不等流 表面粗度에 依한 말뚝群의 抗力係數에 關한 硏究

The Study on Drag Coefficient Calculation
of Piers by Non-uniform Flow

金 治弘* 金 周星**

要 旨

物體로 因해 流體에 作用하는 힘은 抗力과 揚力이 있다 그러나 物理的으로는 滿足스러운 結果를 얻기 어렵다. 따라서 本硏究에서는 부등류 非壓縮性 流體中의 잠수물체(말뚝 군)의 抗力係數를 實驗을 通해 Reynolds 數에 따라 求하여 보았다.

1. 序 論

非壓縮性 流體가 圓柱 또는 角柱 주위를 흐를때 流體는 物體 뒤에서 剝離되어 後流를 形成한다. 그러나 복잡한 後流의 運動과 剝離條件들 사이의 理論的인 관계는 잘알려져 있지 않고, 대부분 實驗에 의존 한다.또한 物體 주변의 剪斷層과 境界層이 形成되어 解析상 많은 어려움이 따르며(이 영역을 "Near wake'라 함.) 物體 뒤에서 형성된 渦(Vorticity)는 더욱 커져서 不安定한 상태로 되고 壓力分布는 物體의 中心領域에서 最小가 되며 물체에서 멀어질수록 自由流動(Free stream)의 壓力과 같이 된다.

이처럼 境界層理論에 입각해 物體로 因한 흐름의 抵抗力은 上流部의 水位를 上昇시킬뿐만 아니라 背水位 上昇으로 因한 通水能의 低減效果를 招來한다. 또한 河川管渠,橋脚 等 水工構造物 設計時 피어의 表面粗度에 따라 Reynolds 數에 對한 抗力係數(C_D)의 適用값은 달라지는데 대부분 全抗力의 計算에 있어서 抗力係數를 1.0 으로 보고 設計에 임하는 것이 보통이다.

* 成均館大學校 敎授
** 成均館大學校 大學院 碩士 3 期

그러나 物體의 表面粗度 및 前,後流의 流速變化에 따라서 抗力係數와 河床의 洗掘깊이 및 堆積높이가 달라지며, 物體 縱方向으로의 設置 位置에 따라서도 複雜한 변화가 發生한다.

實驗을 通한 抗力係數의 算定은 여러학자들에 의해 提示 되었지만, 單柱 또는 縱方向 말뚝群(Multiple Pier)에 대한 것이 대부분이어서 實際 水工構造物 設計時 應用이 困難하다.

따라서 本 硏究에서는 日本의 '吉川秀夫'가 提示한 흐름의 縱,橫方向 말뚝群에 대한 實驗公式을 利用하여 角柱의 境遇를 適用, 基本的 解析을 하고 角柱의 設置 位置 및 角柱 規格變化에 따른 基本的 水理特性을 實驗과 經驗公式으로 比較檢討하며, 實際 河川 構造物 設計時 적용할 수 있는 資料를 얻고자 하는데 그 目的이 있다.

2. 理論的 考察

境界層 理論(Boundary-Layer Theory)은 점성흐름(Viscous Flow)을 定性的으로 理解하는데 매우 重要하다. 왜냐하면 흐름의 分流에 있어서 이 理論은 一般的으로 완전흐름 分野의 定性的인 計算을 하기에 어렵기 때문이다.

特히 이것은 임의의 Re 數에 대한 흐름에 있어서 物體가 潛水해 있는 힘에 대해서는 아직까지 滿足스러운 理論은 없다.

2.1 潛水 物體의 抗力

流體흐름에 있어서 物體가 潛水되어 있을때 흐름으로 부터 Moment 와 힘이 存在한다. 만약 物體가 임의 形態와 方向을 갖는다면 그 흐름은 Fig.2.1과 같이 軸에 대해서 힘과 Moment를 갖는다. 이것은 一般的으로 자유흐름에 平行한 軸方向 下流方向의 흐름을 갖는다. 이 軸에 따라 物體에 作用하는 힘을 Drag 이라 부르고, 座標軸에 따른 Moment를 Rolling Moment라고 부른다. Drag 은 物體가 흐름의 逆方向으로 移動한다면 흐름을 저해시키는 要因으로 作用한다. 또한 Drag 의 鉛直으로 作用하는 힘을 Lift 라 하고,

Lift 로 因한 Moment를 Yaw(요동)이라 한다. 또한 得도 失도 아닌 힘을 Side force 라고 한다.

