

室內 溫熱環境指標의 평가방법에 관한 연구 A Study on the Evaluation Methods of Indoor Thermal Comfort Index in Building

정 창 원* · 堀越哲美** · 윤 인*** · 최 영 식****
Chang-Won Jeong* · Tetsumi Horikoshi** · In Yoon*** · Young-Sik Choi****

<Abstract>

This objective of this paper is to investigate the evaluation and induction of human thermal comfort in building environment. The issue of defining the boundaries of acceptable thermal comfort conditions in buildings and urban may have significant implication for building design and also may have urban design by climate considerations. And then it is to apply the thermal comfort condition to environmental design by using passive methods in Korea. Since 1920, architects have conducted studies to measure thermal comfort in houses under hot and humid conditions, while industrial hygienists have studied the effects of temperature and humidity on the performance of factory workers. Thermal comfort can be influenced by many variables. This paper conducted to review the previous researches and the human heat balance equation, and to analyse in order to reveal the meaning and usage of the thermal comfort index in two traditional essays, Fanger's PMV and Gagge's ET*. Their comfort indexes compared with each other. They were based on human heat balance equation and psychological and physiological responses in the laboratory tests. The researchers and the architectural engineers using thermal comfort index shall be careful in decided the use of indexes and be necessary to recognize the value concept of the design criteria for thermal comfort. Therefore, The opinion of the authors is that different comfort standards have to apply for each building and urban with different climatic conditions.

Key Words : Thermal Comfort, Predicted Mean Temperature
PMV, Operative Temperature OT,
New Effective temperature ET*

* 정회원, 威德大學校 建築工學科, 專任講師, 工·博
E-mail: cwjeong@mail.uiduk.ac.kr

** 정회원, 名古屋工業大學 社會開發工學科 教授, 工·博
E-mail: horikosi@archi.ace.nitech.ac.jp

*** 정회원, 啓明文化大學 建築科 專任講師, 工·博
E-mail: inyoon@mail.keimyung-c.ac.kr

**** 정회원, 嶺南理工大學 建築科 教授, 工·博
E-mail: cys@yjnet.yeungnam-c.ac.kr

Full-Time Lecturer, Dept. of Architectural Engineering,
Uiduk University. Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Nagoya Institute of
Technology, Dr. Eng.

Full-time Lecturer, Dept. of Architecture, Keimyung
College, Dr.Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Yeungnam College of
Science & Technology, Dr. Eng.

1. 서론

실내에서 인체의 热的 需要성에 관한 환경을 물리적으로 표현하거나 热環境에 대한 인체반응을 단순화된 하나의 온열환경지표로 평가하려는 시도는 위생학, 산업의학, 군사, 심리학, 생리학, 공기조화공학, 건축공학 등 여러분야에서 구체적으로 다루어왔다.

고대 그리스의 Hippocrates(B.C 5~4)는 기후와 건강에 대하여 언급하였고 마을의 방위와 바람과 기후를 연관시켜서 건강한 도시 만들기를 주장하였다. 또한 로마의 M. Vitruvius (B.C75~A.D.26)는 도시입지를 위한 기후조건과 도시의 바람 등에 대하여 기술하였다. 이와 같이 고대로부터 風土・文明과 관련지어 기후환경이 얼마나 인간생활에 있어서 중요한 의미를 가지고 있는가를 인식하고 있었다 여기서 인간의 생명 및 지적 활동에 기후요소가 얼마나 크게 관여하고 있는가를 엿볼 수 있다.

근대에 들어서 실생활에 구체적으로 이용하기 위하여 환경평가방법을 표현하려는 시도가 시작되었으나 미약하였다. 19C 말에서 금세기에 걸쳐 근대기후학, 생리학, 냉동공학 등의 각 분야에서 어느 정도 연구성과가 축적되었으며 그 가운데 局地氣候, 生氣候와 體溫調節機構, 냉방기기의 개발 등 괄목할 만한 진척이 있었고 온열환경평가에 의한 공학적 응용이 비로소 가능하게 되었다.

최근 건강하고 쾌적한 건축 및 도시환경 창조를 위한 디자인 계획수법이 상당히 중요한 개념으로 인식되고 있다. 새로운 건축이즘으로서 자연친화건축, 生態建築 등과 같은 기후환경을 고려한 건축환경계획 수법이 지구환경시대를 맞이하여 각광을 받고 있으며 건축공학적인 측면에서 쾌적한 생활환경을 창조하기 위해서는 건물의 주체인 인체의 쾌적성이 고려되어야 하며 그 평가기준이 건축설계단계에서 동시에 적용되어야 할 것이다.

건축온열환경평가 및 인체의 열적 쾌적성에 대한 연구는 工學的인 활용과 실용화에 앞장서고 있다. 이를테면 냉난방설계분야에서 1920년대에 시작한 중앙관리식 冷暖房設備의 사무실이나 극장 설계에서 온・습도의 조합에 대한

인체의 쾌적레벨과 온도감각을 가능한 한 정확히 예측하는 것을 필요로 하였다. 또한 심리학에서는 주로 환경이나 물체의 온도가 따뜻함이나 추움의 감각에 어떻게 관련 지우는가를 소리나 빛 등의 다른 감각자극량과의 대비로서 연구를 시작했었다.

그리고 생리학에서는 주로 환경으로부터의 열자극이 체온조절 생체기능에 어떻게 작동되는지, 또 발한과 혈류량의 변화나 떨림 등의 생리적인 반응이 溫冷의 快・不快感에 어떤 관계가 있는지, 피부온도 등의 생리적 상태치나 온냉감각과의 관련성 등이 연구의 대상이었다.

위생학이나 산업의학에서는 열파 (heat wave)나 暑熱에 노출된 사람들의 건강이나 耐暑의 한계, 작업의 허용시간 예측이나 판단을 하는 것이 대상이었다.

이와 같은 연구성과에 힘입어 건축공학분야에서도 인체의 쾌적성평가에 주목하여 passive design method, sustainable architecture, solar house, eco city 등과 같이 건축공학적 응용 및 건축도시설계 분야의 적용이 시도되었다.

이러한 이유에서 본 연구는 우선 건축 온열환경평가에 관한 역사와 그 발전에 대한 기존의 연구를 바탕으로 그 근거가 되는 인체열평형방정식을 고찰 분석하여 실내환경평가방법의 기준적용 범위를 파악하고 금후 건축설계의 기초적 자료로 제안하고자 한다.

2. 인체의 열적 쾌적성 평가방법의 발전

대표적인 온열환경평가지표로서 신유효온도 ET*(New Effective Temperature) 계열과 예측 평균신고 PMV(Predicted Mean Vote) 계열로 대별할 수 있다. 이 지표들은 모두 인체의 열평형방정식에 근거하여 만들어진 특징을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 이 두 계열의 지표를 중심으로 發展史의 측면에서 접근하여 쾌적성 평가방법을 정리하고자 한다.

1923년 미국 펜실바니아주 피츠버그에 설치된 ASHVE(The American Society of Heating and Ventilating Engineers)연구소에서 미국 광산국과 협력하여 Houghton과 Yaglou¹⁾에 의하여 유효온도(ET: Effective Temperature)에 관

한 일련의 논문들이 발표되었다. 당시 근대적인 냉난방시스템의 설계와 운전에 있어서 실내조건 설정은 필연적인 문제였다. 최초의 논문명은 “등쾌적선의 결정(Determining Lines of Equal comfort)”이었으며, 그 후에 의자에 앉아하는 (椅座)작업시 각각 다른 온·습도와 기류의 조합을 통한 실내온열환경을 어떻게 평가하는가를 판정하기 위한 이른바 넥타이형 “유효온도 선도표”를 발표하였다.

