

# 시공간적 변화를 고려한 SATEEC 토양유실 평가시스템 개발



**박윤식 >>>**  
미국 Purdue University 박사과정  
park397@purdue.edu



**김종권 >>>**  
강원대학교 지역건설공학과 박사과정  
jong\_0923@naver.com



**장원석 >>>**  
강원대학교 지역건설공학과 박사과정  
won.cousin@gmail.com



**임경재 >>>**  
강원대학교 지역건설공학과 부교수  
kjlim@kangwon.ac.kr

## 1. SATEEC 시스템의 개요

Universal Soil Loss Equation (USLE) 모형은 면상침식 (sheet erosion) 과 세류침식 (rill erosion) 만을 모의할 수 있는 시험포 (field-scale) 단위 모형

이다. 이 USLE 모형은 유역에서 유실된 토양이 하천으로의 유사 유입량을 모의하는 것이 아니라, 대상 유역에서의 토양 유실 가능 추정치를 산정할 때 이용될 수 있다. 이는 USLE 를 이용하여서는 유역에서 발생한 유사의 양이 얼마나 많은 양이 하류 수계로 유입이 되어, 탁수발생과 수질악화에 얼마나 영향을 평가하는데 이용될 수 없음을 의미한다. 유역에서 발생한 토양 유실에 따른 하류 수계의 탁수 및 비점오염 문제를 해결하기 위해서는 발생한 유사의 양이 하류하천으로 유입되는 양이 분석될 수 있어야 한다. 시험포 모형의 유역적용 (Watershed application) 문제를 해결하기 위해 USLE 모형의 입력 자료만을 이용하여 농경지에서 유실된 토양이 얼마나 하류 하천으로 유입되는지를 모의할 수 있는 SATEEC 시스템이 개발되어 이용되고 있다(Lim et al., 2005). 이 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion (SATEEC) 시스템은 유역내 임의의 지점에서 토양유실방지대책을 수행하였을 경우 하류하천에 얼마나 유사 발생을 저감시킬 수 있는지를 모의하는 시스템으로 유역 단위(Watershed scale)로 적용시킬 수 있는 장점이 있으며 현재 전 세계 여러나라에서 연구 및 실무 등에 사용되고 있다. 또한 최근 토양 유실에 있어 적지 않은 영향을 주는 강우 인자와 지표 피복 인자에 대해 시간적인 변화를 고려할 수 있는 SATEEC ArcView GIS system ver. 2.0 이 개발되어 상대적으로 입력자료의 구축 및 모형의 구동이 어려운 SWAT 모형과의 비교 분석이 이루어진바 있으며 유역의 특성을 비교적 잘 반영하는 것으로 판단되었다.

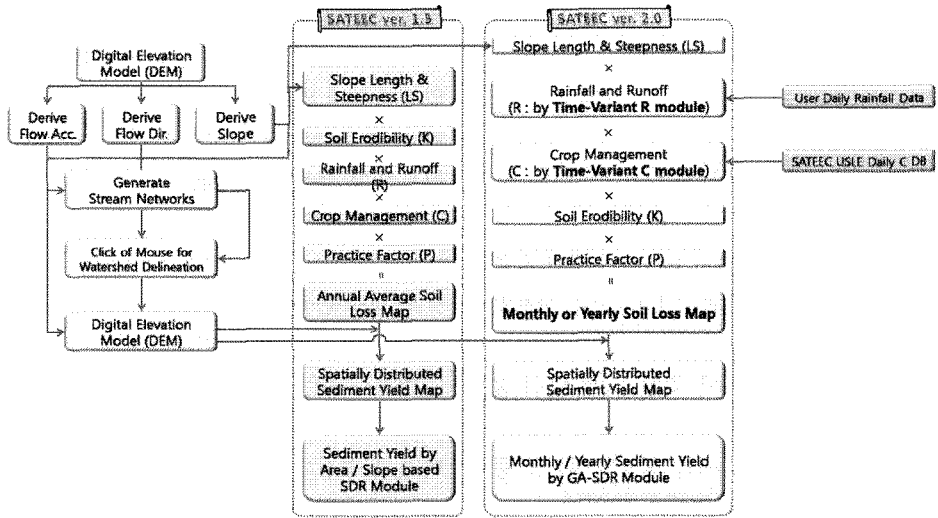


Figure 1. SATEEC system ver. 2.0. ArcView GIS 시스템의 개요 (Park et al., 2010)

