

堆積物 粒子的 跳躍에 關한 研究

張 元 一

A Study on the Saltation of the Sediment

Won - Yil Jang

<目 次>

1. 序 論
3. 分 析

2. 理 論
4. 結 論

Abstract

The transport of sediment particles by a flow of water can be in the form of bed-load and suspended load, depending on the particle characteristics and flow conditions.

The suspended load may contain saltation motion, which is defined as the particles will be moving along the bed by more or less regular jumps.

The experiments on saltation bed-load particles are very scarce and the mathematical model has not been calibrated extensively. In this paper, the critical saltation velocity is calculated for a range of flow conditions.

And using the results of the calculations and conditions the saltation height, length and the concentration of suspended-load particles are computed.

1. 序 論

流水에 의한 堆積物 粒子的 移動 形態는 掃流와 浮流의 形式으로 決定된다. 粒子 粒徑의 두배 높이까지 轉動, 滑動, 小跳躍하면서 移動하는 形式은 掃流의 境遇로 分類하고 剪斷速度가 沈降速度보다 커지므로 **turbulent force**가 作用하여 粒子가 移動되는 現象을 浮流의 形式으로 堆積物 流送形態를 分類하며 이것은 粒子的 特性과 流水의 條件에 따라 決定된다.

堆積物의 두가지 移動形態 가운데 大粒徑을 가진 粒子的 境遇는 掃流, 小粒徑의 粒子는 浮流의 形式이 큰 比重을 차지하나 流送形式은 粒子的 條件뿐 아니라 水理的인 條件에 따라 달라지므로 그 境界條件을 決定하기는 單純한 問題가 아니다.

반면에 流砂量 計算은 掃流, 浮流에 對하여 相異하게 取扱하여야 하므로 그 境界條件을 밝힐 必要가 있다.

粒子가 流速等の 條件에 依해 浮流現象이 始作되는 條件을 跳躍 (**saltation**)의 概念을 導入하여 跳躍이 始作되는 條件으로 본다면 境界條件을 決定하기가 比較的 簡單해질 수 있을 것으로 思料된다. 粒子的 移動特性 가운데 순간적인 **turbulent** 衝擊에 依해 運動을 始作하여 粒子 直徑의 두배 높이 以上으로 **jump** 하면서 移動하는 形態를 跳躍이라 하며 一般的으로 堆積物 移動形態 가운데 浮流로 分類한다.

이러한 浮流의 한 形態에 속하는 **saltation**은 浮流現象의 一部分을 차지하여 浮流의 境界條件을 決定하는 하나의 方法이 될 수 있을뿐 아니라, 全體 流砂量 決定에 影響을 미치는 것으로 알려져 있으나, 粒子的 **saltation**에 관한 實驗은 매우 힘든 境遇이고 數學的 모델 역시 광범위하게 되어 있지 않고 現在까지 알려진 것은 몇가지 實驗式 程度이다. 本論文에서는 **saltation**에 對하여 알려진 實驗式的 限定된 實驗條件을 **saltation**에 關한 一般的인 諸條件으로 擴大 考察하고 그 結果 實祭 流砂量 計算에 使用될 條件과 適用 範圍를 檢討하여 數學的 모델의 基礎로 삼고자 한다.

2. 理 論

跳躍現象은 剪斷速度 (**shear velocity, U_t**)가 沈降速度 (**W_0**)보다 클 때 浮流現象이 發生되므로 $U_t/W_0 > 1$ 인 境遇 堆積物 運搬形態에서 跳躍現象이 일어날 수 있는 條件으로 볼 수 있고 流水에서 浮流現象이 우세한 것으로 決定할 수 있다.

Farnandez 等に 依한 跳躍높이 및 移動거리에 關한 實驗式은 아래와 같이 表現되며

$$\text{Saltation Height } SH = 0.3 \times D_t^{0.7} \times T^{0.5} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Saltation Length } SL = 3.0 \times D_t^{0.6} \times T^{0.9} \dots\dots\dots(2)$$

上記式은 制限된 實驗條件에 依한 結果를 流送比를 計算하는데 많이 利用되는 無次元 要素인 Particle Parameter D_t 와 transport stage parameter T 로서 表現된 式이다.

式(1), (2)에서 Particle Parameter D_t 는 $D_t = D_{50} \times [(s-1) \times g / a^2]^{1/3}$ 으로 表現되며, Transport stage parameter T 는 表面의 粗度係數에 關한 Chezy 常數 C 값에 對해 $g^{0.5}/C$ 인 剪斷速度 U_t 와 限界剪斷速度 U_{cr} 에 依해 $(U_t^2 - U_{cr}^2) / U_{cr}^2$ 으로 表現되는 값이다.

여기서, D_{50} 은 堆積物 粒子的 分析 結果를 表示하는 粒徑의 累積曲線에서 50%에 該當하는 粒子的 粒徑으로 平均粒徑으로 볼 수 있는 값이고 S 는 粒子的 比重 ρ_s 와 流水의 比重 ρ_0 의 比 $s = \rho_s / \rho_0$ 를 나타낸 것이다.

