



Derivation of regional annual mean rainfall erosivity for predicting topsoil erosion in Korea

Lee, Joon-Hak^{a*}

^aDepartment of Civil and Environmental Engineering, Korea Military Academy

Paper number: 18-044

Received: 4 July 2018; Revised: 28 July 2018; Accepted: 28 July 2018

Abstract

The purpose of this study to present updated regional annual mean rainfall erosivity data in the Republic of Korea. In 2012, Ministry of Environment in Korea published the notice about investigation and survey procedure for the amount of topsoil erosion and adopted USLE (Universal Soil Loss Equation) model to predict the amount of national-scale soil erosion in Korea. In the notice, regional rainfall erosivity values for 158 sites, which is essential to apply the USLE, were included, however, these values came from the data made before 1997 and need to be updated. This study collected, classified and combined annual mean rainfall erosivity data from the literature review to analyze the data. We presented that new iso-erodent map, interpolated by IDW (Inverse Distance Weighted) method and extracted updated regional annual mean rainfall erosivity data at 167 regions for 1961~2015. These values will be used as updated rainfall erosivity data to predict the amount of topsoil erosion in Korea.

Keywords: Iso-erodent map, Rainfall erosivity, Soil erosion, Topsoil, USLE

표토침식량 산정을 위한 지역별 연평균 강우침식인자 유도

이준학^{a*}

^a육군사관학교 토목환경학과

요 지

본 연구의 목적은 한국의 지역별 연평균 강우침식인자 값을 갱신하기 위한 것이다. 2012년 환경부는 표토의 침식 현황조사에 관한 고시를 공포하면서 전국 규모의 토양침식량을 추정하기 위한 모델로서 범용토양유실공식 모델을 채택한 바 있다. 이 고시에는 범용토양유실공식을 적용하기 위해 필요한, 158개 지점에 대한 지역별 강우침식인자가 포함되어 있으나, 이 값은 1997년 이전에 만들어진 데이터를 바탕으로 하고 있기에 개선될 필요가 있다. 본 연구는 우리나라 전국 단위의 연평균 강우침식인자 데이터를 수집하고 분류, 통합하여 분석에 사용하였다. 연구결과 1961~2015년 기간의 54개 지점에 대한 연평균 강우침식인자를 재산정하였으며 새로운 등강우침식도를 제시하였다. 또한 실무에서 활용이 용이하도록 국내 167개 시·군별 연평균 강우침식인자 데이터를 제시하였다. 본 연구에서 제시한 값은 표토침식량을 예측하기 위한 업데이트된 강우침식인자로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어: 등강우침식도, 강우침식인자, 토양침식, 표토, 범용토양유실공식

*Corresponding Author. Tel: +82-2-2197-2954
E-mail: cetera@kma.ac.kr (J.-H. Lee)

1. 서론

강우침식인자(rainfall erosivity)는 20년 이상의 연평균 토양침식량을 추정하기 위한 범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation, USLE) 및 개정범용토양유실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)의 매개변수 중에 하나로서 강우가 유발할 수 있는 잠재적인 가식성지표(erosive index)를 나타낸다(Wischmeier and Smith, 1978; Renard *et al.*, 1997). 본 연구는 대규모 개발 사업에 따른 환경영향평가나 사전환경성검토, 사전재해영향평가, 댐의 비유사량 산정, 장기간에 걸친 연평균 토양유실량 추정 등에 적용되어 온 범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation, USLE) 또는 개정 범용토양유실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) 모델에 입력자료로 사용되는 한국의 지역별 연평균 강우침식인자 값을 갱신하기 위한 것이다.

USLE는 1965년 미국에서 개발되었으며, 이를 국내에 적용하기 위한 연구가 1970년대 농촌진흥청 예하 연구소(현 국립농업과학원)를 중심으로 시작되었다. 1990년대 후반부터는 개발사업장 및 유역 단위에서의 토사유출 등에 적용되었고 현재 수자원 및 환경 분야에서도 USLE가 널리 적용되고 있다. 예를 들어 2005년부터 USLE를 이용한 토사유출량 산정 방법을 행정안전부의 사전재해영향평가 지침서에서 채택하고 있으며, 환경부도 2012년부터 대규모 개발 사업에 따른 환경영향평가나 사전환경성검토시 표토(表土) 침식량 산정을 위한 예비조사방법으로 USLE를 채택하고 있다. USLE 또는 RUSLE(이하 (R)USLE)는 미국에서 Wischmeier and Smith (1978)이 개발한 경험적 모델로서 6개의 인자의 곱으로 장기간에 걸친 연평균 토양유실량을 정량적으로 추정하는 모델이다. 식의 형태는 Eq. (1)과 같다.

$$A = RKLCS P \quad (1)$$

여기서, A 는 연평균 토양침식량, R 는 강우침식인자, K 는 토양침식성 인자, L 은 경사길이인자, S 는 경사도 인자, C 는 식생피복인자, P 는 보전관리인자를 의미한다. 강우침식인자(rainfall erosivity)는 강우로 인해 발생하는 토양침식의 정도를 숫자로 나타낸 값으로 호우사상별 강우에너지와 30분 최대 강우강도의 곱(단위: MJmm/ha/hr/yr)으로 정의된다. 강우침식인자는 면상침식(rill erosion)과 세류침식(sheet erosion)으로 발생하는 20년 이상의 연평균 토양유실량 추정을 목적으로 유도된 (R)USLE 모형의 6가지 입력 변수 중에 유일한 수문인자로서 강우의 운동에너지와 지표수 유출에 의한 침식을

포함하고 있기 때문에 강우-유출침식능 인자(rainfall-runoff erosivity)라고도 한다.

(R)USLE에서 토양의 침식을 발생시키는 호우사상의 분류 기준은 “6시간 동안 12.7 mm (0.5 인치) 이상 내리거나, 최소 15분 동안 6.35 mm (0.25 인치) 이상 내린 호우사상을 대상으로 하되, 6시간 동안 강우량이 1.27 mm (0.05 인치) 미만인 경우는 2개의 호우사상으로 구분” 하도록 되어 있다(Wischmeier and Smith, 1978). 이와 같이 연간 호우사상으로부터 토양침식을 유발하는 유효 호우사상을 추출한 후, 호우사상별 강우에너지와 30분 최대 강우강도를 곱하여 강우침식인자를 계산하기 때문에, 지점별로 최소 5분 단위로 관측된 강우자료가 요구된다. 그러나 20년 이상의 5분 단위 관측 자료를 보유하고 있는 지점이 많지 않기 때문에 강우침식인자를 산정하는 연구는 제한적으로 이루어져왔다.

