

# 수치모형을 이용한 수제 길이에 의한 교호사주의 변화 분석

## The change of alternate bars with spur-dike using numerical analysis

송영진\*, 장창래\*\*, 김창성\*\*\*

Young-Jin Song, Chang-Lae Jang, Chang Sung Kim

### 요 지

사주의 거동은 하안침식과 하도의 변화를 일으키며, 치수적으로 많은 문제를 일으키고 있다. 수제는 저수로의 이동과 하안침식을 억제하고 저수로를 안정화시키는데 구조적 대안으로 적용되고 있으나 수제에 의한 사주의 변화 과정을 정량적으로 연구되지 않고 있으며, 명확한 설계기준을 제시하고 있지 않은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 수심적분 2차원 수치모형인 Nays2D를 이용하여 수제에 의한 사주의 변화와 이동 특성을 분석하였다. 수제 설치 후 사주의 이동은 일정하지 않고, 파장의 변화도 일정하지 않는 것으로 나타났다. 무차원 수제의 길이가 증가함에 따라, 수제의 하류에서 사주의 형상은 변화되며, 이동 특성에 영향을 주었다. 특히, 무차원 수제의 길이가 0.6일 때에는 고정사주로 변화되는 것을 알 수 있었다. 또한 무차원 수제의 길이가 증가함에 따라, 사주의 파장은 증가하고, 사주의 이동속도는 감소하는 특성을 보여주고 있다.

**핵심용어 :** 수제, Nays2D, 직선수로, 사주

### 1. 서론

하천에서 사주는 흐름과 유사의 상호작용에 의하여 사주가 발생하며, 하도의 변화와 서식처 형성에 중요한 역할을 한다 (장창래, 2012). 사주는 교호사주, 복렬사주, 점사주, 지류사주 등으로 구분되며, 교호사주는 주로 하천의 신상지 하도구간에서 형성되는 하상형태로서, 흐름의 저항을 가져오게 된다. 특히, 홍수시에 주 흐름이 하안 혹은 강턱에 충돌하여 수층부를 형성시켜 하안침식 및 호안손실을 일으키며, 하천에서 발생하는 재해의 중요한 원인 중의 하나이다 (장창래, 2006). 최근에 대규모 하천사업으로 인하여 사주의 발달과 하도의 지형변화가 발생하고 있으며, 수제를 이용하여, 하안침식을 저감하고 사주의 거동을 조절하여 안정화도 관리를 위한 노력이 진행되고 있다. 최근에 수제와 관련된 흐름 및 세굴심에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 강준구 등(2005)이 수제길이 대 하폭의 비를 0.10~0.25로 제안하였으며, FHWA(1985)에서는 0.25 이내로 제안하였다. 강용구(2012)는 수제 설치 시 발생하는 세굴 심도에 영향을 미치는 지배인자를 산정하였으며, 이를 이용한 세굴심도 예측 공식을 제안하였다. Zhang and Nakagawa(2008)은 수제 주변의 세굴에 대한 시공간적 분석을 통해 세굴 심 추정 공식을 제안하였다. 또, 수제를 설치함으로써 발생하는 흐름에 대해서는 Goddisan and Vaghefi(2009)등이 실험 연구를 수행 하였다. 그러나 이들 연구는 수제에 의한 흐름 및 세굴심의 변화에 대한 연구이며, 수제에 의한 사주의 거동변화 및 하도의 지형변화를 해석한 국내 사례는 보고된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 수제에 의한 사주의 거동과 변화 과정을 분석 하였다.

\* 정회원 · 한국교통대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : [yjsong0724@ut.ac.kr](mailto:yjsong0724@ut.ac.kr)

\*\* 정회원 · 한국교통대학교 토목공학과 부교수 · E-mail : [cjiang@ut.ac.kr](mailto:cjiang@ut.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국교통대학교 토목공학과 선임연구원 · E-mail : [csckim@nate.com](mailto:csckim@nate.com)

## 2. 수치모형의 특성

본 연구에서는 Nays2D 모형을 적용하였으며, 일반좌표계에서 2차원 천수방정식을 적용하였으며, Navier-Stokes 방정식을 시간 적분한 Reynolds 방정식을 다시 수심방향으로 적분하였으며, 이에 대한 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{hu^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{hu^\eta}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta = \quad (2)$$

$$-g \left[ (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right]$$

$$- \left( C_f + \frac{1}{2} C_D a_s h \right) \frac{u^\xi}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\xi$$

$$\frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta = \quad (3)$$

$$-g \left[ (\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right]$$

$$- \left( C_f + \frac{1}{2} C_D a_s h \right) \frac{u^\eta}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\eta$$

