

항로매몰 예측을 위한 수치모형의 적용성 검토 Applicability Study of Numerical Model for Sedimentation in Navigation Channel

김규한*, 배기성**, 백승화***

Kyu Han Kim*, Ki Sung Bae** and Seung Wha Baek***

요 지 : 파와 흐름이 공존할 경우의 항로매몰 예측을 위한 수치모형을 제안하였으며, 아울러 기존의 모델들에 대해서도 종합적인 정리 및 검토를 덧붙여 비교하였다. 본 연구에서 제안되는 항로매몰 예측 모델은 고정도 수치계산법을 이용하여 해석하고, 표사의 비평형성을 고려하기 위해 연직방향의 표사이동 flux의 차를 구하여, 지형변동을 계산하였다. 계산에 의해 얻어진 지형변동 결과는 비교적 파랑보다는 흐름이 탁월할 경우 실험에서 얻어진 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

Abstract □ A numerical model for predicting depositional processes of navigation channels caused by waves and currents is proposed. In the model, non-equilibrium concentrations of suspended sediment are numerically solved by using the split-operator approach. The calculated concentrations across a channel show good agreements with the measured concentrations in experiments. Based on the calculated concentrations, differences of upward and downward sediment fluxes are estimated to predict topographic changes. The predicted topographic change across the channel coincides fairly well with the measured profile provided that the currents are relatively stronger than waves.

1. 서 론

최근 해빈변형을 수치적으로 예측하는 모델이 다수 제안되었다. 이들의 대부분은 소위 평형 상태에서 정식화된 국소표사량을 표사이동의 연속방정식에 채용하여 수심 변화를 예측하고자 하는 것이다. 그러나 표사이동의 외력으로서 파랑 및 흐름장이 공간적으로 급변하는 영역(예를들면, 구조물 주변, 항로 등의 수심급변부, 혹은 쇄파점 근방 등)에 있어서의 표사이동에 관해서는, 평형상태에서의 표사량관계식이 적용될 수 없다. 그러나 비평형 상태에서의 표사이동에 대해서는 지금까지 그다지 연구가 진행되지 않은 상태이다. 단, 부유표사에 대해서는 이러한 비평형성을 고려한 수심 변화 예측모델이 몇 개 제안되어 있기는 하지만 모두

비평형상태의 농도 분포에 대해서는 근사적인 취급방법을 택하고 있을 뿐이다. 또한 소류표사의 비평형성에 대해서는 현재 어느 정도의 공간 규모에서 발생할지의 여부조차도 명확히 되어 있지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 항로에서의 부유표사에 대한 비평형성을 고려하기 위하여 비평형상태의 부유사농도분포의 계산에 대해 이류확산방정식을 고정도 수치계산법을 사용하여 해석하는 지형 변화 예측 model을 이용하여 검토하고, 과거의 예측 model들과의 비교를 수행함에 따라 과거의 해석 model의 문제점에 대해서도 명확히 검토하고자 한다. 더우기 파와 흐름에 의한 항로 매몰에 관한 수치모형실험을 수행하여 매몰 형상과 부유사농도분포에 대해 각각의 해석 model의 적용성에 대해 검토를 수행하기로 한다.

*관동대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Kwan Dong University, Kangnung, Korea)

**경상대학교 해양토목공학과 (Department of Ocean Civil Engineering, Gyeong Sang National University, Tong Yeong, Korea)

***인천시립전문대 토목공학과 (Department of Ocean Civil Engineering, Incheon City Junior College, Incheon, Korea)

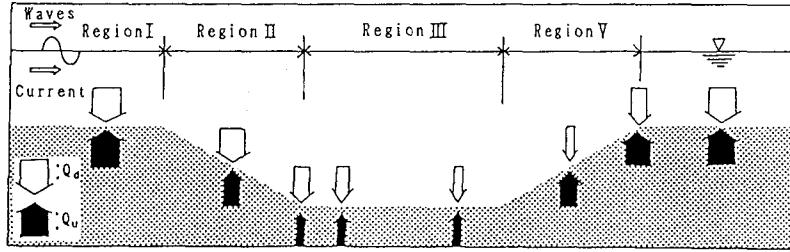


Fig. 1. Nonequilibrium suspended sediment and topographic change around channel.

2. 비평형상태의 부유표사와 지형 변화의 관계

부유표사에 의한 지형 변동은 부상 flux P , 침강 flux Q 및 저질의 공극률 λ 를 사용해 다음 식과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda}(Q-P) \quad (1)$$

윗 식 (1)에서 부상 flux와 침강 flux가 일치할 경우는 평형상태라 할 수 있고 이때에는 부유표사에 의한 지형변화는 발생하지 않는다. 따라서, 부유표사에 의한 지형 변동은 부상·침강 flux에 의해 좌우되고, 부상·침강 flux의 균형이 무너지는 즉 비평형상태의 부유사 농도가 나타나는 영역에서 발생한다.

실제의 항로에 있어서 비평형형성의 부유표사에 의한 매물·침식은 다음과 같은 기구에 의해 발생한다고 생각된다. Fig. 1에서와 같이 파와 흐름이 항로를 횡단하는 경우를 상정한다.

