대한지리학회지 제49권 제3호 2014(339~356)

DEM에서 추출한 하천종단곡선의 평활화 방법 고찰 및 새로운 방법의 제안

변종민* · 성영배**

Comparison Analysis of Methods for Smoothing the Stream Profiles Extracted from Digital Elevation Models and Suggestion of a New Smoothing Method

Jongmin Byun* · Yeong Bae Seong**

요약 : DEM의 보급과 처리 기술의 발전으로 DEM으로부터 하천종단을 추출하는 것이 과거 어느 때보다 용이해졌다. 하지만 DEM에서 추출된 하천종단은 인위적인 평지 및 계단과 같은 문제점들도 포함하고 있기 때문에, 자연스런 하천종단을 얻어내기 위해서는 평활화 과정을 거쳐야 한다. 그러나 평활화 자체는 원본 하천종단의 변형을 필연적으로 동반하기 마련이다. 지금까지는 평활화로 인한 원자료의 변형에 대해 객관적이고 정량적인 평가가 없었다. 이에 본 연구는 주요 평활화 방법의 특성을 파악하고, 이들의 한계점을 극복하는 새로운 평활화 방법을 제안하며, 이의 유용성을 검증하였다. 본 연구는 보다 정밀한 평활화 방법을 제시할 뿐만 아니라 연구목적에 부합하는 평활화 방법을 선택하는데도 도움이 될 것이다.

주요어 : 하천종단, DEM, 평활화, 고정 이동창 평활화, 하류 증대 이동창 평활화, 등고선 간격별 내삽 평활화, 일정 고도 간격 이동창 평활화

Abstract : Easy access to DEMs and the development of technology treating DEMs make it easier to extract stream longitudinal profiles from DEMs than previously done. Since such profiles possess many problems such as artificial flats and steps, it should be required for them to be smoothed like natural profiles to estimate gradient values along those sections. However smoothing itself comes with much distortion of raw profile from original DEMs. There has been no research evaluating quantitatively the effects due to smoothing process. Here we attempt to quantify the effects of major smoothing methods on raw and real profiles, suggest a new method to overcome the limitations of them, and evaluate it. This study not only suggests a new smoothing method, but also provides a guideline for choosing a proper smoothing method.

Key Words : stream profile, DEM, smoothing, fixed window smoothing, stream-wise increasing window smoothing, interpolation at each contour interval, fixed height interval based window smoothing

* 고려대학교 지리교육과 연구교수(Research Fellow, Department of Geography Education, Korea University), cyberzen.byun@gmail.com

** 고려대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Korea University), ybseong@korea.ac.kr

1. 서론

하천종단곡선은 하천을 따라 고도와 거리의 관계를 표현한 그래프이다(Goudie, 2004, 630). 대부분의 하천종단은 요형을 가진 연속된 곡선으로 나타나며, 하천 천이점이라 불리는 경사 급변 구간이 나타나기도 한다. 하천종단에서 관찰되는 오목함(concavity)은 평형하천(graded river)의 하도를 따라 하천 수리요소들이 서로 균형을 이룬 결과로 간주된다(Gilbert, 1877; Mackin, 1948; Flint, 1974). 한편 하천종단의 경사 급변 구간은 암질 차이로 인한 하천의 정상상태 반응(equilibrium response)이거나, 국지적인 지각변형 또는 지반융기운동 및 해수면 변화로 인한 비정상상태 반응(non-equilibrium response)으로 해석된다(Goldrick and Bishop, 2007). 따라서 하천종단곡선에서 관찰되는 특징들은 지각운동과 기후, 그리고 지표작용간의 상호관계를 탐색하는 데 있어서 오랫동안 빈번하게 이용되어 왔다.

하지만 수치고도모형(Digital Elevation Model, 이하 DEM)의 보급과 더불어 하천종단곡선을 추출하는 방법 자체는 급격히 변화했다. 이로 인해 하천종단곡선을 보다 빠르고 손쉽게 추출할 수 있게 되어 연구의 효율성이 증대되었고, 많은 하천종단 분석이 필요한 지역적 규모의 연구도 가능하게 되었다(예. Kirby *et al.*, 2003). 또한 DEM으로부터 추가적인 하천종단 관련 변수들도 쉽게 도출할 수 있게 되어 상부기여면적(upstream contributing area)과 경사 관계와 같은 새로운 분석도 가능해졌다(Willgoose *et al.*, 1994).

DEM을 이용하면서 얻는 이 같은 많은 이점에도 불구하고, DEM에서 추출한 하천종단곡선은 많은 문제점들을 포함한다. 대표적인 예가 하천종단곡선상에서 나타나는 평지 및 계단 현상이다. 이는 DEM상의 연속적인 수리 흐름을 만들기 위한 전처리 과정 때문에 발생한다(Wobus *et al.*, 2006). 최근 연구들은 하천종단곡선상의 이 같은 오류들을 제거하고 실제 하천종단 형태와 유사하도록 만들기 위해, DEM에서 추출한 하천종단곡선을 평활화(smoothing)하였다(Harbor *et al.*, 2005; Wobus *et al.*, 2006). 평활화된 하천종단곡선은 실제 하천종단과 형태적으로 유사하여(Snyder *et al.*, 2000), 다양한 연구의 기본 자료로 활용되었으며 특히 지구조운동이 활발한 지역에서 지표의 역동성을 탐색하는 데 빈번하게 이용되었다(Wobus *et al.*, 2006).

하지만 평활화 방법의 특성상, 이들 방법은 실제 하천종단의 고도 및 경사를 필연적으로 변형시킨다. 그러나 지금까지 이들 평활화가 원본 하천종단에 미치는 영향에 대한 평가가 수행된 적은 없다. 특히 기존 연구들이 주로 지역적 규모의 하천종단 분석에 치중했기 때문에(예. Kirby *et al.*, 2003). 이들 연구에서 적용된 평활화 방법 및 매개변수 조건이 한반도 지역과 같이 보다 정밀한 분석이 요구될 것으로 예상되는 지역에서도 적합한지에 대해서는 객관적인 고찰이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 주로 이용된 평활화 방법들의 특성을 다양한 조건에서 분석하여 이들의 특성을 파악하고, 이들 방법들의 한계점을 극복할 수 있는 새로운 평활화 방법을 제안하며, 이의 유용성을 검증하고자 한다. 이를 통해 본 연구는 연구목적에 적절한 평활화 방법을 선택하는데 있어서의 기준을 제시할 뿐만 아니라 기존 방법들에 비해 보다 신뢰도 높은 평활화 방법을 제시할 것이다.

2. 방법론적 배경

1) 하천종단곡선상의 평지 및 계단 현상 발생 원인

래스터 DEM상에는 실제 경관과는 무관한 싱크(sink) 또는 평지들이 많이 존재한다. 인위적인 싱크 혹은 평지는 대체로 고도 자료 수집 과정 혹은 자료 보간 과정에서의 오류, 그리고 DEM 자료의 수직 해상도 제한(예, 정수형 데이터 타입 한정) 등으로 인해 발생한다(Lindsay and Creed, 2005a, 2005b). 싱크는 DEM상의 수리 흐름이 하류로 연속해서 흘러가는 것을 방해하여 DEM 상의 물질량이 보존되지 않는 문제점을 일으킨다. 인위적인 평지 또한 수리 흐름이 나

아갈 방향을 예측하지 못하도록 만들기 때문에 DEM 상의 흐름을 차단하는 문제점을 발생시킨다. 따라서 다수의 GIS 프로그램들은 인위적인 싱크 또는 평지들을 사전에 제거하여, 수리 흐름이 연속적으로 나타나는 DEM을 만들도록 다양한 전처리 과정을 제공한다.

이들 전처리 과정 중에 가장 널리 이용되는 것은 Jenson and Domingue(1988)가 제안한 알고리듬으로, 싱크를 채우고(fill sink) 이로 인해 발생한 평지에 임의적으로 유향을 부여하는 것이다(그림 1). 이 알고리듬에서는 우선 개별 싱크마다, 싱크를 둘러싸고 있는 셀들 중에 가장 낮으면서도 싱크 외부로 흐름을 전달할 수 있는 셀을 찾고 이를 싱크의 유출구로 정의한다. 이 후 싱크의 유출구보다 고도가 낮은 셀들(혹은 와지)을 유출구의 고도까지 상승시켜 싱크를 포함한 와지를 제거하게 된다. 다음 단계에서는 싱크 제거 과정에서 생성된 평지와 더불어, DEM 상에 처음부터 있었던 인위적인 평지에 임의적으로 유향을 부여하게 된다. 이 때 개별 평지의 최하류 지점부터 유향을 정의하기 시작하며, 평지 전체에 유향이 부여될 때까지 이를 반복한다.

이 같은 전처리 과정을 통해 물질량이 보존되면서도 연속적인 수리 흐름이 나타나는 DEM을 만들 수 있게 된다. 하지만 원본 DEM에 비해 상당한 지역의 고도가 수정되고 인위적인 평지가 발생하는 문제점이 발생한다. 이로 인해 수정된 DEM을 이용하여 하천종단을 추출할 경우, 종단곡선상에 평지 구간과 연속적인 계단이 발생하게 되어 이들 구간에서는 하도 경사가 0으로 계산되거나 인위적인 경사 급변 구간으로 표현되는 심각한 문제점이 발생한다. 많은 연구자들은 하천종단곡선 상에 관찰되는 이들 평지 및 계단 현상이 DEM의 오류를 수정하는 과정에서 발생한 것임을 알고 있기 때문에, 적절한 하도 경사값을 추정하기 위해 다양한 평활화 방법을 동원하여 이를 해결해 왔다(Harbor *et al.*, 2005; Wobus *et al.*, 2006; Peckham, 2009).

