

水理構造物 下流部에서 Vortex에 의한 洗掘量 算定

金 鎖 洪

1. 緒論

排水閘門, 湫 등의 水理構造物 下流部에서는 越流 또는 문비개방에 따른 흐름의 유속이 매우 빠른 jet流가 발생되며 構造物 護床工이 견고하지 않을 경우 wall jet에 의한 1차세굴(primary vortex) 및 vortex에 의한 2차세굴(secondary scour)이 발생된다. 2차세굴은 1차세굴에 비해 세굴량은 작아도 진행방향이 구조물로 향한다. 만약 2차세굴이 구조물 밑바닥까지 진전되면 구조물 안정에 영향을 끼치며 심한 경우 구조물이 破壤되는 결과를 낳게 된다.

본 研究에서는 vortex에 의한 2차세굴의 物理的 特性을 규명하고 2차세굴량을 vortex의 摩擦速度와 에너지 保存法則에 의해 정량적으로 算定하고자 한다.

2. 1차 및 2차 洗掘의 物理的 特性

越流 또는 문비개방에 의해 발생하는 jet流는 호상공 末端에서 먼저 1차세굴을 일으킨다. 이때 세굴의 주원인은 호상공 바닥을 타고 흐르는 이른바 wall jet로서 흐름의 강한 掃流力에 의한다. 세굴 형태는 바닥의 일정한 구께가 떨어져 나가는 판박형 세굴(sheet erosion)로서 洗掘深은 시간에 따라 비례적으로 증가한다. 세굴 진행방향은 하류로 향하므로 구조물 안정에는 큰 영향이 없다.

1차세굴이 어느정도 진행되면 洗掘孔(scour hole)이 형성되고 세굴공 내부에는 line vortex가 발생되며, line vortex에 의해 추가로 2차세굴이 일어난다. 여기서 line vortex는 vortex의 크기와 세기가 흐름의 횡방향으로 일정함을 뜻한다. 2차세굴에 의해 세굴공은 점차 확대되며 세굴공 확대에 따라 line vortex도 점점 커지지만 강도는 점차 약해지고, 따라서 세굴심은 증가속도가 둔화되며 그후 動的平衡狀態에 이르고 세굴진행이 멈추게 된다. Fig. 1과 Table 1은 1차 및 2차세굴의 물리적 특성을 나타내고 있다.

2차세굴은 1차세굴에 비해 세굴량은 작지만 진행방향이 상류로 향하므로 구조물 안정에 영향을 미친다. Fig. 2는 세굴에 따른 호상공 변형과 그에 따른 구조물 破壤를 보여주고 있다.

3. 實驗裝置 및 方法

실험은 길이 10m 폭 30cm의 循環水路에서 可動床 시험으로 실시하였다. Fig. 3과 같이 배수갑문 하류부에 일정 두께만큼 모래를 포설하고 수로 측벽에는 격자 눈금이 매겨진 투명 아크릴판을 부착하여 세굴량을 정량적으로 알 수 있도록 하였다. 세굴속도가 비교적 빠르므로 비데오 카메라와 시간 측정용 V.T.R을 이용하였으며 세굴과정을 좀 더 명확히 관찰하기 위해 강한 조명을 비추고 빛의 반사를 막기 위해 수로 측면 벽 뒷부분에 검정색의 불투명판을 부착하였다.

비데오에 기록된 세굴량을 매 10~20초 간격으로 읽음으로써 세굴량을 계산할 수 있도록 하였다.

4. 洗掘孔에서의 平均 摩擦速度 算定

가. 이론적 고찰방법

2차 세굴량을 얻기 위해서는 세굴공 내부에서의 line vortex의 평균 마찰 속도를 알아야 한다. 평균 마찰속도는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 세굴공 입구와 출구 사이에서의 에너지 보존법칙에 의해 산정할 수 있다. Fig. 4에서 H 는 기준면에서 상류 수위까지의 높이, H_1 은 apron 높이, H_2 는 hump crest의 높이, u_0 는 평균 율류유속, u 는 세굴공에서의 line vortex의 유속, u_{max} 은 line vortex의 최대유속이며 L 은 control section의 길이를 나타낸다.