강우침식인자는 (R)USLE에서 하나의 입력변수로 사용되는 값이기에, 그 값 자체에 대한 수요가 많지 않다. 또한 20년 이상의 분단위 강우자료를 이용해서 유효 호우사상의 분류 및 30분 최대 강우강도를 유도해야 하는 등의 복잡한 계산절차 때문에 국내 수자원 분야에서 이와 관련된 연구는 많이 이루어지지 않았다. 이런 이유로 (R)USLE를 실무에 적용하기 위해 필요한 강우침식인자 값은, 연구자가 직접 계산하기 보다는 기존 연구자가 발표한 강우침식인자 값을 그대로 인용해서 쓰는 경우가 많았다.

예를 들어 국내 학계 및 실무에서 많이 활용해온 강우침식인자 값은 Jung *et al.* (1983)의 연구와 Park *et al.* (2000)의 연구가 있다. Jung *et al.* (1983)은 1960~1980년 기간 동안의 우량기록지(hyetrograph)를 분석하여 전국 51개 지점에 대한 강우침식인자 값을 산정하였다. 이때 자료기간은 지점별로 최소 6년에서 최대 21년까지 상이하며, 평균 자료기간은 10년이다. Jung *et al.* (1983)의 전국 단위 강우침식인자 값은 국토교통부(Ministry of Land, Infrastructures and Transport, MOLIT) (1992)의 “댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사연구”와 국립재난안전연구원(National Disaster Management Research Institute, NDMRI) (1998)의 “개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구” 보고서에 수록되어 실무에서 국내 강우침식인자의 기준 값으로 널리 활용되어 왔다. Park *et al.* (2000)의 강우침식인자 값은 1973~1996년 기간 동안의 시단위 강우자료를 토대로 53개 지점에 대해서 유도한 것으로서 2005년부터 현재까지 행정안전부(Ministry of the interior and Safety, MOIS) (2016)의 “사전재해영향성검토 협의 실무지침”에 수록되어 국내에서 토사유출량 산정을 위해 필요한 지역별 연평균 강우침식인자의 기준 값으로 활용되어 왔다.

2012년 7월 18일 환경부(Ministry of Environment, MOE)는 우리나라 표토의 침식량을 추정하기 위한 예비조사 단계에서 활용할 수 있는 모델로서 USLE를 채택하고, 각 입력변수에 대한 표준 값과 계산과정을 “표토의 침식 현황조사에 관한 고시”로 발표하였다. 현재 환경부 고시(MOE, 2015)는 USLE를 적용할 때, 연간 강우인자는 Jung *et al.* (2004)의 연구결과를 토대로 전국 158개 지점에 대해 기산정된 값을 이용하되, 기산정된 값이 없을 경우에는 가장 가까운 지역의 값을 채택하여 사용하도록 권고하고 있다. 환경부 고시의 기준이 된 Jung *et al.* (2004)의 강우침식인자는 1973~1996년 기간 동안의 Park *et al.* (2000)의 53개 지점의 강우침식인자와 Jung *et al.* (1983)의 1개 지점(제주)의 값을 토대로 국내 54개 지점의 연평균 강우침식인자 값을 역거리가중(Inverse Distance Weighted, IDW) 기법으로 공간분포 시킨 뒤 GIS를 이용하여 158개 행정구역별로 각각 평균값을 뽑아낸 것이다. 그러나 현재 실무에 적용중인 MOLIT (1992), NDMRI (1998), MOE (2015), MOIS (2016)에 수록된 연평균 강우침식인자는 모두 1996년까지의 강우자료를 이용하여 산정된 값으로 1997년 이후의 강우침식인자가 포함되어 있지 않기 때문에 갱신될 필요가 있다.

Jung *et al.* (2004)의 연구 이후에도 전국 단위 강우침식인자 값에 대한 다수의 연구결과(NDMRI, 2009; Shin, 2010; Park *et al.*, 2011; Lee, 2012; Lee and Won, 2013; Risal *et al.*, 2016; Jung *et al.*, 2016)가 학계에 보고된 바 있으나, 각 연구자별로 지점별 계산 값의 편차가 심하여 기존 값을 대체하는데 어려움이 있어왔다. 예를 들어, 대전 지점에 대한 Jung *et al.* (2004)의 연평균 강우침식인자는 4,509 MJmm/ha/yr 인데, 최근 1997~2015년 기간 동안의 10분 단위 누적강우량을 이용한 Risal *et al.* (2016)은 대전 지점에 대한 강우침식인자 값을 6,271 MJmm/ha/yr로 제시하였고, 2002~2015년 기간의 1분 단위 강우자료를 30분으로 합산한 강우자료를 이용한 Jung *et al.* (2016)은 대전 지점의 값을 1,840 MJmm/ha/yr로 새롭게 제시하였다. 이것은 자료기간과 분석 데이터가 다르다는 점을 감안하더라도 동일 지점에 대한 계산 값이 약 60~70%의 편차를 보이고 있는 것이다. Lee *et al.* (2011)은 기존 강우침식인자 값에 대한 비교 연구를 통해 동일 자료, 동일 지점, 동일 기간에 대해서도 연구자의 분석방법에 따라 강우침식인자 값의 차이가 발생할 수 있다는 문제점을 제기한 바 있다. 본 연구는 최근까지 국내의 학계에 발표된 한국의 강우침식인자 관련 연구결과를 수집하고 이를 비교 분석함으로써, 토사유출량 및 표토의 침식량 산정을 위한 지역별 강우침식인자 값을 제시하는데 목적이 있다.

2. 연구방법 및 데이터

장기간에 걸친 연평균 토양침식량을 산정하기 위한 (R) USLE의 입력 값으로서 어떤 지점의 연평균 강우침식인자를 계산하는 절차와 방법은 다음과 같다. 첫 번째는 토양침식을 발생시키는 유효 호우사상의 분류이다. 먼저 우량 관측자료를 토대로 연중 호우사상 중에 총강우량이 12.7 mm 이상인 호우사상을 분류한다. 총 강우량이 12.7 mm가 되지 않더라도 15분 동안에 6.35 mm 이상 내린 호우도 이 호우사상에 포함시킨다. 이 때, 호우와 호우 사이에 6시간 이상 무강우 기간이 있을 경우 2개의 호우사상으로 구분한다. 이와 같이 호우사상의 분류를 하기 위해서는 최소 5분 단위 이하로 계속된 강우자료가 필요하다. 두 번째는 분석하고자 하는 호우사상의 30분 최대 강우강도(I_{30})를 추출하고, 강우기간 동안에 발생한 총 강우에너지(E)를 계산한 뒤, 이 둘을 곱하여 호우사상에 대한 강우침식인자 값(R)을 산정한다. 이를 식으로 나타내면 Eq. (2)와 같다(Wischmeier and Smith, 1978; Renard *et al.*, 1997).

$$R = EI_{30} = \left(\sum e \Delta v \right) I_{30} \quad (2)$$

여기서, R 은 개별 호우사상의 강우침식인자(MJmm/ha), E 는 강우에너지(MJ/ha), e 는 강우운동에너지(MJ/ha·mm), Δv 는 강우량(mm), I_{30} 은 30분 최대 강우강도(mm/hr)를 의미한다. 이렇게 계산된 개별 호우사상의 강우침식인자를 연단위로 합산하면 연강우침식인자가 되며 이를 연단위로 평균하면 연평균 강우침식인자 값을 얻을 수 있다.

