

제 3 장 유사론-1

3.1 토사유송 및 안정하상의 개요

- 침식(erosion) 현상은 빗방울의 충격력과 흐름의 소류력 때문에 발생하며 유사(sediment)의 근원이 됨. 유송(transport) 현상은 침식에 의한 토사가 유수에 의해 이동하는 것으로 수질오염 등에 문제를 야기시키며 국부적으로 수력기계 마모를 유발함. 퇴적(deposition) 현상은 홍수시 운반된 토사가 퇴적되는 것으로, 홍수소통단면을 감소로 인한 범람, 저수지 저수용량 감소, 항만의 고비용 준설작업 등을 발생시키며, 침식이나 유송과정 보다 더 많은 문제점을 야기
- 토사 침식, 유송 및 퇴적은 가장 어려운 문제의 하나로, 토사유송은 침식과 퇴적을 연결하는 중간고리로 유사에 따른 여러가지 문제해결을 위해 토사 유송기구를 이해하는 것이 중요

3.2 토사유송의 형태와 하상의 형상

1) 토사유송의 형태 등에 따른 유사의 분류

- 자연하천(침식성 수로)의 토사는 편의상 하상에서 구르며, 미끄러지며, 튀어오르고 가라앉고를 반복하며 이송하는 소류사와 하천의 난류에 의해 떠가는 부유사로 나뉨. 이 두 양의 합이 그 하천 단면의 총 유사량
- 한편, 상류에서의 유사공급에 의존하는 미립토사의 부유이송 형태인 세류사(wash load)와 흐름의 세기와 하상토의 특성에 의존하는 부유 및 소류 이송형태의 하상토유사(bed material load)로 분류
- 유사는 채취한계에 의해 채취유사(sampled load)와 미채취유사(unsampled load)로 구분되며 소류사 측정기가 하상에서 10cm 이상은 접근이 안되므로 미채취구간이 발생

< 하천 유사의 구분 >

구 분	이송형태에 의한 분류		수리량과의 관계에 의한 분류	채취한계에 의한 분류
유사 sediment load	부유사 suspended load		세류사 wash load	측정유사 sampled load
	소류사 bed load	도류사 saltation load	하상토사류 bed material load	미측정유사 unsampled load
		접류사 contact load		

2) 유속에 따른 하상의 형상의 변화

- 침식성 수로에서 소류력을 지배하는 유속의 크기에 따라 하상형상을 여러 가지로 변화
- 하상물질이 모래인 경우 유속이 증가함에 따라 하상형상도 단계적으로 변화
파상사군(ripples) ⇒ 사구(dunes) ⇒ 정체파상(standing waves) ⇒ 역사구(antidunes) ⇒ 낙수부(chute)와 웅덩이(pool)

3.3 유사의 수리학적 성질

- 토사입자의 유송과 침전을 지배하는 인자는 흐름의 특성과 유사의 물리적 특성이라 할 수 있으며, 유사의 특성은 개개 토사입자의 특성(individual particle property) 뿐만 아니라 전체로서의 유사특성(bulk property)도 대단히 중요
- 개개 토사입자의 특성 중에는 입자의 크기, 모양 비중 및 침강속도 등이 중요하고, 전체로서의 유사특성 중에는 토사의 입도분포, 유사의 단위중량, 공극률 등이 중요

3.3.1 토사입자의 크기와 모양 및 비중

1) 토사입자의 크기

- 하상을 형성하는 개개 토사입자의 크기와 모양은 다양하기 때문에 평균치나 통계치로 표시하게 되며 통상 토사입자군의 크기를 여러 개의 계급구간으로 나누어 표시
- 토사입자군의 분류는 미국지구물리학회(American Geophysical Union, AGU)의 분류법이 널리 사용되고 있으며 이는 체분석에서 사용하는 체의 구멍직경과 밀접한 관계
- 토사입자의 크기를 나타내는 직경에는 체직경, 침전직경, 공칭직경 등으로 구분
- ① 체직경(sieve diameter)은 주어진 토사입자가 입도분석용 체의 한 구멍을 겨우 통과할 경우 체구멍의 변의 길이로 정의
- ② 침전직경(sedimentation diameter)은 동일 유체내에서 주어진 토사입자와 동일한 비중량 및 종말침강속도를 가지는 구의 직경으로 정의
- ③ 공칭직경(nominal diameter)은 주어진 입자의 체적과 동일한 구의 직경으로 정의
- 상기 세가지 직경 중 체직경과 침전직경을 측정하기 편리하기 때문에 많이 사용되며 특히, 침전직경을 침강속도의 측정에 의해 결정되며 유사의 침전과 관련하여 물리적인 의미를 갖기 때문에 침전역학에서 많이 사용

