

스케일 성질을 이용한 강우침식인자 추정

Estimation of Rainfall-Runoff Erosivity Factor Using Scale Invariance Property

이준학*, 정영훈**, 오경두***, 허준행****

Joon-Hak Lee, Younghun Jung, Kyoung-Doo Oh, Jun-Haeng Heo

요 지

토양침식은 농경지 면적의 감소 및 사태 유발, 토사의 하천 유입으로 인한 생태계 교란 및 오염물질 확산 등의 피해를 야기시킨다. 토양침식을 유발하는 가장 큰 인자는 일반적으로 강우로 알려져 있으며, 연구대상 지역의 토양침식량을 산정하기 위해서는 강우침식인자를 추정하는 과정을 거치게 된다. 이와 관련하여 정필균(1983), 박정환 등(2000)은 각각 1980년, 1996년 이전의 강우자료를 이용하여 우리나라 강우침식인자를 제시한 바 있으나, 기상청에서 제공하는 1시간 단위 강우량으로 30분 최대 강우강도를 추정하는 것이 제한되어, 근래에 들어서는 연강수량을 이용하여 강우침식인자를 산정할 수 있는 국외 추정식을 적용하는 연구사례가 늘고 있다. 본 연구는 기상청에서 제공하는 1시간 단위 강우자료를 바탕으로 각 호우사상별 30분 최대 강우강도를 추정하여 보다 정확한 연강우침식인자를 산출하기 위한 것으로서 강우의 스케일 성질을 이용하였다. 속초 지점의 2007년 강우자료를 바탕으로 각 호우사상의 1시간 최대 강우량을 하향스케일링 하여 30분 최대 강우강도를 산출하여 강우침식인자를 산정한 결과, 기존의 EI_{30} 와 EI_{60} 의 상관관계식 및 연강수량을 이용한 추정방법보다 더 합리적임을 알 수 있었다.

핵심용어 : 강우침식인자, RUSLE, 토양침식, 스케일 성질

1. 서 론

토양침식(soil erosion)은 농경지 면적의 감소 및 사태 유발, 토사의 하천 유입으로 인한 생태계 교란 및 오염물질 확산 등의 피해를 야기시킨다. 세계적으로 널리 사용되고 있는 개정범용 토양유실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)은 강우(R) 및 토양(K), 사면길이(L), 경사도(S), 피복 및 관리(C), 토양보전(P)에 관한 각 인자들의 상호 곱으로 연평균 토양침식량을 추정할 수 있는 경험식이다. 이 식은 1950년대 미 농무부(United States Department of Agriculture)가 미국 록키산맥 동부 소규모 농업지역을 대상으로 실제 실험한 결과를 바탕으로 제안한 범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation, USLE)을 일부 보완한 것으로, 구곡침식(gully erosion)이나 대유역 전체, 특정 강우 또는 특정 연도에 적용시 많은 오차가 발생할 수 있는 제한사항이 있지만, 토양침식에서 고려해야할 각 인자들의 영향을 과학적으로

* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학 박사과정 · E-mail : cetera@yonsei.ac.kr

** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학 박사과정 · E-mail : yhjung2000@yonsei.ac.kr

*** 정회원 · 육군사관학교 건설환경학과 교수 · E-mail : okd0629@kma.ac.kr

**** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목환경공학과 교수 · E-mail : jhheo@yonsei.ac.kr

평가할 수 있다는 장점 때문에 전세계적으로 널리 사용되어 왔다.

연강우침식인자는 한 호우사상(rainfall event)의 총 강우에너지(E)와 해당 기간의 30분 최대 강우강도($I_{\max 30}$)를 곱한 값의 연누적값($\sum E I_{30}$)으로 정의된다. RUSLE는 연평균 토양침식을 추정하기 위한 것으로 Wischmeier와 Smith(1978)는 강우침식인자의 적절한 산출을 위해서는 20~25년의 장기간 강우자료를 사용하는 것이 적절하다고 하였다. 연평균 강우침식인자를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j \quad (1.1)$$

여기서, R (MJ/ha · mm/hr/year)은 연평균 강우침식인자, E (MJ/ha)는 총 강우에너지(total storm kinetic energy)를 의미하며, I_{30} (mm/hr)은 30분 최대 강우강도, j 는 계산에 사용되는 연도를 나타내는 지수, k 는 각 연도별 호우사상을 나타내는 지수, n 은 계산에 사용한 연도의 총 개수, m 은 각 연도별 호우사상의 총 개수를 의미한다. 총 강우에너지 E 는 식 (1.3)과 같이 호우사상별 강우에너지(rainfall energy) e_r (MJ/ha · mm)에 비가 내린 동안의 총 강우량 Δv_r (mm)을 곱한 값으로 정의되며, 강우에너지 e_r 은 호우사상별 강우강도 i_r (mm/hr)를 변수로 하는 식 (1.2)에 의해서 구해진다.

