

서울지역의 강우침식인자에 대한 연구

Rainfall Erosivity in Seoul using Various Rainfall Kinematic Equations

이 준 학*, 신 주 영**, 허 준 행***
Joon-hak Lee, Juyoung Shin, Jun-Haeng Heo

요 지

토양유실 모델링의 중요한 입력자료인 강우침식인자는 분석자료, 호우사상의 분류, 강우 운동에너지식의 적용, 30분 최대 강우강도의 산정방법 등에 따라 연구자별로 결과값이 달라질 수 있다. 본 연구의 목적은 다양한 강우 운동에너지식에 따른 (R)USLE의 강우침식인자(R factor) 값의 차이와 정도를 비교 분석하기 위한 것이다. 이를 위해서 기상청으로부터 서울 지점에 대한 1960~1999년 기간의 1분 단위 강우자료를 이용하여 5가지 강우 운동에너지식에 따른 강우침식인자를 각각 계산하였으며, 그 값을 비교 분석하였다. 연구결과 Wischmeier와 Smith(1978)의 강우 운동에너지식을 적용한 강우침식인자 값이 가장 크게 나타났고, Brown과 Foster(1987)의 식을 적용한 값이 이에 비해 약 10%, 노재경과 권순국(1984)의 식을 적용한 값이 약 20% 작게 평가되는 것으로 나타났다. 국내에서 개발된 유일한 강우 운동에너지식인 노재경과 권순국(1984)의 강우 운동에너지식을 적용한 서울 지점의 강우침식인자는 6988.9MJmm/ha/hr/yr이었다.

핵심용어 : 강우에너지, 강우침식인자, 토양침식, 범용토양유실공식, 개정범용토양유실공식

1. 서 론

강우에너지는 지표면을 타격하는 강우입자의 운동에너지(kinetic energy)와 강우량의 곱으로 정의된다. 강우의 운동에너지는 빗방울(single raindrop) 각각의 질량(mass)의 합과 낙하속도의 제곱에 비례하며, 강우강도(rainfall intensity)의 함수로 나타낼 수 있다. 빗방울의 크기와 속도, 운동에너지에 대한 실험적인 연구는 1930년대 후반부터 시작되었으며, 실측 강우자료에 대한 분석을 통해서 강우 운동에너지식을 유도할 수 있다(Laws and Parsons, 1943; Wischmeier and Smith, 1978). 범용토양유실모델(Universal Soil Loss Equation, RUSLE) 및 개정범용토양유실모델(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)의 강우침식인자는 강우에너지에 30분 최대 강우강도를 곱한 값으로 정의된다(Wischmeier and Smith, 1978; Renard et al. 1997). 이와 같이 (R)USLE에 의한 토양유실을 모델링하기 위해서는 강우침식인자 산정이 필수적이며, 강우침식인자 산정을 위해서는 적용할 강우 운동에너지식을 선택해야 한다. 동일한 분석 자료라고 하더라도 강우 운동에너지식이 달라지면 값이 달라질 수밖에 없다. 정필균 등(1983), 박정환 등(2000) 및 신유(2010)는 각각 우리나라에 대한 전국적 규모의 강우침식인자 산정을 시도한 바 있으나, 강우 운동에너지식은 국외 강우 운동에너지식을 적용하였다. 우리나라에서 개발된 강우 운동에너지식은

* 정희원 · 연세대학교 토목환경공학 박사과정 수료 · E-mail : cetera@yonsei.ac.kr

** 정희원 · 연세대학교 산업기술연구소 연구원 · E-mail : asuran@yonsei.ac.kr

*** 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 · E-mail : jhheo@yonsei.ac.kr

노재경과 권순국(1984)이 서울 및 수원지점의 실측자료를 토대로 유도한 식이 있다. 토양유실 모델링의 중요한 입력자료인 강우침식인자는 분석자료, 호우사상의 분류, 강우 운동에너지식의 적용, 30분 최대 강우강도의 산정방법 등에 따라 그 결과값이 달라질 수 있다. 본 연구는 이 중에서 강우 운동에너지식에 따른 강우침식인자 값의 차이를 비교 분석하기 위한 것으로 서울 지점을 대상지점으로 하였다.

