

Kinoshita 사행하도에서 2차류 강도 변화에 의한 하상변동 수치모의 분석

Numerical Simulation of the Bed Change in a High-amplitude Kinoshita Meandering Channel by Considering Secondary Flow

장창래*, 신지혜**

Chang-Lea Jang, Ji Hye Shin

요 지

사행하천 만곡부에서는 원심력에 의한 편수위와 2차류 현상 등 흐름에 변화가 생긴다. 2차류는 흐름의 유속구조를 변화시키고 횡방향 흐름을 만곡의 외측부로 이동시키며, 유사이송, 제방침식, 하상변동 등에 영향을 미친다. 따라서 사행하천 만곡부에서 수치모의 시에 2차류에 하도변화를 연구하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 2차원 수치모형인 Nays2DH를 이용하여 Kinoshita 사행하도(Kinoshita Meandering Channel)에서 2차류와 사행도가 흐름에 미치는 영향을 모의하였다. 2차류 강도가 증가함에 따라, 만곡부 외측에서 수심이 증가하고, 흐름의 방향이 만곡부 외측으로 편향되어 유속이 증가하였다. 만곡부 내측에서는 유속이 감소하고, 와도가 증가하였다. 하상변동 분석 결과, 2차류 강도가 증가함에 따라, 만곡부 내측에서 하상고가 상승하며, 변화 폭이 증가하였다. 만곡부 외측에서 하상이 깊게 세굴되고 세굴심이 하류로 이동하였다.

핵심용어 : Kinoshita Meandering Channel, 사행하천, 만곡부, 2차류, 수치모의

1. 서론

사행하천의 만곡부에서는 원심력에 의한 편수위와 2차류 현상 등 흐름에 변화가 생긴다. 원심력에 의해 수면은 만곡부의 외측으로 갈수록 높아지며, 유속은 만곡부의 내측에서 외측으로 갈수록 작아진다. 그러나 최대 유속은 바닥 마찰 등의 영향으로 실제로 만곡부의 내측에서 조금 떨어진 곳에서 나타난다. 이러한 최대 유속은 하류로 갈수록 흐름의 불안정성 때문에 좌우로 이동할 수 있으며, 그에 따라 수로에 영향을 미친다. 2차류는 흐름의 유속구조를 변화시키고 유사이송, 제방침식, 하상변동 등에 영향을 미친다. 또한 사행하천에서 2차류의 크기는 종방향 유속에 비하여 작지만 유속을 재분포 시켜 흐름의 교란을 발생시키는데 중요한 인자로 사행하천의 대표적 흐름 특성 중 하나이다. Abad and Garcia (2009)는 흐름 및 난류 특성을 주기적이며 비대칭적 사행하천인 'Kinoshita Meandering channel'의 연구를 통해 상류 조건의 경우 에너지 경사가 하류 조건에 비해 작아 흐름 저항이 하류 조건에 대해 상대적으로 크게 나타났음을 제시하였다. 송창근 등(2013), 장창래(2017)는 만곡부에서 2차류가 주 흐름 유속과 하상변동에 미치는 영향을 무시한 기존 수치모의 연구와 다르게 2차류의 영향을 고려한 2차원 수치모의 연구를 수행하였다. 그러나 사행도가 큰 하천에서는 2차류의 영향이 크며, 본 연구에서는 Kinoshita Meandering channel에서 2차류 강도 변화에 의한 사행하천의 흐름 및 하상변동의 특성을 파악하였다.

