

실내실험에 의한 혼합사로 구성된 하상 표층에서 지형변동에 따른 유사의 분급 특성 분석

Experimental Study on the Sediment Sorting Processes of the Bed Surface by Geomorphic Changes in the Alluvial Channels with Mixed Grain Size

장 창 래*

Jang, Chang-Lae

Abstract

The development of bars and sediment sorting processes in the braided channels with the mixed grain sizes are investigated experimentally in this study. The sediment in the steep slope channels discharges with highly fluctuation. However, it discharges with relatively periodic cycles in the mild slope channels. The characteristics and amplitudes of the dominant bars are examined by double fourier analysis. The dimensionless sediment particle size decreases as the longitudinal bed elevation increases. However, the size increases as the longitudinal bed elevation decreases. As the dimensionless critical tractive force in the surface layer ratio to the force in the subsurface layer increases, the surface geometric mean size of sediments and the dimensionless sediment particle size decrease. This means that coarse matrix is formed with the dimensionless tractive force by the sediment selective sorting.

keywords : mixed bed materials, sediment sorting, dimensionless tractive force, hiding effects

요 지

본 연구에서는 혼합사로 구성된 망상하천에서 사주의 변화와 하상토 분급현상을 실내실험을 통하여 파악하였다. 하상경사가 급한 하도에서 유사 유출량은 시간의 변화에 따라 매우 불규칙하지만, 경사가 완만한 하도에서 유사 유출량은 규칙적이고, 일정한 주기를 나타내었다. 또한 2중 푸리에 해석을 통하여 지배적인 사주의 특성과 진폭을 분석하였다. 하상고가 상승하면 무차원 하상토 입경은 작아졌지만, 하상고가 저하되면 무차원 하상토 입경은 커졌다. 기층에서 무차원 한계 소류력과 표층에서 무차원 한계 소류력의 비가 증가하면, 표층에서 평균입경과 무차원 하상토 중앙입경이 작아졌다. 또한 국부적으로 하상경사가 증가하면서, 유사의 선택적 이동에 의하여 하상토가 분급되고, 평면적으로 입경이 불균일하게 분포하는 분급 특성이 나타났다.

핵심용어 : 혼합사, 유사분급, 무차원 소류력, 차폐효과

1. 서 론

자갈하천은 모래와 자갈이 혼합되어 있어서, 하상토

입경분포가 넓은 혼합사로 구성되어 있다. 하상 표층은 크기가 거의 균일한 굵은 자갈로 덮여 있으며, 일반적으로 표층 입경은 기층 입경보다 크다. 이러한 현상은 하도 변

* 한국교통대학교 토목공학과 부교수 (e-mail: cljang@ut.ac.kr, Tel: 82-43-841-5183)

Associate Prof. Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

화와 생태계 서식처 형성에 영향을 준다. 홍수 시에 유량이 증가하면 입경이 작은 유사는 부유되어 이동하지만, 유량이 감소하면 굵은 입자 사이에 포착되어 퇴적된다. 그러나 평갈수 시에 굵은 입자는 거의 이동하지 않지만, 하상 표층이 부분적으로 침식되고, 가는 입자는 굵은 입자 사이에 포착된다. 이와 같이 하상 표층은 유사가 이동하는 동안에 유사의 입도분포에 영향을 주게 된다. 표층에서 하상도 입경이 커지면, 하상 표면에서 울퉁불퉁한 요철이 상대적으로 작아져서 굵은 입자가 쉽게 이동하게 된다(Parker et al., 1982; Parker and Klingeman, 1982; Parker, 1990).

하상 전단응력이 작아서 유사 이송량이 적은 경우에, 표층 입경은 기층 입경보다 크다. 이러한 현상은 하상에서 차폐효과에 의하여 발생하며, 이동 장갑화(mobile armor) 혹은 동적 장갑화(dynamic armor)이라고 한다(Parker, 1990; Lanzoni, 2000). 그러나 이것은 댐 직하류에서 유사 공급이 차단되면서 발생하는 안정 장갑화(stable armor) 현상과는 다르다. 유사 이송량이 많은 경우에, 표층 입경은 작아지게 된다. 이와 같이 유사 공급은 하상도 분급과 밀접한 관계가 있다. 유사 공급량이 감소하면, 사주의 이동성은 감소하고, 하상도 입경이 커지며, 유사가 이동하는 저수로 폭은 감소한다(Listle et al., 1993).

자갈하천에서 유사는 공간적으로 균일하게 이동하지 않으며, 이러한 현상은 하상도 분급 현상과 공간적인 분포에 영향을 주게 된다. 하천에서 하류로 갈수록 하상도 입경이 작아지는 하류 세립화(downstream fining) 현상이 나타난다(Paola and Seal, 1995). 또한 하도 평면적으로 하상도 입경이 불균일하게 분포하여 모자이크 조각처럼 상대적으로 균일한 입경이 군데군데 모이는 구조적 조각(textural patches)이 나타난다(Nelson et al., 2010).

유사 이송을 해석하고 유사량을 산정하는데 하상도 수직분급(vertical sorting) 현상을 파악하는 것은 중요하다(Wilcock 1993; Wathen et al., 1995). 수직분급 현상은 사구와 같은 하상파가 형성되면서 발생한다. 이것은 하상파에 의하여 발생한 난류, 하상도 분급, 유사입자의 공간적 분포와 상호 작용에 의하여 발생한다. 따라서 하상 표층에서 유사가 완전히 혼합되어 있다는 가정 하에 적용되는

차폐효과를 이용하여 유사의 수직분급 현상을 해석하는 것은 많은 한계가 있다(Kleinhans, 2002).

자갈과 모래가 혼합되어 있는 하천은 유사의 수평분급과 수직분급이 동시에 발생하며, 기존 연구는 사주의 이동과 정지가 공존하는 하천에서 공간적으로 하상도 분급 특성을 파악하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 실내 실험을 통하여 사주의 이동과 정지가 공존하여 하상도의 수평분급과 수직분급이 동시에 발생하는 분급현상을 파악하였다. 2중 퓨리에 해석을 통하여 지배적인 사주의 특성과 진폭을 분석하였으며, 하상고의 변화에 따른 무차원 하상도 입경변화를 파악하였다. 또한 무차원 한계 소류력 비의 변화에 따른 하상도 입경 변화를 분석하여, 평면적으로 입경이 불균일하게 분포하는 분급 특성을 파악하였다.

2. 실내실험

실내실험은 길이 12m, 폭 2m인 가변형 경사 수로에서 수행하였다(Fig. 1(a)). 실험을 위한 초기 수로는 자체 제작한 모래 포설기를 이용하여, 밑변 80cm, 높이 3cm, 하안 경사가 40도인 저수로를 만들었으며(Fig. 1(b)), 수로 경사는 1/90~1/140로 설정하였다. 고기수조 안에서 발생한 와류를 정류시키기 위하여, 수조 안에 있는 스크린에 플라스틱 격자망을 부착하였다. 고기수조에서 모래로 채워진 이동상 경사 수로에 물이 유입될 때, 유입구에서 국부세굴이 발생하므로, 이를 방지하기 위하여 길이가 0.6m이고, 폭이 0.8m인 고정상 수로를 목재로 제작하여 설치하였다(Fig. 1(a)). 또한 고정상 하상과 이동상 하상의 경계에서 국부세굴을 방지하고 유사이송을 평형하게 유지하기 위하여 상류 유입구에서 일정하게 유사를 공급하였다. 유출부의 영향을 최소화하기 위하여 하류단 수위는 gate로 조절되었다. 하도의 지형은 각 실험 단계에서 유출부와 유입구의 영향이 적게 받는 상류로부터 2~11m 구간에서 중방향으로 0.2m, 횡방향으로는 0.01m 간격으로 레이저 profiler를 이용하여 측정하였다. 실험을 수행함에 있어서 수로 유입부와 유출부의 영향, 유량공급 펌프의 영향, 유사 공급 시에 수면의 교란 등으로 흐름 상태를 안정적으로

