

USLE모형과 시강우를 고려한 토양유실 평가 시스템을 이용한 연간 토양유실량 비교 분석

금동혁 · 류지철 · 강현우 · 장춘화 · 신민환 · 신동석¹ · 최종대 · 임경재*

강원대학교 지역건설공학과, ¹국립환경과학원 수질총량연구과

Comparison of Annual Soil Loss using USLE and Hourly Soil Erosion Evaluation System

Donghyuk Kum, Jichul Ryu, Hyunwoo Kang, Chun Hwa Jang, Min Hwan Shin, Dong Shuk Shin¹,
Joongdae Choi, and Kyoung Jae Lim*

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

¹National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

Soil erosion and sediment has been known as one of pollutants causing water quality degradation in water bodies. With global warming issues worldwide, various soil erosion studies have been performed. Although on-site monitoring of sediment loss would be an ideal method to evaluate soil erosion condition, modeling approaches have been utilized to estimate soil erosion and to evaluate various best management practices on soil erosion reduction. Although the USLE has been used in soil erosion estimation for the last 40 years, the USLE model has limitations in estimating event-based soil erosion reflecting rainfall intensity and rainfall duration for long-term period. Thus, the calibrated model, capable of simulating soil erosion using hourly rainfall data, was utilized in this study to evaluate the effects of rainfall amount and rainfall intensity on soil erosion. It was found that USLE soil erosion value is 3.06 ton ha⁻¹ yr⁻¹, while soil erosion values from 2006 ~ 2010 were 2.469 ton ha⁻¹ yr⁻¹, 0.882 ton ha⁻¹ yr⁻¹, 1.489 ton ha⁻¹ yr⁻¹, 2.158 ton ha⁻¹ yr⁻¹, 1.602 ton ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. Especially, soil erosion from single storm event for 2008-2010 would be responsible for 30% or more of annual soil loss. As shown in this study, hourly soil erosion estimation system would provide more detailed output from the study area. In addition, the effects of rainfall intensity on soil erosion could be evaluated with this system.

Key words: Sediment yield, Soil loss, MUSLE, USLE

서 언

하천으로 유입되는 토사는 대부분 미세한 미사 또는 점토들로, 토양 표면에 흡착되어 있던 각종 오염물질들을 운반하여 수질에 악영향을 끼치고, 토사가 퇴적됨으로서 수중생물의 서식처와 산란처를 파괴하고 있다. 또한 저수지 등에 토사가 퇴적 될 경우 저수지의 기능 저하와 범람의 위험성이 커지게 된다. 최근에는 지구온난화에 따른 기상이변으로 집중강우 발생 횟수와 강우량이 동시에 증가하고 있어, 토양유실 문제가 더욱더 심각해지고 있다. 환경부에서는 유실된 토양을 비점오염원으로 지정하고 토양유실에 따른 고

탁수 문제가 심각한 소양호, 임하호, 도암호 등을 비점오염원 특별 관리 지역으로 지정하여 토양유실 저감을 위한 다양한 노력을 하고 있으며, 2007년에는 총 3,859억 원의 사업비를 투자하여 토사유출 방지에 대한 종합대책이 마련되었다 (Lee et al., 2011).

하지만 토양유실 저감 대책의 수립은 정확한 토양유실의 크기 및 범위에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이를 위해 장기간의 모니터링이 이루어지고 있지만 시간과 인력, 비용 문제의 한계를 지니고 있다. 이런 문제점을 해결하고자 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 Universal Soil Loss Equation (USLE) 모형이 토양유실량 산정에 많이 이용되고 있다 (Kim et al., 2005). USLE 모형은 강우 인자, 토양침식성 인자, 작물경작인자, 경사와 경사장 인자, 식생피복인자를 이용하여 연평균 토양유실 발생량을 산정한다. 특히 토양유실량 모의시 침식량에 영향을 주는 인자들 중 강우인자

