



## Effects of bed material on scouring under high-velocity flow conditions

Kim, Gwang Soo<sup>a</sup> · Jung, Dong Gyu<sup>b</sup> · Kim, Young Do<sup>c\*</sup> · Park, Yong Sung<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Master's course, Environmental Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

<sup>b</sup>Ph.D Candidate, Environmental Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

<sup>c</sup>Associate professor, Environmental Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

<sup>d</sup>Associate professor, Lecturer in Civil Engineering, Dundee University, Dundee, Scotland UK

Paper number: 18-104

Received: 16 November 2018; Revised: 27 December 2018; Accepted: 27 December 2018

### Abstract

In this study, the degree of scouring according to the bed material according to the flow rate and the relationship between the flow velocity and the bed scouring were investigated in order to examine the operability of the revetment and embankment. The materials used in the experiment were sand and loess as materials used in the embankment. We measured the scouring of the material according to the change of the flow velocity by using the indoor high flow velocity experiment device and verified the flow rate. In this way, The purpose of this study was to compare and analyze changes in material before and after scouring, and compare basal scouring evaluation by bed material with high flow velocity. In case of sand, the cohesive force is very weak, so more than 40% of the material is lost even at less than 1.0 m/s. In the case of loess, less than 6% of the bed material is lost at more than 2 m/s. The reason why the material was lost was that the cohesion was so strong that the material was dried after the compaction and cracked. As a result, the material was lost from the part where the dry crack occurred. In this study, the composition and loss of bed materials were evaluated.

**Keywords:** Bed scouring, soil loss, high-velocity flow, bed material

## 고유속 흐름에서 하상재료에 따른 세굴 영향 연구

김광수<sup>a</sup> · 정동규<sup>b</sup> · 김영도<sup>c\*</sup> · 박용성<sup>d</sup>

<sup>a</sup>인제대학교 환경공학과 석사과정, <sup>b</sup>인제대학교 환경공학과 박사과정, <sup>c</sup>인제대학교 환경공학과(낙동강유역환경연구센터) 부교수,

<sup>d</sup>던디대학교 토목공학과 부교수

### 요 지

본 연구는 하상재료의 종류와 유속에 따른 세굴변화에 대한 연구를 진행하였고, 유속, 구성방법 및 재료와 세굴에 대한 상관관계를 정의하여 호안 및 제방의 운용성을 검토하고자 실험을 통한 연구를 진행하였다. 본 연구의 실험에 사용된 재료는 제방에 사용되고 있는 재료로 모래, 황토를 이용하였다. 실험실규모 고속수로에서 다양한 계측장비들을 이용하여 유속의 변화에 따른 재료의 세굴을 측정하였다. 이를 통해 세굴 전·후의 재료변화를 수치적으로 분석하였다. 고유속흐름에서 하상재료에 따라 세굴의 정도를 비교·평가하여 안정성에 대한 연구도 진행하였다. 실험 결과 모래의 경우 응집력이 매우 약하여 1.0 m/s 이하에서도 40% 이상의 재료가 유실이 되고 황토의 경우 모래보다 유속이 빠른 2 m/s 이상에서도 6% 이하의 재료가 유실이 되었다. 재료가 유실된 이유중 하나는 강한 응집력으로 건조균열이 발생하여 세굴에 취약한 결과를 보였다. 본 연구에서는 이러한 건조균열의 발생부터 재료가 유실되는 현상을 제거하는 방법부터 재료에 대한 구성과 유실정도를 평가 하였다.

