

강우 공간분포가 토사유출에 미치는 영향의 실험적 고찰

신상훈* · 김 원** · 이승엽*** · 백경록****

Shin, Sanghoon*, Kim, Won**, Lee, Seungyub***, Paik, Kyungrock****

Influence of Spatial Rainfall Distribution on Sediment Yield: An Experimental Study

ABSTRACT

We investigate the influence of spatial rainfall distribution on hillslope soil erosion through laboratory experiments. Two distinct spatial distributions are examined in this study, i.e., rainfall concentrated on central area versus upper area of hillslope. During the entire period of 8 hours for each experiment, direct runoff, subsurface flow, and sediment yield are measured at high temporal resolution (10 minutes). Compared to the case that rainfall concentrated on central area, upstream concentrated rainfall results in lower peak of the sediment yield curve while greater cumulative sediment yield. Cumulative sediment yield increases over time linearly but its growth rate shows a sudden decrease at around 2 hours. This should be taken into consideration when temporal variability of sediment yield is estimated from observed total amount, and demonstrates the necessity of measuring sediment yield at high temporal resolution.

Key words : Soil erosion experiment, Rainfall generator, Soil loss, USLE

초록

본 연구에서는 강우의 공간분포에 따른 토사유출의 특성을 토조 실험을 통해 탐구하였다. 강우의 공간분포는 강우 집중위치를 사면의 중앙부와 상류부로 각각 설정함으로써 조정하였다. 토사유출의 시간적 변동성을 충분히 포착하기 위해 장시간(8 시간)의 실험시간 동안 높은 시간해상도(10 분)로 직접유출량, 지하수유출량, 토사유출량을 측정하였다. 그 결과, 강우를 토조의 상류부에 위치시킬수록 토사유출량곡선의 첨두값은 감소하고 누적토사유출량은 증가하였다. 누적토사유출량은 시간에 따라 선형적으로 증가하였으나, 그 증가율이 2 시간을 기준으로 급격히 감소하였다. 이러한 점은 현재 총량 위주로 기록되어있는 토사유출 실험자료를 사용함에 있어 고려해야 할 사항이라고 결론지을 수 있다. 본 연구 결과는 또한, 향후의 토사유출량 실험은 높은 시간해상도로 측정될 필요가 있음을 시사한다.

검색어 : 토사유출실험, 강우발생기, 토양유실, 범용토양유실공식

1. 서론

모든 자연유역과 대부분 도시유역에서 강우의 유출과정은 토사의 유출을 필연적으로 동반한다. 토사의 침식과 퇴적은 다양한 시각에서 문제로 인식되어왔다. 먼저, 토사의 침식은 인근 구조물의 안정성을 저해하는 위협요소가 될 수 있으며, 퇴적은 각종 수리시설의 효율을 떨어뜨리는 방해요소가 될 수 있다. 또한, 토사는 영양물질을 포함하는 것이 보통이므로 토사의 침식과 퇴적은 농업 및 환경적 측면에서도 중요한 문제이다. 유기영양물질을 함유한 토양은 농업을 지속하는 데에 중요한 근간이기에, 토양의 유출은 자원의 손실로 인식될 수

* 정희원 · 고려대학교 방재과학기술연구소 연구원 (현재: 고려대학교 방재과학기술연구소 연구원) (Korea University · mt0127a@naver.com)

** 고려대학교 건축사회환경공학과 석사 (Korea University · kimw31@naver.com)

*** 고려대학교 건축사회환경공학과 석사 (현재: 고려대학교 방재과학기술연구소 연구원) (Korea University · syl5894@naver.com)

**** 정희원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (Corresponding Author · Korea University · paik@korea.ac.kr)

Received June 16, 2014/ revised July 16, 2014/ accepted December 23, 2014

있다. 한편, 환경적인 측면에서는 유기물이 포함된 토사의 유출은 자연환경에 장·단기적 교란을 일으킬 것으로 인식된다. 이와 같이 토사의 침식과 퇴적은 다양한 문제들을 일으킬 수 있으므로 이를 예측하고 관리해야 하는 필요성은 오래전부터 있었다.

토사유출을 예측하기 위해 흔히 개념적 수치모의모형을 이용한다. 지금까지 USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier and Smith, 1965), MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) (Williams, 1975), RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al., 1997), WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Nearing et al., 1989), geoWEPP (Renschler, 2003), LISEM (Limburg Soil Erosion Model) (De Roo et al., 1996), SEMMA (Soil Erosion Model for Mountain Areas) (Park et al., 2005) 등 다양한 모형이 개발되었다. 이들 모형은 우리에게 유용한 정보를 제공해주지만, 모의된 값이 과소 또는 과대 산정되는 경우가 많다는 문제 또한 존재한다. 이와 같은 모형의 불확실성은 토사유출의 발생 및 전달과정이 아직 확실히 밝혀지지 않은 것에서 기인한다. 이러한 모형의 불확실성을 개선하기 위해서는 실측을 통한 고품질의 자료를 확보하여 모형을 검증하는 것이 필수적이다.

