

水理構造物 下流部에서의 Vortex의 特性에 관한 實驗的 研究

金 嶽 洪 *

1. 序 論

排水 門과 같은 水理構造物 下流部에서는 洪水 또는 인위적인 造作에 의해 放流를 하게되는데 이때 흐름의 流速이 매우 빠른 Jet流가 形成된다. 만약 基礎地盤이 堅固하지 않을 경우 Jet流에 의한 1차적인 河床洗掘이 惹起되며, 洗掘에 따른 河床 形態에 의해 Vortex가 形成되는데 이 Vortex는 追加的으로 2차의 河床洗掘을 發生시킨다. 이같은 2차의 河床洗掘은 1차의 경우와 반대로 洗掘의 進行 方向이 上流로 향한다.

만약 2차 洗掘이 構造物 바닥까지 進展될 경우 이는 構造物을 破壞시키는 深刻한 原因이 될 것이다.

本 研究에서는 構造物의 安全에 影響을 미치는 2차 河床洗掘의 主原因인 Vortex의 特性을 糾明함으로써 河床洗掘 방지책에 參考가 되고자 한다.

2. 實驗裝置 및 方法

實驗은 길이 10m, 폭 30cm의 循環水路에서 고정상 實驗으로 實施되었다. 構造物 下流部에서의 1차 洗掘에 따른 河床형태를 Fig.1 과 같이 再現시키고 上流로부터의 放流에 의해 생기는 Line vortex 의 流速場을 흐름의 可視化法 (Flow visualization)에 의해 測定하였는데 順序는 다음과 같다.

- 1) 알루미늄 粒子를 中性洗制와 잘섞어 混合液을 만든다
- 2) 混合液을 水路 入口部에 넣어 흘러 보낸다
- 3) 粒子가 그리는 流跡線을 motor裝着된 카메라를 利用하여 寫眞攝影을 한다
- 4) 흐름을 명확히 測定하기 위해 주위를 어둡게 하고 Slide projector 와 light sheet를 利用한다

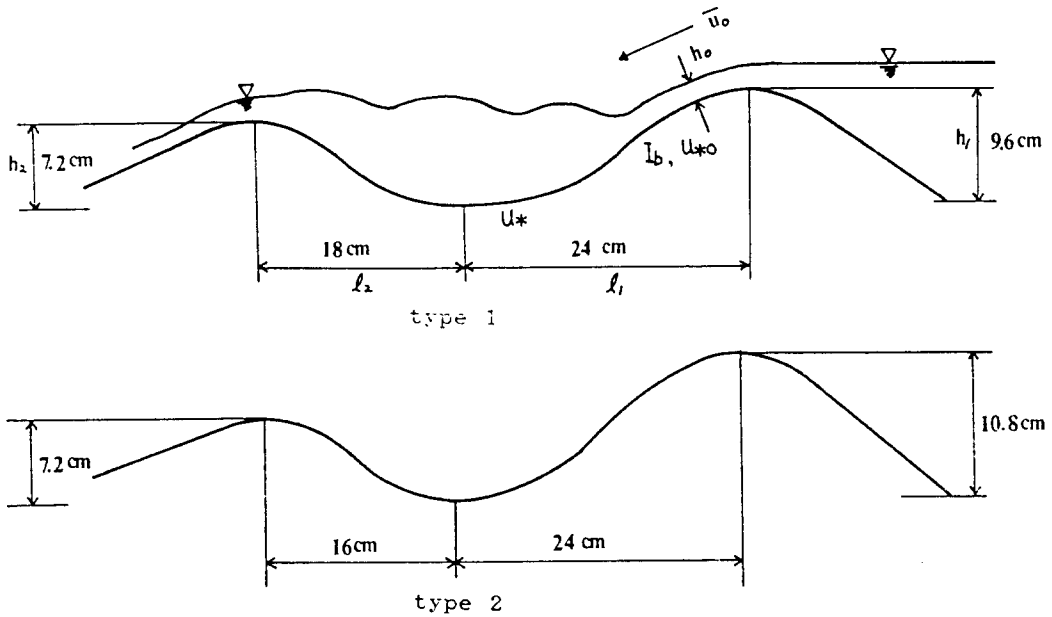


Fig. 1 Rigid bed model for a sand bar

5)流速은 알루미늄粒子 길이를 카메라의 露出時間으로 나눔으로써 구할 수 있다.

6)알루미늄 粒子의 濃도와 速度를 考慮하여 Slit幅과 露出時間을 決定한다.

實驗條件은 Fig.1 및 Table 1에 나타나 있으며, 流速測定 및 亂流強度 測定科程은 Fig. 2,3에 나타

Table 1 Summary of the experimental data

run no.	h_0 (cm)	\bar{u}_0 (cm/sec)	I_b (-)	R (cm)	T (sec)	u_{*o} (cm/sec)	remark
R1	0.5	75	0.40	0.48	1/15	13.72	type 1
R2	0.7	105	0.40	0.65	1/15	15.96	type 1
R3	1.0	120	0.40	0.91	1/15	18.89	type 1
R4	1.2	132	0.40	1.07	1/15	20.48	type 1
R5	1.5	145	0.40	1.30	1/30	22.57	type 1
R6	2.0	154	0.40	1.67	1/30	25.59	type 1
R7	0.5	81	0.45	0.48	1/15	14.55	type 2
R8	1.0	122	0.45	0.91	1/15	20.36	type 2

나 있다. 여기서 h_0 는 越流水深, U_0 는 越流平均速度, I_b 는 河床傾斜, R 은 動水半徑, T 는 露出時間, U^*o 는 摩擦速度를 나타낸다.

