Rainfall Erosivity Factor of Korean Soils Estimated by Using USLE under Climate Change

Min Woo Kang¹, Dong Jin Kim², Kyoungjae Lim^{3*}, and Sang Soo Lee^{4*}

¹Ph.D. Candidate, Department of Environmental and Energy Engineering, Yonsei University, Wonju 26493, Korea

²Research Professor, Environmental Research Institute, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

³Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

⁴Associate Professor, Department of Environmental and Energy Engineering, Yonsei University, Wonju 26493, Korea

*Corresponding author: Sang Soo Lee, cons@yonsei.ac.kr

*Co-corresponding author: Kyoungjae Lim, kjlim@kangwon.ac.kr

ABSTRACT

Received: May 11, 2021

Revised: May 17, 2021

Accepted: May 18, 2021

ORCID

Min Woo Kang

<https://orcid.org/0000-0003-1638-9367>

Dong Jin Kim

<https://orcid.org/0000-0002-7784-4928>

Kyoungjae Lim

<https://orcid.org/0000-0001-6727-9059>

Sang Soo Lee

<https://orcid.org/0000-0001-7096-898X>

Sustainable soil environment along with available water resources is critical for food security and agricultural productivity. The Korea territory consists of 65% of mountainous topography and the variability of rainfall is rapidly increasing due to climate change, thereby increasing a risk of soil erosion. Soil erosion by water has been estimated using the empirical equations with accumulated data over the time in the U.S. since 1930 s, representatively the Universal Soil Loss Equation (USLE) published by the U.S. Department of Agriculture (USDA); however, this empirical model is not always well fitted to soil erosion estimations in other countries because of different regional characteristics. Moreover, application of the conventional equations of soil erosion like USLE for estimation of soil erosion under climate change is not appropriate. This study employed the data of rainfall erosivity for past 30 years (1981 - 2010) and recent 10 years (2011 - 2020) observed from ≤60 observations in Korea and compared them to evaluate the effect of climate change on soil erosion in Korea. The relationship between rainfall erosivity and daily maximum precipitation was positive ($R^2 = 0.66$), but indicated different central tendencies between data for past 30 years and recent 10 years. The values of rainfall erosivity in the southeast part of the country, e.g., Daegu, Ulsan, and Busan, have increased over the last 10 years compared to those over the past 30 years. The more effective and practical estimation technique of soil erosion should further be developed to ensure the climate change effects in Korea.

Keywords: Climate change, R factor, Soil erosion, USLE

Mapping the average annual R factor for each decade.

Introduction

지구온난화로 인한 기후변화는 우리 주변 환경에 막대한 영향을 끼친다. 특히 인간의 활동에 의해 발생된 온실가스 (greenhouse gases)는 기온과 해수면 증가 뿐 만 아니라 극한 가뭄과 홍수 빈도 증가, 강우 변동성 증가, 자연재해 증가, 비점오염 증가, 농업 생산성 저하 등으로 인한 사회·경제적 피해를 가속화 시키고 있다 (Lee and Kim, 2014; IPCC, 2019). 미국 환경청 (United States Environmental Protection Agency; USEPA, 2020)에 따르면, 전체 온실가스 발생량의 81%를 차지하고 있는 CO₂의 경우 그 발생량이 증가 추세에 있으며, 이로 인한 기후변화의 영향은 지속될 것으로 보고한 바 있다 (USEPA, 2020).

우리나라의 경우 몬순기후대에 위치하고 있으며 연평균 강우량이 ~1,200 mm에 달한다. 또한 계절별, 연도별, 지역별 강우량의 편차가 약 20%로, 토양침식 우려가 매우 크며 경사도가 높은 산악지형이 국토의 65%를 차지하고 있어 기후변화에 대한 토양침식 대책이 어느 때보다도 절실하다 (Um and Jeong, 2011). 강우에 의한 토양침식은 비산침식 (splash erosion), 면상침식 (sheet erosion), 세류침식 (rill erosion), 협곡침식 (gully erosion)으로 구분하며, 우리나라 농경지의 경우 집중강우 시 지표유거 (surface runoff)와 함께 발생하는 세류침식 및 협곡침식에 의해 흙탕물 발생 및 주변 수계의 부영양화 (eutrophication) 등 막대한 피해가 발생하고 있다 (Seo et al., 2010; Kum et al., 2011a; Lee et al., 2019).

