CHAPTER 8

Passive Cooling

8.1 INTRODUCTION TO COOLING

여름철(연중 지나치게 온도가 높은 기간)의 열 쾌적을 위해서 세 가지 단계의 냉방이 가능하도록 건물을 설계해야한다.

첫 번째 단계는 'Heat Avoidance'(열의 회피)이다. 이 단계에서 설계자는 건물에서의 모든 열 획득을 최소화할 수 있도록 해야 한다. 이 단계의 방안들은 차양이나 건물의 향, 색깔, 식생, 단열재의 사용, 주광, 내부 열의 조절 등의 적용을 포함한다. 이를 포함한 모든 Heat Avoidance는 방안은 이 책 전반에 걸쳐 설명되고 있다.

Heat Avoidance만으로는 여름 내내 온도를 낮게 유지하기 어렵기 때문에 Passive Cooling(자연 냉방)이라는 두 번째 단계의 해결책이 사용되어야 한다. 자연냉방은 Heat Avoidance만으로 열의 획득을 최소화했던 것과는 달리 실질적으로 온도를 낮춘다. 자연냉방은 쾌적대를 높은 온도로 이동시킬 수 있도록 환기의 방법을 사용한다. 자연냉방의 주된 방법이 이 장에서 논의될 것이다.

많은 기후에서 열쾌적을 유지하기 위해 Heat Avoidance나 자연냉방으로는 충분치 못할 때가 있다. 이러한 이유로 화학적 장비들을 이용하는 세 번째 단계의 방안이 필요하다. 이곳에 설명된 합리적인 설계 과정에 따라 이 장비들은 Heat Avoidance와 자연냉방으로 이루지 못했던 냉각만을 수행해야 하며 따라서 극히 소량만을 사용해야하며 적당량의 에너지를 사용해야한다.

8.2 HISTORICAL AND INDIGENOUS USE OF PASSIVE COOLING

때때로 정의를 사용하는 것보다 예를 드는 것이 개념을 설명하는데 더 적합할 때가 있다. 뒤에 나오는 역사적으로, 고유의 방법으로 지어진 건물의 예는 자연냉방이 무엇을 의미하는지의 개념을 보여준다. 여러 가지 요소들이 건물의 특징을 결정하지만 여기서는 열적 요소만이 다루어진다.

자연냉방은 자연 난방보다 훨씬 더 기후와 연관이 있다. 따라서 덥고 건조한 기후와 덥고 습한 기후에서의 자연냉방 방법은 차이점이 있다.

FIGURE 8.2a
Hot and dry climates typically have buildings with small windows, light colors, and massive construction. Thira, Santorin, Greece. (From Proceedings of the International Passive and Hybrid Cooling Conference, Miami Beach, FL, Nov. 6–16, © American Solar Energy Society, 1981.)

종종 덥고 건조한 지역에서는 드물게 난 작은 창문과 밝은 색의 외피, 벽돌이나 석조 등의 육중한 구조를 지닌 건물을 볼 수 있다(그림 8.2a). 이 육중한 매개체는 열이 벽을 통과하는 속도를 지연시킬 뿐 아니라 낮에는 heat sink의 역할을 한다. 덥고 건조한 기후에서는 주간에 높은 범위의 온도를 가지며 낮에는 추워진다. 따라서 이 매스는 밤 동안 냉각되고

다음날 낮에 다시 heat sink의 역할을 한다. heat sink의 용량이 역부족이 되지 않게 하기 위해서 작은 창문과 밝은 색의 외피가 열의 획득을 최소화 한다. 주간에는 셔터를 닫아 열 획득을 감소시키고 밤에는 셔터를 열어 야간 환기가 잘 되도록 한다.

도시환경이나 바람이 거의 없는 장소에서는 환기를 최대화하기 위해 windscoop을 사용한다. windscoop은 이미 몇천년 전부터 이집트에서 사용되었고(그림 8.2b)

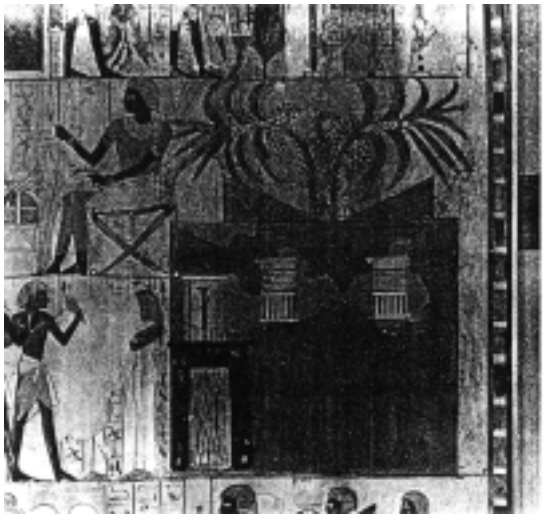


FIGURE 8.2b
Ancient Egyptian houses used windscoops to maximize ventilation. (Replica of wall painting in the Tomb of Nebamun, circa 1300 BC, courtesy of the Metropolitan Museum of Art, New York, #30.4.97.)

오늘날 중동에서도 여전히 찾아볼 수 있다. Pakistan의 Hyderbad에서와 같이 강한세력을 가진 바람이 부는 방향이 있으면 windscoop은 같은 방향을 향하게 된다(그림 8.2c).

FIGURE 8.2c
The windtowers in Hyderabad, Pakistan, all face the prevailing wind.

세력을 지닌 바람의 특정 향이 없는 다른 지역(Persian Gulf에 있는 Dubai등과 같은)에서는 많은 개구부를 지닌 windtower(풍탑?)가 사용된다. 이 사각형의 탑들은 대각선의 벽으로 나뉘어져 네 개의 다른 방향을 향한 수직통로를 만들어낸다(그림 8.2d).

windtower에는 원치 않는 환기가 이루어지지 않도록 막는 셔터가 있다. 건조한 기후에서

이들은 실내로 들어오는 공기를 냉각시키기 위한 증발의 수단으로서도 사용되는데 windtower속에 분수나 작은 개울 등을 이용하거나 다공성의 도기를 그 아랫부분에 놓기도 한다(그림 8.2e).

FIGURE 8.2d
The windtowers in Dubai, United Arab Emirates, are designed to catch the wind from any direction. (Photograph by Mostafa Howeedy.)

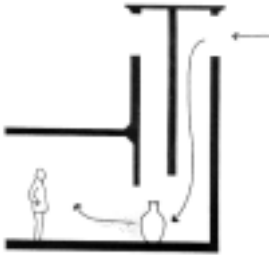


FIGURE 8.2e
Some windtowers in hot and dry areas cool the incoming air by evaporation.

mashrabiya(이집트의 나무격자)는 중동 아라비아에서 wind-catching의 수단으로 널리 사용하는 방법 중의 하나이다(그림 8.2f). 이 베이창(bay window-내민창)들은 섬세한 나무 스크린이 태양빛은 막고 미풍은 통과할 수 있도록 하기 때문에 앉아서 쉬거나 잠자기에 쾌적한 장소였다. mashrabiya의 물이 담긴 곳에 있는 다공성 도기에서 이루어지는 증발작용은 식수와 집안을 냉각시킨다. mashrabiya는 또한 여성이 외부의 눈에 잘 띄지 않고도 바깥세상의 활동들을 엿볼 수 있는 문화적 요구도 충족시키는 것이었다.

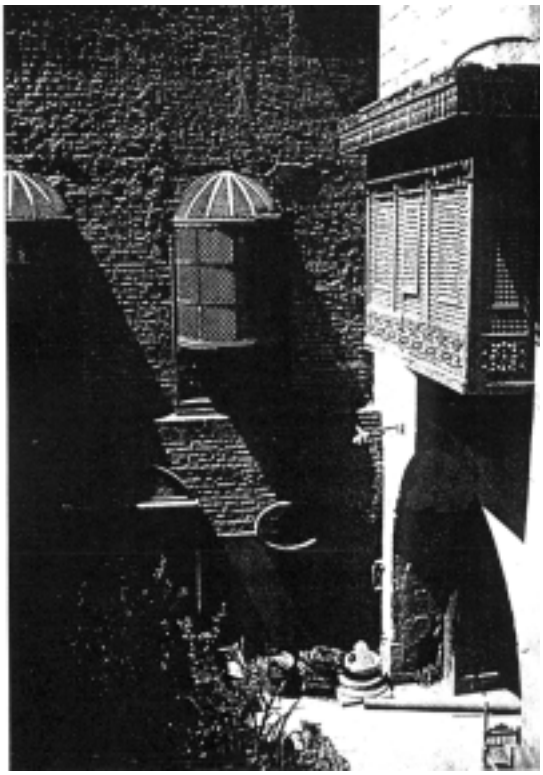
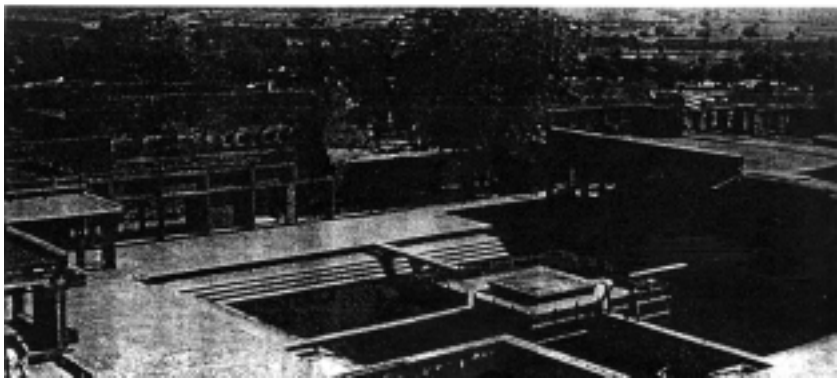


FIGURE 8.2f
Mashrabiya is a screened bay window popular in the Arabic Middle East. It shades, ventilates, and provides evaporative cooling. Cairo, Egypt. (Photograph by Mostafa Howeedy.)

습도가 낮은 장소에서는 증발 냉각이 효과적으로 이루어진다. 분수, 연못, 물이 흘러내리는 벽, 식물에서 이루어지는 증발작용 등은 모두 증발냉각에 사용될 수 있다(그림 8.2g). 증발

작용이 실내나 실내로 흘러들어오는 공기에서 발생한다면 최적의 효과를 얻을 수 있다. India에서는 실내로 유입되는 공기를 냉각시키기 위하여 개구부에 젖은 매트를 걸어두는 것이 일반적이다. 인도의 궁전에는 연못, 개울, 폭포 등이 있는데 이 때문에 더 효과적인 실내 냉방이 가능하게 된다.

FIGURE 8.2g
In the evening the orchestra platform provided entertainment while the water cooled the air at the Panch Mahal Palace at Fathepur, India. (Photograph by Lesa Choudhary.)



공기가 주로 건물의 안마당에서 들어온다면 마당을 증발냉각 시키는 것이 건물의 냉방을 위해서 더 효과적이다(그림 8.2h). 좁고 깊은 마당이나 아뜨리움 등에서는 낮 동안 대부분 그림자가 지게 되므로 덥고 건조한 기후에서 이점을 갖는다. 마당에 의해 프라이버시와 안전성이 보장됨에도 덥고 습한 기후에서는 필수적인 cross ventilation에 방해가 되므로 많이 사용하지 않는다.

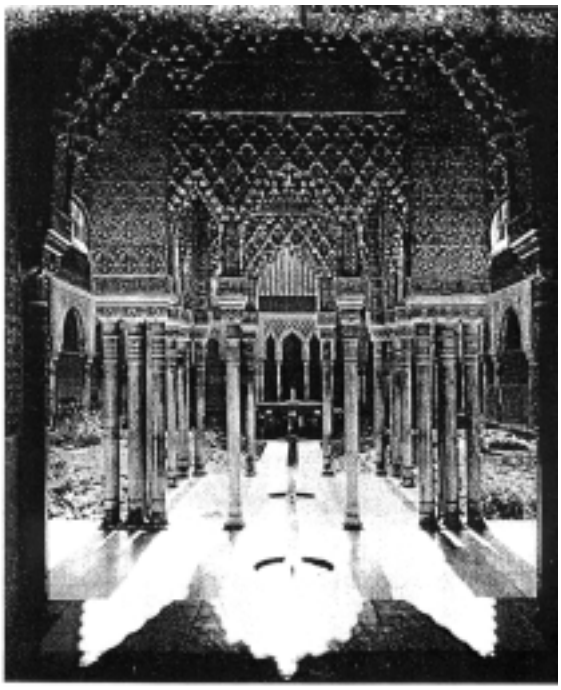


FIGURE 8.2h
A small shaded courtyard was cooled by a series of fountains. Court of the Lions, Alhambra, Spain. (Courtesy of ARAMCO World Magazine.)

