

범용토양침식공식(USLE)을 이용한 만경강유역의 평균토양침식량 산정

Computation of Mean Soil Loss in the Catchment of the Mankyung River by USLE

이연길* / 고주연** / 정성원*** / 박성식****

Lee, Yeon Kil* / Go, Ju Yeon** / Jung, Sung Won*** / Park, Sung Sik****

요 지

본 연구의 목적은 USLE 모형의 적용 범위 확장에 따른 모형의 적정성을 평가하는 데에 있다. 본 연구는 300 km² 정도의 유역면적을 갖는 만경강 봉동 수위관측소 유역에서 유사유출량을 모의한 후 이를 실측치와 비교·분석하는 과정으로 수행되었다. USLE 모형의 주요 인자 등은 객체지향프로그램인 ArcView를 이용하여 산정하였으며, 이를 강우침식인자, 토양침식인자, 지형인자, 식생피복인자, 침식조절인자 등과 같은 주제도에 격자기반(30m×30m)으로 구현하였다. 본 연구의 대상유역에서 모의된 2009년 평균토양침식량은 206.7 ton/km²/year이며, 토양침식량에 Vanoni(1975)와 Boyce(1975), USDA(1972)의 유사전달비(sediment delivery ratio)를 고려한 유사유출량은 각각 47.128 ton/km²/year, 19.223 ton/km²/year, 61.596 ton/km²/year로 산정되었다. Vanoni(1975)의 유사전달비가 고려된 유사유출량은 47.128 ton/km²/year로 봉동 수위관측소에서 실측된 2009년 유사유출량 42.330 ton/km²/year와 비교적 유사하였다.

핵심용어 : USLE, 토양침식량, 강우침식인자, 격자기반, 유사전달비, 유사유출량

1. 서론

토양침식은 유역 및 하천 운영에 매우 중요한 문제 중의 하나로 최근 도시화가 점진적으로 진행되는 등 유역특성의 변화로 인해 빈번하게 발생되고 있다. 또한 토양침식은 이상기후와 연관된 자연재해로서 부각되고 있으며 국민의 생명과 자산을 위협하는 대상으로 평가받고 있다. 그러나 국내에는 이에 대한 인식과 연구부족 등으로 이를 추정할 수 있는 모형 및 공식 개발은 물론, 국외에서 개발된 모형에 대한 국내 적용성 평가에 대한 연구도 빈약한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 USLE 모형을 이용하여 만경강 수계에 위치한 봉동 지점의 유역을 대상으로 토양침식량을 모의하여 그 결과의 적정성을 평가하였다. 또한 본 연구에서는 토양침식량을 모의하기 위해서 지리정보시스템을 이용하였으며, 이를 통해 강우침식인자, 토양침식인자, 지형인자, 식생피복인자, 침식조절인자 등과 같은 격자기반 수치 주제도를 작성하였다.

* 정회원 · 유량조사사업단 연구개발실장, 공학박사 · E-mail : sugawon@kict.re.kr
** 정회원 · 유량조사사업단 팀장, 연구원 · E-mail : ballet8199@kict.re.kr
*** 정회원 · 유량조사사업단 단장 공학박사 · E-mail : swjung@kict.re.kr
**** 정회원 · 국토해양부 한강홍수통제소 시설연구사, 공학박사 · E-mail : sspark72@korea.kr

2. 연구대상 유역

본 연구에서는 300 km² 정도의 중규모 유역에 USLE 모형을 적용하였을 경우 어느 정도의 정적성을 가지는지를 평가하기 위해서 만경강 수계에 위치한 봉동 수위관측소 유역을 대상유역으로 선정하였다. 봉동 수위관측소는 전북 완주군 봉동읍 장기리(동경 127° 10' 22", 북위 35° 56' 21") 용봉교에 위치해 있으며 342.262 km²의 유역면적을 가진다. 하상경사는 만경강 하류부 30km 구간이 1/3,800, 중류부 50km까지가 1/540, 상류부 구간이 1/120이며, 소양천과 전주천이 각각 1/360, 1/700 정도로서 만경강 본류 하류구간을 제외한 대부분의 구간은 경사가 비교적 급한 편이다. 만경강 본류의 전주천 합류점 하류 구간은 Silt 및 Clay로 구성되어 있으며, 그 상류 구간 및 소양천과 전주천은 모래 및 자갈로 구성되어 있다. 본 연구의 대상유역 위치도와 봉동 관측소의 유역도는 Fig. 1~Fig. 2와 같다.