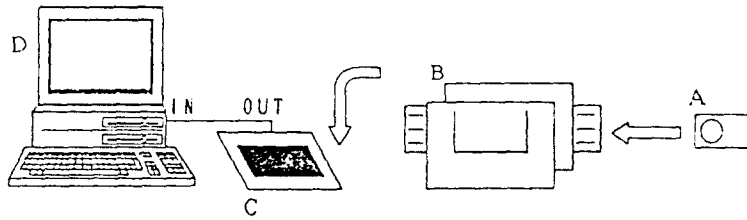


Fig. 2 Data system for a flow trajectory

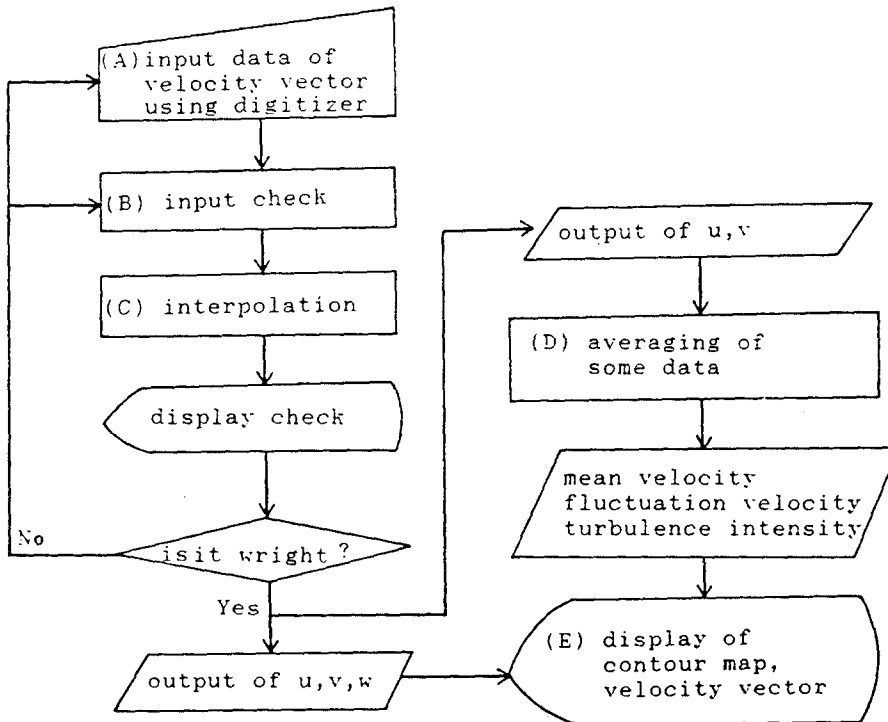


Fig. 3 Flow chart for the data system

3. 實驗 結果

3.1 洗掘 領域에서의 Vortex와 흐름의 特性

Fig. 4 및 Fig. 5는 低流量(R1)과 高流量(R6)에서 時間에 따른 Vortex運動의 流線을 나타내고 있

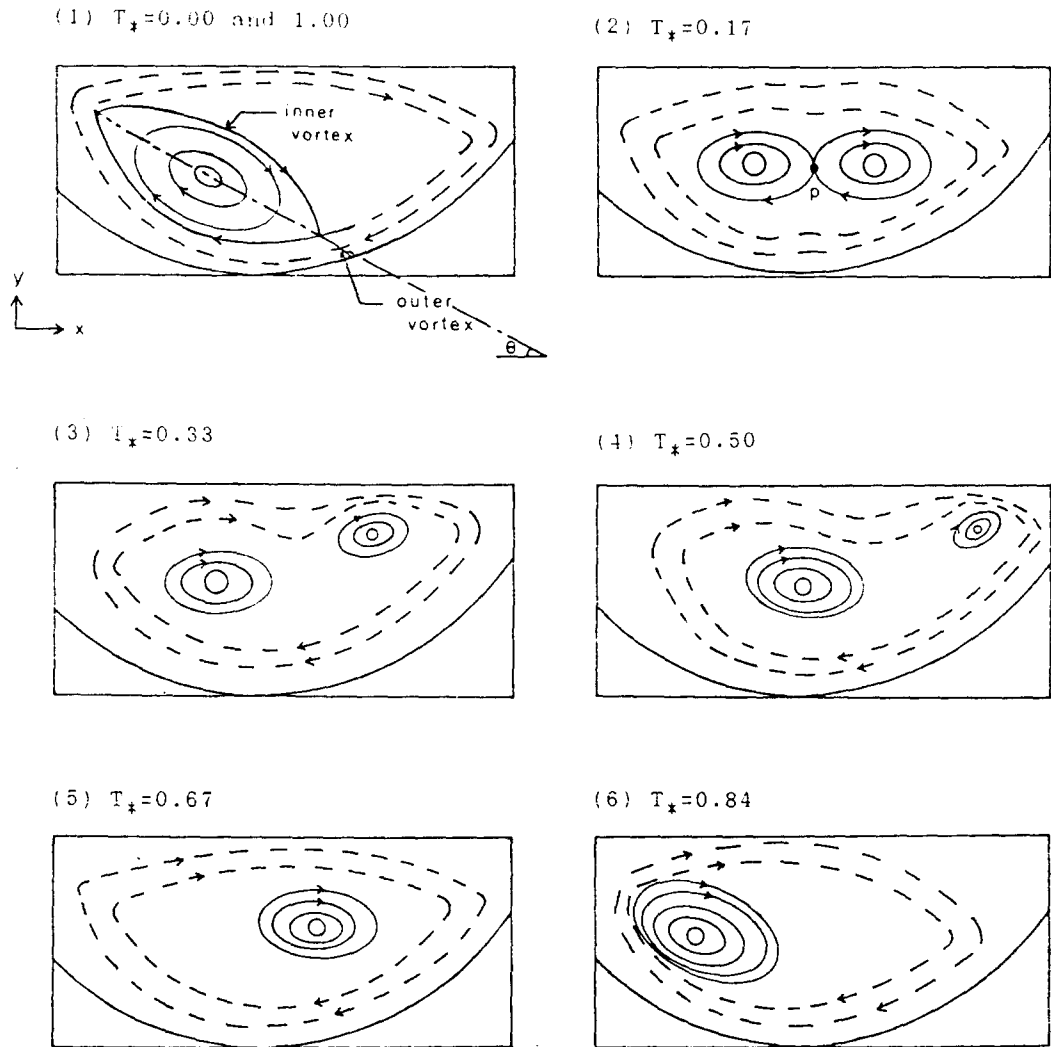


Fig. 4 Schematic diagram of the vortex motion, R1

다. 여기서 外部의 큰 Vortex가 洗掘領域 全 斷面에 걸쳐 形成되며, 外部 Vortex의 内部에도 Vortex가 形成됨을 알 수 있다.

低 流量의 경우, 内部 Vortex는 發生초기에 눈동자 모양의 傾斜진 모양을 갖추다가 (Fig. 4의(1)) 같은 크기와 같은 方向을 갖는 2개의 똑같은 sink로 나뉜다. (Fig. 4의(2)), 2개의 Vortex는 떨어져 고 그중 1개는 점점 작아지다 결국 없어지고 (Fig. 4의 (3), (4), (5)), 남은 Vortex는 크기를 回復한 후 초기의 形態로 다시 還元됨을 알 수 있다. (Fig. 4의 (6)) 流量의 경우, 内部 Vortex는 눈동자 모양의 傾斜진 Vortex와 작은 Vortex가 形成된다. 그러나 작은 Vortex는 強度도 약하며 不安定하여 亂流變動에 의해 종종 없어지기도 한다. 작은 Vortex의 에너지 또한 작으며 洗掘領域에서의