강우운동에너지식은 전 세계적으로 약 50여개 이상이 보고된 바 있는데, Jung *et al.* (1983)과 Park *et al.* (2000)이 사용한 USLE 강우운동에너지식을 SI단위로 변환한 식은 Eqs. (3) and (4)와 같다(Renard *et al.*, 1997).

$$e = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I \quad I \leq 76 \text{ mm} \quad (3)$$

$$e = 0.283 \quad I > 76 \text{ mm} \quad (4)$$

여기서, e 는 강우운동에너지(MJ/ha/mm), I 는 강우강도(mm/hr)를 의미한다. 또한 우리나라 사전 재해영향평가와 환경부 고시에서 채택하고 있는 RUSLE의 강우운동에너지식은 Eq. (5)와 같다(Renard *et al.*, 1997).

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

여기서, e 는 강우운동에너지(MJ/ha/mm), I 는 강우강도(mm/hr)를 의미한다. 이 식은 USLE의 강우 운동에너지식을 유도할 때보다 더 많은 자료를 분석하여 유도한 결과로서, 강우강도에 따른 강우운동에너지의 상한값을 0.29 MJ/mm/ha로 정하고 있다. 이와 같이 강우운동에너지식의 종류에 따라서 강우침식인자 산정 값이 달라지는데, Lee *et al.* (2011)은 USLE의 강우운동에너지식으로 산정한 강우침식인자 값과 RUSLE의 강우운동에너지식으로 산정한 값이 약 10%의 편차가 있음을 밝힌 바 있다.

Lee (2012)는 5분 이하 단위로 계측된 강우자료가 제한될 경우에 강우침식인자를 산정하는 방법을 (R)USLE의 표준방법(standard method)과 구분하여, 수정방법(modified method), 간편법(simplified method) 등으로 분류한 바 있다. 수정방법은 분단위 강우자료를 활용할 수 없을 때, 10분 단위~시강우량을 이용하는 방법이다. 간편법은 강우자료의 획득이 곤란할 때 연강우량, 월강우량, 일강우량, 강우일수, 관측소 표고 등 다른 강우 매개변수를 통해 경험적으로 강우침식인자를 추정하는 방법이다.

본 연구에서는 지역별 강우침식인자 값의 최신화를 위하여 국내 강우침식인자와 관련된 14개의 선행연구자료를 수집하였다. Table 1은 수집된 14개의 선행연구를 산정지점과 자료기간, 사용 데이터, 사용 강우운동에너지식 등을 포함하여 정리한 것이다.

수집된 14개의 국내 선행 연구는 각 연구자가 사용한 자료(지점수, 자료년수, 자료의 해상도)가 상이하고, 산정방법에서도 강우운동에너지식의 차이가 있는 것을 알 수 있었다.

(R)USLE 모델에 적용하기 위한 강우침식인자는 20년 이상의 평균값을 사용하도록 권고하고 있는데, 자료기간이 20년 미만인 경우도 있었다. Table 1에서 알 수 있듯이 기존 14개 연구 중에 (R)USLE의 표준방법으로 강우침식인자를 산정한 연구는 Jung *et al.* (1983)과 Lee *et al.* (2011)이 있으며, Park *et al.* (2000)의 연구를 포함한 국내 대부분의 선행연구는 시강우량을 이용한 수정방법으로 강우침식인자를 산정해왔음을 알 수 있다. 특히 시강우량을 이용한 방법과 1분 단위 강우자료를 10분 단위로 합산하여 활용한 Shin (2010)의 연구, 1분 단위 강우자료를 30분 단위로 합산하여 활용한 Jung *et al.* (2016)의 연구와, 10분 단위 누적강우량 자료를 이용한 Risal *et al.* (2016)의 연구는, 이론적으로 강우침식인자 산정을 위한 호우사상 분류에서 15분 동안 최소 6.35 mm 이상 내린 호우사상을 추출할 수 없다는 물리적인 제한사항이 있다.

한편, Lee and Heo (2014)는 기상청 5개 지점의 20년 강우자료를 토대로 유효 호우사상을 분석한 결과, 12.7 mm 미만이면서 15분 동안 6.35 mm 이상 내리는 호우사상은 지점별 연 1회 미만으로 국내 연강우침식인자 산정에 미치는 영향이 미미하다고 밝힌 바 있다. 이 점에서 본 연구에서는 표준방법과 수정방법으로 산정된 연구결과의 경우, 15분 동안 6.35 mm 이상 내리는 호우의 포함여부에 따라 발생할 수 있는 강우침식인자 값이 차이는 고려하지 않았다.

본 연구는 전국의 표토침식량 산정을 위한 연평균 강우침식인자를 지역별로 최신화하기 위한 연구이므로, 14개 선행 연구 중에서 (R)USLE 강우운동에너지식을 이용하여 50개 이상의 지점에 대한 강우침식인자 값을 제시한 7개 선행 연구

Table 1. Classification of previous studies for rainfall erosivity in Korea

Classification	Number of stations	Observation years	Data	Kinetic energy Eqs.	Remark
Jung <i>et al.</i> (1983)	51	1960~1980 (6~21 years)	Pluviograph	USLE	Standard
Shin <i>et al.</i> (1983)	12	1969~1979 (10 years)	Pluviograph	USLE	Standard
Chung <i>et al.</i> (1999)	9	1964~1996 (24~33 years)	Monthly	-	Simplified
Park <i>et al.</i> (2000)	53	1973~1996 (24 years)	Hourly	USLE	Modified
Hu <i>et al.</i> (2000)	59	1974~1995 (22 years)	Hourly	USLE	Modified
Kang <i>et al.</i> (2003)	26	1988~2001 (13 years)	Hourly	USLE	Modified
NDMRI (2009)	53	1961~2008 (35~47 years)	Hourly	USLE/RUSLE, etc.	Modified
Shin. (2010)	33	1971~1999 (29 years)	10 min	RUSLE2	Modified
Park <i>et al.</i> (2011)	59	1981~2010 (30 years)	Hourly	USLE	Modified
Lee (2011)	21	1980~1999 (20 years)	5 min	USLE/RUSLE, etc.	Standard
Lee (2012)	37	1973~2009 (37 years)	5 min	Noe and Kwon (1984)	Standard
Lee and Won (2013)	76	1962~2010 (10~49 years)	Hourly	Lee and Won (2013)	Modified
Risal <i>et al.</i> (2016)	75	1997~2015 (15~19 years)	10 min	RUSLE	Modified
Jung <i>et al.</i> (2016)	55	2002~2015 (14 years)	30 min	USLE	Modified

의 강우침식인자 데이터 총 406개를 수집하였다. 본 연구에서는 이 중에서 폐쇄된 6개 지점을 제외하고 총 400개의 데이터를 사용하였다. 선행연구에서 제시된 강우침식인자 데이터를 비교하기 위해서 각 연구자별로 중복되는 지점 수를 분석해 본 결과 Table 2에서 알 수 있듯이 여러 연구자들에 의해 공통적으로 연구되어 강우침식인자 값의 비교가 가능한 지점 수는 약 50개 지점인 것을 알 수 있었다.

