



유 사 이 동 론

최 성 옥 (연세대학교 사회환경·건축공학부 조교수)

· 차 례 ·

1. 개설
2. 유사의 특성
3. 유체역학의 기본방정식
4. 유사입자의 운동
5. 소류사 이론
6. 부유사 이론

제 1 편

개설 및 유사의 특성

1. 개 설

하천 및 해안에서의 유사이동에 관한 연구는 공학적으로 매우 중요하다. 저수지 퇴사문제, 하천의 蛇行, 제방의 침식 및 붕괴, 교각주위의 국부세굴문제, 해빈 변형, 그리고 해변의 모래유실 등 수공학 분야에서 유사와 관련된 문제는 매우 다양하게 나타난다. 이러한 문제들은 우리의 생명과 재산 그리고 환경을 위협할 수 있기에 매우 중요한 문제임에 틀림없다.

유사문제는 중요하기도 하지만 매우 어려운 학문 분야이다. 유체에 의한 유사의 이동은 多相흐름(multiphase flow)이다. 유체상태의 물과 고체상태인 유사입자가 혼합되어 상호작용을 하며 흐르는데, 유체의 흐름에 의해 입자가 힘을 받기도 하며 반대로 고체에 의해 유체가 영향을 받기도 한다. 또한 유사이

동은 亂流(turbulence)와 밀접한 관련이 있다. 유사를 하상에서 유입시키는 것과 부유상태로 유지하는 힘 등이 난류에너지와 관계가 있기 때문이다. 1932년에 Sir Horace Lamb이 남긴 다음의 구절은 다가오는 21세기에도 난류문제가 인류의 難題로 남을 것을 예고하고 있다.

I am an old man now, and when I die and go to Heaven there are two matters on which I hope for enlightenment. One is quantum electrodynamics and the other is the turbulent motion of fluids. And about the former I am rather optimistic.

유사에 의한 다상흐름의 대표적인 예가 부유사 밀도류(turbidity current)이다. 부유사 밀도류는 밀도류의 하나로 부유사에 의해 하층 밀도류(underflow)가 형성된 경우이다. 해저협곡이 부유사 밀도류에 의해 형성되었다는 것은 지구물리학에서 정설로 받아들여지고 있다(Pallesen, 1983). 경사가 급한 지형을 흐르는 부유사 밀도류는 강한 전단력을 유발하여 바닥에서 연료인 입자를 공급받을 수 있으므로 부력흐름률이 증가하게 된다. 따라서 부유사 밀도류는 가속하게 되며 더욱더 유사 입자를 밀도류안으로 유입시키게 되어 自己加速 循環系(self accelerating cycle)를 형성하게 되는 것이다. 이와 역학적으로 유사한 예가 눈사태이다. 눈사태는 고체상태의 눈과 유체인 공기로 이루어진 二相흐름으로서 눈이 공기중에 부유상태로 경사진 방향을 향해 진행하는 현상이다. 부유사 밀도류와 같이 자기가속 순환계가 형성되면 눈덩이가 점점 커져 눈사태가 발생하게 되며 그렇지 않은 경우에는 소멸 되고 만다. 하천에서 유사가 이동되는 일반

적인 경우에는 유체가 고체에 힘을 항력의 형태로 제공하지만, 부유사 밀도류나 눈사태의 경우에는 고체가 유체에 추진력을 제공하게 된다(Garcia, 1992).

일반적으로 유사이동 문제는 수학적으로 이동경계치 문제(moving boundary or free boundary problem)이다. 일반적인 경계치 문제는 주어진 경계조건에 따라 편미분 방정식을 해석하여 해를 구하는데 반해, 이동경계치 문제는 경계조건을 적용할 수 있는 경계면이 정해져 있지 않은 문제이다. 흐름조건에 따라서 하상은 砂漣(ripple), 砂丘(dune), 逆砂丘(antidune), 그리고 對應砂洲(alternate bars)를 형성하는데, 이러한 유사이동에 의한 바닥구조는 다시 유수에 저항력을 제공함으로써 흐름에 영향을 미치게 된다. 한편 유수에 의한 유사이동은 연직평면뿐 아니라 수평면에 대한 자유도를 하나 증가시킨다. 즉, 대응사주의 발달은 제방을 침식하고 사형을 촉진하여 유로를 변형시킨다.

물에 의한 유사입자의 이동은 소류사(bed-load)와 부유사(suspended load)의 두가지 형태로 일어난다. 소류사란 유사입자가 바닥에서 구르고(rolling), 미끄러지며(sliding), 혹은 튀겨가면서(saltating) 비교적 바닥의 가까운 범위에서 이동되는 현상을 의미하며, 부유사 형태의 이동은 물에 부유된 상태로 비교적 바닥으로부터 멀리 떨어진 영역에서 이동되는 현상을 의미한다. 입자가 소류사 형태로 이동하게 되는 것은 유수에 의해 하상에 작용하는 전단력의 작용이며, 입자를 부유상태로 유지시키는 힘은 난류에너지에 기인한다. 따라서 하천 등 개수로에서의 유사이동 현상은 소류사나 부유사 모두 중력의 작용에 의한 것으로 유사입자에 항력을 유발하여 하류로 이동되는 것이다.

