토양침식에서의 강우특성, 토양경사 및 지질의 영향

남경훈¹ · 이달희² · 정성래² · 정교철^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과, ²(주)성지엔지니어링

Effect of Rainfall Intensity, Soil Slope and Geology on Soil Erosion

Koung-Hoon Nam¹, Dal-Heui Lee², Sung-Rae Chung², and Gyo-Cheol Jeong^{1*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

²Sung Ji Engineering Co., Ltd.

본 연구의 목적은 토양침식에 관련되는 강우특성, 토양경사도, 그리고 지질특성의 상대적인 중요도를 규명하는데 있다. 이 목적을 달성하기 위하여, 강우강도, 토양경사도, 지질특성의 각각 다른 조건에서 실내 인공강우실험 및 현장조사를 실시하였다. 실내시험 결과에 의하면, 토양침식량은 토양 경사도가 강우강도보다 크게 영향을 받았다. 유출량은 강우량에 비례하며, 점토함량이 높을수록 증가한다. 따라서 토양의 유기물과 점토 함량이 큰 토양에서 토양침식량이 크게 증가하였다. 현장시험 결과로는 토양경사가 큰 지역 및 퇴적암 지역보다 변성암 지역에서 보다 큰 침식량이 계산되었다. 이러한 실험의 결과는 토양침식량을 예측하는 모델개발에 있어서 기반암 풍화의 산물인 토양에서의 지질특성이 침식 및 침식후의 퇴적특성을 잘 반영하고 있음을 보여준다.

주요어 : 토양침식, 강우강도, 토양경사, 인공강우실험, 지질특성

This study aims to elucidate the relative importance of geological characteristics, soil slope, and rainfall intensity in relation to soil erosion. To this end, indoor rainfall simulation experiments were carried out under different conditions of rainfall intensities, soil slope, and geological characteristics. The test results show that the factors affect soil erosion in the order of soil slope > rainfall intensity > organic content in the soil. Erosion rates were proportional to rainfall, and increase with increasing clay content. Therefore, the soil erosion rate increases strongly with increasing organic content and clay content. The results show that the soil erosion rate in areas of metamorphic rocks shows a marked increase compared with areas of steep slope and sedimentary rocks. These results indicate that the geological characteristics to produce soil are closely related to sedimentation before and after erosion, providing basic information for the development of models to predict soil erosion rates.

Key words : Soil erosion, Rainfall intensity, Soil slope, Rainfall simulation, Geological characteristics

*Corresponding author: jeong@anu.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

최근 우리나라 주변의 기후변화에 따라 연강우량이 증가하였으며, 또한 강우량은 약 90% 정도가 6월에서 9월 사이에 집중적으로 내리는 계절라성 강우특성을 보이고 있다. 이러한 집중호우에 의하여 경사지의 토양침식 또는 토양유실이 심각한 실정이며, 이에 대한 대책수립이 필요한 실정이다. 토양침식은 경작지의 유효성분과 수자원의 저수용량을 감소시키는 중요한 지질학적 작용으로, 인간의 활동영역이 확대되면서 토지 이용의 집중화에 따라 토양침식이 급격하게 증가되었다. 특히, 대규모 단지 및 택지개발과 기상이변이 연계되면서 우리에게 위협적인 환경문제로 대두되고 있다.

산지의 토사유출은 일반적으로 강우에 의한 지표면 흐름에 의하여 발생되며 토사유출에 따른 문제점을 예방하기 위해서는 유역에서의 개발행위나 개발 후 유역관리 계획에 대한 자료를 바탕으로 토사생성과 유출에 대한 조사와 분석이 필요하다. 토사유출의 저감을 위해서는 토사의 발생장소, 시간, 규모, 이동형태를 정확하게 파악하고, 그것이 어떤 경로로 유출되는가를 예측할 필요가 있다. 사면에서의 침식과정은 지표특성 및 강우특성에 의해 변화한다. 다양한 지표특성에 의한 침식과정을 이해하기에는 자연강우실험만으로는 시간적이고 공간적으로 어려운 요소가 많이 있다.

이러한 토양침식이나 토양유실 방지대책을 수립하기 위해서는 토양침식이 발생하는 메커니즘을 규명하여야 적절한 공법을 적용할 수 있다. 지금까지는 토양유실이 수리수문학적인 측면에서만 고려되어 강우강도나 강우지속시간 등 강우조건을 고려하여 연구되었다(Foster and Highfill, 1983). 그러나 강우는 인위적으로 조절이 불가능한 인자이므로 실제 영향을 받는 지질조건을 고려한 토양침식 과정의 규명이 필요하다.