실측을 통해 토사유출을 연구하는 방법은 크게 현장조사와 실험의 범주로 나눌 수 있다. 현장조사는 야외의 자연사면을 대상으로 하여 토사유출에 관여하는 인자들을 인위개변하지 않은 조건에서 토사유출을 관찰하는 방법이다. 현장조사는 토사유출이 일어나는 실제 현장 그대로를 탐구하므로 측정된 자료는 해당 지역의 토사유출 실태를 대변한다는 장점이 있지만, 변인이 통제되지 않으므로 여러 인자 사이의 역학관계를 규명하는 것은 어렵다. 반면, 실험을 실시하면, 토질, 식생, 경사, 강우 등의 관련인자 중 한 가지 이상의 인자를 조작하면서 토사유출을 관찰할 수 있다. 다시 말해, 인공적으로 조성한 실내외의 실험구역이나 인공강우를 사용함으로써 각 인자의 영향을 명확히 평가할 수 있는 장점이 있다.

토사유출에 영향을 미치는 인자 각각의 영향을 정량적으로 평가하기 위해 국내외에서 지금까지 많은 실험이 진행되었다. 지금까지 연구된 인자는 사면경사(e.g., Marston and Dolan, 1999), 피복상태(e.g., Römkens et al., 2002), 다짐여부(e.g., Keller and Arvidsson, 2004), 산불발생여부(e.g., Johansen et al., 2001) 등으로 다양하다. 여러 인자 중에서도 특히 강우는 토사유출에 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다. 강우강도에 의한 영향을 평가하기 위해 지금까지 진행된 실험 연구는 크게 토사유출의 총량을 살펴본 연구(e.g., Shin et al., 2009; Lee et al., 2012; Park et al., 2013)와 토사유출의 시간분포를 다룬 연구(e.g., Durnford and King, 1993; Zech et al., 2008; Dong et al., 2012)로 분류할 수 있다. 상기한 총량 위주의 실험들은 강우강도와 사면경사의 변화와 더불어 피복여부(Shin et al., 2009), 토양종류(Lee et al., 2012), 다짐여부(Park

et al., 2013)가 토사유출에 미치는 영향을 연구하였다. 토사유출의 시간분포를 관찰한 실험들을 살펴보면, Dong et al. (2012)은 사면경사, 사면길이, 단위중량, 토사입경분포가 다른 6개 소의 실외시험장에서 인공강우의 강우강도변화에 따른 토사유출을 50분 이내의 시간 동안 2분 간격으로 관찰하였다. Durnford and King (1993)은 사면길이가 서로 다른 3개의 토조에서, 강우강도의 변화에 따른 토사유출을 직접유출발생 후 5, 10, 20, 40, 60분이 지나는 시점에서 측정하였다. Zech et al. (2008)은 실트펜스(silt fence)의 유무에 따른 토사유출의 시간변화를 30분 동안 2분 간격으로 관찰하였다.

한편, 강우강도 못지않게 토사유출에 큰 영향을 줄 수 있는 인자가 강우의 공간분포이다. 실제 강우의 공간분포는 비균질한 것이 보통이다(e.g., National Research Council, 1998; Krajewski et al., 2003). 강우의 공간분포는 실제 토사유출에 매우 큰 영향을 준다고 생각된다. 그러나 지금까지 강우의 공간분포에 따른 토사유출의 시간적 특성의 변화에 대해서는 연구된 것이 많지 않다. 이에 따라, 본 연구에서는 강우의 공간분포에 따른 토사유출의 시간적 변화를 파악하기 위한 실내토사유출실험을 수행하였다. 강우가 사면의 상류부에 집중된 경우와 중앙부에 집중된 경우, 토사유출발생의 시간분포에 어떠한 차이를 가져오는지 고찰하고자 하였다. 이를 위해 여러 가지 변인(강우강도, 토사입경분포, 다짐도 등)의 통제가 용이한 소규모 토사유출 실험장비를 이용하였다. 자세한 내용은 다음 절에서 설명한다.

