

고유속 흐름에서 하상재료의 입도특성에 따른 안정성 평가연구

김광수* · 정동규** · 김영도*** · 박용성****

Kim, Gwang Soo*, Jung, Dong Gyu**, Kim, Young Do***, Park, Yong Sung****

Stability Evaluation on Particle Size Characteristics of Bed Materials at High-Velocity Flow

ABSTRACT

In general, domestic streams and rivers are composed of alluvial rivers consisting of sand and gravel beds. These rivers can cause erosion and riverbed changes due to sudden changes in flow rates, such as floods, torrential rains, and heavy rains. In particular, there are various types of erosion, such as contraction erosion caused by changes in river shape, or local erosion occurring around obstacles such as piers, abutments or embankments. In addition, river changes can occur in various forms, such as static or dynamic periods, due to limitations such as flow rate, velocity, and shear stress. This study focused on the erosions of embankments directly related to human casualties among various river structures, and evaluated limit velocities and critical shear stress in order to identify changes in strength of natural materials by identifying the characteristics of natural hoan materials and resistance to erosions. In particular, the limitations of materials according to the type of materials in the river, characteristics of particles, and size of particles were studied using Soil loss, which is a change in the volume of the revetment material, and it is intended to be used as basic data for river design and restoration.

Key words : Erosion, Soil loss, Limit flow velocity, Bed material

초 록

일반적인 국내 하천은 모래, 자갈하상으로 이루어진 층적하천으로 구성되어 있다. 이러한 하천들은 홍수나 집중호우, 폭우 등의 급격한 유량변화로 인해 침식 및 세굴 등의 하상변화를 초래할 수 있다. 특히 세굴현상은 하천형상의 변화로 인해 발생하는 수축세굴이나 교각, 교대, 제방 등 흐름의 장애물 주위에서 발생하는 국부세굴 등 다양한 형태의 세굴이 있다. 또한 유량이나 유속, 소류력 등의 한계력에 의해 정적세굴이나 동적세굴 등의 다양한 형태로 하천의 변화가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 하천구조물 중 인명피해와 직결되는 제방에 발생하는 세굴에 초점을 두었으며, 자연형 호안재료의 특성과 세굴에 대한 방어능력 등의 특성을 파악하고 자연재료의 강도를 증진시켜 강도증진의 변화를 파악하기 위해, 증진된 강도를 한계 유속과 한계소류력을 산정하여 제방 재료의 강도평가에 관한 연구를 진행하였다. 하상의 재료의 종류, 입자의 특성, 입자의 크기에 따라 재료가 가지는 한계를 호안 재료의 부피 변화인 토양 유실율을 이용하여 연구를 진행하였으며, 재료의 안전성에 대한 평가를 통해 하천설계 및 피해복구 시 활용할 수 있는 기초자료로 활용하고자 한다.

검색어 : 세굴, 유실, 한계유속, 한계소류력, 토양 유실율, 안정성

* 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 박사과정 (Myongji University · gwangsoo5180@naver.com)

** 인제대학교 환경공학과 박사 (Inje University · jdonggue@naver.com)

*** 중신회원 · 교신저자 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Myongji University · ydkim@mju.ac.kr)

**** 중신회원 · 서울대학교 건설환경공학부 부교수 (Seoul National University · dryspark@snu.ac.kr)

Received October 30, 2019/ revised November 14, 2019/ accepted December 23, 2020

1. 서론

하천은 시공간적 변화가 끊임 없이 일어나며, 하천관리의 허용 범위 내에 있을 경우에는 문제가 되지 않지만 최근 우리나라에서 하천 및 유역 환경이 급격히 변화하면서 하상이 현저하게 변하고 있는 추세이다(Lee et al., 2007). 이러한 변화는 하상재료가 하천의 상류 또는 유역으로 부터 유입이 되어 퇴적이 되며, 유하하는 유량에 따라 하상재료의 종류나 크기 등이 변화할 수 있다(Lee and Son, 2011). 이러한 하상의 변화에 영향을 미치는 주요인자는 하천의 유량 및 유속, 하상재료의 종류 및 대표입경, 하상 경사등이 있으며, 국내 하천은 일반적으로 모래, 자갈하상으로 이루어진 충적하천으로 구성되어 있다. 이러한 하천은 홍수시 하상재료의 변화에 영향을 미치는 힘을 산정하는 대표적인 값으로 소류력을 사용하며, 이런 소류력을 저항하는 요소는 하상재료의 단위중량, 대표입경, 재료의 특성과 관련있다. 따라서, 흐름에 따른 소류력과 하상재료의 분포가 서로 연관성을 가지게 되는데 물과 토양의 경계인 하상을 쓸어내리는 소류력이 강한 지점에 존재하는 하상재료의 입경은 크고, 반대로 소류력이 약한 지점에서의 입경은 작은 경향이 있다(Lee et al., 2004). 이렇듯 하상재료의 단위중량과 입경은 소류가 이루어지는 한계조건에 영향을 미치는 인자로, 현재 까지 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 하상재료는 하도의 물리적, 생태적 특성을 지배하는 대표적인 인자로 의미가 있으나, 국내에서는 이와 관련된 연구가 미비한 실정이다(Lee et al., 2006).

또한, 제방이나 호안의 유수에 의한 하상재료의 유사 및 침식으로부터 보호하기 위해 설치되는 호안의 덮기 재료인 호안블록과 같은 콘크리트가 주를 이루고 있어 하천의 오염과 경관 훼손의 원인으로 지적되고 있으며, 이에 따라 최근 콘크리트재료의 단점을