2.2 潛水 物體의 壓力 分布

境界層 理論은 分流點을 豫測할 수 있으나, 分流된 範圍의 壓力分布(일반적으로 작다)는 정확히 解析할 수 없다. 物體 前面에서의 高壓力과 큰 Drag이 作用하는 分流領域 사이의 작은 壓力의 差를 Pressure Drag(壓力抗力)이라 하고, 이것은 物體의 剪斷應力과 摩擦 Drag의 合으로 表示할 수 있다.

即, $C_D = C_{D\ pressure} + C_{D\ friction}$ (2.2.1)

摩擦과 壓力 Drag의 상대적 分布는 物體의 形態, 特히 物體의 두께에 依存한다. Fig. 2.2는 圓柱 周圍를 흐르는 流體의 理論的 非粘性 壓力分布(점선)를 나타내고, 이는 分離된 흐름의 劇的效果를 提示하고 있으며 壓力 Drag은 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$C_P = \frac{P - P\infty}{\frac{1}{2}\rho V^2} = 1 - 4\sin^2\theta \qquad (2.2.2)$$

여기서 $P\infty$ 와 V는 自由 흐름에서 壓力과 速度이다.

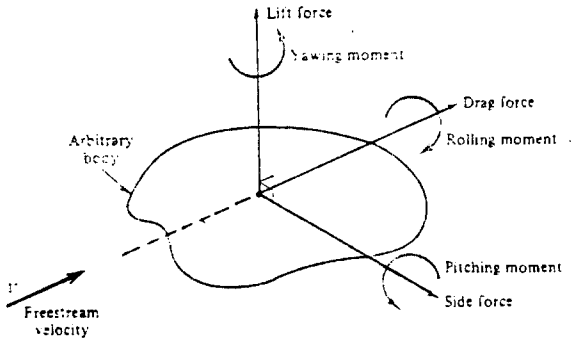


Fig. 2.1 Definition of force and moments in a uniform flow(body immersed)

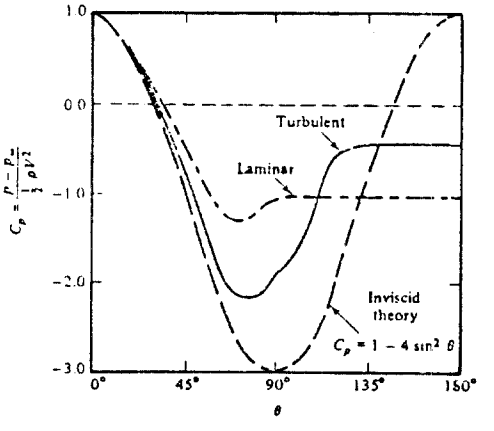


Fig. 2.2 Theoretical and actual surface pressure distributions

2.3 物體에 作用하는 全抗力

物體 周圍를 흐르는 流體는 抗力을 갖고 여기에는 形狀抗力과 潮波抗力이 있다. 形狀抗力은 점성에 기인하고 物體의 後流 領域에서는 渦가 發生하며 흐름방향으로의 힘을 갖는다면 다음식으로 表示할 수 있다.

$$F_f = \frac{1}{2} \rho C_f A_f U^2 \qquad (2.3.1)$$

여기서, F_f : 形狀抗力 ρ : 密度
C_f : 形狀抗力 係數 A_f : 흐름방향의 投影面積
U : 平均 流速

潮波抗力은 物體周圍에서 發生하며 水面波에 依한 抵抗力이 發生하고 다음식으로 表示할 수 있다.

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C_w A_w U^2 \qquad (2.3.2)$$

여기서, F_w : 潮波抗力 C_w : 潮波抗力 係數
A_w : 水面위의 物體 斷面積

따라서 全抗力은 形狀抗力과 潮波抗力의 合으로 表示할 수 있다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D U^2 \qquad (2.3.3)$$