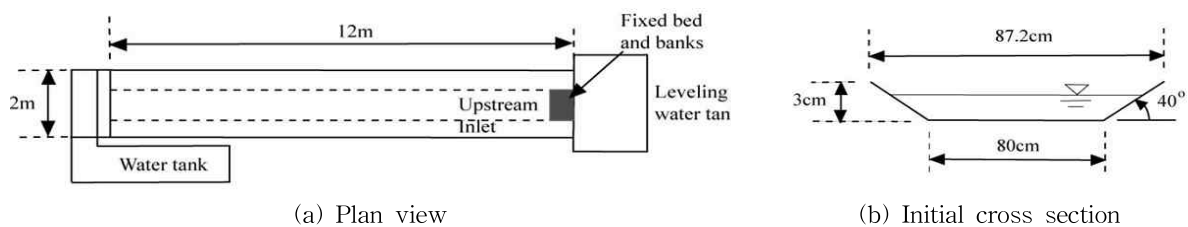


Fig. 1. Sketch of Experimental Setup

Table 1. Experimental Conditions

Run	Water discharge (L/s)	Initial Water Depth (m)	Bed Slope (%)	Froude Number (Fr)	Mean Dia. of Bed material (mm)	Std. Dev. of Bed material
1	3.50	0.012	1/90	1.08	0.85	1.81
2	3.25	0.0117	1/140	0.86	0.85	1.81
3	3.20	0.0117	1/100	1.04	0.85	1.81
4	5.00	0.015	1/80	1.16	1.48	3.03
5	5.83	0.017	1/80	1.17	1.48	3.03

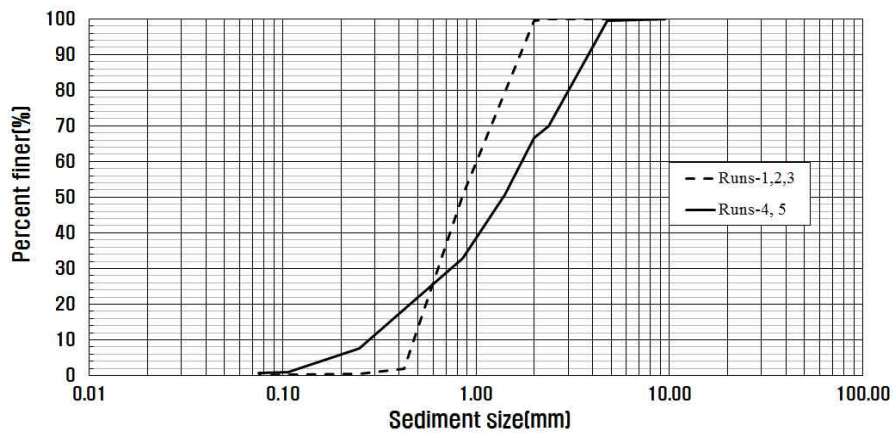


Fig. 2. Grain Size Distribution Used to Laboratory Experiments

로 유지하는데 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 보다 더 긴 수로를 이용하여 유입부와 유출부에서 충분히 떨어진 구간을 확보해야 할 필요가 있다.

실험을 위한 자세한 수리학적 조건은 Table 1에 나타내었다. 본 실험에서는 누가입경 분포에서 통과중량 50%에 해당하는 d_{50} 인 0.85 mm와 1.48 mm 모래를 사용하였다. Runs-1, 2, 3은 하상토 입도분포의 표준편차가 1.81 정도로서, 혼합사의 입경분포 범위가 넓지 않은 경우이고, Runs-4, 5는 하상토 입도분포의 표준편차가 3.03이고 완전 혼합사의 특성을 나타내며, Fig. 2에 나타내었다.

표층에서 하상토 변화를 파악하기 위하여 시료를 채취하였으며, 가로 10 cm, 세로 20 cm, 높이 30 cm인 하상토 표층 채취기(Fig. 3)를 제작하여 사용하였다. 직육면체 대각선으로 마감판(closing plate)을 설치하였으며, 폭이 좁은 한 면은 상하로 이동할 수 있도록 본체와 분리하였다 (Blom and Ribberink, 2003). Fig. 4는 자체적으로 제작한 하상토 채취기를 이용하여 혼합사로 구성된 하도에서 하상토 표층을 채취하는 과정을 보여주고 있다. 우선, 하상토 채취기를 하상에서 수직으로 압력을 가하여 밀어 넣은 후에(Fig. 4①), 하상토 채취기 내부에 대각선으로 설치된 유도판(guide plate)을 따라 마감판을 넣어서 마감판 위에

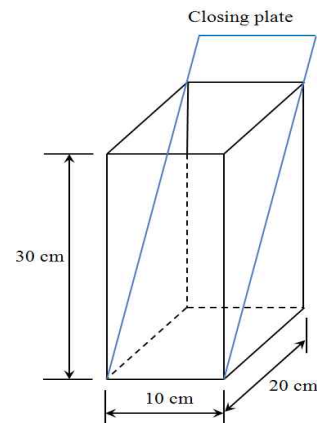


Fig. 3. Bed Material Sampler

있는 하상토를 가두어 둔다(Fig. 4②). 하상토가 교란되지 않도록 하상토 채취기를 조심스럽게 들어 올린다(Fig. 4③). 이때, 하상토 채취기에서 마감판 위에 갇힌 하상토는 하상토 채취기를 들어 올릴 때 교란되지 않은 상태로 하상에서 이탈되며, 마감판 아래에 있는 하상토는 하상에 남게 된다. 상하로 이동할 수 있는 하상토 채취기의 한쪽 면을 아래로 내려서 1 cm 깊이로 하상토가 교란되지 않도록 조심스럽게 cutting plate를 넣어서 잘라낸다(Fig. 4④). 잘라

낸 하상토는 건조로에서 24시간 건조한 후에 체분석을 하여 하상토 입도분포를 구한다. 실험이 완전히 종료된 후에 흐름 방향은 0.2m, 횡방향은 0.2m 간격으로 하상재료가 교란되지 않도록 주의하여 하상토를 채취한다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하도의 지형 변화

혼합사로 구성된 하도에서 지형 변화와 하상토 분급현

상을 파악하기 위하여, 실내실험을 수행하였으며, 시간의 변화에 따른 하도 변화 과정은 Fig. 5와 Fig. 6에 나타나 있다. 실험 초기인 30분 후에 하폭이 증가하면서, 상류에서 중앙사주(central bar)가 발달하고, 하류에서 교호사주가 발달하였다(Fig. 5(a)). 시간이 증가하면서 하폭이 증가하고, 상류와 하류에서 중앙사주가 발달하며(Fig. 5(b)), 저수로 이동이 활발해졌다(Fig. 5(c)). 실험이 계속되면서, 사주의 크기는 증가하고, 흐름은 좌안과 우안으로 분리되며, 좌안과 우안에서 수층부가 형성되어 국부적으로 하안