2. 수치모형의 특징 및 계산조건

* 정회원 · 한국교통대학교 토목공학전공 교수 · E-mail : cljang@ut.ac.kr

** 정회원 · 한국교통대학교 토목공학전공 석사과정 · E-mail : shinjihye@ut.ac.kr

2.1 수치모형의 특징

본 연구에서 사용한 2차원 수치모형 Nays2DH는 iRIC 모형에 탑재되어 있으며 (Shimizu et al., 2014), 직교좌표계를 변환하여 형상이 복잡한 하천에 적합하도록 경계적합좌표계(boundary fitted coordinates)를 사용하였다. 수리구조물을 포함한 2차원 흐름특성을 계산하고, 하안침식과 식생의 영향을 고려한 하도의 지형변화와 하상토의 분급현상을 모의할 수 있다. 수치모의구간에 있는 수리구조물은 각각 계산격자에서 설정할 수 있으며, 보, 수제, 교각 등 수리구조물을 고려할 수 있다. 유사량을 계산하기 위하여 하상에서 소류사량은 Ashida and Michiue(1972)의 공식을 적용하였다. 수치해석 기법으로는 엇갈린 격자(staggerd grid) 상에서 이류항에는 CIP(Cubic Interpolated Pseudoparticle)법을 적용하였으며, 확산항에는 중앙차분법을 적용하였다. 경계조건으로는 상류에는 유량과 유사량을 설정하였으며, 하류에는 등류수심을 설정하였다. 측벽에서는 측벽에 수직으로 유속이 없는 것으로 가정하였으며, 흐름 방향으로는 활동(slip) 조건으로 가정하였다.

2.2 수치모의 조건

본 연구에서는 2차원 수치모형인 Nays2DH 모형을 사용하였다. 수치모의를 하기 위한 수리조건을 선택 하기에 앞서 수로의 형상은 Kinoshita Meandering Curve로 선정하였다. 수치모의의 수리조건은 표 1과 같이 유량 Q는 0.05 m³/sec, 수로 폭 B는 0.6 m, 사행의 파장 길이 L은 10 m, 하상토의 평균 입경 dm은 0.8 mm, 수로의 하상 경사는 0.00045, 사행 각도 θ 는 110°, Manning의 조도계수는 0.0126이다. Kinoshita 사행수로의 형태는 다음 식으로 재현될 수 있다 (Abad and Garcia, 2009).

$$\theta(s) = \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi s}{\lambda}\right) + \theta_0^3 \left[J_s \cos\left(3\frac{2\pi s}{\lambda}\right) - J_f \sin\left(3\frac{2\pi s}{\lambda}\right) \right] \quad (1)$$

여기서, J_s 는 왜도(skewness)계수 ($=\pm 1/32$), J_f 는 편평도(flatness)계수 ($=1/192$), θ_0 는 최대 진폭 ($=110^\circ$), λ 는 파장, s 는 진행방향 좌표이다.

그림 1은 식 1에 의하여 재현된 Kinoshita 사행하도에서 수치모의를 위한 계산 격자를 보여준다. 계산 격자의 수는 횡방향 16개, 종방향 180개(총 3개의 사행, 사행 하나의 종방향 격자의 수는 60개)로 총 2,880개이며 계산 시간은 1,800 sec이다.

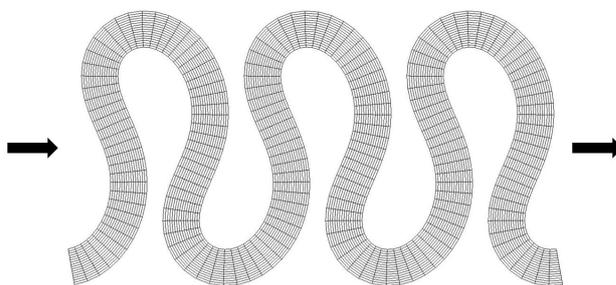


그림 1. 수치모의 계산 격자

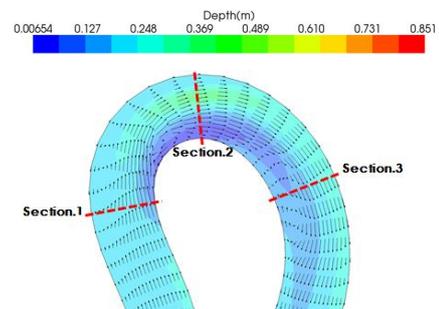


그림 2. 2차류 강도변화에 의한 수심의 변화 (Run-3)

본 연구를 위한 자세한 수치모의를 수리학적 조건은 표 1과 같다.

