

고도를 고려한 공간강우분포와 1분 강우자료를 이용한 RUSLE의 강우침식인자(R) 산정 및 프로그램 개발*

정충길¹ · 장원진¹ · 김성준^{1*}

Spatial Rainfall Considering Elevation and Estimation of Rain Erosivity Factor R in Revised USLE Using 1 Minute Rainfall Data and Program Development*

Chung-Gil JUNG¹ · Won-Jin JANG¹ · Seong-Joon KIM^{1*}

요 약

본 연구에서는 1분 상세강우자료를 이용하여 개정범용토양유실공식(RUSLE)의 강우침식도 R의 추정을 위해 2002년부터 2015년까지 14년간 전국 기상청 관측소의 강우 자료를 수집하여 지점별로 새롭게 계산한 연 강우침식도 및 경험식을 산정하였으며 남한전체(99,720km²)를 대상으로 연 강우침식인자의 공간분포도를 작성하였다. 1분 강우자료로 계산된 강우침식도와 연평균 강우량의 상관관계로부터 도출된 경험식과의 결정계수(R², determination coefficient)는 0.70~0.98로 높은 상관관계를 나타냈으며 이는, 기존의 국내에서 적용된 경험식과 비교하여 실측값과의 정확성이 높게 개선됨을 알 수 있다. 또한, 물리적인 지리요소가 고려된 공간 강우침식인자(R) 분포도를 산정하기 위해 고도가 고려된 공간보간기법(IDW)을 이용하여 연강우량 분포도를 산정하였다. 최종적으로 본 연구에서의 1분 강우자료로부터의 R 산정 및 1시간 강우자료와의 회귀산정 과정의 방법 및 절차를 일반 사용자가 간단하게 사용할 수 있도록 Python GUI 프로그램을 이용하여 R 산정 프로그램을 개발하였다.

주요어 : RUSLE, 토양침식, 강우침식인자, 1분 강우, 파이썬, 고도

ABSTRACT

Soil erosion processes are affected by weather factors, such as rainfall, temperature, wind, and humidity. Among these factors, rainfall directly influences soil erosion by breaking away soil particles. The kinetic energy of rainfall and water

2016년 9월 23일 접수 Received on September 23, 2016 / 2016년 11월 21일 수정 Revised on November 21, 2016 / 2016년 12월 8일 심사완료 Accepted on December 8, 2016

* 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(16AWMP-B079625-03)에 의해 수행되었음.

1 건국대학교 사회환경플랜트공학과 Dept. of Civil, Environmental and Plant Engineering, Konkuk University

* Corresponding Author E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr

flow caused by rain entrains and transports soil particles downstream. Therefore, in order to estimate soil erosion, it is important to accurately determine the rainfall erosivity factor(R) in RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation). The objective of this study is to evaluate the average annual R using 14 years(2002~2015) of 1 minute rainfall data from 55 KMA(Korea Meteorological Administration) weather stations. The R results from 1 min rainfall were compared with previous R studies using 1 h rainfall data. The determination coefficients(R^2) between R calculated using 1 min rainfall data and annual rainfall were 0.70–0.98. The estimation of 30 min rainfall intensity from 1 min rainfall data showed better R^2 results than results from 1 h rainfall data. For estimation of physical spatial rain erosivity(R), distribution of annual rainfall was estimated by IDW(Inverse Distance Weights) interpolation, taking elevation into consideration. Because of the computation burden, the R calculation process was programmed using the python GUI(Graphical User Interface) tool.

KEYWORDS : Revised Universal Soil Loss Equation, Soil Erosion Factor, Rainfall Erosivity, 1 Minute Rainfall, Python, Elevation

서 론

세계 여러 지역에서 홍수와 토양침식은 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 침투홍수, 토양침식, 유사량 등에 대한 예측은 이러한 문제점을 이해하고 통제방법을 고안하여 홍수와 침식에 의한 위험요인을 줄이기 위한 방안을 만드는 데 필요한 것들이다. 홍수와 침식은 강우분포, 토양, 토지이용과 같은 많은 요인들에 의해 영향을 받는다. 이런 요인들은 시간과 공간에 의해 여러 가지 형태로 나타나며, 유역에서의 토양침식의 위험성을 예측하기 위한 방법으로 GIS 기법이 이용되고 있다(Kim *et al.*, 2003). 국내에서도 Lee *et al.*(2003)이 토양도 축적에 따른 토양침식량 산정관련연구를 진행한바 있다.

강우에 의한 토양침식(soil erosion)은 농경지 면적의 감소 및 사태 유발, 토사의 하천 유입으로 인한 환경오염의 원인이 되고 있다. 토양의 보존 및 유지관리를 위해서는 장기적인 토양침식량을 평가하고 이를 저감할 수 있는 대책 마련이 필요하다. 국내에 잘 알려진 범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation, USLE)과 개정범용 토양유실공식(Revised Universal

Soil Loss Equation, RUSLE)은 장기간에 걸친 연평균 토양유실량을 예측할 수 있는 경험적인 모델로서, 지난 40여 년 동안 전 세계적으로 널리 적용되어 왔다. 우리나라는 1970년대 후반부터 USLE를 국내 농업분야에 적용하기 위한 연구가 시작되었으며, 현재는 토목 및 환경 분야에서도 토사유출과 관련된 연구가 진행 중이다(Lee *et al.*, 2011).

USLE 또는 RUSLE는 강우침식인자(R), 토양(K), 사면길이(L), 경사도(S), 피복 및 관리(C), 토양보존 인자(P) 총 6개의 인자의 상호간의 곱으로 구성된다. 이 중 유일하게 기상 특성을 반영하고 있는 인자인 강우침식인자(Rainfall erosivity factor, R)는 비가 내리는 시점부터 종료될 때까지의 강우에너지의 총합과 해당 시간의 30분 최대 강우강도의 곱으로 정의된다(Renard *et al.*, 1997; Wischmeier and Smith, 1978). 이때, 강우에너지는 강우 운동에너지와 강우강도, 시간의 곱으로 정의된다. 강우인자 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 몬순기

후대에 위치한 우리나라의 경우 강우침식인자는 토양유실 모형에 적용되는 중요한 기후인자로서 값의 변동성이 다른 인자에 비해서 비교적 크기 때문에 정확한 값을 산출하려는 노력이 계속되어 왔다(Lee *et al.*, 2011).

강우침식인자의 분포도에 관한 연구는 Wischmeier (1959)가 강우의 운동에너지를 강우강도의 단일 함수로 나타내어 토양유실량을 추정하는 것으로부터 시작한다. 다음 Wischmeier and Smith(1978)에 의해 강우와 토양유실량과의 관계를 강우 크기를 통하여 분석하고 미국 전역의 R 등침식도가 확대 적용되었다(Park *et al.*, 2000). 국내에서의 강우침식인자에 대한 연구는 강원도 지방과 일부 지역에서 조사 보고되었고, Shin *et al.*(1983)에 의하여 강우침식인자의 계산을 시작 하였으며, Jung *et al.*(1983)에 의하여 기상청 산하 51개 관측소의 1960~1980년대에 걸쳐 6~21년의 강우자료 분석에 의한 R의 추정이 이루어졌다. Noe and Kwon(1984)은 대관령 관측지점을 대상으로 강우 입자 크기에 따른 가속도 실측치를 이용하여 강우운동에너지를 산정하여 강우침식인자를 산정하였다. Park *et al.*(2000)은 전국 53개 기상청 지점을 대상으로 1973~1996년까지 1시간 강우자료를 이용하여 강우강도와 강우에 의한 운동에너지를 계산하여 전국 강우침식인자를 산정하여 Jung *et al.*(1983)에 결과와 비교하였다. Lee *et al.*(2011)은 20년 동안(1980~1999년) 1분 단위 강우자료를 이용하여 강우운동에너지를 계산하여 21개 지점의 강우침식인자 값을 산정하였으나 1999년 이전의 1분 강우자료는 정확성이 떨어지며 전국 지점에 대해 충분한 자료를 확보하기 어려워 신뢰성이 높은 강우침식인자로 보기에는 어려움이 있다(Park *et al.*, 2011). 현재 우리나라의 강우침식인자는 Jung *et al.*(1983)과 Park *et al.*(2000)이 Wischmeier and Smith(1978)의 강우 운동에너지 식으로 계산한 값이 널리 알려져 있으며, 이들의 강우침식인자는 현재 농촌진흥청에서 제공하는 전국 단위 토양침식지도의 입력 값으로 활용되고 있다. 그러나 현재 제공되는 강우침식인자는 자기우

량기록지 또는 연속된 분단위 강우자료를 이용한 것이 아니라 제한된 기간의 1시간 강우자료를 이용하여 추정된 값으로서 정확한 강우침식인자 값으로 보기 어렵다(Lee *et al.*, 2011).

