

대류 난방시 실내열환경에 관한 연구 - 상하온도차에 대한 온열쾌적감 -

김 동 규 · 금 종 수*
GE 엔지니어링, *부경대학교 기계공학부
(2005년 1월 25일 접수; 2005년 2월 25일 채택)

The Study on Indoor Thermal Environment during Convection Heating - Thermal Comfort Sensation for Vertical Temperature Differences -

Dong-Gyu Kim and Jong-Soo Kum*
Global Environment Engineering, Busan 611-803, Korea
*Division of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
(Manuscript received 25 January, 2005; accepted 25 February, 2005)

Thermal neutrality is not enough to achieve thermal comfort. The temperature level can be the optimal, and still people may complain. This situation is often explained by the problem of local discomfort. Local discomfort can be caused by radiant asymmetry, local air velocities, too warm and too cold floor temperature and vertical temperature difference. This temperature difference may generate thermal discomfort due to different thermal sensation in different body parts. Therefore, thermal comfort can not be correctly evaluated without considering these differences. This study investigates thermal discomfort sensations of different body parts and its effect on overall thermal sensation and comfort in air-heating room. Experimental results of evaluating thermal discomfort at different body parts in an air-heating room showed that thermal sensation on the shoulder was significantly related to the overall thermal sensation and discomfort. Although it is known that cool-head, warm-foot condition is good for comfort living, cool temperature around the head generated discomfort

Key Words : TSV, CSV, HRV, LF, HF, ECG, Vertical temperature difference

1. 서 론

공조공간에서 불균일한 온열환경 분포가 발생함으로 인하여 열적으로는 중립의 상태에 있는 경우에도 불쾌감이 존재한다. 불쾌의 원인은 불균일 복사, Draught, 상하온도분포, 바닥온도 등이며 인체의 국부온냉감에 영향을 미친다. 이 중에서 실 공기를 가열하는 대류난방을 하는 경우 상하온도차가 존재하면 균일한 환경과는 달리 국부불쾌감이 발생된다. 그러므로 종래의 균일 환경조건에서 적용했던 온열환경지표를 이용하여 상하온도차에 대한 쾌적감을 평가하는 것은 어렵다고 할 수 있다. 따라서

본 연구에서는 겨울철 대류 난방시 발생하기 쉬운 실온의 상하온도차가 인체의 온열쾌적감에 미치는 영향에 관하여 체감실험 및 HRV 분석기법을 적용하여 검토하고, 대류난방시 적절한 상하온도차를 구하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치 및 설정조건

임의의 상하온도차, 습도 및 기류를 만들어 실험을 하기 위한 인공환경실험실은 가로 4.1m, 세로 4.9m, 높이 2.7m의 크기이며 모든 벽과 천정, 바닥은 단열재로서 단열을 하였다. 상하온도차의 구현을 위해 덕트를 이용하여 냉열원과 온열원을 환경시험실내로 공급하였다. 환경실의 실험장치 구성은 Fig. 1과 같다. 상하온도차의 종류로서는 일반적으로 대

류난방시 형성되기 쉬운 머리 부분은 따뜻하고 발 부위가 서늘한 환경(頭熱足寒)과 이상적인 실내열환경인 머리부위가 다소 서늘하고 발 부위가 따뜻한 환경(頭寒足熱) 등으로 나누었다¹⁾. 실험조건은 실내 온도의 상하분포를 인위적으로 변화시킨 2가지로 하였다. 실내 공기온도의 범위는 17℃~29℃이며 습도는 30~40%로 유지 하였다. 기류속도는 모든 실험에서 정지기류 상태인 0.1 m/s를 유지함을 열선 풍속계를 이용하여 확인하였고, 실험에 앞서 1시간 정도 예비운전을 하여 실내에 상하온도차(ISO 7730: 1.1m-0.1m, ASHRAE 55-92: 1.7m-0.1m)가 있는 환경을 구현하였다. 실험 설정조건을 Table 1에 나타내었다. 설정조건에서 Δt는 바닥으로 1.1m와 0.1m 사이의 온도차를 의미한다.

