

〈論 文〉

水理構造物 下流部에서의 Vortex의 特性및 洗掘量 算定에 관한 研究  
 Study on Vortex Characteristics and Estimation of Vortex  
 Erosion at Downstream Part of Hydraulic Structure

金 鎮 洪\*

**Abstract** Characteristics of the vortex structure and the secondary scour at downstream part of the hydraulic structure such as drainage sluice or spillway were studied. Mean shear velocity in the scour hole could be derived by the theory of energy conservation and the amount of a vortex erosion could be obtained using entrainment equation for given value of a shear velocity. Comparison of erosion rates with others showed a large value at low shear velocity due to the continuous and strong upward flow of the macroturbulence different from the conventional vortex formed in the lee-side of a sand ripple. For a design purpose, if the flow depth at the end of an apron and the properties of bed material are given, the amount of vortex erosion can be known.

**요 지 :** 본 研究에서는 排水閘門, 深假 등의 水理構造物 下流部에서 발생되는 渦에 의한 2次洗掘의 물리적 특성을 규명하고, 渦의 평균 摩擦速度를 에너지 보존법칙에 의해 산출하였다. 또한 渦에 의해 발생되는 洗掘량을 摩擦速度에 의한 掃流力 및 난류에 의한 揚力の 향으로써 정량적으로 산출하였다. 분석 결과 水理構造物 下流部에서 발생되는 渦는 하천 砂洲 뒷면에서 발생되는 그것에 비해 강도가 세고 끊임없이 발생하는 대규모 난류성을 지니고 있음을 알 수 있었다. 또한 渦의 摩擦速度는 물받이 끝단의 유속으로 나타낼 수 있으며, 따라서 하상입자의 성질과 흐름의 유속을 알면 洗掘량을 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.

1. 序 論

排水閘門, 深假 등의 水理構造物 下流部에서는 越流 또는 門扉 개방에 따른 흐름의 유속이 매우 빠른 jet流가 발생되며, 이 흐름은 물받이를 지나 護床工 바닥을 타고 흐르는 높은 掃流力의 이른바 wall jet를 이룬다(金鎮洪, 1992a). 만약 護床工이 불완전하거나 門扉작동이 적절치 않을 경우 護床工 말단에서는 wall jet에 의한 1次洗掘이 발생된다. 1次洗掘 형태는 바닥의 일정한 두께가 떨어져 나가는 板狀浸蝕(sheet erosion)으로서 洗掘深은 시간에 따라 증가한다. 이때 洗掘 진행방향은 하류로 향하므로 構造物 안정에는 큰 영향을 미치지 않는다.

1次洗掘이 어느정도 진행되면 洗掘孔(scour hole)이 형성되고 洗掘孔 내부에는 線形渦(line vortex)가 발생되며, 線形渦에 의해 추가로 2次洗掘이 일어난다. 여기서 線形渦는 渦의 크기와 세기가 흐름의 횡단 방향으로 일정함을 뜻한다. 2次洗掘에 의해 洗掘孔은 점차 확대되며 洗掘孔 확대에 따라 線形渦도 점점 커지지만 강도는 점차 약해지고, 따라서 洗掘深은 증가속도가 둔화되며 이후 動的平衡 상태에 이르고 洗掘진행이 멈추게 된다. 그림 1과 표 1은 1次 및 2次洗掘의 물리적 특성을 나타내고 있다.

2次洗掘은 1次洗掘에 비해 洗掘량은 작지만 진행방향이 상류로 향하므로 構造物 안정에 영향을 미친다(金鎮洪, 1992b; 金鎮洪, 1993). 그림 2는 線形渦에 의한 2次洗掘이 발생된 후 생길 수 있는

