*Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 26, No. 5, pp.841-849 (2010)*

# 일강우를 고려한 SATEEC R 모듈 적용성 평가

우원희 · 문종필* · 김남원** · 최재완 · 김기성 · 박윤식 · 장원석 · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과
*국립농업과학원
**한국건설기술연구원

# Evaluation of SATEEC Daily R Module using Daily Rainfall

Wonhee Woo · Jongpil Moon* · Nam Won Kim** · Jaewan Choi · Ki-sung Kim · Youn Shik Park · Won Seok Jang · Kyoung Jae Lim†

*Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University*
**National Academy of Agricultural Science*
***Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology*
***(Received 9 April 2010, Revised 11 August 2010, Accepted 12 August 2010)***

**Abstract**

Soil erosion is an natural phenomenon. However accelerated soil erosion has caused many environmental problems. To reduce soil loss from a watershed, many management practices have been proposed worldwide. To develop proper and efficient soil erosion best management practices, soil erosion rates should be estimated spatially and temporarily. The Universal Soil Loss Equation (USLE) and USLE-based soil erosion and sediment modelling systems have been developed and tested in many countries. The Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) system has been developed and enhanced to provide ease-of-use interface to the USLE users. However many researchers and decision makers have requested to enhance the SATEEC system for simulation of soil erosion and sediment reflecting effects of single storm event. Thus, the SATEEC R factors were estimated based on 5 day antecedent rainfall data. The SATEEC 2.1 daily R factor was applied to the study watershed and it was found that the R2 and EI values (0.776 and 0.776 for calibration and 0.927 and 0.911 for validation) with the daily R were greater than those (0.721 and 0.720 for calibration and 0.906 and 0.881 for validation) with monthly R, which was available in the SATEEC 2.0 system. As shown in this study, the SATEEC with daily R can be used to estimate soil erosion and sediment yield at a watershed scale with higher accuracy. Thus the SATEEC with daily R can be efficiently used to develop site-specific soil erosion best management practices based on spatial and temporal analysis of soil erosion and sediment yield at a daily-time step, which was not possible with USLE-based soil erosion modeling system.

**keywords** : Erosivity, Rainfall, SATEEC, Sediment, Soil Erosion, Universal soil loss equation (USLE)

## 1. 서 론

토양유실이란 강우 등에 의한 침식에 의해 유역 내의 토양이 유실되는 것으로 자연적으로 발생할 수 있는 현상이다. 그러나 인위적인 방목, 지나친 시비 및 관개활동, 산불 등과 같은 인간의 활동으로 인해 토양유실이 가속화되고 있다. 한국뿐만 아니라 전 세계적으로 토양 유실을 줄이기 위해 많은 연구가 수행되고 있으며, 또한 토양 유실을 방지하기 위한 많은 대책들이 제시되고 있다. 유역 내에서 발생한 토양 유실은 강이나 하천으로 유입될 시, 하천의 탁도를 증가시켜 수질오염의 원인 중 하나가 될 수 있다. 또한, 이렇게 발생한 탁수는 강이나 하천 등에서의 수생태계 파괴나 수자원 가치의 하락, 댐 등과 같은 수리 구조물의 기능을 저하 시키는 등 환경적·경제적 측면에서 적지 않은 손실을 발생시킬 수 있다(박윤식 등, 2007b). 예를 들어, 낙동강 상류의 임하댐 유역의 경우 유역의 대부분을 산림 지역이 차지하고 있으나, 적지 않은 면적의 농경지가 하천에 인접하여 있다. 따라서 임하댐 유역에서는 집중성 강우로 인한 사면 붕괴, 농경지 토양유실과 같은 원인으로 상당량의 토양이 유역으로 유입되면서 고탁도의 탁수가 발생한 바 있다. 특히 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미로 인하여 고탁도의 탁수가 발생하였다(박윤식 등, 2007a). 유역 내에서 발생할 수 있는 토양 유실은 강우에 의해 일어나는 자연적 현상이나 인간에 의한 농경 생활 등으로 인해 가중되기 때문에 문제가 되는 것이다. 특히 유실된 토양이 하천으로 유입되고 토양 입자에 흡착되어 이동되어 온 인과 같은 영양물질은 수체 부영양화의 주요원인으로 작용하고 있기 때문에, 한국뿐만 아니라 세계적으로도 환경적 문제로 이슈가 되고 있다. 이러한 토양유실의 문제점을

† To whom correspondence should be addressed.
kjlim@kangwon.ac.kr

해결하기 위해서는 먼저 이에 대한 분석이 필요하며, 이러한 분석 방법 중의 하나로, 여러 모형들이 개발되어 활용되고 있으며, 지난 40여 년간 토양유실을 모의하기 위하여 국내외적으로 Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier and Smith, 1965)가 널리 사용되어 왔다. 그러나 USLE 는 유역 단위(Watershed Scale)로 토양 유실을 분석할 수 있는 것이 아니라, 시험포 단위(Field Scale)로 토양유실을 모의할 수 있기 때문에, 유역 적용시 많은 한계점이 있다. 이에 USLE의 입력 자료와 수치표고 모형(Digital Elevation Model; DEM) 만을 가지고 토양유실과 유사량을 모의할 수 있는 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion (SATEEC) (Lim et al., 2003, 2005)이 개발되어 현재 토양 유실에 대한 연구에 활용(박윤식 등, 2007b; Kang et al., 2009)되고 있으나, 그동안 많은 연구자에 의해서 USLE를 기반으로 하여 개발된 SATEEC 모형의 여러 가지 태생적 한계점이 지적되어 왔다. 이러한 점을 개선하기 위하여 유역내 시간적·공간적인 변화를 고려하여 월/연 단위 토양 유실 모의할 수 있도록 Time-Variant C·R Modules 이 Park 등(2010)에 의해서 개발되었으며, 또한 유역의 여러 지형적 특성 등을 고려할 수 있는 Genetic Algorithm-Sediment Delivery Ratio Module (GA-SDR Module)이 개발 되어 유역에의 적용성을 높인 바 있다(Park et al., 2010). 그러나 GA-SDR SATEEC 시스템은 단일 강우에 따른 토양유실을 산정할 수 없는 단점으로 인해 한국 등과 같이 집중성 강우 특성을 가진 유역에 적용하기에는 많은 한계점이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 USLE 모형의 입력자료와 간단한 강수자료를 이용하여 단일 강우를 고려하여 토양유실을 산정할 수 있는 모듈 개발에 관한 많은 요구가 있어 왔다.

