

저층수 배사관 내 유입된 사석 배출능력에 대한 연구

정석일* · 이승오**

Jeong, Seok Il*, Lee, Seung Oh**

A Experimental Study on Exclusion Ability of Riprap into Bypass Pipe

ABSTRACT

There are various transversal structures (small dams or drop structures) in median and small streams in Korea. Most of them are concrete structures and it is so hard to exclude low-level water. Unless drainage valves and/or gates would not be installed near bottom of bed, sediment from upstream should be deposited and also contaminants attached to the sediments would devastatingly threaten the water quality and ecosystem. One of countermeasures for such problem is the bypass pipe installed underneath the transversal structure. However, there is still issued whether it would be workable if the gravels and/or stones would roll into and be not excluded. Therefore, in this study, the conditions to exclude the rip stone which enter into the bypass pipe was reviewed. Based on sediment transport phenomenon, the behavior of stones was investigated with the concepts from the critical shear stress of sediment and d'Alembert principle. As final results, the basis condition (τ_c^*) was derived using the Lagrangian description since the stones are in the moving state, not in the stationary state. From hydraulic experiments the relative velocity could be obtained. In order to minimize the scale effect, the extra wide channel of 5.0 m wide and 1.0 m high was constructed and the experimental stones were fully spherical ones. Experimental results showed that the ratio of flow velocity to spherical particle velocity was measured between 0.5 and 0.7, and this result was substituted into the suggested equation to identify the critical condition whether the stones were excluded. Regimes about the exclusion of stone in bypass pipe were divided into three types according to particle Reynolds number (Re_p) and dimensionless critical shear force (τ_c^*) - exclusion section, probabilistic exclusion section, no exclusion section. Results from this study would be useful and essential information for bypass pipe design in transversal structures.

Key words : Cross structure, Bypass pipe, Riprap, Exclusion ability, Critical condition

초록

국내 중소하천의 횡단구조물인 보 또는 낙차공은 대부분 고정식 콘크리트 구조물이며, 저층수의 배제가 쉽지 않다. 횡단구조물로 인해 유사가 퇴적되며, 유사에 흡착한 오염물질이 그대로 하천의 바닥을 오염시키고 있다. 이에 저층수 및 퇴적유사에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이며, 이러한 대안의 하나로 횡단구조물 상류와 하류를 하상 아래로 연결시키는 구조물로서, 보 상류 저층의 물 및 유사 배제를 목적으로 저층수배출관을 설치하는 방안이 있다. 그러나 사석이 유입되고, 배제 되지 않을 경우 효율성이 크게 저하될 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 저층수 배출관 내 사석을 배제할 수 있는 능력에 대한 연구를 수행하였다. 사석과 거동이 유사한 유사(sediment)의 한계조건(critical condition) 중 한계전단력(critical shear stress) 유도과정과 달랑베르의 원리(d'Alembert principle)를 응용하여 이동 중인 사석이 배제될 수 있는 조건(τ_c^*)을 유도하였다. 그러나 저층수 배출관 내 유입된 사석은 정지상태가 아닌 이동 중이므로, Lagrangian 기법을 활용하여 수리실험에서 도출된 유속으로 상대속도(relative velocity)를 제시하였다. 수리실험은 축척효과(scale effect)를 최소화하기 위해 폭이 5.0 m이고, 높이가 1.0 m인 광폭 개수

* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정 (Hongik University · suhibb@gmail.com)

** 종신회원 · 교신저자 · 홍익대학교 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · Hongik University · seungoh.lee@hongik.ac.kr)

Received December 6, 2016/ revised December 22, 2016/ accepted January 4, 2017

로를 제작하였으며, 사용된 사석은 가공된 완전 구형을 사용하였다. 실험 결과 유속과 구형 입자 속도와의 비가 0.5~0.7 사이로 나타났으며, 이러한 결과를 유도된 식에 적용하여, 최종적으로 사석이 배제되는 조건을 도출하게 되었다. 구간은 입자레이놀즈수(Re_p)와 무차원 한계 전단력(τ_c^*)에 따라 크게 3가지로 구분되었다. 배제 구간(exclusion section), 확률적 배제 구간(probabilistic exclusion section), 비배제 구간(no exclusion section)이다. 본 연구결과는 횡단구조물의 저층수 배출관 설계시 유용한 기초 정보를 제공할 수 있을 것이다.