토양에서 세립자와 유기물은 농경지에 투입되는 비료 등의 화학물질을 흡착하고 물을 저장하는 역할을 하여 농경지 지력향상의 중추적인 기능을 담당한다(Jo, 2005; Kim et al., 2005). 그러나 토양침식의 발생은 모든 토립자에 균등히 발생하지 않고 점토와 같은 세립자와 비중이 작은 유기물을 선택적으로 침식시킨다(Kuhn and Bryan, 2004). 또한, 하천환경에서의 토양침식은 심한 흙탕물(탁수) 문제를 일으켜 수질환경의 악화뿐만 아니라 하천의 이수 및 홍수관리에 심각한 영향을 준다. 특히 농경지에서 발생하는 토양침식은 하천에서 퇴적과 운반을 반복하며 서서히 하류로 이동한다(Kim et al., 2005).

토양침식을 방지하고 토양유실을 예측하기 위해 국내에서도 토양침식의 특성 분석 및 토양침식의 잠재성 분석(Park et al., 2006; Lee and Song, 2011), 토양 유실량 산정 및 강우 침투속도 분석(Joo, 2003; Kim et al., 2012) 등의 다양한 연구가 진행되고 있으며, 선진국들은 1990년대부터 토양유실과 비점오염원을 규제하기 위하여 막대한 예산을 투자하여 중간지 관리방법인 초생대, 초생수로, 우회수로, 실트 펜스(silt fence), 승수로, 농경지 사면정비 등에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Foster and Huggins, 1977; Arnold et al., 1998; Kuhn et al., 2009; Kuhn and Armstrong, 2012).

본 연구의 목적은 토양침식에 관련되는 강우특성, 토양경사도 그리고 지질, 광물특성을 조사, 분석하여 상대적인 영향인자에 대한 중요도를 규명하는데 있다.

토양침식의 발생원리 및 영향인자

우리나라는 주로 물에 의한 토양침식이 발생하고 있다. 물에 의한 토양침식은 빗방울의 타격력, 유출수의 운반능, 걸리(gully) 등의 발생여부에 영향을 받는다(Kim et al., 2012). 토립자의 이탈은 빗방울의 타격력이나 유출수의 전단력에 의해 토립자가 흩날려서 떨어져 나오는 현상이다. 토양침식은 종류에 따라 면상침식(sheet erosion), 세류침식(rill erosion), 협곡침식(gully erosion), 하천제방침식(streambank erosion), 산사태(landslide) 등으로 구분할 수 있다(Jeong et al., 2011).

면상침식은 토양입자가 토양표면에서 균일하고 일률적으로 유실되어 마치 얇은 막이 벗겨지듯 토양이 유실되는 침식을 말한다. 세류침식은 1~2 mm 폭과 깊이를 가지는 작은 물길 혹은 세류에서부터 20 cm 내외의 폭과 깊이의 세류(rill)에서 일어나는 침식을 말한다. 협곡침식은 세류가 점차 커져서 통상적인 경운으로는 메울 수 없을 정도 이상의 큰 세류에서 일어나는 침식을 말한다. 토양면에서의 흐름은 작은 세류를 많이 형성하기 때문에 지표면 흐름이 넓은 범위에서 유지되기 어렵다(Song, 2006). 세류와 세류 사이의 흐름은 작은 규모의 지표면 흐름으로 정의할 수 있고, 세류와 세류 사이에서 일어나는 침식을 세류간 침식(inter-rill erosion)이라고 한다. 세류간 침식과 세류침식은 수학적 모델링으로 어느 정도까지는 예측이 가능하다(Kim et al., 2005; Smets et al., 2011). 그러나 걸리 침식은 토양유실 양상이 토양의 점착력과 유출수의 소류력과 관계가 아닌 세굴과 측면붕괴에 의해 발생되므로 수학적 모델로는 예측

Fig. 1. Rain simulator frame. Upper part of outer frame: height, 1240 mm; width, 1550 mm; length, 1040 mm. Lower part of outer frame: height, 1280 mm; width, 1550 mm; length, 1040 mm. Total height of frame: 2520 mm.

Fig. 2. Rain gear frame. Nozzle size (mm): 1.5; nozzle number (EA): 9; nozzle type: spray.

이 어렵다(Kim et al., 2009).

토립자의 이탈은 기본적으로 빗방울의 충격력, 지표면 흐름의 전단력, 토양입자의 이탈 용이성, 빗방울의 충격력과 지표면 흐름의 전단력을 감소시킬 수 있는 지표 피복물질의 유무, 영농관리를 통한 토양의 유실저항성 향상 등에 영향을 받는다. 이탈된 토립자의 운반은 표면 흐름의 운반력, 토립자의 운반 용이성, 토립자의 운반을 억제할 수 있는 물질의 존재유무 등에 영향을 받는다. 운반능이 부족하면 토양유실과 유사발생을 제어하는 제한인자가 된다. 또한 운반능은 충분하나 토립자의 이탈이 작으면 토립자의 이탈이 토양침식 발생을 제어하는 인자가 된다. 토립자의 이탈과 운반능에 영향을 주는 인

Fig. 3. Inverter Pump. Model name: PS-350 I; voltage (V): 220; rated output power (W): 350; flow rate (L/min): 30; caliber size (mm): 25.

