강우에너지식 유도를 통한 전국 월별 강우침식인자 특성 분석

Analysis of the Characteristic of Monthly Rainfall Erosivity in Korea with Derivation of Rainfall Energy Equation

이종설* · 원진영**

Lee, Jong Seol · Won, Jin Young

Abstract

The Rainfall kinetic energy equation derived in United States has been used or the result of rainfall erosivity factor using this equation has been applied for soil erosion estimation in the field. But the rainfall energy equation depends on the characteristic of observed location. So, in this study the correlation equation between rainfall intensity and rainfall energy was proposed using rain-drop distribution data measured at Daegwanryeong observatory. Also monthly rainfall erosivity factors of 76 observatories were estimated with different rainfall energy equation considering the seasonal rainfall characteristic. And the monthly rainfall erosivity factor maps were conducted using the values of rainfall erosivity factors for the estimation of monthly soil erosion.

Key words : Rainfall erosivity factor, Rainfall kinetic energy, Monthly soil erosion, Rainfall erosivity map

요 지

현재 실무에서는 토양침식량 산정 시, 미국에서 개발된 강우에너지식을 사용하여 강우침식인자를 계산하거나, 이 식을 이용한 강우침식인자 산정 결과를 적용하고 있다. 그러나 관측지역의 기후적·지리적 특성 및 분석 조건에 따라 강우에너지식은 상당한 차이를 보일 수 있으므로, 본 연구에서는 대관령 지점의 강우입경분포 자료를 이용하여 강우강도와 강우에너지의 상관관계식을 제안하였다. 제안된 식은 국내외에서 주로 사용되는 강우에너지식과 비교하였으며, 관측데이터를 이용하여 그 적용성을 검증하였다. 또한 계절에 따라 강우침식능에 영향을 줄 수 있는 강우특성이 달라짐에 착안하여 강우에너지식에 따른 전국 76개 관측소의 월별 강우침식인자를 산정하였고, 이를 이용하여 월별 토양침식량 산정을 위한 등강우침식도를 제시하였다.

핵심용어 : 강우침식인자, 강우에너지, 월별 토양침식량, 등강우침식도

1. 서 론

우리나라는 국토의 73%가 7° 이상의 경사지로 되어 있고, 대부분 화강암이나 화강편마암이 모암인 토양이 많아 토양침식에 따른 재해의 위험성이 높은 편이다. 뿐만 아니라, 매년 발생하는 산불과 더불어 고령지 농업, 벌목, 도로개설, 골프장 건설 등으로 토양침식의 위험성이 커지고 있다. 이와 같이 다양한 원인으로 발생할 수 있는 토양침식에 의한 재해를 사전에 예방하고 저감하기 위해서는 사면에서의 침식 보존대책이나 하류로의 유출방지 대책 등이 필요하며, 이를 위해서는 우선적으로 토양침식량을 정량적으로 검토하여 토양침식의 위험성을 파악할 필요가 있다. 토양침식량 산정 시, 현재는 주로 미 농무부에서 개발하고 지난 40년간 전 세계적으로

널리 사용되고 있는 경험적 모델인 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)를 이용하고 있다. RUSLE에서는 대상지의 강우, 토양, 지형, 식생, 경작활동을 모두 고려하여 토양침식량을 산정한다.

강우침식인자는 RUSLE의 5개 인자 중 기후 특성을 고려하는 인자로, 토양침식에 매우 큰 영향을 미치는 인자 중 하나이다. 빗방울 충격에 의한 토사 박리량이 강우강도와 강우입자의 낙하속도와와의 함수로 표현된다는 것은 여러 연구결과에 의해 제안되어졌고, RUSLE에서는 강우침식인자를 강우의 운동에너지와 30분 최대 강우강도의 곱으로 정의하였다(Renard, et. al., 1997). 여기서 강우의 침식성 즉, 강우가 토양입자를 박리시키는 능력의 척도로 활용되는 강우의 운동에너지의 산정식은 다양한 지역의 강우 관측자료를 이용하여

*정회원. 국립재난안전연구원 복합재난연구실 복합재난연구실장(E-mail: jlee9609@korea.kr)
National Disaster Management Institute, Social Research Division, Director

**교신저자. 국립재난안전연구원 복합재난연구실 연구원(Tel: 82-2-2078-7786, Fax: +82-2-2078-7789, E-mail: wjy30228@korea.kr)
National Disaster Management Institute, Social Research Division, Researcher

여러 형태의 식으로 제안되어지고 있다. 그러나 운동에너지 산정식은 강우 관측지역의 기후지역적 특성 및 관측자료의 해석방법, 샘플 크기, 범위 및 편이 등으로 인해 그 계수와 형태가 상당한 차이를 보일 수 있다.

USLE(Universal Soil Loss Equation)는 미국 워싱턴 D.C.의 호우사상으로부터 유도된 Wischmeier and Smith (1978)의 강우 운동에너지 식을 채택하고 있으며, RUSLE는 미국 미시시피주의 호우사상으로부터 유도된 Brown and Foster(1987)의 식을 추천하고 있다. 또한 일본 오키나와 (Onega et al., 1988), 홍콩(Jayawardena and Reqaure, 2000), 호주(Rosewell, 1986), 이탈리아 Toscana(Zanchi and Torri, 1980), 포르투갈(Coutinho and Thomas, 1995) 등 세계 각국의 많은 연구자들이 해당 지역의 강우 특성에 맞는 운동에너지식을 각각 제안한 바 있다(Lee et. al., 2011).