보완한 다양한 재료들이 호안 덮기 재료로 대두되고 있으며(Kim et al., 2014), 최근 기후 변화에 따라 국내 하천의 급격한 유량의 증가로 하상에 많은 영향을 미치고 있으며 하상의 재료의 종류, 입자의 특성, 입자의 크기에 따라 재료가 가지는 한계 유속과 한계 소류력의 영향력이 다르기 때문에 본연구에서는 하상재료의 대표 입경과 특성에 대한 재료의 한계 유속, 한계 소류력에 대한 친환경적 재료인 Biopolymer를 사용하여, 대상 재료의 상태 변화를 판단하는 안정성을 평가를 위해 본 연구를 진행하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용한 인제대학교에서 개발한 무경사형 고속수로 (Park et al., 2019)의 제원은 가로 1.5 m, 세로 0.95 m, 높이 2.4 m의 유량 공급을 위한 수조와 총 길이 10 m, 폭과 높이는 각각 0.3 m인 수로가 결합된 개수로 형태의 실험실 규모 무경사 고속수로 (Fig. 1)에서 진행되었다. 구현 가능한 최대유량과 유속은 각각 0.3 CMS 및 6.0 m/s 까지 구현이 가능하다. 고속수로에 유입되는 유량은 초음파 유량계(Ulso Flow 309S)(Fig. 2(a))를 통해 측정하였다. 수로내 유체의 흐름을 안정화구간을 구성하였고, 해당 구간은 유출유입 부분으로부터 3 m 지점으로 설정하여 총 4 m구간에서 연구를 진행하였다. 흐름의 수리특성을 측정하기 위해 고속수로에 초음파 수위계(Fig. 2(b)) 5개를 흐름의 안정화 시작부에서 부터 총 4 m 구간에 3 m, 4 m, 5 m, 5.6 m(재료포트 삽입부), 7 m 지점에 각각 설치하여 수위변화를 측정하였다.

본 연구에서는 실제 하천 제방에서 사용되고 있는 자연 재료(Fig. 3)와 친환경 신소재인 Biopolymer를 이용하여 하상재료를 구성하고 유속 및 소류력에 의한 토양유실을 통해 평가하였으며, 이 고분자

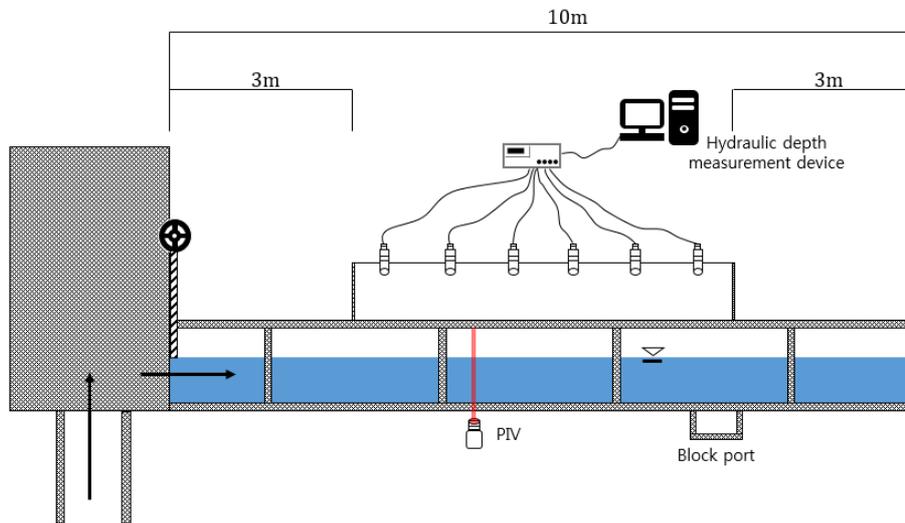
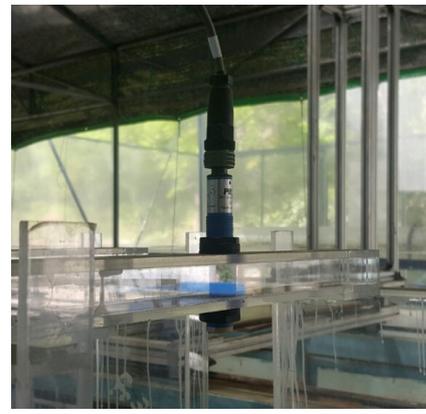


Fig. 1. Mimetic Diagram of Non-Slope High-Speed Channel

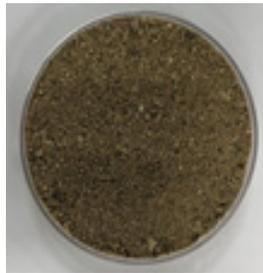


(a) Ultrasonic Flowmeter (Ulso flow-308)



(b) Ultrasonic Level Gauge (UA30CLD)

Fig. 2. Real-Time Measuring Device (Kim et al., 2019)



(a) Sand Sample



(b) Clay Sample

Fig. 3. Experimental Material

Biopolymer는 표면의 이온특성으로 인해 점토질 입자와 직접적인 결합을 형성하거나, 단량체(monomer)간 결합을 통해 직물형태의 매트릭스를 형성하여 흙의 강성과 강도를 증진시킨다(Chang et al., 2016).

각 재료에 대한 특성 및 입자크기 등을 분석하고 두 재료를 적절한 비율로 섞어 실험을 진행하였으며, Figs. 4(a)~4(e)와 같이 SD 01의 경우 모래 100 %, SC 02의 경우 모래 75 %, 황토 25 %, SC 03은 모래 50 %, 황토 50 %, SC 04의 경우 모래 25 %, 황토 75 %, CL 05는 황토 100 %의 비율로 나누어 총 5개의 시료를 만들어 본연구의 재료로 사용하였다.

또한 선정된 재료에 대한 정확한 체시험 분석을 하기 위하여 흙의 입도시험법 KS F 2301의 기준에 따라 건조기를 사용하여 110±5 °C에서 18~24시간 완전건조시킨 시료를 이용하여 미국 표준체 중 #4, #10, #20, #40, #60, #80, #200번체 7개를 이용하여 체분석(Fig. 5)을 실시하였다.

본 실험을 진행하기 위해 재료의 다짐은 실험 재료를 구성하는데 매우 중요한 부분으로 표준 다짐 시험법 KS F 2312를 기반으로 재료를 다짐하였으며 다짐율은 90 % 이상으로 구성하였다. 본 실험에 사용하는 포트는 무경사형 고속수로에 다짐재료를 삽입하기

위해 표준 다짐 시험법의 원형 몰드가 아닌 직사각형 모양의 포트(Fig. 6)를 삽입하기 때문에 표준 다짐 시험법의 기준의 원형몰드를 연구시설의 제원에 적용하여 직사각형 모양의 몰드로 구성하였다. 재료는 3층으로 나누어 다짐(Fig. 7)하여 실험을 진행 하였다.

재료를 다짐 한 후 강도를 증진시키기 위해 재료를 건조시킨 후 실험을 진행하였으며, 재료의 건조 후, 모래는 비점착성 이기 때문에 건조를 시켜도 균열이 발생하지 않았지만, 황토의 경우 강한 점착성으로 인해 건조 시 재료에 건조균열이 발생하였다(Fig. 8).