검색어 : 횡단구조물, 저층수배출관, 사석, 배제능력, 한계조건

1. 서론

국내 중소하천에는 많은 횡단구조물이 설치되어 있다. 횡단구조물은 하천을 횡단하는 구조물로서 보 또는 낙차공을 의미한다. 이러한 하천횡단구조물은 대부분 콘크리트로 구성되어 있기 때문에 하천의 흐름을 정체시킬 수 있다. 정체된 흐름은 유사를 퇴적시키며, 유사에 달라붙은 오염물질이 하상 및 수질을 오염시킬 수 있다. 특히 인(P)은 토양과의 결합력이 매우 크기 때문에(Han, 1997), 유사의 퇴적은 하천 녹조 발생에 큰 영향을 주며, 하천의 복원력을 감소시킨다. 또한 유사의 퇴적은 유수단면적의 감소로 이어져, 홍수위 상승의 직접적인 영향이 되기도 한다. 이러한 이유로 하천 준설에 대한 관심이 크게 고조되고 있다. 현재 국내 하천에 설치된 보는 약 10,000개 정도이며(Ministry of Agriculture and Forestry, 2004), 1990년에 조사되어진 32개 하천정비기본계획 보고서에는 이 중 높이 1.5 m 이내의 것이 전체의 80%를 차지하고 있다. 이러한 중소형 횡단구조물의 경우 퇴적 유사의 배제 장치가 없는 경우가 대부분이며, 준설의 경제성 및 장비 진입 문제로 퇴적된 유사가 방치되는 경우가 많다. 이에 저층수 배출관에 대한 관심이 높아지고 있다. 저층수 배출관은 보 상류와 하류를 하상 아래로 연결해 주는 관으로써, 퇴적된 유사의 배제 능력이 충분하며(Jeong and Lee, 2016), 경제적으로 설치비용이 크지 않다. 그러나 관 내부에 사석이 유입되는 경우, 관의 효율이 크게 떨어질 수 있기 때문에, 관내 사석의 배제 능력에 대한 연구가 필요한 시점이다.

관내 사석의 운동에 대한 연구는 사례를 찾아보기가 쉽지 않다. 이에 사립질 유사(sediment)의 거동에 대한 연구를 본 연구에 응용하였다. 특히 소류사의 초기 거동에 대한 연구는 사석의 초기 거동과 메커니즘이 매우 유사하기 때문에, 저층수 배출관의 효율을 저하 시킬 수 있는 사석이 관내 유입되었을 경우 배제 가능성을 연구하는데, 많은 참고가 될 것이다. 소류사의 초기 운동(한계운동, incipient motion)을 발생시키는 조건을 한계조건(critical condition)이라 한다. Karner (1935)는 한계 운동 전후에서 사립자들의 운동 강도를 약한 운동, 중간 운동, 강한 운동 등 세 가지로 구분하였다. 약한 운동은 한계 운동의 시작으로 사립자들이 여기저기서 움직이기 시작하는 단계이며, 중간 운동은 하상 전체에 걸쳐 하상 재료가 움직이는 단계이고, 강한 운동은 유사 이송이 시작되는 단계이다.

일반적으로 한계 조건은 크게 3가지로 분류된다. 첫 번째는 한계유속(critical velocity)이다. Fortier and Scoby (1926)는 수로의 설계에서 허용유속(permissible velocity)개념을 도입하여, 사립자의 입경별 침전되지 않는 최대 유속을 제시하였다. Mavis and Laushey (1949)는 실험을 통해 한계 유속식을 제시하였으나, 그때의 유속은 실측에서 얻어진 수십별 유속을 바탕으로 외삽한 것으로, 일반적으로 사용하기에는 많은 어려움이 있다. 두 번째는 양력(lift force)이다. 유사가 받는 양력은 일반적으로 유사의 윗부분에 작용되는 유속과 아래부분에 작용되는 유속이 다르기 때문에 발생된다. 이는 에너지 방정식을 통해 얻을 수 있다. 그리고 난류에 의해서 유사를 연직방향과 반대방향으로 이동시키는 힘을 받을 수도 있다. Einstein (1949)은 이러한 양력 개념을 이용하여 소류사 이송량(bed load)를 산정하는 식을 제시하였으며, Apperley (1968)은 구체에 작용하는 양력과 항력의 비는 0.5 정도 됨을 실험으로 입증하였다. 세 번째는 전단력(shear stress)이다. Shields (1936)는 한계소류력 개념을 이용하여 유사의 한계 조건을 제시하였다. 유속은 Prandtl-Karman가 제시한 난류에서의 경계층 유속분포 식을 기본적으로 사용하여, 난류의 영향이 고려되었다 사료된다. Shields의 기본적인 가정은 유사가 받는 항력이 저항력(shear stress)보다 크기 시작할 때 유사가 움직인다는 것이며, 이러한 관계를 이용하여 Rouse (1939)는 Shields 곡식을 제시하였다. White (1940) 또한 항력과 마찰력의 관계를 Shields와 동일하게 가정하여, 실험을 통해 한계 전단력 식을 제시하였다.

