

준설하천에서 직렬로 배열된 웅덩이의 적응에 관한 실험적 연구

장 창 래* · 이 기 하¹

(충주대학교 토목공학과, ¹충남대학교 건설방재연구소)

Experimental Study on the Adjustment Processes of a Series of Mining Pits in the Dredged Channels. Jang, Chang-Lae* and Gi Ha Lee¹ (Department of Civil Engineering, ChungJu National University; ¹Construction and Disaster Research Center, Chungnam National University)

The adjustment processes and responses of a series of mining pits by sand or gravel mining were investigated by laboratory experiments. The filling processes of the two pits were affected by the bars developed in the upstream of the channel. However, the bars were not developed and the bed was degraded in the downstream of the pits due to little sediment flow, which was trapped in the pits. The submerged angle of repose in the pits was nearly constant when the pits were being filled. After the filling processes of the pits were finished, the pit was speedily filled with sediment, and the bed was aggradated and migrated with speed. However, the angle of repose decreased. As the distance between the upstream pit and the downstream pit increased, the bed of the pit downstream was tailcutted and degraded. The migration speed of the pit decreased. However, the dimensionless pit depth increased as the distance between the pits increased. The dimensionless pit depth increased with time.

Key words : dredged channels, a series of mining pits, sediment transport, adjustment processes

서 론

하천준설 및 골재채취에 의한 하천의 인위적인 충격은 다양한 형태로 물리적, 생태적 및 환경적인 영향을 준다. 하천준설의 결과로서, 웅덩이 (pit)가 생기게 되며, 하천의 흐름 및 유사의 이송에 영향을 주게 된다. 하도준설에 의한 웅덩이 상류 끝단에서 두부침식 (headcut)이 발생하며, 하류에서는 웅덩이의 유사 포착에 의하여, 하상이 저하된다. 그리고 하상토의 조립화 및 하천의 측방 불안정성을 야기하면서, 홍수범람, 수리구조물의 불안정성 및 하천수의 취수 곤란 등 많은 문제를 야기하고 있다. 또한 지하수위를 낮추고 생태계의 서식처에 영향을 준다 (Kon-

dolf *et al.*, 2002; Rinaldi *et al.*, 2005; Jang, 2010). 그러나 하천에서 홍수시에 흐름을 원활히 소통시키거나 증가시켜서 홍수재해를 저감시킨다 (Kondolf, 1994; Gob *et al.*, 2005). 이러한 하도의 변화는 하상고, 하폭, 하상토의 구성에 변화를 주면서, 새로운 평형상태에 적응해 가지지만, 이러한 과정은 매우 복잡하고, 다양한 수리학적 특성에 의하여 변하므로 정량적으로 파악하는 것은 어렵다.

최근에 하천준설 및 골재채취로 인한 인위적인 충격이 가해진 하천에서 역학적 거동과 적응과정을 파악하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 하천준설 및 골재채취에 의한 웅덩이 (pit)의 적응 과정은 상류에서 공급되는 유사의 특성에 의해 영향을 받는다. 상류에서 공급되는 유사량이 증가하면 웅덩이의 최대 세굴깊이는 증가한다. 그리고 웅

* Corresponding author: Tel: 043) 841-5183, Fax: 043) 841-5180, E-mail: cljang@cjnu.ac.kr

덩이는 유사 공급이 없고, 유사 거동에 의하여 사구 (dune)와 같은 소규모 하상파가 발생하지 않는 비평형 상태에서 일정한 속도로 이동한다 (Lee *et al.*, 1993; Gill, 1994). 웅덩이 상류에서 발생하는 두부침식은 상류에서 공급되는 유사량의 변화에 따라 하상의 후방 단차 (backward-facing step)의 변형과 이동 특성이 변하게 된다 (Lee and Hwang, 1994).

상류에서 발달한 사주의 이동속도와 방향은 웅덩이의 퇴폐우기 형상과 이동 특성에 깊은 관계가 있다. 한계 마찰속도에 의해 무차원화된 사주의 이동속도가 증가하면 웅덩이의 이동속도는 증가하며, 흐름이 집중되는 사주의 선단부 위치에 따라 웅덩이의 형상이 변형된다 (Jang, 2010; Jang and Jung, 2010).

층적하천에서 골재채취 및 하천준설에 의한 다양한 영향을 평가하기 위해서는 흐름, 유사의 이송 및 지형변화의 복잡한 상호작용을 이해하는 것이 중요하며, 최근에는 수치모형을 이용하여 역학적 거동을 파악하고 있다. 골재채취로 인한 준설하천의 설계 및 관리를 위하여 1차원 수치모형을 이용하여 두부침식과 미부침식 (tailcut)의 최대 깊이와 최대 길이에 대한 경험적인 포락관계 (envelope relations)가 제시되었다 (Wu and Wang, 2008). 또한 주운을 위하여 준설된 하구에서 조류의 영향에 의해 부유사의 농도 변화를 분석하고, 조류의 흐름 방향과 준설방향의 변화에 따른 퇴적과정을 2차원 하상변동 수치모형을 이용하여 검토되었다 (van Rijn, 1996).

실제하천에서는 하천준설 및 골재채취에 의하여 웅덩이가 다양하게 배열되어 존재한다. 웅덩이의 규모가 같은 경우에도, 웅덩이의 배열에 따라 유사의 포착율이 다르고, 하류에 이송하는 유사량이 변화되므로, 하류 하천에 미치는 물리적인 영향이 다르게 된다. 그러나 기존에 수행된 연구는 웅덩이의 배열을 고려하지 않고 단일 웅덩이에서 하상변동에 대하여 연구가 수행되어 왔으며, 웅덩이의 배열을 고려한 실제하천에서 하천의 반응과 적응과정을 정량적으로 파악하는 데 많은 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 웅덩이의 규모가 일정할 때, 웅덩이의 직렬 배치에 따른 하도의 적응과정과 응답 특성을 이동상 실내실험을 수행하여 분석하였다.

재료 및 방법

1. 실험 조건

일반적으로 하천의 준설로 인하여 웅덩이 (pit)가 생기게 되면, 흐름 및 유사이송 특성에 영향을 주게 된다. 웅

덩이 주변에서 발생하는 하천의 지형변화 특성은 초기에 웅덩이 상류부에 침식이 발생하며, 이로 인하여 지속적으로 웅덩이 내부에서 퇴적 현상이 발생하게 된다. 또한 웅덩이 직하류는 웅덩이에서 포착된 유사에 의해 하상이 침식되게 된다. 웅덩이에 대한 유사의 퇴적 과정에 급격한 수심의 변화에 의하여 와류가 발생하게 되지만, 흐름의 가속구간 (acceleration zone)에서는 이러한 연직 방향의 와류가 소멸하게 된다 (Fig. 1).

