

Condensation(결로)

# 1. 습공기(Humid Air)

- 습공기(humid air, moist air) : 수증기를 포함한 대기  
건공기(dry air) : 수증기를 포함하지 않은 공기  
포화공기(saturated air) : 최대한도의 수증기를 함유하는 공기  
수증기량은 온도에 따라 변화하고 온도가 높을수록 다량을 함유할 수 있다.
- 대기의 조성

[표 5-1] 표준상태에서의 건조공기의 성분 조성(지표부근의 대기)

| 성 분     | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | Ar   | CO <sub>2</sub> |
|---------|----------------|----------------|------|-----------------|
| 용적조성(%) | 78.09          | 20.95          | 0.93 | 0.03            |
| 중량조성(%) | 75.53          | 23.14          | 1.28 | 0.05            |

주) 표준상태란 0℃, 760mmHg, g=9.8m/s<sup>2</sup>일때를 말함.

## 2. 습공기 선도

- 습공기의 열역학적 상태를 나타내는 선도로 습공기의 수증기분압, 절대습도, 상대습도, 건구온도, 습구온도, 비체적, 엔탈피 등의 각 상태값을 하나의 선도에 나타낸 것
- 종류
  - 1) 비엔탈피( $i$ ) - 절대습도( $x$ ) : Molier 선도
  - 2) 건구온도( $t$ ) - 비엔탈피( $i$ ) : Carrier 선도
  - 3) 건구온도( $t$ ) - 절대습도( $x$ ) :  $t$ - $x$  선도
- $i$ - $x$  선도 : 경사축에 엔탈피  $i$ , 세로축에 절대습도  $x$ 를 잡아 작성한 선도  
다른 선도에 비해 이론적인 계산을 하는 경우 선도를 정확히 그릴 수 있는 특징



상대습도 :  $RH$  (%)

노점온도 :  $tdp$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

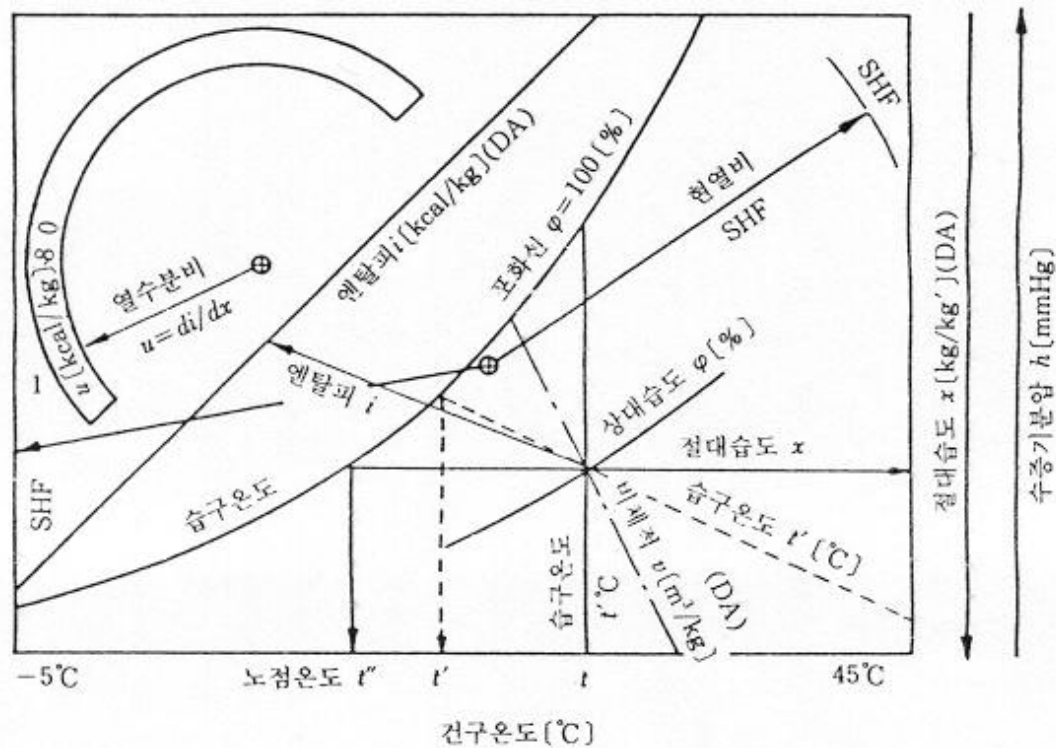
엔탈피 :  $h$  ( $\text{kcal/kgf}'$ )

