



원격탐사자료 기반 유효토양특성 산정을 위한 토양수분자료동화기법 개발

Development of Soil Moisture Data Assimilation Scheme for Predicting Effective Soil Characteristics Using Remotely Sensed Data

이태화* · 김상우* · 이상호* · 최경숙* · 신용철*[†] · 임경재** · 박윤식***

Lee, Taehwa · Kim, Sangwoo · Lee, Sang-Ho · Choi, Kyung-Sook · Shin, Yongchul · Lim, Kyoungjae · Park, Younshik

Abstract

In this study, we developed the Soil Moisture Data Assimilation (SMDA) scheme to extract Effective Soil Characteristics-ESC (Sand, Silt, Clay %) from MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) products. The SMDA scheme was applied to the MODIS-based Soil Moisture (SM) data during the summer (July to September) period. Then the ESC and soil erosion factors (K) were predicted, respectively. Several numerical experiments were conducted to test the performance of SMDA at the study sites under the synthetic and field validation conditions. In the synthetic experiment, the estimated soil moistures values ($R: >0.990$ and $RMSE: <0.005$) were identified well with the synthetic observations. The field validation results at the Bangdongri and Chungmicheon sites were also comparable to the TDR-based measurements with the statistics ($R: 0.772/0.000$ and $RMSE: 0.065/0.000$). The estimated ESC values were also matched well with the measurements for the synthetic and field validation conditions. Then we tested the SMDA scheme to extract the ESC from the MODIS-based soil moisture products. Although uncertainties exist in the results, the estimated soil moisture and ESC based on the SMDA were comparable to the measurements. Overall, the K factors were similarly distributed based on the derived ESC. Also, the K factors in the mountainous regions were higher than those of the relatively flat areas. Thus, the newly developed SMDA scheme can be useful to estimate spatially and temporally-distributed soil erosion and establish soil erosion management plans.

Keywords: SMDA; MODIS; soil moisture; soil erosion; K factor

1. 서 론

최근 들어 기후변화로 인한 강우발생일수는 감소하는 반면에 강우강도는 증가하고 있으며, 특히 우리나라의 경우 산악지형이 우세한 지형적 특성 때문에 강우발생시 지표수와 함께 유실된 토양이 하천으로 유입되고 있다. 하천으로 유입된 토사는 수리구조물의 기능을 저하시키고 집중호우시 통수능력 저하로 인해 하천 범람을 야기하여 농경지나 도로, 주거지 등에 피해가 발생한다. 또한 토양 유실로 인하여 영양염류나 유기물이 하천으로 유입되어 하천오염을 일으키는 원인이 된다.

토양유실을 저감하기 위해서는 유역에서 발생하는 토양유실 발생량의 정확한 산정이 필요하며, 범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation – USLE) (Wischmeier and Smith, 1978)은 강우, 토양, 지형, 지표피복, 토지이용 등의 특성에 따라 연간 단위면적에서 일어나는 토양침식을 예측하는 모형으로 전 세계적으로 많이 사용되고 있다. 범용토양유실공식은 세류침식(rill erosion) 및 면상침식(sheet erosion)에 의한 토양유실량을 예측할 수 있으며, 토양유실량 예측을 위해서는 강우인자(Rainfall erosivity factor-R factor), 토양침식인자(Soil erosion factor-K factor), 경사인자(Slope and slope steepness factor-LS factor), 작물인자(Crop and cover management factor-C factor) 및 토양관리인자(Conservation practice factor-P factor) 5가지 인자가 필요하다. 강우인자(R factor)는 토양유실량 예측 대상 지역에서 강우량 및 강우강도와 관계를 가지는 침식성 인자이며, 토양침식인자(K factor)는 토양침식의 정도를 나타내며 토양의 특성, 구조, 유기물 함량 등에 영향을 받는다. 경사인자(LS factor)는 경사장 및 경사도에 의해 토양유실에 영향을 미치며, 작물인자(C factor)는 농경지에서의 작물의 종류, 토지이용현황 등의 지표피복 상태에 영향을 받는다. 보전관리인자(P factor)는 등고재배 등 농경지 관리 상황을 반영한다.

* School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University

** Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

*** Department of Rural Construction Engineering, Kongju National University

† Corresponding author

Tel.: +82-53-950-5734 Fax: +82-53-950-6752

E-mail: ycshin@knu.ac.kr

Received: November 2, 2017

Revised: November 22, 2017

Accepted: November 22, 2017

토양침식인자(K factor)는 토양의 침식성에 따른 토양침식량의 변화를 나타내는 인자로서, 표토층의 특성을 이용하여 토양의 종류에 따른 토양유실량의 차이를 반영한다. 동일한 경우에도 토양특성에 따라 토양유실의 정도가 다르며, 토양입자(토양의 물리적 특성)중에서 미사와 극세사의 비율이 많을 경우 토양의 유실량이 많아진다. 그러나 유기물 함량이 많고 입단이 잘 형성(토양의 구조적 특성)되어 있는 토양의 경우 토양의 유실량이 적고, 토양층의 투수성이 클수록 지표유출량이 감소하여 유실량이 작아진다. 국내에서는 주로 Wischmeier and Smith (1965)에 의해 제안된 토양침식인자 산정 공식을 이용하거나, Wischmeier (1971)의 추정도표법, Erickson (1997)이 제안한 삼각도표법, 개략토양도를 이용한 추정법(MOCT, 1992)이 많이 사용되었다. 최진규 등 (1998)은 Wischmeier and Smith (1965)가 제안한 공식에서 U.S단위의 토양침식인자를 SI단위로 변환할 수 있는 변환계수에 대한 연구를 진행하였으며, 정강호 등 (2004)은 토양침식인자 산정시 자갈의 지피효과를 고려하기 위해 Box (1981)가 제안한 공식으로 보정하여 산출하였다. 또한 이근상 등 (2003)은 개략토양도와 정밀토양도를 이용하여 토양침식량 산정 및 토양도 축척에 따른 적정 해상도 분석에 관한 연구를 진행하였다. 하지만 이러한 연구들은 토양의 물리적·구조적 특성이 시간에 따라서 불변한다는 가정 하에 연중 토양침식인자를 산정하며, 특히 대부분이 강우가 많이 발생하는 하절기를 바탕으로 토양침식인자를 산정하고 있다. 일반적으로 국내에서는 토양유실 산정시 농촌진흥청 흙토람 (<http://soil.rda.go.kr/soil/index.jsp>)에서 제공하는 토양특성 (Sand, Silt, Clay %) 자료를 이용하여 토양침식인자를 산정한다. 지표토양의 물리적 특성은 시간의 흐름의 따라 크게 변하지 않지만, 토양의 구조는 토지이용변화, 농업활동, 등 자연적·인위적 활동에 의해 크게 영향을 받는다. 흙토람에서 제공하는 토양정보의 경우 시·공간적으로 변하는 토양의 구조적 특성을 나타내지 못하기 때문에 토양유실 산정시 불확실성이 발생하게 된다. 따라서 자연적·