1924년 Pierce재단(JohnB.Pierce Foundation)이 뉴욕에 설립되었고, 1934년 코넥커트주 뉴헤븐에 Pierce 연구소(John B. Pierce Laboratory)가 예일대학(Yale University)의 부속 연구소로서 개설되었다. 초대연구소장인 Winslow 교수는 A.P.Gagge박사와 함께 體熱 放散量의 계측과 예측을 목적으로 인체와 환경사이의 열교환량의 생리학적 계측(Partitional Calorimetry: 분할열량계측)²⁾, 나아가 열평형식에서 도출한 작용온도(Operative Temperature)의 선구적인 연구성과들을 발표하였다.

제2차 세계대전 중 군사적인 목적으로, 혹서(酷暑)와 엄한(嚴寒)을 극복할 수 있는 전략수립 및 병사의 생명을 지키기 위한 위험예지를 위하여 많은 연구가 미육군 및 공군의 주도로 이루어졌다. 1949년 그 연구성과의 집대성이라고 할 만한 “체열(體熱)제어 생리학과 의복과학(Physiology of Heat Regulation and The Science of Clothing)”이 간행되었는데 당시 하버드대학 공중위생학 교수였던 Yaglou는 이 책에서 「유효온도 ET (Effective Temperature)는 저온도 범위내에서 습도의 영향을 과대하게 평가하였으며 고온도 범위에서는 과소평가 하였다」라고 문제점을 지적하였다.

제2차 세계대전후 ASHVE(ASHRAE의 전신)는 Yaglou의 유효온도 ET를 재평가하기로 하고 1956년 오하이오주 클리브랜드에 새롭게 연구실을 설치하여 Koch 등에 의하여 연구가 진행되었으나 1960년 ASHRAE는 클리브랜드의 연구실을 폐쇄하고 1962년에 이것을 캔사스주립대학(KSU)의 Nervins교수 밑으로 이설하였다.

1963년부터 KSU에서 ASHRAE의 지원하에 온도감각과 온습도와의 관계를 구하기 위하여

많은 피험자를 이용한 실험이 전개되었다. 1966년에 Nervins 등³⁾에 의하여 발표된 “신쾌적선(New Comfort Line)”은 Yaglou의 것과 Koch에 의한 것 중간에 위치한 것이었다. 그러나 이 새로운 성과도 실험에서 확인되어진 환경범위 밖에서 적용한 것이어서 여러 가지 온열인자의 조합으로 성립되는 환경에 있어서는 쾌적성 예측평가 이용에는 무리가 있었다.

ASHRAE의 전학회장인 P.B. Gordon은 John B. Pierce 재단의 회장으로 취임하여 전후 침체된 Pierce연구소 재건에 착수했다. 우선 Gordon은 펜실바니아 대학에서 체온조절의 생리학자인 J. D. Hardy를 연구소장으로 초빙하여 이 연구소를 중심으로 체온조절의 생리학에 관한 수많은 연구를 추진하는데 큰 역할을 하였다.

1963년 20여년 동안 공군에서 항공의학에 관한 연구임무를 마친 Gagge 박사는 Pierce 연구소에 초빙되어 온열환경평가 연구에 복귀하였다. 1930년대에 인체와 열환경과의 열평형식을 도출하여 대류·복사 그리고 증발에 의한 인체의 열방산량을 물리적 수법에 의하여 구하는 기초를 세웠던 Gagge는 Hardy와 함께 지금까지의 경험적인 수법을 탈피한 이론적인 온열환경평가수법 개발에 착수하여 현재의 신유효온도 ET*(New Effective Temperature)를 개발하기에 이르렀다.

덴마크공과대학의 P.O.Fanger는 독자적으로 인체와 환경 사이의 열평형을 기술하는 쾌적방정식과 함께 각종 쾌적선을 1966년부터 1967년에 걸쳐 ASHRAE에 발표하였다.

이 후 Nervins 등이 수많은 피험자를 이용하여 얻어진 “New Comfort Line”에 쾌적성평가 관수를 도입한 예측평균신고 PMV (Predicted Mean Vote)를 1970년대에 발표하였으며 현재 ISO 기준에도 채용되고 PMV를 측정하는 comfort meter라는 측정기기가 시장화되는 등 그 인지도가 높은 편이다.

3. 인체와 환경 사이의 열평형방정식

인체의 체온조절 목적은 생명을 유지하기 위하여 체내온을 약 36.5°C로 일정하게 유지하는 것에 있다. 이를 위하여서는 체내에서 생산한

열량과 체외로 방산되는 열량이 평형을 유지하지 않으면 안된다. 즉, 인체의 열평형식은 인체 내부에서의 열생산과 인체로부터 외계로의 방열이 평형한다는 것이다.

인체는 음식물섭취 등에 의한 대사(代謝) $M[W/m^3]$ 에 의하여 열이 생산되며 기계적인 일을 통하여 대사량의 일부가 일 $W[W/m^3]$ 로 변환된다. 그리고 인체 내부에서 직접 외계로 방열이 행해지는 메카니즘으로 호흡에 의한 대류와 증발에 의한 방열량($C_{res} + E_{res}$) $[W/m^3]$ 이 있는데 이는 통상 10%이하로 추정되고 미소량이기 때문에 생략하는 경우가 많다.

인체 피부표면에서의 방열은 큰 비율을 차지하며 통상 현열류(顯熱流)의 대류 $C[W/m^3]$, 열복사 $R[W/m^3]$, 전도 $C_d[W/m^3]$ 와 잠열류(潛熱流)의 증발 $E[W/m^3]$ 로 나누어 진다.

인체의 체온조절 메카니즘은 크게 체심부(Core)와 외피부(Shell)로 나눌 수 있다. 열생산이 행해지는 체심부로부터 전도와 혈류에 의하여 외피부로 열이 이동하여 피부표면으로 전달된다. 착의상태 인체의 경우 체내로부터 피부표면으로 전달되는 현열이 다시 피복내표면으로 3가지의 방열형태를 취하여 방열하고 전도를 통하여 피복외표면으로 전달된다. 잠열은 피부표면에 있어서 불감증설(不感蒸泄) 및 발한에 의한 증발이 일어나 피부표면으로부터 잠열이동이 생기게 된다. 이때 수증기는 착의에 의한 투습저항을 받으면서 透濕에 의해 피복외표면으로 전달되어 외계로 방산된다. 이러한 전달경로를 환경과 인체 사이의 열평형식으로 만들면 (1)식으로 나타내어진다. 외부일 및 호흡열은 직접 인체내부에서 바깥으로 방열되는 것으로 발열측인 좌변에 표시하였다.

$$\begin{aligned} M - W - (C_{res} + E_{res}) \\ = C + R + E + C_d + s \end{aligned} \quad (1)$$

우변의 s 는 인체의 열수지 balance량으로 정상상태에서 $s=0$, 비정상상태에서 $s>0$ 에서 인체에 열축적이 일어나 체온은 상승하고 $s<0$ 의 경우 신체냉각이 일어나 체온은 저하한다. 열평형이 성립되면 $s=0$ 을 취한다. 또 전도에 의한 热授受는 선자세(立位)에서는 발바닥부위가 바닥

이나 지면에 접하고 의자에 앉은자세에서는(椅座位)에서는 엉덩이부위가 의자에 접촉하기 때문에 이 부분에서 전도가 일어난다. 堀越⁴⁾의 보고에 의하면 그 열량은 전방열량의 8%이하이기 때문에 생략하여 취급하였다. 이것은 신유효온도 ET*와 표준신유효온도 SET*, 쾌적방정식과 PMV에서도 마찬가지다. 그러나 바닥에 직접 앉은자세(床座)의 경우 접촉면적이 크게되어 무시할 수 없게 되며 崔英植⁵⁾이 지적한 바와 같이 한국 古來의 온돌방과 같은 환경에서는 바닥난방시 중요한 인자가 된다.