연간 토양유실량 산정을 위해 대표적으로 미국농무성 (USDA)에서 개발한 범용토양침식공식 (Universal Soil Loss Equation, USLE)을 기반으로 한 경험 모델을 주로 사용하고 있다 (Lee, 2020). 기본적으로 USLE는 강우침식인자 (R), 토양침식인자 (K), 경사인자 (LS), 작물관리인자 (C) 및 관리인자 (P)를 활용하여 연간 토양유실량을 산정하며 (Prasannakumar et al., 2012; Park et al., 2019), 단일 강우 영향을 고려한 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), 인자 (factors) 보정을 통한 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 등 USLE에 기반을 둔 향상된 모델들을 활용하고 있다 (Wischmeier and Smith, 1978; Kum et al., 2011b; Djoukbal et al., 2019). 또한, 토양침식 예측 정확성을 확보하기 위해 WEPP (Water Erosion Prediction Project)와 EPM (Erosion Potential Method) 모델을 통한 토양유실 변화를 평가하는 연구도 진행된 바 있다 (Ahmadi et al., 2020; Guo et al., 2021).

USLE 구성 인자 중 강우인자 (R factor)의 경우 기후변화에 따른 변동성이 가장 크며 연간 토양유실량 산정에 있어 모수로 활용된다. 과거 USLE를 활용하여 우리나라 51개 관측지점의 1960년부터 1980년까지의 강우침식인자를 산정 연구와 (Jung et al., 1983) 1980년부터 2010년까지의 31년 동안 1분 단위 강우자료를 통해 21개 지점의 강우침식인자 산정 연구 (Lee et al., 2011)가 수행된 바 있다. 최근 1981년부터 2010년까지 전국 분포 60개 지점의 30년 강우침식인자를 산정하는 연구 결과들이 보고된 바도 있다 (Park et al., 2011). 하지만, 최근 기후변화로 인한 강우사상의 변화를 반영한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 우리나라의 강우변동성을 분석하고, 그에 따른 연간 토양유실량 변화를 추정하기 위하여 우리나라 58개 관측소 강우 자료를 활용하여 최근 10년 (2011 - 2020년)의 강우침식인자를 산정하고, 과거 30년 (1981 - 2010년) 강우침식인자 (Park et al., 2011)와 비교하여 우리나라 토양침식에 대한 기후변화의 영향을 고찰하였다.

Materials and Methods

기상자료 기상자료개방포털 (<https://data.kma.go.kr/>)을 통해 10년 (2011 - 2020년) 동안의 58개 관측소 지점 60분 단위 강우량 자료를 수집하여 강우침식인자를 산정하였다. 또한, 강우침식인자 변동을 추정하기 위해 Park et al. (2011)의 과거 30년 (1981 - 2010년)의 60개 관측소 지점 자료를 사용하여 비교·분석하였다.

강우침식인자 (R factor) 산정 본 연구에서는 Wischmeier and Smith (1978)의 토양유실예측모델을 사용하여 진행하였다. USLE 예측 모델은 강우침식인자 (R), 토양침식인자 (K), 경사인자 (LS), 작물인자 (C) 및 관리인자 (P)를 포함한 5개 인자들로 구성되어 연간토양유실 (A)을 산정하게 된다. 그 중 강우침식인자는 강우 시 지표타격 및 유출 침식을 포함한 토양침식에 대한 잠재적인 요소로, 예측모델에 중요한 요인이다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (\text{Eq. 1})$$

USLE 모델에서는 강우사상은 1회 강우량이 12.7 mm 이상이며, 강우 간격이 6시간 이내일 때는 1회 강우사상, 6시간 이상일 때는 2회 강우사상으로 정의하고 있다. 또한, 1회 강우가 12.7 mm 이하인 경우라도 15분 이내의 강우량이 6.25 mm 이상인 경우에는 1회 강우사상으로 고려하고, 30분간 최대강우강도 (EI_{30}) 자료가 반드시 필요하게 된다. 국내에서 토양침식공식에 이용되는 강우침식인자의 산정은 Wischmeier and Smith (1978)의 모델을 사용하고 있다. 본 연구에서는 시간 단위 강우데이터를 수집하여 시간단위별 운동에너지 (e), 강우강도 (I , cm/h) 및 강우지속시간 (h) 구분을 통한 각 강도에 대한 개별 강우 운동에너지 (E)를 산출하고, 60분 최대강우강도 (EI_{60})를 곱하여 연간 산출된 값을 합산하여 강우침식인자를 산정하였다.

$$e = 210.3 + 89 \log(I) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$E = \sum (e \cdot I \cdot T) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$R = \sum (E \cdot I_{30}) / 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

GIS 도식화 본 연구에서는 GIS (Geographic Information System) 프로그램을 통해 총 40년 (1981 - 2020년) 동안의 강우침식인자를 10년 단위로 위험성 및 변동성을 평가하였다.

