

수분 흡수가 단열재의 열전도계수에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of Water Absorption on the Thermal Conductivity of Insulation Materials

유성연(Seong-Yeon Yoo)¹, 김태호(Tae-Ho Kim)^{2*}

¹충남대학교 기계설계공학과, ²충남대학교 대학원

¹Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²Graduate School of Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received October 16, 2012; revision received December 18, 2012)

Abstract Insulation material is generally used for preventing heat loss from heat transport fluids, and water absorption severely reduces the insulation property. The purpose of this study is to evaluate the amount of water absorption supplied by the pouring method and spraying method, to investigate the effects of water absorption on the thermal conductivity of an insulation material, and modeling the relation between water absorption and thermal conductivity. E-glass, a kind of glass fiber, and HYPERLITE, mainly composed of pearlite, are selected, to compare hygroscopic and insulation properties. E-glass is found to have much higher water absorptivity, compared to HYPERLITE. The thermal conductivity of the water-absorbed E-glass is increased by more than 150%, compared to that of no absorption, while variation of the thermal conductivity of HYPERLITE with water absorption is insignificant. A three-stage model of water absorption for thermal conductivity is developed, and the modeling results are found to be in good agreement with the experimental data.

Key words Insulation material(단열재), Thermal conductivity(열전도계수), Water absorption(수분 흡수), Water absorption model(수분 흡수 모델), Thermal resistance(열저항)

† Corresponding author, E-mail: thkim2845@naver.com

1. 서 론

냉난방과 열원의 수송은 건물은 물론 가전, 선박, 플랜트, 발전소, 농공업시설 등의 각종 분야에서 활용되고 있는데 냉난방과 열원의 수송에는 필연적으로 열손실이 수반된다. 이러한 열손실을 방지하기 위해 단열재가 사용되며, 적절한 단열재의 선정은 세계적인 이슈가 되고 있는 에너지 절약과 온실가스 배출량 저감을 위해 매우 중요하다.

단열재 선정에 있어서 가장 중요한 요소는 열전도계수와 내구성이며, 사용 중 수분의 흡수는 단열재의 단열성과 내구성에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 물의 열전도계수는 유리섬유의 약 15배이며, 단열재에 수분이 흡수되면 단열능력이 저하되고 배관, 장치 혹은 마감재의 부식을 조장하거나 단열재 처짐 현상을 야기한다. 따라서 작동조건에 따라 단열재의 설계에 수분의 영향을 고려하여야 하며, 배관 공사시 수분이 단열재에 들어가지 못하도록 시공하는 것도 중요하다. 그러

나 근본적인 문제 해결을 위해서는 내흡수성이 뛰어난 단열재를 선택하는 것이 더욱 바람직하다.^(1,2)

단열재에 수분이 흡수되는 방법에는 직접적인 수분과의 접촉, 대기 중의 수분과의 접촉, 수증기의 응축 등이 있으며 이때의 수분 분포는 흡수 또는 접촉된 수분과 단열재 내 수분 유동의 복합적인 현상에 의해 이루어진다.⁽³⁾ 섬유계 단열재의 경우 90%의 상대습도에서 2% 혹은 그 미만(질량기준)의 수분 흡수가 이루어진다고 보고된 바 있다.⁽⁴⁾ 이러한 단열재 내의 수분의 영향을 평가하기 위해 Thomas et al.⁽⁵⁾은 젖은 상태의 유리섬유 단열재의 시간에 따른 온도 변화와 수분 유동을 관찰한 바 있으며, Wijesundera et al.⁽⁶⁾은 단열재의 뜨거운 면에 물을 분무시키거나 직접 습한 공기 유동에 노출시킴으로써 온도변화를 관찰하고 특정 시간 후의 수분 흡수량/응축량을 관찰한 바 있다. 또한 Murata⁽⁷⁾는 섬유계 단열재의 뜨거운 면을 100℃에 가까운 습한 공기에 노출시키고 차가운 면은 불침투성의 섬유질 판에 접촉시키는 연구를 통해 응축수의 흡수

현상이 증력과 대류열전달에 의해 일어난다고 보고하였다. 국내에서 Kim et al.⁽⁸⁾는 결로 방지를 위한 습기 투과저항계수의 국내 기준(KSF 2803 : 1996)이 보완의 소지가 있다고 판단하여 투습성과 단열재의 경년열화의 관계를 분석하여 투습에 의한 경년열화가 될수록 단열성능이 낮아짐을 보였다. 또한 Bang and Oh⁽⁹⁾는 수분 흡수량에 따른 단열재의 열전도계수 변화를 관찰함으로써 유리면은 약 10~20%의 흡수율에서 열전도계수가 약 2.69배 증가하며 암면은 약 2~12% 흡수율에서 열전도계수가 약 2.28배 증가함을 보였다.

