

학교건물의 에너지 절약에 관한 연구  
 - 투명 단열외피의 열적성능을 중심으로 -  
 Study on the Energy Saving for School Buildings  
 - through thermal effect of the transparent insulated opaque envelopes -

이 성 · 김세환 · 김기철  
 S. Lee, S. H. Kim and K. C. Kim

**Key Words** : Transparent insulation material(투명단열재), Heat flow efficiency (투명단열벽의 열관류율), Schoolbuilding(학교건물)

**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.

1. 서 론

인류는 유사 이래 에너지를 효율적으로 이용하고 절약하는 경제적인 방법을 연구해 오고 있으며, 향후 에너지 문제는 지구상의 가장 큰 문제 중의 하나로 대두될 전망이다. 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 사용되 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 난방 기간 동안 태양에너지 이용에는 걸림돌이 되고 있다.

최근의 유가상승 추세로 보아 앞으로 이어지는 건축물은 어떤 건축물을 막론하고 에너지 절약 대책이 안 돼 있으면 에너지 문제를 경제적인 방법으로 해결하는 과정에서 건축물들의 소유주는 매년

상승하는 에너지 비용에 의해 지속적으로 가중되는 경제적인부담을 해결해나가기만 할 것이며, 궁극적으로는 많은 건축물들의 실내외 환경이 가중되는 에너지 비용에 의해 열악하게 유지될 수 밖에 없게 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<sup>2)</sup>.

그런데 건물 벽체의 투명단열이용은 이러한 에너지 문제의 해결에 가장 좋은 방법 중의 하나라고 할 수 있다. 투명단열벽은 2개의 층으로 구성되며 (Fig. 1) 실내 쪽의 벽체는 하중을 지탱하기 위한 내력벽이며 외기 쪽에는 높은 단열성능과 벽 쪽으로 일사의 투과를 최대화 시켜주는 투명단열층이 오게 된다<sup>3)</sup>. 이러한 벽체는 태양에너지를 이용하여 겨울철의 난방에너지를 절약하게 해준다.

이와 같은 투명단열재에 관해 지금까지 수행된 연구 결과를 살펴보면 독일 Karsten Voss가 투명단열재료와 시스템에 관한 정리를 하였으며, 독일의 Reichmann이 투명단열재를 주택에 이용하여 에너지 절약효과에 대해 이론연구 및 실측결과를 발표하였다. 또한 독일의 Roland Kraus 외 4명이 투명외벽

접수일 : 2005년 9월 23일  
 이 성(책임저자) : 동의대학교 건축설비공학과  
 E-mail : slee@deu.ac.kr Tel. 011-9324-0599  
 김세환, 김기철 : 동의대학교 건축설비공학과

과 불투명외벽에서의 에너지 이동에 대해 발표하였으며, 독일의 하노버 주립연구소인 ISFH에서 투명단열재의 열적인 성능에 대하여 연구된 바 있다.

본 연구에서는 지금까지 연구된 결과물을 바탕으로 투명단열재를 불투명 외벽에 적용시켰을 경우, 에너지 취득이 시작되는 일사량의 최소값을 연구하여, 투명단열외피의 경제성 분석 및 적용 타당성을 분석하는 기본 자료로 사용하고자 한다. 본 연구결과 이러한 투명단열벽체는 약  $20W/m^2$ 의 일사량에서 이미 실내온도 20도인 건물 외벽체를 통한 열손실을 제로화시킬 수 있게 되는 것으로 나타나, 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<sup>4)</sup>, 본 논문에서는 이러한 투명 단열된 외벽에서의 열적인 성능을 이론적으로 분석하여 불투명외벽에 투명단열재를 사용하는데 열적성능의 기초자료를 제공하고자한다.