따라서, 본 연구의 목적은 SATEEC System Ver 2.0 강우 인자 산정 R 모듈의 단점을 개선하여 단일강우를 고려하여 토양유실 및 유사량 산정하여 SATEEC 시스템의 유역 적용성을 검토하는데 있다.

## 2. 연구방법

### 2.1. SATEEC System ver. 2.0의 개요 및 강우 인자 산정 모듈

SATEEC system ver. 2.0 (http://www.EnvSys.co.kr/~sateec)은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 USLE 모형의 입력자료(Rainfall erosivity, Soil erodibility, Crop management, Practice factice)와 DEM 만을 이용하여 유역내 토양유실 및 유사발생을 모의할 수 있는 시스템이다. SATEEC System ver. 2.0은 DEM을 이용하여 USLE LS Factor를 산정하고, 시스템에 의해 산정된 USLE LS Factor와 입력 자료를 이용하여 토양 유실을 산정하며, 유역의 최종 유출구나 임의 지점에서의 유사량 산정을 위해 유달률을 이용한다. 토양 유실량을 산정하는 과정에 있어 유역에서의 모의기간 내 지표 피복 상태를 고려하기 위해서 Time-Variant C Module 이 사용될 수 있으며 이 모듈에는 산림이나 거주지와 같은 토지 이용패턴과 20여개 이상의 작물에 대한 DB가 구축되어 있어 유역 내에서의 시간적으로 변하는 지표 피복 상태를 고려할 수 있다. 또한 기존 USLE에 의해 토양 유실량을 산정하는 데에 있어서는 유역의 장기간의 강우량을 이용하여 산정한 유역 대표 강우 인자(USLE R Factor)를 사용하는 데에 비해, 유역에서의 태풍 등과 같은

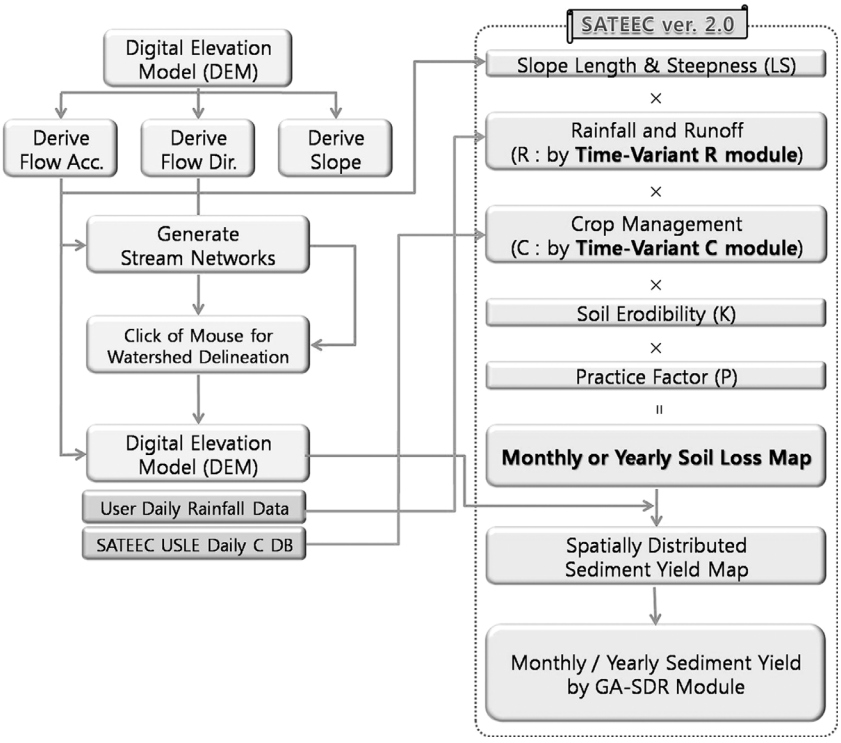



**Fig. 1.** Overview of the SATEEC System ver. 2.0 (Park et al., 2010).

집중성 강우를 고려할 수 있도록 일단위 강우 자료를 사용하여, 월/연별 강우 인자 값을 산정하여 모의 기간 내 각 월 및 각연의 강우 특성을 고려하여 토양 유실량을 산정할 수 있다. 이렇게 산정된 토양 유실량과 유달률(Sediment Delivery Ratio, SDR)를 이용하여 유역의 최종 유출구나 유역 내 임의 지점에서의 유사량을 산정할 수 있는데 현재 SATEEC System ver. 2.0에서는 유역 면적에 의한 유달률 및 유역내 각 지점의 경사도에 의한 유달률뿐만 아니라 유역의 면적, 평균 경사도, Curve Number와 같은 여러 지형적 특성 등을 고려하여 유달률을 산정할 수 있는 GA-SDR 모듈을 사용할 수도 있다(Park et al., 2010).

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 자료에 의한 월/연 단위 강우 인자를 산정하여 모의에 적용할 수 있다. 우리나라 강수 인자(USLE R Factor)의 계산은 정필균 등(1983)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(정필균 등, 1983).

정필균 등(1983)이 제시한 식 (1)과 (2)는 고령지나 산지지역에 바로 적용할 수 없는 단점이 있기 때문에, 정영상 등(1999)은 이러한 제한점을 해결하기 위하여 지역보정계수를 산정하였다(Table 1). SATEEC System ver. 2.0은 각 지역의 강우 특성을 고려하여 지역에 대한 보정계수를 결정한 후 Time-Variant R Module을 이용하여 토양유실량의 시간적 변화를 평가한다.