고도에 따른 강우량에 대한 연구로는 미계측 지점의 강우 보간에 있어 지형요인을 고려한 바 있으며(Lee and Jeon, 1994), 고도보정에 의한 강우량의 공간내삽에 있어 100m 상승에 따라 5% 증가로 내삽을 실시한 바 있다(Yun *et al.*, 1999). 또한 강우자료에 대하여 다양한 보간기법을 적용하여 그 타당성과 차이에 대하여 연구한 바가 있다(Cho and Jeong, 2006). 고도의 증가에 따른 강수 증가량을 산정함에 있어서 영국에서는 고도와 강우와의 관계를 연구하여 고도의 1,000m 증가시 강우량 증가량으로 2,040mm의 값을 산정한 바가 있으며(Goodale *et al.*, 1998), 미국에서는 1,000m 증가시 2,170mm의 수치를 산정한 사례가 있다. 그 외에 강수 증가율을 산정한 사례로 고도의 1,000m 증가시 강우는 74% 증가한다는 연구가 이루어진 바가 있다(Smith, 2008). 강우량뿐 만 아니라 고도감률을 고려한 연구로 Kim *et al.*(2011)은 고도를 고려한 전국 적설분포 연구를 실시하였다.

최근 우리나라에서는 기후변화로 인해 수문학적 극한사상의 규모와 빈도가 변화하고 있다. 수많은 국내외 기존 연구결과들은 극심한 기후변화의 영향으로 현재와 비교하여 미래의 극한강우 발생 가능성과 강우강도 크기 모두 높을 것으로 예측하였다. 따라서 유역별로 연평균강수량 자료를 사용해 강우침식인자를 산정할 경우 매년 달라지는 강우사상과 강우강도를 고려해야만 한다. 또한, 1시간 강우자료와 제한된 1분 강우자료로부터 전국 강우침식인자를 산정하는 기존 연구는 많았지만 대부분 2000년대 이전의 값들로 현재 적용하기에는 큰 무리가 있다.

본 연구에서는 1분 강우자료를 이용하여 2002년~2015년 동안에 강우침식인자를 추정하고 기존 연구결과와 비교 분석하여 적용성을 검증하고 지형요인이 고려된 공간 강우침식인자를 산정하기 위해 고도를 고려한 강우분포기법을 적용하여 결과를 분석하였다. 또한, 최종적으로

강우침식인자 산정 전체과정을 적용하고 검증할 수 있는 프로그램을 개발하고자 하였다.

자료 및 방법

1. 강우입력자료

1분 강우자료는 기상청 기상자료개방포털(data.kma.go.kr)에 별도로 요청하여 1분 누적강우자료를 수집하였으며 1분 누적강우자료가 있는 지점이 많지 않고, 측정을 시작하지 얼마 되지 않은 곳이 많아 2002년부터 2015년까지의 데이터를 사용하였다. 전국 96개 지점의 자료를 구축하였으나 자료의 오차가 크고 결측이 많아 그 중 55개의 지점을 이용하였다. 자료처리를 위해 Python을 이용해 1분 누적강우를 1분단위로 변환하고 30분 간격으로 분리하였다.

2. 고도를 고려한 공간연강우분포도

본 연구의 최종목적으로 지형요인이 고려된 전국 강우침식인자의 공간분포도를 산정하기 위해서는 공간보간기법을 이용한 전국 연강우 공간분포도가 요구된다. 이를 위해, 역거리가중법(Inverse Distance Weights, IDW)을 사용하였다. 그러나 일반적인 IDW 공간기법의 사용은 미세측 지점의 강우 보간에 있어 지형(고도)요인을 고려하지 않게 된다.

고도에 따른 강수량의 변이는 강수시스템의 종류, 이동방향, 이동속도 등에 의해 결정되므로 시간대별로 정확한 양상을 예측하는 것은 사실상 불가능하다(Landsberg, 1958). 그러나 Yun *et al.*(1999)의 연구결과에 의하면, 연간 총강수량의 분포로부터 유추한 결과 산간지에서 고도 100m 상승에 따라 5% 정도씩 증가한다고 하였다. 이들 연구결과를 근거로 본 연구에서는 고도가 1,000m 상승 시 연평균강수량은 74% 증가율(Smith, 2008)을 적용하였는데, 이는 역으로 계산하면 고도 100m 상승에 따라 강수량이 5.7% 증가하는 것에 해당된다.

따라서 본 연구에서는 고도를 고려한 강우보간 기법의 적용을 위해 Jung *et al.*(2011)이 제안한

Lapse rate식을 다음 식(1)과 같이 적용하였다. 여기서, H_{DEM} 은 DEM(Digital Elevation Model)상의 고도, H_{Mean} 은 전국 평균고도를 나타낸다. DEM은 기본 지형입력자료 구축을 위하여 국토지리정보원의 1:5,000 수치지도로부터 ArcGIS를 이용하여 격자크기 1km의 DEM (Digital Elevation Model)을 제작하였다(그림 1).

$$Lapse\ rate = 1.056951^{\left(\frac{H_{DEM} - H_{Mean}}{100}\right)} \quad (1)$$

역거리가중법에 의한 공간내삽법은 관측점과의 거리역수에 가중치를 부여하는 방법으로 관측점과 인접한 점사이의 값은 유사성이 높은 반면 관측점과의 거리가 멀어질수록 유사성이 감소한다는 가정에 기초하며, 다른 보간 방법에 비해 알고리즘이 비교적 간단하다. 역거리가중법의 적용에서 가장 중요한 점은 관측지점에 대한 가중치를 계산하는 것이며 본 연구에서는 Jung *et al.*(2011)식을 사용하였다.

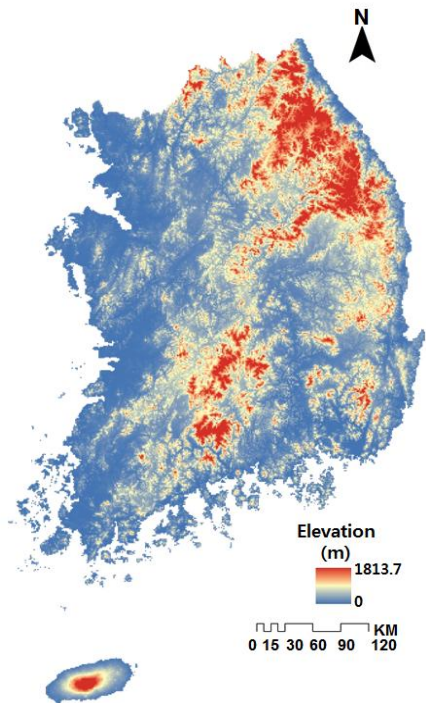


FIGURE 1. Distribution map of elevation by DEM

3. 강우침식인자 계산

기존 연구에서의 년 단위 강우침식인자를 산정하기 위한 강우사상 고려조건은 1회 강우량이 12.7mm 이상이고, 강우 간 간격이 6시간 이내일 때를 1회 강우사상, 6시간 이상일 때는 2회 강우사상으로 정의하였다. 만약 1회 강우량이 12.7mm 이하라면 15분 동안의 강수량을 따져 6.25mm 이상일 경우 1회 강우사상으로 고려하였다(Wischmeier and Smith, 1978). 강우침식인자는 1년 동안 강우사상별로 강우운동에너지의 합으로 계산되게 되는데 그 방법은 식(2), 식(3), 식(4)과 같다.

