

## 〈論 文〉

## 掃流砂量에 關한 研究

A Study on the Bed-Load Transport Rate

姜 周 復\* 鄭 然 泰\*\* 金 元 圭\*\*\*

Kang, ju bok·Jeong, yeon tae·Kim, won gyu

## Abstract

A method is presented which enables the computation of the bed-load transport rate as the product of particle velocity and bed-load Concentration. In this study, it is assumed that particle velocity is proportional to the flow velocity near the particle and the appearance frequency of the component of the fluctuating velocity of turbulent flow close to bed is normally distributed, and the particle velocity is expressed by mean flow velocity near the particle and the function of bed shear stress. Engelund formula, which is checked indirectly to be proper to use in this study, is employed to estimate the effective shear velocity. And the effective bed shear stress acting on particle is obtained by that shear velocity. Ashida-Michiue's formula is used to get the concentration of bed-load. Experimental data for bed-load is compared with the results of other studies and the transport formula suggested in this paper gives results which are in good accordance with other's experimental data excepting the results obtained the case of comparatively small bed shear stress.

## 要 旨

掃流砂의 粒子移動速度와 掃流砂濃度의 곱으로 掃流砂量을 계산할 수 있는 한 방법이 제시되었다. 本 研究에서 砂粒의 平均移動速度는 河床附近의 流速亂流成分의 出現빈도가 정규분포 한다고 가정하고, 粒子移動速度를 掃流力의 함수와 河床附近의 平均流速의 곱으로 나타내었다. 掃流砂에 有效하게 作用하는 掃流力을 구하기 위해서 Engelund가 제시한 식을 사용하여 有效摩擦速度를 구하였으며 Engelund가 제시한 식의 적합성을 간접적으로 검증했다. 掃流砂濃度를 구하기 위해서 芦田·道上의 식을 사용하였다. 실험자료는 타 연구자들의 식과 비교되었으며 타 연구자들의 식과 비슷한 경향을 나타내었다. 掃流力이 비교적 작은 경우를 제외하고 제시된 식에서 계산된 결과와 타 연구자들의 자료는 잘 一致하였다.

\*\*\*부산대학교 공과대학교수

\*\*부산대학교 대학원 토목공학과

\*부산대학교 대학원 토목공학과

## 1. 序 論

산지붕괴나 지면침식에 의하여 土砂가 생성되고 생성된 土砂는 河道로 유입되어 하류로 이동하게 된다. 流水에 의하여 수송되는 流砂의 시간적, 공간적 불균형에 의하여 河床 및 河岸의 변동, 댐 상류의 河床上昇에 의한 유효저수량 감소, 댐 하류의 河床低下, 河口附近的 지형변동 및 河口閉塞, 河口港의 매물 등 여러 문제가 발생하게 되므로 합리적인 治水 및 利水計劃을 위해서 流砂에 대한 대책을 講究해야 한다.

流砂는 수송형식에 따라 掃流砂와 浮流砂로 대별할 수 있으나 운동영역을 想定해서 획일적으로 구분하고 있을 뿐 각각의 정의가 명확치 않다. 대부분의 경우 摩擦速度가 砂粒이 운동을 시작하는 한계값을 초과할 때 活動이나 轉動하게 된다. 摩擦速度가 더욱 증가하면 砂粒은 跳躍하고 粒子의 침강속도를 초과할 때 上方向 亂流力에 의하여 그 粒子는 浮流砂로 되며 일반적으로 轉動, 活動, 또는 河床에 沿하여 跳躍하며 移動하는 砂粒을 掃流砂라 한다.<sup>1)</sup>

從來 河道의 안정문제를 다루는데 있어서 지배적인 역할을 하는 掃流砂에 대한 연구는 1879년 Du Boys의 연구를 발단으로 많은 연구자들에 의하여 실험적, 이론적으로 연구되어 많은 掃流砂量式이 제안되어 왔다. 掃流砂의 운동은 流水와 河床의 境界近傍 극히 얇은 층에서 발생하는 복잡한 현상이기 때문에 流砂 運動機構의 모델化나 次元解析의인 방법에 의해서 流砂量式이 유도되어 왔으며 여러 모델에 의한 많은 연구에 의해서 掃流砂量의 특성을 나타내는 파라메타(parameter)는 대부분 밝혀졌다고 할 수 있으나 이들 모델 중 어느 것이 실제의 流砂機構에 대해서 적합성이 좋은가는 말하기 어렵다.<sup>2)</sup> 특히 流砂에 의하여 河床波가 발생하게 되므로 河床波에 의한 抵抗의 영향을 어떻게 모델화 하는 가에 대해서도 통일된 이론이 없으며 砂粒의 혼합특성에 따라 流砂量에 많은 오차가 발생하게 되므로 합리적이고 경제적인 治水 및 利水計劃을 위해서 보

편적으로 적용가능한 편리하고 精度높은 流砂量式이 필요하다.

本 研究는 河床變動解析의 기초단계로서 掃流層濃度는 Bagnold의 跳躍理論을 적용해서 구한 芦田·道上의 式을 이용하고, 砂粒의 평균 이동속도는 河床附近的 난류변동속도가 確率의으로 분포한다고 가정하여 河床附近的 유속과 掃流力의 함수로 표현하였으며 이들을 이용하여 掃流砂量式에 대한 함수형을 유도하고, 실험자료를 이용하여 掃流砂量式을 결정하였으며 타 연구자의 실험자료와 비교 검토하였다.

