

모의 강우와 유입수에 의해 급경사면에서 발달한 세류의 미세지형 변화

신승숙* · 심영주** · 손상진*** · 박상덕****

Shin, Seung Sook*, Sim, Young Ju**, Son, Sang Jin***, Park, Sang Deog****

Micromorphological Changes of Rill Development under Simulated Rainfall and Inflow on Steep Slopes

ABSTRACT

Interrill erosion dominates in forest areas, and the erosion rate in surface-disturbed areas is significantly increased by the development and expansion of rill. In this study, soil erosion experiments using simulated rainfall and inflow were performed to understand the development and the micromorphological changes of rill on steep slopes. The characteristic factors of the micromorphology, such as the rill cross section, rill volume, rill density, rill order, and rill sharpness, were analyzed according to steepness and location (upper or lower) of slope. The head-cut of the simultaneous incised rills by rainfall simulation moved rapidly upslope, and the randomly developed rills expanded deeply and widely with their connection. The rill cross section evolved to downslope gradually increased. The rill volume occupied about 78 % of the sediment volume, confirming that the contribution of the sediment from the rill erosion is greater than that of the interrill erosion. Although the rate of increase in rill order slowed as the slope increased, the total length and density of the rill generally increased. As the slope increased from 15° to 20°, the bed incision of rills became larger than the sidewall expansion, and the rill sharpness increased by 1.6 times. The runoff coefficient on the lower slope decreased by 12.3 % than that on the upper slope. It was evaluated that the subsoil exposures and formation changes by the rill expansion increased the infiltration rate. Although the sediment accompanying the rills generally increased with slope increase, it was directly influenced by the hydraulic velocity of enhanced rill with the local convergence and expansion in the process of the rill evolution.

Key words : Rill development, Micromorphology, Rill density, Rill sharpness

초 록

산림지역은 세류간침식이 지배적인 반면, 지표 교란지역은 세류의 발달과 확장에 의한 침식이 두드러지게 증가한다. 본 연구는 급경사에서 세류 발달과 미세지형 변화의 특성을 파악하고자 강우와 유입수 모의에 따른 토양침식 실험을 수행한 것이다. 세류의 단면과 체적, 세류밀도, 세류차수, 세류예도와 같은 미세지형의 특성인자들은 사면의 경사와 위치(상부 또는 하부)에 따른 분석이 이루어졌다. 강우모의에 의해 동시다발적으로 절개된 세류들의 두부침식은 빠른 속도로 상류로 이동하였고, 무작위적으로 발달한 세류들은 서로 연결되면서 깊고 넓게 확장하였다. 세류가 하류방향으로 진화함에 따라 횡단면적은 점차적으로 증가하였다. 세류 체적은 유출토사 체적의 약 78 %를 차지하여, 세류침식이 세류간침식보다 토사유출량 기여도가 큼을 확인하였다. 경사가 증가함에 따라 세류차수의 증가는 둔화되지만, 세류의 총길이와 밀도는 전반적으로 증가하였다. 경사 15°에서 20°로 증가하면서 세류의 측벽확장보다 하상절개가 상대적으로 커지면서 세류예도가 1.6배로 증가하였다. 하사면의 유출계수는 상사면보다 12.3 % 적었으며, 이는 세류 확장에 의한 형상 변화와 심토의 노출이 침투를 증가시켰던 것으로 평가된다. 세류가 수반된 토사유

* 중신회원 · 강릉원주대학교 방재연구소 연구교수 (Gangneung-Wonju National University · cewsook@gwnu.ac.kr)

** 케이에스엠기술(주) 대리 (KSM Engineering Co. · yjsim93@naver.com)

*** 강릉원주대학교 토목공학과 석사과정 (Gangneung-Wonju National University · ssj9512@naver.com)

**** 중신회원 · 교신저자 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Gangneung-Wonju National University · sdpark@gwnu.ac.kr)

Received October 7, 2022/ revised November 10, 2022/ accepted November 10, 2022

출은 경사가 급할수록 전반적으로 증가하지만, 세류진화 과정에서 국부적인 합류와 확장으로 강화된 세류의 수리학적 유속에 직접적인 영향을 받았다.

검색어 : 세류발달, 미세지형, 세류밀도, 세류에도

1. 서론

우리나라는 도시와 농경지 확장에 의해 산림지역이 급격히 감소하고 있다. 특히 고랭지의 농경지, 개발 공사지, 산불피해지 등의 급경사면 교란지역에서 노출된 지표토양은 침식에 취약하며, 최근 빈번하게 발생하는 국지성 호우에 의해 토사재해위험이 증가한다. 산림지역은 세류간침식(interrill erosion)이 지배적인 면적을 차지하는 반면, 지표 교란지역은 세류(rill)의 발달과 확장에 의한 침식이 두드러지게 증가한다. 지표흐름이 집중되는 세류의 유속 증가는 토양입자를 분리하는 능력뿐만 아니라 토사를 이송할 수 있는 능력도 증가시키기 때문이다. 세류발달은 지표흐름에 의한 사공간적으로 높은 변동성을 갖는 토양 특성의 복잡한 상호작용의 결과이다(Nachtergaele et al., 2001; Nachtergaele et al., 2002; Poesen et al., 1999). 세류의 발달과 형태에 기여하는 두부침식(head cut), 측벽확장(sidewall expansion), 하상절개(bed incision)는 불확실성과 복잡성을 가지고 있기 때문이다(Bingner et al., 2016). 이러한 이유로 세류 길이와 단면은 세류 형태의 지표로 사용되며, 특히 세류 길이는 세류과정을 설명하는데 유용하게 선택되는 인자이다. 세류의 정량적 측정에는 세류 폭, 깊이, 밀도, 폭의 비율 등을 포함한다(Raff et al., 2004; Wang and Fang, 1998). 세류망(rill network)은 세류의 절개(incision), 분기(divergence), 합류(confluence), 그리고 연결과정을 통해 복잡하게 발전하며, 그 과정은 토양 조건에 따라 다르다(Berger et al., 2010; Brunton and Bryan, 2000; Mancilla et al., 2005). 세류 절개가 발생하면 유속이 증가하여 토사이송능력이 커지며, 수문학적 그리고 지형학적 변화에 의해 세류망이 복잡해지는 것이다(Loch and Donnollan, 1983). 결과적으로 세류의 형태는 지표유출수와 급경사로 인한 토사유출을 결정하는데 중요한 역할을 한다(Govindaraju and Kavvas, 1994).

급경사 세류연구에 대한 국외의 연구들을 살펴보면, 실내의 강우모의장치를 이용한 세류발달과 토사유출 특성 연구(Chen et al., 2016; Qin et al., 2017; Shen et al., 2015; Yao et al., 2008; Zhang et al., 2016)와 현장에서 세류간침식과 세류발달을 이해하기 위한 연구들(Cerdan et al., 2002; Murphy and Flewin, 1993; Robichaud et al., 2010; Tian et al., 2020)로 구분할 수 있다. Qin et al.(2017)은 강우모의실험을 통해 세류의 형태를 TLS (terrestrial laser scanning) 장비를 사용하여 황토 사면에서 세류망 발달과 세류의 지형학적 특성에 대해 연구하였다. Shen

et al.(2015)은 강우강도 50 mm/hr와 100 mm/hr에서 4회의 연속적인 강우 실험을 수행하여 세류절개각(rill inclination), 세류밀도(rill density), 세류개석각(degree of rill dissection), 세류비틀림복잡성(rill tortuosity complexity)의 세류 형태학적 인자를 산정하였으며, 세류절개각은 세류침식과 형태를 추정하기 위한 최적의 형태학적 지표임을 제시했다. Zhang et al.(2016)은 세류의 발달과정을 연구하고 세류형태를 정량화하는 방법에서 프랙탈차원(fractal dimension)과 분기율(bifurcation ratio) 등의 적합한 인자들을 찾았자 하였다. Mancilla et al.(2005)은 오래전에 제시한 Horton (1945)의 이론을 바탕으로 경사길이, 기울기 및 토양 표면조도가 세류망의 복잡성 정도를 결정하는데 중요한 역할을 한다는 것을 제시했다. 세류발달로 인한 토양침식량 변화를 파악하기 위해 He et al.(2017)는 강우강도가 90 mm/hr와 120 mm/hr일 때 연속과 간헐 두 가지 강우 패턴의 실험에서 토양침식량을 비교하였으며, 세류의 형성은 유출수와 토사농도에 상당히 영향을 끼친다는 것을 확인하였다.

