

커튼월에서의 결로저항계수

Condensation Resistance Factor of Curtainwalls

한 화 택
H. T. Han
국민대학교 기계공학부



- 1957년생
- 건축물에서의 열전달문제와 실내공기환경의 제어에 관심을 가지고 있다.

1. 서 론

1.1 결로란

실내의 습공기가 노점온도 이하로 내려간 벽면에 접촉하면 공기중에 내포되어 있는 수증기가 물방울로 응축되어 벽면에 부착되는데 이를 결로(condensation)라고 한다. 결로는 겨울철에 외벽이나 창문의 내부 표면에서 종종 발생하고, 고온다습한 여름철에 지하실 벽면과 같이 상대적으로 온도가 낮은 곳에서 부분적으로 발생하기도 한다. 이와 같은 건축물에서의 결로현상으로 인하여 건축물 표면이 더러워지고 곰팡이의 서식환경에 제공되는 등 비위생적일 뿐만 아니라, 지속적인 결로가 발생하면 단열재등 건축자재의 열적 성능 및 구조역학적 강도를 저하시킬 수가 있다. 또한 응축 잠열에 의한 열전달에 의하여 추가적인 냉난방부하가 발생하기도 한다.

건축물에서의 결로는 크게 두가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫째, 노출되어 있는 건축물 표면에 습공기가 직접 접촉하여 응축하는 표면결로(visible condensation)와 다공성 건축매질 내부로 습공기가 확산되어 벽체 내부에서 응축하는 내부결로(hidden condensation, concealed con-

densation)가 그것이다. 본고에서는 겨울철에 있어서 커튼월(curtain-wall) 표면에 발생하는 표면결로에 관하여 고찰해 보고자 한다.

1.2 커튼월이란

커튼월이란 원래 중세의 성곽에 사용된 성벽을 일컫는 말로 사용되었으나 현재는 주로 건축물에서 구조체로서의 뼈대 바깥쪽에 공간구획을 위해 설치하는 얇은 비내력 외주벽을 일컫는 말로 사용되고 있다. 커튼월에는 투명 또는 반투명 유리를 이용한 유리창부분(glazing section)과 투명하지 않은 마감재를 이용한 스펀드럴 부분(spandrel section)으로 구성되어 있다. 스펀드럴 부분은 보통 내부에 단열재를 설치하므로 실내측 표면의 온도가 노점이하로 내려가는 예는 드물다. 그러나 유리창 부분이나 창틀(mullion section)에 해당하는 부분은 단열재의 설치가 곤란하고 자체의 단열효과에 의존하여야 하므로 실내측 표면온도가 내려가서 결로가 발생하기가 쉽다. 유리창 부분에서는 열손실과 결로방지를 위하여 이중창(double glazing)이나 삼중창(triple glazing)등의 단열성능이 우수한 창재료를 이용한다. 단열성능을 향상시키기 위하여 다중창 사이의 간극에는 일반공기뿐만 아니라 열전도율이 낮은 아

르곤(argon), 크립톤(krypton), SF₆(sulfur hexa fluoride)등의 기체를 채운 것도 있고 특수한 유리재질이나 표면에 낮은 방사율을 갖는 코팅재를 입힌것도 이용된다.

가장 결로가 우려되는 곳은 알루미늄과 같은 금속재질을 사용하는 커튼월의 창틀 부분이다. 알루미늄은 가공면이 수려하고 가공이 용이하며 중량에 비하여 강도가 높아서 고층건물의 커튼월 창틀에 많이 이용되고 있다. 그러나 알루미늄은 열전도율이 매우 높아서 열손실이 많을 뿐만 아니라 내부 표면에 결로와 같은 열적 문제점을 야기할 수 있다. 따라서 커튼월에서의 결로방지를 위하여서는 창틀설계에 특히 유의하여야 한다. 창틀에서의 결로를 방지하고 열전달량을 줄이기 위해서 창틀을 구성할 때 열교(thermal bridge)를 형성하여 열전달을 차단한다. 그러나 커튼월 창틀부분의 단면 형상이 대단히 복잡하고 열전달 메카니즘이 복잡하여 정량적인 해석보다는 주로 과거의 경험에 의존하여 설계하고 있는 실정이다. 커튼월의 열적 성능을 향상시키기 위한 열교의 위치 선정과 창틀단면 부품들의 설계에 있어서 구조적인 성능과 제작상의 용이성과 아울러 열전달 경로 및 열전달 메카니즘을 정확히 이해하여야 한다.

