高粘性流下液膜からの液滴発生に関する研究*

犬丸 淳^{*1}, 大高 円^{*1}, 渡辺 裕章^{*1}Study on Droplet Entrainment of
High-Viscosity Falling Liquid FilmJun INUMARU^{*2}, Maromu OHTAKA and Hiroaki WATANABE^{*2} Energy Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry,
2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 240-0196 Japan

An experimental study of counter-current annular two-phase flow of high-viscosity liquid and air in a large diameter pipe was carried out to investigate the inception criterion for entrainment of molten slag droplet in an entrained flow coal gasifier. Liquid film thickness was measured using a high-speed camera for 4 types of liquid with various viscosities and surface tensions. It was clearly shown that the measured average wave amplitude had a good correlation with the gas Reynolds number, and that the predicted critical gas velocity for droplet inception using new formula of wave amplitude had a good agreement with the experimental results under the condition of very low fluid Reynolds number ($Re_f \leq 10$). The critical Weber number $We_c = 1.73$ was obtained as inception criterion of droplet entrainment.

Key Words: Gas-Liquid Two-Phase Flow, Liquid Droplet, Wave, High-Viscosity, Gasifier, Slag-ging

1. 結 言

近年、発電用大型石炭ガス化炉における溶融スラグ(石炭灰)の流下挙動や、原子炉におけるシビアアクシデント時の炉心溶融物の挙動など、水に比べて粘性はるかに高い流体について、炉内流下挙動の解明が重要な課題となってきた。特に、石炭ガス化炉内においては、炉内壁面を流下する溶融スラグが上昇ガス流により飛散して炉壁へ付着する「スラッシング現象」が発生し、運転障害を引き起こすことがある⁽¹⁾。溶融スラグの飛散現象は、局所的に見ればガス流により流下液膜上に擾乱波が成長し、その波頭が引きちぎられることによって液滴が発生する現象と考えられる。

気液二相流における液滴発生に関する研究は、これまで多くの研究者によって行われているが⁽²⁾⁽³⁾、そのほとんどは水-空気系を対象としたものである。水を対象流体とした研究は、Van Rossum⁽⁴⁾、Whalley⁽⁵⁾、Nigmatulin⁽⁶⁾、Hills⁽⁷⁾などにより行われており、Ishii⁽⁸⁾は、従来の実験結果の整理と考察から、液膜レイノルズ数に対する液滴発生の限界ガス流速を導いている。流体の粘性の違いによる影響については、いくつかの研究が行われており⁽⁹⁾、Steen-Wallis⁽¹⁰⁾はシリコンオイ

ルなどを用いた実験により、高粘性流体にも適用可能な液滴発生限界ガス流速の実験式を与えている。ただし、いずれも水の 100 倍程度までの粘性流体を対象としており、ガス化炉溶融スラグのように、水の 2000 倍といった極めて高粘性の流体による実験例は、Koizumi⁽¹¹⁾による高粘性シリコンオイルを使ったフラッシングに関する実験以外はほとんどない。また、従来の研究のほとんどは、内径 60mm 以下の管路を対象としているが、管径の違いにより、液滴発生やフラッシングなどの機構が異なることが報告されており⁽¹²⁾⁽¹³⁾、小型実験炉で 0.2~0.3m、実用炉では数 m 以上の内径を有するガス化炉における現象を考慮すると、十分大きな管径による検討が必要と考えられる。さらに、液滴発生現象は液膜擾乱波の界面形状の把握が重要であるが、これまでの液滴発生限界に関する研究では、液膜厚さや波高など界面形状の計測結果との相関が必ずしも明確にされていない。

本研究では、石炭ガス化炉内における溶融スラグ飛散発生条件の解明に向け、高粘性流下液膜からの液滴発生に関して、レーザ蛍光法による液膜流界面形状の可視化実験と計測を行い、液膜挙動を明らかにするとともに、液膜の気液界面形状の考察から液滴発生条件に関する検討を行った。

* 原稿受付 2008 年 4 月 16 日。

^{*1} 正員、(財)電力中央研究所(〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1)。

E-mail: inumaru@criepi.denken.or.jp

2. おもな記号

D : 管径	[m]
D^* : 無次元管直径	[—]
g : 重力加速度	[m/s ²]
h : 波高	[m]
Q : 流量 [m ³ /min] または [l/min]	
Re : レイノルズ数	[—]
U : みかけ流速	[m/s]
u : 流速	[m/s]
We : ウェーバー数	[—]
y_f : 液膜厚さ	[m]
y_0 : 平均液膜厚さ	[m]
y_0^* : 無次元平均液膜厚さ	[—]
μ : 粘性係数	[PaS]
ν : 動粘性係数	[m ² /s]
ρ : 密度	[kg/m ³]
σ : 表面張力	[N/m]
Γ : 壁面の単位幅当たりの液膜流量	[kg/ms]