## 2. 열적성능의 시뮬레이션

투명단열된 불투명 외벽과 같은 구조물의 수학적 모델화 방법은 최근에 일정한 조건에서 특정난 대상물의 상태를 시뮬레이션하여 수행하는 것을 일반화 하고 있다<sup>5)</sup>. 본 연구에서도 이러한 시뮬레이션 방법을 이용하였다. 이러한 시뮬레이션을 좀 더 간단히 하기 위해 여기서는 투명단열재에서 광선이 투명단열재에 의해 전혀 방해받지 않고 투과한다고 가정하고, 이렇게 투과되어 수열면에 도달된 광선은 손실없이 전부 흡수된다고 가정하면, 태양광선은 Fig. 1의 투명단열층(A) 범위  $0 \leq d \leq d_m$  사이에서 전혀 방해받지 않고 투과되어 투명단열층과 구조물층(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 다음 식 (1)과 같은 열전달식이 성립된다<sup>6)</sup>.

$$[\alpha(T - T_A) = \lambda_A \cdot T_d]_{d=0} \quad (1)$$

투명단열층에서 열전도가 진행된다면 이 투명단열

층에서의 열전도 평형식은 식 (2)와 같다.

$$T_{dd} = 0 \quad (2)$$

여기서,  $T(d) = ad + b$ 를 만족하게 된다. 여기서  $a$ 는 투명단열층의 온도변화 기울기를,  $b$ 는 투명단열층 외부표면 즉  $d=0$ 일 때의 값을 의미한다.

투명단열층과 구조물층의 경계면  $d=d_m$  에서 온도범위는 투명단열층과 구조물층에서 동일해야하므로<sup>7)</sup> 다음과 같은 식 (3)과 (4)를 만족해야 할 것이다.

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

$$[\lambda_A \cdot T_d - \lambda_B \cdot W_d = I]_{d=d_m} \quad (4)$$

또한 다음 열전도평형식 (5)는 구조층의 온도범위  $W$ 는  $W = Ad + B$  에 의해서 산출될 수 있다. 여기서  $A$ 는 구조층의 온도변화율을,  $B$ 는  $d=d_m$ 에서의 값을 나타낸다.

$$W_{dd} = 0 \quad (5)$$

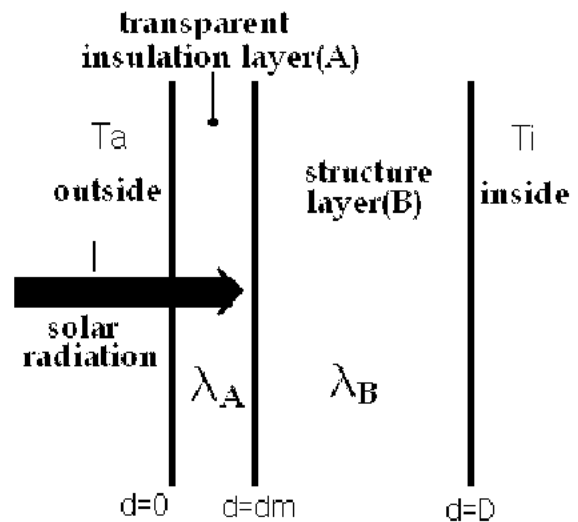


Fig. 1 Transparent insulation wall

실내공간과 접하는 구조층의 면  $d = D$  지점에서 자연적으로 열전달현상이 일어나며<sup>8)</sup>, 이때 열전달율을  $\alpha_i$  라 하고 실내온도를  $T_i$  라 하면 다음과 같은 식이 성립된다<sup>9)</sup>.

$$[\lambda_A \cdot W_d = \alpha_i(T_i - W)]_{d=D} \quad (6)$$

따라서 투명단열층 온도범위  $T(d)$ 와 불투명구조층  $W(d)$ 는 다음 2.1과 같다.

