

河川 水系의 水理幾何學的 特性에 關한 研究

— 河川 蛇行을 中心으로 —

The Hydraulic Geometrical Characteristics in Rivers
—About river meandering—

宋 在 偶*

Song, Jai Woo

ABSTRACT

Meandering has been attributed to the earth's rotation, to the excessive slope and energy of a river, to changes in stage, etc.

The purpose of this study is a geometrical approach of meander shape and to derive the relationship among meander characteristics.

In the analysis of some field examples, in spite of variety of meander shapes, the sine-generated curve was fit actual quite well and better than alternatives against the channel distance.

An attempt is made to find considerable relation among meander characteristics.

But width and meanderbelt did not show any defined trend considerable scatter of points was observed.

1. 序 論

河川에서의 曲線 部分은 넓게 散在되어 있고 규칙적 이고 유연한 蛇行 形狀이 아주 많이 관찰되어 많은 사 람들의 관심을 집중시켜 왔다. 이러한 現象은 빙하에 의하여 生成된 Melt water 水路에서도 發生하고 G - ulf Stream에서도 일어나며, 모래 海岸의 Cusp 에서도 규칙적인 曲線을 볼 수 있음은 그 發生原因은 相異 할지라도 自然現象의 物理學的 形態가 유사함을 알 수 있고, 모든 경우에 공통인 기하학적 비율 때문인 것으 로 생각 된다.

이러한 河川의 蛇行 現象은 流心의 變遷을 同伴하여 航路水深의 維持 困難 取水口의 機能 低下, 堤防의 파 괴와 局所洗掘에 따른 河川 災害 等 河川工學上의 諸 問題와 密接한 關係가 있다.

上記한 工學的인 觀點外에 自然地理學的 關心도 커 서 河川의 蛇行 現象에 關해서는 옛부터 많은 觀察 및 研究가 行하여 왔다.

우리 나라에서도 最近, 改修河川의 堤防流失이 여러

가지 原因이 있겠으나, 河道設計時 蛇行法則을 과 소 평가하지 않았나 하는 觀點에서, 우리나라 河川의 蛇 行 特性을 究明하여 河川 改修計劃時 技術의 檢討에 도 움을 주고져 本研究을 착수하게 되었다.

河川 蛇行에 關한 研究는 今世紀初에 Jefferson¹⁰⁾이 美國과 유럽의 河川을 研究하여 流量과 河幅 및 Mea- nderbelt 의 關係를 發表하였으며 後 Inglis⁹⁾가 蛇 行長을 포함한 關係式을 印度 河川에서 求하여 發表하 였다.

1945年 美國의 陸軍 工兵團⁸⁾에서 大대적인 蛇行 実 驗을 行한 뒤, Leopold²⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ Bagnold²⁾, Wolman,²¹⁾⁽¹⁵⁾ Engelund⁷⁾, Langbein,¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ Ackers,¹⁾ Yang,²⁶⁾ P- arker,¹⁸⁾ Chang³⁾ 等이 理論 및 實驗을 通하여 研究를 거듭해 왔다.

우리 나라에서는 1973年 尹龍男³¹⁾氏가 “位置에너지 개념에 의한 水系의 河川 形態學的 特性 分析”에서 Y- ang²⁶⁾의 第2法則을 適用하여 彎曲現象의 必然성을 증 명했고, 1975年 高在雄氏가 “彎曲水路에서의 河床變 動에 關한 研究”를 發表한 바 있으나 河川 蛇行에 關 한 研究는 그리 活潑하지 못한 實情이다.

* 本學會 正會員 京畿大學 助教授

自然河川이 지니고 있는 한 特性인 蛇行現象은 定說은 아직 確立지 않고 있으나 여러가지 理論과 實驗結果로 많은 研究가 거듭되고 있다.

本 論文에서는 蛇行形狀의 幾何學的 接近을 시도했으며 Regime Theory 에 입각하여 對象 河川의 蛇行特性 因子間의 關係를 究明하고자 하였으나 流量 資料를 알지 못하여 地形圖上의 蛇行長, 平均幅 및 蛇行帶等의 關係究明에 그쳤다.