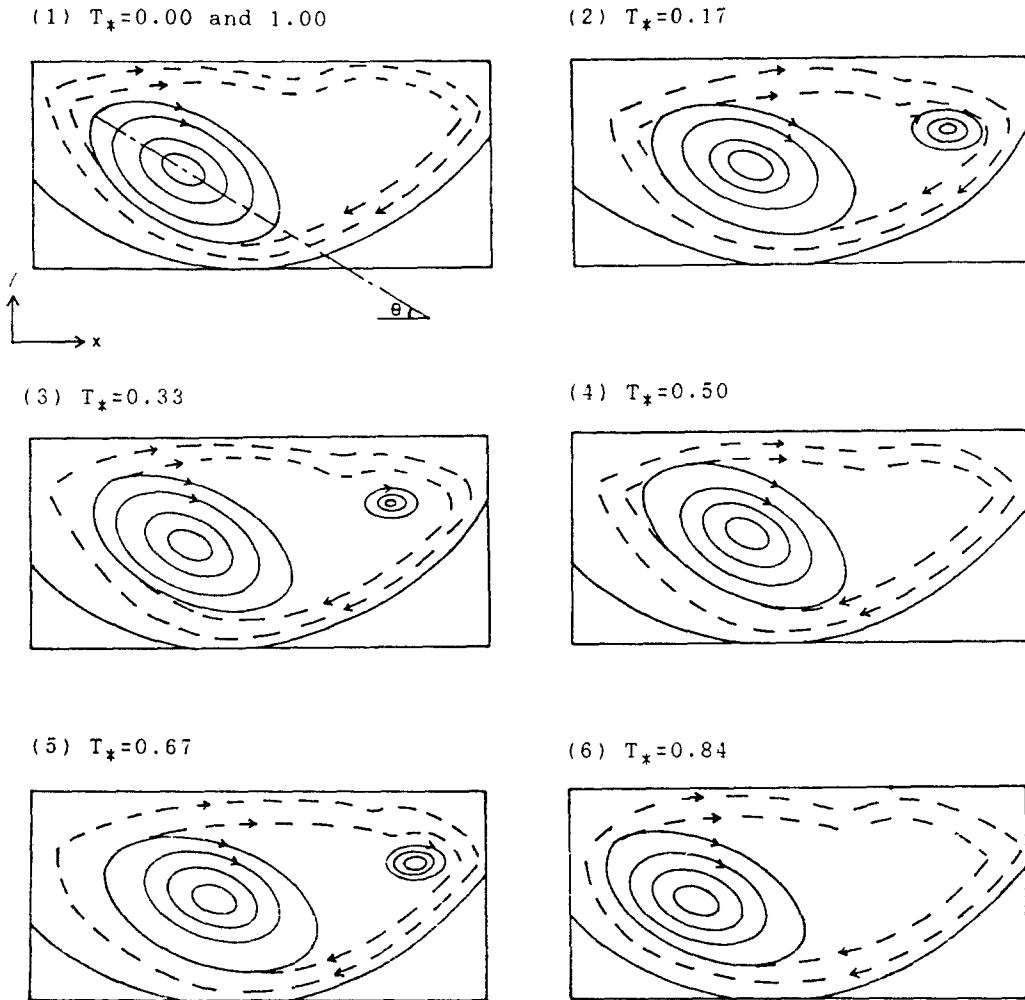


Fig. 5 . Schematic diagram of the vortex motion ,R6

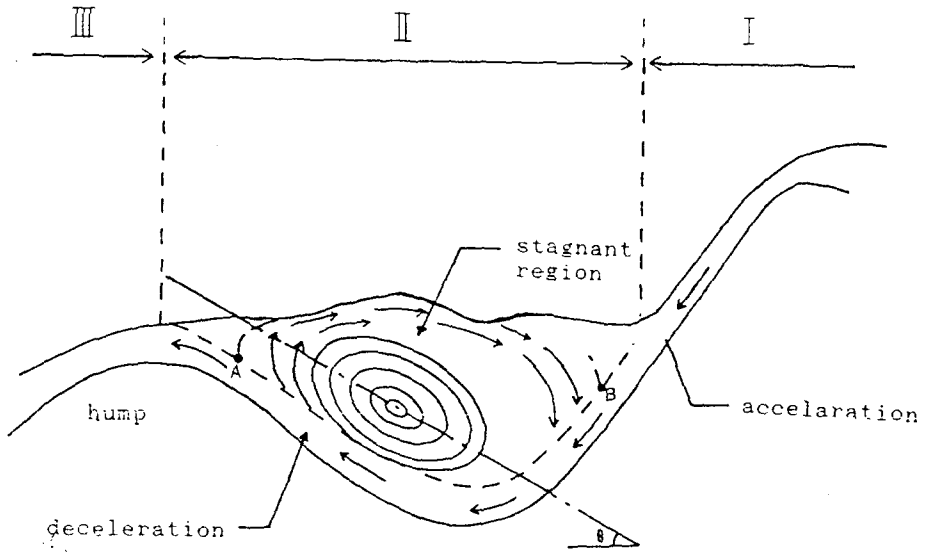
Energy dissipation에 아무런 役割을 하지 못한다. 한편, 傾斜진 Vortex는 全科程을 통해 Energy가 크고 거의 一定함을 알 수 있다. Fig.6은 洗掘 領域에서 形成된 Vortex의 形態를 보여주고 있다

越流 流速은 頂部에서 谷部로 감에 따라 加速되나 谷部에서 hump의 頂部로 감에 따라 減速된다. 洗掘領域의 A점(trailing edge)에서 흐름의 分離가 생기고 다시 加速部分의 B점에서 再結合이 發生되며, 分離 및 再結合으로 인해 外部의 큰 Vortex를 形成함을 알 수 있다. 한편 内部의 傾斜진 Vortex는 加速 部分으로부터 供給된Vorticity로 인해 생기는데 그 軸은 hump의 傾斜와 거의 같음을 알 수 있다.

3.2 循環의 特性

R1 Case 와 R6 Case에 대한 循環을 時間에 따라 그려보면 Fig.7 및 Fig. 8과 같다. 이 그림으로 부터 다음과 같은 內容을 알 수 있다.

- 1) 循環은 内部 Vortex가 下流 hump의 傾斜를 따라 形成될 때 最大가 되며 2개의 같은 크기의 Vortex로 나뉘질때 最小가 된다.
- 2) 2개의 Vortex는 P점에서 saddle을 形成하게 되는데 (Fig. 4의(2)) 이 影響으로



A; separation point
B; reattachment point

Fig. 6 Vortex motion in the scour hole

Vortex크기는 서로 相殺되며 循環이 最小로 된다.

- 3) 두 Vortex가 떨어지고 그중 하나가 循環에너지를 回復하게 되며 따라서 총 循環 또한 增加된다.
- 4) 上記 影響으로 低流量의 경우의 循環은 Fig.7과 같은 sine曲線을 그리게 된다.
- 5) 高流量의 경우 循環變動은 Fig.8처럼 그리 크지않음을 알 수 있는데 이는 3.1에서 언급하였듯이 内部의 작은 Vortex의 循環에너지가 작은 반면 큰 Vortex의 循環에너지는 全科程을 통해 크기가 거의 같기 때문이다.

