

수치지도를 이용한 낙동강 수계의 사행에 관한 연구

○정인주*, 박상주*, 김상용**

1. 서론

자연하천의 전형적인 특성의 하나가 사행성향이며, 이러한 사행현상은 유심의 변천을 동반하여 향로수심의 유지곤란, 취수구의 기능저하, 제방의 파괴, 국소세굴에 따른 하천제해 등, 하천 및 수문학적 또는 지형학상의 여러 가지 문제와 밀접한 관계가 있다. 자연하천은 일반적으로 상류에서 계곡을 따라 흐르다가 중류·하류의 넓은 범람원을 관류할 때 사행유로를 형성하게 된다. 유로변동이 자유롭지 못한 지역에서는 일부 직류하천도 있고, 하류부에서 경사가 완만해지면 분류되어 망상유로를 이루기도 한다. 또한, 경사의 감소와 함께 유속도 감소되어 유송토사가 퇴적함으로 인하여 선상지가 생기고, 하상이 주위의 평지보다 높은 천장천이 발달되기도 한다. 그러나 망재면에서 문제를 일으키는 것은 유로의 변동성향으로 인한 하천의 사행이며, 그 원인이 상이할지라도 자연현상의 물리학적 형태가 유사함을 알 수 있고, 기하학적 비율이 공통점을 가지고 있는 것으로 생각된다. 낙동강은 약 794개의 하천으로 구성되어 있는데, 이들을 대상으로 수치지도를 이용하여 하천형태학적 특성인자들을 상관분석하여 하천개수계획, 그리고 수로의 유지관리면에 있어서 기술적 검토에 도움을 주고자 본 연구를 임하게 되었다.

2 연구동향

2.1 낙동강 유역

낙동강유역은 한반도 동남부의 동경 $127^{\circ} 9'$ ~ $129^{\circ} 8'$, 북경 $35^{\circ} 3'$ ~ $37^{\circ} 3'$ 에 위치하며 북쪽으로 한강유역, 서쪽으로는 금강 및 섬진강유역과 접하고 동쪽으로는 동해안유역과 분수령을 형성하고 있는 우리나라 제2의 유역으로서 유역면적은 $23,817.3\text{km}^2$, 유역연장은 521.5km 로서 전 국토면적의 약24%를 차지하고 있다. 한편 낙동강 본류는 동쪽 태백산맥과 북서쪽의 속리산, 덕유산, 지리산으로 이어지는 소백산맥으로 둘러싸인 낙동강 유역의 거의 중심부를 관류하고 있으며, 유로

* 부경대학교 토목공학과 박사과정

** 부경대학교 토목공학과 교수

는 산악으로 인하여 최단거리로 유하하지 못하고 유향을 4차례나 급변하면서 우회하여 남해안에 유입한다. 수원은 강원도 태백산에서 발원하여 남류하면서 안동댐에 유입한 후 안동댐 지점에서 유로의 주방향을 서쪽으로 1차 바꾼 후 서류하면서 반변천, 미천과 합류한다. 또한 경상북도 예천군 풍양면 지점에서 내성천과 합류한 후 2차유향을 바꾸어 남류를 계속하면서 낙동강 제1지류인 영강, 병성천, 위천, 감천, 백천, 금호강, 회천, 황강과 차례로 합류하고 경상남도 창녕군 지정면 지점에서 남강과 합류한다. 남강 합류후 3번째 유향을 바꾸어 동류하다가 경상남도 밀양군 삼랑진읍에서 밀양강과 합류한 후 4번째 유향이 남류로 바뀌면서 양산천과 합류하여 부산시 사하구 하단동 지점에서 남해안에 유입한다. 낙동강 유역의 행정구역은 부산광역시 일부와 대구광역시 및 경상북도의 8시22군, 경상남도의 3시16군, 강원도의 1시와 전라북도 1군, 전라남도 1군으로 총 2광역시 5도12시40군으로 형성되어 있다.

