

비점착성 하상에서의 두부침식 메커니즘 분석에 관한 실험 연구

지운^{1,2}, 장은경^{1*}, 강진욱^{1,2}

¹한국건설기술연구원 수자원·하천연구소

²과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과

Experimental Study on Mechanism Analysis of Headcut Erosion in the Noncohesive Sediment Bed

Un Ji^{1,2}, Eun-Kyung, Jang^{1*}, Jin-Wook, Kang^{1,2}

¹Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and
Building Technology

²Department of Construction Environment Engineering, University of Science and Technology

요 약 하천의 본류와 지류가 만나는 합류부 구간에서 시작된 두부침식은 시간에 따라 지류 상류로 전파될 수 있으며, 급격한 하상저하로 인해 지류에 설치된 수리구조물의 안정성을 위협할 수 있다. 이러한 두부침식의 피해를 사전에 방지하기 위해서는 발생원인과 그 메커니즘에 대한 정량적 분석이 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 개수로 실험 장치를 이용하여 비점착성 유사로 이루어진 하상에서의 두부침식에 관한 수리실험을 수행하였으며, 수리 조건에 따른 천급점 이동 및 최종 하상경사 변화 등을 분석하였다.

분석 결과, 상하류단의 유속차가 2.5배 큰 조건에서 천급점 이동이 약 1.5배 더 빠르게 진행되는 것으로 나타났으며 좌안과 우안에 비해 중앙의 침식 및 붕괴가 먼저 발생하는 것으로 나타났다. 또한 상·하류단 유속차가 클수록 두부침식 이동길이 길어지고 더 완만한 하상경사가 나타나는 것을 확인하였으며 본 실험에서는 수위차의 경우 유속차에 비해 상대적으로 두부침식 이동성 및 하상경사에 미치는 상관관계가 일정하지 않는 것으로 나타났다.

Abstract The headcut erosion at the confluence section of a mainstream and tributary can migrate up the tributary streams, and rapid degradation can threaten the stability of hydraulic structures installed in the channel. Therefore, quantitative analysis for the development and mechanism of headcut erosion is needed to prevent damage due to the headcut. In this study, hydraulic experiments for headcut erosion in the channel with noncohesive materials were performed and the knickpoint movement and final bed slope change were analyzed based on the different hydraulic conditions.

As a result, the knickpoint movement was 1.5 times faster when the difference in velocity between the upstream and downstream sections was 2.5 times greater and the central part of the cross-section was eroded and collapsed earlier than the left and right sides. The movement length of headcut erosion was longer and the final bed slope was milder as the velocity difference between the upstream and downstream sections was increased. This study showed that a correlation between the knickpoint movement and bed slope change by headcut erosion and the water level difference of upstream and downstream sections was not constant compared to the velocity difference.

Key Words : Bed Change, Channel Stability, Headcut, Hydraulic Experiment, Noncohesive Sediment

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Eun-Kyung Jang(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-910-0188 email: jang@kict.re.kr