2) 기존 평활화 방법

DEM으로부터 추출한 하천종단곡선을 평활화하

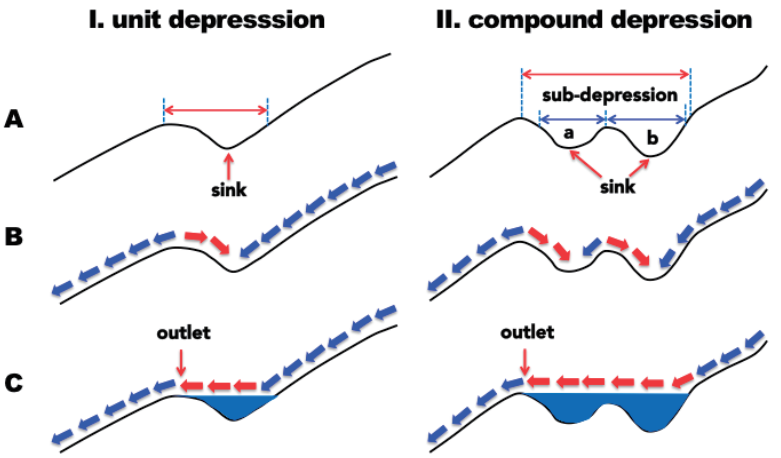

그림 1. DEM상의 싱크와 이의 제거 및 유향(화살표) 부여 과정 개념도

그림의 종단곡선은 싱크 제거 및 유향 부여 과정을 개념적으로 설명하기 위한 1차원 DEM임. 대부분의 DEM은 싱크(sink)를 가지고 있으며, 이로 인해 흐름이 차단되는 와지(depression)가 발생함. 와지에는 하나의 싱크로 인해 발생하는 단일 와지(unit depression)와 연속된 싱크로 인해 발생하는 복합와지(compound depression)가 있음. 연속적인 수리 흐름을 만들기 위해서는 개별 싱크의 유출구(outlet)를 찾고 이의 고도까지 와지를 상승시킨 다음 임의적으로 유향을 부여함(C, I). 만약 이 유출구에서의 흐름이 다시 와지로 흘러갈 경우에는(복합 와지의 경우) 보다 상위의 유출구를 찾고 이의 고도까지 와지를 상승시킨 다음 유향을 부여함(C, II).

는 다양한 방법들이 있지만 여기서는 가장 많이 이용되어온 1) 고정 이동창 평활화(fixed window smoothing), 2) 하류 증대 이동창 평활화(stream-wise increasing window smoothing), 그리고 3) 등고선 간격별 내삽 평활화(interpolation at each contour interval) 방법에 대해 개략적으로 살펴보고자 한다.

(1) 고정 이동창 평활화

우선 일정한 크기의 이동창(moving window)을 설정하고, 이를 이용하여 개별 노드의 고도 평균값을 구하여 각 노드의 고도값으로 대체하는 방식으로 종단곡선을 평활화하는 방법이다(그림 2B). 이 방법은 비교적 간단하기 때문에, 비록 명시적으로 기술되지는 않았지만 상당수의 연구들에서 암묵적으로 이용되었거나 다른 평활화 방법의 사전 단계에 이용되기도 했다(Whipple *et al.*, 2007).

(2) 하류 증대 이동창 평활화

앞서 고정 이동창 방법과 달리, 이 방법은 하류로 갈수록 이동창의 크기를 증가시키면서 개별 노드의 이동창 평균(혹은 중앙) 고도값을 구하고 이를 각 노드의 고도값으로 대체하여 평활화한다(Harbor *et al.*, 2005) (그림 2C). 일반적으로 하천의 하도 경사는 하류로 갈수록 감소하고, 반대로 하도 경사의 변화 파장은 증대하는 경향을 보인다. 따라서 이동창의 크기를 하류로 갈수록 증가시킨다면(반대로 상류로 갈수록 감소시킨다면), 자연적인 하천종단 특성에 부합한 평활화를 할 수 있게 된다. Harbor *et al.*(2005)은 이동창의 크기를 다음과 같은 수식으로 제안하였다.

$$X=\frac{\sqrt{x}}{\sqrt{10^5}}\times K_1+K_2 \qquad (1)$$

수식 (1)에서 X는 이동창의 크기(m)이고 x는 하천 시작점에서부터 하류로의 거리(m)이며 K_1과 K_2는 계수이다. Harbor *et al.*(2005)은 계수 K_1과 K_2를 각각 2000과 500으로 제안하였다. 따라서 최소한의 이동창 크기는 500m이고 하류 100km 지점에서의 이동창 크기는 2,500m가 된다.

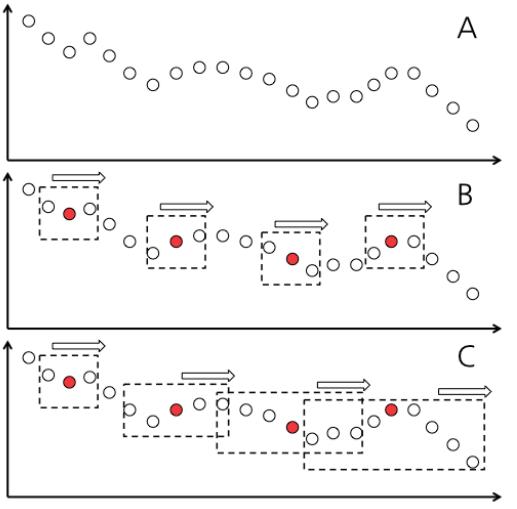

그림 2. 고정 이동창 및 하류 증대 이동창 평활화 방법 개념도

A. DEM에서 직접 추출한 고도와 거리 자료. B. 고정 이동창 평활화 방법. 이동창 크기가 3으로 고정되어 있음. 개별 노드의 고도값은 이동창 내 노드들의 평균 고도값으로 대치됨. C. 하류 증대 이동창 평활화 방법. 이동창의 크기가 하류로 갈수록 증대함.

(3) 등고선 간격별 내삽 평활화

이 방법은 종단곡선에서 등고선 간격별로 고도값을 재추출하고 이들을 내삽하여 평활화한 종단곡선을 구한다(Wobus *et al.*, 2006) (그림 3). 여기서는 우선 하천종단축 가장 끝 지점에서부터 시작하여 상류로 단조 증가하는 곡선을 만든다(그림 3B). 이후 설정된 등고선 간격으로 종단곡선 상의 고도축을 구분하고, 이들 고도값에 해당하는 값들을 추출한다(그림 3C). 끝으로 이들 점들을 내삽하여 새로운 곡선, 즉 평활화된 종단곡선을 얻는다(그림 3D).

이 방법은 등고선 간격별로 고도값들을 재추출하기 때문에, 특히 등고선 지형도 기반의 DEM을 이용하여 종단곡선을 추출할 때 유용하다(Wobus *et al.*, 2006). 이는 등고선 지형도를 근간으로 생성된 DEM의 경우 등고선 간격에 해당하는 고도를 가진 지점이 상대적으로 오차가 적기 때문이며, 이들 지점들을 중심으로 고도값을 재추출하고 이를 내삽한 하천종단 역시 오차가 적을 것으로 보기 때문이다. 또한 상부기여면적과 경사 관계도를 작성할 경우에도 등고선 간

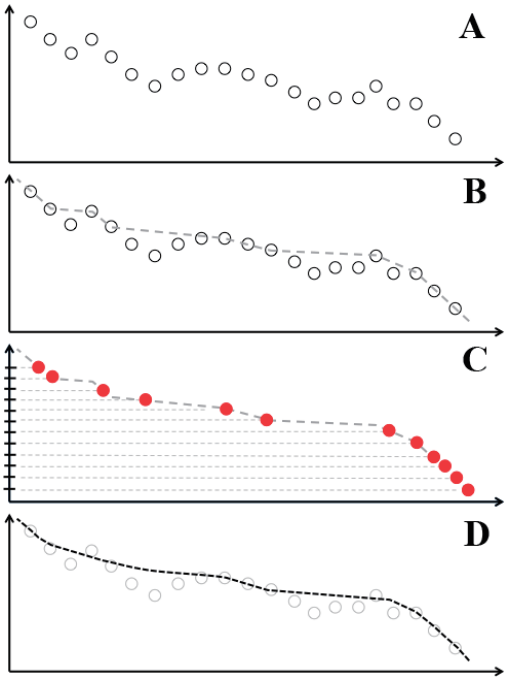

그림 3. 등고선 간격별 내삽 평활화 개념도

A. DEM에서 직접 추출한 고도 및 거리 자료(○). B. 하천종단 끝지점부터 시작하는 단조 증가 함수(회색 점선). C. 등고선 간격이 표현된 고도축 및 단조 증가 함수를 기반으로 등고선 간격별로 재추출된 고도값(●) D. 재추출된 고도값을 내삽하여 평활화한 하천종단(검은 점선)과 원본 고도 및 거리 자료.

격별로 재추출한 자료를 이용하기 때문에, 고도 변화가 상대적으로 작은 하류 구간에서 값들이 집중적으로 나타나는 편중 현상을 막기도 한다(Wobus *et al.*, 2006).

3. 연구방법

본 연구는 크게 다음의 세 가지 단계로 구성된다. 1) 기존 평활화 방법을 다양한 매개변수 조건에서 사례지역 하천의 종단곡선에 적용하고 이들 결과들을 분석하여 개별 방법들의 특성을 파악한다. 2) 분석을 통해 파악된 기존 평활화 방법의 한계점을 극복하는 새로운 평활화 방법을 제안한다. 3) 새롭게 제안한 평활화 방법을 검증하기 위해 기존 방법을 적용한 종단곡선과 새로운 방법을 적용한 종단곡선을 비교 분석한다.

1) 기존 평활화 방법 특성 파악

(1) 사례지역

다양한 평활화 방법을 적용할 사례지역 하천으로 오대천을 선정하였다. 강원도 평창군 진부면에서 발원하여 정선군 북평면을 거쳐 골지천에 합류하는 오대천은 남한강의 최상류에 해당하기 때문에 한강 하류에 비해 상대적으로 훼손이 적었고, 또한 인접한 송천 및 골지천과 달리 상류 지역에 댐이 없어서 자연적인 하천종단 특성을 잘 보여준다. 오대천 종단곡선에서는 일반적인 하천종단 특성과 다르게 하류 부분에 철형(凸形) 구간, 즉 경사 급변 구간이 관찰되는데 이는 기반암의 차이에 기인한 것으로 추정된다(상류의 화강암, 하류의 퇴적암).