동일한 지점에 대한 강우침식인자라도 연구자별로 분석에 사용한 강우데이터의 종류, 자료의 기간과 산정방법 등이 상이하게 달라지면, 결과 값의 차이가 크게 발생할 수 있다(Lee *et al.*, 2011). 본 연구에서는 각 연구자별 강우침식인자의 산포도를 비교하여 각 연구자별 강우침식인자 데이터의 상관성을 분석한 뒤에 상관성이 높은 연구결과를 토대로 Eq. (6)을 이용하여 지점별 연평균 강우침식인자를 유도하였다.

$$R_{mean} = \frac{R_j \times j + R_l \times l + \dots + R_n \times n}{j + l + \dots + m} \quad (6)$$

여기서, R_{mean} 은 지점의 연평균 강우침식인자, R_j 는 동일 지점의 j 개년치 연평균 강우침식인자, R_l 는 l 개년, R_n 은 n 개년의 연평균 강우침식인자 값을 의미한다. 본 연구에서는 상기

방법으로 유도한 강우침식인자 값을 검증하기 위해 기상청 산하 지점에 대해서 획득 가능한 5분 단위 강우자료를 수집하고 연평균강우침식인자를 산정한 뒤, 이 값을 비교하였다.

3. 연구결과

3.1 선행연구 강우침식인자 값의 상관분석

본 연구에서는 14개 선행 연구 중에서 (R)USLE 강우운동 에너지식을 이용하여 50개 이상의 지점에 대한 강우침식인자를 제시한, 7개 선행 연구의 강우침식인자 데이터 총 400개를 상관분석에 사용하였다. Table 3은 분석결과로서 각 연구자별 강우침식인자 값 상호간의 상관계수를 나타낸 것이다.

7개 선행연구 중에 Park *et al.* (2000), Hu *et al.* (2000)과 NDMRI (2009), Park *et al.* (2011), Risal *et al.* (2016)의 강우침식인자 상호간의 상관계수가 0.90 이상으로 높게 나타났다. Fig. 1(a)에서 나타내었듯이 Jung *et al.* (1983)과 Jung *et al.* (2016)의 강우침식인자 상호간의 상관계수가 0.13으로서 상관관계가 매우 낮은 것으로 나타났는데, 이것의 의미는 두 연구자의 강우침식인자 값이 동일 지점이라도 다른 값을 나타내는 것을 의미한다. 이에 반해 Fig. 1(b)의 경우는 두 연구자의

Table 2. Number of stations overlapped between various rainfall erosivity studies

Class	Jung <i>et al.</i> (1983)	Park <i>et al.</i> (2000)	Hu <i>et al.</i> (2000)	NDMRI (2009)	Park <i>et al.</i> (2011)	Risal <i>et al.</i> (2016)	Jung <i>et al.</i> (2016)
Jung <i>et al.</i> (1983)	51	43	43	43	47	47	35
Park <i>et al.</i> (2000)	43	53	50	53	53	53	41
Hu <i>et al.</i> (2000)	43	50	59	50	51	56	42
NDMRI (2009)	43	53	50	53	53	53	41
Park <i>et al.</i> (2011)	47	53	51	53	60	59	46
Risal <i>et al.</i> (2016)	47	53	56	53	59	75	55
Jung <i>et al.</i> (2016)	35	41	42	41	46	55	55

Table 3. Correlation coefficient between various rainfall erosivity data

Class	Jung <i>et al.</i> (1983)	Park <i>et al.</i> (2000)	Hu <i>et al.</i> (2000)	NDMRI (2009)	Park <i>et al.</i> (2011)	Risal <i>et al.</i> (2016)	Jung <i>et al.</i> (2016)
Jung <i>et al.</i> (1983)	1.00	0.61	0.53	0.30	0.25	0.41	0.13
Park <i>et al.</i> (2000)	0.61	1.00	0.63	0.96	0.95	0.90	0.59
Hu <i>et al.</i> (2000)	0.53	0.63	1.00	0.96	0.95	0.90	0.59
NDMRI (2009)	0.30	0.96	0.96	1.00	0.98	0.94	0.70
Park <i>et al.</i> (2011)	0.25	0.95	0.95	0.98	1.00	0.94	0.70
Risal <i>et al.</i> (2016)	0.41	0.90	0.90	0.94	0.94	1.00	0.70
Jung <i>et al.</i> (2016)	0.13	0.59	0.59	0.70	0.70	0.70	1.00

자료기간이 다르더라도 두 연구자가 산정한 강우침식인자의 값과 지점별 순위가 크게 변동되지 않고 있음을 보여주고 있는데, 이것은 이들 연구자의 연구결과를, 강우침식인자를 갱신하는데 사용할 수 있음을 말해준다. 지점별 강우침식인자 값의 상관관계가 높은 것으로 나타난 5개 선행연구의 경우는 강우침식인자 산정 값의 오류가 작고, 지점별로 일관성 있게 계산되었다는 것을 의미한다. 그러나 Hu *et al.* (2000)의 연구 결과는 NDMRI (2009), Park *et al.* (2011), Risal *et al.* (2016)의 연구결과와 상관계수는 높게 나타나지만, 지점별 값은 국내

에서 잘 알려진 Park *et al.* (2000)의 연구결과보다 약 30%과 소 추정되는 오차가 발생하여 본 연구에서는 Hu *et al.* (2000)의 연구결과를 제외한 총 4개 선행연구 자료를 활용하였다.

