

## 강우 운동에너지식에 따른 한국의 강우침식인자 평가

이준학\* · 신주영 · 허준행

연세대학교 토목환경공학과

### Evaluation of Rainfall Erosivity in Korea using Different Kinetic Energy Equations

Joon-Hak Lee\*, Ju-Young Shin, and Jun-Haeng Heo

Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, 134 Shinchon-Dong, Seoul, 120-749, Korea

A particular empirical equation for rainfall kinetic energy is needed to compute rainfall erosivity, calculated by the annual sum of the product of total rainfall energy and maximum 30-min rainfall intensity. If rainfall kinetic energy equation was different, rainfall erosivity will be produced differently. However, the previous studies in Korea had little concern about rainfall kinetic energy equation and it was not clear which rainfall kinetic energy is suitable for Korea. The purpose of this study is to analyze and evaluate the difference of the rainfall erosivity based on different rainfall kinetic energy equations obtained from previous studies. This study introduced new rainfall erosivity factors based on rainfall kinetic energy equation of Noe and Kwon (1984) that is only regression model developed in Korea. Data of annual rainfall erosivity for 21 weather stations in 1980~1999 were used in this study. The result showed that rainfall erosivity factors by the previous equations had been about 10~20% overestimated than rainfall erosivity by Noe and Kwon (1984)'s equation in Korea.

**Key words:** Rainfall kinetic energy, Rainfall erosivity, RUSLE, Soil erosion

## 서 언

강우에 의한 토양침식 (soil erosion)은 농경지 면적의 감소 및 사태 유발, 토사의 하천 유입으로 인한 환경오염의 원인이 되고 있다. 토양의 보존 및 유지관리를 위해서는 장기적인 토양침식량을 평가하고 이를 저감할 수 있는 대책 마련이 필요하다. 국내에 잘 알려진 범용토양유실공식 (Universal Soil Loss Equation, USLE)과 개정범용 토양유실공식 (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)은 장기간에 걸친 연평균 토양유실량을 예측할 수 있는 경험적인 모델로서, 지난 40여년 동안 전 세계적으로 널리 적용되어 왔다. 우리나라는 1970년대 후반부터 USLE를 국내 농업분야에 적용하기 위한 연구가 시작되었으며, 현재는 토목 및 환경 분야에서도 토사유출과 관련된 연구가 진행 중이다.

USLE 또는 RUSLE는 강우침식인자 (rainfall erosivity; R factor), 토양침식인자 (soil erodibility factor; K factor), 사면길이 인자 (hillslope-length factor; L factor), 사면 경사인자 (hillslope-gradient factor; S factor), 식생피복인자

또는 작물경작인자 (cover-management factor; C factor), 토양보전인자 또는 침식조절관행인자 (support practice factor; P factor)의 6가지 인자로 구성된다. 이 중에서 강우침식인자 (rainfall erosivity; R factor)는 USLE 또는 RUSLE의 6가지 인자 중에서 유일하게 기상 특성을 반영하고 있는 기후인자 (climate factor)이다 (Renard et al, 1997; Wischmeier and Smith, 1978). 강우침식인자는 비가 내리는 시점부터 종료될 때까지의 강우에너지 (E)의 총합과 해당 기간의 30분 최대 강우강도 ( $I_{30}$ )의 곱으로 정의된다. 강우에너지 (E)는 호우 지속기간 동안의 강우 운동에너지 (rainfall kinetic energy; e)와 그 강우강도 (rainfall intensity)에 해당하는 강우량 (rainfall amount)의 곱으로 정의되는데, 강우 운동에너지 (e)는 별도의 경험식을 이용하여 계산하도록 되어 있다 (Wischmeier and Smith, 1978).

USLE가 수록되어 있는 미 농무부 (U.S. Department of Agriculture, USDA)의 농업핸드북 No. 537 (Wischmeier and Smith, 1978)과 RUSLE가 수록되어 있는 농업핸드북 No. 732 (Renard et al., 1997)에서는 각각 강우침식인자 계산을 위한 경험적인 강우 운동에너지식을 제시하고 있다. USLE는 미국 워싱턴 D.C.의 호우사상으로부터 유도된 Laws and Parsons (1943)의 연구결과에 기초한 Wischmeier and Smith (1978)의 식을 채택하고 있으며, RUSLE에서는 미국 미시시

