

# 서울 지점의 강우운동에너지 특성에 관한 연구

이준학\*

Lee, Joon-Hak\*

## Characterization of Rainfall Kinetic Energy in Seoul

### ABSTRACT

The rainfall kinetic energy equation derived in the USA has been used in South Korea to quantitatively estimate the amount of soil erosion caused by rainfall for the past 40 years. It is critical to analyze the characteristics of rainfall kinetic energy that causes soil erosion from measured storm events in the study area because the characteristics depend on climate, region, and time. The purpose of this study is to analyze the characteristics in Seoul, South Korea, and the data of the Parsivel rain gauge measured in Seoul for 3 years was used for the current study. This study focuses on deriving the relationship between rainfall kinetic energy and rainfall intensity among the data measured by the Parsivel. The new rainfall kinetic energy equation in Seoul is proposed and compared with the previous equations used in South Korea.

**Key words :** Rainfall intensity, Rainfall kinetic energy, Rainfall erosivity, Seoul, Soil erosion

### 초록

한국은 강우로 인해 발생하는 토양침식량을 정량적으로 예측하기 위해서 미국에서 유도된 강우운동에너지식을 지난 40년 동안 사용해왔다. 강우의 특성은 기후, 지역 및 시간에 의존하기 때문에 연구 지역에서 측정된 호우사상으로부터, 토양 침식을 일으키는 강우운동에너지의 특성을 분석해서 연구에 활용하는 것이 필요하다. 본 연구의 목적은 서울 지역의 강우운동에너지의 특성을 분석하기 위한 것으로서 서울에서 3년 동안 측정 한 파시벨 강우자료를 사용하였다. 본 연구는 파시벨로 측정된 자료 중 강우강도에 따른 강우운동에너지의 관계를 규명하는데 중점을 두었으며, 새로운 강우운동에너지식을 제안하였다. 또한, 기존에 국내 및 국외에서 개발된 강우운동에너지식과 본 연구에서 도출한 서울 지점에서의 강우운동에너지의 특성을 비교 분석하였다.

**검색어 :** 강우강도, 강우운동에너지, 강우침식인자, 서울, 토양침식

## 1. 서론

강우침식인자(Rainfall erosivity)는 운동에너지를 가지고 있는 강우가 지표면에 낙하할 때 토양을 침식하는 정도(erosivity)를 나타내는 값이다. 1965년 미국 농무부(US Department of Agriculture)가 발간한 농업핸드북 282호(Agriculture Handbook No. 282)에 수록된 이후, 지난 55년 동안 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation, 이하 USLE)의 강우침식인자는 미국 로키산맥 동쪽의 농지에서 다년간의 측정과 실험을 통해서 유도한 경험식으로서(Nearing et al., 2017), 강우에너지와 30분 최대강우강도의 곱으로 정의되며 Eq. (1)과 같다(Wischmeier and Smith, 1965).

$$R = EI_{\max 30} = \left( \sum e \Delta v \right) I_{\max 30} \quad (1)$$

\* 종신회원 · 교신저자 · 육군사관학교 토목환경학과 교수 (Corresponding Author · Korea Military Academy · [cetera@kma.ac.kr](mailto:cetera@kma.ac.kr))

Received November 22, 2019/ revised December 10, 2019/ accepted January 2, 2020

여기서,  $R$ 은 강우침식인자,  $E$ 는 강우에너지,  $I_{\max 30}$ 은 30분 최대 강우강도,  $e$ 는 강우운동에너지,  $\Delta v$ 는 강우량을 의미한다. 강우운동에너지는 강우가 하늘에서 낙하될 때, 지표면에 가하는 에너지를 의미한다(Wischmeier and Smith, 1958). 강우운동에너지는 빗방울의 크기와 낙하속도를 측정된 후에 운동에너지를 계산하여 구할 수 있다. 이 방법은 강우가 여러 빗방울 입자의 집합체이기 때문에 강우입자 각각의 크기와 낙하속도를 계산하여 일정한 면적에 가해지는 운동에너지의 총량을 계산하는 것이다. 또 하나의 방법은 경험식을 이용하여 강우운동에너지를 추정하는 것이다. 강우운동에너지를 추정하기 위한 경험식의 중요한 매개변수는 강우강도로 알려져 있다. 이에 기존 연구에서는 강우강도를 변수로 하는 다양한 형태의 강우운동에너지 추정 모델이 제안된 바 있다(Wischmeier and Smith, 1978; Brown and Foster, 1987; McGregor et al., 1995; Salles et al., 2002; Kim et al., 2010; Shin et al., 2016; Kim et al., 2017).

강우운동에너지는 단위에 따라서 단위부피당 강우운동에너지와 단위시간당 강우운동에너지로 구분할 수 있다(Kinnell, 1981; Salles et al., 2002). 단위부피당 강우운동에너지는 비체적 강우운동에너지(volume-specific kinetic energy,  $e_{kv}$ , KEV) 또는 강우운동에너지량(Amount of rainfall kinetic energy)이라고도 하며, USLE의 강우침식인자를 산정할 때 일반적으로 사용되고 있는 값이다(Kinnell, 1981). 이때 강우운동에너지의 단위는  $J/m^2/mm$ 가 되며,  $MJ/ha/mm$ 의 단위로 나타내기 위해서는  $J/m^2/mm$ 에 100을 곱해야 한다(Foster et al., 1981). 이것의 물리적인 의미는 면적  $1 m^2$ , 두께  $1 mm$ 인 흙에 가해지는 운동에너지를 의미한다.

