

## GIS 기반 유역 배수 밀도의 공간분포도 작성

# Mapping the Spatial Distribution of Drainage Density Based on GIS

김주철\* · 이상진\*\*

Kim, Joo Cheol · Lee, Sang Jin

### 要 旨

하천에 의하여 지면이 절개되는 정도로 정의되는 배수밀도는 유역의 형태학적 응답을 포괄적으로 반영하는 자연 지형의 근본적인 특성으로 알려져 있다. 본 연구에서는 배수밀도에 대한 통계학적 접근방법을 기반으로 해당 지형 인자의 공간적 변동성을 분석하고 이로부터 배수밀도의 공간적 변동성을 도시할 수 있는 방법을 제시하였다. 지표면 유하거리의 통계학적 특성을 분석해 본 결과 이 지형인자는 고도의 공간적 변동성으로 대표되는 자연지형의 고유한 특성들 중 하나임을 확인할 수 있었다. 이로부터 본 연구에서 제시한 분포도 형태의 배수밀도는 고전적인 정의의 배수밀도보다 유용한 도구가 될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 배수밀도, 공간적 변동성, 유역 분포도, GIS

### Abstract

Drainage density, defined as the degree to which a landscape is dissected by streams, is a fundamental property of natural terrain that reflect the comprehensive morphologic response of watershed. In this study the spatial variability of drainage density is analyzed by statistical approach to it and its plotting method is proposed. Overland flow length is confirmed to be a highly variable spatial factor from the result of statistical analysis. Distribution map of drainage density based on spatial autocorrelation length in this study would be a superior tool to the classical definition of drainage density.

Keywords : Drainage Density, Spatial Variability, Distribution Map, GIS

### 1. 서 론

Horton(1945)이 제안한 바 있는 고전적 지형인자인 배수밀도(drainage density)는 자연유역의 형상(form)을 정량화하기 위하여 고안된 수문지형학(hydrogeomorphology) 분야의 지표이다. 하천에 의하여 지면이 절개(切開; dissection)되는 정도로 정의되는 이 지형인자는 기후(climate)나 지질(geology) 및 기복(relief) 등과 같은 복합적인 작인(作因, agent)들에 대한 유역의 형태학적 응답을 포괄적으로 반영하는 자연지형의 근본적인 특성으로 알려져 있다(Turker et al, 2001). 따라서 지금까지 배수밀도와 기후/식생피복과의 관계, 토양/암반특성과의 상관성 혹은 지면의 진화과정과의 역학기구(mechanism) 등에 관한 연구가 여러 학자들에 의하여 지속적으로 수행되어 오고 있다(Melton, 1958; Madduma Bandara, 1974; Moglen et al., 1998).

Gregory and Walling(1968)은 “자연하천의 패턴과 배열은 배수계(drainage system)의 효율성을 결정한다.”라는 Gray의 주장을 인용하여 배수밀도의 중요성을 강조한 바 있다. 이러한 주장은 배수밀도와 물 입자의 지표면 유하거리(overland flow length)와의 밀접한 상관성에 기반을 둔 것으로 유사한 규모(scale)의 두 유역이 개별적인 배수밀도를 가질 경우에 대한 고려로부터 그 의미를 검토해 볼 수 있다. 만약 면적이 동일한 두 유역이 서로 다른 하천 총 연장을 갖는다면 이들은 동일한 조건의 강우유입량에 대하여 상이한 유출응답을 나타낼 수 있음을 쉽게 예상할 수 있다. 유역의 배수 구조를 구성하는 하천망(channel network)과 구릉지사면(hill-slope)의 상호작용은 유출현상을 지배하는 주요한 성분으로서 이들의 상대적인 규모는 해당 유역의 유출특성에 본질적으로 영향을 미치게 된다. 배수밀도는 이러한 유출현상의 상호작용이 갖는 상대적인 규모와

2009년 10월 20일 접수, 2009년 11월 24일 채택

\* 한국수자원공사 Kwater연구원 연구원, 공학박사(kjoocheol@hanmail.net)

\*\* 교신저자 · 정회원 · 한국수자원공사 Kwater연구원 책임연구원, 공학박사(sjlee@kwater.or.kr)

