

강원지역 시험유역에 대한 RUSLE 인자특성 분석 (I) - 강우침식능 인자를 중심으로 -

Characteristics Analysis for RUSLE Factors based on Measured Data of Gangwon Experimental Watershed (I)

이종설* · 정재학**

Lee, Jong Seol · Chung, Jae Hak

Abstract

The RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation) has been most widely used to estimate sediment yield in Korea. However RUSLE factors have not been verified based on measured data of sediment yield. The analysis of characteristics for the rainfall erosivity factor R was performed in this study. The R factor of RUSLE is expressed as multiple of total rainfall energy and maximum 30 min rainfall intensity. In this study, the characteristics of 10 rainfall energy equations were investigated using data measured in Gangneung experimental watershed, and applicability of each equations was reviewed based on results of the correlation analysis between measured sediment yield and total rainfall, between measured sediment yield and maximum intensity, and between measured sediment yield and total rainfall energy yield. Also, the relationship of I30 and I60 was proposed using 10-min rainfall data during 9 years.

Key words : RUSLE, Rainfall Erosivity Factor, Rainfall Energy, Maximum 30-min and 60-min Intensity

요 지

토사유출량 산정을 위하여 국내 실무에서는 RUSLE 공식이 대부분 사용되고 있다. 그러나 이 공식의 각 매개변수에 대한 국내의 검증은 거의 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 RUSLE 공식의 매개변수 중 강우침식능 인자에 대한 특성을 분석하였다. 강우침식능 인자는 강우의 총에너지와 30분 최대 강우의 곱으로 표현된다. 본 연구에서는 먼저 강원지역 시험유역의 토사유출량 관측자료를 활용하여 10개의 강우에너지 산정식의 특성을 검토하였으며, 총강우량, 최대 강우강도, 총 에너지, 토사유출량과의 상관관계를 분석하여 각 공식의 국내 적용성을 검토하였다. 또한 9년 동안의 10분 단위의 강우자료를 이용하여 강릉지역 30분 강우강도와 60분 강우강도의 관계를 제시하였다.

핵심용어 : RUSLE 공식, 강우침식능 인자, 강우에너지, 30분 최대강우강도, 60분 최대강우강도

1. 서 론

매년 빈번하게 발생하고 있는 대형 산불, 지역개발에 따른 건설활동, 산림관리를 위한 대규모 벌목 등과 같이 산지환경이 급변하는 지역의 하류에서는 토사재해의 위험성이 매우 높고, 특히 집중호우시 하천으로 다량 유입되는 토사로 인해 하천피해가 가중되고 있다.

이러한 토사재해를 방지하기 위해서는 무엇보다 가장 우선적으로 정확한 토사유출량을 예측할 필요가 있다. 우리나라의 경우 재해영향평가 제도가 실시된 이후 모든 재해영향평가에서는 USLE(Universal Soil Loss Equation) 또는 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)을 적용하여 개발에 따른 토사

유출량 변화를 예측하고 그에 따른 저감대책 수립에 활용하였다. 재해영향평가제도가 사전 재해영향성검토협의제도로 통합된 이후에도 대부분 실무에서 토사저감대책수립을 위하여 RUSLE 공식을 적용하고 있다.

RUSLE는 강우침식능 인자 등 각종 인자들로 구성된 경험식이기 때문에 우리나라의 특성을 고려하여 그 적용성을 검토할 필요가 있으며, RUSLE가 국내 실무에서 널리 사용되기 시작한 이후 RUSLE 인자들에 대한 연구가 많이 수행된 바 있다.

손광익(2001)은 7개 재해영향평가서에서의 RUSLE 산정방법 검토를 통해 국내에서 RUSLE 적용시 많이 범하고 있는 각 인자들의 산정 오류에 대한 연구를 수행한 바 있으며, 임

*정회원 · 국립방재교육연구원 방재연구소 시설연구관(E-mail: jlee@nema.go.kr)

**정회원 · 국립방재교육연구원 방재연구소 시설연구사

재영 등(2000)은 RUSLE 매개변수의 이론적 특성분석을 통하여 LS인자에 대한 민감도와 연평균 강우침식능 인자(annual rainfall erosivity factor)와 단일설계강우에 의한 강우침식능 인자와 비교를 수행한 바 있다. 그 외에도 남정만 등(2006)은 제주지역에서 실측 토사량을 이용하여 토양침식 인자(soil erodibility factor)에 대한 특징을 분석하였다. 그러나 우리나라의 경우 토양침식 및 토사유출량에 대한 관측자료가 매우 부족하며, 대부분의 연구에서는 일정기간동안의 평균 토사유출량 자료나 제한된 개수의 단일호우에 의한 토사유출량 자료만이 매개변수의 검정이나 RUSLE 공식의 국내 적용성 검토를 위해 적용되어 왔고, 이러한 시도들이 보다 높은 신뢰성을 얻기 위해서는 보다 많은 실측자료에 의한 검증이 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 우선적으로 RUSLE공식의 매개변수, 특히 강우침식능 인자에 대한 특성을 분석하고, 강원도 강릉에 위치한 시험유역에서 2001년부터 2006년까지 단일호우기반으로 관측된 토사유출량을 이용하여 RUSLE 공식의 적용성 및 각 인자의 민감도를 검토하고자 하였다.

