

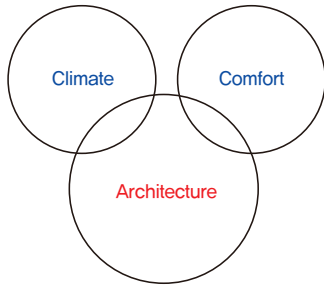
실내환경 쾌적 제어와 건물 에너지

쾌적한 열환경 조성을 위한 재실자 요소의 중요성을 살펴보고, 재실자의 건물 사용과 건축물의 에너지 소비에 대하여 살펴보고자 한다.

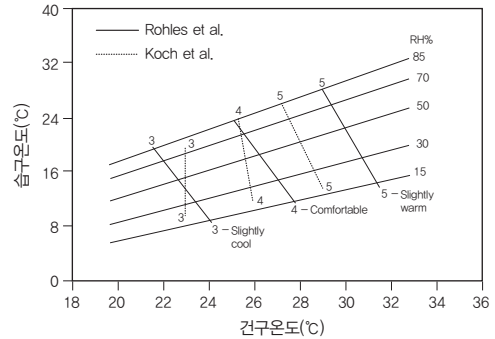
쾌적한 실내환경을 조성하는 것은 건물의 가장 기본적인 기능이다. 가장 오래된 건축 서적 중의 하나인 비트루비우스의 건축십서에 따르면, 건축물은 지역 기후에 따라 주변의 자연환경을 적절히 이용하여 쾌적한 환경을 구축함으로써 재실자가 건물의 사용에 있어서 불편함이 없도록 설계 및 시공되어야 한다(그림 1). 산업 혁명 이후에는 실내환경의 제어를 위해 다양한 기계설비 시스템이 사용되기 시작했으며 이에 따라 실내환경 제어와 건축물의 에너지를 건축물의 설계의 중요한 요소가 되었다.

열평형 기반 열쾌적 연구

열쾌적에 대한 초기 연구는 열환경의 물리적 조건인 공기온도, 습도, 기류속도, 복사온도, 착의량 및 활동량과 인체의 열쾌적 조건의 상관관계를 규명하고자 하였으며, 미국 냉동공조학회(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)의 전신인 ASHVE(American Society of heating and Ventilation Engineers)에 의하여 주도되었다. 1920년대 초 미국의 Houghton과 Yagloglou¹⁾은 ASHVE의 용역을 받아 130명을 대상으로 한 실험 결과를 바탕으로 유효온도와 열환경



[그림 1] 비트루비우스의 건축모델



[그림 2] 공기온도와 습도가 열쾌적에 미치는 영향 분석³⁾

쾌적대를 제시하였다. Houghton과 Yagloglou가 제시한 열환경 쾌적대는 피실험자의 50% 이상이 쾌적하다고 느끼는 상태로 정의되었다. Houghton과 Yagloglou가 제안한 쾌적대는 ASHRAE에 의하여 채택되어 1961년까지 쾌적한 열환경의 조건으로 사용되었다. 이후, ASHRAE의 실험실은 캔자스 주립대학으로 이전되었으며, 열쾌적에 대한 연구는 캔자스 주립대학의 Rohles와 Nevins에 의하여 수정 발전되었다.^{2),3)} 특히 캔자스 주립대학 연구팀은, 남자 800명과 여자 800명을 대상으로 한 방대한 연구를 진행하였으며, 인체의 쾌적대가 16.7~36.6°C라는 사실을 실험적으로 검증하였다. 또한, 공기온도 변화에 대한 민감도가 습도의 변화에 대한 민감도보다 7~9배 정도 높다는 사실도 밝혀낸다(그림 2).³⁾