(2) DEM에서 하천종단 추출하는 방법

1) 단계에서 기존 평활화 방법들을 적용할 하천종단곡선은 다음의 절차를 거쳐 생성되었다(그림 4). (1) NASA의 ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM 배포 사이트(http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp)에서 사례지역인 오대천 유역의 DEM을 구하였다. ASTER DEM의 해상도는 약 30m이지만 투영과정에서 25m로 변경하였다. (2) DEM의 인위적인 싱크를 제거하기 위해 싱크 채움을 수행한다. (3) 싱크를 채운 DEM에 유향을 부여한다. (4) DEM의 각 셀에 상부흐름누적량을 구한다. (5) 하천종단 분석을 수행할 하도를 정의하기 위해 하도 시작과 끝 지점(셀)의 좌표를 파악한다. (6) 하도 시작 지점과 끝 지점을 잇는 하도 경로를 추출한다.[1] (7) 추출한 하도를 따라 DEM 레이어로부터 고도값을 추출한다. (8) 추출된 경로와 이에 해당하는 고도값을 이용하여 하천종단곡선을 작성한다(그림 5).

하천종단곡선 생성 절차 중 (1)~(4) 단계는 ESRI

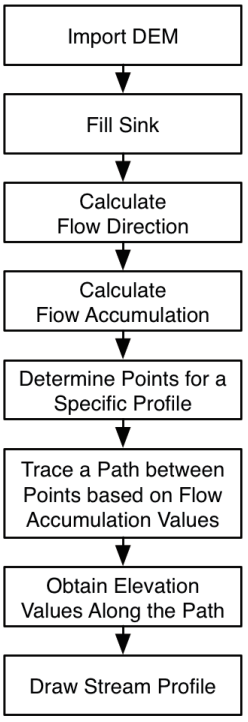

그림 4. DEM으로부터 하천종단곡선 추출 과정 흐름도

사의 ArcGIS 내장 함수들을 이용하여 수행하였으며, (5)~(8) 단계는 별도의 MATLAB 스크립트를 작성하고 이를 이용하여 수행하였다. (2)와 (3) 단계에서 ArcGIS는 싱크 제거를 위해 Jenson and Domingue (1988)가 제안한 알고리듬을 이용한다. 따라서 싱크의 유출구 고도보다 낮은 와지를 채우고 이 과정에서 인위적으로 생성된 평지에는 평지의 최하류 지점부터 다소 임의적으로 유향을 강제 부여하는 과정을 통해 수리적으로 연속된 흐름을 만든다. 한편 (7) 단계에서는 원본 ASTER DEM 또는 싱크를 제거하기 위해 전처리한 DEM 중 하나를 이용할 수 있는데, 본 연구에서는 원본 ASTER DEM을 이용하여 고도를 추출하고 이를 대상으로 평활화 방법들을 적용하였다. 이를 통해 조금이라도 하천종단 자료의 신뢰도를 향상시킬 수 있다(Wobus *et al.*, 2006).

(3) 매개변수에 따른 개별 평활화 방법의 민감도 분석

이상의 과정을 거쳐 추출한 하천종단곡선을 대상으로 개별 평활화 방법들을 다양한 매개변수 조건에

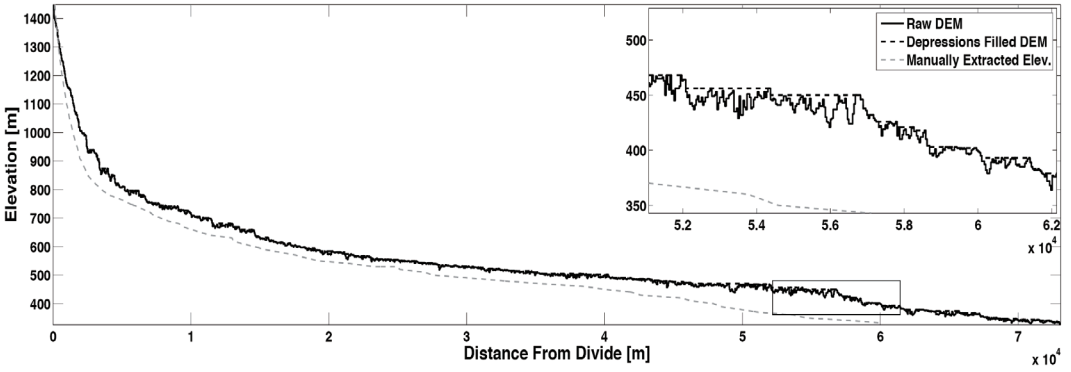

그림 5. DEM과 등고선 지형도로부터 각각 추출한 오대천 하천종단

ASTER DEM에서 직접 추출한 것은 실선으로(Raw DEM), 전처리를 통해 보정된 DEM에서 추출한 것은 검은색 점선으로 그려짐(Depression Filled DEM). 본 연구에서는 ASTER DEM에서 직접 추출한 하천종단을 대상으로 평활화 방법을 적용하며, 고도 오차를 구할 때 대조군으로 이용함. 등고선 지형도에서 수동으로 추출한 것은 회색 점선으로 그려짐(Manually Extracted Elev.). 수동 추출한 하천종단은 평활화된 하천종단의 경사 오차를 구하는 대조군으로 이용됨. DEM에서 추출한 하천종단과 등고선 지형도에서 추출한 하천종단의 연장은 약 10,000m 이상의 차이를 보이는데, 이 같은 차이는 DEM 오류를 제거하는 과정에서 생성되는 평지에 유향이 임의적으로 부여되면서(Jenson and Domingue, 1988), 실제 하천 경로에서 멀어지기 때문임. 오대천 종단곡선에는 하류에 경사 급변 구간(회색 상자)이 관찰됨. 확대한 경사 급변 구간에서는 원본 DEM(심한 요철)과 보정한 DEM(평지와 계단)의 차이가 확연하게 드러남.

서 적용하고 이의 결과들을 분석하여 평활화 방법들의 특성을 파악하였다. 분석은 평활화 정도, 고도 오차, 그리고 경사 오차의 세 가지 측면에서 수행하였다. 여기서 평활화 정도는 종단곡선상에서 하류로의 흐름을 차단하는 요형(凹型) 구간이 나타나지 않는 비율을 말한다. 따라서 이 평활화 정도가 크면 원본 하천종단에서 요철이 많이 제거되어 보다 자연스런 하천종단 형태를 보인다. 고도 오차는 ASTER DEM에서 추출한 원본 종단곡선과 평활화한 종단곡선과의 고도 차이를 평균한 값이다. 따라서 이는 DEM에서 추출한 하천종단이 이상적인 대조군임을 가정하고 있으며[2], 이의 오차가 (양 또는 음의 방향으로) 클수록 대조군에서 (양 또는 음의 방향으로) 멀어짐을 의미한다. 한편 경사 오차는 등고선 지형도로부터 수동으로 추출한 하천종단곡선을 10m 고도 간격으로 구분하고 개별 구간에서의 평균 하도 경사를 계산한 후에[3], 평활화한 종단곡선을 대상으로 똑같은 방법으로 평균 하도 경사를 계산하여, 이들의 오차 평균 제곱근(Root Mean Square Error)을 계산한 값이다.

2) 새로운 평활화 방법 제안

다양한 매개변수 조건에서 기존 평활화 방법들의 장점 및 한계점을 파악한 다음, 한계점을 개선하면서 동시에 각 방법들의 장점을 계승하는 새로운 평활화 방법을 제안한다. 새로운 평활화 방법의 알고리듬은 MATLAB을 이용하여 함수로 구현하였으며, 자세한 절차는 연구결과에서 설명한다.

3) 새로운 평활화 방법의 유용성 검증

새로운 평활화 방법의 유용성을 검증하기 위해 기존 방법을 적용한 종단곡선과 새로운 방법을 적용한 종단곡선을 비교 분석하였다. 서로 다른 평활화 방법이 적용된 종단곡선들간의 비교를 위해서는 공통적인 기준이 필요한데, 여기서는 각각의 평활화 방법을 적용하여 약 99%의 평활화에 도달한 종단곡선들을 대상으로 비교 분석을 수행했다.

4. 연구결과

여기서는 ASTER DEM에서 추출한 오대천의 종단곡선을 대상으로 기존 평활화 방법(고정 이동창, 하류 증대 이동창, 일정 고도별 내삽)을 다양한 매개변수 조건하에서 적용하여 이들 방법들의 장점 및 한계점을 파악하고 이들 평활화 방법의 한계점을 극복하는 새로운 평활화 방법을 제안하고 검증한다.

1) 기존 평활화 방법 특성

(1) 고정 이동창 평활화

DEM에서 추출한 오대천 종단곡선을 대상으로 고정 이동창의 크기를 달리하며 평활화를 시도해보았다. 고정 이동창을 이용하여 평활화한 종단곡선은 이동창의 크기가 증가할수록 원본 종단곡선상의 요철이 평활화되면서 자연스러운 하천종단 형태에 가까워졌다(그림 6C). 특히 이동창의 크기가 전체 하천종단의 약 3.4%에 해당하는 2,500m에 도달하기 전까지 평활화 효과가 크게 나타났으며, 그 이후부터는 아주 완만하게 증가했다(그림 7A).

고정 이동창을 이용한 평활화는 이동창의 크기가 증가할수록 자연스런 하천종단을 보였지만, 한편으로 하천 상류부에 위치한 요형 구간(1,000~6,000m)에서는 이동창 크기 증가와 더불어 고도가 인위적으로 상승하며 경사 급변 지점이 발생하였다(그림 6B). 이는 이 요형 구간을 기점으로 상류 구간에서는 하상고도가 크게 감소하지만 하류 구간에서는 상대적으로 완만하게 감소하게 되면서, 고정 이동창을 이용한 평균값은 상대적으로 상승하기 때문이다. 이 같은 현상으로 인해, 이동창 크기가 커질수록 고도 오차 평균은 양의 방향으로 급격하게 증가하게 된다(그림 6A2, 7B). 한편 경사 오차의 경우는 고도 오차 정도는 아니지만, 이동창의 크기가 증가할수록 완만하게 증가하는 경향을 보였다(그림 7C).