2.2. 실험방법

실험은 Fig. 2와 같이 1회당 3명의 피험자를 전실에 30분간 체재시킨 후 실험실로 입실시켜 60분 동안

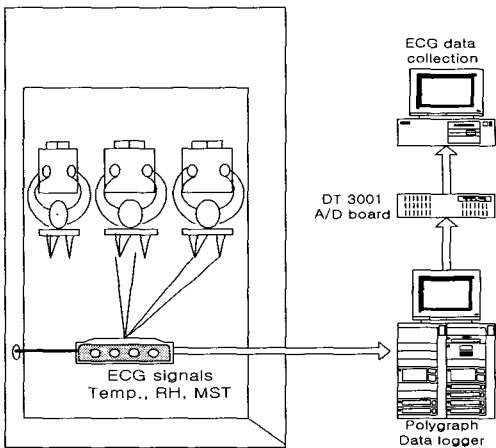


Fig. 1. Experimental setup for the experiment.

Table 1. Experimental setting conditions

Δt \ Temp.	23* [°C]	25 [°C]	27 [°C]	17* [°C]	20 [°C]	23 [°C]
Δ3 [°C]	20℃**	22℃	24℃	20℃**	23℃	26℃
Δ6 [°C]	17℃	19℃	21℃	23℃	26℃	29℃

*Temperature at 1.1m high from floor.
 ** Temperature at 0.1m high from floor.

Table 2. Data of subjects

Subjects	Num. of Subjects	Age	Height[cm]	Weight[kg]	Body Area*[m ²]
Female	6	22.3±0.5**	164.4±3.9	56.1±7.1	1.6 ±0.10
Male	6	22.8±2.8	176.7±5.4	71.0±9.6	1.86±0.11

*Takahira's Equation: $A = 71.46 \times W^{0.425} \times H^{0.725}$
 ** Mean ± S.D.

실험을 하였다. 실험하는 동안 매 10분 간격으로 주관적인 설문 신고를 받았다. 또한 피험자로부터 나오는 심전도신호는 polygraph (SAN-EI, polygraph 363)를 통해 출력되어 512Hz로 120초동안 A/D 변환된 후, 컴퓨터에 저장되는 동시에 기록지에 출력되어 모니터링하였다.

2.3. 피험자 및 설문

피험자로는 남녀 대학생(12명)을 대상으로 하였다. 모든 피험자들은 구강온도 37℃이하이고 정상혈압의 건강한 사람들로 구성되었으며 연령 및 신체적 조건을 Table 2에 나타내었다. 실험시 피험자들은 동일한 유니폼을 착용하였고, 의복중량법으로 의복의 단열값(clo)을 계산한 결과 남자 0.7, 여자 1.0이었다. 또한 실험 중 의자에 앉아서 독서 및 가벼운 대화, 설문지의 응답작성 등 행동이 제한되어 있으므로 대사량은 1.1 met로 가정하였다²⁾. 설문내용 및 척도는 피험자가 실험설정조건에서 느끼는 주관적인 감각을 표현하기 위해 ASHRAE에서 규정한 전신온냉감 7단계 및 Tanabe가 사용한 쾌적감 4단계법을 사용하였다²⁾. Fig. 2에 본 실험에서 사용한 설문내용과 척도를 나타내었다.

2.4. 심리반응 및 생리신호 분석방법

피험자가 실험 중에 설정조건에 대하여 전신온냉감, 쾌적감, 국부온냉감, 불쾌이유 등을 신고하였다. 각 피험자의 신고값은 실험 개시 후 30분 이후 대부분 안정하였으므로 30분 이후부터 실험종료까지의 30분간의 데이터를 검토의 대상으로 하였다. 실험환경이 불균일 환경이므로 SET* 및 PMV가 아닌 공기온도를 사용하여 분석했으며 SPSS 7.5 FOR WINDOWS를 사용하여 설문내용을 통계처리 하였다. 생리신호 분석을 위해 HRV 분석기법을 사용하였다. HRV(심박수 변이도:heart rate variability) 분

석기법은 심장에 영향을 미치는 교감신경 및 부교감 신경의 활동과 같은 자율신경계의 반응을 나타내는데 사용되어진다. 심장은 좌우 한 쌍씩의 축진 신경과 억제신경에 의해 제어되어지며 심장의 박동수는 생체 내외 환경온도의 영향에 민감하게 반응한다. 축진신경은 교감신경(sympathetic nerve)이며 억제신경은 미주신경(vagus nerve)이다. 교감신경을 자극하면 심박동수가 증가하게 되고 반대로 미주신경을 자극하면 심박동수가 감소하게 되므로, 온열환경에 의한 영향도 민감하게 제시해 줄 수가 있다³⁾. 따라서 HRV 분석은 Fig. 3 및 4에 같이 심전도(ECG) 데이터를 주파수 분석함으로써 LF(low frequency)

