

강우침식인자 관련 연구동향



이 준 학 |

육군사관학교 건설환경학과 교수
cetera@kma.ac.kr

계산방법이 동일하다면 동일한 값을 얻을 수 있다. 따라서 우리나라에서도 기상청에서 기후자료를 발표하듯이 강우침식인자를 주기적으로 산정하여 발표하는 기관이 있다면 실무에 많은 도움이 될 것으로 판단된다. 이런 바램에서 본고는 필자가 그동안 관심을 가지고 연구를 해온 “강우침식인자 관련 연구동향”에 대해서 소개하고자 한다.

1. 들어가는 말

지난 30년(1981~2010년) 기간 동안의 서울 지점에 내린 강수량의 연평균값은 1,450.5mm 이었으며, 2011년 한해 동안 서울 지점의 강수량은 총 2,039.3mm 이었다. 이와 같이 연강수량은 기상청에서 공식 집계하여 발표한 값을 사용하기 때문에 이론의 여지가 없다. 그러나 강우자료를 이용하여 값이 결정되는 범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation) 또는 개정범용토양유실공식(Revised Universal Soil Loss Equation)의 강우침식인자는 사정이 좀 다르다. 예를 들어 지난 30년 기간의 우리나라 서울 지점의 연평균 강우침식인자 값은 얼마였을까? 그리고 작년(2011년) 서울 지점의 연 강우침식인자 값은 얼마나 될까? 아쉽게도 아직까지 우리나라에서는 강우침식인자에 관심을 갖고 이를 주기적으로 갱신 및 발표하는 연구기관이 따로 없는 실정이다. 강우침식인자는 강우자료를 토대로 계산되는 값이기 때문에 데이터와

2. USLE와 RUSLE

범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation, 이하 USLE)은 강우로 인해 발생하는 장기간에 걸친 농경지의 연평균 토양침식량을 산정하기 위한 경험적(Wischmeier and Smith, 1965)으로 서식, 1960년대 미국 록키산맥 동부 농업지역에서의 다년간의 걸친 실측결과로부터 유도되었으며, 공식의 이름에서도 알 수 있듯이 지난 50여년 동안 전세계적으로 그 범용성을 인정받아 왔다. USLE를 일부 개정한 개정범용토양유실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, 이하 RUSLE)은 USLE를 농업지역 뿐만 아니라 건설공사장, 개간지 등으로 확대 적용할 수 있도록 각 인자의 산출방법을 일부 수정 보완한 것으로 Renard와 Foster 등(1991)이 제안하였으며, 미 농업핸드북 No. 703(1997)을 통해 널리 알려지게

되었다.

USLE 또는 RUSLE(이하 (R)USLE)는 공통적으로 6개 인자(L인자와 S인자를 묶어서 5개 인자라고도함) 즉, 강우침식인자(R), 토양침식성 인자(K), 경사길이인자(L), 경사도 인자(S), 식생피복인자(C), 보전관리인자(P)의 산술적인 곱으로 연평균 토양침식량을 정량적으로 산정할 수 있도록 되어 있다. 모든 공식이 그러하듯이 (R)USLE도 적용상의 한계를 가지고 있는데, 이 식은 면상침식(rill erosion)과 세류침식(sheet erosion)으로 발생하는 20년 이상의 연평균 토양유실량 추정을 목적으로 유도된 경험식으로서 구곡침식(gully erosion)과 대유역의 침식에 대한 적용은 포함하지 않는다. 또한 이 식은 미국 동부 농업지역의 특정 경사를 갖는 소규모 경작지로부터 식이 유도되었기 때문에, 지역별 적용에 대한 검증이 수반되어야 하며, 농경지가 아닌 삼림지역이나 도시지역, 대유역 전체, 특정 강우 또는 특정 연도에 적용할 경우에는 많은 오차가 발생할 수 있다(Renard et al., 2011).

