

## 대류난방시 실내열환경에 관한 연구 - 온도 및 기류속도에 대한 온열쾌적감 -

김 동 규 · 정 용 현\*  
GE 엔지니어링, \*부경대학교 환경시스템공학부  
(2005년 1월 25일 접수; 2005년 2월 23일 채택)

### The Study on Indoor Thermal Environment during Convection Heating - Thermal Comfort by Indoor Air Temperature and Velocity -

Dong-Gyu Kim and Yong-Hyun Chung\*  
Global Environment Engineering, Busan 611-803, Korea  
\*Division of Env. Eng., Pukyong National University, Busan 608-739, Korea  
(Manuscript received 25 January, 2005; accepted 23 February, 2005)

Draft is defined as an unwanted local cooling of the human body caused by air movement. It is a serious problem in many ventilated or air conditioned buildings. Often draft complaints occur although measured velocities in the occupied zone maybe lower than prescribed in existing standards. Purpose of this study is to clarify the evaluation of thermal comfort based on temperature and air velocity in winter. Experiments were performed in an environmental chamber in winter. Indoor temperature and air velocity was artificially controlled. The experiments were performed to evaluate temperature conditions and air velocity conditions by physiological and psychological responses of human. According to physiological responses and psychological responses, it was clear that the optimum air velocity is about 0.15 m/s and 0.30 m/s.

Key Words : TSV, CSV, MST, ECG, HRV, LF, HF, DR, PPD

#### 1. 서 론

실내공조나 환기시에는 기류가 온열쾌적감에 미치는 영향은 크며, 난방시 강한 기류는 Draft를 유발한다. Draft라 함은 인체가 기류에 의해 원하지 않는 국부적인 냉각효과를 받는 것을 말한다(ASHRAE). 드래프트는 국부불쾌감의 원인중 하나로 환기나 공조가 되는 건물에서 재실자들의 불쾌를 유발하는 일반적인 현상이다. 쾌적조건에 있더라도 낮은 풍속의 드래프트로 인한 불쾌가 크게 되는 경우가 종종 있다. 특히 난방시 실내 기류속도의 증가는 인체의 표면온도를 낮추게 되며, 쾌적하게 느끼는 온도도 정상적인 정지기류의 상태보다 높아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 대류난방시 국부불쾌감 요소인 드래

프트가 인체의 온냉감과 쾌적감에 미치는 영향에 관해 심리반응 및 심전도 측정을 통한 자율신경계 변화를 검토함으로써 드래프트에 의한 국부불쾌감을 유발하지 않는 허용풍속의 범위를 찾고자 하였다.

#### 2. 실험장치 및 방법

##### 2.1. 실험장치

임의의 온도, 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. 실내온도와 습도는 향온향습기를 사용하여 일정하게 유지하였으며, 실험실내에 설치된 12대의 선풍기 전압을 슬라이더스로 조절하여 원하는 기류속도를 얻었다. 그리고 기류를 평행하게 흐르게 하기 위해 선풍기 앞에 그릴 및 망사를 설치하였다. 환경실의 실험장치 개략도는 Fig. 1과 같으며, Photo 1에 실험장면을 나타냈다.

Corresponding Author : Dong-Gyu Kim, Global Environment Engineering, Busan 611-803, Korea  
Phone: +82-51-506-6301  
E-mail: arckim10@hanmail.net

인공환경실내의 물리량 측정은 실내의 수직 공기 온도 분포를 측정하기 위해 실 중앙의 바닥면을 기준으로 10cm, 60cm, 110cm, 170cm에  $\phi$  0.2mm T형 C-C열전대를 두어 측정하였고, 글로브온도를 110cm 지점에서 측정하였다. 습도는 같은 위치의 바닥면으로부터 60cm 지점에 BEAM 습도센서를 두어 측정하였다. 기류는 초음파풍속계(일본 KAISO, Model WA-390)를 이용하여 피험자의 위치에서 풍속을 측정하였다. 인체의 평균피부온도는 Burton의 3점법으로 가슴, 팔, 다리 세 점의 피부온도로 계산하였으며 기류로 인한 인체의 국부피부온도변화를 알아보기 위하여 이마, 어깨, 무릎, 발의 피부온도를 추가로 측정하였다. 열전대와 습도센서 및 풍속계에서 측정

된 데이터는 데이터저장장치(YOKOGAWA, Model 3880)를 통해 PC에서 매 20초 간격으로 저장되도록 하였다.