$$e = 210.3 + 89 \log(I) \quad (2)$$

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

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

여기서 e 와 E 는 각각 개별강우의 시간단위별 운동에너지 및 개별 강우사상별 운동에너지이며, 이를 구하기 위하여 시간단위 강우강도(I , cm/hr), 강우사상별 강우지속시간(t , hr) 값들이 요구된다. E 에 30분 최대 강우강도(I_{30} , cm · hr⁻¹) 값을 연간 합산하여 강우침식인자(R , 100 of MTF · m · cm · ha⁻¹ · hr⁻¹ · yr⁻¹)를 계산하였다. 단, 강우침식인자를 SI 단위(MJ · mm · ha⁻¹ · hr⁻¹ · yr⁻¹)로 환산하기 위해서는 9.808을 곱하였다.

강우침식인자를 계산 한 후 연강우량과의 상관성을 분석하기 위해 연도별 강우침식인자와 연강우량 값을 이용하여 선형회귀분석을 실시하여 지점별 회귀식을 산정하였다. 선형회귀분석은 python의 scipy, numpy, matplotlib을 통해 계산하였으며 이때 96개 지점중 상관성이 적고 값의 편차가 큰 지점을 제외한 55개 지점을 선정하였다.

결과 및 고찰

1. 강우침식인자 산정

강우침식인자 산정을 위하여 2002년부터 2015년까지(14년간)의 55개 주요 기상청 관측소의 1분당 강우정보를 구축하고 이를 프로그래밍하여 계산하였다. 그림 2는 연도별 강우량 변화와 연도별 산정된 강우침식인자 값의 변화를 도시한 것이다. 본 연구에서 사용된 14년간 55개 지점의 연도별 평균 강우량을 분석한 결과 997.9~1,896.6mm · yr⁻¹으로 연도별 표준편차 255.1mm · yr⁻¹으로 매우 큰 것을 알 수 있었다. 특히 2008년의 경우 연도별 표준편차가 368.6mm · yr⁻¹으로 편차가 더욱 심하게 나타났다. 거제지점의 강우침식인자의 최댓값은 10,224.9MJ · mm · ha⁻¹ · yr⁻¹ · hr⁻¹으로 전 지점 평균 강우침식인자 값에 비해 매우 높게 나타났다. 우리나라 평균 강우침식인자는 3,812MJ · mm · ha⁻¹ · yr⁻¹ · hr⁻¹으로 나타났다. 이는 1973~1996년 기상자료로 분석한 기존 우리나라 평균 강우침식인자 4,276MJ · mm · ha⁻¹ · yr⁻¹ · hr⁻¹(Jung *et al.*, 2005)와 21개 지점의 1980~1999년(20년) 기상자료를 이용하여 분석된 평균 5,442~6,721 MJ · mm · ha⁻¹ · yr⁻¹ · hr⁻¹(Lee *et al.*, 2011)값들과는 차이를 나타냈다(표 1). 이러한 차이는 강우침식인자 산정 시 분석에 이용된 지점의 차이, 강우자료 시간스케일 차이에 따른 강우사상의 길이, 분석기간의 상이함, 그리고 강우운동에너지 회귀식의 차이 때문으로 판단된다.

지역별 계산된 값을 살펴보면 강우침식인자 최댓값을 보인 지역은 거제(294)로 10,224.9MJ · mm · ha⁻¹ · yr⁻¹ · hr⁻¹이었으며, 제주도를 제외한 내륙지역에서는 거제(294)>산청(289)>강화(201)순이었다. 최소값은 추풍령(135)으로 1,826.5 MJ · mm · ha⁻¹ · yr⁻¹ · hr⁻¹으로 계산되었으며, 추풍령(135)<대전(133)<고산(185)순으로 낮은 강우침식인자 값을 보였다. 따라서, 산정결과를 토대로 내륙지역의 강우침식인자 값보다 해안지역의 강우침식인자 값이 높게 추정됨을 알 수 있다.

TABLE 1. Annual mean R factor from 2002 to 2015

Location	Code	R factor	Location	Code	R factor
Gangreung	105	2,666.5	Injae	211	3,368.4
Donghae	106	4,701.4	Hongcheon	212	5,251.1
Seoul	108	2,588.9	Taebaek	216	3,139.5
Incheon	112	2,082.3	Jecheon	221	5,536.0
Wonju	114	4,735.9	Boeun	226	2,878.1
Youngwol	121	3,498.4	Cheonan	232	2,348.7
Chungju	127	3,061.0	Boryung	235	2,618.5
Uljin	130	2,664.8	Buyeo	236	6,230.7
Chungju	131	5,689.3	Geumsan	238	2,939.3
Daejeon	133	1,840.3	Buan	243	2,157.5
Chupungryeong	135	1,826.5	Namwon	247	3,309.0
Andong	136	2,008.1	Jangsoo	248	5,475.7
Pohang	138	1,999.8	Goheung	262	4,160.6
Gunsan	140	3,119.2	Youngju	272	3,534.2
Daegu	143	2,904.0	Mungyeong	273	2,648.4
Jeonju	146	2,619.2	Yeongdeok	277	2,804.6
Ulsan	152	2,625.2	Uiseong	278	2,121.8
Changwon	155	5,676.6	Gumi	279	3,570.9
Busan	159	6,108.4	Yeongcheon	281	2,329.2
Tongyoung	162	3,225.8	Geochang	284	3,742.8
Wando	170	3,736.8	Hapcheon	285	4,494.2
Jeju	184	5,607.2	Sancheong	289	9,888.8
Gosan	185	1,879.2	Geoje	294	10,224.8
Seogui	189	6,299.6	Namhae	295	7,823.1
Jinju	192	4,262.7	Sokcho	90	2,925.6
Ganghwa	201	8,510.7	Cheolwon	95	6,843.0
Yangpyung	202	3,208.0	Dongducheon	98	8,311.3
Icheon	203	2,951.9			

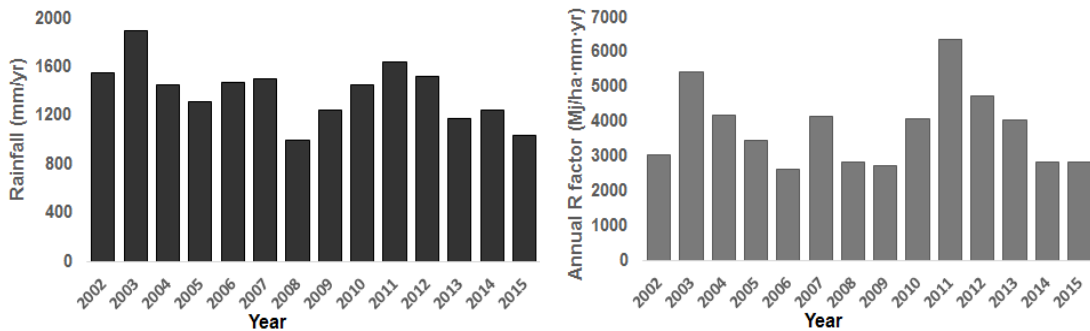


FIGURE 2. Annual mean rainfall and R factor of 55 sites from 2002 to 2015

2. 연평균 강우량을 고려한 강우침식인자 회귀식 선정

본 연구에서는 기존연구에서 선정된 연 강우량을 이용한 경험식 중에 국내·외에서 많이 인용되고 있는 Jung *et al.*(1983), Park *et al.*(2000)의 연구결과에 대한 회귀식과 선행 연구된 122개 자료로부터 도출한 회귀식을 비교 검토하였다. 표 2는 본 연구에서 사용한 강우침식인자 회귀식을 나타낸 것이다. 특히, 유역의 수문학적 동질성을 고려하여 우리나라를 7개 유역으로 구분한 Lee *et al.*(2011)의 연구결과와 비교하기 위해 국내 5대강권역별로 유역의 수문학적 동질성을 고려하여 강우침식도와 연평균강수량에 대한 회귀식과 R^2 (coefficient of determination)를 표 2와 같이 유역별로 유도하였다. 그 결과 구축된 자료로부터 선정된 연도별 R값과 회귀식과의 상관성(R^2)은 본 연구

에서 가장 높게 나타났다.

