



적용 기법에 따른 강우침식인자 산정 결과의 시공간적 불확실성

Spatiotemporal Uncertainty of Rainfall Erosivity Factor Estimated Using Different Methodologies

황세운* · 김동현** · 신상민* · 유승환***†

Hwang, Syewoon · Kim, Dong-Hyeon · Shin, Sangmin · Yoo, Seung-Hwan

Abstract

RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) is the empirical formula widely used to estimate rates of soil erosion caused by rainfall and associated overland flow. Among the factors considered in RUSLE, rainfall erosivity factor (R factor) is the major one derived by rainfall intensity and characteristics of rainfall event. There has been developed various methods to estimate R factor, such as energy based methods considering physical schemes of soil erosion and simple methods using the empirical relationship between soil erosion and annual total rainfall. This study is aimed to quantitatively evaluate the variation among the R factors estimated using different methods for South Korea. Station based observation (minutely rainfall data) were collected for 72 stations to investigate the characteristics of rainfall events over the country and similarity and differentness of R factors calculated by each method were compared in various ways. As results use of simple methods generally provided greater R factors comparing to those for energy based methods by 76 % on average and also overestimated the range of factors using different equations. The variation coefficient of annual R factor was calculated as 0.27 on average and the results significantly varied by the stations. Additionally the study demonstrated the rank of methods that would provide exclusive results comparing to others for each station. As it is difficult to find universal way to estimate R factors for specific regions, the efforts to validate and integrate various methods are required to improve the applicability and accuracy of soil erosion estimation.

Keywords: RUSLE; Rainfall-Erosivity Factor; Soil Erosion; Rainfall Kinetic Energy

1. 서론

토양유실은 농업 생산성 저하, 영농 작업수행의 곤란 등의 1차적 문제점을 비롯하여, 농약, 오염·영양물질 등을 흡착한 유실 토양에 의한 하천 및 호소 수질악화, 탁수발생, 하천 통수 능력 및 저수지의 수리적 기능의 저하 등의 다양한 문제를 야기한다 (Cho and Jeong, 2005). 우리나라의 경우 70 % 이상이 산지와 경사지로 구성되어있고 여름철에 강우가 집중적으로 분포하는 몬순기후 특성을 가지고 있어 계절적 토양유실에 의한 영향과 피해가 크다 (Park et al., 2010). 최근에는 기후변화에 따른 이상기후(예: 우기 집중 호우의 강도 및 빈도 증가) 발생의 증가로 토양유실에 대한 우려와 관심이 더욱 고

조되고 있다(Lee et al., 2008; Kim et al., 2010).

이와 관련한 국내연구에서 주로 적용되어온 토양유실량 추정방법으로는 Wischmeier and Smith (1978)이 최초 개발한 USLE (Universal Soil Loss Equation)를 기반으로 개선된 개정범용토양유실공식인 RUSLE (Revised USLE)의 적용성이 폭넓게 평가되고 있다 (e.g., Cho and Jeong, 2005; Kim et al., 2010). USLE는 강우(R), 토양(K), 사면길이(L), 경사도(S), 피복관리(C) 및 토양보존(P)에 관련된 지표를 인자로 산출하여 이들의 곱으로부터 토양유실량을 추정하는 경험식이며 RUSLE는 이들 각 인자의 결정방법이 개선되어 제안된 방법이다 (Renard et al., 1994).

남한 지역에 대한 강우침식인자 분포를 도출한 연구로서 Kang et al. (2003)은 USLE 공식을 사용하여 전국 26개 기상 관측소 지점에 대해 강우침식인자를 산출하여 반월주기의 강우침식인자 분포를 도출한 바 있으며, Park et al. (2011)은 동일한 공식을 이용하여 전국 60개 기상관측소를 대상으로 지역, 시기 그리고 계절별 강우패턴변화 및 강우운동에너지 변화를 고려하여 강우침식인자를 산정·제시한 바 있다. 이 밖에도 Lee et al. (2011a)은 RUSLE 공식을 적용하여 1980~1999년 기간의 1분단위 강우자료를 이용하여 21개 지점의 강우침식인자를 산정하여 비교하였고, Lee et al. (2011b)은 서울지점의 강우침식인자를 산정하여 비교하였다.

* Department of Agricultural Engineering (Institute of Agriculture & Life Sciences), Gyeongsang National University

** National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration

*** Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University

† Corresponding author

Tel.: +82-62-530-5182 Fax: +82-62-530-2159

E-mail: yoosh15@chonnam.ac.kr

Received: September 28, 2016

Revised: October 6, 2016

Accepted: October 6, 2016

한편, RUSLE의 적용에 있어 제안된 각 인자의 산출방법이 개발국의 기상학적, 지리적, 지형적 특성이 반영된 실험 관측자료를 기초로 고안되었다는 점을 감안할 때, 특정 지역에 합리적인 적용을 위해서는 대상지역에 대한 적용성 검증은 비롯하여 실정에 맞는 방법론 개발이 필요하다는 지적이 있어왔다 (Onega et al., 1988; Jayawardena and Requir, 2000; Lee and Won, 2012). 더불어 지역에 따라 크게 차이가 나는 오차를 고려할 때 추정된 토양유실량의 활용분야에 따라 신중히 적용되어야 한다는 지적이 있다 (Son, 2001). 토지피복, 식생 등에 대한 인자의 경우 한정된 실험에 의해 도출된 경험치를 대상지역에 맞게 적용하는데 반해 강우침식인자는 강우 강도 기반 강우에너지 산정법을 적용하여 계산과정이 비교적 복잡하고 다양하다. 강우침식인자 (R) 산정에 있어 강우사상별 강우에너지와 특정 지속시간 강우강도를 이용하여 산출하는 방법론이 다양하여 적용 방법론에 따른 추정 결과가 상이할 수 있다는 점을 유념해야 한다 (e.g., Lee and Chung, 2009; Lee et al., 2011a).

국내 실정에 맞는 강우침식인자 산정기법 개발 연구로는 Noe and Kwon (1984)이 수원과 서울지역에서 실측 우적자료 및 우량자료를 사용하여 우리나라 특성에 맞는 강우 운동에너지 산정방법을 제안한 바 있으며, Lee and Won (2009)은 대관령 구름물리 관측 자료 (빗방울 입경, 낙하속도)를 이용하여 강우 운동에너지식을 유도하고 RUSLE 공식과 Noe and Kwon (1984)이 제안한 방법의 적용결과와 비교한 바 있다. 더불어 강우에너지 개념을 적용한 강우침식인자 산정방법 외에 보다 간편한 토양유실 산정방법 (간편법)으로 연평균강수량과의 회귀경험식을 적용한 방법이 제시되고 있다. 국내에서는 El-Swaify et al. (1985)와 Toxopeus (1996)가 제안한 방법이 토양유실 산정에 적용된 바 있다 (Cho and Jeong, 2005; Kim et al., 2010; Lee et al., 2008). Park et al. (2000)은 53개의 기상관측소 강우자료 (1973 ~ 1996)를 이용하여 강우침식인자를 산정하고 연평균강수량과의 회귀식을 제시하였다. Lee et al. (2008)은 59개 지점에 대한 연평균 강수량 자료 (1961 ~ 2007)를 여러 강우침식인자 회귀식에 대입하여 동일한 자료 기간 내 가장 근사한 값을 갖는 강우침식인자 추정식을 검토하였다.

이와 같이 다양한 방법론의 적용 결과와 국내 실정에 맞는 방법론의 개발 연구가 축적되면서 최근에는 다른 강우 운동에너지 추정방법의 적용에 따른 강우침식인자 산정결과의 다양성에 대한 연구가 이루어지고 있다. Lee and Chung (2009)은 강원도 강릉시를 대상으로 국내외 10가지의 강우운동에너지를 사용하여 2001 ~ 2006년 기간의 자료를 활용하여 강릉지역에 대해 산정된 강우침식인자들을 비교하여 Noe and

Kwon (1984)이 제시한 강우 운동에너지 산정공식의 적용성이 높은 것으로 평가한 바 있다. Lee et al. (2011a)은 USLE, RUSLE, 그리고 RUSLE2에서 채택된 식과 Noe and Kwon (1984)의 식을 사용하여 강우침식인자를 산정하고 비교하였으며, 국내에서 개발된 Noe and Kwon (1984)의 강우 운동에너지식으로 산정된 강우침식인자를 기준으로 국외 강우 운동에너지식이 과대평가되며, 기존의 국외 강우 운동에너지식을 가감없이 적용해온 연구에 대한 검토 필요하다고 지적하였다. Lee and Won (2013)은 RUSLE에서 채택된 강우운동에너지 식과 Noe and Kwon (1984)이 제안한 방법을 기 연구에서 유도한 산정식의 적용결과와 비교하여 RUSLE과 Noe and Kwon (1984)의 결과보다 과소평가된다는 결과를 보인 바 있다. 이러한 방법론 비교 연구는 새로운 이론 개발, 실측 자료의 축적, 기후변화 등의 기상 특성 변화 등을 고려하여 지속적으로 수행되어야 하는 연구라 판단된다.

