

1차원 수치모형을 이용한 기반암 하상 연구: 이론적 고찰

김동은* · 변종민** · 성영배***

The Study on the Change of Longitudinal Profiles Using 1-dimension Detachment-limited Bedrock Channel Model: Theoretical Approach

Dong Eun Kim* · Jongmin Byun** · Yeong Bae Seong***

요약 : 컴퓨터 기술의 발달은 기존의 정성적, 단계적 추론만이 가능했던 지형발달모형에 대한 검증과 더불어 지형발달 인자들의 영향을 정량화하고 앞으로의 지형변화까지 예측 가능하게 만들었다. 하지만 컴퓨터를 이용한 지형발달 연구는 국내에서는 아직까지 유아기적 단계에 있다. 본 연구는 1차원 기반암 하상 하천중단발달 모형의 이론적 배경과 원리, 그리고 1차원 모형을 이용하여 기반암 하상 하천중단곡선에 영향을 미치는 인자들인 용기율(U)과 침식관련계수 K, 그리고 유역분지형태를 변화시켜 그에 따른 하천중단곡선 변화를 정량적으로 살펴보았다. 연구 결과, 다른 조건을 동일하게 할 경우 침식보다는 용기가 하도의 변화에 더 큰 영향을 미쳤으며, 유역분지의 형태를 달리한 모의결과 유역면적이 넓은 경우 하천중단곡선 변화가 크게 나타났다. 본 연구는 지형발달에 관한 가장 단순한 1차원 모형을 이용하였지만 여러 가지 지표형성작용과 관련된 이론 및 2차원 모형을 통해 보완한다면 실제 지형의 변화를 좀 더 자세히 설명할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 1차원 수치 하천중단 발달 모형, 기반암 하상, 분리제어환경, 용기율, 침식관련 계수 K, 유역분지형태

Abstract : Advance of computer technology have helped not only to perform the qualitative analysis, but also to make quantitative analysis on the landscape evolution. The advanced landscape evolution model can predict the future change of landscape as well as prove the previous landscape model. However, there is little research for using landscape evolution model for determining each landscape process in Korea. This research has attempted to introduce the theoretical frame in 1- dimension bedrock channel model and to simulate the model for understanding the effect of parameters controlling the change in channel geometry. The result of this study indicates that the rock uplift rate has a greater effect on the development of longitudinal profile than rate of erosion and degree of basin wideness also changes the longitudinal profile than others. This study suggests the fact that if we consider other geomorphic processes and combine them with this simple model, we can tell more stories about the landscape evolution processes.

Key Words : 1-dimension numerical model, Bedrock channel, Detachment-limited channel

I. 지구의 표면은 다양한 지형의 집합체이며, 이들은 물리적인 형태적 특징으로 구분이 가능하다. 이러한 지표면의 형태를 변화시키는 원인으로는 크게 내인적 작용과 외인적 작용이 있으며, 이들은 서로 상호작용을 하면서

*고려대학교 지리교육과 박사과정(Ph.D. Student, Department of Geography, Korea University, roehddms@korea.ac.kr)

**고려대학교 건축사회환경공공학과 연구교수(Research Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University, Cyberzen.byun@gmail.com)

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

서 지표면의 형태를 끊임없이 변화시킨다. 외인적 작용이나 내인적 작용 결과가 반영된 지형 중에서 특히 그 형태적인 특징들이 분명하여 자연과학의 연구 재료로서 가치가 있는 지형들을 지형학적 표시(Geomorphic marker)라고 부른다. 대표적인 예로 침식 기준면의 변화로 생긴 단구, 빙하의 퇴적에 의해서 만들어진 모레인 등이 있다.

지형학은 지표 기복의 특성과 그 기복이 어떻게 만들어졌는지를 연구하는 학문으로 지형학적 표시가 어떻게 만들어졌고 그 발달과정에 대해서 분석하는 특성이 강했으며, 그 이론적인 내용들을 설명하고 표현하는 정성적이고 개념적인 도구로서 모형(model)이 사용되었다. 그러나 지형학에서의 모형은 목적이 가진 한계로 인해 제한적인 역할만 수행할 수 있었다. 예를 들어 Davis(1899)는 사면을 유년기 → 장년기 → 노년기로 나누어 각 시기마다 어떠한 모습으로 사면의 형태가 변하는지 설명하였는데, 이러한 시도는 1960년대 이전까지 지형을 해석하고 설명하는 틀로서 중요한 역할을 했지만 과학적인 방법으로 검증할 수 없었고 앞으로의 지형발달과정을 정량적으로 예측할 수 없었다(변종민·김종욱, 2011).

1960년대 이후 지형학에서도 체계이론을 도입하고 정량적인 연구방법론들을 이용하게 되면서 지형을 체계로 간주하고 이들의 관계를 설명하려는 기능적 지형학이 새로운 연구 패러다임으로 등장하였다(김종욱, 1989). 이러한 연구방법론은 보통 물리학 법칙들을 바탕으로 미분방정식과 같은 수식들을 이용하여 시간의 변화에 따른 지형변화를 설명하고자 한다. 이는 다시 말해 기존에 존재하는 정성적인 지형발달모형들을 정량적으로 검증할 수 있음을 의미한다(변종민·김종욱, 2011). 특히 컴퓨터 기술의 발달로 인해 수치 계산의 효율성이 증가하면서 다양한 지표 형성 과정을 설명할 수 있는 연구들이 등장하였다. 예를 들어 지표 형성 과정들의 상호작용이 유역 발달에 미치는 영향(Willgoose *et al.*, 1991), 제4기동간의 기후 변화가 지표 물질 이동 및 지형 변화에 미치는 영향(Tucker and Slingerland, 1997), 긴 시간 규모에서 지표 형성 작용과 지구구조작용의 상호작용으로 인한 대규모의 지형발달과정(Tucker and Slingerland, 1994) 등이 있다.