이로부터 파생되는 상이한 유출특성의 차이를 해당 지역의 형태학적 특성으로부터 정량적으로 계량할 수 있는 지형인자로서 수문지형학 분야에서 그 역할이 주목되고 있다(Tucker and Bras, 1998; Tucker et al., 2001). 이와 관련한 주요한 연구 성과로서 Gupta et al.(1980)은 차수별 배수밀도에 대한 고려로부터 지표면의 차수별 평균유하거리를 평가하여 지형학적 순간 단위도 모형(Rodríguez-Iturbe and Valdes, 1979)의 구조 속에 지표면 유동과정이 포함되도록 하였다. 또한 최근 GIS를 기반으로 한 지리정보처리기술의 발달을 배경으로 D'odorico and Rigon(2003)과 Di Lazzaro (2008, 2009) 등은 DEM을 이용하여 pixel별 지표면 유하거리와 하천거리를 산정하고 이들의 통계학적 특성에 대한 분석으로부터 유역의 전반적인 유출현상에 지표면 유하과정이 미치는 영향을 강조한 바 있다.

현재 자연유역의 배수밀도 산정과 관련하여 주로 1) 종이지도나 DEM(Digital Elevation Model)을 기반으로 한 신뢰성 있는 하천 총 연장의 산정 및 2) 배수밀도의 공간적 변동성에 대한 해석 등이 최대의 난점으로 지적되고 있다(Gregory and Walling, 1968; Tucker et al., 2001). 전자의 경우 GIS(Geographic Information System) 및 R/S(Remote Sensing) 기술의 지속적인 발전과 함께 고해상도(high resolution) 기초자료의 공급을 통하여 향후 상당 부분의 개선이 기대되고 있다. 하지만 후자는 Horton(1945)이 제시한 공간 평균적 형태의 배수밀도에 대한 정의와 직접 관련되는 사안으로 고전적인 지형인자에 대한 새로운 방식의 접근을 요구하고 있다.

비교적 최근 김주철과 김제한(2007a, 2007b)은 DEM으로부터 산정된 국부경사(local slope)의 공간분포특성을 기반으로 신뢰성 있는 하천망 추출을 위한 경사면적한계기준(slope-area threshold)을 제시한 바 있다. 여기서 이들은 유역규모의 지형자료들이 갖는 엄청난 규모의 공간적 변동성을 언급한 바 있는데 전술한 pixel별 지표면 유하거리 역시 유사한 거동특성이 기대된다. 이에 따라 본 연구에서는 Tucker et al.(2001)이 제시한 배수밀도에 대한 통계학적 접근방법을 소개하고 이로부터 배수밀도의 공간적 변동성을 도출할 수 있는 방법을 제시해 보고자 한다. 여기서 '통계학적 접근 방법'이라 함은 DEM으로부터 산정된 pixel별 지표면 유하거리를 일종의 공간무작위함수(spatial random function)로 취급함을 의미하는 것으로 본 연구에서는 이의 공간적 변동성을 통계학적으로 분석하여 배수밀도의 공간적 변동성에 대한 추론을 수행하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 이들에 대한 자기상관

(autocorrelation) 분석을 통하여 해당 계열자료의 공간 상관거리를 추정하고 이를 기반으로 pixel별 지표면 유하거리를 재분류하여 일관성 있는 지표면 유하거리의 공간적 변동성을 도면의 형태로 표현해보고자 한다. 이러한 시도는 대상유역에 대하여 단일한 수치의 형태로 정의되는 배수밀도를 공간적 변동성을 반영한 분포도의 형태로 제시하고자 하는 것으로 GIS를 기반으로 한 수문지형학 분야에 의미 있는 수단을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 배수밀도와 지표면 유하거리

### 2.1 배수밀도의 정의

배수밀도는 대수적으로 다음과 같이 표현되어진다(Horton, 1945; Bras, 1990).