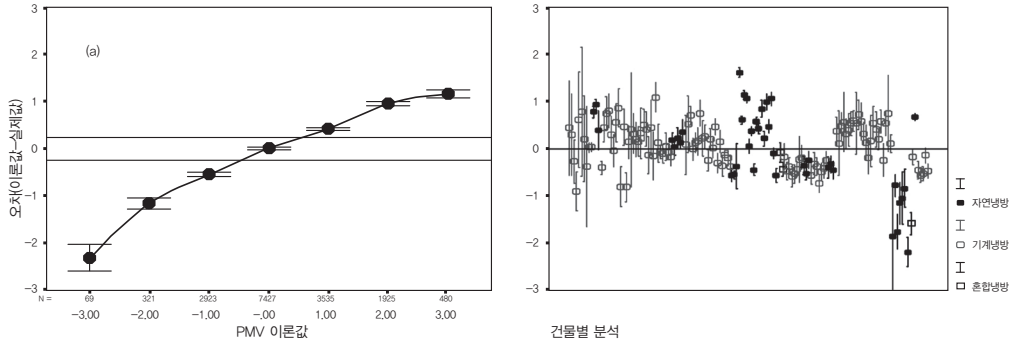
덴마크 공대와 캔자스 주립대학의 Fanger는 열쾌적의 필요조건, 열쾌적과 관련된 열환경의 평가 및 분석 방법 및 원리를 기술한 책, Thermal Comfort⁴⁾를 1970년에 발간하였으며, 이 책은 열쾌적 연구의 가장 중요한 업적으로 평가받고 있다. Fanger는 열쾌적의 4가지 필수조건으로 인체 발열량과 인체가 주위 환경으로부터 손실되는 열량이 동일한 정적 열평형 상태, 피부로부터의 땀 분비율과 피부 평균 온도의 쾌적조건 충족, 그리고 국부적인 불쾌감이 없는 상태를 제시하였으며, 이는 ASHRAE의 실내환경 기준과, ISO 7730에 채택되게 되었다. Fanger의 열쾌적 조건 중 가장 핵심적인 인체와 주변의 열

평형은 인체의 발열과 인체가 주위 환경으로 뺏기는 열이 동일한 상태를 나타내며, Fanger는 이러한 개념을 바탕으로 인체의 열쾌적 조건을 예측하는 PMV(Predicted Mean Vote) 식을 개발하였다.

기존 열평형 기반 열쾌적 모델의 한계

PMV 모델의 정확성과 신뢰성을 검증하기 위한 국외의 현장 실측 연구⁵⁻⁷⁾는 Fanger의 PMV 모델의 예측값이 실생활에서 재실자들이 느끼는 쾌적감과 다르다는 사실을 밝혀냈다. 이에 ASHRAE에서는 PMV모델의 적용성을 평가하기 위한 범지구적인 현장 실측 연구를 지원하였으며, 그 결과 열쾌적 현장실측에 대한 21,000개의 실측자료로 구성된 데이터 베이스를 구축하였다.⁸⁾ 영국 옥스퍼드 대학과 옥스퍼드 브룩스 대학의 Humphreys와 Nicol 연구팀⁹⁾은 PMV 모델의 신뢰성을 ASHRAE 데이터베이스에 대한 통계분석을 통하여 검증하였으며, 그 결과 PMV의 이론값은 열적 중성대에서는 정확성을 가지고 있으나, 중성대를 벗어나면서 그 오차가 급격히 증가한다는 사실을 확인하였다(그림 3).

또한, ASHRAE의 현장 실측 연구를 수행한 Brager와 de Dear는 PMV 결과의 오차가 착의량과 활동량 산정의 어려움, PMV 예측식이 동적이 아닌 정적 열평형 상태를 가정한 점, 열환경의 물리적 요소이외에



[그림 3] PMV 예측값과 실제 재실자의 열쾌적감의 차이

재실자의 열환경에 대한 태도, 선호도 및 기대감과 같은 인식적 요소에 기인한다고 분석하였다.

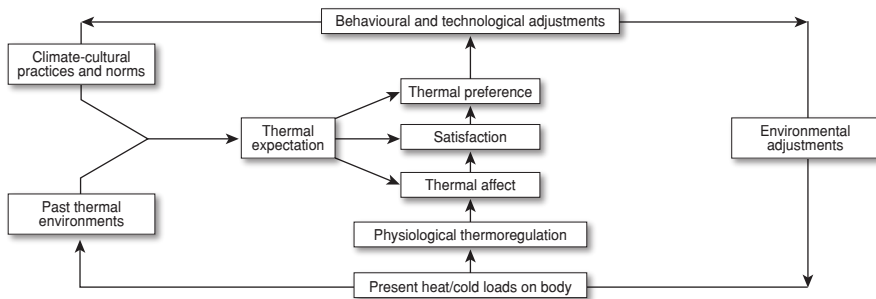
적응쾌적 모델

Fanger의 열쾌적 이론에 대응되는 적응쾌적 모델은 1960년대 말 영국 BRE의 Humphreys와 Nicol 연구팀⁹⁾이 시작한 이래, 영국 Cambridge 대학의 Baker와 Steemers 미국 UC Berkeley 대학의 Brager 호주 Macquarie 대학의 de Dear 등이 그 이론을 정립하였다. 적응쾌적의 연구는 인간이 생활하는 일상적 환경에 대한 현장 조사를 기반으로 한다는 점에서 외부와 격리된 실험실에서 이루어지는 전통적인 열쾌적 연구와 다른 특성을 지니며, 재실자들이 주어진 환경을 쾌적하게 만들 수 있는 가능성과 재실자의 적극적인 실내환경 제어를 통한 열환경 적응 행태