통계 본 연구는 통계 소프트웨어 SAS 9.4 (SAS Institute Inc. Cary, NC)를 사용하여 상관관계분석과 t-test는 95% 오차범위에서 과거 30년 평균값과 최근 10년 평균값 집단의 차이를 검정하였다.

Results and Discussion

지역별 강우자료 분석 과거 30년 (Table 1) 동안의 평균 연간누적강우량은 성산 ($1,927.4 \text{ mm y}^{-1}$)과 의성 ($1,031.6 \text{ mm y}^{-1}$)에서 각각 최대 및 최소값을 나타냈으며, 서귀포 > 거제 > 남해 > 대관령 순으로 나타났다. 일일최대 강우량은 대관령 (196.8 mm d^{-1})과 의성 (100.9 mm d^{-1})에서 최대 및 최소값을 나타냈으며, 거제 > 남해 > 강릉 > 강화 순으로 측정되었다. 최근 10년 (Table 2) 동안의 평균 연간누적강우량은 서귀포 ($2,089.4 \text{ mm y}^{-1}$)와 의성 (920.4 mm y^{-1})에서 최대 및 최소값을 나타냈으며, 남해 > 거제 > 통영 > 부산 순으로 측정되었다. 일일최대강우량의 경우 서귀포 (193.0 mm d^{-1})와 의성 (82.0 mm d^{-1})에서 최대 및 최소값을 나타냈으며, 30년 대비 유의한 평균 차이는 없었다. 하지만, 연간 강우량은 최근 10년 동안 서귀포, 남해, 거제, 통영, 부산 등 남부지방에 $1,600 \text{ mm y}^{-1}$ 이상으로 중부지역 대비 64% 이상 높은 것으로 확인되었다. 이는 지구온난화로 인한 강우 변동성이 증가하고 있고, 국지적인 영향으로 인해 연간누적강우량 및 일일최대강우량이 토양유실에 영향이 있을 것으로 판단된다 (Kim et al., 2016; Cho and Yoo, 2020).

Table 1. Annual cumulative rainfall and daily maximum rainfall for past 30 years (1981 - 2010) (n = 60; based on a study of Park et al., 2011).

Observations (code)	R-factor (MJ mm $\text{ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	Cumulative precipitation (mm y^{-1})	Max. precipitation (mm d^{-1})	Observations (code)	R-factor (MJ mm $\text{ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	Cumulative precipitation (mm y^{-1})	Max. precipitation (mm d^{-1})
Sokcho (90)	3,479	1,402.2	157.3	Yangpyeong (202)	5,332	1,417.2	161.9
Daegwallyeong (100)	4,443	1,821.4	196.8	Icheon (203)	4,474	1,355.9	150.8
Chuncheon (101)	4,010	1,347.3	149.4	Inje (211)	3,318	1,210.6	136.5
Gangneung (105)	4,150	1,464.5	182.7	Hongcheon (212)	4,798	1,405.4	146.1
Seoul (108)	5,746	1,450.5	167.9	Jecheon (221)	4,340	1,387.8	143.2
Incheon (112)	4,458	1,234.4	145.3	Boeun (226)	3,647	1,297.4	126.1
Wonju (114)	4,098	1,343.6	139.1	Cheonan (232)	3,677	1,226.5	128.8
Suwon (119)	4,464	1,312.3	154.5	Boryeong (235)	4,457	1,244.3	133.2
Chungju (127)	3,415	1,222.5	123.6	Buyeo (236)	4,612	1,349.2	137.7
Seosan (129)	4,086	1,285.7	135.0	Geumsan (238)	3,381	1,296.8	120.9
Ulsan (130)	1,946	1,119.0	113.6	Buan (243)	3,526	1,250.4	117.5
Cheongju (131)	3,361	1,239.1	120.2	Imsil (244)	3,613	1,354.8	117.0
Daejeon (133)	4,189	1,372.0	135.6	Jeongeup (245)	3,690	1,317.3	108.4
Chupungnyeong (135)	2,432	1,187.1	116.4	Namwon (247)	3,956	1,359.9	115.8
Pohang (138)	2,708	1,152.0	127.5	Suncheon (256)	5,100	1,531.3	157.4
Gunsan (140)	3,464	1,222.9	117.0	Jangheung (260)	5,289	1,505.6	163.5
Daegu (143)	2,474	1,064.4	110.2	Haenam (261)	4,253	1,325.4	152.5
Jeonju (146)	3,792	1,313.2	119.2	Goheung (262)	5,303	1,453.4	169.7
Ulsan (152)	3,279	1,277.1	141.7	Yeongju (272)	3,205	1,290.9	125.8
Gwangju (156)	4,355	1,391.0	137.6	Mungyeong (273)	2,900	1,259.8	107.6
Busan (159)	5,231	1,519.1	151.5	Yeongdeok (277)	2,252	1,072.7	113.6
Tongyeong (162)	4,176	1,427.5	132.7	Uiseong (278)	2,307	1,031.7	100.9
Mokpo (165)	3,049	1,163.6	122.0	Gumi (279)	2,324	1,072.5	106.7
Yeosu (168)	4,502	1,439.0	138.2	Yeongcheon (281)	2,232	1,046.8	104.0
Wando (170)	5,204	1,532.7	166.0	Geochang (284)	3,371	1,316.8	129.0