3.1 인체의 경로별 방열량

대류에 의한 방열량 C 는 식(2)로 주어진다.

$$C = h_c F_{cl} (t_s - t_a) f_{cl} \quad (2)$$

여기에서

h_c : 인체의 대류열전달율 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

F_{cl} : 착의의 전달효율

t_s : 인체피부온[$^\circ C$] t_a : 기온[$^\circ C$]

f_{cl} : 착의의 유효면적율

착의의 전달효율 F_{cl} 은 착의의 열저항에 의한 콘스턴스로 대류열전달율에 착의의 영향을 넣어 수정한 것으로 다음 식으로 나타낸다.

$$F_{cl} = 1/(1 + R_{cl} (h_c + h_r) f_{cl}) \quad (3)$$

여기에서,

R_{cl} : 착의의 열저항($= 0.155 L_{cl}$)

L_{cl} : 착의 열저항[clo]

복사방열량 R 은 다음 식으로 나타낸다.

$$R = h_r F_{cl} (t_s - t_r) f_{cl} \quad (4)$$

여기에서

h_r : 인체의 복사열전달율 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

t_r : 평균복사온도[$^\circ C$]

증발방열량 E 는 다음식으로 나타낸다.

$$E = \omega h_e F_{pcl} (P_s^* - P_a) \quad (5)$$

$$h_e = LR h_c$$

여기에서

- ω : 피부의 습윤면적율[n.d]
 h_e : 증발에 의한 열전달율[W/(m² · kPa)]
 LR: Lewis 관계의 계수[°C/kPa]
 F_{pcl} : 착의의 투습효율
 P_s^* : 피부의 포화수증기압[kPa]
 P_a : 환경의 수증기압[kPa]

착의 투습효율 F_{pcl} 은 전달효율과 유사한 방법으로 정의되고 있다.

$$F_{pcl} = \{1/(f_{cl} h_e)\} \cdot \{R_{e,cl} + 1/(f_{cl} h_e)\} \quad (6)$$

$R_{e,cl}$ 는 착의의 투습열저항을 가르키고 $h_e F_{pcl}$ 은 착의에서 공기까지의 투습 + 습기 전달에 의한 전증발열전달율 (Overall Evaporative Heat Transfer Coefficient) h'_e 로 정의된다. 그러면 Woodcock⁶⁾에 의하여 풀려진 투습지수 i_m 이 다음식으로 정의된다.

$$i_m LR = h'_e/h' \quad (7)$$

여기에서,

$$h' = (h_c + h_r) F_{cl} f_{cl}$$

$$i_m = [R_{cl} + 1/\{f_{cl} (h_c + h_r)\}] / \{R_{cl}/i_{cl} + 1/(h_c f_{cl})\} \quad (8)$$

단, $i_{cl} = R_{cl}/(R_{e,cl} LR)$

따라서, 최종적인 인체의 열평형식을 세우면 다음 식으로 된다.

$$M - W - C_{res} - E_{res} = h_c F_{cl}(t_s - t_a) + h_r F_{cl}(t_s - t_r) + W i_m LR h'(P_s^* - P_a) \quad (9)$$

4. 인체열평형식에 근거한 온열환경지표

4.1 폐적방정식과 PMV

4.1.1 폐적방정식(Comfort Equation)

Fanger⁷⁾는 폐적조건에서 온열환경요소의 조합을 구하기 위하여 產熱과 피부면에서의 放熱이 평형을 유지한다는 인체의 열평형식을 세워

착의내의 현열류에 관한 방정식을 정리하였다. (1)식에서 피부면에서의 증발방열량 E 를 불감증설(不感蒸泄) E_d 와 발한의 증발 E_r 로 분리하여 좌변으로 이행하였다. 따라서 우변은 현열만의 항으로 남게 된다. 여기에서 현열에 의한 방열량의 경로를 피부표면으로부터 착의표면과 착의표면으로부터 외계까지 2가지로 분할하여 각각의 產熱항인 좌변에 같다고 하는 평형식을 구축하여 (10)식을 얻었다

$$\begin{aligned} M - W - C_{res} - E_{res} - E_d - E_r \\ = (t_s - T_{cl}) / 0.81 I_{clo} \\ = h_c(t_{cl} - t_a) f_{cl} + R \end{aligned} \quad (10)$$

t_{cl} : 착의표면의 온도[°C]

(10)식은 온열환경 6조건 가운데 5조건을 주어도 미지수가 4조건으로 되어 풀 수가 없기 때문에 Fanger는 폐적조건으로서 열평형식을 만족하는 환경 4조건 · 인체측 2조건의 조합을 구하려고 했다. 복사열량 R 산정은 (11)식과 같이 4乘則을, 불감증세량 E_d 는 (12)식을 각각 채용하고 있다.

$$R = 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \{9t_{cl} + 273\}^4 - (t_r + 273)^4 \quad (11)$$

$$E_d = 3.05 \{5.73 - 0.007(M-W) - P_a\} \quad (12)$$

그리고, 호흡에 의한 방열 $C_{res} + E_{res}$ 는 식 (13)과 (14)에 의해 구할 수 있다.

$$C_{res} = 0.0014 M (34 - T_a) \quad (13)$$

$$E_{res} = 0.0173 M (5.87 - P_a) \quad (14)$$

이것이 Fanger가 제안한 폐적방정식이다. 그 조건으로서 인체의 폐적상태와 피부온 t_s 와 발한에 의한 증발방열량 E_r 가 대사량 M 과 선형(線形)인 관계를 이용하여 (15)와 (16)식으로 나타낸다. 이 조건을 결정하는 실험데이타에 대하여서는 아직 검토의 여지가 있다고 생각된다 (Fig1,2).

$$t_s = 35.7 - 0.0275(M - W) \quad (15)$$

$$E_r = 0.42(M - W - 58.15) \quad (16)$$

더욱이 식(10)의 문제점은 증발에 관한 항을 모두 좌변에 두고 있기 때문에 착의에 관한 투습의 문제가 전혀 고려되지 않은 것이다.

4.1.2 예측평균신고 PMV(Predicted Mean Vote)

PMV는 전술한 폐적방정식을 이른바 폐적조건 이외의 경우로 확장 적용시켜 인체의 더위·추위의 감각과 연관시키려고 한 것이다. 폐적조건이 아닌 경우는 식(10)이 성립하지 않는다. 여기에서 식(10)의 제1번이 나타내는 폐적조건의 경우 인체내부 열생산과 제3번이 나타내는 대상으로 하는 조건에서의 방열량과의 차를 인체열부하 L로 정의하여 구하였다. 그리고 이 열부하 L을 인체의 온냉감과 수치적으로 연관시키려고 시도했다.

$$\begin{aligned} L = M - W - C_{res} - E_{res} - E \\ - h_c F_{cl}(t_{cl} - t_a) - h_r F_{cl}(t_{cl} - t_r) \end{aligned} \quad (17)$$

제1번에는 발한의 폐적조건과 그 때의 기온·습도가 포함되어 있어 착의온을 구하는 제2식과 제3식의 방정식에 피부온의 폐적조건과 실제 환경조건이 반드시 폐적시와 실제 조건시의 열적인 차를 나타내고 있다고 하기는 어렵다. 이것은 인체 열평형방정식에서 열수지 balance량 s를 구하는 형으로 변형할 수 있다면 비정상상태를 나타내는 것이 된다. 게다가 발한에 의한 증발방열량과 피부온은 폐적시의 값이 이용되는 모순을 포함하고 있다.