인위적인 활동에 의해서 변화하는 토양의 구조적 특성을 반영한 토양침식인자 산정이 필요하다.

본 연구에서는 지표토양층의 인위적·자연적 활동에 의한 토양의 물리적 및 구조적 특성 변화를 대표할 수 있는 유효 토양침식인자 (effective K)를 산정하였다. 연구목적은 1) 인공위성기반의 토양수분 이미지로부터 유효 토양특성 매개변수 (Sand, Silt, Clay %) 추출을 위한 토양수분자료동화기법 개발, 2) 시·공간적으로 분포되어 있는 유효 토양특성 추출 및 3) 추출된 유효 토양특성을 이용한 우리나라의 유효 토양침식인자의 공간분포를 도출하는 것이다.

II. 실험 및 연구방법

본 연구에서는 인공위성기반의 MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 이미지자료와 Scott et al. (2003)이 제시한 경험적 회귀식을 연계하여 500 m × 500m 해상도의 토양수분을 산정하였으며, 산정된 토양수분 이미지로부터 유효 토양특성 (Sand, Silt, Clay %)를 추출 및 일별 토양수분 모의를 위한 역추적기법 (inversion model, IM) 기반 토양수분자료동화기법 개발하였다. MODIS 이미지는 주기적으로 지표면을 관측하기 때문에 지표면의 인위적·자연적 변화를 관측한다. 따라서 MODIS 기반 토양수분 이미지는 토양의 인위적·자연적 변화를 관측하기 때문에, 추출된 토양특성을 MODIS 해상도를 대표하는 유효 토양특성으로 정의하였다. 프로세스 기반의 토양수분모형 (Noah-Land Surface Model, Noah-LSM)과 연계된 토양수분자료동화기법은 유효 토양특성 (Sand, Silt, Clay %) 및 작물 (*RS, RGL, HS, ZO, LAI*) 매개변수를 이용하여 토양층의 토양수 흐름을 해석한다. 토양수분자료동화기법에 연계되어 있는 최적화 알고리즘 (유전자 알고리즘)을 이용하여 Noah-LSM 모형의 입력변수인 토양의 물리적 및 구조적 특성이 고려된 유효 토양특성 및 작물 매

Table 1 Constrained ranges of the Noah-LSM input variables for the genetic algorithm

	<i>MaxSMC</i>	θ_{sat}	ψ_{sat}	K_{sat}	<i>b</i>	<i>HS</i>	Z_0	<i>LAI</i>
Min.	0.35	5	0.10	0.000001	0.10	36	0.01	0.1
Max.	0.42	8	0.65	0.00001	0.82	55	0.10	5

MaxSMC: 최대 토양수분함량 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

θ_{sat} : 포화된 토양의 토양수분함량 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

ψ_{sat} : 포화된 토양의 matric potential (-cm)

K_{sat} : 포화된 토양의 (cm d^{-1})

b: 공극의 크기 분포를 나타내는 curve fitting 변수

HS: 지표면거칠기 (roughness of length)

Z_0 : 지표면거칠기 (roughness of length)

LAI: 엽면지수 (leaf area index)

개변수 ($P = \{MaxSMC, \theta_{sat}, \psi_{sat}, K_{sat}, b, HS, Z_0, LAI\}$)를 조정하여 토양수분 모의값이 실측값(MODIS, TDR 등)에 근사하도록 동화시킨다(Table 1). 단 RS (최소기공저항)와 RGL (일사량 스트레스)은 민감도 분석결과 토양수분에 미치는 영향이 미비한 것으로 나타나, 최적화 알고리즘의 효율을 향상시키기 위하여 매개변수의 최대 및 최소값 범위의 중간값을 사용하였다. 유전자 알고리즘은 목적함수 (Z)와 *Fitness* 함수 공식(1)과(2)를 이용하여 실측값과 모의된 토양수분의 값의 차이가 최소가 되도록 주어진 세대 (Generation, G)를 반복하여 해를 찾는다. Cosby 등 (1984)은 PTF (Pedo Transfer Function) 기반 모래 (Sand, %) 및 점토 (Clay, %)를 이용하여 Noah-LSM 모형의 입력변수인 θ_{sat} , ψ_{sat} , K_{sat} , 및 b 매개변수 산정 공식을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 최종적으로 최적화된 토양 매개변수(θ_{sat} , ψ_{sat} , K_{sat} , 및 b)와 Cosby 등 (1984)가 제시한 공식(3~6)을 이용하여 토양침식인자(K)의 입력변수인 토양특성 (Sand, Silt 및 Clay %)를 산정하였다. 산정된 토양특성과 Williams and Sharpley (1990)가 제안한 토양침식인자 산정 공식을 이용하여 공간적으로 분포되어 있는 유효 토양침식인자 K를 도출 및 토양침식산정모형 USLE의 입력자료로 활용하여 토양유실을 산정한다.

$$Z(P)_i = \min \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |\theta_{obs}(t) - \theta_{i,\sim}(t;P)| \right\}_i \quad (1)$$

$$Fitness_i(P) = \frac{1}{Z_i(P)} \quad (2)$$

여기서, θ_{obs} : 실측된 토양수분 ($cm^3 cm^{-3}$), θ : 모의된 토양수분 ($cm^3 cm^{-3}$), t : 시간, T : 일별 최대 모의기간, i : 유전자 알고리즘 running index ($i=1, \dots, G$) 이다.