\* 正회원, 광주대학교 토목공학과 전임강사

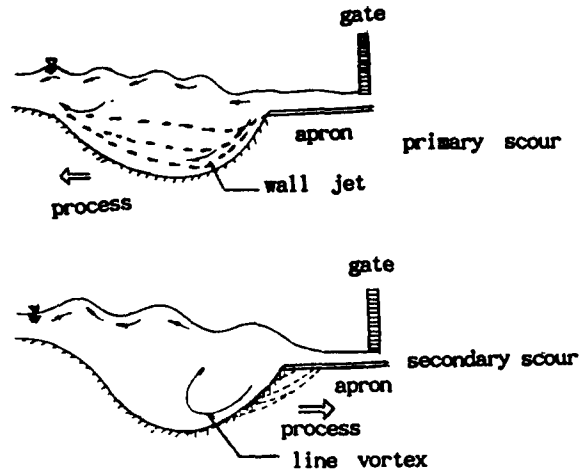


Fig. 1 Comparison between primary scour and secondary scour

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

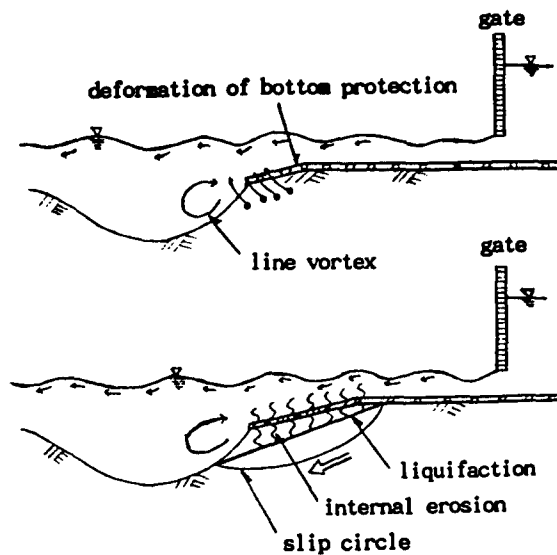


Fig. 2 Characteristics of secondary scour due to line vortex

구조적 파괴 양상을 보여주고 있다. 線形渦에 의해 護床工 말단 바닥에서 内部洗掘이 먼저 발생된 후 지반이 液化狀態에 이르고, 결국은 滑動破壞에 의해 지반 洗掘이 발생되고 護床工 변형과 그에 따른 構造物 파괴가 예상된다. 따라서 構造物 안정을 위해서는 1次洗掘까지만 허용되는 護床工 대책을 마련해야 한다.

본 研究에서는 構造物 안정에 영향을 미치는 2次洗掘(護床工 바닥을 파고 들어오기 전 까지의 상태)을 정량적으로 산출하는 방법을 제시하고, 이를 실험결과와 비교함으로써 水門開放에 따른 2次洗掘량을 실험 자료치에 의해 손쉽게 구할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 洗掘量 算定에 관한 理論的 接近

2.1 洗掘孔에서의 平均 摩擦速度 算定

2次洗掘량을 얻기 위해서는 洗掘孔 내부의 線形渦에 대한 平均 摩擦速度를 알아야 한다. 平均 摩擦速度는 그림3에 나타난 바와 같이 洗掘孔 입구와 출구 사이에서의 에너지 보존법칙에 의해 산정할 수 있다.

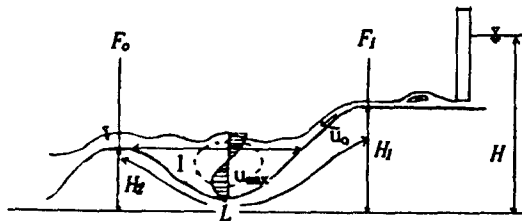


Fig. 3 Definition sketch for energy conservation method

여기서  $H$ 는 기준면에서 상류수위까지의 높이,  $H_1$ 은 물받이의 높이,  $H_2$ 는 洗掘孔 後面에 생긴 背斜構造 형태 (낙타의 肉峰과 같이 생겨 hump crest라고 함)의 높이,  $u_0$ 는 물받이 끝단의 평균유속,  $u$ 는 洗掘孔에서의 線形渦의 유속,  $u_{max}$ 은 線形渦의 최대유속이며  $L$ 은 支配斷面의 洗掘孔 바닥을 따르는 길이를 나타낸다. 그림 3에서 단면 1로 들어오는 에너지 유입량(energy influx)과 단면 2

