

방류형태에 따른 부유사 거동 특성

Effect of Discharge Systems on the Transport of Suspended Sediment Particles

오정선*, 최성욱**
Jungsun Oh, Sung-Uk Choi

요 지

하천에서 유사이동 분석이 중요한 이유는, 지속가능한 하천관리의 관점에서 하도, 구조물, 생물 서식처와 수질에 이르기까지 하천 내 유사이동이 미치는 영향이 광범위하기 때문이다. 특히, 유사가 어느 지점에서 유실되며 어느 지점에 쌓이는지와 같은 이슈는 하천 지속가능한 관리를 위한 핵심이라 해도 과언이 아니다. 상대적으로 크기가 작은 부유사 입자의 이동은 일상적인 하천의 흐름에서도 대부분 관찰되기 때문에, 그 이동패턴을 파악하는 것이 하천의 효율적 관리에 밑바탕이 된다. 기존연구들에서 주로 연구되었던 부유사 농도 또는 플럭스 산정은 유사에 의한 영향을 파악하기 위한 좋은 지표임은 분명하지만, 유사 입자가 움직이기 시작하는 지점이나 침전하는 지점 등 공간적 분석을 위해서는 입자의 움직임에 초점을 맞춘 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 부유사 입자를 추적하는 모의 방법을 이용하여, 개수로에서 부유사 입자를 방류하는 형태가 바뀌었을 때, 입자의 공간적 분포가 어떤 식으로 영향을 받는지에 대하여 분석하였다. 모의결과와 실험결과를 비교하여 연구의 접근방법이 부유사 이동의 공간적 분석을 위한 타당한 방법을 검증하였으며, 나아가 실험으로 측정하기 어려운 부유사 이동 패턴을 제시하였다. 입자의 방류 위치나 방류 간격 등 부유사 입자의 분산에 영향을 미치는 요인들 또한 함께 분석하였다.

핵심용어: 부유사 입자, 방류, 개수로

1. 서론

하천 내 유동에 의해 이동하는 유사는 입자의 특성, 유동, 그리고 지형 등의 여러 가지 요인에 영향을 받는다. 이 특성들의 조합으로 인해 유사 입자는 침전과 재부유를 반복하며 하천 내에서 이동하게 된다. 유사 이동은 하천의 구조 및 환경과 상호적으로 상당한 영향을 주고받기 때문에, 유사량이나 유사 농도를 추정하기 위한 분석이 다각도에서 시도되어오고 있다. 일반적으로 유사량에 대한 분석에 초점을 맞추는 이유는 유사량으로부터 평균적인 영향을 관찰하거나 예측할 수 있기 때문이다. 유사량 이외에도 유사의 영향을 분석하기 위하여 다른 변수들이 사용될 수 있는데, 본 연구에서는 입자의 침전과 재부유가 일어나는 지점에 초점을 두었다. 실제로 하천에서 유사입

* 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 연구교수 · E-mail: jungsunoh@yonsei.ac.kr
** 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 · E-mail: schoi@yonsei.ac.kr

자가 중금속이나 유기물질을 흡착하여 이동하게 될 경우, 유사 입자의 지점에 대한 파악이 중요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 유사 입자의 위치를 추적하는 접근방법으로 유사 입자의 침전 위치에 대한 확률적인 분석을 실시하는 데에 그 목적을 두었다.

2. 유사입자 이동 모형

본 연구에서는 유사입자가 개수로에 방류되었을 때, 유사입자에 작용하는 힘에 의해 침전되는 양상을 모의하기 위하여 입자를 추적하는 라그랑지안 접근방법을 이용하였다.

2.1 추계적 유사이동 모형

난류가 존재하는 흐름에서 흐름에 의해 움직이는 유사 입자의 위치는 다음과 같은 추계 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$dX_i = \overline{u}_i(t, x_i)dt + \sigma_{ij}(t, x_i)dB_j \quad (1)$$

여기서 X_i 는 입자의 위치 벡터, $\overline{u}_i(t, x_i)$ 는 이류속도 벡터, $\sigma_{ij}(t, x_i)$ 는 확산계수 텐서 B_j 는 시간 t 에서 위너 프로세스(Wiener process)의 텐서를 나타낸다. 확산계수 텐서 $\sigma_{ij}(t, x_i)$ 는 대각선에 위치한 원소들만 σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} 으로 값을 갖는 대각행렬이다. 식(1)의 첫 번째 항은 입자의 이류에 의한 움직임을 나타내며, 두 번째 항은 난류에 의한 임의적 움직임을 묘사하고 있다. 유체 내 입자의 움직임에 임의적 특성이 나타나게 하는 가장 근본적인 원인은 난류이다. 본 연구에서는 위너 프로세스를 이용하여 난류에 의한 확산, 또는 난류와 관계한 임의성을 해석하였다. 시간 $s \leq t$ 에 대하여 위너 프로세스 ($B_j(t) - B_j(s)$)는 평균 0, 분산 $(t-s)$ 인 가우시안 분포를 따른다 (Gardiner, 1985). 식 (1)에 대응하여 입자 위치에 대한 확률밀도함수에 대한 방정식은 Fokker-Planck 방정식으로 다음의 식(2)로 나타낼 수 있다 (Risken and Frank, 1996).

