

준설하천의 웅덩이 적응에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Adjustment Processes of Minning Pit in the Dredged Channels

장 창 래* / 정 관 수**

Jang, Chang-Lae / Jung, Kwansue

Abstract

The adjustment processes of mining pits in the disturbed channels by sand or gravel mining were investigated by laboratory experiments in this study. The pit migrated with speed when the river bed was steep. The pit migrated slow and steady when the pit was filling with sand, but the pit migrated with speed after the filling processes was finished. The submerged angle of repose in the pit was nearly constant during the pit was filling. The pit was filled with sand with speed as the channel slope was increased. It took time for the pit to be filled with sand as the pit dimension was increased. This meant that the disturbed channels by sand or gravel mining to adjust the new environment was dependent on the slope of the channels and the dimension of the pits. The dimensionless pit length was short and the dimensionless pit depth was shallow as the time was increased. The dimensionless pit depth was shallow, but the dimensionless pit migration speed was increased as the dimensionless shear velocity and the migration speed of the pit were increased. The dimensionless pit depth was increased with the dimensionless bar migration speed. The shape of the pit was deformed and migrated downstream in accordance with the location and shape of the biased bar front which was developed upstream.

Keywords : dredged channel, mining pit, bed change, adjustment processes

요 지

본 연구에서는 하도준설 및 골재채취에 의한 교란하천의 적응과정을 정량적으로 파악하기 위하여 이동상 실내실험을 수행하였으며, 하상경사 및 골재채취를 위한 준설 규모의 변화에 따른 하도의 응답 특성을 분석하였다. 웅덩이의 퇴메우기가 진행 중일 때에는 웅덩이의 이동속도는 일정하지만, 퇴메우기가 완료된 후에는 웅덩이 (pit)의 이동속도가 빠르게 진행된다. 또한 웅덩이가 퇴메워지는 동안에 웅덩이의 수중 안식각은 일정하게 유지되었다. 하상경사가 급할 경우에, 웅덩이가 퇴메워지는 시간과 이동속도가 증가하였다. 골재채취에 의한 하천준설의 규모가 증가하게 되면, 웅덩이의 퇴메워지는 시간이 증가하게 되며, 웅덩이의 규모가 증가할수록 적응시간이 증가하였다. 무차원 마찰속도가 증가하면 무차원 웅덩이 깊이는 감소하고 무차원 웅덩이 이동속도가 증가하였다. 웅덩이 이동속도가 증가하면 무차원 웅덩이 깊이가 감소하였다. 무차원 사주의 이동속도가 증가하면, 웅덩이의 이동속도가 증가하였다. 상류에서 발달한 사주의 이동이 편향되면, 흐름이 집중되는 사주의 선단부의 위치에 따라 웅덩이의 형상이 변형되어 하류로 이동하였다.

핵심용어 : 준설하천, 웅덩이, 하상변동, 적응과정

* 교신저자, Chungju National University 토목공학과 조교수 (e-mail: cjang@cju.ac.kr)
Assistant Prof. Dept. of Civil Engineering, Chungju National University, Chungju 380-702, Korea

** Chungju National University 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cju.ac.kr)
Prof. Dept. of Civil Engineering, Chungju National University

1. 서 론

최근에 하천에 대한 체계적인 조사 및 연구가 없이 하천준설 및 골재채취가 무분별하게 이루어져 왔다. 이러한 하천의 인위적인 충격은 매우 다양한 형태로 물리적, 생태적 및 환경적인 영향을 만들어 낸다. 또한 기존에 존재하는 하천의 지형이 교란되면서, 국부적으로 유사 결핍이 발생한다. 하도의 굴착은 상류 끝단에 두부침식(headcut)을 일으키며, 하천환경에 직접적인 변화뿐만 아니라, 하상저하, 하상토의 조립화, 그리고 하천의 측방 불안정성을 야기하면서, 하천의 안정성, 홍수범람, 수리구조물의 안정성, 취수의 곤란 등 많은 문제를 야기하고 있다(Kondolf, 1994).

하천의 골재채취를 위한 하천준설의 결과로써, 웅덩이(pit)가 생기게 되며, 이로 인하여 흐름 및 유사이송에 영향을 주게 된다. 이러한 변화는 하상고, 하폭, 하상토의 구성에 변화를 주면서, 새로운 평형상태에 적응해 간다. 이러한 적응 과정은 매우 복잡하고 다양한 수리학적 특성에 의해 변하지만, 이에 대한 체계적인 연구가 거의 없는 실정이다.

Lee et al. (1993)은 실내실험을 통하여 상류에서 유사의 공급이 없는 비평형 상태에서 골재채취에 의한 웅덩이(pit)의 형상과 이동 특성을 예측할 수 있는 경험공식을 제시하였으며, 웅덩이의 형상을 결정하는 최고 세굴심과 최대 유효깊이는 유사의 이송능력이 증가할수록 감소하는 것을 파악하였다. 그러나 유사의 이동에 의해 발생하는 사구(dune)와 같은 하상파의 영향을 고려하지 않았으며, 하상의 특성을 고려하여 웅덩이의 거동을 파악하는데 한계가 있다. Lee and Hwang (1994)은 실내실험을 통하여 흐름의 조건 및 유입 유사량의 변화에 따라 하상의 후방 단차(backward-facing step)의 변형과 이동 특성을 파악하였으며, 이를 예측할 수 있는 수학적 모형을 제시하였다. Gill (1994)은 흐름 및 유입유사량이 변화가 없는 조건에서 웅덩이의 퇴매우기 과정과 이동을 모의할 수 있는 간단한 1차원 수치모형을 제시하였다. van Rijn (1996)은 준설하천에서 조류의 영향에 의해 부유사의 농도 변화를 분석하고, 조류의 흐름 방향과 준설하천의 방향 변화에 따른 퇴적과정을 2차원 하상변동 수치모형을 이용하여 파악하였다. Cao and Pender (2004)는 완전연계형 2차원 수치모형을 개발하여 상류에서 공급되는 유사량의 증가에 따라 하상고 상승과 골재채취로 인한 웅덩이의 반응을 해석하였으며, 골재채취로 인한 하상고의 변화는 웅덩이 상하류의 수위 변화에 영향을 미치는 것을 파악하였다. Wu and Wang (2008)은 1차원 수치모형을 이용하여 두부침식과 미부침식(尾部侵蝕, tailcut)의 최대 깊이와 최대

깊이에 대한 경험적인 포락관계(envelope relations)를 제시하였다. 그러나 사용된 수치모형의 적용성이 검토되지 않은 한계가 있다.

