Journal of the Korean Geo-Environmental Society
19(12): 15～23. (December 2018) http://www.kges.or.kr
ISSN 1598-0820
DOI https://doi.org/10.14481/jkges.2018.19.12.15

강우입자분포를 고려한 시강우의 강우에너지 산정 연구

Estimation of the Kinetic Energy of Raindrops for Hourly Rainfall Considering the Rainfall Particle Distribution

김 성 원[1] · 정 안 철[2] · 이 기 하[3] · 정 관 수†
Seongwon Kim · Anchul Jeong · Giha Lee · Kwansue Jung

Received: August 9th, 2018; Revised: August 17th, 2018; Accepted: November 27th, 2018

ABSTRACT : The occurrence of soil erosions in Korea is mostly driven by flowing water which has a close relationship with rainfalls. The soil eroded by rainfalls flows into and deposits in the river and it polluted the water resources and making the rivers become difficult to be managed. Recently, the frequency of heavy rainfall events that are more than 30 mm/hr has been increasing in Korea due to the influence of climate change, which creating a favourable condition for the occurrence of soil erosion within a short time. In this study, we proposed a method to estimate the distribution of rainfall intensity and to calculate the energy produced by a single rainfall event using the cumulative distribution function that take into account of the physical characteristics of rainfall. The raindrops kinetic energy estimated by the proposed method are compared with the measured data from the previous studies and it is noticed that the raindrops kinetic energy estimated by the rainfall intensity variation is very similar to the results concluded from the previous studies. In order to develop an equation for estimating rainfall kinetic energy, rainfall particle size data measured at a rainfall intensity of 0.254~152.4 mm/hr were used. The rainfall kinetic energy estimated by applying the cumulative distribution function tended to increase in the form of a power function in the relation of rainfall intensity. Based on the equation obtained from this relationship, the rainfall kinetic energy of 1~80 mm/hr rainfall intensity was estimated to be 0.03~48.26 $Jm^{-2}mm^{-1}$. Based on the relationship between rainfall intensity and rainfall energy, rainfall kinetic energy equation is proposed as a power function form and it is expected that it can be used in the design of short-term operated facility such as the sizing of sedimentation basin that requires prediction of soil loss by a single rainfall event.

Keywords : Soil erosion, Rainfall intensity, Cumulative distribution function, Kinetic energy

요 지 : 우리나라에서 발생하는 대부분의 토양침식은 물에 의한 토양침식이며 강우와 밀접한 관계를 가진다. 강우로부터 발생하는 토양침식은 토지자원의 손실을 발생시키고 이후 하천에 유입되고 퇴적되어 하천수자원의 관리 및 이용에 많은 어려움을 주고 있다. 최근 기후변화의 영향으로 우리나라에서는 30mm/hr 이상의 집중호우의 발생횟수가 증가하고 있어 단기간에 토양침식이 발생할 가능성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 강우의 물리적인 특성을 고려하기 위하여 누적분포함수를 이용하여 강우강도별 강우입자의 분포를 추정하고 단일 호우사상이 가지는 강우에너지를 계산하는 방법을 제안하고자 하였다. 강우에너지 산정공식을 개발하기 위하여 강우강도 0.254~152.4mm/hr에서 측정된 강우입자 자료를 이용하였다. 누적분포함수를 적용하여 산정된 강우에너지는 강우강도의 관계에서 멱함수형태로 증가하는 경향으로 나타났으며, 이 관계로 얻어진 식을 바탕으로 1~80mm/hr 강우강도의 강우 운동에너지를 산정한 결과 0.03~48.26$Jm^{-2}mm^{-1}$로 나타났다. 강우강도와 강우에너지의 관계를 바탕으로 강우에너지 식을 멱함수로 제시하였다. 본 연구에서 제안된 공식은 한시적으로 설치하는 침사지와 같은 시설물의 규모를 결정하는 계획의 토양침식량을 예측에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 토양침식, 강우강도, 누적분포함수, 운동에너지

1. 서 론

토양침식은 강우, 바람, 습도, 기온 등의 환경적인 인자들과 지표유출, 토양특성, 사면경사 및 길이, 식생피복 및 토지이용상태 등의 지형학적 인자들의 복합적 작용에 의한 물리적인 현상이다. 사막과 같은 건조한 지역을 제외한 일반적인 영역에서 나타나는 토양침식은 물에 의한 것으로 환경적 인자인 강우의 특성에 의해 결정된다. 최근 기후변화의 영향으로 높은 강우강도를 가지는 집중호우가 증가하고 있는 상황에서, 토양침식의 물리적인 과정에서의 강우 역할을 이해하는 것은 매우 중요하다(Kim et al., 2012; Kim, 2016).

토양침식에 있어 강우는 토양입자를 직접적으로 분리시

1) Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Chungnam National University
2) Researcher, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University
3) Professor, Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University
† Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University (Corresponding Author : ksjung@cnu.ac.kr)

키거나 지표유출을 발생 및 증가시켜 토양침식이 활발히 이루어지게 한다. 지속된 강우로부터 지표유량이 증가하게 되면 표면에 나타나는 흐름에 의해서 형성되는 수위는 강우입자의 에너지가 지표면으로 전달되는 것이 차단된다. 이러한 경우, 강우에 의한 직접적인 토양침식이 발생하지 않게 된다. 따라서, 강우강도에 따라 나타나는 강우입자의 운동에너지가 초기의 침식량에 중요한 영향인자로 작용하게 된다. 강우에너지는 강우입자크기와 종단속도(terminal velocity)의 함수로 표현되고 입자의 크기가 커지면 커질수록 종단속도는 비선형으로 증가한다. 하지만, 공기저항에 의해서 강우입자의 종말속도는 더 이상 증가하지 않고 한계속도를 가지게 되는 것이 일반적이다(Foote & Tori, 1969; Gunn & Kinzer, 1949; Laws & Parsons, 1943; von Lenard, 1904).