1) 기존 강우침식인자와의 비교

강우침식인자를 선정하고 연강우량과 비교하여 경험식을 선정하는 연구는 국내에서도 활발히 진행되어 왔다. 그러나 총강우량, 강우강도, 지속시간 등의 조건들은 연대별로 조금씩 다르며 2000년대 후반으로 갈수록 기후변화로 인한 영향으로 극한강우사상의 증가와 극한가뭄의 발생으로 인한 강우패턴이 이전과는 큰 차이를 나타나게 된다. 따라서 기존 연구에서 선정된 경험식은 현재 강우조건에 적용하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 연대별로 선정된 기존 경험식과 본 연구에서 2000년대 후반 강우조건으로 선정된 경험식 결과의 차이를 비교하고 적용성을 평가하고자 하였다.

표 3은 1분 실측 강우자료로부터 위에 실제 R값 선정공식을 이용하여 순서대로 계산된 강

TABLE 2. Study on estimation of R factor

Researcher	Equation	R^2
Jung <i>et al.</i> (1983)	$R = 0.503 \times P - 202$	0.49
Park <i>et al.</i> (2000)	$R = 0.641 \times P - 355$	0.70
	Total : $R = 0.535 \times P - 230.325$	0.67
	Han river : $R = 0.923 \times P - 644.120$	0.76
	Nakdong river: $R = 0.535 \times P - 266.794$	0.84
Lee <i>et al.</i> (2011)	Geum river : $R = 1.087 \times P - 818.111$	0.62
	Yeongsan river, Seomjin river : $R = 0.428 \times P - 107.951$	0.78
	South coast : $R = 0.727 \times P - 476.534$	0.80
	East coast : $R = 0.440 \times P - 226.131$	0.66
	Total : $R = 0.612 \times P - 405.24$	0.56
	Han river : $R = 0.5541 \times P - 316.4$	0.71
This study(2016)	Nakdong river : $R = 0.575 \times P - 315.6$	0.79
	Geum river : $R = 0.439 \times P - 262.4$	0.65
	Yeongsan river, Seomjin river : $R = 0.432 \times P - 212.9$	0.62
	Jeju do : $R = 0.565 \times P - 381.2$	0.85

TABLE 3. The difference of R factor between this study and previous study results

Basin	Annual R factor($107J \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)				Difference($107J \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)		
	Obs.	Heo	Park	This study	Heo	Park	This study
Han river	441.9	585.1	498.8	421.6	-143.3	-56.9	20.3
Geum river	265.8	504.3	424.8	271.7	-238.6	-159.1	-5.9
Nakdong river	462.0	438.7	490.3	441.3	23.3	-28.2	20.7
Seomjin and Yeongsan river	404.6	533.2	605.3	434.3	-128.6	-200.7	-29.7
Jeju do	532.6	699.5	681.9	532.8	-166.9	-149.3	-0.2

우침식인자를 실측 강우침식인자(Obs.)로 가정하여 Lee *et al.*(2011)과 Park *et al.*(2000)의 결과와 본 연구에서 산정된 경험식 결과를 비교하여 나타내었다. 세 가지 경험식으로부터 산정된 강우침식인자와 실측 강우침식인자의 차이를 비교하여 과대 및 과소평가되는지를 평가하였고 NSE(Nash and Sutcliffe Efficiency)

를 계산하여 정확성 및 경험식의 효율을 비교하여 적용성을 평가하였다. 실측 강우침식인자로 가정한 Obs.와 비교한 NSE 결과 본 연구결과는 0.69로 나타났으며 기존 연구에서는 각각 0.63, 0.59로 나타났다.

강우침식인자의 분포집중정도를 파악하기 위해 각각의 회귀식 결과를 정규분포화하여 분석

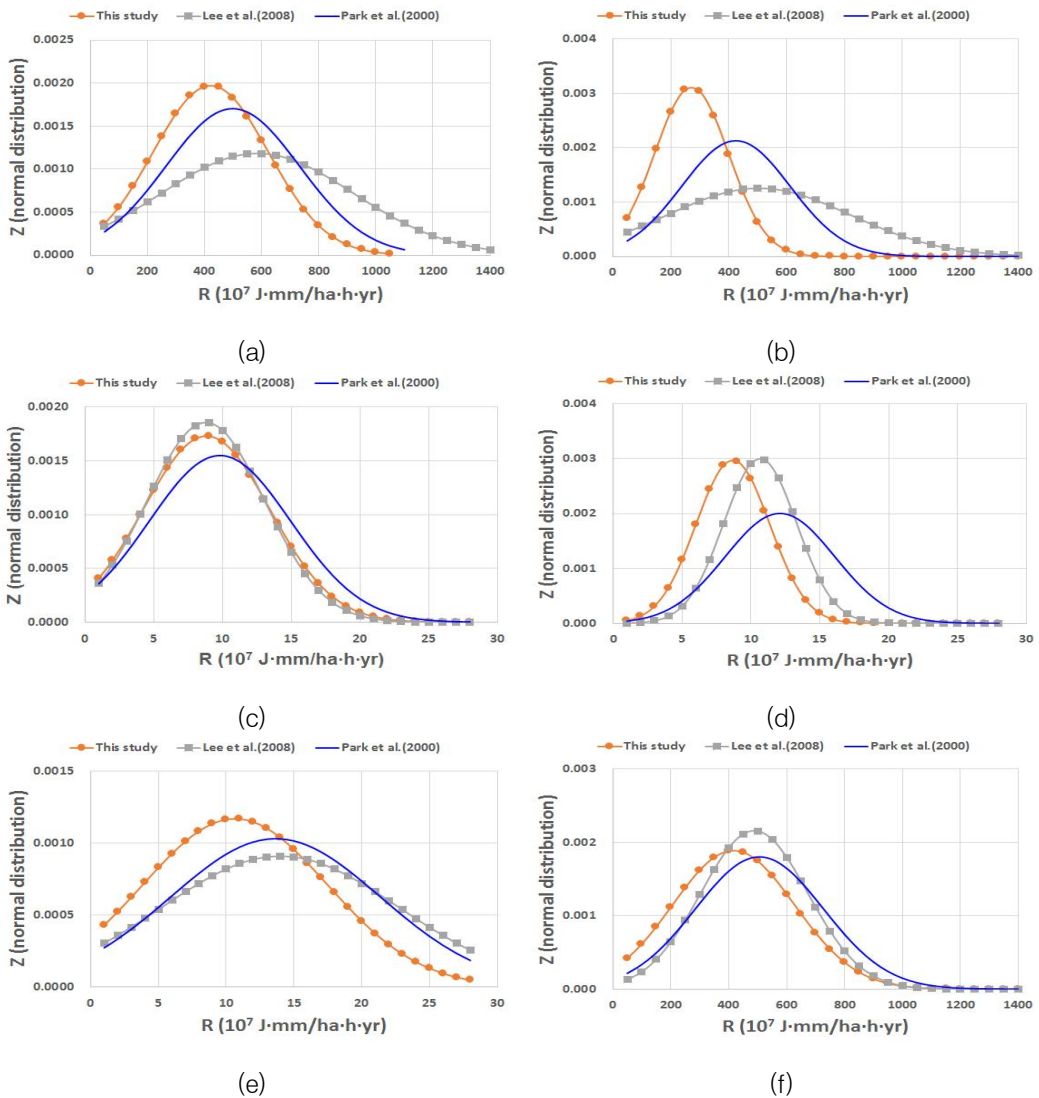


FIGURE 3. The normal distribution graph of R factor about each study results: (a) Han river, (b) Geum river, (c) Nakdong river, (d) Seomjin and Yeongsan river, (e) Jeju-do, and (f) total basins

