

〈研究動向〉

3次元 海濱變形 모델

現況 및 課題

李 宗 燮*

1. 序 言

沿岸의 底質은 流體運動에 의하여 항상 움직이고 있으며, 이러한 土砂移動의 外力으로는 波浪, 波浪에 의한 흐름(wave-induced current), 潮流, 吹送流, 河口流出流 및 바람 등을 들 수 있다. 이 중에서도 波浪에 의한 漂砂移動은 가장 탁월하며, 특히 폭풍이나 해일이 일어날 경우의 海岸地形의 變化를 보면 쉽게 理解할 수 있을 것이다.

自然海濱에 있어서 이와 같은 變化는 一般的으로 계절적인 것이며, 數年에 걸쳐서 보면 대개 平衡狀態에 있는 것이 보통이다. 그러나 海岸에 突堤, 離岸堤 또는 港灣 등의 構造物을 設置할 경우에는 漂砂移動의 平衡이 깨어져 海岸地形의 變化를 가져오게 된다. 따라서, 우리가 海岸構造物의 建設을 計劃할 경우에는 먼저 앞으로 일어날 變化를 豫測할 필요가 있다. 이는 海洋空間의 利用 및 開發이라는 次元에서 많은 海岸工學者들의 關心의 對象이 되어 왔다.

海濱變形의 豫測手法으로는 移動床水理模型實驗, 現地調查方法 및 數值豫測法 등을 들 수 있다. 水理模型實驗은 從來 그리고 現在에도 많이 쓰여지고 있는 方法이라고 할 수 있으나, 아직 現地와 模型사이의 相似則이 미흡한 상태이며, 適當한 底質材料의 入手가 곤란하다는 점이 그 問題點이라고 할 수 있다. 한편, 周期的인 現場觀測資料로 경험적 해석방법(empirical eigenfunction)에 의한 漂砂移動의 樣相을 解析하는 것은 가능하나, 주어진 外力과 地形變動사이의 關係는 불분명하다. 그러므로, 어떤 한 地域에서 얻어진 結果를 조건이 다른 海岸에는 適用하기가 힘들며, 現地調查에 많은 時間과 努力이 要求된다는 점이 問題點이라 할 수 있다.

最近에는 電子計算機의 發達로 인하여 漂砂移動의 外力인 波浪 및 海濱流의 計算이 가능해졌으며, 漂砂移動에 따른 地形變化의 豫測도 어느정도 가능한 단계

에 달해 있다고 할 수 있다. 따라서, 現時點에 있어서 海濱變形의 數值豫測에 있어서 현주소를 파악하고 문제점을 도출하여 장차 解決해 나가야 할 課題를 提示하여 보는 것도 매우 뜻깊은 일이라고 할 수 있다.

海濱地形의 數值豫測手法은 크게 「海岸線變形 모델」과 「3次元海濱變形 모델」로 나눌 수 있다. 海岸線變形 모델은 一般的으로 one-line theory라 불리워지는 것으로 Pelnard-Considère[1]에 의하여 처음으로 提案되었다. 이는 斷面積의 變化量이 汀線變化量과 線形的인 관계(A-L特性)에 있다는 假定하에 漂砂量의 保存則에 의해 汀線의 前進 및 後退를 計算하는 것이다. 그러므로 여기서는 海岸線에 따른 全沿岸漂砂量算定의 基本이 되는 碎波波高 및 碎波波向의 決定이 主對象으로 된다.

한편, 「3次元海濱變形 모델」은 全對象海域에서 波浪 및 海濱流場을 計算하고, 각 지점에서의 局所漂砂量을 구하여, 3次元的인 海濱地形의 時間變化를 豫測하는 方法이다. 그러나, 이들 모델은 각각 장·단점과 適用限界를 갖고 있으므로, 目的에 따라서 잘 구분하여 使用할 필요가 있다.

즉, one-line theory는 海岸線에 따른 全沿岸漂砂量의 保存則으로부터 汀線變化를 計算하기 때문에 計算時間은 거의 문제가 되지 않으나, 局所的인 海濱變形이나 構造物의 配置가 複雜한 경우에는 適用할 수 없다. 또한, 豫測對象海域 및 豫測期間에 있어서도 定常的인 沿岸流가 發生할 수 있는 海岸線의 길이나 계절적인 on-offshore sediment transport가 無視될 수 있는 時間 scale을 要하므로, 대략 1km 이상의 空間 scale과 1年 이상의 時間 scale에서 豫測이 가능하다.

한편, 3次元海濱變形 모델은 基本的으로 각 지점의 局所漂砂量을 算定하여 漂砂의 保存則에 의하여 각 지점의 水深變化를 計算하기 때문에 局所的인 海濱變形이나 構造物의 配置가 複雜한 경우에도 適用이 가능하다. 그러나, 각 지점의 局所漂砂量을 算定하기 위하여는 漂砂移動의 外力이 되는 波浪과 흐름을 計算하지 않으면 안되기 때문에 막대한 計算努力이 필요하게 된

* 正員會 釜山水產大學 海洋工學科 助教授

다. 따라서, 3次元海濱變形모델의 適用性은 計算機의 能力에 따라 달라질 수 있으나, 대개 수 km 이내의 空間 scale과 數個月 또는 1年이내의 時間 scale에서 適用이 가능하다고 할 수 있다. 한편, 3次元海濱變形의 豫測에 있어서 計算努力을 덜기 위하여 波浪變形만을 考慮하여 水深變化를 計算하는 N-line model[2]이 提案되어 있으나, 漂砂移動이 흐름에 의해 크게 좌우되는 경우에 있어서는 適用하기가 곤란하다.

最近, 沿岸域의 利用 및 開發問題와 관련하여, 海岸 保全問題, 港路 및 港灣埋沒對策問題, 海岸構造物設置에 따른 海濱變形의 豫測과 같은 問題가 海岸工學에 있어서 重要한 課題의 하나로 되어 있다. 따라서, 이와 같은 문제해결의 수단 중의 하나로써 3次元海濱變의 豫測手法를 確立하는 것이 切實하게 要求되고 있는 事實이다. 그러므로, 여기서는 海濱變形의 豫測과 相關한 근본적인 問題點 및 現況과 現在까지 提案된 모델의 比較檢討과 아울러 앞으로 解決해야 할 課題를 提示하고자 한다.