2.1 투명단열층 A

미분방정식 (1)과 (5)에 의한 일반적인 해는 다음과 같다.

$$T(d) = ad + b \tag{7}$$

$$W(d) = Ad + B \tag{8}$$

이 결과 단순한 일차 방정식으로 정리된 위식에서 a, b, A, B 는 적분상수가 되며 물리적으로 다음과 같이 해석된다. b는 d=0에서의 온도를 나타내며, a는 투명단열층A에서의 온도상승율을 나타낸다. 투명단열층과 구조층의 경계면인 d=d<sub>m</sub> 에서는 온도가 d<sub>m</sub> + b 가 되며 온도의 연속성에 따라 Ad<sub>m</sub> + B로 표기될 수 있다. 이와 마찬가지로 구조층의 실내면 온도는 AD + B 가 된다. 여기서 만약 a, b, A, B가 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<sup>14)</sup>, 이 계산 결과는 Table 1과 같이 나타난다.

$$A = (T_i - T_a)D^{-1} \{ B_a - ID(\lambda_A(T_i - T_a)) \}^{-1} \cdot (1 + d_m D^{-1} B_a) \cdot [B_a(1 + B_i^{-1} - d_m D^{-1}) + \lambda_B \cdot \lambda_A^{-1}(1 + d_m D^{-1} B_a)] \tag{9}$$

$$b = T_a + I_a^{-1} + \lambda_B \alpha^{-1} A \tag{10}$$

$$a = I \lambda_a^{-1} + \lambda_B \cdot \lambda_A^{-1} A \tag{11}$$

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

여기서, B<sub>a</sub>=αD/λ<sub>A</sub>, B<sub>i</sub>=βD/λ<sub>B</sub>, d<sub>m</sub>=5cm, α=25 [W/(m<sup>2</sup>·K)], D=30cm, β(외부열전달율)=8[W/(m<sup>2</sup>·K)], λ<sub>A</sub>=0.05[W/(m·K)], T<sub>a</sub>=0[°C](외기온도), λ<sub>B</sub> = 0.8 [W/(m·K)], T<sub>i</sub> = 20[°C](실내온도)이다.

Table 1 Integral constant calculation at transparent insulation wall

I(d <sub>m</sub> )	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(d <sub>m</sub> )	°C	14.0	17.1	20.3	23.3

Table 1은 위 식에서 산정된 적분상수를 나타내며 아래 Fig. 2는 여기에 속하는 온도범위를 나타낸다.

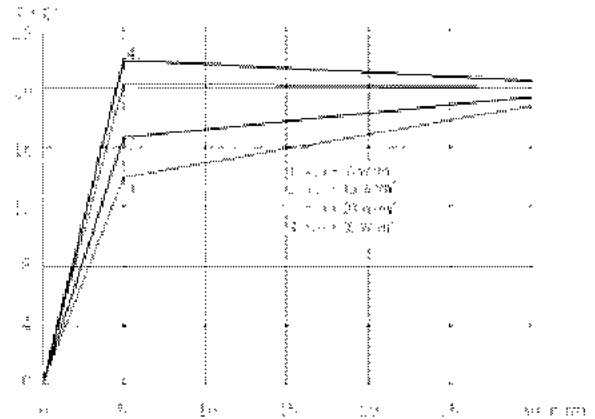


Fig. 2 Temperature variation at transparent insulation wall

2.2 수열면

기존의 투명단열재 중에서 완전히 투명하고 열관류율도 매우 작은 그러한 재료는 아직 현실적으로 존재하지 않는다<sup>10)</sup>. 그렇다면 투명단열층 A에서 깊이에 따라 일사투과율과 흡수율이 감소된다는 것은 확실하고 실제로도 모든 투명단열 재료에서 그렇게 발생되고 있는 현상이지만<sup>11)</sup>, 만약 이것을 정확하게 계산하려고 한다면 매우 복잡한 수학이 요구되므로 여기서는 투명단열층의 두께에 따라 유입일사량 I가 비례적으로 감소한다고 가정하여 다음과 같이 단순한 1차식을 적용하였으며 아래 Fig. 3과 같다.

