

# 실내 열쾌적 평가를 위한 새로운 개념 - Adaptive model

세계적인 유가 상승과 교토의정서 발효 등에 따라 건축환경분야에서는 기존의 열환경 쾌적기준 (ASHRAE Std.55, ISO 7730 등)에 대한 재고의 필요성이 대두되고 있다. 본 고에서는 이러한 흐름에 따라 최근 많은 관심을 불러일으키고 있는 Adaptive Model에 관하여 그 개념과 개요를 간략히 소개하고자 한다.

전 정 윤

연세대학교 주거환경학과(chun@yonsei.ac.kr)

## Introduction

육중하고 삭막한 현대의 건물들은 온실가스를 방출하고 동식물의 서식지를 파괴하여 건물 주변 지역 뿐만 아니라 지구 전체의 환경을 파괴하고 있다 (Barnett and Browning 1995). 온열환경에 있어서 우리가 “쾌적하다”고 느끼는 상태로 건물을 냉·난방하고 유지하기 위해 소비하는 에너지는 이러한 환경파괴에 심각한 영향을 끼치고 있다. 대부분의 선진국에서 난방, 냉방, 환기 등의 공기조화에 사용되는 에너지는 전체 에너지 소비량 중 가장 큰 비율을 차지하고 있으며(Griffiths et al 1988), 개발도상국들도 이러한 추세에 빠른 속도로 접근하고 있다(Ang 1986, Abro 1994). 이는 특히 아시아 태평양의 열대 기후 지역의 국가들이 빠르게 발전하면서 자연환기를 통해 냉방을 피하던 전통적 라이프스타일에서 벗어나 냉방기에 의존하게 된 것과도 관련이 깊다. 이러한 변화는 건물을 설계하는 방식뿐만 아니라 건물 사용자들의 냉방에 대한 기대와 행동패턴도 변화시키고 있다(Lovins 1992).

선진국의 경우 대부분의 사람들은 90% 이상의 시간을 실내에서 보내므로, 실내환경의 질은 사람들의 쾌적감이나 건강, 그리고 웰빙에 대한 전반적인 감각에 지대한 영향을 미치게 된다. 현재 우리는 실내 환경을 쾌적하게 유지하기 위해서 실내기후를 공조 제어를 통해 일정하고 균일하게 유지하고 있다. 공

조제어에서 기준이 되는 쾌적환경의 지표들은 음식을 섭취하여 그것을 체내에서 연소시켜 생산되는 열량(대사산열량)과, 호흡 및 체표면으로부터의 대류, 방사, 증발에 의한 방열량이 평형을 이룬다는 인체 열수지모델을 바탕으로 하여, 주로 미국에서 대학생들을 대상으로 인공환경실의 정상상태 하에서 측정된 피험자의 반응에 기초한 것이다(ASHRAE 1992, ISO 1994). 이러한 지표들이 일상생활의 다양한 변인들 속에서 인간의 반응을 표현해 줄 것이라고 기대하는 것이다.

하지만 현장조사에서 피험자들이 쾌적하다고 대답한 조건의 범위는 이러한 지표들이 예측한 범위보다 훨씬 넓게 나타났다. 이것은 부분적으로는 지표들이 의복저항치나 대사량과 같은 현장에서는 정확히 판단하기 힘든 데이터를 필요로 하기 때문이며, 또한 피실험자의 쾌적감과 실험이 행해진 기후조건 사이에서 행해진 ‘어댑티브(adaptive) 행동’ 사이의 피드백 작용의 결과이기도 하다(Nicol and Humphreys 2002). 이렇게 인간은 자기 자신을 열적으로 쾌적하게 유지하기 위해 스스로 조절할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 이것을 온열환경에 대한 기존의 Fanger 등에 의해 제안된 열평형모델의 개념과 달리 ‘어댑티브 모델(adaptive model)’이라 한다. 이것은 첫째, 사람들이 환경과 상호작용하는 방법과 둘째, 자신의 행동을 조절하는 것, 또 이전에 경험한 온열 환경이 사람들의 온열환경에 대한 기대치나 기호에



영향을 주기 때문에 일어난다. 온열환경에서의 '어댑티브 이론(adaptive theory)'에 대한 관심과 연구는 1970년대 중반에 일어난 오일쇼크 때문에 시작되었으나, 최근에는 지구의 기후변동과 여기에 미치는 인간활동의 영향과 관련된 관심이 고조되면서 다시 활발하게 연구되고 있다. 어댑티브 이론은 온열환경의 쾌적지표나 환경제어 알고리즘, 퍼스널 공조, 거주자의 수용쾌적범위, 에너지 소비 저감, 기후나 환경에 반응하는 건물 디자인 등 많은 부분의 발전에 기여할 수 있다.