해외에서는 위와 같이 다양한 지형들을 연구하기 위해 수치지형발달모형이 활발하게 이용되고 있지만 국내에서는 이를 이용한 연구가 거의 없었다. 1차원 모델을 이용한 연구로는 디퓨전 공식 모델을 이용한 사면의 형

태적인 특징을 바탕으로 사박 사면에 대한 연대를 추정하는 연구(이민부, 1999)나 수리 모형을 이용하여 용기울의 변화가 기반암 하상 하천중단곡선에 미치는 영향에 대한 연구(Kim, 2004)가 있으며 2차원 모델을 이용한 연구는 영동지역을 대상으로 지질시간 규모에서 지형발달과정을 살펴본 연구(변종민, 2011)가 있다.

하천은 앞서 언급한 내인적, 외인적 변화에 가장 민감하게 반응하는 지형으로 하천중단곡선의 형태 및 중단곡선상에서 추출할 수 있는 다양한 정보들을 이용하여 과거의 지형을 추론하거나, 어떠한 변화를 겪었는지 유추하는 연구들이 많이 진행되었으며 그 종류는 크게 퇴적이 주도하는 환경과 기반암 하상처럼 침식이 주도하는 환경 두 가지로 나누어 진다. 그 중에서도 기반암 하상은 다른 모형들에 비해 비교적 변수들을 제한하기 쉽기 때문에 수식화되어 연구가 많이 진행되었다.

본 연구에서는 기반암 하상에서 사용하는 1차원 모형을 이용하여 기반암 하상에 영향을 미치는 인자들에 대해서 살펴보고 그 인자들이 하천중단곡선 상에서 어떻게 변화하는지 살펴보고, 얼마나 하상변화에 영향을 미치는지 정량적으로 살펴보고자 한다.

II.

1. 1차원 기반암 하상 모형

하천은 기후 변화나 지구조적인 운동에 의해 침식기준면의 변화가 오면 중단곡선의 형태를 변화시키면서 적응한다(Bridgland and Westaway, 2008). 따라서 하천중단곡선의 형태적인 분석을 통해 정성적으로 하천이 변화에 적응을 마쳤는지, 아니면 계속 변화해가고 있는지를 파악할 수 있다. 하천은 하상물질의 존재 유무에 따라 크게 기반암 하상 하천과 충적 하천으로 구분할 수 있다. 기반암 하상 하도에서는 침식작용이 우세하여 하상에 퇴적물이 잘 관찰되지 않는데, 이 경우 하상 고도 변화는 기반암의 하상물질 분리력에 의해 결정되며 이를 분리제어(detachment-limited)환경이라고 한다. 이에 반해 하상 물질로 피복된 충적 하도에서는 고도변화가 하상물질의 이동에 의해 결정되기 때문에 이를 운반제어(transport-limited)환경이라고 한다. 본 연구에서는 분리제어환경에서 용기와 침식의 변화에 따른 하상의 변화를 살펴보고자 한다. 분리제어 환경에서 하상침식은

일반적으로 유수력(stream power)을 통해 표현되었다(Howard and Kirby, 1983). 이는 다시 시간에 따른 고도의 변화로 나타낼 수 있으며(dh/dt), 하나의 유역분지 내에 공간적으로 강수량이 동일하다는 전제하에서 침식에 영향을 주는 인자인 강수량(Q)은 유역분지 넓이로 치환할 수 있다. 이러한 조건 아래 분리제어환경 하천에서 침식(E_d)은 경사(S)와 유역면적(A) 간에 상관관계가 있으며, 식 (1)과 같은 방정식으로 표현된다(Flint, 1974; Whipple and Tucker, 1999).

$$E_d = K \cdot A^m \cdot S^n \quad (1)$$

K 는 침식에 영향을 주는 계수로 기반암 저항강도, 기후변화로 인한 유량의 변화, 하상물질 정도 등에 의해 결정된다(Whipple and Tucker, 1999). 정상상태에 도달한 하천은 이론적으로 용기율(U)과 침식률(E)이 같기 때문에 시간(t)에 따른 하상고도(h)의 변화가 없으며, 이는 다시 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$dh/dt = U - E = 0 \quad (2)$$

$$U = K \cdot A^m \cdot S^n \quad (3)$$

식 (2)에서 침식률 정리한 식 (1)을 대입하면 식 (3)을 얻을 수 있으며, 이를 경사(S)에 대한 식으로 정리하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$S = K_s \cdot A^\theta \quad (4)$$

K_s ($= (U/K)^{1/n}$) (Steepness index)는 하도경사(S)가 급한 정도를 보여주는 계수로써 용기율의 변화와 침식관련 계수 K 가 포함되어 있는 값이며, 유역면적(A)의 지수인 $\theta(m/n)$ 는 하천의 요형도를 지시하는 값이다(Flint, 1974). 요형도와 관련하여 크게 몇 가지 관점에서 연구가 진행되고 있다. 첫 번째로는 하천중단곡선 상에서 기후, 지질, 용기율이 유사하다고 볼 때 오목도의 범위 (0.4-0.6) (Duvall *et al.*, 2004; Kirby and Whipple, 2001; Synder *et al.*, 2000; Wobus *et al.*, 2006)에 대한 연구가 있으며, 두 번째로는 하류의 용기율(Kirby and Whipple, 2001), 지질(Duvall *et al.*, 2004), 하상 축적물질의 범위(Sklar and Dietrich, 2004, 2006), 지표유출(Zaprowski *et al.*,

2005)이 변할 때 요형도의 변화를 탐구한 연구, 세 번째로 공간적으로 유사한 용기율과 기반암 위에 있는 하천에서 간단한 하상침식 모델을 이용하여, 하천의 폭과 유량의 증가에 따른 요형도의 변화에 대한 연구(Whipple and Tucker, 1999)나 요형도가 현재 하상침식의 임계치에 얼마나 영향을 받는지에 대한 연구(Tucker, 2004)가 있다. 이러한 연구들은 요형도에 영향을 주는 다양한 요인들에 대해 연구했으며, 비록 그 값이 모든 하천에서 동일하게 나타나지 않고 변화하기는 하지만 정상상태에 도달한 하천중단곡선의 요형도는 상대적으로 제한된 범위를 보이고 있다는 점을 시사하고 있다.

