

## 수제의 길이 변화에 의한 교호사주의 거동 분석 실험

# Experimental Analysis on the Behavior of Alternate Bars in a Channel with a Spur Dike

장창래\* · 송영진

한국교통대학교 토목공학과

Chang-Lae Jang\* and Youngjin Song

Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

Received 11 February 2016, revised 8 March 2016, accepted 20 March 2016, published online 31 March 2016

**ABSTRACT:** This study investigated the effects of a spur dike on the development processes, the migration, and the wave length of alternate bars with laboratory experiments. The bar wave length was shown to be shorter as the spur dikes got longer. The forcing effects of a long spur dike on the behavior of alternate bars were stronger than those of a shorter one. However, the bar height was not affected by the variation of the length of a spur dike. The bar migration speed was in inverse proportion to the bar wave length.

**KEYWORDS:** Alternate bar, Bar height, Bar migration speed, Spur dike

**요 약:** 본 연구에서는 수제의 길이 변화에 의하여 교호사주의 형성, 사주의 이동과 정지, 사주의 파장에 미치는 영향을 실내실험을 통하여 분석하였다. 수제의 길이가 길어질수록 사주의 이동거리와 파장은 짧아지고, 이동속도는 감소하였다. 수제의 길이가 길수록 사주에 작용하는 강제효과가 강하게 작용하였다. 사주의 파고는 수제의 길이 변화에 크게 영향을 받지 않으며, 거의 일정하게 유지되었다. 그러나 사주의 파장이 감소하면 사주의 이동속도는 증가하며, 사주의 파장과 사주의 이동속도는 반비례 관계를 형성하였다.

**핵심어:** 교호사주, 사주의 파고, 사주의 이동속도, 수제

## 1. 서 론

하천의 흐름과 유사의 상호작용으로 인하여 발생하는 사주는 선택적으로 하안침식을 일으키고 저수로의 변화를 일으키며, 치수적으로 문제를 일으키고 있다. 그러나 사주는 동식물이 서식할 수 있는 다양한 공간을 제공하며, 하천환경 측면에서 중요한 역할을 한다 (Jang and Jung 2006). 사주의 형상과 거동은 하폭 대 수심의 비에 의하여 결정된다. 하폭 대 수심의 비가 작은 경우에 사주의 모드가 하나인 교호

사주 (alternate bars)가 발생하며, 하폭 대 수심의 비가 클 때는 사주의 모드가 여러 개 존재하는 복렬사주가 발생한다. 또한 사주는 흐름의 방향으로 이동하거나 고정된다. 사행의 만곡부 혹은 하폭의 불규칙적 변화, 그리고 수제와 같은 수리구조물에 의하여 사주의 이동이 억제될 때, 사주는 흐름의 방향으로 이동하지 못하고 고정된 상태로 존재하게 된다.

Kinoshita and Miwa (1974)는 이에 대한 선구적인 연구를 수행하였으며, 교호사주를 대상으로 zigzag 수로에서 사행각에 대한 사주의 이동과 정지 기준을

