

## 급경사면의 세류간 침식에서 빗물튀김과 면상흐름의 상호작용 Interaction between Raindrops Splash and Sheet Flow in Interrill Erosion of Steep Hillslopes

남 명 준\* / 박 상 덕\*\* / 이 승 규\*\*\* / 신 승 숙\*\*\*\*

Nam, Myeong Jun / Park, Sang Deog / Lee, Seung Kyu / Shin, Seung Sook

### Abstract

Interrill erosion by the rainfall is divided into a detachment of soil particles by raindrop splash when raindrops having kinetic energy strike on the surface soil and a sediment transport by sheet flow of surface runoff. Rainfall kinetic energy is widely used as an indicator expressing the potential ability to separate the soil particles from soil mass. In this study, the soil erosion experiments of rainfall simulation were operated to evaluate the effects of rainfall kinetic energy on interrill erosion as using the strip cover to control raindrop impact. The kinetic energy from rainfall simulator was 0.58 times to that of natural rainfall. Surface runoff and subsurface runoff increased and decreased respectively with increase of rainfall intensity. Surface runoff discharge from plots of non-cover was 1.82 times more than that from plots with cover. The rainfall kinetic energy influenced on the starting time of surface and subsurface runoff. Soil erosion quantity greatly varied according to existence of the surface cover that can intercept rainfall energy. Sediment yields by the interaction between raindrop splash and sheet flow increased 3.6~5.9 times and the increase rates of those decreased with rainfall intensity. As a results from analysis of relationship between stream power and sediment yields, rainfall kinetic energy increased the transport capacity according to increase of surface runoff as well as the detachment of soil particles by raindrop splash.

**Keywords** : rainfall kinetic energy, sheet flow, interrill erosion, rainfall simulation, strip cover

### 요 지

강우에 의한 세류간 토양침식은 운동에너지에 갖는 빗방울이 지표면을 타격하여 발생하는 빗물튀김의 박리현상과 지표유출수의 면상흐름에 의한 토사입자의 운반으로 구분할 수 있다. 강우운동에너지는 토양입자를 토양체로부터 분리시키기 위한 강우의 잠재적인 능력의 지표로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 강우운동에너지가 세류간 토양침식에 미치는 영향을 파악하기 위해 강우의 충돌을 제어하는 스트립 커버를 이용한 토양침식 강우모의 실험을 수행하였다. 강우모의에 의한 강우운동에너지는 자연강우에 비해 0.58배 규모로 재현되었다. 강우강도가 증가함에 따라 지표유출량은 증가하고 지표하유출량은 상대적으로 감소하였다. 지표커버가 없는 사면으로부터 발생한 지표유출량이 지표커버가 있는 경우에 비해 평균 1.82배 증가하였다. 강우운동에너지는 지표유출 및 지표하유출 발생시간에도 영향을 끼쳤다. 빗물튀김과 면상흐름의 상호작용으로 토사유출량이 3.6~5.9배 증가하였으며 그 증가폭은 강우강도의 증가에 따라 감소하였다. 단위수류력과 토사유출량의 관계분석 결과 강우운동에너지는 빗물튀김에 의한 토양입자의 분리침식을 증가시킬 뿐만 아니라 지표유출수 증가에 따른 토사이송능력을 가중시켜 토사유출량을 크게 증가시키는 것으로 확인되었다.

**핵심용어** : 강우운동에너지, 면상흐름, 세류간 토양침식, 강우모의, 스트립 커버

\* 강릉원주대학교 방재연구소 연구원 (e-mail: nmj1225@naver.com)

Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

\*\* 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (e-mail: sdpark@gwnu.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

\*\*\* 강릉원주대학교 방재연구소 연구원 (e-mail: ef2377@nate.com)

Researcher, Institute for Disaster Prevention, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

\*\*\*\* 교신저자, 강릉원주대학교 방재연구소 전임연구원 (e-mail: cewsook@hanmail.net, Tel: 82-33-640-2417)

*Corresponding Author*; Associate Researcher, Institute for Disaster Prevention, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

## 1. 서론

우리나라는 전 국토의 68% 이상이 산지로 이루어져 있으며, 사면경사 15~60° 범위의 구릉지와 산악지가 가장 큰 비중을 차지한다. 산지지역은 토심이 얇고 토양입자가 거친 것이 특징이다. 농경지나 개발지역과 같은 교란 지역에 비해 토양체가 단단하고 강도가 크기 때문에 상대적으로 토양침식이 적게 발생하지만, 경사가 급하기 때문에 토양 자체의 침식 위험성은 더 크다. 따라서 급경사면에서 지표유출에 의해 발생하는 세류간 토양침식 및 토사유출량을 정량적으로 예측하기 위한 모형을 개발하는 것은 수자원 관리측면의 유역 물질순환 시스템의 평가와 환경적 측면의 토양 및 수질 오염평가에도 대단히 중요하다.

과거에 개발된 토양침식 및 토사유출 모형인 USLE (Wischmeier and Smith 1965; 1978)와 RUSLE (Renard, et al., 1997)는 토양침식이 많이 발생하는 경작지와 개발지역을 주요 대상으로 하고 있다. 그러나 산림지역은 수문 및 토양침식에 영향을 미치는 유효강우의 유출발생 메커니즘이 이들 지역과 상당히 다르다(Elliot et al., 1996; Covert, 2003). 산림유역 유출 및 토양침식 모의에 있어서 수문학적 토양침식 모형인 WEPP은 지표하 흐름 과정을 충분히 묘사할 필요성이 있다(Covert et al., 2005). 산림지역은 토심이 얇은 기공성 토양과 낮은 투수성의 기반을 가지고 있어서 지표하흐름이 많이 발생한다. 최근 산림지역의 이러한 특성을 고려하여 WEPP (Flanagan and Nearing, 1995)를 개선하였다(Dun et al., 2009). 초지, 관목지, 산림지 등의 비경작 야대지(rangeland)는 세류발달이 용이하지 않으며, 빗물튀김(splash)과 면상침식(sheet erosion)이 상호 작용하는 세류간 침식이 지배적이다(Shakesby and Doerr, 2006; Shin et al., 2013). 수문학적 침식과정이 상이한 기존 모형을 비경작지에 적용하는 것은 한계가 있음을 의미한다. 다수 연구진들은 20여년에 걸쳐 야대지의 유출 및 토양침식 과정에 대해 많은 연구를 수행하였고(Wilcox, 1994; Tongway and Ludwig, 1997; Pierson et al., 2002; Chartier and Rostagno, 2006; Bartley et al., 2006), 최근 야대지만을 대상으로 하는 토양침식 예측모형인 RHEM (Rangeland Hydrology and Erosion Model)을 개발하였다(Nearing et al., 2011).

