

# 투명 단열외피의 열적성능에 관한 연구1)

## Thermal Effect of the Transparent Insulated Opaque Envelopes

김 세 환\* 이 성\*\*  
Kim, Se-Hwan Lee, Sung

### ABSTRACT

The thermal effect of a transparent insulated opaque wall with solar energy was investigated theoretically. The heat gain through transparent insulated opaque wall was studied for relative simple conditions. The stationary heat transport effect was studied for layer which is built on the opaque wall. This study shows that a relative low solar radiation intensity causes a great heat reduction through the transparent insulated opaque wall. Because the transparent insulation layer is mostly transparent to solar radiation, it is opaque to heat radiation.

키워드 : 투명단열재, 온도범위, 투명단열벽의 열관류율

Keywords : transparency heat insulating material, Temperature scope,

### 1. 서론

인류는 유사이래 에너지를 효율적으로 이용하고 절약하는 경제적인 방법을 연구해 오고 있으며, 향후 에너지 문제는 지구상의 가장 큰 문제 중의 하나로 대두될 전망이고 지금도 지속적으로 에너지 비용이 상승하고 있다. 이러한 경향으로 볼 때 건축물에서 에너지의 효율적 이용 혹은 에너지의 절약대책은 모든 분야에서 시급히 연구돼야 할 것이다. 이러한 관점에서 볼 때 지금까지 제반 건물에 사용 되 왔던 벽체는 아무리 단열두께를 증가시켜도 열손실이 많아 그 한계에 다다르고 있다. 이러한 불투명벽체에 지금까지 사용돼오던 단열재는 불투명하여 실내에서 손실되는 에너지를 잘 차단시켜주는 대신 외부에 주어진 태양에너지를 실내로 유입시키는 것도 잘 차단시키고 있어 난방기간동안 태양에너지 이용에는 걸림돌이 되고 있다.

최근의 유가상승 추세로 보아 앞으로 지어지는 건축물은 어떤 건축물을 막론하고 에너지 절약 대책이 안 돼있으면 에너지 문제를 경제적인 방법으로 해결하는 과정에서 건축물들의 소유주는 매년 상승하는 에너지 비용에 의해 지속적으로 가중되는 경제적인부담을 해결해나가야만 할 것이며, 궁극적으로는 많은 건축물들의 실내외 환경이 가중되는 에너지 비용에 의해 열악하게 유지될 수 있게 될 것이다.

우리는 지금 건물의 난방을 하기위해 대부분 막대한 양의 화석연료를 사용하고 있으며 이렇게 건물의 난방을 위해서만 사용되는 연료의 양은 약 국내 총 에너지소비량의 약 25%를 상회하고 있어 에너지비용에 대한 부담은 말할 것도 없고 배기가스에 의한 환경오염 또한 막대하게 영향을 미치고 있는 실정이다.

그런데 건물 벽체의 투명단열이용은 이러한 에너지 문제의 해결에 가장 좋은 방법중의 하나라고 할

\* 동의대학교 공과대학 건축설비공학과 조교수, 공학박사

\*\* 동의대학교 공과대학 건축설비공학과 교수, 공학박사

1) 본 논문은 2004년 동의대학교 학술연구 조성비의 지원에 의한 연구 일부임.

수 있다. 투명단열벽은 2개의 층으로 구성되며(그림 1) 실내쪽의 벽체는 하중을 지탱하기 위한 내력벽이며 외기쪽에는 높은 단열성능과 벽쪽으로 일사의 투과를 최대화 시켜주는 투명단열층이 오게 된다. 이러한 벽체는 태양에너지를 이용하여 겨울철의 난방에너지를 절약하게 해준다. 지금 까지 연구된 간단한 효과에서도 나타나듯이 이러한 투명단열벽체는 약 20W/m<sup>2</sup>의 일사량에서 이미 실내온도 20도인 건물 외벽체를 통한 열손실을 제로화 시킬 수 있게 된다. 이와 같은 일사량은 실제로 구름이 낀 날에도 공급 가능한 양이 될 것이다.

특히도 이러한 투명단열재는 학교건물과 같이 주간에만 사용되는 건축물에 적용될 경우 그 효과가 매우 높아 학교건물의 난방에너지를 절약하는데 획기적인 역할을 할 수 있을 것으로 사료되므로, 본 논문에서는 이러한 투명단열된 외벽에서의 열적인 성능을 이론적으로 분석하여 불투명외벽에 투명단열재를 사용하는데 열적성능의 기초자료를 제공하고자한다.