여러 연구자들은 실험을 통하여 동일한 강우량이 주어질 때 강우강도를 변화시켜 토양체에 전달되는 강우에너지에 변화에 대한 실험이 많이 진행되었다. 그 결과, 유출되는 토사량은 강우강도와 상관성이 높은 것으로 분석되었고(Young & Wlersma, 1973), 이는 토양침식이 강우량보다 강우에너지에 많은 영향을 받는다는 것을 의미한다.

우리나라에 사용되고 있는 USLE(Universal Soil Loss Equation) 모형은 연평균 토양유실량을 예측하는 경험적인 모델로 강우의 침식능력(rainfall erosion factor; R factor)을 주요인자로 사용하고 있다. 그러나, 이 모형은 30년 동안의 강우 정보를 이용하여 강우강도를 강우에너지로 환산하는 방법을 채택하는 한계점이 있다. Son(2001)은 연평균 강우침식인자 값을 적용하여 토사유출량을 산정하고 침사지의 규모를 계획하는 것은 과대설계의 우려가 있다고 평가하였다. 연평균 강우침식인자를 사용하는 것은 계획과 목적에 따라 적용여부를 결정하되, 독립된 호우사상의 강우에너지를 추정하여 적용하는 것이 단기토양침식을 본질적으로 평가할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있다는 연구결과를 제시하였다.

강우에너지는 호우사상이 시작하고 끝나는 시간 동안 떨어진 강우입자에 대한 운동에너지의 합으로 표현할 수 있고, 단위공간에 존재하는 강우입자의 분포(Drop Size Distribution; DSD)를 파악해야 독립된 호우사상의 강우에너지를 추정할 수 있다. 단위 공간 속에 분산되어 있는 다양한 크기의 강우입자를 측정하는 것에 대한 기술적 어려움이 존재하지만, Marshall & Palmer(1948)와 Marshall et al.(1947)의 연구에서는 공간에 흩어져 있는 강우입자를 투과하여 반사되는 방사선의 산란정도를 측정하여 독립된 강우사상이 가지는 강우입자를 개수밀도(number concentration)로 정량화하였다. 이후, 많은 연구자들은 실내·외 실험을 통해 얻어진 강우자료를 이용하여 강우사상에 존재하는 강우입자를 Gamma, Log-normal 함수와 같은 확률밀도함수 형태로 제안하고 강우에너지를 추정하였다(Afullo, 2011; Assouline & Mualem, 1989; Checa & Tapiador, 2011, Best, 1950). 이 외에도, 인공강우 시뮬레이터와 레이더 장비를 통해 얻어지는 강우입자와 종단속도를 바탕으로 강우강도와 강우에너지의 관계를 규명하고자 하는 연구가 진행되고 있다(Kim et al., 2009; Lim et al., 2012). 그러나, 야외에 관측 장비를 설치하여 호우사상으로부터 강우에너지를 산정하였더라도, 이 결과는 해당 시간의 독립된 강우사상 중에서 점강우에 해당하는 자료가 된다. 따라서 이러한 자료는 시간 변화에 대한 강우특성의 변화 및 대상 유역면적에 대한 특징을 대변하기 어려울 수 있으므로 동일강우에 대한 대푯값으로 사용하기에는 무리가 있다. 하지만, 강우에너지 산정을 위한 산정실험은 실험실에서 재현하기 어려운 실제 강우현상에 대한 심층적인 연구를 위해서 지속되어야 할 필요가 있다.

토양유실은 다량의 강우량이 짧은 시간에 내리는 단기호우사상에 의해 대량으로 발생하는 것이 일반적이다(Kim et al., 2010). 따라서, 토양침식에 있어 강우의 특성을 반영할 필요가 있지만, 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 USLE 등의 강우에너지식은 연평균 토양유실량을 예측하기 위해 개발되었다. 따라서, 단일호우사상으로부터 발생하는 토양침식 예측에 적용가능한지에 대한 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 강우사상의 물리적인 특성에 근거한 독립된 강우사상의 강우에너지(Kinetic Energy, KE)를 추정할 수 있는 방법을 제안하고 강우강도-강우에너지의 관계식을 제시하고자 한다. 또한, 현재까지 국내·외에서 제안되어 사용하고 있는 강우에너지식과 본 연구에서 제안한 강우에너지 공식을 비교·분석하고자 한다.

2. 기본이론 및 강우에너지 공식 도출

강우사상에 의한 총 토양분리량(soil detachment by rainfall, D_R)은 강우가 토양침식에 기여하는 운동에너지에 비례하고, 강우에너지가 지표수위 증가에 의해서 차단될 때 토양분리량이 지수적으로 감소하게 된다(Morgan et al., 1998; Lee et al., 2010). 이를 수식으로 표현하면 Eq. (1)과 같다.

$$D_R = k_j KE^{-bh} \tag{1}$$

여기서, k_j는 토양의 특성에 의해 결정되는 토양분리력(kg/J)으로, 0.1~0.5의 범위의 값을 가지고(Smets et al., 2011), KE

는 강우사상이 가지는 단위면적 당 총 운동에너지(J/m^{-2} mm^{-1}), h는 지표유출의 평균 깊이(m), b는 토양특성에 결정되는 상수로써 0.92~3.11의 범위의 값을 가지는데 세부적으로는 사양토 0.92, 점토 1.61~2.72, 실트질 점토 3.11의 값을 갖는다(Torri et al., 1987).