$$\theta_{sat} = 0.489 - 0.00126 \times sand \quad (3)$$

$$\psi_{sat} = \frac{10.0 \exp(1.88 - 0.0131 \times sand)}{100.0} \quad (4)$$

$$K_{sat} = \frac{0.0070556 \times 10.0 \exp(-0.884 + 0.0153 \times sand)}{1000.0} \quad (5)$$

$$b = 2.91 + 0.159 \times clay \quad (6)$$

여기서, $MaxSMC$: 최대 토양수분함량 ($cm^3 cm^{-3}$), θ_{sat} : 포화된 토양의 토양수분함량 ($cm^3 cm^{-3}$), ψ_{sat} : 포화된 토양의 matric potential (-cm), K_{sat} : 포화된 토양의 ($cm d^{-1}$) 및 b : 공극의 크기 분포를 나타내는 curve fitting 변수이다.

1. MODIS 기반 토양수분이미지 산정

Scott 등 (2003)은 토양의 증발량과 실측된 토양수분의 관계를 회귀식으로 도출하여 원격탐사자료 (LANDSAT)에 적용 및 공간적으로 분포되어 있는 토양수분을 산정하였다. 본 연구에서는 Scott 등 (2003)이 제안한 공식 (7~9)을 MODIS 자료에 적용하여 500 m × 500 m 해상도의 토양증발량 (soil evaporation)을 산정 및 회귀식 기반의 토양수분으로 변환하였다.

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (7)$$

$$A = \lambda E / (\lambda E + H) \quad (8)$$

$$\theta / \theta_{sat} = \exp(A - a) / b, a = 1.0, b = 0.421 \quad (9)$$

여기서 R_n : 지표순복사량 (net radiation, W/m^2), G : 토양의 열 이동 (soil heat flux, W/m^2), H : 대기로 향하는 현열 이동 (sensible heat flux, W/m^2), λE : 잠열 이동 (물의 증발에 사용된 에너지, W/m^2), a, b : 곡선적합계수 (curve-fitting parameters), θ : 토양수분 ($cm^3 cm^{-3}$) 및 A : 토양증발량 (soil evaporation) 이다. 본 연구에서 사용된 MODIS 위성의 제원은 Table 2와 같다.

2. Noah-LSM 모형

Noah-LSM (Noah-Land Surface Model, Ek et al., 2003) 모형은 1993년 국립환경센터 (National Center for Environmental Prediction-NCEP)에서 개발되었다. Noah-LSM 모형은 임의의 지점의 기상자료를 이용하여 지표 토양수분을 모의한다. Noah-LSM 모형은 물수지방정식과 에너지보전방정식으로 구성된다.

Table 2 MODIS information

	Image characteristics	Value
MODIS	Year	2014
	Coordinate system	Latitude, Longitude
	Resolution	Bands 1-7 (500 m × 500 m)
		Land surface temperature (1000 m × 1000 m)
	Emissivities 31/32 (1000 m × 1000 m)	

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta V} \rho_k \theta_k h_k dV = - \int_S U_k dS + \sum_{k'} \int_{\Delta V} M_{k'k} (1 - \delta_{k'k}) dV + \int_{\Delta V} S_k dV \quad (10)$$

여기서 V : control volume (m^3), ρ_k : intrinsic density of constituent k ($kg\ m^{-3}$), θ_k : partial volume of constituent k ($m^3\ m^{-3}$), h_k : specific enthalpy ($J\ kg^{-1}$), U_k : mass flux ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$), $M_{k'k}$: phase change ($kg\ m^{-3}\ s^{-1}$), $\delta_{k'k}$: kronecker delta, S_k : source of sink term 이다.

또한 Noah-LSM 모형은 Clapp and Hornberger (1978)가 제시한 토양수분함량 및 수리전도도 공식을 이용하여 토양층의 토양수분을 모의한다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z}) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} + Q \quad (11)$$

$$\psi = \psi_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^{-b} \quad (12)$$

$$K(\theta) = K_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^{2b+3} \quad (13)$$

여기서, θ : 토양수분함량 ($cm^3\ cm^{-3}$), z : 토양깊이 (cm), D (θ): 토양수분확산계수 ($cm^2\ d^{-1}$), $(K(\theta) (\partial \psi / \partial \theta))$ 및 $K(\theta)$: 비포화토양의 수리전도도 ($cm\ d^{-1}$), Q : 작물뿌리에 의해 흡수되는 토양수분, ψ 및 ψ_{sat} : 비포화 및 포화된 토양의 matric potential, b : 공극의 크기 분포를 나타내는 curve fitting 변수, θ_{sat} 및 K_{sat} : 포화된 토양의 토양수분 ($cm^3\ cm^{-3}$) 및 수리전도도 ($cm\ d^{-1}$) 이다.

Noah-LSM 모형에서 토양층은 총 7개의 층으로 구성하였으며, 전체 토양층의 깊이는 지표면으로부터 210 cm로 하였다. 각 토양층은 $2 \times 5\ cm$, $1 \times 10\ cm$, $2 \times 20\ cm$, $1 \times 30\ cm$, $1 \times 120\ cm$ 로 구성하였다.

3. 유전자 알고리즘 (genetic algorithm)

Noah-LSM모형과 연계된 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm-GA, Holland, 1975; Goldberg, 1989)은 자연선택설에 기반하여 실측값에 근사한 매개변수를 찾는 최적화 기법중의 하나이다. 유전자 알고리즘은 세대 (generation)안의 객체군 (population)에서 가장 적합도 (fitness)가 높은 객체 (individual)를 선택하여 선택(selection), 교차(crossover), 변이(mutation)의 과정 (GA-operator)을 통하여 더 좋은 적합도를 가진 객체

를 찾는다. 본 연구에서 유전자 알고리즘은 *MaxSMC* (최대 토양수분함량, $cm^3\ cm^{-3}$), θ_{sat} (포화된 토양의 토양수분함량, $cm^3\ cm^{-3}$), ψ_{sat} (포화된 토양의 matric potential, -cm), K_{sat} (포화된 토양의, $cm\ d^{-1}$), b (공극의 크기 분포를 나타내는 curve fitting 변수), HS (지표면거칠기, roughness of length), Z_o (지표면거칠기, roughness of length) 및 LAI (엽면지수, leaf area index) 매개변수를 이용하여 모의된 토양수분이 실측된 토양수분에 근사하도록 조정한다.