2. RUSLE 모형의 개요

Wischmeier와 Smith(1978)은 기후인자로 강우침식성 지수(R)를 도입함으로써 최근까지도 널리 사용되고 있는 USLE 모형을 제안하였다.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

여기서 A는 단위면적당 연평균 토양침식량(t/ha)이며, R은 강우침식능 인자(MJ·mm/ha/hr), K는 토양침식 인자(t·hr·year/MJ·mm), L은 사면 길이인자, S는 사면 경사인자, C는 피복 관리인자, P는 토양침식대책인자이며, L, S, C, P는 무차원 인자이다.

국내 실무에서는 피복관리인자와 토양보존대책 인자를 산정할 때, 여러 가지 요구되는 자료의 부족으로 RUSLE에서 제시된 방법을 적용하지 않고 있으며, 피복관리인자와 토양보존대책 인자의 곱으로 표현되는 무차원 인자인 토양침식조절 인자(VM)를 적용하여 다음 식에 의해 대부분 토양침식량을 산정하고 있다.

$$A = R \times K \times L \times S \times VM \quad (2)$$

3. 강우 및 토사유출량 관측자료

RUSLE모형의 국내 적용성 검토 등을 목적으로 2001년부터 2006년까지 강원도 강릉시 사천면 지역에 시험유역을 운영하였다. 시험유역은 2000년 대규모 산불이 발생한 지역으로 산불발생 후 벌목을 실시한 후 조림이나 토사유출방지대책을 시행한 지역이다. 유역면적은 0.66 ha이다. 토사유출은 2001년~2006년 기간동안 총 42회의 강우사상에 대해 유역의 출구점에서 관측하였고, 강우량은 현장관측이 이루어졌으나 일부 결측으로 인해 인근 강릉기상청 자료를 이용하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이 42개 강우사상의 최대강우강도는