국내 실무에서는 토사유출량 산정을 위해 USLE와 RUSLE를 대부분 사용하고 있다. 그러나 RUSLE의 토사유출 산정을 위해 필요한 주요 매개변수는 국내의 조건과 상이할 수 있으며, 적용성에 대한 검증도 많이 이루어지지 않은 상태이다. 이러한 문제점을 해결하고자 국내 유

역의 토양침식모형인 SEMMA를 개발하였다(Park et al., 2005; Park et al., 2012). SEMMA는 다양한 식생분포를 갖는 국내 산지사면에서 강우에 의해 발생하는 토양침식량을 예측하기 위한 모형이다. RUSLE를 기반으로 강우인자, 식생인자, 지형 및 토양인자로 구성된 경험적인 다중회귀식으로 이루어져 있다. 하지만 모형의 보편적인 활용을 위해서는 다양한 검증과 지속적 개선이 필요하다(Park and Shin, 2011). SEMMA의 정확도와 적용범위를 확대하기 위해서는 강우 및 유출수에 의한 토양침식과 토사유출의 물리적 프로세스에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 한다.

강우에 의한 토양침식과 그에 따른 토사유출의 메커니즘은 크게 두 가지로 나뉜다. 강우의 운동에너지가 지표를 타격하여 발생하는 빗물튀김과 그에 의한 박리현상(detachment), 지표유출(surface runoff)의 면상흐름(sheet flow)에 의한 토양입자의 운반으로 구분할 수 있다(Morgan, 1996; Kinnell, 2005). 강우운동에너지(rainfall kinetic energy)는 토사입자를 토양체로부터 분리시키는 강우의 잠재적 능력의 지표이다. 이것은 강우입자 크기와 낙하속도 측정에 의해 직접 계산이 가능하며, 관측이 용이한 강우강도와 경험적 관계식으로부터 간접적 산정이 가능하다. 강우운동에너지와 강우강도의 경험적 관계식은 여러 연구진들에 의해 멱함수(Smith and De Veaux, 1992; Steiner and Smith, 2000; Shin et al., 2015), 지수함수(Rosewell, 1986; McIsaac, 1990; Lee and Won, 2013), 로그함수(Wischmeier and Smith, 1958; Kinnell, 1981; Fornis et al., 2005), 선형함수(Hudson, 1965; Sempere-Torres et al., 1992; Fornis et al., 2005) 형태로 제시되었다. 이처럼 강우운동에너지가 토양침식을 발생시키는 주요인자 중 하나임은 다수의 연구진들의 연구에 의해 밝혀졌다. 침식능 인자인 강우운동에너지를 산출하는 연구는 많이 이뤄진 반면, 강우운동에너지가 토양침식 및 토사유출에 직접적으로 미치는 물리적인 영향에 대한 연구는 아직도 미흡하다.

세류간 토양침식에서 강우운동에너지는 토양입자의 박리현상 능력을 평가하기 위한 침식능 인자이지만 지표유출수의 토사이송능력(sediment transport capacity)을 평가할 수는 없다. 세류간 토양침식은 강우운동에너지와 면상흐름의 상호작용에 의한 복잡한 토양침식의 물리적 과정이기 때문이다. 따라서 면상흐름에 의한 토사 이송능력을 평가하기 위해서는 집중 또는 하천 흐름에서 토사 이송을 해석하기 위해 사용하는 수류력(stream power)의 개념(Bagnold, 1966; Yang, 1972)을 고려해야 한다. 특히 단위수류력(Yang, 1972, 1973)은 지표유출수의 침식 능력

을 평가하기에 적합한 인자이다(Shih and Yang, 2009).

본 연구는 토양침식에 기여하는 강우운동에너지의 물리적인 능력에 초점을 두고 있다. 따라서 강우입자가 지표면을 타격할 때 발생하는 빗물튀김과 박리현상을 제어하기 위한 스트립 커버(strip cover)를 이용하여 강우모의 토양침식 실험을 수행한다. 스트립 커버가 없는 경우 강우입자의 지표면 타격과 면상흐름의 상호작용에 의한 토사유출과 스트립 커버가 있는 경우 면상흐름에 의해서만 발생하는 토사유출을 구분하여 세류간 토양침식 변화를 파악하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실험시설

세류간 토양침식 실험을 위해 소규모 인공강우모의 장비를 제작하였다(Fig. 1). 강우모의 실험장치의 높이는 3.5 m이고, 폭은 4 m이다. 강우모의를 위해 사용된 노즐 Veejet 80100은 인공강우를 발생시키기에 적합한 검증된 노즐이다(Meyer and Harmon, 1979). 강우노즐은 강우강도 조절이 가능한 속도제어 진동장치에 설치되어 있다. 강우강도모의 범위는 약 70~130 mm/hr이다. 토양침식 실험을 위한 토양상자는 규모 0.6×1×0.3 m로 두 개가 설치되어 있다. 출구 부분은 강우모의 시 발생하는 지표유출과 토사유출의 수집이 용이하도록 유도관을 설치하였고, 토양상자 하부에는 지표하 유출량을 측정할 수 있도록 지하수 배수망과 유도관이 설치되어 있다. 재현가능 경사는 0°~31° 범위이다. 강우운동에너지를 제어할 수 있는 스트립 커버를 제작하였다(Fig. 1). 스트립 커버는 지표면과는 떨어져 있으며, 강우운동에너지를 제로로 만들고 강우를 사면에 균등하게 분포시키는 역할을 한다. 따라서 강우입자의 직접적인 충돌만을 제어할 뿐 지표유출 흐름에는 영향을 미치지 않는다. 강우운동에너지만 상쇄시켜 빗방울이 지표면 타격효과를 제어하기 위한 목적이다. 산지사면의 토양침식에 유사한 토양조건을 재현하기 위해 SEMMA 개발의 기초자료 수집 지역인 강릉시 사천면 산지토양을 채취하여 사용하였다.