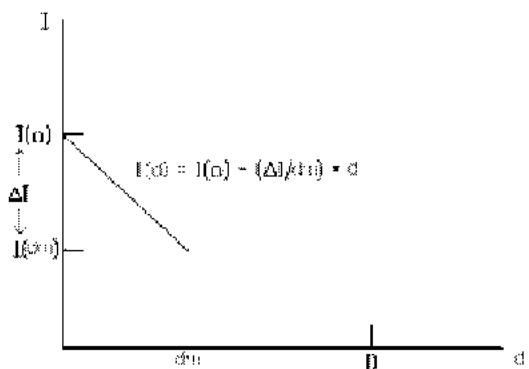


Fig. 3 Solar variation on thickness of transparent insulation material

이 그림은 외기표면으로부터 d(투명단열두께)가 증가할수록 수열면에 도달되는 일사량이 감소되는 것을 나타낸다<sup>12)</sup>. 만약 f = ΔI/dm 를 단위시간당, 체적당 d지점에서의 수열면에 흡수되는 일사에 의

해 공급되는 열에너지라고 한다면, 투명단열층 A에서의 온도범위는 열관류 평형식에 의해  $-\lambda_A T_d = f$  혹은  $T_{dd} = -f$  로 표시되는데<sup>13)</sup> 여기서 T는 아래 식 (13)과 같다.

$$T = a'd + b'd - 1/2 \cdot f \cdot d^2 \quad (13)$$

이러한 경우에 수열면의 온도범위 T(d)와 W의 적분상수는 다음 식 (14)~(17)로 산정된다<sup>15)</sup>.

$$\begin{aligned} & A' \cdot D(\mu - (B_i + 1) - \lambda_B \cdot \lambda_A^{-1}(B_a^{-1} + \mu)) \\ &= (I(d_m)D\lambda_A^{-1} + fD^2\mu)(B_a^{-1} + \mu) - (T_i - T_d) \\ & \quad - 1/2 \cdot fD^2 \cdot \mu^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$a' = I(d_m)\lambda_A^{-1} + \lambda_B \cdot \lambda_A^{-1}A' + fD\mu \quad (15)$$

$$\begin{aligned} b'(1 + \mu B_d) &= A'D[\mu - B_{i-1} + 1] + T_i + 1/2 \\ & \quad \cdot fD^2 \cdot \mu^2 + T_a \cdot \mu \cdot B_a \end{aligned} \quad (16)$$

$$B' = -(\lambda_B \cdot \beta^{-1} + D)A' + T_i \quad (17)$$

이것을 산정하여 계산한 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Integral constant calculation at layer A

I(d <sub>m</sub> )	W/m <sup>2</sup>	0	10	20	30
f'	K/m <sup>3</sup>	100	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'	℃	1.85	1.71	1.57	1.45
B'	℃	22.2	24.3	25.9	27.6
f	K/m <sup>2</sup>	20000	16000	12000	8000
A'D + B'	℃	20	21.01	21.44	21.86
A'd <sub>m</sub> + B'	℃	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

이 경우의 온도범위는 Fig. 4와 같다. Fig. 4는 Fig. 3과 같이 투명단열체의 깊이에 따라 일사유입량이 비례하여 변화할 경우에 투명단열층의 두께에 따른 온도 범위를 나타내고 있다.

여기서 외기에서 공급되는 일사량 I(o)=50[W/m<sup>2</sup>]부터 수열면 d=d<sub>m</sub> 까지 유입되는 일사량 I<sub>o</sub>(d<sub>m</sub>)=0, I<sub>1</sub>(d<sub>m</sub>)=10[W/m<sup>2</sup>], I<sub>2</sub>(d<sub>m</sub>)=[20W/m<sup>2</sup>], I<sub>3</sub>(d<sub>m</sub>)=[30W/m<sup>2</sup>]

에서, 그리고 dm≤d≤D의 범위에서 d가 증가함에 따라 온도범위가 감소되는 결과가 산출되는 것을 볼 수 있다. 즉, 이 투명 단열벽은 열전도에 의한 외기로의 열손실이 없다는 것이고, 반대로 이 벽은 관류 열의 양 Q = -F · λ<sub>B</sub> · W<sub>d</sub> 만큼(F는 벽체면적) 실내로 열공급을 하게 되며 이러한 벽은 에너지 공급원이 된다는 것을 알 수 있다.