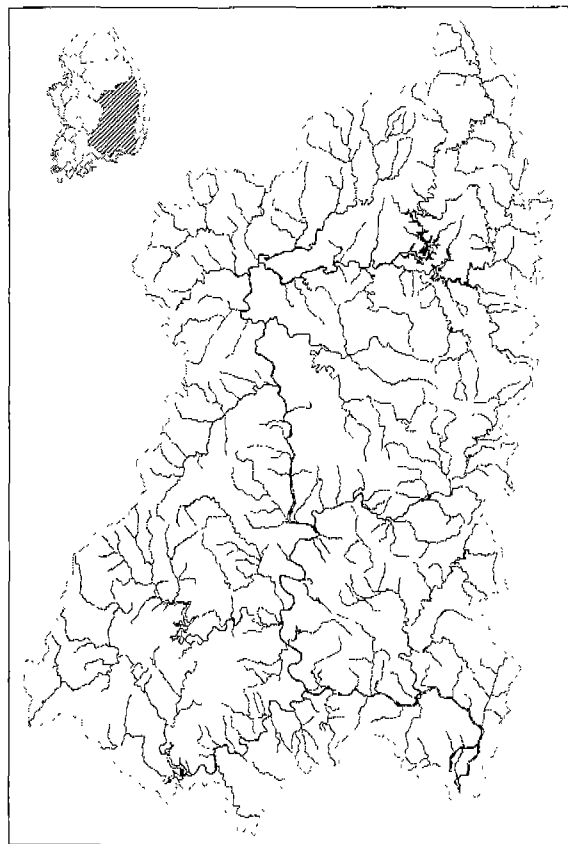


그림 2.1 낙동강 수계도

2.2 연구연혁

사행하천의 연구는 100여년 이전인 19세기 중반부터 시작되었다. James Thomson(1876년)은 나선류가 존재함을 최초로 발견하였고, Inglis(1947년)가 처음으로 사행과장의 개념을 도입하여, 인도하천에서 사행과장, 유량, 하폭, 사행대간의 상관관계를 발표하였다. Leopold and Wolman(1957년)은 하천의 분류, 사행, 직류부의 한계를 구명했고, 실제로 Dury(1969년)는 규칙적인 사행과 불규칙적인 만곡의 연속인 비사행을 구별하기도 했으나, 호주 하천에서 방향의 변동이 대부분 단일 특성을 지니고 있지 않음을 보여준 Speight(1967년)는 사행의 계량형태학적 연구에서 사행과장이 가장 강렬하고 필수적인 인자로서 포함됨을 주장했고, Ferguson(1975년)은 직류부가 아닌 모든 구간을 사행으로 간주하여 사행과장은 방향변화 Spectra로부터 추정될 수 있고 하폭과 유량의 평방근에 선형관계가 성립함을 밝혔다.

2.3 연구방법

본 연구는 낙동강 수계의 전 구간에서 대상하천의 사행특성인자간의 상관관계를 수치지도를 이용하여 구명함으로써 사행 특성을 분석하였다. 사행과장의 개념을 사용하여 낙동강 수계의 사행 특성인자간의 상관관계를 GIS와 연계를 시켜 분석하여 비교검토하고, 이들 자료를 데이터베이스

화 시켜서 사용자가 쉽게 사행특성인자들의 상관관계들을 확인할 수 있도록 하였다. 연구결과 산출된 관계식들은 낙동강유역의 개발계획 수립에 기초자료를 제공할 수 있으리라 판단되고, 사행경사가 0.5~1인 하천에 적용하면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 연구 대상 하천은 낙동강의 하천차수가 1차인 본류로부터 시작하여 6차까지 총 794개의 하천 중 사행이 판단될 수 있는 하천을 택하여 수치지도를 이용하여 분석을 행하였으며, 1차, 2차, 3차, 4차 하천의 자료수는 각각 71개, 484개, 297개, 118개를 얻었고, 하천차수는 실제 사용할 수 있도록 Europe에서 적용하는 본류를 1차하천으로 하는 Gravelius의 차수개념을 도입하였다.