2) 누가크기-빈도곡선

- 토사입자 크기의 분포상태는 토사입자군의 체분석실험(sieve analysis)에 의해 결정되며 그 결과는 누가크기-빈도곡선(cumulative size-frequency curve)으로 표시
- 누가크기-빈도곡선은 주로 대수정규 확률지상에 표시하며 가로축에는 어떤 입자크기보다 작은 입자군의 중량백분율을 세로축에 표시한 것으로써 크기 분포는 대체로 직선
- 누가크기-빈도곡선으로부터 토사입자군을 대표하는 직경을 결정하게 되며 흔히 중앙치(median size)와 기하평균치(geometric mean size)가 사용
- 평균입경(d_{50})은 무게로 50%에 상응하는 체구멍의 크기, 기하평균직경(d_g)은 무게로 15.9% 및 84.1%에 해당하는 직경인 $d_{15.9}$ 및 $d_{84.1}$ 의 기하평균으로 $d_g = \sqrt{d_{15.9} \cdot d_{84.1}}$

3) 토사입자의 모양

- 토사입자의 모양도 유수에 의한 입자의 유송에 막대한 영향을 미치며, 구상도와 원상도로써 구형에 가까운 정도와 둥근 정도를 표시

- 구상도(sphericity)는 주어진 토사입자의 표면적에 대한 입자의 체적과 동일한 체적을 가지는 구의 표면적간의 비, 원상도(roundness)는 주어진 토사입자의 최대 투영면적에 외접하는 원의 반경에 대한 입자모서리의 곡률반경의 평균치간의 비로 정의

- 형상계수(shape factor, SF)는 $SF = \frac{c}{\sqrt{ab}}$

여기서 a, b, c는 각각 입자의 중심을 지나는 3개 직교축의 가장 큰 길이, 중간 길이 및 작은 길이를 표시

4) 토사입자의 비중

- 하상재료의 원천은 암석이며 풍화작용 및 유수의 마찰에 의해 파쇄되면서 그 크기가 점차로 작아져 일부는 세립되어 부유하고 나머지는 유수의 소류력에 따라 부유하거나 침전

- 상기 파쇄과정에서 가장 안정성을 가지는 물질은 모래(sand)이고 대부분의 하상물질은 모래로 구성되어 있으며, 모래의 비중은 2.64~2.67로서 평균값인 2.65를 통상 사용

3.3.2 토사입자의 침강속도

- 침강속도(fall velocity)는 무한대의 정지유체에 토사입자를 강하시킬 때 갖게되는 종말침강속도(terminal fall velocity)를 말하며 토사의 유송 및 침전해석에 있어서 토사의 중요한 성질

- 토사가 정수중으로 하강할 경우 침강속도(ω)는 수중에서의 입자무게(W_s)와 입자의 하강에 저항하는 항력(F_D)이 평형을 이룰 때 얻어지므로 $W_s = F_D$ 의 관계를 이용

$$W_s = \frac{1}{6} \pi d_s^3 (\gamma_s - \gamma), \quad F_D = \frac{1}{2} \rho C_D \omega^2 \frac{\pi d_s^2}{4}$$

$$\therefore \omega^2 = \frac{4}{3} \frac{g d_s}{C_D} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$$

여기서 d_s 는 침전직경, γ_s 는 토사입자의 단위중량, γ 는 물의 단위중량, ρ 는 물의 밀도, C_D 는 항력계수(drag coefficient)

- 항력계수 C_D 는 토사입자의 침강에 따른 흐름이 층류인지 난류인지를 구별하는 흐름의 Reynolds수 $Re = \omega d_s / \nu$ 와 형상계수(SF)의 지배를 받음