국내에서는 No and Kwon(1984)이 수원과 서울지역의 일부 자료를 활용하여 강우에너지 산정식을 제안한 것이 유일하고, 실무에서는 주로 외국에서 제안된 강우 에너지식을 적용하여 강우침식인자를 산정하거나, 기 발표된 연평균 강우침식인자를 적용하는 실정이다. Jung et. al.(1983)은 전국 51개소에 대해 1960년대~1980년 기간동안의 강우자료를 대상으로 Wischmeier and Smith(1978)가 제시한 강우에너지식을 적용하여 연평균 강우침식인자 값을 산정하였다. 이후 Park et. al.(2000)이 전국 53개 지점에 대해 1973년~1996년까지 1시간 강우자료를 이용하여 강우침식인자를 산정한 바 있다. 이때 1시간 강우자료로부터 30분 최대강우강도를 유도하기 위하여 최소지승법을 적용하였으며, 10분 강우자료를 이용하여 그 타당성을 검증하였다. 또한 Lee and Chung(2009)은 강원지역 시험유역의 토사유출량, 강우 관측자료를 활용하여 10개의 강우에너지 산정식의 특성을 검토분석하였다. Lee et. al.(2011)은 4가지 강우 운동에너지식을 적용하여 기상청 산하 21개 지점의 20년간 연평균 강우침식인자를 계산하였다.

전술한 바와 같이 현재 실무에서는 대부분 외국에서 제안된 강우에너지식을 적용하고 있는 실정으로, 본 연구에서는 국내 강우입경분포 관측자료를 활용하여 강우에너지식을 유도하였으며, 국내외에서 제안된 에너지식을 비교하여 국내 산지특성에 적합한 식을 제안하고자 하였다.

또한 현재 사용되고 있는 연평균 강우침식인자의 경우 연간 발생한 각 강우사상의 강우침식인자들을 모두 합하여 평균한 값으로, 토양침식에 크게 영향을 미치는 강우, 식생의 계절적 변화를 반영할 수 없다. 강우의 빈도, 크기, 지속시간 등의 강우특성에 따라 지표면 유출, 토양 포화도 등이 변화하고, 식생의 성장에 따라 토양침식을 억제하는 능력이 변화기 때문에, 유럽 토양국(European Soil Bureau)에서는 이탈리아 전역의 월별 강우자료와 정규식생지수 영상을 활용하여 월별 토양침식위험지도를 작성하고 위험도를 평가한 바 있다 (van der Knijff. et. al., 1999).

따라서 우리나라와 같이 계절적 특성이 뚜렷한 경우 월별 토양침식지도를 작성하여 그에 따른 적절한 대책을 수립할 필요가 있고, 이를 위해서는 먼저 월별 강우침식인자를 산정하고 그 특성을 분석할 필요가 있다고 판단된다.

2. 강우침식인자 산정

2.1 기본이론

RUSLE의 강우침식인자 R은 다음 Eqs. (1)과 같이 강우에너지와 최대 30분 강우강도의 곱으로 표현된다.

$$R = E \cdot I_{30} = (\sum e_k \cdot \Delta P) \cdot I_{30} \quad (1)$$

여기서, R: 강우침식 인자 (MJ/ha·mm/hr)

E: 강우의 총 에너지 (MJ/ha)

I_{30} : 30분 최대 강우강도 (mm/hr)

e_k : 강우에너지 (MJ/ha/mm)

ΔP : 강우지속시간 간격 당 강우증가량 (mm)

강우의 질량과 낙하속도의 제곱의 함수인 강우에너지는 강우의 침식성의 척도로 활용되는 경우가 많다. Rose(1960)는 강우의 운동량(momentum)이 운동에너지보다 토양박리를 좀 더 명확히 표현하는 척도로 결론지었고, Hudson(1971)은 자연 강우에 대해 강우의 운동량과 운동에너지가 강우강도와 가장 유사한 관계를 보임을 입증하였다. 그러나 강우침식능으로 운동에너지만을 적용하는 경우 낮은 강우강도를 가진 강우의 침식능을 과대평가하는 경향이 있고, 이를 보완하기 위한 방법으로 강우강도에 대한 한계값을 사용하거나 운동에너지에 빗방울 크기를 곱하는 방법이 있다. 마지막 방법은 강우의 운동에너지를 최대 강우강도로 곱하는 것이고, RUSLE에서는 이 방법을 적용토록 제안하고 있다.