여기서,  $h$ 는 수심( $m$ ),  $t$ 는 시간( $s$ ),  $u^\xi$ 는  $\xi$  방향의 유속( $m/s$ ),  $u^\eta$ 는  $\eta$ 방향의 유속( $m/s$ ),  $J$ 는 Jacobian 계수이다.  $\eta$ 는 일반좌표계의 공간 좌표 성분,  $u^\xi$ 와  $u^\eta$ 는  $\xi$ 와  $\eta$ 방향의 유속( $m/s$ ),  $H$ 는 수위( $=h+z_b$ )( $m$ ),  $z_b$ 는 하상고( $m$ ),  $C_d$ 는 하상마찰계수( $=gn/h^{1/3}$ ),  $n$ 은 Manning의 조도계수 ( $=d^{1/6}/8.9\sqrt{g}$ ),  $J$ 는 Jacobian 계수를 나타낸다(Jang and Shimizu, 2005). 하도의 변화를 모의하기 위하여 유사량을 계산하며, 유사의 연속방정식을 적용하여 하상고의 변화를 계산한다. 본 연구에서는 소류사량의 거동만 고려하였으며, Meyer-Peter and Muller(1984) 공식을 적용하였다.

$$q_b = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{s_g g d^3} \quad (4)$$

여기서,  $q_b$ 는 소류사량( $m^2/s$ )이고,  $\tau_*$ 는 무차원 소류력,  $\tau_{*c}$ 는 무차원 한계 소류력이며,  $s_g$ 는 수중에서 하상재료 비중( $=1.65$ ),  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $d$ 는 하상토의 평균 입경( $mm$ )이다.

## 3. 수치모의 조건

수치모의를 위한 수로의 조건은 폭( $B$ )은  $0.6 m$ , 길이( $L$ )는  $15 m$ 이며, 하상경사( $i$ )는  $1/200$ , 조도계수( $n$ )는  $0.015$ , 평균입경( $d_m$ )은  $0.8 mm$ , 유량( $Q$ )은  $0.0025 m^3/s$ 를 사용하였다. 수치모의를 위하여 유량과 하상토의 입경을 포함한 수리학적 조건은 무차원소류력( $\tau_*$ )은  $0.084$ ,  $Bi^{0.2}/h$ 는  $9.32$ 로 Kuroki and Kishi(1984)가 제시한 영역구분에서 교호사주가 발생하는 범위에서 있도록 설정하였으며, 자세한 계산 조건은 Table 1과 같다. 또한 수체의 위치는 상류경계에서  $2m$  떨어진 우안쪽에 설치하였고, 수체의 길이는 하폭대비  $0.1\sim 0.6$ 까지 길이를 변화시켜 모의하였다. 수치모의를

