

漂砂移動과 關聯한 Ripple 위 에서의 흐름 特性

沈榮輔*, 崔乘吳**, 李達秀***, 金孝燮****

1. 概要

波에 의해 생기는 境界層 및 底部剪斷力에 관해서는 波의 에너지消散 혹은 低質移動에 관계되는 문제로써 예로부터 많은 研究가 이루어졌다. 그러나, Ripple에 대하여 여러 研究者들에 의해 開發되어진 Model들이 大部分 曲線 座標系로 構成되어 있어서 理論的으로는 Ripple表面을 잘 묘사하여 計算할 수 있다는 長點은 있으나, Ripple 위에서의 흐름장 計算에 만족할 만한 成果를 거두지 못하고 있고, 특히 Vortex의 舉動現象의 表現이 實驗成果와 많은 差異를 보이고 있기 때문에 그 Model들이 나타내는 水理學的 特性에 많은 疑問點을 包含하고 있다고 할 수 있겠다.

따라서, 本 研究에서는 SOLA 方法에 의한 Mixing Length Model을 開發하여 Ripple에 適用함으로써 그 위에서의 발생하는 흐름장, Vortex의 舉動, 渦度, 底部剪斷力등을 計算함으로써 Ripple 위에서의 흐름 特性의 變化를 計算하고, 추후 漂砂移動의 實體를 파악하는 계기를 만들 고자한다.

2. 數值 Model

本 Model 은 Prandtl(1925)의 Mixing Length 概念을 適用한 Zero Eqn. Model 이다. Mixing Length 概念은 Eddy Viscosity (ν_t)가 平均流速 (V)과 Length Scale (L)에 比例 ($\nu_t \propto V \cdot L$)한다는 假定이다. 여기서, V 는 速度 Scale로서 Mixing Length(l_m)에 平均流速 變化率 ($|\partial \bar{U} / \partial y|$)을 곱한 값으로서 정의되며, 本 Model에서는 Eddy Viscosity를 다음과 같이 適用하였다.

$$\nu_t = l_m^2 \cdot \left| \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} \right| \quad (1)$$

여기서, l_m : Mixing Length ($= \kappa L$), κ : Kalman 常數 ($= 0.4$), L : Length Scale이다.

本 Model의 支配方程式은 平均流速에 대한, 連續方程式 式(2)과 運動量方程式 式(3)이다.

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} X: & \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + 2\nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial z^2} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial x \partial z} \right) \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} Z: & \frac{\partial \bar{W}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} + \bar{W} \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + 2\nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial z^2} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial x^2} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x \partial z} \right) \end{aligned} \quad (3b)$$

* 成均館大學校 土木工學科 (成均館大學校-海洋研究所 共同 學研 Program)

** 成均館大學校 土木工學科

*** 韓國海洋研究所 海洋工學部

**** 國民大學校 土木環境工學科

本 Model에서는 壓力項의 計算에 Hirt등(1975)이 提案한 SOLA方法을 使用하였는데, 이 方法은 數值解析上의 오류로서 發生되는 質量流入 ($\nabla \cdot U$)을 計算하여 流速과 壓力項에 分配하고, 再計算된 流速項에 의한 質量流入이 주어진 精度 ($\nabla \cdot U = 1.0E-6$)에 到達될 때까지 反復함으로써 流速을 보정하며, 壓力을 計算하는 方法으로서, 이미 金孝燮등(1994)에 의해 適用성이 立證된 바 있다.

3. 解析條件

3.1 水粒子 流速

本 研究에 適用된 波浪條件은 波高 15cm, 週期 2.0초, 水深 40cm의 規則波이다. 水粒子 流速은 Stokes 3次 波浪으로 計算하였으며 圖 1과 같다. 여기서 ω 는 角速度, c 는 波速, k 는 波數, h 는 水深, g 는 重力加速度, a 는 波의 振幅이고, F_1, F_2, F_3 는 常數로써 위의 波浪條件에서 다음과 같다.

$$\frac{U(t)}{c} = F_1 \cdot \cos \omega t + F_2 \cdot \cos 2\omega t + F_3 \cdot \cos 3\omega t \quad (4)$$

$$c = \frac{g}{k} \cdot \tanh(kh) \cdot \left(1 + a^2 k^2 \frac{8 \cosh^4(kh) - 8 \cosh^2(kh) + 9}{8 \sinh^4(kh)} \right) \quad (5)$$

F1	F2	F3	c	F1·c	F2·c	F3·c
0.1555	0.0336	0.0041	1.9256	0.2994	0.0648	0.0080

3.2 Ripple 形態

Model에 적용된 標準 Ripple(Case 3)은 Nielsen(1981)이 提案한 諸元을 使用하였고, 각 Case 별로 표 1의 값을 갖도록 하여, Ripple의 波高變化와 非對稱性的의 影響에 대한 檢討條件으로 하였다. 또한 Ripple의 形態(Profile)은 Sleath(1974)에 의해 適用성이 立證된 다음과 같은 式 (6)을 使用하였다.

