

표토 침식에 의한 수변구역의 탄소 손실량 산정

윤정환¹ · 오승민² · 김혁수¹ · 양재의^{1*}¹강원대학교 바이오자원환경학과, ²남해화학 농자재연구팀

Quantifying Carbon Loss from Riparian Topsoil Erosion in Korea

Jung-Hwan Yoon¹, Seung-Min Oh², Hyuck-Soo Kim¹, and Jae E. Yang^{1*}¹Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea²Agro-material research team, Namhae Chemical Corporation, Yeosu 59618, Republic of Korea

ABSTRACT

Topsoil erosion not only reduces soil productivity but also accelerates atmospheric carbon release, posing a dual threat to soil sustainability and climate regulation. This study quantified soil erosion and associated carbon loss in riparian regions of Korea's four major rivers under different land uses. A total of 4,414 topsoil samples were collected from the Geum, Nakdong, Yeongsan-Seomjin, and Han River basins. Soil loss was estimated using the Universal Soil Loss Equation (USLE), and carbon loss and emissions were derived from soil organic carbon (SOC) and carbon stock data, assuming 20% carbon release. Average soil loss was highest in the Han River basin ($47.99 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), with bare land showing the greatest erosion ($90.86 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) and carbon loss ($1,209 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). Forest and grassland exhibited minimal losses ($< 30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). Carbon loss correlated positively with soil erosion and carbon stock. Severe erosion in riparian zones, particularly in bare and upland areas, leads to substantial carbon depletion. Strengthening vegetation cover and implementing land-use-specific conservation practices are vital to reduce erosion-induced carbon loss.

Key words : Soil erosion; Carbon loss; Riparian zone; USLE; Topsoil

1. 서 론

전 세계적으로 토양침식은 대표적인 위협요인으로 토양질 저하 뿐만 아니라 식량 생산성 저하에 따른 식량안보 위기, 그리고 토양유기탄소 손실을 초래하는 심각한 문제로 지적되고 있다(Smith et al., 2024), 또한 잠재적 연간 토양 침식량은 약 430억 ton에 달한다고 예측되고 있다(Borrelli et al., 2020). 특히, 우리나라는 국토면적의 약 64%가 산림 면적에 해당하고, 여름철 장마 전선과 온대 저기압에 의한 집중 강우 발생으로 표토 침식이 많이 발생하고 있다(Park et al., 2011; Hur et al., 2025; Yoon et al., 2025). 우리나라의 물에 의한 평균 토양 침식량은 $32 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 OECD 평균인 $11 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 의 3배 수준이며,

OECD 기준 ‘심함(high)’에 해당하고 있어 표토 침식 관리가 시급한 실정이다(OECD, 2008; OECD, 2013).

이에 우리나라는 표토보전의 중요성을 인식하고 표토를 자원으로 간주하여 2011년 표토조사 및 보전을 위한 법적 근거를 마련하여 토양환경 실태조사가 이뤄지도록 하였다(MOE, 2011). 이후 환경부에서는 ‘표토보전 5개년 종합계획(’13~’17)’을 발표하여 표토 관리의 노력을 기울이고 있다. 현재 국내의 표토 침식 평가는 표토 침식 현황 조사에 관한 고시(MoE, 2025)에 의거하여 전 세계에서 가장 많이 사용하는 범용토양유실예측공식(USLE, Universal Soil Loss Equation)을 사용하여 침식량을 산출하고 있다. 표토 침식 현황 조사를 실시하는 지역은 표토 침식 고위험지역인 상수원보호구역, 수변구역(4대강: 영산-섬진강, 금강, 낙동강, 한강 수계)에 대하여 실시하고 있다(MOE, 2025).

그리고 최근 이뤄지고 있는 기후변화의 가속화로 강우 강도 및 강우일수 증가하면서, 강우에 의한 표토 침식 역시 더욱 심각해지고 있다. 이러한 변화는 최근 강우자료에 따른 USLE의 강우인자 (R) 증가 및 표토 침식의 증가로

주저자: 윤정환, 연구교수

공저자: 오승민, 대리; 김혁수, 부교수

*교신저자: 양재의, 명예교수

E-mail: yangjay@kangwon.ac.kr

Received : 2025. 10. 29 Reviewed : 2025. 11. 28

Accepted : 2025. 12. 04 Discussion until : 2026. 02. 27

Table 1. Number of soil samples collected from riparian regions of Korea's four major rivers under different land uses

Rivers	Land Uses					Total
	Bare land	Upland	Grass land	Forest	Orchard	
	n					
Yeongsan river-Seomgin river	177	512	761	256	137	1,843
Geum river	143	144	364	621	83	1,355
Nakdong river	358	222	32	431	53	1,096
Han river	27	63	6	8	16	120
Total	705	941	1,163	1,316	289	4,414

확인할 수 있으며(Hur et al., 2025; Kang et al., 2021; Kim et al., 2010; Tak et al., 2013), 우리나라 뿐만 아니라 전 세계적으로도 지속적인 기후변화에 따라 강우인자 증가 및 토양 침식의 위험성이 증가할 것으로 예상되고 있다(Panagos et al., 2021; Shojaezadeh et al., 2024).