나 HF(high frequency)와 같은 특정 주파수 대역을 추출하여 실내 상하온도차에 따라 나타나는 자율신경계의 반응과 심리반응의 관계를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전신온냉감 및 쾌적감

Fig. 5 및 6은 피험자의 주관반응인 전신온냉감 및 쾌적감의 비교이다. 그림에서 H는 착석시 머리부위 높이에 해당하는 1.1m, F는 발 부위 높이에 해당하는 0.1m를 의미한다. 쾌적감 및 전신온냉감 신호로부터 바닥에서 1.1m 높이(머리부위 높이)의 공기온도가 20℃ 이하의 경우 높은 불쾌감 및 추위를

Comfort Sensation Vote			
0	1	2	3
Comfortable	Slightly uncomfortable	Uncomfortable	Very uncomfortable

Thermal Sensation Vote						
-3	-2	-1	0	1	2	3
Cold	Cool	Slightly cool	Neutral	Slightly warm	Warm	Hot

Fig. 2. Voting scales.

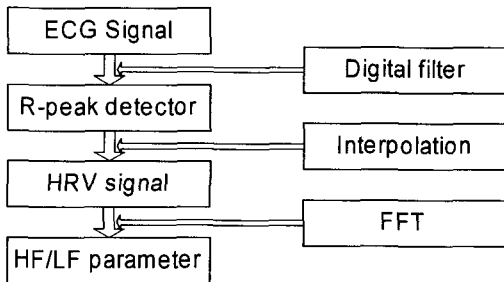


Fig. 3. Flow chart of HRV analysis.

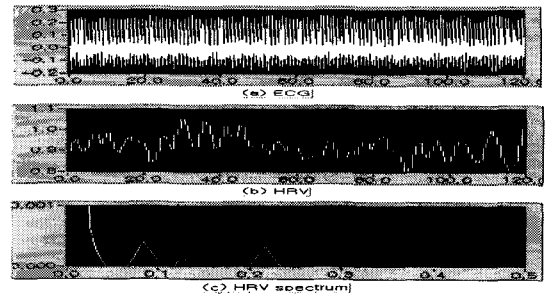


Fig. 4. HRV spectrum from ECG signal.

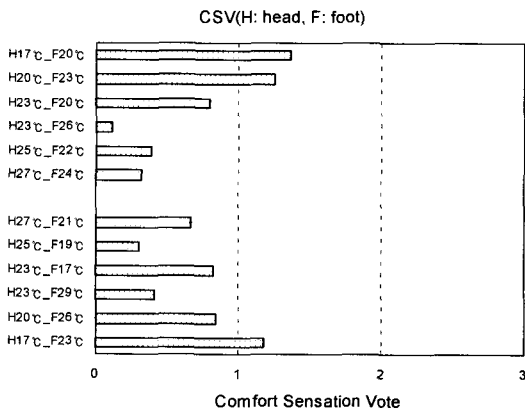


Fig. 5. Comfort Sensation Vote to various thermal conditions.

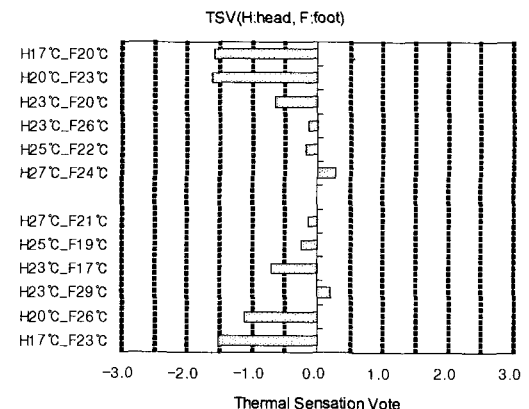


Fig. 6. Thermal Sensation Vote to various thermal conditions

신고하였다. Fig. 7은 상하온도차가 존재하는 실 공간에서 어깨부위와 발부위의 국부온냉감으로 어깨부위 국부온냉감이 발부위 국부온냉감보다 뚜렷한 차이를 나타냈다. 이는 생리적으로 볼 때 신체상부는 다른 부위보다 차가움을 감지하는 수용기가 많기 때문이라고 생각된다⁶⁾. 다만 발 부위 높이에서 머리부위 높이와 달리 차이가 뚜렷하지 않은 이유는

