J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 53, No. 7 (2020), pp. 521-531
doi: 10.3741/JKWRA.2020.53.7.521
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Potential damage assessment of inland wetlands by topsoil erosion

Kim, Seongwon[a] · Jeong, Anchul[b]* · Lee, Daeeop[c] · Lee, Giha[d]

[a]Researcher, Department of Disaster Prevention KNU Emergency Management Institute, Sangju, Korea
[b]Researcher, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University, Daejeon, Korea
[c]Researcher, Department of Disaster Prevention KNU Emergency Management Institute, Sangju, Korea
[d]Professor, Department of Construction and Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University, Sangju, Korea

Paper number: 20-028
Received: 24 March 2020; Revised: 1 June 2020; Accepted: 1 June 2020

Abstract

The purpose of this study is to suggest a quantitative assessment of wetland damage considering the effects of topsoil erosion and deposition from rainfall. In the Cheoncheon Basin located upstream of the Yongdam Dam, 16 wetlands are located, but the lacustrine and small palustrine wetland were analyzed for possible damage to erosion and deposition. As a result of applying typhoon events in 2002 and 2003, the sediment load from the upper basin was the highest at 2.30% (22,548 m^3) of low water capacity. The average sediment load in the mountain areas was found to be 0.03% of the low water capacity, and it was analyzed to be less damaging than the lacustrine with relatively large watershed. as a result of the model, the lacustrine wetland, where a large area is used as agricultural land, shows a high probability of sediment yield, so it is highly likely to damage the wetland by topsoil erosion.

Keywords: Topsoil erosion, Inland wetland, Damaged wetland, Yongdam dam basin

표토침식에 따른 내륙습지 훼손 가능성 평가

김성원[a] · 정안철[b]* · 이대업[c] · 이기하[d]

[a]경북대학교 건설방재공학부 재난대응전략연구소 연구원, [b]충남대학교 국제수자원연구소 연구원,
[c]경북대학교 건설방재공학부 재난대응전략연구소 연구원, [d]경북대학교 건설방재공학부 교수

요 지

본 연구는 강우로부터 나타나는 표토침식과 퇴적의 영향을 고려하여 습지 훼손에 대한 정량적인 평가가 가능한 방안을 제시하고자 하였다. 용담댐 상류에 위치하고 있는 천천유역은 16개의 습지가 존재하며, 습지훼손 가능성에 대한 평가는 호수형습지와 소택지를 대상으로 이뤄졌다. 2002년, 2003년에 발생한 태풍사상을 적용한 결과, 벽남제습지의 경우 상류유역에서 유입되는 토사량은 저수용량의 2.30%(22,548 m^3)로 가장 높았다. 산지영역에 위치하고 있는 소택지의 평균 유입토사량은 저수용량의 0.03%로 나타났으며 비교적 넓은 유역을 가지는 호수형습지보다 훼손가능성이 낮은 것으로 분석되었다. 넓은 면적이 농경지로 사용되고 있는 호수형습지는 모형의 결과에서 토사유입량이 높은 것으로 나타나 토양침식에 의한 습지훼손 가능성이 높을 것으로 판단된다.

핵심용어: 표토침식, 내륙습지, 훼손습지, 용담댐 유역

1. 서 론

습지는 담수, 기수 또는 염수가 영구적 또는 일시적으로 그 표면을 덮고 있는 지역으로서 수질향상, 탄소저장, 홍수조절, 생태적 건전성 및 생물다양성에 많은 이점을 제공하는 것으로 알려져 있다(Cha *et al*., 2010; Janse *et al*., 2019). 국립환경과학원 국립습지센터는 총 3,240개소의 습지를 파악하고 있고 습지유형, 경계, 면적·규모, 생물종 정보 등에 대한 전문가의 검증 과정을 거쳐 약 2,500개소의 내륙습지를 발굴하고 습지

***Corresponding Author.** Tel: +82-42-821-7745
E-mail: anchuly@naver.com (A. Jeong)

© 2020 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

보전과 관리를 위해 다양한 노력이 이루어지고 있다(NWC , 2017). 수리·수문학적 요소는 습지의 형성과 유지에 가장 중요한 요소라고 보고되고 있다(Kim, 2001; Lee *et al*., 2018). 하지만 최근에 들어서 기후변화를 비롯한 자연적인 요인과 도시화 및 각종 개발사업 등과 같은 인위적인 요인으로 인해서 생물 다양성 보고인 습지가 훼손되거나 소실되고 있다. 최근 3년간 전국의 습지 실태를 조사한 결과, 74곳의 습지가 소실되고 91곳은 면적이 감소했다(ME, 2019).

전 세계적으로 지난 약 100년 동안 50%의 습지가 훼손 혹은 소실되었으며(Davidson, 2014), 세계적인 경향과 비교했을 경우에 국내의 습지 감소율은 약 4배가 크다고 할 수 있다. 이 중에서 인위적 요인으로 소실된 습지가 77%이며, 자연적인 요인에 의한 것은 23%로 나타났다. 인위적인 요인은 경작, 개발, 혹은 복합적인 요인으로 나타났으며, 자연적 요인은 육화 및 초지로 천이된 습지가 대부분이었다.

습지에 대한 대중들의 인식이 증가되 고 환경보존에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다. 또한, 국제적으로 람사르 습지가 지정되고 환경부에서도 습지보호지역이라는 제도를 운영하면서 인위적인 요인으로 훼손되는 습지는 점차 감소할 것으로 예상된다. 하지만 기후변화로 인해서 강우 특성이 변화하고 유역유사의 발생이 과거의 형태와 점차 다르게 변화하고 있는 점을 감안한다면 자연적 요인에 의한 습지 훼손은 점차 가속화될 것으로 판단된다. 따라서 이러한 변화를 사전에 감지하고 선제적 대책 수립을 지원하기 위한 연구가 필요하다고 본다.