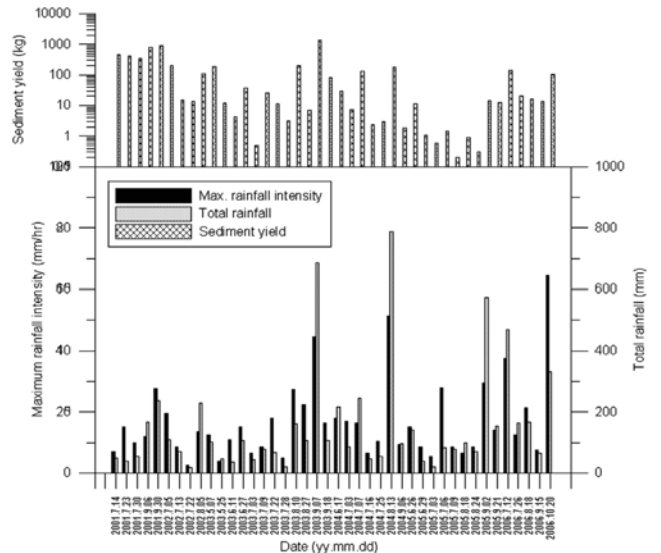


그림 1. 강우사상별 총강우량, 최대강우강도, 관측토사유출량

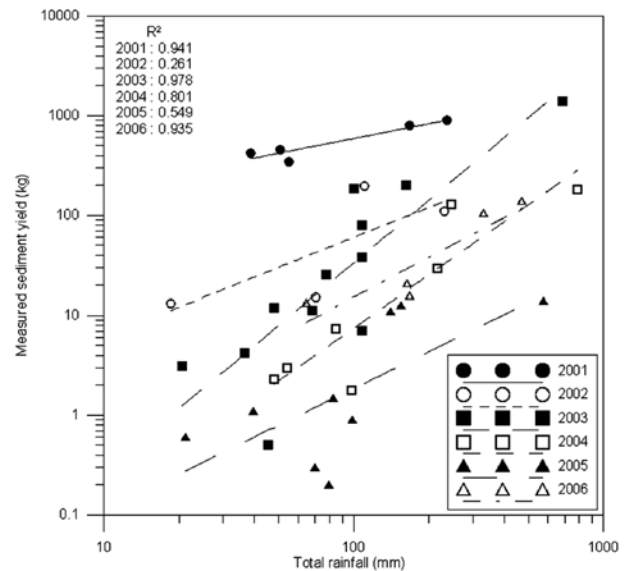


그림 2. P와 Qms의 관계

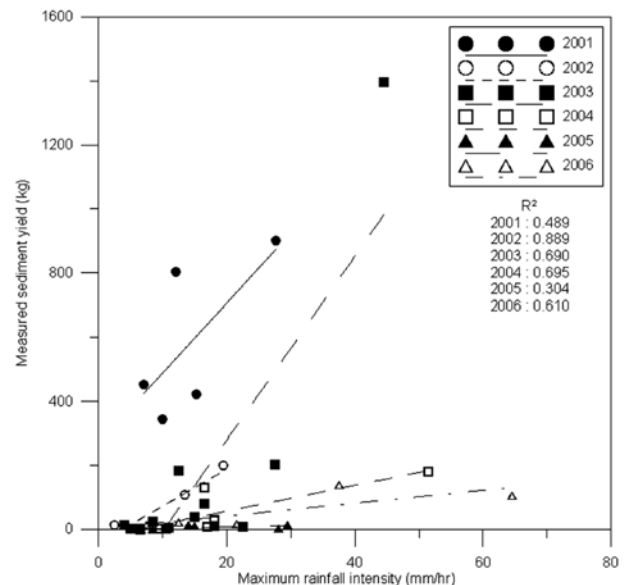


그림 3. I_{max}와 Q_{ms}의 관계

2.5~64.5 mm/hr, 총 강우량은 18.5~788.4 mm 범위이며, 관측 토사유출량은 0.2~1397.3kg의 범위에서 발생하였다.

2001~2006년 전체 연도에 대해서는 관측 토사유출량(Qms)과 총강우량(P) 및 최대강우강도(I_{max})와의 상관성(결정계수 R²=0.181, 0.118)은 매우 낮은 것으로 나타났는데, 이는 본 시험유역이 2000년에 산불이 발생했던 지역으로 산불이후 식생의 회복에 따라 토사유출의 경년 변화가 매우 큰 때문인 것으로 판단된다. 다음 그림 2에서 보는 바와 같이 경년별 P와 Qms와의 관계는 2002년과 2005년(R²=0.261, 0.549)을 제외하면 결정계수가 0.8이상으로 상관성이 상당히 높은 것으로 나타났으나, 그림 3에 나타난 바와 같이 I_{max}와 Qms와의 관계는 2002년을 제외하면 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

4. 강우침식능 인자 특성분석

RUSLE의 강우침식능 인자는 토양침식량과 강우인자들간의 상관관계로 부터 다음 식과 같은 강우에너지와 최대 30분 강우강도의 곱으로 표현하였다.

$$R = \sum EI_{30} \quad (3)$$

여기서, R은 강우 침식능 인자(MJ/ha · mm/hr), E는 강우의 총 에너지(MJ/ha)로 다음 식(4)와 같으며, I₃₀은 30분 최대 강우강도(mm/hr)이다.

$$E = \sum e \cdot \Delta P \quad (4)$$

여기서, e는 강우의 운동에너지(MJ/ha/mm), ΔP는 강우지속 시간간격당 강우증가량(mm)이다.

강우의 침식능은 강우강도, 지속시간, 빗방울의 질량, 직경 및 속도의 함수이며, 운동에너지와 강우강도사이의 일반적인 관계식을 유도하고자 하는 시도는 여러 연구자들에 의해 수행되었다. RUSLE에서는 Brown과 Foster(1987)가 제안한 식(5)를 사용할 것을 권고하고 있으며, 국내 실무에서도 이 식을 사용하고 있다.

$$e = 0.29(1 - 0.72e^{-I^{2.0}}) \quad (5)$$

여기서 I는 강우강도(mm/h), e는 운동에너지(MJ/ha/mm)이다.

Wischmeier와 Smith(1978)는 다음 식을 제시하였으며, 이 관계식은 USLE 공식의 R인자 결정에 주로 적용한 식이다.

$$e = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I \quad (6)$$

전술한 바와 같이 강우의 발생원인, 강우강도 등에 따라 강우의 운동에너지가 변화하기 때문에 강우특성이 상이한 국

가들의 여러 연구자들은 특정지역에 대한 연구를 통하여 다음 표와 같이 다양한 식들을 제시하고 있다. 한편 국내의 경우 노재경과 권순국(1984)이 서울 기상연구소의 1980년 6월~9월, 1982년 8월~9월, 그리고 수원농업 기상관측소에서 1983년 6월~9월까지 관측된 자료를 이용하여 제안한 다음 식이 유일하며, 시간 및 공간적으로 제한된 자료에 의한 것이므로 국내의 적용을 위해서는 추가적인 검정이 필요한 것으로 판단된다.