2. 실험 장비 및 실험 설계

본 연구에서 사용한 실험 장비는 크게 강우발생기와 토조로 이루어져 있다(Fig. 1). 토조의 단면적은 2 m^2 ($2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$),

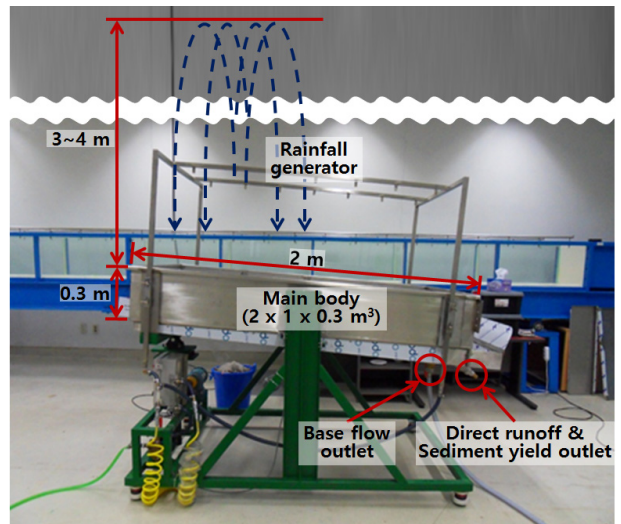


Fig. 1. Hillslope Erosion Experiment Equipment. Artificial Rainfall is Schematically Illustrated with Dotted Blue Lines

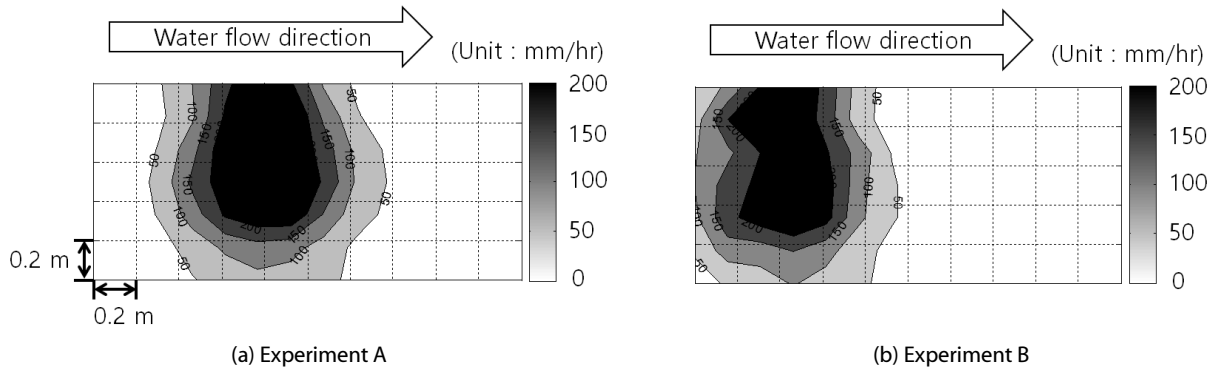


Fig. 2. Spatial Distribution of Rainfall

높이는 0.3 m이다. 강우발생기는 토조의 긴 면을 따라 두 개 열로 정렬되어있는, 개폐가 가능한 총 14 개의 노즐을 통해 물을 분사한다. 압력에 의해 분출된 물이 최대한 공간적으로 균등하게 뿌러지기 위해서는 강우발생기에서 토조표면까지의 거리를 충분히 확보하는 것이 중요하다. 충분한 거리를 확보하는 것은 강우입자가 종말속도에 도달하는 것과 강우입자의 낙하방향이 중력방향과 일치하는 것을 도와주는 효과도 있다. 본 실험에서는 제한된 장비규격 내에서 강우낙하거리를 최대로 하기 위해 분사노즐이 하늘로 향하게 하여 물이 일정거리동안 수직으로 상승한 뒤 자유낙하하도록 유도하였다. 그 결과 자유낙하거리로 3~4 m를 확보할 수 있었다.

본 실험장비는 강우의 공간분포를 자유롭게 결정할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서는 중류집중형(실험A)과 상류집중형(실험B)의 두 가지 분포를 사용했다(Fig. 2). 두 강우분포형 모두 최대강우강도는 200 mm/hr정도이며, 토조 전역에 걸친 평균강우강도는 72 mm/hr로 설정하였다. 또한 각 강우분포형은 실험시간 동안 일정하게 유지되었다(정상상태). 중류집중형은 상류부분에 강우가 내리지 않음으로 상류부는 침식이 거의 일어나지 않는다. 즉, 유효한 사면의 길이는 중류집중형 강우를 사용하는 경우가 상류집중형 강우의 경우보다 짧은 셈이다. 비가 내리지 않는 하류부의 사면길이를 기준으로 보면, 실험A가 실험B의 대략 67% 정도가 된다.