포화수증기압 :  $ps$  ( $\text{mmHg}$ )

절대습도 :  $H$  ( $\text{kgf/kgf}'$ )

비체적 :  $v$  ( $\text{m}^3/\text{kgf}$ )

수증기압 :  $p_v$  ( $\text{mmHg}$ )



- 절대습도 (Absolute Humidity)  
습공기 중에 함유되어 있는 수증기의 중량을 나타내는 것.  
공기 중의 수분의 양
- 포화도 (Degree of Saturation)  
습공기의 절대습도와 그 온도에 대한 포화공기의 절대습도의 비

$$\Psi_s = X/X_s \times 100(\%)$$

$\Psi_s$  : 포화도 (%)       $X$  : 공기의 절대습도 (kg/kg')

$X_s$  : 동일온도의 포화절대습도 (kg/kg')

- 상대습도 (Relative Humidity, R.H.) : 수증기의 분압과 그 온도에 있어서의 포화공기의 수증기 분압과의 비를 백분율로 나타낸 것 (습한 정도를 나타냄.)  
공기 중에 포함되어 있는 수분의 비율

$$\Phi = P_v/P_s \times 100(\%)$$

$P_v$  : 수증기압 (mmHg)       $P_s$  : 동일온도의 포화수증기압(mmHg)

- 노점온도 (Dew Point Temperature) DP ·  $t'$ (°C)  
공기중의 수증기가 공기 중에서 분리되어 물방울이 생기는 온도



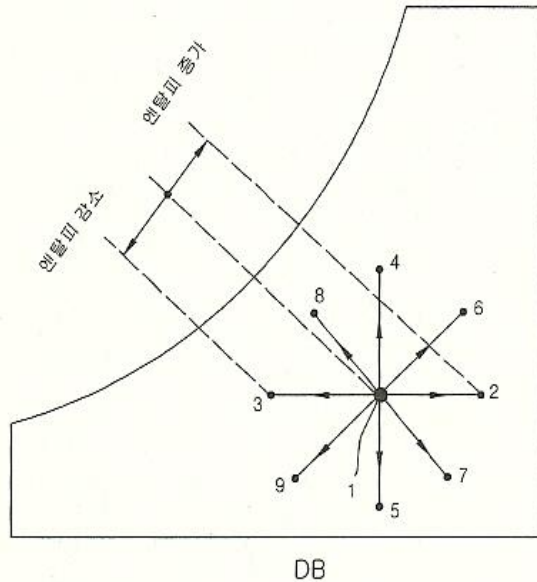
- 건구온도(Dry Bulb Temperature) DB · t (°C)  
보통의 온도계에 나타나는 온도
- 습구온도(Wet Bulb Temperature) WB · t'(°C)  
습구온도계에 나타나는 온도. 기류속도 5m/s이상  
불포화의 공기에서 습구온도는 건구온도보다 낮다.
- 노점온도(Dew Point Temperature)  
수증기가 응축하여 물방울이 맺히는 온도
- 현열비(Sensible Heat Factor, SHF)(=감열비)  
현열변화량에 대한 엔탈피 변화량(전열)의 비율.

$$\text{SHF} = \frac{\text{현열}}{(\text{현열} + \text{잠열 (전열)})}$$

$$= \frac{q_s}{(q_s + q_L)}$$

$q_s$  : 현열부하(kcal/h),     $q_L$  : 잠열부하 (kcal/h)





- 1→2 : 현열가열 (Sensible Heating)
- 1→3 : 현열냉각 (Sensible Cooling)
- 1→4 : 가 습 (Humidification)
- 1→5 : 감 습 (Dehumidification)
- 1→6 : 가열가습 (Heating and Humidifying)
- 1→7 : 가열감습 ((Heating and Dehumidifying)
- 1→8 : 냉각가습 (Cooling and Humidifying)
- 1→9 : 냉각감습 (Cooling and Dehumidifying)