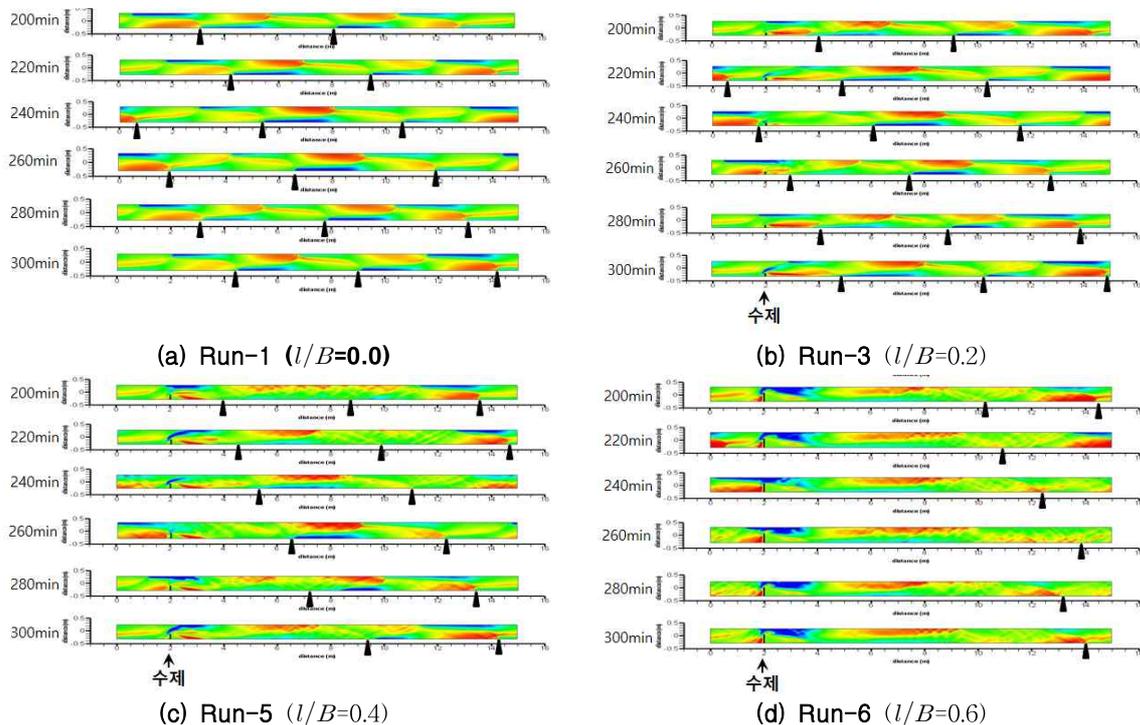
위한 계산 격자망 구성은 안정적인 해를 얻고, 하도의 지형변화를 모의하는데 중요하다. 일반적으로 2차원 수치모의를 위한 수리학적 조건 등에 의하여 결정되지만, 격자의 가로와 세로의 비가 1:1~1:10의 중횡비에서 안정적인 해를 찾을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수제의 크기를 표현하기 위해 1:2의 중횡비인 251(I)×21(J)개 계산 격자를 적용 하였다. 수치해석 기법으로는 CIP(Cubic Interpolated Pseudoparticle)법을 적용하였다. 흐름조건은 등류로 하였으며, 경계조건으로는 상류단의 흐름과 하류단의 흐름을 같게 설정해 주는 주기경계조건을 사용하였고, 총 모의시간은 5시간, 계산시간간격은 0.01초로 하였으며, 흐름이 안정화가 된 후 하상변동모의를 시작하기 위해 60초 이후부터 하상변동을 모의하였다.

**Table 1 Calculation conditions**

Case	Discharge ( $m^3/s$ )	Channel Width(m)	Channel length(m)	Slope	Mean particle size(mm)	Ratio of width to dike length( $l/B$ )
Run-1	0.0025	0.6	15	1/200	0.8	0.0
Run-2	0.0025	0.6	15	1/200	0.8	0.1
Run-3	0.0025	0.6	15	1/200	0.8	0.2
Run-4	0.0025	0.6	15 <td 1/200	0.8	0.3	
Run-5	0.0025	0.6	15	1/200	0.8	0.4
Run-6	0.0025	0.6	15	1/200	0.8	0.6

#### 4. 수치모의 결과 및 분석

본 연구에서는 수공구조물을 이용한 하도제어로 제안된 수제를 이용하여 사주의 변화와 특성을 파악하였으며, 이에 대한 수치모의 결과는 Fig. 1과 같다. Run-1은 수제가 없는 상태에서 사주의 발달과 이동 특성을 보여주고 있으며, 좌안과 우안에서 수층부를 형성하며 교호사주가 발달하고,