Fig. 1은 유사 또는 사석을 거동하게 하는데 영향을 주는 요인을 정리한 것으로 무작위적, 비규칙적인 요인과 입자에 작용하는 힘으로 크게 분류된다. 무작위적이고 비규칙적인 요인으로는 유사 또는 사석의 초기 위치와 난류가 있으며, 입자에 작용하는 힘은 유체에

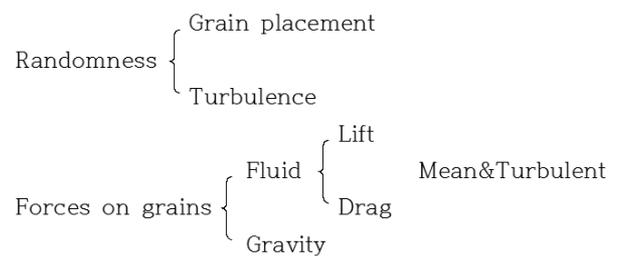


Fig. 1. Classification of Factors Affecting the Behavior of Sediment

의한 힘과 중력(자중)으로 다시 분류된다. 유체에 의한 힘은 양력과 항력으로 나눌 수 있다. 선행연구들은 유사의 초기 거동 문제를 다루는데 초점을 두고 있으며, 본 연구는 이러한 개념들을 관내 사석의 운동을 분석하는데 적용하였다. 이에 사석이 받는 양력, 항력, 중력 및 마찰력 등을 모두 고려하였으며, 3개의 저층수 배출관 형상을 제안하였다. 이러한 조건 하에 Shields의 한계 조건 유도 과정에서 나온 개념을 중심으로 사석이 받는 힘을 유도하였다. 이는 일반적인 유사의 한계조건은 평면을 가정하는 경우가 많지만, 본 연구에서는 경사가 있는 관을 통과해 배제 되어야하기 때문에, 연직방향의 힘과 흐름방향의 힘을 동시에 고려할 수밖에 없었기 때문이다. 유사와 사석 거동의 차이점은 사석이 움직일 때 받는 항력은 유사와 같이 유속으로 가정할 수 없다는 것이다. 이는 유속과 사석의 이동속도가 다르기 때문이며, 이에 상대속도 개념을 적용해야 한다. 본 연구에서는 배제 가능성을 타진하기에 앞서 저층수 배출관에서 사석의 이동속도를 실험을 통해 파악하였으며, 유속과 사석의 속도와의 비를 무차원화 하여, 사석 배제 가능성을 검토하였다. 단, 위에서 제시한 사석의 운동에 영향을 주는 요인 중 사석이 놓인 위치(Grain placement, 바닥의 요철에 의한 추가적인 저항력을 의미함)는 바닥이 평평한 플라스틱 재질의 저층수 배출관을 사용하였기에 고려하지 않았다.

2. 기본 이론

2.1 유사의 초기 거동

유사의 초기 운동은 입자의 안정성이 교란되었을 때 발생한다. 이러한 비안정성은 힘의 균형을 무너뜨릴 수 있으며, 또는 흐름장내에서 입자에 가해지는 힘에 의한 모멘트를 발생시키기도 한다 (Ling, 1995). Fig. 2는 입자에 작용하는 외력을 보여주며, 수중무게 (F_g), 항력(D_f), 양력(L_f)으로 분리될 수 있는 수리화적인 힘이 작용됨을 알 수 있다.

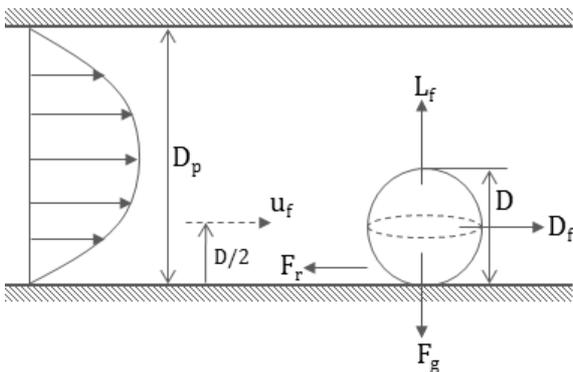


Fig. 2. Definition Sketch Showing Longitudinal Section of Bed Grain Geometry, Flow Velocity, and Forces Acting on Sphere