(b) 습공기선도상에서 공기상태 변화

- 열수분비 (Enthalpy-moisture Ratio)  $U$  :

엔탈피 변화량에 대한 절대습도 변화량의 비율

$$U = \frac{i_2 - i_1}{x_2 - x_1}$$

$i_1$ : 공기 1상태의 엔탈피 (kcal/kg')

$i_2$ : 공기 2상태의 엔탈피 (kcal/kg')

$x_1$ : 공기 1상태의 절대습도 (kg/kg')

$x_2$ : 공기 2상태의 절대습도 (kg/kg')

- 물, 온수, 증기 등을 분무하여 가습을 행할 때에 이용됨

- 비체적(Specific Volume)  $SV \cdot v$  ( $m^3/kg'$ ) :

건조공기 1kg'을 함유하는 습공기(1+x)kg의 체적

$$v = 0.0045(x+0.22)(t+273)$$

$x$  : 절대습도,       $t$  : 건구온도

- 비중량 : 습공기  $1\text{m}^3$ 속에 포함되어 있는 건조한 공기의 중량.  $\text{Kg}'/\text{m}^3$ .  
 $1/\text{비용적} = \text{비중량}$
- 표준공기의 비용적 :  $0.83 \text{ m}^3/\text{kg}'$  , 비중량 :  $1.2 \text{ Kg}'/\text{m}^3$
- 중량비열 : 표준공기  $1\text{kg}$ 을 온도  $1^\circ\text{C}$ 올리는데 필요한 열량.  $0.24\text{kcal}/\text{kg}'$

- 습공기 엔탈피 (Enthalpy)  $T_H \cdot i$  (kcal/kg')
- 건조공기 1kg의 엔탈피와 x kg의 수증기 엔탈피의 합

1) 건공기의 엔탈피 :  $i_a = C_p \cdot t = 0.24 \cdot t$  (kcal/kg)

$C_p$  : 건공기의 정압비열(  $\approx 0.24$  kcal/kg $^{\circ}$ C),  $t$  : 건구온도

2) 수증기의 엔탈피 :  $t^{\circ}$ C인 수증기의 엔탈피는  $0^{\circ}$ C의 포화액의 증발잠열에 이 증기가  $t^{\circ}$ C까지 상승 하는데 필요한 열량의 합이다.

$t^{\circ}$ C 수증기 1kg의 엔탈피  $i_v$  (kcal/kg)은

$$i_v = r + C_{vp} \cdot t = 597.5 + 0.441 \cdot t$$

$r$  :  $0^{\circ}$ C에서 포화수의 증발잠열 ( $\approx 597.5$  kcal/kg)

$C_{vp}$  : 수증기의 정압비열 ( $\approx 0.441$  kcal/kg $^{\circ}$  C)

3) 습공기의 엔탈피 = 건공기의 엔탈피 + 수증기의 엔탈피

절대습도  $X$ (kg/kg') 인 습공기의 엔탈피  $i_w$  (kcal/kg)은

$$i_w = i_a + X \cdot i_v = C_p \cdot t + X(r + C_{vp} \cdot t)$$

$$= \mathbf{0.24 \cdot t + X (597.5 + 0.441t)}$$

### 3. 결로(Condensation)

- 공기 중의 수증기에 의해서 발생하는 일종의 습윤상태
- 결로의 현상
  - 불투습성의 재료표면에 물방울이 생성
  - 흡수성 물질에는 습기 → 곰팡이류, 각종 균의 번식
  - 장식의 손상
  - 불쾌한 냄새
  - 변형에 의한 건물재료와 구조체에 해를 끼침.