Massive한 돔 구조 역시 덥고 건조한 지역에서 유리하다. 게다가 열적인 면에서의 두 가지 다른 이점을 갖는다. 복사난방은 최소화 되고 복사냉방은 최대화 된다. 또한 돔은 높은 공간으로 공기를 성층화 시켜 거주자가 상대적으로 시원한 공기가 있는 낮은 지역에서 거주할 수 있게 된다(그림 8.2i).띠로는 통풍구가 그 꼭대기에 위치해 뜨거운 공기가 밖으로 빠져나갈 수 있도록 한다(그림 8.2j). 돔 중에서 가장 극적인 예는 로마의 판테온이다. 판테온의 'oculus'는 빛은 들어오게 하고 더운 공기는 빠져나갈 수 있게 한다. 이와 같은 개념이 Expo 67'의 U.S. Pavillion에서 사용되었다. 지오데식 돔의 상부 패널은 더운 공기가 빠져나가도록 원형의 개구부를 가지고 있다(그림 7.15b).

FIGURE 8.2i
The trulli are conical stone houses in Apulia, Italy. Their large mass and high ceilings, with the resultant stratification of air, make these houses fairly comfortable. (From Proceedings of the International Passive and Hybrid Cooling Conference, Miami Beach, FL, Nov. 4–16. © American Solar Energy Society, 1981.)

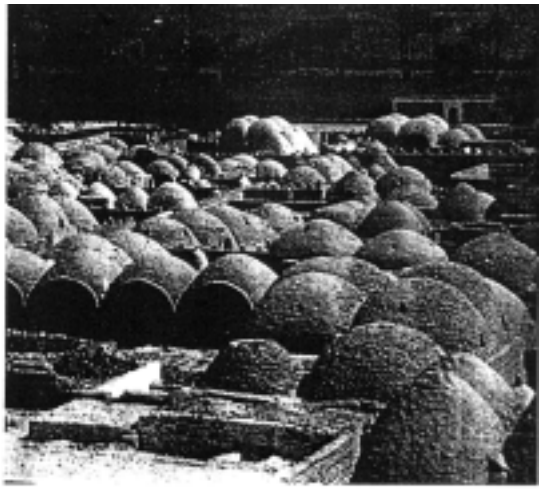


FIGURE 8.2j
Small domes made of sun-dried mud bricks work well in very hot and dry climates as found in Egypt. Small vents allow the hot air to escape and a small amount of light to enter. Narrow alleys allow buildings to shade each other. Small courtyards provide outdoor sleeping areas at night. (Courtesy of the Egyptian Tourist Authority.)

많은 양의 토양이나 암석들은 덥고 건조한 기후에서의 극단적인 온도를 막는 효과적인 장벽의 역할을 한다. 깊은 토양은 대개 그 지역의 연평균 온도(여름동안 토양이 heat sink의 역할을 충분히 할 수 있을 만큼 시원한)와 비슷하다. earth sheltering은 Chapter13에서 더 자세히 설명되어진다.

Turkey의 Cappadocia에서는 지난 2000년동안 volcanic tuffa cone속에 있던 수천개의 주거지와 교회 등이 발굴되었다(그림 8.2k). 이곳에서는 극심한 추위와 더위로부터 효과적으로 보호받을 수 있기 때문에 오늘날에도 여전히 많은 사람들이 거주하고 있다.

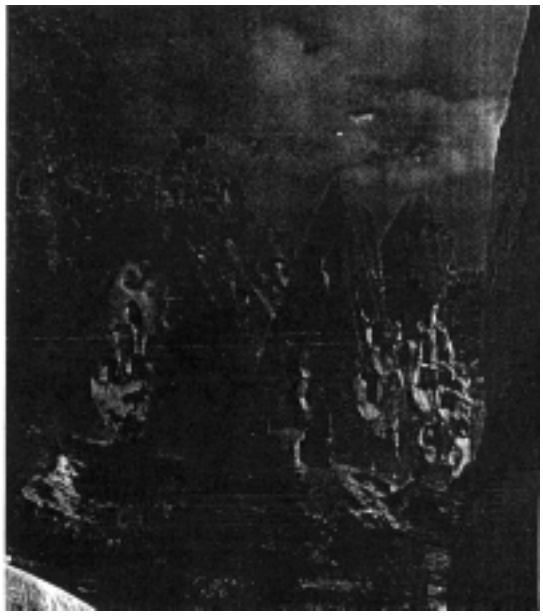


FIGURE 8.2k
Dwellings and churches are carved from the volcanic tuffa cones in Cappadocia, Turkey. (Photograph by Tarik Ozgen.)

구조체는 땅과 접촉함으로서 냉방효과를 얻기 위해 완벽하게 earth sheltered 되어야 할 필요는 없다. Colorado의 Mesa Verde절벽에 있는 거주지들을 암벽과 중량 벽의 heat sink열용량을 모두 사용한다. 남향 절벽의 차양은 여름철에 그늘을 제공한다(그림 8.2l).

FIGURE 8.2l
The cliff dwellings at Mesa Verde, CO, benefit from the heat sink capacity of the stone walls and rock cliff.

덥고 습한 기후에서는 자연 환기에 중점을 둔 다른 종류의 건물을 찾아볼 수 있다. 매우 습한 기후에서는 매스가 불리하며 경량구조가 적절하다. 건조 기후에서보다 태양빛이 그다지 세지 않더라도 습도가 적절치 못하기 때문에 어떠한 추가적인 열도 상당히 불쾌하게 느껴진다. 따라서 습도가 높은 지역에서는 건물이 큰 창문과 큰 차양을 가지며 적은 매스로 이루어져 있음을 볼 수 있다(그림 8.2m). 이 건물들은 좀더 많은 바람을 얻고 지표면 근처의 습기의 영향을 최소화 하고자 stilt(지주, 버팀대, 받침대)를 설치한다. 높은 천정은 송기의 성층화를 유도하여 뜨거운 공기가 밖으로 나갈 수 있도록 한다(그림 1.2c).

FIGURE 8.2m
These "chickees," built by the Indians of southern Florida, are well suited to the hot and humid climate by maximizing ventilation and shade while minimizing thermal mass. The diagonal poles successfully resist hurricane winds.

일본은 대부분의 지역이 덥고 습한 여름기후를 갖는다. 자연 환기를 최대화하기 위하여 일본의 전통가옥은 가구식 구조를 가지며 이 방식에서는 여름철에 이동이 탈부착이 가능한 종이패널 벽을 사용할 수 있다(그림 8.2n). 큰 처마지붕은 이 패널들을 보호하며 'engawa'라 불리는 외부공간을 만들어낸다. 큰 박공구조의 환기구는 건물을 통하는 환기를 증가시킨다(그림 8.2o).

FIGURE 8.2n
Ventilation is maximized by movable wall panels in traditional Japanese houses. (Courtesy of Japan National Tourist Organization.)

FIGURE 8.2o
The movable wall panels open onto the engawa (veranda), which is protected by a large overhang. Also note the large gable vent. Japanese Garden, Portland, Oregon.

걸프 해안의 집과 이들보다 한층 정교한 방식의 French louisiana plantation house는 습도가 높은 지역에 적합하다(그림 8.2p).

FIGURE 8.2p
This Gulf Coast house incorporated many cooling concepts appropriate for hot and humid climates. Note the large shaded porch, ventilating dormers, large windows, and ventilation under the house.

그 지역에서의 전형적인 주거형태는 주 거주공간을 갖고 습기와 찌는듯한 땅으로부터 석조바닥으로 들어올린 위에 경량의 목재프레임으로 짓는다. 높이 올라갈수록 바람의 양은 많아

지고 습도는 낮아진다. 주요 거주공간에는 환기를 최대화하기 위한 높은 개구부가 있다. 천정은 공기를 성층화하여 사람은 상대적으로 차가운 낮은 부분에서 거주할 수 있도록 매우 높다(때로는 14ft ; 약 4.3m). 천정과 지붕 및 높은 곳의 통풍구는 연돌효과를 일으켜 건물의 뜨거워진 공기를 배출할 수 있도록 한다. 깊은 베란다는 별게 그림자를 만들어 시원한 외부공간을 제공한다. 중앙의 오픈 된 현관은 그 지역의 초기 개척자들(10ft의 간격을 둔 두개의 통나무집을 하나의 지붕으로 연결하는 집을 지었던)의 지붕이 달린 통로를 가진 주거형태에서 유래된 것이다(그림 8.2q). 여름이 되면 그늘지고 미풍이 부는 이 외부공간은 사람이나 동물들이 거닐기에 적합한 공간이 된다.

FIGURE 8.2q
The breezy passage of the dog trot house was a favorite for both man and beast during the hot and humid summers.

이와 비슷한 많은 개념들이 결합하여 19세기 남부에서 유행했던 Classical Revival Architecture(신고전주의 건축?)에서 사용되었다. Chapter 7에서 언급하였듯이 고전적인 현관은 높은 출입문과 창문에 그늘을 제공해야 했던 큰 처마를 만들기에 적합한 방식이었다. 이 개구부들은 12ft나 될 만큼 높았으며 창문은 3중으로 되어 그중 2/3은 열 수 있도록 되어있었다. 루버셔터는 차양과 프라이버시가 요구될 때에도 환기가 되도록 충족시켜주었다(그림 8.2r). 이 흰색의 고전적인 건물의 이미지는 더운 기후에서 매우 적합하다.

FIGURE 8.2r
Shutters with adjustable louvers were almost universally used in the old South.

Waverly plantation은 이 고전적인 특성이 기후에 적합하게 지어진 좋은 예이다(그림 8.2s).

FIGURE 8.2s
The Waverly plantation near Columbus, MS, has a large belvedere for view, light, and ventilation. (Photograph by Paul B. Watkins, courtesy of the Mississippi Department of Economic Development, Division of Tourism.)

이 건물에는 전경과 채광, 2개층에 걸친 강한 연돌효과를 만들어내는 창문이 많은 큰 전망대가 있다. 모든 문에는 위에 움직일 수 있는 채광창이 달려있기 때문에 모든 실은 세 방향으로의 통풍이 가능하다(그림 8.2t).

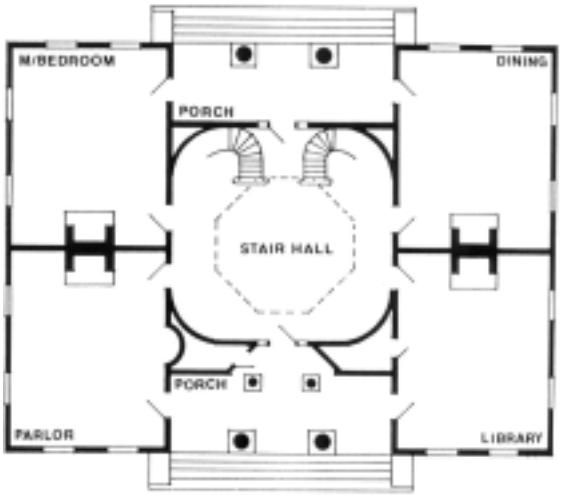


FIGURE 8.2t
A strong stack effect is created by the octagonal belvedere over the open stair hall. All interior doors have transoms. (From Mississippi Houses Yesterday Toward Tomorrow, by Robert Ford (copyright).)

일반적으로 온대기후는 설계하기에 가장 까다로운 기후이다. 이 기후는 실질적으로 여름에는 매우 덥고 겨울에는 상당히 춥기 때문이다. 게다가 건물은 여름이나 겨울철 한가지에만 적합하게 계획해서는 안 된다. 오히려 여름철과 겨울철의 서로 상반된 건축적 특성 요구를 모두 충족시킬 수 있어야 한다. Virginia, Williamburg에 있는 Governor's Mansion은 이러한 기후대에 위치하고 있다. 이 건물은 간결하고 창문은 중간크기이다(그림 8.2u). 벽돌조의 건물은 습도가 그리 높지 않은 여름철에 자연형 냉각이 가능토록 한다. 육중한 굴뚝의 매스는 겨울철의 축열 매체뿐 아니라 여름철의 추가적인 heat sink로서도 작용한다. 모든 실은 통풍을 최대화하기 위해 네 방향 모두 개구부가 나 있다. 지붕의 작은 탑은 그 기능에 따라 다른 명칭을 갖는다. 전경이 가장 중요하다면 전망대이고 천공광의 역할을 한다면 채광창, 그 위에 작은 돔을 갖고 있으며 장식이나 이미지효과를 중점으로 한다면 큐폴라, 환기가 가장 중요하다면 모니터로 불린다. 이 경우 탑의 주 용도는 관영 건물의 이미지를 만들어내기 위한 것이다.

FIGURE 8.2u
The Governor's Mansion in Williamsburg, VA, is well suited for a "temperate" climate. (Courtesy of the Colonial Williamsburg Foundation.)

8.3 PASSIVE COOLING SYSTEMS

이 장에서 자연형 냉방시스템은 앞서 언급한 전형적인 방식들 뿐 아니라 아직은 경험에 의

한 것이지만 꽤 신뢰도가 높은 보다 정교한 방식에 관해 설명되어진다. 자연형 냉방은 가능한 한 자연에너지와 heat sink를 사용한다. 그러나 그리 많지 않은양의 에너지를 필요로 하는 약간의 작은 팬과 펌프의 사용도 가능하다.