II. 본론

투명단열된 불투명 외벽과 같은 구조물의 수학적인 모델화 방법은 최근에 일정한 조건에서 특정한 대상물의 상태를 시뮬레이션하여 수행하는 것을 일반화 하고 있다. 본 연구에서도 이러한 시뮬레이션 방법을 이용하였다. 이러한 시뮬레이션을 좀더 간단히 하기 위해 여기서는 투명단열재에서 광선이 투명단열재에 의해 전혀 방해받지 않고 투과한다고 가정하고, 이렇게 투과되어 수열면에 도달된 광선은 손실없이 전부 흡수된다고 가정하면, 태양광선은 (그림 1)의 투명단열층(A) 범위  $0 \leq d \leq d_m$  사이에서 전혀 방해받지 않고 투과되어 투명단열층과 구조물 층(B)의 경계면  $d=d_m$ 에서 100% 수열되게 된다. 구조물 층 B는 완전히 불투명하다고 가정한다. 여기서  $T_a$ 를 외기온도,  $\alpha$ 를 외기의 열전달율,  $\lambda_A$ 를 투명단열층의 열전도율,  $T(d)$ 를 투명단열층의 온도범위,  $\lambda_B$ 를 구조물층B의 열전도율이라고 하면 다음과 같은 열전달식이 성립된다.

$$[\alpha(T-T_A) = \lambda_A \cdot T'd]_{d=0}, \dots\dots\dots (1)$$

투명단열층에서 열전도가 진행되면 이 투명단열층에서의 열전도 평형식은  $T'd=0 \dots\dots\dots (2)$

가 성립되며 여기서

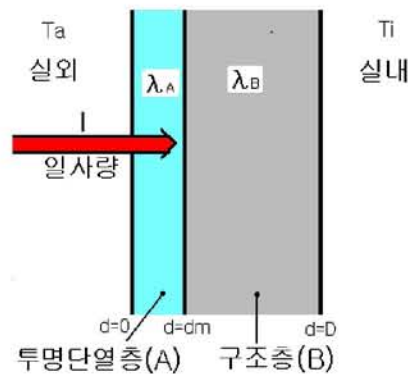
$T(d)=ad+b$  의 식을 만족하게 된다.

투명단열층과 구조층과의 경계면  $d=d_m$  에서 온도범위는 투명단열층과 구조층에서 동일해야하므로 다음과 같은 식을 만족해야 할 것이다.

$$[T = W]_{d=d_m} \dots\dots\dots (3)$$

그리고

$$[\lambda_A \cdot T'd - \lambda_B \cdot Wd = I]_{d=d_m} \dots\dots\dots (4)$$



<그림1> 투명단열 벽

또한 열전도평형식  $W_{dd} = 0 \dots \dots \dots (5)$

는 구조층의 온도범위  $W = Ad+B$ 에 의해서 산출될 수 있다.

실내공간과 접하는 구조층의 면  $d = D$  지점에서도 자연스럽게 열전달현상이 일어나며, 이때 열전달율을  $a_i$  라 하고 실내온도를  $T_i$ 라 하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$[\lambda_B W_d = a_i (T_i - W)]_{d=D} \dots \dots \dots (6)$

1) 온도범위  $T(d)$ 와  $W(d)$

(1) 투명단열층 A

미분방정식 (1)과 (5)에 의한 일반적인 해는 다음과 같다.

$T(d) = ad + b \dots \dots \dots (7)$

$W(d) = Ad + B \dots \dots \dots (8)$

이 결과 단순한 일차 방정식으로 정리된 위식에서  $a, b, A, B$  는 적분상수가 되며 물리적으로 다음과 같이 해석된다.  $b$ 는  $d=0$ 에서의 온도를 나타내며,  $a$ 는 투명단열층A에서의 온도상승율을 나타낸다. 투명 단열층과 구조층의 경계면인  $d=d_m$  에서는 온도가  $d_m + b$  가 되며 온도의 연속성에 따라  $Ad_m + B$ 로 표기될 수 있다. 이와 마찬가지로 구조층의 실내면 온도는  $AD + B$  가 된다. 여기서 만약  $a, b, A, B$ 가 정해지면 여기에 따라 온도범위도 정해지게 된다. 식 (7), (8)을 식 (1), (3), (4), (6)에 대입을 시킬 경우 미지수는 적분계수  $a, b, A, B$  의 네 개가 되고 식도 네 개가 되어 다음과 같이 나타나며, 이 계산 결과는 <표1>과 같이 나타난다.