## 3.1 결로이론

### 1. 습기전달

- 습한 공기의 수증기압은 절대습도에 비례
- 건물의 구조체는 실외와 실내의 양측공간의 수증기 압력차에 의해 압력이 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동
- 금속, 플라스틱, 유리는 내부에 공극이 거의 없어 경계면에 매우 적은 양의 수증기만 있기 때문에 수증기의 이동이 거의 없다 → 단습성 재료
- 경량기포콘크리트 : 공극이 매우 많아 → 실내 습도 조절 능력이 있는 재료
- 공기에 포함된 수증기는 수증기압(Pa, N/m<sup>2</sup>)이 생김

## 2. 투습저항

- 습류 : 수증기의 흐름
- 투습 : 물체를 통과하는 습류현상
- 투습저항(vapour resistance), MNs/g : 투습이 어려운 성질
- 수증기의 투습률( $\delta$ )( $\mu\text{gm}/\text{Ns}$ ,  $\mu\text{gm}/\text{m}^2\text{Pas}$ )  
1Pa의 압력차가 있을 때  $1\text{m}^2$ 의 면적, 1m의 두께를 1초  
간에 통과하는 수증기의 양  
투습계수(vapour permeance,  $\pi$ ),  $\mu\text{g}/\text{Ns}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{Pas}$ )
- 수증기의 투습비저항(vapour resistivity,  $\gamma_v$ )  
어떤 재료의 단위두께당 발생하는 습기에 대한 저항값  
투습률의 역수
- 벽체를 통한 수증기의 이동량은 벽체를 구성하는 여러  
가지 재료의 투습율에 의해 좌우된다.



## 3.2 노점온도 기울기

- 각 구조체 내부 각 점의 온도변화는

$$\Delta\theta = \frac{\Delta R}{R_T} \times \theta_T \dots\dots\dots (5.11)$$

여기서,  $\Delta\theta$  : 특정 재료층에서의 온도 강하(°C)

$\theta_T$  : 전 구조체를 통한 온도강하(°C)

$\Delta R$  : 특정 재료층의 열전도저항( $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} / \text{kcal})$ )

$R_T$  : 전 구조체의 총 열저항( $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} / \text{kcal})$ )

또한 각 재료층을 통과하면서 변화하는 수증기압은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

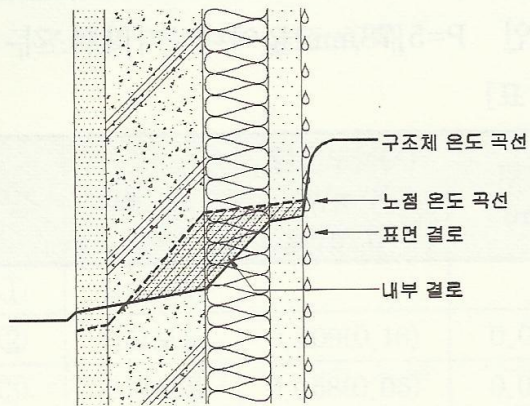
$$\Delta P = \frac{\Delta R_v}{R_{vt}} \times P \dots\dots\dots (5.12)$$

출처 : 건축환경공학; 김재수저; 서우; 2008; p 140

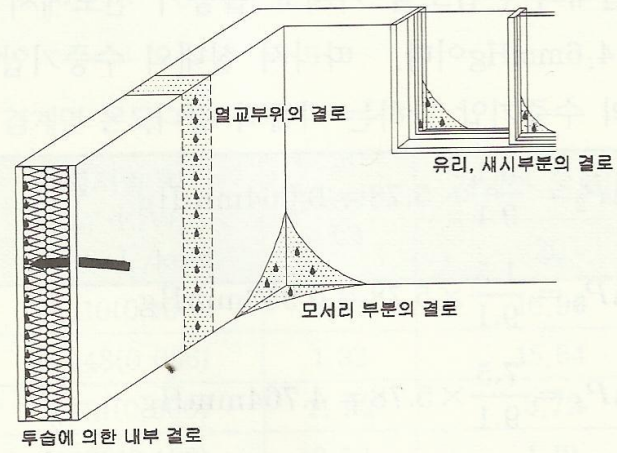
### 3.3 결로의 발생

#### 1) 표면결로(Surface condensation)

- ① 건물의 표면온도가 접촉하고 있는 공기의 포화온도보다 낮을 때에 그 표면에 발생
  - 난방된 실내에서 창문의 찬 표면에 생기는 물기
  - 욕실의 거울 위에 서리는 김
- ② 표면결로는 결로가 발생하는 표면이 불투수성
  - 내측창면의 결로수는 적당한 구멍을 설계하여 해결