에 관한 연구는 국내에서도 활발히 이루어져 Jung et al. (1983)은 전국 69개 강우 관측 지점의 1964년부터 1980년까지의 자료를 사용하여 강우인자를 산정 제시하였다. 하지만 USLE 모형은 연평균 토양유실량을 산정하기 위해 개발되어 강우에 따른 시간적으로 변화하는 토양유실 발생량을 모의할 수 없다 (Heo et al., 2005). 또한, 일강수량을 이용한 토양유실 산정방식은 강우강도나 강우지속시간을 반영하지 못하여 집중강우에 의한 토양유실 발생 특성을 반영할 수 없으며 연속 강우에 의한 토양유실 발생 특성 또한, 반영하지 못하여 하나의 호우 및 강우사상에 의한 토양유실량 산정시 많은 오차를 유발할 가능성을 내포하고 있다. 효율적이고 합리적인 토양유실 저감 대책이 수립되기 위해서는 강우에 따라 시간적으로 변화하는 토양유실 발생량 모의가 이루어져야한다. 최근에 시강우 자료를 활용하여 유출량 및 유사량 평가가 가능한 모형이 Kum et al. (2011)에 의해 개발되었다. 이 모형은 시강우자료를 이용하여 단일 호우에 대한 유출량 (Runoff)과 첨두유량 (Peak flow) 및 강우인자를 산정하고 Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) 모형을 이용하여 유사량을 산정한다. 이와 같이 유출량과 첨두유량을 활용한 강우인자 산정은 단일 호우에 대한 유출 특성이 반영된 것으로 USLE 모형을 활용한 유사량 산정 방법 보다 정확한 유사량 산정이 가능할 것으로 판단된다.

이에 본 연구의 목적은 1) USLE 모형을 이용한 유사량 2) 시강우자료를 이용한 유사량 산정을 통해 토양유실 산정 결과를 비교하고 정확한 토양유실 산정 방법을 위해 시강우량 사용의 필요성을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

연구대상지역 본 연구에서 강원도 춘천시 서면 방동리에 조성한 시험포를 연구대상지역으로 선정하였다. 이 시험포는 경사도 3%, 가로 5 m × 세로 22 m 의 크기로 6개의 시험포가 조성되어 지표피복에 의한 비점오염원의 저감효과를 모니터링하였다 (Fig. 1) (Shin et al., 2011). 유출량과 강우량 측정을 위한 Flume과 자기우량계가 설치되었고, 시험포에서의 유출수를 침사구로 유도하기 위하여 흠배수로를 설치한 뒤 비닐로 포장되었고, 부자식수위계 (Thalimedes)를 이용하여 5분 단위로 수위 측정이 이루어졌다. 유사량은 강우가 종료된 후 유사량을 측정할 수 있을 정도로 토양 수분이 증발하면 침사구의 기준 막대기를 이용하여 기준점까지 퇴적된 양의 무게로 측정이 이루어졌다. 6개의 시험포 중에서 본 연구에서는 1번 시험포의 실측 유출량과 유사량을 이용하여 모형의 보정을 실시하였다. 1번 시험포 밭에는 무작물이 관행적으로 이루어지고 있는 작물 재배 방법과 동일한 방법으로 재배되었다.

BMPs 평가 모형 개요 본 연구에서는 시강우 자료를 이용하여 유출 및 유사량을 평가하는 최적관리기법 (Best Management Practices: BMPs) 평가 모형을 이용하였다 (Fig. 2) (Kum et al., 2011). BMPs 평가 모형은 오픈소스 GIS인 MapWindow를 기반으로 개발되어 구입 비용의 부담이 없고, 모형의 소스코드를 공개하여 사용자가 사용목적에 맞게 코드를 수정 및 배포 할 수 있다는 점이 큰 장점으로