### 2.2 실험방법

인공강우는 용수공급용 펌프에 의해 각 2개의 노즐에 물을 공급하고, 노즐의 좌우 진동분사에 의해 재현된다. 각 노즐에 유입되는 공급량 조절을 위해 압력조절 밸브와 압력계를 설치하였다. 강우량은 20분간 강우를 발생시키고 각각 토양상자 내에 배치된 4개의 측정용기로 측정한다.

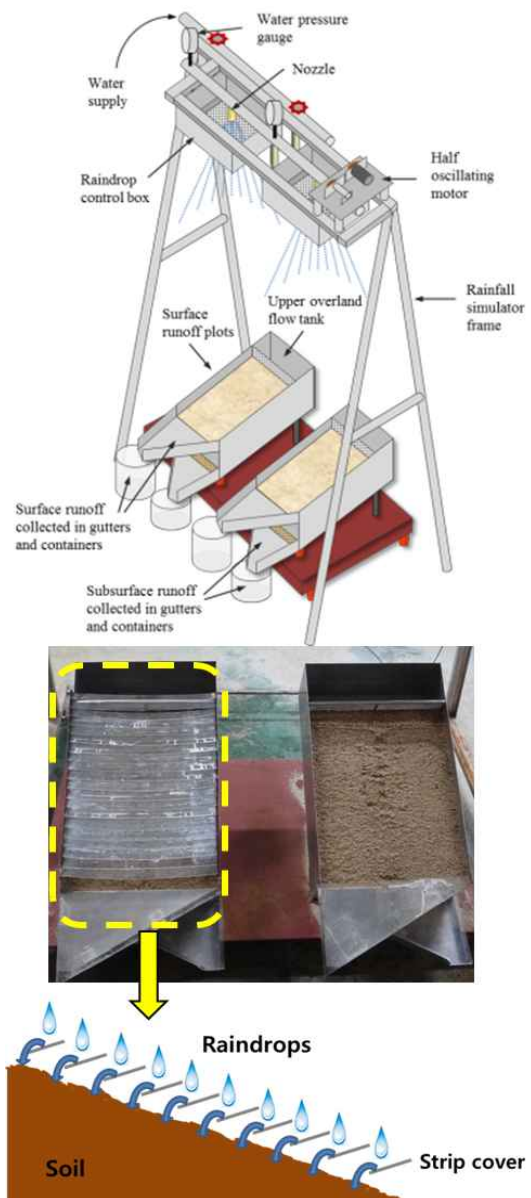


Fig. 1. Rainfall Simulator Experiment With Strip Cover Plot and Non-Cover Plot

강우강도의 평균값과 광학디스트로메타(PASIVEL)에 의해 측정된 결과를 비교 검증하였다(Fig. 2). 각 측정용기에 계측값의 오차는 반복실험을 통해 평균 강우강도 실험 조건인  $80 \pm 2.2$  mm/hr와  $120 \pm 1.3$  mm/hr의 범위로 좁혀졌다. 빗방울의 지름은 0.5~1.0 mm에 가장 많이 분포하는 것을 확인하였다. Gumm and Kinzer (1949)의 실험과 Atlas and Ulbrich (1977)의 실험에 의하면 직경 0.5~1.0 mm의 빗방울의 종말속도는 약 2 m/s에서 4 m/s인 것으로 나타났다. 본 실험에 PASIVEL의 측정값과 비교한 결과 2~4 m/s에 가장 많이 분포한 것을 확인하였다. PASIVEL

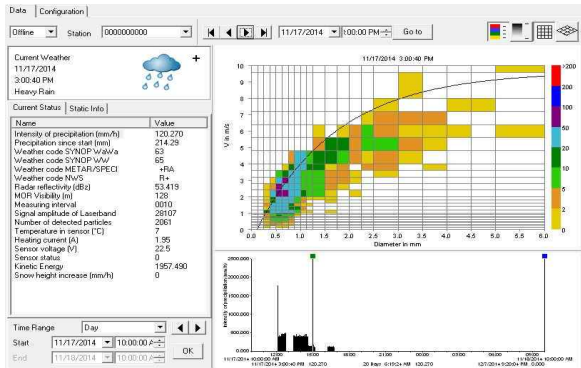


Fig. 2. Rainfall Kinetic Energy Measured by PASIVEL

에 의한 평균 강우운동에너지의 측정결과는 80 mm/hr와 120 mm/hr에서 각각  $1306.5 \pm 195.8 \text{ J/m}^2$ 와  $1917.5 \pm 239.5 \text{ J/m}^2$ 로 나타났다. 이는 자연강우의 강우강도에 따른 강우운동에너지 산정식(Smith and De Veaux, 1992) 모의결과와 0.58배 크기로 재현된 것이다.

토성을 파악하기 위해 체가름시험을 통한 입도분포 분석을 실시하였고, 건조단위중량을 측정하였다. 평균입경은 1.83 mm이고, 건조단위 중량은  $1.78 \text{ g/cm}^3$ 이었다. 토양의 균등계수는 4이고, 곡률계수는 0.38이며, 통일분류법으로 분류한 결과 SP로 입도분포가 불량인 모래에 해당한다. 토사유출량은 수집된 유출수와 함께 유출된 토사를 아스피레이터와 진공펌프로 토사를 걸러낸 뒤 건조로에 건조하여 중량을 측정하여 산정하였다. 매 실험마다 지표 토양의 전단응력을 측정하기 위해 Torvane을 활용하였다. 전단응력을 간단하고 빠르게 측정하기 할 수 있는 정밀검사 장치인 Torvane의 보정계수는  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  이었다. 각 토양상자를 4개 구역으로 나누고 4개 지점에서 전단응력을 측정하여 평균값을 얻었다.

