

Unit Stream Power 에 의한 總流砂量解析에 관한 研究

A Study on the Analysis of the Total Load by the Unit Stream Power

李	元	煥*
Lee,	Won	Hwan
全	敏	遇**
Chun,	Min	Woo
朴	相	德***
Park,	Sang	Deog

Abstract

The analysis of total load was carried out by using the theory of unit stream power (USP). The dimensionless USP equation of S_R which was the rate of suspended load and bed load was derived from the USP function by applying the Einstein's reference concentration and Stokes' fall velocity. And the R relationship between the water discharge and Reynolds number (Re) was discussed, and it was shown that USP was closely related with Re .

The value of S_R was determined from the experimental data of Han River downstream and Mantz. And it was tested to several observatories of Korean Rivers. A good correlation among USP, suspended load and S_R was shown and USP was increased with the increment of the turbulent intensity.

Judging from the above results, it is considered this study can be contributed to estimate the total load.

要 旨

Unit Stream Power(USP)의 理論에 의하여 總流砂量解析이 遂行되어졌다. 浮遊砂에 관한 USP 函數로부터 Einstein의 基準點濃度와 Stokes의 沈降速度를 適用하여 S_R 에 관한 無次元 USP 方程式을 誘導하였다. 또한 流量과 Reynolds 數間의 關係式을 誘導하고 USP와의 關係를 밝혔으며, 兩者는 서로 密接한 關係가 있음을 보여주었다.

S_R 式의 係數들을 漢江下流部實驗資料와 Mantz의 實驗資料로부터 求하여 우리 나라의 數個 河川 觀測地點에 適用하였다. 이로써 USP는 浮遊砂와 S_R 에 대하여 좋은 相關性을 보여주었으며, 이 USP는 亂流強度가 增加함에 따라 같은 傾向을 보여 주었다.

本 研究結果는 總流砂量推定에 寄與될 수 있을 것으로 判斷된다.

*正會員·延世大學校 工科大學 土木工學科 教授

**正會員·忠北大學校 工科大學 土木工學科 專任講師

***延世大學校 大學院 碩士課程

1. 序 論

流水에 의한 河床物質의 運動은 流量, 平均流速, 에너지傾斜, 剪斷應力, 亂流의 程度, 河床形態, 河川의 幾何學의 特性, 河床粒子的 特性 및 水溫 등과 같은 많은 變數들과 관련되어 있으며 이들은 相互間에 從屬의인 關係를 갖기도 한다. 이러한 복잡한 流砂現象을 精確하게 이해하기 위해서는 이런 變數들을 총망라하는 方程式을 開發하는 것이 가장 理想의이었으나, 사실상 그것은 不可能한 일이다. 그러므로 流砂問題에 관한 대부분의 研究는 주어진 條件下에서 流砂現象에 영향을 미치는 變數들의 相對的 重要성을 考慮하여 선택적 支配因子를 取하여 이루어져왔다. 이러한 研究結果를 일반적인 경우에 적용하는 것은 많은 어려움이 수반되며, 實測한 값과 매우 심한 差異를 보이는 경우가 흔히 있다. 따라서 流砂問題의 支配因子를 선택하는 것은 대단히 重要한 問題이다.

河床粒子的 初期運動에 根本的인 바탕을 둔 流砂現象에 관한 研究들은 現在 많은 인정을 받고 있으나 河床剪斷力 혹은 掃流力을 너무 과대하게 강조하는 結果를 초래하였다. 掃流力 혹은 河床剪斷力은 河床物質이 겨칠고 流砂濃度가 작은 경우의 흐름에는 적합하지만, 모래로 덮여있는 河川의 流砂濃度가 큰 흐름에 대해서는 적합하지 않다⁽¹⁾.

과거 流砂에 관한 대부분의 연구는 剪斷力에 基本的인 바탕을 두거나 流砂量에 대한 流量, 平均流速 또는 에너지 傾斜 등의 函數關係를 가정하여 이루어졌다. 그러나 1966년 Bagnold⁽²⁾는 流砂研究에 에너지개념을 도입하여 기존의 연구방법에 도전하였다. 즉 河床의 單位面積當물이 갖는 位置에너지消費率로 定義되는 Stream Power의 개념을 도입하여 平衡狀態下의 流砂運送率決定에 대한 研究를 하였다. 이에 대하여 Yang(1972, 1973)^(3,4)은 單位重量當의 물이 갖는 位置에너지消費率로 定義되는 Unit Stream Power의 개념을 제안하여 總流砂濃度의 決定에 가장 중요한 支配因子라는 것을 보여주었으며, 河床粒子的 初期運動條件을 考慮하여 總流砂濃

度에 관한 Unit Stream Power 方程式을 제시하였다. 또한 Yang(1976)⁽⁵⁾은 河道의 주어진 流量과 流砂濃度를 運送하는데 Minimum Unit Stream Power가 사용되며 그 크기는 水理特性과 流砂特性에 의하여 左右된다고 하였다. Yang과 Stall(1976)⁽⁶⁾은 Yang의 Unit Stream Power 方程式을 自然河川에 적용할 때 實測値와 잘 일치하며, Unit Stream Power의 개념을 河床形態의 變化와 河川의 幾何學의 形態의 變化에 관계없이 적용할 수 있다고 하였다. Y:n₃(1978)⁽⁷⁾은 河床粒子的 初期運動條件을 考慮하지 않아도 별 큰 誤差없이 總流砂濃度의 예측에 Unit Stream Power 方程式을 적용할 수 있다고 하였다.

Song과 Yang(1979)⁽⁸⁾은 2次流와 流砂運送이 없는 河川의 速度分布決定에 Minimum Stream Power를 적용할 수 있다고 하였으며 1980년 그 理論을 發表하였다⁽⁹⁾. Chang(1977)⁽¹⁰⁾은 Total Stream Power를 最小로 하는 Minimum Stream Power를 安定한 충격하도 設計와 河川의 變態解析에 적용하였다. Alonso(1980)^(11,12)는 30여개의 流砂運送公式를 다음의 3가지 관점에서 分析하였다. (1) 컴퓨터 시뮬레이션에 쉽게 적용할 수 있을 것, (2) 흐름의 水理學的 및 幾何學의 特性을 알고서 總流砂量을 求할 수 있을 것, (3) 流砂運送이 있는 임의 크기의 河道에 적용할 때 신뢰할만한 結果를 얻을 수 있을 것. 그 결과 Yang의 Unit Stream Power 方程式에 가장 좋은 예측結果를 보여준다고 하였다. 이외에도 Unit Stream Power를 支配因子로 考慮하여 流砂問題를 研究한 사람에는 Shen과 Hung⁽¹³⁾, Maddock⁽¹⁴⁾ 등이 있으며, Yang과 Mollinas(1982)⁽¹⁵⁾는 이들의 式이 다른 變數를 主要支配因子로 考慮한 式들보다 더 일반적이며 실측치와 잘 일치한다고 하고, 亂流의 에너지方程式으로부터 Unit Stream Power 函數를 誘導하여 그 理論의 뒷받침을 한층 더하였다.

일반적으로 流砂는 그 運動構造에 따라 浮遊砂와 掃流砂로 區分되며 總流砂量은 이들의 합으로써 얻어진다. 總流砂量에서 浮遊砂와 掃流砂가 차지하는 比率은 流水의 흐름狀態와 流砂의 特性에 따라서 달라지게 된다. 洪水時에 있어서 掃流砂는 測定하기도 대단히 困難을 辨만

아니라 신뢰할만한 結果를 기대하기도 어렵기 때문에⁽¹⁶⁾ 浮遊砂만을 測定하고서 總流砂量을 예측할 수 있는 方法을 모색하는 것은 重要하다고 생각한다.

