

토양 침식량 산정을 위한 월별 강우 침식 인자 추정 및 적용성 검증

장유진¹ · 박민석^{1,2} · 서용휘¹ · 현승훈^{1*}

¹고려대학교 환경생태공학과

²고려대학교 오정리질리언스연구원

Estimation and Validation of Monthly Rainfall Erosivity to Apply for Soil Loss Equation

Jang Yoojin¹, Park Minseok^{1,2}, Seo Yonghwee¹, and Hyun Seunghun^{1*}

¹Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

²Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

ABSTRACT

Various empirical models have been developed to estimate the rainfall erosivity factor (R factor) in soil loss equation. However, estimating the R factor requires high-resolution rainfall data and the empirical models must be validated prior to local application. This study reviewed three major R factor models and evaluated the applicability of these models using hourly rainfall data (1973~2007) archived for four cities (Seoul, Chuncheon, Namwon, and Jeju) in Korea. The monthly R factor was calculated using the EI30 method based on hourly rainfall data. Monthly effective rainfall amounts and the number of effective rainy days were extracted, and model parameters were estimated using subset data from 1973 to 2002. Subsequent validation test conducted using subset data from 2003 to 2007. Stepwise regression analysis identified the monthly rainfall amount and the number of rainy days with daily rainfall exceeding 10 mm as the most significant variables of the R factor. The validation result showed acceptable predictive capability ($R^2 \geq 0.7$) but the accuracy reduced with increasing R factor. Use of effective rainfall variables was found to simplify the process for R factor prediction, compared to the EI30 method. However, the existing R factor models do not fully incorporate the interaction between rainfall amount and intensity and the nonlinearity of R factor with rainfall data. Therefore, improving R factor estimation models is necessary to enhance soil erosion predictions under future climate conditions where extreme rainfall events are expected to occur.

Key words : Rainfall erosivity factor, Soil erosion, Rainfall amount, Rainfall intensity, Regression analysis

1. 서 론

농경지에서 토양 침식의 가속화는 표토 중 유기물 및 주요 영양분의 손실에 의한 농업 생산성의 감소를 유발할 수 있다. 또한, 침식된 토양과 함께 유출된 영양분과 오염 물질은 인근 수계로 유입되면서 수질을 악화시키고, 수생

주저자: 장유진, 고려대학교 환경생태공학과 대학원생
공저자: 박민석, 고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수;

서용휘, 고려대학교 환경생태공학과 대학원생

*교신저자: 현승훈 교수, 고려대학교 환경생태공학과 교수
E-mail: soilhyun@korea.ac.kr

Received : 2025. 02. 25 Reviewed : 2025. 03. 18

Accepted : 2025. 04. 09 Discussion until : 2025. 06. 30

태계의 구조와 기능을 저해하는 중요한 환경 문제이다(Lal, 1998). 따라서, 토양 침식량을 정확하게 산정하고 이를 기반으로 하는 토양 보전 전략을 수립하는 것은 지속 가능한 농업 시스템의 유지뿐만 아니라, 수자원 관리 및 생태계 보전 측면에서도 필수적인 과제로 인식되고 있다.

Morris and Fan(1998)은 현장에서 토양 침식을 측정하기 위한 모니터링 방법을 제안하고 있다. 하지만, 모든 침식 우려 지역에서 현장 모니터링을 진행하는 것은 물리적으로 불가능하기 때문에 토양 침식량을 산정하기 위한 다양한 경험적 모형(empirical model)들이 개발되었다(Yu et al., 2017). 미국 농무부(United States Department of Agriculture) 산하의 Agricultural Research Service에서 개발한 USLE (Universal Soil Loss Equation)은 토양 침식량을 산정하기

위한 대표적인 모형이다. 이 모형은 토양 침식에 영향을 끼칠 수 있는 강우 침식 인자(R factor), 토양 침식능 인자(K factor), 경사장 및 경사도 인자(LS factor), 파복 관리 인자(C factor) 및 보존관리 인자(P factor)를 기반으로 경작지 위주의 토양 침식을 예측하는 모형이다(Wischmeier and Smith, 1978). 이를 바탕으로 각 인자를 개선한 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)이 개발되어 경작지 이외에도 산림, 초지, 광산 복구지 등 다양한 환경에서 장기적인 토양유실을 추정하는 데 널리 활용되고 있다 (Renard et al., 1997).

강우가 지표면에 충돌할 때, 빗방울의 운동에너지는 토양으로 전달되며, 이 과정에서 토양 입자가 분리(detachment)되고, 분리된 토양 입자는 표면 유출수(surface runoff)에 의해 하류로 운반(transport)된다. 이러한 과정을 통해 강우는 토양 침식의 주요 원인으로 작용하며, 이에 따라 강우가 토양 침식에 미치는 영향을 정량화하는 R factor의 정확한 산정은 (R)USLE 모형을 이용한 토양 침식량 산정에 필수적인 과정이라 할 수 있다(Jung et al., 2016). (R)USLE에서는 1회 강우량이 12.7 mm 이상인 강우 사건을 토양 침식을 유발할 수 있는 유효 강우 사건으로 정의한다. 또한, 강우 간격이 6시간 이상일 경우 서로 다른 강우 사건으로 구분하며, 1회 강우량이 12.7 mm 미만이라 하더라도 15분 이내 강우량이 6.25 mm 이상이면 유효 강우 사건으로 간주한다. 정의된 유효 강우 사건에 대하여 개별강우의 운동에너지는 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$e = 0.119 + 0.0873 \log(I) \quad (I \leq 76 \text{ mm hr}^{-1}) \quad (1)$$

$$e = 0.288 \quad (I > 76 \text{ mm hr}^{-1}) \quad (2)$$

여기서, e 는 개별강우의 운동에너지($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), I 는 강우강도(mm hr^{-1})를 나타낸다. 개별강우의 운동에너지, 시간 단위별 강우강도, 강우 지속 시간을 이용하여 유효 강우 사건의 총 운동에너지는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$E = \sum(e \times I \times t) \quad (3)$$

여기서, E 는 유효 강우 사건의 총 운동에너지(MJ ha^{-1})이며, I 는 단위 시간에 대한 강우강도(mm hr^{-1}), t 는 강우 지속 시간(hr)이다. (R)USLE 모형에서는 1년 동안 발생한 모든 유효 강우 사건에 대하여 식 (4)를 이용하여 R factor를 산정한다.

$$R = \sum(E \times I30) \quad (4)$$

여기서, R 은 연간 R factor($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ yr}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)이며, $I30$

은 30분 최대 강우강도(mm hr^{-1})를 의미한다. I 는 강우강도(mm hr^{-1})를 나타낸다. 이러한 R factor 계산 방법은 한 시간 이내 단위의 고해상도 강우 데이터가 필요하다. 국내에서 운영되는 대부분의 기상관측소에서는 시간 단위에 해당하는 강우 자료를 제공하고 있어, EI30 방법에 따라 R factor를 계산할 수 있다. 하지만, 지역에 따라 고해상도 강우 자료의 가용성이 제한적이며, 장기간에 걸친 연속적인 강우 데이터를 확보하는 것이 어려울 수 있으며, 대용량 데이터 처리의 복잡성으로 인해 실무적으로 적용하는 데 한계가 존재한다(Risal et al., 2016). 또한, 토양 침식의 대비를 위해서는 기후 시나리오에 따른 강우 패턴 변화를 고려한 R factor 예측이 선행되어야 한다. 하지만 시간 단위의 미래 강우량을 예측하는 것은 불확도를 매우 높일 수 있어, 정확한 R factor의 예측이 어렵다. 이에 상대적으로 작은 시간적 해상도를 갖는 강우자료를 이용한 월별 R factor 예측 모형 개발이 필요하다.