$A = (T_i - T_a) D^{-1} [Ba - ID \{ \lambda_A (T_i - T_a) \}^{-1} \cdot (1 + d_m D^{-1} Ba)] \cdot [Ba (1 + Bi^{-1} - d_m D^{-1}) + \lambda_B \cdot \lambda_A^{-1} (1 + d_m D^{-1} Ba)] \dots \dots \dots (9)$

$b = T_a + I a^{-1} + \lambda_B a^{-1} A \dots \dots \dots (10)$

$a = I \lambda_A^{-1} + \lambda_B \cdot \lambda_A^{-1} A \dots \dots \dots (11)$

$B = T_a - D(1 + Bi^{-1})A \dots \dots \dots (12)$

$Ba = aD/\lambda_A$

$Bi = \beta D/\lambda_B$

$d_m = 5cm, \quad \alpha = 25W/(m^2 \cdot K)$

$D = 30cm \quad \beta = 8 W/(m^2 \cdot K)$

$\lambda_A = 0.05W/(m \cdot K), \quad T_a = 0 \text{ oC (외기온도)}$

$\lambda_B = 0.8 W/(m \cdot K), \quad T_i = 20 \text{ oC (실내온도)}$

표 1. 투명단열층 A의 온도범위 내에서의 적분상수

I(dm)	W/m <sup>2</sup>	0	10	20	30
a	K/m	269.0	328.1	390.3	447.4
b	°C	0.56	0.67	0.77	0.90
A	K/m	16.9	8.1	- 0.7	- 9.5
B	°C	13.1	16.3	20.1	23.5
T(dm)	°C	14.0	17.1	20.3	23.3

<표1> 은 위식에서 산정된 적분상수를 나타내며, 아래<그림2>는 여기에 속하는 온도범위를 나타낸다.

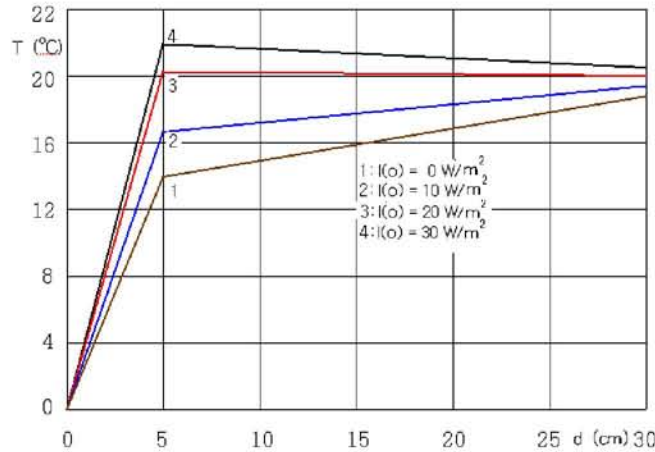


그림 2. 완전히 투과되는 층 A로 투명단열된 벽에서의 온도변화

(2) 수열면

기존의 투명단열재 중에서 완전히 투명하고 열관류율도 매우 작은 그러한 재료는 아직 현실적으로 존재하지 않는다. 그렇다면 투명단열층 A에서 깊이에 따라 일사투과율과 흡수율이 감소된다는 것은 확실하고 실제로도 모든 투명단열 재료에서 그렇게 발생되고 있는 현상이지만, 만약 이것을 정확하게 계산하려고 한다면 매우 복잡한 수식이 요구되므로 여기서는 투명단열층의 두께에 따라 비례적으로 감소한다고 가정하여 다음과 같이 단순한 1차식을 적용하였으며 아래 (그림 3)과 같다.