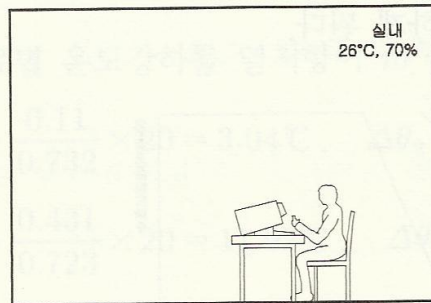


(a) 개념도

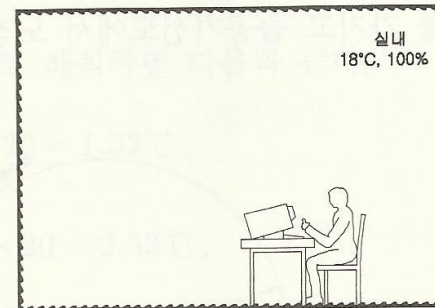


(b) 발생부위

[그림 5.12] 표면열로와 내부열로



(a) 열로없음



(b) 표면열로발생

[그림 5.13] 표면열로의 발생 개념도(겨울)

③ 일시적 결로 : 절대습도가 표면온도 조건에 비해서 급속히 증가하는 경우 발생 → 조절이 불가능 → 건습에 강한 재료만을 사용

- 공조건물에서 문, 창이 열려 있을 때 : 모든 표면에 발생
- 중량건물에서 추운 계절이 끝나고 갑자기 따뜻할 때 : 내부결로 발생

※ 결로방지용 페인트는 결로자체를 조절하는 것이 아니라 그 상태에 대처하기 위한 것(흡수성이 높아 결로수를 빠른 시간에 흡수하여 확장되는 것을 억제함으로써 결로수를 증발시킴)

#### ④ 지속적인 결로

- 구조체의 단열이 잘 안되어 표면온도가 낮을 때
- 실내습도 발생이 극심한 경우

### 2) 내부결로(Interstitial condensation)

- ① 벽체 내의 수증기압 기울기의 노점온도가 온도기울기의 건구온도보다 높게 되면 내부결로가 발생 → 구조체 내에서 수증기가 응결
- ② 경량콘크리트의 경우 내부에서 화학물질이 이동하여 부풀어 오르는 현상 → 철골부재와 같은 구조체에 손상

### 3.4 결로의 원인

#### 1) 결로 발생 조건

- 결로는 구조체의 온도가 습공기의 노점 온도보다 낮을 때 발생함.

$T_c$  (노점 온도) >  $T_s$  (구조체 온도) : 결로 발생함.

$T_c$  (노점 온도) <  $T_s$  (구조체 온도) : 결로 발생 안함.

- 습공기의 노점온도는 습공기의 절대 습도 혹은 수증기 분압에 의해 결정됨. 습공기 중의 수증기량 많으면(즉, 절대 습도 및 수증기 분압 높으면) 노점 온도가 높아져서 결로가 발생할 가능성이 높음.
- 더운 습공기와 차가운 표면이 결로발생 조건

## 2) 결로 유발 요인

(1) 습공기의 노점온도( $T_c$ )를 높이는 요인 (즉, 실내 습공기의 절대 습도 혹은 수증기 분압을 높이는 요인)

### ① 실내 수증기의 과다 발생

- 외부 강우
- 재실자의 호흡 및 발한
- 취사 및 세탁 등

※ 일반가정에서 일상적인 호흡, 조리, 세탁 등의 활동으로 인해 하루 약 12kg의 습기가 발생함.

주거 내 편리해진 시설과 사회관습의 변화로 목욕, 세면, 세탁과 같은 습기발생의 요인이 점차 늘고 있다.

## ② 건물의 기밀 시공

- 침기에 의한 열손실 방지를 위해 창호 등이 기밀 시공되고 있음.
- 이로 인해 자연 환기량이 감소하여, 실내 수증기를 외부로 배출시키는 정도도 크게 감소함.
- 최근의 신주택 환기횟수 : 0.5회/h ( $=0.5 \times \text{실용적(m}^3\text{)}/\text{h}$  : ASHRAE)

## ③ 생활 습관 : 환기 부족으로 인한 결로

- 실내에서의 세탁물 건조, 목욕 횟수 증가
- 안전 등의 이유로 인한 창문 개방 횟수 감소
- 퇴근 후 창을 닫게 되는 야간에 세탁, 취사 등의 행위가 많이 이루어짐.



