

한국형 토양유실공식에 의한 토양유실량 현장예측

송재민¹ · 양재의² · 임경재³ · 박윤식^{1*}

¹공주대학교 생물산업공학부

²강원대학교 바이오자원환경학과

³강원대학교 지역건설공학과

Application of KORSLE to Estimate Soil Erosion at Field Scale

Song Jae Min · Jae E Yang² · Kyoung Jae Lim³ · Youn Shik Park^{1*}

¹Rural Construction Engineering, Kongju National University

²Dept of Biological Environment, Kangwon National University

³Dept of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

ABSTRACT

In 2013, the Ministry of Environment in South Korea promulgated a new regulatory bulletin that contained revised enforcement ordinance on soil management protocols. The bulletin recommends the use of Universal Soil Loss Equation (USLE) for the soil erosion estimation, but USLE has limited applicability in prediction of soil erosion because it does not allow direct estimation of actual mass of soil erosion. Therefore, there is a great need of revising the protocol to allow direct comparison between the measured and estimated values of soil erosion. The Korean Soil Loss Equation (KORSLE) was developed recently and used to estimate soil loss in two fields as an alternative to existing USLE model. KORSLE was applied to estimate monthly rainfall erosivity indices as well as temporal variation in potential soil loss. The estimated potential soil loss by KORSLE was adjusted with correction factor for direct comparison with measured soil erosion. The result was reasonable since Nash-Stucliff efficiency were 0.8020 in calibration and 0.5089 in validation. The results suggest that KORSLE is an appropriate model as an alternative to USLE to predict soil erosion at field scale.

Key words : KORSLE, Soil erosion, USLE, Sensitivity analysis

1. 서 론

토양유실은 강우 발생 시에 빗방울의 타격 및 지표 유출수에 의해서 토양 표면의 토양 입자가 이동하는 현상이다. 그러나 도시화 등과 같은 토지 이용 현황이 인위적으로 바뀌거나 혹은 기후변화에 따른 강우 유형의 변화에 따라 토양입자의 거동은 다양하게 바뀔 수 있다. 경작지에서의 토양유실은 토양 자원의 손실로 작용하며, 또한 유실된 토양이 강이나 하천으로 유입될 경우에는 탁도를 증가시킬 뿐만 아니라 토양 입자에 의해 이동하는 영양염류로 인해 물 오염의 원인으로 작용할 수 있다.

이러한 토양유실의 양을 추정하기 위해 범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation, USLE) (Wischmeier

and Smith, 1965; Wischmeier and Smith, 1978)이 오랫동안 사용되고 있다. 범용토양유실공식은 단위 면적(ha)에서 발생할 수 있는 토양유실 발생 가능성(potential soil loss, Mg/ha/yr)을 추정하기 위한 공식으로, 강우침식능인자(rainfall erosivity factor; R factor, MJ·mm/ha·yr·hr), 토양침식성인자(soil erodibility factor; K factor, Mg·hr/MJ·mm), 지형인자(slope and slope steepness factor; LS factor, dimensionless), 지표피복인자(crop and cover management factor; C factor, dimensionless), 보전관리인자(conservation practice factor; P factor, dimensionless)의 5개 인자를 필요로 한다(Wischmeier and Smith, 1965; Wischmeier and Smith, 1978). 이 공식은 필요로 하는 5개인자의 곱만으로 토양유실 발생 가능성을 추정하

*Corresponding author : park397@kongju.ac.kr

Received : 2019. 9. 11 Reviewed : 2019. 10. 3 Accepted : 2019. 10. 17

Discussion until : 2019. 12. 31

기 때문에 모형의 활용성 측면에서 복잡하지 않다. 그러나 이 공식에 의한 토양유실 발생 가능성 추정치는 적용 대상 지점에서 발생할 수 있는 실제 토양 침식량을 정의하기 위한 것이 아니기 때문에 공식에 의해 예측된 값에 대한 유달률(sediment delivery ratio; SDR) 보정이 필요하다(Wischmeier and Smith, 1965; Wischmeier and Smith, 1978; Park et al., 2007; Kim et al., 2017).

즉, 범용토양유실공식 및 이에 근거한 모형에 의한 토양유실 예측값은 토양이 유실될 수 있는 가능성을 나타내는 지표이기 때문에, 유역의 유출구까지 유실된 토양의 양과의 비교를 위해서는 유달률을 산정하여 보정할 필요가 있다. 유달률이란 유역의 유출구에서의 유수량을 유역의 총 토양유실량으로 나눈 비율로 정의된다. 유달률은 유역의 크기, 유역의 형상, 유역의 경사, 강우 유형, 지표유출량, 침투유량, 토지이용 조건, 작물의 종류 및 생장상태, 토양 속성 등과 같은 조건의 영향을 받으나 위의 모든 조건을 고려하여 유달률을 산정하는 것은 불가능하다.

유달률 산정 방법은 유역의 면적이나 경사에 계수를 곱하여 산정하는 방법(USDA, 1972; Vononi, 1975; Williams, 1977), 유역의 curve number와 유역 면적을 고려하는 방법(Williams and Berndt, 1977) 및 GIS의 격자자료별 유달률 산정 방법과 같은 매우 복잡한 형태로 개발되어(De Rosa et al., 2016) 제안되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 토지이용현황 및 토양의 속성이 다양한 유역의 규모에 대한 적용 시에 필요한 것으로 보인다. 토양유실을 예측하기 위한 대상 지점 하나의 토지이용현황 및 토양 속성으로 그 규모가 작을 경우에는 대상 지점의 조건을 반영할 수 있는 계수를 결정하여 적용하는 것이, 범용토양유실공식의 복잡성 유지 측면에서 볼 때, 보다 합리적일 것으로 보인다.

우리나라에서는 토양유실에 대한 심각성 및 관리 필요성을 인지하여 2012년에 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’(Ministry of Environment, 2012)(이하 ‘고시’)를 제정하고 2013년부터 시행하여 국내에서의 토양유실 발생 현황을 파악하고 있다. 이 고시는 예비조사와 현장조사로 구분되며, 두 단계 조사 모두 범용토양유실공식에 근거하도록 하고 있다. 예비조사에서는 전국을 대상으로 하여 토양유실이 심각할 것으로 추정되는 지점을 선별하는데 주된 목적을 두고 있으며, 현장조사는 예비조사 결과에 근거하여 현장을 방문하여 대상 필지의 토양 속성, 지형적인 조건(경사장 및 경사도), 토지피복현황 등을 조사하여 현장 조건에 부합하는 범용토양유실공식의 인자를 결정하여 토양유실량을 추정하도록 하고 있다.

