

토양유실량 예측을 위한 강우침식인자 재산정

박찬원 · 손연규* · 현병근 · 송관철 · 전현정 · 문용희 · 윤순강

농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부

The Redetermination of USLE Rainfall Erosion Factor for Estimation of Soil Loss at Korea

Chan-Won Park, Yeon-Kyu Sonn*, Byung-Keun Hyun, Kwan-Cheol Song, Hyen-Chung Chun, Young-Hee Moon, and Sun-Gang Yun

Department of Agricultural Environment, NAAS, RDA, Suwon, 441-707, Korea

This study was conducted to redetermine the rainfall erosion factor (R factor) in USLE for the estimation of soil loss at Korea. The redetermined R factor may be applied more precisely to interpret the changes of regional/yearly/seasonal patterns, including the amount of rainfall and the kinetic energy of rainfall, in Korea. This study calculated the R factors based on 60-minute precipitation data from 60 sites covering the whole country for 30 years from 1981 to 2010. As a result, the annual mean rainfall was $4,147 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ yr}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ in Korea. Coastal regions of Jeonnam and Gyeongnam, northwest regions of Gyeonggi, and Seoul had the greater values of R factor compared to other regions. The annual mean R factors for every decade were 3,988, 4,085, and $4,370 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ yr}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ in 1981~1990, 1991~2000, and 2001~2010, respectively. Generally, the R factors had an increasing tendency over and over past decades. The ratios of summer R factor to total annual mean R factor were 69.8% (1981~1990), 73.7% (1991~2000), and 74.2% (2001~2010). We found that the absolute values and the relative ratios of summer rainfall are gradually increased.

Key words: USLE, Soil erosion, Rainfall, R factor

서 언

토양유실에 의한 토양환경의 퇴화와 이에 따른 수환경의 문제는 토양 기능의 훼손이라는 자원적 손실의 측면뿐만 아니라 토양침식에 의해 댐이나 호소로 유입되는 현탁입자는 저수용량의 감소, 부영양화 및 오염물질의 이동 등의 여러 문제를 발생시키므로 이에 토양유실이 환경에 미치는 영향에 대한 평가기술 개발 필요하다. 특히 우리나라의 경우 경사도 0~2%인 토양이 불과 16.8%이며 대부분의 토양은 경사지에 위치하여 있고, 하절기에 집중강우가 빈번히 발생하고 있어 이에 대한 토양침식에 대한 대책수립이 필요하다. 또한, 2011년 4월 개정된 토양환경보전법에서는 제6조의 2항 (표토의 침식 현황 조사)이 2011년 4월 5일 신설됨에 따라 4대강 지역에서는 토양침식현황 및 정도를 조사하여 이에 대한 대책을 수립 시행하여야 한다.

대단위 면적에서 토양침식현황 및 정도를 정량적으로 해

석하는 것은 거의 불가능한 일이기 때문에 토양침식 모형을 이용하여 이를 추정하고 있었으며, 일반적으로 우리나라에서는 전세계적으로 광범위하게 사용되고 있는 USLE (Universal Soil Loss Equation) 모형을 연간 토양유실량 예측에 주로 이용하고 있다 (Kim et al., 2010). USLE 모형은 장기간에 걸친 연평균 토양유실량을 예측할 수 있는 경험적인 모델로 토양유실량 예측을 위하여 강우 (rainfall erosion factor: R factor), 토양특성 (soil erodibility factor: K factor), 경사도 및 경사장 (hill slope-length & gradient factor: LS factor), 토양의 피복 (cover-management factor: C factor), 토양관리 (support practice factor: P factor) 등 5개 인자값에 산정하여 이용하고 있다 (Renard et al., 1997; Wischmeier and Smith, 1965, 1978).