또한 강우운동에너지는 단위시간당 강우운동에너지로도 나타낼 수 있는데, 이를 비시간 강우에너지(time-specific kinetic energy,  $e_{kt}$ ) 또는, 운동에너지 소비율(The rate of expenditure of rainfall kinetic energy or The rain kinetic energy rate, KER)이라고도 한다(Kinnell, 1981; Salles et al., 2002). 이것의 의미는 단위시간당 토양  $1 m^2$ 에 가해지는 에너지를 의미한다. Kinnell(1981)이 제안한 비체적 강우운동에너지와 비시간 강우운동에너지의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{kv} = \frac{e_{kt}}{I} \quad (2)$$

여기서,  $e_{kv}$ 은 비체적 강우운동에너지( $J/m^2/mm$ ),  $e_{kt}$ 는 비시간 강우운동에너지( $J/m^2/h$ ),  $I$ 는 강우강도( $mm/h$ )를 의미한다. 강우운동에너지식의 형태는 여러 가지가 있으나, 대표적인 식의 형태는 다음과 같다. Eq. (3)은 USLE의 강우운동에너지식으로 알려져 있는 대수함수 형태, Eq. (4)는 상한값을 가지고 있는 지수함수

형태, Eq. (5)는 파워함수 형태를 나타낸다.

$$e_{kv} = a + b \log I \quad (3)$$

$$e_{kv} = e_{\max} [1 - a \exp(-bI)] \quad (4)$$

$$e_{kt} = aI^b \quad (5)$$

여기서,  $e_{kv}$ 는 비체적 강우운동에너지,  $e_{kt}$ 는 비시간 강우운동에너지,  $I$ 는 강우강도,  $a, b$ 는 상수를 의미한다. Eqs. (3) and (5)는 강우운동에너지의 상한값이 없지만, Eq. (4)는 강우강도가 일정 값 이상 증가하더라도, 강우운동에너지가 일정한 값에 수렴되도록 상한값( $e_{\max}$ )을 두고 있는 것이 특징이다. Eqs. (3) and (4)의 단위는  $J/m^2/mm$ 이며, Eq. (5)의 단위는  $J/m^2/h$ 를 나타낸다.

강우로 인해 발생하는 토양침식량을 정량적으로 예측하기 위해서 USLE를 적용하는데 있어, 한국은 지난 40년 동안 미국에서 유도된 강우운동에너지식을 사용해왔다. 그러나 강우의 특성은 기후, 지역 및 시간 등에 의존하기 때문에 국외 및 타 지역에서 유도된 식을 그대로 사용하는 것보다, 연구 지역에서 측정된 호우사상으로부터 유도된 식을 사용하는 것이 합리적인 것이다. 이런 관점에서 최근 레이저-광학우적계 등 관측기기의 발전에 따라 강우운동에너지와 관련된 연구가 증가하고 있으며, 이에 전 세계적으로 보고된 강우운동에너지식은 50여종이 넘는다(Lee, 2015).

국내에서 강우운동에너지와 관련된 최초 연구는 Noe and Kwon (1984)이 1980년 및 1982년 6~9월의 서울 및 수원 지점에서 측정된 분 단위 데이터를 분석하여 강우운동에너지식을 제안한 바 있다. 그러나 서울 지점의 강우운동에너지 특성과 관련된 후속연구는 미진한 상태이다.

본 연구는 서울 지역의 강우운동에너지의 특성을 분석하기 위한 것으로서 서울에서 2015년 10월부터 2017년 12월 기간 동안 측정된 Parsivel 광학우적계의 강우자료를 사용하였다. 본 연구의 목적은 서울 지점의 새로운 강우운동에너지식을 유도하기 위한 것으로서 강우강도와 강우운동에너지의 관계를 규명하는데 중점을 두었다. 또한 이를 통해 또한 기존에 국내 및 국외에서 개발된 강우운동에너지식과 본 연구에서 도출한 식을 비교분석하여 서울 지점의 강우운동에너지 특성을 분석하였다.

## 2. 강우운동에너지식

### 2.1 국외 강우운동에너지식

USLE는 Wischmeier and Smith(1978)에 의해 한차례 업데이트되었고, Renard et al.(1997)에 의해 개정범용토양유실공식

(Revised USLE, 이하 RUSLE)으로 발전되었으며, Foster et al.(2003)이 컴퓨터 프로그램인 RUSLE2 (Version 2 of RUSLE)를 개발하여 현재에 이르고 있다. USLE, RUSLE, RUSLE2에서 적용하고 있는 강우침식인자에 대한 정의는 동일하지만, 강우침식인자를 계산하기 위해서 강우에너지를 산정할 때 사용되는 식은 각각 상이하다. Eq. (6)은 USLE의 강우운동에너지식을 나타낸 것이다. 이 식은 Eq. (3)의 형태를 가진 강우운동에너지식이다.

$$e_{kv} = 11.9 + 8.73 \log_{10} I \quad (6)$$

여기서,  $e_{kv}$ 는 강우운동에너지( $J/m^2/mm$ ),  $I$ 는 강우강도( $mm/h$ )를 의미한다. Eq. (6)은 USLE의 강우운동에너지식을 SI단위로 바꾼 것이다(Foster et al., 1981). Foster et al.(1981)은 Eq. (6)에서 강우강도가 76 mm/h 이상일 경우,  $e_{kv}$ 의 상한값을 28.3이라고 하였다. 국내에서 Jung et al.(1983)과 Park et al.(2000)은 Eq. (6)을 이용하여 강우침식인자를 계산한 바 있으며, 한국의 환경부가 채택하고 있는 강우운동에너지식이다.