충적하천에서는 유사의 이동에 의해 하상파가 발달하며, 입경과 수심에 의하여 사런(ripple), 사구(dune), 반사구(antidune)와 같은 소규모 하상형태가 발달하거나, 하폭의 규모에 따라 교호사주나 복렬사주와 같은 중규모 하상형태가 발달한다. 이러한 교호사주나 복렬사주는 사주의 선단부에 흐름이 집중되어 깊게 세굴되거나 웅덩이를 형성시키면서, 홍수 시에 주흐름이 하안에 충돌하여 수층부를 형성하여 하안침식을 일으키며 홍수재해를 일으킨다(장창래와 정관수, 2006). 이러한 사주는 홍수류에 의하여 하류로 이동하기 때문에 세굴위치와 수층부도 하류로 이동하며, 재해의 발생 위치도 하류로 이동하면서 변한다. 이와 같이 하천 준설 및 골재채취로 인하여 발생한 웅덩이의 형상과 이동 특성은 상류에서 발달한 사주의 거동에 의하여 영향을 받게 된다. 그러나 이들 연구에서 사주의 발생에 따른 웅덩이의 이동특성을 파악하기에는 많은 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이동상 실내실험을 수행하여, 하상경사와 준설 규모의 변화에 따른 하도의 응답 특성을 파악하고, 상류에서 발생한 사주의 거동에 따른 웅덩이의 변화과정과 이동 특성을 분석하였다.

2. 실험 조건

하천의 준설에 의해 하상이 급격하게 변하게 되면, 그 지점에서 수심이 증가하므로, 유속이 감소하게 된다. 이러한 영향은 수압이 증가하여 흐름이 크게 감소되는 하상부근에서 매우 중요하다. 준설지역의 상류쪽 사면경사가 1:5 급한 경우에, 흐름의 분리 및 역직방향의 와류(vortex)가 발생하며, 복잡한 흐름의 형상이 나타난다. 재순환 구역(recirculation zone)에서 유속은 분류에 비하여 작다. 수면 부근에서 유속은 하천 준설에 의한 영향을 거의 받지 않는다. 수면층과 재순환 구역 사이(혼합층, mixing layer)에서는 난류 에너지의 발생 및 전달에 의해 지배된다. 준설 구역의 하류 끝단에서 흐름이 회복하여 새로운 평형상태에 도달한다(Fig. 1). 이 과정은 흐름이 가속되는 경사면에서 크게 지배적이며, 유속 분포는 더 균일하게 되고 난류의 발생은 억제된다(van Rijn, 1996).

하천의 준설로 인하여 웅덩이(pit)가 생기게 되면, 흐름 및 유사이송 특성에 영향을 주게 된다. 웅덩이 주변에서 발생하는 하천의 지형변화 특성은 초기에 웅덩이 상류부에 침식이 발생하며, 이로 인하여 지속적으로 웅덩이 내부에서 퇴적현상이 발생하게 된다. 또한 웅덩이 직하류는 웅덩이에서 포착된 유사에 의해 하상이 침식되게 된

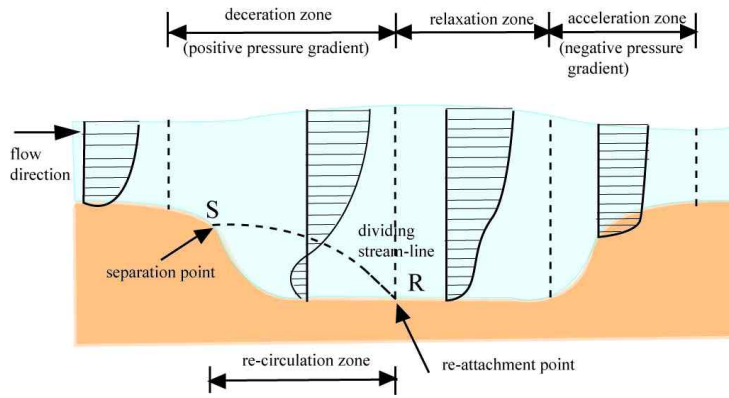


Fig. 1. Sketch of Flow in the Mining Pit (van Rijn, 1996)

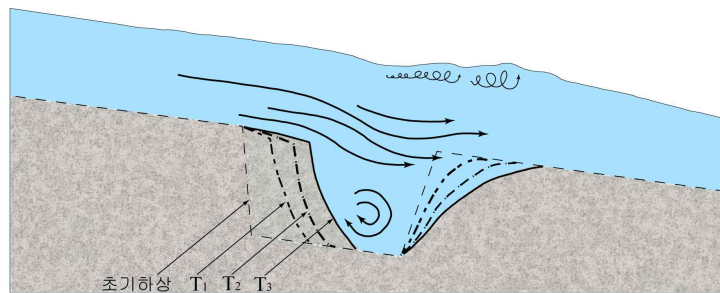


Fig. 2. Sketch of Backfilling in the Mining Pit (장창래 등, 2008)

다. 웅덩이에 대한 유사의 퇴채움 과정에서 급격한 수심의 변화에 의하여 와류가 발생하게 되지만, 흐름의 가속 구간 (acceleration zone)에서는 이러한 연직방향의 와류가 소멸하게 된다 (Fig. 2).

2.1 실내실험 절차

이동상 실내실험을 수행하기 위하여 수로는 하상경사를 조절할 수 있는 가변형 경사수로를 사용하였다. 실험 수로의 크기는 길이 12m, 폭 0.9m, 높이 0.6m이며, 지하저수조에서 펌프를 이용하여 상류단 leveling 탱크로 물을 공급하는 순환형 물순환 시스템을 갖추고 있다 (Fig. 3). 수로의 하류단에 sluice gate가 설치되어 있으며, 하류단 수위를 조절할 수 있다. 수로의 측벽은 좌안이 아크릴 판으로서 실험 중에 수로 내부를 볼 수 있으며, 우안은 철재로 구성되어 있다. 실험 중에 각 지점의 수위 및 하상고 계측은 1/100 mm까지 측정 가능한 전자식 point gauge를 이용하였다.