본 연구의 목적은 단열재의 수분 흡수성을 분석하고 모델을 개발하여 수분 흡수량이 단열성능에 미치는 영향을 규명하는 것이다. 이를 위해 수분 흡수가 잘 되는 E-glass와 수분 흡수가 잘 되지 않는 HYPERLITE 단열재를 비교·평가하였다. 또한 수분 공급방법으로 단열재 중앙에 물을 직접 쏟아 붓는 Pouring 방법과 단열재 전체에 물을 골고루 분무시키는 Spraying 방법을 사용하여 결과를 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 시편

본 연구에서는 가열판과 냉각판을 사용해서 열흐름을 만들어 열전도계수를 측정하였으며, 실험장치(NETZSCH사의 HFM 436)의 구조는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 기전력을 이용한 Peltier 시스템에 의해 가열 혹은 냉각되는 두 평판 사이에 시편을 설치하여 열류를 가하는 구조로 되어있다. 시편사이의 온도차를 열전대로 측정하였으며, 열류량(\dot{Q})은 열유속계를 사용하여 계측하였다. 이때 3개의 열전대를 시편의 중앙과 중앙에서 좌우로 20 mm 떨어진 지점에 설치하였으며, 산술평균으로 평균 온도를 구하였다. 실험시 관련 규격인 ISO 8301, ASTM C518, KS L 9016를 준수하였으며, 시편 크기는 300×

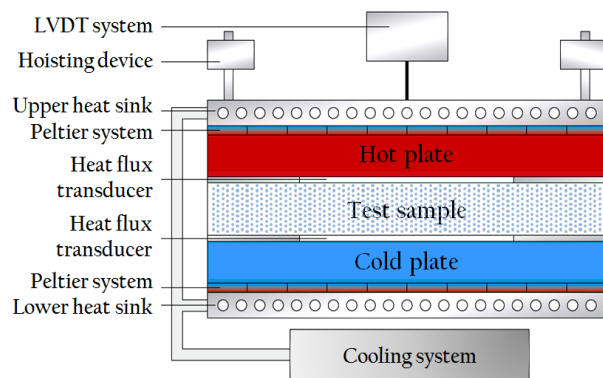


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

300×50 mm이다. 실험장치에 부착된 변위측정기인 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)로 시편의 두께를 정밀하게 측정하였으며, 실험부 주위를 일정한 온도로 유지함으로써 측정의 정확도를 높였다. 측정된 시편의 두께, 온도, 열류량 등이 식(1)의 Fourier 열전도법칙에 입력되어 열전도계수(k)가 자동으로 계산되며, 열전도계수의 측정 정확도는 $\pm 1\sim 3\%$ 이다. 표준시편을 사용하여 매달 열전도계수 측정장치를 교정하고 있으며, 최근 10개월간 표준시편의 측정오차는 $\pm 1\%$ 이하로 나타났다.

$$\dot{Q} = kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1)$$

본 연구에 사용된 단열재 시편은 유리섬유의 일종인 E-glass와 단원셀 팽창 퍼라이트를 주재료로 한 산업용 단열재인 HYPERLITE이다. 두 단열재 모두 Pipe Cover, Round Board, Flat Board의 형태로 제작되며, 본 연구에서는 수분흡수 시험이 용이한 Flat Board 형태를 사용하였다. HYPER LITE는 고효율 보온 단열재로, 고온(650℃)에서도 사용가능하며 우수한 단열성능과 내흡수성, 내구성을 가지는 특징이 있다. Table 1은 두 단열재의 특성을 비교한 것으로 열전도계수와 기타 열적 특성이 매우 유사하며 E-glass의 밀도가 약간 더 높

