

$u$  :  $x$ 방향 속도성분

$v$  :  $y$ 방향 속도성분

$\alpha$  : 열확산율 [ $m^2/s$ ]

$\beta_C$  : 농도팽창계수

$\beta_T$  : 온도팽창계수

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-55-646-4766; fax: +82-55-640-3188

E-mail address: mkji73@naver.com

- $\gamma$  : 열용량비  
 $\zeta$  : 확산계수비  
 $\eta$  : 열확산율비  
 $\lambda$  : 열전도율 [ $W/m \cdot K$ ]  
 $\mu$  : 점성계수 [ $kg/m \cdot s$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\Delta C$  : 농도차  
 $\nu$  : 동점성계수 [ $m^2/s$ ]

## 1. 서 론

인간은 인체 심부의 온도를 일정하게 유지시켜 열적으로 쾌적한 상태를 이루기 위하여 외부환경과 끊임없이 열과 수분을 교환한다. 이는 의복을 통하여 이루어지며 의복은 인체와 환경간에 열평형을 유지하기 위하여 쾌적성에 필요한 환경조절의 기능을 가진다. 의복을 착용한 인체를 미시적으로 보면 인체, 공기층, 의복, 외부환경 등의 복잡한 시스템으로 되어 있다. 이 외부와는 다른 환경이 의복 내의 미환경이고, 온도 및 농도 등에 따른 부력차에 의한 자연대류가 존재하는데 이는 의복을 통하여 이루어지므로 인체로부터 주위환경으로의 열교환에 직접적인 영향을 미치며 의복의 착용감을 좌우한다.<sup>(1-4)</sup>

미환경에 영향을 미치는 인자로는 의복재료의 함기성, 통기성, 보온성 등 열 및 수분의 자연대류에 관계되는 성질들이 있고, 외에도 의복의 형태나 착용방법도 영향을 미친다고 보고되고 있다.

의복의 환기는 피부호흡에 의해 배출되는 이산화탄소 등에 의한 의복 내의 오염도의 지표로서 평가되어 왔으며, 산업현장 또는 군사현장에서 착용자의 온열 쾌적성을 달성하는 데 있어서 의복 환기의 역할이 인식되어져 착의 쾌적감을 좌우하는 인자 중의 하나로써 환기의 중요성이 강조되어 왔다.<sup>(4-7)</sup>

종래의 착의실험은 며칠을 기준으로 하므로 피험자의 실험 당일의 신체 및 건강상태, 항온실의 오차들로 정확한 실험치를 얻기는 힘들었다. 따라서 최소의 오차범위 내에서 실험이 행해지고 있는 실정이다. 하지만, 최근 많은 분야에서 도입되어 활성화되고 있는 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 수치적인 접근방법은 이러한 문제점을 보완해 줄 수 있다. Chu<sup>(3)</sup> 등은 열역학 및 유체역학적 관점

에서 의복환기의 양상을 시뮬레이션에 의해 수치적으로 연구하였다. 이로써 실험으로써는 재현하기 어려운 의복의 환기양상, 특히 의복하의 유동현상을 가시화하여 수치해석에 의한 의복 내 미환경 평가의 가능성을 보여주었다.<sup>(8,9)</sup>

따라서 본 연구에서는 수치해석기법을 이용하여 의복과 인체 사이의 공기층에서의 열 및 수분이 착의의 쾌적감에 미치는 영향을 규명하기 위하여 의복의 통기도에 따른 의복 내 공기층에서의 미환경에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구에서의 미환경의 자연대류에 영향을 미치는 인자로 의복측은 통기성 및 열전도성을 그리고 피부측은 온도를 미환경의 열전달 특성으로 연구하였다. 해석모델로는 인체와 의복을 단순화한 2차원 모델을 사용하였으며, 수치기법은 유한체적법(finite volume method)을 사용하였고, 정상상태의 층류로 가정하여 해석하였다. 직물은 다공체로 가정하였으며, 통기성은 Jean, Gauze의 경우를 고려한 투과계수를 사용하였다. Fig. 1은 본 연구의 수치모델 개략도를 나타낸다. 이는 인체의 어깨와 팔 부분의 의복 내 공기층의 모델을 단순화한 것이다.

해석에 사용된 지배방정식은 연속방정식, X-방향과 Y-방향의 운동량방정식, 에너지방정식, 그리고 확산방정식으로 다음 식(1)에서 식(5)까지에 의해 정의된다.