## 2. 掃流砂量

### 2.1. 有效掃流力

流砂의 이동으로 형성되는 河床底面의 형상은 여러 형태로 나타나게 되며 이들 형상이 底面의 抵抗要素로 작용하게 된다. 從來의 연구중 河床面의 全抵抗을 고려한 掃流砂量式이 제안되어 있으나 대부분의 경우 河床形狀에 의한 抵抗要素를 제외한 掃流力 즉, 실질적으로 掃流砂의 이동에 유효하게 작용하는 有效掃流力을 사용하고 있으며 有效掃流力을 어떻게 평가하느냐에 따라서 流砂量式의 精度가 결정된다고 할 수 있으므로 有效掃流力의 개념은 매우 중요하다고 할 수 있다.

河床波가 형성된 경우의 河床底面 全抵抗은 式(1)과 같이 砂粒에 의한 表面抵抗과 河床波에 의한 形狀抵抗으로 분리해서 취급할 수 있다.

$$\tau_o = \rho gRI = \tau_o' + \tau_o'' \quad (1)$$

여기서  $\tau_o$ 는 全抵抗,  $\tau_o'$ 는 砂粒抵抗,  $\tau_o''$ 는 形狀抵抗,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $R$ 은 경심,  $I$ 는 에너지경사이다.

Engelund<sup>3)</sup>는 2개의 역학적으로 相似한 흐름에 대해서 有效掃流力은 同一한 값을 가지며 河床波에 의한 단면의 확대손실은 전에너지 손실에 대해서 同一한 비율을 차지한다는 抵抗의 相似假設을 도입해서 無次元掃流力을 式(2)와 같이 無次元有效掃流力만의 함수로 나타내었으며

Guy-Simon-Richardson의 실험자료를 이용하여  $\tau_{*}$ 와  $\tau_{*e}$ 에 대한 관계식을 구하였다.

$$\tau_{*} = F(\tau_{*e}) \quad (2)$$

여기서,  $\tau_{*}$ 는 無次元掃流力( $\tau_{*} = \frac{u_{*}^2}{sgd}$ )  
 $\tau_{*e}$ 는 無次元有效掃流力( $\tau_{*e} = \tau_{*e}$ )

$$= \frac{R\Gamma}{sd}$$

$u_{*}$ 는 摩擦速度

$s$ 는 수중비중 ( $s = \rho_s / \rho \cdot 10$ )

$\rho_s$ 는 砂粒의 밀도

$d$ 는 砂粒徑

$u_{*e}$ 는 有效摩擦速度

$R$ 는 流砂에 有效하게 작용하는 徑深이다.

그는 式(2)의  $\tau_{*}$ 에 포함된  $R$ 를 구하기 위해서 式(3)을 제안하였다.

$$\frac{U}{u_{*e}} = \frac{U}{\sqrt{gR\Gamma}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left( \frac{R}{2d_{65}} \right) \quad (3)$$

여기서  $U$ 는 平均流速,  $d_{65}$ 는 砂粒徑이다.

本 研究에서는 河床形狀 위의 流速분포 측정결과 河床形狀 하류의 水流의 再附着點(reattachment point)에서 河床波 頂部까지의 流速분포는 거의 對數則에 따르고<sup>7)</sup> 相當粗度( $k_s$ )는 대부분의 경우  $2d_{65}$ 가 적합하다<sup>8)</sup> 는 점을 고려하여 式(3)에서 試算에 의해  $R$ 를 구하고 그 결과를 이용하여 式(4), 式(5)에서 有效摩擦速度 및 無次元有效掃流力을 구한다.

$$u_{*e} = \sqrt{gR\Gamma} \quad (4)$$

$$\tau_{*e} = \frac{u_{*e}^2}{sgd} \quad (5)$$

## 2.2. 掃流砂 平均移動速度

掃流砂의 平均移動速度는 河床附近의 流速에 비례한다고 가정하면 式(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{u}_s = b(u_b - u_c) \quad (6)$$

여기서  $u_b$ 는 河床面에서 砂粒의 오더(order)높이에서의 流速,  $u_c$ 는 砂粒이 이동하기 시작하는 限界移動速度,  $\bar{u}_s$ 는 砂粒의 平均 이동속도,  $b$ 는 상수이다. 河床附近에서의 흐름방향의 流速 난류 성분  $u'$ 의 出現빈도분포는 정규분포 한다고 생각하면 속도  $u$ 의 확률밀도함수  $f(u)$ 는 式(7)과 같다.

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

여기서  $\sigma^2$ 은 流速  $u$ 의 분산,  $\bar{u}$ 는 河床面에서 砂粒의 粒徑 오더높이의 平均流速이다.

式(6)에서  $b = 1$ 이라 가정하고 式(7)을 이용하면 砂粒의 平均 이동속도는 式(8)과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{u}_s = \frac{\int_{u_c}^{\infty} (u-u_c) f(u) du}{\int_{u_c}^{\infty} f(u) du} \quad (8)$$

式(7)을 式(8)에 代入하여 변형하면 式(9)가 된다.

$$\bar{u}_s = \bar{u} + \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{u_c}^{\infty} \frac{(u-\bar{u})}{\sigma} \exp\left[-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma^2}\right] du}{\int_{u_c}^{\infty} f(u) du} - \frac{\frac{u_c}{\sqrt{2\pi}} \int_{u_c}^{\infty} \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma^2}\right] du}{\int_{u_c}^{\infty} f(u) du} \quad (9)$$

式(9)에서  $\frac{u-u_c}{\sigma} = r$ 로 치환하고 변형하면 式(10)이 된다.