강우발생기에서 뿌려진 강우의 일부는 지표면을 침투하여 지하수로 흘러 장비 하단의 배수구로 배출되고, 나머지는 직접유출의 형태로 토사와 함께 배출된다. 실험의 목표는 강우의 공간분포에 따른 영향을 이해하는 것이므로, 두 실험 A, B에서 강우 외의 다른 인자는 동일한 조건으로 통제하였다. 사용한 토사는 비중이 2.58~2.62인 주물 주강용 모래로 대부분의 입자가 0.28~0.32 mm 범위에 들 만큼 균질하여 입자의 비균질성이 토사유출에 미칠 수 있는 영향을 통제하였다(Fig. 3). 두 실험의 초기사면은 모두 기울기가 0.05이며, 토사의 총 중량이 동일하고 다짐을 하지 않았기에, 두 실험에 쓰인 토사의 부피가 같고 공극률도 공간적으로 균일하다.

선행연구(Durnford and King, 1993; Zech et al., 2008; Dong et al., 2012)에서는 입경분포가 다양하고 실트 및 점토성분이 많이 포함된 토사를 사용하여 실험시간이 1시간 이내였으나, 본 연구에서는 균일한 모래를 사용하였으므로 실험시간을 선행연구들보다 긴 8시간으로 설정하였다. 실험A는 초기지형으로부터 우선 4시간 동안 진행됐다(실험A1으로 부름). 이후, 강우를 멈추고 토조의 지하수를 자연 배수시키는 3일 동안의 휴지기를 가진 후에 실험을 재개하여 4시간 동안 진행되었다(실험A2로 부름). 즉, 실험 A1과 A2는 각각 4 시간 동안 동일한 조건에서 수행된 반복실험이 아닌, 총 8시간 동안 수행된 실험A의 전반부와 후반부이다. 실험B도 실험A와 마찬가지로 B1, B2로 나누어 진행됐으며, Fig. 2에 나타난 강우의 공간분포만 다를 뿐, 다른 내용은 실험A와 동일하게 진행되었다(Table 1). 시간에 따른 토사유출의 변화를 분명하게

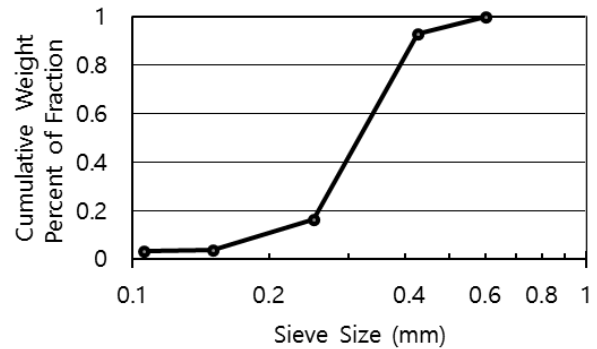


Fig. 3. Particle Size Distribution

Table 1. Design of Experiments

Experiments		Rainfall distribution	Initial terrain condition
A	A1	Concentrated on the central area	Smoothly leveled
	A2		Final terrain of the experiment A1
B	B1	Concentrated on the upstream area	Smoothly leveled
	B2		Final terrain of the experiment B1

포착하기 위해서 유량 및 토사유출량의 측정은 10분이라는 짧은 시간 간격으로 이루어졌다. 토사유출량은 10분 동안 유출된 모든 토사의 건조중량으로 측정했다. 직접유출량과 지하수유출량은 매 10분 동안 유출된 물의 무게를 측정된 뒤 용적으로 환산하고, 이렇게 구한 시간 당 용적(m^3/min)을 사면의 단위면적에 대한 시간 당 깊이(mm/hr)로 나타냈다(Fig. 4)

3. 실험 결과

직접유출(direct runoff)은 실험 시작 후 서서히 증가하여, 실험 A1은 20분 이후부터, 실험A2, B1, B2은 10분 이후부터 평균 67.3 mm/hr 정도로 유지된다(Fig. 4). 지하수유출량(subsurface flow)도 실험 시작 후 증가하여 실험B1은 20분부터, 실험A1, A2, B2은 30분부터 평균 4.5 mm/hr 부근에서 진동한다. 모든 실험에서 30분 이후의 총 유출량은 평균 71.8 mm/hr이며, 이 값은 본 실험에서 사용한 강우강도인 72 mm/hr와 거의 같다. 이러한 관측치는 실험 도중 기타손실 없이 강우의 질량보존이 잘 이루어진 것을 의미한다. 관측된 유출량 자료로부터 모든 실험에서 20~30분 이후에는 모래가 충분히 포화하였음을 알 수 있는데, 이러한 현상은 사면의 깊이와 넓이가 작으며 거의 균일한 입경의 모래(Fig. 3)로 구성되다가 연속적이고 일정한 강우가 가해졌기에 발생한 것이다. 즉, 이와 같은 현상은 이상적인 실험조건 아래에서 발생한 것이며, 일반적인 유역에서는 강우, 토양, 지형, 식생조건 등이 훨씬 복잡하기 때문에 이렇게 단순한 거동을 보이지는 않을 것이다.