(2) 하류 증대 이동창 평활화

이 방법은 고정 이동창 방법과 달리 이동창이 하류

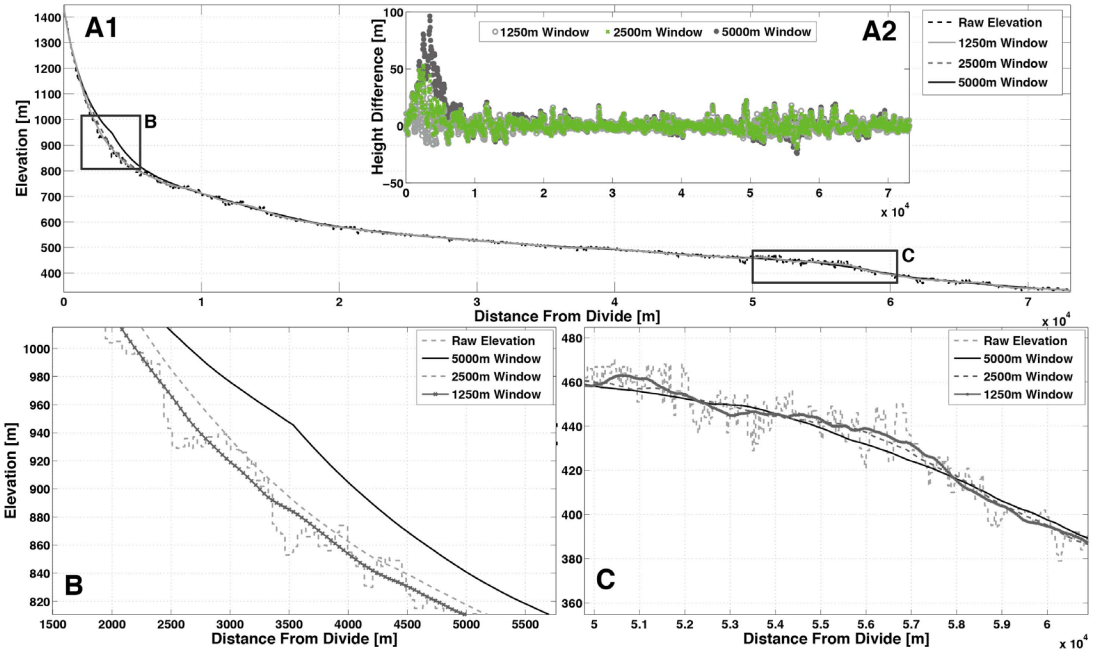

그림 6. 고정 이동창을 이용하여 평활화한 하천종단곡선

DEM에서 직접 추출한 원본 종단곡선과 이동창의 크기를 각각 1,250, 2,500, 5,000m로 설정하고 평활화한 종단곡선. A1. 전체 하천종단. A2. 평활화한 종단곡선과 원본 종단곡선과 고도 차이. 창크기가 증가할수록 상류 요형 구간에서의 오차가 증가함. B. 확대한 요형 구간. C. 확대한 하류 경사 급변 구간.

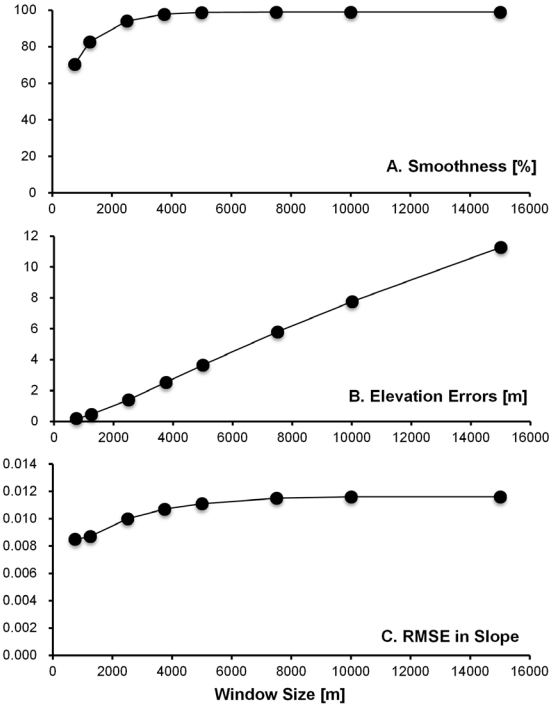

그림 7. 이동창 크기에 따른 평활화, 고도 및 경사 오차 민감도

A. 평활화 정도. 여기서는 하류로의 흐름을 방해하는 요형(凹型)이 나타나지 않는 비율을 의미함. B. 고도 오차 평균. DEM에서 추출한 원본 종단곡선과 이를 평활화한 종단곡선과의 고도 오차를 평균한 값. C. 경사 오차 평균 제곱근. 등고선 지형도로부터 수동으로 추출한 하천종단곡선의 10m 고도 간격별 평균 경사와 평활화한 하천종단곡선의 10m 고도 간격별 평균 경사와의 차이 제곱 평균을 제곱근한 값(Root Mean Square Error, RMSE).

로 갈수록 증가하는 특성을 가진다. 하류 방향으로의 이동창 크기 증가 정도는 수식 (1)의 매개변수 K_1을 통해 조절할 수 있다. 기본적으로 수식 (1)은 거리의 제곱근에 비례하고 있기 때문에 거리가 멀어질수록 이동창 크기가 선형적으로 증가하는 것이 아니라 비선형적으로, 즉 초기에는 빠르게 증가하였다가 하류로 갈수록 완만하게 증가한다(그림 8A2).

여기서는 K_1 값을 달리하며 다양하게 평활화를 시도하였다(그림 9). 앞서 고정 이동창 방법과 유사하게 K_1이 증가할수록 원본 종단곡선상의 요철이 보다 평활화되면서 자연스런 하천종단 형태를 보였다(그림 8). 특히 K_1이 2,000에(이동창 최대 크기는 약 1,713m, 전체 종단거리의 2.3%) 도달하기 전까지 평활화 효과가 크게 나타났으며, 그 이후부터는 아주 완만하게 증가하였다.

하류 증대 이동창을 이용하여 평활화한 하천종단곡선은 앞서 고정 이동창 방법과 달리 상류의 요형 구간에서 인위적인 고도 상승 현상이 나타나지 않아서 보다 자연스러운 하천종단을 보여주었다(그림 8B). 이는 평활화 방법 특성상 하천 상류부, 즉 요형 구간에서는 이동창의 크기가 상대적으로 작아서 바로 인접한 노드들의 고도값만을 이용하여 평균값을 계산하기 때문이다.

하지만 하류 구간에서 국지적인 경사 급변 구간을 과도하게 평활화하여 제대로 표현하지 못하는 문제점이 발생하였다(그림 8C). 이는 하류로 갈수록 이동

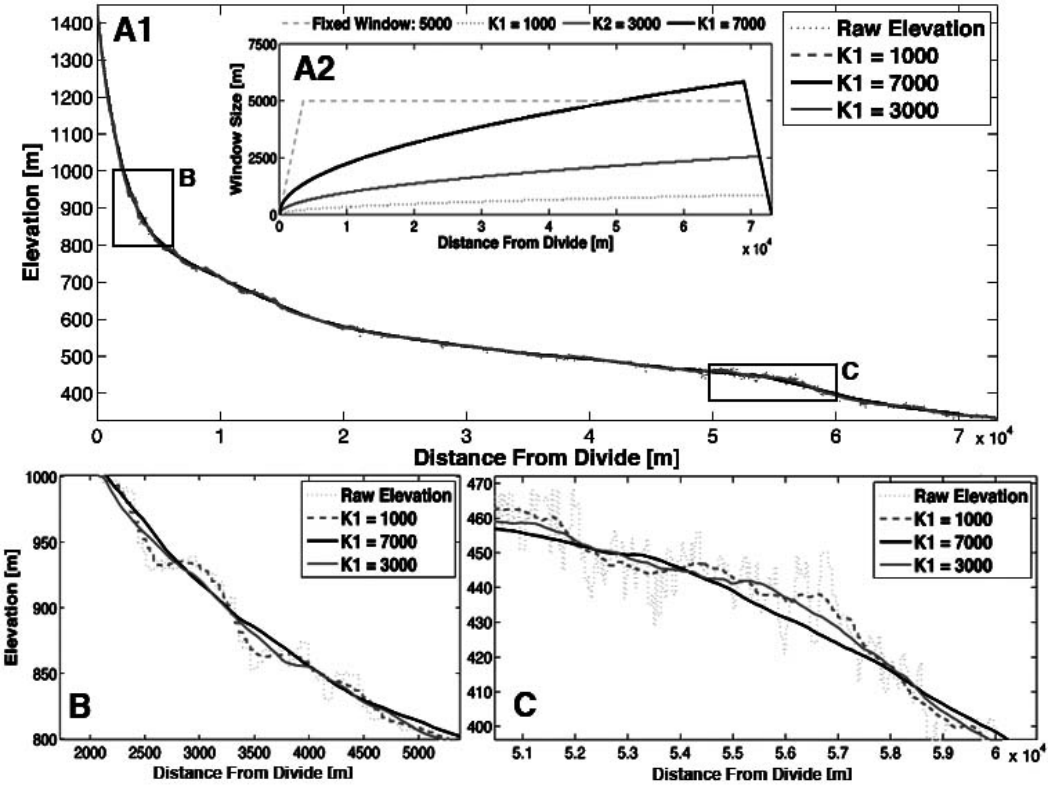

그림 8. 하류 증대 이동창을 이용하여 평활화한 하천종단곡선

DEM에서 직접 추출한 원본 종단곡선과 수식 (1)의 K_1을 각각 1000, 3000, 7000으로 설정하고 평활화한 종단곡선. A1. 전체 하천종단. A2. 거리에 따른 이동창 크기. 비교를 위해 고정 이동창 크기가 5,000m인 것을 추가함. 최하류 구간에서 이동창 크기가 급감하고 있는데, 이는 평균값 계산시 경계효과(boundary effect)를 방지하기 위해 임의로 줄인 것임. B 확대한 요형 구간. C. 확대한 하류 경사 급변 구간.

