수문인자추출에서의 SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model) 적용성 평가: 대동강 및 금강 지역 사례연구

Evaluating Applicability of SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model) in Hydrologic Analysis: A Case Study of Geum River and Daedong River Areas

허용구* · 유승환*†

Her, Younggu · Yoo, Seung-Hwan

ABSTRACT

Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model (SRTM DEM) offers opportunities to make advances in many research areas including hydrology by providing near-global scale elevation measurements at a uniform resolution. Its wide coverage and complimentary online access especially benefits researchers requiring topographic information of hard-to-access areas. However, SRTM DEM also contains inherent errors, which are subject to propagation with its manipulation into analysis outputs. Sensitivity of hydrologic analysis to the errors has not been fully understood yet. This study investigated their impact on estimation of hydrologic derivatives such as slope, stream network, and watershed boundary using Monte Carlo simulation and spatial moving average techniques. Different amount of the errors and their spatial auto-correlation structure were considered in the study. Two sub-watersheds of Geum and Daedong River areas located in South and North Korea, respectively, were selected as the study areas. The results demonstrated that the spatial presentations of stream networks and watershed boundaries and their length and area estimations could be greatly affected by the SRTM DEM errors, in particular relatively flat areas. In the Daedong River area, artifacts of the SRTM DEM created sinks even after the filling process and then closed drainage basin and short stream lines, which are not the case in the reality. These findings provided an evidence that SRTM DEM alone may not enough to accurately figure out the hydrologic feature of a watershed, suggesting need of local knowledge and complementary data.

Keywords: SRTM DEM; DEM error; elevation; slope; watershed delineation; stream network

1. 서 론

수문과정은 기상, 지형, 토지이용, 토양 등의 인자들이 복합적으로 작용하는 자연인문현상으로, 그 과정의 기작을 규명하고 결과를 예측하기 위해서는 수문에 대한 이해뿐만 아니라 다양한 지리정보가 필요하다. 특히, 유역의 면적, 하천망 및 경사도는 수문 과정을 결정하는 중요한 지형인자들로 이들의 정확도는 수문해석 결과에 직접적인 영향을 미친다 (Beven and Kirkby, 1979; van Zyl, 2001; Ludwig and Schneider, 2006; Taramelli et al., 2008). 일반적으로 수문지형인자들은 수치표고모형 (Digital

Elevation Model: DEM)으로 부터 추출되는데, 이러한 지형자료 및 모형은 축척, 원자료의 특징 및 측정방법에 따라 다양한 크기와 종류의 오차를 포함하고 있다. 이러한 오차는 지상검증자료 (ground truths) 또는 표준자료 (reference 또는 standard data)와의 비교를 통하여 파악될 수 있으나, 수문해석에서는 편의상 오차를 무시하는 것이 일반적이다. 하지만 사용하는 자료가 공식적인 오차를 포함하고 있을 때, 이들 오차가 분석 결과에 미치는 영향을 규명하는 것은 최종 산출물의 신뢰성을 높이는데 도움을 줄 수 있다. 특히 그 영향에 대한 정량적 분석은 해당 자료의 적용성을 평가하고 수문연구를 위한 최선의 자료를 선정하는데 유용한 정보를 제공할 수 있다 (Loague et al., 1998; Carlisle, 2005; Fisher and Tate, 2006; Wechsler, 2007).

최근 GIS (Geographic Information System) 및 RS (Remote Sensing) 기술 등의 지리정보 처리능력의 발달로 이러한 지형인자들은 다양한 공간자료로부터 추출이 가능해졌다. LANDSAT 영상이 1972년부터 전지구적 범위에서 일관된 정밀도 (precision)

* Department of Agricultural and Biological Engineering, Purdue University

† Corresponding author Tel.: +1-765-409-8507

Fax: +1-765-496-1115

E-mail: seunghwan.yoo@gmail.com

2013년 7월 30일 투고

2013년 10월 18일 심사완료

2013년 10월 22일 게재확정

의 토지피복정보를 제공하는 것과는 달리 (Markham et al., 2004), 지형정보는 필요에 따라 각 지역의 지형도에서 수작업을 통해 추출하거나 수치지도화를 통하여 연구에 활용된다. 이로 인하여 대유역 또는 광범위한 지역에서는 그 자료들의 정밀도 및 정확도 (accuracy)가 일관되지 않는 문제가 있다. 이러한 점에서 2000년 2월 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)의 성공은 최초로 지구대륙 대부분 지역의 지형정보 (DEM 등)를 동일한 정밀도로 제공함으로써 수문해석을 비롯한 다양한 지구과학 연구 및 응용 분야에 큰 발전을 가져왔다 (Rabus et al., 2003; Farr et al., 2007). 특히 접근 및 자료획득이 어려운 지역의 수문연구가 보다 용이해져 비용절감뿐만 아니라 해당연구의 신뢰성 향상 또한 기대되며 수문연구에서 SRTM DEM의 활용도가 더 커질 것으로 예상된다.