### Defining the adaptive process

PMV, ET\*, SET\*와 같은 열수지모델에 기초한 열환경 쾌적지표들은 다음과 같은 논리를 지지한다.

physics → physiology → subjective discomfort

즉, 온도, 습도, 기류속도와 같은 물리적 환경요인들에 의해 춥다든지 덥다든지 하는 인간의 생리적 인식이 결정되며, 이것이 거주자의 주관적인 만족 혹은 불만족에 다시 결정적 요인이 된다는 것이다.

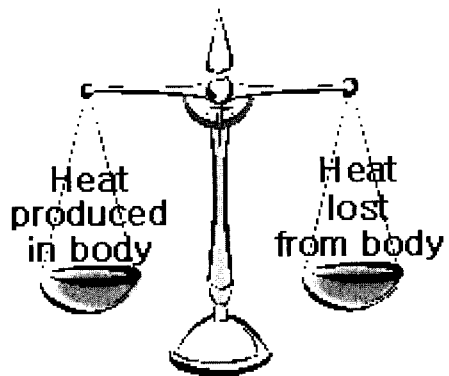
하지만 어댑티브 이론에서는 이러한 물리적, 생리적 요인 외에도 다른 요인들, 예를 들면, 피실험자의 인구통계학적 요인(성별, 연령, 경제수준 등), 상황적 요인(건물 설계, 건물 기능, 계절, 기후 등), 인식(태도, 기호, 기대 등) 등과 같은 요인들도 모두 영향을 끼친다고 본다(McIntyre 1982, Baker 1993, Baker and Standeven 1994, Oseland 1994a,b, Griffith et al 1988).

'적응(adaptation)'이라는 말은 광범위한 의미에서 보면 반복되는 환경자극에 대한 유기체 반응의 점차적인 감소로 표현될 수 있다. '적응'이라는 것은 새로운 환경에 순응하는 모든 생리적 메커니즘과 함께, 거주자 집단의 요구에 "딱 알맞은" 실내기후를 형성하기 위해 수행하는 행동과정과 심리과정을 포함한다. 이와 같은 정의를 바탕으로 '적응'을 세가지 범주로 나눌 수 있다(Folk 1974, Goldsmith 1974, Prosser 1958, Clark and Edholm 1985).

1. 행동의 조정(Behavioral Adjustment)에 의한 적응 : 사람이 의식적으로 혹은 무의식적으로 행하

는 모든 조절을 의미한다. 행동의 조정에 의한 적응은 다시 세 가지의 하위범주로 나눌 수 있다.

- 1) 개인적 조정(Personal Adjustment) : 의복량, 활동량, 자세, 따뜻하거나 차가운 음료나 음식을 섭취하는 것 등 개인적 변수를 조절함으로써 주변환경에 자신을 적응시켜 쾌적함을 느끼도록 하는 것이다.
  - 2) 기술적 혹은 환경적 조정(Technological or environmental adjustment) : 주변환경을 조절할 수 있는 경우라면 환경 자체를 조절함으로써 쾌적한 환경을 만들 수 있다. 창문개폐, 차양개폐, 환기팬 사용, 난방, 공기 취출구를 막는 것, 그 외의 다른 HVAC 시스템을 조작하는 것 등을 예로 들 수 있다.
  - 3) 문화적 조정(Cultural adjustment) : 활동이나 의복 규정 등을 조절하는 것이다.
2. 생리적 조정(Physiological Adjustment)에 의한 적응 : 어떠한 온열환경에 노출되었을 때 나타나게 되며, 그러한 노출로 인해 나타나는 긴장을 점차적으로 감소시키는 생리적 반응의 변화를 말한다. 생리적 조정에 의한 적응은 다시 두 개의 하위범주로 나뉜다.
- 1) 유전학적 적응(Genetic adaptation) : 개인이나 집단의 유전적으로 습득되는 부분의 변화를 말한다. 이것은 개인의 일생이라는 장기간을 단위로 하여 이루어지는 발달이다.
  - 2) 새 환경에의 순응(Acclimation or Acclimatization) : 단독 혹은 결합적인 온열환경의 스트



[그림 1] 인체의 열평형

레스 요인에 의하여 일어나는 체온조절 시스템의 변화로서, 수일이나 수주라는 비교적 단 기간동안에 일어난다.