Hack의 법칙에 따르면 유역면적(A)은 다시 분수계로부터의 거리 x 에 지수적으로 비례하는 관계에 있으며 이는 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$A = k_a \cdot x^h \quad (5)$$

k_a 는 Hack의 법칙에서 거리와 면적의 관계를 보여주는 계수이며, h 는 거리의 지수이다. 이 유역면적의 면적과 거리에 관련된 값들이 바뀐다면 유역면적의 형태 또한 바뀌며 이는 하천중단곡선상에 변화를 야기한다. 이와 관련된 연구는 일반적으로 유역분지의 형태를 이상적인 경우(ideal), 유역분지가 하천을 따라 좁은 경우(narrow), 매우 좁은 경우(very narrow), 넓은 경우(wide)로 나누고 그 값들을 연구하였다(Hack, 1957; Kirby and Whipple, 2012).

만약, 하천이 변화에 적응한 안정 상태에 있다면 식 (4)는 로그-로그 그래프에서 하나의 직선으로 나타낼 수 있다(Wobus *et al.*, 2006)(그림 1). 반대로, 하천의 침식 기준면이 변화하여 아직 하천이 정상상태에 도달해있지 않은 상태라면 로그-로그 그래프에서 하나의 직선이 아닌 여러 개의 직선이 나타나거나 기울기가 다른 직선이 여러 개 나타난다. 식 (4)에서 정상상태에 도달한 하천의 요형도는 0.4와 0.6 사이에서 나타나기 때문에 요형도를 일정한 기준값(reference concavity - θ_{ref})으로 고정시킨다면 각 하도의 Steepness index를 정규화시킬 수 있기 때문에 이를 이용한 분석이 가능하다. 실제로 기준이 되는 요형도(θ_{ref})는 일반적으로 0.45 값을 많이 사용한다(Kirby and Whipple, 2012).

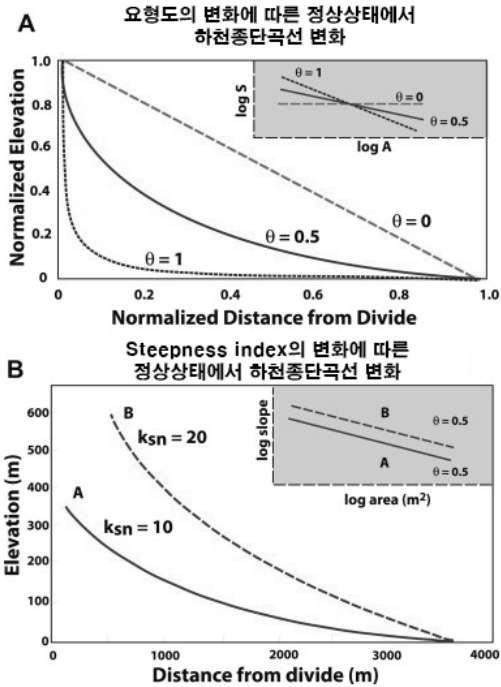


그림 1. 이론적인 정상상태에 도달한 하천중단 곡선의 두 가지 유형

*A. 요형도가 다를 경우 정상상태에 도달한 하천일지라도 하천 중단곡선상에서 차이가 난다. x축과 y축은 분수계로부터의 거리와 고도를 정규화시킨 것이다. B. 요형도가 같은 하천일지라도 K_{sn}(Normalized Steepness index)에 차이가 있다면 실제 중단곡선상에서 차이가 난다. x축과 y축은 실제 분수계로부터의 거리, 고도이다.

**Kirby and Whipple, 2012 참조.

III.

본 연구의 목적은 위의 식 (4)를 이용하여 기반암 하천 중단곡선 변화에 영향을 미치는 인자들에 대해 살펴보고 정량적으로 얼마나 변화가 일어나는 지에 대해 간단한 모형을 이용하여 이론적으로 살펴보는 것이다. 이를 위해서는 크게 두 가지의 자료가 구축되어야 한다. 첫 번째는 침식에 영향을 미치는 값이고 두 번째는 용기율에 대한 값이다.

한국 지형을 대상으로 침식관련 계수 K값에 대한 연구는 많이 존재하지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 침식관련 계수인 K 값을 해외연구에서 사용한 값을 이용하였다. K 값은 남아프리카 순상지를 대상으로 연구한

$1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1.2\text{m}}/\text{yr}$ 을 사용하였다(Braun *et al.*, 2014). 왜냐하면 이 지역은 구조적으로 안정되었으며, 이와 관련된 연구가 진행되어 참조할 수 있는 K값이 있었기 때문이다.

반면 용기에 의한 지표면의 변화를 연구하는 방법은 대표적인 지형학적 표시인 단구면과 같은 곳의 형성연대를 통해 용기율을 간접적으로 추정하는 것이다. 한반도의 용기율에 대한 연구는 주로 영동지역에 분포하고 있는 단구에서 이루어졌으며, 다양한 연대측정 방법을 이용하여 용기율이 추정되었고 구체적인 수치는 차이가 있지만 보통 천년 동안 ~200mm의 용기가 일어났다고 보고 있다(김종욱 등, 2007a, 2007b; Choi *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2011).

구축된 자료들을 바탕으로 기반암 하상의 변화를 살펴보는 모형을 돌려보기 위해서는 초기조건(혹은 초기 하천중단곡선)을 설정해야 한다. 왜냐하면 초기하천중단곡선과 용기 혹은 침식의 변화가 일어난 이후의 하천중단곡선을 비교했을 때 그 차이를 살펴볼 수 있기 때문이다. 초기하천중단곡선은 가상의 하천으로 설정하였으며 동일한 기반암이 공간적으로도 고르게 분포하고 있다고 가정하였으며, 정상상태에 도달한 하천으로 설정하였다. 초기 용기율(U_i)은 한반도 영동지역을 대상으로 나온 값인 0.0002m/yr, 초기 침식계수(K_i)는 해외에서 사용한 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1.2\text{m}}/\text{yr}$ 으로 설정하였다. 또한 가상의 하천중단곡선은 구조적인 용기(U)와 침식(E) 외에는 다른 요인으로부터 영향을 받지 않아야 하기 때문에 해수면의 변화도 고려하지 않았다. 하천중단곡선의 요형도는 0.45로 고정하여 용기와 침식, 유역의 형태 변화에 따른 하천중단곡선 변화를 살펴보았다. 마지막으로 모형을 돌리는 시간은 10만년으로 설정하였다.