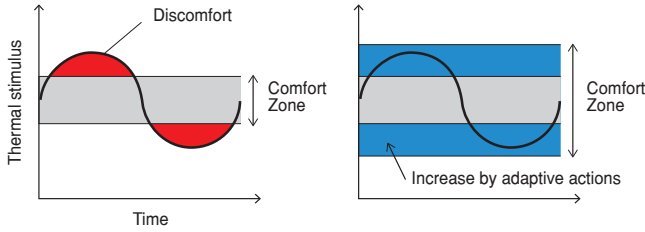
에 기반을 두고 있다. 또한, 적응쾌적 모델에서 인간은 자신의 환경을 쾌적하게 만들기 위하여 주위의 환경시스템을 적극적으로 사용한다는 점에서, 실험실에서 주어진 환경에 수동적으로 반응해야 하는 PMV 이론에서의 피실험자와는 근본적으로 차이를 나타낸다. 특히, 적응쾌적 모델에서의 열쾌적은 단순히 열환경에 대한 물리적 조건에 따라 결정되는 것이 아니며, 재실자의 과거의 열적 경험과 그 경험으로부터 결정되는 공간에 대한 열적 기대감이 중요한 요소이다(그림 4).

환경제어와 적응 쾌적

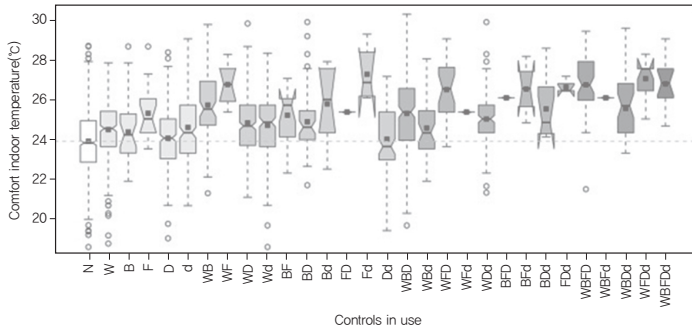
적응 쾌적 이론에 따르면 재실자들은 자신들의 환경을 쾌적하기 만들기 위하여 건물의 환경시스템을 활용한 다양한 적응행동을 하게 되며, 이러한



[그림 4] 적응쾌적 모델에 의한 실내환경 제어



[그림 5] 환경시스템 사용과 심리적 적응



[그림 6] 환경시스템 사용과 쾌적 온도의 변화

적응행동은 쾌적감에 영향을 미치게 된다. 특히, 재실자들이 환경시스템을 적극적으로 사용하는 경우 일반적으로 열쾌적대는 증가하게 되는 특성을 지니게 되며, 이러한 현상을 심리적 적응으로 정의한다(그림 5).

환경시스템의 사용과 쾌적감의 관계는 여러 현장실측 연구로 확인된 바 있다(그림 6). Robinson의 실측 연구에 따르면 여름철에 재실자가 환경시스템을 사용하지 않을 때의 쾌적온도는 24°C였으나, 재실자가 차양장치, 창문, 팬 등을 사용할 경우 쾌적온도가 증가한다는 것을 밝혀냈다. 특히, 창문과 팬을 동시에 사용하는 경우 쾌적온도는 약 3°C 가량 높아지는 것으로 나타났다.¹⁰⁾

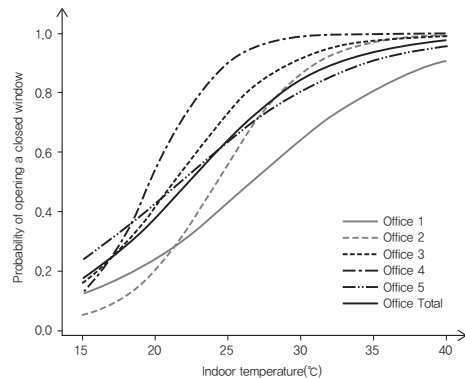
재실자 환경 제어 모델

재실자의 실내환경제어와 쾌적은 밀접한 관련이 있으며 이에 따라 재실자의 환경시스템 사용을

예측하고 모델링 하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. 본고에서는 여름철 자연환기의 중요 요소인 재실자의 창문의 사용에 대한 내용을 중심으로 살펴본다. 기존 연구에 따르면 여름철 창문 사용에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 실내 온도인 것으로 나타났다(그림 7). 실내 온도는 실내발열 부하, 일사열 획득 등을 고려할 수 있다는 점에서 창문의 사용에 대한 좋은 지표가 될 수 있다. 최근의 연구에 따르면 실내 온도는 창문의 여는 행위를 유발하며, 실외 온도는 일단 열려진 창문이 계속해서 열려 있을지 혹은 닫게 될지를 결정하는 요소로 알려져

있다.

