

## 표토유실 보전을 통한 온실가스배출 저감과 수자원 보전 기능의 산출 및 정책제안

오승민<sup>1</sup> · 김혁수<sup>1</sup> · 이상필<sup>1</sup> · 이종건<sup>1</sup> · 정석순<sup>1</sup> · 임경재<sup>2</sup> · 김성철<sup>3</sup>  
박윤식<sup>4</sup> · 이기하<sup>5</sup> · 황상일<sup>6</sup> · 양재의<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 바이오자원환경학과

<sup>2</sup>강원대학교 지역건설공학과

<sup>3</sup>충남대학교 생물환경화학학과

<sup>4</sup>공주대학교 생물산업공학부

<sup>5</sup>경북대학교 건설방재공학부

<sup>6</sup>한국환경정책·평가연구원

## Estimating of the Greenhouse Gas Mitigation and Function of Water Resources Conservation through Conservation of Surface Soils Erosion and Policy Suggestion

Seung-Min Oh<sup>1</sup> · Hyuck Soo Kim<sup>1</sup> · Sang-Pil Lee<sup>1</sup> · Jong Geon Lee<sup>1</sup> · Seok Soon Jeong<sup>1</sup>  
Kyung Jae Lim<sup>2</sup> · Sung-Chul Kim<sup>3</sup> · Youn Shik Park<sup>4</sup> · Giha Lee<sup>5</sup> · Sang-II Hwang<sup>6</sup> · Jae-E Yang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Biological Environment, Kangwon National University

<sup>2</sup>Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

<sup>3</sup>Department of Bio Environmental Chemistry, Chungnam National University

<sup>4</sup>Department of Rural Construction Engineering, Kongju National University

<sup>5</sup>Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

<sup>6</sup>Korea Environment Institute

### ABSTRACT

Soil erosion is often extreme in Korea due to high rainfall intensities and steep slopes, and climate change has also increased the risk of erosion. Despite its significance, erosion-induced soil organic carbon (SOC) emission and water resource loss are not well understood, along with the lack of an integrated surface soil erosion protection policy. Therefore, to design adequate protection policies, land users, scientists, engineers and decision makers need proper information about surface soil and watershed properties related to greenhouse gas emission potential and water conservation capability, respectively. Assuming the total soil erosion of 346 Tg yr<sup>-1</sup>, soil organic matter (SOM) content of 2% (58% of SOM is SOC), and mineralization rate of 20% of the displaced carbon, erosion-induced carbon emission could reach 800 Gg C yr<sup>-1</sup>. Also the available water capacity of the soil was estimated to be 15.8 billion tons, which was 14 times higher than the yearly water supply demand in Seoul, Korea. Therefore, in order to prevent of soil erosion, this study proposes a three-stage plan for surface soil erosion prevention: 1) classification of soil erosion risk and scoring of surface soil quality, 2) selection of priority areas for conservation and best management practices (BMP), and 3) application of BMP and post management.

**Key words :** Surface soil, Erosion, Climate change, Carbon budget, Water resource

\*Corresponding author : yangjay@kangwon.ac.kr

Received : 2017. 11. 20 Reviewed : 2017. 12. 1 Accepted : 2017. 12. 18

Discussion until : 2018. 2. 28

## 1. 서 론

과거 농업사회에서 토양의 주요 기능은 주로 식량생산을 위한 배지 역할로 인식되었지만, 현대사회에서 토양은 1) 바이오매스 생산, 2) 양분, 물질, 물의 저장, 여과, 변환, 3) 생물 다양성 보전, 4) 인간 및 인간활동을 위한 기반 제공 5) 원자재 공급, 6) 탄소 저장소, 7) 지질, 고고학적 유산 보존 기능을 지닌 인류 생존에 필수적인 생명자원으로 인식되고 있다(European Commission, 2006; Bouma, 2014). 그리고 이러한 토양의 기능은 현재 우리 사회가 직면하고 있는 기후변화, 식량 안보, 물 안보, 에너지 안보, 생물다양성 보호 등과 같은 전 지구적 환경 문제와 불가분의 관계를 맺고 있다(Koch et al., 2013; McBratney et al., 2014).

토양 표층(30 cm)으로 표현되는 표토(surface soil)는 유기물, 미생물이 풍부하여 식물의 양분과 수분의 공급원 역할을 수행하기 때문에 앞서 설명한 토양의 기능에 있어 가장 중요한 부분을 차지한다(MOE, 2015; 표토정보 포털 시스템, <http://pyoto.araon.org/>). 하지만 유엔 환경 계획(UNEP)에서는 매년 전 세계에서 50,000 km<sup>2</sup>의 표토가 강우 또는 바람에 의해 유실된다고 보고하고 있으며(UNEP, 2007), 이를 무게로 환산하면 약 65억톤의 표토에 해당된다.

우리나라는 경사지가 많고, 매년 여름 장마 전선과 온대 저기압으로 인해 집중 호우가 발생하여, 물에 의한 표토 유실량이 많다. 실제로 OECD 국가의 물에 의한 평균 토양 유실량은 11 ton/ha/yr(OECD, 2008)인 반면 우리나라는 이보다 약 3배 높은 32 ton/ha/yr으로 조사되었다.

최근에는 이상기후로 인해 집중호우 강도가 더욱 강해져, 산사태와 같은 대형사고가 지속적으로 발생하고 있다. 산림청 제공 산사태 피해현황 자료에 따르면 2011년과 2012년의 산사태 피해면적은 각각 824 ha와 491 ha였으며, 산사태 지역 복구를 위해 각각 1,476억과 972억이 투입되었다.

실제 눈에 보이는 산사태 피해 외에 산사태로 표토의 탄소가 유실된 지역은 원래 탄소함량의 70-80% 만 복구된다는 연구 결과(De Rose, 2013; Minasny et al., 2017)와 표토 유실 과정동안 토양에 저장되어 있던 다량의 탄소가 대기로 방출되어 기후변화에 악영향을 미칠 수 있다는 연구 결과(Lal, 2003, 2005)를 볼 때 표토 유실은 기후변화 피해를 가속시킬 수 있다. 이 뿐만 아니라 표토 유실은 단순히 표토자원의 손실을 넘어 표토가 함유하고 있는 수자원의 손실과 탁수발생 및 부영양화에 따른 2차 환경문제를 유발하므로 결국 산사태 복구에 투입된 비용

이상의 국가적 손해가 발생하게 된다.

따라서 본 연구에서는, 기후변화 경감 및 물 안보의 확보 차원에서 고찰할 때, 표토의 ‘탄소 저장’과 ‘유효 수분(available water) 자원 함양’ 기능을 평가하고, 이러한 표토의 서비스 기능이 표토 유실에 의해 손실되는 정도와 표토 유실을 예방하기 위한 대책 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 표토의 온실가스 저감

### 2.1. 표토와 탄소

토양 기능 중 ‘탄소 저장’ 측면에서 표토의 역할은 매우 중요한데, 그 이유는 전세계가 직면하고 있는 기후변화 문제와 연계하면 쉽게 찾을 수 있다. 2015년 11월 파리에서 개최된 21차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP21)에서는 기후변화 문제 해결을 위해 ‘4 per mille Soils for Food Security and Climate’ 의제를 출범시켰다. 이 내용은 화석연료 사용으로 연간 8.9 Gt의 탄소가 배출되는데, 이 배출량은 토양 2 m 깊이 내에 저장되어 있는 탄소량(2400 Gt)의 4‰(0.4%)에 해당하므로 매년 토양 보전을 통해 탄소 저장량을 4‰ 증가시키면 화석연료에 의한 탄소 배출량을 상쇄시킬 수 있다는 것이다(Minasny et al., 2017).