초기조건이 설정된 후 크게 두 가지로 나누어 모의를 하였다. 첫 번째는 식 (4)에 나온 K_s 값과 관련된 변수들을 바꾸어 모의하였다. K_s에 영향을 미치는 용기율과 침식관련 계수 K는 각각 10배씩 증가시키고 한 점에서의 고도변화와 전체적인 그래프의 형태적인 변화를 넓이로 환산하여 정량적인 분석을 진행하였다. 두 번째로는 식 (5)에서 Hack의 법칙에서 유역의 형태를 결정하는 계수 K_h와 h의 변화에 따른 유역의 형태를 기준에 연구된 4가지(이상적인 경우(ideal), 좁은 경우(narrow), 매우 좁은 경우(very narrow), 넓은 경우(wide))로 나누고(Hack, 1957; Kirby and Whipple, 2012), 각각의 경우에 맞는 변수들을 설정하여 마찬가지로 중단곡선상에서의 고도변화와

표 1. 연구에 사용된 변수들의 값

변수명	설명	값
L	하천의 길이	10 km
timeyr	전체 시간	10 만년
m_n	요형도	0.45
U _i	초기 용기율	0.0002m/yr
K _i	초기 침식관련 계수	$1 \times 10^6 \text{ ml}^2\text{m/yr}$ (Braun <i>et al.</i> , 2014)
10U	용기율 10배 증가	0.002 m/yr
10K	침식관련 계수 10배 증가	$1 \times 10^5 \text{ ml}^2\text{m/yr}$ (Braun <i>et al.</i> , 2014)
IdealKa	이상적 유역분지에서 Hack의 법칙 계수(K _a)	6.69 (Hack, 1957)
Idealh	이상적인 유역분지에서 하도거리와 관련된 지수(h)	1.7 (Hack, 1957)
NarrowKa	폭이 좁은 유역분지에서 Hack의 법칙 계수(K _a)	27 (Kirby and Whipple, 2012)
Narrowh	폭이 좁은 유역분지에서 하도거리와 관련된 지수(h)	1.5 (Kirby and Whipple, 2012)
VnarrowKa	폭이 매우 좁은 형태의 유역분지에서 Hack의 법칙 계수(K _a)	106 (Kirby and Whipple, 2012)
Vnarrowh	폭이 매우 좁은 유역분지에서 하도거리와 관련된 지수(h)	1.3 (Kirby and Whipple, 2012)
WideKa	폭이 넓은 유역분지에서 Hack의 법칙 계수(K _a)	1.68 (Kirby and Whipple, 2012)
Wideh	폭이 넓은 유역분지에서 하도거리와 관련된 지수(h)	1.9 (Kirby and Whipple, 2012)

면적으로 환산했을 때 하천중단곡선 그래프 넓이의 변화를 살펴보았다.

IV.

1. 용기와 침식의 변화에 따른 하천중단곡선의 변화

초기지형으로 설정한 용기율 값 0.0002와 침식관련계수 값 0.000001에서 각각 10배씩 증가했을 경우 하천의 중단곡선변화 결과는 다음과 같다(그림 2-A, 그림 3-A). 그림 2는 침식관련 계수 값이 10배 증가했을 때 하천중단곡선이며 그림 3은 용기율이 10배 증가했을 때 하천중단곡선이다. 각각의 그래프에서 파란색 선은 초기지형을 나타내며 붉은색 선은 10만년이 지난 후의 하천중단곡선을 의미하며 녹색 선은 약 2만 8천년 간격으로 하천의 고도변화를 나타내는 선이다. 이 시간 간격은 연구자가 임의로 설정을 해줄 수 있으며, 본 연구에서는 $t_0 =$ 초기지형, $t_1 = 28 \text{ ka}$, $t_2 = 56 \text{ ka}$, $t_3 = 84 \text{ ka}$, $t_4 = 10$ 만년으로 설정하였다. 해석학적 분석과 달리 수치모형을 통해 얻은 결과물의 장점은 모형을 돌리는 과정에서 나타나는 변화들을 보여줄 수 있다는 것이다. 본 모형에서도

마찬가지로 시간의 흐름에 따른 하천중단곡선의 변화를 보여줄 수 있으며 상류(100m), 중류(4,500m), 하류(8,000m)의 한 지점에서 시간의 흐름에 따른 고도가 얼마나 감소하거나 증가하는지에 대해 살펴보고, 그 증감 폭이 일정한지, 일정하지 않은지 살펴보았다.

침식관련 계수 K 값이 10배 증가했을 경우 중단곡선의 형태는 하류부분에서 그 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 고도가 0m인 부분이 약 2km 정도 상류 쪽으로 전진했다(그림 2-A). 초기지형과 비교하여 10만년이 지난 후의 하천의 고도는 상류, 중류, 하류 별로 164m, 180m, 163.75m 감소하였다(그림 2-B, C). t_0 에서 t_4 까지 시간의 흐름에 따른 고도의 변화는 상류 부분에서는 40m씩 감소하였으며, 중류에서는 45m씩 꾸준히 감소하였고, 하류에서는 45m씩 감소하다 t_3 에서 t_4 로 넘어가는 시점에서 약 28m 감소하였다. 다시말해, 침식관련 계수 K 값이 증가할 경우 하천의 중, 하류에서 고도의 변화가 상류보다 상대적으로 크게 나타나며 특히, 중간 부분에서 고도의 변화가 크게 나타났고, 상, 중, 하류 3 구간에서 평균적인 고도의 감소는 169.45m로 나왔다.