3. 심리적 조정(Psychological Adjustment)에 의한 적응 : 실내기후에서 심리적 차원의 적응이라는 것은 감각되는 정보에 대한 지각의 변화를 말한다. 실내기후에 대한 개인의 경험이나 기대는 현재의 실내기후에 대한 개인의 지각에 직접적인 영향을 끼친다. 이렇게 실내기후에 대한 기대치가 낮아지는 것은 정신물리학에서 말하는 습관화 개념과 연관이 있다. 습관화 개념이란 환경적 스트레스 요인에의 반복적이고 상승적인 노출은 환경에 대한 감각의 긴장을 완화시킨다는 것이다(Glaser 1966, Frisancho 1981).

### A conceptual model of adaptation – feedback loops

어댑티브 모델에서는 인공기후실의 실험에서처럼 거주자가 주어진 환경을 수동적으로 받아들이는 객체가 아니라, 피드백 루프(feedback loops)라는 시스템을 통해 개인과 환경 사이의 상호작용의 주체 역할을 한다는 것을 중요한 전제로 하고 있다. 하지만 어댑티브 모델이 기존의 열수지 모델을 부인하는 것은 아니며, 좀 더 효과적인 실내기후 예측이 가능하도록 보완하는 것이다. 열수지 모델에서도 부분적으로는 어댑티브 행동에 관한 변인(의복량, 대사량 등)을 포함하고 있지만 생리적 적응과 심리적 적응은 완전히 배제하고 있다.

반대로 어댑티브 모델에서는 사람들이 어떻게 그들이 처한 환경과 상호작용하면서 환경을 변화시키고, 경험과 계획, 의향 등이 사람들이 환경을 지각하는데 어떻게 영향을 미치는지를 밝혀내는데 중점을 두고 있다(Canter 1983, Wohlwill 1974, Helson 1964, Veitch and Arkkelin 1995, Kaplan and Kaplan 1982). 어댑티브 가설에 의하면 그 시점, 그 공간 내에서의 실제 온열환경과 사람들이 가지고 있는 실내기후에 대한 기대치 사이에 조화가 이루어질 때 사람들은 실내기후에 대해 만족감을 느끼게 되며, 사람들의 실내기후에 대한 기대치는 현재와 과거의 온열환경에서의 경험과 문화적, 기술적인 요인

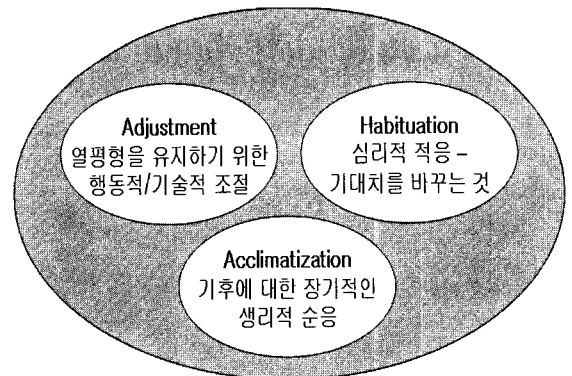
에서 기인한다(Auliciems 1981, 1989, Nicol 1993, de Dear 1994). 그림 2의 다이어그램은 Auliciems에 의해 고안된 것으로 건물내 거주자의 문화, 기후, 그리고 공조에 대한 기대에 따른 쾌적감과 만족감의 관계를 도출하고 있다.

이러한 많은 변인들 때문에 어댑티브 모델을 적용한 건물의 거주자는 ASHRAE 55(1992)와 ISO 7730(1984, 1994)에서 권장하는 범위보다 더 넓은 범위에서 쾌적감을 느낄 수 있다.

### Behavioral feedback - adjustment

사람들이 쾌적함을 유지하기 위해 하는 능동적인 역할에 가장 큰 부분을 차지하는 것이 행동적 조정이다. 건물의 사용자가 실내기후와 어느 정도의 행동적 상호작용을 할 수 있는가 또는 하고 있는가 하는 것은 건물의 환경요소들과 깊은 관계가 있으며, 이것은 어댑티브 모델의 개발과 적용에 매우 밀접한 관련이 있다. 따라서 “어댑티브 기회(adaptive opportunity)”라는 것은 건물이 사용자에게 어댑티브 행동을 할 수 있는 여지를 제공하느냐의 문제이며, 이는 다음의 결과로 나타난다.