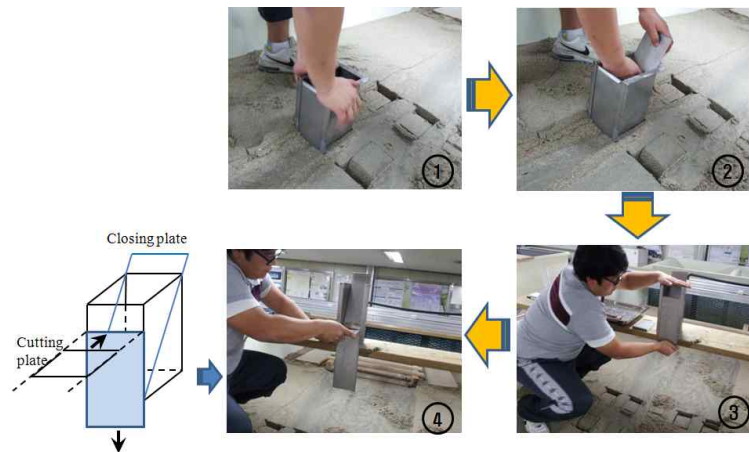


Fig. 4. Sampling Procedures of Bed Materials

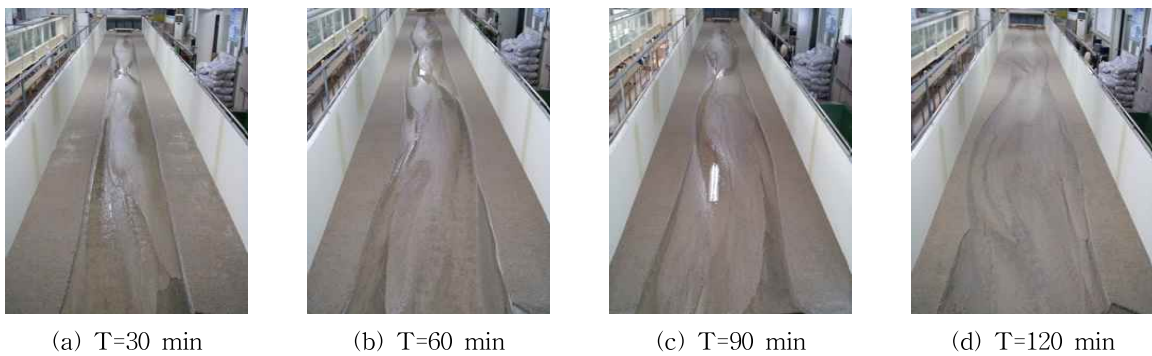


Fig. 5. Experimental Results for Run-1

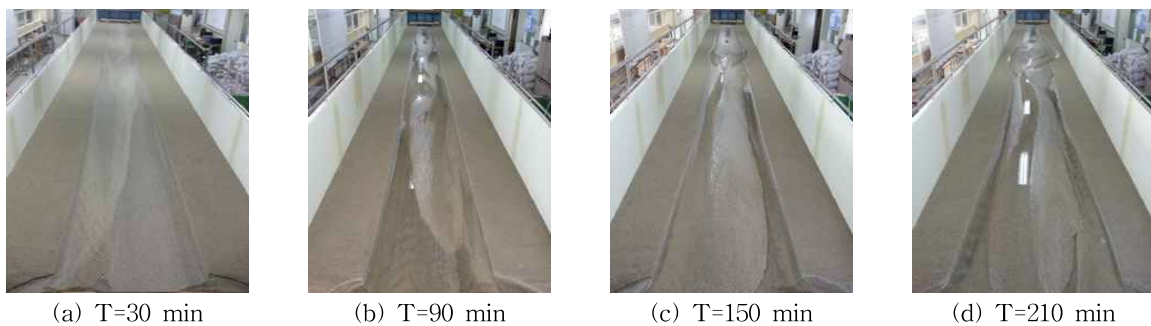


Fig. 6. Experimental Results for Run-2

이 침식되었다 (Fig. 5(d)). 특히, 수층부에서 발생한 와류는 이차류 형성에 중요한 원인이 된다(Gran and Paola, 2001).

Fig. 6은 하상경사가 상대적으로 완만한 하도에서 시간의 변화에 따른 하도 변화 과정을 보여주고 있다. 하폭은 천천히 증가하며, 사주의 규모와 하안침식 속도가 작은 특성을 보여주고 있다. 90분이 지난 후에, 교호사주가 발달하였다(Fig. 6(b)). 150분 후에 상류에서 중앙사주가 발달하고, 하류에서 교호사주가 발달하였다(Fig. 6(c)). 그리고 210분이 지난 후에 상류에서 발달한 중앙사주가 분할되지만, 하류에서 중앙사주가 발달하였다. 이와 같이 하상경사가 상대적으로 완만한 경우에 저수로 이동이 작으며, 상대적으로 하도가 안정한 특성을 보여주고 있다.

Fig. 7은 Run-2와 Run-5에 대한 하도 변화 과정을 보여주고 있다. 하상토 입경이 상대적으로 작은 Run-2에서, 통수 후 90분까지 교호사주가 발달하였다. 120분 후에 8m 지점 우안에서 수층부가 형성되었다. 또한 저수로가 발달하면서 흐름이 집중되어, 하상이 주변보다 깊게 세굴되는 세굴공(scour hole)이 발달하였다. 시간이 증가하면서, 상류에서 사주가 발달하지만, 하상이 주변보다 깊게 세굴되는 세굴공은 8m 지점 우안에서 형성되어 있다(Fig. 7(a)).

하상토 입경이 상대적으로 굵은 Run-5에서 30분 후에 저수로 합류에 의하여 발생한 세굴공이 7m 지점에서 발생하였다. 90분 후에는 8.0m 지점에서 저수로가 분열되면서 새로운 하도가 형성되었다(Fig. 7(b)). 이러한 원인은 직상류에서 형성된 세굴공에서 하류방향으로 흐름이 분리되어서 발생한 것이다. 150분 후에 8.5m 지점 좌안에서 수층부가 형성되었다. 210분 후에는 5m 지점에서 새로운 하도가 형성되면서 7m 지점에서 발달한 세굴공이 하류로 이동하였다. 세굴공은 하도 우안에서 발달하며, 흐름이 집중되어서 길게 형성되었다. 240분 후에 저수로가 좌안으로 이동하였고, 270분 후에 하도 중앙으로 이동하는 특성을 보여주고 있다. 이러한 현상은 상류에서 발달한 사주에 의해 흐름 방향이 변하여 형성된 것이며, 하상경사가 급하고, 흐름과 유사의 강한 비선형적인 상호 작용에 의한 것이다.

Fig. 8은 각 실험에 대한 유사 유출량의 특성을 보여주고 있다. Runs-1, 2, 3 중에서 상대적으로 하상경사가 급한 Run-1과 Run-3은 유사 유출량이 많으며, 유사 유출 특성이 매우 불규칙한 것을 보여주고 있다. 유사 유출량은 저수로와 사주의 변화에 의하여 영향을 받으며, 유사 유출량의 불규칙성은 망상하천의 중요한 특징이다(Ashmore,

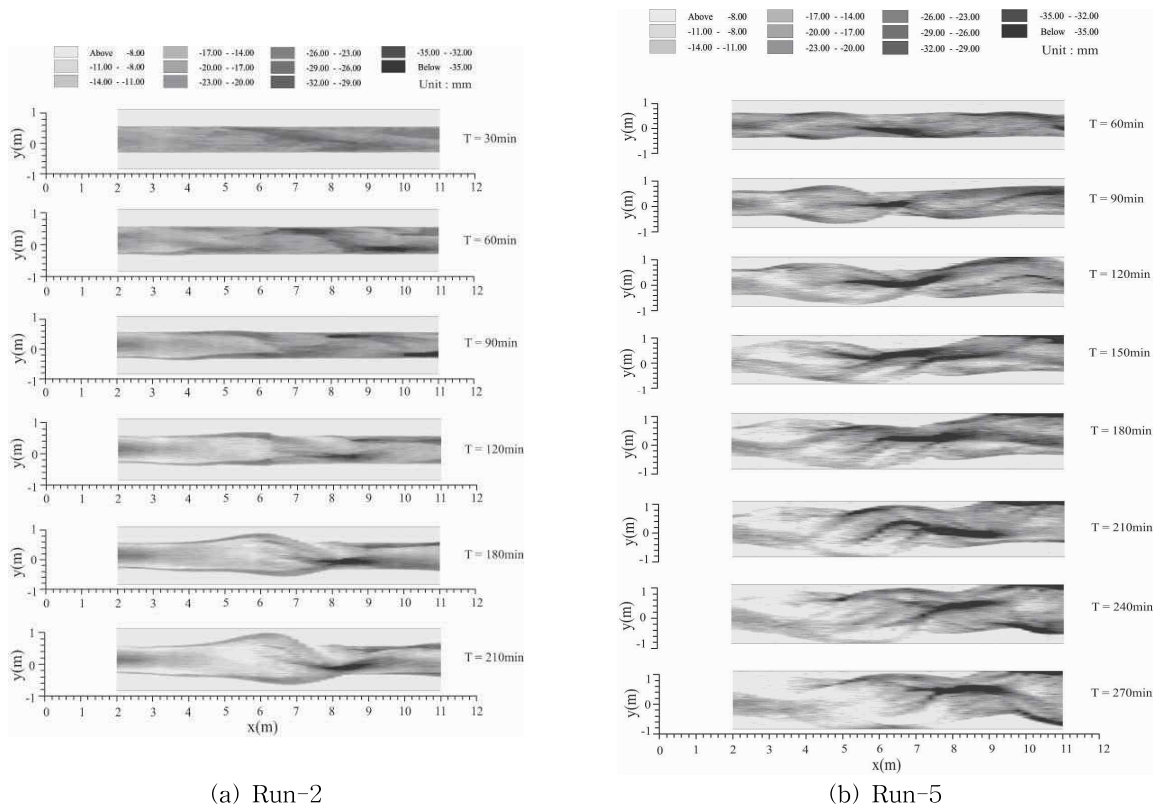
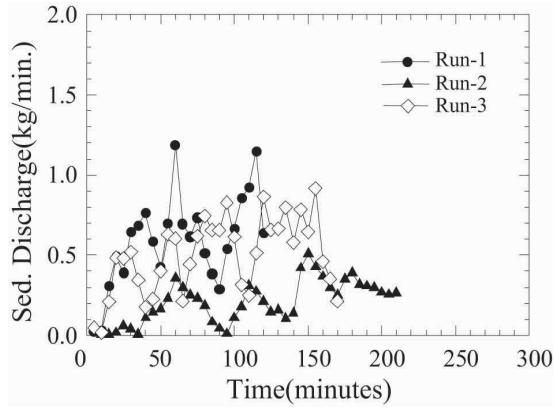
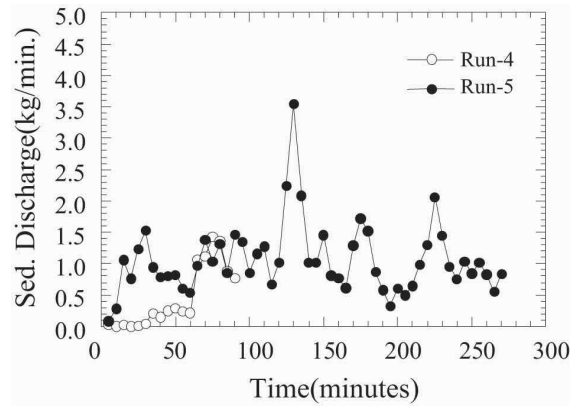


