

집수평면의 신장도에 대한 정량적 평가

(The Quantitative Evaluation of Catchment Plan-Form Elongation)

김 주 철* 이 상 진** 노 준 우***
 (Joo Cheol Kim) (Sang Jin Lee) (Joon Woo Noh)

요 약 본 연구에서는 집수평면의 신장도와 밀집도 그리고 등가타원에 대한 개념을 이론적인 고려와 함께 실제 유역에 적용하여 보았다. GIS를 기반으로 산정된 대상유역들에 대한 집수평면과 등가타원을 상류로부터 하류방향으로 진행하면서 변화 양상을 관찰해 본 결과 현재 논의되고 있는 Hack의 법칙에 대한 두 가설이 무작위적으로 상호작용을 할 경우 나타날 수 있는 유역 형상들에 대한 모집단처럼 보여졌다. 또한 집수평면의 최대 및 최소관성적질의 비 R_i 가 유로연장과 집수평면에 대한 등적원(等積圓)의 직경 사이의 비 E 보다 유역형상의 신장도를 보다 민감하게 평가하는 것으로 나타났다. 집수평면에 대한 밀집도는 정의별로 상이한 양상을 보였다. 이러한 결과는 형상의 정량화가 갖는 난점에 기인하는 것으로 2개 이상의 밀집도들에 대한 복합적 고려를 통한 평가나 프랙탈 이론의 적용 등이 앞으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

키워드 : 집수평면, 신장도, 밀집도, 등가타원

Abstract In this study the concepts on the elongation, compactness and equivalent ellipse of catchment plan-forms are applied to the real basins considering their theoretical frameworks. The catchment plan-forms and corresponding equivalent ellipses, obtained from GIS, are inspected on downstream directions. As a result the catchment plan-forms seem to be the population of the basin shapes which come from the random interaction between two conjectures on Hack's law being controversial recently. The ratio of the maximum and minimum inertia moments of the catchment plan-form R_i is more sensitive to evaluate the elongation of the basin shapes than the ratio of the main channel length and diameter of circle which has the same area as the catchment plan-form E . The catchment plan-forms compactness measures show distinct aspects according to their different definitions. These results are caused by the difficulties to quantification of the shapes and the composite consideration with more than two compactness measures and the fractal analysis are therefore required to recover them.

Keywords : Catchment Plan-Form, Elongation, Compactness, Equivalent Ellipse

1. 서 론

유역은 하천망(channel network)과 구릉지사면(hill-slope)으로 구성된 복합적인 변화계로서 강우 유입량의 효율적인 배수를 위하여 끊임없이 진화해 가고 있다. 이러한 유역의 점진적인 변화과정 속에는 거시적인 규모의 지질구조학적 용기(tectonic uplift)로부터 유수에 의한 국부적인 세굴에 이르기까지 수많은 현상들의 복잡한 상호작용들(complexity)이 포함되어 있어 Newton의 운동법칙과 같이 단순한 형태의 물리학적 지배방정식에 따라 이를 해석하는 것이 현재의 기술수준으로는 불가능한 것으로 알려져 있다.[2] 따라서 지금까지 주로 하천망을 중

심으로 한 유역 표면의 형태학적 특성에 관한 분석이 Horton의 고전적인 연구[8,9]를 기원으로 하여 지속되어 오고있다.[15-17]

최근 지리정보체계(이하 GIS)의 발달은 종이 지도상에서는 시도조차 할 수 없었던 다양한 지형인자들의 추출 [11,18]과 함께 유역의 형상(shape)에 대한 새로운 형태의 접근을 가능하게 하고 있다. 이에 따라 기존의 연구 성과들에 대하여 새로운 각도의 해석들이 제안되는 경향을 확인할 수 있는데 그 대표적인 예로서 Hack의 법칙을 들 수 있다. Hack은 유역면적(drainage area)과 유로연장(main stream length) 사이에 존재하는 상사성(similarity)에 관한 분석으로부터 유역은 규모(scale)가

* 한국수자원공사 Kwater연구원 위촉연구원, kjoocheol@kwater.or.kr

** 한국수자원공사 Kwater연구원 책임연구원, sjlee@kwater.or.kr(교신저자)

*** 한국수자원공사 Kwater연구원 선임연구원, jnoh@kwater.or.kr

커질수록 가늘고 길게 신장(伸長)되는 특성이 있음을 밝히는 연구결과를 제시한 바 있다.[4,6] 하지만 진술한 지리정보 처리기술의 발달과 함께 비교적 최근 등장한 Fractal 기하학 등은 이러한 결과에 대하여 심도 깊은 의문을 던지고 있다.[7,12] 유역의 신장도(elongation)는 수문학 및 지형학 분야에서 상당히 중요한 의미를 갖는 지형인자들 중의 하나이지만 아직까지 통일된 정량적 계량수단을 갖추지 못하고 있다. 이는 유역경계를 수평면 위에 투영할 경우 얻을 수 있는 집수평면(catchment plan-form)의 형상이 대단히 불규칙한 것에 기인하는 것으로 형상의 정량화가 갖는 어려움을 잘 설명하고 있다.