Fig. 2에 나타난 구형 입자에 작용하는 힘을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$D_f = \rho \frac{1}{2} \pi \left(\frac{D}{2} \right) c_D u_f^2 \quad (1a)$$

$$L_f = \rho \frac{1}{2} \pi \left(\frac{D}{2} \right) c_L u_f^2 \quad (1b)$$

$$F_g = \rho R g \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \quad (1c)$$

$$F_r = \mu (F_g - L_f) \quad (1d)$$

여기서, c_D 와 c_L 은 각각 항력계수와 양력계수이며, Schiller and Naumann (1933)이 제시하였던, $c_D = (24/Re_p)(1 + 0.15Re_p^{0.687})$ 을 이용하였다. $c_L = 0.85c_D$ 관계를 사용하였으며, 여기서, Re_p 는 입자 Reynolds number이다. R 은 $(\rho_s - \rho)/\rho$ 로써, 이때의 ρ_s 와 ρ 는 각각 입자와 물의 밀도이고, g 는 중력가속도이며, u_f 는 입자의 중앙($D/2$) 높이의 유속이다. 일반적으로 유사의 거동에 대한 연구를 수행할 경우 경계층의 유속분포식이 이용된다. 경계층 내의 유속분포는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{u_f}{u_*} = \frac{1}{2} \frac{u_* D}{\nu} \quad (\text{if } Re_p < 5) \quad (2a)$$

$$\frac{u_f}{u_*} = 2.5 \ln \left(30 \frac{z}{D} \right) \Bigg|_{z=\frac{1}{2}D} = 6.77 \quad (\text{if } Re_p \geq 5) \quad (2b)$$

경계층은 하상의 영향으로 유속이 대수분포를 이루는 구간으로 관수로는 전체를 경계층으로 볼 수 있다. 본 연구가 관수로 내에서 사석의 거동에 대한 연구이기 때문에, 하상 경계층의 대수 유속 분포식을 이용하기로 결정하였다.

정지하고 있는 입자가 초기 거동을 시작할 조건은 흐름에 의해 입자가 받는 항력과 마찰력이 균형을 이루고 있을 경우이다.

$$D_f = F_r \quad (3)$$

만약에 $F_r > D_f$ 라면 입자는 이동하지 않을 것이며, 반대로 $D_f > F_r$ 이라면 입자는 계속하여 운동을 할 것이다. Eqs. (1a)~(1d) and (3)을 이용하여, 입자가 거동을 시작하는 시점의 유속을 도출하면 다음과 같다.

$$\frac{u_f^2}{RgD} = \frac{4}{3} \frac{\mu}{c_D + \mu c_L} \quad (4)$$

이러한 관계는 $\rho u_*^2 = \tau_b$ (여기서, τ_b 는 경계층의 전단력)의 관계에 의해 변화시킬 수 있으며, 한계조건임을 감안할 때, 밀접자 c 를 추가하여 정리하면 다음과 같다.

$$\tau_c^* = \frac{4}{3} \frac{\mu}{c_D + \mu c_L} \frac{1}{F^2(u_* c D / \nu)} \quad (5a)$$

이 식은 경계층(대수유속분포 구간)에서 유효하다. 만약 경사가 있는 경우라면 위의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_c^* = \frac{4}{3} \frac{(\mu \cos \theta - \sin \theta)}{c_D + \mu c_L} \frac{1}{F^2(u_* c D / \nu)} \quad (5b)$$

만약, 하상의 경사 θ 가 0이라면, 위 식은 Eq. (5a)가 될 것이다.

2.2 본 연구에의 적용

본 연구는 저층수배출관의 사석 배제에 대한 연구로, 유사의 초기 거동과는 메커니즘이 다소 차이가 있다. 유사의 초기거동은 정지된 입자 상태에서 출발하는 것이나, 사석이 저층수 배출관 내로 유입되는 경우에는 정지상태가 아니라, 이동상태가 된다. 이러한 차이점은 달랑베르의 원리(d'Alembert's principle)를 응용하면 해결될 수 있다. 달랑베르의 원리는 관성저항을 이용하여 동역학을 정역학적으로 해석하는 것이지만, 만일 사석이 움직이고 있는 속도와 유속의 차이, 즉 상대속도 개념을 적용한다면 이동하고 있는 사석을 정지상태로 가정할 수 있을 것이다. 구체적으로 항력을 도출하는 Eq. (1a)의 유속인 u_f 를 입자의 이동속도와 유체의 속도 차이인 상대속도($u_R = u_f - u_s$, 여기서 u_s 는 사석의 이동속도)로 치환한다면, 사석이 정지하고 있는 상태에서는 u_R 크기의 유속을 받는 것이 될 것이다. $u_s/u_f = \alpha$ 라고 한다면, $u_R = (1 - \alpha)u_f$ 로 나타낼 수 있다. 일반적으로 관내 입자 Reynolds number가 5이상임을 감안한다면, 이동 중인 입자가 바닥에서 z 높이에서 받는 유속은 Eq. (2b)에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$(1 - \alpha) \frac{u_f}{u_*} = 2.5 \ln \left(30 \frac{z}{D} \right) \Bigg|_{z=\frac{1}{2}D} = 6.77 \quad (\text{if } Re_p \geq 5) \quad (7)$$