## 2.2. 일강수량을 고려한 SATEEC System ver. 2.1 $R_5$ 모듈의 개발

현재 SATEEC System ver. 2.0의 R 모듈은 일단위 강우 자료를 이용하여 식 (1)이나 식 (2)에 의해 월/연 단위 강우 인자 값을 산정하여 유역의 강우 특성을 반영할 수 있으나, 태풍 등과 같이 단기간에 집중되는 강우 특성을 고려하기 위하여서는 일 단위 강우 인자를 산정하여 이를 이용하여 토양유실 및 유사량은 산정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 월/연 평균 강우 인자 값이 아닌 일단위 강우 인자 값을 산정하여 토양유실 평가를 수행하였다.

또한 이러한 일 단위 강우 특성을 반영하는 데에 있어 해당 일의 발생 강우량이 중요하지만, 이전의 선행 강우 또한 유역내 토양수분에 많은 영향을 준다. 이를 반영하기 위하여 본 연구에서는 5일 선행 강우를 고려할 수 있도록 R산정 모듈을 개선하였으며(Fig. 2), 5일 선행 강우량(5-Day Antecedent Rainfall) 값을 산정한 후, 식 (3)에 의해 일 단위의 R Factor를 산정한다. 본 연구에서는 이를 고려한 SATEEC 시스템을 “ver. 2.1”이라 칭하였다.

식 (3)에서 보이는 바와 같이, 매 달 강우 인자 값을 산정하면서 일별 강우량의 양에 따라 월단위 강우 인자 값을 분배하는 방식으로 일별 강우 인자 값을 산정한다. 이 과정에서 5일 선행 강우량을 사용하여 강우 인자 값을 사용하는 경우 월별 강우량의 합이 비교적 증가하기 때문에, 환산되지 않은 강우량에 의해 산정된 강우 인자 값을 이용하여 보정 계수를 구한 뒤, 각 일별 5일 선행 강우량에 의해 산정된 강우 인자 값을 일별로 분배함으로써 5일 선행 강우가 반영된 일단위 USLE R Factor 값을 산정할 수 있다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 본 연구에서 개선된 모듈인 $R_5$ 모듈은 모의 기간 내 각 i번째 일의 강우량에 대해, i일에 대한 5일 선행강우에 해당하는 (i-1)일부터 (i-5)일까지의 강우량의 영향을 선형적으로 가정하여, 각각 i일 부터 (i-5)일까지의 강우량값에 1, 0.83, 0.67, 0.5, 0.33, 0.17의 가중치를 두어 각 일에 대한 강우량을 변환한다.

**Table 1.** Rainfall and R-factor values for the Revised Universal Soil Loss Equation in the different location in the Gangwon-do (Jung et al., 1999)

| Location | | | Rainfall (mm) | | | R-factor | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Apr-Nov | Dec-Mar | Annual | Adjust factor. U | Apr-Nov | Dec-Mar | | Annual |
| | | | | | | | | R | 1.6R | |
| Highland | Taegwallyung | 73-96 | 1,412.4 | 219.3 | 1,631.8 | 0.595 | 360.5 | 31.9 | 47.9 | 408.5 |
| Mid mountainous | Inje | 72-96 | 969.1 | 95.3 | 1,063.5 | 0.898 | 288.4 | 14.6 | 21.9 | 310.3 |
| | Hongchon | 72-96 | 1,224.2 | 120.4 | 1,344.7 | 0.966 | 459.7 | 22.1 | 33.1 | 492.8 |
| Plainy | Weonju | 72-96 | 1,124.5 | 123.8 | 1,248.2 | 1.277 | 567.3 | 29.0 | 34.0 | 601.2 |
| | Chunchon | 67-96 | 1,133.6 | 111.3 | 1,244.9 | 1.051 | 472.8 | 21.9 | 32.9 | 505.7 |
| East coastal | Sogcho | 69-96 | 1,085.2 | 219.5 | 1,304.7 | 0.584 | 288.8 | 49.5 | 74.2 | 303.0 |
| | Kangjung | 72-96 | 1,171.6 | 261.7 | 1,433.3 | 0.669 | 318.4 | 49.1 | 105.5 | 367.5 |
| | Samchwong | 72-96 | 905.7 | 214.0 | 1,117.1 | 0.584 | 204.9 | 31.0 | 46.5 | 251.4 |
| Suwon. Plainy reference | | 64-96 | 1,138.2 | 119.7 | 1,257.9 | 1.110 | 506.0 | 22.6 | 37.8 | 543.8 |

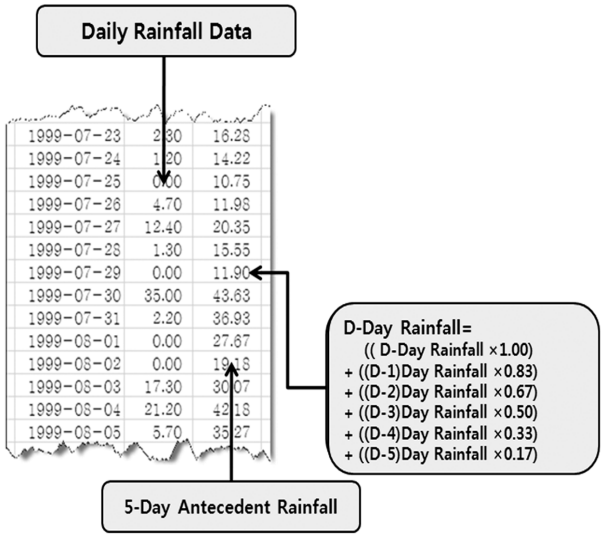



**Fig. 2.** Estimation of '5-Day Antecedent Rainfall'.

$$Daily\ R_5 = \frac{5\ Day\ Antecedent\ Rainfall}{Monthly\ 5\ Day\ Antecedent\ Rainfall} \times Monthly\ USLE\ R\ Factor \times 0.172 \quad (3)$$

여기서, *Daily* $R_5$은 일 강우 인자 값, *Monthly USLE R Factor*는 월 강수량을 이용하여 산정한 R 인자 값 (식 (1))에 *Monthly 5 Day Antecedent Rainfall*을 넣어 만든 R 값, *5 Day Antecedent Rainfall*는 일별 5일 선행 강우량, *Monthly 5 Day Antecedent Rainfall* 일별 5일 선행 강우량의 월단위 합계이다. 식 (3)에 보이는 0.172는 보정계수로 기존의 R 산정 공식과 환산비를 나타낸다.