RUSLE에서 기본식으로 채택하고 있는 Brown and Foster (1987)의 강우운동에너지식은 Eq. (7)과 같다. 이 식은 Brown and Foster(1987)가 미국 Mississippi주 Holly Springs의 빗방울 입경분포로부터 유도한 식이다(Renard et al., 1997).

$$e_{kv} = 29[1 - 0.72 \exp(-0.05I)] \quad (7)$$

여기서,  $e_{kv}$ 는 강우운동에너지( $J/m^2/mm$ ),  $I$ 는 강우강도( $mm/h$ )를 의미한다. 이후 McGregor et al.(1995)은 미국 Mississippi주 북쪽에 위치한 Goodwin Creek 유역 인근의 강우 관측소의 자료를 분석하여 새로운 강우운동에너지식을 유도하였다. RUSLE2에서 채택하고 있는 McGregor et al.(1995)의 강우운동에너지식은 Eq. (8)과 같다.

$$e_{kv} = 29[1 - 0.72 \exp(-0.082I)] \quad (8)$$

여기서,  $e_{kv}$ 는 강우운동에너지( $J/m^2/mm$ ),  $I$ 는 강우강도( $mm/h$ )를 의미한다. 이 식은 Eq. (4)의 형태를 가진 강우운동에너지식으로서, Brown and Foster(1987)의 식과 비교해보았을 때, 상수 값인  $b$ 가 0.05에서 0.082로 소폭 증가했음을 알 수 있다.

또한 Van Dijk et al.(2002)은 미국, 호주, 인도네시아, 포르투갈 등에서 유도된 12개 강우운동에너지식으로부터 Eq. (4)에 해당되는  $e_{max}$ ,  $a$ ,  $b$ 의 각 변수 값을 단순 평균하여 다음과 같은 강우운동에너지식을 제안한 바 있다.

$$e_{kv} = 28.3[1 - 0.52 \exp(-0.042I)] \quad (9)$$

여기서,  $e_{kv}$ 는 강우운동에너지( $J/m^2/mm$ ),  $I$ 는 강우강도( $mm/h$ )를 의미한다. Eq. (9)는 National Disaster Management Research Institute(2005)가 개발한, 산지사면의 토양침식 예측모형(Soil Erosion Model for Mountain Area, 이하 SEMMA)에서 채택하고 있는 강우운동에너지식이다.

## 2.2 국내 강우운동에너지식

Noe and Kwon(1984)은 1980년 6~9월 및 1982년 6~9월의 서울 지점과 1983년 6~9월 기간의 수원지점에서 측정된 총 801개 분 단위 데이터를 분석하여 한국의 강우운동에너지식을 제안한 바 있으며, Kim et al.(2010)은 2008년 8월의 1회 호우사상과 2009년 8월의 2회 호우사상을 대상으로 5분 단위 423개 데이터를 분석하여 안성 지점의 강우운동에너지식을 유도한 바 있다. Lim et al.(2012)은 2010년 1~7월 기간의 대전 지점의 17개 호우사상을 대상으로 5분 단위로 측정된 1,841개 데이터를 분석하여 대전 지점의 강우운동에너지식을 유도하였다. Lee and Won(2013)은 2006년 9월부터 2010년 5월 기간에 측정된 1분 단위 25,017개

Table 1. Previous Studies in Korea

Literatures		Rainfall Kinetic Energy Equation (unit)	Region
(1)	Noe and Kwon(1984)	$\log(e_{kv}) = 1.08 + 0.136 \log(I)$ ( $J/m^2/mm$ )	Seoul, Suwon
(2)	Kim et al.(2010)	$e_{kv} = 10.47 + 2.47 \log(I)$ ( $J/m^2/mm$ )	Ansung
(3)	Lim et al.(2012)	$e_{kv} = 24.49[1 - 0.73 \exp(-0.13I)]$ ( $J/m^2/mm$ ) $e_{kt} = 15.1I^{1.13}$ ( $J/m^2/h$ )	Daejeon
(4)	Lee and Won(2013)	$e_{kv} = 30.03[1 - 0.74 \exp(-0.068I)]$ ( $J/m^2/mm$ )	Daegwanryung
(5)	Lee(2015)	$e_{kv} = 8.175 + 3.896 \ln(I)$ ( $J/m^2/mm$ )	(1)+(2)+(3)+(4) Average
(6)	Shin et al.(2016)	$e_{kt} = 10.3I^{11/9}$ ( $J/m^2/h$ )	(Empirical approach)
(7)	Kim et al.(2017)	$e_{kt} = 5.951I^{1.33}$ ( $J/m^2/h$ )	Yongpyung

데이터를 분석하여 대관령 지점의 강우운동에너지식을 유도한 바 있다. Lee(2015)는 국내에서 개발된 Noe and Kwon(1984), Kim et al.(2010), Lim et al.(2012), Lee and Wan(2013)의 강우운동에너지식을 분석하여 새로운 강우운동에너지식을 유도한 바 있다.

