

2중 푸리에 해석에 의한 망상하천에서 사주의 특성 분석 Characteristics of Braid bars by Double Fourier Analysis

장창래*
Chang-Lae Jang

요 지

본 연구에서는 실내실험을 통하여, 하안침식을 고려한 망상하천에서 저수로의 이동특성을 조사하며, 2중 푸리에 해석에 의하여 사주의 거동특성을 분석하였다. 실내실험은 평균입경이 1.4 mm이고, 표준편차가 1.35인 균일사로 10 cm 의 두께로 전체가 균등하게 채워진, 길이가 12 m, 넓이 2 m 수로에서 수행하였다. 각 시간별 하도의 지형변화에 대하여 2중 Fourier 해석에 의한 지배적인 성분, 즉 모드(mode)의 변화를 분석하였다. 여기서 1-1 mode는 교호사주(alternate bars)이고, 1-2 mode와 2-2 mode는 2차 횡방향 모드로서 중앙 사주(central bars)를 나타낸다. 1-3 mode와 2-3 mode는 한 단면에서 횡방향으로 3개의 사주가 형성된 것(triple row bars)을 나타낸다. 초기에는 1-1 mode인 교호사주가 지배적이지만, 시간이 증가함에 따라, 교호사주인 1-1 mode는 감소하고, 한 단면에서 3개의 사주가 형성되는 2-3 mode가 지배적인 것으로 나타났다. 이러한 원인은 시간이 지나면서 사주가 발달하고, 하안침식이 되면서, 하폭이 증가하여 상대적으로 수심이 감소하면서 복렬사주가 발달하기 때문이며, Colombini 등(1987)이 이론적으로 예측한 결과와 잘 일치한다. 한 단면에서 3개의 모드가 나타나는 것은 하상에서 변화를 일으키는데 중요한 역할을 한다. 직선하도에서 사주의 수가 증가하는 것은 교호사주의 강한 비선형으로 상호작용하기 때문이다.

핵심용어 : 복렬사주, 망상하천, 2중 푸리에 해석

1. 서론

하천복원 및 정비사업은 하폭을 넓히거나 하도 선형을 개선하여 하천환경을 개선하거나 홍수의 소통을 원활히 하여 재해의 위험을 경감시킨다. 이와 같이 하폭이 변하면, 수리학적 특성에 의하여 하도에서 교호사주(alternate bar)나 복렬사주(multiple bar)가 발달하며, 이러한 사주는 하도의 평면변화를 일으키는데 중요한 역할을 한다. 하천의 생태계 조건은 지형학적인 상태에 의해 결정되며, 하천의 지형학적 상태를 나타내는 가장 중요한 정량적인 지표 중의 하나는 하도 단면을 형성하는 사주의 수이다 (Toffolon and Crosato, 2007). 사주는 지형학적인 다양성을 증가시키고, 수생태계의 서식처를 만든다. 따라서 사주의 수는 생태학자들에게 저수위 동안에 하중도와 하안의 출현뿐만 아니라, 서식처의 크기를 부여한다. 하도의 한 단면에서 사주의 수를 결정하는 고전적인 방법은 사주의 수에 대하여 하도의 형태가 안정한지 불안정한지를 분리하는 것으로 정의한다. 복렬사주(multiple bars)는 교호사주(alternate bars)보다 하폭 대 수심의 비가 큰 곳에서 발생한다. 이동하거나 일정한, 안정된 사주인 자유사주(free bars)는 작은 변화(perturbation)에 반응하는 시스템으로써 하상의 진동이 발생한다.

하천의 변화에 따른 사주의 변화 과정을 파악하기 위하여 이론 및 실험을 통하여 많은 연구가 진행되었으나, 하안의 형상이 균일하거나 하폭이 고정되어 있는 형태로 제한되었다. 따라서 본 연구에서는 하안침식을 고려하여 하폭의 변화에 따른 사주의 발달 과정을 실내실험을 통하여 분석하였다. 2중 푸리에 해석을 통하여 하폭의 변화에 따른 사주의 발달 과정을 정량적으로 분석하였다.