균열이 발생한 재료를 실험에 사용 할 경우 균열부위에서 재료 입자의 세굴이 아닌 블록형태의 탈락현상이 발생한다. 이러한 형태의 재료유실이 발생할 수 있기 때문에 정확한 유실매커니즘을 재현하기위해 층다짐을 통해 균열을 없애고 실험조건을 구성하였다. 재료의 유실 측정 방법은 Han et al.(2016)에 제시한 토양 손실물에 대한 세굴 깊이는 각 실험 실행 전후의 세 지점에서 모래 표면 측정기(KENEK, WHT-60)를 사용하였다. 본 연구에서는 제시된 토양 손실물 측정방법을 바탕으로 무경사형 고속수로에 재료포트를 삽입 후, 재료의 유실을 측정하기 위해 40개 측정지점(Fig. 9) 마다 초음파 수위계를 이용하여 유하 전 재료의 위치 측정하고 재료의 유실이 일어난 뒤 다시 동일 지점에서 재측정

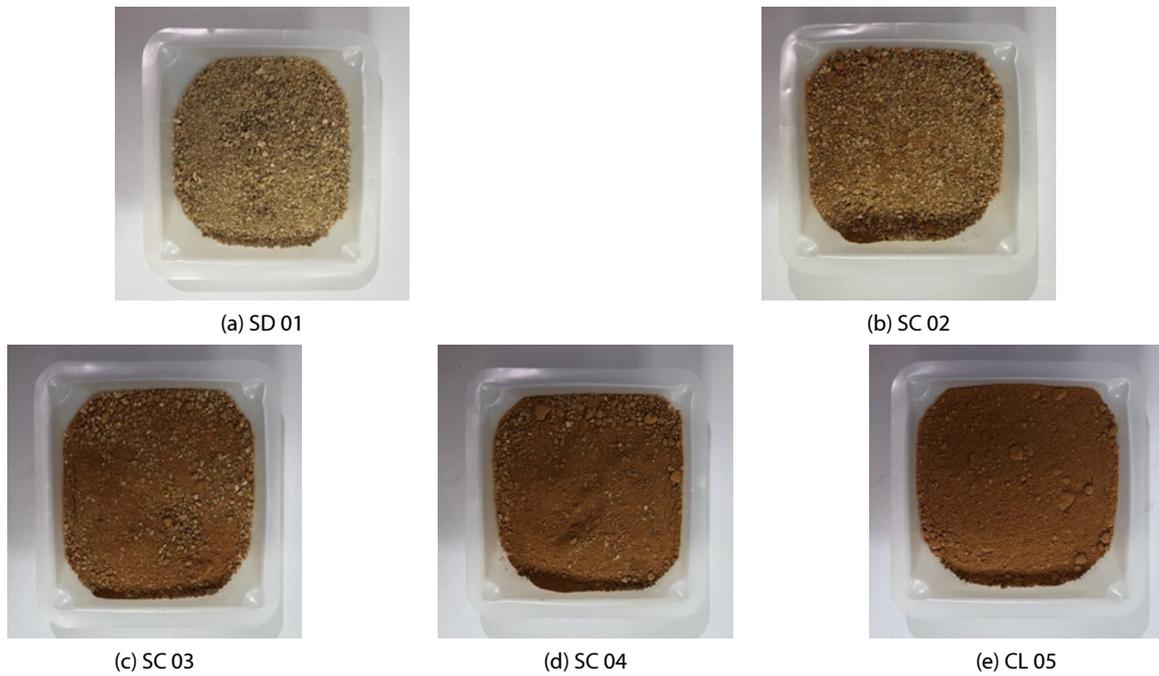


Fig. 4. The Sample of This Study



Fig. 5. Analysis of Each Sample



Fig. 6. Rectangular Material Port (12*16*16 cm)

하여 유하 전후의 위치 차이통해 재료의 변화량을 비교하였으며, 유실 정도의 데이터를 공간분포를 2차원과 3차원 분포도를 도출하였다.

3. 실험 결과

체 분석을 통해 각 시료 별로 입자의 크기별로 나누어 체 분석을 통해 각 시료를 Table 1과 같은 잔량을 측정하였다. 이후 입자의 잔유량을 통해 체 크기에 대한 누가 통과율을 산정하여 Table 2에 나타내고 입도 분포곡선을 구하였다.



Fig. 7. Material Tamped Method

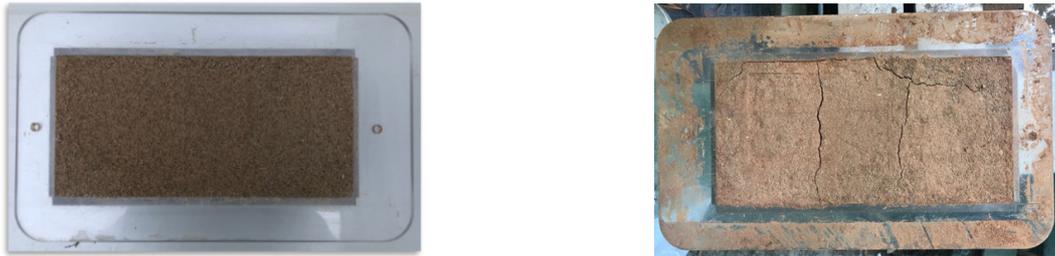


Fig. 8. Dessication Cracks of the Material

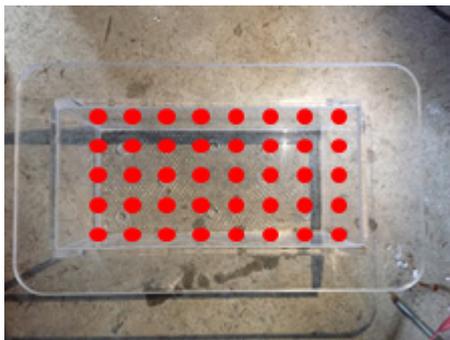


Fig. 9. Scour Measurement Point

입도 분포 곡선(Fig. 10)에서 회색 파선의 경우 하천설계기준에 제시되어있는 1등급시료를 표시하였으며, 검은색의 파선은 2등급 시료, 검은색 점선은 3등시료로 표시하였다. 하천설계기준에 제시 되어 있는 재료에 대한 등급에 비교했을 경우 본 연구에서 진행된

재료는 2등급과 3등급 사이의 재료로 판단되었다.