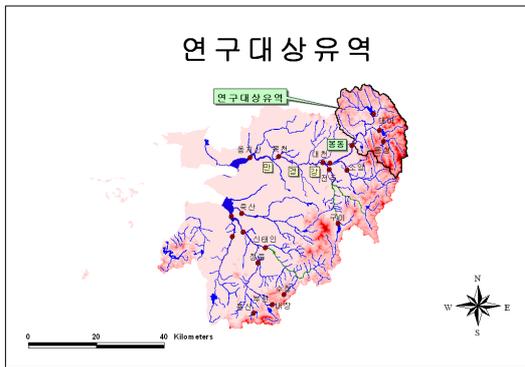


Fig. 1 Mankyung River Area

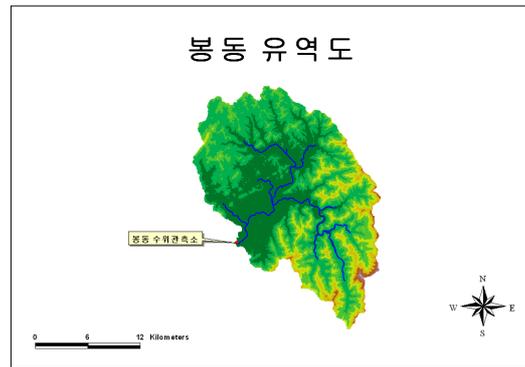


Fig. 2 Study Area(Bongdong)

3. 범용토양침식공식(USLE)

범용토양침식공식은 1960년 미국의 Wischmeier와 Smith(1960)에 의해 농경지에서의 토양손실량을 예측하기 위해 개발되었다. 이 공식은 경험적 방법에 의해 개발되었지만 공식의 이름에서 알 수 있듯이 다른 지역에 대해 범용적으로 적용할 수 있다. 본 공식은 1971년 Wischmeier와 Johnson, Cross 등(1971)에 의해 확대 적용되었다. 이 공식은 유역의 기후(강우), 토양, 토지형태, 토지 이용 등의 변수를 이용하여 그 유역에서의 토양침식량을 추정한다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

여기서, A 는 강우침식도 R 의 해당기간 중 단위 면적에서 침식되어 손실되는 토사량, R 은 강우침식도(rainfall erosivity), K 는 토양침식성 인자(Soil erodivity), LS 는 지형인자(L 은 침식경사면의 길이 인자, S 는 침식 경사면의 경사 인자), C 는 작물형태, 피복상태 등 경작 종류와 형태에 따른 경작 인자, P 는 등고선 경작 등 토양보전대책 인자이다.

4. USLE Factor 산정

4.1 강우침식인자(R)

정필균(1983) 등은 우리나라 기상청 산하 51개 관측소의 60~80년대의 자료를 이용하여 R 값을 산정한 바 있으며, 국토해양부/한국건설기술연구원(1992)에서는 우리나라 등강우침식도를 제작하였다. USLE의 여러 인자들 중 강우침식인자는 유일한 기상인자로서 토양침식이 강우 에너지의 크기에 의해 결정되어진다는 사실에 미루어 볼 때 상당히 중요한 인자가 된다. 우리나라의 실무자들은 유역에서 토양침식량을 산정하고자 할 때 1983년 정필균이 제시한 값과 1992년 국토해양부/한국건설기술연구원에서 제시한 강우침식인자를 이용하고 있다. 그러나 본 연구에서는 강우사상에 의해서 발생된 토양침식량의 정도를 파악하기 위해서 봉동 강우관측소의 2009년 강우량 자료로 강우침식인자를 직접 산정하였으며 그 결과는 Table 1 및 Fig. 4와 같다.