2.2. 실험방법 및 조건

실험에 참여하는 피험자는 설문과 더불어 생리신호를 위해 여성 피험자의 경우 실험기간 중에 생리기간이 있는 여성은 제외되었으며 실험 전일부터는 커피나 알코올, 자극적인 음식의 섭취를 금하도록 하였고, 흡연을 못하게 하여 생리신호 측정에 영향을 주는 요소들을 제거하고자 하였다. 각 실험은 1회당 3명의 피험자를 전실에 30분간 체재시킨 후 실험실로 입실시켜 60분 동안 실험을 하였다. 실험하는 동안 매 10분 간격으로 주관적인 설문 신고를 받았다. 생리신호의 측정은 실험 시작 전 1회를 측정하고 10분 간격으로 2분 동안 다용도기록계(Polygraph) 장비를 통해 심전도를 측정하였다. 측정되어진 신호는 512Hz로 샘플링되어 A/D보드를 통해 분석용 컴퓨터에 저장하였다. 심전도 측정법은 표준 전극 유도법으로 침투치의 절대값의 크기를 가장 크게 나타낼 수 있는 LeadII를 사용하였으며, 전극은 움직임에 의한 잡음을 최소화하기 위해 비분극형 표면전극인 Ag-AgCl을 사용하여 측정하였다. 실내온도는 겨울 난방시 조건을 고려하여 난방 최저 수준인 18℃와 21℃ 및 24℃를 선정하였고, 기류는 일반적으로 건축법 시행규칙 제23조에 있는 보건용 공기조화의 기준에 따라 0.15 m/s, 0.3 m/s, 0.45 m/s를 실험조건으로 설정하였다. Table 1에 실험설정조건과 실제 구현풍속을 나타내었다.

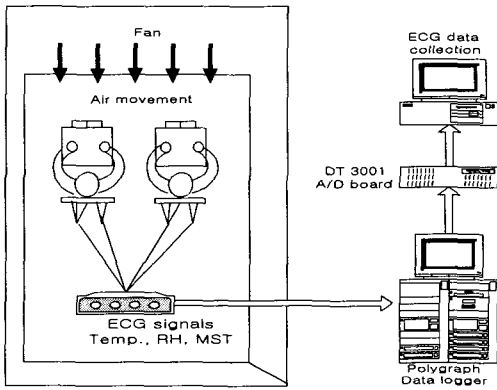


Fig. 1. Experimental setup for experiment.

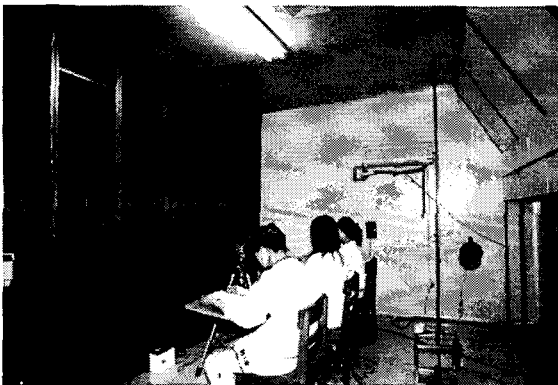


Photo 1. Subjects during the experimentation

2.3. 피험자 개요

피험자로는 남자대학생(6명), 여자대학생(6명)을 대상으로 하였다. 모든 피험자들은 구강온도 37℃이하고 정상혈압의 건강한 사람들로 구성되었으며 연령 및 신체적 조건을 Table 2에 나타내었다. 실험시 피험자들은 동일한 유니폼을 착용하였고, 의복중량법으로 의복단열값(clo)을 계산한 결과 남자 0.7, 여자 1.0 이었다. 또한 실험 중 의자에 앉아서 독서 및 가벼운 대화, 설문지의 응답작성 등 행동이 제한되어 있으므로 대사량은 1.1 met로 가정하였다<sup>1)</sup>.