용기율이 10배 증가했을 때 중단곡선의 형태는 침식관련 계수의 변화일 때와 마찬가지로 하류부분에서 변화가 뚜렷하게 나타났으며 하도의 끝부분에서 경사가 급변하는 지점이 나타났다. 하천의 고도는 상, 중, 하류

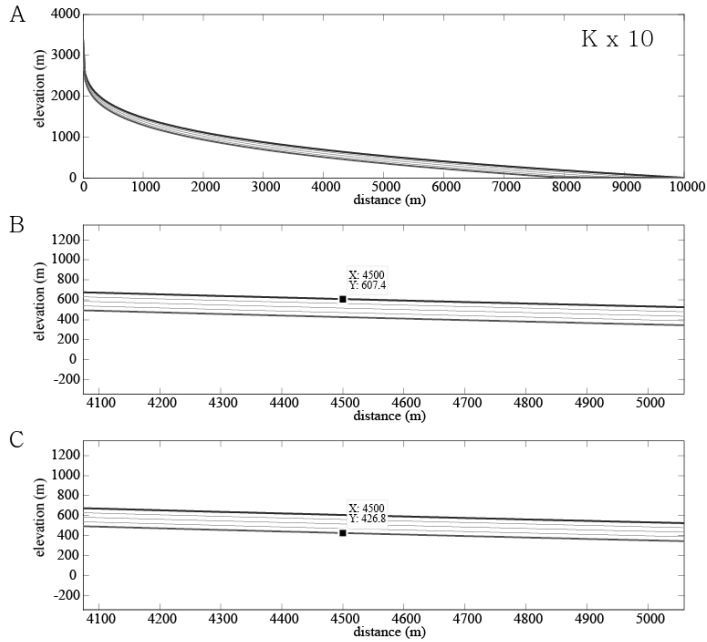


그림 2. 침식관련 계수 K값의 변화에 따른 하상의 변화

*A. 종단곡선상에서의 변화로 붉은 선은 10만년 이후의 하천종단곡선, 파란 선은 초기하천종단곡선을 의미하며, 녹색 선은 일정한 시간간격 동안 하천종단곡선의 변화를 의미, B. 분수계로부터의 거리가 4,500m인 곳에서 초기하도의 고도, C. 10만년 후 하도의 고도.

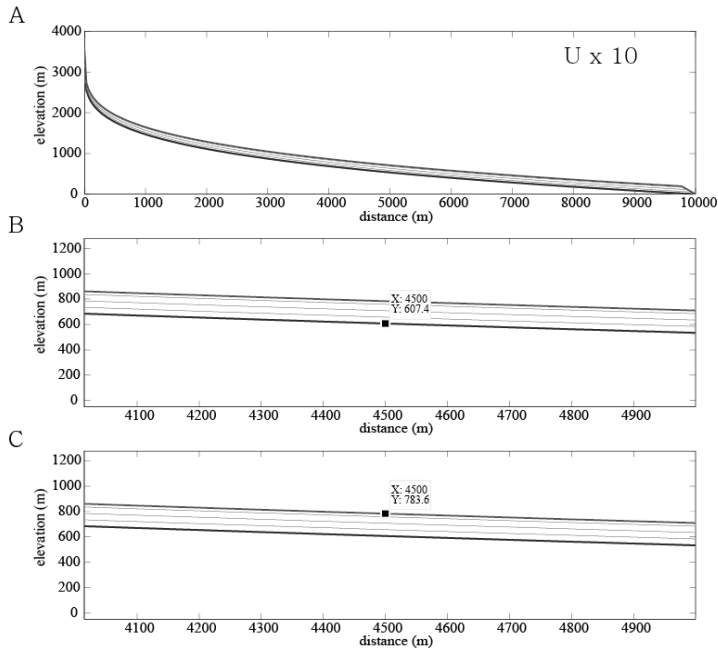


그림 3. 용기율의 변화에 따른 하상의 변화

*A. 종단곡선상에서의 변화로 붉은 선은 10만년 이후의 하천종단곡선, 파란 선은 초기하천종단곡선, 녹색 선은 일정한 시간간격 동안 하천종단곡선의 변화를 의미, B. 분수계로부터의 거리가 4,500m인 곳에서 초기하도의 고도, C. 10만년 후 하도의 고도.

에서 각각 178m, 176.2m, 176.2m씩 증가하였다(그림 3-B, C). 시간이 t_0 에서 t_4 까지 변화할 때 나타나는 고도의 변화는 상류에서는 51m씩 증가하다가 마지막에 25m 증가하였으며, 중간 부분에서는 50.4m씩 증가하다 마지막에 25.2m 증가하였으며, 하류부분에서는 50.4m씩 증가하다 마지막에 25.2m 증가하였다. 침식관련계수 값이 증가했을 때와는 반대로 용기율이 증가했을 경우 상류 부분에서 고도의 증가폭이 178m로 가장 컸으며, 중, 하류부분에서 용기양이 176.2m로 같게 나왔고, 3구간에서 평균 고도는 178m 증가하였다.

이러한 분석을 통해 나온 특징으로 t_3 에서 t_4 로 시간이 흐를 때 침식관련 계수가 10배 증가했을 경우 하류 부분에서 갑자기 감소폭(45m에서 28m)이 줄어들었다면, 용기율이 10배 증가했을 경우 전 구간에서 증가폭이 줄어드는 경향성(약 50m에서 약 25m)이 나타났다는 것을 알 수 있었으며, 용기율의 증가가 침식관련계수의 증가보다 하천종단곡선의 변화에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

특정 지점에서의 고도변화뿐만 아니라 하천종단곡선의 전반적인 형태변화를 살펴보기 위해 1차원 그래프의 면적을 통해 얼마나 변했는지 정량적으로 살펴보았다. 초기지형의 면적은 6.7km^2 로 나왔으며 침식관련 계수 K 값이 10배 증가했을 때 그래프의 면적은 5.1km^2 로 나타났으며, 용기율이 10배 증가하면 8.4km^2 로 나왔다. 침식관련 계수 K 값이 10배 증가했을 때 면적의 변화는 약 23.88% 감소가 나타났으며, 용기율이 10배 증가했을 때 면적은 약 25.37% 증가했다. 이 결과는 다른 조건이 동일하다는 전제하에 용기율의 변화가 침식관련계수의 변화보다 종단곡선의 변화에 더 큰 영향을 미친다고 제시한 고도 분석결과와 일치한다.

