

토양유실량 및 유사량 산정시 지형 입력 자료의 영향 평가

우원희¹, 최재완², 김기성¹, 이지원¹, 금동혁¹, 강현우¹, 임경재^{1,*}

¹강원대학교 지역건설공학과, ²국립환경과학원

(2011년 05월 12일 접수, 2011년 06월 17일 수리)

Evaluation of Effects of Topographic Factors on Soil Erosion and Sediment Yield Estimation

Woo, W. H¹, J. W. Choi², K. S. Kim¹, J. W. Lee¹, D. H. Kum¹, H. W. Kang¹ and K. J. Lim^{1,*}

¹Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

²National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

Abstract

With accelerated soil erosions at the watershed, many computer models have been developed and utilized for various purposes in recent years. The Universal Soil Loss Equation(USLE) and USLE-based soil erosion and sediment modelling system have been developed and tested because of its ease-of-use and readily available data sets in many countries. The Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control(SATEEC) system was one of these models. In this study, The SATEEC system ver 2.1 and ArcGIS Tool were used to evaluate effects of topographic factors on soil erosion estimation by adjusting values by $\pm 50\%$. With these changes, there was 24.8% change in estimated soil erosion values. However, the R^2 and the Nash-sutcliffe coefficient were 0.688 and 0.642, respectively. Similar trends were also found for estimated sediment yield values. These results indicated that the soil erosion values at the field levels should be evaluated first prior to its application at the watershed scale with the SATEEC system.

Key words: SATEEC, Soil erosion, Topographic factor, Sediment yield.

서론

소양댐, 도암댐 등과 같은 강원도의 대부분의 유역은 고랭지 농업지구가 포함되어 있다. 따라서 농업 지구를 중심으로 발생한 토양유실에 의해 매년 탁수문제가 되풀이되고 있다. 토양유실은 농업환경지표를 비롯한 국제 규범에서 농업에 의한 환경오염의 핵심문제로 제기되고 있으며 토양유실의 문제를 해결하기 위해서는 먼저 유역 내 토양유실 발생현황을 파악하는 것이 필요하다. 유역 내 토양유실 발생 현황을 파악하기 위해서는 장기 모니터링을 수행하는 것이 가장 정확한 방법이지만 대규모 유역에서의 장기적인 모니터링은 수행하기 어려운 경우도 많으며 인건비와 장비 등 많은 비용이 요구된다(Choi et al., 2009). 따라서 유역 내 토양유실을 모의하기 위해 지난 40여 년간 여러 모형들이 개발되어 사용되어 왔으며, 전

세계적으로 Universal Soil Loss Equation(USLE; Wischmeier and Smith, 1978)이 많이 사용되어 왔다. 그러나 USLE는 유역단위(Watershed Scale)로 토양유실을 분석할 수 있는 것이 아니라, 시험포 단위(field scale)모형이기 때문에, 유역 적용 시 많은 한계점이 있다. 때문에 Lim et al. (2005)은 USLE의 입력 자료와 수치표고 모형(Digital Elevation Model; DEM)만을 가지고 토양유실과 유사량을 모의할 수 있는 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) system을 개발하였으며, 현재 토양유실에 대한 많은 연구에 활용되고 있다(Park et al., 2007; Kang et al., 2009; Woo et al., 2010). 그러나 그동안 많은 연구자에 의해서 USLE를 기반으로 하여 개발된 SATEEC system의 여러 가지 태생적 한계점이 지적되어 왔다. 따라서 Park et al. (2007)은 SATEEC system의 문제점을 개선하기 위해 유역 내 시간적, 공간적인 변화를 고려하여

*Corresponding Author: Lim, K. J. (E-mail: kjlim@kangwon.ac.kr)