Table 1 Properties of insulation materials

Property	Material		
	E-glass	HYPERLITE	
Density (kg/m ³)	180~220	120~130	
Heat capacity (J/kgK)	795	837	
Thermal conductivity (W/mK, at 20℃)	0.039	0.038	
Composition (%)	SiO ₂	55.2	74.2
	Al ₂ O ₃	14.8	12.8
	B ₂ O ₃	7.3	-
	MgO	3.3	0.07
	CaO	18.7	0.82
	Na ₂ O	0.3	3.81
	K ₂ O	0.2	4.61
	Fe ₂ O ₃	0.3	0.66
	F ₂	0.3	-
Maximum usable temperature(℃)	650	650	

다. 두 단열재 모두 SiO₂가 주성분이지만 HYPERLITE의 SiO₂ 성분비가 훨씬 높으며, E-glass에는 CaO 성분이 상대적으로 많이 들어있다.

2.2 실험방법

수분 흡수에 따른 시편의 열전도계수 변화를 분석하기 위하여 Pouring과 Spraying, 두 가지 방법으로 수분을 공급하였다. Pouring을 통한 수분 공급은 시편의 중앙에 물을 붓는 방법으로, 비가 올 때 빗물 등이 국부적으로 흡수되는 것을 모사하기 위해 수행하였다. 반면 Spraying을 통한 수분 공급은 시편에 물을 분무시키는 방법으로, 단열재 주위의 수증기나 수분이 장기간에 걸쳐 단열재 전체에 균일하게 흡수되는 경우를 모사하기 위해 수행하였다. Pouring을 통해 수분이 공급된 시편을 나타낸 Fig. 2를 보면 수분이 중앙부를 중심으로 공급되었음을 알 수 있다.

HYPERLITE는 미세한 공극에 의한 발수로 수분 흡수성이 극히 낮기 때문에 표면에 수분이 흡수되지 않고 물방울이 맺히는 반면, E-glass의 경우 상당량의 수분이 흡수되어 수분간의 응집을 통해 수분이 퍼지는 현상이 나타남을 알 수 있다.

시편에 수분을 흡수시키기 전, 시편을 104°C에서 24시간 동안 항량건조시킨 후 열전도계수를 측정하였다. 이후 각 시편에 수분을 투입하였으며, Pouring의 경우는 5, 6, 7, 8, 9, 10, 50, 100, 150 g을 투입하고, Spraying의 경우에는 2, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 50, 100, 150 g을 투입하여 실험하였다. 수분을 공급한 뒤 30분

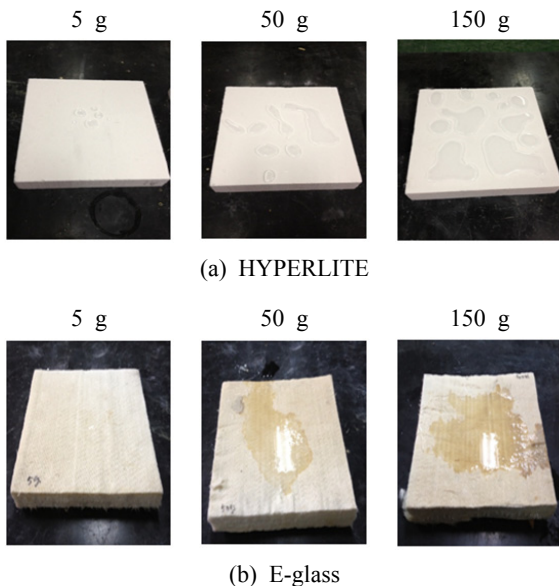


Fig. 2 Photo of specimens after water pouring.

간 방치하여 시편에 수분이 충분히 흡수되도록 하였으며, 이후 시편을 기울여 30분간 방치한 후 표면에 흡수되지 않은 수분을 제거하여 무게를 측정함으로써 흡수된 수분량을 계산하였다. 이후 시편 내부의 수분 분포를 균일하게 하기 위해 Wrapping하여 24시간 저장한 후 열전도계수를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Pouring 방법

수분 공급 전, 시편의 열전도계수를 Fig. 3에 나타내었으며, 이때 HYPERLITE와 E-glass 시편의 평균 열전도계수는 각각 0.0396 W/mK과 0.0382 W/mK, 표준편차는 각각 0.00025 W/mK, 0.00114 W/mK이었다. HYPE