입도분포곡선도를 통해 시료에 대한 균등 계수 및 곡률 계수를 Table 3에 나타내었다. 입도분포는 자갈의 경우 균등 계수가 약 4보다 높아야 되고, 모래의 경우 6보다 높아야 된다. 곡률 계수의 경우 1~3사이가 되어야 흙의 분포가 좋은 흙으로 분류되며, 본 실험의 결과 SD 01과 SC 02의 경우 균등 계수가 각각 4.183, 5.467로 균등 계수가 6보다 낮게 나왔으며 곡률계수는 모두 1보다 높은 값을 보였다. SC 03의 경우 균등계수와 곡률계수가 각각 7.083, 1.318로 입도 분포가 좋은 흙의 값에 포함이 되었다. SC 04의 경우 균등계수와 곡률계수가 각각 5.573, 0.866으로 분포도가 좋은 흙의 값보다 둘다 낮은 결과 값을 보였으며, CL 05의 경우 균등계수가 6.788, 곡률계수가 0.688로 균등계수는 좋았으나 곡률 계수가 낮은 값을 보였다. 따라서 SC 03이 본 연구의 Sample 중 가장 입도 분포가 좋은 재료 였으며 반면, SC 04가 입도 분포가 가장 좋지 않은 재료로 판명되었다.

Table 1. Residual Results for Each Sample

Sieve number	Sieve diameter (mm)	Residual quantity (g)				
		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
4	4.750	0	0	0	0	0
10	2.000	5.24	6.11	5.68	4.63	12.42
20	0.850	46.19	41.89	32.16	29.07	21.43
40	0.425	30.00	26.79	23.09	21.46	17.12
60	0.250	12.42	11.99	12.50	11.58	11.06
100	0.180	4.73	7.11	11.07	15.07	16.04
200	0.075	1.26	3.32	10.46	15.29	16.23
		0.43	2.68	4.80	2.53	5.56

Table 2. Fluctuation Rate Results for Each Sample

Sieve number	Sieve diameter (mm)	Fluctuation rate (%)				
		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
4	4.750	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
10	2.000	94.77	93.88	94.31	95.35	87.56
20	0.850	48.71	51.95	62.07	66.17	66.10
40	0.425	18.79	25.13	38.92	44.64	48.96
60	0.250	6.40	13.12	26.39	33.01	37.88
100	0.180	1.69	6.01	15.30	17.89	21.82
200	0.075	0.43	2.68	4.81	2.54	5.57
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

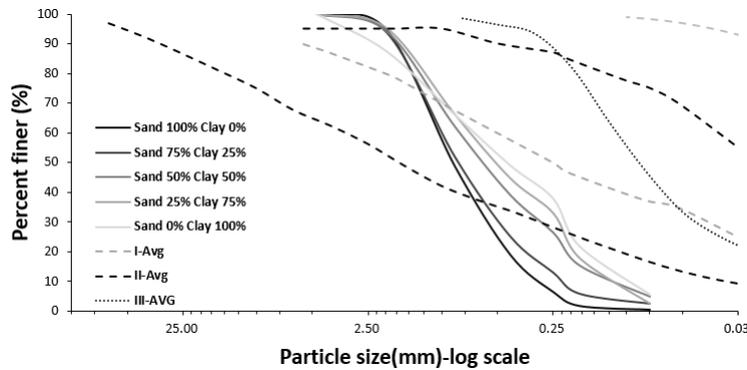


Fig. 10. Grading Curve

Table 3. Uniformity Coefficient and Coefficient Curvature for Each Sample

Sample number	Uniformity coefficient	Coefficient curvature
SD 01	4.183	1.116
SC 02	5.467	1.260
SC 03	7.083	1.318
SC 04	5.573	0.866
CL 05	6.788	0.688

본 연구에 사용된 Biopolymer은 분말형태로 존재하기 때문에 재료와 혼합하기 위해 Biopolymer를 물과 혼합하여 재료를 구성했다. 실험을 진행하기 위해 직사각형 포트에 Biopolymer와 혼합한 시료를 다졌으나, 완전건조 시 Clay의 특성과 Biopolymer의 점성 때문에 재료를 건조균열이 심하게 발생하였다. 건조균열이 발생된 부분은 최대한 균열이 발생한 부분을 다시 다짐을 하여 균열이 발생한 부분이 없도록 실험을 진행하였다. 실험결과는 Table 4와 같이 나타났고, 모든 시료에 있어 유속이 0.35 m/s보다 낮을 경우 재료의 유실이 발생되지 않았다. 실험 결과를 2차원과 3차원으로 가시화하여 Figs. 11~18과 같이 나타내었다.

SD 01는 Case 1 일때 유속이 0.34 m/s이고 Shear stress가

0.381 N/m² 일때 재료의 유실이 발생되지나지 않았다. Case 2 일때 유속이 0.57 m/s이며 Shear stress가 1.053 N/m² 일때 20.8 % 재료의 유실이 일어났으며 최대 세굴심은 5.7 cm, 평균 세굴심 3.3 cm은 로 나타났다. 전체 케이스에 대한 실험결과는 다음과 같다. 평가 재료의 구성 중 유실된 재료를 Soil Loss를 이용하여 구성 재료의 세굴 발생 유무를 판단하였다. 초기 구성 재료의 부피 SL_0 에 대해 실험조건에 해당하는 수리조건에서 실험을 진행한 시간이 지난 이후 잔류 재료의 부피 SL_i 를 이용하여 토양 유실률 ($SL_i/SL_0, \%$)을 산정하였다.

초기 구성재료의 부피 대비 유실 이후의 재료 부피를 다음과 같은 결과를 통해 나타내었다.