Received September 12, 2014

Revised November 6, 2014

Accepted February 12, 2015

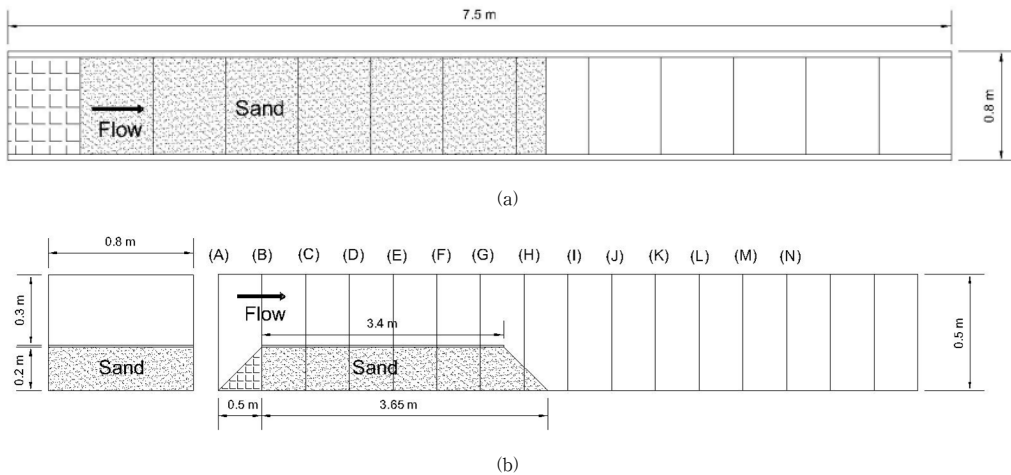
1. 서론

하천 합류부에서 지류와 본류의 하상고 차이 또는 유입유량에 따른 본류와 지류의 수면고 차이로 인해 하상의 급격한 지형변화가 발생할 수 있으며 이러한 변화는 시간에 따라 본류와 지류의 상류로 전파될 수 있다. 특히 합류부에서 지류 하도의 침식이 상류로 전파되는 것을 두부침식이라고 하며 이러한 두부침식의 상류 전파는 지류하천의 하상저하로 인한 수리구조물의 안정성 및 치수적인 문제에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 최근 하천정비를 목적 및 기후변화로 인한 잦은 홍수발생에 대비하기 위해 4대강 본류의 대대적인 준설이 수행되었으며, 이로 인한 본류 하상고 저하는 지류하천 하상에 두부침식과 같은 하상변동 문제를 발생시켜 지류하천 수리구조물에 피해를 입히거나 합류부 하상의 불안정한 상태를 야기할 수 있다. 특히 남한강과 금강천 합류부의 경우 지류 상류로 진행된 두부침식의 영향으로 금강교 안전에 문제가 되고 있으며[1], 낙동강의 병성천에서는 하상보호공, 제방, 제방도로, 어도, 문화광장 등이 침식되거나 유실 또는 붕괴되는 피해가 빈발하고 있다[2]. 따라서 이러한 두부침식의 피해를 사전에 방지하기 위해 상류에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 하도의 변화과정을 사전에 예측할 필요가 있다.

두부침식에 관한 연구로 [3]이 단차가 형성된 급경사 구간에서의 수리학적 흐름 계산 및 수리실험을 수행하였으며, 이를 토대로 두부침식 전개과정에 대한 기준을 제시하였다. [4]는 천급점 거동분석을 위해 비점착성 재료를

를 이용한 수리실험을 수행하였고 단차가 없어질 때까지 천급점 이동이 지속적으로 발생하는 것을 확인하였다. 또한 [5]는 개수로 상류의 인공 강우 실험 장치를 이용하여 집중 호우시 두부침식의 발달 및 진행과정을 분석하였으며 유량 증가에 따라 하류에서의 퇴적이 증가하고 경사가 완만해지는 것으로 나타났다. [6]은 1차원 하상변동 예측모형을 개발하여 천급점 이동과정을 모의하였으며 상류와 하류의 하상고가 낮아짐에 따라 전체 하상변동 구간도 길어지는 것으로 나타났다. 또한 두부침식의 수치모의 연구검증을 위해 수치모의 결과와 수리실험 결과를 비교분석하는 연구도 수행되었다. [7]은 2차원 하상변동 수치모의 결과와 [4]의 실험결과를 비교검증하였으며, 유량이 동일할 때, 두부침식은 초기에 빠르게 발생하지만 시간이 증가하면서 하상경사가 완만해지고 침식속도가 감소하는 것으로 나타났다.

이와 같이 두부침식의 거동을 분석하기 위해 다양한 방법을 활용한 연구가 수행되었으나 대부분의 연구에서 단면내 유속분포를 고려한 평면적 분석이 아닌 종단면에서의 분석이 주를 이루고 있어 하도의 좌안과 우안 및 중앙에서의 유속차를 고려하지 못하는 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 비점착성 모래 하상에서의 두부침식 수리실험을 통해 개수로 종단면뿐만 아니라 평면 분석 결과를 활용한 단면내 유속변화가 천급점 이동 및 최종 하상경사에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이러한 연구결과는 두부침식의 전반적인 메커니즘을 분석하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.