항로의 Region I의 영역에서는 충분히 긴 유하거리로 부유표사가 부상되고 거의 공간적으로 일정한 평형상태의 부유사 농도분포를 형성하여 부상 flux와 침강 flux가 균형을 이루기 때문에 부유표사에 의한 지형 변형은 생기지 않는다. 따라서 항로 법면상과 하류측 Region II의 영역에서는 이류에 의한 수심의 증가에 수반한 저부전단력의 감소에 의해 부유표사의 부상 flux가 감소하기 때문에 부상 flux가 침강 flux보다 적은 비평형상태의 부유사농도를 형성한다. 이 비평형상태의 부유사 농도분포는 Region II 중 하류영역에 존재하는 평형상태의 농도 분포에 도달할 때까지의 범위에서 발생하고 있으며 결국 부유표사의 퇴적현상이 일어난다. 또한 Region III영역에 대해서는 수심의 감소에 수반하는 저부전단력의 증가에 의해 부유표사의 부상 flux가 점차 증가하기 때문에, 부상 flux가 침강 flux보다 큰 비평형상태 부유사농도분포로 된다.

비평형상태의 부유사 농도분포는 항로 하류측 일정 수심에서의 평형상태 부유사 농도 분포에 도달할 때까지의 범위에 걸쳐 발생한다. 이 영역에서는 침식현상이 발생한다. 이상과 같이 비평형상태의 부유표사는 부상·침강 flux와 직접적으로 관계하고 있으므로 지형변화를 전도 높게 예측하기 위해서는 비평형 상태의 부유사 농도 분포를 정확하게 산정할 필요가 있다.

3. 항로 매물의 수치계산법

본 절에서는 항로 매물의 수치예측에 관한 과거의 방법과 그 문제점을 논하고 문제점들을 해결하기 위한 새로운 방법을 제안한다.

3.1 기존의 지형 변화 예측 Model과 그 문제점

3.1.1 1차원확산방정식에 기반한 방법

이 방법은 소위 평형상태를 가정한 계산법이고, 각 지점에서의 기준점농도 C_0 와 연직방향의 확산계수 E_z 를 부여함에 따라 각 지점에 대한 농도의 연직분포를 1차원 확산방정식의 해인 $C(z) = C_0 \times \text{Exp}(-E_z \times z/w)$ 로 산정하는 방법이다. 이 계산법에서는 C_0 와 E_z 가 공간적으로 급변하는 경우 그 영향이 연직방향의 농도 분포에 순식간에 전파하기 때문에 그 지점에서의 농도 분포가 급변한다. 즉 부유표사의 부상·침강과정은 해석상 고려되어 있지 않고 더우기 이류속도의 영향은 C_0 와 E_z 에 고려되지만, 직접적인 이류효과는 무시되어 있다.

3.1.2 Bijker Model

Bijker는 항로내와 항로외의 상류측(Fig. 1의 Region I)에 있어서 평형상태의 부유사 농도 분포를 가정하고, 그 두지점에 대한 평형상태의 연직농도분포로부터 항로 법면상과 하류측의 비평형상태의 농도 분포를 추정하고 국소표사량 ΔQ 를 다음식으로부터 계산

하였다.

$$\Delta Q = \frac{dS_s(x)}{dx} \quad (2)$$

$$S_s(x) = S_{s3} + (S_{s1} - S_{s3}) \times \exp\left(-\frac{E \cdot w_f \cdot x}{q}\right) \quad (3)$$

$$E = \frac{h_{s1}(h_{s2} - h_{s1})}{h_{s2}\{1 - \exp(-h_{s1})\} - \alpha h_{s1}\{1 - \exp(-h_{s2})\}} \quad (4)$$

여기서, $h_s = w_f \times h/E_z$: 무차원화된 수심, h_1 : 항로의 외의 수심, h_2 : 법면상의 수심, h_3 : 항로내의 수심, S_s : 부유사량 flux, w_f : 저질의 침강속도, E_z : 연직방향의 확산계수, q : 유량, $\alpha = C_{03}/C_{01}$: 항로내의 기준점농도의 비를 나타낸다. 이 경우, 항로내에서의 평형상태에 대한 연직방향의 확산계수 E_{z3} , E_{z1} 및 기준점농도 C_{03} , C_{01} 과 법면위에서의 연직방향의 확산계수 E_{z2} 만 주어진다 면 비평형상태의 국소표사량 ΔQ 를 계산할 수 있다. 그러나 계산된 비평형상태의 부유표사에 대해서 역학적인 고찰은 수행되지 않고 1차원 확산방정식에 근거한 방법과 마찬가지로 부유사의 부상·이류·침강과정은 해석상 고려되어 있지 않다. 또한 법면상에서의 연직방향의 확산계수 E_{z2} 에 대해서도 수심에 비례하는 형태로서 다음 식으로 가정 되었다.

$$E_{z2} = E_{z1} \times (h_x/h_1) \quad (5)$$

3.1.3 이류확산방정식에 기반한 계산법

일반적으로 부유표사는 다음 식과 같은 비정상이류 확산방정식에 기반하여 해석된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} - w_f \frac{\partial C}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (6)$$

윗식은 부유표사의 수송속도 u , 수평·연직방향의 확산계수 E_x · E_z 가 주어지면 경계조건이주어진 상태에서 수치적으로 해석이 가능하다. 그러나 계산기 용량의 제한과 계산 시간의 단축을 위해서 이하에 나타내는 여러가지 방법에 의해 해석되어 왔다.