$$\bar{u}_s = \bar{u} \left[ 1 + \left( \frac{\sigma}{\bar{u}} \right) F_1 - \frac{u_c}{\bar{u}} \right] \quad (10)$$

여기서,  $F_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{r_c^2}{2}\right]$

$$F_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{r_c}^{\infty} \exp\left[-\frac{r^2}{2}\right] dr$$

$$r_c = \frac{u_c - u}{\sigma}$$

유속분포식중 對數分布式에서 河床附近的 유속은 摩擦速度에 비례하므로 限界摩擦速度를 구하면 式(10)의  $F_1, F_2$ 를 계산할 수 있고  $\frac{\sigma}{u}$ 는 상수로 나타낼 수 있으므로 式(10)은 式(11)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{u}_s &= \bar{u} \left[ 1 + \left( \frac{a}{u} \right) \frac{F_1}{F_2} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}}} \right] \\ &= \bar{u} F \left( \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $\tau_{*c}$ 는 無次元限界掃流力 ( $\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{sgd}$ )  
 $u_{*c}$ 는 限界摩擦速度이다.

吉川<sup>9)</sup>등은 실험 및 Laufer의 실험결과를 이용하여 유속의 표준편차와 평균유속의 비  $\frac{\sigma}{\bar{u}} = 0.4$ 로 결정하였다. 이를 式(11)에 代入하면  $F(\tau_{*c}/\tau_{*e})$ 의 값은 그림1.과 같다.

여기서,  $\tau_{*c}$ 의 계산은 Van Rijn<sup>14)</sup>이 Shields<sup>10)</sup> Diagram을 사용하기에 편리하도록 변형시킨 그림. 2를 사용하였다.

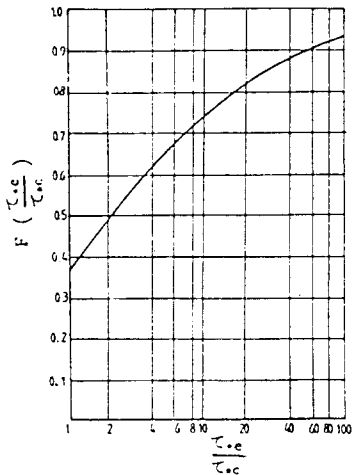


그림1.  $\tau_{*e}/\tau_{*c}$ 에 대한 함수  $F(\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}})$ 의 변화.

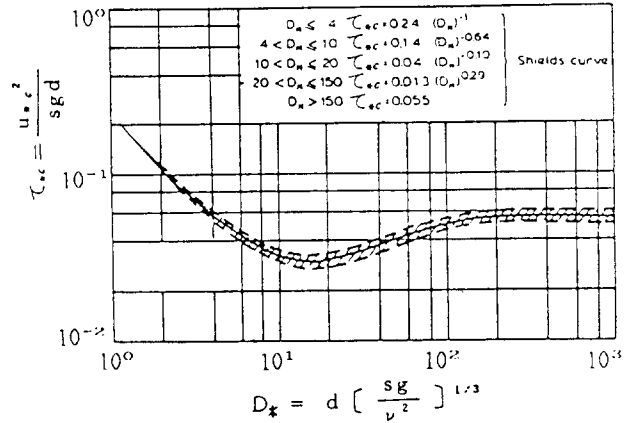


그림2. Shields에 의한 한계소류력 [Van Rijn. 1984]

### 2.3. 掃流砂量式

Bagnold<sup>3)</sup>는 粒子를 함유하는 흐름의 연구에서 다음의 假說이 성립함을 실험적으로 검증했다.

1) 全剪斷應力은 式(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_o = \tau_{os} + \tau_{of} \quad (12)$$

여기서  $\tau_o$ 는 全剪斷應力,  $\tau_{os}$ 는 粒子의 충돌에 의해서 생기는 剪斷應力,  $\tau_{of}$ 는 유체자신의 剪斷應力이다.

2) 유체중의 粒子 충돌에 의해서 鉛直應力  $\sigma_G$ 가 생기고  $\tau_{os}$ 와  $\sigma_G$ 의 관계는 式(13)과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_{os} = \sigma_G \mu_f \quad (13)$$

여기서,  $\mu_f$ 는 粒子의 動摩擦係數이다.

Bognold의 假說檢證과 流砂現狀과 비슷한 飛砂現狀에서 인정된 사실 즉, 有效剪斷應力이 流砂와 流體에 각각 전달되어 流砂濃度가 平衡상태에 있을 때는 河床面의 剪斷應力은 砂粒의 限界掃流力에 거의 가까운 값을 유지한다는 사실을 이용하여 芦田·道上<sup>11)</sup>은 有效剪斷應力을 式(14)과 같이 나타내었다.

$$\tau_e = \tau_s + k_1 \tau_c \quad (14)$$

여기서,  $\tau_e$ 는 有效剪斷應力,  $\tau_s$ 는 流砂 자신  
의 충돌과 流砂와 河床面과의 충돌에 의해서 생  
기는 河床面의 剪斷應力,  $\tau_c$ 는 砂粒의 移動限界  
摩擦應力,  $k_1$ 은 1에 가까운 비례정수이다.

또한 式(13)을 유추해서  $\tau_s$ 는 流砂重量의 연  
직성분과  $\mu_f$ 와의 관계를 式(15)와 같이 나타내  
었다.

$$\tau_s = V_* (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \text{Cos } \theta \cdot \mu_f \quad (15)$$

여기서,  $V_*$ 는 단위면적당의 流砂의 체적,  $\theta$ 는  
河床의 경사,  $\rho_s$ 는 砂粒의 밀도이다.