전세계 토양 2 m 깊이에 저장된 탄소량(2400 Gt) 중 30%(700 Gt)는 표토층(30 cm)에 존재하는 것으로 알려졌으며(FAO et al. 2009), 우리나라는 1 m 깊이에 존재하는 토양 탄소량(0.45 Gt) 중 절반이 표토층에 저장되어 있다(Minasny et al., 2017)(Fig. 1). 따라서 토양 단면의 최상부, 표토만 잘 관리해도 기후변화 완화에 많은 기여를 할 수 있기 때문에 표토는 지속적으로 보전되어야 할 환경자원이다.

기후변화에 의한 국지성 호우, 가뭄 그리고 겨울철 강설량 감소 등의 이상기후 발생으로 표토 유실량은 계속 증가하고 있다(Nearing et al., 2004). 이러한 표토 유실의 예방을 위해 우리나라는 2011년 토양환경보전법 제 6조의 2에 ‘표토의 침식 현황 조사’가 신설되었고, 2013년에는 환경부에서 표토보전 종합계획을 수립하여 전국의 표토 침식현황 조사와 유형별 표토 침식 방지 대책 마련, 한국에 특화된 표토 침식량 예측 모델 수립 등 관련 기술개발을 추진하였다. 그러나 세계적으로도 표토 유실에 따른 탄소의 이동 특성 및 배출량에 대한 연구는 아직 매우 미흡한 실정이다.

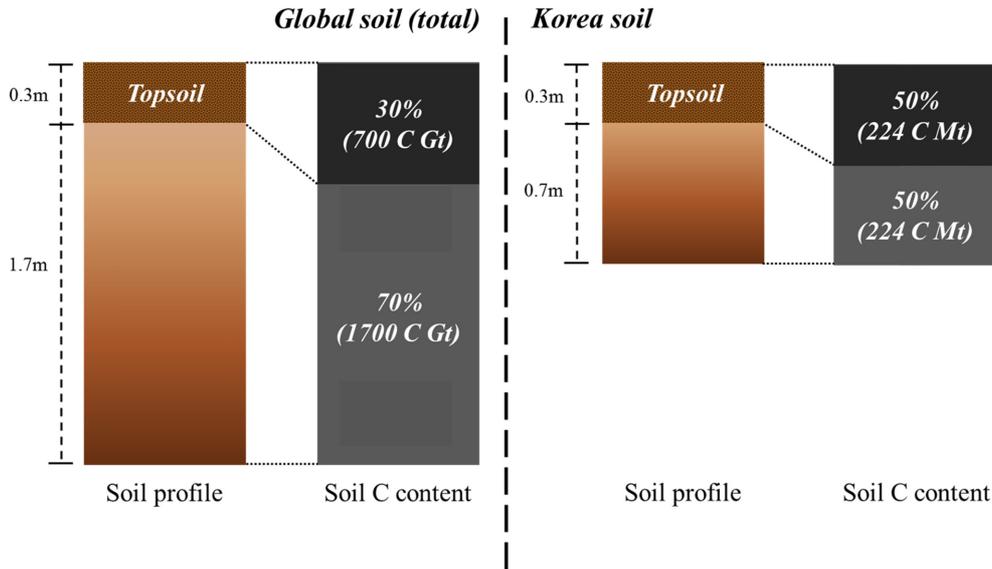


Fig. 1. Soil organic carbon in soil profile.

2.2. 표토 유실과 탄소

전 세계적으로 기후변화 완화 정책이 마련되어 추진되고 있음에도 불구하고, 인위적 온실가스 총배출량은 2000-2010년에 크게 증가했다. 2010 년 인위적 온실가스 배출량은 49 Gt CO<sub>2</sub>/yr 에 달했으며, 이 중 65%는 화석 연료의 연소와 산업 공정에서 발생하는 이산화탄소 배출량이 차지하였다(IPCC, 2014). 앞서 설명한 바와 같이 전 세계 표토는 대규모(700 Gt)의 탄소를 저장 또는 격리하고 있고, 이는 대기(780 Gt) 및 식물(550 Gt)에 존재하는 탄소량과 비교했을 때 비슷하거나 많은 양이므로(Hoyle et al., 2011) 기후 변화 완화에 중요한 위치에 있다. 하지만 표토는 물 또는 바람에 의해 침식되며, 이로 인해 표토 중 탄소도 같이 유실되고 일부는 대기로 배출된다.

표토가 유실되면 표토 유기탄소는 크게 3가지 작용을 받는다. 그 작용은 첫째, 유실 발생 지점(eroded site)에서 유기탄소의 분리(detachment) 및 교체(replacement), 둘째, 표토 퇴적지점(depositional site)에서 유기탄소의 심부 매몰, 셋째 유기탄소의 분리, 이동 시 토양 입단 파괴에 의한 무기화(mineralization) 증가이다(Van Oost et al., 2007; Novara et al., 2016). 그리고 이 작용과정을 바라보는 시각에 따라 학자들 간에 표토 유실이 탄소의 저장원(sink) 또는 배출원(source)인지에 대해 의견은 엇갈리고 있다.

우선 표토 유실을 탄소 저장원으로 생각하는 학자들의 이유는 1) 유실 발생 지점에서 표토가 유실된 후 탄소 함량이 낮은 심토가 다시 원래의 상태로 돌아오는데 많은

시간이 들기 때문에 탄소 배출량이 적고, 2) 표토 퇴적지점에 심부에 매몰된 표토의 탄소 무기화량도 적을 것이며, 3) 표토 이동 과정 중 무기화로 배출되는 탄소의 양은 많지 않을 것으로 판단하기 때문이다(Stallard, 1998; Van Oost et al., 2007).

물론 이와 같은 논리도 일리가 있지만, 표토의 유실 과정 중 무기화로 인한 탄소 배출량이 적다는 의견에 대해서는 최근 시험포를 제작하여 연구한 결과에서 정반대의 결과가 나왔다. Wang 등(2014)은 실내 환경에서 유실, 이동 및 퇴적지역을 구분한 시험포를 제작하여 토양 유실 실험을 진행하였는데, 토양 유실 발생 처리구의 이동지역에서 배출된 CO<sub>2</sub> 양은 토양 유실이 전혀 없었던 처리구의 이동지역에 비해 1.6배 높았고, 이는 전체 지점(유실, 이동, 퇴적지점) 중에서도 가장 높은 배출량이었다. 또한 Novara et al. (2016)은 현장조건에서 시험포를 조성하여 토양 유실에 의한 토양 탄소 변화를 연구했는데, 유실에 의한 토양 이동 과정에서 많은 양의 탄소가 무기화된다고 설명하였다. 이 외에도 국제기구 UN FAO를 비롯하여 많은 연구결과에서 토양 유실은 탄소 배출원으로 판단하고 있다(Jacinte and Lal, 2003; Lal, 2004; Huang et al., 2016; FAO, 2017).