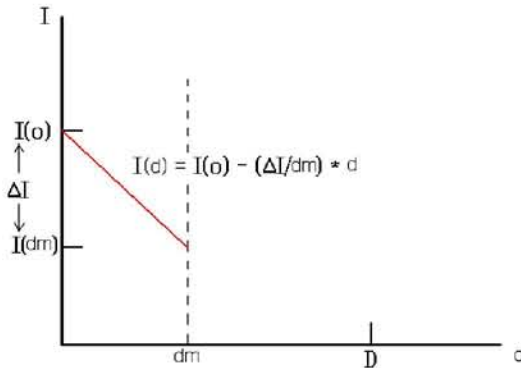


그림 3. 투명단열 벽체에서 투명단열재 두께에 따른 일사량 감소

이 그림은 외기표면으로부터 d(투명단열두께)가 증가할수록 수열면에 도달되는 일사량이 감소되는 것을 나타낸다. 만약  $f = \Delta I/dm$  를 단위시간당, 체적당 d지점에서의 수열면에 흡수되는 일사에 의해 공급되는 열에너지라고 한다면, 투명단열층 A에서의 온도범위는 열관류 평형식에 의해

$$-\lambda A Td = f \text{ 혹은}$$

$$Tdd = -f \text{ 로 표시되는데 여기서}$$

$$T = a'd + b' - 1/2 \cdot f \cdot d^2 \text{가 된다. 이러한 경우에 수열면의 온도범위}$$

$$T(d) = a'd + b' - 1/2 \cdot f \cdot d^2 \text{ 와}$$

$W = A'd + B'$ 의 적분상수는 다음과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} A' \cdot D \{ \mu - (Bi-1 + 1) - \lambda B \cdot \lambda A^{-1}(Ba-1 + \mu) \} = \\ = (I(dm)D\lambda A^{-1} + fD2\mu)(Ba-1 + \mu) - (Ti - Ta) - 1/2 \cdot f D^2 \cdot \mu^2, \\ a' = I(dm)D\lambda A^{-1} + \lambda B \cdot \lambda A^{-1} A' + f D \mu, \end{aligned}$$

$b' (1 + \mu Ba) = A' D [\mu - Bi^{-1} + 1)] + Ti + 1/2 \cdot f D^2 \cdot \mu^2 + Ta \cdot \mu \cdot Ba$  ,  
 $B' = -(\lambda B \cdot \beta^{-1} + D)A' + Ti$  ,  
 이것을 산정하여 표로 나타내보면 아래 <표 2>와 같다.

표 2. 수열층 A에서 온도범위내의 적분상수

I(dm)	W/m <sup>2</sup>	0	10	20	30
f'	K/m <sup>3</sup>	1000	800	600	400
A'	K/m	- 5.4	- 9.2	- 13.4	- 17.6
a'	K/m	907.1	838.9	771.1	703.5
b'	°C	1.85	1.71	1.57	1.45
B'	°C	22.2	24.3	25.9	27.6
f	K/m <sup>2</sup>	20000	16000	12000	8000
A' D + B'	°C	20.	21.01	21.44	21.86
A' dm + B'	°C	22.1	23.3	24.9	26.2
k	W/(m <sup>2</sup> · K)	0.25	0.42	0.58	0.76
R	m <sup>2</sup> K/W	4.00	2.38	1.72	1.32

위에서 산정된 결과는 <표2>와 같이 정리되며 이 경우의 온도범위는 그림 4와 같다.

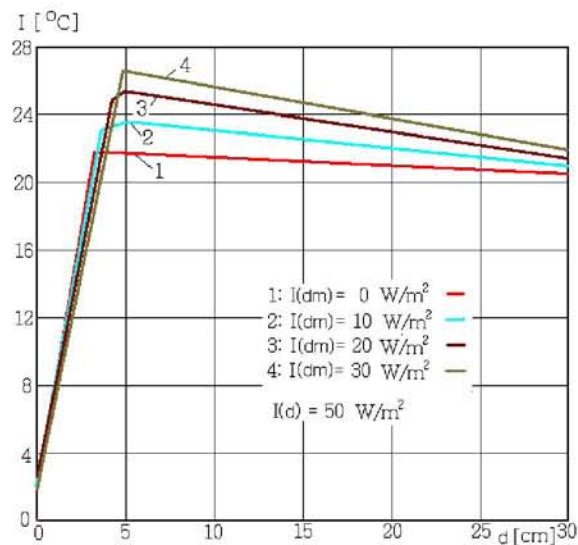


그림 4. 투명단열된 벽체에서의 온도범위  
(일사량이 투명단열층을 통과할 때 그림3과 같이 비례 감소될 경우)

<그림 4>는 <그림 3>과 같이 투명단열재의 깊이에 따라 일사유입량이 비례하여 변화할 경우에 투명 단열층의 일사투과량에 따른 온도 범위를 나타내고 있다.