$$\frac{\partial f(t; x)}{\partial t} = - \frac{\partial(\overline{u}_i f(t; x))}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2(\sigma_{ij}^2 f(t; x))}{\partial x_i^2} \quad (2)$$

여기서 $f(t; x)$ 는 입자 위치의 확률밀도함수를 나타낸다. 즉, 식(2)는 입자 위치의 확률밀도함수가 시간의 경과에 따라 변해가는 것을 설명하는 식이다. 그러므로 이송-확산 방정식이라고 해석할 수도 있다. 따라서 Fokker-Planck 방정식과 식(1)가 입자의 위치에 대해 서로 대응하는 식이라고 하면, 난류 확산계수 D_i 와 추계적 확산식의 확산계수 σ_{ij} 간의 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\sigma_{ii}^2/2 = D_i \quad (3)$$

또한 식(1)의 이류 속도 \overline{u}_i 도 흐름방향 평균속도항과 난류 확산계수의 구배항으로 나뉘어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{u}_i = \overline{U}_i + \nabla D_i \quad (4)$$

여기서 \overline{U}_i 는 i 방향의 시간평균유속을 뜻하며, 수심방향(z)의 평균 유속에는 압자의 침강속도 w_s 를 고려해주었다.

3. 유사입자 이동 모의 결과

본 연구에서는 제시한 모형을 이용하여 유사입자가 실험수로 규모의 개수로에서 모멘텀에 의해 흐름을 따라 진행하다 바닥에 침전하거나 재부유하는 움직임을 모의하면서, 입자가 처음 침전한 종방향 위치를 관찰 분석하였다.

3.1 유사 방류 위치에 따른 침전 위치 변화

유사입자가 방류되는 위치는 결과적으로 유사입자가 침전되는 위치의 변화로 이어진다. 이를 미리 예측한다면, 하천 인근 시설물의 디자인이나 관리에 유용한 정보가 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 방류 위치에 따라 유사입자 침전 위치의 분포가 어떻게 변화하는지를 분석하였다. Fig. 1은 유사입자의 침전 위치에 대한 분포를 제시한 것이며, 흐름방향에 대하여 positively skewed되어 있음을 알 수 있다.

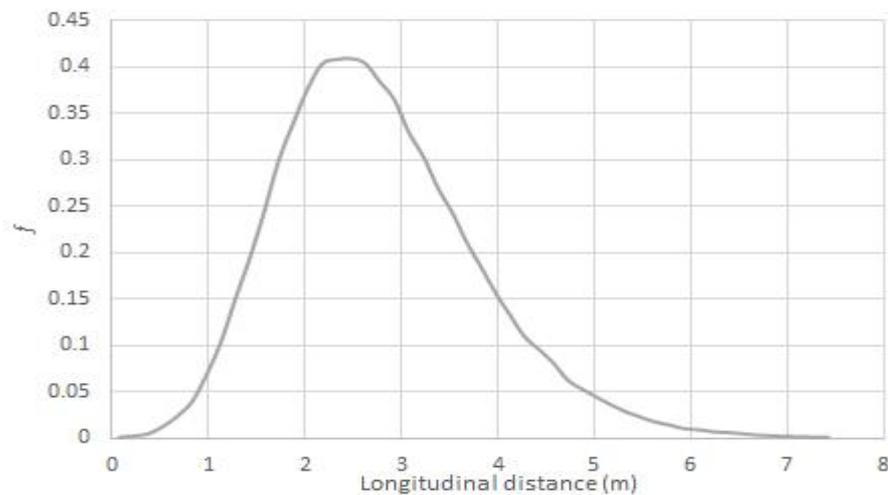


Fig. 1. Positively skewed distribution for the position of particle deposition

4. 결론

본 연구에서는 라그랑지안 기법 모의를 통하여 개수로 흐름에 의해 움직이는 유사입자가 침전하는 위치를 확률적으로 분석하였다. 제시한 모의 기법을 통하여 침전 위치에 대한 분포를 얻을 수 있었으며, 이 분포를 확률식으로 표현할 수 있었다. 일반적으로 유사농도나 유사량으로부터는 유사 침전되는 양을 추정하지만, 이로부터 침전되는 위치를 추정하기는 매우 어렵다. 그러나 위치에 따른 농도로 침전물의 차이를 가늠하는 정도다. 따라서, 본 연구와 같은 입자를 추적하는 방법은 유사입자가 어디에 가서 침전하는지를 알기에 가장 적합한 방법으로 여겨진다. 분석 결과, 입자의 침전 위치의 분포가 난류의 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 특히 흐름방향으로 입자가 침

전하는 위치가 로그정규 분포를 따르게 되는데, 이를 실험으로 얻어진 분포와 비교하여 거의 일치함을 확인하였다. 입자가 방류되는 수심의 위치에 따라 입자 침전 위치 분포도 변화를 보였으며, 이 변화의 경향성을 분석하였다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2012R1A2A2A02047549). 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Gardiner, C. W. (1985), Handbook of Stochastic Methods, Springer, New York City, NY.
2. Risken, H and Frank, T. (1996), The Fokker - Planck Equation: Methods of Solutions and Applications, Springer Series in Synergetics, Springer.