강수인자 산정을 위해서는 단순 강우량을 이용하는 것이 아니라 강우가 지표에 낙하될 때의 발생하는 운동에너지로 환산하는 복잡한 계산과정을 거치게 되며, 이때 30년 동안의 강수정보를 필요로 하게 된다. 특히 하절기 집중강우가 심한 몬순기후대에 위치한 우리나라의 경우 강우침식인자는 토양유실 모형에 적용되는 중요한 기후인자로서 값의 변동성이 다른 인자에 비해서 비교적 크기 때문에 정확한 값

접수 : 2011. 11. 17 수리 : 2011. 12. 6

*연락처 : Phone: +82312900338

E-mail: sonnyk@korea.kr

을 산출하려는 노력이 계속되어 왔다 (Lee et al., 2011). 현재까지 우리나라 연평균 토양유실량 산정에 이용되는 자료를 살펴보면, Jung et al. (2005)은 Jung et al. (1983)과 Park et al. (2000)이 1973~1996년 기상자료를 분석하여 도출한 추정치를 정리하여 강우침식인자를 산정하였고, Lee et al. (2011)은 20년 동안 (1980~1999년) 1분 단위 강수자료를 이용하여 강우운동에너지를 계산하여 21개 지점의 강우침식인자 값을 산정하였다.

본 연구에서는 전국단위 토양침식현황을 산정하기 위하여 기상청 산하 전국 60개 지점의 1981~2010년 기간 (30년)의 60분 단위 강수자료를 이용하여 강우침식인자를 산출함으로써 현재까지 구축된 자료의 지역적 한계과 제한적인 기간을 극복하고자 하였으며, 분석된 결과를 이용하여 지역별 및 시기별 강우패턴변화와 강우운동에너지 변화를 분석하였다.

재료 및 방법

USLE 모형에서 강우인자 계산은 강우사상의 추출하고 이를 강우운동에너지로 환산하여 정량하는 과정이다. 본 연구에서는 이러한 과정을 프로그래밍 언어인 C#.NET을 기반으로 소프트웨어를 개발하여 계산하였다.

강우자료 이용된 강우자료는 기상청 산하 전국 60개 지점의 1981~2010년 기간 (30년)의 60분 단위 강수자료로 기상청 방재기상정보 포털서비스 시스템 (<http://metsky.kma.go.kr>)을 통하여 취득한 자료로 규모는 15,768,000개였다. 강수자료가 취득 지점의 위치는 Fig. 1과 같다.

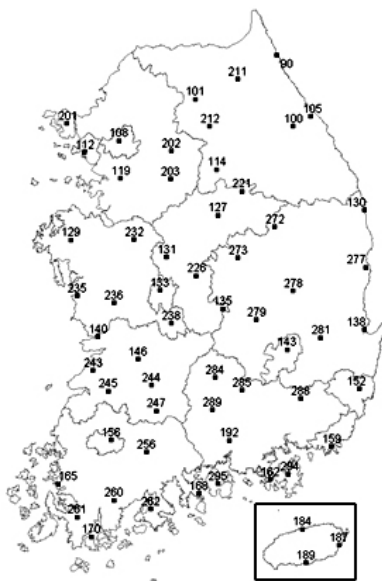


Fig. 1. Location of 60 weather stations where precipitation data were observed in this study.

강우침식인자 계산 USLE 모형에서 강우사상은 1회 강우량이 12.7 mm 이상이며, 강우 간 간격이 6시간이내일 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 고려한다 (Wishmeier and Smith, 1978). 하지만, 본 연구에서는 60분 단위 강우자료를 이용하였기 때문에 15분 이내 6.25 mm 이상의 강우는 강우사상으로 포함하지 않았다. 이렇게 60분 단위 자료를 이용함으로써 무시된 15분 이내 6.25 mm 이상의 강우사상은 발생빈도와 해당 강우에 대한 강우운동에너지 값이 매우 적기 때문에 전체 강우인자에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다. 강우침식인자는 1년동안 강우사상별로 강우운동에너지의 합으로 계산되게 되는데 그 방법은 식 (1), 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$e = 210.3 + 89 \log(I) \tag{1}$$