2. 地形變動과 漂砂量

水深變化를 그림 1과 같은 座標系에 있어서 (1)식과 같은 漂砂의 連續方程式에 의하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\epsilon} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (1)$$

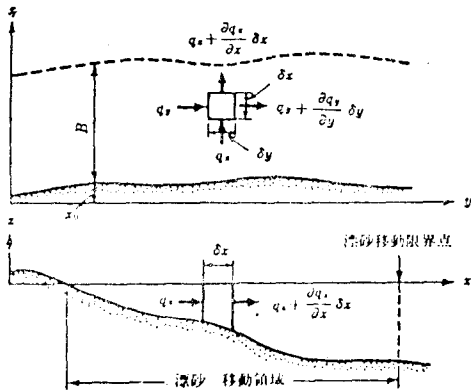


그림 1. 海濱變形의 概念圖[3]

여기서, h 는 수심, t 는 시간, ϵ 은 해저토사의 공극률, q_x 및 q_y 는 浮遊 및 掃流漂砂를 포함한 단위폭·단위시간당의 漂砂量을 나타낸다. 따라서, 수심변화를 계산하기 위하여는 局所漂砂量 q_x, q_y 를 산정하지 않으면 안된다.

2.1 全沿岸漂砂量公式

平行等深線을 갖는 충분히 긴 海岸에 내습하는 波浪

特性에 의한 全沿岸漂砂量(Q_y)의 算定은 one-line theory에 의한 汀線變化의 豫測問題와 관련하여 일찍부터 연구가 시작되었다.

Eaton[4]은 Q_y 가 내습파가 쇄파점에서 갖고 있는 단위폭당·연안방향의 에너지 flux에 비례한다는 가정하에 다음과 같이 나타냈다.

$$Q_y = A_1 \cdot P_t \dots\dots\dots (2)$$

$$P_t = (E \cdot C_g) \sin \theta_b \cdot \cos \theta_b$$

여기서, E 는 波의 에너지, C_g 를 群束度, θ_b 는 쇄파각이다.

그후, 많은 연구자들의 현지관측 또는 모형실험에 의하여 (2)식의 검증과 계수 A_1 의 값을 결정하여, Q_y 에 대한 (2)식의 表現이 일반적으로 쓰여지게 되었다.

그러나, (2)식의 계수 A_1 이 次元을 갖고 있으므로 A_1 의 값을 海岸 또는 底質特性에 따라 크게 변한다. 이에 Komar 등 [5]은 Bagnold의 Power model에 準하여 全沿岸漂砂量을 水中重量의 次元을 갖는 I_y 로 나타내는 것에 의하여 A_1 을 無次元化하여 다음과 같이 表現할 것을 提案하였다.

$$I_y = A_2 P_t \quad (A_2 \approx 0.77) \dots\dots\dots (3)$$

$$I_y = (\rho_s - \rho) g (1 - \lambda) Q_y \dots\dots\dots (4)$$

여기서, ρ 는 물의 密度, ρ_s 는 모래의 密度, g 는 重力加速度이다.

한편, Dean[6]은 沿岸漂砂는 浮遊漂砂가 탁월하다는 사실에 착목하여 A_2 가 底質의 沈降速度 W_0 를 사용한 다음 식으로 나타낼 것을 제안하였다.

$$A_2 \propto \frac{1}{C_f W_0} \sqrt{g \cdot H_b} \cdot \tan \beta \cdot \cos \theta_b \dots\dots\dots (5)$$

여기서, W_0 는 저질의 침강속도, C_f 는 해저마찰 계수, H_b 는 쇄파파고, $\tan \beta$ 는 해저경사이다.

그리고, 沿岸流의 發生機構에 대한 Longuet-Higgins의 Radiation stress 概念이 一般化됨에 따라, (2)식 중의 P_t 이 갖는 物理的인 意味가 不分明하게 되었다. 이에 Bruno 등[6]은 P_t 대신에 沿岸流의 外力인 Radiation stress $S_{xy} (= \rho g H_b^2 \cdot \sin 2\theta_b / 16)$ 과 직접 相關 짓는 시도를 하였다.

이밖에, 河川의 流砂量公式를 沿岸流에 의한 漂砂量算定에 適用한 공식이 岩垣 등 [7]에 의하여 提案되었다.

以上이 대표적인 全沿岸漂砂量公式이며, 각 公式中의 계수 A 는 현지실측 또는 모형실험에 의하여 결정된 것이므로, 각 공식에는 적용한계가 존재한다. 그러므로, 실제 사용에 있어서는 검증하여 계수 A 를 조정할 필요가 있다.

2.2 局所沿岸漂砂公式

보다 상세한 海濱變形의 豫測을 위하여는 局所的인

沿岸漂砂量 $q_s(x, y)$ 을 알 필요가 있다. 그러나, 지금까지 제안되어 있는 沿岸漂砂의 on-offshore 方向 分布에 있어서는 충분히 긴 직선형태의 海岸線을 갖는 海岸에 있어서, 定常인 沿岸流가 發生하고 있다는 가정 하에서 $q_s(x)$ 에 대한 것이다.

한편, 이들 대부분은 Bagnold의 Power model[8] 또는 Flux model에 의한 것이며, 그밖에 하천의 流砂量 公式가 準用되어 있다.

a) Power model에 의한 局所沿岸漂砂量

Bagnold는 흐름에 의한 漂砂量을 定量化하는데 있어서, dynamic이 아닌 에너지의 측면에서 다음 식을 유도하였다.

$$i = i_b + i_s \dots\dots\dots (6)$$

$$i_b = \epsilon_b \cdot W / (\tan\phi - \tan\beta)$$

$$i_s = \epsilon_s (1 - \epsilon_b) \cdot W (W_0/u_s - \tan\beta)$$

여기서, W 는 유체의 힘(저면에서 단위면적·단위 시간당 저면전단능력에 의하여 잃어버리는 전에너지), ϕ 는 저질의 수중안식각, U_s 는 浮遊物質의 平均移動速度, ϵ_b 및 ϵ_s 는 각각 歸流 및 浮遊漂砂에 대한 효율이다. 이와 같이, 波動은 단순히 저질을 이동하기 쉬운 상태로 만들며, 실제로 漂砂는 沿岸流만에 의하여 운반된다는 Power model에 근거하여 提案된 최초의 국소연안포사량식은 Thornton[9]에 의하여 다음과 같이 주어졌다.

$$q_s = \frac{-1}{g(1-\rho/\rho_s)} \left[B_s \left(\frac{V}{U_{bm}} \right)^{\frac{1}{2}} + S_s \left(\frac{V}{W_0} \right) \right] \frac{\partial EC_s}{\partial x} \dots\dots\dots (7)$$

여기서, B_s 및 S_s 는 掃流 및 浮遊漂砂에 대한 효율, U_{bm} 은 저면에서의 最大水粒子速度, V 는 沿岸流速을 나타낸다.