1) 연직방향으로 적분하는 방법

일반적으로 계산기 용량을 절감하기 위하여 식 (6)의 이류확산방정식은 연직방향으로 적분한 다음 식의 형태로서 해석된다.

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + U \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \Delta Q_s \quad (7)$$

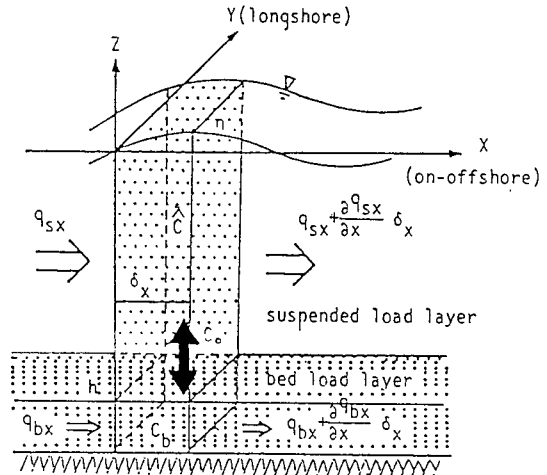


Fig. 2. Depth variation associated with sediment

여기서, U : 단면평균유속, \bar{C} : 부유사의 단면평균농도이다. 또한, 기준점에서의 연직방향의 표사량 flux ΔQ_s 는 파·흐름이 공존하는 영역에서의 마찰속도 u_{cw*} 를 사용하면 다음 식과 같이 나타낼수 있다.

$$\Delta Q_s = [(1-r)C_0 w_f (1 - u_{cw*}/w_f) + \bar{\alpha} \bar{C} w_f] \quad (8)$$

$$u_{cw*} > w_f \quad r=0$$

$$u_{cw*} < w_f \quad r=1$$

식 (8)에서 알 수 있듯이 침강속도가 마찰속도 u_{cw*} 보다 클 경우는 우변 첫째항은 생략되고 둘째항만 존재하게 된다. 여기서, $\bar{\alpha}$ 는 침강 flux를 계산할 경우에 기준점에서의 부유사농도로서 단면평균농도를 사용했을 경우에 필요한 보정계수이고 본 논문에서는 기준점농도와 단면평균농도의 비를 고려하여 그 값을 20으로 했다. 이처럼 본 계산법에 있어서는 경계조건으로서 기준점에 있어서의 연직방향 표사량 flux를 줄 필요가 있고 부상 flux에 있어서의 저질사의 부상속도와 침강 flux에 있어서의 저질사의 농도를 입력해 주어야 한다. 그러나 비평형상태에 있어서 이들의 값을 실험으로 측정, 또는 해석에 의해 구하는 것은 극히 어려운 문제이다.

2) 연직방향을 여러층으로 분할하는 방법

1)의 방법에서의 문제점을 해결하기 위해서 연직방향을 다층으로 분할하여 기준점에서의 침강 flux에 대한 저질의 농도값은 최하층의 단면평균농도를 사용하였다(Irie 등, 1985). 그러나 상, 하층에 있어서의 저질

의 수치로서 연직방향의 확산계수에 대한 실험정수를 주어 줄 필요가 있고, 기준점농도 C_0 , 수평방향의 확산계수 E_x 이외에 많은 실험 정수를 부여할 필요가 있다.

3) 연직방향의 분포형을 가정하는 방법

비평형상태에 대한 농도의 연직분포에 지수분포를 가정하였다. 또한 기준점농도 C_0 와 형상 파라메타 A 라는 두변수를 미지수로 두고 식 (6)을 만족하는 하중 부여차분법에 의해 미지수를 정함으로써, 비평형상태의 부유사농도분포를 결정하였다(Nadaoka 등, 1988). 그러나 기준점에서의 경계조건으로서 부상 flux를 부여할 필요가 있다. 또한 부여된 부상 flux값은 평형상태를 가정하여 평형상태의 기준점농도와 침강속도의 곱으로 표시하고 있으므로 역시 기준점에서의 경계조건의 부여 방법에 문제가 있다고 할 수 있다.