Fig. 7. Temporal Changes of Channels for each Run



(a) Runs 1, 2 and 3



(b) Runs 4 and 5

Fig. 8. Sediment Discharge for each Run

1991; Hoey and Sutherland, 1991; Pittaluga et al., 2001). 하상경사가 상대적으로 완만한 Run-2에서 유사유출 특성은 상대적으로 규칙적이며, 일정한 주기를 나타낸다. 이것은 교호사주의 이동 특성과 비슷하다(Fig. 8(a)).

하상도 입경이 상대적으로 굵은 Run-4와 Run-5에서 유사량이 상대적으로 많이 유출되며, 매우 불규칙하게 유출된다. 특히, 유사량이 크게 증가하는 원인은 저수로의 분열, 생성, 이동과 깊은 관련이 있으며, 저수로 변화가 큰 것을 의미한다(Ashmore, 1988, Pitalauga et al., 2001).

3.2 2중 푸리에 해석

실험과 수치계산으로 하상 형상 특성을 분석할 때, 지배적인 하상과 형상(mode)을 조사하는 것은 중요하다. 하상형태가 복잡한 복렬사주를 대상으로 하여 판단할 경우에, 하상과 형상을 명확하게 파악해야 한다. 따라서 본 연구에서는 복렬사주의 형상을 객관적으로 판단하기 위하여 하상고 자료를 2중 푸리에 해석을 하여 다양한 하상과로 선형화 하여 표현하였다. 하상과 형상 특성은 2중 푸리에 해석을 통하여 얻은 각 파의 진폭 성분을 분석하여 파악하게 된다. 2중 푸리에 변환을 할 때에 중횡단 방향에 1 파장의 자료를 계산하며, 횡단방향으로는 유로(流露)의 반파장 자료를 반대방향으로 똑같이 추가하여 놓고, 하폭이 B라면 2B까지 자료가 있다고 가정하여 계산을 한다. 이렇게 하여 하상 형상의 파를 재현하는 것이 가능하다.

하상 형상에 대하여 흐름 방향(s)에 대한 1 파장의 길이를 L , 횡단방향(n)에 관해서 유로의 1/2에 대한 자료를 양측에 반대방향으로 똑같이 추가하여 놓을 때의 길이를 기준파장 Y 로 한다. 평균수심을 H 라 하고, 하상고와 평균

하상고의 차를 $\tilde{\eta}$ (중력이 작용하는 방향을 +로 함)라 하고, $\tilde{\eta}$ 를 H 로 나눈 무차원 하상고 η 로 하상형상을 나타낸 계산식은 다음과 같다. i 는 물이 흘러 내려가는 종방향 계산점이고, j 는 횡방향 계산점이다.

$$\begin{aligned} \eta = & \frac{1}{2} \sum_i \left\{ a_{i0} \cos\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) + b_{i0} \sin\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) \right\} \\ & + \frac{1}{2} \sum_j \left\{ a_{0j} \cos\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) + c_{0j} \sin\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) \right\} \\ & + \sum_i \sum_j \left\{ a_{ij} \cos\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) \cos\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) + b_{ij} \sin\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) \cos\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) \right\} \\ & + c_{ij} \cos\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) \sin\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) + d_{ij} \sin\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) \cos\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) \end{aligned} \quad (1)$$

Eq. (1)을 이산(離散)화한 식으로 변환하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta(k, m) = & \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M \left\{ a_{ij} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) \right\} \\ & + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M \left\{ b_{ij} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) \right\} \\ & + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M \left\{ c_{ij} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) \right\} \\ & + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M \left\{ d_{ij} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) \right\} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^K \left\{ a_{i0} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) + b_{i0} \sin\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \right\} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M \left\{ a_{0j} \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) + c_{0j} \sin\left(\frac{\pi j}{M} m\right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

Eq. (2) 중에서 계수 a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} 는 역변환하여 나타내면 다음과 같다.

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{KM} \sum_{k=1}^{2K} \sum_{m=1}^{2M} \eta_{km} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) & (j = 0, 2, 4, 6, \dots) \\ 0 & (j = 1, 3, 5, 7, \dots) \end{cases} \quad (3)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{KM} \sum_{k=1}^{2K} \sum_{m=1}^{2M} \eta_{km} \sin\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) & (j = 0, 2, 4, 6, \dots) \\ 0 & (j = 1, 3, 5, 7, \dots) \end{cases} \quad (4)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{KM} \sum_{k=1}^{2K} \sum_{m=1}^{2M} \eta_{km} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \sin\left(\frac{\pi j}{M} m\right) & (j = 1, 3, 5, 7, \dots) \\ 0 & (j = 0, 2, 4, 6, \dots) \end{cases} \quad (5)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{KM} \sum_{k=1}^{2K} \sum_{m=1}^{2M} \eta_{km} \sin\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \sin\left(\frac{\pi j}{M} m\right) & (j = 1, 3, 5, 7, \dots) \\ 0 & (j = 0, 2, 4, 6, \dots) \end{cases} \quad (6)$$

이 식을 역변환 하여 얻은 계수 a, b, c, d 를 다음 진폭 성분들을 구하는 식으로 대입한다.

$$\alpha(i, j) = \begin{cases} \sqrt{a_{ij}^2 + b_{ij}^2} & \text{단, } j \text{는 짝수임} \\ \sqrt{c_{ij}^2 + d_{ij}^2} & \text{단, } j \text{는 홀수임} \end{cases} \quad (7)$$

하도 지형변화를 정량적으로 분석하기 위하여 2중 푸리에 해석에 의한 하상과 분포와 지배적인 성분(mode)의 변화를 파악하는 것은 매우 중요하다. 1-1 모드는 1차 횡방향 성분로서 횡방향으로 1개의 사주가 형성된 교호사주(alternate bars)이고, 1-2 모드와 2-2 모드는 2차 횡방향 모드로서 횡방향으로 2개의 사주가 형성된 중앙 사주(central bars)를 나타낸다. 1-3 모드와 2-3 모드는 한 단

면에서 횡방향으로 3개의 사주가 형성된 것(triple bars)을 나타낸다(Jang, 2014).