한편, Komar[10]는 水中重量으로 表現한 局所沿岸漂砂量 i_s 에 대하여 다음과 같이 提案했다.

$$i_s = K_1 [C_f \rho V^2 + 0.5 \rho f \left(\frac{a}{h} \right)^2 g h] V \dots\dots\dots (8)$$

여기서, C_f 및 f 는 각각 흐름 및 波에 의한 저면마찰계수, a 는 波의 振幅을 나타낸다.

위의 두 모델에서 底質輸送에 필요한 에너지로서 Thornton 流體가 底面전단능력에 대하여 행하는 일 ($\partial EC_s / \partial x$)에 비례한다고 생각하고 있으므로 일반적인 Power model과는 다르기 때문에 B_s 및 S_s 의 算定이 問題가 된다. Komar는 $W = \tau \cdot V$ 인 일반적인 표현을 사용하고 있으며, 계수 K_1 은 실험적으로 定해지는 定數이다.

Walton[11]은 $i_s(x)$ 에 대하여 충실하게 Bagnold의 Power model을 적용하여 다음식을 유도하였다.

$$i_s = \frac{\epsilon_b}{\tan\phi} \rho \frac{r \cdot f \cdot c_b}{2\pi} \cdot \bar{X}^{\frac{1}{2}} \cdot V_2 + \frac{\epsilon_s}{w_0} \left[\frac{5}{16} r^2 \cdot \rho \cdot g \cdot c_b (h + \bar{\eta}) \cdot (1-r) \tan\beta \cdot \cos\theta \right] \bar{X}^{\frac{3}{2}} \cdot V \dots (9)$$

여기서, $\tan\phi$ 는 저질의 수중안식각, r 는 $\left(\frac{a}{h} \right)$, X 축의 원점은 Set-up에 의한 汀線의 後退量을 고려한 새로운 좌표계 \bar{X} 이다. 효율 ϵ_b 는 저면의 단위면적당에 필요한 에너지비로서 0.1~0.15의 값을 가지며, ϵ_s 는 Bagnold의 결과를 인용하여 저질입경과 平均流速의 함수로서 나타내었으며, 그 크기는 대략 $\epsilon_s \sim 10^{-3}$ 정도이다.

b) 河川의 流砂量 公式를 準用한 局所沿岸漂砂量

Bijker[12]는 Frilink 河川에서의 掃流漂砂量 公式에 그가 제안한 沿岸流와 波動에 의한 저면전단응력의 汀線方向成分을 適用하여 掃流沿岸漂砂量式을 提案하였다. 浮流沿岸漂砂量에 대해서는 掃流漂砂量으로부터 掃流砂濃度を 구하여, 그것을 境界條件으로서 1次元擴散方程式을 풀어서 구해지는 浮遊砂濃度分布에 근거하여 浮遊沿岸漂砂量에 대한 식을 提案하였다.

한편, Wills[13]는 局所沿岸漂砂量에 대하여 Ackers와 White에 의하여 提案된 掃流 및 浮遊砂를 포함하는 河川의 流砂量 公式의 적용을 시도하였다.

c) Flux model에 의한 局所沿岸漂砂量

이것은 흔히 質量輸送모델이라 불리워지며, 기본개념은 漂砂量을 (漂砂濃度 × 漂砂移動速度)인 (10)식과 같은 형태로 구하는 것이다.

$$q = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+\eta} \int_{-h}^{\eta} c(z, t) \cdot u_s(z, t) dx dz dt \dots\dots\dots (10)$$

여기서, t_0 計測時間, η 는 自由表面의 높이, c 는 漂砂濃度, u_s 는 漂砂의 移動速度이다.

그리고, 沿岸漂砂量은 그 대부분이 浮遊狀態에서 沿岸流에 의해 운반된다고 하는 가정하에서 출발하고 있다.

土屋 등 [14]은 (10)식 중의 平均浮遊砂濃度 \bar{c} 를 (11)식과 같이 나타내고, 沿岸流速 v 에 대해서는 Longuet-Higgins[15]가 提案한 式을 使用하여 (12)식과 같은 형태로 나타냈다.

$$\bar{c} = c_0 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \left(1 - \frac{\tau_* c}{\tau_*} \right) \dots\dots\dots (11)$$

$$q_s = \bar{c} \cdot v \cdot h \dots\dots\dots (12)$$

여기서, c_0 는 정수로 약 0.2 정도의 값, τ_* 는 底面 摩擦應力 τ 의 無次元값, $\tau_* c$ 는 移動限界時 τ_* 값이다.

以上에서 대표적인 局所沿岸漂砂量 公式에 대하여 그 기본개념을 소개하였다. 현재 沿岸漂砂量의 算定에 있어서는 Power model이 가장 널리 쓰여지고 있으나, 임의형상의 海濱 또는 構造物周邊에서 복잡한 海濱流

가 발생할 때에는 漂砂移動에 대한 효율을 일반성이 있는 형태로 定義하기 위하여, 底質移動에 대한 力學的인 考察이 必要할 것으로 생각된다.

2.3 on-offshore sediment transport rate

3次元 海濱變形的 豫測을 위하여는 汀線과 平行한 방향의 표사량 외에 汀線과 直角方向의 漂砂量(on-offshore sediment transport rate)도 算定하지 않으면 안된다. 그러나 汀線과 直角方向의 漂砂移動樣相은 沒岸漂砂 移動機構와는 전혀 다르다.

즉, 沒岸漂砂는 어떠한 公式에서도 결국 平均流의 方向인 汀線과 平行한 方向으로 移動하는 것으로 表現되었다. 그러나, on-offshore sediment는 入射波의 特性(波形的 非線形性), 非對稱砂灘에서의 底質의 運動特性 및 under-toe의 發生 등으로 인하여 漂砂의 移動方向이 變한다.

위와 같은 이유로 인하여, 처음에는 주로 水平床에서 波動의 1/2 주기에 있어서의 平均移動量에 대한 實驗的인 檢討가 行해졌다. 그러나, 실제 海濱斷面變形을 일으키는 것은 파랑의 1주기에 걸쳐 平均된 net의 漂砂量 \bar{q}_x 이므로, 漂砂量을 掃流力의 함수 또는 河川의 流砂量公式를 準用한 형태로 \bar{q}_x 를 表現하기 위하여는 掃流力 또는 물입자속도를 波의 位相의 함수로서 表現할 필요가 있다.