**핵심용어:** 세굴, 유실, 고유속흐름, 하상재료

\*Corresponding Author. Tel: +82-55-320-3776

E-mail: ydkim@inje.ac.kr (Y. D. Kim)

## 1. 서론

최근 기후 변화에 따라 국지성 집중호우가 많아지고, 순간적으로 유량이 급격히 증가하여 제방의 침식 또는 하상에 여러 변화가 일어나고 있다. 이러한 문제가 제방 붕괴에 영향을 미치기도 하는데, 일반적으로 제방 붕괴의 요인은 월류, 침식, 파이프 및 누수 등이 있으며, 그로 인해 인명 및 재산 피해가 빈번히 일어나고 있다. 2002년 낙동강 홍수피해 조사보고서(Han *et al.*, 2002)에 피해 사례들에 보면 피해 2002년 8월 8일 가천제가 붕괴되었으며 제방의 길이 약 20m가 파괴되면서 제 내지가 침수되었다. 신반천의 광암제의 붕괴로 인해 약 80 ha의 농경지가 침수되고 13가구 112명의 이재민이 발생하였으며, 남강 백산제의 유실로 인해 약 320 ha 농경지가 침수되고 99가구 282명의 이재민이 발생하는 등 많은 인명 피해와 재산 피해가 일어났다. 이러한 제방의 붕괴는 재료의 유실로부터 일어났다. 하천제방의 축제 재료와 관련하여 1990년대까지는 하상토를 이용하여 제방공사를 시행하였으나, 최근 피해를 감안하여 다짐 및 재료관리가 어려운 하상토의 축제 재료의 사용을 원칙적으로 금지하고, 2002년 개정된 하천 설계기준을 통하여 하천제방의 축제재료로서 전단강도 및 투수특성이 양호한 양질토를 사용하여 시공토목 지침이 시달되고 있는 실정이다. 하천제방의 안정성 향상을 위해서는 양질의 성토재료 사용, 철저한 다짐관리, 적절한 수리구조물 및 차수벽 설치 등이 필요하며, 여기서 하천제방 축조를 위한 많은 양질의 성토재료는 시공 현장에서 쉽게 구할 수 없어 하천제방의 경제성 및 안정성에 있어서 가장 중요한 요인이다. 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 이미 안정적인 경제적인 하천제방 축조기술을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근 국내에서도 친환경적인 최적설계 기법의 확립을 위한 하상토 활용 하천제방 축조기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 따라서 경제적이고 안정적인 하천제방 축조를 위해서는 하상재료를 이용한 제방축조기술의 연구가 필수적이다(Kim *et al.*, 2006). 일반적으로 수중에서의 비점착성 입자의 이동은 입자의 중량과 입경 및 흐름특성에 의한 마찰속도에 영향을 받게 되며 하상의 입자가 받는 힘은 항력(drag force) 및 양력(lifting force)과 입자의 수중중량이다(Choi and Park, 2011). 모래 또는 자갈하상으로 이루어진 충적하천은 흐름에 따른 전단응력(shear stress)은 하상재료의 분포가 서로 연관성을 가지게 된다. 즉 물과 토양의 경계인 하상을 쓸어내리는 전단응력이 강한 지점에 존재하는 하상재료의 입경은 크고, 반대로 전단응력이 약한 지점에서의 입경은 작은 경향이 있다(Lee, 2004). 이렇듯 하상재료가 유실되는 데는 한계 유속과 한계 소류력이 밀접해있다. 이러한 한계 유속과 한계 소류력에 대한 재료의

안정성 평가를 진행하고자 본 연구를 진행하였다. 전단응력은 물체의 표면에 평행한 방향으로 작용하는 응력을 말한다. 움직이는 유체가 고체 면과 접촉하게 되면 유체의 점성에 의해 경계면에서 내부 저항을 받으며 흐르게 되는데 이때 경계면에서 작용하는 단위면적당의 마찰력을 전단응력이라 하며, 유체의 점성계수에 많은 영향을 받는다. 일반적인 전단응력 산정식은 다음 Eq. (1)과 같다(Forchheimer, 1914).

$$\tau = \frac{\gamma \cdot V^2 \cdot n^2}{R^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

위 식에서  $\tau$ 는 전단응력(shear stress),  $\gamma$ 는 유체의 비중,  $R$ 는 동수반경,  $n$ 는 조도계수이며  $V$ 는 유속을 말한다.