따라서 本 研究에서는 실제 河川에 있어서 비교적 測定이 용이하고 신뢰할만한 資料로서 특히 洪水時의 경우에, 浮遊砂만을 測定함으로써 總流砂量을 예측할 수 있도록 浮遊砂와 掃流砂의 比를 Unit Stream Power에 의하여 研究하고, Unit Stream Power와 流砂運送特性과의 關係를 밝히는데 目的이 있다.

2. Unit Stream Power의 理論

2.1. Unit Stream Power

Yang의 Unit Stream Power 理論에 의하면 定常等流에 있어서 에너지의 變化는 位置에너지의 變化에 의한 것이며, 물의 單位重量當 位置에너지消費率 $\frac{dY}{dt}$ 는 亂流에 의한 에너지損失과 流水에 의한 河床摩擦力에 起因하는 것으로, 總流砂濃度の 決定에 중요한 支配因子라고 알려져 있다⁽⁹⁾.

$$\frac{dY}{dt} = \frac{dx}{dt} \frac{dY}{dx} = VS \quad (1)$$

여기서 x 는 流水方向의 距離, V 는 平均流速, S 는 에너지傾斜, Y 는 基準線으로부터 位置에너지와 같은 높이이며 t 는 時間이다.

Yang과 Mollinas는 亂流에너지方程式의 亂流에너지生成率로부터 Unit Stream Power 函數를 誘導하여 理論의 根據를 마련하였다⁽¹⁵⁾.

길이방향의 Reynolds 數가 큰 흐름에 대하여 亂流에너지生成率は 다음과 같다.

$$-u_i u_j \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_i} = -u_x u_y \frac{d\bar{V}_x}{dy} \quad (2)$$

$$= \frac{\tau_{xy}}{\rho} \frac{d\bar{V}_x}{dy} \quad (3)$$

여기서 u_i, u_j, u_x, u_y 는 각각 i, j, x, y 方向平均流速의 變動速度, \bar{V}_j 와 \bar{V}_x 는 j, x 方向의 平均流速, y 는 水深方向, ρ 는 密度이다. 여기에 對數流速分布式(4)와 Rouse의 濃度分布式(5)를 적용하여 單位幅當 總浮遊砂量을 求하였다.

$$\frac{\bar{V}_x}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{\kappa_s}\right) + \text{constant} \quad (4)$$

$$\frac{\bar{C}}{C_a} = \left(\frac{H-y}{y} \frac{a}{H-a}\right)^{\beta} \quad (5)$$

여기서 U_* 는 摩擦速度로서 \sqrt{gHS} 이고, κ 는 Von Karman 常數, κ_s 는 河床의 거칠 部分의 높이, \bar{C} 는 浮遊砂濃度, C_a 는 基準點濃度, H 는 水深, a 는 河床으로부터 基準線까지의 距離, z 는 $\frac{\omega}{\kappa U_*}$ 이다.

單位幅當 總浮遊砂量은 다음과 같다.

$$q_s = \int_a^H \bar{C} \bar{V} dy \quad (6)$$

$$= \frac{\bar{C}_a V (A_1 \bar{r})^{\beta_1}}{\left(\frac{\rho U_*^3}{\kappa a}\right)^{\beta_1} (A_2 \ln H + B_2')^{\beta_1 - 1}} (VS)^{\beta_1} \quad (7)$$

$$\int_a^H \left(\frac{H-y}{y}\right)^{\beta_1} (A_1 \ln y + B_1') dy \quad (7)$$

여기서 $A_1, A_2, B_1', B_2', \beta_1$ 는 常數이며, \bar{r} 는 유체의 단위중량, z_1 은 $\frac{z}{\beta}$ 이다. 式(7)의 양변에 對數를 取하여 定理하면 다음과 같은 Unit Stream Power 函數가 얻어진다.

$$\log C_s = \log \left[\frac{\bar{C}_a}{H(A_2 \ln H + B_2')^{\beta_1 - 1}} \left(\frac{\kappa a A_1 \bar{r}}{\rho U_*^3}\right)^{\beta_1} (P_E' K_1 + K_2) \right] + Z_1 \log (VS) \quad (8)$$

$$= M_3 + N_3 \log (VS) \quad (9)$$

여기서 C_s 는 浮遊砂濃度이고 P_E' 는 A_1 과 B_2' 에 관련된 값이며 K_1 과 K_2 는 다음과 같다.

$$K_1 = \int_{a/H}^1 \left(\frac{1-y'}{y'}\right)^{\beta_1} \ln y' dy' \quad (10)$$

$$K_2 = \int_{a/H}^1 \left(\frac{1-y'}{y'}\right)^{\beta_1} dy' \quad (11)$$

여기서 $y' = y/H$ 이다. Einstein 方法에 의하면 總流砂濃度와 浮遊砂濃度の 關係는 다음과 같다.

$$C_t = \left(1 + \frac{1}{P_E I_1 + I_2}\right) C_s \quad (12)$$

여기서 P_E, I_1, I_2 는 式(32), (33), (34)와 같다. 式(9)와 式(12)를 조합하면 總流砂濃도에 관한 Unit Stream Power 方程式이 얻어진다.

$$\log C_t = M + N \log (VS) \quad (13)$$

여기서 M, N 은 흐름狀態와 流砂의 特性에 따라 달라지는 係數이다. Yang은 流砂의 初期運動에 必要한 限界 Unit Stream Power $\frac{V_{cr}}{\omega} S$ 를 고려한 總流砂濃도에 관한 無次元 Unit Stream Power 方程式을 제시하였다⁽⁴⁾.

$$\log C_t = M_1 + N_1 \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right) \quad (14)$$

여기서 M_1, N_1 은 河床粒子的 粒徑, 水溫, 水深 등에 의하여 달라지며, 沈降速度 Reynolds 數 $\frac{\omega D}{\nu}$ 와 剪斷速度와 沈降速度의 比 $\frac{U_*}{\omega}$ 에 대한 函數로 나타내며 다음과 같다.

$$M_1 = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega D}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{\omega} \quad (15)$$

$$N_1 = 1.799 - 0.409 \log \frac{\omega D}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{\omega} \quad (16)$$

여기서 D 는 河床粒子的 平均粒徑, ω 는 沈降速度, ν 는 動粘性係數이다. 式(14)의 $\frac{V_{cr}}{\omega}$ 는 다음과 같다.

$$\frac{V_{cr}}{\omega} = \frac{2.5}{\log \left(\frac{U_* D}{\nu} \right) - 0.06} + 0.66,$$

$$1.2 < \frac{U_* D}{\nu} < 70 \quad (17)$$

$$\frac{V_{cr}}{\omega} = 2.05, \quad \frac{U_* D}{\nu} \geq 70 \quad (18)$$

또한 Yang 은 初期運動條件을 考慮하지 않아도 總流砂量의 예측에 큰 誤差가 없으며 式(14)를 다음과 같이 修正發表하였다(7).

$$\log C_t = M_2 + N_2 \log \frac{VS}{\omega} \quad (19)$$

여기서 M_2, N_2 는 다음과 같다.

$$M_2 = 5.165 - 0.153 \log \frac{\omega D}{\nu} - 0.297 \log \frac{U_*}{\omega} \quad (20)$$

$$N_2 = 1.780 - 0.360 \log \frac{\omega D}{\nu} - 0.480 \log \frac{U_*}{\omega} \quad (21)$$

Yang 과 Stall(6)은 式(14)의 適用性을 檢討하기 위하여 다른 流砂運動方程式에 의하여 求한 總流砂濃度와 式(14)에 의한 總流砂濃度를 比較하였으며, 그 결과 Unit Stream Power 方程式이 여러 河川에서 實測值와 대단히 좋은 一致程度를 보여주었다.