국내 토양유실량 관련자료 구축이 미흡하며, 지형·지리적 특성의 다양성과 불확실성이 큰 점을 고려할 때 강우침식인자 산정을 위한 범용방법론을 합리적으로 결정하거나 개발하는 것은 어려운 일이다. 이를 위한 기초 도입연구로 신뢰도 높은 기상자료를 이용하여 기 제안된 다양한 강우침식인자 산출방법에 따른 결과의 다양성에 대한 고찰이 필요하다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 기상청에서 운영하는 72개 지점 종관기상관측망 강우자료를 이용하여 간편법을 비롯하여 국내 선행연구들에서 적용되었거나 소개된 바 있는 다양한 강우에너지 식을 적용하여 강우침식인자를 산정하여 그 결과를 다양한 각도로 비교·분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 기상자료 수집 및 분석

강우에너지 기반 강우침식인자 산출과정에서는 강우사상별 30분 최대강우강도 (I_{30})가 적용되므로 원칙적으로 30분단위 강우자료 확보가 전제되어야 한다. 기존 연구에서는 시간단위 자료를 이용하여 고정시간 60분 강우강도를 산정한 후 회귀관계를 적용하여 I_{30} 를 추정·적용하는 방법이 널리 이용된 바 있다 (e.g., Kang et al., 2003; Lee and Chung, 2009). 본 연구에서는 강우침식인자 도출 과정의 불확실성을 최소화하기 위해 기상청의 질적 자료품질관리 (Quality Control) 과정을 거친 분단위 자료를 수집하여 적용하였다. 최대 1998년 ~ 2014년 기간에 대한 지상관측 분단위 일누적 강수량 자료를 수집하였으며 Fig. 1은 분단위 자료 구축된 72개 대상 지상관측소의 위치와 지점별 결과를 상세히 제시하기 위해 선정된 광역시 및 도

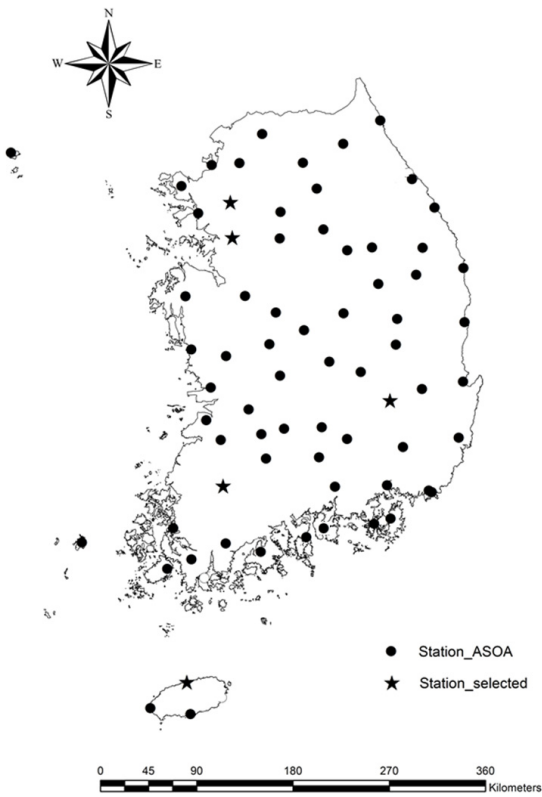


Fig. 1 The location of rainfall stations. Five stars represent the stations of which results (e.g., graphs) are presented in the paper as an example.

별 주요 관측지점을 별표로 구분하여 표시하고 있다.

자료의 결측기간은 연평균 강우침식인자 산정을 위한 자료 기간 산술평균 결과에 영향을 미치므로 신중한 고려가 필요하며 강우에너지는 강우사상별로 산정되기 때문에 강우사상의 빈도와 특성 분석은 중요한 연구과정이다. Table 1은 지점 메타정보와 함께 분단위 일누적 자료의 자료기간 내 지점별 관측률과 연간 발생 강우사상 수를 포함하고 있다. 강우사상은 Wischmeier and Smith (1987)이 제안된 방법을 적용하여 분류하였으며 무강우 시간이 6시간 이내인 경우 연속강우 사상으로 구분하고 1회 사상의 총강우량이 12.7 mm 이상인 경우를 독립된 사상으로 간주하였다. 예외적으로 15분 이하 지속 강우량이 6.25 mm 이상일 경우에는 1회 강우사상으로 분류하였다. 자료기간에 대한 연 평균 강우사상 발생횟수는 25.7회로 나타났으며 제주 서귀포가 약 34회로 가장 높게 나타났다.

2. 강우침식인자(R factor) 산정

가. 강우에너지 기반 산정법

강우의 운동에너지(e_k)는 빗방울의 입경과 속도에 비례하

며, 빗방울의 크기는 강우강도와 속도에 비례하는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2011b). 다양한 강우에너지식이 국내에서 적용된바 있으며 Table 2는 특정지역 및 기상적 특성을 고려한 다양한 연구결과로 제안된 강우강도 기반 강우 운동에너지 산출 공식을 SI 단위로 변환하여 나열하고 개발자 및 국내 적용사례를 정리한 결과이다.

Table 2의 (1)번 식은 USLE에서 Wischmeier and Smith (1987)이 제안한 식을 SI단위로 변환하여 유도한 것이며, 강우강도(I)가 76 mm/hr를 초과할 경우 강우 운동에너지는 일괄적으로 0.283 (MJ/ha·mm)를 적용하는 특징을 가지고 있다. RUSLE에 수록되어 있는 두 번째 식은 Brown and Foster (1987)가 미국 미시시피주 Holly Springs의 빗방울 입경분포로부터 새롭게 제안한 것이며 세 번째 식은 RUSLE2에서 기본 알고리즘으로 탑재되어 있는 것으로 McGregor et al., (1995)가 고안한 강우 운동에너지식으로 알려져 있다.

식 (5), (6), (7) 그리고 (10) 또한 일본, 중국, 이탈리아 등 세계 각국의 연구자들의 의해 해당 지역의 강우 특성에 맞는 운동에너지식을 제안한 것이며 식 (8), (9)은 호주 남동부에서 관측된 데이터를 이용하여 고안된 식이다. 특히 식 (2), (3), (4), (7), (8) 그리고 (9)는 각각 강우강도가 높을 시에 강우운동에너지가 과대 산정되는 것을 제한하도록 (대괄호 앞에 상수가 최대 값이 됨) 고안되었으며, 강우강도에 대한 3차 급수 형태인 식 (6)의 경우 높은 강우강도에 대해 강우운동에너지 값이 비현실적으로 과대 산정되므로 이에 주의하여 적용하여야 한다.

국내 연구로서 제안된 식 (11)은 Noe and Kwon (1984)이 서울 기상연구소와 수원농업 기상관측소의 3년간 우기에 대한 우적 관측자료를 이용한 실험을 통해 제안된 식이다. 더불어 식 (11), (12)는 Lee and Won (2013)이 강우입자크기분포에 대한 장기적인 관측이 이루어지고 있는 대관령 구름물리 관측소의 관측자료를 이용하여 강우강도와 에너지가 지수함수 및 로그함수의 관계를 갖는 것으로 가정하고 회귀곡선을 생성하여 상관관계로부터 유도한 식이다.

강우 운동에너지를 산정한 후 시간구간(강우강도가 일정한 구간)별 강우증가량을 곱한 결과의 합으로 독립된 사상에 대한 강우에너지를 산정하고 최종적으로 강우사상의 30분 최대 강우강도를 곱하여 계산된다. 강우에너지 산정방법은 다음 식(1)과 같다.

$$E = \sum_{i=1}^n e_{ki} \cdot \Delta P_i \quad (1)$$

여기서, E 는 강우사상별 강우에너지(MJ/ha)이며 e_{ki} 는 강우 운동에너지 (MJ/ha·mm)로서 1회 강우사상의 일정한 강

Table 1 Metadata of rainfall stations of which data were used in the study. The rate of missing data and the averaged annual number of rainfall events (determined to affect erosion) for each station were included.