## (2) 구조체 온도( $T_s$ )를 낮추는 요인

### ① 구조재의 열적 특성

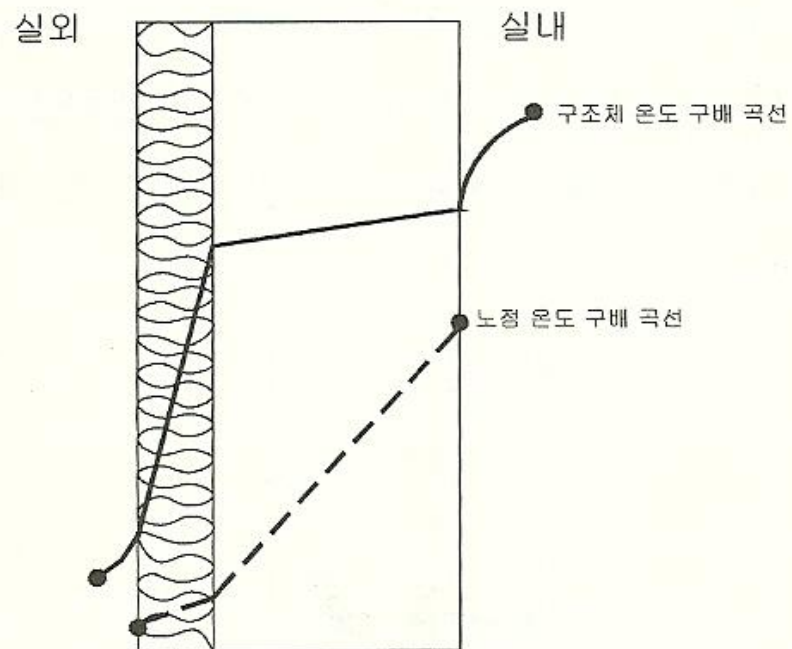
- 단열의 취약부위에서 결로 발생 : 테두리보, 슬래브 지붕, 발코니의 돌출부위 등
- 투습성이 높은 재료 : 건물 외피로 부적당
- 내буд단열재가 설치되지 않은 중량구조체(가열 도중에 결로 발생 가능성이 있음)

### ② 시공불량

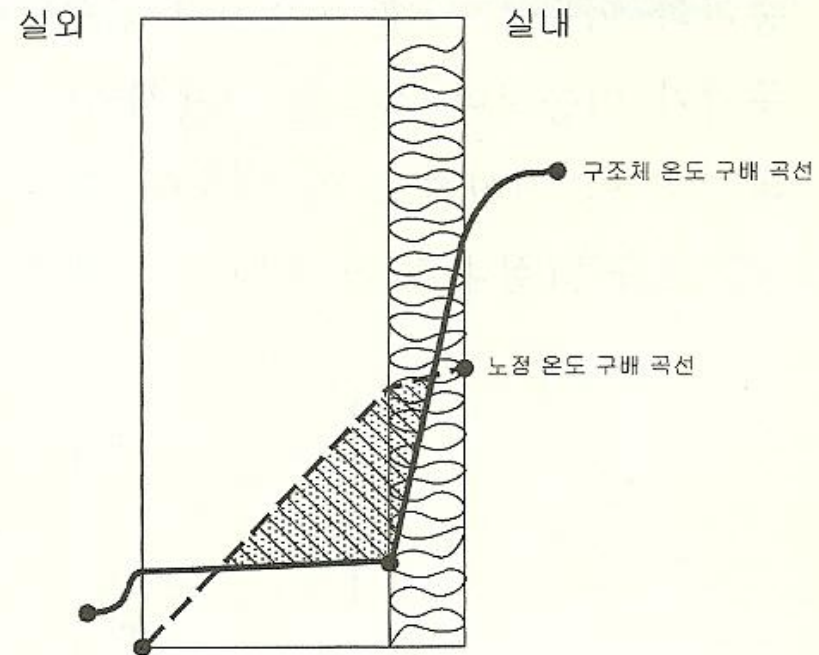
- 단열 부실 시공 → 표면 온도가 가장 낮은 곳
- 냉교(cold bridge) 부위 발생 : 창문의 윗인방