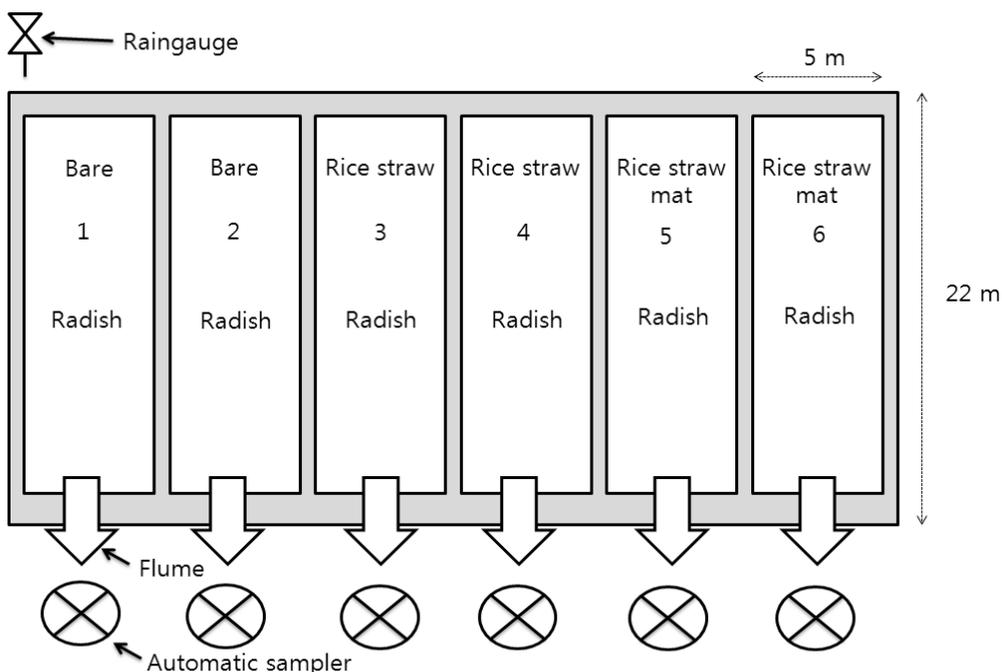


Fig. 1. Sketch of the runoff plots (Shin et al., 2011).

필지별 BMPs에 따른 토양유실저감효과를 산정하기 위해 개발된 모형이다. 이 모형은 크게 유출량 및 유사량 평가 모듈과 BMP기법에 의한 토양유실저감 효과 산정 모듈로 구성되어 있다. 유출량 및 유사량 평가 모듈은 시강우자료와 일강우자료를 복합적으로 이용하여 단일호우에 따른 유출량 및 유사량을 산정한다. 특히 사용자의 기상자료를 입력구축을 용이하게 하기 위하여 HUFF 4분위법을 적용되었다. 시강우자료를 그대로 기상자료로 이용하고 일강우자료에 해당되는 날은 자동적으로 시강우로 분포시켜 모형의 기상자료로 자동 적용되며, 선행토양함수조건과 경사도를 고려하여 유출곡선지수 (Curve Number: CN)를 보정한다. 유출량 산정은 SCS 삼각단위도와 구간별 유효유량을 이용하여 유출량을 산정한다. 유사량은 단일 호우에 대한 유사량 산정이 가능하고 단일 소유역에 적용할 경우 토사전달율이 이미 반영된 식으로 유사량 산정시 전달율을 고려할 필요가 없는 MUSLE를 이용하여 산정한다. 특히 Park et al. (2010) 이 개발한 Time-Variant C 모듈의 C DB를 적용하여 작물별 성장에 따른 시간적 지표 상태를 고려하여 유사량이 산정된다 (Fig. 3).

로 자동 적용되며, 선행토양함수조건과 경사도를 고려하여 유출곡선지수 (Curve Number: CN)를 보정한다. 유출량 산정은 SCS 삼각단위도와 구간별 유효유량을 이용하여 유출량을 산정한다. 유사량은 단일 호우에 대한 유사량 산정이 가능하고 단일 소유역에 적용할 경우 토사전달율이 이미 반영된 식으로 유사량 산정시 전달율을 고려할 필요가 없는 MUSLE를 이용하여 산정한다. 특히 Park et al. (2010) 이 개발한 Time-Variant C 모듈의 C DB를 적용하여 작물별 성장에 따른 시간적 지표 상태를 고려하여 유사량이 산정된다 (Fig. 3).