결과적으로 Fig. 2와 같이 유실된 표토가 퇴적된 지점에서는 다량의 표토가 심부 매몰되어 탄소 배출량이 낮을 수 있으나, 유실이 발생한 지점에서는 1차 순생산량(net primary production)이 감소하고, 표토 이동 과정에서는 토양 입단 파괴에 의한 탄소의 무기화가 증가하기 때문에

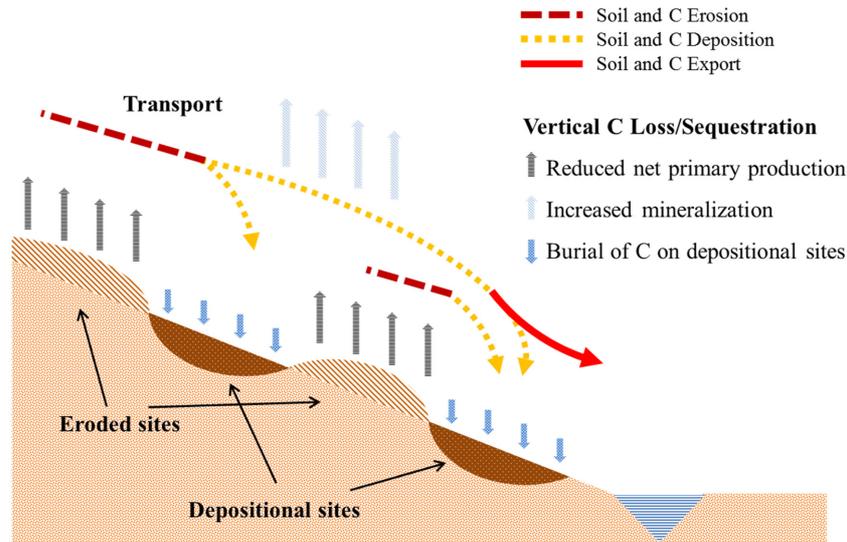


Fig. 2. Transport, redistribution and deposition of soil organic carbon on an eroded site.

Table 1. Estimation of the C emission derived from soil erosion

	Annual soil erosion (ton/ha/yr)	Land use (ha)	Total soil erosion (Tg/yr)	Total SOM <sup>†</sup> erosion (Tg/yr)	Total SOC <sup>††</sup> erosion (Tg/yr)	Mineralization of eroded SOC (Gg/yr)	Price (Won)
Factor				2% <sup>c</sup>	58% <sup>d</sup>	20% <sup>c</sup>	22,000 Won/ton <sup>e</sup>
Value	32 <sup>a</sup>	10,800,000 <sup>b</sup>	345.6	6.9	4.0	801.8	17,639,424,000

<sup>†</sup>Soil organic matter

<sup>††</sup>Soil organic carbon

<sup>a</sup>OECD (2008)

<sup>b</sup>Hong et al. (2010)

<sup>c</sup>Lal (2006)

<sup>d</sup>Navarro et al. (1993)

<sup>e</sup>Korea Exchange (<http://www.krx.co.kr/main/main.jsp>)

표토 유실에 의한 총 탄소 배출량은 증가하게 된다(Lal and Pimentel, 2008; Kirkels et al., 2014).

### 2.3. 표토 유실과 탄소 경제

표토와 같은 환경 공공재는 개개인의 인식 변화를 통해서도 보전될 수 있지만, 우선적으로 국가 정책을 통해 범국가적 차원에서 관리가 이뤄져야 한다. 물론 표토(토양)를 포함한 다양한 환경매체(물, 대기 등)는 모두 소중한 자원이기 때문에 관련 정책 입안자들이 환경자원의 정책 우선순위를 결정하는 일은 매우 중요한 사안이다. 그렇기 때문에 환경자원에 대한 경제적 평가는 정책의 객관성과 효율성을 높이기 위한 필수적 절차이며(KEI, 2007), 표토 유실과 기후변화 문제에 직면하고 있는 현 시점에서 합리적인 토양 보전 정책이 도출되기 위해 토양 유실에 의한 탄소 배출의 경제적 가치 평가가 수행되어야 한다.

우리나라는 ha 당 연간 표토 유실량이 32 ton(OECD,

2008)으로 이를 토지 이용 면적 및 여러 인자를 이용해 총 표토 탄소 배출량을 산정해보면 매년 약 800 Gg의 토양 탄소가 대기중으로 배출되는 것으로 추정된다(Table 1). 이는 전 세계 연간 총 토양 탄소 배출량 295-1,016 Tg C/yr과 비교했을 때 0.08-0.3%에 해당하는 양이다(Chappell et al., 2015). 그리고 현재(2017년 11월 9일 기준) 우리나라 한국거래소에서 거래되는 탄소의 가치(22,000원/ton)를 표토 유실에 의한 탄소 배출량에 적용해보면 우리나라는 매년 약 180억원 가치의 표토 탄소가 대기중으로 배출된다(Table 1). 물론 계산에 사용된 수치들은 일반적인 값들이기 때문에 본 결과는 많은 불확실성을 지니고 있다.

한 예로 본 탄소 배출량 산정과정에서 사용된 유기탄소의 무기화율(20%)은 가장 일반적으로 수치이지만(Wang et al., 2014), 선행 연구 결과마다 매우 넓은 범위를 보인다(Table 2). 따라서 보다 정확한 탄소 배출량 산정을

**Table 2.** Mineralization of eroded soil organic carbon during transport

Fraction mineralized (%)	Reference
Minor	Smith et al. (2001)
1.5	Wang et al. (2014)
20	Lal (1995)
50	Oskarsson et al. (2004)
56	Mora et al. (2007)
70	Beyer et al. (1993)
near 100	Schlesinger (1995)

위해 우리나라 표토와 환경을 고려한 유기탄소 무기화율 인자값이 도출되어야 할 것이다. 또한 우리나라 면적 중 대부분은 산림이 차지하고, 산림 토양의 유기물 함량은 일반 토양보다 상대적으로 높기 때문에 토지 이용별 탄소배출량을 산정한 후 배출량을 합산해보면 본 결과보다 더 많은 탄소 배출량이 산정될 것으로 판단된다.

표토 유실로 손실되는 탄소(또는 이산화탄소)의 양과 해당 비용은 막대하지만 아직까지 전세계적으로 사용 중인 탄소변화 예측 모델(Roth C, Century, APSIM 등)에는 토양 유실에 의한 탄소 배출량을 포함하지 않고 있다(Chappell et al., 2015). 이는 결국 전세계 육상 탄소 변화 예측량 중 18-27%에 해당하는 양(전세계 토양 유실에 의한 탄소 배출량)이 예측 계산에 빠져 있기 때문에 우리가 알고 있는 육상계의 탄소 배출량은 불확실성이 크다고 할 수 있다(Chappell et al., 2015).