4. USLE (Universal Soil Loss Equation) 모형

범용토양유실 (universal soil loss equation-USLE)모형은 미국 농무부 (United States Department of Agriculture-USDA)에서 개발하였으며 연간 단위면적당 토양유실량을 산정한다.

$$A = R \times K \times LS \times P \times C \quad (14)$$

여기서 A: 단위면적당 R의 해당 기간 동안의 토양유실량, R: 강우인자, K: 토양침식인자, LS: 경사인자, C: 작물인자, P: 보전관리인자이다.

토양침식인자(K)는 강우 및 지표수에 의한 토양침식, 경운 방법 등에 의해 시·공간적으로 변화하기 때문에, 자연적 및 인위적 활동을 고려할 수 있도록 토양침식인자 (K factor)개선이 필요하다. 토양침식인자는 그래프를 이용하는 방법과 계산으로 구하는 방법으로 구분한다. 계산으로 구하는 방법으로는 Wylie, Erickson, Wischmeier 등이 제안한 다양한 방법 등이 있으며, 본 연구에서는 Williams and Sharpley (1990)가 개발한 EPIC (erosion/productivity impact calculator)모형에서 이용한 토양침식인자 산정공식을 이용하였으며, 토양침식인자의 범위는 0.01~0.5의 범위를 가진다. 유기탄소 함유량 (%)은 흙토람에서 제공하는 실측값을 사용하였다.

$$K = (0.2 + 0.3 \exp(-0.0256 \text{ sand}(1 - \frac{\text{silt}}{100}))) (\frac{\text{silt}}{\text{clay} + \text{silt}})^{0.3} \times (1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}) \times (1.0 - \frac{0.7SM}{SM + \exp(-5.51 + 22.9SM)}) \quad (15)$$

여기서 Sand: 모래 (%), Silt: 이토 (%), Clay: 점토 (%), C: 유기탄소 함유량 (%), $SN1 = 1 - (\text{sand}/100)$ 이다.

5. 시험 유역 및 실험 방법

본 연구에서 개발된 토양수분자료동화기법을 검증하기 위

하여 강원도 춘천기상관측소의 종관기상관측자료 (Automated Synoptic Observing System-ASOS)를 이용하여 가상실험 (synthetic experiment)을 진행하였다. 가상실험에서는 실측된 토양특성을 Noah-LSM 모형에 입력하여 토양수분을 산정하며, 이를 가상의 실측 토양수분으로 사용한다. 이후 토양수분자료동화기법을 이용하여 가상의 실측 토양수분에서 토양특성을 추출하고 실측된 토양특성과 비교한다. 가상실험의 경우 실측된 토양수분의 실측오차를 배제하고 모형 자체의 성능을 평가할 수 있는 장점이 있다. 가상실험에서는 총 4가지 Case 1~4의 토양 특성을 사용하였다 (Table 3).

또한 토양수분자료동화기법을 검증하기 위하여 TDR (Time Domain Reflectometry)장비로 측정된 춘천시 서면 방동리의 토양수분 실측값과 청미천 유역의 토양수분 실측값을 이용하여 토양특성을 추출하였다. 방동리의 토양수분 실측값은 2011년 6월 11일부터 7월 20일까지 측정된 자료를 이용하였으며, 기상관측자료는 춘천관측소 (101)의 2011년 종관기상관측자료를 이용하였다. 청미천의 경우 2014년 4월 1일부터 10월 31일까지 측정된 자료를 이용하였으며, 이천관측소 (203)의 종관기상관측자료를 이용하였다. 인공위성 기반의 MODIS 이미지자료로부터 도출한 토양수분 이미지자료와 토양수분자료동화기법의 검증을 위하여 경상남도 합천군 청덕면 (Cheongduk-myeon), 대구광역시 달성군 현풍면 (Hyunpoong-myeon), 경상남도 합천군 쌍책면 (SSandchaek-myeon), 경상남도 함양군 함양읍 (Hamyang-eup)의 토양수분 관측값을 사용하였다. 4지역 모두 2014년 4월 1일부터 10월 31일까지 측정된 자료를 이용하였다. 경상남도 합천군, 대구광역시 달성군의 기상자료는 합천 기상관측소 (285) 종관기상관측자료를 이용하였으며, 경상남도 함양군의 기상자료는 산청관측소 (289)의 종관기상관측자료를 이용하였다. 추출된 토양특성은 흙토람에서 제공하는 실측 토양특성과 비교하여 자료동화기법을 검증하였다. 또한 공식 (16) 및 (17)의 Pearson 상관계수 (R)과 RMSE (root mean square error)를 이용하여 실측 및 모의값의 적합도 및 불확실성을 평가하였다. 연구기간은 많은 강우가 발생하는 집중호우 (7~9월)기간을 대상으로 하였다.

Table 3 Synthetic observations of the Effective Soil Characteristics (ESC)

	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Case 1	80.0	10.0	10.0
Case 2	10.0	10.0	80.0
Case 3	40.0	20.0	40.0
Case 4	25.0	50.0	25.0

$$R = \frac{\sum_{t=1}^T (\theta_t^{sim} - \bar{\theta}_t^{sim})(\theta_t^{obs} - \bar{\theta}_t^{obs})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (\theta_t^{sim} - \bar{\theta}_t^{sim})^2 \sum_{t=1}^T (\theta_t^{obs} - \bar{\theta}_t^{obs})^2}} \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (\theta_t^{obs} - \theta_t^{sim})^2}{T}} \quad (17)$$

여기서 θ_t^{sim} : 모의값, θ_t^{obs} : 토양수분 실측값, $\bar{\theta}_t^{sim}$: 모의값의 평균, $\bar{\theta}_t^{obs}$: 실측값의 평균이다.