SRTM DEM 또한 일종의 센서를 통해 관측된 원격탐사의 결과물로 다른 지리정보자료와 마찬가지로 오차를 포함하고 있다. SRTM DEM의 오차는 지역의 위치 및 지형의 특성 (평야 또는 산악)에 따라 그 정도와 범위가 다른 것으로 알려져 있다 (Rodriguez et al., 2005). 특히 SRTM의 탐사방식인 InSAR (Interferometer Synthetic Aperture Radar)는 산지지형에서는 관측 사각이, 평지에서는 반사 신호 감소가 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이로 인하여 생기는 자료공백 (void)은 여러 알고리즘을 이용하여 보정된다 (Hall et al., 2005; Grohman et al., 2006; Hoffmann and Walter, 2006). 한편 DEM은 좌표 (projection) 및 해상도 변환 (aggregation/interpolation) 등의 처리과정을 거칠 때 정오차 (systematic error)가 발생하게 된다. 이러한 오차들은 여러 통계치를 이용하여 정량화할 수 있으며, 보통 평균제곱근오차 (Root Mean Squared Error, RMSE)로 표현된다 (Holmes et al., 2000; USGS, 2009). 예를 들어, 미국지질조사국 (United States Geological Survey, USGS)은 National Elevation Dataset (NED)의 오차를 평균제곱근오차 2.4 m, 오차범위 -42.64 ~ +18.7 m로 보고하고 있다 (USGS, 2009). RMSE와 같은 단일수치는 해당 자료의 평균적인 오차를 나타내는 데는 용이하지만, 그들의 공간분포특성을 표현하는데 한계가 있어 Moran's I나 variogram과 같은 지구통계학적 (geo-statistical) 지수가 이용되기도 한다 (Aerts et al., 2003; Goodchild, 1980; Fisher, 1991; Fisher, 1998).

DEM 자료 자체 뿐만 아니라 그 오차는 높은 공간자기상관 (spatio-autocorrelation) 관계를 가지고 분포되어 있는 것으로 알려져 있다 (Legendre, 1993; Bolstad and Stowe, 1994; Hunter et al., 1995; Hunter and Goodchild, 1997). 이에 DEM을 모의할 때에 이러한 지형 및 그 오차의 공간자기상관을 고려할 수

있는 방법들이 고안되었는데, Goovaerts (1997)와 Deutsch et al. (1998)이 제안한 순차모의 (sequential simulation)와 Wechsler and Kroll (2006)이 제안한 커널 (kernel)을 이용한 공간이동평균법 (spatial moving average)이 대표적이라 할 수 있다. 순차모의는 해당 자료의 공간분포특징을 묘사하는 variogram을 이용하여 오차를 모의하는 방법으로 통계적 기법에 바탕하고 있다. 하지만 이는 알려진 오차 크기에 대한 정보를 고려할 수 없고 계산이 복잡하며 모의시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. Holmes et al. (2000)와 Delbari et al. (2009)은 DEM과 토양수분의 공간분포를 분석하기 위해 순차모의기법을 사용한 바 있다. 공간이동평균법은 표고 및 그 오차가 특정 거리 내에서 높은 상관관계에 있다고 가정한다. 이 방법은 변수의 전체적인 공간분포 특성을 고려하지 않지만, 알려진 자료의 오차 통계치를 잘 반영할 수 있으며, 계산이 비교적 간단하다는 장점이 있다. Wechsler and Kroll (2006)은 4개의 서로 다른 가중치와 커널크기 조합의 공간이동평균법을 이용해서 DEM 오차를 모의한 바 있다.

자료의 오차 (error), 편이 (bias), 지상검증자료 (ground truths) 부족 등으로 인해 공간자기상관을 정량화하는 것은 쉽지 않다 (Oksanen, 2006). 또한 오차와 자기상관정도는 지역과 자료의 종류 그리고 검증자료의 정확도에 따라 크게 달라진다 (Kyriakidis et al., 1999; Holmes et al., 2000; Gorokhovich and Voustianiouk, 2006; Rodrigues et al., 2006; Yoo et al., 2007). 따라서 산정된 오차 및 자기상관관계의 유효성은 해당지역 및 자료에만 국한되어 일반화하기 어렵다. 이러한 기술적 한계에도 불구하고, 수문해석에서 지형자료의 중요성 때문에, 수문해석 결과의 DEM 오차에 대한 민감도 연구는 계속되고 있다. Endreny and Wood (2001)은 DEM 오차가 하천망, 홍수량 및 그 빈도 계산에 미치는 영향을 조사하였고, Albani et al. (2004)는 DEM 오차를 모의하는데 있어서 커널크기와 추출된 경사도, 경사향, 곡률 (curvature) 등의 지형인자들과의 관계를 밝히고자 하였다. 한편 Lindsay (2006)은 LIDAR (Light Detection and Ranging) DEM으로부터 추출된 하천망의 해당 자료의 오차에 대한 민감도를 살펴보았다.

본 연구는 SRTM DEM에 포함되어 있는 오차가 수문인자산정에 미치는 영향을 분석하여 SRTM DEM의 적용성을 평가하고자 한다. 이를 위하여 금강과 대동강 지역의 소유역을 연구대상 지역으로 선정하고, Monte Carlo 모의와 공간이동평균기법을 이용하여 오차의 크기와 자기상관관계 고려여부에 따라 오차를 포함한 (perturbed) SRTM DEM을 모의한 다음, 이들로부터 산정된 유역면적, 하천망 및 경사도를 비교분석하였다. 본 연구결과는 향후 지형정보의 획득이 용이하지 않았던 지역의 수문연구에서 SRTM DEM이 가지고 있는 유용성과 적용한계를 보여준다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

본 연구는 여러 가지 지형 (산악, 평야 등)이 혼재한 북한 대동

Table 1 Topographic and hydrologic characteristics of the study areas

Items		Daedong River	Geum River
Topographic characteristics	Elevation (m)	Min.	0
		Max.	836
		Relief	836
	Slope (%)	Min.	0
		Max.	103.42
		Average	15.64
Hydrologic factors	Stream length (km)	280	1,570
	Watershed area (km ²)	664	3,652

강 지역의 한 소유역을 연구 대상유역으로 선정한 다음, 이와 유사한 지형을 가진 금강 지역의 한 소유역을 추가로 선정하고 각 유역으로부터의 연구결과를 비교하였다. 북한 대동강 지역은 지형자료 습득이 제한되는 지역의 한 예로써 본 연구에 활용되었다. 두 대상유역은 각각 황해남북도의 11개 시군과 충청남도 및 전라북도의 6개 시군에 위치한다. 각 대상유역은 동쪽 상류의 산림지대로부터 서쪽 하류의 평야지대 방향으로 서서히 고도가 낮아지는 지형을 가지고 있어 (Fig. 1), DEM의 오차가 수문인자에 미치는 영향을 지형별로 파악할 수 있다. 대상 유역의 지형특성을 SRTM DEM을 이용하여 분석하였으며, Table 1에 제시하였다.