강우모의에 의한 토양침식 실험은 강우강도 80 mm/hr, 120 mm/hr의 조건에서 강우를 발생시켜 유출량과 토양침식량을 측정하였다. 경사조건은 24°와 28° 경사로 하였으며, 이는 SEMMA 개발을 위해 강원지역 산지사면에 설치한 소규모 플롯의 경사범위에 해당한다. 각 실험조건마다

Table 1. Rainfall Simulation Experiment

구분	조건
Rainfall intensity	80 mm/hr, 120 mm/hr
Mean shear stress	$0.33 \pm 0.04 \text{ kg/cm}^2$
Slope steepness	24°, 28°
Soil texture	Sandy
Surface soil condition	Bare, Strip cover

다 스트립 커버 유무로 실험을 실시하였다. 강우모의 발생 소요시간은 30분으로 진행하였다. 실험토양의 전단응력을 측정 후 강우를 발생시켜, 최초 강우발생 시간부터 지표유출수와 지하수가 유출되는 시간을 측정하고, 1분 간격으로 유출량 및 토사유출량을 채집하였다. 토양상자에는 25cm 깊이로 건조된 토양을 채웠으며, 함수조건을 통일시키기 위해 선형강우를 발생시킨 뒤 3시간 경과 후에 본 실험을 실시하였다(Table 1).

본 실험은 강우강도 조건 80 mm/hr와 120 mm/hr, 경사 조건 24°와 28°, 지표커버 유무 조건에 따라 세 가지 시험 조건을 세 번 반복하여 24번(2×2×2×3)의 강우모의 실험을 수행하였고, 두 개의 토양상자로부터 총 48회 실험 결과를 얻었다. 실험 분석에서 최소와 최대치를 제외한 32회의 자료를 활용한다. 각 실험조건 별 지표유출, 지표하유출, 토사유출의 차이를 비교한다. 특히 지표커버의 유무에 따른 지표유출량의 변화를 파악하고, 강우입자의 지표면 타격과 면상흐름의 상호작용에 의해 발생하는 토사유출량의 변화 특성을 분석하였다.

### 2.3 적용이론

사면의 지표유출수에 의한 토사이송능력을 평가하기 위해 수류력 개념을 적용한다. Yang (1972)의 단위수류력은 하천흐름에 의한 토사이송을 해석하기 위한 대표적인 이론이다. 본래 하천 흐름에 의한 토사이송을 해석하기 위해 수류력을 고려하지만, 격자별 토양의 침식과 퇴적과정 모의를 위한 이송능력을 산정하기 위해 지표면 토양침식에서도 응용 가능하다. 단위 면적의 하상에 작용하는 수류력을 Bagnold (1966)가 처음 제시하였고, Yang (1972)은 유사를 이송시키기 위한 물의 단위무게당 에너지 손실률을 강조하였다. Yang (1972)의 단위수류력  $\phi$ 은 Eq. (1)과 같다.

$$\phi = VS \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 지표유출수의 유속(m/s),  $S$ 는 사면경사이다.

단위수류력 산정식의 적용을 위해서는 유속 값을 결정해야 한다. 유속을 알기 위해서 수심을 측정하여야 하지만, 면상흐름의 수심이 실험토양의 조도고보다 얇은 경우가 대부분이기 때문에, 수심의 측정이 매우 어렵다. 또한 측정값의 오차범위가 크기 때문에 신뢰성이 떨어진다. 단위수류력 산정에 유량을 사용한 함수가 Chang (1979)에 의해 제시되었고, Vanoni (1978)는 무차원 단위수류력 개념에서 토사유출량과 평균입경의 반비례 관계식을 보였다. 면상흐름의 수심이 얇기 때문에 Shih and Yang (2009)은 토양입자의 평균입경은 수심과 같다고 보았다. 본 연구에

서는 Yang (1972)의 단위수류력(m/s)을 유량과 토양의 평균입경 함수로 새롭게 나타내었다.

$$\Phi = qS/Dm \quad (2)$$

여기서,  $q$ 는 단위폭당 유량( $m^2/s$ )이고,  $Dm$ 은 토양의 평균입경(mm)이다. 단위 폭당 유량은 유속과 수심성분을 내포하고 있으며, 유출수의 수심을 토양입경으로 나누면 면상흐름의 속도를 구할 수 있기 때문이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유출반응

강우모의 발생이후 지표유출수와 지표하유출수가 유도판을 통해 유출되기 시작되는 시각을 지체시간으로 보고 이를 측정하였다. 강우강도 80 mm/hr에 대한 지표유출수 발생시간은 커버가 있는 경우, 평균 16~32초 범위였다. 지하수 발생시간은 24° 경사에서는 커버가 있는 경우 1분 7초 늦게 유출되었으나, 28° 경사에서는 커버가 있을 때 평균 42초 빨리 유출되었다. 강우강도 120 mm/hr에서는 지표유출수의 발생시간이 지표커버가 있는 경우 평균 8~9초 그리고 지표하 유출은 22초 정도 늦게 유출되었으며, 강우강도 80 mm/hr인 경우보다 지연되는 평균시간은 짧아지는 것으로 나타났다. 강우강도 80 mm/hr의 경우와 마찬가지로 28° 경사에서는 지표커버가 존재할 때 평균 1분 19초 먼저 유출되는 경향이 나타났다. 지표커버가 있으면, 지표유출수의 유출시간이 평균적으로 느려짐을 확인할 수 있었다. 지표하흐름은 지표커버가 존재할 때 24°에서는 전반적으로 유출시간이 느려지는 경향이 있으나, 28°에서는 오히려 지표커버 존재에 의해 지표하흐름의 발생시간이 빨라지는 결과를 보였다.

강우강도와 지표유출량( $l/m^2$ )의 관계를 Fig. 3과 같이 나타내었다. 강우강도와 유출수의 관계는 강우운동에너지 제어 할 때와 제어하지 않을 때 전부 높은 상관성을 보였다. 그러나 지표커버가 없는 경우가 지표커버가 있는 경우에 비해 지표유출량이 평균 1.82배 증가하는 것을 확인하였다. 즉 강우운동에너지 작용은 지표면의 침투능을 감소시키고, 지표유출량을 증가시키는데 기여했다.