이동상 실내실험을 수행하기 위하여 수로는 하상경사를 조절할 수 있는 가변형 경사수로를 사용하였다. 실험 수로의 크기는 길이 12 m, 폭 0.9 m, 높이 0.6 m이며, 지하 저수조에서 펌프를 이용하여 상류단 leveling 탱크로 물을 공급하는 순환형 물순환 시스템을 갖추고 있다 (Fig. 2). 수로의 하류단에 sluice gate가 설치되어 있으며, 하류단 수위를 조절할 수 있다. 수로의 측벽은 좌안이 아크릴판으로서 실험 중에 수로 내부를 볼 수 있으며, 우안

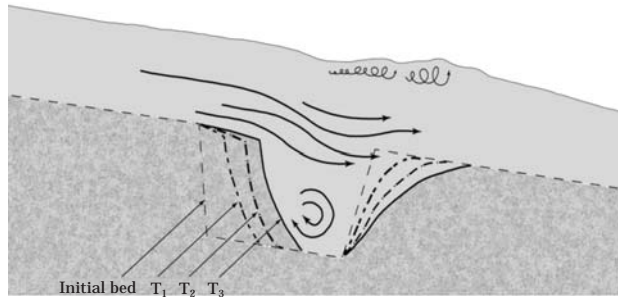


Fig. 1. Sketch of Backfilling in the mining pit (Jang and Jung, 2010).

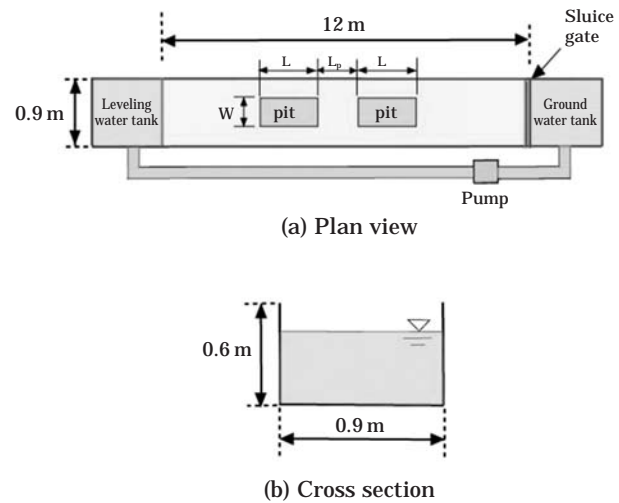


Fig. 2. Sketch of experimental setup: (a) plan view, (b) cross section.

Table 1. Experimental conditions.

CASE	Discharge (m ³ s ⁻¹)	Depth (cm)	Bed slope	Fr	Dia. of bed material (mm)	Sediment feeding rate (m ³ s ⁻¹)	Dredging dimension			
							Length (m)	Depth (m)	Number of pits (EA)	Distance between pits (m)
Run-1	0.015	3.9	1/300	0.68	1.2	0.0205	2.0	0.1	1	-
Run-2	0.015	3.3	1/300	0.67	1.2	0.0166	1.0	0.1	2	0.5
Run-3	0.015	3.3	1/300	0.67	1.2	0.0183	1.0	0.1	2	1.0

은 철재로 구성되어 있다. 실험 중에 각 지점의 수위 및 하상고 계측은 1/100 mm까지 측정 가능한 전자식 point gauge를 이용하였다.

2. 실험 방법

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 만들었다 (Fig. 2(a)). 이동상 실내실험을 위하여 하상재료를 선정할 때에 실험 중에 유사가 표면장력으로 인하여 흐름과 달리 독립적으로 이동하거나 위로 떠오르지 않아야 하며, 부유사가 발생하지 않고, 하상에서 사륜 (ripple)이 발생되지 않아야 한다 (Jang and Jung, 2010). 따라서 본 실험을 위해 사용된 모래는 이러한 조건을 충분히 만족하도록 D₅₀=1.2 mm, D_m=1.29 mm, D₃₅=1.05 mm, 표준편차는 1.37이고, 비중은 2.55~2.65인 주문진 여과사를 사용하였다.

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 2 m 지점에서 하류 10 m 지점까지, 수로의 횡방향으로 5 cm, 종방향으로 20 cm 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 자세히 나타나 있다. 여기서, 웅덩이의 규모가 같을 때, 웅덩이의 이격거리의 변화에 따른 적응과정을 파악하기 위하여 실내실험을 수행하였다. 하상경사는 1/300, 유량은 0.015 m³ s⁻¹이며,

하상토는 1.2 mm이다. Run-1은 웅덩이 규모가 2 m (길이) × 0.5 m (폭) × 0.1 m (깊이)이고, 웅덩이의 이격거리는 없는 조건이다. Run-2는 1 m (길이) × 0.5 m (폭) × 0.1 m (깊이)의 웅덩이 2개로서, 규모는 Run-1과 같지만, 상류에 위치한 웅덩이와 하류에 위치한 웅덩이의 이격거리는 0.5 m이다 (Fig. 2(a)). Run-3은 Run-2와 같은 조건에서 웅덩이와 웅덩이의 이격거리가 1.0 m이다.