이에 Madsen 등 [16]은 Brown型的 流砂量公式에 位相의 함수로 나타낸 掃流力 $\psi(t)$ 를 사용하여 漂砂量을 다음과 같이 나타냈다.

$$q_x(t)/w_0d = 40\phi_m^3 (|\cos\sigma t| \cdot \cos\sigma t)^3 \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{단, } \phi_m = \tau / (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d$$

$$\tau = \rho f \hat{u}_b^2, \quad u_{bm} = \hat{u}_{bm} \cdot \cos\sigma t$$

여기서, 正弦波를 假定하여 물입자속도의 方向이 同一한 位相내에서의 1/2 주기 平均值 \bar{q}_x 를 취하면 (14)식이 얻어진다.

$$\bar{q}_x = 12.5\phi_m^3 \dots\dots\dots (14)$$

다시금, Sleath[17]는 振動板上的 掃流漂砂移動量에 관한 실험을 통하여 $q_x(t)$ 에 대하여 다음과 같은 式을 유도하고, 實驗的인 檢證을 行하였다.

$$q_x(t) = \frac{8}{3} \bar{q}_x \cdot \cos^3(\sigma t + \theta_a) |\cos(\sigma t + \theta_a)| \dots (15)$$

$$\bar{q}_x = \sigma d^{2.47} (\psi - \psi_c)^{1.5} \dots\dots\dots (16)$$

여기서, $\sigma = 2\pi/T$, θ_a 는 波의 位相, ψ 는 Shields數이다. 그리고, 底면전단응력 τ 를 위상의 함수로서 주어지는 물입자속도 $u(t)$ 를 사용함으로써 $\tau(t)$ 를 구할 수 있으며, 따라서 $\psi(t) = \tau(t) / (\rho_s - \rho)gd$ 로 表現되어 掃流漂砂에 대한 물입자속도의 比대칭성 또는 일정한 방향의 定常流의 효과도 고려할 수 있다.

그밖에 on-offshore sediment transport에 영향을 미

치는 요인을 고려하기 위한 노력이 많이 行해졌다. 즉 砂村 등 [18]은 net의 on-offshore transport rate에 대한 非對稱砂灘의 영향을 밝혔다. 한편, 野田 등 [19]은 浮遊狀態에서 offshore 방향으로의 漂砂移動은 非對稱砂灘에 대한 砂村의 결과를 인용하고, 掃流漂砂에 대하여는 stokes의 2次近似解를 사용한 Shields數의 함수로서 나타냈다. 最近 Nielsen[20] 및 Bakker[21]는 漂砂移動은 전부 浮遊狀態에서 생긴다고 가정하고, 位相의 함수로서 주어진 基準點濃度에 일정한 擴散係數를 사용한 1차원 擴散方種式的 解를 구하고, 계산된 浮遊砂濃度의 時空間分布를 이용하여 Flux model에 의한 net의 on-offshore 漂砂量 計算을 시도하였다.

이상에서와 같이 on-offshore 漂砂量에 대하여는 現象의 複雜性 때문에 接近方法도 여러가지이며, 또한 미해결의 문제점도 많이 남아 있다. 그중에서도 가장 중요한 문제점은 net의 on-offshore 漂砂移動을 일으킨다고 생각되는 要因들을 전부 고려하기 위하여는 위상의 함수로서의 순간순간 표사량을 밝히고, 그것을 시간에 대해 적분하여 net의 on-offshore 漂砂量을 구하지 않으면 안된다는 점이다. 기 경우에 있어서도, 일반적으로 잘 알려져 있는 소류표사와 부유표사의 이동방향이 서로 다르다고 하는 사실을 무리없이 설명할 수 있는 모델은 砂村, Nielsen 등이 on-offshore sediment transport에 그 適用性을 시도하고 있는 Flux model이라 생각된다.

3. 3次元海濱變形的 數值豫測모델

지금까지 3次元海濱變形的 豫測手法과 관련하여 여러가지 모델이 제안되어 왔다. 이들을 크게 분류하면, 底質粒徑이 0.06mm 이하인 silt나 clay같은 粘着性물질을 대상으로 하는 경우와 底質粒徑이 0.06mm 이상인 sand를 대상으로 하는 모델로 분류할 수 있다. 前者는 흔히 mud transport model이라 불리워지며, 대상물질의 침강성의 확산물질로 취급하여 sink와 source항을 고려한 확산방정식에 의해 부유사농도나 底면에서의 침식 또는 퇴적을 논하여왔다. 이 경우 외력으로서의 대개 조류나 하구유출류 등에 의한 底면에서의 전단응력을 고려하고 있다. Nihoul et al[22]은 조류장에서 부유물질의 농도변화를, Farmer et al[23]은 밀도차를 고려한 하구유출류와 조류의 공존장에서 하구유출토사의 거동에 의한 河口 delta의 형성에 관하여, Hayter 등 [24] 및 Sheng[25] 등은 호수나 하구 주변에서 취송류나 조류에 의한 Sediment transport에 관하여 Downing 등 [26]은 연안역에서 풍파와 취송류의 공존장에서의 Sediment transport에 관하여 각각 연구하였

다.

한편, 국내에서는 宋 등 [27]은 조류장에서의 mud transport model에 관하여, 姜 등 [28]은 하구에서 조류에 의한 퇴적물의 수송모델에 관하여 각각 발표한 바 있다. 그러나, 이들 모델에 있어서 공통적인 문제점이라고 할 수 있는 것은 다음과 같다.

첫째, 저면마찰력의 평가를 위하여 여러가지 외력을 도입하고 있으나, 그에 따른 부유사의 확산계수평가문제

둘째, 저면에서의 수심변화에 관한 평가식

이들 문제점은 특히 cohesive sediment에 대하여는 그 현상의 복잡성 때문에 아직 미해결의 과제로 남아 있다. 따라서, 현단계에 있어서 mud transport model에 의한水深變化的豫測은 거의 불가능하다고 할 수 있다. 그러므로, 그에 관한 기초적인 연구와 함께 현지관측결과와 numerical model의 결합에 의한 hybrid model의 개발이 절실하게 요구된다.

한편, 底質이 sand인 경우에 있어서는 前章에서 소개한 바와 같이 일찍부터 漂砂移動機構나 漂砂量의 定式化에 관한 연구가 행해져, 實用的인 단계까지 달해 있다고 할 수 있다. 이 경우에 있어서 漂砂移動의 外力으로서의 쇄파대내외에서의 波의 變形과 wave-induced current가 重要한 대상으로 된다. 그동안 淺海에서의 波의 變形, 碎波機構 및 碎波後의 波의 變形에 관하여 많은 연구가 행해져 왔으며, 沿岸流의 發生理論에 대해서도 눈부신 發展이 이루어졌다. 그 결과 漂砂移動의 外力인 波浪 및 海濱流의 數值豫測은 어느정도 가능한 단계에 와있다.

山口 등 [29]은 離岸堤 및 突堤群에 의한 3次元海濱變形的 數值計算에 관하여, 渡邊 등 [30]은 構造物周邊에서의 屈折 回折 및 碎波變형을 고려한 3次元海濱變形的 數值豫測모델을 開發하여 移動床實驗結果를 시뮬레이션하였다. 그러나, 波浪못지않게 沿岸流나 離岸流가 탁월한 임의 海濱의 地形變動을 計算하기 위해서는 構造物周邊에서의 波浪變形 및 海濱流의 計算 이외에 鉛直方向漂砂의 net flux에 관한 검토가 필요하다.