자연형 냉방의 목표가 여름(더운 기간)동안의 열쾌적을 만들기 위한 것이기 때문에 건물의 냉각과 높은 온도에서의 쾌적영역의 이동 두가지 방식 모두 가능하다. 첫 번째 경우 건물의 heat sink를 찾아냄으로서 건물의 열을 제거하는 방식이고 두 번째의 경우 기류의 속도를 증가시킴으로서 쾌적영역을 보다 높은 온도쪽으로 이동시키는 것이다. 이 두 번째의 경우 사람은 건물이 실질적으로 시원하지 않음에도 쾌적하게 느끼게 된다.

자연형 냉방의 다섯가지 방법이다.

Types of Passive Cooling Systems

1. Cooling with ventilation
   A. Comfort ventilation : 피부로부터의 증발작용을 증가하기 위한 낮 동안의 통풍과 이에 따른 열쾌적의 증대
   B. Convective Cooling : 다음날 사용하기 위해 야간에 건물을 인공적으로 냉각시키기 위한 통풍
2. Radiant Cooling
   A. Direct radiant cooling : 야간에 하늘을 향한 복사에 의한 건물 지붕의 냉각
   B. Indirect radiant cooling : 야간에 하늘을 향한 복사로 열 교환유체를 냉각하고 이에 의한 건물의 냉각
3. Evaporative Cooling
   A. Direct evaporation : 건물 안으로 유입되는 공기에 물을 분사하여 공기의 온도를 낮추지만 습도는 증가함
   B. Indirect evaporative cooling : 실내의 습도증가 없이 건물을 증발냉각
4. Earth cooling
   A. Direct coupling : earth sheltered 건물이 토양으로 직접 열을 손실
   B. Indirect coupling : 공기가 땅속의 관을 통해 실내로 유입
5. Dehumidification with a Desiccant : 잠열의 제거

8.4 COMFORT VENTILATION VERSUS CONVECTIVE COOLING

최근까지 통풍이 전 세계적으로 주요 냉방 방식이었다. 두 가지의 상이한 통풍방식이 있으며 이들은 상호 배타적이라는 것을 알아야한다. Comfort ventilation은 온도가 가장 높은 낮 동안의 외기를 도입한다. 공기는 인체를 향해 지나가면서 피부로부터의 증발냉각을 증가시킨다. Convective cooling은 상당히 다른 방식이다. 이 방식은 낮에는 외부공기의 유입이 거의 없도록 하여 건물의 열획득을 최소화 하고 밤에는 차가운 공기를 토입하여 건물의 열이 빠져나가도록 하는 것이다. 그동안 차가워진 건물의 매스는 실내에 있는 거주자들의 위한 heat sink로서 작용한다. 이 방식을 설명하기 전에 공기 흐름의 기본 원리와 건물에서의 적용에 관한 설명이 선행되어야 한다.

8.5 BASIC PRINCIPLES OF AIR FLOW

여름철의 환기와 겨울철 바람으로부터의 보호를 성공적으로 수행하기 위한 건물을 디자인하기 위해서는 다음에 나오는 공기 흐름의 기보 원리들을 이해해야만 한다.

1. Reason for the flow of air : 공기의 흐름은 온도차에 의한 자연 대류의 흐름이나 압력차에 의해 발생한다(그림 8.5a).

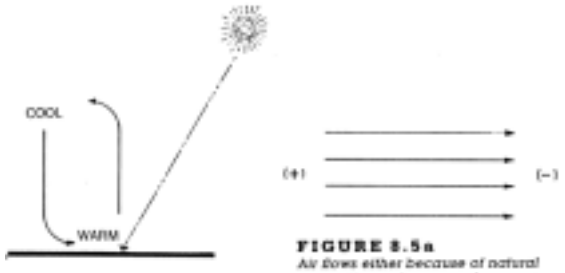


FIGURE 8.5a
Air flows either because of natural convection or because of pressure differentials

2. Types of air flow :

네가지 타입의 공기 흐름 : laminar(층류), separated(분리), turbulent(휘몰아치는), eddy currents(소용돌이)

그림 8.5b는 공기의 흐름을 나타내는 선으로 이 네 가지를 나타낸다.

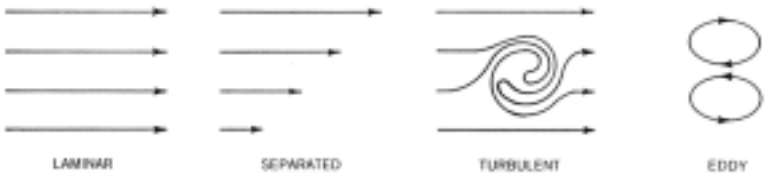


FIGURE 8.5b
The four different kinds of air flow

이 다이어그램은 연기의 흐름을 이용한 풍동실험에서 볼 수 있는 것과 흡사하다. 공기의 흐름은 건물 같은 두드러진 장애물과 충돌할 때 laminar에서 turbulent로 변한다. 소용돌이는 laminar나 turbulent과 같은 공기흐름에서 발생한 원을 그리는 공기의 흐름이다(그림 8.5e).

3. Inertia(관성) : 공기는 질량을 가지고 있기 때문에 움직이는 공기는 직선으로 가고자 하는 경향이 있다. 방향을 바꾸도록 힘이 가해지면 공기의 흐름은 직각이 아닌 곡선을 그리며 이동한다.

4. Conservation of air : 공기는 건물의 대지에서 발생하고 사라지는 것이 아니기 때문에 건물에 접근하는 공기는 건물을 떠나는 공기의 양과 일치해야 한다. 따라서 공기 흐름을 나타내는 선을 끊이지 않고 이어져야한다.

5. High and low pressure areas : 공기가 건물의 바람이 불어오는 쪽을 부딪치기 때문에 공기는 압축되고 정압(positive pressure)을 만들어낸다. 동시에 바람이 불어가는 쪽에서는 공기가 빨아들여지기 때문에 부압이 발생한다.

옆으로 비껴가는 공기는 일반적으로 부압을 만들어낸다. 이 압력은 일관되게 분포된 것이 아니다(그림 8.5c).

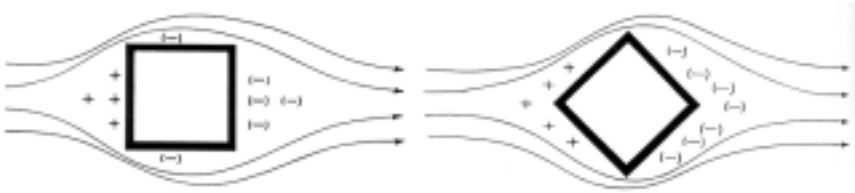


FIGURE 8.5c
Air flowing around a building will cause uneven positive and negative pressure areas to develop.

압력의 종류는 지붕의 경사에 의해서도 발생가능하다(그림 8.5d).

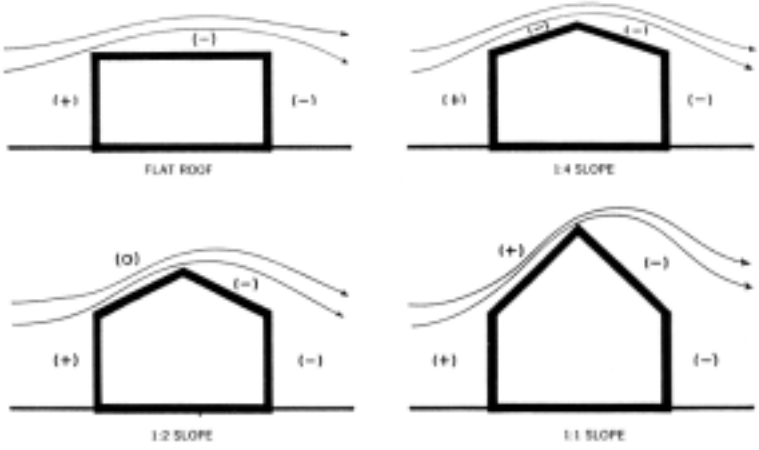


FIGURE 8.5d
The pressure on the leeward side of a roof is always negative (−), but on the windward side it depends on the slope of the roof.

건물 주위의 압력이 발생하는 곳은 건물의 통과하는 공기가 어떻게 흐르는지를 판단하게 한다.

이 정압과 부압이 발생하는 공간은 평온한 곳이 아닌 turbulence와 eddy current의 형태로 공기흐름이 변화하는 곳임을 알아야 한다(그림 8.5e). Note how these currents reverse the air flow in certain locations. For simplicity's sake turbulence and eddy currents, although usually present, are not shown on all diagrams.

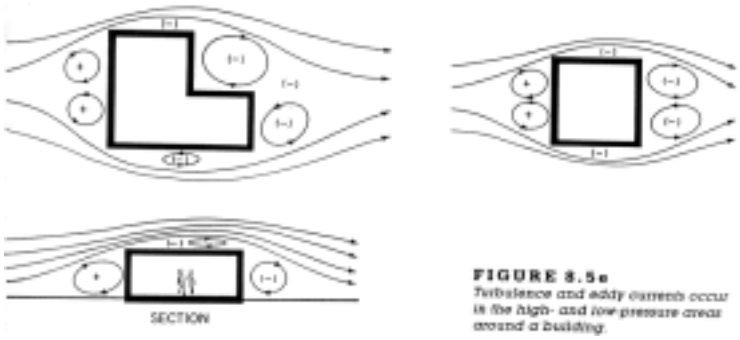


FIGURE 8.5e
Turbulence and eddy currents occur in the high- and low-pressure areas around a building.

6. Bernoulli effect : 베르누이의 정리는 유체 속도의 증가는 그 유체의 정압을 감소시킴을 설명하고 있다. 이러한 현상 때문에 벤투리관의 압축부분에서 부압이 발생한다(그림 8.5f).

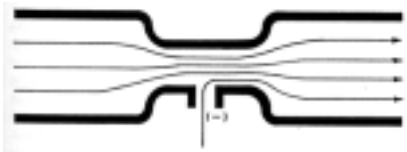


FIGURE 8.5f
The venturi tube illustrates the Bernoulli effect: as the velocity of air increases its static pressure decreases.

비행기 날개의 단면도는 half venturi tube와 같다 (그림 8.5g).

FIGURE 8.5g
An airplane wing is like half of a venturi tube. In this case the negative pressure is also called lift.

이 현상은 건물에서 상당히 효과적으로 사용된다. 지붕의 통풍구는 벤투리관의 형태로 만들어지거나(그림 8.5h) 그 절반모양으로 만들어진다(그림 8.5i).

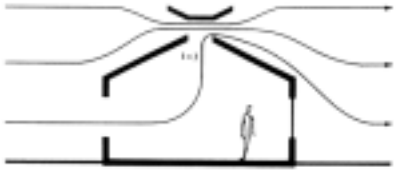


FIGURE 8.5h
A venturi tube used as a roof ventilator.

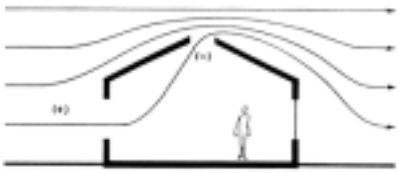


FIGURE 8.5i
Even without a curved hood the Bernoulli effect still sucks air out of a roof opening at the ridge.

이 장소에서는 또 다른 현상이 작용한다. 기류의 속도는 지면에서 높이 올라갈수록 빠르게 증가한다. 이에 따라 지붕 마룻대의 압력은 지표면 근처에 있는 창문에서의 압력보다 낮다. 벤투리 튜브의 기하학적 원리 없이도 베르누이 효과는 지붕의 개구부를 통해 공기를 배출할 것이다(그림 8.5j).

FIGURE 8.5j
Air velocity increases rapidly with height above grade.

7. Stack effect(연돌효과) : 연돌효과는 자연대류현상에 의해 건물로부터 공기를 배출할 수 있다. 연돌효과는 실내에서 두개의 수직적인 개구부에서의 온도차가 외부에서 같은 두 위치의 온도차보다 클 때에만 공기를 배출한다(그림 8.5k).

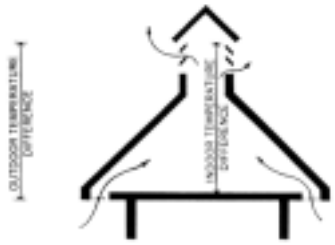


FIGURE 8.5k
The stack effect will exhaust hot air only if the indoor temperature difference is greater than the outdoor temperature difference between the vertical openings.

기본적으로 약한 이 효과를 극대화 하기 위해서 개구부는 가능한 한 크고 수직적으로 멀리 떨어져 있어야 한다. 공기는 아래쪽에서 높은 쪽의 개구부로 자유로이 흐를 수 있어야 한다(즉, 장애물을 최소화해야 한다).

베르누이 효과를 뛰어넘는 연돌효과의 이점은 이는 바람에 의존하지 않는다는 것이다. 단점은 상당히 약한 힘이며 공기를 빠르게 움직일 수 없다는 것이다. 그러나 베르누이 효과와 결합시키면 여름철에 효과적인 수직통풍을 만들어 낼 수 있다. 그림 8.5l은 이 세 가지 효과가 어떻게 극대화 되는지 보여주고 있다. roof monitor와 통풍장치는 공기를 성층화 시켜 뜨거워진 공기를 높은 개구부를 통해 내보내므로 효과적이다.