Table 4. Experiment Scouring Result (Sand, Clay)

Sample number	Case number	Q (m ³ /s)	H (m)	V (m/s)	Froude number	Shear stress (N/m ²)	Soil Loss (%)
SD 01	Case 1	0.017	0.166	0.34	0.2664	0.381	0.0
	Case 2	0.032	0.184	0.57	0.4243	1.053	20.8
SC 02	Case 3	0.017	0.170	0.33	0.2555	0.357	0.0
	Case 4	0.034	0.193	0.59	0.4288	1.120	13.8
SC 03	Case 5	0.019	0.210	0.30	0.2090	0.286	0.0
	Case 6	0.019	0.145	0.44	0.3689	0.652	1.4
	Case 7	0.037	0.210	0.59	0.4111	1.107	17.0
SC 4	Case 8	0.020	0.250	0.27	0.1724	0.226	0.0
	Case 9	0.020	0.150	0.46	0.3792	0.708	5.0
	Case 10	0.035	0.175	0.61	0.4566	1.215	5.0
	Case 11	0.100	0.071	2.44	2.4450	23.088	38.0
CL 05	Case 12	0.018	0.220	0.28	0.1906	0.248	0.0
	Case 13	0.019	0.135	0.47	0.4084	0.753	5.1
	Case 14	0.035	0.210	0.56	0.3902	0.997	9.6

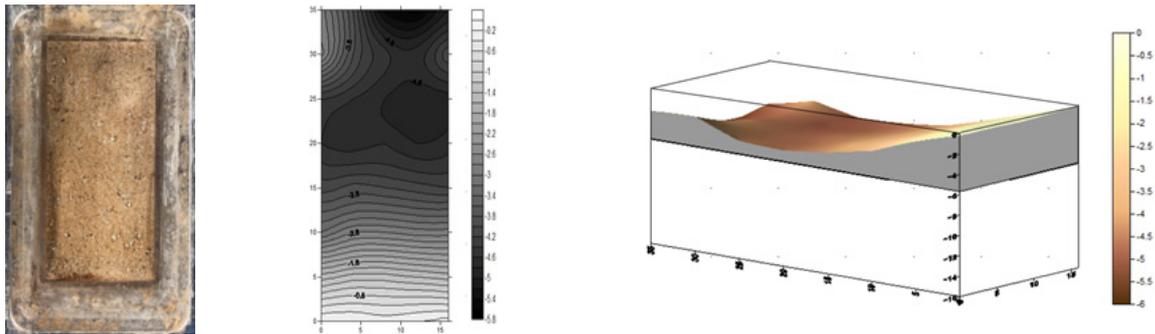


Fig. 11. Scouring 2D and 3D Image of Case 2

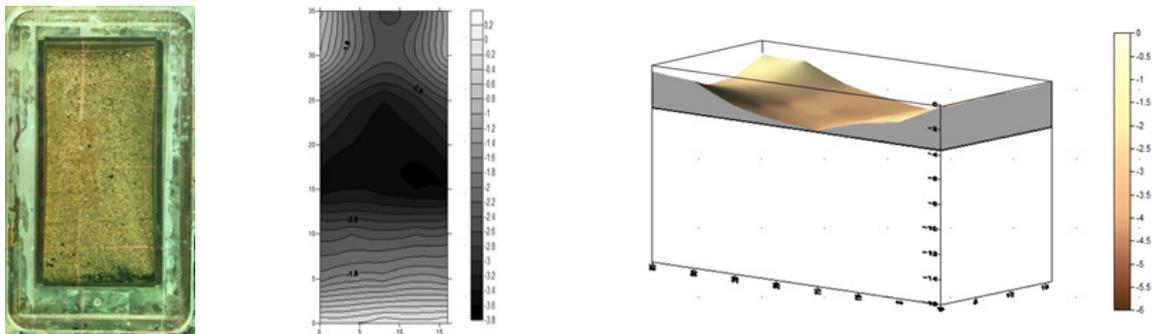


Fig. 12. Scouring 2D and 3D Image of Case 4

SC 02는 Case 3 일때 유속이 0.33 m/s이고 Shear stress가 0.357 N/m² 일때 재료의 유실이 발생되지 않았다. Case 4 일때 유속이 0.59 m/s이며 Shear stress가 1.120 N/m² 일때 13.8 % 재료의 유실이 일어났으며 최대 세굴심은 3.6 cm, 평균 세굴심은 2.2 cm로 나타났다.

SC 03는 Case 5 일때 유속이 0.30 m/s이고 Shear stress가 0.286 N/m² 일때 재료의 유실이 발생되지 않았다. Case 6 일때 유속이 0.44 m/s이며 Shear stress가 0.652 N/m² 일때 1.4 % 재료의 유실이 일어났으며 Case 7 일때 유속은 0.59 m/s, Shear stress가 1.107 N/m² 일때 17.0 % 재료의 유실이 일어났으며