式(14)에서  $k_1 = 1$ 라 두고 式(15)에 代入하여  
 $V_*$ 를 구하면 式(16)이 된다.

$$V_* = \frac{\tau_e - \tau_c}{(\rho_s - \rho)g \cdot \text{Cos } \theta \cdot \mu_f} \quad (16)$$

掃流砂量은 流砂濃도와 砂粒移動速度의 곱의  
적분으로 나타낼 수 있으나 연직방향의 流砂濃도  
와 砂粒의 移動速度를 정확히 구할 수 없고 掃流  
砂는 河床의 얇은 층 내에서 운동하므로 式(17)  
과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_B = \int_0^{H_s} C(z) u_s(z) dz = V_* \bar{u}_s \quad (17)$$

여기서,  $H_s$ 는 掃流層의 두께,  $C(z)$ 는 河床에서  
 $z$  높이의 流砂濃도,  $q_B$ 는 단위폭당 掃流砂量이  
다.

대상으로 하는 흐름은 緩傾斜이므로  $\text{Cos } \theta \approx 1$   
이고 式(11), 式(16)을 式(17)에 代入하면 式

(18)이 된다.

$$q_B = V_* \bar{u}_s = \frac{\tau_e - \tau_c}{(\rho_s - \rho)g \mu_f} \bar{u} F\left(\frac{\tau_*^* e}{\tau_*^* c}\right) \quad (18)$$

河床面 粒徑오더높이의 평균유속이 有效摩擦  
速度에 비례한다고 가정하여 式(18)을 변형하면  
式(19)와 같이 된다.

$$q_B = \frac{K_2}{\mu_f} (\tau_*^* e - \tau_*^* c) u_*^* e d \cdot F\left(\frac{\tau_*^* e}{\tau_*^* c}\right) \quad (19)$$

式(19)의 양변에  $u_*^* e d$ 로 나누고  $\sqrt{\tau_*^* e}$ 를 곱  
하면 式(20)이 된다.

$$\Phi_B = \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = K_3 \tau_*^* e^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_*^* c}{\tau_*^* e}\right) F\left(\frac{\tau_*^* e}{\tau_*^* c}\right) \quad (20)$$

여기서,  $K_3$ 는 상수이며 실험에 의해서 결정할  
수 있다.

### 3. 實驗

그림3. 과 같은 경사를 자유로이 조절할 수 있  
는 길이 12m, 폭 90cm, 높이 60cm인 鋼鐵製矩形  
水路에 15~20cm 두께로 모래를 깔고 소정의 流  
量을 공급하여 等流가 될 때까지 流量과 경사를  
반복 조정하였다.

水路의 상류단과 하류단에는 河床을 일정한 높  
이로 유지하기 위하여 모래 두께와 같은 두께의  
목재를 부착하였으며 粗度の 급변에 의한 흐름의  
변화를 방지하기 위하여 목재의 윗면에 實驗砂와  
같은 粒徑의 모래를 부착하였다.

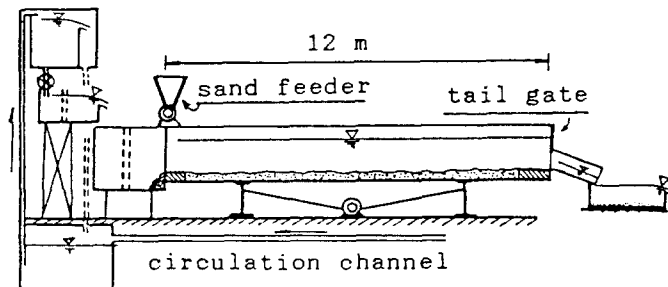


그림 3 실험장치

流砂 수송에 의한 河床의 底下를 방지하기 위하여 하류단에서 측정된 양의 모래를 상류단에 설치된 流砂供給機를 사용하여 공급하고 河床變動 및 水位의 變動이 거의 없을 때 1m 간격으로 水位를 5번 水面計로 측정하여 水面傾斜 계산자료로 사용하였으며 상류단에서 5m 하류 중앙부에서 微流速計로 유속을 측정하였다.

하류단 중앙부에 Guide Vanes를 설치하여 30cm 폭에 대한 유량만을 流砂採集槽에 유입시켜 流砂를 채취하였으며 사용된 砂粒徑은  $d$ 가 0.22, 0.34, 0.38, 0.45, 1.15mm인 5종류의 砂粒을 사용하였으며 砂粒徑에 대한 표준편차  $\sigma$ 는 1.3~1.9로 균일사에 가깝고 각 粒徑에 대해 약 20회 정도 실험을 행하였으며 실험조건의 범위는 표1과 같다.

표1. 실험조건

유속(u)	수심(H)	경사(I)	수온(T)	유량(q)
25~120 (cm/sec)	10~40 (cm)	1/2000~ 1/100	15~21 ( $^{\circ}$ C)	0.15~2. 5 (l/cm <sup>2</sup> ·sec)

#### 4. 實驗結果 및 考察

평균유속  $U$ 의 변화에 대한 摩擦速度  $u_*$ 의 변화는 그림4와 같다. 그림4에서 유속이 증가하면 摩擦速度도 증가하나 유속이 어느정도 이상이 되면 오히려 감소하는 경향이 있으며 이는 河床形狀의 변화에 의하여 抵抗이 변화하기 때문이라 생각된다. 그림5는 Vanoni-Brooks<sup>11)</sup>의 연구결과를 이용하여 측벽의 영향을 제거한 河床만의 摩擦係數 변화를 나타낸 것으로 유속의 증가에 따라 摩擦係數의 증감이 나타나게 되며 이도 河床形狀에 따라 河床抵抗이 다르게 나타나기 때문이다.