자에는 경지의 수문특성, 지형, 토양 침식성(soil erodibility), 토양 운반성(soil transportability), 표면 피복(surface cover), 토양 잔유물(incorporated residue), 토지이용(residual landuse), 지하 잔유물(subsurface effects), 경운(tillage)의 유무, 토양면의 거칠기(roughness) 등이 있다(Jeong et al., 2011).

따라서, 본 연구에서는 토양침식 원인 인자 중 강우량과 강우지속시간, 강우강도 등의 강우특성과 토양의 경사도와 토양의 유기물함량의 인자들에 대한 조건을 달리하여 토양의 표면에서 발생하는 토양침식을 규명하고자 하였다.

연구 방법

강우재현장치와 확률강우빈도

본 연구에서는 강우에 의해 발생하는 토양 침식량을 정량화하고자 강우재현장치와 토양상자를 제작하여 인공강우실험을 실시하였다. 이를 위해 강우재현장치와 노즐분사장치, 저수조와 펌프 그리고 유량계 등을 제작 및 설치하였다(Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4). 노즐 분사 장치는 실험을 수행하는 동안 일정한 강우량이 토양의 표면에 분사되기 위한 장치들이며, 노즐의 밸브를 조절하여 60~200 mm/h의 강우강도를 구현할 수 있었다. 본 연구를 위하여 채취된 토양위치는 안동과 남춘천 지역이며 이들 지역의 50~200년 빈도의 확률강우범위에 해당하는 70 mm/h의 강우강도와 급격히 변화하는 기후에 의해 발생 가능한 강우강도 120 mm/h를 모의하고자 하

Fig. 4. Digital flow monitor. Model name: FLOW-575.

였다. 본 강우실험조건으로 안동지역과 남춘천 지역의 홍수량 산정은 확률강우범위 중 70 mm/h의 강우량으로 결정하였다.

토양분석과 경사도

실험에 사용된 2개의 토양은 낙동강의 수변구역과 한강의 수변구역에서 각각 채취하였으며 샘플 후 2주 이내에 실험을 총 8회 실시하였다. 두개의 디지털 유량 모니터(Model Flow-575, Model Flow-350)와 하나의 인버터 펌프(Model PS-350 I)가 실험에 사용되었다.

실험에 사용된 2개의 토양은 시료명을 각각 Sample A soil, Sample B soil이라고 하였으며, 샘플 채취 후 2주 이내에 실험을 총 8회 실시하였다. 실험에 사용된 토양의 특성을 분석하기 위하여 토양시료를 채취하여 입도시험(KS F 2309)과 비중시험(KS F 2308)을 실시하였다. 또한 실험을 시작하기 전과 실험 종료 후의 토양 함수비를 측정하였으며, 인공강우에 의해 발생하는 표면 유출수의 탁도를 측정하였다.

실험에 사용된 토양상자는 가로 0.8 m × 세로 1 m의 크기로 아연철판으로 제작하였으며, 강우재현 시 강우에 의해 유출이 발생할 수 있도록 토양경사를 5°와 10°의 경사로 토양상자를 제작하여 기울기를 구현하였다.

인공강우실험

강우재현장치를 이용한 인공강우 실험은 Table 1과 같이 조건을 달리하여 총 8회에 걸쳐 수행되었다. 각 노즐에서 토양상자에 살포되는 강우량과 토양상자의 경사도 조건을 달리하여 각 조건에 의해 발생하는 표면유출수와 기저유출수의 양을 측정하였다. 또한 강우강도와 표면유출량 그리고 기저유출량의 차를 이용하여 토양 저류량을 예측하였으며, 토양상자 표면으로 유출되는 표면 유출수는 No. 200체(입경 0.074 mm)를 통과시킨 후 체에 남은 무게를 측정하고, 수질시료를 채취하여 부유물질(SS) 농도를 분석하였다. 이때 분석된 무게와 부유물질 농도를 환산하여 합산한 값을 강우재현장치에 의해 발생한 토양 침식량으로 산정하였다.

현장시험

현장시험 대상으로는 변성암 및 퇴적암지역을 대상으로 하였다. 침식현장에서의 지질, 지형별 침식메커니즘 규명을 하기 위해 연구할 지역을 선정하는데 있어서 본 연구는 변성암 지역과 퇴적암 지역인 경북 안동시 남선면 신석리 2지역, 안동시 임동면 마령리 2지역 등 네곳의 지역을 선정하였다. 남선면 신석리에 위치한 두 선정지역은 변성암 지역이고 임동면 마령리에 위치한 두 선정지역은 퇴적암 지역이다. 지질학적으로 다른 변성암 지역과 퇴적암 지역을 선정한 이유는 지질, 지형별 침식메커니즘을 규명하기 위함이다.