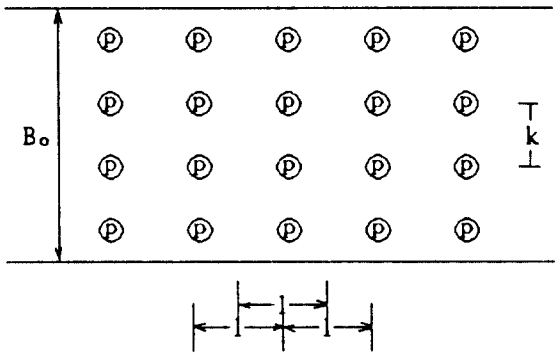
$$= \frac{1}{2} \rho U^2 (C_f A_f + C_w A_w) \qquad (2.3.4)$$

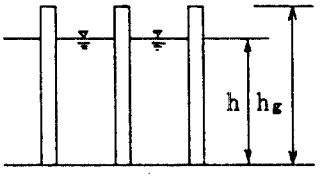
즉, 抗力係數 는 流速에 支配的인 영향을 받는다고 할 수 있다.

2.4 圓柱群 表面粗度에 衣한 抗力係數

動水力學에서 物體에 依한 流體運動의 低下는 質量運動力의 要素로서 抗力(Drag force)과 揚力(Lift force)이 있고, 抗力係數는 流體의 特性에 따라 서로 다른 函數로 提示되는데, 非壓縮性 流體에서의 抗力係數는 단지 粘性力과 慣性力에 支配的인 영향을 받기 때문에 Geometry 와 Reynolds 數만의 函數로 表示된다.그러나 계면 非壓縮性 流體 및 壓軸性 流體에서는 各各 重力,粘性力 그리고 壓力,密度 等에 영향을 받으므로 Froude 數와 Mach 數의 函數로 表示할 수 있다.

만약, 斷面 1과 斷面 2 의 水深이 같다면 作用하는 힘의 總合은 다음식 (2.4.1)과 같이 表示할 수 있다.





$$\Sigma D + \Sigma \tau = \rho g i V \qquad (2.4.1)$$

여기서, ΣD : 1 - 2 斷面間 抗力總合
$\Sigma \tau$: 1 - 2 斷面間 摩擦總合

$h_g > h$ 일때 $\Sigma D = (\rho / 2) C_D N d h v^2$ (2.4.2)

$$\Sigma \tau = \frac{n^2 v^2}{R^{(4/3)}} \rho g Bo h l \qquad (2.4.3)$$

式(2.4.2) 와 式(2.4.3)를 式(2.4.1) 에 代入하여 整理하면 式(2.4.4)를 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2} C_D F^2 m \frac{h}{l} + i_f = i_t \qquad (2.4.4)$$

$$F = \frac{v}{\sqrt{gh}}, \quad m = \frac{N d h}{B_o l}, \quad i_f = \frac{n^2 v^2}{R^{(4/3)}}, \quad i_t = i \left(1 - \frac{\pi N d^2}{4 B_o l}\right)$$

여기서,

n : Manning Coefficient
N : 横斷方向 Pier 個數
v : 平均流速(Average Velocity :흐름방향)
V : 1 - 2 斷面間의 體積
R : 動水半徑(Hydraulic radius : R = A/P)
F : Froude Number
d : Pier 直徑
B_o: 斷面 幅

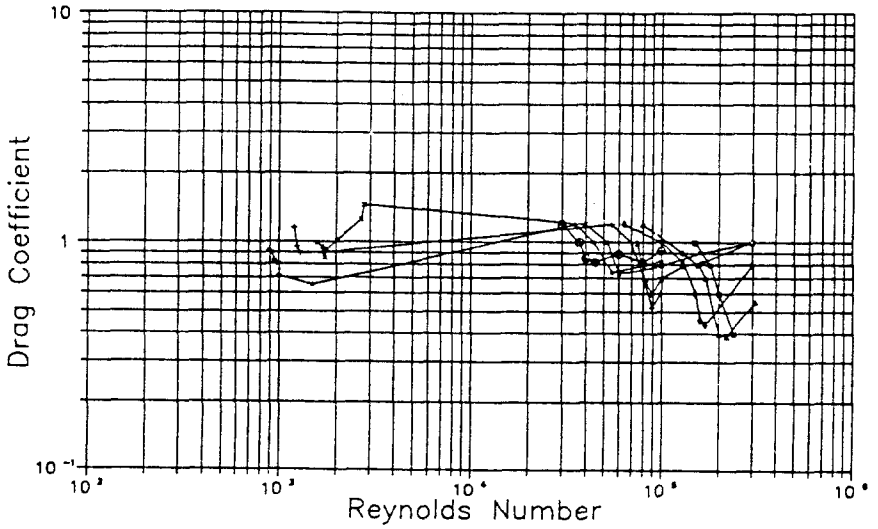


Fig. 3.1 Relation of drag Coeff.& Re.number
(Experiment Data[11])

3. 結果 分析 및 考察

本 研究에 있어서 實驗裝置는 Froude 相似律을 適用하여 模型實驗裝置 및 實驗結果를 分析 檢討하였고, '吉川秀夫'가 提案한 式(2.4.4)를 利用하여 實驗結果를 比較檢討하였다.