2.2 실험 조건

자체적으로 제작한 모래포설기를 이용하여 실험 수로의 바닥에 20 cm 두께의 유사를 균등하게 포설하였다. 그 후에 실험 수로의 하상은 상류로부터 5 m 지점에서 실험 조건에 맞추어 깊이 10 cm 정도로 굴착하여 웅덩이를 만

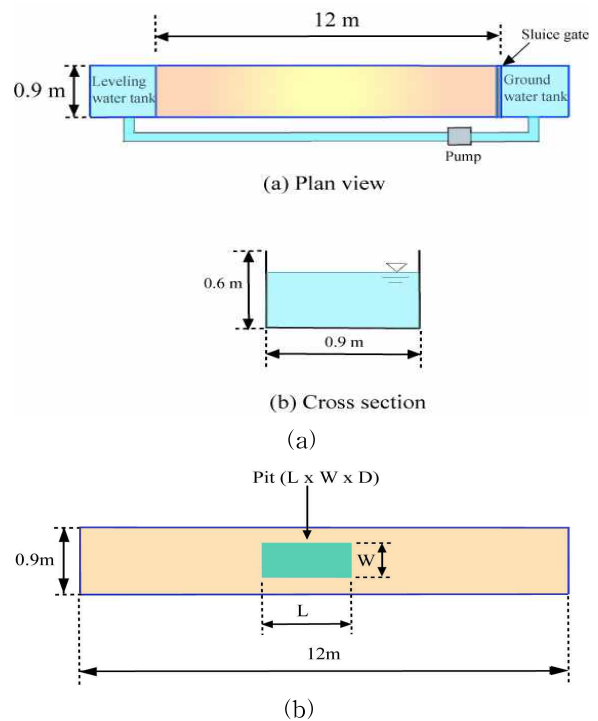


Fig. 3. Sketch of Experimental Setup (a) Plan View and (b) Initial Cross Section

들었다 (Fig. 3(b)). 이동상 실내실험을 위하여 하상토를 선정할 때에 실험 중에 유사에 표면장력으로 인하여 흐름

과 달리 독립적으로 이동하거나 위로 떠오르지 않아야 하며, 부유사가 발생하지 않고, 하상에서 사런(ripple)이 발생되지 않을 조건을 충분히 만족시켜야 한다. 따라서 실험을 위해 사용된 모래는 $D_{50}=1.2\text{ mm}$, $D_m=1.29\text{ mm}$, $D_{35}=1.05\text{ mm}$, 표준편차는 1.37이고, 비중은 2.55~2.65인 주문된 여과사를 선정하였다.

실험이 진행되는 동안, 수로의 유입구에서 국부적인 세굴을 방지하고 하상이 동적 평형을 유지하도록 상류단에서 유사를 일정하게 공급하였다. 하상고는 지정된 시간 동안에 상류에서 공급되는 유량을 정지시키고, 수로에서 완전히 배수시킨 후에, 전자식 point gauge를 이용하여 측정하였다. 하상고는 상류의 2m 지점에서 하류 10m 지점까지, 수로의 횡방향으로 5cm, 종방향으로 20cm 간격으로 측정하였다. 실험은 굴착된 웅덩이(pit)가 완전히 메워질 때까지 지속되었다. 실험이 지속되는 동안 굴착된 웅덩이의 상류에서는 복렬사주가 발생하였으나, 굴착된 웅덩이의 하류에서는 평탄한 상태를 유지하였다. 실험이 진행되는 동안, 유로의 변동을 정확하게 기록하기 위하여, 하상고를 측정하기 직전과 직후에 사진촬영을 하였다. 실험을 위한 수리학적 조건은 Table 1에 잘 나타나 있다. 여기서, 하상경사의 변화에 따른 웅덩이의 적응과정을 파악

하기 위한 실험은 Run-1과 Run-2이며, 웅덩이 규모의 변화에 따른 적응과정을 파악하기 위한 실험은 Run-2, Run-3 및 Run-4이다.

3. 실험결과 및 분석

Fig. 4는 Run-2에 대하여 시간이 진행됨에 따라 웅덩이가 되메워지는 것을 사진으로 보여주고 있다. 하상굴착 지점은 상류로부터 5m 지점에서 길이 1m, 넓이 0.5m, 깊이 0.1m의 규모로 웅덩이(pit)를 굴착하였다(Fig. 4(a)). 통수 개시 후, 초기에는 웅덩이 상류 지점에서 급격한 두부침식이 발생하여 상류로 전파되었고, 상류로 갈수록 그 규모는 작아졌다. 10분 후에는 상류에서 공급되는 유사에 의해 두부침식 부분은 감소되었으며, 웅덩이 부분이 되메워지기 시작하였다. 통수 240분 후에는 되메우기가 거의 완료되었으며, 웅덩이는 상류에서 그 형상이 일정하게 유지되면서 흐름 방향으로 되메워지고 있다(Fig. 4(d)).

Fig. 5와 Fig. 6은 웅덩이 상류에서 발달한 사주의 이동 방향에 의해 시간에 따른 웅덩이의 형상과 그 이동 특성을 Run-2와 Run-4의 실험결과를 통하여 보여주고 있다.

Table 1. Experimental Conditions

CASE	Discharge (m^3/s)	Depth (cm)	Bed slope	Fr	Dia. of bed material (mm)	Sediment feeding rate (kg/s)	Dredging Dimension	
							Length (m)	Depth (m)
Run-1	0.015	2.5	0.005	0.97	1.2	0.0168	1.0	0.1
Run-2	0.015	3.4	0.0025	0.73	1.2	0.0062	1.0	0.1
Run-3	0.015	3.3	0.0025	0.72	1.2	0.0051	2.0	0.1
Run-4	0.015	3.9	0.0033	0.68	1.2	0.0205	2.0	0.1