2. 유역분지의 형태에 따른 하천종단곡선의 변화

Hack의 법칙을 바탕으로 유역분지의 형태를 4가지로 나누는 기존의 연구에서 사용한 값들을 이용하여 얻은 결과는 그림 4와 같다. 하천종단곡선 상에서 유역분지의 형태가 옆으로 넓은 경우(wide)에 고도의 변화가 많이 일어난 것을 알 수 있었으며, 이상적인 경우(ideal)와 좁은 경우(narrow)와 매우 좁은 경우(very narrow) 종단곡선상에서 하도의 상류부분을 제외하고 나머지 부분에서 변화의 차이를 발견하기 어려웠다(그림 4).

하도의 형태적인 변화를 정량적으로 살펴보기 위해 그래프의 면적을 통해 비교해보았다(그림 5). 이상적인 유역분지의 경우 6.7km^2 의 넓이가 나왔으며, 넓은 유역분지의 경우 5.28km^2 (그림 5-D), 좁은 유역분지의 경우 6.84km^2 (그림 5-B), 매우 좁은 유역분지의 경우 7.92km^2 (그림 5-C)를 나타냈다. 좁은 경우 이상적인 유역분지보다 약 1%가량의 면적이 증가하였으며, 매우 좁은 경우 17.9% 증가하였다. 마지막으로 넓은 경우에는 22.38% 면적이 줄어들었다.

분석결과 유역의 형태가 넓은 경우 다른 경우에 비해 고도의 감소가 크게 일어나는 것을 알 수 있었다. 이는 유역의 형태가 넓을 경우 주변에서 유입되는 유량이 그만큼 많아지기 때문에 하천의 침식이 강해지며, 다른 유역형태들보다 하천종단곡선의 변화가 크게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

3. 1차원 수치모형을 이용한 기반암 하상 연구 가능성 모색

본 연구에서는 기반암 하상에 대해 사면과 유역면적

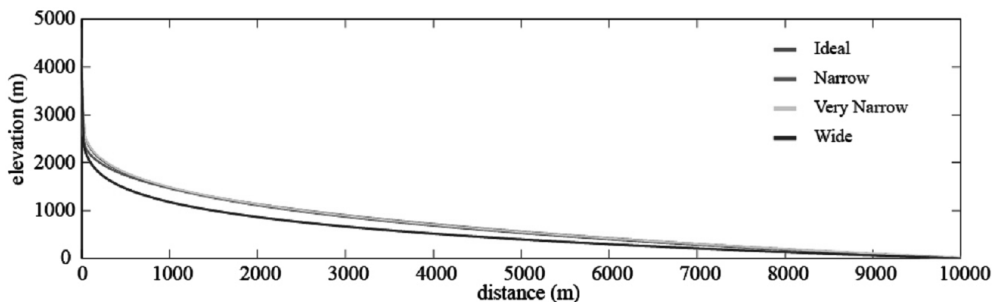


그림 4. 유역분지의 형태에 따른 하천종단곡선의 변화

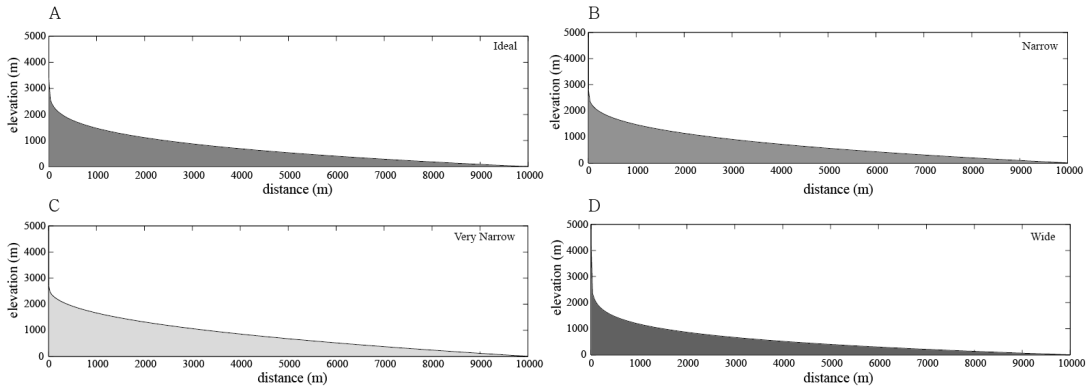


그림 5. 유역분지 형태에 따른 하천중단곡선 면적의 변화

이 멱함수 관계에 있음을 밝히고 있는 식을 바탕으로 하여 1차원 수치모형을 이용하여 기반암의 하상 변화에 영향을 미치는 요인들을 크게 두 가지로 나누었다. 첫 번째로는 K_s 값으로 이는 다시 용기율과 침식관련 계수 K 로 구성되어 있다. 첫 번째 분석에서는 이 두 요소 중에서 어떠한 값이 하천중단곡선에 더 큰 영향을 미치는지 알아보았으며 그 결과 특정 지점에서 고도의 변화를 볼 때 용기율의 증가가 하천중단곡선 변화에 더 크게 작용한다는 결과를 얻었고 전체적인 그래프 면적변화에 기반한 분석결과 또한 용기율의 증가가 하천중단곡선 변화에 더 큰 영향을 미친다는 결과를 얻었다. 이는 다시 말해 다른 조건이 동일할 경우 용기율의 증가가 침식의 증가보다 하천중단곡선의 변화에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 이렇듯 수치모형은 정량적인 분석과 시간의 흐름에 따른 발달과정을 보여주기 때문에 이 결과를 바탕으로 하여 다양한 분석을 시행할 수 있다. 이를 보다 발전시켜 실제 지형분석에 응용할 경우 하도의 상류부분과 하류부분에 각각 용기율(Kim, 2004)과 침식관련 계수 K 값(예: 강수량, 암석저항강도)에 변화를 주어 각각의 시나리오를 설정한 다음 이를 실제 지형과 비교하는 연구가 가능하다(Han *et al.*, 2014; Kim, 2004). 또한 1차원 모델과 2차원 모델을 모두 이용하여 더욱 종합적으로 지형의 발달과정을 연구할 수 있다(변종민·김중욱, 2011; Han *et al.*, 2014).