Table 1. Estimated rainfall erosivity in Bongdong

지속시간 (hr)	강우량(cm)	간격당강우량 (cm)	시간간격 (hr)	강우강도 (cm/hr)	에너지 단위 (m · tones/ha)
0	0.0				
0.5	2.8	2.8	0.5	5.6	774.45
1	4.6	1.8	0.5	3.6	467.12
2	6.2	1.6	1	1.6	365.07
3	9.2	3.0	1	3.0	757.39
6	13.1	3.9	3	1.3	858.55
12	14.4	1.3	6	0.2	196.15
24	14.5	0.1	12	0.0	2.50
에너지단위의 합 (m · tones/ha)					∑ (3,421.22)
강우침식인자 (10^7 joule/ha · mm/hr)					R (191.59)

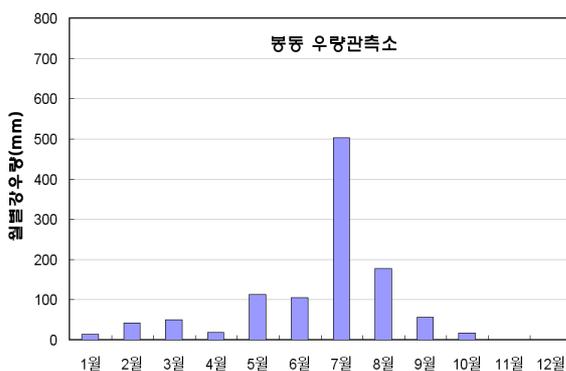


Fig. 3 Monthly rainfall distribution

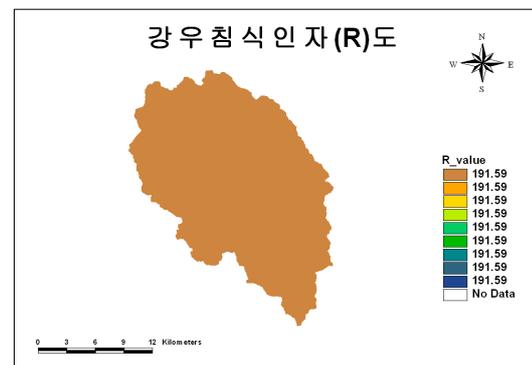


Fig. 4 Estimated rainfall erosivity map

4.2 토양침식인자(K)

토양침식인자 K 값은 토양이 강우에 의한 침식에 저항하는 능력을 나타내는 척도로서, 토양입자

및 분포, 구조, 공극 및 공극크기, 유기물 함량 등에 관계된다. K 값은 Wischmeier의 추정도표(1971)를 이용하거나 Wischmeier와 Smith(1965), Erickson(1977)의 삼각형 도표 및 보정표 등을 이용하여 추정할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 추정도표를 활용하지 않고 1:50,000 개략도양도에 나타난 토양종류의 대표토양통의 침식성계수를 참고하여 직접 격자기반의 토양침식인자도(30m×30m)를 생성하였다.

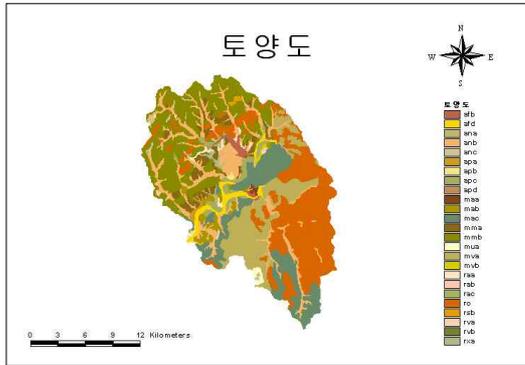


Fig. 5 Soil map(30m×30m)

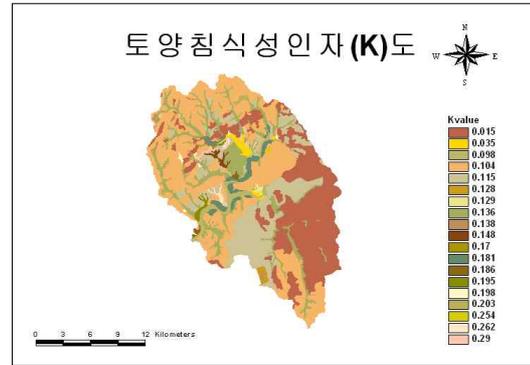


Fig. 6 K_factor map(30m×30m)