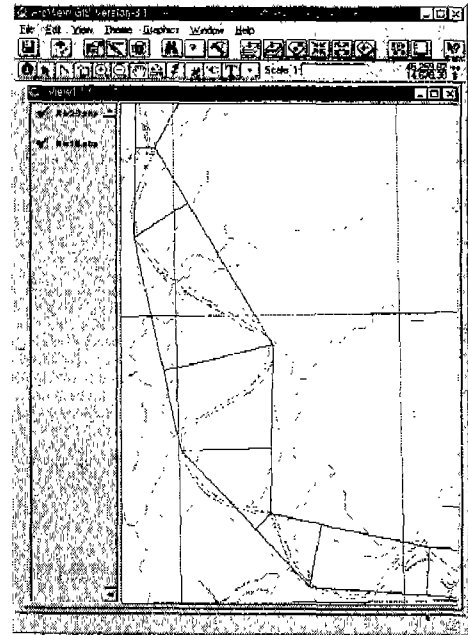


그림 2.2 낙동강 수계의 사행분석

3 이론적 배경

3.1 하천차수

일반적으로 하천차수를 결정하는 방법은 미국의 Horton-Strahler방법과 Europe의 Gravelius방법이 있는데, 전자는 상류의 수원점으로부터 시작하여 하류로 갈수록 차수가 높아지는 방법이며, 후자는 하구를 포함한 본류를 기준으로 하류에서 상류방향으로 순차적으로 하천차수를 결정하는 방법이다. 이 밖에도 A.E.Scheidegger(1965), R.L.Shreve(1966), M.J.Waldenbury(1966)의 방법들이 있는데 본 연구에서는 실무에 적용하기에 양호한 Gravelius방법을 사용하였다. Horton-Strahler 개념에 의한 하천차수는 그림 3.1과 같이 최상류단의 하천, 즉 지류를 갖지 않는 수원의 세류를 1차하천이라고 하고 2개의 1차 하천이 만나면 2차하천, 다시 2개의 2차하천이 만나면 3차하천이 된다. 그러나 큰 차수가 작은 차수와 만날 경우에는 큰 차수에 따른다.

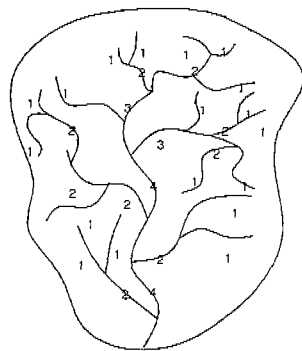


그림 3.1 수계망의 차수구분(Strahler)

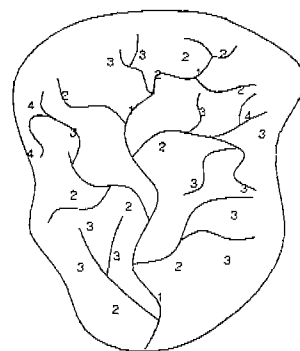


그림 3.2 수계망의 차수구분(Gravelius)

본 연구의 대상인 낙동강은 그림 3.2와 같이 본류가 1차하천이 되는 Gravelius의 방법을 사용하여 1차하천의 수는 1개, 2차하천의 수는 105개, 3차하천의 수는 312개, 4차하천의 수는 275개, 5차하천의 수는 90개, 6차 하천의 수는 11개의 하천으로 결정할 수 있었다.

3.2 수계망의 분석

지형도에서 수계의 부분만을 그려서 그 평면적인 분포상태를 수치지도로 입력하여 수계도를 작성하여 수계망이 갖고 있는 특징, 즉 수로의 수, 길이, 배열상태 등을 지리정보체계를 이용하여 쉽게 분석할 수 있도록 하였다. 이들의 절대값들은 기본도의 축척에 의해서 달라지나 상대적인 특성치는 이외로 축척의 대소에는 큰 영향을 받지 않는다. 이러한 수치수계도를 통하여 본류나 지류의 배치상태를 알 수 있는 동시에 수계망의 일부나 전체가 나타나는 평면적 배치상태를 볼 수 있었다.

3.3 하천특성인자

R.E.Horton은 차수의 수류의 총수보다 하나 높은 차수의 수류의 총수에 대한 비율을 분기율이라 하였다.