예비조사 단계에서는 전국을 대상으로 하기 때문에, 이미 산정된 강우침식능인자(Jung et al., 2004), 정밀토양도에 근거한 토양침식성인자, 수치표고모형을 이용한 지형인자, 토지이용도를 이용한 지표피복인자, 수치표고모형 및 토지이용도를 이용한 보전관리인자를 적용하는 것이 타당할 것으로 보인다. 그러나 현장조사에서는 현장을 방문하기 때문에 대상 지점에 대한 자료를 수집하여 각 인자를 결정하는 것이 타당한 것으로 보이나 강우침식능인자는 예비조사 시에 사용되었던 인자를 그대로 적용하도록 하고 있어, 토양유실 가능성 추정에 한계가 있는 것으로 보인다. 이와 함께 현 고시의 현장조사는 조사대상 필지에서 발생하는 실제 토양유실량을 측정하고, 범용토양유실공식에 의한 토양유실 발생 가능성을 추정하도록 되어 있다. 그러나 범용토양유실공식에 의해 예측된 토양유실 발생 가능성 추정치는 연 단위이기 때문에 1년에 각각 1개의 값만이 주어지게 된다. 따라서 범용토양유실공식은 현장에서의 토양유실 실측치와 예측치를 비교, 평가하는 과정이 이루어지기 어렵다.

본 연구는 현장 적용성이 높은 범용토양유실공식에 근거하여 토양유실 발생 가능성을 추정하고, 이를 실측 토양유실량과 비교하고 보정할 수 있는 방안을 제시하여 환경부 고시를 개정하고 현장에서 보다 정확한 토양유실을 예측할 수 있는 기반을 제공하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지역

환경부의 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’에 따라 한국환경공단에서는 2014년부터 2018년까지 금강수계 2지점, 한강 수계 2지점, 섬진강 수계 2지점, 낙동강 수계 2지점에 대한 토양유실량 모니터링 사업을 수행하였다. 이 모니터링 지점에서의 토양유실량 측정은 필지에서 발생한 토양을 전량 회수하여 유실된 토양의 양(Mg)을 산정하는 방식으로 운영되고 있다. Fig. 1(1)에서와 같이 필지에서 유실된 토양은 집수플럼부(Fig. 1(2))를 거쳐서 침사지통(Fig. 1(3))에 수집된다. 그리고 집수플럼부에서의 유실된 토양의 양(Mg)과 침사지통에서의 유실된 토양의 양을 산정하기 위하여 부유사 농도(mg/L)와 유출량(L)를 측정하고, 침전된 토양의 양(Mg)을 측정하여 대상 필지에서 유실된 토양의 양(kg)을 산정하고 있다.

본 과업에서는 각 8개 필지에서 2014년부터 측정된 토양유실량 자료를 한국환경공단으로부터 제공받아 실측 토양유실량 자료로 이용하였다. 전체적인 모니터링 기간은

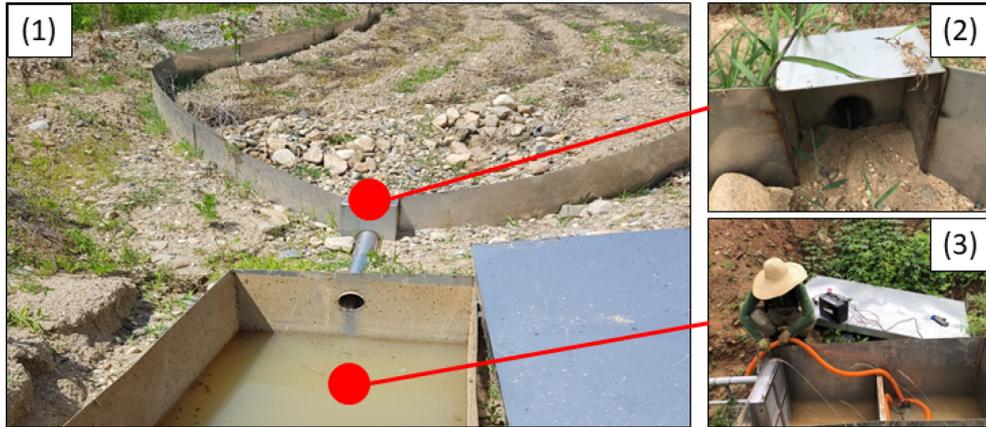


Fig. 1. Soil erosion monitoring method at field segment plot.

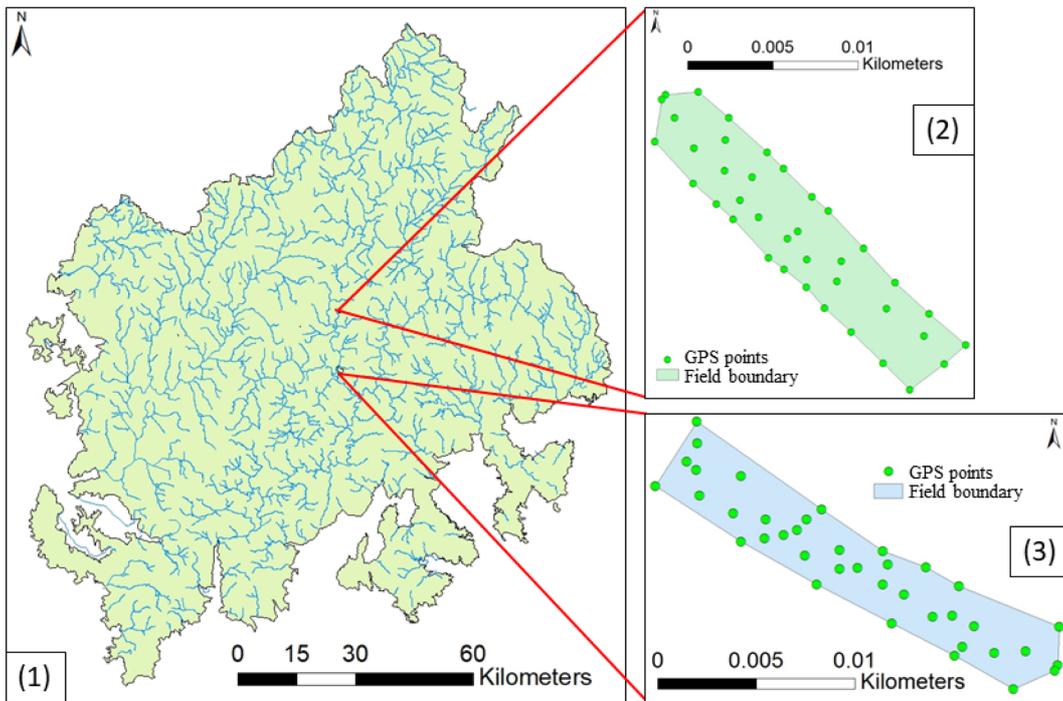


Fig. 2. Locations of field monitoring Seomjingang A (2) and Seomjingang B (3) at Sumjin River watershed.

