真空断熱材の熱伝導率測定方法に関する研究

Study on Measurement Method of Thermal Conductivity of Vacuum Insulated Panel

〇正 大村 高弘 (ニチアス㈱)

Takahiro OHMURA, NICHIA Corporation, Shin-miyakoda 1-8-1, Kita-ku, Hamamatsu, Shizuoka

Key Words : Guarded Hot Plate Method, Thermal Conductivity, Thermal Insulation

1. 緒言

真空断熱材の熱伝導率は、ロックウールやグラスウール、発泡ウレタン系断熱材などのそれらと比べ 1/5~1/10 程度であるとされている。それ故近年、家電製品や住宅、建築などへの応用が盛んに行われるようになった。しかしながら、熱伝導率が小さいが故に、その試験体を通る熱量も非常に小さくなり、熱伝導率測定を非常に難しくしているという問題も生じている^{1,2)}。さらに、真空層を形成する金属箔が高熱伝導率であるため、熱損失を増大させ、より一層熱伝導率測定を難しくしている。そのため、真空断熱材の熱伝導率をどのように評価すべきかは、非常に大きな問題になっている。筆者は、保護熱板法により真空断熱材の熱伝導率を測定した場合を、Microsoft® Excel™ を使って簡易数値シミュレーションし³⁾、真空断熱材と熱伝導率測定の関係を検討している^{4,5)}。本研究では、コア材の厚さや大きさなどが熱伝導率測定にどのような影響を及ぼすかを検討した。

2. 温度場シミュレーション

2-1 熱伝導方程式の差分化

定常状態における熱伝導を表す式は、 x, y, z 軸方向の三次元流れを仮定すると次式で与えられる。

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = 0 \quad (1)$$

ここで、 c は比熱、 Q は発熱量、 T は温度、 λ は熱伝導率である。この式を差分化すると、

$$T_{i,j} = \frac{\frac{T_{i+1,j,k} + T_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1,k} + T_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j,k+1} + T_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} + \frac{Q}{\lambda}}{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \times 2} \quad (2)$$

となり、対象とする各点（格子点）を下付の添え字 i, j, k で表した。ここでは、Excel™ の Sheet 上にセルを単位図形（四角形）として測定系の 3 次元断面図を描き、各セルに式(2)を代入し連立方程式として解いた。今回の計算対象としている部分は、図 1 に示すように、保護熱板法における測定部分の 1/8 にあたる箇所(網掛け部分)である。図 2 に真空断熱材を測定装置(高温板を挟んで下側部分)に設置した場合の断面図を示す。また、図 3 は、図 1 の網掛け部分を計算領域として Excel™ 上で描いた図であり、この各セルに式(2)が代入されている。

主熱板側と冷却板側の緩衝材(Buffer)は、熱伝導率 0.03 W/(m·K)、厚さ 3mm の板状材料を仮定しており、両者のセル数は異なるが、厚さは同じである。

本計算では、主熱板や保護熱板、冷却板の各セルに発熱量 Q を持たせ、測定時の設定温度になる様に、 Q を手動で繰り返し変化させている。そして、所望の温度になった時点で、試験体にかかる温度差 ΔT と試験体厚さ d 、熱流面積（主熱板の面積） S 、および次式を使って熱伝導率 λ を算出した。

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{\Delta T \cdot S} \quad (3)$$

Figure 1 Schematic diagram of computational domain in measurement system (mesh part is an eighth of whole).

Figure 2 Cross section of the part of setting up specimen in the measurement system.

Figure 3 Schematic diagram of computational domain in Microsoft® Excel™ sheet. (mesh part in Fig. 1)

2-2 シミュレーション条件

主熱板のサイズを 150×150mm、厚さ 15mm とし、保護熱板の幅を 74mm、厚さを 15mm、主熱板と保護熱板の間にあるギャップの幅を 2mm とした。さらに、低温側の熱板のサイズを 300×300mm、厚さを 15mm とし、2 枚法による測定とした。主熱板、保護熱板、低温側熱板それぞれの発熱量を調整して、各熱板を所望の温度になるようシミュレーションした。ただし、シミュレーションの対象としたのは、主熱板の下半分側から試験体と冷却板の領域で、その 1/4(全体の 1/8)とした。また、真空断熱材は、芯材の部分を平板とし、それを外装材(ラミネートフィルムの厚さ t を 107μm、熱伝導率 240 W/(m·K))とその外周部(ヒレ)が取り回しているとした。本シミュレーションでは、芯材のサイズ r や厚さ d などを変えながら熱伝導率 λ を求め、設定したコア材の熱伝導率と比較した。