## 2.3. 대상유역의 선정

본 연구의 대상지역은 낙동강에 있는 임하댐 지역으로 유역면적은 1,361 $km^2$이며 낙동강유역면적의 5.7%를 차지하고 있다. Fig. 3은 임하댐 유역내 주요하천과 토지 이용 현황을 보여주고 있다. 하천 주변으로 농경지들이 넓은 면적으로 분포되어있고, 태풍 등과 같은 집중강우로 인해 면상, 세류, 및 걸리 침식과 사면붕괴로 많은 양의 탁수가 유입될 가능성이 있는 것으로 생각되며, 임하댐 유역에서의 최고탁수는 2003년의 태풍 매미로 인하여 1,221NTU가 발생한 바 있었으며(이혜숙 등, 2008) 이후 2004년에는 최고탁도 가 994NTU 정도 되었다(박윤식 등, 2007a). 이 지역을 연구대상 유역으로 선정한 이유는 Park 등(2010)에 의해서 SATEEC 2.0 시스템(월단위 R 값 적용)의 적용성을 평가한 유역이기 때문이다.

## 2.4. SATEEC System ver. 2.1의 입력자료

### 2.4.1. 토양 인자(Soil Erodibility factor)

USLE K Factor는 토양인자(Soil Erodibility factor)로서 토양의 침식성을 표시한다. 토양인자는 토양의 물리적 화학적 특성을 나타내는데, 토양의 구조와 투수성, 유기물과 모래에 관계가 있고, Modified Universal Soil Loss Equation

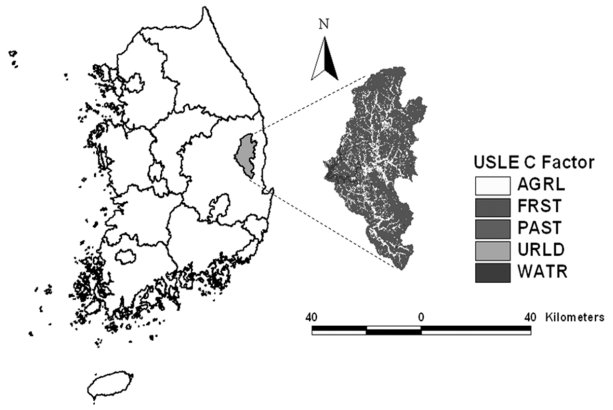



**Fig. 3.** Location and Landuse at Imha Watershed, Gyeongsangbuk-do.

$$K = 0.2 + 0.3\exp(-0.0256SAN(1-(\frac{SIL}{100}))) \times (1.0 - \frac{0.25CLA}{CLA + \exp(3.72 - 2.95C)}) \times (1.0 - (0.7\frac{SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9SN1)}) \quad (4)$$

(MUSLE) (Williams, 1975) 공식에 따라 K값을 정하는 식이다.

여기서 SAN, SIL, CLA는 모래, 실트, 점토 함량(%)이며, SN1은 1-SAN/100이다.

### 2.4.2. 경사장, 경사도 인자(Slope Length & Steepness Factor)

경사장·경사도 인자는 (LS)로 표기하며 경사장 인자인 (USLE L factor)는 표준 시험포의 길이인 22.13 m와 단일 경사를 이루는 지형의 길이의 비로 나타낸다. 경사도 인자 (USLE S factor)는 표준시험포의 경사도인 9%에 대해서 단일경사를 이루는 지형의 경사도의 비로 나타내고 있다. 이 경사장과 경사도를 가지고 SATEEC System ver2.0은 DEM (Digital Elevation Model)을 만들 수 있다. LS값을 산정할 때에는 RUSLE User Guide(Foster et al., 1996)를 이용한다. RUSLE User Guide는 경사장의 실험에 의한 모의실험의 길이는 10.7 ~ 91.4 m로 자연 상태에서 세류가 일어나기 시작하는 최대 경사장 122 m를 사용할 수도 있다(식 (5)).

$$LS = (\frac{A}{22.13})^{0.6}(\frac{\sin\theta}{0.0896})^{1.3} \quad (5)$$

### 2.4.3. 작물피복 인자(Crop Management factor)

지표를 피복하고 있는 식생은 계절에 변화에 따라 다른 조건을 가지기 때문에 이에 의한 영향을 고려하기 위해서는 시간에 따라 변하는 지표를 피복하고 있는 식생의 상태를 모의에 반영하여야 보다 정확한 토양 유실 및 유사량을 모의할 수 있을 것으로 생각된다.

### 2.4.4. 경작방법 인자(Supporting Conservation Practice Factor)

작물의 경작방법 인자는 경작 방법 등에 의한 토양 침식

량의 감소를 뜻하는 값이다. 박철수(1999)는 토지이용과 경사도에 따른 경작방법인자를 제안한 바 있다. Table 2는 토지 이용별 경작인자 값을 나타내고 있다. 밭에 경우 등고선 경작방식을 택하는 가정 하에 경사도에 따른 경작인자 값을 나타낸다.

**Table 2.** USLE P factors different land uses and slopes

| 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 |

#### 2.4.5. 강우 인자(Rainfall Factor)

본 연구에서는 일별 강우 자료를 사용하였으며, 5일 선행강우를 고려하고, 수 일간 집중되는 강우 특성까지 고려하기 위해 개발된 $R_5$ 모듈을 사용하였다. 강우 자료는 임하댐 유역 내 위치하고 있는 진보 강우 관측소의 1999년부터 2008년 까지의 강우 자료를 사용하였다.

