

Lagrangian 개념에 의한 부유토사 확산범위 비교분석 Comparative Analysis of the Sediment Transport Region based on the Lagrangian Concept

조홍연* · 김창일** · 이길하***

Hong Yeon Cho*, Chang Il Kim** and Khil Ha Lee***

요 지 : Lagrangian 개념에 근거하여 입도분포를 고려한 토사 확산범위 예측모형을 구성하여 입도분포를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 확산범위 변화를 분석하였다. 토사의 입도분포를 Lagrangian 관점에서 고려하기 위하여 입도분포곡선을 대수정규분포 함수로 가정하고, 토사입자에 해당하는 난수를 생성하였다. 토사입자는 구형으로 가정하였으며, 입도분포곡선에서 난수의 중량을 기준으로 발생된 난수를 토사입경에 해당하는 인자로 환산하였다. 부유토사 이동양상은 입자의 침강양상 모의를 통하여 검토하였으며, 침강속도는 van Rijn 공식을 이용하였고 침강에 영향을 미치는 인자로는 수평 확산계수만을 상수로 가정하여 포함하였다. 입도분포를 고려한 경우의 확산범위는 표사입도에 의한 영향을 고려하지 않은 경우의 확산범위와 유사하게 산정되었다. 그러나, 확산범위를 공급된 총입자중량의 90%, 99% 토사중량이 차지하는 영역을 기준으로 정의하는 경우, 90% 기준조건에서는 입도분포를 고려하지 않은 경우의 확산범위가 크게 산정되었으나, 99% 기준조건에서는 입도분포를 고려한 경우의 확산범위가 크게 산정되었다. 또한, 토사의 침강양상도 입도분포를 고려한 경우가 보다 현실적인 모습을 반영하고 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 토사이동, 확산, 입도분포, 침강속도, Lagrangian 개념

Abstract : Sediment transport model based on the Lagrangian concept considering the grain size distribution(GSD) was setup and the change of the sediment diffusion range was analysed in the condition of considering and not considering the GSD. The GSD curve is assumed as the Log-normal distribution function in order to consider the GSD with respect to the Lagrangian concept and the random numbers, i.e. sediment particles, are generated based on the distribution function. The sediment particles is assumed as the spherical type and the random numbers based on the sediment weight is converted to the sediment diameters. Sediment transport patterns are analysed by the settling simulation, in which the settling velocity is computed by the van Rijn formulae and the horizontal diffusion coefficient is used as the constant parameter. The diffusion patterns are very similar to the patterns with GSD condition. The diffusion range defined as the range including 90%, 99% sediment weight of the total sediment weight, however, is larger than without considering GSD condition in 90%-option and shorter than with considering GSD condition in 99%-option, respectively. The diffusion range is defined as the p -percentage of the cumulative sediment weight region with reference to the 50% region, 90%-option, 99%-option, respectively.

Keywords : sediment transport, diffusion, grain size distribution, settling velocity, Lagrangian concept

*한국해양연구원 연안개발연구본부(Corresponding author : Hong Yeon Cho, Coastal Development Research Department, KORDI, Ansan PO Box. 29, Seoul 425-600, Korea. hycho@kordi.re.kr)

** (주)유신코퍼레이션 감리부(Consultant Department, Yooshin Cooperation)

***경원대학교 GIS 연구소(GIS Lab., Kyungwon University)

1. 서 론

하천, 호소 및 연안해역으로 유입, 투입(투하) 또는 공사 지역에서 발생하는 부유물질(토사, 표사, sediment; suspended solids)은 흐름을 따라 이동·침강하는 과정을 거치면서 일정한 범위까지 점차 확산되는 양상을 보인다. 부유물질의 확산범위는 부유물질이 해역 환경 및 생태계에 미치는 영향범위 추정, 양식장 및 어업활동에 미치는 피해범위 추정과 밀접한 관련이 있는 매우 중요한 사안이다.

부유물질의 확산범위를 추정하는 전통적인 방법은 Eulerian 개념에 근거하여 부유물질의 농도로 표현되는 운송방정식(transport equation)을 지배방정식으로 하는 수치기법에 의존하여 왔다. 이 방법은 부유물질을 농도로 표현하기 때문에 부유물질의 침강속도를 대표입경(중앙입경)의 함수로 표현하는 경우가 대부분을 차지한다(Nielsen, 1992; Hydro Qual, 2002).

그러나, 실질적으로, 부유물질(토사, 표사)은 균일한 입경을 가진 입자가 아니고, 지역에 따라 다른 입도분포를 가진 입자로 구성되어 있으며 입자마다 침강속도가 다르기 때문에 대표입경으로 산정되는 침강속도를 이용하여 확산범위를 예측하는 모형과 차이가 발생한다. 입도분포를 고려하는 또 하나의 방법은 표사를 크기(grain size)에 따라 여러 등급(classes)으로 구분하는 것으로, 각각에 구분된 토사에 해당하는 운송방정식을 구성하는 방법이다. 이 방법은 대표입경을 사용하는 방법보다 개선된 방법이나, 대부분 3~5 등급 또는 점토(점착성 토사), 실트, 모래 정도의 구분으로 표사이동 모형을 적용하고 있기 때문에 엄밀한 의미(분포의 불연속성)로 입도분포를 고려하였다고 판단하기에는 다소 무리가 있다(El. Ganaoui et al., 2004).