2.2. S_R 式

2.2.1 Unit Stream Power 에 의한 S_R 式의 誘導

Einstein 의 基準點濃度 \bar{C}_a 는 河床으로부터 a 만큼 떨어진 掃流砂移動層內의 平均濃度와 같다(21).

$$\bar{C}_a = \frac{i_B q_B}{a V_*} \quad (22)$$

$$= f_B \frac{q_B}{U_* D} \quad (23)$$

여기서 V_* 는 掃流砂의 平均移動速度로서 βU_* 이며, $i_B q_B$ 는 粒徑에 따른 單位幅當 掃流砂量이고 f_B 는 $i_B/2\beta$ 이다.

式(23)을 式(7)에 代入하여 定理하면 다음과 같다.

$$S_R = f_* \frac{D_1^{2(1-g)} g^{2(1+1)} H}{U_*^{3(2(1+1))} (A_2 \ln H + B_2')^{2(1+1)}} \frac{H}{(P_B' K_1 + K_2) (VS)^{2(1+1)}} \quad (24)$$

여기서 S_R 은 浮遊砂와 掃流砂의 比로서 q_s/q_B 혹은 C_s/C_B 이며, C_B 는 單位幅當 全流量에 대한 掃流砂濃度(= q_B/q_s) 이고 f_* 는 常數이다.

Stokes 의 沈降速度

$$\omega = \frac{D^2 g}{18\nu} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) \quad (25)$$

를 $D^2 g$ 에 對하여 定理하고, 式(24)에 代入하여 定理하면 다음과 같다.

$$S_R = f_*' \frac{H(P_B K_1' + K_2)}{D^2 (A_2 \ln H + B_2')^{2(1+1)} \left(\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \right)^{2(1+1)}} \left(\frac{\nu}{\omega D} \right)^{2(1+1)} \left(\frac{\omega}{U_*} \right)^{3(2(1+1))} \left(\frac{VS}{\omega} \right)^{2(1+1)} \quad (26)$$

윗式에서 比重의 變化를 무시하면 S_R 은 相對粗度 D/H , 沈降速度 Reynolds 數 $\frac{\omega D}{\nu}$, 剪斷速度와 沈降速度의 比 $\frac{U_*}{\omega}$, 無次元 Unit Stream Power $\frac{VS}{\omega}$ 의 函數가 된다. 즉

$$S_R = f_*'' F \left(\frac{D}{H} \right) \cdot G \left(\frac{\omega D}{\nu} \right) \cdot H \left(\frac{U_*}{\omega} \right) \cdot P \left(\frac{VS}{\omega} \right) \quad (27)$$

여기서 S_R 의 決定에 無次元 Unit Stream Power $\frac{VS}{\omega}$ 가 가장 重要한 支配變數라고 가정하고 양변에 對數를 取하면 式(19)와 유사한 형태의 S_R 에 관한 無次元 Unit Stream Power 方程式이 일어난다.

$$\log S_R = I + J \log \frac{VS}{\omega} \quad (28)$$

여기서 係數 I, J 는 흐름特性과 流砂特性에 의

하여 決定되며 다음과 같다.

$$I = a_0 + a_1 \log \frac{H}{D} + a_2 \log \frac{U_*}{\omega} + a_3 \log \frac{\omega D}{\nu} \quad (29)$$

$$J = b_0 + b_1 \log \frac{H}{D} + b_2 \log \frac{U_*}{\omega} + b_3 \log \frac{\omega D}{\nu} \quad (30)$$

위의 係數 $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ 는 實驗 및 實測에 의하여 決定되어야 할 常數들이다.

2.2.2 其他 S_R 式

浮遊砂와 掃流砂의 比 S_R 에 관한 研究로는 다음과 같은 것이 있다.

Einstein 의 式⁽¹⁶⁾

$$S_R = P_E I_1 + I_2 \quad (31)$$

$$\text{여기서 } P_E = 2.303 \log \left(\frac{30.2xH}{D_{65}} \right) \quad (32)$$

$$I_1 = 0.216 \frac{(a/H)^{2.1}}{(1-a/H)^2} \int_{a/H}^1 \left(\frac{1-y}{y^2} \right)^2 dy \quad (33)$$

$$I_2 = 0.216 \frac{(a/H)^{2.1}}{(1-a/H)^2} \int_{a/H}^1 \left(\frac{1-y}{y^2} \right)^2 \ln y dy \quad (34)$$

$$y = z/H \quad (35)$$

Einstein-Abdel Aal 의 式⁽¹⁷⁾

$$S_R = \frac{0.4}{\kappa} (P_E'' I_1 + I_2) \quad (36)$$

$$\text{여기서 } P_E'' = 8.5\kappa + 2.3 \log \left(\frac{xH}{D_{65}} \right) \quad (37)$$

Fort Collins 의 式⁽²²⁾

$$S_R = \frac{H}{\gamma_a \alpha V} \left[VI_1 \left(\frac{a}{H} \right) - U_* \frac{2}{\kappa} I_2 \left(\frac{a}{H} \right) \right] \quad (38)$$

$$\text{여기서 } I_1 \left(\frac{a}{H} \right) = \frac{1}{\varphi_c \left(\frac{a}{H} \right)} \int_{a/H}^1 \varphi_c(\eta) d\eta \quad (39)$$

$$I_2 \left(\frac{a}{H} \right) = \frac{1}{\varphi_c \left(\frac{a}{H} \right)} \int_{a/H}^1 \varphi_c(\eta) \varphi_a(\eta) d\eta \quad (40)$$

$$\varphi_c(\eta) = \left[\frac{\sqrt{\frac{a}{H}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{a}{H}}} \right]^2 \quad (41)$$

$$\varphi_a \left(\frac{a}{H} \right) = \left[\frac{\sqrt{\frac{a}{H}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{a}{H}}} \right]^2 \quad (42)$$

$$\varphi_a(\eta) = \ln \left[\frac{\sqrt{\eta}}{1 - \sqrt{1 - \sqrt{\eta}}} \right] - \sqrt{1 - \eta} - \frac{1}{3}$$

$$(43)$$

$$\gamma = y/H \quad (44)$$

여기서 γ_a 는 係數이다.

2.3. 總流砂量

總流砂量은 浮遊砂와 掃流砂의 率으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_t = q_s + q_B \quad (45)$$

$$= q_s \left(1 + \frac{1}{S_R} \right) \quad (46)$$

$$= q_B (1 + S_R) \quad (47)$$

浮遊砂濃度에 관한 無次元 Unit Stream Power 方程式은 式(8)에 式(25)를 適用하면 다음과 같다.

$$\log C_s = M_3' + N_3' \log \frac{VS}{\omega} \quad (48)$$

여기서 係數 M_3' 와 N_3' 는 흐름特性과 流砂特性에 의하여 決定되며 式(29), (30)과 같은 형태로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_3' = a_0' + a_1' \log \frac{H}{D} + a_2' \log \frac{U_*}{\omega} + a_3' \log \frac{\omega D}{\nu} \quad (49)$$

$$N_3' = b_0' + b_1' \log \frac{H}{D} + b_2' \log \frac{U_*}{\omega} + b_3' \log \frac{\omega D}{\nu} \quad (50)$$

위의 係數들은 實驗 및 實測에 의하여 決定되어야 할 常數이다.

이상에서 總流砂量은 式(28), (48)을 적용하면 式(46)에 의하여 求할 수 있으며, 또한 式(28)에서 S_R 을 求하면 浮遊砂나 掃流砂만을 實測함으로써 式(46), (47)에 의하여 總流砂量을 예측할 수 있다.

2.4. Unit Stream Power 와 Reynolds 數의 關係

水深에 비하여 河幅이 매우 큰 一般河川에 있어서 流量과 Reynolds 數 $\frac{VH}{\nu}$ 는 다음과 같이 밀접한 관계가 있다.

$$Q = A_* V \quad (51)$$

$$= \lambda \cdot R \quad (52)$$

여기서 A_* 는 流水斷面積, λ 는 νW (cm³/sec), W 는 河幅, R 는 Reynolds 數이다. 式(52)의 λ

는 일반적으로 河川에 있어서 流量의 급격한 變化에 比하여 水溫에 의한 動粘性係數 ν 와 水位上昇에 의한 河幅의 變化가 극히 작으므로 一定하게 된다. 式(52)에서 알 수 있는 바와 같이 流量의 增加에 따라서 Reynolds 數가 增加하게 된다. 즉, 亂流強度가 增加하게 된다.