토양수분자료동화기법의 검·보정 이후, MODIS 기반 시·공간적으로 분포되어 있는 토양수분 이미지 자료에 적용하여 우리나라 전체의 토양특성 (Sand, Silt, Clay %)을 추출하였다. 추출된 토양 특성과 Williams and Sharpley (1990)가 제안한 토양침식인자 산정 공식을 이용하여 시·공간적으로 분포되어 있는 유효토양침식인자의 공간분포를 도출하였으며, 토양침식산정모형 USLE의 입력자료로 활용하여 토양유실을 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 가상실험 (Synthetic experiment)

유전자 알고리즘 기반 토양수분자료동화기법의 적용성을

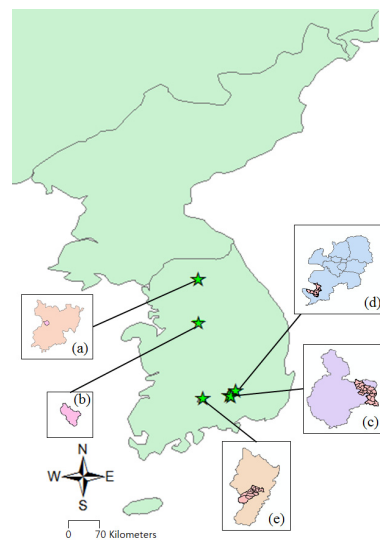


Fig. 1 Study sites for the soil moisture data assimilation scheme; (a) Chuncheon Bangdong-ri, (b) Chungmi-cheon watershed, (c) Gyeongnam Cheongduk-myeon, (d) Daegu Hyunpoong-myeon, (e) Gyeongnam Ssangchaek-myeon/Hamyang-myeon

평가하기 위하여 가상실험 (synthetic experiment)을 수행하였다. 가상실험에서는 춘천시상관측소의 종관기상관측소 (ASOS)의 2011년 기상자료와 Case 1~4 (Table 4)의 실측된 다양한 토양특성 조건을 이용하여 토양특성 추출시 발생하는 불확실성을 평가하였다. Case 1~4에 따른 토양수분자료동화

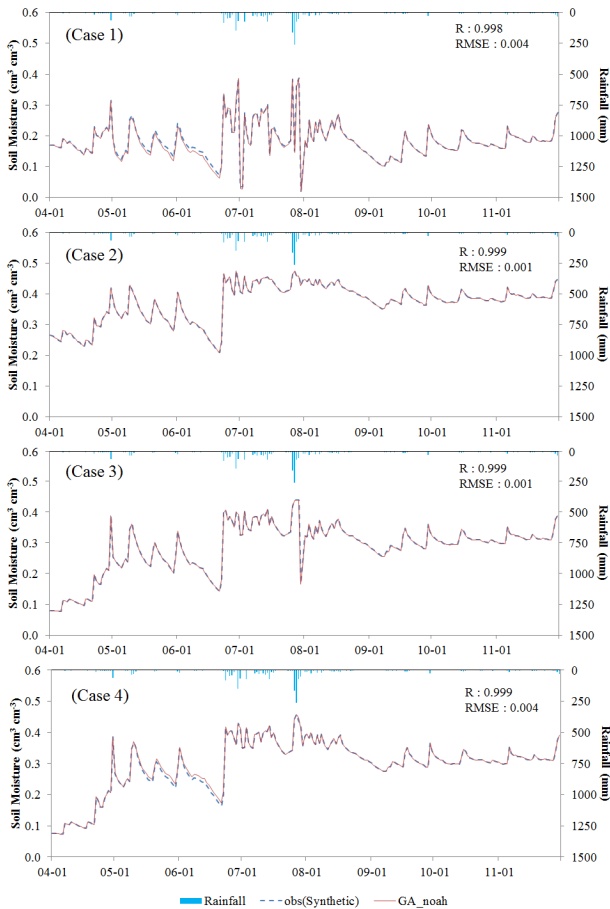


Fig. 2 Comparison of the synthetic and estimated soil moisture dynamics for Cases 1 to 4

Table 4 Results of the synthetic experiments

		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Case 1	Synthetic ESC	80,0	10,0	10,0
	Estimated ESC	81,1	8,4	10,4
Case 2	Synthetic ESC	10,0	10,0	80,0
	Estimated ESC	10,4	8,4	81,1
Case 3	Synthetic ESC	40,0	20,0	40,0
	Estimated ESC	40,3	19,4	40,3
Case 4	Synthetic ESC	25,0	50,0	25,0
	Estimated ESC	26,1	47,8	26,1

기법이 추출한 유효 토양특성은 다소 불확실성이 발생하였으나, 전체적으로 실측값과 모의값이 일치하는 결과를 보였다. 가상실험은 실제 현장에서 토양수분 측정시 발생하는 실측오차를 배제할 수 있기 때문에 Table 4의 결과는 토양수분자료로부터 유효 토양특성을 추출하는 토양수분자료동화기법의 신뢰성을 입증한다.

Fig. 2는 Case 1~4별 토양수분자료동화기법이 추출한 토양특성을 이용하여 모의된 토양수분과 실측 토양수분을 나타낸다. Sand 토양이 우세한 Case 1의 일별 토양수분이 상대적으로 다른 토양의 (Case 2~4) 토양수분과 비교하여 상대적으로 낮게 나타났으며, Case 별 분석 결과 토양특성이 토양층의 토양수 흐름에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 전체적으로 실측값과 모의값 (R: 0.9 이상 및 RMSE: 0.005 이하)이 일치하는 것으로 나타나 토양수분자료동화기법의 모의 성능을 성공적으로 검증하였다.