국내에서는 1970년 무렵부터 농업진흥청(현 농촌진흥청) 및 대학기관의 농업학과를 중심으로 국내 현장 시험결과를 토대로 USLE를 국내에 적용하기 위한 연구가 이루어졌다. 40여년의 세월이 지난 지금, 국내 환경에 맞는 각 인자의 계산방법이 현장 시험을 통해 정립되어, 2005년에는 농업과학기술원(현 국립농업과학원)에서 USLE를 이용하여 산정된 남한지역 전체에 대한 토양유실 지도를 팜플렛 형태로 발간하기에 이른다. 1990년대 후반에 들어 개발사업장 및 산지, 산불지역, 유역 단위에서의 토사유출 등에 대한 연구가 수행되면서 수자원 및 환경 분야에서도 토양침식모형에 대한 관심이 높아졌는데, 이러한 관심으로 나타난 대표적인 연구로 건설교통부(현 국토해양부)에서 1992년 발간한 ‘댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사 연구’와 국립방재연구소에서 1998년에 발간한 ‘개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구’를 들 수 있다. 이를 바탕으로 소방방재청에서는 사전재해영향평

가 지침(2005)에서 USLE를 적용한 토사유출량 산정 방식을 채택하고 있다.

3. 강우침식인자의 개념과 의미

강우침식인자는 (R)USLE의 인자 중의 하나로서 강우로 인하여 발생하는 토양침식의 정도를 나타낸다. 강우침식인자는 단위(SI단위: MJmm/ha/hr/yr)를 가지고 있으며, 수식으로 정의되어 있기 때문에 충분한 강우자료가 있으면 정확한 값의 계산이 가능하다. 강우침식인자는 국외에서는 ‘rainfall erosivity, rainfall erosivity index, rainfall erosivity factor, rainfall erosion factor, rainfall erosion index, R-factor, rainfall-runoff erosivity, rainfall erosive index, R-value, EI₃₀ 등’으로 불리고 있으며, 국내 학계에서는 ‘강우인자, 강우침식인자, 강우 침식성인자, 강수인자, 강우침식도, 강우 에너지인자, 강우가식성 인자, 강우유출인자, 강우침식지수, 강우침식능 지수, 강우침식능 인자, 강우침식계수 등’의 용어로 혼용되어 사용되고 있다(화랑대연구소, 2011). 강우침식인자는 강우로 인해 발생하는 토양 침식의 정도를 강우의 에너지와 30분 최대 강우강도의 곱으로 나타낸 것으로서 강우 운동에너지에 의한 침식 뿐만 아니라 유출에 의한 침식도 일부 포함된다. 따라서 ‘강우유출 침식성인자’라고 하는 것이 원어에 담긴 의미를 표현하는데 합리적일 수 있지만 용어가 길기 때문에 본고에서는 ‘강우침식인자’로 사용하기로 한다.

(R)USLE는 일반적으로 20년 이상의 장기간에 걸친 연평균 토양침식량을 추정하기 위한 목적으로 만들어졌고, 강우침식인자는 (R)USLE의 인자 중에 하나로서 계산되는 값이기 때문에 개별 인자로서 독립적으로 사용될 때는 실무적으로 큰 의미가 없을 수 있다. 따라서 강우침식인자가 토양침식 모델링에 사용될 때는 개별 호우사상의 강우침식인자

의 연간 합을 의미하는 연강우침식인자의 20년 이상의 평균값이 사용될 때 본연의 의미를 갖게 된다.

4. 강우침식인자 산정방법

강우침식인자를 산정하는 방법은 크게 표준방법, 수정방법, 간편법, 대체지수 적용법, 빈도해석에 의한 방법으로 대별할 수 있다.

4.1 표준방법

표준방법은 20년 이상의 연속된 강우계이지 자료로부터 소정의 분류기준을 만족하는 호우사상을 각각 추출하고, 해당 호우사상에 대한 강우에너지와 30분 최대 강우강도를 곱한 값의 연평균값을 직접 계산하는 방법이다. 이 방법은 USLE 농업핸드북 No. 537(Wischmeier and Smith, 1978)과 RUSLE 농업핸드북 No.703(Renard et al., 1997)에 자세한 방법이 수록되어 있으며 가장 원론적이고 널리 알려진 방법이다.