Table 1. Annual cumulative rainfall and daily maximum rainfall for past 30 years (1981 - 2010) (n = 60; based on a study of Park et al., 2011). (Continued)

Observations (code)	R-factor (MJ mm ha ⁻¹ y ⁻¹ h ⁻¹)	Cumulative precipitation (mm y ⁻¹)	Max. precipitation (mm d ⁻¹)	Observations (code)	R-factor (MJ mm ha ⁻¹ y ⁻¹ h ⁻¹)	Cumulative precipitation (mm y ⁻¹)	Max. precipitation (mm d ⁻¹)
Jeju (184)	4,811	1,497.6	161.5	Hapcheon (285)	3,814	1,275.6	135.4
Seongsan (187)	7,864	1,927.5	165.4	Miryang (288)	3,301	1,229.4	119.8
Seogwipo (189)	6,885	1,923.0	168.6	Sancheong (289)	5,343	1,556.6	174.3
Jinju (192)	4,572	1,506.2	150.0	Geoje (294)	7,339	1,840.7	185.8
Ganghwa (201)	5,885	1,346.7	175.5	Namhae (295)	7,160	1,839.4	185.7

Table 2. Annual cumulative rainfall and daily maximum rainfall for last 10 years (2011 - 2020) (n = 58).

Observations (code)	R-factor (MJ mm ha ⁻¹ y ⁻¹ h ⁻¹)	Cumulative precipitation (mm y ⁻¹)	Max. precipitation (mm d ⁻¹)	Observations (code)	R-factor (MJ mm ha ⁻¹ y ⁻¹ h ⁻¹)	Cumulative precipitation (mm y ⁻¹)	Max. precipitation (mm d ⁻¹)
Sokcho (90)	3,157	1,398.2	160.9	Yangpyeong (202)	3,687	1,289.0	128.8
Daegwallyeong (100)	2,737	1,329.0	132.2	Icheon (203)	3,269	1,258.7	130.2
Chuncheon (101)	3,976	1,295.4	143.6	Inje (211)	2,620	1,141.3	130.7
Gangneung (105)	3,651	1,391.3	160.6	Hongcheon (212)	3,034	1,152.9	112.1
Seoul (108)	4,224	1,274.2	125.9	Jecheon (221)	2,875	1,274.9	137.5
Incheon (112)	3,700	1,102.6	112.3	Boeun (226)	3,259	1,320.4	118.1
Wonju (114)	3,626	1,202.9	128.8	Cheonan (232)	3,451	1,178.9	131.7
Suwon (119)	4,527	1,294.1	133.0	Boryeong (235)	3,147	1,135.5	121.8
Chungju (127)	2,933	1,167.9	103.0	Buyeo (236)	3,352	1,310.4	129.2
Seosan (129)	3,617	1,156.5	111.3	Geumsan (238)	2,932	1,266.9	128.1
Ulsan (130)	3,341	1,198.1	149.0	Buan (243)	2,906	1,213.5	125.1
Cheongju (131)	3,620	1,194.1	138.1	Imsil (244)	3,273	1,348.0	123.9
Daejeon (133)	3,613	1,291.0	119.7	Jeongeup (245)	3,771	1,292.7	158.5
Chupungnyeong (135)	2,329	1,184.4	102.0	Namwon (247)	3,616	1,339.7	139.2
Pohang (138)	2,602	1,172.5	137.9	Jangheung (260)	4,330	1,432.6	152.9
Gunsan (140)	3,509	1,265.2	146.4	Haenam (261)	3,843	1,265.8	137.7
Daegu (143)	2,505	1,102.7	122.4	Goheung (262)	5,778	1,533.5	182.4