2. 현장 검증 실험

Fig. 3은 춘천시 서면 방동리의 토양수분을 TDR 기반 실측 자료에 토양수분자료동화기법을 적용하여 추출된 토양 특성 기반 모의값과 실측값의 비교를 나타낸다. 비록 6월 20일부터 7월 20일 기간동안 모의값이 실측값보다 다소 높게 나타났으나, 전체적으로 모의값 (R: 0.772, RMSE: 0.065)이 실측값의 변동특성을 잘 반영하였다. 추출된 토양특성은 Sand 61.5 %, Silt 28.1 %, Clay 10.4 %로 USDA에서 분류한 토양특성에 따르면 Sandy Loam 토양인 것으로 나타났다. 이는 흙탐람에서 제공하는 방동리 지점의 토양특성과도 일치하는 것으로 나타나, 토양수분자료동화기법이 실제 현장에서 측정된 토

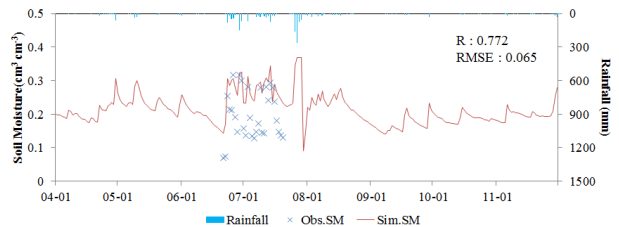


Fig. 3 Comparison of the measured and estimated soil moisture dynamics at the Bangdong-ri site in Chuncheon

Table 5 The measured and estimated Effective Soil Characteristics (ESC) and soil erosion factor (K) at the Bangdong-ri site in Chuncheon

	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	K factor
Measured ESC	61,5	28,1	10,4	0,201
Estimated ESC	61,7	24,3	14,0	0,189

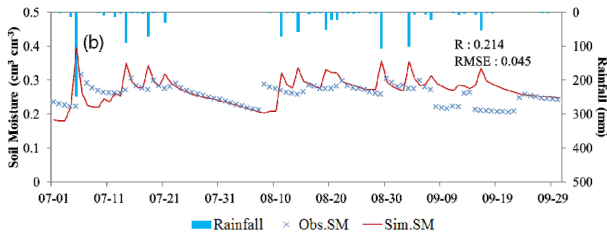


Fig. 4 Comparison of the measured and estimated soil moisture dynamics at the Chungmi-cheon site

Table 6 Comparison of the measured/estimated effective soil characteristics (ESC) and soil erosion factor (K) at the Chungmi-cheon site

	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	K factor
Measured ESC	42,6	41,2	16,5	0,245
Estimated ESC	45,6	41,0	13,4	0,243

양수분에도 충분히 적용 가능한 것으로 판단되었다. 또한 Table 5에 나타난 것처럼 비록 불확실성이 발생하였지만, 방동리 지점의 토양특성 실측값 (Sand: 61.5 %, Silt: 28.1 %, Clay: 10.4 %) 및 모의값 (Sand: 61.7 %, Silt: 24.3 %, Clay: 14.0 %)과 토양침식인자 (K)의 실측값 (0.201) 및 모의값 (0.189)이 유사하게 나타났다.

Fig. 4는 청미천유역에서 측정된 TDR 토양수분 실측자료에 토양수분자료동화기법을 적용하여 추출된 토양수분 모의값과 실측값의 비교를 나타낸다. 청미천유역의 대표토양통은 마산통 (MzD3)이며, 토양유실이 많이 발생하는 여름철 (7~9월, Fig. 4)에 측정된 토양수분 실측값에 토양수분자료동화기법을 적용하였다. 실측값과 모의값의 상관성 (R: 0.214) 및 불확실성 (RMSE: 0.045)이 방동리 유역과 비교하여 상대적으로 낮게 나타났다. 9월의 경우 실측값이 상대적으로 낮게 나타났으며, 특히 8월 중순에 50 mm 이상의 강우가 발생하였

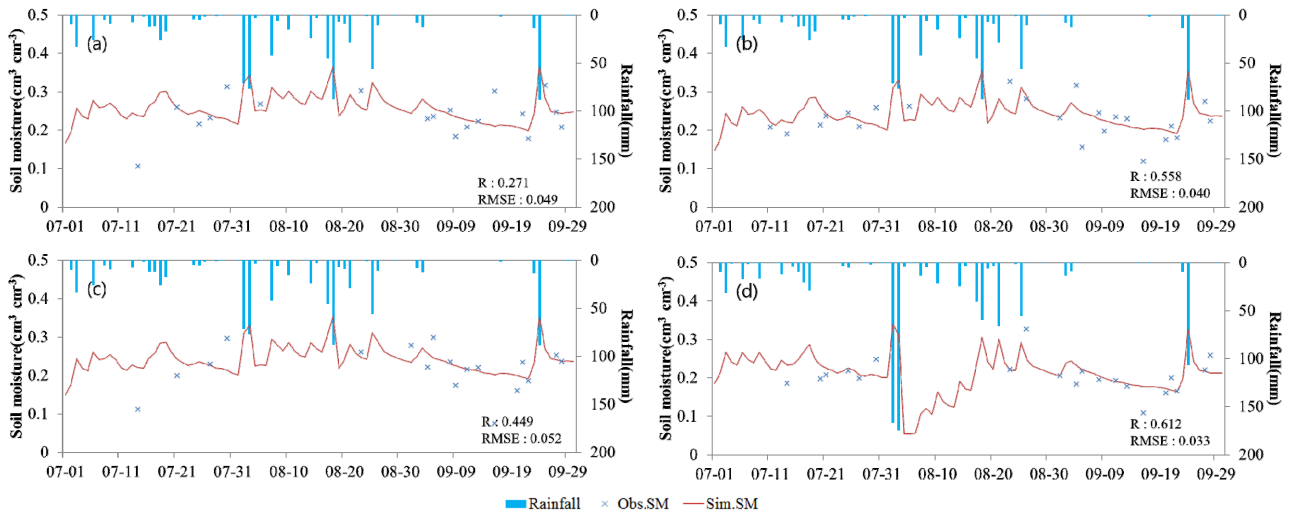


Fig. 5 Comparison of the MODIS-based and estimated soil moisture dynamics; (a) Cheongduk-myeon, (b) Hyunpoong-myeon, (c) SSangchaek-myeon and (d) Hamyang-eup sites

Table 7 Comparison of the measured/estimated effective soil characteristics (ESC) and soil erosion factor (K) at the Cheongduk-myeon, Hyunpoong-myeon, SSandchaek-myeon and Hamyang-eup sites