Shin et al.(2016)은 국내의 강우운동에너지식을 유형별로 수집하고 분석한 뒤, Eq. (5)와 같은 파워함수 형태의 강우운동에너지식을 제안한 바 있으며, Kim et al.(2017)은 2014년부터 2016년 기간 동안의 분 단위 자료를 이용하여 용평 지점의 강우운동에너지식을 제안하였다.

국내 선행연구 중에서 서울 지점에 대한 강우운동에너지에 관한 연구는 Noe and Kwon(1984)의 연구가 유일하며, 그 이후 후속연구는 미진한 상태이다. 강우운동에너지와 관련된 국내 선행연구를 Table 1에 요약하였다.

### 3. 연구방법 및 자료

국내 선행연구 중, Kim et al.(2010)은 안성 지점, Lim et al.(2012)는 대전 지점, Lee and Won(2013)은 대관령 지점, Kim et al.(2017)은 용평 지점에 대해서 레이저 광학우적계인 파시벨(Parsivel)로 측정한 데이터를 분석하여, 강우운동에너지식을 유도



Fig. 1. Laser-Optical Disdrometer

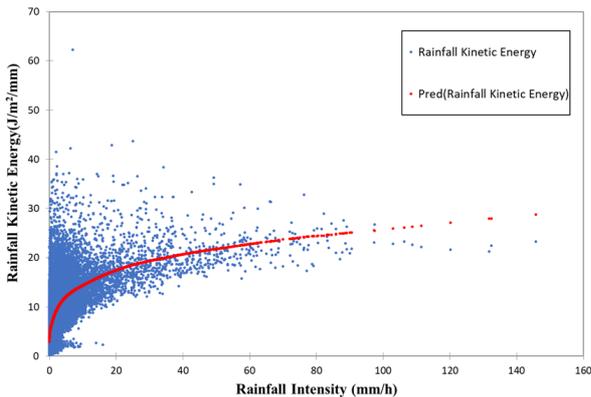


Fig. 2. Scatterplot between I and KEV

하였다. 이에 본 연구에서는 서울 노원 AWS 인근에 Parsivel 레이저 광학 우적계(Laser-optical disdrometer)를 설치하였으며, 2015년 10월부터 2017년 12월까지 측정한 강우자료를 강우운동에너지식 유도에 사용하였다. Parsivel 광학우적계로 측정한 강우량에 대한 검증은 노원 AWS의 시강우량을 이용하였으며, 약 5% 내외로 오차범위를 만족한 데이터를 사용하였다. 레이저 광학우적계는 1분 단위로 빔방울의 크기, 속도, 밀도 값을 제공하며, ASDO라는 전용 프로그램에서 강우강도와 강우운동에너지를 자동으로 산출해서 그 값을 제공하고 있다.

본 연구에서는 연구기간 동안에 1분 단위로 측정한 59,113개의 데이터를 자료 분석에 활용하였다. 측정한 자료 중에 최대 강우강도는 145.75 mm/h였으며, 이 때 강우운동에너지는 23.3 J/m<sup>2</sup>/mm로 측정되었다. Fig. 1은 본 연구에서 활용한 레이저 광학우적계의 사진이며, Fig. 2는 본 연구에서 사용한 강우강도와 강우운동에너지의 산포도를 나타낸 것이다.

### 4. 연구결과

#### 4.1 강우운동에너지식 유도결과

Parsivel 레이저 광학 우적계로 측정한 59,113개의 1분 단위 데이터 중에서 강우강도와 강우운동에너지의 관계를 다음과 같이 산포도로 나타내었다. Fig. 3(a)는 강우강도별로 측정한 강우운동에너지(J/m<sup>2</sup>/mm)를 도시한 것이며, Fig. 3(b)는 강우운동에너지(J/m<sup>2</sup>/mm)에 강우강도(mm/h)를 곱하여 단위시간당 강우운동에너지(J/m<sup>2</sup>/h)로 변환시켜 나타낸 산포도이다.

본 연구에서는 Fig. 3의 강우운동에너지와 강우강도의 관계 그래프를 토대로 다음과 같이 회귀분석을 통해 강우운동에너지식을 유도하였다. Fig. 3(a)에서 점선을 나타내는 식은 Eq. (10)과 같다.

$$e_{kv} = 8.163 + 1.949 \ln(I) \quad (10)$$

여기서,  $e_{kv}$ 는 비체적 강우운동에너지(J/m<sup>2</sup>/mm),  $I$ 는 강우강도(mm/h)이다. 이때 결정계수( $R^2$ )는 0.53이었다. Fig. 3(a)에서 점선을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\ln(e_{kv}) = 1.862 + 0.331 \ln(I) \quad (11)$$

여기서  $e_{kv}$ 는 비체적 강우운동에너지(J/m<sup>2</sup>/mm),  $I$ 는 강우강도(mm/h)이다. 이때 결정계수( $R^2$ )는 0.56으로 나타났다. Eq. (3)과 같은 대수함수 형태의 식은, 강우강도가 증가하더라도 강우운동에너지가 무한히 증가하지 않는 특성을 반영하지 못하는 제한사항이