$$e_r = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I \quad (1.2)$$

$$E = \sum_{r=1}^m e_r \Delta v_r \quad (1.3)$$

Wischmeier와 Smith(1978)는 비가 12.7mm 이상 내리거나 최소 15분간 6.35mm 이상 내리는 경우의 강우자료를 분석 대상으로 하였으며, 호우사상의 구분은 강우와 강우사이에 6시간 이내 강우량이 1.27mm 미만일 경우를 1회, 6시간 이상일 경우를 각 2회로 구분하였다.

이러한 RUSLE의 강우침식인자를 산정하기 위해서는 최소 20년 이상의 분단위 강우자료가 필요하고, 각 호우사상별 분류 및 데이터 처리에 많은 노력이 소요된다. 또한 20년 이상의 분단위 강우자료를 보유하고 있는 국가가 많지 않기 때문에 학계에서는 보다 획득이 용이한 월강우량, 연강우량 등의 강우자료 및 제한된 강우자료를 바탕으로 강우침식인자 대체지수를 추정하려는 연구가 이루어져 왔다.

2. 우리나라 강우침식인자의 추정

국내에서는 정필균 등(1983)이 우리나라 51개 관측지점의 6~21년(1960~1980년) 강우자료를 이용하여 우리나라의 연평균 강우침식인자를 최초로 산정한 바 있다. 박정환 등(2000)은 53개 관측지점의 24년(1973~1996년) 강우자료를 이용하여 80~90년대의 강우사상을 반영한 연평균 강우침식인자를 재산정하였으며, 비슷한 시기에 Hu 등(2000)은 59개 관측소의 22년(1974~1995년) 강우자료를 바탕으로 우리나라 연평균 강우침식 인자를 산정한 바 있다. 본 연구는 기상청에서 제공하는 1시간 단위 강우량을 바탕으로 각 호우사상별 30분 최대 강우강도를 추정하여 보다 정확한 연강우침식인자를 산출하기 위한 것으로서 강우의 스케일 성질을 이용하였다.

3. 강우의 스케일 성질

강우의 스케일 성질(scale invariance property)은 Lovejoy와 Mandelbrot(1985)가 강우의 시공간적인 통계분석을 위해 제안한 것으로서, 지속기간별 강우량에도 일정한 패턴이 있다는 개념이다. 정영훈 등(2008)은 지속기간 1시간을 기준으로 강우의 단일 스케일 성질을 이용하여 대구 지점의 20, 30, 40, 50분 지속기간별 확률강우량을 추정한 결과, 절대상대오차 15% 미만의 결과값을 얻었으며, Nhat 등(2008)은 일본의 5개 관측지점에 대해서 지속기간 1시간 확률강우량에 하향스케일링을 적용해본 결과 지속기간 10분의 강우강도를 약 5%의 MAPE(Mean Absolute Percent Error)로 추정이 가능함을 밝힌 바 있다. 또한, 김영일 등(2008)은 강우의 스케일 성질을 확률강우량이 아닌 실제 강우량에 적용하여 특정지속기간의 강우강도를 추정하는 바 있다.

단일 스케일(simple scaling) 성질을 이용하여 특정 지속기간별 강우량을 추정하는 식은 식 (1.4)와 같다(Gupta and Waymire, 1990). 여기서 " d "는 동일한 확률분포형에 있음을 의미하는 것으로 확률분포형이 스케일에 따라 변하지 않는다는 것을 가정한다.

$$H_{\lambda T} = \lambda^n H_T \quad (1.4)$$

여기서, λ 는 스케일 인자(scaling factor), n 은 스케일 지수(scaling exponent)로 일정한 값을 가지며 H 는 강우량을 의미한다. 지속기간 T' 의 강우량에 임의의 지속기간 T 의 강우량을 추정할 경우에 λ 는 식 (1.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{T}{T'} \quad (1.5)$$