2. SRTM DEM

SRTM은 미국 항공우주국 (NASA)의 Jet Propulsion Laboratory (JPL)와 National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)가

Fig. 1 Elevations and stream networks of study watersheds

공동으로 수행한 전 지구적 지형관측연구로써 2000년 2월, 11 일간의 탐사를 통해 전 지구 육지 표면의 약 80 %에 해당하는 양의 지형자료를 획득하였다 (Farr et al., 2007). SRTM은 우주왕복선 엔데버호 (Endeavour)에서 60 m의 거리를 두고 탑재된 두개의 안테나에서 송출된 레이더가 지구표면에 반사되어 돌아오는 시간, 레이더가 송출된 각과 송출위치의 지오이드 (WGS84 Datum, EGA96 geoid model)상 고도를 분석하여 반사된 표면과 레이더가 송출된 위치간의 거리를 계산하여 지구지표면의 고도가 산출하였다. 이러한 측정 기법을 InSAR라고 부르며, 구체적인 탐사의 내용 및 사용된 센서와 장비의 제원은 Farr et al. (2007)에 상술되어 있다. 이후 SRTM DEM은 2003년 일반에게 공개된 이후, CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)을 통해서 2013년 6월 현재 미국 내 지역은 30 m 해상도, 미국 외 지역은 90 m 해상도에서 제공되고 있다 (CGIAR CSI, 2013). 90 m 해상도의 SRTM DEM은 여러 차례 보완이 이루어져 현재 네 번째 버전이 일반에 공개되어 있으며, 본 연구는 이 자료를 사용하였다.

3. SRTM DEM 오차 모의발생

가. SRTM DEM 오차의 크기

SRTM DEM을 비롯한 모든 관측 자료는 오차를 가지고 있고, 이는 절대오차 및 상대오차로 구분된다. 절대오차는 어떤 알려진 기준 또는 참값과의 차이를 나타내는 반면, 상대오차는 두개의 서로 다른 지점이 가지는 오차의 상대적인 차이를 의미한다. 유역 단위의 수문분석에서는 인접하는 두 지점의 상대적인 고도의 차이로 부터 지표수의 흐름을 결정하는 경사도 및 흐름방향 등의 수문인자들이 결정되기 때문에 절대오차보다는 상대오차가 수문인자분석결과에 더 큰 영향을 미치게 된다. Yoo et al. (2007)은 금강유역 1 : 25,000 수치지형도와 SRTM DEM을 비교하여 이들 사이에는 7.8 m 정도의 차이가 있음을 보여준 바 있다. 하지만 이 결과는 SRTM DEM의 1 : 25,000 수치지형도 (reference data)에 대한 오차로, SRTM DEM에 존재하는 오차들의 상대적인 차이를 의미하는 것은 아니다. Rodriguez et al. (2006)은 SRTM DEM의 상대오차는 지형별 대륙별로 다르나, 대부분의 경우 6 m 이하임을 Kinematic GPS를 이용한 측정치와의 비교를 통해서 밝힌바 있다. 따라서 본 연구에서는 Rodriguez et al. (2006)의 결과를 바탕으로 2 m와 5 m 크기의 상대오차가 각 연구대상지역에 분포함을 가정하였다.

나. 오차의 자기상관

DEM에 존재하는 오차의 공간분포특성은 지역 및 지형에 따라 크게 달라지며, 어떤 지역에도 적용할 수 있는 범용 표준오차분

포모형은 아직 제시되지 않고 있다. 본 연구에서는 대상지역의 수치표고모형이 오차를 포함한다는 기본가정 하에 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 유역별, 오차크기별 및 오차의 공간자기상관 고려여부에 따라 각각 100개의 오차 레이어 (error layer)를 생성하고, 이를 원본 SRTM DEM (이하 oriDEM)에 중첩하여 총 800개의 오차를 포함한 perturbed SRTM DEM (이하 errDEM)을 모의하였다. 이러한 복수의 모의를 통해 다양한 조건 및 경우를 고려함으로써 단일 자료를 이용한 분석보다 더 일반화된 결과를 도출하고자 하였다.

본 연구에서는 SRTM DEM 오차가 서로 독립하여 분포하거나, 인접거리 내에서 상관관계를 가지고 분포한다는 두 기본 가정을 바탕으로 오차를 모의하였다. 오차의 공간분포가정 중 상호독립 분포가정의 경우, 정규분포 난수함수 (평균 0, 표준편차 1)에 의한 Monte Carlo 모의를 통하여 단위 오차를 생성하고, 앞서 설정한 SRTM DEM의 평균오차의 크기 (2 및 5 m)를 식 (1)과 (2)에 적용하여 상호독립오차 레이어를 모의하였다.

$$\varepsilon'_{i,j} = \left(\frac{\varepsilon_{i,j}}{\varepsilon_{\text{std}}} \right) \times \varepsilon_{\text{RMSE}} \quad (1)$$

$$e'_{i,j} = e_{i,j} + \varepsilon'_{i,j} \quad (2)$$

여기서, i 및 j 는 각각 수치표고모형의 x 및 y 좌표, ε' 는 모의된 독립분포오차, ε 는 Monte Carlo 모의에서 생성된 단위오차 또는 백색잡음 (white-noise, 평균 0), ε_{std} 는 단위오차의 표준편차, $\varepsilon_{\text{RMSE}}$ 은 가정된 SRTM DEM의 평균제곱근오차, e' 는 모의된 DEM의 표고, e 는 원본자료의 DEM 표고이다. 식 (1)과 (2)에서 보는 바와 같이 오차의 크기 (2 및 5 m)는 모의된 오차의 평균제곱근오차에 의해 표현되며 이들 오차의 평균은 항상 0이 된다.