$$D_d = \frac{L_T}{A} \quad (1)$$

여기서 우변의  $L_T$ 는 하천의 총 연장 그리고  $A$ 는 유역면적으로서 좌변의 배수밀도  $D_d$ 는 길이의 역수 차원을 갖는다. Eq. (1)은 유역의 단위면적 당 하천 총 연장을 나타내는 지형인자로서 만약 이를 유역 전반에 걸쳐 일정하게 가정할 경우 유역 내 물 입자의 평균 지표면 유하거리  $\bar{L}_h$ 는 다음과 같이 산정할 수 있게 된다(Horton, 1945; Bras, 1990).

$$\bar{L}_h = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{D_d} \right) \quad (2)$$

Eq. (2)로부터 유역의 배수밀도가 증가할수록 지표면 유하거리는 감소하게 됨을 알 수 있다. 이는 하천망이 발달된 유역일수록 전반적인 유출현상에 대하여 지표면 이동경로가 차지하는 비중이 작음을 암시한다. 또한 지표면과 하천의 유하속도 사이에는 비교적 큰 규모의 차가 존재할 수 있음이 여러 학자들에 의하여 지적되고 있다(van der Tak and Bras, 1990; D'odorico and Rigon, 2003; Di Lazzaro, 2009). 이러한 사항들은 하천과 지표면 유하거리의 상대적인 규모가 유역의 유출현상을 지배하는 중요한 지형특성임을 나타내는 것으로 Eqs. (1) and (2)는 배수 구조를 기반으로 하여 이러한 유역의 상이한 유출특성에 대한 체계적인 접근수단을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 배수밀도의 공간적 변동성

Eqs. (1) and (2)는 배수밀도의 동질성(homogeneity)을 기반으로 한 지형인자들이다. 즉 Eq. (2)로부터 산정되는 지표면 유하거리는 유역 내 임의 지점에서 출발한 물 입자가 하천에 도달하기 위하여 유하해야 하는 평균경로의 길이를 의미하게 된다. 하지만 D'odorico and Rigon(2003) 및 Di Lazzaro(2008) 등은 DEM으로부터 pixel별로 산정한 지표면 유하거리에 대한 분석을 통하여 자연유역의 배수경로에는 대규모의 이질성(heterogeneity)이 존재함을 제시한 바 있다. 이는 전술한 지표면 유하거리의 공간적 변동성이 결코 무시할 수 없는 자연지형의 근본적인 특성 중의 하나임을 의미하는 것으로 배수밀도와 지표면 유하거리 사이의 관계를 Eq. (2)보다는 Eq. (3)과 같이 다루는 것이 보다 합리적임을 나타낸다.

$$D_d \propto \frac{1}{L_h} \quad (3)$$

이와 관련하여 Tucker et al.(2001)은 DEM으로부터 산정된 지표면 유하거리를 일종의 무작위변수(random variable)  $L_h$ 로 취급하여 다음과 같은 통계학적 관계식을 제안한 바 있다.

$$E[L_h^R] = \int_0^\infty L_h^R p(L_h) dL_h \quad (4)$$

여기서  $E[\cdot]$ 는 기대치 연산자이고  $p(L_h)$ 는  $L_h$ 에 대한 확률밀도함수이다. Eq. (4)는  $L_h$ 의  $R$ 차 모멘트를 의미하는 것으로 Eq. (2)를 일반화할 경우 얻을 수 있는 관계식임을 확인할 수 있다. 또한 이들은  $L_h$ 를 일종의 공간계열(spatial series)자료로 가정하여 Eq. (5)와 같은 공간적 자기상관 구조를 제시하였다.

$$Cov(\lambda) = E[L_h(x)L_h(x+\lambda)]; \lambda = |\lambda| \quad (5)$$

여기서  $Cov(\cdot)$ 는 공분산 연산자이고  $x=(x,y)$ 는 임의 지점의 좌표 그리고  $\lambda$ 는  $L_h$ 의 공간상관거리로서 Eq. (5)는  $L_h$ 의 자기상관성의 범위를 정의하게 된다.

Eqs. (4) and (5)는 지리정보처리기술의 발전을 토대로 하여 제시된 Eqs. (1) and (2)에 대한 새로운 형태의 접근방법으로 볼 수 있다. 특히 Eq. (5)의 경우 유역규모의 지형자료들이 갖는 엄청난 규모의 공간적 변동성

(Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995; 김주철과 김재한, 2007a, 2007b)을 다루기 위한 이론적 혹은 실무적 배경을 제시하는 주요한 관계식임을 확인할 수 있다.