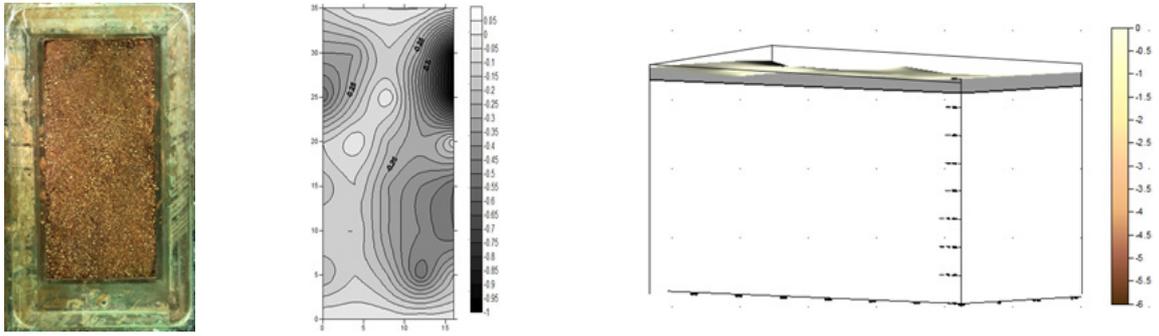


Fig. 13. Scouring 2D and 3D Image of Case 6

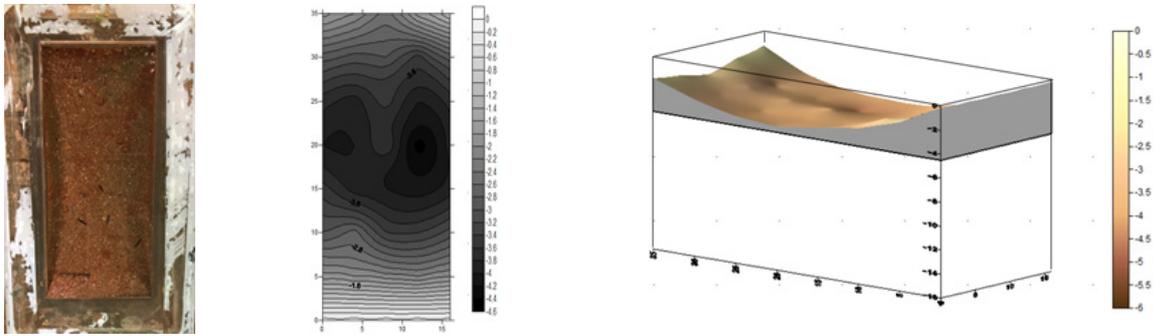


Fig. 14. Scouring 2D and 3D Image of Case 7

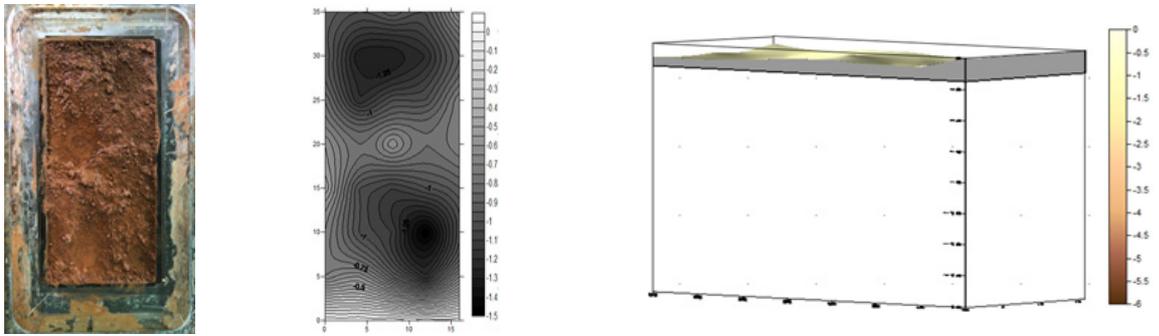


Fig. 15. Scouring 2D and 3D Image of Case 9

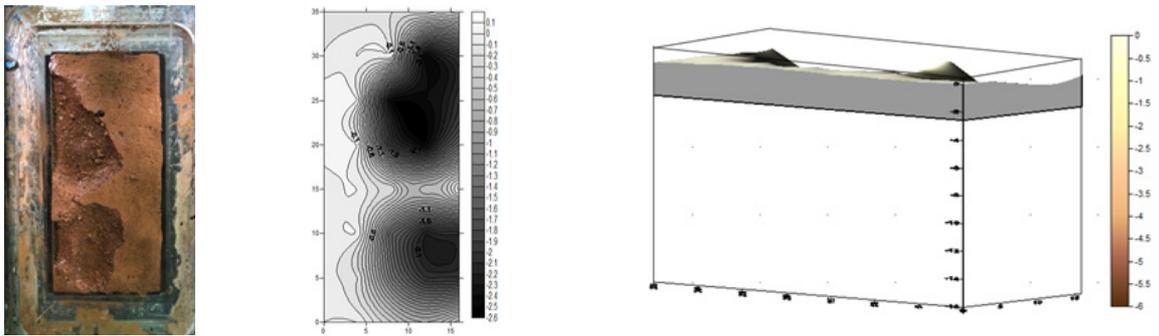


Fig. 16. Scouring 2D and 3D Image of Case 10

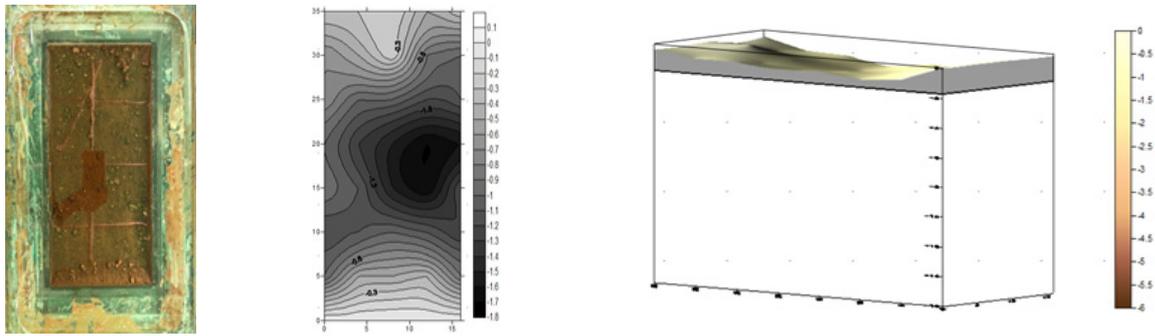


Fig. 17. Scouring 2D and 3D Image of Case 13

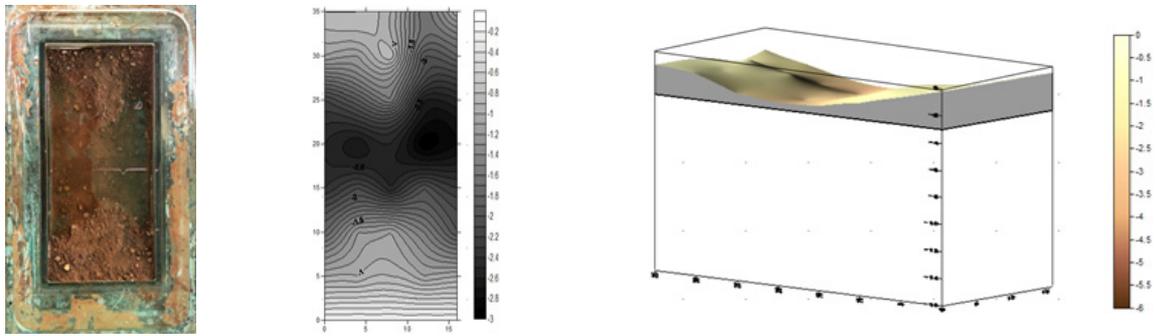


Fig. 18. Scouring 2D and 3D Image of Case 14

Table 5. Experiment Scouring Result (Sand, Clay+Biopolymer)

	Case	Q (m ³ /s)	H (m)	V (m/s)	Froude number	Shear stress (N/m ²)	Soil Loss (%)	Critical velocity (m/s)	Critical Shear stress (N/m ²)
SD 01	Case 1	0.017	0.166	0.34	0.266	0.381	0.0	0.45	0.704
	Case 2	0.032	0.184	0.57	0.424	1.053	20.8		
SD 01 + Bio polymer	Case 1-1	0.051	0.210	1.05	0.838	3.505	3.0	0.83	12.698
	Case 1-2	0.075	0.145	1.71	1.324	9.841	7.0		
	Case 1-3	0.077	0.210	2.15	1.772	14.694	12.0		
SC 04	Case 8	0.020	0.250	0.27	0.172	0.023	0.0	1.97	5.022
	Case 9	0.020	0.150	0.46	0.379	0.072	5.0		
	Case 10	0.035	0.175	0.61	0.457	0.124	5.0		
	Case 11	0.100	0.071	2.44	2.445	2.244	38.0		
SC 04 + Bio polymer	Case 2-1	0.074	0.102	2.44	2.445	21.377	3.0	-	-
	Case 2-2	0.100	0.100	3.33	3.366	39.972	3.0		

최대 세굴심은 4.5 cm, 평균 세굴심은 2.7 cm로 나타났다.