\*Corresponding author: cljang@ut.ac.kr, ORCID 0000-0001-8041-6230

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

제시하였다. Ikeda (1984)는 실내실험 자료를 분석하여 교호사주의 파장과 파고를 추정할 수 있는 경험공식을 제안하였다. Blondeaux and Seminara (1985)은 이론적인 연구를 통하여 수로의 사행의 주파수에 대하여 자유사주와 고정사주에서 공진현상을 처음으로 제시하였으며, Parker and Johannesson (1989)은 보다 더 정교한 이론적인 개념을 정립하였다. Seminara and Tubino (1989)는 교호사주의 이동과 파장의 변화를 이론적으로 분석하였다. Bertoldi et al. (2002)는 하폭 대 수심의 비가 클수록 사주에 작용하는 강제효과가 작으며, 하폭 대 수심의 비가 작을수록 강제효과가 큰 것을 실험을 통하여 제시하였다. Jang and Shimizu (2005)는 수치실험을 통하여 하안의 안정성이 사주의 이동속도, 사주의 파장, 사주의 파고에 미치는 영향을 파악하였다. Crosato et al. (2011)는 충격하천에서 하폭의 변화나 수제 등에 의해 발생한 국부적인 교란에 의하여 사주의 강제효과가 발생하며, 이로 인하여 교호사주의 이동이 정지된 고정사주가 발생할 수 있음을 실내실험과 수치실험 결과를 분석하여 제시하였다. 또한 하폭 대 수심의 비에 의한 공진효과가 없는 상태나 수제 등에 의한 국부적인 교란이 있는 상태에서 사주가 정지될 수 있다는 것을 제시하였다. 그러나 이들은 하폭에서 돌출된 정도나 수제의 길이 변화 등에 의해 국부적으로 교란의 강도가 다르게 되며, 교란의 강도가 사주의 거동에 미치는 영향을 파악하지 못하였다. 수제의 길이 변화에 의하여 사주에 작용하는 강제효과는 다르게 된다. 이로 인하여 사주의 형상, 이동과 정지, 사주의 분열 등에 많은 영향을 준다. 이것은 하천환경을 고려한 하천복원 및 관리에 중요하다. 따라서 본 연구에서는 수제의 길이 변화와 같은 국부적인 교란 강도의 변화가 하도의 지형변화, 사주의 이동과 정지, 그리고 사주의 파장에 미치는 영향을 실내실험을 통하여 분석하였다.

## 2. 연구 방법

수제 길이 변화에 따른 교호사주의 변화를 알아보기 위하여, 길이는 10 m이고, 폭이 0.6 m인 가변형 경사수로를 이용하여 실내실험을 하였다 (Figs. 1 and 2). 유량 ( $Q$ )은  $0.0025 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 수심 ( $h$ )는 0.0135 m이었다. 수로경사 ( $i$ )는 1/150으로 설정하였다. 이동상 실험을 수행하기 위하여 모래의 중앙입경이 0.8 mm인 균일사를 사용하였으며, 수로에서 세굴이 발생하여도 실험의 영향을 받지 않도록 0.11 m 두께로 포설하였다. 조도계수 ( $n$ )는 Manning이 정의한 조도계수를 유사 입경 함수로 정의하여 물리적 의미를 갖는 Strickler (1923) 공식을 적용하여 0.014로 결정하였다. 자세한 조건은 Table 1과 같다.

실험을 위한 유량은 Kuroki and Kishi (1984)가 제안한 영역구분의 기준에 따라 하폭 대 수심의 비에 의하여 교호사주가 발생할 수 있는 조건으로 설정하였다. 또한 충분한 소류력이 발생하여 소류사 형태로 유사 이동할 수 있으나, 부유사는 발생하지 않은 조건으로 설정하였다. 실험이 진행되는 동안 수로 하단에서 유출되는 유사를 15 min 간격으로 채집하여 유사량을 분석하였다. 실험은 동적 평형상태가 될 때까지, 180 min 동안 수행하였다. 하도의 변화를 파악하기 위하여 30 min 간격으로 상류에서 유입되는 흐름을 중단시키고 흐름이 없는 상태에서 포인트 게이지를 사용하여 측정하였다. 측정간격은 실험수로 종방향으로 0.1 m이며, 횡방향으로 0.02 m였다. 수제

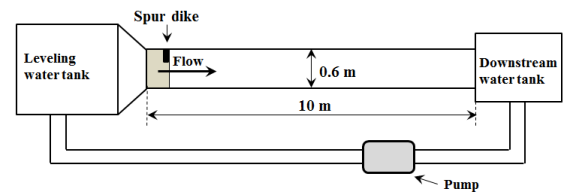


Fig. 1. Plane view of experimental setup.

Table 1. Hydraulic conditions for laboratory experiments.

Case	Discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Channel width (m)	Channel length (m)	Slope	Mean diameter of sand (mm)	Ratio of width to dike length ( $L/B$ ) <sup>1</sup>
Run-1	0.0025	0.6	10	1/150	0.8	0.2
Run-2	0.0025	0.6	10	1/150	0.8	0.4
Run-3	0.0025	0.6	10	1/150	0.8	0.6

<sup>1</sup>L represents the length of the spur dikes and B represents the width of the experimental flume.