### 2.5. SATEEC System ver. 2.1 보정 및 검정

본 연구에서는 1999 ~ 2008년에 이르는 기간 동안의 임하댐 지점에서의 월단위 실측 유입 유사량과 5일 선행 강우를 고려하여 USLE R Factor를 산정할 수 있는 $R_5$ 모듈을 적용한 SATEEC System ver. 2.1에 의해 모의된 유사량, 월별 USLE R Factor에 의한 SATEEC System ver. 2.0에 의해 모의된 유사량을 각각 비교하였다.

1999년 1월부터 2004년 12월까지를 보정 기간으로, 2005년 1월부터 2008년 2월까지를 검정기간으로 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. $R_5$ 모듈을 이용하여 산정한 USLE R Factor 값의 변화

기존의 SATEEC System ver 2.0으로 나온 R값과 SATEEC System ver 2.1의 $R_5$값의 변화를 살펴보면, 모의기간 동안의 평균 R값은 기존의 SATEEC System ver 2.0이 28.93이고, SATEEC System ver 2.1의 $R_5$를 이용한 R은 29.11로 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 강우량이 지속적으로 오거나, 강우량이 많을 경우에는 많은 차이가 있는 것을 알 수 있다. 2002년 8월을 살펴보면, 기존 SATEEC System ver. 2.0의 R 산정 값보다 5일 선행강우를 고려하는 SATEEC System ver 2.1의 $R_5$로 산정한 값이 더 작게 나타냈다. 2002년 8월 기존의 R은 325.43이고 SATEEC System ver 2.1의 $R_5$는 254.77이다. Fig. 4는 SATEEC System ver. 2.0에 의해 산정된 모의 기간 중 R Factor과 SATEEC System ver. 2.1에 의해 산정된 모의 기간 중 $R_5$를 이용한 R Factor을 비교한 그래프이다. 그림에서 보이는 바와 같이 기존 SATEEC System ver 2.0의 R 값으로는 단일 강우로 인한 토양유실 발생 특성을 제대로 평가할 수 없는 단점이 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.2. 보정 및 검정 결과

5일 선행 강우를 고려하여 일단위 강우 인자값을 산정할 수 있는 $R_5$ 모듈의 유역 적용성을 검토하기 위하여 보정과 검정 과정이 수행되었으며, 보정 기간은 1999년 1월부터 2004년 12월까지의 국가수자원관리종합정보시스템(http://www.wamis.go.kr)의 임하댐 월별 유사량 자료를 이용하였다. Fig. 5(a)에서 보이는 바와 같이 보정 기간 내 실측 유사량과 SATEEC System ver. 2.0과 ver. 2.1에 의해 모의된 유사량 모두 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있으며, SATEEC System ver. 2.1에 의한 모의치가 SATEEC System ver. 2.0에 의한 모의치보다 집중성 강우가 발생한 지점 등에서 보다 실측치와 가까운 값들을 보이는 것을 볼 수 있다. Fig.

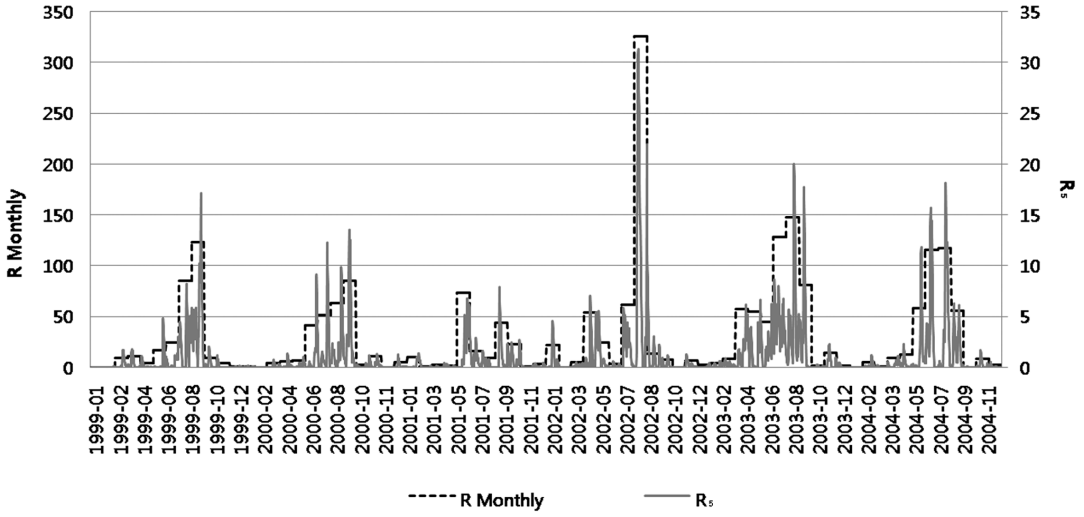
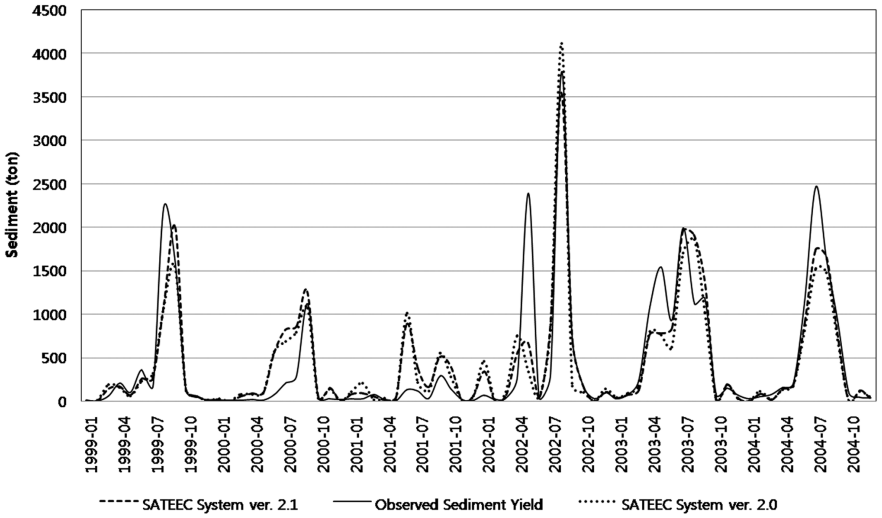
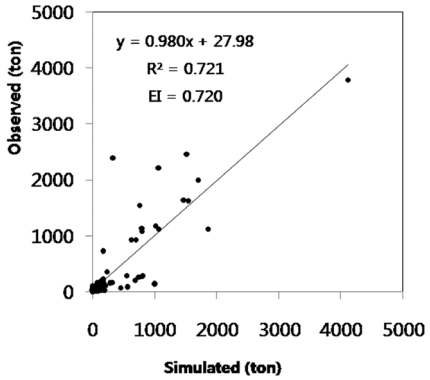