이러한 한계를 극복하기 위해, 여러 연구에서는 R factor 계산을 더욱 쉽게 하기 위한 단순화된 경험적 모형을 제안해왔다. 특히, 최근에는 연간 R factor가 아닌 월별 R factor를 추정하기 위한 모형들이 제안되고 있다. 여러 지역에서 개발된 경험적 회귀 모형을 활용하기 위해서는 한국의 지역적 특성을 고려한 적용 가능성을 검증할 필요가 있다. 본 연구에서는 R factor의 계산을 위한 다양한 모형들을 검토하였고, 우리나라의 4개 도시(서울, 춘천, 남원, 제주)의 강우 데이터를 주요 모형에 적용하여 월별 R factor를 산정 모형에서 지역에 따른 파라미터의 차이를 검토하였다. 또한, 미래의 변화된 강우 패턴에 따른 미래 R factor 예측 모형 개발을 위한 방향성을 고찰하였다.

2. 기존 모형 검토

Fournier(1960)은 R factor를 예측하기 위해 최고 강우량이 발생한 달의 평균 강우량(p)과 연간 강우량(P)을 이용하여 식 (5)와 같은 Fournier's index (F , mm)를 제안하였다.

$$F = \frac{p^2}{P} \quad (5)$$

이후 Arnouldus(1977)는 Morocco 지역에서 Fournier's index를 적용한 R factor 예측 모형이 낮은 결정계수($R^2 = 0.55$)를 갖는 것을 관찰하였다. 이와 같은 한계를 보완하기 위해 수정된 Fournier's index를 식 (6)과 같이 제안하-

였다.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P} \quad (6)$$

여기서, F 는 수정된 Fournier's index (mm)이며, p_i 는 월 강우량(mm)을 의미한다. Arnoldus(1977)은 수정된 Fournier's index를 이용하여 식 (7)과 같이 R factor를 추정하였고, 이 경험모형의 결정계수(R^2)는 0.83으로 평가되었다.

$$R = 0.264F^{1.50} \quad (7)$$

Renard and Freimund(1994)는 미국의 132개 기상 관측소의 강우 자료를 이용하여 연 강우량(P , mm) 또는 수정된 Fournier's index (F , mm)를 변수로 하는 역함수(power function)와 이차함수(quadratic function) 형태의 R factor 추정 모형을 식 (8) – 식 (11)과 같이 제안하였다.

$$R = 0.04830P^{1.610} \quad (8)$$

$$R = 587.8 - 1.219P + 0.004105P^2 \quad (9)$$

$$R = 0.07397F^{1.847} \quad (10)$$

$$R = 95.77 - 6.081F + 0.4770F^2 \quad (11)$$

역함수 모형은 상대적으로 높은 결정계수 값을 보였지만, 연 강우량이 1,200 mm 이상(또는 수정된 Fournier's index가 120 mm 이상)일 때 R factor 값이 다소 낮게 평가되는 경향성이 관찰되었다. 이차함수 모형은 역함수 모형과 비교하여 낮은 결정계수와 높은 표준오차가 관찰되었지만, 강우량(또는 수정된 Fournier's index)이 높은 지점에서 역함수보다 높은 예측 정확도를 보였다(Renard and Freimund, 1994).

Loureiro and Coutinho(2001)는 포르투갈 Algarve 지역을 대상으로 월별로 추출된 10 mm 이상의 강우 시 강우량($rain_{10}$)과 10 mm 이상 강우 일수($days_{10}$)를 변수로 하는 다변량 선형 회귀 모형(multiple linear regression model)을 제시하였으며, 이는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{month} = 7.05rain_{10} - 88.92days_{10} \quad (12)$$

이 모형은 10 mm 미만의 비 침식성 강우를 제외하여 R factor를 예측할 수 있으므로 타당한 모형으로 평가된다. 특히, $days_{10}$ 변수를 활용함으로써 강우량 이외에도 강우 사건의 강도를 함께 고려함으로써 R factor 예측의 정밀도를 높일 수 있다. 그러나 이 회귀 모형은 실제 강우

와 토양 침식 간의 비선형 관계를 반영하지 못한다는 한계가 존재한다(Loureiro and Coutinho, 2001).

Fu et al.(2005)은 중국 황토고원(Loess Plateau)에서 토양 침식량을 평가하기 위해 월별 일 강우량이 9 mm를 초과하는 날의 강우량($rain_9$)을 변수로 하는 식 (13)과 같은 역함수 모형을 이용하여 R factor를 추정하였다.

$$R = 8.3462rain_9^{1.2570} \quad (13)$$

이 모형은 Renard and Freimund(1994)이 제안한 역함수 모형과 유사한 구조를 갖지만, 일 강우량이 9 mm 이하인 비 침식성 강우를 제외하였으며, 이전 연구와 달리 월별 강우 변수와 월별 R factor 사이의 회귀 모형을 통해 시간상으로 고해상도의 R factor를 예측할 수 있는 모형이라는 장점이 있다. 그러나 강우량만을 변수로 사용하기 때문에 강우강도가 토양 침식에 미치는 영향이 충분히 고려되지 못하였다는 한계를 갖는다.

Risal et al.(2016)은 한국의 25개 도시에 대하여 10분 간격의 고해상도 강우 데이터를 활용하여 계산된 R factor를 예측하기 위한 회귀 모형을 제안하였다. 이 연구에서 월별 30분 최대 강우강도($I30_{max}$)가 역이차 모형(reciprocal quadratic model)의 분포를 따른다는 관찰을 바탕으로, 월별 강우량(P)과 월(M, 1-12)을 독립변수로 하는 회귀식을 도출하였다. 제안된 회귀 모형은 지역별 특성을 반영하여 식 (14) 및 식 (15)과 같은 형태로 표현되며, R factor 추정의 정확성을 75% 이상으로 향상하는 것으로 보고되었다.

$$R = aP^b \times M^c \quad (14)$$

$$R = aP^b \times cM^d \quad (15)$$

또한, 한국의 여름철 강우 집중 특성을 반영하여, 지역별 강우 특성을 따른 월별 R factor를 효과적으로 예측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 분석 결과, R factor가 증가할수록 예측 정확도가 감소하는 경향성이 확인되었으며, 기후변화로 인한 극한 강우(extreme rainfall) 및 비정형 강우(anomalous rainfall)의 증가와 같은 강우 패턴 변화를 반영하는 데 한계가 있는 것으로 나타났다.