본 연구가 일반적인 사무실 환경을 고려하여 피험자가 양말 및 슬리퍼를 착용하였기 때문이다. Table 3는 신체부위별(얼굴, 어깨, 무릎, 발) 국부온냉감이 쾌적감 및 전신온냉감에 주는 영향을 파악하기 위해 통계처리한 것으로, 착석상태를 고려할 때 어깨부위에서 느끼는 국부온냉감이 전반적으로 쾌적감 및 전신온냉감과 유의차를 나타냈다^{4,5)}. 따라서 대류

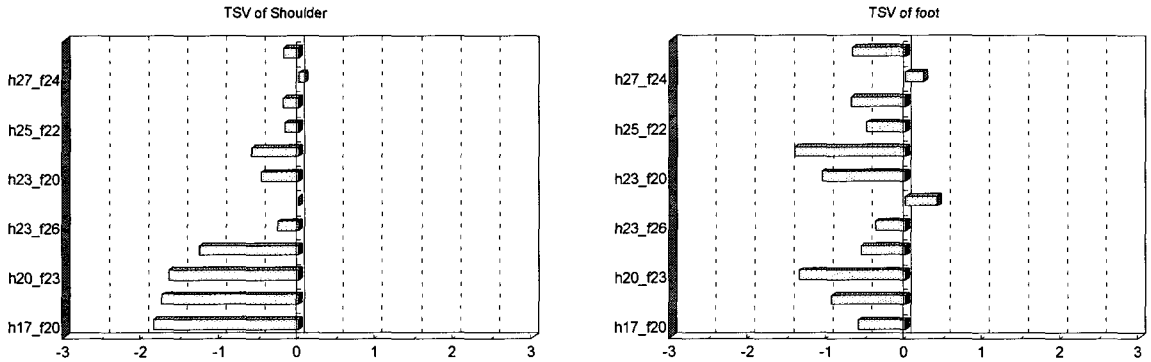


Fig. 7. Shoulder and foot parts of local thermal sensation vote.

Table 3. Relationships between thermal sensations on local body parts and TSV/CSV

Thermal conditons	$\Delta t^{\circ}\text{C}$		face	shoulder	knee	foot
Head: 23°C / Foot: 20°C	3	TSV	~	*	~	*
		CSV	~	~	~	~
Head: 23°C / Foot: 17°C	6	TSV	~	*	*	*
		CSV	~	*	*	*
Head: 25°C / Foot: 22°C	3	TSV	~	*	*	*
		CSV	*	~	~	~
Head: 25°C / Foot: 19°C	6	TSV	~	*	*	*
		CSV	~	*	*	*
Head: 27°C / Foot: 24°C	3	TSV	~	*	*	~
		CSV	*	~	*	*
Head: 27°C / Foot: 21°C	6	TSV	*	*	~	~
		CSV	*	*	~	~
Foot: 20°C / Head: 17°C	3	TSV	*	*	~	*
		CSV	*	*	*	*
Foot: 23°C / Head: 17°C	6	TSV	*	*	*	*
		CSV	*	*	~	~
Foot: 23°C / Head: 20°C	3	TSV	~	*	*	*
		CSV	*	*	~	*
Foot: 26°C / Head: 20°C	6	TSV	~	*	*	~
		CSV	*	*	~	*
Foot: 26°C / Head: 23°C	3	TSV	~	*	~	*
		CSV	~	*	~	~
Foot: 29°C / Head: 23°C	6	TSV	~	*	*	*
		CSV	*	~	*	~

*: p-value = 0.05 ~:Not Significant

난방시 상하온도차로 인하여 바닥위 1.1m 높이에 해당하는 어깨부위에서 느끼는 국부온냉감이 재실자의 쾌적감 및 전신온냉감에 크게 영향을 주는 요인을 알 수 있다.