이처럼 표토 침식에 큰 영향을 주는 기후변화 가속화는 대기 중 온실가스의 증가가 주된 원인으로 알려져 있다. 대표적인 온실가스인 CO₂는 그 중요성이 매우 커져 이에 대한 관리가 전 지구적 관심사로 집중되고 있으며, 국내에서도 CO₂ 및 온실가스 저감 및 감축에 대한 정부의 노력 뿐만 아니라 이와 관련된 연구가 활발히 진행 중이다(Choi et al., 2020; Gwon et al., 2020; Han et al., 2020; Park et al., 2023; Lee et al., 2020; Lee et al., 2024; Ro et al., 2020). 탄소에 대한 관심이 집중되면서 ‘유기물이 풍부한 표층 토양’으로 다량의 탄소(C)를 함유하고 있는 표토의 가치 및 중요성도 매우 커지고 있다(Lal et al., 2004; Lal et al., 2021; Minasny et al., 2017). 표토 침식으로 인해 표토와 함께 다량으로 저장되어 있던 탄소가 유실되며, 유실된 탄소는 침식과정에서 대기로 방출되어 대기 중의 탄소농도를 증가시켜 기후변화를 가속화 시키게 되므로 기후변화에 악영향을 미치게 된다(Lal, 2003; Lal, 2005; Lal, 2020; Yoon et al., 2025). Roose et al. (2002)은 표토 침식에 따른 탄소의 약 10%가 해양으로 이동하며, 약 70%는 주변 토양 위에 다시 퇴적되고, 나머지 약 20%가 대기로 방출된다고 정리하였다.

우리나라의 표토 침식과 탄소 거동에 대한 선행 연구를 조사해 보면, 우리나라에서 발생하는 연간 표토 침식량, 토지이용 면적 및 SOC의 무기화 등 여러 인자를 이용해 매년 약 80만 톤의 토양 탄소가 대기중으로 배출되는 것으로 추정하였다(Oh et al., 2017). 이렇듯 표토 침식과 함께 일어나는 탄소의 손실은 기후변화를 가속화시킬 수 있지만, 국내 연구의 경우 표토 침식량 조사에 대한 연구가 대부분이며 이 때 발생할 수 있는 탄소손실에 대한 연구는

거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 수변구역을 대상으로 토양을 채취하여 표토의 침식량을 조사하고 이에 따른 탄소 손실량을 정량적으로 산출하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구권역 및 시료채취

조사지점은 영산-섬진강, 금강, 낙동강 및 한강 권역의 수변구역 필지를 대상으로 하였고, 토지이용별로 구분하여 조사대상지를 선정하였다(Table 1). 토양시료의 채취는 ‘토양 및 식물체 분석방법 (NIAST, 2010)’에 따라 토양시료 채취기(Auger)를 이용해 표토(0 ~ 30 cm)를 채취하였으며, 용적밀도(bulk density)의 분석을 위한 core 시료도 채취하였다.

2.2. 이화학적 특성 분석

채취한 토양은 풍건 후 2 mm 체로 걸러 2 mm 이하의 토양은 토양 이화학성 분석에 사용하였고, 2 mm 이상의 시료로 자갈함량을 구하였다(MoE, 2025). 채취한 core 시료는 농촌진흥청 표준분석법(NIAST, 2000)에 따라 용적밀도를 측정하였다. 유기물 함량은 Walkley-Black법(Nelson and Sommers, 1996)으로, 입경분석은 비중계법을 사용해 분석하였다(NIAST, 2000).

2.3. 표토 침식량 계산

표토 침식량 (A)은 환경부 (2025)의 “표토의 침식 현황 조사에 관한 고시”에 따라 USLE 모형인 식 (1)을 이용해 산출하였다. 강우인자(R)는 MoE(2025)에 제시된 전국 158개 지점의 제시된 값을 이용하였고, 토양침식성인자 (K)는 토양 분석결과로 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 산출하였고, 자갈에 의한 영향을 고려하기 위해 식 (4)로 보정하였다. 경사인자(LS)는 대상지역 토양 시료 채취 시 경사장 측정 기기(Forestry 550, Nikon, Tokyo, Japan)를 현장에서 직접 측정하였고, 식생피복인자(C) 및 보전관리인자(P)도 현장

에서 각 필지별로 식생 및 작물재배 현황, 보전 관리 방법을 조사하였다. C factor의 경우 시료채취 현장에서 필지 별로 식생 및 작물재배 현황을 조사하여 적용하였다. 이후 MoE(2025)에서 제시한 토지이용 및 관리방법에 따른 C factor와 P factor 값을 적용하였다(MoE, 2025).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