접수 : 2011. 5. 26 수리 : 2011. 6. 8

\*연락처 : Phone: +8223931587

E-mail: cetera@yonsei.ac.kr

피주 Holly Springs에서 유도된 Brown and Foster (1987)의 강우 운동에너지식을 추천하고 있다. 또한 RUSLE의 업그레이드 버전인 RUSLE2 (Foster et al., 2003)에서는 미국 미시시피주 북쪽에 위치한 Goodwin Creek 유역 인근에서 유도된 McGregor et al. (1995)의 강우 운동에너지식을 채택하고 있다. 이와 같이 USLE와 RUSLE, RUSLE2에서 각각 추천하고 있는 강우 운동에너지식은 모두 미국 워싱턴 D.C와 미시시피 지역 등 미국의 특정지역 호우사상을 토대로 도출된 것이다. 만약 USLE, RUSLE, RUSLE2에서 사용하고 있는 강우 운동에너지식을 지역에 상관없이 그대로 적용한다면, 미국 지역의 호우사상의 특성과 해당 지역의 호우사상의 특성 (빗방울의 입경분포, 강우강도와 에너지의 관계 등)이 같다는 기본 가정을 전제로 하고 있는 것이다. 그러나 기후별 (온대, 열대, 아열대 등), 지역별 (해안, 내륙, 산간지역 등)로 강우분포 특성이 현저히 다르다는 것을 감안할 때, 지역 특성에 맞는 강우 운동에너지식을 고려해볼 필요가 있다.

이미 국외에서는 일본 오키나와 (Onega et al., 1988), 홍콩 (Jayawardena and Rezaur, 2000), 호주 (Rosewell, 1986), 이탈리아 Toscana (Zanchi and Torri, 1980), 포르투갈 (Coutinho and Thomas, 1995) 등 세계 각국의 많은 연구자들이 해당 지역의 강우 특성에 맞는 운동에너지식을 각각 제안한 바 있다. 이것은 지역에 따라 실제로 강우강도에 따른 운동에너지 값의 차이가 발생한다는 것을 의미한다. 우리나라에서는 Noe and Kwon (1984)이 비교적 짧은 기간이지만 3년간 서울 지점과 수원 지점의 강우를 계측하여 우리나라 강우특성을 고려한 강우 운동에너지 식을 제안한 바 있으나 그동안 널리 알려지지 않았다. 최근 Lee and Chung (2009)은 강릉지점의 42개 호우사상을 대상으로 국외에서 유도된 10가지 강우 운동에너지식에 따른 운동에너지와 토사유출량과의 상관성을 분석한 결과, 우리나라에서 개발된 Noe and Kwon (1984)의 식으로 계산한 강우 운동에너지 값이 토사유출량과 가장 상관성이 높았다는 연구결과를 발표하였다.

현재 우리나라의 강우침식인자는 Jung et al. (1983)과 Park et al. (2000)이 Wischmeier and Smith (1978)의 강우 운동에너지식으로 계산한 값이 널리 알려져 있으며, 이들의 강우침식인자는 현재 농촌진흥청에서 제공하는 전국 단위 토양침식지도의 입력값으로 활용되고 있다. 이 중에서 Park et al. (2000)이 계산한 강우침식인자는 자기우량기록지 또는 연속된 분단위 강우자료를 이용한 것이 아니라 제한된 기간의 1시간 강우자료를 이용하여 추정된 값으로서, 정확한 강우침식인자 값으로 보기 어렵다.

동일한 강우자료를 사용하더라도 강우 운동에너지식이 달라지면 강우침식인자 값이 달라질 것이다. 국외에서는 Yu (1999)가 호주 열대지역의 호우사상을 바탕으로 USLE와 RUSLE의 강우 운동에너지식에 의한 강우침식인자를 계산

해본 결과, 약 10%의 차이가 났다고 보고한 바 있다. 그러나 기존의 국내 선행연구는 USLE와 RUSLE의 강우 운동에너지식이 다름에도 불구하고, 연구자가 어떤 강우 운동에너지 식을 선택하여 강우침식인자를 계산하였는지에 상관없이, 계산된 값 자체에 의미를 두어왔다. 현재까지 우리나라에서 개발된 Noe and Kwon (1984)의 강우 운동에너지식을 실질적으로 강우침식인자 산정에 적용하려는 시도가 이루어지지 않았으며, 또한 우리나라 강우자료를 바탕으로 다양한 강우 운동에너지식에 따른 강우침식인자 값의 차이를 정량적으로 분석하려는 시도도 없었다.