Eq. (1)에서 강우의 총 운동에너지를 단일 강우입자의 운동에너지로 환산하면, 단일 강우입자가 가지는 질량과 종단속도의 관계로 운동에너지를 Eq. (2)~(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$KE_{d_i} = \frac{1}{2} m_{d_i} V_{d_i}^2 \tag{2}$$

$$m_{d_i} = \rho_w \overline{V}_{\ell d_i} \tag{3}$$

$$\overline{V}_{\ell d_i} = \frac{1}{6} \pi d_i^3 \tag{4}$$

d_i는 강우입자의 직경(mm)이고, KE_{di}는 d_i크기의 강우입자가 가지는 운동에너지, m_{di}는 d_i크기를 가지는 강우입자의 질량(kg), $\overline{V}_{\ell d_i}$은 해당 강우입자의 부피(m^3), ρ_w는 물의 밀도(kg/m^3), V_{d_i}는 d_i크기를 가지는 강우입자의 종단속도(m/s)로 Smith & Wischmeier(1962), Chow & Harbaugh(1965), Assouline & Mualem(1989) 등의 연구자가 제안한 공식을 비교하여 채택하였다. Fig. 1은 선행연구(Laws & Parsons, 1943; Gunn & Kinzer, 1949)에서 제시한 강우입자 크기에 따른 종단속도를 나타낸 그림이다. Fig. 1에서 Chow & Harbaugh (1965)의 결과는 강우입자의 형상이 구체(1d), 반구체(1.25d)일 때를 고려하여 계산된 종단속도이다. 각각의 식으로 계산된 종단속도를 비교한 결과, Assouline & Mualem(1989)가 제안한 공식을 제외한 나머지 식에서는 강우크기가 커질수록 종단속도 비례관계로 계속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 특히, Smith & Wischmeier(1962)의 식을 이용할 경우, 7mm의 강우입자의 종단속도가 15.57m/s로 분석되었으며, 이 결과는 Laws & Parsons(1943)와 Gunn & Kinzer(1949)의 실험 결과인 9.53m/s보다 1.6배 큰 값으로 산정되어 본 연구에서는 제외하였다. 따라서, 본 연구에서는 Laws & Parsons(1943)와 Gunn & Kinzer(1949)의 실험의 종단속도를 잘 모의하는 Assouline & Mualem(1989)이 제안한 식을 적용하였다(Eq. (5)).

$$V_{d_i} = V_{\max}[1 - e^{-(d_i/\delta)\beta}] \pm V_w \tag{5}$$

여기서, $V_{\max}$는 강우입자의 최대 종단속도로 실험결과를 참고로 9.5m/s로 값을 결정하였다(Laws, 1941; Gunn & Kinzer, 1949). δ는 1.77mm, β는 1.147로 Mualem & Assouline (1986)가 제안된 값을 사용하였다. 강우에너지는 종단속도에 영향을 많이 받으며, 강우입자의 종단속도는 대기 중에 흐르는 바람에 영향을 받는다(Pedersen & Hasholt, 1995). 그러나, 본 연구에서는 강우가 가지는 순수한 에너지를 산정하기 위해서 대기 중에 수직으로 흐르는 V_w(wind velocity)를 고려하지 않았다.

본 연구에서 사용한 강우강도별 강우입자크기의 분포는 Fig. 2와 같다(Laws & Parsons, 1943). 만약 각각의 강우사상이 가질 수 있는 입자크기를 연속확률변수로 하고 확률분포가 Eq. (6)을 따를 때 두 개의 양의 상수인 α, β를 갖는 확률밀도함수로 표현할 수 있다. 확률밀도함수를 적분하면 $d^* \le 0$은 0이 되며 $d^* > 0$일 때 누적분포함수를 Eq. (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$f(d^*;\alpha,\beta) = \begin{cases} \alpha\beta d^{*\beta-1} e^{-\alpha d^{*\beta}}, & (d^* > 0) \\ 0, & (d^* \le 0) \end{cases} \tag{6}$$

$$f(d^*) = 1 - \exp^{-\alpha d^{*\beta}} \tag{7}$$

여기서, $d^* \ge 0$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$이며, α는 척도모수(scale parameter)이고, β는 형상모수(shape parameter)이다. $d^* = d_i/d_{50}$이며 d_i는 x축에 해당하는 강우입자의 입경이고, d_{50}은 강우사상이 가지는 강우입자의 평균 크기이다. 강우입자

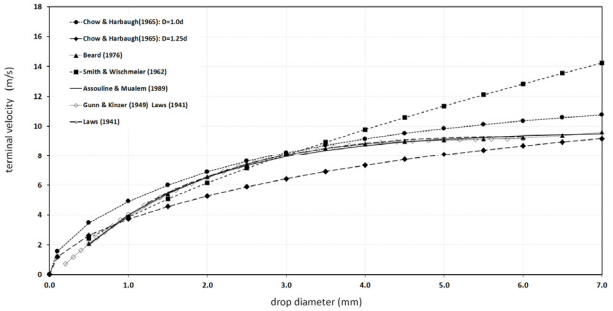

Fig. 1. Comparison of raindrop velocity equations

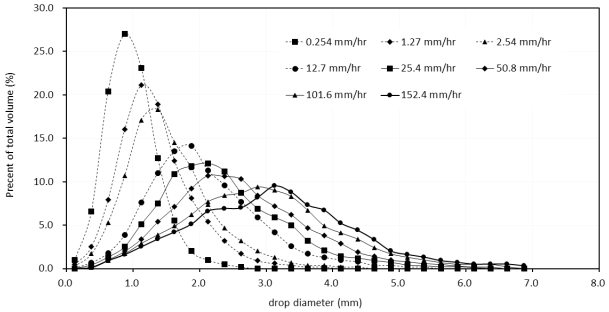

Fig. 2. Measured data by Laws and Parsons (1943)

의 평균크기인 d_{50}은 Laws & Parsons(1943)의 연구에서 제시된 강우사상(Fig. 2)으로부터 각각의 강우입자 구간을 20개로 구분하여 나열한 후 강우입자의 평균크기를 구하였다. 이를 얻어진 강우강도와 평균입자크기를 Eq. (8)과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$d_{50} = 1.27 I^{0.18} \tag{8}$$

Eq. (2)에 Eq. (3)~(4)를 적용하면 강우입자가 가지는 개별적인 운동에너지를 Eq. (9)와 같이 강우사상의 총 운동에너지식으로 표현할 수 있다.

$$KE = \sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{1}{12} \pi \rho_w d_i^3 V_{d_i}^2 N_{d_i} \right) \tag{9}$$

