

# 斷熱과 結露

孫章烈 — 漢陽大學校 教授 · 工博

## THERMAL INSULATION AND CONDENSATION

Sohn, Jang Yeul — Han Yang University Assistant Professor

### 머릿말

에너지 절약적인 건축물의 수요가 늘어남에 따라 건축 기술적인 면에서도 건물의 단열화가 급속히 늘어가고 있다. 그러나 무작정 '단열재'를 많이 사용하였다고 하여 건물의 성능이 향상되는 것은 아니며 단열재의 사용으로 인하여 구조체 내부에 결로현상을 일으켜 건물의 종합적 성능을 저하시키는 예도 드물지 않다. 本稿에서는 결로의 원인, 단열과 결로와의 관계를 개략적으로 서술하고 단열설계, 시공과정에서 반드시 거쳐야 할 결로의 검토 방법을 例示한다.

단열을 하여 건물의 에너지절약과 환경개선의 효과를 얻는 것은 물론 바람직한 일이지만 결로방지를 위하여서도 건물에 적합한 단열방법을 모색하여 건축의 質的저하를 막아야 한다.

### 1. 結露의 發生

벽면의 온도가 실내의 공기(濕한 공기, Moist Air)의 露点温度(Dew Point Temperature)보다 낮을때 그 공기는 飽和狀態(상대습도 100%)를 초과하여 공기중의 수증기는 물방울을 이루며 벽면에 부착한다. 이것을 벽체의 표면결로현상이라고 한다. 결로는 발생상황에 따라 여름철 결로와 겨울철 결로로 나눌 수 있는데 여기에서는 겨울철 결로만을 검토의 대상으로 한다.

겨울철에는 낮은 온도의 外氣의 영향을 받아 외벽의 실내측 표면의 온도는 실내공기보다 낮아진다. 공기는 온도가 낮을수록 수증기를 함유할 수 있는 량(포화수증기압)이 적어지므로 일정량의 수증기를 함유하고 있는 실내공기가 낮은 온도의 외벽표면에 닿으면 그 부분에서 공기의 온도는 표면온도와 비슷 해져 포화수증기압이 낮아지고 이것을 초과하는 수분은 수증

기 상태에서 물방울 상태로 변화하여 표면에 결로하게 된다.(그림 1 참조)

겨울철의 표면결로는 일반적으로 단열성 부족이 원인이며, 따라서 단열재를 벽체에 사용하여 벽체표면온도를 높이므로 방지할 수 있다.

### 2. 斷熱에 의한 結露防止

외기온도를  $\theta_o$ °C, 실내온도를  $\theta_i$ °C, 실내의 상대습도를  $\gamma$ %, 실내노점온도를  $\theta_a$ °C, 벽체표면온도를  $\theta_s$ °C 라고 하면 벽체표면에 결로가 발생하지 않기 위하여서는 표면온도가 공기의 노점온도보다 높아야 한다. 즉

$$\theta_s \geq \theta_a \dots\dots\dots(1)$$

여기에서  $\theta_s$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\theta_s = \theta_i - \frac{k}{\alpha_i} (\theta_i - \theta_o) \dots\dots\dots(2)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_i}} \dots\dots\dots(3)$$

단, k : 벽체의 열관류율

[kcal/m<sup>2</sup>h°C]

$\alpha_i$  : 벽체실내측표면의 열전달율 [kcal/m<sup>2</sup>h°C]

$\alpha_o$  : 벽체실외측표면의 열전

달율 [kcal/m<sup>2</sup>h°C]

$\alpha_1 \sim \alpha_n$  : 벽체구성재료의 두께 [m]

$\lambda_1 \sim \lambda_n$  : 벽체구성재료의 열전도율 [kcal/mh°C]

예로서 그림 2와 같이 단열재를 사용하지 않은 벽체(벽체 1)와 그림 3과 같이 단열재로 단열시공한 벽체(벽체 2)의 표면 결로에 대하여 검토한다.

계산조건으로는 다음을 사용한다.

