

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 18, No. 3, 1998

## 불투명 외피의 열관류에서 단열재의 습도영향<sup>1)</sup>

이 성

동의대학교 건축설비공학과

### Effects of the Moisture on the Overall Heat Transfer Through Heat Insulators Opaque Envelopes

S. Lee

*Donggeui Univ. Dept. of Architectural Equipment*

#### 요 약

일반적으로 건물 단열재는 건조된 것이 사용되며 이 상태에서 열전도율을 측정하여 열 손실을 산정할 때 기초자료로 이용될 수 있다. 그러나 이러한 단열재가 흡습성 재료인 경우에는 습도평형 혹은 다른 작용에 의해 습도가 높아지기에 이에 따라 열전도율도 상승하게 된다. 이처럼 재료 열전도율의 상승효과는 건축물에 흡습성 재료가 사용될 경우 그 사이에 비흡습성 단열재료가 시공됐을 때도 양쪽재료의 흡습성으로 인하여 단열재의 열전도율이 상승하게 되며 이에 따른 열손실 또한 높아진다. 본 논문에서는 이러한 열전도율의 상승을 간단하게 계획단계에서 적용할 수 있도록 실측에 의해 검증된 약산식을 통해 산출될 수 있도록 하였다.

1. 이 논문은 1997학년도 동의대학교 산업기술개발연구소 자체 학술연구조성비의 지원을 받아 작성되었음

## Abstract

The heat conduction and the water vapour diffusion flow through heat insulators between hygroscopical moist building materials were measured by means of the plate method. It was found that the heat transport increases with a moisture motion occurring in the temperature drop. On his basis of simplified assumptions, the increase in the thermal conductivity was calculated from the rate of diffusion flow per unit area, which generally resulted in values inferior to the measured values. The increase in the heat transport due to water vapour diffusion measured at a large-scale wall specimen was inferior to the one measured by means of the plate method by using a comparable arrangement of layers. The overall heat transfer caused by moisture motion is not a characteristic value of the material, but a property of the whole wall structure

## 1. 서 론

어떤 재료를 막론하고 건축 구조물의 외벽면을 통한 열관류 저항 혹은 열관류 계수의 계산을 위해서는 재료 고유의 열 전도율이 사용된다. 그러나 이러한 열 전도율은 생산 과정에서의 원료배합이나 시공 당시의 주변 환경에 따라 물리적인 영향을 받게되어 그 값이 변화하게 되는데, 이러한 재료에 대한 열 전도율에 여러 가지 영향을 주는 요소들에 의해서 최종의 열전도율이 결정되게 된다. 예를들어 열전도율에 영향을 주는 물리적인 요소로서 복사에 의한 열의 이동이 가능한 재료에서는 원료의 밀도와 두께, 혹은 현실적인 습도가 함께 고려되어 진다. 여기서 현실적인 습도라는 것은 보통 난방 건물들을 조사하여 90% 이상의 건물들에서 이 습도를 초과하지 않는다는 결과가 나왔을 경우를 말한다. 즉 흡습성 건축재료의 현실적인 습도는 실내 온도 21°C에서 80% 정도로 습도계의 측정결과 나타나고 있으며 이러한 측정습도는 바로 열전도율을 계산하는데 기본적인 보정계수가 되어 일반적인 재료의 열전도율을 산정하는데 고려된다. 이와 같은 습도는 습도 평형을 위한 재료의 흡습성에 의해 형성되는 것이다.

그렇지만 실제로 거의 모든 건축 재료들 속에는 현장 실측을 했을 경우 다소 차이는 있지만 대부분의 경우 열 전도율 측정 당시 현실적인 습도가 고려된 상태에서 보다 더 높은 열전도율이 실측되고 있다. 이와 같은 경우는 흡습성 재료 자체에서 나타나는 것은 물론 비 흡습성 재료를 사용했을 경우에도 나타나는데, 예를 들어 단열재 중에서 스티로폴(Polystyrol)이나 우레탄(Polyurethan)같은 재료들은 흡습성이 아니며 실제로 현장에서도 건조한 상태로 시공되고 있다.

그러나 구조물의 흡습성 재료와 재료사이에 이러한 비 흡습성 단열재가 시공됐을 경우 단열재가 설사 건조한 상태로 시공됐다 할지라도 온도 차에 따른 습기이동이 수증기 확산현상에 의해 양쪽의 흡습성 재료 사이에서 진행된다. 이 과정에서 단열재 자체는 건조한 상태로 있다 할지라도 단열재를 통한 열흐름 양은 상승하게된다. 물론 이러한 현상은 건축 재료의 성분에 의해 야기 되는 것이 아니고 외피의 구조상태에 따라서 다르게 나타난다. 따라서 이러한 현상에 의해 열이동이 증가 한다고 해서 기존의 모든 건축 재료의 열전도율에 대해 옳지 않다고는 말할 수 없다.