표준방법에 의해서 강우침식인자를 산정하는 절차는, 첫 번째, 연간 호우사상 중에서 토양침식을 발생시키는 유효 호우사상을 먼저 분류해야 한다. 유효 호우사상은 비가 내리기 시작한 시점부터 비가 그칠 때 까지 총 강우량이 12.7mm 이상이거나, 12.7mm 미만의 강우량이더라도 최소 15분 동안 6.35mm 이상 내렸을 경우의 호우사상을 포함한다. 만약 6시간 동안 비가 오지 않거나, 강우량이 1.27mm 미만일 경우는 2개의 호우사상으로 구분하도록 되어 있다. 이 분류기준을 만족하기 위해서는 최소 5분 단위로 계측된 강우자료가 요구된다.

두 번째는 상기 기준으로 분류된 호우사상의 운동에너지를 계산해내는 것이다. (R)USLE는 미국에서 개발된 경험식이기 때문에 미국 지역의 호우사상으로부터 유도된 빗방울의 입경분포, 강우강도와 운동에너지와의 관계로부터 유도된 강우 운동에

너지식을 적용하여 계산하도록 되어 있다. 그러나 미국에서 유도된 강우 운동에너지식을 아무런 검증 없이 전세계 전지역에 적용하는 것은 무리가 있을 수 있다. 왜냐하면 지역에 따라 호우사상의 특성(빗방울의 입경분포, 강우강도와 운동에너지의 관계 등)이 다르고, 기후별, 지역별 강우분포 패턴이 다르기 때문이다. 이에 지역별 특성에 맞는 강우 운동에너지식에 대한 연구가 국내외에서 이루어져왔다. 이미 아시아 및 유럽 일부지역에서 해당 지역의 맞는 강우 운동에너지식이 제안된 바 있으며, 이와 같이 강우 운동에너지식과 관련된 연구는 강우침식인자 관련 연구의 한 분야로서 연구되고 있다. 우리나라에서 유도된 강우 운동에너지식은 노재경과 권순국(1984)의 식을 들 수 있다.

세 번째는 개별 호우사상의 강우자료로부터 30분 최대 강우강도를 추출하는 것이다. (R)USLE에서 강우침식인자를 산정할 때, 15분, 60분 강우강도가 아닌 유독 30분 최대 강우강도를 사용하는 이유는 강우침식인자 개발과정에서 수년간에 걸쳐 실험해본 결과, 다른 매개변수보다 30분 최대 강우강도가 토양침식과 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다. 30분 최대 강우강도가 15분, 60분 강우강도 등에 비해서 토양침식과 가장 상관성이 높다는 것은 현장 실험을 바탕으로 한 국외 연구결과를 통해서도 찾아볼 수 있으며, 우리나라에서도 1970년대말 ~ 80년대에 걸쳐, 현장시험을 통해 15분, 60분 최대강우강도보다, 30분 최대 강우강도를 적용하는 것이 보다 합리적인 것으로 보고 된 바 있다(정필균 등, 1983). 이와 같이 연속된 강우자료로부터 30분 최대 강우강도를 추출해야 하기 때문에 계산에 필요한 강우자료는 최소 10분 단위로 계측된 자료가 요구된다.

네 번째, 이와 같이 강우 운동에너지식을 이용하여 산정한 개별 호우사상의 강우에너지와 30분 최대 강우강도를 곱한 값은 개별 호우사상의 강우침식인자로서, 이 값의 연간 합이 곧 구하려고 하는 특정년도의 연강우침식인자가 되며, 결과적으로 이

연강우침식인자의 20년 이상의 평균값이 (R)USLE의 입력값으로 사용되는 연평균 강우침식인자가 되는 것이다. 국내에서 표준방법으로 계산된 대표적인 연구로는 정필균 등(1983)의 연구를 들 수 있다.