국내에서는 대부분 산지, 개발지, 농경지 등을 대상으로 연구가 이루어졌으며, 최근 지표가 교란된 산지를 대상으로 한 토양침식 연구가 활발하게 진행되고 있다(Kim et al., 2005; Kim et al., 2008; Nam et al., 2015; Park et al., 2005; Park et al., 2012; Park et al., 2013; Shin et al., 2008; Shin et al., 2013; Shin et al., 2019; Shin et al., 2022). Park et al.(2005)은 강우에 따른 산지사면의 유출 및 토양침식 민감도를 정의하고, 산불발생지 지표인자의 회복에 따른 토양침식 민감도를 분석하였다. Shin et al.(2008)은 대형산불 발생지인 양양군 낙산사 주변에 소규모 조사구인 플롯(plot)들을 설치하여 식생회복에 따른 유출 및 토양침식 특성에 대한 연구를 수행하였다. 공사현장과 같은 인공나지사면의 토양침식 연구사례도 있으며, 표토 다짐에 따른 토양침식 저감효과를 파악하고자 강우모의 실험장비를 제작하여 토양침식 실험을 수행한 바 있다(Park et al., 2013). 경사가 심한 고랭지역 농경지에서 토사유출 피해가 급증함에 따라 인공강우에 의한 토성 및 경사도별 농약이동특성을 연구한 사례도 있다(Kim et al., 2005). Hur et al.(2005)는 옥수수 재배경사지에서 인공강우 발생기를 이용하여 강우에 따른 토사유출 양상을 파악하고, 예측모델을 설정하여 토사유출을 저감시키는 방법에 대한 연구를 진행하였다. 최근 실내에 작은 규모의 강우모의 실험장비를 이용하여 강우의 충돌과 면상흐름(sheet flow)의 상호작용이 세류간침식에 미치는 영향과

사질토양의 침식성(erosibility)에 대한 연구를 진행하였다(Nam et al., 2015; Shin et al., 2022). 국내에서는 세류간침식에 대한 메커니즘 연구와 토양침식성 평가는 진행된 바 있으나, 세류의 침식과 발달에 대한 메커니즘 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구는 급경사 조건에서 모의 강우와 유입수에 따른 토양침식실험을 수행하여, 세류발달과 미세지형의 변화특성을 파악하고, 토사유출과의 관계를 평가하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 실험장비

본 실험은 급경사면에서 세류의 발달과 형상을 파악하기 위해 실외의 중규모 강우모의 장비를 사용한다(Fig. 1). 플롯의 토양상자 규모는 1.2 m × 5.5 m × 0.45 m로 총 3개로 구성되어 있다. 토양상자의 바닥면은 침투된 물을 배출시키기 위한 작은 배수구들이 분포한다. 플롯 출구부에는 지표흐름과 토사를 수집하기 위한 유도관이 설치되어 있다. 강우모의 발생을 위해 플롯의 연직방향으로 20개의 강우발생노즐이 구비되어 있다. 모의강우는 노즐의 상하 반회전의 분사에 의해 재현되며, 강우의 입자와 강도를 일부 조절할 수 있도록 노즐의 회전속도는 제어가 가능하다. 강우모의기의 노즐과 토양이 채워진 플롯과의 연직높이는 4.24 m이다. 강우발생은 물탱크의 물을 용수공급용 펌프로 끌어올려 강우모의기로 보내져 압력식으로 분사한다. 강우모의기의 강우강도 발생범위는 60~140 mm/hr 정도로 집중호우에 의한 극한강우를 재현할 수 있다. 토양상자의 경사는 유압기를 이용하여 0°에서 최대 20°까지 조절할 수 있어서 15°~20°범위의 급경사(Hudson, 1936) 재현이 가능하다. 플롯의 상단부에는 상류 지표유입수를 모으할 수 있도록 일정간격

으로 구멍이 있는 PVC관 파이프가 설치되어 있다. 각 플롯 상단의 파이프에서 유출되는 최대유량은 500 ml/사이며, 밸브를 통해 실험 유량을 조절할 수 있다.

2.2 실험방법

급경사면 세류발달 연구를 위한 본 실험의 플롯은 경사 조절은 가능하지만, 세류발달에 대한 해외 연구의 실험 플롯에 비해 규모는 작은 편이다. 특히 토양상자의 길이가 5.5 m로 제한되기 때문에 세류의 완전 발달에는 한계가 있다. 따라서 상사면(upper slope) 구간을 0.0~5.0 m로 보고 유입수 없는 조건의 강우모의 실험을 설계하고, 하사면(lower slope)은 5.0~10.0 m의 구간으로 상사면의 유입수와 강우가 함께 공급되는 실험 조건으로 설계하여 이를 보완하고자 하였다. 모의강우는 강릉지역 200년 빈도 이상의 극한 강우 조건으로 105.3~138.6 mm/hr 범위이다. 하사면의 유입유량을 결정하기 위해 합리식(rational method)을 사용하였다. 유출계수는 본 연구와 동일한 사토를 이용하여 면상침식 실험을 수행했던 Shin et al.(2022)의 실측치인 0.8을 사용했고, 강우강도는 본 실험의 평균 강우강도 범위인 120 mm/hr을 이용하여 유입유량을 산정한 결과 170 ml/s이었다(Table 1).

세류침식 실험을 위해 토양은 2000년 4월 동해안 산불이 발생했던 강원도 강릉시 사천면에 위치한 인근 산지에서 채취하였다. 토양의 특성을 파악하기 위한 체가름과 투수계수 시험을 실행하였다. 실험에 사용한 토양의 평균입경은 1.146 mm이고, 모래함량은 76.6 %를 차지하는 사토(sandy soil)에 해당된다. 매 실험종료 후 토양의 전단응력을 파악하기 위해 베인 전단시험을 실행하였다. 이 실험에서 사용된 토베인(torvane)은 전단강도를 간단하고 빠르게 측정할 수 있는 장비이며, 총 3개의 토베인으로 구성되어있다.

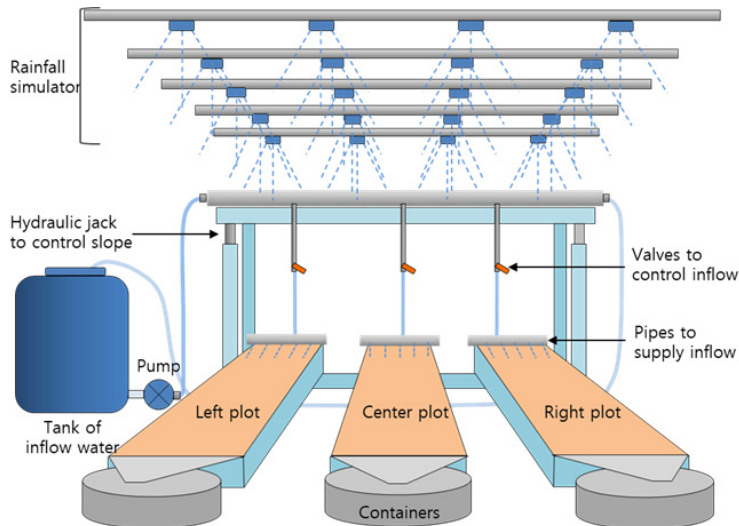


Fig. 1. Schematic Diagram of Rainfall and Inflow Simulators for Rill Erosion Experiment

Table 1. Range of Main Parameters for the Rill Erosion Experiment

Parameter	Range
Rainfall intensity (mm/hr)	120±11
Inflow (ml/sec)	0, 170
Length of plot (m)	5.5
Width of plot (m)	1.2
Slope (°)	15, 20
Clay (%)	1.1±0.7
Silt (%)	5.6±1.5
Sand (%)	76.6±1.6
Gravel (%)	16.7±2.4
Mean diameter (mm)	1.146±0.102
Shear stress (kg/cm ²)	0.300±0.027

이 중에 큰 배인을 사용하여 플롯의 상부, 중부, 하부로 나누어 전단강도를 측정하여 평균값을 사용하였다. 보정계수 0.2 kg/cm²를 이용하여 토양의 전단강도를 산정한 결과 0.258-0.339 kg/cm²의 범위를 보였다(Table 1).