수년에 해당하나 필지 단위 모니터링이기 때문에 강우 시 유출이 발생하지 않았거나, 지점에서 모니터링 수행 기간이 짧아 자료의 개수가 적은 경우도 있었다. 이런 이유 때문에, 본 과업에서는 총 8개 지점 중에서 2014년부터 모니터링이 수행된 섬진강 유역 2개 지점(Fig. 2(1))에 대해서만 토양유실량 예측이 이루어질 수 있었다. 그리고 섬진강A와 섬진강B 지점 모두 모니터링은 2014년 7월 18일부터 수행되었는데, 강우 시 유출과 토양유실이 발생한 경우는 섬진강A 지점이 20회이고 섬진강B지점이 39회이

었다. 실측 자료의 개수가 제한적이므로 이상치 제거 없이 모든 자료를 이용하여 토양유실량 예측값과 비교하였다.

섬진강 유역 내에 위치한 모니터링 지점은 전라남도 화순군 북면에 위치한 섬진강A(Fig. 2(2))와 전라남도 화순군 남면에 위치한 섬진강B(Fig. 2(3))로, 섬진강A와 섬진강B 지점들 모두 농경활동이 이루어지지 않아 초지에 가까운 상태이며, 면적은 각각 0.0091 ha와 0.0076 ha이며, 평균 경사도는 섬진강A는 21.97%였으며 섬진강B는 20.70%였다.

2.2. 한국형 토양유실공식(KORSLE)의 인자 정의

범용토양유실공식(USLE)은 연평균 토양유실 가능성 추정치를 예측하기 위한 공식으로 장기 평균 토양유실량 또는 연간 토양유실량 예측에 이용될 수 있다. 이러한 경우 1년 단위 값인 예측치를 현장 실측치와 비교하기가 어렵다. 이러한 근본적인 문제점을 해결하기 위해 월별로 토양유실 가능성을 추정할 수 있는 한국형 토양유실공식(Korean Soil Loss Equation; KORSLE)이 최근 개발되어 적용된 바 있다(Sung et al., 2016; Kim et al., 2017; Yu et al., 2017). 이 한국형 토양유실공식은 범용토양유실공식의 한계적인 연단위의 토양유실량 발생 가능성 추정치를 월 단위로 예측할 수 있도록 하고 있으며, 또한 최근 혹은 임의 강수량자료에 의해 월별 강우침식능인자를 산정할 수 있도록 하고 있다. 이와 함께 지표피복상태에 영향을 미치는 작물의 생장을 고려할 수 있도록 4대강 수계별 및 월별 지표피복인자 데이터베이스를 제공하고 있다(Kongju National University, 2018). 범용토양유실공식에 의해 예측되는 토양유실량 발생 가능성 추정치는 연간 1개의 값만이 산정될 수 있기 때문에, 본 연구에서는 월별 토양유실량 발생 가능성 추정이 가능한 한국형 토양유실공식에 의해 모니터링기간에 대한 토양유실 발생 가능성 추정치를 산정하였다.

한국형 토양유실공식은 국내 47개 지점에 대해서 월 강수량(mm)에 의한 월 단위 강우침식능인자를 산정할 수 있다. 본 연구의 대상지역인 섬진강A 지점은 기상청의 광주 지점과 인접한 지역이고 섬진강B 지점은 순천 지점과 인접한 지역이므로 강수량 자료는 각각 광주와 순천 지점의 자료를 이용하였으며, 두 기상청 지점 모두 광주 지점에 해당하는 강우침식능인자 산정식을 적용하였다(식 1).

$$R_i = 0.133436P_i^{1.63131} + 10.3128M_i^{0.3287} \quad (1)$$

여기서, R_i 는 월별 강우침식능인자(MJ·mm/ha·yr·hr)이며, P_i 는 월 강수량(mm)이며, M_i 은 월(1월의 경우 1, 12월의 경우 12)이다.

토양침식성인자(Mg·hr/MJ·mm)는 한국환경공단의 모니터링 수행 결과를 적용하여 섬진강A 지점은 0.023, 섬진강B 지점은 0.047을 적용하였다. 지형인자는 지점의 경사도 및 경사장에 의해 산정될 수 있는데 대상 지점을 방문하여 GPS 장비에 의해서 경위도 및 고도 자료를 수집하여(Fig. 2(2), Fig. 2(3)) 대상 지점에 대한 1m 해상도를 가지는 수치표고모형을 제작한 뒤에, 현재 고지에서 제시하고 있는 지형인자 산정식(Wischmeier and Smith, 1978)(식 (2))을 이용하는 모형인 ArcGIS-based Sediment

Assessment Tool for Effective Erosion Control (ArcSATEEC) (Yu et al., 2017)을 이용하여 지형인자를 산정하였다. 지표피복인자는 지표의 상태를 반영하기 위한 인자로 섬진강A와 섬진강B 지점 모두 초지의 상태이므로 0.04를 적용하였다. 보전관리인자는 농경지에서의 경작 관리 형태를 반영하기 위한 것인데 대상 지점은 초지이므로 모두 1.00을 적용하였다(Kongju National University, 2018).

$$LS = (\lambda / 22.13)^m \times (65.4\sin^2\beta + 4.5\sin\beta + 0.0654) \quad (2)$$

$$\beta > 0.05 : m = 0.5$$

$$0.03 < \beta \leq 0.05 : m = 0.4$$

$$0.01 < \beta \leq 0.03 : m = 0.3$$

$$\beta \leq 0.01 : m = 0.2$$

여기서, LS 는 지형인자이며, λ 는 경사면 투영 거리(meter), β 는 경사도(radian), m 은 경사에 따른 변수이다.