- 1) 건물의 특성 : 창문은 개폐가 가능한 것인가? 건물 사용자의 위치가 창문에서 얼마나 멀리 떨어져 있는가? 사무실의 평면 계획이 개인의 사무실로 나누어져 있는가 아니면 개방형인가?
- 2) 건물의 공조 특성 : 중앙 공조 서비스를 제공하는가, 각각 워크스테이션에서 개별 공조를 하는가?
- 3) 건물 내 조직의 사회적 특성 : 유니폼이 있는가



[그림 2] 실내기후 적응의 세 가지 구성요소



아니면 사복을 착용하는가? 직원들은 근무시간 동안 자신의 워크스테이션 내에 머물러있어야 하는가?

어댑티브 기회와 반대로 온열환경을 조절하는 것에 한계가 있는 경우가 있다. 이러한 한계는 다음과 같이 5가지로 크게 나눌 수 있다(Nicol and Humphreys 1972, Humphreys 1994a).

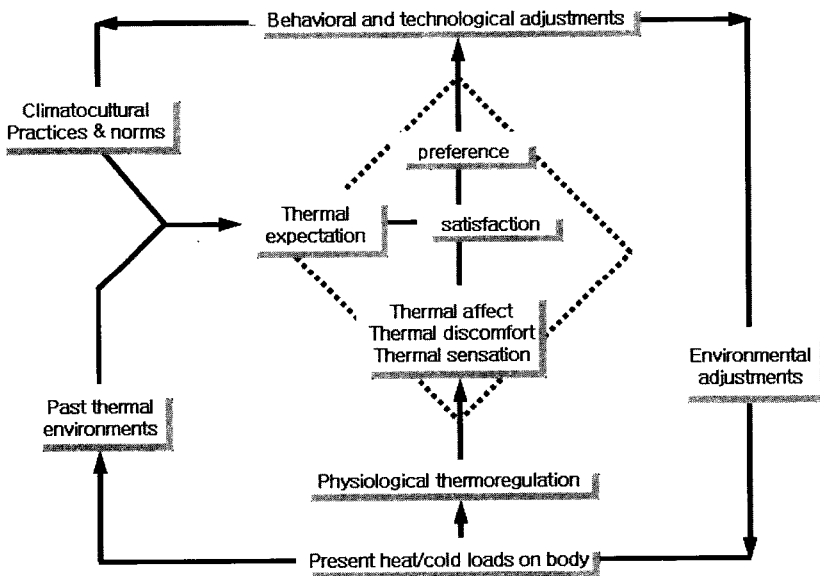
- 1) 기후에 의한 제한 : 아주 덥거나 아주 추운 극단적인 기후지역에 있는 건물들은 온화한 기후의 건물보다 주위 환경에 배타적일 수밖에 없으며, 따라서 건물의 사용자들도 보다 적은 어댑티브 기회를 가지게 된다.
- 2) 경제적 제한 : 많은 국가에서 건물의 온열환경 조절비용은 투자비용과 유지비용에서 사용할 수 있는 예산을 고려하게 된다.
- 3) 사회적 관습이나 법에 의한 제한 : 몇몇 국가에서는 기후나, 종교 등에 의해서 의복 양식이 제한되는 경우가 있다. 정부의 에너지 정책이나 온실가스 방출량의 제한 등에 의해서 온열환경을 조절하는 행위의 자유가 제한된다.
- 4) 직업이나 직무에 의한 제한 : 어떤 특정 직업의 경우에는 고정된 업무환경에서 열적 쾌적감에

우선해서 요구되는 사항들이 있다.

- 5) 건물의 설계에 의한 제한 : 건물이나 HVAC 시스템의 설계, 개인적 환경 조절의 가능성 여부, 차양의 효율성, 창의 위치와 크기의 적절성 등을 말한다.

온열환경에 대한 사람의 반응이 가능한 건물과 모든 어댑티브 피드백이 조작적으로 일어나는 건물을 결정적으로 구분할 수 있게 해주는 것이 어댑티브 기회의 개념이다. 어댑티브 기회의 개념은 연속적인 것으로 봐야 하는데, 한쪽 극단은 연구자가 온도, 습도, 기류속도 등의 물리적 환경을 측정하는 동안 지시된 대로 입고, 정해진 대로 행동하는 인공기후실의 경우이고, 반대쪽 극단은 의복량과 활동량이 모두 자유이고 개폐가 가능한 창문에서부터 개인공조까지 모든 범위의 환경조절이 가능한 일인실의 경우이다.