본 실험에서는 급경사 조건인 경사 15°와 20°에서 유입수 유무에 따른 총 4회의 실험을 계획하고, 일회의 실험조건에서 3개의 플롯 측정자료들을 얻어 총 24회의 자료를 취득한다. 각 토양상자의 하단부 지표유출수 유도관 높이까지 토양을 채우고, 토양을 고르게 정돈하였다. 본 실험 전 토양상자에 선행강우를 약 10분정도 80 mm/hr 이하의 강우강도로 분사하여 토양이 완전히 포화상태가 되도록 한다. 만약 토양의 다짐도가 균일하지 못하여 지나친 꺼짐이 있는 경우 토양을 채워 지표면을 고르게 만들고, 위의 과정을 반복한다. 선행강우 이후 6시간 경과 시점에 포화토양의 플롯을 실험하려는 경사로 조절한다. 모의강우의 강우강도를 파악하기 위해 토양으로 침투하는 강우를 차단하기 위한 비닐을 플롯 위에 덮고, 플롯 경계 안으로 들어오는 모든 강우입자가 일정한 지표흐름으로 빠져나갈 때, 단위시간동안 유출수의 부피를 측정하였다. 토양침식 실험의 전반 과정을 기록하기 위하여 카메라를 이용하여 동영상 촬영한다. 본 실험 시작 이후 5분 간격으로 각 플롯의 중간 단면에 염료를 주입하여, 지표유출의 흐름특성과 유속을 파악하는데 활용한다. 실험종료 후 토사를 포함하는 유출수의 총 부피와 유출수의 부피 그리고 토사의 부피 및 건조무게를 측정한다. 세류 및 세류간 침식에 의해 발생한 샘플 토사는 105 °C 오븐에 건조시켜 토사유출량을 산정하였다. 세류의 미세지형 특성을 파악하기 위해 세류의 길이, 깊이, 너비를 10 cm 간격으로 직접 측도하고, 이를 분석하였다.

2.3 세류의 정의

세류(Rill)는 좁고 얇은 작은 수로로 표토가 노출된 경사면에서 주로 관측된다. 세류침식은 강우가 토양입자들의 공극사이로 침투

하고 포화상태에 도달하게 되면, 면상흐름이 집중되어 수로화(channelization)를 진행하면서 진화(evolution)하는 것이다(Meyer et al., 1975; Moss et al., 1982). 세류는 토양의 박리(detachment)와 이송(transport) 두 가지 메커니즘에 의해 진행되며, 집중흐름이 세류를 통해 흐르면서 세류의 측벽을 파고들고, 세류 폭을 확장시키며 붕괴를 촉발시킨다. 세류가 많은 지역에서 침식의 최대 37%는 세류 측벽의 확장 또는 붕괴로 인해 발생할 수 있다(Boon and Savat, 1981). 이러한 결과는 세류가 형성되기 시작한 후 토양침식과 토사유출량을 증가시키는 다양한 원인이 된다. 침식은 발생 규모와 메커니즘에 의해 세류간침식, 세류침식, 구곡침식(gully erosion), 하천침식(stream erosion) 순서로 발달한다(Merritt et al., 2003; Sun et al., 2013). 세류침식 특성은 세류간침식과는 달리 지표흐름이 중요한 지배 요인이며(Wirtz et al., 2012), 세류간침식에서 세류침식으로의 전환은 토양침식과 지형에 매우 중요한 변화를 일으킨다(Brunton and Bryan, 2000).

2.4 세류의 지형적 특성

2.4.1 세류의 단면 및 체적

세류의 단면은 세류의 규모와 거동을 파악하는데 중요한 인자로서 세류의 형상과 발달과정의 정도를 평가하는데 사용된다. 그러나 세류의 형상이 시간과 공간에 따라 일정하지 않고 불규칙하게 변하기 때문에 측정하기는 어렵다. Qin et al.(2017)의 실험적 강우모의에 의한 세류의 네트워크 발달 및 지형적인 특성에 대한 연구에 따르면, 세류의 차수가 증가함에 따라 U자 형상의 단면적이 증가함을 보였다. 이 형상들에 대한 기하학적 분석 결과 직사각형 단면의 약 0.523 면적비를 보였다. 발달한 세류의 하류방향의 일정한 위치에서 세류 폭과 깊이를 측정하면, 세류의 단면적 계산이 가능하며, 이는 세류의 체적을 구하는데도 활용된다. 세류 단면적 변화는 세류 형태변화를 분석하는데 유용하다. 세류의 체적은 토사 유출량의 체적과의 높은 상관성을 갖고 있으며, 이들 체적을 비교함으로써 침식에 대한 세류의 기여율을 평가할 수 있다. 발달한 세류 한 개의 체적은 다음 Eq. (1)과 같이 세류의 하류방향에 일정한 간격으로 측정된 횡단면적을 이용하여 산정한다.

$$V_N = \sum_{i=1}^n \frac{(A_i + A_{i+1})}{2} \times 0.1 \quad (1)$$

여기서 V_N 은 세류 번호 N 의 체적(m³) A_i 는 세류의 하류방향 i 번째 횡단면적(m²), A_{i+1} 은 하류방향 0.1 m 간격 아래 $i+1$ 번째 횡단면적(m²)이다.

2.4.2 세류밀도

세류밀도는 침식과 세류망 발달의 형태학적 지표로서, 기여면적

의 지표흐름이 세류에 의해 얼마나 배수되는지 파악하는데 사용된다(Bewket and Sterk, 2003). 세류밀도는 경사면의 침식정도를 반영하며 밀도가 높을수록 침식률 기여가 크며, 분기율이 높음을 나타낸다(Shen et al., 2015). 세류밀도(ρ)는 세류의 형태를 계량적으로 이해하는데 적합하며, 다음 Eq. (2)와 같이 계산한다.

$$\rho = \sum_{i=1}^n L_i / A \quad (2)$$

여기서 ρ 는 세류밀도(m^{-1}), L_i 는 세류분기점의 총 길이(m), A 는 토양상자 면적(m^2), i 는 세류 번호를 의미한다. 세류분기점은 하천 형태의 차수 분류법인 Horton(1945)의 방법을 보정한 Strahler(1952) 방법으로 세류의 차수에 따라 구분한다.

2.4.3 세류예도

세류는 불연속적인 흐름 경로와 불규칙한 단면 모양을 가질 수 있는 일시적인 절개 형태를 보인다. 세류의 절개 단면은 지표유출량, 경사, 토양조건에 따라 달라진다. 본 연구에서는 세류 절개의 날카로움을 파악하기 위해 세류의 형태학적 지표로서 세류예도(rill sharpness)를 정의한다. 각 차수의 분기별 세류의 예도를 산정하기 위해 다음 Eq. (3)처럼 세류 단면별 폭과 깊이의 측정값을 사용하여 평균예도를 산정한다.

$$Sp = \frac{\sum_{i=1}^n D_i / B_i}{n} \quad (3)$$

여기서 Sp 는 세류예도를 뜻하며, D 는 세류의 깊이(cm), B 는 세류의 폭(cm)이며, n 은 세류단면의 측정 개수를 의미한다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 세류발달

강우규모와 유입수유무 그리고 경사조건에 따른 세류발달 실험의 세류형태는 Fig. 2와 같다. 실험에 따른 빛의 강도 차에 의해 영상 이미지가 실제와 다소 차이가 있어서 각각의 이미지를 세류를 상대적으로 비교하기란 어렵다. 강우노즐이 중첩되어 강우 강도가 강했던 C 플롯이 다른 플롯에 비해 세류발달의 규모가 상대적으로 컸다. 유입수가 없는 상사면 조건에서 강우모의실험 초기에는 빗방울의 타격에 의한 토양의 박리와 튀김(splash)이 활발한 면상흐름(sheet flow)에 의한 세류간침식이 지배적이다. 세류는 강우발생 약 3분 이후 지표유출이 누적되는 경사면 중하부에서 절개가 이루어졌으며, 4개 이상의 세류가 동시다발적으로 발달하였다. 절개된 세류는 빠른 속도로 두부침식을 일으키며 상류로 이동하였고, 경과 시간 10분 이후에 무작위하게 발달한 세류들이 연결되면서 깊고 넓게 확장되었다(Figs. 2(a) and 2(b)). 유입수가 있는 하사면 조건에서는 실험시작 30초 이내에 세류침식이 발달하기 시작하였다. 유입수의 영향으로 세류는 최상단부터 절개하기 시작했고, 강우와 유입수가 누적되는 하단부에서도 세류 절개가 활발하게 이루어졌다. 상부와 하부에 생성된 세류들은 실패와 성공을 반복하면서 빠른 속도로 확장되어 이어져갔으며, 유입수 없는 조건보다 더 넓고 깊은 형태의 세류 미세지형을 형성했다(Figs.