2. 河川蛇行分析

2-1. 河川蛇行發生要因

河川 蛇行의 成因에 關하여 옛부터 여러가지 學說이 發表되고 있으며, Lacey,¹²⁾ Chately & Herbert,⁴⁾ Eakin,⁵⁾ Quraisy¹⁹⁾ 등은 地球의 自轉에 따르는 偏向力을 그 要因으로 들고 있으며, Schoklitsch,²²⁾ Von-Engeln²³⁾ 등은 水流의 科因傾斜와 科因에너지를, Russell²⁴⁾ 은 河床 變動을, 그리고 「鮮川登」²⁸⁾ 은 上記한 要因外에 水面의 橫振動을 포함시키고 있다.

또한 1940年代까지는 河川蛇行은 河岸의 侵蝕을 意味하는 것으로 생각되었지만 2次大戰後 日本의 「木下」²⁷⁾ 는 兩岸이 侵蝕되지 않는 直立壁의 矩形断面 水路에서도 水路床에 形成된 砂礫堆에 따라 水流의 蛇行의 發生될 수 있음을 實驗을 通하여 밝히고 있으며 「林泰造」²⁹⁾ 는 그 成因을 局所 流砂量의 非對稱性으로 지적하고 있다. 水流 및 河道蛇行과 河床形態의 關係는 Engels⁶⁾, Jasmund¹¹⁾ 등 獨逸의 河川 技術者로부터 最近의 Rossinsky 와 Kuzmin²⁰⁾ 에 이르기 까지 檢討되어 왔다.

2-2. 蛇行 形狀의 幾何學的 接近

2-2-1 最小 分散 理論

Langbein 과 Leopold¹³⁾ 의 河川蛇行과 最小分散 理論에 依하면 二點사이의 가장 確率인 큰 水軌로서 水路의 길이 ds 에 對하여 원래의 方向과 角 dφ의 편차를 表示 確率 P 를 편차각의 함수로 確率分布를 正規로 假定하여 다음식을 提案했다.

$$dp = C \exp \frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi/ds}{\sigma} \right)^2 \quad (2-1)$$

여기서, σ : 표준편차

C : 계수 (∫ dp = 1.0 때)

또한 Von Schelling²⁴⁾²⁵⁾ 은 호의 길이 S 를 다음과 같이 積分으로 定議했다.

$$S = \frac{1}{\sigma} \int \frac{d\varphi}{\sqrt{2(a - \cos \varphi)}} \dots\dots\dots (2-2)$$

여기서, φ : 平均方向과 水路方向의 角

a : 積分常數 (cos w)

w : 平均方向과 科因方向의 最大角

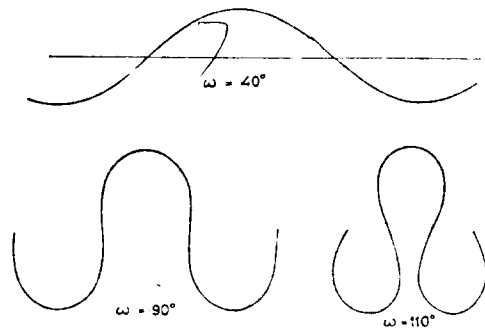


Fig. 2-1 Examples of most frequent random-walk paths of given length between two specified points on a plane (adapted from von Schelling)

그림 2-1 은 蛇行河川에서 볼 수 있는 代表的인 蛇行 形狀의 例로써 ω = 40°, 90°, 110°, 의 曲線이다.

Von Schelling 은 두 지점 사이의 주어진 길이에 對하여 가장 빈도가 높은 水路의 一般의 條件은

$$\sum \frac{\Delta S}{\rho^2} = A \text{ minimum} \dots\dots\dots (2-3)$$

임을 보였다.

