

사면을 따른 토양분포가 토양침식에 미치는 영향

박수진, Almut Brunner

서울대학교 사회과학대학 지리학과, University of Bonn, Germany

1. 서론

토양침식과 그에 따라 전세계적으로 진행되고 있는 토양질의 저하는 인류의 생존근거를 위협한다는 측면에서 심각한 환경문제로 간주되고 있다. 특히 생활의 근거가 토양의 생산성과 밀접하게 연관되어 있는 많은 개발도상국에서는 토양침식이 빈곤문제와 직결되고 있다 (Stoorvogel and Smaling, 1998). 따라서 최근 토양의 공간적인 분포특성을 최대한 활용하여, 토지생산성을 증대시키는 동시에 부정적인 환경영향 (침식, 농업화학물의 오염 등)을 최소화하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. Site-specific land management 혹은 precision farming 등으로 호칭되는 이러한 연구들에서 가장 우선시 되는 것은, 토양의 공간적인 분포특성을 파악하고, 공간적인 변이가 토양관리에 어떻게 적용되어야 하는지를 규명하는 것이다 (Park and Vlek, 2002). 토양침식 연구에서는 과거 토양침식모델들이 주로 사면을 따른 2차원적인 침식과 퇴적작용에 국한되어 왔던 반면, 3차원적인 토양의 공간적인 분포가 지표면에서 침식과 그에 따른 퇴적을 결정하는 중요한 요인으로 인식되기 시작한 것이다.

토양의 물리적·화학적 특성들의 공간적인 분포를 파악하는 작업은 기존의 토양조사법을 이용할 경우 고비용과 함께 장시간의 시간을 요구한다. 특히 점점 정교화되고 있는 토양침식모델들을 고려할 때, 삼차원적인 토양층위의 규명과 각각의 물리적·화학적 특성들을 현장조사를 통해 구득하기에는 현실적으로 많은 장애가 따를 수 밖에 없다. 이에 대한 대안으로 지표면을 토양의 분포가 상대적으로 유사하게 나타나는 토양단위로 분류를 하고, 각 단위별로 토양특성을 측정하여 모델화하는 방법이 제시되고 있다.

지형학 및 토양학분야에서 사면을 따라 에너지와 물의 흐름의 차이에 의해 상호연관된 토양들이 형성된다는 것을 이미 잘 알려져 있다. 이 중 대표적인 개념으로 카테나 (Catena)를 들 수 있으며 (Milne, 1935), 사면상에 나타나는 토양들은 사면운동과 토양형성과정의 복합체로 상호 긴밀한 연관관계 (reciprocal relationship)를 가질 것으로 추측된다. 하지만 기존의 침식연구들은 대부분 그 토양분포가 당연히 존재하는 것으로 간주하여 왔으며, 사면을 따른 토양의 차별화가 침식 및 퇴적

현상을 조절하는 측면은 간과되어 왔다 (Brooks and K.S. Richards, 1993). 본 연구는 사면을 따라 나타나는 토양의 공간적인 분포가 토양모형을 이용한 침식 및 퇴적량의 산정에 어떠한 영향을 미칠지를 비교평가하는 것을 목적으로 한다.