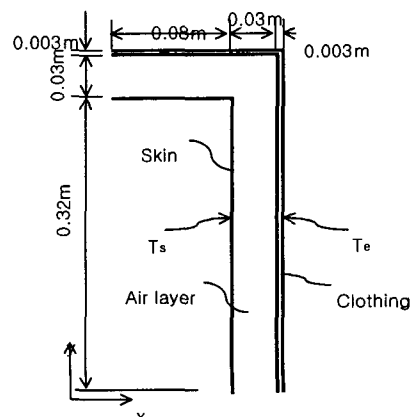


Fig. 1 Schematic diagram of numerical model.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\nu}{K(x)} u \tag{2}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g(\beta_T \Delta T + \beta_C \Delta C) - \frac{\nu}{K(x)} v \tag{3}$$

$$\gamma(x) \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta(x) \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{4}$$

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \zeta(x) D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \tag{5}$$

여기서, 공기층에서는

$$\begin{aligned} K(x') &= \infty, \quad \gamma(x') = 1 \\ \eta(x') &= 1, \quad \zeta(x') = 1 \end{aligned} \tag{6}$$

의복 내에서는

$$\begin{aligned} K(x') &= K_p, \quad \gamma(x') = \rho C_p / (\rho C_p)_p \\ \eta(x') &= \alpha_p / \alpha, \quad \zeta(x') = D_f / D \end{aligned} \tag{7}$$

이 된다. 여기서, 첨자  $p$ 는 직물,  $S$ 는 피부,  $e$ 는 기온을 나타낸다.  $x'$ 는 공기층 또는 의복 내의 양자를 택한다. 그리고 확산계수비  $\zeta$ 의  $D_f$ 는  $D/R$  (=확산계수/투과저항)으로서 투과저항은 재질이 면인 경우 실험에 의하여 2.5로 알려져 있으며,<sup>(7)</sup> 이를 사용하였다.

Table 1은 경계조건을 나타낸다. Table 1의 투과계수에서 Jean의 경우는 공기의 유동이 거의

Table 1 Boundary conditions

Skin temperature ( $T_s$ )	34°C	
Environment temperature ( $T_e$ ) and humidity (%)	5°C	40%
	15°C	60%
	25°C	80%
Permeability coefficient <sup>(7)</sup> ( $K$ )(m <sup>2</sup> )	$1 \times 10^{-11}$ (Jean : $K_1$ )	
	$1 \times 10^{-9}$ ( $K_2$ )	
	$1 \times 10^{-7}$ (Gauze : $K_3$ )	

없는 두꺼운 옷의 경우이고 Gauze의 경우는 공기의 유동이 활발한 얇은 옷의 경우이다. 그리고, 공기층의 상하부 개방면에서의 온도 및 속도 경계조건으로서는 각각의 기울기를 0으로 하였다. 주요 계산변수로는 일정한 피부온도에 대하여 저온저습(겨울)과 고온다습(여름)한 환경에 대하여 여러 가지 투과계수에 대하여 수치해석을 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 공기층 내의 속도, 온도 및 농도분포

기온은  $T_e=5^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ 의 경우를 고려하여 수치해석을 행하였으나,  $5^\circ\text{C}$ 와  $15^\circ\text{C}$ 의 경우는 유동현상이 거의 동일하여 제외하고,  $5^\circ\text{C}$ 와  $25^\circ\text{C}$ 만을 비교 검토하였다. 그림의 왼쪽에서부터 농도, 온도, 속도의 분포를 나타내고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3은 기온  $T_e=5^\circ\text{C}$ ,  $T_e=25^\circ\text{C}$ 일 때 투과계수  $K=1 \times 10^{-11}$ 인 경우의 농도, 온도, 속도의 분포를 도시한 그림이다.  $K=K_1$ 인 경우는 직물층의 통기성이 매우 낮은 것을 의미하는

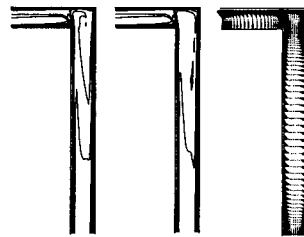


Fig. 2 Distributions of concentration, temperature and velocity at  $T_e=5^\circ\text{C}$  and  $K=1 \times 10^{-11}$ .

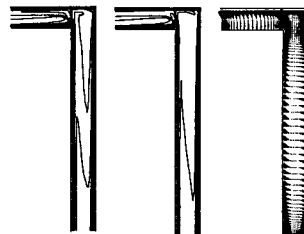


Fig. 3 Distributions of concentration, temperature and velocity at  $T_e=25^\circ\text{C}$  and  $K=1 \times 10^{-11}$ .