하였다(그림 3). 모든 R값의 분포가 각각의 권역별로 다른 산포도 및 경향을 나타냈다. 전국을 비교하였을 경우 기존연구에서의 결과는 본 연구에서 산정한 결과에 비해 과다 추정됨을 알 수 있다. 본 연구결과의 R값이 기존 두 연구결과보다 평균 R값이 낮게 나타났고 8,000 MJ·mm·ha⁻¹·yr⁻¹·hr⁻¹ 이상의 높은 R값을 나타내는 빈도수가 줄어들었다. 반면에 R값의 산포도가 커짐으로 R값이 높은 지역과 낮은 지역의 차이가 기존연구 결과보다 크게 나타남을 알 수 있다.

2) 1시간 강우강도로부터 30분 강우강도 추정

본 연구에서는 강우침식인자를 산정하기 위해서 1분 강우자료를 사용하였다. 1분 강우자료는 자료기간이 짧고 자료를 구축하는데 많은 시간이 요구된다. 따라서 기존연구에서는 지점별로 얻기 쉬운 1시간 강우자료를 이용하여 30분 최대 강우강도를 추정하는 연구들을 진행해왔다. 본 연구에서는 강우침식인자를 산정하기 위한 프로그램 개발을 최종목적으로 1시간 강우자료를 취득할 경우 1시간 강우자료를 이용하여 1분 강우자료의 30분 최대강우강도를 가장 근접하게 추정할 수 있는 연구를 추가적으로 수행하였다.

기존 1분 강우자료를 취득한 동일한 연구기

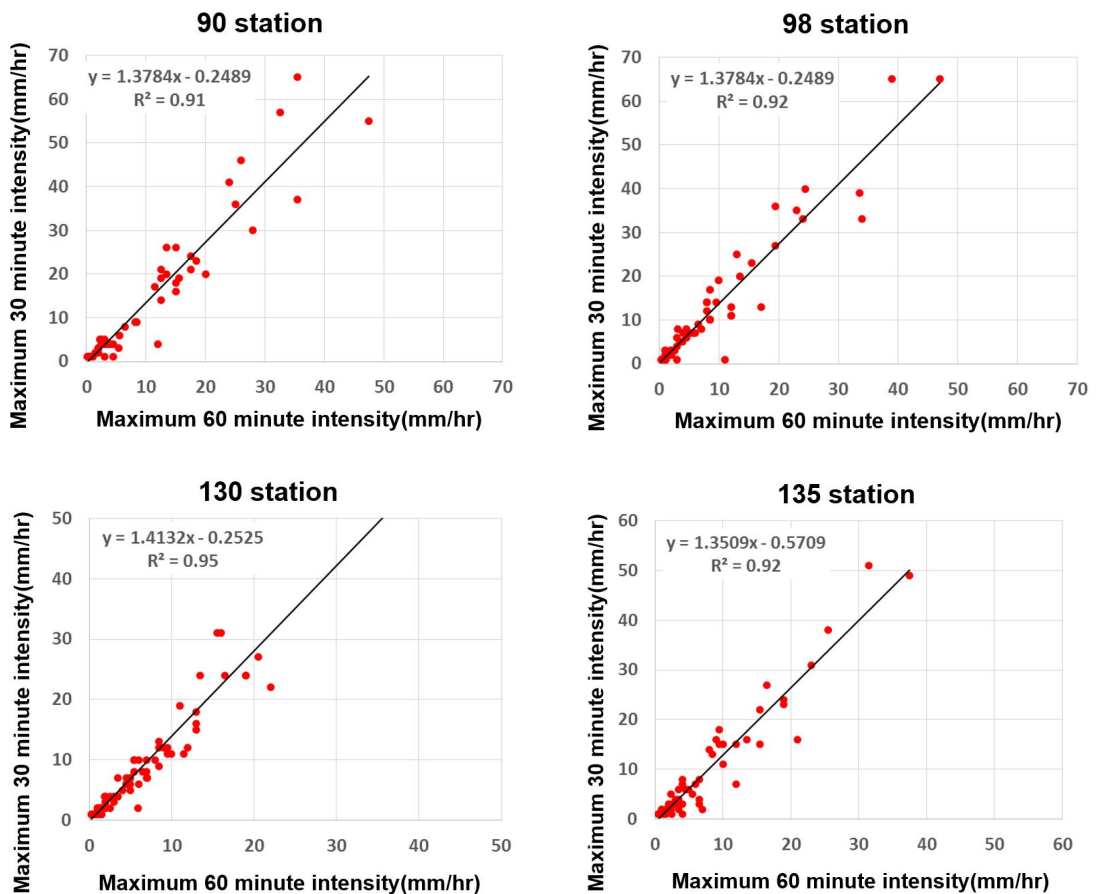


FIGURE 4. The correlation of 30 minute intensity between 1 minute rainfall data and 1 hour rainfall data

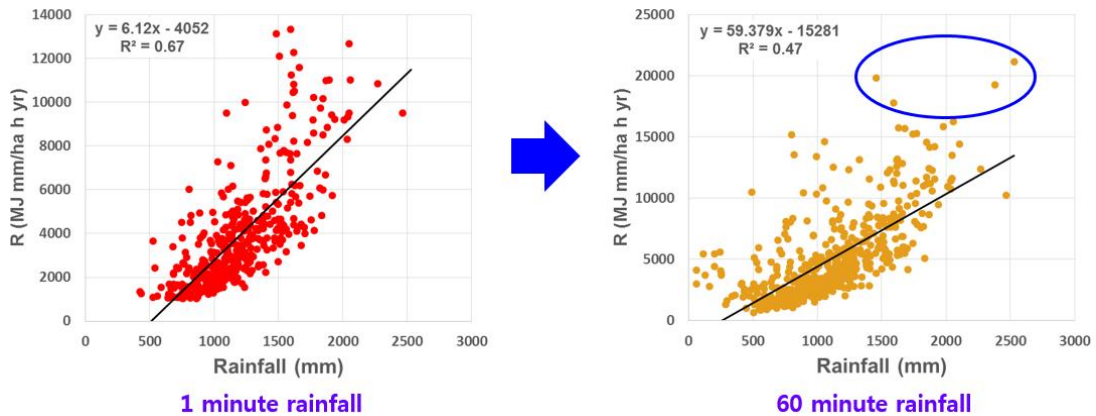


FIGURE 5. The correlation of R factor between 1 minute rainfall data and 1hour rainfall data

간 및 동일지점에 대해서 1시간 강우자료를 구축하고 지점별로 강우사상별 1시간 최대강우강도와 1분 자료를 합쳐서 만든 30분 최대강우강도와와의 상관관계를 분석하였다. 그 결과 1시간 최대 강우강도로부터 30분 최대강우강도를 추정할 수 있는 평균 경험식을 전국 55개 주요 지점별로 구축하였으며 R^2 는 0.85~0.95의 높은 상관성을 나타냈다. 상관성이 높은 주요 4개 지점의 경험식을 다음 그림 4와 같이 나타냈다. 1시간 최대강우강도 추정 경험식으로부터 산정된 30분 최대강우강도를 적용하여 전국 강우침식인자를 계산한 결과 다음 그림 5의 결과에서처럼 1분 강우자료를 이용한 결과보다 R^2 가 약 0.2 감소함을 나타냈다.