SC 04는 Case 8 일때 유속이 0.27 m/s이고 Shear stress가 0.226 N/m² 일때 재료의 유실이 발생되지 않았다. Case 9 일때 유속이 0.46 m/s이며 Shear stress가 0.708 N/m² 일때 5 % 재료의 유실이 일어났으며 Case 10 일때 유속은 0.61 m/s, Shear stress가 1.215 N/m² 일때 5.0 % 재료의 유실이 일어났으며 유속을 계속

증가시켜 Case 11 일때 유속은 2.44 m/s, Shear stress가 23.088 N/m² 일때 38.0 % 재료유실이 관측되었다.

CL 05는 Case 12 일때 유속이 0.28 m/s이고 Shear stress가 0.248 N/m² 일때 재료의 유실이 발생되지 않았다. Case 13 일때 유속이 0.47 m/s이며 Shear stress가 0.753 N/m² 일때 5.1 % 재료의 유실이 일어났으며 Case 14 일때 유속은 0.56 m/s, Shear

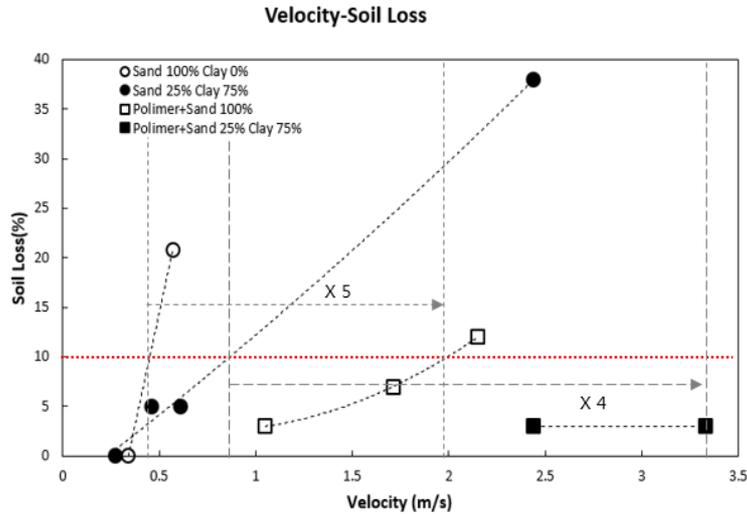


Fig. 19. Relationship between Soil Loss and Velocity for Materials Result

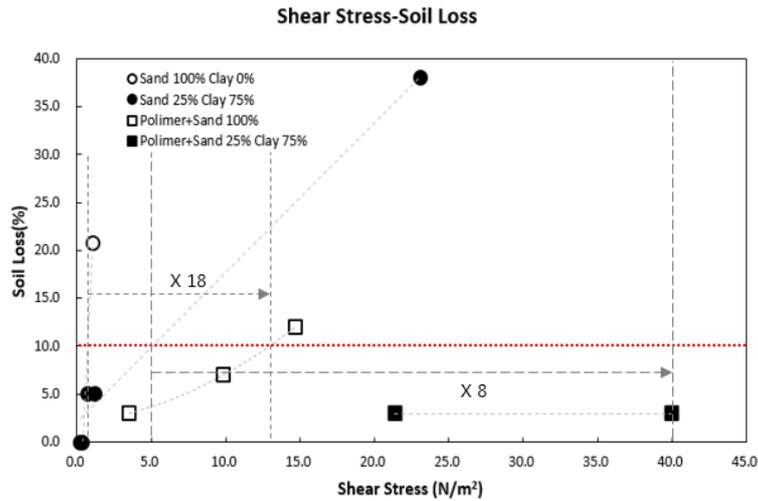


Fig. 20. Relationship between Soil Loss and Shear Stress for Materials Result

stress가 0.997 N/m² 일때 9.6 % 재료의 유실이 일어났으며 최대 세굴심은 3.0 cm, 평균 세굴심은 1.5 cm로 나타났다.

본 연구에서는 재료의 유실이 가장 많이 일어나는 SD 01과 재료의 유실이 가장 적게 일어나는 SD 04의 기초재료와 Biopolymer의 혼합한 재료의 강도증진을 확인하기 위해 추가 실험을 진행하였으며 결과는 Table 5에 나타내었다. SD 01에 Biopolymer을 혼합했을 경우 유속이 4배, Shear stress가 2배 증진효과를 보였으며, SC 04에 Biopolymer을 혼합하였을 경우 유속이 1.5배, Shear stress가 2배이상 증진 되었음에도 불구하고 재료의 피해가 발생되지 않는 효과를 보였다.

본 연구에서는 재료의 유실이 10 %이상 진행되었을때 재료의 피해가 발생되었다고 판단하였다. Critical Shear stress을 산정하

기 위해 10 %의 토양유실을 발생한 시점을 기준으로 선정하였다. 해당 기준과 본 연구의 결과를 Figs. 19 and 20과 같이 그래프로 나타내었다. 모래 100 %의 재료의 경우 Biopolymer와 혼합하여 재료를 구성하였을때 유속은 5배 증진 효과를 보였으며, Shear stress는 18배 이상의 강도증진을 확인할 수 있었다. 모래 25 %, 황토 75 %의 재료에 Biopolymer을 혼합하였을 시 유속이 4배 이상, Shear stress이 8배 이상 증진되었음에도 불구하고 재료의 파괴 변화가 관측되지 않았다.

4. 결론

본 연구는 하천설계기준에 하천설계 시 호안을 구성하는 자연형

재료로 제시되어 있는 모래와 점토를 이용하여 재료의 실험 전후의 부피변화에 따른 안정성 평가를 진행하였다. 평가를 위해 재료의 특성과 구성, 입도분포, 다짐법 및 Biopolymer 혼합시 일어나는 건조균열에 대한 표준시료 제작에 대한 연구를 진행하였다. 재료의 실험 전-후의 피해발생을 판단하기 위해 초음파 수위계를 이용해 재료의 유실 전후 위치차이를 통해 분석하였으며 각각의 데이터의 공간적 재료의 변화량을 분석하였고, 재료의 피해여부를 2,3차원 그래프로 나타내었다.