강우강도와 지표하유출량( $l/m^2$ )의 관계는 Fig. 4와 같다. 지표하유출량은 30분간 측정하였으나, 토양체에 체류한 지하수량까지 고려하기 위해 지표하유량은 총 강우량에 대한 지표유출량의 차로 산정하였다. 지표커버가 있는 경우(Cover) 지표커버가 없는 경우(Non-cover)보다 상대적으로 많은 지표하유량이 발생하였다. Non-cover 경우

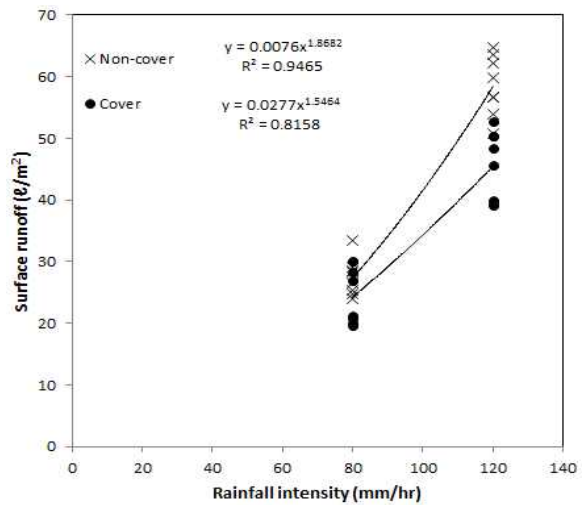


Fig. 3. Relationship between Rainfall Intensity and Surface Runoff

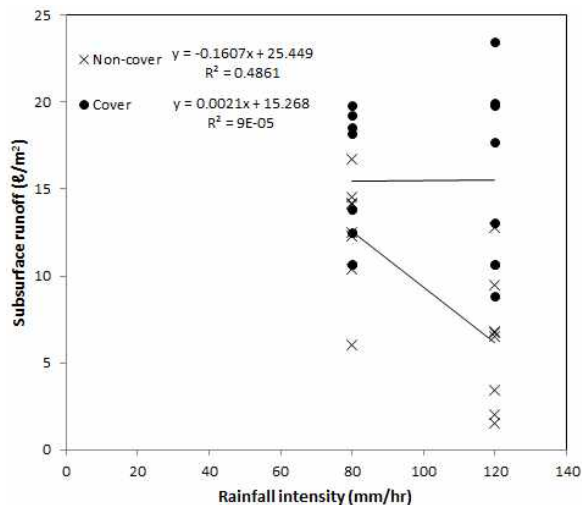


Fig. 4. Relationship between Rainfall Intensity and Subsurface Runoff

에는 강우강도가 증가함에 따라 지표하유량이 줄어드는 경향을 보였다. 이러한 결과는 강우강도가 클수록 지표유출수가 증가하기 때문이다. Cover가 있는 경우에는 강우강도와 지표하유량과의 상관관계는 뚜렷하지 않으나, 강우량 증가에 비해 상대적으로 지표유출수가 크게 증가하지 않았기 때문에 지표하유량의 상대적인 비율은 증가한 것이다. 이는 식생이 많은 급경사 산림지역에서 지표하흐름이 많이 발생하는 것과 같은 맥락이다(Covert et al., 2005; Dun et al., 2009). 지표커버는 빗물방울과 지표면의 직접적인 충돌을 제어하기 때문에 강우의 지표면 다짐효과를 감소시켰을 것이다. 따라서 거친 지표면의 침투율은 상대적으로 증가했을 것으로 판단된다. 결과적으로 자유



낙하하는 강우입자는 지표면을 타격하면서 지표토양을 다지는데 기여하고, 저하된 침투능으로 인해 지표유출량은 증가한 것이다.

### 3.2 토사유출량

강우모의 시험조건별로 발생한 토양수의 샘플링을 통해 총 토사유출량( $g/m^2$ )을 산출하였다. 강우강도가 커짐에 따라 토양침식량이 증가하였으며, Non-cover 경우 그 경향이 더 뚜렷하게 나타났다. 지표커버 유무에 따라 80 mm/hr 강우강도에서 토양침식량은 약 4.8~5.9배 정도 차이가 났으며, 120 mm/hr에서도 약 3.6~4.1배가 차이나는 것을 확인하였다(Fig. 5). 지표커버 적용 시 강우운동에너지에 의한 토양침식량의 관계성이 떨어지는데 이는 지표커버가 빗물방울의 지표면 타격을 보호해주고 있어, 지표유출수의 흐름에 의해서만 토사유출이 지배적으로 작용하기 때문이다(Figs. 6 and 7). 낮은 경사에서 비교적 낮은 토양침식량을 보이며 경사가 커질수록 토양침식량이 증가하는 경향을 보였다. 지표커버 유무에 따라 토사농도( $g/g$ ) 변화도 다르게 나타났다. 시간변화에 따른 유출토사의 농도분석 결과 지표커버가 있을 때 유출초기에는 대체로 토사의 농도가 크게 나타나며 시간이 지남에 따라 점차 줄어드는 경향을 보였고, 지표커버가 없을 때는 이러한 토사농도 감소 현상이 확인하지 않았다(Fig. 8). 이는 직접적으로 토양체에 떨어지는 강우입자의 타격이 토양입자 박리현상에 지속적으로 기여했기 때문에 시간경과에 따른 토사농도가 현격히 감소하지 않은 것으로 보인다.

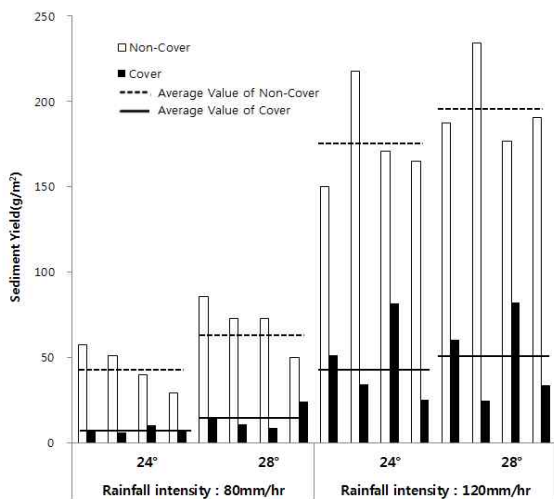


Fig. 5. Comparison of Sediment Yields from Non-cover and Cover Plots under the Conditions of Different Rainfall Intensity and Slope Steepness