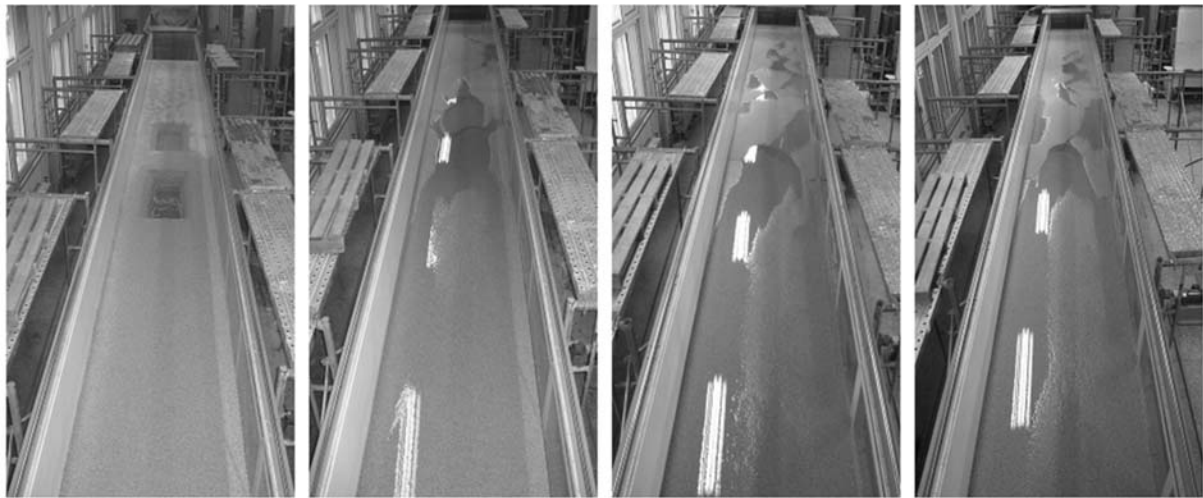
결과 및 고찰

1. 웅덩이의 퇴메우기 과정

Fig. 3은 하상굴착에 의하여 웅덩이가 직렬로 2개 발생하였을 때, 하천의 적응과정을 파악하기 위한 Run-2의 실험결과이며, 시간이 증가함에 따라 웅덩이의 변화 과정을 사진으로 보여주고 있다. 1차 웅덩이의 굴착 지점은 상류에서 4.0 m 지점에서 5.0 m까지 길이 1.0 m, 폭 0.5 m, 깊이 0.1 m의 규모이며, 2차 웅덩이는 5.5 m에서 6.5 m 지점까지 같은 규모로 굴착하였으며, 1차 웅덩이와 2차 웅덩이의 이격거리는 0.5 m이다 (Fig. 3(a)). 통수 개시 후, 초기에는 상류에 있는 1차 웅덩이에서 급격한 두부침식 (head cut)이 발생하였으며, 이러한 두부침식은 급격하게 상류로 전파되었다. 그러나 10분 후에는 상류에서 공급되는 유사에 의해 두부침식이 감소되었으며, 1차 웅덩이가 퇴메워지기 시작하였다. 2차 웅덩이는 상류에서 유입되는 유사가 1차 웅덩이에서 포착되면서 유사의 공급이 거의 없으므로, 약간 두부침식이 발생하였다.

시간이 증가하면서, 웅덩이의 퇴메우기 과정은 1차 웅덩이 상류에서 하류로 순차적으로 진행되었다. 1차 웅덩이 상류에서 2열 복렬사주의 발달로 인하여 흐름의 집중화 현상이 발생하였으나, 웅덩이 하류에서는 사주가 발달되지 않았다 (Fig. 3(b), 3(d)).

Fig. 4는 Run-1에 대한 실험결과로서, 하천준설에서 발생한 1개의 웅덩이에 대한 적응과정과 이동 특성을 평면적으로 보여주고 있다. 통수 30분 후에, 흐름의 집중에



(a) T=0 min.

(b) T=30 min.

(c) T=90 min.

(d) T=120 min.

Fig. 3. Experimental results (Run-2).

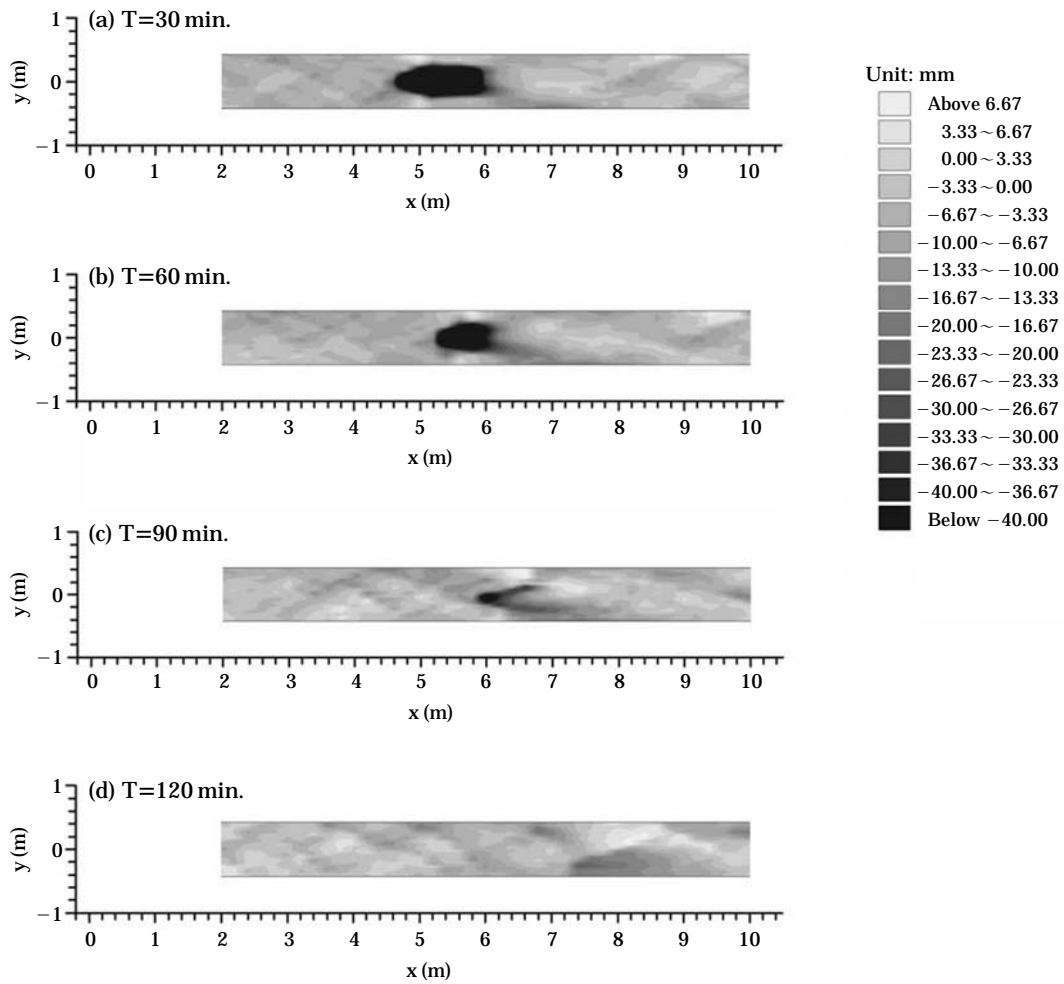


Fig. 4. Morphological changes with time (Run-1).