3. 재료 및 방법

3.1. 대상 지역

한국은 북위 33°–38°에 위치하여 온대몬순기후대(temperate monsoon climate zone)의 특성을 갖는다. 기상청의 기후통계에 따르면 한국의 평균 연 강우량은 1306.3 mm이며, 동아시아 몬순에 의해 연 강우량의 약 54%에 해당

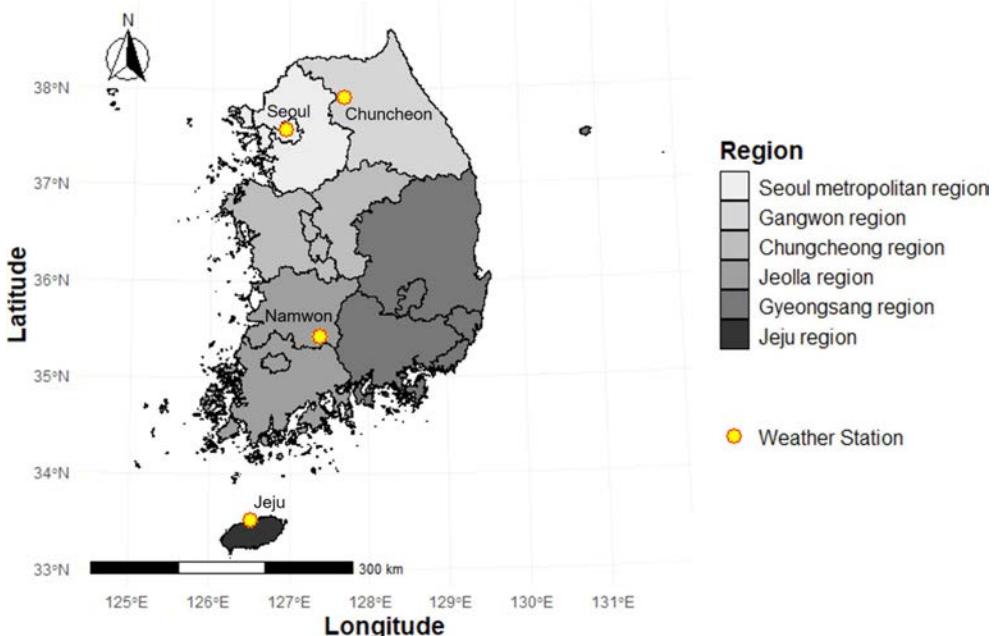


Fig. 1. Location of weather stations where the rainfall data used in this study was measured.

하는 710.9 mm의 강우가 여름철에 집중되는 형태를 보인다. 본 연구에서는 서울, 춘천, 남원, 제주의 기상 관측소에서 측정된 강우 데이터를 이용하여 지역별 R factor를 예측하였다(Fig. 1).

최근 30년간 서울의 연평균 강우량은 1448.3 mm이며, 여름철 강우량은 915.2 mm로 연 강우량의 약 63.2%에 해당하며, 반대로 겨울철 강우량은 연 강우량의 4.5%인 65.8 mm에 불과하다. 춘천의 연평균 강우량은 1371.0 mm이며, 연 강우량의 약 63%를 차지하는 857.6 mm의 강우가 여름철에 집중되며, 겨울철 강우량은 67.3 mm로 연 강우량의 약 5%를 차지한다. 남원의 연평균 강우량은 1386.2 mm이며, 여름철과 겨울철의 강우량은 796.3 mm(약 57%)와 99.4 mm(약 7%)이다. 같은 기간 제주의 연평균 강우량은 1492.2 mm로 다른 지역에 비해 많은 강우량을 보였다. 여름철과 겨울철 강우량은 각각 629.2 mm와 186.1 mm로 연 강우량의 약 42%와 약 12%에 해당한다. 제주는 연중 해양성 기후의 영향을 받기 때문에 다른 지역에 비해 낮은 계절별 강우량 변동을 보인다(Korea Meteorological Administration, 2025).

3.2. 지역별 강우 변수 추출 및 R-factor 추정

서울, 춘천, 제주, 남원의 기상 관측소에서 35년(1973년~2007년)간 측정된 한 시간 단위 강우 데이터를 이용하여 일별 강우량을 계산하였다. 강우 데이터는 기상청 방재 기

상정보 시스템으로부터 취득하였다. 선행 연구들에서 유효 강우의 기준으로 활용한 9 mm, 10 mm, 12.7 mm 이상의 일 강우량을 기록한 날을 선별하고 유효 강우에 대한 월별 강우량(rain_{9} , rain_{10} , $\text{rain}_{12.7}$)과 월별 강우일수(days_9 , days_{10} , $\text{days}_{12.7}$) 값을 도출하였다(Wischmeier and Smith, 1978; Loureiro and Coutinho, 2001; Fu et al., 2005). 이 외에도 월 강우량(rain) 및 강우일수(days)를 계산하였고, 이 값들을 월별 R factor를 추정하기 위한 변수로 활용하였다.

35년간 측정된 한 시간 단위 강우 데이터를 농촌진흥청에서 개발한 강우 인자 계산기에 입력하여 월별 R factor를 계산하였다. 강우 인자 계산기는 시간 단위 강우량을 RUSLE Handbook에서 제시된 식 (1) – 식 (4)에 입력하여 원하는 시간 단위(월, 계절, 연)의 R factor를 계산할 수 있도록 개발된 프로그램이다(Renard et al., 1997; Park et al., 2011). Park et al.(2001)에 따라 R factor의 단위를 SI unit($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{month}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)으로 환산하기 위해 9.808을 곱하여 최종 월별 R factor를 계산하였다.

3.3. 월별 R factor 추정을 위한 회귀분석

각 지역의 기상 관측소에서 1973년부터 2002년까지의 30년간 강우 데이터로부터 산출된 월별 강우량 및 강우일수 변수들과 각 월에 해당하는 R factor 값을 기준 모형(Loureiro and Coutinho, 2001; Fu et al., 2005; Risal et al., 2016)에 적용하여 각 변수의 계수를 추정하기 위한 회귀 분

석을 수행하였다. 또한, 3.2절에서 도출한 월 강우 변수 중 각 지역의 월별 R factor를 추정하기 위해 통계적으로 유의한 변수를 선별하기 위해 1차 회귀식을 기반으로 하는 단계적 회귀 분석(stepwise regression analysis)을 수행하였다.

지역별로 도출된 회귀식에 2003년부터 2007년까지의 월별 강우량 및 강우일수 변수를 대입하여 월별 R factor를 계산하였다. 이때, 0 이하의 R factor는 0으로 대체하였다. 추정된 월별 R factor와 3.2절에서 계산된 R factor를 비교하여 결정계수(R^2), 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE), 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE)를 계산하여 기존 모형의 성능을 검증하였다. 모든 통계분석은 R studio(version 2023.06.0 Build 421)과 R software(Version 4.3.1)을 이용하여 수행되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 지역별 강우 침식 인자(R factor)

Fig. 2는 1973년부터 2007년까지 4개 도시의 시간 단위

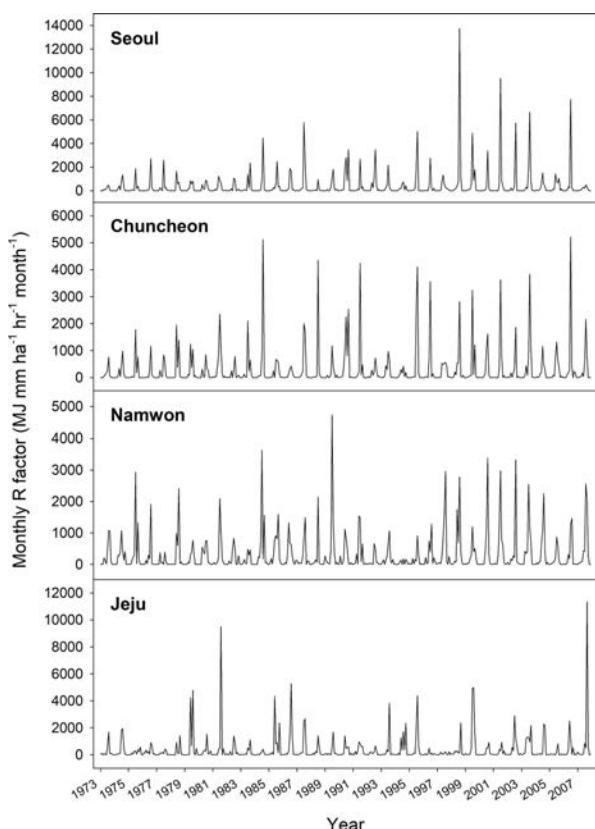


Fig. 2. Monthly R factor estimated from rainfall data for Seoul, Chuncheon, Namwon, and Jeju (1973-2007).