2.2 강우에너지 산정식

2.2.1 강우에너지 산정식의 유형 및 형태

강우에너지 산정식은 다양한 연구를 통해 여러 식들이 제시되어 있으며, 이 식들은 크게 다음과 같은 형태의 지수함수식과 로그함수식으로 대별된다.

$$e_k = e_{\max} [1 - ae^{-bI}] \quad (2)$$

$$e_k = a + b \log I \quad (3)$$

또한 강우에너지는 강우의 입경분포를 정의하는 방법에 따라 비체적 강우에너지(volume-specific kinetic energy)와 비시간 강우에너지(time-specific kinetic energy)로 구분되며, 이들 관계는 다음 Eqs. (4)와 같다.

$$e_{kv} = 3600 e_{kt} / I \quad (4)$$

여기서, e_{kv} 는 비체적 강우에너지, e_{kt} 는 비시간 강우에너지, I는 강우강도이다. 토양침식 예측을 위해 사용되는 강우에너지는 모두 비체적 강우에너지를 사용하며, 본 연구에서 e_k 는 e_{kv} 를 의미한다.

2.2.2 강우에너지식의 유도방법

강우에너지를 산정하는 방법은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 강우의 중간입경과 종말속도로부터 강우에너지를 산정하는 방법이고, 두 번째는 강우의 입경크기 분포를

이용하는 방법이다. 세 번째 방법은 빗방울의 크기분포 관측 자료로부터 크기분포별 강우강도와 강우에너지를 산정하고 이로부터 강우강도-운동에너지 상관관계식을 구하는 방법이다. Torres et. al.(1992)은 강우입경 관측자료로부터 강우강도와 강우에너지를 유도하는 식을 제안하였으며, 이는 다음 Eqs. (5) and (6)과 같다.

$$I = \frac{6\pi \cdot 10^{-4}}{A \cdot \Delta t} \sum_{i=1}^n X_i(D_i) D_i^3 \quad (5)$$

$$e_k = \frac{\pi \cdot 10^{-9}}{12 \cdot A \cdot \Delta t} \sum_{i=1}^n D_i^3 v_i(D) \quad (6)$$

여기서, A 는 수감부의 면적(m^2), Δt 는 강우자료의 시간간격(sec), D 는 강우의 입경(mm), $X(D)$ 와 $v(D)$ 는 각각 입경이 D 인 강우입경의 개수와 속도(m/sec)를 나타낸다.

2.2.3 강우에너지 산정식 비교

강우에너지와 강우강도 사이의 일반적인 관계식을 유도하려는 시도는 여러 연구자들에 의해 수행되었고, 다양한 관계식이 제안되었다.

Wischmeier and Smith(1978)는 미국 워싱턴 D.C.의 호우 사상을 이용하여 Eqs. (7)과 같은 강우에너지식을 제시하였고, 미 농무부의 Agriculture Handbook No. 537에서는 이 식을 적용토록 권고하고 있다.

$$e_k = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I \quad (7)$$

여기서, e_k 는 강우에너지(MJ/ha/mm)이고, I 는 강우강도(mm/hr)를 의미한다.

RUSLE가 수록되어 있는 USDA Agriculture Research Service에서는 Brown and Foster(1987)가 미국 미시시피주 Holly Springs의 강우사상 자료로부터 유도한 강우에너지식을 사용토록 제안하고 있으며 그 식은 Eqs. (8)과 같다.

$$e_k = 0.29(1 - 0.72e^{-I/20}) \quad (8)$$

van Dijk et al.(2002)은 여러 연구자들에 의해 제시된 지수형태의 강우에너지와 강우강도와와의 관계식의 각 계수 값들을 평균하여 다음 Eqs. (9)를 제안하였다.

$$e_k = 0.289(1 - 0.52e^{-0.042I}) \quad (9)$$

국내의 경우 No and Kwon(1984)이 서울 기상연구소의 1980년 6월~9월, 1982년 8월~9월, 그리고 수원농업 기상관측소의 1983년 6월~9월의 관측자료를 이용하여 Eqs. (10)과 같은 형태의 강우에너지식을 제시하였다.

$$\log_{10} e = 1.08 + 0.136 \log_{10} I \quad (10)$$

3. 강우에너지식 유도

3.1 대상 자료 및 분석 방법

전술한 바와 같이 강우에너지식을 유도하는 방법은 다양하

Table 1. The Characteristic of Sample data

No.	Range of Sample data	Number of Sample data	I_{avg}	D_{50avg}
1	~2.5	15,766	0.89	0.86
2	2.5~5.0	4,141	3.56	1.13
3	5.0~7.5	1,884	6.14	1.33
4	7.5~10.0	1,137	8.65	1.50
5	10.0~15.0	1,063	12.07	1.61
6	15.0~20.0	439	17.02	1.73
7	20.0~30.0	312	24.11	1.90
8	30.0~40.0	126	34.62	2.20
9	40.0~50.0	57	44.47	2.29
10	50.0~70.0	60	57.71	2.36
11	70.0~90.0	18	78.71	2.56
12	90.0~	14	108.20	2.63
		25,017		

고 기본적으로 강우의 크기분포 자료가 필요하지만, 국내에서 강우입자크기분포에 대한 장기적인 관측은 대관령 구름물리 관측소와 목포 관측소에서만 이루어지고 있는 실정이다. 본 연구에서는 기상청 대관령 구름물리 관측소에서 PARSIVEL을 이용하여 관측한 자료로부터 강우에너지식을 유도하였다. 대관령 구름물리 관측소는 해발고도 842 m에 위치하고 있고, PARSIVEL로 관측 가능한 액상형태의 강우 입자크기 범위는 0.2~5.0 mm이며, 고체형태의 강수입자 크기의 관측범위는 0.2~25.0 mm이다. 관측 가능한 낙하속도의 범위는 0.05~20.8 m/s이며, 수감부 면적은 180×30 mm이다. 강우 입자크기의 관측은 32개 계급구간으로 이루어지며, 종말속도 또한 32개 계급구간으로 나누어 관측된다.