본 연구에서는 유역의 신장도를 계량하기 위하여 제안된 바 있는 각종 고전적인 지형인자들에 대한 세심한 조사를 통하여 보다 통일된 계량수단으로의 발전을 도모해 보고자 한다. 특히 미국에서 선거구의 정당/인종차별(gerrymandering)의 평가수단으로 이용되고 있는 밀집도(compactness)에 대한 개념과의 비교를 통하여 보다 견고한 이론적 기초를 다질 수 있도록 한다. 또한 최근 GIS의 발달을 기반으로 새롭게 제안된 지형인자들 중의 하나인 등가타원(Moussa, 2003)의 개념을 실제 유역에 적용하여 보다 신뢰성 있는 집수평면의 신장도 평가수단으로서의 가치를 검증해 보고자 한다. 이러한 분석은 GIS를 기반으로 하여 등장하고 있는 새로운 경향의 수문지형학(hydro-geomorphology) 분야에 보다 직관적이고 체계적인 접근 수단을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 이론적 배경

2.1 집수평면의 신장도와 밀집도

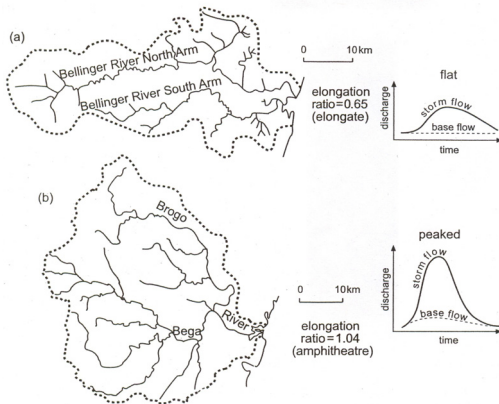


그림 1. catchment plan-form and runoff hydrograph

집수평면은 유역의 경계를 수평면 위에 투영할 경우 얻어지는 폐곡선으로 정의된다.[3] Fig. 1은 집수평면의 형상이 유출수문곡선의 거동특성에 미치는 영향을 개략적으로 예시하는 것으로서 유역이 가늘고 길게 신장될수록 수문곡선의 첨두유량(peak discharge)은 작아지고 유출기저시간(base time)은 길어지는 경향이 나타날 것이 에

상된다. Eq. (1)은 집수평면의 형상을 묘사하기 위하여 수문학자들에 의하여 개발된 기존의 기술자(記述子; descriptor)들로서 F , C_1 은 각각 Horton[8]에 의하여 제안된 형상비(form factor)와 밀집비(compactness factor), C_2 는 Miller의 원상율(basin circularity), 그리고 E 는 Schumm(1956)의 신장비(basin elongation)를 나타낸다[5,21].

$$F = \frac{A}{L^2}; C_1 = \frac{P_1}{2\sqrt{\pi A}}; C_2 = \frac{4\pi A}{P_2^2}; E = \frac{2\sqrt{A/\pi}}{L} \quad (1)$$

여기서 A 는 유역면적, L 은 유로연장, P_1 은 유역의 주변장(perimeter) 그리고 P_2 는 유역면적과 동일한 면적을 갖는 원의 주변장(원주)이다. Eq. (1)의 기술자들은 모두 유역의 형상을 일종의 평면도형으로서 평가하며 주로 집수평면의 신장도를 계량하기 위하여 개발된 도구들임을 확인할 수 있다.

2.2 밀집도(compactness)

미국에서 선거구에 대한 정당/인종차별의 정치적인 평가수단으로 적용되는 밀집도는 “closely or firmly united or packed together” 혹은 “packed into or arranged within a small space”와 같은 사전적 의미를 갖는다(The American Heritage Dictionary). 주로 퍼짐(dis-persion)이나 주변장(perimeter)의 상태를 이용하여 선거구역의 형상을 평가하는 밀집도는 형상의 정량화가 갖는 어려움으로 인하여 여러 가지 정의들이 제시되어 왔으며, 이들이 서로 상호보완적으로 이용되고 있다[10].

