

## 생태환경 특성 파악을 위한 지형분류기법의 개발\*

박수진\*\*

### A Geomorphological Classification System to Characterize Ecological Processes over the Landscape\*

Soo-Jin Park\*\*

**요약** : 효율적인 국토환경관리와 지속가능한 생태자원의 보존을 위해서는 지형 및 토양의 공간적인 분포특성과 그것이 각종 자연 및 인문현상들과 가지는 상관성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 기존의 지형분류법은 대부분 지형형성과정 혹은 지형의 단순한 형태분류에 치중하여, 분류 결과와 지표면에서 나타나는 다양한 생태학적 현상들과의 관련성을 파악하기 어려운 단점이 있었다. 이 연구는 지표면에서 나타나는 물과 에너지, 그리고 물질의 흐름을 생태적 환경특성을 반영하는 주원인으로 규정하고, 이에 근거하여 전산화된 지형분류법을 개발하는 것을 목적으로 한다. 지표면을 에너지와 물질의 흐름을 반영하는 8개의 토양지형단위(soil landscape units)로 구분하였으며, 이것을 수치고도모델(DEM)로부터 추출하는 방법을 개발하였다. 경기도 양평군의 약 12km<sup>2</sup> 크기의 지역에 개발된 기법을 적용하여 토양지형단위들을 분류한 뒤, 각 단위들의 공간적인 분포특성을 살펴보았다. 개발된 방법은 일반적으로 구할 수 있는 수치고도모델에 적용할 수 있어, 넓은 지역의 지형특성들을 쉽게 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 분류된 토양지형단위들은 자연환경조사와 제반 수문 및 토양환경 특성 파악에 중요한 기본자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 제시된 방법이 보다 널리 쓰이기 위해서는 기존 수치지도의 정확성의 문제, 사용된 수치고도모델의 격자크기에 따라 분류기준의 변화를 야기시키는 스케일의 문제, 그리고 다양한 지형형성작용과의 상관성에 관한 보다 체계적인 연구가 요구된다.

**주요어** : 지형분류, 토양지형단위, 사면발달, 토양발달, 수치고도모델(DEM)

**Abstract** : The shape of land surface works as a cradle for various environmental processes and human activities. As spatially distributed process modelings become increasing important in current research communities, a classification system that delineates land surface into characteristic geomorphological units is a pre-requisite for sustainable land use planning and management. Existing classification systems are either morphometric or generic, which have limitations to characterize continuous ecological processes over the landscape. A new classification system was developed to delineate the land surface into different geomorphological units from Digital Elevation Models(DEMs). This model assumes that there are pedo-geomorphological units in which distinct sets of hydrological, pedological, and consequent ecological processes occur. The classification system first divides the whole landsurface into eight soil-landscape units. Possible energy and material flows over the land surface were interpreted using a continuity equation of mass flow along the hillslope, and subsequently implemented in terrain analysis procedures. The developed models were tested at a 12km<sup>2</sup> area in Yangpyeong-gun, Kyeonggi-do, Korea. The method proposed effectively delineates land surface into distinct pedo-geomorphological units, which identify the geomorphological characteristics over a large area at a low cost. The delineated landscape units may provide a basic information for natural resource survey and environmental modeling practices.

**Key Words** : geomorphological classification, soil landscape unit, slope evolution, pedogenesis, Digital Elevation Model(DEM)

\* 이 연구는 서울대학교 신입교원연구지원비의 지원으로 이루어졌음.

\*\* 서울대학교 사회과학대학 지리학과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography, College of Social Science, Seoul National University), catena@snu.ac.kr

## 1. 서론

지표면의 모양, 즉 지형은 지표에서 나타나는 각종 생태현상들을 결정하는 중요 요인이다. 지표자환경은 크게 구조적 요소(지형, 토양), 순환적 요소(물, 공기), 그리고 생물적 요소(식물, 동물)로 구성되어 있으며, 이들 세 요소들은 동적인 상호작용하에서 다른 요소들에게 영향을 미친다(오경섭, 1996). 지표면에서의 순환적 요소들은 장기적으로 지형 및 토양의 형태를 결정하게 되며, 생물적 요소 역시 지형 및 토양의 형태에 직간접적인 영향을 미치게 된다. 하지만 단기적으로는 지표의 형태 그리고 지표를 피복하고 있는 토양 등의 구조적 요소들이 물과 각종 물질의 공간적인 이동경로와 그 양을 결정하며, 식생의 공간적인 분포 그리고 인간을 포함하는 동물의 서식처를 제공한다. 따라서 제반 환경작용들을 정확하게 이해하고 생태자원의 공간적인 분포와 그 특성을 파악하기 위해서는 지형 및 토양의 공간적인 분포를 분류하는 작업이 선행되어야 한다.

최근 지리정보시스템(Geographical Information System, 이하 GIS)의 급속한 발달과 지속가능한 자원이용의 중요성이 부각되면서, 한국에서도 각종 생태현상과 관련된 지형요소들의 전산화 및 지도화에 대한 관심이 증가하고 있다(오경섭, 1996; 조태영, 1997; 이민부 외, 2001; 김태호, 2003). 이러한 논의가 활발하게 이루어지는 것은 국토 및 경관관리에 있어 필수불가결한 지형분류도(geomorphological map)가 국내에서 아직 작성되지 않았기 때문이다. 그 결과, 지형이 가지는 고유한 특성과 그에 따른 관리방안 등이 확립되지 못함으로써 지형경관을 무시한 무절제한 개발과 그 결과로 발생하는 각종 환경재해들을 야기하게 된다고 볼 수도 있다. 지형학이 인간을 포함한 지표생태계의 특성을 해석하는 생활과학의 측면이 강함에도 불구하고, 지형의 형성과정과 형태에 치중하여 각종 지형요소들이 생태현상 및 인간활동과 보이는 연계성을 밝히려는 노력이 비교적 적었던 것도 사실이다. 따라서 지형분류의 기준 설정과 전산화 작업은 효율적인 경관 및 국토관리를 위해 무엇보다 시급히 이루어져야 할 연구과제이다.

지형학 분야에서 지형분류법의 발달은 오랜 역

사를 갖고 있으며, 다양한 기법들이 이미 개발되어 있다(Vitek *et al.*, 1996). 기존의 지형분류법은 성인적 분류법(generic classification)과 형태적 분류법(morphometric classification)으로 대별된다. 성인적 분류법은 지형의 형태와 그 형성작용을 중시하여, 성인과 형태, 형성시기 그리고 구성물질 등을 중심으로 지형을 분류한다. 분류된 지형요소 혹은 지형면들은 대부분 형성과정을 함축적으로 내포하는 개념들을 사용한다. 대표적인 예로 국제지리연합(International Geographic Union)의 지형분류법, 국제지구항측연구기구(International Institute of Aerospace Survey and Earth Science)의 지형구분법 등이 있다(조태영(1997)에서 재인용). 한국에서도 지형의 형성원인에 근거한 지형분류법들이 다수 제안되어 있다(이민부 외, 2001; 김태호, 2003).

성인적 분류법과는 달리, 형태적 분류법(morphometric classification)은 성인보다는 형태 자체에 초점을 맞추어 지형분류를 시도한다. 예를 들어, 경사도(slope angle), 고도(elevation), 곡면률(slope curvature) 등과 같이 수치지도 혹은 지형도 상에서 추출한 지형변수(terrain parameter)들을 조합하여 특정 지형단위들을 구분한다. 그 대표적인 예로 경사도(slope angle)와 평면곡면률(plan curvature), 사면곡면률(profile curvature)을 조합하여 지형면을 분석한 Pennock *et al.*(1987)의 연구가 있으며, Dikau(1989), Dymond *et al.*(1995), Blaszczynski(1997), Giles and Franklin(1998) 등도 유사한 방법론들을 제시하고 있다. 국내에서는 아직 형태적 분류법에 의한 지형분류방법은 제안되지 않고 있지만, 수치지도모형(Digital Elevation Model, 이하 DEM)의 분석을 통해 지형의 특성을 파악한 연구는 다수 알려져 있다(김우관·임용호, 1997; 이금삼·조화룡, 1998).

성인적 분류법의 장점은 대상지역의 지형 발달과정과 특성을 함축적으로 표시해 준다는 점이다. 반면에 대상지역의 지형형성과정에 관한 지식이 선행되어야 하고, 성인을 정확하게 파악하기 위해서는 장기간에 걸친 야외 및 실험실 작업이 필요하다. 그 결과 조사자들 사이에 지형요소 해석에 대한 이견이 대두될 수 있으며, 최근 그 중요성이 더해가는 GIS를 활용한 효율적이고 신속한 지형분류도 작성에는 큰 제약이 따른다. 무엇보다 중요한

단점은 이렇게 작성된 지형분류도를 사용하여 각 지형요소들이 현재의 지표환경 및 생태학적인 특성과 갖는 연계성을 파악하는 데 많은 제약이 따른다는 것이다. 그 중요성이 증가하고 있는 지표면의 지화학적, 수문학적, 생태학적인 작용들과 지형과의 연관성을 효과적으로 파악하기 위해서는 과거의 지형형성작용보다는 현재의 지형에서 나타나고 있는 에너지와 물질흐름의 정량화가 더 중요한 의미를 갖게 된다. 하지만 성인적 지형요소들의 경우 과거에 형성된 경우가 많아 현재 나타나고 있는 제반 환경작용들을 설명하는 데는 한계가 있다.

형태적 분류법의 경우, 전산화된 지형도 혹은 수치고도모델을 이용해 비교적 간편하게 지형을 분류할 수 있다는 장점이 있다. 이 방법론은 지리정보시스템의 발달과 더불어 지표면의 현상태에 대한 정량화된 지형학적 지식을 제공한다는 측면에서 향후 그 중요성이 지속적으로 증대될 것으로 판단된다(Gerrard, 1992; Vitek *et al.*, 1996). 하지만 이러한 분류법들이 대부분 특정 지형변수들의 단순분류에 치중하고 있어, 생태학적인 현상들과의 관련성을 규명하는 데는 상당한 한계를 가지고 있다. 특히 대부분의 분류법이 특정한 목적 하에 만들어졌다는 점과 연속적으로 나타나는 지표면의 특성을 몇 개의 소수그룹으로 분류할 때 발생하는 분류기준자(classifier)의 선정 및 분류기준치의 객관화라는 점에서 일반화하기 어렵다는 단점이 있다. 또한 지형의 성인에 대한 고려가 부족하여 현재 진행되고 있는 지형학적인 작용에 대한 추정이 어려운 단점을 안고 있다.