표 1. 2차류 강도 변화에 의한 수치모의 조건

Case	유량 (m ³ /sec)	하폭 (m)	사행의 과장(m)	하상도입경 (mm)	하상경사	사행각 (°)	2차류 강도계수
Run-1	0.050	0.6	10	0.8	0.00045	110	0
Run-2	0.050	0.6	10	0.8	0.00045	110	4
Run-3	0.050	0.6	10	0.8	0.00045	110	7
Run-4	0.050	0.6	10	0.8	0.00045	110	10
Run-5	0.050	0.6	10	0.8	0.00045	110	13

3. 수치모의 결과

3.1 2차류 강도 변화에 의한 수심의 변화

동일한 조건상에서 2차류 강도를 증가시키며 수치모의를 수행하였다. 그림 2는 2차류 강도 변화에 의한 흐름 및 하상변동에서 수심에 대한 모의결과를 보여주는 그림이다. 수치모의 결과 분석을 위한 대상은 만곡부의 유입부(Section.1), 정점부(Section.2), 유출부(Section.3)로 구분하였다. 그림 3은 2차류 강도 변화에 의한 수치모의에서 수심에 대한 각 지점별 횡단면 변화 그래프이다. 전체적으로 Run-1의 그래프는 2차류의 영향을 받지 않았다. 그러나 만곡부 정점에서는 2차류 강도 계수가 커질수록 우안에서는 수심이 감소하고 좌안에서는 수심이 증가한다 (그림 3(b)). 이것은 만곡부 내측에서 조금 떨어진 부분에 최대유속이 작용하여 2차류의 영향을 받기 때문이다. 내측에 최대유속이 발생하는 현상으로 인해 좌안이 우안에 비해 수심이 높은 것으로 판단된다 (그림 3(c)).

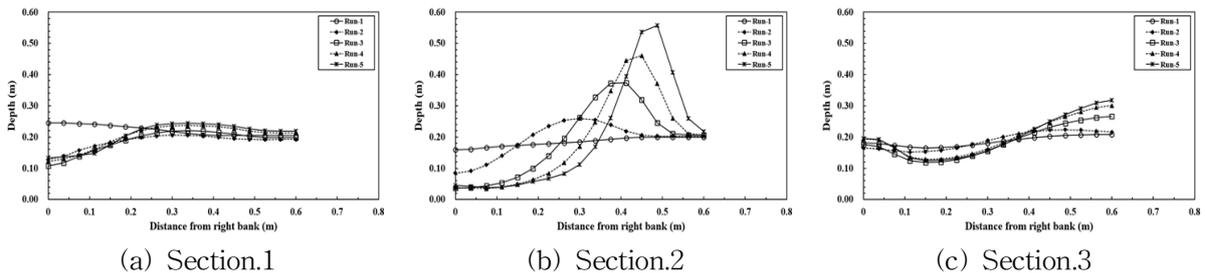


그림 3. 2차류 강도 변화에 의한 각 지점별 수심 변화

3.2 2차류 강도 변화에 의한 유속의 변화

그림 4는 2차류 강도 변화에 의한 수치모의에서 유속에 대한 결과를 보여주고 있다. 2차류 강도 계수가 감소함에 따라 그림 4(a)는 만곡부 외측보다 내측에서 유속이 크며, 흐름이 만곡부 내측으로 편향되었다. 그러나 2차류 강도 계수가 증가함에 따라 그림 4(e)와 같이 만곡부 내측보다 외측의 유속이 크고 만곡부 외측으로 흐름이 편향되었으며, 만곡부 내측에는 와류가 형성되었다. 이 구역에서 와류가 형성되면서 만곡부가 끝나는 지점에서 영향을 주어 또 다른 와류가 형성되고, 이것은 만곡부 외측에 흐름이 집중되도록 영향을 준다 (그림 4(e)).

그림 5는 2차류 강도 변화에 의한 만곡부의 유입부(Section.1), 정점부(Section.2), 유출부(Section.3)에서 횡단 방향의 유속변화를 보여주고 있다. 그림 5(a)는 최대 유속이 만곡부 내측인 우안으로 편향되어 있다. 2차류 강도계수가 증가할수록, 정점부에서 유속은 감소하고 유향은 만곡부 내측으로 편향되었다. 그림 5(c)는 만곡부가 끝나는 지점에서 유속의 변화를 보여주고 있다. 우안에서 유속이 감소하고 있으며, 최대 유속은 좌안에서 발생한다. 만곡부의 유입부에서는 내측에서 최대 유속이 발생하지만 만곡의 정점부를 지나 유

출부에서는 좌안에서 최대유속이 발생하였다. 특히, 2차류 강도계수가 증가할수록 만곡부 내측에서 와류가 발달하고, 이것은 만곡부 외측에서 흐름을 집중시키는 역할을 하는 것으로 판단되다.