우리나라도 예외는 아니다. 2016년 12월 우리나라 정부는 신기후체제 출범(Post 2020, 2016년 11월 4일 발효)에 따라 효율적 기후변화 대응을 위한 ‘2030 국가온실가스 감축 기본로드맵’을 제시하였고, 로드맵에 따라 2030년까지 총 315 Tg CO<sub>2</sub>(연간 22.5 Tg의 CO<sub>2</sub>)를 감축해야 한다. 하지만 국가 CO<sub>2</sub> 배출량 통계에 표토 유실에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 포함되어 있지 않기 때문에 온실가스 감축 체계에 많은 오류를 가져올 수 있다.

그 이유는 표토 유실로 대기에 배출되는 탄소량(800 Gg)을 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 배출량으로 환산해보면 2030년까지 약 41 Tg CO<sub>2</sub>가 배출되고, 이는 국가온실가스 감축 목표량의 약 13%에 해당하는 대규모의 양이다. 반대로 환경 중 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있는 토양, 해양, 식물이 각각 감축 목표량(연간 22.5 Tg의 CO<sub>2</sub>)의 1/3씩 분담한다고 가정하고, 토양 유실 방지 및 보전을 통해 토양(<1 m)이 저장하고 있는 탄소량(447 Tg C=1,639 Mt CO<sub>2</sub>)의 4%를 매년 더 격리하면 토양에 할당된 목표를 달성할 수

있다. 따라서 국가 차원에서 표토 유실을 하나의 탄소 배출원(source)으로 지정하고, 표토 유실에 의한 국가 탄소 배출량을 산정하여, 국가온실가스감축을 위한 하나의 방안으로 표토 유실 방지 사업을 포함시킬 수 있는 노력이 필요하다.

### 3. 표토와 물안보

#### 3.1. 표토와 수자원

물은 대기, 해양, 산림, 토양 등 어디든 존재하며 지구 활동에 중요하게 관여한다. 그 중 토양에 존재하는 물(토양수)은 일반적인 물과는 성질이 다르며, 토양내에 수없이 많은 이·화학적 반응을 야기시킨다. 토양수는 일반적인 성분인 물에 여러 성분이 함께 들어있어 양분공급, 물질 순환 및 이동에 중요한 역할을 담당한다(Jung and Ha, 2013). 또한 토양과 물 사이에서 여러 가지 상호작용이 일어나는데 이러한 상호작용은 용탈, 지표면 유거, 증발산에 의한 수분손실 속도, 토양 공극 내 공기와 수분간의 균형, 토양 온도의 변화 속도, 토양 생물들의 대사 속도 및 종류, 그리고 토양이 수분을 저장하고 식물에 공급할 수 있는 용량 등을 결정하게 된다(Nyle and Ray, 2010). 토양수 중 토양에 저장되어 식물이 이용할 수 있는 수분을 유효수분이라 하며, 유효수분의 확보 및 관리 는 식량생산, 생물다양성 보전 및 지하수함량 조절 등에 매우 중요하다.

국내 수자원 총량은 약 1,297억톤에 달하지만 손실량을 제외한 이용가능 수자원은 58%인 753억톤에 해당한다. 또한 그중에서도 해양으로 유입되는 수자원의 양을 제외하면 실제 총 이용 수자원(하천수, 댐용수, 지하수)은 전체 수자원의 26%(333억톤)으로 이용 효율은 1/4에 불과하다. 즉, 우리나라는 수자원 총량은 많지만, 이용효율이 높지 않기 때문에 수자원의 확보 및 저장이 매우 중요한 실정이다.

현재 우리나라는 국제인구행동연구소(PAI)에서 분류한 물부족국가이며, 경제협력개발 기구(OECD) 가입 국가중 하천 취수율이 약 40%로 1위의 불명예를 안고 있다(KEI, 2013). 또한 영국 생태환경 및 수문학센터(CEH, Center for Ecosystem and Hydrology)가 물 빈곤 지수를 발표하였다. 이 지수는 국가의 복지수준과 물이용가용성의 관련성을 나타낼 수 있는 통합적 수치이다. 이 발표에 따르면 우리나라는 전체 147개 중 43위 수준이며 29개 OECD 국가 중에서는 20위 수준으로 선진국에 비해 낮은 수준인 것으로 확인되었다(MLIT and K-water,

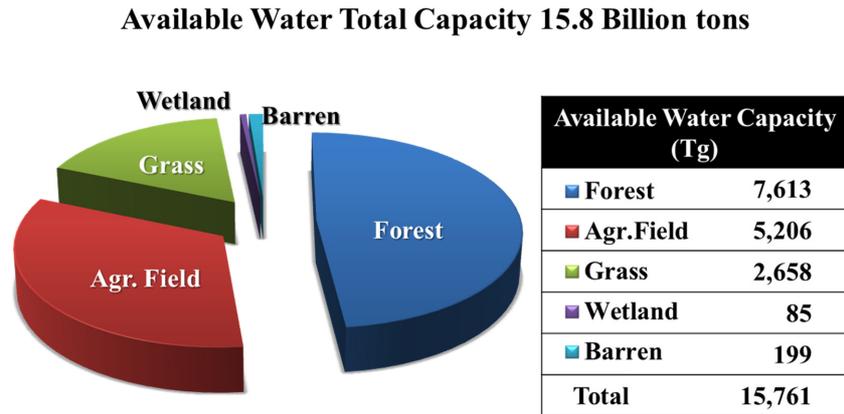


Fig. 3. Available water capacity in Korea (Hong et al., 2010).

Table 3. Available water price in Korea

Available water capacity (Tg) <sup>a</sup>	Water consumption in Seoul (Tg/yr) <sup>b</sup>	Water price in Seoul (won/ton) <sup>b</sup>	Available water capacity price (billion won)
15,761	1,100	576	9,078

<sup>a</sup>Hong et al. (2010)

<sup>b</sup>Office of Waterworks, Seoul Metropolitan Government(<http://arisu.seoul.go.kr/>)

2016). 이에 따라 물을 충분히 지속적으로 관리·확보하고 기후변화로 예상되는 재해상황을 대비해 표토를 통한 ‘물 안보(water security)’ 관리가 필요할 때이다.

우리나라 수자원의 활용 용도는 농업용수(47%) > 생활용수(23%) > 하천유지용수(22%) > 공업용수(8%) 순이며, 활용되는 수자원의 공급은 댐(53%) > 하천(36%) > 지하수(11%) 순으로 분담하고 있다(MCT, 2006). 결과적으로 토양수의 기능을 고려했을 때, 농업분야, 하천, 지하수 등과 같은 수자원 활용과 공급은 토양과 긴밀한 관계를 맺고 있고, 지속가능한 토양 관리는 수자원의 확보에 중요한 부분이라 할 수 있다.

최근 국내 토양 유효수분에 대한 연구에 따르면, 국내 토양 (<1 m 깊이)의 전체 유효수분 용량을 산림, 농경지, 초지, 습지 그리고 나지로 구분하여 보고하였는데(Fig. 3), 평균적으로 약 155 mm를 보유하고 있는 것으로 나타났다(Hong et al., 2010).