유역면적의 형태를 통한 하천중단곡선 결과는 하도의 길이가 동일할지라도 유역분지의 형태가 하천중단곡선에 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주었다. 예를 들어, 유역분지의 형태가 하천을 따라 매우 좁은 경우 고도를

낮추는 침식의 영향이 고도를 증가시키는 용기보다 적은 영향을 미치기 때문에 중단곡선의 고도가 증가했음을 의미하며, 유역의 형태가 넓은 경우는 유역분지에서 하천으로 유입되는 유량이 많아지기 때문에 용기의 영향보다는 침식의 영향을 더 많이 받게 되어 하도의 고도가 감소하는 결과를 보여주었다. 본 연구에서 사용한 값들은 기존 연구에서 사용된 값들을 참고한 값이며, 만약 실제로 지형학에서 한국의 지형을 대상으로 분석한다면 수치지형도나 위성영상에서 추출한 DEM과 같은 수치자료들을 바탕으로 한국에 있는 특정 지역의 경험값을 이용하여 분석을 할 수 있을 것으로 보인다.

마지막으로 1차원 기반암 하상 모형은 하천에 대한 변화만을 고려하였으나 이를 확장하여 사면에서 일어날 수 있는 현상들과 결합하여 모의를 한다면 보다 현실적인 연구를 할 수 있을 것으로 기대된다. 변종민·김중욱(2011) 연구에서는 사면에서부터 하천에 이르기까지 발생할 수 있는 다양한 현상들에 대해 설명하고 이를 모두 연계하여 지질시간규모에서 한반도 영동지역의 지형발달과정을 수치모형을 이용하여 모의하였다. 이와 같이 기존에 개발되어 있는 다양한 모형들(예: Channel Hillslope Integrated Landscape Development, CHILD)을 통해 기반암 하상뿐만 아니라 사면과 하천의 발달과정을 종합적으로 살펴볼 수 있을 것으로 기대한다.

하지만 본 연구에서 사용한 1차원 모형의 경우 몇 가지 한계점을 지니고 있다. 첫 번째로는 앞서 언급했듯이 하천에서 일어나는 용기와 침식, 유역의 형태적인 특성만을 반영했다는 점이다. 이는 다시 말해 사면에서 일어나는 여러 현상들에 대한 고려가 반영되지 않았다는 것

이다. 두 번째로는 용기율을 제외한 값들은 한국 지형에 대한 분석을 통해 나온 결과들이 아니라 해외연구에서 사용된 값들이나 이론적으로 접근했을 때 나온 변수들이기 때문에 모형에서 나온 결과를 실제 지형에 적용하는데 아직은 제한적이다. 따라서 보다 한국의 지형에 대한 연구를 위해서는 이 변수들에 대한 연구가 동시에 진행되어야 할 것이다.

한국 지형학에서 수치모형을 이용한 연구는 아직 초기 단계에 있다. 하지만 수치모형의 경우 지형의 발달 과정을 시각화하여 보여줄 수 있다는 점에서 많은 장점이 있다. 왜냐하면 결과가 같더라도 다른 원인에 의해 같은 결과가 도출할 수 있기 때문이다. 예를 들어 현재의 하천이 구조적인 요인에 의해서도, 혹은 기후변화에 의해서도 만들어 질 수 있기 때문에 수치모형을 이용하여 다양한 시나리오를 설정해보고 이를 모의해 봄으로써 어떤 인자가 좀 더 주도적인 영향을 미쳤는지를 평가할 수 있다.

V.

컴퓨터 기술의 발달로 지형발달모형은 이전의 정성적 단계 평가에 그쳤던 한계를 극복하고, 정량적으로 분석하고 검증하고 예측하는 단계까지 발전하였다. 일반적으로 지질시간규모에서 논의되고 있는 모형들은 실제 관측자료를 바탕으로 하는 것이 아니라 화분화석이나 방사성 동위원소와 같이 특정 환경을 지시하는 proxy 데이터를 통해 초기조건을 설정한다. 그러나 본 연구에서는 외인적 작용(강수량의 변화)과 내인적 작용(용기율의 변화)이 각각 변할 때 하상이 어떻게 변하는지 살펴보기 위해 실제로 관측된 자료를 바탕으로 하여 기반암 하상 침식 환경에서의 1차원 모형을 통해 10 만년 동안의 변화를 살펴보았다. 그 결과 용기율 변화가 하천중단곡선 변화에 더 큰 영향을 미친다는 것을 발견하였다.

하지만 본 연구에서 사용한 계수들이 실제 지형발달 과정을 합리적으로 설명할 수 있는지에 대해서는 추가적인 검증작업이 필요하다. 왜냐하면, 주요한 지형형성 작용들의 경우 서로 상호작용하며 1차원의 공간이 아닌 2차원이기 때문이다. 본 연구에서는 상호작용으로 인해 나타나는 변화를 고려하지 않고 하천중단곡선이 침식관련 계수 K값과 용기율의 변화, 유역형태의 변화에 따라

어떻게 바뀌는 지에 대해서만 논의가 이루어졌다. 따라서 본 연구가 실제 기후변화 또는 지구조적 변화로 인해 발생하는 지형발달과정을 설명하기 위해선 보다 다양한 지형형성과정들의 상호작용 과정들이 고려되어야 할 것이다.