Station ID: Station name	Lat.	Long.	Water shed	Missing data (%)	Strom event	Station ID: Station name	Lat.	Long.	Water shed	Missing data (%)	Strom event
90: Sokcho	38,2	128,3	H, EC	10,4	22,5	189: Seogwipo (*)	33,1	126,3	SC	8,5	33,9
95: Cheorwon	38,1	127,2	H	7,5	23,4	192: Jinju	35,1	128,0	N	7,1	26,5
98: Dongducheon	37,5	127,3	H	7,1	23,6	201: Ganghwa	37,4	126,3	H	1,9	22,6
101: Chuncheon	37,5	127,4	H	7,1	23,1	202: Yangpyeong	37,3	127,3	H	6,9	25,4
102: Baengnyeongdo	37,6	124,4	H	13,4	15,5	203: Icheon	37,2	127,3	H	1,1	26,1
105: Gangneung	37,5	128,5	H, EC	8,7	24,7	211: Inje	38,0	128,1	H	1,2	23,2
106: Donghae	37,3	129,1	H, EC	17,4	21,7	212: Hongcheon	37,4	127,5	H	6,6	24,8
108: Seoul (*)	37,3	126,6	H	13,6	25,1	216: Taebaek	37,1	128,6	N	6,7	25,0
112: Incheon	37,3	126,4	H	8,7	22,8	221: Jecheon	37,1	128,1	H	7,6	26,5
114: Wonju	37,2	127,6	H	11,6	25,1	226: Boeun	36,3	127,4	G	0,9	27,2
115: Ulleungdo	37,3	130,5	EC	8,6	30,6	232: Cheonan	36,5	127,1	G	1,6	25,1
119: Suwon (*)	37,2	126,6	H	6,9	24,4	235: Boryeong	36,2	126,3	G	1,1	24,6
121: Yeongwol	37,1	128,3	H	7,0	25,8	236: Buyeo	36,2	126,6	G	1,7	26,9
129: Seosan	36,5	126,3	G	8,9	24,6	238: Geumsan	36,1	127,3	G	1,2	26,5
130: Uljin	36,6	129,2	N, EC	6,9	22,1	243: Buan	35,4	126,4	G	1,0	25,7
131: Cheongju	36,4	127,3	G	7,4	26,0	244: Imsil	35,4	127,2	S	2,3	29,0
133: Daejeon	36,2	127,2	G	8,6	27,3	245: Jeongeup	35,3	126,5	G	1,5	27,4
135: Chupungnyeong	36,1	127,6	G	11,4	24,3	247: Namwon	35,2	127,2	S	0,9	27,5
136: Andong	36,3	128,4	N	7,5	23,1	248: Jangsu	35,4	127,3	G	1,8	29,2
138: Pohang	36,0	129,2	N, EC	13,2	23,9	260: Jangheung	34,4	126,6	Y	1,0	29,1
140: Gunsan	36,0	126,5	G	6,9	25,3	261: Haenam	34,3	126,3	Y, SC	1,3	26,4
143: Daegu (*)	35,5	128,4	N	1,5	23,1	262: Goheung	34,4	127,2	S, SC	1,6	27,5
146: Jeonju	35,5	127,1	G	7,5	27,8	271: Bongwhoa	36,6	128,5	N	1,9	25,3
152: Ulsan	35,3	129,2	N	3,7	25,1	272: Yeongju	36,5	128,3	N	1,1	25,6
155: Changwon	35,1	128,3	N	11,6	27,4	273: Mungyeong	36,4	128,1	N	1,4	26,5
156: Gwangju (*)	35,1	126,5	Y	8,5	27,3	277: Yeongdeok	36,3	129,2	N, EC	1,8	22,8
159: Busan	35,1	129,0	N, SC	8,8	27,3	278: Uiseong	36,2	128,4	N	1,3	23,4
162: Tongyeong	34,5	128,3	N, SC	7,7	27,9	279: Gumi	36,1	128,2	N	1,1	23,1
165: Mokpo	34,5	126,2	Y	7,2	24,8	281: Yeongcheon	35,6	128,6	N	0,7	23,7
168: Yeosu	34,4	127,4	S, SC	8,7	27,0	284: Geochang	35,4	127,5	N	0,9	26,1
169: Heuksando	34,4	125,3	Y	12,0	20,9	285: Hapcheon	35,3	128,1	N	1,5	26,1
170: Wando	34,2	126,4	S, SC	11,5	27,6	288: Miryang	35,3	128,4	N	2,5	25,8
184: Jeju	33,3	126,3	SC	8,5	28,6	289: Sancheong	35,2	127,5	N	1,0	27,5
185: Gosan	33,2	126,1	SC	11,7	25,5	294: Geoje	34,5	128,4	N, SC	1,1	31,2
188: Seongsan	33,2	126,5	SC	63,1	31,3	295: Namhae	34,5	127,6	N, SC	1,2	31,0

H: Han river, N: Nakdong river, S: Seomjin river, Y: Yeongsan river, G: Guem river, SC: South coast, EC: East coast
 - Stars (*) represent the stations of which results are presented in the paper as an example.

우강도가 지속되는 시간구간별 강우강도를 강우 운동에너지 식에 대입하여 계산된다. n 은 해당 강우사상 내 강우강도 변화에 따라 구분한 총 시간구간의 수이며, ΔP_i 는 해당 강우사

상의 i 번째와 $i-1$ 번째 시간구간 (일정한 강우강도 구간)에 대한 강우량 (mm)의 차이 (증가량)를 의미한다.

특정 지점에 대한 연평균 강우침식인자는 각 독립 강우사

Table 2 Methods used to calculate rainfall kinetic energy

Num.	e_k Equation	Developer	Case studies
(1)*	$I \leq 76 : e_k = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I$ $I > 76 : e_k = 0.283$	Foster et al. (1981), USLE	Gong et al. (2012) Lee et al. (2011b) Lee and Chung (2009)
(2)*	$e_k = 0.29 [1 - 0.72e^{-0.05I}]$	Brown and Foster (1987), RUSLE1	Lee et al. (2011a) Lee et al. (2011b) Lee and Chung (2009)
(3)*	$e_k = 0.29 [1 - 0.72e^{-0.082I}]$	McGregor et al. (1995), RUSLE2	Lee et al. (2011a) Lee et al. (2011b)
(4)*	$e_k = 0.283 [1 - 0.52e^{-0.042I}]$	van Dijk et al. (2002)	Lee and Chung (2009)
(5)*	$e_k = 0.0981 + 0.106 \log_{10} I$	Onaga et al. (1988) Okinawa in Japan	Lee and Chung (2009)
(6)*	$e = 0.1132 + 0.0055I - 0.005 \times 10^{-2} I^2$ $+ 0.00126 \times 10^{-4} I^3$	Carter et al. (1974) South central in United States	Lee and Chung (2009)
(7)*	$e_k = 0.368 [1 - 0.69e^{-0.038I}]$	Jayawardena and Rezaur (2000) Hokong in China	Lee and Chung (2009)
(8)*	$e_k = 0.2635 [1 - 0.669e^{-0.0349I}]$	Rosewell (1986) Souther Queensland in Australia	Lee and Chung (2009)
(9)*	$e_k = 0.29 [1 - 0.596e^{0.0404I}]$	Rosewell (1986) New South Wales in Australia	Lee and Chung (2009)
(10)*	$e_k = 0.0981 + 0.125 \log_{10} I$	Zanchi and Torri (1980) Toscana in Italia	Lee and Chung (2009)
(11)†	$\log_{10} e_k = 1.08 + 0.136 \log_{10} I$	Noe and Kwon (1984) Seoul, Suwon in Korea	Lee and Won (2012) Lee et al. (2011a) Lee et al. (2011b) Lee and Chung (2009)
(12)†	$e_k = 30.03 (1 - 0.74e^{-0.068I})$	Lee and Won (2013) Daekwanryeong in Korea	Lee and Won (2013)
(13)†	$e_k = 6.040 + 12.367 \log_{10} I$	Lee and Won (2013) Daekwanryeong in Korea	Lee and Won (2013)

Unit - I : mm/hr, * e_k : MJ/ha·mm, † e_k : J/m²·mm = 10⁴ J/ha·mm

상의 강우에너지 (E)와 강우사상의 30분 최대강우강도 (I_{30})를 곱하여 산출된 전 자료기간에 대한 사상별 결과의 합으로 계산된다(식 (2)).

$$R = \frac{\sum_{j=1}^m (E \cdot I_{30})_j}{N} \quad (2)$$

여기서, R 은 자료기간 동안의 연평균 강우침식인자(MJ·mm/ha·hr)이며, E 는 해당 강우사상의 강우에너지(MJ/ha), I_{30} 은 해당 강우사상의 30분 최대강우강도(mm/hr), m 은 자료기간 동안의 총 강우사상 수이다. N 은 자료기간의 총 연도수(자료기간)이므로 연평균 강우침식인자 R 은 일반적인 산술평균으로 계산된다.

나. 간편법

앞서 기술한 물리적 개연성을 고려한 강우침식인자 산정 과정은 세부시간 단위 강우자료를 필요로 하고 강우사상 분류 및 사상별 강우에너지 산정을 거쳐 결국 연단위 또는 연평균 강우침식인자를 계산하게 된다. 이에 반해 연강우량과 강우침식인자 간의 통계적 상관성을 이용하여 강우침식인자를 산정하는 간편법이 다수 제시된 바 있다(Table 3).

국내 토양유실 산정에 관한 연구에서는 El-Swaify et al. (1985)가 고안한 식 (15)가 가장 널리 인용되고 있으며(Cho and Jeong, 2005; Kim et al., 2010; Lee et al., 2008) Jung et al. (1983)의 식 (17)은 1960~1980년 동안의 51개 기상관측소의 기상자료와 Table 2의 식 (1) USLE 공식을 적용하여 강우침식인자를 계산하고 강우침식인자와 연평균강수량의 회귀식을 산출한 결과이다. 식 (18)은 Park et al. (2000)이 비교

Table 3 Simple methods to estimate rainfall erosivity factor (referred to Lee et al., 2008)

Num.	Formulas	References
(14)*	$R = 0.5 \times 1.73 \times P$	Roose (1975)
(15)*	$R = 38.5 + 0.35 \times P$	El-Swaify et al. (1985)
(16)†	$R = 587.8 - 1.219 \times P + 0.004105P^2$ ($P > 850\text{mm}$, P : mm/hr)	Renard and Freimund (1994)
(17)*	$R = 0.503 \times P - 202$	Jung et al. (1983)
(18)*	$R = 0.641 \times P - 355$	Park et al. (2000)
(19)*	$R = 0.535 \times P - 230.325$	Lee et al. (2008)
	$R = 0.923 \times P - 644.120$ (Hanriver basin)	
	$R = 0.535 \times P - 266.794$ (Nakdongriver basin)	
	$R = 1.087 \times P - 818.111$ (Geumriver basin)	
	$R = 0.428 \times P - 107.951$ (Yeongsan • Seomjinriver basin)	
	$R = 0.727 \times P - 476.534$ (the Southern coast)	
	$R = 0.440 \times P - 226.131$ (the East coast)	

Unit - P: mm, * R: 10^7 J·mm/ha·hr, †R: MJ·mm/ha·hr

적 최근 기간(1973 ~ 1996)에 대한 53개 기상관측소의 1시간 강우자료를 동일한 USLE 공식에 적용하여 강우침식인자를 재산정하고 회귀식을 도출한 결과이다. 두 식의 비교는 연강우량에 대한 강우침식인자의 선형적 민감도가 90년대 후반으로 갈수록 증가한다는 점을 시사하고 있다. 이와 같이 강우침식인자의 통계적 산정을 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으나 연구별로 적용한 강우자료의 기간 및 시공간적 특성이 다르기 때문에 연구 결과들을 정량적으로 비교하기는 어렵다.