본 연구의 목적은 Jung et al. (1983)의 강우침식인자 이후, 계산되지 않았던 1980년부터 1999년까지의 연강우침식인자를 Noe and Kwon (1984)의 강우 운동에너지식을 이용하여 새롭게 계산하고, 기존 계산방법에 따른 지점별 강우침식인자 값과의 차이를 정량적으로 분석하기 위한 것이다. 본 연구에서는 국내에서 그동안 사용되어온 3가지 강우 운동에너지식과 Noe and Kwon (1984)의 강우 운동에너지식을 이용하여 기상청 산하 21개 지점의, 20년간의 지점별 연평균 강우침식인자 값을 각각 계산하였으며, 그 값의 차이를 정량적으로 비교 분석하였다.

## 기본 이론

본 연구에서는 강우침식인자 계산을 위해 USLE, RUSLE, RUSLE2에서 채택하고 있는 각 강우 운동에너지식과 Noe and Kwon (1984)의 식을 사용하였다. 이들 식에 대한 세부적인 설명은 다음과 같다.

**USLE의 강우 운동에너지식** USLE가 수록되어 있는 미 농무부 (U.S. Department of Agriculture, USDA)의 Agriculture Handbook No. 537 (Wischmeier and Smith, 1978)에서는 아래의 강우 운동에너지식을 채택하고 있다.

$$e = 916 + 331 \log_{10} I, \quad I < 3 \text{ in h}^{-1} \quad (1)$$

$$e = 1074, \quad I > 3 \text{ in h}^{-1} \quad (2)$$

여기서,  $e$ 는 강우의 운동에너지 ( $100 \text{ ft ton}^{-1} \text{ acre}^{-1} \text{ in}^{-1}$ ),  $I$ 는 강우강도 ( $\text{in h}^{-1}$ )를 의미한다. 강우강도가  $3 \text{ in h}^{-1}$  ( $7.6 \text{ cm h}^{-1}$ )를 초과할 경우 강우 운동에너지는 1074 ( $100 \text{ ft ton}^{-1} \text{ acre}^{-1} \text{ in}^{-1}$ )를 적용하도록 되어 있는데, 이것은 강우강도가  $3 \text{ in h}^{-1}$ 를 초과할 경우에 강우 운동에너지가 더 이상 증가하지 않음을 의미하는 것이다. 식 (1)과 (2)는 미터법 (metric unit) 단위 환산을 통해 아래 식의 형태로 나타낼 수 있다 (Wischmeier and Smith, 1978).

$$e = 210.3 + 89 \log_{10} I, \quad I < 7.6 \text{ cm h}^{-1} \quad (3)$$

$$e = 289, \quad I > 7.6 \text{ cm h}^{-1} \quad (4)$$

여기서,  $e$ 는 강우의 운동에너지 (Metric tonf m<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>),  $I$ 는 강우강도 (cm h<sup>-1</sup>)를 의미한다. 만약 강우강도가 7.6 cm h<sup>-1</sup>를 초과할 경우, 강우에너지는 289 (Metric tonf m<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>)를 적용한다. Jung et al. (1983)과 Park et al. (2000)은 식 (3)와 (4)를 이용하여 우리나라의 강우침식인자를 계산하였다.

**RUSLE의 강우 운동에너지식** RUSLE가 수록되어 있는 USDA Handbook No. 732 (Renard et al., 1997)에서는 두 가지 강우 운동에너지 식을 소개하고 있다. 첫 번째는 USLE의 강우 운동에너지식 (1)와 (2)를 SI단위로 바꾼 것이며, 두 번째는 Brown and Foster (1987)가 미국 미시시피주 Holly Springs의 빗방울 입경분포 (drop size distribution)로부터 새롭게 제안한 것으로서 식의 형태는 아래와 같다.

$$e = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05I)] \quad (5)$$

여기서,  $e$ 는 강우의 운동에너지 (MJ ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>),  $I$ 는 강우강도 (mm h<sup>-1</sup>)를 의미한다. 이 식에서 앞의 상수값 0.29는 강우 운동에너지의 상한선 ( $e_{max}$ )를 의미한다. 이 식은 USLE의 강우 운동에너지식보다 많은 자료를 분석하여 만들어진 식으로 RUSLE에서는 이 식의 사용을 추천하고 있으며 (Renard et al., 1997), 우리나라 소방방재청의 사전 재해영향평가 실무지침서 (2005)에서도 이 식의 사용을 권고하고 있다.