(a) Rainfall Simulation on Upper Slopes of 15°



(b) Rainfall Simulation on Upper Slopes of 20°



(c) Rainfall+Inflow Simulation at Lower Slopes of 15°



(d) Rainfall+Inflow Simulation on Lower Slopes of 20°

Fig. 2. Rills Formed by Rainfall and Inflow Simulation on Upper and Lower Slopes of 15° and 20°

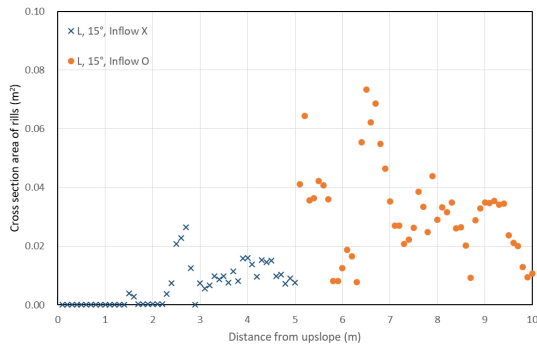
2(c) and 2(d)). 시간이 경과함에 따라 세류의 확장은 주춤해지면서, 형성된 세류 내에서 침식과 퇴적 작용이 반복적으로 이루어졌다. Fig. 2는 위의 과정을 통해 최종적으로 얻어진 세류의 형태와 네트워크인 것이다. 경사가 급한 20°사면에서 발달한 세류는 경사 15°에서의 세류보다 상대적으로 선형적이고, 깊게 파이는 경향을 보였다(Fig. 2).

3.2 세류 미세지형 특성

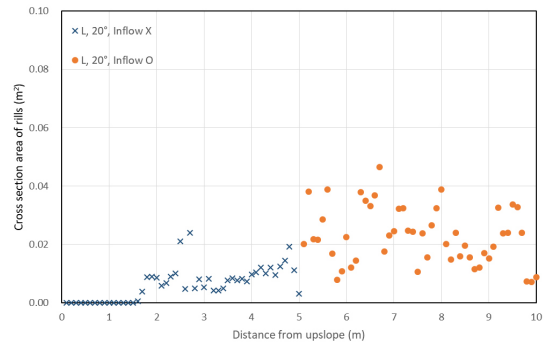
3.2.1 세류의 단면 변화

세류의 형상은 유입수의 유무 조건에 따라 전반적으로 큰 차이를 보였다. 유입수가 플롯 전체의 공급수량을 증가시킴에 따라 지표유

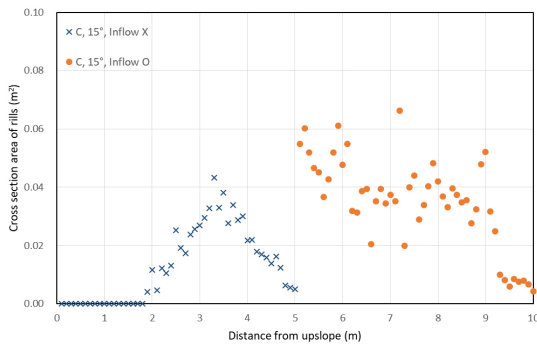
출수의 유속 증가는 세류 진화를 빠르게 진행시켰다. 그로 인해 세류의 단면과 길이 모두 커졌으며, 발생 빈도도 증가하였다. 세류의 0.1 m의 단위길이 당 폭과 깊이를 측정된 결과, 유입수가 없는 상사면의 플롯에서 0.13 m의 깊이까지 파였으며, 20°경사의 L 플롯 경우만 토양양자 측벽을 타고 흐르는 빗물에 의해 최대 0.23 m까지 깊게 침식되었다. 세류의 평균 깊이는 0.09 m, 평균 폭은 0.06 m이고, 최대깊이는 3.5~4.0 m인 것으로 확인되었다. 과거 동일 강우모의 실험에 의한 토양침식 연구에서는 세류의 평균 폭과 깊이는 각각 0.06 m와 0.03 m이었다(Park et al., 2013). 본 실험과 비교해 토양 및 경사는 유사조건이었으나, 강우규모가 평균 80 mm/hr로 상대적으로 작았기 때문에 이번 세류의 단면이 크게 발달한 것은



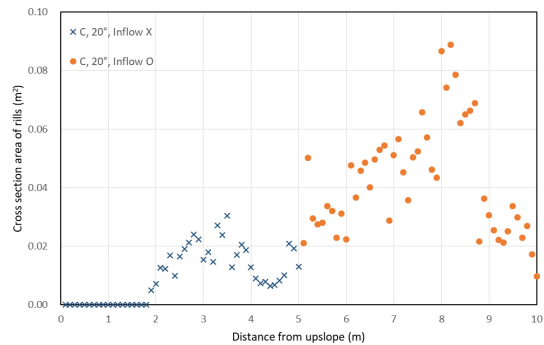
(a) Left Plot of Slope 15°



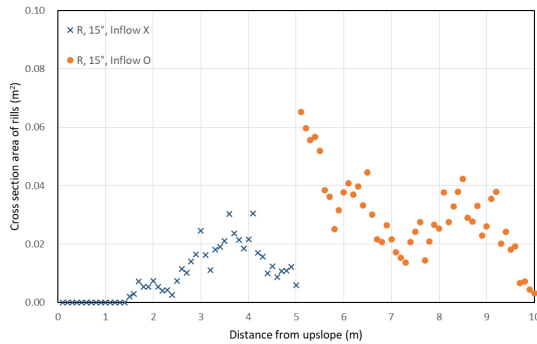
(b) Left Plot of Slope 20°



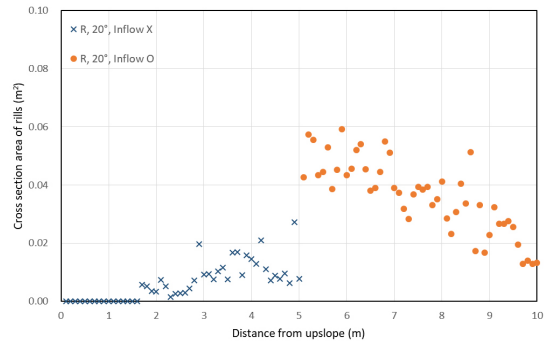
(c) Center Plot of Slope 15°



(d) Center Plot of Slope 20°



(e) Right Plot of Slope 15°



(f) Right Plot of Slope 20°

Fig. 3. Variation of Cross Section Areas of Rills Developed from Upper Slope to Lower Slope

합리적인 것이다. 유입수가 공급되는 하사면 조건 15°의 경사에서 세류 최대깊이는 0.18~0.21 m 범위였으며, 20°의 경사에서는 최대 깊이가 0.20 m부터 0.25 m까지 크게 발달하였다. 세류의 깊이와 폭은 세류들이 합류하는 합류점과 세류의 경로가 변경되며 흐르는 곡선부에서 최댓값을 보였다.

Qin et al.(2017)의 세류 형상 면적비율 0.523을 이용하여 각 세류의 단면적을 계산하였고, 플롯 내 동일 고도에 위치하는 세류들의 횡단면적을 합산하였다. 유입수가 없는 조건인 상사면과 유입수 있는 조건의 하사면을 연결하여, 10 m 규모의 경사면에서 발생하는 세류의 단면적 변화를 파악하고자 Fig. 3과 같이 나타내었다. 플롯의 하부 토양상자의 경계는 세류발달에 영향을 미치므로 상사면과 하사면의 하단 0.5 m는 고려하지 않았다. 플롯의 실험적 제한에 의해 상사면과 하사면이 만나는 5 m 지점에서 세류발달의 불연속은 확인되었으나, 하류방향으로 세류가 발달함에 따라 점차적으로 단면적은 증가하였다.