피부온이나 발한량 등의 생리량은 폐적조건 이외에서 발한을 고려하지 않으면 폐적조건과 다르다. 暑熱 환경에서 발한에 의한 증발방열량은 탁월하며 어느 온도범위를 넘으면 발한만이 방열의 수단이 되기 때문이다. 따라서 발한이 고려되지 않은 폐적조건은 고온측에서 발한이 시작되므로 이 방정식은 폐적조건보다 暑熱측에서는 사용할 수 없게 된다.

온냉감과의 연계는 다음과 같이 행하였다. 온냉감은 ASHRAE에서 사용되어 온 7단계 평정척도법의 -3에서 +3의 수치를 Y로 나타내고

이하의 조작을 행하였다. 피험자의 실험데이터를 이용하여 인체의 온냉감 Y의 열부하 L에 대한 변화율 $\delta Y / \delta L$ 과 대사량 M을 연관시켰다 (Fig.3).

여기서 문제점은 평균값으로 나타냈기 때문에 분포의 精度가 분명하지 못하므로 적분하여 Y를 구한 방정식을 도출했다. 여기에서 계산된 Y를 예측평균신고(Predicted Mean Vote)라 부르고 머릿글자를 따서 PMV로 칭하였다.

$$\delta Y / \delta L = 0.352 e^{-0.042M} + 0.032 \quad (18)$$

$$PMV (=Y) = (0.352 e^{-0.042M} + 0.032) L \quad (19)$$

$\delta Y / \delta L$ 과 대사량의 관계는 회귀방법에도 문제는 있지만 關數적인 관계 검토도 보이지 않고 폐적영역 이외로 확장했지만 t_s 와 E의 폐적시 關數가 방정식 중에 여전히 남아 있다. PMV에서는 온냉감 숫자 때문에 발생하는 오해도 많다. Fanger 자신이 말한 것처럼 제한된 범위 내에서만 사용되어야 할 것이다. 또한 발한이 고려되어 있지 않기 때문에 열적 중성보다 더운측에서 사용하는 것은 곤란하다. 따라서 -0.5부터 +0.5사이의 범위와 약간의 저온측을 사용한계로 보아야 할 것이다. PMV의 문제점은 持田⁸⁾, 西⁹⁾, 堀越¹⁰⁾등이 지적하고 있다.

4.2 신유효온도 ET* (New Effective Temperature)

신유효온도 ET*¹¹⁾는 피험자의 주관적 판단과 같은 감각 온열조건 조합을 구한 Yaglou의 유효온도와는 다른 인체 열평형식에서 도출하였다. 이것은 근본적으로 현열만 취급한 작용온도 OT(Operative Temperature)¹²⁾가 기초가 되기 때문에 작용온도 OT에서 도출한다.

4.2.1 작용온도 OT와 습기작용온도 HOT

작용온도 OT(Operative Temperature)는 인체의 대류와 복사에 의한 방열량 C + R로부터 구해진다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$C + R = h_c F_{cl}(t_s - t_a) + h_r F_{cl}(t_s - t_r) \quad (20)$$

변형하여

$$C + R = h(t_s - OT) F_{cl} \quad (21)$$

$$OT = (h_c t_a + h_r t_r) / (h_c + h_r) \quad (22)$$

여기에서 $t_a = t_r$ 의 경우 작용온도 OT는 기온과 같게 된다. 즉 작용온도는 기온과 평균복사온도가 다른 환경을 기온과 평균복사온도가 같은 환경의 기온으로 환산하여 표시한 온열환경지표이다. 변형하면 식(23), (24)로 된다.

$$\begin{aligned} OT &= (h_c t_a + h_r t_r) / (h_c + h_r) \\ &= t_a + ERF / (h_c + h_r) F_{cl} \end{aligned} \quad (23)$$

$$ERF = h_r F_{cl} (t_r - t_a) \quad (24)$$

ERF[W/m²]는 有效輻射場 (Effective Radiant Field)으로 불려지며 (23)식은 작용온도의 다른 정의이다. 기온을 기준으로 하여 기온상태와 같은 가장적인 인체 열복사 영향을 온도로 환산하여 표현한 것이다. ERF가 0의 경우 OT = t_a 로 되며, 기온과 평균복사온도가 같은 경우와 같다. $t_r = t_a$ 의 환경에서는 ERF = 0으로도 표현가능함으로 작용온도 OT는 기온 t_a 와 같게 된다. 이것에 습도의 영향 즉 증발방열량의 영향을 넣은 것이 습기작용온도 HOT(Humid Operative Temperature)이다. 인체의 방열은 대류・복사・증발을 생각할 수 있으므로 Nishi와 Gagge¹³⁾에 의하여 도출된 습기작용온도 HOT는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} C + R + E \\ = h_c F_{cl} (t_s - t_a) + h_r F_{cl} (t_s - t_r) \\ + \omega b LR h_c F_{pcl} (t_s - t_d) = h_t (t_s - HOT) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} HOT &= (h_c F_{cl} t_a + h_r F_{cl} t_r) \\ &\quad + \omega b LR h_c F_{pcl} t_d / h_t \end{aligned} \quad (26)$$

$$h_t = h_c F_{cl} + h_r F_{cl} + \omega b LR h_c F_{pcl}$$

t_d 는 선형화된 노점온도이며, b 는 포화수증기 압을 온도로 선형화하기 위한 정수이다.

이것이 습도의 영향을 포함한 작용온도이며 습기작용온도 HOT로 불려지고 있다. 이것은 $t_a = t_r = t_d$ 의 경우 기온과 일치한다. 따라서 상

대습도 100%, 기온 t_a 와 평균복사온도 tr 이 같은 경우에서 기온으로 환산시킨 체감을 표현한 지표이다.

4.2.2 신유효온도 ET*(New Effective Temperature)

습기작용온도 HOT는 상대습도 100%를 기준으로 한 표현방법이며 수증기의 포화조건을 기준으로 하고 있기 때문에 물리적으로 알기 쉬운 표현방법이다. 그러나 실제 환경에서는 상대습도 50%를 기준으로 하는 것이 감각적으로 알기 쉽고 때문에 Gagge는 이것을 상대습도 50%로 환산하여 표현하는 방법을 개발했다. 상대습도를 50%로 한 시도는 Dufton¹⁴⁾에 의해서도 행해졌다. 습기작용온도 HOT에 있어서 습도의 조건을 상대습도 50%로 표현한 것이 신유효온도 ET*이다(Fig.4). 공기선도상에 같은 온열조건을 나타내는 선은 습기작용온도 HOT와 같은 것이다. 이것을 수식으로 표현하면 종축은 수증기압 P_a , 횡축은 작용온도 OT의 좌표상에서 점[ET*, 0.5 P*(ET*)]를 통과하는 기울기 $-\phi/\omega$ 의 직선으로 되고 다음 식으로 나타낸다.

$$P_a - 0.5 P^*(ET*) = -(\phi/\omega) \{ (h_c + h_r) F_{cl} / LR h_c F_{pcl} \} (OT - ET*) \quad (28)$$