자기상관 (auto-correlation) 가정에서는 앞서 생성된 오차 레이어에 식 (3)의 커널을 적용하고 오차를 공간이동평균하여 자기상관관계가 고려된 오차 레이어를 모의 하였다. 식 (3)은 Wechsler et al. (2006)가 제안했던 공간이동평균법으로 수치표고모형오차의 공간분포에 대한 정보가 없는 경우, 오차의 공간자기상관을 고려하기 위해 비교적 간단하게 고려할 수 있는 방법이다. 한편 3×3 보다 큰 커널은 경사도를 크게 과소 추정한다는 Albani et al. (2004)의 연구결과를 참고하여, 커널의 크기는 3×3 을 선택 하였다.

$$\varepsilon^{\text{corr}}_{i,j} = \sum_{k=-1}^1 \sum_{h=-1}^1 \varepsilon'_{i-k, j-h} / 9 \quad (3)$$

$$e''_{i,j} = \left(\frac{\varepsilon^{\text{corr}}_{i,j}}{\varepsilon^{\text{corr}}_{\text{std}}} \right) \times \varepsilon_{\text{SE}} \quad (4)$$

Table 2 Error types by study watersheds, amount of errors, and spatial distribution of errors

Study watershed	Error distribution	Size of error (m)	Case ID
Daedong River	Independent	2	D_Ind_2 m
		5	D_Ind_5 m
	Spatially auto-correlated	2	D_Sac_2 m
		5	D_Sac_5 m
Guem River	Independent	2	G_Ind_2 m
		5	G_Ind_5 m
	Spatially auto-correlated	2	G_Sac_2 m
		5	G_Sac_5 m

$$e''_{i,j} = e_{i,j} + \varepsilon''_{i,j} \quad (5)$$

여기서, ε^{corr} 은 모의된 독립분포오차에 3×3 커널을 이용하여 공간이동평균된 오차, ε_{std}^{corr} 는 공간이동평균된 오차의 표준편차, ε'' 는 공간자기상관이 고려된 모의된 오차, e'' 는 공간자기상관을 고려하여 모의된 DEM의 표고를 의미한다. 독립분포오차의 경우에서와 같이 생성된 오차분포 (ε 와 ε^{corr})를 오차의 표준편차 (ε_{std} 와 ε_{std}^{corr})로 나누어 생성한 단위 오차에 가정된 오차의 크기 (ε_{RMSE})로 곱해 원하는 크기의 오차 레이어를 생성하게 된다. 본 연구에서 고려된 오차의 크기, 오차의 공간자기상관 고려 여부 및 연구 지역에 따른 오차의 구분은 Table 2에 제시되어있다.

4. 수문인자의 추출 및 sink 처리

일반적으로 DEM에는 sink가 존재하는데, 이는 DEM에서 상류로부터 흘러내려온 흐름의 방향이 해당 지역의 최소표고지점으로 모여 밖으로 흘러나가지 않는 폐쇄성 지형 또는 유역 (closed drainage basin)을 일컫는 것으로, 카르스트처럼 실제 존재하는 지형이거나, DEM 자료의 오차로 인해 발생할 수 있다. 흐름방향을 이용한 자동 유역경계 추출 시에는 filling 알고리즘을 이용하여 sink를 메우거나 sink를 형성하는 댐 지형을 제거하는 등의 처리를 하여 수문학적으로 타당한 (hydrologically correct) DEM을 얻게 된다. 본 연구에서 SRTM DEM의 모든 sink는 ESRI사의 ArcGIS 10.1이 제공하는 fill 함수를 이용하여 제거되었는데, 이러한 filling 과정은 DEM에 첨가된 모의 오차의 특성을 변화시킨다. 이에 본 연구에서는 filling 과정 전후의 표고와 경사도를 비교하여 filling 과정이 이들에 미치는 영향을 분석하였다. 한편 본 연구는 filling된 DEM에 D8 알고리즘 (D8 Algorithm, Jensen and Domingue, 1988)을 적용하여 흐름방향을 추출하였고, 최소 배수면적 (stream networks initiation threshold area)을 가지고 있는 지점으로부터 추출된 흐름방향도를 따라 유역의 출구까

Fig. 2 Processes of simulating error layers and deriving topographic and hydrologic factors from simulated DEMs (errDEMs)

지 하천망을 정의하였다. 본 연구에서 하천망의 최소 배수면적은 250 ha로 설정되었다. 오차모의 및 수문인자추출은 ESRI사의 ArcGIS 10.1을 이용하여 수행되었으며, 오차모의 및 수문인자추출의 전체적인 과정은 Fig. 2에 흐름도로 설명되어있다.

III. 결과 및 고찰

1. 표고 및 경사도

오차의 크기, 공간 자기상관관계 고려 및 sink filling 적용 여부에 따른 연구유역의 표고 및 경사도의 통계적 특성을 분석하였다 (Table 3). 표고의 경우, 최대 및 최소를 제외한 각 통계치들은 1 m 이내의 비교적 작은 차이를 보인다. 이는 오차의 구조, 크기 및 sink filling 적용 여부는 유역의 평균적인 표고 특성에 큰 영향을 미치지 않는다는 것으로 해석할 수 있다. 독립오차 (independent)의 경우 최소표고는 filling 여부에 따라 10 m (금강 지역)에서 100 m (대동강 지역)가 넘는 큰 차이가 나타났고 최대표고는 오차의 크기에 따라 약 1.2 m (대동강 지역에서 4.7 m (금강 지역) 이내의 차이를 보였다. 한편, 자기상관오차 (spatially auto-correlated)의 경우에는 최소 및 최대표고가 오차의 크기 및 filling 여부에 따라 독립분포오차에 비해 상대적으로 일정하였다. Filling은 수치표고 모형에 존재하는 모든 sink를 제거함에 따라 최대치를 제외한 모든 표고 통계치를 증가시켰으며, 특히 최소표고에 큰 영향을 미쳤다.