A : Annual soil loss ($\text{ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)

R : Rainfall erosivity factor ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)

K : Soil erodibility factor ($\text{ton hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)

LS : Topographic factor

C : Cropping factor

P : Conservation practice factor

$$K = 1.32[(2.1 \times 10^{-4}(12-OM)M^{1.14} + 3.25(S1-2) + 2.5(P1-3))/100]/9.8 \quad (2)$$

$$M = (MS + VFS) \cdot (100 - CL) \quad (3)$$

K : Soil erodibility factor ($\text{ton} \cdot \text{hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)

OM : Organic matter (%)

$S1$: Soil structure codes (1~4)

$P1$: Soil permeability classes (1~6)

MS : Silt (%)

VFS : Very fine sand (%)

CL : Clay (%)

$$K_M = K \times [1.0977 \times 10^{-0.011\chi}] \quad (4)$$

K_M : Modified K considering gravel coverage

χ : Surface coverage by gravel and gravel content (% , v/v and w/w)

2.4. 탄소 손실량 계산

탄소 손실량은 앞에서 산출한 토양 침식량과 토양의 탄소 저장량(C_{stock})을 식 (5)에 적용하여 계산하였다. C_{stock} 은 현재

표토에 저장되어 있는 단위면적 당 탄소의 양으로서 식 (6)로 산출하였다(Chen et al., 2018).

$$C_{loss}(\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}) = \frac{\text{Soil erosion}(\text{ton yr}^{-1})}{p(m) \times \text{Area}(\text{m}^2) \times BD(\text{ton m}^{-3})} \times C_{stock}(\text{ton ha}^{-1}) \times \frac{1,000 \text{ kg}}{\text{ton}} \quad (5)$$

$$C_{stock}(\text{ton ha}^{-1}) = p(m) \times SOC(\text{g kg}^{-1}) \times BD(\text{ton m}^{-3}) \times (100 - GE)(\%) \times \frac{10,000 \text{ m}^2}{\text{ha}^{-1}} \times \frac{\text{ton}}{1,000 \text{ kg}} \quad (6)$$

여기서, p 는 토심으로 본 연구에서는 표토를 대상으로 하였기에 0.3 m를 적용하였고, Area는 각 필지의 면적, BD는 용적밀도, SOC (soil organic carbon)은 토양유기탄소, GE (gravel content)는 자갈 함량을 의미한다.

또한, 우리나라의 표토침식에 의해 손실되는 탄소손실량에 Roose et al. (2002)이 제시한 표토 침식으로 인한 대기 방출 탄소함량(20%)을 이용하여 우리나라에서 표토침식으로 인해 대기로 방출되는 탄소의 함량을 예상하였다(식 (7)).

$$\text{Carbon emission to the atmosphere}(\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}) = \text{Carbon loss}(\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}) \times 0.2 \quad (7)$$

2.5. 통계분석

산출된 토양 침식량 및 탄소 손실량의 통계처리는 SAS University Edition (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 처리하였으며, 4대강권역 및 토지이용별로 일원분산 분석(One-way ANOVA)을 실시한 후 Duncan test ($p < 0.05$)를 활용한 사후검증을 통하여 결과 간 유의성을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유역과 토지 이용에 따른 토양 침식량 비교

기후는 조사 지점의 USLE 인자와 토양침식량을 우리

Table 2. USLE factors and soil loss in riparian regions of Korea's four major rivers

Regional	R	K	LS	C	P	Soil loss
	$\text{MJ} \cdot \text{mm ha}^{-1} \text{ yr}^{-1} \text{ hr}^{-1}$	$\text{ton} \cdot \text{hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$				$\text{ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$
Geum river	3973c	0.0190ab	2.64a	0.14b	0.73a	19.10bc
Nakdong river	4441b	0.0192ab	1.60c	0.40a	0.67b	26.22b
Yeongsan river-Seomgin river	5066a	0.0174b	1.43c	0.19b	0.63c	16.06c
Han river	3651d	0.0208a	1.83b	0.41a	0.55d	47.99a
Total	4537	0.0184	1.85	0.23	0.67	20.38

*Same letters indicate no difference between sampling sites within each column ($p < 0.05$, LSD) .

나라 4대강수계 권역별로 정리한 결과는 Table 2와 같다. 전체 평균 토양 침식량은 $20.38 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었으며, 한강 유역이 $47.99 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 가장 높았고, 그 다음으로 낙동강, 금강, 영산강-섬진강 유역 순이었다. R 인자 값의 경우 한강 유역이 다른 유역보다 다른 유역보다 낮았으나 K와 C 값이 높아 평균 토양 침식량이 많았다. 이는 Table 1에서 한강 유역의 조사 지점 대부분이 나지(22.5%)와 밭(52.5%)이었기 때문으로 간주된다. 평균 토양 침식량이 가장 적었던 영산강-섬진강 유역은 R 값은 가장 높았으나, 그 외의 모든 인자가 다른 유역보다 낮았다. K와 C 값이 낮은 것은 조사 대상지의 41.3%가 피복도가 높은 초지였으며, 나지는 9.6%에 불과하였기 때문이다.