여기서, $n_d = d_{\max}/d_x$로 d_x는 사용자가 고려하고자 하는 강우입자의 간격을 의미하며 본 연구에서는 0.2mm로 하였다. $d_{\max}$는 최대 강우입자크기로 Villermaux & Bossa(2009)의 연구에 의하면 6~7mm 이상의 크기를 유지하기 어렵다고 보고되고 있다. 그 주된 이유는 강우의 크기가 커지면 항력 또한 증가하여 강우입자가 파괴되어 기존 형상을 유지할 수 없기 때문이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 $d_{\max}$를 7mm로 제한하였다. N_{d_i}는 단위면적에 내린 총 강우량(R_A, m^3) 속에 d_i의 크기로 존재하는 입자의 수로 Eq. (10)으로 계산할 수 있다.

$$N_{d_i} = \begin{cases} = \dfrac{f(d_i) R_A}{\overline{V_{\ell d_i}}} & , (i=1) \\ = \dfrac{[f(d_i) - f(d_{i-1})] R_A}{\overline{V_{\ell d_i}}} & , (i>1) \end{cases} \tag{10}$$

3. 강우강도별 운동에너지의 비교·분석

본 연구에서는 국내외에서 강우침식인자를 산정하기 위해 USLE, RUSLE, RUSLE2에서 채택하고 있는 강우 운동에너지식과 실내실험을 통해 제안된 강우 운동에너지식, 그리고 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 계산 강우에너지와 비교 검토하였다. 기후변화로 인해 단기호우사상에 따른 토양침식예측에 대한 접근이 요구됨에 따라 강우의 물리적인 특징을 고려하여 강우에너지를 산정하고 다른 연구의 결과와 비교함으로써 본 연구에서 제안하고자 하는 강우에너지 산정방법의 적용성을 검토하고자 하였다.

과거에 비해 집중호우 발생횟수와 강우강도 증가 등의 강우발생형태 변화로 홍수피해 가능성이 증대되고 있으며 국내의 경우 연간 집중호우가 6~8월에 집중되어 있고 30mm/hr를 초과하는 강우가 2011년에 133회가 발생되었다(KMA, 2018). 본 연구에서는 Laws & Parsons(1943)와 Cater et al.(1974)의 관측자료에서 단기호우사상이 25mm/hr보다 높은 강우강도 조건을 고려하였다. 누적분포함수의 모수추정을 위해서 단순회귀법인 최소제곱법(Least square method)을 사용하였다(Meyna & Pauli, 2003). 본 연구의 분포에서 d_i의 입자분포확률은 Eq. (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$R(d_i) = 1 - \mathrm{f}(\mathrm{d_i}) = \mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{d_i}^{\beta}}{\alpha}} \tag{11}$$

모수추정을 위해 양변에 이 중 자연로그 함수를 취하면 Eq. (12)와 같다.

$$\ln \ln \frac{1}{1-f(d_i)} = \beta \ln d_i - \ln \alpha \tag{12}$$

여기서, $x = \ln \mathrm{d_i}$이고, $y = \ln\ln(1/(1-\mathrm{f}(\mathrm{d_i})))$, $c = -\ln\alpha$이면 Eq. (13)과 같이 표현될 수 있다.

$$y = \beta x + c \tag{13}$$

이 회귀선의 계수를 β를 최소 자승법을 이용하여 Eq. (14)~(15)와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sum_{i=1}^{n_d} (x_i - \overline{x})^2} \tag{14}$$

$$\hat{\alpha} = -e^{-c} = e^{-\overline{y} - \beta \overline{x_i}} \tag{15}$$

$\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$는 추정값이고 $\overline{x} = \Sigma x_{d_i}/n_d$, $\overline{y} = \Sigma y_{d_i}/n_d$ 평균값이다. Laws & Parsons(1943)의 관측자료에서는 α = 0.78, β = 2.95, Cater et al.(1974)의 관측자료에서는 α = 0.74, β = 2.35로 분석되었다.

Laws & Parsons(1943), Carter et al.(1974)의 실험결과와 Eq. (7)을 이용하여 계산된 누적분포함수의 값과 RMSE(Root Mean Squared Error)를 계산한 결과는 Table 1과 같다. Carter et al.(1974)가 측정한 1.27~12.7mm/hr의 강우강도에서 상대적 RMSE가 크게 산정되었으나, 강우강도가 25.4mm/hr 이

상이 되면 1.0 이하로 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 강우강도가 커질수록 그래프의 기울기가 커지게 되는데, 이러한 현상은 여러 연구자(Meyer & Harmon, 1979; Wischmeier & Smith, 1958; Lim et al., 2012)가 강우강도가 커질수록 평균강우입자의 크기가 커지고 평균보다 큰 입자의 수가 증가할 수 있다는 주장을 설명해 주고 있다(Fig. 3~4).

1~80mm/hr의 범위를 가지는 강우강도를 5mm/hr 간격으로 등분하여 강우에너지를 산정하였다. 강우에너지 산정을

Table 1. RMSE of cumulative distribution result

	Rainfall intensity (mm/hr)	Laws & Parsons(1943)	Carter et al.(1974)
		$\alpha = 0.78,\ \beta = 2.95$	$\alpha = 0.74,\ \beta = 2.35$
RMSE (%)	0.254	0.87	-
	1.27	1.85	0.75
	2.54	1.50	-
	5.08	1.23	-
	12.7	-	1.21
	25.4	1.12	0.41
	50.8	1.67	0.12
	76.2	-	0.23
	101.6	1.08	-
	152.4	0.87	-