여기서, ΔS : 水路의 單位길이

ρ : 單位길이의 水路에 對한 曲率半徑

$$\rho = \left(\frac{\Delta S}{\Delta \varphi} \right) \text{ 이므로}$$

$$\sum \frac{(\Delta \varphi)^2}{\Delta S} = A \text{ minimum} \dots\dots\dots (2-4)$$

모든 方向 變化의 합은 " 0 " 이므로

$$\sum \Delta \varphi = 0 \dots\dots\dots (2-5)$$

式(2-4)는 分散이 最小인 가장 確率인 큰 것이다.

2-2-2 Sine-generated Curve

圖式的인 蛇行은 다음과 같이 表現된다.

$$\frac{d\varphi}{ds} = \sigma \sqrt{2(1 - \cos w [1 - (\frac{\varphi}{w})^2])} \dots\dots\dots (2-6A)$$

近似的으로

$$\frac{d\varphi}{ds} = \sigma \sqrt{2(\cos \varphi - \cos w)} \dots \dots (2-6 B)$$

w, φ 는 下流方向으로 中心軸으로 부터의 편차이다.
이것을 간단히 하면

$$\varphi = w \sin \frac{\sigma \sqrt{2(1 - \cos w)}}{w} S \dots \dots (2-7)$$

또는

$$\varphi = w \sin \frac{S}{M} - 2\pi \dots \dots (2-8)$$

여기서, M : 總蛇行長

式(2-7)과 (2-8)에서

$$M = \frac{2\pi}{\sigma} \frac{w}{\sqrt{2(1 - \cos w)}} \dots \dots (2-9)$$

式(2-8)은 方向角 φ 는 蛇行長 S의 Sine 함수임을 보여준다.

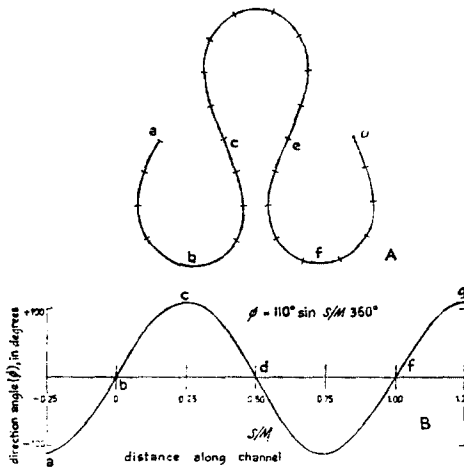


Fig. 2-2 A Theoretical meander in plan. B, Plot of direction angle ϕ against distance along channel path.

그림(2-2)는 Sine 함수로 이루어진 理論的 蛇行을 보여주고 있다. 蛇行은 完全한 Sine curve는 아니나 Sine generated curve로 看做할 수 있을 것이다.

Friedkin⁸⁾의 實驗에서 거의 理想的인 蛇行을 볼 수 있다. 그림 2-3에서 보여 주는 蛇行은 Sine -curve에 잘 일치 함을 알 수 있다.

그림 2-3-A의 水路는 경사 0.006, 미시시피江의 모래를 使用하여 미시시피江의 流量變化에 유사하게 17時間 간격으로 0.05 ft^3/sec 로 부터 0.24 ft^3/sec 를 變化

시키면서 實驗된 것이다. 蛇行形狀은 自然河川에서 보통 兪見되는 것보다 아주 규칙적이다.

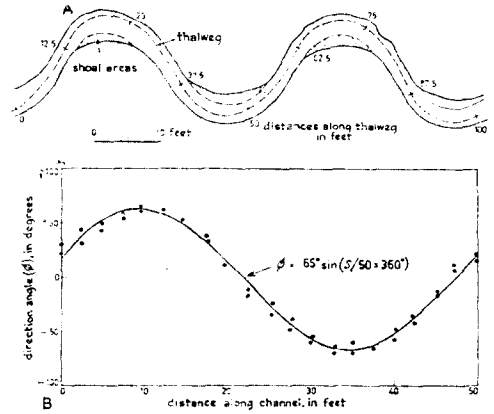


Fig. 2-3 Laboratory meander, A, Plan. B, Comparison of direction angle with sine curve.