의하여, 웅덩이의 중앙에서보다 양쪽 측면에서 웅덩이의 퇴메우기가 진행되었다. 시간이 증가하면서, 웅덩이 하류에서는 흐름이 분열되어 웅덩이의 양쪽 측면에서 하상이 저하되었다 (Fig. 4(b), 4(c)). 통수 120분 후에는 웅덩이의 퇴메우기가 거의 완료되면서, 새로운 평형상태에 도달하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 하천준설에 의하여 직렬로 발생한 2개의 웅덩이에 대한 적응과정과 이동 특성을 Run-2와 Run-3의 실험결과를 통하여 보여주고 있다. Run-2에 대하여, 통수 30분 후에, 상류에 위치한 1차 웅덩이는 0.6 m 정도 퇴메우기가 진행되었고, 하류에 위치한 2차 웅덩이는 그 형상을 유지하며 약 0.1 m 정도 퇴메우기가 진

행되었다. 1차 웅덩이 상류에서는 2열 복렬사주의 발달로 인하여 흐름의 집중화 현상이 발달하고, 골재채취 지점인 웅덩이에서 두부침식이 발달하였다. 1차 웅덩이의 하류에서는 흐름이 양쪽으로 분열되어 좌안과 우안에서 하상이 저하되었다. 2차 웅덩이 하류에서 좌안과 우안에서 흐름이 가속화되어 하상이 저하되었다. 2차 웅덩이 하류에서는 사주가 발달되지 않았으며, 상류에서 공급되는 유사가 웅덩이에서 포착되어 하상이 저하되었다 (Fig. 5(a)). 통수 60분 후에, 상류에 위치한 1차 웅덩이는 거의 퇴메우기가 완료되었으며, 2차 웅덩이도 약 0.5 m 정도 퇴메우기가 진행되었다. 1차 웅덩이는 상류에서 발달한 2열 복렬사주의 발달로 인하여, 흐름이 집중화되고, 하상

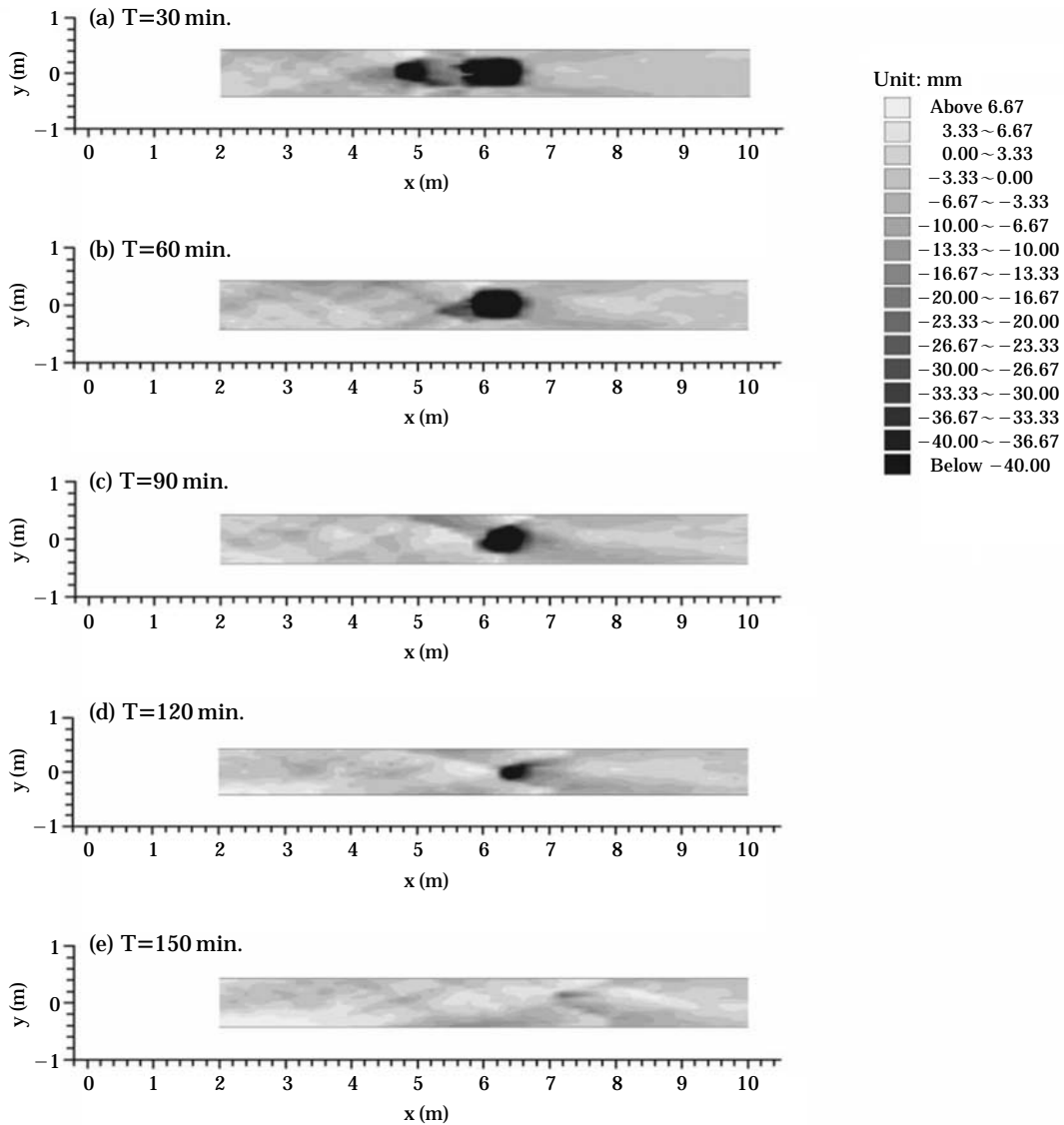


Fig. 5. Morphological changes with time (Run-2).