2.4. 설문 및 생리신호 분석방법

설문내용은 피험자가 실험설정조건에서 느끼는

Table 1. Mean air velocity and turbulence intensity of experimental setting conditions

Setting air velocity [m/s]	Mean air velocity [m/s]	SD	Turbulence intensity	18 [°C]	21 [°C]	24 [°C]
0.15	0.15	0.02	13.78	○	○	○
0.30	0.29	0.04	11.86	○	○	○
0.45	0.45	0.04	9.58	○	○	○

Table 2. Anthropometric data of the subjects

Subjects	Num. of Subjects	Age	Height [cm]	Weight [kg]	Body Area*[m <sup>2</sup> ]
Female	6	22.4±1.13**	161.1±2.9	52.4±7.1	1.53±1.02
Male	6	21.8±2.04	170.8±5.31	60.2±5.92	1.69±0.89

\*Takahira's Equation:  $A = 71.46 \times W^{0.425} \times H^{0.725}$

\*\*Mean ± S.D.

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 range of questionnaire.

주관적인 감각을 표현하기 위해 ASHRAE에서 규정한 전신온냉감 7단계 및 Tanabe가 사용한 쾌불쾌감 4단계법을 사용하였고, 설문분석을 위해 SPSS 7.5 FOR WINDOWS를 사용하였다<sup>34)</sup>. Fig. 2에 본 실험에서 사용한 설문 척도 및 내용을 나타내었다.

생리신호 분석을 위한 HRV(심박수 변이도: heart rate variability) 분석기법은 심장에 영향을 미치는 교감신경 및 부교감 신경의 활동과 같은 자율신경계의 반응을 나타내는데 사용되어진다. 심장은 좌우한 쌍쌍의 축진신경과 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 있다<sup>2)</sup>.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 심전도 데이터를 주파수 분석함으로써 LF(0.05~0.15Hz)와 MF(0.08~0.15Hz)와 HF(0.15~0.50Hz)와 같은 특정 주파수 대역을 추출하였다. HF 대역은 부교감신경의 정보를 가지고 있고, LF대역에서는 교감신경과 부교감신경의 정보를 모두 가지고 있으며 교감신경의 활동정보를 보다 우세하게 나타내고 있다<sup>56)</sup>. 그런데 MF대역에서는 교감보다는 부교감신경의 활동 정보를 많이 나타낸다고 알려져 있다. 따라서 쾌감의 변화를 가장 잘 나타낸다는 MF/(LF+HF)의 비를 통해 자율신경계의 반응과 심리반응의 관계를 분석하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1. 주관 심리반응

Fig. 4에 각 실험조건별 피험자의 쾌적감신고(CSV)

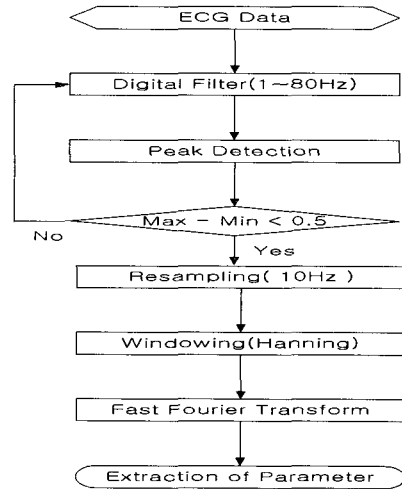


Fig. 3. Flow chart of HRV analysis.