강우 데이터를 EI30 방법을 기반으로 농촌진흥청이 개발한 강우 인자 계산기에 적용하여 계산된 월별 R factor 값을 보여준다(Renard et al., 1997; Park et al., 2011). 월별 R factor는 계절별 강우량 변화에 따라 여름철 R factor가 가장 높고, 겨울철 R factor가 가장 낮은 역이차 모형(reciprocal quadratic model)의 분포를 보여준다. 지역별로 제주 지역의 R factor가 다른 지역에 비해 높은 것으로 나타났다. 연간 R factor의 변동성이 높게 나타났는데, 이는 강우의 변동에 따른 것으로 판단된다. 특히, 제주 지역은 한반도로 향하는 태풍이 지나는 주요 경로이기 때문에 태풍 발생에 따른 R factor의 변동성이 다른 지역에 비해 높은 것으로 판단된다(Park et al., 2021). 1990년대 후반 이후로 서울 지역의 R factor가 다른 지역에 비하여 급증한 것을 확인할 수 있다. 특히, 1998년 8월의 서울 지역 R factor는 약 $14,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ month}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 이상으로 매우 높게 나타났다. 이 시기에 서울의 월 강우량은 1,237.8 mm로 1998년의 연 강우량의 약 53%에 해당하는 양으로 기록되었다. 1998년 이후로 서울 지역의 R factor는 다른 지역에 비하여 높게 유지되었다. 이는 도시화에 따른 열섬 현상으로 인해 대기 중 온도 상승에 따른 국지적 강우의 증가 때문으로 판단된다(Zhang et al., 2017). 서울 지역뿐만 아니라 4개 지역 모두 시간의 흐름에 따라 R factor가 증가하는 경향성을 보여주고 있다. Choi et al.(2010)에 따르면 1998년 이후로 한반도 대기의 기압 변화로 여름철 강우량이 현저하게 증가하였다. 이처럼 강우량의 증가로 인한 R factor의 증가가 우려되며, 이는 토양 침식의 가속화를 유발할 우려가 있다.

4.2. R factor 추정 모형 회귀 분석

본 연구에서는 기존 모형(Loureiro and Coutinho, 2001; Fu et al., 2005)에 4개 지역에서 측정된 30년간 강우 변수를 입력하여 R factor를 추정하였다. Table 1과 Table 2는 각각 Loureiro and Coutinho(2001)와 Fu et al.(2005)에 제안한 모형을 이용한 회귀 분석 결과를 보여준다.

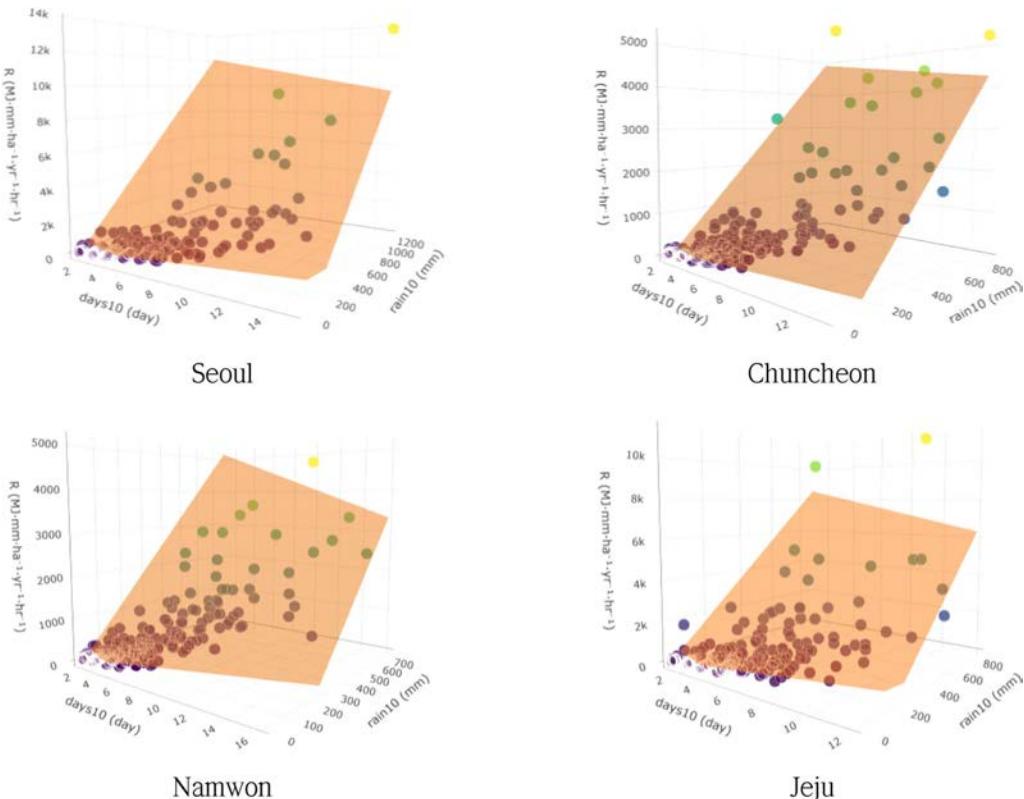
Loureiro and Coutinho(2001)가 제안한 모형은 일 강우량이 10 mm 이상인 날에 대한 월 강우량(rain_{10} , mm)과 일 강우량이 10 mm 이상인 날의 월 강우일수(days_{10})를 변수로 하는 다변량 선형 회귀 모형이다. 이 모형에서 rain_{10} 과 days_{10} 이 0일 경우 R factor는 0이어야 하므로, 상수항은 0으로 고정하였다. 회귀 분석 결과 모든 파라미터의 유의확률은 0.001 이하로 통계적으로 매우 유의한 것으로 평가되었으며, 결정계수(R^2)는 제주에서 0.70으로 가장 낮은 것으로 나타났다. 이 모형은 일 강우량 10 mm를 기

Table 1. Estimation of parameters for the regression model ($R = a \cdot \text{rain}_{10} + b \cdot \text{days}_{10}$, Loureiro and Coutinho, 2001)