3. 고도를 고려한 IDW 적용

지형 및 지리적 요소를 적용한 전국 공간 강우량을 산정하기 위해 전국 지점별 강우자료로부터 IDW 보간기법을 적용하였다. 고도를 고려한 전국 연강우 자료 분포도 추정순서는 다음 아래와 같다.

첫째, IDW는 ArcGIS 프로그램을 이용하여 일반적인 연강우 분포도를 산정하였다. 이때, 각각 관측지점의 강우량 값은 강우량 관측소 고도가 고려된 측정값으로서 고도가 평균고도와 같아질 때의 조건으로 가정하여 강우량을

추정하여 공간분포도를 산정하였다.

둘째, 전국 DEM으로부터 GIS 프로그램을 이용하여 전국 평균 고도를 산정하고 평균고도와 식(1)을 이용하여 전국 Lapse rate 분포도를 작성하였다.

마지막으로 1번으로부터 산정된 전국 강우공간분포도에 2번에서 산정된 전국 Lapse rate 분포도를 곱하여 최종적으로 고도를 고려한 전국 연강우 공간분포도를 구축하였다.

고도를 적용하기 전을 기준으로 고도 적용한 후의 연강우량의 변화를 살펴보면, 전국적으로 평균 9.6%의 증감율을 보였다. 전반적으로 강우량이 상류로 갈수록 증가하고, 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 고도 적용전 공간분포와 비교하여 고도가 높을수록 증가하고 고도가 낮아질수록 감소하는 지형조건을 반영하는 경향을 보였다.

고도를 고려한 공간 강우침식인자 산정하기 위해 지점별로 산정된 회귀분석 계수를 Lee and Won(2013)의 기존연구에서 사용하여 검증된 IDW 보간기법을 ArcGIS tool을 이용하여 공간 강우침식인자 회귀식을 산정하였다. 공간 강우침식인자 산정 순서로 첫 번째로 지점별로 분석한 강우침식인자 회귀식의 매개변수를 IDW를 이용하여 공간적으로 분포시켜 매개변수 공간분포도를 작성하였다. 두 번째로 첫 번째 단

계에서 산정된 매개변수 공간분포도와 고도를 적용한 공간강우분포도를 ArcGIS를 이용하여 산술적으로 계산하여 최종적으로 고도 적용전 및 적용후 강우침식인자 분포도를 산정하였다.

산정된 공간강우침식인자 회귀식과 고도 고려 후 연강우 분포도를 이용하여 최종 공간 강우침식인자를 산정하였다(그림 6). 강우침식인자 분포도는 높은 연도와 낮은 연도의 파악이

가능하며 지역별로 강우침식인자가 높게 나타나는 지역을 분석할 수 있다. 2002년~2015년 중 총 강우량 및 강우사상이 많았던 2003년과 2010년, 2011년의 강우침식인자 값이 크게 나타났으며 극심한 가뭄으로 인해 2008년~2009년, 2014년~2015년의 연강우량 및 강우사상 빈도가 줄어들고 강우침식인자 값이 작게 나타나게 된다. 고도를 적용한 후의 연도별 강우침

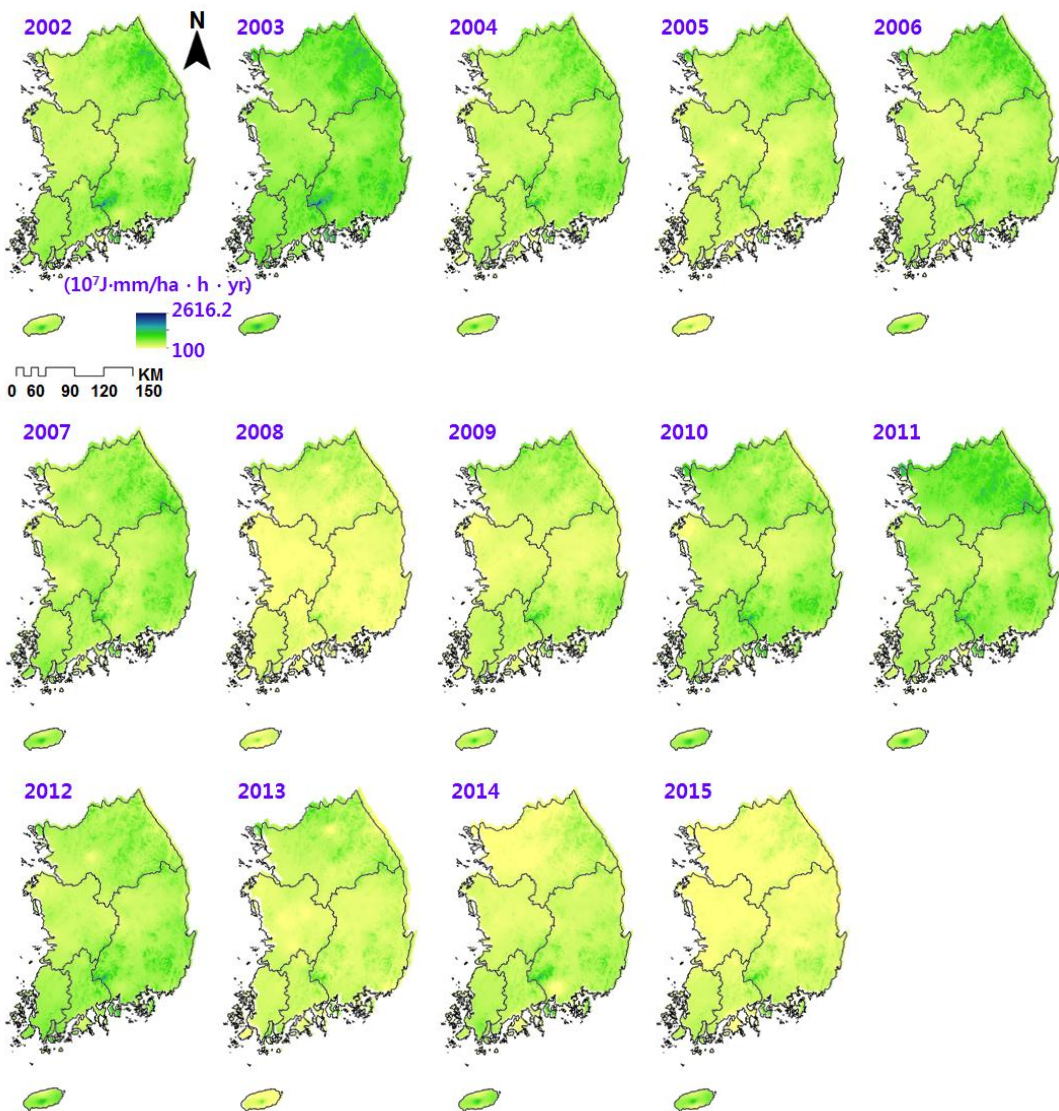


FIGURE 6. The distribution map of R factor after applying lapse rate

식인자의 최대 및 최소값은 $100.0 \sim 3,216.6$ ($107J \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1} \cdot hr^{-1}$)이고 연도별 전국 평균값은 $181.9 \sim 751.6$ ($107J \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1} \cdot hr^{-1}$)이며 고도를 적용하기 전의 연도별 강우침식인자의 최대 및 최소값은 $200.0 \sim 1,500$ ($107J \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1} \cdot hr^{-1}$)이고 연도별 전국 평균값은 $118.0 \sim 647.4$ 로 고도를 적용한 후의 강우침식인자가 평균 21.0% 증가율을 나타냈다. 고도에 따른 강우침식인자를 평가하기 위해 전국 고도의 범위를 최저고도(0m 이상~300m 미만), 저고도(300m 이상~700m 미만), 중고도(700m 이상~1,100m 미만), 최고도(1,100m 이상)로 구분하여 고도범위별 해당하는 2002~2015년까지의 전국 평균 강우침식인자값을 추출하였다. 그 결과 각각의 범위에서 전국 평균 강우침식인자는 각각 371.9, 514.4, 739.3, 1,050.1 ($107J \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1} \cdot hr^{-1}$)로 나타났으며 각각의 최저고도로부터 저고도, 중고도, 최고도로 고도가 증가함으로써 강우침식인자는 각각 38.3, 43.7, 42.0% 증가하는 것을 보였다.