[Fig. 1] Open Channel for Headcutting Experiment
(a) Plane View (b) Side View

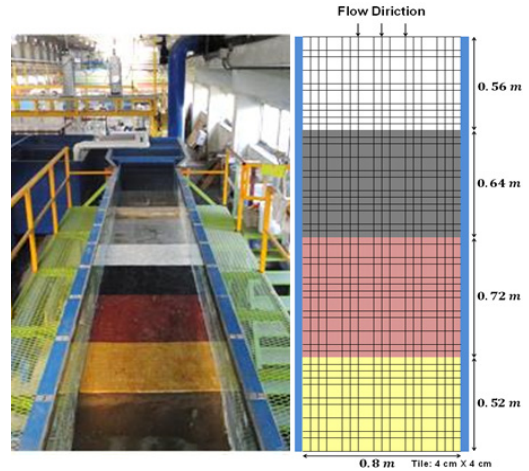
2. 수리실험 장치 및 실험 조건

본 실험에서는 두부침식 이동성 메커니즘 분석을 위해 수조 길이 7.5 m, 높이 0.5 m, 폭 0.8 m인 가변형 경사 수로를 사용하였다(Fig. 1). 개수로 상류단에는 고수조에 유입된 물을 받아 유량을 조절할 수 있는 0.48 m 사각 위어가 설치되어 있으며 수로의 끝에는 수위를 조절할 수 있는 수문이 설치되어있다. 본 실험에서는 유량과 수심을 실험수로에서 직접 측정 한 후 유속은 사각형 단면의 개수로 연속방정식을 이용하여 상류단과 하류단에 대해 각각 계산하였다.

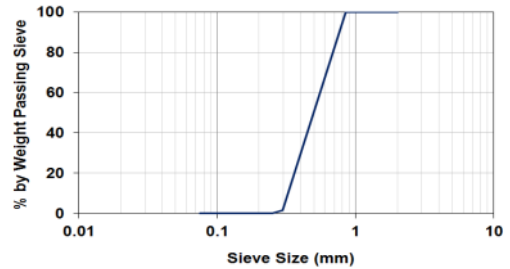
두부침식 천급점 이동을 재현하기 위하여 실험 조건의 유속을 견딜 수 있는 격자형태의 비침식성 레이어 타일을 Fig. 2와 같이 포설하였으며, 구간별로 4가지 색상을 적용하여 천급점 분석이 시각적으로 용이하도록 하였다. 상류단에는 흰색 280개의 타일을 0.56 m 포설하였으며, 검은색 타일은 320개 포설길이 0.64 m, 적색 타일 360개 포설길이 0.72 m, 황색 타일 380개 포설길이 0.52 m로 총 1,340개의 타일을 사용하였고 총 포설길이는 2.44 m로 하였다. 타일 포설길이는 색상별로 상이하나 이러한 실험조건이 실험결과에 미치는 영향은 없으며 물리적 의미를 포함하는 것은 아니다. 시험에 사용된 타일의 크기는 4 cm x 4 cm 정사각형으로 제작하였으며, 하상토는 중앙입경이 0.5 mm인 모래(Fig. 3)로 포설하였고, 포설 높이는 0.2 m로 하였다.

본 실험에서는 상류단 유량과 하류단 수위 조절을 통해 상·하류단 유속차 및 수위차가 하상경사와 시간에 따른 천급점 이동에 미치는 영향을 분석하였으며 실험조건

은 Table 1과 같다. CASE 1과 CASE 2는 시간에 따른 천급점 이동성 분석을 위해 유량을 고정한 후 일정한 시간동안 실험을 진행하였으며 CASE 3에서 CASE 13의 실험은 상·하류단 유속차 및 수위차가 천급점 이동과 하상경사에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험 조건이다.



[Fig. 2] Non-erosive Layer Blocks



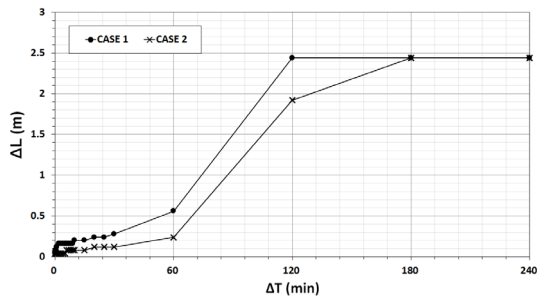
[Fig. 3] Particle Size Distribution of Bed Materials