$$\text{분기율}(R_b) = \frac{N_u(\text{u차의 수류 총수})}{N_u + 1(\text{u+1차의 수류 총수})}$$

각차수마다의 수류의 길이의 평균치는 대수함수에 따라서 차수의 높은 것과는 비례적으로 증대한다. 그리고 수계망을 양적으로 나타내는 지표로서 수계밀도(Drainage density)와 수계빈도(Drainage Frequency)를 사용하고 있다. 수계밀도는 유로의 총연장을 유역의 면적으로 나눈값으로 표시하고 일반적으로 불침투성의 저습지에서는 크고 사지(砂地)와 같이 물이 침투되기 쉬운 곳은 적다. 수계빈도는 유역내의 각급하천의 총수 N 을 그 유역면적 A 로 나눈값, 즉 단위면적에 해당하는 유역의 수를 말한다. 수계밀도가 같다고 할지라도 수계빈도의 값은 많은 차이를 나타낼 수 있다. 또 다른 하천특성인자인 유역의 형상계수는 유역면적을 A [km^2], 본천의 길이를 L_o [km]라고 하면 형상계수 F 는

$$F = \left(\frac{A}{L_o} \right) \left(\frac{1}{L_o} \right) = \frac{A}{L_o^2}$$

이다. F 값이 큰 것은 하천의 길이에 비하여 유역의 폭이 크다. 그리고 하천의 유량의 안정도를 수량적으로 나타내는 하천의 어느 지점의 최대 유량과 최소 유량과의 비를 그 지점의 하상계수라고 한다.

사행특성을 형상면에서 분석하기 위해서 사행과장(M_l)이 가장 중요한 인자로서 포함되어야 함은 잘 알려져 있는 바이며, 사행대(M_b) 및 하폭과 함께 많은 관계식들이 발표되어 있다. 여러 가지 특성인자들의 분석에 의하여 사행현상이 구명되고 있지만, 사행과장과 사행대의 관계가 밝혀짐으로써 설계시 검토자료로 사용될 수 있을 것이다. 그리고 사행과장과 사행대의 상관성을 양호하게 나타내게 하는 사행과장에 대한 사행대의 비로써 사행경사를 다음 식으로 정의하였다.

$$M_s = M_b / M_l$$

여기서, M_s : 사행경사, M_b : 사행대, M_l : 사행과장

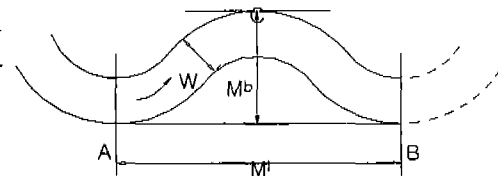


그림 3.3 사행과장(M_l)과 사행대(M_b)

사행경사는 구간에 따라서 상관계수가 큰 폭의 차이가 있으므로 사행현상은 사행경사를 구분하여 분석함이 바람직하다.

4 비교 검토 및 고찰

낙동강 유역의 하천은 1차부터 6차까지의 하천차수를 구분할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 하천차수를 4차까지 자료를 구하여 연구하였고, 5차이상의 자료는 1:25,000의 수치지도에서 측정이 불가능하여 4차까지 구한 식을 6차까지 연장하여 유추하는 것도 가능하리라 사료된다. 본 연구에서는 사행경사에 따라서 많은 상관식을 구하였다. 그러나 식의 적용도에 비추어 보면 사행과장 및 사행대의 최대값이 1차하천과 4차하천의 경우 차이가 있으므로 식의 결과에 대해서도 차이가 있음을 알 수 있었다. 그래서 본 논문에서는 하천차수와 사행과장, 사행대의 관계를 분석하고 상관성을 비교하였다. 표 4.1은 각 차수별 사행과장과 사행대의 최대값과 최소값을 수록했다. 하천차수와 사행과장과 사행대의 상관관계는 각각의 평균값에 대하여 분석하였고, 일차회귀직선식과 지수함수식으로 나타내었다. 표 4.2에서 보는바와 같이 상관계수가 0.70~0.97의 아주 양호한 상관성이 나타났다.

표 4.1 낙동강의 하천차수, 사행과장, 사행대의 자료 분석 (단위 : km)

하천차수 (u)	최대값		최소값		평균값	
	M_b	M_l	M_b	M_l	M_b	M_l
1	9.78	16.00	0.60	1.38	2.62	6.73
2	5.94	9.71	0.02	0.24	0.60	2.09
3	1.76	4.06	0.08	0.10	0.47	1.50
4	2.03	4.14	0.03	0.25	0.32	1.13

표 4.2 하천차수(u)에 대한 사행대, 사행과장의 상관식

상관식	사행대	상관계수	사행과장	상관계수
일차회귀직선	$M_b = -0.704u + 2.765$	0.704	$M_l = -1.739u + 7.21$	0.741
지수함수식	$M_b = 2.293u^{-1.49}$	0.955	$M_l = 6.137u^{-1.286}$	0.972