3. 결과 다양성 평가

적용한 방법론에 따른 결과의 다양성을 평가하기 위해 도출한 연단위 강우침식인자의 지점별 RMSD (root mean square distance, 식 (3))를 산정하였다. 이 결과는 다수의 방법론을 적용한 결과를 산술평균 등 단순합성하여 평균 강우침식인자를 제시할 경우 결과의 불확실성을 기능하는 대리 지표로서 의의가 있다.

$$RMSD_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{i,j} - \bar{R}_j)^2}{N}} \quad (3)$$

여기서 $R_{i,j}$ 는 지점 j 에 대해 i 식을 이용한 강우에너지 기반 강우침식인자이며 \bar{R}_j 는 지점 j 의 평균 강우침식인자를 의미한다. N 은 적용된 산정 방법의 수이다.

각 산정 방법론의 다른 산정법 적용결과에 대한 유사성(상이성)을 기능하기 위해 유클리디안 거리(Euclidean distance,

식 (4))와 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance, 식 (5)) 두 가지 지표를 방법론별 결과에 적용하여 분석하였다. 비교적 가장 널리 적용되고 있는 거리의 척도인 유클리디안 거리를 이용한 상이성 검사는 특정 산정식을 적용한 결과의 나머지 식을 적용한 결과에 대한 평균적 차이(거리)를 제시함으로써 산정식들의 상대적 상이성을 비교할 수 있다.

$$ED_{i,j} = \frac{\sqrt{\sum_{i'=1}^N (R_{i,j} - R_{i',j})^2}}{N} \quad (4)$$

여기서 $ED_{i,j}$ 는 지점 j 에 대한 산정식 i 의 평균 유클리디안 거리이며 $R_{i,j}$ 와 $R_{i',j}$ 는 지점 j 에 대해 산정식 i 와 식 i' 를 적용한 강우침식인자이다.

마할라노비스 거리(Mahalanobis distance)는 공분산 행렬(C_{R_j})을 적용하여 자료의 분포를 고려한 상이성을 정량화할 수 있다. 자료의 분포특성이 방향에 따라 일관적이지 않은 경우 평균에 대한 산술적 거리가 크게 나타나더라도 자료의 분포에는 상대적으로 더 가까운 경우 유클리디안 거리에서 고려되지 않는 분포에 대한 거리를 산정할 수 있다.

$$MD_{i,j} = \sqrt{(R_{i,j} - \bar{R}_j)^T C_{R_j}^{-1} (R_{i,j} - \bar{R}_j)} \quad (5)$$

여기서 $MD_{i,j}$ 는 지점 j 에 대한 산정식 i 의 마할라노비스 거리이며 $R_{i,j}$ 는 지점 j 에 대해 i 식을 이용한 강우에너지 기반 강우침식인자이다. C_{R_j} 은 지점 j 에 대한 산정식들의 공분산이며 \bar{R}_j 는 지점 j 의 평균 강우침식인자를 의미한다. 본 연구

에서 산정된 강우침식인자는 스칼라이므로 공분산 행렬은 강우침식인자의 분산으로 대체되며 유클리디안 거리에 비해 자료의 분포를 고려하고 상이성의 척도가 가시적으로 나타나는 효과가 있다고 하겠다.

III. 결과 및 고찰

1. 강우자료 기초분석

수집한 지점별 분단위 자료를 이용하여 연평균 강수량을

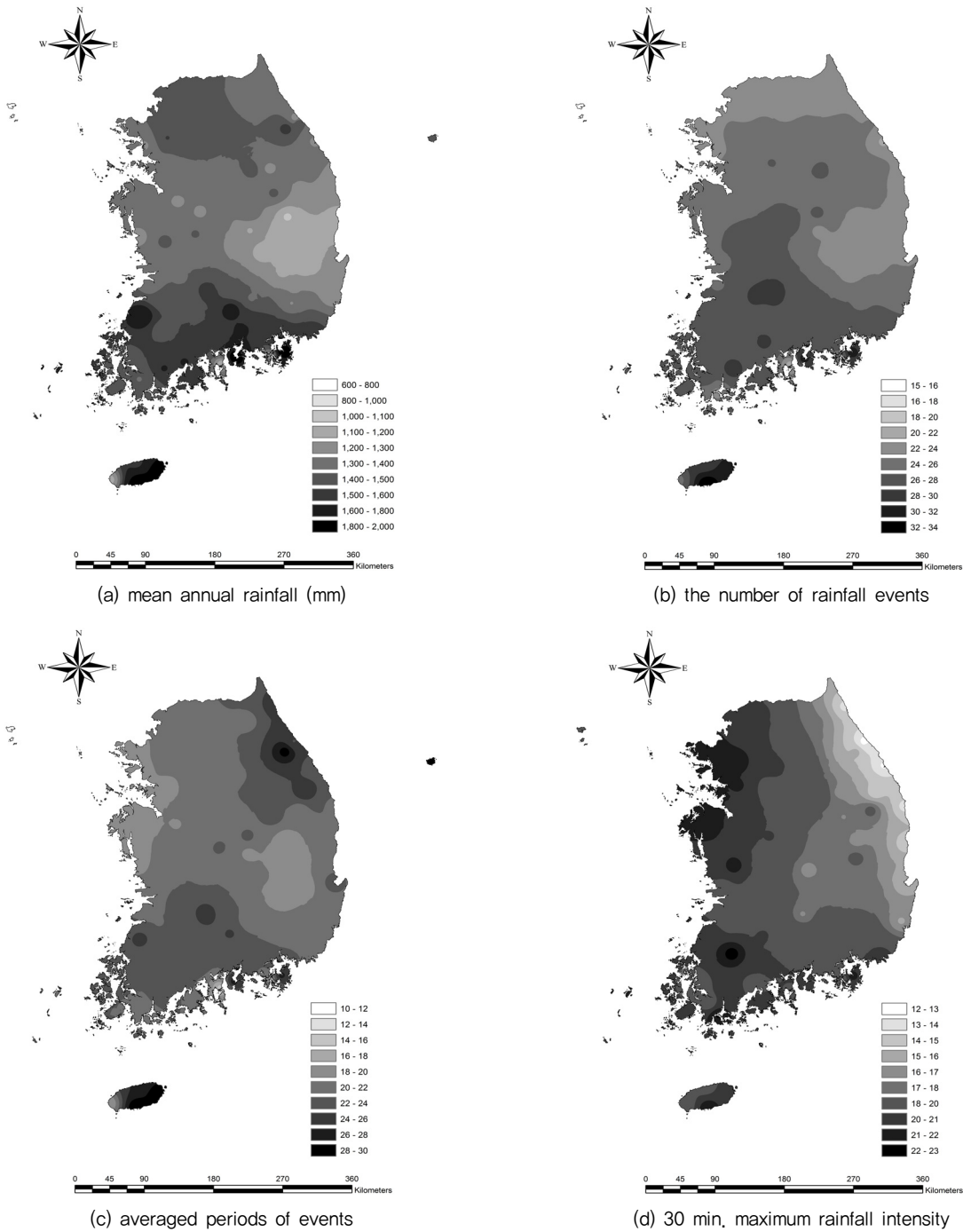


Fig. 2 Spatial distribution of (a) mean annual rainfall (mm), (b) the annual number of rainfall events, (c) averaged period of rainfall events (days), and d) averaged 30min, maximum rainfall intensity for rainfall events (mm/hr)

비롯하여 토양유실량 산정과 상관성이 큰 강우사상의 빈도 및 강우기간을 비롯하여 사상별 최대강우강도에 대한 남한지역 공간분포를 분석하였다. Fig. 2는 연강수량, 강우사상 발생 횟수, 사상별 연속강우일수, 사상의 최대강우강도에 대한 지점별 연평균의 분포를 보여주고 있다. 연평균 강수량의 본 연구의 침식인자 산정에 고려되는 유효강우사상으로 II.1에서 기술한 방법에 의해 분류된 기간 강수량에 대한 결과이다.

유효강우사상에 대한 연 평균 강수량은 630 mm ~ 1,860 mm 범위의 분포로 남한 지점 평균은 약 1,230 mm로 나타났다. 제주도 서귀포를 비롯하여 남해안 지역의 거제 남해 지점에서 연강수량이 1,620 mm 이상으로 높게 나타났으며 호서 지역과 북부 영남지역의 강수량은 상대적으로 낮게 나타났다. 특히 서해안 도서지역 중 황해도와 흑산도의 경우 800 mm 이하의 강수량을 보여 가장 낮은 강수량을 보이는 지점으로 분석되었다.