Rojas *et al*. (2019)은 칠레에 위치한 Rocuant-Andalien 습지를 대상으로 도시화가 습지 훼손에 미치는 영향에 대해서 연구를 수행하였다. 식생에 강하게 반사되는 근적외선과 적색광의 차이를 나타내는 식생차이지수(Difference Vegetation Index, DVI)이용하여 도시화가 진행됨에 따른 토지이용의 변화를 산정하였다. 그 결과 2004년을 기준으로 2014년까지 도시면적이 약 28% 증가하였으며, 습지면적은 약 10% 감소한 것으로 나타났다. 또한 도시 계획이 수립된 대로 진행된다면 도시면적은 약 238%까지 증가할 것이며, 이에 따른 습지면적의 감소는 32%까지 진행될 것이라고 예측하였다. Gulbin *et al*. (2019)은 습지의 홍수조절 역할에 대한 중요성을 강조하면서, 기후변화에 따른 강우량과 홍수위험도 증가의 상황에서 습지의 영향에 대한 연구를 수행하였다. SWAT을 이용하여 기후변화 시나리오 상에서 강우-유출을 모의하였으며, 이때 습지 면적에 따른 홍수 위험 변화를 검토하였다. 그 결과 습지가 홍수 위험을 현저하게 줄이지는 못하지만 홍수관리 측면에서 부정적인 영향을 줄이는 보완책으로서 역할을 할 수 있다는 결과를 제시하였다. Hu *et al*. (2017)은 PTWI (Precipitation Topographic Wetness Index)를 개발하여 원격탐사 기법으로 지구에 존재하는 습지의 분포를 산정하였다. 생태계에 인간의 간섭효과가 없다면 지구에는 약 2,983만 km^2의 습지가 분포할 것이며, 2009년까지 약 33%가 손실된 것으로 분석결과를 제시하였다. 습지 손실은 아시아에서 가장 큰 것으로 나타났고, 유럽이 다음으로 심각하다고 하였다. 지구의 전체적인 습지 지도 작성이 매우 시급한 과제라는 의견도 제시하였다. 다만 원격탐사 기법만을 이용해서 습지라고 단정하는 것은 현재까지의 기술로는 어렵기 때문에 앞으로 많은 연구가 필요하다고 판단된다. Rho (2007)는 한강하구역을 중심으로 1910년대부터 2000년대까지의 지형도를 이용하여 하구습지를 추출하고 공간적 분포특성과 시기별 변동추이를 분석하였다. 이를 통해서 인위적 교란이 하구습지 훼손에 미치는 영향을 파악하였다.

연구동향을 검토한 결과, 습지 훼손에 관련된 연구는 아직까지 많이 이루어지지 않은 분야이다. 인위적인 요인에 의한 습지 훼손은 이해당사자 등의 협의에 의해서 개발과 보존 중 하나를 선택하거나 공존하는 전략을 도출할 수 있다고 판단된다. 그러나 자연적인 요인으로 훼손되는 습지에 대해서는 습지의 가치와 특징을 검토하여 자연적인 요인을 배제시킬 것인지 습지를 잠재적으로 육화시킬 것인지에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 자연적인 요인에 의한 습지 훼손이 매년 발생하고 있어 이를 정량적으로 검토할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 호우사상으로 인해 발생하는 유실토사가 습지로 유입되었을 경우에 대하여 수치해석 모형을 이용하여 토양침식의 공간적 분포를 예측하고 검토하였으며, 습지 훼손에 대한 정량적인 평가가 가능한 방안을 제시하였다. 금강유역 상류에 위치한 천천 유역을 대상유역으로 선정하여 지형자료 등을 수집하고 강우-유출-유사 모형을 구축하였으며, 수치해석을 통해 유사유출량을 산정하였다. 이를 기반으로 천천 유역 내에 위치하고 있는 습지로 유입·유출되는 유사량을 산정하고 습지로서의 기능을 상실할 가능성이 있는지 검토하였다.

2. 연구대상유역 및 연구방법론

2.1 연구대상유역

본 연구에서는 용담댐 유역의 소유역 중 하나인 천천 유역을 대상으로 연구를 수행하였다(Fig. 1). 용담댐 유역은 K-water의 시험유역으로서 수리·수문자료의 수집 및 품질검증이 수행되고 있으며, 이러한 이유로 관측자료에 대한 신뢰도가 상대적으로 높은 장점이 있다(Lee *et al*., 2010). 천천 유역은 연화

교 수위관측소를 유출구로 하였을 때, 유역면적 290.89 km^2, 유로연장 25.5 km, 평균표고 555.2 m, 평균경사 17.6°이며, 천천 유역 주변에 장수군(장판리), 장수군(삼봉리), 진안군(주평리), 장수군(원촌리)에 강수량관측소가 설치·운영되고 있다. 2019년 수문조사 업무규정 제19조에 따라 행정구역과 시설물명으로 수문관측소 명칭이 변경되었으며, 변경 전·후 관측소명 및 관측소 코드는 Table 1과 같다. 천천 유역내에는 소택지(3곳), 하천습지(10곳), 호수습지(3곳) 등을 포함하여 총 16

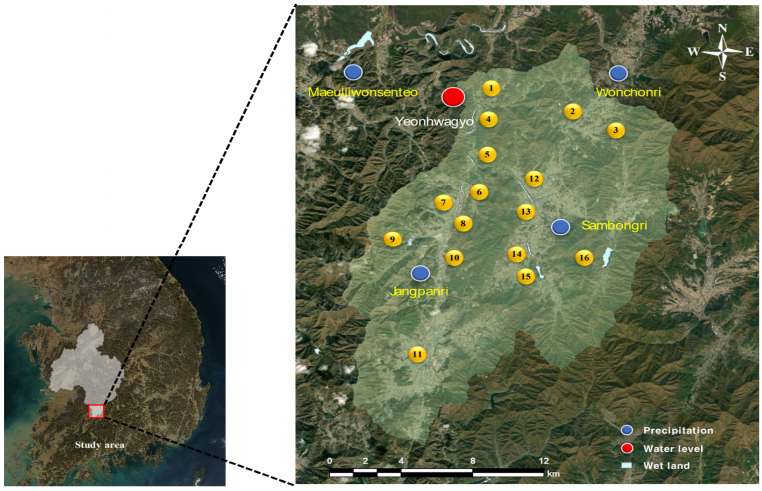


Fig. 1. Study area, Cheonchoen basin

Table 1. Information of observation station

Observation data	Code	Before name	Changed name
Precipitation	30014150	Sang Jeon	Jinangun (Jupyeongri)
	30014160	Cheon Cheon 2	Jangsugun (Jangpasri)
	30014180	Jang Gae	Jangsugun (Sambongri)
	30014190	Gae Buk 2	Jangsugun (Wonchonri)
Water level	3001620	Cheon Cheon	Jangsugun (Yeonhwagyo)