2. 커튼월을 통한 열전달

커튼월을 통한 열전달 및 온도분포에 대한 해석을 위해서는 커튼월을 구성하는 재질에 대한 열전도율과 커튼월을 통한 열전달 메카니즘을 이해하여야 한다. 그림 1은 커튼월을 통한 각종 열전달 메카니즘을 보여주고 있다. 실내외의 표면에서는 대류에 의한 열전달과 복사에 의한 열전달이 이루어진다. 또한 다중창내에서는 복사와 자연대류에 의한 열전달이 발생하고 각 커튼월 구조물을 통해서 열전도가 행해진다. 주간에 비하여 야간에 결로 가능성이 더 높기 때문에 결로 예측을 위한 열전달 해석에서는 태양에 의한 태양열 복사는 고려하지 않는다. 또한 틈새를 통한 외기침투에 의한 영향은 현재 단계에서는 고려하지 않는다.

2.1 열전도율

표 1은 커튼월에 사용되는 재질의 열전도율을 보여준다. 알루미늄의 열전도율은 매우 높아서 커튼월을 통한 전도의 주요 열전달 경로가 된다. 실리콘은 커튼월내의 알루미늄 부품들의 체결과 연결부의 밀폐에 도움이 되며 전도에 의한 열손실을 줄이기 위한 열교 역할을 한다. 또한 공기의 열전도율도 매우 낮아서 커튼월내의 작은 공기층은 외기의 침투가 없는 한 열전도측면에서 우수한 단열재 역할을 한다.

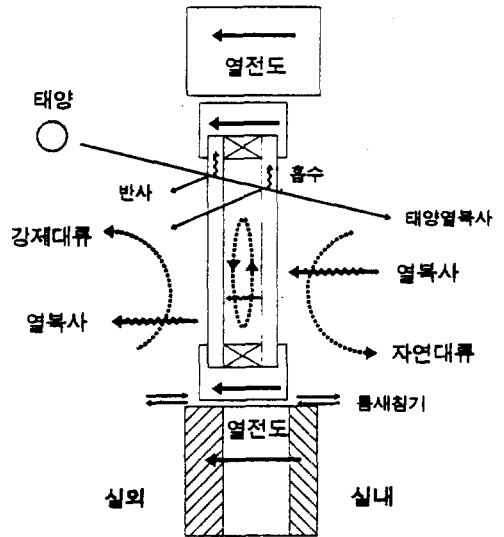


그림 1 커튼월을 통한 열전달 메카니즘

표 1 커튼월 재료의 열전달계수

재 질	열전도율	
	W/m ² ℃ (Btu-in/ft ² F)	
알루미늄(1100)	222	(1536)
실리콘(RTV7403)	0.208	(1.44)
네오프렌	0.1465	(1.016)
유 리(열강화)	0.935	(6.48)
대리석	3.5	(24)
파이버글라스	0.040	(0.28)
우레탄폼	0.017	(0.12)
석고보드	0.43	(3.0)
공 기	0.026	(0.18)

2.2 실내외 표면에서의 대류열전달

실내와 실외에 노출된 표면에서 주위 공기와의 대류와 복사에 의한 열전달이 복합적으로 이루어진다. 실외면의 열대류에서는 주로 바람에 의한 강제대류를 고려하고 실내면에서는 자연대류에 의한 열대류를 고려하여야 한다. 대류 열전달계수와 복사 열전달계수의 합을 막열전달계수(film heat transfer coefficient)라고 하고 다음식과 같이 표현된다.

$$h = h_{conv} + h_{rad} \quad (1)$$

실내면의 온도차에 의한 자연대류열전달 계수는 ASHRAE에서 주어진 바와 같이 단순화된 식(2)를 사용하여 구할 수 있다. 층류와 난류영역에 대해서, 자연대류 열전달계수 $h_{conv}(W/m^2 \cdot ^\circ C)$ 는 다음과 같이 벽면과 대기의 온도차 $\Delta T(^\circ C)$ 와 평판의 길이 $L(m)$ 의 함수형태로 주어진다.

