

한반도 산줄기 체계에 대한 지형학적 검토와 과학적인 체계 정립 방안 모색*

변종민** · 김주연*** · 손학기***** · 박수진*****

Geomorphological Review of the Mountain Ridge Systems on the Korean Peninsula and Exploration of Methods for Establishing a More Scientific System*

Jongmin Byun** · Juyeon Kim*** · Hakgi Son***** · Sujin Park*****

요약 : 일반인의 산지 인식에 큰 영향을 준 전통적인 산경표 산줄기 체계는 그동안 한국 지형학계에서 잘 다루어지지 않았었다. 이로 인해 산경표 체계의 핵심인 백두대간 그리고 대간과 정맥으로 이어지는 위계에 대한 지형학적 의미는 여전히 불확실하며, 앞으로 산줄기 체계를 어떻게 보완해야 할지에 대한 과학적인 해답도 제시되지 못하고 있다. 이 연구는 보다 과학적이고 또한 산줄기 관리 측면에서도 유의미한 한반도 산줄기 체계 정립 방안을 고찰하기 위해, 첫째 지금까지 제안된 한반도 산줄기 체계의 위계 정립 방안을 살펴보고, 둘째 각 체계의 위계별 특성을 지형학적으로 비교·분석하며, 셋째 지형학적으로 의미 있는 분수계 산줄기 추출을 위한 최소 유역면적을 추정해보았다. 분석 결과, 전통적인 산줄기 체계의 위계를 계승하면서도 산줄기를 망(network) 관점에서 분할하고 각 구간별로 위계를 부여하여 산줄기의 고도와 규모를 보다 잘 표현하는 위계 산출 방식이 결합될 필요가 있으며, 지형학적으로 유의미한 산줄기 위계를 구성하기 위해서는 산줄기 도출을 위한 최소한의 임계유역면적이 1km^2 이상이 되어야 한다고 판단된다.

주요어 : 산줄기, 백두대간, 산경표, 분수계

Abstract : The traditional Sangyeongpyo mountain ridge system, which has greatly influenced public perceptions of mountain terrain in Korea, has long been overlooked in Korean geomorphological research. As a result, the geomorphological significance of key elements of this system, particularly the Baekdudaegan and the hierarchical relationships between the Daegan and Jeongmaeg ridges, remains unclear, and no scientific guidelines have yet been proposed regarding how the mountain ridge system of the Korean Peninsula should be further developed. To address these issues and to establish a more scientific and practically applicable mountain ridge system for the Korean Peninsula, this study (1) examined the hierarchical structures of major existing mountain ridge systems; (2) conducted comparative geomorphological analyses of the hierarchical characteristics of these systems; and (3) estimated the minimum threshold drainage area required to delineate the lowest-order mountain ridges that are morphologically distinguishable from higher-order ridges. The results suggest that a future mountain ridge system for

*이 논문은 2025년도 한국산지보전협회에서 발간한 「산줄기위계·지명체계 기본계획 수립과 타당성 조사 (1차년도)」의 내용을 바탕으로 작성되었습니다.

**서울대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Seoul National University, cyberzen@snu.ac.kr)

***서울대학교 지리교육과 박사과정(Doctoral Student, Department of Geography Education, Seoul National University, szszbong96@snu.ac.kr)

****한국농촌경제연구원 선임연구위원(Senior Research Fellow, Korea Rural Economic Institute, hgsohn@krei.re.kr)

*****서울대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Seoul National University, catena@snu.ac.kr)

Korea should inherit the hierarchical framework of the traditional Sangyeongpyo while integrating a divide-network approach and hierarchical classification of ridge segments, which more accurately represents ridge elevation and magnitude. Furthermore, our analyses indicate that, in order to derive geomorphologically meaningful ridge hierarchies, the minimum threshold drainage area for delineating mountain ridges should be at least 1km².

Key Words : Mountain ridge, Baekdudaegan, Sangyeongpyo, Watershed divide

I. 서론: 왜 산줄기 연구인가?

산지 면적이 40%에서 많게는 70% 이상인 우리나라에서(탁한명 등, 2013; 최정선 등, 2018) 산지에 대한 인식은 국토의 자연환경을 이해하는 행위 그 자체이면서 동시에 수자원과 생태자원, 그리고 자연재해 관리를 위한 필수 기초 작업에 해당한다. 한국의 지형학계는 한반도의 산지를 산맥(mountain range)을 중심으로 체계적으로 이해해왔고(예. 김상호, 1977; 권혁재, 2000; 박수진·손일, 2008),¹⁾ 이를 통해 지구조 운동(tectonics)과 지표 침식작용에 의한 한반도 산맥 형성 및 거시적 규모에서의 한반도 지형발달을 규명해왔다. 하지만 지구조 운동을 해석하는데 유의미한 산맥은 분수계(watershed divide) 산지 인식을 토대로 하는 백두대간 중심의 산경표 산지 체계에 비해 산지의 연속적인 분포를 설명하는 데 직관적이지 못한 부분이 있었다. 이로 인해 등산 인구가 증가하며 일반인들의 산에 대한 관심이 증대되었던 1990년대 후반 이래, 지리학 및 지형학계는 땅 속의 지질구조와 지구조 운동에 바탕한 산맥보다 땅 위의 생긴 모양(지세, topography) 그 자체가 연속적인 산지를 선호하는 대중과 학자들에 의해 크게 비판받기도 하였다(예. 조석필, 1997; 김영표 등, 2004).

이러한 비판에 지형학계는 산맥과 분수계 산지가 서로 다름을 알리고 일련의 새로운 산맥도를 제안하는 노력을 하였으며(예. 권혁재, 2000; 박수진·손일, 2008), 동시에 과학적인 방식으로 분수계 산지, 즉 산줄기(mountain ridge) 지도를 제안하는 노력도 하였다. 박수진·손일(2005)이 제안한 한반도 산줄기 지도가 한 예로, 산지의 공간적 연속성을 파악하고자 하는 사회적 요구를 수용하여 분수계 산지 지도를 제안하였다. 저자들은 이 분수계 산줄기가 기존 유역 면적 변화에도 그 형태가 유사하게 나타나는 자기유사성(self-similarity)을 보이며, 기존 산맥도 및 산경표 산줄기 체계와는 어떤 차이를 보이는지 설명하였다. 하지만 안타깝게도 지형학계는 그 이후 산줄기에 대한 논의를 계속 이어가지는 못하였다. 장대한 규모를 가

진 한반도 산줄기에 대한 정밀한 지형 분석이 따르지 못했기 때문에 분수계 산줄기 지형 체계에 대한 논의는 여전히 불확실하고 부정확한 부분이 많다(이민부, 2002). 특히 민족의 역사문화적 상징성이 큰 백두대간은 지형학적으로 어떠한 특성을 가지는지, 산경표 산줄기 체계의 핵심인 대간-정맥 위계는 지형학적으로 어떤 의미를 가지는지, 앞으로 한반도 산줄기 체계는 어떻게 보완해야 할지와 같은 물음에 답해줄 과학적인 연구 성과는 여전히 부재하다.

최근 손학기 등(2022)은 국토 산지관리 차원에서 분수계 산줄기에 전통적인 위계를 부여한 한반도 산줄기 지도를 제안하였다. 이 산줄기 체계는 산경표의 대간-정맥 개념을 받아들여, 백두대간과 연결한 한반도 10대강 유역의 분수계 즉, 유역권 경계 산줄기에 높은 위계를 두어 객관적으로 산줄기를 추출하면서도 전통적인 산줄기 위계를 재현한 것이 특징이다. 한편 DEM(Digital Elevation Model)을 이용하여 다양한 지형 속성을 추출하는 기술이 발달하면서, 최근에는 산줄기를 망(network)으로 간주하여 산줄기를 구간별로 나누고 각 구간에 위계를 부여하는 방안도 등장하였다(Scherler and Schwanghart, 2020). 특히 이 방법은 오픈소스 소프트웨어로 구현되어 이를 잘 활용하면 산줄기의 위계뿐만 아니라 산줄기를 따라 다양한 지형 속성도 추출 및 분석할 수 있어 산줄기 체계에 대한 정량적인 지형 분석도 가능하다. 하지만 전통적 산줄기 위계를 재현한 손학기 등(2022)의 산줄기 체계와 산줄기 구간별로 위계를 산출하는 Scherler and Schwanghart(2020)의 방법 및 결과에 대한 지형학적 검토가 이뤄진 적은 없다. 또한 두 방법 모두 유역 분수계를 토대로 산줄기를 도출하기 때문에 유역면적을 달리하며 기술적으로는 무한개의 산줄기를 추출할 수 있지만 지형학적으로 의미 있는 산줄기 체계 정립을 위한 설정 기준(예. 임계유역면적)에 대한 검토가 이뤄진 적도 없다.

이에 본 연구에서는 지금까지 제안된 산줄기 식별 체계를 위계를 중심으로 지형학적으로 비교·분석하여 각 산줄기 체계가 한반도 산지 지형을 합리적으로 반영하는지 평가하고 이를 토대로 한반도 산줄기 체계가 어떤 방향으

로 정립되어야 하는지 살펴보고자 한다. 이를 위해, 첫째 서로 다른 산줄기 체계의 위계 정립 방식을 살펴보고, 둘째 각 산줄기 체계별 위계와 지형 속성 간의 관계를 비교·분석하며, 셋째 유역면적에 따른 산줄기 위계와 지형 속성 간 관계 변화를 분석하며, 넷째 한강과 낙동강, 그리고 금강 유역을 모두 포함하고 있는 상주시를 사례로 각 산줄기 체계가 지역 산줄기를 어떻게 표현하는지를 비교·분석하였다. 끝으로 이상의 연구 결과를 토대로 지형학적으로 의미 있으면서 산지 관리에도 실질적 도움이 되는 한반도 산줄기 체계 정립을 위한 방안을 논의하고자 한다.