대관령 구름물리 관측소에서는 4개의 강우사상에 대해 강우량계의 강우량과 PARSIVEL에 의한 강우량을 비교검토한 바 있고, 강우량계와 잘 일치된 결과를 얻었으므로 본 연구에서는 강우량계에 대한 보정은 별도로 수행하지 않았다. PARSIVEL은 계급구간별 수농도분포, 종말속도뿐만 아니라 계급구간별 수농도분포 및 종말속도 관측값을 필터링하여 계산한 강우강도, 레이더반사도(radar reflectivity) 등을 제공하는데, 본 연구에서는 수농도분포 및 종말속도로부터 계산된 강우강도와 PARSIVEL에서 계산된 강우강도 값이 3% 이상의 상대오차를 가지는 강우사상은 분석대상에서 제외하였고, 선별된 데이터는 Table 1과 같다. 이는 2006년 9월~2010년 5월의 10초, 30초 또는 60초 단위로 관측된 자료로, 본 연구에서는 10초와 30초 단위로 관측된 자료는 60초 자료로 시간간격을 통일하였으며, 분석에 사용된 60초 단위의 강우 자료 수는 총 25,017개이다. 본 연구에서는 관측된 강우입경의 크기와 개수, 종말속도 데이터를 Eqs. (5) and (6)에 대입하여 강우강도와 강우운동에너지를 산정하였으며, 그 상관관계를 분석하여 강우에너지 식을 유도하였다.

3.2 분석 결과

강우강도와 에너지와의 상관관계를 도시하고, 강우강도와 에너지가 지수함수와 로그함수의 관계를 갖는 것으로 가정하

여 회귀곡선을 생성하였다. 전체 자료에 대한 강우강도와 강우에너지가 최대값에 수렴하는 지수함수의 관계를 가지는 것으로 가정한다면 상관관계식은 Eqs. (11)과 같고, Eqs. (12)는 로그함수 형태의 상관관계식이다.

$$e_k = 30.03(1 - 0.74e^{-0.068I}) \quad (11)$$

$$e_k = 6.040 + 12.367 \log_{10} I \quad (12)$$

Fig. 1은 Eqs. (11)과 Eqs. (12), RUSLE 추천식(Eqs. (8)), van Dijk 식(Eqs. (9)), No and Kwon 식(Eqs. (10))을 비교한 것이다. Eqs. (11)은 'DKR(EXP)'으로 Eqs. (12)는 'DKR(log)'로 표기하였으며, PARSIVEL에서 관측된 강우강도와 강우에너지는 사각형 표식의 분산형 점으로 나타내었다. 다섯 가지 강우에너지식 모두 강우강도가 큰 경우 회귀식보다 실측값이 더 큰 강우에너지를 갖는 것으로 나타났고, Eqs. (11)의 결정계수는 0.512, Eqs. (12)의 결정계수는 0.609로 산정되어 로그함수 식이 지수함수 식에 비해 다소 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. Eqs. (11)은 타 식에 비해 강우강도 20~100 mm/hr에서는 가장 큰 값을 보이며, Eqs. (12)는 강우강도 100 mm/hr 이상인 경우 Eqs. (11)보다 큰 값을 가진다. 60 mm/hr 이상의 큰 강우강도에서는 Eqs. (11)과 Eqs. (12)가 관측값에 더 적합한 것으로 나타났다으며, 타 제안식은 과소한 값을 예측하였다. 특히, No and Kwon식은 5 mm/hr 이상의 강우강도에 대해서는 과소추정하는 결과를 보이고 있으며, 이는 Beard(1977) 등이 제안한 바와 같이 고도가 약 100 m 낮아지면 1% 정도의 운동에너지가 감소한다는 것을 감안하더라도 과소추정의 정도가 크다. 따라서 관측값과의 적합정도, 특히 큰 강우강도에 대한 운동에너지의 상관관계를 고려할 때, 우리나라 산지유역의 강우침식인자 산정 시 Eqs. (12)를 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

Fig. 1. Comparison of Rainfall Kinetic Energy Equations

4. 전국 월별 강우침식인자 산정

계절적·지리적 조건에 따라 강우사상의 빈도, 크기, 지속시간, 분포양상 등의 강우특성이 달라지고, 이는 토양침식량에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 강우에너지식에 따른 전국 주요 지점의 월별 강우침식 인자를 산정하고, 그 결과값을 비교하여 계절별 강우침식 특성을 분석하였다. 강우에너지식으로는 RUSLE에서 제안한 Eqs. (8)과 국내의 자료를 이용하여 No and Kwon이 제시한 Eqs. (10), 본 연구에서 제안한 Eqs. (12)를 적용하여 강우침식인자 값을 계산하였다.