고도를 적용하기 전 연도별 강우침식인자의 결과는 고도가 모두 같다고 가정한 조건에서의

강우침식인자의 분포로 강우가 많이 나타나는 지점에서의 동심원의 형태로 높은 분포를 나타내며 동심원으로부터 거리가 멀어질수록 계속 작아지는 경향을 나타낸다. 이는, 강우침식인자의 값이 일정하게 뭉쳐서 높게 또는 낮게 나타나고 인접한 지역에서도 지역별로 구분되어 강우침식인자의 높고 낮음을 나타내는데 어려움이 있다. 그러나, 고도를 적용한 연도별 강우침식인자의 공간분포는 강우침식인자가 높은 지역이 뭉쳐져서 나타내지 않고 각각의 지형 특징별로 다른 분포를 나타낸다고 볼 수 있다.

4. 강우침식인자 추정 프로그램 구현

본 연구에서는 python GUI tool(designer)를 이용해 기상청으로부터 수집한 데이터를 별다른 처리 없이 강우침식인자를 산정 할 수 있도록 하는 자동 프로그램을 개발하였다(그림 7). 본 연구를 진행하면서 사용되었던 GIS 자료처리, 공간분석에 따른 회귀식 분석, 공간보간 기법 적용 등의 R값 산정을 위한 프로그램을 구현하고자 하였다.

총 4 단계로 프로그램이 설계되었으며 1단계로 강우자료의 입력시간단위를 선택한다. 다음

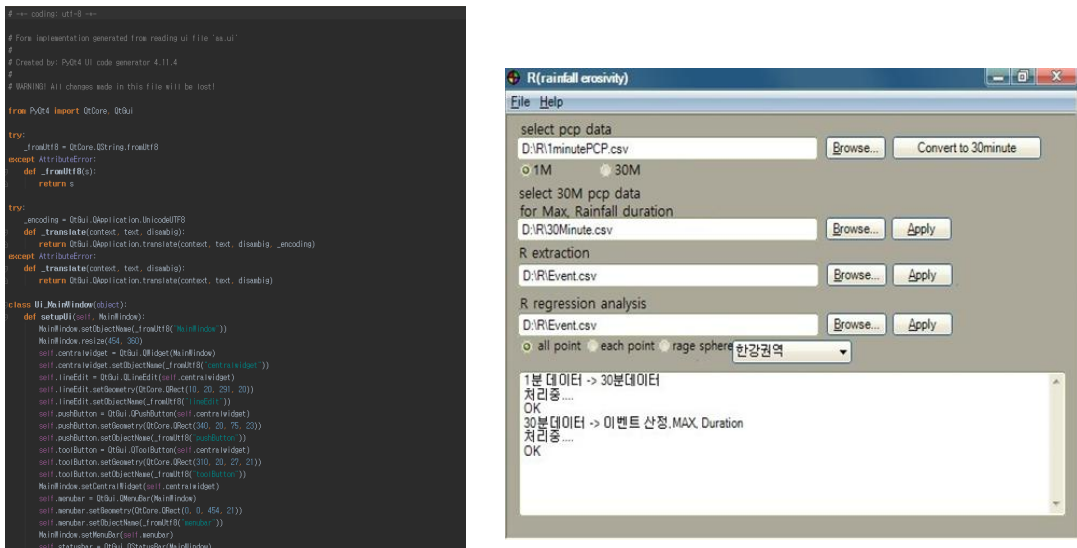


FIGURE 7. The estimation program of R factor based on 1 minute and 1 hour rainfall data

단계는 입력된 강우자료로부터 연도별 강우사상을 선정한다. 선정된 강우사상으로부터 30분 강우강도를 선정하고 지점별 R값을 계산한다. 1분 강우자료의 경우 R을 계산공식에 따라 30분 최대강우강도가 계산되어지며 1시간 강우자료를 사용할 경우 본 연구에서 산정한 지점별 30분 강우자료 추정 회귀식을 이용하여 30분 최대강우강도를 계산한다. 마지막 단계는 연강우량과 R값의 상관분석을 위해 관측된 강우량과 R값을 이용해 전지역, 권역, 지점별로 선형 회귀 회귀식을 산정한다. 본 프로그램은 처리과정(30분 강우강도, 이벤트 선정, R값 선정) 중간에 산출된 데이터들을 확인하고 수정할 수 있어 계산상의 오차 및 입력자료로 인한 오차를 줄일 수 있다.

요약 및 결론

강우침식인자 산정을 위하여 2002년부터 2015년까지(14년) 55개 주요 기상청 관측소의 1분당 강우정보를 구축하고 이를 프로그램화하여 관측지점마다 R값을 산정하였다. 또한, 지점별로 연강우량과의 선형 회귀분석을 이용해 높은 상관관계를 갖는 R 추정 회귀식을 산정하였으며 권역별로 구분하여 회귀식을 표준화하였다. 또한, 지형요인이 고려된 공간 강우침식인자를 산정하기 위해 고도를 고려한 강우분포기법을 적용하여 결과를 분석하였다. 그 결과 이전연구들과 비교하여 정확도(R^2 , NSE)가 향상됨을 보였고 연대별로 회귀식이 변하는 것을 알 수 있었다. 이는, 연대별로 강우강도 및 강우패턴의 변화가 강우침식인자의 영향을 미쳐 강우침식인자 회귀식이 달라지는 것으로 매년 최신의 경험식으로 강우침식인자의 전국 공간분포가 필요로 하게 되면 전국 강우침식인자 공간분포를 산정할 때, 고도를 고려한 공간 강우침식인자가 요구된다.

본 연구에서 사용되는 1분 강우자료의 구축은 매우 제한적이다. 전국 장기간의 강우자료 구축은 매우 어렵고 구축에 필요한 시간 또한 오래 걸린다. 이를 해결하기 위해 1시간 강우자

료로부터 30분 최대 강우강도 추정 방법을 평가하고 제안하였다. 강우침식인자의 공간분포 결과는 고도를 적용한 후의 연도별 강우침식인자의 최대 및 최소값은 $100.0 \sim 3,216.6 (107J \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1} \cdot hr^{-1})$ 이고 연도별 전국 평균값은 $181.9 \sim 751.6 (107J \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1} \cdot hr^{-1})$ 이며 고도를 적용하기 전의 연도별 강우침식인자의 최대 및 최소값은 $200.0 \sim 1,500 (107J \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1} \cdot hr^{-1})$ 이고 연도별 전국 평균값은 $118.0 \sim 647.4$ 로 고도를 적용한 후의 강우침식인자가 평균 21.0% 증가율을 나타냈다. 고도에 따른 강우침식인자를 평가하기 위해 전국 고도의 범위를 최저고도(0m 이상~300m 미만), 저고도(300m 이상~700m 미만), 중고도(700m 이상~1,100m 미만), 최고고도(1,100m 이상)로 구분하여 고도범위별 해당하는 2002~2015년까지의 전국 평균 강우침식인자 값을 추출하였다. 그 결과 각각의 범위에서 전국 평균 강우침식인자는 각각 371.9, 514.4, 739.3, 1,050.1($107J \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1} \cdot hr^{-1}$)로 나타났으며 각각의 최저고도로부터 저고도, 중고도, 최고도로 고도가 증가함으로써 강우침식인자는 각각 38.3, 43.7, 42.0% 증가하는 것을 보였다.