Table 2. Information of Inland wetlands

No	Wetland name	Area (m^2)	Location		Type of wetland
1	Sinheung	803	N35° 47' 43.99"	E127° 33' 05.53"	Palustrine Wetland
2	Wolhyeon	20,187	N35° 47' 10.92"	E127° 35' 47.53"	Palustrine Wetland
3	Munseong	5,655	N35° 47' 03.90"	E127° 37' 51.50"	Palustrine Wetland
4	Bulsundong	3,000	N35° 46' 13.02"	E127° 32' 29.78"	Riverine Wetland
5	Cheoncheongyo	3,000	N35° 45' 13.93"	E127° 32' 29.99"	Riverine Wetland
6	Yangmeyongdong	3,000	N35° 44' 07.20"	E127° 32' 09.74"	Riverine Wetland
7	Boomgol	3,000	N35° 43' 53.57"	E127° 32' 08.81"	Riverine Wetland
8	Ungokmaeul	10,000	N35° 43' 29.75"	E127° 31' 55.98"	Riverine Wetland
9	Waryong	8,047	N35° 42' 08.34"	E127° 30' 04.36"	Lacustrine Wetland
10	Banwolmaeul	4,000	N35° 41' 37.50"	E127° 31' 15.71"	Riverine Wetland
11	Songcheongyo	7,000	N35° 38' 29.53"	E127° 30' 49.19"	Riverine Wetland
12	Chilgokgyo	8,000	N35° 43' 45.79"	E127° 34' 51.13"	Riverine Wetland
13	Bangajae	4,500	N35° 44' 11.10"	E127° 34' 26.50"	Riverine Wetland
14	Hwaeumgyo	140,000	N35° 41' 50.90"	E127° 34' 40.09"	Riverine Wetland
15	Byucknamjae	90,000	N35° 41' 02.60"	E127° 35' 04.62"	Lacustrine Wetland
16	Odongjae (Deagok)	420,000	N35° 41' 47.20"	E127° 37' 30.97"	Lacustrine Wetland

곳의 내륙습지가 분포하고 있으며, 각 습지의 위치 및 면적은 Fig. 1, Table 2와 같다.

2.2 연구방법론

토양침식에 따른 내륙습지 훼손 가능성을 평가하기 위해서 본 연구에서는 수치해석모형을 이용하였다. 수치해석모형은 강우-유출-유사유출에 대한 모의가 가능하며, 각 격자별 계산이 가능한 분포형 모형 중 CSEM (Cell based Soil Erosion Model)을 이용하였다. 천천 유역을 대상으로 DEM, 토지피복도를 활용하여 CSEM 모형의 입력자료를 구축하였으며, 두 개의 태풍 사상(2002년 루사, 2003년 매미)을 이용하여 모형의 검·보정을 수행하였다. 모형의 검·보정은 천천 유역의 최종 유출구인 장수군(연화교) 수위 관측소에서 측정된 자료를 이용해서 산정된 수위-유량 관계곡선과 유량-유사량 관계곡선을 이용하였다(Table 3).

본 연구에서는 검·보정된 모형에 2002년과 2003년에 한반도에 상륙하여 큰 피해를 준 태풍사상을 적용하였다. 수치해석 모의결과를 기반으로 내륙습지가 위치한 구역의 유량 및 유사의 유입/유출 관계를 분석하였다. 본 연구에서 적용하고 있는 모형은 유역에서 발생하는 토양침식량을 산정할 수 있는 장점을 가지고 있지만 하도내에 일어나는 유사이송과 퇴적과정을 고려할 수 없어, 습지에 대한 평가는 소택지와 호수습지를 대상으로 분석이 이루어졌다. 국내의 경우 유역에서 나타나는 토양침식은 강우사상에 의해 시공간적으로 침식과 퇴적 발생하는데, 특히 습지상류에서 침식이 발생할 경우 하류에 위치하고 있는 습지로 토사유입이 활발하여 육화될 가능성이 있다고 가정하고 분석을 수행하였다. Fig. 2는 연구 과정을 순차적으로 정리한 그림으로 모델링 영역을 구분하여 표기하였다.

Table 3. Rating curve formula (K-water, 2002; 2003)

Classification	Formula	Reference
Rating curve	$Q = 24.954 \times (H - 2.281)^{2.448}$	Rusa (2002)
	$Q = 53.522 \times (H - 2.346)^{2.219}$	Maemi (2003)
Sediment rating curve	$Q_{sed} = 0.9 \times 10 - 5 \times Q^{1.700}$	Rusa (2002)
	$Q_{sed} = 0.50 \times 10 - 6 \times Q^{1.932}$	Maemi (2003)

3. 수치해석모형의 개요 및 검·보정

3.1 수치해석모형의 개요

본 연구에서 이용하는 수치해석모형인 CSEM은 지점별 강우자료를 공간분포의 입력자료로 자동 생성을 위한 프로그램, 수치표고자료를 이용하여 배수계통도를 작성하고 토지피복도 등을 입력자료로 구축하는 프로그램 그리고 자료의 입출력 구조의 정의, 모델링 수행, 모의결과 재현성 평가 등의 표토침식해석 알고리즘을 포함된 프로그램으로 구성되어 있다(Yu *et al.*, 2017). CSEM모형에서 강우-유출-침식 해석을 위해 다음과 같은 물리적 과정을 고려하고 있다. 강우발생시 강우입자가 가지는가지는 강우운동에너지에 의해 토양입자가 분리되며 강우는 지표로 침투한다. 강우에 의해 토양공극이 모두 채워지면 지표유출이 발생하게 되며 이때 지표유출은 강우에 의해 분리된 토양입자를 이송시키거나 지표침식을 가속화시킨다. 지표유출이 가지는 격자별 산정되는 유사이송능력이 유사량보다 크면 침식이 발생하고 유사량보다 작으면