Niemi 등(1990)은 밀집도에 대한 각종 인자를 범주별로 분류한 바 있는데, 여기서 주목되는 것은 기존의 집수평면 기술자들과의 유사성이다. 특히 Eq. (1)의 F , C_1 , C_2 는 거의 동일한 형태로 gerrymandering 평가에 적용되고 있으며, 이들의 출처로서 수문학자들의 연구 성과[8]가 제시되고 있음을 찾아볼 수 있다. 결국 Eq. (1)의 기술자들은 모두 집수평면에 대하여 각 특성을 내포한 일종의 밀집도로서 정의할 수 있다.

Eq. (1) 이외의 밀집도에 대한 정의로서 Eq. (2)과 같은 극관성적률의 비 M 이 있다[13].

$$M = \frac{A}{\sqrt{2\pi J}} \quad (2)$$

여기서 J 는 평면의 극관성적률이다[20]. Moussa(2003)는 평면의 관성적률은 유로연장이나 주변장 등과 같은 선형인자에 비하여 지형공간자료의 해상도에 독립적인 특성을 가짐을 시사한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 Eqs. (1), (2)를 집수평면에 대한 형상 평가에 적용해 보고자 한다.

2.3 등가타원

GIS의 발달을 바탕으로 프랑스의 수문학자 Moussa(2003)에 의하여 개발된 등가타원은 집수평면과 동일한

기하학적 특성을 기반으로 하여 다음과 같이 정의된다. 첫째, 타원의 중심은 집수평면의 중심에 위치한다. 둘째, 타원의 장축과 단축은 집수평면의 관성주축과 일치한다. 셋째, 타원과 집수평면의 면적은 동일하다. 넷째, 타원과 집수평면의 최소관성적률과 최대관성적률의 비는 동일하다.

Fig. 2은 집수평면 Σ 를 2차원 평면 xAy 상에 도시한 것이다. 여기서 G 는 Σ 의 도심이고 $x'Gy'$ 은 xAy 를 원점 A 로부터 G 까지 평행 이동할 경우의 2차원 평면이다. 만약 \overline{GX} , \overline{GY} 를 Σ 의 관성주축이라 할 경우, 단면의 기하학적 성질에 따라 Eq. (3)은 Σ 의 중심축 $\overline{Gx'}$, $\overline{Gy'}$ 으로부터의 회전각 ω 와 신장비 R_i 를 나타낸다[19,20].

$$\tan 2\omega = \frac{2I_{x'y'}}{I_y - I_x} ; R_i = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \quad (3)$$

여기서 I_x , I_y , $I_{x'y'}$ 은 Σ 의 중심축에 대한 관성적률이고 I_{\min} , I_{\max} 은 각각 최소관성적률과 최대관성적률이다 [19,20]. R_i 는 0~1의 범위로써 집수평면이 신장될수록 작은 값을 갖는다.

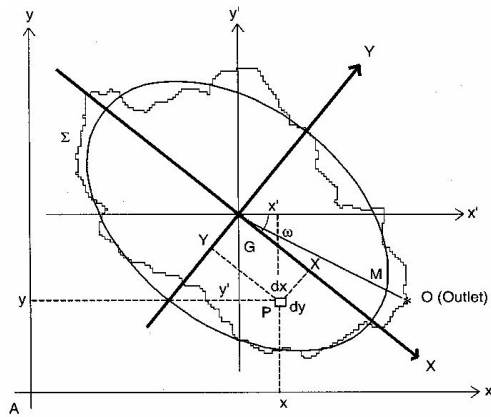


그림 2. Catchment plan-form and equivalent ellipse[11]

타원의 기하학적 특성인 면적 A_e , 최소관성적률 $I_{\min,e}$ 그리고 최대관성적률 $I_{\max,e}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$A_e = \pi ab ; I_{\min,e} = \frac{\pi ab^3}{4} ; I_{\max,e} = \frac{\pi a^3 b}{4} \quad (4)$$

여기서 a, b 는 각각 타원의 장축과 단축의 길이로서 해당 타원의 관성주축과 동일한 방향을 갖는다. 따라서 타원의 신장도는 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_{\min,e}}{I_{\max,e}} = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (5)$$

Fig. 2에서 Σ 의 면적을 S_0 라 할 경우, 등가타원은 전술한 정의에 따라 Σ 와 동일한 면적과 R_i 를 갖게 된다. 따라서 등가타원의 장축과 단축의 길이는 Eq. (6)과 같이 유도할 수 있다.

$$a = \left[\frac{S_0}{\pi} \left(\frac{1}{R_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} ; b = \left[\frac{S_0}{\pi} (R_i)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

본 연구에서는 상기한 등가타원의 개념을 실제 유역에 적용하여 집수평면의 형상을 평가하고 해당 유역의 신장도를 객관적으로 계량하여 전절에서 언급한 고전적 지형인자 및 밀집도에 의한 결과와 비교 검토하여 보다 효율적인 지형인자의 공식화를 제시해 보고자 한다.