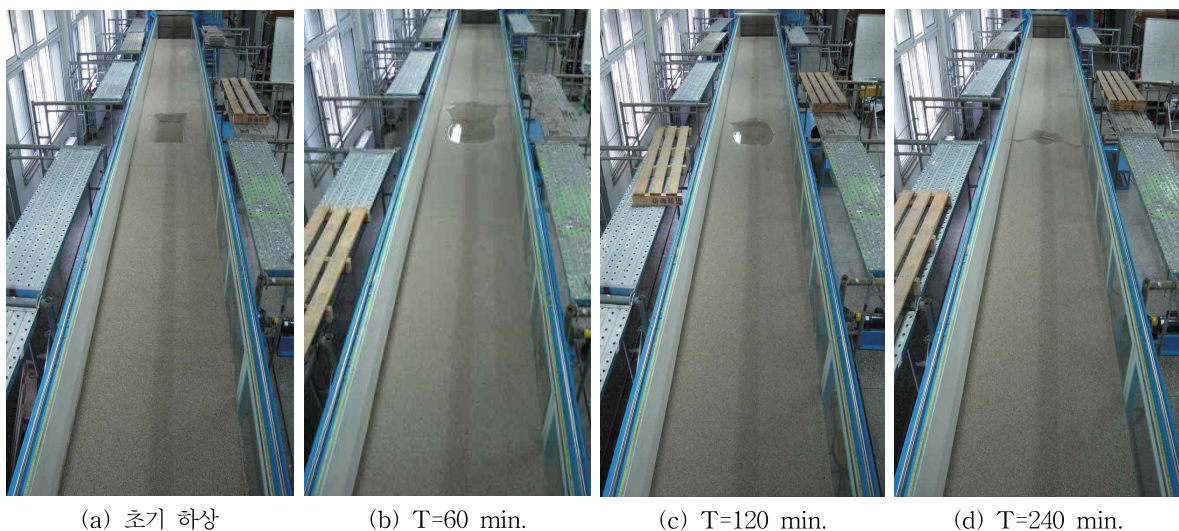


Fig. 4. Experimental Results (Run-2)

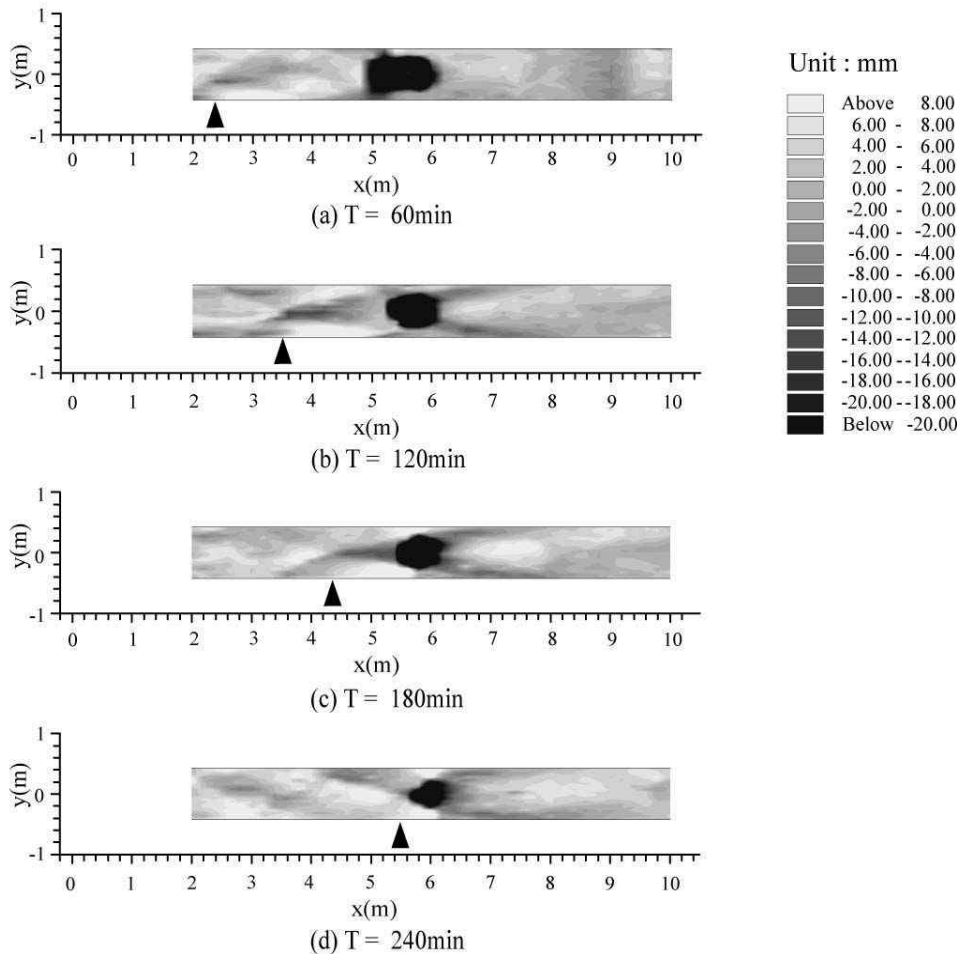


Fig. 5. Morphological Changes with Time (Run-2) ▲ Indicates Bar Front in the Upstream of the Pit

Run-2에 대하여 통수 120분 후에는 웅덩이의 1.2m 정도 되메우기가 진행되어 하류로 이동하였으며, 웅덩이가 하류의 좌안과 우안에서는 흐름의 가속에 의해 하상 저하가 발생하였다 (Fig. 5(b)). 상류의 중앙에서 발달한 2열 복렬 사주에 의해 흐름이 집중되는 중앙부에서는 웅덩이 형상이 좌안이나 우안에 편향되지 않고 일정하게 유지되면서 흐름 방향으로 되메워지고 있다. 그러나 웅덩이 하류의 좌안과 우안에서는 흐름의 분리에 의해 거의 대칭적으로 하상이 저하되고 있다 (Figs. 5(b) and (c)). 시간이 지속된 후에도 그 형상이 일정하게 유지되면서 웅덩이가 되메우기가 진행되며 하류로 이동하였다 (Fig. 5(d)). 그러나 Fig. 6(b)에서 보여주고 있는 것처럼, 초기에 상류의 우안에서 발달한 복렬사주는 하류로 이동하면서 흐름이 집중되는 사주의 선단이 수로의 우안에 집중되고 있다. 웅덩이 하류의 흐름이 가속되는 6m 지점에서 하상은 비대칭적으로 좌안보다 우안에 크게 저하되고 있다 (Fig. 6(c)). 웅덩이의 되메우기가 완료된 후에도 웅덩이의 영향에 의해 발달한 사주의 선단이 7.4m 구간에서 우안에서 발달하며 하류로 이동하고 있다 (Fig. 6(d)). 따라서 상류에서

발달한 사주의 이동 방향은 웅덩이의 이동 특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 각 실험에 대한 종방향 하상고의 변화를 보여주고 있다. 시간이 증가함에 따라, 웅덩이 (pit)가 되메워지면서, 최심하상고가 하류로 이동되고 있다. Run-1과 같이 하상경사가 급할 경우에, 웅덩이의 변화에 대하여 되메워지는 시간이 짧고, 웅덩이의 이동속도가 빠른 것을 보여주고 있다 (Fig. 7(a)). Figs. 7(b) and (c)은 Run-2와 Run-3의 결과로서, 골재채취장의 규모가 커지게 되면, 웅덩이의 되메워지는 시간이 증가하게 된다. 즉, 웅덩이의 규모가 커지면, 적응하는 시간이 길어지는 것을 의미한다. 골재채취장에서 웅덩이의 되메우기가 진행 중일 때에는 웅덩이의 이동속도는 일정하지만, 되메우기가 완료된 후에는 웅덩이의 이동속도가 빠르게 된다. 또한 웅덩이가 되메워지면서 웅덩이의 수중 안식각은 일정하게 유지되었다. 이것은 수심방향으로 발생한 와류에서 의하여 수중 안식각이 일정하게 유지되는 것으로 판단된다 (Figs. 1 and 2).