City	Parameter	Estimate	Std. Error	t value	p value	R^2
Seoul	a	10.3453	0.4424	23.3837	< 2e-16	0.7804
	b	-202.4390	19.9366	-10.1541	< 2e-16	
Chuncheon	a	5.8469	0.3209	18.2193	< 2e-16	0.7490
	b	-78.1168	13.3720	-5.8418	1.16e-08	
Namwon	a	7.3537	0.2252	32.6525	< 2e-16	0.8605
	b	-134.1230	8.7543	-15.3208	< 2e-16	
Jeju	a	8.2826	0.4215	19.6491	< 2e-16	0.7029
	b	-145.7070	16.8091	-8.6684	1.54e-16	

Table 2. Estimation of parameters for the regression model ($R = a \cdot \text{rain}_9^b$, Fu et al., 2005)

City	Parameter	Estimate	Std. Error	t value	p value	R^2
Seoul	a	0.0863	0.0228	3.7876	1.78e-04	0.8460
	b	1.6859	0.0400	42.0965	< 2e-16	
Chuncheon	a	0.2533	0.1021	2.4807	0.0136	0.8874
	b	1.4650	0.0655	22.3647	< 2e-16	
Namwon	a	0.2692	0.0696	3.8658	1.31e-04	0.8406
	b	1.4657	0.0429	34.1993	< 2e-16	
Jeju	a	0.2296	0.1155	1.9878	0.048	0.7090
	b	1.5263	0.0826	18.4721	< 2e-16	

**Fig. 3.** Scatter plot of monthly R factor estimated from rain_{10} and days_{10} in Seoul, Chuncheon, Namwon, and Jeju. The orange planes represent R factors estimated using the model proposed by Loureiro and Coutinho (2001).

준으로 토양 침식을 유발할 수 있는 유효 강우 사건을 선별하여 R factor를 추정하였기 때문에 모형이 타당한 것으로 판단된다. 특히, 강우량과 강우일수를 함께 고려하여 강우강도를 고려하였다는 모형의 장점이 있다. 다만 이 모형은 rain₁₀과 days₁₀을 변수로 하는 이변량 일차 회귀모형이기 때문에 강우량과 강우일수에 따른 월별 R factor의 비선형적 변화를 충분히 반영하지 못한다는 단점을 갖는다(Fig. 3). Fig. 3에서 주황색의 평면은 Loureiro and Coutinho(2001)가 제안한 모형으로 추정된 R factor 값이며, 분산형 그래프는 강우 인자 계산기로 계산된 월별 R factor 값을 보여준다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이, 월별 R factor 값이 증가할수록 계산된 R factor 값과 이 모형에 의해 예측된 R factor 사이의 차이가 증가하는 것을 확

인할 수 있다. Renard and Freimund(1994)는 미국 전역에서 측정된 강우량과 R factor 사이의 비선형 관계를 관찰하였고, 강수량을 이용한 R factor 예측을 위하여 면함수 및 이차함수 형태의 비선형 모형을 제안하였다.

Fu et al.(2005)이 제안한 모형은 일 강우량이 9 mm 이상인 날에 대한 월 강우량(rain₉, mm)을 독립변수로 하는 면함수 형태의 모형이다. 각 지역의 강우 데이터를 이용한 회귀 분석 모형의 모든 파라미터는 95% 유의수준에서 유의한 것으로 평가되었으며, 결정계수(R²)는 제주에서 0.71로 가장 낮게 나타났다. 높은 R² 값과 Fig. 4는 이 모형이 국내의 4개 지역에서 R factor를 예측하는데 매우 높은 성능을 가지고 있음을 보여준다. 하지만, 이 모형에서는 일 강우량이 9mm를 초과한 날의 강우량만을 고려하

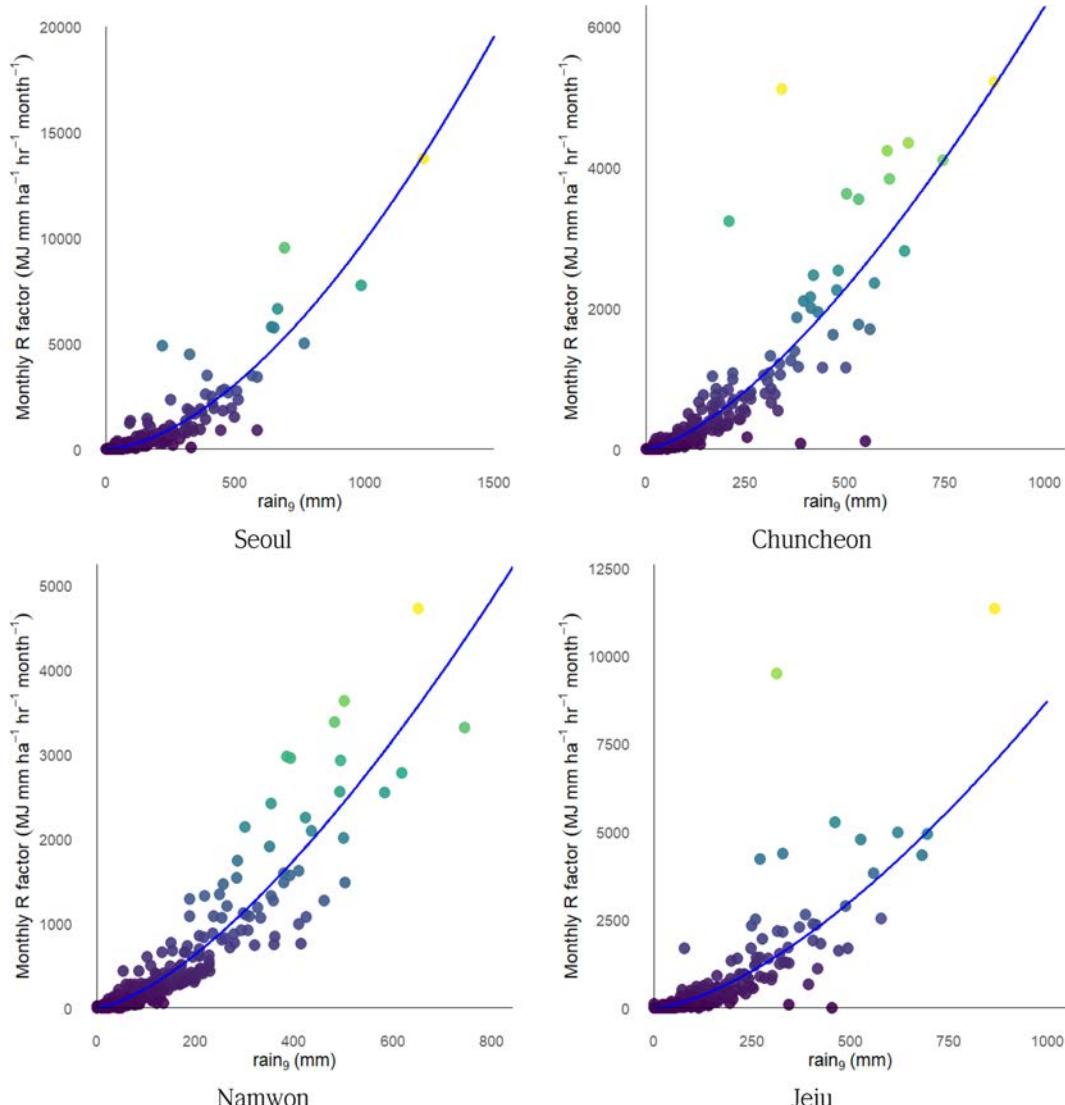


Fig. 4. Scatter plot of monthly R factor estimated from rain₉ in Seoul, Chuncheon, Namwon, and Jeju. The blue lines represent R factors estimated using the model proposed by Fu et al. (2005).

