

산지사면의 유출 및 토양침식에 대한 에너지 보존

Energy Conservation for Runoff and Soil Erosion on the Hillslope

신승숙*, 박상덕**, 조재웅***, 홍종선****

Seung Sook Shin, Sang Deog Park, Jae Woong Cho, Jong Sun Hong

Abstract

The energy conservation theory is introduced for investigating processes of runoff and soil erosion on the hillslope system changed vegetation condition by wildfire. The rainfall energy, input energy consisted of kinetic and potential energy, is influenced by vegetation coverage and height. Output energy at the outlet of hillslope is decided as the kinetic energy of runoff and erosion soil, and mechanical work according to moving water and soil is influenced dominantly by the work rather than the kinetic energy. Relationship between output and input energy is possible to calculate the energy loss in the runoff and erosion process. The absolute value of the energy loss is controlled by the input energy size of rainfall because energy losses of runoff increase as many rainfall pass through the hillslope system. The energy coefficient which is dimensionless is defined as the ratio of input energy of rainfall to output energy of runoff water and erosion soil such as runoff coefficient. The energy coefficient and runoff coefficient showed the highest correlation coefficient with the vegetation coverage. Maximum energy coefficient is about 0.5 in the hillslope system. The energy theory for output energy of runoff and soil erosion is presented by the energy coefficient theory associated with vegetation factor. Also runoff and erosion soil resulting output energy have the relation of power function and the rates of these increase with rainfall.

Key words: Energy conservation, Runoff, Soil Erosion, Energy Coefficient, Hillslope

1. 서론

산지지역에서의 산업개발, 벌목 및 산불은 산지유역의 토양침식 및 토사유출의 증가를 초래한다. 강원도 영동지역은 빈번한 산불로 인해 토양침식에 관한 많은 문제가 발생하였고, 이들 지역에 위한 합리적인 토양 침식 제어방법을 규정하고, 유역의 안전성을 평가하기 위한 모형이 필요하다. 모형은 크게 단순회귀식의 경험적인 모형과 물리적, 역학적 과정을 기술하는 물리적인 모형으로 구분한다. 경험적인 모형은 비교적 매개 변수가 적어 모형 적용이 용이하나, 과정을 모의하지 못하기 때문에 적용범위의 한계가 있다. 물리적인 모형은 다수의 매개변수로 적용이 복잡하지만, 유역으로까지 적용 가능하며, 연속적 모의가 가능하다. 우리나라 산지사면을 대상으로 경험적인 모형인 SEMMA(국립방재연구소, 2004; 박상덕 등, 2005)를 개발 하였으나, 물리적인 모형의 개발은 전무한 상태이다. 본 연구에서는 토양침식 모형 개발을 위해 현장에서 조사된 자료를 바탕으로 유출 및 토양침식의 과정을 규명하기 위한 물리적인 모형을 개발하고자 산지사면을 대상으로 유출 및 토양침식에 대한 에너지보존 이론을 정립하고자 한다.

* 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : cewsook@hanmail.net

** 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 교수 · E-mail : sdpark@kangnung.ac.kr

*** 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 공학석사 · E-mail : kani1005@nate.com

**** 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : hjsuny@nate.com

2. 에너지 보존 이론

2.1 유출 및 토양침식 과정에 대한 에너지 보존

독립된 시스템에서 에너지의 형태는 변화하지만 총에너지는 보존된다. 임의 블록이 고정된 높이에서 마찰이 없는 사면을 따라 미끄러져 내려갈 경우 운동에너지는 증가하지만, 위치에너지는 감소한다. 만약 마찰이 있는 사면이라면, 위치에너지와 운동에너지는 감소하는 대신 마찰에 의한 일과 마찰면에서의 열과 소리 등에 의한 에너지 손실이 발생한다. 역학적 에너지 보존법칙은 식 (1)과 같다.

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2} + W + E_{loss} \quad (1)$$

여기서 E_{k1} 과 E_{p1} 는 1점에서 각각의 운동에너지와 위치에너지이고, E_{k2} 와 E_{p2} 는 2지점에서 각각의 운동에너지와 위치에너지이며, W 1점에서 2지점으로 이동하는 동안 마찰에 의한 일을 의미하고, E_{loss} 는 시스템에서의 손실된 에너지를 의미한다.