浮遊砂와 流量은 일반적으로 다음과 같은 關係가 있다^(16,33).

$$Q_s = pQ^l \quad (53)$$

여기서 p, l 는 常數이며, Q_s 는 浮遊砂量이고 Q 는 流量이다. 또한 Unit Stream Power와 Reynolds 數의 關係는 式(48), (52) 및 (53)에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{VS}{\omega} = \alpha R^n \quad (54)$$

여기서 α, n 는 $p, l, \lambda, M_s', N_s'$ 에 관련된 常數이다. 따라서 亂流強度는 流量에 따라 變하고, 浮遊砂量은 流量의 增加에 따라서 增加하므로

浮遊砂는 亂流強度의 變化에 의하여 달라지게 된다. Unit Stream Power는 式(54)에서 알 수 있듯이 Reynolds 數로 表現가능하다. 이것은 流水에 의한 摩擦損失係數가 亂流程度를 나타내는 Reynolds 數에 關係가 있으므로, 定常等流에 있어서 位置에너지損失이 亂流에 의한 에너지損失과 河床摩擦抵抗에 의한 에너지損失에 起源한다는 Unit Stream Power 理論을^(3,4) 뒷받침하는 것이다.

3. 基本資料

3.1. 實驗資料

實驗資料로는 浮遊砂와 掃流砂를 測定한 漢江下流部水理模型實驗資料(I)의⁽²³⁾, Mantz의 實驗資料(II)를⁽²⁴⁾ 택하였으며 각각의 實驗條件과 水理量은 表(1)과 같다.

表 1. 各 實驗資料의 實驗條件과 水理量

資料	實驗砂의 平均粒徑 (mm)	水深 (m)	水路幅 (cm)	亂流速度 (cm)	傾斜 (×10 ⁻³)	流量 (l/sec)	浮遊砂量 (g/sec)	掃流砂量 (g/sec)	水溫 (°C)	測定數	比重
I	0.25 ~0.45	0.0405 ~0.1408	60	0.243 ~0.781	0.798 ~7.144	10.0 ~60.0	0.001 ~42.83	1.92 ~79.8	20	48	2.61 ~2.65
II	0.018 ~0.123	0.029 ~0.133	30	0.191 ~0.713	0.092 ~6.6	0.8 ~25.0	0.081 ~3088.8	0.0056 ~72.2	22~29	50	2.32

3.2. 實驗資料

實測資料로는 浮遊砂만을 測定한 人道橋地點과⁽²⁵⁾ 浮遊砂와 掃流砂를 測定한 南漢江의 忠州地點⁽²⁶⁾, 南漢江의 支流인 平昌江 後灘地點⁽²⁸⁾, 洛東江의 玄風地點⁽²⁰⁾, 密陽江의 密陽地點⁽¹⁹⁾ 등의 資料를 使用하였다. 人道橋地點의 實測資料는 低水時에서 洪水時에 이르기까지 測定되었으며, 忠州와 後灘의 實測資料는 豐水位以上時의 資料이다. 또한, 密陽의 資料는 洪水位時에 測定되었고, 玄風地點의 資料는 低水位時의 資料이다.

3.3. 資料補完

人道橋地點資料의 결측된 水面傾斜, 河床物質

의 平均粒徑과 水溫 등을 補完하였다. 水面傾斜는 浮遊砂測定日의 流況이 크게 變化하지 않는다고 가정하였으며, 河床物質의 經年的 變化를 무시하였고⁽²⁸⁾, 水溫은 浮遊砂測定日의 日平均氣溫을 使用하였다⁽³¹⁾. 忠州와 後灘地點의 水溫은 비오는 날이 20°C, 흐린 날은 24°C, 맑은 날은 28°C로 하였으며 漢江下流部實驗資料의 水溫은 20°C로 하였다.

本 研究의 資料分析에 사용된 沈降速度는 Rubey의 式을⁽²¹⁾ 使用하였다.

$$\omega = \sqrt{sgD} \cdot F(D) \quad (55)$$

여기서 s 와 $F(D)$ 는 다음과 같다.

$$F(D) = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgD^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgD^3}} \quad (56)$$

$$s = \rho_s / \rho_f - 1 \quad (57)$$

그림(1)은 水溫 20°C와 25°C의 경우에 式(55)에 의한 沈降速度와 平均粒徑의 關係圖이며 이때 術度는 2.65이다.

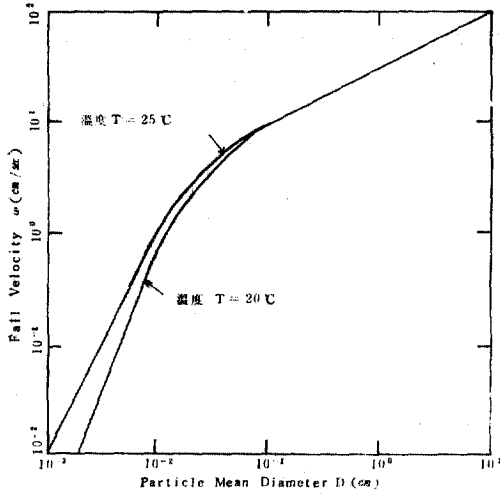


그림 1. 沈降速度 ω (cm/sec)와 平均粒徑 D (cm)의 關係

4. 資料分析

4.1. Unit Stream Power 와 浮遊砂

Unit Stream Power 와 浮遊砂의 關係를 究明하여 본 마 漢江下流部實驗資料의 平均粒徑 0.38 mm인 경우 相關係數는 0.89157이며, Mantz實驗資料에서 平均粒徑 0.018 mm, 水深 0.059 ~ 0.069 m인 경우에는 相關係數가 0.99446이다. 各實驗資料의 平均粒徑과 水深에 따른 浮遊砂濃度에 관한 Unit Stream Power 方程式(48)의 回歸係數 N_s' , N_s' 과 相關係數를 表(2)에 실었으며 相關係數가 대단히 좋게 나타났다. 表

表 2. 式(48)의 回歸係數와 相關係數

區分		平均粒徑 (mm)	水 深 (m)	M_s'	N_s'	相關係數	資料數	
平均粒徑과 水深別 分類	I	1	0.25	0.0539~0.1133	3.8952	1.5003	0.88518	16
		2	0.38	0.0471~0.1250	3.0735	1.3076	0.89157	16
		3	0.45	0.0339~0.1358	5.5509	2.7749	0.80183	16
	II	1	0.018	0.030 ~0.036	2.9084	2.7752	0.99129	6
		2	0.018	0.059 ~0.069	3.4911	2.3942	0.99446	5
		3	0.018	0.118 ~0.133	3.8485	3.3276	0.98638	5
		4	0.042	0.029 ~0.037	4.4085	2.1057	0.89228	6
		5	0.042	0.06 ~0.065	4.4430	2.8657	0.98901	6
		6	0.042	0.115 ~0.126	4.5961	2.2869	0.98390	6
III	7	0.123	0.028 ~0.035	3.7925	1.4385	0.97888	5	
	8	0.123	0.059 ~0.063	4.6441	2.0661	0.95998	5	
	9	0.123	0.118 ~0.120	3.1472	0.7487	0.70536	5	
水深別分類	III	1	0.018 ~0.123	0.028 ~0.037	3.9812	1.4950	0.89407	17
		2	0.018 ~0.123	0.059 ~0.069	4.0711	1.5560	0.95365	16
		3	0.018 ~0.123	0.115 ~0.113	4.1421	1.5753	0.91583	16
資分料別類	I	0.25 ~0.123	0.0339~0.1358	4.1736	1.9097	0.80315	48	
	II	0.018 ~0.123	0.028 ~0.113	4.0479	1.5110	0.92735	49	