**Fig. 1. 수제에 의한 사주의 변화에 대한 수치모의 결과( ▲는 사주의 위치를 우안에서 나타냄)**

일정한 속도와 형상을 유지하며 하류로 이동하는 특성을 보여주고 있다 (Fig. 1(a)). Run-2는  $l/B=0.2$  이며, 사주의 이동과 형상이 거의 변화 없이 일정하고 하류로 이동하고 있으나, 사주가 수제의 전부에 만날 때, 세굴이 형성된다 (Fig. 1(b)). Fig 1(c)는 무차원 수제의 길이( $l/B$ )가 0.4이며, 수제의 후면에 유사가 퇴적되고 사주가 고착화 된다. 수제의 전면에서는 깊이 세굴되고, 유향이 수로의 좌안으로 편향되면서 수층부가 형성되면서 세굴공(scour hole)이 형성된다. 수제 하류에서는 사주의 파장이 길어지며, 교호사주의 형상은 유지되지만, 좌우로 번갈아가며 이동하는 현상은 보여주지 않고 있다. Fig 1(d)는 무차원 수제의 길이( $l/B$ )가 0.6이며, 사주의 파장은 증가하지만, 고정사주의 특성을 보여주고 있다. Fig. 2는 시간의 변화에 따른 사주의 이동 자취를 보여주고 있다. 사주의 변위가 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 무차원 수제의 길이( $l/B$ )가 0.2일 때까지는 사주는 일정하게 간격을 유지하며 하류로 이동하는 한다 (Fig. 2(a), (b), (c)). 그러나 무차원 수제의 길이가 0.3인 경우에서 10 m 지점에서 이동 속도는 감소하며, 사주의 형상이 변화가 나타난다 (Fig. 2(d)). 무차원 수제의 길이( $l/B$ )가 증가함에 따라, 사주의 이동 속도는 감소하며, 사주의 파장이 길게 늘어나는 특성을 보여준다. 무차원 수제의 길이가 0.6인 경우에는 6 m 까지는 수제의 의하여 흐름이 강하게 교란되어 사주의 형상이 나타나지 않으며, 사주가 고정되고 사주의 파장이 증가하는 것을 보여주고 있다. 즉, 무차원 수제의 길이( $l/B$ )가 0.6이 되면 자유사주가 고정사주로 변화되는 특성을 보여주고 있다. Fig. 3은 시간에 따른 사주의 파장, 파고, 이동속도의 변화를 보여주고 있다. 사주의 파장은 수제가 없는 조건에서 일정하게 유지되고 있다. 그러나 무차원 수제의 길이( $l/B$ )가 증가함에 따라, 사주의 파장이 감소하는 특성을 보여주고 있다(Fig. 3(a)). 사주의 파고는 수제가 없는 조건과 수제가 있는 조건에서 비슷하게 감소와 증가를 하지만 수제가 없는 조건보다  $l/B=0.1$  일 경우 평균 0.002m 낮게 나타났고,  $l/B=0.2$  일 경우 평균 0.002m,  $l/B=0.3$  일 경우 0.005m,  $l/B=0.4$  일 경우 평균 0.003m 낮게 나타났다(Fig. 2(b)). 사주의 이동속도는 수제가 없는 조건에서 보다 수제가 있을 때 초기에는 감소하는 것으로 나타났다(Fig 3(c)).