입자추적 개념(Lagrangian 개념)에 근거한 표사이동 모형은 표사 입자 하나하나의 이동을 추적하는 모형으로, 표사의 이동 확산현상을 가장 정확하게 표현하는 기법이나 표사의 이동을 지배하는 흐름모형이 Eulerian 개념에 근거한 모형이기 때문에 표사이동 모형이 흐름모형과의 효율적인 연결을 위하여 Eulerian 개념에 근거한 농도확산 모형으로 구성되는 경우가 대부분이다. 그러나, Eulerian 모형은 용존성(dissolved) 물질의 확산범위 예측에는 적합하나, 입자성(particulate) 물질의 확산범위 예측에는 입자 하나하나의 특성을 반영하지 못하는 한계가 있다(Baptista 등, 1984). 특히, 다양한 크기를 가진 표사의 경우에는 크기에 따라 침강속도가 다르기 때문에 Eulerian 모형을 이용하여 정확하게 확산범위를 예측하는 방법은 제한요소로 작용한다고 할

수 있다. 입자추적모형(particle tracking model)은 토사를 포함한 오염물질 확산분야에서 활발하게 사용되고 있는 모형으로 Lagrangian 접근방식이라는 측면에서 본 연구에서의 토사확산모형과 동일하지만, 수치계산에서 사용하는 입자가 토사 입도분포를 반영하여 서로 크기가 다르다는 점에서 본 연구내용과 근본적인 차이가 있다.

따라서, 본 연구에서는 최근 중요한 해양환경문제로 대두되는 준설토사 투기문제(Wood, 1993)와 관련하여 해역으로 투입 또는 발생하는 토사의 확산범위를 입도분포를 고려하여 추정하는 입자추적 모형을 제시하고, 대표적인 중앙입경 또는 대표입경을 사용한 기존의 방법으로 추정된 확산범위를 정량적으로 비교분석하였으며, 토사 입도분포를 고려한 본 연구에서 제안한 모형이 기존의 방법보다 현실적으로 토사 침강양상을 재현하고 있음을 제시하고자 한다.

2. 입자추적 표사이동 모형

본 논문에서 제시하는 표사이동 모형은 입자의 입도분포를 고려하여 표사의 이동·확산범위를 추정하는 모형으로, Monte-Carlo 모의기법, Random-Walk 모형을 기반으로 구성된다(Fischer 등, 1979; Lewis, 1998; Prickett 등, 1981). 세부적인 경계 처리 및 일정 구간에 침전 또는 체류하고 있는 표사 입자의 농도 환산은 통상적인 방법으로 처리하였다. 전통적인 방법은 표사 입도로 대표입경(중앙입경)을 이용하기 때문에, 표사 대표입경에 대한 침강속도를 계산하여 입경이 일정한 다수(동일한 비교를 위하여 입도분포를 고려한 예측방법과 동일한 개수의 입자 사용)의 입자의 이동경로를 추적하고, 모의시간 범위에서 확산범위를 예측한다. 표사 확산범위에 대한 과학적인 정의는 계산영역에 포함된 모든 표사를 포함하는 범위로 정의하는 것이 바람직하나, 실질적으로 매우 미세한 입자는 실질적으로 토사중량에서 차지하는 비율이 매우 미미하기 때문에 본 연구에서는 투입 또는 유입된 표사질량의 90%, 99% 정도가 존재하는 영역을 확산범위로 정의하였다(Fig. 1참조).

2.1 모형의 수립(모형의 구조 및 특성)

Lagrangian 개념에 근거하여 토사 확산범위 예측 모형은 다음과 같은 계산과정을 통하여 확산범위를 예측한다. 토사 확산범위 예측모형의 Programming 언어는 계산결과를 Text Window, Graphic Window 영역에서 제시할 수 있고, 다양한 Tool-Box(본 연구의 경우 통계 Tool-Box 활용 및 통계정보 문헌 참조, Haldar and Mahadevan, 1999) 기능

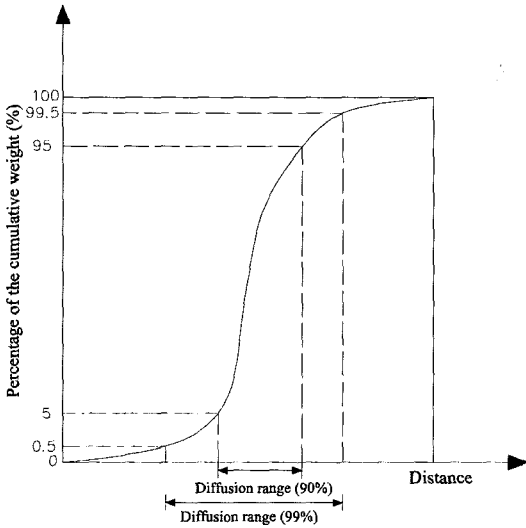


Fig. 1. Definition diagram of the sediment diffusion range.