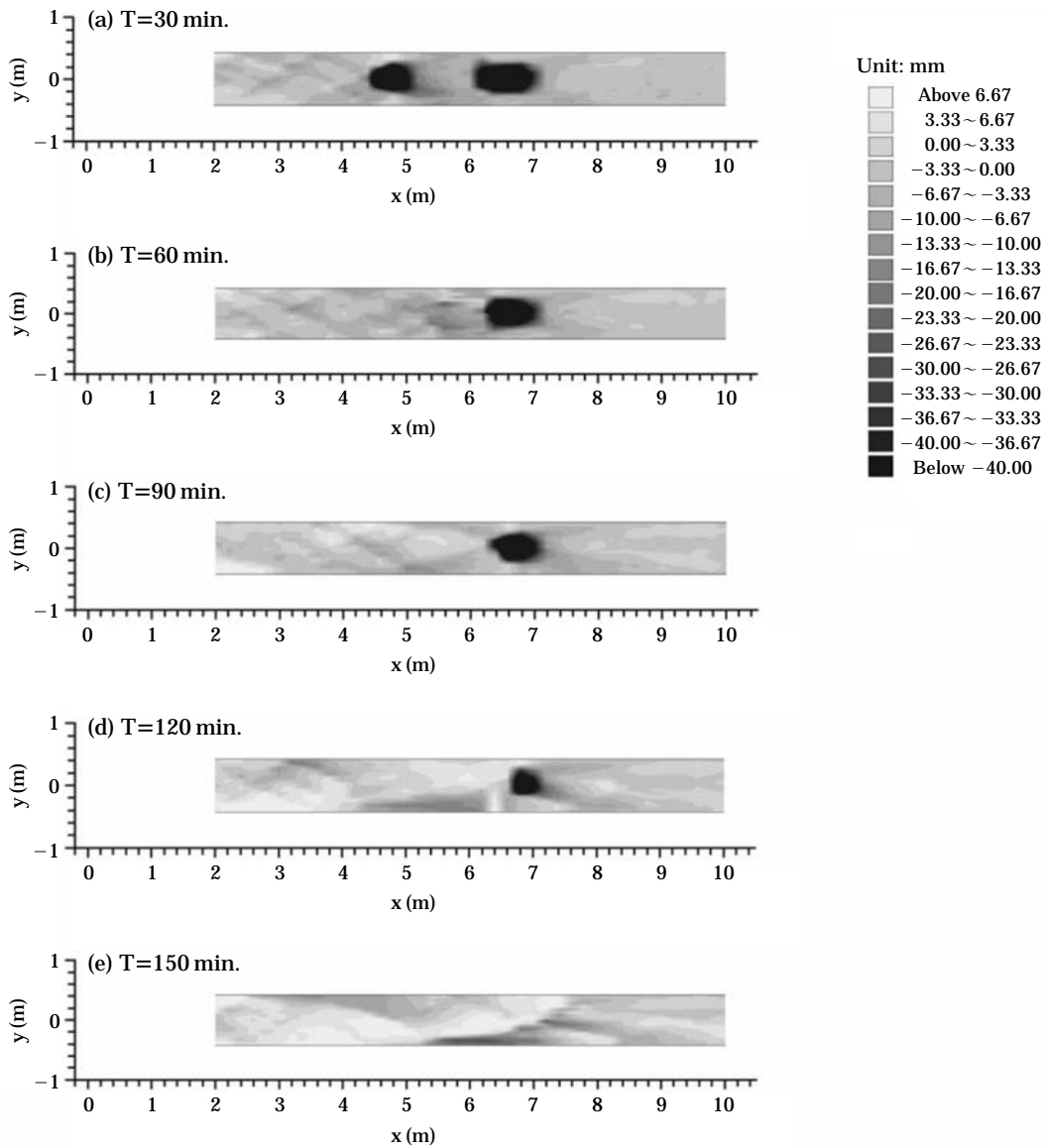


Fig. 6. Morphological changes with time (Run-3).

이 저하되었다. 2차 웅덩이 하류에서 흐름이 좌안과 우안으로 분리되어 하상이 저하되어, 미부침식이 발생하였으며, 중앙에서는 하상저하가 발생하지 않았다(Fig 5(b)). 이것은 흐름이 가속되는 경사면에서 연직방향의 와류가 소멸하고, 유속분포가 균일하게 되며, 유속이 가속되기 때문으로 판단된다(van Rijn, 1996; Jang and Jung, 2010).

상류에 위치한 1차 웅덩이의 퇴메우기가 완료된 후, 2차 웅덩이는 퇴메우기가 진행되었으며, 2차 웅덩이 하류에서 하상이 지속적으로 저하되고 있다(Fig. 5(c)). 웅덩이 상류에서는 2열 복렬사주가 발달하여 하류로 이동하고 있다. 웅덩이 지점은 흐름이 집중되고 있으며, 유사가

포착되어 좌안과 우안에서 사주의 선단부가 발달하여 상류에서 7 m 지점까지 발달하였다. 웅덩이 하류에서는 좌안과 우안뿐만 아니라, 중앙에서도 하상이 지속적으로 저하되고 있다(Fig. 5(d)). 시간이 증가하면서, 웅덩이의 퇴메우기가 거의 완료되었으며, 7.2 m 지점에서는 2차 웅덩이의 영향으로 scour hole이 발달하여 하류로 이동하고 있다(Fig. 5(e)). 이것은 웅덩이의 퇴메우기가 완료되면서, 새로운 환경에 하천이 적응하는 과정을 보여주고 있다.

Fig. 6은 웅덩이의 이격거리가 증가함에 따라, 웅덩이의 적응과정에 대한 Run-3의 실험결과를 보여주고 있다. 1차 웅덩이 상류에서 발달한 사주와 웅덩이에서 하상의