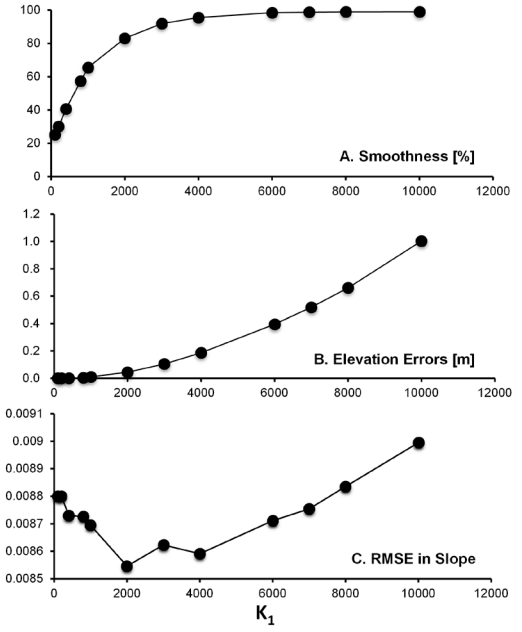

그림 9. 매개변수(K_1)에 따른 평활화, 고도 및 경사 오차 민감도

창의 크기가 증가하는 자체 속성 때문이다. 따라서 오대천보다 더 긴 연장을 가진 하천의 경우에는, 하류부에서 나타나는 경사 급변 구간의 고도 및 경사가 상당히 왜곡될 가능성이 있다고 판단된다.

(3) 등고선 간격별 내삽 평활화

앞서 이동창을 이용하여 평활화하는 방법들과 달리, 이 방법은 일정한 등고선 간격으로 고도값들을 재추출하고 이들을 내삽하여 평활화한다. 따라서 여기서는 등고선 간격을 달리하며 평활화를 시도하였다. 방법 자체 특성상 제일 작은 등고선 간격에서도 종단곡선상의 모든 요철이 제거되었으며, 등고선 간격이 증가할수록 보다 자연스런 하천종단 형태를 보였다(그림 10). 특히 등고선 간격이 30m(하천종단 전체 고도의 약 2.7%)일 때는, 고정 이동창 방법에서 나타났던 상류 요형 구간에서의 임의적인 고도 상승이 관찰되지 않을 뿐만 아니라 하류 증대 이동창 방법에서 하류의 국지적인 경사 급변 구간이 과도하게 평활화되던 현상도 나타나지 않았다(그림 10B). 하지만 등고선 간격이 100m(하천종단 전체 고도의 9%)를 넘어가면서는 고도 및 경사의 오차가 크게 증가하는 것으로 나타나, 이 등고선 간격 이상은 하천종단을 제대로 표현하지 못하는 것으로 판단된다(그림 11).

작은 등고선 간격에서도 높은 평활화 효과를 보여준 것과는 달리, 이 방법은 다음과 같은 몇 가지 한계점을 가지고 있었다. 우선 등고선 간격이 작은 경우에는 인위적인 경사 급변점이 나타난다(그림 10B). 이는 원본 종단곡선의 끝 지점에서부터 단조증가하는 함수를 만들고(그림 3A), 이를 기준으로 등고선 간격별로 고도를 재추출하기 때문이다(그림 3B). 이로 인해 특히 원본 DEM이 국지적인 오류(실제 고도보다 과대 추정된 노드 또는 하천의 인공 구조물)를 많이 내재한 경우, 이들 오류에 상당히 민감하게 반응하여 인위적인 평지 또는 경사 급변점을 포함하는 종단곡선을 생성할 수 있다.[4)]

또한 평활화된 종단곡선의 고도가 전체적으로 과도하게 상승하는 현상이 발생한다. 앞서 고정 이동창 방법을 이용하여 98.8%의 평활화 정도를 보인 종단곡선(이동창 크기: 3,750m)의 고도 오차 평균은 3.66이고(그림 7), 하류 증대 이동창 방법을 이용하여 98.5%의 평활화 효과를 보인 종단곡선(K1: 7,000)의 고도 오차 평균은 0.52이다(그림 9). 이에 반해 이 방법은 모든 등고선 간격에서 최소 4 이상의 고도 오차 평균값을 보였다(그림 11). 특히 상대적으로 고도 오차가 적었던 등고선 간격 20m 조건에서도 많게는 30m 이상이 상승하는 지점이 발생한다(그림 10B). 이같은 높은 고도 오차는, 기존 방법들이 대체로 종단곡선상의 낮은 지점을 상승시키고 높은 지점은 하강시키면서 요철을 평활화하였지만, 이 방법은 낮은 지점을 주로 상승시키기만 했다는 것을 의미한다. 물론 이 같은 현상은 DEM 자체의 오류 정도와도 관련성이 있지만, 단조증가 함수에 근거하고 있는 평활화 방법 자체의 특성과 보다 밀접한 관련성이 있는 것으로 판단된다.

2) 새로운 평활화 방법: 일정 고도 간격 이동창 평활화

기존 평활화 방법들의 특성을 분석한 결과, 고정 이

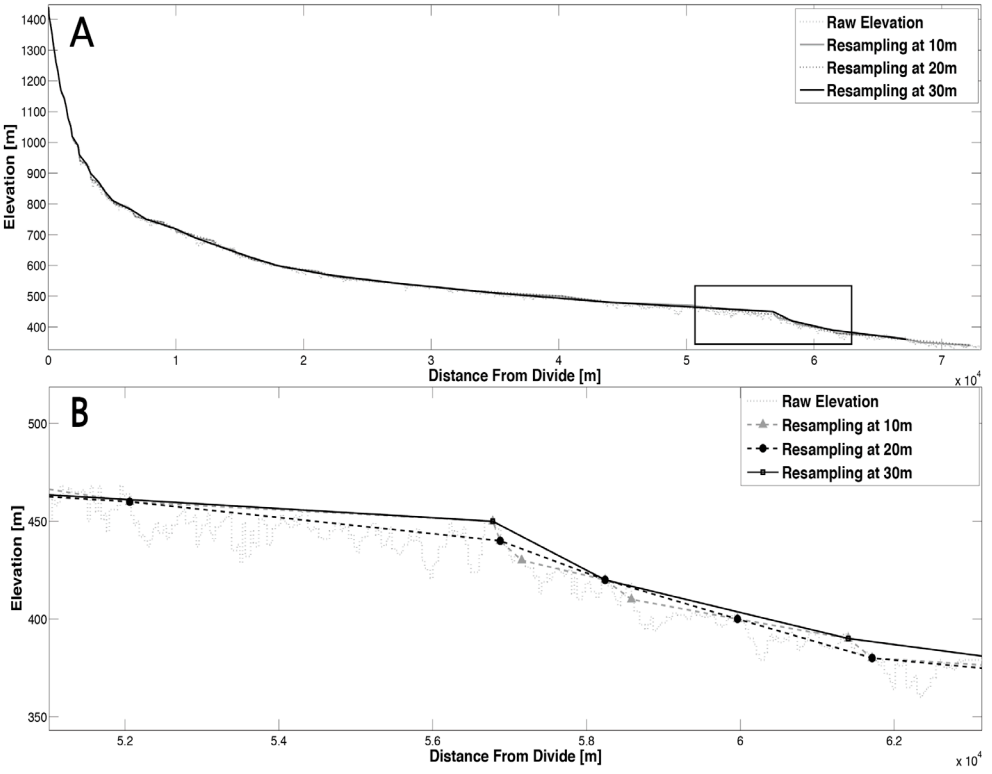

그림 10. 등고선 간격별 내삽 방법으로 평활화한 하천종단곡선

DEM에서 직접 추출한 원본 종단곡선과 등고선 간격을 각각 10, 20, 30m로 설정하고 평활화한 종단곡선. A. 전체 하천종단. B. 확대한 하류 경사 급변 구간.

동창 및 하류 증대 이동창 방법은 각각 상류 요형 구간과 하류의 경사 급변 구간을 적절하게 반영하지 못하였다. 한편 등고선 간격별 내삽 방법은 특정 구간의 고도 왜곡은 나타나지 않았으나, 방법 특성상 원본 DEM 오차에 민감하게 반응하여 인위적인 경사 급변점이 발생하거나 고도가 과도하게 상승하는 현상이 발생하였다.

따라서 여기서는 기존 평활화 방법들의 이 같은 한계점들을 개선하면서 동시에 각 방법들의 장점들을 아우를 수 있는 새로운 평활화 방법을 제안한다. 새로운 평활화 방법의 주안점은 다음과 같다. 첫째, 새로운 평활화 방법은 하천종단 전 구간의 고도 변화를 잘 반영할 수 있도록 한다. 특히 고정 이동창 방법에서 나타난 상류 요형 구간의 인위적 고도 증가 현상이 발생하지 않도록 하고, 동시에 하류 증대 이동창 방법에서 문제가 된 하류 경사 급변 구간의 과도한 평활화 현상도 감소시킨다. 둘째, 새로운 방법은 원본 DEM 오차에 덜 민감하면서도 과도한 고도 왜곡이 나타나지 않도록 한다.