3.2 고정도수치해석법

비정상 2차원 이류확산방정식을 수치적으로 해석해서 비평형상태의 부유사농도분포를 구하는 경우, 최대의 이점은 수평·연직방향의 확산계수 E_x · E_z 와 기준점농도 C_0 만을 부여하면 계산이 가능하고, 이들의 물리량은 평형상태를 가정하면 실험에 의하여 용이하게 구할 수 있다는 것이다. Rijn(1986)은 정상상태를 고려하고, 더우기 수평방향의 확산항을 무시한 이류확산방정식에 기반해서 해석을 수행한 바 있다. 본 논문에서는 수평방향의 확산도 고려하여 식(6)을 유한차분법에 의해 수치적으로 풀기로 한다. 계산법으로서 연산자 분리방법(split operator approach)에 의해 계산을 수행하고, 이류방정식의 차분에는 6점법을, 확산방정식의 차분에는 5점법을 사용하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mu \frac{\partial C}{\partial x} - \alpha_f \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (10)$$

연산자 분리방법은 식 (6)의 이류확산방정식을 식 (9)와 식 (10)과 같이 이류방정식과 확산방정식으로 분해하여, 각각을 상호교환하여 계산함으로써 농도분포를 계산하는 데에 특징이 있다. 즉 식 (9)과 식 (10)을 각각 차분화하고, 격자점에서 시간 단계 마다 교대로 계산을 진행한다. 이류방정식에 대해 여러과정을 거쳐 결과적으로 얻어지는 차분식은 다음과 같다.

$$\sum_{k=0}^N \frac{1}{k!} \frac{\partial^k C}{\partial x^k} (-u\Delta t)^k = \sum_{k=0}^N \sum_{m=2}^{m=1} b_m \frac{1}{k!} \frac{\partial^k C}{\partial x^k} (m\Delta x)^k \quad (11)$$

여기서, $\frac{\partial^k C}{\partial x^k}$ 와 b_m 은 미지수이다. 위식은 $\frac{\partial^k C}{\partial x^k}$ 에 대해

항등식이 되고, 좌우양변의 $\frac{\partial^k C}{\partial x^k}$ 의 계수를 비교함에 따라 b_m 에 대한 $N \times N$ 의 matrix가 되어 이를 해석함에 따라 b_m 이 결정된다. 이와같은 방정식은 풍상차분법 등을 사용하면 $N=2$ 정도로 계산될 수 있으나 오차가 큰 단점이있다.

본 연구에서는 계산정도는 물론 경계조건의 수를 절약하기 위해 6점법($N=6$)을 채용하였다. 식 (10)의 확산방정식도 x, z 방향에 대해 각각 독립적으로 계산된다. 단, 확산방정식의 경우 시간미분과공간미분의 관계식에 있어서 공간미분은 시간미분의 2배의 차수를 갖기 때문에 N 을 기수로 선택함에 따라 쉽게 차분화된다.

$$\begin{aligned} C(i,n+1) = & C(i,n) + \frac{k_x \Delta t}{\Delta x^2} \left[-\frac{1}{12} \{C(i+2,n) + C(i-2,n)\} \right. \\ & + \frac{4}{3} \{C(i+1,n) + C(i-1,n)\} - 2.5 \times C(i,n) \left. + \left(\frac{k_x \Delta t}{\Delta x^2} \right)^2 \right. \\ & \left. \left[\frac{1}{2} \{C(i+2,n) + C(i-2,n)\} - 2\{C(i+1,n) \right. \right. \\ & \left. \left. + C(i-1,n)\} + 3 \times C(i,n) \right] \right] \quad (12) \end{aligned}$$

이때 계산상에서 기준점농도 C_0 , 수평·연직방향 확산계수 E_x, E_z 및 부유표사의 수송속도 u 를 부여해 줄 필요가 있다. 일반적으로 C_0 는 파와 흐름이 공존하는 영역에서의 저부전단력, 혹은 마찰속도 u_{cw} 의 함수로서 주어지고 확산계수 또한 흐름에 대한 와동점성계수에 비례한다고 생각한다면 u_{cw} 의 함수로서 주어질 수 있다. u_{cw} 는 파와 흐름이 공존하는 영역에 있어서의 저부경계층의 와동점성계수에 대해 2층모델을 가정함에 의해 구해지고 파와 흐름의 유속 분포의 엄밀해에 기반한 저부전단력의 진폭으로부터 결정하였다(1991). 그리고 연직방향의 확산계수 E_z 및 기준점농도 C_0 를 다음 식에 의해서 계산하였다.

$$E_z = \alpha_{tz} \times x \times \mu_{cw} \times \delta_w \quad (13)$$

$$C_0 = \alpha_{c0} \times \left[\frac{0.688 \times (\alpha_m \cdot \sigma)^2}{g \times w_f \times T} \right]^{1.77} \left\{ 1.13 \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \right\} \quad (14)$$

여기서, χ 는 Karman 정수, δ_w 는 경계층두께이고, 혼합거리 $l (= \chi \times u_{cw} / \sigma; \sigma = 2 \pi / T)$ 의 4배로 정의하였다. α_m 은 경계층 외연의 파에 의한 수립자 궤도 진폭이다. $\alpha_{tz} \cdot \alpha_{c0}$ 는 각각비례 정수이고 평형상태라고 생각되어지는 항로 상류측에서의 연직방향의 부유사 농도분포의 실험결과와 비교하여 결정하였다. 또한 수평방향의 확산계수 E_x 는 E_z 와 같다고 가정하고, 부유사의 침강속도 w_f 는 Rubey의 식으로부터 구했다. 또한 수치계산의 안정성에 대한 페클수와 쿠란수에 대해서는 페클수 $(E_x \Delta t / \Delta z^2) = 0.2$, 쿠란수 $w_f \Delta t / \Delta z = 0.05$ 로서 계산을 수행하였다. 여기에서, $w_f = 1.16 \text{ cm/sec}$, $\Delta t = 0.02 \text{ sec}$, $\Delta x = 5 \text{ cm}$, $\Delta z = 0.5 \text{ cm}$ 이다. 또한, 부유표사의 수송속도 u 는 유속과 같다고 가정하고, 유속의 연직분포는 대수분포로 가정해서 단면평균유속 U 에 의해 구했다. 단면평균유속 U 에 대해서는 연속방정식과 흐름의 영향을 고려한 잉여응력(radiation stress) 항을 포함하는 식 (15)와 같은 운동방정식을 2-step Lax-Wendroff 법으로 차분화해서 계산한다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = - \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - \frac{1}{(h + \bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \bar{c}_x \right) + \epsilon_x \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (15)$$