세류의 절개는 플롯 상부로부터 거리 1.5 m~1.7 m 지점에서 지표흐름이 집중되면서 세류가 발달하였다. Brunton and Bryan (2000)는 초기 두부침식은 경사가 증가함에 따라 상부로 이동한다는 것을 확인했다. 경사 증가에 따른 세류의 발달거리에 대한 Yao et al.(2008)의 연구에 따르면, 본 연구와 유사한 강우강도와 15°~20°경사면에서 세류발달 거리가 2~3 m 범위로 약간의 차이를 보였다. 이는 본 실험의 토양과 다른 토성을 갖은 미사질양토를 사용하였기 때문인 것으로 판단된다. 거리 2~4 m 범위에서 세류의 흐름이 강화됨에 따라 세류의 두부침식, 측벽 세굴 및 붕괴, 하상절개 등에 의해 세류의 규모가 확장되었다. 세류의 단면변화는 유입수가 공급된 하사면 구간인 5~7 m 사이에서 대체로 최대를 보였다. 단, 20°경사의 C 플롯에서는 예외적으로 8 m지점에서 최대단면적 0.087 m²을 보였다. 모의 강우량이 많았던 C 플롯에서 세류 단면이 다른 플롯에 비해 크게 발달하였다. 경사에 따른 세류 단면적 변화의 차이는 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 플롯의 제한된 길이와 불연속 연결에 따른 하단부의 유속 감소에 의해 퇴적지형이 형성되는 것으로 확인되었다. 세류의 단면 변화를 통해 세류 규모와 발달과정은 파악이 가능하지만, 세류 확장 및 퇴적에 대한 정보는 플롯의 규모에 따른 한계가 있다.

강우와 유입수 모의에 의해 플롯에서 발달한 세류의 체적은 측정된 세류들의 단면적과 길이를 이용한 Eq. (1)에 의해 산정되었다. 플롯에서 발생한 토사유출량을 이용하여 세류간침식과 세류침식에 의해 발생한 총 토사의 체적을 산정하여, 경사면에 형성된 세류의 체적과 비교하였다. Fig. 4는 세류의 체적과 토사의 체적을 비교한 것으로 이 관계는 높은 상관계수를 보였다. 경사 15°의 경우 토사체적에 비해 세류체적이 72 %를 보이는 반면, 경사 20°의 경우는 86 %로 상대적으로 크게 평가되었다. 이것은 경사가

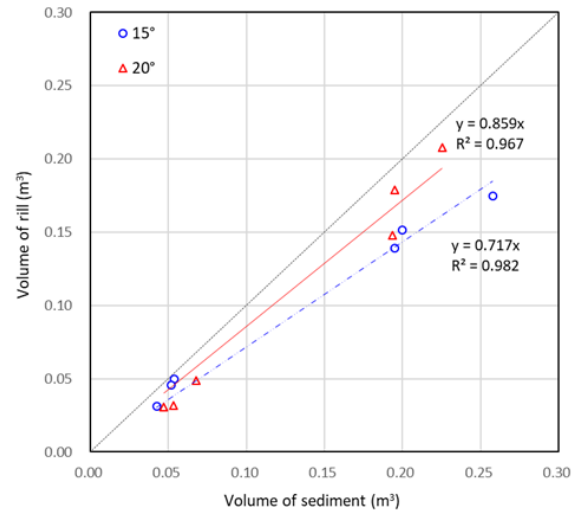


Fig. 4. Relationship between Total Volume of Incised Rills and Total Volume of Sediment

증가함에 따라 세류 침식에 의한 침식율이 증가하는 Tian et al.(2020)의 연구와 유사한 결과이다. 세류체적은 토사체적의 평균 78 % 차지하는 것으로 평가되어, 세류침식에 의한 토사유출량 기여도가 세류간침식보다 더 큼을 확인하였다. 각 경사와 세류 발달 단계별 세류의 단면 형상이 다름에도 불구하고, Qin et al.(2017)의 세류형상 면적비율을 일률적으로 적용했기 때문에 그에 따른 오차를 분명히 포함하고 있다. 따라서 세류의 미세지형을 정밀하게 예측하기 위해 LiDAR 스캐너 장비로 취득한 고정밀 3D 영상을 활용한 세류 발달 및 미세지형 변화에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

3.2.2 세류밀도

세류발달의 경로를 파악하기 위하여 Strahler(1952)의 하천차수 방법을 이용하여 Fig. 5와 같이 플롯별로 세류차수(rill order)를 작도하였다. 1차 세류는 실험 초기 사면에서 활발한 토양박리와 두부침식으로 인하여 빠르게 진행하였다. 1차 세류들이 서로 수렴한 후 세류망 형성 단계로 진화하면서, 2차와 3차 세류가 발달하였다. 시간이 지남에 따라 세류발달은 점차 안정화되었고, 실험 15분 후에는 세류에서 활발한 침식활동을 하지 않는 평형상태에 이르러 Fig. 5와 같은 세류의 차수가 형성되었다. 강우강도와 유입수 증가로 세류 차수는 증가하는 경향을 보였다. 상사면을 의미하는 유입수가 없는 경우 1~2차까지 5~7개의 세류가 발달하였으며, 최대 차수인 2차 세류는 플롯의 상부에서 3 m 지점 이후에서 형성되었다 (Figs. 5(a) and 5(b)). 하사면을 의미하는 유입수가 있는 경우 2차 세류는 플롯에 약 0.5 m 지점부터 발달하기 시작하여, 최대 3차까지 발달하였으며, 세류의 최대 길이는 5.2 m로 토양상자

사면의 길이와 유사했다(Figs. 5(c) and 5(d)). 경사의 증가는 1차와 2차 세류가 선형적으로 길게 발달함에 따라 치수의 증가는 둔화되었다. 하사면인 경우 유입수 공급으로 지표유출량이 크게 증가함에 따라 세류 치수뿐만 아니라 밀도도 증가하였다. 경사 20°의 유입수가 존재하는 하사면 중에 토사유출량이 많았던 C 플롯에서 최대의 세류밀도를 보였다. Table 2는 경사 및 유입수 조건에 따른 각

플롯에 대한 세류치수, 세류의 총길이, 세류밀도를 정리한 것이다. 세류의 총길기와 밀도는 경사가 증가함에 따라 전반적으로 증가하여, Tian et al.(2020)의 연구결과와 유사했다. 진화를 실패한 세류를 성공적인 세류로 병합하는 과정은 세류길기와 세류밀도 감소를 촉진하고, 결국 최소한의 에너지 소비로 안정적인 상태의 세류 네트워크를 형성했기 때문이다(Gomez et al., 2003).