실내온도  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$

외기온도  $\theta_o = -10^\circ\text{C}$

벽체실내측표면의 열전달율

$\alpha_i = 7$  [kcal/m<sup>2</sup>h°C]

벽체실외측표면의 열전달율

$\alpha_o = 20$  [kcal/m<sup>2</sup>h°C]

철근콘크리트의 열전도율

$\lambda = 1.4$  [kcal/mh°C]

물타의 열전도율

$\lambda = 1.2$  [kcal/m<sup>2</sup>h°C]

포리스치렌 폼의 열전도율

$\lambda = 0.03$  [kcal/m<sup>2</sup>h°C]

(3)식으로 부터 열관류율 k를 구하면 벽체 1의 k=3.12kcal/m<sup>2</sup>h°C, 벽체 2의 k=0.50 kcal/m<sup>2</sup>h°C가 된다. 다음에 (2)식으로 부터 벽체의 내부표면 온도를 구하면 벽체 1의  $\theta_s = 6.6^\circ\text{C}$ ,

그림 1. 결로현상의 설명도

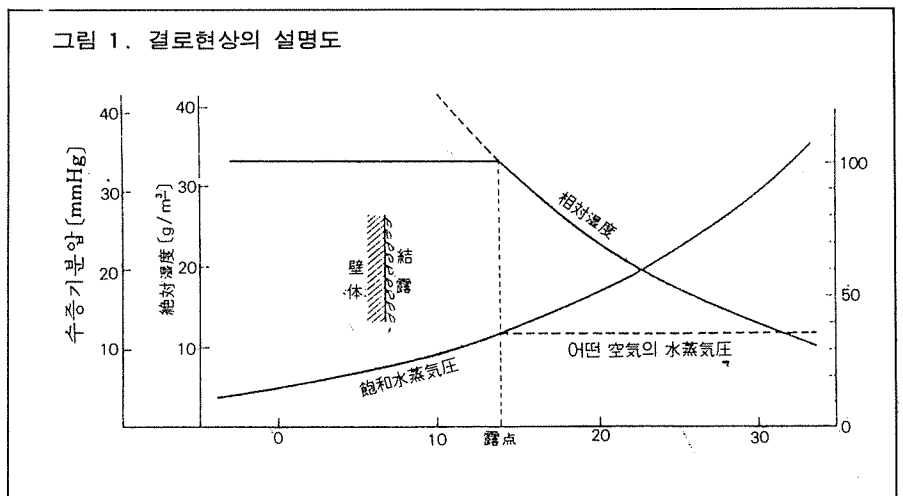
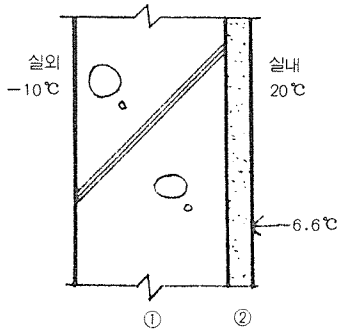
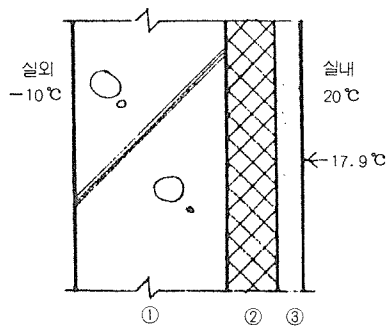


그림 2. 벽체 1 (k=3.12)