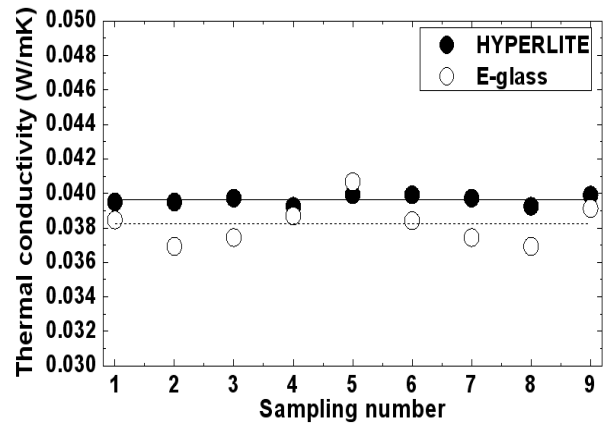


Fig. 3 Thermal conductivity of testpiece before water pouring.

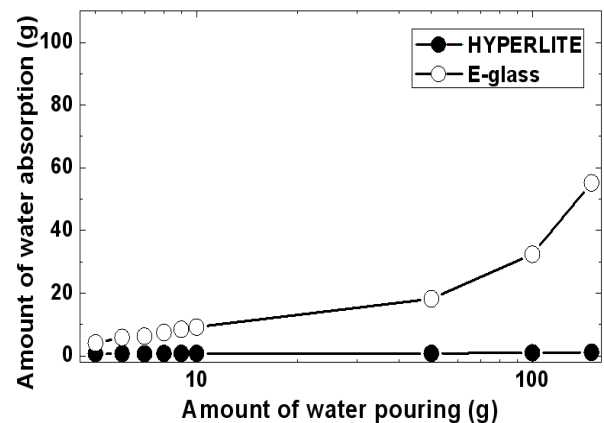


Fig. 4 Comparison of water absorption for pouring method.

RLITE에 비해 E-glass의 표준편차가 비교적 큰 편인데 그 이유는 E-glass는 Rolling 후 Punching 방식으로 제품이 생산되므로 성형공법에 비해 균일한 제품을 얻기가 어려울 뿐만 아니라 완제품의 경우에도 외부의 충격으로 인해 압축될 시 복원력이 없어 부위별로 밀도편차가 발생하기 때문이다. 그러나 수분을 가하기 전의 열전도계수 편차는 수분흡수에 따른 열전도계수의 변화에 비해서 훨씬 작기 때문에 시편을 새로 제작하지 않고 그대로 사용하였다.

Fig. 4는 Pouring 방법으로 수분을 공급하였을 때 단열재의 수분 공급량과 수분 흡수량의 관계를 나타낸 것이다. E-glass는 수분 공급량이 증가하면서 수분 흡수량이 현저히 증가하는 반면 HYPERLITE는 수분을 다량 공급하여도 흡수되는 수분이 미미한 것으로 나타났다. 이는 E-glass 시편의 경우 바인더 처리가 되어 바인더 형태가 불균일하고 바인더 코팅 상태가 약한 부위에 집중적인 수분 흡수가 일어나 수분이 내부까지 침투하기 때문이다. 그러나 열린셀(Open cell) 폼라이트로 제조되어 공극이 있는 일반적인 폼라이트 보온재와는 달리 HYPERLITE는 닫힌셀(Closed cell) 형식의 폼라이트로 제조되어 공극이 최소화되며, 이와 더불어 재질에 발수처리를 하여 수분 흡수가 표면근처에서만 일어난다.

Fig. 5는 Pouring 방법으로 수분을 공급할 때 단열재의 수분 흡수량에 따른 열전도계수의 변화를 나타낸 그림이다. 수분 흡수량이 적은 HYPERLITE는 그래프의 우측에 밀집되며 약 1%의 미미한 열전도계수 변화를 보였다. 반면 E-glass는 수분 흡수가 적은 초기에는 건조상태보다 약간 높은 열전도계수를 가지다가 흡수량 4 g과 8 g 사이에서 140% 정도의 급격한 열전도계수 증가를 보이며 이후 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