Fig. 8은 웅덩이의 이동 추세선을 보여주고 있다. Run-

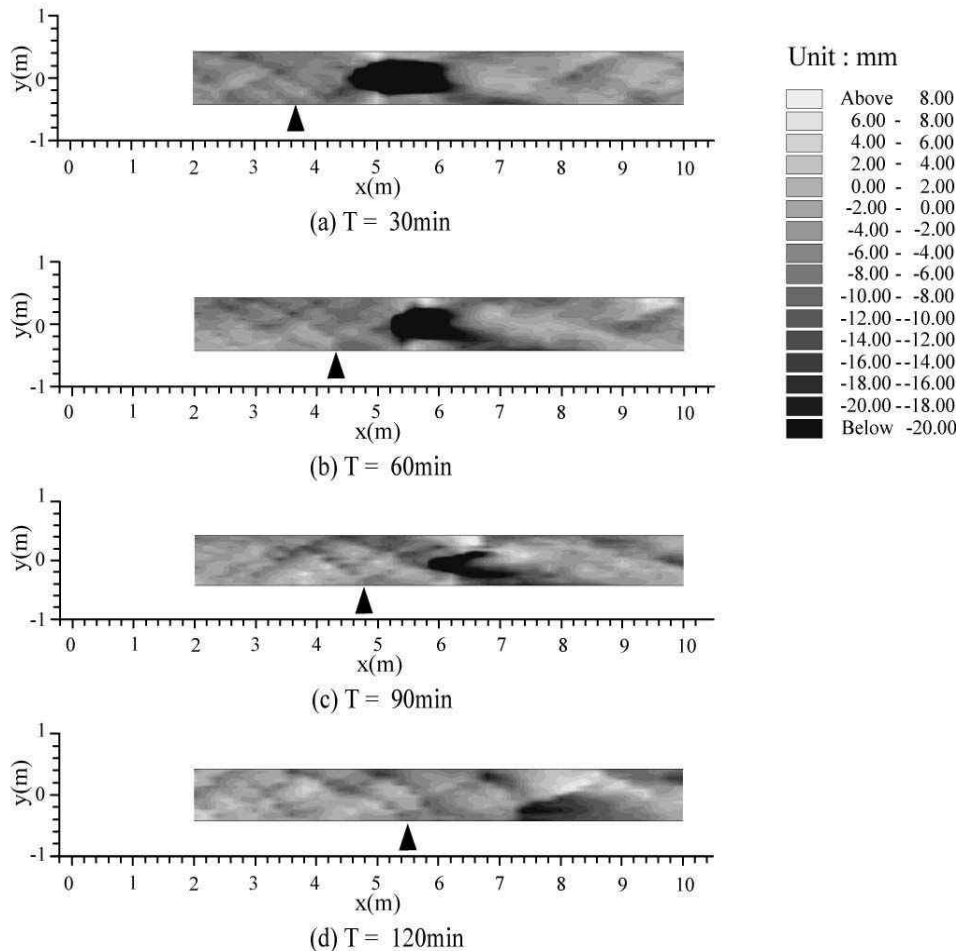


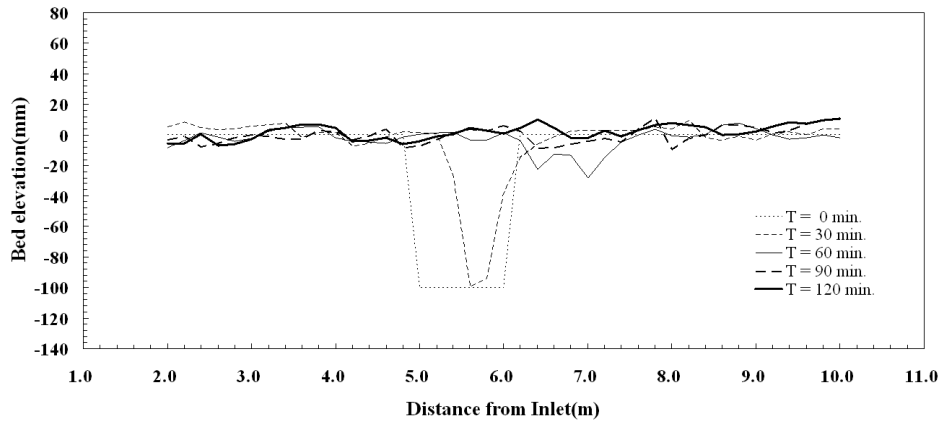
Fig. 6. Morphological Changes with Time(Run-4) ▲ Indicates Bar Front in the Upstream of the Pit

1에서 30분까지 일정하게 이동하다가 웅덩이의 퇴메우기가 끝난 후인 60분부터 웅덩이의 깊이가 얕아지고 웅덩이의 이동이 빠른 것을 알 수 있다 (Fig. 7(a)). Run-2에서는 웅덩이가 240분까지 지속적으로 퇴메워지고 있으며, 웅덩이 퇴메우기가 끝난 후에 웅덩이 깊이가 얕아지고 이동속도가 빠르게 된다 (Fig. 7(b)). Run-3에서는 웅덩이의 이동속도가 430분까지 일정하게 유지되고 있으나, 하상경사가 급한 Run-4에서는 90분까지 그 이동속도가 상대적으로 일정하게 유지되지만, 그 이후부터는 증가하는 것을 보여주고 있다.