여기서, X_c 는 曲線座標系, (x, z) 는 直角座標系를 나타내고, η, λ 는 각각 Ripple波高와 波長이다.

$$x = X_c - (\eta/2) \sin(2\pi X_c/\lambda) \quad (6a)$$

$$z = (\eta/2) \cos(2\pi X_c/\lambda) \quad (6b)$$

4. 分析結果

4.1 流速의 鉛直 分布

圖 2,3은 各 Case別 位相 $19\pi/10$ 에 대한 波谷에서의 鉛直流速分布를 나타내는데, Ripple波高의 2배 以上에서는 流速의 鉛直分布가 一定함을 보여주고있다. 圖 2는 對稱 Ripple의 波高가 變化하는 경우에 대한 그림인데, 各 Case 別로 渦度(곡선의 Slope)는 비슷하지만, Ripple波高가 높아질수록 Vortex下端의 流速이 커지는 現象이 보인다. 이는 Vertex의 크기가 Ripple波高에 比例함을 나타낸다. 한편 Vortex의 中心軸의 높이 ($U=0$ 인 地點, H_v)는 Case 1이 1.05cm, Case 5가 2.44cm로써 各 Case別로 거의 一定 間격으로 變化하고 있는데, 이들은 Ripple波高 (η)의 一定 ($\alpha \approx 1.23$) 제곱에 비례 ($H_v = C\eta^\alpha$)하여 높아지는 것으로 分析되었다. 圖 3은 非對稱 Ripple에 대한 鉛直流速分布圖로써, Ripple 波高가 5가지 Case 공히 1.5cm이며, Vortex 中心軸의 높이는 1.76cm 정도에 形成되고 있어서, 위의 比例關係가 여기서도 成立되고 있음을 確認했으며, 鉛直流速分布는 비슷한 流速分布를 보이고 있다.

4.2 流速의 時間的 分布

Ripple 波峰에서의 水平流速分布(圖 4)는 모든 Case에 대하여 거의 비슷한 分布를 보이고 있다. 反面에 圖 5의 Ripple 波谷에서의 水平流速分布는 各 Case別로 매우 다른 分布를 나타내고 있는데, Ripple 波高가 낮은 Case 1의 境遇, Vortex의 擧動이 단순하기 때문에 流速의 時間에 따른 變化가 부드러운 曲線으로 表示되고 있으나, 그 외의 Case에서는 Vortex가 Ripple 波峰에서 發生,分離되어 波谷 상에서 머물다가, 反轉되는 흐름에 의해 흘러나가는 過程에 基因하여 波谷 상에서의 水平流速分布가 심하게 變化하며,모두 雙峰現象을 보이고있다. 또한 流速이 Zero에 到達하는 時間은 Case 1에 비해 Ripple 波高가 높은 Case 5에서 2배 이상 빠르게 나타나는데, 이는 Vortex의 形成,發達,分離가 Ripple 波高에 比例함을 단적으로 나타낸다 하겠다.

4.3 Vortex 軌跡

Case 3에 대한 Vortex의 軌跡은 圖 6과 같다. Vortex는 flow가 反轉하여 $3\pi/10$ 에서 $4\pi/10$ 후에 Ripple 波峰에서 分離되며, 分離된 Vortex는 Ripple 波谷 위에서 成長하여 다시 Flow가 反轉할때 Flow를 따라 移動하며 渦度를 잃고 사라진다. 水粒子流速의 非對稱性으로 因하여 分離된 Vortex의 移動距離가 서로 다른데, 外海側으로 움직이는 Vortex는 最大로 2.0λ 程度 移動하여 反轉하며, 沿岸側으로 움직이는 Vortex는 3.0λ 程度 移動하여 사라진다. 外海側으로 移動되는 Vortex가 매우 빨리 渦度를 잃어버리며 移動하는 것과는 달리, 渦度를 꾸준히 지니며 흘러간다. Vortex의 浮上 높이는 Ripple 波高의 1.5배 程度까지 올라가서 flow를 따라 흘러 다니는 것으로 分析 되었다.

4.4 渦度

分離된 Vortex의 渦度는 圖 7에 提示되었는데, 圖 1에서도 傾向을 알 수 있듯이 Ripple 波高가 높아질수록 渦度는 작아지는 傾向을 보이는데, 이는 Ripple波高가 커질수록 Vortex가 커지며, 底面摩擦에 의한 에너지 消散이 커져 渦度는 작아지는 것으로 判斷된다. 또한 紙面關係上 그림이 提示되지 않는 獰으나,Ripple의 非對稱性에는 相關性이 없는 것으로 분석되었다.

5. 結論

完全히 發達되어 分離된 Vortex의, 中心軸의 높이는 Ripple 波高의 일정 제곱에 比例하여 높아지며,渦度는 Ripple 波高가 높을수록 작아진다.