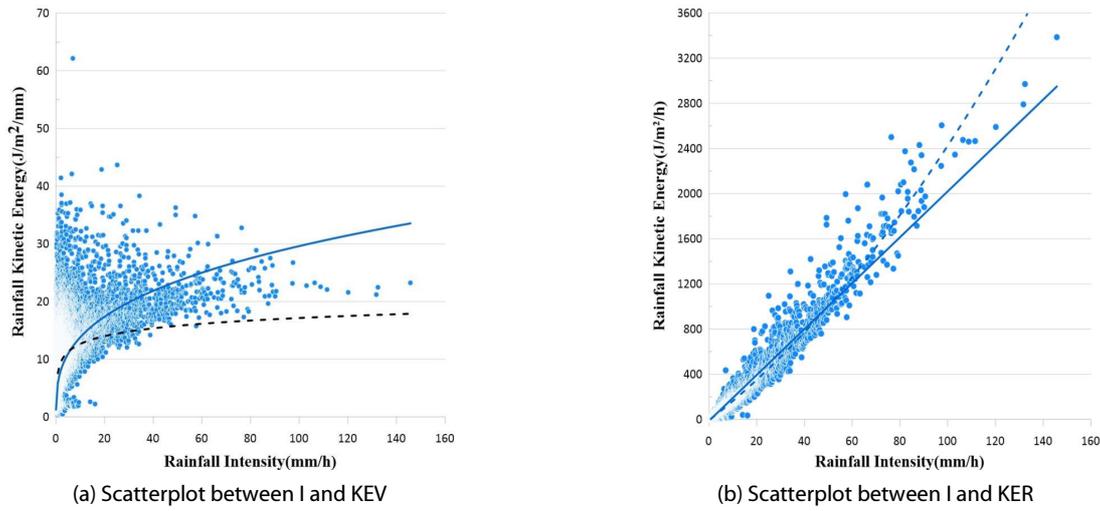


Fig. 3. Relationship between Rainfall Intensity and Rainfall Kinetic Energy

있다. 본 연구에서는 Lee and Won(2013)의 연구결과를 참고하여 100 mm/h 이상일 경우의 국내 강우운동에너지의 상한값을 30 J/m<sup>2</sup>/mm으로 하였다.  $e_{kv}$ 의 단위를 MJ/ha/mm로 바꿔주기 위해서는 Eq. (11)에 100을 곱하면 된다.

Fig. 3(b)는 강우강도와 비시간 강우에너지( $e_{kt}$ )의 관계를 도시한 것이며, 강우강도와 비시간 강우에너지의 데이터를 분석하여 다음과 같은 식을 도출하였다. Fig. 3(b)에서 실선은 Eq. (12)를, 점선은 Eq. (13)을 나타낸 것이다.

$$e_{kt} = 20.331I - 12.961 \quad (12)$$

여기서,  $e_{kt}$ 는 비시간 강우운동에너지(J/m<sup>2</sup>/h),  $I$ 는 강우강도(mm/h)이며, 이때 결정계수( $R^2$ )는 0.94로 나타났다. 또한 파워함수 형태로 강우운동에너지식을 유도한 결과는 다음과 같다.

$$e_{kt} = 6.439I^{1.33} \quad (13)$$

여기서,  $e_{kt}$ 은 비시간 강우운동에너지(J/m<sup>2</sup>/h),  $I$ 는 강우강도(mm/h)이며, 이때 결정계수( $R^2$ )는 0.92로 나타났다.

Fig. 3(b)에서 점선의 경우, 일정 강우강도가 커질수록 높게 추정되는 것으로 나타나서, 이에 본 연구에서는 강우강도가 25 mm/h 이상일 때 강우운동에너지식을 다음과 같이 추가로 제시하였다.

$$e_{kt} = 10.529I^{1.177} \quad (14)$$

여기서,  $e_{kt}$ 는 비체적 강우운동에너지(J/m<sup>2</sup>/h),  $I$ (mm/h)는 강우강도를 의미한다. 이때, 결정계수( $R^2$ )는 0.84로 나타났다.