4.2 수정방법

수정방법은 강우자료의 제한으로 10분 단위 이상의 계측된 강우자료(통상적으로 30분 또는 1시간 단위 자료)를 사용하게 될 때, 적용되는 방법이다. 이 방법의 경우, 호우사상의 분류에서 12.7mm 미만의 강우량이더라도 최소 15분 동안 6.35mm 이상 내렸을 경우의 호우사상의 강우침식인자는 분류가 불가능하므로 배제된다. 그 외에 강우 운동에너지식을 이용한 강우에너지 계산은 동일한 절차를 거치며, 한정된 자료로 30분 최대 강우강도를 추정하는 절차를 따르게 된다. 예를 들어 고정시간 30분 단위 강우자료를 이용할 경우, 임의시간 30분 최대 강우강도 추정시 환산계수(conversion factor)를 적용할 수 있다. 또한 시간 단위 강우량을 이용하여 이보다 지속기간이 짧은 30분 최대 강우강도를 추정하는 방법으로는 60분 최대 강우강도와 30분 최대 강우강도간의 회귀식을 이용한 방법과 강우강도식을 이용한 방법 등이 사용되고 있다. 강문성 등(2003)은 전자의 방법으로, 박정환 등(2000)과 국립방재교육연구원 방재연구소(2009)에서는 후자의 방법을 사용한 바 있다. 최근 박찬원 등(2011)은 우리나라 60개 지점의 60분 단위 강우자료를 이용하여 1981~2010년 기간 동안의 연평균 강우침식인자 값을 재산정한 바 있다.

4.3 간편법

간편법은 강우자료의 획득이 제한되는 지역의 강우침식인자를 구하기 위한 방법으로서 다른 강우매개변수를 이용하여 경험적으로 추정하는 것이다. 이것은 표준방법으로 계산한 연강우침식인자와 동

일 기간 내에 연강우량, 월강우량 등과 같이 비교적 획득이 용이한 자료와의 통계적인 분석을 토대로 회귀식을 유도하여 다른 기간의 연강우침식인자를 간접적으로 추정하는 방법이다. 예를 들어 국외에 보고된 추정가능 강우매개변수로는 일강우량, 월강우량, 연강우량, 관측소 표고, 최대 시간강우량, 최대 24시간 강우량, 강우일수, 100mm 이상의 강우량 등을 들 수 있다. 이러한 방법은 지역별 특정 상수값을 포함하고 있는 식의 형태를 갖기도 한다. 이 방법은 호우사상의 분류, 강우 운동에너지식의 적용이나, 30분 최대 강우강도의 추출 등의 절차를 밟지 않고 간편하게 강우침식인자를 추정할 수 있는 방법으로 활용되고 있지만, 타지역에서 유도된 식을 다른 지역에 적용할 때는 많은 오차가 발생할 수 있음에 주의해야 한다. 국내 일부 학계에서는 Lo et al.(1985)이 제안한 연강수량을 이용한 간편 추정식이 널리 적용되어 왔는데, Lee and Heo (2011)는 이 식이 국내 강우침식인자를 추정하는데 적합하지 않음을 밝힌 바 있다. 이 분야는 국외에서 가장 활발히 연구되고 있는 분야로서 최근에는 기후변화와 연계된 연구 산물들이 보고되고 있다.

4.4 대체지수 적용법

이 방법은 강우침식인자 값과 근사한 값을 찾기 보다는 토양침식과 상관성이 높은 것으로 알려진 지표를 R값으로 대체하여 사용하는 경우이다. 대표적인 것으로서 Fouriner Index(FI) (Fournier, 1960)와 Modified Fouriner Index(MFI) (Arnoldus, 1977), 농업과학지수(Institute of Agricultural Index, IAS) (신제성 등, 1983) 등을 들 수 있다. 연구자에 따라 이 대체지수 자체를 강우침식인자 값으로 대체하거나, 제안된 지표를 매개변수로 한 회귀식을 이용하여 추정하는 방법이 사용되고 있다. 그러나 이중에서 FI와 MFI의 경우는, 실제 강우침식인자 값과의 통계분석을 통해서

제시된 지표가 아니기 때문에, 지역적인 검증이 요구된다.