에서 나가는 에너지 유출량(energy efflux)의 단위폭당 단위시간당 차이는 洗掘孔에서 형성된 線形渦의 운동에너지, 洗掘孔 바닥과의 마찰에 의한 에너지 소모량 및 洗掘孔에서 亂流流動에 따른 에너지 소모량의 단위폭당 단위시간당 합과 같다. 즉,

$$F_1 - F_0 = \partial(E_v + E_f) \partial t + E_f / \text{time} \quad (1)$$

여기서  $F_1$ 는 단위시간당 단위폭당 에너지 유입량으로서 상류수위의 위치에너지 또는 단면 1의 위치에너지와 운동에너지의 합이며,  $F_0$ 는 단위시간당 단위폭당 에너지 유출량으로서 단면 2에서의 위치에너지 및 운동에너지의 합으로 표시된다. 즉,

$$\begin{aligned} F_1 &= \rho q g H = \rho q g (H_1 + u_0^2 / 2g) \\ F_0 &= \rho q g (H_2 + V_2^2 / 2g) \end{aligned} \quad (2)$$

$E_v$ 는 洗掘孔 내부의 단위폭당 線形渦의 운동에너지이며  $\partial E_v / \partial t$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$\partial E_v / \partial t = \frac{\rho}{V/Q} \int \frac{u^2}{2} dA \quad (3)$$

$E_f$ 은 洗掘孔 바닥과의 마찰에 의한 단위폭당 에너지 소모량으로서 물받이 끝단의 유속이 洗掘孔 내부의 線形渦의 최대유속과 같다는 가정하에 다음 식이 성립된다.

$$E_f / \text{time} = \frac{\tau}{\rho} L u_{max} \quad (4)$$

한편 洗掘孔 내부에서 난류 유동에 의한 에너지 소모량  $E_f$ 는 마찰에 의한 에너지 소모량에 비해 작으므로 무시할 수 있다. 따라서,

$$\begin{aligned} F_1 - F_0 &= \partial E_v / \partial t + E_f / \text{time} \\ &= \rho q g (H_1 + \frac{u_0^2}{2g}) - \rho q g (H_2 + \frac{V_2^2}{2g}) \\ &= \frac{\rho}{V/Q} \int \frac{u^2}{2} dA + \frac{\tau}{\rho} L u_{max} \\ \therefore \frac{\tau}{\rho} (= u_*^2) &= \end{aligned}$$

$$\frac{\rho q g (H_1 + \frac{u_o^2}{2g} H_2 - \frac{V_2^2}{2g}) - \rho \frac{Q}{V} \int \frac{u^2}{2} dA}{Lu_{max}} = \frac{\rho q g (H_1 + \frac{u_o^2}{2g} H_2 - \frac{V_2^2}{2g}) - \rho q \int \frac{u^2}{2} \frac{dA}{A}}{Lu_{max}} \quad (5)$$

여기서  $q$ 는 단위폭당 유량,  $Q$ 는 유량이며,  $V$ 는 線形渦의 체적,  $A$ 는 線形渦의 면적,  $t$ 은 단면 1, 2사이의 洗掘孔 바닥을 타고 흐르는 시간,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\tau$ 는 유체의 전단력을 의미한다.

2.2 關聯 外部變數를 이용한 平均 摩擦速度 算定

식(5)를 이용하여 洗掘孔 내부의 平均 摩擦速度를 구하기란 절차가 까다롭다. 따라서 平均 摩擦速度를 관련된 외부변수(outer parameter)로써 나타내면 상당히 편리하다.

Ikeda와 Asaeda(1983)에 의하면 난류속도의 平均 수직성분  $W$ 와 흐름방향의 平均유속  $U$ 와는 다음 식으로 표시된다고 하였다.

$$W = \beta U \quad (6)$$

여기서  $\beta$ 는 비례계수로서 0.23~0.46의 값을 가진다.

한편 平均 摩擦速度의 값은 砂洲의 trailing ridge 근처에서의 수직 난류 변동속도 성분과 같으므로,

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

砂洲 바닥에서 측정된 실험치에 의하면 (Ikeda and Asaeda, 1983),

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

따라서 식 (7)은,

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

와 같이 된다. 상기 결과에 의하면 물받이 끝단의 平均유속  $u_o$ 와 洗掘孔 내부의 平均 摩擦速度  $u_*$ 와는 일정한 관계가 있음을 짐작할 수 있다. 즉,

$$u_* = \alpha_2 u_o \quad (10)$$

2.3 線形渦에 의한 洗掘量 算定

Asaeda(1989)는 砂洲 뒷면에서 渦에 의해 河床粒子가 뜨는 현상을 발견하고 이를 그림 4와 같이 線形渦로 단순 가정하여 洗掘量 산정공식을 발표하였다.