Fig. 4에서 일정단면으로 들어오는 에너지 流入量(energy influx)과 流出量(energy efflux)의 차이는 세굴공에서 형성된 line vortex의 運動에너지, 세굴공 바닥의 摩擦에 의한 시간당 에너지 소모량 및 세굴공에서 亂流流動에 따른 시간당 에너지 소모량의 합과 같다. 즉,

$$F_{in}-F_{out} = \partial (E_v + E_t) / \partial t - E_f / \text{time} \quad \text{----- (1)}$$

여기서 F_{in} 은 에너지 유입량으로서 단면 1의 위치에너지(=qgH), F_{out} 은 유출량으로서 단면 2에서의 위치에너지 및 운동에너지의 합으로 표시된다. 즉

$$F_{out} = qg(H_2 + V_2^2/2g) \quad \text{----- (2)}$$

$\partial E_v / \partial t$ 는 세굴공 내부의 vortex의 운동에너지로서 다음식으로 표시된다.

$$\partial E_v / \partial t = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{V/Q} \int \frac{u^2}{2} dA \right] \quad \text{----- (3)}$$

E_t 은 세굴공 바닥과의 마찰에 의한 에너지 소모량으로서

$$E_t = \frac{-\tau}{q} Lu_{max} \quad \text{----- (4)}$$

한편 세굴공 내부에서 난류 유동에 의한 에너지 소모량 E_t 는 마찰에 의한 에너지 소모량에 비해 작으므로 무시할 수 있다.

따라서,

$$F_{in}-F_{out} = \partial E_v / \partial t - E_f / \text{time}$$

$$\begin{aligned}
 qgH - qg\left(H_2 + \frac{V_2^2}{2g}\right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{V/Q} \int \frac{u^2}{2} dA \right] + \frac{\tau}{q} Lu_{\max} \\
 \therefore \frac{\tau}{q} (=u_*^2) &= \frac{qg\left(H - H_2 - \frac{V_2^2}{2g}\right) - \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{Q}{V} \int \frac{u^2}{2} dA \right]}{Lu_{\max}} \\
 &= \frac{qg\left(H - H_2 - \frac{V_2^2}{2g}\right) - \frac{\partial}{\partial t} \left[q \int \frac{u^2}{2} \frac{dA}{A} \right]}{Lu_{\max}} \quad \text{----- (5)}
 \end{aligned}$$

여기서 q는 단위폭당 유량, Q는 유량이며, V는 line vortex의 체적, A 는 line vortex의 영역을 나타낸다.

上記 (5)식에 의한 실험결과 및 세굴공 내부의 평균 마찰속도 u_* 는 Table 2에 나타나 있다.

나. 外部 關聯變數를 이용한 平均 摩擦速度 算定

식(5)를 이용하여 세굴공 내부의 평균 마찰속도를 구하기란 절차가 까다롭다. 따라서 평균 마찰속도를 관련된 외부변수(outer parameter)로써 나타내면 상당히 편리하다. Ikeda 와 Asaeda(1983)에 의하면 난류속도의 평균 수직성분 \overline{W} 와 흐름 방향의 평균유속 U와는 다음식으로 표시된다고 하였다.

$$\overline{W} = \beta' U \quad \text{----- (6)}$$

한편 평균마찰속도의 값은 sand ripple 의 trailing edge 근처에서의 垂直 亂流流動과 같으므로

$$\frac{u_*^2}{U^2} = \frac{W'^2}{(\overline{W}/\beta')^2} = \beta'^2 \cdot \frac{W'^2}{\overline{W}} = \beta'^2 \left(\frac{W - \overline{W}}{\overline{W}} \right)^2 \quad \text{----- (7)}$$

ripple 바닥에서 측정된 실험치에 의하면,

$$\left(\frac{W - \overline{W}}{\overline{W}} \right)^2 = 0.0324 \quad \text{----- (8)}$$

따라서 식(7)은,

$$\frac{u_*^2}{U^2} = 0.0017 - 0.0068 \text{ ----- (9)}$$

와 같이 된다.