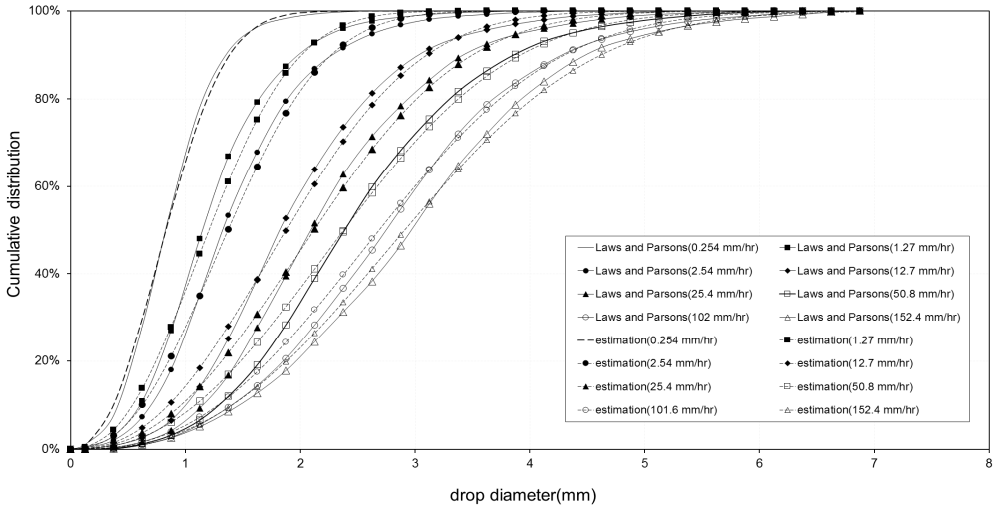

Fig. 3. Comparison of measured data (Laws & Parsons, 1943) and result of Eq. (7)

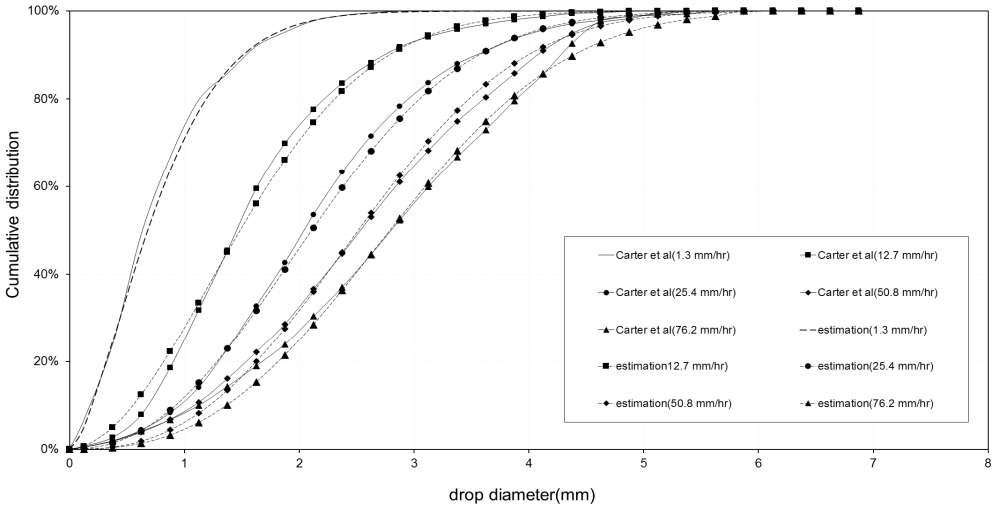

Fig. 4. Comparison of measured data (Carter et al., 1974) and result of Eq. (7)

위해서 선행연구에서 제시된 공식을 이용하였으며, 본 연구에서 사용한 강우에너지 공식은 Table 2와 같다. Eq. (16)~(17)은 Kim et al.(2016)이 강우시뮬레이터와 레이저 장비를 이용하여 30초~5분 사이에 발생할 수 있는 50mm/hr 이상의 집중호우사상을 고려하기 위해 수행된 실험에 의해 제안된 관계식이다. Eq. (18)~(22)는 여러 지역을 대상으로 개발된 경험적인 강우에너지 공식으로 현재까지 USLE 및 RUSLE에서 사용되고 있다.

본 연구에서 누적분포함수를 이용하여 계산된 강우강도-강우에너지의 관계는, 강우강도(I)가 증가할 때 강우에너지도 비례적으로 증가하는 것으로 분석되었다. 이때의 강우강도와 강우에너지의 관계는 Eq. (23)과 같이 표현할 수 있다.

$$KE = aI^{e} \tag{23}$$

여기서 KE는 강우사상이 가지는 총 강우에너지($Jm^{-2}mm^{-1}$)로 I는 강우강도(mm/hr)이다. a, e는 회귀분석에 의해 구해지는 계수와 지수로, 두 자료에서 e = 1.66으로 동일한 값을 가지는 것으로 나타났다. a의 경우 Cater et al.(1974)은 0.040(R^2=1.000), Laws & Parsons(1943)은 0.0282(R^2=0.999)로 분석되었다.

기존의 강우에너지 산정공식을 이용하여 계산된 강우에너지와 강우사상의 강우입자분포를 고려하여 제안된 식으로 계산된 강우에너지를 비교한 결과 Fig. 5와 같다.

토양침식모형에서 채택하고 있는 경험식(Eq. (18)~(22))으로 강우에너지를 산정한 결과, 1~80mm/hr의 강우강도에서는 강우에너지가 8.4~30.3$Jm^{-2}mm^{-1}$를 가지는 것으로 분석되었다. Eq. (23)에서 a=0.040일 때, 1~80mm/hr의 강우강도에서 강우에너지는 0.04~57.14$Jm^{-2}mm^{-1}$로 나타났으며, 기존 토양침식예측모형에서 채택하고 있는 공식이 1mm/hr의 경우 210배, 10mm/hr의 경우 11.44배, 20mm/hr의 경우 4.46배, 50mm/hr의 경우 1.09배, 80mm/hr의 경우 0.53배의 강우에너지를 가지는 것으로 분석되었다. a=0.0282인 경우에는 1~80mm/hr의 강우강도에서 강우에너지는 0.03~40.69 $Jm^{-2}mm^{-1}$로 나타났으며, 기존 토양침식예측모형에서 채택하고 있는 공식이 1mm/hr의 경우 280배, 10mm/hr의 경우