입도 분석을 위해 체분석을 통해 각 시료 별로 균등계수와 곡률계수를 구했으며 SC 03이 균등계수 7.083, 곡률계수가 1.318로 본 연구에서 가장 좋은 흙이었으며 모든 시료는 2~3등급사이의 시료로 판명되었다. SD 01의 경우 비점착성 재료인 모래로만 구성하였기 때문에 입자들의 응집력이 매우 약하고 세굴에 대한 방어능력이 현저히 떨어지기 때문에 0.5 m/s의 낮은 유속에도 유실이 발생되고 1.0 m/s의 유속에선 20 %이상의 재료가 유실되는 결과를 보였다. 반면 CL 5는 점착성재료인 Caly로만 구성하였을 때 유속이 0.56 m/s일때 재료의 유실이 9.6 %로 SD 01의 절반 정도만 유실이 진행되었다.

곡률계수와 균등계수가 가장 좋은 SC 03이 가장 유실이 적게 될 것이라 예상되었지만 Clay의 함유량이 더 많은 시료보다 더 많은 유실이 일어났다. 또한 Clay는 입자가 매우 강한 응집력 성질을 가지고 있기 때문에 함유량이 많으면 많을수록 재료를 다짐하는 부분에서 건조균열이 크게 발생하였다. 이 결과는 Shear stress에 의해 발생한 피해라고 판단되지 않고 단순히 건조균열로 부자연스러운 현상으로 판단되어, 추가 다짐을 진행하여 건조균열이 발생한 부분을 모두 제거하고 연구를 진행하였으나, 재료 특성상 해당 실험조건에 부적합한 것으로 판단되었다.

모래의 함유량이 적고 Clay의 함유량이 많은 SC 04에서 세굴에 대한 방어 능력이 가장 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 모래나 황토를 단일 재료만으로 구성할 경우 응집력이 매우 약하기 때문에 제방이 쉽게 붕괴될 수 있다. 특히 평상시 건조상태인 제방을 고려하여 평가재료를 완전 건조시킨 후 연구를 진행하였다. 이러한 조건은 유체 내에서의 토양 유실은 홍수 시 제방에 발생하는 현상을 재현하였다. 실제 국내하천 중 홍수터가 넓게 구성되어있는 하천은 모래와 같은 세굴에 취약한 재료로 구성되어있는 경우가 많기 때문에 이러한 연구결과는 실제 하천설계 시 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 반대로 응집력이 매우 강한 재료인 황토를 사용했을 경우 건조균열에 대한 문제가 발생하기 때문에 제방설계 시 이러한 문제점을 배제하기 힘들 것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 Biopolymer는 앞서 언급된 기초 재료와 혼합하기 위해 함수율이 불가피하게 높아지게 된다. 또한 Biopolymer 특성상 응집력이 매우 강하기 때문에 기초 재료와 마찬가지로 건조균열이 발생한다.

이러한 두 가지 이유로 건조균열이 발생했음에도 불구하고, SD 01에 Biopolymer를 혼합한 경우 혼합하지 않은 조건에 비해 유속 5배 이상, Shear stress 18배 이상 증가되었을 때 재료의 피해가 발생하였다. 마찬가지로 SC 04의 경우 Biopolymer를 혼합 했을 때 유속이 4배 이상, Shear stress가 8배 이상 증가되었음에도 불구하고 재료의 피해가 발생되지 않는 결과를 보여 충분한 Biopolymer가 세굴에 대한 방어능력의 증진효과를 검증하였다. 본 연구를 통해 하천 제방 설계에 사용되는 자연 재료와 Biopolymer를 사용함으로써 강도증진을 확인하였고, 입도분포를 통한 재료의 등급, 다짐도, 함수율 등의 표준화된 시험법과 적용방법을 제시하였다. 이러한 평가기법은 제방재료로써 활용되고있는 자연형재료를 다시 평가하고 보다 정확하고 효과적인 하천 설계에 적용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(20AWMP-B114108-05)에 의하여 수행되었으며, 이와 같은 지원에 감사드립니다.

References

- Chang, I. H., Cho, G. C. and Park, J. W. (2016). "New geotechnical engineering practices using microbial biopolymers." *Proceedings of the KSCE Conference*, KSCE, pp. 202-203 (in Korean).
- Han, E. J., Park, Y. S., Kim, Y. D. and Park, J. H. (2016). "A study on soil loss rate assessment of vegetation mat measures." *Journal of Hydro-Environment Research*, Vol. 10, pp. 21-31.
- Kim, G. S., Jung, D. G., Kim, Y. D. and Park, Y. S. (2019). "Effects of bed material on scouring under high-velocity flow conditions." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 52, No. 2, pp. 133-139 (in Korean).
- Kim, M. H., Lee, D. H. and Kim, Y. J. (2014). "A real scale experimental for evaluation of hydraulic stability on vegetation Mats." *Proceedings of the Korean Society of Hazard Mitigation Conference*, KSHM, pp. 481-481 (in Korean).
- Lee, D. H. and Son, M. W. (2011). "Investigation on mean diameter of bed material and relationship with tractive force in Korean rivers." *The Korean Geomorphological Association*, Vol. 18, No. 1, pp. 29-39 (in Korean).
- Lee, D. H., Son, M. W., Hwang, S. Y. and Kim, C. W. (2004). "Relationship of bed materials and nod-dimensional tractive force in the alluvial rivers." *Proceedings of the KSCE Conference*, KSCE, pp. 2104-2107 (in Korean).
- Lee, D. H., Son, M. W., Kim, M. H. and Kim, C. W. (2006). "Research on relationship of bed material and channel characteristics." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 613-617 (in Korean).

- Lee, S. H., Hwang, S. Y. and Park, J. M. (2007). "Understanding on characteristics of the sand bars' movement in the meandering reaches by a movable-bed experiment." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 1679-1683 (in Korean).
- Park, J. H., Kim, Y. D., Park, Y. S. and Jung, D. G. (2019). "Direct measurement of bed shear stress using adjustable shear plate over a wide range of froude numbers." *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 65, pp. 122-127.