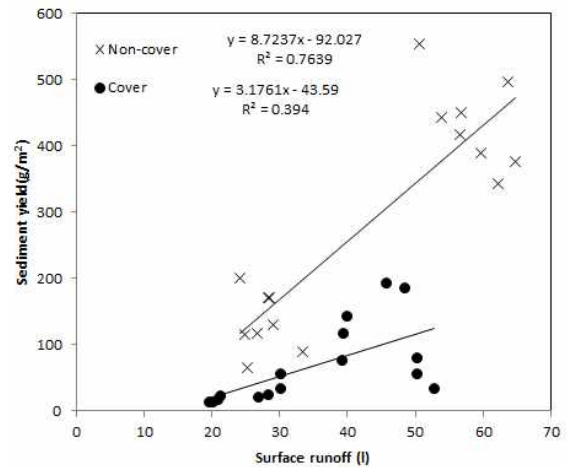


Fig. 6. Relationship between Surface Runoff and Sediment Yield

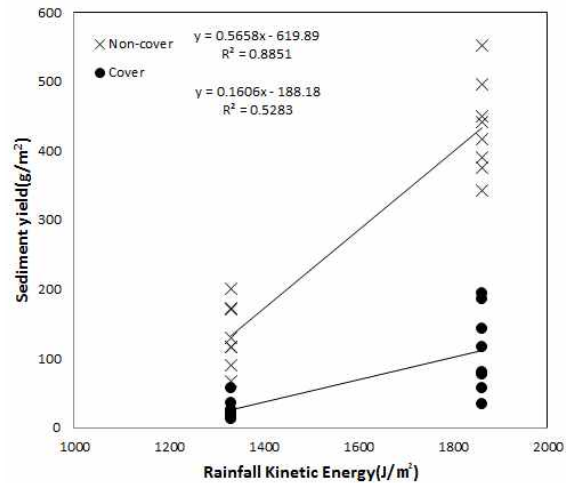


Fig. 7. Relationship between Rainfall Kinetic Energy and Sediment Yield

### 3.3 단위수류력

Yang (1973)의 유량함수 단위수류력 산정결과와 강우강도의 관계를 나타내었다(Fig. 9). Non-cover의 경우, 강우강도가 증가함에 따라 지표유출량이 증가하고, 유출수의 단위수류력도 크게 증가함으로 강우강도와 단위수류력의 관계는 높은 관계성을 보였다. 하지만 지표커버가 있는 경우 강우운동에너지가 직접적으로 지표유출수에 가해지지 않으므로 지표유출수와와의 상관관계가 상대적으로 낮았다. 이로써, 강우운동에너지는 지표유출수의 유량과 단위수류력에도 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 스트림 커버가 있는 경우와 없는 경우의 단위수류력과 토양침식량의 관계를 Fig. 10에 제시하였다. 지표커버가 있는 경우 상대적으로 적은 양의 토사유출이 발생하지만, 지표