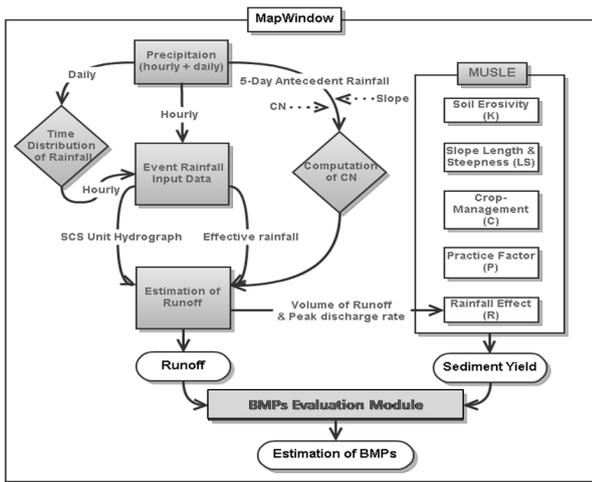
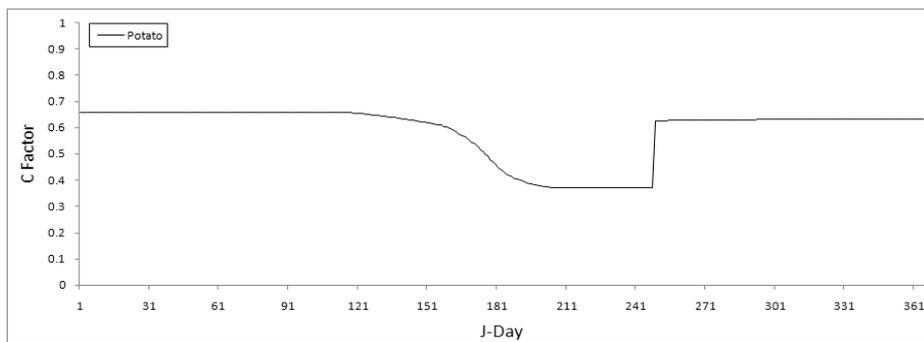


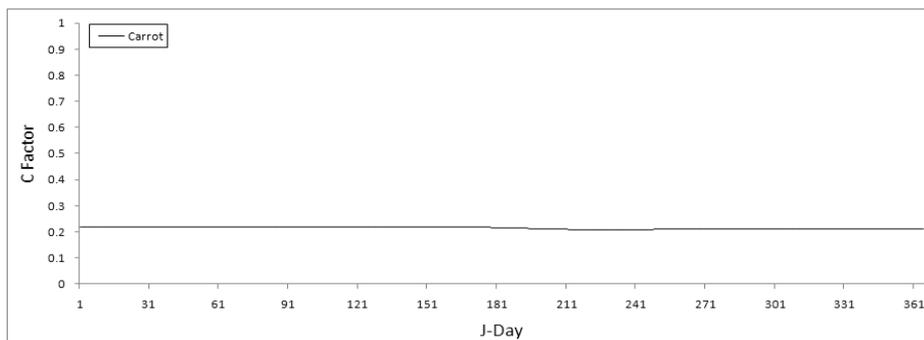
Fig. 2. Overview of hourly rainfall-runoff and sediment evaluation system (Kum et al., 2011).

입력자료 구축 본 연구에서는 시강우자료를 이용하여 장기 유출-유사 평가가 가능한 BMP 평가 모형의 유출량 및 유사량 평가 모듈을 이용하였다. 이 모형은 최소한의 입력 자료만을 이용하여 유출량 및 유사량을 평가하기 때문에 모형의 기본적인 강우자료는 WAMIS를 통해 2006~2010년까지의 국토해양부에서 운영하는 춘천 관측지점의 시강우자료를 구축하였다. 춘천 관측지점의 시강우자료는 구축 기간 동안 시강우량 자료에 대한 결측이 없기 때문에 일강우자료에 대한 기상자료 구축의 필요성은 없었으며 그 외의 1번 시험포에 대한 모형 입력 자료는 경사도 3%, 경사장 22 m, 면적 110 m², 작물 무, 토양속성은 사질양토 (Sandy loam)이다.

USLE 모형의 입력자료로 강우 인자 (R factor)는 Jung et al. (1999)의해 계산된 값을 이용하였고, 시험포 인근 실측



(a) Daily C factor of potato



(b) Daily C factor of carrot

Fig. 3. Change of the daily C factor (Kum et al., 2011).

토양침식성 인자 (K factor), 작물피복인자 (C factor)는 환경부에서 배포하는 1:25,000의 대분류 토지피복도를 이용하여 Jung et al. (1984)이 제시한 값을 이용하였다. 경사와 경사장 인자 (LS factor)는 BMP 평가 모형에서 산정된 값을, 작물경작인자 (P factor)는 Park (1999)이 경사도에 따라 제시한 값을 이용하였다 (Table 1).

유출 및 유사 보정 BMPs 평가 모형 보정에 사용된 자료는 시험포에서 Flume과 자기우량계를 통해 조사된 2011년 6월 1일부터 2011년 7월 6일까지의 실측 강우량과 유출량, 유사량 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 Kum et al. (2011)이 제시한 매개변수를 이용하여 모형 보정을 하였다. 모형의 유출량 적용성 평가는 결정계수 (R^2)와 유효지수 (NSE)를 이용하였으며 NSE 산정은 식 (1)과 같다.