경사도의 경우, 평균, 최소 및 최대를 포함한 모든 통계치들이 오차의 구조, 크기 및 filling 적용 여부에 따라 1 % 이내의 차이를 보였다. 그러나 5 m 크기의 filling 되지 않은 독립오차의 경우 상대적으로 큰 경사도를 보이는데, 특히 1분위수 (1 QT)는

Table 3 Descriptive statistics of derived elevation and slopes from simulated DEMs

Watershed	Topography	Statistics	Independent				Spatially Auto-correlated			
			2 m		5 m		2 m		5 m	
			Sim.	Filled	Sim.	Filled	Sim.	Filled	Sim.	Filled
Geum River	Elev. (m)	Min.	- 8.0	- 2.8	- 8.4	- 3.2	- 3.3	- 2.9	- 3.2	- 2.8
		1 QT	32.0	32.2	32.1	32.8	32.0	32.2	32.0	32.2
		Median	101.8	101.9	101.7	102.1	101.8	101.9	101.8	101.9
		Mean	149.6	149.8	149.6	150.1	149.5	149.7	149.5	149.7
		3 QT	223.2	223.4	223.4	223.7	223.2	223.3	223.2	223.4
		Max.	1114.0	1114.0	1114.1	1114.1	1100.0	1100.0	1100.2	1100.2
	Slope (%)	Min.	1.0	0.0	2.4	0.1	1.0	0.0	1.0	0.0
		1 QT	3.7	3.5	4.5	3.8	3.8	3.5	3.8	3.5
		Median	12.6	12.4	12.8	12.4	12.6	12.5	12.6	12.5
		Mean	16.7	16.5	17.2	16.7	16.7	16.5	16.7	16.5
		3 QT	25.7	25.6	25.8	25.6	25.7	25.7	25.8	25.7
		Max.	103.5	103.5	103.7	103.7	103.5	103.5	103.6	103.6
Daedong River	Elev. (m)	Min.	- 111.9	- 0.6	- 111.6	- 1.2	- 105.0	- 105.0	- 105.2	- 105.2
		1 QT	40.9	41.0	40.7	41.5	40.9	41.0	40.9	41.0
		Median	96.1	96.2	96.1	96.6	96.1	96.2	96.1	96.2
		Mean	127.6	127.8	127.6	128.2	127.5	127.8	127.5	127.8
		3 QT	179.1	179.3	179.3	179.5	179.1	179.2	179.1	179.2
		Max.	923.8	923.8	923.3	923.3	900.4	900.4	900.3	900.3
	Slope (%)	Min.	0.7	0.0	1.6	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0
		1 QT	3.6	3.4	4.4	3.8	3.6	3.4	3.6	3.4
		Median	9.8	9.7	10.1	9.6	9.9	9.7	9.9	9.7
		Mean	14.3	14.1	14.8	14.3	14.3	14.1	14.3	14.1
		3 QT	21.5	21.4	21.6	21.4	21.5	21.4	21.5	21.4
		Max.	108.9	108.9	109.1	109.1	108.7	108.7	108.5	108.5

다른 경우들에서 보다 평균 경사도가 1 % 이상 크게 나타났다. 일반적으로 filling과 자기상관관계를 고려하기 위한 커널의 적용은 경사도를 낮추는 결과를 낳게 되는데, 5 m의 크기로 모의된 오차가 이들 과정을 거치지 않음으로써 완만한 지역의 경사도에 상대적으로 큰 영향을 주게 되어 나타나는 현상으로 판단된다. 한편 filling이 적용되었던 모든 경우에서 최소 경사도는 0으로 나타났으며, 이는 filling이 적용되는 기작을 고려했을 때 쉽게 설명될 수 있는 현상이다.

2. 유역 경계 및 하천망도

errDEMs로부터 하천망도 및 유역경계를 추출한 후, 지역, 오차 크기 및 공간자기상관 고려 여부별로 분석하였다. Fig. 3과 4는 각 경우별로 생성된 100개의 모의된 DEM에서 각 셀이 추출된 하천망 및 유역으로 편입된 빈도의 공간분포를 나타내고 있다. 하천망도의 경우, Fig. 3에서 보는 바와 같이 유역의 하류로 내려갈수록 하천망의 변동이 증가하는 반면, 상류에서는 비교적

일관된 분포를 보인다. 이는 표고의 상대적인 차이가 적은 하류 평지의 경우 첨가된 모의 오차가 하천흐름산정에 상대적으로 큰 영향을 미치게 되어 나타나는 결과이다. 특히 금강 지역 소유역의 경우 oriDEM을 이용하여 산정된 유역경계 밖에서 하천망이 추출되는 현상을 볼 수 있는데 (Fig. 3), 이는 모의된 수치표고모형 오차가 상대적으로 일정한 표고를 가지는 유역의 출구 근처 지형의 흐름방향을 바꾸면서, 연구유역의 북쪽에 위치한 다른 유역이 편입되어 나타나는 결과이다. 이러한 현상은 유역경계 추출 (Fig. 4)의 경우에서도 관찰된다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이, 유역경계는 상류 지역에서는 일정하지만 유역 출구 근처에서는 큰 변동을 보인다. 하천망도의 경우와 같이 이는 수치표고모형의 오차가 상대적으로 완만한 유역의 하류 지역에서 유역경계결정에 상대적으로 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다. 특히 오차의 자기상관관계를 고려한 경우, 대동강 유역의 가운데에 위치한 sink가 filling을 적용했음에도 제거되지 않고 남아 최종 유역경계산정에서 제외되는 결과를 얻었