上記 결과에 의하면 월류 평균유속 $\frac{u_*}{u_0}$ 와 세굴공 내부의 평균마찰속도 u_* 와는 일정한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉,

$$u_* = a_2 \frac{u_*}{u_0} \text{ ----- (10)}$$

u_* 와 $\frac{u_*}{u_0}$ 의 실험치는 Table 2에 있으며 Fig. 5는 (10)식의 관계를 보여주고 있다. u_* 와 $\frac{u_*}{u_0}$ 와는 좋은 상관관계를 보이며, $a_2 = 0.0046 \sim 0.0058$ (평균치 0.051)로 나타났다.

5. line vortex에 의한 洗掘量 算定

세굴공 내부에서 line vortex에 의해 생기는 단위폭당, 단위 시간당 세굴량은 다음 식에 의해 구할 수 있다.(Asaeda, 1989)

$$q_s = \frac{2}{3} \rho k \sqrt{\frac{6}{\pi}(s+1)} u_* \int_{a_1}^{a_2} \int_{\eta_0}^{\infty} \sqrt{\frac{\pi}{4} C_L \eta - \frac{\pi}{8} C_D a_0^2 S_1(a)} \\ \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) d\eta da \text{ ----- (11)}$$

여기서 a_1, a_2 는 세굴공에서 세굴이 발생하는 始點과 終點 위치를 나타낸다. u_* 는 세굴공 내부의 평균 마찰속도로서 식 (5)에 의해 구할 수 있다. 변수 K 는 세굴공 바닥에 있는 전체 모래입자와 세굴되는 모래입자와의 비율을 나타내며, Asaeda(1989)에 의하면,

$$K = (0.5)^n, \quad n = 4.75 \text{ ----- (12)}$$

s 는 粒子의 水中 比重이고 η 는 揚力(lift force)을 나타내며, 이때 η 는 正規分布를 따른다. η_0 는 모래 입자가 세굴되기 시작하였을 때에 해당되는 양력으로서 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\pi}{4} C_L \eta_0 = \frac{\pi}{8} C_D a_0^2 S_1(a) \text{ ----- (13)}$$

$$\eta_0 = \frac{\pi}{8} C_D S_1(a) \frac{4a_0^2}{\pi C_L} \text{ ----- (14)}$$

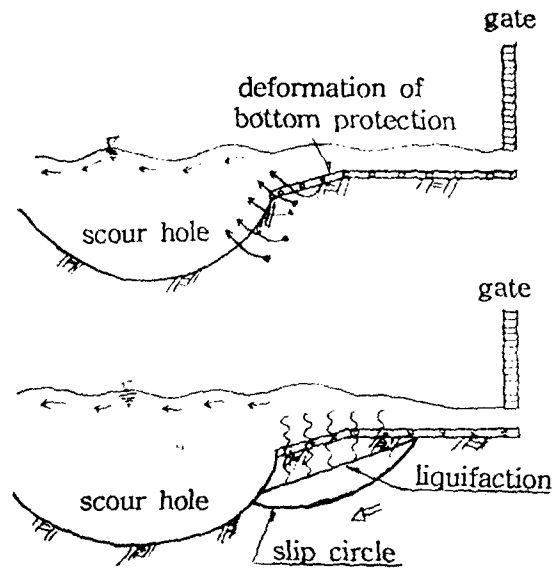
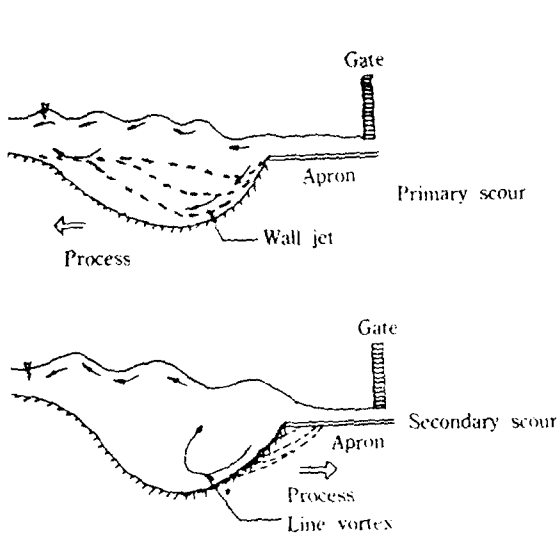