Jeonju (146)	2,898	1,241.4	104.3	Yeongju (272)	2,597	1,267.5	114.2
Ulsan (152)	3,395	1,278.2	143.2	Mungyeong (273)	2,606	1,273.0	113.1
Gwangju (156)	3,706	1,347.2	119.8	Yeongdeok (277)	2,320	1,113.5	125.7
Busan (159)	5,561	1,614.0	169.4	Uiseong (278)	1,334	920.4	82.0
Tongyeong (162)	5,358	1,650.4	149.2	Gumi (279)	2,404	1,132.0	109.1
Mokpo (165)	2,797	1,193.9	104.5	Yeongcheon (281)	2,318	1,075.9	120.4
Yeosu (168)	4,902	1,499.9	161.4	Geochang (284)	2,593	1,240.7	120.6
Wando (170)	4,002	1,508.6	130.4	Hapcheon (285)	3,983	1,394.9	159.1
Jeju (184)	5,317	1,520.6	171.6	Miryang (288)	3,025	1,214.4	119.2
Seogwipo (189)	9,464	2,089.4	192.5	Sancheong (289)	5,045	1,592.6	189.2
Jinju (192)	4,109	1,537.1	142.8	Geoje (294)	7,357	1,999.5	190.8
Ganghwa (201)	3,707	1,144.7	137.0	Namhae (295)	7,210	2,002.2	191.1

강우침식인자 산정 과거 30년 (1981 - 2010년) 60개 지점의 강우침식인자 산정 결과 성산 ($7,864 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$)과 울진 ($1,946 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$)에서 최대 및 최소값을 나타냈으며, 거제 > 남해 > 서귀포 순으로 산정된 바 있다 (Table 1; Park et al., 2011). 하지만 최근 10년의 경우 서귀포 ($9,464 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$)와 의성 ($1,334 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$)에서 최대 및 최소값을 나타냈으며, 남해 > 거제 > 통영 > 부산 순으로 산정되었다 (Table 2). 평균 강우침식인자는 과거 30년 (1981 - 2010년) 동안 $4,149 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$, 최근 10년 (2011 - 2020년) 동안 $3,704 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 로 산정되었으며, 과거 30년 대비 최근 10년간 $445 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 감소한 것을 확인할 수 있었다. 특히, 서귀포의 경우 과거 30년 대비 강우침식인자가 $2,580 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 증가하였으며, 최근 10년 동안 남부지방에서 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 평균 강우침식인자는 과거 30년 대비 10.7% 감소율을 보였으며, 지역별 변동성이 큰 것으로 분석되었다. 환경부에 따르면, 2020년의 경우 1973년 이후 장마기간이 가장 길었으며, 8 - 9월의 연속적인 태풍으로 인해 산사태 및 토양침식 등 이례적인 집중호우가 발생되었다고 보고하였다 (MOE, 2020). Moon et al. (2019) 또한 최근 장마기간 이후 태풍 발생증가로 인해 가을철 집중호우가 증가하고 있으며, 한반도 대도시를 대상으로 여름철 집중호우 특성을 분석한 결과 모든 지점에서 누적 강우량이 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 기후 변화로 인해 증가하고 있는 국내 강우침식인자의 정확한 산정을 위해서는 장기간의 자료축적과 보다 정밀한 측정인자의 도입이 필요한 시점으로 판단된다.

Fig. 1. GIS maps for the average annual R factor for each decade since 1981.