실험A1의 토사유출량(sediment yield)은 실험 시작 후 1 g/min/min의 기울기로 증가하여, 30~40분 구간에서는 침투값 34 g/min에 이른다(Fig. 5). 이후 완만한 감소세를 가지다가 90분부터 130분까지 0.54 g/min/min의 기울기로 감소한다. 남은 기간인 130분부터 240분까지는 7.75 g/min 내외에서 진동한다. 실험A2의 토사유출량은 진동하면서 대체로 실험A1의 후반부의 추세를 따르며 점차 감소한다. 즉, 실험 시작 후 20분까지는 토사유출량이 거의 없다가(1 g/min), 30분경에 증가하여 80분까지는 A1 실험의 후반부와 유사한 4~13 g/min 구간에서 진동한다. 80분 이후에는 소폭 감소하여 5 g/min 내외에서 진동한다.

실험B1의 토사유출량은 실험 시작 후 0.83 g/min/min의 기울기로 증가하여, 30~40분 구간에서 27 g/min에 이른다. 50~60분과 70~80분 구간에서 침투값 28 g/min을 기록한 뒤에, 240분 까지 19~28 g/min의 범위에서 진동하며 완만히 감소하는 추세를 따른다. 실험A2가 실험A1을 이은 것으로 해석할 수 있듯이, 실험B2는 실험B1의 연속선상에 있다고 할 수 있다. 29 g/min을 기록한 50~60분 구간 이후부터는 실험이 종료되는 240분에 기록한 10 g/min에 이르기까지 완만한 감소세가 이어진다.

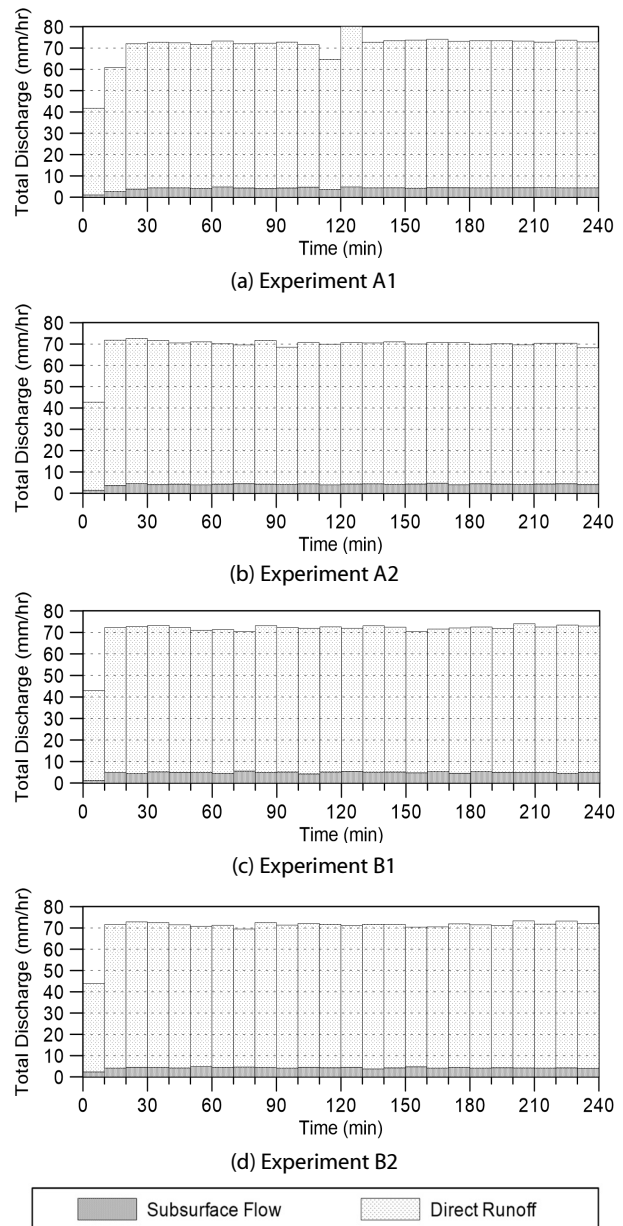


Fig. 4. Variation of Direct Runoff and Subsurface Flow over Time

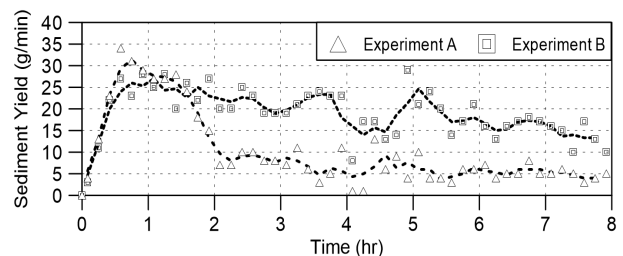


Fig. 5. Comparison of Sediment Yield Flux Between Two Experiments. Three Points Moving Averages are Plotted in Dotted Lines for Each Experiment