조사지점을 토지이용에 따라 구분하여 표토 침식량을 비교한 결과는 Table 3과 같았다. 토양 침식량의 평균값이 가장 높은 토지 이용 형태는 나지($90.86 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)였고, 밭, 과수원, 산림, 초지 순이었다. 나지는 표토침식의 주된 메커니즘인 강우의 지표타격에너지에 의한 침식을 방지할 수 있는 피복식물이 거의 없어 표토침식이 매우

심각하게 발생할 수 있다. 특히 우리나라처럼 여름철 집중강우가 빈번한 지역에서는 나지의 표토침식이 매우 심각하므로 표토관리가 매우 시급한 실정이다.

C 값은 표토의 침식을 줄이기 위해 노력할 수 있는 대표적인 인자값이지만 일반적으로 나지는 지표 피복식물이 거의 없어 C 값을 대부분 '1.00'으로 적용하기 때문에 표토 침식량이 매우 크게 산출된다(Panagos et al., 2015). 과수원과 산림, 초지는 평균 토양침식량이 $6 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이하로 토양 침식이 거의 없는 수준인 것으로 나타났다. 이는 해당 토지이용의 평균 C값이 0.05 미만으로 적용되었기 때문에 다른 인자들이 높더라도 침식량이 매우 적게 산출되었다. 이 결과를 통해 USLE를 이용한 토양 침식량 산정에서 토양침식량을 줄이기 위한 가장 효과적인 방법은 지표 피복도를 높이는 것이 효과적인 것임을 알 수 있다.

3.2. 토양 침식지표에 따른 토양 침식량 분석

유역별 평균 토양침식량을 OECD의 토양 침식지표를 이용하여 토양 침식 정도를 알아보았다(Fig. 1). OECD

Table 3. USLE Factors and soil loss from riparian regions with different land uses

Land use	R	K	LS	C	P	Soil loss
	$\text{MJ} \cdot \text{mm ha}^{-1} \text{ yr}^{-1} \text{ hr}^{-1}$	$\text{ton} \cdot \text{hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$				$\text{ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$
Orchard	4457c	0.0197a	1.83b	0.05c	0.73b	5.93c
Bare land	4436c	0.0194a	1.61c	0.98a	0.67c	90.86a
Upland	4649b	0.0186ab	1.33d	0.26b	0.56e	15.11b
Forest	4368d	0.0185ab	2.65a	0.03d	0.78a	4.76c
Grass land	4718a	0.0175b	1.53c	0.04d	0.61d	3.19c

*Same letters indicate no difference between sampling sites within each column ($p < 0.05$, LSD)

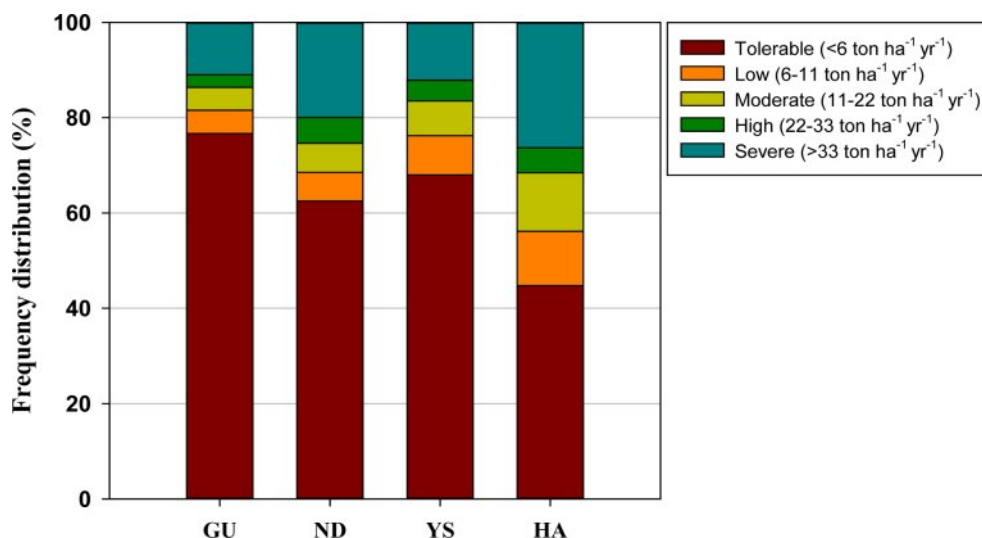


Fig. 1. Distribution of soil erosion classes ($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) in the riparian regions of Korea's four major rivers: Geum River (GU, $n = 1,355$), Nakdong River (ND, $n = 1,096$), Yeongsan-Seomjin River (YS, $n = 1,843$), and Han River (HA, $n = 120$).