토양경사는 저경사 3~4° 및 고경사 25~27°를 대상으로 하였다. 7월 한 달 동안 강우 후 총 3회 침식깊이를 측정하였고 8월과 9월은 각각 1회 침식깊이를 측정하였으며 경사에 따른 침식량 확인을 위해 남선면과 임동면 지역의 저경사 지역(Site 1, 3)과 고경사 지역(Site 2, 4)을 선정하여 모니터링하였다. 측정 후 주변 토양에 대한 물리적 특성변화 관찰을 위해 토양시료를 채취하였다.

Table 1. Combination of conditions for test.

Test Case	Slope (°)	Rainfall (mm/h)	Rainfall duration time (h)	Test item
1, Sample A soil	5	70	1	Surface runoff Groundwater runoff Retention soil SS Turbidity Soil erosion mass
2, Sample A soil	10	70		
3, Sample A soil	5	120		
4, Sample A soil	10	120		
1, Sample B soil	5	70		
2, Sample B soil	10	70		
3, Sample B soil	5	120		
4, Sample B soil	10	120		

Table 2. Soil characteristics.

Sample soil	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	pH	Organic C content (%)	USDA Classification
A	79.4	8.6	12	6.5	0.2	sandy loam
B	72.6	11.4	16	7.9	2.1	sandy loam

Fig. 5. Scale pipe installation for soil erosion monitoring.

모니터링 방법은 시험 대상지에 고정 파이프를 깊이 박아서 움직임이 없도록 고정시켰다. 파이프는 두 개를 설치하고 그 간격은 50 cm로 하였다(Fig. 5). 측정은 두 개의 파이프 중 왼쪽지점을 시작점으로 잡아 5 cm씩 수평으로 이동하며 지면과 떨어진 길이를 정하였다. 집중 강우 전(2012년 7월 3일, 7월 9일)과 강우 후(2012년 7월 16일, 8월 17일, 9월 25일)에 측정이 이루어졌으며 강우 전과 후의 평균적인 거리차를 통해 강우에 의해 침식된 깊이를 분석하였다.

결과 및 토의

인공강우실험에 사용한 토양

채취된 두 개의 토양에서 토성 및 토양의 특성 값을

Table 2와 같은 결과를 얻었다. 사용된 토양시료 A의 경우 점토 12.0%, 실트 8.6%, 모래 79.4%로 구성되었으며, 미국 농무성의 삼각좌표분류법에 따라 분류한 결과 토성은 사질로(sandy loam)으로 분류된다. 또한 토양시료 B의 경우 점토 16.0%, 실트 11.4%, 모래 72.6%로 구성되었으며, 토양시료 A와 동일하게 사질로으로 분류되었다. 인공강우 실험에 사용된 두 토양시료(A, B)는 토양분류상 동일한 사질로으로 분류되나 pH값과 토양유기물함량(organic C contents (%))값은 차이가 크게 나고 있으며, 특히 유기물 함량의 비는 약 10배의 차이 값을 보이고 있다(Table 2).

토양시료 A의 함수비는 실험 전에는 6.4%로 분석되었으며, 인공강우시험 종료 직 후 토양의 표면에서 채취한 토양의 함수비는 4번의 실험에서 18.9~20.1%의 범위로 나타나고, 토양시료 B의 함수비는 실험 전에는 4.9%로 분석되었으며, 인공강우시험 종료 직 후 토양의 표면에서 채취한 토양의 함수비는 4번의 실험에서 18.5~20.5%의 범위로, 인공강우에 의해 토양의 표면함수비가 크게 증가한 것으로 나타났다(Table 3). 이와 같이 강우 종료 후 토양의 함수비가 증가하게 되면 토양 입자간의 점착력이 약화되면서 지표면 유출에 빨리 도달하게 되어 토양의 침식이 발생할 확률이 높아진다. 따라서 여름철 장마기간이나 겨울철 융설기에 토양의 침

Table 3. Water content in the test soil box.

Sample A soil (sandy loam)				
Test case	Slope (°)	Rainfall (mm/h)	Water content (%) before test	Water content (%) after test
1	5	70	6.4	20.1
2	10	70		18.9
3	5	120		19.8
4	10	120		19.1
Sample B soil (sandy loam)				
Test case	Slope (°)	Rainfall (mm/h)	Water content (%) before test	Water content (%) after test
1	5	70	4.9	18.5
2	10	70		19.4
3	5	120		20.5
4	10	120		18.9

Table 4. Runoff based on simulated rainfall.