그러나 이러한 습도에 의한 열전도율 증가의 문제점을 사전에 제거하기 위해서는, 우선 설계자

는 외피 구조물의 재료와 단열재료의 위치에 대해 구조적으로 안정되도록 결정해야 할 것이다. 그 후에 이러한 재료들의 조합에서 외피의 열전도율에 영향을 줄 수 있는 실내 쪽 재료에 따른 흡습량을 고려해 주어야 한다. 이러한 고려의 한 방법으로는 이상적인 상태에서 계산된 열관류 계수에 보정치  $\Delta k$ 를 추가함으로 가능하게 된다. 본 논문에서는 바로 이러한 구조물의 열이동에 영향을 미치는 수증기 확산이 단열재의 열전도율 상승에는 어떤 영향을 미치는지에 대해 연구하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

연구하고자 하는 외피의 복층 구조물에서 기본적으로 실측을 위한 외피의 단열재 배치를 내 단열, 중단열, 외단열의 세 종류로 구분하였다. 세 종류의 외피는 모두 단열재와 양쪽에 건축재료가 접하도록 구성되어 있다. 여기서 단열재 양쪽에 접한 건축재료는 단열재를 통한 열 이동을 위한 경계조건을 만들어 주는 역할을 하게 된다. 그래서 단열재 양쪽에 접하는 건축 재료는 건구온도 20℃에서 상대습도 80%가 되는 공간에서 습도평형이 될 때까지 오랜 기간 보관되었다. 여기에서 이 건축 재료들은 실내 쪽에 오는 것이나 실 외쪽에 가는 것이나 똑같은 상태로 흡습 되었다. 비 흡습성 재료인 단열재는 완전 건조된 상태로 시공되었다. <Table 1>에서는 실측된 단열재의 물리적 성질과 <Table 2>에서는 이 단열재와 같이 실측될 외피 구조재료의 물리적 성질을 볼 수 있으며 단열재의 열전도율은 열전도율 측정기에 의해 실측되었다.

여기서 외 단열일 경우 실측을 위해서 첫 번째만 외기 쪽 마감재로 시멘트 몰탈을 사용하였고 측정후 파손되어 그 이후로는 석고보드를 사용하였다.

Table 1. Engineering properties of the insulation materials<sup>1)</sup>

insulation material	density [kg/m <sup>3</sup> ]	thermal conductivity W/(m·K)	steam diffusion [μ]	thickness [m]
polystyrene	16	0.036	46	0.04
rock wool	87	0.031	1	0.04

<sup>1)</sup>Bauphysik : Tabelle

Table 2. Engineering properties of the construction materials<sup>2)</sup>

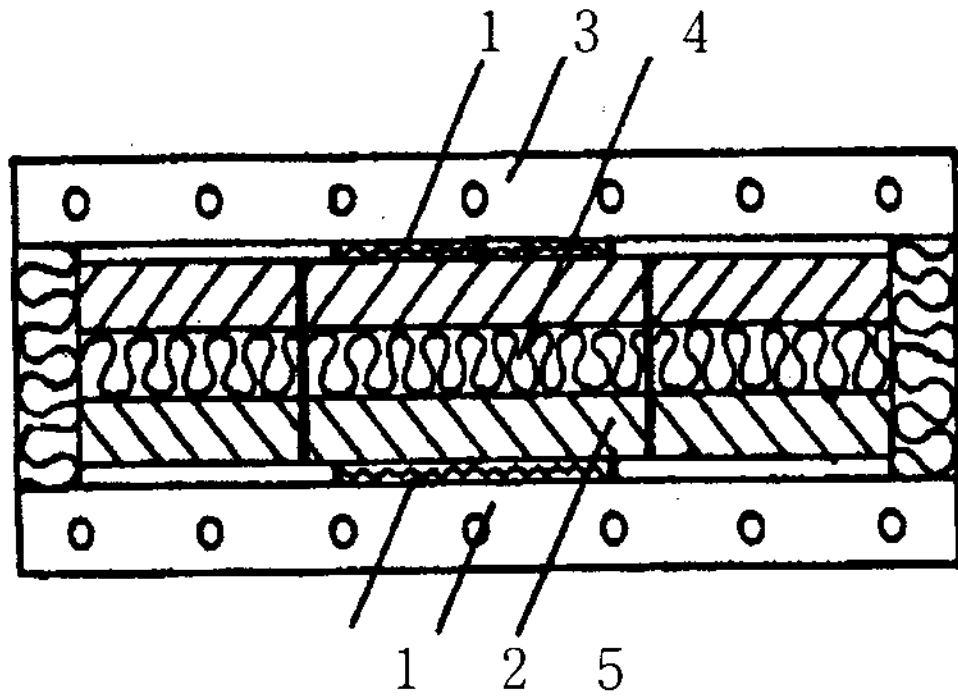
construction material	density [kg/m <sup>3</sup> ]	thermal conductivity W/(m·K)	steam diffusion [μ]	thickness [m]
plaster board	930	0.41	8	0.01
concrete	2000	2.03	50	0.04
mortar	1230	0.58	10	0.02
cement brick	1400	0.7	10	0.018

<sup>2)</sup>Bauphysik : Tabelle

## 3. 실험

실측하고자 하는 외피의 구조물은 열전도율 측정기(Therm 3280)에 의해서 열 전도율이 측정되었는데, 여기서 열전도율은 열류 센서에 의한 열 흐름 양과 양쪽의 온도차에 의해 산정 된다. 양쪽의 온도차는 온열 판과 냉열 판을 사용하여 일정한 온도차가 발생되게 하여 하부에서 상부로 열이 이동 되도록 제작되었다. 실측 모델제작 전에 온열 판과 냉열 판은 미리 일정한 설정 온도가 되도록 예열되었다. 이리하여 측정기 내에서 양쪽의 온도상태가 빠른 시간 내에 일정하게 유지 되도록 하였다. 측정하고자 하는 외피 구조물의 양쪽 면의 온도차는 약 17 K로 유지되었다.