또한 g 는 重力加速度, a 는 流水의 動粘性係數, C 는 Chezy 常數를 나타낸다.

Chezy 常數 C 는 Vanoni - Brooks 方法에 依한 河床의 水理半徑 R_b 를 適用, $C = 18 \times \log [(12 \times R_b) / (3 \times D_{90})]$ 으로 計算하였고, D_{90} 은 堆積物 粒子 累積曲線에서 90%에 該當하는 粒徑이다.

또한 限界剪斷速度 U_{cr} 은 Shield 實驗에 依한 限界流動要素 (Critical particle mobility parameter) M_{cr} 로서 表現되는 $U_{cr} = [(s-1) \times g \times D_{50} \times M_{cr}]^{1/2}$ 으로 計算하였다.

여기서 限界流動要素 M_{cr} 은 Particle Parameter D_t 값에 따라 다음과 같이 決定되는 값이다.

$$\begin{aligned} M_{cr} &= 0.24 \times D_t^{-1} & D_t &\leq 4 \\ M_{cr} &= 0.14 \times D_t^{-0.34} & 4 &< D_t \leq 10 \\ M_{cr} &= 0.04 \times D_t^{-0.1} & 10 &< D_t \leq 20 \\ M_{cr} &= 0.013 \times D_t^{0.29} & 20 &< D_t \leq 150 \\ M_{cr} &= 0.055 & 150 &\leq D_t \end{aligned}$$

跳躍에 依한 堆積物 移動量은 바닥에서의 濃度, 跳躍높이, 粒子的 速度에 對한 函數關係로 알려져 있고, 粒子的 速度는 平均的으로 $U = [(s-1) \times g \times D]^{0.5} \times T^{0.6} \times 1.5$ 로서 Transport stage parameter T 와 粒徑 D 의 값으로 計算되어진다.

또한 粒子直徑 200~2,000 μm , 平均水深 0.1 m 以下の 實驗에서 濃度 C_a 와 最大濃度 C_o 의 比는 $C_a / C_o = 0.18 \times T / D_t$ 로 나타낼 境遇 水理計算에서의 濃度分布와 거의

일치하는 것으로 밝혀져 있으므로 上記 濃度式 및 速度 計算式과 (1)式으로 堆積物 移動量을 表現하면 $Q = 0.053 \times T^{2.1} \times D_{50}^{1.5} \times [(s-1) \times g]^{0.5} / Dt^{0.3}$ 과 같다.

3. 分 析

1) Chezy 常數의 D_{90}

Vanoni - Brooks 方法에 依한 水理半徑과 堆積物 粒子直徑의 累積曲線에서 90%에 該當하는 粒徑인 D_{90} 의 값으로 算出되는 Chezy 常數는 一般的으로 使用되는 값이나, 實際 條件에 依하여 水理半徑과 D_{90} 에 依한 計算 結果는 그 變化폭이 아주 크게 나타난다.

그러므로 C 값은 實際 諸條件에 對한 計算의 結果值를 利用하여야 하나 計算機에 依한 simulation 過程에서의 變數를 考慮하여, 平均粒徑이라고도 볼 수 있는 D_{50} 과 D_{90} 값에 따라 誤差폭을 計算하였다. $D_{90} = aD_{50}$ 으로 놓고 a 값에 따른 saltation 및 浮流砂量을 計算하여 그 結果를 表示하면 그림 1과 같이 나타난다.

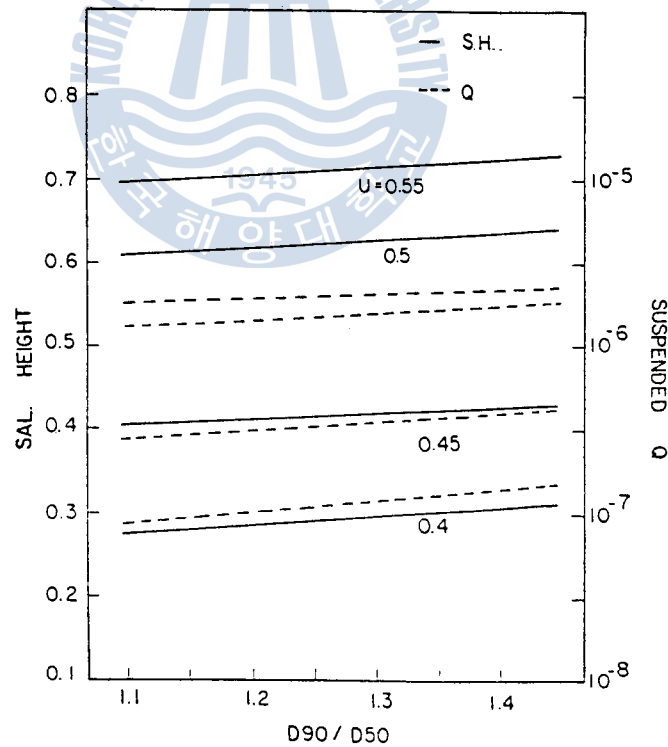


그림 1. 浮流砂量 및 Saltation 에서 D_{90}/D_{50} 의 影響

a 값의 變化에 對한 saltation 및 浮流砂量의 結果値는 그 變化量이 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 以下로서 a 를 平均値 1.3 으로 一般의인 堆積物 粒子的 傾向을 취하였을 境遇 誤差가 1% 以內에 該當되므로 a 를 1.3 으로 決定하여 D_{90} 을 平均粒徑의 1.3 배 값으로 固定, 計算하였다. 또한 上記 結果는 粒子的 移動이 始作되는 限界速度에서부터 流速이 增加함에 따라 誤差는 점차 적은 값으로 나타남으로 그 結果에 별 影響이 없을 것으로 思料된다.