Sample A soil (sandy loam)								
Test Case	Slope (°)	Rainfall (mm/h)	Runoff (L)			Runoff (%)		
			Surf.	G.	S.	Surf.	G.	S.
1	5	70	47.74	12.8	9.46	68.2	18.3	13.5
2	10	70	51.46	9.6	8.94	73.5	13.7	12.8
3	5	120	91.76	17.5	10.74	76.5	14.6	9.0
4	10	120	94.86	14.2	10.94	79.1	11.8	9.1

Sample B soil (sandy loam)								
Test Case	Slope (°)	Rainfall (mm/h)	Runoff (L)			Runoff (%)		
			Surf.	G.	S.	Surf.	G.	S.
1	5	70	50.48	13.4	8.98	69.3	18.4	12.3
2	10	70	52.82	10.1	8.49	74.0	14.1	11.9
3	5	120	100.92	18.8	11.08	77.2	14.4	8.5
4	10	120	102.24	17.9	10.99	78.0	13.7	8.4

Surf. = Surface runoff

G. = Groundwater

S. = Retention Soil

식이 크게 증가할 수 있기 때문에 산사태나 토양붕괴에 대한 대비가 필요할 것으로 보여 진다. 실험에 사용된 토양의 비중은 총 8번의 실험에서 2.55~2.66으로 분석되었다.

인공강우실험에서의 유출량

각 조건별 인공강우 실험에 따른 유출량과 유출률 값을 Fig. 6과 Table 4와 같이 얻었다. 토양상자에 살포된 인공강우는 토양이 포화되고 강우타격력에 의해 토양입자가 분리되면서 토양과 함께 유출된다. 이때 표면으로 유출되는 유출수를 표면유출수, 토양으로 침투되어 유출되는 유출수를 기저유출수, 그리고 토양에 저류되는 양을 토양 저류수로 정의하고 인공강우에 의한 물수지 분석을 실시하였다.

시료A 토양과 시료B 토양을 이용하여 각각 4회씩 총 8번의 실험결과, 토양상자의 경사도가 5°에서 10°로 증가하거나 강우량이 70 mm/h에서 120 mm/h로 증가할수록 표면유출량이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 기저유출량은 경사도가 작을수록, 강우량이 클수록 기저유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 토양에 저류되는 양은 경사도의 차이에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타나나, 동일 경사도에서 강우강도의 증가에 따라서는 다소 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 6, Table 4). 또한, 두 토양의 차이점 중 하나인 토양 유기물 함량값이 큰 시료B 토양에서 표면 유출량과 기저유출량이 모두 증가

Fig. 6. Comparison of runoff based on simulated rainfall.

하였고, 토양저류량은 일정 하지 않았다 (Table 4).

강우량을 100%로 환산하여 표면유출량과 기저유출량 그리고 토양저류량을 분석한 결과, 시료A 토양상자에서는 경사도와 강우량에 따라 표면유출량은 68.2~79.1%의

범위로 나타났으며, 기저유출량은 11.8~18.3%의 범위로 나타났다. 시료B 토양상자에서는 경사도와 강우량에 따라 표면유출량은 69.3~78.0%의 범위로 나타났으며, 기저유출량은 13.7~18.4%의 범위로 나타났다. 또한 Table 4 결과와 같이 경사도가 완만할수록 토양으로 침투되는 양이 증가하는 것으로 나타났으며, 경사도와 강우량 증가에 따라 유출률이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, 유기물 함량이 큰 시료B 토양 유출률의 증가율은 시료 A 토양 유출률의 증가율 보다 적었다. 이는 Kim et al. (2008)의 연구에서와 같이 경사도와 강우량 증가에 따른 유출률이 증가한다는 결과와 동일한 결과이다. 또한 Kuhn et al. (2012)의 연구결과와 같이 본 연구에서도 유기물함량값이 클수록 토양으로 침투되는 물의 양은 적었으며, 유출률은 강우강도에 크게 의존한다는 연구결과와 유사한 결과이다.

인공강우실험에서의 토양침식량

Table 5는 강우재현장치를 이용하여 인공강우 실험을 수행한 결과 발생한 토양 침식량이다. 각 인공강우 실험마다 발생한 표면유출수의 유사량과 부유물질 농도를 분석하여 토양 침식량을 분석한 결과 강우량과 경사도의 증가에 따라 토양 침식량이 증가하는 것으로 나타났다. 시료A 토양상자에서는 경사도 5°와 강우량 70 mm/h에서는 365.7 g, 경사도 10°와 강우량 70 mm/h에서는 386.9 g, 경사도 5°와 강우량 120 mm/h에서는 541.5 g, 그리고 경사도 10°와 강우량 120 mm/h에서는 594.4 g으

로 경사도가 증가하거나 강우량이 증가할수록 토양침식량이 증가하는 것으로 나타났다. 이를 단위면적으로 환산하면 4번의 실험에 의해 각각 4.57 ton/ha, 4.84 ton/ha, 6.77 ton/ha 그리고 7.43 ton/ha의 토양침식이 발생하는 양이다. 시료B 토양상자에서는 경사도 5°와 강우량 70 mm/h에서는 379.3 g, 경사도 10°와 강우량 70 mm/h에서는 391.7 g, 경사도 5°와 강우량 120 mm/h에서는 593.4 g, 그리고 경사도 10°와 강우량 120 mm/h에서는 631.1 g으로 경사도가 증가하거나 강우량이 증가할수록 역시 토양 침식량이 증가하는 것으로 나타났으며, 시료 A 토양에서보다 각 조건별 실험 모두에서 토양 침식량은 증가하였다. 이를 단위면적으로 환산하면 4번의 실험에 의해 각각 4.74 ton/ha, 4.9 ton/ha, 7.42 ton/ha 그리고 7.89 ton/ha의 토양침식이 발생하는 양이다. 또한 유사량과 부유물질 농도뿐만 아니라 탁도(NTU)도 증가하는 것으로 나타났다.