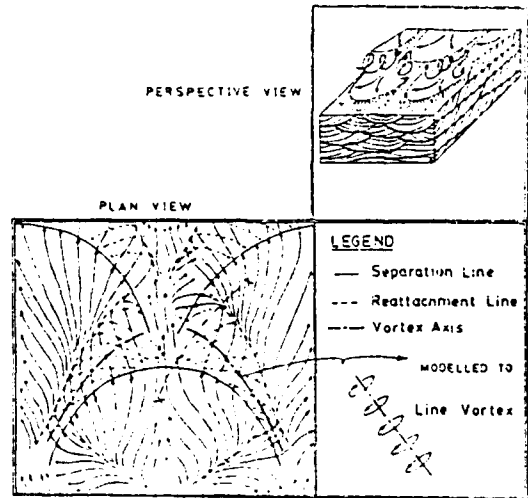


Fig. 4 Typical bottom streamlines in rippled bed

그의 공식을 본 研究에 적용하면 洗掘孔 내부에서 線形渦에 의해 생기는 단위폭당, 단위시간당 洗掘量은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_s = \frac{2}{3} \rho K \sqrt{\frac{6}{\pi}(s+1)} u_* \int_{a_1}^{a_2} \int_{\eta_0}^{\infty} \sqrt{\frac{\pi}{4}} C_1 \eta - \frac{\pi}{8} C_0 a_0^2 S_1(a) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) d\eta da \quad (11)$$

여기서  $a_1, a_2$ 는 洗掘孔에서 洗掘이 발생하는 부분의 始點과 終點 위치를 나타내며,  $S_l(a)$ 는 洗掘이 발생하는 어느 한 지점  $a(a_1, a_2$ 의 범위 내에 위치)에서의 경사를 나타낸다.  $u$ 는 洗掘孔 내부의 평균 摩擽速度로서 식 (5)에 의해 구할 수 있다. 변수  $K$ 는 洗掘孔 바닥에 있는 전체 하상입자와 洗掘되는 하상입자와의 비율을 나타내며 Ashida와 Fujita(1986)에 의하면,

$$K = (0.5)^n, n = 4.75 \quad (12)$$

$s$ 는 입자의 水中 비중이고  $\eta$ 는 揚力(lift force)을 나타내며, 이 때  $\eta$ 는 正規分布를 따른다.  $\eta_0$ 는 하상입자가 洗掘되기 시작하였을 때에 해당되는 양력으로서 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\pi}{4} C_l \eta_0 = \frac{\pi}{8} C_D a_0^2 S_l(a) \quad (13)$$

$$\eta_0 = \pi 8 C_D S_l(a) \frac{4a_0^2}{\pi C_l} \quad (14)$$

식(13)의 좌변은 揚力, 우변은 抗力을 나타내며, 따라서 식(13)은 하상입자가 움직이기 시작하는 초기조건을 의미한다.  $C_D$ 는 항력계수로서,

$$C_D = 2 + 24\nu/\omega d \quad (15)$$

로 표시되며,  $\omega$ 는 입자의 沈降速度,  $d$ 는 입자의 직경이다.  $a_0$ 는 입자의 침강속도와 渦의 摩擽速度와의 비율로서,

$$a_0 = \omega/u. \quad (16)$$

로 표시되고  $C_l$ 는 양력계수이다.

식 (11)에 의한  $q_s$ 를 무차원화 하기 위해 입자의 침강을 고려한 가상 침강량을 생각할 수 있으며, 洗掘量을 가상 침강량으로 나누면 무차원 세굴량  $E_s$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$E_s = \frac{q_s}{\sigma \omega l_{12} S_l(a)} \quad (17)$$

여기서  $\sigma$ 는 하상입자의 비중,  $l_{12}$ 는  $a_1, a_2$  사이의 거리를 나타낸다.