범용토양유실공식과 이에 근거한 모형은 적용대상 지역에서 발생할 수 있는 토양유실의 가능성을 추정하기 위한 것으로 실제 발생량과 비교하기 위해서는 보정이 필요하다. 이러한 보정은 한국형 토양유실공식에 의해 예측된 토양유실량에, 강우 시 필지 조건을 반영할 수 있는 계수를 결정하여 적용하고 실제로 발생하는 토양유실량과의 비교를 통해 가능할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 한국형 토양유실공식에 의해 예측된 토양유실 발생 가능성 추정치에 각 지점에서의 조건을 반영할 수 있는 보정계수를 산정하여 예측 토양유실량(Mg)과 실측 토양유실량을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 한국형 토양유실공식의 인자 산정 결과

본 연구에서는 실측 토양유실량과 한국형 토양유실공식에 의한 예측 토양유실량을 비교하였는데, 한국형 토양유실공식은 범용토양유실공식의 기본 형식을 따르면서 월별에 대한 토양유실 가능성 예측이 가능하다. 한국형 토양유실공식의 강우침식능인자는 기간에 대한 누적 강우량에 의해 결정되기 때문에 강우량의 크기에 따라 인자의 크기가 변화한다. 섬진강A 지점의 경우 모니터링 시작 시점부터 유실된 토양의 양이 측정이 된 첫 번째 날인 2014년 7월 18일의 경우, 기상청의 광주 지점으로부터 누적 강수량은 69.6 mm였으며 식(1)에 의해서 계산된 강우침식능인자(R)는 272.1 MJ·mm/ha·yr·hr였다. 동일한 방식으로 2017

Table 1. Determination of KORSLE factors in Seomjingang A site

Date	Accumulated Rainfall (mm)	R	K	LS	C	P
2014. 07. 18	69.6	272.1	0.023	0.8492	0.04	1.00
2014. 07. 21	59.0	240.1	0.023	0.8492	0.04	1.00
2014. 08. 05	83.1	344.0	0.023	0.8492	0.04	1.00
2014. 08. 08	14.6	174.0	0.023	0.8492	0.04	1.00
2014. 08. 15	14.6	174.0	0.023	0.8492	0.04	1.00
2014. 08. 19	196.0	895.7	0.023	0.8492	0.04	1.00
2014. 08. 22	17.0	177.0	0.023	0.8492	0.04	1.00
2014. 08. 26	73.0	309.6	0.023	0.8492	0.04	1.00
2014. 09. 12	35.5	236.2	0.023	0.8492	0.04	1.00
2014. 09. 24	78.0	354.0	0.023	0.8492	0.04	1.00
2014. 10. 23	77.5	381.0	0.023	0.8492	0.04	1.00
2015. 07. 14	109.9	421.8	0.023	0.8492	0.04	1.00
2016. 07. 05	234.4	1117.3	0.023	0.8492	0.04	1.00
2016. 08. 30	49.1	240.0	0.023	0.8492	0.04	1.00
2016. 09. 22	190.2	888.3	0.023	0.8492	0.04	1.00
2016. 10. 07	146.3	674.2	0.023	0.8492	0.04	1.00
2017. 07. 05	58.2	237.9	0.023	0.8492	0.04	1.00
2017. 07. 25	74.5	288.0	0.023	0.8492	0.04	1.00
2017. 10. 18	518.3	3797.5	0.023	0.8492	0.04	1.00
2017. 11. 06	1.2	249.7	0.023	0.8492	0.04	1.00

년 7월 18일부터 2017년 11월 6일까지의 강수량에 의한 강우침식능인자가 산정이 되었으며, 이로 인해 강수량에 의해 변화하는 강우침식능인자가 섬진강A와 섬진강B 지점들에 대해서 산정되었다(Table 1, Table 2). 토양침식성인자(K)는 고시에 제시된 바와 같이 현장조사 시에 토양 표본을 채집하여 유기물 백분율(%), 토양 유실에 대한 입경 특성 함수, 토양 구조 지수, 토양 투수 등급, 미사 백분율(%), 극세사 백분율(%), 점토 백분율(%)에 의하여 결정이 되는데, 본 과업에서는 한국환경공단으로부터 제공 받은 토양침식성인자를 적용하였다. 지형인자(LS)의 경우 대상 지점의 경사의 조건을 반영하기 위한 것으로 지점별로는 다르게 적용이 되었으나, 한 지점에 대해서는 시기와 상관없이 동일한 값이 적용되었다.

지표피복인자(C)는 작물의 생육 등에 의해 지표의 피복 상태가 변화하기 때문에 한국형 토양유실공식에서는 작물에 따라 다르게 적용이 되나, 섬진강A와 섬진강B 지점 모두 농경지가 아니기 때문에 초지에 해당하는 값이 시기에 상관없이 동일하게 적용이 되었다. 보전관리인자(P)는 농경지가 아닌 지역이기 때문에 1.00의 값이 시기와 상관없이 동일하게 적용되었다. 즉, 본 연구에서 적용된 한국

형 토양유실공식의 각 인자는 강우침식능인자는 강수량에 따라 변화하는 값이 적용이 되었으며, 토양침식성인자와 지형인자는 지점별로는 다르나 각 지점에서 시기별로는 동일하게 적용이 되었으며, 지표피복인자와 보전관리인자는 두 지점 모두 동일하게 적용이 되었다.

3.2. 보정계수 정의

한국형 토양유실공식은 범용토양유실공식에 근거한 모형이고, 월별 토양유실 발생 가능성을 추정하기 위한 값을 제공하기 때문에, 실제 발생한 토양유실량과 비교하기 위해서는 예측된 값에 대한 조정이 필요하다. 따라서 대상 필지의 조건을 검토하여 한국형 토양유실공식에 의해 예측된 값을 조정할 수 있도록 하였다. 이에 각 필지에서 발생한 총 토양유실량(Net soil)에 영향을 크게 줄 수 있는 요소를 검토하였는데, 강수량(Rainfall), 유출량(Runoff), 집수부에서의 토양유실량 측정치(Measured soil at water collecting basin; Soil_{WCB}), 침사지에서의 토양유실량 측정치(Measured soil at grit chamber, Soil_{GC}), 침사지에서 부유사량(Suspended sediment yield, Soil_{SS})에 대해서 상관관계(Correlation coefficient)를 검토하였다. 섬진강A과