4.3 지형인자(LS)

최근 지리정보시스템(GIS)이 발달함에 따라 지형분석 자료처리 분야에서 LS 인자를 계산하는 방법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 1974년 Foster & Wischmeier는 평탄한 경사 조건하에서 적용 가능한 LS 산정식을 제안한 바 있으며, Moore & Burch(1986)은 unit stream power 이론을 근거로 하여 LS 인자를 물리학적으로 유도하였다. 또한 Bernie(1999)은 Moore & Burch(1986)의 식을 ArcView를 이용하여 LS 인자를 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 LS 인자를 계산하기 위하여 Bernie의 식을 이용하였으며, 이용된 식은 아래와 같다.

$$LS = (FlowAccumulation \times CellSize/22.13)^{0.3} \times (sinslope/0.0896)^{1.3}$$

Bernie 식을 이용하여 격자기반의 지형인도를 생성하기 위해서 수치표고분포도(DEM)를 활용하였으며, 이를 통해 흐름방향격자도, 누적흐름도 등을 생성한 후 지형인자도(30m×30m)를 생성하였다.

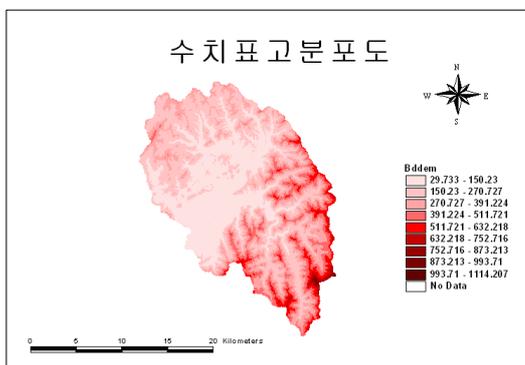


Fig. 7 Digital Elevation Model(30m×30m)

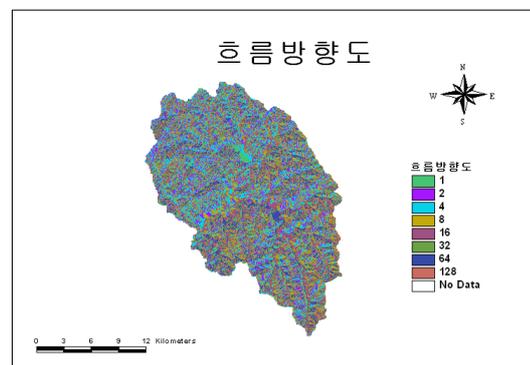


Fig. 8 Flow Direction map(30m×30m)

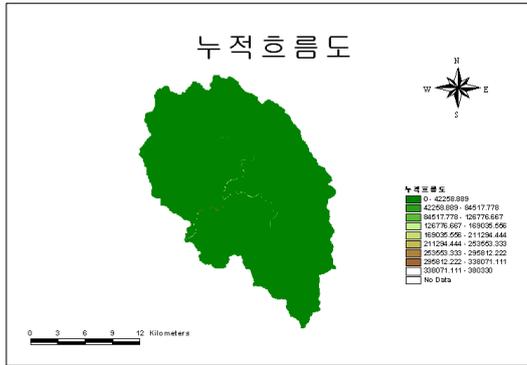


Fig. 9 Flow Accumulation map(30m×30m)

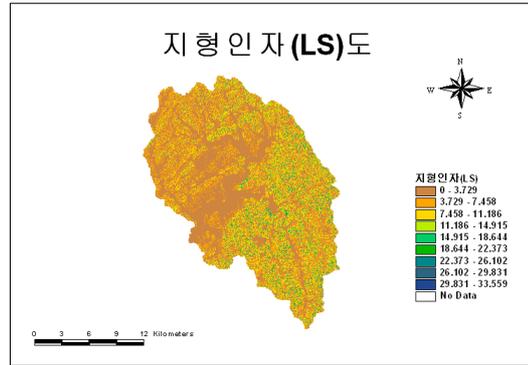


Fig. 10 LS_factor map(30m×30m)