한편, 소류표사는 부유표사만큼 부상 높이가 크지 않기 때문에 지형 변화에 미치는 영향은 그리 크지 않다고 생각되지만 기준점농도와 관계되어 부유표사

에 어느 정도 관계될 것을 고려한다면 앞으로 소류표사의 비평형성에 대해서도 연구할 필요가 있을 것으로 생각된다. 본 논문에서는다음 식 (13)을 이용해서 부유표사의 독립적으로 소류사량 flux Q_b 를 산정하였다. 계산에 대한 전반적인 흐름도는 Fig. 3와 같다.

$$Q_b = 47 \sigma \pi d_{50}^2 (\psi - \psi_c)^{3/2} U / u_w \quad (16)$$

$$\psi = \mu_{cw}^2 \left\{ \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_{50} \right\}$$

$$\psi_c = \mu_c^2 \left\{ \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_{50} \right\}$$

여기서, d_{50} : 저질의 중앙입경, $u_w (= \alpha_m \times \sigma)$ 경계층의 연에 대한 파에 의한 수립자속도 진폭, u_c : 이동한계 마찰속도이다.

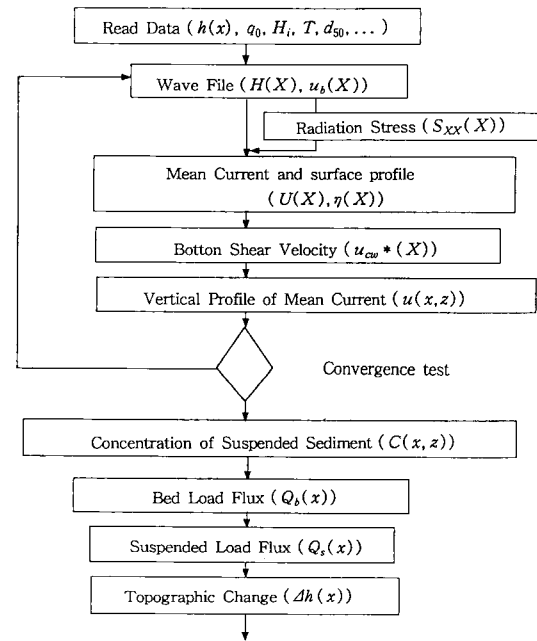


Fig. 3. Flow chart of the numerical model.

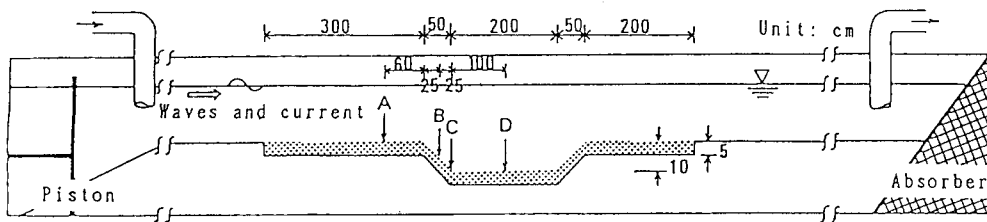


Fig. 4. Experimental setup.

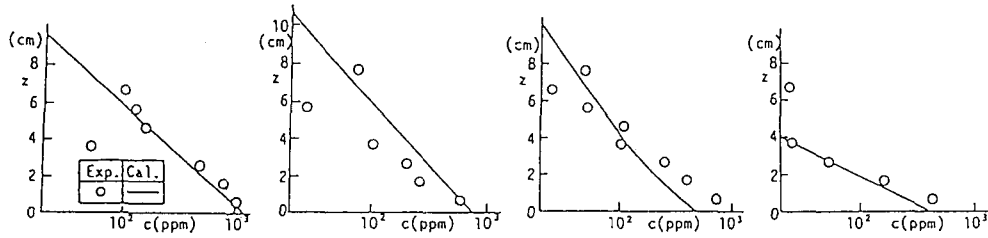


Fig. 5. Distribution of suspended sediment concentration (Exp. I). (a) Point A (b) Point B (c) Point C (d) Point D.