3.1 水深變化에 대한 概念

一般的으로 모래는 靜止⇌掃流⇌浮遊와 같은 運動을 반복하면서 移動한다. 한편, 浮上한 모래는 浮遊→分散→沈降과 같은 運動을 하면서 결국에는 저면으로 침강한다. 따라서, 모래의 運動은 掃流砂層과 浮遊砂層에서 전혀 다른 거동을 나타낸다. 특히, 離岸流나 河口流出에 의한 浮遊漂砂는 沈降性的 擴散物質과 같은 움직임을 나타내어, 砂州나 河口前面의 delta 형성

에 重要한 要因이 된다.

위와 같은 漂砂의 運動에 의한 水深變化를 計算하기 위해서는 底面에서의 漂砂의 連續式과 浮遊砂層에서 漂砂濃도에 관한 保存式에 의하여 水深變化를 計算할 필요가 있다.

지금, 底面境界를 그림 2에 나타낸 것과 같이 掃流砂層과 浮遊砂層의 境界로서 定義한다.

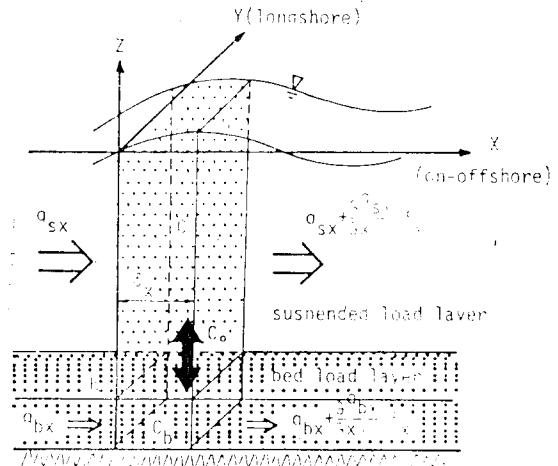


그림 2. 水深變化의 定義

따라서, 底面에서의 水深變化 Δh 는 掃流砂의 移動과 鉛直方向의 net flux Q_s 에 의하여 생기는 것으로 된다. 그러므로, 漂砂에 관한 連續式을 考慮하면, 水深變化에 기여하는 浮遊砂의 評價에 대하여 다음 3가지 方法에 의하여 表現할 수 있다.

方法 1; 水深變化는 浮遊砂濃도에 기여하는 漂砂의 浮上 flux와 沈降 flux와의 差 Q_s , 및 掃流砂의 移動에 의하여 생기는 것으로서 (17)식과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left[-Q_s + \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) \right] \dots (17)$$

方法 2; 定常狀態에 있어서 鉛直 및 時間平均된 浮遊砂濃度 \bar{c} 를 사용하여, 掃流漂砂 및 浮遊漂砂의 保存則으로부터 (18)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left[\alpha \left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) \right] \dots (18)$$

여기서, $q_{sx} = \bar{c} \cdot u \cdot (h + \bar{\eta})$, $q_{sy} = \bar{c} \cdot v \cdot (h + \bar{\eta})$ 이며, α 는 상수이다.

方法 3; (18)식에 있어서 q_{sx} 및 q_{sy} 를 1次元擴散理論에 의하여 (19)식과 같이 추정하는 방법이다.

$$q_{yx} = \bar{c}_0 \cdot (\varepsilon_z / w_f) \cdot U \dots\dots\dots (19)$$

$$q_{zy} = \bar{c}_0 \cdot (\varepsilon_z / w_f) \cdot V$$

여기서, \bar{c}_0 는 모래가 浮上할 때 底面境界에서 時間平均된 基準點濃度이며, ε_z 은 鉛直方向의 擴散係數, w_f 는 모래의 沈降速度이다.

상기 식들에서 \bar{c} 는 (20)식과 같은 浮遊濃度에 관한 保存式으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + U(h+\eta) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + V(h+\eta) \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + Q_s \dots\dots\dots (20)$$

$$Q_s = \frac{1}{h+\eta} \left[k_z \frac{\partial c}{\partial z} - w_f C \right]_{z=h} \dots\dots\dots (21)$$

여기서, $\bar{c} = \frac{1}{h+\eta} \int_{-h}^{\eta} C dz$ 이며, k_x, k_y 및 k_z 는 각각 x, y, z 방향의 확산계수이다.

한편, (21)식과 같이 나타내어지는 Q_s 에 대하여는 모래의 浮上限界로서 마찰속도(u_*)가 w_f 보다 클때 浮上한다고 하는 표현을 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_s = \left[(1-r) \bar{c}_0 w_f \left(1 - \frac{u_*}{w_f} \right) + \bar{c} w_f \right] \dots\dots\dots (22)$$

여기서, $u_* > w_f$ 이면 $r=0$, $u_* < w_f$ 이면 $r=1$ 이다. 한편, 基準點濃度 \bar{c}_0 및 (19)식의 ε_z / w_f 는 實驗的으로 구할 수 있다.

以上の 計算法은 海域의 경우이지만, 河道內에 港이 있는 경우의 航路埋沒豫測은 澱貯水池에서의 堆砂豫測問題와 같다. 이에 관하여는 芦田 등 [32]에 의하여 研究되어 있으며, 基本的으로는 위의 方法 1과 같은 결론을 유도하였다.

또한, Fleming et al[33]은 위의 方法 3과 거의 같은 方法으로 航路埋沒豫測을 行하였다.

3.2 局所掃流漂砂量의 算定問題

局所掃流漂砂量의 算定에 있어서는 掃流漂砂의 移動速度, 移動層두께 및 掃流砂層의 平均濃度를 算定하여, 掃流砂量을 計算하는 Flux model이 Deguchi et al[29]에 의하여 개발되어 沿岸砂量에 대하여는 그 검증이 이루어졌으나, on-offshore 漂砂量에 대해서는 漂砂移動機構의 複雜性 때문에 算定단계에는 이르지 못하고 있다.

따라서, 현재까지 3次元海濱變形의 豫測과 관련한 局所掃流漂砂量의 算定에 있어서는 2.2에서 소개한 Power model의 概念이 많이 準用되고 있다.

결국, Power model에 의한 漂砂量의 表現에 있어서는 波浪과 흐름의 共存場에서 저면마찰력의 評價, 平均流의 流速計算 및 2.3에서 소개한 on-offshore 漂

砂量을 어느정도 表現할 수 있으나 하는 것이 重要한 問題點으로 남아 있다.