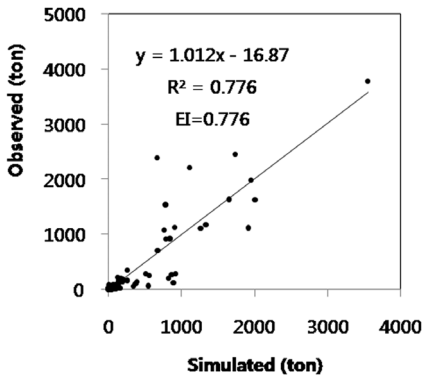

**Fig. 4.** Comparison of R monthly and $R_5$.




(a) Comparison of observed sediment yield, simulated sediment yields by SATEEC system ver. 2.0 and SATEEC system ver. 2.1




(b) $R^2$ and EI of simulated sediment yield by SATEEC system ver. 2.0




(c) $R^2$ and EI of simulated sediment yield by SATEEC system ver. 2.1

**Fig. 5.** Comparison of observed and simulated sediment yields during calibration.

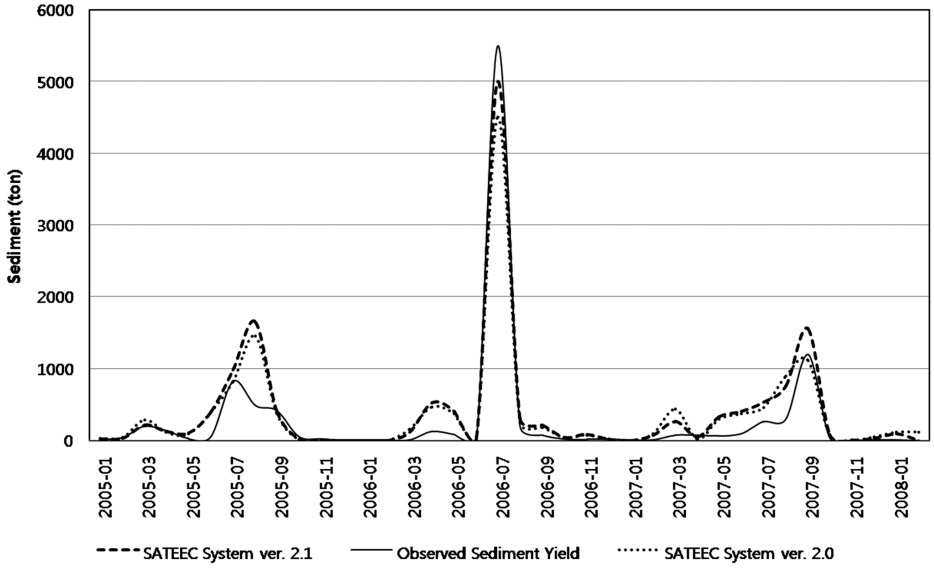
5(b)에서 보이는 바와 같이 SATEEC System ver. 2.0에 의한 모의치와 실측치와의 결정계수($R^2$)와 유효지수(EI, Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient)는 각각 0.72와 0.72를 보인데 비해 SATEEC System ver. 2.1에 의한 모의치와 실측치와의 결정계수($R^2$)와 유효지수(EI)는 각각 0.78와 0.78로 보다 높은 상관관계를 보였다(Fig. 5(c)).

Fig. 6(a)에서 보이는 바와 같이 검정 기간 내 실측 유사량과 SATEEC System ver. 2.0과 ver. 2.1에 의해 모의된 유사량 역시 보정기간에서와 마찬가지로 모두 실측치와 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있으며, SATEEC System ver. 2.1에 의한 모의치가 SATEEC System ver. 2.0에 의한 모의치보다 집중성 강우가 발생한 지점 등에서 보다 실측치와 가까운 값들을 보이는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(b)에서 보이는 바와 같이 SATEEC System ver. 2.0에 의한 모의치와 실측치와의 결정계수($R^2$)와 유효지수(EI)는 각각 0.92와 0.90의 값을 보인데에 비해, SATEEC System ver. 2.1에 의한 모의치와 실측치와의 결정계수($R^2$)와 유효지수(EI)는 각각 0.93와 0.91로 보다 높은 상관관계를 보였다 Fig. 6(c).