이러한 상대속도는 저층수 배출관의 형상 및 초기 조건에 의해 달라질 수 있으며, 수치적으로 해결되기가 쉽지 않기 때문에, 본 연구에서는 저층수 배출관의 형상 및 초기 조건에 따른 사석의

상대속도를 도출하는 수리실험을 수행하였다. 이러한 가정을 한다면, 최종적으로 Eq. (5b)는 Eq. (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_c^* = \frac{4}{3(1 - \alpha)} \frac{(\mu \cos \theta - \sin \theta)}{c_D + \mu c_L} \frac{1}{F^2(u_* c D / \nu)} \quad (8)$$

3. 수리 실험

3.1 실험 개요

중소하천에 설치된 대부분의 고정된 대부분의 고정보는 저층수 배출이 불가능하여, 수질이 오염되고 수위조절에 한계성을 갖는다. 이를 해결하기 위해 저층수 배출관에 대한 관심이 고조되고 있는 상황이다. 그러나 저층수 배출관으로 사석이 유입될 경우 관의 폐색이 발생할 가능성이 있기 때문에, 사석의 배출 여부는 저층수 배출관의 효율과 직결된다. Eq. (8)을 통해 저층수배출관을 통과할 한계조건을 도출하였지만, 상대속도에 대한 계수 α 는 현실적으로 계산이 불가능하다. 이에 본 연구에서는 수리실험을 통해 상대속도에 대한 계수 α 를 도출하였다. Fig. 3은 실험 수로 개념도이며, Fig. 4는 본 실험에서 사용한 저층수 배출관의 개념도이다. Table 1은 이에 대한 제원을 나타낸다. 동일한 모멘텀을 받기 위해 높이(h)를 고정하였으며, 유입부와 유출부가 하상과 만나는 경사에 따라 관내 수리현상이 변화할 것이라 판단하여, θ 에 따라 3가지 형상을 제작하여 실험을 수행하였다.

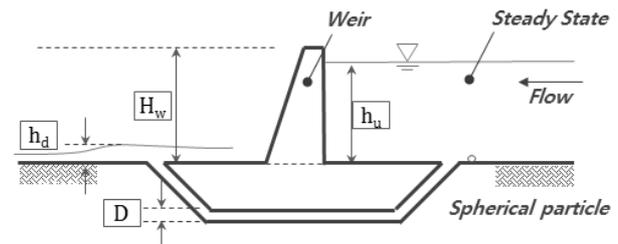


Fig. 3. Conceptual Sketch Showing Side View of Experimental Channel

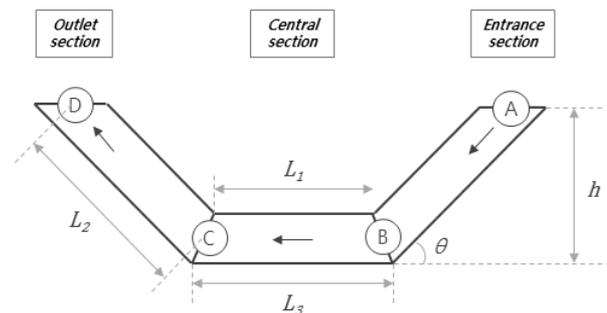


Fig. 4. Conceptual Sketch Showing Side View of Bypass Pipe

Table 1. Dimensions of Bypass Pipe

Type	L_1 (m)	L_2 (m)	L_3 (m)	θ	h (m)
A	0.67	0.26	0.78	60°	0.275
B	0.40	0.32	0.53	45°	
C	0.10	0.45	0.15	30°	

축척효과(scale effect)를 최소화하기 위해 가능한 실험 수로를 실제 소하천 규모와 유사하게 제작하였으며(13.0 m(L)×5.0 m(B)×0.5 m(H)), 좌우안의 제방경사는 1:1로 결정하였다. 유속은 초음파유량계(Ulsoflow 309P, error rate: ±0.5%)로 측정하였으며, 구형입자의 이동속도는 가장 큰 저항을 받는 C구간에서 측정하였으며, 디지털 캠코더(30 frame/sec)를 이용하여 촬영한 후, 후처리 분석을 통해 도출하였다. 보는 고무보(Rubber weir)를 사용하였