3. シミュレーション結果

3-1 試験体厚さと熱伝導率

図4(△印)に、試験体平均温度 23℃、試験体にかかる温度差 $\Delta\theta$ が 20℃ の場合の、芯材寸法 250 mm 口における試験体の厚さ(芯材部分の厚さ d)と熱伝導率の関係を示す。芯材の熱伝導率を 0.002 W/(m·K)として計算したが、試験体の熱伝導率 λ_s は、どの厚さについても芯材のそれよりも 15%以上大きな値になった。また、試験体厚さ 5~20 mm の範囲で厚さに対して、熱伝導率がほぼ正比例していた。この原因の一つとして、真空断熱材が被覆材を備えた不均質構造であることが挙げられる。均質材料を対象とした場合の側面からの熱損失は、主熱板の一边の長さに対する試験体厚さの比が 0.6 以下であれば、ほとんど変化しないことが分かっている⁶⁾。一方、今回のシミュレーションでは、主熱板の一边が 150 mm、試験体厚さが最大で 20 mm であり、したがって、両者の比が最大でも約 0.13 である。それにもかかわらず、熱伝導率が厚さに対して大きく変化している結果となった。そこで、比較として均質材料(熱伝導率 0.002 W/(m·K)、厚さ 5, 10, 20 mm)についても計算を行った。その結果、図4の○印に示すように、均質材料の場合は、試験体厚さに対して熱伝導率がほとんど変化しないことが分かった。

したがって、熱伝導率が試験体厚さに伴って大きくなっていく原因は、真空断熱材が被覆材などを備えていることにより、不均質材料となってしまうためと考えられる。

3-2 芯材寸法と熱伝導率

試験体平均温度 23℃、 $\Delta\theta=20^\circ\text{C}$ 、厚さ $d=10\text{mm}$ における真空断熱材の芯材寸法(芯材の一边の長さ $2r$)に対する熱伝導率の関係を図5に示す。芯材の一边の長さが、主熱板の一边の長さ(150mm)に近づくにつれて、熱伝導率が急激に上昇していくのが分かる。

この原因は、芯材の側壁を形成するラミネートフィルムを介して主熱板からの熱損失が大きくなるためと考えられる。

3-3 緩衝材の影響

図6に緩衝材を試験体の加熱面および冷却面に設置した場合としない場合の、熱伝導率比較を示す。ここでは、緩衝材(図3に示す Buffer)を外した場合を計算し、図5で計算した厚さ 10mm(○印)の結果と比較した。

緩衝材を設置しない場合の方が、芯材寸法(一边の長さ)に関わらず、ほぼ一定の熱伝導率となり、芯材の熱伝導率として設定した値 0.002 W/(m·K)と 10%以内で一致した。一方、緩衝材を設置した場合は、芯材の寸法に大きく依存していた。

この原因は、高い熱伝導率を持つ被覆材からの熱損失が、熱伝導率測定に大きく影響しているためと考えられる。被覆材の温度を保護熱板により、主熱板と同じ温度になるように直接制御することで、正確に熱伝導率測定が可能になると考えられる。ただし、実際の真空断熱パネルでは、その表面の凹凸や厚さの不均質性などがあるため、熱板との間に空気層を作ってしまう可能性がある。そのため、緩衝材を挟む方が正確な測定となる場合もあると考えられる。

4. まとめ

真空断熱材の熱伝導率は、芯材の寸法や厚さ、試験体と熱板の間に挟み込む緩衝材などに大きく影響を受けてしまうことが分かった。その主な原因は、真空層を形成するために施されたラミネートフィルムによる熱損失によるものと考えられる。それ故、真空断熱材の熱伝導率を評価する際には、測定方法のみならず、芯材の寸法や緩衝材の有無などの測定条件も含めた注意が必要である。

謝辞

本研究は、経済産業省委託 平成23~25年度国際標準開発事

Figure 4 Relationship between simulated thermal conductivity λ_s and specimen thickness at 23°C and $\Delta\theta=20^\circ\text{C}$

Figure 5 Relationship between simulated thermal conductivity λ_s and core size $2r$ at 23°C and $\Delta\theta=20^\circ\text{C}$

Figure 6 Effect of buffer material for relationship between λ_s and core size $2r$ at 23°C and $\Delta\theta=20^\circ\text{C}$

業「低熱伝導率材料の熱伝導率測定方法の標準化委員会」の研究の一環として実施したものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 一般財団法人建材試験センター, 平成 23 年度国際標準開発事業 低熱伝導率材料の熱伝導率測定方法の標準化成果報告書, (2012).
- (2) 一般財団法人建材試験センター, 平成 24 年度国際標準開発事業 低熱伝導率材料の熱伝導率測定方法の標準化成果報告書, (2013).
- (3) 富村他, 丸善綸, エクセルとマウスでできる熱流体のシミュレーション
- (4) 大村, 第 34 回 日本熱物性シンポジウム(A131), 24-26, (2013).
- (5) 大村, 日本機械学会, 山梨講演会講演論文集 605,160-161, (2013).
- (6) W. Woodside, Analysis of Errors due to Edge Heat Loss in Guarded Hot Plates, ASTM STP, pp.49-64 (1957)