* 정회원 · 한국교통대학교 건설교통대학 토목공학과 조교수 · E-mail : cljang@ut.ac.kr

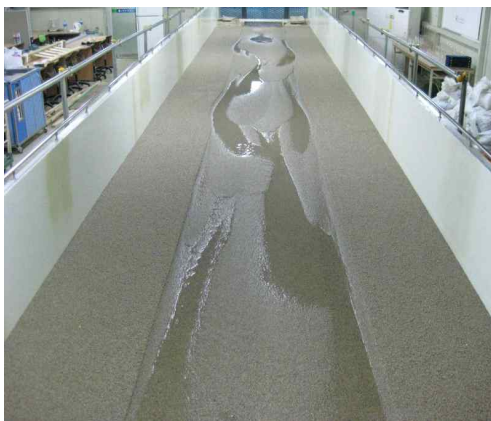
2. 실내실험

실내실험은 길이 12 m, 넓이 2 m 수로에서 수행하였다. 수로는 평균입경이 1.4 mm이고, 표준편차가 1.35인 균일사로 10 cm의 두께로 전체가 균등하게 채웠다. 가변형 경사수로에서 실험을 위한 초기 수로는 자체 제작한 모래 포설기를 이용하여, 밑변이 80 cm, 깊이가 3 cm, 하안의 경사가 40도인 저수로를 만들었으며, 수로의 경사는 1/100으로 설정하였다. 하도 변화에 대한 지형자료는 상류로부터 2 ~ 12 m 구간에서 종방향으로 0.2 m, 횡방향으로는 0.05 m 간격으로 point gauge를 이용하여 측정되었다. 초기에 상류에서 3.97 /s의 유량으로 일정하게 공급하였다. 하폭 대 수심의 비는 86.9 이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하도의 지형변화

망상하천은 하상 및 하안침식에 의하여 흐름 및 하도의 변화가 급격하고 예측하기 어렵기 때문에, 하도를 계획하거나 관리하는데 많은 한계가 있다. 망상하천의 하도에 대한 형상 변화는 하폭 대 수심의 비가 증가하면서 복렬사주가 발달한다. 사주가 하류로 이동하면서 성장하고, 사주의 주변에서 흐름이 분리되어 하안 침식을 가속시킨다(그림 1). 시간이 증가하면서, 사주는 하류로 이동하고 사주의 면적은 증가하며 하폭이 넓어진다(그림 1). 사주의 후미에서는 흐름이 집중되고 하상이 깊게 세굴되면서 scour hole이 발생한다. 통수 후 30분에 유입구로부터 2.2m 지점과 6m 지점에서 중앙 사주(central bar)가 나타나며, 흐름이 분열된다(그림 1(a)). 중앙 사주의 파장은 약 4m 정도이며, 시간이 증가하면서 하류로 이동한다. 하도에서 흐름이 분열되는 것은 망상하천을 형성하는데 중요하며, 사주에서 유선(streamline)이 분열되어 만들어진다(Mosley, 1976). 또한 이러한 흐름의 분리는 사주의 상류에서 유입되는 흐름의 Froude 수와 하폭 대 수심에 의하여 흐름이 분리되고, 중앙 사주(central bars)가 형성이 된다. 사주의 상류에서 흐름이 분리되는 것은 무차원 소류력(dimensionless tractive force) 혹은 Shield 응력에 의하여 흐름의 Froude 수와 하폭 대 수심의 비가 증가하면서 흐름의 불안정성(instability)에 의한 것이다(Federici and Paola, 2003).



(a) T = 30 min.



(b) T = 90 min.