토양 침식 지표는 5개 등급이며, 토양 침식량에 따라 적음 (Tolerable, $< 6 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), 약간 적음 (Low, $6-11 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), 보통 (Moderate, $11-22 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), 위험 (High, $22-33 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), 심각 (Severe, $> 33 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)으로 구분되어 있다. 이 기준에 따르면 한강 유역 (HA)은 평균 값이 '심각' 수준 ($33 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)을 상회하는 값이며, 낙동강 유역 (ND)도 ($26.22 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) '위험' 수준 ($22 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)으로 관리가 매우 시급한 것으로 확인되었다. Fig. 1과 같이 유역별 지점의 침식지표 분포를 살펴봐도 한강 유역의 26.3%, 낙동강 유역의 20.0%가 심각(Severe) 수준에 해당하여 가장 많았고, 금강 유역(GU)은 11.0%만 심각수준으로 분류되었다. 침식이 적은(Tolerable) 지점은

한강 유역이 44.7%로 가장 적었고, 낙동강 유역이 62.5%, 영산강-섬진강 유역이 68.0%, 금강 유역이 76.7%였다.

토지이용에 따른 지점별 토양 침식 정도는 Fig. 2와 같다. 나지에서 60.6%가 심각 수준이며, 침식이 적은 수준은 15.2%에 불과하였다. 나지 다음으로 침식이 심각한 밭은 13.8%가 심각, 9.4%가 위험 수준이었으며, 48.9%가 적음 수준으로 분류되었다. 과수원은 68.2%가 침식이 적은 수준이었으며, 초지와 산림은 각각 90.3%와 92.7%가 침식이 적은 지점으로 분류되었다.

이처럼 유역별과 토양 이용에 따라 침식 정도를 비교한 결과 한강 유역과나지에서 침식 정도가 심각한 수준임을 알 수 있었고, 한강의 침식 정도가 심각한 것은 다른

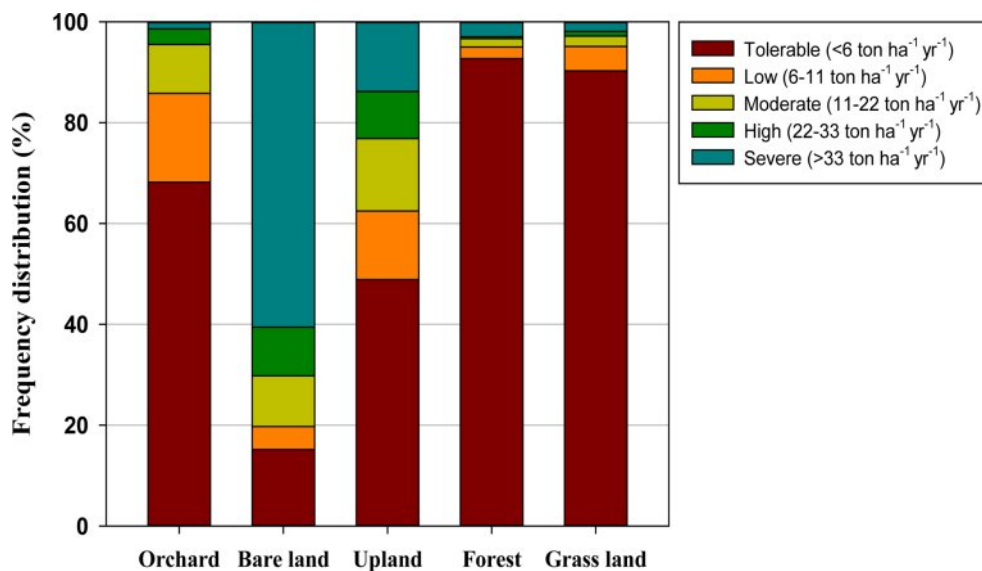


Fig. 2. Distribution of soil erosion classes ($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) across different land uses: orchard ($n = 289$), bare land ($n = 705$), upland ($n = 941$), forest ($n = 1,316$), and grassland ($n = 1,163$).