**RUSLE2의 강우 운동에너지식** RUSLE2는 토양유실량을 계산할 수 있는 전산프로그램 RUSLE의 업그레이드 버전이다 (Foster et al., 2003). RUSLE2의 기본모듈에는 강우침식인자를 계산할 수 있는 기본 알고리즘이 탑재되어 있는데, RUSLE2에서는 강우 운동에너지식으로 아래와 같은 McGregor et al. (1995)의 강우 운동에너지식을 채택하고 있다.

$$e = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.082I)] \quad (6)$$

여기서,  $e$ 는 강우의 운동에너지 (MJ ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>),  $I$ 는 강우강도 (mm h<sup>-1</sup>)를 의미하며, 이 식은 Brown and Foster (1987)의 식의 형태와 유사하다. 이 식은 McGregor et al. (1995)이 1982~1992년 기간 동안 미국 미시시피 북쪽에 위치한 Goodwin Creek 유역 인근의 29개 강우 관측소의 자료를 분석하여 유도한 식이다. 우리나라에서는 Shin (2010)이

식 (6)을 이용하여 우리나라의 33개 지점의 강우침식인자를 계산한 바 있다.

**Noe and Kwon (1984)의 강우 운동에너지식** Noe and Kwon (1984)은 서울 지점의 1980년 6월~9월, 1982년 8월~9월, 수원 지점의 1983년 6월~9월 기간의 호우사상을 대상으로 우적 (雨滴) 측정장치 (System for recording drop size distribution)를 이용하여 실측한 우적자료와 자기우량기록지로부터 읽은 동일기간의 우량자료를 사용하여 우리나라 강우특성에 맞는 운동에너지식을 유도하려는 노력을 기울였다. 801개의 1분 단위 우적입경자료에 대한 중위 (中位) 입경 (D50)과 강우강도 ( $I$ )와의 관계식을 유도하고, 이를 바탕으로 아래와 같은 회귀식을 제안하였다. 이 식에서 강우 운동에너지와 강우강도와의 상관계수는 0.630이었다.

$$\log_{10} e = 1.08 + 0.136 \log_{10} I \quad (7)$$

여기서,  $e$ 는 강우의 운동에너지 ( $J \text{ m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ),  $I$ 는 강우강도 (mm h<sup>-1</sup>)를 의미한다. Noe and Kwon (1984)은 우리나라의 강우 운동에너지가 미국의 강우 운동에너지보다 동일 강우강도 하에서 뚜렷이 작으며, 이는 동일 강우강도시 우리나라의 강우가 미국의 강우보다 더 작은 입경으로 구성되어 있기 때문인 것으로 추정하였다. 식 (7)은 비교적 짧은 기간의 자료를 토대로 유도된 식이지만, 우리나라의 호우사상으로부터 유도된 유일한 강우 운동에너지식이다.

## 자료 및 방법

본 연구에서는 기상청 산하 21개 지점의 1980~1999년 기간 (20개년)의 1분 단위 강우자료를 이용하였다. 모의에 사용한 강우자료는 기상청에서 자기우량기록지 (pluviograph)를 스캔하여 디지털로 판독 후 데이터베이스 (database)로 구축해놓은 강우자료 (Minutely data using the Magnetic Recording; MMR)로서 관측개시년도부터 1999년까지 구축되어 있다. Kwok et al. (2005)은 1분 단위 강우량 자료의 분석 및 신뢰도 조사를 위해, 32개 관측지점에 대하여 1시간 강우량의 산출값과 관측값을 비교한 결과 99% 이상의 유의수준에서 유용한 자료임을 알 수 있었다고 하였다.

본 연구에서는 먼저 기상청 산하 21개 지점의 1980~1999년 기간의 1분 단위 강우자료를 Fortran 프로그램을 이용하여 5분 단위로 합산하였다. 그리고 (R)USLE의 호우분류 기준을 적용하여 비가 내린 시점부터 종료될 때까지 12.7 mm (0.5 inch) 이상 내리거나, 12.7 mm 미만이라도 15분 동안 6.35 mm (0.25 inch) 내린 호우사상을 추출하였다. 호우와 호우 사이에 6시간 이내 무강우 (0.05 in, 즉 1.27 mm 이내)일 경우 2회의 호우사상으로 간주하고, 그렇지 않을

경우는 동일 호우사상으로 간주하였다. 이렇게 분류된 개별 호우사상에 대한 강우 운동에너지를 앞에서 설명한 4가지 운동에너지식을 각각 적용하여 계산하였으며, 여기에 해당 강우량을 곱하여 강우에너지를 산정하였다. 이렇게 계산된 개별 호우사상의 강우에너지의 총합에 호우 지속기간 동안의 30분 최대 강우강도를 곱하여 최종적으로 개별 호우사상의 강우침식인자 값을 산정하였다. 연강우침식인자는 개별 호우사상을 연간 합하여 산정하였으며, 연평균 강우침식인자는 지점별 연강우침식인자의 20년 평균값으로 산정하였다.