II. 산줄기 식별 체계의 위계 정립 방식 검토

1. 산경표 산줄기 체계

백두대간을 중심으로 한 전통적인 우리의 산지 인식은 조선 후기인 1770년 무렵 신경준의 산경표를 통해서 명칭과 개념이 완성되었다(양보경, 1997; 김우선, 2022). 백두산에서 뻗어 내린 큰 줄기라는 의미를 가진 백두대간(白頭大幹)은 민족의 성산인 백두산을 조종(祖宗)으로 국토의 산지를 단절되어 고립된 봉우리로 보기보다 흐름을 가지고 이어지는 줄기(脈勢)로 이해했던(양보경, 1997)²⁾ 우리의 전통적인 산지 인식 체계를 상징적으로 표현하는 용어이다. 백두대간이라는 개념은 고려 승려 도선이 지은 옥룡기(10세기)에도 이미 언급이 되고 있어 고려 시대 이전부터 형성되었으며, 이러한 산지 인식 체계는 고(古) 지도에도 투영되어 현존하는 우리나라 최고(最古) 지도인 혼일강리역대국대지도(混壹疆理歷代國都之圖)에서는 한반도의 산지가 하천과 마찬가지로 연속된 선으로 표현되어 있다. 특히 한국의 지도학 역사와 특징을 정리한 Short(2012)는 선을 통해 산의 연결성을 표현하는 형세도(Hyungsaedo)를 한국 지도학을 대표하는 표현이라고 기술하기도 했다. 이처럼 백두대간을 중심으로 한 연속된 산지 인식은 오랫동안 우리에게 국토에 대한 지리적 인 일체감을 주어왔다.

한반도의 산지를 1대간·1정간·13정맥으로 정리한 산경표의 산줄기 체계를 지형학적 측면에서 보면 ‘산은 물을 넘을 수 없고, 물은 산을 넘을 수 없다’는 산자분수령(山自分水嶺) 원리를 토대로 산지를 유역의 경계 즉, 분수계 산지로 인식한다. 분수계 역할을 중요시하기 때문

에 산경표의 산지 인식이 가장 높은 산능선(또는 산마루)에 한정된 것으로 생각되기 쉽지만, 분수계는 하천의 합류부에서 끝나거나 시작하기 때문에 수계, 즉 유역(또는 생활권) 개념을 바탕에 둔 산지 인식 체계로 볼 수 있다. 한편 산경표에서는 한민족의 영산(靈山)으로 인식되는 백두산과의 연결성을 우선시하고 있기 때문에 산경표 산줄기 체계의 계층 구조는 위에서 아래로 내려가는 하향식 결정 구조를 가진다고 볼 수 있다. 하지만 이처럼 역사문화적 상징성이 큰 산경표 체계가 지형학적으로 어떠한 특성을 가지는지 규명된 적은 없다.

2. 유역면적 기반 산줄기 체계(박수진·손일, 2005)

과학적인 산줄기 추출 방법을 토대로 한반도의 분수계 산줄기를 처음으로 규명한 것은 박수진·손일(2005)이다. 이들은 DEM에서 유역 분수계를 도출하고 이 중 산지로 인식될 수 있는 고도와 형태를 가진 분수계를 산줄기로 정의한 한반도 산줄기 지도를 제작하였다(그림 1; 이

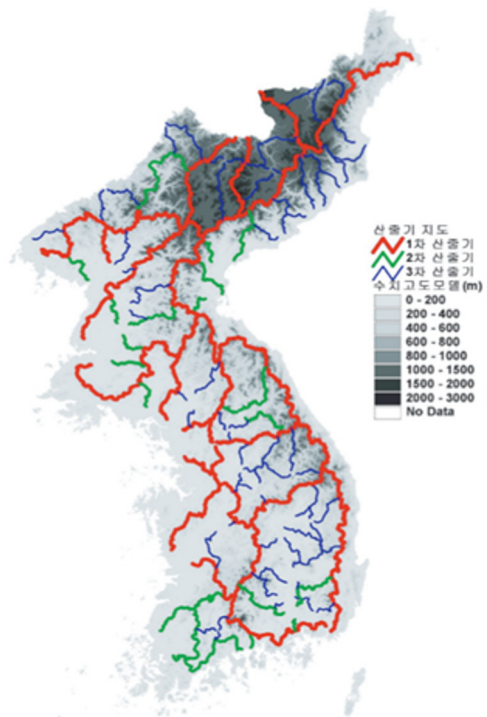


그림 1. 유역면적 기반 한반도 산줄기 지도

출처 : 박수진·손일, 2005.

하 유역면적 기반 산줄기 체계). 여기서는 분수계 도출을 위한 유역의 면적을 달리하면서 서로 다른 면적과 경계 길이를 가지는 유역을 만들고 이들 유역 분수계에서 산줄기를 도출한 다음 유역면적에 따른 산줄기 위계를 두었다 (1,250km², 3차; 2,500km², 2차; 5,000km², 1차). 따라서 계층 구조 측면에서 보면 유역면적이 증가할수록 대응하는 산줄기의 위계는 높으며 큰 유역에서 도출된 상위 산줄기는 작은 유역의 하위 산줄기 일부를 포함하고 있다. 비록 산경표 체계와는 위계 산출 방식이 다르지만 면적이 큰 유역의 분수계인가에 따라 산줄기 위계가 결정되기 때문에 이 역시 하향식 위계 결정 구조를 가진다고 볼 수 있다. 이처럼 유역면적에 따라 위계가 결정되므로 산출 과정이 객관적이지만 산줄기 도출을 위한 유역의 면적 선정은 다소 임의적인 측면이 있어 과학적인 검토가 필요해 보인다.

3. 신(新)백두대간 산줄기 체계(손학기 등, 2022)

객관적으로 산줄기를 추출하면서도 전통적인 산줄기 위계를 재현하고 있는 손학기 등(2022)의 산줄기 체계는

한반도 10대강 개별 유역에서 시작하여 내부에 포함된 작은 면적의 유역(내포內包 유역)을 다층적으로 구축하는 1 단계(그림 2)와 백두대간의 줄기-가지 관계에 기초하여 이를 관리할 행정단위와 연결 짓는 2 단계로 이루어진다.

1 단계는, 먼저 특정 지역의 모든 지점에 물을 흘려 바다와 만나는 지점을 집수점(●)으로 하는 가장 면적이 큰 대하천(예. 한반도 10대강 중 하나) 유역(최대 면적 유역이자 1차 내포 유역)과 해당 집수점에서 시작하여 유역 최상류로 향하는 1차 내포 최장 하천을 정의한 다음(그림 2 #1), 도출된 1차 내포 유역의 분수계에서 물을 흘려 1차 내포 최장 하천과 만나게 되는 지점을 집수점(●)으로 하는 2차 내포 유역(nested sub-basin)과 이 하부 유역의 2차 내포 최장 하천을 도출한다(그림 2 #2). 3차 내포 유역은 2차 내포 유역 내부를 세분화하면서 만들어지거나 1차 내포 유역 밖의 미분화 지역(undifferentiated area)에 확장되는 형태로 도출된다(그림 2 #3). 사전에 정한 최소 유역면적(1 arc second (약 30m) SRTM DEM에서 0.25km²)에 도달할 때까지 이러한 방식을 하부 유역에 반복적으로 적용한다(그림 2 #4). 이 방법은 최대 면적 유역에 순차적으로 내포되는 유역을 도출하고, 최초의 집수

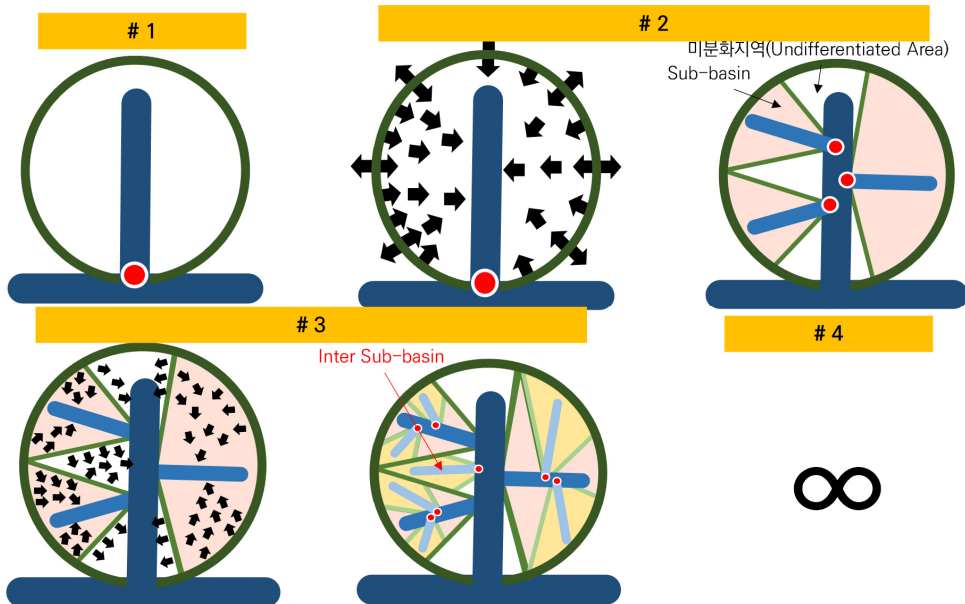


그림 2 신백두대간 산줄기 체계의 산줄기 내포 유역 분석 방법

출처 : 손학기 등, 2022.

구 도출이 해당 지역의 모든 지점에서 물을 흘려 만나는 하구에서 시작한다는 점에서 산줄기 내포 유역 분석법이라고 한다.³⁾

2단계에서는 산줄기 내포 유역 분석법을 통해 도출된 다층의 내포 유역에 백두대간⁴⁾과의 줄기-가지 관계에 기초해 위계를 산출하고 각 위계의 이름을 관리의 주체가 될 행정단위를 고려해 행정구역체계를 따라 부여한다. 이에 따라 총 7개의 위계-국가, 광역, 지역, 시군구, 읍면동, 동리, 기타-를 가진 산줄기 계층 구조가 만들어진다. 여기서 줄기-가지 관계는 백두대간 아래로 정맥이 연결되는 것과 같이 상위 위계 산줄기에서 분기하는 산줄기에 하위 위계를 두는 것을 말한다. 이치럼 손학기 등(2022)의 산줄기 체계는 전통적인 산줄기 위계를 재현하고 있기 때문에 산경표 체계와 같이 하향식 위계 결정 구조를 가진다. 이에 따라 이 체계를 여기서는 신(新)백두대간 산줄기 체계로 명하고자 한다. 하지만 신백두대간 체계의 계층 구조가 한반도 산지 지형을 합리적으로 반영하는 지에 대해서 검토된 바는 없으며, 동리 및 기타 행정단위까지를 포함하는 상세한 저위 산줄기가 지형학적으로 의미가 있는지에 대해서도 검토되지 않았다.

4. 분수계망 기반 산줄기 체계(Scherler and Schwanghart, 2020)

Scherler and Schwanghart(2020)의 산줄기 체계(이하 분수계망 산줄기 체계; 그림 3)는 분수계 산줄기를 추출하고 이후 산줄기를 연결 지점(junction)마다 분할하여 산줄기 구간(divide segment)을 설정한 다음 여기에 위계를 부여한 것이 특징이다. 따라서 앞서 기술한 방법들과 달리 산줄기를 구간별로 나누어 살펴볼 수 있는 기회를 준다.