여기에 대하여 李 등 [34]은 Walton[11]의 局所沿岸漂砂量式을 準用하였으며, 渡邊 등 [30]은 局所漂砂量에 대하여 平均流의 成分과 波의 作用에 의한 成分으로 나누어 생각하였으며, on-offshore 漂砂에 대해서는 波에 의한 漂砂의 移動方向을 나타내는 함수를 도입하였다.

3.3 3次元海濱變形計算의 흐름도

그림 3은 3.1에 나타낸 계산방법에 의한 3次元海濱變形計算의 흐름도이다.

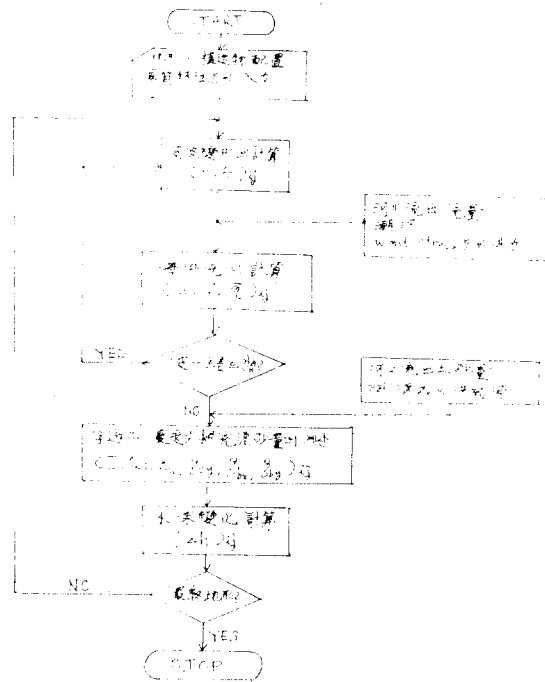


그림 3. 3次元海濱變形 計算의 흐름도

그림 3에서 보는 바와 같이 우선 水深, 底質의 粒徑分布 등의 특성을 입력하고, 漂砂移動의 지배적인 外力을 考慮하며 海濱流를 計算한다. 淺海에서 風波의 存在는 波浪에 의한 물입자속도에 의하여 저면전단응력을 크게 하기 때문에 考慮해 넣을 필요가 있다. 그리고, 河口部近과 같이 波浪과 흐름이 直接 相互干涉을 고려하여 波浪變形을 計算할 필요가 있다.

그리고, 구해진 파랑과 흐름의 공존장에서 掃流漂砂量과 浮遊砂濃度 등을 計算한다. 여기서, 河口로부터 流出土砂量이나 준설공사 등으로 인하여 S.S의 負荷量이 있을 경우에는 확산계산의 境界조건으로 쓸 필요가 있다.

이상, 구해진 모든 값에 의하여水深變化的計算을 행하며,豫測하고자 하는時間만큼上記計算을 반복하여 행한다. 단,時間에 따라外力조건이 달라질 경우에는外力을 시시각각으로 바꾸어 주면서計算을 행하면 된다.

4. 3 次元海濱變形的 計算例

4.1 河口流出流와 波浪에 의한 地形變化的 數値시뮬레이션

그림 4는 河口流出流와 入射波의 共存場에서 河口 周邊의 地形變化에 대하여 3.1에서 소개한 李 등[34]의 3次元海濱變形모델에 의하여 計算한 例를 나타낸 것이다.

實驗은 河道幅 1m, 河口水深 4.5m인 循環水槽에서 行하여 졌으며, 이때 河川流量은 10l/sec, 深海 入射波는 周期 1.25sec, 波高 6cm 入射角은 汀線에 對해 45°였다. 底質材料로서는 모래의 밀도 $\rho_s = 2.65$, $d_{50} = 0.25mm$ 의 모래가 쓰여졌다.

한편, 計算에 있어서는 格子間隔 $\Delta S = 12.5cm$, 모래의 沈降速度 $w_f = 3.2cm/sec$ 로 하였다.

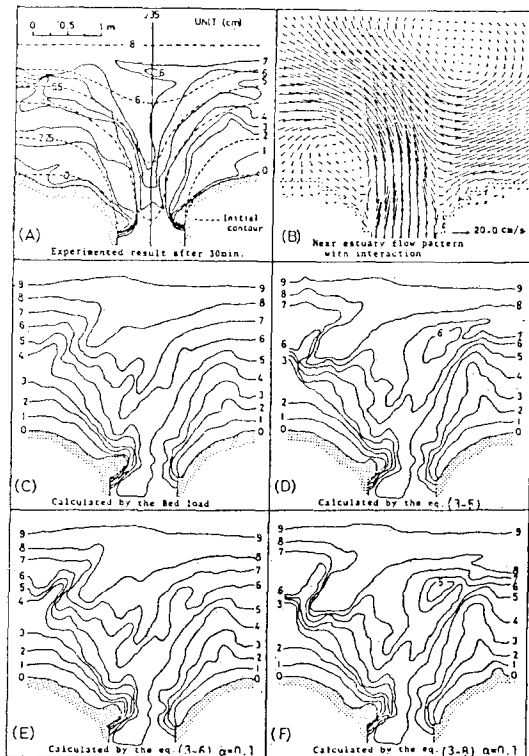


그림 4. 河口流出流와 波에 의한 地形變化的 實驗 및 計算結果(李[34])

波浪의 計算은 波흐름의 干涉을 고려한 波의 運動과 波動에너지 保存式에 의해 計算했다.

그림 4의 (A)는 造波後 30分後의 地形變動的 實驗 結果이며, (D)는 3.1의 方法 1, (E)는 方法 2 그리고 (F)는 方法 3에 의한 計算結果를 나타낸다.

4.2 河口流出土砂에 의한 砂州彩或의 시뮬레이션

Tidal inlet에 있어서 流出土砂의 擴散, 沈降 등에 의한 底面의 堆積 및 侵食의 樣相은 Özsoy[35]에 의해 理論的으로 연구되어, 모래의 堆積은 底面摩擦力, 地形, 모래의 沈降速度 및 河口流出流의 流出形態 등에 의해 決定된다는 것을 밝혔다.

여기서는 河口流出土砂에 의한 砂州形成에 관한 Butakov[36]의 實驗結果를 利用하여 計算한 例를 소개한다.

그림 5는 實驗開始 250時間後에 있어서 砂州의 堆積 Pattern 및 그 計算結果를 나타낸다. 그러나, 地形變化的 計算에 있어서는 時間으로 變하는 地形에 對한 흐름을 계산하면서 水深變化를 計算해야 하는데, 여기서는 初期地形에 對한 흐름장에 의하여 水深變化를 計算했다.