가 설치된 지점을 기준으로 하류로 8.6 m 구간을 계측하였다 (Fig. 1). 본 실험에서 사용한 무차원 수제 길이 비 ( $L/B$ )는 각각 0.2, 0.4, 0.6이며, 세 가지 조건으로 수행하였다.



Fig. 2. Photograph showing a flume for laboratory experiments in this study.

### 3. 결과 및 논의

사주는 하상의 불안정에 의하여 자발적으로 발달한다. 직선하천이나 사행도가 작은 하천에서 흐름과 함께 하류로 이동하는 사주를 자유사주 (free bar)라고 한다. 그러나 사주는 공진효과에 의하여 흐름의 방향으로 이동하지 못하거나 측면의 돌출부, 수제, 하폭의 불규칙한 변화, 사행도가 큰 하천에서 사주에 작용하는 강제효과에 의하여 정지되는데 이를 고정사주 (forced bar)라고 한다. 본 실험은 수제와 같은 수리 구조물에 의하여 사주에 강제효과가 작용할 때, 사주의 발달, 사주의 형상변화, 이동 특성을 분석하기 위하여 수행하였다. 수제는 물이 유입되는 수로의 유입부 좌안에 설치되었으며 (Fig. 1), 실험을 위한 수로의 전경은 Fig. 2와 같다.

Fig. 3은 실험에 의한 사주의 발달과정을 보여주고 있다. 실험을 시작한 30 min 후에 유입부 지점에 설치된 수제에 의하여 흐름의 교란이 발생하였다. 흐름

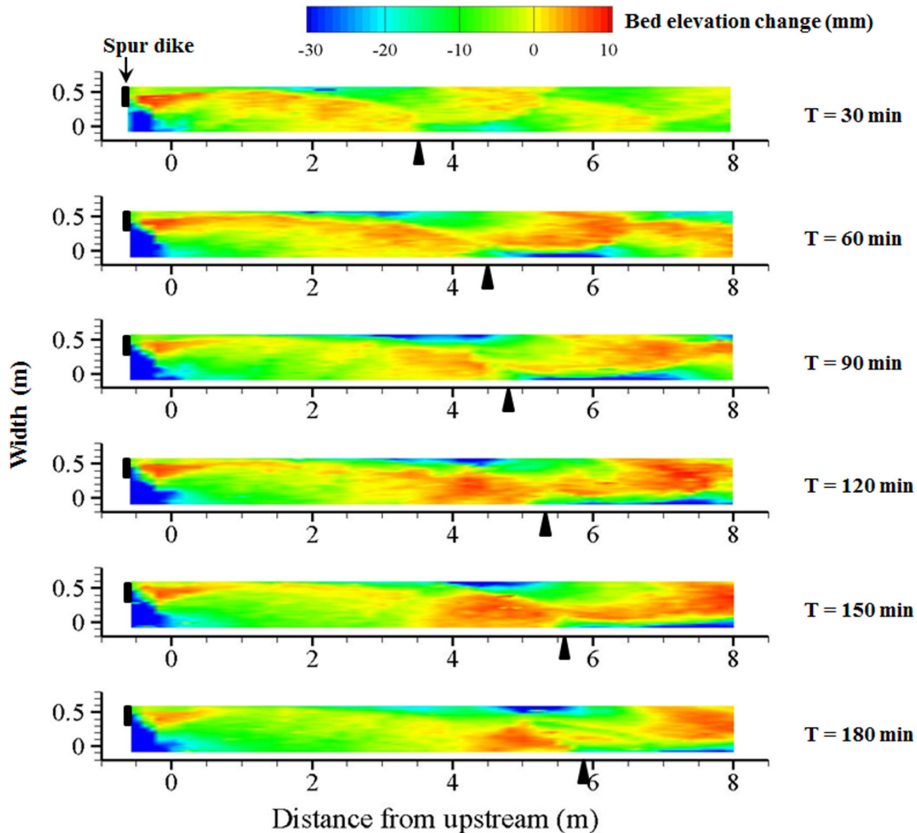


Fig. 3. Morphological changes with time for Run-2. The legend indicates the bed elevation changes from the initial bed elevation. The ▲ symbol indicates the bar front in the right bank with time. Flow is from left to right.