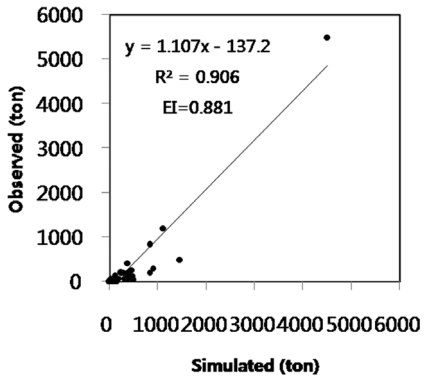
### 3.3. 모의 기간 내 유사량 분석

Fig. 7(a)는 실측 유사량과 SATEEC System ver. 2.0 및 SATEEC System ver. 2.1에 의해 산정된 유사량 모의 결과를 보여주는 그림이며, 그림에서 보이는 바와 같이 모의 기간 내에서 SATEEC system ver. 2.0과 SATEEC system ver. 2.1에 의한 각각의 모의치는 실측 유사량과 비교적 유사한 경향을 보였으나, 비교적 큰 유사량 등을 비롯하여 각 모의 유사량 값과 실측 유사량과의 차이는 다른 것으로 나타났다. Fig. 7(b)에 보이는 바와 같이, 모의 기간 중 분석 대상 시점이 된 비교적 큰 유사량 값을 보이는 5개의 지점에서의 실측 유사량과 각 SATEEC System ver. 2.0과 ver. 2.1에 의한 모의 유사량의 차이를 보면, 선행강우를 고려하지 않는 SATEEC 2.0에 의한 실측-모의 유사량 차이가 5일 선행강우를 고려하는 SATEEC System ver. 2.1에 의한 실측-모의 유사량 차이보다 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이를 통해 단일 강우를 고려한 SATEEC 2.1의 모의 정확성이 향상되었으리라 판단된다.

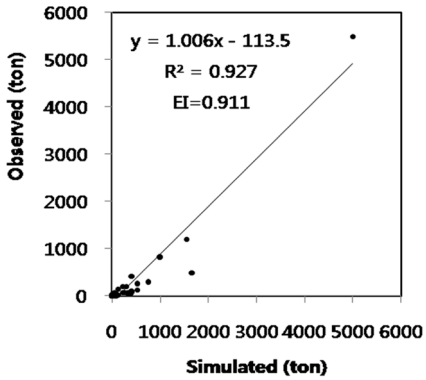
Table 3은 모의 기간 중 Fig. 7에 표시된, 비교적 큰 유사량 값을 보이는 5개의 지점에서의 실측 유사량과, SATEEC




(a) Comparison of observed sediment yield, simulated sediment yields by SATEEC system ver 2.0 and SATEEC system ver. 2.1.




(b) $R^2$ and EI of simulated yield by SATEEC system ver. 2.0




(c) $R^2$ and EI of simulated yield by SATEEC system ver. 2.1.

**Fig. 6.** Comparison of observed and simulated sediment yields in validation.

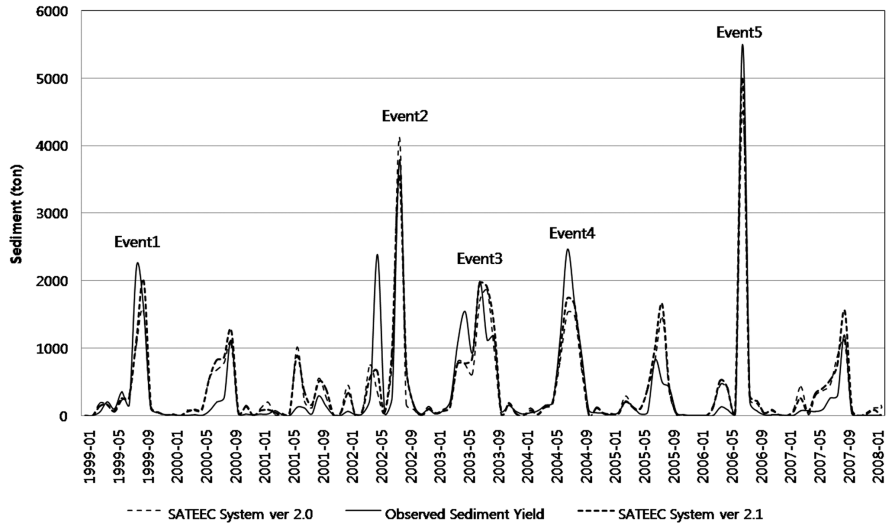
System ver. 2.0에 의한 모의 유사량 및 SATEEC System ver. 2.1에 의한 모의 유사량 값을 보여준다. 표에서 보이는 바와 같이 실측치와 SATEEC System ver. 2.0의 차이는 547.36 ton(2002년 9월) 982.97 ton(2006년 7월) SATEEC System ver. 2.1은 45.58 ton(2002년 9월) 496.94 ton(2006년 7월)의 차이를 보였다.

Table 4는 각 지점에서 실측 유사량과의 각 SATEEC System ver. 2.0과 SATEEC System ver. 2.1에 의한 모의 유사량과의 상대오차를 보여주는 것으로 SATEEC System ver. 2.0의 경우에는 각 지점에서의 상대 오차가 13.4%(2004년 8월)에서 107%(1999년 8월)로 평균 96.2%의 값을 보였으며, SATEEC System ver. 2.1의 경우에는 각 지점에서의 상대오차가 0.5%(2004년 8월)에서 99% 1999년 8월)로 평균 23.6%의 값을 보였다.