- 침강에 따른 흐름이 층류영역에 속하는 $Re < 1.0$ 에서의 침강속도는 Stokes 방법 또는 Rubey 방법 등을 적용하고 난류영역에 속하는 $Re > 1.0$ 에서의 침강속도는 경험적 방법으로 결정

1) Stokes 방법

- Stokes 침강속도 : $\omega = \frac{g d_s^2}{18 \nu} \frac{Y_s - Y}{Y} = \frac{g d_s^2}{18 \nu} (S - 1)$
- 상기 식에서 동점성계수(ν)는 $\nu = \frac{1.79^2 \times 10^{-6}}{1.0 + 0.0337 T + 0.000221 T^2}$
여기서 ν 는 동점성계수(m^2/sec), T 는 온도($^{\circ}C$)
- Stokes 침강속도는 토사입자의 직경이 0.1mm 이하인 경우에만 적용 가능

2) Rubey 방법

- 모래입자의 직경이 1mm보다 큰 경우의 침강속도 $\omega = F \left[d_s g \left(\frac{Y_s - Y}{Y} \right) \right]^{1/2}$
- 상기 식의 F 는 토사입자의 직경이 1mm 이상이고 물의 온도가 10~25 $^{\circ}C$ 범위이면 0.79이며 토사입자의 직경이 1mm 이하이면 다음과 같이 산출

$$F = \left[\frac{2}{3} + \frac{36 \nu^2}{g d_s^3 \left(\frac{Y_s}{Y} - 1 \right)} \right]^{1/2} - \left[\frac{36 \nu^2}{g d_s^3 \left(\frac{Y_s}{Y} - 1 \right)} \right]^{1/2}$$

- 토사입자 직경이 2mm 이상, 수중온도가 16 $^{\circ}C$ 인 경우 침강속도의 근사치 $\omega = 3.32 d_s^{1/2}$
여기서 ω 는 침강속도(m/sec), d_s 는 토사입자의 직경(m)

3) 국내 기준

- 토사입자의 직경이 0.1mm 이상인 경우에는 아래와 같은 하수도 시설기준 등에서 제시한 침강속도를 기준으로 적용

< 수중에서 모래입자의 침강속도 >

입 경 (mm)	침강속도 (cm/sec)	비 고 (체번호)	입 경 (mm)	침강속도 (cm/sec)	비 고 (체번호)
2.000	20.3	10	0.100	0.74	
1.000	10.0		0.090	0.56	
0.800	8.3		0.080	0.48	
0.600	6.3		0.074	0.41	200
0.420	4.4	40	0.060	0.25	
0.300	3.2		0.040	0.11	
0.250	2.7	60	0.020	0.028	
0.200	2.1		0.010	0.0069	
0.150	1.5	100	0.006	0.0025	

3.4 토사입자 이동의 한계조건

• 모래나 자갈과 같은 비점착성 토사로 형성되는 하상 위로 물이 흐르면 흐름의 소류력은 입자를 움직이게 하려 하고 토사입자의 무게는 소류력에 저항하게 되는 반면 점토와 같은 점착성 세사는 무게보다도 입자간의 점착력이 소류력에 저항하는 힘으로 작용

• 대부분 하상은 비점착성 토사로 형성되므로 비점착성 토사입자가 움직이기 시작하는 한계조건(threshold condition, or critical condition)을 위주로 검토

• 토사가 움직이기 시작하는 순 단위면적당 받는 힘을 한계소류력(critical tractive force) τ_c 라 하면 이때 입자가 받는 전항력(total drag force) F_D 은 한계소류력에 입자의 유효단면적 $c_1 d^2$ 을 곱한 $F_D = \tau_c c_1 d^2$ 임. 여기서 c_1 은 상수, d 는 토사의 평균입경인 d_{50}

• 토사입자의 수중무게 W_s 는 소류력에 의한 저항하는 힘으로 $W_s = c_2 (\gamma_s - \gamma) d^3$

여기서 $c_2 = \pi/6$ 으로 상수

• 모멘트에 관한 평형방정식을 수립하여 무차원변량으로 정리하면 $\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d} = \frac{c_2 a_2}{c_1 a_1} \tan \phi$