Table 4. Average values of SOC, C stock, C loss, and C emission in topsoil by region and land use. Identical letters indicate no significant difference among regions (uppercase) or among land uses (lowercase) at $p < 0.05$ (LSD test)

		SOC	C Stock	C loss	C emission
		g kg^{-1}	ton ha^{-1}	$\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$	$\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$
Regions	Geum river	19.00B	28.32D	210.01C	42.00C
	Nakdong river	24.16A	56.27A	363.01B	72.60B
	Yeongsan river-Seomgin river	18.24B	39.41C	194.34C	38.87C
	Han river	18.28B	46.13B	509.09A	101.82A
Land uses	Orchard	21.32b	46.16b	76.94c	15.39c
	Bare land	20.92b	50.07a	1209.28a	241.86a
	Upland	19.27c	42.78c	172.34b	34.47b
	Forest	22.65a	43.13bc	28.69c	5.74c
	Grass land	16.50d	28.01d	23.18c	4.64c
Total		19.94	40.38	249.59	49.92

유역보다 밭과 나지가 조사지점에 많이 포함되었기 때문이다. 또한 수변구역은 직접적으로 침식된 토양이 수계로 유입되므로 지표 피복률이 낮은 나지와 밭에 대한 관리가 매우 시급함을 알 수 있었다.

3.3. 표토 침식에 따른 탄소 손실량과 대기 방출량

수변구역 표토의 침식에 의한 탄소 손실량(carbon loss)을 표토 침식량과 표토의 탄소저장량을 이용하여 유역별과 토지이용별로 산출하였다(Table 4). 수변구역 표토의 침식에 의한 탄소 손실량 추정 결과, 단위 면적당 연간 탄소 손실량(carbon loss, $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) 평균치는 나지 ($1,204.28 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) > 밭 ($172.34 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) > 과수 ($76.94 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) > 산림 ($28.69 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) > 초지 ($23.18 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)의 순서로 나타났다. 나지 (BL)의 경우 토양유실량이 크고 따라서 탄소 손실량이 월등히 높은 것으로 나타났다. 토지 이용 분류 상 나지 (BL)의 경우 산림 (FR)이나 초지 (GL)에 비해 강우타격에 직접적으로 노출되는 빈도가 높다. 이는 상대적으로 낮은 지표피복에 의한 결과로 표토 침식량의 증가를 초래하며, 탄소 손실량의 증가로 이어진다. 다수의 논문에서도 식물 피복이 토양 유실 및 탄소 손실을 줄인다는 보고가 있었으며(Chamizo et al., 2017; Liu et al., 2016; Yoon et al., 2025; Zheng et al., 2021), 실제로 Novara et al. (2016)은 현장 시험포를 조성하고 토양 침식에 의한 탄소 변화를 연구한 결과, 토양 침식과 토양의 이동과정에서 입단이 파괴되고, 유기물질이 보다 쉽게 무기화 되기 때문에 토양침식으로 상당량의 토양유기탄소가 무기화 된다고 보고하고 있다.

수변구역의 연간 총 탄소 손실량 (total carbon loss, ton yr^{-1}) 산출 결과, 나지 (BL, $215.27 \text{ ton yr}^{-1}$) > 산림 (FR, $50.94 \text{ ton yr}^{-1}$) > 밭 (UL, $24.77 \text{ ton yr}^{-1}$) > 과수원 (OC, $14.29 \text{ ton yr}^{-1}$) > 초지 (GL, 4.43 ton yr^{-1})의 순서로 높게 나타났다. 나지가 단위면적당 탄소 손실량이 많았기 때문에 총 탄소 손실량도 가장 많았고, 토지이용별 전체 면적이 차이가 있었기 때문에 산림 (FR)에서 총 탄소 손실량이 많이 산출되었다.

Roose et al. (2002)에 따라 탄소 손실량의 20%를 대기로 방출된다고 적용한 결과, 대기로 방출되는 탄소의 평균은 나지에서 $241.86 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 밭 ($241.86 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$), 과수원 ($15.39 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$), 산림 ($5.74 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$), 초지 ($4.64 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) 순이었다. Lal (2020)은 표토 침식은 토양 입자의 분리, 이동, 재분배 그리고 퇴적 등의 복잡한 과정에 의해 일어나며 각각의 과정에서 모두 무기화 (mineralization)가 가능하며, 이중 대기중으로

방출가능한 양을 약 15 ~ 20%로 정리하였다. 탄소 방출량 값은 산출시 표토 침식량과 탄소 저장량에 비례하고 용적 밀도와 표토의 무게에 반비례한다. 그렇기 때문에 유기물의 함량이 높지 않은 나지 (BL)가 탄소 손실량이 월등히 높게 나타난 것은 토지피복도가 낮아 표토 침식량이 상대적으로 높은 나지의 토지이용 특성에 따른 것으로 판단된다 (Jung et al., 2005).