본 연구에서 개발한 프로그램은 본 연구결과를 모두 반영한 프로그램으로 1분 강우자료로부터 지점별 R 추정 경험식과 지점별로 1시간 강우자료로부터 30분 최대강우강도 회귀식을 추가함으로써 1시간 강우자료를 이용하여 R값을 산정할 수 있도록 프로그램을 구현하였다. 결론적으로 1분 강우자료로부터 매년 최신 R값을 산정하며 1분 강우자료 구축이 어려운 경우 1시간 강우자료로부터 간단하게 R값을 산정할 수 있도록 본 프로그램을 개발하였으며 장기 토양침식을 추정할 때 최신의 R값의 이용할 수 있도록 본 프로그램을 제공하고자 하였다. 또한, 고도를 고려한 R값의 산정은 기상 및 토양학적 관점에서의 기존 결과로부터 지리정보학적 관점에서의 물리적인 결과를 추가함으로써 수문분야에서 융합 공간정보자료로 널리 사용될 것으로 기대된다. 추가 연구내용으로 1시

간 강우 및 1분 강우 자료에 대한 오차원인 분석과 다양한 강우사상 선정 방법을 적용하여 R 값을 비교 및 평가하여 본 프로그램의 활용성을 다양하게 검증하고자 한다. **KAGIS**

REFERENCES

- Cho, H.L. and J.C. Jeong. 2006. Application of spatial interpolation to rainfall data. *The Journal of GIS Association of Korea* 14(1):29-41 (조홍래, 정중철. 2006. 강우자료에 대한 공간보간 기법의 적용. *한국공간정보학회지* 14(1): 29-41).
- Goodale C.L., J.D. Aber, and S.V. Ollinger. 1998. Mapping monthly precipitation, temperature, and solar radiation for Ireland with polynomial regression and a digital elevation model. *Climate Research* 10(1):35-49.
- Jung, H., H.J. Shin, J.Y. Park, I.K. Jung, and S.J. Kim. 2011. A study of spatial interpolation impact on large watershed rainfall considering elevation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(6):23-29 (정혁, 신형진, 박종윤, 정인균, 김성준. 2011. 고도를 고려한 공간보간기법이 대우역 강우량 산정시 미치는 영향 연구, *한국농공학회 논문집* 53(6): 23-29).
- Jung, K.H., Y.K. Sonn, S.Y. Hong, S.O. Hur, and S.K. Ha. 2005. Assessment of national soil loss and potential erosion area using the digital detailed soil maps. *Korean Journal Society of Soil Science and Fertilizer* 38(2):59-65 (정강호, 손연규, 홍석영, 허승오, 하상진. 2005. 수치 정밀토양도를 이용한 전국 토양 유실량의 평가 및 침식 위험지역의 분석. *한국토양비료학회지* 38(2):59-65).
- Jung, P.K., M.H. Ko, J.N. Im, K.T. Um, and D.U. Choi. 1983. Rainfall Erosion factor for estimationg Soil Loss. *Korean Journal Society of Soil Science and Fertilizer* 16(2):112-118 (정필균, 고문환, 임정남, 윤기대, 최대웅. 1983. 토양유실량 여측을 위한 강우인자의 분석. *한국토양비료학회지* 16(2):112-118).
- Kim, J.H., K.T. Kim, and G.B. Yeon. 2003. Analysis of soil erosion hazard zone using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 6(2):22-32 (김주훈, 김경탁, 연규방. 2003. GIS를 이용한 토양침식 위험지역 분석. *한국지리정보학회지* 6(2):22-32).
- Kim, S.B., H.J. Shin, J.W. Lee, Y.S. Yu, and S.J. Kim. 2011. Mapping technique for heavy snowfall distribution using Terra MODIS images and ground measured snowfall data. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(4):33-43 (김셋별, 신형진, 이지완, 유영석, 김성준. 2011. Terra MODIS 영상과 지상 적설심 자료를 이용한 적설분포도 구축기법 연구. *한국지리정보학회지* 14(4): 33-43).
- Landsberg, H. 1958. *Physical climatology* (2nd edition). Gray Printing Co, Pennsylvania. p.446.
- Lee, G.S., Y.R. Jang, and G.S. Cho. 2003. The analysis of optimum resolution with different scale of soil map for the calculation of soil loss. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 6(3):1-10 (이근상, 장영률, 조기성. 2003. 토양침식량 산정에서 토양도 축적에 따른 적정 해상도 분석에 관한 연구. *한국지리정보학회지* 6(2):1-10).

- Lee, J.H. and I.K. Jeon. 1994. A rainfall forecasting model for the ungaged point of meteorological data. *The Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 14(2):307-316 (이재형, 전일권. 1994. 기상 자료 미계측 지점의 강우 예보 모형. *대한토목학회 논문집* 14(2):307-316).
- Lee, J.H., J.W. Shin, and J.H. Heo. 2011. Evaluation of rainfall erosivity in Korea using different kinetic energy equations. *Korean Journal Society of Soil Science and Fertilizer* 44(3):337-343 (이준학, 신주영, 허준행. 2011. 강우 운동에너지식에 따른 한국의 강우침식인자 평가. *한국토양비료학회지* 44(3): 337-343).
- Lee, J.S. and J.Y. Won. 2013. Analysis of the characteristic of monthly rainfall erosivity in Korea with derivation of rainfall energy equation. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 13(3):177-184 (이중설, 원진영. 2013. 강우에너지식 유도도를 통한 전국 월별 강우침식인자 특성 분석. *한국방재학회 논문집* 13(3):177-184).
- 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 (노재경, 권숙국. 1984. 강우특성을 이용한 강우에너지 산정에 관한 연구. *서울대농학연구지* 9(2):23-31).
- Park, C.W., Y.K. Sonn, B.K. Hyun, K.C. Song, H.C. Chun, Y.H. Moon, and S.G. Yun. 2011. The re-determination of USLE rainfall erosion factor for estimation of soil loss at Korea. *Korean Journal Society of Soil Science and Fertilizer* 44(6):977-982 (박찬원, 손연규, 현병근, 송관철, 전현정, 문용희, 윤순강. 2011. 토양유실량 예측을 위한 강우침식인자 재산정. *한국토양비료학회지* 44(6):977-982).
- 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 Korea Water Resources Association* 33(5): 603-610. (박정환, 우효섭, 편종근, 김광일. 2000. 토양유실공식의 강우침식도 분포에 관한 연구. *한국수자원학회 논문집* 33(5):603-610).
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA (United States Department of Agriculture), Agricultural research service, Agriculture handbook number 703. pp.24-26.
- Shin, J.S., M.H. Ko, and J.N. Im. 1983. Rainfall erosion factor for analyzing soil loss. *Korean Journal Society of Soil Science and Fertilizer* 16(2):106-111 (신재성, 고문환, 임정남. 1983. 토양유실량 예측을 위한 강우인자의 추정. *한국토양비료학회지* 16(2):106-111).
- Smith, C.D. 2008. Cold region atmospheric and hydrologic Studies, chapter 10: the relationship between monthly precipitation and elevation in the Alberta foothills during the foothills orographic precipitation experiment. pp.167-185.
- Wischmeier, W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Proceeding of Soil Science Society of America* 23(3):246-249.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion lossers: a guide to conservation planning. USDA (United States Department of Agriculture), Agricultural research service, Agriculture handbook number 537. pp.40-47.

Yun, J.I., D.S. Yi, J.Y. Choi, S.I. Cho, E.W. Park, and H. Hwang. 1999. Elevation-

corrected spatial interpolation for near-real time generation of meteorological surfaces from point observations. The Korean Society of Agricultural Information Science 1(1):28-33 (윤진일, 이동석, 최재연, 조성인, 박은우, 황현. 1999. 고도보정 공간내삽에 의한 전국의 1km² 단위 기상상황 추정. 농업정보과학 1(1):28-33). 