특정 대상에 대한 분류를 위해서는 분류의 목적과 그 목적을 달성하기 위한 분류자의 설정을 일차적으로 고려하여야 한다(Vitek *et al.*, 1996). 생태학적 측면에서 궁극적으로 요구되는 지형분류법은 대상지점의 지형형태에 대한 객관적인 형태의 기술과 더불어 그 지점에서 나타나는 물질과 물, 그리고 에너지의 흐름을 정량화하고 공간적인 상관성을 파악할 수 있어야 한다. 특히 지형과 토양의 상관성과 각종 생태현상에 미치는 이 두 가지의 구조적 요인들의 중요성을 고려한다면, 보다 효율적인 지형분류를 위해서는 지형과 토양간의 관계를 종합적으로 고려할 수 있어야 한다는 전제가 필요하다(Conacher and Darlymple, 1977; 오경섭, 1996). 뿐만

아니라 추후 각종 환경 및 생태모델링에서의 사용가능성을 전제한다면, 지형분류도가 GIS에서 쉽게 활용될 수 있도록 정량화되어야 한다.

이 연구는 생태학적인 측면에서 현재 지표면에서 나타나는 에너지와 물질의 흐름을 파악하고, 그 결과로서 나타나는 토양특성을 예측할 수 있는 지형분류법을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이 연구에서 지형과 토양간의 관계를 설명하는 데 널리 사용되고 있는 Nine-Unit Landscape Model(Conacher and Darlymple, 1977)을 전산화하는 방안을 모색하고 그 결과를 한국지형에 적용시켜 보고자 하였다. 보다 구체적인 연구내용은 1) 지표상에 나타나는 토양지형단위(soil landscape units)들의 기본개념과 그 특성을 설명하고, 2) 제시된 토양지형 단위들을 DEM을 이용하여 추출하는 분석절차를 제시하였으며, 3) 사례지역을 선정하여 개발된 방법을 적용하여 보았다. 그리고 4) 지형분류과정에서 발생하는 다양한 문제점들에 대한 토론과 향후의 연구과제들을 제시하였다. 개발된 기법을 경기도 양평군의 약 12km<sup>2</sup> 크기의 지역에 적용하여 지형분류를 시도하였으며, 분류된 지형단위들의 공간적인 분포를 정성적으로 고찰하였다. 제시된 방법에 따른 분류의 정확성에 대한 정량적 평가는 이 연구에서는 이루어지지 않았으며, 추후의 연구과제에 남겨두고자 한다.

## 2. 일반화된 지형분류법의 개념

### 1) Nine-Unit Landscape Model(NULM)

Nine-Unit Landscape Model(이하 NULM)은 호주의 지형학자인 Conacher와 영국의 토양학자인 Darlymple에 의해 1968년 처음 제안되었으며, 이후 내용에 대한 개선과 지도화 과정을 보완하여 1977년에 수정 제안된 지형과 토양간의 상관관계를 설명하는 모델이다(Darlymple *et al.*, 1968; Conacher and Darlymple, 1977). 기존의 많은 지형 및 토양발달 모델들과는 달리 이 모델은 지형형태와 그에 따른 물질의 흐름, 그리고 그 결과로 형성되는 토양을 종합적으로 고려한 것이다(그림1). 이 모델은 지표상에서 나타나는 에너지와 물, 그리고 물질의 흐름이라는 측면에서 지형과 토양의 공간적 분포

에 대해 다음의 3가지 기본전제를 설정하였다. 첫째, 자연상태에서는 성인상 특징적인 사면형태가 존재하고 있다. 둘째, 실제 지형면에서 나타나는 각종 지형학적 작용들은 대부분 지표의 형태적 특성과 공간적인 상관성에 의해 결정된다. 그리고 셋째, 지표면에 발달하는 토양 특성은 지형면의 특성으로부터 효과적으로 유추할 수 있다.

NULM은 당시 지형학계에서 활발히 논의되고 있던 지형의 진화에 따른 일반사면(normal slope 혹은 standard slope)의 개념을 효과적으로 정리한 것으로 평가된다(Parsons, 1988). 특히 지형의 형태적 특성을 사면상에 분포하고 있는 토양특성과 접목시켰다는 측면에서 높은 평가를 받고 있다(Gerrad, 1992). 지형과 토양의 상관성은 1930년대에 이미 영국의 토양학자 Milne에 의해 카테나(catena)라는 개념으로 처음 제시되었으며, 오랜 기간 각국의 토양 조사과정에서 가장 핵심적인 개념으로 사용되어 왔다(Conacher and Darlymple, 1977; Schoeneberger et al 1998). 따라서 이 모델을 적용하여 토양지형면의 분류가 이루어지면 야외조사 전에 이미 토양의 특성을 예측할 수 있다는 장점이 있다.

NULM 모델에서는 지표면을 총 9개의 토양지형단위(soil-landscape units)로 재구성하였으며, 각 토양지형단위에서 나타나는 각종 지형형성작용과 그 결과로 나타나는 토양특성을 기술하고 있다(그림 1). 주의를 요하는 것은 그림 1에 제시된 9개의 토양지형단위들이 모든 사면에서 반드시 나타나는 것은 아니며, 사면의 특성에 따라 다른 순서로 나타날 수 있다는 점이다. 예를 들면 interfluve 혹은 fall face 등은 나타나지 않는 사면이 많으며, convex creep slope과 alluvial footslope의 경우는 일정한 사면내에서 반복되며 나타날 수 있다. 다음은 독자들의 편의를 위해 각 토양지형단위(토양지형면)의 주요 특징들을 요약·정리한 것이다.

(1) Interfluve

이 토양지형면은 산정상부에 나타나는 평탄지이며, 지표경사도는 주로 1°미만이다. 산정상부에 위치해 있기 때문에 주변으로부터 물질의 유입이 제한되어 있으며, 낮은 지표경사도 때문에 하부사면으로의 에너지와 물질의 유출 역시 제한된다. 따라서 주로 수직적인 토양형성작용이 우세하게 나타

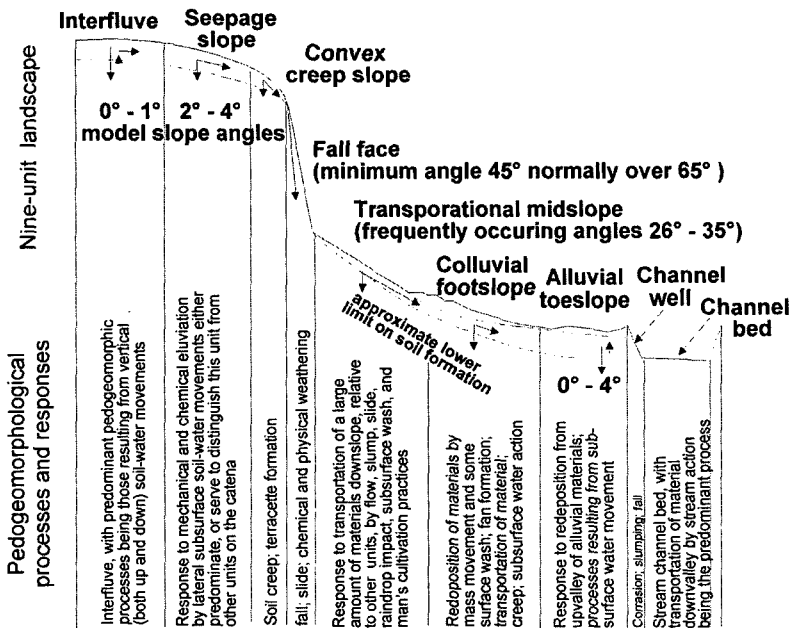


그림 1. Nine Unit Landscape Model의 모식도와 각 지형토양단위에서의 주요 지형 및 토양형성작용 출처 : Conacher and Darlymple(1977)의 그림 1을 수정.

나며, 토양하부에는 장기간의 토양화작용으로 인해 점토광물 및 이차토양광물의 집적과 그에 따른 환원작용(hydromorphism)이 나타난다.

#### (2) Seepage Slope

이 토양지형면은 interfluve에 인접하여 나타나는 완만한 경사의 철형(凸形)사면(convex slope)으로 활발한 운반작용이 일어나는 하부의 convex creep slope과 연결된다. Interfluve와 구분되는 점은 수직적인 물의 흐름이 사면경사도의 증가에 따라 수평적인 흐름으로 대체되며, 그에 따라 interfluve에서 집적된 물이 토양 내부에서 흐르는 지표하수(lateral subsurface water movement)가 중요한 토양 및 지형 형성작용이 된다. 일반적으로 지표면의 경사도는 2~4° 정도이며, 지표면에는 얇은 저지와 골들이 형성되어 있다. 이러한 불규칙적인 지표면은 주로 용식과 토양 내의 파이핑(soil piping)에 의해 만들어진다.

#### (3) Convex creep slope

이 토양지형면은 상부사면에 나타나는 철형사면으로 지표수 및 지표하수에 의한 활발한 침식과 중력에 의한 사면이동현상(creep)이 진행되는 지점이다. 지표면에서 철형사면의 형성 원인을 설명하는 데는 침식에 의한 물질의 유출이 유입보다 우세하다는 것과 creep 등의 사면이동에 의한 것이라는 두 가지 이론이 있다(Young, 1972; Parsons, 1988). 현재 일반적으로 통용되는 의견은 이 두 가지 작용들이 복합적으로 작용하여 철형사면이 만들어진다는 것이다(Carson and Kirkby, 1972). 따라서 이 지점은 토양발달이 미약한 경우가 많으며, 토양층이 충분히 발달한 경우라도 사면이동에 의해 토양층들이 교란되어 있다.

#### (4) Fall face

이 토양지형면은 기반암이 노출된 자유사면으로 일반적으로 45° 이상의 경사를 나타내며, 65° 이상의 경사를 가진 경우가 대부분이다. 이 면은 주로 기반암의 차이에 의해 형성되는 경우가 많으며, 동일한 지질 상에서는 사면발달의 초기 단계에서 나타난다. 급사면의 기반암 사면인 free face와 급사면의 talus, block stream 같은 debris slope이 주종을 이룬다. 따라서 토양 및 식생의 발달이 극히 미약하다.

#### (5) Transportational mid-slope

이 토양지형면은 사면의 중앙부에 나타나는 직선사면으로, 물질의 유출이 우세한 상부사면(convex creep slope)과 물질의 유입이 우세해 지는 하부의 footslope의 중간 지점에 나타난다. 주요 지형 형성작용으로는 침식, slide, creep, 토양층 내부에서의 물질의 이동 등이 있다. 사면을 따른 물질 이동량은 많지만 상부사면으로부터의 유입량과 하부사면으로의 유출량이 균형을 이루어 직선사면(linear slope)의 형태가 만들어진다. 하지만 유입량과 유출량 간의 균형의 파괴되면 즉시 철형사면(유출량이 많은 경우)과 요형사면(유입량이 많은 경우)으로의 변형이 이루어진다.