산줄기 도출 과정을 자세히 살펴보면(그림 3A), 특정 상부사면면적(산줄기 도출을 위한 하계망 시작 면적임)을 강조하기 위해 여기서는 이를 임계유역면적으로 명함)에서 시작하는 하계망(stream network)을 구성한 후, 각 하천 합류점(정확히는 합류점 상류 셀)을 유출구(tributary outlet)로 하는 유역 경계(drainage divide)를 도출한 다음, 이후 각 유출구를 분수계의 말단(divide endpoint)으로, 그리고 다른 유역 경계와 만나는 지점을 분수계 합류점(divide junction)으로 정의하여 말단과 합류점 또는 합류점과 합류점 사이를 구간(divide segment)으로 하는 분

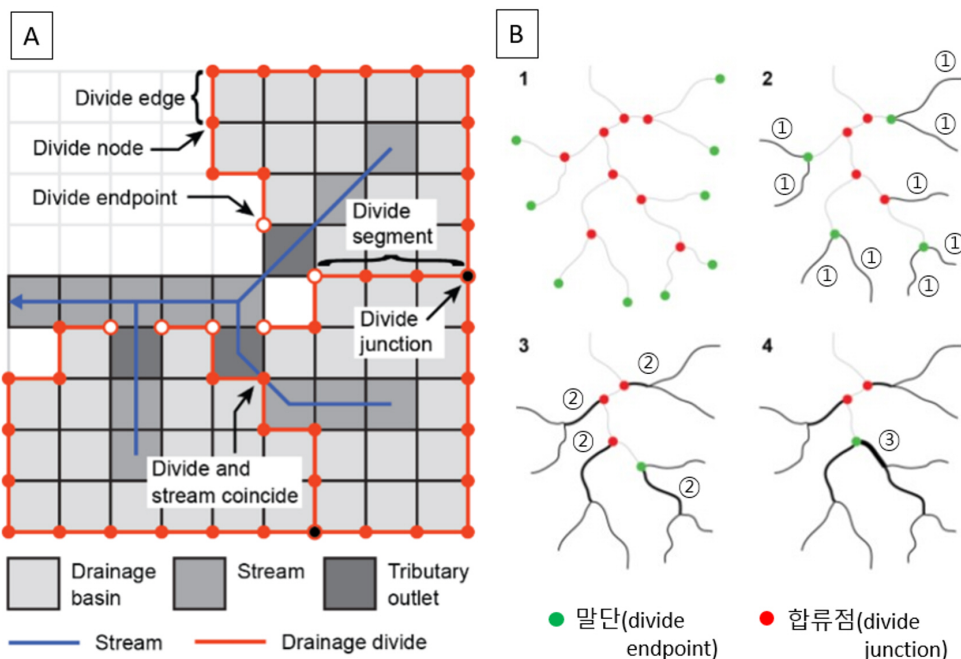


그림 3. 분수계망 기반 산줄기 도출(A) 및 스트랄러(Strahler) 방식의 산줄기 차수 산출(B) 개념도

출처 : Scherler and Schwanghart, 2020.

수계망(divide network)을 조성하여 분수계 산줄기를 생성한다(그림 3A).

이에 따라 분수계망 기반 산줄기는 산줄기 구간으로 구성된 망이며, 각 구간에 하천 차수를 계산하는 방식과 동일하게 산줄기 연결 정도에 따라 차수를 부여하여 산줄기의 위계를 계산한다(그림 3B). 따라서 산줄기의 위계는 앞서 기술한 체계와 달리 산줄기 말단의 개수 그리고 산줄기 구간과 구간의 연결 방식과 연결 정도를 결정하는 산체(또는 유역)의 형태에 따라 달라진다. 이에 따라 분수계망 기반 체계의 위계는 위에서부터 결정되는 앞서의 산줄기 체계와 달리, 아래에서부터 위로 올라가는 상향식 위계 결정 구조이다.

III. 연구 방법

기존의 산줄기 체계가 한반도 산지 지형을 합리적으로 반영하는지 평가하고 보다 과학적인 한반도 산줄기 정립 방안을 모색해보기 위해, 산줄기 체계별 위계에 따른 산줄기 고도와 길이를 분석하였고 산줄기 도출을 위한 최소 유역면적을 추정하기 위해 임계유역면적을 달리하며 도출한 산줄기에 대해 위계에 따른 지형 속성을 분석하였다.

1. 산줄기 체계별 위계에 따른 지형 속성 간의 관계 분석

산줄기 체계별로 계층 구조가 산지 특성을 합리적으로 반영하는지 검토하기 위해, 위계에 따른 산줄기 지형 특성, 구체적으로 산줄기의 규모를 대변하는 평균 고도와 길이를 QGIS와 MATLAB TopoToolbox⁵⁾(이하 TopoToolbox) 등을 이용하여 분석하였다. 먼저 산경표 체계 산줄기 분석을 위해서, 산경표에 기술된 각각의 산, 령, 치 등의 위치를 파악하고 이를 연결하여 GIS DB로 구축한 손학기 등(2020)의 복원된 산경표를 이용하였으며, 이에 기반하여 대간, 정간 및 정맥, 그리고 지맥에 대해 각각의 평균 고도와 길이를 구하였다.

유역면적 기반 체계의 경우, 산줄기를 도출한 유역의 면적에 따라 산줄기 위계가 결정된다. 이에 따라, 먼저 TopoToolbox STREAMObj 함수를 이용해 임계유역면적을 달리한(1km², 10km², 100km², 1,000km², 10,000km²) 5개의 하계망을 만들고, 이후 개별 하계망을 이용하여

하천 합류지점을 유출구로 하는 유역을 TopoToolbox drainagebasins 함수를 이용하여 정의한 다음(이들 유역의 평균 면적은 각각 4±2km², 37±20km², 352±183km², 3,680±1,742km², 35,558±12,573km²에 해당함), 이들 유역의 경계인 분수계를 추출하여 총 5개의 산줄기를 도출하였고 이후 이들 산줄기를 QGIS에서 벡터 연산을 통해 합성하여 유역면적 기반 산줄기를 최종 도출하였다.⁶⁾ 끝으로 이 산줄기를 대상으로 위계별 산줄기 평균 고도와 길이를 계산하였다.

한편 신백두대간 산줄기 체계의 경우, 손학기 등(2022)이 구축한 산줄기 체계 GIS DB를 이용하여 평균 고도와 각 산줄기 위계별 유역면적을 계산하였다. 현재 손학기 등(2022)의 GIS DB에는 모든 위계별 산줄기가 도출된 것은 아니며 저위 산줄기의 경우 남한에만 구축되어 있었다. 이로 인해 본 연구에서는 위계별 산줄기 길이를 구하지 못하였다. 끝으로 분수계망 기반 산줄기 체계 분석을 위해서, 우선 만주 일부와 한반도 전역을 포함하는 1 arc second SRTM DEM을 150m로 리샘플링한 DEM을 만들고, 이를 대상으로 TopoToolbox DIVIDEObj 클래스를 이용하여 10km²를 임계유역면적으로 하는 하계망으로부터 한반도 분수계 산줄기를 추출하였다. 이후 TopoToolbox divorder 함수를 이용하여 스트랄러 방식으로 산줄기 구간별 차수를 계산하였고 각 위계별로 평균 고도와 길이를 각각 구하였다.

끝으로 체계별 위계와 지형 속성 간의 관계(위계-길이, 위계-고도)를 규명하기 위해 이상의 과정을 통해 수집한 산줄기 체계별 위계에 따른 고도와 길이 자료를 토대로 다양한 유형의 회귀분석(선형, 지수함수형, 멱함수형)을 실시하였다.

2. 산줄기 도출을 위한 최소 임계유역면적 추정

유역면적 기반, 신백두대간, 그리고 분수계망 기반 산줄기 체계는 공통적으로 DEM에서 유역을 정의하고 이의 분수계를 토대로 산줄기로 추출한다. 이에 따라 기술적으로는 유역의 면적을 달리하며 무한개의 산줄기를 추출할 수 있다. 따라서 산줄기 추출을 위한 유역의 면적을 어떻게 설정하느냐가 산줄기 체계 검토의 출발점에 해당한다. 최대 유역면적의 경우, 박수진·손일(2005)은 한반도 10대강을 대체로 구분하는 면적인 5,000km²로 설정하

였다. 이는 해당 유역면적에서 평균 고도와 산지 지수의 상관 관계가 가장 높아 이 유역면적에서 도출된 산줄기가 산지의 연결성도 가장 잘 표현한다고 판단했기 때문이다. 또한 손학기 등(2020)도 백두대간과 더불어 우리나라 10대강의 유역 분수계와 유사한 정맥을 최고 산줄기 체계로 설정하였다. 따라서 최대 유역면적은 한반도 대하천의 유역면적이 대체로 상한선 역할을 하였다.

하지만 최저위 산줄기 추출을 위한 최소 유역면적으로 어떤 면적이 적절한지에 대한 논의가 이뤄진 적은 없었으며, 기존 연구자들은 저마다 서로 다른 유역면적 값을 설정하여 최저위 산줄기를 정의하였다(예. 박수진·손일(2005), 1,250km²; 손학기 등(2022), 0.25km²). 여기서는 임계유역면적을 달리하며(1km², 10km², 100km², 1,000km², 10,000km²) 도출한 5개의 분수계망 기반 산줄기를 대상으로 위계에 따른 평균 고도와 길이를 각각 산출하고 이를 그래프에 도시해 보았다. 이를 통해 임계유역면적에 따른 위계와 지형 속성 간의 관계 변화를 살펴보고 유의미한 차이가 더 이상 나타나지 않는 임계유역면적이 어디 인지를 살펴보았다.

IV. 연구결과

1. 산줄기 체계별 위계와 지형 속성 간의 관계

산줄기 체계별로 위계에 따른 평균 고도와 길이를 계산하고 이들 간의 관계(위계-길이, 위계-고도)를 분석하기 위해 선형 및 비선형(지수함수, 멱함수) 회귀분석을 실시하였으며 분석 결과는 표 1과 같다. 각 회귀모형의 결정계수(R²)를 비교한 결과, 지수함수형 회귀모형의 R²값이 전체적으로 높아 위계에 따른 길이와 고도의 변화가 지수함수 관계를 가지는 것으로 평가되었다. 이러한 지수함수형 비선형 관계는 하천 지형 체계에서 보편적으로 관찰되는 특징(예. 하천 차수와 하도 길이(김종욱, 1991))이며 산줄기를 포함한 산지 지형 체계에서도 관찰된 바 있다(Yamada, 1999; 박수진·손일, 2005; 김추홍·손일, 2010). 따라서 이 결과는 산줄기가 자연 시스템의 보편적 법칙에 따라 형성되었음을 다시 한번 확인시켜주며 각 산줄기 체계는 이를 전반적으로 잘 표현하고 있음을 보여준다.