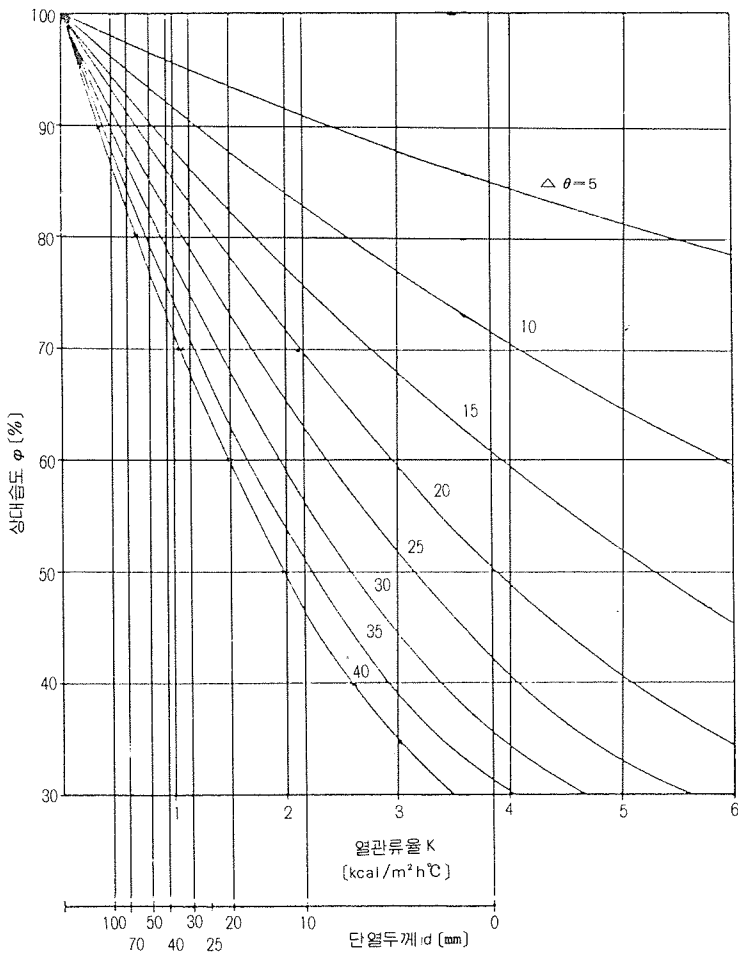
- ① 철근콘크리트 150mm
- ② 몰탈 25mm

그림 3. 벽체 2 (k=0.50)



- ① 철근콘크리트 150mm
- ② 포리스치렌 폼 50mm
- ③ 몰탈 25mm

그림 4. 表面防露線圖



벽체 2의  $\theta_s = 17.9^\circ\text{C}$ 가 된다. 작은 온도에서 노점온도가 되는 실내의 상대습도를 구하면(濕한 공기線圖를 사용)  $6.6^\circ\text{C}$ 에서 41%,  $17.9^\circ\text{C}$ 에서 88%가 된다. 따라서 그림 2의 단열하지 않은 벽체의 경우에는 실내 상대습도가 41%를 넘으면 결로가 발생하

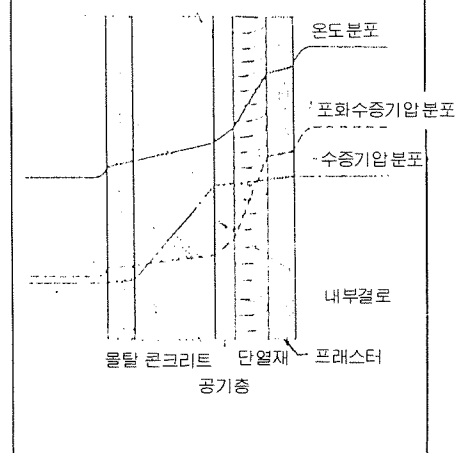
고 그림 3의 50mm의 단열재를 사용한 벽체의 경우에는 상대습도가 81% 이상이 되어야 결로가 발생한다. 일반적으로 실내의 쾌적 습도조건은 상대습도 50% 전후이므로 그림 3의 경우에는 실내에서 특별히 많은 수증기를 발생시키지 않는한 결로는 방지된다.