Table 2. Determination of KORSLE factors in Seomjingang B site

Date	Accumulated Rainfall (mm)	R	K	LS	C	P
2014. 07. 18	61.0	245.9	0.047	0.9023	0.04	1.00
2014. 08. 05	390.7	2419.6	0.047	0.9023	0.04	1.00
2014. 08. 08	41.5	221.6	0.047	0.9023	0.04	1.00
2014. 08. 15	27.0	192.3	0.047	0.9023	0.04	1.00
2014. 08. 20	140.0	586.4	0.047	0.9023	0.04	1.00
2014. 08. 22	35.5	208.5	0.047	0.9023	0.04	1.00
2014. 08. 26	139.5	583.9	0.047	0.9023	0.04	1.00
2014. 09. 12	28.0	221.7	0.047	0.9023	0.04	1.00
2014. 09. 25	190.0	887.1	0.047	0.9023	0.04	1.00
2014. 10. 24	83.0	400.1	0.047	0.9023	0.04	1.00
2014. 11. 03	37.0	297.8	0.047	0.9023	0.04	1.00
2015. 01. 14	111.1	300.4	0.047	0.9023	0.04	1.00
2015. 02. 27	38.2	76.7	0.047	0.9023	0.04	1.00
2015. 03. 20	68.0	174.6	0.047	0.9023	0.04	1.00
2015. 04. 09	48.2	139.3	0.047	0.9023	0.04	1.00
2015. 05. 13	178.5	716.1	0.047	0.9023	0.04	1.00
2015. 07. 14	252.5	1243.7	0.047	0.9023	0.04	1.00
2015. 09. 08	140.3	615.5	0.047	0.9023	0.04	1.00
2015. 10. 14	110.5	507.3	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 03. 10	141.5	474.7	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 04. 11	50.6	145.5	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 04. 26	112.0	359.0	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 06. 23	53.4	199.3	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 06. 27	53.5	199.6	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 07. 05	231.5	1097.6	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 08. 11	25.7	190.0	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 08. 30	0.2	163.4	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 09. 22	165.7	747.9	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 10. 07	75.0	372.6	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 10. 12	37.9	270.0	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 10. 21	54.1	309.5	0.047	0.9023	0.04	1.00
2016. 11. 28	69.3	383.8	0.047	0.9023	0.04	1.00
2017. 01. 04	70.8	149.4	0.047	0.9023	0.04	1.00
2017. 07. 05	49.7	214.9	0.047	0.9023	0.04	1.00
2017. 07. 25	31.7	174.3	0.047	0.9023	0.04	1.00
2017. 10. 18	494.6	3534.5	0.047	0.9023	0.04	1.00
2018. 06. 21	484.5	3316.4	0.047	0.9023	0.04	1.00
2018. 07. 10	249.2	1220.2	0.047	0.9023	0.04	1.00
2018. 09. 06	512.4	3702.5	0.047	0.9023	0.04	1.00

Table 3. The Pearson correlation coefficients between the measured soil erosions and parameters affecting soil erosions in Seomjingang A site

Correlation	Rainfall (mm)	Runoff (L)	Soil _{wCB} (Mg)	Soil _{GC} (Mg)	Soil _{SS} (Mg)	Net soil (Mg)
Rainfall (mm)	1.0000					
Runoff (L)	0.1152	1.0000				
Soil _{wCB} (Mg)	-0.1245	-0.0057	1.0000			
Soil _{GC} (Mg)	-0.0926	0.8568	0.5421	1.0000		
Soil _{SS} (Mg)	-0.0453	0.7644	0.0609	0.9858	1.0000	
Net soil (Mg)	-0.0213	0.8607	0.0887	0.9997	0.9245	1.0000

Table 4. The Pearson correlation coefficients between the measured soil erosions and parameters affecting soil erosions in Seomjingang B site

Correlation	Rainfall (mm)	Runoff (L)	Soil _{wCB} (Mg)	Soil _{GC} (Mg)	Soil _{SS} (Mg)	Net soil (Mg)
Rainfall (mm)	1.0000					
Runoff (L)	0.4634	1.0000				
Soil _{wCB} (Mg)	0.2490	0.4432	1.0000			
Soil _{GC} (Mg)	0.4499	0.6196	-0.0145	1.0000		
Soil _{SS} (Mg)	0.1646	0.4478	-0.0562	0.9622	1.0000	
Net soil (Mg)	0.0963	0.5755	0.0763	0.9994	0.6351	1.0000

섬진강B 지점 모두 총 토양유실량은 강수량과 낮은 상관관계를 보였다. 그리고 유출량은 집수플럼부 퇴적량과 낮은 상관관계를 보였으나, 총 토양유실량을 포함하여 다른 퇴적량과는 높은 상관관계를 보였다(Table 3, Table 4). 따라서 본 연구에서는 총 토양유실량 예측에 있어 유출량(L)에 관한 함수로 표현할 필요가 있는 것으로 판단하였다.

이에 Table 1과 Table 2에 제시된 한국형 토양유실공식의 각 인자의 곱에 의해 예측된 토양유실 가능성 추정치(A_{KORSLE})와 상관관계가 높은 것으로 판단된 유출량(Q)을 보정계수(C_1)에 관한 함수를 정의하였다. 그리고 이 보정계수가 적용된 예측 토양유실량(A_{Est})을 실측 토양유실량(A_{Msd})와 비교하면서 Nash-Stucliff Efficiency(NSE), 결정계수(Coefficient of Determination(R^2), t-test에 의한 p-value로 예측치에 대한 신뢰도를 판단하였다.

섬진강A 지점의 경우 이용 가능한 토양유실량 측정 자료는 2014년 7월 18일부터 2017년 11월 6일까지 20개이며 측정된 토양유실량의 범위로 볼 때, 보정 및 검정 자료로 분할하기 어려운 것으로 판단하여 전체 자료를 이용하여 한국형 토양유실공식에 의한 토양유실 가능성 추정치에 대한 조정이 이루어졌다. 섬진강B 지점의 경우, 2014년 7월 18일부터 2018년 9월 6일까지 총 39개의 자료가 이용 가능하였으며 실측 토양유실량 값의 범위와 자료의 개수를 고려하여 2014년 7월 18일부터 2016년 4월 26일까지 22개 측정 자료를 이용하여 한국형 토양유실공식에 의한 토양유실 가능성 추정치에 대한 보정이 이루어졌으며, 2016년 6월 23일부터 2018년 9월 6일까지 17개 측정 자료를 이용하여 보정과정에서 결정된 계수에 대한 검정이 이루어졌다.

섬진강A 지점에 대한 조정은 식(3)과 같이 한국형 토양유실공식에 의해 예측된 토양유실 가능성 추정치(A_{KORSLE})에 면적(Area)을 곱한 뒤에, 유량(Q)과 계수(C_1)를 곱하여 토양유실량(Mg)을 예측할 수 있도록 하였는데, C_1 은 강수량이 80 mm 이상일 경우에는 0.8로, 그 이하일 경우에는 3.6으로 정의되었다. 섬진강B 지점에 대한 조정은 식(4)와

같이 한국형 토양유실공식에 의해 예측된 토양유실 가능성 추정치에 상용로그를 취한 뒤에 면적을 곱한 뒤에, 유량과 계수(C_2)를 곱하여 토양유실량(Mg)을 예측할 수 있도록 하였다. C_2 는 강수량이 400 mm 이상인 경우에는 66,000, 140 ~ 400 mm인 경우에는 6,600, 140 mm 미만인 경우에는 3,300으로 정의되었다. 이 식(3) 및 식(4)의 기본 형태와 강수량의 범위에 따른 C_1 과 C_2 의 정의는 한국형 토양유실공식에 의한 토양유실량(Mg)과 실측 토양유실량(Mg)을 비교하면서 시행착오법(try and error method)에 의해 결정된 것이다.