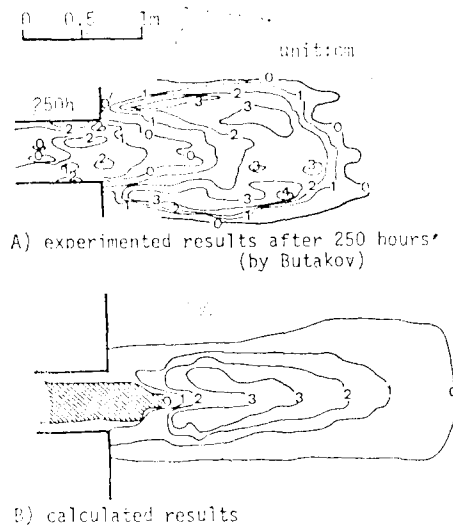


그림 5. 河口流出土砂에 의한 砂州의 堆積에 관한 計算例(李[37])

4.3 現地에의 適用例

그림 6은 調查對象海域을 나타낸다. 여기서는 河口 前面에 人工島가 건설될 경우, 그에 따른 地形變化를 計算하였다(Lee et al[38]).

計算조건은 대상해역에 있어서 과거의 바람자료로부

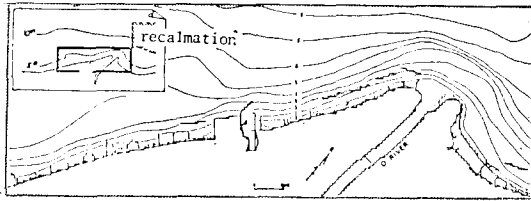


그림 6. 調査對象 海域

터 여러가지의 入射波浪特性和 河川流出流量資料로부터 決定되었다.

그림 7은 代表波의 有義波高가 3.05m, 주기 5.61 sec, 入射波向이 wsw 이고, 河川流出流量 65m³/sec 인 경우에 있어서 1時間後의 海濱流의 計算結果를 나타낸다.

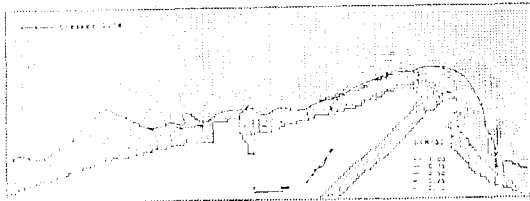


그림 7. 인공도 건설전의 폭풍과 河川流出流量에 의한 海濱流의 計算結果

한편, 그림 8은 인공도 건설후에 있어서 폭풍에 의한 수심변화량을 나타낸다.

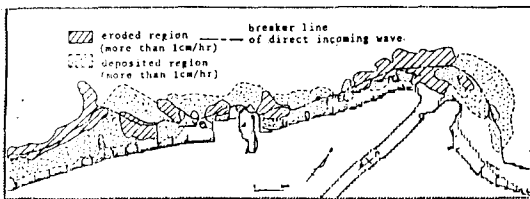


그림 8. 인공도 건설후의 폭풍에 의한 수심변화량의 計算結果

이상, 몇가지 計算例를 제시하고 移動床水理實驗結果에 의하여 李 등 [34]의 3次元海濱變形모델의 適用性에 대한 檢討를 行했다. 그 結果 實驗結果의 再現性에 대해서는 어느정도 그 適用性이 인정되었으나, 現地에 適用하기에는 아직 解決해야 할 많은 問題點을 안고 있다.

5. 3次元海濱變形豫測에 있어서 남겨진 課題

海濱變形豫測모델의 開發目的은 現地에 適用하기 위

한 것이다. 지금까지 實驗水槽의 규모에서는 어느정도 檢證이 이루어졌다. 그러나, 現地에서 適用은 하고 있으나 아직 檢證단계까지는 이르지 못하고 있다. 그 이유는 現地波浪은 不規則波이기 때문이다. 그리고 現地の 海濱流系를 構成하는 것은 波浪만이 아니라는 점이다.

따라서, 우선 現地 海濱流를 再現하기 위해서는 불규칙파의 Radiation stress를 추정할 필요가 있으며, 불규칙파의 Radiation stress를 추정하기 위해서는 불규칙파의 변형을 계산해야 한다.

즉, 不規則波의 特性인 方向分散性和 不規則性을 고려한 波浪의 屈折, 回折, 淺水變形 및 碎波變形을 어떻게 計算할 것인가 하는 것이 앞으로 남겨진 과제의 하나라고 할 수 있다.

그리고, 장차 海岸開發이나 海岸侵食制御 등과 같은 問題와 관련하여, 主要海岸에 대한 定期的인 海岸線測量과 水深測量資料의 축적이 무엇보다도 시급한 과제의 하나이다.

6. 結 言

海濱變形의 豫測手法과 관련하여, 먼저 각 漂砂量式에 關하여 說明하고 one-line theory와 3次元海濱變形모델의 차이점에 대하여 소개하였다. 한편, 3次元海濱變形모델에 있어서 mud transport model과 sand transport model로 나누어 각 모델의 현황과 문제점을 論하였다.

실제 海濱變形모델의 豫測精度를 높이기 위해서는 각 모델에 適合한 漂砂量公式의 開發과 檢證이 필요하며, 특히 mud transport model에 있어서는 관측자료와 numerical model 과를 결합시키는 hybrid model의 開發이 절실하게 요구된다고 할 수 있다. 그리고, 現地 不規則波의 취급이나 現場調查結果에 의한 檢證을 통하여, 실제로 海濱豫測에 3次元海濱變形모델이 有用하게 쓰여질 날이 곧 다가올 것으로 생각한다.

그리고, 本稿를 作成하는데 있어서, 2절에 대하여는 大阪大學 出口助教授의 博士學位論文을 일부분 引用하였으며, 3절과 4절은 筆者의 學位論文의 일부를 토대로 作成한 것이다.