지역별 강우침식인자의 변동성을 시각적으로 파악하기 위해 GIS를 이용하여 1981년부터 10년 단위 강우침식인자 지도 (Fig. 1)를 나타내었다. 10년 단위 평균 강우침식인자는 $3,988 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (1981 - 1990년), $4,085 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (1991 - 2000년), $4,375 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (2001 - 2010년) 및 $3,870 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (2011 - 2020년)로, 강우침식인자가 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 강우침식인자의 가장 높은 밀도 범위는 1981 - 1990년 동안 $3,500 - 4,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (31.1%), 1991 - 2000년 $3,500 - 4,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (26.1%), 2001 - 2010년 $4,000 - 4,500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (19.0%) 및 2011 - 2020년 $3,500 - 4,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (29.3%)로 나타났다. 과거 1981 - 1990년 대비 2011 - 2020년의 강우침식인자 $3,500 - 4,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 범위에서는 1.8% 감소하였지만, 과거 (1981 - 2010년)에는 강우침식인자가 최대 $6,500 - 7,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 에서 분포된 반면, 최근 10년의 경우 최대 $8,000 - 8,500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 범위까지 분포된 것으로 나타났다. 이는 기후변화로 인한 최대 강우침식인자가 증가한 것으로 사료된다.

강우침식인자가 북부지역에서 감소하고 남부지역에서 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 기후변화로 인해 강우침식인자의 지역별 편차가 증가함에 따라 토양유실 위험성이 가속화되고 있는 것으로 판단되며, 지역·계절별 대비가 시급한 것으로 판단된다. 이는 강우침식인자의 GIS 맵핑을 통해 토양유실 우심지역 선정과 효율적 관리가 필요할 것으로 판단된다 (Jung et al., 2015; Lee et al., 2019).

시도 및 광역시별 강우침식인자 분석 시도 및 광역시로 구분하여 비교 분석한 결과 과거 30년 동안 제주에서 $5,848 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$, 경상북도에서 $2,796 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 로 각각 최대 및 최소값을 나타냈으며, 최근 10년 동안에도 제주와 경상북도에서 각각 $7,390 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 와 $2,650 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 로 최대·최소값을 나타냈다. 제주에서 과거 30년 대비 최근 10년간의 강우침식인자가 26.4% 높은 증가율을 보였지만 통계 결과 유의한 평균차이를 나타내지 않았다. 하지만 최근 집중호우 발생빈도가 증가하고 있으며, 이에 따른 강우침식인자가 증가할 확률이 높아 토양유실 대비가 필요할 것으로 판단된다. Park et al. (2011)에 의하면 2001 - 2010년 기간 동안 여름철 강우가 강우침식인자에 미치는 영향이 74.2%로, 절대·상대적으로 가장 높은 것으로 나타났다.

Fig. 2. Comparison of R factors for the past 30 years (1981 - 2010) and the last 10 years (2011 - 2020) (n = 58, * $p < 0.05$).

제주를 제외한 나머지 8개 도시에서 과거 30년에 비해 최근 10년간의 강우침식인자가 낮은 수치를 나타냈다 (Fig. 2). 특히 과거 30년 대비 강우침식인자는 강원도, 경기도 및 충청남도에서는 각각 19.4%, 24.6% 및 14.5% 유의하게 감소하였다 ($p < 0.05$). 반면 한반도 남부지역에 위치한 대구, 울산, 부산의 경우 다소 증가한 것으로 산정되었다. 이는 기후변화의 가속화로 인해 강우량이 지속해서 감소하고 강우세기는 증가한 영향이라고 판단된다. Jeong and Cho (2019)는 기후변화로 인한 기온상승은 증발산량을 증가시켜 이상기후 발생빈도 및 강우세기 증가로 이어질 것으로 보고 있다.

강우특성에 따른 강우침식인자 상관관계 과거 30년과 최근 10년의 연간누적강우량 및 일일최대강우량은 과거 30년 ($R^2 = 0.33, r = 0.57$), 최근 10년 ($R^2 = 0.43, r = 0.66$) 모두 정의 상관관계를 나타냈으며 (Fig. 3), 과거 30년 대비 최근 10년에서 연간누적강우량과 일일최대강우량 모두 높은 편차를 나타냈다. Kim (2020)은 기후변화에 따라 강우강도와 강우일수가 증가한다고 하였고 이러한 경향은 이상기후 발생과 지구온난화 가속화의 원인으로 분석하였다. 우리나라의 경우 일반적으로 여름철에 집중강우가 발생하고, 기후변화의 영향으로 최근에는 가을철 이상기후가 빈번히 발생하고 있어 기존 경험식을 통한 산정보다 연간누적강우량과 일일최대강우량의 실측값의 비교를 통한 강우침식인자의 산정이 국내 계절적 토양유실 위험성 평가에 효과적일 것으로 판단된다 (Kim et al., 2017).