4. 결 론

우리나라 표토의 침식량을 4대강수계 권역 별로 산출한 결과, 평균 토양침식량은 한강 권역이 $47.99 \text{ ton ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 토지이용별로는 나지가 가장 높았고, 밭도 과수원, 산림, 초지보다 높았다. 이와 같은 결과는 지표 피복이 큰 영향을 초래하였다. 표토의 침식에 의한 연간 탄소유실량도 한강 유역과 나지에서 가장 많았고, 대기 방출 계수를 곱한 탄소 방출량 분석 결과도 동일하였다. 표토 침식은 토양질 저하 뿐 아니라 흙탕물 발생 비점오염 등 수변환경 오염 뿐만 아니라 탄소 손실 및 탄소 대기 방출을 가속화하기 때문에 이를 줄이기 위한 지속적인 표토관리가 매우 중요하며, 향후 전국적인 토양유실에 의한 탄소 손실 및 대기 방출에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

사 사

This work carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2021-RD009878)” Rural Development Administration, Republic of Korea and the strategic EcoSSSoil Project, Korea Ministry of Environment, with KEITI (Korea Environmental Industry and Technology Institute), Korea (Grant No. 2019002820004).

References

- Borrelli, P., Robinson, D.A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J.E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., and Ballabio, C., 2020, Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *PNAS*, **117**(36), 21994-22001.
- Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Román, J.R., and Cantón, Y., 2017, Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall. *Catena*, **148**, 117-125.
- Chen, S., Martin, M.P., Saby, N.P.A., Walter, C., Angers, D.A., and Arrouays, D., 2018, Fine resolution map of top- and subsoil

- carbon sequestration potential in France, *Sci. Total Environ.*, **630**, 389-400.
- Choi, E.J., Kim, G.Y., Lee, S.I., Lee, J.S., Yoon, J.H., and Gwon, H.S., 2020, Estimation of Greenhouse Gases Emission from the Crop Cultivation Session of Agricultural Sector according to 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines, *J. Climate Change Res.*, **11**(6-2), 703-712.
- Gwon, H.S., Kim, G.Y., Lee, S.I., Lee, J.S., and Choi, E.J., 2020, Estimation of Greenhouse Gas Emission in Rice Paddy Soil Under Slow Released N Fertilizer Application: Annual Investigation, *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, **53**(4), 575-588.
- Han, Y., Nam, H.S., Park, K.L., Lee, Y., Lee, B.M., and Park, K.C., 2020, Evaluation of Soil Carbon Storages in the Organic Farming Paddy Fields, *J. of KORRA.*, **28**(1), 73-82.
- Hur, S.O., Ok, J.H., Jeong, S.S., Kim, H.S., Park, Y.S., Yang, J., and Yoon, J.H., 2025, Soil Erosion and Conservation. In *The Soils of Korea* (pp. 99-108). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Jung, K.H., Sonn, Y.K., Hong, S.Y., Hur, S.O., and Ha, S.K., 2005, Assessment of National Soil Loss and Potential Erosion Area using the Digital Detailed Soil Maps, *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, **38**(2), 59-65.
- Kang, M.W., Kim, D.J., Lim, K.J., and Lee, S.S., 2021, Rainfall erosivity factor of Korean soils estimated by using USLE under climate change, *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, **54**(3), 265-275.
- Kim, M.K., Hur, S.O., Kwon, S.I., Jung, G.B., Sonn, Y.K., Ha, S.K., and Lee, D.B., 2010, Prediction of Soil Erosion from Agricultural Uplands under Precipitation Change Scenarios, *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, **43**(6), 789-792.
- Kim Y.S, Ku, N.I., and Kang, W.S., 2018, Evaluation of Forest Soil Characteristics Using Plant Reaction Technique, NIFS (National Institute of Forest Science), Seoul, Korea.
- Lal, R., 2003, Soil erosion and the global carbon budget, *Environ. Int.*, **29**, 437-450.
- Lal, R., 2005, Soil erosion and carbon dynamics, *Soil Till. Res.*, **81**(2), 137-142.
- Lal, R., 2020, Soil erosion and gaseous emissions, *Appl. Sci.*, **10**(8), 2784.
- Lal, R., Monger, C., Nave, L., and Smith, P. 2021. The role of soil in regulation of climate. *Philos. Trans. R. Soc. B.*, **376**(1834), 20210084.
- Lal, R., Griffin, M., Apt, J., Lave, L., and Morgan, M.G., 2004, Managing soil carbon, *Science*, **304**(5669), 393-394.
- Lee, H.S., Jeong, H.C., Lee, S.I., Park, H.R., Lee, M.J., Lee, J.M., Park, D.G., Jang, E.B., and Oh, T.K., 2024, 2006 IPCC guideline application: Analysis of greenhouse gas methodology and emissions in the rice cultivation and agricultural soil, *J. Clim. chang. res.*, **15**(1), 47-55.
- Lee, S.I., Kim, G.Y., Gwon, H.S., Lee, J.S., Choi, E.J., and Shin, J.D., 2020, Effects of Different Nitrogen Fertilizer and Biochar Applications on CO₂ and N₂O Emissions from Upland Soil in the Closed Chamber. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **53**(4), 431-445.
- Liu, C., Liu, Y., Guo, K., Wang, S., Liu, H., Zhao, H., Qiao, X., Hou, D., and Li, S., 2016. Aboveground carbon stock, allocation and sequestration potential during vegetation recovery in the karst region of southwestern China: a case study at a watershed scale. *Agric. Ecosyst. Env.*, **235**, 91-100.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z., 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., Vågen, T.G., van Wesemael, B., and Winowiecki, L., 2017, Soil carbon 4 per mill, *Geoderma*, **292**, 59-86.
- MOE (Ministry of Environment), 2011, Soil Environmental Conservation Act., Dept. Soil and Groundwater, MOE, Sejong, Korea.
- MoE., 2025. The Notice about the Erosion Status Survey and Measures such as Topsoil. Ministry of Environment, Korea. pp. 1-26.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology), 2000, Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA (Rural Development Administration), Jeonju, Korea.
- Novara, A., Keesstra, S., Cerda, A., Pereira, P., and Gristina, L., 2016, Understanding the role of soil erosion on CO₂-C loss using ¹³C isotopic signatures in abandoned Mediterranean agricultural land, *Sci. Total Environ.*, **550**, 330-336.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), 2008, Environmental performance of agriculture in OECD countries since 1990.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), 2013, 2013 Edition of the OECE Environmental Database: Soil erosion [http://stats.oecd.org], OECD.Stat, Paris, France.
- Oh, S.M., Kim, H.S., Lee, S.P., Lee, J.G., Jeong, S.S., Lim, K.J., Kim, S.C., Park, Y.S., Lee, G.H., Hwang, S.I., and Yang, J.E., 2017, Estimating of the greenhouse gas mitigation and function of water resources conservation through conservation of surface soils erosion and policy suggestion, *J. Soil Groundwater Environ.*, **22**(6), 74-84.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., and Montanarella, L., 2015, Estimating the soil erosion cover-