#### (6) Colluvial footslope

이 토양지형면은 사면상부의 convex creep slope 혹은 transportational mid-slope, fall face 등과 연결되어 있는 요형사면(concave slope)으로, 상부의 토양지형면에서 유입된 물질들이 집적되는 현상을 보인다. 지형학적으로 지표면의 concavity는 사면운동이나 퇴적 등에 의해 물질의 축적이 이루어지는 경우에 형성되는 것으로 알려져 있다(Young, 1972). 성인상 이 지점의 토양은 퇴적물로 구성된 깊은 토양층이 형성되고, 각종 토양구성물질들의 집적을 관찰할 수 있다. 하지만, 장기간의 사면발달작용의 결과로 뚜렷한 퇴적물 층위를 관찰할 수 있는 경우가 많다. 그리고 사면상의 위치가 하천 혹은 alluvial toeslope과 가까울 경우에는 지하수의 유입으로 인해 토양층 하부에서 환원작용이 나타나기도 한다.

#### (7) Alluvial toeslope

이 토양지형면은 이상에서 다룬 면과는 달리 사면에서의 물질이동이 아닌 하천에 의한 물질이동에 의해 발달하는 하천양안의 평탄지를 의미한다. 일반적으로 하천 양안에 발달하는 배후습지(floodplain)와 같이 하천을 따라 이동한 물질들이 퇴적되어 형성된 지형면이다. 일반적인 지형의 기복은 0~4°로 평탄하며, 하천 및 하천과 연결된 지하수의 영향으로 강한 환원작용이 나타난다.

#### (8) Channel wall

하천의 유로를 결정하는 하천의 측벽을 의미한

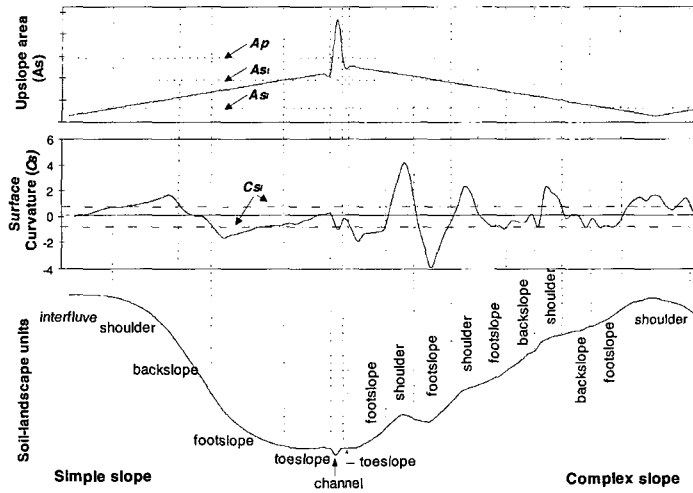


그림 2. 사면유역지수와 지표곡면율을 이용한 토양지형단위의 구분  
출처 : Park et al. (2001)

다. 주요한 지형형성작용은 하천에 의한 측방침식과 그 결과로 나타나는 하천측벽의 슬럼프(slump) 현상을 들 수 있다. 퇴적이 우세하게 나타나는 평탄지인 alluvial toeslope에 비해, 침식이 우세하여 급한 경사도를 보인다.

(9) Channel bed

하천을 형성하는 하도를 의미하는 토양지형면으로 하천작용에 의한 물질의 침식과 퇴적이 나타난다. 물의 흐름이 항상 나타나는 고차하천의 경우, 하도의 설정은 비교적 쉽게 이루어질 수 있지만, 물의 흐름이 간헐적으로 나타나는 저차하천의 경우 하도를 정확하게 파악함에는 상당한 어려움이 따르기도 한다.

### 3. DEM을 이용한 토양지형면의 추출

상기에 제시된 NULM의 가장 큰 단점은 각 토양지형면의 구분기준과 토양발달 특성들이 정성적인 서술에 머물고 있다는 점이다. 즉, 개념적인 모델로서 많은 정보들을 제공해주지만 야외에서 각 토양지형면을 객관적으로 분류하는 작업은 쉽지 않다(Parsons, 1988; Park et al., 2001). 가장 대표적인 문제는 어떻게 토양지형면들의 경계를 설정해야 하는가의 문제이다. 사면상에서 특정 지형면의

존재를 확인한다고 하더라도 연속적으로 변하는 지표면에서 두 토양지형면간의 경계를 설정하는 작업은 연구자의 주관적인 판단이 개입될 수 밖에 없다. 특히 그림 2에 표현된 'complex slope'에서와 같이 형태가 복잡한 사면의 경우, 정량적인 구분기준이 없는 상태에서는 특정 토양지형면의 존재와 경계를 설정하기가 어렵다.

또 다른 문제점은 분류과정에서 사면을 따라 나타나는 수직적인 지형형태의 변화와 더불어 수평적인 지표형태의 변화를 어떻게 고려해야 하는지의 문제이다. NULM이 2차원적인 사면의 형태만을 기술한 모델이기 때문에, 실제 현장에서 적용되기 위해서는 3차원적인 지표형태에 적용될 수 있는 모델로 변환이 필요하다. 이와 더불어 각 토양지형면이 설정되는 경우에 각각의 지형면 내부에서 발생하는 지형 및 토양의 공간적인 변이를 어떻게 해석하는가의 문제 역시 이 모델의 적용을 어렵게 하는 요인이 되고 있다(Parsons, 1988).

따라서 NULM을 지형분류도 작성에 적용하기 위해서는 이러한 단점들의 보완과 더불어 지형분류 과정을 객관화, 수치화하는 작업이 필요하다.

#### 1) 사면에서의 물질이동모델

NULM의 기본전제가 되는 사면을 따른 물질과 토양특성의 변화는 다음의 식 (1)로 표현될 수 있

다(Carson and Kirkby, 1972, p.107).

$$\partial p/\partial t = \mu \cdot W - \partial S/\partial x \quad (1)$$

이 식에서  $p$ 는 토양의 두께,  $t$ 는 시간,  $\mu$ 는 단위 당 기반암에서 풍화에 의해 형성되는 토양광물의 양,  $W$ 는 풍화속도,  $S$ 는 평균토양물질이동량, 그리고  $x$ 는 사면정상부에서의 거리이다. 이 식에서  $\mu \cdot W$ 은 토양형성작용에 의한 수직적인 토양형성의 양을 나타내는 반면,  $-\partial S/\partial x$ 은 사면을 따른 수평적인 물질의 흐름의 양을 표시한 것이다. 따라서 상기한 NULM의 세가지 전제를 이용하여 식 (1)을 재해석하면, 주어진 사면위치에서 사면이동특성 ( $\partial S/\partial x$ )은 토양의 두께의 변화와 수직적인 토양작용( $\mu \cdot W$ )과 직접적인 관계를 가지고 있다고 가정할 수 있다. 특히 사면 및 토양발달의 동적평형을 가정한다면(Hack, 1960) 사면상의 한 지점의 토양 특성( $\mu \cdot W - \partial p/\partial t$ )은 그 지점에서 나타나는 물질이동의 양에 의해 예측이 가능하게 된다.

일반적으로 토양으로 피복된 사면상에서 물질이동의 양  $S$ 는 사면상의 물질이동잠재력( $T_h$ )로 표시되며, 수치고도모델상에서 이 양은 다음의 식 (2)에 의해 추정된다(Carson and Kirkby, 1972, Tucker and Bra, 1998).

$$S = T_h = k \cdot f(x)^m \cdot g(x)^l \quad (2)$$

여기서  $f(x)$ 는 사면정상부에서의 거리의 함수이며  $g(x)$ 는 거리에 따른 고도의 변화( $-\partial z/\partial x$ ), 그리고  $k$ 와  $m$ ,  $l$ 은 상수 및 계수들이다. 이러한 물질이동의 잠재력 추정식은 실제 사면상에서 나타나는 제반 지형학적 작용들을 단순화시킨 것이지만, 사면발달모델(Ahnert, 1976; Armstrong, 1980; Tucker and Bra, 1998)과 침식모델(Moore and Wilson, 1992; Mitas and Mitasova, 1998)에서 광범위하게 적용되고 있다.

식 (2)가 실제 3차원의 DEM에 응용될 경우,  $f(x)$ 는 일반적으로 사면유역지수(upslope contributing area,  $A_s$ )로 추정할 수 있다(Carson and Kirkby, 1972; Moore and Wilson, 1992). 사면유역지수란 사면의 한 지점으로 유입될 수 있는 물의 양을 추정하는 지형변수로 DEM의 한 격자  $i$ 에 서는 다음의 식 (3)에 의해 계산된다.

$$A_s = (1/b) \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot A_i \quad (3)$$

여기서  $A_i$ 는 한 격자의 면적,  $n$ 은 셀 로 물이 흘러 드는 상부격자들의 수, 그리고  $\rho$ 는 유수가 이루어지는 정도를 표시하는 상수, 그리고  $b$ 는 셀의 크기에 의해 추정되는 등고선의 폭(contour width)이다.

반면 식 (2)의  $g(x)$ 는 사면에서의 물질이동에 영향을 미치는 형태의 영향을 추정하는 변수로, 침식 및 사면발달모델에서는 주로 사면경사도( $-\partial z/\partial x$ )로 대체되어 사용된다(Carson and Kirkby, 1972; Mitas and Mitasova, 1998). 하지만 사면경사도는 특정 격자에서 경사가 가장 급한 한 방향만을 선택하여 계산함으로써 물질이동에 영향을 미치는 사면의 3차원적 형태를 파악하는 데 한계가 있다. Park et al.(2001)은 이러한 단점을 보완하기 위해 사면곡면률(surface curvature)이라는 새로운 지표를 개발하여 사용하였다. 사면상의 한 격자  $i$ 에서의 사면곡면률( $C_s$ )는 다음의 식 (4)에 의해 계산된다.

$$C_s = \left( \sum_{i=1}^n (z_i - z_n) / d_{in} \right) / n \quad (3)$$

이 식에서  $z_i$ 는 격자의 고도,  $z_n$ 는 격자  $i$  주변의 격자들의 고도,  $d$ 는 격자간의 거리, 그리고  $n$ 은 사면곡면률을 계산하는 데 사용된 격자의 총수를 의미한다. 이렇게 구해진 사면곡면률은 3차원적인 사면형태의 요철(凹凸)정도(convexity, concavity)와 지표의 경사를 동시에 고려하는 장점이 있다. 그 결과 양의 값을 가지는  $C_s$ 는 철형사면으로 그 값이 증가할수록 볼록한 정도가 증가하고, 음의 값을 가진  $C_s$ 는 요형사면으로서 음의 값의 증가는 오목도가 증가하는 결과를 가져온다. 반면 평탄한 지점이나 직선사면(linear slope)의 경우는  $C_s$ 가 0에 가까운 값을 갖는다.