유체에 의한 유사의 이동을 연구하는데 일반적인 Newton 역학을 적용하기 위한 가정이 필요하다. 즉, Newton 역학을 적용할 수 있을 만큼 유사 농도가 작아야 한다는 것이다. 이와 같은 경우에만 유체와 유사입자를 따로 구별하여 고려할 수 있기 때문이다. 일반적으로 유체의 연속 방정식과 운동량 방정식, 부유사 보존 방정식, 그리고 하상의 유사 보존방정식(Exner 방정식)을 해석하여 유사 문제에 접근할 수 있는 것은

유사 농도가 작아 유체에 Newton 역학을 적용할 수 있기 때문이다. 만약 토석류(debris flow)와 같이 Newton 역학을 적용하기 힘든 경우에는 해당하는 유체에 관한 새로운 流動學적 모형(rheological model)이 필요하게 된다(Choi and Garcia, 1993).

2. 유사의 물리적 특성

유사입자 하나의 물리적 특성으로는 크기, 비중, 형상, 그리고 침강속도 등을 들 수 있으며, 토양(group of particles)의 중요한 물리량으로는 입도분포와 공극률 등을 들 수 있다.

(1) 모형사의 선정

폭이 100m, 수심이 4m, 그리고 경사가 0.0002인 하천의 하상 입자의 평균 입경이 0.5mm 라고 하자. 축척 1/100인 이동상 수리모형 실험에서 왜곡되지 않은 축척을 사용할 경우, 하폭과 수심을 각각 1m와 0.04m로 하고 경사는 실물과 같은 0.0002로 할 수 있다. 그러나 입경이 0.5mm인 실제 하천의 유사를 실험에 사용하면 단순히 기하학적 상사법칙에 의해 우리는 입경이 0.5m의 轉石(boulder)을 가지고 실험을 하는 것과 같게 된다. 한편 우리가 동일한 상사법칙을 적용하여 모형사의 입경을 5 μ 으로 줄이면 이 토립자는 점착성(cohesiveness)을 띄게 된다. 따라서 모형사는 실제 하천의 유사에 비해 훨씬 가동성(mobility)이 떨어지게 되며 역학적으로 실제 하천의 유사와 완전히 상이한 거동을 보이게 된다.

이와 같은 딜레마를 해결하는 방법중의 하나는 경량의 모형사를 사용하는 것이다. 물의 밀도를 ρ , 유사입자의 밀도와 체적을 각각 ρ_s 와 V_p 라고 하면 입자의 중량(W)은 다음과 같다.

$$W = \rho_s g V_p \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도이다. 이러한 입자의 수중 중량(W_s)은 아르키메데스의 원리에 의하면 다음과 같다.

$$W_s = \rho R g V_p \quad (2)$$

여기서, R은 토립자의 수중 단위중량(submerged specific gravity)으로서 다음과 같이 정의 된다.

$$R = \rho_s / \rho - 1 \quad (3)$$

수리실험시 단위중량이 2.65인 모래 대신에 단위중량이 1.3인 석탄을 사용한다면 우리는 수중에서 실제로 0.18(=0.3/1.65) 배 가벼운 입자를 사용하게 되는 것이다. 따라서 가동성이 무게와 비례한다고 가정하면 단위중량이 반인 경량입자를 사용하여 가동성을 약 5배 증가시킬 수 있는 것이다.

(2) 비중

다음 표 1은 다양한 자연상태 혹은 인공재료로서 수리모형실험에 모형사로 쓰일 수 있는 유사의 비중이다.

표 1. 유사의 종류에 따른 비중

유사의 종류	비중(specific gravity)
모래 (quartz)	2.6-2.7
석회암 (limestone)	2.6-2.8
현무암 (basalt)	2.7-2.9
자철 (magnetite)	3.2-3.5
플라스틱 (plastic)	1.0-1.5
석탄 (coal)	1.3-1.5
호두껍질 (walnut shells)	1.3-1.4

(3) 입자의 크기

입자의 크기는 보통 D로 표시하며 단위로는 mm 혹은 μ 를 사용한다. 또한 입자의 크기를 나타내기 위하여 流砂學(sedimentology)에서 흔히 사용되는 방법으로 다음과 같은 ϕ -스케일을 들 수 있다.

$$D = 2^{-\phi} \quad (4)$$

위의 공식에 의하면 $\phi = 0$ 에 해당하는 입자의 크기는 $D = 1\text{mm}$ 이다. 특히 ϕ -스케일은 직경이 1mm 이하의 입자들을 다룰 때에 편리하며 ϕ 값이 클수록 입자의 크기는 줄어든다. 다음 표 2는 유사의 분류에 따른 입자의 크기를 나타낸다.