凡例: I: 漢江下流部實驗資料

II: Mantz의 實驗資料

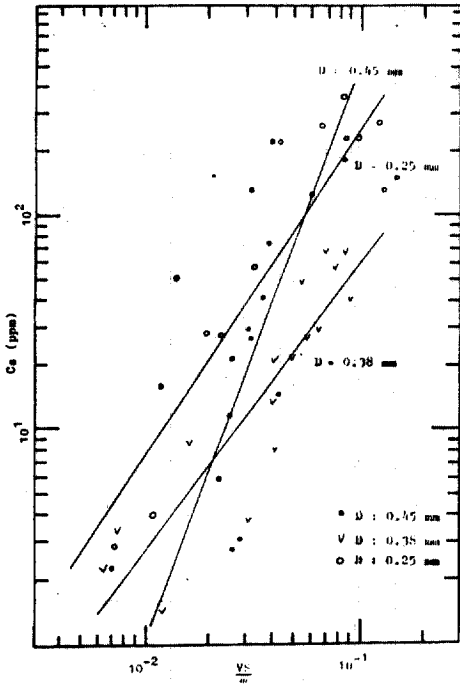


그림 2. 漢江下流部實驗資料의 C_s 와 $\frac{VS}{\omega}$ 의 相關圖

(2)에서 알 수 있는 바와 같이 M_3' 와 N_3' 는水深과 粒徑에 따라서 달라진다. 이것은 M_3' 와 N_3' 가 흐름特性和 流砂特성에 의하여 左右된다는 것을 의미한다. 여기서 漢江下流部實驗資料의 相關係數가 Mantz의 實驗資料에 비하여 다소 작게 나타난 것은 水温의 결측으로 인하여 溫度變化가 考慮되지 않았기 때문으로 생각된다.

그림 (2)는 漢江下流部實驗資料의 平均粒徑別 Unit Stream Power와 浮遊砂濃度의 相關圖이며, 그림 (3)은 Mantz 實驗資料의 表(2)에 따른 分類別 Unit Stream Power와 浮遊砂濃度의 相關圖이다.

그림 (4)는 漢江의 人道橋地點에서 浮遊砂量 Q_s 와 Unit Stream Power의 關係를 plot한 것으로서 相關式은 다음과 같고 相關係數는 0.95334이다.

$$\log Q_s = 7.637 + 1.917 \log \frac{VS}{\omega} \quad (58)$$

이상에서 알 수 있는 바와 같이 Unit Stream

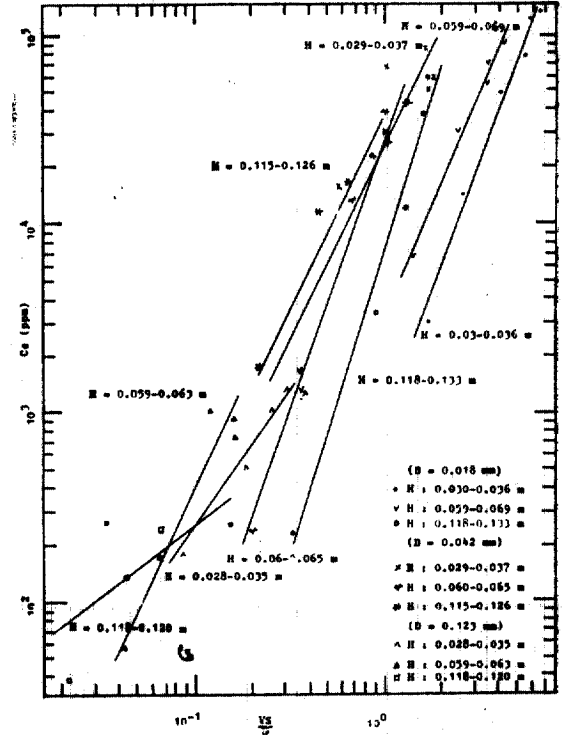


그림 3. Mantz 實驗資料의 C_s 와 $\frac{VS}{\omega}$ 의 相關圖

Power와 浮遊砂는 서로 密接한 關係가 있다. 이것은 Unit Stream Power가 浮遊砂를 決定하는 중요한 支配因子라는 것을 의미한다.

漢江下流部實驗資料와 Mantz 實驗資料의 浮遊砂濃度에 따른 資料로부터 多重回歸分析(multiple regression analysis)에 의하여 求한 式(48)과 (49)의 係數와 相關係數를 表(3)에 실었다.

4.2. Unit Stream Power와 S_R

Unit Stream Power와 S_R 의 關係를 分析한 결과 漢江下流部實驗資料의 平均粒徑 0.25 mm인 경우 相關係數는 0.85492이었으며, Mantz 實驗資料의 水深 0.059~0.069 m인 경우 相關係數는 0.90595이었다. S_R 에 관한 Unit Stream Power方程式(28)의 回歸係數 I, J 와 相關係數를 表(4)에 수록하였다. 그림 (5), (6)은 各 實驗資料에 대한 Unit Stream Power와 S_R 의 相關圖이다. 이상으로부터 I, J 는 흐름特性和 流砂

表 3. C.에 관한 Unit Stream Power 方程式의 係數와 相關係數

浮遊砂濃度	a_0'	a_1'	a_2'	a_3'	b_0'	b_1'	b_2'	b_3'	相關係數	資料數
$C_s \geq 30\text{ppm}$	3.1361	0.6498	0.1014	0.7107	0.4475	-0.0585	2.6606	1.5303	0.95146	69
$C_s \geq 20$	3.1142	0.5570	0.4639	0.8756	0.6251	-0.1584	2.8206	1.6420	0.95680	79
$C_s \geq 10$	3.0823	0.4687	0.8316	1.0535	0.7806	-0.2701	3.0242	1.7547	0.95915	83
$C_s \geq 0$	4.1842	0.7421	-1.5925	-0.2904	1.8993	0.1443	-0.0051	0.2353	0.95130	97

表 4. 式(28)의 回歸係數와 相關係數

資料	平均粒徑 (mm)	水深 (m)	I	J	相關係數	資料數	
I	1	0.25	0.0539~0.1133	2.5234	1.9913	0.85492	16
	2	0.38	0.0471~0.1250	0.4677	0.9502	0.78001	16
	3	0.45	0.0339~0.1359	3.6029	3.1711	0.83099	16
II	1	0.018~0.123	0.028~0.037	1.0096	1.4736	0.88340	17
	2	0.018~0.123	0.059~0.069	1.5216	1.2227	0.90595	16
	3	0.018~0.123	0.115~0.133	2.0368	1.0985	0.71511	16