4.4 식생피복인자(C)

본 연구에서는 식생피복인자를 산정하기 위해서 Table 2에 제시된 식생피복인자 값을 이용하였다(한국지질자원연구원(2004)). Table 2에 나타나 있는 바와 같이 식생피복인자의 특성은 경작지, 인공지물, 수계, 산림지역, 나지로 구분되며 경작지의 밭에 가장 큰 값이, 인공지물과 수계에 0의 값이 부여되어 있다. 본 연구에서 생성한 격자기반 식생피복인자도는 Fig. 12와 같다.

Table 2. Land Cover and C factor for study area

토지이용	세부형태	인자	비고
경작지	논	0.3	토지피복도 (30m×30m)
	밭	1.0	
	과수원	0.5	
인공지물	도로	0.0	
	건물	0.0	
	시가지 구역	0.0	
수계	하천 및 저수지	0.0	
산림지역	고밀도	0.001	
	중밀도	0.003	
	저밀도	0.009	
기타	나지	0.043	

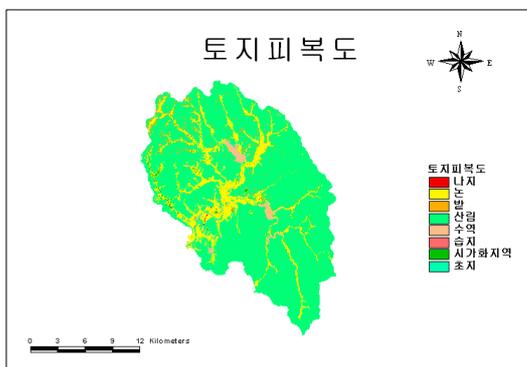


Fig. 11 Land Cover Map(30m×30m)

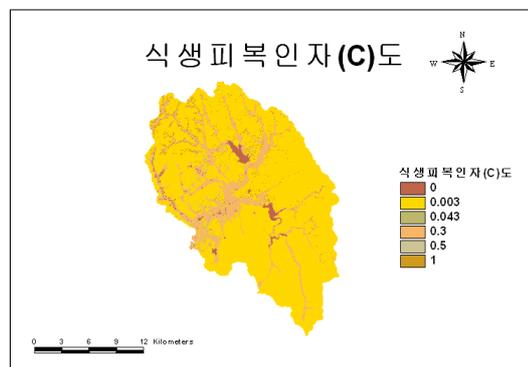


Fig. 12 C_factor map(30m×30m)

4.5 경작인자(P)

유역에서 발생 가능한 토양침식량은 등고선 효과와 대상재배, 단구효과에 따라 조절되며 이에 대한 특성은 Wischmeier and Smith(1978)가 제시한 Table 3에서 찾아 볼 수 있다. 본 연구에서는 등고선효과, 대상재배, 단구효과 중에서 등고선효과만을 고려하여 경작인자도를 생성하였다. 연구대상 유역의 등고선 효과를 적용하기 위해서 수치표고분포도(30m×30m)로부터 Slope Request를 이용한 후 경사도를 산정하였다. 생성된 경사도에 Wischmeier and Smith(1978)가 제시한 속성을 각각 부여한 후 최종적으로 Fig. 14와 같은 경작인자도를 생성하였다.

Table 3. P value by Wischmeier and Smith(1978)

지면경사도	농장으로 계획할 때	
	등고선 인자	대상재배 인자
1 to 2	0.60	0.30
3 to 8	0.50	0.25
9 to 12	0.60	0.30
13 to 17	0.70	0.35
81 to 20	0.80	0.40
21 to 28	0.90	0.45