표 2. 유사의 분류에 따른 입자의 크기

유사의 종류	직경(mm)
전석 (boulder)	256-4,000
조약돌 (cobble)	64-256
자갈 (gravel)	2-64
모래 (sand)	0.06-2
실트 (silt)	0.004-0.06
점토 (coal)	0.00024-0.004

(4) 침강속도

일반적으로 입자의 침강속도(sediment fall velocity)는 유체안에서 입자에 작용하는 중력과 반대방향으로의 항력이 평형을 이루어 정상상태로 가라앉을 때의 속도를 의미한다. 유사의 침강속도는 부유사 보존방정식에서 퇴적률을 나타내는데 쓰이며 레이놀즈 흐름률(Reynolds flux)에 의한 유사의 유입률을 무차원화 하는데도 사용된다. 따라서 입자의 침강속도를 정확히 산정하는 것은 중요하다. 입자의 침강속도는 입자의 밀도, 크기, 둥근정도, 표면의 거칠기 그리고 유체의 밀도와 점성계수 등과 관계가 있다. 입경이 D인 입자의 침강속도(u_s)는 다음과 같은 식을 사용하여 결정할 수 있다.

$$u_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{gRD}{C_D}} \quad (5)$$

여기서 C_D 는 항력계수로서 일반적으로 입자 레이놀즈수($Re = \nu_s D / \nu$)의 함수이다. 아래의 그림 1은 입자 레이놀즈수에 따른 항력계수의 값이다. 입자 레이놀즈수가 0.1보다 작을 때에는 항력계수가 입자 레이놀즈수만의 함수이고($C_D = 24/Re$) 입자의 침강속도는 다음과 같은 Stokes 법칙을 따른다.

$$u_s = \frac{gRD}{18\nu} \quad (6)$$

여기서 ν 는 유체의 동점성계수이다. 식(5)를 사용하여 입자의 침강속도를 구할 때 좌변과 우변에 모두 미지수가 있으므로 반복법을 사용하여야 한다. Dietrich (1982)는 기존의 자료를 이용하여 침강속도에 관한 회귀식을 제안하였는데, 입경에 따른 침강속도를 산정하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다.

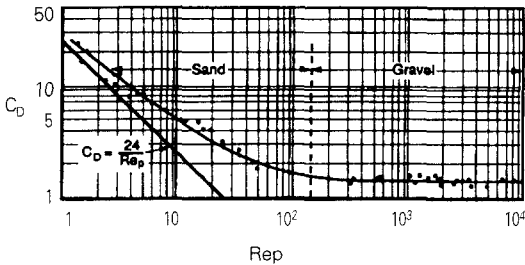


그림 1. 입자 레이놀즈수에 따른 항력계수 (Julien, 1995)

(5) 입도분포

토양은 여러 토립자로 이루어지므로 이의 중요한 역학적 성질의 하나가 입도분포(size distribution)이다. 특히 입도분포는 흐름저항과 유사입자의 운동에 직접 관련이 있다(ASCE, 1975). 입경이 자갈에서 가는 모래에 해당하는 경우(0.06mm < D < 30mm) 체분석을 통하여, 모래에 해당하는 경우에는(0.06mm < D < 2mm) 입자의 침강실험을 통하여 입도분포를 구한다.

유사입자의 직경 $D(\phi)$ 보다 작은 입자의 무게비(fraction by weight)를 입도분포함수(size distribution function) $p(\phi)$ 로 정의할 수 있다. 또한 구간 $(\phi, \phi + d\phi)$ 존재하는 토양의 비율이 $p(\phi)d\phi$ 이 되도록 크기 밀도함수(size density function) $p(\phi)$ 를 정의하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p(\phi)d\phi = p_f(\phi + d\phi) - p_f(\phi) \quad (7)$$

$$\text{또는 } p(\phi) = \frac{dp_f}{d\phi} \quad (8)$$

아래의 그림 2는 입의 토양에 대한 크기밀도함수

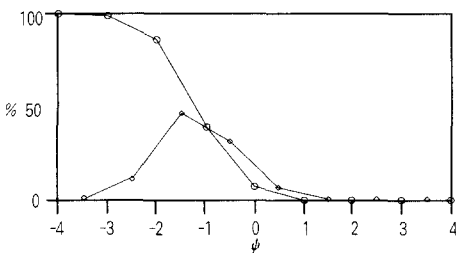


그림 2. ϕ -스케일에서의 크기밀도함수 $p(\phi)$ 와 입도분포함수 $p_f(\phi)$

와 입도분포함수의一例이다.