添字

g : 気相, f : 液相, w : 波
 m : 実測値, pre : 計算値, c : 限界値

3. 実験装置および実験方法

3・1 実験流体 高粘性流体として、グリセリン水溶液およびシリコンオイルを用いた。比較のための水も加え、粘性が大きく異なる4種類の液体により実験を行った。表1に、各液体の物性値を示す。参考に、熔融スラグの代表的な物性値もあわせて示した。熔融スラグの粘性は、石炭種、温度および雰囲気によって大きく変わるが、高温回転粘度計による実測結果から、石炭ガス化炉内の運転条件下では、2~20Pa sと推察される。したがって、シリコンオイル 3000cSt は、ほぼ熔融スラグと同等の粘性を有している。なお、熔融スラグの表面張力は文献値⁽¹⁴⁾による。

3・2 実験装置および実験方法 実験装置の概略を図1に示す。テストセクションは、内径180 mm、直管部長さ1600 mmの亚克力管とその周囲に配置された観察用水槽から成る。ここで、管内径は液膜の波幅および波高に比較して十分に大きく、液滴発生現象が管径に依存しない大きさとして、Richter⁽¹²⁾による無次元管直径 D^* が50以上となるように設定した。

$$D^* = D(g(\rho_f - \rho_g)/\sigma_f)^{1/2} \quad (1)$$

Table 1 Properties of tested liquids and molten slag

Liquids (Temperature K)	Density	Viscosity	Surface Tension
	kg/m ³	Pa s	N/m
Water (293)	998	0.001	0.074
Glycerol (80%) (293)	1209	0.064	0.063
Glycerol (99%) (293)	1259	0.73	0.062
Silicone Oil (3000cSt) (298)	970	2.64	0.020
Molten Slag (1993)	2700	2~20	0.40

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

液体は粘性流体用モノポンプにより定量供給され、回転数制御により流量が設定される。空気はブロウにより吸引され、整流格子（内径 140 mm）より管内に流入する。液膜表面からの液滴発生が最初に生じる位置近傍（直管部上端から 1110 mm，整流格子出口から 410 mm）を観察部として，Ar レーザ（出力 4 W）のライトシートを照射し，レーザ蛍光法による液膜断面の可視化を行った。液体には，レーザ蛍光染料であるローダミン B を濃度 30ppm で溶解した。ただし，シリコンオイルにはローダミン B が解けないため，いったんローダミン B をオクタノールに溶解した後に，シリコンオイルに溶かした。表 1 に示した物性値は，全てローダミン B を溶解した後に実測した結果であり，溶解前に比べほとんど変化がないことを確認した。粘度測定には，コントラバス社レオマット 115，表面張力測定には，エーアンドディー社 DCA-100 を使用した。

Ar レーザを照射するとローダミン B が発色し，液膜断面が可視化される。これを，高速ビデオカメラ（NAC 社 MEMRECAM Ci-RX-1）を用いて，液流下速度が高い水の場合 500 画像／秒で，速度が低いグリセリンおよびシリコンオイルの場合 100 画像／秒で撮影した。画像処理ソフトにより，取得した画像から液膜厚さを求めた。実験は，液体流量（5～16 l/min）および空気流量（0～25 m³/min）を変化させて行い，所定の液体流量に設定した後に，空気流量を増加させ液滴の発生開始条件を調べた。液滴の発生は上部タンクでハロゲンライトを照射し目視およびビデオ画像により確認した。ここでは，観察された液滴数が 50～60 個/min に達し，連続的に気相中に随伴される状態になった時を，液滴発生開始時とした。