연간 강우사상 발생 횟수와 연속강우기간은 호남지역이 높고 북부로 갈수록 작아지는 대체로 유사한 분포를 보였으나 영동지방에 대해서는 강우량 및 강우사상 빈도에 비해 연속강우사상의 기간이 길게 나타났다. 이와 관련하여 강우사상의 강도를 나타내는 최대강우강도는 영동지역을 비롯한 동부 해안지역이 낮고 경기, 호남을 비롯한 서부지역에서 강도가 큰 사상의 발생 빈도가 높은 것으로 분석되었다. 남한지역의 유효강우사상의 발생횟수는 평균 26회 평균 강우 기간은 22일로 나타났다. USLE 강우침식인자 산정을 위한 기본 방법론에서 고려되고 있는 강우사상의 특성을 분석한 이들 결과는 최종 산정된 강우침식인자의 분포와 비교하여 간편법에서 적용하고 있는 연 강수량 외 강우침식인자 도출을 위한 매개변수로서의 활용성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 강우사상의 양적·질적 특성 간의 상관성 분석

앞서 살펴본 강우사상의 질적 특성 중 사상별 강우강도는 강우에서지 기반 강우침식인자 산정에 직접적인 영향을 미치며(식 (2)) 강우량 및 강우 운동에너지와도 상관성이 높을 개연성이 크다. Fig. 3은 강우사상에 대한 30분 최대강우강도와 사상별로 산정된 강우에너지(USLE 식 적용), 강우침식인자, 강우량 및 강우기간의 관계를 보여주는 산포도이다. 강우에너지 산정 방법 (Table 2)과 지역 별 지점에 대한 결과는 서로 유사한 패턴을 보이는 가운데 강우에너지와 강우침식인자의 사상별 최대강우강도에 대한 상관성이 각각 R^2 0.81 ~ 0.85, 0.92 ~ 0.94로 강하게 나타났다. 한편 강우사상의 양적 특성인 규모(사상별 총 강우량)는 R^2 0.34 ~ 0.44로 비교적 약한 상관관계를 보였다. 이는 연 평균 강우침식인자(R factor) 산정 시 연강수량 자료만을 사용하여 추정하는 간편법을 적용

할 경우 강우침식도 연변동성 등의 특성은 분석이 가능하나 USLE 강우침식인자 산출 지표로 활용하기에 연간 강우사상의 질적 특성에 관한 지표를 함께 적용할 필요성이 있다는 점을 시사한다. 더불어 강우사상의 기간은 사상의 강도 및 사상별 침식인자에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이는 국내 강우사상의 단위시간 최대강우강도 또는 사상별 강우량이 연속강우기간과 높은 상관성을 보이지 않고, 시간단위 강우량의 크기에 의해 결정되는 강우강도와 관련한 에너지 산정에 있어 강우의 연속성은 비교적 낮은 중요도를 가진다는 것을 의미한다.

3. 연단위 강우침식인자(R factor) 산정 결과

가. 강우에너지 기반 방법론 적용 결과 비교

강우사상에 대한 에너지 기반 강우침식인자 산정 결과를 자료기간에 대해 연도별, 지점별로 비교하였다. Fig. 4는 유효강우사상에 대한 남한지역 연평균 강수량과 강우 운동에너지 식과 지상관측지점에 대한 강우침식인자 산정 결과의 연도별 범위를 보여주고 있다. 각 강우 운동에너지 식 (Table 2)에 따른 남한지역 평균(지점평균) 결과의 범위를 연도별로 비교한 결과 (Fig. 4b), 대체로 연강수량 변화와 유사한 경향을 보이는 한편 산정된 강우침식인자의 연도별 범위가 평균값의 34% ~ 44%에 해당하는 1,510 MJ·mm/ha·hr로 나타났으며 연평균 강우침식인자의 변동계수는 0.28로 산정되었다. 산정 방법 간 연평균의 지점별 다양성 (Fig. 4c)은 연강수량 변동과의 상관성이 다소 낮게 나타났는데 이는 강우침식인자의 공간다양성에 대한 연변동성이 크지 않고 일관적인 경향을 가짐을 의미한다. 침식인자 산정결과의 지점 간 범위는 방법론에 따른 범위에 비해 월등히 크게 나타나 강우침식인자의 공간다양성 재현이 합리적 방법론 선정에 지배적인 근거요소가 될 것으로 판단된다.

지점별 강우침식인자의 규모와 다양성간의 관계를 분석하기 위해 산정된 지점별 강우침식인자의 평균과 산정식에 대한 결과의 산포 정도를 나타내는 RMSD를 산정하여 비교하였다. Fig. 5는 Fig. 3에서 결과를 보인 5개 기점에 대한 결과이며 최소오차를 보이는 2차 다항 회귀식과 결정계수를 제시하고 있다. 지점별로 R^2 0.8이상의 회귀관계가 도출되었으며 이는 극한 강우사상의 빈도 및 강도를 비롯한 연강우량이 상대적으로 커 강우침식인자가 큰 해의 경우 산정식에 따른 연단위 결과의 불확실성이 증가하는 것을 의미한다. 더불어 지점별로 차이는 있으나 연 강우침식인자의 약 상위 15%에 해당하는 두세 해의 RMSD는 평균에 대한 증가세가 둔화되는 것을 확인하였다. 지역별 다양성이 큰 특성을 가지는 국내 강우침식인자 산정에 있어 방법론별 불확실성은 사상별 강우강도 및 강우량

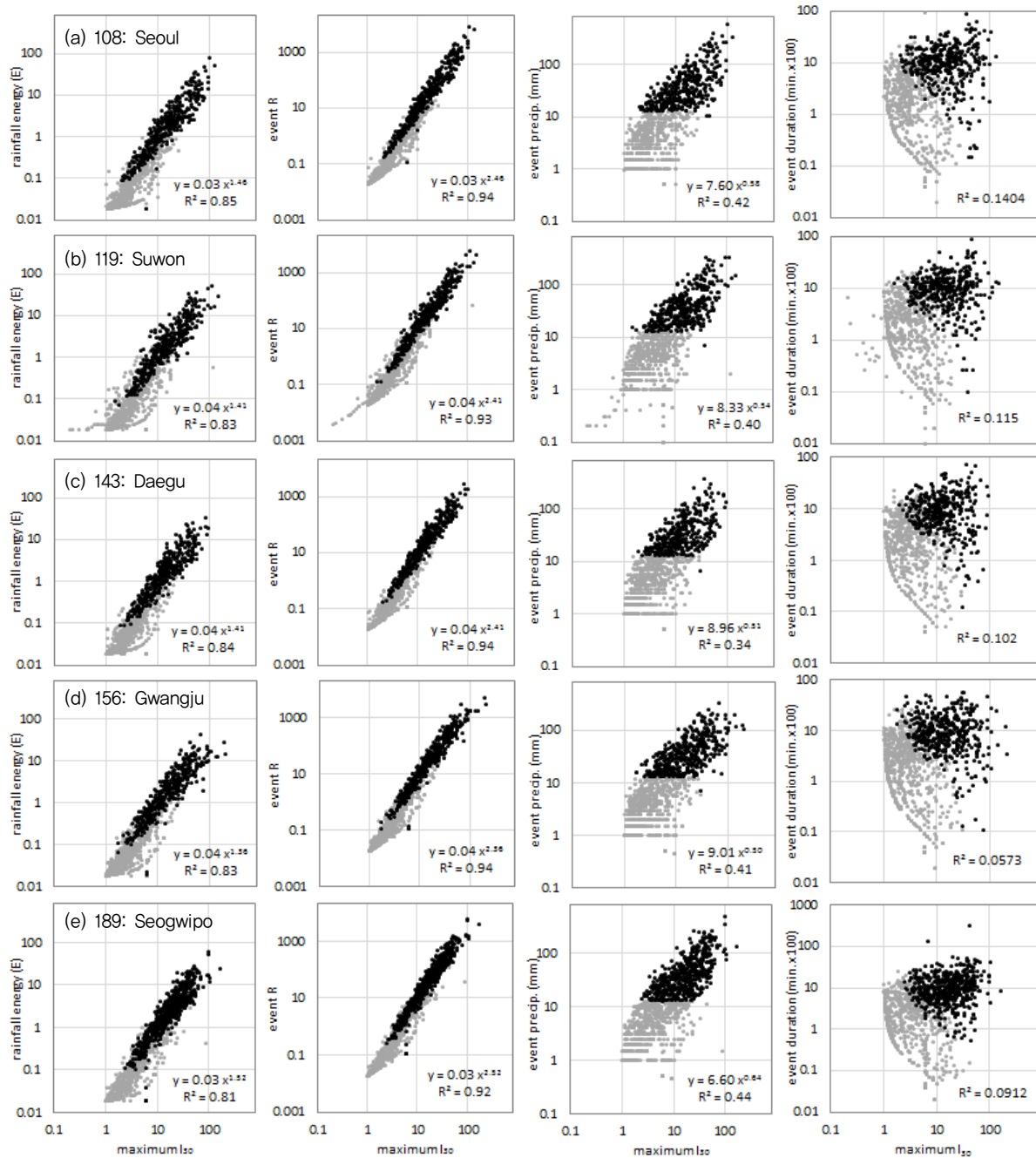


Fig. 3 Comparison of maximum rainfall intensity (by events over the data period) to rainfall energy (first column), R factor (second column), rainfall amount (third column), and event duration (last column) for major stations i.e., (a) Seoul, (b) Suwon, (c) Daegu, (d) Gwangju and e) Seogwipo. Gray and black dots present the results for all rainfall events and effective events, respectively.

이 큰 지역에 대한 결과에 대해 상대적으로 클 수 있으므로 방법론 선정 및 적용에 주의가 필요하다고 판단된다.