Park et al.(2001)은 식 (3)과 (4)를 결합하여 식 (5)와 같은 지형특성지수(terrain characterization index)를 제시하였으며, 이 지수는 DEM상에서 사면을 따라 나타나는 물질이동잠재력( $T_h$ )을 추정하는 식으로 사용될 수 있다고 주장하였다.

$$T_h \equiv TCI = C_s \log_{10}(A_s) \quad (5)$$

여기서 사면유역지수( $A_s$ )는 DEM상에서 큰 변

화를 보이기 때문에 로그함수로 치환하여 사용하는 것을 권장하였다.

## 2) 지형특성지수(TCI)를 이용한 토양지형면의 분류

TCI는 DEM상에서 물질이동잠재력을 추정하는 지수로 사용되는 동시에, 구성된 두 변수의 조합을 통해 토양지형면을 분류하는 목적으로 사용될 수 있다. 그림 2는 TCI를 이용하여 단순화된 사면에서 토양지형면을 구분하는 예를 표시한 것이다 (Park *et al.*, 2001). 이 그림에서 사용된 토양지형면의 명칭은 NULM의 명칭을 변형한 것으로 표 1에 보다 자세한 내용이 수록되어 있다.

그림 2에서 알 수 있는 것과 같이  $C_s$  값은 interfluve에서 0에 가까워지며, 요형사면인 shoulder (seepage slope과 convex creep slope)로 접근하면서  $C_s$  값이 양의 값을 가지기 시작하는 것을 알 수 있다. 반면 직선사면인 backslope (transportational midslope)에서는  $C_s$  값이 다시 0에 근접하게 되며, 요형사면인 footslope (colluvial footslope)에서는  $C_s$  값이 음의 값을 가진다. 그리고 다시 하천 주변의 평탄한 toeslope (alluvial toeslope)으로 이동하면서  $C_s$  값이 0에 가까워지는 것을 알 수 있다.  $C_s$  값은 계산법의 특성상 정확하게 0이 되는 경우는 극히 드물기 때문에 직선사면 혹은 평탄면을 구분하기 위해서는 일정한 변화폭( $C_s$ )을 허용하는 것이 필요하다.

그림 2에서  $C_s$  값의 변화에 따라 요형 및 철형 사면은 비교적 쉽게 구분된다는 것을 알 수 있다. 반면, 0에 근접한 값을 가지는 interfluve, backslope, toeslope의 경우에는  $C_s$  값만으로는 구분이 어렵다. 이 경우에 사용될 수 있는 것이 사면유역지수( $A_s$ )의 변화이다. Intefluve는 대부분 사면 정상부에 위치하고 있기 때문에  $A_s$ 가 낮은 값을 가지는 반면, toeslope의 경우에는 사면하부에 위치하여 높은  $A_s$  값을 가지게 된다. 따라서 이 세가지의 지형면을 구분하기 위해서는 interfluve와 backslope을 구분하기 위한 기준치인  $A_{s_i}$ 와 backslope과 toeslope을 구분하기 위한 기준치인  $A_{s_t}$ 가 필요하다. 연속적으로 변하는 사면상에서  $A_{s_i}$ 와  $A_{s_t}$ 를 설정하기 위해서는 분류 이전에 대상지역의  $C_s$ 와  $A_s$ 값의 변화에 대한 체계적인 분석이 필요하다. 이 과정에 대해서는 아래에서 보다 자세히 기술하도록 하겠다.

## 3) 한국지형에서의 개발 모델 적용가능성

상기에서 제시된 지형분류절차는 자연상태에서 비교적 완만한 경사를 가진 요철형 사면(convex-concave slope)에서 효과적으로 적용될 수 있었다 (Park *et al.*, 2001; Park and van de Giesen, 2004). 하지만 한국과 같이 급사면과 인간에 의한 지형변화가 많은 지역에서 적용되기 위해서는 NULM의 기본개념과 수치화 과정에 대한 수정이 불가피하다. 특히 실측이 아닌 등고선으로부터 구축된 DEM을

표 1. 이 연구에서 제시된 지형토양면 분류를 위해 사용된 구분근거

토양지형면의 구분	Nine-unit soil landscape model	Park <i>et al.</i> (2001)에서 제시된 토양지형면	Upslope Area( $A_s$ )	Surface curvature ( $C_s$ )	Slope angle ( $\theta$ )
Interfluve	Interfluve seepage slope	interfluve	$A_{s_i}, j \leq A_{s_t}$	$C_{s-j} < C_{s_i}, j \leq C_{s_t}$	$\theta_{i, j} \leq 4^\circ$
Summit	Interfluve Seepage slope	shoulder	$A_{s_i}, j \leq A_{s_t}$	$C_{s_i, j} > C_{s_t}$	
Shoulder	Convex creep slope		$A_{s_i, j} < A_{s_t}, j \leq A_{s_t}$	$C_{s_i, j} > C_{s_t}$	
Fall face	Fall face	없음			$\theta_{i, j} > 45^\circ$
Backslope	Transportational midslope	backslope	$A_{s_i, j} < A_{s_t}, j \leq A_{s_t}$	$C_{s-j} < C_{s_i}, j \leq C_{s_t}$	
Footslope	Colluvial footslope	footslope	$A_{s_i, j} < A_{s_t}, j \leq A_{s_t}$	$C_{s_i, j} \leq C_{s-j}$	
Toeslope*	Alluvial toeslope	toeslope	$A_{s_i, j} > A_{s_t}$	$C_{s-j} < C_{s_i}, j \leq C_{s_t}$	$\theta_{i, j} \leq 4^\circ$
Channel	Channel(channel well)	channel	지형도상의 하천의 rasterization		

\* Toeslope의 추출과정에는 상부사면 토양지형면으로 분류되는 interfluve, seepage slope, convex creep slope, transportational midslope, colluvial footslope은 제외됨.



사용하는 경우에는 DEM의 정확성과 격자크기에 따라 특정한 토양지형면의 분류가능성을 수정하여야 한다. 다음은 한국지형에서 토양지형면의 분류과정에서 수정이 불가피한 내용들을 정리한 것이다.

첫째, 한국의 지형에서 interfluve와 seepage slope의 존재와 그 범위에 대한 재해석이 요구된다. 일반적으로 사면상부에 나타나는 평탄한 지형은 지형윤회의 흔적으로 간주되며, 습윤기후지역과 건조기후지역에서는 그 분포가 비교적 넓게 나타난다 (Young, 1972). 하지만 한국과 같이 침식이 우세한 지역에서는 그 출현 범위가 극히 제한되어 있다. 더군다나 이 토양지형면에서 사면하부로 물과 물질의 이동이 제한되기 위해서는 그 폭이 넓어야 한다. NULM에서는 interfluve의 폭이 적어도 30m 이상이어야 하며, 그 이하일 경우에는 물질의 순유출이 우세한 유역분수계 (drainage divide, summit)의 특성을 가진다고 규정하였다. 이와 더불어 seepage slope의 존재 여부 역시 interfluve에서 지표하수 (subsurface flow)를 만들 수 있을 정도의 충분한 유역면적이 확보되어야 한다는 전제가 있기 때문에, 한국과 같이 interfluve의 존재가 명확하지 않은 경우 seepage slope의 존재 역시 제한될 수 밖에 없다. 따라서 이 연구에서는 사면정상부에 나타나는 토양지형면의 경우에는 interfluve와 summit으로 구분하고 seepage slope의 존재를 인정하지 않는다. 이 경우 interfluve는 NULM의 정의를 따라 산정상부에 존재하는 평탄하고 넓은 지형면으로 규정하는 반면, summit은 산정상부의 철형지형이나 평탄지중에서 폭이 넓지 않은 지형면으로 규정한다. 후자의 경우는 Ruhe(1960)의 사면구분법에서 사용되고 있는 summit의 개념과 유사하여, 사면의 정상부에서 침식과 사면운동에 의한 물질의 순유출만이 발생하는 철형지형이다. 그 결과 토양발달은 극히 미약하거나 암석이 지표면에 노출된 경우가 대부분이다.

둘째, fall face의 존재를 추가하고 이 토양지형면의 추출방법에 약간의 변형을 가했다. 한국과 같은 급경사지에서 자주 관찰되는 이러한 지형면들은 대부분의 경우 지표경사도가 45° 이상으로 나타난다. 이들은 주로 암반의 노출 혹은 사면발달과정에서 기반암의 차이에 의해 만들어지는 것이 일반적이다. 만약 이러한 지형면이 지형도상에서 충분히 반영되어 있다면, DEM로부터 그 범위를 추출하는

작업은 지표경사도를 이용하면 비교적 단순하게 이루어질 수 있다. 따라서 이 연구에서는 사면곡면률과 사면유역지수와 더불어 사면경사도를 추가로 사용하여, 그 경사도가 45° 이상인 지점을 fall face로 구분하였다.

셋째, 사면하부에 발달하는 toeslope을 어떻게 규정하고 DEM로부터 추출하느냐는 문제에 대한 고민이 필요하였다. Toeslope은 성인상 하천에 의해 운반된 물질들이 퇴적되어 형성된 지형면이다. 따라서, 그 공간적인 범위와 분포를 알기 위해서는 하천의 흐름과 홍수시 범람의 범위를 추정하는 작업이 선행되어야 한다. 그러므로 이 연구에서 제시된 사면이동에 관한 수식만으로 toeslope을 정확하게 구분해 내는 데는 한계가 있다. 이 연구에서는 하천작용에 관한 추가의 분석기법을 개발하지 않았으며, toeslope은 NULM에서 제시된 바와 마찬가지로 하천양안에 존재하는 지표경사도 4°미만의 평탄한 지형면으로 규정하였다. 이러한 규정 하에서는 하천주변에 존재하는 대부분의 논의 toeslope에 포함된다. 한국의 지형에서는 오랜 수전농업의 결과, 하천주변의 넓은 지역이 논 혹은 밭으로 사용되고 있고 하천의 유로 역시 상당히 많이 변형되어 있다. 논으로 이용되고 있는 지점들은 많은 경우 과거 범람원이었으며, 현재도 범람시 침수되는 경우가 많기 때문에 개념상의 상이성에도 불구하고 이 연구에서는 toeslope으로 간주하였다.