Fig. 9는 유사량 변화와 하도 변화를 파악하기 위하여 하상파에 대한 2중 푸리에 해석을 수행한 결과를 보여주고 있다. Run-1에서 통수 후 120분에 교호사주의 특성을 나타내는 1-1 모드 진폭은 1.76으로 가장 지배적이며, 중앙사주의 특성을 나타내는 2-2 모드의 진폭은 0.69이었다(Fig. 9(a)). Run-2에서 210분에 가장 지배적인 1-1 모드 진폭은 1.35이었으며, 2-2 모드 진폭은 0.67이었다(Fig. 9(b)). Run-3에서 210분에 1-1 모드 진폭은 0.89로써, 가장 지배적이다. 2-2 모드 진폭은 0.33으로 상대적으로 작은 특성을 보여주고 있다(Fig. 9(c)). Run-4에서 90분에 가장 지배적인 1-1 모드의 진폭은 0.68이며, 2-2 모드 진폭은 0.13이었다(Fig. 9(d)). Run-5에 대하여, 270분에 1-1 모드 진폭은 0.48이지만, 복렬사주의 특성을 나타내는 1-2 모드 진폭은 0.63이며, 가장 지배적이다. 중앙사주의 특성을 나타내는 2-3 모드 진폭은 0.18이며 상대적으로 작은 특성을 보여주고 있다(Fig. 9(e)). 이러한 특성은 유출 유사량의 불규칙한 특성에서 잘 보여주고 있다(Fig. 8(b)).

3.3 하도의 변화와 하상토의 입도분포 특성

혼합사로 구성된 망상하천에서 하상토 입경은 공간적으로 다양하게 분포하며, 그 분급과정도 복잡하다(Lisle et al., 1991). 초기하도에서 하안이 침식되고 하폭이 증가하면서, 중앙사주가 발달한다. 입경이 큰 입자는 사주 앞

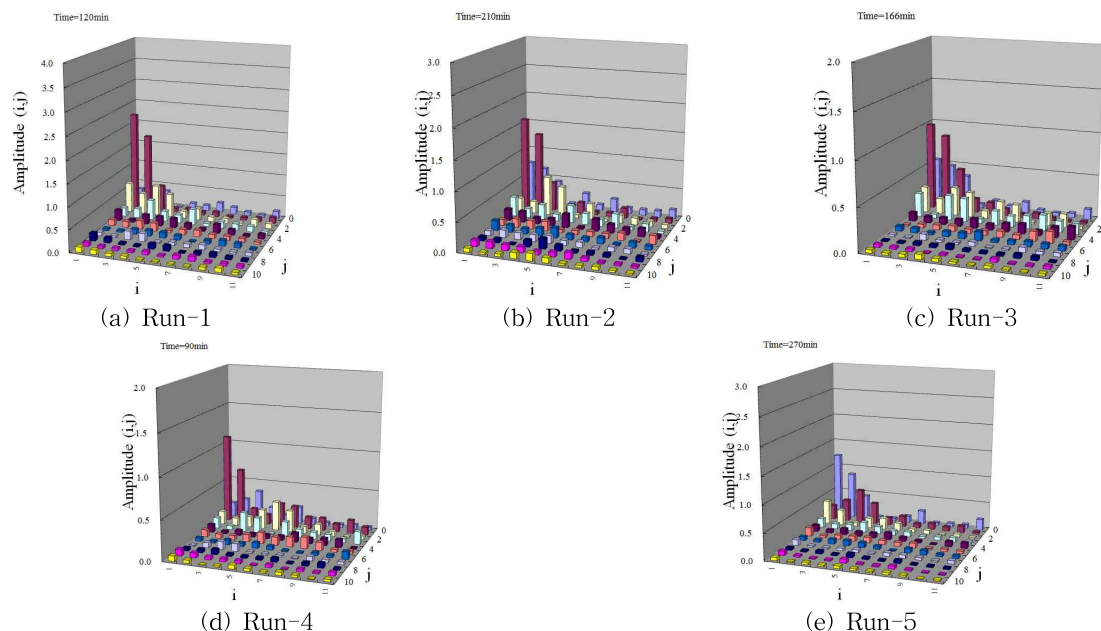


Fig. 9. Double Fourier Analysis of Sediment Waves for each Run

부분(선단부)으로 이동하고 퇴적된다. 그러나 입경이 작은 유사는 사주 주변으로 이동하며 측면에 퇴적된다(Fig. 10). Fig 10과 Rig 11에서 보여주는 것처럼, 6m 지점에서 중앙사주가 발달하고 하안이 침식되면서 하폭이 증가한다. 또한, 하상토는 굵어진다. 초기에 사주가 성장하면서, 사주 위에서 흐름이 양쪽으로 분리되고, 사주 하류에서 흐름이 합류된다. 유사는 중앙사주 전체 표면에서 이동하며, 하류에서 퇴적된다.

사주는 하류로 이동하면서 성장하고, 사주의 이동속도는 감소한다. 시간이 지나면서 중앙사주는 발달하고, 하폭이 증가하며 사주는 이동하지 않는다. 중앙사주 정상부에서 수심은 얕고 유속은 느리며, 사주 주변으로 흐름이 분리되어 흐른다. 또한 사주 정상부에서 유사 이송량은 감소한다. 그러나 사주 주변으로 유선이 굵어지면서, 유사는 저수로에서 활발하게 이송한다.

수층부가 형성된 하안에서는 지속적으로 침식이 일어

나고 유사가 하도로 공급된다. 중앙사주 앞부분(선단부)에서 하상경사는 급하고 여울이 형성되면서, 입경이 작은 입자가 이동한다. 상대적으로 굵은 입자는 이동하지 않으며,