3. 유역 적용사례

3.1 유역의 규모에 따른 집수평면의 형상

본 논문에서는 한강 수계의 평창강 유역, 금강 수계의 보청천 유역 그리고 낙동강 수계의 위천 유역을 대상유역으로 선정하였다(그림 3).

3개 대상유역 내 위치한 총 17개 수위표 지점에 대하여 각종 집수평면 기술자 및 등가타원에 의한 집수형상 기술자들을 DEM을 기반으로 추출하였다. DEM의 생성에는 1/25,000 축척의 수치지도도를 이용하였고 격자크기는 20m를 적용하였다. 또한 실제 하천자료와의 오차를 줄이기 위하여 DEM의 전처리에 fillburn DEM 기법을 적용

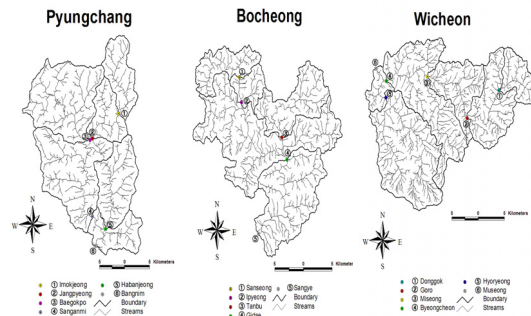


그림 3. Study catchments

하였다. 집수평면의 각종 관성적률은 grid형 유역도의 격자 중심점들의 좌표로부터 계산하였다.

Figs. 4~6은 3개 대상유역의 17개 수위표 지점에 대한 집수평면과 등가타원을 도시한 것으로 상류로부터 하류방향으로 진행하면서 집수평면과 그에 해당하는 등가타원의 변화를 시각적으로 확인할 수 있다. 여기서 흥미로운 사항은 유역의 규모에 따른 양자의 변화 양상으로서 Hack의 법칙에 대한 고전적 해석과는 달리 규모의 증가에 따라 유역이 가늘고 길게 신장되어 가는 경향을 찾아볼 수 없다. 예를 들어 Fig. 5의 보청천의 5개 유역에 대한 결과에서는 오히려 상류에서는 타원에 가까운 형상을 가지나 하류로 이동함에 따라 신장도가 줄어들어서 상하, 좌우가 서로 대칭된 원과 같은 형상으로 진행됨을 볼 수 있다.

Table 1은 17개 수취점 지점의 등가타원에 대한 주요한 기술자들을 정리한 것으로 3열에 수록된 유역의 중심축과 관성주축 사이의 회전각 ω 가 거의 모든 유역에서 0에 가깝게 산정된 것이 주목된다. 이는 Moussa[11]가 프랑스의 7개 유역에 대한 분석으로부터 얻은 결과와는 상

이한 양상을 보여준다. 하지만 이러한 결과들이 국내유역형상의 고유한 특성으로 판단하기는 어려울 것으로 보이며 보다 많은 유역에 대한 적용 및 분석이 필요한 것으로 사료된다.