Fig. 6은 강우에너지 산정방법 (Table 2)을 각 지점에 대해 적용하여 추정된 연평균 강우침식인자를 4대강 유역과 동부·

남부 해안 권역으로 구분하여 비교한 것이다. boxplot은 산정 방법에 따른 평균 강우침식인자의 지점별 범위를 나타내고 있다. 권역내 강우사상 특성의 공간 변동성이 큰 수도권 한강 유역의 지점별 강우침식인자의 분포가 다양하게 나타났으며

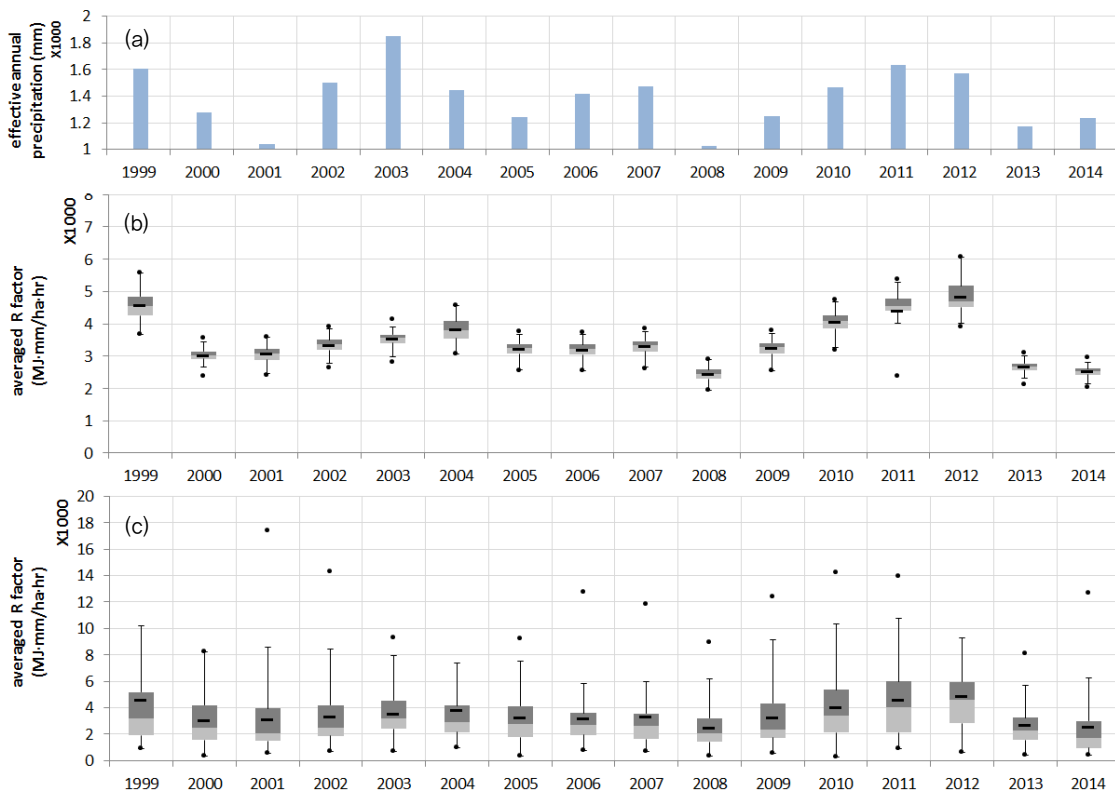


Fig. 4 Annual patterns of (a) total precipitation for effective events, (b) the range of R factors estimated using the different rainfall energy based-methods (averaged over the stations), and (c) the range of R factors estimated for stations (averaged over the methods)

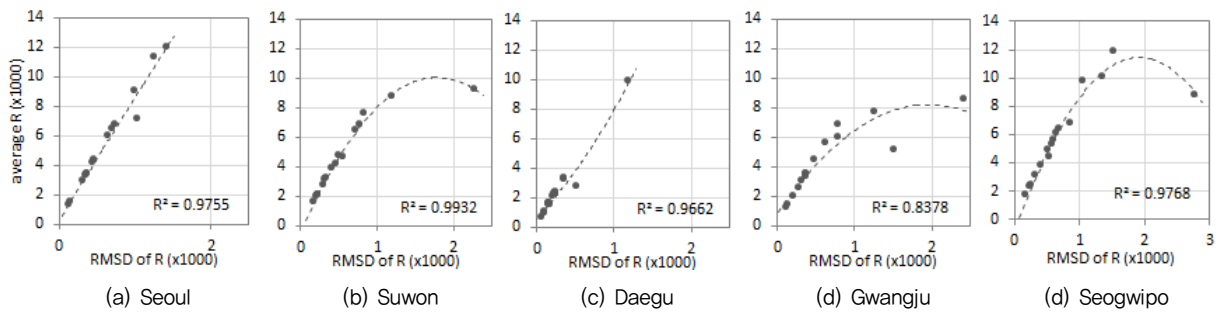


Fig. 5 Comparison of annual average and RMSD of R factors estimated using various energy based-methods for the selected stations

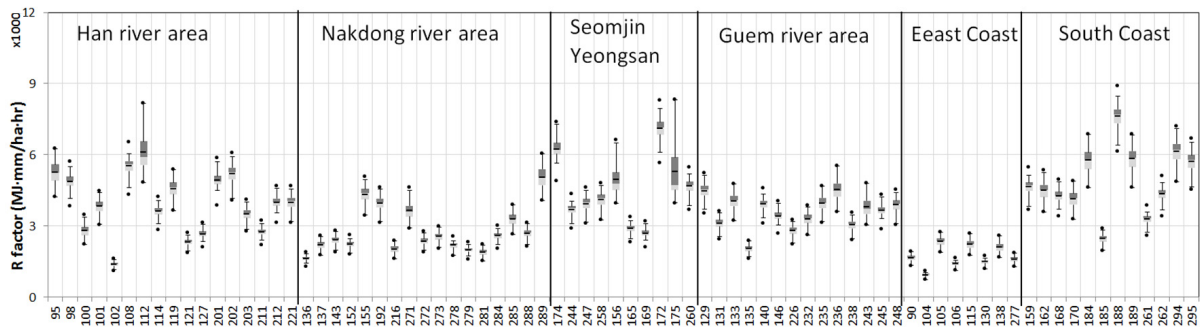


Fig. 6 Average of annual R factors over the data period for stations, the range of boxplots indicates the differences among the results using the energy based-methods

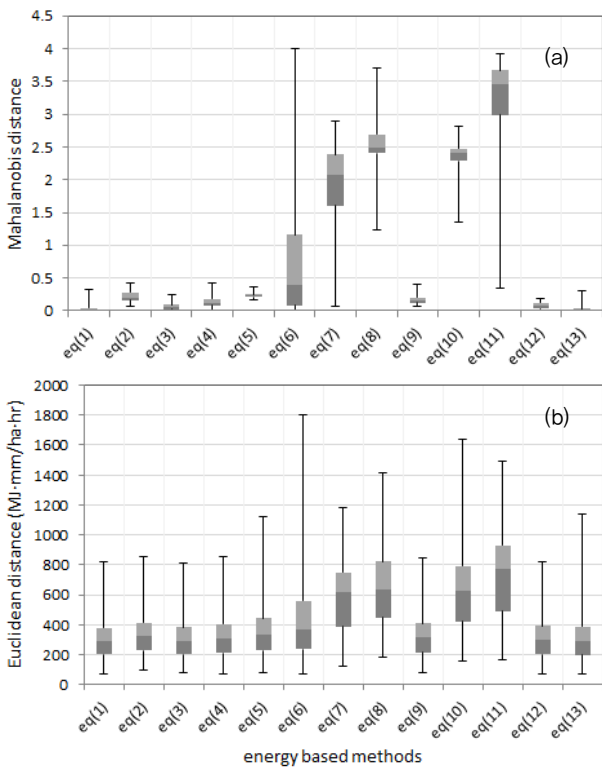


Fig. 7 (a) Mahalanobis distances and (b) Euclidean distances of the averaged R factor estimated using energy based methods. The error bars indicate the ranges of the results for 72 stations.

강우량과 강우강도가 상대적으로 크게 나타난 (Fig. 2) 호남 지역 섬진·영산강 유역을 비롯한 남해안 지역의 침식인자가 비교적 크게 산정되었고 영남과 동부해안 지역의 결과가 대체로 낮게 나타났다. 이결과는 남한지역 강우사상의 공간적 다양성에 기인하여 산정된 강우침식인자가 지역적 특성을 반영하는 것을 보여주며 Fig. 5와 함께 인자가 크게 산정되는 지점에 대한 결과는 적용방법론에 따른 불확실성도 크게 나타남을 보여주고 있다.

Fig. 7은 산정 방법론별 적용 결과에 대한 마할라노비스 거리와 유클리디안 거리를 비교하고 있다. 산정식별 상이성은 지점별로 큰 범위를 보였으며 침식인자 분포에서 비교적 크게 벗어나는 산정식의 경우 지점별 범위가 넓게 나타나고 있다. 대체로 식 (8) (Rosewell (1986))과 식 (10) (Zanchi and Torri (1980)), 그리고 식 (11) (Noe and Kwon (1984))의 적용 결과가 타 산정식을 적용한 결과범위를 비교적 크게 벗어나는 것을 확인하였다. 이는 산정식의 상대적 특성에 대한 결과이며 정확성 및 적용성에 대한 분석은 실측자료에 대한 재현성 평가를 통해 이루어져야 할 것이다.

나. 간편법 적용결과 비교

연강수량 기반 간편법을 이용하여 강우침식인자 산정 결과를 연도별 지역별로 비교하였다. Fig. 8은 유효강우사상에 대한 남한지역 연평균 강수량과 강우 운동에너지 식과 지상관측지점에 대한 강우침식인자 산정 결과의 연도별 범위를 보여주고 있다. 간편법 식 (Table 3)에 따른 남한지역 평균 (지점평균)은 연강수량 변화와 유사한 경향을 보이는 한편 에너지 기반 산정식을 적용한 경우에 비해 강우침식인자가 평균적으로 약 76 % 크게 산정되었다. 산정식별 연평균 강우침식인자의 변동계수는 0.27로 강우에너지 기반 산정식 적용결과와 유사하게 나타났으나 지점별 결과에 대한 변동계수는 평균 0.69로 비교적 높게 나타났다. 한편 지점간 평균의 산정식별 적용 결과의 다양성과 산정식 평균 강우침식인자의 지점별 다양성은 연강수량 변동과 유사한 상관성과 범위를 보였다. 이는 간편법 적용시 적용 산정식은 선정 및 지역적 특성에 대한 고려가 동시에 신중하게 이루어져야 한다는 점을 시사한다.