이는 Kim et al. (2008)의 연구결과와 같이 토양유실량이 유출량과 직선의 형태로 비례하는 양상을 나타낸다는 연구결과와 유사한 결과이며, Sagong et al. (2009)의 연구결과에서도 강우강도와 유출량 그리고 사면인자의 크기와 비례한다는 결과와 유사하다. 그러나 본 연구결과에서 경사도와 강우량 그리고 토양 침식량의 상관관계나 회귀식 등의 상관성을 도출하기 위해서는 토양의 유기물 함량 정도와 강우량 조건 등의 다양한 조건의 변경을 통한 실험이 요구된다(Kuhn, 2007).

Kuhn and Armstrong (2012)의 연구에 의하면, 강우

Table 5. Soil erosion based on simulated rainfall.

Sample A soil (sandy loam)							
Test	Slope (°)	Rainfall (mm/h)	Surface runoff (L) A	Soil weight in Tray (g) B	SS (mg/L) C	Turbidity (NTU)	Soil erosion mass (g) A×C+B
1	5	70	47.74	227.2	2,900.0	2,790	365.7
2	10	70	51.46	232.2	3,005.2	2,840	386.9
3	5	120	91.76	255.7	3,115.0	3,200	541.5
4	10	120	94.86	266.9	3,452.4	3,400	594.4
Sample B soil (sandy loam)							
Test	Slope (°)	Rainfall (mm/h)	Surface runoff (L) A	Soil weight in Tray (g) B	SS (mg/L) C	Turbidity (NTU)	Soil erosion mass (g) A×C+B
1	5	70	50.48	230.4	2,950.0	2,800	379.3
2	10	70	52.82	233.2	3,000.9	2,910	391.7
3	5	120	100.92	269.7	3,207.4	3,200	593.4
4	10	120	102.24	272.8	3,504.2	3,500	631.1

강도가 낮을 경우에는 silty clay loam > loam > silt > fine sand의 순서로 침식이 잘 이루어지며, 강우강도가 높을 경우에는 silty clay > silty clay loam > silt > loam > fine sand의 순서로 침식이 발생 한다. 대체로 토양침식은 투수율에 반비례하지만 유출이 일어날 정도로 지표가 치밀해졌을 경우에는 느슨한 물질의 양에 따라 상이하다. 한편 빗방울에 의한 비산은 토양입단을 붕괴시켜 세립질로 표면막(surface seal)을 형성함으로써 투수율을 저하시키기도 한다. 강우에서 토양 속으로 투수되거나 대기로 증발되고 난 나머지는 지표수로 유출된다.

유출량은 강우강도보다 강우량에 비례하며, 점토함량이 높을수록 증가한다. 본 연구 결과에서도, 토양의 유기물 함량 값과 점토 함량이 큰 토양에서 토양침식량이 증가되었다(Table 5). 그러나 사면의 길이가 길어지면 유출시간도 길어지고 투수량이 증가하므로 단위면적당 침식량은 감소한다(Hu et al., 2012; Kuhn, 2010). 강우

가 토양의 투수능력(infiltration capacity)을 초과하여 계속되면 물은 지표의 저지에 저수되며, 지표저수량은 사면의 길이가 길수록 증가한다. 그래서 지표유수의 에너지는 강우강도, 토양의 투수능력, 지표유수의 길이, 사면의 경사, 지표의 기복정도, 유수의 교란정도 등에 따르는 함수로 표현된다. 지표유수에 의한 침식은 유수의 힘(shear stress)이 토양의 저항을 초과할 때에 가능하다. 따라서 침식력이 토양의 저항에 미치지 못하는 곳은 무침식대(belt of no erosion)로 남게 되는데, 무침식대의 너비는 유출강도와 지표의 기복정도에 반비례하며 토양 저항성에 비례한다(Kuhn, 2010; Hu et al., 2012).

현장시험에서의 토양침식 특성

현장시험 결과 고경사(27°) 변성암지역인 Site 1에서 7월 5일~7일 사이 약 80 mm 정도의 많은 강우량을 기록하여, 그 다음날인 7월 9일 측정결과 최대 43.0 mm,

Fig. 7. Erosion depth of soil in metamorphic rocks by rainfall events (Site 1, soil slope 27°).

Fig. 8. Erosion depth of soil in metamorphic rocks by rainfall events in Fig. 7 (Site 2, soil slope 3°).