[Table 1] Experiment Cases

Case	Discharge (m ³ /s)	Upstream Water Level (El.m)	Downstream Water Level (El.m)	Upstream Velocity (m/s)	Downstream Velocity (m/s)	Kinckpoint Movement (ΔL) (m)
CASE 1	0.0170	0.170	0.106	0.304	0.200	2.44
CASE 2	0.0170	0.150	0.125	0.425	0.170	2.44
CASE 3	0.0037	0.227	0.210	0.171	0.022	0.56
CASE 4	0.0095	0.235	0.222	0.339	0.053	0.6
CASE 5	0.0136	0.244	0.230	0.386	0.074	0.64
CASE 6	0.0170	0.248	0.235	0.443	0.090	1.68
CASE 7	0.0248	0.258	0.245	0.534	0.127	1.84
CASE 8	0.0037	0.230	0.210	0.154	0.022	0.56
CASE 9	0.0071	0.238	0.222	0.234	0.040	0.68
CASE 10	0.0095	0.243	0.227	0.276	0.052	0.8
CASE 11	0.0136	0.250	0.234	0.340	0.073	1.02
CASE 12	0.0207	0.264	0.245	0.404	0.106	1.4
CASE 13	0.0248	0.270	0.250	0.443	0.124	1.48

3. 시간에 따른 두부침식 이동성 분석

본 연구에서는 시간에 따른 두부침식 이동성 분석을 위해 유량($Q=0.017 \text{ m}^3/\text{s}$)을 고정시킨 후 천급점 이동(ΔL)을 분석하였다. 수리실험이 진행되는 동안 15초, 20초, 25초, 30초, 35초, 40초, 1분, 2분, 1시간, 2시간, 3시간, 4시간 경과 후 이동점을 측정하였으며 천급점 이동 길이(ΔL)는 Fig. 4와 같다. CASE 1의 상하류단 수위차는 0.064 m, 유속차는 0.1 m/s 였으며, CASE 2의 상하류단 수위차는 0.025 m, 유속차는 0.255 m/s로 설정하여 진행하였다. 분석 결과 수로 내 측정 가능한 최대 천급점 길이인 2.44 m까지 도달하는데 CASE 1의 경우 2시간이 소요되었으며 CASE 2의 경우 3 시간이 소요되는 것으로 나타났다. 또한 동일한 유량조건인 실험에도 불구하고 CASE 2에 비해 CASE 1의 천급점 이동이 더 빠르게 진행되는 것으로 나타나 상하류 유속차의 영향이 큰 것으로 나타났다.

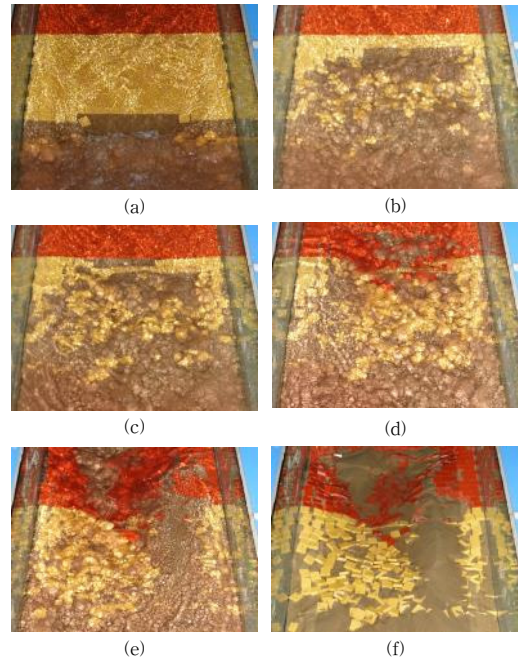


[Fig. 4] Knickpoint Movement by Time($Q=0.017 \text{ m}^3/\text{s}$)

또한 개수로 내 측벽에서 존재하는 마찰의 영향으로 한 단면에서의 유속분포는 위치에 따라 다르기 때문에[8] 개수로 단면 내 유속 분포의 변화를 고려하기 위한 평면 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 이러한 유속 분포를 정량적으로 측정하기 위해 비침식성 레이저를 활용하여 두부침식의 이동성을 평면적으로 분석하였다.