### ③ 비재실시 난방의 중지

- ### ④ 시공직후 미건조 상태에 따른 결로 : 완공 후 약 1달간의 건조기간 중 흡수된 습기는 벽체 외부로 방출되어 내부공기의 습도를 증가



(a) 외단열(결로없음)



(b) 내단열(결로발생)

[그림 5-18] 결로 방지를 위한 단열 방법 비교

출처 : 건축환경공학; 김재수저; 서우; 2008; p 149

## 3.5 결로 방지 방법

### 1) 결로 유발 요인 제거

- 더운 습공기 제거
- 차가운 구조체의 표면 제거

#### (1) 환기

- 절대습도(혹은 수증기 분압)가 낮은 실외 공기를 절대습도(혹은 수증기분압)가 높은 실내 공기와 치환시켜 줌으로써 실내 습공기의 노점온도를 낮춰줌.
- 수증기 발생원 근처에서의 국부적 환기가 효과적
- 각 실의 환기창은 기밀성이 우수, 난방 에너지 손실을 최대한 억제하는 구조

## (2) 난방

- 구조체 온도가 습공기의 노점온도보다 높게 유지되도록 해줌.
- 중량구조의 경우 연속 난방이 결로 방지에 유리

## (3) 단열

- 구조체에서 단열재로부터 실내측의 온도를 높게 유지되게 하여 습공기의 노점온도보다 높게 해줌.(표면 결로 예방에 필수적임)
- 설계단계부터 고려되어야 하는 가장 효과적인 결로 방지 대책

## 2) 방습층(vapor barrier) 설치

- 방습층은 두께가 약 0.1mm정도로 아주 얇아 열저항이 거의 0에 가깝다.
- 열은 방습층에 영향을 받지 않고 자유롭게 이동하지만 습기는 거의 차단됨.
- 방습층의 투습성이  $0.067 \mu\text{g}/\text{Ns}$  이하인 경계층으로 정의된다.

### (1) 방습층의 결로 방지 원리

- 수증기는 수증기압이 높은 곳(주로 실내)에서 낮은 곳(주로 실외)으로 이동함.
- 수증기압 낮으면 노점 온도 낮아짐.

- 방습층을 두면 수증기가 이동하지 못하므로, 수증기 이동시 방습층 앞에서는 노점 온도가 높으나 방습층 뒤에서는 노점온도가 급격히 낮아짐.
- 방습층을 두면 구조체 온도보다 노점온도가 낮아지게 되므로 내부 결로 예방에 매우 효과적임.

## (2) 방습층의 설치 위치

- ① 벽체 : 단열재로부터 따뜻한 쪽
- ② 지붕 : 단열재로부터 따뜻한 쪽(warm roof)

지붕 속 환기 병용하면 효과적

※ 방습층과 더불어 통기, 통습층을 설치하면 보다 효과적으로 내부결로 방지

### ③ 바닥

- 바닥난방의 경우 표면온도가 높아 결로발생 위험이 적다.
- 마루밑 공간 상부의 마루바닥 같이 필요한 경우 : 방습층을 반드시 단열재의 상부에 설치
- 지면과 접해 있는 바닥, 지하실 외벽 : 구조체의 외부를 방수처리하고 내부에 방습층을 별도로 설치하는 것이 바람직.

### 3) 구조체의 결로 방지 대책

#### (1) 표면 결로 방지 대책

- 표면결로는 구조체의 단열 효율에 직접적 영향
- 외단열을 하면 어느 정도 방지
- 결로 방지를 위해서는 벽체의 열관류율(K)를 낮추어 단열성능을 강화
- 실내의 상대습도를 낮추어야 함.



## (2) 내부 결로 방지 대책

- 구조체의 온도가 노점온도보다 높게
- 외단열로 시공해야 결로를 방지

## (3) 기계환기장치를 이용한 결로 방지대책

- 기계장치를 이용하여 창문을 개폐하지 않고 외부의 신선한 공기를 실내에 유입하여 실내의 습도를 조절
- 동계의 경우 에너지 절약적 방법