넷째, channel well과 channel bed를 통합하여 channel로 단일화하였고, DEM으로부터의 추출방법 역시 수치지도상에 표시되어 있는 하도를 격자화하여 사용하였다. 일반적으로 구독이 가능한 1:5,000 혹은 1:25,000 지형도에서의 등고선의 조밀도와 정확성을 고려하였을 때, DEM으로부터 channel wall과 channel bed를 분리해내는 작업은 쉽지가 않다. 하도와 하도벽의 공간적인 범위가 DEM의 한 격자크기보다 좁게 나타나는 경우가 많기 때문이다. 이와 더불어 한국의 경우 거주지 주변에서는 오랜 경작활동으로 인해 하천유로의 변화가 발생하여, 지형의 기복만으로 하천을 추출하기가 어렵다. 따라서 이 연구에서는 지형도상에서 나타나는 하천의 벡터자료를 격자화(rasterization)하여 하천의 공간적인 범위를 설정하였다.

이상의 논의들을 정리하여 이 연구에서 사용된

토양지형면과 추출 근거를 정리한 것이 표 1이다. 대부분의 토양지형면과 그 내부에서 발생하는 제반작용의 정의는 NULM과 유사하지만, 사용상의 편의를 위해 최종적으로 사용된 토양지형단위의 명칭은 Ruhe(1960)가 제시한 명칭을 사용하였다.

## 4. 모델의 적용

### 1) 연구지역 및 자료

제시된 모델을 적용한 지역은 경기도 양평군 단월면 보룡리 주변지역으로, 경위도 좌표로는 북위 37°31' ~ 37°32', 동경 127°39' ~ 127°40' 사이에 위치하고 있다(그림 3 가). 연구지역은 장축 4.4km, 단축 2.8km로 그 면적이 약 12.4km<sup>2</sup>에 달한다. 남한강의 지류인 흑천과 부안천이 합류하는 지역으로, 전체적인 고도분포는 100m~400m를 보인다. 지질은 선캄브리아기 용두리편마암 복합체에 속하는 호상흑운모편마암으로 구성되어 있다. 전체적인 지형적 특징은 평균경사도 18° 이상을 보이는 산지지역이 연구지역의 서쪽과 동쪽에 나타나며, 그 사이를 흑천과 부안천이 흐르면서 하천 양안에 넓은 평탄지를 만들고 있다. 산지지역에서는 다수의 소규모 유역들이 나타나며, 그 유역을 중심으로 주거지가 형성되어 있다. 토지이용 측면에서는 고도와 경사가 높은 서쪽 산지지역은 산림으로 구성되어 있으며, 산지의 하부에 대상으로 연결된 완사면지형에서는 주로 밭농사가 그리고 하천 주변지역은 경지개간을 통한 논이 형성되어 있다.

### 2) DEM 구축과 지형분석

국립지리원에서 발행된 1:5,000 수치지형도의 5m 간격의 등고선을 이용하여 TIN(Triangular Irregular Network) 망을 구축한 뒤, 이를 다시 5m 격자크기로 변환하여 DEM을 구축하였다. 하천은 1:5,000지형도에서 제공되는 하계망을 10m 크기로 격자화하여 사용하였다. DEM의 격자크기와는 다른 10m 격자크기를 사용한 이유는 하계망의 분포를 GIS 분석의 결과에서 보다 명확하게 표현하기 위한 것이었다. 하지만, 연구지역에서 산지의 하천을 제외한 대부분 하천의 폭이 10m 이상으로 나타나고 있다.

그림 3의 가)는 연구지역을 수치지도로 표현한

것이며, 나)와 다)는 DEM에서 추출된 사면유역지수(As)와 사면곡면률(Cs)을 각각 보여주는 것이다. 사면유역지수를 추출하는 데는 다양한 기법들이 사용되고 있으나(Conrad, 1998), 이 연구에서는 Freeman(1991)에 의해 개발된 다중흐름법(multiple flow algorithm)을 사용하였다. 반면 사면곡면률(Cs)은 식 (4)에 제시된 방법을 이용하여 계산하였으며, 이 과정에서 Cs의 계산범위는 7×7의 격자방형구(moving window)를 사용하였다. 사면곡면률은 계산에 고려되는 격자방형구의 크기에 많은 영향을 받게 된다. 이 연구에서는 지표면에서 35×35m의 면적을 고려하여 사면곡면률을 계산하는 것이 지형작용의 특성을 효과적으로 반영할 수 있을 것이라고 가정하였다.

사면유역지수의 평균은 2.61(1.29~6.69)로 낮았으며, 표준편차는 0.79이다. 산정상부와 분수계를 중심으로 사면유역지수가 낮게 나타나고, 하곡부와 하천양안을 따라서는 지수가 높아 연구지역의 물의 흐름의 경로를 쉽게 파악할 수 있다. 하지만 다중흐름법에서 보편적으로 나타나고 있는 저지에서의 '흐름확산현상'이 뚜렷하다(그림 3 나). 사면유역지수의 계산에서 확산현상이란 사면의 하부와 저경사지에서 물의 흐름이 유로 형성가능성이 있는 지점들을 따라 집중하여 흐르는 것이 아니라 넓은 지역에 걸쳐서 확산되는 현상을 의미한다(Wilson and Gallant, 2000). 그 결과 사면하부, 특히 하천주변의 평탄지에서는 물의 흐름의 경로가 비현실적으로 나타나 정확한 하천유로를 추정하기 어렵게 된다. 그림 3의 나)에서 주목되는 사항은 농경지로 이용되고 있는 하천양안의 경우, 여러 부분에서 삼각형의 흐름확산현상이 나타나고 있는 점이다. 이러한 삼각형의 왜곡현상은 사면곡면률의 분포에서도 마찬가지로 발생하고 있다(그림 3 다) 참조). 이것은 등고선을 DEM로 전환하는 과정에서 발생하는 내삽법상의 오류로 판단된다. TIN을 통한 DEM의 구축과정에서는 일반적으로 '계단화현상'이 나타나게 된다(Wise, 2000). 계단화 현상이 발생하는 원인은 내삽과정에서 등고선을 선이 아닌 점사상으로 인식하기 때문이다. 격자크기를 증가시키면 이러한 계단화현상은 완화되는 것으로 알려져 있으나, 이 연구에서는 격자크기의 영향에 대한 평가를 실시하지는 않았다.

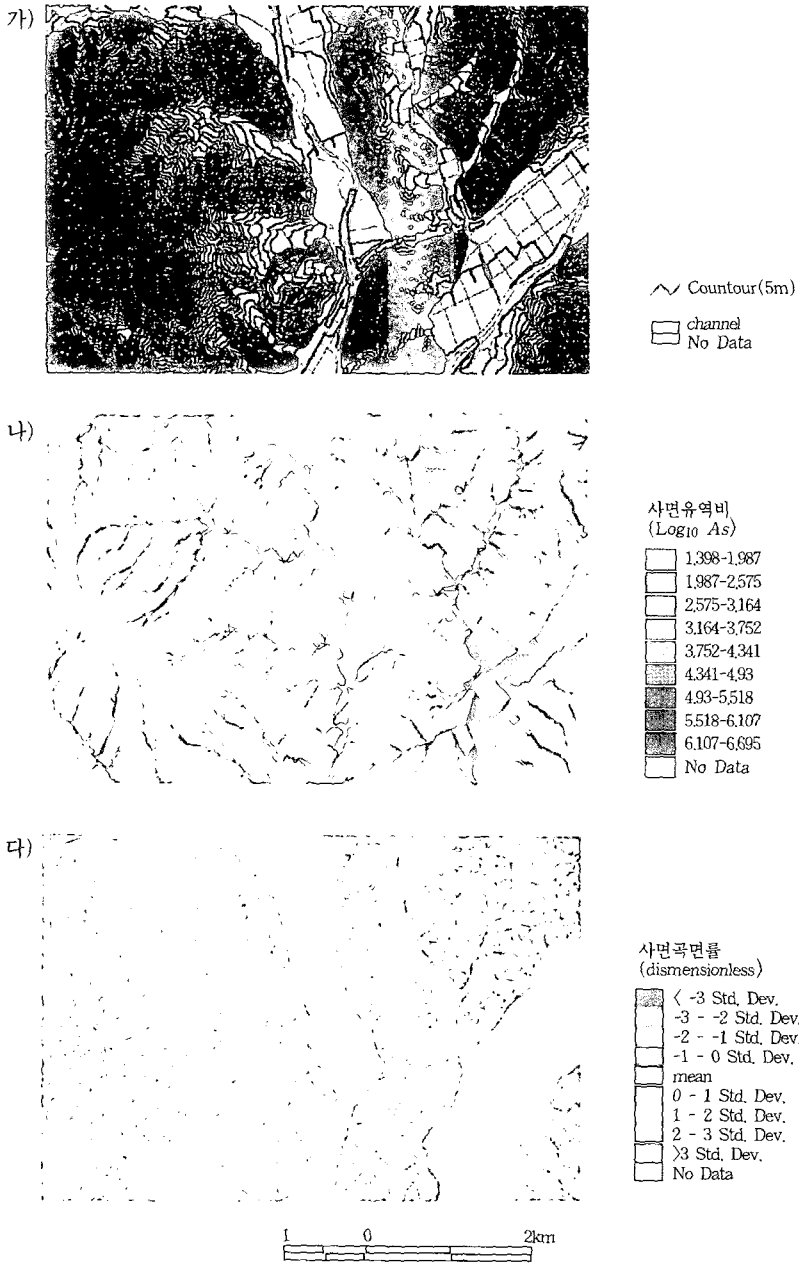


그림 3. 연구지역의 가) 수치지형도 (1:5,000)와 나) 사면유역지수(Upslope contributing area), 다) 사면곡면률 (Surface curvature)

계산된 사면곡면률의 평균은 0.00(-7.77~4.10)이며, 표준편차는 0.34로 나타났다. 그림 3의 다)에서 볼 수 있듯이, 사면곡면률은 급경사 및 산지의 요지에서 높은 값을 가지는 반면, 곡지 및 사면의 하부지역에서 낮은 값을 나타냈다. 반면, 하천주변에

서는 0에 가까운 사면곡면률을 보인다. 사면곡면률의 공간적인 분포는 산지지형에서는 뚜렷하게 유형과 철형사면이 구분되지만, 하천 인근에서는 그 패턴이 명확하지 않다.