은 수로의 우안에 집중되며 하상에서 세굴이 발생하였다. 수제에 의하여 유속이 감소되면서 수제 하류 후면에서 유사가 퇴적되고 교호사주가 형성되었다 (Fig. 3). 시간이 증가하면서 교호사주는 하류로 발달하며, 120 min 이후에는 사주의 길이가 감소하였다. 수제에 의하여 수로 좌안으로 발달한 사주는 하류로 이동하며, 교호사주의 형상은 뚜렷하게 나타났다. 통수 후 30 min에 상류 2 m 지점의 좌안에서 세굴이 발달하였다. 시간이 증가하면서 흐름이 사주에 의하여 좌안으로 편향되면서 수층부가 형성되었다. 이로 인하여 세굴심이 증가하고, 하류로 이동하였다. 좌안에서 발달한 세굴심은 하류로 이동하지만, 시간이 증가하면서 사주의 이동이 정지되면서 세굴심은 감소되었다.

Fig. 4는 각각의 실험 결과에 대하여 하도 중앙에서 종방향 하상고 변화를 보여주고 있다. 수제가 설치되는 지점에서부터 하류로 갈수록 하상고가 상승하고 있다. Run-1에서 하상고가 가장 높은 곳은 상류로부터 5.6 m 지점이고, Run-2에서는 4.8 m 지점이며, Run-3에서는 3.8 m 지점이다. 즉, 수제의 길이가 길수록 수제로부터 가까운 곳에 하상고가 상승하는 것을 알 수 있다. 또한 6 m 하류부터는 하상고 변화의 차이가 거의 없이 일정하게 상승하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 5는 시간의 변화에 대한 사주의 선단부 위치를 보여주고 있다. 수제의 길이가 가장 긴 Run-3에서 사주의 선단부가 가장 상류에 있으며, 수제의 길이가 가장 짧은 Run-1이 가장 하류에 위치하고 있다. 수제의 길이가 길수록 물이 통과하여 흐를 수 있는 단면적이 좁아지면서 흐름이 하안에 집중되었다. 이로 인

하여 수층부가 형성되면서 강한 2차류 발생하여 사주는 횡방향으로 발달할 수 있는 조건이 강화되기 때문으로 판단된다. 즉, 수제의 길이가 길수록 사주에 작용하는 강제효과가 큰 것을 의미한다.

자유사주는 흐름방향으로 이동하면서 사주의 파장은 일정하게 유지된다. 그러나, 수제에 의하여 형성된 강제사주는 흐름방향으로 사주의 길이가 증가한다. 즉, 시간이 증가하면서 수제 하류에서 발달한 사주의 파장은 증가한다. 수제의 길이가 짧은 Run-1에서 사주의 길이는 길지만, 수제의 길이가 긴 Run-3이 사주의 길이가 짧은 특성을 보여주고 있다. 이것은 수제의 길이가 길수록 흐름이 집중된다는 것을 보여준다. 수로 측벽에서는 수층부가 형성되고 강한 2차류가 발달하며 사주에 작용하는 강제효과가 크기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 수제에 의하여 강제사주가 형성되면서 사

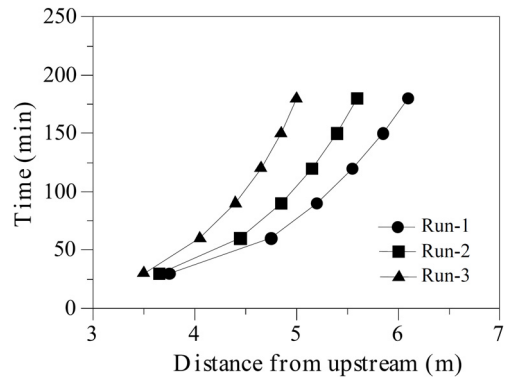


Fig. 5. Location of the bar front in the right side of channel with time for each run.

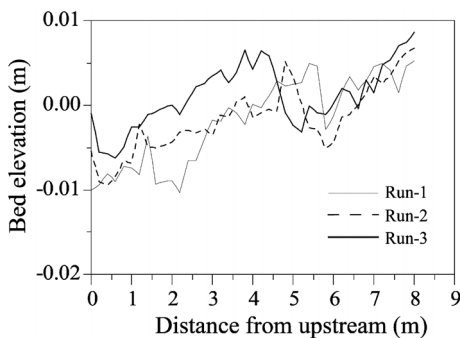


Fig. 4. Longitudinal bed elevations at the center of the channel for each run from the spur dike at 180 minutes.