Fig.9는 循環을 Reynolds수로 나타낸 그림이다. 이 그림에서와 같이 循環은 Vortex의 형상이나 河

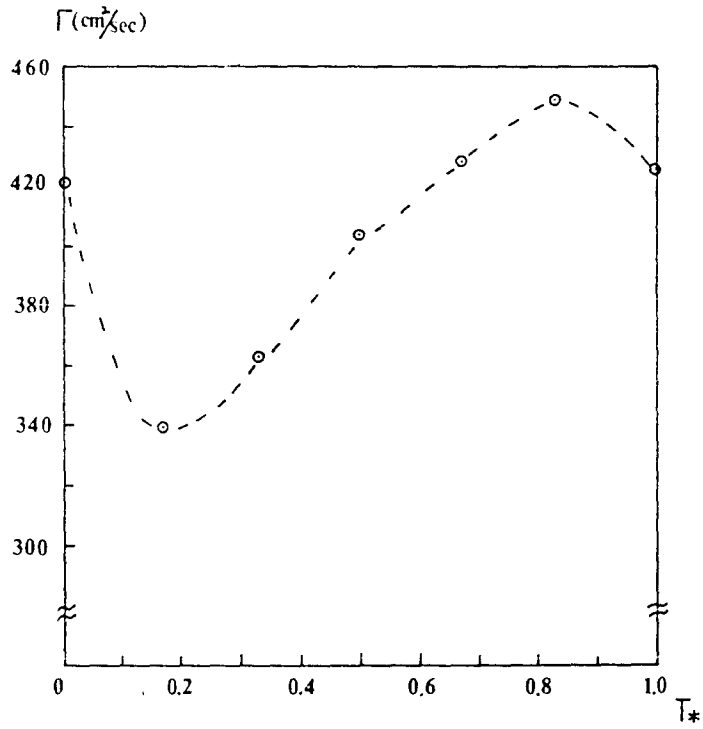


Fig. 7 Time variation of the circulation for R1 case

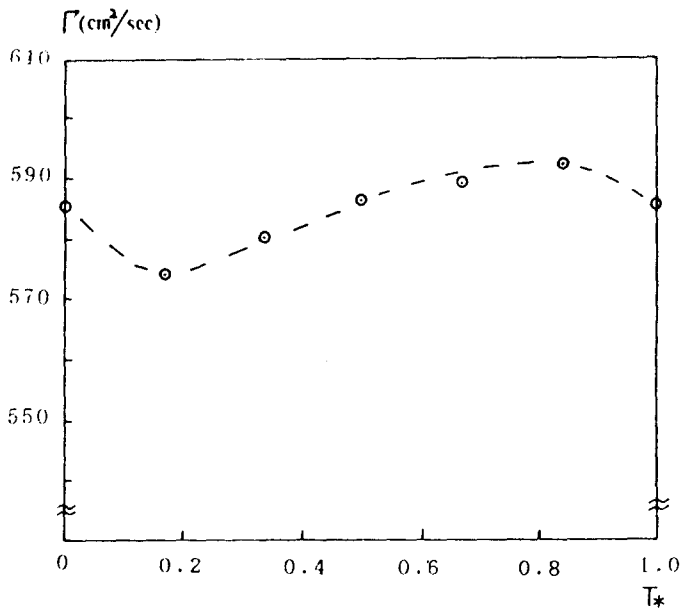


Fig. 8 Time variation of the circulation for R6 case

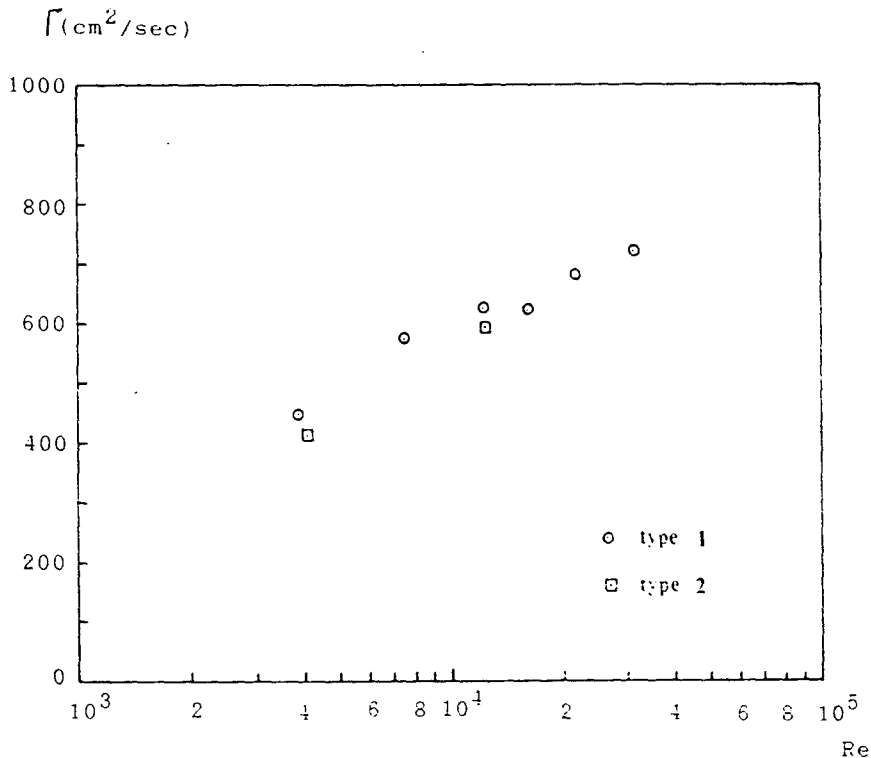


Fig. 9 Circulation as a function of Reynolds number

床形態에 關係없이 레이놀드數가 增加함에 따라 그 에너지가 커짐을 알 수 있다. 循環을 Vortex길이의 無次元 함수로 나타내면 Fig. 10과 같다. 여기서 Γ_m 와 L_m 은 각각 循環의 最大値, Vortex의 最大値를 뜻하며 Γ 는 Vortex의 길이 L 에 해당되는 循環을 뜻한다. 한편 砂洲 뒷부분에서 發生되는 Vortex의 循環에 대한 Tanaka(1986)의 實驗値를 Fig. 10의 形式에 따라 나타내면 Fig. 11과 같으며, 이들 結果로 부터 循環은 Vortex의 構造的 特性에 관계없이 Vortex 길이의 增加에 比例하여 커짐을 알 수 있다.