Fig. 3에서 제시한 유효수분용량을 전체 국토면적 108,849 km<sup>2</sup>과 비교하여 본다면 국내 토양의 유효수분 총량은 약 158억톤에 해당한다. 이는 건설교통부에서 보고한 국내 수자원 이용현황(MCT, 2006) 중 댐에 의한 용수 공급량인 188억톤과 비슷한 수준의 용량으로, 토양에 존재하는 유효수분 관리만으로도 전국 댐의 용수 공급기능을 대신할 수 있음을 의미한다.

토양이 보유한 수자원용량의 가치를 서울시 연간 급수

량(Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government, <http://arisu.seoul.go.kr/>)과 비교해보면, 토양의 유효수분 총량은 서울시(연간 11억톤)에 14년간 상수도 급수가 가능한 용량(2016년 기준)이었고, 2016년 서울시 급수사용료, 약 6,339억원을 토양의 수자원용량에 적용 시 토양유효수분의 경제적 가치는 약 9조 1천억에 상응하는 ‘수자원 저장고’로의 기능을 수행하고 있다(Table 3).

표토는 ‘수자원 저장고’로서의 기능 외에 ‘정화기능’과도 밀접한 연관이 있다. 토양으로 유입된 물은 지표수와 지하수 상태로 이동하여 수계로 유입되는데, 토양에 유입 시 물은 오염물질을 포함한 다양한 성분을 포함하고 있다. 이 때 표토는 ‘여과 및 완충기능’이란 생태계 서비스를 제공하여 지표수와 지하수 오염물질의 거동과 잠재적 이동에 깊게 관여 한다(Keesstra et al., 2012). 표토의 수질정화 기작은 물리·화학·생물학적 기작이 복합적으로 진행되는데, 오염물질의 물리적 제거 및 흡착, 화학적 교환, 생물학적 분해 및 고정 등이 이에 해당한다(Kadlec and Knight 1996; Song and Kang, 2006). 표토가 보여주는 오염물질의 정화기능을 주화적 가치로 환산하면 천문학적 인 금액이 될 것이다.

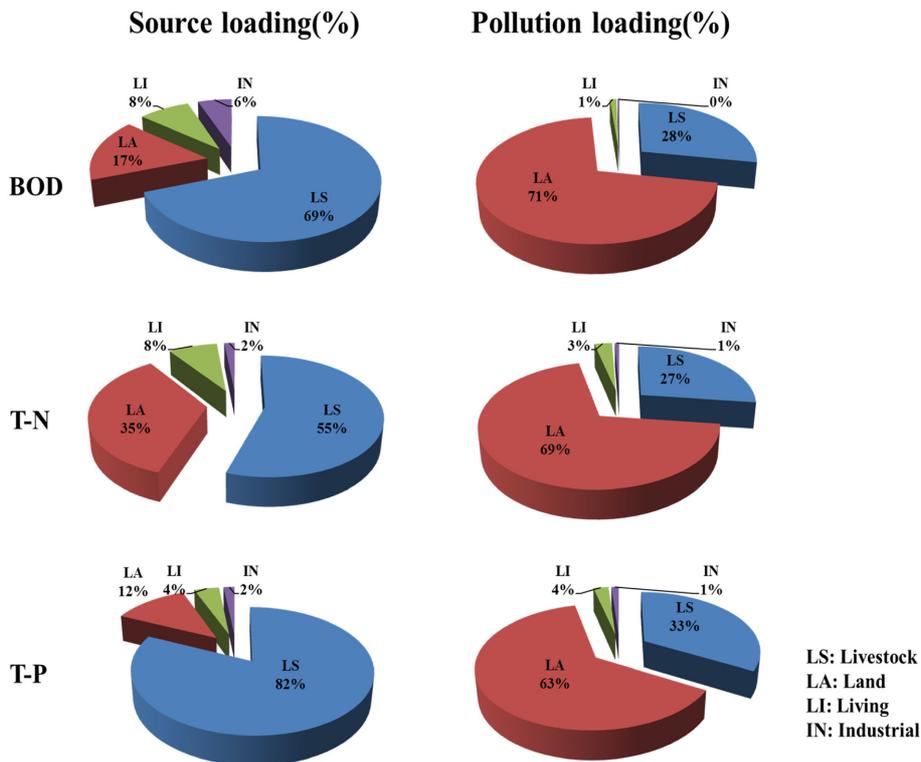
### 3.2. 표토유실에 의한 수자원 손실

기후변화가 빠르게 진행되면서 강우량의 증가와 더불어 강우의 빈도 및 강도도 함께 증가하는 사례가 빈번히 보

**Table 4.** Estimation of the loss of the available water capacity by soil erosion

Annual soil erosion (ton/ha/yr)	B <sub>D</sub> <sup>†</sup> (t/m <sup>3</sup> )	Soil erosion depth (cm/yr)	Available water capacity (0-1m, Tg)	Water rate in Seoul (won/ton)	Available water loss rate (won)
32 <sup>a</sup>	1.33	0.2406	15,761	576	21.9 billion

<sup>†</sup>Bulk density  
<sup>a</sup>OECD (2008)



**Fig. 4.** Source loading and pollution loading in Doam dam watershed (MOE, 2014).

고되고 있으며, 이로 인한 표토유실의 발생과 환경문제가 심각해지고 있다 (Kim et al., 2009; Oh et al., 2012).

우리나라의 연간 표토유실량은 Table 4에서 볼 수 있듯이, 약 350 Tg에 달한다. 표토유실로 인해 손실되는 수자원을 산출해 볼때, 연간 표토유실량과 일반적인 토양의 용적밀도 (1.33 t/m<sup>3</sup>) 및 유효수분함량 자료를 토대로 계산한 결과, 매년 표토유실로 인해 사라지는 토양의 깊이는 약 0.24 cm이며 이때 표토가 함유하고 있는 토양 수분의 양은 3천 8백만톤에 달한다. 이를 서울시 급수요금으로 환산하면 연간 약 219억원의 경제적 손실이 발생하고 있다(Table 4).

**3.3. 표토유실에 의한 수질오염**

최근 국내 주요하천 및 호소 등에서 수온상승, 영양염류 과다유입, 하천환경 변화 등으로 초여름부터 가을사이

에 조류의 대량증식에 의한 수질오염발생이 빈번한 실정이다. 특히 급격한 사회발전으로 인한 도시화와 인구증가, 표토보전 미흡으로 인한 조류의 성장 및 지속식간을 직접적으로 결정하는 영양염류가 과다 유입되면서 국내 주요 4대강과 하천 및 호소의 녹조현상이 빈번히 발생하고 있다(KECO, 2012; Cho et al., 2016).

정부는 4대강 수질관리를 위해 ‘4대강 물환경 관리 기본계획(2006~2015)’을 수립하고 총 32조 7000억원을 투입하여 수질개선을 위해 사업을 진행하였지만, 대부분의 구간에서 목표수질에 미달하고 있는 실정이다. 이는 수질오염에 대한 배출부하의 68%가 비점오염원에 해당하지만 지금까지 점오염원 위주의 수질개선사업의 진행으로 인한 한계점으로 사료된다(AIRI, 2013).