Fig. 3 Spatial variations in the derived stream networks from simulated DEMs

Fig. 4 Spatial variations in the derived watershed boundaries from simulated DEMs

다. oriDEM으로부터 이 sink의 최소 표고는 -112 m로 아주 깊고 71.3 ha의 비교적 좁은 면적에 분포하는 것으로 파악되었다. 이러한 정보를 토대로 이 sink는 채석장과 유사한 지형 및 토지피복의 암석 또는 고인 물에 InSAR의 레이더가 반사되어 나타나는 결과로 추측되었으나, 해당 지형의 흐름방향을 추정할 수 있는 자료가 부재하여 sink가 실재하는지 여부에 대해서는 확인할 수 없었다.

Table 4에 제시되어 있는 추출된 하천망 길이와 유역 면적의 통계적 특성은 DEM의 오차가 이들 수문인자에 미치는 영향을 정량적으로 보여준다. 대체적으로 오차의 공간자기상관을 고려했을 때, 하천망도의 길이가 다소 짧게 산정되었는데, 이는 kernel을 이용한 공간이동평균이 하천망을 상대적으로 단순화 시켰음을 의미한다. 한편 다른 통계치들과는 달리 평균의 경우, 유역별, 오차의 크기 및 공간자기상관 고려 여부에 따라 상대적으로 큰 차이를 보였다. 이는 앞서 Fig. 3과 4에서 보인 것과 같이 sink로 인해 발생한 폐쇄성 유역(대동강 지역)과 외부유역의 편입(금강 지역) 등과 같은 특이 경우들(outliers)로 인해 발생한 결과이다. 또한 오차의 공간자기상관 고려 여부에 상관없이 두 대상 유역에서 모두 최소 하천망 연장은 0으로 나타났다. errDEM을 이용하여 추출된 유역이 어떤 경우에서는 극히 작아서 최소배수면적 250 ha를 만족하는 셀이 없어서 발생하는 결과로써, 이는 오차가 하천망과 유역경계 산정에 미치는 극단적인 영향의 한 예를 보여준다. 유사한 결과는 유역경계 산정에서도 나타나는데, 공간자기상관 고려할 때 같은 이유로 인하여 유역면적이 상대적으로 작게 산정되는 것으로 판단된다(Table 4). 또한 하천망의 경우에서와 같이 오차의 크기가 클 때(5 m), 유역면적이 상대적으로 작게 산정되었으며, 이는 Table 4에서 평균치와 1분위수를 통해서 알 수 있다.

모의된 하천망의 평균연장과 유역의 평균면적은 오차의 크기 및 자기상관관계 고려 여부에 따라 큰 차이를 보였는데, 대동강 및 금강 지역 소유역의 경우 평균 하천망 연장의 차이가 각각 354 km와 83 km로 나타났고, 이는 oriDEM에서 산정된 하천연장 1,570 km(대동강 지역)와 280 km(금강 지역)의 22.5 % 및 29.6 %에 해당한다. 모의된 유역경계의 평균 면적은 대동강과 금강 지역 소유역에서 각각 735 km²와 197 km²의 차이를 보였으며, 이는 oriDEM에서 산정된 유역면적 3,652 km²와 664 km²의 20.1 % 및 29.7 %에 해당한다. 이러한 분석결과는 하천망 및 유역경계 산정에 활용함에 있어서 SRTM DEM이 지니는 한계를 잘 보여준다. 또한 분석결과는 SRTM DEM을 이용한 수문 분석 시 정확한 하천망 및 유역경계 산정을 위해서 추가적인 지형도나 고해상도 위성영상 등의 해당지역 지형에 대한 보다 구체적인 정보가 필요함을 시사한다.

Table 4 Descriptive statistics of derived stream networks and watershed areas from simulated DEMs

Watershed	Hydrologic Factors	Statistics	Independent		Spatially auto-correlated	
			2 m	5 m	2 m	5 m
Daedong River	Stream network length (km)	Min	0.0	0.0	0.0	0.0
		1 QT	1608.0	1607.8	1553.4	1544.5
		Median	1613.1	1615.0	1566.1	1565.0
		Mean	1564.8	1407.3	1252.6	1210.7
		3 QT	1618.3	1623.7	1576.8	1575.5
		Max	1633.2	1643.2	1593.7	1603.7
	Area (km ²)	Min	1.4	0.1	0.3	0.2
		1 QT	3644.5	3641.1	3621.2	3596.6
		Median	3648.3	3646.6	3635.7	3632.4
		Mean	3639.8	3174.5	2902.6	2805.1
		3 QT	3656.4	3653.3	3643.8	3643.9
		Max	3663.8	3665.5	3663.6	3663.7
Guem River	Stream network length (km)	Min	0.0	0.0	0.0	0.0
		1 QT	286.2	89.9	277.7	276.5
		Median	288.5	286.2	281.3	281.1
		Mean	283.8	201.1	244.3	240.1
		3 QT	291.3	293.3	284.2	284.2
		Max	390.4	395.0	373.8	381.8
	Area (km ²)	Min	0.6	0.2	0.1	0.2
		1 QT	663.6	200.9	662.9	662.7
		Median	664.1	660.6	663.7	663.6
		Mean	652.5	456.0	574.7	564.6
		3 QT	664.5	664.6	664.2	664.2
		Max	879.9	880.6	875.9	879.9

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 SRTM DEM에 포함되어 있는 오차가 수문인자 산정에 미치는 영향을 분석하여 수문분석에서 SRTM DEM의 적용성을 평가하고자 하였다. 모의된 오차는 그 크기와 공간자기상관 고려 여부와 관계없이 대상지역의 표고와 경사도의 통계 특성에 1 % 이내의 미미한 영향을 미쳤다. 이는 SRTM DEM이 지역의 대체적인 표고와 경사도 파악에 유용한 자료가 될 수 있음을 의미한다. 다만 filling은 대상지역의 최소 표고를 높이고 최소 경사도를 낮추는 결과를 가져왔다.