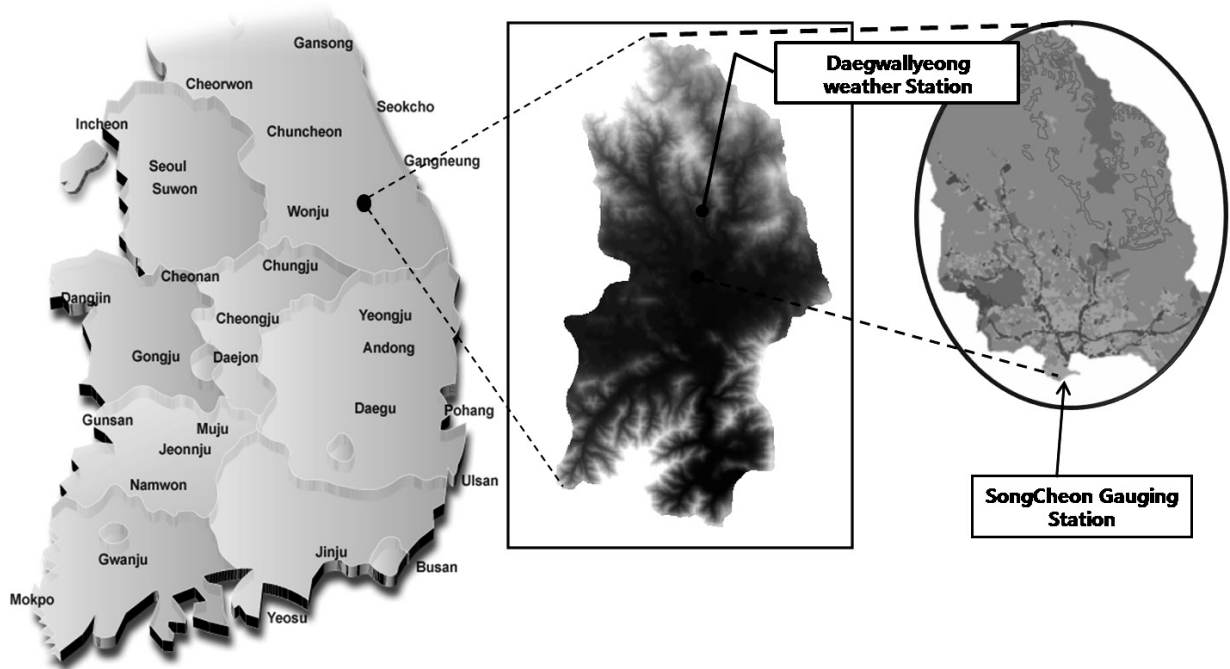


Fig. 1. Location and land uses at Doam-dam watershed, Kangwon-do.

월 또는 연 단위 토양유실을 모의할 수 있도록 Time-Variant C and R Modules을 개발하였다. 또한 유역의 여러 지형적 특성을 고려하여 유달 특성을 평가할 수 있는 Genetic Algorithm Sediment Delivery Ratio Module (GA-SDR Module)(Park et al., 2010)이 개발되어 유역에의 적용성을 높인 바 있으며, Woo et al. (2010)은 우리나라와 같이 집중성 강우 특성을 가진 유역에서 일 강우에 따른 토양유실량을 분석하기에 적합한 모듈인 R_s Module을 개발하였다. 또한 토양유실량 산정 시 임도나 도로, 농업용수로 등으로 인한 단일경사장의 변화를 고려할 수 있는 L Module의 개발되었다(Kang et al., 2009). 그러나 여러 가지 모듈 개발에도 불구하고 많은 연구자들이 최종 유출구에서의 모의유사량과 실측 유사량을 비교하기 때문에 지형자료의 오류가 있더라도 SATEEC system의 결과에는 반영되지 않는 문제점이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 1) 지형자료의 정확성이 토양유실량 및 유사량에 미치는 영향을 분석하여, SATEEC system의 지형 입력 자료의 중요성을 제시하고자 함에 있다. 본 연구의 결과는 향후 SATEEC 모형을 이용하여 유사량 산정 시 토양유실량의 검증 후에 최종 유출구에서의 유사량 산정에 효과적으로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

연구방법

1. 연구유역의 선정

본 연구의 대상지역은 강원도 평창군 도암댐 유역으로 송천1 지점을 최종유출구로 하는 소유역이다. 송천1 지점의 유역면적은 36.56 km²이며 도암댐 유역면적의 25.28%를 차지하고 있다. Figure 1은 도암댐 유역의 모습과 본 연구의 대상유역인 송천 1지점의 토지이용현황을 보여주고 있다.