를 나타내었다.(v15 : 풍속 0.15 m/s) 여기서 실내온도 21℃의 조건에서는 풍속이 0.15m/s와 0.3m/s일 때 쾌적영역에 속하며 실내온도가 24℃일 때는 세가지 풍속에서 모두 쾌적함을 나타내고 있다. 그리고 실내온도가 18℃일 때는 풍속이 0.15m/s가 되어도 불쾌한 것으로 평가되었다. 이것은 실내온도가 저온일 경우 풍속의 허용범위가 작은 반면 실내온도가 올라갈수록 풍속의 허용범위가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5에 각 조건별 전신온냉감신고(TSV)를 나타내었다. 여기에서도 Fig. 2와 유사한 결과를 가지지만, 실내온도 21℃에서 기류속도가 0.3m/s이상의 경우 쾌불쾌감신고와는 달리 적용가능성이 떨어진다. 따라서 신체의 온냉감적 중립영역은 실내온도 21℃에서 기류속도 0.15m/s이고, 실내온도 24℃에서는

0.45m/s까지 포함됨을 알 수 있다. 여기에서도 실내 온도가 저온일 경우 풍속의 허용범위가 작은 반면 실내온도가 올라갈수록 풍속의 허용범위가 증가함을 알 수 있다. 쾌적감 및 전신온냉감과 신고에 대한 T검정결과를 Table 3에 나타내었다. 전신온냉감은 모든 온도 및 기류영역에서 유의차가 있었다.

3.2. 평균피부온도

Fig. 6에 각 풍속별 평균피부온도(MST)와 전신

온냉감신고(TSV)와의 관계를 나타내었다. 피험자가 열적으로 중립을 느낄 때의 평균피부온도는 풍속이 0.15m/s와 0.3m/s인 경우에는 약 34.7°C가 되지만 풍속이 0.45m/s일 때는 평균피부온도가 35°C 이상 되어야 함을 예측할 수 있다.

Fig. 7에 실온 · 풍속별 쾌적감신고를 나타내었다. 여기서 풍속이 0.15m/s일 때는 실온이 21.8°C 이상 되어야 쾌적영역(CSV ±0.5이내)에 포함되며, 풍속이

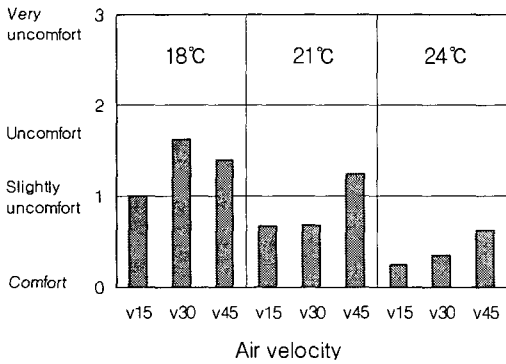


Fig. 4. CSV of experimental conditions.

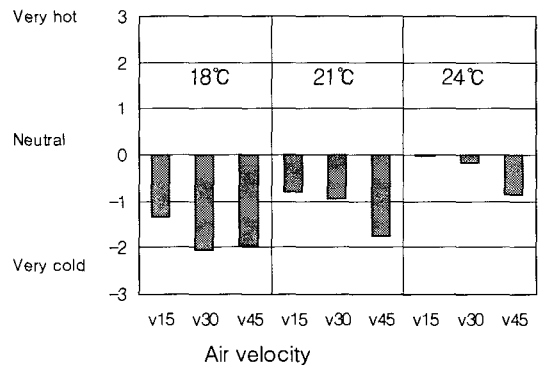


Fig. 5. TSV of experimental conditions.

Table 3. Paired sample t-test

Air temperature		Air velocity	0.15m/s vs 0.3m/s	0.15m/s vs 0.45m/s	0.3m/s vs 0.45m/s
18°C	CSV		*	*	*
	TSV		*	*	*
21°C	CSV		~	*	*
	TSV		*	*	*
24°C	CSV		~	*	*
	TSV		*	*	*

~ : Not significant      \*: significant(p-value<0.05)

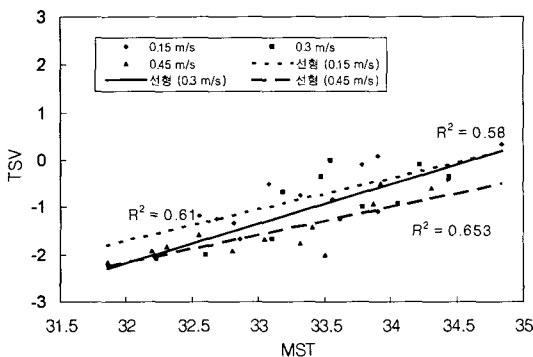


Fig. 6 Relationships between MST and TSV.