Han *et al.* (2013)은 길이 14 m, 넓이 1.2 m의 복단면 수로에서 실험이 수행되었다. 실험의 재료는 식생매트에 silt와 모래에 식생을 키워서 실험을 진행하였다. Kim *et al.* (2013)에서는 총 길이 6 m, 수로구간 5 m, 수로의 폭과 높이는 각각 0.3 m, 최대유속은 수평경사에서 2.8 m/s까지 구현이 가능한 실험실 규모의 수로로 실험을 수행하였다. 실험은 호안블록을 제작하여 사용하였으며 호안블록을 만든 때 사용한 사석의 직경은 5 mm, 13 mm, 20 mm에 파자마 열매에서 추출한 식물성 폴리우레탄을 이용하여 자연생태계에 악영향이나 토양과 물을 오염시키지 않는 무독성 접착제를 사용하였다. Jang *et al.* (2013)에서는 길이 12 m, 넓이 2 m의 가변형 경사수로에서 수행되었으며 수로는 평균입경 1.4 mm. 표준편차가 1.35인 균일사로 10 cm의 두께로 전체를 균등하게 채워 복렬사주를 재현하여 실험을 진행하였다.

본 연구와 기존 문헌의 큰 차이점은 다음과 같다. 먼저 Han *et al.* (2016)에서 식생매트를 이용하여 유속에 유실 정도를 실험하였으며, Kim *et al.* (2013)에서 자연친화적인 무독성 호안블록 등 호안공법을 사용하여 한계유속을 제시하였다. Jang *et al.* (2013)은 균일 사를 이용하여 유속에 대한 재료의 유실을 산정하였다. 본 연구는 기존 문헌을 참고하여 자연친화적인 재료를 사용하여 기존문헌에 제시되어있지 않은 한계 유속과 전단응력(shear stress)에 대한 단순 체제재료만을 이용하였다. 또한 경사가 없는 무경사에서 유속에 대한 재료의 유실정도를 평가하고자 실험을 진행하였다.

본 연구는 실제 하천을 구성하고 있는 재료와 전단응력(shear stress), 유속의 관계가 하상변동에 미치는 영향을 파악하고 세굴정도를 관찰, 분석하였다. 결과를 통해 재료 유실정도를 평가하여 홍수로 인한 제방 피해예방을 위한 기초자료로 기여하고자 실험을 진행하였다.

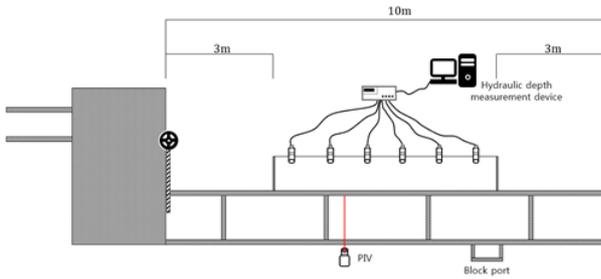


Fig. 1. Schematic diagram of the high-speed open channel

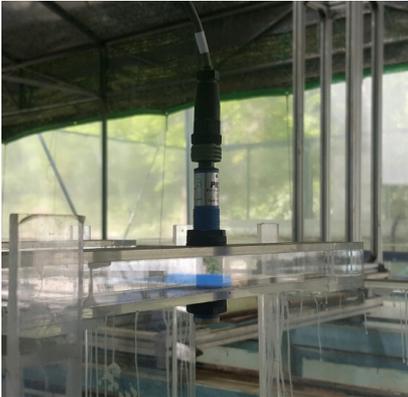


(a) Sand sample (b) Clay sample

Fig. 3. Experimental material



(a) Ultrasonic Flowmeter (Ulso flow-308)



(b) Ultrasonic level gauge (UA30CLD)

Fig. 2. Real-time measuring device



Fig. 4. Rectangular port (12\*16\*16 cm)