Vortex의 擧動은 Ripple의 높이와 매우 密接한 關聯이 있는데, Stoke의 3次 波浪理論을 適用할 때 Vortex의 最大移動軌跡은 外海側으로 2.0λ 程度, 沿岸側으로 3.0λ 程度 까지 움직인다. 또한Vortex의 浮上 높이는 Ripple 波高의 1.5배 程度로 分析 되었다.

參考文獻

- Nielsen, P., 1981. Dynamics and geometry of wave generated ripples. J Geophys Res, Vol 86
Sleath, J.F.A., 1974. Stability of laminar flow at seabed. J Waterways, Harbors and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 100, WW4
Hirt, C.W., B.D. Nichols, N.C. Romero, 1975. SOLA-A numerical solution algorithm for transient fluid flows. Los Alamos Scientific Laboratory of Univ. of California
金孝燮, B.A. O'Connor, 沈榮輔, 1994. Numerical modelling of flow over ripples using SOLA method. 24th Inter. Conf. on Coastal Eng. 提出中.

Run Case	Ripple Length (cm)				Height (cm)		Remark	
	λ_1	λ_2	λ	λ_1/λ	η	η/λ		
1					1.00	0.11	Symmetric Ripple	
2					1.25	0.14		
3	4.5	4.5	9.0	0.5	1.50	0.17		
4					1.75	0.19		
5					2.00	0.22		
6	4.95	4.05	9.0		0.55	1.50	0.17	Asymmetric Ripple
7	5.40	3.60		0.60				
8	5.85	3.15		0.65				
9	6.30	2.70		0.70				

表 1. Ripple Dimension

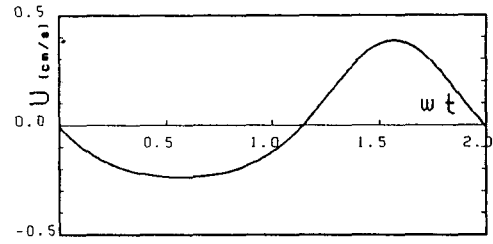


Fig.1 Wave Orbital Velocity Profile

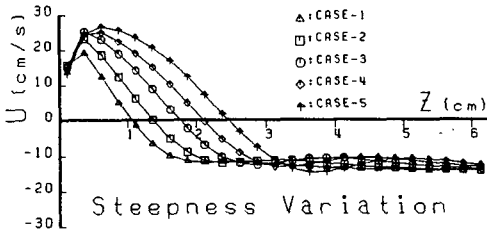


Fig 2. Steepness Variation of Horizontal Velocity over Trough

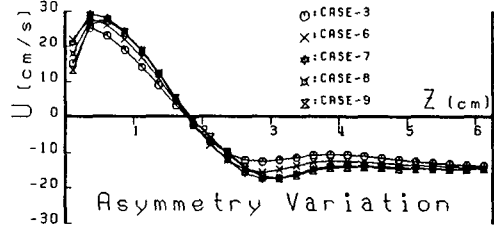


Fig.3 Asymmetry Variation of Horizontal Velocity over Trough

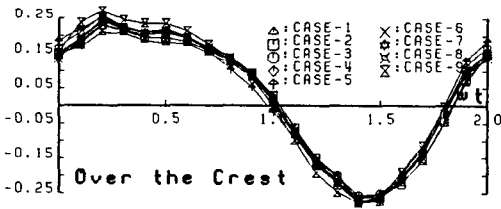


Fig 4. Time Variation of Horizontal Velocity over Crest

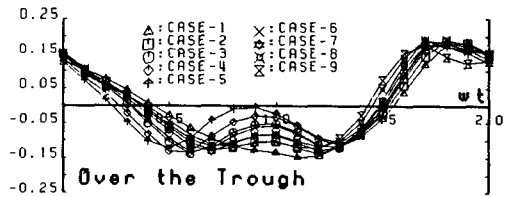


Fig.5 Time Variation of Horizontal Velocity over Trough

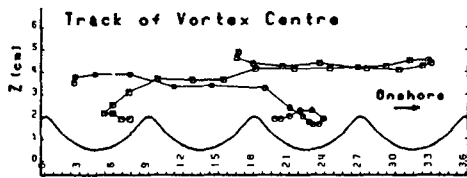


Fig 6. Track of Vortex Centre

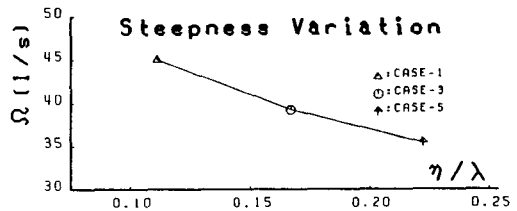


Fig.7 The Effect of Ripple Steepness on the Vorticity of the Separated Vortex