모델 열전도율 측정기의 크기는 약 650mm × 650 mm이며, 측정 외피모델은 약 250 mm × 250



1: heat flow sensor, 2: heating plate, 3: cooling plate, 4: insulation material, 5: construction material

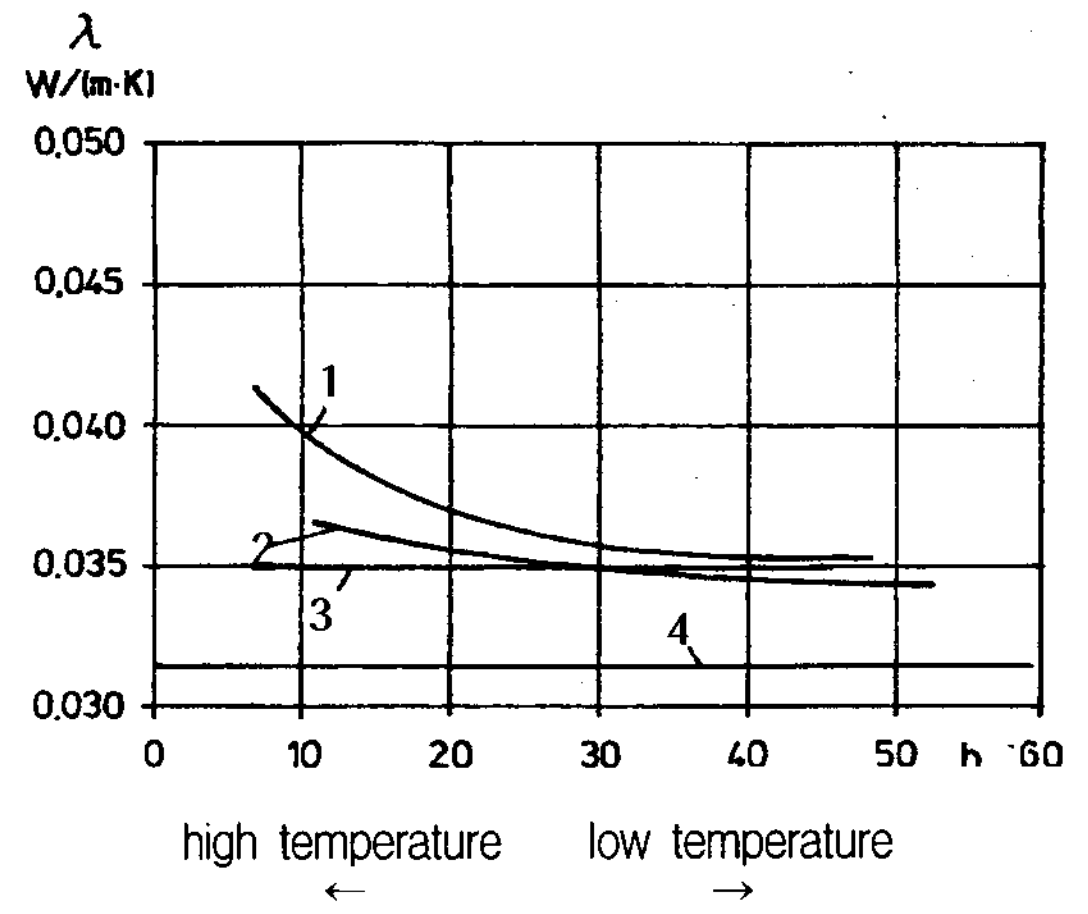
Fig. 1. Model section for measurement

mm 였고, 열 흐름의 다른 곳으로의 손실은 20 cm 두께의 폴리스티렌 단열재로 단열하여 최소화하였다. 구조물의 양쪽 면에 각각 3개씩의 온도 센서를 설치해서 재료와 재료사이의 온도를 측정토록 했다. 단열재 양쪽의 온도차, 열흐름 그리고 단열재의 두께에 의해 단열재의 열전도율이 계산되었다.(Fig. 1 참조)