## 결과 및 고찰

Wischmeier and Smith (1978)의 호우분류 기준에 의해서 분류된 호우사상은 21개 지점의 총 8,814개로서 지점별 연평균 21회 정도로 나타났다. 이것은 토양유실이 시작되는 12.7 mm 이상의 강우량이 지역에 따라 차이가 있지만, 대체적으로 연강우 횟수가 20회 전후라고 했던 선행 연구결과 (Jung et al. 1983)와 일치하는 것이다. 분석에 사용한 호우사상의 지점별 세부현황은 Table 1과 같다.

Table 1에서 알 수 있듯이 원주, 진주 지점이 상대적으로 호우사상이 많고, 속초, 목포 지점이 상대적으로 호우사상

이 적은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 USLE에 수록된 Wischmeier and Smith (1978)의 강우 운동에너지식, RUSLE에서 추천하고 있는 Brown and Foster (1987)의 식, RUSLE2에서 채택하고 있는 McGregor et al. (1995)의 식과 Noe and Kwon (1984)의 강우 운동에너지식을 각각 적용하여 총 8,814개의 호우사상에 대한 강우침식인자를 계산하였으며, 이를 토대로 21개 강우관측소 지점에 대한 연평균 강우침식인자를 각각 계산하였다. 그 결과를 비교하기 위해 SI단위로 환산하여 Table 2에 나타내었다.

현재 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하고 있는 우리나라 토양침식지도는 Jung et al. (1983)과 Park et al. (2000)의 강우침식인자를 바탕으로 하고 있다. 이들은 Wischmeier and Smith (1978)의 강우 운동에너지식으로 계산된 값인데, Table 2의 R1은 이 식을 이용하여 계산한 지점별 연평균 강우침식인자를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Brown and Foster (1987)의 식으로 계산한 지점별 연평균 강우침식인자를 R2, McGregor et al. (1995)의 식을 이용하여 계산한 값을 R3, Noe and Kwon (1984)의 식을 이용하여 계산한 값을 R4 값으로 각각 나타내었으며, 기준에 적용하고 있는 연평균 강우침식인자와의 비교를 위하여 해당값을 R1으로 나눈 비율(%)을 비교해보았다. Fig. 1은 대구 지점의 1980~1999년 기간 동안의 연평균 강우침식인자 값을 비교한 것이다.

**Table 1. Storm events for the gauging stations (21 sites).**

Code	Name	Total storm events	Average storm events per year	Period
90	Sokcho	367	18	1980 - 1999 (20 years)
101	Chuncheon	422	21	
105	Gangneung	405	20	
108	Seoul	434	22	
112	Incheon	392	20	
114	Wonju	471	24	
127	Chungju	406	20	
129	Seosan	395	20	
131	Cheongju	416	21	
133	Daejeon	458	23	
135	Chupungnyeong	419	21	
138	Pohang	374	19	
140	Gunsan	397	20	
143	Daegu	391	20	
156	Gwangju	440	22	
159	Busan	456	23	
162	Tongyeong	439	22	
165	Mokpo	361	18	
168	Yeosu	459	23	
170	Wando	436	22	
192	Jinju	476	24	
Total	21 sites	8,814	21	