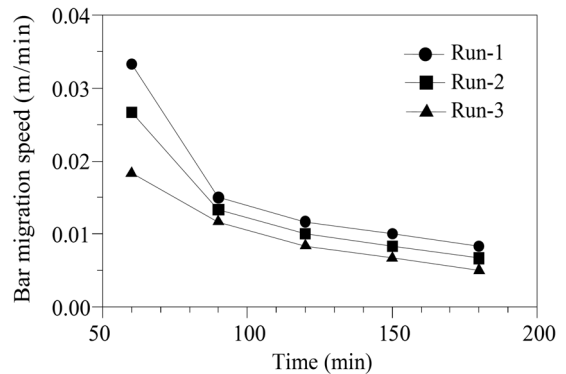


Fig. 6. Relationship between bar migration and time for each run.

주가 하류로 이동해 가는 속도를 보여주고 있다. 사주의 이동속도는 90 min까지 급격하게 감소하고 있으며, 시간이 증가하면서 사주의 이동 속도는 거의 일정하게 유지되고 있다. 이것은 초기에 발달한 사주가 안정화 되고, 평형상태에 이르게 되는 것을 의미한다. 사주의 이동속도는 수제의 길이가 짧은 Run-1에서 가장 빠르며, 수제의 길이가 긴 Run-3에서 느렸다. 즉, 수제의 길이가 길수록 사주의 이동속도가 느린 특성을 보여주고 있다.

Fig. 7은 사주의 파고를 보여주고 있다. 수제의 파고는 사주의 한 파장 안에서 가장 높은 하상고와 가장 낮은 하상고의 차이이다. 시간이 증가할수록 수제의 길이가 짧은 Run-1에서 사주의 파고는 증가하고 있다. Run-2에서 60 min까지 사주의 파고는 감소하다가 시간이 증가할수록 파고는 상승하였다. 그러나 전체적으로 큰 변화가 없는 경향을 보여주고 있다. Run-3에서 사주의 파고는 증가하다가 감소하는 경향을 보이지만, 전반적으로 파고의 변화는 없다.

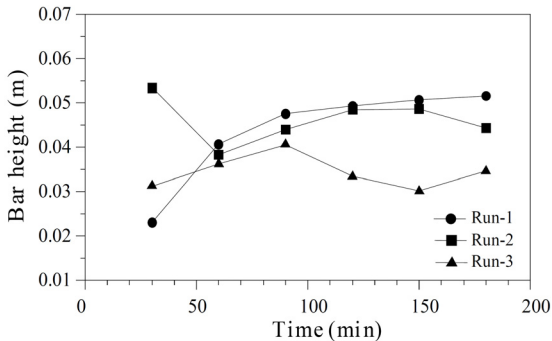


Fig. 7. Relationship between bar height and time for each run.

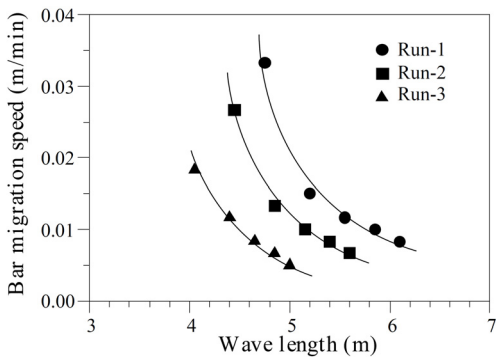


Fig. 8. Relationship between bar wave length and bar migration speed for each run.