#### 4. 시험결과 및 토의

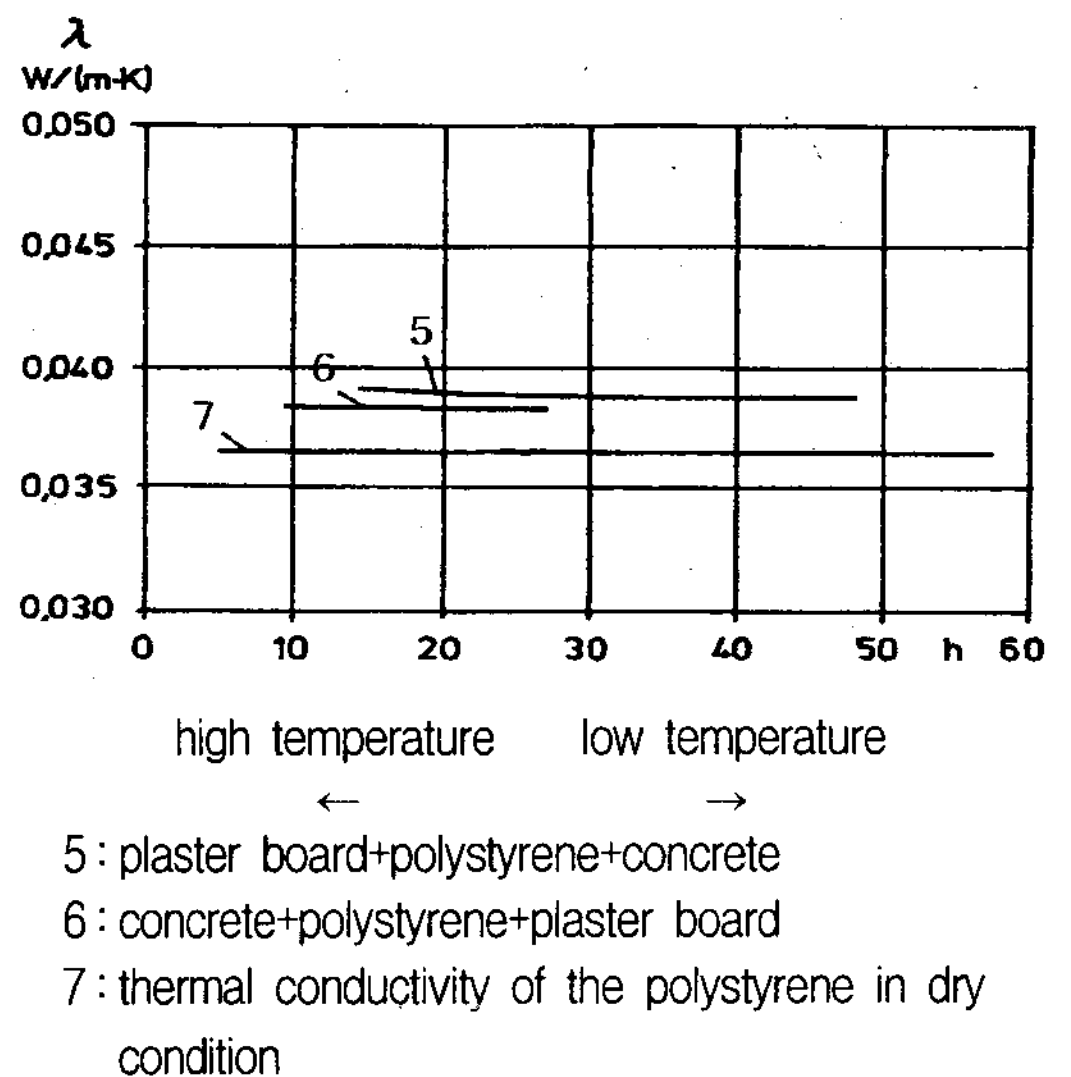
단열재의 시간 흐름에 따른 열전도율 변화는 Fig. 2와 Fig. 3에서와 같이 건조상태의 열전도율과 비교되었다. 암면과 같은 증기확산 저항계수가 낮은 단열재의 열전도율은 처음에는 건조된 단열재의 값보다 훨씬 위에 있다가 시간의 흐름에 따라 점차 그 값이 감소되고 있는 것을 확실하게 볼 수 있다. 이것의 원인은 고온쪽 재료의 함습량이 감소함에 따라 증기확산이 감소되고, 저온쪽의 재료에서는 반대로 증기확산이 증가되기 때문이다. 이 실험에 따른 재료와 재료사이에 있는 암면에서의 온도변화 모습을 Fig. 2에서 볼 수 있다.

그러나 증기확산저항 계수가 높은 단열재에서는 열전도율의 값이 시간의 변화에 따른 차이는 없으나 구성재료에 따른 열전도율의 상승을 Fig.