대동강 지역의 SRTM DEM은 특정 위치에 -100 m 보다 낮은 표고를 나타내고 있는데, 이는 SRTM DEM의 탐사방식인 InSAR의 특성에 따라 발생한 오류(artifacts)로 판단되었다. 이러한 DEM 자료의 오류로 인해 발생한 깊은 sink는 독립오차의 경우 그 오차의 크기에 상관없이 filing 과정에 의해 제거되었으나, 자기상관오차의 경우에는 잔존하는 특징 보였다. 이 sink는

하천망 및 유역경계 추출에 영향을 미쳤는데, 대동강 지역 소유역의 경우에서 극단적으로 짧은 하천망과 작은 유역이 추출되는 결과를 낳았다. 이러한 결과는 향후 수문분석에서 SRTM DEM 활용 시 해당오류에 대한 각별한 주의가 필요함을 시사한다.

표고와 경사도의 경우와는 달리, 모의된 오차는 하천망과 유역의 경계 산정에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 모의된 오차에 따른 하천망의 공간적 변동의 대부분은 지형의 기복이 심한 유역의 상류보다는 비교적 완만한 하류에서 발생하였는데, 이는 모의된 오차가 상대적으로 완만한 하류 지역에서 흐름방향도에 미치는 영향이 더 커서 발생하는 결과다. 특히, 금강 지역의 경우 모의된 오차에 의해 변화된 하류 지역의 흐름방향에 따라 인접 유역이 연구대상유역에 편입되는 경우가 자주 발생하였다. 이는 SRTM DEM 자체의 오류와 오차가 하천망과 유역경계결정에는 큰 영향을 미쳐 때로 잘못된 결과를 얻게 될 수 있는 예로써, SRTM DEM이 수문인자 추출에 단독으로 사용되어 정확한 분석 결과를 제공하기에는 다소 부족한 면이 있음을 보여준다. 향후 SRTM DEM을 이용한 수문분석에서 보다 정확하고 타당한 수문인자산정을 위해서는 추가적인 정보 및 자료를 통한 보완이 필요할 것으로 사료된다. 예를 들어 Landsat (USGS, 2013) 위성영상, 인터넷 지도 및 위성영상서비스 (예: Google Earth) 등이 제공하는 토지피복정보 및 영상들은 SRTM DEM으로부터 산정된 하천망을 비교해볼 수 있는 유용한 참고자료가 될 수 있다. 또한 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM (Global Earth Elevation Model)은 다양한 형태의 많은 결함 (artifacts)과 잡음 (noises)을 가지고 있는 것으로 알려져 있지만 (Tachikawa et al., 2011), SRTM DEM을 이용한 유역의 수문인자 분석에 보조적인 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

본 연구결과에서 나타난 수문인자의 SRTM DEM 오차에 대한 민감도는 지역의 지형특성 (산악 또는 평지)에 따라 다르게 나타날 수 있다. 하지만 본 연구에서 제시한 영향분석 방법은 간단하여 쉽게 다른 지역 및 연구에서도 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어, 향후 SRTM DEM이 이용 가능한 유일한 지형자료인 지역의 수문 해석을 실시할 때 본 연구에서 사용된 방법으로 모의된 유역 면적 및 하천망의 총 연장의 중간치 (median)에 해당하는 유역 경계 및 하천망을 유역의 대표치로 채택할 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서 행해진 간단한 Monte Carlo 모의를 이용한 민감도 분석은 DEM으로부터 산정 및 추출된 수문인자의 신뢰성을 가늠해 볼 수 있는 유용한 방법이 될 수 있을 것이다. 즉 오차의 특성을 고려하여 모의된 다수의 SRTM DEM에서 산정된 수문인자들로부터 각 인자의 확률분포를 추출할 수 있으며, 이는 SRTM DEM 오차에 의한 수문인자의 불확실성을 나타낸다.

본 연구는 SRTM DEM 오차가 수문인자 산정뿐만 아니라, 수문인자의 공간분포에 미치는 영향도 고려하여 함께 분석하였다. 또한 DEM 모의 시 오차의 공간자기상관을 고려하여 공간자료가 가지고 있는 일반적인 특성을 반영하여 분석하였다. 특히 북한 한 유역을 연구 대상지역 중 하나로 선정하여 SRTM DEM의 적용성을 평가함에 따라 본 연구결과는 향후 지형정보의 획득이 용이하지 않은 지역의 수문연구에서 SRTM DEM을 이용할 때 필요한 해당 자료의 처리 및 오류 가능성에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Aerts, J. C. J., M. F. Goodchild, and G. B. M. Heuvelink, 2003. Accounting for spatial uncertainty in optimization with spatial decision support systems. *Transactions in GIS* 7(2): 211-230.
2. Albani, M., B. Klinkenberg, D. W. Anderson, and J. P. Kimmins, 2004. The choice of window size in approximating topographic surfaces from Digital Elevation Models. *International Journal of Geographic Information Science* 18(6): 577-593.
3. Beven, K. J., and M. J. Kirkby, 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin* 24: 43-69.
4. Bolstad, P. V., and T. Stowe, 1994. An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope, and aspect. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 60(11): 1327-1332.
5. Carlisle, B. H., 2005. Modelling the spatial distribution of DEM error. *Transactions in GIS* 9(4): 521-540.
6. Consortium for Spatial Information (CGIAR CSI), 2013. SRTM 90m Digital Elevation Database. Available at: <http://www.cgiar-csi.org/data>. Accessed 4 Feb. 2013.
7. Delbari, M., P. Afrasiab, and W. Loiskandl, 2009. Using sequential Gaussian simulation to assess the field-scale spatial uncertainty of soil water content. *Catena* 79: 163-169.
8. Deutsch, C., and A. Journel, 1998. GSLIB: Geostatistical Software Library, 2nd Ed. Oxford, U.K.: Oxford University Press.
9. Endreny T. A., and E. F. Wood, 2001. Representing elevation uncertainty in runoff modelling and flowpath mapping. *Hydrological Processes* 15: 2223-2236.
10. ESRI, 2012. ArcGIS Help 10.1, How Fill works, Available