다. 실험에 사용된 입자는 구형의 테프론을 사용하였다. 테프론을 사용한 이유는 실제 사석과 비중이 매우 유사하며(비중 2.4), 가공이 용이하여 구형으로 제작이 용이하기 때문이다. 실험은 보 상류수위가 보의 높리와 동일한 경우와 월류할 경우로 구분하여 총 3가지 수위/유량 조건에 대해 수행하였다. 보 상류 지점은 하상계수가 큰 국내 여건을 감안하더라도 대부분 수위가 일정 수준이상 유지되기 때문이다.

3.2 실험 결과

Table 2는 실험 조건 및 이에 따른 실험 결과를 정리한 것이며, Fig. 5는 실험 모습이다.

실험결과 관내 유속과 사석의 이동속도와의 관계가 도출되었으며, Fig. 6에 이를 도시하였다.

Table 2. Experimental Conditions and Results

Case	D_s/D_p	h_u/h_d	Re_p (104)	u_s/u_f	Bypass pipe type	max. τ_c^*	min. τ_c^*
1	0.1	4.68	0.356	0.692	A	0.143	0.238
2	0.2		0.713	0.613	A	0.179	0.298
3	0.3		1.069	0.634	A	0.204	0.340
4	0.4		1.426	0.634	A	0.224	0.373
5	0.5		1.782	0.601	A	0.240	0.400
6	0.1		0.404	0.607	B	0.162	0.271
7	0.2		0.809	0.566	B	0.203	0.339
8	0.3		1.213	0.533	B	0.232	0.386
9	0.4		1.617	0.533	B	0.254	0.423
10	0.5		2.021	0.526	B	0.273	0.455
11	0.1		0.431	0.521	C	0.146	0.243
12	0.2		0.862	0.525	C	0.182	0.304
13	0.3		1.292	0.525	C	0.208	0.346
14	0.4		1.723	0.525	C	0.227	0.379
15	0.5		2.154	0.497	C	0.244	0.407
16	0.1	3.90	0.344	0.662	A	0.141	0.235
17	0.2		0.687	0.602	A	0.177	0.295
18	0.3		1.031	0.636	A	0.202	0.336
19	0.4		1.375	0.636	A	0.221	0.368
20	0.5		1.718	0.580	A	0.237	0.396
21	0.1		0.390	0.534	B	0.160	0.267
22	0.2		0.780	0.515	B	0.201	0.335
23	0.3		1.170	0.576	B	0.229	0.382
24	0.4		1.559	0.576	B	0.251	0.419
25	0.5		1.949	0.508	B	0.270	0.449
26	0.1		0.415	0.523	C	0.144	0.240
27	0.2		0.831	0.519	C	0.180	0.300
28	0.3		1.246	0.533	C	0.205	0.342
29	0.4		1.662	0.533	C	0.225	0.375
30	0.5		2.077	0.519	C	0.241	0.402

Table 2. Experimental Conditions and Results (Continue)

Case	D_s/D_p	h_u/h_d	$Re_P (104)$	u_s/u_f	Bypass pipe type	max. τ_c^*	min. τ_c^*
31	0.1	4.88	0.355	0.686	A	0.143	0.238
32	0.2		0.711	0.665	A	0.179	0.298
33	0.3		1.066	0.673	A	0.204	0.340
34	0.4		1.421	0.673	A	0.223	0.372
35	0.5		1.777	0.632	A	0.240	0.400
36	0.1		0.403	0.586	B	0.162	0.270
37	0.2		0.806	0.564	B	0.203	0.339
38	0.3		1.209	0.594	B	0.232	0.386
39	0.4		1.612	0.594	B	0.254	0.423
40	0.5		2.015	0.572	B	0.272	0.454
41	0.1		0.429	0.550	C	0.145	0.242
42	0.2		0.859	0.554	C	0.182	0.303
43	0.3		1.288	0.557	C	0.207	0.346
44	0.4		1.718	0.557	C	0.227	0.379
45	0.5		2.147	0.537	C	0.244	0.407