여기서

$$\phi = (h_c + h_r) F_{cl} / LR h_c F_{pcl}$$

습기작용온도 HOT는 노점온도를 일정하다고 가정하면 작용온도로 될 수 있다. 작용온도는 풍속의 영향을 완전히 표현하지 못하며 신유효온도 ET*에서도 마찬가지다. 여기서 작용온도와 같이 풍속의 영향 표현이 가능하도록 또 착의의 열저항도 고려할 수 있도록 표준습기작용온도 SHOT(Standard Humid Operative Temperature)가 도입되었으며 (29)식으로 정의된다. 표준습기작용온도 SHOT는 습기작용온도 HOT를 표준조건인 풍속 0.1m/s, 착의량 0.6 clo로 환산한 것이다.

$$SHOT = (h_t/A_s)HOT + (1 - h_t/A_s)t_s \quad (29)$$

$$A_s = h_{cs} F_{cls} + h_r F_{cls} + \omega b LR h_c F_{pcl}$$

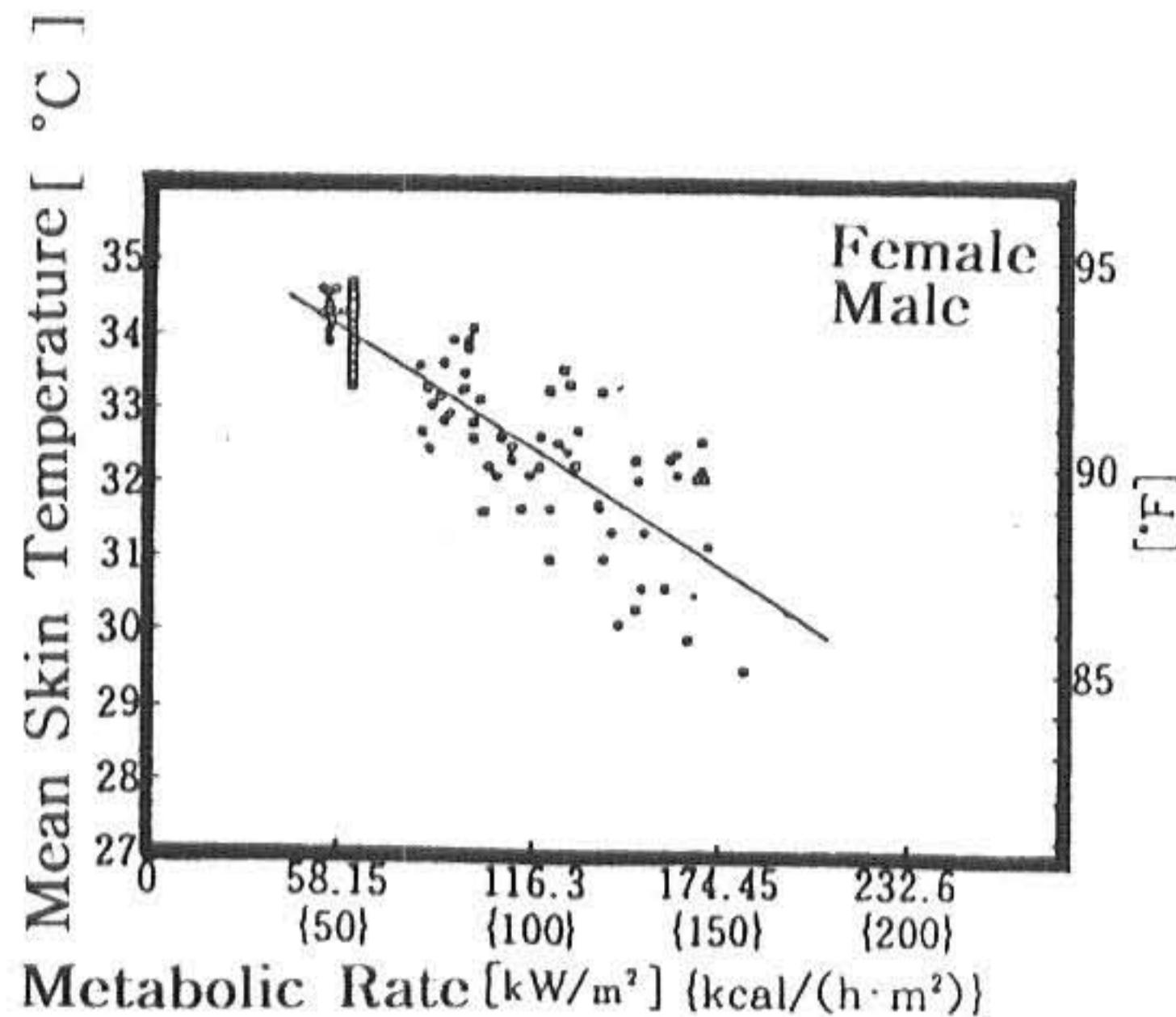


Fig.1 Relation between Metabolic Rate M and Mean Skin Temperature t_s under Thermal Comfort Condition⁷⁾