**Table 2. Annual mean rainfall erosivity using different kinetic equations (1980-1999).**

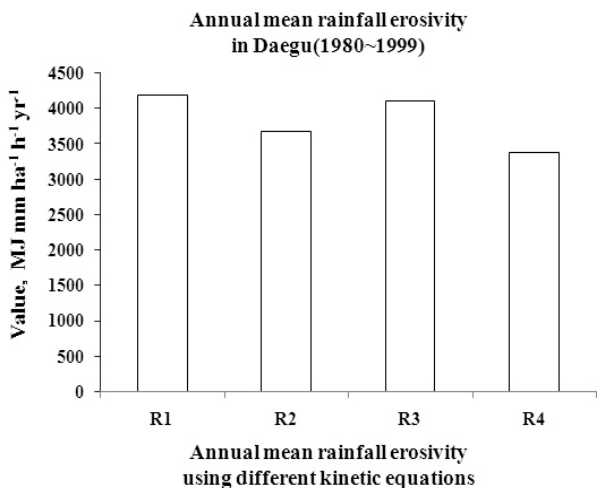
Code	Name	R1 <sup>†</sup>	R2 <sup>‡</sup>	R3 <sup>§</sup>	R4 <sup>¶</sup>	R2 / R1	R3 / R1	R4 / R1
		MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>				%		
90	Sokcho	5014	4281	4886	4067	85	97	81
101	Chuncheon	7066	6266	7012	5684	89	99	80
105	Gangneung	4693	4007	4583	3815	85	98	81
108	Seoul	8133	7386	8175	6496	91	101	80
112	Incheon	7224	6565	7240	5780	91	100	80
114	Wonju	11681	10950	11714	9929	94	100	85
127	Chungju	7651	7096	7739	6295	93	101	82
129	Seosan	6673	6019	6679	5352	90	100	80
131	Cheongju	5608	5031	5599	4485	90	100	80
133	Daejeon	7876	7183	7919	6312	91	101	80
135	Chupungnyeong	4349	3801	4261	3520	87	98	81
138	Pohang	4401	3856	4316	3572	88	98	81
140	Gunsan	5450	4859	5416	4372	89	99	80
143	Daegu	4184	3669	4110	3375	88	98	81
156	Gwangju	6796	6115	6797	5436	90	100	80
159	Busan	8041	7196	8019	6446	89	100	80
162	Tongyeong	5881	5129	5795	4746	87	99	81
165	Mokpo	4766	4236	4737	3824	89	99	80
168	Yeosu	8503	7641	8469	6869	90	100	81
170	Wando	8630	7802	8628	6966	90	100	81
192	Jinju	8527	7644	8441	6941	90	99	81

<sup>†</sup>by Wischmeier and Smith (1978)'s kinetic equation recommended in USLE.

<sup>‡</sup>by Brown and Foster (1987)'s equation recommended in RUSLE.

<sup>§</sup>by McGregor et al. (1995)'s equation recommended in RUSLE2.

<sup>¶</sup>by Noe and Kwon (1984)'s kinetic equation.



**Fig. 1. Annual mean rainfall erosivity in Daegu (1980-1999) using different rainfall kinetic equations (R1 calculated by Wischmeier and Smith (1978)'s kinetic equation; R2 by Brown and Foster (1987)'s; R3 by McGergor et al. (1995)'s; R4 by Noe and Kwon (1984)'s; the result showed that R1 > R3 > R2 > R4).**

Table 2와 Fig. 1에서 알 수 있듯이, Brown and Foster (1987)의 식으로 계산한 강우침식인자는 Wischmeier and

Smith (1978) 식으로 계산한 강우침식인자보다 약 6~15% 작은 것으로 나타났으며, McGregor et al. (1995)의 식으로 계산한 값은 Wischmeier and Smith (1978) 식으로 계산한 강우침식인자의 약 97~101% 범위로 나타났다. 이에 비해 Noe and Kwon (1984)의 식으로 계산한 강우침식인자는 Wischmeier and Smith (1978) 식으로 계산한 값의 약 15~20% 수준으로 나타났다. 평균적으로, McGregor et al. (1995)의 식으로 계산한 강우침식인자는 Wischmeier and Smith (1978)의 운동에너지 식으로 계산한 값보다 약 1% 정도의 차이가 나는 것으로 나타났으며, Brown and Foster (1987)의 식으로 계산한 강우침식인자는 평균 약 10%, 마지막으로 Noe and Kwon (1984)의 식으로 계산한 강우침식인자는 평균 약 20% 정도 작게 산정되는 것으로 나타났다. Fig. 2는 대구 지점에서 1999년에 발생한 19개의 호우사상을 대상으로 강우량에 상응하는 총 강우에너지를 나타낸 것이다.