• 위 식은후술되는 Shields의 함수와 동일한 형태이며, 여기서 a_1 과 a_2 가 동일하면 입자에 작용하는 힘은 입자의 중심에 작용하게 되며 힘은 주로 압력에 의한 것을 표시

• 상기 식에서 알 수 있는 것처럼 수평하상에서의 한계소류력은 경사하상의 경우보다 크고 역경사하상의 경우보다 작음

• 인공 유사수로에서 실시한 White의 실험결과에 의하면 하상부근의 흐름이 층류일 때 $c_2 a_2 / c_1 a_1$ 의 평균치가 약 0.18인 것으로 나타나 위 식은 $\tau_c = 0.18 (\gamma_s - \gamma) d \tan \phi$

가. Shields의 실험적 연구

• Shields는 토사입자 이동의 한계조건을 토사입자의 운동과 관계되는 6개 주요 변수의 차원 해석(dimensional analysis)에 의해 3개 무차원변량을 얻고 이들간의 관계를 기준으로 여러 실험 자료를 분석함으로써 토사입자 이동의 한계조건을 도표화

• 토사입자 운동에 대한 주요변수는 소류력(τ_0)과 입자직경(d) 및 밀도(ρ_s)와 물의 밀도(ρ), 중력가속도(g) 및 물의 동점성계수(ν)이며 차원해석에서 물리변수 $n=6$ 이고, 물리변수는 MLT 또는 FLT 등의 차원으로 표시할 수 있으므로 $m=3$ 이므로 $\frac{\tau_0}{\rho g d}$, $\frac{\rho_s}{\rho}$, $\frac{d \sqrt{\tau_0 / \rho}}{\nu}$ 의 3개의 무차원변량($n-m$)으로 표시 가능

• 마찰속도(friction velocity) $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ 를 도입하면 $\frac{u_*}{g d} = \text{func} \left(S_s, \frac{u_* d}{\nu} \right)$

여기서 $u_*^2 / g d$ 는 Froude수의 형태, $S_s = \rho_s / \rho$ 는 토사입자의 비중, $u_* d / \nu$ 는 Reynolds수의 형태로써 입자 Reynolds수(particle Reynolds number) R_e^*

- Shields는 다음 관계식에 의해 위 변량에 대한 실험자료를 정리하여 Shields 곡선 수립

$$\frac{u_*}{g d (S_s - 1)} = \text{func} \left(\frac{u_* d}{v} \right)$$

- 좌변항을 다음과 같이 변형하면 F_s 는 무차원변량으로서 Shields의 함수(entrainment function)라하고 토사입자의 이동여부를 판단할 수 있는 함수

$$\frac{u_*}{g d (S_s - 1)} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d} = F_s$$

- 이 곡선은 토사입자 이동의 한계조건선으로 곡선의 아래 영역에서는 입자의 이동이 없고 곡선과 일치하는 조건에서 입자는 움직이기 시작하며, 고선의 윗 영역에서는 토사입자가 움직여서 흐름조건에 따라 하상이 파상사군이나 사구 등이 형성되다가 도약과정을 거쳐 부유

- 이 한계조건선은 관수로에서의 Moody도표처럼 하상부근의 흐름이 층류이면 R_* 의 증가에 따라 F_s 가 작아지다가 천이영역에서는 다시 커지며 난류영역에 들어오면 $F_s = 0.056$ 으로 대략 일정하게 수렴

나. White의 해석적 연구

- White는 토사입자의 이동 한계조건을 수립하고자 하였으며 하상의 단위면적당 소류력을 실제로 감당하는 토사입자의 수는 입자의 단면적(d^2)에 반비례하므로 $n = \frac{n}{d^2}$

여기서 n 는 묶음계수(packing coefficient)로서 하상 단위면적당 돌기되어 소류력의 대부분을 감당하는 토사입자가 차지하는 실제 표면적

- 소류력을 받는 개개 입자의 영향권면적은 $a = d^2/n$ 이라 할 수 있으며 단위면적당 소류력을 τ_0 라 할 때 개개 입자가 받는 총소류력(F_τ)은 τ_0 에 입자의 영향권면적을 곱하여 산출