그림 1. 실내실험 결과

망상하천에서 흐름이 합류되는 지점은 흐름이 집중되어 하상이 깊게 세굴 되고, scour hole이 형성된다. 이러한 합류부의 세굴은 하도를 설계하거나 관리하는데 중요하며, 망상하천의 발달과정을 이해하는데 중요하다. 합류점에서 발생한 scour hole은 망상하천에서 node로써, 하도의 이동과

유사의 분포에 많은 영향을 준다. 상류에서 발달한 scour hole은 60분에 1.67 cm/min.에서 2.33 cm/min.으로 증가하였으며, 하류에서 발달한 scour hole도 1.67 cm/min.에서 2.0 cm/min.으로 증가하였다 (그림 2와 3). 망상하천에서 scour hole이 이동하는 특성은 파악하는 것은 상류에서 발달한 사주에 의하여 흐름이 합류되는 각도에 의하여 변하게 된다. 시간이 증가함에 따라, 사주가 발달하면 유입 각도가 증가하고, 각각 유입되는 흐름이 강하게 충돌하여 와류가 크게 발달하며, 하상이 크게 세굴되기 때문으로 판단된다.

사주의 선두 부분에서 흐름이 집중되어 수층부가 형성되며, 하안이 침식된다. 하안침식에 의한 하폭이 증가하는 비율은 통수 후 30분에는 0.84 m, 60분에는 0.95 m, 90분에는 1.06 m 이다 (그림 4). 또한 하폭의 증가에 대한 영향은 하류로 전파되고 있으며, 이러한 이동 특성은 scour hole의 이동 특성과 매우 일치한다.

3.2 유사의 유출특성

망상하천에서 유로의 변화를 파악하기 위하여 유사의 유출 특성을 분석해야 한다. 본 연구에서는 실험이 진행되는 동안 가변형 경사수로의 하류단에서 매 5분 간격으로 유사를 수집하여, 유사량을 측정하였다. 통수 후 30분까지는 유사의 유출량이 거의 일정하게 증가하였으나, 그 후에는 강한 변동을 보이면서 유사가 유출되는 것을 보여주고 있다(그림 5). 통수 30분까지 유사의 유출량이 일정한 것은 초기에 저수로에서 일정하게 하안침식이 발생하기 때문이다. 그러나 30분 이후에 유사의 유출량이 강한 변동을 보이는 것은 사주의 증가에 의하여 하안이 침식되고, 저수로의 수가 증가하거나 하폭이 증가하면서 유사가 이동되지 않는 수심이 얇은 구간이 증가하면서 유사의 유출이 증가하거나 감소하기 때문에, 강한 변동을 보여주고 있는 것으로 판단된다.