Table 1. Input data of USLE model.

R factor	K factor	C factor	LS factor	P factor
464	0.1201	0.31	0.354	0.5

Table 2. Criteria for evaluating model performance.

Evaluation	Poor	Fair	Good	Very good
NSE for Daily Simulation	< 0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	> 0.8

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (1)$$

여기서 O_i 는 각 강우별 실측된 유출량 값이고, P_i 는 모형에서 예측한 각 강우별 유출량 값이며, \bar{O}_i 강우시 실측된 유출량의 평균이다. NSE는 값이 1에 가까울수록 모형의 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다.

R^2 가 0.5 이상이고 NSE가 0.4이면 모형이 자연현상을 잘 예측하는 것이며 (Ramanarayanan et al., 1997), 일반적인 NSE값에 따른 모형의 효율범위는 Table 2와 같다 (Donigian et al., 2003).

결과 및 고찰

유출량 및 유사량 보정 결과 시험포에서 조사된 실측 유출량과 유사량과 Kum et al. (2011)이 제시한 연구대상지역의 모형 매개변수를 이용하여 BMP 평가 모형의 적용성을 평가하였다. 실측 유출 발생은 보정기간 동안 6일간 유출이 발생하였고, BMP 평가 모형의 유출량 및 유사량 평가 모듈을 이용하여 모의한 결과도 실측과 같은 6일간 유출이 발생하는 것으로 나타났다. BMP 평가 모형의 유출량 및 유사량 평가 모듈의 유출 보정결과 NSE=0.868, $R^2=0.917$ 로 나타났다 (Fig. 4). 유출량 보정 후 보정된 매개변수를 이용

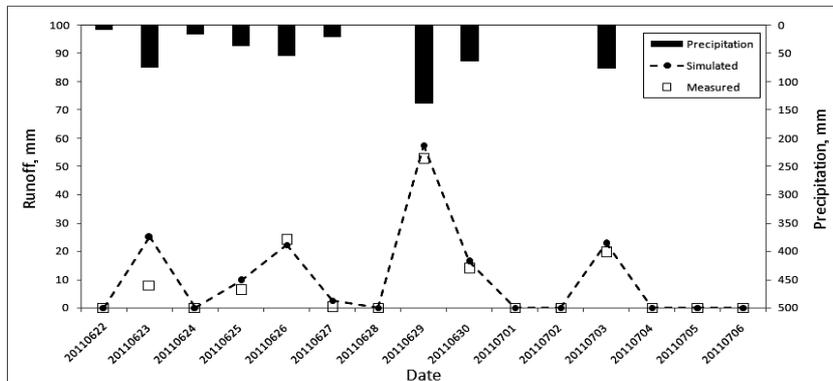


Fig. 4. Comparison of simulated and measured runoff (Kum et al., 2011).

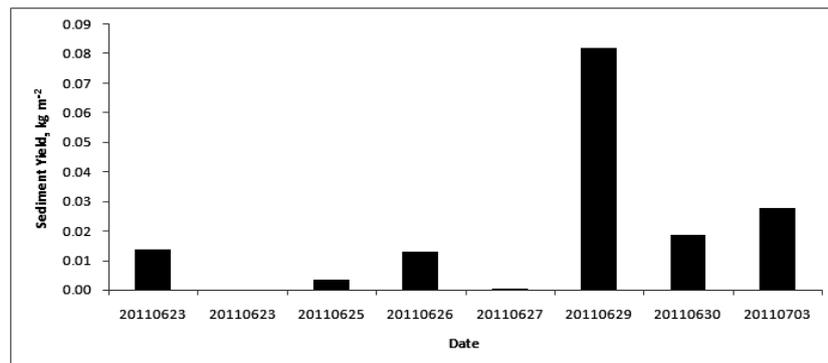


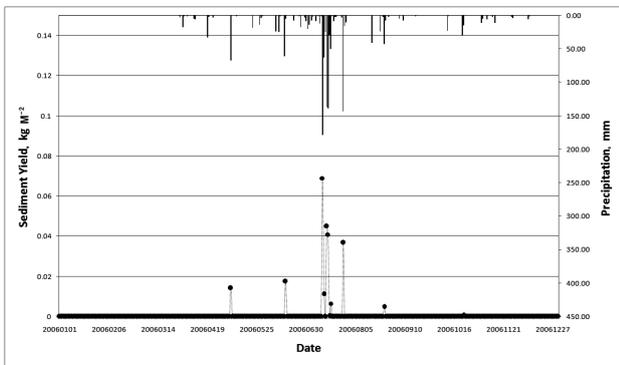
Fig. 5. Result of sediment yield (Kum et al., 2011).