SATEEC system ver. 2.0은 Figure 1에서 보이는 바와 같이 USLE 모형의 입력자료 (Rainfall erosivity, Soil erodibility, Slope length and steepness, Crop management, Practice factice) 만을 이용하여 유역내 토양유실 및 유사발생을 모의할 수 있는 시스템이다. 이 SATEEC 시스템은 유역면적에 따른 유달률을 산정하여 유역에서 유실된 토양이 얼마만큼 하루로 유달되는지를 모의한다. 유역면적은 USLE 입력자료 중 경사장 (L) 과 경사도 (S) 입력값을 추출하기 위하여 이용된 Digital Elevation Model (DEM) 지형자료를 이용하여 자동으로 추출된다. 특히 SATEEC system ver. 2.0은 이전 버전인 SATEEC system ver. 1.5가 모의기간 내 단일의 강우 인자 값을 사용하여 모의하기 때문에 장기간에 걸친 연평균 토양 유실 가능 추정치와 유사량을 모의하는 데에 비해, 일별 강우 자료값을 강우 인자값으로 사용하고 일단위 토지이용별 작물별 지표피복 인자 값을 이용하여 월별/연별 토양 유실 가능 추정치 및 유사량을 모의하기 때문에 대상 유역의 시간적 강우 패턴 및 지표 피복 패턴을 고려할 수 있다는 장점이 있다.

Figure 2는 SATEEC ArcView GIS 2.0의 메인 인터페이스이다. 그림에서 보이는 바와 같이

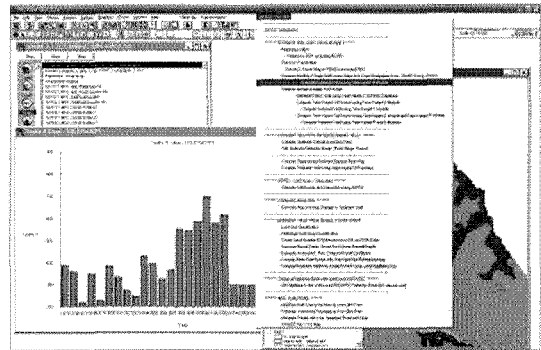


Figure 2. SATEEC ArcView GIS 시스템 인터페이스  
SATEEC 시스템의 모든 기능은 Avenue 프로그래밍을 통해 자동화되어 있으며, 모의 과정을 순차적으로 배열되어 있다. 따라서 GIS에 관한 전문지식이 없는 사람도 간단한 교육만으로 운영할 수 있는 사용자 편의 중심으로 설계된 토양유실 및 유사모의의 평가 시스템이다. Figure 2에 보이는 SATEEC ArcView GIS 2.0 메뉴구성을 보면 연구목적으로 개발된 많은 부분이 포함되어 있으나 토양유실 및 유사발생을 모의하기 위해서는 대항목 메뉴만 이용하면 손쉽게 토양 유실량과 유사발생량을 모의할 수 있다.

SATEEC system ver. 2.0.은 위에서 설명된 바와 같이 USLE 입력 자료만을 이용하여 유사발생을 모의할 수 있는 시스템이며, 토양유실 발생가능성이



높은 지역에 대해서는 토양유실을 방지할 수 있는 대책을 수립하는 데에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. SATEEC 시스템의 입력자료

SATEEC system ver. 2.0은 장기간에 걸친 강우 자료를 이용하여 단일의 USLE R Factor를 사용할 수도 있으나, Time-Variant R Module을 이용하여 일 단위 강우 자료 (Figure 3)에 의한 월/연 단위 강우 인자를 산정하여 모의에 적용할 수 있다. 우리나라 강우 인자 (USLE R Factor)의 계산은 정필균 등

(1984)이 각 지역별로 8~21년 정도의 강우자료를 바탕으로 하여 제시한 다음 식을 이용하여 산정할 수 있으며 현재 SATEEC System ver. 2.0의 강우 인자 산정 모듈은 다음 식(1)과 식(2)에 의해 월/연단위 강우 인자 값을 산정한다.

월 강수량에 대해,

$$R = 0.0378X^{1.4190} \quad (1)$$

연 강수량에 대해,

$$R = 0.0115Y^{1.4947} \quad (2)$$

여기서 R은 강우강도(USLE R Factor), X는 각 월 강수량의 합(mm), Y는 각 연 강수량의 합 (mm)이다. 토양침식인자(K)는 어떤 토양의 고유한 침식성을 정량적으로 표시한 것으로 유실량은 토양 침식에 영향을 끼치는 인자가 동일한 경우 토양 특성의 차이로 인하여 달라진다. Williams(1975)는 위의 공식을 토대로 K값을 정할 수 있는 Monograph를 제시하였는데 우리나라 토양에 적용성 검토 결과 타당한 것으로 보고된 바 있다(정 등, 1976). 식생은 유출수의 유속과 강우의 타격력을 감소시키는 한편, 뿌리에 의한 토양구조의 발달 및 공극률 증가로 강우의 침투율을 증가시킴으로써 토양 유실량을 감소시키는 효과를 갖는다(정필균, 1984). 지표를 피복하고 있는 이 식생은 시간에 따라 다른 조건을 갖기 때문에, 이에 의한 영향을 고려하기 위해서는 기상 등을 비롯한 시간에 따라 변하는 조건에 의한 식생의 상태를 고려하여야