4.1. 대상 자료

본 연구에서는 전국 강우침식인자 산정을 위하여 전국 76개 지점에 대해 관측시점부터 2010년까지의 1시간 강우자료를 이용하였다.

Fig. 2는 서울, 대구, 남해 관측소의 평균 월별 강수량과 76개 지점의 평균 월별 강수량을 나타낸 것으로, 6~9월에 집중되는 특성을 잘 보여주고 있다. 관측소별로 비교해 보면, 대구지점은 서울지점과 남해지점에 비해 7~8월 강수량이 적은 것으로 나타났고, 남해지점의 경우 1월~6월까지의 강수량이 타 지점에 비해 높은 것으로 나타났다.

4.2 관측소별 월별 강우침식인자 R

본 연구에서는 최소 10년, 최대 49년 동안 관측된 76개 지점의 강우자료를 대상으로 Eqs. (8), (10) and (12)를 적용하여 월별 강우침식인자 값을 계산하고 분석하였다. 여기서 Eqs. (8)에 의한 강우침식인자는 'R-RUSLE'로 표현하였고, Eqs. (10)에 의한 강우침식인자는 'R-No&Kwon'으로 표기하였으며, Eqs. (12)에 의한 강우침식인자는 'R-DKR(Log)'로 표기하였다. Table 2는 전국 강우관측소 중 주요 8개 관측지점의 월별 강우침식인자를 산정한 결과이다.

적용된 강우에너지식에 따라 R인자 값의 차이가 발생하지만, 공간적 분포양상은 크게 다르지 않은 것으로 나타났다. 1월~4월, 6월의 경우 백령도 지점에서 최소 R인자가 산정되었고 5월의 경우에는 동해지점의 R인자 값이 가장 작게 산정되었다. 강우량이 집중되는 7월과 8월의 경우에는 각각 영덕

Fig. 2. Monthly Rainfall of 3 Observatories and Average Rainfall of 76 Observatories

Table 2. Monthly R factor of Main Observatories

Observatory		R-RUSLE (MJ/ha-mm/hr)													Annual R	
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann	Jung (1983)	Park (2000)
105	Gangneung	138	75	107	64	87	201	665	1753	539	436	237	80	4381	2970	4170
108	Seoul	11	36	100	76	162	447	2298	2372	678	54	115	11	6359	5930	5260
143	Daegu	20	34	68	55	102	345	671	994	428	32	60	16	2825	2990	2710
156	Gwangju	43	94	106	151	157	575	1696	1941	542	68	83	32	5486	5510	4600
201	Ganghwa	25	30	123	89	172	448	2145	2854	749	78	319	15	7046	6870	6660
295	Namhae	88	304	591	472	518	1165	1659	1669	1345	265	323	70	8467	7010	8030
Observatory		R-No&Kwon (MJ/ha-mm/hr)													Jung (1983)	Park (2000)
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann		
105	Gangneung	143	83	115	74	98	214	654	1567	539	410	235	85	4220	2970	4170
108	Seoul	13	37	99	86	177	441	2071	2108	607	57	113	13	5823	5930	5260
143	Daegu	22	37	72	65	106	349	660	931	427	37	59	18	2782	2990	2710
156	Gwangju	45	94	111	159	168	567	1533	1720	518	74	84	34	5107	5510	4600
201	Ganghwa	24	31	113	100	187	433	1930	2463	669	80	270	15	6315	6870	6660
295	Namhae	85	271	518	473	522	1102	1534	1520	1200	248	276	66	7814	7010	8030
Observatory		R-DKR(Log) (MJ/ha-mm/hr)													Jung (1983)	Park (2000)
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann		
105	Gangneung	149	82	116	67	92	211	696	1816	569	456	255	87	4594	2970	4170
108	Seoul	13	38	107	80	171	469	2377	2447	703	56	123	12	6596	5930	5260
143	Daegu	21	37	74	57	105	364	707	1037	451	32	63	17	2966	2990	2710
156	Gwangju	46	99	114	159	165	607	1754	2004	563	71	88	35	5703	5510	4600
201	Ganghwa	27	33	129	96	184	469	2226	2963	776	83	330	16	7332	6870	6660
295	Namhae	93	316	614	502	551	1222	1729	1739	1394	275	331	74	8840	7010	8030

Table 3. Annual R factor of 76 Observatories using Proposed Rainfall Kinetic Equation