測定 流速은 表 3.1과 같고 이에따른 抗力係數(Drag Coefficient)의 分布는 Fig.3.1 - Fig.3.4 에 提示하였다.

角柱 또는 圓柱의 抗力係數 分布는 Piers 의 表面粗度가 重要한 要素로서 作用하나, 本 研究에서는 表面粗度를 全體 水路(Flume)粗度와 供合하여 Manning 粗度係數를 0.015 와 0.020 으로 變化시키면서 實驗을 하였다.

이 結果 角柱를 橫方向으로 1列,2列,3列 設置時 각기 다른 流速分布를 갖고 抗力係數도 많은 변화가 생겼는데(角柱보다 높은 水深도 考慮) 粗度係數가 0.015 일때 1列 設置時 Reynolds 數 53200 - 77040 의 範圍에서 抗力係數는 2.440에서 0.412 까지 變化하여 平均 1.40 정도로서 나타났고, 2 列 設置時에는 Reynolds 數 52960 - 76480 의 範圍에서 1.235 - 0.209, 3列 設置時는 Reynolds 數 53520 - 76680 範圍에서 抗力係數는 0.816 - 0.138 로 나타났다. 또한 조도계수 0.020 에서는 1列 設置時 Reynolds 數 53600 - 76440 範圍에서 抗力係數(Drag Coefficient)는 1.477 - 0.350, 2列 設置時 Reynolds 數 52840 - 75360 範圍에서 0.771 - 0.180 , 3 列 設置時 Reynolds 數 53280- 76080 사이에 0.491 - 0.118 로 나타났다.

이처럼 圓柱에 比하여 抗力係數가 적은 Reynolds數에 比하여 크게 나타나고 있지만,縱橫方向으로 Pier數를 增加시킴에 따라 抗力係數는 全體的으로 작게 나타났다.即 流速의 減少와 더불어 背水位 增加 및 通水能 減少를 招來한다고 할 수 있다.

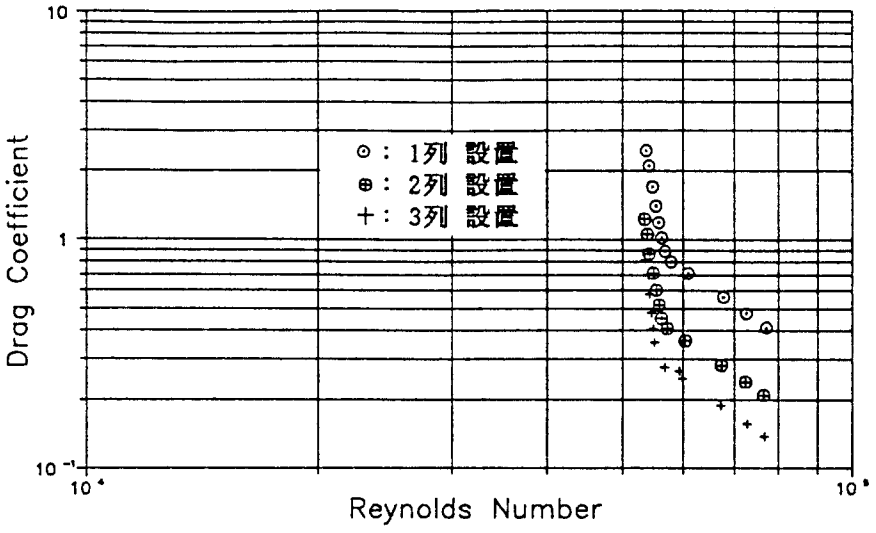


Fig.3.1 粗度係數 0.015 일때 Drag Coeff.