하여 유사량 실측치와 예측치를 보정하였다. 유사량은 보정 기간 동안의 총량으로 실측이 이루어져 예측치의 총량과 비교하였다. 비교 결과 실측치는 15,17 kg, 모의치는 16,54 kg 으로 실측치와 매우 근사한 값을 나타내는 것으로 결과가 나왔다 (Fig. 5). BMP 평가 모형이 자연형상을 적절히 모의 하는 것으로 판단된다.

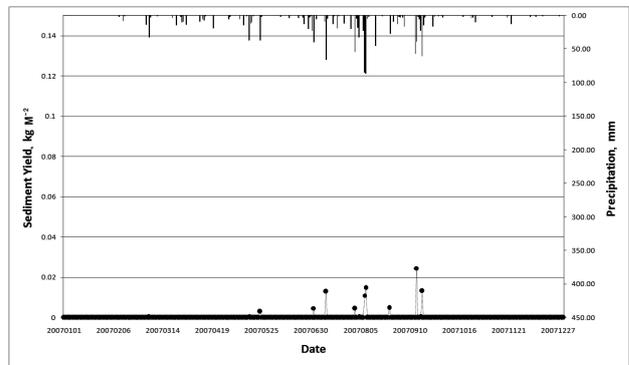
장기 유사량 평가 및 비교 2006년~2010년까지의 시 강우자료와 BMP 평가 모형의 유출량 및 유사량 평가 모듈 을 이용하여 유사량을 평가한 결과 5년 동안 최소 0.882 ton ha⁻¹ yr⁻¹에서 최대 2.469 ton ha⁻¹ yr⁻¹, 연 평균 1.72 ton ha⁻¹ yr⁻¹가 발생되는 것으로 평가되었다 (Table 3). 특히 연

평균 토양유실 발생량은 연 총강수량에 상관없이 단일호 우의 지속시간과 강우량에 따라 변화하는 것으로 나타났다 (Fig. 6, Table 3). 2008년부터 2010년까지의 경우 하나의 단일 강우 이벤트에 의해서 연토양유실량의 30% 이상이 발 생하는 것으로 분석되었다. 하지만 USLE 모형을 이용한 토 양유실량 산정은 장기 강우자료를 이용하여 산정된 강우인 자를 사용하여 토양유실량을 산정하기 때문에 강수량의 시 간적 변화를 고려하지 못하고 모의기간 동안인 5년 동안 모 두 동일한 3.06 ton ha⁻¹ yr⁻¹의 토양유실이 발생되는 것으 로 산정되었다.

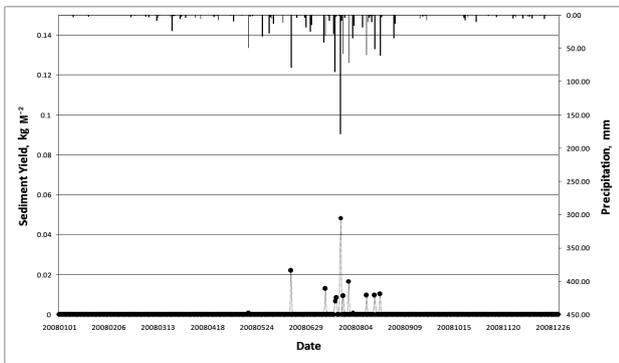
시험포에서 실측된 유사량의 연평균 토양유실량 1,38 ton ha⁻¹ yr⁻¹과도 USLE 모형보다 시강우자료를 이용한 유사량