환경부(MOE, 2013)에 따르면 비점오염지표 중 녹조의 주된 오염원인 T-P에 대해 토지계에서 2010년 41.1%에서

2017년 44.4%로 증가할 것으로 전망하였으며, 이는 생활계, 축산계에 비해 약 2배에 달하는 비중이다. 그 중 한 예로 강원지역의 비점오염원 발생 현황 및 특성 검토를 위해 도암댐유역 비점오염원 부하량 현황을 살펴보면 Fig. 4와 같다(MOE, 2014). 발생부하량(source loading)의 경우 오염지표 모두 축산계에서 대부분 발생하는 것으로 나타났지만, 실제적인 오염원의 배출부하량(pollution loading)은 모두 토지계에서 63~71% 기인하는 것으로 보고되었다.

이는 실제로 녹조 발생의 주요한 영향인자인 T-P와 T-N의 오염배출이 토지계에서 비롯되고 있는 것이며, 이를 방지하게 위해서는 유실되어 수계로 유입되는 표토의 관리가 시급한 것을 의미한다. 비점오염원을 관리하기 위하여 정부는 제1차 비점오염원 종합관리대책(2000-2012)을 설정하여 약 2조원의 예산을 투입하였으며 현재는 제2차 비점오염원 종합관리대책(2012-2020)까지 연장되어 추가적으로 8조원이 투입되어 총 10조원의 예산투입으로 비점오염원을 관리할 예정이다. 그 중 토지계에서 기인한 비점오염관리예산은 약 2조원으로 전체 예산의 약 20%에

해당한다. 이는 수질오염(녹조)의 오염배출부하가 토지계에서 40~60%이상 기인하는 것에 비해 상대적으로 많지 않은 금액이라 생각된다. 실제로 표토보전 선진국인 미국의 U.S. Department of Agriculture - National Resources Conservation Service (USDA NRCS) 경우 2017년 한해 전체 예산의 약 43%의 자원을 표토침식 예방 및 관련 예산으로 사용하였다 한다. 따라서 효과적인 표토유실 보전을 위해서는 국민적인 관심과 체계적인 표토보전 관리 대책마련 및 효율적인 예산 활용이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 정책제안

표토가 제공하는 다양한 기능 중 ‘탄소 저장’과 ‘수자원 함양’ 기능만기 고려할 때 표토는 우리가 보전해야 할 충분히 가치 있는 자원이다. 현재 우리나라의 경우 표토의 소중함과 유실 심각성을 인식하고, 표토 유실의 예방을 위해 2011년 토양환경보전법 제6조의 2에 ‘표토의 침식 현황 조사’가 신설되었고, 2013년에는 환경부에서 표토보전 종합계획을 수립하여 전국의 표토 침식현황 조사와 유형

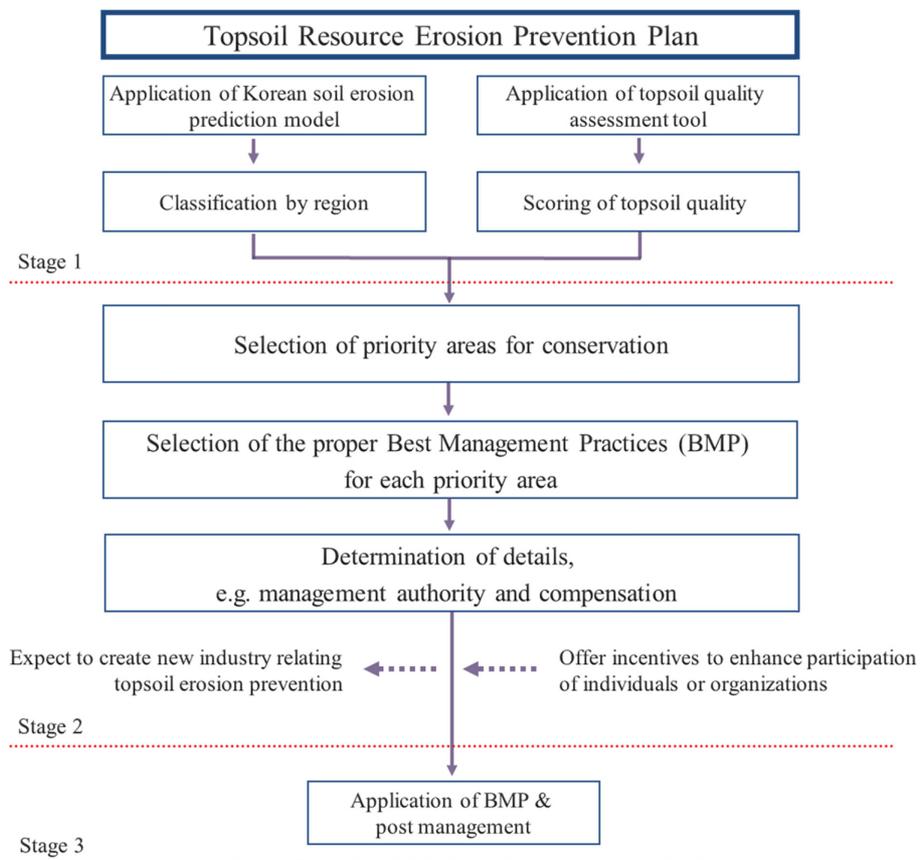


Fig. 5. Proposal of surface soil resource erosion prevention plan.

별 표토 침식 방지 대책 마련, 한국에 특화된 표토 침식량 예측 모델 수립 등 관련 기술개발을 추진하였다.

환경부 지원 하에 운영 중인 ‘표토자원전략연구단’에서는 GIS 자료, 영상 자료 및 우리나라 특성에 맞는 표토 침식 예측모델 인자를 적용한 한국형 표토 유실 예측 시스템, 표토의 물리, 화학, 생물학적 특성, 표토 오염 등을 고려한 표토 질(quality) 평가 기법, 표토의 등급화, 우선관리지역선정 등의 내용을 담고있는 ‘표토종합 포탈시스템’(http://pyoto.araon.org)을 구축하였다. 따라서 기 개발된 시스템을 이용한다면 효율적이고 신속한 표토 자원 관리 종합대책방법 모색과 ‘표토의 침식 현황 조사’에 접목하여 국내실정에 맞는 효과적인 표토침식 예측이 가능할 것

으로 판단되며 정책적 활용도 또한 높을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 “표토종합 포탈시스템”을 활용한 표토 자원 관리 종합대책(안)으로 3단계로 구성된 표토 관리방안을 제안하고자 한다. 1단계는 기 개발된 표토 유실 예측 시스템 및 표토 질(quality) 평가 기법을 이용해 표토의 가치와 표토유실량에 따른 전국 표토를 등급화 또는 점수화하는 것이다. 표토등급은 25개의 등급으로 분류되며 해당 지역의 표토유실량과 표토의 가치(질, 생태계서비스 기능)을 고려하여 세분화 된다. 2단계에서는 등급화, 점수화한 결과를 바탕으로 표토유실량이 많고 표토의 가치가 높은 지역을 우선관리지역으로 선정하고, 해당 우선관리지역별 적합한 최적관리기법(Best Management Practices)을 제시 할 수 있다. 본 포탈시스템에서 제시하는 최적관리기법의 경우 USDA-NRCS에서 발행한 자연자원보전기법(Conservation Practice)에 제시된 156가지의 관리방안을 이용하여 제시하고있다. 또한 제시된 최적관리기법은 해당지역의 표토 질, 표토유실량 및 토지이용을 고려하여 제시되도록 고안하였다.