한편 Vortex의 循環을 適切한 外部變數 (outer parameter)로 나타내면 便利하다. 즉,

$$\Gamma = K * LU_0 \tag{1}$$

여기서 L 은 Fig. 1에 나타난 바와같이 2개의 頂部사이의 길이 (= 11 + 12)이며, U_0 는 越流平均 流速을 나타내고 있다. 이들 結果는 Fig. 12에 나타나 있으며 레이놀드數의 函數로써 나타낸 結果는 Fig. 13에 보여진 바와 같다.

이들로부터 K 값은 $K = 0.12$ 로서 Re 에 關係없이 一定함을 알 수 있으며 이로써 越流流速과 河床 形態를 알면 Vortex의 循環을 定量的으로 결정할 수 있다.

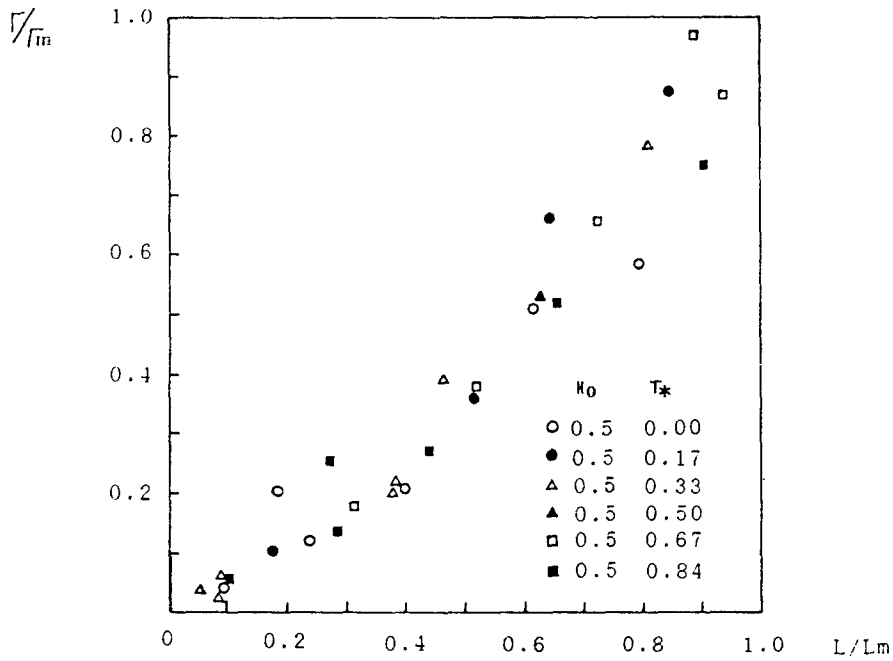


Fig. 10 Non-dimensional distribution of circulation for R1 case

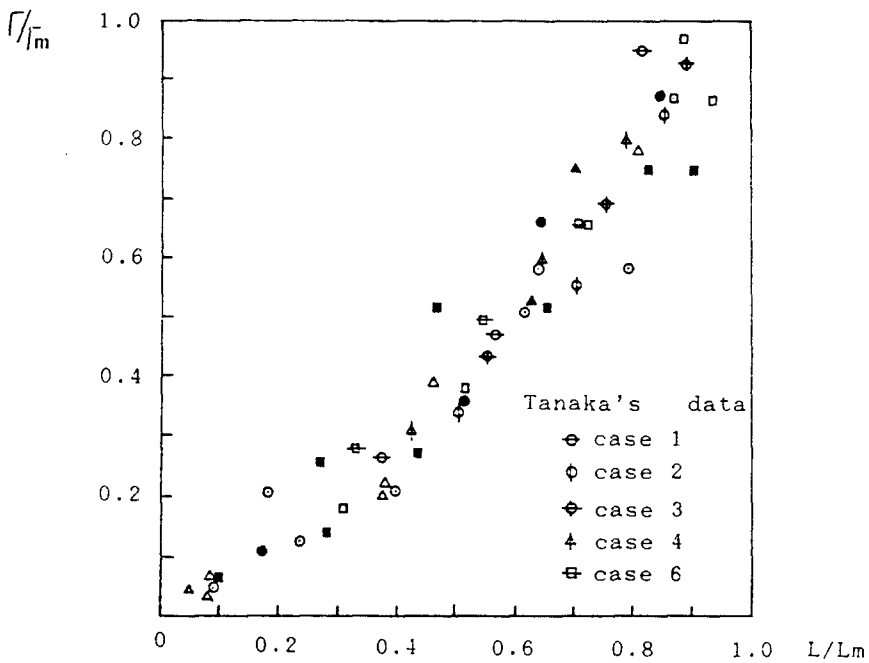


Fig. 11 Non-dimensional distribution of circulation including Tanaka(1986)'s data