$$E = \sum(e \cdot I \cdot t) \tag{2}$$

$$R = \sum(E \cdot I_{30}) / 100 \tag{3}$$

여기서 e와 E는 각각 개별강우의 시간단위별 운동에너지 및 개별 강우사상별 운동에너지이며, 이를 구하기 위하여 시간단위 강우강도 (I, cm hr⁻¹), 강우사상별 강우지속시간 (t, hr) 값을 입력이 필요하며, E에 30분 최대 강우강도 (I₃₀, cm hr⁻¹) 곱을 연간 합산하여 강우침식인자 (R, 100 of MTF-m-cm/ha-hr-yr)를 계산하였다. 단, 강우침식인자를 SI 단위 (MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹)로 환산하기 위해서는 9.808을 곱하여야 한다.

결과 및 고찰

강우침식인자 산정 강우침식인자 산정을 위하여 1981년부터 2010년까지 (30년간)의 60개 주요 기상청 관측소의 시간당 강수정보를 D/B화하고 이를 프로그램화하여 계산하였다. Fig. 2는 연도별 강우량 변화와 연도별 산정된 강우침식인자 값의 변화를 도시한 것이다. 본 연구에서 사용된 30년간 60지점의 연도별 평균 강수량을 분석한 결과 726~1,702 mm yr⁻¹으로 연도별 표준편차 251 mm yr⁻¹으로 매우 큰 것을 알 수 있었다. 특히 1991~2000년의 경우 연도별 표준편차가 269 mm yr⁻¹으로 더 심했다. 60지점의 연도별 평균 강우침식인자 또한, 2,264~6,856 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹으로 편차가 비교적 높았으며, 마찬가지로 1991~2000년의 경우 연도별 강우침식인자값의 표준편차가 1,352 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹으로 비교적 높은 것을 알 수 있었다.

우리나라 평균 강우침식인자는 4,147 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹이었다. 이는 1973~1996년 기상자료로 분석한 기준 우

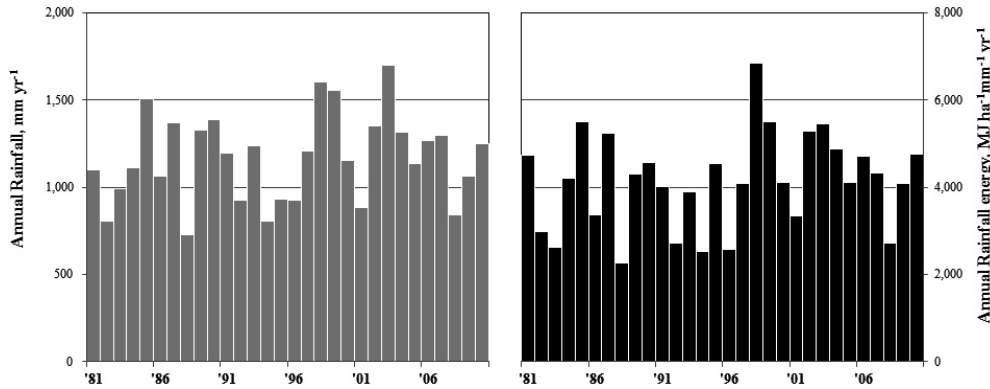


Fig. 2. Annual mean precipitation and R factor of 60 sites from 1981 to 2010.

Table 1. Annual mean R factor from 1981 to 2010.