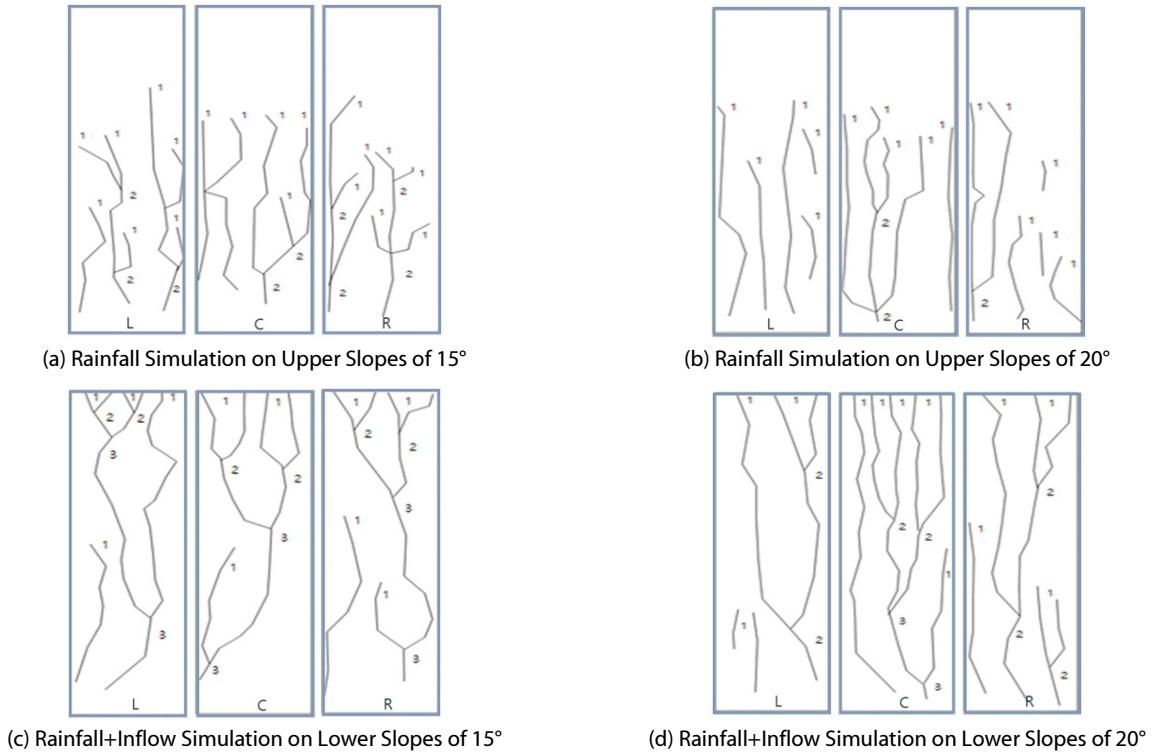


Fig. 5. Distribution Maps of Rill Orders by Rainfall and Inflow Simulation on Upper and Lower Slopes

Table 2. Rill Order, Rill Length, and Rill Density for Plots on Upper and Lower Slopes of 15° and 20°

Slope degree (°)	Location of plot	Plot name	Rill order			Rill length (m)	Rill density (m ⁻¹)
			1st	2nd	3rd		
15	Upper slope (Inflow ×)	L	7	4		8.1	1.23
		C	5	2		11.5	1.74
		R	7	4		10.1	1.53
	Lower slope (Inflow ○)	L	6	2	2	12.2	1.85
		C	5	2	2	10.6	1.61
		R	6	2	2	10.9	1.65
20	Upper slope (Inflow ×)	L	5			14.5	2.20
		C	5	2		13.4	2.03
		R	6	1		11.9	1.80
	Lower slope (Inflow ○)	L	5	2		11.9	1.80
		C	6	2	2	17.7	2.68
		R	6	3		14.9	2.26

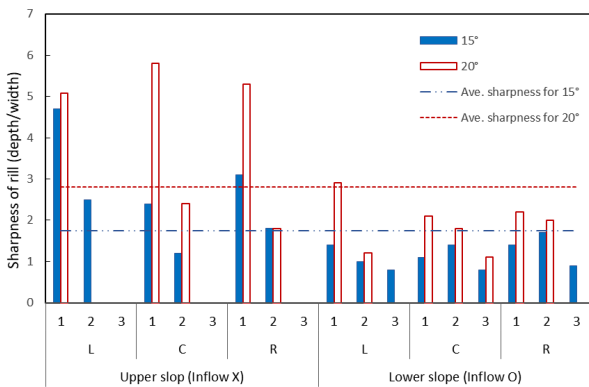


Fig. 6. Distribution of Rill Sharpness according to Rill Order of Each Plot under Different Inflow Condition and Slope Steepness

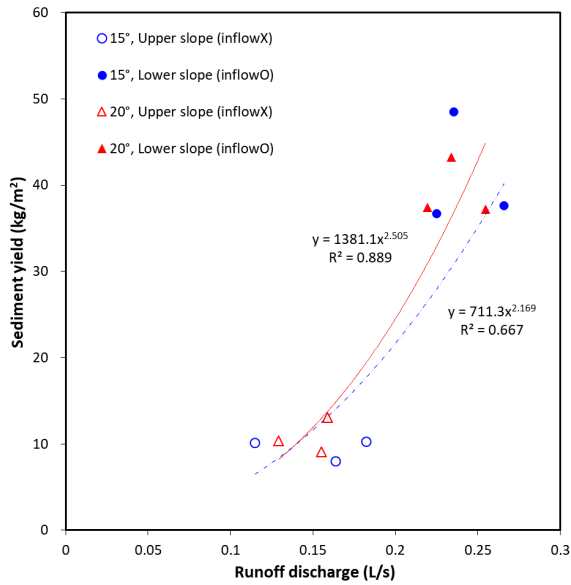
3.2.3 세류의 예도

세류의 형태학적 지표인 예도의 특성을 파악하고자 각 차수의 분기별 세류예도를 분석하였다. 앞서 언급한 바와 같이 강우와 유입수 증가에 의해 세류 단면의 폭과 깊이가 확장한다. 확장한 세류의 단면변화 특성을 파악하기 위해 예도 분석이 필요하다. Fig. 6은 유입수 유무조건과 각 플롯에서 발달한 세류의 차수별 경사에 따른 예도 분포를 보여주는 자료이다. 유입수가 없는 상사면에서 절개되는 1차 세류들이 다른 차수 세류들에 비해 2배 이상의 높은 예도를 보였다. 즉 세류발달 초기는 집중된 지표흐름이 하상을 절개하면서 깊게 파이는 V자형 세류를 만들기 때문이다. 유입수가 증가함에 따라 하사면의 세류예도는 상대적으로 작아지고 U자형 세류를 형성했다. 즉 세류가 하류로 발달함에 따라 측벽의 세굴과 붕괴에 의해 폭의 확장이 이루어짐을 의미한다. 3차 세류로 갈수록 예도는 더욱 감소하여 1이하가 되어 세류의 깊이에 비해 상대적으로 폭이 넓어졌다. 이는 상류 세류로부터 이송된 고농도 토사가 넓은 폭의 세류지형에서 퇴적이 진행되었기 때문이다. 예도의 변화는 특히 경사에 민감하게 반응하였다. 경사 15°에서 평균 1.75의 예도를 보인 반면, 20°에서 평균 2.81로 예도는 1.6배 증가하였다. 세류는 경사가 급할수록 측벽보다 하상을 더욱 침식시킨다는 것을 알 수 있다. 이는 급경사에 의해 지표유출수 및 토양체의 포텐셜 에너지가 커지고, 지표흐름의 유속 증가와 토사의 자체 운동 능력이 커지기 때문이다.

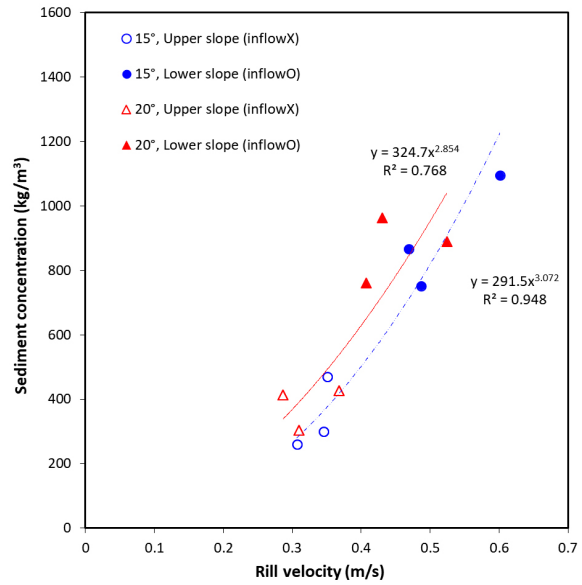
3.3 세류 토사유출

모의 강우만 있었던 상사면의 지표유출량은 0.151 ± 0.024 L/s 이었고, 모의 강우와 유입수가 함께 공급된 하사면의 지표유출량은 0.239 ± 0.018 L/s로 상사면보다 1.59배 컸다. 상사면에서 발생한 지표흐름의 유출계수는 평균 0.73인 반면, 하사면의 경우는 평균 0.62의 유출계수를 보였다. 합리식에 의한 유입수의 유량 산정