$$\log_{10} e = 1.08 + 0.136 \log_{10} I \quad (7)$$

따라서, 본 연구에서는 시험유역의 관측자료를 바탕으로 여러 연구자들에 의해 제안된 표 1의 강우에너지 산정식(5)-(14)를 42개의 강우사상에 대해 적용하여 총 강우에너지 E와 R을 산정하고 이를 최대강우강도 I_{max}, 총강우량 P, 관측토사유출량 Qms와의 비교를 통해 강우 에너지식의 적용성을 검토하고자 한다. 다음 표 2는 P와 E, I_{max}와 E의 결정계수를 나타낸 것으로 P와 E는 식(7)에 의해 산정된 E가 P와 가장 상관성이 높으며, I_{max}는 식(12)에 의한 것이 가장 상관성이 높다. 그러나 I_{max}는 P에 비해 상관성이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 다음 그림 4와 5에서 보는 바와 같이 각 공식들에 의해 산정된 E값의 차이는 강우량과 강우강도가 증가할수록 커지며, 이탈리아에서 유도된 식(14)와 USLE 추천공식(6)이 상대적으로 높은 값을 예측하고 있고, RUSLE 공식(5)와 우리나라에서 유도된 식(7)이 낮은 값을 예측하고 있다. van Dijk에 의해 제안된 식(8)에 의한 예측 값은 중간값을 나타내고 있는데 이 식은 여러 연구자들에 의해 제안된 식을 재검토하여 만들어진 일반식이기 때문에 평균적인 값을 보이고 있는 것으로 판단된다.

표 3과 표 4는 42개의 강우사상에 대해 각 공식들에 의해

표 1. 강우의 운동에너지와 강우강도 관계식

관계식	출처	식번호
$e = 0.283(1 - 0.52e^{-0.042I})$	van Dijk et al(2002)	(8)
$e = 0.0981 + 0.106 \log_{10} I$	Onaga et al.(1988), 일본 Okinawa	(9)
$e = 0.1132 + 0.00551I - 0.005 \times 10^{-2}I^2 + 0.00126 \times 10^{-4}I^3$	Carter et al(1974), 미국 남중부	(10)
$e = 0.369(1 - 0.69e^{-0.038I})$	Jayawardena & Rezaur(2000) 홍콩	(11)
$e = 0.26(1 - 0.7e^{-0.035I})$	Rosewell(1986), 호주 Southern Queensland	(12)
$e = 0.29(1 - 0.6e^{-0.04I})$	Rosewell(1986), 호주 New South Wales	(13)
$e = 0.0981 + 0.125 \log_{10} I$	Zanchi & Torri(1980), 이탈리아 Toscana	(14)

표 2. P와 E, I_{max}와 E와의 상관관계

년도	E 산정식									
	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
P-E	0.979	0.993	0.995	0.991	0.990	0.982	0.980	0.979	0.987	0.990
I _{max} -E	0.679	0.660	0.659	0.665	0.665	0.681	0.681	0.683	0.672	0.666

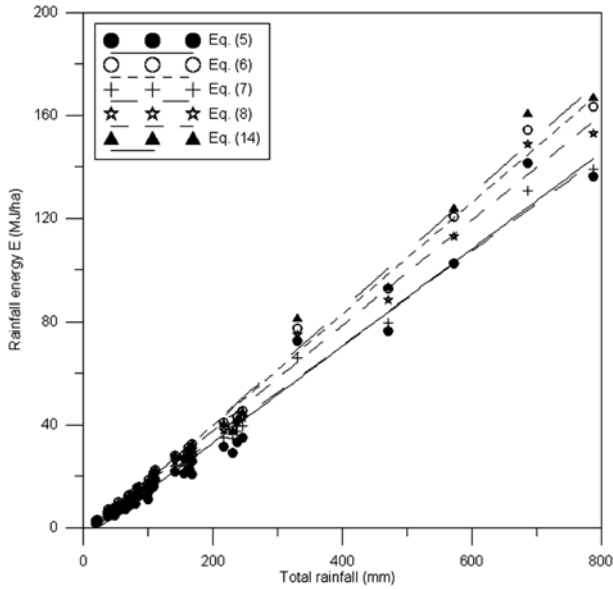


그림 4. P와 E의 상관관계

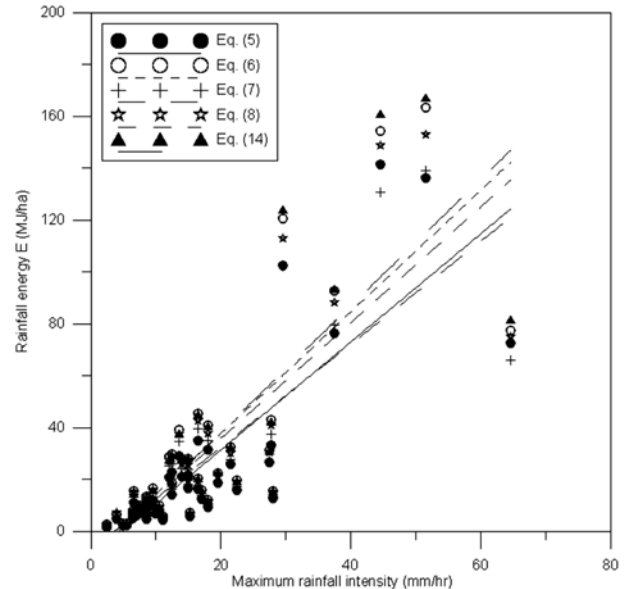


그림 5. I_{max}와 E의 상관관계

산정된 E값 및 R값과 관측 토사유출량 Q_{ms}와의 상관관계 (결정계수)를 나타낸 것이다. 그림 2와 3에서 나타난 바와 같이 토사유출량은 경년변화가 크기 때문에 연도별로 상관관계를 분석하였다. 표 3의 E와 Q_{ms}의 관계는 표 4의 R과 Q_{ms}의 관계보다 상관성이 매우 높으며, R과 Q_{ms}의 상관성이 낮은 것은 R값이 총 강우에너지 E와 30분 최대 강우강