Table 1 Comparison between primary scour and secondary scour

	primary scour	secondary scour
scour mechanism	wall jet	line vortex
erosion characteristics	sheet erosion	vortex erosion
scour direction	downstream	upstream
scour quantity	large	small
scour intensity	strong	not so strong
scour depth	linearity	deceleration

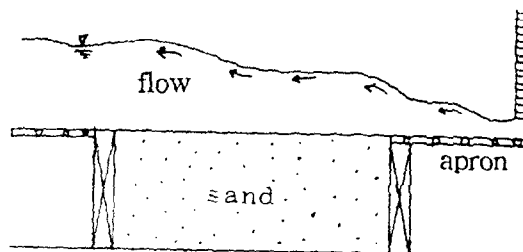


Fig. 3 Experimental arrangement

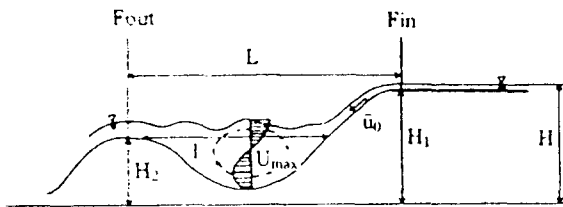


Fig. 4. Definition sketch for energy conservation method

Table 2. Summary of hydraulic conditions

run no.	h_0 (cm)	\bar{u}_0 (cm/sec)	H (cm)	H_2 (cm)	V_2 (cm/sec)	u_{max} (cm/sec)	L (cm)	u_s (cm/sec)
R1	0.5	75	10.4	7.2	70.5	25.2	41.14	4.35
R2	0.7	105	10.6	7.2	73.5	31.5	41.14	4.83
R3	1.0	120	11.1	7.2	80.0	33.1	41.14	5.65
R4	1.2	132	11.4	7.2	83.4	32.6	41.14	6.36
R5	1.5	145	11.8	7.2	87.0	35.2	41.14	7.01
R6	2.0	154	12.2	7.2	90.6	37.3	41.14	8.91
R7	0.5	81	11.5	7.2	84.3	31.2	37.20	4.05
R8	1.0	122	12.0	7.2	90.3	34.3	37.20	6.15

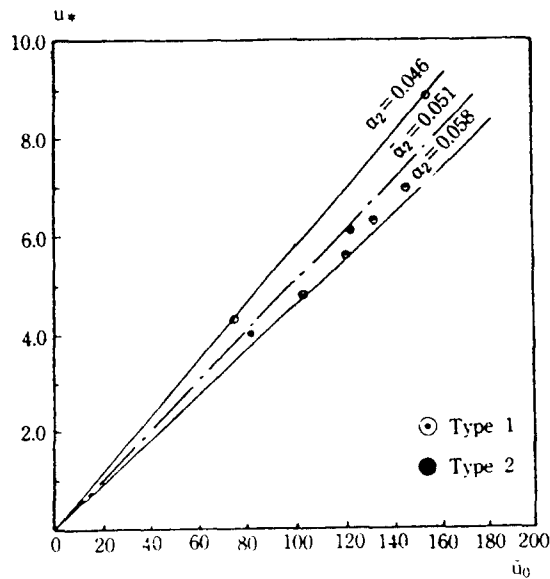


Fig. 5. Relation between \bar{u}_0 and u_s .

(13)의 좌변은 揚力, 우변은 抗力을 나타내며, 따라서 식(13)은 河床粒子가 움직이기 시작하는 초기조건을 의미한다.