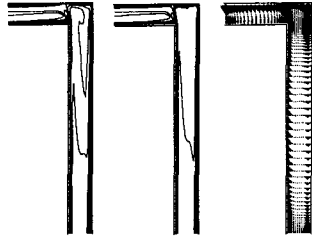


Fig. 4 Distributions of concentration, temperature and velocity at  $T_e=5^\circ\text{C}$  and  $K=1 \times 10^{-9}$ .

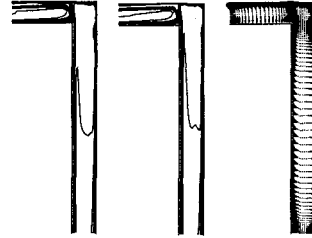


Fig. 6 Distributions of concentration, temperature and velocity at  $T_e=5^\circ\text{C}$  and  $K=1 \times 10^{-7}$ .

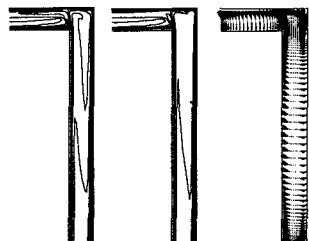


Fig. 5 Distributions of concentration, temperature and velocity at  $T_e=25^\circ\text{C}$  and  $K=1 \times 10^{-9}$ .

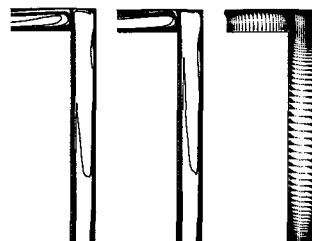


Fig. 7 Distributions of concentration, temperature and velocity at  $T_e=25^\circ\text{C}$  and  $K=1 \times 10^{-7}$ .

것으로 일반적인 개념은 겨울철의 두꺼운 옷에 해당한다고 볼 수 있다.  $T_e=5^\circ\text{C}$ 의 경우에는 피부 표면과 의복 근처에서 속도벡터가 밀집하고 있으며 농도와 온도의 분포도 속도의 경우처럼 비슷한 경향을 보이고 있다. 이것은 투과계수가 작은 경우에는 온도차가 큰 경우라 하더라도 피부와 의복 사이에는 열전달이 잘 일어나지 않아서 의복이 피부의 보온효과를 잘 유지하고 있음을 나타낸다.

Fig. 3은  $T_e=25^\circ\text{C}$ 의 경우로 농도, 온도 및 속도의 분포들이  $T_e=5^\circ\text{C}$ 일 때보다는 피부와 의복의 벽면보다는 공기층 쪽으로 넓게 분포가 됨을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5는  $T_e=5^\circ\text{C}$ 와  $25^\circ\text{C}$ 일 때  $K=1 \times 10^{-9}$ 에 대한 그림이다. Figs. 2 및 3에 비하여 통기성이 크기 때문에 피부와 의복의 벽면 쪽으로 밀집되는 현상보다는 중앙 공기층 쪽으로 열전달이 고르게 분포됨을 알 수 있는데 이는 통기성이 작은 경우보다는 큰 경우가 피부로부터 의복 쪽으로 열전달이 촉진된다는 것을 의미한다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각  $T_e=5^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ 일 때

$K=1 \times 10^{-7}$ 의 경우를 나타내고 있으며,  $K_1$ ,  $K_2$  (Figs. 2~5)일 때보다는 통기성이 크기 때문에 의복 쪽으로 열전달이 잘 일어나고 있음을 알 수 있다. 우리나라의 기후상 기온이 대략  $5^\circ\text{C}$ 인 경우는 겨울철에 가깝기 때문에 이러한 날씨에는 통기성이 작은 의복을 입는 것이 보온에 효과적이라는 일반적인 상식에 일치하고 있어 본 프로그램의 신뢰성을 확인하였다. Fig. 3과 Fig. 7을 비교해 보면  $T_e=25^\circ\text{C}$ 일 때  $K_1=1 \times 10^{-11}$ 과  $K_3=1 \times 10^{-7}$ 의 경우로서  $K_1$ 일 때보다는  $K_3$ 의 경우가 의복 쪽으로 열전달이 크게 나타남을 알 수 있다.

### 3.2 공기층 내의 농도, 온도 및 열전달 특성

Fig. 8은 기온의 변화에 따른 통기성에 대한 공기층 내의 평균 온도와 농도의 분포를 나타내었다. 평균 온도는  $T_e=5^\circ\text{C}$ 와  $T_e=25^\circ\text{C}$ 일 때 모두  $K$ 가 큰 경우가 낮게 나타났다. 또한 농도도 온도와 동일한 양상이며 온도보다는 약간 높게 나타났다.