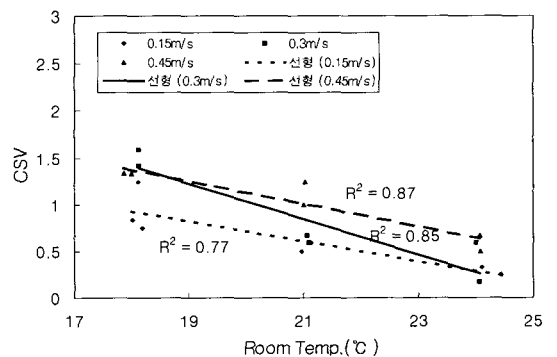


Fig. 7. CSV regression between air temperature and air velocity.

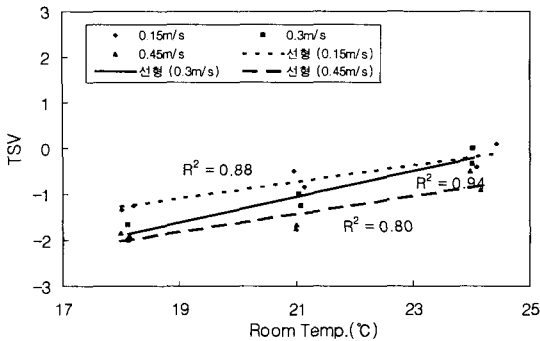


Fig. 8. TSV regression between air temperature and air velocity.

0.3m/s일 때는 실온이 22.7°C 이상 되어야 쾌적영역에 포함됨을 알 수 있다. Fig. 8은 실온·풍속별 전신온냉감신고를 나타내었다. 여기서는 온냉감적 중립영역(TSV ±0.5이내)을 실온과 풍속별로 알 수 있다. 풍속이 0.15m/s일 때는 실온이 22.1°C 이상 되어야 하며, 풍속이 0.3m/s일 때는 실온이 22.9°C 이상 되어야 온냉감적 중립영역에 포함됨을 알 수 있다.

### 3.3. 불쾌신고를

Fig. 9는 피험자들이 신고한 값으로부터 구한 불쾌신호와 ISO 7730에서 사용한 DR(Draft Rate), 그리고 PPD값을 비교한 것이다. ISO에서는 Draft에 의한 예상불만족율(DR)을 다음 식으로 나타내었다.

$$DR = (34 - t_a) * (v_a - 0.05)^{0.62} * (37 * SD + 3.14)$$

DR: Draft Rating [%]

$t_a$ : 공기온도 [°C]

$v_a$ : 평균풍속 [m/s]

SD: 풍속의 표준편차 [m/s]

그리고 불쾌신고는 피험자의 주관설문평가를 기초로 하여 구하였다.

$$\text{불쾌신고율} = (\text{불쾌신고수}(\text{scale } 1,2,3) / \text{총 신고수}) * 100$$

여기서 불쾌신고율이 DR값보다 상당히 높게 나타나는데 이것은 DR값이 온냉감적 중립상태가 되는 척의량을 기준으로 하였으므로, 척의량의 변화가 없었던 본 실험에서는 추운 것으로 인한 불쾌가 크게 작용하였기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 저온일 때 PPD값은 불쾌신고율과 유사하지만, 비교적 온도가 높은 영역에서는 DR값이 PPD값보다 불쾌신고율에 근접한다. 이것은 DR산출식이 기류의 난류강도, 평균풍속에 영향을 많이 받고, PPD산출식은 기류속도, 척의량의 변화에 민감하기 때문이다. 따라서 기존의 평가척도 외에, 동일 척의량에서 실온 및 기류속도, 난류강도의 영향을 평가하기 위해