2.3 지표면 유하거리의 산정

DEM을 기반으로 한 유역의 지형분석과정에는 일반적으로 8방향 모형이 자주 적용된다(김주철과 김재한, 2007a). 8방향 windows 상의 최급하향경사를 따라 모든 pixel들에 대한 배수경로가 결정되면 해당 pixel들의 유역출구까지의 유하거리가 일관성 있게 산정될 수 있다. Tucker et al.(2001)은 상기한 과정을 통하여  $L_h$ 를 계량하는 방법을 Fig. 1과 같이 제안한 바 있다. 여기서 pixel 내부의 화살표는 8방향 windows 상에서 정의되는 흐름방향이고 아래 부분의 검은 pixel들은 수로를 나타낸다. 이에 따라 굵은 선으로 표시된 화살표의 길이는 \*지점의  $L_h$ 에 해당하게 됨을 알 수 있다. 즉, 유역내 임의 지점에 떨어진 물의 유동은 굵은 실선의 지표면 유동에 의해 빗금 부분의 하천까지 이동하게 되며, 다시 빗금부분의 하천 유동에 의해 유역 출구점까지 유하하게 된다. 만약 동일한 절차에 따라 고려하는 정의역 내 모든 pixel들에 대한  $L_h$ 를 산정하여 적절한 축척에 따라 도상에 도시할 경우 이는 Eq. (3)의 정의에 따라 본질적으로 배수밀도의 공간 분포도와 일치하게 됨을 알 수 있다(Tucker et al., 2001).

2.4 지표면 유하거리의 공간적 변동성 분석

본 연구에서는 전 절에서 소개한 방법에 따라 대상유역 내 포함되는 모든 pixel들에 대하여  $L_h$ 를 산정하고 이를 기반으로 Eq. (4)에 의한 배수밀도의 통계학적 특

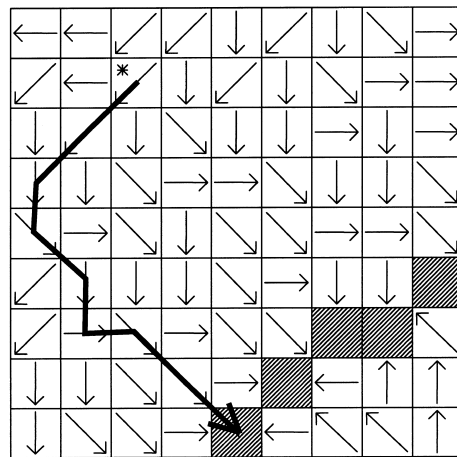


Fig. 1. Hill-slope Flow Path Length

성분석을 시도하였다. 또한 동일한 자료를 공간계열자료로서 가정하여 Eq. (5)에 의한  $L_h$ 의 공간상관거리  $\lambda$ 를 도출하여 보았다. 이는 임의 지점에 대한  $L_h$ 가 주변 지점의  $L_h$ 와 상관성을 갖는 범위 혹은 영향반경을 정의하는 것으로 대규모의 공간적 변동성을 나타내는 지형인자들을 재분류(binining)하기 위한 일관성 있는 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 Arc Info의 Grid module 내에서 운용되는  $\lambda$ 를 영향반경으로 한 원형 moving windows(Focal Mean operator)를 이용하여 대상유역 내 모든 pixel들에 대한 이동평균(moving average)을 산정하고 이를 도상에 도시하여  $L_h$ 의 공간적 변동성 분석에 적용하였다. 실제  $\lambda$ 의 추정을 위한 자기상관분석에는 범용통계 package인 Minitab을 적용한다.