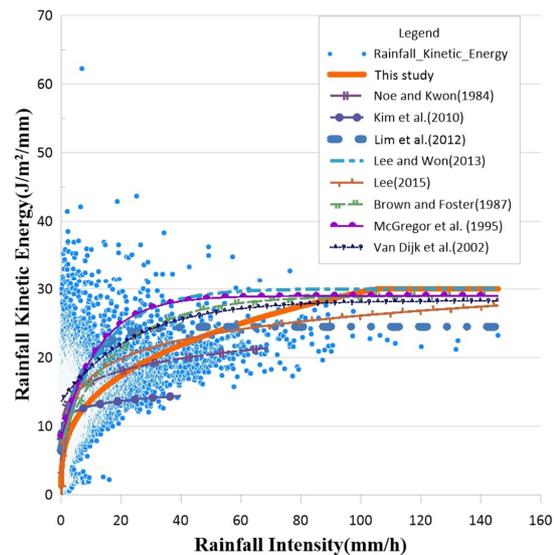


Fig. 4. Comparison with the Previous Equations

#### 4.2 기존 비체적 강우운동에너지식과 비교

본 연구에서 유도한 강우운동에너지식을 선행 연구결과와 비교하기 위하여 선행 강우운동에너지식을 유도할 때 경계조건이 되었던 강우강도의 구간 범위를 적용하여 도시하였다. 예를 들어 Kim et al.(2010)은 실험조건에서 최대 강우강도가 40 mm/h였고, Noe and Kwon(1984)의 경우는 최대 강우강도가 70 mm/h였다. 본 연구에서 유도한 Eq. (11)과 Table 1에 제시한 국내 선행 연구의 5개 강우운동에너지식 및 국외 강우운동에너지식인 Eqs. (7)-(9)를 함께 Fig. 4에 나타내었다. Table 2는 선행연구에서 유도된 식과 본 연구에서 유도된 식을 형태별로 정리해서 비교한 것이다. Table 2에서 결정계수( $R^2$ )는 식을 유도할 당시의 결정계수를 해당 문헌에서

Table 2. Comparison between New Equations and the Previous Studies for KEV

Classification	Rainfall Kinetic Energy Equation ( $J/m^2/mm$ )	R <sup>2</sup>
This Study (Eq. (11))	$\ln(e_{kv}) = 1.862 + 0.331\ln(I)$	0.56
Noe and Kwon(1984)	$\log(e_{kv}) = 1.08 + 0.136\log(I)$	0.40 (R = 0.63)
This Study (Eq. (10))	$e_{kv} = 8.163 + 1.949\ln(I)$	0.53
Lee(2015)	$e_{kv} = 8.175 + 3.896\ln(I)$	-
Kim et al.(2010)	$e_{kv} = 10.47 + 2.47\log(I)$ for Ansung	0.24
Lim et al.(2012)	$e_{kv} = 11.52 + 2.71\log(I)$ for Daejeon	0.41

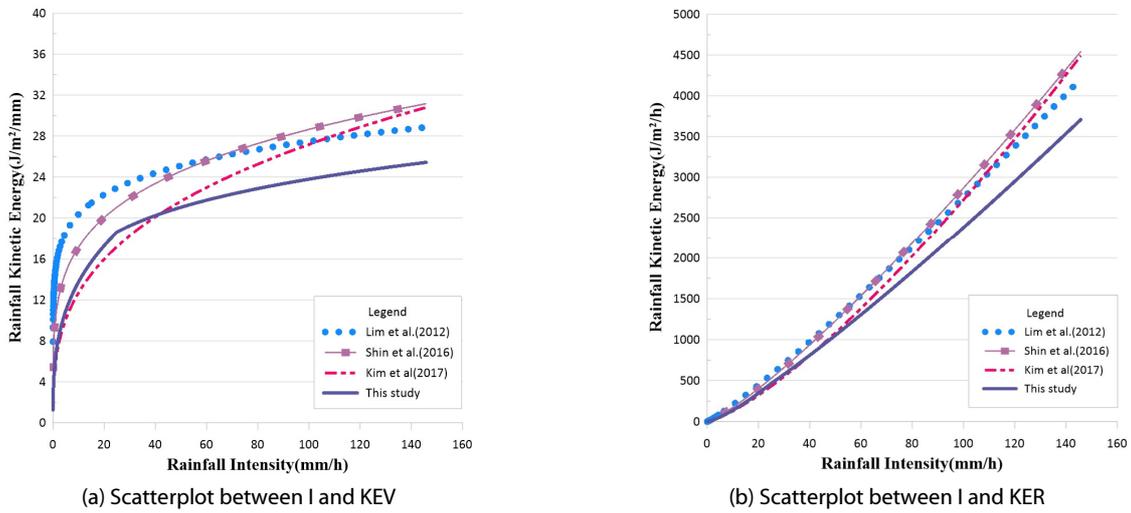


Fig. 5. Relationship between Rainfall Intensity and Rainfall Kinetic Energy

Table 3. Comparison between New Equations and the Previous Studies for KER

Classification	Rainfall Kinetic Energy Equation ( $J/m^2/h$ )	R <sup>2</sup>
This Study (Eq. (13))	$e_{kt} = 6.439I^{1.33}$	0.94
This Study (Eq. (14))	$e_{kt} = 10.529I^{1.177}$ ( $I > 25mm/h$ )	0.84
Lim et al.(2012)	$e_{kt} = 15.1I^{1.13}$ for Daejeon	0.98
Shin et al.(2016)	$e_{kt} = 10.3I^{11/9}$	Empirical approach
Kim et al.(2017)	$e_{kt} = 5.951I^{1.33}$ for Yongpyung	0.90

찾아서 정리한 것이다.

연구결과, Fig. 4에서 알 수 있듯이, 서울 지점의 강우운동에너지는 Noe and Kwon(1984)의 강우운동에너지식과 비교했을 때, 강우강도 30 mm/h 이하인 경우는 동일 강우강도에서 작은 값을 갖지만, 30 mm/h 이상인 경우는 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 대관령 지점에서 유도한 Lee and Won(2013)의 강우운동에너지 보다는 약 100 mm/h 이하일 때 동일 강우강도에서 더 작은 강우에너지를 갖는 것으로 나타났다.