2. SATEEC system ver. 2.1 개요

SATEEC system ver. 2.1은 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 USLE 모형의 입력 자료(Rainfall erosivity, Soil erodibility, Crop management, Practice factice)와 DEM을 이용하여 유역 내 토양유실 및 유사발생을 모의할 수 있는 시스템이다. SATEEC system ver. 2.1은 DEM을 이용하여 USLE LS Factor를 산정하고, Fig. 2에서 보이는 바와 같이 시스템에 의해 산정된 USLE LS Factor와 다른 USLE 입력 자료를 이용하여 토양 유실을 산정한다. 현재 SATEEC system ver. 2.1에서는 유역 면적에 의한 유달률 및 유역 내 각 지점의 경사도에 의한 유달률뿐만 아니라 유역의 면적, 평균 경사도, Curve Number와 같은 여러 지형적 특성 등

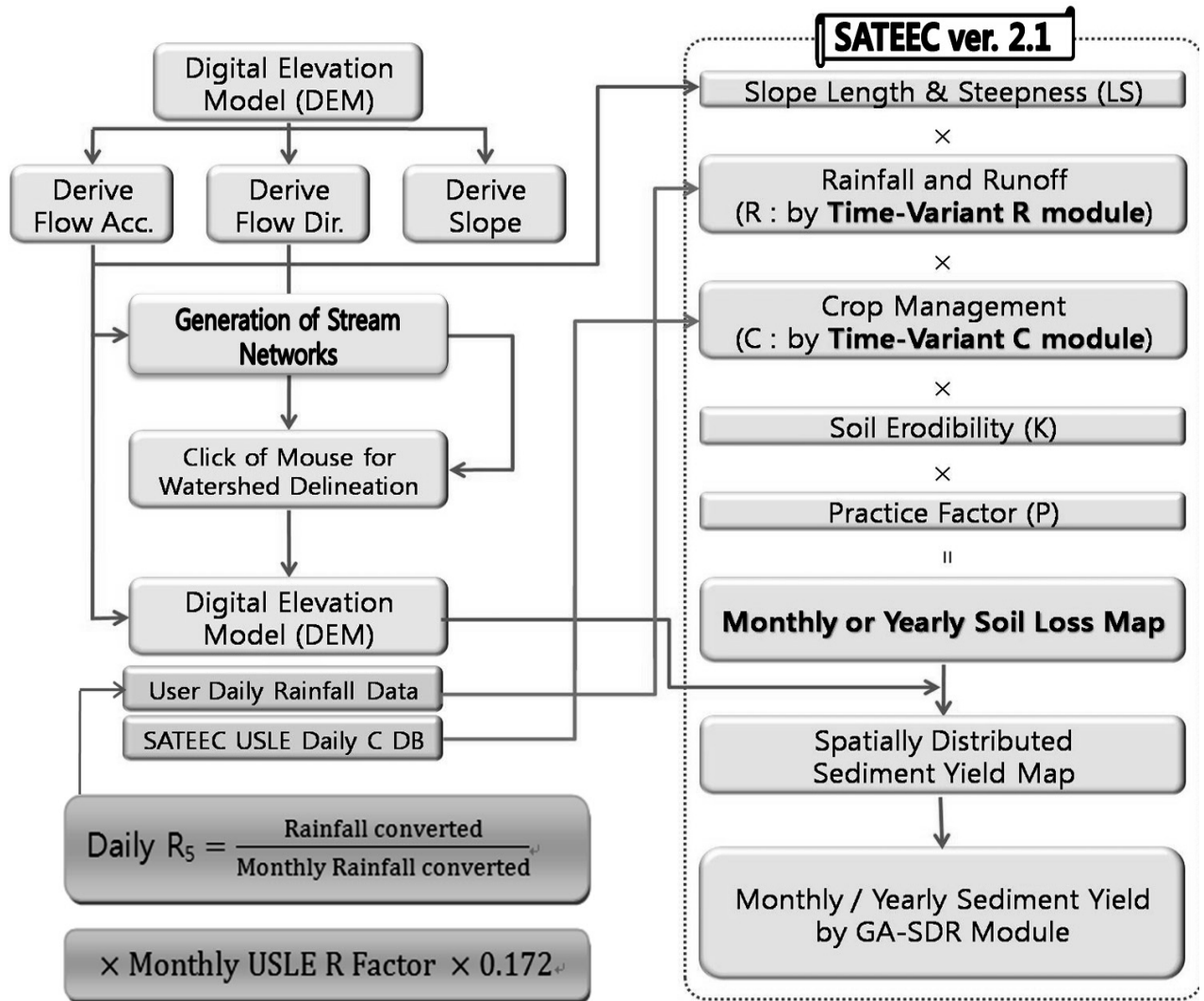


Fig. 2. Overview of the SATEEC system ver. 2.1 (Woo et al., 2010).