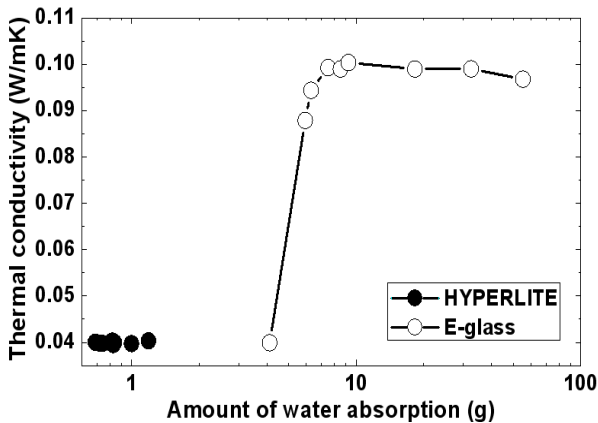


Fig. 5 Variation of thermal conductivity with water absorption for pouring method.

3.2 Spraying 방법

Pouring 수분 공급의 특성상 수분 흡수가 물이 부어진 중앙에서 주로 일어나 가장자리로 번지는 형태이기 때문에 보다 균일한 수분 공급을 위해 단열재 표면에 수분을 분무시키는 Spraying 방법으로 실험을 반복하였다. Spraying 방법을 통한 수분 공급 전 항량건조상태인 시편의 열전도계수를 측정한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. HYPERLITE와 E-glass의 평균 열전도계수는 각각 0.0403 W/mK, 0.0409 W/mK이었으며, 표준편차는 각각 0.00015 W/mK, 0.00029 W/mK로 나타났다. Pouring 방법에 사용한 시편보다 열전도계수는 약간 높게 나왔으나 큰 차이는 없다.

Spraying 방법을 통한 수분 공급량과 수분 흡수량의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Pouring 방법과 비슷한 경향을 보이거나 흡수된 수분량이 더 많고 데이터가 고르게 분포됨을 알 수 있다. 이는 Spraying 방법을 통해

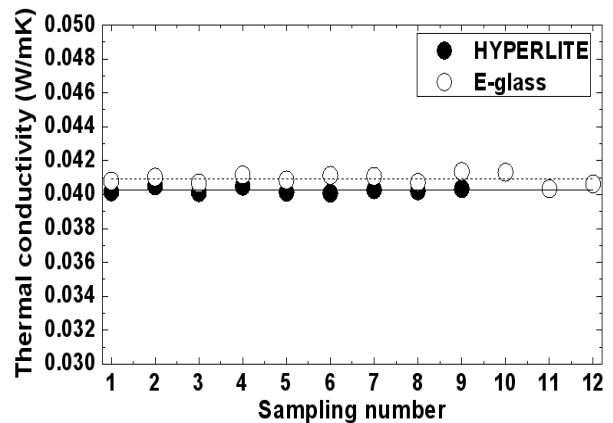


Fig. 6 Thermal conductivity of testpiece before water spraying.

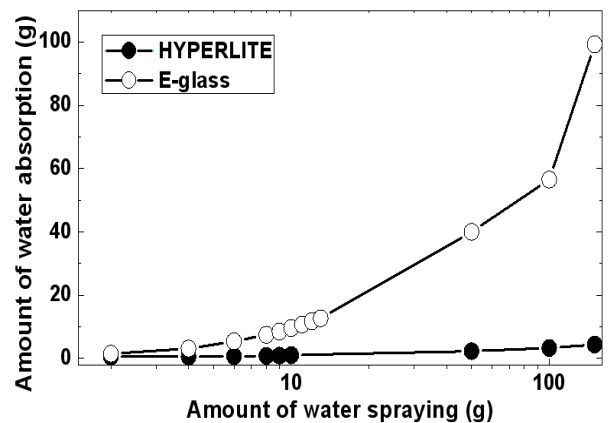


Fig. 7 Comparison of water absorption for spraying method.