- 소류력에 저항하는 힘은 수중에서의 입자 무게(W_s)에다 마찰계수($\tan \phi$)를 곱한 것이며 입자의 이동순간에는 F_τ 와 같아져야 함

$$F_\tau = \tau_0 a = \frac{\tau_0 d^2}{n}, \quad F_\tau = \frac{\tau_0 d^2}{n} = \frac{\pi}{6} (\gamma_s - \gamma) d^3 \tan \phi \quad \therefore \tau_0 = \frac{\pi}{6} n (\gamma_s - \gamma) d \tan \phi = \frac{W_s}{a} \tan \phi$$

- 위 식을 Shields 함수의 형태로 변환시키면 다음과 같이 표시

$$F_s = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d} = \frac{\pi n}{6} \tan \phi$$

- 상기 식은 토사입자에 작용하는 소류력이 입자의 중심에 작용한다고 가정했을 뿐만 아니라 하상부근에서의 난류가 가지는 양력이라든지 기타 복잡한 흐름상태를 고려하지 않아 불완전성이 지적되고 있으나 이론적 접근방법에 의해 Shields의 차원해석적 방법 및 실험자료 분석의 타당성을 재 입증했다는 점에서 큰 가치

다. 한계조건의 응용

- Shields곡선은 바닥으로부터 하상물질의 이동이 없도록 설계하는데 응용 가능
- Shields곡선에서 흐름상태가 완전 난류가 되는 $R_*^* > 400$ 에서는 $F_s \simeq 0.056$ 으로 일정해지며 이때 하상재료의 입경 $d > 1/4 \ln$ 가 됨이 증명 가능하므로 Shields 함수 $F_s = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d} = 0.056$
- 동수반경이 R_h 이고 경사가 S_0 인 개수로내의 등류의 소류력은 $\tau_0 = \gamma R_h S_0$
- 두 식을 정리하면 $\frac{\gamma R_h S_0}{\gamma (S_s - 1) d} = 0.056$
- $S_s = 2.65$ 를 사용하면 아래와 같고 여기서 하상재료의 직경 $d = 11 R_h S_0$ 는 주어진 R_h 와 S_0 를 갖는 수로바닥에서 토사입자가 움직이지 않고 안정상태에 있을 최소 입경
- Shields곡선상의 몇 개의 점을 선정하여 각각 F_s 와 R_*^* 값을 정하고($S_s = 2.65$, $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 가정) 이로부터 d 에 상응하는 $R_h S_0$ 를 계산함으로써 Shields 곡선과 같이 $d \sim R_h S_0$ 관계곡선을 얻을 수 있음

3.5 하천유사량의 조사

- 하천 유사량 조사는 하상변동 예측, 저수지 퇴사량 추정, 유사유출량 추정, 기타 하도 계획과 설계를 위해 수행하며, 주요 하천 지점에서 유량 조사와 같이 주기적으로 수행
- 유사량 조사 방법은 크게 유사량 실측에 의한 방법과 유사량 공식을 이용한 방법으로 구분
- 유사량 실측에 의한 유량-유사량 관계는 일반적으로 $q_s = k q^n$ 와 같음

여기서 q_s 는 단위폭당 부유사량(ton/s/m), k 는 계수, q 는 단위폭당 유량($\text{m}^3/\text{s/m}$), n 은 부유사 입경과 흐름 특성에 따라 변하는 지수($n = 1 \sim 3$)

- 소류사량에 관한 최초의 연구는 DuBoys에 의한 것으로 $g_s = \frac{28.51 \tau_0 (\tau_0 - \tau_c)}{d_{50}^{3/4}}$
- 국내하천에 대해서 소류사량 공식으로는 Meyer-Peter -Muller공식이, 총유사량 공식으로는 Engelund-Hansen공식, Yang공식, Browline공식 등이 비교적 신뢰도가 높은 것으로 알려져 있으며, 부유사량 만을 따로 산정할 필요가 있는 경우가 적기 때문에 부유사량 공식은 상대적으로 많이 쓰이지 않음.
- 기존 유사량 공식에 의한 하천 유사량 산정치는 실측치와 크기는 1/10~10배까지 차이가 나므로 결과의 적용시 신중을 필요