실험 결과, 실험 시작 후 15초 경과 후 수로 중앙의 타일이 붕괴되기 시작하였으며(Fig. 5(a)), 1분 경과 후 수로의 중앙을 중심으로 황색구간이 상당량 붕괴되는 것으로 나타났다(Fig. 5(b)). 5분 경과 후 황색구간(0.52 m)이 거의 모두 붕괴되었고(Fig. 5(c)), 1시간 후 적색구간 중앙부분이 서서히 붕괴 되었으며(Fig. 5(d)), 3시간 후 적색구간 중앙 및 좌안 부분이 모두 붕괴되었다(Fig. 5(e)). 실험 종료 후 최종 천급점 이동길이 분석결과, 사각형 단

면에서의 유속분포는 중앙에서 유속이 가장 크기 때문에, 본 실험에서도 좌안과 우안에 비해 중앙의 침식 및 붕괴가 먼저 발생하는 것으로 나타났으며 좌안과 우안에 비해 침식 정도가 더 크게 나타났다(Fig. 5(f)). 또한 두부침식이 초기에 빠르게 발생하였지만, 시간이 지나면서 증가속도는 감소하는 것으로 나타났다.



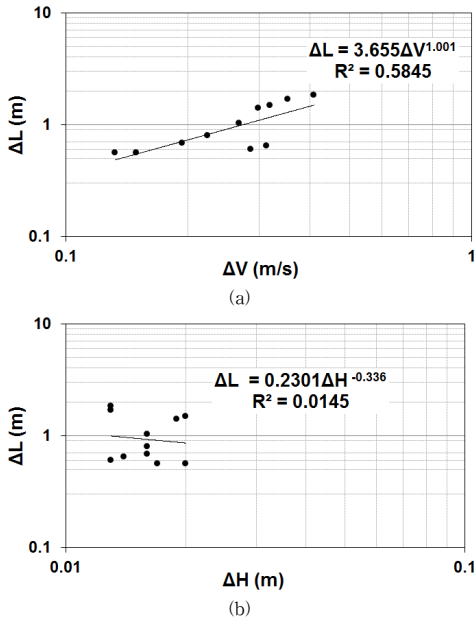
[Fig. 5] Headcutting Experiment Results (a) after 15 secs, (b) after 1 min, (c) after 5 mins, (d) after 1 hr, (e) after 3 hrs, and (f) after 4 hrs

4. 유속 및 수위변화에 의한 이동성 분석 결과

4.1 천급점 이동성 분석 결과

본 논문에서는 유속과 수위 변화에 따른 천급점이동에 대해 분석하였으며 먼저 상·하류단 유속차(ΔV)에 따른 두부침식 천급점 이동분석을 분석하였다. 분석결과, 상·하류단 유속차 0.13 m/s에서 0.41 m/s 범위에서는 천급점 이동이 0.56 m에서 1.84 m인 것으로 나타났다(Fig. 6(a)). 또한 CASE 5의 경우 0.31 m/s의 유속차, CASE 13의 경우 0.32 m/s의 유속차로 유사한 조건에서 실험을 수행하였지만 최종 천급점 이동 길이가 각각 0.64 m와 1.48 m로 2배 이상의 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나

전체적인 양상은 유속차가 클수록 두부침식 이동길이가 길어지는 일정한 패턴을 가지는 것으로 나타났다.



[Fig. 6] Knickpoint Movement (ΔL) Changes by
(a) Velocity Difference (ΔV) and
(b) Water Level Difference (ΔH)