그러므로 Chezy 常數 C 는 saltation 計算에서는 $C = 18 \times \log [(12 \times Rb)/(3.9 \times D_{50})]$ 로 計算하여도 誤差는 無視할 수 있다.

2) Saltation 限界速度

saltation을 包含한 浮流形態의 堆積物 移動의 境遇 河床에 接近된 粒子가 跳躍裝態에 있는 동안은 longitudinal velocity 成分이 主成分이다. 또한 剪斷速度 대신에 最近의 各種 水理計算에서 平均流速을 많이 使用하는데 平均流速을 使用함으로써의 誤差보다 野外 測定 結果를 그대로 使用할 수 있는 等長點이 많으므로 平均流速의 使用頻度가 높은 편이다.

式(1), (2)에 依하여 saltation 理象이 發生될 수 있는 限界流速을 考察하기 위하여, 水理 半徑 및 粒子 粒徑에 따라 計算한 結果 그림 2, 3 과 같이 表現된다.

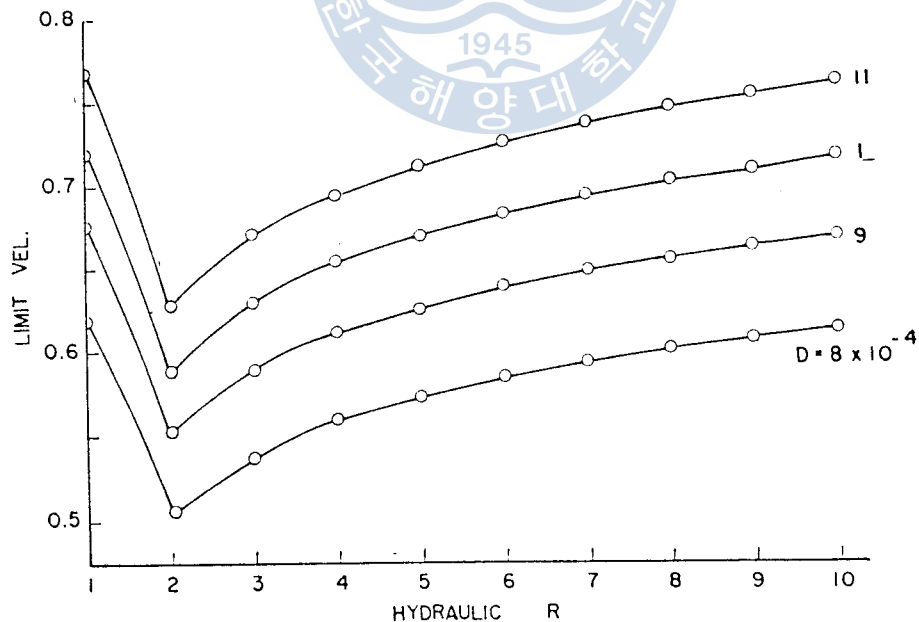


그림 2. 水理半徑에 對한 限界流速值 ($R = 7 m$)