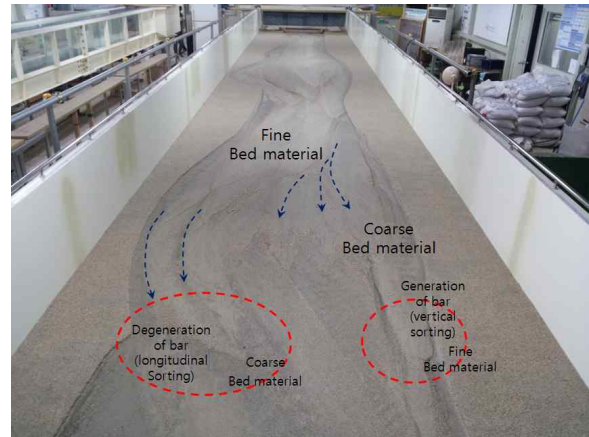


Fig. 10. Surface Sediment Particle Distribution for Run-1

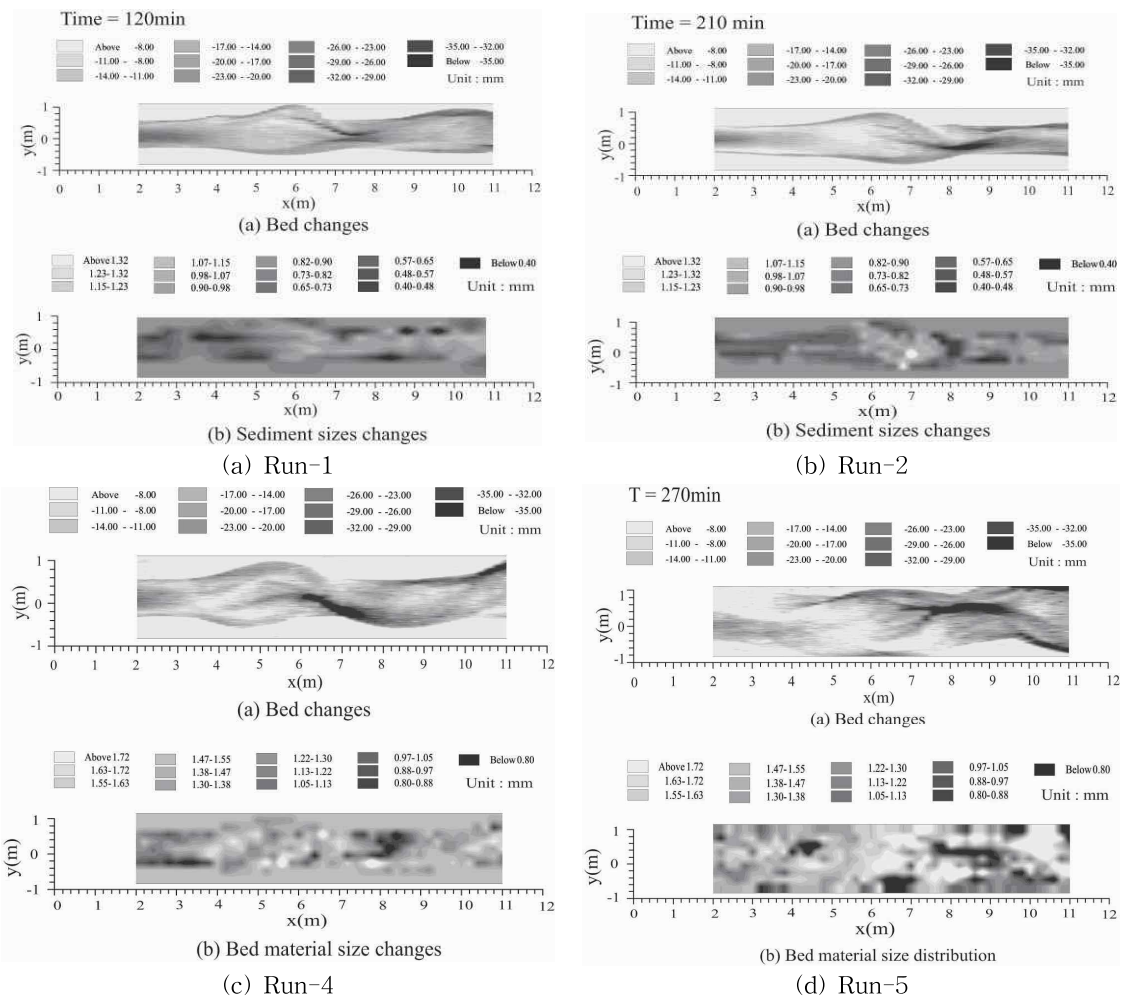


Fig. 11. Bed and Bed Material Changes for each Run

하상토 입경은 커진다(Fig. 11). 이와 같이 유사 선택적 이동에 의하여 하상토 수평분급이 발생하며, 표층에서 차폐효과에 의하여 동적 장갑화 혹은 이동 장갑화(mobile armor)가 형성된다(Parker, 1990; Wilcock and McAdrdel, 1993).

흐름이 합류되는 중앙사주 하류(Fig. 11의 6.0m에서 8.0 m 지점에서) 저수위가 합류되면서 흐름이 집중되며, 강한 전단력과 2차류의 영향을 받아서 하상이 깊게 세굴 된다. 합류부 유입구에서 수위는 주변보다 약간 낮다. 그러나 깊게 세굴이 된 세굴공 직하류에서 수위가 상승하고 수면이 매우 불규칙적으로 튀면서, 강한 와류가 발생한다. 하상 저면에 흐르는 물이 강한 와류에 의하여 수면으로 상승하여 용승류가 발생하며, 유사는 매우 활발하게 이동한다. 상대적으로 작은 입자는 하류로 이송되고 하상토 분급이 발생하여 입경이 커진다.

Fig. 11 (b)의 8m 지점 좌안과 (d)의 8m 지점 우안에서 보여주고 있는 것처럼, 중앙사주 하류에서 발생한 사주(side bars)는 하상고가 높고 하상토 입경이 상대적으로 작은 특성을 보여주고 있다. 이러한 원인은 상류에서 발달한 중앙사주에 의하여 흐름 방향이 바뀌면서 2차류가 발달하여, 입경이 작은 유사가 기준에 발달한 사주에 지

속적으로 공급되고 퇴적되기 때문이다.

국부적으로 하상경사가 증가하면서, 유사가 선택적으로 이동하여 하상토 분급이 발생하기 때문에, 하도 전체에 걸쳐서 평면적으로 입자의 크기가 불균일하게 분포하여 모자이크 조각처럼 상대적으로 균일한 입경이 군데군데 모이는 분급현상이 나타났다(Nelson et al., 2010).

하상고 변화에 따른 하상토 분급 특성을 파악하기 위하여 하상토 무차원 입경 변화를 파악하였다(Fig. 12). 무차원 입경 변화는 수로의 횡방향으로 1m 지점에서 표층의 중앙입경(d_{50i})과 초기에 포설한 하상토의 중앙입경(d_{50})의 비로 나타났다. 여기서 d_{50} 은 기층의 하상토 중앙입경을 나타내지만(Parker, 1990), 교란되지 않은 기층의 중앙입경은 초기 포설한 하상토 중앙입경과 같으므로, 본 연구에서는 d_{50} 을 초기 포설한 값으로 사용하였다.

대체적으로 하상고가 상승하면 무차원 하상토 입경(d_{50i}/d_{50})은 작아지고, 하상고가 저하되면 무차원 하상토 입경이 커지는 경향을 보여주고 있다. Run-1에서는 7.4 m 지점에서 하상고가 저하되었으나, 무차원 하상토 입경은 8.6m 지점에서 가장 크게 나타났다(Fig. 12(a)). 이러한 원인은 하상경사가 국부적으로 증가하고, 수심이 작아지며 전단응력이 크게 되면서 하상토 분급 현상이 나타나

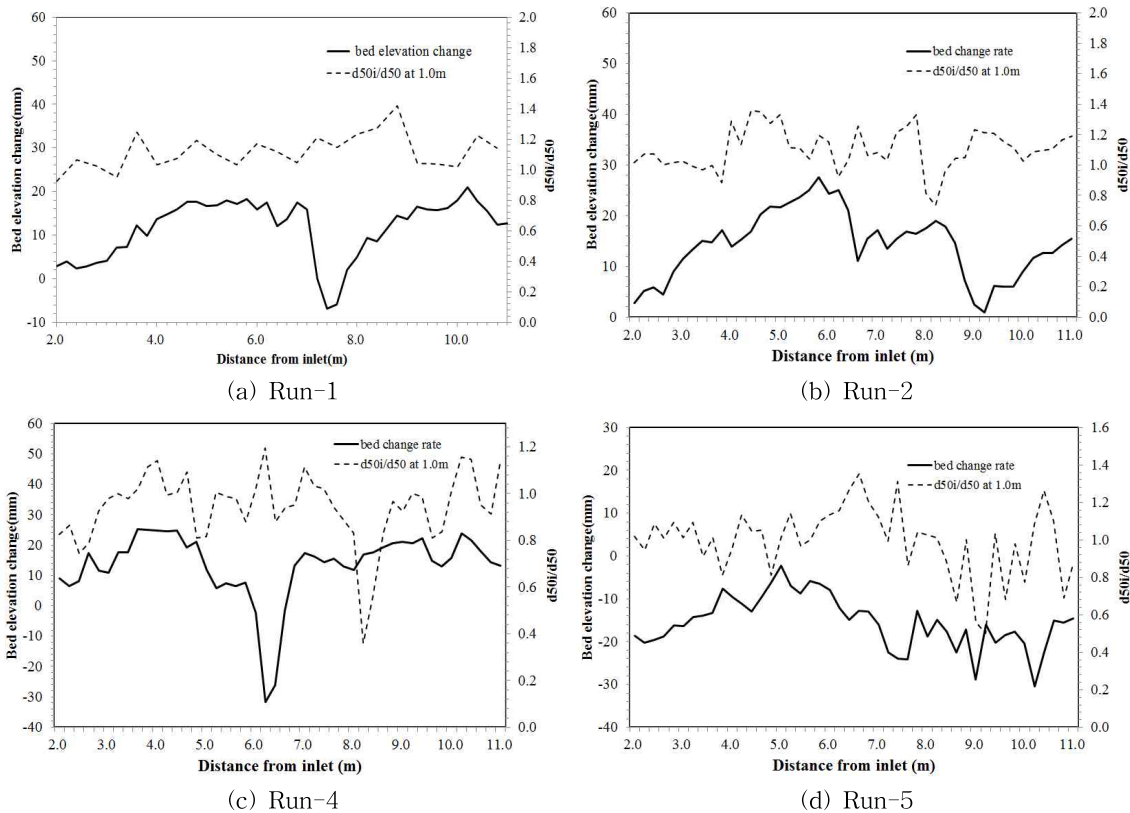


Fig. 12. Dimensionless Sediment Particle Distribution (d_{50i}/d_{50}) with Bed Change for each Run

기 때문이다(Parker, 1990).

Run-4에서는 8.2m 지점에서 하상고 변화에 비해 무차원 하상토 입경이 작게 나타났다. 이러한 원인은 하상파가 발달하여 유사의 수직분급이 발생하고, 하상토 입경이 작기 때문이다(Kleinmans, 2002). 본 실험 결과는 하폭이 상대적으로 넓고 수심이 얕아서 저수로 변화가 크게 발생하는 하도에서, 차폐효과에 의한 하상토 입도 분급이 나타나는 수평분급 현상과 하상파의 발달에 의한 수직분급 현상이 공존하는 특성을 잘 보여주고 있다.