(unit : MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹)

Location (code)	R-factor	Location (code)	R-factor
Sokcho (90)	3,479	Yangpyeong (202)	5,332
Daegwallyeong (100)	4,443	Icheon (203)	4,474
Chuncheon (101)	4,010	Inje (211)	3,318
Gangneung (105)	4,150	Hongcheon (212)	4,798
Seoul (108)	5,746	Jecheon (221)	4,340
Incheon (112)	4,458	Boeun (226)	3,647
Wonju (114)	4,098	Cheonan (232)	3,677
Suwon (119)	4,464	Boryeong (235)	4,457
Chungju (127)	3,415	Buyeo (236)	4,612
Seosan (129)	4,086	Geumsan (238)	3,381
Ulsan (130)	1,946	Buan (243)	3,526
Cheongju (131)	3,361	Imsil (244)	3,613
Daejeon (133)	4,189	Jeongeup (245)	3,690
Chupungnyeong (135)	2,432	Namwon (247)	3,956
Pohang (138)	2,708	Suncheon (256)	5,100
Gunsan (140)	3,464	Jangheung (260)	5,289
Daegu (143)	2,474	Haenam (261)	4,253
Jeonju (146)	3,792	Goheung (262)	5,303
Ulsan (152)	3,279	Yeongju (272)	3,205
Gwangju (156)	4,355	Mungyeong (273)	2,900
Busan (159)	5,231	Yeongdeok (277)	2,252
Tongyeong (162)	4,176	Uiseong (278)	2,307
Mokpo (165)	3,049	Gumi (279)	2,324
Yeosu (168)	4,502	Yeongcheon (281)	2,232
Wando (170)	5,204	Geochang (284)	3,371
Jeju (184)	4,811	Hapcheon (285)	3,814
Seongsan (187)	7,864	Miryang (288)	3,301
Seogwipo (189)	6,885	Sancheong (289)	5,343
Jinju (192)	4,572	Geoje (294)	7,339
Ganghwa (201)	5,885	Namhae (295)	7,160

리나라 평균 강우침식인자 4,276 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹ (Jung et al., 2004)와 21개 지점의 1980~1999년 (20년) 기상자료를 이용하여 분석된 평균치 5,442~6,721 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹ (Lee et al., 2011)간의 차이가 있었다. 이러한 차이는 본 연구에서 사용된 강우자료의 경우 60분단위 강우자료를 이용하였기 때문에 강우침식인자 값이 과소 평가될 가능성이 높으며, 강우침식인자 산정시 분석에 이용된 지점의 차이, 분석기간의 상이함, 그리고 강우운동에너지 추정식

적용의 차이 때문으로 판단된다.

지역별 계산된 값을 살펴보면 강우침식인자 최대값을 보인 지역은 제주 성산 (187)으로 7,864 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹였으며, 제주도를 제외한 내륙지역에서는 거제 (294) > 남해 (295) > 강화 (201) > 서울 (108) > 산청 (289) 순이었다. 최소값은 경북 울진 (130)으로 1,946 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹으로 계산되었으며, 영천 (281) < 영덕 (277) < 의성 (278) < 구미 (279) 순으로 낮은 강우침식인자 값을 보였다. 전체적으로

볼 때 제주와 남해안 지역이 가장 높았으며 경북지역이 가장 낮은 수치를 보였다 (Table 1).

지역별 강우침식인자의 패턴분석 및 우리나라 토양유실량 산정을 위하여 본 연구에서 산정된 30개 지역 관측소에서 강우침식인자를 TM좌표를 이용하여 거리역산가중치법 (IDW, Inverse Distance Weight method)을 적용, 30 m 단위로 강우침식인자 지도를 작성하였고, 기존 지도와 같이 비교하였다 (Fig. 3). 우리나라 전체적으로 볼 때 Table 1. 수치와 같이 제주도를 제외하고 전남 및 경남 해안지방, 경기도 북서 및 서울지역이 높은 강우침식인자 값을 보였다. 새로 작성한 지도와 기존 지도를 비교한 결과 인제 (211), 대관령 (100), 순천 (256), 서울 (100), 양평 (202), 문경 (273), 포항 (138) 등 지역의 경우 기존 강우침식인자 값과 비교하여 약 100~700 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹ 증가하였으나, 울진 (130), 부산 (159), 고흥 (262), 강화 (201) 등 해안지역의 경우 오히려 기존 값보다 감소하는 경향을 보였다. 또한, 내륙지방의 경우 천안 (232), 청주 (131) 지역 또한 기존값보다 감소하는 경향을 보였다.