3.2 선행연구 결과를 이용한 연평균강우침식인자 값 유도

본 연구에서는 상관계수가 0.90 이상인 Park *et al.* (2000)과 NDMRI (2009), Park *et al.* (2011), Risal *et al.* (2016)의 강우침식인자를 토대로 Eq. (6)을 이용하여 52개 지점에 대한 지점

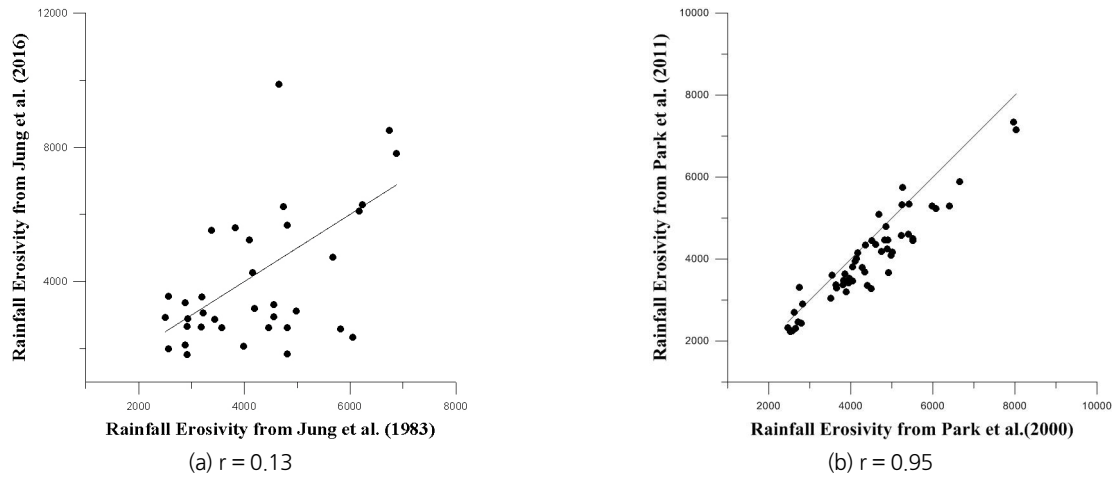


Fig. 1. Scatter plot between various rainfall erosivity data (unit: MJmm/ha/yr)

Table 4. Annual mean rainfall erosivity data at 54 stations (R unit: MJmm/ha/yr)

Station no.	R	Period	Station no.	R	Period	Station no.	R	Period
90	4,003	1968~2015	162	5,588	1961~2015	244	4,500	1973~2015
101	4,793	1966~2015	165	3,835	1961~2015	245	4,861	1973~2015
105	4,627	1961~2015	168	5,643	1961~2015	247	4,957	1973~2015
108	6,634	1961~2015	184	5,977	1981~2015	260	6,652	1973~2015
112	5,198	1961~2015	189	8,289	1981~2015	261	5,300	1973~2015
119	5,794	1964~2015	192	5,694	1969~2015	262	6,865	1973~2015
127	4,191	1973~2015	201	7,119	1973~2015	272	4,298	1973~2015
129	5,188	1968~2015	202	6,384	1973~2015	273	3,648	1973~2015
131	4,446	1967~2015	203	5,297	1972~2015	277	2,922	1973~2015
133	5,288	1969~2015	211	3,865	1973~2015	278	3,053	1973~2015
135	2,916	1961~2015	212	5,737	1973~2015	279	2,975	1973~2015
138	3,097	1961~2015	221	5,143	1973~2015	281	2,970	1973~2015
140	4,455	1968~2015	226	4,562	1973~2015	284	4,268	1973~2015
143	3,131	1961~2015	232	4,869	1972~2015	285	4,680	1973~2015
146	4,917	1961~2015	235	5,601	1973~2015	288	4,260	1973~2015
152	4,285	1961~2015	236	5,823	1973~2015	289	6,339	1973~2015
156	5,292	1961~2015	238	4,337	1973~2015	294	9,154	1973~2015
159	6,595	1961~2015	243	4,515	1973~2015	295	8,795	1972~2015

별 연평균 강우침식인자를 산정하였다. 52개 지점 중에 제주도 지역이 빠져 있어서 등강우침식도 작성을 위하여 Park *et al.* (2011), Risal *et al.* (2016)의 결과 값을 토대로 제주와 서귀포 지점을 추가하였다. 이렇게 산정한 전국 54개 지점의 연평균 강우침식인자 값은 Table 4와 같다. 이것은 환경부 고시의 강우침식인자를 업데이트하여 1961~2015년 기간(43~55년)까지 확장시킨 연평균 강우침식인자 값이다.

연구결과, 1961~2015년 기간(43~55년) 동안의 54개 지점에 대한 연평균 강우침식인자는 5,067 MJmm/ha/yr로 나타났다. 추풍령 지점(135)이 2,916 MJmm/ha/yr로 가장 낮고, 거제 지점(294)이 9,154 MJmm/ha/yr로 가장 높은 것으로 나타났다. 현재 환경부 고시의 기준이 된 Jung *et al.* (2004)의 54개 지점에 대한 연평균 강우침식인자 값은 1997년 이전 강우자료로 산정된 값으로 그 값은 4,476 MJmm/ha/yr이다. 본 연구에서 유도한 방법으로 1997~2015년 기간의 강우사상을 포함할 경우 한국의 연평균 강우침식인자 값이 약 13% (590 MJmm/ha/yr) 증가되었음을 알 수 있었다. 또한 Jung *et al.* (2004)의 강우침식인자와 본 연구결과의 상관계수는 0.91로 나타났다.

3.3 연평균 강우침식인자 값의 검증

연구결과에 대한 검증을 위해서 기상청 54개 지점 중 결측자료가 있는 18개 지점을 제외하고 36개 지점에 대한 1961~2015년(43~55년) 기간 동안의 5분 단위 강우자료를 검증에 활용하였다. 1961~1999년까지의 자료는 MMR (Minutely data using the Magnetic Recording) 자료를 5분 단위로 합산하여 사용하였고 2000년부터 2015년 기간의 자료는 기상청의 5분 단위 누적강우량을 5분 단위로 변환하여 활용하였다. MMR자료는 기상청에서 자기우량기록지(pluviograph)를 스캔하여 디지털로 판독 후 데이터베이스(database)로 구축해놓은 강우자료로서 관측개시년도부터 1999년까지 구축되어 있다. 기상청의 5분 단위 누적강우량은 시강우량과 비교하여 오차가 큰 18개 지점을 제외하고, 10% 미만의 오차 범위 내에 있는 36개 지점의 자료를 사용하였다.