그리고 최종 최적관리기법이 선정되면 관리주체, 보상 문제 등과 같은 세부사항이 결정되어야 한다. 이에따라 마지막 3단계에서는 최적관리기술 적용 및 사후관리가 필요할 것이며, 특히 포탈시스템을 통해 선정된 최우선관리지역(25등급)에 대한 최적관리기법 적용은 제도화하여 의무적으로 표토를 관리하는 방안 마련이 필요하다. 또한 해당지역(우선관리지역) 최적관리기술 적용 시 개인 또는 기업 등 관리주체 지정을 제도적으로 의무화하고, 관리주체의 참여를 도모하고자 다양한 인센티브(예: 탄소배출권, 세금 면제 등) 제도가 도입된다면 표토 유실 방지 관련 신산업분야 창출 효과도 발생할 것으로 예상된다.

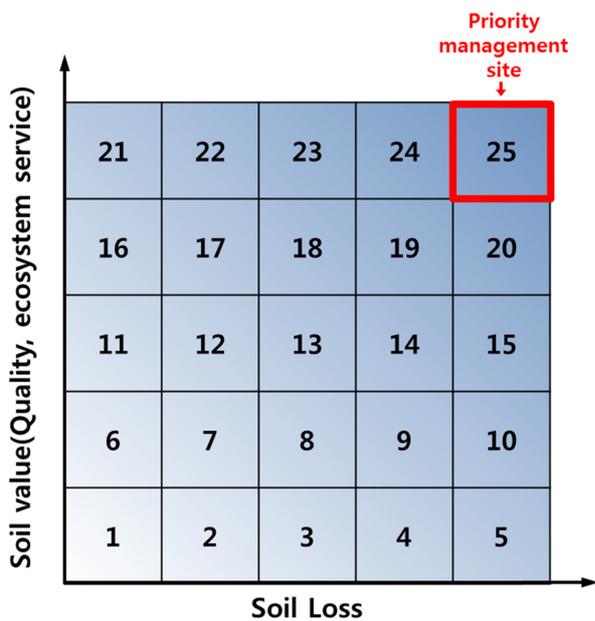


Fig. 6. Surface soil grading graph.

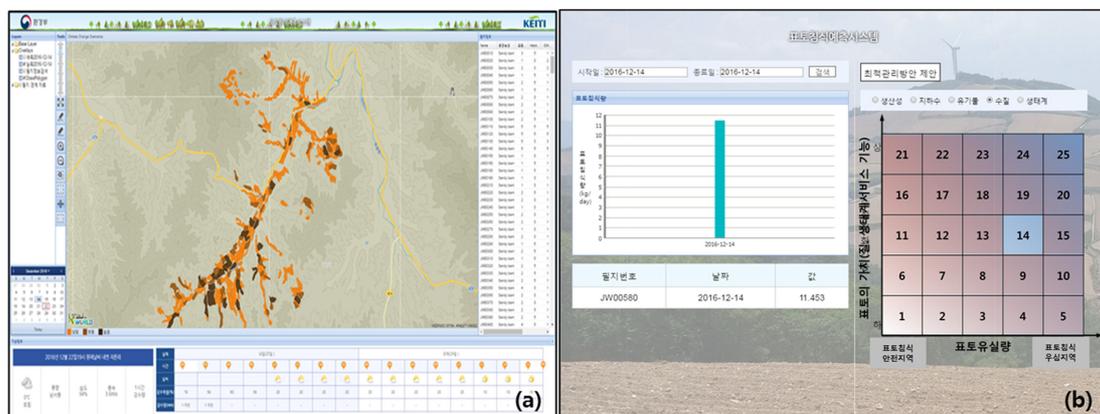


Fig. 7. Surface soil information portal system web page. (a): surface soil erosion prediction system page, (b): surface soil grading page.

## 5. 결 론

현재 우리나라는 표토 유실 방지를 위한 국가적 제도가 착수되었으나, 아직 시작단계이다. 향후 표토를 생명자원으로 인식하고, 이를 기반으로 집중적인 연구개발 투자와 체계적인 표토관리시스템이 구축된다면, 건강한 표토가 제공하는 다양한 기능을 통해 우리가 직면하고 있는 전 국가적 환경문제 해결 방안을 찾을 수 있을 것이다. 따라서 표토 유실방지 사업 및 연구를 추진하기 위한 예산 확보 근간이 될 수 있는 정책 및 제도가 개선될 수 있도록 정부를 중심으로 산업체, 연구기관 및 학계가 협력해야 한다.

## 사 사

본 연구는 한국환경산업기술원 GAIA project (No:2014 000540003) “한국형 표토 침식 조사 평가 기술개발”의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

AIRI, 2013, Analysis of Non-point Pollution Source for Improvement of Water Quality, Audit Result Report, Audit and Inspection Research Institute, Korea.

Beyer, L., Fründ, R., Schleuß, U., and Wachendorf, C., 1993, Colluvisols under cultivation in Schleswig-Holstein. 2. Carbon distribution and soil organic matter composition, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **156**(3), 213-217.

Bouma, J., 2014, Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **177**, 111-120.

Chappell, A., Baldock, J., and Sanderman, J., 2015, The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes, *Nat. Clim. Change*, **6**(2), 187-191.

Cho, Y.C., Jin, S.J., Han, H.J., Ryu, M.H. and Yoo, S.H., 2016, Estimainl of the Aesthetic and Environmental Costs of Algal Bloom, *Kor. Environ. Pol. Admin. Soc.*, **24**(4), 227-246.

De Rose, R.C., 2013, Slope control on the frequency distribution of shallow landslides and associated soil properties, North Island, New Zealand, *Earth Surf. Process. Landf.*, **38**, 356-371.

European Commission, 2006, Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Establishing a Framework for the Protection of Soil and Amending Directive 2004/35/EC. Brussels, 22-9-2006. COM (2006)232 final.

FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, JRC, 2009, Harmonized World

Soil Database v1.1. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.

FAO, 2017, Soil Organic Carbon: the Hidden Potential.

Hong, S.Y., Minasny, B., Zhang, Y., Kim, Y., and Jung, K., 2010, Digital soil mapping using legacy soil data in Korea. *Proceeding of 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*, World Congress of Soil Science, Brisbane, Australia, p. 1-6.

Hoyle, F.C., Baldock, J.A., and Murphy, D.V., 2011, Soil organic carbon-role in rainfed farming systems. In: *Rainfed Farming Systems*, Springer, Netherlands, p. 339-361)

Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., and Guo, R., 2016, Accelerated dryland expansion under climate change, *Nature Clim. Change*, **6**(2), 166-171.