2. 강우의 운동에너지식

일반적으로 빗방울의 중앙값 크기(median drop size)는 강우강도가 높아질수록 점차 증가하며, 빗방울이 떨어지는 속도는 빗방울의 크기가 커질수록 증가하는 것으로 알려져 있다. Laws와 Parsons(1943)의 연구결과를 바탕으로 유도된 강우강도와 강우 운동에너지에 관한 식은 아래와 같다(Wischmeier and Smith, 1978).

$$e = 916 + 331 \log_{10} I, \quad I \leq 3 \text{ in/h} \quad (1a)$$

$$e = 1074, \quad I > 3 \text{ in/h} \quad (1b)$$

여기서, e 는 강우의 운동에너지($\text{ft} \cdot \text{tonf}/\text{acre}/\text{in}$), I 는 강우강도(in/h)를 의미한다. 이 식은 USLE에서 채택하고 있는 강우 운동에너지식으로, 이 식을 이용하여 미국 전역의 등강우침식도(iso-erodent map)가 작성되었다(Wischmeier and Smith, 1978). 식 (1a ~ 1b)으로부터 강우강도의 단위를 cm/h 로 하여 유도된 식은 아래와 같다.

$$e = 210.3 + 89 \log_{10} I, \quad I \leq 7.6 \text{ cm/h} \quad (2a)$$

$$e = 289, \quad I > 7.6 \text{ cm/h} \quad (2b)$$

여기서, e 는 강우의 운동에너지($\text{Metric tonf} \cdot \text{m}/\text{ha}/\text{cm}$), I 는 강우강도(cm/h)를 의미한다. 정필균 등(1983)은 이 식을 이용하여 우리나라 51개 지점의 강우침식인자를 계산한 바 있다. 또한, 식 (1a ~ 1b)를 SI단위로 바꾸어 유도한 식은 아래와 같다(Foster et al. 1981).

$$e = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I, \quad I \leq 76 \text{ mm/h} \quad (3a)$$

$$e = 0.283, \quad I > 76 \text{ mm/h} \quad (3b)$$

여기서, e 는 강우의 운동에너지(MJmm/ha), I 는 강우강도(mm/h)를 의미한다. 이 식은 박정환 등(2000)이 강우침식인자 계산에 적용했던 식이다.

Brown과 Foster(1987)는 기존과 다른 형태의 강우 운동에너지식을 아래와 같이 제안하였다.

$$e = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.05I)] \quad (4)$$

여기서, e 는 강우의 운동에너지(MJmm/ha), I 는 강우강도(mm/h)를 의미한다. RUSLE에서는 이 식의 사용을 추천하고 있으며(Renard et al, 1997), 우리나라 소방방재청(2005)에서도 사전 재해 영향평가지 이 식을 채택하고 있다.

일반적으로 강우는 국가별, 지역별 분포 특성이 다르기 때문에 다른 나라에서 조사된 강우 운동에너지식을 그대로 적용하는 데는 무리가 따른다. 이에 노재경과 권순국(1984)은 비교적 짧은 기간이지만 서울 지점의 1980년 6월~9월, 1982년 8월~9월, 수원 지점의 1983년 6월~9월 기간의 강우를 계측하여 우리나라 강우특성을 고려한 강우 운동에너지 식을 유도한 바 있다.

$$\log_{10} e = 1.08 + 0.136 \log_{10} I \quad (5)$$

여기서, e 는 강우의 운동에너지($J/m^2 \cdot mm$), I 는 강우강도(mm/h)를 의미한다. 신유(2010)는 Brown과 Foster(1987)의 강우에너지식과 유사한 형태의 아래 식을 적용하여 강우인자를 계산하였다.

$$e = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.082I)] \quad (6)$$

여기서, e 는 강우의 운동에너지($MJ/ha/mm$), I 는 강우강도(mm/h)를 의미한다. 이 식은 RUSLE(Foster et al., 2003)에서 채택하고 있는 강우 운동에너지식으로 McGregor et al.(1995)의 연구결과를 근거로 하고 있다.

3. 연구방법 및 데이터

본 연구의 목적은 강우 운동에너지식에 따른 강우침식인자값의 차이를 비교 평가하기 위한 것으로서 대상지역은 서울지점으로 한정하였으며, 이를 위하여 기상청으로부터 획득한 서울지점의 1960~1999년(40년) 기간의 1분 단위 강우자료를 5분 단위로 합산하여 사용하였다. 본 연구에서 사용한 자료는 기상청에서 자기우량기록지를 이미지 인식처리 프로그램을 이용하여 1분 단위로 수치화하여 구축한 강우자료(Minutely data using the Magnetic Recording, MMR)로서 관측개시 연도로부터 1999년까지 구축되어 있다. 본 연구에서는 정필균 등(1983)이 사용한 식 (2a ~ 2b), 박정환 등(2000)이 사용한 식 (3a ~ 3b), 소방방재청(2005)의 추천식인 식 (4), 노재경과 권순국(1984)이 개발한 식 (5), 신유(2010)가 사용한 식 (6)을 각각 적용하여 5가지 강우 운동에너지식에 따른 강우침식인자를 계산 후 동일단위로 환산하여 그 값을 비교 분석하였다.