Fig. 3. Correlation between annual cumulative rainfall and annual daily maximum rainfall for the past 30 years and the last 10 years.

과거 30년 강우침식인자와 연간누적강우량 ($R^2 = 0.79, r = 0.89$) 또는 일일최대강우량 ($R^2 = 0.66, r = 0.81$)은 모두 정의 상관관계를 나타냈으며, 비교적 높은 결정계수 및 상관계수를 보였다 (Fig. 4). 이는 연간누적강우량 또는 강우강도의 증가가 강우침식인자를 높인다는 의미이다 (Jung et al., 2016). 마찬가지로 최근 10년 연간누적강우량 ($R^2 = 0.84, r = 0.91$)과 일일최대강우량 ($R^2 = 0.66, r = 0.81$)은 강우침식인자와 모두 정의 상관관계를 나타냈다 (Fig. 4). Woo et al. (2010)은 강우침식인자 산정에 있어 1년 혹은 월 단위 강우량에 의해 태풍이나 집중호우와 같은 단기간 집중되는 특성을 반영하기에 한계가 있다고 판단하고 있으며, USLE의 경우 유역 (watershed) 단위가 아닌 plot 단위로 산정하고 있어 한계점이 있다. 이에 따라 1년 혹은 월 단위보다 일 단위 강우특성을 반영하여 강우침식인자를 산정하는 것이 유역 내 토양유실 산정에 효과적이라고 평가되고 있다.

Fig. 4. Correlation between R-factor and annual cumulative rainfall or annual maximum daily rainfall for the past 30 years and the last 10 years.