실내외온도차  $\Delta\theta (= \theta_i - \theta_o)$ , 실내 상대습도  $\varphi$  [%]인 경우 벽체표면에 결로가 발생하지 않기위한 조건의 열관류율 k 또는 단열두께 d를 구하여 실용상에 편리하도록 그래프화한 것이 그림 4이다. 표면결로가 생기지 않게 하기 위하여서는 k, d의 값이 그림의 곡線보다 왼쪽이 되도록 하여야 한다. 이 그림은 (2)식과 (3)식을 이용하여 계산한 결과이며 단열두께 d의 값은 콘크리트 100mm의 벽체에 열전도율  $\lambda = 0.05 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 의 단열재를 부착했을 때의 결과이다.

### 3. 内部結露

실내벽체의 표면결로는 단열에 의하여 표면온도를 높임으로 방지할 수 있으나 부주의한 단열은 내부결로를 발생시켜 결로의 피해가 한층 더 심각해지는 경우가 있다. 즉 그림 5와 같이 수증기압이 다른 두 공기가 多物質의 재료나 틈이 있는 벽을 사이에 두고 있을때 수증기압이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 수증기가 이동하게 된다. 이 경우 벽체내부의 수증기압 분포(---선)와 포화수증기압 분포(----선)를 비교하여 포화수증기압의 낮은 부분이 있으면 여기에 결로한다(그림의 사선부분). 이것을 내부결로라고 한다.

그림 5. 단열재에 의한 내부결로



### 4. 내부결로의 방지

내부결로의 발생여부를 이론식에 의하여 검토할 수 있으나 복잡하고 명쾌하지 않으므로 일반적으로 圖式解法을 널리 사용한다. 여기에서는 이론식에 대한 설명은 생략하고 圖式解法을 이용하여 내부결로의 검토방법을

그림 6. 내부단열의 예

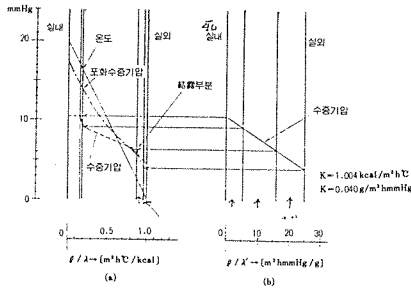


그림 7. 외부단열의 예

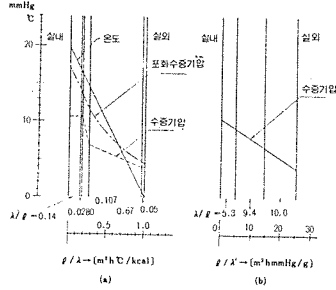
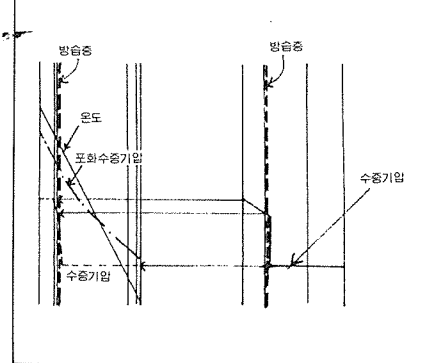


그림 8. 내부결로방지의 검토 (내부단열에 방습층설치)



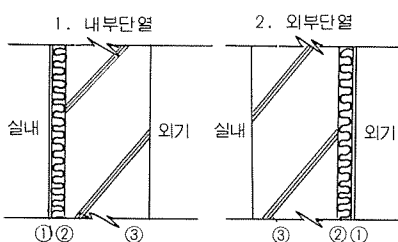
例示한다. 내부결로현상은 단열재의 설치위치에 따라 달라지므로 단열재를 벽체실내부측에 설치하였을 경우 (내부단열)와 실외부측에 설치하였을 경우 (외부단열)에 대하여 검토한다.