을 고려하여 유달률을 산정할 수 있는 GA-SDR 모듈이 탑재되어 있다. 그리고 태풍 등과 같이 단기간에 집중되는 강우특성을 고려한 일 단위 강우자료를 사용하여, 유역의 장기간의 강우량에 의한 강우인자를 산정할 수 있다. 집중성 강우는 해당일의 발생 강우량뿐만 아니라, 이전의 선행강우 또한 유역 내 토양수분에 많은 영향을 주므로 이를 반영하기 위해 5일선행강우를 고려한 R₅모듈이 탑재되어 있다(Woo et al., 2010).

3. SATEEC system의 입력자료

가. 강우인자(Rainfall erosivity factor)

본 연구에서는 일 강우 자료를 사용하여 태풍 등과 같은 단기간에 집중되는 강우 특성을 고려한 일 단위 강우인자를 사용하였다. 이러한 일 단위 강우특성을 반영하는

데 있어 해당 일의 발생 강우량도 중요하지만, 이전의 선행강우 또한 유역 내 토양수분에 많은 영향을 끼치므로 이를 반영하기 위해 5일 선행강우를 고려하여 개발된 R₅ Module(Fig. 3)을 사용하였다(Woo et al., 2010).

나. 토양침식인자(Soil erodibility factor)

USLE K Factor 는 토양침식인자(Soil erodibility factor)로서 토양의 침식성을 나타낸다. 토양침식인자는 토양의 물리적, 화학적 특성을 나타내고, 토양의 구조와 투수성, 유기물과 모래, 실트, 점토의 함량과 관계가 있다. 식 (1)은 Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) (Williams, 1975) 공식에 따라 K값이 산정되며, 여기서 SAN, SIL, CLA는 모래, 실트, 점토 함량 (%)이며, SN1은 1-SAN/100이다.

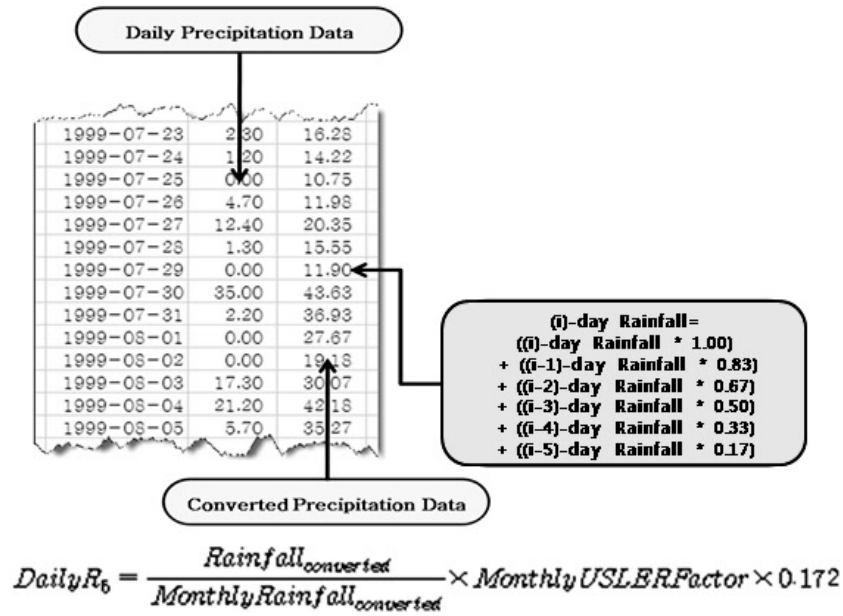


Fig. 3. USLE R factor in SATEEC system ver. 2.1 (Woo et al., 2010).

$$K = 0.2 + 0.3 \exp\left(-0.0256 SAN \left(1 - \left(\frac{SIL}{100}\right)\right)\right) \times \left(1.0 - \frac{0.25 CLA}{CLA + \exp(3.72 - 2.95 C)}\right) \times \left(1.0 - \left(0.7 \frac{SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9 SN1)}\right)\right) \quad (1)$$

Figure 4는 본 연구에서 사용된 SATEEC system ver 2.1의 토양침식인자를 나타낸다.