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 실제 제방에서 사용되고 있는 자연 재료를 이용하여 유속에 의한 하상재료의 구성과 토양유실 정도를 평가하였다. 본 연구에 사용한 장비는 실험실 규모의 무경사 고속수로(Fig. 1)로 총 길이 10 m 폭과 높이는 각각 0.3 m이며 재료를 삽입할 수 있는 구간은 총 길이의 7 m 지점이 되는 곳이며 최대유속은 5 m/s까지 구현이 가능하다. 수로의 유출·유입 부분으로부터 3 m 지점까지 안정화를 시킨 후 계측장비들을 통해 수위, 유속을 구했다.

실험에 사용된 측정 장비는 휴대용 초음파 유량계(Fig. 2(a))를 사용하였고 유속측정범위는 0~±15 m/s까지 측정이 되며 정밀도는±1%, 현장 교정시±0.5%이며 수위측정에 사용된 장비는 CARLO GAVAZZI사의 초음파 수위계(Fig. 2(b))를 사용하였으며 수위 100~1500 mm 측정이 가능하다.

본 실험에 사용한 재료는 모래, 황토로 기존 제방에 사용되고 있는 재료들로 선정을 했다(Fig. 3). 선정된 재료를 실험실 규모의 무경사수로에 결합하기 위해 흙 다짐 시험법 KSF 2312에 의거하여 다짐을 진행하였다. KSF 2312 시험의 다짐 장비는 원형 모양의 래머와 몰드를 사용하지만 본 실험에 사용되는 수로에 결합하기 위해 직사각형 모양의 실험포트(Fig. 4)를 이용하였다. KSF 2312 시험과 최대한 동일한 조건으로 Fig. 5과 같이 각층마다 함수율 10%이상으로 3층으로 나누어 다짐을 진행하였다.

또한 각층을 다짐할 때 마다 완전 건조시켜 재료를 건조균열을 방지하며 구성하였다. 하지만 재료의 다짐을 하고 완전 건조후 모래는 건조 수축 등의 특이현상이 일어나지 않았지만 황토의 경우 Fig. 6(a)처럼 황토의 응집력으로 인해 건조균열이 발생하였다. 건조 균열이 발생한 이유는 황토의 특성상 응집력이 매우 강해 발생한 것으로 판단된다. 건조 균열이 일어난 부분은 재다짐을 통하여 균열을 제거하였다.(Fig. 6(b))