위의 (1)식을 유출 및 토양침식과정을 하나의 시스템으로 생각하여 에너지 보존 법칙을 적용하면 식 (2)와 (3)처럼 표현할 수 있다.

$$E_{k2} + E_{p2} + W = E_{k1} + E_{p1} - E_{loss} \quad (2)$$

$$E_{output} = E_{input} - E_{loss} \quad (3)$$

여기서 E_{output} 는 유출 및 토양침식량의 에너지를 의미하는 출력에너지, E_{input} 는 강우의 에너지를 의미하는 입력에너지, E_{loss} 는 강우에 의한 유출 및 토양침식 시스템에서의 침투, 증발산 등에 의한 손실에너지를 의미한다.

2.2 강우에너지

입력에너지인 강우에너지는 식 (4)와 같이 강우가 지표면에 도달했을 때 운동에너지와 위치에너지 합이다.

$$E_{input} = E_{k1} + E_{p1} = \frac{1}{2}mv^2 + mgh \quad (4)$$

여기서 m 은 강우의 질량(kg/m), v 는 강우의 속도(m/s), g 는 중력가속도(m/s^2), h 는 강우의 위치(m)이다. 강우가 지표면에 도달하는 과정에 있어서 지표식생의 유무에 따라 강우에너지는 변한다.

2.2.1 식생이 없는 경우

식생이 없는 경우의 산지사면에서 강우의 낙하속도 및 총 질량을 나타낸 모식도는 Fig. 1과 같다. 강우는 강우입자의 형태로 시간과 공간에 따라 다른 양상을 보인다. 그러나 본 연구에서는 모든 강우물방울을 합하여 하나의 질량으로 보고, 단일강우의 단위폭당 운동에너지(J/m)와 위치에너지(J/m)를 고려한다.

식생이 없는 경우의 강우의 총 운동에너지는 식 (5)와 같이 표현한다.

$$E_{k1} = \frac{1}{2}MV_{\infty}^2 \quad (5)$$

여기서, E_{k1} 는 강우의 총 운동에너지(J/m), M 은 강우의 질량(kg/m), V_{∞} 는 강우의 자유낙하속도(m/s)이다.

물방울의 평균직경과 개수를 알면 총 질량을 알 수 있으며, 자유낙하에 의한 속도를 알면 총 운동에너지 산정이 가능하나, 다음 식 (6)과 같이 van Dijk(2002)에 의한 경험식을 이용하면 용이하다.

$$E_{k1} = E_0 = e_k RL = 28.3 [1 - 0.52 \exp(-0.042 I)] R L \quad (6)$$

여기서, E_0 는 식생 통과 없이 지표면에 바로 떨어지는 강우의 총 운동에너지(J/m)를 의미하고, e_k 는 강우의 운동에너지($J/m^2 \cdot mm$), I 는 호우의 평균강우강도(mm/hr), R 는 총강우량(mm) 그리고 L 은 사면투영길이

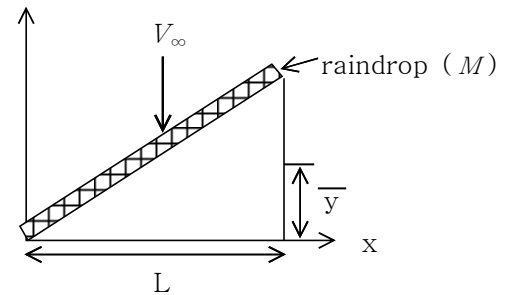


Fig. 1. Schematic diagram of raindrop on the hillslope in case of non-vegetation

(m) 이다.

식생이 없는 경우 강우 위치에너지는 Fig. 2처럼 산지사면에 M 의 질량을 가진 강우의 평균 높이 \bar{y} 를 고려하여, 식 (7)의 위치에너지를 산정한다.

$$E_{p1} = mgh = Mg\bar{y} = R\gamma_w\bar{y}L \quad (7)$$

여기서, E_{p1} 은 강우의 위치에너지(J/m), M 는 강우의 질량(kg), g 는 중력가속도(m/s^2), R 은 총강우량(mm), γ_w 는 물의 단위중량(N/m^3), \bar{y} 는 산지사면의 평균 높이(m)이다.