표 1. 산줄기 체계별 위계와 지형 속성 간의 회귀분석 결과

	선형 모형	지수함수형 모형	멱함수형 모형
산경표 체계			
길이*·위계*	$L = -5,644.6X + 1.8 \times 10^4$ (R ² =0.910)	$L = 3.7 \times 10^4 e^{-1.0X}$ (R ² =0.998)**	$L = 1.3 \times 10^4 x^{-1.6}$ (R ² =0.998)
고도*·위계	$E = 353.9X + 56.8$ (R ² =0.820)	$E = 237.7 e^{0.33X}$ (R ² =0.917)	$E = 371.5 x^{1.0}$ (R ² =0.816)
유역면적 기반 체계			
길이·위계	$L = -8.1 \times 10^5 X + 3.5 \times 10^6$ (R ² =0.816)	$L = 7.0 \times 10^6 e^{-0.79X}$ (R ² =0.883)	$L = 3.2 \times 10^6 x^{-1.43}$ (R ² =0.805)
고도·위계	$E = 110.2X - 81.2$ (R ² =0.873)	$E = 64.6 e^{0.40X}$ (R ² =0.813)	$E = 51.7 x^{1.38}$ (R ² =0.873)
신백두대간 체계***			
고도·위계	$E = 97.4X + 37.1$ (R ² =0.926)	$E = 152.2 e^{0.23X}$ (R ² =0.938)	$E = 114.3 x^{0.95}$ (R ² =0.921)
분수계망 기반 체계			
길이·위계	$L = -3.5 \times 10^5 X + 2.1 \times 10^6$ (R ² =0.348)	$L = 2.0 \times 10^8 e^{-3.85X}$ (R ² =1.000)	$L = 4.2 \times 10^6 x^{-5.50}$ (R ² =1.000)
고도·위계	$E = 133.3X + 399.0$ (R ² =0.806)	$E = 482.4 e^{0.15X}$ (R ² =0.886)	$E = 444.3 x^{0.56}$ (R ² =0.730)

* 길이는 L, 고도는 E, 위계는 X로 표현함.

** 결정계수 R²가 세 모형 중 가장 높은 값일 때 밑줄을 그었음.

*** 신백두대간 체계의 경우 남한 지역에 한해 모든 위계의 산줄기가 구축되어 있어서 고도·위계 분석만 수행함.

각 체계별로 관계를 자세히 살펴보면, 산경표 체계의 경우(그림 4A), 먼저 산줄기 위계가 올라갈수록 즉 지맥에서 정간 및 정맥 그리고 대간으로 갈수록 산줄기의 길이는 지수적으로 감소하였다(그림 5A; $L=3.7 \times 10^4 e^{-1.0X}$). 이는 저위 산줄기인 지맥의 연장이 가장 길고 최고위 백두대간에 이르러서는 연장이 가장 짧음을 의미한다. 한편 평균 고도는 위계에 따라 지수적으로 증가하였는데($E=237.7e^{0.53X}$) 특히 지수함수 모형의 지수 계수(exponential

coefficient)값이 0.53으로 다른 체계에 비해 커서 최고위 백두대간의 고도는 하위 정맥에 비해 2배 이상 높았다(그림 5A). 이는 최고위 산줄기인 백두대간이 지형적으로도 한반도의 가장 높은 산지가 연속된 것임을 의미한다.

유역면적 크기에 따라 위계가 결정되는 유역면적 기반 산줄기 체계의 경우(그림 4B), 산경표 체계와 유사하게 위계가 올라갈수록(또는 유역면적이 증가할수록) 산줄기의 길이는 지수적으로 감소하고($L=7.0 \times 10^6 e^{-0.79X}$) 산줄

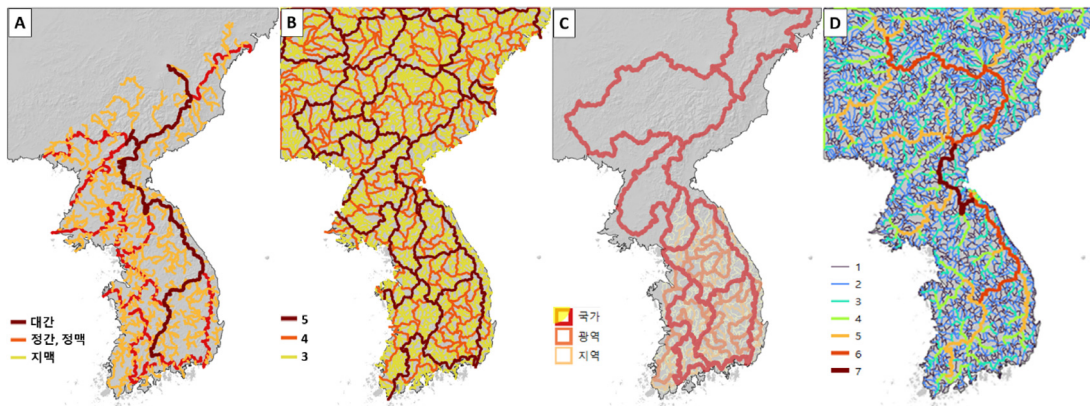


그림 4. 산경표(A), 유역면적 기반(B), 신백두대간(C), 그리고 분수계망 기반(D) 한반도 산줄기 체계

* 유역면적 기반과 신백두대간 체계는 고위 산줄기(3, 4, 5차; 국가, 광역, 지역)만 표시하였음. 신백두대간 체계의 경우, 지역 산줄기는 남한만 시범적으로 도시하였음.

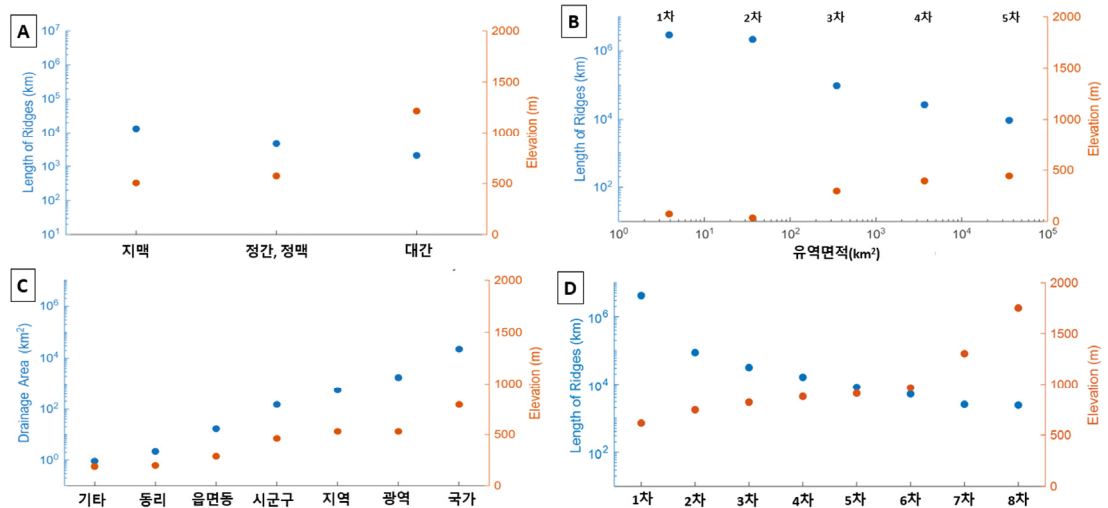


그림 5. 산경표(A), 유역면적 기반(B), 신백두대간(C), 그리고 분수계망 기반(D) 체계 산줄기의 위계에 따른 산줄기 길이와 평균 고도 변화

* 유역면적 기반 체계(B)에서 1차는 가장 낮은 위계를, 5차는 가장 높은 위계를 각각 표현함. 이는 그림 1의 차수 표현 방식과 반대인데, 하천 차수 표기 방식과 동일하게 하여 보다 직관적으로 이해할 수 있도록 한 것임. 신백두대간 체계(C)의 경우, 저위 산줄기는 남한 지역만 추출되어 있어 한반도 전역의 산줄기 길이를 구할 수가 없었음. 이에 따라 위계별 산줄기를 도출한 내포 유역의 평균 면적을 계산하여 길이 대신 도시함. 이에 따르면 위계에 따라 평균 유역면적도 비선형적으로 증가함을 보여줌.

기 고도는 지수적으로 증가함($E=64.6e^{0.40X}$)을 보였다(그림 5B). 하지만 산줄기 계층 구조가 5차까지 커지면서 산경표 체계에 비해 산줄기 길이의 경우 최저위 1차 산줄기의 연장이 대폭 증가하였다. 또한 저위 산줄기 간(1차와 2차)의 길이 차이가 크지 않아 결정 계수 값이 상대적으로 낮았다. 고도의 경우도 계층이 증가하면서 유사한 경향이 나타나 최저위 1차 산줄기의 고도가 크게 감소하였다. 한편 위계-고도 관계가 지수함수 모형을 대체로 따르지만, 4차 산줄기(임계유역면적 $3,680\text{km}^2$) 이후로 고도의 증가폭이 감소하여 산경표 체계와 달리 최고위 5차 산줄기의 평균 고도가 하위 4차 산줄기에 비해 큰 차이를 보이지 않았다. 특히 최고위 5차 산줄기와 하위 산줄기의 평균 고도 차이가 크지 않은 것은 유역면적 기반 산줄기 체계의 최고위 산줄기가 산경표의 대간뿐만 아니라 정맥에 해당하는 산줄기까지 포함하고 있어 고도가 낮은 대하천 하구까지 산줄기가 도달하기 때문이다.