4. 토론

4.1 강우의 집중위치에 따른 토사유출 침투값과 토사유출 총량의 변화

강우의 집중위치만 다른 두 실험 A, B는 토사유출량에서 상반된 특징을 보인다. 중앙부에 강우가 집중된 실험A는 초기의 단일침투값 이후 확연한 감소세를 보인 다음, 이후에 일정한 값이 유지된다. 반면, 상류부에 강우가 집중된 실험B는 침투값 이후에 진동하며 완만하게 감소하는 추세를 보인다(Fig. 5). 강우집중부를 상류로 옮기는 것은 강우가 직접 내리지는 않지만, 유수가 흘러가는 부분인 무강우사면의 길이를 늘이는 것과 마찬가지이다. 무강우사면이 길어짐에 따라 침투토사유출량이 줄어드는 이유는, 사면에서 해리된 토사입자가 유수를 타고 출구까지 내려오는 과정에서 유사이송이 지체되기 때문으로 추정할 수 있다.

누적토사유출량은 무강우사면의 길이에 비례하여 증가한다(Fig. 5에서 실험B 아래 면적이 실험A 아래 면적보다 큼). 그 이유는 무강우사면의 길이에 따라 최종적으로 형성 가능한 종단형상이 달라질 수 있기 때문이다. 침식이 진행됨에 따라 강우의 타격을 받는 부분에서 토조의 출구까지의 종단면 형상은 초기의 선형으로부터, 오목하게 만곡한 형태로 바뀌어 갈 것이다(Fig. 6). 본 실험에서 하류경계단 고도는 고정되어있어 침식이 제한되므로, 사면길이가 긴 경우가 짧은 경우보다 잠체적으로 발생할 수 있는 총 토사유출량이 많다. 한편, 후반부에서 두 실험의 토사유출량은 모두 진동하지만, 점차 감소하는 추세를 보인다. 본 실험에서는 토조 바깥 상류에서의 토사공급이 없으므로, 실험을 계속 진행된다면 실험B도 실험A와 같은 수준으로 시간당 토사유출량이 감소할 것이며, 언젠가는 토사유출량이 이론적인 최소값에 접근하게 될 것으로 유추할 수

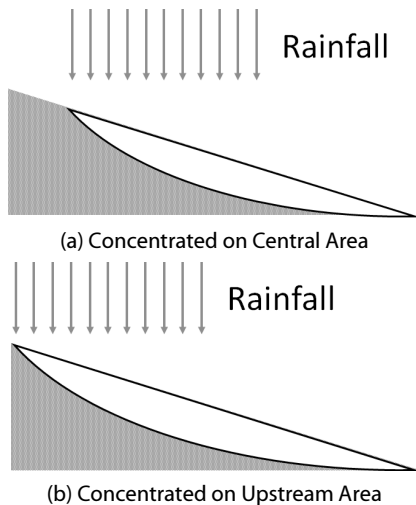


Fig. 6. Conceptual Illustration of Eroded Profiles for the Hillslopes Having Different Rainfall Distributions

있다.

이상에서 서술한 무강우사면길이에 따른 토사유출곡선의 차이는 다음과 같이 이해할 수 있다. 무강우사면이 길어질수록 사면에서 해리된 토사입자가 유수를 타고 출구까지 내려오면서 다시 정착할 수 있는 확률이 높아진다. 반대로 무강우사면이 짧을수록 초기에 해리된 토사량 중 더 많은 부분이 토조 밖으로 빠져나갈 수 있다. 따라서 무강우사면이 짧을수록 토사유출 침투값이 커지는 현상이 관찰된다.

4.2 시간에 따른 누적토사유출량 변화

실험A의 시간에 따른 누적토사유출량의 변화를 살펴보면 2 시간 전후로 급변하는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 7). 한편, 실험B의 경우 증가세가 2 시간 부근에서 변하기는 하지만 실험A에 비하면 변화폭이 완만하다고 할 수 있다. 본 실험에서 관측된 누적토사유출량(Q_s)은 각 시간 구간별로 다음과 같이 시간(t)의 선형함수로 표현할 수 있다.

$$Q_s = \alpha t + \beta \quad (1)$$

관측된 누적토사유출량을 Eq. (1)의 형태로 선형회귀시키면 상관관계수가 매우 높음을 확인할 수 있다(Table 2). 이렇게 시간구간별로는 선형관계를 따르지만, 실험A에서 보여지듯이 토사유출이 급변하는 분기점이 존재함은 누적토사유출량과 강우지속시간의 관계가 근본적으로 비선형임을 의미한다. 단위시간 당 평균적인 토사유출량을 의미하는 기울기(Eq. (1)의 α)를 비교해보면, 실험