- at: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/How_Fill_works/009z00000061000000/. Accessed in Sep. 2013.
11. Farr, T. G., P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodrigues, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, and D. Alsdorf, 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics* 45, RG2004.
12. Fisher, P. F., and N. J. Tate, 2006. Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography* 30(4): 467-489.
13. Fisher, P., 1998. Improved modeling of elevation error with geostatistics. *GeoInformatica* 2-3: 2115-233.
14. Fisher, P. F. 1991. First experiment in viewshed uncertainty: The accuracy of the viewshed area. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57(10): 1321-1327.
15. Goodchild, M. F., 1980. Algorithm 9: Simulation of autocorrelation for aggregate data. *Environment and Planning A* 12(9): 1073-1081.
16. Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. NewYork, N.Y.: Oxford University Press.
17. Gorokhovich, Y., and A. Voustianiouk, 2006. Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment* 104: 409-415.
18. Grohman, G., G. Kroenung, and J. Strebeck, 2006. Filling SRTM voids: the delta surface fill method. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72(3): 213-216.
19. Hall, O., G. Falorni, and R. L. Bras, 2005. Characterization and quantification of data voids in the shuttle radar topography mission data. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE* 2(2): 177-181.
20. Hoffmann, J., and D. Walter, 2006. How complementary are SRTM-X and -C band digital elevation models? *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(3): 261-268.
21. Holmes, K. W., O. A. Chadwick, and P. C. Kyriakidis, 2000. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. *Journal of Hydrology* 233: 154-173.
22. Hunter, G. J., M. Caetano, and M. F. Goodchild, 1995. A methodology for reporting uncertainty in spatial database products. *Journal of Urban and Regional Information Systems Association* 7(11): 11-21.
23. Hunter, G. J., and M. F. Goodchild, 1997. Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases. *Geographical Analysis* 29(1): 35-49.
24. Jensen, S. K., and J. O. Domingue, 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54(11): 1593-1600.
25. Kyriakidis, P. C., A. M. Shortridge, and M. F. Goodchild, 1999. Geostatistics for conflation and accuracy assessment of digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science* 13(7): 677-707.
26. Legendre, 1993. Spatial autocorrelation: Trouble or new paradigm? *Ecology* 74(6): 1659-1673.
27. Lindsay, J. B., 2006. Sensitivity of channel mapping techniques to uncertainty in digital elevation data. *International Journal of Geographic Information Science* 20(6): 669-692.
28. Loague, K., D. L. Corwin, and T. R. Ellsworth, 1998. The challenge of predicting nonpoint source pollution. *Environmental Science & Technology News & Research Notes Mar. 1*, 1998: 130-133.
29. Ludwig, R., and P. Schneider, 2006. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 60(5): 339-358.
30. Markham, B., J. Storey, D. Williams, and J. Irons, 2004. Landsat sensor performance: history and current status. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42(12): 2691-2694.
31. Oksanen, J., 2006. Digital elevation model error in terrain analysis. PhD diss. Helsinki, Finland: University of Helsinki, Department of Geography.
32. Rabus, B., M. Eineder, A. Roth, and R. Bamler, 2003. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 57, 241-262.
33. Rodriguez, E., C. S. Morris, J. E. Belz, E. C. Chapin,

- J. M. Martin, W. Daffer, and S. Hensley, 2005. An assessment of the SRTM topographic products. Jet Propulsion Laboratory D-31639. JPL NASA.
34. Rodriguez, E., Charles S. Morris, and Erci Belz, 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(3): 249-260.
35. Tachikawa, T., M. Kaku, A. Iwasaki, D. Gesch, M. Oimoen, Z. Zhang, J. Danielson, T. Krieger, B. Curtis, J. Haase, M. Abrams, R. Crippen, and C. Carabajal, 2011. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. Jet Propulsion Laboratory.
36. Taramelli, A., P. Reichenbach, and F. Ardizzone, 2008. Comparison of SRTM elevation data with cartographically derived DEMs in Italy. *Revista Geografica Acadêmica* 2(8): 41-52.
37. United States Geological Survey (USGS), 2009. Vertical accuracy of the national elevation dataset. United States Geological Survey. Available at: <http://ned.usgs.gov/downloads/documents/NED>. Assessed on 15 Dec 2009.
38. USGS, 2013. Landsat Search and Download. Available at: http://landsat.usgs.gov/Landsat_Search_and_Download.php. Accessed in Sep 2013.
39. van Zyl, J. J., 2001. The shuttle radar topography mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica* 48(5): 559-565.
40. Wechsler, S. P., and C. N. Kroll, 2006. Quantifying DEM uncertainty and its effect on topographic parameters. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(9): 1081-1090.
41. Wechsler, S. P., 2007. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology Earth System Sciences* 11: 1481-1500.
42. Yoo, S. H., W. H. Nam, and J. Y. Choi, 2007. Assessment of accuracy of SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). *Korea National Committee on Irrigation and Drainage (KCID) Journal* 14(1): 80-88 (in Korean).