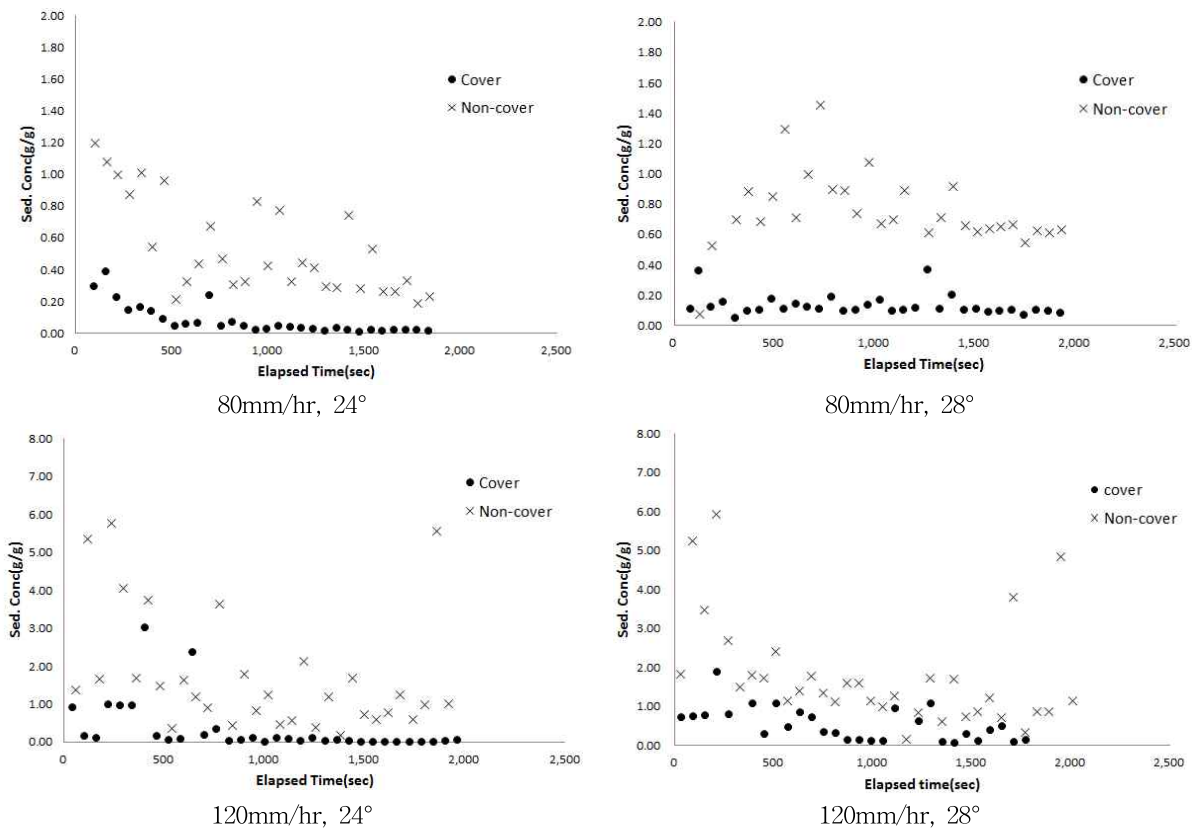


Fig. 8. The Change of Sediment Concentration according to Elapse Time

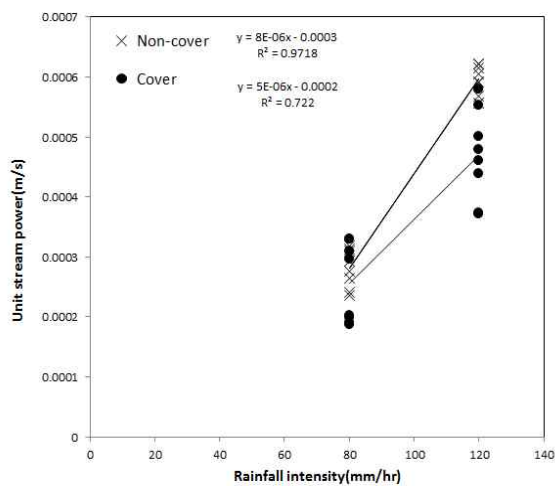


Fig. 9. Relationship between Rainfall Intensity and Unit Stream Power

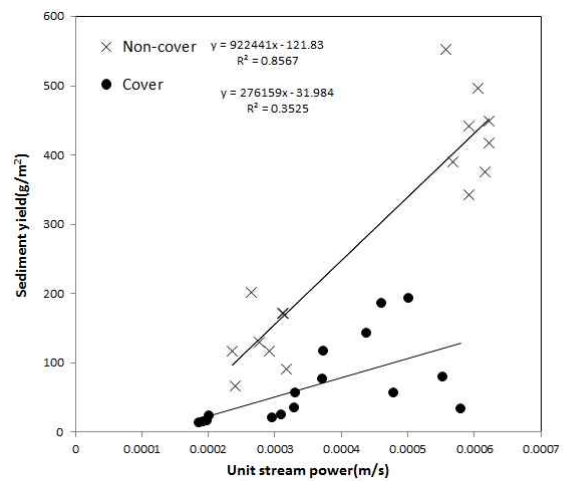


Fig. 10. Relationship between Unit Stream Power and Sediment Yield

커버가 없는 경우 단위수류력이 증가함에 따라 토양침식량이 크게 증가하는 추세를 보였다. 이러한 결과는 단위수류력이 지표유출수의 침식에 있어서 주요한 인자임을 보여주는 것이다(Shih and Yang, 2009). 또한 강우운동에너지는 세류간 토양침식의 토양입자 박리현상에 역학적으로 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 결과적으

로 급경사면의 지표면에 작용한 강우운동에너지는 빗방울 충돌에 의한 토양입자들의 박리와 튀김현상에 기여하여 경사 아래 방향으로의 토양침식량을 증가시켰다. 그리고 단위수류력이 커진 지표유출수의 침식능력과 이송능력이 많은 양의 토사를 사면으로부터 유출시키는데 기여했다.

#### 4. 결 론

본 연구는 강우모의 발생기를 이용한 토양침식 실험으로 강우운동에너지가 나지의 지표유출량, 지표하유출량, 그리고 토양침식량에 미치는 영향을 파악하기 위해 지표커버 설치유무에 대한 실험을 수행하였다.

지표커버의 설치유무에 따라 지표유출수와 지표하유출수 발생 시간이 달라졌다. 지표커버를 설치했을 경우 지표유출수의 발생시간을 지연시키는 것이 확인되었다. 지표하유출수 시작시간은 24° 경사에서는 지표커버가 없을 때 빨랐으나, 28° 경사에서는 지표커버가 있을 때 더 빨랐다. 지표유출량과 지표하유출량도 지표커버의 유무에 따라 변동하는 것을 확인하였다. 이는 강우운동에너지의 작용은 지표토양을 다지는데 기여하고, 지표면의 침투능력의 감소는 지표유출수를 증가시켰기 때문이다. 지표커버가 설치되었을 때 토양침식량은 강우강도 80 mm/hr에서 약 4.8~5.9배, 120 mm/hr에서 약 3.6~4.1배 감소되었고, 시간에 따른 토사유출농도의 변동 폭도 작아졌다. 이는 강우운동에너지에 따른 빗물튀김이 지표의 토양침식과 토사유출농도 변화를 증폭시킨다는 것을 의미한다. 대부분 토양침식 실험에서 지표면유출이 발생한 초기에는 토사유출 농도가 크고 시간이 경과함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 비다짐 나지표면에서 초기강우에 의한 토양침식 반응이 상대적으로 민감하게 반응하지만, 시간이 경과함에 따라 지표면 토양이 안정화되기 때문이다.

지표면 유출에 의한 토양침식을 분석하기 위하여 무차원 수심의 단위수류력 산정 식을 사용하였다. 강우강도가 증가함에 따라 단위수류력은 지표커버의 설치유무에 관계없이 증가하였으나, 지표커버가 없을 때 단위수류력에 따른 토사유출량의 증가폭이 훨씬 컸다. 결과적으로 강우운동에너지는 강우입자의 지표면 타격에 의한 토양입자 박리를 증가시킬 뿐만 아니라 지표유출수의 증가를 초래해 토사입자를 이송시키는 능력인 수류력을 증가시켰다.

#### 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2013R1A1A3011962)

#### References

Atlas, D., and Ulbrich, C.W. (1977). "Path- and area-

integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band." *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 16, pp. 1322-1331.

Bagnold, R.A. (1966). "An approach to the sediment transport problem from general physics." *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 422-J.

Bartley, R., Roth, C.H., Ludwig, J., McJannet, D., Liedloff, A., Corfield, J., Hawdon, A., and Abbott, B. (2006). "Runoff and erosion from Australia's tropical semi-arid rangelands: influence of ground cover for differing space and time scales." *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 3317-3333.

Chang, H.H. (1979) "Geometry of rivers in regime." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 105, HY6, pp. 691-706.

Chartier, M.P., and Rostagno, C.M. (2006). "Soil erosion thresholds and alternative states in northeastern Patagonian rangelands." *Rangeland Ecology Management*, Vol. 59, pp. 616-624.

Covert, S.A. (2003). *Accuracy Assessment of WEPP-based Erosion Models on Three Small, Harvested and Burned Forest Watersheds*. MS Thesis, Univ. Idaho, Moscow, ID.