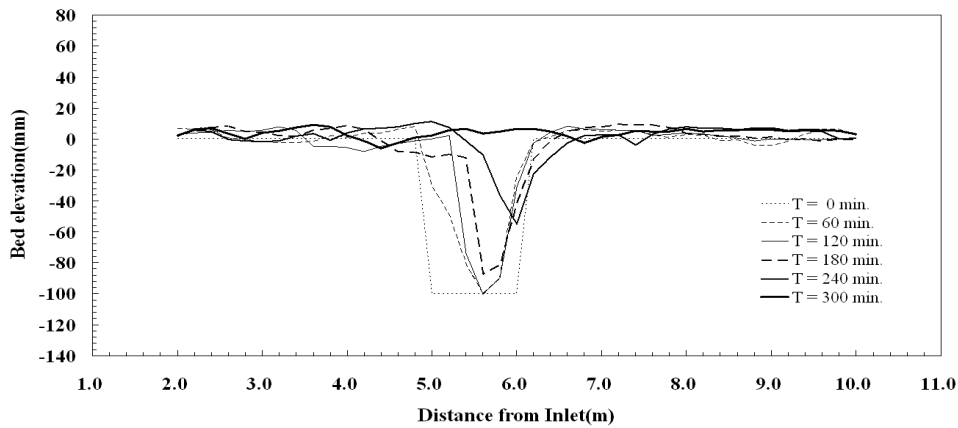
Run-1보다 하상경사 완만한 Run-2에서는 240분까지 웅덩이가 일정한 속도를 유지하며 이동하고 있지만, 그 이후부터는 빠르게 이동하는 것을 보여주고 있다. Run-2보다 웅덩이의 규모가 큰 Run-3에서는 웅덩이의 이동이 440분까지 일정하게 유지되고 있는 것을 보여주고 있다. 이와 같이 웅덩이가 일정한 속도를 유지하며 이동하는 구간에서는 웅덩이가 퇴메워지고 있는 과정이며, 웅덩이의 이동이 빠르게 진행되고 있는 구간에서는 웅덩이의 퇴메우기가 거의 완료되어 하류로 이동되고 있는 것을 의미한다.

다. 따라서 Run-1 및 Run-4와 같이 하상경사가 급한 경우에, 웅덩이의 퇴메워지는 시간과 이동속도가 빠르며, Run-2 및 Run-3과 같이 골재채취장의 규모가 증가하게 되면, 웅덩이의 퇴메워지는 시간이 증가하게 되며, 하천준설 및 골재채취로 인한 교란하천이 새로운 환경에 적응하는 시간이 증가하는 것을 의미한다.

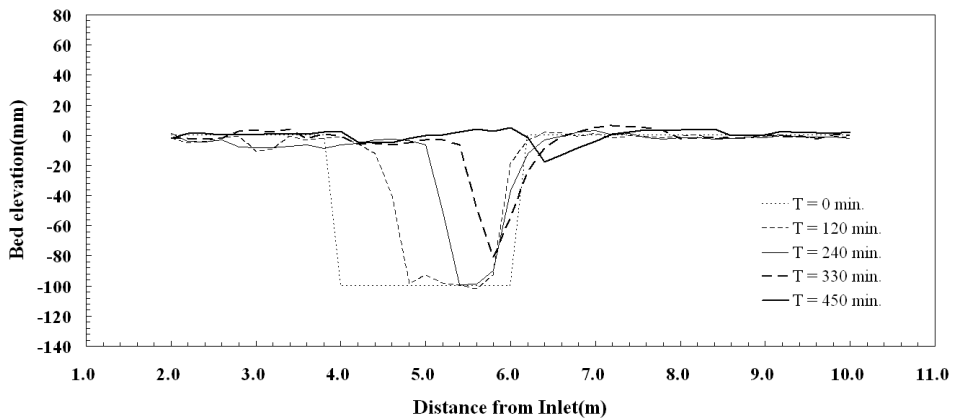
하천준설 및 골재채취로 인한 웅덩이의 변화 및 적응 과정을 파악하기 위하여 수리학적 특성을 파악하였다. 이와 같은 교란하천의 적응과정은 크게 두 단계로 나눌 수 있다. 첫째 단계는 상류에서 유사의 이동에 의하여 웅덩이(pit)가 퇴메워지는 단계이고, 둘째 단계는 웅덩이가 퇴메워지고 나서 하류로 이동하는 단계이다 (Lee et al., 1993). 웅덩이가 퇴메워지는 단계에서 초기에는 웅덩이 상류 끝단에서 침식이 강하게 발생하고, 웅덩이의 침식에 의해 발생한 유사는 웅덩이에 의하여 포착되며, 웅덩이의 퇴메우기가 시작된다. 이 과정에서 웅덩이의 하상고는 상승하고 일정하게 유지되며, 퇴메워지는 경사각이 일정하게 유지된다. 이것은 웅덩이에 수직으로 발생하는 와류에 의해 수중에서 일정하게 안식각을 유지하고 있기 때문이



a) Run-1



b) Run-2



c) Run-3

Fig. 7. Thalweg Changes with Time

다. 웅덩이의 퇴메우기는 일정한 속도로 진행되며, 웅덩이의 끝단까지 지속된다. 웅덩이 하류에서는 미부침식이 발생하며, 시간이 증가하면서 웅덩이의 규모가 감소함에 따라 침식량이 증가하고, 하상경사가 완만해진다.

웅덩이의 위치와 규모를 정량적으로 파악하기 위해서, 가장 중요한 변수는 웅덩이 (pit)의 길이, 웅덩이의 최대 깊이, 웅덩이의 이동 속도 등이다. 골재채취로 인한 교란 하천의 적응과정을 파악하기 위하여 무차원 웅덩이 길이

와 무차원 웅덩이 깊이의 시간에 대한 변화를 분석하였다. 무차원 웅덩이 길이와 깊이의 변화는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{무차원 웅덩이 길이} = \frac{L}{y} \quad (1)$$

$$\text{무차원 웅덩이 깊이} = \frac{H_c}{y} \quad (2)$$

여기서, L =옹덩이의 길이, y =옹덩이의 상류수심, H_c = 옹덩이의 최대수심이다.

Fig. 9는 시간의 변화에 따른 무차원 옹덩이의 길이를 보여주고 있다. 시간이 증가함에 따라 옹덩이의 규모와 상관없이 무차원 옹덩이 길이는 짧아지고 있다. 또한 Fig. 10에서 보여주고 있는 것처럼, 시간이 증가함에 따라 무차원 옹덩이 깊이는 감소하는 것을 보여주고 있다. 그러나 옹덩이의 퇴메우기가 완료된 후에는 무차원 옹덩이 길이와 깊이의 변화가 거의 없다. Run-1과 Run-2 혹은 Run-3과 Run-4와 같이 옹덩이의 규모가 같을 경우에는 하상 경사가 완만한 경우에 시간에 대한 무차원 옹덩이 깊이가 증가하는 것을 보여주고 있다. 따라서 하상경사가 완만하고 골재채취장 규모가 큰 경우에 무차원 옹덩이 깊이가 큰 것을 알 수 있다.