Conclusions

본 연구에서는 최근 10년 (2011 - 2020년) 동안의 강우침식인자를 산정하고 과거 30년 (1981 - 2010년) 동안의 강우침식인자와 비교·분석을 실시하였다. 과거 30년과 비교하여 최근 10년 동안의 연간누적강우량과 일일최대강우량은 강우침식인자와 높은 정의 상관관계를 나타냈다. 과거 30년 대비 최근 10년간의 우리나라 북부지역 강우침식인자는 감소하고, 제주를 포함한 남부지역 (대구, 울산, 부산 등)은 증가하였다. 특히 최근 10년 동안 서귀포, 거제, 남해에서는 $7,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 이상의 강우침식인자가 산정됨에 따라 우리나라 북부와 남부의 지역별 편차가 증가하였다. 이는 최근 기후변화에 따른 강우 변동성 증가로 인해 지역별 편차가 커진 것으로 사료되며, 지속적으로 국지적 토양침식 위험성이 증가할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of ‘Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ014821032021)’ Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Ahmadi, M., M. Mineaei, O. Ebrahimi, and M. Nikseresht. 2020. Evaluation of WEPP and EPM for improved predictions of soil erosion in mountainous watersheds: A case study of Kangir River basin, Iran. *Model. Earth. Syst. Environ.* 6:2303-2313.
- Cho, E.S. and C.S. Yoo. 2020. Analysis of the spatiotemporal behavior of precipitation in south Korea based on EOF and CSEOF analyses. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* 20(4):21-32.
- Djoukbala, O., M. Hasbaia, O. Benselama, and M. Mazour. 2019. Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). *Model. Earth. Syst. Environ.* 5:725-743.
- Guo, T., A. Srivastava, and D.C. Flanagan. 2021. Improving and calibrating channel erosion simulation in the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model. *J. Environ. Manage.* 291:112616.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. Climate change and land, special report.
- Jeong, E.S. and H.L. Cho. 2019. Analysis of impact of climate change on river flows in an agricultural watershed using a semi-distributed watershed model STREAM. *J. Korean Soc. Water Environ.* 35(2):131-144.
- Jung, C.G., W.J. Jang, and S.J. Kim. 2016. Spatial rainfall considering elevation and dstimation of rain erosivity factor R in revised USLE using 1 minute rainfall data and program development. *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.* 19(4):130-145.
- Jung, P.K., M.H. Ko, J.N. Im, K.T. Um, and D.U. Choi. 1983. Rainfall erosion factor for estimation soil loss. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 16(2):23-29.
- Jung, Y.H., D.H. Kum, J.H. Han, C.H. Jang, J.E. Yang, K.J. Lim, and K.S. Kim. 2015. Study on topsoil erosion indices for efficient topsoil management. *J. Korean Soc. Water Environ.* 31(5):543-555.
- Kim, D.H., S.J. Hong, D.G. Han, C.H. Choi, and H.S. Kim. 2016. Analysis of future meteorological drought index considering climate change in Han-River Basin. *J. Wet. Res.* 18(4):432-447
- Kim, D.Y. 2020. Effect of regional climate change on precipitation in the 21st century. *J. Korea Soc. Environ. Restor. Technol.* 21(3):205-210.
- Kim, J.G., J.E. Ynag, K.J. Lim, S.C. Kim, G.H. Lee, S.I. Hwang, N.Y. Yu, and Y.S. Park. 2017. A study to define area of concern for potential soil loss in Geumgang watershed by KORSLE-based GIS model. *J. Soil Groundw. Environ.* 22(6):29-36.
- Kum, D.H., J.C. Ryu, H.W. Kang, C.H. Jang, M.H. Shin, D.S. Shin, J.D. Choi, and K.J. Lim. 2011b. Comparison of annual soil loss using USLE and hourly soil erosion evaluation system. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 44(6):991-997.
- Kum, D.H., J.W. Choi, I.J. Kim, D.S. Kong, J.C. Ryu, H.W. Kang, and K.J. Lim. 2011a. Development of automatic extraction model of soil erosion management area using ArcGIS model builder. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 53(1):71-81.
- Lee, J.H. 2020. Characterization of rainfall kinetic energy in Seoul. *J. Korean Soc. Civ. Eng.* 40(1):111-118.
- Lee, J.H., J.Y. Shin, and J.K. Heo. 2011. Evaluation of rainfall erosivity in Korea using different kinetic energy equations. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 44(3):337-343.
- Lee, S.H. and J.K. Kim. 2014. A study on the method of urban planning for adaptation to climate change. *J. Clim. Change Res.* 5(3):257-266.
- Lee, S.R., G.J. Lee, D.S. Yang, Y.J. Choi, K.J. Lim, and W.S. Jang. 2019. Occurrence and behavior analysis of soil erosion by applying coefficient and exponent of MUSLE runoff factor depending on land use. *J. Korean Wet. Res.* 21(s-1):98-106.
- MOE (Ministry of Environment). 2020. Korean climate change assessment report 2020.
- Moon, T.H., C.Y. Park, G.Y. Kim, and D.H. Cha. 2019. Long-term variability of summer heavy rainfall in the Seoul

- metropolitan area. *J. Clim. Res.* 14(4):209-219.
- Park, C.W., Y.K. Sonn, B.K. Hyun, K.C. Song, H.C. Chun, Y.H. Moon, and S.G. Yun. 2011. The redetermination of USLE rainfall erosion factor for estimation of soil loss at Korea. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 44(6):977-982.
- Park, Y.S., J.Y. Park, J.W. Seok, and J.G. Kim. 2019. A study to determine the slope length and steepness factor of Universal Soil Loss Equation with determining and adapting major slope length at field scale. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 61(6):55-65.
- Prasannakumar, V., H. Vijith, S. Abinod, and N. Geetha. 2012. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using revised universal soil loss equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geosci. Front.* 3(2):209-215.
- Seo, I.K., Y.S. Park, N.W. Kim, J.P. Moon, J.C. Ryu, Y.S. Ok, K.S. Kim, and K.J. Lim. 2010. Estimation of soil erosion using SATEEC and USPED and determination of soil erosion hot Spot watershed. *J. Korean Soc. Water Qual.* 26(3), 497-506.
- Um, M.J. and C.S. Jeong. 2011. Spatial analysis of precipitation with PRISM in Gangwondo. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 44(3):179-188.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2020. The inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2018. EPA 430-R-20-002.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agric Handbook No. 537.
- Woo, W.H., J.P. Moon, N.W. Kim, J.W. Choi, K.S. Kim, Y.S. Park, S.J. Jang, and K.J. Lim. 2010. Evaluation of SATEEC daily R module using daily rainfall. *J. Korean Soc. Water Qual.* 26(5):841-849.