행동적 조절은 온열환경에 대한 가장 즉각적인 피드백 현상이다. 쉽게 말해서 어떤 사람이 어떤 환경에서 불쾌하다고 느끼게 되면 그 환경을 조절하는 행동을 하게 된다는 것이다. 열수지 모델에서의 최종 단계(불쾌감을 자각하는 단계)가 어댑티브 모델에서는 피드백의 시작이 된다.



[그림 3] 열적 지각(thermal perception)과 “어댑티브 모델”

**Physiological Feedback - acclimatization**

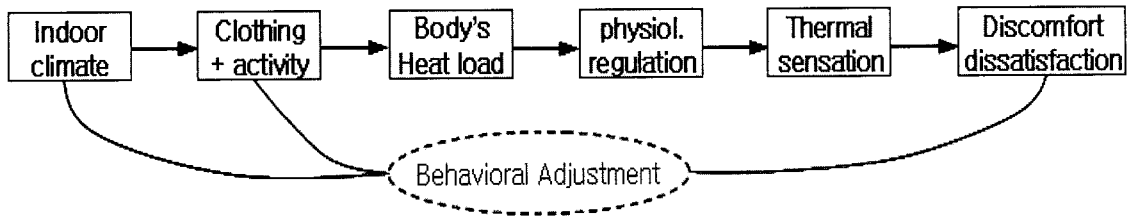
추위에 대한 생리적 순응은 주로 몸의 떨림으로 인한 피부온의 유지와 인체내부열 생산의 증가로 이루어진다(Frisancho 1981). 반면에 추위에 대한 adaptation은 위에서 설명한 바와 같이 주로 환경이나 자기 자신과 관련된 변인에 대한 행동으로 나타난다(Clark and Edholm 1985). 추위와 반대로 더위 스트레스를 받게 되면 주어진 발한량을 증가시키는 생리적 반응을 보이게 된다. 더위에 순응된 사람은 동일한 양의 열부하를 받으면서 순응되지 못한 사람에 비해 피부의 발한량이 많아진다. 또한 더위에 순응된 사람은 심장박동수의 감소, 혈류량의 증가, 말초부 혈류의 증가 등 여러 가지 심장혈관의 반응을 보인다(Fox 1974, Bean and Eichna 1943, Hardy 1961, Wyndham 1970). 쉬고있거나 착석상태의 작업 하에서 더위에 대한 순응은 주로 더위에 노출된 지 1주일 만에 이루어지지만, 추위에 대한 순응이 이루어지기까지는 더 오랜 시간이 필요하다(Bruce 1960).

순응은 자율신경계의 무의식적인 조절에 의한 무의식적인 피드백 현상이다. 이것은 사람들의 생리적 체온조절에 직접적으로 영향을 끼친다. 생리적 순응을 개략적으로 나타내면 그림 5와 같다.

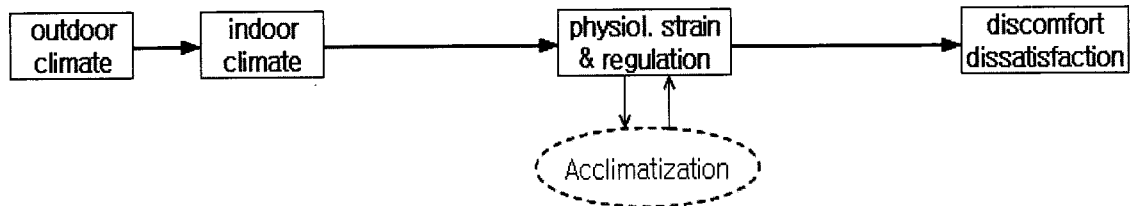
**Psychological feedback - habituation and expectation**

심리적 적응은 인식 변인과 문화 변인의 영향을 포함하며, 열적 지각을 변화시키는 습관화와 기대치의 범위를 설명한다. 이러한 개념은 "적응단계 이론(adaptation-level theory)" (A-LT)으로 발전하였다. A-LT는 최적상태로부터의 편차로부터 발생하는 환경 스트레스에 따른 자극정도나 적응정도의 개념을 포함하고 있다. 환경을 평가하는데 있어서 기준이 되는 과거의 환경에 대한 노출이나 행동에서 이러한 최적 적응정도가 도출된다(Wohlwill 1974, Helson 1964). 환경에 대한 지각(知覺)의 특징과 함께 지각(知覺)과 환경자극, 기억, 인식 사이의 관계, 그리고 건물종류나 계절과 같은 상황적 요인은 건물 내에서의 열적 쾌적감을 이해하는데 도움을 준다(de Dear et al 1991c, Helson 1971, Ittelson 1973, Auliciems 1981, Russell and Ward 1982).