IPCC, 2014, Climate Change: Synthesis Report; Summary for Policymakers.

Jacinthe, P.A., and Lal, R., 2001, A mass balance approach to assess carbon dioxide evolution during erosional events. *Land Degrad. Dev.*, **12**(4), 329-339.

Jung Y.S. and Ha S.K., 2013, Soil Science, Kangwon National University, Korea

KECO, 2012, Algae Reduction Technology for Improvement Water Ecological Stability. Korea Environment Corporation, Korea.

Keesstra S.D., V. Geissen, K. Mosse, S. Piirainen, E. Scudiero, M. Leistra and van Schaik L., 2012, Soil as a filter for ground-water quality, *Environ. Sustain.*, **4**(5), 507-516.

KEI, 2007, Building the Environmental Valuation System\*, Korea Environment Institute, Korea.

KEI, 2013, Research on Mid-long-term Policy Plan for Building National Water Security, Korea Environment Institute, Korea.

Kim, J.H., Kim, K.T. and Lee, H.J., 2009, Analysis of Korea soil erosion yields and soil loss hazard zone, *J. GIS Assoc. Korea*, **17**, 261-268.

Kirkels, F.M.S.A., Cammeraat, L.H., and Kuhn, N.J., 2014, The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes-a review of different concepts, *Geomorphology*, **226**, 94-105.

Koch, A., McBratney, A., Adams, M., Field, D., Hill, R., Crawford, J., Minasny, B., Lal, R., Abbott, L., O'Donnell, A., Angers, D., Baldock, J., Barbier, E., Binkley, D., Parton, W., Wall, D.H., Bird, M., Bouma, J., Chenu, C., Flora, C.B., Goulding, K., Grunwald, S., Hwmpel, J., Jastrow, J., Lehmann, J., Lorenz, K., Morgan, C.L., Rice, C.W., Whitehead, D., Young, I., and Zimmermann, M., 2013, Soil security: solving the global soil crisis, *Global Policy*, **4**(4), 434-441.

Lal, R., 1995, Global soil erosion by water and carbon dynam-

- ics. In: Lal, R., Kimble, J.M., Levine, E., Stewart, B.A., (ed.), *Soils and Global Change*, CRC/Lewis Publishers, Boca Raton, p. 131-141.
- Lal, R., 2003, Soil erosion and the global carbon budget, *Environ. Int.*, **29**, 437-450.
- Lal, R., 2004, Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science*, **304**(5677), 1623-1627.
- Lal, R., 2005, Soil erosion and carbon dynamics, *Soil Till. Res.*, **81**(2), 137-142.
- Lal, R., 2006, Influence of soil erosion on carbon dynamics in the world, In: Roose, E.J., Lal, R., Feller, C., Barthes, B., Stewart, B.A. (ed.), *Advances in Soil Science: Soil Erosion and Carbon Dynamics*, Taylor & Francis, Boca Raton, p. 23-36.
- Lal, R., Pimentel, D., 2008, Soil erosion: a carbon sink or source?, *Science*, **319**(5866), 1040-1042.
- McBratney, A., Field, D.J., and Koch, A., 2014, The dimensions of soil security, *Geoderma*, **213**, 203-213.
- MCT, 2006, Long-term Comprehensive Plan for Water Resources (2006-2020), Ministry of Construction & Transportation, Korea.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z., S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.C., Vågen, T.G., van Wesemael, B., and Winowiecki, L., 2017, Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, **292**, 59-86.
- MLIT (Ministry of Land Infrastructure and Transport) and K-water, 2016, Water for the Future, Water and Jobs, Korea
- MOE, 2013, A Study on Policy Direction Setting by Change of Water Environment Management Condition, Ministry of Environment, Korea.
- MOE, 2014, Monitoring and Evaluation Project of Nonpoint Source Controlled Area Nearby Doam Lake, Ministry of Environment, Korea.
- MOE, 2015, Notification of the Topsoil Preliminary Investigation, Ministry of Environment, Korea.
- Mora, J.L., Guerra, J.A., Armas, C.M., Rodríguez-Rodríguez, A., Arbelo, C.D., and Notario, J.S., 2007, Mineralization rate of eroded organic C in Andosols of the Canary Islands, *Sci. total environ.*, **378**(1), 143-146.
- Navarro, A.F., Cegarra, J., Roig, A., and Garcia, D., 1993, Relationships between organic matter and carbon contents of organic wastes, *Biores. Technol.*, **44**(3), 203-207.
- Nearing, M.A., Pruski, F.F., and O'neal, M.R., 2004, Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review, *J. Soil Water Conserve.*, **59**(1), 43-50.
- Novara, A., Keesstra, S., Cerdà, A., Pereira, P., and Gristina, L., 2016, Understanding the role of soil erosion on CO<sub>2</sub>-C loss using <sup>13</sup>C isotopic signatures in abandoned Mediterranean agricultural land, *Sci. Total Environ.*, **550**, 330-336.
- Nycle C. B. and Ray R.W., 2010, Elements of the Nature and Properties of Soils, 3<sup>rd</sup>, Pearson College Div, Korea.
- OECD, 2008, Environmental performance of agriculture in OECD countries since 1990.
- Oh, Y.J., Kim, M.H. Na, Y.E. Hong, S.H., Paik, W.K. and Yoon, S.T., 2012, Vulnerability assessment of soil loss in farm area to climate change adaption, *Kor. J. Soil Sci. Fer.* **45**(5), 711-716.
- Oskarsson, H., Arnalds, O., Gudmundsson, J., and Gudbergsson, G., 2004, Organic carbon in Icelandic Andosols: geographical variation and impact of erosion, *Catena*, **56**, 225-238.
- Schlesinger, W.H., 1995, Soil respiration and changes in soil carbon stocks, In: Woodwell, G.M., Mackenzie, F.T. (ed.), *Biotic Feedbacks in the Global Climatic System: Will the Warming Feed the Warming*, Oxford University Press, New York, p. 159-168.
- Smith, S.V., Renwick, W.H., Buddemeier, R.W., and Crossland, C.J., 2001, Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States, *Glob. Biogeochem. Cycles*, **15**, 697-707.
- Song, K.Y. and Kang, H.J., 2006, Construction and application of artificial wetlands for water purification, *Kor. Geo-Environ. Soc.*, **7**(1), 6-10.
- Stallard, R.F., 1998, Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial, *Glob. Biogeochem. Cycles*, **12**(2), 231-257.
- UNEP (United Nations Environment Programme), 2007, Global Environmental Outlook GEO4 - Environment for Development.
- Van Oost, K., Quine, T.A., Govers, G., De Gryze, S., Six, J., Harden, J.W., Ritchie, J.C., McCarty, G.W., Heckrath, G., Kosmas, C., Giraldez, J.V., Marques da Silva, J.R., and Merckx, R., 2007, The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle, *Science*, **318**(5850), 626-629.
- Wang, X., Cammeraat, E.L.H., Romeijn, P., and Kalbitz, K., 2014, Soil organic carbon redistribution by water erosion - The role of CO<sub>2</sub> emissions for the carbon budget, *PLOS ONE*, **9**(5), e96299.