실내외 설정조건

실온:  $\theta_i = 20.0^\circ\text{C}$ , 상대습도: 60% [수증기압 10.5mmHg]

외기:  $\theta_o = 0.0^\circ\text{C}$ , 상대습도: 90% [수증기압 4.1mmHg]

계산대상



圖解에 의하여 결로를 검토하기 위

벽체구성재의 물리적 성질

| 번호 | 명칭    | 두께d(m) | 열전도율 λ [kcal/mh°C] | 열전도저항 $\rho/\lambda$ [m²h°C/kcal] | 습기전도율 λ' [g/mhmmHg] | 습기전도저항 $\rho/\lambda'$ [m²hmmHg] |
|----|-------|--------|--------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------------------|
|    | 내표면공기 | —      | $\alpha_i = 7$     | $1/\alpha_i = 0.14$               | $\alpha_i' = 20$    | $1/\alpha_i' = 0.05$             |
| ①  | 합판    | 0.004  | 0.14               | 0.0286                            | 0.00075             | 5.3                              |
| ②  | 단열재   | 0.020  | 0.03               | 0.670                             | 0.002               | 10.0                             |
| ③  | R C   | 0.150  | 1.4                | 0.107                             | 0.016               | 9.4                              |
|    | 외표면공기 | —      | $\alpha_o = 20$    | 0.05                              | 50                  | $1/\alpha_o' = 0.02$             |

열관류율:  $k = 1/R = 1.004$  ( $R = 0.9956$ ) kcal/m²h°C

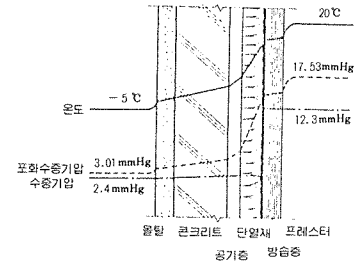
습기관류율:  $k' = 1/R_v = 0.040$  ( $R_v = 24.77$ ) g/m²hmmHg

하여 그림 6-(a)에서 벽체 각부분을 열전도저항 ( $\rho/\lambda$ )에 대응하는 길이로 바꾸어(예를 들면 열저항 0.1을 길이 2mm로 하면 열저항 0.2에는 4mm가 된다) 실제의 벽체구조 순서대로 나란히 작도한 후 외기온  $\theta_o$ , 실내온  $\theta_i$ 의 위치를 좌측눈금에서 찾아 결정한다.  $\theta_o$ 와  $\theta_i$ 를 연결하는 선과 각부분 경계선과의 교점을 구하여 그 교점에서의 온도를 구할 수 있다.

다음으로 그림 6-(b)의 습기전도저항 ( $\rho/\lambda'$ )에 대하여서도 그림 6-(a)에서와 마찬가지로 방습층을 습기전도저항에 대응하는 길이의 비율로 작도하여 각 부분에서의 수증기압을 그림 6-(a)에 옮긴다. (----선)

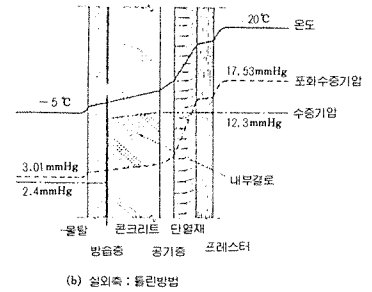
그림 5-(a)의 각 부분 온도에 대한 포화수증기압을 濕한 空氣線圖로부터 구하여 작도한다. (---선) 완성

그림 9. 防湿層에 의한 防露



방습층

(a) 실내측: 바른방법



(b) 실외측: 틀린방법

한 작도결과로 부터 포화수증기압이 수증기압보다 낮은 부위에 결로가 발생한다는 것(사선부분)을 판단할 수 있다.

그림 7의 외부단열에 대하여서도 그림 6과 같은 절차에 의하여 검토한다.

이상의 검토에서 알 수 있는 것처럼 외부단열의 경우에서 내부결로의 우려가 전혀 없으나 내부단열의 경우에는 내부결로의 염려가 있으므로 습기의 차단을 위하여 방습층을 설치할 필요가 있다. (그림 8) 방습층은 실내측에 가까운 부분에 설치하여야 하며 방습층을 실외측에 설치하였을 경우에는 그림 9와 같이 오히려 내부결로가 심해지므로 주의하여야 한다. 방습층의 재료로는 습기전도저항이 큰 루-핑, 비닐시-트 등을 사용한다.