Table 3. Estimation of parameters for the stepwise regression analysis

City	Parameter	Estimate	Std. Error	t value	p value	R ²
Seoul	rain ₁₀	24.46	5.73	4.27	2.50e-05	0.7965
	days ₁₀	-194.01	27.08	-7.16	4.54e-12	
	rain _{12.7}	-8.20	5.16	-1.59	0.113	
	rain	-5.94	2.25	-2.64	8.55e-03	
Chuncheon	rain ₁₀	89.40	39.46	2.27	0.0241	0.7691
	days ₁₀	-934.88	442.82	-2.11	0.0355	
	rain _{12.7}	-81.30	39.45	-2.06	0.0401	
	days _{12.7}	856.11	444.86	1.92	0.0551	
	rain	-2.21	1.40	-1.58	0.1159	
Namwon	rain ₁₀	13.77	1.73	7.96	2.26e-14	0.8974
	days ₁₀	-153.95	10.10	-15.24	< 2e-16	
	rain _{12.7}	-6.14	1.64	-3.74	2.13e-04	
Jeju	rain ₉	8.21	0.41	20.03	< 2e-16	0.6737
	days ₉	-139.41	15.55	-8.97	< 2e-16	

였으며, 강우강도에 의한 영향은 고려하지 않았다. 하지만 강우량이 동일한 강우 이벤트일지라도 강우지속시간이 짧은 이벤트일수록 토양에 더 강한 에너지를 전달하기 때문에 더 많은 토양 침식을 유발할 수 있다. RUSLE Handbook에서 R factor 계산에 사용하는 식에서도 강우강도(mm hr^{-1})에 따라 강우 에너지가 다르게 계산된다(Wischmeier and Smith, 1978; Renard et al., 1997). 이와 같은 선행 연구들은 강우량과 강우강도가 함께 고려되어야 정확한 R factor를 계산할 수 있음을 보여준다. 특히, 기후변화로 인해 높은 강우강도를 갖는 국지성 강우가 증가하게 된다면 R factor는 더욱 과소평가 될 수 있다.

4.3. 월별 R factor 추정을 위하여 통계적으로 유의한 변수의 선별

미국에서 개발한 (R)USLE 모형에서는 침식을 유발할 수 있는 유효 강우를 결정할 때 강우량이 12.7 mm 이상인 강우 사건들만을 고려한다. 여기서, 12.7 mm는 0.5 인치로 미국에서 강우량을 측정할 때 사용하는 단위를 기반으로 결정된 기준치이다(Wischmeier and Smith, 1978). Loureiro and Coutinho(2001)의 연구에서는 일 강우량 10 mm를 유효 강우를 결정하기 위한 기준치로 사용하였고, Fu et al.(2005)의 연구에서는 일 강우량 9 mm를 초과하는 것을 유효 강우로 판별하였다. 일반적으로 10 mm 이상의 강우가 발생할 때 표면 유출수(surface runoff)가 발생하는 것으로 알려져 있다(Baek and Coles, 2013). 반면에 Risal et al.(2016)은 월 강우량을 변수로 활용하였다. 이처럼 모형마다 유효 강우 사건을 결정하기 위해 다른 기준을 활

용하고 있다. 한국에서 지역에 따른 월별 R factor를 추정하기 위한 모형의 개선을 위해 통계적으로 가장 유의한 유효 강우 변수를 결정하기 위해 stepwise regression analysis가 수행되었다.

Table 3은 4개 지역에서 수행된 stepwise regression 결과를 보여준다. Stepwise regression은 전진 선택(forward selection)과 후진 제거(backward elimination)를 동시에 적용하여 계산된 Akaike Information Criterion (AIC)를 비교하는 방법으로 수행되었다. Stepwise regression model에서 상수항은 0으로 가정하였다. 서울, 춘천, 남원에서 공통으로 rain₁₀과 days₁₀ 변수가 선택되었다. 특히, 이 변수들은 세 개 지역에서 공통으로 95% 유의수준에서 유의한 것으로 평가되었으며, Louriero and Coutinho(2001)이 제안한 모형에서 사용되는 변수와 동일하다. 반면에 제주에서는 rain₉과 days₉ 변수가 선택되었다. 국내에서 토양 침식에 대한 유효 강우의 기준을 통일하기 위해 서울, 춘천, 남원에서 공통으로 선별된 rain₁₀과 days₁₀ 변수를 국내 지역에 대한 월별 R factor 추정 모형의 변수로 결정하였다. 이는 Louriero and Coutinho(2001)의 모형의 국내 적용이 타당함을 보여주며, Table 1에 따르면 제주 지역에서도 통계적으로 높은 유의성을 보였다. 이러한 결과는 국내에서 토양 침식을 유발하는 유효 강우의 기준으로 일강우량 10 mm 이상인 강우 사건을 적용하는 것이 타당하다.

4.4. 국내 지역의 월별 R factor 추정을 위한 기준 모형 검증

R factor를 추정하기 위한 기준 모형(Loureiro and Coutinho,

2001; Fu et al., 2005)의 성능을 평가하기 위해 서울, 춘천, 남원, 제주에서 측정된 5년(2003년~2007년)간의 강우 데이터를 활용하여 월별 R factor를 추정하였다. 또한,

Risal et al.(2016)에서 한국의 지역별로 제안한 R factor 산정 모형 및 4.3절에서 지역별로 선별된 변수들을 이용한 stepwise regression model을 이용하여 4개 지역의 R

Table 4. Validation results of regression models for monthly R estimation in Seoul, Chuncheon, Namwon, and Jeju

City	Evaluation metrics	Loureiro and Coutinho (2001)	Fu et al. (2005)	Risal et al. (2016)	Stepwise regression model
Seoul	R ²	0.89	0.87	0.65	0.90
	RMSE	440.6	470.5	777.3	438.5
	MAE	222.6	184.7	331.9	215.8
Chuncheon	R ²	0.89	0.93	0.73	0.90
	RMSE	287.1	226.8	452.9	293.9
	MAE	139.5	110.5	228.7	148.8
Namwon	R ²	0.89	0.91	0.28	0.92
	RMSE	208.6	193.1	538.9	212.0
	MAE	117.0	106.6	325.8	118.3
Jeju	R ²	0.76	0.84	0.94	0.79
	RMSE	749.3	625.3	379.6	752.8
	MAE	223.0	213.0	205.2	228.6