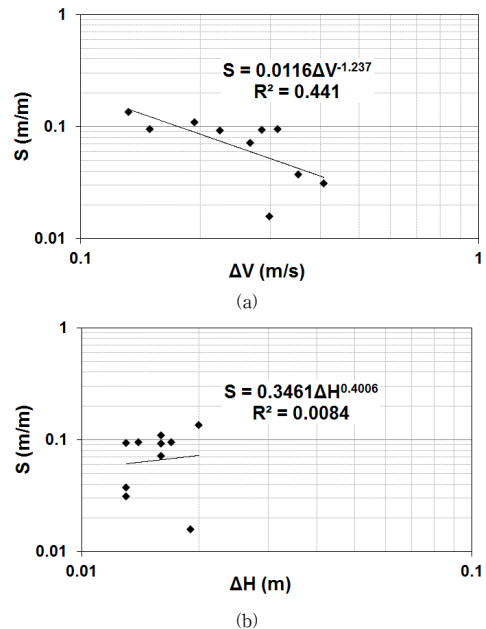
상·하류단 수위차(ΔH)에 따른 두부침식 이동성 분석 결과, 상·하류단 수위차 0.013 m에서 0.02 m 범위에서는 천급점 이동이 0.56 m에서 1.84 m인 것으로 나타났으며, 유속차에 비해 상대적으로 두부침식 이동성에 미치는 상관관계가 일정하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 6(b)). 특히 CASE 4와 CASE 6, CASE 7의 경우 수위차가 0.013 m로 동일함에도 불구하고 천급점 이동이 각각 0.6 m, 1.68 m, 1.84 m 인 것으로 나타났으며, 이를 통해 상·하류단 수위차보다 유속차가 천급점 이동에 더 민감한 변수임을 알 수 있다.

4.2 최종 하상경사 분석 결과

실제하천 및 실험을 통한 재현 모두 상·하류단의 단차에 의해 두부침식이 발생하게 되며 일정시간이 경과 후에는 천급점 이동에 의해 일정한 하상경사를 형성하게 된다. 이러한 하상경사의 변화 또한 두부침식의 이동성 분석을 파악하는데 중요한 변수이며 본 장에서는 상·하류단 유속차 및 수위차에 의한 최종 하상경사를 분석하였다.

분석결과, 상·하류단 유속차 0.13 m/s에서 0.41 m/s 범위에서의 하상경사는 0.0157에서 0.134인 것으로 나타났으며, 상·하류단 유속차가 클수록 더 완만한 하상경사가 나타나는 것을 확인하였다(Fig. 7(a)). 이는 상류에서 침식된 유사가 하류로 이동하여 발생하는 것을 판단된다. 또한 CASE 12의 경우 0.3 m/s의 유속차, CASE 11의 경우 0.31 m/s의 유속차로 유사한 조건에서 실험을 수행하였지만 최종 하상경사가 각각 0.0157과 0.0934로 차이가 나타나 상·하류단의 유속차 및 수위차를 모두 고려한 분석이 필요할 것으로 판단된다. 동일한 구간내에서 하상경사가 더 완만하게 나타난다는 것은 상류로 더 긴 구간까지 두부침식의 영향이 미친다는 것을 의미하므로 실제 하천에서도 큰 유속차가 발생할 경우 급격한 하상변동이 발생할 것으로 예상할 수 있다.

상·하류단 수위차에 따른 최종 하상경사 분석 결과, 상·하류단 수위차 0.013 m에서 0.02 m 범위에서는 최종 하상경사가 0.0157에서 0.134인 것으로 나타났다. 최종 하상경사와 수위차의 변화는 상관성이 크지 않는 것으로 나타났으며(Fig. 7(b)), 천급점 이동 분석 결과 Fig. 6(b)와 마찬가지로 유속차에 비해 정량적인 관계로 정의하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.



[Fig. 7] Final Bed Slope (S) Changes by
(a) Velocity Difference (ΔV) and
(b) Water Level Difference (ΔH)

5. 결론

본 연구에서는 수리실험을 통해 단면내 유속변화가 비점착성 모래 하상의 두부침식으로 인한 천급점 이동 및 하상경사에 미치는 영향을 분석하였으며 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 두부침식의 발생과 천급점 이동은 초기에 빠르게 진행되었고 시간이 지나면서 증가속도는 감소하였다. 따라서 비점착성 하상에서는 두부침식 발생 후 상류로 전파되는 범위와 속도가 다르게 나타날 수 있기 때문에 실제 하천에서 두부침식에 대처하는 하상보호공과 같은 구조물을 설치할 경우 이를 고려한 적절한 위치선정 및 규모를 결정하는 것이 필요하다.