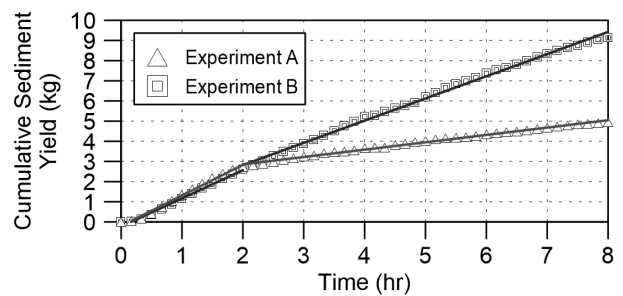


Fig. 7. Cumulative Sediment Yield Versus Time

Table 2. Results of Linear Regressions of Cumulative Sediment Yield on Time

Experiments	Time interval	α (kg/hr)	β (kg)	R^2
A	0 ~ 2 hours	1.520	-0.205	0.9901
	2 ~ 8 hours	0.365	2.126	0.9927
B	0 ~ 2 hours	1.399	-0.230	0.9908
	2 ~ 8 hours	1.101	0.620	0.9965

시작부터 2시간까지는 중류집중형(실험A)과 상류집중형(실험B)이 비슷하다. 그러나, 2시간 이후에는 상류집중형의 단위시간별 토사유출량이 중류집중형의 것보다 3배 정도 크게 된다. 이에 따라 강우지속시간이 길어질수록 실험A와 실험B의 누적토사유출량의 차이가 점차 벌어져서, 실험종료시(8시간) 실험B의 누적토사유출량은 실험A에 비해 1.85배가 되기까지 증가한다. 그 원인은 유수가 지나는 무강우사면의 길이가 증가하여 유수에 의한 토양입자의 해리가 추가로 발생함에 따른 토사유출의 가중효과로 분석된다.

이와 같은 토사유출의 비선형성은 USLE계열모형과 같은 다수의 기존모형이 고려하지 못하는 사항이다. 강우강도가 일정한 경우에 USLE/RUSLE는 누적토사유출량과 강우지속시간이 선형 비례함을 가정하며, 사면침식예측모형인 RillGrow2도 누적토사유출량이 시간 경과에 따라 선형적으로 증가하는 결과를 도출한 바 있다 (Favis-Mortlock et al., 2000). 따라서, 본 연구결과는 이러한 모형을 사용함에 있어 사용자가 모형의 한계에 대해 인지할 필요성을 시사한다. 또한, 침사지 등에서 최종적인 누적토사유출량만 기록된 경우가 많은데, 이러한 자료를 활용함에 있어서도, 시간적 비선형성에 유의해야 함을 뜻한다. 이와 더불어 차후에 실험을 수행하거나 현장자료를 수집할 시에는 위와 같은 시간적 비선형성의 존재여부를 확인할 수 있을 만큼의 조밀한 시간 간격으로 측정해야 할 필요를 보여준다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 토조에서 강우가 집중되는 위치를 중앙부(실험A)와 상류부(실험B)로 조합에 따른 토사유출의 시간적 변동성을 탐구하는 실험을 수행했다. 강우집중위치가 상류로 조정될수록 무강우사면의 길이가 길어지는 효과가 있으며, 무강우사면의 길이 증가는 단위시간 당 토사유출량의 침투깊은 감소시키고 누적토사유출량은 증가시켰다. 또한, 일정한 강우강도 조건에서의 누적토사유출량과 강우지속시간의 관계가 일부 시간구간에서는 선형으로 간주할 수도 있으나, 토사유출이 지속됨에 따라 비선형적으로 나타날 수 있음을 확인하였다.

본 실험은 강우의 공간분포만 바꾸고 나머지 조건은 이상적으로 동일하게 통제된 소규모 실험이므로 본 연구에서 도출한 결론을 실제 유역에서 발생하는 현상으로 일반화하기 위해서는 추가 연구가 필요하다. 예를 들어 본 연구에서는 토사입자분포도 균일하고, 식생이 없는 나지 조건을 다루었으나, 이런 조건은 실제 유역의 환경과는 차이가 있다. 실제로, 식생이 존재하는 경우에는 침투 및 직접유출과 더불어 토사유출의 양상이 달라질 수 있음이 알려졌다(e.g., van de Giesen et al., 2000; Nicolau, 2002; Moreno-de las Heras et al., 2010). 따라서, 강우 외에 토사입자크기, 표면기울

기, 초기지형상태, 식생, 다짐도 등의 다양한 요인들이 토사유출에 미치는 영향에 대해서도 차후 연구를 통해 탐구해야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A2A2A01015355).