凡例 : I : 漢江下流部 實驗資料
 II : Mantz 의 實驗資料

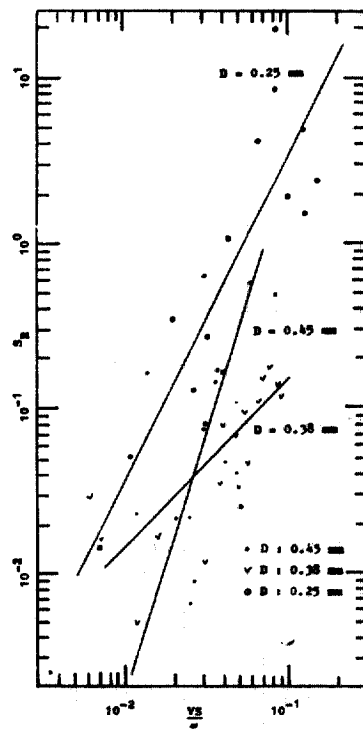
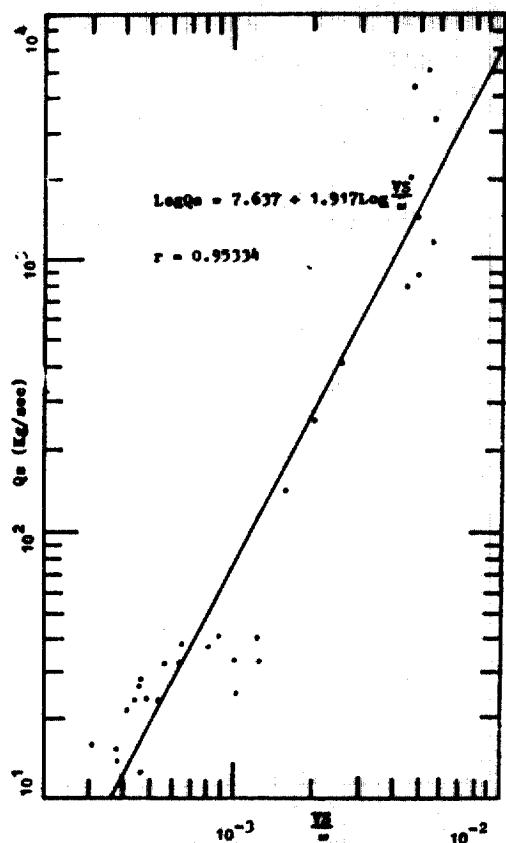


그림 4. 人道橋地點의 浮遊砂斗 Unit Stream Power 의 相關圖

그림 5. 漢江下流部實驗資料의 S_R 과 $\frac{VS}{c}$ 의 相關圖

表 5. S_R 에 관한 Unit Stream Power 方程式의 係數와 相關係數

S_R 값	Q_c^*	a_0	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3	相關係數	資料數
$S_R \geq 9$	$Q_c \geq 90\%$	-1.1432	1.2022	-1.5303	-0.8596	-0.4490	-0.1778	0.8589	0.0738	0.91266	35
$S_R \geq 4$	$Q_c \geq 80\%$	-1.1695	1.0825	-1.1321	-0.7169	-0.2226	-0.2717	1.1536	0.3597	0.92224	38
$S_R \geq 1$	$Q_c \geq 50\%$	-1.3713	0.7275	0.0133	-0.4246	2.6208	-0.3131	-2.3511	-1.3799	0.92670	51
$S_R \geq 0.5$	$Q_c \geq 33\%$	-1.8993	0.6141	0.8367	-0.1105	3.2992	-0.6597	-2.1884	-1.4018	0.94025	57
$S_R \geq 0.25$	$Q_c \geq 20\%$	-2.0225	0.4419	1.4206	0.0859	2.0010	-0.4993	-1.2293	-0.8443	0.93481	63
$S_R \geq 0.1$	$Q_c \geq 9\%$	-2.1770	0.5880	1.2708	0.1395	0.2190	-0.2156	0.4268	0.2277	0.93230	72

* S_R 값에 對應하는 總流砂量에 대한 浮遊砂의 比

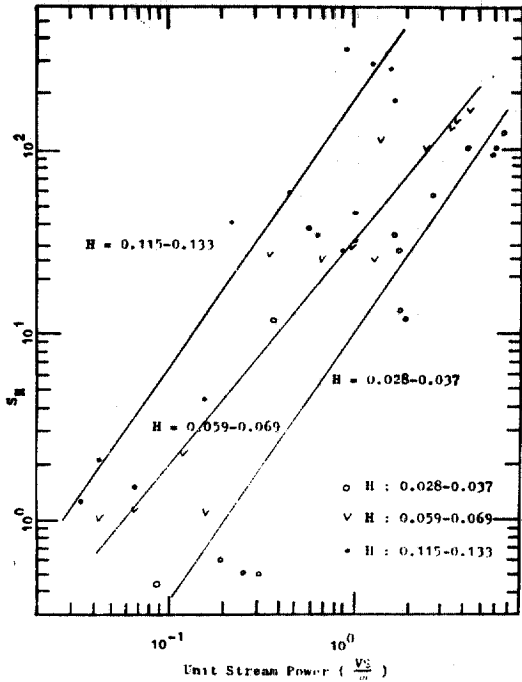


그림 6. Mantz 實驗資料의 S_R 과 $\frac{VS}{\omega}$ 의 相關圖

特性에 의하여 달라지는 것을 알 수 있으며, Unit Stream Power 의 S_R 에 대한 相關係數가 C_s 에 대한 것보다 相對的으로 작게 나타난 것은 掃流砂의 測定精度가 浮遊砂에 比하여 떨어지기 때문으로 생각된다.

表(5)에는 S_R 값에 따른 實驗資料로부터 式(29)와 (30)의 係數와 相關係數를 求하여 수록하였다.

4.3. Unit Stream Power 와 Reynolds 數

그림(7)은 人道橋地點의 流量과 Reynolds 數의 相關圖로서 相關式은 다음과 같고 相關係數는 0.98998 이다.

$$Q = 5.882 \times 10^{-5} R_e^{1.1272} \quad (59)$$

그림(8)은 式(54)의 Unit Stream Power 와 Reynolds 數의 關係를 人道橋地點에 적용한 相關圖로서 相關式은 다음과 같다.

$$\frac{VS}{\omega} = 2.642 \times 10^{-8} R_e^{0.75118} \quad (60)$$

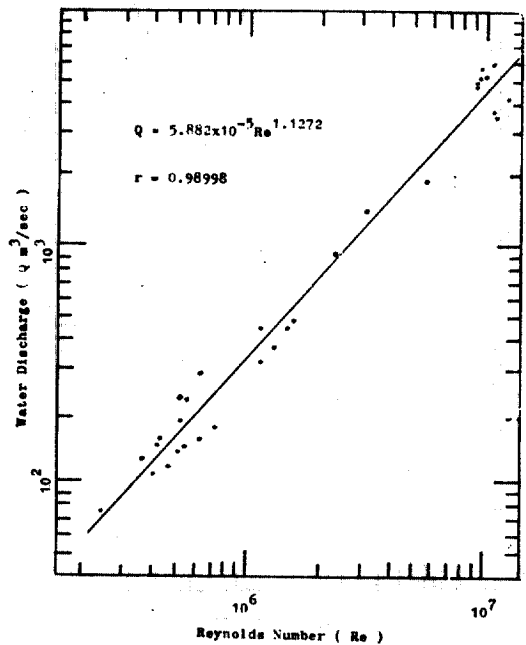


그림 7. 人道橋地點의 流量과 Reynolds 數의 相關圖

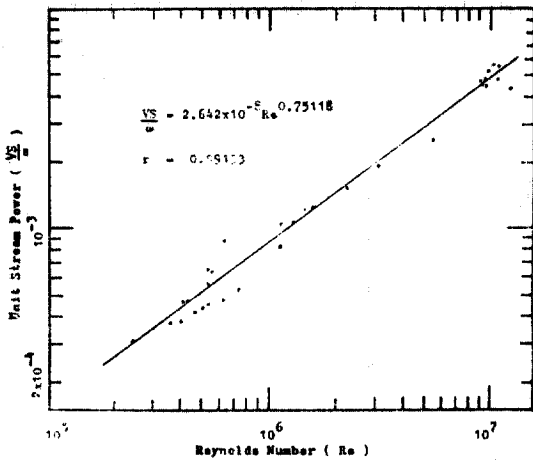


그림 8. 人道橋地點의 Unit Stream Reynolds 와 數의 相關圖

윗식의 相關係數는 0.99133 이며 亂流強度의 增加에 따라서 Unit Stream Power 가 增加한다.