Observatory	Data Period (year)	R factor (MJ/ha-mm/hr)	Observatory	Data Period (year)	R factor (MJ/ha-mm/hr)	Observatory	Data Period (year)	R factor (MJ/ha-mm/hr)	Observatory	Data Period (year)	R factor (MJ/ha-mm/hr)
Sokcho	43	3959	Daejeon	42	5375	Gosan	23	4214	Namwon	38	5054
Cheorwon	23	5568	Chupungnyeong	50	2935	Seongsan	37	11199	Jangsu	23	5269
Dongducheon	13	7865	Andong	28	2767	Seogwipo	49	9402	Soonchun	38	6118
Munsan	10	7188	Sangju	9	3232	Jinju	42	5775	Jangheung	38	6548
Daegwanryeong	39	4837	Pohang	50	3128	Ganghwa	38	7332	Haenam	38	5420
Chuncheon	45	4578	Gunsan	43	4484	Yangpyeong	38	6349	Goheung	38	6819
Bakryeongdo	11	2509	Daegu	50	2966	Icheon	39	5359	Bonghwa	23	4222
Gangneung	50	4594	Jeonju	50	4974	Inje	38	3762	Yeongju	38	4058
Donghae	19	3691	Ulsan	50	4018	Hongcheon	38	5776	Mungyeong	38	3583
Seoul	50	6596	Masan	26	7045	Taebaek	26	3795	Yeongdeu	38	2803
Incheon	50	5191	Gwangju	50	5703	Jecheon	38	4950	Uiseong	38	2904
Wonju	38	5341	Basan	50	6783	Boeun	38	4750	Gumi	38	2857
Ulleungdo	50	3419	Tongyeong	43	5612	Cheonan	39	5026	Yeongcheon	38	2781
Suwon	47	5367	Mokpo	50	3848	Boryung	38	5567	Geochang	38	4114
Yeongwol	17	3873	Yeosu	50	5746	Buyeo	38	5782	Hapcheon	38	4545
Chungju	38	4180	Heuksando	14	4552	Geumsan	38	4302	Miryang	38	4337
Seosan	43	5198	Wando	38	7114	Buan	38	4725	Sancheong	38	6200
Uljin	39	2449	Jindo	9	7667	Imsil	38	4628	Geoje	38	9493
Cheongju	44	4498	Jejo	48	6097	Jeongeup	38	4856	Namhae	39	8840

지점과 울진지점이 가장 작은 R인자 값을 가지는 것으로 나타나 여름철의 경우 경북 해안지역의 R인자가 가장 낮은 값을 가지는 것으로 나타났다. 9월~11월은 안동지점과 상주시점이 최소 R인자 값을 가져 가을철의 경우 경북 내륙지역의 R인자 값이 가장 작은 것으로 나타났으며, 12월의 경우 문산

지점의 R인자 값이 0으로 산정되었다. 월별 최대 R인자를 비교해보면, 1월~3월과 10월, 12월의 경우 제주지역의 R인자 값이 최대로 나타났고, 4월과 11월은 문산지점이 가장 높은 R인자 값을 가지는 것으로 나타났다. 이에 반해 5월과 6월은 각각 거제지점과 남해지점의 R인자 값이 가장 크게 산정되었

고, 7월과 8월의 경우 동두천지점의 R인자 값이 최대로 산정되었으며, 10월의 R인자는 강릉지점에서 최대값을 가지는 것으로 나타났다.

적용된 강우에너지식에 따른 R인자 값을 비교해보면 지점과 월별로 차이를 보이는 것으로 나타났다. R-RUSLE 값을 기준으로 봤을 때 R-No&Kwon 값은 -20.5~100.0%의 오차를 보이는 것으로 나타났고, R-DKR(Log) 값은 0~12.2%의 오차를 가지는 것으로 나타났다. 산정된 월별 R인자 값을 모두 합하여 연평균 R인자 값을 계산하고 이를 기 발표되었던 Jung et. al.(1983) and Park et. al.(2000)이 제시한 연평균 R인자 값과 비교해 본 결과, R-RUSLE는 Jung et. al.(1983)이 제시한 연평균 R인자 값과 -28.0~32.2% 오차를 보이는 것으로 나타났고, Park et. al.(2000)이 제시한 연평균 R인자 값과는 -17.4~23.3%의 차이를 보였다. R-No&Kwon은 Jung et. al.(1983)의 값과 -38.1~31.8% 차이를 나타내었고, Park et. al.(2000)의 값과는 -20.7~20.3%의 차이를 보였다. R-DKR(Log)는 Jung et. al.(1983)의 값과 -22.8~35.6%, Park et. al.(2000)의 값과 -12.0~27.2%의 오차를 가져 기 발표된 값과 가장 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 상이한 강우에너지식에 의한 영향일 뿐만 아니라, 강우 관측 지점의 확대, 관측기간의 연장으로 인해 분석에 이용된 원자료가 달라졌기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 Eqs. (12)를 적용하여 산정한 76개 지점의 연평균 R인자 값은 Table 3에 제시하였다.