그림4와 그림5의 河床의 抵抗 변화에서 알 수 있듯이 河床形狀에 따라 抵抗이 변화하기 때문에 掃流砂量을 평가하기 위해서는 河床形狀에 의한 抵抗을 제외한 砂粒만의 抵抗 즉, 有效掃流力을 사용해야 됨을 알 수 있다.

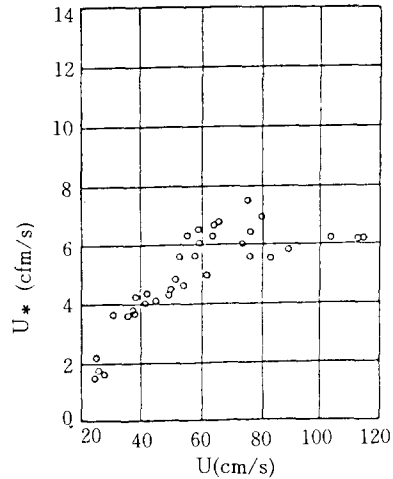


그림4. 유속에 대한 마찰속도의 변화

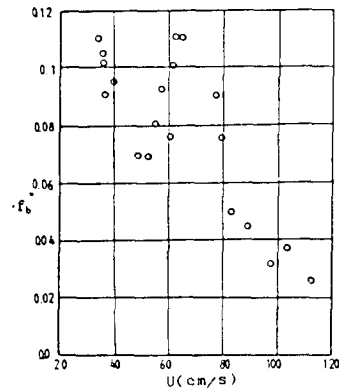


그림5. 유속에 대한 하상마찰계수의 변화

그림6은 각 실험조건에 대해서 摩擦速度를 구하고 이에 대해 여러 연구자들의 식을 이용하여 계산한 有效摩擦速度를 나타낸 것이다.  $u_*$ 가 동일하더라도 실험조건에 따라 서로 相異한  $u_{*c}$ 값이 계산되지만 同一한  $u_*$ 에 대해 대표적인  $u_{*c}$ 를 나타낸 것이며 연구자에 따라 相異한 값을 나타내고 있다. 특히  $u_*$ 값이 증가할 수록 有效摩擦速度의 값이 차이가 많이 나타난다. Shinohara-Tsubaki<sup>12)</sup>의 식에 의한  $u_{*c}$ 의 값은 다른 연구자의 값에 비하여 모든 경우의  $u_*$ 값에 대해 크게 나타난다. 이는 砂粒만의 抵抗은 과소하므로 全抵抗과 砂粒抵抗을 기하평균하여  $u_{*c}$

를 계산하기 때문에 크게 나타나는 것은 당연한 결과라고 생각된다. 芦田·道上의 식에 의한  $u_{*c}$  값은 대부분 다른 연구자들의 결과에 비해 작게 나타나며 이는 평탄하상의 실험결과만을 이용해서 數式化 하였기 때문이라 생각된다.

Engelund, Meyer-Peter-Müller<sup>13)</sup>, Van Rijn의 식에 의한  $u_{*c}$  값은 거의 비슷한 경향을 나타내고 있으며 특히 Engelund, Meyer-Peter-Müller에 의한  $u_{*c}$  값은  $u_*$ 의 값이 증가 할수록 서로 거의 같은 값을 나타내고 있다. 이들의 값은 Shinohara-Tsubaki, 芦田·道上의 중간정도의 값을 나타내고 있을 뿐만 아니라 前節 2.1에서 언급한 유속분포 및 砂粒의 相當粗度에 대한 타당성을 고려할 때 Engelund의 방법이  $u_{*c}$ 를 계산하는데 적절하다고 생각된다.

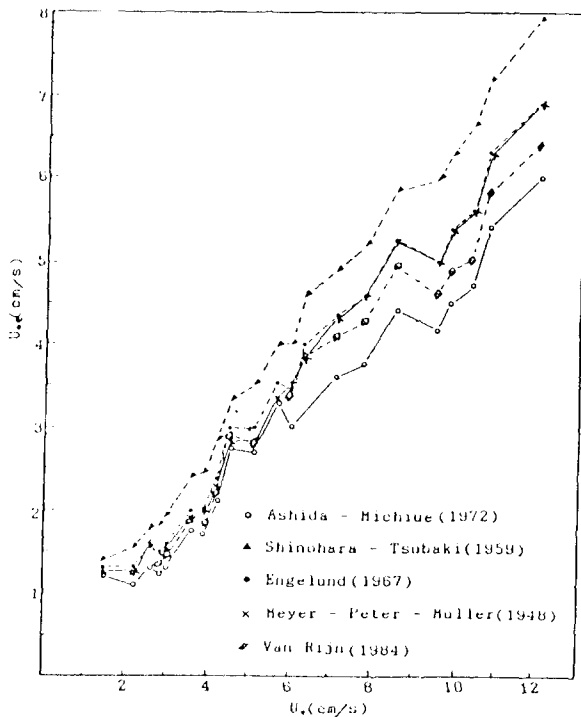


그림6. 마찰속도  $u_*$ 와 유효마찰속도  $u_{*c}$ 의 관계에 대한 여러공식들의 비교.