전술한 Hack의 법칙은 현재 다음과 같은 개별적인 두

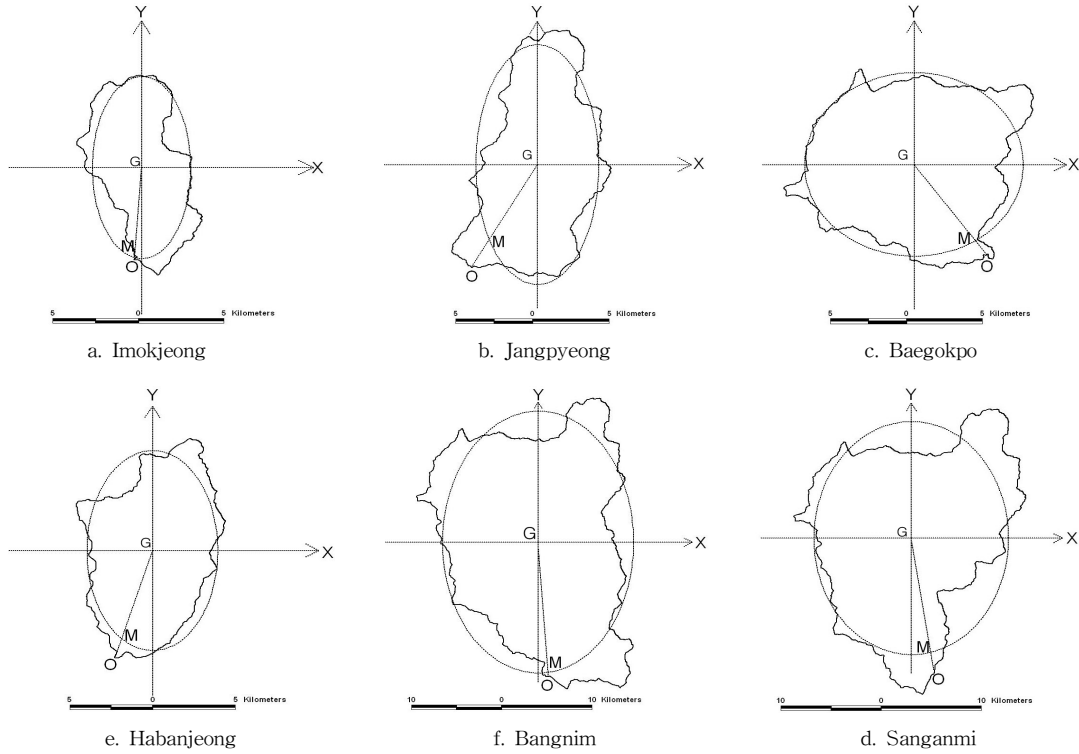


그림 4. Pyungchang catchment

표 1. Main descriptors of equivalent ellipses

Basin	control point	descriptors of equivalent ellipses				
		Ri	ω (rad)	a(km)	b(km)	a+b(km)
Pyungchang	Imokjeong	0.21	1.57	6.20	2.86	9.06
	Jangpyeong	0.23	1.57	8.37	4.00	12.37
	Baegokpo	0.78	0.00	7.19	6.37	13.56
	Sanganmi	0.56	1.57	12.93	9.69	22.62
	Habanjeong	0.33	1.57	6.91	3.94	10.85
	Bangnim	0.44	1.57	15.88	10.58	26.46
Bocheong	Sanseong	0.23	0.00	5.73	2.73	8.46
	Ipyeong	0.30	0.00	6.66	3.65	10.31
	Tanbu	0.41	0.00	6.22	3.97	10.19
	Gidae	0.41	0.00	13.29	8.48	21.77
	Sangye	0.98	0.00	12.49	12.36	24.86
Wicheon	Donggok	0.66	1.57	3.61	2.94	6.55
	Goro	0.66	1.57	6.54	5.31	11.85
	Miseong	0.50	0.00	8.77	6.23	15.00
	Byeongcheon	0.38	0.00	12.52	7.70	20.22
	Hyoryeong	0.61	1.57	7.84	6.11	13.95
	Museong	0.53	0.00	14.38	10.46	24.84

개의 가설로 해석되고 있다[7]. 첫째, 하천의 사행 (meandering)은 모든 규모에서 발생한다. 그러므로 하천의 길이는 수원과 출구 사이의 직선거리(Euclidean length)의 성장률보다 빠르게 증가한다. 둘째, 유역은 폭