Fig. 9는 간편법을 적용한 지점별 평균 강우침식인자와 산정식 적용결과에 대한 RMSD를 비교한 결과이다. 지점별로 R² 0.98이상의 회귀관계가 도출되었으며 이는 대체로 큰 연강수량에 의해 강우침식인자가 크게 산정된 해의 경우 산정식에 따른 연단위 결과의 불확실성이 증가함을 의미하여 강우에너지 기반 산정식 적용결과와 유사한 결과를 보였으며 그 상관성과 지역적 패턴은 보다 일관적으로 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 10은 간편법을 적용하여 각 지점에 대해 추정된 연평균 강우침식인자를 주요 권역으로 구분하여 비교한 것이다. 강우량과 강우강도가 상대적으로 크게 나타난 남해안 지역의 침식인자가 비교적 크게 산정되고 간편법 간의 범위가 넓게 분포하고 있다. 강우에너지 기반 산정식 적용결과에 비해 대체로 과대산정된 결과를 보이는 가운데 권역 및 지점간 평균적 차이는 크게 나타나지 않았다.

Fig. 11은 간편법 적용결과에 대한 마할라노비스 거리와 유클리디안 거리를 비교하고 있다. 대체로 침식인자 분포에서 비교적 크게 벗어나 거리가 크게 산정된 간편법 식의 경우 지점별 범위가 넓게 나타나고 식 (14) (Roose (1975))와 (16) (El-Swaify et al. (1985))의 적용 결과가 타 산정식을 적용한 결과범위를 비교적 크게 벗어나는 것을 확인하였다. 국내에서 개발된 식 (17)~(19)는 유사한 결과를 보이며 산정식 간의 유사성이 큰 것으로 분석되었다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 국내 선행연구들에서 적용되었거나 소개된

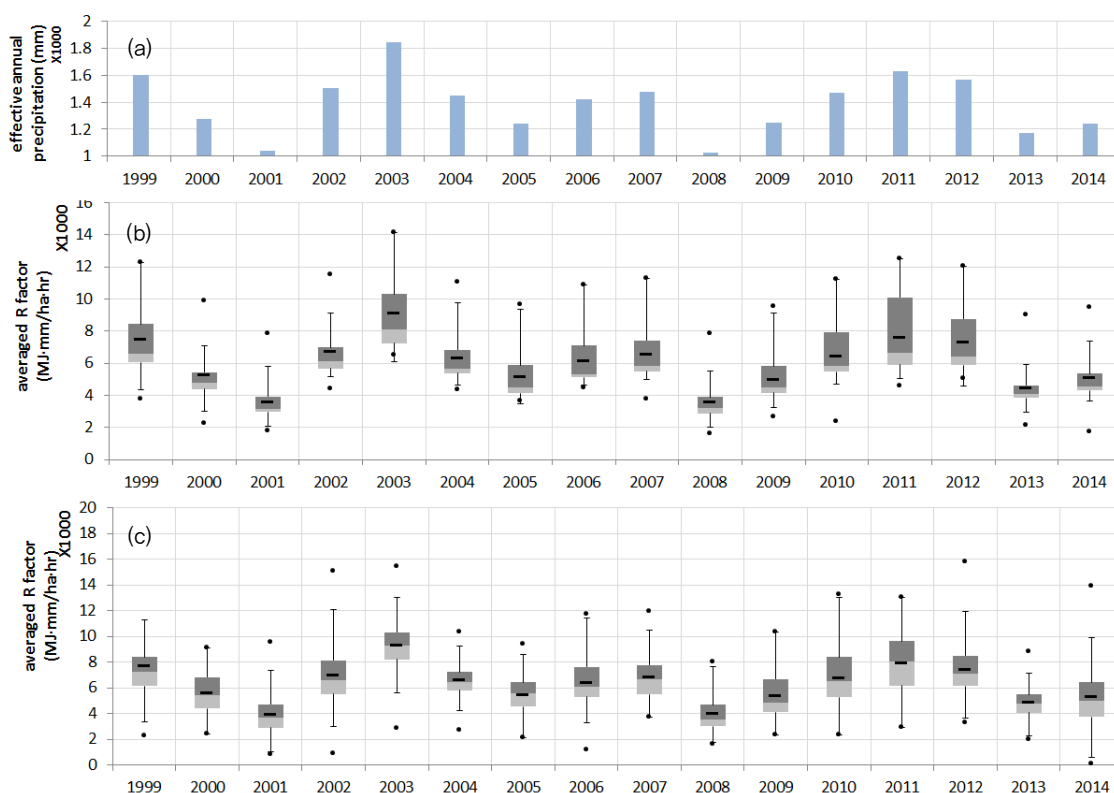


Fig. 8 Annual patterns of (a) total precipitation for effective events, (b) the range of R factors estimated using the different simple methods (averaged over the stations), and (c) the range of R factors estimated for stations (averaged over the methods)

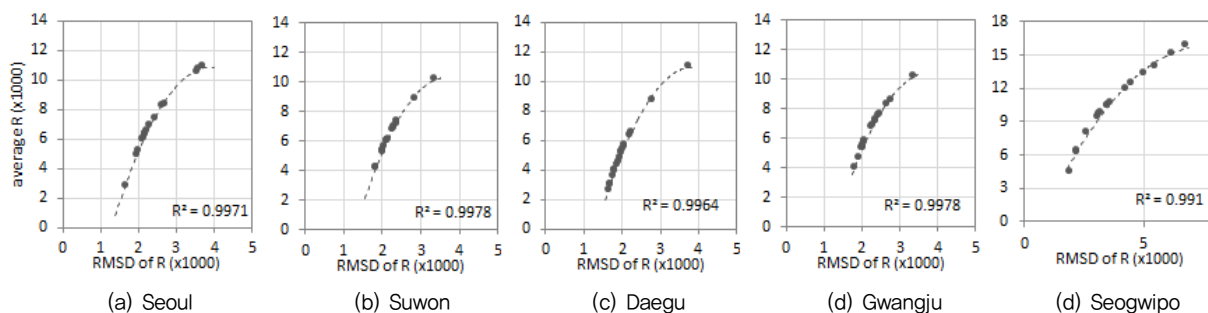


Fig. 9 comparison of annual average and RMSD of R factors estimated using simple methods for the selected stations

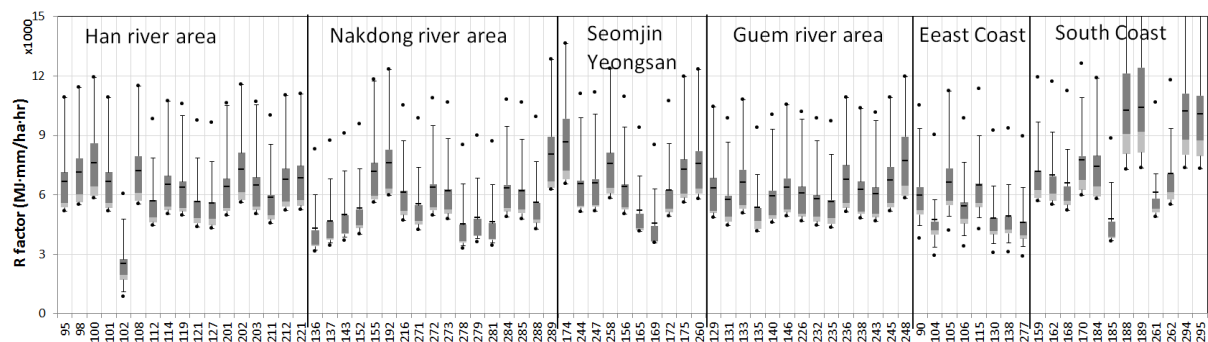


Fig. 10 Average of annual R factors over the data period for stations, the range of boxplots indicates the differences among the results using the simple methods.

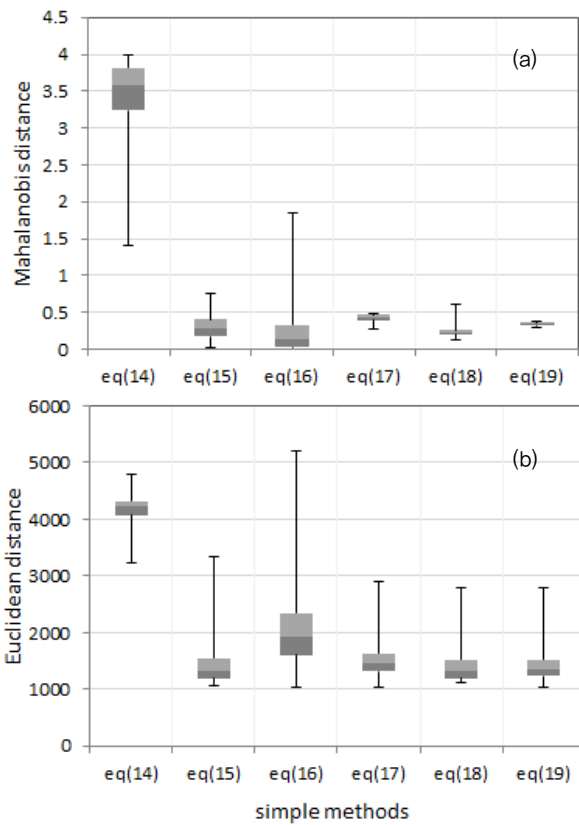


Fig. 11 (a) Mahalanobis distances and (b) Euclidean distances of the averaged R factor estimated using simple equations. The error bars indicate the ranges of the results for 72 stations.