위의 입도분포함수 $p_f(\phi)$ 크기밀도함수 $p(\phi)$ 를 이용하여 통계적으로 유용한 값들을 찾아낼 수 있다. 전체 입자중 입자 크기 ϕ_x 보다 작은 입자의 비율이 $x\%$ 라고 하면, 그때의 입도분포함수는 다음과 같다.

$$p_f(\phi_x) = \frac{x}{100} \quad (9)$$

위의 식을 일반적인 스케일로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$D_x = 2^{-\phi_x} \quad (10)$$

많이 사용되는 대표입경으로 D_{50} 과 D_{10} 이 있는데, 예를 들어 D_{50} 의 경우, 이 입자 크기보다 작은 입자의 무게가 전체의 90%라는 것이다.

크기밀도함수를 사용하면 통계적으로 모멘트를 정의할 수 있고, 이를 이용하면 다음과 같은 입경의 평균값(ϕ_m)과 표준편차(σ)를 유도할 수 있다.

$$\phi_m = \int \phi p(\phi) d\phi \quad (11)$$

$$\sigma = [\int (\phi - \phi_m)^2 p(\phi) d\phi]^{1/2} \quad (12)$$

위의 결과를 이용하여 입경의 기하학적 평균과 표준편차는 다음과 같다.

$$D_g = 2^{-\phi_m} \quad (13)$$

$$\sigma = 2^\sigma \quad (14)$$

위의 식 (12)과 (14)에 의하면 완전히 입자의 크기가 완전히 균일한 경우에는 $\sigma=0$ 그리고 $\sigma_g=1$ 임을 알 수 있다. 일반적으로 입경의 기하학적 표준편차가 1.3보다 작으면 입도가 균일(well-sorted)한 것으로 보며, 1.6보다 큰 경우에는 입도분포가 양호(poorly-sorted)한 것으로 본다.

중종 모래 토양의 경우 ϕ -스케일에서의 입도분포를 정규분포(normal distribution)로 가정할 수 있으며, 완전한 정규분포에서의 평균값과 표준편차는 다음과 같다.

$$\phi_m = \frac{1}{2} (\phi_{84} + \phi_{16}) \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{1}{2} (\phi_{s1} - \phi_{s6}) \quad (16)$$

위의 식을 사용하면 입경의 기하학적 평균과 표준편차는 각각 다음과 같다.

$$D_g = (D_{s1} D_{s6})^{1/2} \quad (17)$$

$$\sigma_g = \left(\frac{D_{s1}}{D_{s6}} \right)^{1/2} \quad (18)$$

식 (15)-(18)은 입도분포가 대수정규분포(log-normal distribution)라고 가정할 때 성립하는 관계식으로 자연사의 경우에는 많은 오차를 유발하게 된다. 따라서 입도분석에 의한 평균값과 표준편차의 산정이 더 바람직한 방법이라고 할 수 있다.

(6) 공극률

공극률(porosity)은 전체 토양의 체적에 대한 공극

의 체적으로서 정의된다. 즉,

$$\lambda_p = \frac{\text{공극의 체적}}{\text{전체토양의 체적}}$$

계산을 통하여 유사의 이동량(질량)이 결정되면 공극률을 가지고 실제 침식되거나 퇴적되는 양을 구할 수 있다. 입도분포가 고른(well-sorted) 모래의 경우 공극률은 0.3-0.4이고 자갈과 같은 입자는 입도분포가 고르지 못하여 공극률은 0.2 정도가 된다. 막 퇴적된 점토의 경우에는 공극률이 매우 크며 자중에 의해 압밀이 진행되면 서서히 공극률은 줄어들게 된다. 공극률은 생태수리학의 측면에서도 중요한 의미를 가질 수 있다. 예를 들어, 연어가 자갈층에 산란을 할 때 모래 혹은 실트가 20-25% 이상이면 투수성이 떨어져서 산란에 매우 불리한 것으로 알려져 있다(Garcia, 1992). ❶

〈참고 문헌〉

- ASCE (1975). Sedimentation Engineering. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54. New York, NY.
- Choi, S.-U., and Garcia, M.H. (1993). "Kinematic wave approximation for debris flow routing." Proceedings of XXV IAHR Congress, Tokyo, Japan.
- Dietrich, P. (1982). "Settling velocity of natural particles." Water Resources Research, 18(6), 1615-1626.
- Garcia, M. (1992). Sediment Transport. CE459 Lecture Note, University of Illinois, Urbana, IL.
- Julien, P.Y. (1995). Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press, New York, NY.
- Palleesen, T.R. (1983). Turbidity Currents. Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering Series Paper 32, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.