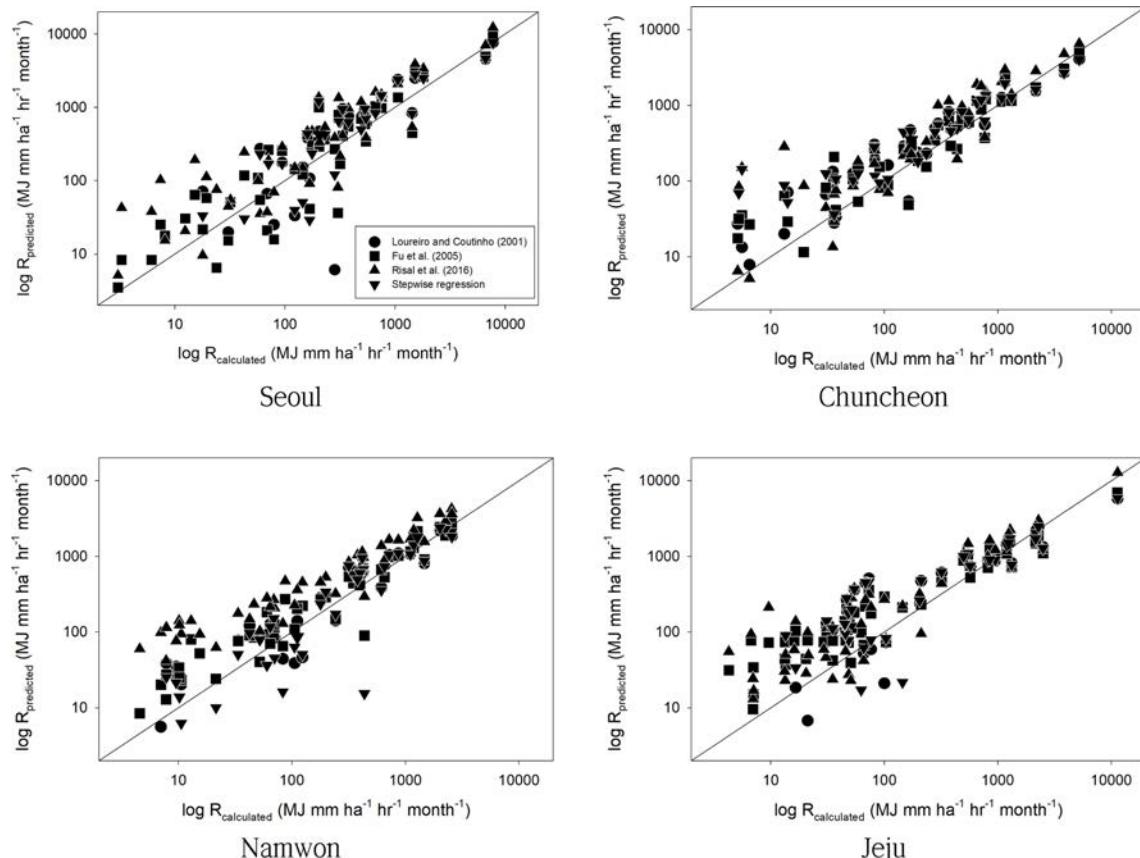


Fig. 5. Comparison of the performance of four models for estimating monthly R factor (● Loureiro and Coutinho, 2001; ■ Fu et al., 2005; ▲ Risal et al., 2016; ▽ Stepwise regression model). The solid line represents the 1:1 line indicating perfect agreement between calculated and predicted R factor values.

factor를 산정하였다. 4개의 모형에 의해 각 지역에서 추정된 월별 R factor를 농촌진흥청에서 개발한 강우 인자 계산기로 계산된 월별 R factor 값과 비교하였으며, R^2 , RMSE, MAE 값을 이용하여 각 모형의 성능을 검증하였다(Table 4, Fig. 5).

R^2 값이 1에 가까울수록, RMSE와 MAE 값이 낮을수록 월별 R factor의 예측 성능이 높은 모형이다. 4개 지역에서 공통으로 Loureiro and Coutinho(2001)와 Fu et al. (2005)에 의해 제안된 모형과 stepwise regression model 은 0.7 이상의 R^2 값을 보이며, RMSE와 MAE도 모두 비슷한 수준으로 평가되었기에 세 가지 모형 모두 월별 R factor를 추정하는데 적합한 것으로 판단된다. Risal et al.(2016)이 제안한 지역별 모형은 제주에서 가장 높은 R^2 (0.94)와 가장 낮은 RMSE와 MAE가 계산되었다. 하지만 다른 지역에서는 상대적으로 낮은 R^2 를 보였으며, RMSE 와 MAE는 모두 다른 모형에 비해 높은 것으로 평가되었다(Table 4, Fig. 5).

Loureiro and Coutinho(2001)이 제안한 다중 선형 회귀 모형은 $rain_{10}$ 과 $days_{10}$ 변수를 이용함으로써 월별 R factor 를 추정하는 데 있어 강우량과 강우일수를 동시에 반영한다는 장점이 있으며, 이 모형에서 사용된 변수들은 다양한 연구자들에 의해서도 월별 R factor 추정에 활용되고 있다(Shamshad et al., 2008; Ferreira and Panagopoulos, 2014). 특히, 표면 유출수를 일으킬 수 있는 임계치인 10 mm 이상의 유효 강우 사건만을 반영할 수 있다는 장점이 있다(Baek and Coles, 2013). 하지만 두 변수의 상호작용이 충분히 고려되지 못한다는 한계를 갖는다.

Fu et al.(2005)이 제안한 모형은 멱함수 형태의 회귀식을 기반으로 하여 강우량과 R factor 사이의 비선형 관계를 효과적으로 반영하였다. 특히, 강우량이 특정 임계치를 초과할 때 강우 침식성이 급격히 증가하는 현상을 잘 설명하였으며, 4개 지역에 대한 검증 분석 결과 가장 높은 예측 정확도($R^2 > 0.84$)를 보였다. 하지만 강우량만을 변수로 이용하기 때문에 강우강도를 비롯한 복합적인 기후 변수의 영향을 반영하지 못한다는 한계를 갖는다(Table 4, Fig. 5).

Risal et al.(2016)이 제안한 모형을 활용하여 서울, 춘천, 남원, 제주에 대해 월별 R factor를 추정한 결과, 제주 지역을 제외한 다른 지점에서 해당 모형의 예측 성능은 다른 모형에 비해 상대적으로 낮은 수준의 성능을 보였다 (Table 4, Fig. 5). 이 모형에서는 월 강우량과 월(month, 1-12월)을 입력 변수로 사용하였다. 국내 대부분의 지역에서 월별 강우강도가 여름철에 가장 높고 겨울철에 가장 낮은 종 모양의 월별 분포 특성을 보이는 점을 고려하여, 월

(month) 변수를 통해 강우강도를 추정하였다(Risal et al., 2016). 이 모형은 강우량과 강우강도를 모두 고려할 수 있는 모형이지만 비 침식성 강우를 걸러내지 못하기 때문에 강우 침식 인자가 과대평가 될 수 있다는 한계를 갖는다. 또한, 이 모형은 월(month) 변수를 이용하여 강우강도를 추정하지만, 기후변화로 인해 기존의 강우 패턴과는 달리 고강도의 갖는 극한 강우 발생 빈도가 증가하고 있는 점을 고려할 때, 월 변수를 기반으로 한 강우강도 추정 방법은 R factor 예측의 정확도를 저하시킬 우려가 있다.

4.5. R factor 예측 모형의 개선을 위한 연구 방향성 검토

본 연구에서는 일 강우량 10 mm 이상인 강우 사건이 R factor를 추정하는 데 통계적으로 유의한 변수임을 확인하였다. 이는 기존 R factor 계산 과정에서 요구되었던 시간 단위의 고해상도 강우 데이터 대신 일 강우 데이터를 활용한 R factor 예측의 가능성을 시사한다. 이러한 접근법은 다양한 지역에서 R factor를 추정할 수 있게 할 뿐만 아니라, 데이터 처리 과정의 복잡성을 줄여 실무적 적용성을 높이는 데 이바지할 수 있을 것으로 기대된다.