을 가지고 있는 MATLAB 언어를 사용하였다(Etter, 1997; The Mathworks, 2002).

0단계(입력단계, 기본단계): 모형 입력자료

- 표사정보: 대표(중앙)입경[d_{50}], 입도분포 매개변수(분포 추정을 위한 정보, 본 연구의 경우에는 입도분포곡선을 대수정규분포로 가정하였으며, 이 경우 대수정규분포에 해당하는 입도분포 매개변수는 중앙입경에 해당하는 표사의 중량 및 중량에 근거한 입도분포곡선의 분산을 의미)
- 통계정보: Monte-Carlo 모의를 위한 난수 N , 분포함수
- 모형 매개변수: 유속, 수심, 수평 확산계수(D_H), 연직 확산계수(D_V)
- 확산범위 정의 Option 인자: 기준 90%, 99%(90, 99)

1단계: 표사 입도분포 함수를 이용한 난수(표사 입도) 발생 ($N=100,000$)

(Matlab **Statistics** ToolBox - 대수정규분포 난수발생 LOGNPDF, LOGNRND 함수 이용; 확률밀도함수가 중량 분포를 확률변수로 사용하기 때문에 토사중량을 통계인자로 하여 대수정규분포에서 난수를 발생시키고, 중량에 해당하는 발생된 난수입자를 토사입자(입경)로 환산[토사의 형태를 구(sphere)형으로 가정])

2단계: 정규분포(Gauss 분포)를 따르는 난수(확산계산에 이용) 발생 ($N=100,000$)

(Matlab **Statistics** ToolBox - RNDN 함수 이용)

3단계: 각각의 표사입자에 대하여 침강속도 w_s 계산(van

Rijn 공식; van Rijn, 1993) (침강속도는 각각의 표사입자에 대하여 계산되기 때문에, 본 연구에서 이용한 난수의 개수 100,000개에 대하여 침강속도를 100,000번 계산).

$$w_s = \frac{10v}{d} \left[\left(1 + \frac{0.001(\rho_s - 1)gd^3}{v^2} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

여기서, v = 동점성계수(m^2/s), d = 표사입경(m), ρ_s = 표사의 비중(=2.6), g = 중력가속도(m/s^2)이다.

4단계: 표사 입자의 초기 위치(x^0, z^0) 지정(초기조건) 및 계산시간 간격(Δt) 설정

(초기위치는 토사 투하지점으로 본 연구의 경우, 원점으로 지정(0, 0); 그러나, 기본적으로 좌표지정의 문제이며, 기본적인 입력자료에 해당).

5단계: 현재의 입자 위치좌표(x^0, z^0) 및 확산계수를 이용한 다음 시간 단계의 입자 좌표 계산(x^1, z^1) 추적

$$x^{n+1} = x^n + \sqrt{2D_H\Delta t} \cdot N(0, \sigma_H) \quad (n=0, 1, 2, \dots, NS)$$

$$z^{n+1} = z^n - w_s\Delta t + \sqrt{2D_V\Delta t} \cdot N(0, \sigma_V)$$

$$(n=0, 1, 2, \dots, NS)$$

여기서, D_H, D_V = 각각 수평, 연직확산계수, $N(0, \sigma_H), N(0, \sigma_V)$ = 각각 평균 0, 표준편차 σ_H, σ_V 를 가지는 정규분포에 해당하는 난수(본 연구의 경우에는 정규분포의 표준편차는 모두 1.0으로 동일한 값을 사용하였다). $\Delta t, NS$ = 각각 시간간격, 모의시간 단계로 1초 간격으로 86,400번 모의할 경우 86,400초의 모의시간을 가지게 된다.

6단계: 모의시간 단계(NS)를 초과하지 않은 경우, 다음 시간 단계의 토사입자 위치좌표를 현 단계의 입자좌표 위치로 대체하고, 시간에 따른 입자좌표 정보를 기록, 5단계로 Feedback; 모의시간 단계(NS)를 초과한 경우에는 계산을 종료하고 모의시간을 기준으로 확산범위를 추정.

7단계(종료단계): 모형 출력자료 제공: 확산범위 및 확산양상 도시(plotting).

(토사 확산범위 계산: 토사 투하지점을 기준으로 투하된 총 토사중량의 90%, 99%를 포함하는 조건에 대하여 각각 확산범위를 계산). 계산된 정보를 출력하고 계산을 종료.