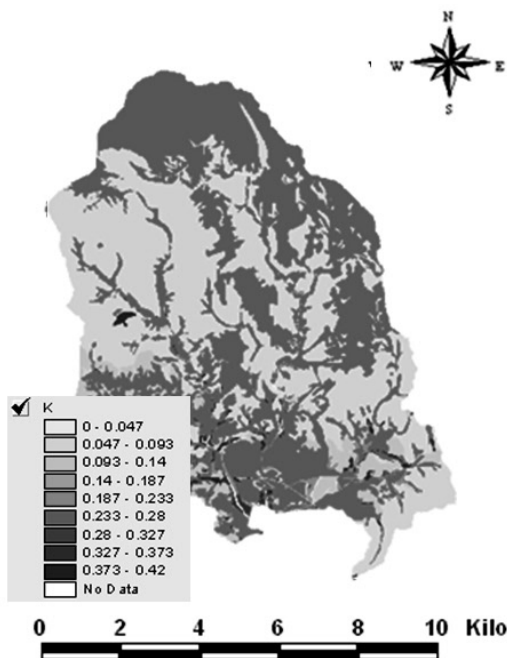


Fig. 4. USLE K factor used in SATEEC system ver. 2.1.

다. 작물피복인자(Crop management factor)

작물피복인자는 작물성장에 따른 지표피복면적에 영향을 받는다. 따라서 강우타격의 영향은 작물이 성장함에 따라 감소하게 된다. 이러한 작물성장에 따른 토양유실 저감효과를 고려하기 위해서는 작물성장에 따라 변화하는 지표 피복 상태를 고려하여야 한다.

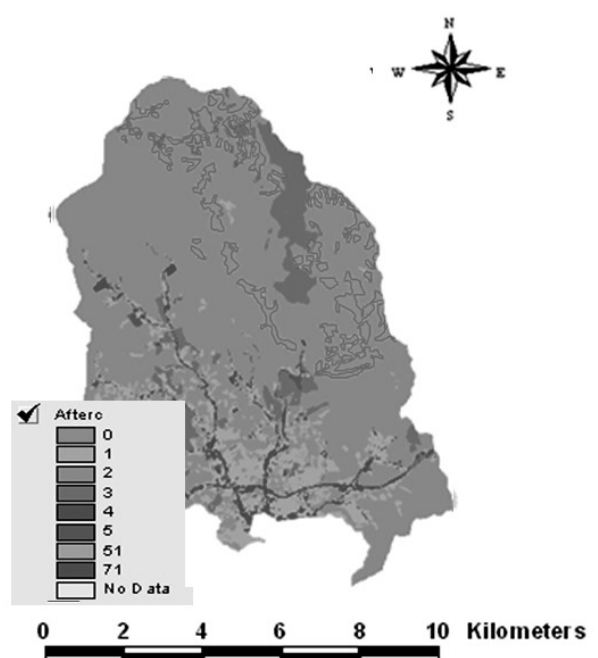


Fig. 5. USLE C factor used in SATEEC system ver. 2.1.

Figure 5는 이러한 지표 피복 상태를 고려할 수 있는 SATEEC system ver. 2.1의 Time-Variant C Module의 입력 자료이다.

라. 작물경작인자(Supporting conservation practice factor)

작물의 경작방법 인자는 경작 방법 등에 의한 토양 침식 량의 차이를 나타내는 값이다. Park (1999)은 토지이용과 경사도에 따른 경작방법인자를 Table 1과 같이 제안한 바 있다. 밭에 경우 등고선 경작방식을 택하는 가정 하에 경사도에 따른 경작인자 값을 나타낸다.

Figure 6은 SATEEC System ver 2.1 에서의 작물경작인자를 나타낸 모습이다.