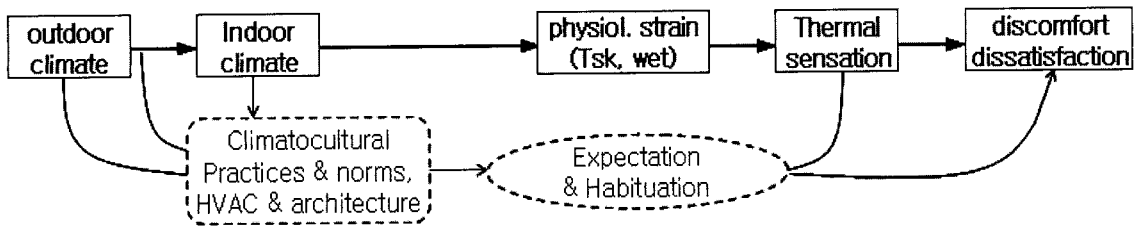
McIntyre(1980)는 초기의 연구에서 열적 쾌적감에서의 기댓값(expectation)의 역할을 "완벽하게 쾌적하지 않은 온도에 대한 어떤 사람의 반작용은 그 사람의 기댓값, 개인적 특성, 그리고 그 사람이 그 순간에 하고 있는 모든 다른 것에 의해 좌우된다"고 하였다. 지금까지 설명한 세가지의 어댑티브 메커니즘



[그림 4] Behavioral feedback loop



[그림 5] Physiological feedback loop



[그림 6] Psychological feedback loop

중에서 심리적 적응은 가장 덜 연구된 분야이지만, 온열환경에 대한 사람의 반응에서 측정된 값과 예측된 값 사이의 차이를 설명하는데 가장 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 이러한 사실은 특히 실험실, 주택, 사무소 건물과 같은 다른 환경이나 공조를 하는 건물과 하지 않는 건물에서의 반응을 비교할 때 적용될 수 있다(Fishman and Pimbert 1982, Heijs and Stringer 1988, Bush 1990, de Dear et al 1991c, Rowe et al 1995, Oseland 1995).

어댑티브 모델에서 기대값과 습관화는 실내·외에서 개인이 현재 경험하고 있는 온열환경이나 예전에 경험했던 온열환경의 영향을 받는다. 이것은 다시 현재의 온열환경이 수용할만한가라는 열적 감각과 인식에 직접적으로 영향을 미친다. 이것을 개략적인 그림으로 나타내면 그림 6과 같다.

### Conclusion

지금까지 설명한 내용을 간략하게 줄여보면 다음과 같다. 현재 전세계적으로 널리 사용되고 있는 인체 열수지 모델을 바탕으로 한 온열환경 지표인 ISO 7730과 ASHRAE Standard 55는 쾌적영역 범위를 좁게 설정하게 함으로써 과잉난방 또는 과잉냉방을 초래할 가능성이 있으며, 이것은 에너지 소비뿐만 아니라 온실가스의 방출과 깊은 관련이 있다. 이러한 배경에서 1970년대 초에 어댑티브 이론이 소개되었는데, 어댑티브 이론은 간단하게 말해서 건물의 사용자에게 그들의 환경에 적응할 수 있는 권한이 주어지면 ISO 7730이나 ASHRAE Standard 55에서 권

장하는 쾌적범위보다 더 넓은 범위에서도 거주자들은 쾌적하게 느끼게 된다는 것이다. 여기에서 말하는 환경에 적응할 수 있는 권한이라는 것은 위에서 설명한 행동적 적응, 생리적 적응, 심리적 적응을 모두 포함한다.

지구온난화와 지구환경문제가 날로 심각해지고 있는 지금의 상황에서 adaptive이론은 온열적쾌적감을 바탕으로 한 공조제어의 바람직한 방향을 재고하게 하여주며, Globalism과 더불어 Localism을 바탕으로 한 연구의 필요성을 제시하여주고 있다.

### Reference

1. de Dear, R.; Brager, G.; and Cooper, D. 1997. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. Final Report. ASHRAE RP-884. "Results of Cooperative Research between the American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., and Macquarie Research, Ltd."
2. McCartney, K.J.; and Nicol, J.F. 2002. Developing an adaptive control algorithm for Europe. Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 623-635.
3. Nicol, J.F.; Humphreys, M.A. 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 563-572. (S)