2.2 모형의 기본적인 적용

토사 확산범위 예측모형은 기본적인 입력 조건($D_H=0.1 \text{ cm}^2/s, D_V=0.0 \text{ cm}^2/s$; 토사 투하지역의 수심 $h=20 \text{ m}$, 토사 중앙입경 $d_{50}=0.250 \text{ mm}$)을 이용하여 토사 투하지점을 기준으로 거리에 따른 중량분포를 계산하였다. 토사의 대수정규분포

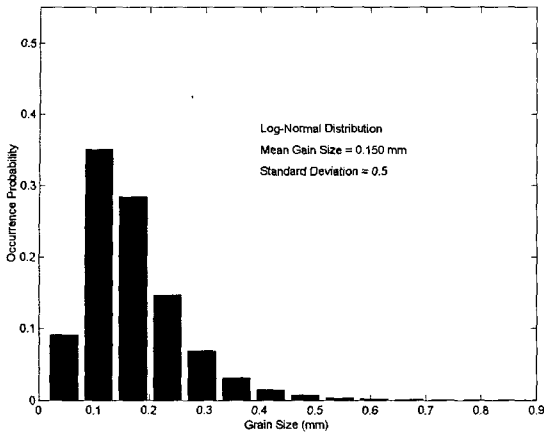


Fig. 2. Log-normal probability distribution function ($d_{50}=0.150$ mm).

함수는 식 (1)(Fig. 2참조)에 제시하였으며, 중량분포에 따른 확산범위는 표사 입도분포를 고려한 경우(표준편차 $\sigma_w=1.0$; 굵은 실선)와 고려하지 않은 경우(표준편차=0.0; 가는 실선)를 대비하여 도시하였으며, 토사중량 1%, 5% 영역은 확대도시하였다. 토사중량 분포그림의 1%, 5% 영역에서 표사입자를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 확산범위가 역전되는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다(Fig. 3참조).

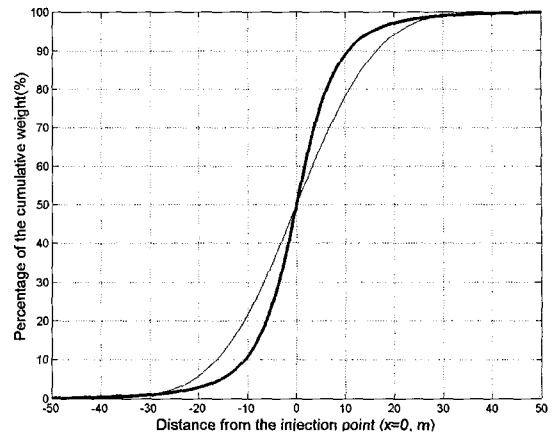
$$f(W_d) = \frac{1}{W_d \sqrt{2\pi\sigma^2 W}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\text{Log}(W_d) - \text{Log}(\bar{W}_d)}{\sigma_w}\right)^2\right] \quad (1)$$

여기서, W_d = 입경 d 에 해당하는 표사의 중량으로 대수 정규분포 함수의 변수, \bar{W}_d = 중앙입경(d_{50})에 해당하는 토사입자의 중량, σ_w = 토사 입도분포곡선의 분산정도를 표현하는 표준편차이다($\sigma_w = 0.0$ 은 토사가 단 하나의 입자로만 구성되어 있음을 의미하며, 표준편차가 증가할수록 토사가 다양한 입자로 중량측면에서 균등하게 구성되어 있음을 의미한다).

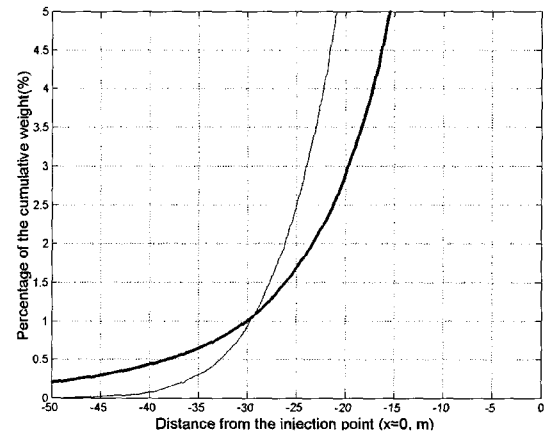
3. 모형에 따른 확산양상 및 범위 비교

3.1 시간에 따른 확산양상 비교

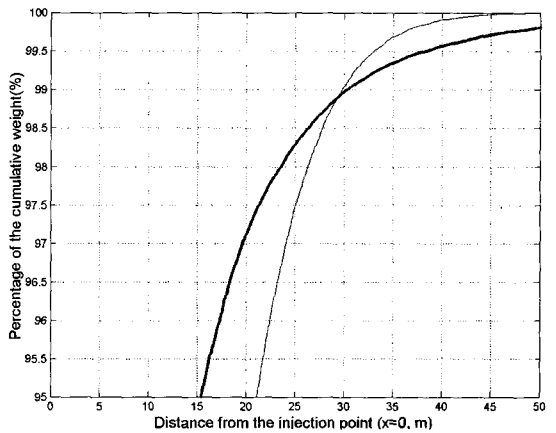
입도가 큰 표사는 일찍 침강하고, 입도가 작은 표사는 천천히 침강하는 양상은 침강속도가 입자크기에 비례하는 함수이기 때문에 추측이 가능하다. 토사의 입도분포를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우의 확산범위는 수평확산계수와 침강속도에 의하여 결정된다고 할 수 있다. 본 연구에서는 수평확산계수는 상수로 간주하였기 때문에 중앙입



(a) Overall Region



(b) Zoom in the 0 to 5 percent region



(c) Zoom in the 95 to 100 percent region

Fig. 3. Cumulative sediment weight percentage (Grain size distribution: Thick Solid Line=considered; Hair Line=not considered).