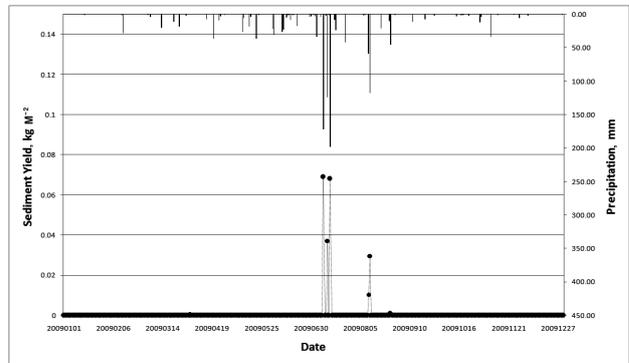
(a) Sediment yield in 2006



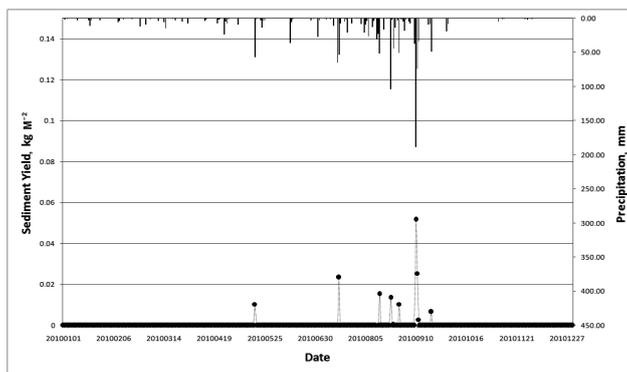
(b) Sediment yield in 2007



(c) Sediment yield in 2008



(d) Sediment yield in 2009



(e) Sediment Yield in 2010

Fig. 6. Comparison of the sediment yield for five years.

Table 3. Comparison of sediment yield and annual precipitation.

Years	2006	2007	2008	2009	2010
Annual Precipitation (mm)	1450	1256	1300	1337	1402
Sediment Yield (ton ha ⁻¹ yr ⁻¹)	2.469	0.882	1.489	2.158	1.602
Maximum Storm Event (mm)	177	56	179	172	143
Sediment from Maximum Storm Event (ton ha ⁻¹ yr ⁻¹)	0.690	0.254	0.485	0.689	0.518
% of Sediment from Maximum Storm Event compared with Annual Sediment Yield	27.9	28.8	32.6	31.9	32.3

산정이 좀 더 가까운 결과 값을 나타내는 것으로 나타났다. 이는 현재 진행되고 있는 지구온난화에 따른 기후변화로 인한 집중강우 발생 빈도 증가 및 강우량 증가 결과를 반영하지 못하여 USLE 모형을 이용한 토양유실 산정에 있어 강우량의 변화, 강우강도 증가 및 강우지속시간 감소 등의 영향을 평가하는데 있어 한계가 있을 것이라 판단된다.

결 론

본 연구에서는 USLE 모형을 이용한 방법과 5년간 시강우량 자료를 이용하여 유사량을 산정하는 BMP 평가 모형의 유출량 및 유사량 평가 모듈을 이용하여 유사량을 산정 비교해 보았다. 본 연구에서는 Kum et al. (2011)에 의해서 보정된 시강우량 BMP 평가 모형을 이용하였다. 보정결과는 유출량의 경우 NSE=0.868, R²=0.917로 매우 높은 적용성을 보였고 유사량도 실측치 15.17 kg, 모의치 16.54 kg으로 BMP 평가 모형의 유출량 및 유사량 평가 모듈이 자연 현상을 잘 모의하는 것으로 나타났다 (Kum et al., 2011). 하지만 본 연구에서는 수작업에 의한 보정이 이루어졌지만 향후 Auto-calibration tool이 개발되어 적용된다면 좀 더 정확한 보정과 검정이 이루어질 수 것으로 판단된다.

USLE 모형은 연평균 3.06 ton ha⁻¹ yr⁻¹의 토양유실이 발생하는 것으로 산정되었고, BMP 평가 모형의 유출량 및 유사량 평가 모듈을 이용하여 유사량을 산정한 결과 5년 모의 기간 동안 (2006-2010) 각각의 연평균 토양유실량이 2.469, 0.882, 1.489, 2.158, 1.602 ton ha⁻¹ yr⁻¹으로 매년 강수량 및 강우강도 등에 따라 다르게 산정되었다. USLE 모형은 장기 강우 자료를 이용하여 산정된 강우인자를 사용하여 토양유실량을 산정하기 때문에 강우량의 시간적 변화를 고려하지 못한 연간 동일한 토양유실량이 산정하였고, BMP 평가 모형의 유출량 및 유사량 평가 모듈은 단일 호우에 강우 자료를 이용하여 시간적 변화를 고려한 토양유실량을 산정한다. 특히 연평균 강수량이 비슷한 2007년과 2008년의 경우 강수량이 1,256 및 1,300 mm이나 토양유실량은 각각 0.882 및 1.489 ton ha⁻¹ yr⁻¹로 많은 차이 (169%)를 나타냈는데, 이는 토양유실에 많은 영향을 주는 단일강우사상 크

기 차이에 따른 것이다. 특히 하나의 단일 강우이벤트에 의한 토양유실량이 연간토양유실량의 30%이상 발생하는 것으로 분석되었다.