2.2.2 식생이 있는 경우

식생이 있는 경우, 강우의 운동에너지는 식생의 피복율과 낙하속도를 변화시키는 식생의 높이 그리고 식생의 종류에 따른 강우의 입경 변화에 의해 좌우된다. 강우가 식생을 통과하면서 물방울 입경은 커지며, 식생고에 따른 낙하속도는 일반적으로 줄어든다. Fig. 2는 식생이 있는 경우 강우의 유출과정 모식도를 나타낸 것이다.

강우의 운동에너지는 식 (8)처럼 산지사면에 직접 떨어지는 강우와 식생을 통과해서 떨어지는 강우를 모두 고려해야 한다.

$$E_{k1} = E_c + (1-\alpha) E_0 \quad (8)$$

E_c 는 식생을 통과하여 떨어지는 강우의 운동에너지(J/m), α 는 식생피복도, E_0 는 식생 통과 없이 지표면에 바로 떨어지는 강우의 운동에너지(J/m)로 식 (5)와 같다.

$$E_c = \frac{1}{2} M_{DT} V_c^2 \quad (9)$$

여기서, M_{DT} 는 식생을 통과하는 강우의 질량(kg/m), V_c 는 식생고에 따른 자유낙하 속도(m/s)이다.

$$M_{DT} = \alpha R - I_t - P_s \quad (10)$$

여기서, R 은 식생에 떨어지는 강우량(mm), I_t 는 식생차단 강우량(mm), P_s 는 줄기타고 흐르는 강우량(mm)이다. 식생을 통과하는 강우의 질량 산정은 총강우량에 식생피복도를 곱하여 식생에만 떨어지는 강우에 대한 질량만을 고려한다. 식생에 떨어진 강우는 식생의 차단에 의해 강우량이 줄어들고, 나무줄기를 타고 내려가는 강우는 사면 지표를 타격하지 않아 산지사면을 타격하는 운동에너지로 작용하지 않는다. 수관차단수량과 수관유하수량은 식생의 종류와 형상에 따라 다르므로, Zhou 등(2002)과 김(1994)의 측정 자료를 활용한다.

식생을 통과한 강우 중에 식생에 의해 차단되어 지표면에 도달하지 않은 수량을 제외한 위치에너지는 식 (11)과 같이 산정 가능하다.

$$E_{p1} = mgh = Mg\bar{y} = (R - I_t)\gamma_w\bar{y}L \quad (11)$$

2.3 유출수 및 침식된 토양의 에너지

출력에너지인 유출수 및 침식토양 에너지는 산지사면의 출구부를 빠져나가는 위치에서 운동에너지는 존재하지만, 출구부의 고도를 기준으로 보기 때문에 위치에너지는 0이다. 또한 산지사면에 도달한 강우는 유출과 토사이송의 형태로 일을 수행하므로 식 (12)과 같이 표현한다.

$$E_{output} = E_{k2} + E_{p2} + W = \frac{1}{2}mv^2 + 0 + F\bar{s} \quad (12)$$

여기서, m 는 유출수 및 침식토양의 질량(kg/m)이고, v 는 침식토양을 포함하는 유출수의 평균속도(m/s)이고, F 는 산지사면에서 출구부로 이동한 유출수 및 침식토양의 무게(kg/m^2)이고, \bar{s} 는 평균이동거리이다.

유출수 및 침식토양의 운동에너지는 식 (13)처럼 표현 가능하다.

$$E_{k2} = \frac{1}{2} M_t V_t^2 = \frac{1}{2} (m + m_s) V_t^2 \quad (13)$$

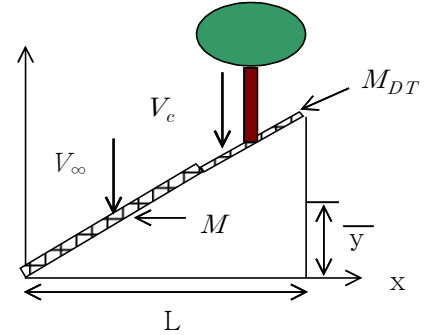


Fig. 2 Schematic diagram of raindrop on the hillslope in case of being vegetation