경과 표사이동 범위를 정의하는 과정에서 표현되는 토사 전체 중량에서 1%, 10% 경계의 중량을 차지하는 입자의 침

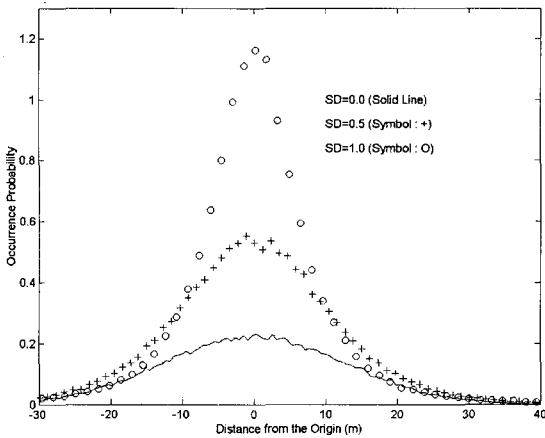


Fig. 4. Kurtosis changes of the Sediment weight distribution.

침강속도가 확산범위를 결정하게 된다. 즉, 표사 입자분포를 고려하지 않는 경우에는 중앙입경이 침강특성 및 속도를 결정하지만 입도분포를 고려하는 경우에는 초기 침강양상은 입도가 큰 입자가 좌우하고, 최종 침강양상 및 범위는 입도가 작은 표사가 좌우하기 때문에 확산범위를 정의하는 정량적인 기준에 따라 표사 입도분포를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 확산범위가 차이가 나게 된다.

입도변화를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 확산양상은 전체적으로 정규분포 형태를 보이고 있으나, 분포를 고려한 경우(표준편차 $SD[\sigma_{\mu}] = 0.5, 1.0$)에 비하여 분포를 고려하지 않은 경우(표준편차 $SD[\sigma_{\mu}] = 0.0$)의 첨도(kurtosis)가 2.35에서 7.44, 18.97로 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 입도분포를 고려한 경우의 첨도가 증가하는 이유는 큰 입자가 신속한 침강을 보여, 투하지점에 집중되고, 미세한 입자가 느린 침강속도로 인하여 적은 중량비율에 대해서는 확산범위 증가에 기여하는 것으로 판단된다(Fig. 4참조; SD = 표사 입도분포의 표준편차에 해당하는 값, σ_{μ}).

한편, 토사의 입도분포를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 침강양상을 비교한 결과, 토사의 입도분포를 고려한 경우가 보다 현실적인 분포를 정성적으로 재현하고 있음을 알 수 있다(Fig. 5참조). 시간에 따른 (침강) 양상은 평균 토사 침강시간($T_s = h/w_{SM}$; h = 토사 투하해역의 수심 [m], w_{SM} = 중앙입경(d_{50})에 해당하는 토사입자의 침강속도 [m/s])을 정의하여 도시적으로 제시하였다.

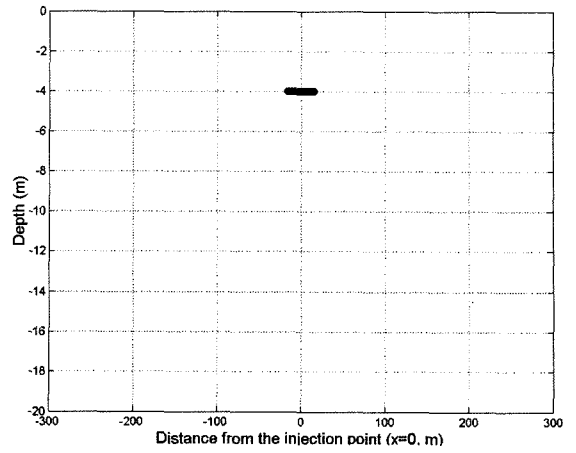
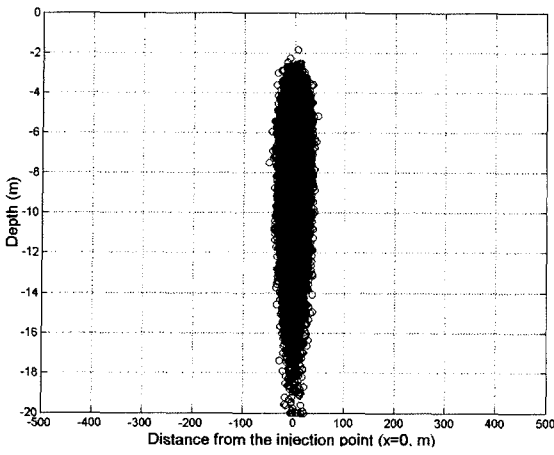
3.2 중앙입경 및 표준편차에 따른 확산범위 비교