시 동일 토양에 대한 세류간침식의 유출계수 0.80 (Shin et al., 2022)을 고려하였기 때문에 실제 상사면에서 발생한 유출량보다 많은 유입수를 공급했음에도 불구하고, 하사면의 유출계수는 상사면보다 12.3 %로 크게 감소함을 알 수 있다. 이는 하류로 갈수록 집중흐름의 강도증가에 의해 사면이 활발하게 절개되고, 세류 확장으로 측벽과 하상이 지속적으로 침식됨에 따라 새롭게 노출된 심토(subsoil)에서의 침투능이 증가하고, 미세지형의 변화에 의한 지표하흐름의 변화가 유출계수를 감소시킨 것으로 추측된다. 모의 강우와 유입수의 공급수량은 경사 20°에서 평균 0.384 L/s로 15°의 평균 0.381 L/s보다 조금 컸다. 그러나 유출계수는 경사 20°에서 평균 0.61로 경사 15°의 0.63보다 약간 감소하였다. 이 또한 경사가 증가함에 따라 세류의 총길이와 밀도가 증가하기 때문에 지표유출수의 감소 원인으로 파악된다. 이러한 추측의 근거는 세류절개는 세류채널의 침투 증가로 인해 유출수는 감소시키지만, 토사유출량은 증가시킨다는 Slattery and Bryan(1992)의 연구결과에서도 찾아볼 수 있다. 지표유출수에 의해 세류간 및 세류에서 발생한 토사유출량을 Fig. 7(a)처럼 나타냈다. 지표유출수가 없는 경우 토사유출이 발생하지 않는다는 기본적인 사실을 전제로 지표유량과 토사유출량의 관계에 대한 최적의 멱함수를 제시한 것이다. 경사 20°에 대한 멱함수의 상수와 지수 그리고 결정계수는 경사 15°에 대한 것보다 모두 컸다. 즉 급경사면의 경사 증가는 지표유출수의 감소에도 불구하고 세류에 의한 토사유출량을 증가시켰다. 세류의 절개부인 상사면의 평균 토사유출량은 101.6 ± 17.0 t/ha인 것에 비해 세류의 확장부인 하사면은 401.1 ± 47.7 t/ha의 토사유출을 보여 약 4배가 증가하였다. 최대 토사유출량은 경사 20°가 아닌 경사 15°의 C 플롯에서 발생하였다. 경사 15°의 C 플롯은 강우량과 유입수량 모두 최대가 아니며, 지표유출량도 최대가 아니었다. 그러나 염료 추적에 의한 유속측정 결과 이 플롯의 세류에서 최대 유속이 발생한 것으로 확인되었다. 세류차수의 분포를 나타낸 Fig. 5(b)를 자세히 살펴보면, 세류의 길이가 긴 한 개의 3차 세류가 플롯 하단까지 연결되는 것은 C 플롯에서만 보인다. 이러한 하나의 세류로 집중되는 지표유출수는 기여면적이 커짐에 따라 유량과 유속이 상대적으로 증가했을 것이다. 세류의 유속과 토사농도와의 관계를 나타낸 Fig. 7(b)을 살펴보면, 그림에서 가장 큰 유속 0.6 m/s를 보이는 것이 바로 경사 15°의 C 플롯이다. 이는 하사면 조건의 세류 평균최대유속보다 23.6 % 증가한 이 최대유속이 유사이송능력을 증가시켰음을 알 수 있다. 상사면에 세류의 평균최대유속은 0.328 ± 0.031 m/s 이고, 하사면은 0.486 ± 0.070 m/s로 하사면에서 1.5배 증가했다. 토사농도도 사면 경사와 함께 증가했으며, 이는 Chen et al.(2016)의 급경사 유입수 모의실험과도 동일한 결과이다. 지표유량과 토사량의 관계는 경사 20°에서 높은 결정계수를 보였지만, 세류유속과 토사농도의 관계에



(a) Relationship between Sediment Yield and Runoff Discharge



(b) Relationship between Sediment Concentration and Rill Velocity

Fig. 7. Relationships between Sediment Yield and Runoff Discharge and Sediment Concentration and Rill Velocity

서는 경사 15°에서 더 높은 결정계수를 보였다. 세류침식은 경사가 급할수록 전반적으로 증가하는 것은 사실이지만, 세류발달 과정에서 국부적인 세류 합류와 확장에 의해 집중되는 흐름의 수리학적 특성에도 영향을 받는다는 것을 의미한다. 경사가 급할수록 지표유출수와 토양체의 포텐셜에너지가 증가하여, 일반적으로 토사유출량도 증가하지만, 이것은 일반적인 경향이지 절대적인 현상은 아니라는 것이다. 모든 실험에서 토양입경분포, 강우분포, 유입수공급, 지표면조도 및 미세지형 등의 조건들이 비균일적 그리고 비균질적인 특성을 가지고 있기 때문에 세류는 무작위적 절개와 확장에 의해 무질서하게 진화한다. 따라서 극한강우와 집중되는 지표유출수의 상호작용에 의해 발달하는 세류의 사면절개, 두부침식, 세류하상침식 및 측벽붕괴 등은 국부적인 미세지형 변화를 지속적으로 초래하고, 무질서하게 변화는 세류의 수리학적 그리고 수력학적 특성은 유사이송능력과 토사유출율을 결정하는 직접적인 요인으로 작용하는 것이다.

4. 결론

급경사면에서 세류발달에 의한 미세지형의 특성을 파악하고자 본 연구는 강우와 유입수 공급의 토양침식 실험을 수행하였다. 강우 규모가 다른 세 개의 플롯을 대상으로 상사면과 하사면 조건에 따른 유입수 유무와 급경사 조건의 15°와 20° 경사에 대한 총 24개의 세류발달 토양침식 결과를 얻었다. 세류의 미세지형에 대한 특성 인지들을 분석하기 위해 세류의 단면과 체적, 세류밀도, 세류에

도를 산정하여 평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 유입수가 없는 상사면 조건에서 모의 강우에 의해 동시다발적으로 절개된 세류들의 두부침식은 빠른 속도로 상류로 이동하였고, 무작위하게 발달된 세류들이 연결되면서 깊고 넓게 확장하였고, 유입수가 있는 하사면 조건에서는 세류침식이 상부부터 절개되어 하부까지 빠른 속도로 이어져 세류가 더 크고 넓게 확대되었다.
- (2) 하류방향으로 세류가 발달함에 따라 점차적으로 횡단면적은 증가하였고, 세류체적은 토사체적의 약 78 % 차지하여, 세류간보다 세류에 의한 토사유출량 기여도가 컸다.
- (3) 세류의 차수는 1차 세류들이 서로 수렴한 후 세류망 형성 단계로 진화하면서, 최대 3차 세류까지 발달하였으며, 경사의 증가는 1차와 2차 세류가 선형적으로 길게 발달함에 따라 차수의 증가를 둔화시켰다.
- (4) 유입수 공급이 있는 하사면에 지표유출량이 크게 증가함에 따라 그리고 경사가 증가함에 따라 세류밀도도 증가하였다.
- (5) 세류발달 초기는 지표흐름의 집중으로 하상을 깊게 절개하면서 형성된 V자형의 1차 세류들로 예도가 높았지만, 차수가 증가함에 따라 U자형의 세류발달로 예도는 감소하였고, 경사가 15°에서 20°로 증가함에 따라 세류예도가 1.6배 증가하였다.
- (6) 활발한 세류발달이 침투량을 증가시키기에 따라 하사면은 상사면보다 유출계수가 12.3% 감소했지만, 토사유출량은 약 4배 크게 증가하였다.

- (7) 세류침식에 의한 토사유출량은 강우, 유입수, 경사, 토양 인자들에 영향을 받지만, 국부적인 세류의 합류와 확장에 의해 집중되는 지표흐름의 수리학적 특성에 더욱 영향을 받았다.
- (8) 향후 세류의 미세지형을 정밀하게 계측하기 위해 LiDAR 스캐너 장비와 같은 고정밀 3D 영상을 활용한 세류 발달 및 미세지형 변화에 대한 진보적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부(No. 2019R1A2C1009285)와 교육부(2021R1A6A1A03044326)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업으로 이에 감사를 표합니다.