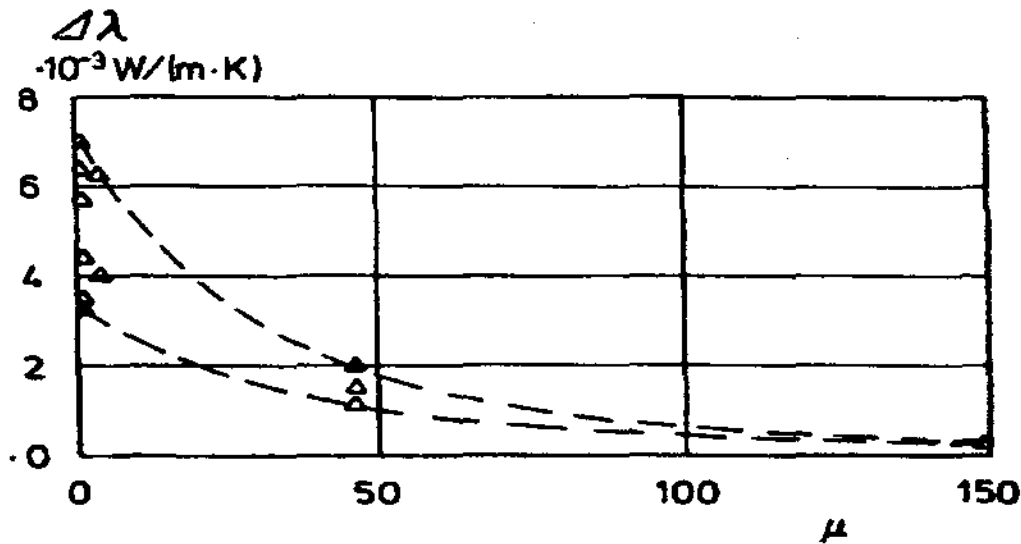
1: cement brick+rock wool+cement brick  
2: concrete + rock wool + mortar  
3: concrete + rock wool + plaster board  
4: thermal conductivity of rock wool in dry condition

Fig. 2. Thermal conductivity of the rock wool among construction materials



5: plaster board+polystyrene+concrete  
6: concrete+polystyrene+plaster board  
7: thermal conductivity of the polystyrene in dry condition

3에서 볼 수 있다. 이러한 습기의 이동은 일정시간이 경과한 후 습기의 추가 투입 없이는 단열재의 양쪽 면에서 증기압의 평형상태로 인해 증기



△ : measured point, — : assumed line

Fig. 4. variations of the thermal conductivity depending on the steam diffusion resistance

확산 운동이 중지하게 된다. 시험적으로 암면의 고온쪽에 증기 차단재를 설치했을 경우 단열재의 열 전도율에는 아무런 변화도 일어나지 않았다.

이 실험 결과에서 암면이나 유리면의 경우 흡습성이므로 구성물질 사이에 있는 습기에 의해 이론 값보다 높은 열전도율이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 것은 이미 실험실에서 단열재료만 가지고도 실측될 수 있다.

또한 이 실험을 통해 열전도율의 증가량과 단열재료의 투습저항 계수  $\mu$  사이에는 Fig. 4와 같은 관계가 있음을 알 수 있다. 이 그림에서 단열재료의  $\mu$  값이 증가할수록 증기확산과 에너지 이동이 감소하는 것을 알 수 있으며, 여기서 열전도율의 증가량은 측정된 값을 시간적인 변화로 나타낸 평균값에 의한 것이며  $\mu$  값에 따라 측정된 점들이 Fig. 4의 점선과 같이 변화된다고 추정될 수 있다.

#### 4.1 증기 확산에 따른 에너지의 이동 량 추정

증기 확산 밀도 변화와 에너지 이동과는 매우 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에(Fig. 4 참조) 증기확산 밀도로부터 에너지 이동 량이 산정 될 수 있다. 이 산정 과정에서 고온 측에서는 수증기 상태로 이동하여 저온 측에서는 이동된 모든 수증기가 결로 된다고 가정하였다. 따라서 고온 측에

서 수증기가 되기 위해 취득된 에너지는 저온 측에서 혹은 결로가 되는 장소에서 똑같은 양의 에너지를 다시 방출하게 된다. 여기서 주어진 온도 영역에서의 물의 증발잠열  $r = 0.686 \text{ Wh/kg}$ 로 나타낼 수 있으며, 여기에서 증기확산을 통해서 발생된 열흐름 밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = r \cdot g = 686 \cdot g \text{ [W/m}^2\text{]}$$