총 7개의 위계(국가, 광역, 지역, 시군구, 읍면동, 동리, 기타)를 가진 신백두대간 체계(그림 4C)도 위계가 올라갈수록 산줄기의 평균 고도가 지수적으로 증가하는 것으로 나타났다(그림 5C; $E=152.2e^{0.23X}$). 하지만 최고위에 해당하는 국가 산줄기가 산경표 체계의 백두대간보다 낮았는데, 이는 산경표 체계와 달리 최고위 국가 산줄기가 산경표의 정맥까지도 포함하고 있어 고도가 낮은 대하천 하구까지 연장되어 있기 때문이다. 한편 광역-지역-시군구 산줄기 그리고 동리-기타 산줄기에서는 유역면적 기반 체계 저위 산줄기와 유사하게 위계에 따른 고도 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

산줄기 구간별로 위계를 산출하는 분수계망 체계(그림 4D) 또한 위계가 올라갈수록 산줄기의 길이는 지수 감소하였고($L=2.0 \times 10^8 e^{-3.85X}$) 위계별 산줄기 평균 고도도 지수 증가($E=482.4e^{0.15X}$)하였다(그림 5D). 하지만 산줄기 길이의 경우, 다른 체계에 비해 지수 계수의 절대값이 가장 커서(-3.85) 저위 산줄기에서 위계에 따른 길이의 감소 폭은 매우 크게 나타났다. 이는 산줄기 구간별로 위계를 부여했기 때문에 다른 체계와 달리 산줄기 빈도가 전체적으로 증가하였는데, 특히 최저위 말단 산줄기의 개수가 대폭 증가하였기 때문이다. 한편 위계를 부여하는 산줄기 구간의 개수가 많다 보니 신백두대간 체계보다 많은 8차 산줄기까지 존재했고, 이로 인해 다른 체계보다 지수 계수 값(0.15)은 낮았지만 최고위 8차 산줄기에 가까워질수록 고도가 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다. 이에 따라 최고위 8차 산줄기의 평균 고도는 산경표 백두대간과 유사하게 하위 산줄기 고도와 큰 차이를 보였다.

2. 임계유역면적에 따른 산줄기 위계와 지형 속성 간의 관계

산줄기 도출을 위한 최소 임계유역면적을 추정하기 위해 임계유역면적을 달리하며 총 5개의 분수계망 기반 한반도 산줄기를 생성하고(그림 6) 각 산줄기에서 위계별 평균 고도와 길이를 계산한 다음 도시하였다(그림 7).

분석 결과(그림 7), 가장 넓은 임계유역면적($10,000\text{km}^2$) 일 때 도출한 산줄기의 계층 구조는 3차에 불과하였고, 위계에 따른 평균 고도는 증가율이 큰 지수 증가 패턴

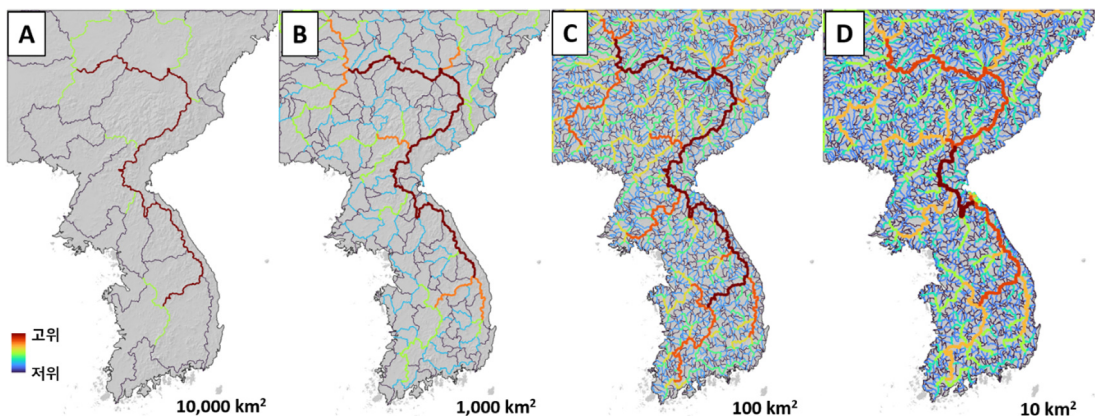


그림 6. 임계유역면적을 달리하며 구한 분수계망 기반 체계 한반도 산줄기

* 임계유역면적 1km^2 에서 도출한 산줄기 지도는 산줄기가 너무 많아 분별이 어려워 그림에서는 제외하였음.

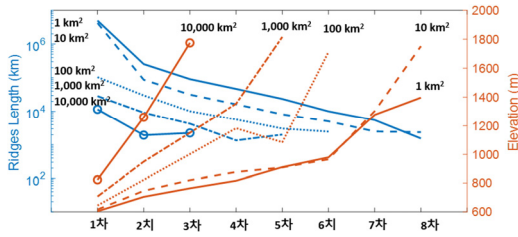


그림 7. 임계유역면적에 따른 산줄기 위계와 평균 고도 및 길이의 관계 변화

($E=583.4e^{0.37X}$, $R^2=0.996$)을 보였으며, 산줄기 길이는 지수 감소 패턴($L=4.8 \times 10^4 e^{-1.45X}$, $R^2=0.947$)을 보였다. 그러나 가장 작은 임계유역면적(1km^2)일 때 도출한 산줄기의 계층은 8차로 크게 증가하였고, 위계에 따른 평균 고도는 증가율이 낮은 지수 증가 패턴($E=515.7e^{-0.1X}$, $R^2=0.964$)을 보여 저위보다는 특히 고위(6, 7, 8차) 산줄기에서 위계별 고도 증가가 큰 폭으로 나타났고, 산줄기 길이는 감소율이 더욱 커진 지수 감소 패턴($L=9.2 \times 10^7 e^{-2.93X}$, $R^2=0.999$)을 보였다.

이를 종합하면, 임계유역면적이 감소함에 따라 최고위 산줄기 차수가 증가하여 산줄기 계층구조는 커지고, 위계에 따라 지수 감소 패턴을 보이는 산줄기 길이는 감소율이 더욱 증가하였으며, 고도의 경우는 증가율이 감소하는 지수 증가 패턴을 보였다. 이에 따라 특히 작은 임계유역면적(예. 1km^2 와 10km^2)에서 도출한 산줄기 간의 고도 차이가 크지 않았다. 이 같은 결과는 임계유역면적을 작게 할 때, 보다 상세한 산줄기 계층 구조를 가질 수 있지만 저위 산줄기 간의 지형적 차이는 유의미하지 않음을 의미한다.

3. 상주시 일대를 사례로 한 산줄기 체계 비교

각 산줄기 체계가 지역의 산줄기를 어떻게 표현하는지 구체적으로 살펴보기 위해, 백두대간이 지나가며 한강과 금강, 그리고 낙동강 유역을 구분하고 있는 상주시 일대를 선정하여 산경표 체계, 신백두대간 체계, 그리고 분수계망 기반 체계로 산줄기를 표현하고 비교·분석하였다(그림 8). 여기서 박수진·손일(2005)의 유역면적 기반 체계는 최저위 산줄기 도출을 위한 유역면적이 너무 커서($1,250\text{km}^2$; 그림 1 참고) 사례 지역인 상주시 일대 산줄기를 상세히 표현하지 않고 있어서 분석에서는 제외하였다.

먼저 상주시 지역의 산경표 산줄기 체계의 경우(그림

8A), 태봉산과 소백산을 거쳐 상주시북부까지 내려온 백두대간이 속리산에 도달하기 전까지는 한강과 낙동강 유역을 경계 짓고, 이어서 지리산이 있는 남쪽으로 내려가며 금강과 낙동강 유역을 구분하고 있다. 한편 속리산에서 분기된 하위 산줄기 한남금북정맥은 서해로 유입하는 남한강과 금강 유역을 가로지르며 칠갑산이 있는 서쪽으로 지나간다. 그리고 하위 산줄기인 지맥이 백두대간에서 분기하여 상주시 일대의 높은 봉우리를 잇고 있다. 하지만 이들 지맥의 경로는 상주시에서 발원한 이안천과 병성천의 유역 경계와 반드시 일치하지는 않았고, 또한 이들 하천이 낙동강에 합류하는 지점까지 도달하기보다 하상 비고가 어느 정도 이상 되는 산지에서 산줄기의 연장이 끝나고 있었다.

신백두대간 체계의 경우(그림 8B), 예상했던 대로 최고위에 해당하는 국가 산줄기가 산경표의 백두대간과 정맥을 비교적 잘 표현하고 있었다.⁷⁾ 하지만 하위 위계인 광역 및 시군구 산줄기는 산경표의 지맥과 일치하지는 않았으며 다만 이안천 및 병성천 유역 분수계와 일치함을 보여주었다. 또한 산경표 체계와 달리 산줄기의 말단이 기복이 낮은 하천 합류부까지 이어졌으며 특히 최고위 바로 아래 위계인 광역 산줄기가 낙동강까지 도달하는 사례(예. 이안천과 낙동강의 합류 지점)도 관찰되었다. 한편 낙동강에 합류하는 주요 지류의 유역 경계 산줄기는 백두대간과 직접 연결되더라도 같은 위계를 보여주지는 않았다(예. 이안천 유역의 경계는 광역 산줄기, 병성천 유역의 경계는 시군구 산줄기). 이는 백두대간에 접하면서도 특정 유역면적 이상을 가진 이안천 유역은 하부 유역(sub-basin)으로 지정되었지만, 유역면적이 작은 병성천 유역은 미분화지역으로 있다가 다음 단계에서 유역이 정의되며 산줄기가 도출되었기 때문이다(그림 2). 이에 따라 산줄기 위계의 공간적 변화가 다소 크게 나타났다.

분수계망 기반 체계의 경우, 산경표 및 신백두대간 체계에서 단일한 위계로 되어 있었던 산줄기(대간 또는 정맥; 국가 또는 광역)가 산줄기 합류 지점마다 분절되어 있었으며 각 산줄기 구간마다 서로 다른 위계가 부여된 것이 특징이었다(그림 8C). 즉, 상주시 지역의 백두대간은 분수계망 기반 산줄기에서 단일한 위계가 아니라 5차와 6차의 산줄기 구간으로 구성되어 있었으며, 지맥의 경우도 2차와 3차의 산줄기 구간으로 구성되어 있었다. 이에 따라 분수계망 기반 체계는 기존의 산줄기를 네트워크 관점에서도 생각해볼 수 있는 기회를 주었다. 예를 들어,

백두대간은 분수계망 기반 산줄기에서도 5차와 6차의 고위 산줄기로 지맥은 2차와 3차의 저위 산줄기로 각각 표현되고 있는데, 이는 백두대간이 한반도 산지의 연결성 측면에서도 가장 높은 위계임을 보여준다.