도의 곱으로 산정되고, 그림 3에 나타난 바와 같이 최대강우강도 I_{max}와 관측토사유출량 Q_{ms}의 상관성이 낮기 때문인 것으로 판단된다. I_{max}와 Q_{ms}의 상관성이 낮은 이유는 42개 강우사상 중 지속시간이 길고 1개 이상의 침투강우량을 갖는 사상이 많아 최대강우강도가 해당 강우사상의 대표성을 갖는다고 보기 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

표 3. E와 Q_{ms}의 상관관계

년도	E 산정식									
	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
2001	0.916	0.934	0.934	0.930	0.931	0.924	0.920	0.919	0.926	0.930
2002	0.465	0.384	0.354	0.361	0.420	0.391	0.430	0.430	0.389	0.426
2003	0.983	0.982	0.982	0.982	0.983	0.983	0.983	0.984	0.983	0.983
2004	0.775	0.785	0.788	0.785	0.781	0.778	0.776	0.775	0.781	0.781
2005	0.523	0.542	0.541	0.533	0.540	0.525	0.524	0.523	0.529	0.540
2006	0.937	0.949	0.952	0.953	0.946	0.943	0.938	0.936	0.949	0.945
평균	0.766	0.763	0.758	0.757	0.767	0.757	0.762	0.761	0.759	0.768
평균(2002제외)	0.827	0.838	0.839	0.837	0.836	0.831	0.828	0.828	0.834	0.836
평균(2005제외)	0.766	0.763	0.758	0.757	0.767	0.757	0.762	0.761	0.759	0.768
평균(02,05년제외)	0.903	0.913	0.914	0.913	0.910	0.907	0.904	0.904	0.910	0.910

표 4. R과 Q_{ms}의 상관관계

년도	E 산정식									
	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
2001	0.662	0.680	0.683	0.678	0.676	0.672	0.666	0.666	0.674	0.675
2002	0.866	0.805	0.785	0.796	0.830	0.819	0.846	0.846	0.818	0.833
2003	0.983	0.984	0.983	0.983	0.984	0.983	0.983	0.983	0.983	0.984
2004	0.667	0.672	0.673	0.672	0.670	0.668	0.667	0.667	0.670	0.670
2005	0.438	0.451	0.451	0.447	0.448	0.441	0.439	0.439	0.443	0.448
2006	0.625	0.667	0.670	0.659	0.654	0.623	0.622	0.617	0.643	0.652
평균	0.707	0.710	0.708	0.706	0.710	0.701	0.704	0.703	0.705	0.710
평균(2002제외)	0.705	0.723	0.725	0.720	0.718	0.708	0.706	0.704	0.714	0.717
평균(2005제외)	0.716	0.719	0.715	0.713	0.720	0.708	0.712	0.711	0.712	0.720
평균(02,05년제외)	0.772	0.792	0.795	0.790	0.787	0.776	0.773	0.772	0.783	0.786