유사량 변화는 표층에서 입도변화와 밀접한 관계가 있다. 즉, 국부적으로 하상경사가 증가하는 곳에서 유사량이 감소하면 표층에서 입경이 커지고, 유사량이 증가하면 표층에서 입경이 작아지는 것과 관련이 있다. 혼합사로 구성된 하도에서 유사 이동은 표층에서 개별 입자의 이동과 기층에서 하상토 이동의 비와 밀접한 관련이 있으며 (Parker, 1990), 그 정의는 다음과 같다.

$$\phi_{50} = \frac{\tau_{50}^*}{\tau_{r50}^*} \quad (8)$$

여기서, τ_{50}^* 는 하상토 중앙 입경 d_{50} 에 대한 Shield 응력으로써, 무차원 한계 소류력이며, τ_{r50}^* 는 기준면, 즉 기층

에서 하상토 중앙 입경 dr_{50} 에 대한 무차원 한계 소류력이며, 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{50}^* = \frac{hi}{sd_{50}} \quad (9)$$

$$\tau_{r50}^* = \frac{hi}{sdr_{50}} \quad (10)$$

여기서, h 는 수심이고, i 는 하도의 바닥경사, s 는 유사의 수중 비중(=1.65)이다.

표층에서 하상토 입경변화를 파악하기 위하여, 표층에서 무차원 한계 소류력과 기층에서 무차원 한계 소류력의 비(ϕ_{50})에 대한 표층에서 하상토 평균입경 크기(D_{sg})를 비교하였다(Fig 13과 Fig 14). Fig 13은 하상토 입도분포의 표준편차가 1.81이며, 혼합사 입도분포 범위가 넓지 않은 경우에, ϕ_{50} 에 대한 D_{sg} 의 변화를 보여주고 있다. Run-2에서는 ϕ_{50} 이 증가하면서 표층에서 하상토 평균입경은 작아진다(Fig 13(a)). 그러나 Run-3에서는 ϕ_{50} 이 변해도 표층에서 하상토 입경이 크게 변하지 않는 것을 보여주고 있다. 이것은 무차원 한계 소류력에 영향을 받고 있으며, Run-2에서 입경이 지속적으로 변화가 되고 있는 것을 의미한다. 그러나 Run-3에서는 무차원 한계 소류력의 영향을 작

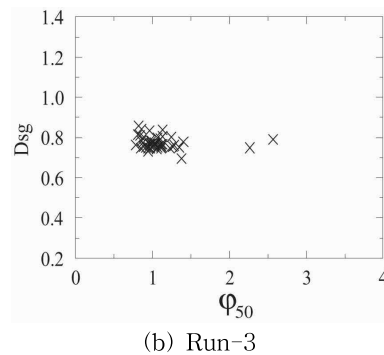
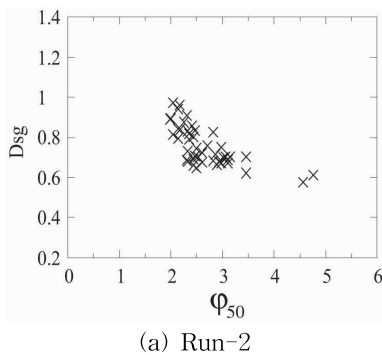


Fig. 13. Plot of Mean Surface Size D_{sg} as a Function of ϕ_{50} for Poorly Mixed Sediments

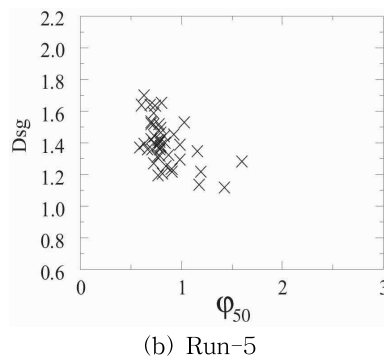
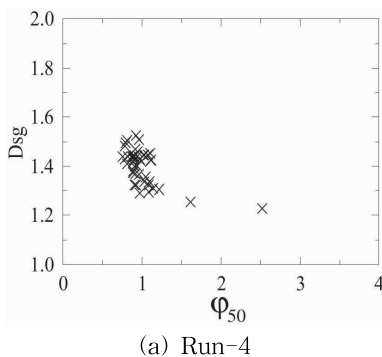


Fig. 14. Plot of Mean Surface Size D_{sg} as a Function of ϕ_{50} for Well Mixed Sediments

게 받는 것을 의미한다.

Fig 9(b)와 (c)에서 보여주고 있는 것처럼, Run-2에서 지배적인 사주인 1-1 모드 진폭(1.35)은 Run-3에서 지배적인 1-1 모드 진폭(0.89)보다 큰 것을 보여주고 있다. 따라서 Run-3에서 ϕ_{50} 에 대한 D_{sg} 의 변화가 작은 원인은 하상에서 국부적인 변화가 작고, 하상토 분급이 적게 발생하기 때문으로 판단된다.

Fig. 14는 하상토 입도분포의 표준편차가 3.03이며, 혼합사 입도분포 범위가 넓은 경우에 ϕ_{50} 에 대한 D_{sg} 의 변화를 보여주고 있다. Run-4와 Run-5에서 ϕ_{50} 이 증가하면서 D_{sg} 가 감소하며, 표층에서 하상토 평균입경이 작아지는 특성을 보여주고 있다. 이것은 한계 소류력이 작은 표층에서 입경이 작은 유사가 선택적으로 이동하여 하상토 입경이 크고, 한계 소류력이 큰 곳에서는 유사가 전체적으로 이동하여 표층 입경이 작은 특성을 나타낸다. 이것은 동적 장갑화 혹은 이동 장갑화이며, 본 결과는 이러한 특성을 잘 나타내고 있다.

표층에서 차폐효과에 의한 하상토 입경이 불균일하게 분포하는 특성을 파악하기 위하여, 표층에서 무차원 한계 소류력과 기층에서 무차원 한계 소류력의 비(ϕ_{50})에 대한 무차원 하상토 중앙입경(d_{50i}/d_{50})의 변화를 파악하였다.

Fig. 15는 각 실험 결과에 대하여, ϕ_{50} 의 변화에 대한 무차원 하상토 중앙입경이 변하는 특성을 보여주고 있다. ϕ_{50} 의 값이 증가하면 무차원 하상토 중앙입경은 감소하였다. Run-3, Run-4, Run-5에서는 매우 일관적인 특성을 보여주면서 감소하고 있으나, Run-2에서는 분포의 폭이 큰 특징을 보이면서 감소하고 있다. 이러한 특성은, Fig. 9에서 제시된 것처럼, 사주의 진폭이 크고, 하상파에 의한 유사 수직분급이 발생하여, 유사의 수평분급에 적용되는 무차원 한계 소류력 비를 산정할때 한계가 있기 때문으로 판단된다.

무차원 한계 소류력의 비가 작은 곳에서는 기층과 표층의 입경비가 크고, 선택적으로 입경이 작은 입자가 이동하며, 굵은 입자가 많아지면서 차폐효과가 크다. 반대로, 무차원 한계 소류력의 비가 큰 곳에서는 기층보다 표층의 입경이 작으며, 입경이 작은 입자가 많아진다. 따라서 무차원 소류력의 비가 작은 곳에서는 굵은 입자가 많이 모이며, 무차원 소류력의 비가 큰 곳에서는 가는 입자가 많이 모이면서, 공간적으로 하상토 입경이 불균일하게 분포하여 모자이크 조각처럼 상대적으로 균일한 입경이 군데 군데 모이는 구조적 조각이 나타나는 현상을 파악할 수 있다.