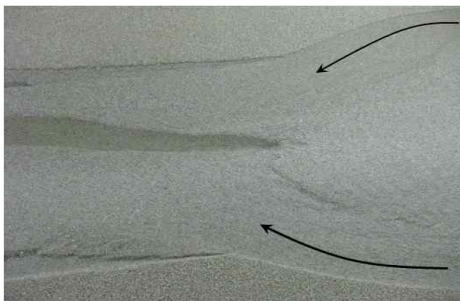


그림 2. 중앙사주 후미(통수 후 90분에 5.4m 지점에서 발달한 scour hole

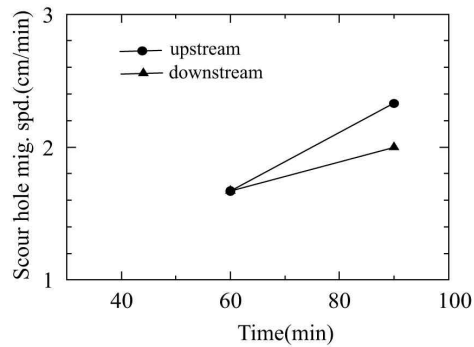


그림 3. scour hole의 이동 속도

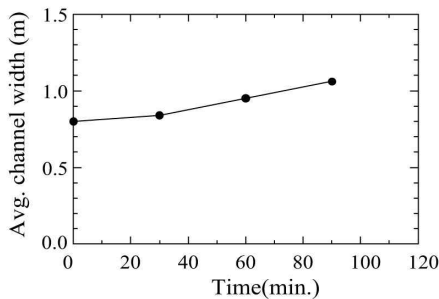


그림 4. 시간에 따른 평균 하폭 변화

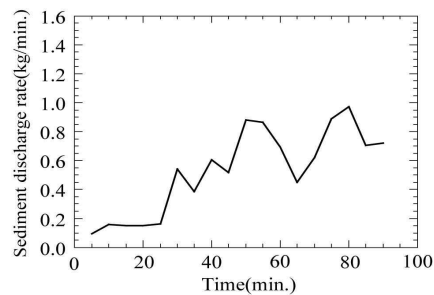


그림 5. 시간에 따른 유사의 유출량

3.3 2중 푸리에 해석

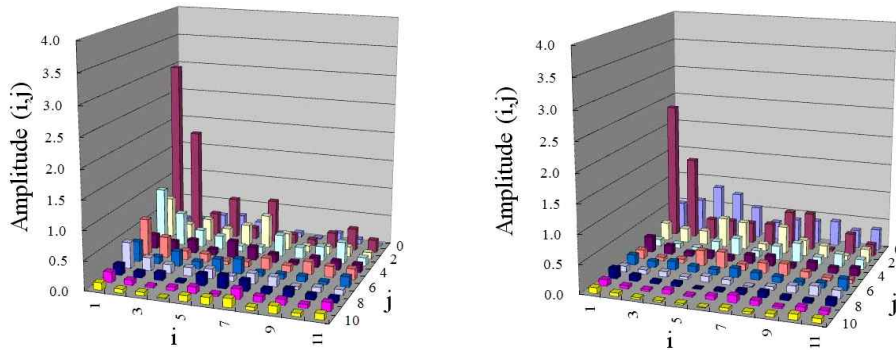
실험 결과를 통하여 얻은 하상형상에 대하여 2중 푸리에 해석을 하는 것은 하상형상을 다양한 하상파(wave)를 선형화 하여 표현하는 것이 가능하다. 2중 푸리에 해석을 통하여 얻은 각 파의 진폭 성분을 분석하여 모드 특성을 이해하게 된다. 2중 푸리에 변환을 할 때에 종횡단 방향에 1 파장의 자료를 계산하며, 횡단방향에서는 유로의 반파장 자료를 반대방향으로 굴절시키고, 하폭을 B라면 2B까지 자료가 있다고 가정하여 계산을 한다. 해석을 하는 하상 형상의 흐름 방향()에 대한 1 파장의 길이를 , 횡단방향 (n)에 관해서 유로의 1/2에 대한 자료를 양측에 반대방향으로 굴절시킬 때의 길이를 기준파장 Y로 한다.

평균수심을 H라 하고, 하상고와 평균 하상고의 차를 η (중력이 작용하는 방향을 +로 함)라 하고, $\tilde{\eta}$ 를 H로 나눈 무차원 하상고 η 로 하상형상을 나타낸 계산식은 다음과 같다.

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

여기서, i 는 물이 흘러 내려가는 방향의 계산점이고, j 는 횡단방향의 계산점이다.

그림 6은 각 시간별 하도의 지형변화에 대하여 2중 Fourier 해석에 의한 파(wave)의 분포를 보여주고 있다. 통수 후 30분에는 1-1 모드(mode)가 가장 지배적이며, 진폭(amplitude)이 1.8이며, 두 번째로 지배적인 것이 1-3모드로써, 0.69에 이르고 있다. 통수 후 90분에서는 1-1 모드(mode)의 진폭이 1.42이며, 두 번째로 지배적인 것이 1-3모드로써, 0.36에 이르고 있다. 그러나 시간이 증가하면서, 1-1 모드의 값은 작아지지만, 다른 모드의 진폭이 증가하는 것을 보여주고 있다.



(a) T = 30 min.

(b) T = 90 min.