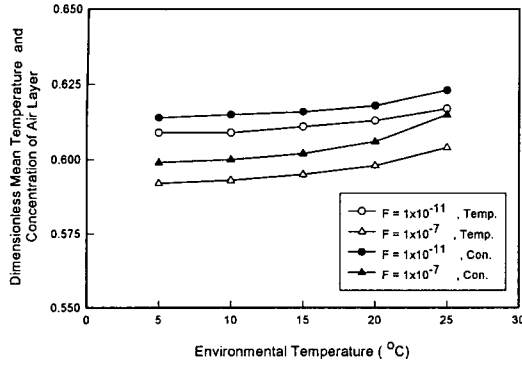


Fig. 8 Dimensionless mean temperature and concentration of air layer versus the environment temperature.

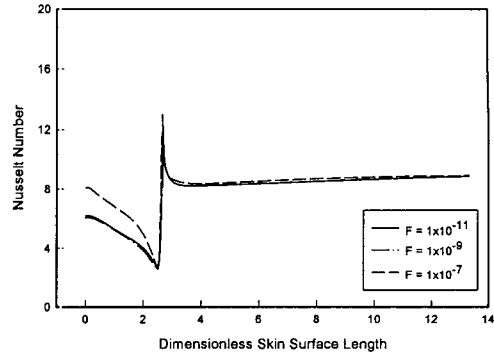


Fig. 10 Distributions of Nusselt number for dimensionless skin surface length at  $T_e=25^\circ\text{C}$ .

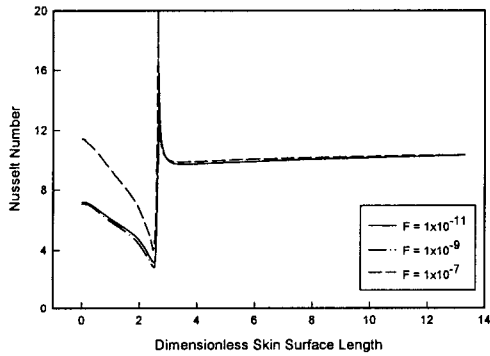


Fig. 9 Distributions of Nusselt number for dimensionless skin surface length at  $T_e=5^\circ\text{C}$ .

Figs. 9~11에 사용된 국부 너셀수의 정의식은 다음 식(8)과 같다.

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} = \frac{\partial\theta}{\partial n} \quad (8)$$

Fig. 9는  $T_e=5^\circ\text{C}$ 일 때, 의복의 통기성의 변화에 따른 피부 표면에서의 너셀수의 분포를 나타낸 것이다. 통기성이 작은 경우보다는 큰 경우의 너셀수가 높게 나타나고 있으며 피부에서 의복 쪽으로 열전달이 잘 일어나고 있음을 알 수 있다. 너셀수의 분포는  $x=2.5$  정도까지는 감소를 보이다가  $x=2.5\sim3$  사이에서 급격하게 상승하고 있음을 알 수 있다. 너셀수가 감소하는 부분은 Fig. 1에서처럼 어깨 부분의 수평 공기층으로 공기는 부력으로 인하여 위쪽으로 상승하기 때문에 아래에서 상

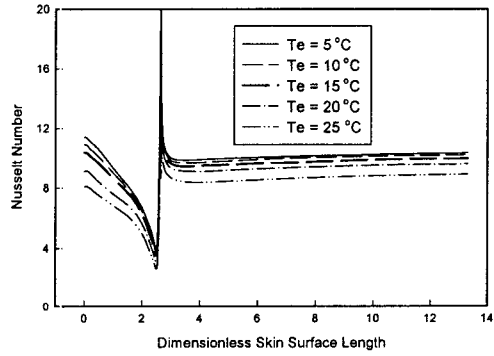


Fig. 11 Nusselt number for various environment temperature at  $K_3=1\times 10^{-7}$ .

승되는 더운 공기가 어깨 부위를 지나면서 상부의복 쪽으로 상승하여 상대적으로 어깨 근처에서 너셀수가 낮아진다. 그러나 어깨 부위( $x=2.5\sim3$ )에서는 아래에서 상승한 유속이 빠른 기류 때문에 급격히 너셀수가 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은  $T_e=25^\circ\text{C}$ 일 때 의복의 통기성 변화에 따른 피부 표면에서의 너셀수의 분포를 나타낸 그림이며, 어깨 부위에서의 너셀수는 Fig. 9에서의 경우보다 더욱 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 속도의 경우처럼 기온  $T_e$ 가 높은 경우는 낮은 경우보다 열전달이 잘 일어나지 않기 때문에 상대적으로 어깨 부위에서 상승유동이 작아지는 결과이다.