Fig. 8은 사주의 이동속도와 파장의 관계를 보여주고 있다. 사주의 파장이 짧으면 사주의 이동속도는 증가하며, 사주의 파장과 사주의 이동속도는 반비례 관계를 형성하고 있다. 이러한 특성은 흐름의 방향으로 사주가 이동하는 자유사주의 특성과 일치한다. Jang and Shimizu (2005)는 수치실험을 통하여 하안의 안정성을 고려하여 교호사주의 거동 특성을 검토하였다. 또한 Seminara and Tubino (1989)는 실험과 이론적인 해석에 의하여 자유사주의 파장과 이동속도의 관계를 입증하였다. 수제의 길이가 짧은 Run-1은 수제의 길이가 긴 Run-3보다 사주의 파장이 동일한 조건에서 사주의 이동속도가 빠른 특성을 보여주고 있다. 이러한 원인은 수제의 길이가 길수록 사주의 이동에 영향을 주는 강제효과가 큰 것을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수제와 같은 국부적인 교란에 의하여 하도의 지형변화, 사주의 이동과 정지, 그리고 사주의 파장에 미치는 영향을 실내실험을 통하여 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 상류단에 위치한 수제에 의하여 사주가 발달하고 하류로 이동하며, 시간이 증가하면서 사주의 이동이 정지되면서 감소되었다.
- 2) 수제의 길이가 증가하면, 사주의 파장은 감소한다. 수제의 길이가 길수록 흐름은 실험수로 측벽에 집중되고, 수층부가 형성되면서 강한 2차류가 발달하여 사주에 작용하는 강제효과가 크기 때문이다.
- 3) 사주의 이동속도는 수제의 길이 변화에 영향을 받는다. 수제의 길이가 증가하면 사주에 작용하는 강제효과가 작으므로 사주의 이동속도는 빠르다. 그러나 수제의 길이가 증가하면 사주에 작용하는 강제효과가 증가하여 사주의 이동속도는 감소한다.
- 4) 사주의 파고는 수제의 길이 변화에 크게 영향을 받지 않으며, 거의 일정하게 유지되었다. 그러나 사주의 파장이 감소하면 사주의 이동속도는 증가하며, 사주의 파장과 사주의 이동속도는 반비례 관계를 형성하였다.



본 연구는 유량이 일정한 상태에서 수제의 길이변화에 의한 사주의 거동을 파악하였으며, 향후에 다양한 수리학적 조건에서 도출된 실험결과를 토대로 이론적 해석이 수행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원 (11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Bertoldi, W., Tubino, M. and Zolezzi, G. 2002. Experimental observations of river bifurcations with uniform and graded sediments. In, River flow 2002, International Conference on Fluvial Hydraulics, Louvain-la-Neuve, Belgium. pp. 751-759.
- Blondeaux, P. and Seminara, G. 1985. A unified bar-bend theory of river meanders. *Journal of Fluid Mechanics* 157: 449-470.
- Crosato, A., Mosselman, E., Desta, F.B. and Uijttewaal, W.S.J. 2011. Experimental and numerical evidence for intrinsic nonmigrating bars in alluvial channels. *Water Resources Research* 47: W03511, doi:10.1029/2010WR009714.
- Ikeda, S. 1984. Prediction of alternate bar wavelength and height. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 110(4): 371-386.
- Jang, C.-L. and Jung, K.S. 2006. Numerical experiments of bar migration in meandering channels. *Journal of the Korea Society of Civil Engineers* 26(2B): 209-216. (in Korean)
- Jang, C.-L. and Shimizu, Y. 2005. Numerical simulations of the behavior of alternate bars with different bank strength. *Journal of Hydraulic Research* 43: 595-611.
- Kinoshita, R. and Miwa, H. 1974. River channel formation which prevents downstream translation of transverse bars. *Shinsabo* 94: 12-17. (in Japanese)
- Kuroki, M. and Kishi, T. 1984. Regime criteria on bars and braids in alluvial straight channels. *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers* 342: 87-96. (in Japanese)
- Parker, G. and Johannesson, H. 1989. Observations on several recent theories of resonance and over-deepening in meandering channels. In, Ikeda, S. and Parker, G. (eds.), *River Meandering*, American Geophysical Union, Washington, USA. pp. 379-416.
- Seminara, G. and Tubino, M. 1989. Alternate bars and meandering: free, forced, and mixed interactions. In, Ikeda, S. and Parker, G. (eds.), *River Meandering*, American Geophysical Union, Washington, USA. pp. 267-320.
- Strickler, A. 1923. Beitrage zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen fuer Stroeme, Kanale und geschlossene Leitungen. *Mitteilungen des Amtes fuer Wasserwirtschaft*. 16: 265-268. (in German)