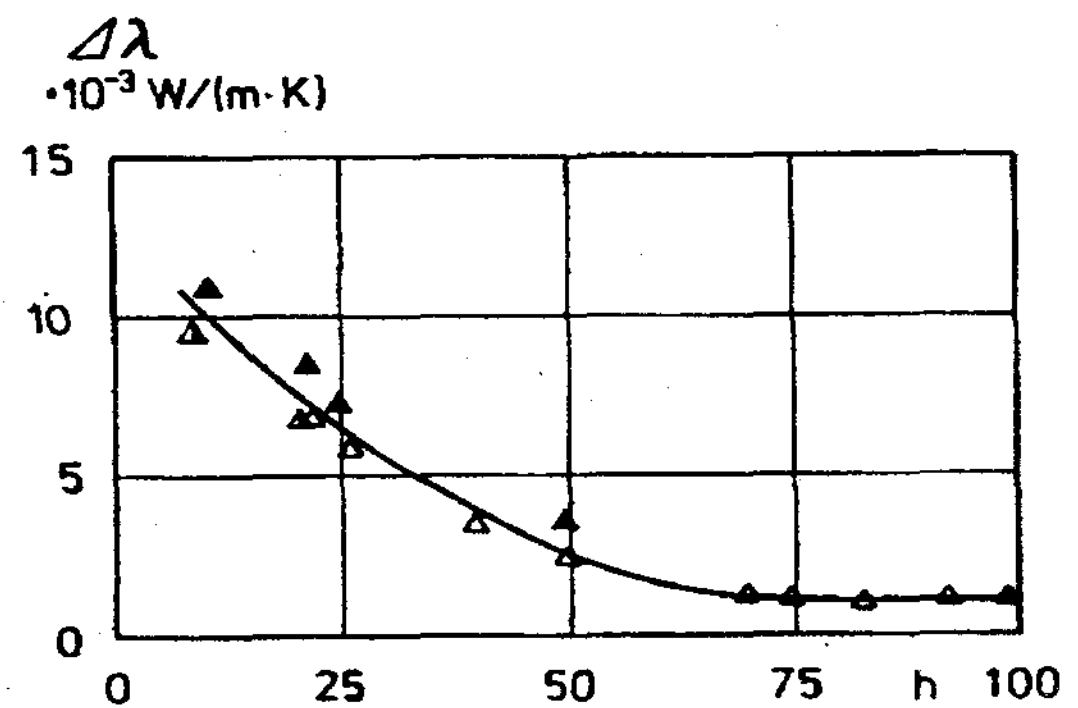
$g$ : 재료에 따른 단위면적당, 시간당 증기확산밀도

이러한 열흐름 밀도에서 등가에 상당하는 열전도율  $\lambda$ 가 다음과 같이 계산될 수 있으며,

$$\lambda = 686 \cdot g \cdot d \cdot 1/\Delta T \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]} \quad (1)$$

$d$ : 재료의 두께(m)

이 계산식에 의해 산정된 결과를 가지고 실측값과 비교해 볼 수 있다. 건조상태에서 위 식에 의해 산정된 열전도율  $\lambda$ 의 합에서 단열재의 총 열전도율이 계산될 수 있다. 지속적으로 변화되는 증기밀도와 열전도율의 변화를 시간 흐름에 따라 알아보기 위하여 한 개의 외피구조를 선택하여 (시멘트벽돌, 단열재, 시멘트벽돌) 시간적인 변화



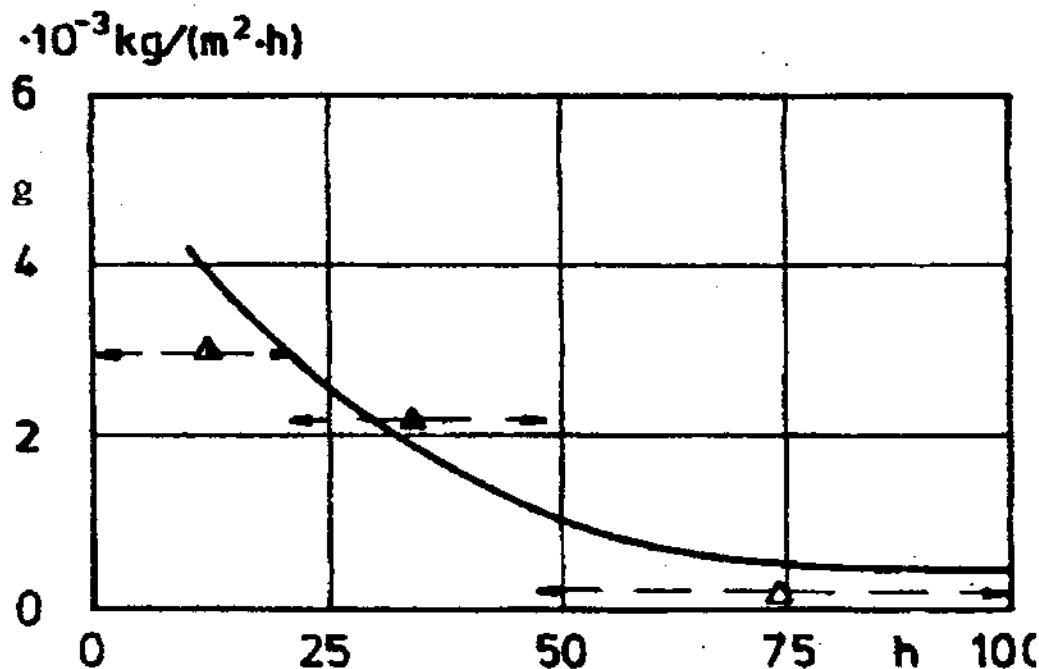
△ : measured after 24 hours, ▲ : measured after 48 hours  
△ : measured after 96 hours

Fig. 5. variations of the thermal conductivity of the insulation material with respect to measured time

를 주어 3종류를 측정하였다. 첫 번째는 24 시간 후, 두 번째는 48 시간 후, 그리고 세 번째는 96 시간 후에 측정하였다. 이러한 시간변화에 의한 열 전도율의 변화량은 Fig. 5와 같다.