이상으로부터 流量의 增加에 따라 Reynolds 數와 Unit Stream Power 가 增加하므로 亂流에 의한 浮遊砂도 增加하게 될 것이다. 또한 流量의 감소와 함께 總流砂量에 대하여 浮遊砂의 比率은 줄어들고 掃流砂의 比率이 相對的으로 流量의 감소, 즉 Unit Stream Power 의 감소에 따라 S_R 이 감소한다. 逆으로 流量의 증가에 따라 Unit Stream Power 가 增加하게 되고, Unit Stream Power 의 增加에 따라서 S_R 값이 增加하게 될 것이다.

5. 比較考據

5.1. S_R 式과 適用

式(29), (30)의 係數를 漢江下流部實驗資料와 Mantz 實驗資料로부터 求하였다. 이 S_R 式은 掃流砂의 測定이 困難한 경우 특히 洪水時에 相對的으로 比較的 測定이 容易하고 그 精度도 信賴할만한 浮遊砂만을 測定하여 總流砂量을 推定하는데 유용하게 이용할 수 있다.

일반적으로 S_R 값은 河川에 따라서 固定되어 있지 않고 表(6)과 같이 많은 變化를 보이고 있다. 즉 S_R 값은 흐름狀態와 流砂의 特性에 따라서 變하게 된다. 그러므로 S_R 값을 河川에 따라

表 6. 各 地點別 總流砂量에 대한 浮遊砂의 比와 S_R 값

地點	總流砂量에 대한 浮遊砂의 比		S_R 값	
	最小(%)	最大(%)	最 小	最 大
忠 州	76.9	98.5	3.33	65.67
后 灘	90.8	96.3	9.87	26.03
玄 風	75.6	99.2	3.10	124.0
津 洞	51.3	99.9	1.05	999.0
新 上	67.8	95.0	2.11	19.0
密 陽	99.2	99.7	124.0	332.3

表 7. 各 地點別로 適用된 S_R 式과 그 一致度

地點	적용된 S_R 式*	一 致 度		
		最 小	最 大	平 均
忠 州	$S_R \geq 0.1$	0.35	1.22	0.84
后 灘	$S_R \geq 4$	1.59	7.55	4.16
玄 風	$S_R \geq 0.1$	0.12	3.74	0.82
密 陽	$S_R \geq 0.25$	0.92	5.50	2.09

*表 5의 係數를 式(28), (29), (30)에 적용한 S_R 式

固定시켜 놓고 浮遊砂만을 測定하여 總流砂量을 推定하는 것은 대단히 많은 誤差를 수반할 수도 있다. 이와 같은 S_R 값의 合理的인 推定은 重要한 의미를 지니게 되나 그것은 대단히 어려운 問題가 아닐 수 없다.

表(7)은 忠州, 后灘, 玄風, 密陽地點에 적용한 S_R 式과 一致度를 나타낸 것으로 南漢江의 忠州와 洛東江의 玄風은 一致程度가 대단히 좋고, 密陽江의 密陽地點은 비교적 計算값이 큰 편이며 平昌江의 后灘은 計算값이 매우 크게 나타났다. 여기서 一致度는 實測한 S_R 값에 대한 計算에 의한 S_R 값의 比로서 完全히 一致할 경우 一致度는 1이다.

그림(9)은 表(7)의 S_R 式과 式(46)에 의하여 各 地點別 總流砂量을 計算하여 實測한 값에 대하여 plot 한 것으로서 대단히 좋은 一致程度를 보이고 있다. 各 地點의 S_R 값의 一致度가 多少間 變動이 있음에도 불구하고 總流砂量의 推定이 대단히 좋게 나타난 것은 掃流砂가 浮遊砂에 比하여 작기 때문으로 생각된다.

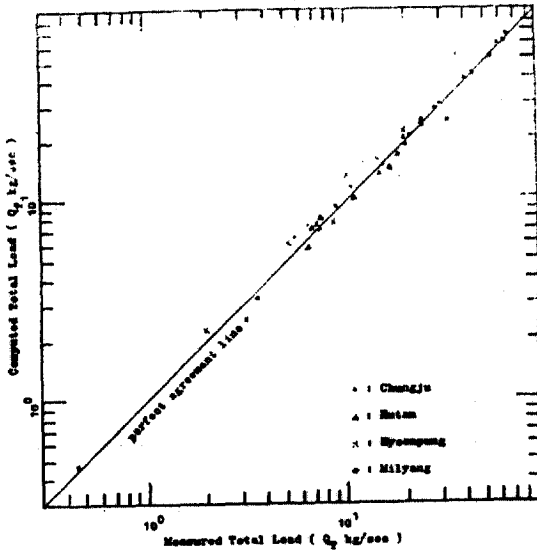


그림 9. 忠州, 后灘, 玄風 및 密陽地點의 Computed Q_r 와 Measured Q_r

비교적 流砂問題를 重要하게 考慮해야 할 地點의 總流砂量推定에 $S_R \geq 0.1$ 인 각 실험자료로부터 다중회귀분석을 통하여 얻어진(表 5) 다음식을 적용할 수 있다.

$$\log S_R = -2.177 + 0.588 \log \frac{H}{D} + 1.271 \log \frac{U_*}{\omega} + 0.140 \log \frac{\omega D}{\nu} + \left(0.219 - 0.216 \log \frac{H}{D} + 0.427 \log \frac{U_*}{\omega} + 0.228 \log \frac{\omega D}{\nu} \right) \log \frac{VS}{\omega} \quad (61)$$

그림(10)은 식(61)과 (46)을 각 지점에 적용하여 求한 總流砂量과 實測에 의한 값을 나타낸 것으로서 計算値가 實測値보다 약간 크지만 比較的 좋은 一致程度를 보이고 있다. 이것은 河川의 開發이나 運用에 있어서 流砂量을 重要하게 다루어야 할 경우에 식(61)을 適用하여 S_R 을 推定할 수 있음을 보여주는 것이다.

S_R 식(31), (36) 및 (38)에서 S_R 의 決定에 가장 重要한 支配因子는 相對粗度이다. 이것은 本 研究에 의한 S_R 식(28)이 Unit Stream Power의 支配를 받고 있는 것과 대조적이다. 또한 식(28)의 I, J 는 식(29), (30)과 같이 相對粗度, 剪

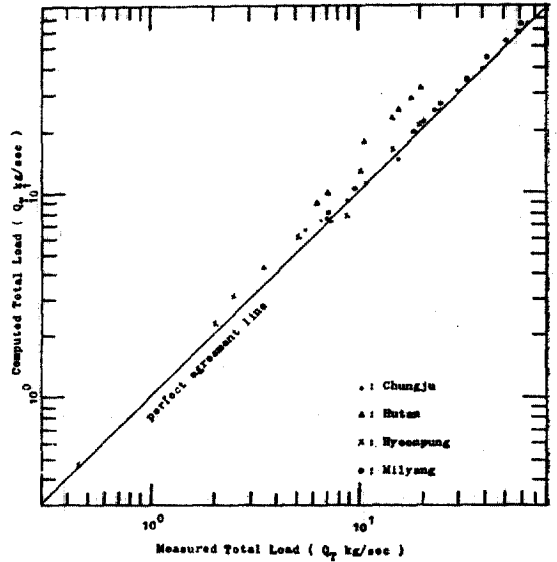


그림 10. 式(60)을 適用한 忠州, 后灘, 玄風 및 密陽地點의 Computed Q_r 와 Measured Q_r

斷速度와 沈降速度의 比 및 沈降速度 Reynolds 數의 函數로서 식(31), (36) 및 (38)보다 폭넓은 變數를 포함하고 있다. 뿐만 아니라, 式의 適用性에 있어서도 식(31), (36) 및 (38)은 대단히 복잡한 積分項을 포함하고 있으므로 本 研究에 의한 식(28)이 훨씬 더 적용하기에 편리한 것을 알 수 있다.

또한 Yang은 Einstein의 식(31)을 적용하여 總流砂濃度에 관한 Unit Stream Power 方程式(13)을 誘導하였으나 식(28)을 적용하면 직접적으로 얻을 수 있다.