마찰속도는 하상의 전단응력(소류력)을 물의 밀도로 나눈 값이며, 다음의 식으로 정의된다.

$$u_* = \sqrt{\tau_o/\rho} = \sqrt{ghi} \quad (3)$$

여기서, g =중력가속도 (m/s^2), h = 수심 (m), i =하상 경사이다.

무차원 마찰속도와 무차원 옹덩이 이동속도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{무차원 마찰속도} = \frac{u_*}{u_{*c}} \quad (4)$$

$$\text{무차원 옹덩이 이동속도} = \frac{U_{bc}}{u_{*c}} \quad (5)$$

$$\text{무차원 사주의 이동속도} = \frac{U_{bms}}{u_{*c}} \quad (6)$$

여기서, U_{bc} =옹덩이의 이동속도, U_{bms} =옹덩이 상류에서 발달한 사주의 이동속도, u_{*c} =유사 입자의 한계마찰속도이며, Shield 곡선으로부터 구할 수 있다.

Fig. 11은 상류 수심에 의해 무차원화 된 옹덩이 깊이 (H_c/y)와 한계 마찰속도에 의해 무차원 마찰속도 (u_*/u_{*c})의 관계를 보여주고 있다. 무차원 마찰속도가 증가하면 무차원 옹덩이 깊이는 감소한다. 규모가 동일한 하천에서 하상경사가 증가하거나 유량이 증가하여 유사의 이동이 많으면 옹덩이의 퇴메우기가 빠르게 진행되는 것을 의미한다.