그림7, 그림8은 각각 Shinohara-Tsubaki, Meyer-Peter-Müller의 식에 의해 계산된 無次元有效掃流力  $\tau_{*e}$ 와 無次元掃流砂量  $\Phi_B$ 에 대해서 著者の 실험결과와 비교한 것이다. 그림.7에서 著者の 실험결과는 Shinohara등이 제안한 식에 비해 약간 적은 값을 나타내고 있으나 전체적으로 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그림.8에서도 著者の 실험결과와 Meyer등의 식에 의한 값이 비슷한 값을 나타내고 있으나  $\tau_{*e}$ 의 값이 큰 경우에는 실험치가 약간 큰 값을 나타내고 있다. 이는 掃流力이 큰 경우에 대해 Wilson의 실험결과를 이용해 Meyer등의 식과 비교한<sup>15)</sup>  $\Phi_B = (5.28 \tau_{*e})^{3/2}$ 는  $12 \tau_{*e}^{3/2}$ 과 비슷한 경향을 나타내고 있으며 Wilson<sup>16)</sup>은 그 후 계수 12에 대해서 타당성을 입증하였다.

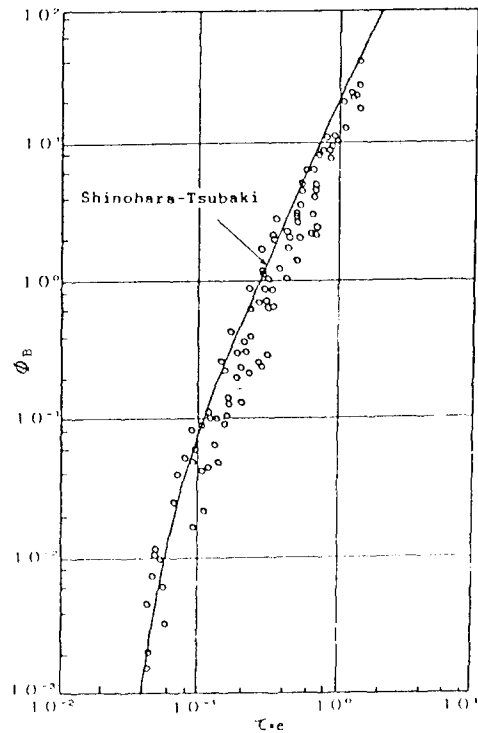


그림.7 실험결과와 Shinohara-Tsubaki식에 의한 무차원 소류사량과의 비교.

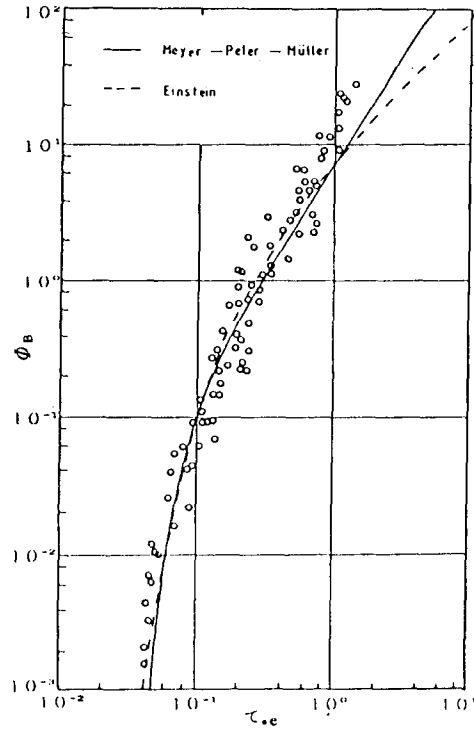


그림.8  $\tau_{*e}$ 와  $\Phi_B$ 의 관계에 대한 실험결과와 Meyer-Peter-Müller식과의 비교.

그림.9는 여러 연구자들의 결과와 실험결과를 비교하기 위하여  $q_B / u_* d$ 와  $\tau_{*e}$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 연구자에 따라 有效掃流力 및 掃流力의 계산방법이 다르고 浮流砂가 포함된 경우도 있어 엄밀한 비교는 불가능하지만 著者들의 실험결과는 여러 연구자들의 중간값 정도를 나타내고 있으며 Einstein 및 Meyer 등의 식과 비슷한 경향을 나타내고 있다.

그림.10은 本研究의 실험결과를 이용하여 계산한  $\Phi_B$ 와  $\tau_{*e}^{3/2}(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}}) F(\frac{\tau_{*e}}{\tau_{*c}})$ 의 관계를 나타낸 그림으로  $\tau_{*e}^{3/2}(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}}) F(\frac{\tau_{*e}}{\tau_{*c}})$ 가 0.01보다 큰 경우 식(20)의  $K_3$ 값 평균이 약 10 정도였으나  $\tau_{*e}^{3/2}(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}}) F(\frac{\tau_{*e}}{\tau_{*c}})$ 가 0.01보다 작은 경우에는  $K_3$ 가 10보다 작은 경향이 있다. 이처