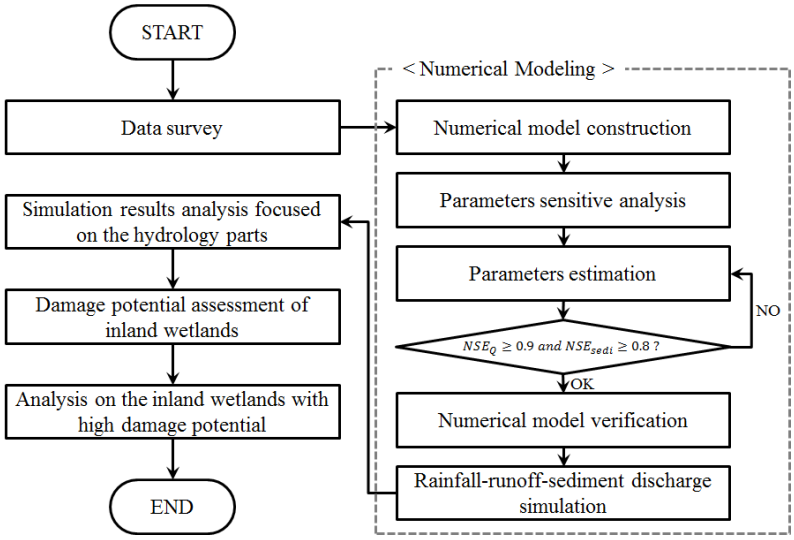


Fig. 2. The flow chart of this study

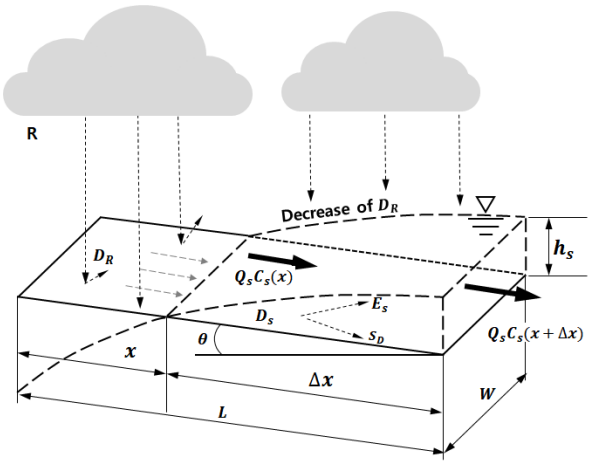


Fig. 3. Process of soil erosion and soil particle transport (Kim, 2019)

퇴적된다. Fig. 3과 같은 과정을 유역의 토양침식량을 시간과 공간의 변화로 나타내면 Eq. (1)과 같은 형태의 연속방정식으로 나타낼 수 있다(Bennett, 1974; Kirkby, 1980).

$$\frac{\partial(h_s C_s)}{\partial t}+\frac{\partial(Q_s C_s)}{\partial x}-E(x,t)=0 \tag{1}$$

여기서, h_s는 지표수의 수심(m)이고 Q_s는 지표 유출량(m^3/s), C_s는 유사농도(kg/m^3)이고 E는 순 침식량(Net erosion, kg/m^2/hr)으로 지표흐름에 의한 토양분리량(D_s)과 강우에 의한 토양분리량(D_R)의 합으로 계산할 수 있다. t와 x는 각각 시간과 공간을 나타낸다.

강우에 의한 토양분리량은 호우사상이 강우운동에너지에 의해 결정되며, 토양침식에 기여하는 강우운동에너지는 강우강도에 비례한다. 그러나 지표수심이 증가할수록 지표면에 전달되는 강우운동에너지가 감소하게 되며 이러한 관계를 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다(Morgan *et al.*, 1998).

$$D_R=kKE_R^{-bh_s} \tag{2}$$

여기서, k는 토양의 특성에 의해 결정되는 토양분리력으로 0.8~6.0 g/J의 값을 가지며(Morgan *et al.*, 1998), KE_R (rainfall kinetic energy)는 단위면적당 강우운동에너지(Jm^{-2}mm^{-1}), b는 토양특성에 따라 결정되는 무차원 상수로 사양토는 0.92, 점토는 1.61~2.72, 실트질은 3.11로 평균값인 2.0을 적용하였다(Torri *et al.*, 1987).

임의의 격자에서 지표유출에 의한 토양분리량은 유사이송능력(T_c, Sediment transport capacity)에 따라 결정된다. 흐름의 유사이송능력이 해당 격자의 유사농도(C_i)보다 큰 값을 가질 때 해당영역에서 침식이 발생하고 유사이송능력이 작은 값을 가질 때 지표유출의 유사이송능력만큼만 유사가 하류로 이송(E_s)되고 나머지 유사들은 해당영역에 퇴적(S_D, Soil deposition)되게 된다. 이를 수식으로 표현하면 Eq. (3)과 같다.

$$D_S\begin{cases}D_S=(T_c-C_i), & T_c>C_i\\ D_S=0 \text{ and } S_D, & T_c\le C_i\end{cases} \tag{3}$$

유사입자의 이동은 지표면과 유사입자 사이에 존재하는 마찰력보다 지표흐름이 가지는 힘이 클 때 발생한다. 이러한 관계를 고려하여 지표유출의 하상전단응력(τ_0)과 유사입자의 한계전단응력(τ_{cr})의 관계로 유사이송능력을 다음과 같은 식을 나타낼 수 있다(Eq. (4)).

$$T_c=\Phi(\tau_0-\tau_{cr}) \tag{4}$$

여기서, Φ은 세류에 의한 토양분리계수로 토지피복상태에 따라 상이한 값을 가지게 되며, 0.0009(목초지)~0.344(절개지)의 값을 가진다(Li *et al.*, 2015).

토양침식을 추정하는 대부분의 물리모형에서 산지나 경사가 급한 지역을 대상으로 개발된 유사량산정공식이 없어, 하천을 대상으로 개발된 유사량산정공식을 적용하고 있다. 본 연구에서는 해당 격자의 유사발생량을 산정하기 위하여 지표경사, 지표수심 등을 반영할 수 있는 Engelund and Hansen (1967)이 제시한 공식을 이용하여 토양침식량을 산정하고자 하였다. Engelung and Hansen (1967)이 제시한 유사량 산정공식은 마찰계수와 무차원 유사량의 관계를 이용하였으며 Eq. (5)와 같다.

$$q_t=0.05\gamma_s\bar{u}^2\frac{(h_sS)^{3/2}}{d_{50}\sqrt{g}(G-1)^2} \tag{5}$$

여기서 q_t는 단위폭 당 유사량(kg/s·m), γ_s는 유사의 단위중량(kg/m^3), G는 사립자의 비중(ρ_s/ρ_w), $\bar{u}$는 평균유속(m/s), h_s는 수심(m), S는 경사, d_{50}는 중앙입경(mm), g는 중력가속도(9.8 m/s^2)이다.

임의의 격자에서의 유사농도는 지표유출량(Q_s)과 하폭(W)과 유사량의 관계를 이용하여 산정할 수 있다(Eq. (6)).

$$C_i = \frac{q_t \times W}{Q_s \times 1000} \times 10^6 \tag{6}$$

3.2 모형의 검·보정

수문모형의 매개변수는 물리적 매개변수와 과정매개변수로 구분되며(Sorooshian and Gupta, 1995), 물리적 매개변수는 지형 및 토양도를 활용하여 값을 산정할 수 있지만 과정 매개변수의 경우 실측보다는 보정을 통해 그 값을 결정한다. 최근 관측장비의 발달로 지형이나 토지피복과 관련된 고해상도 디지털 자료를 제공하고 있지만 아직까지 개발된 관측기술은 공간에 대한 이질성을 완벽하게 고려할 수 없어 수문모형의 매개변수는 보정을 통해 값을 산정하게 된다(Lee *et al.*, 2010). 모형의 주요매개변수의 범위와 초기값은 Table 4와 같다. Table 4에서 Kinetic energy의 경우 고정값을 사용하고 있는데 자연현상에서 강우사상은 시변성을 가지고 있기 때문에 고정값을 사용하는 것은 한계가 있는 것으로 판단하여 시단위 강우에너지를 산정하기 위해 Kim *et al.* (2018)이 제안한 공식을 적용하였다. 본 연구에서는 유사농도를 산정하기 위해 전단응력과 한계전단응력을 기반으로 개발된 Engelund and Hansen (1967)의 식을 적용하였다.