		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	K factor
Cheongduk-myeon	Measured ESC	40,5	36,1	23,4	0,230
	Estimated ESC	40,2	37,4	22,4	0,237
Hyunpoong-myeon	Measured ESC	48,3	40,2	11,5	0,275
	Estimated ESC	42,0	44,9	13,1	0,293
SSandchaek-myeon	Measured ESC	42,2	33,6	24,2	0,221
	Estimated ESC	42,0	44,9	13,1	0,254
Hamyang-eup	Measured ESC	59,8	30,0	10,2	0,232
	Estimated ESC	54,5	32,3	13,1	0,240

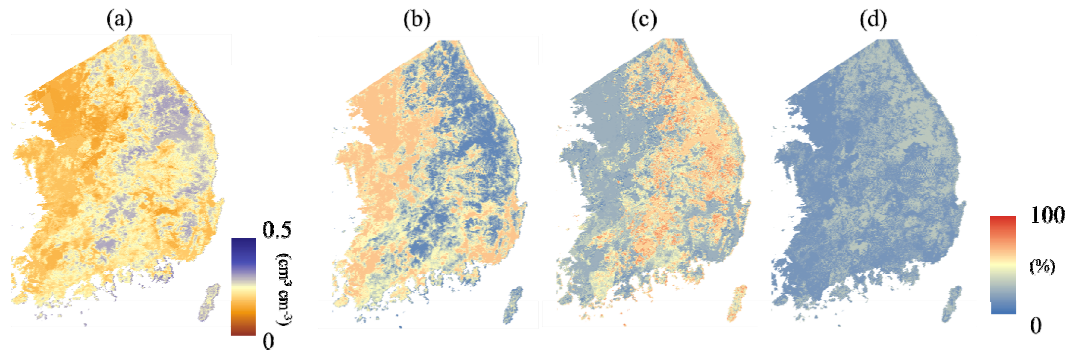


Fig. 6 (a) Estimated (averaged from July to September) soil moisture, (b) Sand, (c) Silt and (d) Clay in South Korea

으나 실측 토양수분이 강우사상에 반응하지 않았다. 따라서 청미천 유역의 경우 모의값이 실측 오차로 인하여 상관성 및 불확실성이 증가한 것으로 판단되었다. 토양특성을 비교한 결과 (Table 6) 실측된 토양특성 (Sand: 42.6 %, Silt: 41.2 %, Clay: 16.5 %)과 모의된 토양특성 (Sand: 45.6 %, Silt: 41.0 %, Clay: 13.4 %)이 매우 유사한 것으로 나타났으며, 토양침식인자 (K) 역시 모의값 (0.237)이 관측값 (0.245)과 거의 일치하였다.

방동리 및 청미천 유역에서 토양수분자료동화기법의 검증 을 수행한 이후, 남한 전체 유역의 MODIS 기반 토양수분 이 미지에 적용하여 토양특성을 추출하였다. Fig. 5는 경상남도 함천군 청덕면/쌍천면 및 함양군 함양읍과 대구광역시 달성 군 현풍면 등 4개 지점의 MODIS 기반 해상도 (500 m × 500 m)의 토양수분과 모의값을 나타낸다. 전체적으로 4개 지점의 MODIS 기반 시계열 토양수분이 강우발생 유무를 잘 반영하 는 것으로 나타났으나, 불확실성 (R: 0.271~0.612 및 RMSE: 0.033~0.052)이 다소 높게 나타났다. 그러나 전체적으로 4개 지점에서 추출된 토양침식인자 모의값이 실측값의 시계열 분 포와 유사한 것으로 나타났다 (Table 7).

3. 우리나라의 토양특성

Fig. 6은 원격탐사된 MODIS 토양수분 이미지 자료에 토 양수분자료동화기법을 적용하여 도출한 7~9월의 평균 유효 토양수분 및 토양특성 (Sand, Silt, Clay %) 공간분포를 나타 낸다. 전체적으로 우리나라의 지형적 특성에 따라서 평야지 역보다 산림지형의 토양수분 값이 상대적으로 높게 나타났 다. 이는 산림지역의 경우 지표면의 피복이 낙엽 등에 피복되 어 있으며, 지표면에서 발생하는 증발량이 대기로 환원되는 과 정에 영향을 미치기 때문으로 판단되었다. 전체적으로 MODIS 토양수분 이미지 자료와 토양수분자료동화기법을 이용하여 산정된 시·공간적으로 분포되어 있는 토양수분이 우리나라

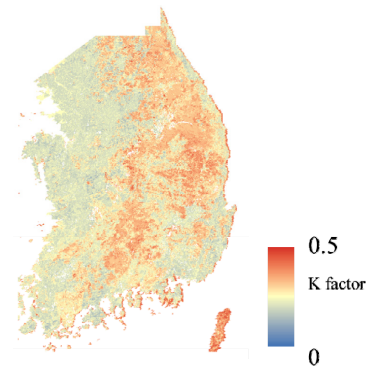


Fig. 7 Estimated soil erosion factor (K) in South Korea

의 지형적 및 지표특성을 잘 반영하는 것으로 판단되었다. Fig. 6(b)~(d)는 MODIS 토양수분 이미지로부터 토양수분자 료동화기법을 적용하여 추출된 유효 토양특성 공간분포를 나 타낸다. 전체적으로 토양특성의 공간분포는 토양수분의 공간 분포와 유사한 특성을 보였다. 산림 유역의 경우 Sand의 비율 이 평야 지역보다 낮게 나타났으며, Silt 및 Clay의 경우 산림 유역에서 높은 것으로 나타났다. Fig. 7은 7~9월의 추출된 유효 토양특성을 이용하여 산정된 토양침식인자의 공간분포를 나타낸다. 전체적으로 토양침식인자의 공간분포는 토양수분 및 토양특성 분포와 매우 유사한 분포를 보였다. 평야지역의 토양침식인자가 낮게 나타났으며, 산림지역에서 상대적으로 높게 나타나 MODIS 이미지가 지표특성을 잘 나타내는 것으 로 판단되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 인공위성기반의 토양수분 이미지 자료를 이용하여 유효 토양특성 매개변수 (Sand, Silt, Clay %) 추

출을 위한 토양수분자료동화기법을 개발하였다. 공간적으로 분포되어 있는 유효 토양특성 추출 및 추출된 유효 토양특성 기반 우리나라의 토양침식인자의 공간분포를 도출하였다.

