605 下面加熱・上面冷却境界を有する潜熱エマルジョンスラリーの自然対流熱伝達 Natural Convection Heat Transfer of Latent heat Microcapsule Surry Layer with Bottom Heating and Top Cooling Horizontal Boundary Layers

正 稲葉 英男 (岡山大院) ○戴 伝山 (岡山大院) 正 堀部 明彦 (岡山大院)

Hideo INABA Chuanshan DAI and Akihiko HORINE
Okayama University, 3-1-1 Tsushimanaka, Okayama, 700-8530

Key Words: Natural Convection, Microemulsion, Phase Change Material, Non-Newtonian Fluid

1. 緒言

最近、機能的熱媒体として注目されている潜熱マイクロカプセルや潜熱エマルジョンは潜熱蓄熱物質を含み、流動性を持つ利点がある。しかしながら潜熱マイクロカプセルや潜熱エマルジョンスラリーは具体的にどのような熱輸送特性があるかに関する研究は少ないようである。また、潜熱エマルジョンは非ニュートン流体の特徴を示す。本研究は非ニュートン流体である潜熱エマルジョンを充填した密閉容器内自然対流熱伝達に関する実験的に検討するものである。

2. 実験装置及び実験方法

図1は試験部の詳細を示したものである。試験部は加熱板と冷却版、アクリル製の側壁による試料潜熱エマルジョン充填部 ($W=120\text{mm}$, $D=120\text{mm}$) で構成されている。冷却板、加熱板ともに厚さ 10mm 銅板で構成し、等温条件とした。加熱はフィルムヒーターを用いてその出力は電圧調節して行い、冷却は恒温槽から冷却水を循環させ行った。冷却板、加熱板の温度は T 型熱電対 (素線径 0.1mm) により測定する。ヒーターからの熱流束は、加熱銅板下面に設置した熱流束センサーにより測定する。試料の温度は電圧印加後、加熱板の温度が変化しない定常状態に達した後、試験部中央に設置した可動式の T 型熱電対 (素線径 0.1mm) により、上部から下部まで試料層の温度を測定した。また、試験部には断熱材を設けて、熱損失の軽減を図っている。

Figure 1. Schematic of the test section

本実験に用いた潜熱エマルジョンの比熱は図2に示す DSC によって測定した。それによると潜熱エマルジョンは 40℃ から 50℃ までにおける温度範囲で相変化を起こす。実験はそれぞれ固相領域 30℃~40℃、相変化領域 40℃~50℃、液相領域 50℃ 以上の三つの温度範囲で測定を行った。それぞれに対して冷却板上の流れる冷却水の温度 $T_c=30^\circ\text{C}$ 、40℃ と 50℃ に設定し、加熱板の温度は入力電力により $T_h=30^\circ\text{C}$ ~60℃ の範囲で変化させた。又試験部の高さ H はアクリル製の側壁の取り替えることによって $H=5.5\sim30.4\text{mm}$ の範囲で変かさせた。

Figure 2. Specific heat capacity measured by differential scanning calorimetry (DSC)

3. 実験結果

図3は潜熱物質が固相として存在している温度領域の自然対流の結果である。図3から分かるようにアスペクト比 $AR(=W/H)$ 小さくなるともに Nu 数が減少する。又アスペクト比 AR が 10.7 以上の場合容器内部熱伝達状態は加熱速度に依存する。即ち徐々に加熱すればむしろ定常状態は熱伝導状態になる、しかし最初高い加熱電力入力すれば自然対流が生じることになる。一方アスペクト比 AR が 9.0 以下の場合はその現象がなくなる。その理由としては粘度などの物性の温度依存性が大きいことによるものと判断される。

熱伝導状態のデータを除き、最小二乗法により実験データの整理を行った。全実験データを平均偏差 $\pm 8.5\%$ にて次式に示すヌセルト数 Nu に関する整理式を得た。実験データと式(1)で計算した結果の比較は図7に示す。 C_1 は AR 依存する係数 $\exp(-0.09AR)$ である。

$$Nu = \frac{1}{3} (1 - C_1) Ra^{\frac{1}{3.5n+1}} \quad (1)$$

Figure 3. Measured Nu vs. Ra for PCM in solid phase

図4は相変化領域における Nu 数と Ra 数との関係を表したものである。この領域には全てのスラリー物性が大きく温度に依存し、自然対流現象が複雑になるため、データを整理するのは難しくなる。この温度範囲での熱伝達は潜熱物質が相変化しながら伝熱を行うことにより、次の修正 Ste 数を定義した。

$$Ste^* = \frac{C_{po}(T_h - T_c)}{\int_{T_c}^{T_h} C_p dT} \quad (2)$$

ここで C_{po} は参考点 40°C の比熱である。 C_p は DSC 方法により測った比熱データである。ヌセルト数 Nu に関する実験整理式は次のようになる。

$$Nu = CRa^{\frac{1}{7n+2}} Ste^{-(1.9-1.65n)} \quad (3)$$

ここで、係数 C は次のようになる。

$$C = 1.22 - 0.035AR \quad \text{適用範囲 } AR > 10, T_h < 50^\circ\text{C}$$

$$C = 0.55 - 16.4e^{-1.1AR} \quad \text{適用範囲 } AR < 10, T_h < 50^\circ\text{C}$$

式(3)と実験結果の比較を図5に示す。全実験データは平均偏差 $\pm 6.8\%$ にて式(3)に一致する。

加熱板温度は 50°C 以上の場合には潜熱物質が加熱板の付近に液相状態になるため、相変化による伝熱促進効果は無視することができる。従ってこの温度範囲での実験データは式(3)の Ra 数関数だけで整理することが出来る。

図6は潜熱物質が液相でアスペクト比 AR をパラメータとして、 Nu 数と Ra 数の関係を示したものである。実験データを固相領域の同様に整理すると次式を得た。

$$Nu = \frac{1}{3}(1 - C_2)Ra^{\frac{1}{3.5n+1}} \quad (4)$$

係数 C_2 は AR の関数で $\exp(-0.4AR)$ である。図7に示したように標準偏差は 11.3% である。この場合混合水のべき乗粘度係数は潜熱物質が固相領域より小さいため、矩形容器側面の影響は減少することになる。

4. 結論

潜熱物質を持つマイクロエマルジョン混合水の自然対流は複雑な現象を示した。潜熱物質は自然対流に対して伝熱促進することがあり、その割合が本研究に定義した Ste 数をパラメータにすることにより自然対流の本実験データを整理することが明らかとなった。

Figure 4. Measured Nu vs. Ra for PCM in phase changing

Figure 5. Comparison between experimental results with the calculated from a correlation of Nu with Ra and AR (Eq. 3) for PCM in phase changing

Figure 6. Measured Nu vs. Ra for PCM in liquid phase

Figure 7. Comparison between experimental results with the calculated from a correlation of Nu with Ra and AR (Eq. 1 or 4) for PCM in solid or liquid phase