References

- Berger, C., Schulze, M., Rieke-Zapp, D. and Schlunegger, F. (2010). "Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 35, No. 12, pp. 1456-1467.
- Bewket, W. and Sterk, G. (2003). "Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga watershed, Ethiopia." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 97, No. 1-3, pp. 81-93.
- Bingner, R. L., Wells, R. R., Momm, H. G., Rigby, J. R. and Theurer, F. D. (2016). "Ephemeral gully channel width and erosion simulation technology." *Natural Hazards*, Vol. 80, No. 3, pp. 1949-1966.
- Boon, W. and Savat, J. (1981). "A nomogram for the prediction of rill erosion." In Morgan, R., editor, *Soil conservation: Problems and prospects*, Wiley, Chichester, pp. 303-319.
- Brunton, D. A. and Bryan, R. B. (2000). "Rill network development and sediment budgets." *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, Vol. 25, No. 7, pp. 783-800.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Bourennane, H. and Souchère, V. (2002). "Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France." *Soil and Tillage Research*, Vol. 67, No. 1, pp. 99-108.
- Chen, X., Zhao, Y., Mi, H. and Mo, B. (2016). "Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method." *Catena*, Vol. 136, pp. 135-140.
- Gomez, J. A., Darboux, F. and Nearing, M. A. (2003). "Development and evolution of rill networks under simulated rainfall." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 6, 1148.
- Govindaraju, R. S. and Kavvas, M. L. (1994). "A spectral approach for analyzing the rill structure over hillslopes. Part I. Development of stochastic theory." *Journal of Hydrology*, Vol. 158, No. 3-4, pp. 333-347.
- He, J. J., Sun, L. Y., Gong, H. L. and Cai, Q. G. (2017). "Laboratory studies on the influence of rainfall pattern on rill erosion and its runoff and sediment characteristics." *Land Degradation & Development*, Vol. 28, No. 5, pp. 1615-1625.
- Horton, R. E. (1945). "Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology." *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 56, No. 3, pp. 275-370.
- Hudson, G. D. (1936). "Unit area method of land classification." *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 26, No. 2, pp. 99-112.
- Hur, S. O., Jung, K. H., Ha, S. K., Kwak, H. K. and Kim, J. G. (2005). "Mathematical description of soil loss by runoff at inclined upland of maize cultivation." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 38, No. 2, pp. 66-71 (in Korean).
- Kim, C. G., Shin, K. I., Joo, K. Y., Lee, K. S., Shin, S. S. and Chung, Y. S. (2008). "Effects of soil conservation measures in a partially vegetated area after forest fires." *Science of the Total Environment*, Vol. 399, No. 1-3, pp. 158-164.
- Kim, S. S., Kim, T. H., Lee, S. M., Park, D. S., Zhu, Y. Z. and Hur, J. H. (2005). "Mobility of pesticides in different slopes and soil collected from Gangwon alpine sloped-land under simulated rainfall conditions." *The Korean Journal of Pesticide Science*, Vol. 9, No. 4, pp. 316-329 (in Korean).
- Loch, R. J. and Donnollan, T. E. (1983). "field rainfall simulator studies on two clay soils of the darling downs, Queensland. I. the effect of plot length and tillage orientation on erosion processes and runoff and erosion rates." *Soil Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 33-46.
- Mancilla, G. A., Chen, S. and McCool, D. K. (2005). "Rill density prediction and flow velocity distributions on agricultural areas in the pacific northwest." *Soil and Tillage Research*, Vol. 84, No. 1, pp. 54-66.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A. and Jakeman, A. J. (2003). "A review of erosion and sediment transport models." *Environmental Modelling & Software*, Vol. 18, No. 8-9, pp. 761-799.
- Meyer, L. D., Foster, G. R. and Romkens, M. J. M. (1975). "Source of soil eroded by water from upland slopes." *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, Oxford, Mississippi, pp. 177-189.
- Moss, A., Green, P. and Hutka, J. (1982). "Small channels: Their formation, nature and significance." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 7, pp. 401-415.
- Murphy, B. W. and Flewin, T. C. (1993). "Rill erosion on a structurally degraded sandy loam surface soil." *Soil Research*, Vol. 31, No. 4, pp. 419-436.
- Nachtergaele, J., Poesen, J., Sidorchuk, A. and Torri, D. (2002). "Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels." *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 10, pp. 1935-1953.
- Nachtergaele, J., Poesen, J., Steegen, A., Takken, I., Beuselinck, L., Vandekerckhove, L. and Govers, G. (2001). "The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils." *Geomorphology*, Vol. 40, No. 3-4, pp. 237-252.
- Nam, M. J., Park, S. D., Lee, S. K. and Shin, S. S. (2015). "Interaction between raindrops splash and sheet flow in interrill erosion of

- steep hillslopes.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 48, No. 7, pp. 595-604 (in Korean).
- Park, S. D., Lee, K. S. and Shin, S. S. (2012). “Statistical soil erosion model for burnt mountain areas in Korea - RUSLE approach.” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 17, No. 2, pp. 292-304.
- Park, S. D., Shin, S. S. and Lee, K. S. (2005). “Sensitivity of runoff and soil erosion in the burnt mountains.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 1, pp. 59-71 (in Korean).
- Park, S. D., Shin, S. S., Kim, S. J. and Choi, B. K. (2013). “Effects of surface compaction treatment on soil loss from disturbed bare slopes under simulated rainfalls.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 5, pp. 559-568 (in Korean).
- Poesen, J., de Luna, E., Franca, A., Nachtergaele, J. and Govers, G. (1999). “Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content.” *Catena*, Vol. 36, No. 4, pp. 315-329.
- Qin, C., Zheng, F., Xu, X., Wu, H. and Shen, H. (2017). “A laboratory study on rill network development and morphological characteristics on loessial hillslope.” *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 18, No. 4, pp. 1679-1690.
- Raff, D. A., Ramirez, J. A. and Smith, J. L. (2004). “Hillslope drainage development with time: A physical experiment.” *Geomorphology*, Vol. 62, No. 3-4, pp. 169-180.
- Robichaud, P. R., Wagenbrenner, J. W. and Brown, R. E. (2010). “Rill erosion in natural and disturbed forests: 1. Measurements.” *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 10.
- Shen, H., Zheng, F., Wen, L., Lu, J. and Jiang, Y. (2015). “An experimental study of rill erosion and morphology.” *Geomorphology*, Vol. 231, pp. 193-201.
- Shin, S. S., Park, S. D. and Hwang, Y. H. (2022). “Erodibility evaluation of sandy soils for sheet erosion on steep slopes.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 55, No. 4, pp. 291-300 (in Korean).
- Shin, S. S., Park, S. D. and Lee, K. S. (2013). “Sediment and hydrological response to vegetation recovery following wildfire on hillslopes and the hollow of a small watershed.” *Journal of Hydrology*, Vol. 499, pp. 154-166.
- Shin, S. S., Park, S. D., Cho, J. W. and Lee, K. S. (2008). “Effects of vegetation recovery for surface runoff and soil erosion in burned mountains, Yangyang.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No. 4B, pp. 393-403 (in Korean).
- Shin, S. S., Park, S. D., Pierson, F. B. and Williams, C. J. (2019). “Evaluation of physical erosivity factor for interrill erosion on steep vegetated hillslopes.” *Journal of Hydrology*, Vol. 571, pp. 559-572.
- Slattery, M. and Bryan, R. (1992). “Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: A laboratory experiment.” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 17, pp. 127-146.
- Strahler, A. N. (1952). “Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography.” *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 63, No. 11, pp. 1117-1142.
- Sun, L., Fang, H., Qi, D., Li, J. and Cai, Q. (2013). “A review on rill erosion process and its influencing factors.” *Chinese Geographical Science*, Vol. 23, No. 4, pp. 389-402.
- Tian, P., Pan, C., Xu, X., Wu, T., Yang, T. and Zhang, L. (2020). “A field investigation on rill development and flow hydrodynamics under different upslope inflow and slope gradient conditions.” *Hydrology Research*, Vol. 51, No. 5, pp. 1201-1220.
- Wang, X. and Fang, D. (1998). “Study on the slope pattern of the slope erosion.” *Sichuan Hydraulic Electrogenation*, Vol. 17, No. 2, pp. 83-86.
- Wirtz, S., Seeger, M. and Ries, J. B. (2012). “Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes.” *Catena*, Vol. 91, pp. 21-34.
- Yao, C., Lei, T., Elliot, W. J., McCool, D. K., Zhao, J. and Chen, S. (2008). “Critical conditions for rill initiation.” *Transactions of the ASABE*, Vol. 51, No. 1, pp. 107-114.
- Zhang, P., Tang, H., Yao, W., Zhang, N. and Xizhi, L. V. (2016). “Experimental investigation of morphological characteristics of rill evolution on loess slope.” *Catena*, Vol. 137, pp. 536-544.