4.5 빈도해석에 의한 방법

빈도해석은 실제 관측된 값을 토대로 해당 값이 얼마만큼의 빈도를 가지고 발생할 것인가를 해석하는 것이다. 따라서 실제 계산된 강우침식인자 값을 기준으로 빈도해석을 하는 방법과, 기존의 강우빈도해석과 동일한 방법으로 확률강우량을 산정한 후, 지역적 설계강우의 시간적 분포계수 등의 방법을 이용하여 30분 최대 강우강도를 추정 후에, 빈도별 강우침식인자를 구하는 방법은 전혀 다른 결과값이 나올 수 있다. 강우의 운동에너지는 일반적으로 일정 강우강도 이상일 경우 더 이상 상승하지 않고 일정한 값에 수렴되는 것으로 알려져 있기 때

문에 극치 강우량 값을 이용한 빈도해석을 통해 설계 호우사상을 만들어내고 이를 통해 강우침식인자를 추정하는 것은 무리가 있다. 빈도해석을 이용한 강우침식인자의 추정은 국내에서 일부 연구가 이루어졌으나, 결론적으로 (R)USLE를 이용한 토양유실 모델링의 입력자료로 사용하기 위한 강우침식인자는 개별 극치값이 중요한 것이 아니라, 20년 이상 누적된 총량의 평균값으로서의 의미가 중요하기 때문에, 강우침식인자의 기본개념으로 볼 때, 빈도해석에 의한 방법을 강우침식인자 계산방법으로 적용하는 것은 어렵다고 보겠다.

이상 짧은 지면을 통해 강우침식인자와 관련된 연구동향을 살펴보았는데, 본고의 내용이 향후 국내 강우침식인자 관련 연구에 도움이 되기를 바라는 바이다. ☺

참고문헌

1. 강문성(2003). "RUSLE를 위한 반월주기 강우가식성인자 산정", 한국농공학회지, 45(3), 29-40.
2. 건설교통부 한국건설기술연구(1992), 댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사연구
3. 국립방재연구소(1998), 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구
4. 기상청(2011). 1981~2011 한국기후표
5. 노재경, 권순국(1984). "강우특성을 이용한 강우에너지 산정에 관한 연구", 서울대학교 농학연구, 9(2), 23-31.
6. 농촌진흥청 농업과학기술원(2005), 비점오염원 관리와 국토보전을 위한 전국 토양침식위험성 평가
7. 박정환, 우효섭, 편종근, 김광일(2000). "토양유실공식의 강우침식도 분포에 관한 연구" 한국수자원학회 논문집, 33(5), 603-610.
8. 박찬원, 손연규, 현병근, 송관철, 전현정, 문용희, 윤순강(2011). "토양유실량 예측을 위한 강우침식인자 재산정", 한국토양비료학회지, 44(6), 977-982.
9. 방재연구소(2009), 토양침식예측모형의 매개변수 추정방법
10. 소방방재청(2005), 사전재해영향평가 지침
11. 신재성, 고문환, 임정남(1983). "토양유실예측을 위한 강우인자의 추정" 한국토양비료학회지, 16(2), 106-111.

12. 이준학, 오경두, 허준행(2011). “수정 IAS 지수를 이용한 강우침식인자 추정” 한국수자원학회 논문집, 44(8), 619-628.
13. 정필균, 고문환, 임정남, 윤기대, 최대웅(1983). “토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석” 한국토양비료학회지, 16(2), 112-118.
14. 화랑대연구소(2011). GIS를 이용한 한반도 등강우침식도 작성에 관한 연구
15. Arnoldus, H.M.J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. FAO Soils Bulletin, FAO, Rome, Italy 34, 83.
16. Fouriner, F. (1960). Climat er Erosion, Pressess Universitaires de France, Paris.
17. Lee, J. and Heo, J. (2011). “Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea”, Journal of Hydrology, 409, 30-48.
18. Renard, K.G., Yoder, D.T., Lightle, D.T., and Dabney, S.M. (2011). "Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation" In: Morgan, R.P.C. and Nearing, M.A.(Eds.), Handbook of Erosion Modelling, Willey-Blackwell, 137-167.
19. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., and Porter, J.P. (1991). “RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation”, Journal of Soil & Water Conservation, 46(1), 30-33.
20. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and Yode, D.C. (1997). “Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE” USDA Agric. Handbook No. 703, Washington, D.C.
21. 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.
22. Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1965). Rainfall-Erosion Lossess from Cropland East of the Rocky Mountains:Guide for selection of practices for soil and water conservation. USDA Agric. Handbook, No 282, Washington, D.C.