해역에서 투기(투하)하는 표사 확산범위는 본 연구에서 투하지점을 기준으로 투하된 표사총량의 90%, 99% 부분

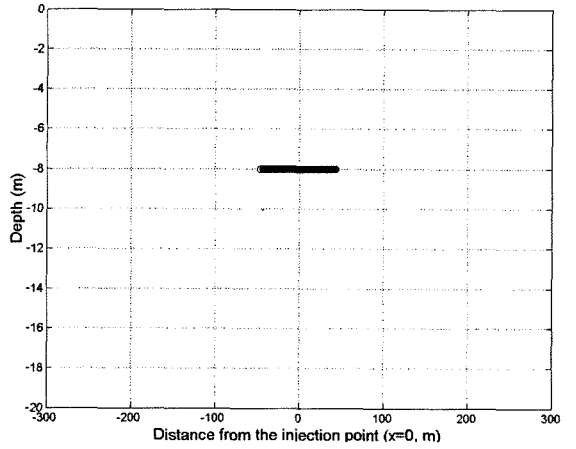
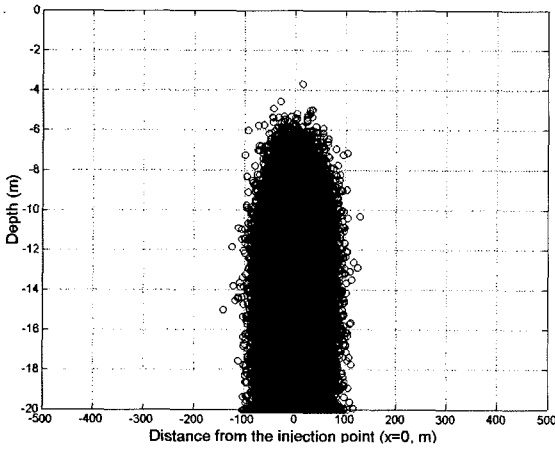
이 차지하는 거리(각각 입자중량 90%, 99% 기준 확산범위)로 정의하였다. 확산범위 비교는 이 정의를 기준으로 계산하였으며, 입력조건에 다양한 크기 변화를 부여하여 변화 양상을 분석하였다.

중앙입경은 토사의 침강속도를 결정하는 가장 중요한 인자이며, 표사 입도가 증가할수록 침강속도가 증가하는 양상을 보이고 있다. 침강속도는 van Rijn 공식을 이용하여 산정하였으며, 입도가 증가할수록 침강속도가 증가하여 표사입자가 빨리 침강하기 때문에 확산범위는 감소하는 경향을 보일 것으로 예상할 수 있다. 본 모형의 검증(verification) 차원에서 수치모의를 수행한 결과 예상되는 결과(모형 중앙입경이 0.25~0.10 mm 변화하는 경우, 확산범위는 90%, 99% 정의범위에서 각각 42~405 m, 67~637 m 정도로 약 10배 정도로 증가하는 예상되는 경향을 보이고 있다(Table 1 참조). 모형에 사용된 입력조건은 표사입도는 0.10~0.25 mm 정도의 coarse silt, fine sand 영역이며, 입도분포는 분포함수의 표준편차(0.0, 0.5, 1.0조건), 연직 확산계수 $D_V = 0.0(\text{cm}^2/\text{s})$, 수평 확산계수 $D_H = 0.1(\text{cm}^2/\text{s})$ 조건을 기본 입력조건으로 사용하였으며, 입자추적모의를 위한 입자는 100,000개를 생성하였다.