여기서, M_t 는 유출수 질량(m)과 침식토양의 질량(m_s)의 합으로 단위는 kg/m^2 이고, V_t 는 유출수의 평균유속(m/s)이다. 연속방정식과 Manning 공식을 이용하여 평균유속을 산정할 수 있다. 유출수에 비해 토사량이 적으므로 이를 무시하여 운동에너지 식을 정리하면 식 (14)과 같다.

$$E_{k2} = \frac{1}{2} \rho_w n^{-1.2} S^{0.6} t^{-0.8} q^{1.8} \quad (14)$$

여기서, ρ_w 는 유출수의 밀도(kg/cm^3), n 은 Manning의 조도계수이고, S 는 사면경사(m/m)이며, t 는 유출시간으로 강우지속시간과 같으며, q 는 단위폭당 유출량(ℓ/m)이다. 조도계수는 Hessel 등(2003)이 급경사 지역의 나지 및 산림지역에 대한 Manning의 조도계수에 관한 연구 자료를 활용한다.

산지사면의 각 지점에 위치하는 강우에 의한 유출수와 토사는 사면의 출구부인 좌표 (x, y) 가 $(0, 0)$ 지점까지 이동함으로써 마찰에 의한 일을 수행함으로써 식으로 표현하면 식 (15)와 같다.

$$W = \tau_0 L = F \bar{s} = g(q + q_s) \sin \theta \bar{s} \quad (15)$$

F 는 산지사면에서 출구부로 이동한 유출수 및 토사의 무게(kg/m)로서 단위폭당 유출수와 토양무게의 합이고, \bar{s} 는 평균이동거리이다.

3. 결론

소규모 조사구로부터 측정 조사된 산지지역의 유출 및 토양침식량을 자료(박상덕 등, 2005)를 바탕으로 에너지보존 이론의 강우입력에너지와 유출 및 토양침식에 의한 출력에너지를 산정한다. 단위폭당 강우의 에너지에 대한 유출 및 토양침식의 에너지 결과를 비교한 것이 Fig. 3이다. 강우 입력에너지의 경우, 나지 지표면에 도달하는 에너지에 비해 수관층 통과에 의한 강우에너지 최대 33.1%로 감소하였고, 평균 62.4%로 에너지가 감소하였다. 유출 및 토양침식에 의한 출력에너지의 경우, 운동에너지는 유출수 및 토사 이동에 의한 일 에 비해 평균 $0.013 \pm 0.008\%$ 의 범위로 무시 가능함으로 출력에너지는 파워함수로 표현된다. 자유낙하 강우 에너지에 대한 출력에너지의 비인 C_{eo} (Original Energy Coefficient)는 최대 0.454이었고, 수관통과 강우에너지에 대한 출력에너지의 비인 C_{et} (Throughfall Energy Coefficient)는 최대 0.512이었고, 총강우량에 대한 유출고의 비인 유출계수 C_R 은(Runoff Coefficient) 최대 0.757의 결과를 보여 강우 손실에 비해 강우에너지의 손실이 큼을 알 수 있었다.

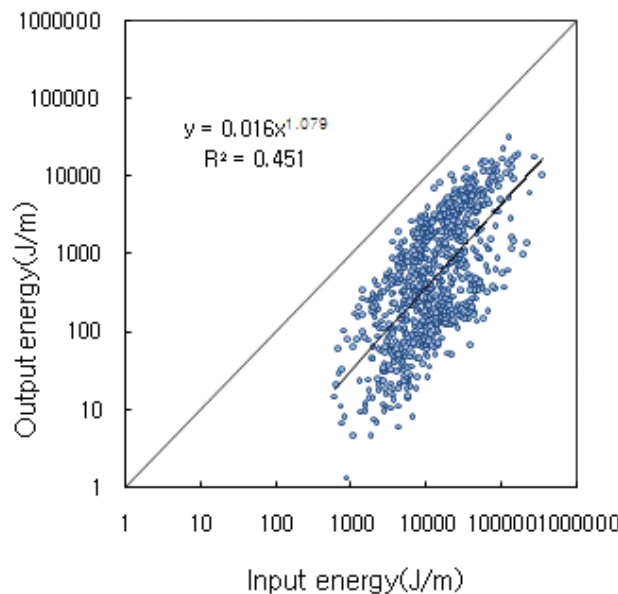


Fig. 3 Relationships between input energy of rainfall and output energy for runoff water and erosion soil in fired hillslope at four locations, Goseong, Yangyang, Gangneung, and Samcheok($n=809$)