C_D 는 항력계수로서,

$$C_D = 2 + 24\nu/wd \text{ ----- (15)}$$

로 표시되며 이때 w 는 입자의 沈降速度, d 는 입자의 直徑이다.

$S_1(a)$ 는 세굴공 a 지점에서 傾斜를 말하며, a_0 는

$$a_0 = w/u_0 \text{ ----- (16)}$$

C_L 은 양력계수이다.

無次元 세굴량을 E_s 라고 하면,

$$E_s = \frac{q_s}{\sigma w l_{12} S_1(a)} \text{ ----- (17)}$$

여기서 σ 는 입자의 비중, l_{12} 는 1, 2점간 거리이다.

무차원 세굴량 E_s 를 무차원 변수

$$\mu = u_0/w (= \frac{1}{a_0}) \text{ ----- (18)}$$

및 粒子 레이놀즈 수

$$R_p = d\sqrt{\sigma gd} / \nu \text{ ----- (19)}$$

로 나타내면 Fig. 6 과 같다. 여기서 직선식은 Akiyama 와 Fukushima (1986)의 실험 결과치이다. 이들에 의하면 E_s 는 R_p 의 제곱근과 일정관계를 가지고 있으며, 따라서 E_s 는 식(20)으로 표시되는 변수

$$Z = \mu R_p^{0.5} \text{ ----- (20)}$$

로 나타낼 수 있다. Fig. 7은 식(20)에 의한 결과를 나타내고 있다. Fig.7을 보면 E_s 와 Z 와는 급한 경사를 보이고 있는데 이는 세굴공 내의 vortex의 強度가 세다는 것을 의미한다.

또한 본 연구의 결과치가 Itakura와 Kishi(1980)의 결과치와 같은 형태를 이루는데 이는 본 연구와 같은 이론에서 얻은 결과이기 때문이다. 대체적으로 본 연구에서 얻은 결과치가 다른 결과치와 비교하여 볼때 마찰속도가 낮은 값에서는 세굴량이 크고 높은 마찰속도일 경우 세굴량이 낮음을 알 수 있는데 이는,

- ① 세굴공 내부에서 발생하는 vortex가 sand ripple 후면에서 발생하는 vortex에 비해 큰 난류성(macroturbulent)을 지니며, vortex의 수직속도 성분이 강하고 연속적으로(strong and continuous) 발생되기 때문이고,
- ② 마찰속도가 어느정도 커진후 세굴공내에서 농도가 높아지면 세굴량 발생에 역