본 연구에서는 54개 지점 중에 자료 획득이 가능한 기상청 산하 36개 지점의 1961~2015년(43~55년) 기간 동안의 5분 단위 강우자료를 이용하여 동일기간의 연평균 강우침식인자 값을 산정하였으며, 이를 토대로 앞에서 Eq. (6)을 통해 유도한 지역별 연평균 강우침식인자 값과 비교하였다. 36개 지점에 대하여 직접 계산한 연평균 강우침식인자 값은 5,218 MJmm/ha/yr이었으며, 본 연구에서 제시한 선행 연구결과를 갱신하는 방법으로 산정한 값은 5,349 MJmm/ha/yr으로 나

타났다. 이 각 지점별 계산 값을 비교해본 결과 0.95의 높은 상관관계를 보였으며, 오차는 약 2.5%로 나타났다. 이것은 앞으로 강우침식인자 값을 갱신할 때, 연구자가 처음부터 지점별 강우침식인자를 일일이 계산할 필요가 없이 자료기간이 다른 선행연구의 결과 값을 합산하고 평균을 내서 활용해도 실제 계산 값과 큰 차이가 없다는 것을 말해 준다. 예를 들어 본 연구에서 54개 지점에 대한 2015년까지의 연평균 강우침식인자를 제시하였는데, 앞으로 2016년, 2017년 기간으로 기존의 연평균 강우침식인자를 확장한다면, 지점별로 2016년과, 2017년의 연강우침식인자를 각각 계산하여 기존 연평균 강우침식인자에 더 해준 뒤에 총 자료값으로 나눠주면 자료기간이 확장된 지점별 연평균 강우침식인자를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

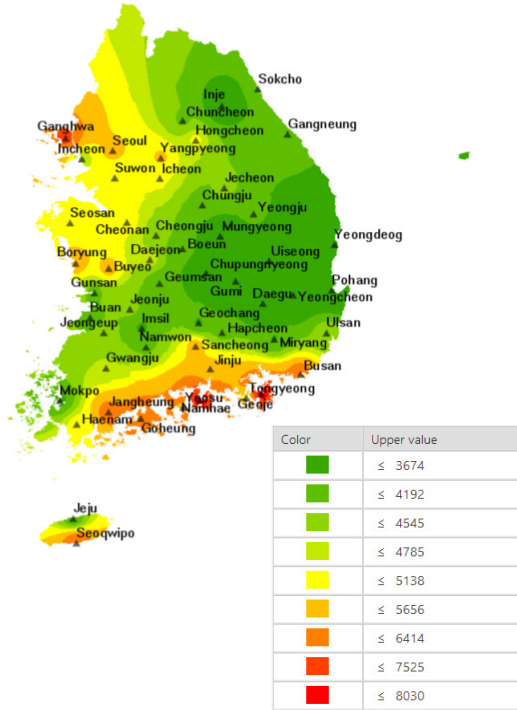
3.4 전국단위 지역별 연평균강우침식인자 값 유도

본 연구에서는 54개 지점의 연평균 강우침식인자 값을 토대로 공간분포 기법에 따라 등강우침식도(Iso-erodent map)를 작성하고, 전국단위 지역별 연평균 강우침식인자 값을 유도하였다. Jung *et al.* (2004), Park *et al.* (2011), Risal *et al.* (2016), Jung *et al.* (2016)은 각각 IDW (Inverse Distance Weight) 기법을 이용하여 등강우침식도(iso-erodent map)를 작성한 바 있다. 본 연구에서도 기존 환경부에서 고시된 Jung *et al.* (2004)의 연평균 강우침식인자 값과 비교하기 위하여, 본 연구에서 산정된 54개 지점의 연평균 강우침식인자를 기준으로, IDW 기법을 이용하여 등강우침식도를 작성하였다. Fig. 2(a)는 현 환경부 고시의 등강우침식도를 나타내며, Fig. 2(b)는 1961~2015년 기간(43~55년) 동안의 54개 지점에 대한 연평균 강우침식인자를 토대로 IDW (Inverse Distance Weight) 기법으로 작성한 등강우침식도를 나타낸 것이다. IDW 기법 적용 시 셀의 크기(cell size)는 30 m로 하였으며, 주변 지점 수는 12개로 하였다.

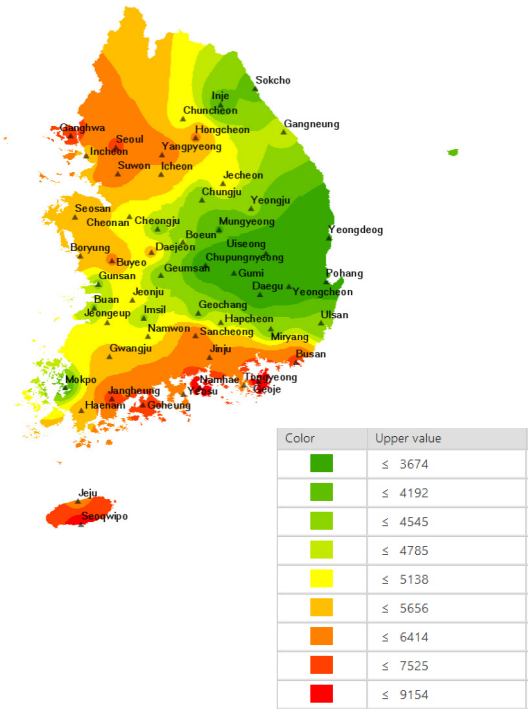
Jung *et al.* (2004)은 등강우침식도로부터 국내 시·군 행정구역도를 기준으로 158개 각 지역별 연평균 강우침식인자 값을 추출하여 제시한 바 있는데, 이 값이 2012년부터 환경부의 강우침식인자 값으로 현재 고시되어 있다. 본 연구에서는 2016년 기준 국내 시·군 행정구역도를 기준으로 GIS기법(zonal statistics)을 이용하여 등강우침식도로부터 167개 시·군별 연평균 강우침식인자 값을 추출하였다. 이 값은 167개 행정구역별 경계선을 기준으로 시·군 행정구역 내의 강우침식인자 데이터를 평균한 값이다. Fig. 2의 등강우침식도로부터 유도한 시·군별 연평균 강우침식인자 값을 Fig. 2(d)에 나타내었으며, 167개 지역의 강우침식인자 값을 Table 5에 제시하

였다. Figs. 2(c) and 2(d)에서도 알 수 있듯이 현재 환경부 고시 값인 Jung *et al.* (2004)보다 1997년 이후의 강우사상을 포함해서 계산했을 때, 연평균강우침식인자가 평균 10% 증가했음

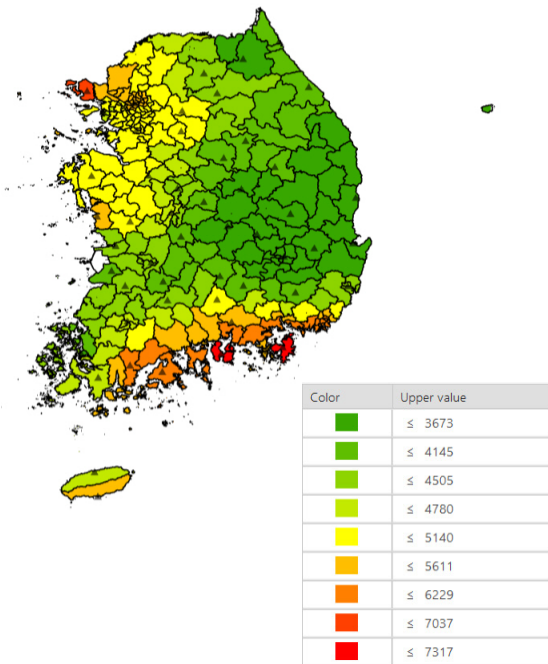
을 보여주고 있다. 이것은 1997년 이후 지난 20여 년 동안 국내에서 강우에 의한 잠재적인 토양침식 위험이 증가되었음을 말해주는 것이다.