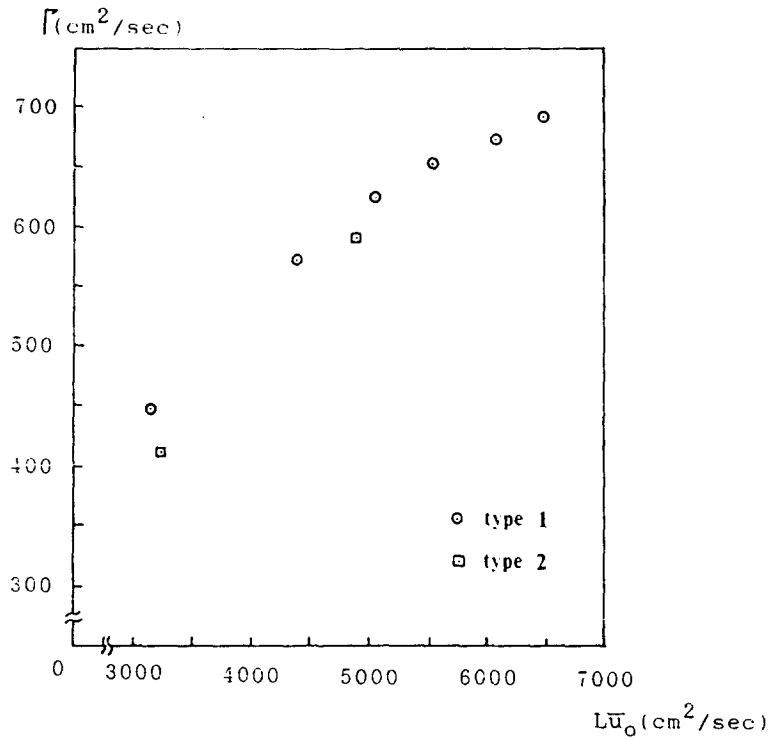


Fig. 12 Comparison between the circulation and the outer parameter

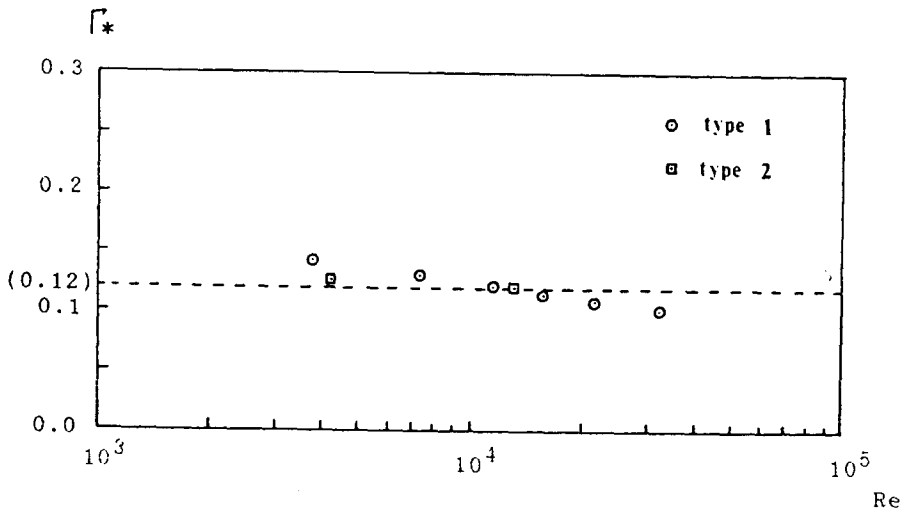


Fig. 13 Non-dimensional circulation as a function of a Reynolds number

4. 理論的 考察

Fig. 4에서 나타나는 内部 Vortex는 다음과 같이 理論적으로 解析할 수 있다. x축과 $-\theta$ 의 傾斜角을 갖고 서로 같은 크기의 Γ 로 a 의 거리를 갖고 있는 무한개의 Vortex에 대한 Complex potential은

$$W(z) = \frac{\Gamma}{2i} \ln \left(\sin \frac{z}{a} \right) \exp(-\theta i) \quad (2)$$

微分한 후 실수부, 허수부로 나누면 Vortex 流速의 水平, 垂直 성분 (U, V)는

$$U = \frac{\Gamma}{2a} \frac{\sin\theta \sin(2/a)x + \cos\theta \sinh(2/a)y}{\cosh(2/a)y - \cos(2/a)x} \quad (3)$$

$$V = -\frac{\Gamma}{2a} \frac{\cos\theta \sin(2/a)x - \sin\theta \sinh(2/a)y}{\cosh(2/a)y - \cos(2/a)x}$$

과 같이 된다.

(3)式的 理論値와 實驗値를 無次元으로 表示한 結果는 Fig. 14에 나타나 있다. 여기서

$\theta = 21.8^\circ$ 는 内部 Vortex의 傾斜角이며

$$X^* = x/a, \quad Y^* = y/a, \quad U^* = U/(\Gamma/2a), \quad V^* = V/(\Gamma/2a) \quad (4)$$

이다. Fig. 14를 보면 原點에서는 理論적으로 볼 때 水平, 垂直速度가 무한대가 되는 特異點 (Singular point)이 되나 실제로는 그렇지 않다. 즉 (3)式에서 Vorticity를 計算하면

$$\psi = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

로서 比回轉流가 되나 實際로는 回轉流로서 이는 原點에 高度로 結集된 Vorticity (Vortex filament)가 存在하기 때문이다. 따라서 Rankine의 combined vortex 理論을 導入하면 點線과 같이 되며 實驗値와 比較해 볼 때 거의 一致하고 있음을 알 수 있다.