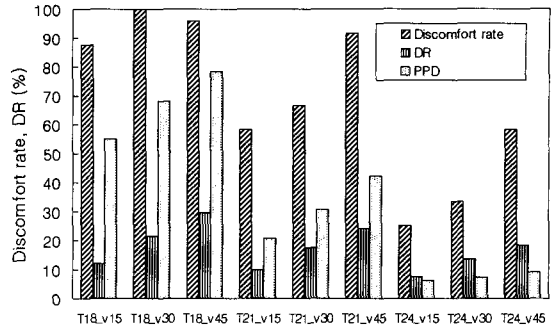


Fig. 9. Relationships between discomfort rate and DR/PPD.

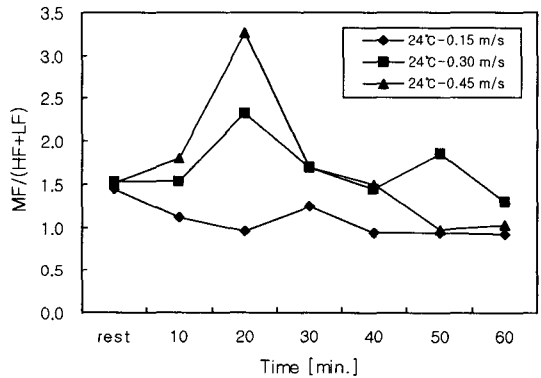


Fig. 10. Time-series variations in MF/(LF+HF).

서는 적절한 기류 평가척도의 도출이 필요하다.

### 3.4. 생리신호

MF/(LF+HF) 값의 경시변화를 Fig. 10에 나타냈다. 피험자가 휴지기 상태(rest)에서 기류 자극을 받았을 때 기류 변화의 영향은 시작 후 20분 동안 가장 많은 변화를 보였으며 시간이 경과할수록 인체의 항상성으로 인한 자율신경계의 적응이 관찰되어 휴지기 상태로의 복귀현상이 나타났다. 따라서 본 연구에서는 자극제시 후 초기 20분까지의 데이터를 이용하여 분석을 실시하였다. 또한 결과의 비교에 신뢰성을 두기 위해 각각의 결과값을 기류자극이 없는 실험 전 상태에 대한 비교값으로 정규화하였다. 각각의 자극제시 온도에서 기류변화에 따른 MF/(LF+HF) 값을 살펴보았다.

Fig. 11에서 보듯이 기류속도가 증가함에 따라 MF/(LF+HF) 값이 크게 감소하고 있음을 알 수 있고, 각 기류별로 나타나는 결과값을 살펴보면 동일 기류시는 온도가 24°C에서 가장 높은 MF/(LF+HF) 값을 나타내고 다음은 21°C, 18°C의 순으로 나타나고 있다. 그리고 기류속도는 0.15m/sec 일때가 가장 높은 MF/(LF+HF) 값을 나타내고 있다. 특히 기류속도가

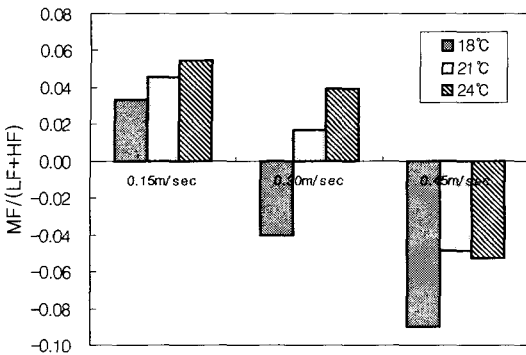


Fig. 11. Comparisons of averaged MF/(LF+HF) ratio.