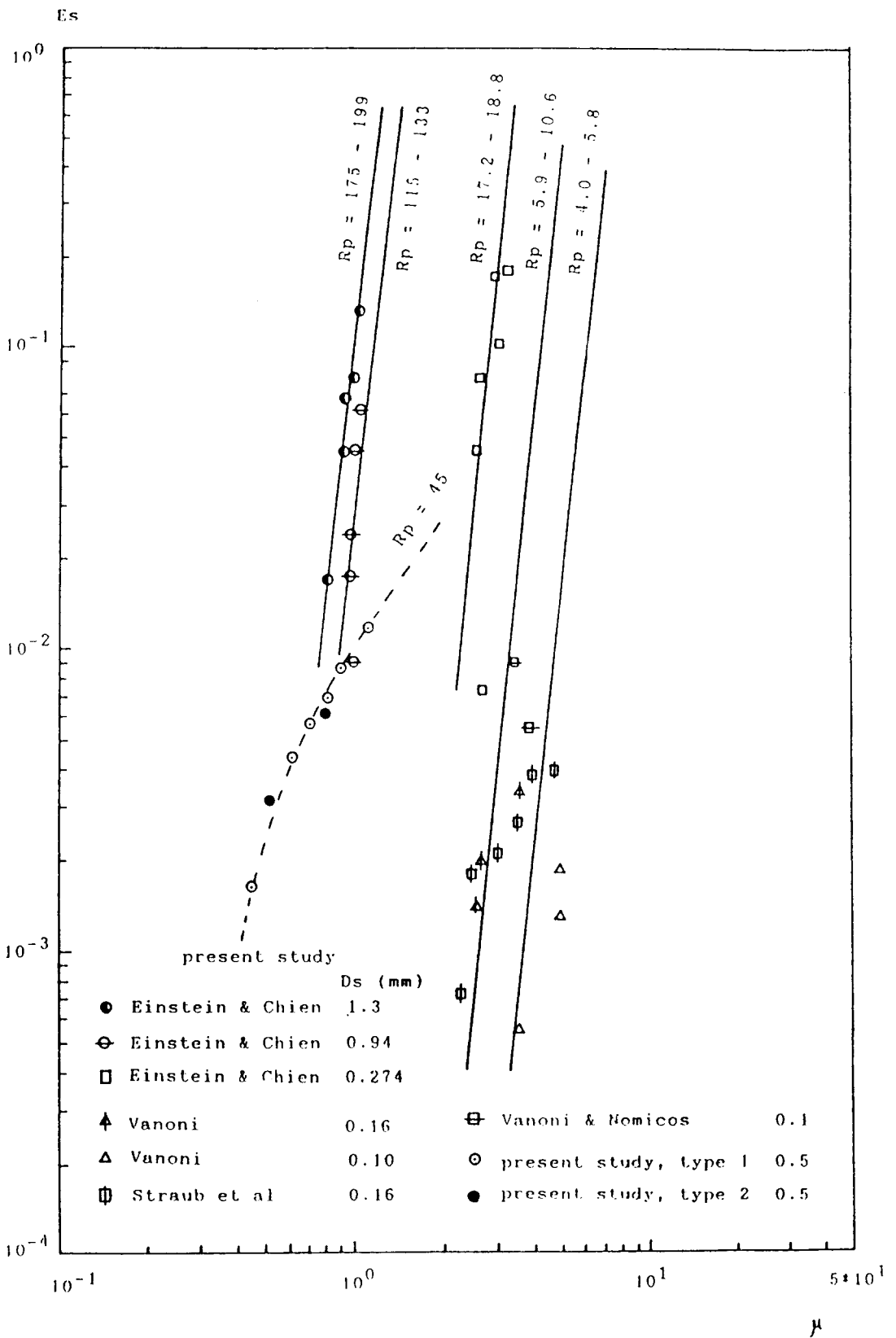


Fig. 6. Entrainment rate as a function of nondimensional friction velocity with second parameter of particle Reynolds number