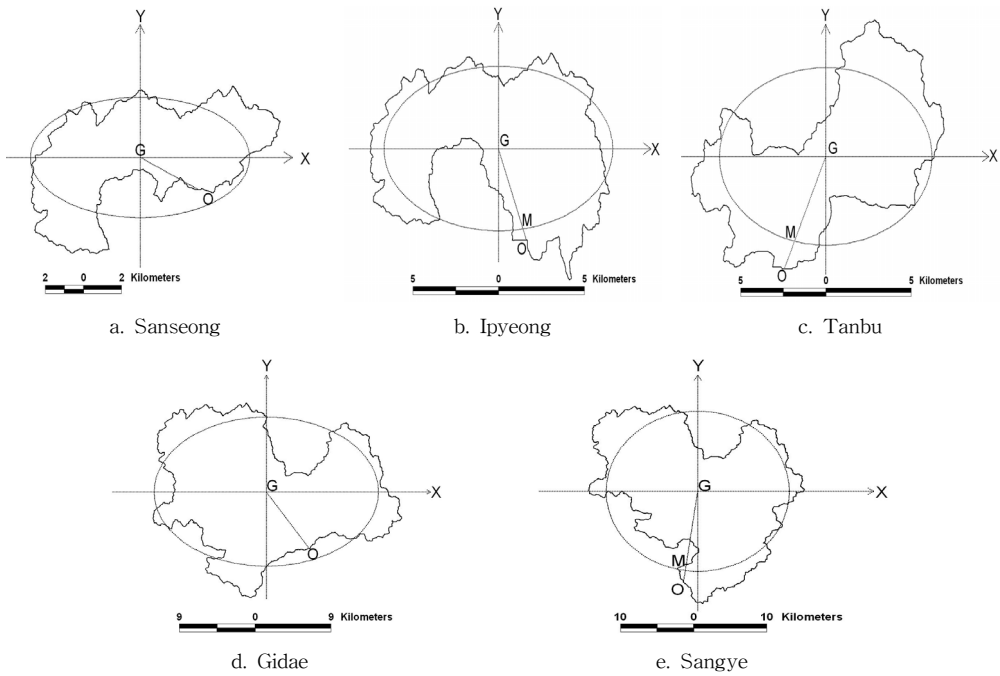


그림 5. Bocheong catchment

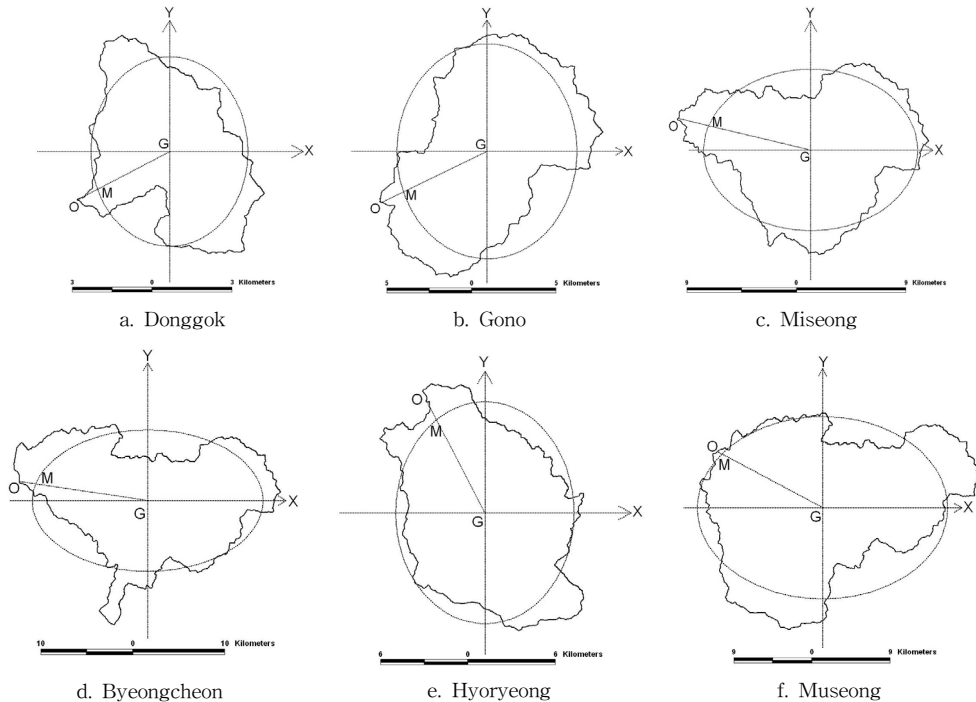


그림 6. Wicheon catchment

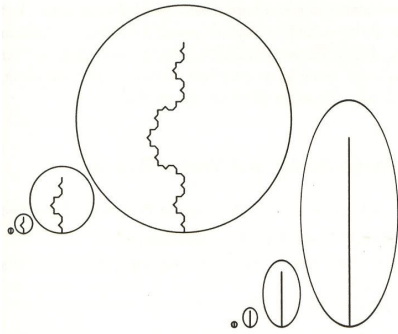


그림 7. Hack's law[7]

방향에 비하여 길이 방향의 성장률이 더 크다 (anisotropic). 따라서 유역은 규모에 따라 개별적인 형상을 갖는다. Fig. 7은 상이한 두 가설을 시각적으로 예시한 것으로 전술한 17개 유역들에 대한 결과는 이러한 두 가설이 무작위적으로 상호작용을 할 경우 나타날 수 있는 유역 형상들에 대한 모집단처럼 보여진다. 이로부터 집수평면의 신장도는 복잡한 유역 형성 과정을 적절히 묘사할 수 있는 중요한 지형인자인 것으로 판단된다.