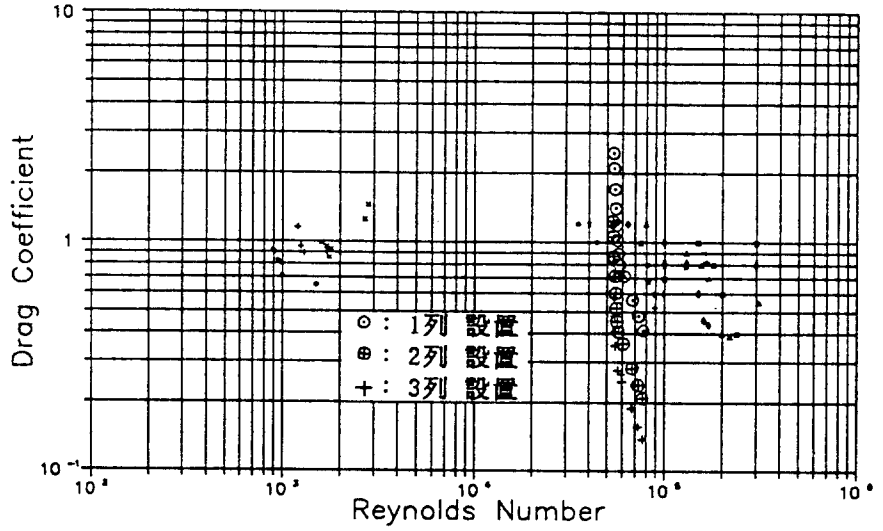


Fig.3.2 圓柱形과 角柱形 比較 (n=0.015)

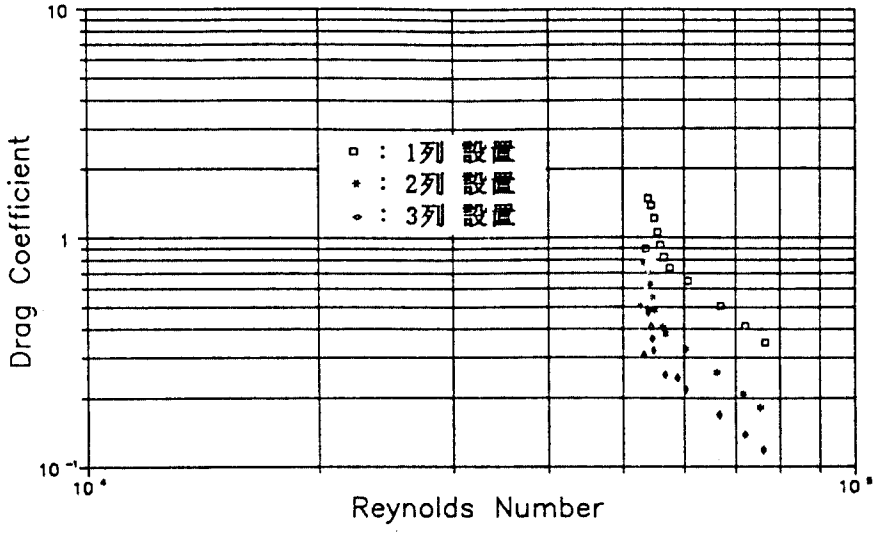


Fig.3.3 粗度係數 0.020 일때 Drag Coeff.

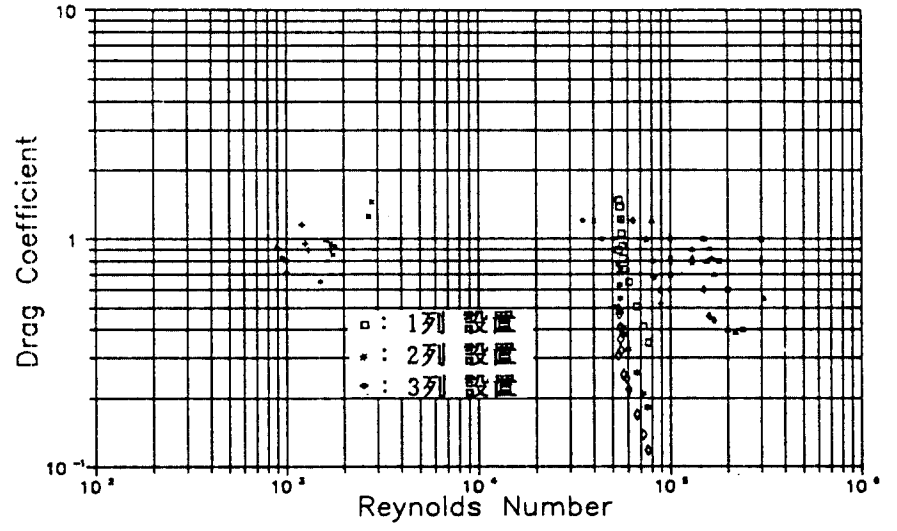


Fig.3.4 圓柱形과 角柱形 比較 (n=0.020)