Table 1. USLE P factors various slopes (Park, 1999, 2002)

Land use	P factor	
Paddy land	0.2	
Upland	Slope	P factor
	0%~2%	0.60
	2%~7%	0.50
	7%~12%	0.60
	12%~18%	0.80
	18%~24%	0.90
	24%~30%	0.95
>30%	1.00	

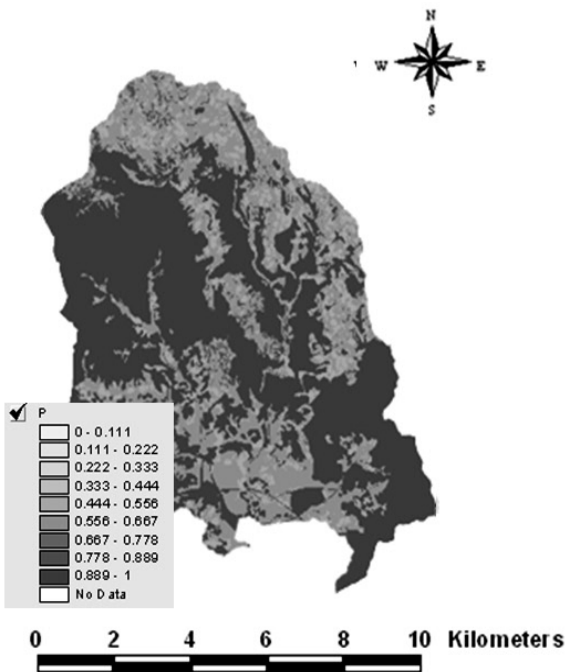


Fig. 6. USLE P factor used in SATEEC system ver. 2.1.

마. 경사장, 경사도 인자(Slope length & Steepness factor)

경사장 인자(USLE L factor)는 표준 시험포의 길이인 22.13 m 와 단일경사를 이루는 지형의 길이의 비로 나타낸다. 경사도 인자(USLE S factor) 는 표준시험포의 경사도인 9%에 대해서 단일경사를 이루는 지형의 경사도의 비로 나타내고 있다. 또한 LS값을 산정할 때에는 RUSLE User Guide(Foster et al., 1996)를 이용한다. RUSLE User Guide에 따르면 경사장의 실험에 의한 모의실험의 길이는 10.7-91.4 m이나 자연 상태에서 세류가 일어나기 시작하는 최대 경사장 122 m를 사용할 수도 있다 식(2). SATEEC system은 아래 식을 이용하여 LS 인자 값을 산정한다.

$$LS = \left(\frac{A}{22.13}\right)^{0.6} \left(\frac{\sin\theta}{0.0896}\right)^{1.3} \quad (2)$$

Figure 7은 SATEEC system ver. 2.1의 LS factor를 나타낸다.

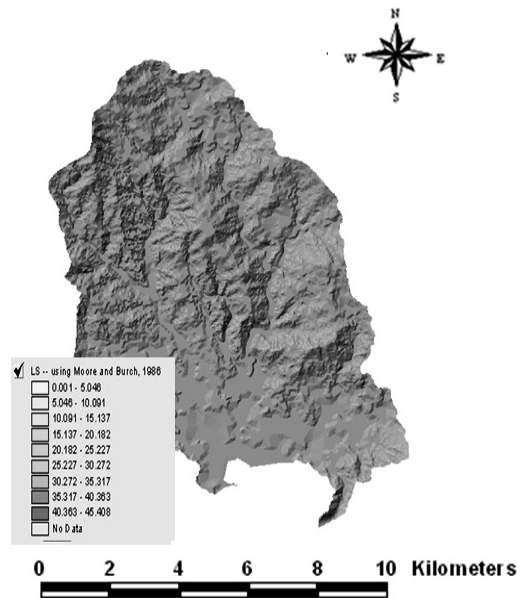


Fig. 7. USLE LS factor used in SATEEC system ver. 2.1.

4. SATEEC system 의 GA-SDR Module

GA-SDR Module은 유역에서의 실측 유사량 자료와 SATEEC system에 의해 산정된 토양유실량을 이용하여 유달률을 산정하며, 이 연산 과정에서 유역의 특성을 반영하기 위해 유역의 면적, 유역의 평균 경사, 그리고 유역의 Curve Number (CN) 을 고려하여 계수 (A) 와 각 지수 (B, C, D) 의 최적 해를 유전자 알고리즘을 이용하여 찾는다. 식 (3)은 GA-SDR의 유달률 산정식이다.