$$h_{conv} = 1.42(\Delta T/L)^{1/4} : \text{층류영역}$$

$$h_{conv} = 0.95(\Delta T/L)^{1/3} : \text{난류영역} \quad (2)$$

건물벽 외부표면에서의 바람에 의한 강제대류 열전달 계수는 McAdams가 제시한 열전달 상관관계식을 이용할 수 있다.

$$h_{conv} = 5.62 + 3.9V : 0 < V < 5m/s$$

$$h_{conv} = 7.2V^{0.78} : 5 < V < 30m/s \quad (3)$$

여기서 V 는 풍속(m/s)이고, h_{conv} 는 강제대류 열전달계수($W/m^2 \cdot ^\circ C$)이다. 겨울철의 결로해석을 위해서는 일반적으로 강풍조건인 6.7m/s(15mph)의 외기조건에 대하여 해석을 수행한다.

2.3 복사열전달

복사에 의한 열전달량은 Boltzmann식에서 주어진 바와 같이 절대온도의 4제곱의 차에 비례한다. 그러나 온도차가 그리 크지 않은 경우에 대해서 이식을 선형화하여 열복사에 의한 열전달 계수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$h_{rad} = 4\epsilon\sigma T_{mean}^3 \quad (4)$$

여기서 σ 는 Boltzmann 상수($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)이고, ϵ 는 표면방사율(emissivity)이며 T_{mean} 는 복사열교환을 행하는 두 표면의 평균온도에 해당한다. 표 2는 각종 건축재 표면의 열방사율을 보여준다. 상온에서 온도차가 30°C 이내인 경우 선형화에 따른 오차는 약 0.25% 이내이다. 실내면의 경우 복사열교환은 실내표면과 이를 마주보고 있는 주위의 다른 실내벽면과 이루어지므로 보통 실내공기온도를 주위온도로 이용한다. 실외면의 경우 복사열교환을 이루는 주위온도는 인접한 위치의 건물, 하늘, 지면등을 향하는 형상계수를 고려하여야 하지만, 보통 실외기온을 이용하며 천정과 같은 수평 커튼월의 경우에는 먼하늘(far sky)의 온도를 이용한다. 먼하늘의 온도는 공기중에 먼지나 수증기가 없는 맑은 날은 -40°C까지도 내려갈 수 있다.

표 2 각종 표면의 열방사율

재 질	표면방사율
알루미늄 상용 연마표면 산화표면	0.09 0.039-0.057 0.20-0.31
페인트, 라커, 바니쉬 흰 에나멜 검은 광택 라커 알루미늄 페인트 오일 페인트 라커	0.91 0.875 0.27-0.67 0.92-0.96 0.80-0.95
유 리 보통유리 파이렉스, 라임, 소다유리	0.94 0.85-0.95
도 기(광택) 붉은 거친 벽돌 자갈(연마) 석면 나무(참나무) 물표면	0.92 0.93 0.93 0.93-0.94 0.90 0.95-0.963

2.4 공기층을 통한 열전달

수직 유리창내의 공기층이나 건축자재 사이의 공기층을 통한 대류열전달계수는 Elsherbiny등에 의해 주어진 Nusselt수의 상관관계로 부터 구할 수 있다.

$$Nu = [1 + (0.0303Ra^{0.402})^{11}]^{0.0901} \quad (5)$$

여기서 Nu와 Ra는 공기층 두께에 기초한 Nusselt 수와 Rayleigh 수이다. 이 상관관계는 Ra수가 2×10^5 이하에 대하여 또 종횡비가 40에 대하여 주어졌으나 그 이상의 종횡비에 대해서도 그리 크게 변화하지 않는다. 또한 공기층의 내외측 면사이에는 복사열교환을 행한다. 복사열 전달은 앞에서 설명한 것과 같은 방법으로 구한다. 나란한 두면 사이의 형상계수(shape factor)는 1.0이다. 이중창의 경우에도 두 유리면사이에 복사열교환을 하는데, 가시광선 영역에서의 유리의 방사율(emissivity)은 매우 작으나 긴 적외선 영역에서는 일반벽체와 유사하다.