한편 분수계망 기반 산줄기의 말단은 신백두대간 체계와 동일하게 하천의 합류부까지 이어졌지만, 고위 산줄기가 하천 합류부까지 도달하는 경우는 없었다. 분수계망 기반 산줄기의 경우, 하천 합류부에서 시작하는 산줄기의 위계는 반드시 1차이며 이후 능선을 따라 올라가며 다른 산줄기 구간과 만나면서 위계가 증가하였다. 따라서 하천 합류부에서 멀어질수록 위계가 점진적으로 증가하는 공간적 패턴을 보였다. 특히 산줄기가 길게 연속되며 서로 비슷한 위계의 산줄기 구간이 서로 만날 때 고차산줄기가 발생하였다(예. 그림 8C에서 이안천과 병성천 유역을 구

분하는 3차 산줄기 구간). 이처럼 분수계망 산줄기 체계에서는 산체의 형태가 고위 산줄기 형성에 큰 영향을 미쳤으며, 이는 백두대간과의 연결성에 따라 위계가 결정되는 산경표 및 신백두대간 체계와의 가장 큰 차이점이었다.

V. 논의

1. 과학적인 한반도 산줄기 체계 정립을 위한 방향

역사문화적 상징성이 큰 산경표 산줄기 체계, 그리고 DEM을 기반으로 비교적 객관적인 방법으로 분수계 산줄기를 추출하는 현행 산줄기 체계가 한반도 산지 지형을

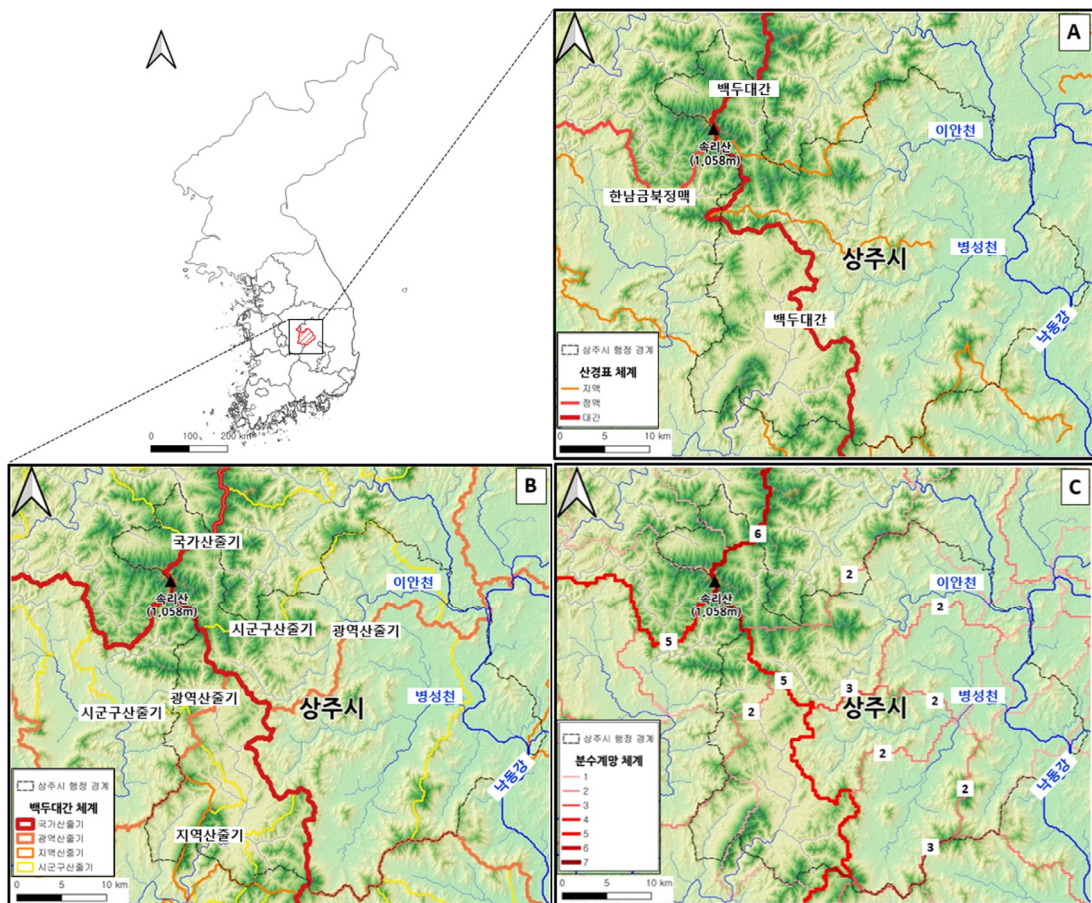


그림 8. 상주시 일대를 대상으로 한 산줄기 체계 비교

* 산경표(A), 신백두대간(B), 분수계망 기반(C) 산줄기 체계.

합리적으로 표현하는지를 살펴보기 위해 지금까지 산줄기 체계별로 위계에 따른 산줄기 평균 고도와 길이를 비교·분석해보았다. 연구 결과, 산경표 체계의 최고위 산줄기인 백두대간의 고도는 하위 정맥의 고도와 2배 이상의 차이를 보여, 백두대간이 한반도의 가장 높은 산지를 잘 대변하고 있음을 보여주었다(그림 5A). 또한 백두대간과 정맥의 상당 부분은 산줄기 말단(endpoint)에서부터 구간별로 위계를 부여하는 분수계망 기반 체계에서도 높은 위계를 보였다(그림 8C). 따라서 백두대간을 중심으로 하는 전통적인 산경표 산줄기 체계는 고도와 산체의 연결성 측면에서 과학적으로도 합리적인 산지 인식 체계로 해석된다. 그러나 하위 정맥과 지맥 간의 고도 차이가 크지 않아 위계가 산체의 규모와 형태를 반영하지 못하였고, 또한 유역 분수계와도 일치하지 않아 이를 활용한 국토관리 측면에서도 적절하지 않은 것으로 판단된다.

유역면적을 달리하며 유역 분수계를 추출하고 여기서 산지로 인식될 수 있는 고도와 형태를 가진 분수계를 산줄기로 정의한 박수진·손일(2005)의 유역면적 기반 산줄기 체계는, 산줄기가 유역 분수계와 일치하는 첫 번째 산줄기 지도이며 산지 형태와 고도를 가진 분수계만을 산줄기로 정의하여 산줄기의 말단이 저평한 하천 합류부까지 도달하지 않는 장점이 있었다(그림 1). 하지만 유역면적에 의해 산줄기 위계가 결정되다 보니, 저위 산줄기 간에는 유의미한 고도와 길이 차이가 나타나지 않았고, 최고위 산줄기의 경우 산경표의 대간뿐만 아니라 정맥에 해당하는 산줄기까지를 포함하고 있어 하위 산줄기와 유의미한 고도 차이를 보이지도 않아서(그림 5B), 위계가 산줄기의 고도와 규모를 잘 반영하지 못했다. 또한 하향식 위계 결정 구조이다 보니 위계의 공간적인 분포가 불규칙한 경향을 보였다.

손학기 등(2022)의 신백두대간 산줄기 체계는 산경표의 백두대간과 정맥을 비교적 잘 재현하고 있었고(그림 4C; 그림 8B), 대간과 정맥과의 직접적인 연결성에 우선순위를 두어 위계를 산출하였기 때문에 전국에 있는 어떤 산지이든 백두대간과의 연결 정도를 직관적으로 파악할 수 있었으며, 동시에 주요 하천의 유역권과 정확하게 일치하였다. 하지만 산경표의 대간·정맥 위계를 재현하기 위한 알고리즘을 하위 위계 산줄기 도출에도 반복적으로 적용하면서 높은 위계를 가진 내포 유역 경계인가에 따라 산줄기 위계도 결정되어(그림 2) 비슷한 고도의 인접한 산줄기라도 위계의 차이가 크게 나타났다(그림 8B). 또한 같은 이유로 저위 산줄기에서, 구체적으로 읍면동·동리·

기타 산줄기, 광역·지역·시군구 산줄기 간의 평균 고도 차이가 유의미하지 않았다(그림 5C). 이는 동리 및 기타까지를 포함하는 7개의 세밀한 위계 구분이 지형학적으로 필요한지에 대한 의문을 제기하였다. 이와 더불어 최고위에 해당하는 국가 산줄기의 평균 고도 또한 산경표의 대간에 비해 낮았는데(그림 4C) 이는 백두대간과 달리 저평한 대하천 하구까지 산줄기가 도달하기 때문에 나타난 현상이다(그림 8B). 이처럼 산줄기 위계가 산체의 규모를 잘 설명하지 못하는 이러한 문제는 전통적인 산줄기 위계를 재현하려는 알고리즘과 하천 합류 지점까지 연결되는 산줄기 말단에 기인하는 것으로 생각된다.

산줄기를 분할하여 구간별로 위계를 부여하는 Scherler and Schwanghart(2020)의 분수계망 기반 체계는 위계를 부여하는 산줄기 개수가 많아지면서 산줄기 위계 구조가 8차에 달하였지만 유역면적 기반 체계 그리고 신백두대간 체계와는 달리 계층간 길이와 고도의 차이가 비교적 고르게 나타났다(그림 5D). 이에 따라 위계가 산줄기의 고도와 규모를 가장 잘 표현하는 산줄기 체계로 판단되었다. 한편 사례 지역인 상주시에서 확인된 바와 같이 분수계망 기반 체계는 공간적인 측면에서 볼 때 위계의 변화가 점진적이고 연속적으로 일어남을 보여주어 위계의 변화가 공간적으로 급격하고 비연속적인 신백두대간 체계와 대조를 이루었다(그림 8B, 8C). 이는 최저위 1차 산줄기가 하천 합류부에서 시작되어 능선을 따라 올라가며 다른 산줄기와의 합류 여부에 따라 위계가 결정되기 때문이며(그림 3B), 이로 인해 산줄기 위계의 공간적 분포는 산체의 형태 및 분포 특성과 긴밀히 연관되었다.

표 2는 지금까지의 산줄기 체계 비교·분석 결과를 정리한 것이다. 지금까지의 결과가 특정 산줄기 체계가 우월함을 말해줄 수는 없지만, 분수계망 기반 산줄기 체계의 계층 구조가 다른 체계에 비해 적어도 산체의 규모와 연결성을 잘 표현해 주고 위계의 공간적 분포 또한 산체의 형태 및 분포 특성과 긴밀히 연계되어 표현된다는 것을 확인하였다. 따라서 분수계망 기반 산줄기 체계가 한반도의 산줄기 지형을 보다 합리적으로 표현한다고 볼 수 있었다.