$$SDR = A * (DA^B) * (ZL^C) * (CN^D) \quad (3)$$

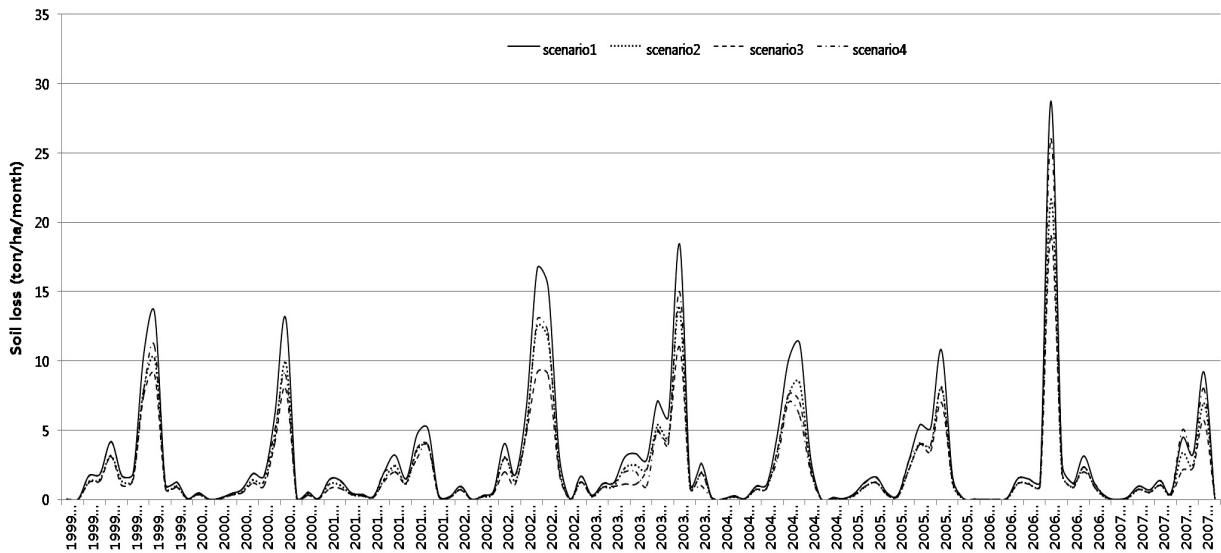


Fig. 8. Soil erosion used in SATEEC system ver 2.1 and random grid.

Table 2. Soil erosion and Sediment yield used in SATEEC system ver.2.1

Scenario	Scenario1	Scenario2	Scenario3	Scenario4
Soil erosion (ton/ha/year)	4.01	3.62	3.17	3.74
Sediment Yield (ton/ha/year)	0.686	0.685	0.684	0.687

DA는 유역의 면적 (km²), ZL은 유역의 평균경사 (m/km), CN은 유출곡선지수(Curve Number) 이다. 본 연구에서는 유역의 특성을 반영하여 실측유사량을 이용하여 유달률을 산정하는 GA-SDR 전처리 프로세서를 이용하여 유달률을 산정하였으며, 이를 유사량 산정 시 적용하였다.

5. ArcGIS Random grid Tool을 이용한 토양유실량 산정 시나리오

본 연구에서 사용한 토양유실량 시나리오는 총 4개로써, 시나리오 1은 SATEEC system을 이용하여 산정된 토양유실량이며, 시나리오2~4는 시나리오1의 DEM을 ArcGIS Random grid Tool을 사용하여 ±0.50 가중치를 주어 새로 생성된 DEM을 이용하여 토양유실량을 산정한 것이다. 따라서 이러한 여러 개의 토양유실량 시나리오를 사용하여 SATEEC system의 유사량 산정 시 입력 자료로 활용하였다.

결과 및 고찰

1. 시나리오별 토양유실량 비교

Figure 8은 SATEEC system을 이용하여 산정된 토양유실량을 토양유실량 시나리오별로 나타낸 그래프이다. Figure 8에서 보는 것과 같이 토양유실량은 시나리오별로 3.17~4.01 (ton/ha/year)의 차이를 보였다. 지형자료의 차이로 인해 전체적인 토양유실량에도 차이가 발생하였다.

2. GA-SDR을 이용하여 유달률 산정

예측된 토양유실량을 이용하여 유사량 산정 시 SATEEC GA-SDR Module을 이용하여 유달률을 산정하는데 본 연구에서는 SATEEC GA-SDR Module을 이용하여 유달률 산정하였으며 토양유실량 시나리오별 유달률은 0.019~0.024로 나타났다.