### 3. 적용 및 고찰

#### 3.1 대상유역의 개요

본 연구에서는 대상유역으로 금강 수계에 위치한 국제수문개발계획(IHP) 시험유역인 보청천 유역(Fig. 2)을 선정하였다. 보청천 유역은 북위 36° 5'에 위치한 우리나라 중부의 구릉지로 금강유역의 약 5%에 해당하는 중소규모의 유역이다. 대부분 산지로 형성되어 있어 유역의 평균 고도는 높은 편이며 유역의 경계부는 높고 하천을 중심으로 좌우안은 평탄하다. 현재 유역 내부에는 총 5개의 수위관측소가 운영 중에 있으며 그 위치는 Fig. 2와 같다. 이들은 상류로부터 본류를 따라 산성, 이평, 기대, 산계지점의 순으로 위치하고 있으며 이외는 개별적으로 지류 유역이 이평~기대 구간 사이에 위치한 탄부지점을 통하여 측방유입하고 있다.

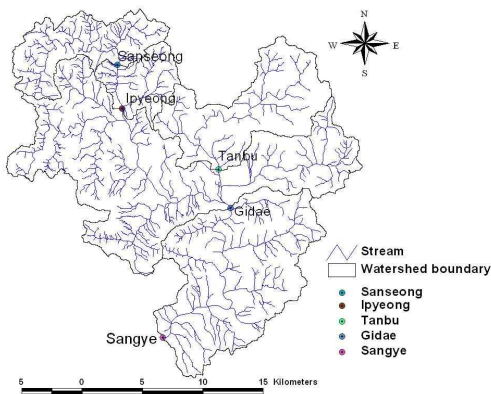


Fig. 2. Drainage map of Bocheong watershed

#### 3.2 지표면 유하거리의 공간적 변동성

대상유역에 대한 배수밀도 및 지표면 유하거리를 산정하기 위하여 GIS를 기반으로 한 지형분석을 수행하였다. DEM의 생성에는 국립지리원에서 발행한 1/25,000 축척의 수치지도를 적용하였고 pixel의 해상도는 20×20m로 하였다. Fig. 2에 도시된 하천망은 수치지도에서 추출한 하천선(blue line)으로서 본 연구에서는 별도의 하천망 추출작업을 거치지 않고 이를 분석에 직접 적용하였다. 현재 DEM을 기반으로 한 하천망의 추출에는 면적한계기준(O'Callaghan and Mark, 1984)이나 경사-면적한계기준(Montgomery and Dietrich, 1989)과 같은 방법들이 제시되고 있다. 하지만 이 방법들에 대한 신뢰도나 적용성 평가는 아직 수문지형학 분야의 큰 숙제로 남겨져 있다(Montgomery and Dietrich, 1988; 김주철과 김재한, 2007a, 2007b). 이는 하천 총 연장의 신뢰성을 기반으로 한 본 연구의 결과가 하천망 추출에 적용된 기법에 종속적일 수 있음을 시사하는 것으로 본 연구에서는 객관성 있는 결과의 제시를 위하여 Fig. 2의 하천망을 별도의 전처리 없이 분석에 적용하여 보았다.

Table 1은 대상유역 내 위치한 각 수위관측소 지점을 출구로 하는 소유역별 배수밀도  $D_d$ 와 평균 지표면 유하거리  $\bar{L}_h$ 를 이들에 대한 고전적 정의인 Eqs. (1) and (2)로부터 산정한 결과로서 전술한 바와 같이 유역의 상·하류 간에 걸친 두 지형인자의 공간적 변동성을 확인할 수 있다. 주목되는 사항은 지류유역인 탄부유역의 이질성으로서 본류구간의 상류에 위치한 두 유역(산성 및 이평유역)의 배수밀도와 약 2배의 차이를 보여준다. 결국 상기한 대상유역의 상·하류 간에 걸친 지형특성의 변동성은 이러한 상류 지역들의 지형학적 이질성이 본류를 따라 합류하면서 나타나는 것으로 판단된다.