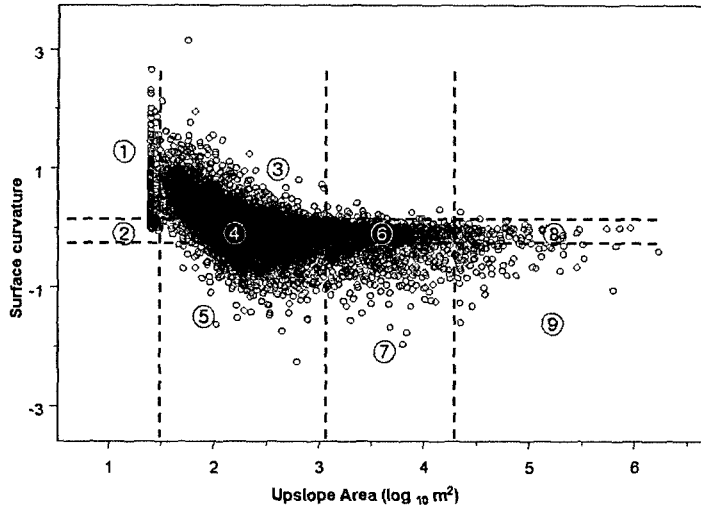


그림 4. 연구지역의 사면유역지수 (Upslope Area)와 사면곡면률(Surface Curvature)의 상관관계

### 3) 지형분류의 구분기준 설정

제시된 토양지형면을 구분하기 위해서는 표 1과 그림 2에서 제시된 각각의 지형변수들의 임계치 ( $C_s$ ,  $A_{s1}$ ,  $A_{s2}$ )를 설정하는 작업이 선행되어야 한다. 하지만 이러한 임계치들이 지질 및 기후, 그리고 토양특성에 따라 지역별로 상이할 것으로 예측되기 때문에, 모든 지역에서 공통적으로 적용될 값을 설정하는 것은 어려울 것으로 판단된다. 따라서 지형분류에 앞서 대상지역의  $C_s$ 와  $A_s$ 의 분포를 분석하여 임계치들을 설정하였다.

그림 4는 연구지역에서 추출된  $C_s$ 와  $A_s$ 값의 상관관계를 나타낸 것이다.  $\log_{10}(A_s)$ 가 1.5(실제면적은 약  $60m^2$ ) 미만인 경우에는  $C_s$  값이 대부분 양의 값을 가지지만 상대적으로 많은 변이를 보이고 있다. 그리고  $\log_{10}(A_s)$  1.5~3.0 범위에서는  $A_s$ 와  $C_s$ 의 값 간에 뚜렷한 음의 상관관계를 보여주고 있다. 하지만  $\log_{10}(A_s)$ 가 3.0 보다 큰 경우에는  $C_s$  값이 전체적으로 0 혹은 음의 수치를 나타내며,  $A_s$  값이 증가함에 따라  $C_s$ 의 값은 0의 값으로 수렴되는 특성을 지닌다. 그림 4와 유사한 형태의  $C_s$ 와  $A_s$ 의 분포는 다른 지역에서도 관찰되는 점을 미루어(Park and van de Giesen, 2004), 이러한 분포특성이 대상지역의 지형변수의 특성, 그리고 나아가서는 이 연구에서 제시하는 토양지형면의 분

석과 긴밀한 연관성을 가지는 것으로 판단된다.

이 연구에서  $\log_{10}(A_s) = 1.5$ 를  $A_{s1}$  그리고  $C_s$ 와  $A_s$ 의 산포특성이 다르게 보이는  $\log_{10}(A_s) = 3.0$ 을 경계로 그 좌우를 서로 다른 영역으로 구분하였다(그림 4). 이전의 연구(Park et al., 2001)에서 toeslope을 구분하기 위해 제시되었던  $A_{s2}$ 는 이 연구에서 고려하지 않았다. 그리고 하천이 시작되는 임계치인  $A_{s3}$ 는 사면유역지수와 DEM상의 실제 하계망을 비교한 결과  $\log_{10}(A_s) = 4.3$ 이 가장 근접하였다. 요철사면과 직선사면을 구분하는  $C_s$ 의 경우에는 뚜렷한 구분 근거를 찾을 수 없었지만, 사면유역지수가  $\log_{10}(A_s) = 3.0$  보다 큰 영역에서 나타나는 대부분의  $C_s$  값을 포함하는 0.17로 설정하였다. 향후  $C_s$ 를 보다 객관적으로 판단할 수 있는 절차에 대한 연구가 필요하다.

그림 4에서  $C_s$ 와  $A_s$ 의 상관관계는, 모두 9개의 다른 영역으로 구분이 가능하다. 영역 ①의 경우는 낮은 사면유역지수와 함께 양의 사면곡면률(凸형사면)이 주를 이룬다. 이러한 지표들이 나타나는 지점은 주로 산정상부와 같이 볼록한 사면 형태를 가지고 물질의 유입보다는 유출이 우세한 지점들로, 표 1에서 제시된 summit의 속성을 가진다. 반면 영역 ②는 사면곡면률이 0에 가까운 반면 낮은 사면유역지수를 가진다. 즉 물질의 유입이 제한된 반면 평탄지로서 하부사면으로의 유출 역시 제한

되어 interfluve로 분류될 수 있을 것이다.

영역 ③, ④, 그리고 ⑤의 경우는 물질의 유입과 유출이 활발한 사면유역지수를 가지고 있으며, 지형곡면을 역시 뚜렷한 차이를 보인다. 따라서 ③의 경우에는 침식과 creep이 우세하게 나타나는 shoulder, ④의 경우는 상부사면으로부터의 유입과 하부사면으로의 유출이 유사하게 나타나는 backslope, 그리고 ⑤는 퇴적 혹은 사면이동에 의해 물질의 집적이 나타나는 footslope의 영역으로 간주할 수 있을 것이다. 뚜렷한 convex-concave의 사면 특성에서 벗어난 ⑥과 ⑦영역의 경우에는 사면특성이 전체적으로 직선사면 혹은 요형사면이 우세하다. 이 연구에서 영역 ⑥은 footslope II, 그리고 영역 ⑦은 backslope II로 각각 구분하였다. 영역 ⑦의 경우는 영역 ⑤의 footslope과 연속선상으로 나타나는 지점으로, 영역 ⑤에 비해 상대적으로 높은 사면유역지수를 가지고 있어 우곡(gully) 등의 지표침식과 지하수위의 상승에 의한 토양내 환원작용의 가능성이 높은 지점이다. 이에 반해 영역 ⑥의 경우는 상대적으로 높은 사면유역지수를 보이지만 직선사면의 형태를 나타낸다. 영역 ⑥에 해당하는 지점들은 대부분 산지사면 하부의 하곡부를 채우고 있는 평탄지로 분류되었다.

반면 사면유역지수가 하천을 만들기에 충분한 영역 ⑧과 ⑨의 경우에는 channel로 구분할 수 있을 것이다. 하지만 전술한 바와 같이 한국의 경우 하천들이 대부분 농경 혹은 하천정비로 인해 상당한 유로변경을 경험하였고, 그 결과 지형분석에 의한 하천추출은 무의미한 경우가 많아 channel의 공간적인 분포는 현 지형도의 하계망에 근거하여 추출하였다.

#### 4) 지형분석결과의 적용

그림 5와 6, 7은 사면유역지수와 사면곡면을, 그리고 사면경사도를 근거로 하여 표 1에서 설정된 기준에 따라 토양지형면을 분류한 결과이다. 부분적으로 각 지형면들이 혼재되어 나타나고 있는 경우도 있지만, 대상이 된 지형면들의 분포가 명확하게 구분되는 것을 관찰할 수 있다. 분류 결과, 가장 높은 면적을 차지한 토양지형면은 backslope으로 전체 지역의 약 37%가 이에 해당되며, 그 뒤를 이어 footslope(22%), toeslope(20%), shoulder(18%)의

순서로 나타났다(표 2). 반면 출현빈도가 낮은 지형면은 interfluve, summit, 그리고 fall face로서 2% 미만을 차지하고 있다.

급사면의 산지에서는 침식이 우세하게 나타나는 shoulder와 퇴적이 우세한 footslope이 비교적 넓은 면적을 차지하면서 공간상으로 뚜렷한 분화를 보이고 있다(그림 6). 예상했던 바와 같이 interfluve의 존재는 미약한 반면, summit으로 분류된 지형면은 산의 능선부에서 비교적 넓은 면적을 차지하고 있다. Shoulder의 경우에는 주로 산의 능선부를 따라 연속적으로 나타나며, footslope은 곡부에 주로 분포하고 있다. Shoulder와 footslope의 연결부분에는 fall face와 backslope이 나타나며, shoulder가 footslope과 바로 연결되는 경우는 비교적 적었다. Fall face의 경우에는 대부분 산정상 주변부와 능선을 따라 부분적으로 나타난다. 반면, backslope의 경우는 shoulder와 footslope사이에 협재되어 대상으로 나타내거나 독립적으로 상당히 넓은 면을 차지하고 있는 경우가 대부분이다. 하지만 부분적으로는 한 격자만으로 이루어진 backslope이 나타나기도 한다. 지도화 과정에서 보다 연속적인 토양지형면의 분포를 나타낼 필요가 있는 경우에는 필터링 기법을 사용하여 단일 격자로 이루어진 지형면들을 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

산지와는 달리 주민들이 거주하고 있는 산지 하부 혹은 산록의 완사면 지역에서는 backslope과 toeslope들이 광범위하게 나타나고 있다(그림 7, 사진 1, 사진 3, 사진 4 참조). 하천을 따라서는 toeslope으로 분류된 논들과 함께 backslope으로 분

표 2. 연구지역에서 분류된 토양지형면별 격자수와 출현빈도

지형도양면	격자수	백분율
interfluve	2,277	0.47
summit	8,501	1.75
shoulder	86,039	17.68
fall face	3,898	0.80
backslope I	100,149	20.59
backslope II	78,764	16.19
footslope I	80,204	16.49
footslope II	27,390	5.63
toeslope	99,288	20.41
stream	19,160	3.94
총계	486,510	100.00