사행과장과 사행대의 관계를 분석한 결과는 다음과 같다. Gravelius개념에 의하여 하천차수를 구분하여 3차하천과 4차하천이 전체 유역의 각각 39.29, 34.63%를 차지하고 있었다. 하천차수와 사행과장 및 사행대의 관계는 높은 상관성을 보였고, 일차회귀직선식보다는 지수함수식의 상관성이 높았다. 그러나 일차회귀직선식의 경우는 5, 6차하천에서 사행과장 및 사행대의 값이 음의 값을 나타내어 사행특성인자와 하천차수는 지수함수식의 관계임을 알 수 있었다. 사행경사의 범위에 따라서 사행과장과 사행대의 통계학 분석에 있어서 상관성의 차이를 나타냈다. 낙동강 전 구간에 대한 사행과장과 사행대에 대한 상관계수는 0.50~0.58로 나타났고, 이에 대한 일차회귀직선식은

$M_t = 1.65M_b + 1.01$ 이고, 지수함수식은 $M_t = 2.57M_b^{0.62}$ 로 나타낼 수 있었다. 낙동강 전체의 사행경사 구간별 관계식은 사행경사가 0~0.5일 때 일차회귀직선식은 $M_t = 2.52M_b + 0.77$ 이고, 지수함수식은 $M_t = 3.10M_b^{0.62}$ 로 유도되었고, 사행경사가 0.5~1구간에서 일차회귀직선식은 $M_t = 1.39M_b + 0.19$ 이고, 지수함수식은 $M_t = 1.53M_b^{0.96}$ 로 유도되었다. 낙동강 전체의 하천에 대해서 사행경사가 0~0.5구간에서 상관계수는 0.63~0.75로 비교적 양호하게 나타났고, 0.5~1구간에서 상관계수는 0.92~0.94로 아주 양호함을 알 수 있었다. 사행경사 범위를 지정하지 않았을 때의 상관도는 0.02정도의 거의 상관성이 없었으나 사행경사 범위를 지정했을 때는 상관도가 0.60~0.90까지 아주 양호한 것으로 나타났다. 따라서 사행현상은 사행경사를 구분하여 분석함이 바람직하다.

5 결론

낙동강 수계의 사행에 관한 연구를 위해 낙동강 유역인 밀양댐을 기점으로 낙동강 하구언까지의 범위에서 수치지도상에서 970개의 자료를 측정하였다. 이를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 하천차수와 사행대 및 사행과장의 관계는 일차회귀직선식보다 지수함수식의 관계로 나타났고, 하천차수별 사행과장과 사행대의 상관관계를 사행경사별로 구분 분석한 결과가 상관성이 양호하게 나타났다.
2. 사행경사에 따라 상관성의 변화가 크므로 식을 달리 유도해야 한다고 판단되어, 본 논문에서는 사행경사를 0.5미만과 0.5~1.0의 2구분으로 나누어 조사 분석한 결과 0.5~1.0이 0.5미만보다 그 상관성이 더 양호하였다.
3. 낙동강의 사행과장과 사행대의 상관식은 자료수가 가장 많고, 상관성이 양호한 2차하천에서 일차회귀직선식은 $M_t = 1.55M_b + 0.06$, 지수함수식은 $M_t = 1.60M_b^{0.97}$ 로 유도되었고, 1,3,4차하천에서 유도된 식보다 표준편차가 적었다.
4. 본 연구에서는 사행경사가 사행분석에 가장 크게 기여하는 인자임을 확인할 수 있었다.

6. 참고문헌

1. 송재우외 1(1981), "하천 사행의 계량형태학적 특성", 한국수문학회지
2. 임흥국(1997), "유한요소모형을 이용한 사행하천의 흐름해석", 서울대학교 대학원
3. 최철웅(1999), 지형공간정보체계를 이용한 수문지형인자 결정에 관한 연구, 부산대학교 대학원
4. Strahler, A.N.(1952), "Quantitative Geomorphology of Erosional Landscapes," C-R., 19th Inter. Geol. Congress, Algiers, Sec. 13, part 3.
5. Massimo Rinaldi and Peggy A.Johnson(1997), "CHARACTERIZATION OF STREAM MEANDERS FOR STREAM RESTORATION"