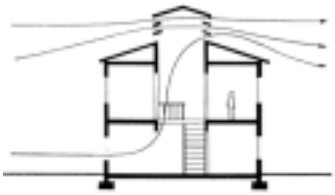


FIGURE 8.5l
The central stair and geometry of this design allow effective vertical ventilation by the combined action of stratification, the stack effect, and both Bernoulli effects.

연돌효과의 흥미로운 변형은 solar chimney이다. 연돌효과가 온도차를 이용한 것이기 때문에 실내 공기의 가열은 공기의 흐름을 증가시킨다. 그러나 이것은 실내 공기를 냉각시키는 목적과 모순 된다. 따라서 solar chimney는 건물을 빠져나간 뒤에 공기를 가열한다(그림 8.5m). 따라서 연돌효과는 실내공기의 추가적인 가열 없이 연돌효과를 증대시킨다.

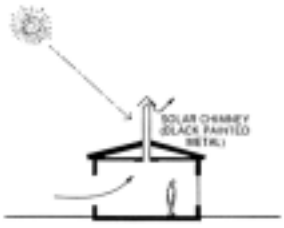


FIGURE 8.5m
A solar chimney increases the stack effect without heating the indoors.

8.6 AIR FLOW THROUGH BUILDINGS

건물을 통과하는 공기 흐름의 패턴을 결정하는 요소들은 건물 주변의 압력 분포, 창문을 통해 들어오는 공기의 방향, 사이즈, 위치, 창문의 디테일, 내부 구획 등이다. 이 각각의 요소들은 좀더 자세하게 고려될 것이다.

Site Conditions

대지에 인접하는 건물, 벽, 식생 등은 공기의 흐름에 큰 영양을 미친다. 이 대지의 조건들

은 Chapter 9에서 논의된다.

Window Orientation and Wind Direction

바람은 표면과 직각을 이룰 때 최고의 압력을 발휘하며 45°정도의 사각일 때 그 압력은 50%로 감소한다. 그러나 실내 환기는 사각일 때 큰 turbulence를 만들기 때문에 더 효과적이다(그림 8.6a).

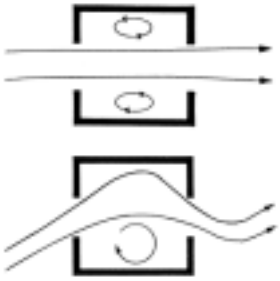


FIGURE 8.6a
Usually indoor ventilation is better from oblique winds than from head-on winds, because the oblique air stream covers more of the room.

결과적으로 대부분의 설계 시에 작용하는 바람의 방향의 범위가 있다. 바람이 중점적으로 한 방향에서 불어오는 대지는 거의 없기 때문에 이는 다행이다. Even where there are strong prevailing directions it may not be possible to face the building into the wind.

대부분의 기후에서 여름철 차양과 겨울철 태양의 필요성 때문에 모든 건물이 동-서로 자리 잡고 그림 8.6b는 그 향에서 최적의 효과를 발휘할 수 있는 바람의 방향의 범위를 나타낸다. 바람이 동-서로 불더라도 바람은 태양에 비해 쉽게 비껴갈 수 있으므로 태양의 향이 우선적이다.

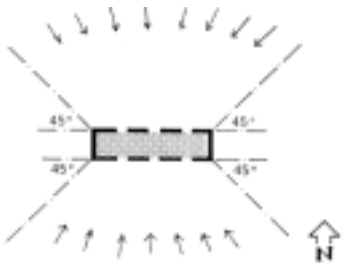


FIGURE 8.6b
Acceptable wind directions for the orientation that is best for summer shade and winter sun.

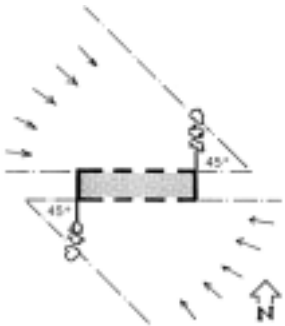


FIGURE 8.6c
Deflecting walls and vegetation can be used to change air flow direction so that the optimum solar orientation can be maintained.

Window Locations

정압에서 반대편 벽에 위치한 부압으로의 공기의 흐름 때문에 통풍이 원활하게 된다(그림 8.6d). 인접한 벽에 있는 창문에서의 통풍은 압력 분포와 그와 함께 다양하게 나타나는 바람의 방향에 따라 좋을 수도, 나쁠 수도 있다(그림 8.6e).

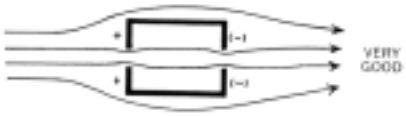


FIGURE 8.6d
Cross-ventilation between windows on opposite walls is the ideal condition.

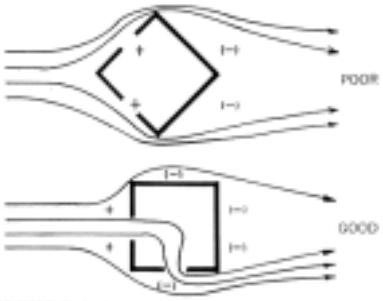


FIGURE 8.6e
Ventilation from adjacent windows may be poor or good depending on the wind direction.

건물의 한쪽 면에 있는 창에서부터 시작한 통풍은 창문의 위치에 따라 공평하게 혹은 열악하게 나타난다. 압력은 바람이 불어오는 방향의 벽 중심부가 그 가장자리보다 크기 때문에 창문 배치상 비대칭으로 하는 것이 압력차를 만들어 낸다. 그러나 대칭적인 배치에서는 압력차가 일어나지 않는다(그림 8.6f).

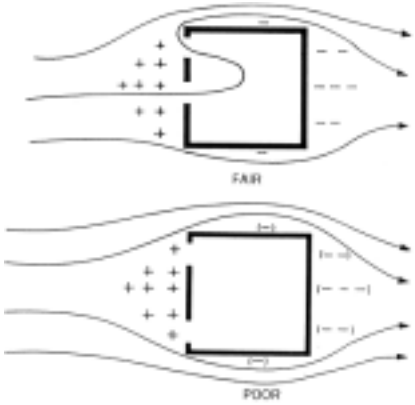


FIGURE 8.6f
Some ventilation is possible in the asymmetric placement of windows because the relative pressure is greater at the center than at the sides of the windward wall.

Fin wall

fin wall은 건물의 같은 면에 나 있는 창문을 통한 환기의 양을 압력의 분포를 바꿈으로서 증가시킬 수 있다(그림 8.6g). 그러나 각각의 창문은 한 개의 fin만을 갖는다. 또한 fin wall은 각각 창문의 같은 방향에 위치해 있으면 제대로 작용하지 않는다(그림 8.6h). fin wall은 바람이 창문에 45°로 불어올 때 최적의 효과를 발휘하며 정면으로 불어오는 바람에는 아주 약간만 효과적이다.

FIGURE 8.6g
Fin walls can significantly increase ventilation through windows on the same wall.

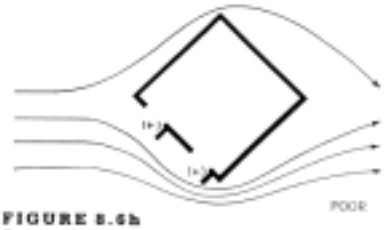


FIGURE 8.6h
Poor ventilation results from fin walls placed on the same side of each window or if two fins are used on each window.

벽에서의 창문의 배치는 공기의 양을 결정할 뿐 아니라 실내 유입 공기의 최초 방향을 결정한다. 중심을 벗어난 창문의 배치는 정압이 창문의 한쪽 면에만 크게 작용하기 때문에 공

기의 흐름이 편향하도록 한다(그림 8.6i). 실의 통풍을 더 효과적으로 하기 위해서 공기의 흐름은 반대 방향으로 편향되어야 한다. fin wall은 압력의 균형을 바꾸는 역할을 하며 따라서 공기 흐름의 방향도 바뀌게 된다(그림 8.6j).

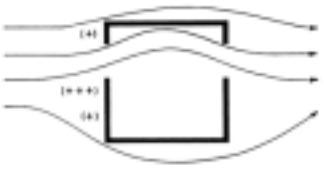


FIGURE 8.6i
The greater positive pressure on one side of the window deflects the air stream in the wrong direction.

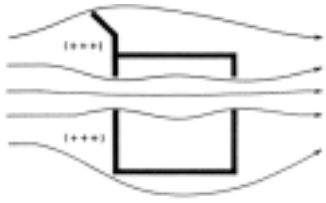


FIGURE 8.6j
A fin wall can be used to direct the air stream through the center of the room.

Horizontal Overhangs and Air Flow

창문 바로 위의 overhang은 견고한 overhang이 그 위의 정압과 아래쪽의 정압이 균형을 이루는 것을 방해하기 때문에 공기의 흐름이 천정 쪽으로 편향되도록 한다(그림 8.6k). 그러나 6인치나 그 이상의 틈은 그 위의 정압이 공기 흐름의 방향에 영향을 끼치게 한다(그림 8.6l). overhang을 벽 높이 설치하는 것 역시 공기의 흐름이 거주자 쪽으로 내려가도록 유도한다(그림 8.6m).

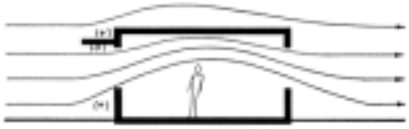


FIGURE 8.6k
The solid horizontal overhang causes the air to deflect upward.

FIGURE 8.6l
A gap in the horizontal overhang will allow the air stream to straighten out.

FIGURE 8.6m
A solid horizontal overhang placed high above the window will also straighten out the air stream.

Window Types

창문의 타입과 모양은 공기 흐름의 양과 방향에 큰 영향을 미친다. 오르내리창이과 미닫이창은 공기 흐름의 방향은 바꾸지 못하지만 고기 흐름의 최소한 50%는 차단할 수 있다. 여닫이창은 공기 흐름이 끝에서 끝으로 편향하도록 하며 바깥으로 열려있으면 fin wall로서도 작용한다. 공기 흐름의 수직적 편향에는 호퍼나 잴루지 창을 이용한다(그림 8.6n).

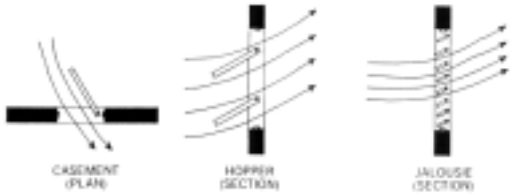


FIGURE 8.6n
All but double hung and sliding windows have a strong effect on the direction of the air stream.

이 유형들은 비가 들이치는 것을 막으면서 공기의 흐름은 가능토록 하므로 덥고 습한 기후 지역에서 중요하다. 그러나 이런 종류의 경사는 공기가 사람의 머리 뒤쪽으로 편향하게 한

다. 따라서 그림 8.6o에서 볼 수 있듯이 부차적인 편향장치가 필요하다. 이는 비는 막을 수 있고 동시에 통풍은 가능하다.

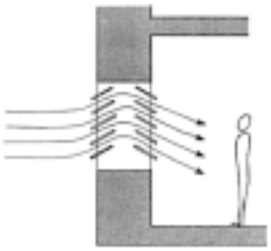


FIGURE 8.6o
If both rain protection and ventilation are required much of the time, then hopper and jalousie windows should be coupled with a second set of deflectors to direct the air down to the occupants.

주로 셔터의 형태로 사용하는 가변적인 불투명 루버는 잴루지 창과 비슷하지만 태양빛과 경관을 차단하는 면에서는 다르다. 많은 양의 crack과 resultant(합, 합력) infiltration(침투, 침윤)은 이런 유형의 창문과 루버가 추운 겨울철에 적합하지 않은 특성이다.

가로줄 형태의 창문은 실의 넓은 면적에 효과적인 통풍이 필요할 때 적절하다.

Vertical Placement of Windows

기류의 목적에 따라 창문의 높이와 수직적 배치가 결정된다. comfort ventilation을 위해서는 실 안에 거주하는 사람의 높이만큼 낮게 위치해야 한다. 사람이 누워있거나 앉아있는 높이에 맞추기 위해서는 바닥으로부터 1~2feet떨어진 곳이 적합하다. 호퍼창이나 잴루지 창 등을 이용할 때에는 이들이 공기를 위쪽으로 흐르게 하는 경향이 있기 때문에 낮게 배치하는 것이 중요하다. 추가적으로 설치하는 높은 창이나 천정의 통풍구들은 천정 부근에 모인 뜨거운 공기들이 빠져나갈 수 있도록 한다(그림 8.6p). 높은 개구부는 공기가 건물의 구조체를 통과할 때 convective cooling에서 중요시된다.

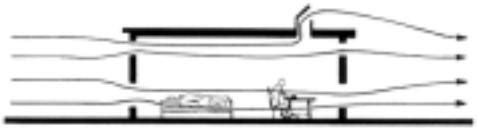


FIGURE 8.6p
For comfort ventilation, openings should be at the level of the occupants. High openings vent the hot air collecting near the ceiling and are most useful for convective cooling.