76개 지점의 R인자 값을 평균하여 Fig. 3과 같이 비교해 본 결과, 3월에 비해 4월의 강우량이 증가함에도 불구하고 강우침식인자 값은 오히려 감소하고, 11월 평균 강우량이 10월 강우량에 비해 감소함에도 불구하고 R인자 값은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 평균 강우량은 7월이 최대인 것에 비

Fig. 3. Average Monthly R factor of 76 Observatories

해 R인자는 8월이 최대로 산정되었으며, 그 값 또한 7월을 제외한 모든 월별 R인자 값과 상당한 차이를 보였다. R인자 값이 비교적 작은 1월~6월과 9월~12월은 적용식에 따른 차이가 크지 않은 것으로 나타났으나, 연간 R인자 중 많은 비중을 차지하는 7월, 8월의 경우 R-No&Kwon은 R-RUSLE에 비해 약 8~9% 감소하였고, R-DKR(Log)는 R-RUSLE에 비해 약 4% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 No and Kwon이 제안한 식은 전술한 바와 같이 5 mm/hr 이상의 강우강도의 강우에서는 타 식에 비해 R인자 값을 과소산정하고, 본 연구에서 제안한 식이 타 식에 비해 R인자 값을 과대산정하기 때문인 것으로 판단된다. 76개 지점에 대한 월별 R인자의 표준편차 값은 Fig. 3에서와 같이 R-No&Kwon이 R-RUSLE와 R-DKR(Log)에 비해 비교적 작게 산정되므로, No and Kwon이 제시한 강우에너지식을 적용할 경우 지점에 따른 R인자 값의 변화가 타 식에 비해 크지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 4. Monthly R factor Distribution of Main Observatories

Fig. 4와 같이 지점별로 월별 R인자 분포 양상을 비교해보면, 정량적인 R값에는 차이를 보이지만 강릉지점과 대구지점의 R인자 분포 양상이 유사한 것으로 나타났고, 서울지점과 광주지점, 강화지점이 유사한 분포를 보였다. 이에 반해 남해지점은 타 지역과 상당히 상이한 분포를 보였으며, 강릉지점과 대구지점의 경우 8월에 침투값을 가지는 분포양상을 나타냈고, 서울지점과 광주지점, 강화지점은 7월과 8월의 R인자 값이 비슷한 것으로 나타났다. 남해지점의 경우 Table 3에서 나타난 바와 같이 3월의 R인자 값이 타 지점에 비해 상대적으로 매우 높은 것으로 나타났고, 이는 남해지점, 거제지점, 통영지점 등 남해안에 위치한 관측소의 3월 강우량이 타 지점에 비해 상당히 크기 때문인 것으로 판단된다.

4.4 전국 월별 등강우침식도

본 연구에서는 PARSIVEL로터 관측된 강우강도 및 운동에너지와의 비교를 통해 국내 산지유역에 적용성이 높은 강우에너지식을 제안하였고, 국내외 강우에너지식들을 적용하여 R인자 값을 산정 및 분석하였다. 유역 특성에 따라 강우특성 또한 상이해지므로 유역 특성을 대표할 수 있는 관측지점들의 강우데이터를 모두 이용하여 대표 강우에너지식을 제안해

야하나, 현재 국내에서는 강우에너지식 유도를 위해 필요한 강우입경분포 자료를 장기적으로 관측하고 있는 지점이 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 공간적 한계가 존재하지만 국내 강우특성을 고려하고 있는 Eqs. (12)를 적용하여 산정한 76개 관측지점의 R인자 값을 IDW(Inverse Distance Weighted) 보간법으로 공간보간하여 전국의 월별 등강우침식도를 작성하였고, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 여기서 월별 R인자 값의 차가 매우 크므로, 범례를 동일하게 적용하지는 않았다. 1월과 10월, 12월의 R인자 분포를 살펴보면, 강원 해안지역과 남해안 일부 지역이 다른 지역에 비해 높게 산정되었고, 2월, 3월, 5월의 경우에는 남해안 전 지역에 걸쳐 높은 R인자 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한 4월과 11월의 R인자 분포를 보면, 경기 북부지역과 남해안 일부 지역이 다른 지역에 비해 높은 R인자 값을 가지는 것으로 나타났다. 반면 강우사상이 많고 강우량이 큰 6월-9월의 R인자는 이와는 다른 양상을 보인다. 6월의 경우 전북 내륙 지방과 남해안 전 지역이 높은 R인자 값을 가지는 것으로 나타났고, 남서지방으로 내려갈수록 R인자 값이 증가하는 것으로 보인다. 그러나 7월과 8월은 경기 북부지역의 R인자 값이 최대로 산정되었고, 경북 해안지역은 매우 낮은 R인자 값을 가지는 것으로 나타

Fig. 5. Monthly R factor Map using Proposed Rainfall Kinetic Energy Equation

났다. 9월의 경우 6월의 강우침식도와 비슷한 양상을 보이거나, 충북 내륙지역이 6월에 비해 확연히 낮은 값을 가지는 것으로 나타났고, 이는 추풍령 지점의 R인자 값이 타 지점에 비해 매우 낮게 산정되었기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 강우침식인자 산정 시 국내외에서 가장 많이 적용되고 있는 강우에너지식을 비교하고, 대관령 관측소의 PARSIVEL 관측데이터를 이용하여 강우강도와 강우의 운동에너지 관계를 분석하고 강우에너지식을 유도하였다. RUSLE 추천식과 No and Kwon 식, 그리고 본 연구에서 유도한 강우에너지식을 적용하여 전국 76개 지점의 월별 R인자를 산정하였고 시공간적 특성을 비교분석하였다. 적용된 강우에너지식에 따라 R인자 값이 크게 차이를 보이는 것으로 나타났고, 76개 지점의 평균 R인자 값을 비교해 보았을 때 RUSLE 추천식과 No and Kwon 식이 본 연구에서 제시한 강우에너지식보다 과소 산정하는 것으로 나타났다. 계절적지리적 조건에 따른 강우사상의 빈도, 크기 등의 차이로 인해 각 관측지점의 월별 R인자는 크기와 그 분포양상이 확연히 달라지는 것을 확인하였고, 공간적시간적 월별 강우침식 특성 변화를 확인하였다. 또한 각 관측지점의 R인자 값을 공간분포시켜 월별 등강우침식도를 작성하였고, 이는 월별 월별 토양침식 위험지도 작성에 이용 가능할 것으로 판단되며, 계절별 토양침식방지대책 수립 시에도 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