3.2 집수평면의 신장도와 밀집도

Table 2는 전절의 결과를 바탕으로 수위표 지점별 집수평면과 등가타원에 대한 각종 형상척도의 산정결과를 나타낸 것이다. 주목되는 것은 신장도 E 와 R_i 에 대한 산정결과로 후자의 경우가 보다 민감하게 유역의 형상을 반영하는 것으로 판단된다. 이는 관성적률을 기반으로 정의된 R_i 가 고전적인 지형인자들인 면적과 길이에 의한 E 보다 안정적인 결과를 줄 수 있는 것을 암시하는 것으로 이로부터 집수평면의 R_i 로부터 정의되는 등가타원은 시

각적/정량적으로 집수평면의 신장도 평가에 있어 중요한 도구가 될 수 있을 것으로 판단된다.

집수평면에 대한 밀집도는 정의별로 상이한 양상을 보였다. 이러한 결과는 전술한 바와 같이 형상의 정량화가 갖는 난점에 기인하는 것으로, gerrymandering 평가에서 적용되는 것과 마찬가지로 2개 이상의 밀집도들에 대한 복합적 고려[13]를 통한 평가 등이 앞으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 유역에 대한 각종 형상기술자들을 DEM 으로부터 추출하고 집수평면의 신장도 평가에 적용하여 보았다. 이상으로부터의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 선거구에 대한 정당/인종차별의 평가수단으로 적용되는 밀집도에 대한 이론적 검토로부터 수문학분야에서 개발된 기존의 집수평면 기술자들과의 유사성을 발견할 수 있었다. 특히 Horton이 제시한 형상비와 밀집비는 거의 동일한 형태로 gerrymandering 평가에 적용되고 있으며, 이들의 출처로서 수문학자들의 연구 성과가 제시되고 있음을 찾아볼 수 있었다. 결국 이들은 모두 집수평면에 대하여 각 특성을 내포한 일종의 밀집도로서 정의할 수 있었다.

2) 대상유역들에 대한 집수평면과 등가타원을 상류로부터 하류방향으로 진행하면서 변화 양상을 관찰해 본 결과 현재 논의되고 있는 Hack의 법칙에 대한 두 가설이 무작위적으로 상호작용을 할 경우 나타날 수 있는 유역 형상들에 대한 모집단처럼 보여졌다. 이로부터 집수평면의 신장도는 복잡한 유역 형성 과정을 적절히 묘사할 수 있는 중요한 지형인자인 것으로 판단된다. 이는 유역의 형성 과정은 전술한 두 가설 중 어느 한 가설이 지배적

표 2. Shape factors of catchment plan-forms and equivalent ellipses

Basin	control point	Catchment plan-form						equivalent ellipse		
		F	C_1	C_2	M	E	R_i	C_1	C_2	M
Pyungchang	nImokjoeng	0.201	1.825	0.300	0.807	0.506	0.213	1.112	0.809	0.873
	Jangpyeong	0.163	1.841	0.295	0.828	0.455	0.229	1.102	0.823	0.882
	Baegokpo	0.220	1.778	0.316	0.966	0.530	0.783	1.003	0.995	0.996
	Sanganmi	0.159	1.911	0.274	0.906	0.450	0.562	1.016	0.970	0.980
	Habanjeong	0.248	1.720	0.338	0.892	0.562	0.326	1.059	0.892	0.928
	Bangnim	0.160	1.896	0.278	0.906	0.451	0.444	1.031	0.941	0.961
Bocheong	Sanseong	0.182	2.428	0.170	0.725	0.481	0.227	1.103	0.821	0.881
	Ipyeong	0.183	2.443	0.168	0.800	0.483	0.300	1.068	0.877	0.918
	Tanbu	0.175	2.252	0.197	0.778	0.472	0.406	1.038	0.928	0.952
	Gidae	0.263	2.392	0.175	0.861	0.579	0.408	1.038	0.929	0.952
	Sangye	0.156	2.447	0.167	0.898	0.446	0.980	1.000	1.000	1.000
Wicheon	Donggok	0.408	1.884	0.282	0.903	0.721	0.664	1.008	0.985	0.990
	Goro	0.260	1.757	0.324	0.902	0.575	0.659	1.008	0.984	0.989
	Miseong	0.157	1.899	0.277	0.914	0.448	0.504	1.022	0.958	0.972
	Byeongcheon	0.164	2.301	0.189	0.854	0.456	0.378	1.044	0.917	0.945
	Hyoryeong	0.281	1.840	0.295	0.932	0.598	0.607	1.012	0.977	0.985
	Museong	0.223	2.005	0.249	0.898	0.532	0.528	1.019	0.963	0.975

으로 주도하는 것이 아니라 양자의 무작위적인 상호작용으로 구성되는 것을 의미하는 것으로 집수평면의 신장도는 이들의 복합적인 영향을 포괄적으로 반영할 수 있는 지형인자로서 평가할 수 있을 것이다.