시기 및 계절별 강우침식인자의 변화 Table 2는 60개 관측지점의 30년 동안의 시기별/계절별 강수량 및 강우에너지의 변화를 나타낸 것으로 강수량의 경우는 1981~1990년 시기에 비하여 2001~2010년 시기에 비하여 65 mm yr⁻¹ 증가한 것으로 나타났으며, 특히 여름철인 6~8월 동안은 70 mm yr⁻¹ 증가하였다. 그러나 가을의 경우는 오히려 감소하는 43 mm yr⁻¹가 감소하는 등 감소하는 경향을 보였다. 강우운동에너지의 변화는 강수량 변화와 패턴이 비슷하였다. 특히 여름철의 경우 1981~1990년 동안의 값이 2001~2010년 시기에 비하여 456 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹ 증가하였으며, 가을철과 겨울철의 경우는 각각 71, 33 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹ 감소하였다. Choi et al. (2008)은 35년 동안 (1973~2007) 우리나라 61개 지점의 강수량상의 사·공간적 변화 패턴을 분석한 결과 총 평균 강수량은 8.55 mm yr⁻¹의 비율로 증가 추세를 보였으며, 여름 강수패턴의 변화는 주로 40 mm d⁻¹ 이상의 여름철 극한 강우일이 증가하는 것으로 나타났다.

30년 평균적인 강수량의 분포는 계절별로 각각 봄 18.5%, 여름 54.7%, 가을 19.8%, 겨울 7.0%을 보였으며, 강우운동에너지는 각각 봄 8.6%, 여름 72.6%, 가을 17.4%, 겨울 1.5%

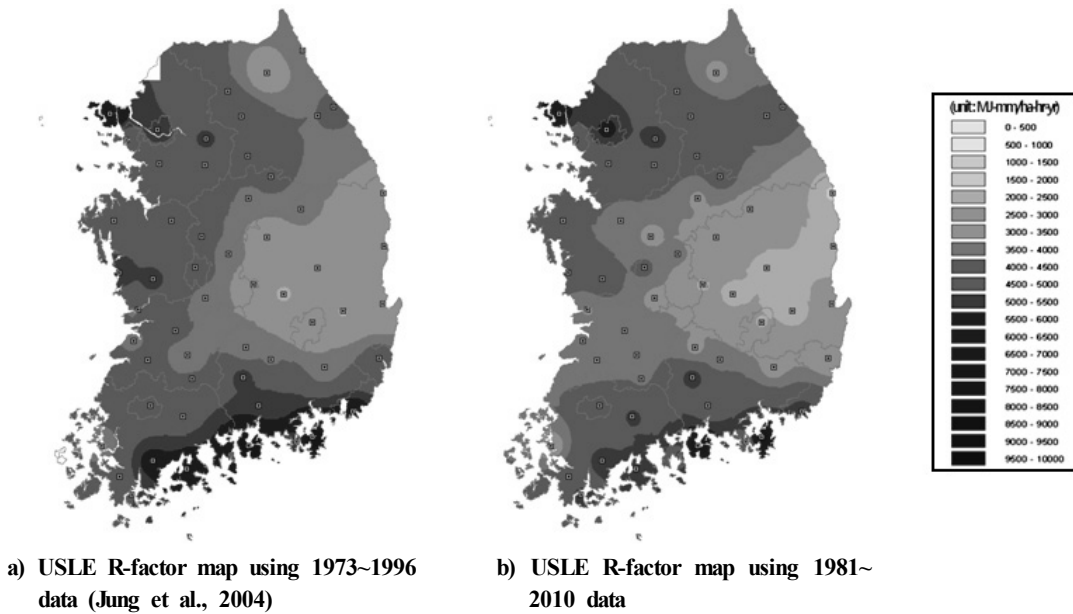


Fig. 3. Maps of USLE R factor obtained from a) existing and b) updated calculation.