Figs. 3 and 4는 최급하향경사에 따라 DEM으로부터 결정된 대상유역 내 모든 pixel들의 배수경로를 Fig. 2의 하천망을 기준으로 하천길이와 지표면 유하거리로 분할해 본 결과이다. 여기서 하천길이의 경우 상류로부

Table 1. Drainage Density and Overland Flow Length of 5 Sub-basins

	$A(km^2)$	$L_T(km)$	$D_d(km^{-1})$	$\bar{L}_h(km)$
Sanseong	49.10	98.92	2.01	0.25
Ipyeong	76.30	149.75	1.96	0.25
Tanbu	77.51	79.04	1.02	0.49
Gidae	354.13	544.06	1.54	0.33
Sangye	485.21	749.62	1.54	0.32

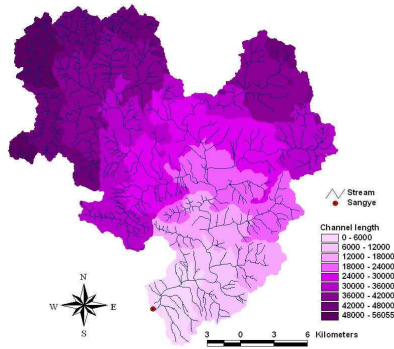


Fig. 3. Channel Length Distribution

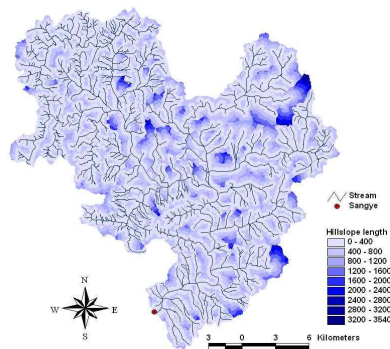


Fig. 4. Overland Flow Length Distribution

터 하류 방향으로 진행하면서 일관성 있게 증가하는 경향을 Fig. 3으로부터 분명하게 확인할 수 있다. 하지만 지표면 유하거리  $L_h$ 의 경우 대상 pixel의 유역 내 공간적 위치와는 독립적으로 무작위한 형태의 분포를 나타냄을 Fig. 4에서 발견할 수 있다. 이로부터  $L_h$ 는 상당한 규모의 공간적 변동성을 가진 지형인자임을 확인할 수 있다.

Table 2는 Fig. 4에 도시된 pixel별  $L_h$ 의 통계학적 특성을 소유역별로 산정해 본 결과로서 2열의 평균에 대한 산정결과가 주목된다. 이는 Eq. (4)에 따라 통계학적으로 산정된 값으로서 Table 1 5열에 수록된 고전적인 방법에 의한 결과와 유사한 값을 나타내고 있다. 하지만 3열과 4열의 표준편차 및 변동계수와 5열과 6열의 최소 및 최대값에 대한 산정결과로부터 이 지형인자의 공간적 변동성은 결코 무시할 수 없는 지형특성임을 재차 확인할 수 있다. 흥미로운 사항은 5개 소유역 중 지류유역에 해당하는 탄부유역에 대한 산정결과로서 비슷한 규모(혹은 면적)의 본류유역인 이평유역에 대한 결과와 상이한 특성을 나타내고 있음을 볼 수 있

Table 2. Statistical Properties of Overland Flow Length of 5 Sub-basins

	mean (km)	St. Dev. (km)	Coe. Variation	min (km)	max (km)
Sanseong	0.258	0.265	1.03	0.000	1.627
Ipyeong	0.288	0.309	1.08	0.000	2.404
Tanbu	0.509	0.509	1.00	0.000	3.540
Gidae	0.375	0.390	1.04	0.000	3.540
Sangye	0.373	0.386	1.03	0.000	3.540

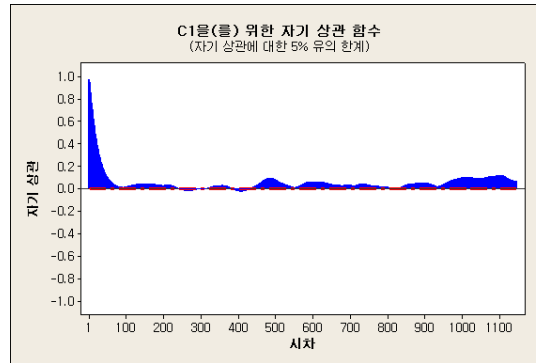


Fig. 5. Autocorrelation of Overland Flow Length(Minitab)