바 있는 13개 강우에너지 식 (energy based methods)을 비롯하여, 다양한 간편법을 적용하여 산정한 강우침식인자 산정 결과를 분석하고 지점별 결과의 다양성을 평가하였다. 연구의 주요 세부 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 강우침식에 대한 유효강우사상에 대한 연 평균 강수량은 630 mm ~ 1,860 mm 범위의 분포로 나타났으며 남한 전역의 대상 관측지점 평균은 약 1,230 mm로 나타났다. 남해안 지역의 경우 지역평균 1,620 mm 이상으로 비교적 높게 나타났다으며 호서지역과 북부 영남지역을 비롯한 서해안 도서지역의 강수량은 상대적으로 낮게 나타났다.
2. USLE 연단위 지속강우침식인자에서 고려되는 사상별 지속시간30분 최대강우강도와 강우관련 인자인 강우사상별 크기 및 강우 지속시간의 높은 상관성을 확인하였다. 지점별로 일관적인 결과를 보였으며 이는 연강우량 기반의 간편법 개발·적용에 있어 추가적으로 적용 가능한 매개변수로서의 활용성을 시사한다.

3. 강우에너지 기반 산정법 적용결과 남한 평균 강우침식인자는 3,642 MJ·mm/ha·hr, 지점별 연평균 침식인자의 표준편차는 2,617 MJ·mm/ha·hr로 산정되었다. 지점별로 산정된 강우침식인자의 범위는 넓게 나타났으나 연변동성이 크지 않고 일관적인 경향을 보였다. 침식인자 산정결과 지점 간 범위는 방법론에 따른 범위에 비해 월등히 크게 나타나 강우침식인자의 공간다양성에 대한 재현성이 합리적 방법론 선정에 있어 고려되어야할 주요요소로 판단되었다.
4. 간편법 적용결과 남한 평균 강우침식인자는 6,421 MJ·mm/ha·hr, 지점별 연평균 침식인자의 표준편차는 1,941 MJ·mm/ha·hr로 산정되었다. 국내에서 개발된 산정식 적용결과는 대체로 유사한 결과를 보였으며 강우에너지 기반 산정법 적용결과에 비해 대체로 높게 산정되었고 지점별 연도별 평균 침식인자는 연강우량과 높은 상관성을 보였다.
5. 강우사상별 강우강도 및 강우량이 큰 지역의 경우 산정 방법론별 강우침식인자 산정결과 다양성이 상대적으로 크게 나타나 지역의 기후특성의 다양성 및 기후변화 등으로 인한 극한사상의 빈도 및 강도 변화를 고려할 때 국내 강우침식인자 산정 및 공간분포 분석에 있어 신중한 방법론 선정이 필요할 것으로 판단하였다.
6. 권역별 침식인자 산정결과를 비교하면 수도권 및 한강유역의 지점별 강우침식인자의 분포가 다양하게 나타났으며 강우량과 강우강도가 상대적으로 크게 나타난 남해안 지역의 침식인자의 결과 범위가 넓고 평균적 결과도 비교적 크게 산정되는 반면 영남과 동부해안 지역에 대한 결과는 대체로 낮게 나타났다.
7. 식 (8) (Rosewell (1986))과 식 (11) (Noe and Kwon (1984)), 그리고 식 (14) (Roose (1975))와 (16) (El-Swaify et al. (1985))의 적용결과가 다른 식의 평균적 적용결과와 비교해 가장 상이하게 나타났다. 이는 산정결과 정확성을 바탕으로 한 국내 적용성 평가결과는 아니며 국내 실정에 맞게 개발된 식의 특수성을 보이는 결과일 수 있으며 토양유실 모니터링 및 강우침식 연구를 통해 과학적으로 증명하기 위한 추가 연구가 필요하다.

지역별 강우특성이 다양하게 나타나는 국내 강우침식인자 산정에 있어 적용방법론 별 결과의 다양성에 대해 이해하고 적합한 기법을 선정하는 것은 중요하고 어려운 과정이다. 본 연구에서는 다양한 방법론 적용에 따른 결과의 차이를 정량적으로 분석함으로써 다른 산정법 적용에 따른 결과의 불확실성과 산정법별 상대적 상이성에 대해 제시하고자 하였다. 지형·지역적 양상이 다르게 나타나는 토양유실량 예측에 있어 강우침식인자 산정을 위한 최적 방법론 선정 및 개발은 한계가

있는 만큼 다중모델 결과를 조합하는 방법론 개발과 신중한 적용이 필요하다고 판단된다. 더불어 토양유실 모니터링을 통한 모델 검증은 통해 산정기법의 국내 적용성 및 정확성에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 2015년 경상대학교 발전기금재단 재원과 2016년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-이공야기초연구사업의 지원 (No. 2016010074)을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- Brown, L. C. and G. R. Foster, 1987. Storm erosivity using idealized intensity distributions, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 30: 379-386.
- Carter, C. E., J. D. Greer, H. J. Braud, and J. M. Floyd, 1974. Raindrop characteristics in south central United States, *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 17: 100-103.
- Cho, H. L. and J. C. Jeong, 2005. Estimating Soil Loss in Alpine Farmland with RUSLE and SEDD. *The Journal of GIS Association of Korea* 13(1): 79-90.
- El-Swaify, S. A. et al., 1985. Soil Erosion and Conversion, *Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa*.
- Gong, H. Y., K. P. Lee, J. Y. Lee, B. J. Kim, A. R. Lee, B. H. Bae, and J. Y. Kim, 2012. Assessment of Soil Loss at Military Shooting Range by RUSLE Model: Correlation Between Soil Loss and Migration of Explosive Compounds. *Journal of Soil and Groundwater Environment* 17(6): 119-128.
- Jayawardena, A. W. and R. B. Rezaur, 2000. Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong, *Hydrological Processes* 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. *Journal of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 16(2): 112-118.
- Kang, M. S., S. W. Park, S. J. Im, and H. K. Kim, 2003. Computing the Half-Month Rainfall-Runoff Erosivity Factor for RUSLE. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 45(3): 29-40.
- Kim, M. K., S. O. Hur, S. I. Kwon, G. B. Jung, Y. K. Sonn, S. K. Ha, and D. B. Lee, 2010. Prediction of Soil Erosion from Agricultural Uplands under Precipitation Change Scenario. *Journal of the Korean Soil Science and Fertilizer* 43(6): 789-792.
- Lee, H. K., Y. H. Jung, and J. H. Heo, 2008. A Study on Estimation of Rainfall Erosivity in RUSLE. *Journal of the Korea Water Resources Association* 1324-1328.
- Lee, J. H., J. Y. Shin, and J. H. Heo, 2011a. Evaluation of Rainfall Erovisity in Korea using Different Kinetic Energy Equations. *Journal of the Korean Soil Science and Fertilizer* 44(3): 337-343.
- Lee, J. H., J. Y. Shin, and J. H. Heo, 2011b. Rainfall Erosivity in Seoul using Various Rainfall Kinetic Equations. *Journal of the Korea Water Resources Association* 124-128.
- Lee, J. S. and J. H. Chung, 2009. Characteristics Analysis for RUSLE Factor base on Measured Data of Gawon Experimental Watershed. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 9(6): 111-117.
- Lee, J. S. and J. Y. Won, 2012. Suggestion of Cover-Management Factor Equation for Mountain Area in RUSLE. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12(2): 79-85.
- Lee, J. S. and J. Y. Won, 2013. Analysis of the Characteristic of Monthly Rainfall Erovisity in Korean with Derivation of Rainfall Energy Equation. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 13(3): 177-184.
- McGregor, K. C., R. L. Bingner, A. J. Bowie, and G. R. Foster, 1995. Erosivity index values for northern Mississippi. *Transactions of 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, In Rimwanich, S. (eds), Land conservation for future generations, *Department of Land Development, Bangkok* 627-639.
- Park, C. W., Y. K. Son, 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. *Journal of the Korean Soil Science and Fertilizer* 44(6): 977-982.
- Park, C. W., Y. K. Son, Y. S. Zhang, S. Y. Hong, B. K. Hyun, K. C. Song, S. K. Ha, and Y. H. Moon. 2010. Soil Erosion Risk Assessment in the Upper Han River Basis Using Spatial Soil Erosion Map. *Journal of the Korean Soil Science and Fertilizer* 43(6): 826-836.
- 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. *Journal of the Korea Water Resources Association*. 33(5): 603-610.
- Renard, K. G. and J. R. Freimund, 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology* 157: 287-306.
- Roose, E., 1975. Use of the universal soil loss equation to

- predict erosion in West Africa. In: *Soil Erosion: Prediction and Control*, Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA, 60-74.
24. Rosewell, C. J., 1986. Rainfall kinetic energy in eastern Australia, *Journal of Climate and Applied Meteorology* 25: 1965-1971.
25. Son, K. I., 2001. Applicability Examination of the RUSLE Sediment Yield Prediction Equation in Korea. *Journal of the Korea Water Resources Association* 34(3): 199-207.
26. Toxopeus, A. G., 1996. An Interactive Spatial and Temporal Modeling System as a tool in Ecosystem Management. Ph.D. Thesis. ITC.
27. van Dijk, A.I.J.M, Bruijnzeel, L. A., and Rosewell, C.J. 2002 Rainfall intensity-kinetic energy relationships : a critical literature review, *Journal of Hydrology* 261, pp. 1-23.
28. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D, 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning, *US. Dep. Agric., Agric. Handb.* 537.
29. Zanchi, C. and D. Torri, 1980. Evaluation of rainfall energy in central Italy, In De Boodt, M. and D. Gabriels (eds), *Assessment of erosion*, Wiley, London.