$$A_{Est} (Mg) = A_{KORSLE} (Mg/ha) \times Area (ha) \times (Q (L) / C_1) \quad (3)$$

$$A_{Est} (Mg) = (\log_{10} A_{KORSLE} \times Area (ha) \times 10^4) \times (Q(L) / C_2) \quad (4)$$

3.3. 토양유실량 보정 및 검정

한국형 토양유실공식에 근거하여 섬진강A 지점은 식(3)에 의해 예측 토양유실량으로 결정하였으며, 섬진강B 지점은 식(4)에 의해 예측 토양유실량으로 결정하였다. 이들 예측 유실량을 실측 토양유실량과 비교하여 KORSLE 모델의 현장 적용 가능성을 판단하였다. 모형에 의한 예측값과 실측값을 비교할 때 수문 모형에 의한 예측값의 유의성 여부의 판단은 NSE, 결정계수, t-test에 의한 p-value 등에 의해 이루어질 수 있다. 유의성 (significance)에 대한 기준은 Ramanarayaman et al.(1997)은 NSE가 0.4 이상이고 결정계수가 0.5 이상일 때라고 제안하였으며, Donigain(2000)은 결정계수의 범위에 따라 만족 단계를 제시하였는데 0.6 이상일 때 만족 가능(Fair)으로 제안하였으며, Engel et al.(2007)은 유사량(Sediment yield)에 대해서 NSE가 0.5 이상이고 R^2 가 0.6 이상이며 상대오차가 20% 이하일 때라고 제안한 바 있다. 본 과업에서는 NSE와 결정계수가 각각 0.4와 0.5 이상일 경우에 이를 도식화하고, t-test에 의한 p-value에 의해서 예측값에 대한 유의성 여부를 결정하였다. p-value는 유의확률 95%

Table 5. Comparison between the measured and the estimated soil erosion (Mg) in Seomjingang A site

Date	A _{Msd} (Mg)	Rainfall (mm)	A _{KORSLE} (Mg)	A _{Est} (Mg)
2014. 07. 18	0.5413	69.6	0.0019	3.2640
2014. 07. 21	12.3072	59.0	0.0017	9.2182
2014. 08. 05	2.1583	83.1	0.0024	2.0175
2014. 08. 08	0.42	14.6	0.0012	0.0093
2014. 08. 15	0.0411	14.6	0.0012	0.0034
2014. 08. 19	0.3084	196.0	0.0064	0.6455
2014. 08. 22	0.0402	17.0	0.0013	0.0063
2014. 08. 26	0.2412	73.0	0.0022	2.9712
2014. 09. 12	0.0013	35.5	0.0017	0.0063
2014. 09. 24	0.0826	78.0	0.0025	1.7111
2014. 10. 23	0.0007	77.5	0.0027	0.0102
2015. 07. 14	0.0062	109.9	0.0030	0.0092
2016. 07. 05	0.0022	234.4	0.0079	0.0044
2016. 08. 30	0.0947	49.1	0.0017	0.0064
2016. 09. 22	0.001	190.2	0.0063	0.0018
2016. 10. 07	0.0021	146.3	0.0048	0.0020
2017. 07. 05	0.6669	58.2	0.0017	0.1797
2017. 07. 25	0.6452	74.5	0.0020	0.1407
2017. 10. 18	0.397	518.3	0.0270	0.2249
2017. 11. 06	0.2849	1.2	0.0018	0.0111

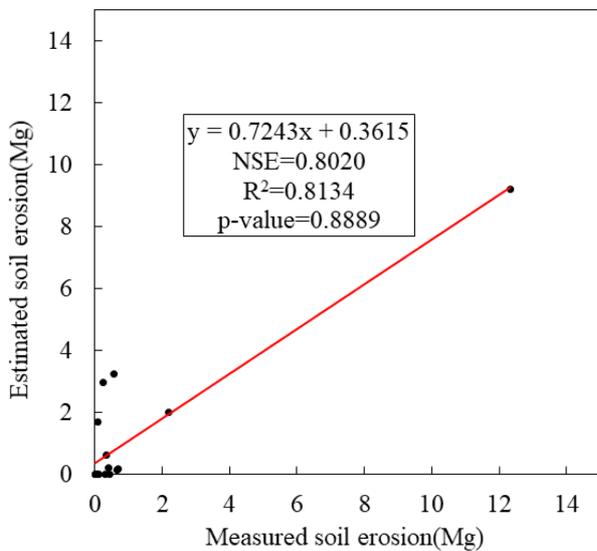


Fig. 3. Correlation between the measured and the estimated soil erosion (Mg) in Seomjingang A site.

(유의수준 $\alpha=0.05$)에 대해 검토하여 p-value가 유의수준보다 클 경우(검정통계량이 임계값의 범위 이내인 경우) 예측값에 대해 신뢰할 수 있는 것으로 정의하였다.

섬진강A 지점은 모니터링 기간 중 토양유실이 발생한 자료의 개수는 20개로 한국형 토양유실공식에 대한 예측 정확성 향상에 중점을 두었다. 한국형 토양유실공식에 의

한 토양유실 가능성 추정치는 강우량에 따라 변화하였으며, 이 추정치에 식(3)을 적용하여 토양유실량 예측치가 산정되였으며 NSE가 0.8020, 결정계수가 0.8134, p-value가 0.8889로 토양유실량 실측값과 비교할 때 예측값을 신뢰할 수 있는 것으로 나타났다(Table 5, Fig. 3). 섬진강A 지점의 경우 토양유실량이 2014년 7월 21일에 가장 높게 측정되었으며, 대상 지점에서 모니터링이 더 수행되어 이 토양유실량과 비슷한 범위를 가질 경우 보정계수에 대한 검정이 가능할 것으로 판단된다.

섬진강B 지점은 모니터링 기간 내 토양유실량이 발생한 경우가 모형의 보정 및 검정 과정이 수행되기에 충분하다고 판단되어 2014년 7월 18일부터 2016년 4월 26일까지 22개 자료에 대해 보정계수에 대한 판단을 통해 식(4)을 유도하였으며, 이 보정과정에서 NSE는 0.5089, 결정계수는 0.5576, p-value는 0.9731로 한국형 토양유실공식에 대한 보정이 잘 이루어진 것으로 판단하였다(Table 6, Fig. 4). 검정과정에서는 식(4)에 대한 조정 없이 보정 과정에서 정의된 계수를 그대로 적용하여 예측값과 실측값에 대한 비교가 이루어졌으며, NSE가 0.5157, 결정계수가 0.5999, p-value가 0.7992로 한국형 토양유실공식 및 식(4)에 의한 토양유실량 예측에 대해 신뢰할 수 있는 것으로 판단되었다.