이상의 목적을 구현하기 위해 본 연구에서 제안하는 평활화 방법은 기본적으로 이동창을 이용하여 평활화를 수행하지만, 이동창의 크기가 고정되거나 혹은 일방적으로 증가하는 것이 아니라, 이의 크기를 일정한 고도 간격에 대응하여 가변적으로 결정되도록 하였다. 이로 인해 고도 변화가 큰 구간에서는 이동창의 크기가 줄어들고, 변화가 작은 구간에서는 이동창의 크기가 늘어나게 된다(그림 12). 결국 새로운 평활화 방법은, 특정 구간의 고도 왜곡이 발생하지 않았던 등고선 간격별 내삽 방법의 장점을 계승하면서도, 내삽이 아니라 이동창을 이용한 평균값을 계산함으로

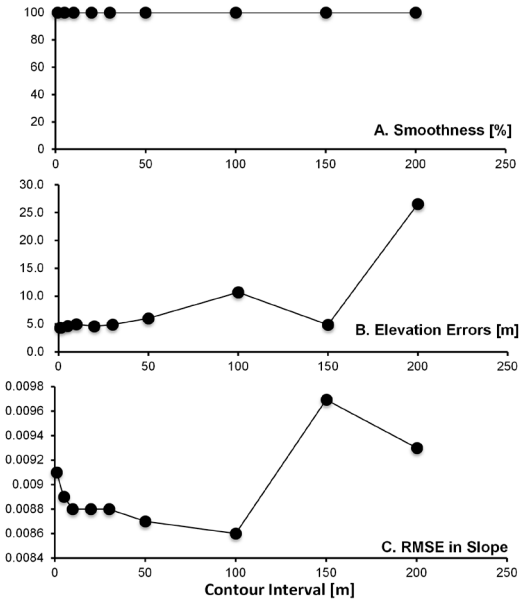

그림 11. 등고선 간격에 따른 평활화, 고도 및 경사 오차 민감도

써 DEM 오류가 민감하게 반영되어 과도한 고도 왜곡이 발생하던 문제점을 해결할 것으로 기대된다.

평활화를 위한 세부 과정은 다음과 같다. 1) 원본 종단곡선의 최종 말단부에서부터 단조증가하는 함수를 만든다(그림 12A). 2) 등고선 간격(CI)별로 고도값을 재추출하고 이를 내삽하여 곡선을 구한다(그림 12B). 3) 하천 시작점부터 시작하여 끝지점까지 다음의 작업을 반복한다. 내삽하여 구한 곡선을 기준으로 하여, 주어진 점의 상류와 하류 방향으로 일정 고도 간격(HI) 범위 내에 있는 셀들을 파악하고(동시에 이동창의 크기가 결정됨), 이들 셀의 평균 고도값을 구하여 대치한다(그림 12C).

여기서 세부 과정의 1)~2)는 등고선 간격별 내삽 방법의 절차와 동일하다. 그리고 이후 내삽하여 구한 곡선을 기준으로 3)에서는 일정 고도 간격을 기반으로 이동창 크기를 결정하고 이를 이용하여 평활화를 수행한다. 따라서 새로운 평활화 방법에는 등고선 간격과 일정 고도 간격이 주요한 매개변수이다.

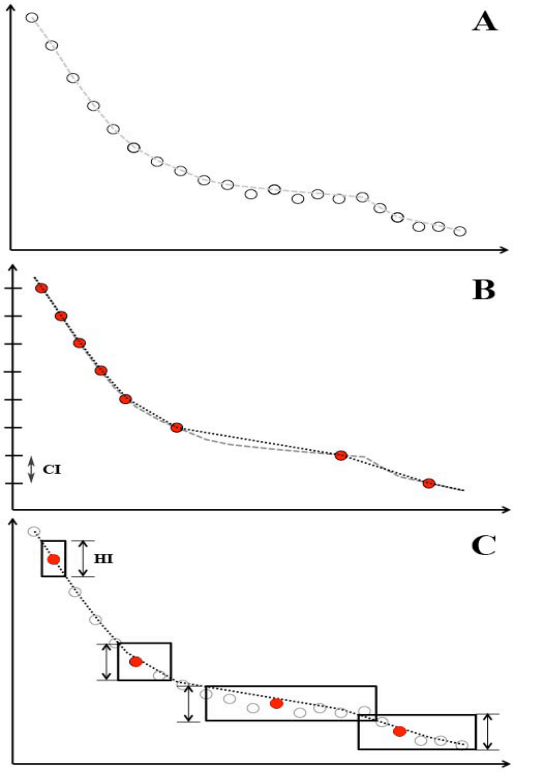

그림 12. 일정 고도 간격 이동창을 이용한 평활화 개념도

A. 원본 종단곡선에서 만든 단조 증가 함수. B. 등고선 간격(contour interval, CI)별로 추출된 고도와 이를 내삽한 곡선. C. 내삽 곡선을 기준으로 일정 고도 간격(height interval, HI)을 기반으로한 이동창 크기.

3) 새로운 평활화 방법의 유용성 검증

새로 제안한 평활화 방법의 유용성을 검증하기 위해 여기서는, 주요 매개변수(등고선 간격, 고도 간격)를 달리하며 평활화를 수행하고, 이를 통해 새 평활화 방법의 특성과 비교 분석에 사용될 최적의 매개변수 조건을 파악하며, 이후 새 방법을 적용한 종단곡선과 기존 방법들을 적용한 종단곡선을 비교 분석하였다.

(1) 새로운 평활화 방법의 특성

일정 고도 간격 이동창 방법의 주요 매개변수인 등고선 간격과 고도 간격을 달리하며 평활화를 수행하였으며, 이를 통해 얻은 하천종단들의 평활화 정도, 고도 오차 평균, 그리고 경사 오차의 평균 제곱근을

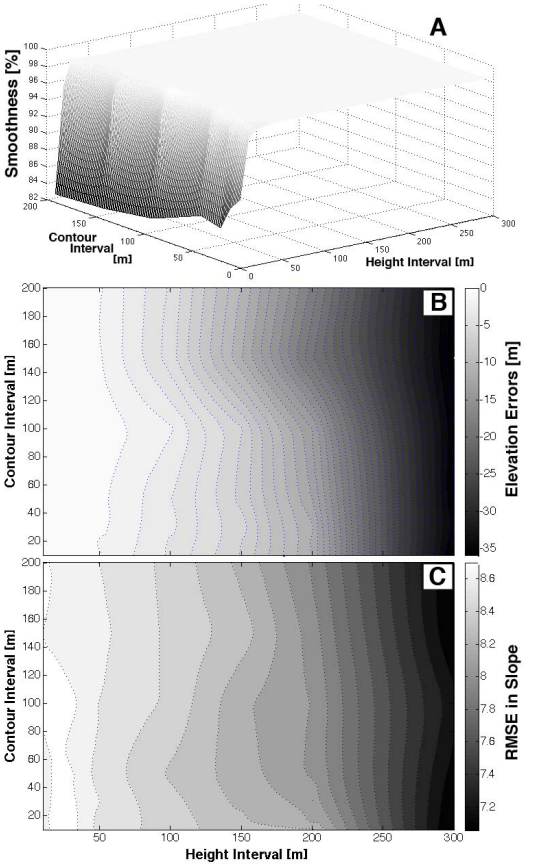

그림 13. 새 평활화 방법의 주요 매개변수에 대한 민감도 분석 결과

등고선 간격과 고도 간격을 달리하면서 측정한 평활화 정도(A), 고도 오차 평균(B), 경사 오차의 평균 제곱근(C).

분석하였다(그림 13). 분석 결과, 예상했던 것과 달리 등고선 간격은 평활화 정도에 큰 영향을 주지 않았으며, 고도 간격이 일차적으로 평활화 정도를 결정지었다(그림 13A). 특히 고도 간격이 약 100m(전체 종단 고도 범위의 약 9%)에 도달하기 전까지 평활화 효과가 가장 컸고, 그 이후부터는 아주 완만하게 상승하였다. 이 같은 고도 간격에 따른 평활화 효과는 앞서 이동창을 이용하는 두 방법(고정 이동창, 하류 증대 이동창)에서 나타난 경향과 유사하다.

한편 고도 및 경사 오차의 분포 역시, 등고선 간격보다는 고도 간격에 일차적으로 영향을 받았으며(그림 13B, 13C), 고도 간격이 증가할수록 고도 및 경사 오차도 대체로 증가하는 것으로 나타났다. 특히 고도 간격이 70m(전체 종단 고도 범위의 7.5%) 이상부터 고도 및 경사의 오차가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이 같은 경향은 고도 간격이 증가할수록 경계효과(boundary effect) 또한 증가하여 실제 하천종단 형태와 멀어지기 때문으로 판단된다. 따라서 평활화 정도가 크면서도 고도 및 경사 오차가 최소화되는 매개변수 조건을 평활화를 하기 전에 탐색하는 것이 바람직할 것이다.

(2) 기존 평활화 방법과의 비교 분석

공정한 비교를 위해, 개별 평활화 방법을 적용한 하천종단이 약 99%까지 평활화 정도를 보이면서도 고도 및 경사 오차가 최소화되는 매개변수 조건을 찾고, 이들 조건에서 평활화된 하천종단곡선들을 비교 분석하였다(그림 14, 표 1). 여기서 이동창을 이용한 방법들과 달리, 등고선 간격별 내삽 방법을 적용한 하천종단은 모든 구간에서 100% 평활화를 보이기 때문에, 고도 및 경사 오차가 최소화되는 조건(등고선 간격: 100m, 고도 간격: 32m)을 선택하였다.

분석 결과, 고정 이동창 방법이 적용된 하천종단은 상류 요형 구간에서 인위적인 고도 상승 현상이 여전히 관찰되었다(그림 14B). 이로 인해 고도 오차의 평균값은 다른 방법들에 비해 상대적으로 큰 양의 값을 보였으며, 경사 오차 평균 제곱근 또한 다른 방법들에 비해 가장 큰 0.0111로 나타났다(표 1). 특히 오대천 하류의 하도 경사값이 대체로 소수점 3~4자리로 표현된다는 점을 고려할 때 이러한 차이는 상당히 큰 것으로 볼 수 있다.

이에 반해 하류 증대 이동창 방법을 적용한 하천종단은 고정 이동창 방법에 비해 고도 및 경사 오차가 상당히 감소하였다(표 1). 하지만 하류의 경사 급변 구간에서는 여전히 과도한 평활화가 발생하여 이를 적절히 표현하지 못했다(그림 14C). 비록 고도 및 경사의 오차가 다른 방법에 비해 상당히 감소하였지만, 방법 특성상 상류에서 하류로 갈수록 보다 큰 이동창을 이용하여 고도 평균값을 구하기 때문에 하류에 분포하는 경사 급변 구간에서는 과도한 평활화가 발생한 것으로 판단된다.