Table 4. Selected parameters and initial value

Description	Range of value	Initial value
Hydraulic conductivity (m/s)	0.001～0.1	0.006
Effective soil depth (mm)	1000	1000
Unsaturated depth ratio	0～1	0.142
Saturated depth ratio	0～1	0.051
Permeability (%)	0～100	8.001
Particle diameter (mm)	0.1～50	19.990
Soil detachability (g/J)	0.0001～1	0.003
Erosion coefficient	0.01～1.0	0.086
Kinetic energy ($J/m^2/mm^1$)	1～30	0.051
Critical Stream Power (m/s)	0.002～1.0	0.300

본 연구의 민감도 분석은 유사유출량에 사용되는 매개변수에 대하여 일정 범위내에서 값을 변화시켜 유사유출량의 변화를 검토하였다. 민감도 분석은 2002년 태풍루사의 강우사상을 적용하였다. 매개변수는 Table 4의 초기값을 기준으로 0.1, 0.5, 1.5, 2.0배 변화시켰으며 분석결과 유사입자 직경, 강우의 토양분리력, 지표흐름이 가지는 침식계수, 한계전단응력 순으로 첨두유사유출량의 변동성이 큰 것으로 분석되었다(Fig. 4).

본 연구에서는 유사유출과 관련된 매개변수 보정에 있어 민감도가 높은 두 가지 변수 유사입자의 직경과 강우의 토양분리력에 대하여 검·보정을 수행하였다. 한계전단응력은 유사입자에 작용하는 동수역학적인 힘과 입자 내부에 저항하는 힘이 평형상태에 있을 때의 응력으로 유사입자 크기에 따라 그 값이 결정되기 때문에 유사입자의 크기에 따라 그 값을 설정해 주었다. 침식계수의 이전 연구에서 제안값(초기값)을 적용하였다.

관측값과 모의값의 정밀도와 정확성 검증을 위하여 RMSE (Root Mean Square Error, Eq. (7))와 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency, Eq. (8))를 산정하여 그 결과를 비교하였다. RMSE는 잔차의 제곱근을 산술평균한 값으로 표준편차를 일반화시켜 관측값과 모의치간의 차이를 평가하는 척도이다. NSE는 관측값과 모의치 간의 정확성을 검증하는데 주로 사용되는 계수로서 1.0이 가장 이상적인 결과를 의미한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{N}} \tag{7}$$

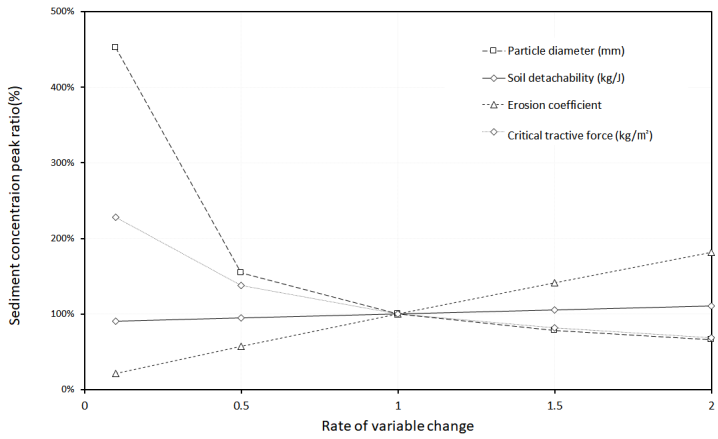


Fig. 4. Analysis of influencing factors of sediment discharge

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \overline{O})^2} \tag{8}$$

여기서, N은 자료수, O와 P는 관측값과 모의값, $\overline{O}$는 관측값의 평균을 의미한다.

모형의 검·보정을 위해서 2002년과 2003년에 많은 양의 강우량이 발생하였던 태풍 루사와 매미 호우사상을 적용하였다. 2002년에 발생한 태풍 루사는 2002년 8월 30일부터 9월 1일까지 2일 동안 180.0 mm 이상의 강우량이 관측되었다. 태풍매미의 경우 2003년 9월 11일부터 9월 13일까지 2일 동안 130.0 mm 이상의 강우량이 관측되었다.

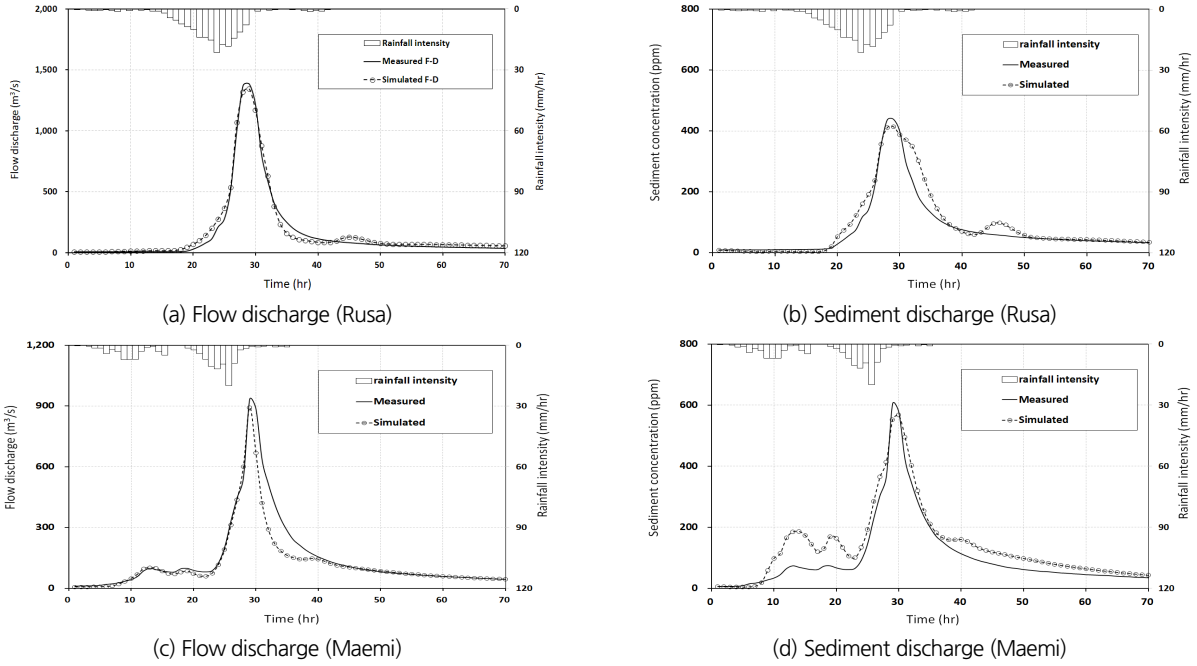
태풍 루사 호우사상에 대하여 모의한 결과, 연화교 관측소에서 관측된 첨두유출량은 1,384 m^3/s, 모의첨두유출량은 1,344 m^3/s로 모형이 4%의 과소 추정되었고 NSE는 0.99, RMSE는 35.41 m^3/s로 모형의 결과가 관측값을 잘 모의하는 것으로 분석되었다. 첨두유사농도의 관측치는 439.1 ppm이었으며, 모의 첨두유사유출농도는 414.2 ppm으로 모의값이 24.69 ppm 과소추정되었다. 그러나 NSE와 RMSE는 각각 0.95와 28.34 ppm으로 산정되어 관측치를 모형의 결과가 잘 모의하는 것으로 판단된다. 태풍 매미사상을 대상으로 매개변수가 적절