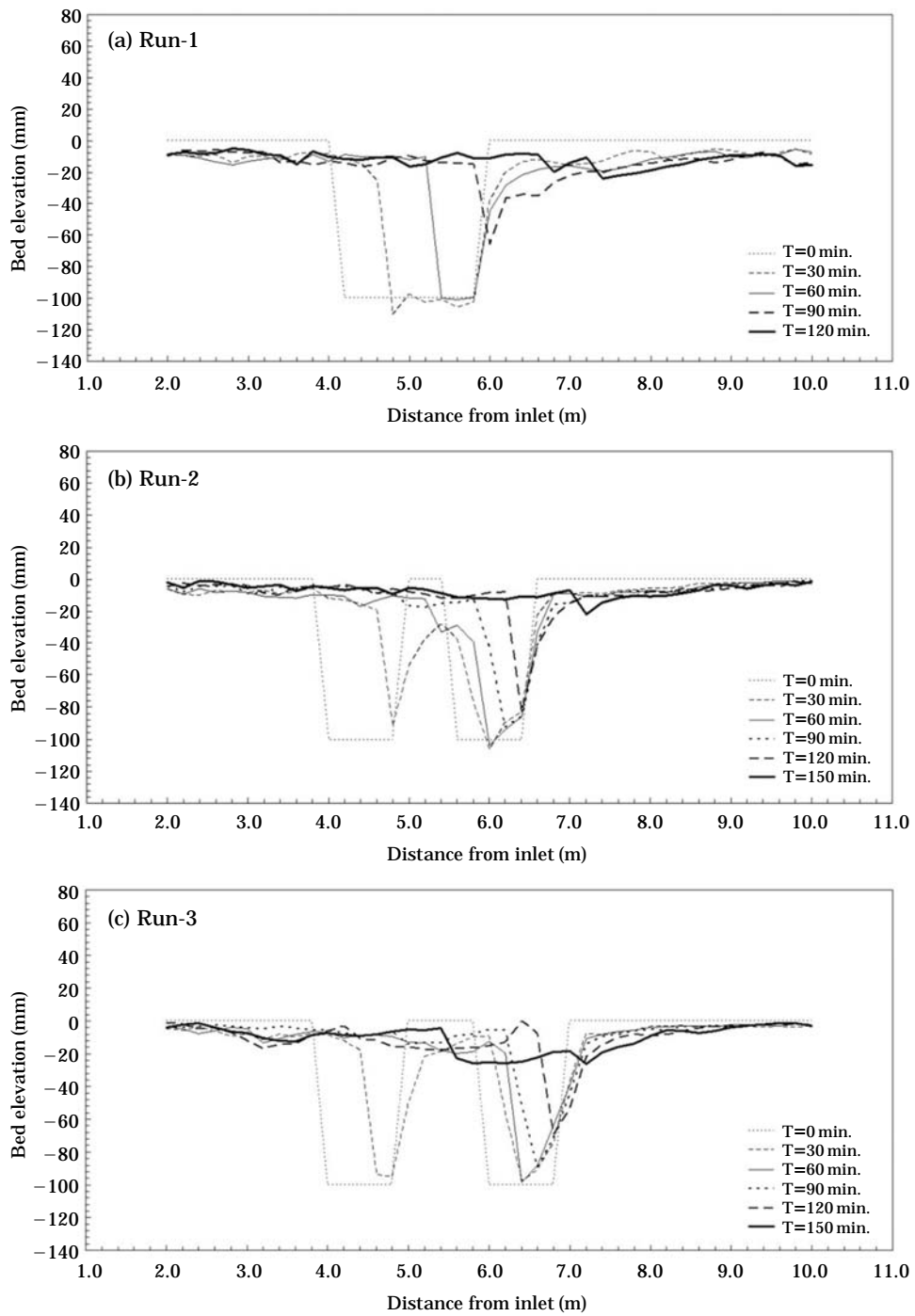


Fig. 7. Thalweg changes with time for each run.

마찰응력이 감소하면서 흐름의 집중화 현상이 발달하였다. 웅덩이 형상은 마제형으로 상류에서는 둥근 원형을 유지하며, 웅덩이 폭이 좁아지면서 되메우기가 진행되었다 (Fig. 6(b)).

시간이 증가하면서, 웅덩이에 의하여 상류에서 공급되

는 유사의 차단으로, 2차 웅덩이 하류의 중앙에서 하상이 지속적으로 저하되고 있다 (Fig. 6(d)). 웅덩이 상류에서는 교호사주가 발달하여 하류로 이동하고 있다. 웅덩이 지점은 교호사주의 선단에 위치하고 있으며, 흐름이 집중되고 있다. 2차 웅덩이 하류에서는 웅덩이에 의하여 유사 가 포

착되어 좌안과 우안에서 흐름이 분리되어 하상이 지속적으로 저하되고 있다. 2차 웅덩이의 퇴메우기가 거의 완료된 후에도 웅덩이의 상류에서는 교호사주가 발달되어 하류로 이동하고 있으나, 사주의 선단부 하류에서는 하상이 불규칙적으로 발달하고 있다. 그러나 웅덩이에서 유사의 포착에 의하여, 웅덩이 하류에서는 사주가 발달되지 않고 있으며, 하상이 지속적으로 저하되는 현상이 나타나고 있다 (Fig. 6(e)).

Fig. 7은 각각의 실험에 대한 종방향 하상고의 변화를 보여주고 있다. 시간이 증가함에 따라, 웅덩이 (pit)가 퇴메워지면서 하류로 이동하고 있다. Run-1과 같이 단일 웅덩이인 경우에 시간이 지속됨에 따라 웅덩이가 지속적으로 퇴메워지고 있다 (Fig. 7(a)). 웅덩이의 퇴메우기가 진행될 때, 웅덩이의 이동속도는 균일하며, 웅덩이의 수중 안식각은 일정하게 유지되고 있다. 이것은 웅덩이 상류에서 흐름의 분리 및 연직방향으로 발생한 와류 (vortex)에 의하여, 안식각이 크고 일정하게 유지되는 것으로 판단된다 (Jang and Jung, 2010). 웅덩이의 퇴메우기가 거의 완료되면서, 하상고는 높아지고 웅덩이의 이동속도는 빠르게 진행되며, 웅덩이의 수중 안식각은 작아지고 있다.

Fig. 7(b)는 하천준설 혹은 골재채취로 인하여 발생한 웅덩이가 규모는 같으나, 웅덩이와 웅덩이의 이격거리가 0.5 m인 경우에 Run-2에 대한 종방향 하상고의 시간적 변화를 보여주고 있다. 시간이 증가함에 따라, 상류에서부터 순차적으로 웅덩이가 퇴메워지고 있다. 통수 후 60분에 1차 웅덩이의 퇴메우기가 거의 완료되었으며, 2차 웅덩이의 퇴메우기가 시작될 때, 1차 웅덩이보다 2차 웅덩이의 하상경사가 급한 것을 보여주고 있다. 이것은 웅덩이가 퇴메워지면서 규모가 작아져서 웅덩이의 수중 안식각이 작아졌기 때문이다.

Fig. 7(c)는 하천준설 혹은 골재채취로 인하여 발생한 웅덩이가 규모가 Run-2와 같으나, 웅덩이와 웅덩이의 이격거리가 1.0 m인 경우에 Run-3에 대한 종방향 하상고의 시간적 변화를 보여주고 있다. 웅덩이의 적응과정은 Run-2와 같으나, 2차 웅덩이 하류에서 미부침식이 지속적으로 발생하고 있으며, 그 크기는 Run-2가 큰 것을 보여주고 있다. 즉, 웅덩이의 규모는 같으나, 웅덩이와 웅덩이의 이격거리가 커질수록, 웅덩이 하류에서 하상고가 더 저하되고 있으며, 하상이 회복되는 데 시간이 오래 걸리는 것을 보여주고 있다.

2. 웅덩이의 이동 특성 및 적응 메카니즘

Fig. 8은 시간에 따른 웅덩이의 이동 추세를 보여주

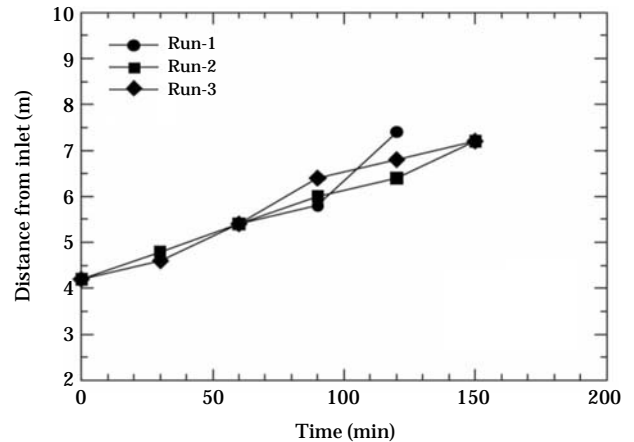


Fig. 8. Trend line of the pits migration with time for each run.

고 있다. Run-1에서 웅덩이는 90분까지 일정하게 이동하다가 웅덩이의 퇴메우기가 끝난 후인 90분부터는 웅덩이의 이동속도가 빠른 것을 알 수 있다.