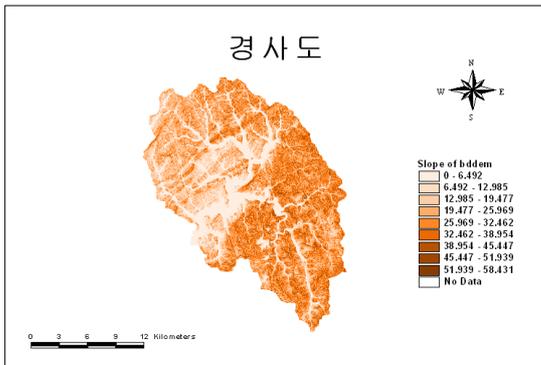


Fig. 13 Slope map(30m×30m)

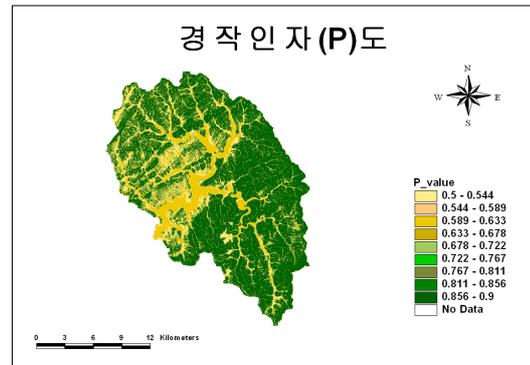


Fig. 14 P_factor map(30m×30m)

5. 토양침식량 산정

토양침식량의 공간적인 분포를 나타낼 수 있는 격자기반의 토양침식도를 생성하기 위해서 Fig. 15에 나타나 있는 바와 같이 강우침식성인자도, 지형인자도, 토양침식성인자도, 식생피복인자도, 침식조절인자도를 각각 곱하였다. 본 연구에서는 ArcView의 Map Calculator에서 5개 인자들의 곱을 수행하였으며, 이들의 곱을 통해서 얻어진 토양침식도(30m×30m)는 Fig. 16과 같다. 본 연구에서 생성된 2009년 토양침식도를 분석한 결과는 Table 4와 같으며, 평균토양침식량은 206.700 ton/km²/year의 값을 가졌으나, 대부분의 유역에서는 토양침식량이 발생되지 않았다.

Table 4. Soil loss load

봉동	토양침식량 (ton/km ² /year)	격자해상도	비고
최대	48,469.3	30m×30m	셀(1개)
최소	0.000	30m×30m	
평균	206.7	30m×30m	면적가중평균

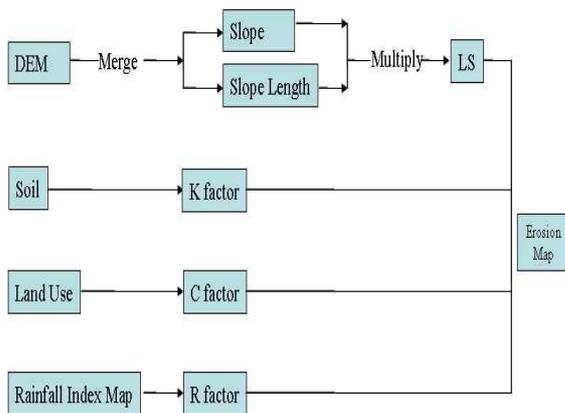


Fig. 15 Process of USLE Model

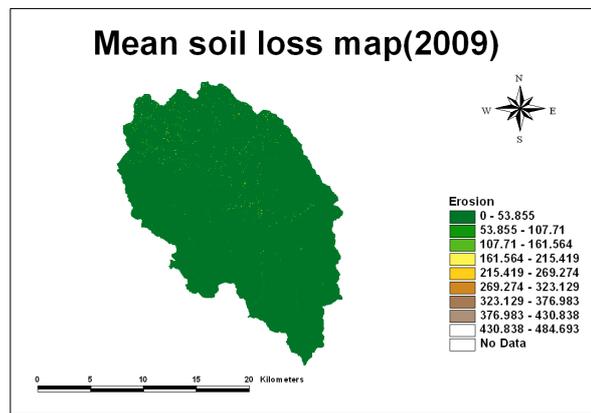


Fig. 16 Mean soil loss map(2009)