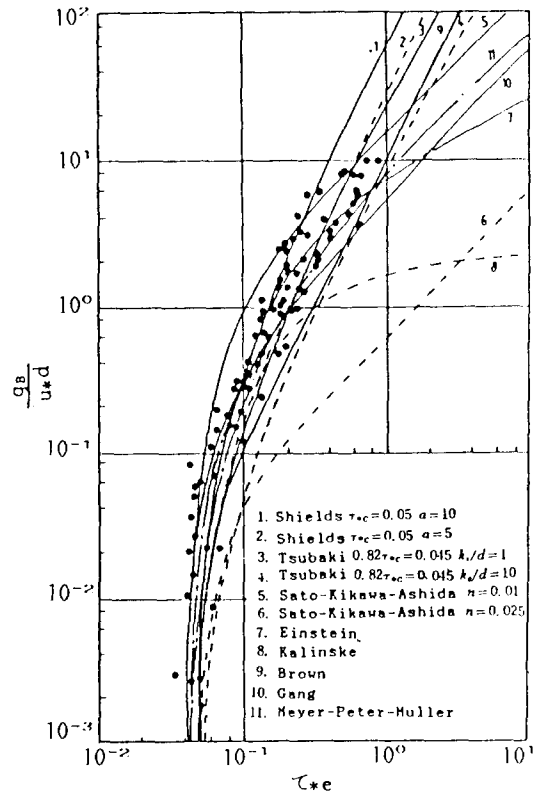


그림.9  $q_B / u_* d$ 와  $\tau_{*e}$ 의 관계에 대한 실험결과와 여러 연구자의 식과의 비교.

럼  $\tau_{*e}^{3/2}(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}}) F(\frac{\tau_{*e}}{\tau_{*c}})$ 가 작은 경우  $K_3$ 값이 작은 이유는 다음의 세가지 때문이라 생각된다.

1) 限界掃流力 부근의 흐름에서 砂粒이 이동하지 않거나 아주 느린 속도로 이동하게 된다. 그러나 그림.1과 같이 限界掃流力 부근에서도 식(11)의  $F(\frac{\tau_{*e}}{\tau_{*c}})$ 가 零보다 상당히 크게 주어지므로  $\tau_{*e}^{3/2}(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}}) F(\frac{\tau_{*e}}{\tau_{*c}})$ 가 실제보다 크게 계산된다.

2) 河床附近的 흐름은 亂流이며 亂流變動성분은 정규분포한다고 가정하였으나 掃流力이 작은 경우 河床附近的 흐름은 層流狀態로 존재할 수 있다.

3) 식(6)의  $b$  및 식(14)의  $K_1$ 을 1로 가정했기 때문에 實狀과 차이가 있다.



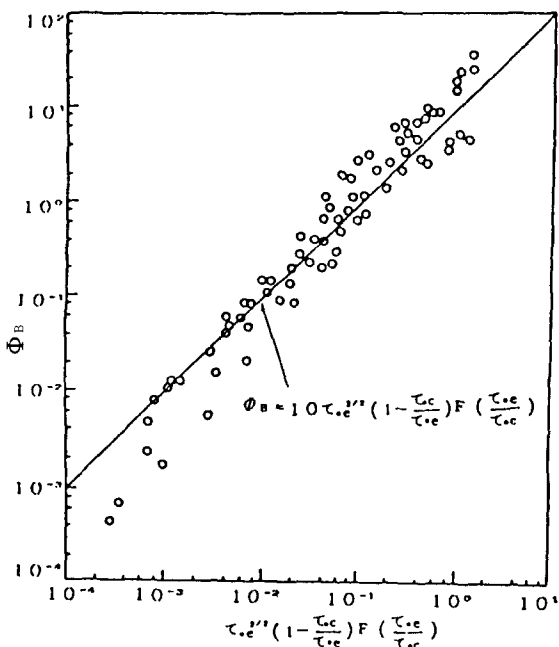


그림. 10. 무차원 소류사량  $\Phi_B$ 와  $\tau_{*c}^{3/2}(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}})F(\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}})$ 의 관계

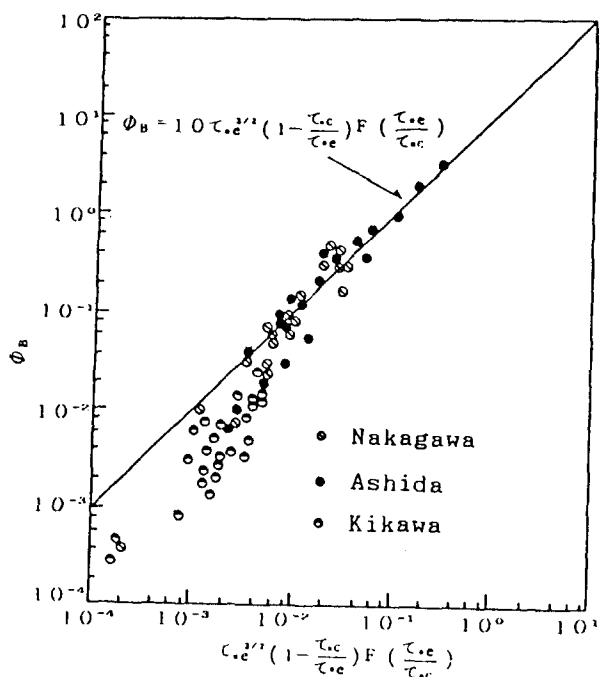


그림 11. Nakagawa, Ashida, Kikkawa의 자료를 이용하여 계산한  $\Phi_B$ 와  $\tau_{*c}^{3/2}(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}})F(\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}})$ 의 관계.