References

- De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G. and Ritsema, C. J. (1996). "LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output." *Hydrol. process.*, Vol. 10, No. 8, pp. 1107-1117.
- Dong, J., Zhang, K. and Guo, Z. (2012). "Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study." *Transport. Res. D-Tr. E.*, Vol. 17, No. 1, pp. 8-14.
- Durnford, D. and King, J. P. (1993). "Experimental study of processes and particle-size distributions of eroded soil." *J. Irrig. Drain. E.-ASCE*, Vol. 119, No. 2, pp. 383-398.
- Favis-Mortlock, D. T., Boardman, J., Parsons, A. J. and Lascelles, B. (2000). "Emergence and erosion: A model for rill initiation and development." *Hydrol. process.*, Vol. 14, pp. 2173-2205.
- Johansen, M. P., Hakonson, T. E. and Breshears, D. D. (2001). "Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forests with shrublands and grasslands." *Hydrol. process.*, Vol. 15, No. 15, pp. 2953-2965.
- Keller, T. and Arvidsson, J. (2004). "Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: Effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil." *Soil Till. Res.*, Vol. 79, No. 2, pp. 2953-2965.
- Krajewski, W. F., Ciach, G. J. and Habib, E. (2003). "An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes." *Hydrolog. Sci. J.*, Vol. 48, No. 2, pp. 151-162.
- Lee, G. J., Lee, J. T., Ryu, J. S., Oh, D. S. and Kim, J. S. (2012). "Effects of slope gradient and rainfall intensity on soil losses with rainfall simulator experiment." *Korean J. of Soil Sci. Fert.*, Vol. 45, No. 6, pp. 877-881 (in Korean).
- Marston, R. A. and Dolan, L. S. (1999). "Effectiveness of sediment control structures relative to spatial patterns of upland soil loss in an arid watershed, Wyoming." *Geomorphology*, Vol. 31, No. 1, pp. 313-323.
- Moreno-de las Heras, M., Nicolau, J. M., Merino-Martín, L. and Wilcox, B. P. (2010). "Plot-scale effects on runoff and erosion along a slope degradation gradient." *Water Resour. Res.*, Vol. 46, W04503.
- National Research Council (1998). *Global energy and water cycle experiment (GEWEX) continental-scale international project (GCIP): A review of progress and opportunities*, National Academy Press,

- Washington, D.C.
- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J. and Finkner, S. C. (1989). "A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology." *T. ASAE*, Vol. 32, No. 5, pp. 1587-1593.
- Nicolau, J. M. (2002). "Runoff generation and routing on artificial slopes in a Mediterranean-continental environment: The Teruel coalfield, Spain" *Hydrol. process.*, Vol. 16, pp. 631-647.
- Park, S. D., Lee, K. S., Shin, S. S., Chae, K. S., Kim, T. G. and Won, D. K. (2005). *A basic study on the development of the soil erosion model in the mountain area (SEMMA)*. Publication No. 11-1660030-00035-01, National Institute for Disaster Prevention (in Korean).
- Park, S. D., Shin, S. S., Kim, S. J. and Choi, B. (2013). "Effects of surface compaction treatment on soil loss from disturbed bare slopes under simulated rainfalls." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 46, No. 5, pp. 559-568 (in Korean).
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. and Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook 703.
- Renschler, C. S. (2003). "Designing geo-spatial interfaces to scale process models: The GeoWEPP approach." *Hydrol. process.*, Vol. 17, No. 5, pp. 1005-1017.
- Römkens, M. J. M., Helming, K. and Prasad, S. N. (2002). "Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes." *Catena*, Vol. 46, No. 2, pp. 103-123.
- Shin, M., Won, C., Choi, Y., Seo, J., Lee, J., Lim, K. and Choi, J. (2009). "Simulation of field soil loss by artificial rainfall simulator-by varying rainfall intensity, surface condition and slope-." *J. Korean Soc. Water Qual.*, Vol. 25, No. 5, pp. 785-791 (in Korean).
- van de Giesen, N. C., Stomph, T. J. and de Ridder, N. (2000). "Scale effects of Hortonian overland and rainfall-runoff dynamics in a West African catena landscape." *Hydrol. process.*, Vol. 14, pp. 165-175.
- Williams, J. R. (1975). "Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor." *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources: Proc. of the Sediment-Yield Workshop*, Washington, D.C., Vol. 40, pp. 244-252.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation*. Agricultural Research Service, Vol. 282, U.S. Department of Agriculture.
- Zech, W. C., Halverson, J. L. and Clement, T. P. (2008). "Intermediate-scale experiments to evaluate silt fence designs to control sediment discharge from highway construction sites." *J. of Hydrol. Eng.*, Vol. 13, No. 6, pp. 497-504.