4. 実験結果および考察

4・1 液膜挙動 高速ビデオカメラによって撮影された流下液膜断面映像の例を図 2 に示す。グリセリン 99% による流下液膜の擾乱波が，上昇ガス流によって引きちぎられ，液滴が飛散する瞬間を捉えた画像である。時刻の異なる連続した複数の画像から，液膜断面部分の輝度の違いを利用した画像処理により，壁面上の一定位置における液膜厚さの経時変化データを取得した。図 3～5 は，液滴発生条件（発生開始時）において，液流量を変化させた場合の水，グリセリン 80%，シリコンオイル 3000 cSt の液膜厚さの経時変化を示したものである。また，平均液膜流速を用いて横軸を距離に変換して示した。ここで，平均液膜流速は，液流量と計測画像から求めた平均液膜厚さより算出した（4.3 節参照）。これらの図より，液流量および液体の

Fig. 2 Image of entrainment of a disturbance wave
(Glycerol 99%, $Re_g = 8.6 \times 10^4$, $Re_f = 1.88$)

Fig.3 Variation of film thickness (Water)

(a)

(b)

Fig.4 Variation of film thickness
(Glycerol80%)

粘性が高いほど液膜厚さが大きくなり、液流量の増加に伴い波数が増加する傾向にあることがわかる。

4・2 液膜厚さ 液滴発生条件における平均液膜厚さを式(2)のように無次元化し、式(3)で定義される液膜レイノルズ数 Re_f に対して示したものが図6である。

$$y_0^* = y_0 \left(\frac{g}{\nu_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$Re_f = 4 \Gamma / \mu_f \quad (3)$$

$$\Gamma = \rho_f u_f y_0 \quad (4)$$

図中には、層流液膜に対する Nusselt⁽¹⁵⁾ の関係式 (4), および乱流液膜に対する Dukler⁽¹⁶⁾ の解析結果をあわせて示した。

$$y_0^* = \left(\frac{3}{4} \right)^{\frac{1}{3}} Re_f^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

(a)

(b)

Fig.5 Variation of film thickness
(Silicone Oil 3000cSt)

液滴発生条件における平均液膜厚さの実験値は、水が若干高い値を示しているものの概ねこれらの式に一致しており、ガス流れがない場合も同様であった。これより、粘性が高く液膜レイノルズ数が低い ($Re_f \leq 10$) 場合でも、液滴発生時における平均液膜厚さは、Nusselt の式 (5) でほぼ推定可能であることがわかった。

液滴の発生に対しては、図7に示すように流下液膜における擾乱波の波高 h や波に対する気相の相対速度などが強く影響するものと考えられる。そこで、まず波高の特性を調べるため、図7に示すように、得られた波形データにおいて波の最大高さ y_m と当該波左右それぞれで最低となる液膜厚さ y_l と y_r の平均値との差から波高 h を求めた。これらの平均値を算出することで、それぞれの流体の液滴発生条件における平均波高 h_0 を得た。

図8は、各流体の平均波高 h_0 を平均液膜厚さ y_0 で除した無次元平均波高 h_0 / y_0 を気相レイノルズ数 Re_g に対してプロットしたものである。液滴発生条件における無次元平均波高 h_0 / y_0 は、気相レイノルズ数が高く

Fig.6 Non-dimensional mean film thickness and liquid film Reynolds number

なるほど増加する傾向を示した。本実験における、水の h_0/y_0 は 2.0 前後の値を示しており、これは Chu and Dukler⁽¹⁷⁾ がほぼ同条件 ($Re_f \approx 10^3$, $Re_g \approx 10^5$) の気液対向二相流で行った実験結果とよく一致している。また、Peng ら⁽¹⁸⁾ は、水平ダクトを用いて粘性の異なるグリセリン水溶液による実験を行い、無次元波高と気相レイノルズ数との関係について、本実験結果と同様の傾向があることを報告している。図 8 において、 h_0/y_0 は水が最も大きく、グリセリン、シリコンオイルの順に小さい値を示し、同様に Re_g も低くなっている。これは、流体の粘性が高くなるため h_0 の増加に対して y_0 が相対的に大きくなること、および h_0 の増加に伴い液滴発生時の流速が低下することによるものと考えられる。ただし、シリコンオイルは、図 5 で示したように h_0 が比較的小さいが、表面張力が低いため低い流速で液滴発生条件に到達すると考えられる。以上より、液滴発生時における h_0/y_0 は、 Re_g に強く依存し、流体の種類に依らず概ね Re_g で整理できるものと考えられる。ここで、両者の関係を表す近似式を(6)式に示す。

$$h_0/y_0 = 9.0 \times 10^{-12} Re_g^{2.24} \quad (6)$$

(4), (5), (6)式から、平均波高 h_0 を Re_f および Re_g の関数として表現することができる。

$$h_0 = 9.0 \times 10^{-12} \left(\frac{3}{4} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\nu_f^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} Re_f^{\frac{1}{3}} Re_g^{2.24} \quad (7)$$