Run-2에서는 통수 후 60분까지는 웅덩이의 이동거리가 거의 일정하지만 90분에는 약간 증가하는 것을 보여주고 있으나, 그 이후에는 다시 작아지는 것을 보여주고 있다. 이것은 90분에는 상류에 위치한 1차 웅덩이가 완전히 퇴메워지고 나서, 하류에 위치한 2차 웅덩이가 퇴메워지는 것을 의미한다. Run-3에서는 통수 후 60분까지는 웅덩이의 이동거리가 Run-2와 마찬가지로 거의 일정하지만 90분에는 이동거리가 현저하게 많았다. 이것은 90분에서 Run-2보다 Run-3에서 웅덩이와 웅덩이의 이격거리가 크고 이동속도가 빠른 것을 의미한다. 120분에서 Run-1이 Runs-2와 3보다 이동거리가 많은 것은 웅덩이의 퇴메우기가 완료되었기 때문으로 판단된다. Run-2와 Run-3에서는 웅덩이의 이동거리가 Run-1보다 작은 것은 2차 웅덩이에서 퇴메우기가 진행되고 있기 때문이다.

골재채취로 인한 웅덩이의 이격거리에 따른 변화 및 적응과정을 파악하기 위하여 수리학적 특성을 파악하였다. 골재채취로 인한 교란하천의 적응과정은 크게 두 단계로 나눌 수 있으며, 첫째 단계는 상류에서 유사의 이동에 의하여 웅덩이 (pit)가 퇴메워지는 단계이고, 둘째 단계는 웅덩이가 퇴메워지고 나서 하류로 이동하는 단계이다 (Lee et al., 1993).

웅덩이의 퇴메우기 과정을 정량적으로 파악하기 위해서, 가장 중요한 변수는 웅덩이 (pit)의 길이, 웅덩이의 최대 깊이, 웅덩이의 이동 속도 등이다 (Jang and Jung, 2010). 골재채취로 인한 교란하천의 적응과정을 파악하기 위하여 무차원 웅덩이 길이와 무차원 웅덩이 깊이의

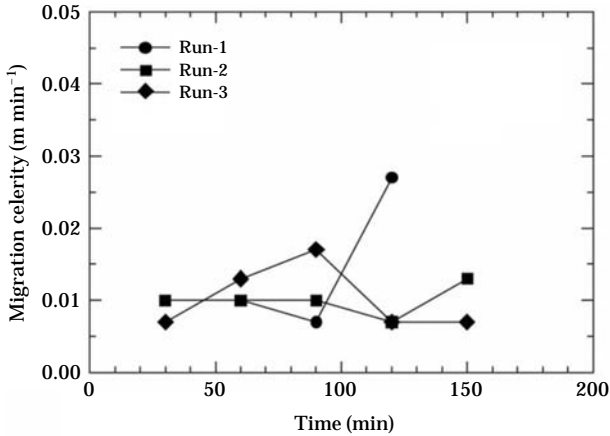


Fig. 9. Migration celerity of the pits with time for each run.

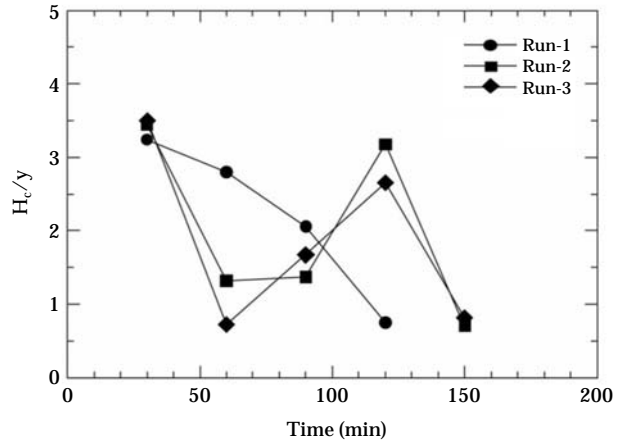


Fig. 10. Change of H_c/y with time for each run.

시간에 대한 변화를 분석하였다. 무차원 웅덩이 길이와 깊이의 변화는 다음과 같이 정의된다 (Jang and Jung, 2010).

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

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

여기서, L =웅덩이의 길이, y =웅덩이의 상류 수심, H_c =웅덩이의 최대 수심이다.

Fig. 9는 시간의 변화에 따른 웅덩이의 이동속도를 보여주고 있다. Run-1에서 웅덩이의 이동속도는 90분까지 일정하게 유지하다가, 120분에 급격하게 증가하고 있다. 이것은 120분에 웅덩이의 퇴메우기가 거의 완료되는 것을 의미한다. Run-2에서 웅덩이의 이동속도는 90분까지 증가하다가 120분에 감소하지만, 150분에 다시 증가하는 것을 보여주고 있다. 이것은 60분까지 1차 웅덩이가 퇴메워지고, 90분에는 scour hole이 1차 웅덩이와 2차 웅덩이에 위치하므로, 웅덩이의 이동속도가 증가한다. 120분 후에는 2차 웅덩이가 퇴메워지므로, 웅덩이의 이동속도가 감소한다. Run-3에서 웅덩이는 90분까지 거의 일정하게 유지하다가, 120분부터 감소하고 있다.

Fig. 10은 시간의 변화에 따른 무차원 웅덩이의 깊이 (H_c/y) 변화를 보여주고 있다. Run-1에서 시간이 증가함에 따라, 무차원 웅덩이의 깊이는 지속적으로 감소하고 있다. Run-2와 Run-3에서 90분까지 무차원 웅덩이의 깊이가 감소하지만, 120분에 다시 증가하고 있다. 즉, 무차원 웅덩이의 깊이는 웅덩이가 퇴메워지는 동안에 감소한다. 따라서 웅덩이와 웅덩이의 이격거리가 증가할수록,

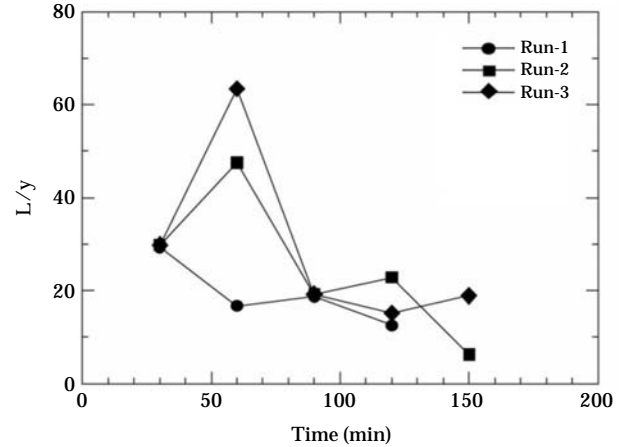


Fig. 11. Change of L/y with time for each run.

무차원 웅덩이 길이는 증가한다.

Fig. 11은 시간의 변화에 따른 무차원 웅덩이의 길이 (L/y) 변화를 보여주고 있다. Run-1에서 시간이 증가함에 따라, 무차원 웅덩이의 길이가 지속적으로 감소하고 있다. Run-2와 Run-3에서 무차원 웅덩이 길이는 초기 60분까지는 증가하지만, 시간이 증가하면서 감소하고 있다. 또한 Run-2의 무차원 웅덩이 길이는 Run-3보다 대체적으로 작은 것을 보여주고 있다. 따라서 웅덩이와 웅덩이의 이격거리가 클수록 무차원 웅덩이 길이가 커지는 것을 알 수 있다.