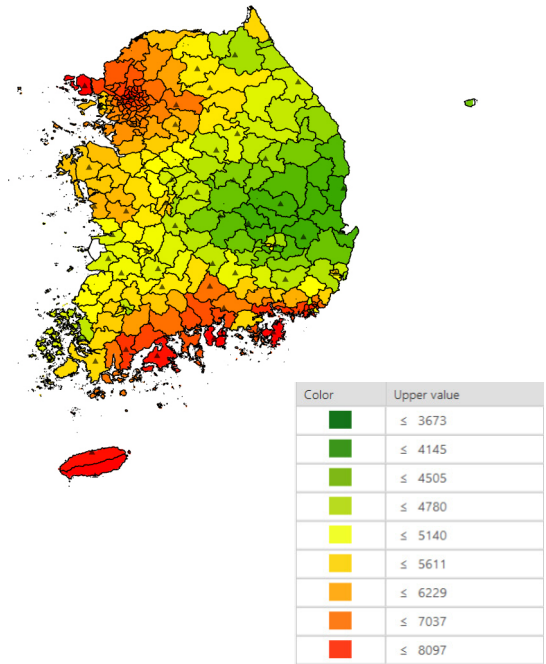
(a) Iso-erodent map for 1973~1996 (Jung *et al.*, 2004)



(b) Iso-erodent map for 1961~2015 (this study)



(c) Iso-erodent map of 158 regions (Jung *et al.*, 2004)



(d) Iso-erodent map of 167 regions (this study)

Fig. 2. Iso-erodent map (unit: MJmm/ha/yr)

Table 5. New annual mean rainfall erosivity of the cities and countries (unit: MJmm/ha/yr)

City/County	R	City/County	R	City/County	R	City/County	R	City/County	R
Seoul	6,334	Gimpo	6,265	Jeungpyeong	4,609	Buan	4,644	Gunwi	3,204
Busan	6,255	Hwaseong	5,685	Jincheon	4,840	Mokpo	3,907	Uiseong	3,242
Daegu	3,478	Gwangju	5,791	Goesan	4,344	Yeosu	6,149	Cheongsong	3,221
Incheon	5,559	Yangju	6,103	Eumseong	4,876	Suncheon	5,916	Yeongyang	3,321
Ganghwa	6,853	Pocheon	5,659	Danyang	4,435	Naju	5,234	Yeongdeok	3,055
Ongjin	5,769	Yeosu	5,489	Cheonan	4,927	Gwangyang	6,179	Cheongdo	3,977
Gwangyu	5,248	Yeoncheon	5,799	Gongju	5,138	Damyang	5,131	Goryeong	4,178
Daejun	5,018	Gapyeong	5,545	Boryeong	5,427	Gokseong	5,275	Seongju	3,705
Ulsan	4,296	Yangpyeong	5,881	Asan	5,078	Gurye	5,448	Chilgok	3,260
Ulju	4,307	Chuncheon	5,020	Seosan	5,256	Goheung	6,616	Yecheon	3,848
Sejong	4,908	Wonju	5,055	Nonsan	5,049	Boseong	6,234	Bonghwa	3,789
Suwon	5,795	Gangneung	4,569	Gyeryong	5,006	Hwasun	5,602	Uljin	3,405
Seongnam	5,909	Donghae	4,407	Dangjin	5,342	Jangheung	6,355	Ulleung	3,700
Uijeongbu	6,146	Taebaek	4,025	Geumsan	4,466	Gangjin	5,900	Changwon	5,960
Anyang	5,974	Sokcho	4,075	Buyeo	5,462	Haenam	5,163	Jinju	5,806
Bucheon	5,845	Samcheok	4,057	Seocheon	4,856	Yeongam	5,140	Tongyeong	6,162
Gwangmyeong	6,044	Hongcheon	5,066	Cheongyang	5,394	Muan	4,422	Sacheon	6,213
Pyeongtaek	5,427	Hoengseong	5,122	Hongseong	5,279	Hampyeong	4,916	Gimhae	5,461
Dongducheon	5,895	Yeongwol	4,564	Yesan	5,213	Yeonggwang	4,914	Miryang	4,385
Ansan	5,735	Pyeongchang	4,673	Taeon	5,325	Jangseong	5,045	Geoje	8,097
Goyang	6,208	Jeongseon	4,454	Jeonju	4,889	Wando	5,881	Yangan	4,883
Gwacheon	6,093	Cheorwon	5,332	Gunsan	4,646	Jindo	5,147	Uiryeong	5,234
Guri	6,163	Hwacheon	4,990	Iksan	4,949	Sinan	4,653	Haman	5,562
Namyangju	5,933	Yanggu	4,436	Jeongeup	4,818	Pohang	3,240	Changnyeong	4,642
Osan	5,694	Inje	4,207	Namwon	5,044	Gyeongju	3,656	Goseong	6,345
Siheung	5,755	Goseong	4,202	Gimje	4,743	Gimcheon	3,506	Namhae	8,001
Gunpo	5,838	Yangyang	4,317	Wanju	4,807	Andong	3,441	Hadong	6,147
Uiwang	5,866	Cheongju	4,575	Jinan	4,665	Gumi	3,176	Sancheong	5,910
Hanam	5,968	Chungju	4,487	Muju	4,372	Yeongju	4,160	Hamyang	5,122
Yongin	5,575	Jecheon	4,708	Jangsu	4,788	Yeongcheon	3,131	Geochang	4,461
Paju	6,094	Boeun	4,462	Imsil	4,684	Sangju	3,631	Hapcheon	4,766
Icheon	5,334	Okcheon	4,422	Sunchang	4,925	Mungyeong	3,886	Jeju	6,628
Anseong	5,247	Yeongdong	3,803	Gochang	4,871	Gyeongsan	3,413	Seogwipo	7,431

4. 결론

국내 실무에서 활용하고 있는 연평균 강우침식인자는 1997년 이전의 호우사상으로부터 유도된 것으로서, 1997년 이후의 호우사상을 포함한 값으로 갱신할 필요가 있다. 그동안 다수의 연구자가 각자의 연구방법으로 강우침식인자 값을 나름대로 제시하였지만, 기존 강우침식인자 값과 연구자별로 산정된 지점별 값의 편차가 커서 실무에 적용하는데 어려