參 考 文 獻

1. Pelnard-Considére, R., Les Energies de la Mer, Question III, 4th Jour. de l'Hdyr., Rap. No. 1, 1956.

2. Perlin, M. and R.G. Dean, 3-D Model of Bathymetric Response to Structures, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, A.S.C.E., 111(2), 1985.
3. 樫木 亨, 漂砂と海岸侵食, 森北出版社, 1982.
4. Eaton, R.O., Littoral Processes on Sandy Coasts, *Proc. 1st Conf. Coastal Eng.*, 1951.
5. Komar, P.D. and Inman D.L., Longshore Sand Transport on Beaches, *J. Geophys. Res.*, 75, 1970.
6. Bruno, R.O. and Gable, C.G., *Proc. 15th Inter. Conf. Coastal Eng.*, 1976.
7. Iwagaki, Y. and Sawaragi, T., A New Method for Estimation of the Rate of Littoral Sand Drift, *Coastal Eng. in Japan*, Vol. 5, 1962.
8. Bagnold, R.A., *Sedimentation, The Sea*, III, Hill, M.N. (editor), Interscience, 1963.
9. Thornton, E.B., Distribution of Sediment Transport across the Surf Zone, *Proc. 13th. I.C.C.E.*, 1973.
10. Komar, P.D., Beach Sand Transport, *Coastal and Ocean Div.*, A.S.C.E., 1977.
11. Walton, T.L. Jr, Littoral Sand Transport on Beaches, Thesis, presented to the Univ. of Florida, Gainesville, 1979.
12. Bijker, E.W., Longshore Transport Computations, *J. Waterways, Harbour and Coastal Eng. Div.*, A.S.C.E., 1971.
13. Willis, D.H., Sediment Load under Waves and Currents, *Proc. 16th I.C.C.E.*, 1978.
14. 土屋義人・芝野照夫・安田孝志, 沿岸流と漂砂, 漂砂の動態と海岸侵食抑制に関する研究, 自然災害特別研究報告書, 1978.
15. Longuet-Higgins, M.S., Longshore Current Generated by Obliquely Incident Sea Waves, *J. Geophys. Res.*, Vol. 75(33), 1970.
16. Madson, O.S. and Grant, W.D., Quantitative Description of Sediment Transport by Waves, *Proc. 15th I.C.C.E.*, 1976.
17. Sleath, J.F.A., Measurements of Bed Load in Oscillatory Flow, *J. Waterways Port Coastal and Ocean Div. A.S.C.E.*, 1978.
18. 砂村繼夫・阪東浩造・堀川清司, 非對稱砂漣上での砂移動機構と漂砂量に関する實驗的研究, 第25回海岸工學講演會論文集, 1978.
19. 野田英明・松原雄平, 汀線に直角方向の漂砂, 第25回海岸工學講演會論文集, 1978.
20. Nielsen, P., Svendsen, I.A. and Staub, C., On Shore Offshore Sediment Movement on Beaches, *Proc. 16th I.C.C.E.*, 1978.
21. Bakker, W.T., Sand Concentration in an Oscillatory Flow, *Proc. 14th I.C.C.E.*, 1974.
22. Nihoul, J.C.J. and Y. Adam, Dispersion and Settling around a Waste Disposal Point in a Shallow Sea, *J. Hyd. Res.*, Vol. 13, 1975.
23. Farmer, R.C. and W.R. Waldrop, A Model for Sediment Transport and Delta Formation, *A.S.C.E. Coastal Sediment*, 77, 1977.
24. Hayter, E.J. and A.J. Metha, Modelling Fine Element Transport in Estuaries, *EPA Tech. Rep.*, 1983.
25. Sheng, Y.P., Mathematical modelling of Three-Dimensional Coastal Currents and Sediment Dispersal: Model Development and Application, *C.E.R.C. Tech. Rep* 1983.
26. Downing, J.P., Shi, N.C. and L.H. Larsen, Two-Dimensional Sedimentation Model for Shallow Water, *OTC*, 1985.
27. 宋源吾・廉器大・蔡璋源, 沿岸開發에 따른 海岸變形 豫測을 위한 數值解析 모델기법 개발 연구, 韓國科學技術院 海洋研究所, 1986.
28. 姜始桓, C.K. Ziegler, 沿岸堆積物의 輸送모델 研究, 韓國海洋學學會秋季研究發表會要約集, 1986.
29. 山口正隆・西岡洋一, 離岸堤群および突堤群による3次元海濱變形の數值豫測法, 第30回海講論文集, 1983.
30. 渡邊晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山純, 構造物設置に伴う三次元海濱變形の數值豫測モデル, 第31回海講論文集, 1984.
31. Deguchi, I. and T. Sawaragi, Calculation of the Rate of Net On-offshore Sediment Transport on the basis of Flux Concept, *Proc. 19th I.C.C.E.*, 1984.
32. 芦田和男・岡部建士, 貯水池堆砂の數值計算法に関する研究, 京都大學防災研究所年報, 第25號, 1982.
33. Fleming, C.A. and J.N. Hunt, Application of a Sediment Transport Model, *Proc. 10th. I.C.C.E.*, 1976.
34. 樫木亨・李宗燮・出口一郎, 河口周邊の海濱流及び地形變動モデルに関する研究, 第31回海講論文集, 1984.
35. Özsoy, E., Suspended Sediment Transport near Tidal Inlets, *A.S.C.E. Coastal Sediment*, 77, 1977.
36. Butakov, A.N. Study of Development and Deform-

ation of Mouth Bar, 14th IAHR Conf., 1977.

37. 李宗燮, 河口閉塞に關する基礎的研究, 大阪大學工學部博士學論文, 1986.

38. Sawaragi, T., Jong-Sup Lee and I. Deguchi, A New

Model for a Prediction of Beach Deformation around a River Mouth, Proc. Inter. Symp. Ocean Space Utilization, 85, Vol. 2, 1985.

◆◆◆【新刊紹介】◆◆◆

水 理 學

全訂版

崔榮博

南宜祐・朴定應・安元植・尹泰勳 共著
李寬洙・李舜鐸・李殷泰・崔漢圭

水 理 學

工學博士 李 元 煥

이 책은 崔榮博 先生의 還曆을 記念하기 위하여 오랜 學究生活을 함께 한 學友들이 自己專攻分野를 담당하여 執筆, 整理한 것임.

이 책은 各章 끝에 演習問題와 參考文獻을 收錄하여 工夫하는데 도움이 되도록 하였음.

內容：第1章 概 說

第2章 靜止流體에 力學

第3章 흐름의 基礎理論

第4章 오리피스의 水門

第5章 웨 어

第6章 摩擦抵抗과 流速分布

第7章 管水路

第8章 開水路

第9章 物體에 作用하는 流體力과 그 應用

第10章 土砂에 流送

第11章 非回轉흐름

第12章 波 浪

第13章 地下水에 흐름

第14章 次元解析과 相似法則

4·6倍版, 426페이지, 값 8,000원

1987年 2月 20日 發行

發行處：普成文化社(電話：733-7244)

內容：1. 概 說

2. 靜水力學

3. 動水力學

4. 管水路

5. 開水路의 흐름

6. 流水中에 物體抵抗

7. 水流에 測定

8. 波動과 海岸水理

9. 土破水理

10. 水衝作用

11. 地下水

12. 洪水流와 河口水理

13. 水質水理

14. 相似律과 水理模型 實驗

新菊版, 512페이지, 값 8,500원

1987년 1월 25일 發行

發行處：文運堂(電話：762-6010)