### 3. 實驗裝置 및 方法

#### 3.1 固定床 實驗

洗掘孔 내부에서 2次洗掘의 주 원인이 되는 線形渦의 평균 摩擽速度를 산정하기 위해 構造物 하류에서 1次洗掘에 따른 洗掘孔 형태를 그림 3과 같이 시멘트 몰탈로 재현시키고 상류로부터 放流에 의해 생기는 線形渦의 流速場을 흐름의 가시화법에 의해 측정하였다. 실험은 길이 10m 폭 30cm의 循環水路에서 실시하였으며 실험순서는 다음과 같다 (金鎮洪, 1992a).

- 1) 알루미늄 입자를 中性洗劑와 잘 섞어 비중 1.0에 가깝도록 혼합액을 만든다.
- 2) 혼합액을 수로 入口部에 흘려 보낸다.
- 3) 입자가 그리는 流線을 모타 장착된 카메라를 이용하여 사진촬영을 한다.
- 4) 흐름을 명확히 관찰, 측정하기 위해 주위를 어둡게 하고 slide projector와 light sheet를 이용한다.
- 5) 유속은 알루미늄 입자 길이를 카메라의 노출시간으로 나눔으로써 구할 수 있다.
- 6) slit의 폭과 노출시간은 알루미늄 입자의 농도와 속도를 고려하여 결정한다. 試算에 의해 0.5~0.7mm의 slit폭과 1/15~1/30초의 노출시간이 유속장을 관찰하기 적절한 값으로 나타났다.
- 7) 洗掘진행에 따른 洗掘孔의 변화 형태를 시멘트 몰탈로 재차 성형시킨 후 1)~6)의 과정을 되풀이 한다.

상기 절차에 의해 線形渦의 면적  $A$ 와 유속장  $u$  및  $u_{max}$ 를 구할 수 있으며 따라서 식(5)의 摩擽速度를 구할 수 있다.

#### 3.2 移動床 實驗

線形渦에 의한 洗掘量을 산정하기 위해 길이 10m 폭 30cm의 循環수로에서 이동상 실험을 실시

하였다. 그림 5와 같이 排水閘門 下流部에 일정 두께만큼 모래를 포설하고 수로 측벽에는 가로, 세로 1cm씩의 격자 눈금이 매겨진 투명 아크릴판을 부착하여 시간에 따른 洗掘孔의 형상 변화량을 측정함으로써 洗掘량을 정량적으로 알 수 있도록 하였다.

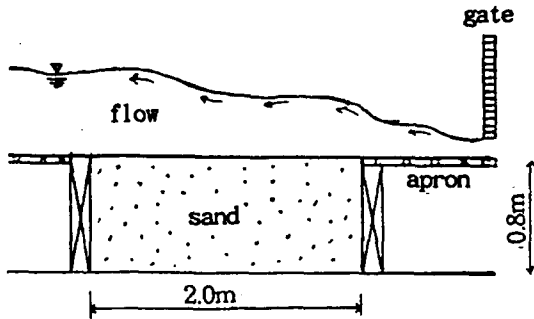


Fig. 5 Experimental arrangement

洗掘속도가 비교적 빠르므로 캠코더와 시각이 기록되는 V.C.R을 이용하여 洗掘 진행과정을 0.1초 간격으로 비데오테이프에 녹화하였다. 洗掘 진행과정을 좀 더 명확히 관찰하기 위해 강한 조명을 비추고 빛의 반사를 막기 위해 수로 측벽 뒷면에 검정색의 불투명판을 부착하였다. 비데오테이프에 기록된 洗掘 진행과정을 느린 속도로 재생시켜 관측하여 wall jet에 의한 1次洗掘이 진행되고 난 후, 線形渦가 발생되고 洗掘 진행과정이 上流로 향하는 순간을 2次洗掘 발생 시점으로 간주하여 洗掘 진

행과정을 매 5초 간격으로 읽음으로써 2次洗掘량을 계산할 수 있도록 하였다.

#### 4. 實驗結課 및 分析

식(5)에 있는 諸般 물리량을 측정된 결과치 및 이들 값에 의해 산출되는 洗掘孔 내부의 線形渦의 평균 摩擦速度의 값은 표 2에 나타나 있다.

여기서  $h_0$ 는 물받이 끝단의 수심을 나타내며, 단위폭당 유량  $q$ 는 물받이 끝단의 수심  $h_0$ 와 평균유속  $\bar{u}_0$ 를 곱하여 산정한다. 식(10)에 따른 물받이 끝단의 평균유속과 線形渦의 평균 摩擦速度와의 관계는 그림 6에 나타나 있다.