0.45m/sec가 되면 MF/(LF+HF) 값이 급격히 낮아진다. 기류속도가 증가하면 MF/(LF+HF)의 값이 전체적으로 감소되어지는 현상은 자율신경계 활동에 영향을 미쳐 부교감신경의 활성도보다는 교감신경의 활동이 우세함을 알 수 있다. 즉 이는 기류속도가 증가할수록 부교감 신경 활동보다 교감신경 활동이 커지기 때문에 쾌적감 측면에서는 더욱 좋지 않은 온열환경으로 평가된다. 따라서 대류난방시 기류속도는 0.15m/sec 이하로 설정하는 것이 가장 적절할 것이라고 평가되어진다. 또한 온도와 관련하여 평가해본 결과는 실내온도는 낮아질수록 불쾌한 환경이 됨을 평가할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대류 난방시 기류속도에 따라 발생하는 드래프트 인체에 미치는 영향을 알아보기 위해 체감실험 및 심전도를 측정하여 객관적이고 신뢰성 있는 허용기준을 제시하고자 하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

##### 1) 쾌적영역의 하한선

실온이 21°C일 때는 풍속이 0.15, 0.3m/s까지 포함된다. 그리고 실온이 24°C일 때는 풍속이 0.15, 0.3, 0.45m/s까지 포함된다.

풍속이 0.15m/s일 때는 실온이 21.8°C 이상, 풍속이 0.3m/s일 때는 실온이 22.7°C 이상이 되어야 한다. 풍속이 0.45m/s일 때는 실험조건에서 쾌적 영역에 포함되는 풍속이 없었다.

##### 2) 온냉감적 중립영역에서 본 실온의 하한선

실온이 21°C일 때는 풍속 0.15m/s, 실온이 24°C일 때는 풍속 0.15, 0.3m/s가 포함된다. 풍속별로 비교를 하면, 풍속이 0.15m/s일 때는 실온 22.1°C

이상, 풍속이 0.3m/s일 때는 실온이 22.9°C 이상 되어야 한다. 풍속이 0.45m/s일 때는 해당되는 조건이 없었다.

- 3) 피험자가 열적으로 중립을 느낄 때의 평균피부온도는 풍속이 0.15m/s와 0.3m/s인 경우에는 약 34.7°C가 되지만 풍속이 0.45m/s일 때는 평균피부온도가 35°C 이상 되어야 함을 예측할 수 있다.
- 4) 불쾌신고율이 DR값보다 상당히 높게 나타나는데 이것은 DR값이 온냉감적 중립상태가 되는 착의량을 기준으로 하였으므로, 착의량의 변화가 없었던 본 실험에서는 추운 것으로 인한 불쾌가 크게 작용하였기 때문인 것으로 생각된다.
- 5) 생리신호 분석결과 대류난방시 기류속도는 0.15 m/sec 이하로 설정하는 것이 가장 적절한 것이라고 평가되어진다. 따라서 기류자극이 0.15m/sec 이고 실내온도가 24°C인 실내환경에서 가장 긍정적인 반응을 보였다. 또한 온도와 관련하여 실내온도는 낮아질수록 불쾌한 환경이 됨을 평가할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 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.
- 2) Bootsman, M., C. A. Swenne and H. Van. Brusckhe, 1994, Heart rate and Heart rate variability as indexes of sympathovagal balance, Am. J. Physiol., 226, 1565-1571.
- 3) ASHRAE, 1989, ASHRAE Handbook Fundamentals, 8.1-8.29.
- 4) Tanabe, S. I., 1998, Thermal Comfort Requirements in Japan, Ph.D. thesis, Waseda University, Tokyo, Japan, 65-111pp.
- 5) Rollin, M. MS, M. Atkinson and A. William, 1995, The Effect of Emotions on Short-Term Power Spectrum Analysis of Heart Rate Variability, The American Journal of Cardiology, 76(14), 1089-1093.
- 6) Shin, K. S., 1995, The Study on Power Spectral Analysis of Heart Rate Variability for Assessment of Autonomic Functions in Cardiovascular Control, Ph. D Dissertation, Institute of Biomedical Engineering, Keio University, Japan, 30-45pp.