図 9 は、(7)式を用いて求めた平均波高 h_{0pre} を実測した平均波高 h_0 と比較したものである。水とグリセリン

Fig.7 Wave in the counter-current flow

Fig.8 Non-dimensional wave amplitude

Fig.9 Prediction of wave amplitude

80%の実験値が、(5)式または(6)式による値に比べて若干の相違が見られたため、図 9 においても h_0 と h_{0pre} の値にやや違いが生じているが、(7)式により高粘性流体の液滴発生時の平均波高を概ね推定できることがわかった。

4・3 波速度 液滴の発生に対しては、気相に対する液膜の波の相対速度が影響すると考えられる。本実験では波速度の計測は行っていないため、従来の研究を参考に波速度について検討を行った。流下液膜の波速度については従来多くの研究⁹⁾が行われているが、本研究で対象とする極めて高い粘性の流体に関する研究は少ない。その中でも Koizumi ら⁽¹¹⁾は、高粘性シリコンオイルを使った気液対向二相流の実験を行っており、Nusselt の層流流下液膜の関係式から得た (8) 式が、 $Re_f < 600$ において実験値とほぼ一致しており、 $Re_f \geq 600$ では実験値は (8) 式から徐々にはずれ、(8) 式のおよそ 1/2 の値に近づくことを報告している。

$$u_w = 2 \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{3}{4} \right)^{\frac{2}{3}} (g \nu_f)^{\frac{1}{3}} Re_f^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

$$Re_f < 600$$

そこで、本実験で得られた平均液膜流速 $u_0 = \Gamma / \rho_f y_0$ を液膜レイノルズ数 Re_f に対してプロットするとともに、(8) 式および $1/2 \times (8)$ 式 ($Re_f \geq 600$) より求めた u_w を実線で合わせて示したものが図 10 である。これより、波速度 u_w は平均液膜流速 u_0 の 3 倍程度になるものと推定され、これらはシリコンオイル 3000 cSt では気相流速の 1~2%、グリセリン 99% では 2~5%、グリセリン 80% では 4~10%、水では 6~10% に相当する。したがって図 10 より、液滴の発生に関して、 $Re_f \leq 10$ では波速度が気相流速のおよそ 5% 以下となり、波の相対速度の影響は小さいが、 $Re_f > 10$ となる場合は波速度の影響が大きくなることがわかった。

4・4 液滴発生限界流速 液滴発生開始時の気相平均流速を液滴発生限界流速 U_{gc} とし、液流量に対してプロットしたものが図 11 である。液の流量および粘性が増加するほど、液滴発生限界流速 U_{gc} は低くなる、すなわち液滴が発生しやすくなる傾向が見られる。ここで液滴の発生条件について考察する。図 7 で気液界面におけるせん断応力と表面張力とのバランスから (9) 式を得ることができる。

$$\frac{1}{2} \rho_g (u_g - u_w)^2 \geq A \frac{\sigma}{h} \quad (9)$$

ここで、 A は係数、 σ は流体の表面張力である。したがって、液滴発生限界流速 U_{gc} は、平均波高 h_0 を用いて (10) 式の通りとなる。

Fig.10 Average velocity of liquid film u_0 and wave velocity u_w by Koizumi

Fig.11 Critical superficial gas velocity and liquid flow rate

$$U_{gc} = A \left(\frac{\sigma}{\rho_g h_0} \right)^{\frac{1}{2}} + u_w \quad (10)$$

図 12 に、本実験で得られた液滴発生限界流速 U_{gc} を液膜レイノルズ数 Re_f に対して示した。あわせて従来提案されている関係式より求めた値を示した。同じ流体では、 U_{gc} は Re_f が増加すると減少している。これは流量の増加により液膜厚さおよび波高が増加し、(10) 式より U_{gc} が低下するためと考えられる。また、異なる流体間における U_{gc} は、水、グリセリン水溶液、シリコンオイルの順に低下した。これは、グリセリン水溶液は波高が増加していること、シリコンオイルは波高は水と同程度であるが、表面張力が大幅に低下していることが影響しているものと考えられる。Steen and Wallis⁽¹⁰⁾は粘性が異なる流体の下降流に関する実験を行い、 U_{gc} の実験式を与えているが、それには波高の影響が考慮されていないため、図 12 で示したように実験