4. 연구결과

정필균 등(1983), 박정환 등(2000), 신유(2010)가 각각 계산한 서울 지역의 강우침식인자를 표 1에 정리해보았다. 자료기간과 분석자료, 적용한 강우 운동에너지식이 다르기 때문에 정량적인 비교가 제한됨을 알 수 있다. 정필균 등(1983)의 강우침식인자는 단위가 $Metric \ tonf \cdot m/ha/cm$ 로 $MJmm/ha/hr/yr$ 로 환산하기 위해서 9.808을 곱하였다.

표 1. 서울 지역의 강우침식인자(선행연구 결과)

구 분	자료기간	강우침식인자 (MJmm/ha/hr/yr)	분석자료	강우 운동에너지식
정필균 등(1983)	1969~1978년	5816.1	자기우량기록지	식 (2a ~ 2b)
박정환 등(2000)	1973~1996년	5260.0	1시간 단위 강우자료 (1973~1987년 6~9월, 1988~1996년 12개월)	식 (3a ~ 2b)
신유(2010)	1971~1999년	6709.2	1분 단위 강우자료 10분 단위 합산	식 (6)

본 연구에서 식 (2a ~ 2b), (3a ~ 3b), (4), (5), (6)의 5가지 강우 운동에너지식을 적용하여 강우침식인자를 각각 계산한 결과는 표 2, 그림 1과 같다. 그림 2는 강우침식인자를 오름차순으로 정렬 후, 식 (2a ~ 2b)를 기준으로 한 강우침식인자와 식 (4), (5), (6)으로 계산한 강우침식인자와의 비율(%)을 나타낸 것이다.

표 2. 서울 지역의 강우침식인자 계산결과(단위 : MJmm/ha/hr/yr)

구 분	R1	R2	R3	R4	R5
1960~1969	10611.3	10614.5	9744.2	8545.3	10618.8
1970~1979	7939.6	7941.0	7166.4	6418.6	7910.2
1980~1989	7330.4	7331.4	6661.3	5884.8	7345.7
1990~1999	8935.0	8935.3	8110.6	7106.9	9003.4
40년 평균	8704.1	8705.6	7920.6	6988.9	8719.5
강우운동에너지식	식 (2a ~ 2b)	식 (3a ~ 3b)	식 (4)	식 (5)	식 (6)

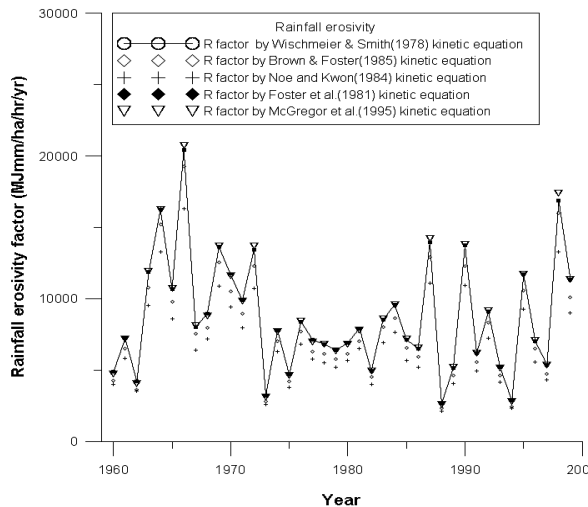


그림 1. 연도별 서울지역의 연강우침식인자(1960~1999년)

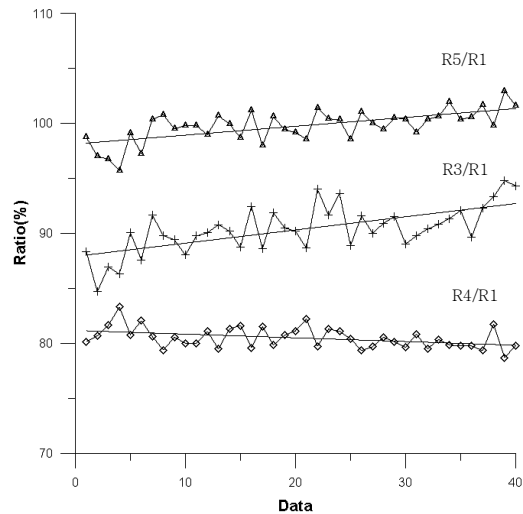


그림 2. 강우침식인자 비교(오름차순 정렬)

표 2에서 알 수 있듯이 USLE 추천식인 식 (2a ~ 2b)와 식 (2a ~ 2b)로부터 SI단위 변환을 통해 유도된 식 (3a ~ 3b)을 이용한 강우침식인자는 약 0.1% 미만의 차이를 보여 거의 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 RUSLE 추천식인 식 (4)를 적용한 값은 이 값보다 5.2~15.3%(평균 9.7%) 작은 것으로 나타났다. RUSLE2 추천식인 식 (6)을 적용한 값은 이 값보다 최소 4.3% 작거나, 2.9% 큰 값을 갖는 것으로 나타났으며, 평균값은 0.2% 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 노재경과 권순국(1984)의 강우 운동에너지식인 식 (5)을 적용하여 계산한 값은 USLE의 추천식을 이용한 값보다 16.7~21.3%(평균 19.5%) 작은 값을 갖는 것으로 나타났다.