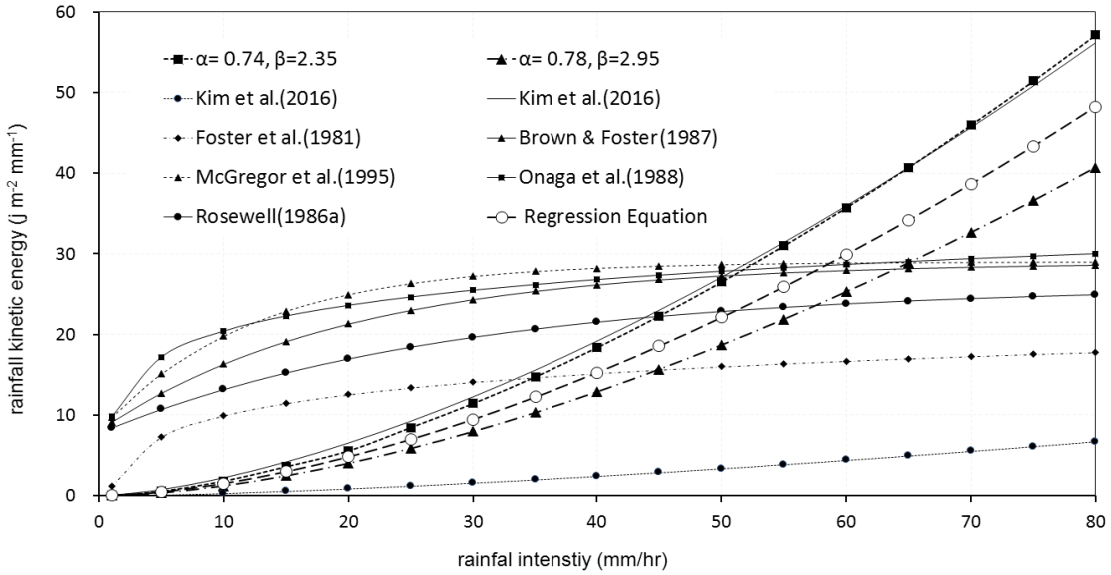

Fig. 5. The rainfall intensity-kinetic energy relationship for the different equation

Table 2. Kinetic energy equations

Kinetic energy equation	Application	Developer	Equation number
$KE = 0.011 \times I^{1.464}$	Experiment (30 sec)	Kim et al.(2016)	(16)
$KE = 0.063 \times I^{1.55}$	Experiment (5 min)	Kim et al.(2016)	(17)
$KE = 0.119 \times 0.0873 \log_{10} I$	Conversion factor to SI metric units	Foster et al.(1981)	(18)
$KE = 0.29 \times (1 - 0.72 \exp^{-0.05I})$	Holly springs in USA	Brown & Foster(1987)	(19)
$KE = 0.29 \times (1 - 0.72 \exp^{-0.082I})$	Goodwin creek in USA	McGregor et al.(1995)	(20)
$KE = 0.0981 + 0.106 \log_{10} I$	Okinawa in japan	Onaga et al.(1988)	(21)
$KE = 0.26^{*}(1 - 0.7 \exp^{-0.035I})$	Southern queensland in AUS	Rosewell(1986)	(22)

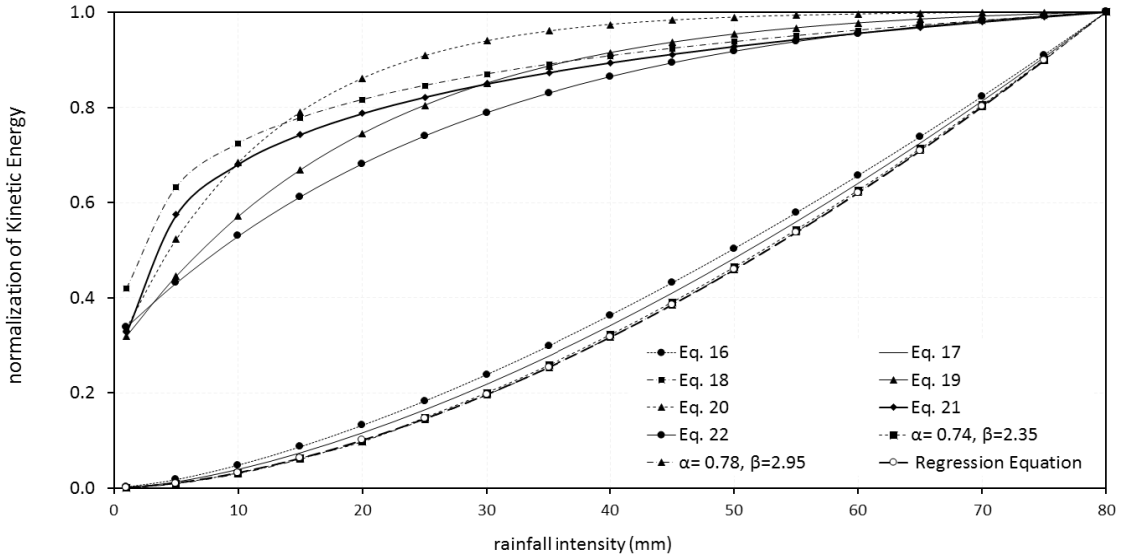

Fig. 6. Normalization of kinetic energy

16.98배, 20mm/hr의 경우 6.18배, 50mm/hr의 경우 1.54배, 80mm/hr의 경우 0.74배의 강우에너지를 가지는 것으로 분석되었다. 이러한 분석결과를 통하여 기존의 강우에너지 공식을 50mm/hr 이하의 강우강도를 가지는 단기호우사상에 적용하면 유역에서 발생하는 토양침식량이 과대하게 산정될 것으로 판단된다.

Kim et al.(2016)의 실험에서 30초 간격으로 측정된 자료를 바탕으로 제안된 강우에너지 공식(Eq. (16))으로 계산되는 강우에너지는 그 크기가 작은 값을 가지고 있다. 이는 강우사상이 가지는 입자분포가 30초간 측정된 자료에서는 정규성(normality)을 가지지 못하는 한계로 판단된다. 반면에, 측정간격인 5분인 경우에는 비교적 긴 시간 동안 측정할 수 있어 강우입자의 분포가 정규분포에 근사하는 것으로 나타났다(Eq. (17)). 이로 인해서, 실제 강우사상이 가지는 강우에너지를 근사하게 표현하는 것으로 판단되며, 강우강도가 가지는 강우에너지가 비례하여 증가하는 것을 보여주고 있다. Eq. (23)에서 a=0.040일 때, 80mm/hr의 강우강도에서 강우에너지는 57.14$Jm^{-2}mm^{-1}$로 실험식인 Eq. (17)에 비해서 1.02$Jm^{-2}mm^{-1}$큰 것으로 분석되었고 실험치를 잘 따르는 것을 확인하였다. a=0.0282인 경우 80mm/hr의 강우강도에서 강우에너지는 40.69$Jm^{-2}mm^{-1}$로 Eq. (17)로 계산된 강우에너지보다 15.43$Jm^{-2}mm^{-1}$ 작은 것으로 분석되었고 전체적으로 작은 운동에너지를 가지는 것을 확인하였다.