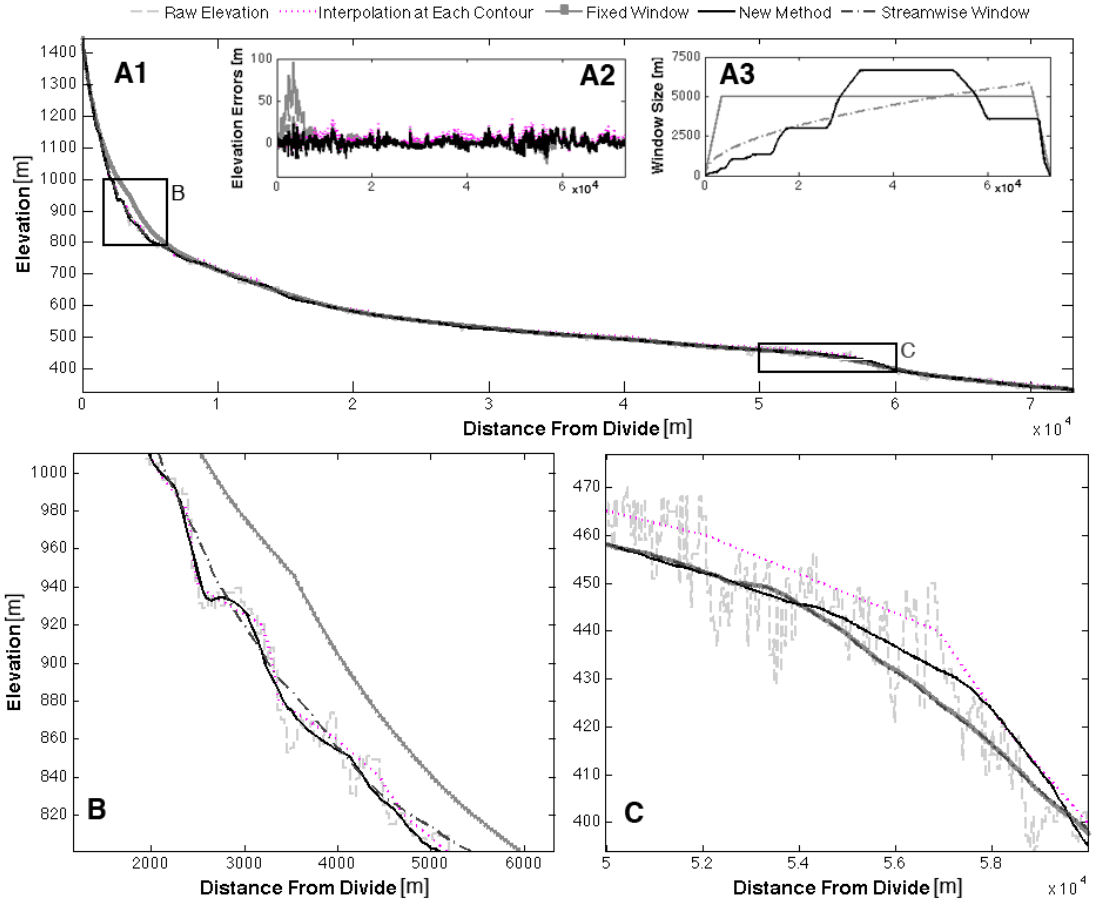

그림 14. 기존 방법 및 새로운 방법을 이용하여 평활화한 하천종단곡선

DEM에서 직접 추출한 원본 종단곡선과 고정 이동창(Fixed Window; 이동창 크기 5,000m), 하류 증대 이동창(Streamwise Window; K_1=7,000), 등고선 간격별 내삽(Interpolation at Each Contour; 등고선 간격 20m), 그리고 일정 고도 간격 이동창(New Method; 등고선 간격 100m, 고도 간격 32m)을 이용하여 평활화한 하천종단곡선. A1. 전체 하천종단. 모든 종단곡선은 약 99% 수준에서 평활화됨. A2. 고도 오차. A3. 이동창 크기(등고선 간격별 내삽법 제외). 일정 고도 간격 이동창 방법은 창크기가 하천종단의 고도 변화에 따라 가변적인 것을 확인할 수 있음. B. 확대한 상류 요형 구간, C. 확대한 하류 경사 급변 구간.

등고선 간격별 내삽 방법을 적용한 하천종단은 이상의 방법들과 달리 100% 평활화를 보여주었으며, 특히 상류 또는 하류에 상관없이 전체 구간의 고도를 적절하게 표현하였다(그림 14B, 14C). 하지만 방법 특성상 전체 하천종단의 고도가 조금씩 상승하여 다른 방법들에 비해 고도 오차 평균값이 양의 방향으로 가장 높게 나타났다(표 1). 또한 등고선 간격에 해당하는 지점에서는 인위적인 경사 급변점이 여전히 나타났다.

한편 새로 제안한 일정 고도 간격 이동창 방법은 유사한 평활화 정도임에도 불구하고 고도 오차 평균이 가장 작게 나타났다(표 1). 이는 하류의 경사 급변 구간에서도 고정 및 하류 증대 이동창 방법과 달리 과도한 평활화가 발생하지 않았고, 또한 DEM 오류에도 덜 민감하게 반응하며 고도 상승효과가 나타나지 않았기 때문이다(그림 14C). 따라서 새로운 평활화 방법은 기존 방법들의 한계점을 어느 정도 극복한 것으로 판단된다.

표 1. 기존 방법 및 새로운 방법을 이용하여 평활화한 종단곡선의 속성 분석

	고정 이동창	하류 증대 이동창	등고선 간격별 내삽	일정 고도 간격 이동창
매개변수 조건	창 크기: 5,000m	K1: 7,000	등고선 간격: 20m	등고선 간격: 100m 고도 간격: 32m
평활화 정도[%]	98.8	98.8	100.0	98.7
고도 오차 평균 [m]	3.66	0.52	4.62	−0.11
경사 오차 평균 제곱근	0.0111	0.0088	0.0088	0.0087

5. 논의: 평활화 방법 선택을 위한 제언

앞장의 연구결과를 통해 각 평활화 방법의 장점과 한계점이 분명하게 드러났다. 고정 이동창 평활화는 가장 간단한 방법이지만, 99%의 평활화 정도에서 상부 요형 구간의 임의적인 고도 상승을 필연적으로 동반하며 이로 인해 고도 및 경사의 오차가 다른 방법들에 비해 크다. 하류 증대 이동창 평활화는 하상고도 변화의 내재적 속성에 착안하여 이동창 크기가 하류로 갈수록 증대하며, 이로 인해 같은 평활화 정도에서 고도 오차가 상당한 수준으로 감소한다. 하지만 하류로 갈수록 이동창 크기가 커지기 때문에 하류의 경사 급변 구간을 제대로 표현하지 못한다. 한편 등고선 간격별 내삽 방법은 일정한 등고선 간격별로 고도를 재추출하는 과정을 거치기 때문에, 상류 혹은 하류 특정 구간에서 임의적인 고도 오차가 발생하지 않는다. 하지만 전체 하천종단의 고도가 과도하게 상승하는 경향이 있고, 방법 특성상 DEM 오류에 민감하게 반응하여 하천종단에 큰 왜곡을 가져올 수 있다. 본 연구에서 제안한 일정 고도 간격 이동창 평활화는 등고선 간격별 내삽 방법의 장점을 계승하여 특정 구간의 고도 오차가 발생하지 않으면서, DEM 오류에 덜 민감하여 이로 인한 왜곡도 적다.

한편 공통적으로 나타나는 흥미로운 점들은 다음과 같다. 첫째, 99%의 평활화 정도를 보인 하천종단을 서로 비교하면, 고정 이동창 방법을 제외하고는 경사 오차값에서 큰 차이가 관찰되지 않는다. 둘째, 수평적인 이동창을 이용한 방법들(고정 이동창, 하류 증대 이동창 평활화)에서는 이동창의 크기가 하천 연장의 2~3%를 넘어설 경우, 평활화 정도는 아주 완만하게 상승하지만 고도 오차는 빠르게 증가하는 경향이 있다. 셋째, 수직적인 고도가 기준이 되는 방법들(등고선 간격별 내삽, 일정 고도 간격 이동창 평활화)에서는 등고선 혹은 고도 간격이 하천종단 고도 범위의 10% 이상일 때부터 고도 오차가 빠르게 증가하는 경향을 보인다. 넷째, 이동창을 이용한 방법들(고정 이동창, 하류 증대 이동창, 일정 고도 간격 이동창 평활화)에서는 이동창 크기가 증가할수록, 평활화 정도는 음의 비선형적인 증가를 보이고 고도 오차는 양의 비선형적 증가를 보인다. 따라서 평활화 정도를 높이면서도 고도 오차를 최소화하는 매개변수 조건을 탐색하는 것이 중요하다.

그렇다면 어떤 평활화 방법을 선택하는 것이 가장 좋은가? 이 같은 물음에 답하기 위해서는, 평활화 방법에 대한 고민을 담은 기존 연구들에서 분석된 하천종단의 특성과 이들의 평활화 매개변수 조건을 정리해볼 필요가 있다.

우선 하류 증대 이동창 방법을 고안한 Harbor *et al.*(2005)은 북미 애팔래치아 Mauri River 유역에서 기준면 변화가 초래하는 유역의 반응과정을 파악하기 위해 하천종단을 분석하였다. 분석한 하천종단은 연장이 350~500km에 달하며 고도 범위는 1,000m 미만이었다. 특히 주요한 분석 대상인 하천 천이점의 규모는 폭이 5km를 넘고 고도차는 50~100m에 달한다(Harbor *et al.*, 2005, Fig. 2). 만약 Harbor *et al.*(2005)이 제안한 수식 및 매개변수 조건을 그대로 이용한다면, 최대 이동창 크기는 4,242~4,972m(전체 연장의 약 1%) 정도로 추정된다. 앞서 연구결과를 감안하면, 이 같은 이동창 크기에서 평활화된 하천종

단은 높은 수준의 평활화에 도달하지는 못하더라도 고도 오차는 상대적으로 작았을 것으로 판단된다. 비록 하류로 갈수록 이동창이 커져 하류의 경사 급변 구간을 제대로 표현하지 못할 가능성이 있지만, 주요 분석 대상인 하천 천이점의 규모가 상대적으로 크기 때문에 이들이 제안한 평활화 방법 및 매개변수 조건이 어느 정도 유효했을 것으로 생각된다.