忠州, 后灘, 玄風 및 密陽地點의 實測資料에 의한 식(29), (30)의 係數와 相關係數를 表(8)에 列었다.

5.2. 流砂運送과 Unit Stream Power

總流砂濃度 C_b , 浮遊砂濃度 C_s , 掃流砂濃度(= q_B/q_ω) 및 浮遊砂와 掃流砂의 比 S_R 을 流砂運送特性値라고 하면 식(19), 식(28) 및 식(48)에서 알 수 있는 바와 같이 流砂運送特性値[ST]는 Unit Stream Power와 密接한 關係가 있으며 다음과 같은 關係式을 갖는 것으로 생각된다.

$$\log [ST] = A + B \log \frac{VS}{\omega} \quad (62)$$

表 8. 各地點別 S_R 에 관한 Unit Stream Power 方程式의 係數와 相關係數

地 點	a_0	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3	相關係數	資料數
忠 州	39.087	-27.229	-134.54	83.521	30.519	-18.922	-79.850	45.285	0.94844	10
后 灘	22.850	-13.500	-13.429	11.345	6.455	-5.805	7.701	6.209	0.99951	8
玄 風	102.880	-33.842	-11.265	3.876	38.075	-12.345	-6.540	0.609	0.99327	10
密 陽	-33.255	-14.762	-43.822	70.065	-6.316	-5.430	-10.841	20.849	0.93344	10

여기서 A, B 는 式(29), (30)처럼 相對粗度, 剪斷速度와 沈降速度의 比 및 沈降速度 Reynolds 數 등과 같이 흐름特性和 流砂特性에 의하여 달라진다.

6. 結 論

本 研究를 通하여 얻어진 成果는 아래와 같다.

1. Unit Stream Power는 浮遊砂와 S_R 의 決定에 重要한 支配因子役割을 하며 相關關係가 대단히 좋았다.

2. S_R 에 관한 無次元 Unit Stream Power 方程式을 Unit Stream Power 函數로부터 誘導하였으며 係數 I, J 는 흐름特性和 流砂特性에 의하여 달라진다.

3. 流量의 增加에 따라 亂流強度가 增加되며, Unit Stream Power는 Reynolds 數와 密接한 關係가 있다.

4. 流砂의 平均粒徑 0.018~0.45 mm, $S_R \geq 0.1$ 인 實驗資料로부터 S_R 式의 係數를 式(61)과 같이 提示하였으며, 이는 河川의 總流砂量推定에 사용될 수 있다.

5. 流砂運送特性值와 Unit Stream Power는 아래와 같은 相關式이 成立된다.

$$\log [ST] = A + B \log \frac{VS}{\omega}$$

參 考 文 獻

- Maddock, T., Jr., "A Role of Sediment Transport in Alluvial Channels" *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 99, No. Hy 11, November, 1973, pp. 1915~1931.
- Bagnold, R.A., "An Approach to the Sediment Transport Problem form General Physics," *U. S. Geological Survey*, US Government Printing

Office, Washington D.C., Professional Paper 422 -I, 1966, pp. 1~37.

- Yang, C.T., "Unit Stream Power and Sediment Transport", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 98, No. Hy 10, October, 1972, pp. 1805~1826.
- Yang, C.T., "Incipient Motion and Sediment Transport", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 99, No. Hy 10, October, 1973, pp. 1679~1704.
- Yang, C.T., "Minimum Unit Stream Power and Fluvial Hydraulics", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 102, No. Hy 7, October, 1976, pp. 919~934.
- Yang, C.T., J.B. Stall, "Applicability of Unit Stream Power Equation", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 102, No. Hy 5, May, 1976, pp. 559~568.
- Yang, C.T., "Unit Stream Power Equations for Total Load", *Journal of Hydrology*, Vol. 40, 1979, pp. 123~138.
- Song, C.C.S., and Yang, C.T., "Velocity Profiles and Minimum Stream Power", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 105, No. Hy 8, August, 1979, pp. 981~998.
- Song, C.C.S., and Yang, C.T., "Minimum Stream Power: Theory", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 106, No. Hy 9, September, 1980, pp. 1477~1487.
- Chang, H.H., and Hill, J.C., "Minimum Stream Power for Rivers and Deltas", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 103, No. Hy 12, December, 1977.
- Alonso, C.V., "Selecting a Formula to Estimate Sediment Transport Capacity on Non-Vegetated Channels", *CREAMS: a Field Scale Model for*

- Chemicals, Runoff, Erosion from Agricultural Management Systems, Conservation Research Report No. 26, United States Department of Agriculture, 1980, pp. 426~435.
12. by Task Committee on Relations Between Morphology of Small Streams and Sediment Yield of the Committee on Sedimentation of Hydraulics Division, "Relationships Between Morphology of Small Streams and Sediment Yield", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 108, No. Hy 11, November, 1982, pp. 1328~1365.
 13. Shen, H.W., Hung, C.S., "On Engineering Approach to Total Bed Material Load by Regression Analysis", *Proceedings of the Sedimentation Symposium*, Chapter 14, 192, pp. 14.1~14.17.
 14. Maddock, T., Jr., "Equations for Resistance to Flow and Sediment Transport in Alluvial Channels", *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 1, 1976, pp. 11~21.
 15. Yang, C.T., and Albert Molinas, "Sediment Transport and Unit Stream Power Function", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 108, No. Hy 6, June, 1982, pp. 774~793.
 16. Graf, W.H., *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw-Hill, 1971, pp. 155~156, pp. 234~237.
 17. Einstein, H.A., and Farouk M. Abdel-Aal, "Einstein Bed-Load Function at High Sediment Rates", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 98, No. Hy 1, January, 1972, pp. 137~151.
 18. 安相鎮, "南漢江의 流砂量에 대한 考察", 大韓土木學會誌, 第17卷 第4號, 1970, pp. 12~20.
 19. 安世永, "流砂量算定에 관한 研究~密陽江을 中心으로~", (碩士學位論文, 東亞大學校 大學院, 1979).
 20. 金熙鍾外 2人, "韓國河川의 流砂量 算定에 관한 研究(Ⅰ)(洛東江을 中心으로)", 韓國水文學會誌, 第15卷 第2號, 1982. 6, pp. 41~57.
 21. 河村三郎, 土砂水理學 I, 森北出版株式會社, 1982, p. 295, p. 23.
 22. Yalin, M.S., *Mechanics of Sediment Transport*, 2nd Edition, Pergamon Press, 1977, pp. 152~159.
 23. 建設部, 한국수자원개발공사, 한강하류부 수리모형 실험보고서(국부개소 및 이동상기조실험), 1972. 12.
 24. Mantz, P.A., "Semi-empirical Correlations for Fine and Coarse Cohesionless Sediment Transport", *Proc. Instn Civ. Engrs*, Part 2, 1983, 75, Mar., pp. 1~33.
 25. 韓國電力株式會社, 水力地點 流砂量測定調査報告書(忠州, 后灘), 1970. 9.
 26. 李元煥, "漢江開發을 爲한 移動床水理模型實驗에 關하여" 大韓土木學會, 1983年度 學術發表會 概要集, 1983, pp. 5-42~5-54.
 27. 李元煥譯, "河川水理模型實驗의 相似律에 關하여" 大韓土木學會誌, 第31卷 第4號, 1983. 8.
 28. 建設部, 漢江河床變動調査報告書, 1981. 12.
 29. 建設部, 韓國水文調査年報
 30. 建設部, 漢江河川整備基本計劃, 1978. 12.
 31. 중앙기상대, 기상년보
 32. Honderson, F.M., *Open Channel Flow*, Macmillan Pub. Co. Inc., 1966, p. 522.
 33. ASCE, *Sedimentation Engineering*, 1975, p. 745.

(接受: 1984. 1. 19)