Fig.12 Critical superficial gas velocity and liquid film Reynolds number

結果をうまく表現できない。Ishi ら⁸⁾は、水-窒素ガスなどにより 25.4 mm×3.2 mm の傾斜チャンバーを用いた実験を行い、(9) 式と同様の考え方から液滴発生限界流速を Re_f の関数として得た。しかしながら、図 12 に示したように低液膜レイノルズ数で今回の実験値より大幅に低い値を示している。Woodmansee ら¹⁹⁾も、水-空気により 305 mm×25.4 mm の水平ダクトで実験を行い、(9) 式と同様に液滴発生条件の実験式を求めており、合わせて図 12 に示した。Woodmansee らの結果は、今回の実験値と比較的近い値を示しているが低液膜レイノルズ数ではあまり一致していない。これらは、上記の二つの実験式は、水を用いた実験結果に基づくものであること、いずれも波高を実測しておらず、前者は他の実験から求めた摩擦係数から剪断応力を求めており、後者では波高に平均液膜厚さを用いるなど、波高の影響を正確に反映していないことによるものと考えられる。そこで、(10)式における平均波高 h_0 に平均実測値を用いた結果を図 12 に示した。ここで、波速度 u_w には Koizumi らの式を用い、係数 $A=1.73$ とした。図からわかるように、(10)式による結果は、流体の種類によらず今回の実験結果とよく一致した。特に従来提案されている式では合わなかった $Re_f \leq 10$ の低液膜レイノルズ数領域においても、波高 h_0 に実測値を用いることで、液滴発生限界流速をよく表現できることを明らかにした。さらに、液滴発生条件として用いられるウェーバー数について検討した。(9)式に基づき、液滴発生限界ウェーバー数 We_{ec} を(11)式で定義する。

$$We_{ec} = \rho_g \frac{1}{2} (U_g - u_w) \left(\frac{h_0}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Fig.13 Critical Weber number

Fig.14 Comparison of critical superficial gas velocity between measured and present formula

(10), (11)式より、 $We_{ec} = 1.73$ を得ることができる。本実験におけるウェーバー数を液膜レイノルズ数に対して示すと図 13 となり、流体の種類によらず液滴発生評価指標として、(12) 式を得ることができる。

$$We_{ec} \geq 1.73 \quad (12)$$

また、波高が実測できない場合の液滴発生限界流速の予測式を求めるため、(10)式に、(7)式および、(8)式を導入し、 $Ref < 600$ の高粘性流体に適用できる、波高を考慮した関係式として以下を得た。

$$U_{gc} = 6.05 \times 10^{-5} \left\{ \frac{\sigma}{\rho_g} \left(\frac{g}{\nu_f^2} \right)^{\frac{1}{3}} Re_f^{-\frac{1}{3}} Re_g^{-2.24} \right\}^{\frac{1}{2}} - 0.825 (g \nu_f)^{\frac{1}{3}} Re_f^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

図 14 は, (10)式による液滴発生限界流速 U_{gc} について, 平均波高 h_0 に実測値を用いた場合(h_{0m})と, (13)式から求めた場合(h_{0pre})を比較して示したものである. (13)式によって, 概ね 20%程度の範囲で U_{gc} を予測できることがわかった. さらに, 4.3 節より $Re_f \leq 10$ の場合は, 波速度の影響は小さくなるため, (13)式の第 2 項を省略でき, U_{gc} を Re_f から評価できる予測式(14)を得ることができる.

$$U_{gc} = 5.34 \times 10^2 \left\{ \frac{\sigma}{\rho_g} \left(\frac{g}{\nu_f^2} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{D}{\nu_g} \right)^{-2.24} Re_f^{-\frac{1}{3}} \right\}^{\frac{1}{4.24}} \quad (14)$$

5. 結 言

石炭ガス化炉における溶融スラグなど, 極めて高い粘性を有する流下液膜からの液滴発生条件の解明を目的に, 粘性が異なる 4 種類の流体について, レーザ蛍光法による液膜流界面形状の可視化実験と計測を行い, 液膜挙動および液滴発生条件に関する以下の結論を得た.