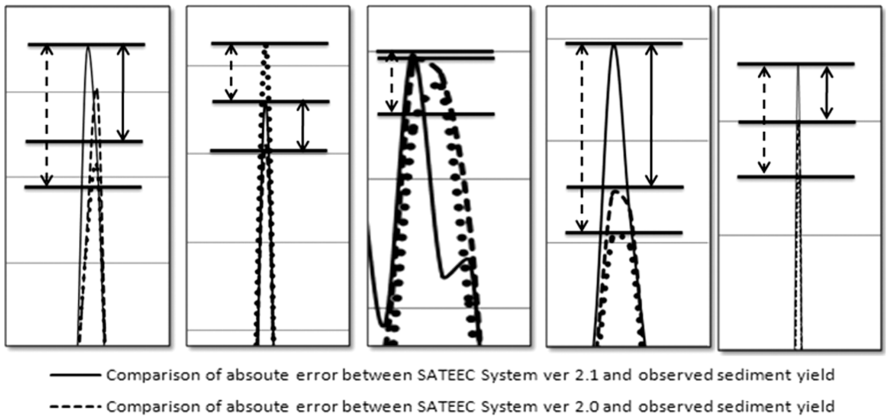
## 4. 결 론

본 연구에서는 토양유실로 인한 사회적, 환경적, 생태적 문제를 해결하기 위하여 유역에서의 토양유실 특성을 산정하는데 많이 활용되고 있는 SATEEC 시스템의 강우인자 모듈을 개선하여 유역 적용성을 평가하였다. 기존의 SATEEC 2.0 시스템을 적용한 결과 보정기간에 대해 $R^2$와 EI가 각각 0.72와 0.72 그리고 검정기간에 대해 $R^2$와 EI가 각각 0.92와 0.90로 분석되었다. 반면, 5일 선행 강우를 고려하여 산정한 SATEEC 2.1 적용 결과, 보정기간에 대해 $R^2$와 EI가 각각 0.78와 0.78 그리고 검정기간에 대해 $R^2$와 EI가 각각 0.93와 0.91로 보다 높은 상관관계를 보였다. 이는 모의 기간 내 태풍 등과 같은 집중성 강우가 잘 반영되었기 때문으로 생각된다. 또한 비교적 유사량이 큰 값을 보이는 5개의 시점에서의 차이를 산정해 본 결과 SATEEC 2.0 적용 시 96.2%, SATEEC 2.1 적용 시 23.6% 로 오차가 많이 줄어든 것을 볼 수 있었다. 그러나, 모의 기간 중 몇몇 지점들에 대해서 실측치보다 모의치가 다소 크게 산정된 것은 향후 개선해야 할 사항 중 하나라 생각된다.

본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 단일 강우량을 고려하여 유역에서의 토양유실 및 유사량을 보다 정확하게 산정할 수 있는 SATEEC 2.1 시스템은 유역 내 토양유실의 시간적, 공간적 특성을 구명하는데 활용될 수 있을 것




(a) Sediment yield (1999 ~ 2008)




(b) Analysis of peak sediment yield (1999 ~ 2008)

**Fig. 7.** Analysis of peak sediment yield during 1999 ~ 2008.

**Table 3.** Comparison of SATEEC system ver 2.0 and SATEEC system ver 2.1 with observed sediment yield

| | Observed sediment yield (ton) | SATEEC system ver. 2.0 | | SATEEC system ver. 2.1 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Sediment yield (ton) | Diff. (ton) | Sediment yield (ton) | Diff. (ton) |
| Aug. 1999 | 2218.54 | 1072.18 | 1146.36 | 1114.79 | 1103.76 |
| Sept. 2002 | 717.26 | 169.90 | 547.36 | 671.68 | 45.58 |
| July 2003 | 1990.80 | 1703.05 | 287.75 | 1953.54 | 37.26 |
| Aug. 2004 | 1604.60 | 1447.03 | 193.58 | 1649.48 | -8.88 |
| July 2006 | 5495.02 | 4512.05 | 982.97 | 4998.08 | 496.94 |

**Table 4.** Comparison of relative error (%) SATEEC system ver. 2.0, SATEEC system ver. 2.1 and observed sediment yield

| | SATEEC system ver. 2.0 | SATEEC system ver. 2.1 |
|---|---|---|
| Aug. 1999 | 107 | 99 |
| Sept. 2002 | 322 | 6.8 |
| July 2003 | 16.9 | 1.9 |
| Aug. 2004 | 13.4 | 0.5 |
| July 2006 | 21.8 | 9.9 |
| Average | 96.2 | 23.6 |

이며, 비점오염 중점관리 지역으로 지정된 유역에서의 토양 유실 최적관리 기법 개발 및 평가에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 “수자원의 지속적확보기술개발사업단” 의 연구비지원(과제번호: 2-2-3)과 강원대학교 농업생명과학원의 지원으로 수행되었습니다. 이에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

박윤식, 김종건, 박준호, 전지홍, 최동혁, 김태동, 최중대, 안재훈, 김기성, 임경재(2007a). 임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 467-473.

박윤식, 김종건, 김남원, 김기성, 최중대, 임경재(2007b). SATEEC 시스템을 이용한 면적/경사도에 의한 유달률 산정 방법에 따른 유사량 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(5), pp. 650-658.

박철수(1999). 율문천 소유역에서 토지이용에 따른 불특정 오염 Monitoring. 석사학위논문, 강원대학교.

이혜숙, 김정곤, 이상욱(2008). HSPF를 활용한 임하댐 우역의 탁수 예측모델 구축. *대한환경공학회지*, **30**(8), pp. 760-767.

정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의(1999). 강원도 경사지 토양 유실예 측용 신 USLE의 적용을 한 강수 인자와 토양 침식성인자의 검토. *한국토양비료학회지*, **32**(1), pp. 31-38.

정필균, 고문환, 임정남(1983). 토양유실 예측을 위한 강우인자의 추정. *한국토양비료학회지*, **16**(2), pp. 106-111.

Foster, G. R., Renard, K. G., Yoder, D. C., McCool, D. K., and Weesies, G. A. (1996). *User's Guide*, Soil & Water Cons. Soc.

Kang, H., Kim, K. Park, Y. S., Kim, N., Ok, Y. S., Kim, J., Choi, Y. H., and Lim, K. J. (2009). Development and Application of SATEEC L Module for Slope Length Adjustment based on Topography Change. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, **28**(2), pp. 113-124.

Lim, K. J., Choi, J. D., Kim, K. S., Sagong, M., and Engel, B. A. (2003). Development of sediment assessment tool for effective erosion control (SATEEC) in small scale watershed. *Transactions of the Korean Society of Agricultural Engineer*, **45**(5), pp. 85-96.

Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J., and Kim, K. (2005). GIS-based sediment assessment tool. *CATENA*, **64**, pp. 61-80.

Park, Y. S., Kim, J., Kim, N., Kim, S., Jeon, J., Engel, B. A., Jang, W., and Lim, K. J. (2010). Development of New R, C. and SDR Modules for the SATEEC GIS System. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.11.005. *Accepted in Computers & Geosciences*.

Williams, J. R. (1975). Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resour. Bull*, **11**(5), pp. 965-974.

Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1965). Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. *Agriculture Handbook*, **282**, USDA-ARS.