Date	Rsp
20020927	0.0
20020928	5.0
20020929	20.0
20020930	0.0
20021001	0.0
20021002	0.0
20021003	0.0
20021004	0.0
20021005	2.0
20021006	14.0
20021007	0.0
20021008	0.0
20021009	0.0
20021010	0.0
20021011	0.0
20021012	0.0
20021013	0.0
20021014	0.0
20021015	1.0
20021016	0.0
20021017	0.0

Figure 3. Daily Rainfall data for SATEEC System ver. 2.0 (Park et al., 2010).

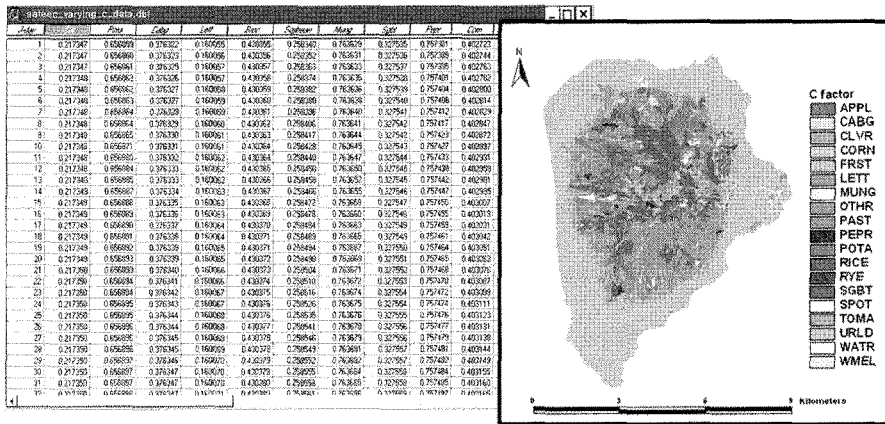


Figure 4. Daily Crop DB and Land cover for SATEEC System ver. 2.0

식생에 의한 지표 피복 상태에 따른 합리적인 토양 유실 및 유사량을 모의 할 수 있다. SATEEC system ver. 2.0 에서의 작물 인자는 작물에 따라 단일의 값을 사용할 수 있는 모듈 외에, Julian-day 별로 구축되어 있는 DB를 이용하여 시간에 따라 변하는 값으로 모의할 수 있는 Time-Variant C module 을 이용할 수도 있다 (Figure 4).

경사장과 경사도는 USLE에서 경사장 인자(L)과 경사도 인자(S)로 표기되는 지형 인자(LS)로 알려져 있다. 경사장은 유역의 끝지점에서 경사진 지점까지의 거리, 즉 유출구까지의 거리이며, 표준 시험포에서의 길이(22.13 m)의 비로 나타내어진다. 경사도는 표준 시험포에서의 경사도(9%)와의 비로 나타내어진다. 이 경사장과 경사도 인자를 SATEEC은 DEM (Digital Elevation Model) 을 이용하여 Moore 등 (1986a, 1986b)의 방법 식(2)를 이용하여 계산한다. DEM 을 이용하여 LS값을 산정할 때 (식 3), RUSLE User Guide(Foster et al., 1996)에 따르면 경사장의 실험에 의한 모의 길이는 10.7 m (35 ft) 에서 91.4 m (300 ft) 이나 자연 상태에서 세류가 일어나기 시작하는 최대 경사장 122 m (400 ft) 를 사용할 수도 있다.

$$LS = \left(\frac{A}{22.13}\right)^{0.6} \left(\frac{\sin\theta}{0.0896}\right)^{1.3} \quad (3)$$

### 3. SATEEC system ver. 2.0. 에서의 유달률 산정 방법

SATEEC 시스템은 유역내 토양유실 및 하천으로의 유사유입 그리고 침사지와 같은 토양유실 저감대책, 토지이용변화 및 최적관리 기법에 따른 유사 저감효과를 분석할 수 있는 시스템이다. 이러한 유사 저감 효과 분석을 위해 유역 내 유사량을 산정하는 것이다. 유사량은 보통 총 토양 유실에 대한 유사량의 비로 정의되는 유달률을 이용하여 산정할 수 있으며 식(4)와 같이 나타낼 수 있다(Yin et al., 2005).