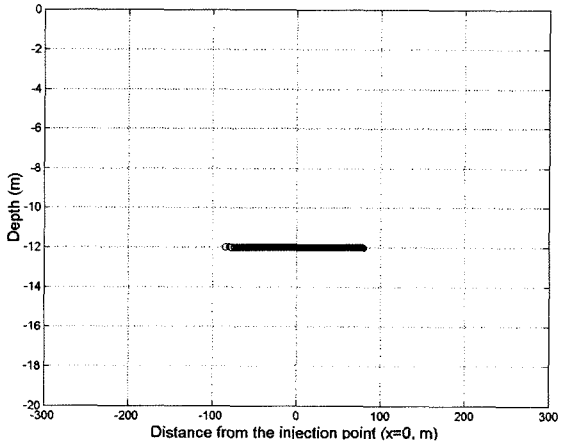
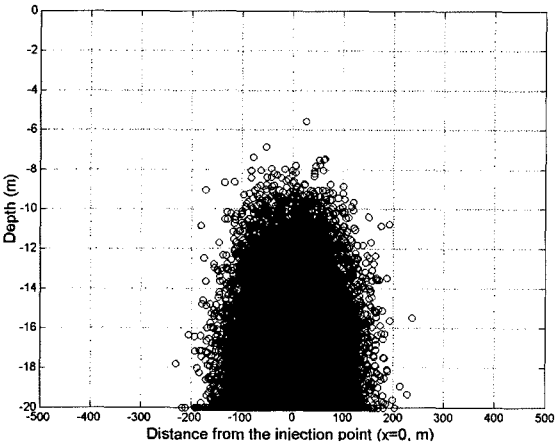
한편, 입도분포를 고려한 확산범위는 표사입도에 의한 영향을 고려하지 않은 경우와 유사한 값으로 계산되었다. 그러나, 확산범위를 공급된 총입자중량의 90%, 99%를 포함하는 영역으로 정의하는 경우, 90% 기준조건에서는 입도분포를 고려하지 않은 경우가 확산범위가 크게 산정되었으나, 99% 기준조건에서는 입도분포를 고려한 경우가 확산범위가 크게 산정되었다. 중앙입경 0.1 mm 조건에서 중량기준 확산범위 90% 기준을 적용하는 경우에는 입도분포를 고려한 경우 확산범위가 405 m에서 383 m, 283 m로 감소하고 있으나, 99% 기준을 적용하는 경우에는 확산범위가 637 m에서 788 m, 839 m로 증가하는 양상을 보이고 있다. 중량기준 확산범위는 중량기준이 증가할수록 확산범위가 증가하게 된다. 중량기준이 90%에서 99% 증가한 경우, 확산범위는 42~405 m에서 67~637 m로 60% 정도 증가한다. 확산범위가 중량기준의 확산범위 정의에 따라 변하는 원인은 입도가 작은 표사가 차지하는 비율이 확산범위를 정의하는 중량기준에 따라 영향정도가 차이가 나기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 중량기준의 확산범위를 엄격하게 정의(예, 99% → 99.9% → 99.99%)할수록, 미세한 표사입자의 영향이 증가하여 확산범위는 기하급수적으로 증가할 것으로 판단된다. 따라서, 실질적으로 의미가 있고 판단가 능한 확산범위를 정의하는 정량적인 기준이 필요하며, 동



(a) Time = $0.2 \cdot T_s$

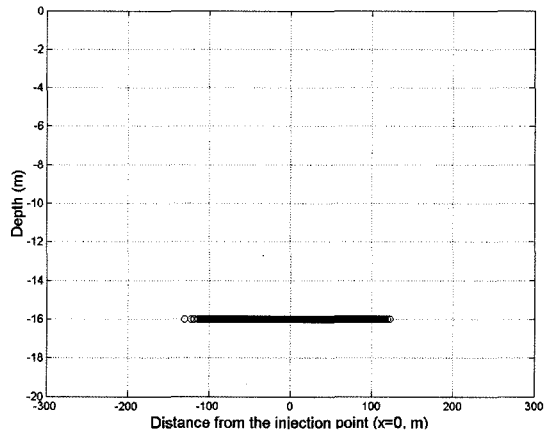
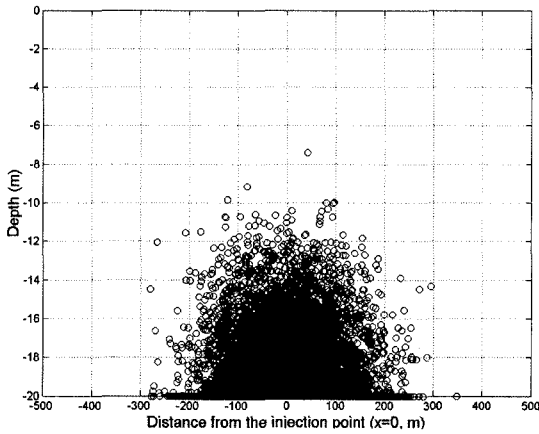


(b) Time = $0.4 \cdot T_s$

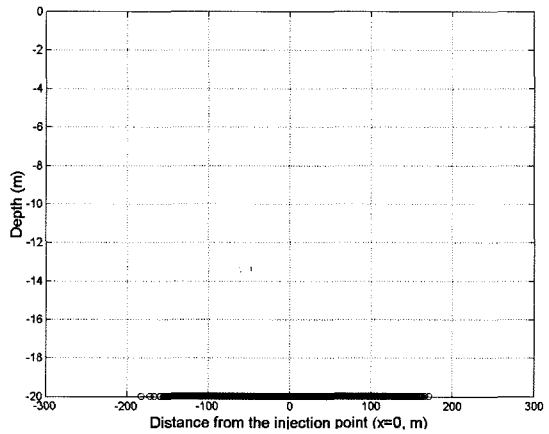
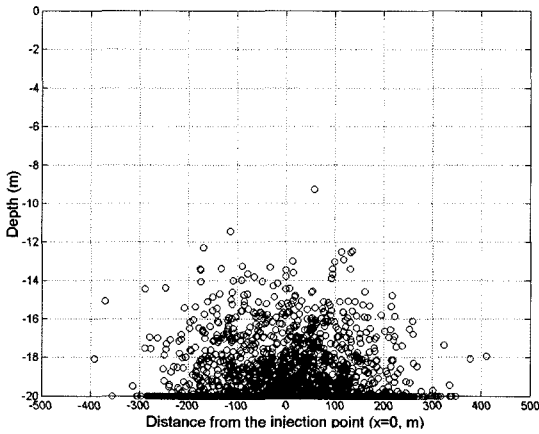


(c) Time = $0.6 \cdot T_s$

Fig. 5. Temporal sediment settling pattern (Sediment Grain Size : Left=considered, Right=not considered)



(d) Time = 0.8 · Ts



(e) Time = 1.0 · Ts

Fig. 5. (Continued). Temporal sediment settling pattern (Sediment Grain Size : Left=considered, Right=not considered).