3. 수리학적 상사법칙을 이용한 실제 하천에 대한 규모 검토

실내실험 결과를 실제 하천에 적용할 때, 실험결과를 실제하천의 규모로 전환시켜서 파악해야 하며, 이를 위해

서는 수리학적 상사성 (hydraulic similarity)이 성립되어야 한다. 하천의 지형학적 변화를 파악하기 위한 실험은 자유수면이 있는 흐름의 특성은 중력의 작용에 의하여 결정되므로, Froude 상사법칙을 적용하여 수행하여야 하며, 정상모형 (undistorted model) 상태에서 하천의 지배유량 (Q_w), 하천의 저수로 폭 (B), 웅덩이의 길이 (L_d), 웅덩이의 이격거리 (D_b), 시간 (t)은 다음과 같이 표현한다 (Cantelli et al., 2004).

$$(Q_w)_p = \lambda^{\frac{5}{2}} (Q_w)_m \quad (3a)$$

$$(B)_p = \lambda (B)_m \quad (3b)$$

$$(L_d)_p = \lambda (L_d)_m \quad (3c)$$

$$(D_b)_p = \lambda (D_b)_m \quad (3d)$$

$$(t)_p = \lambda^{\frac{1}{2}} (t)_m \quad (3e)$$

여기서, 첨자 “ p ”는 원형 (prototype)을 나타내고, “ m ”은 모형 (model)을 나타낸다.

실제 하천의 규모를 파악하기 위하여, 최근에 하천준설 및 골재채취가 빈번하게 수행된 낙동강의 제1지류인 감천을 대상으로 규모를 파악하였다. 하천의 하상 및 지형 변동에 가장 크게 영향을 미치는 지배유량인 (Q_w)_p는 1,069 m³ s⁻¹이며, 실험에 사용된 유량인 (Q_w)_m는 0.015 m³ s⁻¹이므로, 원형과 모형의 비 (λ)는 식 (3a)에 의하여 87이 된다. 이를 기준으로, 지배유량이 통과하는 저수로 폭인 (B)_p는 80 m이다. 실험 Run-1에서 적용된 웅덩이의 길이인 (L_d)_m이 2 m는 감천과 같은 규모의 실제 하천에서 웅덩이 길이 (L_d)_p가 174 m에 해당되며, 실험 Run-2와 3에서 적용된 웅덩이의 길이 1 m는 하천에서 87 m에 해당된다. 또한 실험에서 웅덩이 이격거리 (D_b)_m이 0.5 m는 하천에서 (D_b)_p가 43.5 m에 해당되며, 웅덩이 이격거리가 1 m인 경우에는 실제하천에서 87 m가 된다. Run-1의 조건에서 실제 하천에서 웅덩이가 되메워지는 데에는 약 16시간 소요되며, Run-2와 Run-3의 조건에서는 24시간이 소요된다.

적 요

본 연구는 하천준설 및 골재채취로 인하여 2개의 웅덩이가 직렬로 발생하였을 때, 이동상 실내실험을 수행하여 웅덩이의 적응과정과 응답특성을 분석하였다. 웅덩이의 되메우기 과정은 웅덩이 상류에서 발달한 사주의 영향을 받지만, 웅덩이 하류에서는 웅덩이에서 유사가 포착되어

사주가 발달되지 않았으며, 하상이 지속적으로 저하되었다. 웅덩이의 되메우기가 진행될 때, 웅덩이의 이동속도는 거의 일정하며, 웅덩이의 수중 안식각은 일정하게 유지되었다. 그러나 웅덩이의 되메우기가 거의 완료되면서, 웅덩이의 이동속도는 증가하고, 웅덩이에서 수중 안식각은 작아졌다. 웅덩이와 웅덩이의 이격거리가 증가하면, 2차 웅덩이 하류에서 미부침식이 크게 발생하였다. 또한 웅덩이의 이격거리가 증가할수록 웅덩이의 이동속도는 감소하였다. 이것은 웅덩이가 되메워지는 데 시간이 증가하고, 웅덩이 하류하천에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다. 시간이 증가함에 따라, 무차원 웅덩이의 깊이는 지속적으로 감소하지만, 웅덩이의 이격 거리가 증가할수록, 무차원 웅덩이 깊이는 증가하였다. 그러나 무차원 웅덩이의 깊이는 시간이 증가함에 따라서 전체적으로 감소하지만, 웅덩이와 웅덩이의 이격 거리가 증가할수록, 무차원 웅덩이의 깊이가 증가하는 경향을 보여주었다.

사 사

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업 (06건설핵심B01)의 ECORIVER21 사업단 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

인 용 문 헌

- Cantelli, A., C. Paola and G. Parker. 2004. Experimental on upstream-migrating erosional narrowing and widening of and incisional channel caused by dam removal. *Water Resources Research* **40**: W03304, doi:10.1029/2003WR002940.
- Gill, M.A. 1994. Hydrodynamics of mining pits in erodible bed under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* **120**: 1337-1348.
- Gob, F., G. Houbrechts, J.M. Hives and F. Petit. 2005. River dredging, channel dynamics and bed load transport in an incised meandering river (The river semois, Belgium). *River Res. Applic* **21**: 791-804.
- Jang, C.-L. 2010. Numerical modeling of the adjustment processes of mining pit in the dredged channels. *Journal of Korea Water Resources Association* **43**: 921-932 (in Korean).
- Jang, C.-L. and K. Jung. 2010. Experimental study on the adjustment processes of mining pit in the dredged channels. *Journal of Korea Water Resources Association* **43**:

- 657-666 (in Korean).
- Kondolf, G.M. 1994. Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning* **28**: 225-243.
- Lee, H.Y. and S.T. Hwang. 1994. Migration of backward-facing step. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* **120**: 693-705.
- Lee, H.Y., D.T. Fu and M.H. Song. 1993. Migration of rectangular mining pit composed of uniform sediments. *Journal of Hydraulics Engineering, ASCE* **119**: 64-80.
- Rinaldi, M., B. Wyqga and N. Surion. 2005. Sediment mining in alluvial channel: physical effects and management perspectives. *River Res. Applic* **21**: 805-828.
- van Rijn, L.C. 1996. Sedimentation of dredged channels and trenches, p. 611-650. *In: Handbook of coastal and ocean engineering* (Herbich, J.B., ed.).
- Wu, W. and S.SY. Wang. 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**: 1-10.
- (Manuscript received 16 August 2011,
Revised 1 December 2011
Revision accepted 21 December 2011)