Fig. 9. Erosion depth of soil in sedimentary rocks by rainfall events in Fig. 7 (Site 3, soil slope 25°).

Fig. 10. Erosion depth of soil in sedimentary rocks by rainfall events in Fig. 7 (Site 4, soil slope 4°).

평균 9.5 mm의 침식깊이를 보이는 것으로 확인하였다. 변성암지역 저경사(3°) Site 2에서는 측정결과 최대 26.0 mm, 평균 2.05 mm의 침식깊이를 보였다. 퇴적암지역인 고경사(25°) Site 3에서는 측정결과 최대 14.0 mm, 평균 5.98 mm의 침식깊이를 보이고, 저경사(4°)인 Site 4에서는 측정결과 최대 19.0 mm, 평균 2.70 mm의 침식깊이를 보이는 것으로 확인하였다(Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10).

현장시험 결과에 따르면 Site 1과 3이 Site 2와 Site 4에 비해 토양경사가 큰 지역으로 이 지역에서 침식이 더 많이 일어났다. 토양 침식과 경사도의 관계에 있어서는 토양경사가 급할수록 침식이 더 많이 일어남을 알 수 있다. 지질별로 Site 1, 2와 Site 3, 4를 비교하면, 퇴적암지역보다는 변성암 지역에서의 침식량이 더 큰 것으로 확인되었다. 또한 토양의 형태와 성질이 비슷하다면 경사각도가 클수록 침식량이 많을 것으로 판단된다(Ryu and Jeong, 2012).

특히 침식은 강우량이 높은 기간 동안 강하게 발생하였는데, 측정지역 중심부에서 침식량이 증가하였다. 일단 초기에 침식 또는 세굴이 발생하면 이 부분을 따라 유로가 개설되면서 유수가 집중적으로 흐르기 때문에 아래쪽, 즉 하방침식이 가속화된다. 이어 침식구간의 폭이 점차 넓어지면서 측방침식도 점진적으로 발생한다. 이로 볼 때 침식은 광범위한 구간에 균질하게 일어나기 보다는 초기 지형기복이나, 연약층을 중심으로 차별적으로 발생하며, 일단 초기에 침식구간이 발달하게 되면, 그 부분에서 집중적으로 침식이 가속화됨을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 실내 인공강우실험 및 현장시험을 이용하여 강우특성, 토양경사도와 지질특성(토양특성)에 따른 토양 침식량 및 침식깊이를 측정, 분석 하였다. 연구결과 강우량이 증가하고 경사도가 급할수록 표면 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 표면 유출량 증가로 인해 유출수에 포함되어 있는 유사량과 부유물질 그리고 탁도도 함께 증가하여 토양 침식량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 유출량은 강우량에 비례하며, 점토 함량이 높을수록 증가한다. 현장시험 결과로는 토양경사가 큰 지역 및 퇴적암 지역보다 변성암 지역에서 보다는 큰 침식량이 계산되었다. 이러한 실험의 결과는 토양 침식량을 예측하는 모델개발에 있어서 기반암 풍화의 산물인 토양에 있어서 지질특성이 침식 및 침식후의 퇴적

특성을 잘 반영하고 있음을 보여준다. 그러나 본 연구 결과는 소규모 토양상자 및 제한적인 현장시험을 통한 분석결과로써 단기간에 도출 할 수 있었으나, 지역적인 침식특성 규명 및 대책을 위해서는 추후 상세한 지질특성, 경사도나 피복정도 및 경사장 상태 그리고 기후변화에 의한 자연강우 특성을 고려한 현장 실시간 모니터링을 통한 실험이 수행되어 추가적인 영향인자 분석이 있어야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 토양·지하수오염 방지기술개발 사업 중 2013년 토양침식 모니터링 및 저감기술개발 및 토양침식 모니터링 센서개발 사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R., 1998, Large hydrologic modeling and assessment, Part I; model development, Journal of American Water Resources Association, 34(1), 73-89.
- Foster, G. R. and Highfill, R. E., 1983, Effect of the terraces on soil loss: USLE P factors for terraces, Journal of Soil Water Conservation, 38(1), 48-51.
- Foster, G. R. and Huggins, L. F., 1977, Deposition of sediment by overland flow on concave slopes, In: Soil Erosion Prediction and Control, 21 (Special publication), Soil Conservation Society of America, Ankeny, IA, 167-182.
- Hu, X., Liu, L. -Y., Li, S. -J., Cai, Q. -G., Lu, Y. -L., and Guo, J. -R., 2012, Development of soil crusts under simulated rainfall and crust formation on a loess soil as influenced by Polyacrylamide, Pedosphere, 22(3), 415-424.
- Jeong, J. -S., Jung, C. -G., Lee, J. -I., and Lee, S. -H., 2011, Determination of failure mechanism of slope calibration chamber tests using rainfall simulation (I), Journal of the Korean Geotechnical Society, 27(2), 27-34 (In Korean with English abstract).
- Jo, E. -Y., 2005, Pattern of the soil erosion in the mountain cropland (Goraengji) with case study on Wangsan-myeon, Gangreong City, Gangwon Province, Central East Korea, master's thesis of Korea National University of Education, 86p.
- Joo, J. -D., 2003, Characteristics of surface flow and soil erosion on the forest fired area by using rainfall simulator, master's thesis of Yeungnam University, 64p.
- Kim, H., Shin, H., Kim, Y. -T., Park, D. -K., and Min, T. -K., 2012, Analysis of seepage velocity in unsaturated weathered soils using rainfall infiltration test, Journal of the Korean Geotechnical Society, 28(2), 27-34 (In Korean with English abstract).