여기서 외기에서 공급되는 일사량  $I(o)=50W/m^2$  부터 수열면  $d=dm$  까지 유입되는 일사량  $I_0(dm)=0$ ,  $I_1(dm)=10W/m^2$ ,  $I_2(dm)=20W/m^2$ ,  $I_3(dm)=30W/m^2$ 에서, 그리고  $dm \leq d \leq D$ 의 범위에서  $d$ 가 증가함에 따라 온도범위가 감소되는 결과가 산출되는 것을 볼 수 있다. 즉, 이 투명 단열벽은 열전도에 의한 외기로의 손실이 없다는 것이고, 반대로 이 벽은 관류열의 양  $Q = -F \lambda B W d$  만큼( $F$ 는 벽체면적) 실내로 열공급을 하게되며 이러한 벽은 에너지 공급원이 된다는 것을 알 수 있다.

### III. 결론

본 논문은 정상상태의 열전도식으로부터 변화되는 일사량에 의해 주어진 실내의 온도(실내온도 20°C, 외기온도 0°C)에 의해 투명 단열된 건물벽체의 온도범위가 산정되었다. 여기서 수식의 단순화를 위해 일사량이 투명단열재의 유입깊이에 따라 일직선으로 균등 감소된다고 가정하였으며, 그 결과 20W/m<sup>2</sup>의 일사량 이상이 투명 단열된 수열면에 공급되기 시작하면 투명 단열된 외벽을 통한 열손실이 0이 되며 이 시점부터 일사량이 증가됨에 따라 태양열이 실내로 취득되기 시작하는 전환점이 된다는 것을 알 수 있었다. 이러한 20W/m<sup>2</sup>의 일사량은 학교 건물과 같이 주간에만 이용되는 경우에는 대부분의 기후조건에서 취득될 수 있는 적은 양이고 야간에는 열손실이 증가하지만 학교건물은 야간에 사용되지 않으므로 그 효과는 매우 높을 것으로 추정된다. 그리고 또한 투명단열재를 건물외벽에 시공할 경우에 투명단열재의 두께를 산정할 때 그 지역의 외기온도와 일사량에 따라 달리 적용되어야 효율적이 된다는 것도 밝혀졌다.

### 참고문헌

1. Haferland, F. : Das waermetechnische Verhalten mehrschichtiger Aussenwaende ; Bauverlag Wiesbaden, 1970
2. Caemmerer, W. : Berechnung der Wasserdampfdurchlaessigkeit und Bemessung des Feuchtigkeits-schutzes von Bauteilen; Berichte aus der Baufor-schung, Heft 51, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1968
3. Reiher, H. : Waermeschutz und Feuchtigkeitsverhalten von Aussenwaenden Deutsche auzeitung (DBZ), Heft 10, 1964
4. DIN 4108 : Ergaenzende Bestimmungen, Ministerialblatt 1974
5. DIN 52616 : Waermeschutztechnische Pruefung. Bestimmung der Waermeleit-faehigkeit 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
7. Goetzberger, A.: Transparente Waermedaemmung, In:Sonnenenergie 17 Heft2, 1992-04
8. Hilbig, G. : Das thermische Verhalten partiell transparenter Waende, In: Bauphysik 13 (1991), Heft 6
9. Hullmann, H. : Rarionelle Energieverwendung in Gebaeden, In: Beton- Und Fertigteiljahrbuch, 1992
10. Jesch, L. : Proceeding of the 5th International Meeting on Transparent Insulation Technology, Freiburg, 1992
11. 이 성, Anwendung transparenter Waermedaemmung Hannover, Universitaet Hannover, Institut fuer Industrialisierung des Bauens, Diss., 1993
12. 이 성, 학교건물의 에너지 절약방안, 교육시설학회지, 1999년, 9월 제6권 3호
13. 이 성, 투명단열된 평판형 집열기에 관한 연구, 건축학회논문집, 제6권 1호