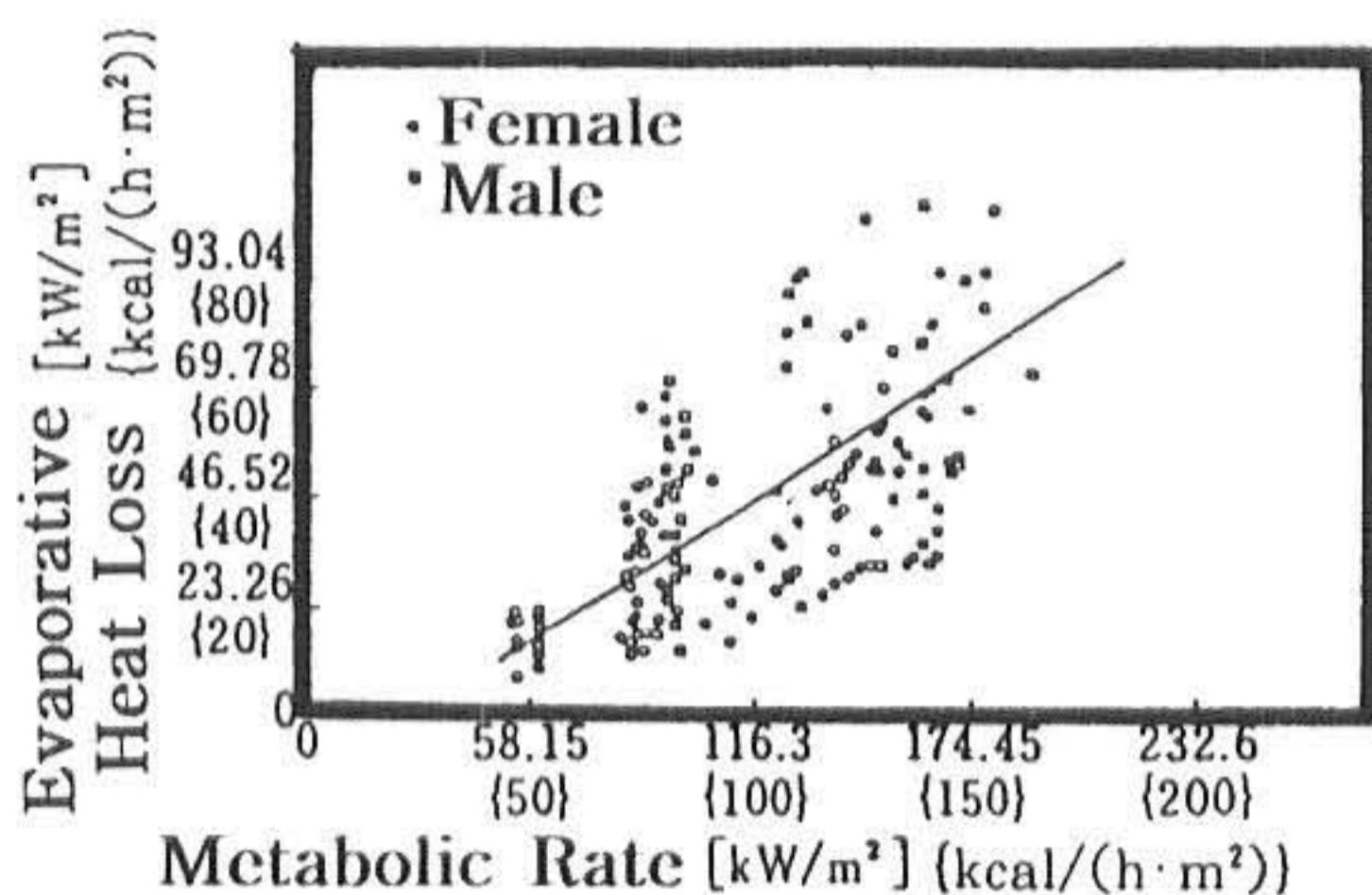


Fig.2 Relation between Metabolic Rate and Evaporative Heat Loss from Skin E under Thermal Comfort Condition⁷⁾

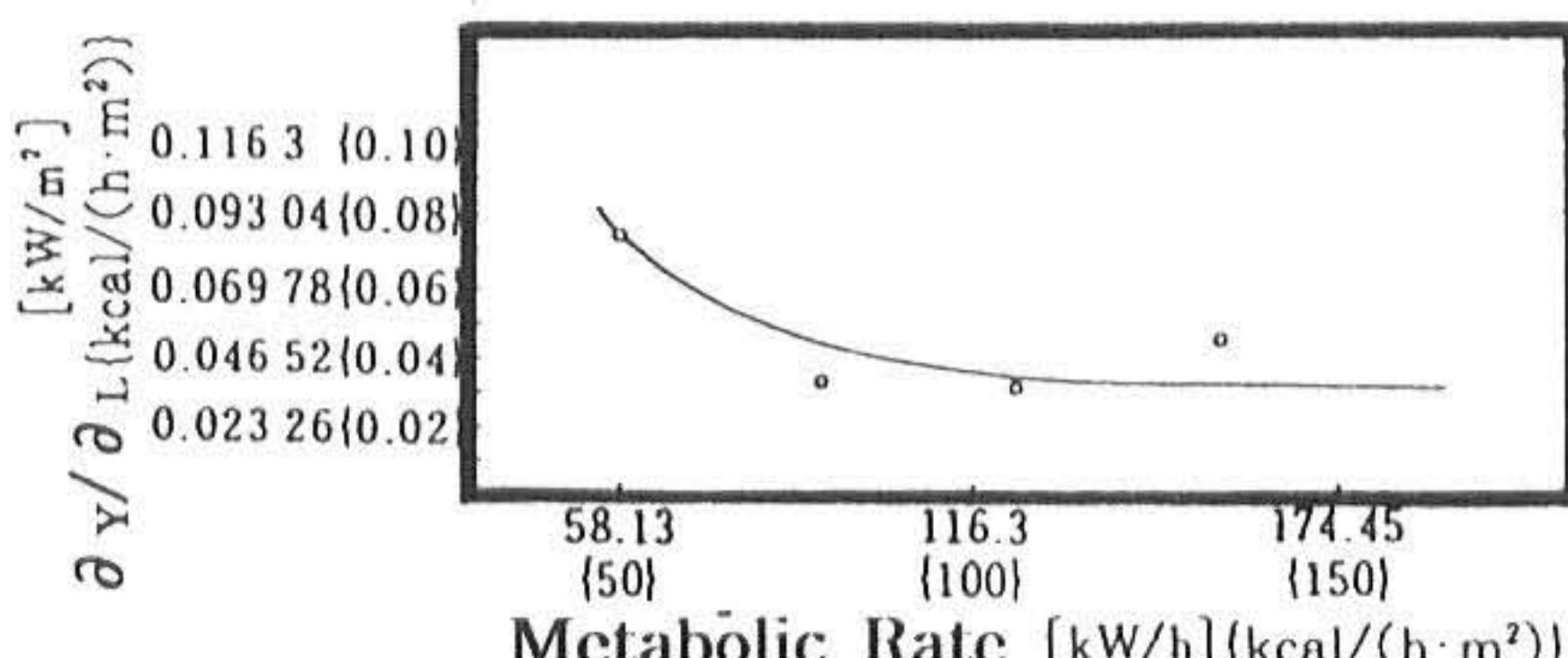


Fig.3 Relation between Metabolic Rate and $\delta v/\delta L$ ⁷⁾

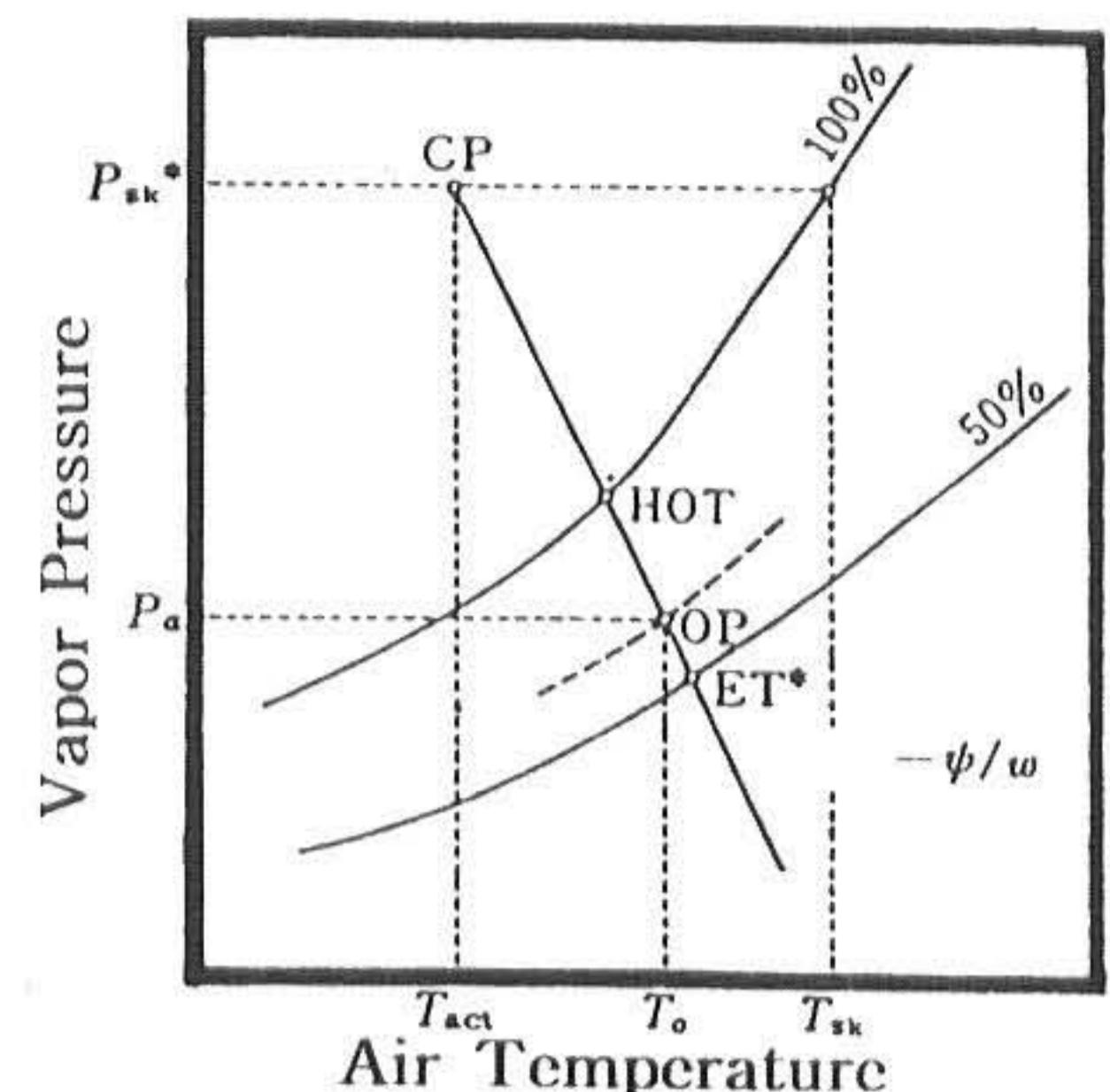


Fig.4 Constant Heat Loss Line and Its Relationship to HOT and ET* in Psychrometric Chart²¹⁾