Llasat(2001)은 강우강도를 5단계로 구분하였고, 50mm/hr는 매우 큰 강우(very heavy rainfall) 범주에 속하며 지역적으로 발생빈도가 다르지만 그 횟수가 많지 않음을 이야기하였다. 그러나 제안된 식에서 a=0.04인 경우, 50mm/hr인 강우강도가 가지는 강우에너지의 특징을 보여주고 있어, 실제 50mm/hr 이하의 강우강도가 발생하였더라도 이를 적용할 경우에 강우에너지가 과대하게 산정될 수 있다. 또한 본 연구에서 강우입자 분포자료로 계산된 강우강도-강우에너지 관계는 측정된 지역에서 나타나는 강우의 특성을 포함할 수 있어, 두 강우강도-강우에너지의 관계를 이용하여 a와 e를 다시 산정하였다. 그 결과, a=0.0335, e=1.66으로 나타났다.

본 연구에서 제안한 강우에너지 산정공식의 강우강도-강우에너지 관계는 토양침식예측모형에서 채택하고 있는 강우에너지 산정공식의 결과와 상이한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 제안된 공식은 호우사상별 측정된 강우입자분포를 고려하여 단기토양침식을 예측하기 위해 개발되었다는 것에 의미를 가질 수 있다. 그러나 기후변화의 영향으로 집중호우 증가와 강우패턴 변화가 나타나고 있어, 적용성을 확보하기 위해서는 지속적인 모니터링을 통하여 다양한 강우강도에 대한 표본자료 취득하고 개선하는 작업이 요구된다.

4. 결 론

국내에 적용되고 있는 경험적인 모형에서 채택하고 있는 강우에너지 식은 30년 이상의 자료를 이용하여 연평균 토양유실량을 예측하기 위해 개발되었다. 경험식으로 40~50mm/hr 이하의 단기사상의 토양유실예측에 적용할 경우 유출토사량이 과대하게 추정될 있다. 강우에너지는 토양침식예측에 있어 매우 중요한 기후인자로 환경적인 변화에 따라 그 발생이 매우 다양하고 특성이 변화한다. 따라서 단기간에 발생하는 토양침식을 해석하기 위해서는 단기사상에 맞는 강

우에너지를 추정하여 적용할 필요가 있다.

본 연구에서는 시간변화에 따른 강우의 특성을 반영하여 0.254~154.2mm/hr의 강우입자분포를 이용하여 강우에너지를 산정할 수 있는 공식을 제안하였다. 제안한 공식의 검증을 위하여 선행연구에 의해서 제안된 강우에너지 공식과 비교/검토를 수행하였다. 국내외에서 채택하고 있는 강우에너지 산정공식으로 계산된 10mm/hr의 강우에너지는 13.2 $Jm^{-2}mm^{-1}$~21.06$Jm^{-2}mm^{-1}$로 제안된 공식으로 계산된 1.53 $Jm^{-2}mm^{-1}$보다 8.63~13.76배 큰 값을 보였고, 80mm/hr의 강우에너지는 17.8$Jm^{-2}mm^{-1}$~31.52$Jm^{-2}mm^{-1}$로 0.37~0.65배 수준의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 이를 토대로 보았을 때, 기존의 공식은 강우강도가 작을 경우에도 과대하게 강우에너지를 산정할 수 있어 단기호우사상에 적용하였을 때 토양침식량이 과대로 산정되는 문제가 있을 것을 본다. 제안된 방법으로 계산된 강우에너지와 Kim et al.(2016)의 실험식으로 계산된 강우에너지를 비교한 결과, 실험식에서 나타나는 강우강도와 강우에너지 관계와 유사한 결과를 얻었다 (Fig. 6).