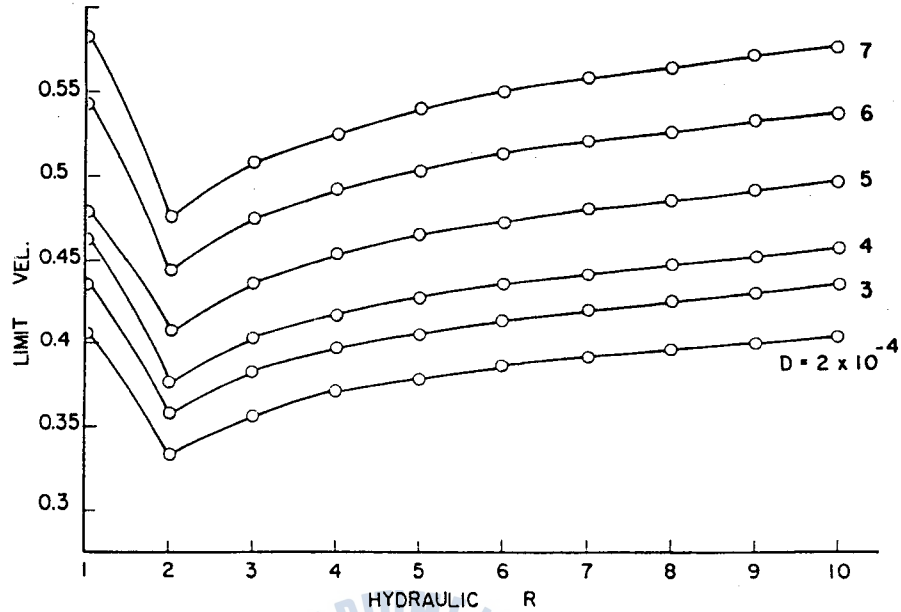


그림 3. 水理半徑에 對한 限界流速值

그림에 依하면 限界速度는 水理半徑 2 m일 境遇 最低值를 나타내고, 水理半徑이 커짐에 따라 限界速度가 높아짐을 알 수 있다. 이것은 水理半徑이 增加함에 따라 粒子의 沈降速度가 커지고 壓力과 表面摩擦에 依한 Drag force의 longitudinal 成分이 增加함으로 發生되는 結果이나 2 m以下인 境遇 그림에 나타나는 結果는 거의 最大値에 가까운 값으로 上記 實驗에 依한 saltation 式은 水理半徑이 아주 작은 地點에서는 適用되지 못함을 알 수 있다.

이것은 一般的으로 限界剪斷力을 考慮할 境遇 平均水深으로 水理半徑이 計算되는 事例가 많고 그 結果가 妥當性이 있는 것으로 알려져 있으므로 上記 結果는 平均水深에 適用하여도 큰 誤差는 없을 것으로 思料되어 平均水深이 극히 얇은 곳에서의 saltation에 依한 浮流砂量은 無視하여도 좋을 것으로 생각된다.

3) Saltation Length

諸條件들의 變化에 對한 saltation length는 그림 4, 5, 6, 7 과 같이 나타난다. 그림 4는 水理半徑에 對한 saltation length로서 水理半徑이 增加함에 따라 SL은 減小하나 그 變化幅이 거의 없다.

특히 限界流速值에서 0.1 ~ 0.2 增加分에서는 減小幅이 10%程度 있으나 限界流速值

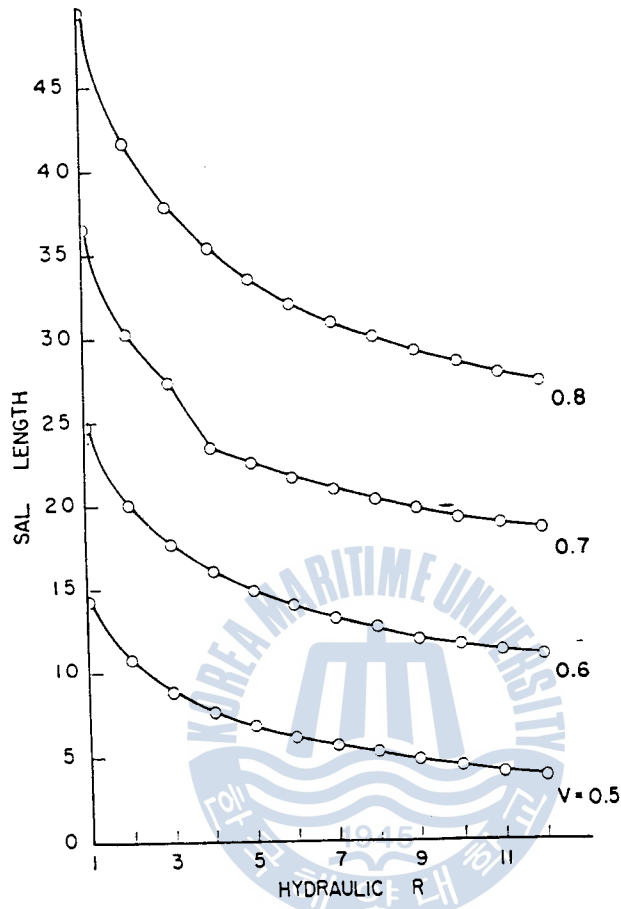


그림 4. 水理半徑에 對한 Saltation Length

0.3 以上에서는 거의 一定한 값으로 나타나 SL 計算에서는 水理半徑에 對한 變化는 거의 없는 것으로 考慮하여도 큰 誤差는 없다.

粒子的 粒徑에 對한 SL 은 그림 5 에서와 같이 堆積物의 平均粒徑 $4 \sim 5 \times 10^{-4}$ 에서 SL 의 最大値를 보이며, 粒徑이 적을수록 lift force 에 比하여 Drag force 의 연직성분이 크게 作用함으로 그 變化가 相當히 크게 나타나고, 粒子가 클수록 lift force 가 크게 作用되어 saltation 에 의한 移動거리가 크게 나타난다.

이것은 Drag force 가 粒子的 斷面 및 粒子速度의 2 乘에 比例하고 lift force 는 粒徑의 2 乘과 粒子速度에 比例하는 表現과 比較 說明될 수 있다.

또한 粒徑에 對한 SL 값은 水理半徑의 變化에 關係없이 同一한 變化를 가진다.