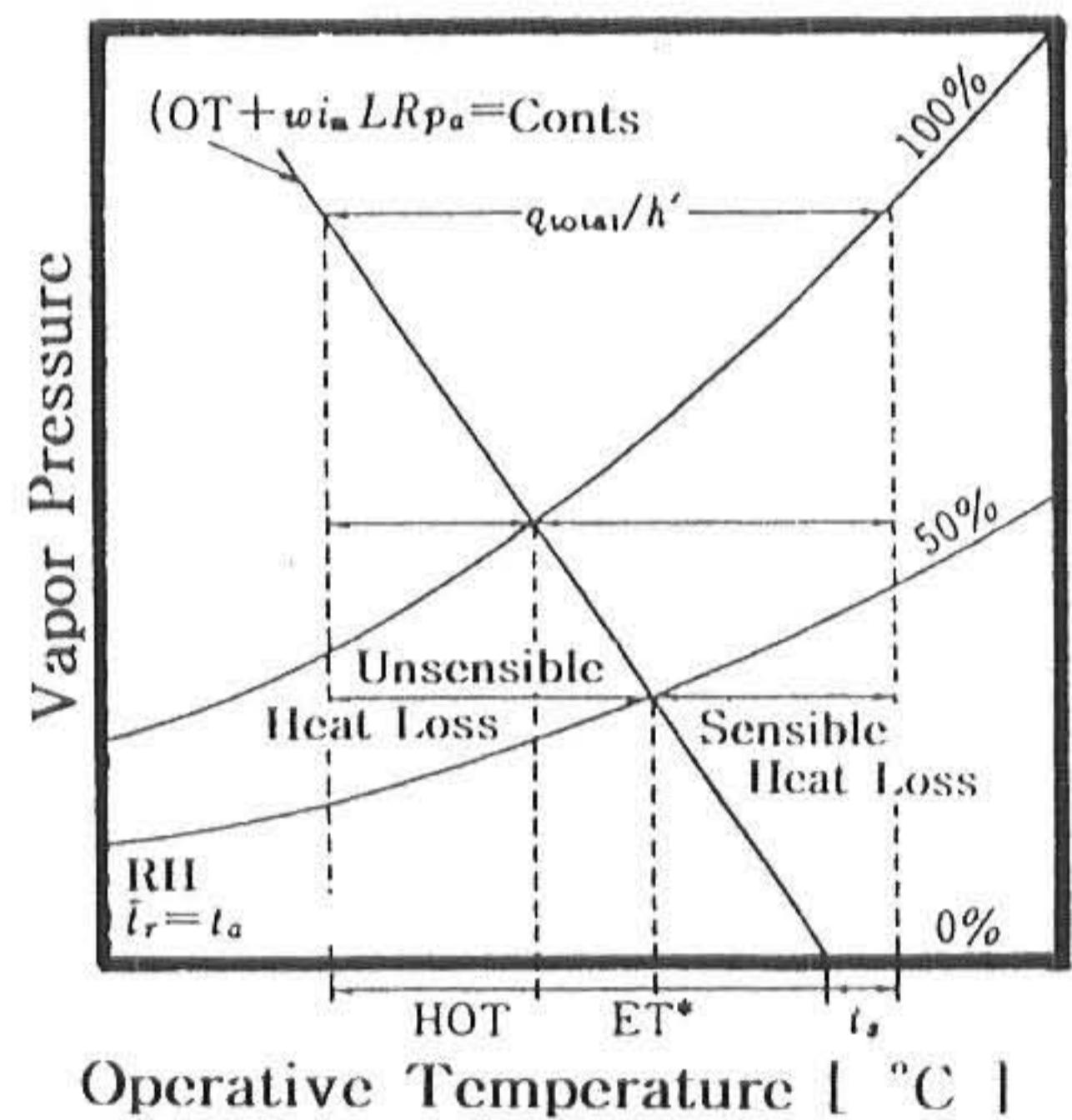


Fig.5 New definition of Constant Heat Loss and Its Relationship to HOT to ET* in Psychrometric Chart⁶⁾

여기에서 사피구스_s는 표준조건을 나타낸다. 신유효온도 ET*와 같이 상대습도 50%의 조건으로 변환한다. 이것을 수식으로 나타내면 다음과식으로 나타낸다.

$$P_a - 0.5 P_{(SET*)}^* = - \{ (h_c + h_r) F_{cl} / LR h_c F_{pcl} \} (OT - ET^*) \quad (30)$$

이상이 신유효온도 ET* 계열이다. 그러나 1988년 Gagge와 Fobelets¹⁵⁾는 방열량 표현을 수정하여 다음과 같이 정의하였다. 피부면에서의 전방열량 q_t 는 식 (31)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} q_t &= h'(t_s - OT) + \omega h'_e (P_s^* - P_a) \\ &= h' \{ t_s + \omega i_m LR P_s^* \} \\ &\quad - (OT + \omega i_m LR P_a) \end{aligned} \quad (31)$$

우변괄호내 제1항은 피부의 상태이고 제2항은 공기의 상태이기 때문에 다른 parameter가 변하지 않으면 OT와 P_a 의 어떤 범위내에서의 조합에 대하여 같은 방열량을 주는, 즉 제2항의 값이 같게 되는 온도 t_{com} 과 t_{com} 에 있어서 수증기압 P_{com} 의 조합이 존재하는 다음식이 성립된다.

$$t_{com} = OT + \omega i_m LR (P_a - P_{com}) \quad (32)$$

t_{com} 으로서 특징적인 상태를 취하면 온열환경 지표가 정의될 수 있다. 즉, 상대습도 100%에서는 습기작용온도가, 상대습도 50%에서는 신유효온도가 다음과 같이 재 정의된다.

$$HOT = OT + \omega i_m LR (P_a - P_{HOT}^*) \quad (33)$$

$$ET^* = OT + \omega i_m LR (P_a - P_{ET}^*) \quad (34)$$

이 관계를 나타내면 Fig.5와 같이 된다.

습기작용온도 HOT • 신유효온도 ET*의 계열은 인체열평형방정식에 근거하고 있기 때문에 범용적이지만 생리량으로서 평균피부온 t_s 와 인체 습윤면적을 ω 의 계측이 이루어지지 않으면 구할 수 없다. 여기에서 Gagge¹¹⁾는 인체의 체온조절 모델을 구축하였는데 이것은 Two

Node Model 즉 2절 모델이다. 이것은 인체를 체심부 Core와 외피부 Shell의 2개의 부분으로 구성한 것으로 2개의 집중용량을 가진 열적 모델이다. 발한량과 피부온은 기존의 생리학적 관념에서 모델화시켰으나 모델을 통한 예측계산만으로 괜찮은지는 검토할 여지가 남아있다.