Fig 2에서처럼 Noe and Kwon (1984)의 식으로 계산한 총 강우에너지 (total rainfall energy)는 강우량이 많아질수록, Wischmeier and Smith (1978) 식으로 계산한 총 강우에너지보다 값이 더 작아지는 것을 알 수 있었다. 이것은 강우량이 많은 호우사상일수록 Noe and Kwon (1984)의 식으

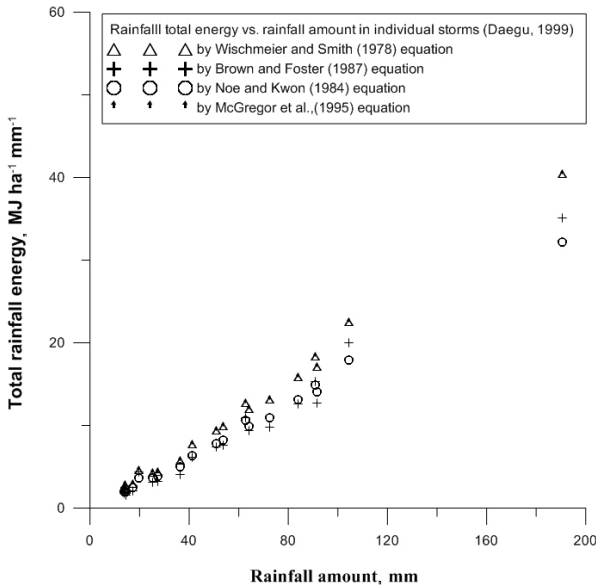


Fig. 2. Rainfall total energy using 4 kinetic equations vs. rainfall amount in individual storms, (e.g. Daegu in 1999).

로 계산한 강우침식인자 값과 Wischmeier and Smith (1978) 식으로 계산한 강우침식인자의 편차가 심해짐을 의미하는 것이다. 본 연구에서 이와 같이 동일한 강우데이터를 사용하더라도 강우 운동에너지식의 차이에 따라서 강우침식인자 값이 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

### 결론

강우침식인자는 토양유실모델링에 적용되는 중요한 기후인자로서 값의 변동성이 다른 인자에 비해서 비교적 크기 때문에 정확한 값을 산출하려는 노력이 계속되어왔다. (R)USLE의 강우침식인자를 계산하기 위해서 사용되는 강우 운동에너지식은 빗방울의 입경분포에 대한 현장 실측실험을 통해서 유도되는 것으로, 대부분 강우강도를 변수로 한 경험식의 형태를 가지고 있다. 기존 국내 선행연구는 어떤 강우 운동에너지식을 택하느냐에 따라 강우침식인자 값이 달라짐에도 불구하고, 강우 운동에너지식에 대한 관심보다는 계산된 강우침식인자 값 자체에 의미를 두어 왔다. 본 연구에서는 1980~1999년 기간 동안의 21개 지점에 대한 연평균 강우침식인자를 기상청의 1분 단위 강우자료를 이용하여 재계산하였으며, 다양한 강우 운동에너지식에 따른 강우침식인자 값의 차이를 비교 평가하였다. 본 연구로부터 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 우리나라 21개 지점의 총 8,814개 호우사상에 대한 강우침식인자를 계산하고 이를 분석해본 결과, 21개 지점의 연평균 강우침식인자 값의 크기는 평균 5442~6721 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 인 것으로 나타났다. 이 중 Noe and Kwon (1984)의 강우 운동에너지식을 이용한 값이 5442 MJ mm

ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>로 가장 작고, 그 다음 RUSLE에서 추천하고 있는 Brown and Foster (1987)의 식은 6035 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, RUSLE2에서 추천하고 있는 McGregor et al. (1995)의 식은 6692 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, Wischmeier and Smith (1978)의 강우 운동에너지식으로 계산한 값은 6692 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>로 나타났다. 특히 USLE의 Wischmeier and Smith (1978) 식을 이용한 값과 RUSLE2에서 채택하고 있는 McGregor et al. (1995)의 식에 의한 강우침식인자는 차이가 근소한 것 (1~3%)으로 나타났으나, RUSLE에서 추천하고 있는 Brown and Foster (1987)의 식과 Noe and Kwon (1984)의 식에 의한 값은 각각 평균 10% 및 20% 차이가 나는 것으로 나타났다. 이를 토대로 보았을 때, 과거 국외 강우 운동에너지식을 가감없이 적용해온 기존의 한국의 강우침식인자 (Jung et al., 1983; Park et al., 2000; Shin, 2010)가 그동안 과대평가되어 온 것이 아닌지에 대한 검토가 필요하다고 본다.