- management factor at the European scale, *Land Use Policy*, **48**, 38-50.
- Panagos, P., Ballabio, C., Himics, M., Scarpa, S., Matthews, F., Bogonos, M., Poesen, J., and Borrelli, P., 2021, Projections of soil loss by water erosion in Europe by 2050. *Environ. Sci. Policy*, **124**, 380-392.
- Park, C.W., Sonn, Y.K., Hyun, B.K. Song, K.C., Chun, H.C., Moon, Y.H., and Yun, S.G., 2011, The Redetermination of USLE Rainfall Erosion Factor for Estimation of Soil Loss at Korea, *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, **44**(6), 977-982.
- Park, J.H., Kim, D.W., Kang, S.W., and Cho, J.S., 2023, Effect of continuous biochar use on soil chemical properties and greenhouse gas emissions in greenhouse cultivation. *Korean J. Environ. Agric.*, **42**(4), 435-443.
- Ro, Y.H., Chung, W.J., Chung, S.J., Jung, I.H., Na, H.S., Kim, M.S., and Shin, J.D., 2020, Characteristics of Greenhouse Gas Emissions with Different Combination Rates of Activated Rice Hull Biochar during Aerobic Digestion of Cow Manure, *Korean J Environ Agric.*, **39**(3), 222-227.
- Roose, E.J., Lal, R., Feller, C., Barthes, B., and Stewart, B.A., 2002, Soil erosion and carbon dynamics, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA.
- Shojaeezadeh, S.A., Al-Wardy, M., Nikoo, M.R., Mooselu, M.G., Alizadeh, M.R., Adamowski, J.F., Moradkhani, H., Alamdari, N., and Gandomi, A.H., 2024, Soil erosion in the United States: Present and future (2020-2050). *Catena*, **242**, 108074.
- Smith, P., Poch, R.M., Lobb, D.A., Bhattacharyya, R., Alloush, G., Eudoxie, G.D., Anjos, L.H.C., Castellano, M., Ndzana, G.M., Chenu, C., Naidu, R., Vijayanathan, J., Muscolo, A.M., Studert, G.A., Eugenio, N.R., Calzolari, M.C., Amuri, N., and Hallett, P., 2024, Status of the World's Soils. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, **49**(2024), 73-104.
- Tak, H.M., Kim, S.H., and Son, I., 2013, A study on distributions and spatial properties of geomorphological mountain area, *J. Kor. Geogr. Soc.*, **48**(1), 1-18.
- Yoon, J.H., Jung, S.S., Kim, H.S., Park, Y., Kim, H., Mishra, U., Gautam, S., Alewell, C., Panagos, P., Kirkham, M.B., Borrelli, P., and Yang, J.E., 2025, Impact of soil erosion on soil organic carbon loss and its implications for carbon neutrality, *Adv. Agron.*, **191**, 363-414.
- Zheng, J.Y., Zhao, J.S., Shi, Z.H., and Wang, L., 2021, Soil aggregates are key factors that regulate erosion-related carbon loss in citrus orchards of southern China: Bare land vs. grass-covered land. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **309**, 107254.