2-2-3 自然河川 蛇行形狀의 方向角 變化

北漢江 支流로서 春城郡 南面과 洪川郡 西面의 境界를 이루고 있는 洪川江의 蛇行이 그림 2-4에 볼 수 있듯이 流心의 水路길이에 따른 方向變化가 Sine-generated curve에 잘 일치 됨을 알 수 있다.

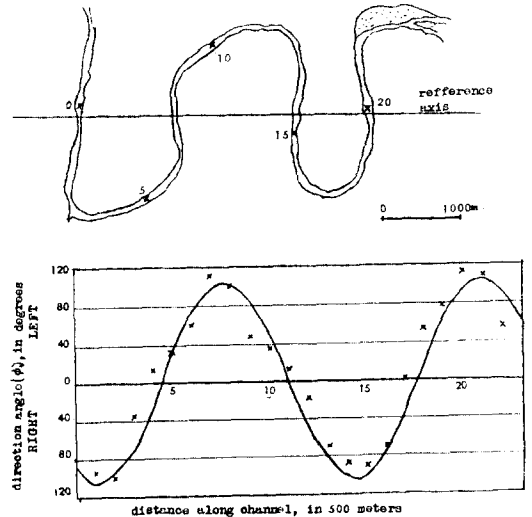


Fig. 2-4 Sine-generated curve and plots of channel direction against distance, Hong cheon river at Handuk-Bangoglee.

그림 2-5와 그림 2-6은 錦江 本流部의 報恩과 伊院地域에서 兪見된 蛇行의 實例로 水路길이에 따른 方向角變化를 Plotting 해본 결과 Sine-generated curve에 fitting 됨을 보여준다.

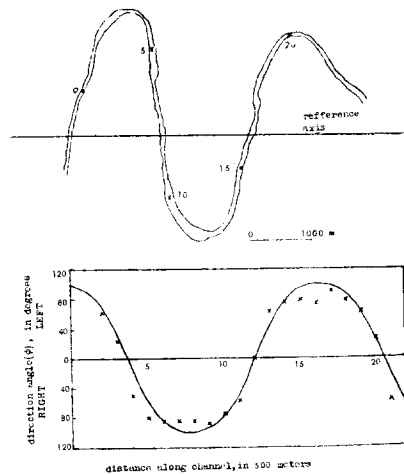
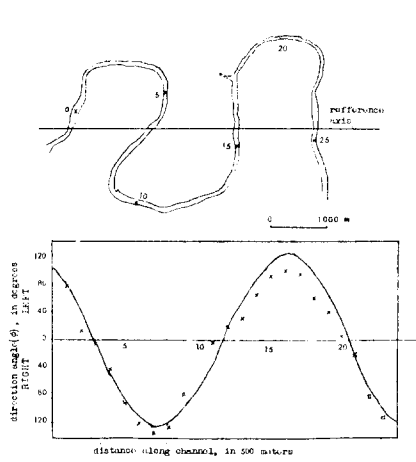


Fig. 2-5 Sine-generated curve and plots of channel direction against distance, Geum river at Boeun

Fig. 2-6 Sine-generated curve and plots of channel direction against distance, Geum river at Eawon

2-3. 蛇行 形状 因子間の 相關分析

對象河川の 蛇行波長(Mℓ)과 蛇行帶(Mb) 및 水路의 有効幅(W)間的 關係를 究明하기 爲하여 調査된 資料를 分析한 結果 表 2-1 과 같은 關係를 알 수 있었다.

蛇行帶(Mb)와 有効幅(W)과의 關係를 究明하기 爲하여 資料를 Plotting 해 보았으나, 特定한 傾向을 갖지 않음이 判明되었다.