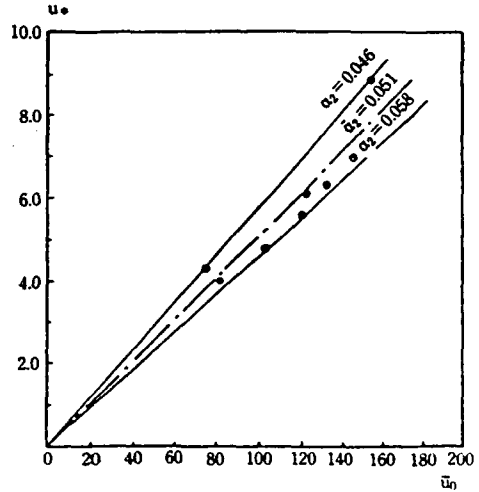


Fig. 6 Relation between  $\bar{u}_0$  and  $u_*$ .

Table 2. Summary of experimental results

run no	$h_0$ (cm)	$u_0$ (cm/sec)	$H_1$ (cm)	$H_2$ (cm)	$v_2$ (cm/sec)	$u_{max}$ (cm/sec)	$L$ (cm)	$u_*$ (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

좋은 상관관계를 알 수 있으며 비례계수는  $\alpha_2 = 0.046 \sim 0.058$ 로서 평균 0.051의 값을 나타내고 있는데, 따라서 물반이 끝단의 유속을 알면 洗掘孔 내부의 평균 摩擦速度를 구할 수 있다.

한편 식(17)의 무차원 洗掘量  $E_s$ 를 무차원 摩擦速度

$$\mu = u_* / \omega (= 1/a_0) \quad (18)$$

및 입자 레이놀즈 수

$$R_p = d\sqrt{\sigma g d} / \nu \quad (19)$$

로 나타내면 그림 7과 같다. 여기서 직선식은 Akiyama와 Fukushima (1986)의 이론 결과치이다. 그림 7에 의해 洗掘孔 내부의 線形渦의 摩擦速度와 하상입자의 성질(입자의 직경, 밀도)을 알면 2次洗掘量을 산정할 수 있다.