또한, 재실자의 환경시스템의 사용이 건축물의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구도 활발히 진행 중이다. 예를 들면, 경희대학교 인간에너지 건축 연구실 팀은 건축물의 에너지 시뮬레이션에서 재실자의 환경시스템 사용을 모델링 하기 위한 알고리즘을 개발한 바 있다.¹¹⁻¹⁵⁾



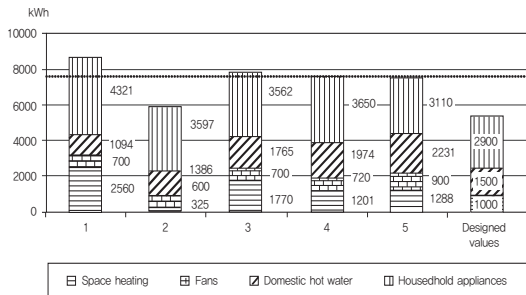
[그림 7] 실내 온도에 따른 창문 사용 확률

재실자 환경 제어와 건물의 에너지 성능

건축물의 냉난방 부하와 에너지 소요량을 산출하기 위한 건축물의 에너지 시뮬레이션은 컴퓨터의 발전으로 인하여 1960년대 이래 비약적으로 발전하게 되었으며, 사용자의 편의를 위한 편리한 인터페이스 개발로 사용자가 증가하게 되었다. 특히, 에너지 시뮬레이션을 효과적으로 사용함으로써 건축물의 온실가스 배출량을 감소시키고, 실내환경의 질을 개선하며, 건설산업분야의 신기술개발에도 크게 기여할 수 있다. 이에 따라, 건축물의 에너지 시뮬레이션은 단순히 건물의 설계 단계에서 건물의 설계 및 냉난방 시스템에 따른 에너지 소요량을 예측하는 것뿐 아니라 건물의 완공 이후에도 커미셔닝이나 냉난방 시스템의 운영에도 적용되고 있다.

위와 같은 에너지 시뮬레이션의 장점에도 불구하고 건축물의 설계 단계에서의 시뮬레이션의 활용은 아직 제한적인 것이 사실이다. 이러한 에너지 시뮬레이션 프로그램의 제한적인 사용의 가장 대표적인 원인은 바로 실제 건물의 에너지 사용량과 시뮬레이션 결과와의 상당한 차이가 발생하여 시뮬레이션 결과의 신뢰성이 부족하다는 점이다.

건물의 재실자들은 건물의 온도설정 및 환기, 조명 및 급탕 시스템의 실제 사용을 결정하게 되며, 건물의 시뮬레이션 단계에서는 가정과 실제 건



[그림 8] 에너지 시뮬레이션 결과와 5개 가구의 에너지 사용량

물의 사용패턴과는 많은 차이를 나타내게 된다. 이러한 재실자 행태의 불확실성은 건물의 시뮬레이션 결과의 신뢰성에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이다.

스웨덴의 에너지 절약형 주거 단지를 대상으로 한 연구 결과를 보면 시뮬레이션 결과와 실제 건물에너지 사용량은 큰 편차를 보이고 있음을 알 수 있다(그림 8). 특히, 난방 에너지의 경우는 시뮬레이션 결과와 비교하여 최대 3배의 편차를 나타내고 있다.¹⁶⁾

1990년 초 MIT 연구진은 시뮬레이션 결과와 실제 건물의 에너지 사용결과에 대한 상세한 분석을 실시하였다(그림 9). 연구진은 동적 에너지 해석 프로그램인 DOE-2를 에너지 절약형 건물의 설계 단계에 적용하였으며, 건물의 완공 후 실제 에너지 사용량과 설계 단계에서의 DOE-2 프로그램의 에너지 소모량을 비교하였다. 그 결과 실제 건물의 연간 에너지 사용량은 325 kWh/m²로 시뮬레이션 결과인 125 kWh/m²의 두 배를 상회하는 것으로 나타났다. 특히, 건물 사용시간, 냉난방 시스템의 사용시간 및 설정 온도, 조명 및 기기의 사용 등과 같은 재실자의 환경시스템 사용이 시뮬레이션과 실제 에너지 사용량 오차의 약 60% 이상을 설명할 수 있는 것으로 나타났다.¹⁷⁾