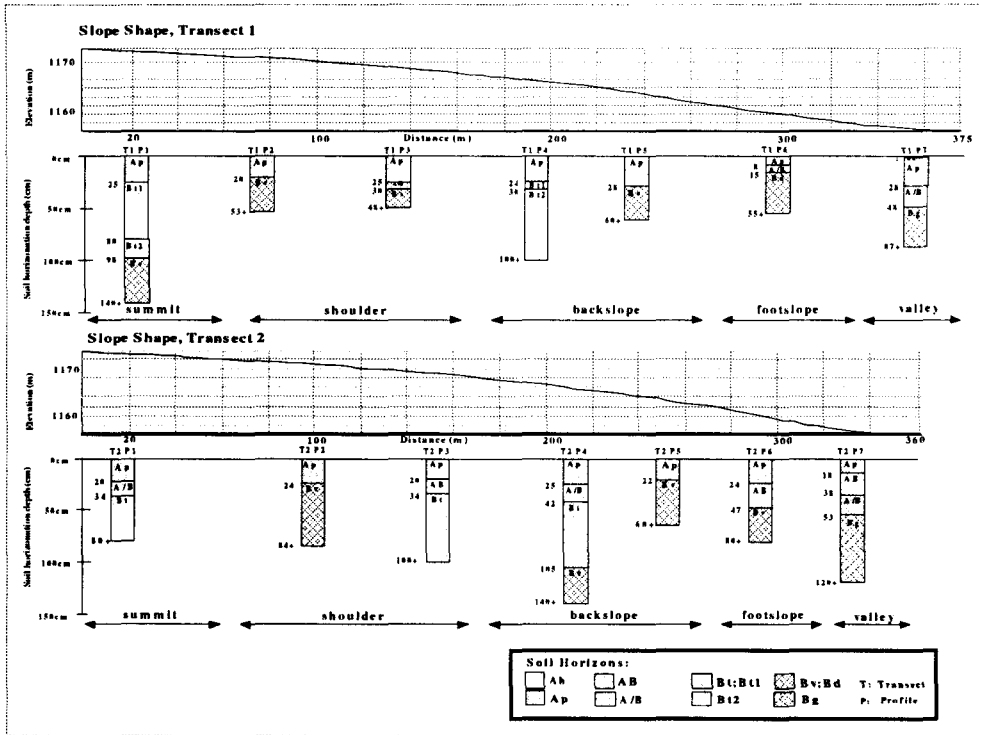
2. 연구지역 및 방법

이 연구에서는 동아프리카 우간다 (Uganda)의 남부 지역에 위치한 마가다(Magada)의 약 $300 \times 350\text{m}$ 크기의 사면에서 실시되었다 ($33^{\circ}51'E, 4^{\circ}59'N$). 우간다는 영국의 토양학자였던 Milne가 처음 카테나 개념을 제시했던 곳으로, 전체적으로 평탄한 소기복의 구릉들이 연속되어 나타난다. 연구사면은 구릉지의 정상부에서 하곡부까지를 포함하여, 사면을 따른 에너지와 물질의 흐름이 토양형성 작용에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 사면의 평균경사도는 약 3° 이며, 구릉의 정상부와 하곡부에서는 낮은 경사도를 보이지만, 사면이 하곡부와 만나는 지점에서는 최대 12° 의 경사도가 나타나기도 한다. 전사면을 통해 발농사를 중심으로 한 경작이 진행되고 있으며, 주요작물은 바나나, 옥수수, 고구마, 밀 등을 포함하고 있다. 경지는 소규모로 나뉘어져 다양한 토양관리와 작물이 재배되고 있다. 기반암은 프리캠브리안 (pre-Cambrian)의 편마암이 주종을 이루며, 옥시솔 (Oxisol)이 주요한 토양으로 알려져 있다. 하지만 사면을 따라 뚜렷하게 다른 토양들이 형성되어 있다 ([그림 1]). 평균 강우량은 약 $1,300\text{mm}$ 로 뚜렷한 건기와 우기를 구분이 나타난다. 우기에는 높은 강우강도로 인해 토양침식이 활발히 진행된다 (Brunner et al., 2003).

토양조사는 사면을 따른 세 개의 sampling transect 상에서 5-7개 지점에서 이루어졌다. [그림 1]은 그중 2개의 transect에서 나타나는 토양특성을 도화한 것으로 뚜렷한 카테나 발달을 관찰할 수 있다. 구체적인 토양발달특성 및 토양의 속성들에 대한 보고는 Brunner et al. (2002)를 참조하기 바란다.

사면을 따른 침식과 퇴적량의 추정에는 WEPP (Water Erosion Prediction Project, Flanagan and Laflen, 1997) 모델을 사용하였다. WEPP 모델은 결정론적인 모델 (deterministic model)로 토양의 층위특성 및 기후, 토지이용 등이 토양침식에 미치는 영향을 시뮬레이션할 수 있도록 개발되었다. 현재 3차원모델은 개발단계에 있으며, 이 연구에서 사용된 모델은 사면을 따른 2차원모델로 version 4.0이다 (Flanagan and Laflen, 1997).