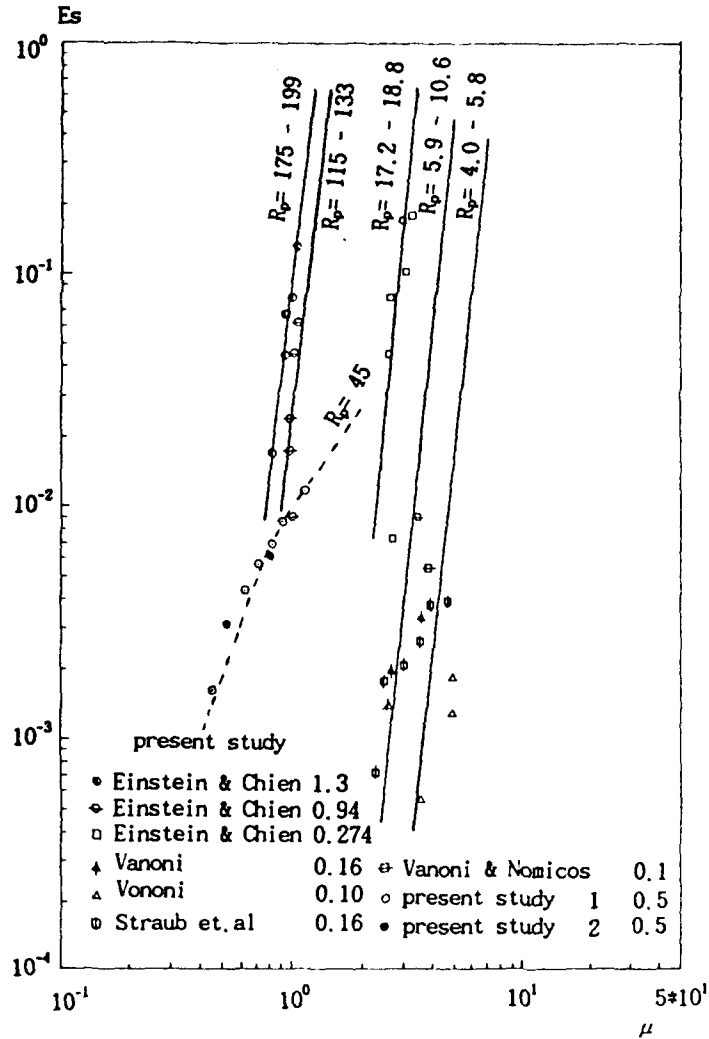


Fig. 7 Entrainment rate as a function of nondimensional friction velocity with second parameter of particle Reynolds number

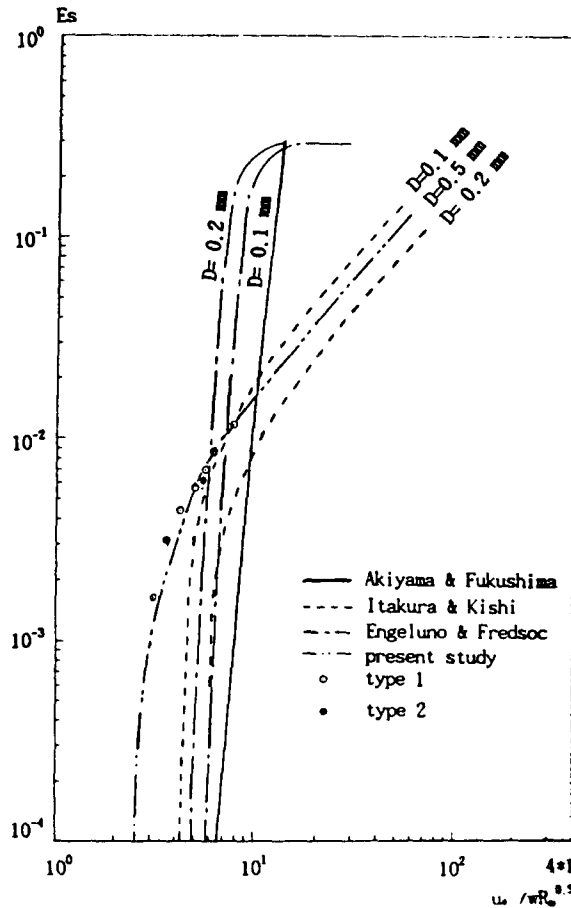


Fig. 8 Entrainment rate as a function of similarity variable with second parameter of sand diameter

한편 Akiyama와 Fukushima(1986)에 의하면  $\mu$  는  $R_p$ 의 제곱근과 일정관계를 가지고 있으며, 따라서 무차원 洗掘量  $E_s$ 는 식 (20)으로 표시되는 변수

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

로 나타낼 수 있다고 하였다. 그림 8은 식(20)과 무차원 洗掘量과의 결과를 나타내고 있으며, 따라서 하상입자의 직경과 밀도 및 線形渦의 摩擦速度를 알면 2次洗掘量을 구할 수 있다.

그림 8을 보면  $E_s$ 와  $Z$ 와는 비교적 급한 경사를 보이고 있는데 이는 線形渦의 강도가 커짐에 따라

기하학적으로 커지는 洗掘力量을 지닌渦의 성질을 나타낸다고 볼 수 있다. 본 研究의 결과치가 Itakura와 Kishi(1980)의 결과치와 같은 형태를 이루는데 이는 그들의 실험조건이 흐름의 掃流력이 큰  $s=1/20 \sim 1/30$ 의 급경사 수로에서 실시한 것으로서, 본 研究에서 洗掘의 원인이 되는 線形渦의 掃流력이 큰 점과 유사한 상태이기 때문이다. 그림 7, 8을 보면 본 研究에서 얻은 결과치가 다른 결과치와 비교하여 摩擦速度가 낮은 값에서는 洗掘量이 크고 높은 摩擦速度에서는 洗掘量이 작음을 알 수 있는데 이는,

- 1) 洗掘孔 내부에서 발생되는渦가 砂洲 後面에서 발생되는渦에 비해 대규모의 난류 성



(macro turbulence)을 지니며, 渦의 수직속도 성분이 강하고 연속적으로(strong and continuous) 발생되기 때문이고,

- 2) 摩擦速度가 어느 정도 커진 후 洗掘孔 내에서 유사농도가 높아지면 洗掘量 발생에 오히려 역효과를 주기 때문인데 이는 유사농도가 큰 土石流에서 자주 나타나는 현상으로 알려져 있다 (Takahashi, 1981).