움이 있었다. 본 연구는 (R)USLE 강우운동에너지식을 이용하여 국내 50개 이상 지점의 연평균 강우침식인자를 제시한 선행연구를 대상으로 상관분석과 비교 연구를 통해 2015년까지의 강우사상이 포함된 새로운 연평균 강우침식인자 값을 제시하였으며, 기존 연구결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 14개 선행 연구 중에 Jung *et al.* (1983), Hu *et al.* (2000), Jung *et al.* (2016)의 연구는, 상관관계가 낮거나 결과 값의 편차가 큰 것으로 나타났으나, Park *et al.* (2000), NDMRI (2009), Park *et al.* (2011), Risal *et al.* (2016)의 연구의 경우는, 상관관계수 0.90 이상의 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 이들 4개의 연구결과는 자료기간이 다르더라도 강우침식인자 값의 지점별 순위가 유사하게 나타나서, 지점별 강우침식인자 패턴의 일관성이 있음을 알 수 있었다.
- 2) 본 연구에서 1961~2015년(43~55개년) 기간 동안의 54개 지점에 대한 연평균 강우침식인자를 재산정한 결과, 전체 평균값이 5,067 MJmm/ha/yr, 최소 2,916 MJmm/ha/yr, 최대 9,154 MJmm/ha/yr 로 나타났다. 1997년 이후의 호우사상을 포함할 경우, 현재 환경부 기준으로 되어 있는 Jung *et al.* (2004)의 연평균 강우침식인자보다 약 13% 증가됨을 알 수 있었다. 이를 토대로 1997년 이후 지난 20여 년 동안 국내에서 강우에 의한 잠재적인 토양침식 위험이 증가되고 있음을 알 수 있었다.
- 3) 기존 환경부 고시를 대체할 수 있도록, IDW 기법을 이용하여 작성한 등강우침식도로부터 2016년 행정구역을 기준으로 분류된 167개 지역에 대한 강우침식인자 값을 유도하여 제시하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 이용하면, 앞으로 연구자가 강우침식인자를 일일이 계산할 필요 없이, 지점별 값들에 대한 연도별 업데이트를 통해 갱신해나갈 수 있을 것이다.

본 연구는 우리나라 전국 단위의 연평균 강우침식인자 데이터를 수집하고 분류, 통합하여 분석에 사용하였다. 연구결과 1961~2015년 기간의 54개 지점에 대한 연평균 강우침식인자를 재산정하였으며 새로운 등강우침식도를 제시하였다. 또한 실무에서 활용이 용이하도록 국내 167개 시·군별 연평균 강우침식인자 데이터를 제시하였다. 본 연구에서 제시한 값은 표토침식량을 예측하기 위한 업데이트된 강우침식인자로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2015년 육군사관학교 화랑대연구소와 한국연구재단 신진연구지원사업의 연구비지원(No. 2015R1C1A1A02037087)에 의해 수행되었습니다.

References

- Hu, Q., Gantzer, C. J., Jung, P., and Lee, B. (2000). "Rainfall Erosivity in the Republic of Korea." *Journal of Soil and Water Conservation*, Second Quarter Vol. 55, No. 2, pp. 115-120.
- Jung, C., Jang, W., and Kim, S. (2016). "Spatial rainfall considering elevation and estimation of rain erosivity factor R in revised USLE using 1 minute rainfall data and program development." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 19, No. 4, pp. 130-145.
- Jung, K., Kim, W., Hur, S., Ha, S., Jung, P., and Jung, Y. (2004). "USLE/RUSLE factors for national scale soil loss estimation based on the digital detailed soil map." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 37, No. 4, pp. 199-206.
- Jung, P., Ko, M., Im, J., Um, K., and Choi, D. (1983). "Rainfall erosion factor for estimating soil loss." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 16, No. 2, pp. 112-118.
- Jung, Y., Kwon, Y., Im, H., Ha, S., and Yang, J. (1999). "R and K factors for an application of RUSLE on the slope soils in Kwangwon-do, Korea." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 32, No. 1, pp. 31-38.
- Kang, M., Park, S., Im, S., and Kim, H. (2003). "Computing the half-month rainfall-runoff erosivity factor for RUSLE." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 45, No. 3, pp. 29-40.
- Lee, J. (2012). *Estimation of annual rainfall erosivity and development of iso-erodent map for the Korea peninsula*. Doctor in Philosophy Thesis, Yonsei University, pp. 58-60.
- Lee, J., and Heo, J. (2011). "Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea." *Journal of Hydrology*, Vol. 409, No. 1-2, pp. 30-48.
- Lee, J., and Heo, J. (2014). "Classification of storm events for estimating rainfall erosivity." *Proceedings Korean Society of Civil Engineers 2014 Convention Conference*, 2014.10, pp. 1019-1020.
- Lee, J., and Won, J. (2013). "Analysis of the characteristic of monthly rainfall erosivity in Korea with derivation of rainfall energy equation." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 3, pp. 177-184.
- Lee, J., Oh, K., and Heo, J. (2011). "Estimation of rainfall-runoff erosivity using modified institute of agricultural sciences index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 619-628.
- Lee, J., Shin, J., and Heo, J. (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.
- Ministry of Environment (2015). *Notification concerning investigation on condition of topsoil erosion*.
- Ministry of Land, Infrastructures and Transport (1992). *Investigation and research on specific sediment yield in watershed for dam design*.
- Ministry of the Interior and Safety (2016). *Guideline of practical*

technologies for damage assessments and countermeasure for geohazards.

- National Disaster Management Research Institute (1998). *Study on the sediment yield estimation due to land development.*
- National Disaster Management Research Institute (2009). *Improvement of estimation method on parameters of soil erosion model.*
- Park, C., Son, Y., Hyun, B., Song, K., Chun, H., Moon, Y., and Yun, S. (2011). "The redetermination of USLE rainfall erosion factor for estimation of soil loss at Korea." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 44, No. 6, pp. 977-982.
- Park, J., Woo, H., Pyun, C., and Kim, K. (2000). "A study of distribution of rainfall erosivity in USLE/RUSLE for estimation of soil loss." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. 5, pp. 603-610.
- Renard, K.G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., and Yode, D. C. (1997). "Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation, RUSLE." *USDA Agriculture Handbook*, No. 703.
- Risal, A., Bhattarai, R., Kim, D., Park, Y., Yang, J., and Lim, K. (2016). "Application of Web ERosivity Module (WERM) for estimation of annual and monthly R factor in Korea." *Catena*, Vol. 147, pp. 225-237.
- Shin, J., Koh, M., and Im, J. (1983). "An approximation of the rainfall factor (R) in predicting soil loss." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 16, No. 2, pp. 106-111.
- Shin, Y. (2010). *Estimation of rainfall erodibility factor R in the Universal Soil Loss Equation (USLE) using 1 minute rainfall data.* Master degree thesis, Jeonbuk University, pp. 28-31.
- Wischmeier, W. H., and Smith, D. D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning." *USDA Agriculture Handbook*, No. 537, Washington, D.C.