토양수분자료동화기법의 적용성을 검증하기 위하여 가상 실험 (synthetic experiment) 조건하에서 4가지 Case의 모의 실험을 수행하였다. Case 1~4의 모의값과 실측값의 상관성 (R) 0.990 이상 및 불확실성 (RMSE) 0.005 이하로 나타나 가상의 조건에서 토양수분자료동화기법 기반의 모의값이 실측값과 일치하는 것으로 나타났다. 또한 실측 토양수분 측정장비 TDR을 이용하여 측정된 춘천시 서면 방동리와 청미천 유역의 실측 토양수분자료에 토양수분자료동화기법을 적용하여 검증을 수행한 결과 방동리의 경우 실측 및 모의된 토양수분의 상관성 (R) 0.772 및 불확실성 (RMSE) 0.065로 높게 나타났다으며, 실측 (Sand: 61.5 %, Silt: 28.1 %, Clay: 10.4 %) 및 모의 (Sand: 61.7 %, Silt: 24.3 %, Clay: 14.0 %)된 토양특성 역시 매우 유사하게 나타났다. 청미천 지점에서는 실측오차로 인하여 실측 및 모의된 토양수분이 다소 차이를 보였으나, 토양특성 실측값 (Sand: 42.6 %, Silt: 41.2 %, Clay: 16.2 %) 과 모의값 (Sand: 45.6 %, Silt: 41.0 %, Clay: 13.4 %) 그리고 토양침식인자 역시 실측값 (0.245)과 모의값 (0.243)이 매우 유사하게 나타났다. MODIS 토양수분 이미지자료와 토양수분자료동화기법 기반의 추출된 토양특성 검증을 위해 4개 지역 (경상남도 합천군 청덕면, 대구광역시 달성군 현풍면, 경상남도 합천군 쌍책면, 경상남도 함양군 함양읍)을 선정하였으며, 토양수분 및 토양특성을 산정하여 실측값과 비교하였다. 4개 지역의 MODIS 기반 토양수분은 TDR 기반 실측값과 비교하여 다소 불확실성이 나타났으나 전체적으로 MODIS 토양수분 이미지와 모의값이 유사하게 나타났으며, 추출된 토양특성 모의값이 실측값과 일치하는 경향을 보였다. 전체적으로 우리나라의 토양수분 공간분포는 산림지역에서 높게 나타났으며, 평야지역에서 상대적으로 낮게 나타났다. 또한 Sand, Silt 및 Clay 토양의 경우 산림지역에서 Sand 토양이 낮게 나타났으며 Silt 및 Clay 토양은 산림지역이 평야지역보다 높은 것으로 나타났다. 우리나라의 토양침식인자 공간분포는 추출된 Sand, Silt 및 Clay 토양특성을 반영하여 산림지역에서 평야지역과 비교하여 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 MODIS 토양수분 이미지에서 토양특성을 추출하여 토양침식 인자의 공간분포를 산정하였다. 토양특성은 일반적으로 시간에 따라서 크게 변화하지 않지만 토양의 구조적 특성은 자연적·인위적 활동에 의해 변화하기 때문에 토양침식인자(K)는 토양의 물리적·구조적 특성에 크게 영

향을 받는다. 본 연구에서 도출한 유효 토양침식인자는 토양의 물리적·구조적 특성을 함께 고려하기 때문에 시·공간적으로 변화하는 토양유실 및 토양유실저감대책 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원의 한국형 표토침식 예측모델 개발 (2014000540004) 사업에서 지원받았습니다.

REFERENCES

1. Box, Jr. J. E., 1981. The effect of surface slaty fragment on soil erosion by water. *Soil Science Society of America Journal*, 43, 111-116. doi:10.2136/sssaj1981.03615995004500010024x.
2. Cosby, B. J., G. M. Hornberger, R. B. Clapp, and T. R. Ginn, 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20, 682-690. doi:10.1029/WR020i006p0682.
3. Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model, *Journal of Geophysical Research*, 108, 8851. doi:10.1029/2002JD003296.
4. Erickson, A. J., 1997. *A disforestimating soil erodibility - K value class and soil loss tolerance*. U.S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Salt Lake City, Utah.
5. Jin-Kyu Choi, Ja-Woong Koo, and Jae-Gwon Son, 1998. Review on the unit conversion with the USLE application in Korea, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 31(3): 301-308.
6. Kang-Ho Jung, Won-Tae Kim, Seung-Oh Hur, Sang-Keon Ha, Pil-Kyun Jung, and Yeong-Sang Jung, 2004. USLE/RUSLE factors for national scale soil loss estimation based on the digital detailed soil map, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 37(4): 199-206.
7. Lee Geun Sang, Jang Yeong Lyul, and Jo Gi Seong, 2003. The analysis of optimum resolution with different scale of soil map for the calculation of soil loss. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 6(3): 1-10.
8. Ministry of Construction and Transportation-MOCT, 1992. Investigation of sediment loads at watershed-scales for designing dam.
9. Scott, C. A., W. G. M. Bastiaanssen, and M. D. Ahmad, 2003. Mapping root zone soil moisture using remotely sensed optical

- imagery, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5): 362-335.
10. Sharpley, A. N., and J. R. Villiams, eds., 1990. *EPIC--Erosion/ Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation*. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768. pp. 235.
 11. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., 1965. *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains, Guide for selection of practices for soil and water conservation*. *Agriculture Handbook No. 282*, Agricultural Research Service, U. S. Dept. of Agric, Washington DC, pp. 47.
 12. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses. A Guide to Conservation Planning. The USDA Agricultural Handbook No.537*.
 13. Wischmeier, W. H., John, C. B., and Cross, B. V., 1971. A Soil erodibility monograph for farm land and conservation sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol.26.