기존에 국내에서 활용되고 있는 USLE, RUSLE, RUSLE2의 강우운동에너지식과 비교시 서울 지점의 강우운동에너지는 강우강도 100 mm/h 이하일 경우, 동일 강우강도에서 더 작은 강우운동에너지를 갖는 것으로 나타났다. 이것은 서울 지점의 강우운동에너지의 특성이 강우강도 100 mm/h 이하일 경우에 다른 지역에 비해 동일 강우강도에서 더 작은 강우침식인자 값을 갖는다는 것을 의미한다.

### 4.3 기존 비시간 강우운동에너지식과 비교

Table 1에 제시한 것처럼 Shin et al.(2016)과 Kim et al.(2017)은 비시간 강우운동에너지식을 파워함수 형태로 제시한 바 있다. 본 연구에서 강우강도가 25 mm/h 미만일 때, Eq. (13)을 적용하고 25 mm/h 이상일 때 Eq. (14)를 적용한 결과를, Shin et al.(2016)과 Kim et al.(2017)의 식과 비교하면 Fig. 5(b)와 같다.

비시간 강우운동에너지는 Eq. (2)의 관계식에 의거하여 비체적 강우운동에너지로 환산이 가능한데, Fig. 5(a)는 비시간 강우운동에너지를 비체적 강우운동에너지로 변환하여 도시한 것이다. 이를 통해서 비체적 강우운동에너지의 차이를 살펴볼 수 있다. Table 3은 선행연구에서 유도된 식과 본 연구에서 유도된 식을 비교한 것이다. Table 3에서 결정계수( $R^2$ )는 식을 유도할 당시의 결정계수를 해당 문헌에서 찾아서 정리한 것이다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 본 연구에서 유도한 서울 지점의 강우운동에너지 식은 Shin et al.(2016)과 Lim et al.(2012) 식과 비교했을 때, 동일한 강우강도에도 작은 강우운동에너지 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한, Kim et al.(2017)의 용평지점에서 유도한 식과의 비교하면, 강우강도 약 40 mm/h 이하에서는 서울 지점의 강우운동에너지가 약간 높게 나타나지만, 40 mm/h 이상에서는 동일한 강우강도일 때 용평지점의 강우운동에너지가 서울지점의 강우운동에너지보다 더 크게 나오는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구는 서울 지역의 강우운동에너지 특성을 분석하기 위한 목적으로 수행되었으며 이를 위해, 서울에서 Parsivel 광학우적계로 3개년 동안 측정된 강우강도와 강우운동에너지와의 관계를 분석하여 서울 지점의 강우운동에너지식을 새롭게 유도하여 제시하였다. 또한, 기존에 국내 및 국외에서 개발된 강우운동에너지식과 본 연구에서 도출한 강우운동에너지식의 특성을 비교 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 기존에 서울과 수원 지점의 강우사상을 토대로 유도된 Noe and Kwon(1984)의 강우운동에너지식은 예측된 호우사상의 강우강도 범위가 최대 70 mm/h라는 한계가 있었고, 이를 활용시, 동일 강우강도에서 USLE의 강우운동에너지식보다 약 15~20 % 정도 작은 값을 갖는 것으로 나타났다(Lee et al., 2011), 본 연구는 3개년 동안의 계측데이터를 이용하여 최대 강우강도 145.75 mm/h를 포함하는 서울 지점의 강우운동에너지식을 새롭게 제시하였다. 또한 이를 통해 100 mm/h 이하의 동일 강우강도 하에서 서울 지점의 강우운동에너지가 Noe and Kwon(1984)의 강우운동에너지식으로 추정된 값보다는 크고, USLE의 강우운동에너지식으로 산출한 값보다 약 10 % 작은 값을 갖는다는 것을 알 수 있었다.

둘째, 국내에서 안성, 대관령, 용평 지점에서 유도된 강우운동에너지식과 본 연구에서 유도된 식을 비교해본 결과, 강우강도 40 mm/h 이상에서 서울 지점의 강우운동에너지가 다른 지역에 비해서 작은 값을 갖는 것을 알 수 있었다.

강우운동에너지는 빗방울의 크기와 낙하속도, 밀도와 관계가 깊으며, 동일 강우강도, 동일 지점이라고 하더라도 계절과 시간 등에 따라 다를 수 있고, 지점별로 상이할 수밖에 없다. 그럼에도 불구하고 지난 40여 년 동안 미국의 특정지점에서 유도된 하나의 강우운동에너지식을 아무런 비판 없이 국내 전 지역에 채택하여 활용해온 것이 사실이다. 그 이유는 이를 대체할 수 있는 강우운동에너지식에 대한 심도 깊은 연구가 없었기 때문인 것으로 사료되며, 이에 본 연구는 서울 지점의 호우사상을 바탕으로 강우운동에너지식을 새롭게 유도하였다. 그 결과, 서울 지점의 강우운동에너지의 특성은 동일 강우강도라고 하더라도 국외에서 유도된 강우운동에너지식을 이용하여 산정한 값과 대전, 대관령, 용평 지점 등에서 유도된 값과 다른 특성을 보임을 알 수 있었다. 강우운동에너지 값이 달라지면 강우침식인자 값이 달라지기 때문에 USLE를 이용한 토양침식량을 추정할 때 불확실성이 증가하게 된다.