Table 1은 유출량, 토양침식량, 출력에너지, 에너지손실, 자유낙하에너지계수, 수관통과에너지계수 및 유출계수에 대한 유출 및 토양침식에 영향을 미치는 주요인자들과의 관계를 나타낸 것이다. 강우의 규모에 따라 절대적 크기의 에너지손실이 커지므로, 에너지손실에 대한 강우인자 및 입력에너지의 상관계수는 크게 나타난다. 에너지계수 및 유출계수는 토심(Sd) 및 유기물함량(OM)에 반비례 관계를 가지며, 특히 식생피복도(V_c)에 가장 민감하게 반응을 보여 에너지손실에 주요인자가 식생임이 확인되었다. 에너지보존이론을 이용하여, 강우에 의한 산지사면에서의 유출 및 토양침식 발생에 대한 에너지 산정 결과와 값의 범위를 파악할 수 있었으며, 추후 에너지손실의 주요 과정인 침투 및 증발에 대한 정량적인 에너지를 평가함으로써 에너지보존 모형의 이론을 수립하고자 한다.

Table 1 Pearson correlation coefficients among output energy, energy loss, energy ratio, runoff coefficient and infiltration and other factors influencing runoff and soil erosion(n=809)

	L (m)	S (%)	h (m)	Dm (mm)	Sd (m)	OM (%)	R (mm)	I (mm/hr)	T (hr)	V_c (%)	E_{in} (J/m)	E_{int} (J/m)
q	0.115	-0.166	0.001	0.095	-0.217	-0.226	0.595	0.572	0.285	-0.394	0.441	0.498
q_s	-0.026	-0.021	-0.038	0.010	-0.123	-0.073	0.428	0.442	0.064	-0.198	0.272	0.312
E_{out}	0.276	-0.172	0.166	0.169	-0.188	-0.209	0.510	0.477	0.264	-0.389	0.520	0.597
E_{loss}	0.441	-0.097	0.463	0.024	0.098	0.129	0.682	0.572	0.388	-0.013	0.981	0.997
C_{eo}	0.067	-0.140	-0.028	0.180	-0.369	-0.343	-0.006	0.055	0.016	-0.624	-0.031	0.038
C_{et}	0.002	-0.110	-0.091	0.117	-0.348	-0.355	0.017	0.079	0.019	-0.551	-0.049	0.001
C_R	-0.052	-0.142	-0.159	0.112	-0.399	-0.341	0.043	0.104	0.029	-0.644	-0.051	0.011

감사의 글

본 논문은 2001년에서 2004년까지 산지토사유출에 관한 연구 수행에서 얻어진 실측 자료를 활용하였으며, 실측 연구에 있어 국립방재연구소의 아낌없는 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 국립방재연구소(2004). '04년 산지시험유역 운영을 통한 토사재해 저감효과 분석, pp. 116.
2. 김기대(1994). 소나무와 신갈나무 숲에서 강수, 수관통과수 및 수간유하수에 의한 유기영양소의 이입량, 서울대학교 대학원, pp. 22-23
3. 박상덕, 이규승, 신승숙, 심재현(2005). 산지지역의 유출 및 토양침식 예측모형 개발, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.328 ~ 331.
4. Hessel, R., V. Jetten and G. Zhang(2003). Estimating Manning's n for Steep Slopes. CATENA. Vol. 54, pp. 77-91.
5. Van Dijk,A.I.J.M., Bruijnzeel,L.A. and Rosewell,C.J.(2002). Rainfall intensity -Kinetic energy relationships. Journal of Hydrology. Elsevier Science B.V., pp. 1-23.
6. Zhou, G., X. Wei and J. Yan(2002). Impacts of eucalyptus(*Eucalyptus exserta*) plantation on sediment yield in Guangdong Province, Southern China—a kinetic energy approach. CATENA. Elsevier Science Vol.31, pp. 235-241.