그림 6. 2중 Fourier 해석에 의한 시간에 따른 파(wave)의 분포(Run-1)

그림 7은 각 시간별 하도의 지형변화에 대하여 2중 Fourier 해석에 의한 지배적인 성분, 즉 모드(mode)의 변화를 보여주고 있다. 여기서 1-1 mode는 교호사주(alternate bars)이고, 1-2 mode와 2-2 mode는 2차 횡방향 모드로서 중앙 사주(central bars)를 나타낸다. 1-3 mode와 2-3 mode는 한 단면에서 횡방향으로 3개의 사주가 형성된 것(triple row bars)을 나타낸다. 초기에는 1-1 mode인 교호사주가 지배적이지만, 시간이 증가함에 따라, 교호사주인 1-1 mode는 감소하고, 한 단면에서 3개의 사주가 형성되는 2-3 mode가 지배적인 것으로 나타났다. 이러한 원인은 시간이

지나면서 사주가 발달하고, 하안침식이 되면서, 하폭이 증가하여 상대적으로 수심이 감소하면서 복렬사주가 발달하기 때문이며, Colombini 등(1987)이 이론적으로 예측한 결과와 잘 일치한다. 한 단면에서 3개의 모드가 나타나는 것은 하상에서 변화를 일으키는데 중요한 역할을 한다. 직선하도에서 사주의 수가 증가하는 것은 교호사주의 강한 비선형으로 상호작용하기 때문이다.

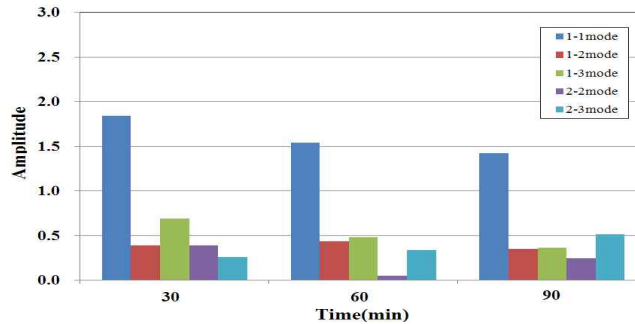


그림 7. 2중 Fourier 해석에 의한 지배적인 성분

4. 결론

본 연구에서는 실내실험을 통하여, 하안침식을 고려한 망상하천에서 저수로의 이동특성을 조사하며, 2중 푸리에 해석에 의하여 사주의 거동특성을 분석하였다. 망상하천의 하도에 대한 형상 변화는 하폭 대 수심의 비가 증가하면서 복렬사주가 발달한다. 시간이 증가하면서, 사주는 하류로 이동하고 사주의 면적은 증가하며 하폭이 증가하였다. 사주의 후미에서는 흐름이 집중되고 하상이 깊게 세굴되면서 scour hole이 발생하였다.

시간별 하도의 지형변화에 대하여 2중 Fourier 해석에 의한 지배적인 성분, 즉 모드(mode)의 변화를 분석하였다. 초기에는 1-1 mode인 교호사주가 지배적이지만, 시간이 증가함에 따라, 교호사주인 1-1 mode는 감소하고, 한 단면에서 3개의 사주가 형성되는 2-3 mode가 지배적인 것으로 나타났다. 이러한 원인은 시간이 지나면서 사주가 발달하고, 하안침식이 되면서, 하폭이 증가하여 상대적으로 수심이 감소하면서 복렬사주가 발달하기 때문이다. 또한 직선하도에서 사주의 수가 증가하는 것은 교호사주의 강한 비선형으로 상호작용하기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 2011-0009759).

참고 문헌

1. Toffolon, M., and A. Crosato (2007). Developing macroscale indicators for estuarine morphology: The case of the Sheldt estuary, *J. Coastal Res.*, 23(1), 195-212, doi:10.2112/03-0133.1.
2. Federici, B., and C. Paola. (2003). Dynamics of channel bifurcations in noncohesive sediments, *Water Resources Research*, 39(6), 1162, doi:10.1029/2002WR001434.
3. Colombini, M., G. Seminara, and M. Tubino. (1987). Finite amplitude alternate bars, *J. Fluid Mech.*, 181, 213-232