창틀에 의하여 둘러싸인 2차원 밀폐공기공간에 대하여서는 둘레에 따른 경계온도조건이 미리 주어지지 않기 때문에 둘러싸고 있는 알루미늄 표면온도의 평균온도로 생각할 수 있다. 이러한 공기층 공간에 대하여서는 단열 경계조건을 사용하여도 무방하나 좀더 정밀한 계산을 위해서는 밀폐공간 둘레의 평균온도와 내부 공기층온도를 반복하여 적용 계산하여야 한다.

3. 결로저항 계수

그림 2에 보이는 바와 같이 습공기선도에서 실내 습공기의 노점온도보다 표면의 온도가 낮은 경우 그곳에 응축이 발생한다. 결로는 표면중에서도 최저의 표면온도를 갖는 곳에서 우선 발생하므로 실내측 최저 표면온도가 결로의 가능성(condensation potential)을 의미하는 중요한 파라미터이다. 결로를 방지하는 척도로서 최저 표면온도를 이용하여 다음과 같이 결로저항계수를 정의할 수 있다.

$$CRF = (T_{min} - T_o) / (T_i - T_o) \quad (6)$$

여기서 T_i , T_o 은 각각 실내외의 온도이며 T_{min} 은 실내에 노출된 표면온도중 최저값이다. 결로 저항 계수는 실내측 표면의 최저온도의 무차원값에 해당한다고 이해할 수 있다. 이는 주어진 벽체나 커튼월의 고유한 값으로 실내외의 온도조건과는 무관하다. 결로저항계수가 큰 벽체란 주어진 외기조건에 대해서 실내표면온도가 상대적으로 높기 때문에 실내의 높은 상대습도에 대해서도 결로의 가능성이 낮은 벽체를 의미한다.

그림 3은 주어진 결로저항계수 값을 갖는 커튼월에서의 실외온도에 따른 허용 최대 실내습도를 보여주고 있다. 또한 이 그림은 주어진 실내의 상대습도와 실외의 온도에 대하여 표면결로를 방지하기 위하여 필요한 벽체의 최저 결로저항계수를 결정하는데 이용될 수도 있다.

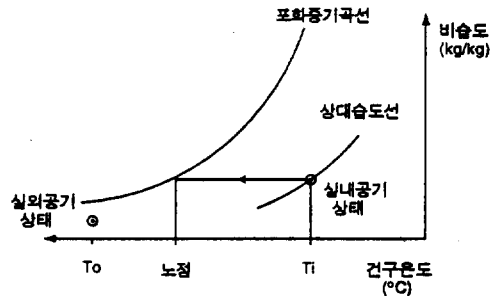


그림 2 습공기 선도

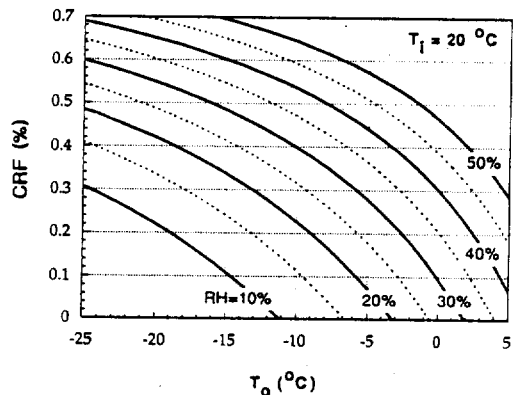


그림 3 실외온도에 따른 허용 실내상대습도

3.1 1차원 열전도해석에 의한 결로저항계수

다중층으로 이루어진 벽체의 1차원 열전달해석은 다음식과 같이 열저항의 개념으로 쉽게 설명된다. 다중층 벽체나 다중창의 총 열저항계수(R-factor)는 실내외의 막열저항과 각층의 열저항의 총합과 같고 이의 역수를 U-factor라고 한다.

$$R=R_1+R_2+R_3+\dots+R_n \quad (7)$$

$$U=1/R \quad (8)$$

여기서 R_1 와 R_n 는 각각 실내면과 실외면의 막열저항에 해당하고 이는 실내외면의 막열전달계수의 역수에 해당한다. 또한 R_1, R_2 등은 다중층 각각의 열저항값이다. 이때 실내 표면의 무차원 온도인 결로저항계수(CRF factor)와 열저항계수(R-factor)와는 다음과 같은 관계에 있다.