Table 2. Seasonal changes of the annual mean precipitation and rainfall kinetic energy in each decade.

Season	Rainfall			Rainfall kinetic energy		
	'81~'90	'91~'00	'01~'10	'81~'90	'91~'00	'01~'10
	mm			MJ ha ⁻¹ mm ⁻¹ yr ⁻¹		
Spring	233	254	265	340	361	369
Summer	712	737	782	2,785	3,009	3,241
Fall	294	260	252	787	654	717
Winter	96	87	101	76	62	42
Sum	1,335	1,339	1,401	3,988	4,085	4,370

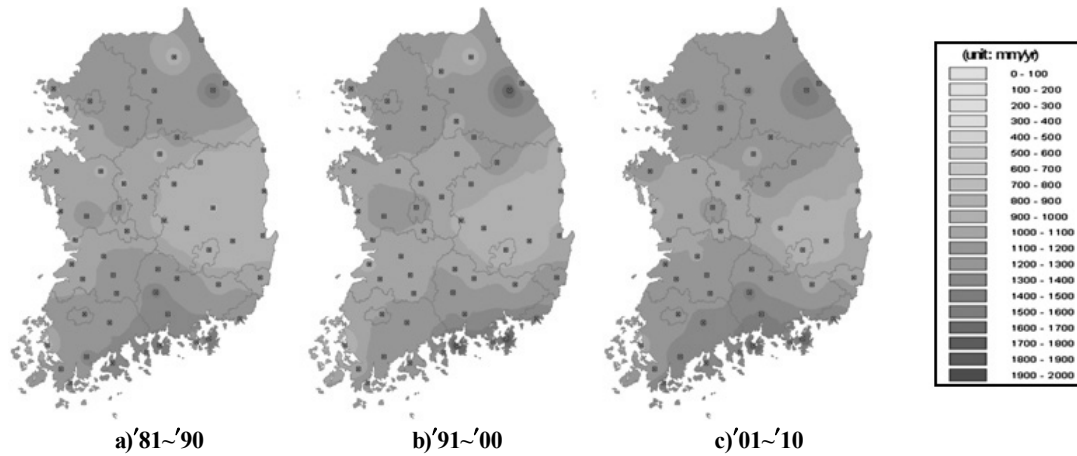


Fig. 4. Change of the annual mean precipitation in each decade.

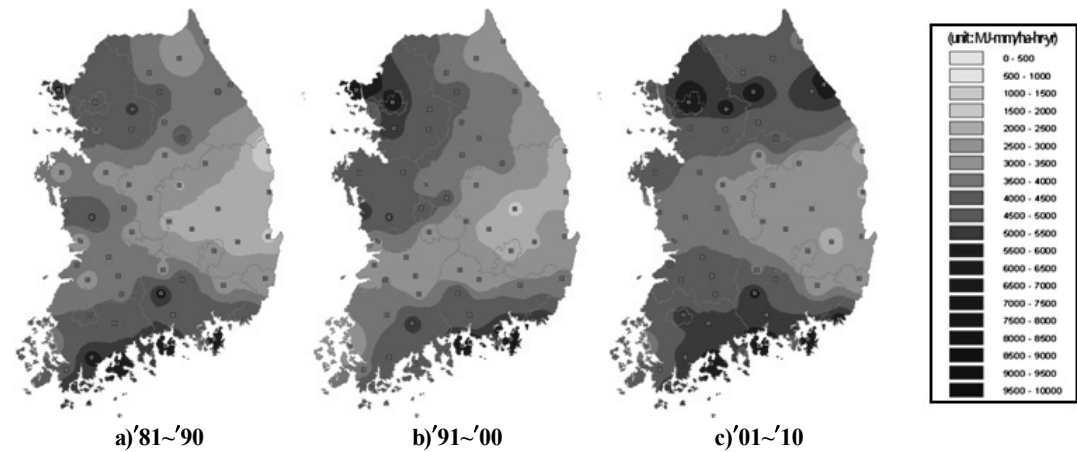


Fig. 5. Change of the annual mean R factors in each decade.