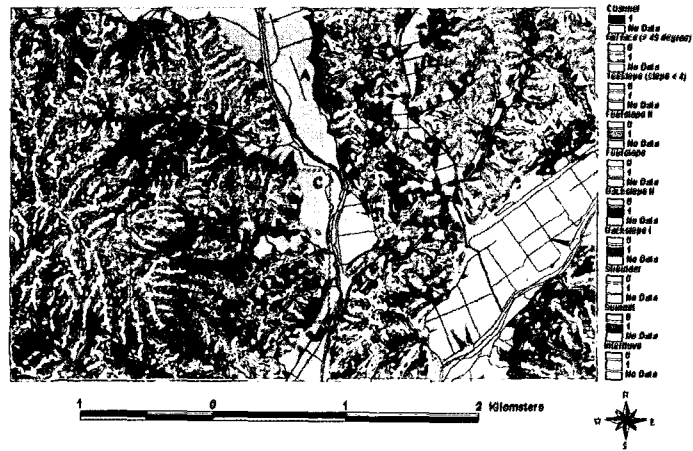


그림 5. 연구지역의 토양지형면의 분류결과. 보다 자세한 지형면의 분포는 그림 6과 그림 7을 참조



그림 6. 토양지형단위의 분류결과. 그림 5의 B 지역을 확대한 것임

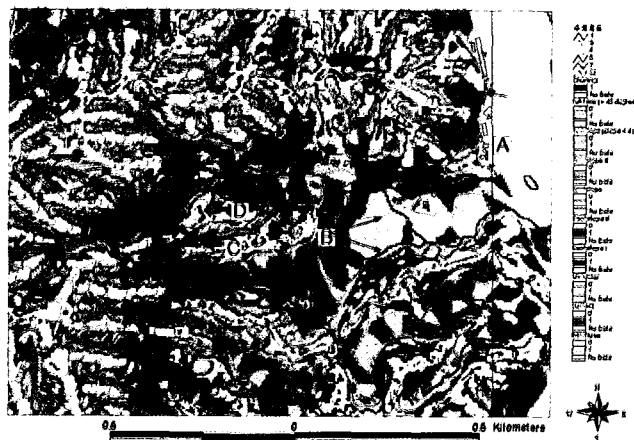


그림 7. 토양지형단위의 분류결과. 그림 5의 C 지역을 확대한 것임

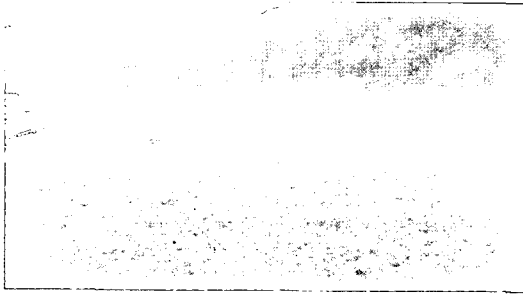


사진 1. 그림 7의 B 지점에서 바라 본 전경. 능선을 따라서는 shoulder가 발달하고 있으며, toeslope으로 분류된 논과 shoulder 사이에는 대상의 footslope과 하천이 발달하고 있다.

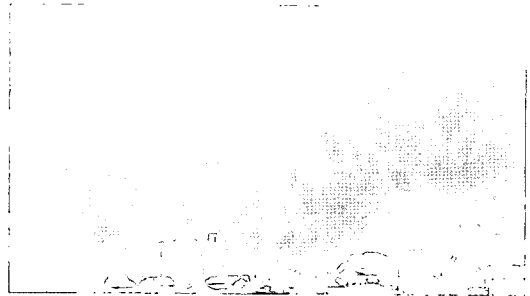


사진 2. 그림 7의 A 지역의 사진. 능선을 따라 발달하는 shoulder slope이 가파른 직선사면 (backslope I)를 거쳐 계곡부의 매곡부(backslope II)로 연결되는 것이 뚜렷하다. 요형의 footslope은 backslope II를 둘러싸고 나타나고 있으며, 배후 사면 쪽의 하곡을 따라 집중적으로 footslope 발달하고 있다.

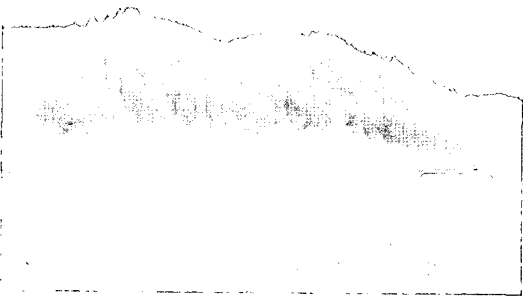


사진 3. 그림 5의 A 지점에서 바라본 사면. 급사면의 하부에 산록완사면이 잘 발달하고 있음을 알 수 있다. 지형분류상 backslope I으로 분류되었다.

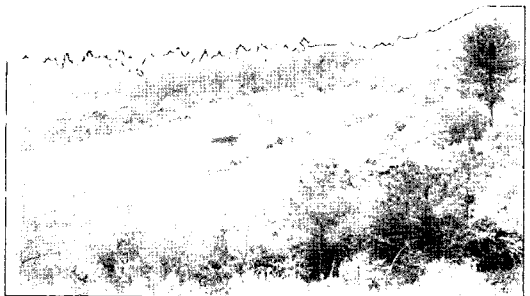


사진 4. 그림 7의 C 지점에서 바라 본 전경. 여기서도 계곡을 채우고 있는 평탄지 (backslope II)가 잘 발달되어 있으며, 상대적으로 급사면의 backslope과 연결되어 있다.

류된 지형면들이 대상으로 혼재된 양상을 보이고 있다. 반면 하천의 양안부에서는 backslope들이 광범위하게 분포하고 있다. 분류 결과 backslope은 지형면들 중에서 가장 넓은 면적을 차지하고 있으며, toeslope 역시 20% 이상의 면적을 차지하고 있다. Backslope의 면적이  $C_{5j}$ 의 값에 따라 강한 영향을 받는다는 사실을 주지한다면, backslope이 차지하는 면적이 높은 이유는 사용된 사면곡면률( $C_{5j} = 0.17$ )이 상대적으로 높기 때문일 가능성을 배제하기 어렵다. 하지만 backslope의 대부분 지역이 하천에 인접한 저경사지 혹은 평탄지들로 지형학적 성인상으로 주변과는 뚜렷이 구별이 될 수 있는 특징을 가지고 있다. 특히 대부분 지역이 밭이나 논, 혹은 거주지로 이용되면서 지표면이 직선화 혹은

평탄화가 넓은 직선사면을 만들었을 가능성을 배제할 수도 없다(사진 3 참조).

Backslope을 구성하는 토양지형면은 현지 조사결과 크게 세가지의 유형으로 분류할 수 있었다. 가장 대표적인 것은 그림 4의 영역 ④에 해당되는 지점들로서 구릉성 산지의 shoulder부분에서 하곡의 footslope과 연결되는 급경사의 직선사면이다(사진 2 참조). 이에 반해 그림 4의 영역 ⑥의 경우에는 두 가지 형태의 backslope들로 구분이 가능했다. 첫째는 급경사지의 하부에서 하천방향으로 완만하게 연결되는 산록완사면(사진 3 참조)이며, 둘째는 주로 산지 주변의 곡부를 채우고 있는 선상지와 같은 형태의 지형이다(사진 2과 4 참조). 전자의 경우는 경기도 남한강 유역에서 광범위하게 분포하고 있는

평탄면의 특성을 보이는 반면(권혁재, 1999), 후자의 경우는 주빙하환경하에서 형성된 다량의 암설이 하곡부를 채우면서 형성되는 선상지형의 평탄면으로 간주할 수 있을 것이다. 한국에는 산지의 곡부를 따라 매곡이 이루어지고 그 지표형태가 평탄한 곡저면(谷低面)이 다수 출현하며, 그 성인은 일반적으로 주빙하기후 하의 사면운동에 의한 암설의 매곡현상에 의한 것으로 알려지고 있다(김주환, 2002). 후자의 경우 성인만을 고려하였을 때에는 footslope으로 분류되어야 하지만, 현재의 지형형성 작용 하에서 뚜렷한 퇴적작용을 관찰하기는 어렵고, 지표면의 형태도 직선의 활강사면을 이루고 있어 backslope으로 분류될 수 있을 것이다. 이곳의 주민들이 평탄한 직선사면인 backslope을 선택적으로 토지이용에 이용했는지, 아니면 오랜 기간의 토지이용 중에 사면들의 평탄화가 이루어졌는지에 대해서는 보다 체계적인 연구가 필요하다.

## 5. 토론

이 연구에서는 지형분류를 위한 기법의 개발에 중점을 두었기 때문에, 분류결과의 정확성을 검증하는 작업을 시도하지는 않았다. 선행연구에서 분류된 토양지형면들이 토양분포특성과 토양수분의 흐름과 높은 상관성을 가지고 있다는 사실이 밝혀졌다(Park *et al.*, 2001; Park and van de Giesen, 2004). 하지만 선행 연구들은 좁은 지역에서 실측을 통한 정밀한 DEM을 이용한 반면, 이 연구에서 사용된 DEM은 1:5,000 수치지도에서 제공되는 5m 간격의 등고선이었기 때문에 분류된 각 지형면들의 생태학적인 유용성에 대해 보다 체계적인 현장 검증이 요구된다. 제시한 토양지형면 분류법은 지표상의 에너지와 물질의 흐름을 파악하는 일반식에 근거하고 있기 때문에, 지표면에서의 생태현상들을 파악하여 각종 식생 혹은 동물상의 공간적인 분포를 예측하는 중요한 근거가 될 수 있을 것으로 예측된다. 또한 제시한 기법이 기존의 토양조사에서 일반적으로 사용되는 지형분류법(Schoeneberger *et al.*, 1998)과 유사하기 때문에 토양미분류지역, 특히 산지토양조사를 위한 적용 가능성 역시 타진해 볼 필요가 있다. 지형과 토양의

뚜렷한 상관성을 고려한다면, 제시된 모델이 최근 각종 생태환경모델에서 구득이 어려운 것으로 여겨지는 토양자료들을 대체할 수 있을 가능성도 제시될 수 있다. 하지만 제시된 방법이 보다 광범위하게 적용되기 위해서는 아래와 같은 사항에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다.

### 1) DEM의 정확도

수치화된 지형분류의 결과는 사용된 DEM의 구축방법과 정확도에 의해 큰 영향을 받게 될 것으로 추측된다. 최근 각종 측량기술의 급격한 발전에도 불구하고, 정확하고 상세한 DEM을 만드는 것은 지형학에서 가장 어려운 작업으로 간주된다. 특히 대상지역이 산림 혹은 다른 인공구조물에 의해 피복된 경우에는 자연적인 지형면과 그에 따른 물질의 흐름을 정확하게 모사하는 데는 많은 한계가 있다. 특히 한국과 같이 인간의 토지이용으로 인해 지형의 변화가 많이 일어난 경우, 인공지형면의 파악과 분류에 보다 세심한 주의가 요구된다. 이 연구에서 관찰된 바와 같이 DEM을 현장측량을 통해 구축한 것이 아니라 기존에 존재하는 등고선을 이용한 경우에는 보간법(interpolation)의 정확도 역시 지형분류의 중요한 변수가 된다. 이와 더불어 사용되는 각종 지형변수들의 개발 및 보완에 있어서도 더 많은 연구가 진행되어야 할 것이다. 예를 들면 지표면에서 나타나는 물의 흐름을 추정하는 사면유역지수는 각종 지리정보시스템과 환경모델링에 가장 핵심적인 변수로 고려된다(Wilson and Gallant, 2000). 하지만 수문현상을 이해하는 도구로 이용되기에는 아직도 많은 한계를 가지고 있다. 이들 기법들의 비교평가와 더불어 새로운 알고리즘의 개발은 지형분류 이외에도 지표환경의 모델링에 광범위하게 적용될 수 있으므로, 보다 많은 발전이 요구되는 분야이다.