Table 1. Diffusion range due to Median Grain Size changes

(a) Sediment Particle Weight : 90% Base				
d_{50} (mm)	0.100	0.150	0.200	0.250
σ				
0.0	405.0	133.9	67.5	42.1
0.5	382.7	126.7	63.5	39.8
1.0	282.5	94.8	48.5	31.0
(b) Sediment Particle Weight : 99% Base				
d_{50} (mm)	0.100	0.150	0.200	0.250
σ				
0.0	637.0	209.5	105.4	66.8
0.5	787.5	256.7	122.4	73.5
1.0	839.4	267.5	128.4	76.3

4. 결론 및 제언

본 연구에서 제안한 입도분포를 고려한 토사 확산범위 예측모형은 입도분포를 고려하지 않은 기존의 모형에 비하여 보다 실제 현상에 유사한 침강양상을 재현하고 있으며, 확산범위는 확산범위를 정량적으로 정의하는 중량비율에 의하여 직접적인 영향을 받고 있는 것으로 파악되었다. 본 모형에서 제시된 침강양상은 정량적으로 실험실 자료 또는 현장 관측자료와 비교하는 과정이 필요하나, 현 단계에서도 본 논문에서 제안한 모형을 이용하여 계산된 침강양상이 정성적으로 보다 현실적인 침강양상을 보이고 있는 것으로 판단할 수 있다.

입도분포를 고려한 확산범위는 표사입도에 의한 영향을 고려하지 않은 경우에 계산한 확산범위와 유사한 값을 보

일한 기준에서 확산범위를 비교하는 과정이 바람직할 것으로 사료된다.

이고 있다. 그러나, 확산범위를 공급된 토사 총 중량에서 입자중량 90%, 99%가 차지하는 영역으로 정의하는 경우, 90% 기준조건에서는 입도분포를 고려하지 않은 경우가 확산범위가 크게 산정되었으나, 99% 기준조건에서는 입도분포를 고려한 경우가 확산범위가 크게 산정되었다.

본 연구에서 제안된 모형이 보다 현실적인 양상을 정성적으로 반영하는 것은 확실하지만, 정량적인 양상분석을 위해서는 다양한 조건에서의 수리모형실험 결과를 이용한 비교분석 연구 등이 필요할 것으로 사료된다. 한편, 토사 중량에서 차지하는 비율이 적은 미세입자는 중량 기여비율이 작으나, 입자 개수로는 대부분을 차지하기 때문에 토사확산 모의에서 과도한 계산시간을 필요로 하고 있다. 따라서, 토사중량에 대한 미세입자의 영향을 검토하여 무시할 만한 범위의 미세한 토사입자를 제거하고 확산모의를 수행한다면 보다 효율적인 토사확산 모의가 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 기본연구사업(하구 관리 및 기능회복 기술개발, PE-977-01)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한, 본 논문을 심사하여 내용을 개선하여 주신 심사위원에게도 감사드립니다.

참고문헌

- Baptista, A.E. de M., Eric, A.E. and Stolzenbach, K.D., (1984). *Eulerian-Lagrangian Analysis of Pollutant Transport in Shallow Water*, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.
- El. Ganaoui, O., Schaaff, E., Boyer, P., Amielh, M., Anselmet, F. and Grenz, C. (2004). The deposition and erosion of cohesive sediments determined by a multi-class model, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol. 60, pp. 457-475.
- Etter, D.M., (1997). *Engineering problem solving with Matlab*, Prentice Hall, New Jersey
- Fischer, H.B., (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic press, New York, 35-36.
- Haldar, A. and Mahadevan, S. (1999). *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York, 258-261.
- HydroQual Inc. (2002). *A Primer for ECOMSED, Version 1.3, Users Manual*.
- Lewis, R. (1998). *Dispersion in Estuaries and Coastal Waters*, John Wiley & Sons, Chichester, 147-150.
- Nielsen, P. (1992). *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*, Chap. 6, *Advanced Series on Ocean Engineering*.
- Prickett, T.A., Naymik, T.G. and Lonquist, C.G., (1981). A "Random-Walk" Solute Transport Model for Selected Groundwater Quality Evaluations, *Champaign, Bulletin 65*, Illinois State Water Survey, Illinois.
- The MathWorks, (2002). *Statistics Toolbox for Use with MATLAB, User's Guide*, The MathWorks, Inc.
- van Rijn, L.C., (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, *Delft Hydraulics*, The Netherlands, 3.11-3.13.
- Wood, I.R., Bell, R.G. and Wilkinson, D.L., (1993). *Ocean Disposal of Wastewater*, *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 8, Chap. 17, World Scientific.

Received December 27, 2006

Accepted March 16, 2007