최근 기후변화로 인해 강우 패턴이 변화하면서 국지성 강우(localized heavy rainfall)의 빈도가 증가하는 경향이 관찰되고 있다. 국지성 강우의 증가는 강우강도가 높은 강우 사건의 발생 빈도를 증가시키며, 이로 인해 강우에 의한 토양 침식이 심화할 가능성성이 크다. 따라서, 이러한 강우 패턴 변화를 반영할 수 있는 R factor의 추정 방법의 개발이 필요하다. 특히, 강우량뿐만 아니라 강우강도를 동시에 고려하는 R factor 예측 모형의 개발이 요구된다. 강우강도는 강우량과 독립적인 요소로 작용할 뿐만 아니라, 토양 침식 과정에서 중요한 역할을 하는 물리적 요인 중 하나이다. 따라서, 강우량과 강우강도 간의 상호작용을 포함하는 R factor 추정 모형을 개발한다면, 미래 강우 패턴 변화에 따른 월별 R factor를 더욱 정밀하게 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 기존의 경험적 또는 통계적 R factor 모형에 강우강도를 반영하는 방법을 검토하고, 기후변화 시나리오에 따른 강우 패턴 변화를 고려한 예측 모형을 개발하는 것이 중요하다. 이를 통해 강우에 의한 토양 침식 예측의 정확성을 높이고, 농경지 및 자연 생태계 보호를 위한 실질적인 대책 수립에 이바지할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 토양 침식량 산정에 필요한 강우 침식

인자(R factor)를 추정하기 위한 모형의 구조 및 변수 특성을 검토하였고, 국내 지역 중 서울, 춘천, 남원, 제주의 기상 관측소에서 측정된 강우 데이터를 활용하여 개별 모형의 성능 및 국내 적용 가능성을 평가하였다. 본 연구에서 검토한 모형은 기존의 R factor 계산에 필요한 시간 단위 이내의 고해상도 강우 자료 대신 일 단위의 강우 자료를 사용하여 R factor를 추정할 수 있으므로 강우 자료의 수집 과정에서의 어려움과 이를 이용한 데이터 처리 과정의 복잡성을 낮춰 R factor의 계산을 쉽게 할 수 있다는 장점이 있다.

서울, 춘천, 남원, 제주에 적용한 결과 검토된 모형 대부분은 통계적으로 유의한 수준의 결정계수($R^2 > 0.70$)를 보였기에 국내에 적용이 적합한 것으로 판단되었다. 하지만 강우량 및 강우강도의 증가로 인해 R factor가 증가할 수록 모형의 예측 정확도가 낮아질 우려가 있는 것으로 판단되었다. 미래에는 기후변화 때문에 국내로 유입되는 수증기량과 대기 온도가 증가하게 되고, 이는 국지성 강우의 증가를 일으킬 것으로 예측된다. 이와 같은 미래 기상 조건을 고려하여 R factor를 추정하기 위해서는 강우량과 강우강도 및 이들의 상호작용을 고려하기 위한 R factor 추정 모형이 필요하다. 본 연구는 앞으로 진행될 국내의 주요 지역에 대한 R factor 추정 모형 개선 연구에 기초를 제공할 것이며, 이와 같은 연구는 미래 기후 조건에서 강우에 의한 R factor를 예측할 수 있게 할 것이고, 이는 토양 침식량 산정을 통한 토양 보존 전략 수립에 이바지할 수 있을 것이다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 신기후체계 대응 환경기술개발사업의 지원을 받아 연구되었으며(RS-2022-KE002294), 교육부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 자율운영형 중점연구소 고려대학교 오정리질리언스연구원 (NRF-2021R16A1A10045235)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Arnoldus, H.M.J., 1977, Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco, *FAO Soils Bull.*, **34**, 39-51.
- Baek, C.W. and Coles, N.A., 2013, An artificial catchment rainfall-runoff collecting system: Design efficiency and reliability potential considering climate change in Western Australia, *Agric. Water Manag.*, **121**, 124-134.
- Choi, K.-S., Moon, J.-Y., Kim, D.-W., Byun, H.-R., and Kripalani, R.H., 2010, The significant increase of summer rainfall occurring in Korea from 1998, *Theor. Appl. Climatol.*, **102**, 275-286.
- de Santos Loureiro, N. and de Azevedo Coutinho, M., 2001, A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal, *J. Hydrol.*, **250**(1-4), 12-18.
- Ferreira, V. and Panagopoulos, T., 2014, Seasonality of soil erosion under Mediterranean conditions at the Alqueva dam watershed, *Environ. Manag.*, **54**, 67-83.
- Fournier, F., 1960, Climat et Erosion, Universitaires de France, Paris.
- Fu, B.J., Zhao, W.W., Chen, L.D., Zhang, Q.J., Lu, Y.H., Gulinck, H., and Poesen, J., 2005, Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: a case study in the Loess Plateau of China, *Land Degrad. Dev.*, **16**(1), 73-85.
- Jung, C.-G., Jang, W.-J., and Kim, S.-J., 2016, Spatial rainfall considering elevation and estimation 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.
- Korea Meteorological Administration, 2025, Rainfall data archive. Korea Meteorological Administration Data Portal. <https://data.kma.go.kr/stcs/grnd/grndRnList.do>, 2025.02
- Lal, R., 1998, Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality, *CRC Crit. Rev. Plant Sci.*, **17**(4), 319-464.
- Morris, G.L. and Fan, J., 1998, Reservoir sedimentation handbook, McGraw-Hill Book Co., New York.
- Park, C., Son, S.-W., Kim, J., Chang, E.-C., Kim, J.-H., Jo, E., Cha, D.-H., and Jeong, S., 2021, Diverse synoptic weather patterns of warm-season heavy rainfall events in South Korea, *Mon. Wea. Rev.*, **149**(11), 3875-3893.
- Park, C.-W., Sonn, Y.-K., Hyun, B.-K., Song, K.-C., Chun, H.-C., Moon, Y.-H., and Yun, S.-G., 2011, The redetermination of USLE rainfall erosion factor for estimation of soil loss at Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **44**(6), 977-982.
- 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). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703.
- Renard, K.G. and Freimund, J.R., 1994, Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE, *J. Hydrol.*, **157**(1-4), 287-306.
- Risal, A., Bhattacharai, R., Kum, D., Park, Y.S., Yang, J.E., and

- Lim, K.J., 2016, Application of Web Erosivity Module (WERM) for estimation of annual and monthly R factor in Korea, *Catena*, **147**, 225-237.
- Shamshad, A., Azhari, M.N., Isa, M.H., Wan Hussin, W.M.A., and Parida, B.P., 2008, Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI_{30} index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia, *Catena*, **72**(3), 423-432.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D., 1978, Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. United States Department of Agriculture.
- Yu, W., Park, J., Yang, J.E., Lim, K.J., Kim, S.C., Park, Y.S., Hwang, S., and Lee, G., 2017, Development and application of a physics-based soil erosion model, *J. Soil Groundwater Environ.*, **22**(6), 66-73.
- Zhang, Y., Miao, S., Dai, Y., and Bornstein, R., 2017, Numerical simulation of urban land surface effects on summer convective rainfall under different UHI intensity in Beijing, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**(15), 7851-7868.
- Zhang, Z., 2016, Variable selection with stepwise and best subset approaches, *Ann. Transl. Med.*, **4**(7), 136.