4. 스케일링 방법에 의한 강우침식인자 산정

본 연구를 수행하기 위하여 기상청 속초 관측소의 2007년 1월 1일부터 12월 31일까지 1시간 단위로 계측된 강우자료와, 동일기간내 15분 단위로 관측된 강우자료를 이용하였다. 먼저 Wischmeier와 Smith(1978)의 강우자료 분류기준에 의거하여, 2007년 속초 관측소의 실강우일수 145일에 해당하는 일강우자료를 분석하여 총 125개 호우사상을 추출하였고, 이중 12.7mm 이상이 되는 22개 호우사상을 최종적으로 분류하였다. 이렇게 분류된 22개 호우사상의 15분 단위 강우자료를 활용하여 호우사상별 최대 30분 강우강도를 산정하였다. 스케일링 방법 적용을 위해서 호우사상별 1시간 단위 강우량 중에서 1시간 최대 강우량을 식별하여, 여기에 정영훈 등(2008)이 선행연구에서 제시한 속초지점의 스케일 지수(n) 0.606 및 스케일 인자(λ) 0.5를 적용하였다. 기상청은 11월부터 3월까지의 강우량을 3시간 단위로 계측하고 있는데, 이 경우 3시간 관측 최대 강우량에 스케일 성질을 적용($\lambda = 1/3$)하여 1시간 최대 강우량을 계산 후 적용하였다.

15분 강우자료로 분석한 30분 최대 강우강도와 스케일링에 의한 방법, 그리고 강문성 등(2003)이 1973년~1987년 동안의 속초지역의 44개 호우사상을 분석하여 제시한 EI_{30} 와 EI_{60} 의 상관관계식에 의한 추정방법을 비교한 결과는 표 1, 그림 1과 같다. 그 결과 스케일링 방법이 EI_{30} 와 EI_{60} 의 상관관계식에 의한 추정방법보다 정확하며 22개 호우사상에서 평균 10% 미만의 오차를 가짐을 알 수 있었다. 그림 2와 3은 속초지점의 15분, 일단위 강우량을 도시한 것이다.

표 1. 30분 최대 강우강도 추정(22개 호우사상)

구 분	I_{max30}	스케일링 방법	강문성 등 (2003)
평 균	10.05	9.13	7.38
RMSE 평균	-	1.51	2.70

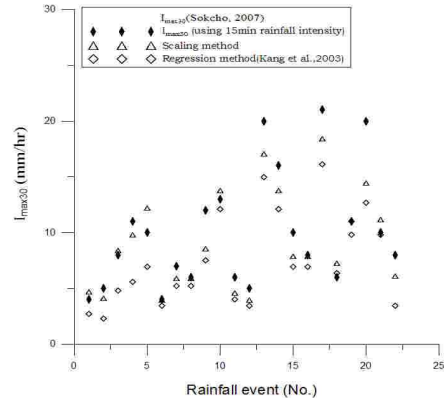


그림 1. 30분 최대 강우강도 비교

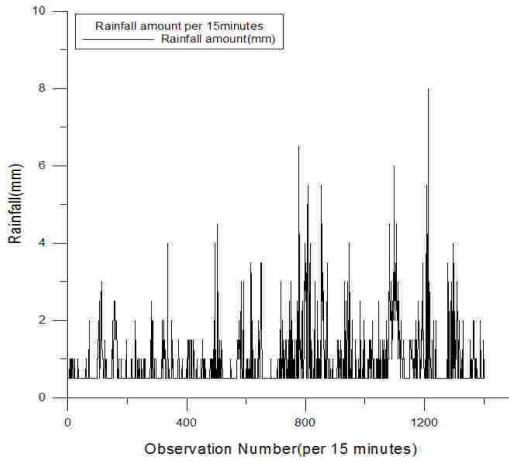


그림 2. 15분 단위 강우량(속초, 2007)

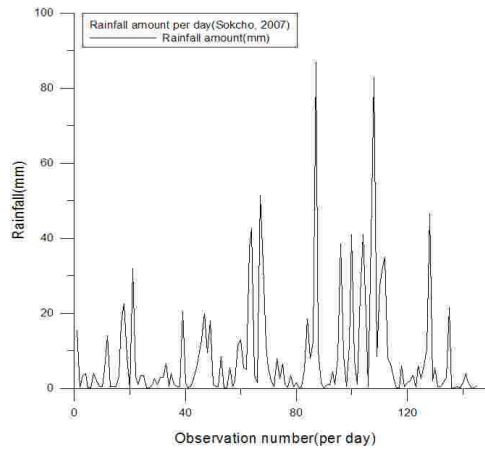


그림 3. 1일 단위 강우량(속초, 2007)