이는 지형학적 측면에서 기존 산줄기 체계에서는 하나로 간주했던 산줄기를 망 관점에서 분할하여 접근할 필요가 있음을 시사한다. 길이가 수 km에서부터 수십 km 이상인 산줄기를 하나의 단위로 다루는 기존 체계는 백두대간의 연결성을 직관적으로 알 수 있다는 장점도 있었지

표 2 산출기 체계별 위계 특성과 장·단점 비교표

체계 구분	산정표 체계 (신경준, 19세기)	유역면적 기반 체계 (박수진·손일, 2005)	신백두대간 체계 (손학기 등, 2022)	분수계망 기반 체계 (Scherler and Schwanghart, 2020)
특징	- 백두산에서 주요 고을의 진산으로 이어지는 산들을 축보 형태로 기록 - 한국의 10대강 유역 분수계와 유사하지만, 일치하지는 않음	유역면적을 달리하며 도출한 유역 분수계에서 산지 형태를 가진 분수계를 이은 선	최대 유역 경계를 정하고, 이후 내부 하위 유역 찾는 과정을 반복하며, 내포 유역 분수계에 서로 다른 위계를 부여한 선	특정 임계유역면적에서 시작하는 하계망을 만들고, 하천의 합류점에서 시작하는 유역 분수계를 만든 다음, 망 관점에서 이를 분할하여 산출기를 구성함
위계 (산출기 계층성)	1대강, 1정간, 13정맥으로 한반도의 산출기를 명명함 - 정맥 이하의 산출기는 명명하지 않았지만, 특정 지점(산령, 치)을 기준으로 산출기를 구성할 수 있음 - 대강과의 연결성이 중요하기 때문에 위에서 아래로 내려가는 위계 결정 구조를 가짐	- 백두대간 산출기를 별도로 설정하지 않음 10대강을 구분하는 유역면적(50,000km²)을 시작(최고위 산출기)으로 유역면적을 반분해 나가면서 산출기 위계를 지정 - 유역면적이 넓을수록 상위 위계를 가지는 하향식 위계 결정 구조를 가짐	1차 산출기는 백두산에서 지리산으로 이어지는 능선이고, 2차 산출기부터는 하부 유역의 내포 횡수에 따라 위계를 두어 7차까지 구분함 - 국토 관리 측면에서 국가, 광역시도, 시도 산출기 등의 7단계 행정구역체계 대응 명명 - 산정표 체계와 동일한 하향식 위계 결정 구조를 가짐	- 백두대간 산출기를 별도로 설정하지 않음 - 하천 차수 계산 방식과 동일하게, 산출기 구간별로 다른 산출기와의 연결 정도에 따라 위계를 산출함(여기서는 스트랄러 방식으로 차수를 계산하였음) - 이에 따라 상향식 위계 결정 구조를 가짐
장점	- 전통적인 산지 인식을 보여줌 - 최고위인 백두대간이 지형적으로도 한반도의 가장 높은 연속된 산지임	- 동일한 구분원리에 의해 산출기 추출 / 자동화 가능 - 산출기가 유역 분수계와 일치함 - 산출기의 발달이 저평한 하천 합류부까지 도달하지 않음	백두대간과 10대강 유역 경계 산출기가 최상위 위계를 가지며 이를 통해 산정표의 위계를 재현함	- 산출기를 구간별로 나누어 위계를 살펴볼 수 있는 기회를 제공 - 산체(또는 유역) 형태에 따라 위계가 달라지기 때문에, 계층 구조가 산체의 분포와 지형 특성을 반영함
단점	- 부정확성의 문제 - 정맥 하부 산출기(지맥)는 복원된 자료를 활용하여 추출할 수 있으나, 추가 검토가 필요함	- 문화역사적 혹은 지역적 맥락을 고려하지 못함 - 위계가 산지의 고도 및 규모와 관련성이 낮음	- 위계가 산지의 고도 및 규모와 관련성이 낮음 - 산출기의 발달부를 지정하지 못함	산출기의 발달부를 지정하지 못함

만, 앞서 살펴본 대로 위계가 산지의 지형 특성을 반영하지 못하였고(그림 5A, 5C) 공간적으로도 산줄기 위계의 변화가 연속적이지 않고 급격한 문제점이 관찰되었다(그림 8A, 8B). 또한 단일 산줄기 내에서도 형태적으로 다양한 산줄기 유형이 나타날 수 있는데(예. Scherler and Schwanghart, 2020), 이러한 산줄기의 형태적 차이는 산줄기 지표 구성물질과 주도적 물질이동과정에 차이가 있음을 의미하며 이는 산지 지형에 대한 이해뿐만 아니라 산지 관리를 위해서라도 산줄기를 구간별로 파악할 필요가 있음을 시사한다. 특히 단일 산줄기가 서로 다른 행정 구역 경계를 넘나들다 보면 실제 관리 단위가 불분명해지는 문제점이 존재한다.

따라서 보다 과학적인 한반도 산줄기 체계를 정립하기 위해서는 전통적인 산줄기 위계를 재현한 신백두대간 산줄기 체계와 수십 km 이상되는 단일 산줄기를 분할하고 구간별로 위계를 도출하여 산체의 형태 및 규모를 잘 표현하는 망 기반 산줄기 체계 방식을 결합할 필요가 있다고 판단된다. 이 경우 우리 민족의 전통적인 산줄기 체계를 계승하면서도 산지 인식 향상과 관리 용이성 증대를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

2. 산줄기 도출을 위한 최소 유역면적 추정과 이의 지형학적 함의

유역면적 기반, 신백두대간, 그리고 분수계망 기반 산줄기 체계는 공통적으로 유역 경계인 분수계를 토대로 산줄기로 추출한다. 이에 따라 이론적으로는 유역면적을 달리하며 무한대의 산줄기를 추출할 수 있기 때문에, 산줄기를 도출하는 유역의 면적이 중요한 변수에 해당한다. 실제로 신백두대간 산줄기 체계에서는 유역면적이 0.25km^2 에 도달할 때까지 분수계 산줄기를 도출하였다. 하지만 어느 정도까지의 유역면적에서 산줄기를 추출하는 것이 과학적인가에 대한 논의가 이뤄진 적은 없었다.

분수계망 기반 산줄기 체계 방식으로 임계유역면적을 달리하며 산줄기를 도출하고 각 산줄기별로 위계에 따른 평균 고도와 길이를 계산하여 도시한 결과, 임계유역면적이 줄어들어 1km^2 이 되었을 때 도출한 산줄기의 위계별 평균 고도는 임계유역면적 10km^2 에서 도출한 산줄기와 거의 차이가 없었다(그림 7). 따라서 임계유역면적을 1km^2 보다 더 줄이는 시도는 지형적으로 구분이 되는 산줄기 위계를 만들어 내기 힘들 것으로 판단되며, 이는 유

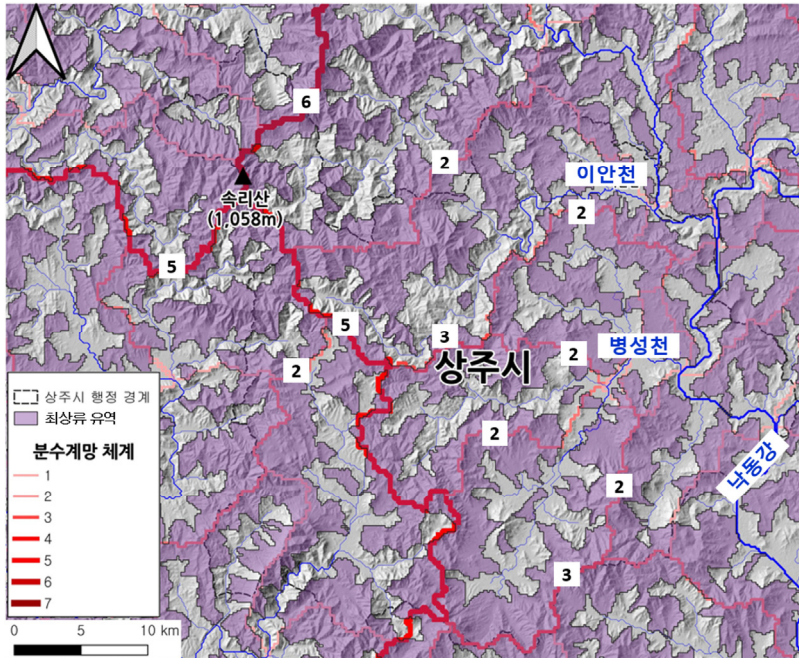


그림 9. 상주시 일대를 대상으로 임계유역면적 1km^2 로 도출한 최상류 유역(보라색)과 분수계망 기반 산줄기

* 보라색 최상류 유역은 임계유역면적 1km^2 하계망의 합류지점을 유출구로 하는 유역으로 산줄기를 도출하는 단위 유역(그림 3 참고)에 해당하며 평균 면적은 $4\pm 2\text{km}^2$ 에 해당함.

역 분수계를 토대로 산줄기를 도출하는 유역면적 기반 및 신백두대간 산줄기 체계에도 유사하게 적용될 것으로 판단된다.

한편 유역면적 1km^2 는 지표물질 이동과정, 수문, 그리고 잔존 유기물질 크기의 점이적 변화가 일어나는 면적 범위($10^4 \sim 10^6 \text{m}^2$)의 상한에 해당한다(Gomi *et al.*, 2002). 구체적으로 물질이동 측면에서는 중력에 의한 매스무브먼트(mass-movement)와 붕적과정(colluvial process)이 우세한 붕적계곡(colluvial valley)에서 유수에 의한 물질 이동이 주도적인 하성계곡(fluvial valley)로의 전이가 발생하는 면적이다(Montgomery, 2001; Gomi *et al.*, 2002). 따라서 임계유역면적이 1km^2 인 하계망을 토대로 도출된 분수계 산줄기는 지형학적으로 산사태와 암설류 등의 사면작용으로 인한 침식이 주도적인 최상류 유역(headwater catchment)의 경계에 해당하며, 특히 산사면에서 시작한 암설류가 하도를 따라 이동하여 퇴적되는 최대 도달 거리(runout distance)를 포함하는 유역 경계에 해당하므로 산사태 재해 관리를 위한 단위로 활용될 수 있다(손학기 등, 2020).

그동안 백두대간의 관리 범위를 마루금에서부터 특정 거리까지로 지정해 왔는데, 이와 같은 단순한 거리 기준으로 백두대간 관리 범위를 설정하는 것은 산계와 수계를 결합하여 산지를 인식한 전통적인 산경표 체계에 위배되며, 이에 따라 수계를 기준으로 백두대간 관리 범위를 설정할 필요가 있다는 주장이 제기되기도 하였다(신준환, 2004). 이러한 측면에서도 백두대간에 연접한 임계유역면적 1km^2 의 최상류 유역(그림 9)은 산사태 재해에 대응하는 기본 관리 단위로도 활용될 수 있으면서 동시에 백두대간 관리 범위 설정의 기준으로도 사용될 수 있을 것이다. 이상의 결과는 지형학적으로 유의미한 최저 위계 산줄기가 존재함을 보여주며 이를 한반도 산줄기 체계에 반영한다면 과학적인 산지 관리에도 활용될 수 있음을 시사한다.