차지하고 있었다. 연평균 강우운동에너지의 연대별 변화를 보면 1981~1990년 기간에는 3,988, 1991~2000년 기간에는 4,085, 그리고 2001~2010년 기간에는 4,370 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 여름철이 강우침식인자에서 차지하는 비율은 1981~1990년 기간에는 69.8%, 1991~2000년 기간에는 73.7%, 그리고 2001~2010년 기간에는 74.2%으로 여름철 강우가 절대적 수치값 뿐만 아니라 상대적인 비율도 점차 높아지고 있는 경향이였다.

시기 및 지역별 강수량 및 강우침식인자의 패턴분석을 분석하기 위하여 본 연구에서 이용된 30개 지역 관측소에서 연대별 강수량과 강우침식인자를 TM좌표를 이용하여 거리역산가중치법 (IDW, Inverse Distance Weight method)을 적용, 30 m 단위로 강우침식인자 지도를 작성하였다 (Fig. 4, 5). 연대별 강수량 변화는 Table 2의 수치적 결과와 마찬가지로 전체적인 증가하였으며, 한강권역 및 백두대간 및 남해안 지역을 따라 증가하는 경향을 보였고, 대관령 (100) 인근 지역이 가장 강수량이 증가하는 것으로 나타났다. 강우침식인자의 변화 또한 마찬가지로 전체적으로 비슷한 경향으로 증가하였으나 특히 중부지역인 서울, 양평, 홍천, 대

관령, 강릉 및 전남 및 경남 해안지방의 증가폭이 더 큰 것을 알 수 있었다.

요 약

전국단위 토양유실량 예측을 위하여 기상청 산하 전국 60개 지점의 30년 동안 (1981~2010년)의 60분 단위 강수량 자료를 이용하여 강우침식인자를 산출하였고, 분석된 결과를 이용하여 지역/시기/계절 별 강우패턴변화와 강우운동에너지 변화를 분석하였다.

강우침식인자를 계산한 결과 우리나라 평균 강우침식인자는 4,147 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹이었다. 지역별로 보면, 제주도를 제외하고 전남 및 경남 해안지방, 경기도 북서 및 서울지역이 높은 강우침식인자 값을 보였다. 시기별 강우침식인자는 1981~1990년 기간에는 3,988, 1991~2000년 기간에는 4,085 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹, 그리고 2001~2010년 기간에는 4,370 MJ mm ha⁻¹ yr⁻¹ hr⁻¹으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 여름철이 강우침식인자에서 차지하는 비율은 1981~1990년 기간에는 69.8%, 1991~2000년 기간에는 73.7%,

그리고 2001~2010년 기간에는 74.2%으로 여름철 강우가 절대적 수치값 뿐만 아니라 상대적인 비율도 점차 증가하고 경향이였다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ0063752011)의 지원에 의해 수행되었습니다.

인 용 문 헌

Choi G.C., W.T. Kwon, K.O. Boo, and Y.M. Cha. 2008. Recent spatial and temporal changes in means and extreme events of temperature and precipitation across the Republic of Korea. *J. Korean Geographical Soc.* 43(5):681-700.
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 scenarios. *Korean J. Soil. Fert.* 43(6):789-792.
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. Fert.* 44(3):337-343.
Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D K. McCool, and D.C. Yoder. 1997. Prediction soil erosion and water: A guide to conservation planning with the revised USLE, US. Dep. Agric., Agric. Handbook No. 703.
Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A guide for selection of practices for soil and water conservation. US. Dep. Agric., Agric. Handbook No. 282.
Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall-erosion losses: A guide to conservation planning. US. Dep. Agric., Agric. Handbook No. 537.
Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall-erosion losses: A guide to conservation planning. US. Dep. Agric., Agric. Handbook No. 537.