모델의 변수화(parameterisation)과 검증(validation), 그리고 개개 입력변수가 전체 모델의 결과에 미치는 영향 (sensitivity analyses)은 다른 곳에서 발표될 예정이다 (Brunner et al., 2003), 이 글에서는 상기에 제시된 토양특성의 변화가 사면을 따라 나타나는 침식 및 퇴적의 공간적인 패턴과 어떠한 연관성을 가지고 있으며, 전사면을 대상으로한 총토양유실량의 추정에 미치는 영향을 평가한 결과이다. 시뮬레이션 결과 이 사면에서의 침식량은 일년에 $2.5-9\text{t/ha}$ 로 나타났으며, 이 결과는



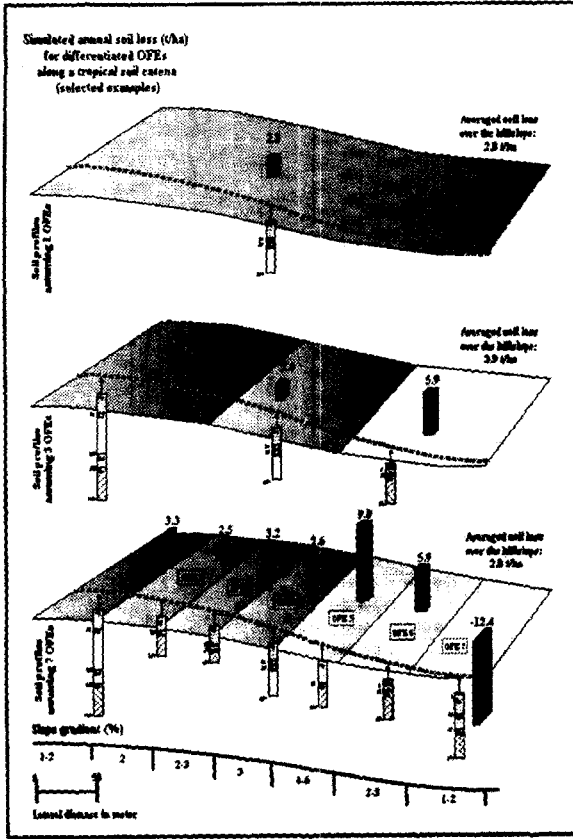
(그림 1) 토양의 사면에 따른 분포, Magada hillslope, Uganda.

유사한 환경에서 실시된 침식방형구 (erosion plots)에서의 측정결과 및 동일한 사면에서 Cs-137을 이용한 침식량과 대략적으로 일치하였다.

3. 결과 : 사면에 따른 토양의 변화와 토양침식의 공간적인 분포

WEPP 모델에서는 사면을 나누어 각기 다른 토양특성과 토양관리인자들을 입력할 수 있는 OFE (Overland Flow Element) 개념을 도입하고 있다. 이 연구에서는 조사된 토양이 주변의 토양분포를 반영한다는 전제하에 토양지형대 (soil-landscape unit)와 유사한 개념으로 사용하였다. 따라서 전체 사면을 7개의 OFE로 나눈 다음, 각기 다른 토양변수들을 입력시켜서 전체적으로 나타나는 지표 유출 (runoff) 및 지표침식량 (soil loss), 그리고 전 사면을 대상으로 한 총 토양유실량을 (sediment yield)를 측정하였다.

[표 1]은 transect 1을 대상으로 각기 다른 토양들을 입력하였을 때, 나타나는 결과를 나타낸 것이며, [그림 2]을 토양의 침식량이 공간적으로 어떻게 분포하는 지를 예를 들어 표시하였다. [표 1]



[그림 2] 토양지형대의 증가에 따라 나타나는 사면상의 침식 및 퇴적량의 변화. 이 그림에서 나타난 그림은 여러 가지 가능한 토양지형대의 조합중 한개를 임의로 추출한 것이다. 세 번째 그림에서 사면하부의 퇴적작용에 주목이 요구된다.

의 증가에 따라 다른 토양 조합을 사용한 시물레이션간의 차이가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 적은 수의 OFE가 시물레이션에 도입되었을 때에는, 토양간의 큰 차이에 의해 지표유출량, 지표 침식량, 총토양유출량의 CV (coefficient of variation)이 증가하지만, OFE를 증가시킴으로서 CV가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 토양지형대의 증가에 따라 사면내의 침식 및 퇴적작용의 분포를 예측함에 있어 불확실성이 감소한다는 것을 의미하는 것이다.