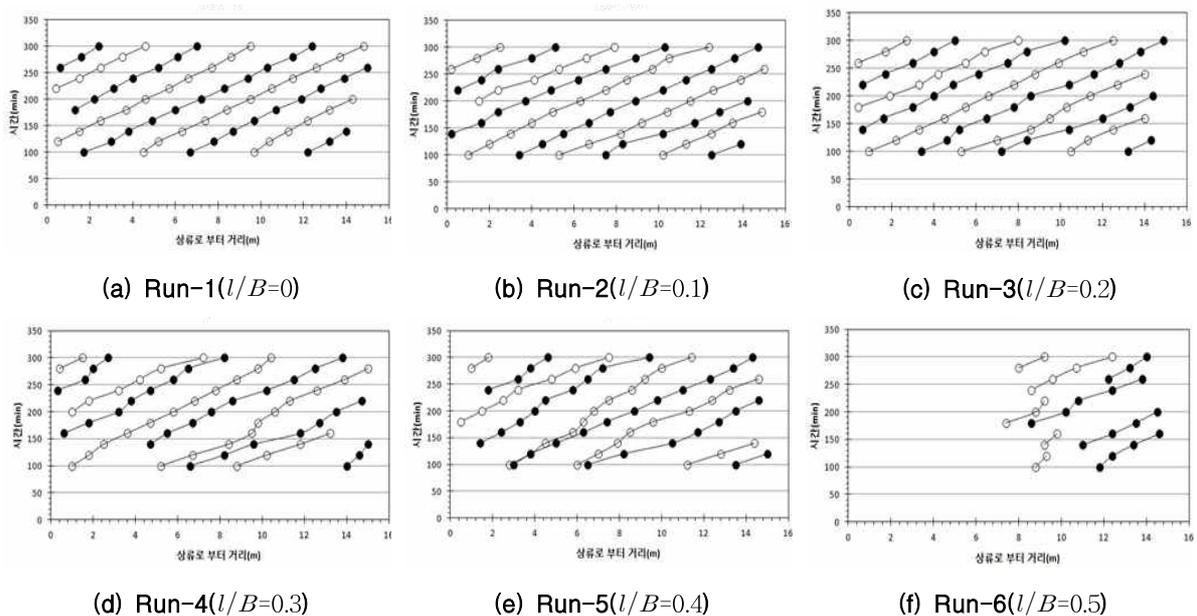


Fig. 2. 시간에 따른 사주의 이동 자취

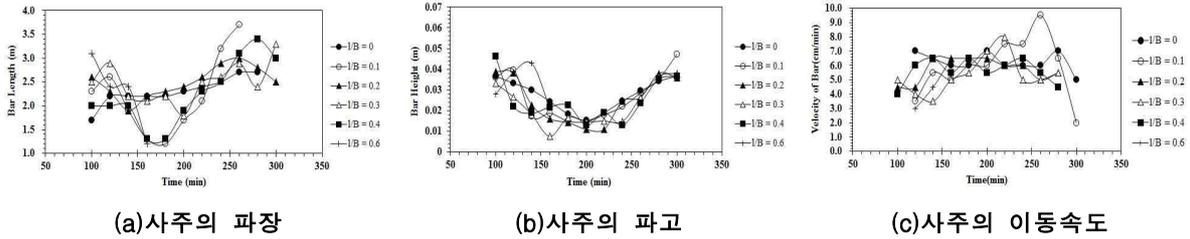


Fig. 3. 사주의 특성 변화

무차원 수제비가 0.6 일 경우 수제 상류에서 생성되는 사주가 사라지게 되어 하류로 이동을 하지 않고, 수제에 의하여 발생하는 흐름의 교란 때문에 수제 직하류에서도 사주가 발생하지 않는다. 그러나 수제의 영향이 감소되는 지점에서 교호사주가 형성되며, 사주의 파장은 길어지지만, 사주의 이동은 정지되는 특성을 보여주고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 수제에 의한 사주의 거동과 변화 과정을 분석하였다. 분석결과 무차원 수제의 길이가 증가함에 따라, 수제 하류에서 사주의 형상은 변화되며, 이동 특성에 영향을 주었다. 특히, 무차원 수제의 길이가 0.6일 때에는 고정사주로 변화되는 것을 알 수 있었다. 또한 무차원 수제의 길이가 증가함에 따라, 사주의 파장은 증가하고, 사주의 이동속도는 감소하는 특성을 보여주고 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11건설기술혁신C06)에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 강용구(2012). 수제 설치에 따른 하상변화 예측기법 연구, 영남대학교, 석사학위논문.
2. 강준구, 여홍구, 김성중(2005). 단일 횡수제 조건에 따른 선단부 유속과 재순환 영역에 대한 실험 연구, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제38권, 제2호, pp.143-153.
3. 장창래(2012). 사주발생제어 및 저수로 안정화 기술개발 연구보고서, 국토해양부, 첨단기술 기반 하천운영 및 관리 선진화 연구단 기술보고서
4. 장창래, 정관수(2006). 사행하천에서 사주의 이동특성에 관한 수치실험, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제26권, 제2호, pp. 209-216.
5. Ghodsian, M. and Vaghefi, M.(2009). Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend, Int. J. of Sediment Research, Vol. 24. No. 2. pp. 145-458.
6. Zhang, H., and Nakagawa, H.(2008). Scour around Spur Dyke: Recent Advances and Future Researches, 교토대학방재연구소, 제 51호, pp. 633-652
7. Jang, C.-L., and Shimizu, Y.(2005) " Numerical simulation of relatively wide, shallow channels with erodible banks." J. Hydraul. Eng., , ASCE, 131(7),pp. 565-575.
8. Kuroki, M. and Kishi, T.(1984). Regime criteria on bars and braids in alluvial straight channels, proc.JSCE, 342, pp87-96 (in Japanese).
9. Meyer-Peter, E. and Muller, R.(1948). Formulas for bed load transport, Proceedings Second Meeting of International Association for Hydraulic Structures Research, Stockholm.