섬진강A와 섬진강B 지점 모두 모니터링 기간은 2014

Table 6. Comparison between the measured and the calibrated estimated soil erosion (Mg) in Seomjingang B site during 2014~2016

Date	A_{Msd} (Mg)	Rainfall (mm)	A_{KORSLE} (Mg)	A_{Est} (Mg)
2014. 07. 18	0.6745	61.0	0.0032	1.7226
2014. 08. 05	3.6974	390.7	0.0314	2.7086
2014. 08. 08	1.8275	41.5	0.0029	0.2387
2014. 08. 15	0.0954	27.0	0.0025	0.0019
2014. 08. 20	1.5452	140.0	0.0076	1.8470
2014. 08. 22	0.2632	35.5	0.0027	0.1042
2014. 08. 26	1.0598	139.5	0.0076	1.8338
2014. 09. 12	0.3083	28.0	0.0029	0.0752
2014. 09. 25	1.6239	190.0	0.0115	2.0673
2014. 10. 24	0.1804	83.0	0.0052	0.0603
2014. 11. 03	0.0194	37.0	0.0039	0.0120
2015. 01. 14	1.8684	111.1	0.0039	0.9891
2015. 02. 27	0.002	38.2	0.0010	0.0000
2015. 03. 20	0.0115	68.0	0.0023	0.0000
2015. 04. 09	0.0857	48.2	0.0018	0.1158
2015. 05. 13	0.0345	178.5	0.0093	0.1047
2015. 07. 14	0.6145	252.5	0.0161	2.0593
2015. 09. 08	0.7446	140.3	0.0080	0.5058
2015. 10. 14	0.1282	110.5	0.0066	0.4463
2016. 03. 10	0.5878	141.5	0.0062	0.1987
2016. 04. 11	0.0039	50.6	0.0019	0.0039
2016. 04. 26	0.0083	112.0	0.0047	0.0854

Table 7. Comparison between the measured and the validated estimated soil erosion (Mg) in Seomjingang B site during 2016~2018

Date	A_{Msd} (Mg)	Rainfall (mm)	A_{KORSLE} (Mg)	A_{Est} (Mg)
2016. 06. 23	0.0159	53.4	0.0026	0.0150
2016. 06. 27	0.0068	53.5	0.0026	0.1340
2016. 07. 05	1.1931	231.5	0.0142	0.5991
2016. 08. 11	4.0254	25.7	0.0025	1.6513
2016. 08. 30	0.0905	0.2	0.0021	0.0760
2016. 09. 22	0.0877	165.7	0.0097	0.3861
2016. 10. 07	0.0943	75.0	0.0048	1.0611
2016. 10. 12	0.4871	37.9	0.0035	0.6065
2016. 10. 21	0.0653	54.1	0.0040	0.4068
2016. 11. 28	0.0042	69.3	0.0050	0.0090
2017. 01. 04	0.002	70.8	0.0019	0.0068
2017. 07. 05	0.0101	49.7	0.0028	0.0197
2017. 07. 25	0.1229	31.7	0.0023	0.0369
2017. 10. 18	0.3618	494.6	0.0459	0.0494
2018. 06. 21	0.0176	484.5	0.0430	0.0011
2018. 07. 10	0.7157	249.2	0.0158	1.0598
2018. 09. 06	0.2756	512.4	0.0480	0.3072

년부터 2018년까지이며 현 고시에서 제시하고 있는 범용 토양유실공식에 의한 예측값의 신뢰 가능여부를 판단하기에는 부족하다. 그러나 연단위가 아닌 월단위 예측이 가

능한 한국형 토양유실공식의 경우 같은 기간에 대해서 다수의 실측값 및 예측값이 존재하기 때문에 모형에 대한 통계치 정의가 가능하였다.

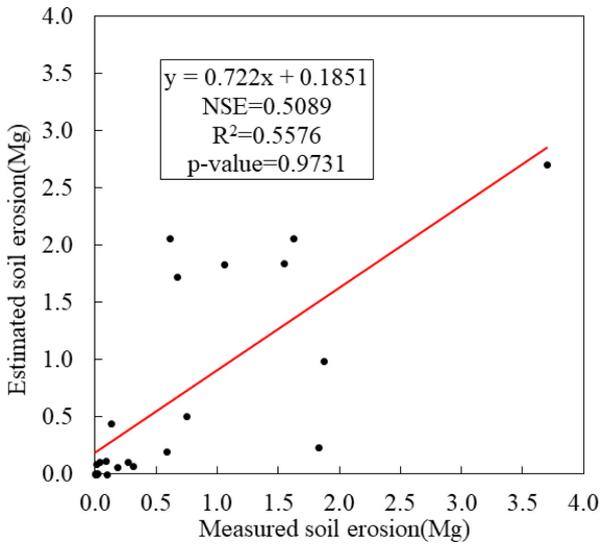


Fig. 4. Correlation between the measured and the calibrated estimated soil erosion (Mg) in Seomjingang B site during 2014~2016.

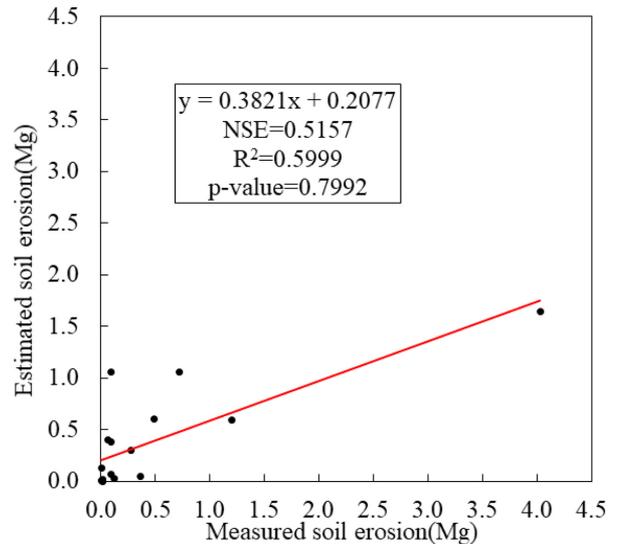


Fig. 5. Correlation between the measured and the validated estimated soil erosion (Mg) in Seomjingang B during 2016~2018.

4. 요약 및 결론

본 연구는 현재 한국환경공단에서 수행하고 있는 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’의 현장조사 단계에서 토양유실량 실측 및 예측에 대한 비교 및 검증 과정이 이루어질 수 있는 방안을 제시하는 데 목적을 두고 있다. 현재 고시는 전국을 대상으로 하여 토양유실량에 대한 예측을 수행하여 현장 방문 지점을 선별하는 예비조사와, 대상 지점(혹은 필지)을 방문하여 자료를 수집하여 토양유실량을 보다 정확하게 측정하는 현장조사로 구분된다. 현 고시에서는 이 두 조사 모두 범용토양유실공식을 사용하도록 제시하고 있는데, 전국을 대상으로 하는 예비조사의 경우 범용토양유실공식 적용은 타당한 것으로 판단된다. 그러나 현장을 방문하여 자료를 수집하고 대상 지점에 대한 토양유실량 예측 정확성 향상을 위한 현장조사 단계에서는 이 범용토양유실공식의 적용에 한계점이 존재한다.