다. 이는 두 유역에 동일한 조건의 강우유입량이 발생할 경우 이들이 서로 비슷한 규모의 유역들임에도 불구하고 개별적인 형태의 수문학적 응답특성을 나타낼 것을 암시하는 것으로 본 연구에서 제시한 Figs. 3 and 4 및 Table 2와 같은 분석결과는 배수구조의 형태에 따른 유역의 유출특성분석에 있어 매우 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 지표면 유하거리의 공간분포도 작성

Fig. 4에 도시된 pixel별  $L_h$ 에 대하여 자기상관분석을 수행하였다. Fig. 5는 범용 통계 package인 Minitab을 이용하여 해당 계열자료의 자기상관함수를 산정해 본 결과로서 유의한 공간상관거리  $\lambda$ 는 약 4.8km 정도인 것으로 나타났다.

Fig. 5에서 산정된  $\lambda$ 를 영향반경으로 하는 원형 moving windows를 이용하여 대상유역 내 모든 pixel들에 대한 이동평균(moving average)을 산정하여 보았다. Fig. 6은 이를 도상에 도시해본 결과로서 Fig. 4에 비하여 유역 전반에 걸쳐 일관성 있는  $L_h$ 의 변동성을 시각적으로 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 이는 Eq. (3)의 관계로부터 대상유역에 대한 배수밀도의 공간분

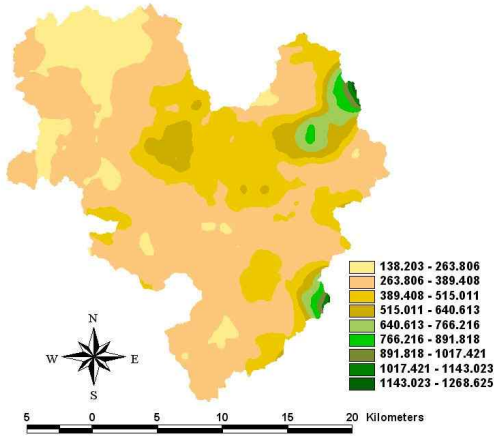


Fig. 6. Distribution Map of Overland Flow Length

포도와 개념적으로 일치한다. 따라서 유역의 배수밀도는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 공간적 변동성을 결코 무시할 수 없는 지형인자인 것으로 판단된다. 따라서 향후 유역의 수문지형학적 분석에 있어 Eq. (1)과 같이 정의되는 고전적인 정의의 배수밀도보다는 본 연구에서 제시하는 Fig. 6과 같은 분포도 형태의 배수밀도가 보다 유용한 도구가 될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 GIS를 기반으로 산정된 pixel별 지표면 유하거리의 거동특성에 대하여 통계학적 방법에 따라 접근하여 고전적 지형인자인 배수밀도의 공간적 변동성에 대한 추론을 수행하여 보았다. 또한 동일한 자료를 공간계열자료로 가정하여 자기상관범위를 추정하고 이를 기반으로 pixel별 지표면 유하거리를 재분류하여 해당 지형인자의 공간적 변동성을 일관성 있게 반영할 수 있는 분포도의 작성을 시도하여 보았다. 이상으로부터 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

1) 대상유역 내 소유역별 배수밀도와 평균 지표면 유하거리를 이들에 대한 고전적 정의에 따라 산정해 본 결과 유역의 상하류 간에 걸친 두 지형인자의 공간적 변동성을 확인할 수 있었다. 주목되는 사항은 지표유역인 탄부유역의 이질성으로서 상기한 대상유역의 상하류 간에 걸친 지형특성의 변동성은 상류 지역들의 지형학적 이질성이 합류하면서 나타나는 것으로 판단할 수 있었다.

2) 모든 pixel들의 배수경로를 하천길이와 지표면 유하거리로 분할하여 도시한 분포도로부터 하천길이의

경우 상류로부터 하류 방향으로 진행하면서 일관성 있게 증가하는 경향을 발견할 수 있었다. 하지만 지표면 유하거리의 경우 무작위한 분포를 나타냄을 발견할 수 있어 상당한 규모의 공간적 변동성을 가진 지형인자임을 확인할 수 있었다.