재료에 대한 유속흐름에 따른 세굴 정도를 구하기 위해 다

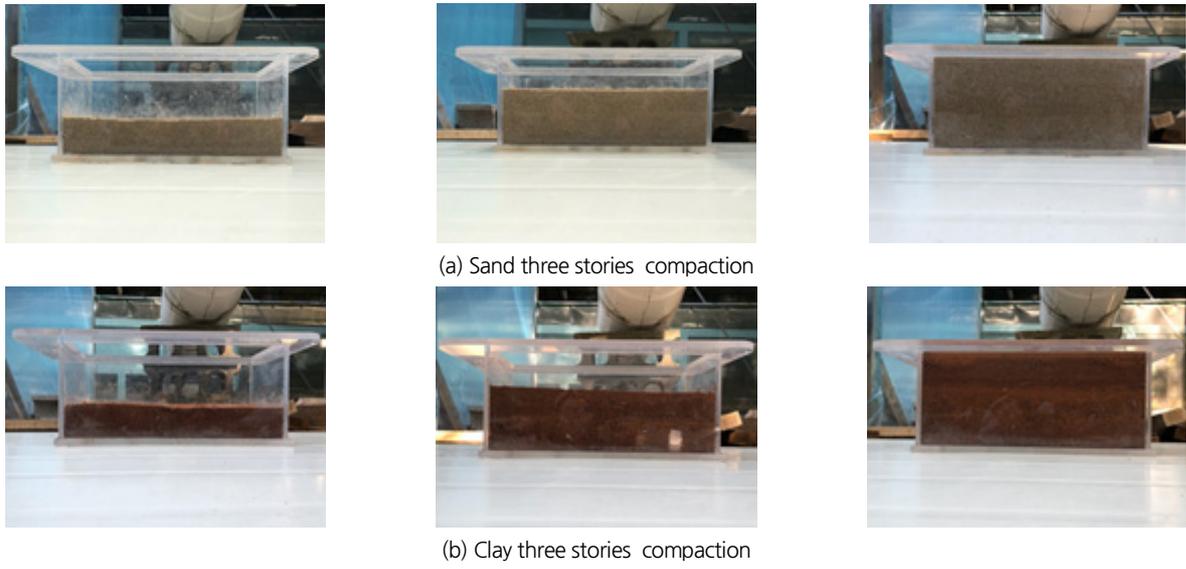


Fig. 5. Material three stories compaction

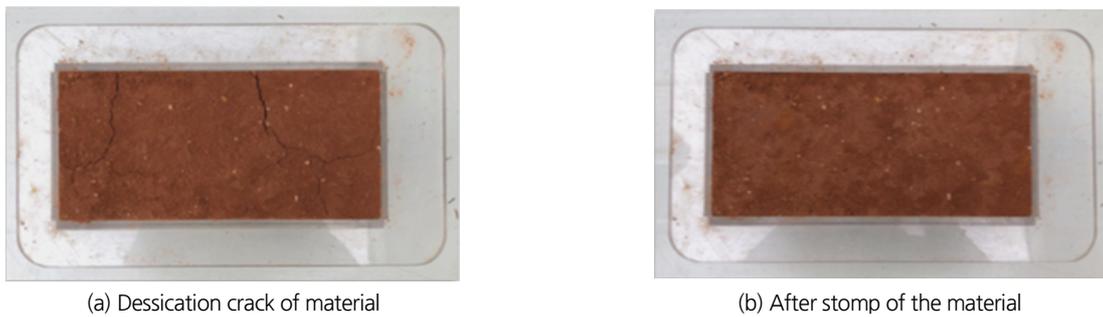


Fig. 6. Comparison of re-stomping of the material before and after the dessication crack

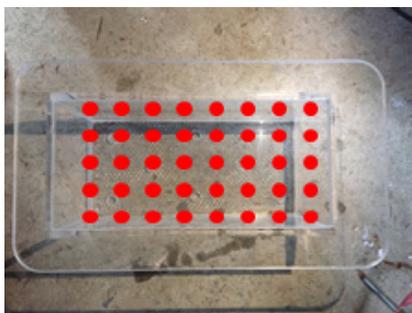


Fig. 7. Scour measurement point

진 재료를 수로에 결합하고 유사가 발생되기 전후를 Fig. 7에 나와 있는 40개의 측정지점(각 측정사이 거리 2 × 2 cm)에서 수위계를 이용하여 세굴심을 측정하였다.

실험 Case는 Table 1과 같이 실험을 진행했다. Case A의 경우 초기유량을 유하시키고 10분 후 세굴심을 측정하였고 Case B의 경우는 Case A의 실험을 진행한 후 10분 추가 실험을

Table 1. Experimental conditions

Material	Case Number	Q (m <sup>3</sup> /s)	V (m/s)	H (m)	Water Flow Time (min)	Fr (Froude Number)
Sand	Case 1-A	0.018	0.56	0.119	10	0.240
	Case 1-B	0.018	0.56	0.119	20	0.240
	Case 2-A	0.049	1.02	0.161	10	0.323
	Case 2-B	0.049	1.02	0.161	20	0.323
Clay	Case 3-A	0.049	1.34	0.122	10	0.560
	Case 3-B	0.049	1.34	0.122	20	0.560
	Case 4-A	0.076	1.75	0.149	10	0.599
	Case 4-B	0.076	1.75	0.149	20	0.599
	Case 5-A	0.100	2.22	0.151	10	0.749
Case 5-B	0.100	2.22	0.151	20	0.749	

진행하였다. 유속의 범위는 0.5~2.0 m/s 까지 재료의 유실이 발생할 때까지 유속을 점차 증가시키면서 실험을 진행하였다.