Table 2.1 Relations of Meandering Characteristics

Riv. Name	MD.length and MD.belt	MD.belt and width	MD.length and with
Hongcheon	$M\ell = 1.74 Mb$	$M\ell = 18.79 W$	$M\ell = 31.08 W$
Okdong	$M\ell = 2.50 Mb$	$M\ell = 13.75 W$	$M\ell = 30 W$
Gonjiam	$M\ell = 3.72 Mb$	$M\ell = 15.47 W$	$M\ell = 39.56 W$
Jecheon	$M\ell = 2.087 Mb$	$M\ell = 19.74 W$	$M\ell = 32.23 W$
Jojong	$M\ell = 2.06 Mb$	$M\ell = 24.26 W$	$M\ell = 45.11 W$

Table 2.2 Relationships of Mℓ and Mℓ/Mb

Riv. Name	Eq. of correlation	Percentage of all data	Coefficient of Correlation
Hongcheon	$Y = 2564.82 X - 921.28$	50	$r = 0.87$
Okdong	$Y = 347.31 X - 448.68$	58	$r = 0.64$
Gonjiam	$Y = 578.6 X - 156.6$	56	$r = 0.79$
Jecheon	$Y = 662.46 X - 86.28$	57	$r = 0.87$
Jojong	$Y = 256.65 X - 373.27$	100	$r = 0.60$

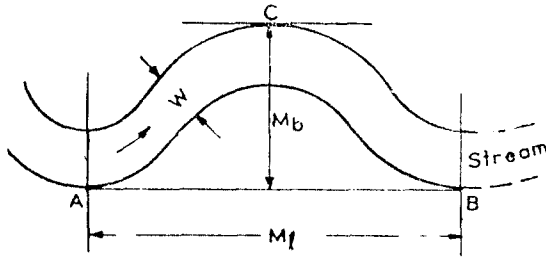


Fig. 2-7 Definition of Mb and Ml

北漢江 水系의 支流인 洪川江의 蛇行長과 蛇行帶의 比 (Ml/Mb)는 0.83에서 2.92 사이의 값을 가지며, $Y = Ml/Mb$ 로 놓았을 때 總蛇行의 50%가 $Y=2564.82X - 921.28$ 의 關係를 가지고, 이 때 相關係數 $r = 0.87$ 이었다.

表 2 - 2는 5個의 對象河川의 Ml 과 Ml/Mb 의 關係를 보여 준다.

3. 結 論

本 論文의 結論을 要約하면 다음과 같다.

- 1) 自然河川의 한 特性인 河道蛇行은 流心의 方向角變化를 利用, 水路길 이에 따라 Plotting 해 본 結果 Sinogenerated curve로 幾何學的 接近이 可能하며 우리나라의 河川蛇行에도 잘 일치됨을 보였다.
- 2) 蛇行特性 因子間의 相關分析을 究明하였으며 相關性이 높은 式은 河導設計時에 檢討資料로 使用될 수 있다.
- 3) 蛇行帶와 水路의 有效幅은 特別한 關係가 成立되지 않는 것으로 思料된다.
- 4) Regime Theory 에 입각한 蛇行特性因子와 流量과의 相關性 究明은 重要한 意味를 지니는 것으로 次期 研究課題로 돌린다.

謝 辭

本 研究는 1979年度 文敎部 學術造成研究費로 이루어 졌으며 本研究수행에 指導를 해주신 李元煥博士께 感謝드린다.

Reference

1. Ackers, P., and Charlton, F.G., "Meandering of Small Streams in Alluvium," Hydraulics Research Station, Report No. INT 77, Wallingford, Berkshire, England, Jan. 1970.
2. BAGNOLD, R.A.. LEOPOLD, L.B.. WOLMAN, M.B., and BRUSH, L. M. "Flow Resistance in