Calibration steps	Consumption (kWh/m ²)	Increment as percentage of total increment (%)
As simulated	125	
Increments from calibration		
Additional tenant loads		
Lights/equipment	53	
Computer center	44	
Kitchen	19	
Subtotal	117	64
Observed HVAC Schedules and thermostat settings	43	24
Remainder of modifications (HVAC equipment performance, conductive heat transfer coefficient, outdoor-air intake)		
	21	12
Total, as calibrated	305	
Measured energy use	325	

[그림 9] 에너지 시뮬레이션 결과와 완공 후 건물 에너지 사용량

결론

건물 사용자의 환경 제어는 쾌적한 실내환경을 조성하며 동시에 건축물의 에너지 소비를 결정하는 중요한 요소이다. 본고에서는 재실자의 온열 쾌적감과 건축 환경시스템의 사용에 대한 관계를 살펴보고, 재실자의 환경시스템 사용 모델에 대한 소개와 더불어 건물 에너지 시뮬레이션의 정확성 확보를 위한 환경시스템 모델링의 중요성을 확인하였다. 앞으로 재실자의 쾌적을 향상시키는 동시에 건축물의 에너지 성능을 향상시킬 수 있는 다양한 환경시스템 제어 기술 분야의 발전을 기대해 본다.

참고문헌

1. Houghton, F.C. and Yagloglou, C.P., 1923, Determining equal comfort lines, Journal of ASHVE, Vol. 29, pp. 165-176.
2. Nevins, R.G., 1971, Thermal comfort and draughts, Journal de Physiologie, Vol. 13, pp. 356-358.
3. Nevins, R.G. et al., 1966, A temperature humidity chart for thermal comfort of seated persons, ASHRAE Transactions, Vol. 72, No. 1, pp. 283-291.
4. Fanger, P.O., 1970, Thermal Comfort, Copenhagen : Danish Technical Press.
5. Humphreys, M.A. and Nicol, J.F., 2002, The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments, Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 667-684.
6. Heidari, S. and Sharples, S., 2002, A comparative analysis of short-term and long-term thermal comfort surveys in Iran, Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 607-614.
7. Hwang, R.L. and Chen, C.P., 2010, Field study on behaviors and adaptation of elderly people and their thermal comfort requirements in residential environments, Indoor Air, Vol. 20, pp. 235-245.
8. de Dear, R.J. and Brager, G.S., 1998, Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions, Vol. 104, pp. 145-167.
9. McCartney, K. and Nicol, F., 2002, Developing an adaptive control algorithm for Europe, Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 623-635.
10. Haldi, F. and Robinson, D., 2009, On the behaviour and adaptation of office occupants, Building and Environment, Vol. 44, pp. 2378-2395.
11. Yun, G.Y., Kong, H.J., and Kim, J.T., 2011, A field survey of occupant and air-conditioner use patterns in open plan offices, Indoor and Built Environment, Vol. 20, pp. 137-147.
12. Yun, G.Y. and Steemers, K., 2010, Night-time naturally ventilated offices : statistical simulations of window-use patterns from field monitoring, Solar Energy, Vol. 84, pp. 1216-1231.
13. Yun, G.Y. and Steemers, K., 2008, Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer, Building and Environment, Vol. 43, pp. 1471-1482.
14. Yun, G.Y., Steemers, K., and Baker, N., 2008, Natural ventilation in practice : Building design, occupant behaviour and thermal performance, Building Research & Information, Vol. 36, pp. 608-624.
15. Bae, C. and Chun, C., 2009, Research on seasonal indoor thermal environment and residents' control behavior of cooling and heating systems in Korea, Vol. 44, pp. 2300-2307.
15. Yun, G.Y., Kong, H.J., and Kim, J.T., 2012, The

- effect of seasons and prevailing environments on adaptive comfort temperatures in open plan offices, *Indoor and Building Environment*, Vol. 21, No. 10, pp. 41-47.
16. Karson, F. et al., 2007, Measured and predicted energy demand of a low energy building : important aspects when using building energy simulation, *Building Services Engineering Research and Technology*, Vol. 28, pp. 223-236.
17. Norford, I.K. et al., 1994, Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a low-energy office building : insights from a reconciliation based on the DOE-2 model, *Energy and Buildings*, Vol. 21, pp. 121-131. 