$$CRF_1 = \frac{(T_{is} - T_o)}{(T_i - T_o)} \cdot \frac{1 - 1/h_i R}{1} \quad (9)$$

여기서 T_{is} 는 실내표면온도, h_i 는 실내표면의 막열전달계수, 그리고 R 은 다중층의 총열저항값을 의미한다. 그림 4에 벽체 또는 다중창의 열저항계수와 결로저항계수의 관계가 주어져 있고 단일창, 이중창, 삼중창에 대한 열저항값이 표시되어 있다. 다중창의 경우, 공기층의 두께는 13mm

이고 순수공기로 충전되어 있는 경우에 대한 열저항값이다. 이때에 사용된 표면에서의 막열전달계수와 열저항값에 대해서는 앞 절에서 이미 설명하였다.

3.2 2차원단면의 결로저항계수

유리창의 구석부분과 복잡한 단면을 갖는 창틀에서의 열전도 문제는 위의 1차원 해석으로는 해석이 불가능하다. 커튼월 단면에서의 최저온도 및 표면온도분포는 2차원 유한요소법 해석을 수행하여 구할 수 있다. 단면의 형상을 삼각형 또는 사각형의 유한요소로 나누어 각 요소마다 그 재질에 따른 열전도율을 적용한다. 커튼월에 주로 사용되는 재질의 열전도율은 이미 표 1에 나타나 있다. 또한 앞에서 설명한 대류열전달계수 및 복사열전달계수가 전체 계산영역에 대해서 경계조건으로 대입한다. 유한요소법 해석은 직접 프로그래밍을 수행할 수도 있고 상용 열전도 프로그램을 사용할 수도 있다. 열전도 방정식 해법은 수학적으로 완전히 정립되어 있고 프로그래밍에서 발생하는 오차는 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다. 단 경계조건에 대입되는 열전달 계수의 유추값과 두개의 다른 재질의 접촉에 의한 접촉 열저항의 유추값이 해의 정확도를 결정하는데 대단히 중요한 역할을 하게 된다.

2차원 단면에서의 결로저항계수는 계산된 실내측 표면온도중 최저온도($T_{is, min}$)를 무차원한 온도와 같다.

$$CRF_2 = \frac{(T_{is, min} - T_o)}{(T_i - T_o)} \quad (10)$$

전체 커튼월의 결로저항계수는 각 단면에서의 최저온도값에 근거한 단면 결로저항계수 값중 최소값으로 표시한다.

4. 열전달 및 결로저항계수의 해석결과

4.1 CRF-factor

그림 5에 수평창틀과 수직창틀 부근의 커튼월 단면에 대하여 유한요소해석을 수행한 온도분포 결과가 그림에 나타나 있다. 실리콘 열교(thermal bridge)와 단열재를 경계로 온도강하가 크