한편 본 研究에서 구한 무차원 洗掘量의 이론치가 실험치에 비해 약간 낮음을 알 수 있는데, 이는 고정상실험으로 구한 線形渦의 摩擦速度 값이 이동상실험의 값보다 작은 것도 한가지 이유가 될 수 있다. 고정상실험에 의한 摩擦速度 값을 이동상실험의 값으로 변환시키는 데는 흐름의 유속과 流砂濃度가 변수일 것으로 판단되며 추후 검토 대상이라고 생각한다.

상기 결과를 종합해 볼 때 물받이 끝단의 유속을 알면 2次洗掘量을 구할 수 있다. 물받이 끝단의 유속은 排水閘門의 門扉 개방고 및 내, 외 수위차를 알면 기존의 排水閘門 유량공식에서 구할 수 있다 (農林水産部, 1991). 따라서 2次洗掘量을 구하는 절차를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 水理 構造物의 門扉 개방고 및 내, 외 수위차를 알면 물받이 끝단의 유속을 배수갑문 유량공식으로 부터 구할 수 있다.
- 2) 그림 6에 의해 洗掘孔 내부의 평균 摩擦速度를 구할 수 있다.
- 3) 하상입자의 성질을 알면 그림 7, 8에 의해 2次洗掘量을 구할 수 있다.

## 5. 結 論

본 研究에서는 水理構造物 下流部の 渦에 의해 생기는 洗掘孔 내부의 평균 摩擦速度를 에너지 보존법칙에 의해 구하였고, 주어진 摩擦速度에 의해 양력이 정규분포를 따르며 연속적으로 일어난다는 가정하에 2次 洗掘量을 정량적으로 산출하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 水理構造物 下流部에서 발생하는 渦는 하천의 砂洲 후면에서 발생하는 渦에 비해 강도가 세고 연속적으로 발생하는 대규모 난류성을 지니

고 있음을 알 수 있었다.

- 2) 洗掘孔 내부의 摩擦速度는 물받이 끝단의 유속으로 표시될 수 있었다.
- 3) 水理構造物의 門扉 개방고와 내, 외 수위차를 알면 물받이 끝단의 유속을 알 수 있고 하상입자의 성질을 알면 構造物 下流部の 2次洗掘量을 산정할 수 있었다.

## 參 考 文 獻

1. 金鎮洪(1992a), “水理構造物 下流部에서의 vortex 特性에 관한 實驗的 研究”, 제 34 會 水工學 研究 發表會, pp.151-163.
2. 金鎮洪(1992b), “洗掘孔 內部에서의 vortex와 摩擦速度에 관한 特性”, 韓國農工學會誌(英文)34권, pp.45-59.
3. 金鎮洪(1993), “水理構造物 下流部에서 vortex에 의한 洗掘量 算定”, 제 35 會 水工學 研究 發表會, pp.97-106.
4. 農林水産部(1991), 農地改良事業設計基準, 海面干拓, pp.471-475.
5. Akiyama, J. and Fukushima, Y.(1986), “Entrainment of noncohesive bed sediment into suspension”, Pro. 3rd. Int. Symp. on River Sedimentation, pp.804-813.
6. Asaeda, T.(1989), “Sediment Entrainment in channel with rippled bed”, ASCE, HY 115(3), pp.327-339.
7. Ashida, K. and Fujita, M.(1986), “Stochastic model for particle suspension in open channels”, J. Hydrosoci. Hydr. Engrg., JSCE, 4(2), pp.21-46.
8. Ikeda, S. and Asaeda, T.(1983), “Sediment suspension with rippled bed”, ASCE, HY 109(3), pp.409-423.
9. Itakura, T. and Kishi, T.(1980), “Open channel flow with suspended sediments”, ASCE, HY 106(8), pp.1345-1352.
10. Takahashi, T.(1981), Debris flow, Ann. Rev. Fluid Mech., vol. 13, pp.57-77.