한편 등고선 간격별 내삽 평활화를 다룬 Wobus *et al.*(2006)은 네팔 중부의 Trisuli River, Burhi Gandaki, Marsyandi 유역의 하천종단을 분석하였으며, 주로 상부기여면적과 하도 경사와의 관계에서 추정한 요형도(concavity index)와 경사도(steepness index) 분석을 수행하였다. 분석한 하천들의 연장은 150~250km에 달하고 고도 범위는 4,000m를 상회하였으며, Wobus *et al.*(2006)은 이들 하천종단을 30m(전체 고도 범위에서 최소 0.8%) 등고선 간격으로 평활화 하였다. 앞장의 연구결과를 감안할 때, 이같은 등고선 간격에서 평활화된 하천종단은 상당한 고도 오차를 가지며 형태적으로 인위적인 경사 급변점이 발생했을 것으로 추정된다. 하지만 이들의 연구가 하도 경사를 기반으로 한 요형도와 경사도 분석에 의존하고 있으며, 하도 경사 오차가 이 정도의 등고선 간격에서는 상대적으로 작았던 점을 고려한다면 이들의 연구결과도 유효한 것으로 판단된다.

결국 지금까지의 논의를 바탕으로 본다면 하나의 평활화 방법만을 좋은 것으로 단정하기 어렵다. 연구과정에서의 효율성, 연구지역의 규모, 분석 대상에 따라 다음과 같이 그 선택이 달라질 수 있을 것으로 생각된다. 우선 연구지역 규모 및 분석 대상을 고려하기보다 평활화한 종단곡선을 빠르게 얻으려면 고정 이동창 방법이 좋을 것이다. 둘째 하천 연장이 그리 길지 않고, 하류의 국지적인 경사 급변 구간보다는 큰 규모의 하천 천이점을 주로 분석한다면, 하류 증대 이동창 방법이 적합할 것이다. 셋째 하천 연장이 상당히 길고, 상류 또는 하류에서도 경사 급변 구간이 잘 나타나며, 하상 고도의 정확성보다 상부기여면적과 경사 관계에 초점을 두고 분석할 경우에는, 등고선 간격별 내삽 평활화가 적합할 것이다. 끝으로 상대적으로 절차가 복잡하지만, 위 조건에서 하상고도까지 실제 하천에 가까운 종단곡선을 원한다면, 본 연구에서 제안한 일정 고도 간격 이동창 방법이 보다 적절할 것이다.

6. 결론

DEM의 활발한 보급으로 인해, 하천종단을 분석하는 연구가 상당히 용이해졌으며 많은 수의 하천종단 분석이 필요한 지역적 규모의 연구도 가능하게 되었다. 하지만 DEM으로부터 추출한 하천종단은 DEM 자체의 오류로 인해 많은 문제점을 가지고 있으며, 이 같은 문제점을 해결하기 위해 기존 연구들에서는 다양한 평활화 방법을 적용하여 자연스런 하천종단을 만들고 이를 토대로 하천종단 특성을 분석하였다.

하지만 평활화 방법의 특성상 원본 하천종단이 변형될 수 밖에 없으며 변형된 하천종단이 실제 하천종단을 적절하게 표현하는지에 대한 객관적인 평가 작업이 지금까지 없었다. 또한 개별 평활화 방법이 어떤 규모 혹은 특성을 가진 하천에 적합하지에 대한 논의도 었었다. 본 연구에서는 DEM에서 추출한 하천종단곡선을 평활화하는 주요 방법들의 특성을 분석하고, 이들 방법들의 한계점을 극복하는 새로운 평활화 방법을 제안하였으며, 기존 방법들과 새로이 제안한 방법을 적용한 하천종단곡선들과의 비교 분석을 통해 새 방법의 유용성을 검증하였다.

연구결과, 고정 이동창 평활화는 가장 간단하지만 상류 요형 구간의 인위적인 고도 상승을 가져오고, 하류 증대 이동창 평활화는 고도 오차를 상당히 감소시키지만 하류에 분포하는 경사 급변 구간을 제대로 표현하지 못하며, 등고선 간격별 내삽 평활화는 상류 혹은 하류 특정 구간에서의 인위적인 오차가 발생하지 않지만 전체 하천종단의 고도가 과도하게 상승하는 경향이 관찰되었다.

새로이 제안한 일정 고도 간격 이동창 평활화는 등고선 간격별 내삽 방법의 장점을 계승하면서도 고도 오차까지 감소시키는 것으로 나타났다. 다양한 평활화 방법 중에 하나를 선택하는 것은 연구의 효율성,

연구지역의 규모 그리고 분석 대상에 따라 달라질 수 있다. 비록 절차가 다른 방법에 비해 복잡하지만, 하천 연장이 길고 상류 또는 하류에서 국지적인 경사 급변 구간이 잘 나타나며, 실제 하상 고도와 가까운 종단곡선을 필요로 한다면, 본 연구에서 제안하는 평활화 방법이 적절할 것으로 판단된다.

사사

이 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2011-354-B00127).

주

1) 이를 위해 여기서는 하도 시작 지점부터 하도 끝 지점까지 다음의 작업을 반복한다. 주어진 셀의 이웃한 8개 셀들을 탐색하여 이들 중 하류 방향에 있으면서 가장 큰 상부흐름 누적량을 가진 셀을 찾아 이의 좌표를 기록하고, 다음 탐색을 위해 이 셀로 이동한다.
2) 이상적인 대조군으로 등고선 지형도에서 수동으로 추출한 하천종단을 이용하지 않고 DEM에서 추출한 하천종단곡선을 이용한 이유는, (2), (3) 단계를 통해 ArcGIS에서 계산된 하도 경로가 수동으로 추출한 자연 하도 경로와는 큰 차이를 보이고 이로 인해 이를 기반으로 추출한 고도값을 일대일로 비교한다는 것이 불가능하기 때문이다. 하지만 이 값을 통해 실제 하천종단의 고도 오차를 추정하는데 무리는 없을 것으로 생각한다.
3) 따라서 이는 등고선 지형도에서 추출한 하천종단이 이상적인 대조군임을 가정하고 있다. 한편 10m 등고선 간격으로 구분하고 이의 평균 경사를 이용한 이유는, 수동으로 추출한 하천종단의 하도 경로와 ArcGIS를 이용하여 추출된 하도 경로가 서로 달라 일대일 비교가 힘들기 때문이다.
4) 또한 이와 같은 연유로 실제 하천종단에서의 국지적 변동이 등고선 간격에 포함되느냐의 여부에 따라 고도 및 경사 오차가 큰 변동을 나타내기도 한다. 그림 11에서는 등고선 간격이 증가할수록 고도 오차 평균 및 경사 오차 평균 제곱근이 각각 증가–감소–증가, 감소–증가–감소 패턴을 보인다. 이 같은 변동은 오대천 종단곡선의 하류 경사 급변 구간(그림 10B)이 등고선 간격 내에 위치하여 부드럽게 된 경우와 반대로 간격 밖에 위치하여 과도한 경사 급변 구간으로 표현되면서 발생한 것이다.

참고문헌

Flint, J.J., 1974, Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge, *Water Resources Research*, 10, 969-973.

Gilbert, G., 1877, *Report on the Geology of the Henry Mountains*, Goverment Printing Office.

Goldrick, G., Bishop, P., 2007, Regional analysis of bedrock stream long profiles: Evaluation of Hack's SL form, and formulation and assessment of an alternative (the DS form), *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 649-671.

Goudie, A.S. (Ed.), 2004, *Encyclopedia of Geomorphology*, Routledge.

Harbor, D., Bacastow, A., Heath, A., Rojers, J., 2005, Capturing variable knickpoint retrea in the Central Appalachians, USA, *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 28, 23-36.

Jenson, S.K., Domingue, J.O., 1988, Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1593-1600.

Kirby, E., Whipple, K.X., Tang, W., Chen, Z., 2003, Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles, *Journal of Geophysical Research: B Solid Earth,* 108, ETG 16-1-16-4.

Lindsay, J.B., Creed, I.F., 2005a, Sensitivity of digital landscapes to artifact depressions in remotely-sensed DEMs, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71, 1029-1036.

Lindsay, J.B., Creed, I.F., 2005b, Removal of artifact depressions from digital elevation models: towards a minimum impact approach, *Hydrolological Pro-*

cesses, 19, 3113-3126.

Mackin, H., 1948, Concept of the graded river, *Bulletin of the Geological Society of America*, 59, 463-512.

Peckham, S., 2009, A new algorithm for creating DEMs with smooth elevation profiles, *Proceedings of Geomorphometry*, 34-37.

Snyder, N.P., Whipple, K.X., Tucker, G.E., Merritts, D.J, 2000, Landscape response to tectonic forcing: digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California, *Geological Society of American Bulletin*, 112, 1250-1263.

Whipple, K., Wobus, C., Crosby, B, Kirby, E, Sheehan, D., 2007, *New tools for quantitative geomorphology: Extraction and interpretation of stream profiles from digital topographic data*.

Willgoose, G., 1994, A physical explanation for an observed area-slope-elevation relationship for catchments with declining relief, *Water Resoures Research*, 30, 151-159.

Wobus, C., Whipple, K.X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropolou, K., Crosby, B., Sheehan, D., 2006, Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls, *Geological Society of Americal Special Paper*, 398, 55-74.

교신: 변종민, 136-713, 서울시 성북구 안암동 고려대학교 건축사회환경공학과 지표수문변화연구실(이메일: cyberzen.byun@gmail.com, 전화: 02-3290-4723)

Correspondence: Jongmin Byun, Surface Hydrology and Dynamics Research Group, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, South Korea (e-mail: cyberzen.byun@gmail.com, phone: +82-2-3290-4723)

최초투고일 2014. 4. 7
수정일 2014. 6. 5
최종접수일 2014. 6. 13