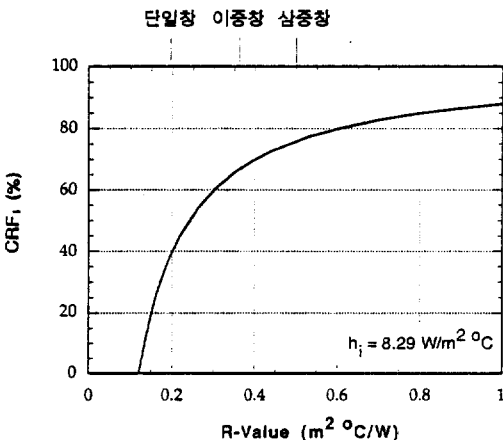


그림 4 창 열저항값과 결로저항계수의 관계

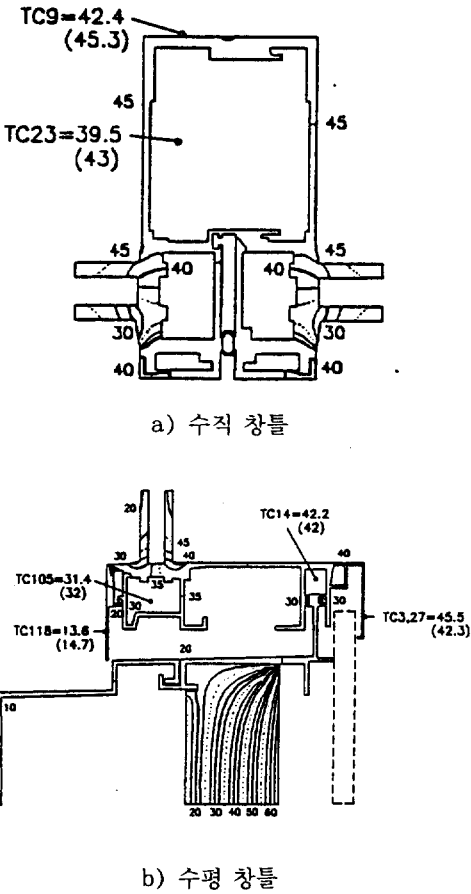


그림 5 커튼월 내의 온도분포 계산결과와의 예

게 나타나며 알루미늄 조각내에서는 온도변화가 그리 크지 않다. 그림에서 TC는 열전대에 의한 온도 측정결과이며 괄호안에 표시된 숫자는 수치 해석결과이다. 여기서 모든 온도는 화씨(°F)로 나타나 있다. 전체적으로 실험결과와 약 화씨 3~4도 이내로서 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 유리창 부분에서는 창틀과 맞닿는 구석에서 약 5cm 정도까지는 2차원 열전도에 의한 구석효과(edge effect)가 나타나고 있으며, 그 보다 멀리 떨어진 부분에서는 1차원 열전달 해석 결과와 동일하다. 여기서 이중창 사이의 간격은 약 13mm이다. 수평 창틀의 경우 결로저항계수가 52.8로 나타났으며 수직창틀의 경우에는 64.1로 나타났다. 실험결과에 의하면 수평창틀에서 최소

표면 온도를 보였으며 이곳에서 가장 먼저 결로가 발생하였다. 최소표면온도에 의한 결로저항계수값은 52로 측정되어 수치해석결과와 잘 일치하였다.

그러나 실험결과에 의하면, 같은 형상의 프레임에 대해서도 수직 높이에 따라 결로가 불균일하게 발생하였는데 이는 실내측 표면을 따라 하강하는 자연대류 기류에 의한 표면 열전달계수가 일정하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 본 해석에서 가장 오차의 소지가 있는 부분이 막열전달 계수값과 두개의 다른 부품의 접촉에 의한 접촉 저항이다. 막열전달계수를 보다 정확히 예측하기 위해서는 복잡한 표면위에서의 자연대류에 대한 유동 해석을 수행하여야 한다.

4.2 U-factor

커튼월을 통한 총 열전달량은 실내 또는 실외 표면의 온도분포로부터 구할 수 있다.

$$Q = \int h \Delta T dA \quad (11)$$

여기서 h 는 막열전달계수이며 ΔT 는 커튼월 표면과 주위와의 온도차이다. 적분은 실내면 또는 실외면을 따른 돌출된 표면적에 대하여 수행되어야 한다. 1차원 해석이 가능한 부분은 열저항의 개념으로 간단히 해석이 되고 구석부분에 대해서는 2차원 해석결과에 의한 온도분포를 대입하여 구한다. 또한 전체 커튼월에 대한 U-factor는 각 부분을 통한 열전달량의 총합으로부터 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$U = Q/A_c(T_i - T_o) \quad (12)$$

여기서 A_c 는 커튼월의 단면적이고 T_i , T_o 는 실내외 온도이다. 그림 6은 샘플 커튼월의 각 부분을 통한 면적비와 열전달비를 구한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 스펠드럴 부분은 다시 단열재 부분과 프레임부분으로 나누어져 있는데, 스펠드럴 프레임 부분이란 스펠드럴에 가려져 노출되지 않은 프레임 부분을 의미한다. 스펠드럴 부분의 면적은 상당히 큰 비중을 차지하고 있으나 이를 통한 열전달량은 그리 크지 않다. 반면 예상할 수 있는 바와 같이 프레임부분에 대해서는 단면적에 비하여 상당히 큰 열전달량을 보인다.