5. 結 論

本 研究에서는 水理構造物 下流部에서의 洗掘의 原因이 되는 Vortex의 水理的 特性을 糾明하기 위해 實驗을 實施하였으며, Vortex 流速을 Complex potential 方法에 의해 理論적으로 解析하고 이를 實驗値와 比較해 보았다. 그 결과 흐름의 流速을 알고, Jet流에 의해 생기는 河床 洗掘의 形

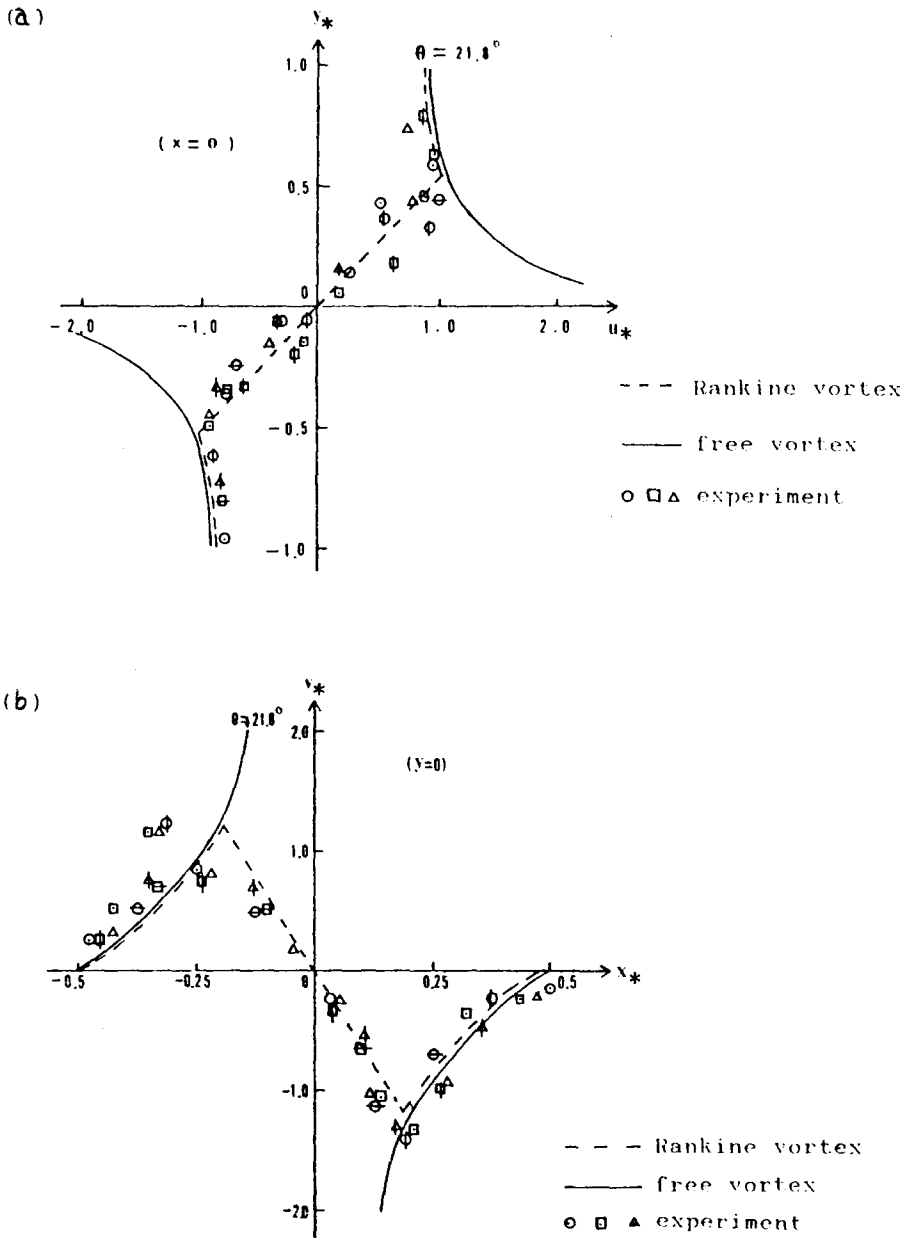


Fig. 14 Comparison of $u_* v_*$ between the calculational and the experimental results.

態를 알면 Vortex의 循環, 強度 등을 알 수 있었다. 本 研究에서 얻어진 結果들을 토대로, 추후 河床洗掘의 直接的인 原因이 되는 摩擦 速度와 前斷力을 에너지 保存法則에 의해 導出하고 Vortex 洗掘을 定量的으로 糾明할 豫定이다.

参考文献

- (1) Kim, J. H., Tamai, N., & Asaeda, T., Bank erosion due to overflow, 44th annual meeting, JSCE, 1989
- (2) Kim, J. H., Tamai, N., Unsteady flushing of a sand bar by overflow, 45th annual meeting, JSCE, 1990
- (3) Tanaka, H., On the structure of flow over rippled models, 30th Japan conf. on Hydraulics, JSCE, 1986