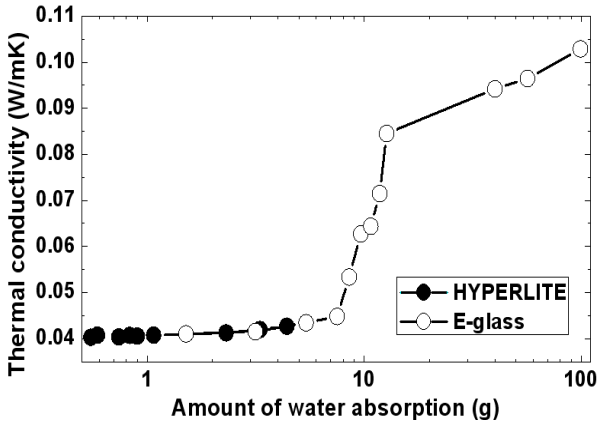


Fig. 8 Variation of thermal conductivity with water absorption for spraying method.

수분을 공급할 경우 미세한 수분 입자가 단열재 표면 전체에 고르게 공급되기 때문이다.

Fig. 8은 Spraying 방법으로 수분을 공급할 때 수분 흡수에 따른 열전도계수의 변화를 나타낸 것으로 Pouring 방법으로 수분을 공급하는 경우와는 상당히 다른 양상을 보이고 있다. E-glass의 경우 소량의 수분이 흡수될 때는 열전도계수가 서서히 증가하다가 일정량 이상의 수분이 흡수되면 열전도계수가 급격히 증가하며, 그 이후 다시 열전도계수가 증가하는 속도가 완만해지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 수분이 흡수되는 초기에는 단열재 표면 근처에서 수분이 흡수되고 이에 따라 열전도계수가 서서히 증가하다가 수분이 단열재를 관통하는 순간 열전도계수가 급격히 증가하며, 이후 단열재 내의 수분이 포화되면서 열전도계수가 완만하게 증가하기 때문으로 판단된다. 수분을 흡수한 E-glass의 열전도계수는 수분 흡수가 없는 초기값의 150% 이상까지 증가하지만 HYPERLITE의 열전도계수 증가는 매우 미미하다. 그러나 열전도계수가 급격하게 증가하기 전인 소량의 수분 흡수에서는 HYPERLITE와 E-glass의 열전도계수 변화가 매우 흡사하며, 따라서 수분 흡수에 의한 열전도계수의 변화는 단열재의 종류와는 상관없이 없는 것으로 판단된다. HYPERLITE 단열재는 Fig. 7에 보인 바와 같이 수분 공급이 많아도 소량의 수분만을 흡수하므로 수분 흡수가 많은 경우의 열전도계수 변화를 관찰할 수가 없었다.

3.3 수분 흡수 Modeling

위에서 고찰한 특성을 보다 명확하게 규명하기 위하여 단열재 내에 수분이 흡수되는 과정을 열전도계수 변화와 연계하여 모델링하였으며, 모델링을 위해 열저항 개념을 도입하였다. 평판 형상의 단열재에서의 열

전달율은 식(2)와 같이 양 표면의 온도차를 전도열저항으로 나누어 구하며, 이때 전도열저항은 식(3)과 같이 표현된다.

$$\dot{Q} = \Delta T / R_{cond} \quad (2)$$

$$R_{cond} = L / kA \quad (3)$$

여기서 L 은 단열재의 두께, k 는 열전도계수, A 는 열전달면적을 의미한다.

본 연구에서는 수분 흡수가 세 단계로 진행된다고 가정하여 모델링하였다. 열전도계수가 서서히 증가하는 첫 번째 단계(Step 1)에서는 수분이 상부 표면에서 흡수되어 하부와 측면으로 퍼져나간다고 가정하였다. Fig. 9(a)는 Step 1의 수분 흡수 형태에 대한 개념도를 표시한 것으로, 이를 열저항으로 나타내면 Fig. 10(a)와 같이 단열재만 있는 부분과 수분과 단열재가 있는 부분의 병렬구조를 가지게 된다. 이때 총 전도열저항을 구하는 식은 식(4)와 같이 되며, 수분이 흡수되는 깊이 (L_w)와 면적(A_w)은 식(5)와 같이 시편의 총 길이(L)와 총 면적(A)의 일정 비율(a)로 표시할 수 있다. 식(5)를 전도열저항을 정의하는 식(3)에 대입하고, 각각의 저항을 계산하여 식(4)에 대입하면 수분이 흡수된 단열재의 유효열전도계수(k)를 식(6)과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{ii}} + \frac{1}{R_{ww} + R_{iw}} \quad (4)$$