Covert, S.A., Robichaud, P.R., Elliot, W.J., and Link, T.E. (2005). "Evaluation of runoff prediction from WEPP-based erosion models for harvested and burned forest watersheds." *Trans. ASAE*, Vol. 48, pp. 1091-1100.

Dun, S., Wu, J.Q., Elliot, W.J., Robichaud, P.R., Flanagan, D.C., Frankenberger, J.R., Brown, R.E., and Xu, A.C. (2009). "Adapting the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for forest applications." *Journal of Hydrology*, Vol. 366, pp. 46-54.

Elliot, W.J., Luce, C.H., and Robichaud, P.R. (1996). Predicting Sedimentation from Timber Harvest Areas with the Wepp Model. In: *Proc. 6th Fed. Interagency Sedimentation Conf.*, March 10-14, 1996. Las Vegas, NV. pp. IX-46-53.

Flanagan, D.C., and Nearing, M.A.(eds) (1995). *US Department of Agriculture Water Erosion Prediction Project (WEPP) version 95.7, hillslope profile and watershed model documentation*. National Soil Erosion Research Laboratory Report 10. US Department of Agriculture-Agricultural Search Service, West Lafayette.



- Fornis, R.L., Vermeulen, H.R., and Nieuwenhuis, J.D., (2005). "Kinetic energy-rainfall intensity relationship for Central Cebu, Philippines for soil erosion studies." *Journal of Hydrology*, Vol. 300, pp. 20-32.
- Gunn, R., and Kinzer, G.D. (1949). "The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air." *J. Meteorol.*, Vol 6, pp. 243-248.
- Hudson, N.W. (1965). *The influence of rainfall mechanics on soil erosion*. MSc Thesis, Cape Town.
- Kinnell, P.I.A. (1981). "Rainfall intensity-kinetic energy relationship for soil loss prediction." *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 45, pp. 153-155.
- Kinnell, P.I.A. (2005). "Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review." *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 2815-2844.
- Lee, J.S., and Won, J.Y. (2013). "Analysis of the characteristic of monthly rainfall erosivity in Korea with derivation of rainfall energy Equation." *Journal of KOSHAM*, Vol. 13, No. 3, pp. 177-184.
- McIsaac, G.F. (1990). "Apparent geographic and atmospheric influences on raindrop sizes and rainfall kinetic energy." *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 45, pp. 663-666.
- Meyer, L.D., and Harmon, W.C. (1979). "Multiple-Intensity Rainfall Simulator for Erosion Research on Row Sideslopes." *Transactions of the ASAE*, pp. 100-103.
- Morgan, R.P.C. (1996). *Soil erosion and conservation*, Longman, New York.
- Nearing, M.A., Wei, H., Stone, J.J., Pierson, F.B., Spaeth, K.E., Weltz, M.A., Flanagan, D.C., and Hernandez, M. (2011). "A rangeland hydrology and erosion model." *Transactions of the ASABE*, Vol. 54, No. 3, pp. 1-8.
- Park, S.D., and Shin, S.S. (2011). "Applying evaluation of soil erosion models for burnt hillslopes-RUSLE, WEPP, and SEMMA." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 3B, pp. 59-71.
- 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, pp. 55-64.
- Park, S.D., Lee, K.S., and Shin, S.S. (2012). "A statistical soil erosion model for burnt mountain areas in Korea -RUSLE approach." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 17, No. 2, pp. 293-304.
- Pierson, F.B., Spaeth, K.E., Weltz, M.A., and Carlson, D.H. (2002). "Hydrologic response of diverse western rangelands." *J. Rangeland Management*, Vol. 55, pp. 558-570.
- 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)*. US Department of Agriculture Handbook 703. US Department of Agriculture-Agricultural Search Service, Washington DC.
- Rosewell, C.J. (1986). "Rainfall Kinetic Energy in Eastern Australia." *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 25, pp. 1965-1971.
- Sempere-Torres D., Salles C., Creutin J.D., and Delrieu G. (1992). "Quantification of soil detachment by raindrop impact: performance of classical formulae of kinetic energy in Mediterranean storms." *Erosion and sediment transport monitoring programs in river basin IASH Publ.*, Vol. 210, pp. 115-124.
- Shakesby, R.A., and Doerr, S.H. (2006). "Wildfire as a hydrological and geomorphological agent." *Earth-Sci. Rev.*, Vol. 74, pp. 269-307.
- Shih, H.M., and Yang, C.T. (2009) "Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power." *International Journal of Sediment Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 46-62.
- 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., and Choi, B.K. (2015). "Universal power law for relationship between rainfall kinetic energy and rainfall intensity." *Advances in Meteorol.*, Vol. 2015, pp. 1-11.
- Smith, J.A., and De Veaux, R.D. (1992). "The temporal and spatial variability of rainfall power." *Environmental metrics*, Vol. 3, p. 29.
- Steiner, M., and Smith, J.A. (2000). "Reflectivity, rain rate, and kinetic energy flux relationships based on

- raindrop spectra." *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 39, No. 11, pp. 1923-1940.
- Tongway, D.J., and Ludwig, J.A. (1997). The nature of landscape dysfunction in rangelands. In: J. Ludwig, D. Tongway, D. Freudenberger, J. Noble and K. Hodgkinson (eds). *Landscape Ecology: Function and Management*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Collingwood, Victoria, Australia, pp. 49-61.
- Vanoni, V.A. (1978). "Predicting sediment discharge in alluvial channels." *Water Supply and Management*, Pergamon Press, Oxford, pp. 399-417.
- Wilcox, B.P. (1994). "Runoff and erosion in intercanopy zones of Pinyon-Juniper woodlands." *Journal of Range Management*, Vol. 47, pp. 285-295.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1958). "Rainfall energy and its relationship to soil loss." *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 39, pp. 285 - 291.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1965). Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agriculture hand book 282. US Department of Agriculture, Washington DC
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537*. US Department of Agriculture-Science and Education Administration, Washington DC.
- Yang, C.T. (1972). "Unit stream power and sediment transport." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 98, No. HY10, pp. 1805-1826.
- Yang, C.T. (1973). "Incipient motion and sediment transport." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 99, No. HY10.

<p>paper number : 15-038          Received : 23 April 2015          Revised : 26 May 2015 / 8 June 2015          Accepted : 8 June 2015</p>
---