VI. 결론

과학적으로 의미 있는 한반도 산줄기 체계 정립 방안을 마련하기 위해, 전통적인 산경표 산줄기 체계와 더불어 DEM을 기반으로 산줄기를 추출하는 박수진·손일(2005)의 유역면적 기반, 손학기 등(2022)의 신백두대간, 그리고 Scherler and Schwanghart(2020)의 분수계망 기

반 산줄기 체계를 지형학적으로 비교·분석하여 각 체계가 산줄기의 지형 특성을 얼마나 합리적으로 반영하는지 검토하였다. 연구 결과, 산경표 체계는 고도와 산체의 연결성 측면에서 과학적으로 합리적인 산지 인식 체계로 인정되나 정맥 하위 위계 산줄기가 불분명하고 분수계와 정확하게 맞아 국토 관리 측면에서 부적절하였다. 유역면적에 의해 위계가 결정되는 유역면적 기반 체계와 산경표 체계의 산줄기 위계를 재현한 신백두대간 체계는 산줄기 위계간 차이가 유의미한 지형 차이를 가져오지는 않았고, 또한 산줄기 위계가 유역면적 또는 상위 위계 산줄기와의 연결 여부에 의해 결정되기 때문에 산줄기 위계의 변화가 공간적으로 급격히 나타났다. 한편 산줄기를 분할하여 구간별로 위계를 부여하는 분수계망 기반 체계는 산줄기의 위계간 고도 및 길이 차이가 고르게 나타나 위계가 산체의 규모를 가장 잘 표현하였다. 그리고 산줄기와의 연결 정도에 의해 위계가 결정되기 때문에 공간적인 위계 변화가 산줄기 말단인 지류 합류부에서 산체 내부로 들어가며 점진적이고 연속적으로 나타났다. 하지만 신백두대간 및 분수계망 체계 모두 산줄기의 말단이 낮은 고도의 저평한 하천 합류부까지 도달하는 문제점이 발견되었다. 또한 지형학적으로 의미 있는 산줄기 추출을 위한 유역의 최소 면적을 분석한 결과, 임계유역면적 1km^2 이하에서는 지형적으로 구분되는 산줄기를 추출하기 힘든 것으로 밝혀졌으며 해당 면적은 산사태와 암설류 등의 사면작용이 활발한 최상류 유역의 경계와 대응하였다. 이상의 결과는 보다 과학적이면서 산줄기 관리 측면에서도 도움이 되는 한반도 산줄기 체계 정립을 위해 다음의 노력이 필요함을 시사한다. 첫째, 전통적인 산줄기 체계를 계승하면서도 산줄기를 망 관점에서 분할하고 각 구간별로 위계를 부여하여 산줄기의 고도와 규모를 잘 반영하는 위계 산출 방식이 결합될 필요가 있다. 둘째, 지형학적으로 유의미한 산줄기 구성을 위해 산줄기 도출 유역면적에 대한 평가가 필요하며 최소한의 유역면적은 1km^2 이상이 되어야 한다. 셋째, 저평한 하천 합류부까지 이어지는 산줄기 말단을 산지 내로 한정하는 방안이 마련되어야 한다.

사사

이 논문은 서울대학교 창의선도 신진연구자 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

註

- 1) 근대적 의미에서 산지를 체계적으로 이해하려는 지형학적 시도는 일련의 산맥(山脈, mountain range) 연구이다(예, 김상호, 1977; 권혁재, 2000; 박수진·손일, 2008). 산맥 역시 산줄기(山徑, mountain ridge)와 유사하게 선형적인 속성을 지니지만, 국부적인 침식저항도 차이에도 큰 영향을 받는 산줄기와 달리, 산맥은 광역적인 지구조 운동으로 결정되는 산지 분포를 체계적으로 이해하는데 유용하며(오경섭, 2003) 산지형성 매커니즘에 따라 위계(예, 지구 내적영력이 주도적인 1차와 지표면의 외적영력이 주도적인 2차 산맥)가 결정된다.
- 2) 산을 단절되고 고립된 봉우리로 보기보다 흐름을 가지고 이어지는 줄기(脈勢)로 이해하는 산지 인식은 풍수사상의 보급과 관련이 있다(양보경, 1997). 풍수에서는 지기(地氣)의 맥이 산줄기를 따라 흐른다고 보아, 명당의 입지에서 산줄기의 계통적 파악은 필수적이었다. 또한 국토를 유기체와 동일하게 보아 줄기(幹)와 맥에 비유하는 방식도 풍수적 자연관에 기초한 것이다(최원석, 2013).
- 3) 내포 유역 분석법은 여러 개의 유역 면적 변수를 이용하여 유역을 위계적으로 구축할 때 발생할 수 있는 유역 위계 간의 중복 또는 누락을 막을 수 있는 장점이 있다.
- 4) 여기서 백두대간 산줄기는 한반도의 모든 지점에서 물을 흘릴 때 최종적으로 동해로 흐르는 지역과 서해로 흐르는 지역의 분수계를 말하는 것으로 산경표의 백두대간과 엄밀히 비교하면 차이가 있다.
- 5) TopoToolbox는 MATLAB 기반의 지형분석 함수 모음으로 DEM 자료를 이용하여 다양한 지형 속성을 계산하고 흐름 경로 및 누적을 계산하여 하계망 추출 등의 지형수문 분석도 가능하다(TopoToolbox), 특히 코드가 공개되어 있기 때문에 연구자들이 원하는 분석을 구현할 수 있다는 장점이 있어 지표를 다루는 다양한 분야의 연구자들이 사용하고 있다.
- 6) 박수진·손일(2005)은 분수계에서 형태적으로 산지에 해당하는 것만을 산줄기로 정의하였다. 하지만 이들이 산지를 정의할 때 사용한 고도와 지표볼록도 값을 보다 작은 면적의 유역에서 도출한 산줄기 그리고 다른 해상도를 가진 DEM에 그대로 적용하는 것은 별도의 평가가 요구되기에 여기서는 이

절차를 생략하였다.

- 7) 일부 차이가 있는 지역은 신백두대간 산줄기 체계를 도출했던 DEM의 해상도(약 30m)가 복원된 산경표 체계 산줄기를 추출한 DEM의 해상도보다 상대적으로 낮기 때문에 발생한 오류로 판단된다.

참고문헌

- 권혁재, 2000, “한국의 산맥,” 대한지리학회지, 35(3), 389-400.
- 김상호, 1977, “韓國의 山脈論,” 자연보존, 19, 1-4.
- 김종욱, 1991, “하천지형 발달에 관여하는 주요 변수들간의 기능적인 관계에 관한 연구 : 신리천, 사천내, 군선강을 사례지역으로,” 지리학, 26(1), 1-29.
- 김영표·임은선·김연준, 2004, 「한반도 산맥체계 재정립 연구 : 산줄기 분석을 중심으로」, 국토연구원.
- 김우선, 2022, “18세기 실학적 지리학자들의 학문적 親緣性,” 한국고지도연구, 14(1), 5-30.
- 김추홍·손일, 2010, “산지 차수에 근거한 남한지역의 산지구분,” 한국지형학회지, 17(2), 1-13.
- 박수진·손일, 2005, “한국 산맥론(II) : 한반도 ‘산줄기 지도’의 제안,” 대한지리학회지, 40(3), 253-273.
- 박수진·손일, 2008, “한국 산맥론(III) : 새로운 산맥도의 제안,” 대한지리학회지, 43(3), 276-295.
- 손학기·김종민·박시현·박종래·이지영, 2022, 「농업·농촌 정책 고도화를 위한 정보지원체계 구축 방안 (5/10 차년도) - 산지지형 공간구조와 산줄기 위계 구축을 중심으로」, 한국농촌경제연구원.
- 손학기·석현덕·이용선·정호근·구자춘·변승연·은종호·김나현·조성은·강민혜·박수진·이도원·최원석·변종민·박선영·심우진·장효진·진훈·강지옥·이승수·박종래·김종익·윤지수, 2020, 「산지전용·일시사용제한지역 광역 산줄기 선형과 능선부 관리범위의 조사」, 한국농촌경제연구원.
- 신준환, 2004, “백두대간 관리범위 및 관리방안,” 한국환경생태학회지, 18(2), 197-204.
- 양보경, 1997, “조선시대의 ‘백두대간’개념의 형성,” 진단학보, 83, 85-106.
- 오경섭, 2003, “국토 이해의 밑그림이 되는 산지 인식 방향,” 한국지형학회지, 10(1), 101-103.

- 이민부, 2002, “백두대간과 산지지형”, 공우석 등(편), 「백두대간의 자연과 인간」, 산악문화, 215-236.
- 조석필, 1997, 「태백산맥은 없다」, 산악문화.
- 최원석, 2013, “조선후기의 산줄기 개념과 산보(山譜) 편찬의 의의,” 대한지리학회 학술대회논문집, 395-399.
- 최정선·장효진·심우진·안유순·신혜섭·이승진·박수진, 2018, “산지 경계 추출을 위한 지형학적 변수 선정과 알고리즘 개발,” 한국지형학회지, 25(3), 1-18.
- 탁한명·김성한·손일, 2013, “지형학적 산지의 분포와 공간적 특성에 관한 연구,” 대한지리학회지, 48(1), 1-18.
- Gomi, T., Sidle, R.C., and Richardson, J.S., 2002, Understanding processes and downstream linkages of headwater systems, *BioScience*, 52(1), 905-916.
- Montgomery, D.R., 2001, Slope distributions, threshold hillslopes, and steady-state topography, *American Journal of Science*, 301, 432-454.
- Scherler, D. and Schwanghart, W., 2020, Drainage divide networks - Part 1: Identification and ordering in digital elevation models, *Earth Surface Dynamics*, 8(2), 245-259.
- Short, J.R., 2012, *Korea, A Cartographic History*, Chicago: Chicago University Press.
- Yamada, S., 1999, Mountain ordering: A method for classifying mountains based on their morphometry, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(7), 653-660.
- TopoToolbox, <https://topotoolbox.wordpress.com>
- 교신 : 변종민, 08826, 서울시 관악구 관악로 1, 서울대학교 지리교육과(이메일: cyberzen@snu.ac.kr)
- Correspondence: Jongmin Byun, 08826, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, South Korea, Department of Geography Education, Seoul National University (Email: cyberzen@snu.ac.kr)
- 투고접수일: 2025년 5월 29일
심사완료일: 2025년 6월 20일
게재확정일: 2025년 6월 30일