$$L_{w1} = aL, \quad A_w = aA \quad (5)$$

$$k = (1-a)k_i + \frac{ak_w k_i}{ak_i + (1-a)k_w} \quad (6)$$

두 번째 단계(Step 2)에서는 수분이 단열재를 관통하여 열전도계수가 급격히 증가하며, 이 단계의 수분 흡수 개념도와 열저항 구조는 각각 Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)에 보여지고 있다. 이때 수분은 단열재 깊이 방향으로 더 이상 진행할 수 없고 옆으로 퍼져 나갈 것이다. 수분이 흡수된 면적(A_w)을 식(8)과 같이 시편의 총 면적에 b 라는 일정한 비율로 증가한다고 가정하고 식(3)과 식(7)에 대입하여 유효열전도계수(k)를 구하면 식(9)와 같이 된다.

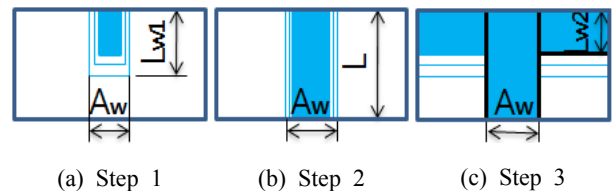


Fig. 9 Assumed shape of absorbed water.

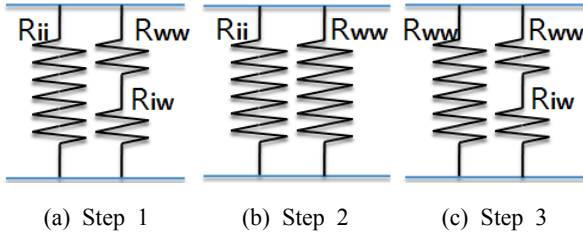


Fig. 10 Circuit of conduction resistance.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{ii}} + \frac{1}{R_{ww}} \quad (7)$$

$$L_w = L, \quad A_w = bA \quad (8)$$

$$k = (1-b)k_i + bk_w \quad (9)$$

마지막으로 수분이 단열재 표면에서부터 포화되어 가는 세 번째 단계(Step 3)의 수분 흡수 개념도와 열저항 구조는 각각 Fig. 9(c)와 Fig. 10(c)와 같다. 이 단계에서 수분이 관통한 면적(A_w)은 더 이상 증가하지 않고 수분이 흡수된 깊이(L_w)는 식(11)과 같이 단열재의 총 두께의 일정 비율(c)로 증가한다고 가정하여 위에서와 비슷한 방법으로 유효열전도계수(k)를 구하면 식(12)와 같다. 이때 수분이 관통한 면적(A_w)은 두 번째 단계의 최종 면적이므로 이때의 b 값을 대입하여 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{ww}} + \frac{1}{R_{ww} + R_{iw}} \quad (10)$$

$$L_{w2} = cL, \quad A_w = bA \quad (11)$$

$$k = bk_w + \frac{(1-b)k_w k_i}{ck_i + (1-c)k_w} \quad (12)$$

위의 세 단계에서 비율 a, b, c 는 흡수된 수분의 체적의 함수로 표현할 수 있으며, 이를 단열재의 체적으로 무차원화하여 나타내면 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} a &= C_1 \left(\frac{V_w}{V_i} \right)^{m_1} \\ b &= C_2 \left(\frac{V_w}{V_i} \right)^{m_2} \\ c &= C_3 \left(\frac{V_w}{V_i} \right)^{m_3} \end{aligned} \quad (13)$$

E-glass에 Spraying 방법으로 수분을 공급한 경우에 대해 곡선맞춤하여 각각의 상수 C 와 m 을 구하면 Table 2와 같다. Fig. 11은 흡수된 수분의 체적을 단열재의 체적으로 나눈 무차원 값의 변화에 따른 수분 흡수 후

Table 2 Values of constants of eq.(13)

C_1	C_2	C_3
76.64	1.371E7	2.795
m_1	m_2	m_3
0.8782	3.264	0.4850

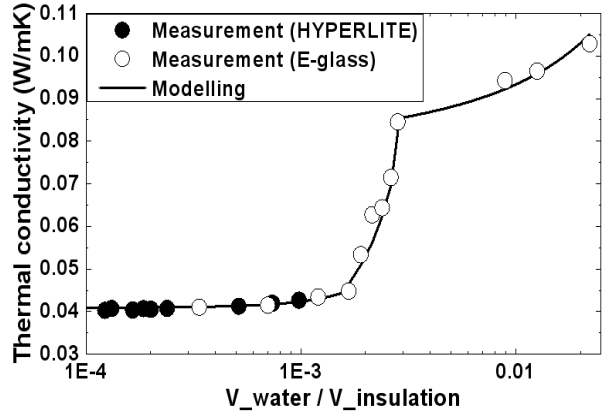


Fig. 11 Comparison of measured data with modelling data.