各 粒徑 및 流速에 對한 SL 은 그림 6, 7 에서 볼 수 있는 바와 같이 流速에 따라 增加

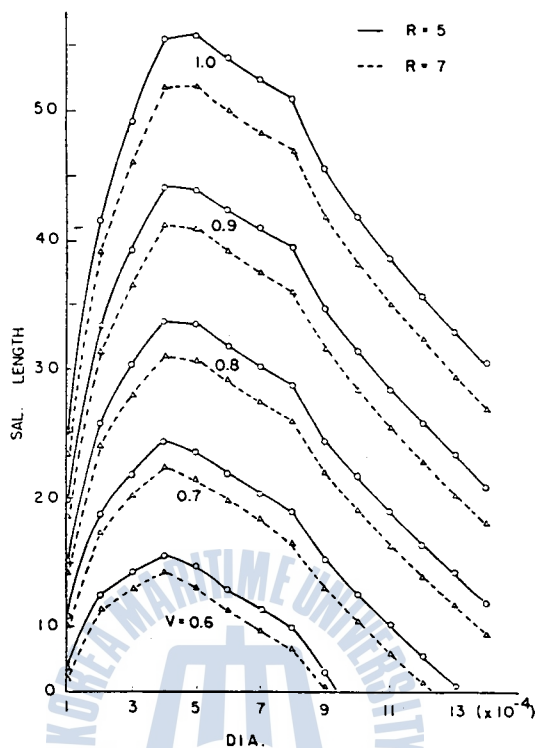


그림 5. 堆積物 粒徑에 對한 Saltation Length

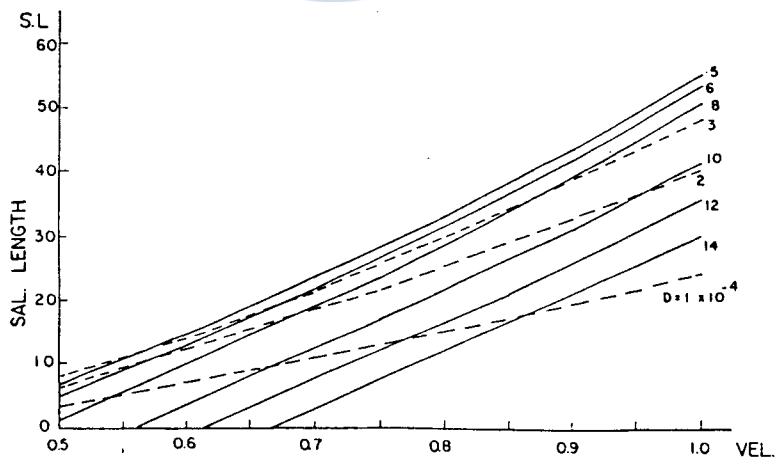


그림 6. 流速에 對한 Saltation Length

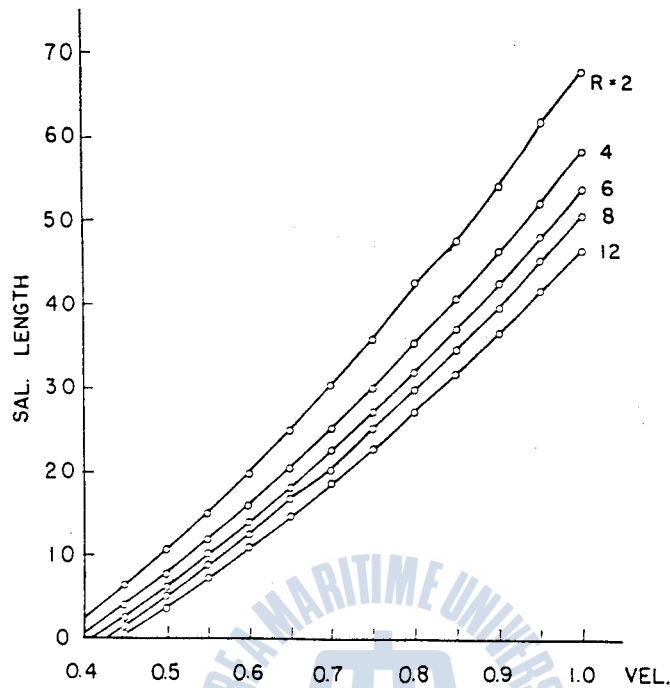


그림 7. 流速에 對한 Saltation Length ($D_{50}=500 \mu m$)

하는 것은 當然한 現象이나 그림 4에서와 같이 SL이 最大인 粒徑을 中心으로 增加와 減少가 同一한 傾向을 보여준다. 以上에서 SL값에 水理半徑은 別 影響을 미치지 않고 速度 및 粒徑은 相當한 影響을 미친다.

4) Saltation Height

諸條件의 變化에 對한 SH의 값은 그림 8, 9와 같이 表現된다. SH는 그림 8에서와 같이 水理半徑에 關係없이 거의 同一한 變化를 가지면서 流速이 增加함에 따라 SH도 增加하며, 거의 流速에 比例하는 傾向을 나타낸다.