表 3.1 測定 流速 分布

單位 : m/s

粗度係數 / Pier 設置 / 水位	0.015			0.020			備 考
	1列	2列	3列	1列	2列	3列	
0.5 m	1.330	1.324	1.334	1.325	1.310	1.327	縱方向 距離 2.6 m 河床傾斜 1/1000
1.0 m	1.342	1.336	1.338	1.340	1.321	1.332	
1.5 m	1.353	1.347	1.351	1.349	1.333	1.347	
2.0 m	1.368	1.355	1.354	1.361	1.350	1.350	
2.5 m	1.382	1.371	1.365	1.374	1.355	1.362	
3.0 m	1.393	1.384	1.372	1.388	1.365	1.368	
3.5 m	1.406	1.396	1.376	1.398	1.374	1.372	
4.0 m	1.420	1.406	1.484	1.413	1.410	1.472	
4.5 m	1.447	1.431	1.421	1.440	1.420	1.420	
5.0 m	1.523	1.511	1.498	1.519	1.510	1.510	
5.5 m	1.692	1.684	1.682	1.674	1.655	1.667	
6.0 m	1.814	1.810	1.818	1.801	1.792	1.799	
6.5 m	1.926	1.912	1.917	1.911	1.884	1.902	

4. 結 論

流體의 흐름에 대한 物體의 抵抗은 流速과 通水能이 저감되는 대신 背水位는 上昇됨을 볼수 있었다. 또 縱,橫方向으로 말뚝(四角柱)設置數를 變化시킴에 따라 抗力係數(Drag Coefficient)도 변화되는데, 말뚝의 數를 增加시킴에 따라 抗力係數는 減少됨을 보였다. 即 抗力係數는 流速에 反比例함을 보여주고 있다. 또한 圓柱에 비해서도 全體的으로 크게 나타났다.

그리고 抗力係數는 말뚝의 表面粗度에 따라 그 變化가 뚜렷하나 本 硏究에서는 Manning 粗度係數를 利用하여 實驗硏究를 하였으므로 말뚝의 表面粗度에 따른 抗力係數의 比較算定은 부족하다. 또한 縱方向으로의 設置 間隔에 따라서도 前流 및 後流範圍에서 抗力係數는 變化를 보일 것이나 앞으로 繼續的인 硏究가 있을 것이다.

參 考 文 獻

[1] 吉川秀夫 ' 河川工學 ' 朝倉 土木學會 講座 17 PP.228 - 230

[2] 日本 土木學會 '水理 公式集'土木學會 昭和 38 年 PP.160 - 163

[3] Robert D.Bievins 'Applied Fluid Dynamics Handbook' VNB 1984 PP.327-375

[4] P Novak. J Cabelka 'Models in Hydraulic Engineering' Pitman 1981 PP.4-45 , 56-75

[5] Frank M.White 'Fluid Mechanics' McGraw-Hill 1987 PP.412-423

[6] Roshko. A, etal 'Flow Forces on a Cylinder Near a Wall or Near Another Cylinder' Colorado State Univ.1975

[7] S.P.Rai 'Hydraulic Performance of Multiple Bridge Piers ' IAHR 1986 PP. 265-281

[8] H.B.KIM etc 'Calculation of Two-Dimensional Biuff Body Potential Flow'韓國航空宇宙 學會誌 1983 第 11券 第 2 號 PP.48-54

[9] Roshko,A 'Experiments on the flow past a Circular cylinder at very high Reynolds Number'J.of Fluid Mech.vol 10 1961 PP. 345-356

[10] Bearman, P.W & Fackrell,J.E ' Calculation of Two-dimensional and axisymmetric Buff-body potential flow' J.of Fluid Mech. vol 72 1975 PP.229-241

[11] Smith,F.T 'Laminar flow of a incompressible fluid past a bulff body' J.of Fluid Mech.vol 92 PP.171-205