3. 시나리오별 유사량 비교

예측된 토양유실량과 SATEEC GA-SDR Module을 이용하여 산정한 유달률을 통해 Table 2에서 보이는 바와 같이 유사량을 산정하였다. Table 2에서도 알 수 있듯이 토양유실량의 차이에도 불구하고 최종유출구에서의 유사량은 거의 비슷한 값(0.684~0.687 ton/ha/year)을 나타내고 있다. 이는 시나리오별 토양유실량 값이 다름에도 불구하고 GA-SDR Module의 유달률 산정 시 최종유출구에서의 실측유사량과 토양유실량을 비교하여 각 시나리오별 최적

의 유달률을 산정하기 때문에 최종유출구에서의 모의된 유사량과 실측유사량은 $R^2=0.688$, $EI=0.642\sim0.643$ 으로 매우 비슷한 경향을 나타냈다.

결 론

본 연구에서는 ArcGIS Tool을 사용하여 DEM에 ± 0.50 가중치를 주어 지형자료의 정확성이 토양유실량 및 유사량에 미치는 영향을 분석하였다. 다양한 DEM자료를 바탕으로 SATEEC system을 이용하여 경사장과 경사도를 구한 뒤 토양유실량을 산정하였다. 이때 지형자료의 오류가 있더라도 최종유출구에서의 유사량은 실측유사량과 비슷한 경향을 보였다. 이는 실측유사량과 모의된 토양유실량을 이용하여 유달률을 산정하는 모듈인 GA-SDR Module이 산정한 결과이다. 따라서 SATEEC system을 이용하여 유사량 산정 시 필지별 토양유실량의 검증은 통해 유사량을 산정해야 함을 의미한다. 이는 많은 유역단위 유출, 유사, 비점 거동 평가 모형에서도 고려되어야 할 부분이다.

따라서 토양유실량의 검증후에 유역 출구에서의 유사량 자료를 활용하여 모형을 검보정 한다면, 다양한 최적 관리 기법 개발 및 적용 후 평가에도 SATEEC 시스템이 널리 활용될 수 있으리라 판단된다.

사 사

본 연구는 강원대학교 농업생명과학연구원의 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌

- Choi, J. W., Hyun, G. W., Lee, J. W., Shin, D. S. Kim, K. S., Park, Y. S., Kim, J. G., Lim, K. J. (2009) Evaluation of Sediment Yield Prediction and Estimation of Sediment Yield under Various Slope Scenarios at Jawoon-ri using WEPP Watershed Model. *Journal of Korean Society on*
- Water Quality*. 25(3): 441-451.
- Foster, G. R., Renard, K. G., Yoder, D. C., McCool, D. K., Weesies, G. A. (1996) RUSLE User's Guide. Soil and Water Conservation Society.
- Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J. D., Kim, K. S. (2005) GIS-based sediment assessment tool. *CATENA*. 64: 61-80.
- Park, C. S. (1999) Monitoring of Non-point Pollutants from the Different Land Use in the Yulmunchon Tributary Watershed, the So-yang River Basin. Master's degree, Kangwon National University, Chuncheon, Korea.
- Park, C. S. (2002) Soil Management Practices to Reduce Water Erosion from the Sloped Farmland in Highland. Ph.D. Thesis, Kangwon National University, Chuncheon, Korea.
- Park, Y. S., Kim, J. G., Kim, N. W., Kim, K. S., Choi, J. D., Lim, K. J. (2007) Analysis of Sediment Yields at Watershed Scale using Area/Slope-Based Sediment Delivery Ratio in SATEEC. *Journal of Korean Society on Water Quality*. 23(5):650-658.
- Park, Y. S., Kim, J. G., Kim, N. W., Kim, S. G., Jeon, J. H., Engel, B. A., Jang, W. S., Lim, K. J. (2010) Development of New R, C and SDR Modules for the SATEEC GIS System. *Computers & Geosciences*. 36(6): 726-734.
- Williams, J. R. (1975) Sediment routing for agricultural water sheds. *Water Resour. Bull.* 11(5): 965-974.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses A Guide To Conservation Planning. The USDA Agricultural Handbook No. 537.
- Woo, W. H., Moon, J. P., Kim, N. W., Choi, J. W., Kim, K. S., Park, Y. S., Jang, W. S., Lim, K. J. (2010) Evaluation of SATEEC Daily R Module using Daily Rainfall. *Journal of Korean Society on Water Quality*. 26(5): 841-849.