본 연구는 3개년 동안 측정된 자료를 토대로 하였으나 자료 구축은 계속 진행 중에 있으며, 후속연구로서 국내 Parsivel 광학우적계가 설치되어 있는 국립기상과학원의 자료를 토대로 한국의 지점별 강우운동에너지식을 유도하고 그 특성을 비교분석하는 연구를 수행할 계획이다. 본 연구에서 제시한 서울 지점의 강우운동에너지식은 향후 한국의 강우침식인자를 재산정하는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 2019년 화랑대연구소 군사학술연구과제 연구비 지원을 받았으며, 광학 우적계는 2015년 한국연구재단 연구비 지원을 받아서 설치된 장비를 사용하였습니다. 이에 감사를 드립니다.

본 논문은 2019 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

## References

- Brown, L. C. and Foster, G. R. (1987). "Storm erosivity using idealized intensity distributions." *Transactions of the ASAE*, Vol. 30, No. 2, pp. 379-386.
- Foster, G. R., McCool, D. K., Renard, K. G. and Moldenhauer, W. C. (1981). "Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units." *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 36, No. 6, pp. 355-359.

- Foster, G. R., Yoder, D. C., Weesies, G. A., McCool, D. K., McGregor, K. C. and Bingner, R. L. (2003). *RUSLE 2.0 user's guide.* USDA-Agricultural Research Service, Washington D.C.
- Jung, P. K., Ko, M. H., Im, J. N., Um, K. T. and Choi, D. U. (1983). "Rainfall erosion factor for estimating soil loss." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 16, No. 2, pp. 112-118 (in Korean).
- Kim, J. G., Yang, D. Y. and Kim, M. S. (2010). "Evaluation physical characteristics of raindrop in Anseung, Gyeonggi province." *Journal of the Korean Geomorphological Association*, Vol. 17, No. 1, pp. 49-57 (in Korean).
- Kim, S. J., Lee, J. H., Shim, J. G. and Choi, B. C. (2017). "Analysis on the characteristics of rainfall kinetic energy at Youngpyung using PARSIVEL observation data." *Proceedings of the Autumn Meeting of KMS in 2017*, KMS, pp. 170-171 (in Korean).
- Kinnell, P. I. A. (1981). "Rainfall intensity-kinetic energy relationships for soil loss prediction." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 45, No. 1, pp. 153-155.
- Lee, J. H. (2015). "A comparative study on rainfall kinetic energy equations for Korea." *Proceedings of the KWRA 2015 Conference*, Korea Water Resources Association, pp. 32-36 (in Korean).
- Lee, J. H., Shin, J. Y. and Heo, J. H. (2011). "Evaluation of rainfall erosivity in Korea using different kinetic energy equations." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 44, No. 3, pp. 337-343 (in Korean).
- 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 the Korean Society of Hazard Mitigation*, KSHM, Vol. 13, No. 3, pp. 177-184 (in Korean).
- Lim, Y. S., Kim, J. W., Kim, J. K. and Park, B. I. (2012). "Evaluation of kinetic energy of raindrops at Daejeon city using laser-optical disdrometer." *Journal of the Korean Geomorphological Association*, Vol. 19, No. 2, pp. 133-143 (in Korean).
- McGregor, K. C., Bingner, R. L., Bowie, A. J. and Foster, G. R. (1995). "Erosivity index values for Northern Mississippi." *Transactions of the ASAE*, Vol. 38, No. 4, pp. 1039-1047.
- National Disaster Management Research Institute (NDMI) (2005). *A basic study on the development of the soil erosion model in the mountain area (SEMMA)*, p. 20 (in Korean).
- Nearing, M. A., Yin, S. Q., Borrelli, P. and Polyakov, V. O. (2017). "Rainfall erosivity: An historical review." *CATENA*, Vol. 157, pp. 357-362.
- Noe, J. K. and Kwon, S. K. (1984). "A study of the estimation of rainfall kinetic energy based on rainfall characteristics." *College of Agricultural Research, Seoul National University*, Vol. 9, No. 2, pp. 23-31 (in Korean).
- Park, J. H., Woo, H. S., Pyun, C. K. and Kim, K. I. (2000). "A study of distribution of rainfall erosivity in USLE/RUSLE for estimation of soil loss." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 33, No. 5, pp. 603-610 (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)*, Agricultural Handbook, No. 703, U. S. Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- Salles, C., Poesen, J. and Sempere-Torres, D. (2002). "Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity." *Journal of Hydrology*, Vol. 257, No. 1-4, pp. 256-270.
- Shin, S. S., Park, S. D. and Choi, B. K. (2016). "Universal power law for relationship between rainfall kinetic energy and rainfall intensity." *Advances in Meteorology*, Vol. 2016, Article ID 2494681, pp. 1-11.
- Van Dijk, A. I. J. M., Bruijnzeel, L. A. and Rosewell, C. J. (2002). "Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal." *Journal of Hydrology*, Vol. 261, No. 1, pp. 1-23.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1958). "Rainfall energy and its relationship to soil loss." *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 39, No. 3, pp. 285-291.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1965). *Rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains-guide for selection of practices for soil and water conservation*. Agriculture Handbook, No. 282, U. S. Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook, No. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, USA.