Table 5. Model validation results

Rainfall event	Peak flow discharge (m^3/s)		Peak sediment concentration (ppm)		Flow discharge		Sediment concentration	
	Measured	Simulated	Measured	Simulated	NSE	RMSE (m^3/s)	NSE	RMSE (ppm)
Rusa	1,384.6	1,344.1	439.1	435.2	0.99	35.41	0.95	28.34
Maemi	931.9	891.7	603.8	567.4	0.90	51.87	0.86	40.87

Table 6. Parameters estimation result

Parameter	Estimated value	Parameter	Estimated value
Hydraulic conductivity (m/s)	0.012	Particle diameter (mm)	1.05
Effective soil depth (mm)	900	Soil detachability (kg/J)	0.5
Unsaturated depth ratio	0.138	Erosion coefficient	0.086
Saturated depth ratio	0.051	Kinetic energy (J/m^2)	Equation (Kim *et al.*, 2018)
Permeability (%)	8.001	Critical Stream Power (m/s)	0.04



(a) Flow discharge (Rusa)

(b) Sediment discharge (Rusa)

(c) Flow discharge (Maemi)

(d) Sediment discharge (Maemi)

Fig. 5. Model validation results using rainfall events of Rusa and Maemi

하게 추정되었는지 검토하였다. 그 결과 첨두유량은 관측치가 931.9 m^3/s, 모의치가 891.7 m^3/s, 첨두유사농도는 관측치가 603.8 ppm, 모의치가 567.4 ppm으로 나타났다. NSE와 RMSE는 유량에서는 0.9와 51.87 m^3/s, 유사발생량에서는 0.86, 40.87 ppm으로 계산되었다(Table 5). 모의결과의 일부 구간에서 차이를 보이지만 첨두치를 잘 모의하고 있고 NSE 및 RMSE가 적절하게 산정되어 모의에 적절한 매개변수가 추정되었다고 판단하였다(Table 6). Fig. 5는 각각의 모의결과를 유량과 유사량으로 구분하여 도식화한 것이다.

4. 결과 및 분석

4.1 모의 결과

유역내 위치하고 있는 습지지역은 지형 및 주변환경의 변화에 의해 크기가 축소되거나 확장될 수 있고 때로는 습지로서 기능을 상실하기도 한다. 특히 강우에 의해 발생하는 토양침식과 퇴적은 내륙습지의 환경변화에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 토양침식과 퇴적은 지형의 형태, 토양심도, 토지이용 상태 그리고 기후환경에 따라 다양한 발생패턴을 가지게 된다. 천천유역의 대부분은 산림(77%), 논(9%), 밭(7%), 시가화지역(5%) 순으로 토지가 이용되고 있다. 경사도와 토지이용현황 관계에서 산림의 경우 지형경사가 5～20°인 영역이 가장 많이 분포하고 있으며, 시가화지역은 5°이하, 논은 지형경사가 0～15°에 형성되어 있지만 경사도가 5°이하 인 영역이 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다. 밭의 경우 지형경사가 5～10°에 가장 많이 형성되어 있었으며 습지는 지형경사가 0～10°에 형성되어 있다(Fig. 6).

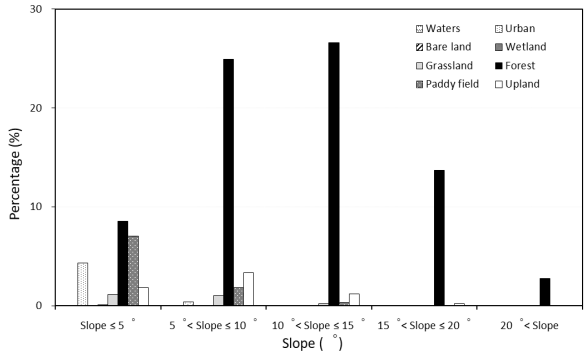


Fig. 6. Landuse-slope relation

모형에서 얻어진 토양침식 및 퇴적결과를 지형학적 인자인 경사도와 비교한 결과, 태풍루사의 경우 침식은 경사가 0～20° 영역에서 발생하였으며 퇴적은 경사가 10° 미만의 영역에서 발생하였다(Fig. 7). 태풍매미의 경우에도 태풍루사와 비슷한 침식 및 퇴적 발생 결과를 나타내고 있다(Fig. 8).

습지의 훼손가능성을 평가하기 위하여 세 개의 호우사상으로 인하여 유역에서 발생한 토양침식 및 퇴적지역과 유역내 위치하고 있는 습지를 비교하였다(Figs. 9 and 10). 분석된 결과에서 (-)값은 해당 격자에 유사가 퇴적되었음을 의미하며 (+)값은 해당격자에서 표토침식이 발생하였음을 나타낸다.