3.2. 상하온도차와 불쾌율

상하온도차에 따른 피험자의 불쾌율을 정량화하기 위해 불쾌 원인별 비율을 Table 4에 나타냈다. 두열축한의 경우 발 부위 높이 공기온도가 20℃ 이하인 경우 신체하부가 서늘함으로 인하여 불쾌하다는 비율이 상부가 서늘해서 불쾌하다는 비율보다 높았다. 반면에 두한축열의 경우는 머리부위 높이의 공기온도가 20℃ 이하의 경우는 상부가 서늘해서 불쾌하다는 비율이 하부가 서늘해서 불쾌하다는 비율보다 높았다. 따라서 상하온도차가 존재하는 경우 신체 상부 및 하부를 기준으로 할 때 한계온도가 20℃로 나타났다.

인체가 열적으로 쾌적한 상태에서 한계온도를 기준으로 상하온도차의 범위를 두열축한 및 두한축열에 대하여 추정하고자 Fig. 8에 전신온냉감 및 쾌적감이 쾌적영역에 속하는 신고값의 상하온도차와 불쾌율의 분포를 나타냈다. 불쾌율은 머리부위의 공기온도가 발부위 공기온도에 비해 서늘한 영역(두한축열)에서 반대의 경우보다 낮은 불쾌율을 나타냈다. 이러한 관계로부터 불쾌율 10% 해당되는 상하온도차는 -4℃~+2℃로 신체상부가 서늘한 조건이 반대의 경우보다 허용온도차가 2℃정도 크게 나타났다. 따라서 한계온도 이상에서 허용상하온도차는 두한축열의 경우 4℃, 두열축한의 경우 2℃로 나타났고, ISO 및 ASHRAE 기준(허용상하온도차: 3℃)과 1℃

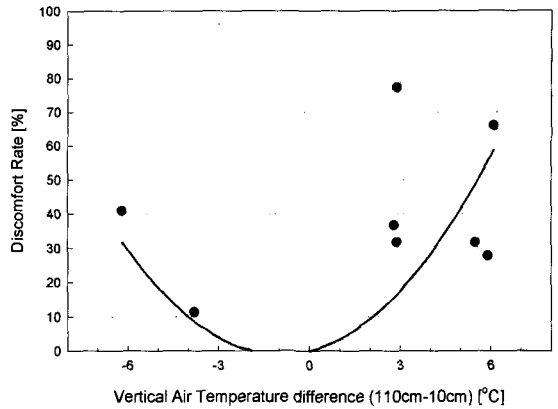


Fig. 8. Thermal discomfort rate to vertical temperature difference.

정도의 차이를 나타냈다.

3.3. 생리신호 분석

피험자의 주관심리반응을 보완하기 위하여 조건별 생리신호인 ECG에 대한 HRV분석을 Fig. 9에 나타냈다. 피험자의 생리상태를 나타내는 HF/LF 수치값은 전반적으로 머리부위가 서늘하고 발부위가 따뜻한 조건(두한축열)이 반대의 조건보다 높은 값을 나타냄으로 두열축한에 비해 양호한 환경으로 판단할 수 있고, 주관심리반응 결과와 일치하였다. 즉 HF/LF 수치값이 낮다는 사실은 인체가 외부환경에 대해 자극을 받고 불균형상태가 되었으므로 다시 정상상태로 유지하기 위해 교감신경이 작용한 것이라고 말할 수 있다. 상하온도차 3℃와 6℃차이에 대한 HRV 분석 결과는 큰 차이를 나타내지는

Table 4. Discomfort rate

Thermal conditions	Not response	Upper warm	Upper cool	Lower warm	Lower cool
Head: 23℃ / Foot: 20℃	17.0	11.3	11.3	-	60.4
Head: 23℃ / Foot: 17℃	22.2	16.7	5.6	-	55.5
Head: 25℃ / Foot: 22℃	56.0	18.0	8.0	-	18.9
Head: 25℃ / Foot: 19℃	63.8	6.4	-	-	29.8
Head: 27℃ / Foot: 24℃	51.9	30.8	-	13.5	3.8
Head: 27℃ / Foot: 21℃	62.5	27.1	-	-	10.4
Foot: 20℃ / Head: 17℃	5.9	-	74.6	4.5	14.9
Foot: 23℃ / Head: 17℃	9.5	-	80.6	-	25.4
Foot: 23℃ / Head: 20℃	8.2	-	47.5	-	44.3
Foot: 26℃ / Head: 20℃	23.8	-	55.5	-	20.6
Foot: 26℃ / Head: 23℃	86.7	-	2.2	-	11.1
Foot: 29℃ / Head: 23℃	52.0	14.0	6.0	26.0	2.0