6. 유사전달비 및 유사유출량 산정

모의된 토양침식량은 2009년 강우침식성인자에 대응하는 토양침식량으로 유사유출량과는 다른 의미를 갖는다. 강우 에너지의 크기에 의해 세굴된 토양침식량이 유역의 표면과 하천을 따라 유하하다가 얼마만큼 차단되고 하천으로 유입되는지를 알 수 있게 하는 유사전달비(Sediment Delivery Ratio)를 고려해야 유사유출량으로 변환이 가능하다. 본 연구에서는 유사전달비를 산정하기 위해서 Vanoni(1975), Boyce(1975), USDA(1972) 등이 제시한 공식을 이용하였다. 각각의 식에서 산정된 유사전달비는 Table 5에 나타나 있는 바와 같이 Vanoni(1975)와 USDA(1972)는 0.228과 0.298의 값을 가져 비교적 유사하였으나, Boyce (1975)는 이에 비해 상당히 적은 값을 가졌다.

본 연구에서는 각각의 유사전달비로 유사유출량을 산정하였으며 그 결과는 Table 6과 같다. 산정된 유사유출량도 유사전달비와 같이 Vanoni(1975)와 USDA(1972)의 경우가 비교적 유사한 값을 가졌으나 Boyce(1975)는 상대적으로 적은 값을 가졌다. 또한 본 연구에서는 산정된 유사유출량의 적정성을 파악하기 위해서 2009년에 봉동 지점에서 실측된 유사유출량과 비교하였다. 실측된 2009년 유사유출량은 한국건설기술연구원에서 하천유사량을 측정하여 산정한 결과로 부유사량과 총유사량으로 구분되어 있다. 총유사량은 실측된 부유사량과 수리특성 인자 등을 이용하여 Modified Einstein 방법으로 산정된 결과이다.

USLE로 모의된 값과 실측된 유사량을 비교·분석한 결과, Vanoni(1975)의 값이 실측치와 비교적 유사하였다.

Table 5. Sediment Delivery Ratio

봉동	산정식	유역면적(km ²)	유사전달비(SDR)	비고
Vanoni(1975)	SDR = 0.4724 A ^{-0.125}	342.262	0.228	
Boyce(1975)	SDR = 0.3750 A ^{-0.2382}	342.262	0.093	
USDA(1972)	SDR = 0.5656 A ^{-0.11}	342.262	0.298	

Table 6. Estimated Sediment Load

봉동	평균토양침식량 (ton/km ² /year)	유사유출량		비고
		(ton/km ² /year)	(ton/year)	
Vanoni(1975)	206.700	47.128	16,130	2009년
Boyce(1975)	206.700	19.223	6,579	2009년
USDA(1972)	206.700	61.596	21,082	2009년

Table 7. Observed Sediment Load

봉동	유사유출량		비고
	(ton/km ² /year)	(ton/year)	
부유사	42.33	15,025.92	2009년
총유사	53.42	18,962.46	2009년

7. 결론

USLE 모형의 적용 범위 확장에 따른 모형의 적정성을 평가하기 위해서 본 연구에서는 300 km² 정도의 유역면적을 갖는 봉동 수위관측소 유역에서 유사유출량을 모의하였다. 본 연구를 통해서 얻어진 결론은 아래와 같다.

1. 2009년의 강우사상에 의해서 발생된 평균토양침식량은 206.7 ton/km²/year로 산정되었다.
2. Vanoni(1975)와 USDA(1972)의 유사전달비는 비교적 유사한 값을 가졌다.
3. 실측된 유사유출량과 비교·분석한 결과, Vanoni(1975)의 유사전달비를 고려한 유사유출량이 보다 실측치에 근접한 결과를 나타내었다.

참고문헌

1. 한국수자원학회(1998), '개발사업으로 인한 토양손실량 예측 및 침사지 설계.
2. 한국지질자원연구원(2004), '침식퇴적재해 저감기술 개발.
3. 한국건설기술연구원(2009), '만경강 봉동 지점의 유사량 조사·분석 보고서.
4. Wischmeier, W.H. and Smith, 1978, Predicting rainfall erosion loss, U.S.D.A. Handbook.
5. Foster, G. R. and Wischmeier, W.H. 1974 Evaluating Irregular Slopes for Soil Loss Prediction.