둘째, 세계 각국의 많은 연구자들이 각 지역에 맞는 강우 운동에너지식을 도출하려는 시도를 했던 이유는, USLE와 RUSLE에서 채택하고 있는 강우 운동에너지식이 미국의 특정지역 (워싱턴 및 미시시피 지역)의 호우사상으로부터 유도된 식이기 때문이다. 이런 관점에서 Noe and Kwon (1984)의 강우 운동에너지식은 3년이라는 비교적 짧은 기간에 유도된 식이지만, 한국 유일의 강우 운동에너지식으로 주목받을 만하다고 본다. 물론 Noe and Kwon (1984)의 식이 약 30년 전에 개발된 강우 운동에너지식이기 때문에, 최근 지구 온난화에 따른 기후변화와 연계하여, 30년 전과 현재의 강우 운동에너지 특성이 동일하지 여부에 대한 후속연구가 필요하다고 본다. 그러나 현재로서는 Lee and Chung (2009)의 연구결과에서 알 수 있듯이, 한국의 강우침식인자를 계산할 때, 국외 강우 운동에너지식보다 Noe and Kwon (1984)의 강우 운동에너지식을 적용하는 것이 보다 합리적일 것이라고 사료되며, 다른 강우 운동에너지식을 적용하더라도 그 값의 차이점이 비교 평가될 필요가 있다고 사료된다.

### 인용 문헌

Brown, L.C. and G.R. Foster. 1987. Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Trans ASAE* 30:379-386.  
 Coutinho, M.A. and P.P. Tomas. 1995. Characterization of raindrop size distributions at the Vale Formoso Experimental Erosion Center. *Catena* 25:187-197.  
 Foster, G.R., D.C. Yoder, G.A. Weesies, D.K. McCool, K.C. McGregor, and R.L. Bingner. 2003. RUSLE 2.0 user's guide. USDA-Agricultural Research Service, Washington D.C.  
 Jayawardena, A.W. and R.B. Rezaur. 2000. Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong. *Hydrol*

- Process. 14:1069-1082.
- Jung, P.K., M.H. Ko, J.N. Im, K.T. Um., and D.U. Choi. 1983. Rainfall Erosion factor for estimating Soil Loss. Korean J. Soil Sci. Fert. 16(2):112-118.
- Korean National Emergency Management Agency. 2005. Previousness Disaster Impact Assessment Handbook. p. 97. Seoul, Korea.
- Kwok, Y.M., J.K. Park, J.S. Jung, S.E. Jung, and D.Y. Yoon. 2005. Analysis and Assessment of reliability of 1 minute-based rainfall data. p. 316-317. Proceedings of the Spring Meeting, Korean Meteorological Society. Gangneong, Korea.
- Laws, J.O. and D.A. Parsons. 1943. The relation of raindrop size to intensity. Transactions, American Geophysical Union. 24:452-460.
- Lee, J.S. and J.H. Chung. 2009. Characteristics Analysis for RUSLE Factors based on Measured Data of Gangwon Experimental Watershed ( I ). J. of the Korean Society of Hazard Mitigation. 9(6):111-117.
- McGregor, K.C., R.L. Bingner, A.J. Bowie, and G.R. Foster. 1995. Erosivity index values for northern Mississippi. Trans ASAE. 38:1039-1047.
- Noe, J.K. and S.K. Kwon. 1984. A study of the estimation of rainfall kinetic energy based on rainfall characteristics. College of Agricultural Research. Seoul National University 9(2):23-31.
- Onega, K., K. Shirai, and A. Yoshinaga. 1988. Rainfall erosion and how to control its effects on farmland in Okinawa. p. 627-639. In Rimwanich, S. (eds). Land conservation for future generations. Department of Land Development, Bangkok.
- Park, J.H., H.S. Woo, C.K. Pyun, and K.I. Kim. 2000. A study of distribution of rainfall erosivity in USLE/RUSLE for estimation of soil loss. J. Korean Water Res. Assoc. 33(5):603-610.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agric. Research Service. Washington, D.C.
- Rosewell, C.J. 1986. Rainfall kinetic energy in eastern Australia. J. Clim. Appl. Meteorol. 25:1695-1701.
- Shin, Y. 2010. Estimation of rainfall erodibility factor R in the Universal Soil Loss Equation (USLE) using 1 minute rainfall data. p. 97. the Master Degree Thesis. Jeonju University. Jeonju City, Korea.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA Agric. Handbook. No. 537. Washington, D.C.
- Yu. B. 1999. A comparison of the R-factor in the universal soil loss equation and revised universal soil loss equation. Trans ASAE. 42:1615-1620.
- Zanchi, C. and Torri, D. 1980. Evaluation of rainfall energy in central Italy. p. 133-142. In De Boodt, M., and D. Gabriels. (eds), Assessment of erosion. Wiley, New York.