- (1) 粘性が高く液膜レイノルズ数 Re_f が低い ($Re_f \leq 10$) 場合でも, 液滴発生時における平均液膜厚さは, 層流液膜に対する Nusselt の関係式でほぼ推定可能である.
- (2) 液滴発生時における無次元平均波高 h_0 / y_0 は, 流体の種類に依らず概ね気相レイノルズ数 Re_g で整理できる. これにより, 平均波高 h_0 を Re_f および Re_g から推定する関係式を得た.
- (3) 液滴の発生に関して, $Re_f \leq 10$ では波速度が気相流速の 5% 以下となり, 波の相対速度の影響は小さいものと考えられる.
- (4) 液滴発生限界流速 U_{gc} について, 波高の実測値を用いた予測式により, 従来合わなかった $Re_f \leq 10$ の低液膜レイノルズ数領域においても, 実験結果をよく表現できた. さらに, U_{gc} を Re_f から評価できる予測式を得た.
- (5) 液滴発生評価指標として, 限界ウェーバー数 $We_c \geq 1.73$ を得た.

謝 辞

本研究の実施にあたり様々な貴重なアドバイスを頂いた, 東京大学 丸山教授, 信州大学 小泉教授に深く感謝致します.

文 献

- (1) Araki, M. and Hanai, Y., *Journal of the Japan Society of Energy(in Japanese)*, 75-9 (1996)
- (2) Wallis, G.B. *One-Dimensional Two-Phase Flow*, McGraw-Hill Book Co.(1969), pp.315-374.
- (3) Azzopardi, B.J., *Drops in Annular Two-phase Flow*, *Int. J. Multiphase Flow*, 23-Sup. (1997), pp. 1-53.
- (4) Van Rossum, J.J., *Experimental investigation of horizontal liquid films*, *Chem. Eng. Sci.*, 11 (1959),35-52.
- (5) Whalley, P.B., Hewitt, G.F. and Hutchinson, P., *Experimental wave and entrainment measurements in vertical annular two-phase flow*. *Multi-phase Flow Systems Symp.*, Strathclyde. (1974), pp. 1-24.
- (6) Nigmatulin, R. I., Nigmatulin, B.I., Khodzhaev, YA.D. and Kroshilin, V.E., *Entrainment and deposition rates in a dispersed-film flow*, *Int. J. of Multiphase Flow* 22 (1996), pp. 19-30.
- (7) Hills J.H., *The critical liquid flow rates for wave and droplet formation in annular gas-liquid flow*. *Exp. Heat Transfer Fluid Mech. Thermodyn.*, Ed. ETS 2 (1997), pp. 1241-1247.
- (8) Ishii, M. and Grolmes, M.A., *Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent flow*, *AIChE J.* 21 (1975), pp. 308-318.
- (9) Clift, R., et al., *The effect of viscosity on the flooding conditions in wetted wall columns*, *Chem. Eng. Sci.*, 21(1966), pp.87-95.
- (10) Steen, D.A. and Wallis, G.B., *The transition from annular to annular-mist co-current two-phase down flow*, *AEC Rep. NYO-3114-2*, (1964)
- (11) Koizumi, Y., Enari, R. and Ohtake, H., *Correlation of Characteristics of Waves on a Film Falling Down on a Vertical Wall*, *Proceedings of IMECE2005*, 82244, (2005)
- (12) Richter, H. J., *Flooding in Tubes and Annuli*, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.7, No.6 (1981), pp.647-658.
- (13) Jayanti, S., Tokarz, A. and Hewitt, G.F., *Theoretical investigation of the diameter effect on flooding in countercurrent flow*, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.22, No.2(1981), pp.307-324.
- (14) Nowok, J.W. et al., *Physicochemical effects influencing the measurements of interfacial surface tension of coal ashes*, *FUEL*, Vol.70 (1991), pp.951-956.
- (15) Nusselt, W., 1916 *Z.VDI*, 60-27(1916-7-1), pp.541, 60-28 (1916-7-8), pp. 569
- (16) Dukler, A.E., *Fluid mechanics and heat transfer in vertical falling-film systems*, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, No.30, 56, (1960), pp. 1-10
- (17) Chu, K.J. and Dukler, A. E., *Statistical Characteristics of Thin, Wavy Films*, *AIChE J.*, Vol.21, No.3(1975), pp.583-593.
- (18) Peng, C.-A., et al., *Formation of Solitary Wave on Gas-Sheared Liquid Layers*, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.17, No.6 (1991), pp.768-782.
- (19) Woodmansee, D. E., and Hanratty, T. J., *Mechanism for the removal of droplets from a liquid surface by a parallel air flow*, *Chem. Eng. Sci.*, 24 (1969), pp.299-307.