Inlet and Outlet Sixes and Locations

일반적으로 입구와 출구의 사이즈는 같지만 한쪽의 개구부가 상대적으로 더 작다면 그쪽이 입구가 되어야 한다. 실내 유입공기의 속도를 최대화하여 쾌적함을 증대시킬 수 있기 때문이다. 그러나 빠른 속도를 가지고 있다고 해도 통풍이 되는 면적은 감소한다(그림 8.6q). 공기가 들어오는 입구는 기류의 속도와 기류의 패턴까지도 결정하는 요소이다. 반면에 출구의 위치는 기류 속도나 패턴에 거의 영향을 미치지 않는다.

FIGURE 8.6q
Inlets and outlets should be the same size. If they cannot be the same size, then the inlet should be smaller to maximize the velocity.

Insect screen(방충망)

기류는 insect screen에 의해 약 50%정도 감소한다. 실질적인 저항은 바람이 정면으로 만날 때 최소의 저항을 받는 것을 포함, 스크린에 부딪치는 각도에 따라 달라진다. 이 스크린에 의한 영향을 보완하기 위해서는 넓은 개구부가 필요하다. 스크린으로 둘러싸인 베란다는

매우 넓은 면적을 가지고 있기 때문에 특히나 효과적이다(그림 8.6r).

FIGURE 8.6r
The resistance to air flow by insect screens can be largely overcome by means of larger openings or screened-in porches.

Roof Vents

자연형 지붕 통풍장치는 일반적으로 지붕 바로 밑층의 온도를 낮추기 위해 사용되었다. 그러나 바람이 충분히 높게 불고 통풍장치 또한 크고 지붕위에 높게 달려있다면 이 장치들은 거주공간 전체 통풍에 사용될 수 있다. 일반적으로 사용되는 wind turbine은 open stack에 비해 30%가량 통풍기능을 강화한 것이다. 다른 설비들은 최대한 120%까지도 강화할 수 있음을 연구에서 볼 수 있다.

큐폴라, 모니터, roof vent는 전통적인 건축의 일부분이지만(그림 8.2s 와 u) 이들은 현대건축에서도 성공적으로 통합되어 사용할 수 있다(그림 8.6t).

FIGURE 8.6s
The design of a roof ventilator has a great effect on its performance. Percentages show relative effectiveness.

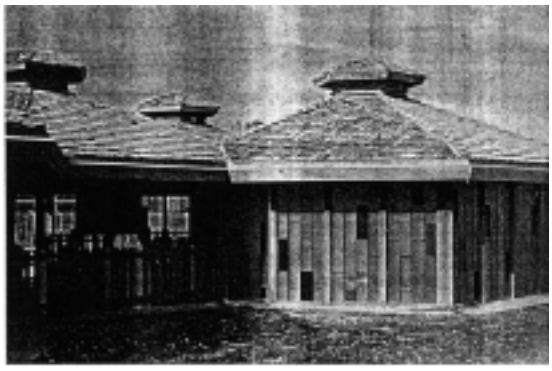


FIGURE 8.6t
Monitors on the roof of the bathing pavilions at Callaway Gardens, GA.

Fan

대부분의 기후지역에서 바람이 항상 충분하지는 않으면 밤에는 낮에 비해 바람이 적게 분다. 따라서 바람의 양을 증가시키기 위해 팬이 필요하다.

팬의 사용에는 크게 세 가지 목적이 있는데 그중 하나는 뜨겁고 습하고 오렴된 공기를 배출시키는 것이다. 이는 heat avoidance방식의 하나로 Chapter 13에서 설명하고 있다. 두번째는 야간에 인체를 냉각하고(comfort ventilation) 건물을 냉각시키기 위해(convective cooling) 외부공기를 유입하는 것을 목적으로 한다. 셋째로 실내공기가 실외공기보다 시원할 때 그 안에서 순환시키는 목적을 갖는다.

Separate fan은 각각의 목적을 갖는다. window나 whole house fan은 야간의 comfort ventilation이나 convective cooling을 위해 사용된다(그림 8.6u). ceiling이나 table fan은 실내공기가 외부공기보다 시원하고 습도가 낮을 때 사용한다.

FIGURE 8.6u
Whole house or window fans are used to bring in outdoor air for either comfort ventilation or corrective cooling. Ceiling or table fans are mainly used when the air temperature and humidity is lower indoors than outdoors.

Partitions and Interior Planning

실의 깊이는 통풍에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 짧은 벽에 있는 창문을 긴 벽의 창문보다 훨씬 많은 면적에 대해 통풍이 가능하다(그림 8.6v). 천정의 높이는 기류의 패턴에 거의 영향을 미치지 않지만 높은 천정은 여름철에 필요한 공기의 성층화에 유리하다.

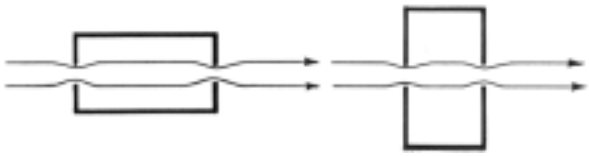


FIGURE 8.6v
To maximize ventilation a rectangular room should have windows on the short walls.

칸막이를 사용한 구획이 기류에 대한 저항을 높여 총환기량을 감소시키기 때문에 'open plans'가 바람직하다. 그러나 환기량 감소나 기류속도의 분포는 파티션의 정밀한 구획(배치)에 따라 다르다. 일반적으로 파티션은 바람이 불어오는 쪽이 넓도록 위치해야한다(그림 8.6w). 물론 각 실간의 연결은 환기가 필요할 때 열려있어야 한다.

FIGURE 8.6w
The best ventilation results when the larger space is on the windward side of a partition.

파티션이 아파트나 주거지 안에 있다면 통풍은 각 실간의 문을 열어두면 가능할 것이다. 그러나 중복도형 건물에서는 전혀 통풍이 되지 않는다. 공기조화가 가능해지기 전까지는 문 위의 채광창에 의해 통풍이 이루어졌다. 중복도형에 대한 대체안으로 완전한 통풍이 가능한 single-loaded corridor가 있다(그림 8.6x).

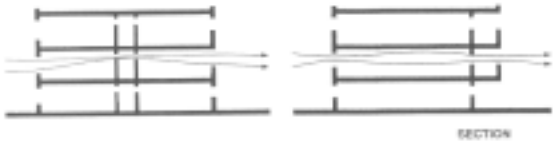


FIGURE 8.6x
In regard to natural ventilation, single-loaded corridor plans (right) are far superior to double loaded plans (left).

단층 건물은 문 위의 채광창 대신 clerestory(측고창)를 이용할 수 있기 때문에 통풍이 가능하다(그림 8.6y).

FIGURE 8.6y
In single story buildings, a double-loaded corridor plan can use clerestory windows instead of transoms.

Le Corbusier는 Marseilles에 있는 그의 작품 Unite d'Habitation에서 독창적인 해결안을 제안하였다(그림 8.6z). 3개층에 하나씩 복도가 있고 모든 아파트가 건물의 반대편 복도에 개구부를 가진 복층형이다(그림 6.8aa). 발코니에는 구멍이 뚫린 난간벽이 있어 통풍을 촉진시키며 차양을 위한 거대한 brise-soleil(브리즈 솔레이)가 있다.

Le Corbusier는 건물 아래부분을 필로티로 개방하여 통풍이 가능하게 하였다. 이 장소는 여름에는 시원한 바람이 부는 쾌적한 곳이지만 겨울철에는 춥기 때문에 불쾌감을 느끼게 된

다. 건물 주변 바람의 패턴은 Chapter 9에서 설명될 것이다.

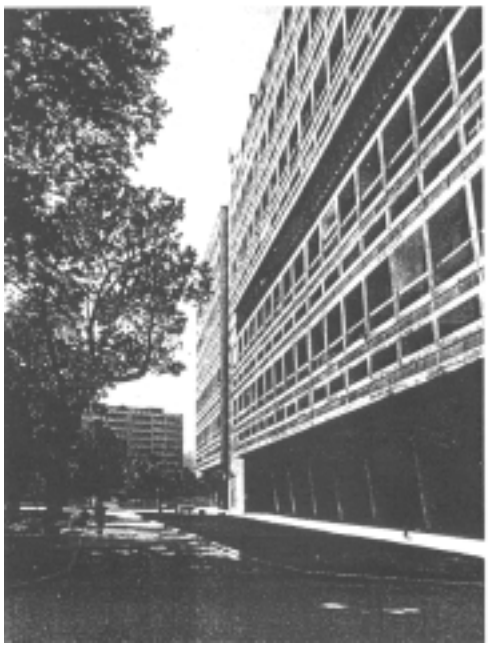


FIGURE 8.6z
The Unite d'Habitation outside of Marseilles was designed by Le Corbusier to provide cross-ventilation for each apartment. (Photograph by Alan Cook.)

8.7 EXAMPLE OF VENTILATION DESIGN

환기계획은 cir flow diagram을 사용함으로서 수월하게 행할 수 있다. 이 다이어그램은 앞서 언급한 기본 원리와 규칙들에 바탕을 두고 있지만 계산상으로 정확하지는 않다. 대신 이들은 수많은 시행착오의 결과이다. air flow diagram을 만들기 위한 다음의 단계를 따라보자.

Air Flow Diagram

1. 지역기후 자료나 그림 4.6e에 주어진 바람의 방향에서 여름철 우세한 바람의 방향을파악한다.
2. 평면과 대지를 겹친 위에 바람이 불어오는 방향을 바람이 불어오는 쪽과 불어나가는 쪽에 화살표로 평행하게 그린다(그림 8.7a). 이 화살표들은 가장 작은 창문의 너비만큼의 간격을 갖도록 그린다.

FIGURE 8.7a
Initial set-up for drawing an air flow diagram.

3. 건물 주위의 정압과 부압을 정밀하게 조사하여 이를 그 위에 기록한다(그림 8.7a).

4. 시행착오의 과정에 의해 건물을 통과하는 혹은 건물 주변 바람이 불어오는 방향에 대응하는 불어나가는 방향의 화살표를 연결한다. 선들은 교차하거나 끊기거나 급커브를 나타내서는 안된다. 건물을 통과하는 기류는 정압에서 부압이 있는 곳으로 간다(그림 8.7b).

FIGURE 8.7b
A completed air flow diagram.

5. 기류가 강제적으로 다른 층으로 흘러가야 하는 경우에는 다른층으로 떠나간 지점에 점과 원으로 표시하고 되돌아온 지점은 십자표와 원으로 표시한다(그림 8.7b). 또한 건물의 단면에서 수직적인 움직임도 표시한다(그림 8.7c).

FIGURE 8.7c
Air flow should also be checked in section.

6. 기류의 선이 통과하지 않은 공간은 통풍이 충분히 되지 않고 있는 지역이므로 요구되는 기류 패턴으로 바꾸기 위해서 창문의 위치를 바꾸거나 fin wall을 추가하는 등의 대안을 제시한다.
7. 2~5번까지의 단계를 되풀이 하여 적절한 기류의 패턴이 나올 때까지 한다.

이 방법은 UCLA의 Murray Milne의 작업에 기초를 두고 있다.

8.8 COMFORT VENTILATION

피부 위를 지나가는 공기는 심리적인 냉각효과를 만들어 열쾌적을 만들어내므로 쾌적 영역은 위쪽으로 이동하게 된다. comfort ventilation은 피부를 지나가는 공기의 흐름이 열쾌적을 증진시키는 방법을 말한다. 이 자연형 냉방 기술은 대부분의 기후에서 유용하게 쓰이지만 특히 기온이 일반적으로 뜨겁고 실내 습도를 조절하기위한 통풍이 요구되는 덥고 습한 기후지역에 적합하다. 그림 3.9를 보면 comfort ventilation이 어떤 조건에 적합한지 알 수 있다.

comfort ventilation은 완전한 자연형 시스템으로 이루어지기 힘들다. 대부분의 기후지역에서 실내 기류속도를 충족시킬 수 있을 만큼 바람이 충분하지 않기 때문이다. window나 whole house attic fan은 바람을 보충하기 위해 필요하다. 표 8.A를 보면 기류 속도에 따른 쾌적감에 대한 영향에 대해 나와 있다. comfort ventilation을 위해서는 앞서 언급한 기류에 관한 기술들은 공기가 최대한 건물의 거주자들을 지나서 흘러가도록 하는데 주력해야

한다.

TABLE 8.A
Air Velocities and Thermal Comfort

Air Velocity		Equivalent Temperature Reduction	
fpm	Approx. mph	(°F)*	Effect on Comfort
10	0.1	0	Stagnant air slightly uncomfortable
40	0.5	2	Barely noticeable but comfortable
80	1	3.5	Noticeable and comfortable
160	2	5	Very noticeable but acceptable in certain high activity areas if air is warm
200	2.3	6	Upper limit for air conditioned spaces Good air velocity for natural ventilation in hot and dry climates
400	4.5	7	Good air velocity for natural ventilation in hot and humid climates
900	10	9	Considered a "gentle breeze" when felt outdoors

* The values in this column are number of degrees Fahrenheit that the temperature would have to drop to create the same cooling effect as the given air velocity.