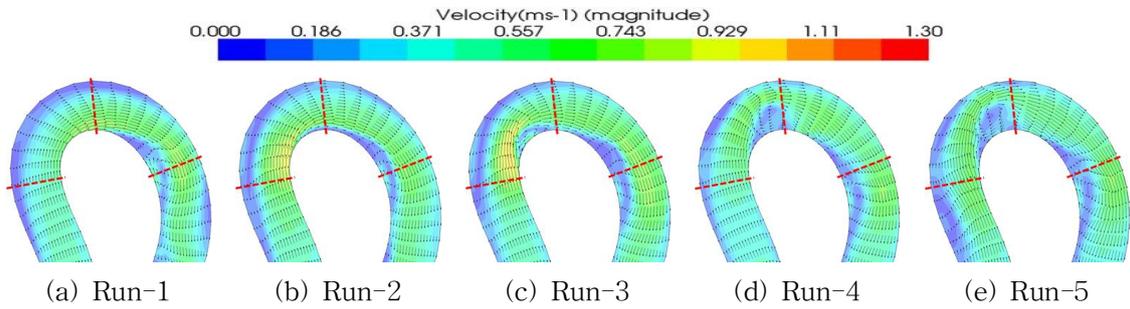


그림 4. 2차류 강도 변화에 의한 수치모의 결과 (유속)

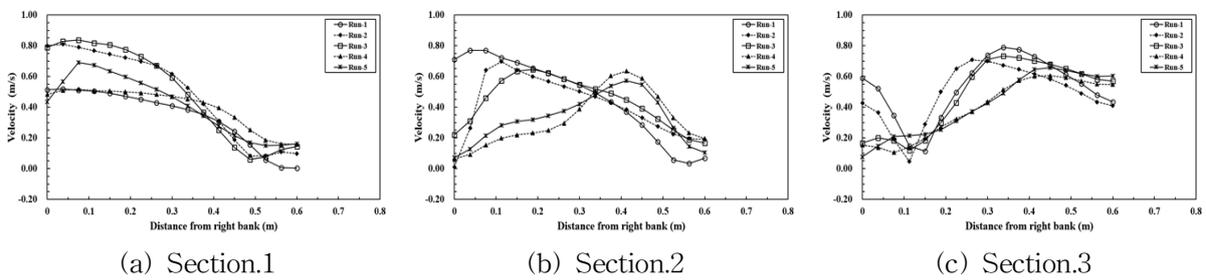


그림 5. 2차류 강도 변화에 의한 각 지점별 유속 변화

3.3 2차류 강도 변화에 의한 하상고의 변화

2차류 강도 변화는 흐름뿐만 아니라 하상고 변화에 많은 영향을 준다. 그림 6(a)은 2차류의 영향을 받지 않아 침식과 퇴적 활동이 적게 일어났고 하상고의 변화도 거의 없었다. 그림 6(b)에서 (e)까지 2차류 강도 계수가 증가함에 따라 만곡부 외측에서 하상이 저하되었으며 하류로 길게 나타났다. 그러나 만곡부 내측에서 퇴적이 나타났으며 2차류 강도계수가 증가할수록 하류로 넓어진다. 그림 7은 2차류 강도 변화에 의한 하상고의 횡단면 변화에 대한 각 지점별로 보여주고 있다. 그림 7(a)의 Run-1은 좌안에서 퇴적이 일어났고 우안에서 하상이 저하되었다. Run-2에서 Run-5까지는 Run-1과 반대로 좌안에서 하상이 저하되고, 우안에서 하상고가 상승하였다. 즉, 2차류 강도 계수가 커질수록 우안에서는 하상고가 증가하고 좌안에서는 하상이 저하된다.