4.2 습지훼손 가능성 평가

본 연구에서는 천천유역를 대상으로 토양침식과 퇴적발생에 대한 공간분포 분석을 위해 물리적 기반 모형을 적용하여 습지로 유입되는 토사량을 산정하였다. 2002년과 2003년에 발생한 태풍호우사상으로 침식되어 유입되는 토사량은 Table 7과 같다. 천천유역의 호수형습지인 와룡, 벽남제, 오동제의 저류용량은 1.92백만 m^3, 0.98백만 m^3, 7.96백만 m^3이다. 호우사상에 의한 토사유입량을 살펴보면 와룡습지의 경우 2002년과 2003년은 23,942 m^3, 9,711 m^3로 와룡습지 저수요량의 1.25%, 0.53%에 해당하는 토사가 유입되는 것으로 분석되었다. 벽남제습지와 오동제습지 경우 2002년과 2003년의 유입되는 토사량이 22,548 m^3(2.29%), 18,800 m^3(1.19%),

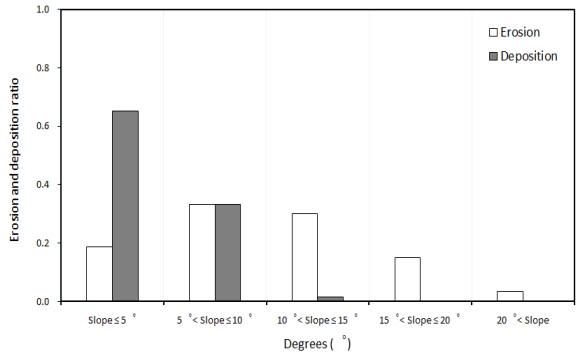


Fig. 7. Ratio of erosion and deposition from Rusa

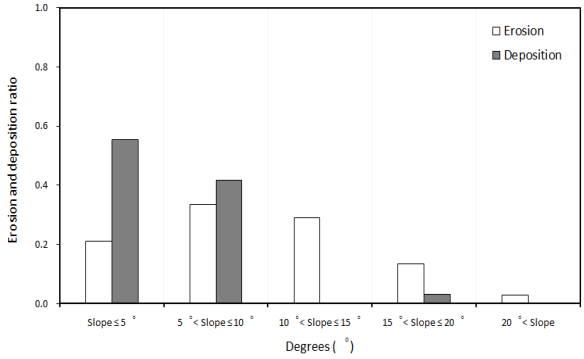


Fig. 8. Ratio of erosion and deposition from Maemi

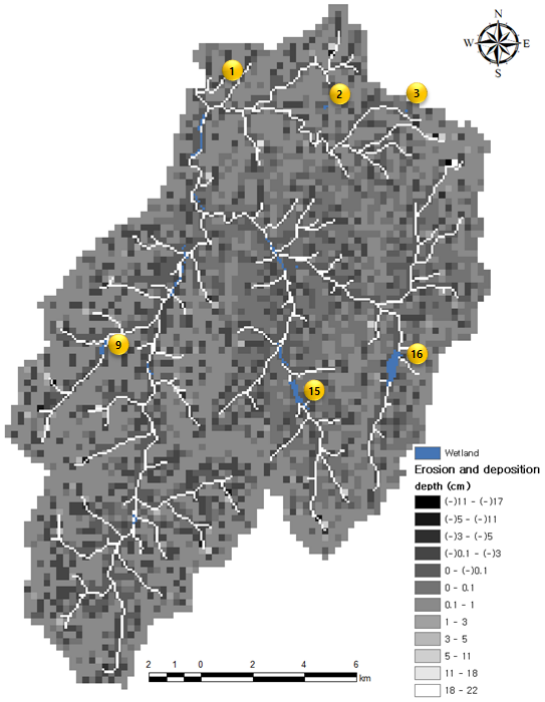


Fig. 9. Result of Rusa rainfall event

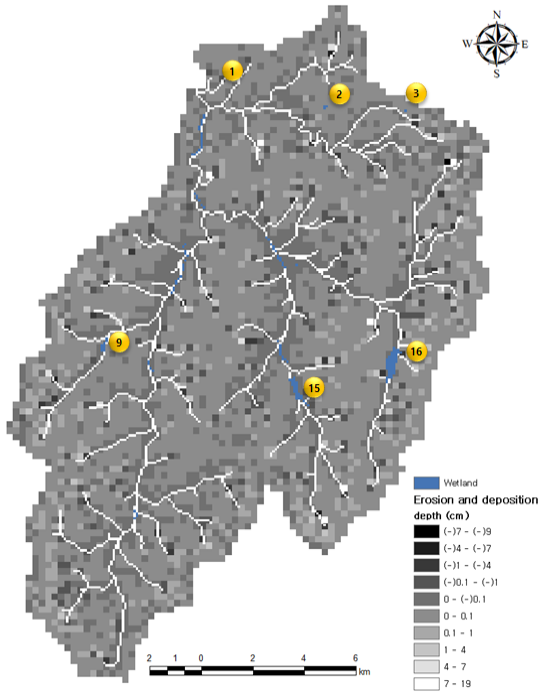


Fig. 10. Result of Maemi rainfall event

2,316 m^3(0.03%), 2,887 m^3(0.04%)으로 분석되었다.

천천유역내 소택지의 경우 용량에 대한 정보가 없어 국토환경정보센터에서 면적이 8 ha, 수심이 2 m이하인 경우를 소택지로 구분하고 있는 기준을 적용하였다. 본 연구에서는 소택지의 수심을 1 m로 가정하여 산정된 소택지의 저수용량은 신흥(803 m^3), 월현(20,187 m^3), 문성(5,655 m^3)이다. 소택지의 2002년과 2003년의 단기호우사상으로 발생된 토사유입량은 신흥습지의 경우 0.424 m^3(0.05%), 0.145 m^3(0.02%), 월현습지는 6.91 m^3(0.02%), 0.763 m^3(0.003%), 문성습지는 2.311 m^3(0.04%), 0.783 m^3(0.01%)으로 분석되었다.

Table 7. Potential sediment load entering the wetland

No	Wetland name	Watershed area (km^2)	Storage capacity (m^3)	Sediment load (m^3)	
				Rusa	Maemi
1	Sinheung	0.02	803	1.12	0.39
2	Wolhyeon	0.42	20,187	18.31	2.02
3	Munseong	0.15	5,655	6.12	2.08
9	Waryong	13.50	1,920,000	23,942	9,711
15	Byucknamjae	21.67	980,000	22,548	18,800
16	Odongjae (Deagok)	13.17	7,960,000	2,316	2,887

호수습지와 소택지 저수용량대비 유사유입량에서 벽남제, 와룡, 오동제, 신흥습지 순으로 나타났다. 벽남제습지의 경우 와룡과 오동제에 비해 작은 저수용량과 넓은 유역을 가지고 있다. 또한 유역내에 농경지로 사용되는 토지가 많아 상류에서 유입되는 토사량이 높아 습지훼손가능성이 높은 것으로 나타났다. 소택지의 경우 경사가 있는 산지에 위치하고 있어 유역면적이 작아 침식되어 유입되는 토사량이 적은 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구는 물리적 기반의 표토침식 예측 모형을 적용하여 천천유역내 호수형습지와 소택형습지에 대한 훼손가능성에 대한 평가를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 천천유역에서 단기호우사상으로 발생한 침식의 경우 지형경사가 5～15°인 영역에서 발달하였고, 퇴적의 경우 0～10°에서 발달하였으며 하천주변에 위치하고 있는 경사가 낮은 지대에서 퇴적이 나타나는 결과를 얻었다. 경사가 낮은 지역은 지표유출이 토사를 하류로 이송시킬수 있는 유사이송능력보다 상류격자에서 유입되는 토사량이 많은 경우 하류지역에서 퇴적발달하는 것으로 나타났다.
2) 천천유역을 대상으로 2002년과 2003년에 발생한 단기호