표 5. 강우사상별, 산정식별 E값

event	I _{max} (mm/hr)	P (mm)	E (MJ/ha)											
			Eq. (5)	Eq. (6)	Eq. (7)	Eq. (8)	Eq. (9)	Eq. (10)	Eq. (11)	Eq. (12)	Eq. (13)	Eq. (14)	Max.	Min.
1	7.0	50.6	6.03	8.21	7.37	8.04	7.62	6.83	7.63	5.17	7.18	7.78	8.21	5.17
2	15.2	38.8	5.85	7.36	6.35	6.94	7.14	6.08	7.10	4.81	6.40	7.34	7.36	4.81
3	10.0	55.0	6.98	9.10	8.17	9.00	8.49	7.71	8.73	5.91	8.12	8.68	9.10	5.91
4	12.0	168.0	20.98	28.82	25.37	27.27	27.20	23.26	26.26	17.78	24.52	27.85	28.82	17.78
5	27.7	237.2	33.38	43.18	37.62	40.97	41.42	35.81	41.16	27.91	37.48	42.53	43.18	27.91
6	19.5	110.0	18.79	22.58	19.18	21.09	22.31	18.83	22.46	15.21	19.77	23.02	23.02	15.21
7	8.5	70.5	8.47	11.43	10.28	11.24	10.61	9.56	10.69	7.25	10.06	10.83	11.43	7.25
8	2.5	18.5	1.83	2.56	2.42	2.71	2.25	2.27	2.43	1.65	2.37	2.28	2.71	1.65
9	13.5	230.0	29.24	39.24	34.71	37.67	36.98	32.25	36.52	24.73	33.97	37.86	39.24	24.73
10	12.5	100.5	14.19	18.88	16.22	17.33	18.26	14.97	17.35	11.74	15.83	18.77	18.88	11.74
11	4.0	48.1	4.83	6.62	6.29	7.09	5.81	5.95	6.37	4.33	6.20	5.88	7.09	4.33
12	11.0	36.5	4.48	5.86	5.30	5.88	5.42	5.03	5.64	3.82	5.28	5.53	5.88	3.82
13	15.0	107.5	16.79	21.11	18.05	19.58	20.65	17.17	20.24	13.70	18.13	21.27	21.27	13.70
14	6.5	45.5	5.22	7.41	6.60	7.10	6.88	6.01	6.66	4.51	6.32	7.03	7.41	4.51
15	8.5	77.4	9.99	13.41	11.81	12.76	12.69	10.92	12.42	8.41	11.53	13.00	13.41	8.41
16	18.0	68.5	9.48	11.99	10.60	11.73	11.38	10.22	11.72	7.94	10.71	11.67	11.99	7.94
17	5.0	20.5	2.20	3.03	2.81	3.11	2.73	2.62	2.85	1.93	2.74	2.77	3.11	1.93
18	27.5	162.5	26.66	31.22	27.16	30.60	30.37	27.66	32.39	22.01	28.61	31.26	32.39	22.01
19	22.5	108.0	15.92	19.71	17.25	19.13	18.92	16.87	19.52	13.24	17.61	19.43	19.71	13.24
20	44.5	686.5	141.51	154.48	130.78	148.84	155.72	142.42	169.78	115.88	143.72	161.14	169.78	115.88
21	16.5	107.5	16.35	20.55	17.71	19.30	19.97	16.89	19.81	13.41	17.82	20.55	20.55	13.41
22	18.0	216.2	31.51	40.87	35.18	37.94	39.60	32.98	38.40	25.99	34.82	40.73	40.87	25.99
23	17.0	85.0	12.49	15.92	13.77	14.99	15.39	13.07	15.22	10.30	13.77	15.82	15.92	10.30
24	16.5	245.8	35.23	45.63	39.49	42.76	44.00	37.10	43.05	29.14	39.16	45.22	45.63	29.14
25	6.5	48.0	5.58	7.77	6.96	7.53	7.21	6.39	7.09	4.81	6.72	7.36	7.77	4.81
26	10.5	54.0	7.68	9.95	8.63	9.35	9.57	8.10	9.39	6.35	8.55	9.83	9.95	6.35
27	51.5	788.4	136.42	163.55	139.14	153.03	162.01	139.66	164.79	112.05	144.13	167.20	167.20	112.05
28	9.5	97.5	12.23	16.64	14.69	15.86	15.68	13.54	15.30	10.36	14.27	16.05	16.64	10.36
29	15.0	140.5	21.91	27.99	23.77	25.53	27.47	22.31	26.36	17.83	23.63	28.31	28.31	17.83
30	8.5	39.5	4.63	6.43	5.74	6.23	5.97	5.29	5.88	3.98	5.56	6.10	6.43	3.98
31	5.5	21.2	2.28	3.15	2.91	3.22	2.84	2.71	2.96	2.00	2.84	2.89	3.22	2.00
32	28.0	83.0	12.92	15.68	13.64	15.19	15.19	13.68	15.85	10.77	14.12	15.62	15.85	10.77
33	8.5	79.5	9.31	12.85	11.53	12.53	11.92	10.63	11.82	8.01	11.18	12.17	12.85	8.01
34	6.6	99.0	11.20	15.46	14.03	15.35	14.18	12.99	14.33	9.71	13.63	14.45	15.46	9.71
35	8.5	70.0	9.42	12.76	11.04	11.78	12.25	10.11	11.61	7.86	10.70	12.58	12.76	7.86
36	29.5	572.5	102.64	120.79	102.23	113.04	120.10	102.32	122.42	83.02	106.74	124.02	124.02	83.02
37	14.0	154.5	21.03	28.13	24.39	26.16	26.99	22.52	25.90	17.53	23.79	27.71	28.13	17.53
38	37.5	470.5	76.56	92.76	79.78	88.14	90.80	79.55	93.07	63.23	82.33	93.54	93.54	63.23
39	12.5	163.5	22.72	29.78	25.88	27.99	28.57	24.17	27.89	18.88	25.52	29.34	29.78	18.88
40	21.5	167.5	25.90	32.52	27.89	30.36	31.71	26.68	31.34	21.22	28.09	32.65	32.52	21.22
41	7.5	64.5	7.34	10.08	9.15	10.03	9.25	8.49	9.38	6.36	8.92	9.43	10.08	6.36
42	64.5	330.5	72.52	77.66	65.96	75.20	78.96	74.53	88.24	60.63	73.51	81.82	88.24	60.63

표 3에서 E와 Q_{ms}의 연도별 결정계수를 비교하면 2001년은 식 (6)과 (7), 2002년은 식 (5), 2003년은 식 (12), 2004년은 식 (7), 2006년은 식 (8)이 가장 상관성이 높은 것으로 나타났으며, 전체 평균은 식 (14)가 가장 상관성이 높은 것으로 나타났다. 그러나, P와 Q_{ms}의 상관성이 매우 낮은 2002년과 2005년을 제외하면 식 (7)이 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다.