### 2) 지형분류과정에서 발생하는 스케일의 문제 (Scale effect)

사용되는 수치고도의 정확도와 더불어 고려되어야 할 또 다른 문제점은 지형분류과정에서 사용되는 격자의 크기와 관련된 스케일(scale)문제에 대해 보다 체계적인 연구가 요구된다는 점이다. 제반 자연현상의 인지와 그 내부에서 일어나는 작용들에



대한 이해는 연구 대상의 범위와 격자크기 등의 scale요인들에 의해 민감하게 변한다(Wolock and Price, 1994; Wilson et al., 2000). 특히 지형면들이 갖는 공간적인 범위, 그리고 각각의 지형면간의 위상관계를 파악하는 작업은 scale의 영향을 매우 크게 받을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 지형분류에 영향을 미치는 scale의 문제를 심도 있게 다루지는 못했으며, 추후의 연구과제로 남겨두고자 한다.

### 3) 기타 지형형성요인들과의 결합

지표면에서의 물질의 흐름을 결정하는 요인은 크게 확산작용(diffusive processes)과 하천작용(fluvial processes)으로 대별된다. 확산작용은 사면을 따른 이동 및 퇴적작용으로 규정되는 반면, 하천작용의 경우에는 하천활동에 의한 지형형성작용이다. 이 연구에서 제시된 지형분류기법은 주로 사면에서 나타나는 확산작용에 근거한 것이며, 그 특성이 하천작용에 의해 형성되는 각종 지형요소들을 분석하는 데는 한계가 있다. 예를 들면, 이 연구에서는 toeslope은 비교적 단순한 지형적 특성에 의해 추출되었으나, 하천작용을 포함하는 보다 체계적인 분석기법의 개발이 요구된다. 이와 더불어, 이 연구에서 제시된 모델은 물과 중력에 의한 침식과 퇴적이 우세한 산지지형을 대상으로 개발된 모델이다. 따라서 다른 지형형성작용(해수, 바람, 용식 등)에 의해 형성된 지형면들에서도 적용되기 위해서는 적절한 변형과 새로운 알고리즘의 개발이 필요하다. 더군다나 현재의 각종 지형요소들이 오랜 기간에 걸쳐 형성되었다는 점을 고려한다면, 이렇게 분류된 지형면들이 기타의 지형요인들(시간, 기후, 지질)과 어떻게 연결되는 지에 대해서도 보다 체계적인 연구가 필요하다.

### 4) 생태환경현상과의 상관관계파악

이 연구에서 제시된 지형분류기법은 사면상에서 나타나는 지형형성작용에 관한 일반적인 개념 및 수학적 모델에 근거하여 제시된 기법이다. 분류된 지형분류기법이 환경관리 및 생태특성의 파악에서 효과적으로 이용되기 위해서는, 각 지형면에서 나타나는 제반 생태학적인 작용들과의 정량적인 상관관계를 파악하는 작업이 선행되어야 한다. 현재 각종 환경평가 및 관리모델에서 최우선

적으로 고려되고 있는 사항은, 공간상에서 서로 다른 분포특성을 보이는 제반 환경요인들이 어떻게 전체적인 환경시스템과 연결되는가의 문제이다. Spatially distributed model로 표현되는 이러한 연구분야에서 지형면의 공간적인 분포와 각각의 역할의 중요성은 재론의 여지가 없다. 이 연구에서 분류된 지형면들이 개개의 환경요인들의 공간적인 변이를 설명할 수 있는 능력과 그 공간적인 분포와의 연계성을 파악하는 작업이 요구된다.

## 6. 요약 및 결론

이 연구에서는 지표면에서 나타나는 생태학적 특성을 파악할 수 있는 지형분류방법을 개발하였다. 지형면에서 에너지와 물질의 흐름을 반영하는 것으로 판단되는 총 8개의 토양지형면을 개념화하였으며, 지표면에서의 물질흐름의 특성을 반영하여 DEM상에서 각 토양지형면을 추출하는 기법을 개발하였다. 개발된 방법은 경기도의 44×2.8km 지역에 적용되었으며, 분류결과는 연구지역의 지형 특성의 분포와 그 형성과정을 이해하는 기회를 마련해 주었다. 제시된 방법은 일반적으로 구독이 가능한 DEM에 쉽게 적용될 수 있어, 넓은 지역의 지형특성을 간편하게 분류할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히, 분류된 토양지형면은 생태학적인 자연조사와 각종 수문 및 토양환경의 파악에 중요한 기본자료를 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 이 연구의 진행 과정에서 분류의 정확성에 대한 정량적인 검증은 이루어지지 않았다. 그리고 이 방법이 보다 광범위하게 적용되기 위해서는 기존 수치지도의 정확성의 문제, 사용되는 수치지도의 격자크기에 따른 분류기준의 변화를 야기시키는 scale문제, 사면발달 이외의 지형형성요인들과의 통합의 문제 등에 있어 보다 체계적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 文 獻

- 권혁재, 1999, 지형학(제4판), 법문사.  
 김우관·임용호, 1997, "GIS를 이용한 거제도 지형

- 및 하계분석,” 한국지역지리학회지, 3(2), 19-35.
- 김주환, 2002, 지형학, 동국대학교 출판부.
- 김태호, 2003, “제주도 해안지대의 지형분류,” 한국지형학회지, 10(1), 33-47.
- 오경섭, 1996, “한국의 지형·토양환경 정밀지도화 방안에 관한 연구,” 한국지형학회지, 3(1), 1-25.
- 이금상·조화룡, 1998, “GIS 기법에 의한 한국의 고도·기복량분석,” 대한지리학회지, 33(4), 487-497.
- 이민부·김남신·한균형, 2001, “GIS Database 구축을 위한 지형요소의 지도화,” 대한지리학회지, 36(2), 81-92.
- 조태영, 1997, GIS 활용을 위한 지형분류체계 및 데이터베이스 설계에 관한 연구, 이화여대 석사학위논문.
- Ahnert, F., 1976, Brief description of a comprehensive three-dimensional process-response model of landform development, *Z. Geomorphol., N.F., Suppl. Bd.*, 25, 29-49.
- Armstrong, A.C., 1980, Soils and slopes in a humid temperate environment: a simulation study, *Catena*, 7, 327-338.
- Blaszczynski, J.S., 1997, Landform characterization with geographical information systems, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63, 183-191.
- Carson, M.A. and Kirkby, M.J., 1972, *Hillslope Form and Process*, Cambridge University Press, Cambridge
- Conacher, A.J. and Dalrymple, J.B., 1977, The nine unit landsurface model: An approach to pedogeomorphic research, *Geoderma*, 18, 1-153.
- Conrad, O., 1998, *DiGem-Software for Digital Elevation Model*. Ph.D. Thesis (in German), University of Goettingen, Germany.
- Dalrymple, J.B., Blong, R.J., and Conacher, A.J., 1968, An hypothetical nine unit landscape model, *Zeitschrift fuer Geomorphologies N.F. Bd*, 12, 60-76.
- Dikau, R., 1989, The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology, in Raper J. (ed.), *Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems*, Taylor & Francis, 151-175.
- Dymond, J.R., Derosé, R.C. and Harmsworth, G.R., 1995, Automated mapping of land components from digital elevation model, *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, 131-137.
- Gerrard, J., 1992, *Soil Geomorphology*, Chapman & Hall, London.
- Giles, P.T. and Franklin, S.E., 1998, An automated approach to the classification of the slope units using digital data, *Geomorphology*, 21, 251-264.
- Hack, J.T., 1960, Interpretation of erosional topography in humid climates, *American Journal of Science*, 258, 80-97.
- Jenson, S.K. and Domingue, J.O., 1988, Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1593-1600.
- Mitas, L. and Mitasova, H., 1998, Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention, *Water Resources Research*, 34, 505-516.
- Moore, I.D. and Wilson, J.P., 1992, Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation, *Journal of Soil and Water Conservation*, 47, 423-428.
- Park, S.J. N. and van de Giesen, N., 2004, Delineation of soil-landscape units along hillslopes to identify the spatial domains of hydrological processes, *Journal of Hydrology*, 295, 28-46.
- Park, S.J., McSweeney, K. and Lowery, B., 2001, Prediction of soils using a process based terrain characterisation, *Geoderma*, 103, 249-272.
- Parsons, A.J., 1988, *Hillslope Form*, Routledge, London.
- Pennock, D.J., Zebarth, B.J. and De Jong, E., 1987, Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada,

- Geoderma*, 40, 297-315.
- Ruhe, R.V., 1960, Elements of the soil landscape, *Transactions of the 7th International Congress of Soil Science, Madison*, 4, 165-169.
- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., and Broderson, W.D., 1998, *Field book for describing and sampling soils*, Natioan Soil Survey Center, National Resources Conservation Service, USDA, Lincoln, NE.
- Tucker, G.E. and Bras, R.L., 1998, Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology, *Water Resource Research*, 34, 2751-2764.
- Vitek, J.D., Giardino, J.R. and Fitzgerald, J.W., 1996, Mapping geomorphology: A journey from paper maps, through computer mapping to GIS and virtual reality, *Geomorphology*, 16, 233-249.
- Wilson, J.P. and Gallant, J.C., 2000, Digital terrain analysis, in Wilson J.P. and Gallant J.C. (eds.), *Terrain Analysis: Principles and Application*, 1-27, John Wiley and Sons.
- Wilson, J.P., Repetto, P.L. and Snyder, R.D., 2000, Effect of data source, grid resolution, and flow routing method on computed topographic attribute, in Wilson J.P. and Gallant J.C. (eds.), *Terrain Analysis: Principles and Application*, John Wiley & Sons, 133-161.
- Wise, S., 2000, Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours, *Hydrological Processes*, 14, 1909-1929.
- Wolock, D.M. and Price, C.V., 1994, Effects of digital elevation model and map scale and data resolution on a topography-based watershed model, *Water Resources Research*, 30, 3041-3052.
- Young, A., 1972, *Slopes*, Oliver and Boyd, Edinburgh.

최초투고일 04. 05. 20

최종접수일 04. 09. 11