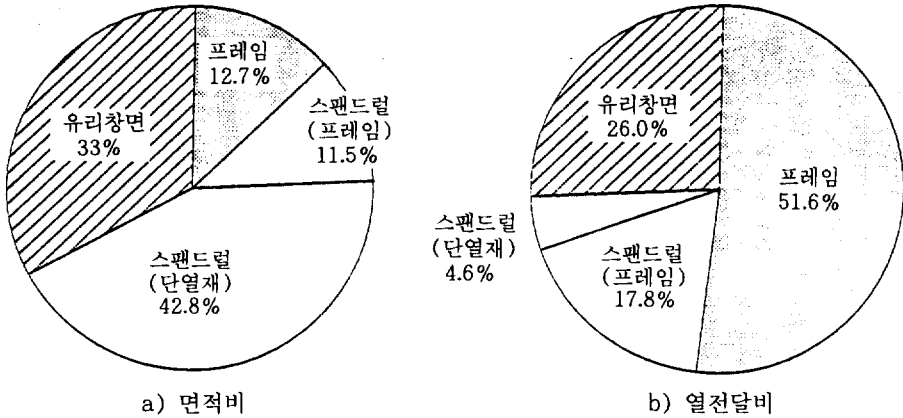


그림 6 커튼월 면적비와 열전달비의 계산 예

5. 결 론

결로저항계수(CRF-factor)는 열저항계수(R-factor)나 U-factor와 마찬가지로 커튼월의 형상과 설계에 따라서 결정되는 고유한 값으로서 실내외의 온도조건이나 습도조건과 무관하므로 커튼월의 열적성능을 표시하는 지표로 사용될 수 있다.

완성된 커튼월의 결로저항계수는 전체 커튼월의 부분적 최저 실내 표면온도에 의하여 지배된다. 알루미늄과 같은 열전도율이 큰 금속재질을 사용하는 경우 커튼월 창틀부분에서의 결로저항계수가 전체적인 커튼월의 결로저항계수를 결정하므로 특히 창틀 부분에서의 열성능을 향상시키기 위한 노력이 필요하다.

커튼월을 통한 열전달 경로를 정확히 파악하여 중요한 열전달 경로를 적절히 차단할 수 있도록 열교(thermal bridge)의 위치가 선정되어야 한다. 결로방지를 위하여 실내측 부품과 실외측 부품이 직접 맞닿지 않도록 열교를 위치시키는 것이 바람직 하다. 또한 실내측 커튼월 표면이 실내쪽으로 돌출되어 노출된 표면적을 넓게 하고 실외측의 돌출 표면적은 적게 함으로써 결로 저항계수를 크게 할 수 있다.

결로저항계수를 향상시킴으로써 표면의 결로 방지뿐만 아니라 커튼월을 통한 열손실의 감소에

도 기여할 수 있다.

결로해석을 보다 정확하게 수행하기 위해서는 열전달계수의 위치에 따른 변화를 고려하여야 하며 외기침투에 의한 온도변화등도 고려하여야 하는데 이는 추후 연구과제라 하겠다.

참 고 문 헌

1. ASHRAE, 1993, ASHRAE Handbook-Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.
2. AAMA, 1988, "AMA Standard 1503. 1-88, Voluntary test method for thermal transmittance and condensation resistance of windows, doors and glazed wall sections," American Architectural Manufacturer Association.
3. McAdams, W. H., 1954, 'Heat Transmission', 3rd ed. McGraw-Hill, New york.
4. Elsherbiny, S. M., Raithby, G. D. and Hollands, K. G. T., 1982, Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers," J. Heat Transfer 104.
5. Han, H. Khusinsky, B. M., Crooks, B., 1992, "Numerical prediction of moisture

- condensation on curtain walls using the finite-element method and its experimental validation," ASHRAE Trans. Vol. 98, Pt. 1, pp. 574~583.
6. Wright, J. L. and Sullivan, H. F., "A 2-D numerical model for natural convection in a vertical rectangular window cavity," ASHRAE Trans. Vol. 100, Pt. 2.
7. McGowan, A. G., 1995, "Predicting window condensation potential," ASHRAE J. Vol. 37, No. 7, pp. 24~29.