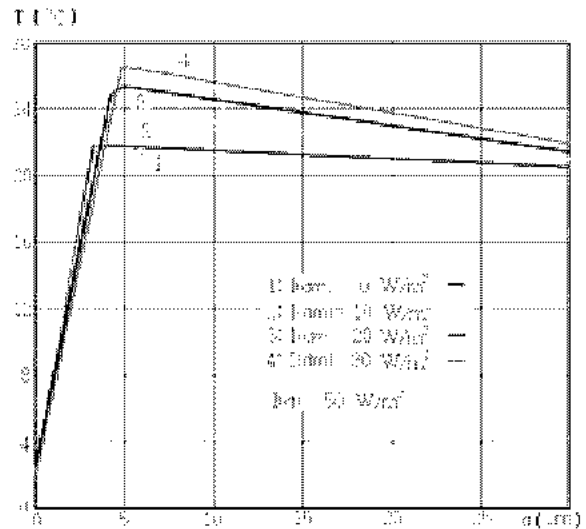


Fig. 4 Temperature variation at layer A

### 3. 결 론

본 논문은 정상상태의 열전도식으로부터 변화되는 일사량에 의해 주어진 실내외 온도(실내온도 20℃, 외기온도 0℃)에 의해 투명 단열된 건물벽체의 온도범위가 산정되었다. 여기서 수식의 단순화를 위해 일사량이 투명단열체의 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 투명단열체의 두께를 산정할 때 그 지역의 외기온도와 일사량에 따라 달리 적용되어야 효율적이라는 것도 밝혀졌다.

후 기

본 논문은 2002년 동의대학교 학술연구조성비의 지원에 의한 연구임.

참고 문헌

1. Jesch, L. 1992, "Proceeding of the 5th International Meeting on Transparent Insulation Technology", Freiburg, TI5, pp. 42-45.
2. 이 성, 2001, "투명단열된 평판형 집열기에 관한 연구", 건축학회논문집, 제 6권 1호, pp. 12-19.
3. 이 성, 1993, "Anwendung transparenter Waermedaemmung", Hannover,, Institut fuer Industrialisierung des Bauens, Diss., pp. 62-66.
4. 이 성, 1999, "학교건물의 에너지 절약방안", 교육 시설학회지, 제 6권 3호, pp. 17-25.
5. Hilbig, G., 1991, "Das thermische Verhalten partiell transparenter Waende", Bauphysik 13, Heft 6, pp. 41-43.
6. Haferland, F., 1970, "Das waermetechnische Verhalten mehrschichtiger Aussenwaende", Bauverlag, Wiesbaden, pp. 88-89.
7. Hullmann, H., 1992 "Rarionelle Energieverwendung in Gebaeden", Beton-Und Fertigteiljahrbuch, pp. 54.
8. Caemmerer, 1968, "Berechnung der Wasserdampfdurchlaessigkeit und Bemessung des Feuchtigkeitsschutzes von Bauteilen", Berichte aus der Bauforschung, Heft 51, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, pp. 232-235.
9. Reiher, H., 1964, "Waermeschutz und Feuchtigkeitsverhalten von Aussenwaenden Deutsche Bauzeitung (DBZ), Heft 10.
10. DIN 4108, 1974, "Ergaenzende Bestimmungen, Ministerialblatt"
11. DIN 52616, 1984, "Waermeschutztechnische Pruefung. Bestimmung der Waermeleitfaehigkeit mit dem Waermestrommessplatten geraet".
12. Kuenzel, H. 1982, "Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Aussenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe", Bauphysik 4, H. 3, pp. 101-107.
13. Goetzberger, A., 1992, "Transparente Waermedaemmung", :Sonnenenergie 17 Heft2-04
14. W. Platzer, 2001 "Theoretische und Experimentelle Ergebnisse einer Transparente Waermedaemmten Hausfassade" Bauphysik 23, Heft4
15. Boy, E, 1987, "Transparente Waermedaemmung und passive Solarenergienutzung in einem System". Zeitschrift fuer Waermeschutz 32, Heft22.