堆積物 粒徑에 對한 SH의 값은 SL 과는 相異하게 平均粒徑이 $8 \sim 9 \times 10^{-4}$ 에서 SH의 最大値를 나타내고 粒徑이 작을수록의 變化幅은 緩慢히 나타낸다. 이것은 그림에서 보는 바와 같이 粒子가 작을수록 drag force가 強하게 作用되고 클수록 lift force가 強하게 作用되는 것으로 SL과 同一한 現象을 보인다.

또한 그림 9에서 流速이 限界値에서 增加할수록 粒子의 크기에 對한 saltation의 變化가 작게 나타낸다. 特히 流速이 빠른 境遇 SH의 最大値 以上の 粒子 크기에서 SH는 거의 -

定한 값을 維持한다.

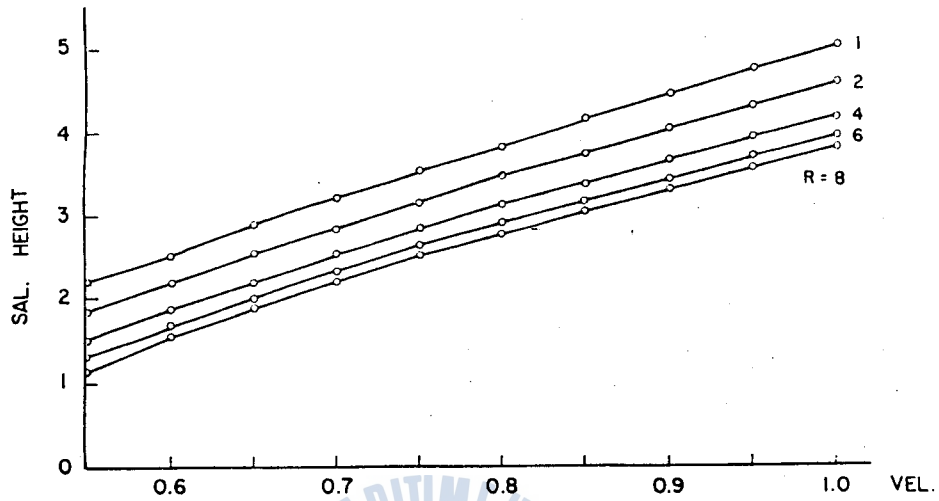


그림 8. 流速에 對한 Saltation Height ($D_{50} = 700 \mu m$)

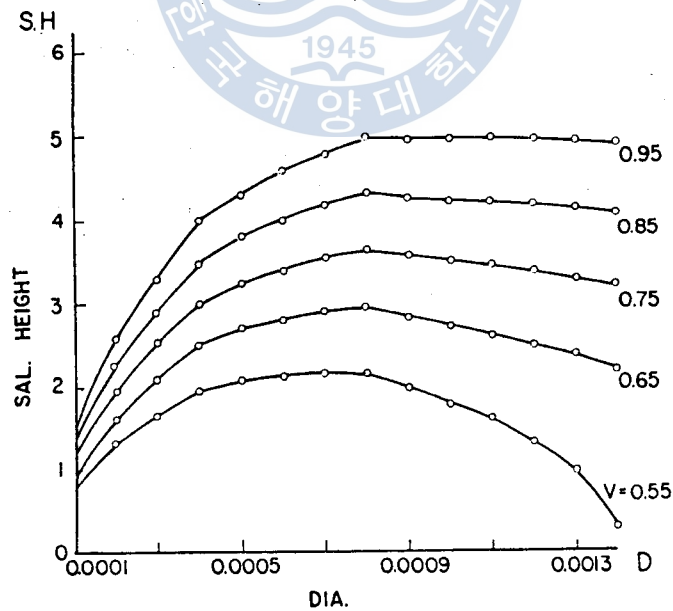


그림 9. 粒子的 粒徑에 對한 Saltation Height

5) 浮流砂量

saltation에 依한 堆積物 粒徑, 水理半徑, 流速의 變化에 對한 浮流砂量은 그림 10, 11, 12, 13 과 같이 나타나고, 그 結果를 SH, SL 의 結果와 比較 考際하면 水理半徑의 變化에 따른 浮流砂量은 限界流速 部近에서는 水理半徑이 커짐에 따라 浮流砂量 减小가 어느 程度 있는 것으로 나타나 있으나, 限界流速 以上에서는 水理半徑에 無關하게 一定한 값을 보여 준다.

또한 앞에서 saltation 現象에서 言及한 바와 같이 流速이 增加함으로 浮流砂量이 增加하는 것은 當然한 現象이나, 그림 11, 12 에서와 같이 水理半徑이 클수록 浮流砂量은 限界速度에서 約 0.6 까지는 增加幅이 매우 크고 流速 0.85 以上에서는 거의 一定한 값을 維持한다. 이러한 結果로 流速 0.6 과 0.85 를 境界條件으로 볼 수 있다. 粒徑에 對해서는 粒子가 커질수록 浮流砂量이 적은 반면에 流速에 따른 그 增加幅이 상당히 크게 나타난다.