열전도계수의 변화를 나타낸 것으로 모델링으로 구한 값과 측정 데이터가 매우 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 사용된 E-glass의 경우 단열재 체적의 약 0.17%의 수분이 흡수된 상태에서 급격하게 열전도계수가 증가하였으며, 수분 흡수 비율 0.28%에서 세 번째 단계로 바뀌고 있다. 그리고 HYPERLITE는 첫 번째 단계에서 수분 흡수가 멈추어 두 번째 단계로 진행되지 않는 것을 알 수 있다. E-glass와 HYPERLITE가 동일 전상에 있는 것으로 보아 이러한 모델링은 단열재의 종류에 상관없이 적용될 수 있을 것이라 사료된다.

4. 결 론

E-glass와 HYPERLITE 단열재에 수분을 공급하여 수분 흡수량을 측정하고, 수분 흡수량에 따른 열전도계수의 변화를 실험과 모델링으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수분 공급 방법과 관계없이 HYPELITE의 수분 흡수량은 E-glass에 비해서 훨씬 적으며, Spraying 방법으로 수분이 공급될 경우 Pouring 방법에 비해서 훨씬 더 많은 수분이 흡수된다.

(2) 수분을 흡수한 E-glass의 열전도계수는 수분 흡수가 없는 초기값의 150% 이상까지 증가하지만 HYPELITE의 열전도계수 증가는 미미하다.

(3) 단열재의 열전도계수는 표면에서 수분이 흡수되어 하부와 옆으로 퍼지면서 서서히 증가하다가 수분이 단열재를 관통할 때 급격히 증가하며, 그 이후 단열재 내에 수분이 포화되면서 완만하게 증가한다.

(4) 단열재에 수분이 흡수되는 과정을 열전도계수와 연관하여 모델링하였으며, 측정 데이터와 모델링으로 구한 값은 매우 잘 일치한다. 무차원 변수를 이용하여 개발된 모델은 단열재의 종류에 상관없이 적용 가능하다.

참고문헌

1. Kim, J. S., 2011, Effective application of insulating material for green plant, NICE, Vol. 29, No. 1, pp. 77-84.
2. Park, S. B., 2005, An experimental study on thermal conductivity characteristics of a composite insulation by heat flux method, M.S. thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea.
3. Fan, J., Cheng, X. and Chen, Y. S., 2003, An experimental investigation of moisture absorption and condensation in fibrous insulations under low temperature, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 27, pp. 723-729.
4. Langlais, C., Hyrien, M. and Klarsfeld, S., 1982, Moisture migration in fibrous insulating materials under the influence of a thermal gradient and its effect on thermal resistance, ASTM STP 779, pp. 191-206.
5. Thomas, W. C., Bal, G. P. and Onega, R. J., 1983, Heat and moisture transfer in a glass roof-insulating material, ASTM STP 789, pp. 582-601.
6. Wijesundera, N. E., Hawlader, M. N. A. and Tan Y. T., 1989, Water vapor diffusion and condensation in fibrous insulations, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, No. 10, pp. 1865-1878.
7. Murata, K., 1995, Heat and mass transfer with condensation in a fibrous insulation slab bounded on one side by a cold surface, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 17, pp. 3253-3262.
8. Kim, S. H., Park, J. I., Lee, M. W. and Hong, J. K., 2006, The estimation on the insulation performance of thermal insulation materials according to water vapor permeance, Proceedings of Summer Annual Meeting of SAREK, pp. 1012-1018.
9. Bang, L. B. and Oh, M. D., 2002, Performance evaluation of insulation materials, Proceedings of Summer Annual Meeting of SAREK, pp. 761-766.