지구온난화에 의한 기상이변으로 강우량은 해가 거듭될수록 증가되고 있다. 강우량 증가에 따른 토양유실 문제를 효과적으로 대처하고 예방하기 위해 다양한 저감 노력이 이루어지고 있지만 효과적인 대책이 개발되기 위해서는 토양유실 발생량에 대한 연구가 선행되어야 하는데 현재 토양유실량 산정에 가장 널리 이용되고 있는 USLE 방식은 많은 한계점을 지니고 있다. 이에 효과적인 토양유실 저감 대책을 개발하기 위해서는 강우의 시간적 변화를 고려하여 산정되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원 (과제번호: 20110510745-00, 비점관리 고시지역 BMP 적용에 따른 삭감효과 산정모형 개발)과 농림수산식품부와 한국농어촌공사 농어촌연구원 (새만금유역 농업비점오염 저감기법 개발 연구)의 연구 지원을 받아 수행되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

인 용 문 헌

- Donigian, A.S. and J.T. Love. 2003. Sediment calibration procedures and guidelines for watershed modeling. WEFTMDL, November 16-19, WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM, Illinois, Chicago.
- Heo, S.G., K.S. Kim, M. Sagong, J.H. Ahn, and K.J. Lim. 2005. Evaluation of SWAT applicability to simulate soil erosion at Highland agricultural lands. Korean. Soc. Rural Planning. 11(4):67-74.
- Jung, P.K., M.H. Ko, J.N. Im, K.T. Um, and D.U. Choi. 1983. Rainfall erosion factor for estimating soil loss. Korean J. Soil Sci. Fert. 16(2):106-111.
- Jung, P.K., M.H. Ko, and K.T. Um. 1984. Discussion of cropping management factor for estimating soil loss. Korean J. Soil Sci. Fert. 18(1):7-13.

- Jung, Y.S., Y.K. Kwon, H.S. Lim, S.K. Ha, and J.E. Yang. 1999. R and K factors for an application of RUSLE on the slope soils in kangwon-do, Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 32(1):31-38.
- Kim, K.S., S.G. Heo, Y.S. Jung, J.M. Kim, and K.J. Lim. 2005. Analysis of soil erosion vulnerability at alpine agricultural fields of Hongcheon County. *Korean. Soc. Rural Planning.* 11(2):51-57.
- Kum, D.H., J.C. Ryu, J.W. Choi, M.H. Shin, D.S. Shin, S.U. Cheon, J.D. Choi, and K.J. Lim. 2011. Development and evaluation of long-term runoff-sediment evaluation system and BMPs evaluation modules for agricultural fields considering rainfall intensity. In rivew. *Korean. J. Sco. Water Qual.* in review
- Lee, J.W., J.S. Eom, B.C. Kim, W.S. Jang, J.C. Ryu, H.W. Kang, K.S. Kim, and K.J. Lim. 2011. Water quality prediction at Mandae watershed using SWAT and water quality improvement with vegetated filter strip. *Korean. J. Sco. Agri. Engi.* 53(1):37-45.
- 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 thesis. Kangwon National University. Chuncheon, Korea.
- Park, Y.S., J.G. Kim, N.W. Kim, S.J. Kim, J.H. Jeon, B.A. Engel, W.S. Jang, and K.J. Lim. 2010. Development of new R, C and SDR modules for the GIS system. *Computers & Geosciences.* 36(2010):726-734.
- Ramanarayanan, T.S., J.R. Williams, W.A. Dugas, L.M. Hauck, and A.M.S. McFarland. 1997. Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. ASAE International Meeting, Minneapolis, MN. 97-2209.
- Shin, M.H., C.H. Won, W.J. Park, Y.H. Choi, J.R. Jang, K.J. Lim, and J.D. Choi. 2011. Analysis of the reduction effect on NPS pollution loads by surface cover application. *Korean J. Sco. Agri. Engi.* 53(4):29-37.