그림. 11은 Nakagawa<sup>17)</sup>, Ashida<sup>18)</sup>, Kikkawa<sup>19)</sup>등의 자료를 이용하여 계산한  $\Phi_B$ 와  $\tau_{*c}^{3/2}(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}})F(\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}})$ 의 관계를 나타낸 그림

으로  $\tau_{*c}^{3/2}(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}})F(\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}})$ 가 0.01보다 큰 경우에는 식(20)의  $K_3$ 가 10인 경우와 잘 일치하나 0.01보다 작은 경우에는 본 연구의 실험결과와 같은 경향을 나타내고 있다. 특히 Kikawa의 자료는 粒徑이 1cm 이상인 大粒經砂礫에 대한 것으로 본 연구의 실험결과와 비슷한 경향을 나타내고 있으나  $\Phi_B$ 가 본 연구의 실험결과보다 작게 나타남을 알 수 있다.

이상의 결과에서 砂粒徑이 큰 경우와 掃流力이 작은 경우를 제외하고는 식(21)을 이용하여 掃流砂量을 구할 수 있음을 알 수 있다.

$$\Phi_B = 10 \tau_{*c}^{3/2} (1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}}) F(\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}}) \quad (21)$$

### 結 論

掃流砂量式의 함수형을 유도하고 實驗結果를 이용하여 비교적 掃流力이 큰 경우에 대한 掃流砂量式을 구하고 他 研究者들의 자료 및 研究結果를 비교 검토한 결과는 다음과 같다.

河床形狀에 따라 河床抵抗이 다르게 나타나므로 掃流砂量을 구하기 위해서 砂粒에 유효하게 작용하는 掃流力을 사용해야 됨을 보였으며, 有效摩擦速度를 구하기 위해서는 Engelund가 제시한 식이 타당함을 간접적으로 밝혔다.

Meyer, Shinohara등이 제안한 無次元 掃流砂量式과 實驗結果를 이용하여 이들 研究者들의 계산방법으로 계산한 掃流力에 대한 掃流砂量이 비교 되었으며 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

本 研究結果에 의해 비교적 掃流力이 큰 경우에 대해 제시된 掃流砂量式은 Nakagawa, Ashida, Kikkawa 등의 실험자료와 비교 되었으며 掃流力이 비교적 큰 경우에 잘 一致함을 알 수 있었다.

掃流力이 작거나 砂粒徑이 큰 경우에 대한 掃流砂量式을 구하기 위해서 보다 엄밀한 研究가 필요하다고 생각된다.

#### 參考文獻

- 1) 河村三郎, “土砂水理學”, 森北出版社, 1982, pp. 243~244.
- 2) 姜周復, “流砂量算定에 관한 基礎的 研究”, 工學博士學位論文, 東亞大學校 大學院, 1982.
- 3) Bagnold, R.A., “The Flow of Cohesionless Grains in Fluids”, Philosophical Trans., Royal Soci. of London, Vol. 249, 1957.
- 4) 芦田和男・道上正規, “移動床流れ의 抵抗と 掃流砂量に 關する 基礎的 研究”, 日本土木學會論文報告集, 第206號, 1972, pp. 59-69.
- 5) Engelund, F. “Hydraulic Resistance of Alluvial Streams”, JHD, ASCE, Vol. 92, NO. HY2, Pro. Paper 4739, March 1966, pp. 315-327.
- 6) Engelund, F. “Hydraulic Resistance of Alluvial Streams”, JHD, ASCE, Vol. 93, NO. HY4, Paper 5304, July 1967, pp. 287-296.
- 7) Raudkivi, A.J., “Study of Sediment Ripple Formation”, Proc. ASCE, Vol. 89, HY6, 1963.
- 8) Sleath, J.F.A., “Sea Bed Mechanics”, John Wiley & Sons, 1985.
- 9) 吉川香夫・藤堂正樹・井筒庸雄・關根正人, “掃流砂의 機構에 關する 基礎的 研究”, 日本土木學會 論文報告集, 第342號, 1984.
- 10) Shields, A., “Anwendung der Ahnlichkeitsmechanik und Tubulenz Forschung auf die Geschiebebewegung”, Mitt. der Preussischen Versuchsanstalt für Wasser und Schiffbau, Berlin, Germany, 1936.
- 11) Vanoni, V.A. and Brooks, N.H., “Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams”, Report NO. E-68, Calif. Inst. Technology, Pasadena, Calif., 1957.
- 12) Shinohara, K. and Tsubaki, T., “On the Characteristics of Sand Waves Formed upon the Beds of Open Channels and Rivers”, Report of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol., No. 25, 1959, pp. 15-45.
- 13) Meyer-Peter-Müller, “Formulas for Bed-Load Transport”, proc. of the 2nd Congress of the International Association for Hydraulic Research, Stockholm, Sweden, 1948.
- 14) Van Rijn, L.C., “Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport”, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 110, NO. HY10, 1984.
- 15) Yalin, M.S., “Mechanics of Sediment Transport”, Pergamon Press, Oxford, 1972.
- 16) Kenneth C. Wilson, “Analysis of Bed-Load Motion at High Shear Stress”, ASCE, Vol. 113, No. 1, January 1987.
- 17) Nakagawa, H. Tsujimoto, T. and Yada, A., “On Relation between Bed Configuration and Sediment Transport and Deformation Process of Sand Waves”, Bull. Disaster Prev. Res. Inst. Kyoto Univ. 21, 1978.
- 18) Ashida, K. and Tanaka, Y., “An Experimental Study on Sand Saves(3)”, Bull. Disaster Prev. Res. Int. Kyoto Univ. 10, 1967.
- 19) Kikkawa, H. Hukuoka, s. Mazo, T. and KANO H., “Study on Bed-Load Transport Rate for Coarse Grains Bed”, Proceedings of the 19th Conference on Hydraulic in Japan, 1975.