3) 지표면 유하거리의 통계학적 특성을 분석해 본 결과 이 지형인자의 공간적 변동성은 결코 무시할 수 없는 지형특성임을 재차 확인할 수 있었다. 흥미로운 사항은 동일한 지역 내의 비슷한 규모의 소유역들이 상이한 특성을 나타내는 것으로 이는 두 유역에 동일한 조건의 강우유입량이 발생할 경우 개별적인 형태의 수문학적 응답특성을 나타낼 것을 암시한다. 따라서 본 연구에서 제시한 분석결과는 이러한 배수구조의 형태에 따른 유역의 유출특성분석에 있어 매우 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 지표면 유하거리의 공간상관거리를 기반으로 해당 지형인자의 일관성 있는 변동성을 도시하여 보았다. 이로부터 배수밀도는 공간적 변동성을 결코 무시할 수 없는 지형인자인 것으로 판단되었다. 향후 유역의 수문지형학적 분석에 있어 고전적인 정의의 배수밀도보다는 본 연구에서 제시한 분포도 형태의 배수밀도가 보다 유용한 도구가 될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(1-6-3)에 의해 일부 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 김주철, 김재한(2007a), "DEM을 이용한 수로망의 형태학적 표현", 한국수자원학회논문집, 40(4), 287-297.
2. 김주철, 김재한(2007b), "배수밀도와 수원유역의 기하학적 특성을 기반으로 한 배수구조에 대한 해석", 한국수자원학회논문집, 40(5), 373-382.
3. Bras, R. L.(1990), Hydrology-An introduction to hydrologic science, Addison Wesley, 574.
4. D'odorico, P., and Rigon, R.(2003), "Hillslope and channel contributions to the hydrologic response", Water Resources Research, 39(5), 1113. doi:10.1029/2002WR001708.
5. Di Lazzaro, M.(2008), "Correlation between channel and hillslope lengths and its effects on the hydrologic response", Journal of Hydrology, 362,

- 260-273.
6. Di Lazzaro, M.(2009). "Regional analysis of storm hydrographs in the rescaled width function framework". *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.04.027.
  7. Gregory, K. K. and Walling, D. E.(1968) "The variation of drainage density within a catchment", *BULL INT ASS SCI HYDROL*, 13(2), 61-68.
  8. Gupta, V. K., Waymire, E. and Wang, C. T.(1980), "A Representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology", *Water Resources Research*, 16(5), 855-862.
  9. Horton, R. E.(1945), "Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology", *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370.
  10. Ijjasz-Vasquez, E. J. and Bras, R. L.(1995), "Scaling regimes of local slope versus contributing area in digital elevation models", *Geomorphology*, 12, 299-311.
  11. Melton, M. A.(1958), "Correlation structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents", *Journal of Geology*, 66, 442-640.
  12. Madduma Bandara, C. M.(1974), "Drainage density and effective precipitation", *Journal of Hydrology*, 21, 187-190.
  13. Moglen, G. E., Elthair, E. A., and Bras, R. L.(1998), "On the sensitivity of drainage density to climate change", *Water Resources Research*, 34(4), 855-862.
  14. Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E.(1988), "Where do channels begin?", *Nature*, 336, 232-234.
  15. Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E.(1989), "Source area, drainage density, and channel initiation", *Water Resources Research*, 25(8), 1907-1918.
  16. O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M.(1984), "The extraction of drainage networks from digital elevation data", *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, 324-344.
  17. Rodríguez-Iturbe, I. and Valdes, J. B.(1979), "The geomorphologic structure of hydrologic response", *Water Resources Research*, 15(6), 1409-1420.
  18. Tucker, G. E. and Bras, R. L.(1998), "Hillslope process, drainage density and landscape morphology", *Water Resources Research*, 34(10), 2751-2764.
  19. Tucker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A. and Bras, R. L.(2001), "Statistical analysis of drainage density from digital terrain data", *Geomorphology*, 36, 187-202.
  20. van der Tak, L.D., and Bras, R.L.(1990). "Incorporating hillslope effects into the geomorphologic instantaneous unit hydrograph", *Water Resources Research*, 26(10), pp.2393-2400.