특히 $1,000 \mu\text{m}$ 以上の 粒徑을 가진 粒子的 境遇 限界流速에서 約 0.85 까지는 急變化를 하면서 增加하고 그 以上에서는 比較的 緩慢한 變化를 보이므로 역시 0.85 의 流速과 $1,000 \mu\text{m}$ 의 粒徑을 境界條件으로 볼 수 있다. 또한 限界流速과 比較 一般의인 條件에서 細粒堆積物의 境遇 流速 0.45~0.7 에서 saltation에 依한 浮流現象이 發生하고 그 量은 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 의 값을 가진다.

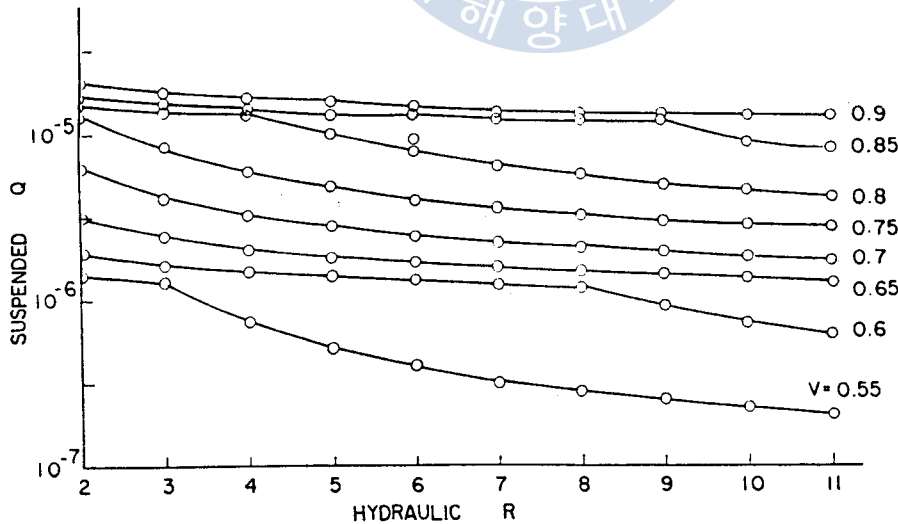


그림 10. 水理半徑에 對한 浮流砂量

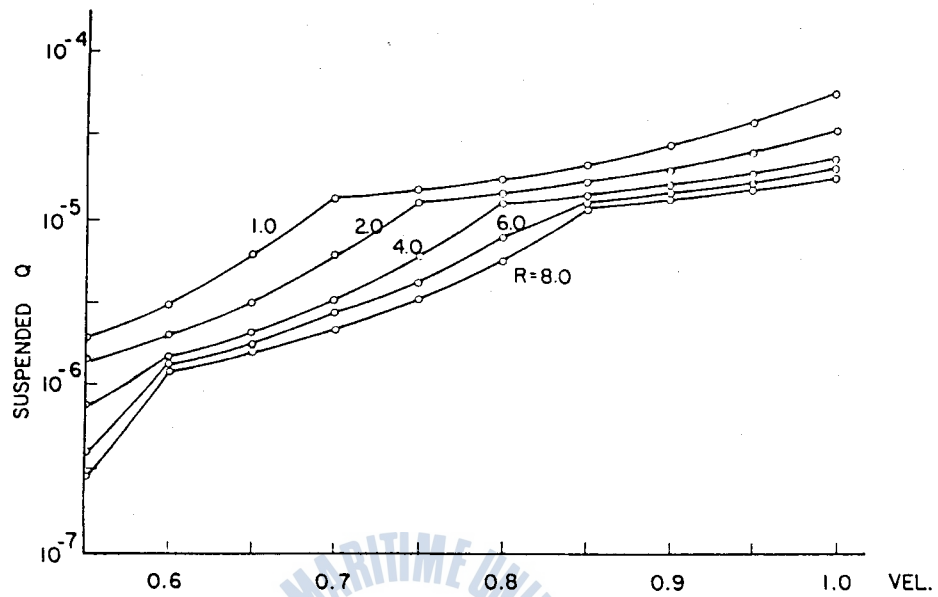


그림 11. 流速에 對한 浮流砂量

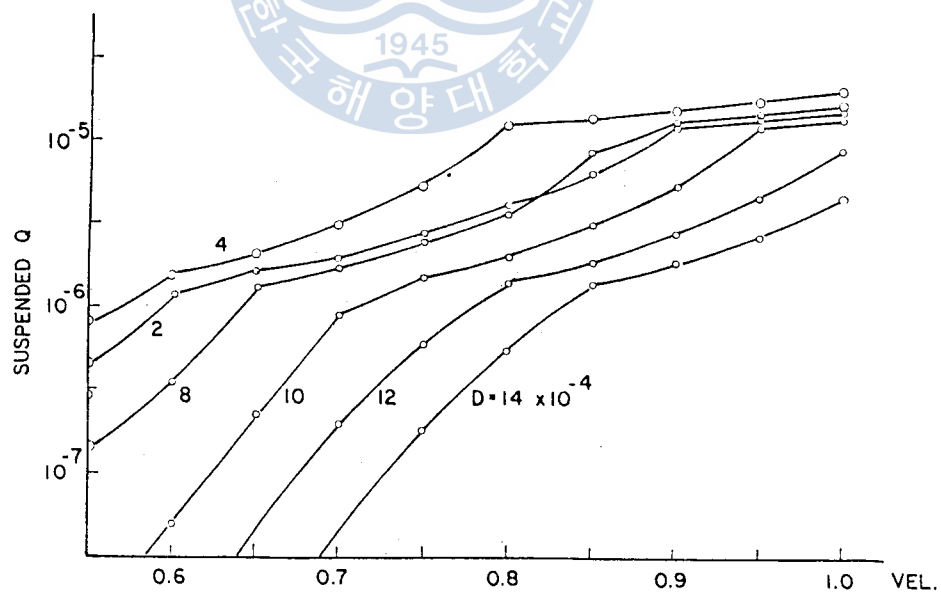


그림 12. 流速에 對한 浮流砂量

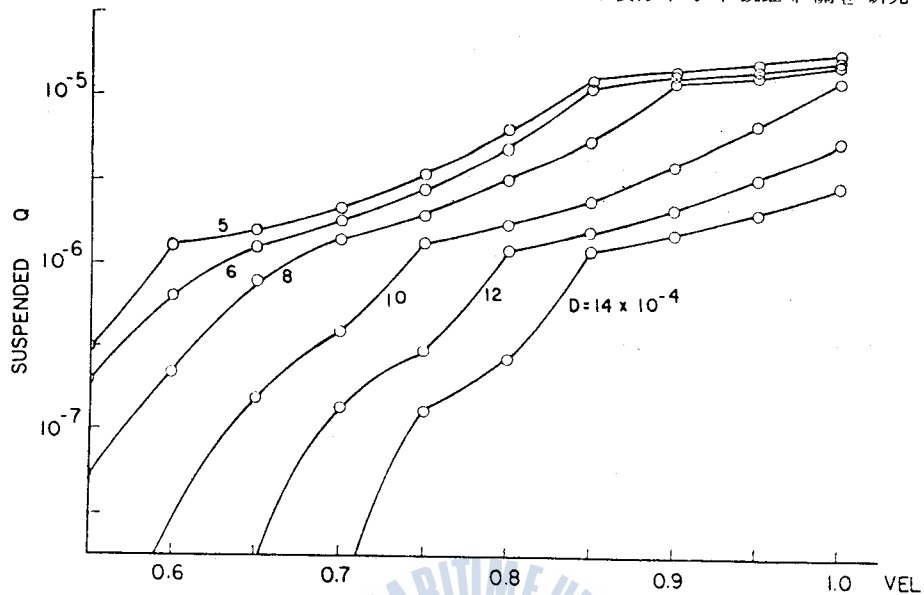


그림 13. 流速에 對한 浮流砂量

4. 結 論

堆積物의 移動形式 가운데 浮流에 依한 移動에 많은 影響을 미치는 saltation 特性과 saltation에 依한 浮流砂量 計算에 關하여, 粒子 및 流水等 水理的인 條件에 對하여 檢討한 結果 다음의 結論을 얻을 수 있었다.

- 1) 水理半徑과 粒子의 크기에 依해 計算되는 Cnezy 常數 計算式은 $C = 18 \times \log [(12 \times Rb) / (3.9 \times D_{50})]$ 으로 表現되며,
- 2) 全體 堆積物 移動量 計算에 많은 影響을 주는 水理半徑은 saltation 現象의 境遇 그 結果值에 거의 關係가 없고 流速 및 粒子 特性이 重要한 要素이다.
- 3) 浮流, 掃流의 境界條件은 流速 0.6 및 0.85 m/S, 粒徑 1,000 μm 로 볼 수 있다.
- 4) saltation 現象 頻度가 가장 높은 粒子의 크기는 400 ~ 900 μm 이다.
- 5) 細粒堆積物에서 saltation 現象은 0.45 ~ 0.7 m/S 의 流速에서 發生되며, saltation에 依한 浮流砂量은 約 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 程度다.

參 考 文 獻

1. Bi-Huei Wang, Estimation of Probable Maximum Precipitation, Jour of Hy-

- draulic Engineering, Vol. 110, No.10, 1984.
2. Leo C. Van Rijn, Sediment transport, Part I, Bed Load Transport, Jour. of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No.10, 1894.
 3. Moris S. A., Alexander, A. J., An Investigation of Particle Trajectories in Two Phase Flow Systems, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 55, Part 2, 1972.
 4. R. Garde Rang Raju, Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems.
 5. Rijn, D. C. Van, Computation of Red-load Concentration and Bed-load Transport, Delft Hydraulics Laboratory Reach Report, 487-D, 1981.
 6. Willis, J. C., Suspended-load from Error-Function Models, Jour. of the Hydraulics Division, ASCE, No. HY 7, 1979.