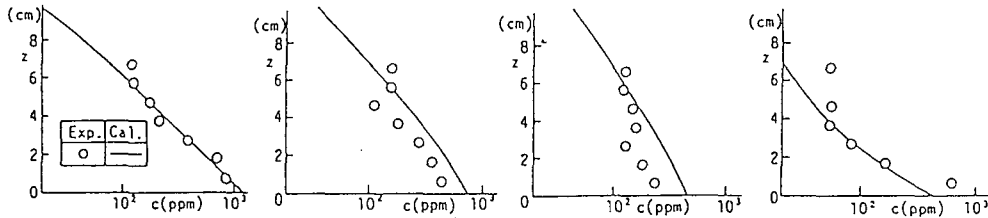


Fig. 6. Distribution of suspended sediment concentration (Exp. I). (a) Point A (b) Point B (c) Point C (d) Point D.

4. 항로매물에 관한 이동상 수리모형실험

실험은 2차원 조파수조를 이용해서 항로를 수로 중앙부에 설치하여 흐름 및 파가 항로를 횡단하는 경우를 상정했다. 항로의 상류측에서는 평형상태의 부유사농도분포로 되게끔 3m의 이동상을 설치하고, 이동상에서 침식이 생기지 않게끔 이동상의 상류단의 모래를 급사하였다. 실험에서 사용한 저질은 중앙입경이 0.012 cm이다. 파의 주기와 파고는 1.5 sec와 8 cm 정도이고, 단면평균유속 U 는 19.4, 10 cm/sec의 2종류를 사용하였다. 연직방향의 부유사농도의 측정, 사이편에 의한 방법으로 측정하였으며 사련의 crest 위의 0.7 cm 높이로부터 연직방향으로 1 cm 간격으로 8지점에서 동시 측정했다. 측정 정도는 30 ppm 정도이다. 비평형상태의 부유사농도의 측정은, Fig. 1에 표시한 퇴적 영역(부상 flux < 침강 flux)이고 상류측의 항로 법면 및 하류측의 3지점에서 측정했다. 그리고, 항로 상류부의 평형상태로 생각되어지는 부유사농도의 연직농도의 연직분포는 60 cm 상류측의 A지점에서 측정했다. 또한 지형 변화의 측정은 조파개시순간에서 3.5시간 후에 행했다.

5. 적용성 검토

5.1 비평형상태 부유사농도의 공간분포

Fig. 5과 Fig. 6은 각각 단면평균유속 U 가 10 cm/sec와 19.4 cm/sec의 경우에 있어서 항로 주변의 부유사농도의 연직분포를 나타낸다.

각각의 그림 (a)는 항로의 상류부의 거의 평형상태로 생각되어지는 Fig. 4 중의 A지점에 놓인 부유사농도분포를 나타내고 각각의 그림 (b), (c), (d)는 항로내의 부유사농도분포를 나타내는 Fig. 2중의 B, C, D 지점에 있어서 연직방향의 농도 분포를 나타낸다. 이 경우 종축의 z 는 사련의 crest로부터 연직상향으로 구한 값이다. 또한 Fig. 5, 6 중에 나타난 계산 결과는 연산자 분리방법에 의해 계산된 것이다. 양 그림으로부터, 비평형상태의 부유사농도의 연직분포는 항로의 법면상에서도 거의 지수 분포를 가지면서 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 항로 상류측의 법면상에서는 이류에 의한 상류로부터의 모래 공급이 있기 때문에 저부로부터 떨어져 있는 곳의 농도는 그다지 변화가 없음을 알 수 있다. 또한 수심의 증가에 수반하는 저부전단력의 감소로 인해 저부로부터 부상 flux가 유하에 수반하여 감소하기 때문에 기준점 근방의 부유사농도는 감소한다. 또한 항로 법면 구석으로부터 항로 저면에 걸쳐 농도 분포는 수심이 깊기 때문에 기준점농도 및 확산계수도 작지만 상류로부터 이류해온 부유사의 침강에 수반해서 농도 경사가 완만하게 되고, 항로저면상 평형상태의 농도 분포에 근사화 된다. 그러나 기준점 농도는 항로 저면상에서 현저한 장소적 변화는 나타내지 않는다. 이러

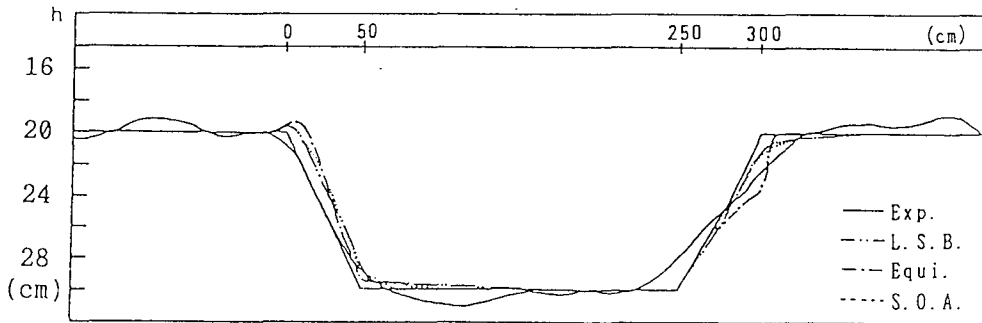


Fig. 7. Change in the channel cross-section (Exp. I).

