E221

曲管部における氷スラリーの流動および熱伝達

Flow and Convection Heat Transfer Characteristic of Ice Slurries in a Curved Pipe

正 堀部 明彦 (岡山大院)
正 春木 直人 (岡山大院)正 稲葉 英男 (岡山大)
○学 長木 健一 (岡山大院)

Akihiko HORIBE, Hideo INABA, Naoto HARUKI, Kenichi NAGAKI

Graduate school of natural science and technology, Okayama Univ., 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama 700-8530

This paper describes flow and heat transfer characteristics of ice slurry in a curved pipe. Ice slurry is a mixture of water and ice particles about 1~5mm in diameter, which is used as a phase change material. Experiments were carried out under the some parameters of ice packing factor(IPF), velocity(V_m), radius ratio(R/r) and ice particle size(d_p). Heat transfer coefficients of four points (top, bottom, in, and out) around a pipe were measured. It was found that heat transfer in a curved pipe affected second flow reduction by ice particles and interaction of latent heat.

Key Words: Ice slurry, Curved pipe, Heat transfer, Forced convection

1. 緒言

近年、省エネルギーや昼夜間の電力負荷平準化を目的とした氷蓄熱システムの研究が盛んに行われている⁽¹⁾。その中でも熱輸送媒体として氷スラリーを用いるものは、氷の融解潜熱を利用できるため熱輸送密度が高いという利点がある。一方、氷スラリーは氷と水の固液二相流となり、配管内を流動する際に管壁との摩擦による圧力損失や曲管内での二次流れなどの諸因子の影響を受け、その流動状態は複雑なものになる。

本研究では配管系で重要な因子となる曲管において、曲率半径比、氷の体積分率(IPF : Ice Packing Factor)、流速、氷の粒子径を変化させることにより、曲管での流動状態、熱伝達特性について検討を行うものである。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置はFig.1 に示すように、氷スラリー混合槽、ボルトックスポンプ、 IPF 測定器⁽²⁾、曲管試験部、電磁流量計、差圧発信機からなり、外気の影響を避けるため室温を2℃に設定した恒温恒湿室内にて実験を行った。

試験部詳細を Fig.2 に示す。試験部には内径31.5mm、外径33.4mm のステンレス製の曲管(曲率半径: $R/r=9.5, 20, 35, 50$)を用い、圧力タップ、熱電対は図に示す位置のそれぞれ上下内外4箇所に設置した。

本実験で使用した氷粒子は、フレークアイス製氷機で作製したものを一定時間混合槽で攪拌して得られた平均粒子径

$d_p=2.53\text{mm}$ のものに加え、冷凍庫で作成したブロック氷を砕氷機にかけ砕いた平均粒子径 $d_p=5.35\text{mm}$ のもの、さらに同ブロック氷を削氷機にかけた平均粒子径 $d_p=0.84\text{mm}$ の3種類を用いた。

実験は、氷粒子を混合層に投入し管内に氷スラリーを流動させ流速、 IPF を所定の値に設定した後に、試験部を直接通電により等熱流束条件で加熱を行い、氷スラリー温度、壁面温度から熱伝達率の算出を行うものである。本実験は、 $IPF=0\sim 20\%$ 、氷スラリーの平均流速 $V_m=0.5\sim 6.0\text{m/s}$ の範囲で測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 氷の粒子径の影響

Fig.3 は $R/r=50$, $V_m=0.5\text{m/s}$, $IPF=10\%$ の条件において、試験部入り口から出口までの各点における局所熱伝達率を示したもので、氷の粒子径 d_p を変化させた時の比較を行った。一般に曲管部では直管とは違い、二次流れが発生するため上下内外の点においてそれぞれ違った傾向を示すことがわかっていく。特に管の上下での熱伝達率は水のみの場合では等しくなるが、氷スラリーでは低流速域において氷粒子が浮力により管上部へ偏在するため融解潜熱の影響により熱伝達率は

Fig.1 Experimental apparatus

Fig.2 Test section of curved pipe

増加する傾向にある⁽³⁾。ここでそれぞれ円管下部、内側、外側に対応するbottom,in,outの三点に注目すると、各点とも粒子径の減少に伴い熱伝達率が減少していることが確認できる。これは同IPFでは粒子径の減少が氷粒子の表面積の増大となるため、氷粒子の凝集現象が起こりやすくなる。そのため氷粒子が二次流れを抑制する作用も増大し、熱伝達率は減少したものと考えられる。次に円管上部であるtopに注目すると、他とは傾向が変わり、 $d_p=2.5\text{mm}$ が最も熱伝達率の高い値を示している。これは、 $d_p=0.8\text{mm}$ では凝集力が強いいため、管上部への氷粒子の偏在が密にならず管壁との接触面積が小さくなる。 $d_p=5.3\text{mm}$ では凝集力は弱い表面積が小さいため接触面積が小さい。それに対し $d_p=2.5\text{mm}$ ではその二つのバランスがとれ、接触面積が確保でき、融解潜熱による熱伝達の向上が現れたのではないかと考えられる。

Fig.4 に、氷の粒子径と平均熱伝達率の関係を流速、IPFで比較したものを示す。低流速域での熱伝達は $V_m=0.5\text{m/s}$ と同様の傾向を示したが、高流速域においては $d_p=0.8\text{mm}$ における平均熱伝達率の減少が確認できる。高流速では氷粒子の融解潜熱の効果は少なく、二次流れを抑制する効果の割合が増加するため熱伝達率は減少する傾向にある。また、氷粒子径の減少により粒子の凝集現象が起きやすくなるため、流れの抑制効果も強まり、熱伝達率は減少したものと推察される。

3.2 曲率半径比の影響

Fig.5 に等熱流束条件で各局率半径比 R/r における試験部各点での熱伝達率を平均した平均熱伝達率 α_m をとり、平均流速 V_m 、氷の充填率IPFで比較したものである。このグラフより、曲率半径比の縮小に伴い平均熱伝達率は増加していることが確認できる。これは、曲率の減少に伴い、曲管内で流体にかかる遠心力が増大するため、曲管特有の二次流れの強

(a) top, bottom

(b) in, out

Fig.3 Relationship between θ and α_θ

度が増し、強制対流による熱伝達が促進されたためであると考えられる。さらに、ある程度曲率が增大すると、二次流れは緩やかになるため熱伝達の変化量は少なくなり、その値は直管部のものに近づく傾向を示す。また、氷粒子を添加したことによる変化は、各曲率とも同様の傾向を示していることがわかる。

4. 結言

本研究では曲管試験部において熱伝達特性について実験的に検討し、以下に示す結論を得た。

- (1) 氷の粒子径を変化させることにより、粒子径の減少に伴い、熱伝達率は減少する傾向にあることが明らかとなった。
- (2) 曲率半径比の減少に伴い、熱伝達率は増加し、氷粒子が添加されることによる熱伝達率への影響は、曲率によらず同様の傾向を示すことが明らかになった。

5. 参考文献

- (1) 大平, 冷凍空調学会論文集, Vol.21, No.4(2004) pp.285~297
- (2) Maxwell, J. C., A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed(1954), Oxford Univ. Press, 440
- (3) 堀部, ほか4名, 伝熱シンポジウム講演論文集, 第40回, (2003), F124

Fig.4 Relationship between α_m and d_p

Fig.5 Relationship between α_m and R/r