현재 실무에서는 주로 연평균 토양침식량 산정 시 Park et. al.(2000)이 Wischmeier and Smith(1978)의 강우에너지식을 적용하여 제시한 연평균 R인자 값을 적용하고 있으나, 관측된 강우스펙트럼에 대한 강우강도 및 운동에너지와의 적합성, 결정계수 등을 고려해볼 때, 본 연구에서 제안한 강우에너지식이 우리나라의 강우침식 특성을 더 잘 표현할 수 있다고 판단된다.

그러나 본 연구에서 제시한 강우에너지식은 대관령 관측소만의 데이터를 통해 유도된 식으로 전국의 강우특성을 대표한다고는 할 수 없을 것이다. 따라서 향후 유역별 강우특성을 대표할 수 있는 관측지점의 데이터가 구축된다면 강우강도와 강우에너지의 관계식을 보완하는 과정이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상연구소의 자료 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Beard, K.V. (1977) Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft, *Trans J. Atmos. Sci.*, Vol. 33, pp.851-864.

- Brown, L.C. and Foster, G.R. (1987) Storm Erosivity using Idealized Intensity Distributions, *Trans ASAE* 30, pp.379-386.
- Coutinho, M.A. and Tomas, P.P. (1995) Characterization of raindrop size distributions at the Vale Formoso Experimental Erosion Center, *Catena*, Vol. 25, pp.187-197.
- Hudson, N.W. (1971) Raindrop size, *In Soil Conservation*, Cornell University Press, Ithaca, New York, pp. 50-56.
- Jayawardena, A.W. and Rezaur, R.B. (2000) Drop Size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong, *Hydro Process*, Vol. 14, pp.1069-1082.
- Jung, P.K., Ko, M.H., Im, J.N., Um, K.T. and Choi, D.U. (1983) Rainfall Erosion factor for Estimating Soil Loss, *Korean J. Soil Sci. Fert.* Vol. 16, No. 2, pp.112-118.
- Lee, J.H., J.Y. Shin, and J.H. Heo (2011) Evaluation of Rainfall Erosivity in Korea using Different Kinetic Energy Equations, *Korea J. Soil Sci. Fert.* Vol. 44, No. 3, pp.337-343.
- Lee, J.S. and Chung, J.H. (2009) Characteristics Analysis for RUSLE Factors based on Measured Data of Gangwon Experimental Watershed(I), *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 6, pp.111-117.
- No, J.K. and Kwon, S.K. (1984) A Study of the Estimation of Rainfall Kinetic Energy based on Rainfall Characteristics, *College of Agricultural Research*, Seoul National University, Vol. 9, No. 2, pp.23-31.
- Onega, K., Shirai, K. and Yoshinaga, A. (1988) Rainfall erosion and how to control its effects on farmland in Okinawa, *Land conservation for future generation*, Department of Land Development, Bangkok, pp.627-239.
- Park, J.H., Woo, H.S., Pyun, C.K., and Kim, K.I. (2000) A Study of Distribution of Rainfall Erosivity in USLE/RUSLE for Estimation of Soil Loss, *Journal of Korean Water Res. Assoc.*, Vol. 33, No. 5, pp.603-610.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. and Yoder, D.C. (1997) Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE), *USDA Agric. Research Service*, Washington, D.C.
- Rose C.W. (1960) Soil detachment caused Rainfall, *Soil Science*, Vol. 89, No. 1, pp.683-687.
- Rosewell, C.J. (1986) Rainfall Kinetic Energy in Eastern Australia, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, No. 25, pp.1965-1971.
- Torres, D., Salles, C., Creutin, J.D. and Delrieu, G. (1992) Quantification of Soil Detachment by Raindrop Impact: Performance of Classical Formulae of Kinetic Energy in Mediterranean Storms, *IAHS Publ.*, No. 210, pp. 115-124.
- van der Knijff J.M., Jones, R.J.A. and Montanarella, L. (1999) *Soil Erosion Risk Assessment in Italy*, EUROPEAN SOIL BUREAU.
- 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*, Vol. 261, pp. 1-23.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning, *USDA Agric. Handbook*, No. 537, Washington, D.C.
- Zanchi, C. and Torri, D. (1980) Evaluation of Rainfall Energy in Central Italy, *Assessment of Erosion*, Wiley, New York, pp. 133-142.

© Received April 22, 2013

© Revised April 29, 2013

© Accepted May 27, 2013