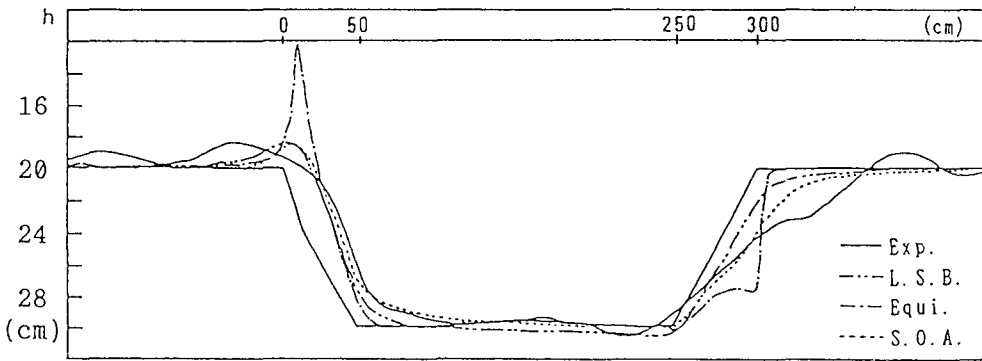


Fig. 8. Change in the channel cross-section (Exp. II).

한 항로법면에서의 부유사농도분포 거동은 단면 평균유속이 큰 경우에 보다 명확하게 나타난다.

또한 상술한 방법에 의해서 계산된 부유사농도분포는 실측된 농도 분포의 특징을 잘 재현해 주고 있다. 항로 법면상에서의 농도 분포에 대해서는 실험 결과가 계산결과보다 작게 나타나고 있다. 이것은 계산 결과에 있어서 법면상에서의 연직방향의 유속이 무시되어져 있기 때문이라고 생각되어진다.

5.2 항로단면형상의 변화

Fig. 7, 8은 각각 단면평균유속 U 가 10, 19.4 cm/sec의 경우에 있어서 3.5시간 후의 항로지형에 대해서 3종류의 해석법에 의한 계산 결과와 실험 결과와의 비교를 나타낸다. 즉 1차원 확산방정식에 기반하는 계산법(그림 중에 Equi.로 표시), 2차원 이류확산방정식을 연직방향으로 적분한 단면평균농도를 이용한 계산법(그림 중에 L.S.B.로 표시) 및 고정도계산법(그림 중에 S.O.A.로 표시)의 3가지 방법이다. 부유표사의 비평형성이 그다지 넓은 범위에서 생기지 않고 단면평균유속

이 작은 Fig. 7의 경우, 각 계산 결과에 그다지 차이는 보이지 않는다.

그러나, 부유표사의 비평형성이 넓은 범위에서 생기고 단면평균유속이 큰 Fig. 8의 경우 1차원 확산방정식에 기반한 계산 결과는 이류확산방정식에 기반한 나머지 두 가지의 계산법에 비교하면 항로의 법면상에서 큰 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 이것은, 1차원 확산방정식에 기반한 계산 방법에서는 부유표사농도분포가 그 지점의 기준점농도와 확산계수에 의해 결정되기 때문에 저면에서의 전단 특성이 급변하는 항로 사면상에서의 부유사농도분포가 공간적으로 급변하고 이 부분에서의 수심 변화가 과대평가되어 있기 때문이다.

또한 이류확산방정식에 기반하는 두 가지 해석 방법의 차이는 연직방향 농도 분포를 생각하느냐, 생각하지 않느냐이고, 연직방향의 농도분포형상이 공간적으로 그다지 변화하지 않는 본 연구의 경우에는 양 계산 결과의 차이는 작다고 생각된다. 한편, 실험 결과와 세 가지의 계산 결과와의 비교를 수행하면 지형 변화량이 작은 Fig. 7의 경우에는 명확한 차이는 나타나지 않지

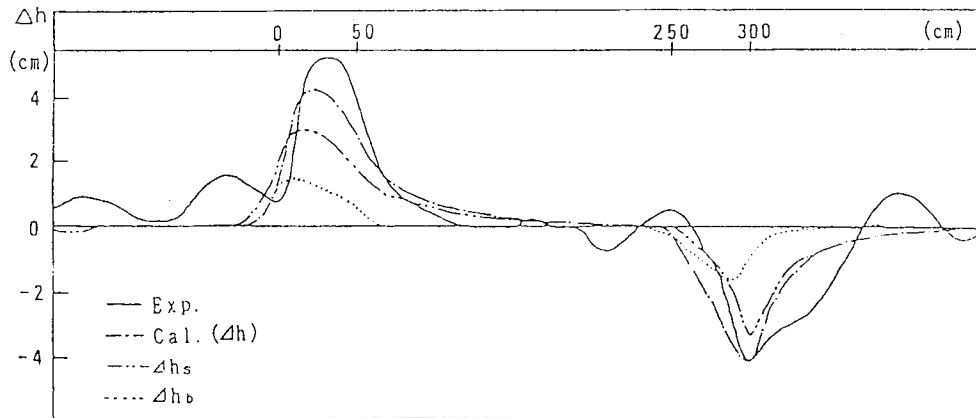


Fig. 9. Change in water depth (Exp. II).