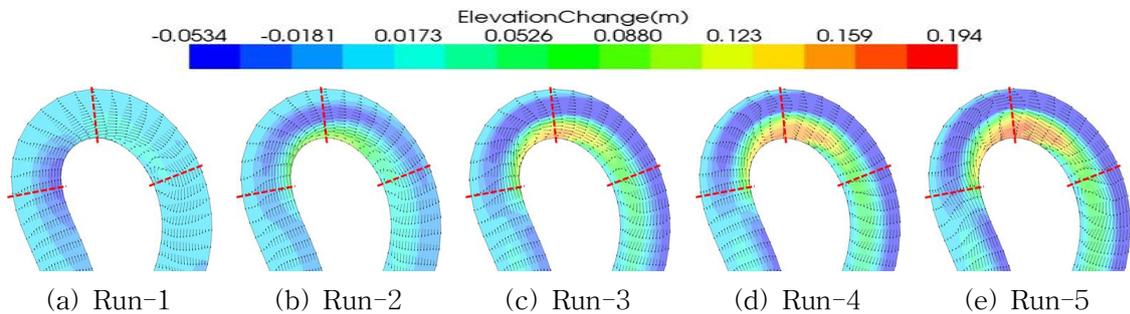


그림 6. 2차류 강도 변화에 의한 수치모의 결과 (하상고 변화)

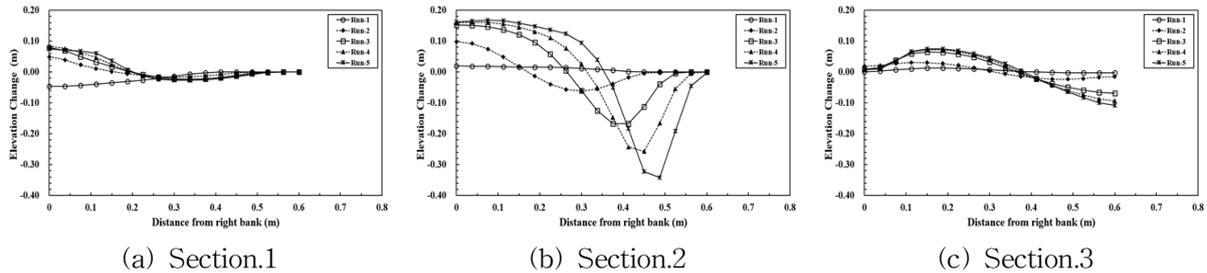


그림 7. 2차류 강도 변화에 의한 각 지점별 하상고 변화

4. 결론

본 연구에서는 2차원 수치모형인 Nays2DH를 적용하여 Kinoshita 사행하도에서 2차류 강도 변화에 의한 흐름 및 하상변동의 특성을 파악하였다. 2차류 강도 계수가 커질수록 우안에서는 수심이 감소하고 좌안에서는 수심이 증가하였다. 이것은 만곡부 내측에서 조금 떨어진 부분에 최대유속이 작용하여 2차류의 영향을 받기 때문이다. 2차류 강도 계수가 증가함에 따라 만곡부 내측보다 외측의 유속이 크고 만곡부 외측으로 흐름이 편향되었으며, 만곡부 내측에는 와류가 형성되었다. 이 구역에서 와류가 형성되면서 만곡부가 끝나는 지점에서 영향을 주어 또다른 와류가 형성되고, 이것은 만곡부 외측에 흐름이 집중되도록 영향을 준다. 2차류 강도 계수가 증가함에 따라 만곡부 외측에서 하상이 저하되었으며 하류로 길게 나타났으나, 만곡부 내측에서 퇴적이 발생하였다. 2차류 강도 계수가 증가함에 따라 최심하상고의 위치가 만곡부 내측으로 이동하였다. 또한 만곡부 내측에서 하상고가 상승하며 변화의 폭이 증가하였고, 만곡부 외측에서 하상이 깊게 세굴되고 세굴심이 하류로 이동하였다.

감 사 의 글

본 연구는 2018년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2017R1D1A1B03032083)에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 송창근, 서일원 (2015), “만곡부에서의 이차류 영향 반영 기법”, 한국수자원학회지, 물과 미래
2. 장창래 (2017), “내성천 급만곡부에서 유량 변화에 의한 흐름 및 하도변화 수치모의”, 응용생태 공학회, 응용생태공학회 논문집, pp. 24-33
3. Ashida, K. and Michiue, M. (1972), “Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams” Proc. JSCE, pp. 59~69
4. Jorge D. Abad and Marcelo H. Garcia (2009), “Experiments in a high-amplitude Kinoshita meandering channel : 1. Implications of bend orientation on mean and turbulent flow structure”, Water resources research, Vol. 45, W02401
5. Shimizu, Y. Takuyam, I. Michihiro, H. Toshiki, I. (2014), “Nays2D Solver Manual of iRIC software.”