기후가 극도로 습하고 난방이 거의 필요하지 않을 때에는 경량구조가 적절하다. 이러한 기후에서 축열매스는 낮 동안의 열을 저장하여 밤에 불쾌감을 유발할 뿐이다. U.S.에서는 플로리다와 하와이가 이 기후에 속한다. 이러한 기후에서는 벽이나 지붕에 낮 동안 태양에 의해 너무 뜨거워지는 것을 막기 위한 적절양의 단열재가 필요하다. 단열재는 실내 공기가 너무 높아져서 열쾌적이 감소되지 않도록 평균복사온도를 유지시킨다. 단열재는 건물이 공기조화를 할 때에도 필요하다.

실내로 들어오는 공기의 온도에 대한 조절도 가능하다. 예를 들어 땡볕 아래 아스팔트 위의 기온은 110°F이지만 인접한 곳의 그늘진 잔디밭에서는 90°F의 결과가 나온 실험이 있다. 이 20°F의 온도차는 건물의 열 부하에 꽤 큰 영향을 줄 것이다. 따라서 comfort ventilation은 건물이 아스팔트보다는 식재들로 둘러싸인 곳에서 더 효과적일 것이다. comfort ventilation을 위해서는 가변적인 창문의 면적은 바람이 불어오는 쪽과 나가는 쪽으로 똑같이 나누어 바닥 면적의 약 20%가 되어야 한다. 창문은 Chapter 7에서 설명한 것과 같이 실외에서 차양이 잘 되어야 한다. 프랭크 로이드 라이트의 Robie House를 예로 들어보자(그림 7.1j). 이 집은 환기 시 모두 개방할 수 있는 창문의 차양을 위해 꽤 넓은 처마를 가지고 있다(그림 8.8). 시카고는 매우 뜨겁고 습한 여름기후를 가지고 있기 때문에 공기조화가 가능하기 전 까지는 충분한 통풍과 완벽한 차양이 냉방 방법의 주요 관건이었다.

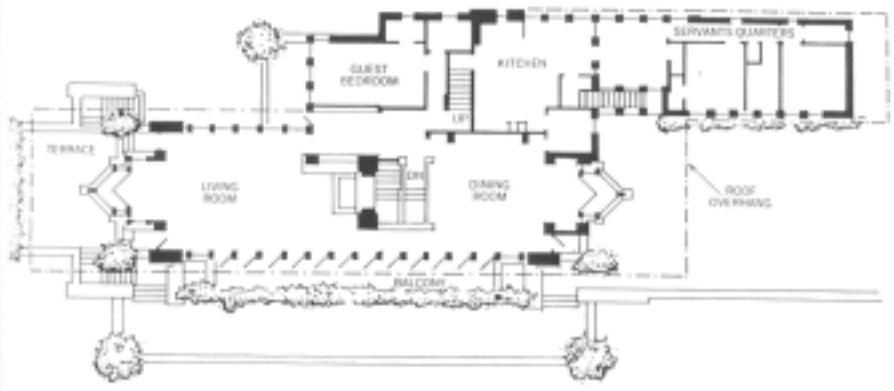


FIGURE 8.8
Frank Lloyd Wright's Robie House (1909) in Chicago had whole walls of doors and windows that opened for natural ventilation.

comfort ventilation은 실내의 온도와 습도가 바깥보다 높을 때 가장 적절하다. 내부적인 발열원과 태양의 가열효과 때문이다. 좀더 확장해 보면 comfort ventilation은 실내 온도가 쾌적 영역 보다는 높으나 실외 온도보다는 낮을 때에도 공기 흐름에 의한 심리적인 냉방 효과 때문에 적절한 방법이다. 이 조건에서의 통풍에 의한 이점은 실질적으로는 뜨거운 외부 공기에 의해 건물이 데워지고 있기 때문에 제한적일 수밖에 없다. 따라서 실내 공기가 너무 높지 않다면 창문을 닫고 팬을 돌려 실내 공기를 순환시켜서 냉각효과를 만들어 내는 것이 더 현명하다. 그러나 이 방법은 comfort ventilation이 아닌 다음에 설명되어질 convective cooling이다.

Rules for Comfort Ventilation

1. 그림 3.9를 보면 comfort ventilation이 어떠한 기후 조건에 적합한지 알 수 있다.
2. 바람을 보충하기 위하여 팬을 사용한다.
3. 거주자를 c통과하는 기류를 최대화한다.
4. 습기가 많고 자연형 태양열 난방이 필요하지 않은 곳에서는 경량 구조가 적절하다.
5. 공기의 온도와 비슷한 평균 복사 온도를 유지하기 위한 최소한의 단열은 사용한다.
6. 가변형 창문의 면적은 바람이 불어오는 쪽과 불어 나가는 쪽을 도같이 나누어 바닥 면적의 20%가 되도록 한다.
7. 창문은 낮과 밤에 모두 열려있어야 한다.

8.9 CONVECTIVE COOLING

실질적으로 대부분의 습윤한 기우에서는 야간의 기온은 낮의 기온에 비해 현저치 차갑다. 이 차가운 밤공기는 건물의 매스에서 열이 빠져나갈 수 있도록 한다. 미리 냉각된 매스는 다음날 낮동안에 열을 흡수함으로서 heat sink의 역할을 한다. 통풍은 대류에 의해 매스로부터 열을 제거하기 때문에 이 효과가 보증된 자연형 방법을 convective cooling이라 부른다.

이 냉방 방식은 주간 온도 분포의 범위가 넓기 때문에(30°F이상) 덥고 건조한 기후에 적절하다. 그러나 약간의 습도가 있고 주간의 온도 분포가 20°F인 지역에서도 좋은 효과를 볼 수 있다.

convective cooling은 두 가지 조건에서 작용한다. 밤에는 자연 환기나 팬이 외부의 차가운 공기를 내부의 매스로 끌어들여 냉각을 한다(그림 8.9a). 다음날 아침이면 외부 공기로부터 건물 안으로 열이 전달되는 것을 막기 위하여 창문을 모두 닫는다(그림 9.8b). 매스는 heat sink의 역할을 하여 실내 온도가 외부 기온만큼 빠르게 올라가는 것을 막는다. 그러나 실내의 온도가 쾌적 영역 이상으로 올라가면 순환 팬이 추가적인 시간동안 쾌적함을 유지하기 위해 필요하다.

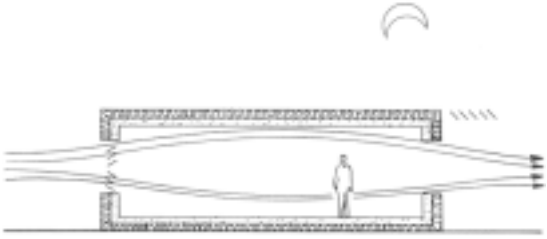


FIGURE 8.9a
With "convective cooling" night ventilation cools the mass of the building.

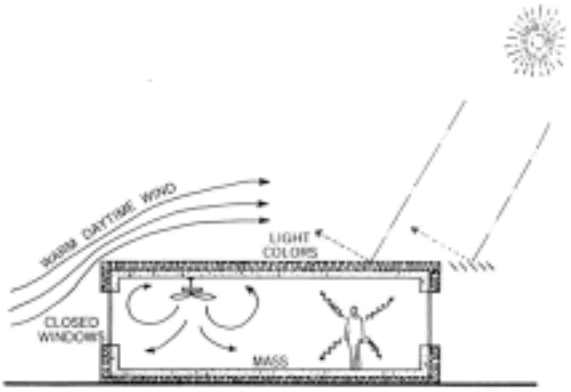


FIGURE 8.9b
During the day the convectively cooled mass acts as a heat sink. Light colors, insulation, and closed windows keep the heat gain to a minimum. Interior fans can be used for additional comfort.

축열 매스는 그것이 없이는 낮 동안 건물을 냉각시킬 heat sink가 없기 때문에 중요하다. 이 매스의 필요성은 자연형 태양열 난방에서와 비슷하고 실제로 매스는 이 두 가지 목적으로 모두 사용할 수 있다. 이상적으로 매스는 바닥면적 $1ft^2$당 80lb가 적당하다(콘크리트는 $150lb/ft^2$). 매스의 표면적은 바닥면적의 두 배 정도가 되어야 한다.

열 획득을 최소화하기 위해서 벽과 지붕은 단열이 잘 되어 있어야 하며 외부 표면은 밝은 색으로 칠해야 한다(지붕의 반사율은 최소한 0.75이고 벽의 반사율을 최소한 0.5).

밤에 열이 빠져나가게 하기 위한 가변형 창문의 면적은 바닥 면적의 10~15%정도 되어야 한다. 자연 통풍이 충분하지 못할 때에는 환기팬을 사용해야 한다. convective cooling에서는 기류는 거주자가 아닌 매스를 향하여 통해야 한다. 또한 창문은 외부에서 차양이 잘 되어야 한다.

일반적인 건물에서 야간에 열을 완전히 배출하는 것은 어렵다. convective cooling의 발전된 유형에서는 구조체 내부의 경로를 따라 야간의 공기가 지나간다. Oregon에 있는 최근에 지어진 Emerald PUD Building은 주요 설계방법으로 convective cooling을 사용하였다. 차가운 야간의 공기가 속이 빈 콘크리트 패널지붕을 따라 지나간다. 이 훌륭한 설계안은 다른 많은 이너지 절약형 디자인 개념을 통합한 것으로 Chapter 15의 케이스 스터디에서 더 자세하게 설명하고 있다.

California의 Sacramento에 잇는 Bateson State Office Building은 다른 두 가지의 convective cooling방식을 사용하고 있다. 야간의 공기는 실내의 노출된 콘크리트 구조물을 직접 냉각하고 간접 냉방을 위해서 rock bed를 사용한다. 이 건물 열시 Chapter 15에서 설명하고 있다.

Rules for Convective Cooling

1. convective cooling은 일교차가 30°F이 넘는 덥고 건조한 기후에서 적합하며 일교차가 20°F이고 약간 습기가 있는 기후지역에서도 효과적이다.

2. 야간에 바람이 지속되는 지역을 제외하고는 window나 whole house fan을 사용해야만 한다. ceiling이나 다른 실내 팬은 창문을 닫고 있는 주간에 사용해야한다.
3. 이상적으로 바닥면적에 대한 매스의 무게는 80lb/ft^{2}이며 이 매스의 표면적은 바닥면적의 두 배정도가 되어야 한다.
4. 야간의 공기의 흐름은 효과적인 열전달 확보를 위하여 매스를 향해야 한다.
5. 창문의 면적은 바닥 면적의 10~15%정도가 적당하다.
6. 창문은 밤에는 열고 낮에는 닫는다.

8.10 RADIANT COOLING

Chapter 2에서 설명한 것과 같이 모든 사물은 복사에너지를 흡수하고 방사하며 사물은 net flow가 외부에서 들어올 때 복사현상에 의해 냉각된다. 야간에는 공기 중에 긴 파장의 적외선이 건물로부터 나오는 적외선보다 적기 때문에 밤하늘을 향해 net flow가 발생한다(그림 8.10a).

FIGURE 8.10a
On clear nights with little humidity there is strong radiant cooling.

지붕은 하늘에 노출되어있기 때문에 자외선 방사체로 가장 적절하다. 반짝이는 금속 표면의 물체만 빼고는 모든 비금속성 표면을 지닌 재료는 자외선 방사체로 쓰인다.

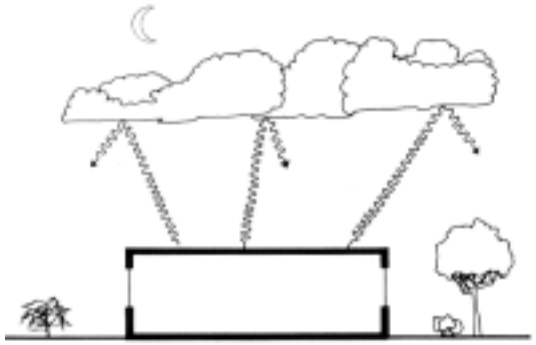


FIGURE 8.10b
Humidity reduces radiant cooling and clouds practically stop it.

(무슨 색이든)페인트 칠해진 금속은 빠른 속도로 열을 이동시키기 때문에 상당히 효과적이다. 맑은 밤의 방사체는 밤공기보다 최대한 12°F까지 냉각되어 차가운 밤공기보다 낮아질 수 있다. 습한 밤에는 복사 냉방은 비효율적이지만 기온은 7°F정도까지 내릴 수 있다. 반면에 구름이 낀 날씨에는 복사냉각은 거의 차단된다(그림 8.10b).

Direct Radiant Cooling

잠재적으로 복사냉방에 대한 가장 효율적인 접근은 지붕자체를 방사체로 만드는 것이다. 예를 들어 노출 콘크리트 지붕은 복사를 통해 밤하늘로 빠르게 열을 손실할 것이다. 다음날이 되면 차가워진 콘크리트 매스는 heat sink의 역할을 하여 효과적으로 건물을 냉방한다. 그러나 지붕은 태양과 뜨거운 공기로부터 보호되어야 한다. 따라서 매일 아침 단열을 하고 밤이 되면 제거해야 한다.