만, 지형 변화량이 많은 Fig. 8의 경우에는 역시 고정도 계산법이 항로 주변의 지형변화 전체를 보다 정확히 예측할 수 있다고 생각된다. 또한 실험 결과가 1m 정도의 파장을 갖고 변동하고 있지만 이것은 소파공으로부터의 반사의영향이라고 생각된다. 또한 Fig. 7의 경우에는 3가지의 산정 결과에 있어서 항로 매몰이 생기는 결과임에도 불구하고, 실험 결과에서는 항로 매몰이 생기지 않는다. 이것은, 파에 의해서 해안 종단방향의 표사이동이 생기고 흐름에 의한 순표사이동과 거의 조화를 이루고 있기 때문에 항로매몰이 생기지 않았다고 생각된다. 파와 흐름의 공존장에서의 표사이동에 있어서 흐름방향의수송을 결정하는 파라메타로서 U/u_b 를 생각하면, Fig. 7의 경우 $U/u_b = 0.37$, Fig. 8의 경우 $U/u_b = 0.76$ 이다. U/u_b 의 값이 어느 값 이상이 되고 흐름의 이류에 의한 표사량이 파에 의한 순표사량과 비교해서 충분히 큰 경우가 아니면 고정도 계산법에 의한 예측은 곤란하다고 생각되어진다. 최후에 Fig. 9는 단면평균유속 U 가 19.4 cm/sec의 경우에 대해서 고정도 계산법의 계산 결과의 소류, 부유표사별의 수심 변화량(각각 Δh_s , Δh_b 로 표시함)을 나타내고 있는 것이다. 그림으로부터 소류표사에 의한 지형 변화는 저부전단력의 장소적변화가 큰 항로의 사면상에서 발생하고 있고, 부유표사에 의한 지형 변화는 사면상 및 그 하류측의 비평형상태 부유사농도가 발생하는 넓은 범위에서 변화하고 있는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

표사이동의 외력으로 작용하는 파와 흐름이 공간적

으로 급변하는 영역에 있어서 정확한 지형 변화를 예측하고자 할 경우에는 부유표사에 대한 비평형성을 고려해야 할 필요가 있다. 비평형성을 정확히 고려하기 위해서는 비정상 2차원 이류확산방정식에 기반하여 부유사농도를 예측하여야 한다.

본 연구에서는 비평형상태의 부유사농도분포 및 그에 수반한 지형 변화의 예측법을 비정상 2차원 이류확산방정식의 고정도 계산법에 기초하여 제안하였다.

본 계산법에서는 경계조건으로서 비교적 실험 등에 의해 구하기 쉬운 기준점농도와 확산계수를 사용하여 해를 구하였다. 따라서 종래의 계산법에서와 같이 침강·부상 flux를 경계조건으로 줄 필요가 없으므로, 본 계산법은 보다 용이한 방법이라 할 수 있을 것이다.

항로 주변의 지형변화는 단면평균유속이 큰 만큼 비평형상태의 부유사 농도분포가 발생하는 영역이 커지며, 넓은 영역에서 지형변화가 발생함을 알 수 있었다. 파·흐름 공존장에서의 표사이동량이 파보다는 흐름에 의해 지배되는 영역에서의 지형변화는 본 논문에서 제안한 계산법에 의해 충분히 예측 가능하다고 사료된다. 앞으로는 파에 의한 순표사량 및 소류사에 있어서의 비평형성등에 대한 검토를 수행할 예정이며, 저질 조건에 있어서 점성을 갖고 있는 silt를 대상으로 한 수치모형을 개발 중에 있다. 또한 단면에서의 계산뿐만 아니라 평면모델의 개발을 추진중 있다.

참고문헌

김규한, 出口 一郎, 배기성, 1991. 파랑과 흐름이 공존하는 영역에서의 평형 및 비평형 부유사 이동특성, 한국해

- 안 · 해양학회지, **3(4)**, pp. 209-216.
- 入江 功, 栗山善昭, 1985. 底質の移流 · 沈降過程を入れた航路 · 港内埋没の豫測, 港研報告 **24(2)**, pp. 157-204.
- 榎木 亨, 李宗燮, 出口 一郎, 1985. 河口周邊の海浜流及び地形變形モデルに關する研究, 第32回 海岸工學講演會論文集, pp. 411-415.
- Bijker, E.W., 1980. Sedimentation in channels and trenches, *Proc. of 17th Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp. 1708-1718
- Eysink, W., and Vermaas, H., 1983. Computational method to estimate the sedimentation in dredged channels and harbour basins in estuarine environment, *Int. Conf. on Coastal and Ports Eng. in Developing Countries*, Colombo, Sri Lanka.
- Mikkelsen, L., 1980. Sedimentation in dredged navigation channels, *Proc. of 17th Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp. 1719-1732.
- Swart, H.D., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. *DHL Publ. No. 131*.
- van, Rijn, L.C., 1985. Flume experiments of sedimentation in channels by currents and waves, *Report S 347-II*, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands.
- van Rijn, L.C., 1986. Sedimentation of dredged channels by currents and waves, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **112(5)** ASCE, pp. 541-559.