에서 관찰되는 특징은 OFE의 수가 증가함에 따라 평균 지표유출량의 양은 감소하는 반면, 지표침식량은 증가하는 특성을 보였다. 하지만 전사면을 대상으로한 총토양유출량은 (sediment yield)는 2-3개의 OFE까지는 증가하지만, 그 이후 점차 감소하는 패턴을 보인다. 이 결과는 사면하부에서 나타나는 퇴적작용에 의해 설명될 수 있을 것으로 보인다. [표 2]에서 보는 바와 같이 작은 수의 OFE를 고려했을 때에는 사면 전체에서 퇴적 현상이 나타나지 않고 있다. 하지만 5개의 OFE 이후에는 사면의 하부에서 뚜렷한 퇴적작용을 관찰할 수 있었다.

[그림 1]에서 보는 바와 같이 연구지역에서는 사면을 따라 침식과 퇴적작용의 활발이 진행되고, 토양의 A층과 전체 토양층의 두께가 조사된 지점에서의 침식과 퇴적작용을 간접적으로 반영하고 있다. 따라서 OFE의 수가 적을 때에는 그런 차이가 충분히 반영되지 않고 있지만, 5개 이상의 OFE부터는 침식 및 퇴적의 상이성이 보다 정확하게 표현되어지는 것을 알 수 있다. 이와 더불어 [표 1]에서 관찰되는 또 다른 특징은, OFE 수

[표 1] Transect 1에서 서로 다른 조합의 OFE에 의해 나타나는 유출량, 침식량, 총토양유실량의 변화. CV = Coefficient of Variation (STDEV/average × 100), STDEV = 표준편차 (standard deviation)

No. of OFE	지표수 유출량 Runoff (mm)			침식량 Soil loss (kg/m)			총토양유실량 Sediment Yield (t/ha)		
	Average	STDEV	CV	Average	STDEV	CV	Average	STDEV	CV
OFE1 (n= 7)	66.88	30.80	46.05	0.20	0.07	34.93	1.92	0.81	42.31
OFE2 (n=21)	65.81	19.72	29.96	0.29	0.04	14.93	2.18	0.55	25.21
OFE3 (n=32)	61.99	16.42	26.49	0.34	0.04	12.28	2.17	0.46	21.52
OFE4 (n=35)	56.49	11.01	19.49	0.38	0.03	9.93	2.03	0.39	19.46
OFE5 (n=21)	53.33	5.03	9.44	0.41	0.03	7.43	1.90	0.30	16.07
OFE6 (n= 7)	51.79	2.30	4.45	0.43	0.01	4.40	1.78	0.23	12.95
OFE7 (n= 1)	50.76			0.45			1.68		

4. 결론

이 연구에서는 사면에 발달하는 토양특성의 반영여부가 침식 및 퇴적현상의 공간적인 분포의 예측과 사면으로부터의 유실되는 총토양유실량을 결정하는 데 중요한 영향을 미친다는 것을 증명되었다. 이러한 연구결과는 단순히 침식모델 뿐 아니라 수문모델 그리고 지화학적인 순환모델에 공히 적용될 것으로 예측된다. 토양조사에 필요한 경비와 노력을 고려하였을 때, 지형특성과 토양간의 관계를 토대로 기존의 환경모델들의 입력변수들을 보다 현실화하는 방법론에 대한 연구들이 선행되어야 할 것이다.

■ 참고문헌

- Brooks, S.M. and K.S. Richards. 1993. Establishing the role of pedogenesis in changing soil hydraulic properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18: 573-578.
- Brunner A.C., S.J.Park, G.R. Ruecker, R.Dikau and P.L.G. Vlek. 2003. Catenary soil development influencing erosion susceptibility along a hillslope in Uganda. *Catena (in review)*.
- Flanagan, D.C. and S.J. Livingston. 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project. *WEPP User Summary*. NSERL Report No. 11. West Lafayette.
- Milne, G. 1935. Some suggested units of classification and mapping, particularly for East African soils. *Soil Research* 4: 183-198
- Park, S.J. and P.L.G. Vlek. 2002. Soil-landscape analysis as a tool for sustainable land resource management in developing countries. *The Geographical Journal of Korea* 36: 31-49.
- Stoorvogel J.J. and E.M.A. Smaling. 1998 Research on soil fertility decline in tropical environments: integration of spatial scales. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50: 151-158.