Halold Hay는 이 개념을 사용한 몇몇 건물을 설계했는데 그 건물들은 heat sink매체로서 콘크리트 대신 물을 채운 플라스틱 통을 사용했다. 밤이 되면 단열 커버를 열어 야간 대기 중에 노출된다(그림 8.10c). 다음날 해가 뜨면 물통은 이동 가능한 단열재로 다시 덮는다. 낮 동안 금속 데크 위에 놓인 물통은 heat sink의 역할을 하여 실내 냉방을 한다(그림 8.10d). 이 시스템은 겨울철에는 자연형 난방모드로 작용하기 때문에 상당히 적합한 방식이다(그림 6.18c-e). 이 개념이 상당히 효율적인 방식이라는 것이 입증되었음에도 불구하고 경제성과 신뢰성, 단열 커버 이동의 편이성 등은 여전히 극복해야할 주요 문제점이다.

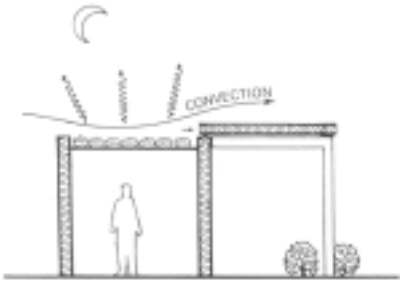


FIGURE 8.10c
During the summer night the insulation is removed and the water is allowed to give up its heat by radiant cooling.

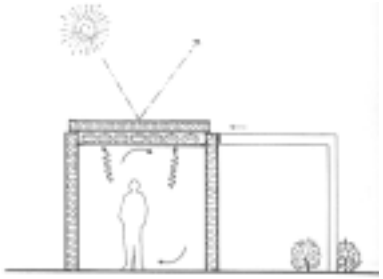


FIGURE 8.10d
During the summer day the water is insulated from the sun and hot outdoor air, while it acts as a heat sink for the space below.

FIGURE 8.10e
At night the movable insulation is in the "open" position so that the building's heat can be radiated away. This is an example of direct radiant cooling.

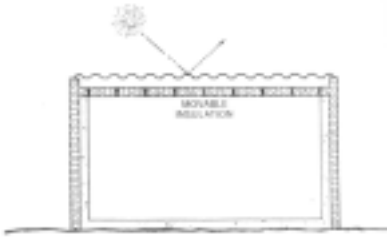


FIGURE 8.10f
During the day the insulation is in the "closed" position to keep the heat out. The cool interior mass now acts as a heat sink.

다른 직접 냉방 방식은 실내의 이동가능한 단열재를 설치한 경량 방사체를 사용하는 것이다. 이 방식은 위에 나온 개념의 두 가지 문제점을 해결한다. : 육중한 지붕 구조와 외부에 노출된 이동가능한 단열재. 이 시스템 역시 지붕에 페인트칠을 한 금속 방사체를 설치하고 이동가능한 단열재로 덮는다(그림 8.10e). 밤이 되면 단열재를 열어 건물로부터의 열이 방사체를 통해 빠져나갈 수 있도록 한다. 주간의 냉방효과가 적절하게 하기 위해서는 heat sink의 역할을 수행할 수 있도록 건물에 충분한 매스가 있어야 한다. 또한 주간에 단열재는 지붕으로부터의 열 획득을 차단하기 위해서 덮어놓아야 한다(그림 8.10f).

Indirect Radiant Cooling

가변형 단열재는 사용이 어려우므로 열교환 유체(heat transfer fluid)를 사용한 특성화된 방사체를 사용한다. 이 접근 방식은 자연형 태양열 난방 방식을 역으로 이용한 것과 같다. 그림 8.10g을 보면 페인트칠을 한 금속은 야간에 공기를 냉각시켜 실내의 매스를 식히도록 건물 안으로 들어오도록 한다. 다음날 아침이면 팬을 끄고 건물을 외부로부터 차단한다. 차가워진 실내의 매스는 heat sink로 작용한다. 래이에이터는 낮동안 건물의 열 부하를 감소시키기 위해 통풍작용을 한다(그림 8.10h). 래디에이터를 자연형 난방에 사용할 것이 아니라면 긴 파장의 방사에 유리하고 짧은 파장(태양열)을 잘 흡수하지 않는 흰색으로 칠하는 것이 좋다.

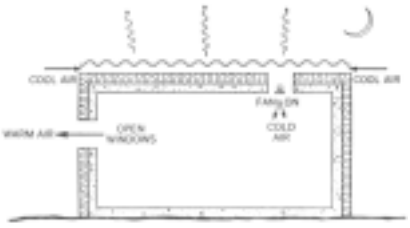


FIGURE 8.10g
The specialized radiator cools air, which is then blows into the building to cool the mass. This is an example of indirect radiant cooling.

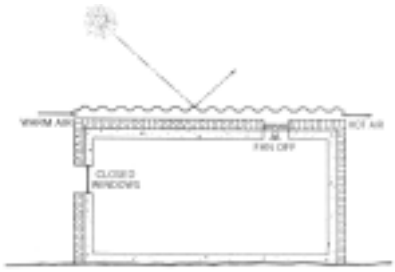


FIGURE 8.10h
During the day the radiator is sealed outdoors, while the building is sealed and the cooled mass acts as a heat sink.

건물에 노출된 매스가 충분하지 않다면 추가적으로 rock bed를 사용한다. 밤이 되면 차가워진 공기가 rock bed를 통과하면서 열이 빠져나갈 수 있도록 한다. 낮에는 실내의 공기가 rock bed를 통해 불어 들어와 rock에 열을 전달함으로서 냉각된다. 이 방식은 Bateson State Office buildling에 사용한 자연형 냉방 방식과 유사하다(Chapter 15 참조).

Rules for Radiant Cooling

1. 복사냉방은 구름이 많이 끼는 기후지역에서는 적합하지 않다. 맑고 건조한 대기상태에서 최적의 효과를 발휘하지만 습한 지역에서도 조금은 덜 효율적으로 사용된다.
2. 이 냉방의 개념은 주로 단층 건물에 적용한다.
3. 래디에이터를 난방의 목적으로 사용할 것이 아니라면 흰색으로 칠해야한다.
4. 냉방효과는 적기 때문에 지붕 면적 모두를 사용한다.

8.11 EVAPORATIVE COOLING

물이 액체에서 기체로 바뀔 때 많은 양의 열이 필요하다. 이 '증발열'은 건물의 냉방에 두 가지 다른 방법으로 사용될 수 있다. 물이 신선한 공기 중에서 증발한다면 이 방식은 direct evaporative cooling이라 부른다. 반명, 지붕이 증발에 의해 식는다면 이 방식은 indirect evaporating이다. 첫 번째 경우에는 실내 공기의 습도가 높아지고 두 번째 경우에는 그렇지 않다. 증발 냉각은 덥고 건조한 기후에서 가장 적절하다. 그 적용에 관한 정확한 설명은 그림 3.9에 나와있다.

Direct Evaporative Cooling

물이 공기중에 증발할 때 온도는 내려가지만 습도는 증가한다. 덥고 건조한 기후에서 습도의 증가는 실직절으로 쾌적함을 증진시킨다. 그러나 direct evaporative cooling은 습한 기후에서는 적절하지 않다. 냉각효과가 떨어질 뿐 더러 이미 높은 습도에서 습도의 증가는 소용이 없기 때문이다. 온실의 경우에는 대부분의 식물들이 높은 온도가 아니더라도 높은 습도에서 잘 자라기 때문에 예외이다.

direct evaporative cooling의 가장 일반적인 형태는 evaporaive cooler이다. 설비평 기계처럼 보이지만 실질적으로 매우 간단하고 에너지를 거의 소비하지 않는다. 모든 장소에서 바람이 불지는 않기 때문에 외부 공기를 젖은 스크린을 통해 내부로 들어오게 하기 위한 팬이 사용된다(그림 8.11a). 스크린을 적시기위한 적절한 양의 물이 필요하다. 쾌적함을 유지하기 위해서는 낮 동안에 많은 양의 통풍이 필요하다(20회/h).

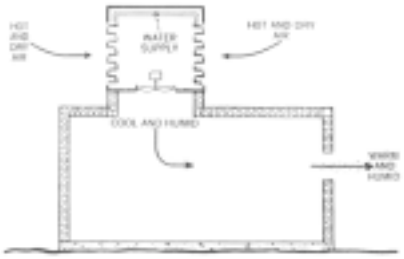


FIGURE 8.11a
Evaporative coolers are widely used in hot and dry regions. This is an example of direct evaporative cooling.

Indirect Evaporative Cooling

증발에 의한 냉각효과는 실내 냉방을 위한 heat sink로 쓰이는 건물의 지붕을 냉각시키는 데도 사용된다. 이 기술은 indirect evaporative cooling의 한 예로 이 방식의 주요 장점은 습도의 증가 없이 실내 공기가 냉각된다는 것이다.

evaporative cooling의 주요 관점에서 보면 증발열은 어떠한 것이 식으면서 나오는 것이다. 따라서 햇볕이 드는 지붕의 물을 분사하는 것은 물이 태양열에 의해 모두 증발되어 버리므로 그리 좋지 않다. 그러나 그늘진 지붕 연못의 물이 증발할 때 나오는 열은 주로 건물 자체에서 나오는 것이다.

그림 8.11b는 지붕연못 냉방방식의 기본적인 특성을 보여준다. 단열지붕은 태양으로부터 연못에 그림자가 지도록 한다. 지붕의 개구부는 여름철 공기의 흐름이 연못을 지나가도록 한다. 물의 증발에 따라 연못은 점점 차가워질 것이고 천정의 구조물도 함께 실내 공기의 heat sink역할을 한다. 겨울철에 연못의 물은 배수되고 지붕의 개구부도 닫는다. 이 시스템의 주된 단점은 이중지붕과 방수의 가격이 비싸다는 것이다.

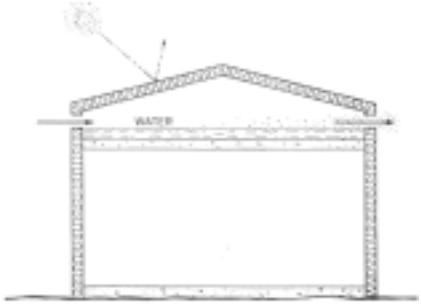


FIGURE 8.11b
This indirect evaporative cooling system uses a roof pond. Note that no humidity is added to the indoors.

위의 지붕 연못에 대한 대안으로 나온 것이 'roof pond with floating insulation'이다. 이 중 지붕구조는 단열재가 지붕 연못위에 떠 있으므로 필요가 없다(그림 8.11c). 밤이 되면 단열재의 위쪽으로 물을 분사하여 증발과 복사에 의해 냉각한다. 해가 뜨면 펌프는 멈추고 단열재 아래 태양열로부터 차단된 곳에 물이 남는다. 우선 지붕 구조물과 함께 물은 heat sink의 역할을 한다. 밤에만 냉각장용이 일어남에도 불구하고 증발과 복사의 작용이 결합하여 매우 효과적이다.

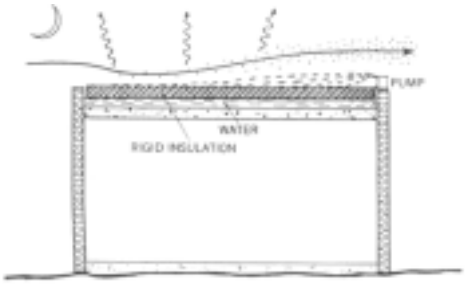


FIGURE 8.11e
This indirect evaporative cooling system uses floating insulation instead of a second roof to protect the water from the sun and heat of the day.

indirect evaporative cooling은 현재 패키지 유닛으로 개발되어 상업적으로 이용이 가능하다. 이들은 앞서 말한 evaporative cooler와 비슷하지만 이 방식은 실내 공기의 습도를 높이지 않는다(그림 8.11d).

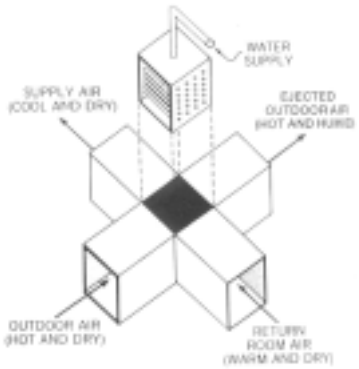


FIGURE 8.11d
Indirect evaporative coolers reduce the indoor air temperature without increasing its humidity.

Rules for Evaporative Cooling

1. 직접 증발 냉방은 건조한 기후에서만 적합하다.
2. 간접 증발 냉방은 건조한 기후에서 가장 효과적이지만 실내 공기의 습도를 높이지 않기 때문에 약간 습한 기후에서도 사용가능하다.

8.12 EARTH COOLING

earth cooling 방식을 설명하기 전에 토양의 열적 특성에 관해 먼저 알아야 한다. 지표면 근처의 흙의 온도는 기온에 따른다. 특히 평균 월 기온과 지표면 근처 토양의 온도는 거의 같다. 그러나 time lag에 따라 깊은 곳의 토양 온도는 변화가 거의 없다. 이들은 연평균 기온과 거의 비슷한 수준을 유지한다. 그림 8.12a에 나온 그래프는 깊이에 따른 토양의 온도를 보여준다. 오른쪽의 곡선은 토양의 여름철 최고온도를 나타내고 왼쪽의 곡선은 겨울철 최저온도를 나타낸다. 어느 깊이에서든 땅의 온도는 이 두 곡선 사이에서 움직인다.