우사상을 적용하여 유역내 위치하고 있는 호수습지와 소택지를 대상으로 습지훼손 가능성에 대한 평가를 수행하였다. 모형의 결과에서 두 개의 강우사상으로 저수용량의 3.48%(41,348 m^3)에 해당하는 토사유입이 우려되는 벽남제습지가 훼손가능성이 높을 것으로 분석되었다. 벽남제습지는 다른 습지에 비해 넓은 유역을 가지고 있고 다른 습지에 비해 상류지역에 논과 밭으로 토지가 이용되는 면적이 많아 강우에 의해 다량의 토사가 침식되어 유입될 가능성이 높은 것으로 나타났다.

3) 천천유역내 소택지의 경우 대부분 산지영역에 위치하고 소택지를 유출구로 유역면적이 크지 않아 2002년과 2003년의 호우사상으로 유입되는 토사량은 저수용량의 0.01～0.05%에 해당하는 것으로 분석되었다. 따라서 소택지의 경우 상류유역에서 토양이 침식되어 유입되는 토사의 퇴적으로 습지가 훼손될 가능성이 낮을 것으로 판단된다.

본 연구는 단기호우사상으로부터 나타나는 토양침식과 퇴적으로 호수형습지와 소택지에 대한 훼손 가능성 평가를 수행하였다. 비교적 넓은 유역을 가지는 호수형습지가 소택지에 비해 토양침식에 의한 토사로 훼손가능성이 높은 것으로 분석되었다. 그러나 결과가 단기호우사상에 의한 침식과 퇴적만을 반영하고 있어 장기간에 걸쳐 내리는 연속적인 강수자료를 적용하여 장기호우사상에 의한 습지훼손과 습지를 보전하고 관리하기 위한 분석이 추가적으로 이루질 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “표토보전관리기술개발사업; 2019002830001”으로 지원받은 과제임.

References

Bennett, J.P. (1974). “Concepts of mathematical modelling of sediment yield.” *Water Resources Research*, Vol. 10, pp. 485-492.

Cha, E.J., Hamm, S.Y., Kim, H.J., Lee, J.H., and Ok, S.I. (2010). “Physical and chemical properties of soil in Jang-San wetland, Busan metropolitan city.” *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 19, No. 11, pp. 1363-1374.

Davidson, N.C. (2014). “How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global 295 wetland area.” *Marine and Freshwater Research*, Vol. 65, No. 10, pp. 934-941.

Engelund, F.A., and Hansen, E. (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial Streams*. Technical University of Denmark 0stervoldgade 10, Copenhagen K, Denmark.

Gulbin, S., Kirilenko, A.P., Kharel, G., and Zhang, X. (2019). “Wetland loss impact on long term flood risk in a closed watershed.” *Environmental Science and Policy*, Vol. 94, pp. 112-122.

Hu, S., Niu, Z., Chen, Y., Li, L., and Zhang, H. (2017). “Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status.” *Science of the Total Environment*, Vol. 586, pp. 319-327.

Janse, J.H., van Dam, A.A., Hes, E.M., de Klein, J.J., Finlayson, C. M., Janseen, A.B., van Wijk, D., Mooij, W.M., and Verhoeven, J.T. (2019). “Towards a global model for wetlands ecosystem services.” *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 36, pp. 11-19.

Kim, H. (2001). “Introduction of hydrology/hydraulic analysis for wetlands design.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 5, pp. 23-30.

Kim, S.W. (2019). E*stimation of topsoil erosion considering physical characteristics of rainfall intensity and overland flow*. Ph. D. dissertation, Chungnam National University, p. 80.

Kim, S.W., Jeong, A.C., Lee, G.H., and Jung, K.S. (2018). “Estimation of the kinetic energy of raindrops for hourly rainfall considering the rainfall particle distribution.” *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 19, No. 12, pp. 15-23.

Kirkby, M.J. (1980). “Modelling water erosion processes.” *Soil erosion*, Edited by Kirkby, M.J., and Morgan, R.P.C., Wiley, Chichester, U.K., pp. 183-216.

K-water (2002). *Hydrological investigation report of Yongdam dam basin.*

K-water (2003). *Hydrological investigation report of Yongdam dam basin.*

Lee, G.H., Yu, W.S., Jang, C.L., and Jung, K.S. (2010). “Analysis on spatiotemporal variability of erosion and deposition using a distributed hydrologic model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 3, pp. 221-233.

Lee, S., Yeo, I.Y., Lang, M.W., Sadeghi, A.M., McCarty, G.W., Moglen, G.E., and Evenson, G.R. (2018). “Assessing the cumulative impacts of geographically isolated wetlands on watershed hydrology using the SWAT model coupled with improved wetland modules.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 223, pp. 37-48.

Li, Z.W., Zhang, G.H., Geng, R., and Wang, H. (2015). “Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China.” *Biosystems Engineering*, Vol. 129, pp. 248-257.

Ministry of Environment (ME) (2019). *Treasure house of biodiversity, wetlands are disappearing*.

Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J. W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., and Styczen, M.E. (1998). “The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments.” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 23, pp. 527-544.

National Wetlands Center (NWC) (2017). *Nationwide inland wetlands monitoring I-General*, *Gangwon4, Gyeongsang3*.

Rho, P. (2007). "Spatio-temporal dynamics of esturine wetlands related to watershed characteristics in the Han river estuary." *Journal of the Korean Geographical society*, Vol. 42, No. 3, pp. 344-354.

Rojas, C., Munizaga, J., Rojas, O., Martínez, C., and Pino, J. (2019). "Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: Lessons for sustainable land use planning." *Land Use Policy*, Vol. 80, pp. 47-56.

Sorooshian, S., and Gupta, V. K. (1995). "Model calibration." *Computer Models of Watershed Hydrology*, Vol. 1, pp. 23-68.

Torri, D., Sfalanga, M., and Del Sette, M. (1987). "Splash detachment: Runoff depth and soil cohesion." *Catena*, Vol. 14, pp. 149-155.

Yu, W., Park, J., Yang, J., Lim, K.J., Kim, S.C., Park, Y.S., and Lee, G. (2017). "Development and application of a physics-based soil erosion model." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 22, No. 6, pp. 66-73.