### 3. 실험 결과

초기 실험을 진행시 유량 0.049 m<sup>3</sup>/s에서 진행하였고, 모래의 경우 유속을 1.02 m/s로 유지시켜 10분간 유하시켰을 때 재료가 45.4% 유실되었고, 10분을 추가로 유하시킨 경우 48.5%의 재료가 유실이 되었다. 재료가 45% 이상 유실된 경우 대부분이 유실되었다고 판단하여 더 높은 유속조건에서의 실험 진행이 불필요하다고 판단되어, 더 낮은 유속조건에서 추가 실험을 진행하였다. 유실율이 45% 이하의 한계점을 산정하고자 점차적으로 낮은 유속의 추가 실험을 진행하였다. 모래의 경우 유속 0.56 m/s에서 10분간 유하시킨 경우 재료의 5.4% 유실이 되었

으며, 추가로 10분을 유하시킨 경우 30.9%의 재료가 유실되었다. 황토는 유량 0.049 m<sup>3</sup>/s에서 진행했을 때, 유속이 1.34 m/s에서 재료가 유실되지 않았다. 황토는 모래와 반대로 더 낮은 유속에서 재료가 유실되지 않을 것으로 판단 되어 유량을 증가시키며 추가 실험을 진행하였다. 추가 실험 결과 유속 1.75 m/s에서 재료가 4.5% 유실되었으며, 이는 재료를 다지고 건조시키는 과정에서 재료의 건조균열이 일어난 부분에서부터 유실이 된 것을 확인할 수 있었다. 2.22 m/s의 유속에서 재료가 5.6% 유실되고 더 이상 유실이 관측되지 않았다(Fig. 8). 이러한 결과는 건설교통부 기준 자연호안의 허용 소류력보다 낮은 소류력에서 세굴이 발생하는 결과를 보였다(Fig. 9)(Table 2).