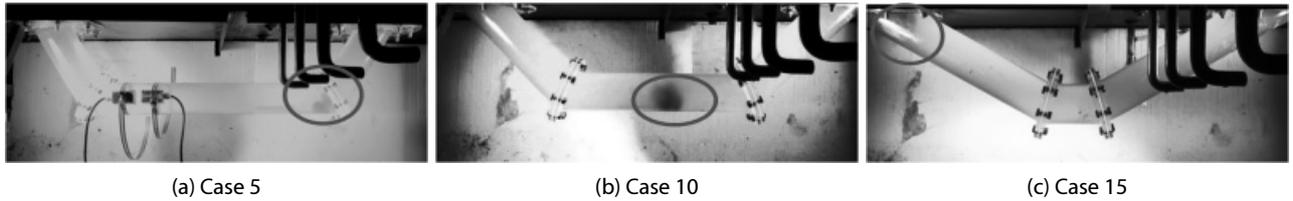


Fig. 5. Experiment Scene (a) Case 5, (b) Case10, (c) Case15

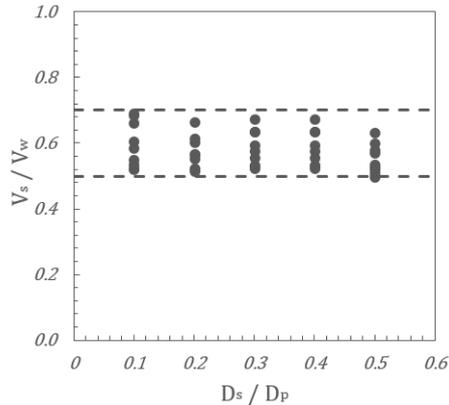


Fig. 6. Relative Velocity of Spherical Particle to Fluid Velocity According to Particle Diameter

실험결과 저층수 배출관의 형상에 따라 관내의 유속과 이에 따른 사석의 이동속도가 다르게 나타났다. 상류와 하류의 수위변화에 크게 관계없이 유속과 구형입자의 이동속도 간에는 일정한 관계가 형성되었는데, Fig. 6에서 보듯이 최소 0.5배 ~ 최대 0.7배 사이에 집중되었으며, 이에 α 값의 범위를 $0.5 \leq \alpha \leq 0.7$ 로 결정하였다.

4. 결과 분석

실험을 통해 결정된 α 의 범위를, Eq. (8)에 대입하여 구형입자가 배제되는 한계조건을 도출하였다. 식에 사용된 마찰계수(μ)은 마찰 경사와 마찰계수와의 관계($\mu = \tan\theta$)를 이용하였다. 계산결과는 Table 2에 정리하였으며, 입자 Reynolds Number와 τ_c^* 의 관계는 Fig. 7에 도시하였다.

Fig. 7에서는 α 의 최소값인 0.5와 최대값인 0.7로 인하여 3개의 구간으로 나뉜다. 아래 구간(no exclusion section)은 $D_f < F_r$ 인 구간으로 구형 입자가 저층수 배출관을 빠져나가지 못하는 조건이며, 가장 윗 구간(exclusion section)은 $D_f > F_r$ 로써, 구형 입자가 저층수 배출관을 빠져나갈 수 있는 조건이다. 가운데 구간은 확률적으로 구형 입자가 빠져 나갈 수 있는 구간(probabilistic exclusion)으로 난류 및 흐름 상태의 변화에 따라 배제 여부가 달라질 수 있다고 판단된다. Einstein은 소류사량 산정에 있어서 사립자가 움직이는 확률은 위치에 관계없이 같다는 가정하에, 바닥에 있는 유사가 한계조건에 도달하더라도 이동하는 유사와 그렇지 않은 유사가 있다고 하였다. 이는 흐름의 난류 성분으로 인하여,

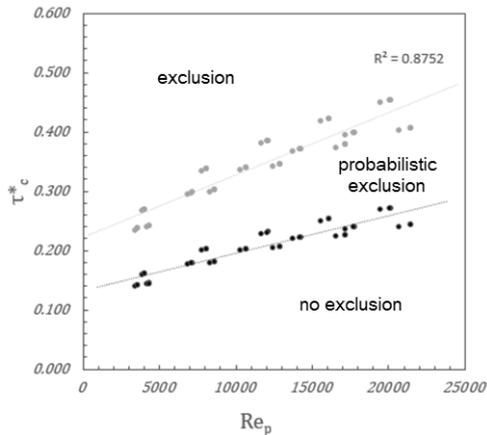


Fig. 7. Relationship Particle Reynolds Number with Critical Shear Stress for Exclusion Spherical Particle from Bypass Pipe

양력이 유사의 무게보다 한계조건임에도 커지지 않을 수 있음을 의미한다. 또한 상기에 진술한 Kerner (1935)의 유사 운동 단계의 구분(약한 운동, 중간 운동, 강한 운동)도 이와 같은 맥락으로 볼 수 있을 것이다.