- Kim, K. -S, Heo, S. -G., Jung, Y. -S., Kim, J. -M., and Lim, K. -J., 2005, Analysis of soil erosion vulnerability at alpine agricultural fields of HongCheon County, Journal of Korean Society of Rural Planning, 11(2), 51-57 (In Korean with English abstract).
- Kim, S. -H., Park, N. -H., and Shim, T. -S., 2008, A study on soil water characteristic curve of the weathered granite soil through simulated rainfall system and SWCC cell test, Journal of Advanced Engineering and Technology, 1(2), 383-394 (In Korean with English abstract).
- Kim, S. -H., Shim, T. -S., and Park, N. -H., 2009, A study on the pore water pressure characteristic of unsaturated weathered granite soil slopes through rainfall simulation, Journal of Advanced Engineering and Technology, 2(1), 153-164 (In Korean with English abstract).
- Kuhn, N. J., 2007, Erodibility of soil and organic matter: independence of organic matter resistance to interrill erosion, Earth Surface Processes and Landforms, 32, 794-802.
- Kuhn, N. J., 2010, Rainfall simulation experiments on crusting and interrill sediment organic matter content on a silt loam from Devon, Die Erde, 141(4), 283-300.
- Kuhn, N. J. and Armstrong, E. K., 2012, Erosion of organic matter from sandy soils: Solving the mass balance, Catena, 98, 87-95.
- Kuhn, N. J., Armstrong, E. K., Ling, A. C., Connolly, K. L., and Heckrath, G., 2012, Interrill erosion of carbon and phosphorus from conventionally and organically farmed Devon silt soils, Catena, 91, 94-103.
- Kuhn, N. J., and Bryan, R. B., 2004, Drying, soil surface condition and interrill erosion on two Ontario soils, Catena, 57, 113-133.
- Kuhn, N. J., Hoffmann, T., Schwanghart, W., and Döterweich, M., 2009, Agricultural soil erosion and global carbon cycle: controversy over?, Earth Surface Processes and Landforms, 34, 1033-1038.
- Lee, M. G. and Song, C. S., 2011, Characteristics of the soil erosion with the rainfall and geotechnical conditions, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 53(3), 53-58 (In Korean with English abstract).
- Park, I. -H., Jang, G. -S., Lee, G. -S., and Seo, D. -J., 2006, Analysis of soil erodibility potential depending on soil and topographic condition, Journal of Environmental Impact Assessment, 15(1), 1-12 (In Korean with English abstract).
- Ryu, J. -H. and Jeong, G. -C., 2012, Characteristics of soil erosion by rainfall and geology, Proceeding of KSEG 2012 Fall Conference, Buan, November, 7-9 (in Korean).
- Sagong, M., Yoo, J. -H., and Lee, S. -J., 2009, Analysis on the rainfall triggered slope failure with a variation of soil layer thickness: Flume tests, Journal of the Korean Geotechnical Society, 25(4), 91-103 (In Korean with English abstract).
- Smets, T., Lopez-Vicente, M., and Poesen, J., 2011, Impact of subsurface rock fragments on runoff and interrill soil loss from cultivated soils, Earth Surface Processes and Landforms, 36, 1929-1937.
- Song, S. -T., 2006, A study on soil erosion hazard zone of GAYA national park using patterns of GIS & RUSLE model, master's thesis of Daegu University, 73p.

원고접수일: 2014년 1월 21일

수정본채택: 2014년 3월 15일

게재확정일: 2013년 3월 17일

남경훈

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375
Tel: 054) 820-7735
Fax: 054) 822-5467
E-mail: namsoil@naver.com

이달희

(주)성지엔지니어링
431-767 경기도 안양시 동안구 관양동 799 안양메
가벨리 215호
Tel: 031) 420-4760
Fax: 031) 420-4761
E-mail: dalheui@yonsei.ac.kr

정성래

(주)성지엔지니어링
431-767 경기도 안양시 동안구 관양동 799 안양메
가벨리 215호
Tel: 031) 420-4760
Fax: 031) 420-4761
E-mail: sj9171@chol.com

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375
Tel: 054) 820-5753
Fax: 054) 822-5467
E-mail: jeong@anu.ac.kr