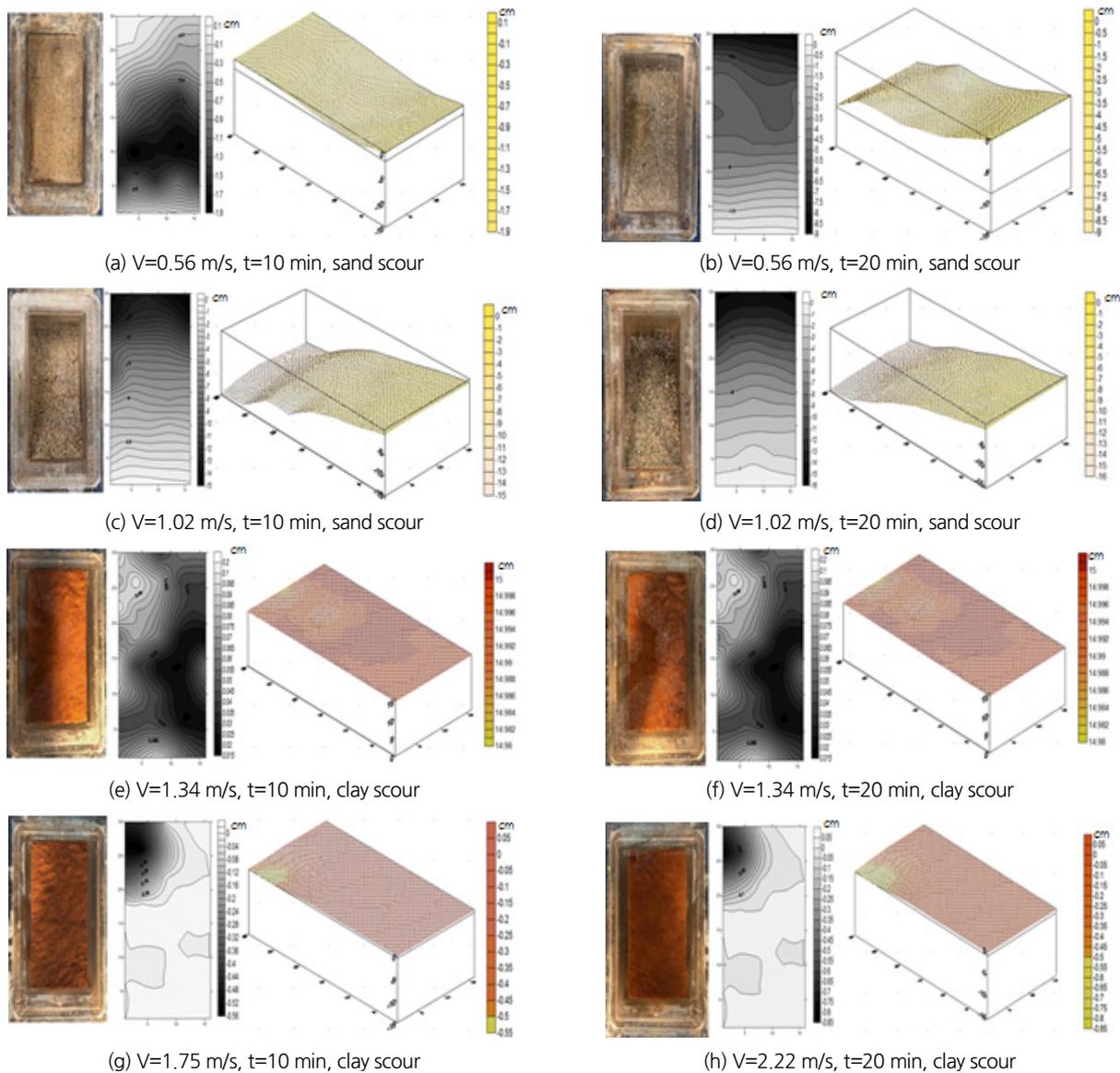


Fig. 8. Degree of scouring according to the change of flow rate according to material

Table 2. Experiment scouring result

Material	Case Number	Calculated Shear Stress $\tau_m$ (N/m <sup>2</sup> )	Soil Loss (%)	Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Permissible Shear Stresses on natural revetment (N/m <sup>2</sup> )
Sand	Case 1-A	0.223	5.4	1.0
	Case 1-B	0.223	30.9	
	Case 2-A	0.934	45.4	
	Case 2-B	0.934	48.5	
Clay	Case 3-A	1.329	0.1	6.0
	Case 3-B	1.329	0.5	
	Case 4-A	2.576	4.2	
	Case 4-B	2.576	4.5	
	Case 5-A	4.207	5.3	
	Case 5-B	4.207	5.6	