본 연구에서 호우사상의 물리적인 특성에 근거하여 제안된 식은 강우에너지에 관한 연구가 없는 지역과 한시적으로 설치하는 침사지 규모를 결정하는 계획과 같이 단기토양침식예측이 필요한 경우에 적용하는 것이 합리적일 것으로 사료된다. 그러나 강우에너지 산정기법의 국내 적용성 확보를 위해서는 지역적으로 발생하는 강우특성분석과 토양유실모니터링자료를 활용한 검증이 지속적으로 이루질 필요가 있다. 지표를 구성하고 있는 토양특성은 강우발생과 동시에 다양한 상태로 전환된다. 이러한 현상이 초기 토양침식의 물리적인 과정에 있어서 토양침식에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 또한 토양침식에 있어서 강우 운동에너지와 토양상태변화의 시간적 변화를 고려하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 충남대학교 학술연구비와 환경부 물관리연구사업((18AWMP-B079625-05)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Afullo, J. O. (2011), Raindrop size distribution modeling for radio link along the eastern coast of South Africa, Progress in Electromagnetics Research, Vol. 34, pp. 345~366.
2. Assouline, S. and Mualem, Y. (1989), The similarity of regional rainfall : a dimensionless model of drop size distribution, Transactions of the ASAE, Vol. 32(4), pp. 1216~1222.
3. Best, A. C. (1950), The size distribution of raindrops, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 76. pp. 16~36.
4. Brown, L. C. and Foster, G. R. (1987), Storm erosivity using idealized intensity distribution, Vol. 30, pp. 379~386.
5. Carter, C. E., Greer, J. D., Braud, H. J. and Floyd, J. M. (1974), Raindrop characteristics in South Central United States, Transactions of the ASAE, Vol. 17(6), pp. 1033~1037.
6. Checa, R. and Tapiador, F. J. (2011), A maximum entropy modelling of the rain drop size distribution, Entropy, Vol. 13, pp. 293~315.
7. Chow, V. T. and Harbaugh, T. E. (1965), Raindrop production for laboratory watershed experimentation, Journal of Geophysical Research, Vol. 70(24), pp. 6111~6119.
8. Foote, G. B. and Tori, P. S. (1969), Terminal velocity of raindrops Aloft, Journal of Applied Meteorology, Vol. 8(2), pp. 249~253.
9. Foster, G. R., McCool, D. K. and Moldenhauer, W. C. (1981), Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 36, pp. 355~359.
10. Gunn, R. and Kinzer, G. D. (1949), The terminal velocity of fall for water drops in stagnant air, Jounal of Meteor, Vol. 6, pp. 243~248.
11. Kim, J. K., Yang, D. Y. and Kim, M. S. (2010), Evaluating physical characteristics of raindrop in Anseong, Gyeonggi Province, Journal of the Korea Geomorphological Association, Vol. 17(1), pp. 49~57 (In Korean).
12. Kim, J. K., Yang, D. Y., Kim, M. S., Kim, J. Y. and Shin, H. M. (2009), Growth of gully in the mountainous slope underlain by granite, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 16(3), pp. 87~100 (In Korean).
13. Kim, J. Y., Yi, S. H. and Kim, J. W. (2012), A study on mountain stream type deposit at Suhang valley in Odaecheon, The Association of Korean Geographers, Vol. 1(1), pp. 75~90 (In Korean).
14. Kim, M. S. (2016), Analysis of sediment yield properties in two small watersheds situated under granite and gneiss using GeoWEPP model, The Association of Korean Geographers, Vol. 5(1), pp. 61~70 (In Korean).
15. Kim, J. K., Kang, J. W., Jeong, G. S., Choi, H. and Kim, M. S. (2016), Suggestion for the optimum operating methods of rainfall simulator through the analysis of raindrop's characteristics, The Association of Korean Geographers, Vol. 5(5), pp. 51~60 (In Korean).
16. KMA (Korea Meteorological Administration) (2018), Abnormal climate report (In Korean).
17. Laws, J. O. (1941), Measurements of the fall-velocities of waterdrops and raindrops, Transactions of American Geophysical Union, Vol. 22, pp. 709~712.
18. Laws, J. O. and Parsons, D. A. (1943), The relation of raindrop-size to intensity, Transactions of American Geophysical Union, Vol. 24, pp. 452~460.
19. Lee, J. H., Oh, K. D. and Heo, J. H. (2010), Assessment of rainfall parameters to predict rainfall-runoff erosive index, Proceeding of KSCE conference, pp. 1881~1884 (In Korean).
20. Lim, Y. S., Kim, J. W., Kim, J. K. and Park, B. I. (2012), Evaluation of kinetic energy of raindrops at Deajeon city using

laser-optical disdrometer, Journal of the Korea Geomorphological Association, Vol. 19(2), pp 133~143 (In Korean).
21. Llasat, M. C. (2001), An objective classification of rainfall events on the basis of their convective features: application to rainfall intensity in the northeast of Spain, International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 21(11), pp. 1385~1400.
22. Marshall, J. S. and Palmer, W. McK. (1948), The distribution of raindrops with size, Jounal of Meteor, Vol. 5, pp. 165~166.
23. Marshall, J. S., Langille, R. C. and Palmer, W. McK. (1947), Measurement of rainfall by radar, Jounal of Meteor, Vol. 4, pp. 186~192.
24. McGregor, K. C., Bingner, R. L., Bowie, A. J. and Foster, G. R. (1995), Erosivity index values for northern mississippi, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 38(4), pp. 1039~1047.
25. Meyer, L. D. and Harmon, W. C. (1979), Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 22(1), pp. 100~103.
26. Meyna, A. and Pauli, B. (2003), Taschenbuch der Zuverlässigkeitsund Sicherheitstechnik, Carl Hanser Verlag, München.
27. Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D. and Styczen, M. E. (1998), The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 23, pp. 527~544.
28. Mualem, Y. and Assouline, S. (1986), Mathematical model for rain drop distribution and rainfall kinetic energy, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 29(2), pp. 494~500.
29. Onaga, K., Shirai, K. and Yoshimaga, A. (1988), Rainfall erosion and how to control its efforts on farmland in Okinawa. In: Rimwanich S (ed) Land conservation for future generations. Department of Land Development, Bangkok, pp. 627~639.
30. Pedersen, H. S. and B. Hasholt (1995), Influence of windspeed on rainsplash erosion, Catena, Vol. 24, pp. 39~54.
31. Rosewell, C. J. (1986), Rainfall kinetic energy in Eastern Australia, Journal of Climate and Applied Meterology, Vol. 25, pp. 1965~1971.
32. Smets, T., Borselli, L., Poesen, J. and Torri, D. (2011), Evaluation of the EUROSEM model for predicting the effects of erosion-control blankets on runoff and interrill soil erosion by water, Geotext Geomembr, Vol. 29, pp. 285~297.
33. Simth, D. D. and Wischmeier, W. H. (1962), Rainfall erosion, Advances in agronomy, Vol. 14, 109~148.
34. Son, K. I. (2001), Applicability examination of the RUSLE sediment yield prediction equations in Korea, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 34(3), pp. 199~207 (In Korean).
35. Torri, D., Sfalanga, M. and Del Sette, M. (1987), Splash detachment: runoff depth and soil cohesion, CATENA, Vol. 14, pp. 149~155.
36. Villermaux, E. and Bossa, B. (2009), Single-drop fragmentation determines size distribution of raindrops, Nature physics, Vol. 5, pp. 697~702.
37. von Lenard, P. (1904), Über regen, Meteor. Zeit., Vol. 6, pp. 92~262.
38. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1958), Rainfall energy and its relationship to soil loss, Transactions of American Geophysical Union, Vol. 39(2), pp. 285~291.
39. Young, R. A. and Wlersma, J. L. (1973), The role of rainfall impact in soil detachment and transport, Water Resources Research, Vol. 9(6), pp. 1629~1636.