그림 2에서 알 수 있듯이 강우강도가 커질수록 Brown & Foster(1987)의 식 (3)과 McGregor et al(1995)의 식 (5)를 이용한 강우침식인자와 Wischmeier and Smith(1978)의 강우 운동에너지식 (식 (2a ~ 2b))을 적용한 값의 차이가 감소되는 것으로 나타났으나, 노재경과 권순국(1984)의 식 (4)를 이용한 강우침식인자 값의 차이는 상대적으로 커지는 것을 알 수 있었다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 서울지점의 1960~1999년(40년) 기간의 연강우침식인자를 5가지 강우 운동에너지식을 적용하여 각각 계산한 뒤 결과값을 비교 분석한 결과는 아래와 같다.

첫째, 연구결과 Wischmeier와 Smith(1978)의 강우 운동에너지식을 적용한 강우침식인자 값이 가장 크게 나타났고, USLE에서 추천하고 있는 강우 운동에너지식(Wischmeier & Smith, 1978)과 Foster et al.(1981)의 식, RUSLE2의 강우 운동에너지식(McGregor et al. 1995)을 이용한 값은 거의 동일한 값을 갖는 것으로 나타났으나, RUSLE의 추천식(Brown & Foster, 1987)과 노재경과 권순국(1984)의 식으로 계산한 값은 평균 약 10% 및 20% 과소평가되는 것으로 나타났다. 향후 상이한 강우 운동에너지식을 이용한 강우침식인자의 상호 비교시 이러한 차이점을 고려해야할 것으로 사료된다.

둘째, 국내에서 개발된 유일한 강우 운동에너지식인 노재경과 권순국(1984)의 강우 운동에너지식을 적용한 서울 지점의 강우침식인자는 6988.9MJmm/ha/hr/yr이었다. 노재경과 권순국(1984)의 강우 운동에너지식이 서울 및 수원지점의 실측 실험을 통해서 국내에서 개발된 유일한 강우 운동에너지식 임을 볼 때 향후 서울지점의 강우침식인자 계산시 국외에서 개발된 강우 운동에너지식을 적용해온 기존 강우침식인자에 대한 재평가가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 노재경, 권순국 (1984). "강우특성을 이용한 강우에너지 산정에 관한 연구." **서울대학교 농학연구**, 제9권, 제2호, pp. 23-31.
2. 박정환, 우효섭, 편종근, 김광일 (2000). "토양유실공식의 강우침식도 분포에 관한 연구." **한국수자원학회의 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 603-610.
3. 소방방재청, (2005). 재해영향평가 실무지침서, p. 97.
4. 신유 (2010). 분단위 강우자료를 이용한 범용토양유실공식(USLE)의 강우침식인자 R 산정, 석사학위 논문, 전주대학교, p. 97.
5. 정필균 고문환, 임정남, 윤기대, 최대웅 (1983). "토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석." **한국토양비료학회지**, 한국토양비료학회, 제16권, 제2호, pp. 112-118.
6. Brown, L. C., and Foster, G. R. (1987). "Storm erosivity using idealized intensity distributions." *Transactions of the ASAE*, Vol. 30, pp. 379-386.
7. Foster, G. R., McCool, D. K., Renard, K. G., and Moldenhaus, W. G. (1981). "Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI Units." *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 36(6), pp. 355-359.
8. Foster, G. R., Yoder, D. C., Weesies, G. A., McCool, D. K., McGregor, K. C., and Bingner, R. L. (2003). *RUSLE 2.0 user's guide*. USDA-Agricultural Research Service, Washington D.C.
9. Laws, J. O. and Parsons, D. A. (1943). "The relation of raindrop size to intensity." *Transactions American Geophysical Union*, Vol. 24, pp. 452-460.
10. McGregor, K. C., Bingner, R. L., Bowie, A. J., and Foster, G. R. (1995). "Erosivity index values for northern Mississippi." *Transactions of the ASAE*, Vol. 38, pp. 1039-1047.
11. 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)*, U.S. Department of Agricultural Research Service, Washington, D.C.
12. 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.