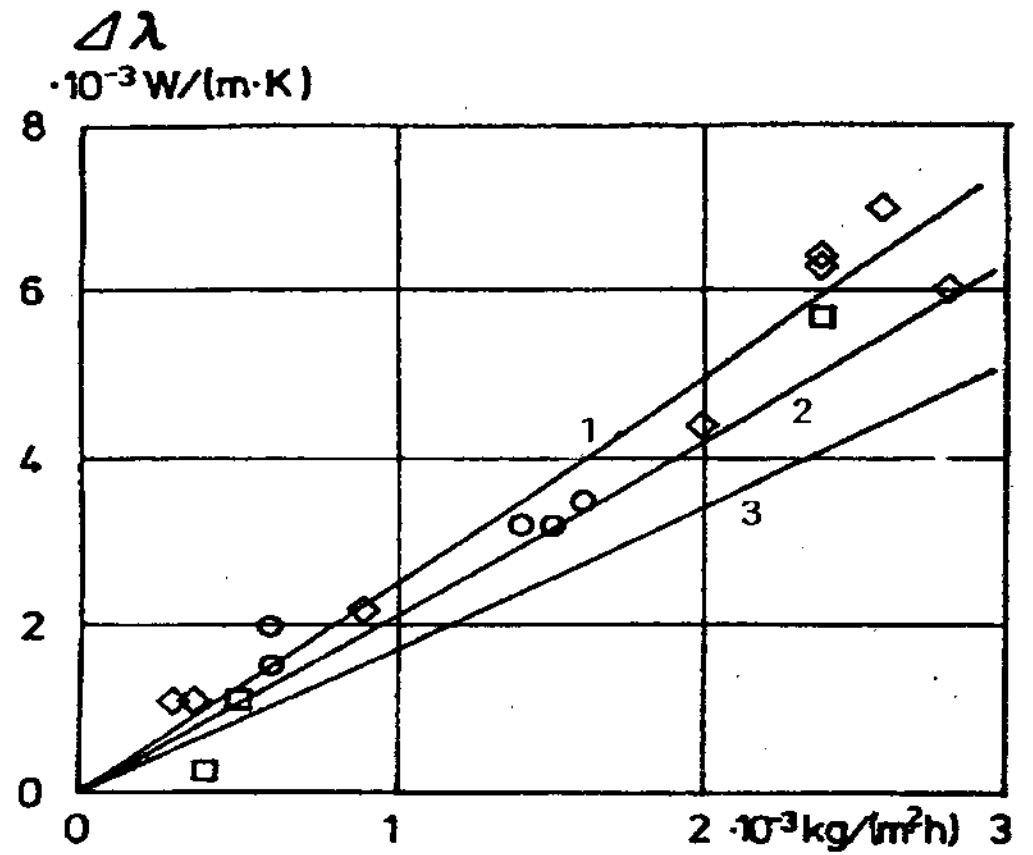
그리고 열 전도율과 같은 방법으로 측정된 시간변화에 따른 증기확산 밀도의 변화는 Fig. 6의 점들과 같다. 식 (1)에 측정된 열전도율 변화 값을 대입시켜 증가된 열전도율에 따른 증기확산 밀도  $g$ 가 계산될 수 있고 이 결과에 의해 Fig. 6의 곡선이 만들어졌고 이 곡선은 실측된 점들과 근접되는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서 실측된 모든 모델의 열전도율의 평균 증가치와 실측된 증기확산 밀도와 관계 살펴보면 Fig. 7의 점들과 같이 나타난다. 단열재를 실측하는 동안 단열재와 접한 구조물의 종류가 달라 단열재 경계면에서의 온도차는 11~16 K 사이에 분포된 것으로 나타났다. 여기서 단열재의 두께는 모두 부산지역에서 의무적으로 시공되어야 하는 4cm 였다. 또한 식 (1)에 의해 온도차와 증기확산밀도에 따른 열전도율의 증가량이 간단하게 계산될 수 있다. 온도차 11K, 13K, 16K 별로 윗식의 결과에서 증기확산 밀도에 따른 단열재의 열전도율 증가량 변화가 Fig. 7의 직선과 같이



△ : measured after 24 hours, ▲ : measured after 48 hours  
△ : measured after 96 hours, — : calculated result

Fig. 6. comparisons of measured steam diffusion density vs. calculated steam diffusion density



- thermal conductivity by measuring  
◇ : surface temperature difference (s.t.d.) of the insulation material 11K  
□ : s.t.d. of the insulation material 13K  
○ : s.t.d. of the insulation material 16K  
- thermal conductivity by calculation(1)  
1 : s.t.d. of the insulation material 11K  
2 : s.t.d. of the insulation material 13K  
3 : s.t.d. of the insulation material 16K

Fig. 7. Thermal conductivity of the insulation material depending on the steam diffusion density

나타난다. 실측된 점들이 계산결과에 따른 직선보다 높게 나타나고 있는데 이것은 계산과정에서 물의 비열 외에도 재료로의 축열이 추가로 고려되어야 할 요소로 생각될 수 있다.