참고문헌

- 김종욱, 1989, "Functional geomorphology의 연구방법론," 지리교육논집, 22, 15-27.
- 김종욱, 1993, "지형학에서의 시간의 역할과 기능," 지리교육논집, 30, 1-15.
- 김종욱·장호완·최정현·최광희·변종민, 2007a, "울진 후정-죽변 일대의 해안단구 퇴적물에 대한 OSL 연대 측정," 한국지형학회지, 14, 15-27.
- 김종욱·장호완·최정현·최광희·변종민, 2007b, "경주시 양남-양북 일대의 해안단구 지형 특성과 단구 퇴적물에 대한 OSL 연대측정," 한국지형학회지, 14, 1-14.
- 변종민, 2011, "2차원 지질시간 규모 수치지형발달모형의 활용과 개발을 위한 이론적 토대," 대한지리학회지, 46(3), 331-350.
- 변종민·김종욱, 2011, "2차원 지질시간 규모 수치지형발달모형의 개발," 대한지리학회지, 46(6), 673-692.
- 이민부, 1999, "디퓨전 공식 모델을 이용한 한국 사면 지형의 연대측정 연구," 대한지리학회지, 34, 371-384.
- Braun, J., Guillocheau, F., Robin, C., Baby, G., and Jelsma, H., 2014, Rapid erosion of the Southern African Plateau as it climbs over a mantle superswell, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(7), 6093-6112.
- Bridgland, D. and Westaway, R., 2008, Climatically controlled river terrace staircases: A worldwide Quaternary phenomenon, *Geomorphology*, 98 (3-4), 285-315.
- Choi, J.H., Kim, J.W., Murray, A.S., Hong, D.G., Chang, H.W., and Cheong, C.S., 2009, OSL dating of marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea with implications for Quaternary tectonics, *Quaternary International*, 199, 3-14.
- Davis, W.M., 1899, The geographical Cycle, *The Geo-*

- graphical Journal*, 14(5), 481-504.
- Duvall, A., Kirby, E., and Burbank, D., 2004, Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California, *Journal of Geophysical Research*, 109, F03002.
- Flint, J.J., 1974, Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge, *Water Resources Research*, 10, 969-973.
- Hack, J.T., 1957, Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland, *US Geological Survey Special Paper*, 294-B.
- Han, J., Gasparini, N.M., Johnson, J.P., and Murphy, B.P., 2014, Modeling the influence of rainfall gradients on discharge, bedrock erodibility, and river profile evolution, with application to the Big Island, Hawai'i, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119, 1418-1440.
- Howard, A.D. and Kirby, G., 1983, Channel change in badland, *Geological Society America Bulletin*, 94, 739-752.
- Kim, J.Y., 2004, Influence of Tectonic Uplift on Longitudinal Profiles of Bedrock Rivers: Numerical Simulations, *Journal of the Korean Geographical Society*, 39(5), 722-734.
- Kirby E. and Whipple, K.X., 2012, Expression of active tectonics in erosional landscapes, *Journal of Structural Geology*, 44, 54-75.
- Kirby, E., Whipple, K., 2001, Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis, *Geology*, 29, 415-418.
- Lee, S.Y., Seong, Y.B., Shin, Y.K., Choi, K.H., Kang, H.C., and Choi, J.H., 2011, Cosmogenic ¹⁰Be and OSL dating of fluvial strath terraces along the Osip-cheon River, Korea: tectonic implications, *Geosciences Journal*, 15, 349-444.
- Montgomery, D.R., Fournelle-Georgiou, E., 1993, Channel network representation using digital elevation models, *Water Resources Research*, 29, 1178-1191.
- Sklar, L. and Dietrich, W.E., 2004, A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resources Research*, 40, W06301.
- Sklar, L. and Dietrich, W.E., 2006, The role of sediment in controlling steady-state bedrock channel slope: implications of the saltation-abrasion incision model, *Geomorphology*, 82, 58-83.
- Snyder, N., Whipple, K., Tucker, G., Merritts, D., 2000, Landscape response to tectonic forcing: digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. *Geological Society of America, Bulletin*, 112, 1250-1263.
- Tucker, G., 2004, Drainage basin sensitivity to tectonic and climatic forcing: implications of a stochastic model for the role of entrainment and erosion thresholds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 185-205.
- Tucker, G.E. and Slingerland, R.L., 1994, Erosional dynamics, flexural isostasy, and long-lived escarpments: a numerical modeling study, *Journal of Geophysical Research*, 99(B6), 12229-12243.
- Tucker, G.E. and Slingerland, R.L., 1997, Drainage basin responses to climatic change, *Water Resource Research*, 33(8), 2031-2047.
- van der Beek, P. and Bishop, P., 2003, Cenozoic river profile development in the Upper Lachlan catchment (SE Australia) as a test quantitative fluvial incision models, *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 108(6), 2309, doi: 10.1029/2002JB002125.
- Whipple, K.X. and Tucker, G.E., 1999, Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 104, B8, 2156-2202.
- Willgoose, G., Bras, R. L., and Rodriguez-Iturbe, I., 1991, A coupled channel network growth and hillslope evolution model, 1. Theory, *Water Resource Research*, 27(7), 1671-1684.
- Wobus, C., Whipple, K.X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropolou, K., Crosby, B., and Sheehan, D., 2006, Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls. Tectonics, Climate, and Landscape Evolution, *Geological Society of America Special*

Paper, 398, 55-74.

Zaprowski, B.J., Pazzaglia, F.J., and Evenson, E.B.,
2005, Climatic influences on profile concavity and
river incision, *Journal of Geophysical Research-Earth
Surface*, 110, F03004.

Correspondence : Jongmin Byun, 136-701, 145 Anam-ro,
Seongbuk-gu, Seoul, Korea, School of Civil,
Environmental, and Architectural Engineering, Korea
University (Email: Cyberzen.byun@gmail.com)

교신 : 변종민, 136-701, 서울시 성북구 안암로 145, 고려
대학교 건축사회환경공학과 (이메일: Cyberzen.byun@
gmail.com)

투 고 일: 2014년 11월 20일

심사완료일: 2014년 12월 8일

투고확정일: 2014년 12월 15일