- Sinuuous or Irregular Channels," U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1960. 282-D, 111-34.
3. Chang, H.H., "Geometry of rivers in regimes" J. Hydraul. Dive., A.S.C.E., 105 (HY6), 1979.
4. Chatley, Herbert, "Hydraulics of large rivers:" Civil Eng. Public Works Rev., Feb. 1938.
5. Eakin, H. M., "The Influence of the Earth's Rotation upon the Laterla Erosion of Streams," J. Geology, Vol. 18, No. 5, 1910, pp. 435-447.
6. Engels. H., and Kramer. Hans, "Large scale experiments in river hydraulics:" Civil Eng., V2, Nov. 1932.
7. Engelund, F. and Skovgaard, O., "On the origin of meandering and braiding in alluvial streams." J. Fluid Mech., Part 2, 52: 289-302. 1973.
8. Friedkin, J. R., "A Laboratory Study of the Meandering of Alluvial Rivers," U.S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1945.
9. Inglis, C.C., "Meanders and Their Bearing on River Training," The Institution of Civil Engineers, 1947, pp. 1-23.
10. Jefferson, M.S.W., "Limiting Width of Meander Belts," National Geographic Magazine, Washington, C.C., 1902.
11. Jasmund, R.: Handbuch der Ingenieurwissenschaften, Dritter Teil, Der Wasserbau. Erster Band Die Gewisserkunde, Leipzig, Verlag von Wilhelm Englemann, 1911, pp. 171-204, pp. 348-357.
12. Lacey, J.M., "Some problems connected with rivers and canals in southern India": Inst. Civil Eng. Proc., V. 216. 1923.
13. Langbein, W.B., and L.B. Leopold, "River meanders-Theory of minimum variance," U.S.Geol. Surv. Prof. Paper 422-H, 15 pp., 1966.
14. Langbein, W.B., "Closure on Geometry of River Channels by W.B. Langbein," J. Hydraulics Div., Proceeding, ASCE, May, 1965.
15. Leopold, L.B., and Wolman, M.G., "River Channel Patterns: Braided, Meandering, and Straight," U.S. Geological Survey, Professional Paper 282-B, 1957, pp. 39-84.
16. Leopold, L.B., and Langbein, W.B., "The Concept of Entropy in Landscape Evolution," U.S., Geological Survey, Professional Paper 500-a, 1962.
17. Leopold, L.B., and Langbein, W.B., "River Meanders," Scientific American, Vol. 214, No. 6, 1966, pp. 60-70.
18. Parker, G., "On the cause and characteristic scales of meadering and braiding in rivers". J.

- Fluid Mech., Part 3, 76: 457-480. 1976.
19. Quraishy, M.S., "River meandering and the Earth's rotation." *Current Sci.*, Oct. 1943.
 20. Rossinsky, K.I. and Kuzmin, I.A.: "Regularities of river channels formation composed by astatic ground." *Bulletin de l'Association internationale d'hydrologie scientifique*, VII Anee, No. 4. 1962.
 21. Russell, R.J., "Physiography of lower Mississippi Delta," *Reports Geology of Plaquemines and St. Bernard Parishes: La. Geol. Survey Bull.* 8. 1936.
 22. Schoklitsch, A., *Hydraulic Structures*, translated by Samuel Shulits, translation reviewed by L.G. Straub, *Amer. Soc. Mech. Eng.* 1937.
 23. Von Engeln, O. D., *Geomorphology*. McGraw-Hill, New York, 1942.
 24. Von Schelling, H., "Most frequent, particle paths in a plane," *Trans. Am. Geophys. Union*, 32, 222-226, 1951.
 25. Von Schelling, H., "Most frequent random walks," *General Electric Advanced Tech. Lab. Rept. #64-GL92*, 1964, pp. 60
 26. Yang, C.T., "Potential Energy and Stream Morphology," Presented at the 51st American Geophysical Union Annual Meeting, Sheraton Park Hotel, Washington, D.C.; Apr. 1970. pp. 20~ 24.
 27. 木下良作：河床たわける 砂礫 堆の形成たつじて。日本土木学会論文集，第42号，1959年 pp. 1-21
 28. 川登，"河川蛇行の 発生限界は関する 研究" 日本土木学会 論文報告集 第181号 1970.9 pp. 67~76
 29. 林泰造，"河川蛇行の 成因はつじての研究" 日本土木学会 論文報告集，第180号 1970.8 pp. 61~70
 30. 高在雄，"彎曲水路에서의 河床變動에 관한 研究" 韓国水文学会誌 第8卷2号 1975.12. pp. 75~80
 31. 尹竜男，"位置에너지 概念에 의한 水系의 河川形態学的分析" 大韓土木学会誌 第21卷 1973.6 pp.95~105