5. 결론

중소하천에 설치된 고정식 수공구조물로 인한 유사 퇴적 및 하상 오염으로 인하여 저층수 배출관에 대한 관심이 증가되고 있지만, 사석의 유입으로 인한 효율성 저하에 우려가 있다. 이에 본 연구에서는 저층수 배출관으로 사석이 유입하는 경우 배제 가능성을 검토하였다. 이론적으로 유사의 한계조건 중 한계전단응력 개념을 이용하여, 유사가 받는 항력이 마찰력보다 클 경우 유사의 거동이 시작된다는 가정에서 연구가 시작되었다. 정지상태의 유사와 이동중인 구형 입자는 물리적으로 차이가 있기 때문에, 유사의 한계조건 개념의 적용을 위해 달랑베르 원리를 역으로 응용하였다. 이를 위해 유속에 대한 구형 입자의 상대속도가 필요하였으며, 이론적인 규명이 불가능하여, 수리실험으로 상대속도를 도출하였다. 실험결과 상대속도는 유속의 0.5~0.7배 사이에 집중되었으며, 이 결과를 바탕으로 사석이 저층수 배출관에서 배제되는 한계전단력을 도출하였다. 그 결과 3개의 구간으로 나뉘어 졌으며(배제구간과 비배제구간 그리고 확률적 배제구간), 이는 관내 난류 등의 영향으로 순간적인 항력 및 양력의 변화가 있었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 사용된 입자는 완전한 구형으로, 실제 하천에서 유입될 수 있는 사석과는 차이가 있다. 또한 실용화를 위해 좀 더 세분화된 조건에서 실험이 필요하며, 특히 관 매설로 인한 보의 안정성 문제에 대해서는 본 연구에서 다루지 못하였다. 이에 향후에는 입자 형상계수를 본 연구에 추가하고, 보의 규모

등 다양한 조건에 대해 결과를 도출하여, 실무 적용성을 높이고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(16RDRP-B076564-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Apperley, L. W. (1967). *The Effect of Turbulence on Sediment Entrainment*, Ph.D. Thesis, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Einstein, H. A. and El-Samni, E. S. A. (1949). "Hydrodynamic forces on a rough wall." *Reviews of Modern Physics*, Vol. 21, No. 3, p. 520.
- Fortier, S. and Scobey, F. C. (1923). "Permissible canal velocities." *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 51, No. 7, pp. 1398-1414.
- Han, K. Y. (1997). "Modeling of nutrients and sediment/water quality interactions." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 30, No. 4, pp. 28-34 (in Korean).
- Jeong, S. I. and Lee, S. O. (2016). "Experimental study for flushing of sediment bypass pipe underneath rubber weir." *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 31, No. 5, pp. 133-140 (in Korean).
- Karma, H. (1935). "Sand mixtures and sand movement in fluvial models." *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 60, No. 4, pp. 443-484.
- Ling, C. H. (1995). "Criteria for incipient motion of spherical sediment particles." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 6, pp. 472-478.
- Mavis, F. T. and Laushey, L. M. (1949). "Formula for velocity at beginning of bed-load movement is reappraised." *Civil Engineering*, Vol. 19, pp. 38-39.
- Ministry of Agriculture and Forestry (1998). *Agricultural Production Infrastructure Improvement Project Plan Design Standards* (in Korea).
- Rouse, H. (1939). *An analysis of sediment transportation in the light of fluid turbulence*. SCS, Report No. SCS-TP-25, US Department of Agriculture, Washington, D. C.
- Schiller, L. and Naumann, A. (1933). "Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung." *Z. Ver. Dtsch. Ing.*, Vol. 77, No. 12, pp. 318-320.
- Shields, A. (1936). *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebepbewegung*. Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau. Mavis.
- White, C. M. (1940). "The equilibrium of grains on the bed of a stream." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, Vol. 174, No. 958, pp. 322-338.

Appendix 기호

c_D : 항력계수	Re_p : 입자 Reynolds number
c_L : 양력계수	u_* : 마찰속도
D_f : 항력	u_f : 유속
D_p : 저층수 배출관 직경	u_R : 상대유속
D_s : 구형 입자 직경	u_s : 사석의 속도
F_g : 중력	α : 상대유속계수
F_r : 마찰력	ρ : 물의 밀도
g : 중력가속도	ρ_s : 사석의 밀도
h_d : 하류수심	τ_c^* : 한계마찰전단력
h_u : 상류수심	τ_b : 바닥 전단력
L_f : 양력	μ : 마찰계수
R : 수중 사석의 비중	θ : 저층수 배출관 유입부 및 유출부 각도