둘째, 시간에 따른 두부침식 이동성을 분석한 결과, 동일한 유량 조건임에도 불구하고 상·하류단 유속차에 의해 천급점 이동이 다른 것으로 나타났으며, 유속차가 클수록 천급점 이동이 더 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 또한 개수로 단면 내 유속 분포의 변화를 고려하기 위한 평면 분석결과, 좌안과 우안에 비해 중앙의 침식 및 붕괴가 먼저 발생하는 것으로 나타났으며 침식 정도가 더 큰 것으로 나타났다. 천급점의 위치를 기준으로 상·하류단 수위차에 의한 천급점 이동 분석 결과는 유속차에 비해 상대적으로 두부침식 이동성에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났으며 이를 통해 상·하류단 수위차보다 유속차가 천급점 이동에 더 민감한 변수임을 알 수 있다.

셋째, 유속차에 의한 최종 하상경사 분석 결과, 상·하류단 유속차가 클수록 더 완만한 하상경사가 나타나는 것을 확인하였으며 수위차에 의한 분석 결과, 천급점 이동 분석 결과와 마찬가지로 최종 하상경사와 수위차의 변화는 상관성이 크지 않은 것으로 나타나 유속차에 비해 정량적인 관계로 정의하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

따라서 실제 모래 하천에서도 상·하류단 수위차가 크지 않더라도 유속차가 큰 구간에서는 두부침식 발생 및 천급점의 상류 이동 속도가 클 것으로 판단되기 때문에 이러한 구간을 사전에 선별하여 적절한 대비책을 마련하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] The Kyunghyang Shinmun, "Head cutting of geumdang stream, because 4-river project not flood." August 12, 2011.
- [2] N. J. Lee, K. I. Son, K. K. Yu, "Headcutting Fieldstudy of Byeongseongstream, Gamstream, HwangRiver.", *Magazine of Korea water resources association*, Vol. 44, No. 7, pp. 64-71, 2011.
- [3] O. R. Stein, P. Y. Julien, "Criterion Delineating the Mode of Headcut Migration.", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 1, pp. 37-50, 1993.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:1\(37\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:1(37))
- [4] L. M. Brush, M. G. Wolman, "Knickpoint behavior in noncohesive material: a laboratory study.", *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 71, pp. 59-71, 1960.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1960\)71\[59:KBINMA\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1960)71[59:KBINMA]2.0.CO;2)
- [5] S. J. Bennett, C. V. Alonso, S. N. Prasad, M. J. M. Rönkens, "Experiments on headcut growth and migration in concentrated flows typical of upland areas.", *Water Resources*, Vol. 37, No. 7, pp. 1911-1922, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2000WR900067>
- [6] S. M. Bhallamudi, M. H. Chaudhry, "Numerical Modeling of Aggradation and Degradation in Alluvial Channels.", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 9, pp. 1145-1164, 1991.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:9\(1145\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:9(1145))
- [7] C. L. Jang, "2-Dimensional Numerical Simulation of the Behaviors of Knickpoint in the Channel with Noncohesive Materials.", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 6, pp. 259-265, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2012.12.6.259>
- [8] H. S. Woo, *River Hydraulics*, 2001.
- [9] V. T. Chow, *Open-Channel Hydraulics*, Mc-Graw Hill, New York, USA, p. 25, 1959.

지 운(Un Ji)

[정회원]



- 2006년 12월 : Colorado State University, Dept. of Civil and Environmental Engineering(공학 박사)
- 2007년 3월 ~ 2012년 12월 : 명지대학교(박사후연구원, 연구교수)
- 2012년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원
- 2015년 2월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교(UST) 건설환경공학과 부교수

<관심분야>

토목공학, 수리학, 유사이송

장은 경(Eun-Kyung Jang)

[정회원]



- 2010년 2월 : 명지대학교 공과대학 토목환경공학과(공학사)
- 2012년 2월 : 명지대학교 대학원 공과대학 토목환경공학과(공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 대학원 공과대학 토목환경공학과(박사과정)
- 2013년 6월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 석사후연구원

<관심분야>

토목공학, 수리학

강진욱(Jin-Wook Kang)

[정회원]



- 2014년 8월 : 가천대학교 공과대학 토목환경공학과(공학사)
- 2014년 9월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교(UST) 건설환경공학과 석박사통합과정

<관심분야>

토목공학, 수리학