각 호우사상의 강우에너지를 식 (1.2)~(1.3)에 의해서 구한 뒤 스케일링 방법으로 추정된 30분 최대강우강도를 곱하여 속초지점의 2007년 연강우침식인자를 산정하였다. 이것을 15분 단위 강우자료를 바탕으로 계산한 경우와, 강문성 등(2003) 및 Hu 등(2000)이 사용했던 EL_{30} 와 EL_{60} 의 상관관계식, 그리고 연강수량 $P(mm)$ 을 이용하여 추정된 연 강우침식인자와 비교하였다. 이때 연강수량은 속초의 2007년 연강수량 1,264.7mm를 적용하지 않고, 분류된 호우사상의 총 강우량 990.3mm를 적용하였다. 표 2와 같이 연 강우량을 이용한 추정은 총 강수량이 아닌 분류된 호우사상의 총 강우량을 적용했음에도 불구하고 과다 추정됨을 알 수 있었으며, RMSE(Root Mean Square Error)와 MAPE(Mean Absolute Percent Error)로 비교시 스케일 성질을 이용한 강우침식인자 계산방법이 EL_{30} 와 EL_{60} 의 상관관계식에 의한 추정방법보다 더 정확한 값을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

표 2. 연강우침식인자 산정 비교(속초, 2007) (단위: $10^7 J/ha \cdot mm/hr$)

구 분	R	스케일링 방법	강문성 등 ¹⁾ (2003)	Hu 등 ²⁾ (2000)	이준학 등 ³⁾ (2008)	Swafly 등 ²⁾ (1987)
산정값	193.45	174.10	152.75	163.95	210.48	385.81
RMSE	-	19.35	40.7	29.5	107.11	192.36
MAPE	-	10.00	21.04	15.25	55.37	99.43

※ ¹⁾ $EL_{30} = 1.1529EL_{60}$, ²⁾ $EL_{30} = 1.26EL_{60} + 14.3$, ³⁾ $R = 0.535P - 230.325$, ⁴⁾ $R = 38.5 + 0.35P$

5. 결 론

본 연구는 기상청에서 제공하는 1시간 단위 강우량을 바탕으로 각 호우사상별 30분 최대 강우강도를 추정하여 보다 정확한 연강우침식인자를 산출하기 위한 것으로서, 속초 지점의 2007년 강우자료를 바탕으로 각 호우사상의 지속기간 1시간 최대 강우량을 하향스케일링 하여 30분 최대 강우강도를 계산하여 강우침식인자를 산정하였으며, 스케일링 방법이 기존의 EI_{30} 와 EI_{60} 의 상관관계식을 이용한 방법 및 연강수량을 이용한 강우침식인자 추정방법보다 합리적임을 알 수 있었다. 본 연구는 속초지점의 2007년 강우자료를 바탕으로 모의하였으나 향후 다른 연도 및 다른 지점에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 강문성, 박승우, 임상준, 김학관(2003), RUSLE을 위한 반월주기 강우가식성 인자 산정, 한국농공학회지, 제45권 제3호, pp. 29-40
2. 김영일, 김수영, 김태순, 허준행(2008), 강우의 스케일 성질을 이용한 특정 지속기간의 강우자료 추정, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 115-119
3. 박정환, 우효섭, 편종근, 김광일(2000), 토양유실공식의 강우침식도 분포에 관한 연구, 한국수자원학회 논문집, 제33권 제5호, pp. 603-610
4. 이준학, 정영훈, 허준행(2008), RUSLE의 강우침식도 추정에 관한 연구, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 1324-1328
5. 정영훈, 김수영, 김태순, 허준행(2008), 스케일 성질을 이용한 확률강우량의 추정, 한국수자원학회 논문집, 제41권 제9호, pp. 873-884
6. 정필균, 고문환, 임정남, 윤기대, 최대웅, (1983), 토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석, 한국토양비료학회지, 제16권 제2호, pp. 112-118
7. Hu, Q., Gantzer, C. J., Jung P., Lee, B.(2000), Rainfall Erosivity in the Republic of Korea, Journal of Soil and Water Conservation, Second Quarter, pp. 115-120
8. Lovejoy, S., Madelbrot, B. B.(1985), Fractal properties of rain and a fractal model, Tellus, Vol. 37A, pp. 209-232
9. Nhat, L.M., Tachikawa, Y., Sayama, T., Takara, K.(2008), Estimation of Sub-hourly and Hourly IDF Curves Using Scaling Properties of Rainfall at Gauged Site in Asian Pacific Region, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 51B, pp. 63-73
10. El-Swaify, S.A., Gramier, C.L. and Lo, A.(1987), Recent Advances in Soil Conservation in Steepland in Humid Tropics. In: Proceedings of the International Conference on Steepland Agriculture in the Humid Tropics. Kuala Lumpur, MARDI, pp. 87-100
11. Wischmeier, W. H., Smith, D. D.(1978), Predicting Rainfall Erosion Losses-A Guide to Conservation Planning, USDA Agriculture Handbook No. 537.