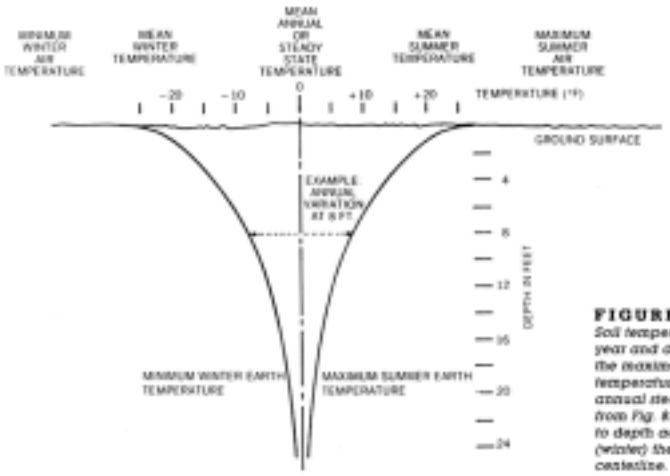


FIGURE 8.12a
Soil temperature varies with time of year and depth below grade. To find the maximum or minimum soil temperature, first find the mean annual steady state temperature from Fig. 8.12b, and then according to depth add (summer) or subtract (winter) the deviation from the centerline.

땅의 온도는 항상 최고기온보다 낮으며 깊이 내려갈수록 그 차이는 커진다. 따라서 여름철 내내 땅은 heat sink로서 작용한다. 그러나 온도차가 그리 크지 않다면 earth xooling은 실용적이지 못하다. 그림 8.12b의 지도를 보면 대부분의 지역에서 깊은 곳에 있는 토양의 온도가 earth cooling이 가능할 만큼 낮은 온도를 가지고 있음을 보여준다(60°F혹은 그 이하). 다행히도 자연적인 온도보다 토양을 냉각시킬 수 있는 기술이 있으면 따라서 earth cooling 은 U.S. 전역에서 가능하다.

FIGURE 8.12b
Deep earth temperatures are approximately equal to these well water temperatures. (Reprinted with permission of National Water Well Association.)

Cooling the earth

흙은 태양에 의해 가열되기 때문에 표면의 차양은 토양의 최고온도를 확실히 낮춰준다. 지표면에서의 물의 증발 역시 토양을 차갑게 식힌다. 이 두 가지 방법 모두 지표면의 온도를 최대 18°F까지 낮출 수 있다. 그러나 식물에 의한 증산작용은 지표면보다 높은 위치에서 일어나므로 그다지 도움이 되지 않는다.

나무 그늘, 데크, 다락 공간 등 역시 지표면에서 증발작용이 가능하도록 공기는 흐르게 하면서 햇빛은 막을 수 있다(그림 8.12c). 비가 충분히 내리지 않을 때에는 스프링클러를 사용하여 흙을 적셔준다. 건조한 기후에서는 밝은 색의 자갈을 4인치 두께로 깔아 자갈 밑에서 증발작용이 가능하도록 하면서 햇빛을 차단할 수 있다(그림 8.12d). 그러나 스프링클러를 사용할 때에는 밤에만 사용해야하는데 낮에는 햇볕에 데워진 물이 땅속으로 스며들 수 있기 때문이다.

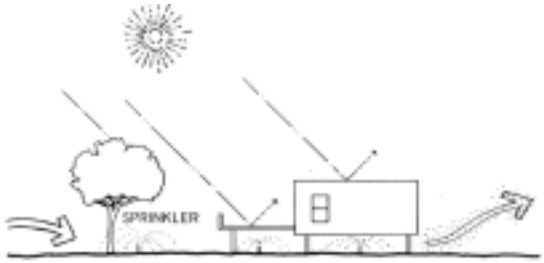


FIGURE 8.12e
Soil can be cooled significantly below its natural temperature by shading it and by keeping it wet for evaporative cooling.

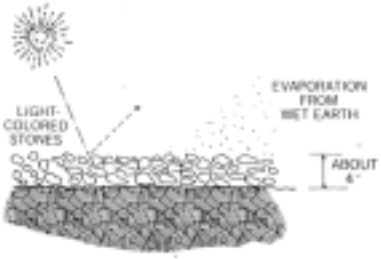


FIGURE 8.12d
In dry climates, soil can be cooled with a gravel bed, which shades the soil while it allows evaporation to occur.

Direct Earth Cooling

땅속에 파묻힌 건물은 벽이 토양에 직접적으로 닿아있는데(다시 말해 벽에 단열이 거의 안 되어 있는 상태) 이러한 상태에서 direct earth coupling이 이루어진다. 연 평균 기온이 60°F이하인 지역에서는 direct coupling은 두드러진 냉방 방식의 하나일 것이다. 그러나 이 이점은 겨울철에는 차가워진 땅에서 열에 초과된 열을 손실할 수 있으므로 불리하게 작용할 수 있다. 한 가지 해결방법은 겨울철 건물에서 열이 빠져나오는 것을 막기 위해 땅 쪽에서 단열을 하는 것이다(건물 쪽에서는 하지 않는다.)(그림 8.12e). 땅속에 파묻힌 이 지평선상의 단열재는 평형을 유지하는 기온에 영향을 주지는 않지만 땅의 최고 온도와 최저 온도치는 감소시킬 것이다.

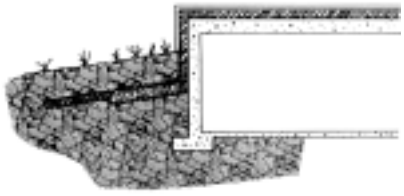


FIGURE 8.12e
In earth-sheltered buildings in cold climates the earth should be insulated from the cold winter air.

연평균 기온이 60°F이하인 곳에서는 겨울철 열 손실이 그리 큰 문제가 되지 않지만 대신 여름철에 토양이 충분히 냉각되지 않을 것이다. 위에 설명하였듯이 이러한 지역에서 토양은 미리 의도적으로 냉각되어야 한다. 땅속에 건물이 들어가야 할 특별한 다른 이유가 없다면 earth cooling은 아래 나오는 indirect earth Coupling을 이용하는 것이 더 효과적이다. earth sheltered building에 관해 자세히 알기 위해서는 Chapter 13을 참고하면 된다.

Indirect Earth Coupling

건물은 earth tube에 의해 간접적으로 토양과 연결될 수 있다. 냉방이 필요하면 공기는 튜브를 통해 건물로 불어 들어온다(그림 8.12f). 이 때 토양의 역할은 공기를 식히는 heat sink이다. 겨울철에는 이 튜브를 통해 들어가는 공기를 차단한다. 겨울철에 신선한 외기가

필요하면 이 튜브를 통해 들어오면서 예열이 가능하다.

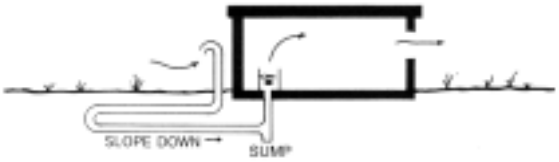


FIGURE 8.12f
Indirect earth cooling is possible by means of tubes buried in the ground. Sloped tubes and a sump are required to catch condensation.

튜브를 넣기 위한 필요한 깊이는 기후에 따라 다르다(그림 8.12b). 의도적으로 흙을 냉각시키는 것은 그 온도를 낮춤과 동시에 불필요하게 땅을 너무 깊이 파는 것을 막는다..

earth tube의 가장 큰 문제점은 응축수로 주로 흙의 온도가 공기의 노점온도이하로 내려가는 습한 기후지역에서 주로 발생한다. 따라서 튜브는 반드시 집수갱으로 배수되도록 경사가 있어야 한다. 습한 튜브속에 생기는 생물학적 활동의 결과물(예를 들어 곰팡이)들에 대해서는 아직 알려지지는 않았지만 경고는 하고 있다. 응축수는 건조기후에서는 그다지 큰 문제가 아니다. 또다른 잠재적인 문제점은 radon gas인데 이는 Chapter 14의 환기에서 더 자세히 논의된다.

Rule for Earth Cooling

1. 평형을 유지하는 깊이의 흙의 온도는 어느 지역에서나 평균복사 온도와 비슷하다(그림 8.12b).
2. 따뜻한 기후에서 차양과 증발작용으로 흙을 냉각한다.
3. 땅에 직접적으로 접하는 earth cooling은 땅속의 평균 온도가 60°F정도일 때 효과적이다. 흙의 온도가 이보다 차갑다면 건물은 토양 쪽에서 단열이 되어야 한다.
4. earth tube는 건조한 기후에서 겨울에도 효과적이다.
5. 습한 기후지역에서 응축수는 곰팡이의 원인이 된다.
6. 땅 속으로 직접 접한 구조체는 덥고 습한 기후지역에서 최우선적으로 고려되어야 할 자연환기에 대한 접근이 어렵다.

8.13 DEHUMIDIFICATION WITH A DESICCANT

습한 지역에서 여름철 공기의 제습은 열쾌적과 곰팡이 제거에 매우 중요하다. 공기로부터 수분을 제거하는 방법에는 기본적으로 두 가지가 있는데 첫 번째 방법은 공기가 노점온도이하로 내려가거나 포화상태가 되도록 온도를 낮추는 것이다. 일반적인 공기 조화와 제습은 이러한 원리를 사용한다. 앞에 언급한 몇몇 자연형 냉방 방식에서도 역시 이 원리로 제습을 할 것이다. 예를 들어 습한 기후에서 물은 튜브안에서 응축한다.

두 번째 방법은 건조제를 사용한다. 그 안에는 실리카겔, 제올라이트, 활성 알루미나, 칼슘 콜로아이드 등 공기로부터 수분을 흡수하는 수많은 화학물질들이 들어있다. 그러나 이것을 사용하기에는 두가지 심각한 문제가 있다. 첫 번째는 수분이 흡수되어 물로 면화할 때 열을 발한하는 것이다. 이 열은 물이 증발할 때 얻었던 증발열과 같은 양이다. 따라서 건조제가 방안에 있다면 제습이 이루어짐에 따라 실내 공기의 온도는 올라갈 것이다(다시 말해 건조제는 잠열을 현열로 바꾼다). 따라서 열 쾌적은 또다른 냉방을 요구하게 된다.

두 번째 문제점은 건조제가 금새 흠뻑 젖어서 제습작용을 멈춘다는 것이다. 따라서 건조제는 물을 가열하여 다시 사용해야 한다. 건조제를 사용한 제습은 이론상으로만 가능할 뿐 아

무도 비경제적이고 복잡한 건물을 사용하지 않는다(그림 8.13).

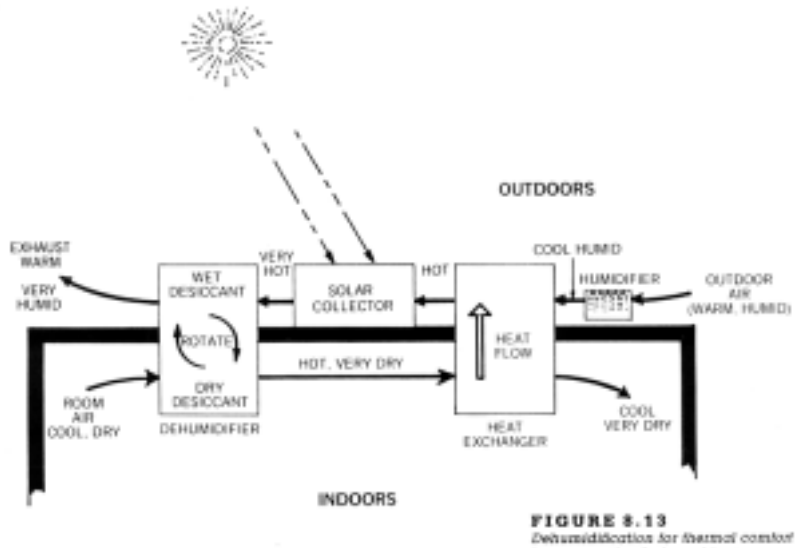


FIGURE 8.13
Dehumidification for thermal comfort by means of a desiccant is very expensive and complicated as the schematic diagram above indicates. (From the Passive Cooling Handbook by Lawrence Berkeley Laboratory, CA. 1980. DOE Pub-375.)

8.14 CONCLUSION

자연형 냉방방식은 덥고 건조한 기후에서 가장 잠재적인 효과를 지닌다. 모든 냉방 방식이 이 기후에서는 적합하다. 반면, 습도가 매우 높은 지역에서는 comfort ventilation만이 유용하다. 그러나 많은 지역이 convective cooling을 하지 못할만큼 습도가 높지는 않으며 야간 복사냉방 또한 유용하다. 미국 동부의 대부분은 이러한 일반적으로 습한 기후이며 여름철에 자연형 냉방이 air conditioning을 대체하거나 감소시킬 수 있다. 그러나 모든 기후지역에서 여름철의 쾌적을 위해서는 우선적으로 heat avoidance가 행해져야 한다.