$$SDR = \frac{S_y}{T} \quad (4)$$

여기서,  $S_y$ 는 최종 유출구 혹은 임의 지점에서의 유사량이며 T는 유역의 총 토양 유실량이다. 유달률은 유역의 크기 및 형상, 강우 패턴, 직접 유출량, 침투 유량, 토지 이용도, 작물, 경사, 토양 입자 등과 같은 유역의 물리적 인자의 영향을 받는다. 이러한 모든 자연 요소를 고려하는 유달률을 식으로 정의한다는 것은 거의 불가능하다. 이에, 몇 가지 인자를 고려한 경험적인 식이 많은 연구자들에 의해 개발되었다. 널리 알려진 것 중 하나가, 유달률과 유역의 크기의 관계로 표현된 SDR 곡선이다(USDA, 1972).

$$SDR = 0.472AREA^{-0.125} \quad (\text{Vanoni, 1975}) \quad (5)$$

$$SDR = 0.5656AREA^{-0.11} \quad (\text{Boyce, 1975}) \quad (6)$$

$$SDR = 0.3750AREA^{-0.2382} \quad (\text{USDA, 1972}) \quad (7)$$

그리고 Williams 등(1977) 에 의해 유역의 평균 경사도를 고려하여 유달률을 산정하는 방법이 제안되었다.

$$SDR = 0.627SLOPE^{-0.403} \quad (\text{Williams et al., 1977}) \quad (8)$$

SATEEC은 이러한 유달률을 이용하여 최종 유출구나 임의 지점에서의 유사량을 모의할 수 있다. SATEEC System ver. 2.0 은 위에 언급된 유달률 산정 모듈 외에 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm)을 이용하여 유역에서의 여러 특성을 고려하여 유달률을 산정할 수 있는 GA-SDR 모듈을 탑재하고 있다. GA-SDR 모듈은 유역에서의 실측 유사량 자료와 SATEEC 시스템에 의한 토양 유실량 (USLE A 값)을 이용하여 유달률을 산정하며, 이 과정에서 유역의 특성을 반영하기 위하여 유역의 면적 및 유역의 평균 경사 그리고 유역의 Curve Number (CN) 을 고려하여 지수 (A) 와 각 계수 (B, C, D) 의 최적의 해를 찾는다. 식 9 는 GA-SDR 모듈의 기본 유달률 산정식이다.

$$SDR = A*(DA^B)*(ZL^C)*(CN^D) \quad (9)$$




여기에서 DA = 유역면적 (km<sup>2</sup>), ZL = 유역의 평균 경사, CN = Curve Number

현재 GA-SDR 모듈을 이용하여 정확한 토양유실/유사 평가가 가능하도록 SATEEC ArcView GIS 시스템을 보완/개선되어 있으며, 간단한 메뉴를 통해

사용자가 손쉽게 GA-SDR 모듈을 활용할 수 있게 되었다.

- SATEEC ArcView GIS:

<http://www.EnvSys.co.kr/~sateec> 

### 참고문헌

1. 정필균, 고문환, 엄기태 (1984). "토양 유실량 예측을 위한 작부 인자 검토" 한국토양비료학회지, 한국토양비료학회 제18권 제1호 pp. 7-13.
2. 정영상, 신재성, 신용화 (1976). "경사지 토양의 침식 인자에 관하여" 한국토양비료학회지, 한국토양비료학회 제9권 제2호 pp. 107-113.
3. Moore, I. and Burch, G.. (1986a). "Modeling Erosion and Deposition: Topographic Effects" Trans. of the ASAE, 제29권 제6호 pp. 1624-1640.
4. Moore, I. and Burch, G.. (1986b). "Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation" Soil Science Society of America Journal, 제50호 pp. 1294-1298.
5. Boyce, R. C., (1975). "Sediment routing with sediment delivery ratios" Present and Prospective Technology for ARS. USDA, Washington, D. C.
6. Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Zhenxu, T., Choi, J. D., and Kim, K. S., (2005). "GIS-based sediment assessment tool" Catena, 제64권 pp. 61-80.
7. USDA. (1972). "Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios" National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation.
8. Vanoni, V. A., (1975). "Sedimentation Engineering, Manual and Report" American Society of Civil Engineers, New York, N. Y.
9. Williams, J. R. (1975). "Sediment routing for agricultural watersheds" Water Resour. Bull, 제 11권 제5호, pp.965-974.
10. Yin, Z., Walcott S., Kaplan, B., Cao, J., Lin, W., Chen, M., Liu, D. and Ning, Y.. (2005). "An analysis of the relationship between spatial patterns of water quality and urban development in Shanghai" China. Computers. Environment and Urban Systems, 제29권, pp. 197-221.