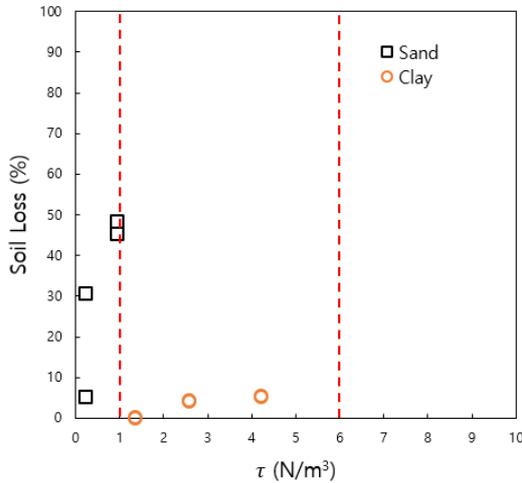


Fig. 9. Materials for different types of materials loss

### 4. 결론

본 연구는 하천설계기준에 하천설계 시 제방을 구성 재료로 제시되어 있는 모래와 황토질 재료를 이용해 실험을 진행하였다. 재료의 세굴 전·후를 수위계로 세굴심을 측정 후 결과를 분석하였으며, 각각의 결과값을 가시적으로 표현하기 위해 재료의 유실변화율을 2, 3차원 그래프로 작성하였다. 모래의 경우 응집력이 매우 약하고 세굴에 대한 방어능력이 낮기 때문에 저유속에서 세굴이 발생되고 건설교통부 기준 자연호안의 허용 소류력기준이 1.0 N/m<sup>3</sup> 이하로 제시되어있지만, 본 연구를 통해 산정된 전단응력(shear Stress)이 0.223 N/m<sup>3</sup>에서 30% 이상 재료가 유실되는 결과를 보였다. 또한 유속이

1.02 m/s 일 때 산정된 전단응력이 0.934 N/m<sup>3</sup>로 건설교통부 기준 자연호안의 허용 소류력과 비슷하지만 재료가 40% 이상 재료가 유실이 되어 단순히 모래만으로 제방을 구성하기 힘들 것으로 판단이 되었다. 건설교통부 기준 자연호안의 허용 소류력은 황토가 6.0 N/m<sup>3</sup>로 제시되어있지만, 유속 1.34 m/s, 전단응력 1.32N/m<sup>3</sup>에서는 재료의 유실이 발생되지 않았다. 1.75 m/s의 유속에서 2.576 N/m<sup>3</sup>의 전단응력이 발생할 경우 4.5%의 미미하게 재료가 유실되기 시작하였다. 재료의 유실이 발생한 부분은 황토의 특성상 응집력이 매우 강해 건조균열이 발생하였고 균열이 발생한 부분을 재다짐 했음에도 불구하고 균열이 발생한 부분에서부터 재료의 유실이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 제방을 축조할 때 황토만을 사용해서 제방을 구성하는 재료로 사용할 경우 건조균열에 대한 문제를 배제하기 힘들것으로 판단된다. 따라서 추가적인 문헌조사와 국내외 다양한 연구 사례를 조사하고 다양한 재료에 대한 연구뿐만 아니라 모래와 황토를 혼합하여 최적의 비율을 산정하고 제방설계 시 제방재료로 사용할 수 있는 비율을 산정하는 추가적인 연구가 필요하다 판단된다. 본 연구의 결과는 실제 하천과 차이가 있기 때문에 실제하천과 유사한 환경의 실험연구를 통해 제방 피해예방의 기초자료 및 설계에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(18 AWMP-B114119-03)에 의하여 수행되었으며, 이와 같은 지원에 감사드립니다.

### References

Choi, H. S., and Park, G. H. (2011) “Experimental formulae development of hydraulic stability for riprap.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 44, No. 6. pp. 449-459.

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.

Han, K. Y., and Seo, K. W., (2002). “August 2002 report on the flood damage survey in Nakdong River” *Korean Society of Civil Engineers*. Vol. 9, pp. 6-13.

Infrastructure and Transport of Korean government (2007). “manual of stream construction”. *Korean Water Resources Association*, pp. 3-25.

- Jang, C. L. (2013) "Dynamic characteristics of multiple bars in the channels with erodible banks." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 46, No. 1. pp. 25-34.
- Kim, J. M., Lee, D. Y., Choi, B. H., Kim, K. M., and Kim, H. S. (2006). "Evaluation of engineering characteristics of bed sediment in Nakdong River as fill material of levee." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, pp. 3975-3980.
- Kim, S. W., Koo, Y. M., Kim, Y. D., and Park, J. H. (2013). "An experimental study on hydraulic stability of non-toxic revetment block." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3. pp. 987-995.
- Lee, D. H., Son, W. M., Hwang, S. Y., and Kim, C. W. (2004). "Relationship of materials and nod-dimensional tractive force in the alluvial rivers." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, pp. 2104-2107.