Fig. 12는 무차원 옹덩이 깊이 (H_c/y)와 한계 마찰속도

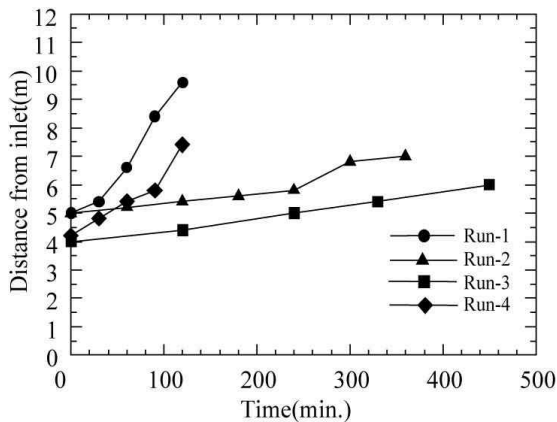


Fig. 8. Trend Line of the Pit Migration with Time

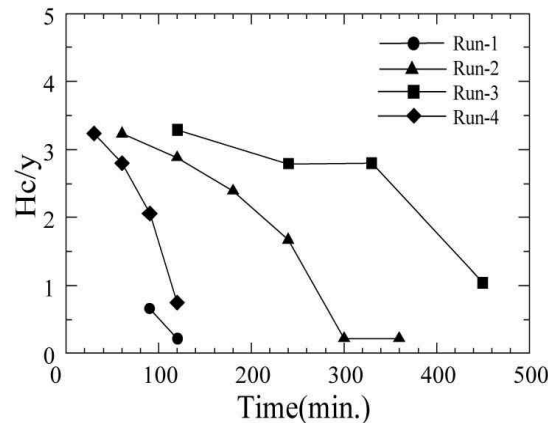


Fig. 10. Change of H_c/y with Time

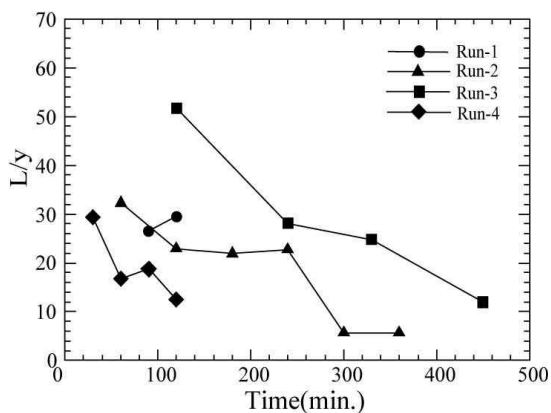


Fig. 9. Change of L/y with Time

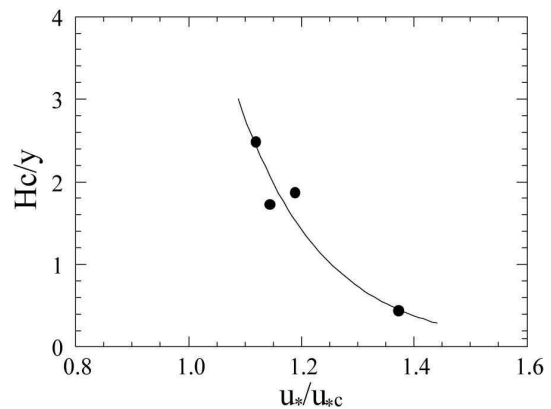


Fig. 11. Plot of H_c/y versus u_*/u_{*c}

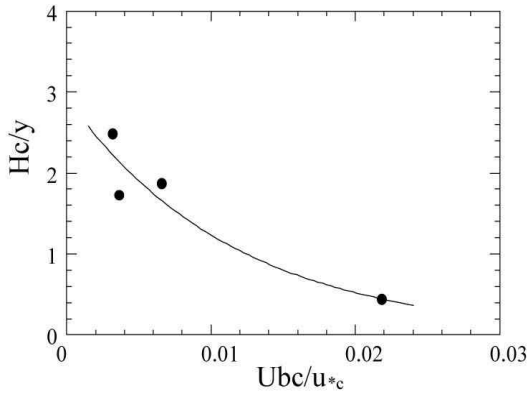


Fig. 12. Plot of Hc/y versus U_{bc}/u_{*c}

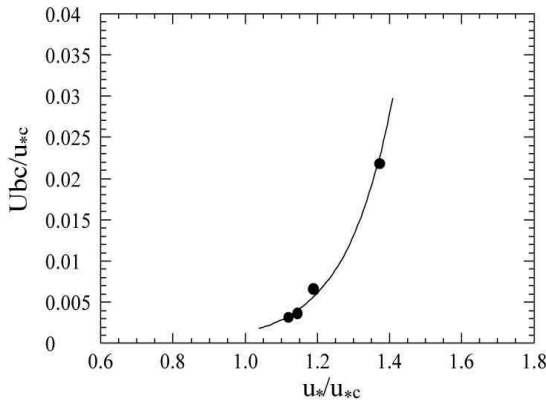


Fig. 13. Plot of U_{bc}/u_{*c} versus u_s/u_{*c}

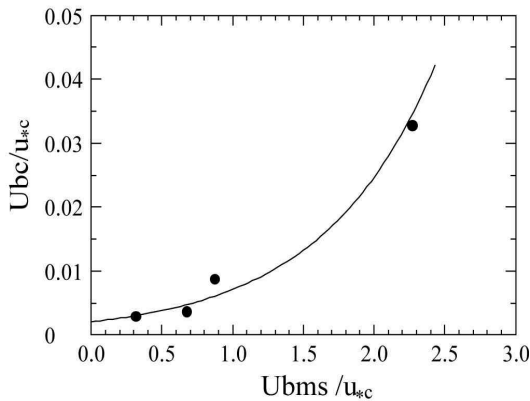


Fig. 14. Plot of U_{bc}/u_{*c} versus U_{bms}/u_{*c}

에 의해 무차원화 된 웅덩이의 이동속도 (U_{bc}/u_{*c})의 관계를 보여주고 있다. 무차원 웅덩이 이동속도가 증가하면 무차원 웅덩이 깊이가 감소하는 것을 알 수 있다. 상류에서 공급되는 유사량이 증가하여 웅덩이의 이동속도가 증가하면, 웅덩이의 되메우기가 빠르게 진행되지만, 상류에서 공급되는 유사량이 감소하게 되면 웅덩이의 되메우기가 느리게 진행되는 것을 보여준다.

Fig. 13은 한계 마찰속도에 의해 무차원화 된 웅덩이의 이동속도 (U_{bc}/u_{*c})와 마찰속도 (u_s/u_{*c})의 관계를 보여주

고 있다. 하상경사나 수심이 증가하여 무차원 마찰속도가 증가하면 무차원 웅덩이 이동속도가 증가한다. 따라서 마찰속도가 크면, 교란하천에 대한 적응이 빠른 것을 의미한다.

Fig. 14는 한계 마찰속도에 의해 무차원화 된 사주의 이동속도 (U_{bms}/u_{*c})와 웅덩이의 이동속도 (U_{bc}/u_{*c})의 관계를 보여주고 있다. 상류에서 발달한 사주의 무차원 이동속도가 증가하면 무차원 웅덩이 이동속도가 증가한다. 일반적으로 직선하도에서 사주의 이동속도는 사주의 파고, 하폭, 유사량과 관련이 있으며, 사행하천에서는 사행의 파장과 하폭의 비가 작고, 사행의 각이 증가할수록 사주의 이동성이 증가한다. 따라서 사주의 이동 속도를 지배하는 흐름과 유사량, 그리고 하천의 지형조건에 의해서 웅덩이의 이동 속도가 영향을 받게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 이동상 실내실험을 통하여 하천준설로 인한 교란하천에 대한 적응과정과 그 메커니즘을 파악하기 위하여, 하상경사 및 골재채취를 위한 준설 규모의 변화에 따른 하도의 응답 특성을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 하상경사가 급할 경우에, 웅덩이의 변화에 대하여 되메워지는 시간과 웅덩이의 이동속도가 빠르다. 골재채취에 의한 하천준설의 규모가 증가하게 되면, 웅덩이의 되메워지는 시간이 증가하게 되며, 이것은 웅덩이의 규모가 증가할수록 적응시간이 증가한다.
- 2) 준설하천에서 웅덩이의 되메우기가 진행 중일 때에는 웅덩이의 이동속도는 일정하지만, 되메우기가 완료된 후에는 웅덩이 (pit)의 이동속도가 빠르게 진행되고, 시간이 증가함에 따라 웅덩이 상류 수심에 대하여 무차원화된 웅덩이 깊이는 작아진다.
- 3) 한계 마찰속도에 대하여 무차원화된 마찰속도가 증가하면 무차원 웅덩이 깊이는 감소하고, 한계 마찰속도에 대하여 무차원화된 웅덩이 이동속도가 증가한다. 웅덩이 이동속도가 증가하면 무차원 웅덩이 깊이가 감소한다. 마찰속도의 증가는 웅덩이의 이동속도를 증가시켜서, 교란된 하천이 빠르게 적응하는 것을 의미한다.
- 4) 상류에서 발달한 사주의 이동속도와 방향은 웅덩이의 되메우기 형상과 이동 특성에 깊은 관계가 있다. 한계 마찰속도에 의해 무차원화 된 사주의 이동속도가 증가하면, 무차원 웅덩이의 이동속도도 증가한다. 상류에서 발달한 사주의 이동이 편향되면, 흐름이 집중되는 사주의 선단부의 위치에 따라 웅덩이의

형상이 변형되어 하류로 이동한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업 (06건설핵심B01)의 ECORIVER 21 사업단 연구비와 건설기술혁신사업 (08기술혁신F01)의 차세대홍수방어기술개발연구단 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

장창래, 김기홍, 정수동, 조강현, 이승휘, 배연제 (2008). **하천교란백서**, 자연과 함께하는 하천복원 기술개발 (ECORIVER21) 연구단, pp. 100-107.

장창래, 정관수 (2006). "사행하천에서 사주의 이동특성에 관한 수치실험" **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제2B호, pp. 209-216.

Cao, Z., and Pender, G. (2004). "Numerical modelling of alluvial rivers subject to interactive sediment mining and feeding." *Advances in Water Resources*, Vol. 27, pp. 533-546.

Gill, M.A. (1994). "Hydrodynamics of mining pits in

erodible bed under steady flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 11, pp. 1337-1348.

Kondolf, G.M. (1994). "Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining." *Landscape and Urban Planning*, Vol. 28, pp. 225-243.

Lee, H.Y., Fu, D.T., and Song, M.H. (1993) "Migration of rectangular mining pit composed of uniform sediments." *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 1, pp. 64-80.

Lee, H.Y., and Hwang, S.T. (1994). "Migration of backward-facing step." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 693-705.

van Rijn, L.C. (1996) "Sedimentation of dredged channels and trenches." *Handbook of coastal and ocean engineering*, Edited by Herbich, J.B., pp. 611-650.

Wu, W., and Wang, S.S.Y. (2008). "Simulation of morphological evolution near sediment mining pits using a 1-D mixed-regime flow and sediment transport model." *World Environmental and Water Resources Congress 2008*, pp. 1-10.

논문번호: 10-036	접수: 2010.04.21
수정일자: 2010.06.21/07.12	심사완료: 2010.07.12