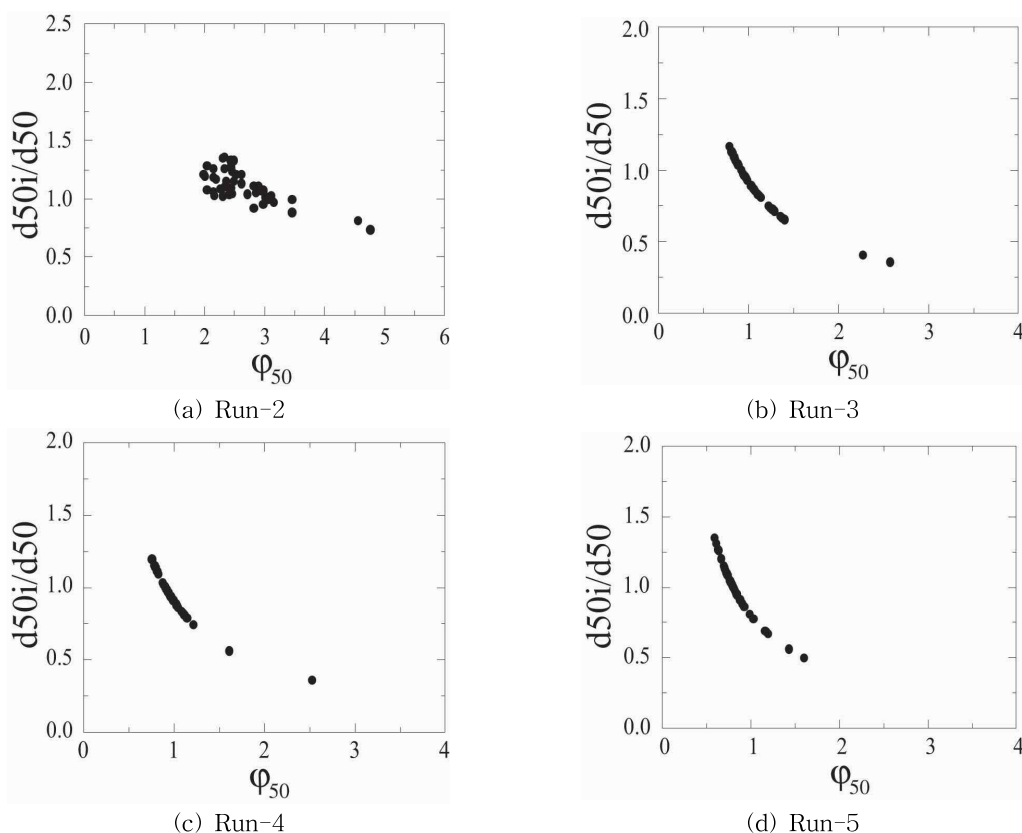


Fig. 15. Plot of d_{50i}/d_{50} as a Function of ϕ_{50} for each Run

4. 결 론

본 연구에서는 혼합사로 구성된 망상하천에서 사주의 변화와 하상도 분급현상을 실내실험을 통하여 파악하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 경사가 급한 하도에서 유사의 유출특성은 불규칙하지만, 완만한 하도에서 그 특성은 일정한 주기를 나타내며 규칙적이었다. 경사가 급한 하도에서 저수로는 불안정하고 이동하였다. 경사가 완만한 하도에서 저수로는 상대적으로 안정하였다. 또한 2중 푸리에 해석을 통하여 지배적인 사주의 특성과 진폭을 분석하였으며, 하상도 입경이 상대적으로 균일하고 하상경사가 완만한 곳에서 사주의 진폭이 큰 것을 알 수 있었다.
- 2) 하상고가 상승하면서 무차원 하상도 입경(d_{50i}/d_{50})이 작아졌으나, 하상고가 저하되면 무차원 하상도 입경은 커졌다. 또한 하폭이 상대적으로 넓고 수심이 얕아서 저수로의 변화가 크게 발생하는 하도에서 하상도의 수평분급 현상과 수직분급 현상이 공존하는 특성을 나타냈다.
- 3) 표층에서 무차원 한계 소류력과 기층에서 무차원 한계 소류력의 비(ϕ_{50})에 대한 표층에서 하상도 평균 입경 크기(D_{sg})를 비교한 결과, ϕ_{50} 이 증가하면서 하상도 평균입경은 작아졌다. 이것은 한계 소류력이 작은 표층에서 입경이 작은 입자가 선택적으로 이동하여 하상도 입경이 커지고, 한계 소류력이 큰 곳에서는 유사가 전체적으로 이동하여 표층 입경이 작아지는 특성을 의미한다.
- 4) 표층에서 차폐효과에 의한 하상도 입경이 불균일하게 분포하는 특성을 파악하기 위하여, 표층에서 무차원 한계 소류력과 기층에서 무차원 한계 소류력의 비(ϕ_{50})에서 대한 무차원 하상도 중앙입경(d_{50i}/d_{50})의 변화를 파악하였으며, ϕ_{50} 의 값이 증가하면 무차원 하상도 중앙입경은 감소하였다.

본 연구는 혼합사로 구성된 망상하천에서 소류사가 발생하는 수리학적 조건에서 하안침식을 고려한 사주의 변화와 하상도 입도 분급현상을 실내실험을 통하여 파악하였으며, 향후에 정교한 자료가 있는 현장에 적용하여 그 특성을 정량적으로 파악해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2012-0002697) 및 국토교통부 물

관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신 C06)에 의하여 수행되었습니다. 또한 실험을 수행하는데 많은 도움을 준 한국교통대학교 수리실험실 학생들에게 감사를 표합니다.

References

- Blom, A., and Ribberink, J.S. (2003). "Vertical sorting in bed forms: Flume experiments with a natural and a trimodal sediment mixture." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 2, 1025, doi:10.1029/2001WR001088, 2003
- Gran, K., and Paola, C. (2001). "Riparian vegetation controls on braided stream dynamics." *Water Resour. Res.*, Vol. 37, No. 12, pp. 3275-3283.
- Jang, C.-L. (2013). "Experimental analysis of the morphological changes of the vegetated channels." *J. Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 9, pp. 911-921. (in Korean)
- Kleinhans, M.G. (2002). Sorting out sand and gravel sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers, Ph. D. dissertation, Utrecht University, The Netherlands.
- Lanzoni, S. (2000). "Experiments on bar formation in a straight flume 2. Graded sediment." *Water Resour. Res.*, Vol. 36, No. 11, pp. 3351-3363.
- Lisle, T.E., Ikeda, H., and Iseya, F. (1991). "Formation of stationary alternate bars in a steep channel with mixed-size sediment: a flume experiment." *Earth Surf Processes Landforms*, Vol. 16, pp. 463-469.
- Lisle, T.E., Iseya, F., and Ikeda, H. (1993). "Response of a channel with alternate bars to a decrease in supply of mixed size bed load: A flume experiment." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 11, pp. 3623-3629, doi:10.1029/93WR01673.
- Nelson, P.A., Dietrich, W.E., and Venditti, J.G. (2010). "Bed topography and the development of forced bed surface patches." *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, F04024, doi:10.1029/2010JF001747.
- Paola, C., and Seal, R. (1995). "Grain size patchiness as a cause of selective deposition and downstream fining." *Water Resour. Res.*, Vol. 31, No. 5, pp. 1395-1408, doi:10.1029/94WR02975.
- Parker, G. (1990). "Surface-based bedload transport

- relation for gravel rivers." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 28, No. 4, pp. 417-436.
- Parker, G., and Klingeman, P.C. (1982). "On why gravel bed streams are paved." *Water Resour. Res.*, Vol. 18, No. 5, pp. 1409-1423, doi:10.1029/WR018i005p01409.
- Parker, G., Klingeman, P.C., and McLean, D.L. (1982). "Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams." *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 108, No. HY4, pp. 544-571.
- Parker, G. (1990). "Surface based bedload transport relation for gravel rivers." *J. Hydraul. Res.*, Vol. 28, No. 4, pp. 417-436, doi:10.1080/00221689009499058.
- Wilcock, P.R. (1993). "Critical shear stress of natural sediments." *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 119, pp. 491-505.
- Wilcock, P.R., and McArdeell, B.W. (1993). "Surface based fractional transport rates: Mobilization thresholds and partial transport of a sand-gravel sediment." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 4, pp. 1297-1312, doi:10.1029/92WR02748.
- Wathen, S.J., Ferguson, R.I., Hoey, T.B., and Werritty, A. (1995). "Unequal mobility of gravel and sand in weakly bimodal river sediments." *Water Resour. Res.*, Vol. 31, No. 8, pp. 2087-2096.

paper number : 14-085

Received : 3 September 2014

Revised : 22 October 2014 / 15 November 2014

Accepted : 15 November 2014