Fig. 11은 기온 변화에 대하여 피부 표면의 국소 너셀수 분포를 나타내었다. 기온이 높아질수록, 즉 피부온도와 기온의 차가 작을수록 피부 전 영

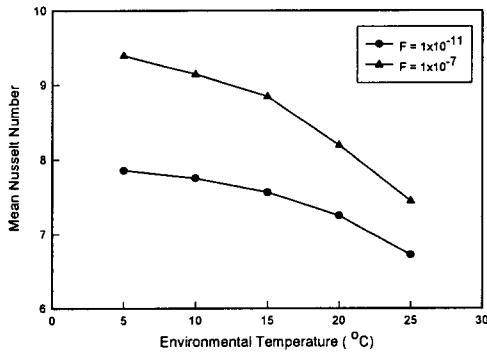


Fig. 12 Mean Nusselt number vs. environment temperature.

역에서 열전달이 둔화됨을 보였다. Fig. 12는 기온 변화에 따른 의복 통기성에 대한 평균 낮셀수의 변화를 나타내었다. 통기성이 큰 경우가 작은 경우보다 평균 낮셀수가 높게 나타남을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

의복재질의 투과계수에 따른 피부와 의복 사이의 공기층에서의 자연대류 열전달 현상에 대한 수치해석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 농도와 온도, 속도의 분포는 어깨선을 기준으로 분리된 2개의 큰 셀을 형성하였다.

(2) 투과계수가  $1 \times 10^{-7}$  이상인 경우에는 의복 내의 유동 특성이 공기층에 미치는 영향이 크다.

(3) 피부온도와 기온의 차가 작을수록 피부 전체 영역에서 대류열전달이 둔화된다.

(4) 직물의 투과계수가 클수록 어깨 부분과 같은 수평 공기층에서의 열전달이 커진다. 그러나 팔 부분과 같은 수직 공기층에서의 열전달 영향은 거의 없다.

#### 후 기

본 연구는 2001년 두뇌한국 21사업에 의해 지원되었습니다. 관계자 여러분께 감사를 표합니다.

#### 참고문헌

- Lee, J. A., 2000, Numerical Analysis of Natural Convection in the Clothing Microenvironment, MS thesis, Gyeongsang national University, Chinju, Korea.
- Chu, M. S. and Toshinari Nakajima, 1997, Assessment of Clothing Ventilation by a Trace Gas Method, Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles, Vol. 21, No. 8, pp. 1387-1395.
- Chu, M. S., 1996, A Numerical Analysis of Two-Dimensional Model on the Pattern of Clothing Ventilation Through Openings, KSLES J., Vol. 3, No. 1, pp. 27-36.
- Jintu Fan, Zhongxuan Luo and Yi Li, 2000, Heat and Moisture Transfer with Sorption and Condensation in Porous Clothing Assemblies and Numerical Simulation, International Journal of Heat and Mass Transfer 43, Issue 16, pp. 2989-3000.
- Park, S. J. and Tamura Teruko, 1994, Change of Evaporation Rate on Local Skin by Posture for Designing Comfortable Clothing, The Korean Home Economics Association, Vol. 32, No. 2, pp. 245-253.
- Washi Hirano, 1999, Numerical analysis of ventilation in clothing, MS thesis, Tokyo university of agriculture technology, Tokyo, Japan.
- Yayoi Satsumoto, Masaaki Takeuchi and Kinzo Ishikawa, 1991, The Effect of Air Permeability and Radiation Property on Free Convective Heat Transfer of Clothing System, SEN-I GAKKAISHI, Vol. 47, No. 6, pp. 263-270.
- Kwon, O. K., Song, M. K. and Yi, C. M. 2000, A Study on Wear Sensations of Tencel Fabrics in Hot Environments, The Korean Home Economics Association, Vol. 38, No. 3, pp. 149-161.
- Chung, J. S. and Chung, U. J., 1987, The Effects of the Superimposed Fabrics on the Air-Permeability, Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles, Vol. 11, No. 1, pp. 21-28.
- Hong, Y. P. and Chung, H. S. et al., 1996, Thermodynamics, Jin Young Publishing Co., Korea, pp. 85-96.