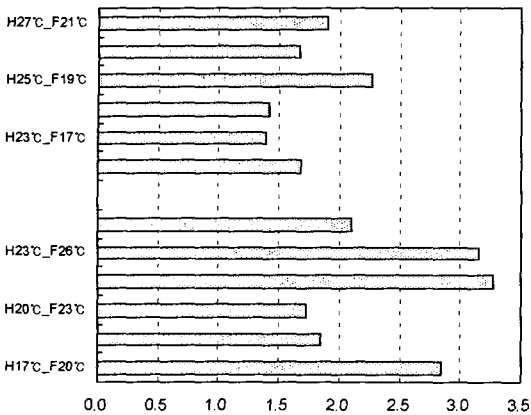


Fig. 9. Comparisons of averaged HF/LF ratio to various thermal conditions.

않았지만, 주관심리반응에서 양호한 쾌적감 및 전신 온냉감을 신고하였던 머리부위 공기온도가 23°C인 경우 발 부위가 따뜻한 쪽이 서늘한 쪽에 비해 HF/LF수치값이 높았다. 이러한 점에 관해서는 추후 연구가 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

겨울철 대류 난방 시 국부불쾌감의 원인인 실내 기온의 상하분포가 인체에 미치는 영향에 관하여 정량적으로 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대류난방시 상하온도차로 인하여 바닥위 1.1m 높이에 해당하는 어깨부위에서 느끼는 국부온냉감이 재실자의 쾌적감 및 전신온냉감에 크게 영향을 주는 요인임을 알 수 있다.
- 2) 불쾌원인별 설문을 고려할 때 상하온도차가 존재하는 경우 신체 상부 및 하부를 기준으로 할 때 한계온도가 20°C로 나타났다.
- 3) 한계온도 이상에서 허용상하온도차는 두한족열의 경우 4°C, 두열족한의 경우 2°C로 나타났고, ISO 및 ASHRAE 기준(허용상하온도차: 3°C)과 1°C 정도의 차이를 나타냈다. 두한족열 허용온도차 범위가 두열족한에 비해 2°C정도 큼을 알 수 있다.
- 4) 피험자의 생리상태를 나타내는 HF/LF 수치값은 전반적으로 머리부위가 서늘하고 발부위가 따뜻

한 조건(두한족열)이 반대의 조건보다 높은 값을 나타냄으로 두열족한에 비해 양호한 환경으로 판단할 수 있고, 주관심리반응 결과와 일치하였다.

- 5) 상하온도차 3°C와 6°C차이에 대한 HRV 분석 결과는 큰 차이를 나타내지는 않았지만, 주관심리반응에서 양호한 쾌적감 및 전신온냉감을 신고하였던 머리부위 공기온도가 23°C인 경우 발 부위가 따뜻한 쪽이 서늘한 쪽에 비해 HF/LF수치값이 높았다.

참 고 문 헌

- 1) Kazuaki, B., 1990, The effects of vertical air temperature differences on thermal comfort and physiological responses, Journal of Archit. Plan. Engineering, AIJ, 417, 154-162.
- 2) Kim, D. G., 1998, Studies on thermal comfort evaluation and corrections of comfort indices for koreans, Ph.D. thesis, Pukyong National University, Pusan, Korea, 14-52pp.
- 3) Bootsman, M., C. A. Swenne and H. Van. Bruschke, 1994, Heart rate and Heart rate variability as indexes of sympathovagal balance, Am. J. Physiol., 226, 1565-1571.
- 4) Lee, K. H., J. S. Kum, D. G. Kim, G. S. Lee, H. C. Kim and J. J. Lim, 2000, Comparisons of Thermal Comfort Sensation at Different Body Parts for Temperature Differences during Air-Heating, 5th International Congress on Physiological Anthropology, 15-18pp.
- 5) Kim, D. G., D. S. Bae, J. S. Kum, K. W. Choi, S. I. Kim, K. S. Im and K. H. Lee, 1998, Experimental study on thermal comfort sensation and physiological response of Koreans in various thermal conditions, Part 3: The effects of vertical air temperature difference in a room, Korean society for emotion and sensibility conference, 264-269pp.
- 6) 강두희, 1992, 생리학 개정 4판, 신광출판사, 12.1-12.12.