표 4의 R과 Q_{ms}의 관계 역시 E와 Q_{ms}와의 관계와 유사하며, P와 Q_{ms}의 상관성이 매우 낮은 2002년과 2005년을 제외하면 식 (7)이 가장 상관성이 높은 것으로 나타났다. 여기서 특이한 것은 우리나라 실무에서 사용되고 있는 RUSLE 추천식 (5)에 의한 결과는 P와 Q_{ms}의 상관관계가 가장 낮은 연도인 2002년에서만 가장 상관성이 높은 것으로 나타났고, 평균이나 상관성이 낮은 2002년과 2005년을 제외한 평

균 측면에서 보면 식 (7)과 식 (12)보다 오히려 상관성이 낮은 사실이다.

표 5는 42개 강우사상에 대해 각 산정식을 적용하여 구한 E값을 나타낸 것이다. 27번 강우사상의 경우 최소값과 최대값의 차이가 55.15 MJ/ha로 최대이며 이때 상대오차는 33.0%이다. 표에서 보는 바와 같이 식 (12)는 42개 강우사상 모두에 대해 최소산정을 하고 있으며, 식 (6), 식 (8), 식 (11), 식 (12)가 최대 산정을 하고 있다.

특히 USLE 추천식인 식 (6)은 대부분의 강우사상에 대해 최대 산정을 하고 있으며, 식 (11)과 식 (14)는 강우량과 강우강도가 큰 사상에 대해서 최대 산정을 하는 것으로 나타났다. 식 (8)은 강우강도와 강우가 매우 작은 사상에 대해 최대 산정하고 있는 것으로 나타났다. RUSLE 추천식 (5)에 비해 우리나라에서 유도된 식 (7)의 경우 대부분의 강우사상에 대해 근소하게 큰 값으로 산정하고 있으나, 강우강도와 강우량이 큰 경우 식 (5)가 오히려 큰 값을 산정하는 경우가 많다. 이 두 식에 의한 E값의 상대오차 범위는 0.4%~24.4%, 평균 12.8%로 큰 차이가 없고, 토사유출량과의 높은 상관성을 고려할 때 비록 제한된 자료에 의해 유도되긴 했으나 우리나라 특성을 반영하고 있는 식 (7)을 사용하는 것이 오히려 바람직한 것으로 판단된다. 그러나 향후 강우크기분포 자료의 시·공간적인 범위를 확대하여 강우에너지식을 보완 검증하여 우리나라에서 일반화된 식의 개발이 조속히 이루어져야 할 필요가 있다.

한편, RUSLE의 강우침식능인자 산정 시 강우의 운동에너지는 실 강우자료 또는 확률강우량의 자료를 이용하여 쉽게 산정가능하나, 30분 최대 강우강도를 산정하는 것은 용이하지 않다. 대부분 실무에서는 60분 최대 강우강도(I_{60})를 2배 또는 적절한 배수를 곱하여 산정하고 있으나, 30분 최대 강우강도(I_{30})의 환산을 위한 배수는 토양침식량에 직접 비례하

기 때문에 토양침식량 산정 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, I_{30} 과 I_{60} 과의 적절한 관계를 설정할 필요가 있다. 다음 그림 6은 2000년부터 2008년까지 강릉 지방기상청에서 관측된 10분 강우자료를 이용하여 강우사상별 I_{30} 과 I_{60} 을 산정하여 그 관계를 도식한 것으로, 강릉지역의 경우 이들 두 최대강우강도는 다음 식과 같은 관계식으로 나타낼 수 있으며, 결정계수는 0.970으로 신뢰할만한 수준이라고 할 수 있다.