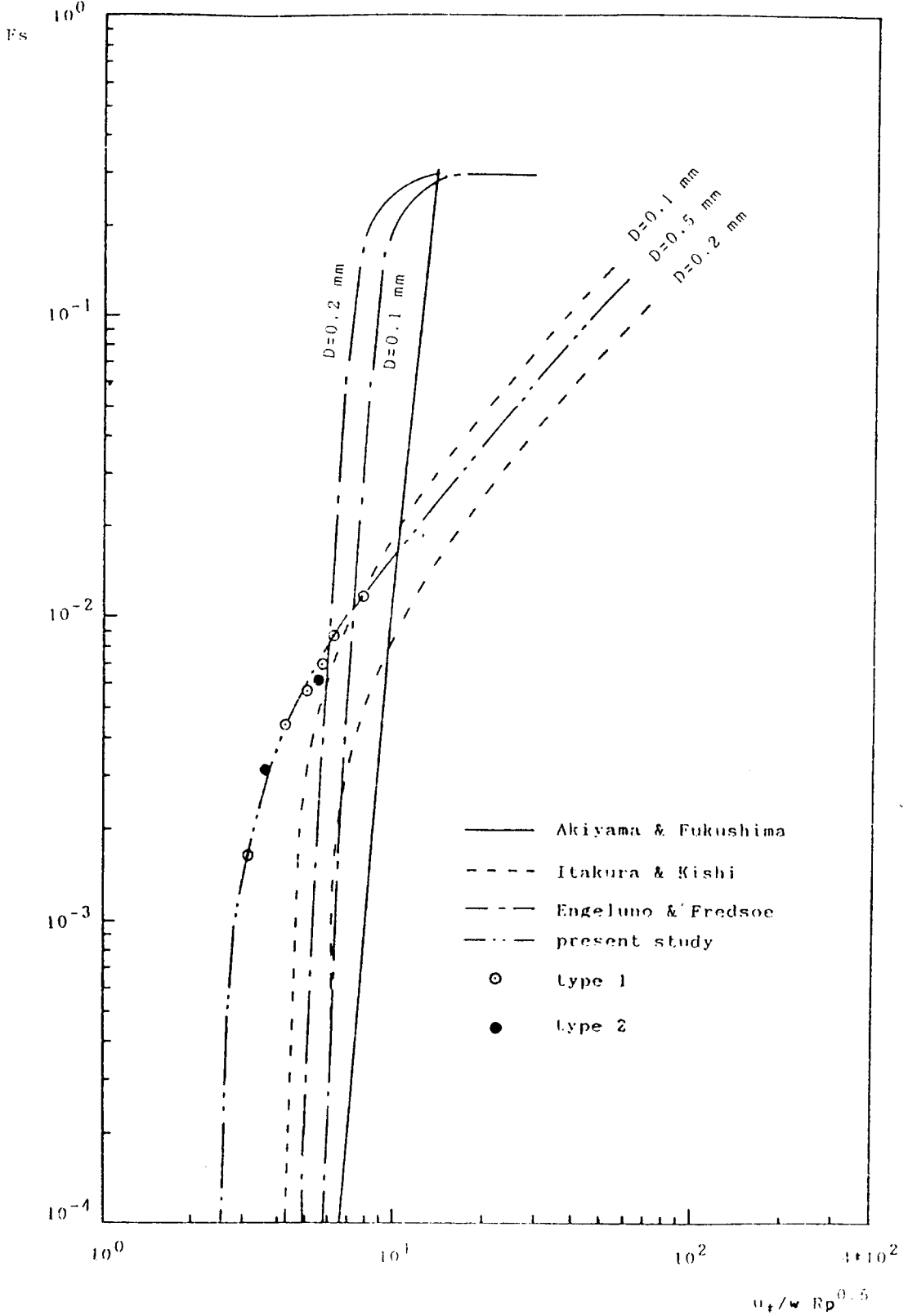


Fig. 7 Entrainment rate as a function of similarity variable with second parameter of sand diameter

효과를 주는 것이기 때문인것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 水理構造物 하류부의 vortex에 의해 생기는 洗掘孔내의 마찰속도를 에너지 보존법칙에 의해 구하였고, 주어진 마찰속도에 의해 揚力이 正規分布를 따르며 연속적으로 일어난다는 가정하에 洗掘量을 정량적으로 산정하였다. 또한 수리구조물 하류부에서 발생하는 vortex는 河川의 sand ripple 後面에서 발생하는 vortex에 비해 強度가 세고 끊임없이 발생하는 macroturbulence를 지니고 있음을 알았다. 洗掘孔내의 마찰속도를 apron 끝단의 유속으로 나타낼 수 있다는 것이 실험에 의해 규명되었으므로 배수갑문이나 보의 문비 開放高에 따른 호상공 하류단의 洗掘量을 산정할 수 있다.

참고문헌

- (1) 金鎭洪, "水理構造物 下流部에서의 vortex 特性에 관한 實驗的 研究", 제 34회 水工學 研究 發表會, 1992.
- (2) 金鎭洪, "洗掘孔 内部에서의 vortex와 摩擦速度에 관한 特性", 韓國農工學會誌 (英文) 34권, 1992.
- (3) Akiyama, J. and Fukushima, Y., "Entrainment of noncohesive bed sediment into suspension", Pro, 3rd Int. Symp. on River sedimentation, 1986.
- (4) Asaeda, T., "Sediment entrainment in channel with rippled bed", ASCE 115(3), 1989.
- (5) Itakura, T. and Kishi, T., "Open channel flow with suspended sediments", ASCE 106(8), 1980.