#### 4.2 측정결과의 적용

본 연구에서 밝혀진 열관류율의 증가에 미치는 습도의 영향을 한 예를 들어, 암면으로 중 단열된 외피에서 간단하게 계산되어질 수 있다. 실내쪽에는 17.5 cm 두께의 구조물로 열전도율은 0.45 W/(mK), 외부의 구조물은 11.5 cm 두께로 열전도율이 0.6 W/(mK)라고 가정하고, 단열재는 중단열을 했고 6cm 두께로 열전도율이 0.40 W/(mK)라고 가정했을 때 이 외피의 열관류율은 0.444 W/(m<sup>2</sup>K)로 계산된다. 여기서 단열재의 열전도율의 증가가 7%라고 한다면, 단열재의 열전도율은 0.43



W/(mK)가 되고, 전체 외피의 열관류율은 0.464 W/m<sup>2</sup>K가 된다. 이 결과 열관류율의 차이는 0.02가 되며 이 차이는 실제 건물의 열손실 계산에 보정치로 고려되어 질수 있을 것이다. 이와같은 고려는 물론 실내에 면한 외피의 구조물이 난방기간 동안 일정습도가 유지될 경우로만 국한될 것이다.

## 5. 결 론

건축물에 시공된 단열재의 시간 흐름에 따른 열전도율 변화가 건조상태의 열전도율과 비교되었다. 암면과 같은 증기확산 저항계수가 낮은 단열재의 열전도율은 처음에는 건조된 단열재의 값보다 훨씬 위에 있다가 시간의 흐름에 따라 점차 그 값이 감소되고 있는 것을 확실하게 볼 수 있었다. 이것의 원인은 고온쪽 재료의 함습량이 감소함에 따라 증기확산이 감소되고, 저온쪽의 재료에서는 반대로 증기확산이 증가되기 때문인 것으로 나타났다.

그러나 증기확산저항 계수가 높은 단열재에서는 열전도율의 값이 시간의 변화에 따른 차이는 없었으나 구성재료에 따른 열전도율의 상승이 나타났다. 이러한 습기의 이동은 일정시간이 경과한 후 습기의 추가 투입 없이는 단열재의 양쪽 면에서 증기압의 평형상태로 인해 증기확산 운동이 중지되었다.

실험 결과에서 암면이나 유리면의 경우 흡습성이므로 구성물질 사이에 있는 습기에 의해 이론 값보다 높은 열전도율이 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 이와 같은 것은 이미 실험실에서 단열재료만 가지고도 실측될 수 있었으며, 또한 이 실험을 통해 열전도율의 증가량과 단열재료의 투습저항 계수  $\mu$  사이에서 단열재료의  $\mu$  값이 증가할수록 증기확산과 에너지 이동이 감소하는 것을 알 수 있었다.

이와 같이 증기 확산 밀도 변화와 에너지 이동과는 매우 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에 증기 확산 밀도로부터 에너지 이동량이 산정될 수

있었으며, 이 산정 과정에서 고온 측에서는 수증기 상태로 이동하여 저온 측에서는 이동된 모든 수증기가 결로 된다고 가정하였다. 따라서 고온 측에서 수증기가 되기 위해 취득된 에너지는 저온 측에서 혹은 결로가 되는 장소에서 똑같은 양의 에너지를 다시 방출하게 된다는 이론에서 산정된 계산 결과를 가지고 실측값과 비교해 보았다. 그 결과 이론 계산 결과와 실측된 결과와 근접되는 것을 알 수 있었으며, 이 계산식을 이용하여 실제 건물에서 각종 외피에서의 열관류율 차이가 계산되어 실제 건물의 열손실 계산에 보정치로 고려되어 질 수 있는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. Haferland, F.: Das waermetechnische Verhalten mehrschichtiger Aussenwaende; Bauverlag Wiesbaden, 1970
2. Caemmerer, W.: Berechnung der Wasserdampfdurchlaessigkeit und Bemessung des Feuchtigkeitsschutzes von Bauteilen; Berichte aus der Bauforschung, Heft 51, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1968
3. Reiher, H.: Waermeschutz und Feuchtigkeitsverhalten von Aussenwaenden Deutsche Bauzeitung (DBZ), Heft 10, 1964
4. DIN 4108: Ergaenzende Bestimmungen, Ministerialblatt 1974
5. DIN 52616: Waermeschutztechnische Pruefung. Bestimmung der Waermeleitfaehigkeit mit dem Waermestrommessplattengeruet.
6. Kuenzel, H.: Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Aussenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe, Bauphysik 4(1982), H. 3, S. 101~107

# Effects of the moisture on the overall heat transfer through heat insulators opaque envelopes

S. Lee

*Donggeui Univ. Dept. of Architectural Equipment*

## Abstract

The heat conduction and the water vapour diffusion flow through heat insulators between hygroscopical moist building materials were measured by means of the plate method. It was found that the heat transport increases with a moisture motion occurring in the temperature drop. On his basis of simplified assumptions, the increase in the thermal conductivity was calculated from the rate of diffusion flow per unit area, which generally resulted in values inferior to the measured values. The increase in the heat transport due to water vapour diffusion measured at a large-scale wall specimen was inferior to the one measured by means of the plate method by using a comparable arrangement of layers. The overall heat transfer caused by moisture motion is not a characteristic value of the material, but a property of the whole wall structure