$$I_{30} = 1.279 \times I_{60} \quad (15)$$

현재 실무에서와 같이 I_{30} 을 I_{60} 을 2배한 값을 적용하는 경우 강릉지역에서는 36.1%의 상대오차를 유발하게 되며, 이는 강우에너지 산정식의 선정에서 발생할 수 있는 상대오차보다 훨씬 크다. 식 (15)는 강릉지역에 국한되어 적용할 수 있는 식이며, 전국적인 사용을 위해서는 타 지역의 10분 강우자료를 활용하여 이들 관계를 설정하거나, 자료가 없다면 강우사상별로 1시간, 2시간, 3시간 최대강우로부터 30분 최대 강우량을 외삽하는 방법 등을 적용하는 것이 합리적인 방법이라고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 토사유출량 산정을 위하여 국내 실무에서 많이 사용되고 있는 RUSLE 공식의 매개변수 중 강우침식능 인자에 대한 특성을 분석하였으며, 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 42개의 강우사상에 대해 총 강우에너지 E와 총강우량 P, 총 강우에너지 E와 최대강우강도 I_{max} 와의 상관성을 분석한 결과, E는 P와는 높은 상관성을 보인 반면, I_{max} 와는 상대적으로 낮은 상관관계를 보였다. 이는 대상 강우사상 중 지속시간이 길고 1개 이상의 침투강우를 갖는 강우사상이 많아 하나의 최대강우강도가 강우사상의 특성을 반영하기 어려웠기 때문으로 판단된다.
- 2) 각 공식에 의한 강우에너지 및 강우침식능 인자값을 비교한 결과, 호주 Southern Queensland의 자료를 이용하여 Rosewell(1986)이 제안한 식이 강우에너지와 강우침식능 인자값을 최저 산정하고 있으며, Wischmeier와 Smith(1978)가 제시한 USLE 채택식이 대부분의 강우사상에서 이들 값을 최대 산정하는 것으로 나타났다.
- 3) 각 강우에너지 산정공식과 토사유출량과의 상관성을 분석한 결과 가장 양호한 자료계열에서는 노재경과 권순국(1984)이 제시한 공식이 토사유출량과의 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다. 이 식은 시·공적으로 제한된 자료에 의한 것으로 국내 적용시 추가적인 검토가 필요하지만, 큰 무리없이 적용이 가능한 것으로 판단된다.
- 4) 강릉지역의 9개년 동안의 10분 단위 강우자료를 이용하여 30분과 60분 최대강우강도의 관계를 분석하였으며, 30분 최대강우강도는 60분 최대 강우강도의 1.279배인 것으로 나타났다. 향후 타 지역에 대해서도 이들 관계의 규명이 추가적으로 필요한 것으로 판단된다.

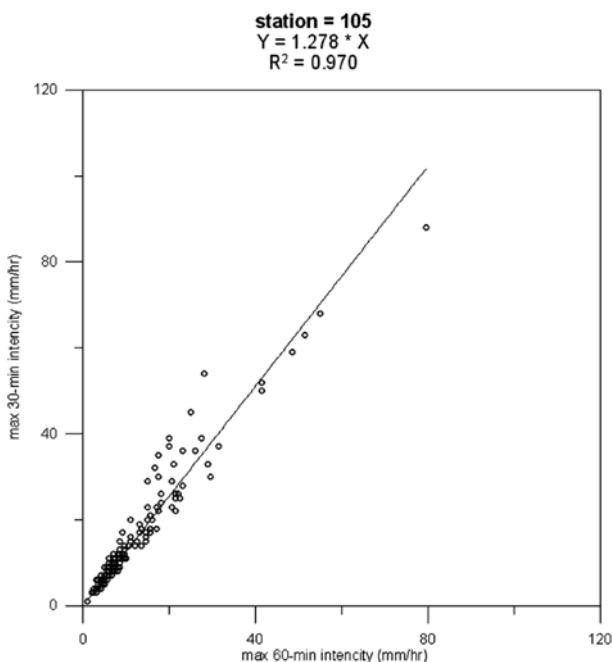


그림 6. 강릉지역 I_{30} 과 I_{60} 과의 관계

참고문헌

- 남정만, 김한중, 김준호 (2006) 개정범용토양손실공식의 토양침식 인자 추정에 관한 연구, **제주대 해양과환경연구논문집**, 제30권 제1호, pp. 47-58.
- 노재경, 권순국 (1984) 강우특성을 이용한 강우에너지 산정에 관한 연구, **서울대 농학연구**, 제9권, 제2호, pp. 23-31.
- 손광익 (2001) 해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토(I) - RUSLE를 중심으로-, **한국수자원학회논문집**, 34(3), pp. 199-207.
- 임재영, 서규우, 송일준, 송무효 (2000) USLE 계열모형의 매개변수 산정에 관한 연구, **동의대학교 산업기술연구지**, 제14권, pp. 61-71.
- Brown, L.C. and Foster, G.R. (1987) *Storm erosivity using idealized intensity distributions*, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 30, pp. 379-386.
- Carter, C.E., Greer, J.D., Braud, H.J. and Floyd, J.M. (1974) Rain-drop characteristics in south central United States, *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 17, pp. 100-103.
- Jayawardena, A.W. and Rezaur, R.B. (2000) Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong, *Hydrological Processes* 14, pp. 1069-1082.
- Onega, K., Shirai, K. and Yoshinaga, A. (1988) Rainfall erosion and how to control its effects on farmland in Okinawa, In Rimwanich, S.(eds), *Land conservation for future generations*, Department of Land Development, Bangkok, pp. 627-639.
- Rosewell, C.J. (1986) Rainfall kinetic energy in eastern Australia, *Journal of Climate and Applied Meteorology* 25, pp. 1965-1971.
- 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* 261, pp. 1-23.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) Predicting rainfall reosion losses: A guide to conservation planning, US. Dep. Agric., *Agric. Handb.* No. 537
- Zanchi, C. and Torri, D. (1980) Evaluation of rainfall energy in central Italy, In De Boodt, M. and D. Gabriels(eds), *Assessment of erosion*, Wiley, London.

◎ 논문접수일 : 2009년 10월 26일
 ◎ 심사의뢰일 : 2009년 10월 26일
 ◎ 심사완료일 : 2009년 11월 06일