3) 관성적률을 기반으로 정의된 R_i 가 면적과 길이에 의한 E 보다 집수평면의 신장도를 보다 민감하게 평가하는 것으로 나타났다. 이는 Table 2의 결과로부터 직관적으로 확인할 수 있는 사항으로서 이로부터 집수평면에 대한 R_i 로부터 정의되는 등가타원은 시각적/정량적으로 집수평면의 신장도 평가에 있어 중요한 도구가 될 수 있을 것으로 판단된다.

4) 집수평면에 대한 밀집도는 정의별로 상이한 양상을 보였다. 이러한 결과는 형상의 정량화가 갖는 난점에 기인하는 것으로 2개 이상의 밀집도들에 대한 복합적 고려를 통한 평가 등이 앞으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

[1] Abraham, A. D., "Channel network: A geomorphological perspective", *Water Resources Research*, 20(2), 1984, pp. 161-188.

[2] Bak, P., *How nature works*, Copernicus/Springer-Verlag, New York., 1996.

[3] Eagleson, P. S., *Dynamic Hydrology*, McGraw-Hill., 1970.

[4] Gray, D. M., "Interrelationships of watershed characteristics", *J. Geophys. Res.*, 66(4), 1961, pp. 1215-1223.

[5] Gregory, K. J. and Walling, D. E., *Drainage basin form and process, A geomorphological approach*, Edward Arnold., 1973.

[6] Hack, J. T., "Studies of longitudinal profiles in Virginia and Maryland", *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 1957, 294-B.

[7] Hergarten, S., *Self-organized criticality in earth system*, Springer-Verlag, New York., 2002.

[8] Horton, R. E., "Drainage-basin characteristics", *EOS Trans. AGU*, 13, 1932, pp. 350-361.

[9] Horton, R. E., "Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology", *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 1945, pp. 275-370.

[10] Knight, J. L., "GIS based compactness measurement using fractal analysis", *Proceedings of the 1997 UCGIS annual assembly and summer retreat*, 1997, Online. Available: <http://www.spatial.maine.edu/~onsrud/ucgis/testpro/knight/knight.html>

[11] Moussa, R., "On morphometric properties of basins, scale effects and hydrological response", *Hydrological Processes*, 17, 2003, pp. 33-58.

[12] Mandelbrot, B. B., *The Fractal geometry of nature*, W. H. Freeman, New York., 1982.

[13] Niemi, R. G., Grofman, B., Carlucci, C. and Hofeller, T., "Measuring compactness and the role of a compactness standard in a test for partisan and racial gerrymandering", *Journal of Politics*, 52(4), 1990, pp. 1155-1181.

[14] Shumm, S. A., "Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey", *Geol. Soc. Am. Bull.*, 67, 1956, pp. 597-646.

[15] Shreve, R. L., "Statistical law of stream numbers", *Journal of Geology*, 74, 1966, pp. 17-37.

[16] Smart, J. S., "Channel Networks", *Advances in Hydrosience*, 8, 1972, pp. 305-346.

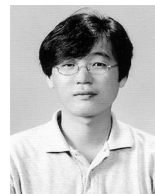
[17] Strahler, A. N., "Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks", 1964, pp. 4.39-4.76, In: *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

[18] Tarboton, D. G., "Terrain Analysis Using Digital Elevation Models in Hydrology", 23rd ESRI International Users Conference, San Diego, California., 2003.

[19] 김재한, 수문계의 수학적 모형, 선형계를 중심으로, 도서출판새론, 2005.

[20] 양창현, 구조역학, 청문각, 1996.

[21] 이원환, 최신하천공학, 동명사, 1999.



김 주 철
1993년 충남대학교 토목공학과 졸업(학사)
2004년 충남대학교 토목공학과 수공업 졸업(박사)
2004년~2008년 2월 충남대학교 산업기술연구소 연구원
2008년 3월~현재 한국수자원공사 Kwater 연구원 위촉연구원



이 상 진
1995년 부산대학교 토목공학과 졸업(학사)
2004년 부산대학교 토목공학과 수공학 졸업(박사)
2002년~현재 한국수자원공사 Kwater 연구원 책임연구원



노 준 우

1996년 경북대학교 토목공학과 졸업(학사)

1998년 경북대학교 토목공학과 석사

2003년 콜로라도 주립대

(Colorado state univ.) 졸업 (박사)

2004년~현재 한국수자원공사 Kwater연

구원 선임연구원