4.2.3 최근의 지표

ET*계열의 지표로서 개개의 온열조건 영향을 알 수 있는 수정습기작용온도 HOTV (Corrected Humid Operative Temperature)¹⁶⁾를 들 수 있다. 이 지표는 인체와 환경 사이의 대류에 의한 열교환량을 유효복사장을 도출해 낸 방법으로 풍속과 습도의 영향을 표현하는 에너지장인 溫熱風速場 TVF와 減効濕度場 RHF를 정의하였다. 즉 HOTV는 풍속수정온도, 평균복사온도, 노점온도를 加重平均한 것으로, 일종의 작용온도이다. 기온을 기준으로 하여 풍속, 열복사, 습도의 효과를 온열풍속장 TVF, 유효복사장 ERF, 감효습도장 RHF를 구하고 이것을 온도로 변환하여 그 합으로서 정의한 지표다. 나아가 상대습도 50%를 기준으로 변환하는 방법¹⁷⁾도 발표하였다.

Gagge에 의하여 제안된 작용온도를 수정하여 崔英植⁵⁾은 바닥난방시 인체측을 기준으로 한 傳導修正作用溫度 OT_f를 제안하였으며 그 유효성을 검증하기 위하여 많은 피험자를 이용한 실험을 거쳐 바닥난방시의 온열환경 지적온도범위를 제안하였다.

그리고 鄭楣元¹⁸⁾¹⁹⁾은 도시 및 건축외부공간을 대상으로 日射와 장파장복사를 고려한 작용온도 OT_n과 신유효온도 ET*_n을 제안하였다.

PMV계의 폐적방정식을 이용하여 등가온도 (等價溫度; Modified Temperature)를 제안한 田辺²⁰⁾는 Dufton의 등가온도¹⁴⁾와 같은 표현방법이다.

5. 결론

이상 온열환경평가방법에 관한 발전과정과 인체의 열평형방정식에 대하여 고찰하고 열적 폐적성지표 PMV와 신유효온도 ET* 계열에 대

한 평가기준과 문제점에 대하여 분석하였다.

그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 예측평균신고 PMV는 Fanger 자신이 말한 것처럼 제한된 범위 내에서 사용되어야 한다. 발한을 고려하지 않았기 때문에 열적 중성보다 더운측에서 사용하는 것은 문제점이 있고 -0.5부터 +0.5 범위와 약간의 저온측을 사용한 게로 보아야 한다.

(2) 신유효온도 ET*계열은 열평형식에 근거하고 있기 때문에 범용적이지만 생리량으로서의 평균피부온 t_s 와 습윤면적율 ω 의 계측을 행하지 않으면 구할 수 없다. Gagge 등은 인체의 체온조절 모델을 구축하였는데 이것은 Two Node Model 즉 2절 모델이다. 인체를 체심부 Core와 외피부 Shell의 2개의 부분으로부터 구성하여 2개의 집중용량으로 한 열적 모델이다. 발한량과 피부온은 기존의 생리학적 관념에서 모델시켰으며 또한 모델을 통한 예측계산만으로 괜찮은지 검토할 여지가 남아 있다.

(3) 온열환경지표는 그 지표의 이론적인 근거 및 배경을 파악한 후 그것에 맞는 건축 및 도시열환경평가 등에 적용시켜야 한다. 또한 그 지표의 적용범위 내에서 사용해야 하며 사용조건과 목적에 맞는 지표를 찾아 공학적인 차원에서 건축이나 도시환경 설계에 적용을 유도해야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Houghten,F.C. & Yaglou,C.P.: Determining equal comfort lines, ASHVE Trans. Vol.29,p.163, 1923
- 2) Winslow, C. E. A., Herrington, L. P. & Gagge, A. P.: The determination of radiation and convection exchanges by partitional calorimetry, Am. J. Physiol., 116, p.669, 1936
- 3) Nevins, R. G., Rohles, F. H. & Springer, W.: A temperature and humidity chart for thermal comfort of seated persons, ASHRAE J, p.55, April, 1966
- 4) 堀越哲美: 建築空間における熱ふく射を中心とした溫熱環境條件の人體影響評價方法の研究、博士學位論文、東京工業大學、1978
- 5) 崔英植: 床暖房の溫熱環境が胡座人體に及ぼす影響に関する基礎的研究, 名古屋工業大學博士學位論文, 1995
- 6) ASHRAE: ASHRAE Handbook of fundamentals, pp.8.1-8.29, Atlanta, 1993
- 7) Fanger P. O.: Thermal comfort, danish Technical Press, Copenhagen, 1970
- 8) 持田徹, 大平英人: PMVに及ぼす人体熱定數の影響, 日本空氣調和・衛生工學會北海道支部學術講演論文集, pp.49-50, 1986
- 9) 西安信: PMVの成果と問題點, 日本生氣象學會雜誌 29, p.36, 1986
- 10) 堀越哲美: PMVと快適方程式の検討, 空氣調和・衛生工學, 60-10, pp.963-969, 1986
- 11) Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J. & Nishi, Y.: An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response, ASHRAE Trans. 77, pp.247-262, 1971
- 12) Gagge, A. P., Rapp, G. M. & Hardy, J. D. :The Effective Radiant Field and Operative Temperature Necessary for Comfort with Radiant Heating, ASHRAE Trans. 73(1), I.2.1-I.2.9, 1967
- 13) Nishi Y. & Gagge, A. P.: Humid Operative Temperature. A Biophysical Index of Thermal Sensation and Discomfort, J. Physiol.(Paris), 63, pp.365-368, 1971
- 14) Dufton,A.F.:The Equivalent Temperature of a Room and Its Measurement, Building Research Station Tech. Pap. 13, pp.1-9, 1932
- 15) Gagge, A. P. Fobelets, A. P. R. & Berglund,L.G.: A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Trans. 92(2b),pp.709-731, 1986
- 16) 堀越哲美, 小林陽太郎: 総合的な溫熱環境指標としての修正濕り作用溫度の研究, 日本建築學會計劃系論文報告集,第355號, pp.12-19, 1985.9
- 17) Horikoshi,T.,Tsuchikawa,T.,Kurazumi,Y. & Matsubara, N.: Mathematical Expression of Combined and Separate Effect of Air Temperature, Humidity, Air Velocity and Thermal Radiation on Thermal Comfort, Proc. 6th

ICCEF '94, pp.75-80, 1994

- 18) 鄭相元, 堀越哲美, 梅村茂樹, 宮本征一, 水谷章夫: 都市の街路および開放空間における熱放射環境が人体に及ぼす影響, 日本建築學會計劃系論文報告集 第493號, pp.77-84, 1997.3
- 19) 鄭相元, 尹仁: 建築外部空間에 있어서 人體의 日射熱負荷 및 热的 快適性에 관한 실험적 연구, 韓國產業應用學會誌 Vol.1,No.2, pp.65-74. 1998. 10
- 20) 田辺新一, 木村建一: 夏季の成人の温冷感と快不快感に関する試行実験, 日本建築學會計劃系論文報告集 第368號, pp.31-41, 1986
- 21) 西安信著,中山昭雄編: 温熱生理學, p.33-72, 理工學社, 1981
- 22) Simon, E., 入來正躬編: 體溫調節のしくみ, pp.4-14, 文光堂, 1995
- 23) 空氣調和・衛生工學會: 快適な温熱環境のメカニズム, 豊かな生活空間をめざして, 丸善, 1997

(1999년 6월10일 접수, 1999년 10월10일 채택)