첫째, 범용토양유실공식은 연평균 혹은 연단위이기 때문에 한 개의 실측 토양유실량을 적용하기 위해서는 1년의 기간이 필요하며 모형에 의한 예측값과의 비교를 위해서는 수십 년 동안의 자료가 수집되어야 가능하다. 두 번째 한계점으로는 현 고시의 강우침식능인자가 현재 기상 조건을 반영하기에는 어렵다는 것이다. 현 고시의 강우침식능인자는 우리나라의 1973년부터 1996년까지의 기상자료에 근거하여 산정되었기 때문에 현재의 기상조건을 반영할 수 있다고 보기 어렵다(Kim et al., 2018; Kongju

National University, 2018). 즉, 기상조건에 의한 토양유실 발생 가능성이 높았던 지점이 현재에도 높다고 단정하기에는 어렵기 때문에, 현재 혹은 최근 기상 조건을 반영해야 토양유실량에 대한 예측이 합리적일 수 있다. 세 번째 한계점은 범용토양유실공식에 의해 예측은 토양유실 발생 가능성에 대한 추정치이기 때문에 실측 토양유실량과 차이가 발생하지만, 이에 대한 보정은 한계가 있다. 발생한 토양 입자가 측정 지점까지 도달할 때에는 대상 지점의 조건에 따라 달라질 수 있으나 이를 연간 특성으로 보기에는 어렵거나 예측 과정에서 불확실성이 커질 수 있기 때문이다.

따라서 현장조사 과정에 대한 개선이 필요하며, 이는 연단위가 아닌 월단위 예측이 가능한 한국형 토양유실공식의 적용이 필요한 것으로 판단된다. 범용토양유실공식을 개선하여 국내 여건에 부합하는 데이터베이스를 제공하고, 월 강수량에 의해 임의 기간에 대한 강우침식능인자 산정이 가능한 한국형 토양유실공식이 고시의 현장조사 단계에 이용이 될 경우, 수년 동안 측정된 토양유실량과의 비교가 가능하기 때문에 앞서 언급된 범용토양유실공식의 첫 번째 한계점은 해결될 수 있다. 또한 현 고시와 같이 특정 기간 동안 수집된 자료에 의해 산정된 강우침식능인자가 아니라, 임의 기간에 대한 강우량에 대한 강우침식능인자 산정이 가능하기 때문에 두 번째 한계점 역시 해결이 가능하다. 그리고 실측된 토양유실량과 비교할 수 있도록 본 연구와 같이 보정계수 산정 과정이 이루어진다면 마지막 한계점 역시 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “표토보전관리기술개발사업”의 “영상 자료 및 해석모형 기반의 표토환경 변화 예측 기술 개발 (2019002820001-1485016179)”로 지원받은 과제임.

References

- De Rosa P., Cencetti C., and Fredduzzi A., 2016, A GRASS tool for the Sediment Delivery Ratio mapping. *Proceedings of the 4th Open Source Geospatial Research and Education Symposium*, In Marchesini I. & Pierleoni A. (Eds.), Perugia, Italy.
- Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., and Arabi, M., 2007, A hydrologic/water quality model application protocol. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, **43**(5), 1223-1236.
- Jung, K.H., Kim, W.T., Hur, S.O., Ha, S.K., Jung, P.K., and Jung, Y.S., 2004, USLE/RUSLE factors for national scale soil loss estimation based on the digital detailed soil map. *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, **37**(4), 199-206.
- Kim, J., Yang, J.E., Lim, K.J., Kim, S.C., Lee, G., Hwang, S., Yu, N., and Park, Y.S., 2017, A study to define area of concern for potential soil loss in Geumgang watershed by KORSLE-based GIS model. *J. Soil Groundwater Environ.*, **22**(6), 29-36.
- Kim, J., Jang, J.U., Seong, G.G., Cha, S.S., and Park, Y.S., 2018, A study to determine to rainfall erosivity factor of Universal Soil Loss Equation using recent rainfall data. *J. Korean Soc. Ag. Eng.*, **60**(6), 13-20.
- Kongju National University, 2018, Development of topsoil erosion model for Korea. Yesan-gun: Republic of Korea.
- Ministry of Environment, 2012, A bulletin on the survey of the erosion of topsoil. Sejong-si: Ministry of Environment.
- Park, Y.S., Kim, J., Kim, N., Kim, K.S., Choi, J., and Lim, K.J., 2007, Analysis of sediment yields at watershed scale using area/slope-based sediment delivery ratio in SATEEC. *J. Korean Soc. Water Qual.*, **23**(5), 650-658.
- Ramanarayanan, T.S., Williams, J.R., Dugas, W.A., Hauck, L.M., and McFarland, A.M.S., 1997. Using Apex to identify alternative practices for animal waste management. *ASAE International Meeting*, Minneapolis, MN, USA.
- Sung, Y.S., Jung, Y., Lim, K.J., Kim, J., Kim, K.S., Park, S.K., Shin, M., Kum, D.H., and Park, Y.S., 2016, A study to develop monthly cover management factor database for monthly soil loss estimation. *J. Korean Soc. Ag. Eng.*, **58**(6), 23-30.
- United States Department of Agriculture, 1972, National Engineering Handbook: Sediment Source, Yields, and Delivery Ratios, Soil Conservation Service, Washington, DC., USA.
- Vanoni, V.A., 1975, Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54, American Society of Civil Engineers, New York, USA.
- Williams, J.R. and Berndt, H.D., 1977, Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. *Trans. Am. Soc. Ag. Eng.*, **20**, 1100-1104.
- Williams, J.R., 1977, Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources, USDA-ARS-S-40, U.S Department of Agriculture, Washington, DC., USA.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D., 1965, Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A guide for selection of practices for soil and water conservation Handbook No.282. U.S. Department of Agriculture.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D.D., 1978, Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning Handbook No.537. U. S. Department of Agriculture.
- Yu, N.Y., Lee, D.J., Han, J.H., Lim, K.J., Kim, J., Kim, K.H., Kim, S., Kim, E.S., and Park, Y.S., 2017, Development of Arc-GIS-based model to estimate monthly potential soil loss. *J. Korean Soc. Ag. Eng.*, **59**(1), 21-30.